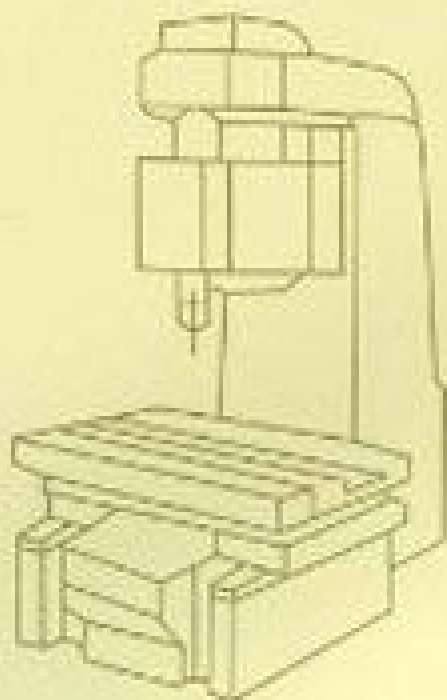


普通高等院校机械类“十一五”规划教材

机床数控技术与编程

JICHUANG SHUKONG JISHU YU BIANCHENG

于超 杨玉海 郭建焯 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

前 言

数控机床综合了微电子技术、计算机应用技术、精密检测技术、自动控制技术以及精密机床的设计制造技术，是一个典型的机电一体化产品。随着数控机床性价比的逐渐提高，数控机床在制造业的各个领域应用越来越广泛，使制造业的面貌发生了革命性的变化，而且这种影响越来越深刻。随着相关技术的发展，数控机床也正在发生着日新月异的变化。为了发展数控机床和更好地使用数控机床，必须了解数控技术和加工程序编制。

本书以机械设计制造及自动化专业和机械电子专业学生应掌握的知识为出发点，在形式上尽力符合机械类专业学生的思维模式，并结合数控机床模块化设计制造的总体思路，讲解数控装置、检测装置、伺服系统等数控技术知识，使学生掌握数控机床各部件的选用、使用、维护的基本概念。在数控程序编制方面，详细地讲解数控程序编制的基础知识及工作方法，并对数控程序进行归类举例；由浅入深地论述了复杂曲面的数学处理方法。

本书是在《机床数控技术与编程》（沈阳航空工业学院院内教材2006）基础上编写而成。针对原教材在使用过程中反映出的问题，参考相关知识的发展情况，以及结合作者多年教学实践经验，对部分章节和内容进行了补充和删减，使教材质量进一步提高。每章都增加了复习和作业题，便于学生掌握和巩固所学知识。

本书包括数控技术与数控程序编制两大部分，共八章。第二章数控机床轨迹控制原理、第三章计算机数控（CNC）系统、第四章检测装置由郭建焯编写；第八章编程中的数学处理由杨玉海编写；第一章概论、第五章数控机床的伺服系统、第六章数控编程的基础知识、第七章数控程序编制由超编写。全书的组织和统稿工作由超完成。在本书的编写过程中得到张建中、朱虎、李景奎等老师的大力支持和帮助，在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限，经验不足，书中难免存在疏漏和欠妥之处，敬请读者批评指正。

作 者
2009年8月

目 录

第一章 概论.....	1
§ 1-1 机床数控技术的基本概念.....	1
§ 1-2 数控机床的分类.....	3
§ 1-3 数控机床的产生和发展.....	5
§ 1-4 数控加工的程序编制.....	6
第二章 数控机床轨迹控制原理.....	12
§ 2-1 概述.....	12
§ 2-2 逐点比较法.....	13
§ 2-3 数字积分法.....	22
§ 2-4 数据采样插补.....	35
§ 2-5 数控装置的进给速度与加减速控制.....	43
第三章 计算机数控 (CNC) 系统.....	53
§ 3-1 概述.....	53
§ 3-2 CNC 装置的硬件结构.....	58
§ 3-3 CNC 装置的软件结构.....	65
§ 3-4 CNC 装置软件的控制功能.....	73
§ 3-5 数控机床的可编程控制器 (PLC)	87
第四章 检测装置.....	98
§ 4-1 概述.....	98
§ 4-2 旋转变压器.....	100
§ 4-3 感应同步器.....	104

§ 4-4 光栅.....	107
§ 4-5 磁栅.....	115
§ 4-6 编码器.....	120
第五章 数控机床的伺服系统.....	128
§ 5-1 概述.....	128
§ 5-2 步进电机伺服系统.....	131
§ 5-3 直流伺服电动机及其速度控制.....	140
§ 5-4 交流伺服电动机及变频调速.....	147
§ 5-5 位置控制.....	153
第六章 数控编程的基础知识.....	158
§ 6-1 程编中的工艺处理.....	158
§ 6-2 数控程编常用指令.....	167
§ 6-3 机床坐标系与工件坐标系.....	174
§ 6-4 刀具半径补偿与长度补偿.....	177
§ 6-5 固定循环和子程序.....	183
§ 6-6 数控车床程编基础.....	192
§ 6-7 变量参数编程与用户宏程序.....	202
§ 6-8 CAD/CAM 编程软件概述.....	205
第七章 数控程序编制.....	222
§ 7-1 孔系加工程序编制.....	222
§ 7-2 平面轮廓加工程序编制.....	228
§ 7-3 解析曲面加工程序编制.....	234

§ 7-4 数控车床的程序编制.....	237
第八章 程编中的数学处理.....	245
§ 8-1 非圆曲线（平面）轮廓的数学处理.....	245
§ 8-2 列表曲线轮廓零件程编中的数学处理.....	250
§ 8-3 列表曲面的数学处理.....	286
参考文献.....	301

第一章 概论

§ 1-1 机床数控技术的基本概念

一、什么是机床数控技术

机床数字控制技术顾名思义就是以数字信号实现机床控制的一门技术（Numerical Control），简称数控（NC）。采用数字控制技术的机床就称为数字控制机床（Numerical Control Machine Tools），简称数控机床。

二、数控机床的组成

如图 1-1 所示，数控机床一般由控制介质、数控装置、伺服系统和检测装置、机床本体五部分组成。

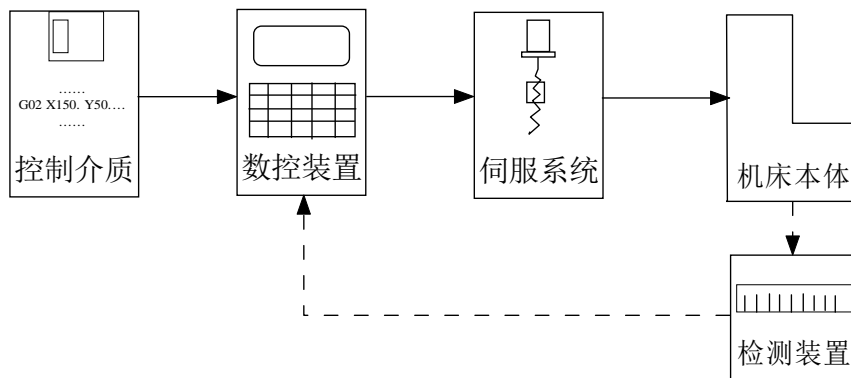


图 1-1 数控机床的组成

1、控制介质

控制介质是加工程序的载体。早期的控制介质是穿孔纸带，并规定了 ISO（国际标准化组织制定）和 EIA（美国电子工业协会制定）两种标准信息代码，加工程序编制好后，按标准制成穿孔纸带，加工时，由读带机将指令读入数控装置。现在的加工程序大多存贮在数控装置的外存贮器中，加工时，将程序读到程序存贮器中执行。

2、数控装置

数控装置一般是一台专用计算机，由中央处理单元（CPU）、存储器、总线和输入输出接口及外围逻辑电路构成。其主要工作是对输入的数控程序及有关数据进行存储与处理，通过插补运算等形成运动轨迹指令，再通过伺服系统，实现刀具与工件的相对运动。并且通过 PLC 对开关量实现逻辑控制。

3、伺服系统

伺服系统的作用是把来自数控装置的脉冲信号转换为机床移动部件的运动，使机床工作台精确定位或按规定的轨迹作严格的相对运动。伺服机构一般包括驱动装置（驱动电路）和执行机构（驱动元件和传动件）两大部分，驱动元件有步进电机、直流伺服电机和交流伺服电机。由于伺服系统是将数字信号转化为位移量的环节，因此它的静态和动态特性决定了数控机床的加工质量和生产率。相对于每一个脉冲信号，机床移动部件的位移量称为脉冲当量，一般用 δ 表示。常用的脉冲当量为 $\delta = 0.01\text{mm/p}$ 、 $\delta = 0.005\text{mm/p}$ 、 $\delta = 0.001\text{mm/p}$ 及更高。

4、检测装置

检测装置可以包括在伺服系统中，它由检测元件和相应的电路组成，其作用是检测速度和位移，并将信息反馈回来，构成反馈控制。由于现在的直流伺服电机和交流伺服电机都带有测速发电机等速度检测元件及光电编码器等位置检测元件，所以检测装置应用广泛。

5、机床本体

机床本体包括机床的主传动部件、进给传动部件、刀具安装装置、工件安装装置、床身等基础部件。由于数控机床在加工过程中切削用量大、连续加工发热多，并且在加工过程中工作精度不能人为进行补偿，因此与传统的手动机床相比，数控机床的外部造型、整体布局、传动系统与刀具系统的结构以及操作机构等方面都已发生了很大的变化。

三、 数控机床的工作原理

数控机床加工零件时，首先要将零件图纸上的几何尺寸和机加工工艺参数用规定的代码和格式编写成加工程序，然后将加工程序输入数控装置，经过计算机的处理、运算，把指令脉冲送到各坐标轴的驱动电路，经过转换、放大去驱动伺服电动机，使各坐标轴移动若干个最小位移量，并且在闭环和半闭环数控系统中还要进行反馈控制，使各轴精确走到程序要求的位置，实现刀具与工件的相对运动，完成零件全部轮廓的加工。

通常把数控机床上刀具运动轨迹是直线加工的称为直线插补；刀具运动轨迹是圆弧加工的称为圆弧插补。数控机床在各个坐标轴的最小移动量都是直线段，在加工直线和圆弧时，要用不同方向的折线去逼近直线和圆弧，所谓插补就是根据有限的数值（起点和终点坐标）对数据进行密化从而进行各坐标的脉冲分配。一般的数控系统都具有直线和圆弧插补，能加工出各象限直线和圆弧功能。对于非圆曲线和列表曲线，根据要求的加工精度，首先用直线段或圆弧段去逼近，称为数学处理（第一次插补），然后再进行数控插补（第二次插补）。

数控机床的数字控制功能是由数控系统完成的。数控系统包括：数控装置、伺服驱动和检测装置、可编程控制器等。数控装置能接受零件图纸加工要求的信息，进行插补运算，实时地向各坐标轴发出控制指令。伺服驱动装置能快速响应数控装置发出的指令，驱动机床各坐标轴运动，同时能提供足够的功率和扭矩。伺服系统中常用的驱动装置，根据控制系统的类型不同而不同，开环伺服系统常用步进电动机，闭环伺服系统常采用脉宽调速直流电动机和交流伺服电动机等。检测装置将坐标位移的实际位置检测出来，反馈给数控装置中的比较器与指令位置进行比较，实现偏差控制。伺服系统中常用的检测装置有测量线位移的光栅、磁栅、感应同步器等，测量角位移的旋转变压器、数字脉冲编码器等。可编程控制器（PLC）在数控机床中一般用来对一些逻辑开关量进行控制，如：主轴的启、停，刀具更换，冷却液开关等。

四、 数控机床的特点和应用

由于数控机床综合了微电子技术、计算机应用技术、自动控制技术以及精密机床设计与制造技术，具有专用机床的高效率，精密机床的高精度和通用机床的高柔性等显著特点，具体说来可包括以下几个方面。

1、自动化程度高、柔性好

由于采用数控程序控制，加工中多采用通用型工装，只要改变数控程序，便可实现对新

零件的自动化加工。由于数控机床采用计算机插补技术和多坐标联动控制，可以实现任意的轨迹运动和加工出任何复杂形状的空间曲面，可方便地完成各种复杂曲面，如螺旋桨、气轮机叶片、汽车外形冲压用模具等类零件的加工。

2、加工精度高，加工质量稳定

数控机床的机械结构是按照精密机床的要求进行设计和制造的，传动采用滚珠丝杠，装配时消除了传动间隙，并采取了提高刚度的措施，传动精度很高；机床导轨采用滚动导轨或粘接有磨擦系数很小的合成塑料，因而减小了磨擦阻力，消除了低速爬行。闭环、半闭环伺服系统，装有精度很高的位置检测元件，并随时把位置误差反馈给计算机，使之能够及时的进行误差校正。此外，数控机床是根据数控程序自动工作，一般在工作过程中不需要人工干预，这就消除了操作者人为产生的失误或误差，因而加工质量稳定。

3、生产效率高

数控机床良好的结构刚度和抗振性允许机床采用大切削用量和进行强力切削，并且数控机床上使用的刀具通常是不重磨装夹式刀具，且都有很硬的表面涂层，可以高速切削，因而，基本工艺时间少。加工中心的刀库有足够数量的刀具，自动换刀的速度很快，工件一次装夹，可进行多面和多工步加工，可大大减少工件装夹次数；空行程的速度在 15m/min 以上，有些达到了 240m/min，因而，辅助时间很短。与普通机床相比，数控机床的生产率可提高 2~3 倍，有些可提高几十倍。

4、减轻劳动强度、改善劳动条件

由于数控机床的操作者主要是利用操作面板对机床的自动加工进行操作，大大减轻了操作者的劳动强度，改善了生产条件，并且可以实现一个人轻松管理多台机床。

5、有利于现代化生产与管理

采用数控机床加工能方便精确计算零件的加工工时或进行自动加工统计，能精确计算生产和加工费用，有利于生产过程的科学管理。

总之，数控机床较好地解决了复杂、精密、小批量、多品种的零件加工问题，是一种柔性的、高效能的自动化机床，代表了现代机床控制技术的发展方向。数控机床是计算机辅助设计与制造 (CAD/CAM)、群控或分布式控制 (DNC)、柔性制造系统 (FMS)、计算机集成制造系统 (CIMS) 等先进制造系统的基础。

但是与普通机床相比，数控机床的初始投资及维护费用较高，要求具有较高技术水平和文化程度工人和维修人员进行操作和维修。所以，应该从生产实际出发，合理地选择与使用数控机床。

§ 1-2 数控机床的分类

数控机床的种类繁多，根据数控机床的功能和组成的不同，可以从多种角度对数控机床进行分类。

一、按工艺用途分类

1、金属切削类

这一类是数控机床的主要类型，又可以分为两类，一类是普通数控机床，包括数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床等，其工艺用途与传统车床、铣床、钻床、磨床等基本相似。另一类是加工中心，其主要特点是具有刀库和自动换刀装置，工件一次装夹后可进行多种工

步加工，主要有铣镗加工中心和车削加工中心两类，一般所说的加工中心指的是前者，主要完成铣、镗、钻、攻丝等加工，后者主要完成回转体零件各表面加工。

2、金属成形类

这类数控机床有数控折弯机、数控弯管机、数控压力机等。

3、特种加工类

主要指数控电火花线切割机、电火花成形机、激光加工机等

4、测量绘图类

主要有三坐标测量机、绘图机、对刀仪等

二、按控制的运动轨迹分类

1、点位控制数控机床

对于一些加工孔用的数控机床，只要求精确的孔系坐标定位精度，而对从一个孔到另一个孔的运动轨迹和运动速度不进行数字控制，具有这种运动控制的机床称为点位控制数控机床，如数控冲床、数控钻床、坐标镗床等。

2、直线控制数控机床

是在点位控制基础上，能对单个机床坐标轴的移动速度进行控制，这类机床有二个到三个可控轴，但同时控制轴只有一个。这类机床主要有简易数控车床、数控镗铣床和数控磨床等，能完成简单台阶形或矩形零件的加工。

3、轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床也称为连续控制数控机床，其特点是能够对两个或两个以上运动坐标的位移和速度同时进行连续控制，使刀具与工件间的相对运动符合工件加工轮廓的要求。在这类控制方式中，要求数控装置具有插补运算的功能，即根据加工程序输入的基本数据（如直线的终点坐标、圆弧的终点坐标和圆心坐标或半径），进行插补运算，并且边计算边根据计算结果发出指令脉冲，控制2个或2个以上坐标轴协调运动。目前的大多数金属切削机床的数控系统都是轮廓控制系统。

根据同时控制坐标轴的数目可以分为2轴联动、2.5轴联动、3轴联动、4轴联动、5轴联动数控机床。2.5轴联动是三个主要控制轴（ x ， y ， z ）中，任意两个轴联动，另一轴做点位直线控制。

三、按伺服系统控制方式分类

1、开环伺服系统

这种控制方式不带位置测量元件。数控装置将零件的程序处理后，输出脉冲信号给伺服电动机，驱动机床工作台运动。机床工作台的位移精度主要取决于伺服电动机和传动机构的精度。这类机床较为经济，但是速度及精度都较低。由步进电动机驱动的中、小型数控机床多属此种类型。

2、闭环控制数控机床

这类机床采用直流伺服电动机或交流伺服电动机，工作台的实际位移能通过检测装置反馈给数控装置中的比较器，与指令值进行比较，再用比较的差值控制伺服电动机，补偿传动系统的误差。这类机床的定位精度高，但其控制系统复杂，成本高，对机床的使用环境要求高，只适用于要求加工精度较高的数控机床。

3、半闭环控制数控机床

当把位移测量装置移到滚珠丝杠或伺服电动机轴的端头时，便形成了半闭环控制系统。这种系统的闭环环路内不包括惯量很大的机床工作台，而且很多伺服电机出厂时可以带有速度和位移测量装置，使得系统稳定性易于保证。由于只能间接测量工作台的位移和速度，不能补偿传动装置的误差，精度较闭环系统低。但系统简单，安装、调试都比较方便，广泛用于中等以上精度的数控机床。

§ 1-3 数控机床的产生和发展

一、 数控机床的产生和发展过程

数控机床最早产生于美国，是军备竞赛的产物，是为解决航空与航天技术方面的大型和复杂零件的单件、小批量生产而发展起来的。1952年，美国帕森斯公司（Parsons）和麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology）合作研制成功了世界上第一台数控机床，它是一台三坐标数控铣床，用于加工直升机叶片轮廓检查用样板。数控铣床的计算与控制装置采用电子管元件组成的专用计算机，即逻辑运算与控制采用硬件连接电路。1955年，该类机床进入实用化阶段，在复杂曲面的加工中发挥了重要作用。

到现在为止，数控系统经历了两个阶段和六代产品的发展过程。这六代是指电子管数控系统、晶体管数控系统、集成电路数控系统、小型计算机数控系统、微处理器数控系统和基于工业PC机的通用CNC系统。前三代为第一阶段，数控系统（Numerical Control，简称NC系统）主要是由硬件连接构成，称为硬件数控；后三代称为计算机数控（Computer Numerical Control，简称CNC系统）其功能主要由软件完成（一般是软件和硬件相结合），又称为软件数控。在由20世纪50年代初到70年代末近30年当中，数控机床尽管经历了五代产品发展过程，但由于其价格昂贵、加工费用高、故障率高、应用技术复杂和各项配套措施尚在发展中等原因，其实际应用的普及率并不高。近30年来，随着微电子技术及相关技术的发展，特别是微处理器技术的应用，使数控机床的性能价格比有了极大的提高，实际应用普及率越来越高，使得数控机床已成为现代机械制造技术的基础。

1958年由清华大学和北京机床研究所研制了我国第一台电子管控制的数控机床。我国的数控系统同样经历了两个阶段和六代发展历史。近年来，由于引进了国外的数控系统与伺服系统的制造技术，使我国的数控机床在品种、数量和质量方面得到了迅速发展。目前，我国已有几十家机床厂能够生产不同类型的数控机床和加工中心。在数控技术领域，我国和先进的工业国家之间还存在着不小的差距，但这种差距正在缩小。

二、 数控技术的发展趋势

随着科学技术的发展，制造技术的进步，以及社会对产品质量要求越来越高，对品种多样化的要求越来越强烈，中小批量生产的比重明显增加，要求现代数控机床成为一种高效率、高质量、高柔性和低成本的新一代制造设备。同时，为了满足制造业向更高层次发展，为柔性制造系统（FMS），以及计算机集成制造系统（CIMS）提供基础设备，也要求数控机床向更高水平发展。这些要求要由数字控制技术的发展来实现，所以对数控装置、伺服系统、检测装置、机床本体提出越来越高的要求。具体体现在以下几个方面。

1、 具有先进的自检能力，使之能长期可靠的工作

在现代数控机床上装配有多种监控、检测装置。如红外线、声发射、温度测量、功率测量、激光检测等手段对加工精度、刀具磨损及破坏、工件装夹等进行监控，提高机床的综合性能，使之能够更精确可靠地工作。

2、向高速、高精度发展

高速是指数控机床的高速切削和高速插补进给，目标是在保证加工精度的前提下，提高加工速度。这不仅要求数控系统的处理速度快，同时还要求数控机床具有大功率和大转矩的高速主轴、高速进给电动机、高性能的刀具、稳定的高频动态刚度。高精度包括高进给分辨率、高定位精度和重复定位精度、高动态刚度、高性能闭环交流数字伺服系统等。数控机床由于装备有新型的数控系统和伺服系统，使机床的脉冲当量和进给速度达到 $0.1 \mu\text{m}$ (24m/min)， $1 \mu\text{m}$ ($100\sim 240\text{m/min}$) 甚至更高。

3、更高的生产率和利用率

在数控机床上装有自动换刀、自动更换工件等机构，实现一次装夹完成更多的加工内容，减少装卸刀具、装卸工件及调整等辅助时间。在同一台机床上进行粗、精加工。采用更大功率的主轴电动机和新型刀具，提高切削速度，缩短加工时间。

4、单元模块化

数控机床的主轴部件、变速箱立柱、工作台、刀架、刀库等等，都可模块化生产，有专门生产厂家供货，需要时组装成各种不同形式的机床。不仅可提高产品质量，也大大的缩短机床的生产周期。

5、有更强的通讯功能、图像编程和显示功能

更先进的数控机床有自动编程能力，通过键盘和图像显示可进行人机对话，可根据图样自动编程并通过远距离的串行接口输入给机床，使之能自动加工。

§ 1-4 数控加工的程序编制

数控机床是按照事先编制好的数控加工程序自动进行加工的高效率自动化设备，编制的加工程序是否合理，将影响到工件的加工质量、生产效率和成本、以及数控机床的可靠性和安全性。所以数控加工程序编制工作是数控机床使用中最重要的一环。

一、 数控加工程序指令格式

1、 程序结构

一个零件加工程序是由一个完整的程序串组成，这个程序串定义了数控机床加工过程的操作的指令序列。一个加工程序通常包括：程序开始字符(程序号)；程序段(指令内容)；程序结束字符。程序开始字符放在程序的第一个程序段之前，而程序结束字符则包含在程序的最后一个程序段之中，如图 1-2 所示。

实际上，零件加工程序的结构形式，是随数控装置不同而异。对于 CNC 系统，加工程序可分为主程序和子程序，它们都由许多程序段所组成，数控装置在运行主程序过程中，一旦遇到某个子程序调用指令就转入到这个子程序运行，当遇到返回主程序指令后，则返回到主程序继续运行，其关系如图 1-2 所示。

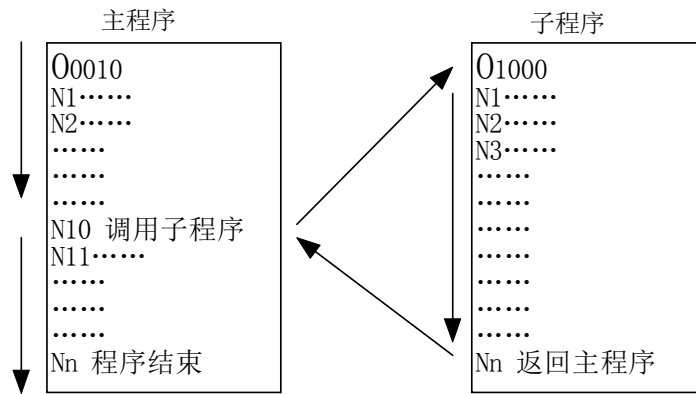


图 1-2 主程序与子程序关系

主程序和子程序虽然内容不同，但程序格式是相同的。用这种程序结构可以大大简化加工程序编制的工作。

2、程序段的格式

一个程序段不论是在主程序中还是在子程序中，其功能都是执行一个动作或一组操作，因此程序段中应包括需要完成的动作或操作的全部数字信息。所以程序段由若干个“字”（每个“字”是某种控制的具体指令）和“程序段结束”字符所组成。每一程序段是按规定的次序书写的，其格式和内容随控制机不同而异，一般为

N- Gxx X- Y- Z- 其它坐标 F- S- T- Mxx 其它附加指令 CR

上述各种功能符号的含义是：N 是程序段顺序号，为便于检索用，通常由 N 和 1~4 位数字表示；G 是准备功能指令，常用的 G 指令见第六章表 6-1。第二部分内容是各坐标的运动尺寸，对于多坐标系统，其顺序是 X、Y、Z、U、V、W、P、Q、R、I、J、K、A、B、C（它们的含义见第六章表 6-3）。第三部分内容是一些工艺性指令，包括坐标进给速度 F、主轴转速 S、刀具号 T 和辅助功能指令 M。常用的 M 指令见第六章表 6-2。如果还有其它附加指令则列于 M 指令之后。最后是程序段结束字符 CR 或 LF（也有用*或；表示）。

上述程序段格式是：每一个程序段都是由一系列开头是英文字母、其后是数字的信息单元——“字”所构成，每个“字”是根据字母来确定其意义。这样的英文字母称为“字地址”，所以这种程序段格式叫做字地址程序段格式，或称为可变程序段格式。后一称谓是因为这种程序段格式对各“字”的先后排列可以不严格；坐标尺寸字的数字位数一般不超过控制机所规定的容量，按需要可多可少，不必填满位数。例如程序段“N65 G00 G90 Z10.0 Y0.0 S1500 T1 M03;”清楚地表明这种程序格式的特点：程序段内包含的信息一目了然，有错误便于修正；程序段中的“字”数目及排列顺序或一个“字”中的字符数目具有可变性。由于这种程序段格式直观、简短、对程序编制方便，故广泛使用。

二、数控编程的步骤

程序编制一般要经过工艺的制订、数值计算、编写程序单、制备输入介质及程序校核与首件试切等主要步骤，如图 1-3 所示。

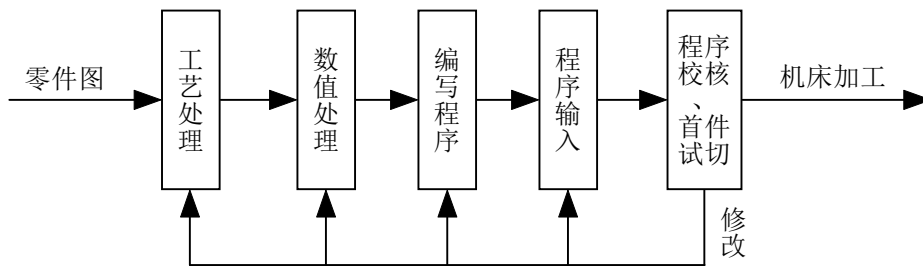


图 1-3 数控加工程序编制的一般过程

1、工艺处理

在分析零件图样要求是否适合用数控加工及现有设备条件的基础上，确定数控加工的工序并选用合适的数控机床；然后进行数控工序的详细设计，包括工件的定位与装夹、工步的划分、走刀路线的确定、刀具与切削用量的选用、工序卡等工艺文件的编写，作为编制数控加工程序与工装准备的依据。

2、数学处理

数学处理的主要任务是计算出编程时所需的刀位点的坐标值。首先在零件图样上建立编程坐标系作为计算坐标数据的基准；然后根据零件的几何尺寸及确定的走刀路线计算走刀轨迹的坐标数据，并以此作为程序刀位数据的依据。

一般的数控系统均具有直线插补、圆弧插补及刀具补偿功能。对于由圆弧和直线组成的简单零件，只需计算出基点（直线、圆弧的交点和切点）坐标值，得出各几何元素的起点、终点和圆弧的圆心坐标值。

对于可以用方程表示的非圆曲线，按照编程允许误差，对非圆曲线进行分割，然后将分割点（非圆曲线上的这些分割点称为节点。）用直线或圆弧进行连接以便对曲线进行逼近。这时要计算出节点坐标值。

对于不能用特性方程描述，而是以离散的坐标点给出的曲线（列表曲线），首先，要构造一条样条曲线，建立数学模型，即第一次逼近；再按照处理非圆曲线的数学处理方法，计算节点坐标。

掌握数学处理的思路和方法，是开发和应用自动编程软件的基础。

3、编写加工程序单

根据工序卡已确定的工步与走刀路线、刀号、切削参数、辅助操作以及上述计算所得出的运动轨迹坐标值，按机床规定的功能指令与程序格式逐段编写加工程序。

4、程序输入

程序输入有手动数据输入、介质输入、通讯输入等方式。

现代 CNC 系统存储容量大，可储存多个零件加工程序，且可在不占用加工时间的情况下进行程序输入。因此，对于不太复杂的零件常用手动数据输入（MDI），显得较为方便、及时。介质输入方式是将加工程序记录在穿孔带、磁盘等介质上，用输入装置一次性输入。穿孔带方式由于是用机械的代码孔，不易受环境（磁场、粉尘等）影响，是数控机床传统信息载体，但随着数控技术的发展，正逐渐被磁盘取代。介质输入方式常用于程序量较大的情况，输入快捷，便于长期保存和重复使用。

5、程序较核与首件试切

程序单和所制备的控制介质必须经过较验和试切削才能正式使用。一般的方法是将控制介质上的内容直接输入到 CNC 装置进行机床的空运转检查，亦即在机床上用笔代替刀具，坐标纸代替工件进行空运转画图，检查机床运动轨迹的正确性。在具有 CRT 屏幕图形显示的数控机床上，用图形模拟刀具相对工件的运动，则更为方便。但这些方法只能检查运动是否正确，不能查出由于刀具调整不当或编程计算不准而造成工件误差的大小。因此，必须用首件试切的方法进行实际切削检查，它不仅可查出程序单和控制介质的错误，还可知道加工精度是否符合要求。当发现尺寸有误差时，应分析错误的性质，或者修改程序单，或者进行尺寸补偿，直至满足图样要求。至此，一个加工程序的编制方告完成，才能进行批量加工。

三、 数控编程的方法

数控编程就是将加工过程中刀具的轨迹、工艺参数等信息用 CNC 所能识别的代码来表示。这种代码已经标准化了，国际上通用的有两种标准，即 ISO 标准和 EIA 标准。我国正式公布的数控标准是 JB3208-83《数字控制机床穿孔带程序段格式中的准备功能 G 和辅助功能 M 的代码》等，与 ISO1056-1975E 基本一致。

根据零件加工表面的复杂程度，数值计算的难易程序、数控机床的数量及现有编程条件等因素，可采用不同的编程方法——手工编程与自动编程。

1、 手工编程

顾名思义，手工编程就是如图 1-3 所示的编程过程全部或主要由人工完成，有时也借助于通用计算机进行一些复杂的数值计算。对几何形状不太复杂或孔数不多的点位加工，所需程序不多，计算也较简单，校核也较容易，这时用手工编程显得经济、及时，因而至今仍被广泛应用。但对复杂程度较高的零件，特别是曲线、曲面（如叶片、复杂模具型腔）、几何形状并不复杂但程序量大的零件（如复杂孔系的箱体）及数控机床拥有量较大而产品不断更新的企业，手工编程就很难胜任，显得效率低、周期长、易出错，甚至会严重影响数控机床的开工率与生产计划。

2、 自动编程

自动编程是用计算机及其外围设备并配以专用的系统处理软件进行编程。根据编程系统输入方法及系统处理方式的不同，主要有批处理式、交互式、实物模型等编程系统。

批处理方式即数控语言输入方式。它是编程人员根据零件图形用数控语言编写一个简短的零件源程序，一次性输入计算机，经计算机处理后便自动输出加工程序及控制介质，无需人工参与。如有错误则修改源程序，重新输入处理。

交互式编程即交互图形编程。其特点是以人机对话输入的工作方式，按菜单提示与图形显示，从零件几何图形的生成、几何元素的定义、坐标系的建立、刀具的选择、起刀点与走刀路线的确定、刀具中心运动轨迹的计算、工艺指令的插入、直至加工程序的生成与运动轨迹的动态图形显示，都是在编程人员与计算机反复对话中完成。此方法不需繁琐的数控语言，若有错可随时修改，显得直观、灵活，功能强，目前已被广泛应用。

应指出的是，手工编程与自动编程只是应用场合与编程手段的不同，而所涉及的内容基本相同，最终所编出的加工程序应无原则性差异，都必须遵守具体数控机床数控程序所规定的指令代码、程序格式及功能指令编程方法。

四、 数控机床的坐标系

应统一规定数控机床的坐标轴和运动方向，并共同遵守，这样将给数控系统和机床的设计、程序编制和使用维修带来极大的便利。国际标准化组织以及一些工业发达的国家都先后指定了数控机床坐标和运动命名的标准。我国机械工业部也于1982年颁布了JB3051-82标准，该标准中规定的坐标轴和运动方向的命名原则如下：

(1) 不论机床的具体结构是工件静止、刀具运动，还是工件运动、刀具静止，确定坐标系时一律看作是工件相对静止，刀具产生运动。

(2) 标准的坐标系是一个右手直角笛卡儿坐标系。

(3) 刀具远离工件的运动方向为坐标的正方向。

(4) 机床主轴旋转运动的正方向是按照右旋螺纹进入工件的方向。

每台机床都有自己的坐标系和坐标原点，它们是编制零件加工程序的重要依据。如果在基本的直角坐标 x , y , z 之外，另有轴线平行于它们的坐标系，则附加直角坐标系指定为 u , v , w 和 p , q , r 。这些附加坐标系的运动方向与基本坐标系对应坐标运动方向相同。围绕 x , y , z 轴的旋转坐标分别用 a , b , c 表示（如图1-4）。

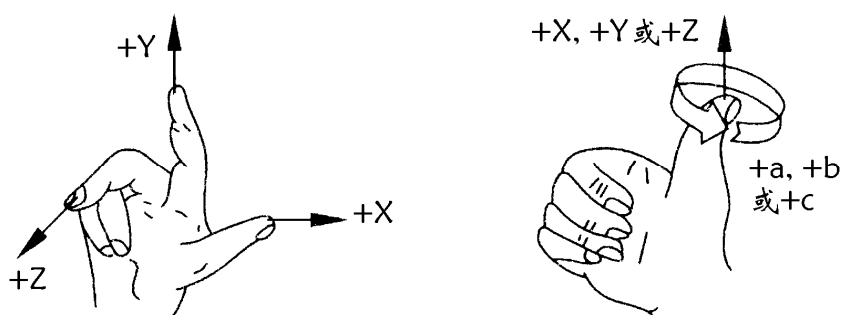


图 1-4 坐标系判定

通常 Z 轴平行于机床主轴， X 轴水平，并且是主要进给方向，坐标的正向为增大工件与刀具距离的刀具运动方向。 X 轴与 Z 轴确定后，由右手定则确定 Y 轴。如图 1-5。

每台数控机床出厂时，都规定好了自己的机床坐标系，使用者可以从使用说明书中查阅，以此作为编程依据。

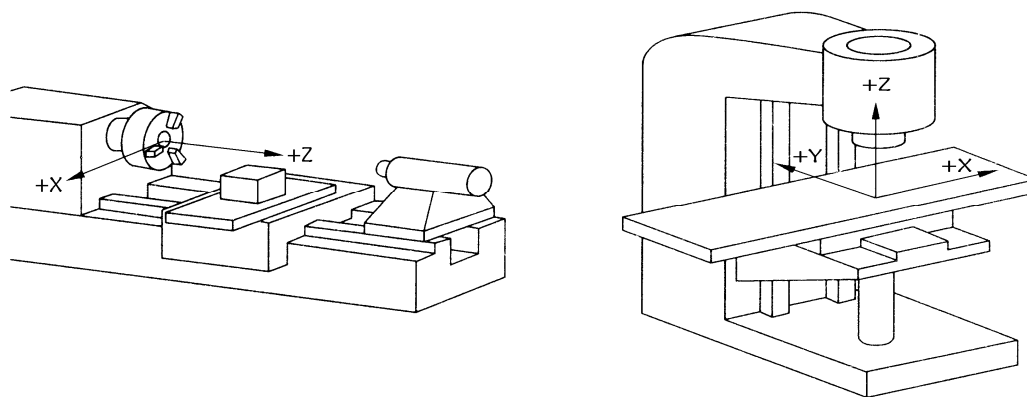


图 1-5 车床、立式升降台铣床坐标轴示意

思考和作业题

1. 什么是数字控制机床？它是在什么时代背景下产生的？
2. 画出数控机床的组成框图，简述各部分的主要功能。
3. 什么叫脉冲当量？目前数控机床的脉冲当量是多少？
4. 数控机床加工有什么特点？应用范围是怎样的？
5. 按工艺用途数控机床分为哪些种类？
6. 何谓点位控制、直线控制、轮廓控制？三者有何区别？
7. 什么是字地址程序段格式，有何优点？
8. 数控加工程编工作的主要内容有哪些？首件试切的目的是什么？
9. 什么是手工编程和计算机辅助（自动）编程？
10. 数控机床的坐标轴与运动方向是怎样规定的？
11. 解释下列术语：NC、CNC、CAD/CAM、DNC、FMS、CIMS。

第二章 数控机床轨迹控制原理

§ 2-1 概 述

一、插补的基本概念

数控加工的实质就是要解决控制刀具或工件运动轨迹的问题。对于大多数数控机床，数控装置都具有直线和圆弧的插补功能，当要加工其它形状轮廓轨迹时，数控装置可以用一个个小段直线或圆弧来拟合理论轨迹。

数控系统根据零件轮廓线型上的已知信息（如直线的起点、终点；圆弧的起点、终点和圆心等），按进给速度、刀具参数和进给方向等要求，运用一定的算法计算出轮廓线上一系列中间点的位置坐标值，从而对各坐标轴进行脉冲分配，完成整个轨迹的运行，使机床加工出所要求的轮廓曲线，这个过程就被称为“插补”。插补的实质就是根据有限的信息完成“数据密化”的工作。数控系统根据插补所得的这些坐标值控制刀具或工件的运动，从而实现数控加工。插补运算具有实时性，其运算速度和精度直接影响数控系统的性能指标。所以对于数控系统来说，插补是最重要的计算任务，它是整个数控系统控制软件的核心。

二、插补方法的分类

在早期的数控系统中，依靠由逻辑电路组成的硬件装置来完成插补运算工作，这种装置被称为插补器。数控系统对于插补器的基本要求有以下几方面：

- (1) 插补所需的原始数据较少；
- (2) 没有累积误差，局部偏差不超过允许值，插补曲线要精确地通过给定点；
- (3) 进给速度恒定且符合加工要求；
- (4) 线路简单可靠。

目前，根据结构的不同，插补可分为硬件插补、软件插补及软、硬件结合插补三种类型。硬件插补的特点是运算速度快，但灵活性差，结构复杂，成本较高。软件插补主要由微处理器组成，它通过计算机程序来完成各种插补功能，特点是结构简单，灵活易变，但速度较慢。随着微处理器运算速度和存储容量的不断提高，为了满足日益增长的插补速度和精度要求，现代数控系统大多采用软件插补或软、硬件结合插补的形式，即由软件完成粗插补，硬件完成精插补。粗插补就是采用软件形式先将加工轨迹分割为若干线段，精插补则采用硬件形式将粗插补分割的线段进一步进行数据点的密化。粗、精插补相结合的形式对数控系统运算速度要求不高，并可节省存储空间，且响应速度和分辨率都比较高。但是，无论软件数控还是硬件数控，其插补的运算原理基本相同，都是根据给定的信息进行数字计算，在计算过程中不断向各个坐标发出相互协调的进给脉冲，使执行件按指定的轨迹移动。

插补的方法和原理很多，根据数控系统输出给伺服驱动装置信号的不同，插补方法可分为基准脉冲插补和数据采样插补两种类型。

1、基准脉冲插补

基准脉冲插补又称脉冲增量插补或行程标量插补。基准脉冲插补算法主要是完成对各坐标轴的脉冲分配计算，其特点是每次插补结束后，数控装置向各坐标轴输出基准脉冲序列。其中，一个脉冲代表了刀具或工件的最小位移，脉冲的数量代表了刀具或工件移动的位移量，脉冲序列的频率代表了刀具或工件运动的速度。通常，一个脉冲所产生的坐标轴移动量叫脉冲当量，用 δ 表示。脉冲当量是脉冲分配计算的基本单位，脉冲当量可根据加工精度选择，普通机床一般可取 $\delta = 0.01mm$ ，较为精密的机床取 $\delta = 1\mu m$ 或 $0.1\mu m$ ，插补误差不得大于一个脉冲当量。

基准脉冲插补的插补运算简单，容易用硬件电路实现，运算速度很快。早期的NC系统都是采用这类方法，在目前的CNC系统中也可用软件来实现，但仅适用于一些由步进电机驱动的中等精度或中等速度要求的开环数控系统。有的数控系统将其用于数据采样插补中的精插补。

基准脉冲插补的方法很多，如逐点比较法、数字积分法、比较积分法、数字脉冲乘法器法、最小偏差法、矢量判别法、直接函数法等，其中应用较多的是逐点比较法和数字积分法。

2、数据采样插补

数据采样插补又称数字增量插补或时间标量插补。这类插补算法的特点是数控装置产生的不是单个脉冲，而是数字量。插补运算分两步完成。第一步为粗插补，它是在给定起点和终点的曲线之间插入若干个点，即用若干条微小直线段来逼近给定曲线，每一微小直线段的长度 ΔL 都相等。粗插补在每个插补运算周期中计算一次，因此直线段的长度 ΔL 与进给速度 F 和插补周期 T 有关，即 $\Delta L = FT$ 。第二步为精插补，它是在粗插补算出的每一微小直线段上再做“数据点密化”的工作。这一步相当于对直线的基准脉冲插补。

数据采样插补方法适用于闭环、半闭环以直流或交流伺服电动机为驱动装置的位置采样控制系统。粗插补在每个插补周期内计算出坐标实际位置增量值，而精插补则在每个采样周期内采样闭环或半闭环反馈位置增量值及插补输出的指令位置增量值，然后算出各坐标轴相应的插补指令位置与实际反馈位置，并将二者相比较，求得跟随误差。根据所求得的跟随误差算出相应轴的进给速度，并输出给驱动装置。在实际使用中，粗插补运算通常用软件实现，而精插补可以用软件，也可以用硬件来实现。插补周期与采样周期可以相等，也可以不等，通常插补周期是采样周期的整数倍。

数据采样插补的方法也很多，有直线函数法、扩展数字积分法、二阶递归扩展数字积分法、双数字积分插补法等，其中应用较多的是直线函数法和扩展数字积分法。

§ 2-2 逐点比较法

逐点比较法又称代数运算法或醉步法，是早期数控机床开环系统中广泛采用的一种插补方法，它可实现直线、圆弧的插补，也可用于其它非圆二次曲线（如椭圆、抛物线和双曲线等）的插补，

其特点是运算直观、最大插补误差不大于一个脉冲当量、脉冲输出均匀、调节方便。因此，这种方法在两坐标联动的数控机床中应用较为广泛。

逐点比较法的基本原理是每次仅向一个坐标轴输出一个进给脉冲，每走一步都要将加工点的瞬时坐标与理论的加工轨迹相比较，判断实际加工点相对于理论加工轨迹的偏移位置，通过偏差函数计算两者之间的偏差，从而决定下一步的进给方向，并使刀具向减小误差的方向移动，且每次只沿一个坐标方向产生移动。

利用逐点比较法进行插补时，每进给一步都要经过以下四个步骤，其过程如图 2.1 所示。

(1) 偏差判别：判别刀具当前位置相对于给定轮廓的偏离情况，以此决定刀具下一步的移动方向；

(2) 坐标进给：根据偏差判别结果，控制刀具相对于工件轮廓向着减少偏差的方向进给一步；

(3) 偏差计算：计算出刀具移动后处于新位置时的偏差值，为下一次的偏差判别作准备；

(4) 终点判别：判别刀具是否已到达被加工轮廓的终点。若到达终点则停止插补；若未到达终点则继续插补。

如此不断重复上述四个步骤就可以加工出所要求的轮廓。

一、逐点比较法直线插补

1、逐点比较法直线插补原理

在逐点比较法插补算法中，偏差计算是关键的一步。下面以第一象限直线为例导出其偏差计算公式。如图 2.2 所示，设被加工直线 OE 位于 xOy 平面的第一象限内，起点为坐标原点，终点为 $E(x_e, y_e)$ ，则直线方程为：

$$\frac{x}{y} = \frac{x_e}{y_e} \quad (2-1)$$

整理为： $x_e y - x y_e = 0 \quad (2-2)$

假定 $P(x_i, y_j)$ 为加工点，若 P 点正好位于直线上，则有：

$$x_e y_j - x_i y_e = 0$$

若 P 点位于直线上方，则有：

$$x_e y_j - x_i y_e > 0$$

若 P 点位于直线下方，则有：

$$x_e y_j - x_i y_e < 0$$

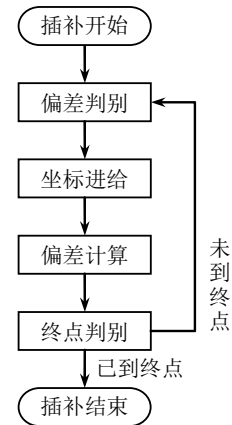


图 2.1 逐点比较法工作步骤

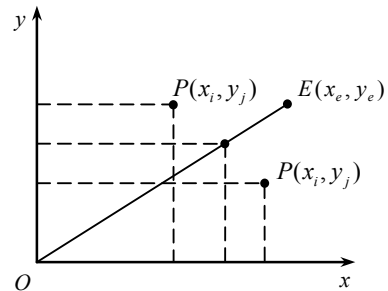


图 2.2 直线方程

由此可以取偏差判别函数 F_{ij} 为:

$$F_{ij} = x_e y_j - x_i y_e$$

由 F_{ij} 的数值 (称为“偏差”) 就可以判别点与直线的相对位置。即当 $F_{ij} = 0$ 时, 点 $P(x_i, y_j)$ 正好处于直线上; 当 $F_{ij} > 0$ 时, 点 $P(x_i, y_j)$ 处于直线的上方; 当 $F_{ij} < 0$ 时, 点 $P(x_i, y_j)$ 处于直线的下方。

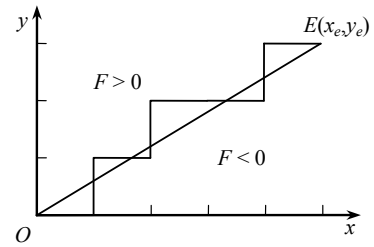


图 2.3 直线插补脉冲走向示意图

如图 2.3 所示, 对于直线 OE 来说, 当点 P 在直线上方 (即 $F_{ij} > 0$) 时, 应该向 $+x$ 方向前进一步, 以接近该直线; 当点 P 在直线下方 (即 $F_{ij} < 0$) 时, 应该向 $+y$ 方向前进一步, 以接近该直线; 当点 P 正好在直线上 (即 $F_{ij} = 0$) 时, 既可向 $+x$ 方向前进一步, 又可向 $+y$ 方向前进一步, 通常规定向 $+x$ 方向前进一步, 即将其和 $F_{ij} > 0$ 归为一类。这样从原点开始, 走一步, 算一算, 然后判别 F_{ij} , 再趋向直线, 步步前进。当两个方向所走的步数和终点 $E(x_e, y_e)$ 坐标值相等时, 发出终点到达信号, 停止插补。在图 2.3 中, 运用上述算法就可以获得图中折线形式的插补轨迹。

在实际中, 为了便于硬件系统的运算, 在计算 F_{ij} 时通常采用简化算法形式, 即采用迭代法或称递推法。根据插补算法规则, 若 $F_{ij} \geq 0$ 时, 应向 $+x$ 方向前进一步, 即由加工点 $P(x_i, y_j)$ 移动到新加工点 $P(x_{i+1}, y_j)$, 并且 $x_{i+1} = x_i + 1$, 因此在新加工点 $P(x_{i+1}, y_j)$ 处的偏差值为:

$$F_{(i+1)j} = x_e y_j - x_{i+1} y_e = x_e y_j - (x_i + 1) y_e = x_e y_j - x_i y_e - y_e = F_{ij} - y_e$$

即
$$F_{(i+1)j} = F_{ij} - y_e \quad (2-3)$$

若 $F_{ij} < 0$ 时, 则应向 $+y$ 方向前进一步, 并且 $y_{j+1} = y_j + 1$, 因此在新加工点 $P(x_i, y_{j+1})$ 处的偏差值为:

$$F_{i(j+1)} = x_e y_{j+1} - x_i y_e = x_e (y_j + 1) - x_i y_e = x_e y_j - x_i y_e + x_e = F_{ij} + x_e$$

即
$$F_{i(j+1)} = F_{ij} + x_e \quad (2-4)$$

由式 (2-3) 及式 (2-4) 可以看出, 新加工点的偏差完全可以用前一个加工点的偏差递推出来。

2、运算过程和程序流程图

综上所述, 在逐点比较法的直线插补过程中, 每走一步都要进行以下四个步骤:

(1) 判别: 根据偏差值确定刀具位置在直线的上方(或线上), 还是在直线的下方;

(2) 进给: 根据判别结果, 决定控制哪个坐标 (x 或 y) 移动一步;

(3) 运算: 根据递推公式计算出刀具移动后的新偏差, 为下一步判别提供依据。在开始加工点处, $F_{ij} = 0$ 。

(4) 比较: 在每次计算偏差的同时, 还要进行一次终点判别, 以确定是否达到终点。若已到达终点, 就不再运算。

图 2.4 为用逐点比较法插补第一象限直线的运算程序流程图。

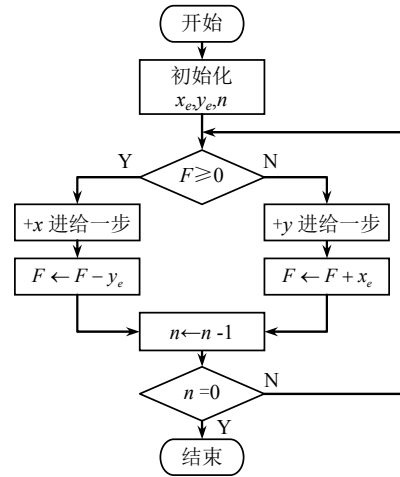


图 2.4 第一象限直线插补运算流程图

3、直线插补举例

例 2.1: 假设欲加工直线 OE (如图 2.3 所示), 其终点坐标为 $x_e = 5, y_e = 3$, 则终点判别值可取为 $n = x_e + y_e = 5 + 3 = 8$, 起始点处偏差 $F_{00} = 0$, 插补过程的运算步骤如表 2.1 所示。

表 2.1 直线插补运算过程

序号	工 作 步 骤			
	判 别	进 给	运 算	比 较
1	$F_{00} = 0$	$+\Delta x$	$F_{10} = F_{00} - y_e = 0 - 3 = -3; n_7 = n_8 - 1 = 8 - 1 = 7$	$n \neq 0$
2	$F_{10} = -3 < 0$	$+\Delta y$	$F_{11} = F_{10} + x_e = -3 + 5 = 2; n_6 = n_7 - 1 = 7 - 1 = 6$	$n \neq 0$
3	$F_{11} = 2 > 0$	$+\Delta x$	$F_{21} = F_{11} - y_e = 2 - 3 = -1; n_5 = n_6 - 1 = 6 - 1 = 5$	$n \neq 0$
4	$F_{21} = -1 < 0$	$+\Delta y$	$F_{22} = F_{21} + x_e = -1 + 5 = 4; n_4 = n_5 - 1 = 5 - 1 = 4$	$n \neq 0$
5	$F_{22} = 4 > 0$	$+\Delta x$	$F_{32} = F_{22} - y_e = 4 - 3 = 1; n_3 = n_4 - 1 = 4 - 1 = 3$	$n \neq 0$
6	$F_{32} = 1 > 0$	$+\Delta x$	$F_{42} = F_{32} - y_e = 1 - 3 = -2; n_2 = n_3 - 1 = 3 - 1 = 2$	$n \neq 0$
7	$F_{42} = -2 < 0$	$+\Delta y$	$F_{43} = F_{42} + x_e = -2 + 5 = 3; n_1 = n_2 - 1 = 2 - 1 = 1$	$n \neq 0$

8	$F_{43} = 3 > 0$	$+\Delta x$	$F_{53} = F_{43} - y_e = 3 - 3 = 0; n_0 = n_1 - 1 = 1 - 1 = 0$	$n = 0$
---	------------------	-------------	--	---------

二、逐点比较法圆弧插补

1、逐点比较法圆弧插补原理

在此以第一象限逆时针圆弧为例导出其偏差判别计算公式。如图 2.5 所示，设第一象限逆时针圆弧 AE 的圆心在原点，半径为 R ，起点坐标为 $A(x_0, y_0)$ ，圆弧上任意加工点的坐标为

$P(x_i, y_j)$ ，则 P 点与圆心的距离 R_p 满足等式：

$$R_p^2 = x_i^2 + y_j^2。$$

若点 $P(x_i, y_j)$ 正好处在圆弧上，则下式成立：

$$x_i^2 + y_j^2 = x_0^2 + y_0^2 = R^2$$

若点 $P(x_i, y_j)$ 处在圆弧的外侧，则 $R_p > R$ ，即：

$$x_i^2 + y_j^2 > x_0^2 + y_0^2$$

若点 $P(x_i, y_j)$ 处在圆弧的内侧，则 $R_p < R$ ，即：

$$x_i^2 + y_j^2 < x_0^2 + y_0^2$$

将上面各式分别改写为下列形式：

$$(x_i^2 - x_0^2) + (y_j^2 - y_0^2) = 0 \quad (\text{在圆弧上})$$

$$(x_i^2 - x_0^2) + (y_j^2 - y_0^2) > 0 \quad (\text{在圆弧外侧})$$

$$(x_i^2 - x_0^2) + (y_j^2 - y_0^2) < 0 \quad (\text{在圆弧内侧})$$

取偏差判别式为：

$$F_{ij} = (x_i^2 - x_0^2) + (y_j^2 - y_0^2)$$

同样地，若点 $P(x_i, y_j)$ 在圆弧外侧或圆弧上，即满足 $F_{ij} \geq 0$ 时，应向 $-x$ 方向前进一步，即向圆弧内走一步；若点 $P(x_i, y_j)$ 在圆弧内侧，即满足 $F_{ij} < 0$ 时，则应向 $+y$ 方向前进一步，即向圆弧外走一步。为了简化偏差判别式的运算，仍用递推法来计算新位置处的偏差。

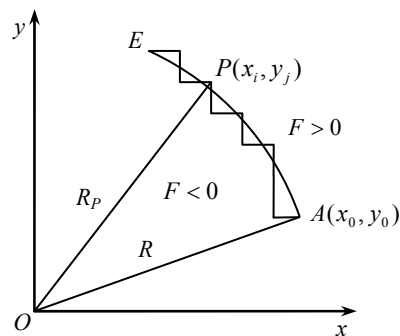


图 2.5 圆弧插补脉冲走向示意图

设加工点 $P(x_i, y_j)$ 在圆弧外侧或圆弧上, 则 $F_{ij} \geq 0$, 在向 $-x$ 方向前进一步后移动到新加工点 $P(x_{i+1}, y_j)$ 。此时, 新加工点的 x 坐标值为 $x_i - 1$, y 坐标值仍为 y_j , 在新加工点 $P(x_{i+1}, y_j)$ 处的偏差为:

$$\begin{aligned} F_{(i+1)j} &= (x_{i+1}^2 - x_0^2) + (y_j^2 - y_0^2) = [(x_i - 1)^2 - x_0^2] + (y_j^2 - y_0^2) \\ &= x_i^2 - 2x_i + 1 - x_0^2 + y_j^2 - y_0^2 = F_{ij} - 2x_i + 1 \end{aligned} \quad (2-5)$$

设加工点 $P(x_i, y_j)$ 在圆弧内侧, 则 $F_{ij} < 0$, 在向 $+y$ 方向前进一步后移动到新加工点 $P(x_i, y_{j+1})$ 。此时, 新加工点的 x 坐标值仍为 x_i , y 坐标值则改为 $y_j + 1$, 在新加工点 $P(x_i, y_{j+1})$ 处的偏差为:

$$\begin{aligned} F_{i(j+1)} &= (x_i^2 - x_0^2) + (y_{j+1}^2 - y_0^2) = (x_i^2 - x_0^2) + [(y_j + 1)^2 - y_0^2] \\ &= x_i^2 - x_0^2 + y_j^2 + 2y_j + 1 - y_0^2 = F_{ij} + 2y_j + 1 \end{aligned} \quad (2-6)$$

由式 (2-5) 及式 (2-6) 可以看出, 新加工点的偏差可以用前一个加工点的偏差递推出来。递推法把圆弧偏差运算由平方运算化为加法和乘 2 运算, 而在二进制中乘 2 运算是容易实现的。

2、运算过程和程序流程图

圆弧插补的运算过程与直线插补的运算过程基本一样, 每进给一步也需要进行偏差判别、坐标进给、偏差计算、终点判别四个步骤, 所不同的是在圆弧插补计算偏差的同时, 还要对动点(加工点)的坐标进行加 1 或减 1 运算, 为下一点的偏差计算作好准备。对于第一象限逆时针圆弧, 具体情况为:

当 $F_{ij} \geq 0$ 时, 应走 $-\Delta x$, 新偏差为:

$$F_{(i+1)j} = F_{ij} - 2x_i + 1, \text{ 动点坐标为:}$$

$$x_{i+1} = x_i - 1, \quad y_j = y_j。$$

当 $F_{ij} < 0$ 时, 应走 $+\Delta y$, 新偏差为:

$$F_{i(j+1)} = F_{ij} + 2y_j + 1, \text{ 动点坐标为: } x_i = x_i, \quad y_{j+1} = y_j + 1。$$

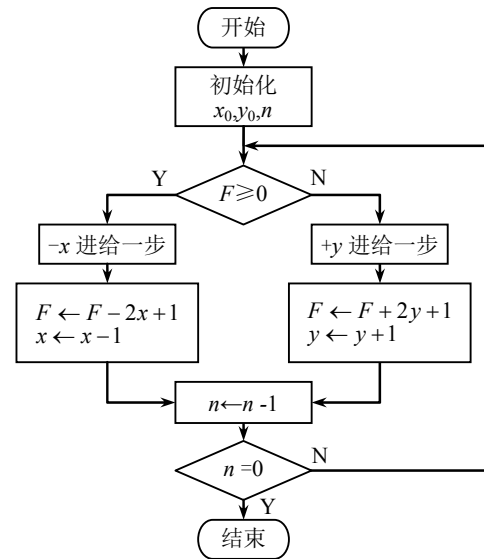


图 2.6 第一象限逆时针插补运算流程图

圆弧插补运算过程的流程图如图 2.6 所示。在进行终点判别计算时，终点计数器存放两坐标轴进给的总步数： $n = |x_e - x_0| + |y_e - y_0|$ 。每走一步，都要从总步数中减去 1，直至总步数减为零，才发出终点到达信号终止计算。

3、圆弧插补举例

例 2.2：设欲加工第一象限逆时针圆弧 AE ，起点 A 的坐标是 $x_0 = 4$ ， $y_0 = 3$ ；终点 E 的坐标是 $x_e = 0$ ， $y_e = 5$ ；终点判别值 $n = |x_e - x_0| + |y_e - y_0| = 6$ ，加工过程的运算步骤如表 2.2 所示，插补后获得的实际逼近曲线如图 2.7 所示。

表 2.2 圆弧插补运算过程

序号	工 作 步 骤			
	判 别	进 给	运 算	比 较
1	$F = 0$	$-\Delta x$	$F = 0 - 2 \times 4 + 1 = -7; x = 4 - 1 = 3, y = 3; n = 6 - 1 = 5$	$n \neq 0$
2	$F = -7 < 0$	$+\Delta y$	$F = -7 + 2 \times 3 + 1 = 0; x = 3, y = 3 + 1 = 4; n = 5 - 1 = 4$	$n \neq 0$
3	$F = 0$	$-\Delta x$	$F = 0 - 2 \times 3 + 1 = -5; x = 3 - 1 = 2, y = 4; n = 4 - 1 = 3$	$n \neq 0$
4	$F = -5 < 0$	$+\Delta y$	$F = -5 + 2 \times 4 + 1 = 4; x = 2, y = 4 + 1 = 5; n = 3 - 1 = 2$	$n \neq 0$
5	$F = 4 > 0$	$-\Delta x$	$F = 4 - 2 \times 2 + 1 = 1; x = 2 - 1 = 1, y = 5; n = 2 - 1 = 1$	$n \neq 0$
6	$F = 1 > 0$	$-\Delta x$	$F = 1 - 2 \times 1 + 1 = 0; x = 1 - 1 = 0, y = 5; n = 1 - 1 = 0$	$n = 0$

三、象限处理与坐标变换

1、象限处理

在前面的讨论中，用逐点比较法进行直线及圆弧插补的原理和计算程序，只分别适用于第一象限直线和第一象限逆时针圆弧的情况。但是，当插补轮廓处于不同的象限以及圆弧走向不同时，其插补计算公式和脉冲进给方向都是不同的。为了将各象限直线的插补公式统一于第一象限的公式，将各种圆弧的插补公式统一于第一象限逆时针圆弧的计算公式，就需要将坐标和进给方向根据实际情况的不同而进行变换。这样，不管哪个象限的直线，都可按第一象限直线进行插补计算；不管哪个象限、如何走向的圆弧，都可按第一象限逆时针圆弧进行插补计算。而在控制机床工作时，采用逻辑电路将进给脉冲按实际象限和线型的需要分别发到 $\pm x$ 和 $\pm y$ 四个方向上去。

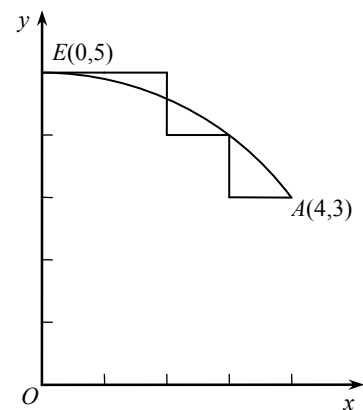


图 2.7 圆弧插补轨迹

假设用 SR_1 、 SR_2 、 SR_3 、 SR_4 分别表示第一、第二、第三、第四象限的顺时针圆弧， NR_1 、 NR_2 、 NR_3 、 NR_4 分别表示第一、第二、第三、第四象限的逆时针圆弧， L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分

别表示第一、第二、第三、第四象限的直线。由图 2.8 可以看出，若按 NR_1 线型插补运算时，如将 x 轴的进给反向，即可走出 SR_2 ；如将 y 轴的进给反向，即可走出 SR_4 ；如将 x 、 y 轴两者进给都反向，即可走出 NR_3 。这样， NR_1 、 NR_3 、 SR_2 、 SR_4 四种线型都可以应用相同的偏差计算公式。另外，若按 NR_1 线型插补运算时，如将 x 轴和 y 轴对调，即以 x 作 y 、 y 作 x ，那么就可走出 SR_1 。然后，同样按上述原理，应用 SR_1 偏差计算公式，通过适当改变进给方向即可走出其余线型 SR_3 、 NR_2 、 NR_4 。因此，所有的八种圆弧线型都可以应用相同的偏差计算公式。

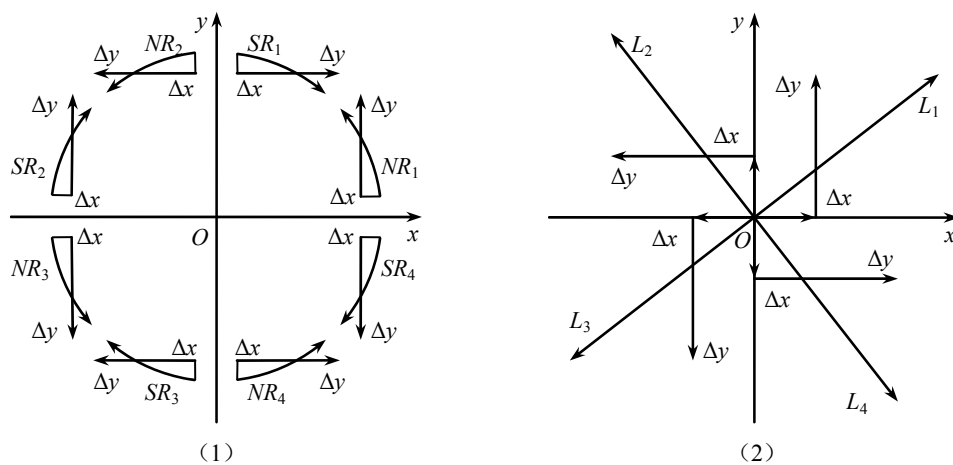


图 2.8 圆弧和直线的象限变换

同样地，对于直线来说，按照 L_1 的线型进行插补运算后，根据不同象限的要求将进给脉冲分配到机床不同坐标的正、负方向上去，就可以分别走出 L_2 、 L_3 和 L_4 。这也就是说，若针对不同象限建立类似于第一象限的坐标，就可得到与第一象限直线和第一象限逆时针圆弧类似的情况，从而可以用统一公式作插补计算，然后根据象限的不同发出不同方向的脉冲。表 2.3 表达了进给脉冲的实际分配情况。

表 2.3 进给脉冲的实际分配情况

图 形	脉 冲	第一象限	第二象限	第三象限	第四象限
直 线	Δx	+x	+y	-x	-y
	Δy	+y	-x	-y	+x

顺时针圆弧	Δx	$-y$	$+x$	$+y$	$-x$
	Δy	$+x$	$+y$	$-x$	$-y$
逆时针圆弧	Δx	$-x$	$-y$	$+x$	$+y$
	Δy	$+y$	$-x$	$-y$	$+x$

另外，当圆弧的起点和终点不在同一象限内时，还需要解决圆弧插补的过象限问题。所以为实现一个程序段的完整功能，数控系统需设置圆弧自动过象限功能。要完成过象限功能，就必须先判别何时过象限。当圆弧过象限时存在一个明显特点，就是过象限处正好是圆弧与坐标轴相交处，因此在加工点的两个坐标值中必然有一个为零，判别是否过象限只要检查加工点的坐标值中是否有为零的即可。每过一次象限后，圆弧的线型就发生一次变化，但这种变化是有一定规律的。

当圆弧起点在第一象限时，逆时针圆弧过象限后的转换顺序是： $NR_1 \rightarrow NR_2 \rightarrow NR_3 \rightarrow NR_4 \rightarrow$

NR_1 ；顺时针圆弧过象限后的转换顺序是： $SR_1 \rightarrow SR_4 \rightarrow SR_3 \rightarrow SR_2 \rightarrow SR_1$ 。

2、坐标变换

前面所述的插补都是在 xy 平面内讨论的，对于其它平面的插补可采用坐标变换的方法实现。具体就是用 y 代替 x 、 z 代替 y ，就可以实现 yz 平面内的直线和圆弧插补；用 z 代替 y 、 x 保持不变，就可以实现 xz 平面内的直线和圆弧插补。

四、逐点比较法的速度分析

在插补过程中，对于某一坐标而言，进给脉冲的频率就决定了进给速度。设 f_x 为 x 坐标方向的脉冲频率， V_x 为 x 坐标方向的进给速度，则它们有如下的关系：

$$V_x = 60\delta f_x$$

式中， δ 为脉冲当量，单位为毫米 / 脉冲。

对于三坐标系统而言，合成进给速度 V 为：

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

式中， V_x 、 V_y 、 V_z 分别为 x 、 y 、 z 三个方向的进给速度。

合成进给速度直接决定了加工时的粗糙度和精度。所以应使合成进给速度恒等于指令进给速度或只在允许的误差范围内变化。但在实际上，合成进给速度 V 与插补计算方法、脉冲源频率及程序段的形式和尺寸都有关系。也就是说，对于不同的脉冲分配方式， F （指令进给速度）和 V 之间的换算关系各不相同。

在逐点比较法的插补过程中，脉冲源产生的每一个脉冲，不是发向 x 轴，就是发向 y 轴。令 f_g 为脉冲源频率，则有：

$$f_g = f_x + f_y$$

所以， x 坐标和 y 坐标方向的进给速度为：

$$V_x = 60\delta f_x; \quad V_y = 60\delta f_y$$

合成进给速度 V 为：

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = 60\delta \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$$

上式在 $f_x = 0$ （或 $f_y = 0$ ）时，也就是脉冲按平行于坐标轴的方向分配时有最大速度，这

个速度由脉冲源频率决定，所以称其为脉冲源速度 V_g ，其计算公式为：

$$V_g = 60\delta f_g$$

合成进给速度 V 与 V_g 之比为：

$$\frac{V}{V_g} = \frac{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}{f_g} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{x + y}$$

其插补速度变化范围为 $(1 \sim 0.707)V_g$ ，最大速度与最小速度之比为 $V_{\max}/V_{\min} = 1.414$ 。这

样的速度变化范围，对一般机床来说可以满足要求，所以逐点比较法的进给速度是比较平稳的。

§ 2-3 数字积分法

数字积分法又称数字微分分析法 DDA (Digital Differential Analyzer)，它是利用数字积分的原理，计算刀具沿坐标轴的位移，使刀具沿着所要加工的轨迹运动。数字积分法具有运算速度快、脉冲分配均匀、易于实现多坐标联动及描绘平面各种函数曲线的特点，所以它在轮廓控制数控系统中应用比较广泛。其缺点是速度调节不便，插补精度需要采取一定措施才能满足要求。由于计算机有较强的计算功能和灵活性，所以采用软件插补可克服上述缺点。

如图 2.9 所示，从几何概念上讲，求函数 $y = f(t)$ 对 t 的积分运算，就是求此函数曲线与坐标轴 t 在积分区间内所包围的面积 S 。若把自变量的积分区间 $[a, b]$ 等分成许多有限的小区间

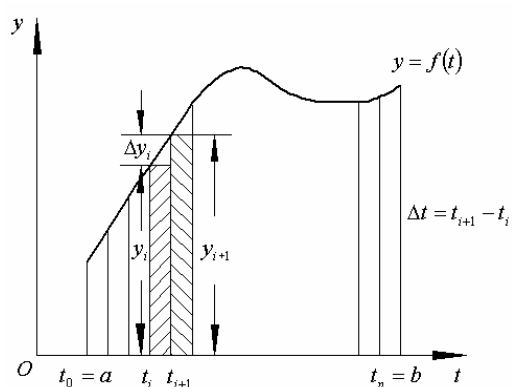


图 2.9 函数 $y = f(t)$ 的积分

Δt ($\Delta t = t_{i+1} - t_i$)，则求面积 S 可以转化成求有限个小区间内微小矩形面积之和，即：

$$S = \int_a^b y dt \approx \sum_{i=0}^{n-1} \Delta S_i = \sum_{i=0}^{n-1} y_i \Delta t$$

这种近似积分法称为矩形积分法。在数学运算时， Δt 一般取为单位“1”，即一个脉冲当量，则：

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} y_i$$

通过从数学角度的分析可以看到，积分过程实质上包括两部分内容：一个是随着坐标值 t 的变化，被积函数 $y = f(t)$ 也要发生变化；另一个是在坐标值 t 变化时，要不断完成对被积函数 $y = f(t)$ 的累加。

在数控系统中，可以用数字积分器来完成积分运算。如图 2.10 所示，数字积分器通常可由两个容量相同的寄存器和两个加法器组成，其中一个寄存器为被积函数寄存器，用来寄存被积函数 y_i ；另一个寄存器为余数寄存器，用来寄存被积函数累加运算的余数。与积分过程相对应，积分器的工作也分成两步运算：一个是当出现 Δt 后，通过加法器 A 将被积函数寄存

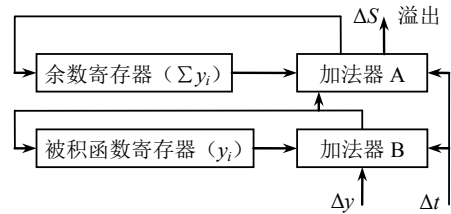


图 2.10 数字积分器的结构

器中的 y_i 与余数寄存器中的余数相加，并将结果存入余数寄存器，从而形成 $\sum y_i$ ；另一个是通

过加法器 B 将 Δy_i 与 y_i 相加，从而形成新的被积函数值 $y_{i+1} = y_i + \Delta y_i$ 。这两步运算称为一次迭

代，并重复进行。当余数寄存器中的数值超出其容量时，就会产生溢出 ΔS ，这个 ΔS 往往就是数字积分器的输出。

一、DDA 直线插补

1、DDA 直线插补原理

首先看一个具体实例。如图 2.11 所示，若要加工 xy 平面上的直线 OE ，起点在原点 $O(0,0)$ ，终点为 $E(7,4)$ 。设需在 $t = 10ms$ 内使加工到达终点 E ，在单位时间间隔 Δt 内 x 和 y 的增量分别为 Δx 和 Δy ，则可得：

$$\Delta x = \frac{x_e}{10} = 0.7 < 1; \quad \Delta y = \frac{y_e}{10} = 0.4 < 1$$

可以看出，在单位时间内发出的脉冲个数不到 1 个（即 0.7 个和 0.4 个），但数控系统只能在接收到 1 个脉冲时才

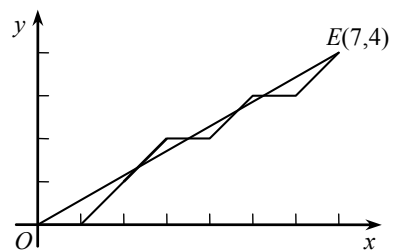


图 2.11 直线插补示意图

可走一步，因此第一个 Δt 出现时，在两个方向上均不发出进给脉冲，但会将 0.7 和 0.4 分别寄存在两个坐标方向的余数寄存器 R_x 和 R_y 中。随着时间 t 的推移，累加过程不断进行，一旦有一个坐标方向上的累加值超过 1，则在此方向上就会产生溢出，也就是沿此坐标方向进给一步，同时将溢出后小于 1 的部分又存入余数寄存器中以备下次累加所用。这样，在两个坐标方向上不断产生溢出，也即沿两个坐标方向不断产生进给，刀具就从 O 点加工到 E 点。其具体累加运算过程如表 2.4 所示，插补后的轨迹如图 2.11 所示。

表 2.4 直线插补运算过程

累加次数	Δt	Δx	Δy	R_x	x 向进给	R_y	y 向进给
1	1	0.7	0.4	0.7		0.4	
2	1	0.7	0.4	0.7+0.7=1.4 1.4-1=0.4	1	0.4+0.4=0.8	
3	1	0.7	0.4	0.4+0.7=1.1 1.1-1=0.1	1	0.8+0.4=1.2 1.2-1=0.2	1
4	1	0.7	0.4	0.1+0.7=0.8		0.2+0.4=0.6	
5	1	0.7	0.4	0.8+0.7=1.5 1.5-1=0.5	1	0.6+0.4=1.0 1.0-1=0	1
6	1	0.7	0.4	0.5+0.7=1.2 1.2-1=0.2	1	0+0.4=0.4	
7	1	0.7	0.4	0.2+0.7=0.9		0.4+0.4=0.8	
8	1	0.7	0.4	0.9+0.7=1.6 1.6-1=0.6	1	0.8+0.4=1.2 1.2-1=0.2	1
9	1	0.7	0.4	0.6+0.7=1.3 1.3-1=0.3	1	0.2+0.4=0.6	
10	1	0.7	0.4	0.3+0.7=1.0 1.0-1=0	1	0.6+0.4=1.0 1.0-1=0	1

借鉴上面的具体例子，来讨论一下一般情况下的插补运算过程。如图 2.12 所示，若在 xy 平面内加工一条直线 OE ，直线的起点在原点 $O(0,0)$ ，终点为 $E(x_e, y_e)$ ，假设进给速度 V 是均匀的，直线 OE 的长度为 L ，则有：

$$\frac{V}{L} = \frac{V_x}{x_e} = \frac{V_y}{y_e} = k \quad (2-7)$$

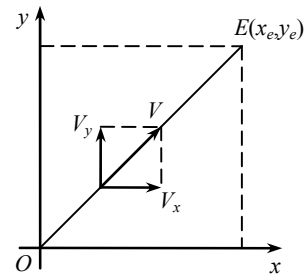


图 2.12 DDA 法直线插补原理

式中， V_x 、 V_y 分别表示动点在 x 和 y 方向上的移动速度， k 为比例系数。由式 (2-7)，在 Δt 时间内， x 和 y 方向上的微小移动增量 Δx 、 Δy 应为：

$$\begin{cases} \Delta x = V_x \Delta t = kx_e \Delta t \\ \Delta y = V_y \Delta t = ky_e \Delta t \end{cases} \quad (2-8)$$

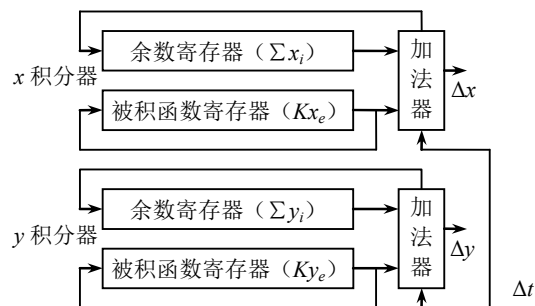


图 2.13 DDA 直线插补结构图

因此，动点从原点走向终点的过程，可以看作是各坐标每经过一个单位时间间隔 Δt 分别以增量 kx_e 、 ky_e 同时累加的结果。据此可以作出直线插补结构图，如图 2.13 所示。

设经过 m 次累加后， x 和 y 方向分别都到达终点 $E(x_e, y_e)$ ，则：

$$\begin{cases} x_e = \sum_{i=1}^m (kx_e)\Delta t = mkx_e\Delta t \\ y_e = \sum_{i=1}^m (ky_e)\Delta t = mky_e\Delta t \end{cases} \quad (2-9)$$

取 $\Delta t = 1$ ，则有：

$$\begin{cases} x_e = mkx_e \\ y_e = mky_e \end{cases} \quad (2-10)$$

式 (2-8) 也变为：

$$\begin{cases} \Delta x = kx_e \\ \Delta y = ky_e \end{cases} \quad (2-11)$$

由式 (2-10) 可知 $mk = 1$ ，即：

$$m = \frac{1}{k} \quad (2-12)$$

因为累加次数 m 必须是整数，所以比例系数 k 一定为小数。选取 k 时主要考虑 Δx 、 Δy 应不大于 1，以保证坐标轴上每次分配的进给脉冲不超过一个单位步距，即由式 (2-11) 得：

$$\begin{cases} \Delta x = kx_e < 1 \\ \Delta y = ky_e < 1 \end{cases} \quad (2-13)$$

另外，当寄存器为 n 位时， x_e 、 y_e 的最大值为 $2^n - 1$ ，所以由式 (2-13) 得：

$$k(2^n - 1) < 1, \quad \text{即} \quad k < \frac{1}{2^n - 1}$$

一般取
$$k = \frac{1}{2^n} \quad (2-14)$$

则有：
$$m = 2^n \quad (2-15)$$

式 (2-15) 说明 DDA 直线插补的整个过程要经过 2^n 次累加才能到达终点。

当 $k = 1/2^n$ 时，对二进制数来说， kx_e 与 x_e 的差别只在于小数点的位置不同，将 x_e 的小数点左移 n 位即为 kx_e 。因此，在 n 位寄存器中存放 x_e 和存放 kx_e 的数字是相同的，只是后者的小数点出现在最高位数的前面。这样，对 kx_e 与 ky_e 的累加就可分别转变为对 x_e 与 y_e 的累加。

DDA 直线插补的终点判别比较简单，因为直线程段进行 2^n 次累加运算后就一定到达终点，所以可用一个与积分器中寄存器容量相同的终点计数器 J_E 来实现终点判别。计数器的初值设置

为 0，每进行一次累加运算后 J_E 加 1，当累加 2^n 次后产生溢出，使 $J_E = 0$ ，这时插补完成。

2、DDA 直线插补流程

用 DDA 法进行插补时， x 和 y 两坐标可同时进给，即可同时送出 Δx 、 Δy 脉冲，同时每累加一次，要进行一次终点判别。插补流程图如图

2.14 所示，其中 J_{Vx} 、 J_{Vy} 为被积函数寄存器，

J_{Rx} 、 J_{Ry} 为余数寄存器， J_E 为终点计数器。

3、DDA 直线插补举例

例 2.3：设要插补图 2.15 所示的直线轨迹 OE ，起点坐标为 $O(0,0)$ ，终点坐标为 $E(5,3)$ 。若被积函数寄存器 J_{Vx} 、 J_{Vy} 和余数寄存器 J_{Rx} 、 J_{Ry} ，以及终点计数器 J_E 均为三位二进制寄存器，

则迭代次数为 $m = 2^3 = 8$ 次时，插补完成，其插补过程如表 2.5

所示。在插补前， J_E 、 J_{Rx} 、 J_{Ry} 均为零， J_{Vx} 、 J_{Vy} 分别存放 $x_e = 5$ ， $y_e = 3$ 。在直线插补过程中， J_{Vx} 、 J_{Vy} 中的数值始终保持不变（始终为 x_e 、 y_e ）。

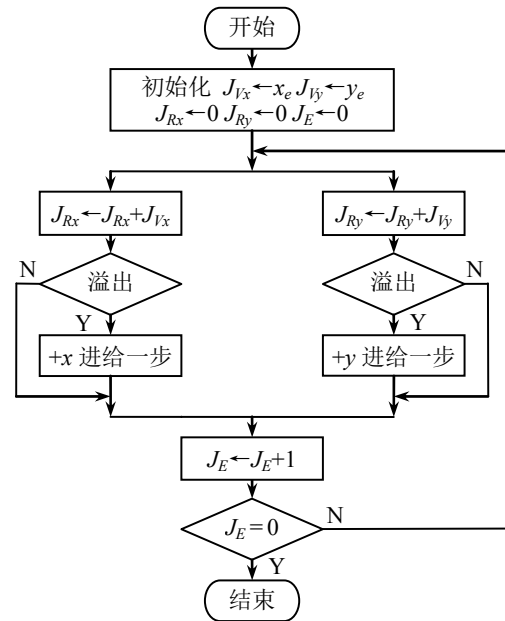


图 2.14 DDA 直线插补软件流程图

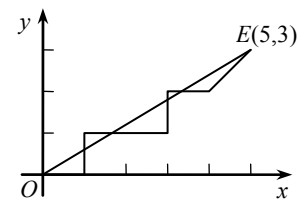


图 2.15 DDA 直线插补举例

表 2.5 DDA 直线插补过程

累加	x 积分器	y 积分器	终 点	备 注
----	---------	---------	-----	-----

次数	$J_{I_x}(x_e)$	J_{R_x}	溢出 Δx	$J_{I_y}(y_e)$	J_{R_y}	溢出 Δy	计数器 J_E	
0	101	000	0	011	000	0	000	初始状态
1	101	101	0	011	011	0	001	第一次迭代
2	101	010	1	011	110	0	010	J_{R_x} 有进位, Δx 溢出
3	101	111	0	011	001	1	011	J_{R_y} 有进位, Δy 溢出
4	101	100	1	011	100	0	100	J_{R_x} 有进位, Δx 溢出
5	101	001	1	011	111	0	101	J_{R_x} 有进位, Δx 溢出
6	101	110	0	011	010	1	110	J_{R_y} 有进位, Δy 溢出
7	101	011	1	011	101	0	111	J_{R_x} 有进位, Δx 溢出
8	101	000	1	011	000	1	000	Δx 、 Δy 同时溢出, 插补结束

二、DDA 圆弧插补

1、DDA 圆弧插补原理

从上面的叙述可知, 数字积分法直线插补的物理意义是使动点沿速度矢量的方向前进, 这同样适合于圆弧插补。下面以第一象限逆时针圆弧为例, 来说明圆弧插补的原理。

如图 2.16 所示, 设圆弧 AE 圆心在原点, 半径为 R , 起点 $A(x_0, y_0)$, 终点 $E(x_e, y_e)$, $P(x_i, y_j)$ 为圆弧上的任意动点, 动点移动速度为 V , 沿各坐标方向的分速度为 V_x 和 V_y 。则有下列关系:

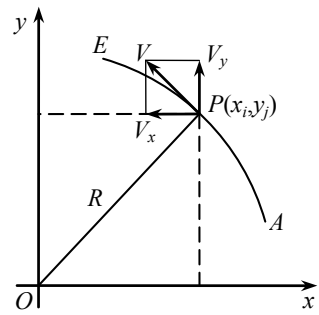


图 2.16 DDA 法圆弧插补原理

$$\frac{V}{R} = \frac{V_x}{y_j} = \frac{V_y}{x_i} = k \quad (2-16)$$

其中, k 为比例系数。因为半径 R 为常数, 切向速度 V 为匀速, 所以可认为 k 是常数。在一个单位时间间隔 Δt 内, x 和 y 方向上的位移增量可表示为:

$$\begin{cases} \Delta x = V_x \Delta t = ky_j \Delta t \\ \Delta y = V_y \Delta t = kx_i \Delta t \end{cases} \quad (2-17)$$

根据式 (2-17), 仿照直线插补方法可以构成如图 2.17 所示的圆弧插补结构图。图中系数 k 的省略原因与直线插补时类同。但必须要注意圆弧插补与直线插补的区别:

(1) 圆弧插补时坐标值 x_i 、 y_j 存入被积函数寄存器 J_{V_x} 、 J_{V_y} 的对应关系与直线插补相反, 即 y_j 存入 J_{V_x} , 而 x_i 存入 J_{V_y} 。

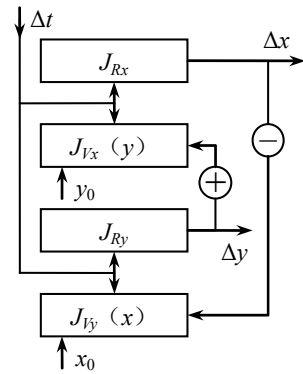


图 2.17 DDA 圆弧插补结构图

(2) 直线插补时 J_{I_x} 、 J_{I_y} 分别寄存的是终点坐标 x_e 和 y_e (都为常数), 而圆弧插补时它们分别寄存的是动点坐标 y_j 和 x_i (都为变量)。因此, 在刀具移动过程中必须根据刀具位置的变化来更改寄存器 J_{I_x} 、 J_{I_y} 中的内容。在起点时, J_{I_x} 、 J_{I_y} 分别寄存起点坐标值 y_0 、 x_0 。在插补过程中, J_{I_y} 每溢出一个 Δy 脉冲, J_{I_x} 寄存器应该加“1”; 而当 J_{I_x} 溢出一个 Δx 脉冲时, J_{I_y} 寄存器应该减“1”。减“1”的原因是刀具在作逆时针圆弧运动时, x 坐标轴进行负方向进给, 动点的 x 坐标不断减少。

对于其它象限的顺时针圆弧和逆时针圆弧, 插补运算过程和积分器结构基本上与第一象限逆时针圆弧是一致的。其区别在于控制各坐标轴的进给方向不同, 以及修改 J_{I_x} 、 J_{I_y} 内容时是加“1”还是减“1”, 要由 x_i 、 y_j 坐标值的增减而定, 具体情况如表 2.6 所示。

表 2.6 DDA 圆弧插补时被积函数寄存器值的变化情况

圆弧走向	顺 时 针 圆 弧				逆 时 针 圆 弧			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
$J_{I_x}(y)$	⊖	⊕	⊖	⊕	⊕	⊖	⊕	⊖
$J_{I_y}(x)$	⊕	⊖	⊕	⊖	⊖	⊕	⊖	⊕
Δx	+	+	-	-	-	-	+	+
Δy	-	+	+	-	+	-	-	+

DDA 圆弧插补的终点判别可以利用两个终点减法计数器来实现。把 x 、 y 坐标所需输出的脉冲数 $|x_e - x_0|$ 和 $|y_e - y_0|$ 分别存入这两个计数器中, x 或 y 积分器每输出一个脉冲, 相应的减法计数器减 1, 当某一坐标计数器为 0 时, 说明该坐标已到达终点, 这时该坐标就停止迭代。当两个计数器均为 0 时, 圆弧插补结束。另外也可根据 J_{I_x} 、 J_{I_y} 中的存数来判断是否到达终点, 如果 J_{I_x} 中的存数是 y_e , J_{I_y} 中的存数是 x_e , 则圆弧插补到达终点。

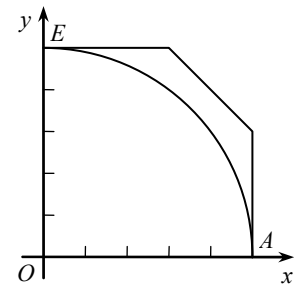


图 2.18 DDA 圆弧插补举例

2、DDA 圆弧插补举例

例 2.4: 设有第一象限逆时针圆弧 AE , 起点为 $A(5,0)$, 终点为 $E(0,5)$, 即 $x_0 = 5, y_0 = 0$; $x_e = 0, y_e = 5$ 。假设所有寄存器的位数都为 3, 其运算过程如表 2.7 所示, 插补轨迹如图 2.18 所示。

表 2.7 DDA 圆弧插补过程

累加 次数	x 积分器			x 终	y 积分器			y 终	备 注
	$J_{Ix}(y_j)$	J_{Rx}	Δx		$J_{Iy}(x_i)$	J_{Ry}	Δy		
0	000	000	0	101	101	000	0	101	初始状态
1	000	000	0	101	101	101	0	101	第一次迭代
2	000	000	0	101	101	010	1	100	Δy 溢出
	001								修正 y_i
3	001	001	0	101	101	111	0	100	
4	001	010	0	101	101	100	1	011	Δy 溢出
	010								修正 y_i
5	010	100	0	101	101	001	1	010	Δy 溢出
	011								修正 y_i
6	011	111	0	101	101	110	0	010	
7	011	010	1	100	101	011	1	001	Δx 和 Δy 同时溢出
	100				100				修正 x_i 和 y_i
8	100	110	0	100	100	111	0	001	
9	100	010	1	011	100	011	1	000	Δx 和 Δy 同时溢出, y 到达终点
	101				011				修正 x_i 和 y_i
10	101	111	0	011	011	011	0	000	
11	101	100	1	010	011	011	0	000	Δx 溢出
					010				修正 x_i
12	101	001	1	001	010	011	0	000	Δx 溢出
					001				修正 x_i
13	101	110	0	001	001	011	0	000	
14	101	011	1	000	001	011	0	000	Δx 溢出, x 到达终点
					000				插补结束

三、DDA 插补的速度分析

DDA 插补的特点是脉冲源每产生一个脉冲，就进行一次积分运算。如果 f_x 、 f_y 分别为 x 、 y 坐标进给脉冲的频率， f_g 为脉冲源的频率，则 x 方向的平均进给比率为 x/N （ N 是余数寄存器容量， $N = 2^n$ ），而 y 方向的平均进给比率为 y/N 。所以有：

$$f_x = \frac{x}{N} f_g; \quad f_y = \frac{y}{N} f_g$$

各坐标方向的进给速度为：

$$V_x = 60 f_x \delta = 60 \delta f_g \frac{x}{N}; \quad V_y = 60 f_y \delta = 60 \delta f_g \frac{y}{N}$$

合成进给速度为：

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = 60 \delta \frac{f_g}{N} \sqrt{x^2 + y^2} = 60 \delta \frac{L}{N} f_g \quad (2-18)$$

其中， $L = \sqrt{x^2 + y^2}$ ，当插补段为直线时， L 为直线长度；当插补段为圆弧时， L 应改为圆弧半径 R 。显然，进给速度受到被加工直线长度和被加工圆弧半径的影响。

插补速度变化率为：

$$\frac{V}{V_g} = \frac{L}{N}$$

可见，速度变化率与程序段的 L （或 R ）成正比。由于 L （或 R ）的变化范围是 $0 \sim N$ ，所以合成速度的变化范围是 $V = (0 \sim 1)V_g$ 。这种程度的变化在加工中是不允许的，必须设法加以改善。另外，分析 DDA 插补的过程也可知，不论被积函数寄存器中存数的大小如何，即不论加工行程的长短如何，都必须同样完成 $m = 2^n$ 次累加运算才能到达终点。这就是说当脉冲源频率 f_g 一定时，行程长，脉冲溢出快，走刀快；行程短，脉冲溢出慢，走刀慢，所以各程序段的进给速度是不一致的。这就影响了加工表面的质量，特别是行程短的程序段生产率低。

四、改进 DDA 插补质量的措施

1、进给速度的均匀化措施

如上所述，为了克服 DDA 插补中进给速度不一致的缺点，使溢出脉冲均匀，并提高溢出速度，通常可采用设置进给速率数 FRN（feed rate number）或左移规格化等改善措施，较为常用的是左移规格化。

（1）设置进给速率数 FRN

进给速率数 FRN 对于直线插补和圆弧插补可以分别表示为：

$$\begin{cases} FRN = \frac{V}{L} = \frac{1}{2^n} f\delta \\ FRN = \frac{V}{R} = \frac{1}{2^n} f\delta \end{cases} \quad (2-19)$$

则 $V = FRN \cdot L$ 或 $V = FRN \cdot R$ ，通过 FRN 调整插补脉冲频率 f ，使其与给定的进给速度相协调，消除直线长度 L 与圆弧半径 R 对进给速度的影响。

(2) 左移规格化

在数字积分法插补的过程中，当被积函数比较小时，就需要很多次累加才能输出一个溢出脉冲，致使输出脉冲的速率下降。因此在实际的计算中，常把被积函数寄存器中的前零移去，即对被积函数实现“左移规格化”处理。经过左移规格化处理的数就称为规格化数，其特点是寄存器中数的最高位为“1”；相应地最高位为“0”的数就称为非规格化数。显然，规格化的数累加两次必有一次溢出，而非规格化数必须作两次以上甚至多次累加才能有一次溢出。由于直线插补与圆弧插补的左移规格化处理稍有不同，下面分别加以介绍。

① 直线插补的左移规格化

直线插补时，将被积函数寄存器 J_{V_x} 、 J_{V_y} 中的 x_e 、 y_e 同时左移，同时记下左移位数。当其中任一坐标的被积函数寄存器的前零全部移去时，说明该坐标数据已变成规格化数，此时左移规格化即告结束。也就是说，直线插补的左移规格化是使坐标值最大的被积函数寄存器的最高有效位为1。同时左移意味着把 x 、 y 两坐标方向的脉冲分配速度扩大同样的倍数，而二者数值之比不变，所以直线斜率也不变。因为规格化后，每累加运算两次必有一次溢出，溢出速度比较均匀，所以加工的效率和质量都大为提高。

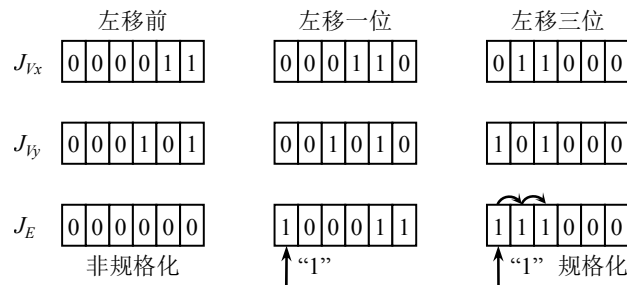


图 2.19 左移规格化实例

左移规格化后，在一个程序段时间间隔内，各坐标分配脉冲数最后应该等于 x_e 及 y_e 值，这样作为终点判别的累加次数 m 必须减少。因为积分器中的数每左移一位，数值增大了一倍，这时 kx_e （或 ky_e ）的比例常数 k 必须更改为 $k = 1/2^{n-1}$ ，而累加次数相应地为 $m = 2^{n-1}$ 。若左移了 Q

位，则数值增大了 2^Q 倍，即 $k = 1/2^{n-Q}$ ，累加次数就相应地为 $m = 2^{n-Q}$ 。换句话说，每左移一位，累加次数应减少一倍，相当于终点判别计数器 J_E 的长度要缩短一位。要达到这个目的并不困难，只要在 J_{V_x} 、 J_{V_y} 左移的同时，终点判别计数器 J_E 把“1”信号从最高位输入，进行右移来缩短计数长度即可。图 2.19 表示了左移规格化及修改终点判别计数长度的实例。

例如，在第一象限内的直线 OA ，起点在坐标原点，终点为 $A(7,5)$ ，寄存器位数为 4 位。左移规格化前寄存器中的数为 0111 及 0101，需累加运算 16 次才可以到达终点。左移规格化后寄存器中的数为 1110 及 1010，只需累加运算 8 次就可以到达终点了。如图 2.20 所示，为左移规格化前后的插补轨迹。

② 圆弧插补的左移规格化

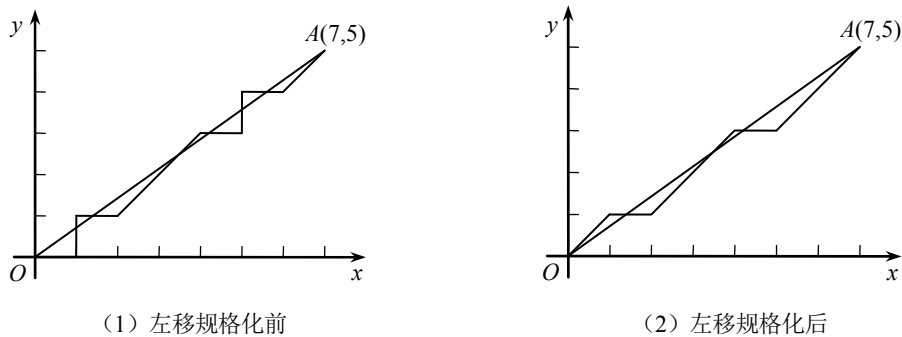


图 2.20 左移规格化前后直线的插补轨迹

圆弧插补的左移规格化处理与直线插补基本相同，唯一的区别在于圆弧插补的左移规格化是使坐标值最大的被积函数寄存器的次高位为 1（即保持一个前零），也就是说在圆弧插补中将 J_{V_x} 、 J_{V_y} 寄存器中次高位为“1”的数称为规格化数。这是由于在圆弧插补过程中， J_{V_x} 和 J_{V_y} 寄存器中的数 y_j 和 x_i 会随着加工过程的进行不断地改变（即作 ± 1 修正），数值可能不断增加，若仍取最高位为“1”作规格化数，则有可能在+1修正后溢出。将规格化提前一位后，就避免了溢出。另外，由于规格化数提前一位而产生，就要求寄存器的容量必须大于被加工圆弧半径的二倍，这一点是明显的。

圆弧插补左移规格化后还需注意另一个问题，左移 Q 位相当于坐标 x_i 、 y_j 扩大了 2^Q 倍，亦即 J_{V_x} 及 J_{V_y} 寄存器的数分别为 $2^Q y_j$ 及 $2^Q x_i$ ，这样当 y 积分器有溢出时，则 J_{V_x} 寄存器中的数应改为：

$$2^Q y_j \rightarrow 2^Q (y_j + 1) = 2^Q y_j + 2^Q$$

所以，对于第一象限逆时针圆弧，若规格化过程中左移 Q 位，当 J_{R_y} 寄存器溢出一个脉冲时， J_{V_x} 寄存器应该加 2^Q （注意不是1），即第 $Q+1$ 位加“1”；同理，若 J_{R_x} 寄存器溢出一个脉冲时， J_{V_y} 寄存器应该减 2^Q ，即第 $Q+1$ 位减“1”。

由此可见，虽然直线插补和圆弧插补的规格化数不一致，但均能提高溢出速度。直线插补时，经规格化后最大坐标的被积函数可能的最大值为111...111，可能的最小值为100...000，最大坐标每次迭代都有溢出，最小坐标每两次迭代也会有溢出，可见其溢出速率仅相差一倍；而在圆弧插补时，经规格化后最大坐标的被积函数可能的最大值为011...111，可能的最小值为010...000，其溢出速率也相差一倍。因此，经过左移规格化后，不仅提高了溢出速度，而且使溢出脉冲变得比较均匀，所以加工的效率和质量都大为提高。

(3) 自动改变累加频率 f_g

在编制程序时F功能直接用进给速度 V 表示，而在程序输入数控装置后，由F后面的数字直接来控制累加频率 f_g ，但是当尺寸变化时，数控装置能自动地改变 f_g 。计算机数控软件插补很容易实现 f_g 的改变，其方法可采用软件定时和可变频外部实时时钟中断。

2、提高插补精度的措施

根据DDA插补的原理，直线插补的插补误差小于一个脉冲当量，但是圆弧插补的插补误差有可能大于一个脉冲当量，其原因是数字积分器溢出脉冲的频率与被积函数寄存器的存数成正比。当在坐标轴附近进行插补时，一个积分器的被积函数值接近于0，而另一个积分器的被积函数值却接近最大值（圆弧半径），这样后者可能连续溢出，而前者几乎没有溢出脉冲，两个积分器的溢出脉冲速率相差很大，致使插补轨迹偏离理论曲线（可参见图2.18和表2.7）。减小插补误差可有以下两种方法。

(1) 减小脉冲当量

为了减小插补误差，提高插补精度，可以把积分器的位数增多，从而增加累加次数，这相当于把矩形积分的小区间 Δt 取得更小。这样做虽然可以减小插补误差，但是进给速度却降低了，所以我们不能无限制地增加寄存器位数。

(2) 余数寄存器预置数

在实际的积分过程中，常常应用一种简便而行之有效的办法，称为余数寄存器预置数。即在 DDA 插补之前，余数寄存器 J_{Rx} 、 J_{Ry} 中预置某一数值（不是零），这一数值可以是最大容量（即 $2^n - 1$ ），也可以是小于最大容量的某一个数，常用的则是预置最大容量值和预置 0.5。预置 0.5 称为半加载，就是在 DDA 插补迭代前，余数寄存器 J_{Rx} 、 J_{Ry} 的初值不是置 0，而是置 $1000\cdots000$

（即 0.5），也就是把余数寄存器 J_{Rx} 、 J_{Ry} 的最高有效

位置“1”，其余各位均置“0”，这样只要再累加 0.5，余数寄存器就可以产生第一个溢出脉冲，从而使溢出提前。这在被积函数较小，迟迟不能产生溢出的情况下，具有很大的实际意义，它改善了溢出脉冲的时间分布，减小了插补误差。

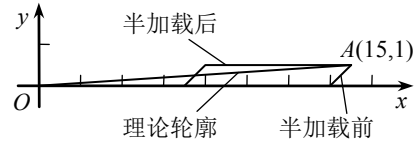


图 2.21 直线插补的半加载轨迹

半加载可以使直线插补的误差减小到半个脉冲当量以内，也可以使圆弧插补的精度得到明显改善。如图 2.21 所示，为直线进行半加载后的插补轨迹图，其中直线 OA 处于第一象限，起点为坐标原点，终点为 $A(15,1)$ 。如图 2.22 所示，为例 2.4 中的圆弧进行半加载后的插补轨迹图。通过将半加载前后的插补轨迹进行对比，可以看到无论是对于直线插补还是圆弧插补，采用半加载后都改善了溢出脉冲的时间分布，提高了插补精度。

全加载就是在 DDA 插补迭代前，余数寄存器 J_{Rx} 、 J_{Ry} 的初值置成该寄存器的最大容量值，

即对于 n 位寄存器置入初值 $2^n - 1$ ，这会使坐标值较小的被积函数寄存器提早产生溢出，从而改善了插补精度。如图 2.23 所示，为例 2.4 中的圆弧进行全加载后的插补轨迹图。

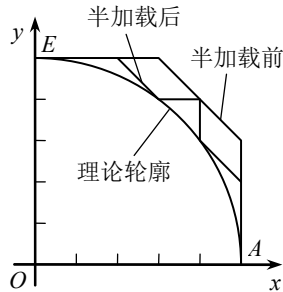


图 2.22 圆弧插补的半加载轨迹

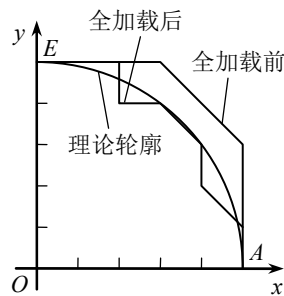


图 2.23 圆弧插补的全加载轨迹

五、多坐标直线插补

DDA 插补算法的优点是可以实现多坐标直线插补联动，下面介绍实际加工中常用的空间直线插补。如图 2.24 所示，设在空间直角坐标系中有一直线 OE ，起点在坐标原点，终

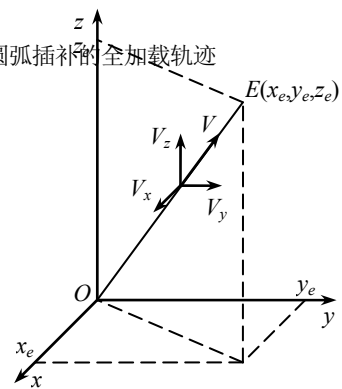


图 2.24 空间直线插补

点为 $E(x_e, y_e, z_e)$ 。假定进给速度 V 是均匀的， V_x 、 V_y 、 V_z 分别表示动点在 x 、 y 、 z 方向上的移动速度，则有：

$$\frac{V}{|OE|} = \frac{V_x}{x_e} = \frac{V_y}{y_e} = \frac{V_z}{z_e} = k \quad (2-20)$$

式中， k 为比例常数。

动点在时间 Δt 内的各坐标位移分量为：

$$\begin{cases} \Delta x = V_x \Delta t = kx_e \Delta t \\ \Delta y = V_y \Delta t = ky_e \Delta t \\ \Delta z = V_z \Delta t = kz_e \Delta t \end{cases} \quad (2-21)$$

参照平面内的直线插补可知，各坐标轴经过 2^n 次累加后分别到达终点，当 Δt 足够小时，有：

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^m kx_e \Delta t = kx_e \sum_{i=1}^m \Delta t = kx_e m = x_e \\ y = \sum_{i=1}^m ky_e \Delta t = ky_e \sum_{i=1}^m \Delta t = ky_e m = y_e \\ z = \sum_{i=1}^m kz_e \Delta t = kz_e \sum_{i=1}^m \Delta t = kz_e m = z_e \end{cases} \quad (2-22)$$

与平面直线插补一样，每有一个 Δt ，最多只允许产生一个单位的位移增量，故 k 的选取也为 $1/2^n$ 。由此可见，在空间直线插补中， x 、 y 、 z 坐标单独累加溢出，彼此独立，易于实现。

§ 2-4 数据采样插补

随着计算机技术的发展，以直流或交流伺服电动机为驱动装置的闭环和半闭环数控系统已经被广泛应用。在这些系统中，一般都采用数据采样方法进行插补。

一、概述

1、数据采样插补的基本原理

数据采样插补是根据编程的进给速度，将轮廓曲线按时间分割为采样周期的进给段，即进给步长。在每一插补周期中，插补程序被调用一次，为下一周期计算出各坐标轴应该行进的增长段（而不是单个脉冲） Δx 或 Δy 等，然后再计算出相应插补点（动点）位置的坐标值。数据采样插补的核心问题是计算出插补周期的瞬时进给量。

数据采样插补一般分为粗、精插补两步完成。第一步是粗插补（一般数据采样插补都是指粗插补），其过程就是在给定曲线的起点和终点之间插入若干个中间点，将曲线分割成若干个微小

直线段，即用一组微小直线段来逼近曲线。这些微小直线段再由精插补进一步进行数据点的密化工作，即进行对直线的基准脉冲插补。

采用数据采样插补方法，在进行直线插补时，是用插补所形成的进给步长子线段逼近给定直线，它与给定直线是相重合的；在进行圆弧插补时，是用切线、弦线或割线逼近给定圆弧，常用的是弦线或割线。

2、插补周期的选择

(1) 插补周期与插补运算时间的关系

插补周期与插补运算时间有密切关系，一旦选定了插补算法，则完成该算法的时间也就确定了。一般来说，插补周期必须大于插补运算所占用的 CPU 时间。这是因为当数控系统进行轮廓控制时，CPU 除了要完成插补运算外，还必须要实时完成其它一些工作，如显示、监控甚至精插补等。所以插补周期 T 必须大于插补运算时间与完成其它实时任务所需时间之和。

(2) 插补周期与位置反馈采样周期的关系

插补周期与位置反馈采样周期有一定的关系，插补周期与采样周期可以相等，也可以不等。如果不等，通常插补周期是采样周期的整数倍。

3、插补周期与精度、速度的关系

在直线插补时，插补所形成的每一个小直线段与给定直线重合，不会造成轨迹误差。在圆弧插补时，用内接弦线或内外均差弦线来逼近圆弧，如图 2.25 所示。这种逼近必然会造成轨迹误差，对于内接弦线，最大半径误差 e_r 与步距角 δ 的关系为（ r 为圆弧半径）：

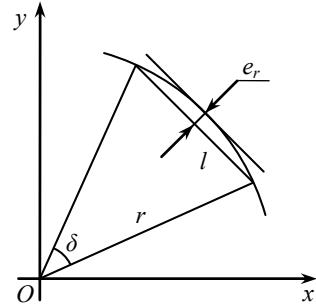


图 2.25 用弦线逼近圆弧

$$e_r = r(1 - \cos \frac{\delta}{2}) \quad \text{或} \quad \cos \frac{\delta}{2} = 1 - \frac{e_r}{r} \quad (2-23)$$

将上式中的 $\cos \frac{\delta}{2}$ 用级数展开式表达，可得：

$$e_r = r(1 - \cos \frac{\delta}{2}) = r \left\{ 1 - \left[1 - \frac{(\delta/2)^2}{2!} + \frac{(\delta/2)^4}{4!} - \dots \right] \right\} \quad (2-24)$$

由于步距角 δ 很小，则：

$$\frac{(\delta/2)^4}{4!} = \frac{\delta^4}{384} \ll 1$$

$$\delta = \frac{l}{r} \quad (\text{用进给步长代替弧长})$$

$$l = TV \quad (T \text{ 是插补周期, } V \text{ 是刀具移动速度})$$

因此，最大半径误差为：

$$e_r = \frac{\delta^2}{8} r = \frac{l^2}{8r} = \frac{(TV)^2}{8r} \quad (2-25)$$

由式 (2-25) 可以看出, 在圆弧插补时, 插补周期 T 分别与最大半径误差 e_r 、半径 r 和速度 V 有关。在给定圆弧半径和弦线误差极值的情况下, 插补周期应尽可能的小, 以便获得尽可能大的加工速度。

下面介绍数据采样插补的算法: 直线函数法、扩展数字积分法。

二、直线函数法

直线函数法又称弦线法, 是典型的数据采样插补方法之一。在圆弧插补时, 它以内接弦线进给代替弧线进给, 提高了圆弧插补的精度。

1、直线插补

如图 2.26 所示, 设在 xy 平面内加工直线 OE 。起点在原点, 终点在 $E(x_e, y_e)$, 沿 x 轴和 y 轴的位移增量分别为 Δx 和 Δy 。

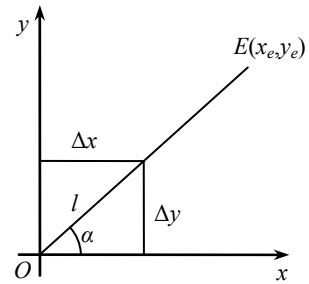


图 2.26 直线函数法直线插补

插补时取增量大的轴作长轴, 增量小的轴作短轴, 要求沿 x 轴和 y 轴的速度保持一定的比例, 且同时到达终点。设刀具移动方向与长轴夹角为 α , 插补的进给步长为 l , 则可得:

$$\tan \alpha = \frac{y_e}{x_e}$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}$$

从而求得插补周期内两坐标轴的进给量分别为:

$$\begin{cases} \Delta x = l \cos \alpha \\ \Delta y = \frac{y_e}{x_e} \Delta x \end{cases} \quad (2-26)$$

则有:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + \Delta x \\ y_{i+1} = y_i + \Delta y \end{cases} \quad (2-27)$$

2、圆弧插补

如图 2.27 所示, 设加工轮廓为顺时针圆弧, 在圆弧上有插补点 $A(x_i, y_i)$, $B(x_{i+1}, y_{i+1})$ 。插补的过程就是由已加工点 A 求出下一点 B , 实质上是求在一个插补周期内, 沿 x 轴和 y 轴的进给增量 Δx 和 Δy 。图中弦 AB 正是圆弧插补时每个周期的进给步长 l , AP 是 A 点的切线, M 是弦的中点, $OM \perp AB$, $ME \perp AF$, E 是 AF 的中点。

由图中几何关系可得:

$$\angle PAF = \beta; \quad \angle BAP = \frac{1}{2}\delta$$

所以:

$$\alpha = \angle PAF + \angle BAP = \beta + \frac{1}{2}\delta \quad (2-28)$$

式中, δ 为弧 AB 所对应的圆心角, 即步距角。在 $\triangle MOD$ 中, 可有:

$$\operatorname{tg}\left(\beta + \frac{1}{2}\delta\right) = \frac{DM}{OD} = \frac{x_i + l \cos \alpha/2}{y_i - l \sin \alpha/2} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2-29)$$

又因为

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{FB}{FA} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

由此可以推出 x_i 、 y_i 与 Δx 、 Δy 的关系式为:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{x_i + l \cos \alpha/2}{y_i - l \sin \alpha/2} \quad (2-30)$$

由于 $\cos \alpha$ 和 $\sin \alpha$ 都是未知数, 所以难以求解 Δx 和 Δy 。在此采用近似算法, 用 $\cos 45^\circ$ 和 $\sin 45^\circ$ 来代替 $\cos \alpha$ 和 $\sin \alpha$, 即:

$$\tan \alpha = \frac{x_i + l \cos \alpha/2}{y_i - l \sin \alpha/2} \approx \frac{x_i + l \cos 45^\circ/2}{y_i - l \sin 45^\circ/2} \quad (2-31)$$

其中 x_i 、 y_i 为已知, 由上式求出 $\operatorname{tg} \alpha$ 后即可求出 $\cos \alpha$ 。

所以可得:

$$\Delta x = l \cos \alpha$$

由于 $\operatorname{tg} \alpha$ 是近似值, 则 Δx 值也是近似值。但是这种偏差不会使插补点离开圆弧轨迹, 这是由式 (2-30) 保证的。因为圆弧上任意相邻两点必满足:

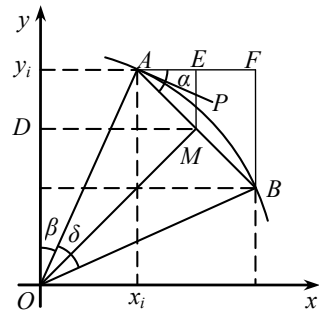


图 2.27 直线函数法圆弧插补

$$\Delta y = \frac{(x_i + \Delta x/2)\Delta x}{y_i - \Delta x/2} \quad (2-32)$$

Δx 、 Δy 求出后，可求得新插补点的坐标为：

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + \Delta x \\ y_{i+1} = y_i - \Delta y \end{cases} \quad (2-33)$$

以此新插补点的坐标又可求出下一个插补点的坐标。

在圆弧插补中，由于是以弦线逼近圆弧，因此插补误差主要表现为径向误差。该误差取决于进给速度的大小，进给速度越高，则每次插补进给的弦长越长，径向误差就越大。所以，当加工的圆弧半径确定后，为了使径向误差不致过大，对进给速度要有一个限制。

由式 (2-25) 可求出：

$$l \leq \sqrt{8e_r r} \quad (2-34)$$

式中， e_r 为最大径向误差， r 为圆弧半径。

当 $e_r \leq 1\mu m$ ，插补周期 $T = 8ms$ ，则进给速度为：

$$V \leq \frac{\sqrt{8e_r r}}{T} = \sqrt{\frac{8r}{1000}} \times \frac{60 \times 1000}{8} = \sqrt{450000r}$$

式中 V 为进给速度，单位 mm/min 。

三、扩展数字积分法

与数字积分法相似，扩展数字积分法也是在数字积分原理的基础上发展起来的，并将数字积分法中用切线逼近圆弧的方法改进为用割线逼近，这样减小了逼近误差，提高了圆弧插补的精度。

1、直线插补

如图 2.28 所示，要加工的直线为 OE ，起点在坐标原点 O ，终点为 $E(x_e, y_e)$ 。设在时间 T 内动点由起点到达终点， V_x 、 V_y 分别为速度 V 在 x 、 y 坐标上的分量，则可得：

$$\begin{cases} V_x = \frac{x_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}} V \\ V_y = \frac{y_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}} V \end{cases} \quad (2-35)$$

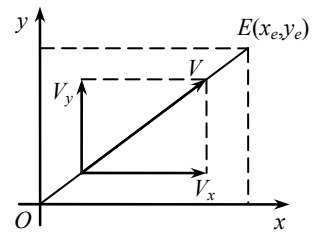


图 2.28 扩展 DDA 直线插补

将时间 T 用采样周期 λ_t 分割为 n 个子区间 (n 取大于等于 T/λ_t 且最接近的整数), 从而在

每个采样周期 λ_t 内的坐标增量分别为:

$$\begin{cases} \Delta x = V_x \lambda_t = \frac{x_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}} V \lambda_t = \frac{V}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}} \lambda_t x_e = FRN \lambda_t x_e \\ \Delta y = V_y \lambda_t = \frac{y_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}} V \lambda_t = \frac{V}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}} \lambda_t y_e = FRN \lambda_t y_e \end{cases} \quad (2-36)$$

式中, V 为编程的进给速度; FRN 为进给速率数, $FRN = V/\sqrt{x_e^2 + y_e^2}$ 。

由式 (2-36) 可以看出, 在扩展 DDA 直线插补中, 各坐标轴的进给步长 Δx 、 Δy 分别为轮廓步长的轴向分量, 其大小仅仅随 FRN 或 V 变化。

对于具体的一条直线来说, 由于 V 、 x_e 、 y_e 及 λ_t 均为已知的常数, 因此 FRN 也为常数,

可以记作 $\lambda_d = FRN \lambda_t$, 称其为步长系数, 则式 (2-36) 可以写为:

$$\begin{cases} \Delta x = \lambda_d x_e \\ \Delta y = \lambda_d y_e \end{cases} \quad (2-37)$$

在计算出每个采样周期 λ_t 内的 Δx 、 Δy 后, 就可得到动点的位置坐标值为:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + \Delta x \\ y_{i+1} = y_i + \Delta y \end{cases} \quad (2-38)$$

由于直线插补每次迭代形成的微小直线段的斜率 $\Delta y/\Delta x$ 等于给定直线的斜率, 从而保证了轨迹要求。

2、扩展 DDA 圆弧插补

如图 2.29 所示, 要加工圆心在坐标原点 O , 半径为 R 的第一象限顺时针圆弧 $A_i D$ 。设刀具当前处在 $A_i(x_i, y_i)$ 点位置, 若在一个采样周期 λ_t 内, 刀具沿切线方向进给一步后到达 A_{i+1} 点, 即刀具沿切线方向的轮廓进给步长为 $l = A_i A_{i+1}$ 。

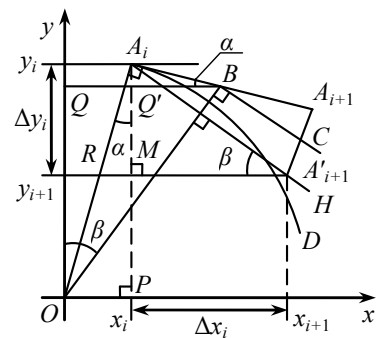


图 2.29 扩展 DDA 圆弧插补

由图可见，点 A_{i+1} 偏离所要求的圆弧轨迹较远，径向误差较大。因此，扩展 DDA 算法并不是让刀具沿切线方向进给，而是将切线逼近圆弧的方法转化为弦线逼近的方法，即用弦线进给代替切线进给。

如果我们通过线段 $A_i A_{i+1}$ 的中点 B 作 $BC \perp OB$ ，再通过 A_i 点作 BC 的平行线 $A_i H$ ，并在 $A_i H$ 上截取直线段 $A_i A'_{i+1}$ ，使 $A_i A'_{i+1} = A_i A_{i+1} = l$ 。可以证明， A'_{i+1} 一定不在所插补圆弧 $A_i D$ 的内侧。扩展 DDA 算法就是用弦线段 $A_i A'_{i+1}$ 来代替切线段 $A_i A_{i+1}$ 的进给，即扩展 DDA 算法在一个采样周期内计算的结果，应该是刀具从 A_i 点沿弦线走到 A'_{i+1} 点（而不是沿切线走到 A_{i+1} 点）。显然，这样进给会使径向误差大为减小。

现在我们就来计算一个采样周期 λ_i 内的轮廓进给步长 l 在各坐标方向上的分量值 Δx 和 Δy ，求出这两个值后，就很容易得到本次采样周期后应达到的 A'_{i+1} 点位置坐标。

由图 2.29 可知，在 $\triangle OPA_i$ 中，有：

$$\sin \alpha = \frac{OP}{OA_i} = \frac{x_i}{R} \quad (2-39)$$

$$\cos \alpha = \frac{A_i P}{OA_i} = \frac{y_i}{R} \quad (2-40)$$

过 B 点作 x 轴的平行线 BQ 交 y 轴于 Q 点，并交 $A_i P$ 线段于 Q' 点。由图中可以看出，

$\triangle OQB$ 与 $\triangle A_i M A'_{i+1}$ 相似，则有：

$$\frac{MA'_{i+1}}{A_i A'_{i+1}} = \frac{OQ}{OB} \quad (2-41)$$

式中， $MA'_{i+1} = \Delta x$ ， $A_i A'_{i+1} = l$ 。在 $\triangle A_i Q' B$ 中有 $A_i Q' = A_i B \sin \alpha = l \sin \alpha / 2$ ，则：

$$OQ = A_i P - A_i Q' = y_i - \frac{l}{2} \sin \alpha \quad (2-42)$$

在直角 $\Delta OA_i B$ 中有:

$$OB = \sqrt{A_i B^2 + OA_i^2} = \sqrt{(l/2)^2 + R^2} \quad (2-43)$$

将式(2-42)和式(2-43)代入式(2-41)中,得:

$$\frac{\Delta x}{l} = \frac{y_i - l \sin \alpha / 2}{\sqrt{(l/2)^2 + R^2}}$$

因为 $l \ll R$,故可以将 $(l/2)^2$ 略去,并考虑到 $l = V\lambda_i$,则上式变为:

$$\Delta x \approx \frac{l}{R} (y_i - \frac{l x_i}{2R}) = \frac{V}{R} \lambda_i (y_i - \frac{V}{2R} \lambda_i x_i)$$

令 $\lambda_d = \frac{V}{R} \lambda_i = FRN \lambda_i$, 则:

$$\Delta x = \lambda_d (y_i - \frac{1}{2} \lambda_d x_i) \quad (2-44)$$

在上述相似 ΔOQB 与 $\Delta A_i M A'_{i+1}$ 中,有:

$$\frac{A_i M}{A_i A'_{i+1}} = \frac{QB}{OB} = \frac{QQ' + Q'B}{OB}$$

已知 $A_i A'_{i+1} = l = V\lambda_i$, $OB = \sqrt{(l/2)^2 + R^2}$, $QQ' = x_i$, 又由直角 $\Delta A_i Q'B$ 得:

$$Q'B = A_i B \cos \alpha = \frac{l y_i}{2R}$$

所以有:

$$\Delta y = A_i M = \frac{A_i A'_{i+1} (QQ' + Q'B)}{OB} = \frac{l(x_i + l y_i / 2R)}{\sqrt{(l/2)^2 + R^2}}$$

同理,由于 $l \ll R$,故可以略去 $(l/2)^2$,则:

$$\Delta y \approx \frac{l}{R} (x_i + \frac{l y_i}{2R}) = \frac{V}{R} \lambda_i (x_i + \frac{V}{2R} \lambda_i y_i) \quad (2-45)$$

又由 $\lambda_d = \frac{V}{R} \lambda_i = FRN \lambda_i$, 则:

$$\Delta y = \lambda_d (x_i + \frac{1}{2} \lambda_d y_i) \quad (2-46)$$

由于 $A_i(x_i, y_i)$ 为已知，故利用式 (2-44) 和式 (2-46) 很容易求得 Δx 和 Δy 的值。这样，

就可算出本次采样周期后刀具应达到的位置坐标 x_{i+1} 和 y_{i+1} 的值，即：

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + \Delta x \\ y_{i+1} = y_i + \Delta y \end{cases} \quad (2-47)$$

以上为第一象限顺时针圆弧插补计算公式的推导过程。依照此原理，也可得出其它象限及其它走向圆弧的扩展 DDA 插补计算公式。

由上述扩展 DDA 圆弧插补公式可知，采用该方法只需要有限次加、减法及乘法运算，因而计算较方便、速度较高。此外，该方法采用弦线逼近圆弧，其精度比直线函数法高。因此，扩展 DDA 插补法是一种比较适合 CNC 系统的数据采样插补方法。

§ 2-5 数控装置的进给速度与加减速控制

在数控加工控制中，既要运动轨迹进行严格控制，也要对运动速度进行严格控制，以保证被加工零件的精度和表面粗糙度、刀具和机床的寿命以及高效的生产率。在高速运动阶段，为了保证在启动或停止时不产生冲击、失步、超程或振荡，数控系统需要对机床的进给运动速度进行加减速控制；在加工过程中，为了保证加工质量，在进给速度发生突变时必须对送到进给电动机的脉冲频率或电压进行加减速控制。在启动或速度突然升高时，应保证加在伺服电动机上的进给脉冲频率或电压逐渐增大；当速度突然降低时，应保证加在伺服电动机上的进给脉冲频率或电压逐渐减小。

一、进给速度控制

由于基准脉冲插补和数据采样插补的计算方法不同，它们的速度控制方法也有所不同。

1、基准脉冲插补算法的进给速度控制

基准脉冲插补的输出形式是脉冲，其频率与进给速度成正比，因此可通过控制插补运算的频率来控制进给速度。常用的方法有软件延时法和中断控制法。

(1) 软件延时法

根据编程进给速度，可以求出要求的进给脉冲频率，从而得到两次插补运算之间的时间间隔 t ，它必须大于 CPU 执行插补程序的时间 $t_{\text{程}}$ ， t 与 $t_{\text{程}}$ 之差即为应调节的时间 $t_{\text{延}}$ ，可以编写一个延时子程序来改变进给速度。

例 2.5：设某数控装置的脉冲当量 $\delta = 0.01\text{mm}$ ，插补程序运行时间 $t_{\text{程}} = 0.1\text{ms}$ ，若编程进给速度 $F = 300\text{mm}/\text{min}$ ，求调节时间 $t_{\text{延}}$ 。

解：由 $v = 60\delta f$ ，得：

$$f = \frac{v}{60\delta} = \frac{300}{60 \times 0.01} = 500\text{Hz}$$

则插补时间间隔为：

$$t = \frac{1}{f} = 0.002\text{s} = 2\text{ms}$$

调节时间为：

$$t_{\text{延}} = t - t_{\text{程}} = (2 - 0.1)\text{ms} = 1.9\text{ms}$$

用软件编一程序实现上述延时，即可达到进给速度控制的目的。

(2) 中断控制法

根据进给速度计算出定时器 / 计数器的定时时间常数，以控制 CPU 中断。定时器申请一次中断，CPU 就执行一次中断服务程序，在中断服务程序中进行一次插补运算并发出进给脉冲，然后 CPU 等待下一次中断，如此循环进行，直至插补完毕。

这种方法使得 CPU 可以在两个进给脉冲时间间隔内做其它工作，如输入、译码、显示等。进给脉冲频率由定时器时间常数决定。时间常数的大小决定了插补运算的频率，也决定了进给脉冲的输出频率。该方法速度控制比较精确，控制速度不会因为不同计算机主频的不同而改变，所以在很多数控系统中被广泛应用。

2、数据采样插补算法的进给速度控制

数据采样插补根据编程进给速度，计算出一个插补周期内合成速度方向上的进给量。

$$f_s = \frac{FTK}{60 \times 1000} \quad (2-48)$$

式中， f_s 为系统在稳定进给状态下单个周期的插补进给量，称为稳定速度 (mm/min)； F

为编程进给速度 (mm/min)； T 为插补周期 (ms)； K 为速度系数，包括快速倍率、切削进给倍率等。

为了调速方便，设置速度系数 K 来反映速度倍率的调节范围，通常 $K = 0 \sim 200\%$ 。当中断服务程序扫描到面板上倍率开关的状态时，给 K 设置相应参数，从而对数控装置面板手动速度调节作出正确响应。

二、加减速度控制

在 CNC 装置中，加减速度控制多数都采用软件来实现，这给系统带来了较大的灵活性。这种用软件实现的加减速度控制可以放在插补前进行，也可以放在插补后进行，放在插补前的加减速度控制称为前加减速度控制，放在插补后的加减速度控制称为后加减速度控制。

前加减速度控制仅对编程速度 F 指令进行控制，其优点是会影响实际插补输出的位置精度，其缺点是需要预测减速点，而这个减速点要根据刀具实际位置与程序段终点之间的距离来确定，预测工作需要完成的计算量较大。

后加减速控制与前加减速相反，它是对各运动轴分别进行加减速控制，这种加减速控制不需要专门预测减速点，而是在插补输出为零时才开始减速，经过一定的延时逐渐靠近程序段终点。该方法的缺点是由于它对各运动轴分别进行控制，所以在加减速控制以后，各坐标轴合成的实际位置就可能不准确。但这种影响仅在加减速过程中才会有，当系统进入匀速状态后，这种影响就不存在了。

1、前加减速控制

(1) 稳定速度和瞬时速度

稳定速度就是系统处于稳定进给状态时，一个插补周期内的进给量 f_s ，可用式 (2-48) 表示。

通过该计算公式将编程速度或快速进给速度 F 转换成了每个插补周期的进给量，并包括了速率倍率调整的因素在内。如果计算出的稳定速度超过系统允许的最大速度（由参数设定），则取最大速度为稳定速度。

瞬时速度指系统在每个插补周期内的进给量。当系统处于稳定进给状态时，瞬时速度

$f_i = f_s$ ，当系统处于加速（或减速）状态时， $f_i < f_s$ （或 $f_i > f_s$ ）。

(2) 线性加减速处理

当机床启 / 停或在切削加工过程中改变进给速度时，数控系统自动进行线性加减速处理。加速的速率必须作为机床的参数预先设置好，其中包括机床允许最大进给速度 F_{\max} 和由 0 加速到

F_{\max} 或由 F_{\max} 减速到 0 所需的时间 t (ms)。设定了上述参数后，快速进给的加速度 a 为：

$$a = \frac{1}{60 \times 1000} \times \frac{F_{\max}}{t} = 1.67 \times 10^{-5} \times \frac{F_{\max}}{t} (\text{mm}/\text{ms}^2) \quad (2-49)$$

当进行切削进给时，上式中应代入进给速度 F 以及加速到 F 所用的时间 t 。

1) 加速处理

系统每插补一次，都应进行稳定速度、瞬时速度的计算和加减速处理。当计算出的当前稳定速度 f_s 大于上一个插补周期内的瞬时速度 f_i 时，需进行加速处理，当前瞬时速度为：

$$f_{i+1} = f_i + aT \quad (2-50)$$

式中， T 为插补周期。

新的瞬时速度 f_{i+1} 作为插补进给量参与插补运算，计算出各坐标的位置增量值，使坐标轴运动直至进给稳定速度为止。

2) 减速处理

每进行一次插补计算，系统都要进行终点判别，计算出刀具与终点之间的瞬时距离 s_i ，并判别是否已到达减速区域。若 $s_i \leq s$ ，表示已到达减速点，则要开始减速。在稳定速度 f_s 和设定的加速度 a 确定后，减速区域可由下式决定：

$$s = \frac{f_s^2}{2a} + \Delta s \quad (2-51)$$

式中， Δs 为提前量，可作为参数预先设置好。若不需要提前一段距离开始减速，则可取 $\Delta s = 0$ ，每减速一次后，新的瞬时速度为：

$$f_{i+1} = f_i - aT \quad (2-52)$$

新的瞬时速度 f_{i+1} 作为插补进给量参与插补运算，控制各坐标轴移动，直至减速到新的稳定速度或到达终点速度减为 0。

(3) 终点判别处理

每进行一次插补计算，系统都要计算 s_i ，然后进行终点判别。若即将到达终点，就设置相应标志；若本程序段要减速，则在到达减速区域时设置减速标志，并开始减速处理。终点判别计算分为直线插补和圆弧插补两个方面。

1) 直线插补

如图 2.30 所示，设刀具沿直线 OE 运动， E 为直线程序段终点， N 为某一瞬时点。在插补计算时，已计算出 x 轴和 y 轴插补进给量 Δx 和 Δy ，所以 N 点的瞬时坐标可由上一插补点的坐标 x_{i-1} 和 y_{i-1} 求得：

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + \Delta x \\ y_i = y_{i-1} + \Delta y \end{cases} \quad (2-53)$$

瞬时点 N 与终点 E 之间的距离 s_i 为：

$$s_i = NE = \sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2} \quad (2-54)$$

2) 圆弧插补

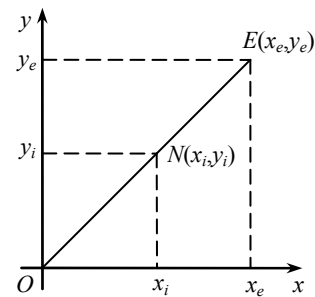


图 2.30 直线插补终点判别

如图 2.31 所示，设刀具沿圆弧 AE 作顺时针运动， N 为某一瞬时点，其坐标值 x_i 和 y_i 可在插补计算中求出，则瞬时点 N 与终点 E 之间的距离 s_i 为：

$$s_i = \sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2} \quad (2-55)$$

2、后加减速控制

后加减速控制方法主要有指数加减速控制算法和直线加减速控制算法。

(1) 指数加减速控制算法

在切削进给或手动进给时，系统对跟踪响应要求较高，这时一般采用指数加减速控制，其过程是将速度突变处理成为速度随时间呈指数规律的上升或下降，如图 2.32 所示。

指数加减速控制时速度与时间的关系是：

$$\text{加速时} \quad v(t) = v_c (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (2-56)$$

$$\text{匀速时} \quad v(t) = v_c \quad (2-57)$$

$$\text{减速时} \quad v(t) = v_c e^{-\frac{t}{T}} \quad (2-58)$$

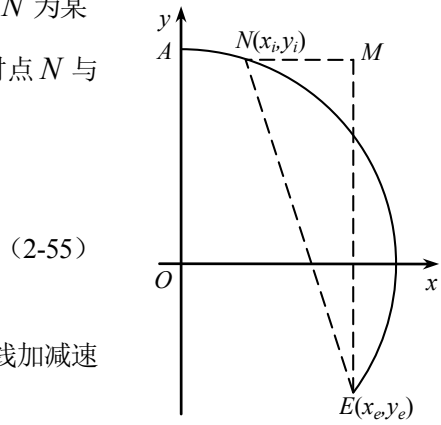


图 2.31 圆弧插补终点判别

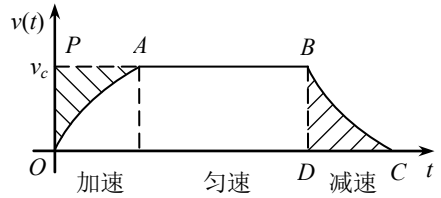


图 2.32 指数加减速

式中， T 为时间常数， v_c 为稳定速度。上述过程可以用累加公式来实现，即：

$$E_i = \sum_{k=0}^{i-1} (v_c - v_k) \Delta t \quad (2-59)$$

$$v_i = \frac{E_i}{T} \quad (2-60)$$

下面结合指数加减速控制算法的原理图 2.33 来说明公式的含义。 Δt 为采样周期，它在算法中的作用是对加减速运算进行控制，即每个采样周期进行一次加减速运算。误差寄存器 E 的作用是对每个采样周期的输入速度 v_c 与输出速度 v 之差 $E = v_c - v$ 进行累加。累加结果一方面保存在误差寄存器 E 中，另一方面与 $1/T$ 相乘，乘积作为当前采样周期加减速控制的输出 v 。同时 v 又

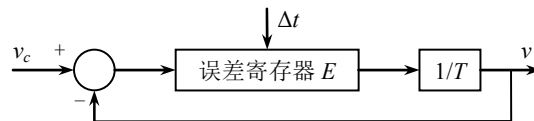


图 2.33 指数加减速控制原理图

反馈到输入端，准备在下一个采样周期中重复以上过程。公式中的 E_i 和 v_i 分别为第 i 个采样周期

误差寄存器 E 中的值和输出速度值，累加初值分别为 $E_0 = 0$ 和 v_0 。

指数加减速控制算法的推导过程如下：

当 Δt 足够小时，式 (2-59) 和式 (2-60) 可写成：

$$E(t) = \int_0^t [v_c - v(t)] dt \quad (2-61)$$

$$v(t) = \frac{1}{T} E(t) \quad (2-62)$$

对以上两式分别求导得：

$$\frac{dE(t)}{dt} = v_c - v(t) \quad (2-63)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dE(t)}{dt} \quad (2-64)$$

将式 (2-63) 和式 (2-64) 合并，得：

$$T \frac{dv(t)}{dt} = v_c - v(t)$$

或

$$\frac{dv(t)}{v_c - v(t)} = \frac{dt}{T} \quad (2-65)$$

上式两端积分后，得：

$$\ln[v_c - v(t)] \Big|_{v(0)}^{v(t)} = -\frac{t}{T} \quad (2-66)$$

即

$$\frac{v_c - v(t)}{v_c - v(0)} = e^{-\frac{t}{T}} \quad (2-67)$$

由式 (2-67) 可得：

$$\text{加速时： } v(0) = 0, \text{ 则： } v(t) = v_c(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (2-68)$$

$$\text{匀速时： } t \rightarrow \infty, \text{ 则： } v(t) = v_c \quad (2-69)$$

减速时： $v(0) = v_c$ ，且输入为 0，由式 (2-63)，得：

$$\frac{dE(t)}{dt} = v_c - v(t) = -v(t) \quad (2-70)$$

代入式 (2-64)，得：

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{v(t)}{T} \quad (2-71)$$

即

$$\frac{dv(t)}{v(t)} = -\frac{dt}{T} \quad (2-72)$$

两端积分后，得：

$$v(t) = v_0 e^{-\frac{t}{T}} = v_c e^{-\frac{t}{T}} \quad (2-73)$$

上面的推导过程证明了用式 (2-59) 和式 (2-60) 可以实现指数加减速控制。下面进一步导出其实用的指数加减速算法公式。

参照式 (2-59) 和式 (2-60)，设

$$\Delta x'_i (\Delta y'_i) = v_i \Delta t$$

$$\Delta x (\Delta y) = v_c \Delta t$$

其中， Δx 或 Δy 为每个采样周期加减速的输入位置增量，即每个插补周期内粗插补计算出的坐标位置增量值。 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 则为第 i 个插补周期加减速输出的位置增量值。后加减速是在插补后进行的，对 x 轴和 y 轴分别进行控制。

将以上两式代入式 (2-59) 和式 (2-60)，得：

$$\begin{cases} E_i = \sum_{k=0}^{i-1} (\Delta x - \Delta x'_k) = E_{i-1} + (\Delta x - \Delta x'_{i-1}) \\ \Delta x'_i = E_i \frac{1}{T} (\text{取 } \Delta t = 1) \end{cases} \quad (2-74)$$

或

$$\begin{cases} E_i = \sum_{k=0}^{i-1} (\Delta y - \Delta y'_k) = E_{i-1} + (\Delta y - \Delta y'_{i-1}) \\ \Delta y'_i = E_i \frac{1}{T} (\text{取 } \Delta t = 1) \end{cases} \quad (2-75)$$

以上两组公式分别为 x 轴和 y 轴加减速控制算法的实用累加公式。

(2) 直线加减速控制算法

快速进给时速度变化范围大，要求平稳性好，一般采用直线加减速控制。使速度突然升高时，沿一定斜率的直线上升；速度突然降低时，沿一定斜率的直线下降。如图 2.34 所示的速度变化曲线 $OABC$ 。

直线加减速控制分以下五个过程：

1) 加速过程

若输入速度 v_c 与上一个采样周期的输出速度

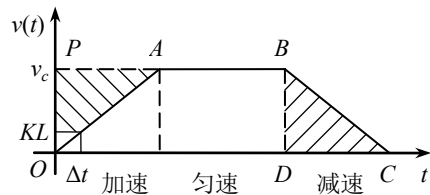


图 2.34 直线加减速

v_{i-1} 之差大于一个速度常数 KL ，即 $v_c - v_{i-1} > KL$ ，则必须进行加速控制，使本次采样周期的输出速度增加一个 KL 值，即：

$$v_i = v_{i-1} + KL \quad (2-76)$$

式中， KL 为加减速的速度阶跃因子。

显然，在加速过程中，输出速度 v_i 沿斜率为 $K' = KL/\Delta t$ 的直线上升， Δt 为采样周期。

2) 加速过渡过程

当输入速度 v_c 与上一个采样周期的输出速度 v_{i-1} 之差满足下式时，

$$0 < v_c - v_{i-1} < KL \quad (2-77)$$

说明速度已上升至接近匀速。这时可改变本次采样周期的输出速度 v_i ，使之与输入速度 v_c 相等，即：

$$v_i = v_c \quad (2-78)$$

经过这个过程后，系统进入稳定速度状态。

3) 匀速过程

在这个过程中，输出速度保持不变，即：

$$v_i = v_{i-1} \quad (2-79)$$

4) 减速过渡过程

当输入速度 v_c 与上一个采样周期的输出速度 v_{i-1} 之差满足下式时，

$$0 < v_{i-1} - v_c < KL \quad (2-80)$$

说明应开始减速处理。改变本次采样周期的输出速度 v_i ，使之减小到与输入速度 v_c 相等，即：

$$v_i = v_c \quad (2-81)$$

5) 减速过程

若输入速度 v_c 小于上一个采样周期的输出速度 v_{i-1} ，且其差值大于 KL 值时，即：

$$v_{i-1} - v_c > KL \quad (2-82)$$

则进行减速控制，使本次采样周期的输出速度 v_i 减小一个 KL 值，即：

$$v_i = v_{i-1} - KL \quad (2-83)$$

显然，在减速过程中，输出速度沿斜率为 $K' = -KL/\Delta t$ 的直线下降。

后加减速控制的关键是加速过程和减速过程的对称性，即在加速过程中输入到加减速控制器的总进给量必须等于该加减速控制器减速过程中实际输出的进给量之和，以保证系统不产生失步和超程。因此，对于指数加减速和直线加减速，必须使图 2.32 和图 2.34 中区域 OPA 的面积等于区域 DBC 的面积。为此，用位置误差累加寄存器 E 来记录由于加速延迟而失去的进给量之和。当发现剩下的总进给量小于 E 寄存器中的值时，即开始减速。

在减速过程中，又将误差寄存器 E 中保存的值按一定规律（指数或直线）逐渐放出，以保证在加减速过程全程结束时，机床到达指定的位置。由此可见，后加减速控制不需要预测减速点，而是通过误差寄存器的进给量来保证加减速过程的对称性，使加减速过程中的两块阴影面积相等。另外，如图 2.35 所示，也存在一种特殊情况，就是由于行程短，在未加速到指定速度时即开始减速。

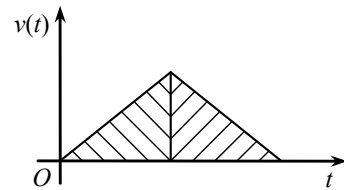


图 2.35 减速点的确定

思考和作业题

1. 插补的基本概念是什么？插补方法可以分为哪两类？并分别说明这两类插补方法的特点。
2. 试述逐点比较法插补过程中的四个步骤。
3. 利用逐点比较法插补直线 OE ，起点为 $O(0,0)$ ，终点为 $E(4,5)$ ，试写出插补计算过程并绘出插补轨迹。
4. 利用逐点比较法插补圆弧 PQ ，起点为 $P(4,0)$ ，终点为 $Q(0,4)$ ，试写出插补计算过程并绘出插补轨迹。
5. 逐点比较法插补中，如何实现 xy 平面内所有象限直线和圆弧的插补？
6. 试述数字积分法 (DDA) 的插补原理。
7. 试用数字积分法插补直线 OA ，起点为 $O(0,0)$ ，终点为 $A(3,6)$ ，设寄存器的位数为 3，请写出插补计算过程并绘出插补轨迹。
8. 试用数字积分法插补第一象限逆时针圆弧 AB ，起点为 $A(7,0)$ ，终点为 $B(0,7)$ ，设寄存器的位数为 3，请写出插补计算过程并绘出插补轨迹。
9. FRN 是如何定义的？如何通过 FRN 调整进给速度？
10. 何谓左移规格化？它有什么作用？

-
11. 直线插补与圆弧插补在进行左移规格化时有何不同?
 12. 提高 DDA 插补精度的措施有哪些?
 13. 何谓“全加载”和“半加载”? 为什么说它们可以提高 DDA 的插补精度?
 14. 在数据采样插补中, 插补周期与采样周期之间是什么关系?
 15. 在进行圆弧插补时, 径向误差 $e_r \leq 1\mu\text{m}$, 插补周期 $T = 8\text{ms}$, 插补圆弧的半径为 100mm ,

试求允许的最大进给速度为多少?

16. 试用扩展 DDA 法插补直线 OE , 起点为 $O(0,0)$, 终点为 $E(8,6)$, 即 $x_e = 8$, $y_e = 6$,

若 $V = 1000\text{mm}/\text{min}$, 采样周期 $\lambda_s = 10\text{ms}$, 请计算各采样周期的插补值并绘出轨迹。

17. 基准脉冲插补的进给速度控制常用哪些方法?
18. 数控机床的加减速控制有什么作用?
19. 何谓前加减速控制和后加减速控制? 它们各有什么特点?
20. 后加减速控制主要有哪两种算法? 它们分别适用于什么情况?

第三章 计算机数控（CNC）系统

§ 3-1 概 述

一、CNC 系统的组成

“数控”是指以数字信息形式实现控制的一种技术。传统数控系统（NC—Numerical Control）的核心数字控制装置是由各种逻辑元件、记忆元件等组成的硬件结构，它是靠硬件来实现数控功能的，这类数控系统称之为硬件数控。随着半导体技术、计算机技术的发展，微处理器和微型计算机功能逐步增强、价格不断下降，目前数字控制装置已经发展成为计算机数字控制（CNC—Computer Numerical Control）装置。它包含一种采用存储程序的专用计算机，靠软件来实现部分或全都数控功能。

如图 3.1 所示，CNC 系统主要包括数控程序、输入输出设备、CNC 装置、可编程控制器(PLC)、主轴驱动装置和进给驱动装置（包括检测装置）等部分，其核心是 CNC 装置。随着计算机技术的发展，CNC 装置的性能越来越高，价格越来越低。

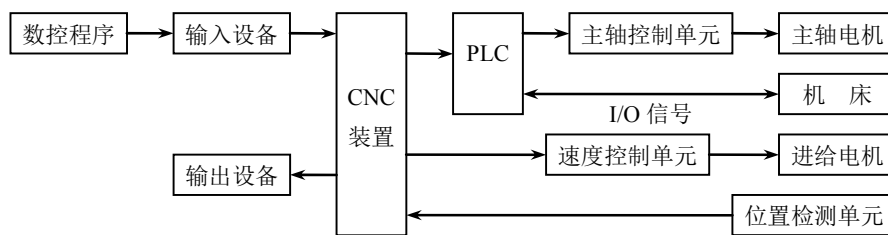


图 3.1 CNC 系统的组成框图

二、CNC 装置的组成

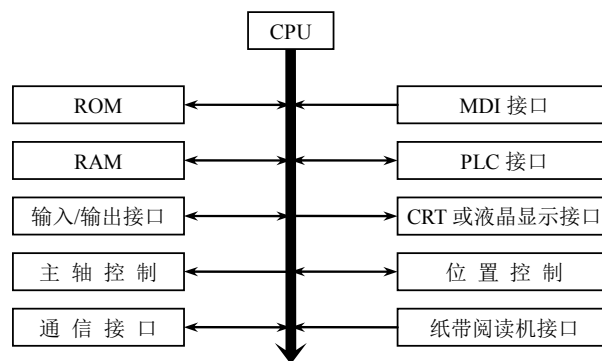


图 3.2 CNC 装置硬件的组成

CNC 装置由硬件和软件共同组成，软件在硬件的支持下运行，硬件依赖于软件进行正常工作，两者缺一不可。CNC 装置的硬件除具有一般计算机的基本结构外，还具有满足数控加工需要所特有的功能模块与接口单元，硬件结构如图 3.2 所示。CNC 装置的软件又称为系统软件，它由管理软件和控制软件两部分组成。管理软件包括零件程序的输入输出程序、显示程序和 CNC 装置的自诊断程序等；控制软件包括译码程序、刀具补偿计算程序、速度控制程序、插补运算程序和位置控制程序等，软件组成框图如图 3.3 所示。

对于不同的数控机床，一些实时控制可由硬件（如插补器）完成，这样 CPU 作些插补前的准备工作，而位置控制由硬件电路完成，从而可以提高机床的进给速度。因此数控机床中软、硬件所承担任务的划分并不是绝对不变的。

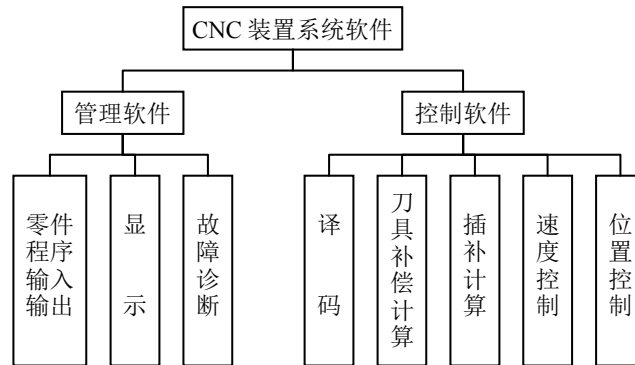


图 3.3 CNC 装置的软件框图

三、CNC 装置工作过程

CNC 装置的工作是指在硬件支持下执行软件的全过程。下面从输入、译码、刀具补偿、进给速度处理、插补、位置控制、I/O 处理、显示和诊断几方面来说明 CNC 装置的工作过程。

1、输入

输入 CNC 装置的信息包括零件程序、控制参数和补偿数据。输入形式有早期的纸带输入、键盘输入、磁盘输入和连接上级计算机的 DNC（直接数控）接口输入。从 CNC 装置工作方式看，有存储工作方式输入和 NC 工作方式输入。存储工作方式是指将零件加工程序一次且全部输入到 CNC 装置的内部存储器中，加工时再把程序段从存储器中一个个调出；NC 工作方式是指 CNC 装置一边输入程序一边加工零件，即在前一个程序段正在加工时，输入后一个程序段内容。通常在输入过程中 CNC 装置还要完成无效码删除、代码校验和代码转换等工作。

2、译码

译码是指将零件程序以程序段为单位进行处理，把其中的各种零件轮廓信息（如起点、终点、直线或圆弧等）、进给速度信息（F 代码）和其它辅助信息（M、S、T 代码等）按照一定的语法规则解释成计算机能够识别的数据形式，并以一定的数据格式存放在指定的内存专用区间内。在译码过程中，还要完成对程序段的语法检查，若发现语法错误便立即报警。

3、刀具补偿

刀具补偿包括刀具长度补偿和刀具半径补偿。通常 CNC 装置的零件程序是以零件轮廓轨迹来编程的，刀具补偿的作用是把零件轮廓轨迹转换成刀具中心轨迹。在目前的 CNC 装置中，刀具补偿工作还包括程序段之间的自动转接和过切判别，这就是所谓的 C 刀具补偿。

4、进给速度处理

编程所给的刀具移动速度是指在进给方向上的合成速度，速度处理要做的工作是根据合成速度来计算各运动坐标方向的分速度。另外，速度处理还包括对于机床允许的最低速度和最高速度限制的处理，以及软件的自动加减速处理。

5、插补

插补是指在一条已知起点和终点的曲线上进行“数据点密化”的工作。在一个插补周期内，插补过程运行一次，系统根据指令进给速度计算出一个微小的直线数据段。通常经过若干个插补周期后，插补完成一个程序段的加工，即完成从程序段起点到终点的“数据点密化”工作。

目前在一般的 CNC 装置中，仅能对直线和圆弧进行插补计算，但在一些较专用或较高档的 CNC 装置中还能完成对椭圆、抛物线和一些专用曲线的插补计算。

6、位置控制

如图 3.4 所示，位置控制装置位于伺服系统的位置环上。它的主要工作是在每个采样周期内，将插补计算出的理论位置与实际反馈位置进行比较，用其差值控制进给电机。位置控制可由软件完成，也可由硬件完成。通常为了提高机床的定位精度，在位置控制中还要完成位置回路的增益调整、各坐标方向的螺距误差补偿和反向间隙补偿等。

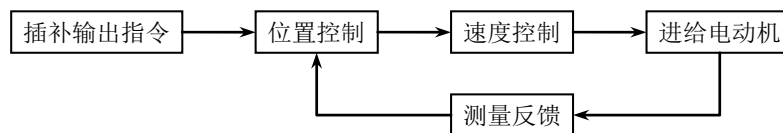


图 3.4 位置控制的原理

7、输入 / 输出 (I / O) 处理

CNC 的输入 / 输出 (I / O) 处理是 CNC 与机床之间信息传递和变换的通道。其作用一方面是将机床运动参数输入到 CNC 中；另一方面是将 CNC 的输出命令（如换刀、主轴变速、开冷却液等）变为执行机构的控制信号，实现对机床的控制。

8、显示

CNC 装置的显示主要是为操作者提供方便，显示装置有 CRT 显示器或液晶显示器，一般位于机床的控制面板上。显示内容通常包括：零件程序显示、参数显示、刀具位置显示、机床状态显示、刀具加工轨迹静态和动态图形显示、报警显示等。

9、诊断

现代 CNC 装置都具有联机诊断和脱机诊断的能力。联机诊断是指 CNC 装置中的自诊断程序，这种自诊断程序融合在各部分中随时检查不正常的事件；脱机诊断是指系统不工作但处于运转条件下的诊断，一般 CNC 装置配备有各种脱机诊断程序，以检查存储器、外部设备、I / O 接口等。脱机诊断还可以采用远程通讯方式进行，把用户的 CNC 装置通过网络与远程通讯诊断中心的计算机相连，由诊断中心的计算机对 CNC 装置进行诊断、故障定位和修复，即所谓的远程诊断。

四、CNC 装置的优点

CNC 装置与传统的数控装置相比，具有下述一些优点。

1、灵活性

传统的数控装置是以固定的接线逻辑电路硬件结构来实现特定功能的，一旦硬件结构实现了某些控制功能就难以改变。而 CNC 装置则不然，尤其是采用模块化结构方式后，只要改变相应的硬件模块，改变相应的控制软件就可改变、缩小或扩充其功能，从而满足用户使用上的不同要求。

2、可靠性

在现代 CNC 装置中，内存容量较大，零件程序常常是在加工前一次送入存储器内，加工时再被调用，从而避免了在加工过程中因实时零件程序输入故障而引起的错误。另外，由于许多功能均由软件实现，硬件系统所需元器件数目大大减少，整个 CNC 装置的可靠性就大为改善。特别是随着大规模集成电路、超大规模集成电路以及精简指令集运算芯片 RISC 技术的应用，装置的可靠性得到了更大的提高。

3、通用性

CNC 装置的模块化结构使其易于实现功能扩展，且可依靠软件变化来满足各种机床的不同要求，因此用一种 CNC 装置的硬件就有可能满足多种数控机床的要求。这样不但有利于降低 CNC 装置的生产成本，也有利于用户对 CNC 装置的维护保养和操作人员的培训。

4、丰富的数控功能

CNC 装置可利用计算机很强的计算能力来实现一些复杂的数控功能。如坐标系偏移、刀具补偿、图形显示、固定循环等，都可用适当的软件程序来实现。大量的辅助功能可以被编程，子程序和宏程序概念的引入更大大简化了程序的编制过程。

5、使用和维修方便

CNC 装置依赖于诊断程序可针对数控系统出现的故障显示出相关信息，使操作和维修人员能了解故障部位，减少维修的停机时间。此外，CNC 装置有零件程序编辑功能，程序编制很方便，交互式编程方式使程序编制更加简便，对编程人员的专业水平要求不高。零件程序编好后，可通过显示功能将程序及刀具轨迹显示出来，以检验程序是否正确。

6、易于实现机电一体化

由于 CNC 装置采用了大规模集成电路和 RISC 技术，电子元器件、印刷线路板大大减少，硬件结构非常紧凑，体积也大为减小，因此有可能与机床紧密结合而成为机电一体化产品，并减少了数控机床的占地面积。

五、CNC 装置的功能

CNC 装置的硬件采用模块化结构，许多复杂的功能靠软件实现。CNC 装置的功能通常包括基本功能和选择功能。其中，基本功能是必备的数控功能；选择功能是根据机床的特点和用途由用户进行选择的功能。对于不同生产厂家的 CNC 装置，其功能是存在一些差异的，但主要功能是相同的。CNC 装置的主要功能有：

1、控制功能

控制功能是指 CNC 装置能够控制的并且能够同时控制联动的轴数，它是 CNC 装置的重要性指标，也是体现数控机床加工能力的重要依据。控制轴可分为移动轴和回转轴、基本轴和附加轴。如数控车床一般只需 x 、 z 两轴联动控制，数控铣床、钻床和加工中心等需三轴控制以及三轴联动控制。联动的轴数越多，就说明 CNC 装置的功能越强，可加工的零件结构也就越复杂。

2、准备功能

准备功能又称 G 功能，用来指明机床的一步完整动作。它包括基本移动、程序暂停、平面选择、坐标设定、刀具补偿、固定循环、公英制转换、子程序等指令。通常用指令 G 和后续的两位数字来表示指令的功能。在个别情况下，如 SIEMENS 公司的 CNC 装置（840D、802D）也用指令 G 和后续的三位数字来表示某一功能。

3、插补功能

插补功能用于对零件轮廓加工的控制，一般的 CNC 装置有直线插补、圆弧插补功能，特殊的 CNC 装置还有其它二次曲线和样条曲线的插补功能。常用的插补运算方法有逐点比较法、数字积分法（DDA）、直接函数法和扩展 DDA 法等。

4、固定循环加工功能

在数控加工中，对于一些典型的加工工序（如钻孔、铰孔、攻螺纹等），所需完成的动作循环基本一致，若用基本指令编写则比较麻烦，使用固定循环加工功能则可以使编程工作简化。固定循环加工指令是将典型动作事先编好程序并储存在内存中，然后用 G 代码进行指定。固定循环加工指令包括钻孔、铰孔、攻螺纹循环；车削、铣削循环；复合加工循环；车螺纹循环等。

5、进给功能

进给功能用来给出各进给轴的进给速度，由 F 指令进行指定。在数控加工中常用到以下几种与进给速度有关的术语。

（1）切削进给速度：指定刀具切削时的移动速度，单位为 mm / min 。如 F100 表示切削速度为 $100\text{mm} / \text{min}$ 。

（2）同步进给速度：即主轴每转一圈时进给轴的进给量，单位为 mm / r 。只有主轴装有位置编码器的机床才能指令同步进给速度。

（3）快速进给速度：指机床的最快移动速度，用 G00 命令指定快速移动。其参数设定可通过操作面板上的快速开关改变。

（4）进给倍率：操作面板上设置了进给倍率开关，使用倍率开关能实现不修改零件加工程序就可改变进给速度。进给倍率可在 0~200% 之间变化。

6、主轴功能

主轴功能包括以下几个方面：

（1）指令主轴转速：用 S 后跟 4 位数字表示，单位为 r / min 。

（2）设置恒定线速度：该功能主要用于车削和磨削加工中，使工件端面质量提高。

（3）主轴准停：该功能使主轴在径向的某一位置准确停止。加工中心换刀时必须要有主轴准停功能，主轴准停后方可实现卸刀和装刀动作。

7、辅助功能

辅助功能主要用于指定主轴的正转、反转、停转、冷却液的开关、换刀等机床的辅助动作，指令用 M 字母后跟两位数字表示。对于没有指定的辅助功能指令可用作其它用途。

8、刀具功能

刀具功能用来选择刀具并且指定有效的刀具几何参数地址。

9、补偿功能

补偿功能包括刀具补偿（刀具半径补偿、刀具长度补偿、刀具磨损补偿）、丝杠螺距误差补偿和反向间隙补偿。CNC 装置采用补偿功能可以把刀具长度或半径的相应补偿量、丝杠的螺距误差和反向间隙误差的补偿量输入到内部存储器里，在控制机床进给时按一定的计算方法将这些补偿量增补到运动轨迹中。

10、显示功能

CNC 装置配备 CRT 显示器或液晶显示器，用来显示程序、零件图形、人机对话编程菜单、故障信息等。

11、通信功能

通信功能主要完成上级计算机与 CNC 装置之间的数据和命令传送。一般的 CNC 装置带有 RS32C 串行接口，可实现 DNC 方式加工。高级的 CNC 装置带有 FMS 接口，按 MAP（制造自动化协议）通信，可实现车间和工厂的加工自动化。

12、自诊断功能

CNC 装置安装了各种诊断程序，这些程序可以嵌入其它功能程序中，在 CNC 装置运行过程中进行检查和诊断。诊断程序也可作为独立的服务性程序，在 CNC 装置运行前或故障停机后进行诊断，查找故障的部位。有些 CNC 装置可以进行远程诊断。

13、人机对话编程功能

复杂零件的 NC 程序是要通过自动编程的方式得到的。有的 CNC 装置可以根据设计图纸直接编制程序，编程人员只需输入图纸上简单表示几何尺寸的命令，系统就能自动地计算出全部交叉点、切点和圆心坐标，生成加工程序；有的 CNC 装置可以根据引导图和说明的显示进行对话式编程，并具有工序自动选择（对于数控车床），刀具、切削条件自动选择，以及刀具使用顺序变更（对于数控铣床或加工中心）等智能功能；有的 CNC 装置还备有用户宏程序。这些功能对于未受过 CNC 编程专门训练的操作者来说，都能使编程工作变得简便、快捷。

§ 3-2 CNC 装置的硬件结构

CNC 装置是在硬件的支持下通过运行软件来进行工作的，其控制功能在一定程度上取决于硬件结构。根据控制功能的复杂程度，CNC 装置的硬件结构可分别采用单微处理器结构和多微处理器结构。

早期的 CNC 系统和一些经济型 CNC 系统采用单微处理器结构。随着数控技术的不断发展，制造业对数控机床进给速度、加工精度和许多复杂功能的要求越来越高，多微处理器结构的 CNC

系统因可满足这些高要求而得到了迅速发展，这种结构也适应于更高层次的自动化 FMS 和 CIMS 系统运行的需要，它反映了当今数控系统的新水平。

一、单微处理器结构的 CNC 装置

在单微处理器结构的 CNC 装置中，只有一个中央处理器（CPU），因此多采用集中控制、分时处理的方式来完成数控加工中的每一项任务。对于有些 CNC 装置虽然有两个以上的 CPU，但只有一个 CPU（主 CPU）能控制系统总线并访问存储器，而其它的 CPU（从 CPU）不能控制系统总线，只是完成某一项辅助功能（如键盘管理、CRT 显示等）。这些从 CPU 也接受主 CPU 的指令，它们之间形成主从结构，所以这种结构也属于单微处理器结构。

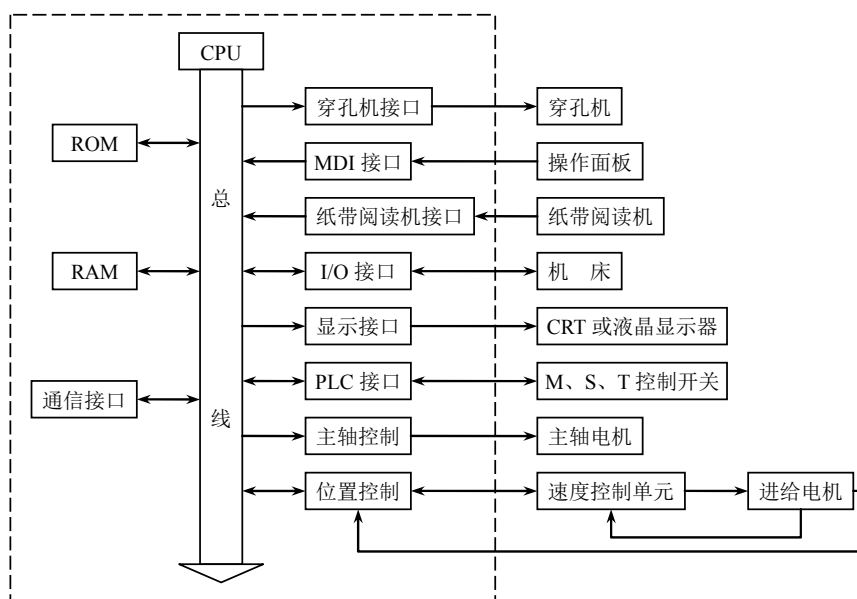


图 3.5 单微处理器结构的 CNC 装置框图

单微处理器结构 CNC 装置的结构框图如图 3.5 所示。单微处理器结构 CNC 装置的基本结构包括：CPU、总线、I/O 接口、存储器、显示接口和 MDI 接口等，还包括数控系统控制单元部件和接口电路，如位置控制单元、PLC 接口、主轴控制单元、速度控制单元、穿孔机和纸带阅读机接口以及其它接口等。

1、微处理器

微处理器是数控系统的核心，它由控制器和运算器组成，主要完成控制和运算两方面的工作。在 CNC 装置中，控制器的任务是从程序存储器中依次取出指令，经过解释后向 CNC 装置各部分按顺序发出执行操作的控制信号，使指令得以执行。同时，控制器又接收执行部件发回来的反馈信号，并根据程序中的指令信息及这些反馈信息决定下一步的命令操作。运算器的任务主要是对数据进行算术运算和逻辑运算，在运算过程中运算器不断得到由存储器提供的数据，并将运算结果送回存储器保存起来。通过对运算结果的判断，设置寄存器的相应状态（进位、奇偶和溢出等）。

CNC 装置中常用的微处理器有 8 位、16 位、32 位和 64 位之分。在实际选用时主要根据实时控制和处理速度的要求，按字长、数据宽度、寻址能力、运算速度及计算机技术发展的最新成果选用相应的微处理器。

2、总线

在单微处理器的 CNC 系统中常采用总线结构。总线一般可分为数据总线、地址总线和控制总线三组。数据总线为各部分之间传送数据，数据总线的位数和传送的数据宽度相等，它采用双方向线；地址总线传送的是地址信号，与数据总线结合使用，以确定数据总线上传输数据的来源或目的地，它采用单方向线；控制总线传输的是一些控制信号，如数据传输的读写控制、中断复位等信号，它采用单方向线。

3、存储器

CNC 装置的存储器包括只读存储器（ROM）和随机存储器（RAM）两类。常用的只读存储器有紫外线擦除可编程 ROM（EPROM）和电擦除可编程 ROM（E²PROM）。只读存储器存放系统程序，由 CNC 装置生产厂家写入，即使断电信息也不会丢失。或者由厂家提供系统程序软件和操作工具，由使用者通过上位计算机下装到 CNC 装置中并将用户的参数存放在 E²PROM 中，以保持不丢失。

随机存储器 RAM 分为静态 RAM（SRAM）和动态 RAM（DRAM），静态 RAM 在加电使用期间，除非进行改写，否则其存储信息不会改变。动态 RAM 在加电使用期间，当超过一定时间（一般为 2ms），其存储的信息会自动丢失。因此，为了保持存储信息不致丢失，必须另外设置刷新电路，每隔一定时间按原存储内容重新刷新一遍。

CNC 装置的系统程序存放在只读存储器 EPROM 之中。零件加工程序、机床参数、刀具参数等存放在有后备电池的 CMOS RAM 中，或者存放在磁泡存储器中，这些信息在这种存储器中能被随机读出，还可以根据需要写入和修改，断电后信息仍被保留。数控加工中各种运算的中间结果、需显示的信息和数据、运行中的状态、标志信息等均放在随机存储器 RAM 中，它可以随时读出和写入，断电后信息就消失。

4、I/O（输入 / 输出）接口

CNC 装置和机床之间的信号一般不直接连接，而是通过输入（Input）和输出（Output）接口电路连接。CNC 装置与机床之间接口符合“机床 / 数控接口”国际标准，它是 1975 年由国际电工委员会（IEC）第 44 技术委员会制定并批准的。

数控装置与机床及机床电器设备之间的接口分为三种类型。即与驱动控制器和测量装置之间的连接电路；电源及保护电路；开 / 关信号和代码连接电路。接口电路的主要任务为：

（1）电平转换和功率放大。一般 CNC 装置的信号是 TTL 电平，而控制机床和来自机床的信号通常不是 TTL 电平，因此要进行电平转换。在重负载情况下，还要进行功率放大。

（2）电气隔离。要用光电耦合器或继电器将 CNC 装置和机床之间的信号进行电气隔离，以防止各种干扰信号的影响。

（3）数模转换。CNC 装置的微处理器只能处理数字量，而对于模拟量控制的部件需进行数 / 模（D / A）转换处理，同样将模拟量输入到 CNC 装置中需进行模 / 数（A / D）转换处理。

(4) 防止信号畸变。信号在传输过程中，由于衰减、噪声和反射等影响，会发生一定程度的畸变，所以要根据信号类别及传输线质量，采取一定措施并限制信号的传输距离。

5、位置控制器

CNC 装置中的位置控制器又称为位置控制单元，位置控制主要是指控制数控机床进给运动的坐标轴位置。例如工作台的移动、主轴箱的移动及旋转运动等。数控机床的轴控制不仅要单个轴的运动和位置精度有严格要求，而且在多轴联动时还要求各移动轴有很好的动态配合关系。另外，对主轴的控制要求在很宽的范围内速度连续可调，并且每一种速度下均能提供足够的切削功率和转矩。

在有换刀装置的加工中心上，还需要对主轴的停止位置进行控制（准停）。加工中心根据指令若要实现放刀、取刀、自动换刀的过程，就必须控制刀库（或取放刀机构）位置和主轴停止位置，使刀库（或取放刀机构）准确停在要选用的刀具位置并能正确抓取刀具。这种位置控制与轴控制相比，没有复杂计算，相对比较简单，可以用 PLC 进行控制。

6、MDI / 显示接口

MDI（手动数据输入）是通过数控面板上的键盘进行操作的。CNC 装置的微处理器扫描到按键信号时，就将数据送入移位寄存器。移位寄存器的输出经报警电路检查后，若按键有效，则按键数据在控制选通信号的作用下，经选择器、移位寄存器、数据总线送入 RAM 存储起来；若按键无效，则按键数据不被送入 RAM。

显示接口是在 CNC 软件配合下，在显示器上实现字符和图形显示。显示器多为电子阴极射线管（CRT），近年来已经开始出现平板式液晶显示器（LCD），使用液晶显示器可大大缩小 CNC 装置的体积。

7、可编程序控制器（PLC）

可编程序控制器用来代替传统机床强电的继电器逻辑控制，主要用来实现各种开关量（S、M、T）的控制。例如主轴正转、反转、停止；换刀；切削液的开、关；工件的夹紧、松开以及润滑系统的运行等，同时还包括主轴驱动及机床报警处理等。

可编程序控制器在结构上可分为内装型和独立型两种。内装型 PLC 从属于 CNC 装置，PLC 与数控系统之间的信号传送在 CNC 装置内部实现。PLC 与机床间则通过 CNC 的 I / O 接口电路实现信号传输。数控机床中的 PLC 多采用内装型，它已成为 CNC 装置的一个部件。独立型 PLC 又称通用型 PLC，独立型 PLC 在结构上不属于 CNC 装置，可以自己独立使用，它具有完备的硬件和软件结构。

8、通信接口

通信接口用来与外部设备进行信息传输，例如与上位计算机进行数据通信，一般都采用 RS232C 串口。

单微处理器 CNC 装置的结构特点如下：

(1) CNC 装置内只有一个微处理器，对存储、插补运算、输入输出控制、CRT 显示等功能实现集中控制、分时处理的方式。

(2) 微处理器通过总线与存储器、输入输出控制等各接口电路相连，构成整个 CNC 装置。

(3) 结构简单, 容易实现。由于只有一个微处理器集中控制, 对实时性要求很高的插补运算则会受到微处理器字长、数据宽度、寻址能力和运算速度等因素的限制。为了提高处理速度, 增强数控功能, 可以采用增加协处理器的方式, 由硬件完成部分插补工作; 也可采用带微处理器的 PLC、CRT 等智能部件; 甚至可以采用多微处理器的结构。

二、多微处理器结构的 CNC 装置

在单微处理器结构的 CNC 装置中, 由于只有一个 CPU, 该 CPU 既要对键盘输入和 CRT 显示进行处理, 又要对译码、刀补及插补计算等进行实时控制处理, 所以只能采用集中控制、分时处理的工作方式, 这样进给速度显然会受到影响。随着制造技术的不断发展, 多微处理器硬件结构得到了迅速发展, 许多数控装置都采用这种结构, 它代表了当今数控系统的新水平。在多微处理器结构的 CNC 装置中, 每个 CPU 完成系统中规定的一部分功能, 分管各自的任务, 独立执行程序, 这种结构与单微处理器结构相比, 提高了系统的处理速度。

多微处理器结构的 CNC 装置一般采用两种结构形式, 即紧耦合结构和松耦合结构。在紧耦合结构中, 由各微处理器构成处理部件, 处理部件之间采取紧耦合方式, 有集中的操作系统, 共享资源; 在松耦合结构中, 由各微处理器构成功能模块, 功能模块之间采取松耦合方式, 有多重操作系统, 可以有效地实现并行处理。多微处理器结构的 CNC 装置多采用模块化结构, 可以采取搭积木的方式组成 CNC 装置, 因此它具有良好的适应性和扩展性, 且结构紧凑。如果某个模块出现故障, 其它模块仍能照常工作, 并且插件模块更换方便, 因此可使故障对系统的影响降到最低程度, 提高了系统的可靠性。与单微处理器结构的 CNC 装置相比, 其运算速度高, 性价比高, 因此更适用于多轴控制、高进给速度、高精度、高效率的数控加工要求。

1、多微处理器结构 CNC 装置的基本功能模块

(1) 管理模块: 用于管理和组织整个 CNC 系统的工作。主要包括系统的初始化、中断管理、总线裁决、系统出错识别和处理、系统软硬件诊断等。

(2) 插补模块: 该模块主要是完成插补前的预处理, 如对零件程序的译码、刀具补偿计算、坐标位移量计算和进给速度处理等。然后进行插补计算, 并给定各坐标轴的位置值。

(3) 位置控制模块: 对插补后的坐标位置给定值与位置检测装置测得的位置实际值进行比较, 进行自动加减速、回基准点、伺服系统滞后量的监视和漂移补偿, 最后得到速度控制的模拟电压, 去驱动进给电机。

(4) 存储器模块: 指存放程序和数据的主存储器, 或是功能模块间用于数据传送的共享存储器。

(5) PLC 模块: 对零件程序中的某些辅助功能和从机床面板传来的信号进行逻辑处理, 实现各功能与操作方式之间的连锁, 如机床电气设备的启停控制、刀具交换、主轴转速、转台分度、工件数量和机床运转时间的计数等。

(6) 命令数据输入输出和显示模块: 包括零件加工程序、参数和数据、各种操作命令的输入输出、显示所需要的各种接口电路。如纸带阅读机接口、打印机接口、键盘和 CRT 接口、通信接口等。

2、多微处理器结构 CNC 装置的典型结构

多微处理器结构 CNC 装置的结构方案是多种多样的，并且随着计算机系统结构的发展以及 CNC 装置功能和结构的变化而变化。多微处理器的互连方式有总线互连、环型互连、交叉开关互连、多级开关互连和混合交换互连等。多微处理器的 CNC 装置一般采用总线互连方式来实现各模块之间的互连和通信，典型的结构有共享总线和共享存储器两类。

(1) 共享总线结构

共享总线结构以系统总线为中心，把组成 CNC 装置的各个功能部件划分为带有 CPU 的主模块和不带 CPU 的从模块两大类。所有主、从模块都共享标准的系统总线，系统总线的作用是把各个模块有效地连接在一起，按照标准协议交换各种数据和控制信息，实现各种预定的功能，其结构框图如图 3.6 所示。

在共享总线结构中，只有主模块有权控制使用系统总线。由于可能会有多个主模块同时请求使用总线，所以系统设有总线仲裁电路来裁决多个主模块同时请求使用总线而造成的竞争，以便解决某一时刻只能由一个主模块占有总线的矛盾。根据每个主模块所承担任务的重要程度，预先安排好它们的优先级别顺序。总线仲裁电路在多个主模块争用总线而发生冲突时，能够判别出各个主模块优先级别的高低，最后决定由优先级别高的主模块优先使用总线。

在共享总线结构中，由于有多个主模块共享总线，所以易引起冲突，从而使数据传输效率降低。另外，总线一旦出现故障，将会影响整个 CNC 装置的性能。但由于其结构简单、系统配置灵活、实现容易等优点而被广泛采用。

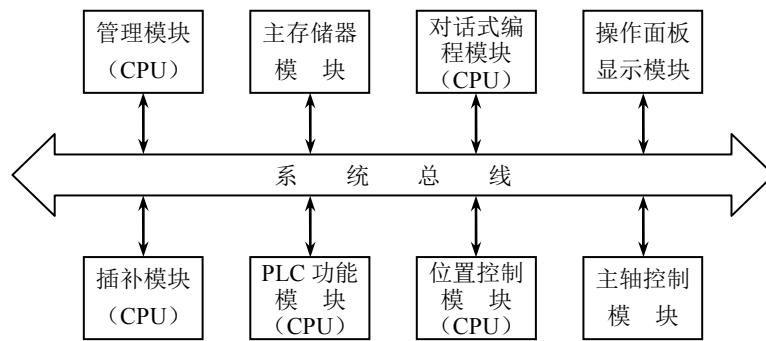


图 3.6 多微处理器共享总线结构框图

(2) 共享存储器结构

在这种结构中，通常采用多端口存储器来实现各微处理器之间的互连和通信，每个端口都配有一套数据、地址、控制线以供端口访问，由多端口控制逻辑电路解决访问冲突问题，其结构框图如图 3.7 所示。如图 3.8 所示为一个双端口存储器结构，它配有两套数据、地址与控制线，可供两个端口访问，访问优先权预先安排好。当两个端口同时访问时，由内部逻辑电路裁决其中一个端口优先访问。

对于共享存储器结构，由于同一时刻只能有一个微处理器对多端口存储器进行读写，所以当系统功能复杂而要求增加微处理器数量时，会因争用共享存储器而造成信息传送的阻塞，降低系统效率，因此这种结构扩展功能较困难。

3、多微处理器结构 CNC 装置的优点

与单微处理器结构 CNC 装置相比，多微处理器结构 CNC 装置具有以下优点：

(1) 计算速度快

多微处理器结构中每一个微处理器完成某一特定功能，相互独立，且并行工作，所以运算速度快。它适应多轴控制、高进给速度、高精度、高效率的数控要求。由于系统共享资源，故性能价格比高。

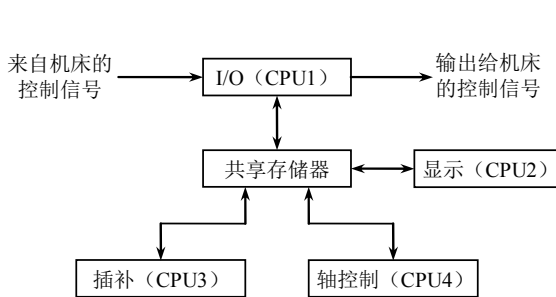


图 3.7 多微处理器共享存储器结构框图

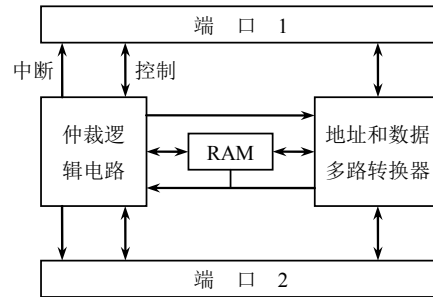


图 3.8 双端口存储器结构框图

(2) 有良好的适应性和扩展性

多微处理器结构 CNC 装置大多采用模块化结构。将微处理器、存储器、输入输出控制组成独立微计算机级的硬件模块，相应的软件也是模块结构并固化在硬件模块中。硬、软件模块形成一个特定的功能单元，称为功能模块。功能模块之间通过按工业标准严格定义的固定接口进行信息交换，这样就可以使 CNC 装置设计简单，有良好的适应性和扩展性，维修也方便。

(3) 可靠性好

由于每个功能模块独立完成一项任务，所以当某个功能模块出现故障后，其它模块可以照常工作，不至于使整个系统瘫痪，而且只要换上正常的模块就可以解决问题，从而提高了系统的可靠性。

(4) 易于组织规模生产

一般硬件是通用的，只要开发新的软件就可构成不同的 CNC 装置，这样便于组织规模生产，保证质量，形成批量。

三、开放式数控系统

目前，大多数商品化数控系统都属于专用型系统，其硬件和软件是由制造厂专门设计和制造的，具有专用性强，布局合理，结构紧凑等特点，它是一种专用的封闭系统。这样的系统没有通用性，硬件之间彼此不能交换，各个厂家的产品之间也不能互换，与通用计算机不能兼容，并且维修、升级困难，费用较高，这些都给使用带来了复杂性。

虽然专用封闭式数控系统在很长时期内一直占据着市场，但是随着计算机技术的不断发展，人们对数控系统提出了新的要求，这种封闭式的专用系统严重制约着数控技术的发展。针对这种情况，开放式数控系统应运而生，国内外技术人员正在大力研究开发开放式数控系统，有的已经进入了实用阶段。

开放式数控系统是一种模块化的、可重构的、可扩充的通用数控系统，它以工业 PC 机作为 CNC 装置的支撑平台，再由各专业数控厂商根据需要装入自己的控制卡和数控软件构成相应的

CNC 装置。由于工业 PC 机可以大批量生产，成本很低，因而也就降低了 CNC 系统的成本，同时工业 PC 机维护和升级均很容易。

开放式数控系统的特点主要表现为：依据分布式控制原则，开放式数控系统采用系统、子系统和模块分级式的控制结构；各模块相互独立，各模块接口协议明确，可移植性好；根据用户的需要可方便地重构和编辑，实现一个系统的多种用途；具有一种较好的通信和接口协议，使各个相对独立的功能模块通过通信实现信息交换，并满足实时控制的要求。

以工业 PC 机为基础的开放式数控系统，很容易实现多轴、多通道控制、实时三维实体图形显示和自动编程等，基于 Windows 软件平台，使开发工作量大大减少，而且可以实现数控系统三种不同层次的开放：

(1) CNC 系统的开放

CNC 系统可以直接运行各种应用软件，如工厂管理软件、车间控制软件、图形交互编程软件、刀具轨迹校验软件、办公自动化软件、多媒体软件等，这大大改善了 CNC 的图形显示、动态仿真、编程和诊断功能。

(2) 用户操作界面的开放

用户操作界面的开放使 CNC 系统具有更加友好的用户接口，并具备一些特殊的诊断功能，如远程诊断。

(3) CNC 内核的深层次开放

通过执行用户自己用编程语言开发的程序，就可以把应用软件加到标准 CNC 的内核中，称为编译循环。CNC 内核系统提供已定义的出口点，机床制造厂商或用户把自己的软件连接到这些出口点，通过编译循环，将其知识、经验、诀窍等所体现出来的专用工艺集成到 CNC 系统中去，形成独具特色的个性化数控机床。

这样三个层次的全部开放，能满足机床制造厂商和最终用户的各种需求。通过这种数控技术的柔性，使用户能十分方便地把 CNC 应用到所有可以应用的场合。

§ 3-3 CNC 装置的软件结构

CNC 装置的软件是为完成 CNC 系统的各项功能而专门设计和编制的，是数控加工系统的一种专用软件，又称为系统软件（或系统程序）。CNC 系统软件的管理作用类似于计算机操作系统的功能。对于不同的 CNC 装置，其功能和控制方案各不相同，因而各系统软件在结构上和规模上差别较大，各厂家的软件也互不兼容。由于现代数控机床的功能大多数都采用软件来实现，所以系统软件的设计及功能就成为了 CNC 系统的关键所在。

数控系统是按照事先编制好的控制程序来实现各种控制的，而控制程序是根据用户对数控系统所提出的各种要求进行设计的。所以，在设计系统软件之前必须细致地分析被控制对象的特点和对控制功能的要求，以决定采用哪一种计算方法。在确定好控制方式、计算方法和控制顺序后，将其处理顺序用框图描述出来，从而使系统设计者对所设计的系统有一个明确而清晰的轮廓。

一、CNC 装置的软硬件界面

CNC 装置由软件和硬件共同组成，硬件为软件的运行提供了支持环境。在 CNC 装置中，软件和硬件在逻辑上是等价的，即由硬件完成的工作原则上也可以由软件来完成，但是它们各有不同的特点。硬件处理速度快，造价相对较高，适应性差；软件设计灵活，适应性强，但是处理速度慢。因此，CNC 装置中软、硬件的分配比例是由性能价格比来决定的，这也在很大程度上涉及到软、硬件的发展水平。一般说来，软件结构首先要受到硬件的限制，但软件结构也有独立性。对于相同的硬件结构，可以配备不同的软件结构。

现代 CNC 装置中软、硬件界面并不是固定不变的，而是随着软、硬件的水平和成本，以及 CNC 装置所具有的性能不同而发生变化。图 3.9 给出了不同时期和不同产品中三种典型的 CNC 装置软、硬件界面。

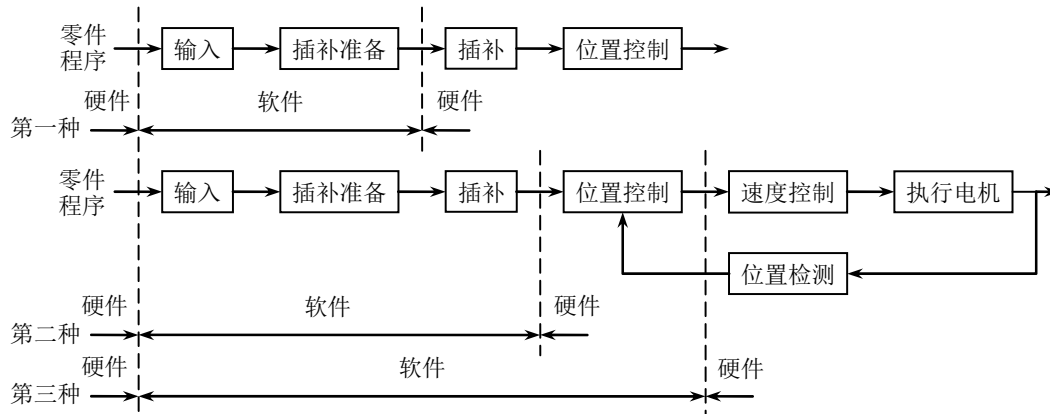


图 3.9 CNC 装置的三种典型软、硬件界面

二、CNC 装置软件结构的特点

CNC 系统是一个专用的实时多任务计算机系统，它的控制软件也采用了计算机软件技术中的许多先进技术。其中，多任务并行处理及多重实时中断技术的运用是 CNC 装置软件结构的主要特点。

1、CNC 系统的多任务性

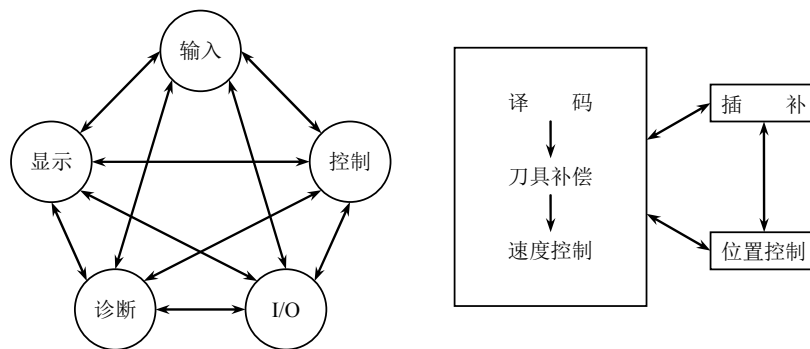


图 3.10 CNC 系统多任务并行处理的关系

CNC 系统作为一个独立的过程数字控制器被应用于工业自动化生产中，其多任务性表现在它必须完成管理和控制两大任务，所以 CNC 装置系统软件可分为管理软件和控制软件两大部分。其中，系统的管理包括输入、I/O 处理、通信、显示、诊断以及加工程序的编制管理等程序；系统的控制包括译码、刀具补偿、速度处理、插补和位置控制等程序，CNC 系统任务的组成可参照图 3.3 所示。

同时，CNC 系统的这些任务必须协调进行，也就是管理和控制的某些工作必须同时进行。例如，为了便于操作人员能及时掌握 CNC 系统的工作状态，管理软件中的显示模块必须与控制模块同时运行，即插补时同时在屏幕上显示坐标位置；当 CNC 系统处于 NC 工作方式时，管理软件中的零件程序输入模块必须与控制软件同时运行。另一方面，控制软件中的一些处理模块也必须同时进行。例如，为了保证加工过程的连续性，即刀具在各程序段间不停顿，译码、刀具补偿和速度处理模块必须与插补模块同时运行，而插补又必须要与位置控制同时进行等，这种多任务并行处理的关系如图 3.10 所示。

2、并行处理

并行处理是指计算机在同一时刻或同一时间间隔内完成两种或两种以上性质相同或不不同的工作。运用并行处理技术可以提高运行速度。

并行处理方法有资源共享、资源重复和时间重叠。资源共享是根据“分时共享”的原则，使多个用户按时间顺序使用同一套设备；资源重复是用多套相同或不同的设备同时完成多种相同或不同的任务。如在 CNC 系统硬件设计中，采用多 CPU 的系统体系结构来提高处理速度；时间重叠是根据流水线处理技术，使多个处理过程在时间上相互错开，轮流使用同一套设备的几个部分。

目前，CNC 装置的硬件设计普遍采用资源重复的并行处理方法。而 CNC 装置的软件设计则常采用资源分时共享和资源重叠的流水处理方法。

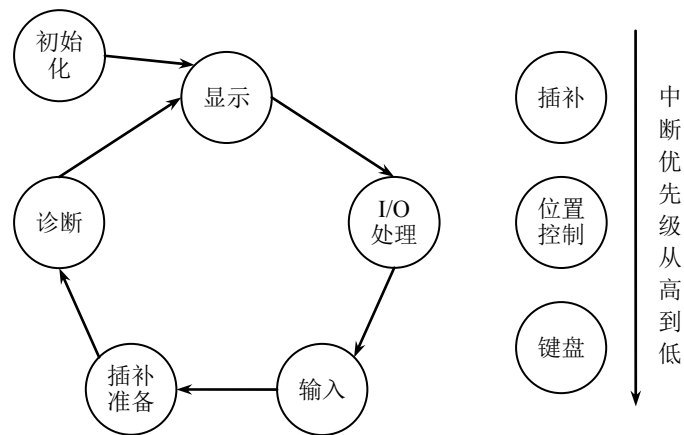


图 3.11 CPU 分时共享的并行处理

(1) 资源分时共享并行处理方法

在单 CPU 的 CNC 装置中，主要采用 CPU 分时共享的原则来解决多任务的同时运行。分时共享要解决的主要问题是分配各任务占用 CPU 的时间，即各任务何时占用 CPU 以及占用 CPU

时间的长短。在 CNC 装置中，各任务占用 CPU 是用循环轮流和中断优先相结合的方法来解决的。如图 3.11 所示为一个典型的 CNC 装置各任务分时共享 CPU 的时间分配图。

系统在完成初始化以后自动进入时间分配循环中，依次轮流处理环中的各任务。而对于系统中一些实时性很强的任务则按优先级排队，分别放在不同中断优先级上作为环外任务，环外任务可以随时中断环内各任务的执行。每个任务允许占有 CPU 的时间是受限制的，对于某些占有 CPU 时间较多的任务（如插补准备），可以在其中的某些地方设置断点，当程序执行到断点处时，自动让出 CPU，等到下一个运行时间里自动跳到断点处继续执行。

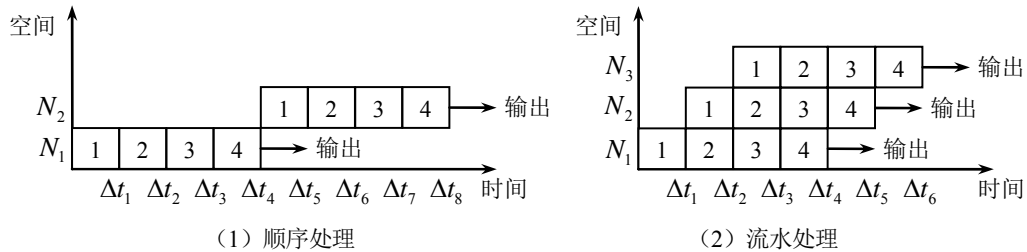


图 3.12 时间重叠流水处理

(2) 资源重叠流水并行处理方法

当 CNC 装置处于自动加工工作方式时，其数据的转换过程将由零件程序输入、插补准备（包括译码、刀具补偿计算和速度处理等）、插补、位置控制四个子过程组成。如果每个子过程的处理时间分别为 Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 、 Δt_4 ，那么一个零件程序段的数据转换时间将是

$t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4$ 。如果以顺序方式处理每个零件程序段，则第一个零件程序段处理完后才能处理第二个程序段，以后依次类推。这种顺序处理时的时间与空间关系如图 3.12 (1) 所示。从图中可以看出，这种顺序方式处理的结果将会导致在两个程序段的输出之间产生一个时间间隔。这种时间间隔反映在电机上就是电机的时转时停，反映在刀具上就是刀具的时走时停，这种情况在加工工艺上是绝对不允许发生的。

消除上述这种时间间隔的方法就是使用时间重叠流水处理技术，采用流水处理技术后的时间与空间关系如图 3.12 (2) 所示。流水处理的关键就是时间重叠，即在一段时间间隔内不是处理一个子过程，而是处理两个或更多的子过程。从图 3.12 (2) 可以看出，经过流水处理后从时间 Δt_4 开始，每个程序段的输出之间不再有间隔，从而保证了电机转动和刀具移动的连续性。在采用流水处理技术时，原则上要求处理每个子过程的运算时间相等，但实际上 CNC 装置中每个子过程所需的处理时间都是不同的，解决的办法是取最长的子过程处理时间作为流水处理的时间间隔，这样在处理时间较短的子过程时，当处理完成之后就进入等待状态。

在单微处理器结构的 CNC 装置中，从宏观上看流水处理的时间是重叠的，即在一段时间内 CPU 处理多个子过程，而实际上各子过程是分时占用 CPU 的。

3、实时中断处理

CNC 装置软件结构的另一个特点是实时中断处理。CNC 系统程序以零件加工为对象，每个程序段中有许多子程序，它们按照预定的顺序反复执行，各个步骤间关系十分密切，有许多子程序的实时性很强，这就决定了中断成为整个系统中不可缺少的重要组成部分。CNC 系统的中断管理主要由硬件完成，而系统的中断结构决定了软件结构。CNC 装置的中断类型如下：

(1) 外部中断

主要有纸带光电阅读机中断、外部监控中断（如紧急停止等）和键盘操作面板输入中断。前两种中断的实时性要求很高，通常将它们放在较高的优先级上，而键盘和操作面板输入中断则放在较低的中断优先级上。在有些系统中，甚至用查询的方式来处理它。

(2) 内部定时中断

包括插补周期定时中断和位置采样定时中断。在有些系统中，将这两种定时中断合二为一。但在处理时，总是先处理位置控制，然后处理插补运算。

(3) 硬件故障中断

它是 CNC 装置各种硬件故障检测装置发出的中断。如存储器出错、定时器出错、插补计算超时等。

(4) 程序性中断

它是程序中出现各种异常情况的报警中断。如各种溢出、除零等。

三、CNC 系统软件的结构形式

CNC 系统的软件结构决定于系统采用的中断结构。在常规的 CNC 系统中，有中断型和前后台型两种结构模式。

1、中断型结构模式

中断型结构模式的特点是除了初始化程序之外，整个系统软件的各种功能模块分别安排在不同级别的中断服务程序中，整个软件就是一个大的中断系统。其管理的功能主要是通过各级中断服务程序之间的相互通信来解决。

一般在中断型结构模式的 CNC 软件体系中，控制 CRT 显示的模块为低级中断（0 级中断），只要系统中没有其它中断级别请求时，总是执行 0 级中断，即系统进行 CRT 显示。其它程序模块，如译码处理、刀具中心轨迹计算、键盘控制、I/O 信号处理、插补运算、终点判别、伺服系统位置控制等处理，则分别具有不同的中断优先级别。当开机后，系统程序首先进入初始化程序，进行初始化状态的设置、ROM 检查等工作。在初始化后，系统转入 0 级中断 CRT 显示处理。此后，系统就进入各种中断的处理，整个系统的管理是通过每个中断服务程序之间的通信来实现的。

例如 FANUC-BESK 7CM CNC 系统就属于一个典型的中断型结构模式。整个系统的各个功能模块被分成 8 个不同优先级的中断服务程序，如表 3.1 所示。其中伺服系统位置控制被安排成很高的级别，这是因为机床刀具运动的实时性很强。

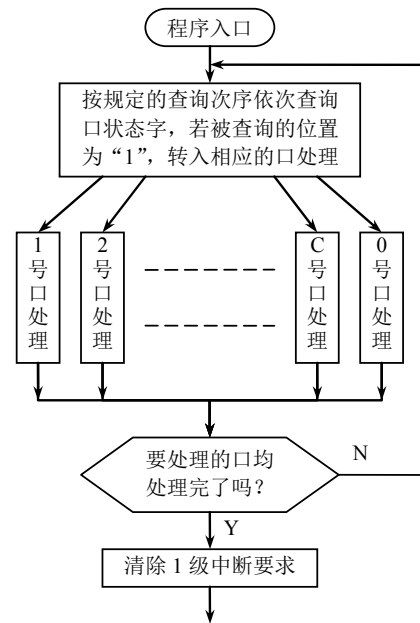


图 3.13 1 级中断各口处理转换框图

表 3.1 FANUC-BESK 7CM CNC 系统的各级中断功能

中断级别	主要功能	中断源
0	控制 CRT 显示	硬件
1	译码、刀具中心轨迹计算，显示器控制	软件，16ms 定时
2	键盘监控，I/O 信号处理，穿孔机控制	软件，16ms 定时
3	操作面板和电传机处理	硬件
4	插补运算、终点判别和转段处理	软件，8ms 定时
5	纸带阅读机读纸带处理	硬件
6	伺服系统位置控制处理	4ms 定时
7	系统测试	硬件

0 级中断是进行 CRT 显示。它被安排的级别最低，其中断请求是通过硬件接线始终保持存在的。在 0 级以上的中断服务程序均未发生的情况下，就进行 CRT 显示。

1 级中断相当于后台程序的功能，进行插补前的准备工作。1 级中断有 13 种功能，对应着口状态字中的 13 个位，每位对应于一个处理任务。在进入 1 级中断服务时，先依次查询口状态字 0~12 位的状态，再转入相应的中断服务（如表 3.2 所示），其处理过程如图 3.13 所示。口状态字的置位有两种情况：一是由其它中断根据需要置 1 级中断请求的同时置相应的口状态字；二是在执行 1 级中断的某个口子处理时，置口状态字的另一位。当某一口的处理结束后，程序将口状态字的对应位清除。

表 3.2 FANUC-BESK 7CM CNC 系统 1 级中断的 13 种功能

口状态字	对应口的功能
0	显示处理
1	公英制转换
2	部分初始化
3	从存储区（MP、PC 或 SP 区）读一段数控程序到 BS 区
4	轮廓轨迹转换成刀具中心轨迹
5	“再启动”处理
6	“再启动”开关无效时，刀具回到断点“启动”处理
7	按“启动”按钮时，要读一段程序到 BS 区的预处理
8	连续加工时，要读一段程序到 BS 区的预处理
9	纸带阅读机反绕或存储器指针返回首地址的处理
A	启动纸带阅读机使纸带正常进给一步
B	置 M、S、T 指令标志及 G96 速度换算
C	置纸带反绕标志

2 级中断服务程序的主要工作是对数控面板上的各种工作方式和 I/O 信号进行处理。

3 级中断则是对用户选用的外部操作面板和电传机进行处理。

4级中断最主要的功能是完成插补运算。FANUC-BESK 7CM CNC 系统中采用了时间分割法（数据采集法）进行插补。按照此方法，经过 CNC 系统插补计算后输出的是一个插补周期 T(8ms) 内的进给指令（F 指令）值，这是一个粗插补进给量，而精插补进给量则是由伺服系统的硬件与软件来完成。一次插补处理分为速度计算、插补计算、终点判别和进给量变换四个阶段。

5级中断服务程序主要对纸带阅读机读入的孔信号进行处理。这种处理基本上可以分为输入代码的有效性判别、代码处理和结束处理三个阶段。

6级中断主要完成位置控制、4ms 定时计时和存储器奇偶校验工作。

7级中断实际上是工程师的系统调试工作，非使用机床的正式工作。

以上各中断请求的发生，除了第 6 级中断是由 4ms 时钟发生之外，其余的中断均依靠别的中断设置，即依靠各中断程序之间的相互通信来解决。例如第 6 级中断程序每进行两次设置一次第 4 级中断请求（8ms）；每四次设置一次第 1、2 级中断请求。插补的第 4 级中断在插补完一个程序段后，要从缓冲器中取出下一段程序并进行刀具半径补偿，这时就置第 1 级中断请求，并把 4 号口置 1。

2、前后台型结构模式

前后台型结构模式适合于采用集中控制的单微处理器 CNC 装置。这种结构模式的 CNC 系统软件分为前台程序和后台程序。前台程序为实时中断服务程序，承担了几乎全部实时功能，这些功能都与机床的动作直接相关，如位置控制、插补、伺服等。后台程序是一个循环运行程序，主要用来完成准备工作和管理工作，包括输入、译码、插补准备及管理，通常也称为背景程序。在后台程序运行过程中，实时中断程序不断插入，前后台程序相互配合共同完成加工任务。如图 3.14 所示为实时中断程序与后台程序的关系图，程序启动后先运行初始化程序，再进入后台程序循环，同时开放实时中断程序，每隔一定时间发生一次中断，执行一次中断服务程序，此时后台程序停止运行，实时中断程序执行后再返回后台程序。这样，实时中断程序和后台程序有条不紊地协同工作。

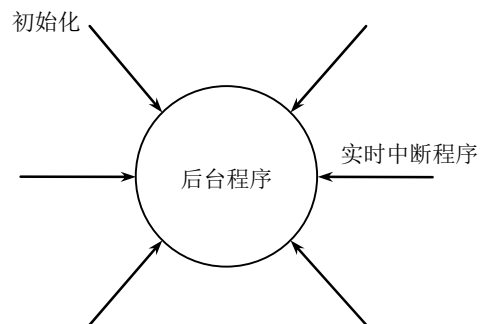


图 3.14 实时中断程序与后台程序关系图

在系统运行过程中，前后台型结构模式 CNC 装置的调度管理功能由后台程序来完成，如图 3.15 所示为一个简化程序框图。系统初始化后等待启动按钮的按下，当启动按钮按下后就对第一个程序段译码，并进行预处理，完成轨迹计算和速度计算，得到插补所需要的各种参数，如刀具中心的起止点坐标、刀具中心的位移量、圆弧插补时圆心的各坐标分量等，并将所得参数送至插补缓冲存储区保存。若有辅助功能码（M，S，T），则将其送至系统工作寄存器保存。然后将插补缓冲存储区的内容送至插补工作存储区，系统工作寄存器中的辅助功能码送至系统标志单元以供使用，完成交换后设置标志（数据交换结束标志、开始插补标志）。在标志设置之前，尽管实时中断照常发生，但并不执行插补及辅助信息处理等功能，仅执行一些列行的扫描、监控等功能。只有在标志设置之后，实时中断程序才能执行插补、伺服输出、辅助信息处理等功能，同时开始

对下一段程序进行译码、预处理。系统必须保证在当前程序插补过程中完成对下一段程序的译码和预处理，否则在加工过程中将会出现停刀的现象。上述表明，后台程序通过设置标志来实现对实时中断程序的管理和控制。

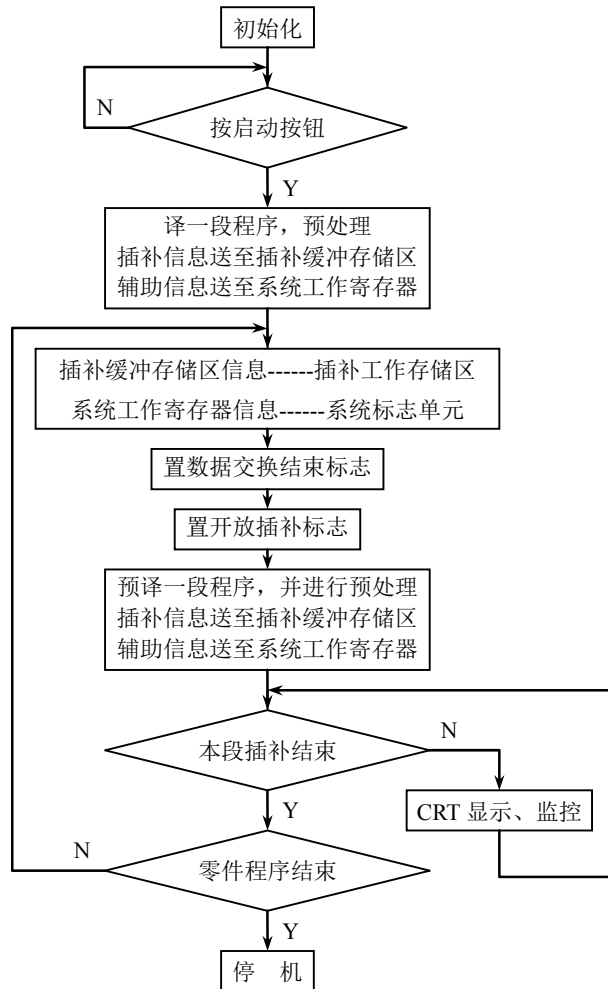


图 3.15 后台程序的调度管理功能简化程序框图

从设立两个标志到插补完成的这段时间里，CNC 装置的工作最为繁忙。这是因为中断程序要进行本段程序的插补及伺服输出，同时后台程序要完成对下一段程序的译码和预处理。插补、伺服输出与译码、预处理分时占用 CPU，以实现多任务并行处理。另外，对下一段程序进行译码、预处理的时间比对本段程序进行插补的运行时间短，因此在后台程序中有一个等待插补完成循环，在等待过程中不断进行 CRT 显示和状态、键盘等监控。

§ 3-4 CNC 装置软件的控制功能

CNC 的系统软件是为完成特定功能所编制的专用软件，由于 CNC 系统的功能设置与控制方案各不相同，各种系统软件在结构和规模上差别很大。系统软件的设计与各项功能的实现及扩展有最直接的关系，它是整个 CNC 系统研制工作中最关键、工作量最大的部分。

如前所述，系统软件一般由输入、译码、数据处理（预计算）、插补运算、输出控制、管理程序及诊断程序等部分构成，下面分别加以介绍。

一、零件程序的输入

早期的数控装置是使用纸带阅读机和键盘进行零件程序输入的，现代数控装置则可通过 DMA 和通讯接口或其它输入装置实现零件程序的输入。纸带阅读机和键盘输入大多采用中断方式，由相应的中断服务程序完成输入。

纸带阅读机中断服务程序执行一次只读入一个字符，而且要经过一系列检查判别，这些检查由融合在中断服务程序中的诊断程序完成，经过检查并认为合格后才将该字符存入零件程序缓冲器。键盘中断服务程序执行一次读入一个按键的信息，即按下一个键就向主 CPU 申请一次中断，调出一次键盘服务程序，对相应的键盘命令进行处理。在键盘服务程序中，先将键盘上输入的字符送到 MDI 缓冲器，然后再送入零件程序存储器。

从其它输入装置送来的信息均需通过缓冲器后才能被存入零件程序存储器。在译码时，又将零件程序存储器中的零件程序调至缓冲器，供译码处理程序使用。零件程序缓冲器和 MDI 缓冲器容量较小，一般只可存几个程序段，而零件程序存储器容量较大。输入过程中的信息传送流程如图 3.16 所示。

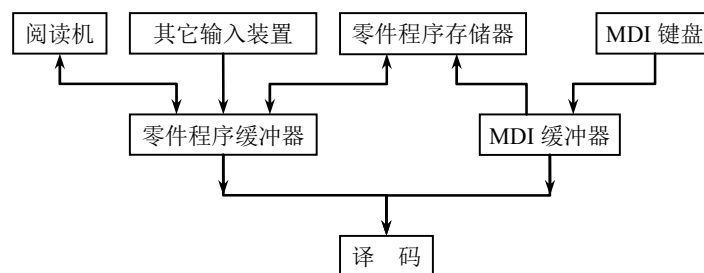


图 3.16 输入过程信息传送流程

1、数据存放的形式

在零件程序存储器中可以储存多个零件程序，这些零件程序一般是按顺序存放的。而且为方便零件程序的调用，在零件程序存储器中还设有目录区，在目录区中按固定格式存放着相应零件程序的有关信息。目录区中每一项都对应于一个零件程序，并记录了该零件程序的程序名称以及它在零件程序存储器中的首、末地址等信息。零件程序存储器的结构如图 3.17 所示。

零件程序在外界通常用 ISO 代码或 EIA 代码表示,但储存在零件程序存储器内的零件程序并不用这两种代码表示,这是因为 ISO 代码和 EIA 代码的排列规律并不明显,若将它们转换为具有一定规律的数控内部代码形式,则会便于计算机进行处理。

表 3.3 常用数控代码及其内部码

字符	ISO 码	EIA 码	内部代码	字符	ISO 码	EIA 码	内部代码
0	30H	20H	00H	X	D8H	37H	12H
1	B1H	01H	01H	Y	59H	38H	13H
2	B2H	02H	02H	Z	5AH	29H	14H
3	33H	13H	03H	I	C9H	79H	15H
4	B4H	04H	04H	J	CAH	51H	16H
5	35H	15H	05H	K	4BH	52H	17H
6	36H	16H	06H	F	C6H	76H	18H
7	B7H	07H	07H	M	4DH	54H	19H
8	B8H	08H	08H	CR/LF	0AH	80H	20H
9	39H	19H	09H	—	2DH	40H	21H
N	4EH	45H	10H	DEL	FFH	7FH	22H
G	47H	67H	11H	%/ER	A5H	0BH	23H

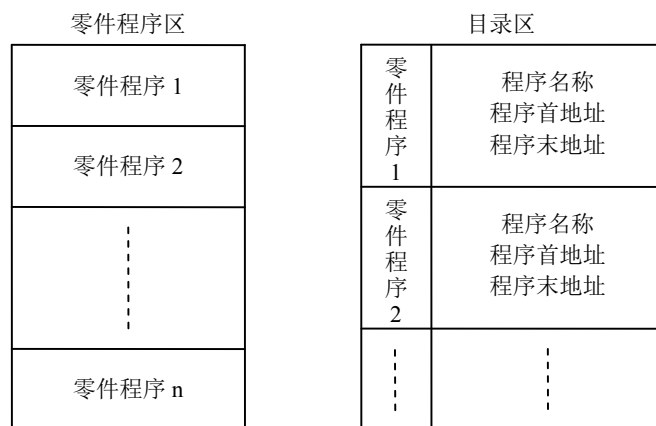


图 3.17 零件程序存储器的结构

根据表 3.3 可以将标准 ISO 代码和 EIA 代码转换为数控内部代码的形式。例如若将一个零件程序段:

N10 G90 G01 X100 Y-50 F100 M03 LF

转换为数控内部代码,就可得到表 3.4 所示的该程序段转换后在零件程序存储器中的信息。可以看出,在使用内部代码后,数字码 0~9 便可直接进行二一十进制的转换,文字码和符号码也有了明显的标志,这使后续译码的速度加快。

表 3.4 零件程序存储器的信息

存储器地址	内 容	存储器地址	内 容	存储器地址	内 容
8000H	10H	800AH	12H	8013H	01H
8001H	01H	800BH	01H	8014H	00H
8002H	00H	800CH	00H	8015H	00H
8003H	11H	800DH	00H	8016H	19H
8004H	09H	800EH	13H	8017H	00H
8005H	00H	800FH	21H	8018H	03H
8006H	11H	8010H	05H	8019H	20H
8007H	00H	8011H	00H		
8009H	01H	8012H	18H		

2、零件程序的编辑

将零件程序输入后，常常需对该程序进行编辑。编辑工作主要包括插入、删除、替换和修改等操作，一般通过键盘配合 CRT 进行。

编辑时经常要进行大面积的内容移动，若一个零件程序中有多处要编辑时，则需反复大幅度移动内容，从而使处理时间加长，这种情况下对零件程序可采用数据结构中的链表存储方式。采用这种方式时，零件程序存储区被分成各个固定长度的区域，并按区域分配给各个零件程序，因此零件程序是存储在一个个分离的区域中，并建立相应的文件定位表，用指针链将零件程序的各个区域标志出来，形成链表结构。这样，编辑时就无需大块移动内存内容，响应快且操作简单，但在这种方式下文件管理系统复杂，编译时定位操作不易。另一种方法是对零件程序采用顺序存储方式。在这种方式下，首先将零件程序调至一个空白存储区内进行编辑，然后计算出编辑好的零件程序长度，根据长度大小将后续程序相应前移或后移，并修改目录中的首、末地址，这样避免了多次反复的大块存储内容移动，减少了处理时间。

目前，基于 PC 总线的工控机作为数控系统的应用已经很普遍，这为零件程序的编辑提供了很好的物理环境和软件支撑环境。

二、译码

译码程序是把零件程序段的各种工件轮廓信息（如起点、终点、直线或圆弧等）、进给速度（F）和其它辅助信息（M、S、T）按一定规律翻译成计算机系统能识别的数据形式，并按系统规定的格式存放在译码结果缓冲器中。在译码过程中，还要完成对程序段的语法检查，若发现语法错误立即报警。

译码是任何计算机系统要执行输入程序必须经过的一个步骤。译码有解释和编译两种方法。解释方法是将输入程序改成某种形式，执行时由计算机顺序取出进行分析、判断和处理，即一边解释，一边执行。编译方法是将输入程序作为源程序，对它进行编译，形成由机器指令组成的目的程序，然后计算机执行这个目的程序。由于数控代码比较简单，零件程序不复杂，解释执行并不慢，同时解释程序占内存少，操作简单，故 CNC 控制软件中多数采用解释方法。译码工作主要包括代码识别和各项功能的译码。

1、代码识别

在 CNC 系统中，代码识别由软件完成。在识别过程中，译码程序从零件程序缓冲器中逐个输入字符代码，并将其与相应数字进行比较，若相等就说明输入了该字符，这是一种串行工作方式，即比较时要一个个地进行，直到相等为止，所以速度较慢。与软件译码相比，硬件译码线路则是并行工作的，所以速度较快。但由于软件译码可以在插补空闲时间内完成，不占用实时工作时间，因此采用软件译码是可以满足要求的。由表 3.3 可知，常用的数控代码包括数字码、文字码和符号。在比较时可以将每个字符与文字码和符号逐个比较，相符后就设立对应标志，并转入对应的处理子程序。而识别数字码相对比较简单，因为在内部码中它们已用二一十进制的 0~9 表示出来，只需要进行二一十进制的运算。图 3.18 表示了代码识别的原理。

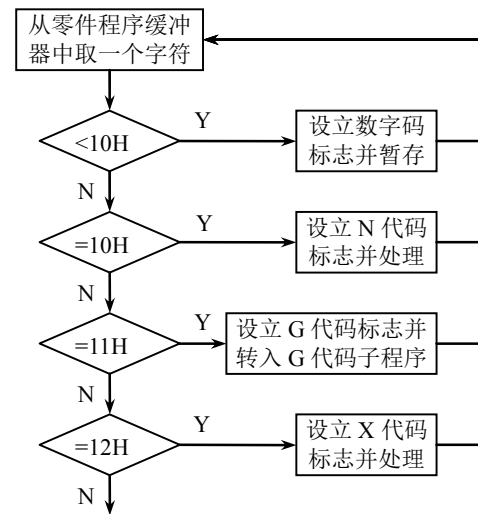


图 3.18 代码识别原理

2、各功能码的译码

经代码识别设立了各功能代码的标志后，就可以分别对各功能码进行了。由于不同的 CNC 系统有自己规定的编程格式，所以设计译码结果缓冲器时可与零件程序段格式相对应，如表 3.5 所示。表中的 GA~GG，MA~MC 是考虑到 CNC 系统允许一个程序段中同时出现不止一个准备功能（G 代码）和辅助功能（M 代码）而设置的。此外，也没有必要为每一种 G 代码或 M 代码准备一个单元，因为某些 G 代码或 M 代码是不允许同时出现在一个程序段中的，即它们是互相排斥的。例如 G00、G01、G02 和 G03 是不可能在一个程序段中出现的，否则将会出现编程错误。如果将 G 代码（或 M 代码）中不能同时出现在一个程序段的代码归为一组，则可把 G 代码（或 M 代码）分成几组，这样就可以减小缓冲器容量，还便于查找出编程错误。常用的 G 代码和 M 代码分组如表 3.6 所示。对于 M 代码来说，这里允许同一个程序段中出现三组 M 代码，因此分为三组 MA、MB 和 MC，MA 对应于 M00、M01 和 M02；MB 对应于 M03、M04 和 M05；MC 对应于 M06。

表 3.5 译码结果缓冲器格式

地址码	字节数	数据存放格式	地址码	字节数	数据存放格式
N	2	二一十进制	MA	1	特征字
X	3	二进制	MB	1	特征字
Y	3	二进制	MC	1	特征字
Z	3	二进制	GA	1	特征字
I	3	二进制	GB	1	特征字
J	3	二进制	GC	1	特征字

K	3	二进制	GD	1	特征字
F	2	二进制	GE	1	特征字
S	2	二进制	GF	1	特征字
T	2	二十进制	GG	1	特征字

表 3.6 常用的 G 代码和 M 代码分组

组 号	代 码	功 能
GA	G00	点位进给（快速进给）
	G01	直线插补（切削进给）
	G02	顺时针圆弧插补
	G03	逆时针圆弧插补
	G33	螺纹切削
GB	G04	暂停
GC	G28	自动返回参考点
	G29	自动离开参考点
GD	G40	取消刀具补偿
	G41	刀具半径补偿（左刀补）
	G42	刀具半径补偿（右刀补）
GE	G80	取消固定循环
	G81~G89	固定循环
GF	G90	绝对值输入
	G91	增量值输入
GG	G92	工作坐标系设定
MA	M00	程序暂停
	M01	计划中停
	M02	程序结束
MB	M03	主轴正转
	M04	主轴反转
	M05	主轴停转
MC	M06	换刀指令

各个功能码的处理方式不尽相同。除 G 代码和 M 代码需分组外，其余功能码均只有一项，其地址在内存中是指定的，因此译码程序根据代码识别设置的各功能码标志，确定存放其相应数值的地址，以便送入数据。对于数字也需判别功能码标志，不同功能码后面的数字位数和存放形式也有区别。每个功能码后面的数字位数均有规定，如 N 代码后面可接 4 位数字，坐标值后面接 7 位数字等。在系统 ROM 中有一个格式字表，表中每一个字符均有相应的地址偏移量、数据位数等。处理时可根据功能码格式字中的标志决定是否需要将这些数字送入上一个功能码指定的地

址单元中去。对于分组的 G 代码和 M 代码，则在译码结果缓冲器中以特征字形式表示。识别出功能码 G（或 M）后还不能分组，需根据后续的两数字组合来判别。由于译码结果缓冲器中各单元的地址是固定的，是根据各功能字所在的地址放置数据，所以在编程时允许可变地址字格式。

下面举例说明译码过程。假如有零件加工程序为：

```
O001
N1 G01 X150 Y200 F100 LF
N2 X-200 LF
N3 M02 LF
%
```

译码的结果就是把程序段中各数据根据其前后的文字地址送到相应的缓冲寄存器中。译码程序流程如图 3.19 所示，译码时首先从零件程序存储区中取出一个字节是地址“N”，由于它是第一个地址，故再取一个字节是数字“1”，将“1”存入数字码寄存器。然后再取一个字节为地址“G”，由于它是新的文字字符，这说明上一个地址的内容已取完，因此就把数字码寄存器中的数字“1”存入上一个地址“N”的缓冲寄存器中。然后继续取一个字节是数字“0”，将“0”存入数字码寄存器，接着再取一个字节是数字码“1”，将“1”也存入数字码寄存器，这时数字码寄存器中为“01”。再继续取一个字节是地址“X”，这一个新文字字符的取出说明上一个地址的内容已取完。因而就把数字码寄存器中的数“01”送入上一个地址“G”的缓冲寄存器中……，

当取出该程序段最后一个字符“LF”时，就把当时数字码寄存器中的数“100”送入上一个地址“F”的缓冲寄存器中，随后返回主程序。这样，在译码程序的作用下，一个程序段中的所有文字连同它们后面的数字都被存入相应的文字缓冲寄存器中，从而完成了译码功能。

三、刀具补偿

经过译码后的程序段数据是不能直接用于插补程序的，还要通过有关的刀具补偿计算，将编程时工件轮廓数据转换成刀具中心轨迹数据后才能进行正确的插补。刀具补偿分为长度补偿和半径补偿两种。长度补偿的计算相对比较简单，下面就以介绍刀具的半径补偿为主。

在编制零件加工程序时，刀具的位置信息取自于零件的轮廓线，但是实际切削时是以刀具中心为控制对象的，由于刀具总是具有一定的半径，致使刀具与工件之间相对切削运动所形成的实际轨迹就不是零件轮廓线了，而是偏离了一个刀具半径值。

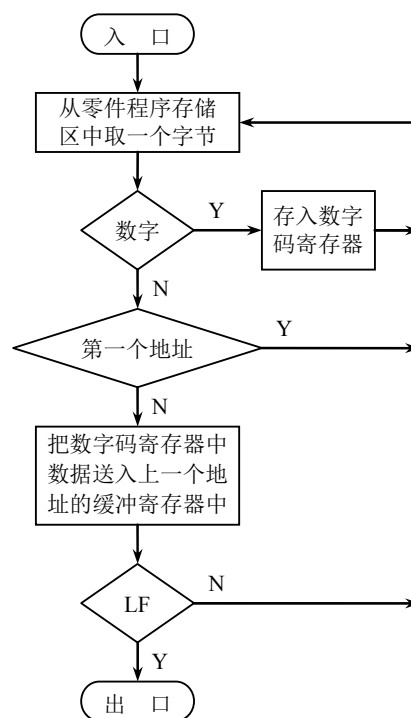


图 3.19 译码程序流程图

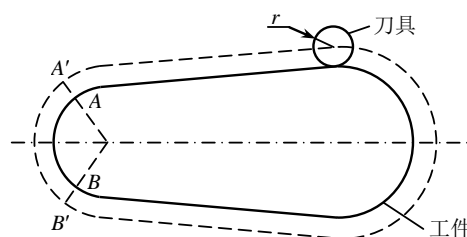


图 3.20 刀具中心的偏移

如图 3.20 所示, 在进行外轮廓加工时, 为了能获得合格轮廓的零件, 刀具中心需要偏移零件外轮廓面一个半径值, 这种偏移计算被称为刀具半径补偿。

在实际加工中, 刀具半径的补偿通常不是由编程人员来完成的, 而是由 CNC 系统软件中的刀补程序完成的。编程人员只是按零件的加工轮廓编制程序, 同时用指令告诉 CNC 系统是沿零件的内轮廓还是外轮廓运动。CNC 系统根据零件轮廓尺寸 (直线或圆弧以及其起点和终点) 和刀具偏移方向指令 (G41, G42, G40), 以及实际加工中所用的刀具半径值自动地完成刀具半径补偿计算。

根据 ISO 标准, 当刀具中心轨迹在编程轨迹 (零件轮廓) 前进方向右边时称为右刀具补偿, 简称右刀补, 用 G42 表示; 反之, 则称为左刀补, 用 G41 表示; 当取消刀具补偿时用 G40 表示。在零件轮廓切削过程中, 刀具半径补偿的执行过程可分为以下三步:

(1) 刀具补偿的建立。它是指刀具从起点出发沿直线接近加工零件, 依据 G41 或 G42 指令使刀具中心在原来编程轨迹的基础上左偏或右偏一个刀具半径值, 其过程如图 3.21 所示。

(2) 刀具补偿的进行。刀具补偿指令属于模态指令, 一旦刀具补偿建立后就一直有效, 直至

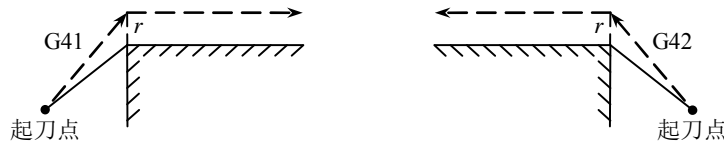


图 3.21 刀具补偿的建立

刀具补偿被取消。在刀具补偿进行期间, 刀具中心轨迹始终相对于编程轨迹左偏或右偏一个刀具半径值的距离。在轨迹转接处, 采用圆弧过渡或直线过渡。

(3) 刀具补偿的撤消。它是指加工完成后刀具撤离工件, 回到起刀点。与刀具补偿建立的过程相反, 刀具中心轨迹从与编程轨迹相距一个刀具半径值转变成与编程轨迹重合。撤消刀具补偿用 G40 指令。

刀具半径补偿只是在二维坐标平面 (xy 平面、 zx 平面和 yz 平面) 内进行的, 半径补偿值由刀具号寄存器 D (H) 所指定。刀具半径补偿实质上所表达的是刀具半径方向上的补偿, 灵活运用刀具半径补偿可以给零件的加工工艺带来很大的方便。

1、B 功能刀具半径补偿

B 功能刀具半径补偿主要是计算刀具中心在直线或圆弧的起点和终点的位置值, 以及刀具补偿后刀具中心轨迹的圆弧半径值。有了这些值就能实施轨迹控制 (直线或圆弧插补)。

(1) 直线刀具半径补偿

如图 3.22 所示, 被加工直线 OA 的起点为坐标原点, 终点为 $A(x, y)$ 。设刀具半径为 r , 刀具偏移后从 A 点移动到了 A' 点, 现在要计算的是 A' 点的坐标 (x', y') 。

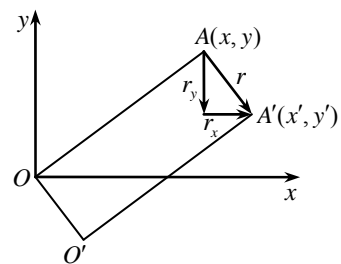


图 3.22 直线刀具补偿

刀具偏移分量 r_x 和 r_y 分别为:

$$\begin{cases} r_x = \frac{ry}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ r_y = -\frac{rx}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (3-1)$$

则 A' 点的坐标为:

$$\begin{cases} x' = x + r_x = x + \frac{ry}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ y' = y + r_y = y - \frac{rx}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (3-2)$$

式 (3-2) 就是直线刀具补偿计算公式。

其中, 起点 O' 为上一个程序段的终点, 其坐标求法与求 A' 点坐标相同。直线刀具偏移分量 r_x

和 r_y 的正、负号确定与直线终点所在象限以及刀具偏置方向 (G41 或 G42) 有关。

(2) 圆弧刀具半径补偿

如图 3.23 所示, 被加工圆弧 AB , 半径为 R , 圆心为坐标原点, 圆弧起点为 $A(x_a, y_a)$, 终点为 $B(x_b, y_b)$ 。刀具中心点的起点 A' 为上一个程序段的终点, 它已经被求出。现在要计算刀具中心点的终点 B' 的坐标 (x'_b, y'_b) 。

设刀具半径为 r , 则 B 点的刀具偏移分量为:

$$\begin{cases} r_x = r \frac{x_b}{R} \\ r_y = r \frac{y_b}{R} \end{cases} \quad (3-3)$$

B' 点的坐标为:

$$\begin{cases} x'_b = x_b + r_x = x_b + r \frac{x_b}{R} \\ y'_b = y_b + r_y = y_b + r \frac{y_b}{R} \end{cases} \quad (3-4)$$

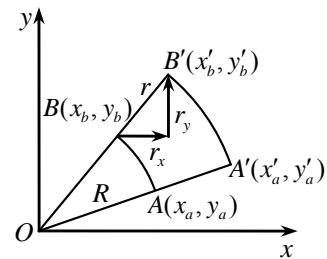


图 3.23 圆弧刀具补偿

式 (3-4) 为圆弧刀具半径补偿计算公式。圆弧刀具偏移分量 r_x 和 r_y 的正、负号确定与圆弧走向 (G02 / G03)、刀具偏置方向 (G41 或 G42) 以及圆弧所在象限有关。

事实上，刀具偏移计算的方法很多。在 NC 系统中，常用的方法就有 DDA 法、极坐标法、逐点比较法（又称刀具半径矢量法或 r^2 法）、矢量判断法等。这些刀具偏移计算方法的采用，大多数与数控系统所采用的插补方法有关，也就是随着数控系统的不同而有所差异。

2、C 功能刀具半径补偿

当编程人员按零件轮廓编制程序时，各程序段之间是连续过渡的，不存在间断点或重合段。但是，当进行了刀具半径补偿后，在两个程序段转接处刀具中心轨迹就可能会出现间断点或交叉点。如图 3.24 所示，粗实线为编程轮廓，当加工外轮廓时会出现间断 $A' \rightarrow B'$ ；当加工内轮廓时会出现交叉点 C'' 。

在采用 B 功能刀具半径补偿方法时，它只能计算出直线或圆弧终点的刀具中心值，而对于两个程序段转接处可能出现的一些特殊情况没有给予考虑。对于只有 B 刀具补偿的 CNC

系统，编程人员必须事先估计出刀具补偿后可能出现的间断点和交叉点的情况，并进行人为处理。如图 3.24 所示，如果遇到间断点时，要事先在两个间断点之间增加一个半径为刀具半径的过渡圆弧段 $A'B'$ ；如果遇到交叉点时，要事先在两个程序段之间增加一个过渡圆弧段 AB ，而且圆弧的半径必须大于所使用刀具的半径。另外，在采用这样的处理方式后，当遇到加工外轮廓尖角时，由于轮廓尖角始终是处于切削状态，尖角加工的工艺性就比较差。特别是在磨削加工中，所需的轮廓尖角往往会被加工成小圆角。显然，这种仅有 B 刀具补偿功能的 CNC 系统在使用时是很不方便的，一旦疏忽就会因刀具干涉而产生过切削现象，从而限制了刀具半径补偿方法在复杂的、高要求的数控系统中的应用。

与 B 刀具补偿功能相比，C 刀具补偿功能可以处理两个程序段间转接的各种情况。以前，由于普通 NC 系统运算速度及硬件结构的限制，很难求得刀具中心轨迹转接交点 C' 和 C'' 的位置（见图 3.24）。但随着数控技术的发展，系统工作方式、运算速度及存储容量都有了很大的改进和增加，CNC 装置的性能得到了很大提高，使得人们最早所想到的刀具半径补偿方法得以实现，它是由数控系统根据和实际轮廓完全一样的编程轨迹，直接算出刀具中心轨迹转接交点 C' 和 C'' 的位置，然后再对原来的编程轨迹作伸长或缩短的修正，这种方法就被称为 C 功能刀具半径补偿。

(1) C 功能刀具半径补偿的基本设计思想

B 刀具补偿之所以对编程起限制作用，原因就在于其确定刀具中心轨迹时，都采用了读一段，计算一段，再走一段的控制方法。这种方法不能预计到由于刀具半径的存在而造成的下一段加工轨迹对本段加工轨迹的影响。所以，对于给定的加工轮廓轨迹，合理选择刀具半径以及在相邻加工轨迹转接处选用恰当的过渡圆弧等问题，就必须由编程人员自己来处理。

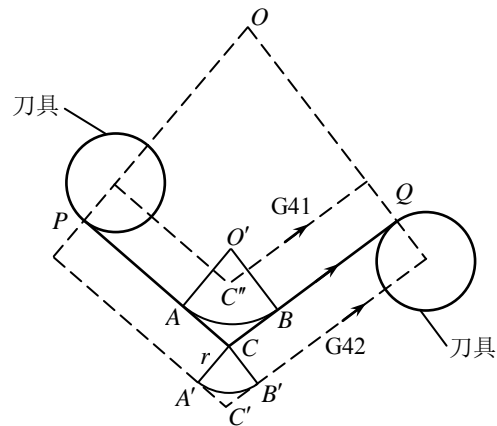
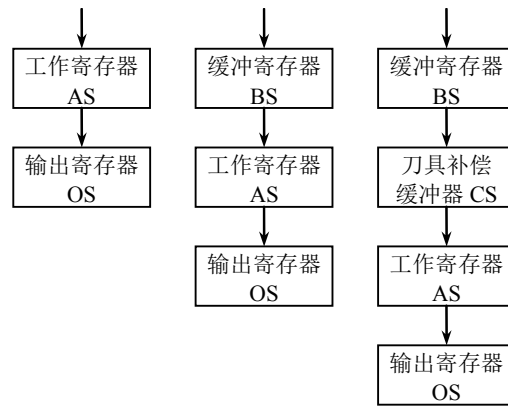


图 3.24 B 刀具补偿的间断点和交叉点

为了处理下一段加工轨迹对本段加工轨迹影响的问题，就需要在计算完本段轨迹后提前读入下一段程序，然后根据它们之间转接的具体情况，再对本段轨迹作适当的修正，从而得到合理的本段加工轨迹。

如图 3.25 所示，图（1）是普通 NC 系统的工作方法，程序轨迹作为输入数据送至工作寄存器 AS 后，由运算器进行刀具补偿运算，运算结果送至输出寄存器 OS，然后直接作为控制信号输送给伺服系统。图（2）是改进后 NC 系统的工作方法，它增加了一组数据输入的缓冲寄存器 BS。在 AS 中存放着正在加工的程序段信息时，BS 中已经存入了下一段要加工的程序段信息，这样可节省数据读入的时间。图（3）是在 CNC 系统中



(1) 一般 NC 方法 (2) 改进后 NC 方法
(3) 采取 C 刀具补偿的方法

图 3.25 几种数控系统的工作流程

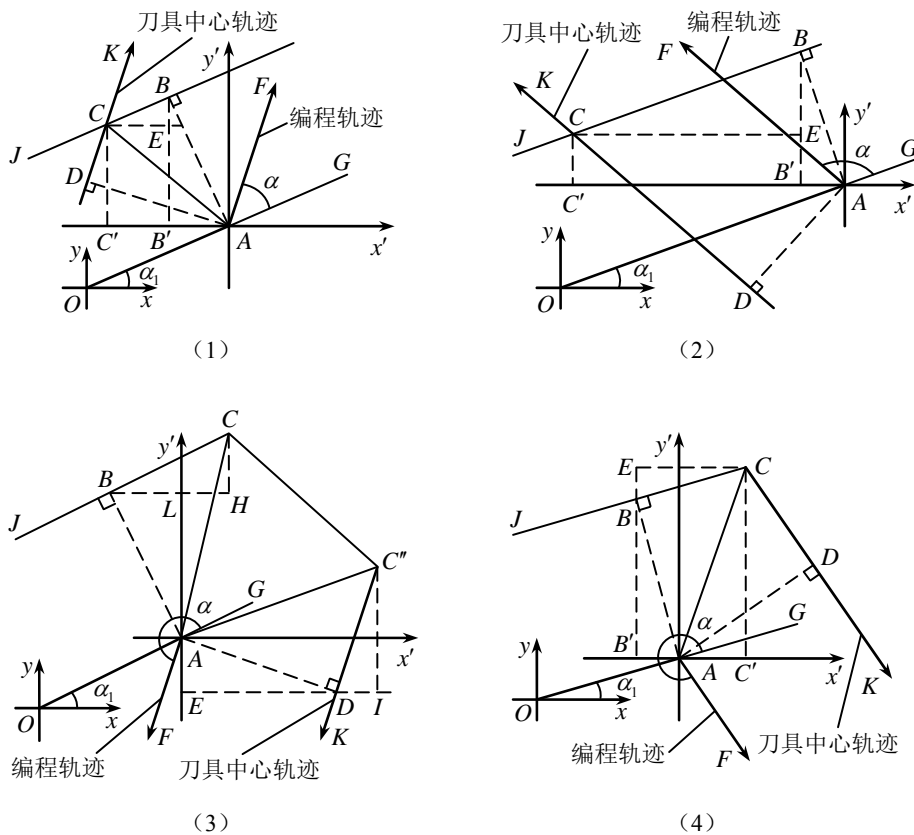
采用 C 刀具补偿方法的工作流程图。与 NC 系统工作方法不同，这种方法是在 CNC 装置内部又设置了一个刀具补偿缓冲器 CS。零件程序的输入参数在 BS、CS、AS 中的存放格式是完全一样的，所以当某一程序在 BS、CS 和 AS 中被传送时，它的具体参数是不变的。这样，在系统启动后，第一段程序先被读入 BS，在 BS 中算得的第一段刀具中心轨迹被送到 CS 中暂存后，又将第二段程序读入 BS，再同样算出第二段刀具中心轨迹。接着，对这两段程序轨迹的连接方式进行判别，根据判别结果再对 CS 中的第一段刀具中心轨迹作相应的修正。然后，顺序地将修正后的第一段刀具中心轨迹由 CS 送入 AS 中，第二段刀具中心轨迹由 BS 送入 CS 中。随后，由 CPU 将 AS 中的内容送到 OS 中进行插补运算，运算结果送到伺服系统中予以执行。当修正过的第一段刀具中心轨迹开始被执行后，利用插补间隙，CPU 又命令将第三段程序读入 BS 中，然后又根据 BS、CS 中的第三、第二段程序轨迹的连接方式，对 CS 中的第二段刀具中心轨迹进行相应的修正，……，以后的各段程序也都依此进行下去。根据 C 刀具补偿方法的过程可知，CNC 系统在刀具补偿工作状态时，其内部总是同时存有三个程序段的信息。

在具体实现时，为了便于进行交点计算以及对各种编程情况进行综合分析，必须将 C 刀具补偿方法中所有的编程输入轨迹都当作矢量来看待。显然，直线段本身就可作为一个矢量，而圆弧在这里意味着要将起点、终点处的半径及起点到终点的弦长都看作是矢量，刀具半径也要作为矢量来看待。所谓刀具半径矢量是指在加工过程中，始终垂直于编程轨迹，大小等于刀具半径值，方向指向刀具中心的一个矢量。在进行直线加工时，刀具半径矢量始终垂直于刀具移动方向；在进行圆弧加工时，刀具半径矢量始终垂直于编程圆弧瞬时位置点的切线，它的方向是一直在改变的。

(2) 刀具中心轨迹连接方式

在一般的 CNC 装置中，所能控制的零件轮廓轨迹通常只有直线和圆弧。由零件轮廓的不同可将两段程序轨迹的转接类型分为四种：直线与直线转接、直线与圆弧转接、圆弧与直线转接、

圆弧与圆弧交接。根据两段程序轨迹交接类型、矢量夹角 α （锐角和钝角）和刀具补偿方向的不同，可将刀具中心轨迹连接方式（转接过渡方式）分为：伸长型、缩短型和插入型。图 3.26 表示了直线与直线转接并进行左刀具补偿的情况下，刀具中心轨迹在连接处的过渡方式。其中，图（1）和图（2）为缩短型连接，图（3）为插入型连接，图（4）为伸长型连接。



(1)、(2) 缩短型转接 (3) 插入型转接 (4) 伸长型转接

图 3.26 直线与直线转接并进行左刀具补偿的情况

在确定刀具中心轨迹连接方式后，C 刀具补偿程序的主要任务是计算转接矢量，所谓转接矢量主要指刀具半径矢量（图 3.26 中的 AB 和 AD ）和两段程序轨迹交点与刀具中心轨迹交点的连接线（图 3.26 中的 AC 和 AC'' ）。转接矢量的计算可以采用平面几何法或解析法。平面几何法的计算软件简单，不需要进行复杂的判断，因此一般都采用这种方法；解析法的求解过程相对比较复杂，尤其是出现多解时，确定唯一解会很烦琐。

3、刀具的长度补偿

刀具长度补偿就是把编程轮廓轨迹按刀具长度沿各坐标轴方向的补偿分量进行平移。当每把刀具在机床上安装完成后，其长度及安装位置也就固定下来。因此，在加工前可预先分别测得装在刀架上的刀具长度沿各坐标轴方向的分量，即刀具长度偏移量，然后通过 MDI 将偏移量输入到 CNC 装置中，工作时系统从刀具补偿寄存器中调出刀具偏置值进行补偿计算。

数控车床需对 X 轴和 Z 轴进行刀具长度补偿计算，数控铣床只需对 Z 轴进行刀具长度补偿计算。同样地，刀具长度补偿实质上所表达的是刀具长度方向上的补偿，对于它的灵活运用也可以给零件的加工工艺带来很大的方便。

四、其它的预计算

插补前除进行译码、刀具补偿计算外，还有其它一些必要的预计算。如坐标系转换、不同编程方式的处理以及对一些辅助功能的处理等。

1、坐标系转换

数控机床的机床坐标系原点又称机床零点，它是固定不变的。在加工时将工件坐标系原点，即工件零点（或编程原点）与机床零点重合或使两点之间距离固定，则将给安装调整带来极大的

不便，对于有的机床甚至很难实现。因此，加工中必须能在坐标系全程范围内任意设置工件坐标系的原点，而不必考虑它与机床坐标系的关系，才可以使编程和操作更简便。如图 3.27 所示，把编程原点设在 O_p 点，就得到了工件坐标系 $x_p O_p z_p$ ，在该坐标系下编制程序就可以不考虑与机床坐标系 xOz 的关系了，从而使编程更加方便和简化。应该指出，在机床坐标系中，坐标值是刀具参考点相对于机床原点的位置；而在工件坐标系中，坐标值则是刀具参考点相对于工件原点的位置。

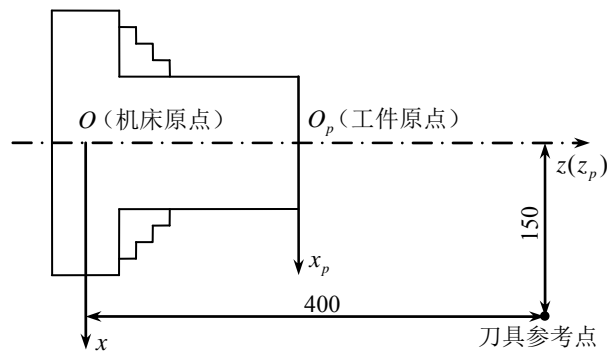


图 3.27 机床坐标系与工件坐标系

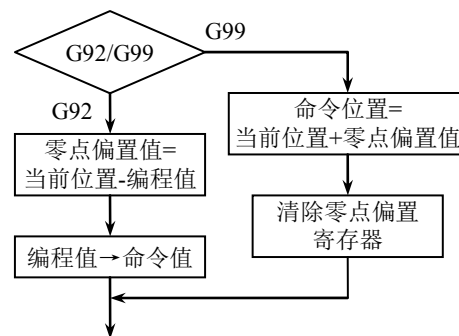
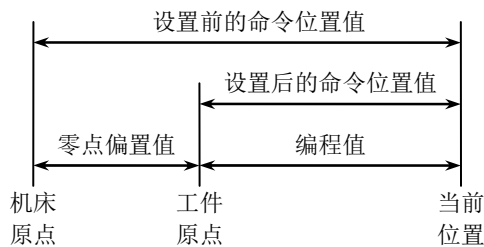


图 3.28 设置和撤消工件坐标系

设置工件坐标系可用准备功能 G92 来实现。当用 G92 指令进行编程时，CNC 装置便自动将该指令后面的编程坐标值置入命令位置寄存器中，这些坐标值就表示了当前刀具参考点在所要设置的工件坐标系中的位置，通过这种方式工件坐标系就被确定下来。事实上，在设置工件坐标系后，CRT 上显示的位置数据就将是工件坐标系下的坐标值，而在系统内部则仍在机床坐标系下进行位置计算。一般用 G99 指令即可撤消所设置的工件坐标系。值得注意的是，设置或撤消工件坐

标系的程序段均不会使机床产生运动，而只是由软件对坐标轴的当前位置和命令位置进行相互转换，其过程如图 3.28 所示。

2、编程方式处理

编程方式有绝对值方式和增量值方式两种，系统默认状态下按绝对值方式编程。绝对值编程方式是按相对于工件原点的坐标值进行编程，增量值编程方式则是用沿各坐标轴的位移量直接编程。在工作中，系统需要根据两种编程方式的程序段数据计算出当前程序的终点坐标及位移量，其过程如图 3.29 所示。

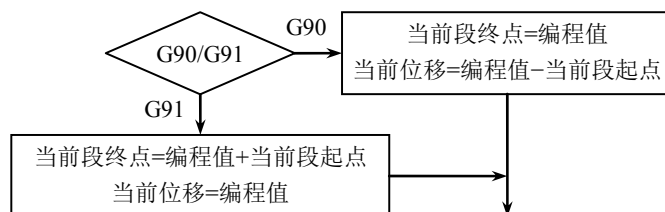


图 3.29 编程方式处理

3、辅助功能处理

除了上面的预计算外，数控系统还要进行一些辅助功能 F、M、S、T 的处理，它们虽然和加工轨迹无直接关系，但却是加工过程中不可缺少的信息。其中，关于进给速度 F 我们在上一章节中进行了介绍，而系统对于 M、S、T 仅进行传送处理。在早期的 CNC 系统中，M、S、T 信息由继电器逻辑电路进行处理，而在现代 CNC 系统中则由可编程控制器进行处理。

预计算是在插补的空闲时间内进行的，也就是说在当前程序段插补运行过程中，必须完成下一段程序的数据预计算工作，这样才能保证加工的连续性。数据预计算的精度也将直接影响后续的插补运算。所以，精度和实时性是设计数据处理软件时必须重视的问题。

五、插补计算

插补计算是 CNC 系统中最重要的工作之一。在传统的 NC 系统中，一般采用标准脉冲插补方法由硬件电路（插补器）来实现各种轨迹的插补。在目前的 CNC 系统中，各种插补计算都可以由软件来完成，但由于计算机运行插补程序需要花费一定的时间，为了能满足机床对进给速度和分辨率的要求，实际的 CNC 系统常采用数据采样插补方法，将插补功能分成软件插补和硬件插补两部分。其中，计算机控制软件把刀具轨迹分割成若干段，而硬件电路在每段的起点和终点之间再进行“数据密化”，最终保证插补误差不大于允许值。即软件实现粗插补，硬件实现细插补。

粗插补的任务是根据编程进给速度 F 和终点坐标值计算出一个插补周期后刀具沿各坐标轴方向的位移量 Δx 、 Δy 、 Δz ，这由插补计算软件和伺服控制软件来实现。设 x_r 、 y_r 、 z_r 为程序段中尚未插补输出的位移量（简称剩余量），若刀具轨迹的起点在原点，则它们的初值分别为终点坐标。每当数控系统进行一次插补计算后，都会向伺服系统输出一组位移量 Δx 、 Δy 、 Δz ，同时进行一次如下计算，以求得新的剩余量：

$$x_r - \Delta x \rightarrow x_r; \quad y_r - \Delta y \rightarrow y_r; \quad z_r - \Delta z \rightarrow z_r$$

当下面条件都成立时，

$$|x_r| \leq |\Delta x|; |y_r| \leq |\Delta y|; |z_r| \leq |\Delta z|$$

说明此时为本程序段最后一次插补计算,这时输出到伺服系统的位移量为剩余值 x_r 、 y_r 、 z_r , 而不再是 Δx 、 Δy 、 Δz 。

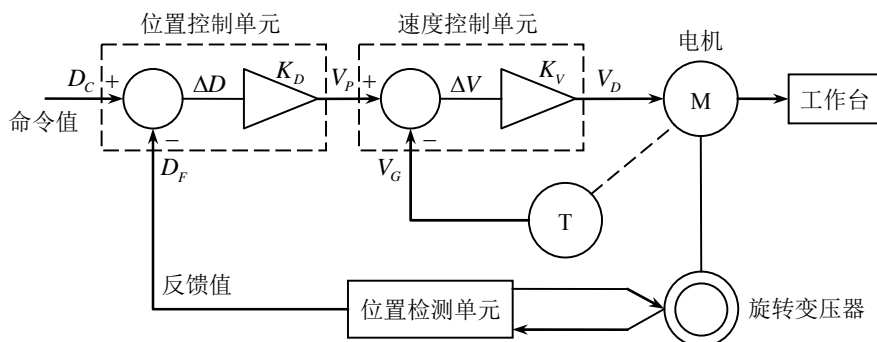


图 3.30 细插补硬件结构原理图

细插补是由硬件来实现的,图 3.30 为细插补硬件结构原理图。旋转变压器为位置测量装置,测速电机 T 为速度测量装置。伺服控制软件根据命令值 D_C 和反馈值 D_F 计算出它们之间的位移差值 ΔD , 然后乘以增益系数 K_D , 就得到了速度指令值并向硬件系统发出速度信息。硬件系统把速度信息由数字量转换成模拟量,产生一个速度命令电压 V_P 输出到速度控制单元,根据位移差值 ΔD 及伺服控制中断周期可以得到速度的大小。由于硬件伺服控制系统本身的平均作用,使坐标轴以这个速度指令均衡地移动,从而保证刀具轨迹在允许的误差范围内。

六、输出

输出程序的功能主要包括:进行伺服控制;当改变方向时,进行反向间隙补偿处理;进行丝杠螺距补偿,通过预先对机床各点误差进行测量,然后将各点的误差修正量存入数控系统中,这样在机床运行时就可对各点位置坐标自动进行补偿,从而提高了机床的定位精度;M、S、T 等辅助功能的输出。

七、管理与诊断软件

CNC 系统中的管理软件涉及 CPU 管理和外部设备管理。在实际系统中,通常多是采用一个主控程序将整个加工过程串起来,主控程序对输入的数据分析判断后,转入相应的子程序处理,处理完毕后再返回对数据的分析、判断、运算……。在主控程序空闲时,可以安排 CPU 执行预防性诊断程序,或对尚未执行程序段的输入数据进行预处理等。另外,由于系统中大部分实时性较强的控制任务(如插补运算、速度控制、故障处理等)都要由中断处理来完成,所以中断处理部分是 CNC 系统的重点,其工作量也比较大。

CNC 系统的另一个明显特点就是有了比较完善的诊断程序,这在一定程度上可以防止故障的发生或扩大,而且在故障出现后可以迅速查明故障的类型和部位,减少故障停机时间。诊断程序可以包括在系统运行过程中进行检查和诊断,也可以作为服务性程序,在系统运行前或故障停机后进行诊断。现在的 CNC 系统还可以进行通讯诊断,由通讯诊断中心指示系统或操作者进行某些试运行,以查找和诊断出机床故障。

§ 3-5 数控机床的可编程控制器 (PLC)

在数控机床中,除了对各坐标轴运动进行位置控制之外,还需要对诸如主轴正反转及停止、刀具交换、工件的夹紧及松开、切削液的开关等进行顺序控制。同时还包括主轴驱动和进给伺服驱动的控制以及机床报警处理等。在现代数控机床中,通常采用可编程控制器来完成以上这些功能。

可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller) 简称 PLC,它是一类以微处理器为基础的通用型自动控制装置。它一般以顺序控制为主,回路调节为辅,能够完成逻辑、顺序、计时、计数和算术运算等功能。它即能控制开关量,也能控制模拟量。

自从美国 DEC 公司于 1969 年研制出世界上第一台可编程逻辑控制器以来,它前后经历了形成期 (1970—1974)、成熟期 (1973—1978 年) 和发展期 (1977—1984) 三个阶段的发展。随着技术的不断进步,它在原 PLC 的基础上与先进的微机控制技术相结合已经发展成为一种崭新的工业控制器,其控制功能已远远超出逻辑控制的范畴,因而又被命名为可编程控制器 (PC, Programmable Controller)。但为了区别于个人计算机 (PC, Personal Computer), 习惯上仍简称其为 PLC。

国际电工委员会 (IEC) 于 1987 年将 PLC 定义为: 可编程控制器是一种专为在工业环境下应用而设计的数字运算电子系统。它采用可编程的存储器,用于存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等特定功能的用户指令,并通过数字式或模拟式的输入和输出,控制各种类型的机械或生产过程。可编程控制器及其有关设备,都应按易于与工业控制系统联成一个整体,易于扩充其功能的原则设计。

PLC 是专门为工业控制设计的控制器,实质上是专门服务于工业控制领域的计算机系统。它是一种通用的产品,并具有以下特点:

(1) 编程简单。PLC 的基本指令不多,其常用于编程的梯形图比较容易掌握。PLC 可与专用编程机、编程器、个人计算机等设备连接,可以很方便地实现程序的显示、编辑、诊断、存储和传送等操作。编制程序的步骤和方法简单易学,对程序进行增减、修改和运行监视都很方便。

(2) 通用性好。对于同样一台 PLC,通过改变软件就可以实现不同的控制要求。而且 PLC 已实现产品系列化,可以由各品种组合成不同的控制系统,以满足不同的控制要求。

(3) 功能强、体积小、质量轻、性能价格比高。PLC 的结构紧密、坚固、体积小,容易装入机械设备内部,因而成为“机电一体化”较为理想的控制设备。

(4) 可靠性高，抗干扰能力强。PLC 是专门为工业控制而设计的专用计算机，能在恶劣的环境中可靠工作，具有很强的抗干扰能力。

(5) 减少了控制系统设计及施工工作量。由于 PLC 采用软件编程来实现控制功能，这不同于继电器控制采用硬件线路来实现控制功能，因而减少了设计及施工工作量。同时，PLC 能事先进行模拟调试，更减少了现场工作量。

一、PLC 的基本结构

PLC 实质上是一种工业控制用的专用计算机，PLC 系统与微型计算机结构基本相同，也是由硬件系统和软件系统两大部分组成。

1、PLC 的硬件结构

通用型 PLC 的硬件基本结构如图 3.31 所示，它是一种通用的可编程控制器，主要由中央处理单元 CPU、存储器、输入 / 输出 (I / O) 模块及电源组成，其各部分之间均通过总线连接。

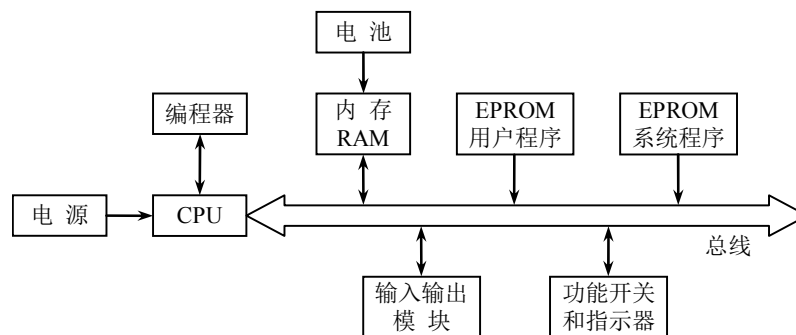


图 3.31 PLC 基本结构图

(1) 中央处理单元 CPU

PLC 的 CPU 与通用微型计算机的 CPU 一样，是 PLC 的运算、控制中心。它按 PLC 中系统程序赋予的功能，接收并存储从编程器键入的用户程序和数据；用扫描方式查询现场输入装置的各种信号状态或数据，并存入输入过程状态寄存器或数据寄存器中；诊断电源及 PLC 内部电路工作状态和编程过程中的语法错误等；在 PLC 进入运行状态后，从存储器逐条读取用户程序，经过命令解释后，按指令规定的任务产生相应的控制信号，去启闭有关的控制电路；分时、分渠道地去执行数据的存取、传送、组合、比较和变换等功能，完成用户程序中规定的逻辑运算或算术运算等任务；在控制单元内还可设有标志、计时、计数等组件地址，它们直接与运算器交换数据信息，根据运算结果更新有关标志位的状态和输出状态寄存器的内容，再由输出状态寄存器的位状态或数据寄存器的有关内容实现输出控制、制表打印、数据通信等功能，以上这些都是在 CPU 的控制下完成的。PLC 常用的 CPU 主要采用通用微处理器、单片机或双极型位片式微处理器。

(2) 存储器

PLC 的存储器也是用来存储数据或程序的。它包括随机存取存储器 RAM 和只读存储器 ROM。

PLC 配有系统程序存储器和用户程序存储器，分别用以存储系统程序和用户程序，存储器的容量以字节为单位。系统程序存储器用来存储监控程序、模块化应用功能子程序和各种系统参数等，一般使用 EPROM。用户程序存储器用来存放用户编制的梯形图等程序，一般使用 RAM，若

程序不经常修改，也可写入到 EPROM 中。系统程序存储器的内容不能由用户直接存取，因此一般在产品样本中所列的存储器型号和容量，均是指用户程序存储器。

(3) 输入 / 输出模块 (I / O 模块)

I / O 模块是 CPU 与现场 I / O 装置或其它外部设备之间的连接部件。PLC 提供了各种操作电平和驱动能力的 I / O 模块以及各种用途的 I / O 组成供用户选用，如输入 / 输出电平转换、电气隔离、串 / 并行转换、数据传送、误码校验、A / D / 或 D / A 变换以及其它功能模块等。I / O 模块将外部输入信号变换成 CPU 能接收的信号，或将 CPU 的输出信号变换成需要的控制信号去驱动控制对象，以确保整个系统正常工作。

I / O 模块要求具有抗噪声和抗干扰功能，并与外界绝缘，因此多数都采用光电隔离回路、消抖动回路、多级滤波器等措施。I / O 模块可以制成各种标准模块，根据输入、输出点数来增减、变换、互换和组合。I / O 模块还配有各种发光二极管以指示各种运行状态。

(4) 电源

电源的主要功能是将外部供电转换成 CPU 所需要的 5V 工作电压。由于 PLC 直接在工业现场应用，因此对电源的技术要求较高。为了防止交流电源的干扰，电源中一般采用多级滤波器，并使交流电源和内部直流电源之间绝缘，而且还要采用稳压电源以减小电网波动和温度变化的影响。另外，电源对于过载电压应具有一定的保护能力，以防止在电压突变时损坏 PLC。

(5) 编程器

编程器用于用户程序的编制、编辑、调试和监视等，还可以通过其键盘来调用和显示 PLC 的一些内部状态和参数。它通过通讯接口与 CPU 联系，完成人机对话连接。

编程器可分为简易型和智能型两类。简易型编程器只能在线编程，它通过一个专用接口与 PLC 连接，程序以软件模块的形式输入，各程序段先在编程器的 RAM 区存放，经过调试通过后，再将程序复制到 EPROM 中。智能型编程器既可在线编程又可离线编程，还可以不与 PLC 连接而直接插到现场控制站的相应接口上进行编程。智能型编程器有许多不同的应用程序软件包，功能齐全，适应的编程语言和方法也较多，并可直接用梯形图编程，还可与微型计算机接口或与打印机接口相连，实现程序的存储、打印、通信等功能。

2、PLC 的软件系统

PLC 的软件系统是指 PLC 所使用的各种程序的集合。它包括系统程序和用户程序。

(1) 系统程序

系统程序包括监控程序、编译程序及诊断程序等。监控程序又称为管理程序，主要用于管理全机；编译程序用来把程序语言翻译成机器语言；诊断程序用来诊断机器故障。系统程序由 PLC 生产厂家提供，并固化在 EPROM 中，用户不能直接存取，故也不需要用户干预。

(2) 用户程序

用户程序是用户根据现场控制的需要，用 PLC 的程序语言编制的应用程序，用以实现各种控制要求，用户程序由用户通过编程器键入到 PLC 内存。小型 PLC 的用户程序比较简单，不需要分段，是顺序编制的。大、中型 PLC 的用户程序很长，也比较复杂，为使用户程序的编制变得简单清晰，可按功能结构或使用目的将用户程序划分成各个程序模块。在按模块结构组成的用户程

序中，每个模块都用来实现一个确定的技术功能，这样能使很长的程序编制得易于理解，还使得程序的调试和修改变得很容易。

对于数控机床来说，PLC 中的用户程序由机床制造厂提供，并已固化到用户 EPROM 中，机床用户不需对其进行写入和修改。只是当机床发生故障时，用户可根据机床厂提供的梯形图和电气原理图来查找故障点，以便进行维修。

二、PLC 的指令和程序编制

PLC 的系统软件用来管理协调各部分的工作，循环检测输入口的状态，解算用户应用逻辑程序。应用软件是用户根据系统控制的需要而编写的应用程序，用以实现用户的控制要求。下面介绍 PLC 的指令和应用程序的编制。

1、指令系统

指令系统包括两种指令：基本指令和功能指令。在此以 FANUC PMC-L 型 PLC 为例分别进行介绍。

(1) 基本指令

基本指令共有 12 条，其内容如表 3.8 所示。基本指令的格式如下：

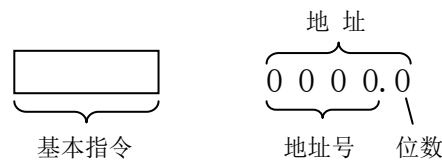


表 3.8 基本指令和处理内容

指 令	处 理 内 容
RD	读指令信号的状态，并写入 ST0 中，在一个梯级开始的节点是常开节点时使用。
RD. NOT	将信号的“非”状态读出，送入 ST0 中，在一个梯级开始的节点是常闭节点时使用。
WRT	输出运算结果（ST0 的状态）到指定地址。
WRT. NOT	输出运算结果（ST0 的状态）的“非”状态到指定地址。
AND	将 ST0 的状态与指定地址的信号状态相“与”后，再置于 ST0 中。
AND. NOT	将 ST0 的状态与指定地址的信号的“非”状态相“与”后，再置于 ST0 中。
OR	将指定地址的状态与 ST0 相“或”后，再置于 ST0 中。
OR. NOT	将指定地址的“非”状态与 ST0 相“或”后，再置于 ST0 中。
RD. STK	堆栈寄存器左移一位，并把指定地址的状态置于 ST0 中。
RD. NOT. STK	堆栈寄存器左移一位，并把指定地址的状态取“非”后再置于 ST0 中。
AND. STK	将 ST0 和 ST1 的内容执行逻辑“与”，结果存于 ST0 中，堆栈寄存器右移一位。
OR. STK	将 ST0 和 ST1 的内容执行逻辑“或”，结果存于 ST0 中，堆栈寄存器右移一位。

(2) 功能指令

由于数控机床执行的顺序逻辑往往较为复杂,仅用基本指令编程常常会十分困难或规模庞大,因此必须借助功能指令以简化程序。功能指令都是一些子程序,应用功能指令就是调用相应的子程序。FANUC PMC-L 共有 35 条功能指令,在此就不进行详细介绍了。

2、PLC 的编程语言


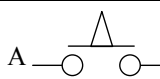

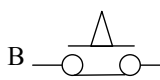
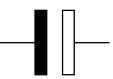
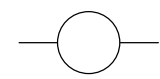
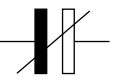
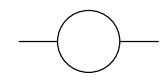
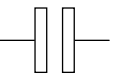
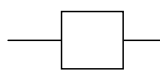
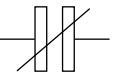
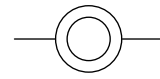
PLC 提供了比较完整的编程语言,以适应在工业环境中的使用。利用编程语言,用户可以按照不同的控制要求编制不同的控制程序,编程语言通常分为三种:梯形图、指令表语言及逻辑功能图。梯形图编程有时又称继电器梯形逻辑图编程,这种编程方法现在使用最为广泛。它在形式上类似于继电器控制电路图,具有简单、直观、易读、易懂的特点。FANUC PLC 梯形图编制的一般规则如下:

(1) 输入 / 输出信号及继电器等的名称和记号应易懂、确切,名称长度不超过 8 个字符。第 1 个字符用字母,其中的 P 代表正, N 代表负, B 代表非。

(2) 梯形图中的继电器,一般按其作用来给定符号,且字母要大写。

(3) 当出现 PLC 机床侧输入 / 输出信号名称与 CNC 设备连接手册中输入 / 输出信号名称相同的情况时,应在机床侧信号名称之后加“M”,以便与 CNC 信号相区别。为区分 CNC 侧与机床侧信号,在画梯形图时常采用表 3.9 中的图形符号。

表 3.9 梯形图中的符号

符 号	说 明	符 号	说 明
A 	PLC 中的继电器触点, A 为常开, B 为常闭	A 	PLC 中的定时器触点, A 为常开, B 为常闭
B 		B 	
A 	从 CNC 侧输入信号, A 为常开, B 为常闭		PLC 中的继电器线圈
B 			输出到 CNC 侧的继电器线圈
A 	从机床侧(包括机床操作面板)输入的信号, A 为常开, B 为常闭		输出到机床侧的继电器线圈
B 			PLC 中的定时器线圈

(4) 在梯形图中,通常都标出每个继电器在图形中的地址,用 S**表示。S 是标志,必须给出;第一个“*”是功能中的顺序号,间隔为 5 或 2,间隔 5 用于继电器电路,间隔 2 用于输入输出信号电路;第二个“*”是控制功能序号,以 A、B、C 表示,控制功能中包括方式控制、主轴控制、旋转控制等。

根据上面的编制规则,梯形图各部分功能可一目了然。如图 3.35 所示为数控机床主轴定向控制的梯形图。

随着数控技术的发展，PLC 所控制的设备已由单个机器扩展到 FMS、FA 等。PLC 处理的信息除直流开关量信号、模拟量信号、交流信号外，还需要完成与上位机或下位机的信息交换。某些信息的处理已不能再采用顺序执行的方式，而必须采用高速实时处理的方式。基于这些原因，近年来在计算机上所使用的高级语言（如 PASCAL 语言）便被逐步引用到 PLC 的应用程序中。

3、数控机床中的 PLC 编程步骤

(1) 确定控制对象

选定 PLC 的型号及其硬件配置。不同型号的 PLC 具有不同的硬件组成和性能指标，PLC 的性能指标主要考虑其基本 I / O 点数和存储量。

(2) 制作接口格式并定义输入 / 输出信号

需要设计和编制的接口技术文件包括：输入和输出信号电路原理图、地址表、PLC 数据表。

(3) 制作梯形图

在分析机床工作原理或动作顺序的基础上，用流程图、时序图等描述信号与机床运动之间的逻辑顺序关系，并据此设计制作梯形图。

(4) 输入、调试及确认

把梯形图转换成指令表的格式，然后通过编程器键盘写入顺序程序，再用仿真装置或模拟台进行调试和修改。

(5) 程序固化、存储及文件整理

将经过反复调试并确认无误的顺序程序固化到 EPROM 中，并将程序存入软盘或光盘。同时整理出有关图纸及维修所需资料。

三、PLC 的工作过程

在用户程序通过编程器顺序输入到用户存储器后，CPU 对用户程序进行循环扫描并顺序执行，这就是 PLC 的基本工作过程。

当 PLC 运行时，用户程序中有许多操作需要去执行，但 CPU 是不能同时去执行多个操作的，它只能按分时处理原则去执行每个操作。只是由于 CPU 运算处理速度很快，才使得外部宏观结果显现这些操作似乎是同时完成的。这种分时执行操作的过程被称为 CPU 对程序的扫描。

在 PLC 接通电源并开始运行后，它立即进行自诊断。当自诊断通过后，CPU 就对用户程序进行扫描。扫描从 0000H 地址所存的第一条用户程序开始，顺序地进行，直到存储器结尾或用户程序占有的最后一个地址为止，这样就形成一个扫描循环，此循环周而复始地执行。顺序扫描的工作方式简单直观，它简化了程序的设计，并为 PLC 的可靠运行提供了保证。如图 3.32 所示，对用户程序的循环扫描执行过程可分为输入采样、程序执行、输出刷新三个阶段。

1、输入采样阶段

在输入采样阶段，PLC 以扫描方式将所有输入端的输入信号状态（ON / OFF 状态）读入到输入映像寄存器中寄存起来，这称为对输入信号的采样。在接下来的程序执行阶段，即使输入状态发生变化，输入映像寄存器的内容也不会改变。输入状态的变化只能在下一个工作周期的输入采样阶段才被重新读入。

2、程序执行阶段

在程序执行阶段，PLC 对程序进行顺序扫描。如果程序用梯形图的形式表示，则总是按先上后下、先左后右的顺序扫描。扫描每一条指令时所需要的输入状态或其它元素的状态，分别从输入映像寄存器或输出映像寄存器中读入，然后进行相应的逻辑或算术运算，运算结果再存入专用寄存器。若执行程序输出指令时，则将相应的运算结果存入输出映像寄存器。

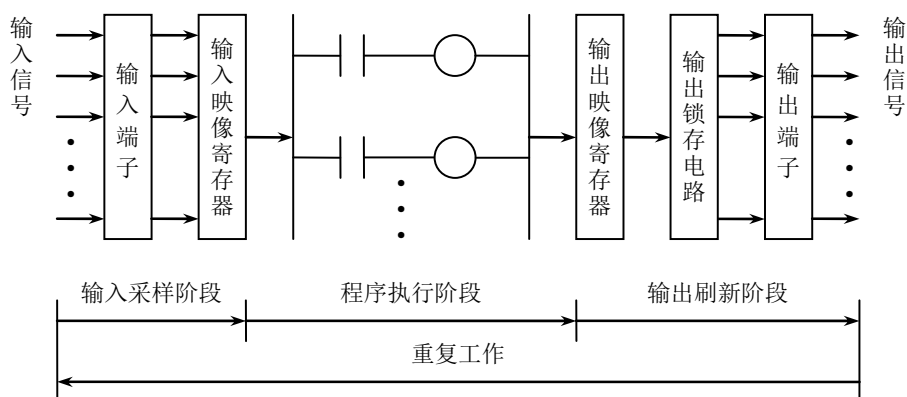


图 3.32 PLC 的工作过程

3、输出刷新阶段

在所有指令执行完毕后，输出映像寄存器中的状态就是欲输出的状态。在输出刷新阶段将其转存到输出锁存电路，再经输出端子输出信号去驱动用户设备，这就是 PLC 的实际输出。

PLC 重复地执行上述三个阶段，每重复一次就是一个工作周期（或称扫描周期）。工作周期的长短与程序的长短有关。

由于输入 / 输出模块滤波器的时间常数、输出继电器的机械滞后以及执行程序时按工作周期进行等原因，输入 / 输出响应会出现滞后现象。对于一般工业控制设备来说，这种滞后现象是允许的，但有一些设备的某些信号要求响应必须快速，所以有些 PLC 采用高速响应的输入 / 输出模块，也有的将顺序程序分为快速响应速度的高级程序和一般响应速度的低级程序两类，并优先保证高级程序中信号响应的快速性。

四、数控机床用 PLC 的分类

数控机床用 PLC 可分为两类。一类是专为实现数控机床顺序控制而设计制造的内装型 PLC。另一类是输入 / 输出信号接口技术规范、输入 / 输出点数、程序存储容量以及运算和控制功能等均能满足数控机床控制要求的独立型 PLC。

1、内装型 PLC

内装型 PLC 从属于 CNC 装置，PLC 与 NC 之间的信号传送在 CNC 装置内部实现。PLC 与数控机床之间的信号传送则通过 CNC 输入 / 输出接口电路实现。具有内装型 PLC 的 CNC 机床系统结构如图 3.33 所示。

内装型 PLC 具有以下特点：

(1) 内装型 PLC 实际上是 CNC 装置带有的 PLC 功能，一般是作为一种基本的或可选择的功能提供给用户。

(2) 内装型 PLC 的性能指标（如输入 / 输出点数、程序最大步数、每步执行时间、程序扫描时间、功能指令数目等）是根据所属的 CNC 系统的规格、性能、适用机床的类型等确定的，其硬件和软件是被作为 CNC 系统的一部分而与 CNC 系统统一设计制造的，所以 PLC 所具有的功能针对性强，技术指标较合理、实用，适用于单台数控机床及加工中心等场合。

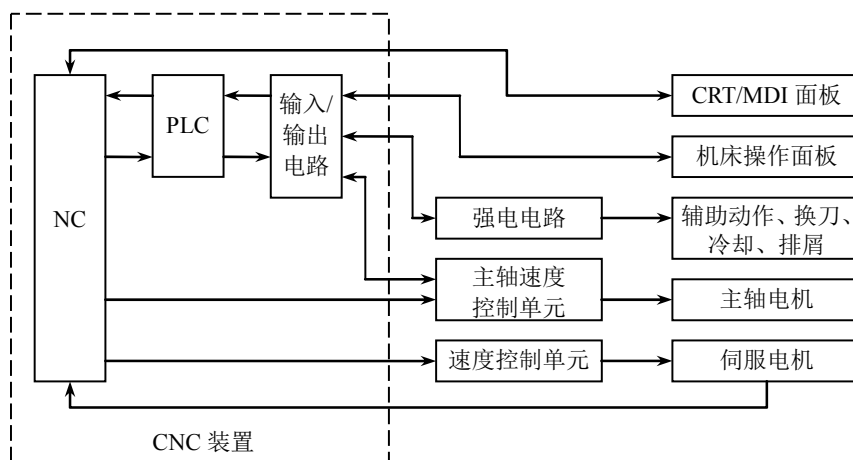


图 3.33 内装型 PLC 的 CNC 机床系统结构

(3) 在系统的具体结构上，内装型 PLC 可与 CNC 共用 CPU，也可单独使用一个 CPU；PLC 硬件电路可与 CNC 系统其它电路制作在同一块印刷电路板上，也可以单独制成一块附加板，当需要时将其插装到 CNC 主机中；内装型 PLC 一般不单独配备输入 / 输出接口电路，而是使用 CNC 系统本身的输入 / 输出电路；PLC 控制电路及部分输入 / 输出电路所用电源由 CNC 装置提供，不需另备电源。

(4) 采用内装型 PLC 结构，CNC 系统可以具有某些高级的控制功能，如梯形图编辑和传送功能等。

2、独立型 PLC

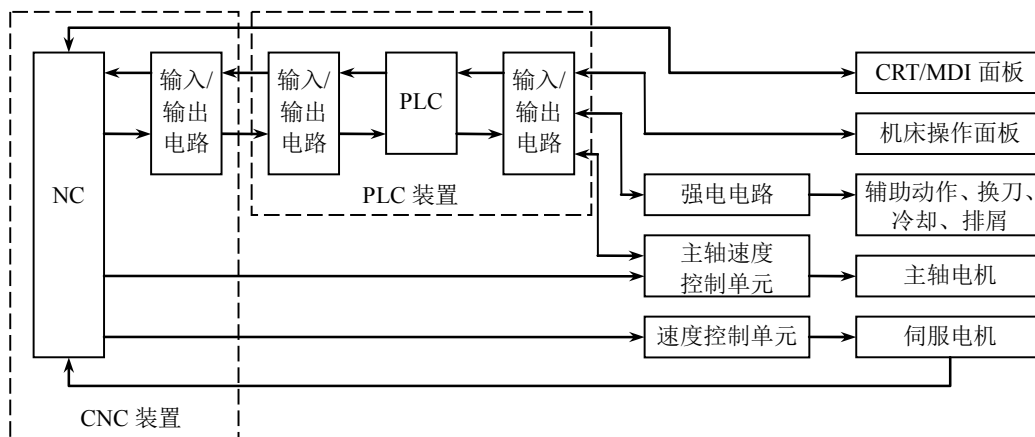


图 3.34 独立型 PLC 的 CNC 机床系统结构

独立型 PLC 独立于 CNC 装置，是具有完备的硬件和软件功能，能够独立完成规定控制任务的装置。具有独立型 PLC 的 CNC 机床系统结构如图 3.34 所示。

独立型 PLC 具有以下特点：

(1) 独立型 PLC 具有如下基本的功能结构：CPU 及其控制电路、系统程序存储器、用户程序存储器、输入 / 输出接口电路、与编程机等外部设备进行通信的接口和电源等。

(2) 独立型 PLC 一般采用积木式模块化结构或笼式插板式结构，具有安装方便、功能易于扩展和变更等优点。

(3) 独立型 PLC 的输入 / 输出点数可以通过输入 / 输出模块或插板的增减来灵活配置。有的独立型 PLC 还可以通过网络，实现大范围的集中控制。

五、数控机床中 PLC 实现的功能

在数控机床中，利用 PLC 的逻辑运算功能可以实现各种开关量的控制，对于专门用于数控机床的 PLC 又被称为 PMC，现代数控机床通常采用 PLC 完成如下功能：

(1) M、S、T 功能

M、S、T 功能可以在数控加工程序中指定，也可以在机床的操作面板上进行控制。

M 功能——PLC 根据不同的 M 功能，可控制主轴的正、反转和停转；主轴箱的换挡变速；主轴的准停；切削液的开、关；卡盘的夹紧、松开及换刀机械手的取、送刀等动作。

S 功能——主轴转速可以用 S 二位代码或四位代码直接指定。在 PLC 中可以很容易用四位代码直接指定转速。CNC 装置送出 S 四位代码至 PLC 中，PLC 将十进制数转换为二进制数并送入 D / A 转换器，在转换成相对应的输出电压后作为转速指令控制主轴的转速。

T 功能——数控机床可通过 PLC 管理刀库，进行刀具自动交换。处理的信息包括刀库选刀方式、刀具累计使用次数、刀具剩余寿命和刀具刃磨次数等。

(2) 机床外部开关量信号控制功能

机床的开关量包括各类控制开关、行程开关、接近开关、压力开关和温控开关等。工作时系统将各开关量信号送入 PLC，经逻辑运算后再输出给控制对象。

(3) 输出信号控制功能

PLC 输出的信号经强电柜中的继电器、接触器，通过机床侧的液压或气动电磁阀，对刀库、机械手和回转工作台等装置进行控制。另外，它还对冷却泵电动机、润滑油电动机及电磁制动器等装置进行控制。

(4) 伺服控制功能

PLC 通过机床驱动装置，驱动主轴电动机、伺服进给电动机和刀库电动机等。

(5) 报警处理功能

PLC 收集强电柜、机床侧和伺服驱动装置的故障信号，然后在报警标志区中置相应的报警标志位，数控系统便发出报警信号或显示报警文本以便于故障诊断。

(6) 其它输入装置互联控制

在用计算机软盘读入数控加工程序时，PLC 通过控制软盘驱动装置，实现与数控系统之间进行零件程序、机床参数和刀具补偿等数据的传输。

六、PLC 在数控机床上的应用举例

下面以数控机床主轴定向控制为例说明 PLC 在数控机床上的应用。

在数控机床进行加工时，自动换刀或精镗孔都要用到主轴定向功能。如图 3.35 所示为主轴定向功能的 PLC 控制梯形图。

在梯形图中，AUTO 为自动工作状态信号，手动时 AUTO 为“0”，自动时为“1”。M06 是换刀指令，M19 是主轴定向指令，这两个信号并联作为主轴定向控制的控制信号。RST 为 CNC 系统的复位信号。ORCM 为主轴定向继电器。ORAR 为从机床输入的定向到位信号。另外，这里还设置了定时器 TMR 来检测主轴定向是否在规定时间内完成。通过手动数据输入（MDI）面板在监视器上设定 4.5s 的延时数据，并存储在第 203 号数据存储单元内。当在 4.5s 内不能完成定向控制时，将发出报警信号。R₁ 为报警继电器。梯形图符号边的数据表示 PLC 内部存储器的单元地址，如 200.7 表示数据存储单元中第 200 号存储单元的第 7 位，这些地址可由 PLC 程序编制人员根据需要来指定。

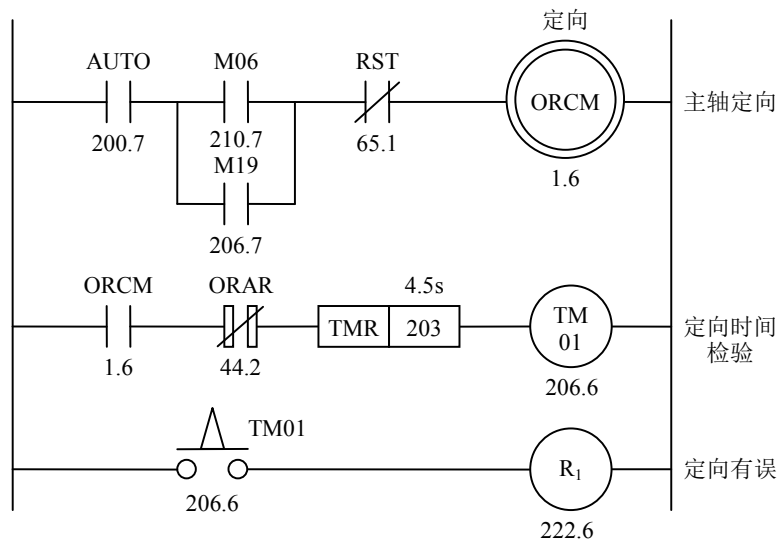


图 3.35 数控机床主轴定向控制梯形图

思考和作业题

1. CNC 系统主要由哪几部分组成？
2. 与传统 NC 装置相比，CNC 装置具有哪些优点？
3. CNC 装置的主要功能有哪些？
4. 单微处理器的 CNC 装置与多微处理器的 CNC 装置在结构上有何不同，它们在工作方式上各有何特点？
5. 多微处理器的 CNC 装置有什么优点？
6. 什么是开放式数控系统？
7. CNC 装置软件结构有哪些特点？
8. 时间重叠流水处理技术的含义是什么？它在数控加工控制中有什么好处？

-
9. CNC 装置的中断类型有哪些?
 10. 常规 CNC 系统软件有哪几种结构形式?
 11. 请简要说明在前后台型结构模式中, 后台程序的功能和工作过程。
 12. 简述 CNC 系统软件对零件程序输入的处理过程。
 13. 译码的含义是什么?
 14. 何谓刀具半径补偿? 其执行过程如何?
 15. B 刀具补偿与 C 刀具补偿有何不同?
 16. 在编程轮廓轨迹转接时, 有哪几种过渡类型? 它们各有何特点?
 17. 何谓刀具长度补偿? 数控车床和数控铣床的刀具长度补偿有何不同?
 18. CNC 系统常采用粗、细插补相结合的方法, 试说明这有什么优点?
 19. CNC 系统的诊断程序可分为哪几种类型? 各有何特点?
 20. 可编程控制器 (PLC) 的定义是什么? 它具有哪些特点?
 21. 可编程控制器 (PLC) 的硬件结构主要由哪几部分组成? 各部分的作用是什么?
 22. PLC 对用户程序的扫描过程可分为哪几个阶段? 并简述一下程序执行的过程。
 23. 数控机床上使用的 PLC 可以分为哪两类? 它们各有何特点?

第四章 检测装置

§ 4-1 概 述

数控系统的位置控制是将插补计算的指令位置与实际反馈位置相比较，用其差值去控制进给电机，而实际反馈位置的检测则是通过位置检测装置来实现的。常用的检测装置有旋转变压器、感应同步器、编码器、光栅、磁栅等。

位置检测装置是数控机床闭环和半闭环伺服系统的重要组成部分，其作用是检测位移（线位移或角位移）和速度，发送反馈信号至数控装置，构成伺服系统的闭环或半闭环控制，使工作台按指令的路径精确地移动。闭环或半闭环控制的数控机床加工精度主要由检测系统的精度决定。对于半闭环控制的数控机床，其位置检测装置一般采用旋转变压器或编码器，工作时将它们安装在进给电机或丝杠上，旋转变压器或编码器每旋转一定角度，都严格地对应着工作台移动的一定距离。所以通过检测装置测量了电机或丝杠的角位移，也就间接地测量了工作台的直线位移。对于闭环控制的数控机床，可采用感应同步器、光栅、磁栅等测量装置，工作时将它们安装在工作台和导轨上，直接测量工作台的直线位移。

一、对检测装置的要求

根据数控机床的使用环境及特点，检测装置一般都应满足以下要求：

1、工作可靠，抗干扰性强。由于机床上有电动机、电磁阀等各种电磁感应元件，并且实际使用中又有润滑油、切削液的存在，所以要求检测装置除了对电磁感应有较强的抗干扰能力外，还要不怕油、水的污染。另外，由于加工中会产生切削热，也要求检测元件受环境温度的影响较小。

2、满足精度和速度的要求。即在满足机床最大位移速度的条件下，达到一定的检测精度和较小的累积误差。目前，检测装置对直线位移的分辨率一般在 $0.0001\sim 0.01\text{mm}$ 之间，其测量精度可达 $\pm 0.001\sim 0.02\text{mm/m}$ 以内；对转角位移的分辨率在 $2''$ 时，其测量精度可达到 $\pm 10''/360^{\circ}$ 。若要提高检测装置的分辨率，除会增加装置的复杂性外，还受到检测位移速度的限制和升降速时对加速度的快速响应性的限制。

3、安装维护方便，适应机床的工作环境。由于机床在实际加工中有铁屑和切削液的存在，所以在机床拖板上安装直线位移检测元件时必须配有一定的防护罩。一般来说，光栅和磁尺安装较方便，而感应同步器安装就比较复杂。

4、对所检测位移信号处理方便。主要是指从检测元件中取出的与位移有关的电信号，能比较方便地通过有关电路进行放大、整形、细分、计数等信号处理。一般来说，数字式测量装置的信号处理较方便，而模拟式测量装置的信号处理就较复杂。

5、成本低。

二、检测装置的分类

数控机床检测装置的种类很多。若按被测量的对象分，有回转型（测量角位移）和直线型（测量线位移）；若按检测信号的类型分，有数字式和模拟式；若按检测量的基准分，有增量式和绝对式，如表 4.1 所示。对于不同类型的数控机床，因工作条件和检测要求不同，可采用不同的检测方式。

表 4.1 常用位置检测装置分类

	数字式		模拟式	
	增量式	绝对式	增量式	绝对式
回转型	增量式脉冲编码器、圆光栅	绝对式脉冲编码器	旋转变压器、圆感应同步器、圆磁尺	多极旋转变压器、三速圆感应同步器
直线型	激光干涉仪、计量光栅	多通道透射光栅、编码尺	直线感应同步器、磁尺	三速直线感应同步器、绝对式磁尺

1、按检测对象不同分类

(1) 直线位移测量

它是将检测装置安装在机床拖板上，直接测量机床坐标的直线位移量，因此也称直接测量，这种测量主要用于全闭环伺服系统的位置反馈。其缺点是测量装置要与工作台行程等长，所以在大型数控机床上使用时受到一定限制。

(2) 转动角度测量

它是将检测装置安装在驱动电动机轴上或滚珠丝杠上，通过检测转动件的角位移来间接测量机床坐标的直线位移量，因此也称为间接测量，这种测量主要用于半闭环伺服系统的位置反馈。其优点是测量方便可靠、无长度限制，但缺点是测量信号中增加了由回转运动转变为直线运动的传动链误差，从而影响其测量精度。

2、按检测信号的类型分类

(1) 数字式测量

数字式测量是以量化后的数字形式表示被测量，测量信号一般为脉冲形式，以计数后得到的脉冲个数表示位移量。测量信号可以被直接送到数控装置进行比较、处理。这种测量的主要特点是被测量量化后转换成脉冲个数，便于显示和处理；测量精度取决于测量单位，与量程基本无关；检测装置比较简单，脉冲信号抗干扰能力强。

(2) 模拟式测量

模拟式测量是将被测量转换为连续变化的模拟电量来表示，如电压的幅值变化、相位变化等。因此，它对信号处理的方法相对比较复杂，并且需增加滤波器等装置来提高抗干扰性。模拟式测量主要用于小量程测量。这种测量的主要特点是直接对被测量进行检测，无需量化；在小量程内可以实现高精度测量；可用于直接测量和间接测量。

3、按检测量的基准分类

(1) 增量式测量

增量式测量只测量相对位移量，其特点是测量装置较简单，对任何一个中间点都可作为测量的起点，而移动量是由测量信号计数累加所得，一旦计数有误，以后测量所得结果则完全错误。

因此，在增量式测量系统中选择基点就特别重要。此外，由于这种测量方式没有一个特定的零点标记，所以当机床由于某种事故停机后，必须将执行部件移至起始点重新计数才能找到停机前的正确位置。

(2) 绝对式测量

绝对式测量对于被测量的任意一点位置均是从一个固定的零点算起，每一个被测点都有一个对应的测量值。绝对式测量装置的结构较增量式的复杂，如编码器中码盘的每一个角度位置都对应于一组二进制位数，所以分辨精度要求越高、量程越大，则所要求的二进制位数也越多，结构也就越复杂。

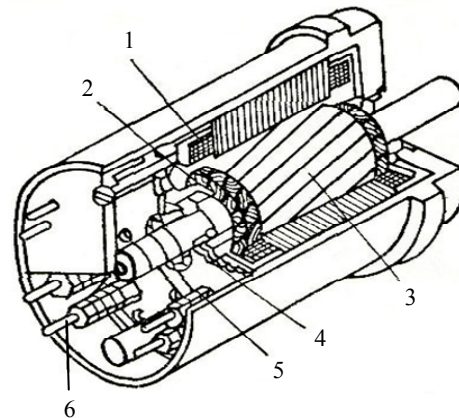
§ 4-2 旋转变压器

旋转变压器是一种数控机床上常见的角位移测量装置，它具有结构简单、动作灵敏、工作可靠、对环境条件要求低、输出信号幅度大和抗干扰能力强等优点，其缺点是信号处理比较复杂。旋转变压器被广泛应用于半闭环控制的数控机床上。

一、旋转变压器的结构

旋转变压器在结构上与两相绕线式异步电机相似，它由定子和转子组成，是一种旋转式的小型交流电机。旋转变压器分为有刷式和无刷式两种。有刷式旋转变压器定子与转子上两相绕组轴线分别相互垂直，转子绕组的引线（端点）经滑环引出，并通过电刷送出来，如图 4.1 所示。无刷式旋转变压器无电刷与滑环，由分解器和变压器组成。如图 4.2 所示，左边是分解器，右边是变压器。变压器的作用就是不通过电刷与滑环把信号传递出来，分解器结构与有刷式旋转变压器基本相同。变压器一次绕组（定子绕组）与分解器转子上的绕组相连，并绕在与分解器转子固定在一起的线轴上，与转子轴一起转动；变压器二次绕组绕在与线轴同心的定子线轴上。分解器定子线圈外接激磁电压，常用的激磁频率为 400Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz 及 5000Hz。如果激磁频率较高，则旋转变压器的尺寸可以显著减小，转子的转动惯量也就可以很小，这适用于加、减速比较大或高精度齿轮、齿条组合使用的场合。分解器转子线圈输出信号接到变压器的一次绕组，从变压器的二次绕组（转子绕组）引出最后的输出信号。无刷式旋转变压器具有输出信号大、可靠性高、寿命长及不用维修等优点，所以在数控机床上主要使用无刷式旋转变压器。

旋转变压器又分为单极对和多极对。通常应用的旋转变压器为单极对旋转变压器和双极对旋转变压器，单极对旋转变压器的定子和转子上都各有一对磁极。多极对旋转变压器就是增加定子

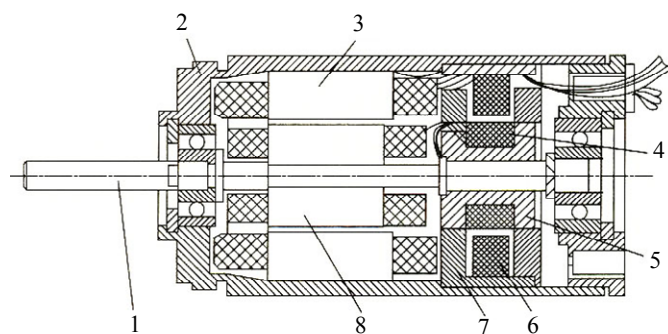


1-定子绕组 2-转子绕组 3-转子 4-整流子
5-电刷 6-接线柱

图 4.1 有刷式旋转变压器

或转子的磁极对数，使电气转角为机械转角的倍数，用于高精度绝对式检测系统。双极对旋转变压器的定子和转子上都各有两对相互垂直的磁极，其检测精度较高，在数控机床上应用普遍。

旋转变压器工作时，通过将其转子轴与电机轴或丝杠联接在一起来实现电机轴或丝杠转角的测量。对于单极对旋转变压器，其转子通常不直接与电机轴相联，而是经过精密齿轮升速后再与电机轴相联。此时，需要根据丝杠的导程选用齿轮的升速比，以保证机床的脉冲当量与输入设定的单位相同，升速比通常为 1:2、1:3、1:4、2:3、1:5、2:5 等。多极对旋转变压器不用升速，可与电机直接相联，因此精度更高。另外，还可以把一个磁极对数少的和一个磁极对数多的两种旋转变压器做一个机壳内，构成“粗测”和“精测”电气变速双通道检测装置，用于高精度检测系



1-转子轴 2-壳体 3-分解器定子 4-变压器一次线圈 5-变压器转子线圈
6-变压器二次线圈 7-变压器定子 8-分解器转子

图 4.2 无刷式旋转变压器

统和同步系统。

二、旋转变压器的工作原理

旋转变压器是根据互感原理进行工作的，它在结构上保证了其定子和转子之间空气间隙内磁通分布符合正弦规律。因此，当激磁电压加到定子绕组时，通过电磁耦合，转子绕组便产生感应电势。如图 4.3 所示，为两极旋转变压器工作原理图，其中 Z 为阻抗。设加在定子绕组 S_1S_2 中的激磁电压为随时间 t 以角速度 ω 变化的交变电压 $V_s = V_m \cdot \sin \omega t$ ，则转子绕组 B_1B_2 中的感应电势为：

$$V_B = KV_s \sin \theta = KV_m \sin \theta \sin \omega t$$

其中， K 为旋转变压器的变比； V_m 为定子绕组中交变电压的幅值； θ 为转子的转角，当转子和定子的磁轴垂直时， $\theta = 0$ 。如果转子安装在机床的丝杠上，定子安装在机床底座上，则 θ 角代表的是丝杠转过的角度，即工作台移动的距离。

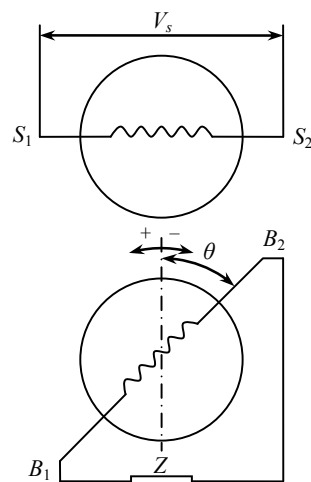


图 4.3 两极旋转变压器原理图

由上式可知，转子绕组中的感应电势 V_B 为随时间 t 以角速度 ω 变化的交变电压信号。其幅值

$KV_m \sin \theta$ 随转子和定子的相对位置 θ 以正弦函数规律变化。因此，只要测量出转子绕组中感应电势的幅值，便可间接地得到转子相对定子的位置，即 θ 角的大小。

以上是两极绕组式旋转变压器的基本工作原理。在实际应用中，考虑到使用的方便性和检测精度等因素，常采用四极绕组式旋转变压器，这种结构形式的旋转变压器可分为鉴相式和鉴幅式两种工作方式。

1、鉴相式工作方式

鉴相式工作方式是根据旋转变压器转子绕组中感应电势的相位来确定被测位移大小的检测方式。如图 4.4 所示，定子绕组和转子绕组均是由两个匝数相等且互相垂直的绕组组成。其中， S_1S_2 为定子主绕组， K_1K_2 为定子辅助绕组。当在 S_1S_2 和

K_1K_2 中分别通以交变激磁电压：

$$V_s = V_m \cos \omega t$$

$$V_K = V_m \sin \omega t$$

则根据线性迭加原理，便可在转子绕组 B_1B_2 中得到感应

电势 V_B ，其值为激磁电压 V_s 和 V_K 在 B_1B_2 中的感应电势 V_{BS}

和 V_{BK} 之和，即：

$$\begin{aligned} V_B &= V_{BS} + V_{BK} = -KV_s \sin \theta + KV_K \cos \theta \\ &= -KV_m \cos \omega t \sin \theta + KV_m \sin \omega t \cos \theta \\ &= KV_m \sin(\omega t - \theta) \end{aligned}$$

由上式可见，旋转变压器转子绕组中的感应电势 V_B 与定子绕组中的激磁电压同频率，但相位不同，其差值为 θ 。因 θ 角代表的是被测位移的大小，故通过比较感应电势与定子激磁电压信号的相位，便可求出旋转变压器转子相对于定子的转角 θ ，即被测位移的大小。

2、鉴幅式工作方式

鉴幅式工作方式是根据旋转变压器转子绕组中感应电势的幅值来确定被测位移大小的检测方式。参看图 4.4，在定子主绕组 S_1S_2 和辅助绕组 K_1K_2 中分别输入随时间 t 以角速度 ω 变化的交

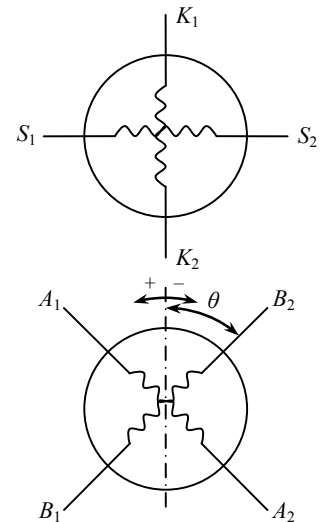


图 4.4 四极旋转变压器原理图

变激磁电压:

$$\begin{aligned}V_S &= V_m \cos \alpha \sin \omega t \\V_K &= V_m \sin \alpha \sin \omega t\end{aligned}$$

其中, $V_m \cos \alpha$ 和 $V_m \sin \alpha$ 分别为激磁电压 V_S 和 V_K 的幅值, α 角可由伺服系统产生, 通常称 α 角为旋转变压器的电气角。

根据迭加原理, 我们可以得出转子绕组 $B_1 B_2$ 中的感应电势 V_B 为

$$\begin{aligned}V_B &= V_{BS} + V_{BK} \\&= -KV_m \cos \alpha \sin \omega t \sin \theta + KV_m \sin \alpha \sin \omega t \cos \theta \\&= KV_m (-\cos \alpha \sin \theta + \sin \alpha \cos \theta) \sin \omega t \\&= KV_m \sin(\alpha - \theta) \sin \omega t\end{aligned}$$

由上式可以看出, 感应电势 V_B 是以 ω 为角频率的交变信号, 其幅值为 $KV_m \sin(\alpha - \theta)$ 。若电气角 α 已知, 那么只要测量出 V_B 的幅值, 便可间接地求出 θ 值, 即被测位移的大小。特别当感应电势为零时, $\alpha = \theta$, 此时旋转变压器电气角的大小就是被测角位移的大小。因此我们只要逐渐地改变 α 值, 使 V_B 的幅值等于零, 便可根据 α 值的大小得出被测位移 θ 值。实际上, 在鉴幅式伺服系统中, 旋转变压器作为测量元件就是这样工作的。

三、旋转变压器的应用

根据旋转变压器的工作原理可知, 在鉴相式工作方式中, 当把激磁信号 $V_S = V_m \cos \omega t$ 和 $V_K = V_m \sin \omega t$ 施加于定子绕组时, 旋转变压器转子绕组便可输出感应信号 V_B 。若转子已转过一个角度 θ , 那么感应信号 V_B 和激磁信号 V_K 之间一定存在有相位差, 这个相位差可通过鉴相器线路检测出来并表示成相应的电压信号。这样, 通过对该电压信号的测量, 便可得到转子转过的角度 θ 值。但由于 $V_B = KV_m \sin(\omega t - \theta)$ 是关于变量 θ 的周期函数, 故转子每转一周, V_B 值将周期性地变化一次。因此, 实际应用时不但要测出 V_B 的大小, 而且要测出 V_B 周期性变化的次数, 或者将被测角位移 θ 限制在 180° 以内。

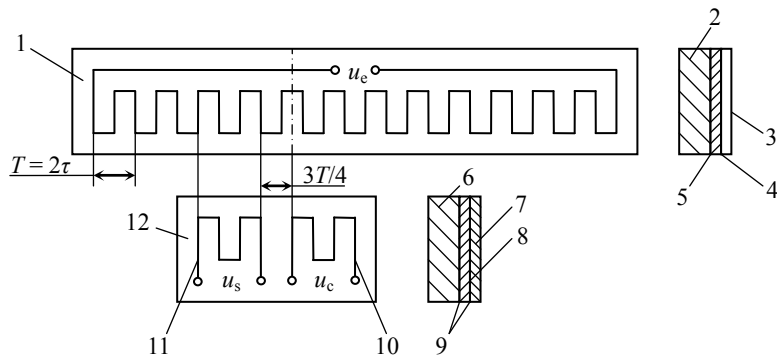
在鉴幅式工作方式中, 当把激磁信号 $V_S = V_m \cos \alpha \sin \omega t$ 和 $V_K = V_m \sin \alpha \sin \omega t$ 加到旋转

变压器的定子绕组时，从转子绕组可测出感应电势 V_B 值。根据旋转变压器的工作原理， V_B 的幅值可表示为 $V_{mB} = KV_m \sin(\alpha - \theta)$ 。在实际应用中，常以测出的 V_{mB} 值为反馈控制信号，对 α 进行调节使之趋于 θ 。当 α 变化之后，激磁信号 V_S 和 V_K 随之变化，从而造成感应信号的幅值 V_{mB} 逐步趋于零。若 V_{mB} 不为零，那么它将再次作为反馈信号对 α 进行调节，通过改变 V_S 和 V_K 值使 V_{mB} 趋于零。若 $V_{mB} = 0$ ，则此时 α 的变化量就是被测角位移 θ 的变化量。 α 的变化情况可通过具体的电子线路测量出来并表达为数字脉冲的变化，只要测出该数字脉冲的变化量，便可得到转子转过的角度 θ 值。但是，由于 V_{mB} 是关于变量 θ 的周期函数，当 θ 大于 180° 时，将会造成 α 对 θ 的跟随错误，例如，当 $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ 时， α 可能反向跟随 θ 角；当 $\theta > 360^\circ$ 时， α 可能出现跟随失步。另外 θ 值较大时， α 跟随 θ 的线性度不好，跟随误差大，由此组成的机床伺服系统的性能将受到影响。因此，用于机床伺服系统的鉴幅式旋转变压器的 θ 值常选得很小，一般不超过 3° 。

事实上，尽管每次被测对象转过的角度 θ_i 很小，但转过 N 次之后，其总的角位移量 θ 可以很大，即：

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \cdots + \theta_N = \sum_{i=1}^N \theta_i$$

§ 4-3 感应同步器



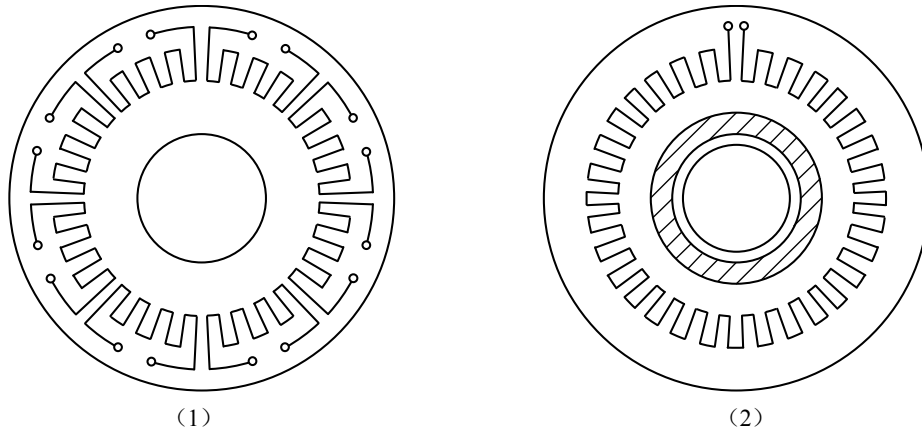
1-定尺 2, 6-基板 3-耐切削液涂层 4, 8-铜箔 5, 9-绝缘粘结胶
7-铝箔 10-余弦励磁绕组 11-正弦励磁绕组 12-滑尺

图 4.5 直线式感应同步器的结构

感应同步器类似于旋转变压器，它相当于一个展开的多极旋转变压器。感应同步器的种类繁多，根据用途和结构特点的不同可分成直线式和旋转式两大类。直线式感应同步器由定尺和滑尺组成，用以测量直线位移，用于全闭环伺服系统。旋转式感应同步器由定子和转子组成，用以测量转角位移，用于半闭环伺服系统。旋转式感应同步器在结构上可分为圆形及扇形两种，其工作原理与直线式的相同，所不同的是定子（相当于定尺）、转子（相当于滑尺）及绕组的形状。

一、感应同步器的结构与安装

如图 4.5 所示为直线式感应同步器，它由定尺和滑尺组成；如图 4.6 所示为旋转式感应同步器，它由定子和转子组成。两者的结构和工作原理类同。



(1) 定子 (2) 转子

图 4.6 旋转式感应同步器的结构

在直线式感应同步器中，定尺和滑尺的总厚度各为 9.5mm，定尺长 250mm，滑尺长 100mm。为减小因温度变化造成的热变形误差，定尺和滑尺的基板采用与机床材料热膨胀系数相似的钢板和铸铁板，通常用 40 号钢（低碳钢），其磁导率高、矫顽力小、便于加工且不易变形。在基板上采用热压的办法用热固化绝缘粘结胶贴上一层 0.1mm 厚的玻璃丝布，在该绝缘层上用同样的绝缘

胶贴上一层 0.05mm 厚的铜箔，并采用感光印刷腐蚀或直接在铜箔上机械刻制的方法刻出绕组。有时在滑尺表面还需粘贴一层厚度为 0.02mm 的金属屏蔽铝箔膜，并将它接地以限制容性电流通过输出绕组，降低它对零位误差奇偶波动影响，即起静电屏蔽作用。

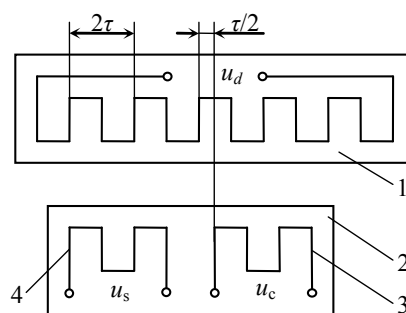
直线式感应同步器的定尺绕组或旋转式感应同步器的转子绕组都是连续绕组，而滑尺绕组或定子绕组都有两个独立的正弦绕组和余弦绕组。直线式感应同步器两个单元绕组之间的距离称为节距 T ，相邻两线之间的距离称为极距 τ （见图 4.5）。标准直线式感应同步器的节距 $T = 2\text{mm}$ ，极距 $\tau = 1\text{mm}$ 。滑尺上正弦绕组和余弦绕组相距 $3T/4$ ，即两个绕组的位置相互错开 $T/4$ 。

直线式感应同步器的定尺安装在机床的固定部件上，滑尺安装在机床的移动部件上。为防止切屑和油污浸入，一般在感应同步器上安装防护罩。感应同步器在安装时必须保证定尺和滑尺相平行，两平面间的间隙约为 $0.25 \pm 0.05\text{mm}$ ，其它具体的安装要求则依据具体的产品说明而定。只有将感应同步器正确安装在机床上，才能保证定尺和滑尺在全部工作长度上正常耦合，从而减小测量误差。

直线感应同步器的标准定尺长度一般为 250mm，当需要增加测量范围时，可将定尺接长。拼接定尺时要根据具体的使用情况，按照一定的步骤和要求进行。全部定尺接好后，采用激光干涉仪或量块加千分表进行全长误差测量，对超差处进行重新调整，使得总长度上的累积误差不大于单块定尺的最大偏差。

二、感应同步器工作原理

如图 4.7 所示，直线式感应同步器的定尺是单向均匀感应绕组，绕组节距为 2τ ，每个节距相当于绕组空间分布的一个周期 2π 。滑尺上有两组激励绕组，一组为正弦激励绕组，另一组为余弦激励绕组。两绕组的节距与定尺相同，并相互错开 $1/4$ 节距排列，即当正弦激励绕组的每一只线圈和定尺对准，余弦激励绕组的每一只线圈和定尺相差 $\tau/2$ 的距离。若 2τ 相当于 2π 电角



1-定尺 2-滑尺 3-余弦绕组 4-正弦绕组

图 4.7 直线式感应同步器绕组原理图

度，则 $\tau/2$ 的距离相当于 $\pi/2$ 的电角度。

滑尺与定尺互相平行并保持一定的间距，当向滑尺上的绕组通以交流激励电压时，则在滑尺绕组中产生激励电流，绕组周围就会产生按正弦规律变化的磁场，根据电磁感应原理便会在定尺上出现感应电压。当滑尺与定尺间产生相对位移时，由于电磁耦合的变化，会使定尺上的感应电压随位移的变化而变化。如图 4.8 所示，当定尺与滑尺的绕组重合时，即图中 A 点所示，这时定尺上的感应电压最大；当滑尺相对于定尺作平行移动时，感应电压就慢慢地减小，到两者刚好错开 $1/4$ 节距（即

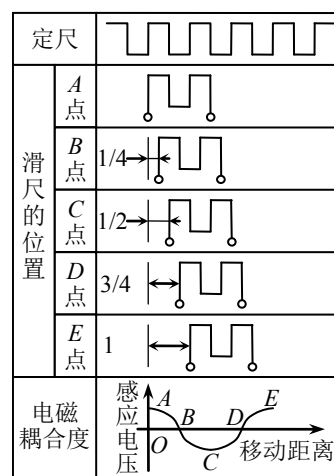


图 4.8 定尺绕组感应电压原理图

$\tau/2$) 时, 即图中 B 点所示, 感应电压为零; 再继续移动到 $1/2$ 节距位置时, 即图中 C 点所示, 得到的感应电压值与 A 点相同但极性相反; 再移动到 $3/4$ 节距时, 即图中 D 点所示, 感应电压又变为零; 当移动到一个节距时, 即图中 E 点所示, 感应电压的情况与 A 点位置时相同。这样, 在滑尺移动一个节距的过程中, 定尺上的感应电压变化了一个余弦波形。感应同步器就是利用感应电压的这种变化来进行位置检测的。

与旋转变压器类似, 根据不同的激磁供电方式, 感应同步器也有两种不同的工作方式, 即鉴相式工作方式和鉴幅式工作方式。其工作原理与四极式旋转变压器完全相同, 在此不再赘述。

三、感应同步器的特点

(1) 精度高

直线式感应同步器直接对机床位移进行测量, 不经过任何机械传动装置, 测量精度主要取决于尺子的精度。因为定尺的节距误差有平均自补偿作用 (在 250mm 的长度上制作印刷绕组, 有的节距小了, 一定有的节距大了, 总的平均误差几乎为零), 所以定尺上感应电压信号有多周期的平均效应, 降低了绕组局部尺寸制造误差的影响, 从而达到较高的测量精度。

(2) 测量长度不受限制

感应同步器可以采用多块定尺接长来增大测量尺寸, 行程为几米到几十米的中型或大型机床工作台位移的直线测量, 大多数采用直线式感应同步器来实现。

(3) 工作可靠、抗干扰性强

因为直线式感应同步器金属基板和床身铸铁的热胀系数相近, 所以当温度变化时, 两者的变化规律相同, 故能获得较高的重复精度; 旋转式感应同步器的基板受热后各方向的热胀量对称于圆心, 故也不影响测量精度。另外, 感应同步器是非接触式的空间耦合器件, 所以对尺面防护要求低, 而且可选择耐温性能良好的非导磁性涂料作保护层, 可加强感应同步器的抗温防湿能力。

(4) 维护简单、寿命长

感应同步器的定尺和滑尺互不接触, 因此无任何摩擦、磨损, 使用寿命很长。使用时加防护罩, 可防止切屑进入定、滑尺之间滑伤导片, 并能防止灰尘、油污和冲击振动。同时由于感应同步器是电磁耦合器件, 所以不需要光源、光电元件, 不存在元件老化及光学系统故障等问题。

(5) 工艺性好、成本较低, 便于复制和成批生产。

(6) 输出信号比较微弱, 需要放大倍数较高的前置放大器。

§ 4-4 光 栅

光栅按用途分有两大类, 一类是物理光栅, 另一类是计量光栅。物理光栅的刻线细密, 线纹密度一般为 $200\sim 500$ 条/mm, 线纹相互平行且距离相等, 称此距离为栅距。由物理光栅的线纹密度可知其栅距一般为 $0.002\sim 0.005\text{mm}$, 它主要是利用光的衍射原理进行工作, 常用于光谱分析和光波波长的测定。计量光栅的刻线稍粗, 线纹密度一般为 25 条/mm、 50 条/mm、 100 条/mm、 250 条/mm 等, 即栅距为 $0.004\sim 0.25\text{mm}$, 它主要是利用光的透射和反射现象进行工作, 可用于数控机

床检测系统。因此，我们这里所讨论的光栅是指计量光栅。

计量光栅一般用于高精度数控机床的位置检测装置，是闭环控制系统中用得较多的测量元件，它可以用作直线和转角的测量，测量精度可达几微米。另外，计量光栅的读数速率可达数十万次之高，非常适用于动态测量。

一、光栅的种类

计量光栅按形状可以分为长光栅（又称直线光栅）和圆光栅。长光栅用于测量直线位移，圆光栅用于测量转角位移。按制作原理又可以分为玻璃透射光栅和金属反射光栅。

1、长光栅

(1) 玻璃透射光栅

在玻璃的表面上制成透明与不透明间隔相等的线纹，称作透射光栅。其制造工艺为在玻璃表面感光材料的涂层上或金属镀膜上刻成光栅线纹，也可采用刻蜡、腐蚀、涂黑等工艺。

玻璃透射光栅的特点是：

- 1) 光源可以垂直入射，光电元件直接接受光信号，因此信号幅度大，读数头结构比较简单。
- 2) 刻线密度较大，其栅距一般为 0.01 mm，再经过电路细分，可达到微米级的分辨率。

(2) 金属反射光栅

在钢尺或不锈钢带的镜面上用照相腐蚀工艺制作光栅，或用钻石刀直接刻划制作光栅线纹，称作反射光栅。常用的反射光栅刻线密度为：4、10、25、40、50 条/mm。

金属反射光栅的特点是：

- 1) 标尺光栅的线膨胀系数很容易与机床材料一致；
- 2) 标尺光栅的安装和调整比较方便；
- 3) 易于接长或制成整根的钢带长光栅；
- 4) 不易破碎；
- 5) 分辨率比透射光栅低。

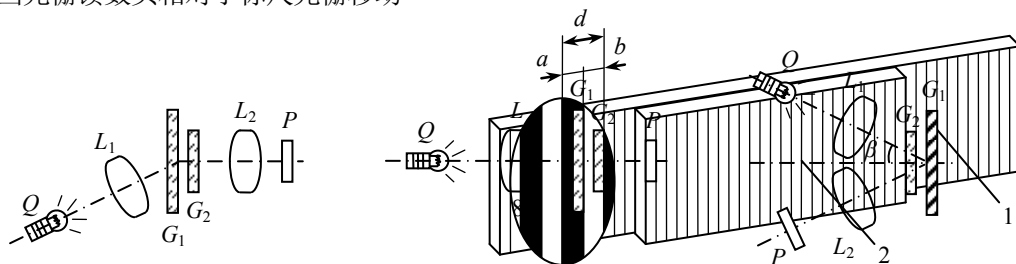
2、圆光栅

圆光栅是在玻璃圆盘的外环端面上，做出黑白间隔的条纹，条纹呈辐射状且相互间夹角相等。根据不同的使用要求，其圆周内的线纹数也不相同。一般有三种形式：

- (1) 60 进制，如圆周内的线纹数为 10800、21600、32400、64800 等；
- (2) 10 进制，如圆周内的线纹数为 1000、2500、5000 等；
- (3) 2 进制，如圆周内的线纹数为 512、1024、2048 等。

二、光栅的结构

光栅主要由标尺光栅和光栅读数头两部分组成。标尺光栅一般安装在机床活动部件上（如工作台上或丝杠上），光栅读数头安装在机床固定部件上（如机床底座上），指示光栅装在光栅读数头中。当光栅读数头相对于标尺光栅移动



(1) 分光读数头

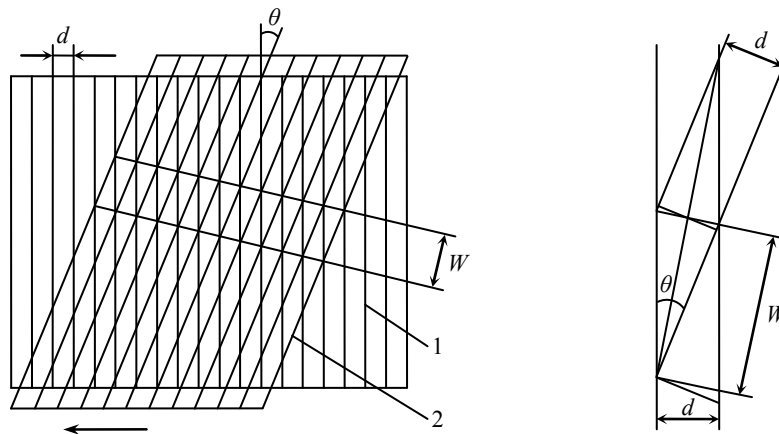
(2) 垂直入射读数头 1-标尺光栅 2-指示光栅读数头

图 4.10 光栅读数头光路图 图 4.9 光栅尺的结构图

时，指示光栅便在标尺光栅上相对移动。标尺光栅和指示光栅构成了光栅尺。如图 4.9 所示为光栅尺的结构简图，标尺光栅和指示光栅上均匀刻有很多条纹，黑的部分为不透光宽度 a ，白的部分为透光宽度 b ，设栅距为 d ，则有 $d = a + b$ 。通常情况下，光栅尺刻线的不透光宽度和透光宽度是一样的，即 $a = b$ 。在安装光栅尺时，标尺光栅和指示光栅的平行度以及两者之间的间隙要严格保证。

光栅读数头又称光电转换器，它由光源、透镜、指示光栅、光敏元件和驱动线路组成。光栅读数头的结构形式很多，按光路不同可分为分光读数头、垂直入射读数头、反射读数头等，其光路分别如图 4.10 所示，图中 Q 表示光源，L 表示透镜，G 表示光栅，P 表示光电元件。

上述光栅只能用于增量式测量方式，有的光栅读数头设有一个绝对零点，当由于停电或其它原因出错时，可以重新对零。它是在两光栅尺上分别有一小段光栅，当这两小段光栅重合时便发出零位信号，并在数字显示器中进行显示。



1-标尺光栅 2-指示光栅

图 4.11 光栅工作原理图

三、光栅的工作原理

常见光栅的工作原理都是根据物理上莫尔条纹的形成原理进行工作的，如图 4.11 所示为光栅工作原理图。当指示光栅上的线纹与标尺光栅上的线纹成角度 θ 放置时，必然会造成两光栅尺上的线纹相互交叉。在光源的照射下，交叉点附近的小区域内黑线重叠，透明区域变大。因而遮光面积最小，挡光效应最弱，透光的累积使这个区域出现亮带。相反地，离交叉点越远的区域，两光栅不透明黑线的重叠部分越少，黑线所占的空间增多。因而遮光面积增大，挡光效应增强，只有较少的光线透过光栅而使这个区域出现暗带。这些与光栅线纹近似于垂直的相间出现的亮、暗带就是莫尔条纹。莫尔条纹具有如下特性：

(1) 光强分布近似余弦函数

当用平行光束照射光栅时，透过莫尔条纹的光强度分布近似于余弦函数，即莫尔条纹由亮带到暗带，再由暗带到亮带所透过的光强变化可近似用余弦函数表示。

(2) 放大作用

若用 W 表示莫尔条纹的宽度, d 表示光栅刻线的栅距, θ 表示两光栅尺线纹的夹角, 则它们之间的几何关系为:

$$W = \frac{d}{2 \sin(\theta/2)}$$

当 θ 角很小时, 取 $\sin(\theta/2) \approx \theta/2$, 上式可近似写成:

$$W = \frac{d}{\theta}$$

若取 $d = 0.01\text{mm}$, $\theta = 0.01$ 弧度, 则由上式可得到 $W = 1\text{mm}$ 。这说明无须复杂的光学系统和电子系统, 利用光的干涉现象就能把光栅的栅距转换成放大 100 倍的莫尔条纹宽度, 这种放大作用是光栅的一个重要特点。

(3) 误差均化作用

由于莫尔条纹是由若干条光栅线纹干涉形成的, 如指示光栅宽为 10 毫米, 光栅线纹密度为 100 条 / 毫米, 则莫尔条纹将由 1000 条光栅线纹组成。故莫尔条纹对光栅各线纹之间的栅距误差具有平均效应, 能消除光栅栅距不均匀造成的影响。但光栅线纹的累积误差将造成莫尔条纹宽度误差, 因此光栅线纹的累积误差常被作为衡量光栅精度的重要指标。

(4) 莫尔条纹的移动与两光栅尺之间的相对移动相对应

当两光栅尺相对移动一个栅距 d 时, 莫尔条纹便相应地移动一个条纹宽度 W , 其方向与光栅尺相对移动的方向垂直。而且, 若两光栅尺相对移动的方向改变, 莫尔条纹移动的方向也随之改变。

根据上述莫尔条纹的特性, 假如我们在莫尔条纹移动的方向上取四个位置 A 、 B 、 C 、 D , 且使这四个位置两两相距 $1/4$ 莫尔条纹宽度, 即 $W/4$ 。我们就可以根据从这四个位置上所观察到的光强度变化情况得出两光栅尺相对移动的情况。

首先, 因两光栅尺相对移动一个栅距的距离, 莫尔条纹便移动一个条纹宽度的距离, 即在任何一个观察位置处的光强度都要变化一个周期。故可以得出, 各个观察位置的光强度每变化一个周期就表明两光栅尺相对移动了一个栅距。

第二, 当用光照射光栅尺时, 因为莫尔条纹的光强度分布近似于余弦函数, 所以若两光栅尺有相对移动, 我们就可以在观察位置上观察到近似于余弦函数的光强度变化过程。而且两光栅尺相对移动一个栅距, 各个观察位置的光强度刚好按余弦函数变化一个周期。因此, 当两光栅尺相对移动的距离小于一个栅距时, 则根据光栅尺移动前后观察位置的光强度变化情况就可以推导出两光栅尺相对移动的距离。

第三, 在每个观察位置上都可以得到一个光强度变化过程, 从这四个两两相差 $1/4$ 莫尔条纹宽度的观察位置处, 我们可以得到四个在相位上依次超前或滞后 $1/4$ 周期 (即 $\pi/2$) 的近似于余弦函数的光强度变化过程。例如, 当莫尔条纹沿一个方向以速度 v 移动时, 得到的四个光强度

变化过程为：

$$A: \cos\left(\frac{2\pi}{W}vt\right); \quad B: \cos\left(\frac{2\pi}{W}vt + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$C: \cos\left(\frac{2\pi}{W}vt + \pi\right); \quad D: \cos\left(\frac{2\pi}{W}vt + \frac{3}{2}\pi\right)$$

则可以看出， A 滞后 B 为 $\pi/2$ ， B 滞后 C 为 $\pi/2$ ， C 滞后 D 为 $\pi/2$ 。那么，当莫尔条纹反向移动时，从四个位置得到的光强度变化过程就变为依次超前 $\pi/2$ ，即 A 超前 B 为 $\pi/2$ ， B 超前 C 为 $\pi/2$ ， C 超前 D 为 $\pi/2$ 。由于莫尔条纹移动方向的改变是两光栅尺相对移动方向改变的结果，因此根据从四个观察位置得到的光强度变化过程的相互超前或滞后关系便可确定光栅尺的相对移动方向。

第四，因为两光栅尺的相对位移与莫尔条纹的位移成比例，即两光栅尺的相对位移与各个观察位置的光强度变化成比例，所以两光栅尺的相对移动速度决定着莫尔条纹的移动速度，即决定着各个观察位置的光强度变化频率。故根据各个观察位置的光强度变化频率就可以推断出两光栅尺的相对移动速度。

由以上分析可知，各个观察位置的光强度变化完全代表了兩光栅尺相对移动的情况，而且莫尔条纹的移动是对两光栅尺相对移动的放大，放大倍数可达千倍。

在实际应用中，各个观察位置的光强度变化过程并不是靠人的眼睛去观察的，而是用光敏元件检测的。光敏元件把四个观察位置处近似于余弦函数的光强度变化全部转换成近似于余弦函数的电压信号变化。因此，根据光敏元件产生的四路两两相差 $\pi/2$ 的交变电压信号的相位关系、变化过程及频率就可以确定出两光栅尺的相对移动情况。利用光敏元件的光电转换功能，将各个观察位置的光信号转换成电信号，给信号处理和应用带来了极大的方便。

四、信息处理及应用

当两光栅尺有相对移动时，光栅读数头中的光敏元件根据莫尔条纹光强度的变化，将两光栅尺（即工作台）的机械位移转换成四路微弱的两两相差 $\pi/2$ 的交变电压信号。其中，交变电压信号的变化频率代表工作台的移动速度；交变电压信号每变化一个周期，表示工作台移动了一个光栅栅距的距离；四路信号的超前或滞后关系反映了工作台的移动方向。但在实际应用中，常常需要将工作台的位移量转换成易于辨识和应用的数字脉冲量，因此光栅读数头输出的四路相差 $\pi/2$ 的交变电压信号还必须转换成代表工作台位移的数字脉冲量。

如图 4.12 所示是将光栅读数头输出的微弱信号转换成数字脉冲量的信息处理框图。光栅信息处理

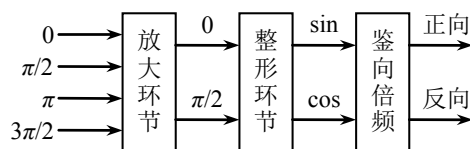


图 4.12 光栅信息处理框图

线路共由三部分组成，即放大环节、整形环节和鉴向倍频线路。下面分别对这三部分的功能及线路组成作简要介绍。

1、放大环节

不同种类的光栅读数头，其输出信号的强弱程度相差很大，而且信号的失真度也不一样，因此对于不同的光栅读数头，放大环节的线路结构、放大器型号和放大倍数都不同。一般为了抑制干扰信号的影响，矫正因光栅尺和读数头的机械误差而造成光栅读数头输出信号的相位误差，常采用差动放大器对读数头输出的信号进行功率和电压放大。图 4.13 为一种放大环节的线路图，初相位角为 0 和 π 的两路交变信号与初相位角为 $\pi/2$ 和 $3\pi/2$ 的两路交变信号经差动放大后变成了初相位角为 0 和 $\pi/2$ 并与放大前四路信号同频率的交变信号。差动放大器的放大倍数可以改变，一般将输出电压的幅值调为 5 伏左右，平均值调为 +2.5 伏。

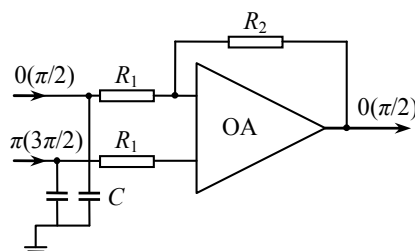


图 4.13 放大环节线路图

设放大环节输出的两路电压信号为 V_A 和 V_B ，那么 V_A 和 V_B 的频率表示了工作台移动的速度；

V_A 或 V_B 每变化一个周期表示工作台移动了一个光栅栅距的距离； V_A 与 V_B 的相位关系表示了工作台的移动方向，如 V_A 超前 V_B 则表示工作台正向移动，而 V_B 超前 V_A 则表示工作台反向移动。

2、整形环节

整形环节的作用是将放大环节输出的两路交变电压信号转换成同频率的两路方波信号 A 和 B ，方波信号的高电平为 +5 伏，低电平为 0 伏。实际上只要用两个电压比较器就可以实现这一功能。因为交变电压信号的平均值为 +2.5 伏，故可取比较电压为 2.5 伏。比较器的功能是当被比较电压 V_A 或 V_B 低于 +2.5 伏时，电压比较器输出低电平，即 0 伏；当被比较电压 V_A 或 V_B 高于 +2.5 伏时，电压比较器输出高电平，即 5 伏。整形环节的线路图及输入输出信号对应关系如图 4.14 所示。比较器可选用 LM311，采用单电源 +5 伏。

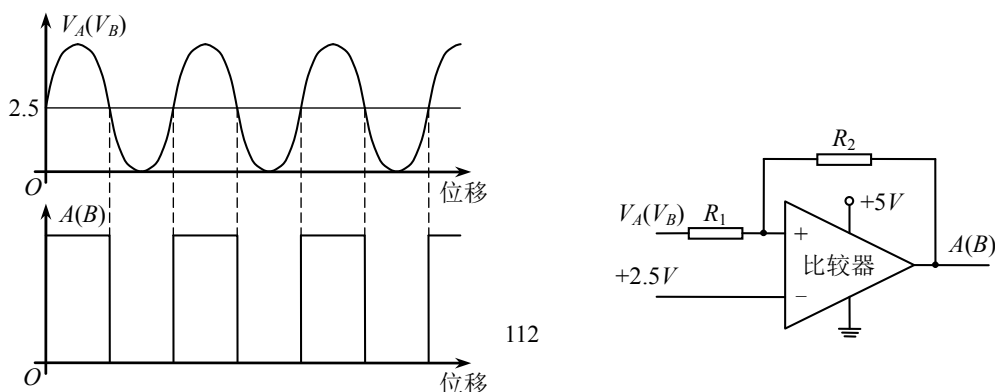


图 4.14 整形环节线路图及输入输出信号关系

与 V_A 和 V_B 相对应, 整形环节输出的两路方波信号 A 与 B 的超前或滞后关系代表着工作台的移动方向。

3、鉴向倍频线路

鉴向倍频线路有两个功能, 一个是根据整形环节输出的两路方波信号的相位关系确定出工作台的移动方向; 另一个是将方波信号变成四倍于基频率的数字脉冲信号, 也就是在方波信号的一个周期内产生四个脉冲信号。由于方波信号每变化一个周期表示工作台移动了一个栅距, 所以鉴向倍频线路每发一个脉冲, 表示工作台移动了 $1/4$ 栅距, 这样就提高了光栅测量装置的分辨率。如图 4.15 所示为鉴向倍频线路的框图, 它由四倍频线路和鉴向线路组成。四倍频线路的逻辑图如图 4.16

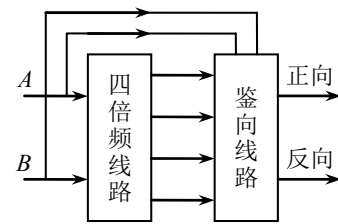


图 4.15 鉴向倍频线路框图

所示, 波形图如图 4.17 所示。在四倍频线路中, 时钟脉冲信号的频率要远远高于方波信号 A 和 B 的频率。时钟脉冲信号的频率越高, 四倍频后产生的误差就越小。这种倍频线路工作可靠, 而且产生的脉冲信号与时钟脉冲同步, 便于应用。图 4.18 是鉴向线路图, 它实际上是由一个双“四选一”线路组成。双“四选一”线路有集成块(如 74LS153), 其真值表见表 4.2。如果用 $1y$ 表示正向脉冲输出端, $2y$ 表示反向脉冲输出端, 根据双“四选一”线路的真值表, 可将 $1y$ 和 $2y$ 写成表达式:

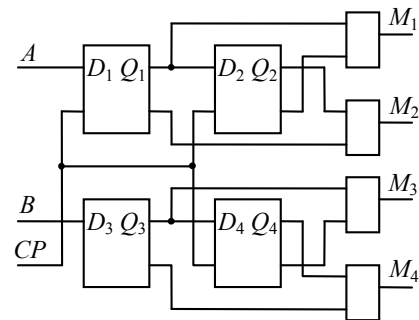


图 4.16 四倍频线路逻辑图

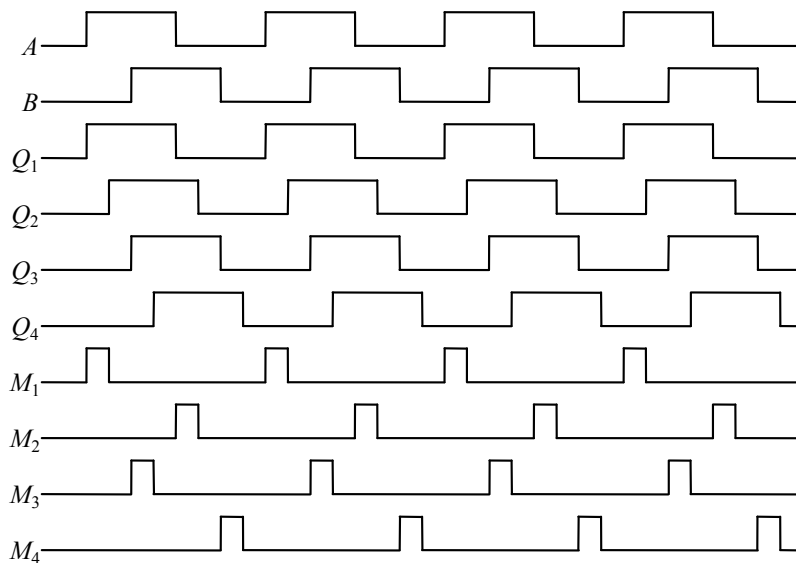


图 4.17 四倍频线路波形图

$$1y = \overline{ENA} \cdot \overline{ENB} \cdot 1C_0 + \overline{ENB} \cdot ENA \cdot 1C_1 + ENB \cdot \overline{ENA} \cdot 1C_2 + ENA \cdot ENB \cdot 1C_3$$

$$= \overline{B} \cdot \overline{A} \cdot M_4 + \overline{B} \cdot A \cdot M_1 + B \cdot \overline{A} \cdot M_2 + B \cdot A \cdot M_3$$

$$2y = \overline{ENA} \cdot \overline{ENB} \cdot 2C_0 + \overline{ENB} \cdot ENA \cdot 2C_1 + ENB \cdot \overline{ENA} \cdot 2C_2 + ENA \cdot ENB \cdot 2C_3$$

$$= \overline{B} \cdot \overline{A} \cdot M_2 + \overline{B} \cdot A \cdot M_4 + B \cdot \overline{A} \cdot M_3 + B \cdot A \cdot M_1$$

表 4.2 双“四选一”数据选择器真值表

数 据 选 择		输 出
ENB	ENA	y
0	0	y = C ₀
0	1	y = C ₁
1	0	y = C ₂
1	1	y = C ₃

如图 4.19 所示,由上式可画出方波信号 *A* 超前 *B* (即工作台正向移动) 和方波信号 *A* 滞后 *B* (即工作台反向移动) 时鉴向线路的波形图。从图中可以看出,当工作台正向移动时,表示工作台正向移动的 1*y* 端输出了一系列代表移动距离的数字脉冲,而表示工作台反向移动的 2*y* 端输出为低电平;反过来,当工作台反向移动时,1*y* 端输出为低电平,而 2*y* 端输出了一系列代表移动距离的数字脉冲。因此,只要 1*y* 端有脉冲,就表示工作台正向移动,若 2*y* 端有脉冲,就表示工作台反向移动。

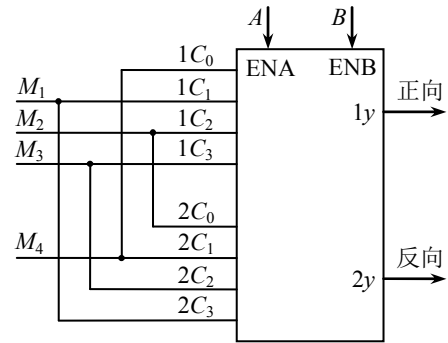
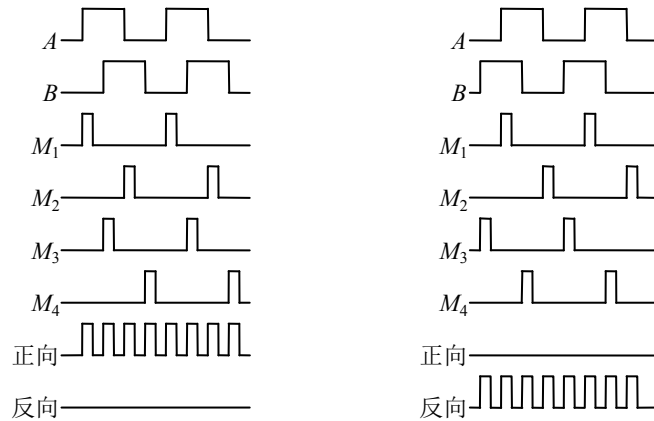


图 4.18 鉴向线路图

在实际应用中,鉴向倍频线路的输出直接连接到一个二进制可逆计数器上,并且正向脉冲信号使计数器做加法计数,反向脉冲信号使计数器做减法计数。当计数器的内容为 0 时,表示工作台正处于机床的坐标原点。



(1) 工作台正向移动

(2) 工作台反向移动

图 4.19 鉴向线路波形图

§ 4-5 磁 栅

磁栅是利用电磁方法计算磁波数目的一种位置检测元件，可用于直线和转角位移的测量。磁栅与感应同步器、光栅相比，测量精度略低，但它具有独特的优点：

(1) 制作简单，安装、调整方便，成本低。磁栅上的磁化信号录制完后，若发现不符合要求，可抹去重录。而且，还可以先将磁栅安装在机床上再录磁，避免了安装误差。

(2) 磁栅的长度可以任意选择，亦可录制任意节距的磁信号。

(3) 对使用环境要求低。在油污、粉尘较多的环境中使用时，具有较好的稳定性。

鉴于上面的特点，磁栅比较广泛地应用在数控机床、精密机床和各种测量机上。

一、磁栅的工作原理

磁栅的工作原理与普通磁带录磁和拾磁的原理是相同的。在录磁时，用录磁磁头将节距相等（常为 $20\mu\text{m}$ 或 $50\mu\text{m}$ ）且呈周期变化的磁信号记录到磁性标尺上，用它作为测量位移量的基准尺。在检测时，用拾磁磁头读取记录在磁性标尺上的磁信号，通过检测电路将位移量用数字显示出来或送至位置控制系统。如图 4.20 所示为磁栅位置检测原理图。

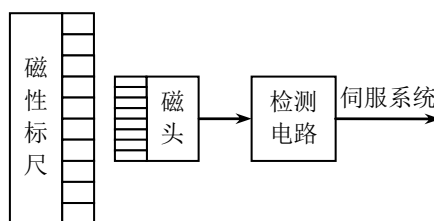


图 4.20 磁栅位置检测原理图

但是，测量用磁栅的工作原理与普通磁带录音的原理也存在一定的区别：

(1) 磁性标尺的等节距录磁精度要求很高。因为磁性标尺的等节距录磁精度直接影响位移测量精度，因此需要在高精度录磁设备上进行磁尺录磁。

(2) 磁头采用磁通响应型磁头（静态磁头）。拾磁磁头可分为动态磁头和静态磁头。动态磁头又称为速度响应型磁头，它只有一组输出绕组，所以只有当磁头和磁尺有一定相对速度时才能读取磁化信号，并有电压信号输出。这种磁头用于录音机、磁带机的拾磁磁头，不能用来测量位移。由于用于检测用的磁栅要求当磁尺与磁头相对运动速度很低或处于静止时亦能测量位移或位置，所以需要采用静态磁头。静态磁头又称磁通响应型磁头，它是在普通动态磁头上增加了带励磁线圈的可饱和铁芯，从而利用了可饱和铁芯的磁性调制原理。静态磁头又可分为单磁头、双磁头和多磁头。

二、磁栅的结构组成

磁栅检测装置由磁性标尺、磁头和检测电路三部分组成。

1、磁性标尺

磁性标尺（简称磁尺）是在非导磁材料（如铜、不锈钢、玻璃或其它合金材料）的基体上，用涂敷、化学沉积或电镀的方法形成一层 $10 \sim 20\mu\text{m}$ 厚的硬磁性材料（如 Ni-Co-P 或 Fe-Co 合金），并在它的表面上录制节距相等且周期变化的磁信号。磁信号的节距一般为 0.05mm 、 0.1mm 、 0.2mm 、 1mm 。为了防止磁头对磁性膜的磨损，通常在磁性膜上涂一层 $1 \sim 2\mu\text{m}$ 厚的耐磨塑料作

为保护层。

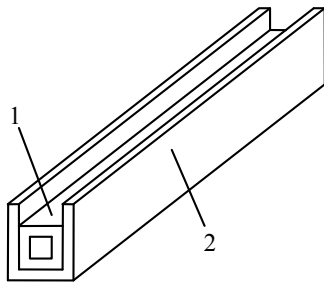
磁尺按基体形状的不同可分为以下几种：

(1) 平面实体型磁尺

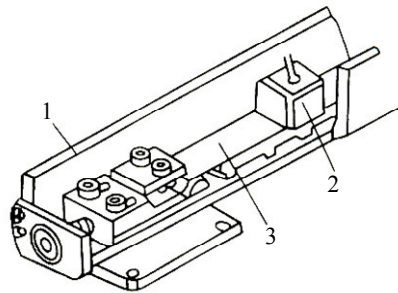
如图 4.21 所示，磁头和磁尺之间留有间隙，磁头固定在带有板弹簧的磁头架上。磁尺的形状和加工精度要求较高，刚性要好，因而成本较高。磁尺长度一般小于 600mm，如果要在较长的距离内进行测量时，必须将几根磁尺接长使用。

(2) 带状磁尺

带状磁尺是在磷青铜带上镀一层 Ni-Co-P 合金磁膜，带宽为 70mm，厚为 0.2mm，最大长度可达 15m。如图 4.22 所示，磁带固定在用低碳钢做的屏蔽壳体内，并以一定的预紧力绷紧在框架或支架中，这样可使带状磁尺随同框架或机床一起胀缩，从而减少温度对测量精度的影响。工作时磁头与磁尺接触，因而存在磨损现象。由于磁带是弹性件，允许有一定的变形，因此对机械部件的安装精度要求不高。



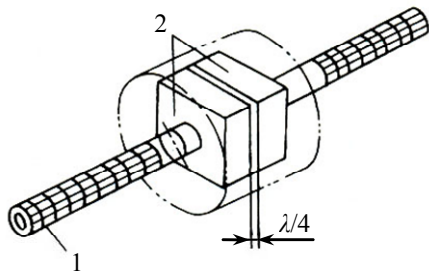
1-实体磁尺 2-尺座
图 4.21 实体型磁尺



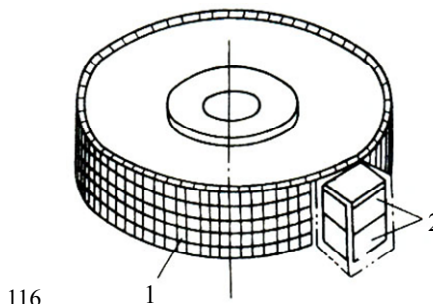
1-框架 2-磁头 3-带状磁尺
图 4.22 带状磁尺

(3) 线状磁尺

如图 4.23 所示，磁尺为直径 2mm 的青铜丝并镀上 Ni-Co 合金或用永磁材料制成。磁头是特制的，两磁头相距 $\lambda/4$ (λ 为磁信号节距)。线状磁尺套在磁头中间并与磁头同轴，两者之间具有很小的间隙，由于磁尺包围在磁头中间，对周围电磁场起到了屏蔽作用，所以抗干扰能力强、输出信号大、系统检测精度高，但线膨胀系数大，所以不宜做得过长，一般都小于 1.5m。其机械结构可以做得很小，通常应用于小型精密数控机床、微型测量仪或测量机上，其系统精度可以达到 $\pm 0.002\text{mm}/300\text{mm}$ 。



1-磁尺 2-磁头
图 4.23 线状磁尺



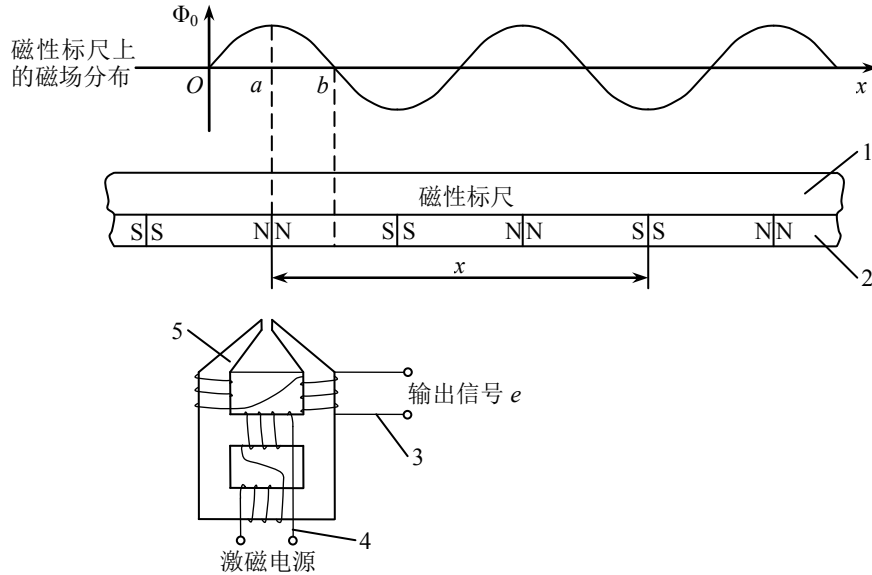
1-磁盘 2-磁头
图 4.24 回转型磁尺

(4) 回转型磁尺

如图 4.24 所示，回转型磁尺的磁头和带状磁尺的磁头相同，所不同的是将其磁尺做成磁盘或磁鼓形状，它主要用来检测角位移。

2、磁头

磁头是一种磁电转换器，它把反映空间位置变化的磁信号检测出来，然后将其转换成电信号并输送给检测电路。



1-非导磁性材料基体 2-磁膜 3-拾磁绕组 4-激磁绕组 5-拾磁磁头

图 4.25 磁通响应型磁头

(1) 磁通响应型磁头

如图 4.25 所示为单磁头的磁通响应型磁头，它是一个带有可饱和铁芯的二次谐波磁性调制器，铁芯由软磁性材料制成，上面绕有两组串联的激磁绕组（绕在横臂上）和两组串联的拾磁绕组（绕在竖杆上）。当激磁绕组通以 $I = I_0 \sin(\omega_0 t / 2)$ 的高频激磁电流时，其产生的磁通与磁性标尺作用于磁头的直流磁通相叠加形成 Φ_0 。由于方向不同，各分支路的磁通有的被加强，有的被减弱。

Φ_0 是由磁性标尺中磁信号决定的，由于磁路的非线性，便可在输出绕组中得到高频激磁电流的二次谐波输出信号，其输出电压为：

$$e = E_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin \omega t$$

式中， e ——输出线圈输出的感应电动势；

E_0 ——输出线圈输出的感应电动势峰值；

- λ ——磁性标尺上磁信号的节距；
- x ——磁头对磁性标尺的位移量；
- ω ——输出线圈感应电动势的角频率。

由上式可知，磁头输出信号的幅值是位移 x 的函数。一般选用磁尺的某一 N 极作为位移零点（如图 4.25 中的 a 点），测出 e 过 0（即 $e = 0$ ，如图 4.25 中的 b 点）的次数，然后根据磁性标尺磁信号的节距，便可计算出位移量 x 的大小。

磁尺的分辨率不仅与磁性标尺磁信号的节距有关，还与细分电路的细分倍数有关。如磁性标尺写入磁信号的节距为 0.04mm，当把它细分为四等分时，其磁尺的分辨率可达 0.01mm。

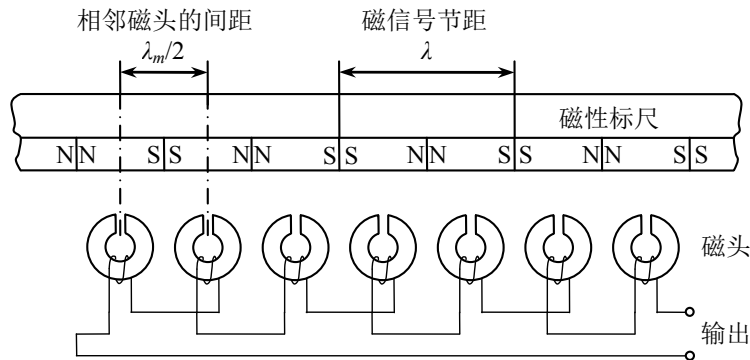


图 4.26 多间隙磁通响应型磁头

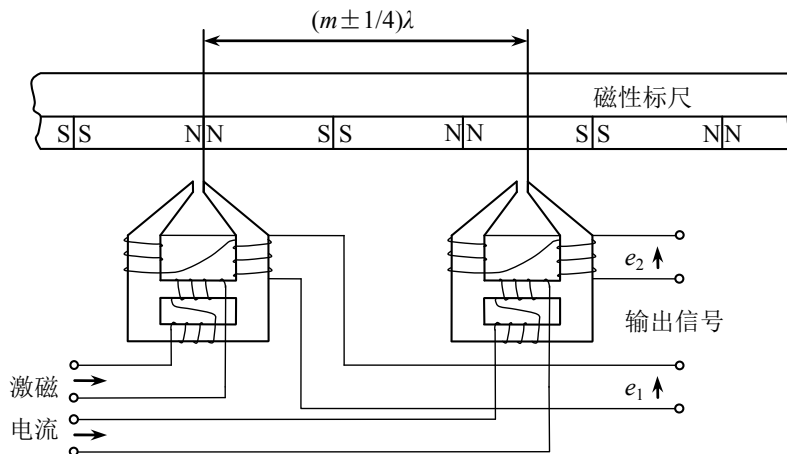


图 4.27 双磁头配置原理图

(2) 多间隙磁通响应型磁头

使用单个磁头读取磁化信号时，由于输出信号电压很小（几毫伏到几十毫伏），抗干扰能力低，故实际使用时将几个甚至几十个磁头以一定方式联接起来，组成多间隙磁头，如图 4.26 所示。它具有高精度、高分辨率和输出电压大等特点。

多间隙磁头中的每一个磁头都以相同的间距 $\lambda_m/2$ 配置，相邻两磁头的输出绕组反相串接，

这时得到的总输出电压为每个磁头输出电压的叠加。当 $\lambda_m/\lambda = 1, 3, 5, 7$ 时，总的输出值最大。

为了辨别磁头与磁尺相对移动的方向，通常使磁头彼此相距 $(m \pm 1/4)\lambda$ (m 为正整数) 配置。如图 4.27 所示，以双磁头的情况为例，当给两磁头通以频率相同、相位相差 $\pi/2$ 的激磁电流时，两个磁头拾磁绕组的输出电压分别为：

$$e_1 = E_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin \omega t ; \quad e_2 = E_0 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin \omega t$$

e_1 和 e_2 是两列相位相差 $\pi/2$ 的脉冲。至于它们之中哪个超前，则取决于磁尺的移动方向。

根据两个磁头输出信号之间的超前或滞后关系，就可确定其移动方向。

3、检测电路

磁尺检测属于模拟测量，它必须与检测电路相配合才能实现检测。磁栅的检测电路包括磁头激磁电路、读取信号的放大、滤波及辨向电路、细分内插电路、显示及控制电路等部分。根据检测方法的不同，检测电路也可分为鉴幅型和鉴相型两种。

(1) 鉴幅型系统工作原理

如前所述，磁头有两组信号输出，将高频载波滤掉后则得到相位差为 $\pi/2$ 的两组信号：

$$e_1 = E_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) ; \quad e_2 = E_0 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

当两个磁头相对于磁尺每移动一个节距的距离便会发出一个正（余）弦信号，信号经过处理后可进行位置检测。这种方法的电路比较简单，但分辨率受到录磁节距 λ 的限制，若要提高分辨率就必须采用较复杂的倍频电路，所以此类型的检测电路不常采用。

(2) 鉴相型系统工作原理

采用相位检测的精度可以大大高于录磁节距 λ ，并可以通过提高内插补脉冲频率来提高系统的分辨率，可使分辨率达到 $1\mu m$ 。鉴相型检测系统框图如图 4.28 所示，将第 I 组磁头的激磁电流移相 $\pi/4$ ，或将它的输出信号移相 $\pi/2$ ，可得：

$$e_1 = E_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos \omega t$$

$$e_2 = E_0 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin \omega t$$

将两组磁头输出信号求和，得：

$$e = E_0 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

由上式可以看出，合成输出电压 e 的幅值恒定，而相位随磁头与磁尺相对位置 x 的变化而变

化。其输出信号与旋转变压器、感应同步器绕组中读取的信号相似，所以其检测电路也基本相同。从图 4.28 中看出，振荡器送出的信号经分频器、低通滤波器后变成正弦波信号并被分成两路。一路经 $\pi/2$ 移相后进行功率放大并送至磁头 II 的激磁绕组；另一路经功率放大后送至磁头 I 的激磁绕组。然后将两磁头的输出信号送入求和电路中相加，即得到相位随位移 x 而变化的合成信号，该信号经滤波、限幅、放大整形后成为与位置量有关的信号，将其送入鉴相内插电路中进行内插细分，可得到分辨率为预先设定单位的计数信号。计数信号送入可逆计数器，用来进行系统控制和数字显示。

在实际应用过程中，一般选用多个磁通响应型磁头，这样不仅可以提高灵敏度，而且能均化节距误差，并使输出幅值均匀。此外，当磁头间距与磁栅栅距一致时，输出信号最大，且具有良好的选频特性。但是，目前数控机床快速移动的速度可达到 24m/min，而磁栅作为测量元件难以适应这样高的反应速度，故其应用受到限制。

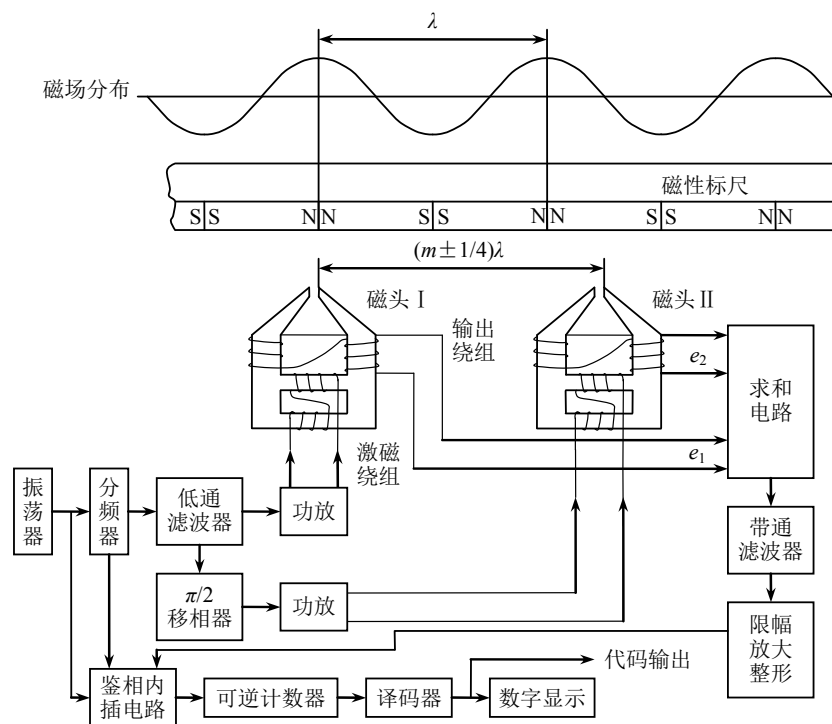


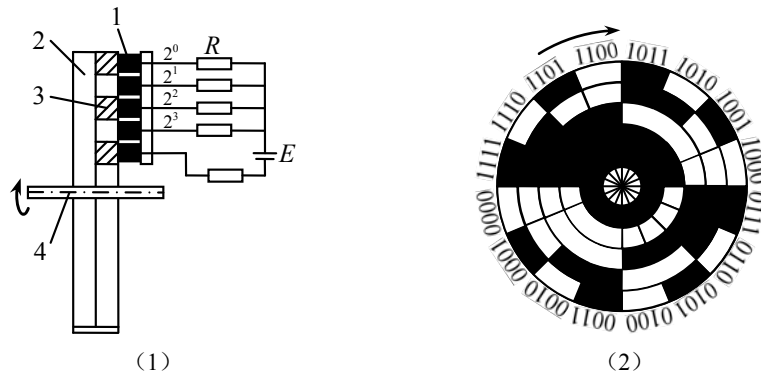
图 4.28 鉴相型检测系统框图

§ 4-6 编码器

编码器又称编码盘，是一种旋转式测量元件。它通常装在被测轴上，随被测轴一起转动，可将被测轴的角位移转换成增量脉冲形式或绝对代码形式。根据使用的计数制不同，可分为二进制

编码、二进制循环码（格雷码）、余三码和二—十进制码等形式的编码器；根据输出信号形式的不同，可分为绝对值式编码器和脉冲增量式编码器；根据内部结构和检测方式的不同，可分为接触式、光电式和电磁式编码器。

编码器在数控机床中有两种安装方式：第一种是编码器和伺服电机同轴联接在一起，称为内装式编码器，伺服电机再和滚珠丝杠联接，这种安装方式中编码器在进给传动链的前端；第二种是编码器联接在滚珠丝杠末端，称为外装式编码器。外装式检测信息中所包含的传动链误差比内装式多，因此位置控制精度较高，但内装式安装方便。



1-电刷 2-绝缘体 3-导体 4-转轴

图 4.29 四位二进制编码盘

一、接触式编码器

接触式编码器是一种绝对值式的检测装置，它可直接把被测转角用数字代码表示出来，且每一个角度位置均有表示该位置的唯一代码与其相对应。因此即使在断电情况下，通过这种测量方式也能读出转动的角度值。

如图 4.29 所示为一个四位二进制编码盘，图中涂黑部分表示导电，其余部分是绝缘的。编码盘的外四圈按导电为“1”、绝缘为“0”组成二进制码。通常，我们把组成编码的各圈称为码道，对应于四条码道并排安装有四个电刷，电刷经电阻接到电源正极，其结构如图 4.29（1）所示。码盘上最里侧的一圈是公用的，它接到电源的负极，并且与四条码道上的导电部分连在一起，而与绝缘部分是断开的。编码盘的转轴与被测对象连在一起（如机床丝杠），编码盘的电刷则装在一个不随被测对象一起运动的部件（如机床本体）上。当被测对象带动码盘一起转动时，在与电刷串联的电阻上将接有电流流过和没有电流流过而出现相应的二进制代码。如图 4.29（2）所示，若编码盘沿顺时针方向转动，就可依次得到 0000，0001，0010，…，1111 的二进制输出。

从图 4.29（2）中可以看出，码道的圈数就是二进制的位数，且高位在内，低位在外。由此可以推断出，若是 n 位二进制码盘，就有 n 圈码道，且圆周被 2^n 等分，即共有 2^n 个数据来分别表示其不同位置，所能分辨的最小角度为 $\alpha = 360^\circ / 2^n$ 。

显然，位数 n 越大，所能分辨的角度就越小，测量精度也就越高。所以，若要提高分辨率就必须提高码道数，即二进制位数。目前接触式编码盘一般可以做到 8~14 位二进制，若要求位数

更多，则可采用组合码盘。组合码盘在结构上包括一个粗计码盘和一个精计码盘，精计码盘转一圈，粗计码盘依次转一格。如果一个组合码盘是由两个 8 位二进制码盘组合而成的，那么就相当于得到一个 16 位的二进制码盘，这样可使测量精度大大提高。但是，组合码盘的结构却比较复杂。

另外，在实际应用中对码盘制作和电刷安装的要求都十分严格，否则会使个别电刷偏离原来的位置而给测量造成很大的误差。图 4.30 是图 4.29 所示的四位二进制编码盘的展开图，当电刷在图 4.30 (1) 所示的位置时，读数应是 1011 (十进制数为 11) 向 1100 (十进制数为 12) 过渡，若各电刷严格保持在一条直线上，读数没有误差。如果电刷安装不准，如图 4.30 (2) 中黑色所示，则读数变为 1111 (十进制数为 15)。可见处于这一位置情况下，由于电刷错位会产生从 8 到 15

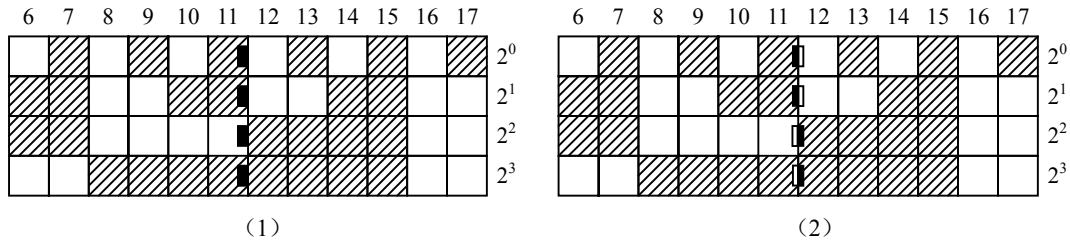


图 4.30 四位二进制编码盘展开图

之间的读数误差，一般称这种误差为“非单值性误差”。消除“非单值性误差”有两种方法，一种方法是采用双电刷，即在码盘的两个不同位置上分别安装一组电刷，并且当一组电刷位于过渡线上时，另一组电刷一定位于两个过渡线中间。这样根据两组电刷的空间位置和测得的编码值进行比较判断，可推算出正确的测量值；另一种方法是采用循环码，即格雷码。如图 4.31 所示为一个四位二进制循环码的光电码盘，循环码属于无权码，其特点为相邻两个代码之间只有一位上的数发生变化，即“0”变为“1”或“1”变为“0”。因此，由于电刷安装不准而产生的误差最多不超过“1”，这样就大大减小了误差。

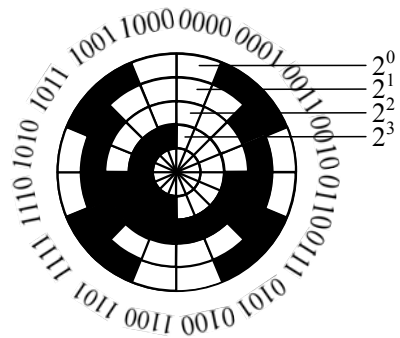


图 4.31 二进制循环码盘

接触式绝对值编码器的优点是结构简单、体积小、输出信号强。缺点是电刷磨损会降低使用寿命，而且转速不能太高（每分钟几十转），精度会受到外圈码道宽度的限制，因此使用范围比较有限。

二、光电式编码器

常用的光电式编码器为增量式光电编码器，是一种旋转式脉冲发生器，亦称光电码盘、光电脉冲发生器、光电脉冲编码器等。它把机械转角变成电脉冲，是数控机床常用的一种角位移检测元件，而且也可用于检测角速度。增量式光电编码器按每转发出脉冲数的多少来分有多种型号，但数控机床最常用的类型如表 4.3 所示，使用时要根据数控机床滚珠丝杠的螺距来选用。

表 4.3 光电脉冲编码器

丝杠长度单位	脉冲编码器	每转脉冲位移量	丝杠长度单位	脉冲编码器	每转脉冲位移量
mm (米制)	2000 p/r	2, 3, 4, 6, 8	in (英制)	2000 p/r	0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4

	2500 p/r	5, 10		2500 p/r	0.25, 0.5
	3000 p/r	3, 6, 12		3000 p/r	0.15, 0.3, 0.6

为了适应高速、高精度数字伺服系统的需要，最近又发展出现了高分辨率的脉冲编码器，如表 4.4 所示。现在已有每转发出十万乃至几百万个脉冲的编码器，该类脉冲编码器装置的内部采用了微处理器。

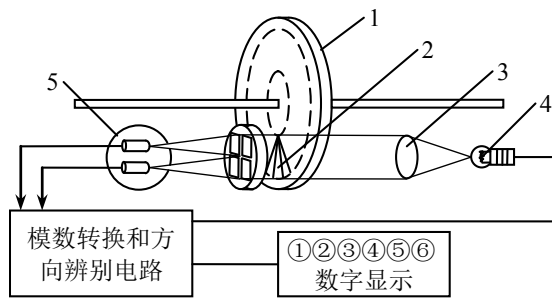
表 4.4 高分辨率脉冲编码器

丝杠长度单位	脉冲编码器	每转脉冲位移量	丝杠长度单位	脉冲编码器	每转脉冲位移量
mm (米制)	20000 p/r	2, 3, 4, 6, 8	in (英制)	20000 p/r	0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4
	25000 p/r	5, 10		25000 p/r	0.25, 0.5
	30000 p/r	3, 6, 12		30000 p/r	0.15, 0.3, 0.6

如图 4.32 所示，光电脉冲编码器由光源、聚光镜、光电盘、分度狭缝、光电元件、模数转换线路及数字显示装置组成。

光电盘可用玻璃经研磨抛光制成。玻璃表面在真空中镀上一层不透明的铬，然后用照相腐蚀法在上面制成狭缝用以透光，狭缝的数量可为几百条或几千条。光电盘也可采用精制的金属圆盘，在圆盘的圆周上开出一一定数量的等分槽缝，或在一定半径的圆周上钻出一定数量的孔，使圆盘形成相等数量的透明或不透明区域。在光电盘的里圈不透光圆环上还刻有一条透光条纹 Z 作为参考标记，用来产生“一转脉冲”信号，即光电盘转一周时发出一个脉冲，通常称其为“零点脉冲”。该脉冲以差分形式 Z 、 \bar{Z} (Z 的反相) 输出，用来作为测量标准。

在工作时，光电盘装在回转轴上并随其一起转动，每当转过一个缝隙时就会发生一次光线的明暗变化。光电元件接收这些明暗相间的光信号，并将其转换为交替变化的电信号。该信号为两组近似于正弦波的电流信号 A 和 B ， A 信号与 B 信号相位相差 $\pi/2$ ，它们经过放大和整形后变成方波信号，如图 4.33 所示。根据信号 A 和信号 B 的发生顺序，即可判断光电编码器转轴的正反转。若 A 相超前于 B 相，则对应正转；若 B 相超前于 A 相，则对应反转。数控系统正是利用这一相位关系来判断转动方



1-光电盘 2-分度狭缝 3-聚光镜 4-光源 5-光电元件

图 4.32 光电脉冲编码器的结构示意图

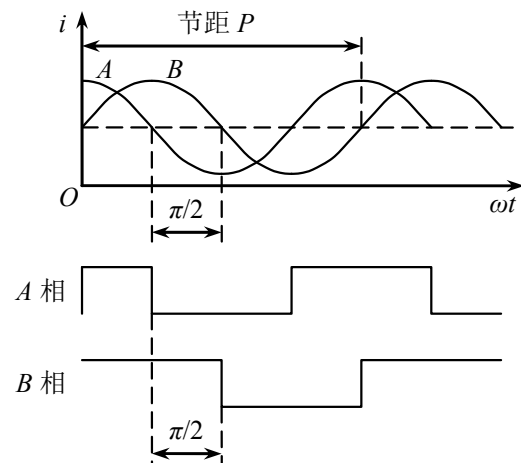


图 4.33 光电脉冲编码器的输出波形

向的。

在应用时，从光电脉冲编码器输出的 A 和经反相后的 \bar{A} ， B 和经反相后的 \bar{B} 四路方波信号被引入位置控制回路，经辨向和乘以倍率后，形成代表位移的测量脉冲。再经频率-电压变换器转变成正比于频率的电压，并作为速度反馈信号供给速度控制单元以进行速度调节。光电脉冲编码器的输出信号 A 、 \bar{A} 、 B 和 \bar{B} 为差动信号，差动信号大大提高了传输的抗干扰能力。在数控机床上对以上信号进行倍频处理，可以进一步提高分辨率。

三、电磁式编码器

电磁式编码器也称磁性编码器，是近年来发展非常迅速、越来越受到重视的一种编码器。电磁式码盘是在导磁性较好的软铁或坡莫合金圆盘上，用腐蚀的方法做成相应码制的凹凸图形。当有磁通穿过码盘时，由于圆盘凹下的地方磁导小，凸起的地方磁导大，其感应电势也就不同，因而可区分成“0”或“1”，进而达到测量转角的目的。它输出的信号形式与光电式编码器一样，都是数字脉冲信号。

电磁式编码器属于一种非接触式的编码器，具有抗干扰能力强、响应速度快、寿命长、结构简单和价格低廉等优点，其精度可达到很高（可达 20 位左右的二进制数），是一种有发展前途的直接编码式测量元件，它将在很大程度上代替光电式编码器。

电磁式编码器用得最多的是磁敏电阻式和励磁环式两种类型。磁敏电阻式磁性编码器又分为强磁金属磁敏电阻式和半导体磁敏电阻式。励磁环式磁性编码器又称为磁栅或磁尺，前面已进行过介绍。同光电式编码器一样，电磁式编码器也可分为增量式和绝对值式编码器。

四、编码器在数控机床上的应用

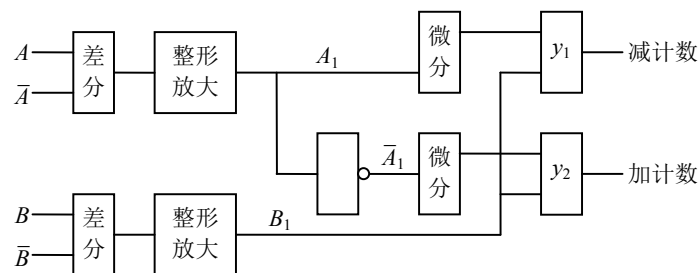


图 4.34 光电脉冲编码器信号处理电路

1、位置测量

在数控机床上，光电脉冲编码器用在数字比较伺服系统中，它作为位置检测装置，将检测信号反馈给数控装置。如图 4.34 和 4.35 所示，分别为光电脉冲编码器信号处理电路和输出波形，脉冲编码器输出的脉冲信号 A 、 \bar{A} 、 B 和 \bar{B} 经过差分驱动和差分接收进入数控装置，再经过整形放大电路变为 A_1 、 B_1 两路脉冲。将 A_1 脉冲和它的反向信号 \bar{A}_1 脉冲进行微分后作为加减计数脉

冲， B_1 脉冲被用作加减计数脉冲的控制信号。在正走时（ A 脉冲超前于 B 脉冲）， y_2 输出加计数脉冲，此时 y_1 输出为低电平；在反走时（ B 脉冲超前于 A 脉冲）， y_1 输出减计数脉冲，此时 y_2 输出为低电平。

把输出的脉冲输入到带加减计数要求的可逆计数器中进行计数，即可检测出脉冲的数量，用这个数量乘以脉冲当量就可得出光电盘的转角。在进行直线距离测量时，可将光电编码器安装到伺服电机轴上，伺服电机轴与滚珠丝杠相连，当伺服电机转动时就通过滚珠丝杠带动工作台或刀具产生移动。这时，光电编码器的转角对应于直线移动部件的移动量，因此可根据滚珠丝杠的导程来计算出移动部件的位移量。

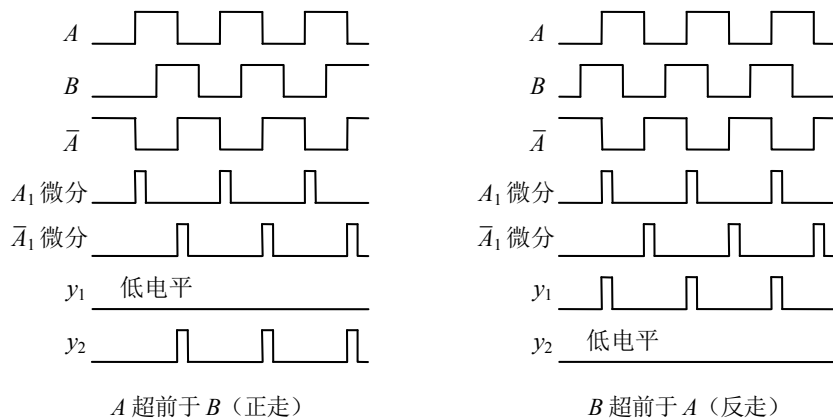


图 4.35 光电脉冲编码器输出波形

2、主轴控制

当主轴控制中采用编码器后，就成为具有位置控制功能的主轴控制系统，或者称作 C 轴控制。在一般主轴控制系统中，所采用的主轴位置脉冲编码器的原理与光电脉冲编码器相同。

主轴位置脉冲编码器的作用主要包括：

(1) 主轴旋转与坐标轴进给的同步控制

在螺纹加工中，为了保证切削螺纹的螺距，必须有固定的进刀点和退刀点。安装在主轴上的光电脉冲编码器在切削螺纹时主要解决以下两个问题：

1) 通过对编码器输出脉冲的计数，保证主轴每转一周，刀具准确地移动一个螺距（导程）。

2) 一般的螺纹加工要经过几次切削才能完成，每次重复切削时，开始进刀的位置都必须相同。为了保证重复切削时螺纹不乱扣，数控系统在接收到光电编码器中的一转脉冲（零点脉冲）后才开始螺纹切削的计算。

(2) 主轴定向准停控制。

在加工中心换刀时，为了使机械手对准刀柄，主轴必须停在固定的径向位置上。在固定切削循环中（如精镗孔），要求刀具必须停在某一径向位置上才能退出。上述情况都要求主轴能准确地停在某一固定位置上，这就是主轴定向准停功能。

(3) 恒线速度切削控制。

在车床和磨床上进行端面或锥面切削时，为了使切削表面粗糙度 R_a 保持一定的值，就要求刀具与工件接触点的线速度为恒定值。因此，随着刀具的径向进给和切削直径的变化，应不断调整主轴转速，并保持 $V = \pi Dn$ 为常值，式中 V 是切削线速度； D 为工件的切削直径，它会随刀具进给不断变化； n 为主轴转速。其中， D 可由坐标轴的位移检测装置（如光电编码器）检测获得。上述数据经过软件处理后即可得到主轴转速 n ，转换成速度控制信号后送至主轴驱动装置。

3、转速测量

光电编码器输出脉冲的频率或周期与其转速成一定的比例关系，所以光电编码器可以作为一种数字测速装置实现对转速的测量。

用脉冲频率法测量转速是指在给定的时间内对光电编码器发出的脉冲计数，然后由下式求出其转速，即：

$$n = \frac{N_1}{N} \times \frac{60}{t} (r/min)$$

式中， t 为测速采样时间； N_1 为 t 时间内所测脉冲数； N 为编码器每转脉冲数。

如图 4.36 所示为用脉冲频率法测量转速的原理图。在给定 t 时间内，使门电路导通，则编码器输出的脉冲允许进入计数器计数，这样可以算出 t 时间内光电编码器的平均转速。

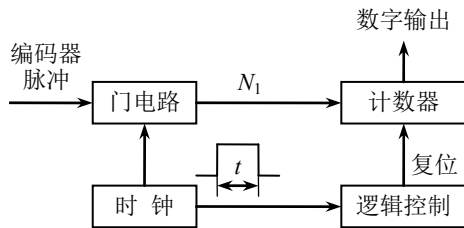


图 4.36 脉冲频率法测速原理简图

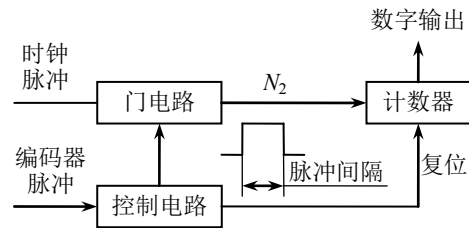


图 4.37 脉冲周期法测速原理简图

如图 4.37 所示为用脉冲周期法测量转速的原理图。当编码器输出脉冲处于正半周期时，使门电路导通，标准时钟脉冲通过控制门进入计数器计数，由计数器可得出转速 n ，即：

$$n = \frac{60}{2N_2NT} (r/min)$$

式中， N 为编码器每转脉冲数； N_2 为编码器一个脉冲间隔内标准时钟脉冲输出个数； T 为标准时钟脉冲周期。

4、编码器应用于交流伺服电动机控制中，用于转子位置检测、提供速度反馈信号、提供位置反馈信号。

5、零标志脉冲用于回参考点控制

当数控机床采用增量式的位置检测装置时，在接通电源后数控机床要做回参考点的操作。这是因为机床断电后，系统就失去了对各坐标轴位置的记忆，所以在接通电源后，必须让各坐标轴回到机床的某一固定点上，这一固定点就是机床坐标系的原点或零点，也称为机床参考点。使机床回到这一固定点的操作就称为回参考点或回零操作，参考点位置是否正确与检测装置中的零标志脉冲有相当大的关系。在回参考点操作中，数控机床坐标轴先以快进方式向参考点方向运动，在碰到减速挡块后，坐标轴再慢速趋近参考点。当编码器产生零标志信号（一转脉冲信号）后，坐标轴再移动一个设定距离就停止于参考点处。

思考和作业题

1. 数控机床对检测装置的要求有哪些？
2. 检测装置按检测对象的不同可以分为哪两类？各有何特点？
3. 增量式测量和绝对式测量各有何特点？
4. 旋转变压器的鉴相式工作方式和鉴幅式工作方式在原理上有哪些异同？
5. 在实际应用中，鉴相式旋转变压器和鉴幅式旋转变压器会出现什么问题？应如何解决？
6. 感应同步器在安装时需要注意什么？
7. 简述感应同步器的工作原理。
8. 感应同步器有什么特点？
9. 玻璃透射光栅和金属反射光栅各有何特点？
10. 光栅在结构上主要由哪几部分组成？
11. 简述光栅的工作原理。
12. 在光栅的信息处理线路中，鉴向和倍频线路各有什么作用？
13. 磁栅具有哪些优点？
14. 磁栅上为什么要采用磁通响应型磁头？
15. 磁栅检测装置由哪几部分组成？各部分的主要作用是什么？
16. 简述磁栅鉴相型系统的工作原理。
17. 编码器在数控机床中的安装方式有哪两种？各有何特点？
18. 在编码器检测中，何谓非单值性误差？消除非单值性误差的方法有哪些？
19. 编码器在数控机床上的应用有哪些？

第五章 数控机床的伺服系统

§ 5-1 概述

伺服系统是实现电信号到机械动作的转换装置或部件，是以机床移动部件的位置和速度为控制量的自动控制系统，又称随动系统、拖动系统。在 CNC 机床中，伺服系统接收数控装置发出的速度控制量和进给位移控制量，经转换和放大，驱动工作台以指定的速度移动到指定位置。

伺服系统是数控装置和机床本体的联系环节，伺服系统的性能，在很大程度上决定了数控机床的性能。例如，数控机床的最高移动速度、跟踪精度、定位精度等重要指标均取决于伺服系统的动态和静态性能。因此，研究与开发高性能的伺服系统一直是现代数控机床的关键技术之一。

一、 伺服系统的分类

1、按控制对象和使用目的分类

(1) 进给驱动

控制机床各坐标轴的切削进给运动，是一种精密的位置跟踪和定位控制系统。它包括速度控制和位置控制。

(2) 主轴驱动

控制机床主轴在切削过程中的旋转速度、转矩和功率，一般以速度控制为主。对于具有 C 轴功能的机床主轴，也需要位置控制。

(3) 辅助驱动

在各类加工中心和多功能数控机床中，控制刀库、料库等辅助系统，多采用简易的位置控制。

2、按伺服系统的结构分类

(1) 开环伺服系统

开环伺服系统（如图 5-1）即无位置反馈的系统，其驱动元件主要是功率步进电机或液脉冲马达。这两种驱动元件工作原理的实质是数字脉冲到角度位移的变换，驱动元件转过的角度正比于指令脉冲的个数；这里不用位置检测元件实现定位，而是靠驱动装置本身，运动速度由进给脉冲的频率决定。

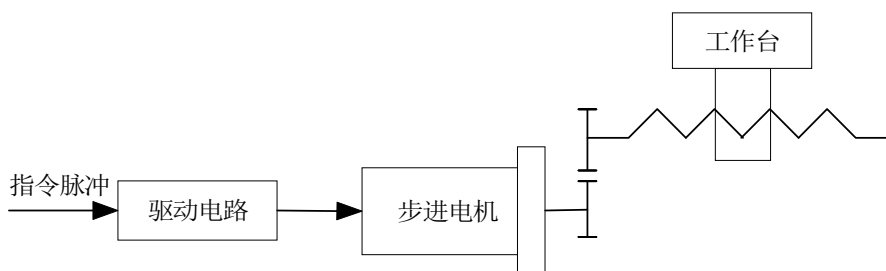


图 5-1 开环伺服系统

开环系统的结构简单，易于控制，但精度差，低速不平稳，高速扭矩小。一般用于轻载

及负载变化不大或经济型数控机床上。

(2) 闭环伺服系统

闭环系统（如图 5-2）由位置控制单元、速度控制单元、驱动元件、工作台、检测装置组成，是误差控制的随动系统。数控机床进给系统的误差，是 CNC 输出的位置指令和机床工作台实际位置的差值。检测装置测出工作台的实际速度和位移量或者实际所处的位置，并将测量值反馈给 CNC 装置，与指令进行比较，求得误差，依此对位置指令值和速度指令值进行修正，构成闭环控制。

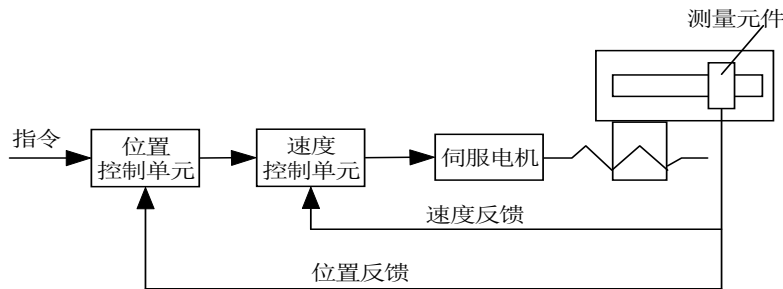


图 5-2 闭环伺服系统

由于闭环伺服系统是反馈控制，反馈测量装置精度很高，所以系统传动链的误差，环内各元件的误差以及运动中造成的误差都可以得到补偿，从而大大提高了跟随精度和定位精度。目前闭环系统的分辨率多数为 $1\ \mu\text{m}$ ，定位精度可达 $\pm 0.01\sim\pm 0.05\text{mm}$ ；高精度系统分辨率可达 $0.1\ \mu\text{m}$ 。

(3) 半闭环伺服系统

半闭环伺服系统（见图 5-3）的驱动电路与闭环伺服系统的驱动电路基本相同，也是一个双闭环控制系统，内环为速度环，外环为位置环。所不同的是检测装置不直接安装在进给坐标的最终传动部件上，而是安装在驱动元件或中间传动部件的轴上，因此是间接测量。由于传动链有一部分在位置环以外，这部分传动链误差得不到控制系统的补偿，因此半闭环伺服系统的精度低于闭环伺服系统的精度。理论上讲闭环伺服系统位置精度能够达到很高，但由于机械加工过程中的受力、受热变形、振动和机床磨损等因素的影响，使系统的稳定性发生变化，很难加以调整。因此，目前数控设备大多数使用半闭环伺服系统。只有在传动部件精度高、使用过程温度变化不大的高精度数控机床上才使用闭环伺服系统。

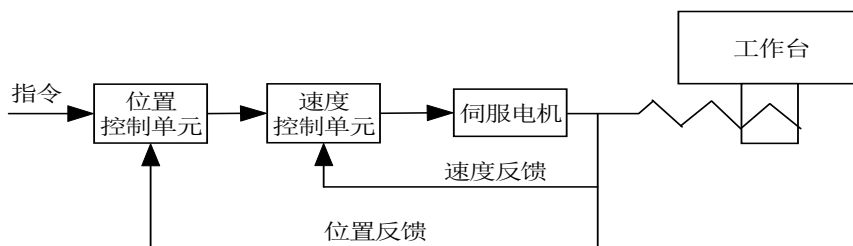


图 5-3 半闭环伺服系统

除上述的分类方法外，可以按反馈比较控制方式分为相位比较控制系统、幅值比较控制

系统、脉冲（或数字）比较伺服系统。此外，按执行元件的种类可以将伺服系统分为液压伺服系统和电气伺服系统，电气伺服系统又分为步进式伺服系统、直流伺服系统和交流伺服系统。

二、对伺服系统的要求

1、对机床进给伺服系统的要求

(1) 高精度 伺服系统的精度是指坐标轴实际的移动位置与插补器的指令位置相一致的程度。对于数控加工，对定位精度和轮廓加工精度要求都比较高，定位精度一般为 $0.01\text{ mm}\sim 0.001\text{ mm}$ ，甚至 $0.1\ \mu\text{m}$ 。轮廓加工精度与速度控制和联动坐标的协调一致控制有关。在速度控制中，要求高的调速精度，比较强的抗负载扰动能力。即对静态、动态精度要求都比较高。

(2) 稳定性好 稳定是指系统在给定输入或外界干扰作用下，能在短暂的调节过程后，达到新的或者恢复到原来的平衡状态。对伺服系统要求有较强的抗干扰能力，保证进给速度均匀、平稳。稳定性直接影响数控加工的精度和表面粗糙度。

(3) 快速响应 快速响应是伺服系统动态品质的重要指标，它反映了系统的跟踪精度。为了保证轮廓切削形状精度和低的表面粗糙度，要求伺服系统跟踪指令信号的响应要快。这一方面要求过渡过程时间要短，一般在 200ms 以内，甚至小于几十毫秒；另一方面要求超调要小。这二方面的要求往往是矛盾的，实际应用中要采取一定措施，按工艺加工要求作出一定的选择。

(4) 电机调速范围宽 在数控加工过程中，切削速度的要求因加工刀具、被加工材料以及零件加工要求的不同而不同，为保证在任何条件下都能获得最佳的切削速度，要求进给系统必须提供较大的调速范围。一般要求调速范围应达到 $1:1000$ ，而性能较高的数控系统调速范围应能达到 $1:10000$ ，而且是无级调速。

(5) 低速大转矩 机床加工的特点是低速时进行重切削。这就要求伺服系统在低速时提供较大的输出转矩。进给坐标的伺服控制系统是恒转矩控制，而主轴坐标的伺服控制则是低速实现恒转矩传动，高速时实现恒功率传动。

(6) 可靠性高 对环境的适应性强，如温度、湿度、粉尘、油污、振动、电磁干扰等，性能稳定，使用寿命长，平均无故障时间间隔长。

2、主轴伺服系统的要求

主轴伺服系统一般为速度控制系统，除上面的一般要求外，还具有下面的控制功能。

(1) 主轴与进给驱动的同步控制 该功能使数控机床具有螺纹（或螺旋槽）加工能力。

(2) 准停控制 在加工中心上为了自动换刀，要求主轴能进行高精度的准确位置停止。

(3) 角度分度控制 角度分度有两种情况：一是固定的等分角位置控制，二是连续的任意角度控制。任意角度控制属于带位置环的伺服系统控制，如在车床上加工端面螺旋槽，在圆周面加工螺旋槽等。这时主轴坐标具有了进给坐标的功能，称为“C”轴控制。“C”轴控制可以用一般主轴控制和 C 轴控制切换的方法实现，也可以用大功率的进给伺服系统代替主轴系统。

为了满足对伺服系统的要求，对伺服系统的执行元件—伺服电机也相应提出高精度、快反应、宽调速和大转矩等要求。

三、 伺服系统的发展过程

机床伺服系统的技术进步很大程度上取决于伺服驱动元件的发展水平。随着数控技术的演变和发展，伺服系统的驱动元件大致经历了三个阶段。

第一阶段：20 世纪 70 年代以前，以电液伺服系统和步进伺服系统为主。数控机床发展的初期，多数采用电液伺服系统，电液伺服系统的执行元件为液压元件，其前一级为电气元件，驱动元件为液动机和液压缸，常用的有电液脉冲马达和电液伺服马达。电液伺服系统具有在低速下可以得到很高的输出力矩，以及刚性好、时间常数小、反映快和速度平稳等优点。然而，液压系统需要油箱、油管等供油系统，体积大，另外，还有噪声、漏油等问题，因此逐渐被电气伺服系统所取代。步进电机开环系统，具有结构简单、价格低廉、使用维修方便的优点，在当时被大力推广，至今仍在经济型数控机床上使用。

第二阶段：20 世纪 70~80 年代中期，功率晶体管和晶体管脉宽调制驱动装置的出现，加速了直流伺服系统的性能提高和推广普及的步伐，直流伺服逐渐占据主导地位。直流伺服系统常用的伺服电机有小惯量直流伺服电机和永磁直流伺服电机（也称为大惯量宽调速直流伺服电机）。小惯量伺服电机最大限度地减少了电枢的转动惯量，所以能获得最好的快速性。在早期的数控机床上应用较多，现在也有应用。小惯量伺服电机一般都设计成有高的额定转速和低的惯量，所以应用时，要经过中间机械传动（如齿轮副）才能与丝杠相连接。

永磁直流伺服电机能在较大过载转矩下长时间工作以及电机的转子惯量较大，能直接与丝杆相连而不需中间传动装置。此外，它还有一个特点是可在低速下运转，如能在 1r/min 甚至在 0.1r/min 下平稳地运转。因此，这种直流伺服系统在数控机床上获得了广泛的应用。自 70 年代至 80 年代中期，在数控机床上应用占绝对统治地位，至今，许多数控机床上仍使用这种电机的直流伺服系统。永磁直流伺服电机的缺点是有电刷，限制了转速的提高，一般额定转速为 1000~1500r/min。而且结构复杂，价格较贵。

第三阶段：80 年代以后，由于交流伺服电机的结构、控制理论及控制方法均有突破性的进展；而且交流伺服电机没有直流伺服电机那些固有的缺点（有电刷、结构复杂、价格贵等），对应用环境没有特殊要求；另外转子惯量比直流电机小，动态响应好；此外在同样体积下，交流电机的输出功率可比直流电机提高 10%~70%，容量可以造得比直流电机大，达到更高的电压和转速；因此，交流伺服系统得到迅速发展，已经形成潮流，从 80 年代后期开始，大量使用交流伺服系统，到今天，有些国家的厂家，已全部使用交流伺服系统。一般情况下，主轴伺服电机使用交流异步伺服电机，进给伺服电机使用永磁同步交流伺服电机。

§ 5-2 步进电机伺服系统

与大部分电动执行部件不同，步进电动机是一种能够将数字脉冲信号转换成固定数值机械角位移、并自动产生定位转矩使转轴锁定的机电转换执行装置，它是现代数字控制技术中最早出现的控制执行部件。可以说步进电动机是数字电子计算机技术能在工业自动化领域得到广泛应用的领路人。

一、 步进电机工作原理及种类

1、 步进电动机的工作原理

步进电动机的基本工作原理实际上是电磁铁的作用原理。

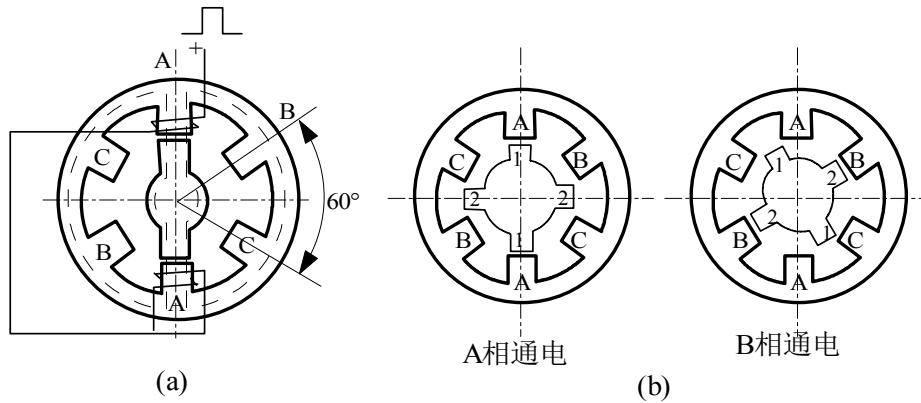


图 5-4 步进电动机工作原理

图 5-4(a)所示的步进电机有 A、B、C 三相，每相有两磁极，转子也有两个磁极（两个齿）。当 A 相绕组通以直流电流时，转子的两极与 A 相的两个磁极齿对齐，使该相磁路的导磁最大。磁通回路如虚线所示。若 A 相断电，B 相通电，为了使 B 相磁路的导磁最大，电磁力又使转子的两极与 B 相磁极齿对齐，即电磁力使转子沿顺时针转过 60° 。通常我们称步进电机绕组的通电状态每改变一次，其转子转过的角度为步距角。因此，如(a)所示步进电机的步距角等于 60° 。如果控制线路能不停地按 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \dots$ 的顺序送入电流脉冲，步进电机的转子便不停地顺时针转动。如果通电顺序为 $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A \dots$ 步进电机的转子就不停地逆时针转动。这种通电方式称为三相三拍。还有一种三相六拍的通电方式，它的通电顺序是，顺时针为 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A \dots$ 。

若以三相六拍通电方式工作，当 A 相通电转子磁极与 A 对齐，当 A 相与 B 相同时通电时，转子的磁极将同时受到 A 相磁极和 B 相磁极的吸引力，因此，转子的磁极只好停在 A、B 两相磁极之间，这时它的步距角等于 30° 。当由 A、B 相同时通电转为 B 相通电时，转子磁极再顺时针转 30° 与 B 相磁极对齐。其余以此类推。采用三相六拍通电方式，可使步距角缩小一半。

图(b)中的步进电机，定子仍是 A、B、C 三相，每相两极，但转子不是两个磁极而是四个。当 A 相通电时，是 1、3 极与 A 相的两极对齐，很明显，当 A 相断电、B 相通电时，2、4 极将与 B 相两极对齐。这样一来，在三相三拍的通电方式中，步距角等于 30° ，在六拍通电方式中，步距角为 15° 。

实际上步进电机的转子的齿数很多，因为齿数越多步距角越小。为了改善运行性能，定子磁极上也有齿，这些齿的齿距与转子的齿距相同，但各极的齿依次与转子的齿错开齿距的 $1/m$ (m 为电机相数)。这样，每次定子绕组通电状态改变时，转子只转过齿距的 $1/m$ (如三相三拍) 或 $1/2m$ (如三相六拍) 即达到新的平衡位置，如图 5-5 所示

综上所述，我们可以得到如下结论：

(1) 步进电机的步距角 α 与定子绕组的相数 m 、转子的齿数 z 、通电方式 k 有关，可用下式表示：

$\alpha = \frac{360^\circ}{mzk}$ 式中，三相三拍时， $k=1$ ；三相六拍时， $k=2$ ；其它依次类推。

步进电机的步距角 α 是步进电机的一个重要技术指标。它是决定步进伺服系统脉冲当量的重要参数。一般为 $0.75^\circ \sim 3^\circ$ 。

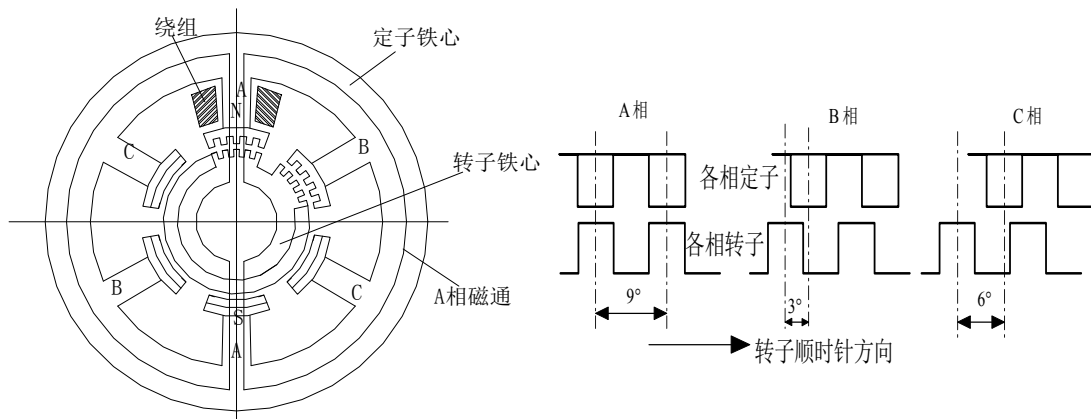


图 5-5 三相反应式步进电机的结构示意图和展开后步进电机齿距

(2) 改变步进电机定子绕组的通电顺序，转子的旋转方向也随之改变。

(3) 步进电机定子绕组通电状态的改变速度越快，其转子旋转的速度越快，即通电状态的变化频率越高，转子的转速越高。

2、 步进电机的分类

步进电机是采用定子与转子间电磁吸合原理工作，根据磁场建立方式，主要可分为反应式、永磁式和混合式三种。

(1) 反应式步进电动机

反应式步进电动机又称为变磁阻式步进电动机，它根据相数、磁路结构的不同可形成很多种类，但其工作原理是一样的。

反应式步进电机的定子、转子铁芯都用软磁材料制造，定位精度可以做得很高、气隙可以做得很小，磁极也可以设计得比较窄（步距角可以较小）。工作时完全靠磁阻（磁力线的长度）的变化产生工作转矩，因此工作时定子绕组需要的励磁电流较大。由于没有恒磁场的作用，此类步进电机一旦断电就完全失去工作力矩，在使用时应注意这一特点。

我国生产反应式步进电机的历史很长，最典型的是定型为 BF 系列的步进电机，目前应用还十分广泛。

(2) 永磁式步进电动机

永磁式步进电机定子、转子铁芯的其中之一以永磁材料制造（大多数是转子），另一件用软磁材料。如果使其激磁磁场作连续回转运动，实质上它就成了一台永磁同步电动机。

(3) 混合式步进电动机

顾名思义，混合式步进电动机就是反应式与永磁式步进电动机的混合，它利用部分永磁材料的磁性来减小反应式步进电动机的激磁电流和断电以后获得一定数量的剩余转矩，但它

的工作转矩并不完全依靠永磁，所以步距角可以与反应式步进电动机相近。正因为混合式步进电动机以上特点，它有逐步取代反应式步进电动机的趋向。

二、 步进电动机的主要特性

步进电动机的静态和动态参数是设计、选用步进电动机的基本依据。除了前面提到的步距角外，主要有以下几个方面。

1、 静态矩角特性和最大静转矩

当步进电动机在某相通电时，转子处于不动状态，这时，在电机轴上施加一个负载转矩，转子会在载荷方向上转过一个角度 θ ，转子因而受到一个电磁转矩 T 的作用与负载平衡，该电磁转矩 T 称为静态转矩，该角度 θ 称为失调角。步进电动机单相通电的静态转矩 T 随失调角 θ 的变化曲线称为矩角特性，可以通过实验测得，实验时对定子激磁绕组输入额定工作电流，特性曲线如图 5-6 所示，该曲线上电磁转矩最大值称为最大静转矩，最大静转矩在步进电机的参数中可以查到。在静态稳定区内，当外加转矩撤除后，转子在电磁转矩作用下，仍能回到稳定平衡位置。

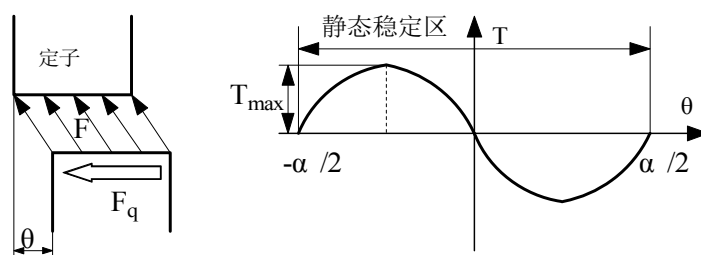


图 5-6 静态矩角特性示意图

从步进电动机的矩角特性曲线可知：即使步进电机处于维持某一角度位置的“锁相”状态，也必须用牺牲转角位置（产生角度位置误差）的方式来承受外加的载荷。

2、 最高空载起动频率

在不承受任何外加负载（空载）条件下，步进电动机能够正常起动可以施加的最高脉冲频率。此时，步进电动机的惯性负载只有电机转子本身。起动时指令脉冲频率应小于起动频率，否则将产生失步。步进电动机在带负载下的起动频率比空载要低。

3、 最高空载运行频率

该参数也为空载条件下的性能参数。最高空载运行频率通常是最高起动频率的 4~10 倍。进行这一参数测试时，步进电动机应先以较低的脉冲频率正常运行，然后再缓慢、平稳地升高工作频率，直到能够维持不丢步运行的最高频率。

4、 运行矩频特性

运行矩频特性是描述步进电动机在连续运行时，输出转矩与连续运行频率之间的关系。它是衡量步进电机运转时承载能力的动态指标，如图 5-7 所示。图中每一频率所对应的转矩

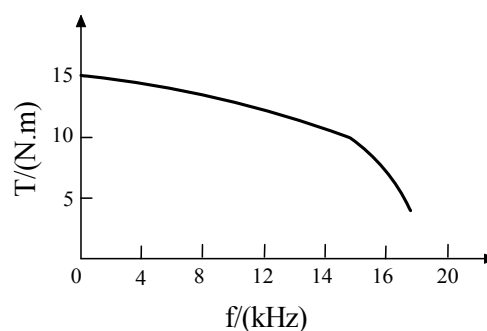


图 5-7 运行矩频特性示意图

称为动态转矩。从图中可以看出，随着运行频率的上升，输出转矩下降，承载能力下降。在载荷一定的情况下，当运行频率超过最高频率时，步进电动机便无法正常工作。

一般情况下，国产步进电动机的实用工作频率大约为几百赫兹，最高上千赫兹。

表 5-1 列举了部分国产反应式步进电动机产品的主要工作性能参数。

表 5-1 部分反应式步进电动机主要工作参数

项目 型号	相数	步距角 /°	电压 /V	相电 流 /A	最大静 转矩 /N.m	最高空载 起动频率 /Hz	线圈 电阻 /Ω	重量 /kg	转子转 动惯量 /kg.m ²	外形尺 寸 D×L×d
36BF003	3	1.5/3	27	1.5	0.078	3100	1.6	0.22	0.0784	36×42×4
45BF008	3	1.5/3	27	0.2	0.118	500	129	0.4	0.137	45×58×4
55BF009	4	0.9/1.8	27	3	0.784	2500	1.2	0.78	0.701	55×70×6
75BF001	3	1.5/3	24	3	0.392	1750	0.62	1.1	1.274	75×53×6
90BF006	5	.36/0.72	24	3	2.156	2400	0.76	2.2		90×65×9
150BF003	5	0.75/1.5	80/12	13	15.68	2600	0.127	16.5	10.29	150×178× 18

三、步进电动机的基本工作状态

步进电动机的基本工作状态可分为静态、稳态、过渡状态三种。

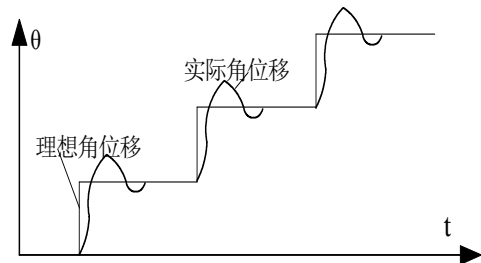
1、静态

静态是指步进电动机某相通以恒定的电流，使转子处于固定位置的状态。在静态时，绕组中的电流最大，有时会产生发热现象。

2、稳态

它是指步进电动机在某一固定频率下恒速运转状态。它分为以下三个区：

(1) 低频区 步进电动机工作于较低的频率区内，在这个范围内，步进电动机转子每转动一步的时间比换相周期小。这时步进电动机好像工作于单步状态。在每步转动的过程中，转子都是从零开始以较大的加速度起动，然后再以衰减振动的形式停在新的平衡位置（如图 5-8 所示）。所以在低频区工作的步进电动机会引起较大的振动并影响精度。



5-8 低频步进示意图

(2) 共振区 当频率在接近转子的共振频率或在共振频率整数倍的区域为共振区。在这个区内会产生较大的振动，在使用中要设法避免。

(3) 高频区 这是高于共振区的频率区间。在这个区间内步进电动机能正常工作。

可见，步进电动机有一个合理的工作频率范围。

3、过渡状态

过渡状态是指步进电动机从一种工作状态转变到另一工作状态。起动、制动、反转过程都是过渡过程。过渡过程中频率变化差值应小于起动频率。为了避免步进电动机在过渡状态中失步，应在控制脉冲频率上采取办法来解决。通常使用升降速控制。

四、步进电动机驱动电路

步进电动机驱动电路主要由输入脉冲信号隔离接口、环形分配环节和功率放大电路等部分组成，如图 5-9 所示。

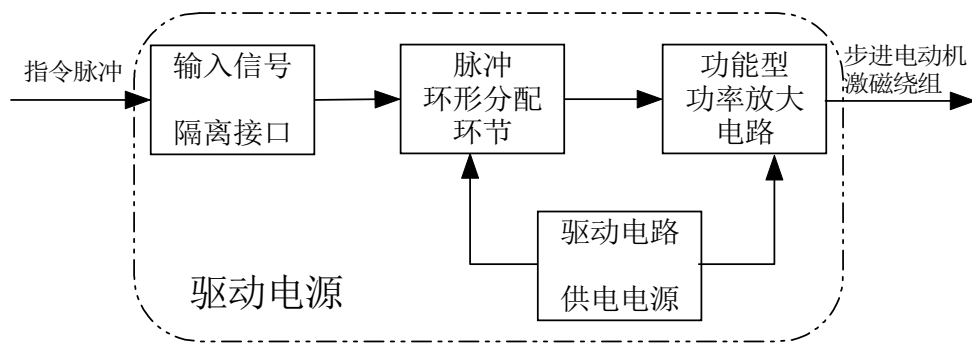


图 5-9 步进电动机驱动电路结构框图

实际上，生产步进电动机的厂商一般都有相应的配套驱动电路供应，另外，还有一些专业厂商专门研发和生产步进电动机驱动装置，设计伺服系统时可以选用。下面介绍驱动电路的基本原理，在要求不高的情况下，也可以考虑按此原理自行制作。

1、光电耦合隔离接口

数控装置输出的脉冲控制信号在和步进电动机的驱动电路相联接时，都必须设置一个光电耦合隔离接口，以防止外部驱动电路对计算机内部极敏感集成电路的干扰和损坏。光电耦合接口通过光强变化或光脉冲把“弱电”和“强电”联系起来，使两者之间完全脱离了电的关系，将控制计算机和外部驱动电路完全隔离开来。

具体的光电耦合电路如图 5-10。最普通的光电耦合隔离电路的工作频率大约在 100kHz 以下。在此电路中特别要注意的是：来自数控装置的电路通道与输出到功率放大的电路通道必须完全隔离。其中包括两路通道的接地也不允许联在一起！

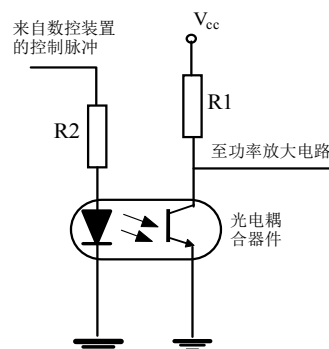


图 5-10 光电耦合隔离电路

当有脉冲信号输入时，发光二极管点亮，通过光能的作用使光电耦合器件中的光敏三极管导通，此时功放端电压基本被电阻 R_1 吸收，光电耦合隔离电路的对外输出是低电平。无脉冲信号输入时，输出端呈高电平。如果将 R_1 接到光电耦合器件的下方，则输出的情况就完全相反。

2、脉冲的环形分配器

步进电动机各相激磁绕组通电次序的环形分配有硬件和软件两种实现方式。

(1) 硬件环形分配器

硬件环形分配器的种类很多，它可由 D 触发器和 JK 触发器构成，亦可采用专用集成电路或通用可编程逻辑器件。

图 5-11 是三相步进电动机六拍工作时的环形分配器。它由与非门和 JK 触发器组成。指令脉冲加到触发器的时钟端，控制脉冲输出速度。正反相控制端控制转向，高电平有效。

目前市场上有许多专用的集成电路环形脉冲分配器出售，集成度高，可靠性好，有的还有可编程功能。如国产的 PM 系列步进电机专用集成电路有 PM03、PM04、PM05 和 PM06 分别用于三相、四相、五相和六相步进电机的控制。进口的步进电机专用集成电路有 PMM8713

(用于控制三相和四相步进电动机)、PMM8714 (用于控制五相步进电动机) 等许多品种, 它们的具体应用方法可查阅相关的资料或手册。

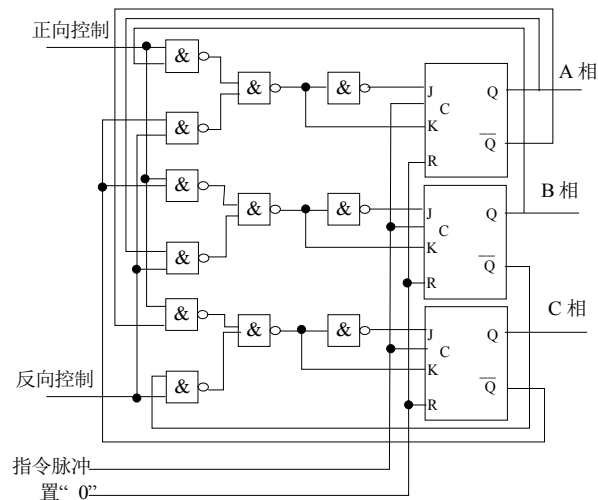


图 5-11 三相六拍环形分配器

(2) 软件环形分配

软件环形分配是由计算机的内部工作程序来完成, 因此它应放在光电耦合隔离电路之前。

软件环形分配器的设计方法有多种, 下面介绍常用的查表法软件环形分配器的工作原理。

首先结合驱动电源线路, 按步进电机励磁状态转换表求出所需的环形分配器输出状态表, 将其存入内存地址中。图 5-12 为软件环形分配器伺服系统框图。步进电机的三相定子绕组 A、B、C, 分别经各自的放大器、光电耦合隔离器与计算机的 PIO 的 PA₀、PA₁、PA₂ 相连。环形分配器的输出状态如表 5-2 所示, 表中的内容即步进电机的励磁状态, 与接口的接线紧密相关。然后编写程序, 根据步进电机的运转方向按表地址的正向或反向, 顺序依次取出地址的内容并输出, 即依次输出表示步进电机各个励磁状态的二进制数, 则步进电动机就正转或反转以步进方式运行。

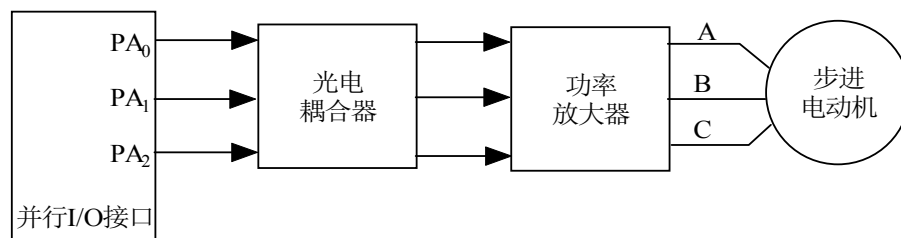


图 5-12 软件环形分配伺服系统框图

表 5-2 步进电动机软件环形分配器的输出状态表

节拍 序号	C	B	A	存贮单元		方向
	PA ₂	PA ₁	PA ₀	地址	内容	
0	0	0	1	2A00H	01H	↓ 正转
1	0	1	1	2A01H	03H	
2	0	1	0	2A02H	02H	
3	1	1	0	2A03H	06H	
4	1	0	0	2A04H	04H	
5	1	0	1	2A05H	05H	

虽然软件环形分配器简化了驱动电路的硬件，但是，每次步进电机运行时，都要调用该程序，占用一定的运算时间，使原来就紧张的 CNC 系统资源又增加了一定的负担。所以，现在用的比较多的还是硬件环形分配器。

3、功率放大电路

从环形分配器输出的进给控制信号的电流只有几毫安，而步进电机的定子绕组需要几安培的电流，因此需要对从环形分配器输出的进给控制信号进行功率放大。由于功率放大器中的负载为步进电机的绕组，是感性负载，与一般功放不同点就由此产生，主要是：尽快建立激磁绕组的工作电流，保持激磁绕组中的额定工作电流，断电后在最短时间内消除剩余电流的影响。下面介绍几种功率放大电路。

(1) 简单限流电阻电路（如图 5-13a）：在功率放大电路中，一般都用开关型三极管作为导通、切断工作电流的控制元件。步进电动机产品铭牌上标示的额定工作电压就是为尽快建立激磁绕组额定工作电流所设定的较高电压。因激磁绕组的电感性质，在电压施加于该功率放大电路的瞬间，电路中没有工作电流，限流电阻不产生电压降，所以激磁绕组两端直接以额定电压起动。当电流逐渐建立和增大时，限流电阻上的电压降也随之增高。最后，工作电流达到稳态的额定工作电流。

如 55BF004 步进电机，额定电压为 27V，额定电流为 3A，线圈电阻为 0.54Ω，三极管上压降粗略估计成 1V，则限流电阻的阻值大约为：

$$R=(27-1)/3-0.54\approx 8\Omega$$

(2) 增加续流二极管电路（如图 5-13b、c）：只用限流电阻的驱动电路解决了使励磁绕组在高压下快速起动和限流问题，但没有解决绕组断电时的惯性电流问题。为此，在电路中并联一个反向二极管，用来释放断电后激磁绕组内部出现的惯性电流（续流电流）。该二极管至少应能耐受两倍以下额定工作电压的冲击。可在回路中串联适当的电阻以耗散惯性电流的能量。

(3) 并联增流电容电路（如图 5-13d）：为使激磁绕组在通电瞬间的工作电流建立得更加迅速，可在限流电阻的两端再并联一个大电容来减小回路的动态阻抗，而稳态工作时的阻抗仍然仅为限流电阻本身。

(4) 双电压工作电路（如图 5-13e）：在前述的功率放大电路中，限流电阻总要耗散能量，使这种电路的效率降低，只能应用于驱动能力较小的情况。如果安排两种供电电压，分别承担高压起动和在额定电流下工作的任务，则可以提高驱动电路的工作效率。图中 V1 控制高电压的输入，V2 控制整个激磁绕组是否开通。为防止高压电路对低压电路的“窜入”，

在低压输入端串联一个保护二极管 D。

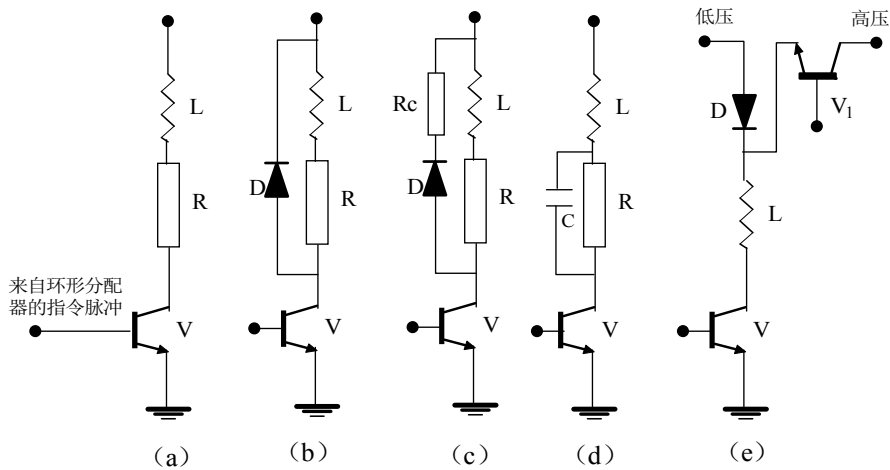


图 5-13 几种步进电动机驱动电路

对高电压输入的控制大都采用定时控制的方式，根据步进电动机驱动功率及整个系统惯量的不同，高电压接入的时间一般约在 0.1~1ms 之间。

4、步进电动机的细分驱动技术

用分相输入的方波脉冲来实现步进电动机转子的运动是按设定步矩角的断续转动。目前步进电动机产品的最小步矩角只有 0.9° 和 0.75°，也就是说：如果简单地使用步进电动机按步距角进行步进驱动，其对整个圆周的最细分割仅为 1/400 或 1/480，这一数值不仅难以满足日趋精细的伺服传动的需要，而且还存在由于断续运动所引起的运动不平稳、工作噪声大等问题。

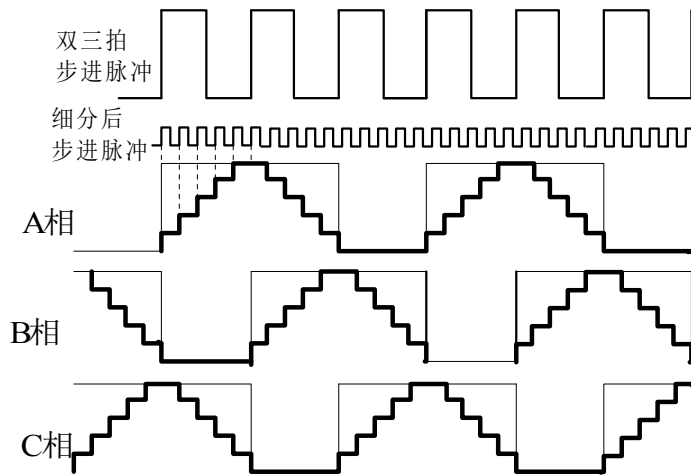


图 5-14 三相步进电动机双三拍细分时各相电流时序图

在三相步进电动机的双三拍通电的方式下，是两相同时通电，转子的齿与定子的齿不对齐而是停在两相定子齿的中间位置。若两相通以不同大小的电流，那么转子的齿不会停在两

齿的中间，而是偏向通电电流较大的那个齿。如果把额定电流分成 n 个台阶进行通电，转子就以 n 个通电台阶所决定的步数来完成原有一个步距角所转过的角度，使原来的每个脉冲走一个步距角，变成了每个脉冲走 $1/n$ 个步距角，即把原来一个步距角细分成 n 份，从而提高步进电动机的精度（如图 5-14 所示）。我们把这种控制方法称为步进电动机的细分控制。

步进电动机细分后，由 n 微步来完成原来一步距所转过的角度，所以在电动机和机械系统不变的情况下，通过细分驱动可得到更小的脉冲当量，因而提高了定位精度。由于绕组电流均匀由小增到最大，或由最大均匀减到最小，避免了电流冲击，基本消除步进电动机低速振动，使步进电动机低速运转平稳，无噪声。步进电动机细分控制在实际中得到广泛应用。

近年来，能够作很大程度细分的步进电动机产品与配套的驱动电路（驱动电源）商品层出不穷，某些产品可以细分至基本步距的几十分之一、甚至数百分之一，作为机电伺服技术的工程应用者，其主要任务应该是详细了解各种产品的性能与可靠性，并正确地进行选用。

§ 5-3 直流伺服电动机及其速度控制

以直流电机作为驱动元件的伺服系统称为直流伺服系统。因为直流伺服电机实现调速比较容易，动态响应快，所以，在数控机床上得到了广泛的应用。

一、 直流伺服电动机的结构和种类

在数控机床上常用的直流伺服电动机主要有以下几种：

1、小惯量直流伺服电动机

为尽量减小电枢的转动惯量，小惯量直流伺服电动机转子设计成光滑无槽铁心的形式，电枢线圈用绝缘粘合剂直接粘于铁心表面。又因为转动惯量与转动物体半径的平方成正比，所以将转子的直径设计得较小、而长度相对很长，使电动机能够得到相同的输出转矩。

这种电动机的转子转动惯量只有一般直流电动机的十分之一，机电时间常数也只有几个毫秒（一般直流电动机至少几十毫秒），响应速度快，有利于伺服工作中的频繁启停。由于转子没有开槽，所以它运转时的均衡性好，低速状态下运行时无爬行现象。主要用在进给伺服系统中。

2、大惯量直流伺服电动机

大惯量直流伺服电动机又称为大惯量宽调速直流伺服电动机，其结构与普通直流电动机比较相似。由于电动机转子的惯量较大，系统中负载部分的惯量影响已经不占主导地位，负载的变化及不稳定对系统影响较小，这种直流电动机用在主轴伺服系统中较多。

直流伺服电动机的品种很多，随着科学技术的发展，至今还在不断出现新品种及新结构。

一般情况下，直流电动机定子由励磁线圈或永磁材料形成磁场，由于新型永磁材料的磁场强度越来越高，成本越来越低，所以，现在数控机床上所用的直流伺服电动机，其定子大多数为永磁材料制成。

二、 直流电动机工作原理及特性

1、直流电动机工作原理

如图 5-15 所示，直流电动机由磁场（定子）、电枢（转子）、电刷和换向片三部分组成。根据电磁力安培定律，通电导线在磁场中要受到力的作用。力的大小为 $F = B I l$ (B —磁场强度，

I —导线中通过的电流, l —导线在磁场中的有效长度), 受力方向用左手定则判断。

当磁场由永磁材料形成时, 磁场强度一定, 直流电动机的输出转矩为:

$$T = K_T i_a \quad (5-1)$$

其中: T —直流电动机的输出转矩;

K_T —与直流电动机结构及磁场性质相关的转矩常数;

i_a —电枢线圈中通过的电流。

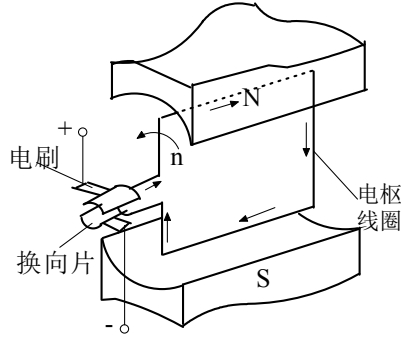


图 5-15 直流电机工作原理示意图

从公式 (5-1) 可以看出, 直流电动机的输出转矩与电枢线圈的电流成十分简单的线性比例关系, 只要磁场充分强、线圈的匝数足够多或者电动机的电枢线圈能够允许通过相当大的电流, 电动机就可以输出很大的转矩。

当直流电动机处于某工作转速时, 电枢线圈在定子磁场中的转动相当于导体作切割磁力线的运动, 根据楞次定律, 将产生感应电动势, 此感应电动势的大小与定子磁场的强度、电枢线圈在磁场中的有效长度以及线圈导线的运动速度成比例。由此推知: 这种感应电动势 (反电势) 将与电枢所处的工作转速成正比:

$$E_b = K_b n \quad (5-2)$$

其中: E_b —电枢在定子磁场中转动时电枢线圈所产生的反电势;

K_b —与结构及磁场性质相关的直流电动机磁常数;

n —直流电动机的工作转速。

假设施加在电枢线圈上的电压为 u_a , 它应当主要用以克服反电势。但是, 由于电枢线圈本身必然有电阻, 也要耗散一部分能量, 故外加的电压还要在电枢线圈上有损耗。所以有:

$$u_a = E_b + i_a R_a \quad (5-3)$$

其中: R_a —电枢线圈本身的电阻。

将式 (5-1)、(5-2)、(5-3) 联立后得出以关系:

$$n = \frac{1}{K_b} u_a - \frac{R_a}{K_b K_T} T \quad (5-4)$$

式 (5-4) 综合表述了稳态条件下直流电动机的输出转矩、施加在电枢线圈上的电源电压、工作转速以及电动机自身结构和性能参数之间的关系。为更明确地描述, 可把该关系用直流电动机的机械特性图 (5-16a) 和调速特性图 (5-16b) 来表示。

2、直流电动机的机械特性和调速特性及调速原理

机械特性图显示：直流电动机的工作转速主要取决于施加于电枢线圈上的电源电压。而且，在某一电源电压下，随着负载转矩的增大，因为电枢线圈中电流的增大加大了线圈电阻上的压降，使电动机的工作转速有所下降，这种现象在工程上习惯称为动力源特性的“硬”、“软”。显然，电枢线圈电阻对机械特性的软硬起着十分关键的作用。电阻越小，电动机的机械特性越硬，反之变软。按机械特性是稍微向下倾斜的直线的趋向。从图上看，似乎直流电动机可以无限大的输出转矩，但实际上输出转矩还要受电动机结构散热能力的限制，当电枢线圈中的电流过大时，过高的温升将破坏线圈绕组的绝缘，使电动机损坏。

调速特性图说明：对电枢线圈所施加的电源电压越高，则电动机相应的工作转速就越高，两者之间是比较理想的线性关系。当电动机要求的输出转矩增加时，需要以更高的电源电压才能实现原定的工作转速。

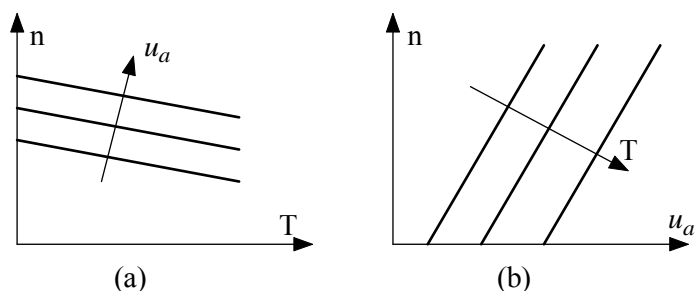


图 5-16 直流电动机的机械特性和调速特性

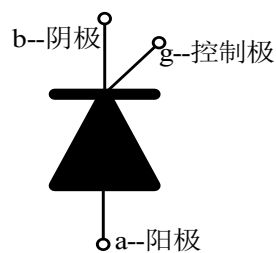
直流伺服电动机速度控制方式主要有两种：一种是电枢电压控制，即在定子磁场不变的情况下，通过控制施加在电枢绕组两端的电压来控制电动机的转速和输出转矩（永磁式直流伺服电动机只能采用这种方式）；另一种是励磁磁场控制，即通过改变励磁电流大小来改变定子磁场强度，从而控制电动机的转速和输出转矩。

采用电枢电压控制方式时，由于定子磁场保持不变，其电枢电流可以达到额定值，相应的输出转矩也可以达到额定值（公式 5-1），而且，转速和电压呈直线关系，调速过程平稳，实现容易，所以，在直流伺服系统中大多采用电枢调压调速。

三、晶闸管调速系统

晶闸管是晶体闸流管（Thyristor 的中文译名）的简称，亦可称为可控硅（Silicon Controlled Rectifier 的中文译名，英语简称为 SCR）。它是一种大功率的半导体器件，它具有体积小、重量轻、耐压高、容量大、使用维护简单、控制灵敏等优点。同时它的功率放大倍数很高，可以用微小的信号功率（几十到一、二百毫安的电流，二、三伏的电压）对大功率（电流为几百安、电压为数千伏）的电源进行控制。

晶闸管的代表符号如右图。晶闸管的导通条件为：除在阳极-阴极间加上一定大小的正向电压外，还要在控制极-阴极间加正向触发电压。只有电路满足这两个条件，晶闸管才能导通，



否则就处于阻断状态。一旦管子触发导通后，控制极即失去控制作用，这时要使电路阻断，必须使阳极电压降到足够小（关断性能不好）。

图 5-17 (a) 为单相晶闸管整形放大电路。变压器副边绕组上的电压波形如 (b) 所示。假如 T_1 、 T_2 都是功率两极管，则转子线圈上的电压波形将如图 (c) 所示。图 (d) 表示了控制极触发脉冲的相位角，通过控制 α 角的大小，就可以控制 L 上的电压平均值，从而实现控制直流电动机的转速。由于电枢的电感较大，加上 D 的续流作用，通过 L 上的电流 i_L 基本上是连续的， i_L 的波形几乎是一条直线。

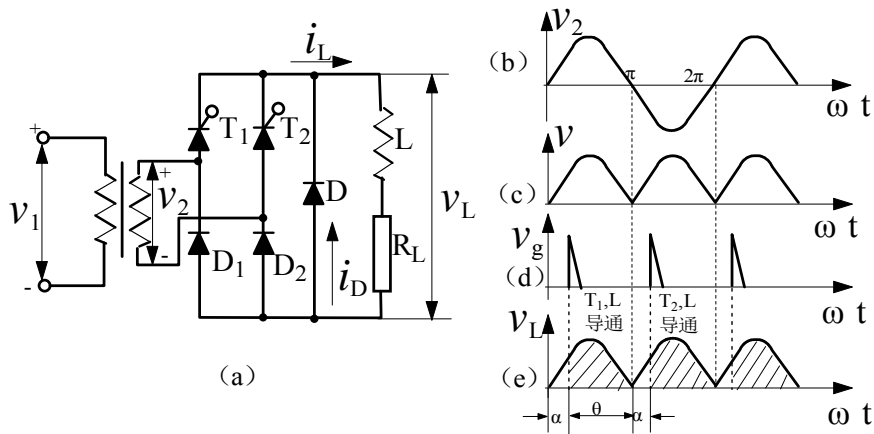


图 5-17 单相桥式晶闸管整形放大电路

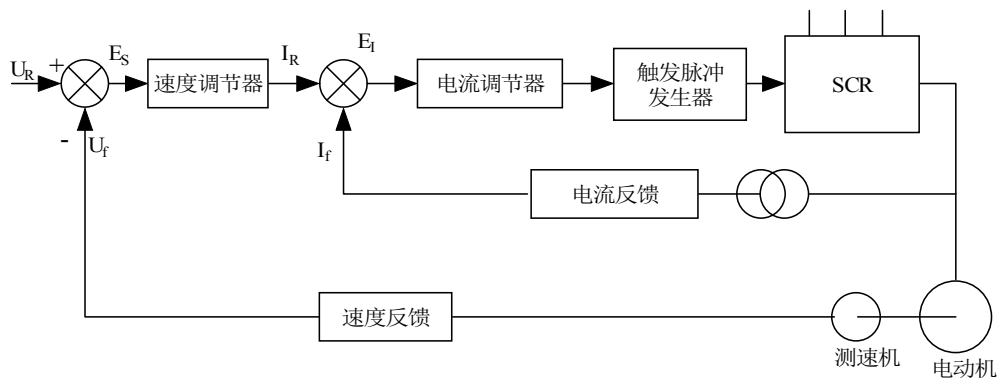


图 5-18 晶闸管直流调速单元结构框图

图 5-18 所示为晶闸管直流调速单元结构框图。该系统由内环—电流环、外环—速度环和可控硅整流功率放大器等组成。内环电流环的作用是，由电流调节器对电动机电枢回路中引起滞后作用的某些时间常数进行补偿，使动态电流按所需的规律变化。 I_R 为电流参考值，来自速度调节器的输出。 I_f 为电流的反馈值，由电流传感器取自电枢回路。SCR 为可控硅整流功率放大器。外环为速度环， U_R 为来自数控装置经 D/A 变换后的模拟量参考值，该值也就是速度的指令信号，正负极性对应于电动机的转动方向。 U_f 为速度反馈值。速度的测量，目前多

用两种元件：一种是测速发电机，可直接装在电动机轴上，其输出电压的大小即反应了电动机的转速。另一种是光电脉冲发生器，也直接装在电动机的转轴上，光电脉冲发生器发出的脉冲经频压变换，其输出电压反应了电动机的转速。 U_R 与 U_f 的差值 E_s ，为速度调节器的输入，该调节器的输出就是电流环的输入参考值。

直流晶闸管调速系统的工作原理如下：

(1) 当速度指令信号增大时，速度调节器输入端的偏差信号加大，输出信号也随之增加，电流调节器输入和输出同时增加，因此使触发器的输出脉冲前移， α 角减小，电枢回路电压增高，电动机转速上升。同时速度检测信号值增加，当达到给定的速度值时，偏差信号为 0，系统达到新的平衡状态，电机按指令速度运行。当电机受到外负载干扰，如外负载增加时，转速下降，速度调节器输入偏差增大，与前面产生同样的调节效果。

(2) 当电网电压产生波动时，如电压减小，主回路电流随之减小。这时，电动机由于转动惯量速度尚未发生改变，但电流调节器的输入偏差信号增加，输出增加，使触发器脉冲前移，功放输出电压增加，使电流恢复到指定值，从而抑制了主回路电流的变化，起到了维持主回路电流的作用。

(3) 当速度给定信号为一个阶跃信号时，电流调节器输入一个很大的值，但其值已达到整定的饱和值。此时电动机以系统控制作用的最大极限电流运行，从而使电动机在加速过程中始终保持最大转矩和最大加速状态，以缩短起动、制动过程。

由此可见，双环调速系统具有良好的动、静态指标，其起制动过程快，可以最大限度地利用电动机的过载能力，使电动机运行在极限转矩的最佳过渡过程。其缺点是：在低速轻载时，电动机电流出现断续现象。机械特性变软，整流装置的外特性变陡，总放大倍数降低，动态品质恶化。为此可采取电枢电流自适应调节方案。也可以增加一个电压调节器内环，组成三环系统来解决。

四、 晶体管脉宽调制 (PWM) 调速控制

与晶闸管相比，晶体管开关特性好，控制电路简单，克服了可控硅调速系统的波形脉动，而且目前功率晶体管的耐压等性能都已大大提高。因此，在中、小功率直流伺服系统中，晶体管脉宽调制 (Pulse Width Modulation, 简称 PWM) 方式驱动系统已得到广泛应用。

1、直流电动机的 PWM 调速原理

所谓脉宽调制，就是使功率晶体管工作于开关状态，开关频率恒定，用改变开关导通时间的方法来调整晶体管的输出。使电动机两端得到宽度随时间变化的电压脉冲。当开关在单周期内的导通时间随时间发生连续地变化时，电动机电枢得到的电压的平均值也随时间连续地发生变化，而由于内部的续流电路和电枢电感的滤波作用，电枢上的电流则连续地发生变化，从而达到调节电动机转速的目的。

图 5-19 是用方波电压调速的原理图，用大功率晶体管的开关作用，将直流电源电压转换成频率约 2000Hz 的方波电压，送给直流电动机的电枢绕组。通过对晶体管导通时间长短的控制，来控制加到电枢绕组两端的平均电压，达到调速的目的。图中 T 为开关周期，如果开关频率为 2000Hz，则 $T=0.0005s$ ； τ 为每次导通的时间，则电枢两端的平均电压为

$$U_L = \frac{\tau}{T} U \quad (5-5)$$

其中 $\frac{\tau}{T}$ 导通率，改变导通率可改变 U_L 。

在电枢两端接有续流二极管，当晶体管导通时二极管不导通；当开关晶体管阻断时，电枢绕组产生的感应电流通过它构成闭合回路。

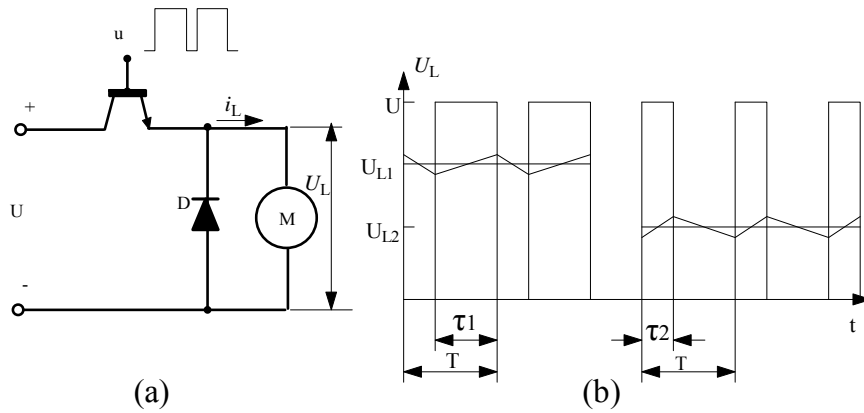


图 5-19 脉宽调制示意图

2、电压脉宽调制器

脉宽调制器的任务是将连续控制信号变成方波脉冲信号，作为功率转换电路的基极输入信号，控制直流电动机的转速和转矩。

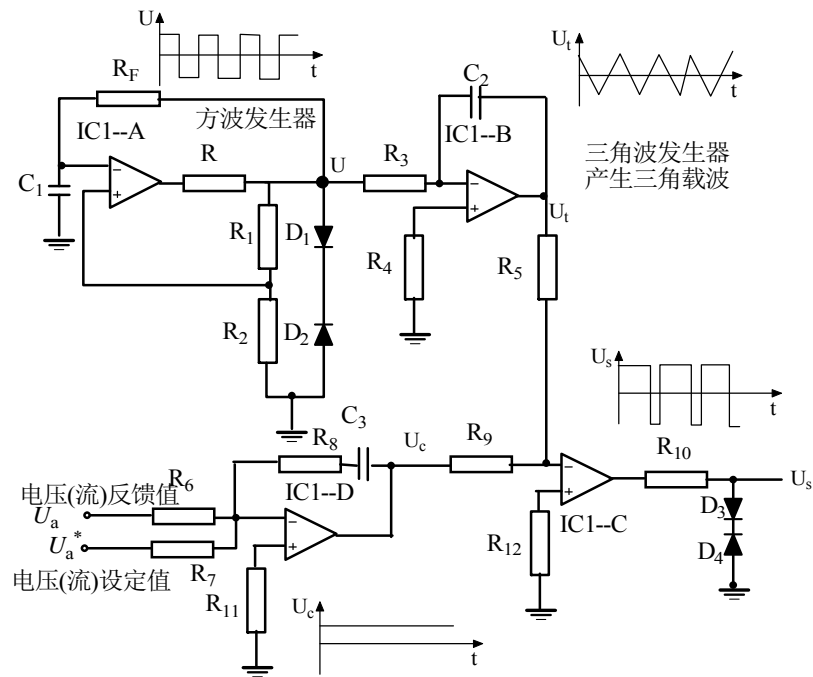


图 5-20 三角波脉冲宽度调制器原理图

脉冲宽度调制器的种类很多，但从构成来看，都是由两部分组成，一是调制信号发生器，二是比较放大器。而调制信号发生器都是采用三角波发生器或是锯齿波发生器。下面介绍一种用三角波作为调制信号的脉宽调制器（如图 5-20 所示）。

图中的三角波发生器由两个运算放大器构成，IC1—A 是多谐振荡器，产生频率恒定且正负对称的方波信号，IC1—B 是积分器，把输入的方波变成三角波信号 U_t 输出。三角波发生器输出的三角波应满足线性度高和频率稳定的要求。只有满足这两个要求才能保证调速精度。

三角波的频率对伺服电动机的运行有很大的影响。由于 PWM 功率放大器输出给直流电动机的电压是一个脉冲信号，有交流成份，这些不做功的交流成份会在电动机内引起功耗和发热，为减少这部分的损失，应提高脉冲频率，但脉冲频率又受功率元件开关频率的限制。目前脉冲频率通常为 2000~4000Hz，脉冲频率是由三角波调制的，三角波频率等于控制脉冲频率。

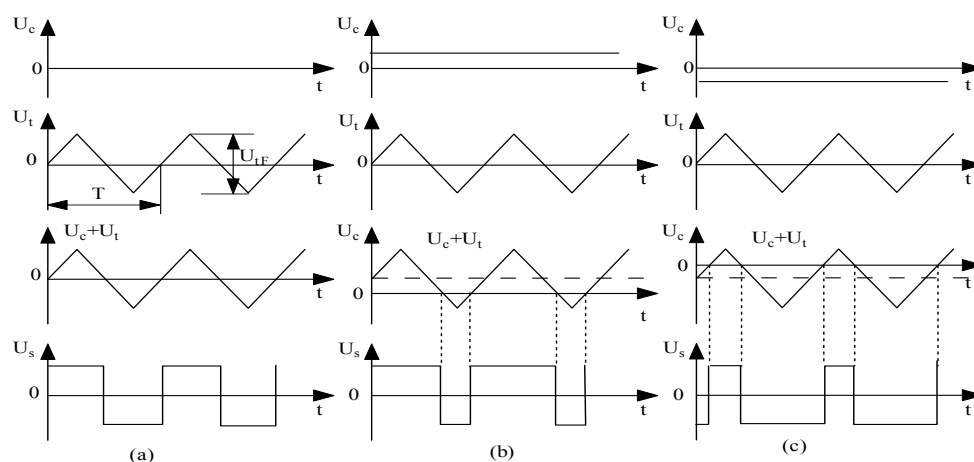


图 5-21 PWM 脉宽调制波形图

比较器 IC1—C 的作用是把输入的三角波调制信号 U_t 和控制信号 U_c 相加输出脉宽调制波，如图 5-21 所示。当外部控制信号 $U_c=0$ 时，比较器的输出为正负对称的方波（图 5-21 (a)），直流分量为零，电动机不转。当 $U_c>0$ 时， U_c+U_t 对接地端是一个不对称三角波，平均值高于接地端，因此输出方波的正半周较宽，负半周较窄。 U_c 越大，正半周的宽度越宽，直流分量也越大（如图 5-21 (b)）。当控制信号 $U_c<0$ 时， U_c+U_t 的平均值低于接地端，IC1—C 输出的方波正半周较窄，负半周较宽。 U_c 越小，负半周越宽（如图 5-21 (c)）。

脉冲宽度调制也可以由全数字软件生成。

3、开关功率放大器

开关功率放大器是脉宽调制速度单元的主回路，其结构形式有两种形式，一种是 H 型（也称桥式），另一种是 T 型。每种电路又有单极性工作方式和双极性工作方式之分，而各种不同的工作方式又可组成可逆开关放大电路和不可逆开关放大电路。图 5-22 所示，为一种 H 型功率放大电路，由四个功率管组成的桥式结构的功率放大电路，由四个续流二极管构成在晶体管关断时的直流伺服电动机绕组中能量的释放回路。 U_s 来自电压脉宽变换器的输出， $-U_s$ 可通过对来自电压脉宽变换器的输出反相获得。当 $U_s>0$ 时，VT₁ 和 VT₄ 导通；当 $U_s<0$ 时，VT₂ 和 VT₃ 导通。直流供电电源 $+E_s$ 由三组全波整流供电。

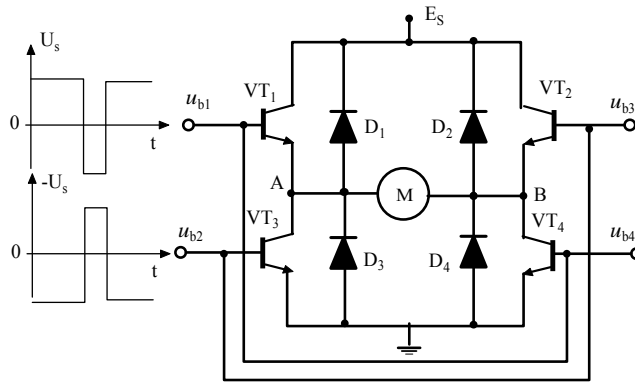


图 5-22 H 型桥式 PWM 功率放大器电路原理图

按照控制指令的不同情况,该功率放大电路及其所驱动的电机的有以下 4 种工作状态。

(1) 当 $U_c=0$ 时, U_s 的正脉宽等于负脉宽, 直流分量等于零, VT_1 和 VT_4 导通时间与 VT_2 和 VT_3 的导通时间相等, 流过电枢绕组中的平均电流等于零, 电动机不转。但在交流分量作用下, 电动机在停止位置处微振, 这种微振有动力润滑作用, 可消除电动机启动时的静摩擦, 减少启动电压。

(2) 当 $U_c>0$ 时, U_s 的正脉宽大于负脉宽, 直流分量大于零, VT_1 和 VT_4 导通时间大于 VT_2 和 VT_3 的导通时间, 流过电枢绕组中的平均电流大于零, 导致电动机正转。并且, 随着 U_c 增加, 转速亦增加。

(3) 当 $U_c<0$ 时, U_s 的正脉宽小于负脉宽, 直流分量小于零, 流过电枢绕组中的平均电流小于零, 导致电动机反转。并且, 随着 U_c 减小, 转速增加。

(4) 当 $U_c \geq U_{TF}/2$ 或 $U_c \leq -U_{TF}/2$ 时, U_s 为正或负的直流信号, VT_1 和 VT_4 、或 VT_2 和 VT_3 始终导通, 电动机在最高转速下正转或反转。

现在, 商品化的直流伺服电动机调速模块产品非常多, 在选用时应详细了解各种品牌产品的性能及可靠性。

§ 5-4 交流伺服电动机及变频调速

如前所述, 由于直流伺服电动机具有优良的调速性能, 因此长期以来, 在要求调速性能较高的场合, 直流伺服电动机调速系统一直占据主导地位。但是, 由于直流伺服电动机的电刷和换向器易磨损, 有时产生火花, 而且结构复杂, 制造成本较高, 随着微电子技术和交流变频技术的快速发展, 加上高性能材料及精密加工等新技术的日新月异, 在某些场合, 直流伺服电动机已被交流伺服电动机代替。交流伺服电动机结构简单, 动态响应好, 输出功率较大, 因而在数控机床上被越来越广泛应用。

一、交流伺服电动机的种类和工作原理

交流伺服电动机分为交流永磁式伺服电动机和交流感应式伺服电动机。永磁式交流伺服

电动机相当于交流同步电动机，常用于进给伺服系统；感应式相当于交流感应异步电动机，常用于主轴伺服系统。

1、永磁式交流同步电动机

永磁式交流同步电动机由定子、转子组成，一般都带有检测元件。定子上嵌有三相绕组，转子由多块永久磁铁和冲片组成，检测元件为光电脉冲发生器或测速发电机，用以检测电动机转速。其工作过程如下：

当定子三相绕组通以交流电后，产生一旋转磁场，这个旋转磁场以同步转速 n_s 旋转，如图 5-23 所示。根据磁极的同性相斥，异性相吸的原理，定子旋转磁场与转子永久磁场磁极相互吸引，并带动转子一起旋转。因此转子也将以同步转速 n_s 一起旋转。当转子轴加上外负载转矩时，转子磁极的轴线将与定子磁极的轴线相差一个 θ 角，当负载增大时，差角 θ 也随之增大。只要外负载不超过一定限度，转子就会与定子旋转磁场一起旋转。

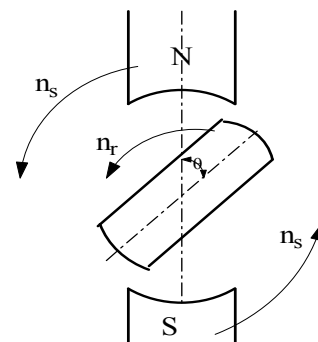


图 5-23 永磁交流电机工作原理

若设其转速为 n_r ，则

$$n_r = n_s = 60f/p \quad (5-6)$$

式中 f —电源交流电的频率，Hz；

p —定子和转子的极对数。

2、交流主轴电动机

交流主轴电动机是基于感应电动机的结构而专门设计的。通常为增加输出功率、缩小电动机体积，采用定子铁心在空气中直接冷却的方法，没有机壳，且在定子铁心上做有通风孔。因此电动机外型多呈多边形而不是常见的圆形。转子结构与普通感应电动机相同。在电动机尾部安装检测用的码盘。

交流主轴电动机与普通感应电动机的工作原理相同。在电动机定子的三相绕组通以三相交流电时，就会产生旋转磁场，这个磁场切割转子中的导体，导体感应电流与定子磁场相作用产生电磁转矩，从而推动转子转动，其转速为：

$$n_r = n_s (1 - s) = \frac{60f}{p} (1 - s) \quad (5-7)$$

式中： n_s —同步转速，r/min；

n_r —转子转速，r/min；

f —供电电源频率，Hz；

s —转差率；

p —极对数；

为了满足数控机床切削加工的特殊要求，出现了一些新型主轴电动机，如液体冷却主轴电动机和内装主轴电动机等。

二、交流伺服电动机变频调速的主电路

由公式 (5-6) 和 (5-7) 可见，只要改变交流伺服电动机的供电频率，即可改变交流伺

服电动机的转速。随着大功率晶体管等电子元件的出现和发展，使改变供电频率成为可能。

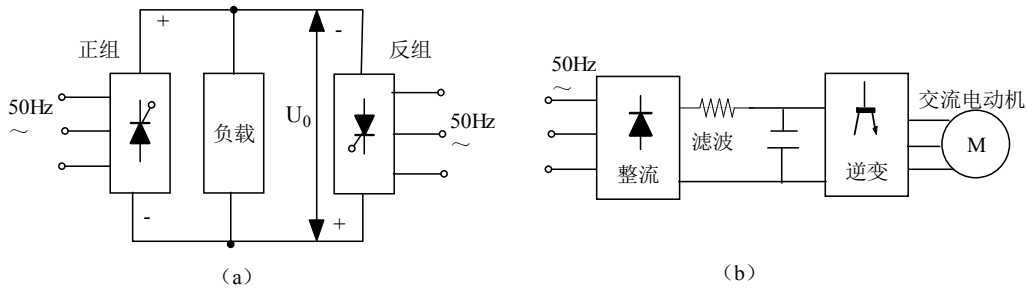


图 5-24 两种变频方式

变频调速的主要环节是为电动机提供频率可变电源的变频器。变频器可分为交-交变频和交-直-交变频两种。交-交变频（5-24a 所示），利用可控硅整流器直接将工频交流电变成频率较低的脉动交流电，正组输出正脉冲，反组输出负脉冲。这个脉动交流电的基波就是所需的变频电压。但这种方法所得到的交流电中波动比较大，而且最大频率即为变频器输入的工频电压频率。在交-直-交变频中（5-24b 所示），它先将交流电整流成直流电，然后将直流电压变成脉冲波电压，这个矩形脉冲波的基波频率就是所需的变频电压。这种调频方式所得交流电的波动小，调频范围比较宽，调节线性好。数控机床常采用交-直-交变频调速。在交-直-交变频中，根据中间直流电压是否可调，可分为中间直流电压可调 PWM 逆变器和中间直流电压固定的 PWM 逆变器；根据中间直流电路上的储能元件是大电容还是大电感，可分为电压型逆变器和电流型逆变器。下面以交-直-交电压型变频器为例说明变频工作原理。

三、SPWM 波调制原理

1、SPWM 波

SPWM 波调制称正弦波 PWM 调制。在直流脉冲宽度调制中，是用三角载波来调制直流电压指令信号，而在这里，指令信号是正弦波。SPWM 波形的定义是：把一个正弦半波分成 N 等分，然后把每一等分的正弦曲线与横坐标所包围的面积用一个与此面积相等的等高矩形脉冲来代替，这样可得到 N 个等高而不等宽的脉冲序列。它对应着一个正弦波的半周，对正负半周都这样处理，即可得到相应的 $2N$ 个脉冲，这就是与正弦波等效的正弦脉宽调制波，其波形如图 5-25 所示。

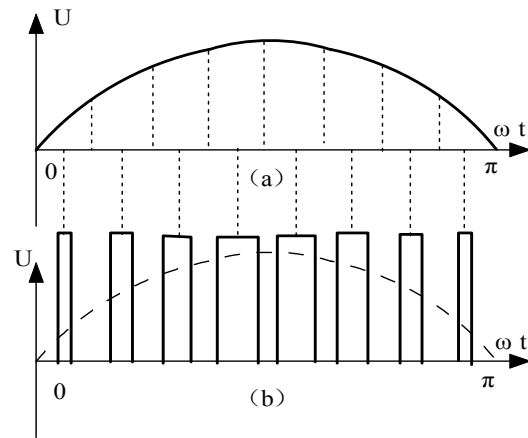


图 5-25 与正弦波等效的 SPWM 波形

2、一相 SPWM 波调制原理

在直流电动机 PWM 调速系统中，PWM 输出电压是由三角载波调制直流电压得到的。同理，在交流 SPWM 中，输出电压是由三角载波调制的正弦电压得到，如图 5-26 所示。三

角波和正弦波的频率比通常为 15~168 或更高。SPWM 的输出电压 U_0 是一个幅值相等，宽度不等的方波信号。其各脉冲的面积与正弦波下的面积成比例，所以脉宽基本上按正弦分布，其基波是等效正弦波。用这个输出脉冲信号经功率放大后作为交流伺服电动机的相电压（电流）。改变正弦基波的频率就可改变电动机相电压（电流）频率，实现调频调速的目的。

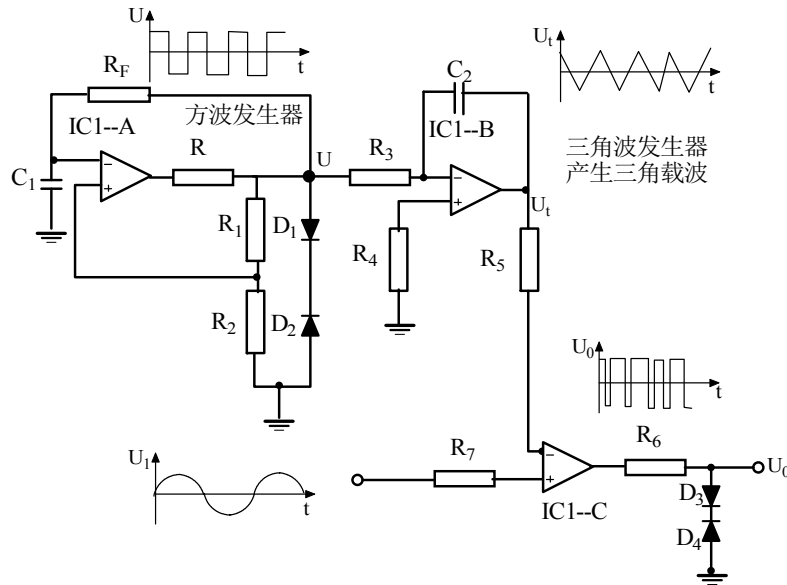


图 5-26 双极性 SPWM 波调制原理（一相）

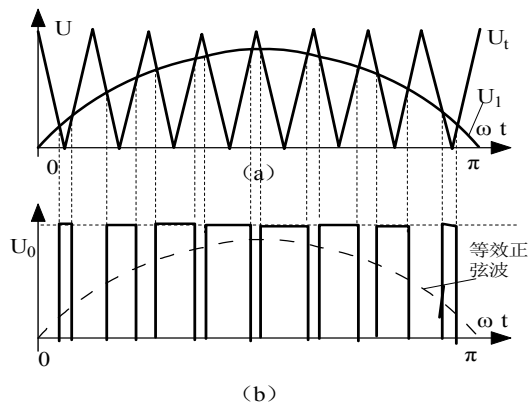


图 5-27 单极性 SPWM 波调制波形图

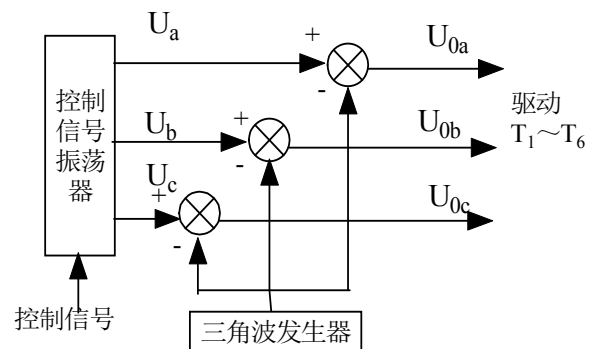


图 5-28 三相 SPWM 波调制原理框图

在调制过程中可以是双极性调制（如图 5-26 中的调制是双极性调制），也可以是单极性调制，（如图 5-27 是单极性 SPWM 调制波形）。在双极性调制过程中同时得到正负完整的输出 SPWM 波。当控制电压 U_1 高于三角波电压 U_t 时，比较器输出电压为“高”电平，否则输出“低”电平。双极性调制能同时调制出正半波和负半波。而单极性调制只能调制出正半波或负半波，再把调制波倒相得到另外半波形，然后相加得到一个完整的 SPWM 波。

3、三相 SPWM 波的调制

在三相 SPWM 调制中，三角调制波 U_t 是共用的（如图 5-28 所示），而每一相有一个输入正弦信号和一个 SPWM 调制器。输入的 U_a 、 U_b 、 U_c 信号是相位相差 120° 的正弦交流信号，其频率为指令速度频率，用来改变输出的等效正弦波的频率，以达到对电动机转速的控制。

4、SPWM 变频器的功率放大

SPWM 调制波经功率放大后才能驱动电动机。图 5-29 为双极性 SPWM 通用型功率放大主回路。图左侧是桥式整流电路，将工频交流电变成直流电；右侧是逆变器，用 $T_1 \sim T_6$ 六个大功率开关管把直流电变成脉宽按正弦规律变化的等效正弦交流电，用来驱动交流伺服电动机。图 5-28 中输出的 SPWM 调制波 U_{0a} 、 U_{0b} 、 U_{0c} 及它们的反向波控制图中的 $T_1 \sim T_6$ 基极。 $D_7 \sim D_{12}$ 是续流二极管，用来导通电动机绕组产生的反电势。功率放大器输出端接在交流伺服电动机上。由于电动机绕组电感的滤波作用，其电流则变成正弦波。三相输出电压（电流）相位上相差 120° 。

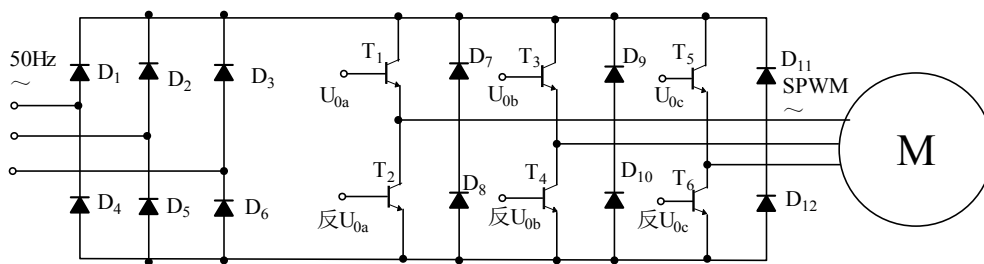


图 5-29 双极性 SPWM 通用型功率放大主回路

四、交流伺服系统组成

一个完整的交流伺服系统主要由变频电源和伺服电动机组成。

1、变频电源

变频电源产品的外形如图 5-30 所示。由于运行时其散热表面的温度可高达 90°C ，所以大多数要求壁挂立式安装，并在电源机壳内配有冷却风扇以保证热量得到充分的散发。在电气柜中应注意给变频电源的两侧及后部留出足够空间，而且在它的上部不应安装容易受影响的器件。多台变频电源安装在一起时要尽量避免竖排安装，如必须竖排则要在两层间配备隔热板。变频电源工作的环境温度不准超过 50°C 。

2、变频电源的选用

在选用变频电源时，主要注意以下问题：

(1) 电网供电方式

交-直-交变频电源仅从电网获得电能，单相、三相供电方式都能够达到此目的。但是，在功率容量较大时，单相供电的相电流太大，联接导线要求很粗，而且对电网的三相平衡不利；因此，在条件许可时应优先考虑选用三相供电方式。在选购变频电源时，两种供电方式的价格是有区别的。

(2) 控制频率的模式

变频电源的频率控制模式有模拟与数字两种。

模拟控制模式又有电压和电流两类输入可以选择。电压控制信号一般在 0~10V 的范围，变频电源自身安排了参考电压的接线端子，用户只要按规定接上一只分压电位器即可。模拟电流控制信号的范围一般为 0~20mA。

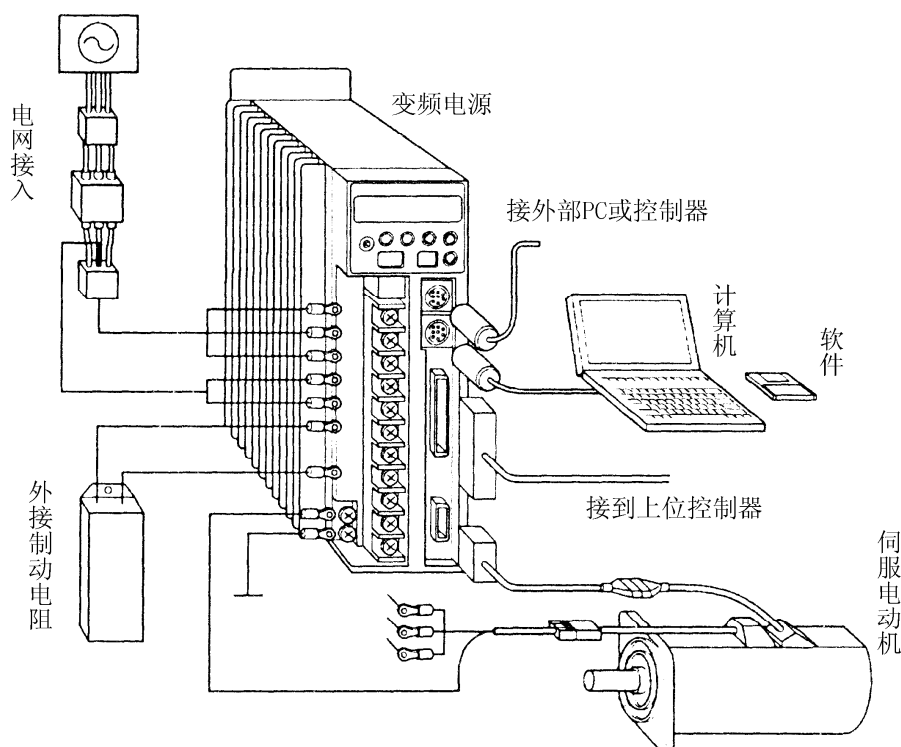


图 5-30 交流伺服系统总体设备接线情况

一般变频电源的数字频率控制都以“频率预选”方式进行，即在频率预选端口以三位二进制数预选工作频率的“档位”，其中“000”大都认定为进入模拟控制模式的选定指令，因此可以预选七个频率档位。各档位的具体频率数值需要按操作说明预先设定。

比较高档的变频电源也具备数字直接输入实时控制运行频率的功能。

(3) 其他参数和功能的说明

实际上，变频电源内部都有单片机进行协调和控制，所以它可以比较容易地实现许多附加的功能，它们主要有：

- ①运行状态显示：当前运行的频率、电动机转速、输出电压、输出电流、实际温度等。
- ②附加控制功能：电动机起动、多段加减速时间常数的选择、转矩的电压补偿和频率补偿、惯性停车或强制制动停车的控制，附加的外部继电器控制触点控制等。
- ③监视与输出功能：频率输出（数学或模拟）、电动机工作电压电流输出、运行过程极限值的记录与输出（频率、电压、电流）、运行状态输出（运转、停车、堵转）等。
- ④故障与报警功能：过热报警、超载报警、堵转报警等。

§ 5-5 位置控制

位置控制是伺服系统的基本环节和运动精度的重要保证。位置控制分为开环、半闭环和闭环。在数控机床的半闭环、闭环伺服系统中，按位置反馈和比较方式不同，分为相位比较、幅值比较、脉冲比较和全数字式伺服系统。

一、 相位伺服控制系统

相位比较伺服系统是数控机床中常用的一种位置控制系统。它的结构形式与所使用的位置检测元件有关，常用的检测元件是旋转变压器和感应同步器，并要工作在鉴相工作方式。图 5-31 为闭环相位比较伺服系统的框图，该系统采用直线形感应同步器作为位置检测元件。它由基准信号发生器、脉冲调相器（或称数字相位变换器）、鉴相器、位置和速度控制单元、功率放大器、检测元件及信号处理电路和执行元件组成。

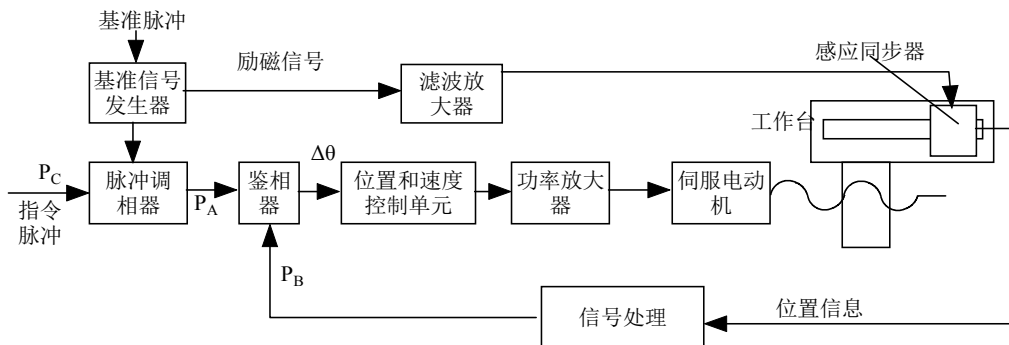


图 5-31 闭环相位比较伺服系统框图

(1) 基准信号发生器

基准信号发生器输出为一定频率的正弦信号或方波信号，其作用是给伺服系统提供相位比较基准。

(2) 脉冲调相器

脉冲调相器的作用是将来自于插补器的进给脉冲信号转换成相位变化的信号，该相位变化信号可以用正弦信号表示，也可用方波信号表示。如果插补器没有进给脉冲输出，则脉冲调相器输出的信号与基准信号发生器产生的基准信号同相，即两者没有相位差。若插补器输出一个正向或反向进给脉冲信号，则脉冲调相器输出的信号超前或滞后基准信号一个相应的相角 ϕ_1 。如果 CNC 插补器输出 N 个正向进给脉冲，则脉冲调相器输出的信号超前于基准信号的相位角为 $\phi = N\phi_1$ 。

(3) 测量元件及信号处理电路

该电路和元件的作用是将工作台的位移检测出来，并转换成与基准信号之间的相位差。

(4) 鉴相器

鉴相器有两个同频率的输入信号 P_A 和 P_B ，其相位均以与基准信号的相位差表示， P_A 为脉冲调相器的输出信号，表示工作台的指令规定位置； P_B 来自信号处理电路，表示工作台的实际位置。当工作台的实际移动距离小于指令脉冲所规定的距离时，这两个信号之间就存在着一个相位差，这个相位差代表工作台实际位置与指令位置之间的差，鉴相器就是鉴别这个

误差的电路，输出一个与此相位差成正比的电压信号。

相位伺服系统利用相位比较原理进行工作。当数控机床的数控装置要求工作台向某一方进给时，插补器就产生一系列的进给脉冲给调相器，作为指令脉冲，其频率和数量分别代表工作台的进给速度和位置，方向代表工作台进给方向。调相器输出的正弦信号的相位与基准信号的相位差和指令信号成正比；当插补器给出正向进给脉冲时，调相器输出信号的相位超前于基准信号相位；当插补器给出反向进给脉冲时，调相器输出信号的相位滞后于基准信号的相位。如果插补器输出 200 个 X 轴正向进给脉冲给调相器，则调相器输出信号超前于基准信号的相位为 $\phi = 200 \phi_1$ (ϕ_1 为单个相差相位角)，即 P_A 值为 $200 \phi_1$ 。在工作台运动前，因工作台没有位移，故测量和处理线路的输出与基准信号同相位，即 P_B 为 0。 P_A 与 P_B 在鉴相器相比较，得相位差 $\Delta \theta = P_A - P_B$ ，输出与 $\Delta \theta$ 成正比的电压信号。这个信号经位置控制单元和速度控制单元后，驱动伺服电动机带动工作台正向进给。当工作台正向移动后，测量元件及信号处理线路输出相位超前于基准信号的相位，并逐渐增加，即 P_B 值逐渐增大，而在鉴相器中的相位比较结果 $\Delta \theta = P_A - P_B$ 逐渐减小，直到 $\Delta \theta$ 为 0，即工作台的位置与指令信号给定位置相同，工作台停止进给。如果插补装置又发出新的进给脉冲，按上述过程继续工作。从伺服系统的工作过程来看，它实际上是一个自动调节系统。如果多个坐标进给，原理一样，只是每个坐标都配一套相位比较伺服系统即可。

二、幅值伺服控制系统

幅值比较伺服系统是以位置检测信号的幅值大小来反映机械位移量的数值，并以此作为位置反馈信号与指令信号进行比较构成的闭环控制系统。检测元件工作在鉴幅工作方式。常用检测元件主要有旋转变压器和感应同步器。

图 5-32 为闭环幅值比较伺服系统框图。幅值系统工作前，指令脉冲数 P_C 与反馈脉冲数 P_F 均没有，比较器输出为 0，这时伺服电动机不会转动。当指令脉冲建立后，比较器输出不再为 0，其数据经 D/A 转换后，向速度控制电路发出电动机运转信号，电动机转动并带动工作台移动。同时，位置检测元件将工作台的位置检测出来，经鉴幅器和电压频率转换器处理，转换成相应的数字脉冲信号，其输出一路作为反馈脉冲 P_F ，另一路送入检测元件的励磁电路。随着工作台的移动，反馈脉冲数量不断增加，比较器输出逐渐减小。当指令脉冲与反馈脉冲两者相等时，比较器输出为 0，说明工作台实际位置与指令所要求的位置相同，电动机停止运转，工作台静止不动。

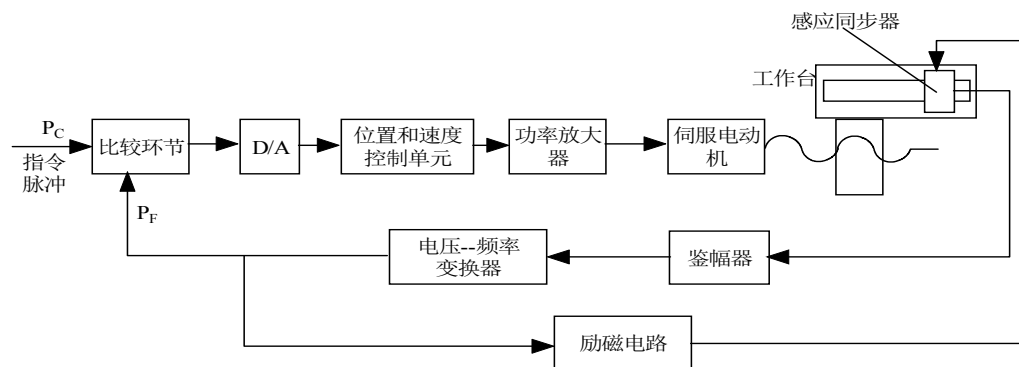


图 5-32 闭环幅值比较伺服系统框图

三、 脉冲比较伺服系统

脉冲比较（也称数字比较）伺服系统是来自于数控插补器指令脉冲数 P_C 与反馈脉冲数 P_F 进行比较，决定位置数字偏差 e ，再经 D/A 转换和放大后给位置调节器、速度调节器和伺服电动机执行，以减少和消除位置偏差。在半闭环系统中，通常使用光电编码盘作检测元件；在闭环系统中，多使用光栅作为检测元件。这种系统的优点是结构比较简单，易于实现数字化控制。在控制性能上，脉冲比较伺服系统优于模拟方式、混合方式的伺服系统。

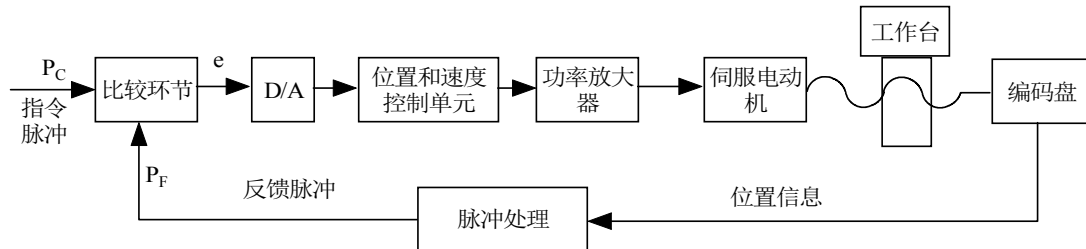


图 5-33 半闭环脉冲比较位置伺服系统

下面以采用光电编码盘为检测元件的半闭环位置控制系统为例（图 5-33），说明其工作原理。

光电编码盘与伺服电动机的转轴相连接，随着电动机的转动产生脉冲序列输出，其脉冲频率与转速成正比改变。插补器和光电编码盘来的脉冲分别由各自数字脉冲—数码转换器转换成数码，其简单的实现方法是可逆计数器，它将输入脉冲进行计算，以数码值输出。对应指令脉冲的数码值为 P_C ，对应反馈脉冲的数码值 P_F 。当工作台处于静止状态时，如果指令脉冲 P_C 为 0，这时反馈脉冲 P_F 也为 0，经比较环节可知偏差 $e = P_C - P_F = 0$ ，则伺服电动机的速度指令为 0，工作台继续保持静止不动。随着指令脉冲的输出 $P_C \neq 0$ ，在工作台尚未移动之前，反馈脉冲 P_F 仍为 0，这时比较器输出的偏差信号 $e = P_C - P_F \neq 0$ ，若指令脉冲为正向进给脉冲，则 $e > 0$ ，由位置速度控制单元驱动伺服电动机，带动工作台正向运动。随着电动机运转，光电编码盘的光电脉冲被送入反馈脉冲计数器， P_F 值增大，只要反馈脉冲的数量 P_C 与指令脉冲的数量 P_F 不等，比较器的输出 $e = P_C - P_F \neq 0$ ，电动机继续运转，反馈计数器值 P_F 连续增加，直到反馈脉冲个数等于指令脉冲个数时， $e = 0$ ，工作台停在指令规定的位置上。如果插补器继续给正向运动指令脉冲，工作台继续运动。当指令脉冲为反向运动脉冲时，控制过程与 P_C 为正时基本相似。只是偏差 $e < 0$ ，工作台反向进给。最后，也应在指令所规定的反向某个位置，在 $e = 0$ 时，准确停止。

四、 CNC 伺服系统和全数字伺服系统

1、CNC 伺服控制系统

前面介绍的位置伺服系统都是用硬件来处理控制信号，而现代 CNC 机床的伺服控制系统称为 CNC 伺服控制系统。CNC 伺服控制系统的最突出特点是位置环（有时也包括速度环）是在计算机内的位置控制单元中闭合，其原理与数字脉冲式或幅值比较式工作原理相似。它利用计算机软件功能，将来自检测元件的反馈信号，与由插补软件产生的指令信号进行比较，求得偏差大小，为保证伺服系统时刻处于最佳状态而对位置增益进行调整；最后将偏差值经数字位置调节器调节，产生速度指令输出。这种伺服控制系统是一种软硬结合、数字信号与

模拟信号结合的混合系统，不仅用软件代替了大量硬件，大大简化了硬件结构，而且具有精度高、稳定性好等优点。

2、全数字式伺服系统

所谓全数字式伺服系统是指系统中的控制信息全用数字量处理。随着数字信号微处理器性能的提高，伺服系统的信息处理可完全用软件来实现。全数字伺服系统是一种离散控制系统，它由采样器和保持器两个环节组成。控制器由软件实现，由位置环、速度环和电流环构成的三环反馈全部实现数字化。

全数字式伺服系统可采用现代控制理论，通过计算机实现最优控制，具有更高的动、静态控制精度。在检测灵敏度、时间及温度漂移和抗干扰性能等方面优于模拟和模拟数字混合伺服系统。

思考和作业题

1. 机床伺服系统以什么作为控制量？按控制方式分为哪几类？常用的伺服执行元件有哪些？
2. 进给伺服系统的作用是什么？进给伺服系统的技术要求有哪些？
3. 步进电机的静态和动态特性主要用哪几个方面表示？
4. 步进电机伺服系统的位移和速度如何控制？
5. 步进电动机的细分驱动有何作用？
6. 欲设计一步进电机伺服系统，已知系统选定的脉冲当量为 0.06 毫米/脉冲，电机与丝杠直连，工作台以滚珠丝杠传动，丝杠的导程为 7.2 毫米。试问：
 - (1) 步进电机的步距角应选多大？
 - (2) 若已选步进电机为三相，转子上开有 40 个小齿，试决定环形分配器的输出应为几相几拍，并写出正向和反向进给时环形分配器输出信号状态的变化顺序。
7. 如图 5-34 所示，采用三相六拍驱动方式的步进电机，其转子有 80 个齿，已知齿轮传动比为 0.8，丝杠的导程为 6mm，工作台移动的最大速度为 50mm/s，求：
 - (1) 步进电机的步距角；
 - (2) 工作台的脉冲当量；
 - (3) 步进电机的最高工作频率。

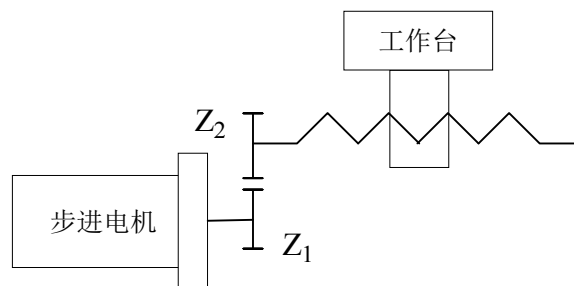


图 5-34 步进电机直线进给系统

8. 直流电机调速方式主要有哪两种？在直流伺服系统中用的是哪一种？
9. 与可控硅（SCR）调速相比，晶体管脉宽调制（PWM）调速有何优点？

10. 交流电机调速方法有哪些？交流伺服系统中用的是哪种？
11. 试述“交—交”变频和“交—直—交”变频的变频过程及优缺点？
12. 位置伺服控制有哪些类型？

第六章 数控编程的基础知识

§ 6-1 程编中的工艺处理

数控编程就是将加工过程中刀具的轨迹、工艺参数等信息用 CNC 所能识别的代码来表示，所以数控加工工艺是程序编制首要解决的问题，也是编制程序的依据，无论是手工编程还是自动编程，都要从工艺处理开始。工艺处理是否合理，将直接影响到数控机床加工质量、生产效率及加工成本。

一、 数控工艺特点

1、 工艺详细

数控机床加工工艺制订的步骤和内容与普通机床加工工艺大致相同，但数控工艺的一个明显特点是工艺内容十分具体、完整。普通工艺规程视零件的生产批量、复杂程度以及零件的重要性等的不同而有不同的工艺设计内容，但最多详细到工步。数控加工工艺必须详细到每一步走刀和每一个操作的细节，亦即普通工艺留给操作工人完成的工艺与操作内容都必须由编程人员在程序中预先确定。其次，凡是用数控加工的零件，不论简单、重要与否，都要有完整的加工程序，因而都要制订详细的工艺。

2、 工序集中

现代数控机床具有刚性大、精度高、刀库容量大、切削参数范围广及多坐标、多工位等特点，有可能在零件一次装夹中完成多种加工方法和由粗到精的过程，甚至可在工作台上安装几个相同或相似的工件进行加工，从而缩短工艺路线和生产周期、减少加工设备和工艺装备、减少中间储存和运输。

3、 加工方法的特点

对于一般简单表面的加工方法，数控加工与普通加工无大差异。但对于一些复杂表面、特殊表面或有特殊要求的表面，数控加工就与传统加工有着根本不同的加工方法。例如：对于曲线、曲面的加工，传统加工是用划线、样板、靠模、预钻、砂轮、钳工等方法，不仅费工、费时，而且还不能保证加工质量，甚至产生废品。而数控加工则用多坐标联动自动控制刀具运动轨迹，其加工质量与生产效率是传统方法无法与之相比的。

二、 工序划分与机床选用

普通工艺有关基准选择以及“基面先行、先主后次、先粗后精、先面后孔”等原则同样适用于数控加工的工序划分。但由于数控加工特点，在制订零件的工序划分时应注意以下要点。

1、 工序集中的原则

前已述及数控机床具有工序集中的条件。因此，根据零件加工表面形状与所用数控机床的功能，应尽可能集中多种加工内容（特别是加工中心机床）在一次装夹中完成，以减少工序。对于大型零件更应尽可能在一次装夹中完成全部或主要表面的加工，以减少工序间的储存与运输。

2、 零件数控加工与普通加工工序的划分

可以认为，凡是用普通机床等传统方法加工的零件，都可用数控加工。但就经济性、合

理性及生产条件而言，特别是企业数控化率较低的情况下，并非所有的零件或一个零件的所有加工部分都用数控加工为好。因此，下列情况应考虑插入普通机床加工工序。

(1) 铸、锻件毛坯的预加工。如去黑皮、不均匀或不稳定的余量切除。

(2) 粗定位基准的预加工。数控加工对定位基准（如箱体与平板凸轮零件的基准面与定位孔，轴类零件的装夹面与中心孔）的圆柱度、平面度、表面粗糙度有较高要求，可预先用普通机床加工，但要顾及加工面与非加工面的尺寸要求。

(3) 数控加工难以完成的个别或次要部位。例如：排屑不畅且易断刀的小直径螺孔或深孔的加工；由于所用数控机床的功能原因难以完成的个别部位（如斜孔、珩磨孔）；由于刀库容量不足无法完成的个别部位等等。

(4) 大型、复杂零件中的简单表面。例如模具的复杂型腔（特别是用数学模型表示的曲线、曲面）只能用数控加工。而其型腔体的外平面要求较高，除刨或铣外还要求平磨加工，常用普通方法加工。

上述示例或类似情况插入必要的普通加工工序，可更加有效地发挥现有数控机床的效能，延长数控机床的使用寿命，降低加工成本，是一种经济、合理的工艺路线方案。但在制订零件的工艺路线时，应以工艺文件的形式明确数控工序与非数控工序的定位、加工余量、质量要求等方面的衔接问题，以便协调与管理。

3、数控加工部位的工序划分

一个零件的数控加工部位按前述集中工序的原则，一般而言，只要数控机床选用适当，可在一次装夹中完成。但在下列情况下可划分几个数控加工工序：

(1) 车间现有数控机床的功能不能满足一个零件的全部加工部位的加工要求；批量较大时，则可根据实际情况分散在几台数控机床上加工。

(2) 当粗加工的热变形或力变形较大而影响零件加工精度时，则只能将粗、精加工分开。

(3) 如程序过长（如大型曲面），不仅容易出错，而且有可能超过系统内存容量，或超过一个工作班，或在一个加工面的中途刀具磨损失效，此时应按刀具或加工表面划分工序。

4、机床的选用

在上述工序确定的过程中，就应考虑加工设备的选用问题。根据零件的表面加工方法、精度与粗糙度、工件形状与尺寸、需要机床的坐标轴数等要求，并考虑现有数控机床条件与负荷、加工成本等因素正确选用机床。例如：

(1) 对不太复杂、尺寸不大的孔系加工（如阀体），可选用数控钻床而不必用价格昂贵的加工中心。

(2) 立式加工中心与卧式加工中心的选用：对四面体（要求多工位）并有平面的复杂孔系零件（如箱体），应选用卧式加工中心；对单面的孔系或曲面的板件与端面凸轮等零件，则选用立式加工中心，定位方便，加工成本低（立式的价格为卧式的1/2~1/3）。对于曲面加工若无数控铣床，也可用加工中心替代。

(3) 数控机床有高档型、普通型、经济型之分。目前，我国的经济型数控机床已有了质的提高，价格低，性价比较高，应尽可能选用。对高档型，为保持其精度应控制使用。

(4) 对于曲面加工机床，有二轴半、三轴、四轴、五轴等之分，根据曲面形状、精度与生产率（决定于刀具形状）选用不同坐标轴数的机床。例如，同样的曲面用二轴半与三轴都

可加工，只是二轴半的加工质量较差，但成本较低。

5、曲面加工与坐标轴数的选用

对于母线为任意曲线的平面轮廓和立体曲面的加工，由于数控系统只具有直线和圆弧插补功能，故可用多个微小的直线段与圆弧段去逼近的加工方法，如图 6-1 所示。逼近线段的交点为节点，逼近误差 δ 一般取零件公差的 1/5~1/10（节点计算见第八章）。

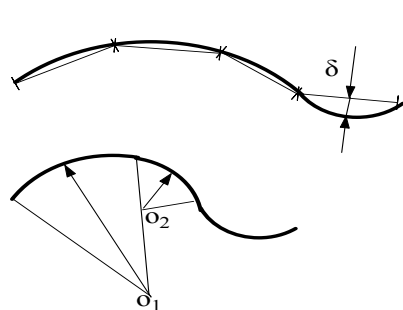


图 6-1 曲线的逼近加工

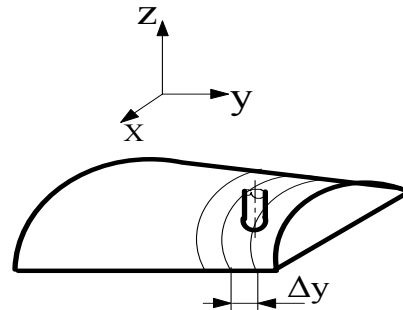


图 6-2 曲面行切法

(1) 两坐标联动的三坐标行切法加工

x 、 y 、 z 三轴中任意两轴作插补联动，第三轴作单独的周期进刀，常称二轴半或 2.5 轴加工。如图 6-2，将 y 向分成若干段，球头铣刀沿 xz 面所截的曲线进行铣削，每一行加工完后进给 Δy ，再加工另一相邻曲线，如此依次切削即可加工出整个曲面。由于是一个个狭截面的加工，故称“行切法”。根据表面粗糙度及刀头不干涉相邻表面的原则选取 Δy 。行切法加工所用的刀具通常采用球头铣刀，计算比较简单。球头铣刀的刀头半径应选得大些，有利于减小表面粗糙度，增加刀具刚度、散热等。但刀头半径应小于曲面的最小曲率半径。

用球头铣刀加工曲面时，总是用球心（刀位点）轨迹的数据进行编程。图 6-3 为两轴联动三坐标行切法加工的刀位点轨迹与切削点轨迹示意图。ABCD 为被加工曲面， P_{xz} 平面为平行于 xz 坐标面的一个行切面，其刀位点轨迹 O_1O_2 为曲面 ABCD 的等距面 efgh 与行切面 P_{xz} 的交线，显然 O_1O_2 是一条平面曲线。当曲面的曲率变化时，会导致球头刀与曲面切削点的位置亦随之改变，因而，切削点的连线 ab 则是一条空间折线，从而在曲面上形成扭曲的残留沟纹。

由于二轴半加工的刀位点轨迹为平面曲线，故编程计算较简单，常用于曲率变化不大及精度要求不高的粗加工。

(2) 三坐标联动加工（三轴加工）

x 、 y 、 z 三轴可同时插补联动。用三坐标联动加工曲面时，通常亦用行切方法。如图 6-4，同样， P_{xz} 平面为平行于 xz 坐标面的一个行切面，其与曲面的交线 ab 若要求为一条平面曲线，则应使球头刀与曲面的切削点总是处在平面曲线 ab 上（即沿 ab 切削），以获得规则的残留沟纹。显然，这时的刀心轨迹 O_1O_2 不在 P_{xz} 平面上，而是一条空间折线，因此，需要 x 、 y 、 z 三轴联动加工。

三坐标联动加工常用于复杂空间曲面的精确加工（如精密锻模）。但编程计算相对复杂一些，所用机床的数控装置还必须具备三轴联动功能。

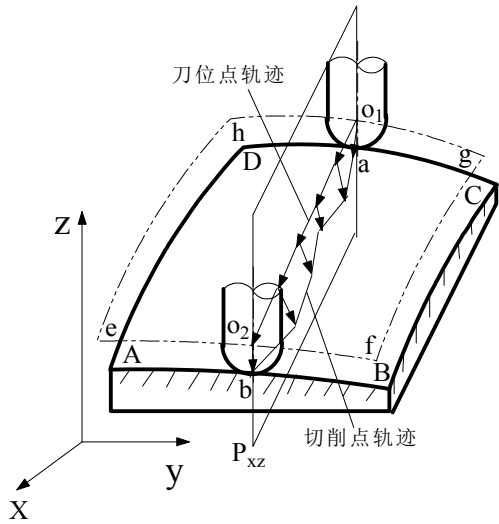


图 6-3 2.5 坐标（二轴半）加工

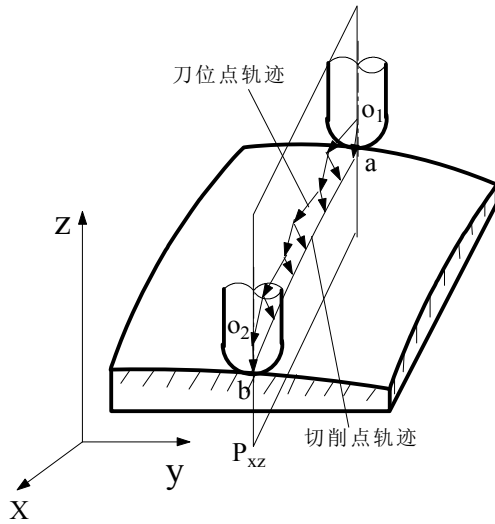


图 6-4 三坐标（三轴）加工

(3) 四坐标加工

如图 6-5，侧面为直纹扭曲面。可以在三坐标联动机床上用鼓形铣刀按行切法加工，但是生产效率低、表面粗糙度大。为此，采用圆柱铣刀周边切削，并用四坐标铣床加工。即除三个直角坐标运动外，为保证刀具与工件型面在全长始终贴合，刀具还应绕 O_1 （或 O_2 ）作摆角联动。由于摆角运动导致直角坐标（图中 y 轴）需作附加运动，其编程计算较复杂。

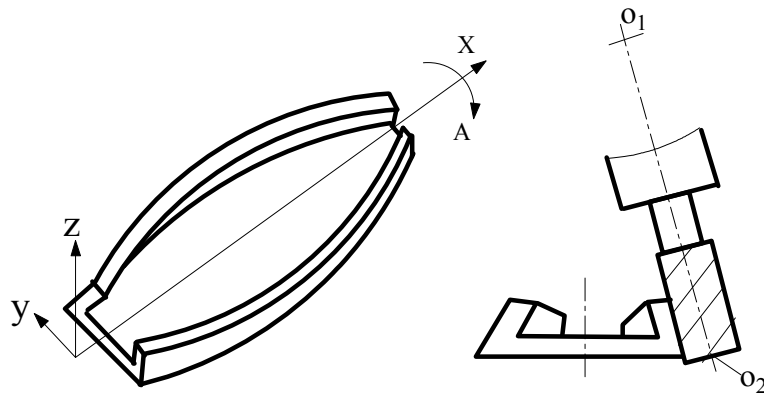


图 6-5 四坐标加工

(4) 五坐标加工

图 6-6 是利用平底立铣刀五坐标行切法加工曲面示意图。在编程数学处理时，用一组与 yz 坐标平面平行的等距平面切割被加工曲面得到铣削曲线，然后用直线或圆弧逼近该曲线，计算出节点坐标，在切削过程中，铣刀刀位点（平底立铣刀底面中心点）过每个节点，并且铣刀轴线与该节点处曲面的法线重合，这不但要求三个直线坐标 x 、 y 、 z 联动，而且还要求两个转动坐标（ A 、 B ）与三个直线坐标联动。

五坐标行切法加工曲面的残留面积比三坐标行切加工曲面的残留面积小，表面粗糙度小。行距大，加工效率高。但五轴数控机床价格昂贵，编程数学处理复杂，只能用于要求比较高的重要零件的精加工。

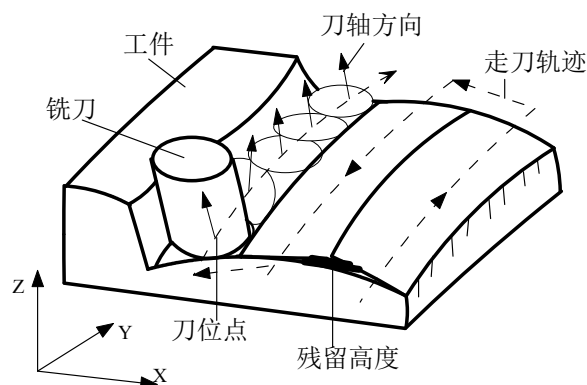


图 6-6 五坐标加工

三、 工序设计

当工序划分以后，即可对每个工序进行详细设计。工序设计是保证加工质量与生产效率的关键，是编写加工程序的工艺依据。

数控加工的工序设计是指一个工件在一次装夹中连续自动加工直至加工结束那部分的工艺内容。它包括工件的装夹方法与夹具选用、刀具选择与工步划分、工件原点选择及走刀路线的确定、切削用量选择等内容。

1、 工件的装夹与夹具

数控机床是按程序自动加工的，刀具与零件在机床的空间总是处于一个确定的位置，因此总的要求是：每一个工件在夹具上的装夹必须精确定位，加工中不允许变形，力求减少工件的装卸时间。

①工件在夹具上的定位基准应与零件的设计基准或工序基准一致。夹具安装在机床工作台上的定位面应与工件的定位基准面严格平行，并与机床坐标系一致。

②夹具结构应具有足够的刚性，避免振动与夹压变形，还应能方便地消除切屑。

③确保刀具的运动空间，避免刀具组件与夹具碰撞。当用卧式加工中心加工四面体的箱体时尤应注意。

④尽可能采用组合夹具与可调夹具，以满足准备周期短、成本低的要求。但当生产批量较大、周期性重复生产或有特殊要求的零件（如多工件装夹）也可设计专用夹具。当单件切削时间较短或要求较大的夹紧力时，应采用气动或液压夹紧，以缩短辅助时间并可靠装夹。

⑤对批量较大的中、小零件，也可在夹具上装夹几个相同的工件或相似的工件加工。但在夹具上应具有与每个工件相应的精密定位元件与对刀元件，分别对每个工件进行加工。也可共用一个对刀元件，但各个工件间的位置要求一致，可用每一把刀分别对所有工件相同表面加工完后，再换刀加工另一个相同表面。

2、 刀具的选用

先进的数控机床必须有先进的刀具与之相适应，才能充分发挥数控机床的效能。如果一

台价值数十万元的数控车床采用普通车床的手磨刀具加垫片，由于频繁磨刀和换刀，导致生产率明显降低，加工成本明显增加，这就失去了采用数控机床的意义。因此，对数控加工的刀具有着更高、更严格的要求。

①足够的强度与刚度：刀具只有具备足够的强度与刚度，才能满足粗、精加工的要求。现代数控机床具有高速、大动力、高刚度的性能，这就要求刀具具备高速切削与强力切削的性能。另一方面，高刚度的刀具有利于加工质量的提高，这对于加工中心由于无法使用导向支承套的孔加工尤为重要。

②高的刀具耐用度：刀具耐用度的提高，会减少换刀与对刀的次数，从而减少停机损失。对大余量、难加工材料以及精度要求高的加工，更应注意高硬度、高耐磨性的刀具材料的应用。一般而言，刀具的耐用度尽可能保证加工完一个工件，或一个大型、复杂表面。

③高的可靠性：数控加工要求每一把刀都有高的可靠性，若其中某一把刀偶而或经常发生故障（过快磨损、断裂、崩刃），就会使整台机床中断加工。

④较高的精度：例如机夹不重磨转位刀具，其刀片精度一般选用 M 级，则转位与压紧结构应保证刀片转位时刀尖的位置精度；车刀刀杆安装基面至刀片刀尖的高度有较高要求，以保证不用调整垫片即可满足刀尖（通过工件回转中心）的等高；钻头两主切削刃重磨时应检查对称性；加工中心的精密镗孔应采用微调镗刀。

⑤可靠的断屑：数控机床与传统自动化机床一样，断屑与排屑往往是困扰加工的一个难题。因此，应合理选用切削用量与断屑槽的形状与尺寸，有时还得通过试验确定。

数控加工对刀具材料的硬度与耐磨性、强度与韧性、耐热性等方面有较高要求，应根据工件材料的切削加工性、粗精加工要求及冲击振动与热处理等工况合理选用。

刀位点（或称刀具参考点，如图 6-7 所示的 P 点）是由刀具结构和对刀方法决定的，是径向基准和轴向基准的相交点，加工过程中指令的坐标值就是指刀位点的坐标值，当测量和输入刀具修正因素后，控制系统能识别该点。

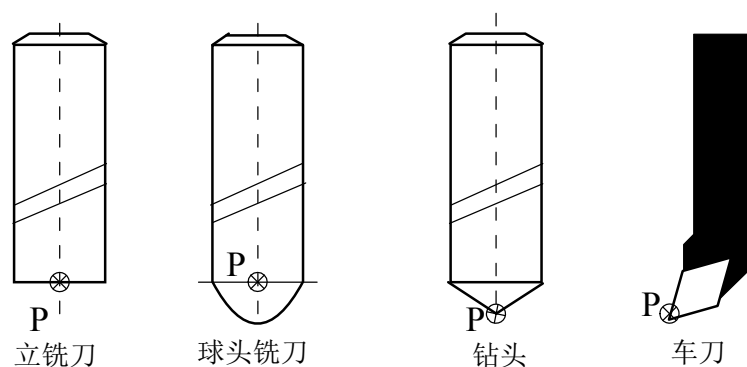


图 6-7 几种刀具刀位点示意图

3、确定程序零点、对刀点和换刀点

(1) 程序零点

程序零点即是工件坐标系的原点，由它确定工件坐标系在机床坐标系中的位置。程序中所给出的坐标值是指刀位点在工件坐标系中的数值。程序零点尽量与设计基准重合，便于数

值计算。一个零件程序一般只有一个程序零点，为了数学处理方便，或者为了减少累积误差，也可以设计多个程序零点。

(2) 对刀点

对刀的目的是确定程序零点在机床坐标系上的位置。对刀点在零件坐标系中的位置是已知的（如图 6-8 所示 X_1, Y_1 ），可以与程序零点重合。对刀时，让刀位点与对刀点重合，对刀点在机床坐标系中的坐标值为 (X_0, Y_0) ，则工件零点在机床坐标系中的坐标值为 $(X_1 + X_0, Y_1 + Y_0)$ 。

对刀点可以选在零件上，如零件的定位基准孔的中心或相互垂直平面的交点。也可以选择在夹具上。以便于对刀操作、对刀精度高为选择原则。

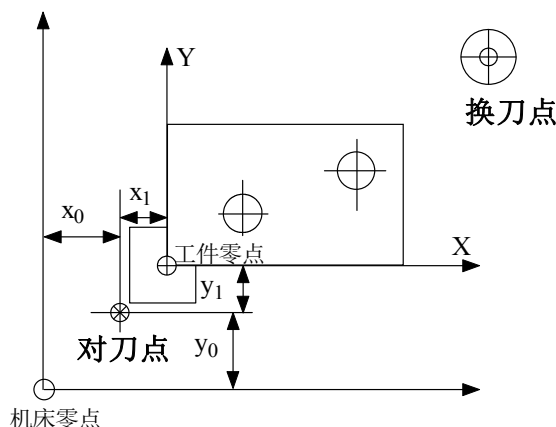


图 6-8 对刀点与换刀点示意

(3) 换刀点

在数控车床、数控镗铣加工中心等使用多种刀具加工的机床上，工件加工时需要经常更换刀具，在编制程序时，就要考虑设置换刀点。换刀点的位置应根据换刀时刀具不碰伤工件、夹具和机床的原则而定。一般换刀点应设在工件或夹具的外部（如图 6-8）。

4、确定走刀路线

走刀路线是指数控加工过程中刀位点相对于被加工工件的运动轨迹。走刀路线包括切削加工的路径及刀具引入、返回等非切削空行程。确定走刀路线时，首先考虑保证加工质量，其次要使数值计算简单，走刀路线尽量短。

(1) 点位控制的走刀路线

对于位置精度要求高的孔系加工，特别要注意孔加工顺序的安排，安排不当时，就有可能将沿坐标轴的反向间隙带入（如图 6-9 (b)），直接影响孔的位置精度。图 6-9 (c) 是当孔 4 加工后没有直接在孔 5 处定位，而是多运动了一段距离，然后折回来在孔 6、孔 5 处进行定位，这样，六个孔的定位方向是一致的，避免反向间隙误差的引入。

(2) 轮廓铣削加工的走刀路线

凸轮类零件的内外轮廓加工，一般采用立铣刀，两轴联动加工。如图 6-10 所示，路径 1 快速接近，启动刀补；路径 2 为工进切入段，路径 3 铣削轮廓，路径 4 为工进切出段，路径 5 快退回起刀点，同时撤消刀补。增加路径 2、4，使切入切出都沿曲线的切线方向，减少接

刀痕迹。另外，为了提高加工精度和表面质量，应采用顺铣。

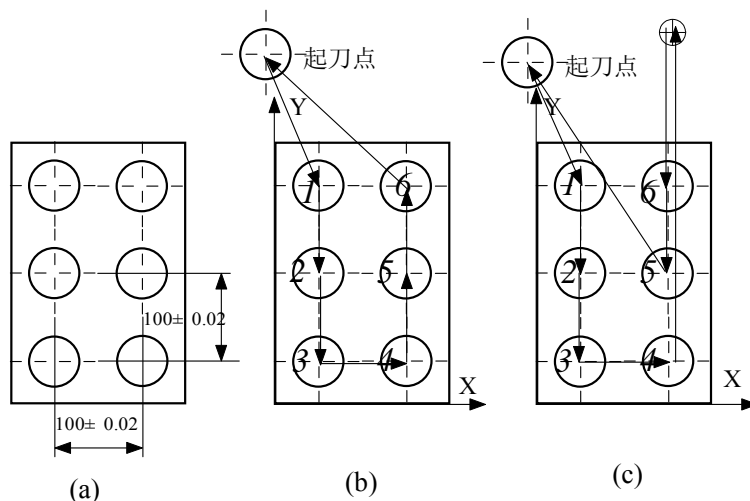


图 6-9 点位控制的孔系加工走刀路线

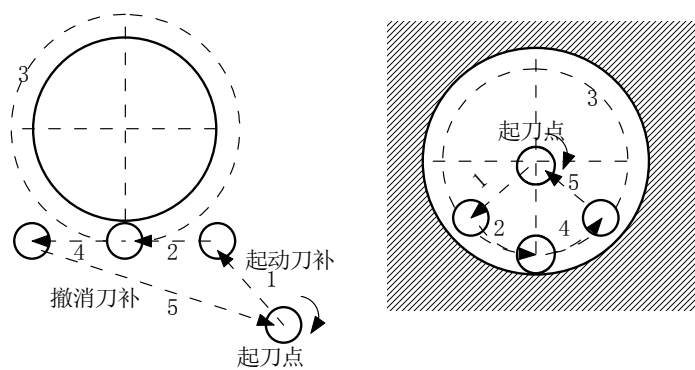


图 6-10 轮廓铣削的走刀路线

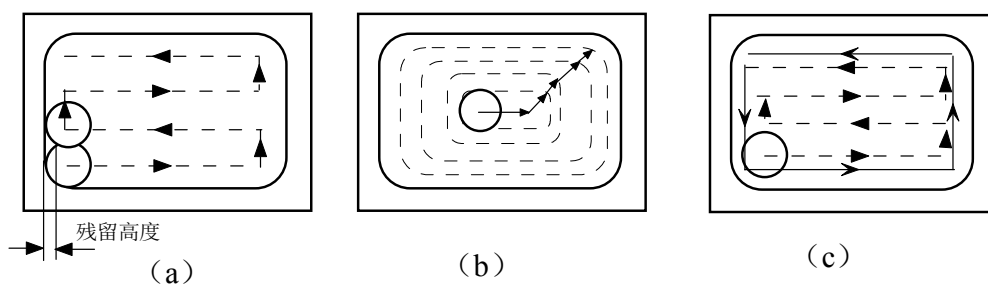


图 6-11 加工凹槽走刀路线示意图

(3) 凹槽的走刀路线

凹槽是封闭曲线为边界的平底凹槽。凹槽采用平底立铣刀加工，刀具的圆角半径应符合

凹槽的图纸要求。

图 6-11 (a) 为行切法, 这种方法数值计算比较简单, 走刀路线比较短, 加工效率高, 但是, 每两次走刀的起点和终点间有残留面积, 而且是顺铣和逆铣交替进行, 加工质量低。

图 (b) 为环切法, 数值计算稍为复杂。所以实际生产中, 常先采用行切法, 最后环切一刀光整轮廓表面, 能获得较好效果。

在刀具的轴向 (如图 6-12), 可以先加工一个进刀孔, 从这点进刀, 也可以让立铣刀在 XOZ 面 (或 YOZ) 内来回铣削逐渐进刀到指定深度。另外可以用键槽铣刀, 直接进刀到切深, 键槽铣刀端面上有两个切削刃, 并且延伸到中心, 即像立铣刀, 又像钻头。如果加工余量较大时, 要分层切削。

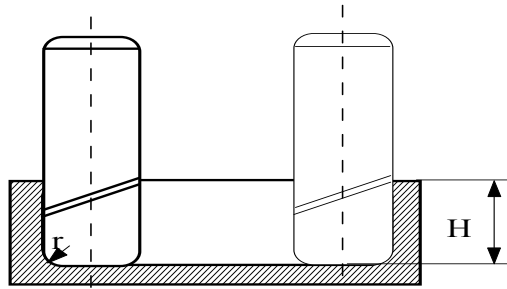


图 6-12 凹槽深度方向切削示意图

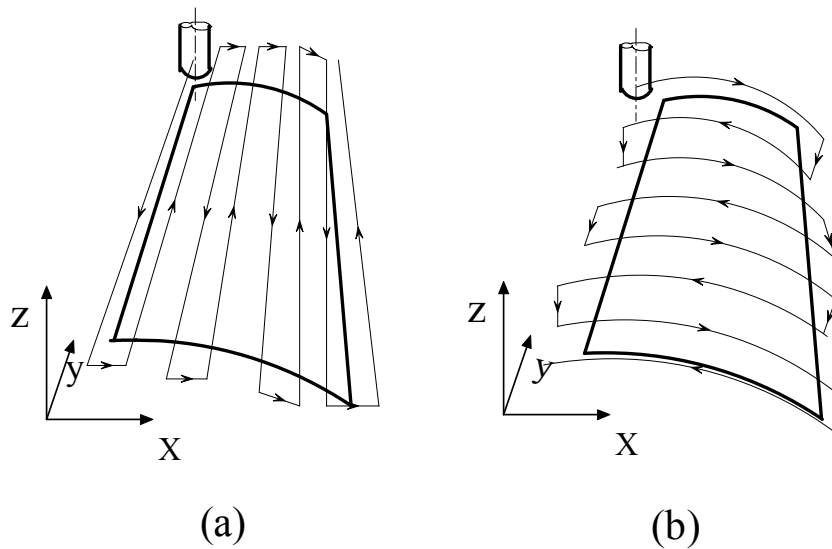


图 6-13 曲面行切走刀路线示意图

(4) 曲面加工的走刀路线

铣削曲面时, 常用球头铣刀二轴半或三轴行切, 也可用平底立铣刀五轴行切, 其加工精度和表面粗糙度不但受刀具尺寸和行距等因素的影响, 而且也受走刀路线的影响。在安排曲面行切的走刀路线时, 要与曲面的成形机理及自由曲面坐标点的给出方法相适应。如发动机

的大叶片和直母线机翼型面都是直纹面，可以采用图 6-13 (a) 所示的走刀路线。这时每次沿直线走刀，与机床的插补功能相符，刀位点计算简单，程序段少，而且加工过程符合直纹面的形成机理，可以准确保证母线的直线度。如果型面是列表曲面，根据数值给出的情况，可以采用 6-13 (b) 所示的走刀路线，这时刀具轨迹是曲线，数值计算比较复杂，但是便于在加工后检验型面的准确度。

5、确定切削用量

切削用量包括刀具轴向切深和径向切深、进给量、切削速度或主轴转速。在数控加工中，对于车、铣、镗、攻丝等的粗加工、精加工的切削用量，都要写入程序中。切削用量数值是否合理，直接影响加工质量、生产效率和制造成本。确定切削用量时要综合考虑数控机床的性能、工件材料、刀具材料等各方面的因素。在实际生产中，一般是根据各企业积累的经验数据确定，并通过试切削和加工过程中的表现予以修正。另外，对于新材料可以通过工艺试验来确定。

(1) 主轴转速

主轴转速要根据机床允许的转速范围、工件材料、刀具材料允许的切削速度和刀具耐用度来确定。例如对于常用的硬质合金涂层刀片，切削中碳钢，切削速度 v_c 常选 100~200m/min 左右。

(2) 切削深度

在零件程序中，切削深度体现在刀具轨迹的数值中。在粗加工时，根据工艺系统的刚度尽量选择大的切削深度，以提高生产效率；精加工时，为了提高精度和表面质量，一般要有 0.2~0.5mm 的精加工余量。

(3) 进给量

进给速度通常是根据零件的加工精度和表面质量要求以及刀具与工件材料选择。一般粗加工时选择大一些，精加工时选择小一些。

随着数控机床和刀具材料的发展，采用大的切深、高的切削速度的强力切削是数控加工的发展方向。

§ 6-2 数控程编常用指令

一、程序的结构和组成

一个完整的数控加工程序由程序号、若干个程序段、程序结束指令组成。

程序号是程序的开始，每种数控系统都有自己定义的程序号，如%、P、O 等。用 M02 或 M30 作为程序结束指令。程序号与结束指令之间的若干程序段是数控加工程序的主体，包括在加工过程中机床要完成动作的全部指令。

一个程序段由若干字组成，典型的程序段可书写成下列格式：

N-- Gxx X-- Y-- F-- S-- T-- Mxx ;

1、程序段号字 (N--)

用字母 N 和后面的数字表示，范围 0000~9999。可以省略，当有跳转语句时，程序段号字是必须的。程序段标号与程序执行顺序无关。

表 6-1 JB3208—83 标准中的准备功能 G 指令

代 码	功能保持到 被取消或被 同样字母表 示的程序指 令所代替 (2)	功能仅 在所出 现的程 序段内 有作用 (3)	功 能 (4)	代 码	功能保持到 被取消或被 同样字母表 示的程序指 令所代替 (2)	功能仅 在所出 现的程 序段内 有作用 (3)	功 能 (4)
(1)		(3)	(4)	(1)		(3)	(4)
G00	a		点定位	G50	#(d)	#	刀具偏置 0/-
G01	a		直线插补	G51	#(d)	#	刀具偏置 +/0
G02	a		顺时针圆弧插补	G52	#(d)	#	刀具偏置 -/0
G03	a		逆时针圆弧插补	G53	f		直线偏移, 注销
G04		*	暂停	G54	f		直线偏移 X
G05	#	#	不指定	G55	f		直线偏移 Y
G06	a		抛物线插补	G56	f		直线偏移 Z
G07	#	#	不指定	G57	f		直线偏移 XY
G08		*	加速	G58	f		直线偏移 XZ
G09		*	减速	G59	f		直线偏移 YZ
G10~G16	#	#	不指定	G60	h		准确定位 1(精)
G17	c		XY 平面选择	G61	h		准确定位 2(中)
G18	c		XZ 平面选择	G62	h		准确定位 3(粗)
G19	c		YZ 平面选择	G63		*	攻螺纹
G20~G32	#	#	不指定	G64~G67	#	#	不指定
G33	a		螺纹切削、等螺距	G68	#(d)	#	刀具偏置,内角
G34	a		螺纹切削、增螺距	G69	#(d)	#	刀具偏置,外角
G35	a		螺纹切削、减螺距	G70~G79	#	#	不指定
G36~G39	#	#	永不指定	G80	e		固定循环注销
G40	d		刀具补偿、刀具偏置 注销	G81~G89	e		固定循环
G41	d		刀具补偿—左	G90	j		绝对尺寸
G42	d		刀具补偿—右	G91	j		增量尺寸
G43	#(d)	#	刀具补偿—正	G92		*	预置寄存
G44	#(d)	#	刀具补偿—负	G93	k		时间倒数进给率
G45	#(d)	#	刀具偏置+/-	G94	k		每分钟进给
G46	#(d)	#	刀具偏置+/-	G95	k		主轴每转进给
G47	#(d)	#	刀具偏置-/-	G96	i		恒线速度
G48	#(d)	#	刀具偏置-/+	G97	i		每分钟转数(主轴)
G49	#(d)	#	刀具偏置 0/+	G98~G99	#	#	不指定

注:

1、#号表示: 如选作特殊用途, 必须在程序格式说明中说明。

- 2、如在直线切削控制中没有刀具补偿，则 G43~G52 可指定作其它用途。
- 2、 在表中左栏括号中的字母 (d) 表示：可以被同栏中没有括号的字母 d 所注销或代替，亦可被有括号的字母 (d) 所注销或代替。
- 3、 G45~G52 的功能可用于机床上任意两个预定的坐标。
- 4、 控制机上没有 G53~G59, G63 功能时，可以指定作其它用途。
- 5、 *号表示功能仅在所出现的程序段内有效。

2、准备功能字 (Gxx)

又称为 G 代码或 G 指令。用以设定工件坐标系、刀位点相对工件的运动轨迹、刀具补偿等，是数控程序的基础。G 指令详见表 6-1。

从表中可见有的 G 指令为不指定或永不指定，其功能可由 CNC 厂商自行规定，因此不同 CNC 系统的 G 指令会存在差异，编程中必须注意。本书参照 BEIJING-FANUC 数控系统的功能编写。

G 指令分模态方式和非模态方式，所谓模态方式指令是指表 6-1 中第二栏中有字母 a, c, d 等指令，具有相同字母标识的 G 指令属于一组。这种 G 指令一旦设定，其功能在后续程序段中保持有效，指令字不必重写，直到被同组中其它指令所代替或被注销。非模态方式的 G 指令仅在其出现的单个程序段中有效，这类指令在表 6-1 中用*号标识。

3、尺寸字

由字母 X, Y, Z; U, V, W; P, Q, R; I, J, K; A, B, C 和+、-及数字组成。不带小数点，由 CNC 系统规定。编程时要注意机床的脉冲当量。

4、进给功能字 (F--)

由字母 F 和若干数字组成，单位为 mm/min 或 mm/r，分别用 G94 与 G95 指定。一般车床类数控机床开机后默认为 mm/r (即 G95)，铣床类 (包括镗铣加工中心) 数控机床开机后系统默认为 mm/min (即 G94)，默认值可以通过参数设定，在编程和操作时，要以具体机床情况为准。须注意的是：若运动轨迹是平面上的一个斜线或一个圆弧，其 F 后跟的数值是指斜线方向及圆弧切线方向的进给速度。该速度在各坐标轴的分速度不应超过允许值。

5、主轴转速功能字 (S--)

由 S 和若干数字组成，其单位可以是转速 (r/min)，也可以是切削速度 (m/min)。对于大多数采用变频调速的数控机床，数字表示主轴转速，如 S1300 即表示主轴转速 1300 r/min。对于齿轮变速的主轴，用 S 后面两位代码表示主轴转速，具体数值要查表。

6、刀具功能字 (T--)

由 T 加若干数字组成，表示刀号或刀号加刀具补偿号。一般 T 后面带两位数字或四位数字。两位数字代表刀具号 (01~99)。四位数字时，前两位表示刀具号 (01~99)，后两位表示刀具补偿寄存器的地址号 (01~99)。前两位的刀具号是刀具在刀库中的编号，后两位是选定的刀具在控制器中寄存器地址号，在该地址中存储有预先测定的刀具各种参数，包括刀具尺寸，补偿值等，用户可以查询和修改。

7、辅助功能字 (Mxx)

由 M 加两位数字表示。各种数控系统的 M 功能不完全相同，编程时必须了解所使用的数控系统的 M 功能。M 代码详见下表 6-2。

6-2 JB3208—83 标准中的辅助功能 M 指令

代码 (1)	功能开始时间		功能保持到被注销或被适当指令代替(4)	功能仅在所出现的程序段内有作用(5)	功能 (6)	代码 (1)	功能开始时间		功能保持到被注销或被适当指令代替(4)	功能仅在所出现的程序段内有作用(5)	功能 (6)
	与程序指令运动同时开始(2)	与程序指令运动完成后开始(3)					与程序指令运动同时开始(2)	与程序指令运动完成后开始(3)			
M00		*		*	程序停止	M36	*		*		进给范围 1
M01		*		*	计划停止	M37	*		*		进给范围 2
M02		*		*	程序结束	M38	*		*		主轴速度范围 1
M03	*		*		主轴顺时针转	M39	*		*		主轴速度范围 2
M04	*		*		主轴逆时针转	M40 ~ M45	#	#	#	#	如有需要作齿轮换挡,此外不指定
M05		*	*		主轴停止	M46 ~ M47	#	#	#	#	不指定
M06	#	#		*	换刀	M48		*	*		注销 M49
M07	*		*		2号切削液开	M49	*		*		进给率修正旁路
M08	*		*		1号切削液开	M50	*		*		3号切削液开
M09		*	*		切削液关	M51	*		*		4号切削液开
M10	#	#	*		夹紧	M52 ~ M54	#	#	#	#	不指定
M11	#	#	*		松开	M55	*		*		刀具直线位移,位置 1
M12	#	#	#	#	不指定	M56	*		*		刀具直线位移,位置 2
M13	*		*		主轴顺时针转,切削液开	M57 ~ M59	#	#	#	#	不指定
M14	*		*		主轴逆时针转,切削液关	M60		*		*	更换工作
M15	*			*	正运动	M61	*		*		工件直线位移,位置 1
M16	*			*	负运动	M62	*		*		工件直线位移,位置 2
M17~ M18	#	#	#	#	不指定	M63 ~ M70	#	#	#	#	不指定
M19		*	*		主轴定向停止	M71	*		*		工件角度位移,位置 1
M20~ M29	#	#	#	#	永不指定	M72	*		*		工件角度位移,位置 2
M30		*		*	纸带结束	M73 ~	#	#	#	#	不指定

						M89					
M31	#	#		*	互锁旁路	M90 ~ M99	#	#	#	#	永不指定
M32~ M35	#	#	#	#	不指定						

注:

1、#号表示: 如选作特殊用途, 必须在程序说明中说明。

2、M90~M99 可指定为特殊用途。

在程序中出现的各种字母地址表示的含义如下表 6-3。

表 6-3 地址字符表

功 能	地 址	意 义
程序号	%, O, P	程序编号, 子程序编号
程序段号	N	程序段编号
准备功能	G	指令动作方式
坐标字	X, Y, Z	刀位点在基本直角坐标系中的值
	U, V, W	刀位点在第 1 组附加直角坐标系中的值
	P, Q, W	刀位点在第 2 组附加直角坐标系中的值
	A, B, C	旋转角位移坐标值
	I, J, K	指定圆弧中心坐标或螺距
进给速度	F	进给速度的指令
主轴功能	S	主轴旋转速度的指令 (r/min)
刀具功能	T	刀具编号的指令
辅助功能	M	机床开/关指令
补偿号	H, D	补偿号指定
暂停	P, X	暂停时间指定
重复次数	L	子程序及固定循环的重复次数
圆弧半径	R	实际上是坐标字的一种

二、常用的 G 指令

1、与刀具运动有关的 G 代码

(1) G00—快速定位指令

格式: G00 X-- Y-- Z--;

命令刀具从所在点快速移到 (X, Y, Z) 点。速度的大小由系统预先设定。进给速度代码对 G00 无效。数控面板上的快速进给倍率有效。

(2) G01—直线插补指令

格式: G01 X-- Y-- Z-- F--;

命令刀具以指定的进给速度值进行直线插补运动。

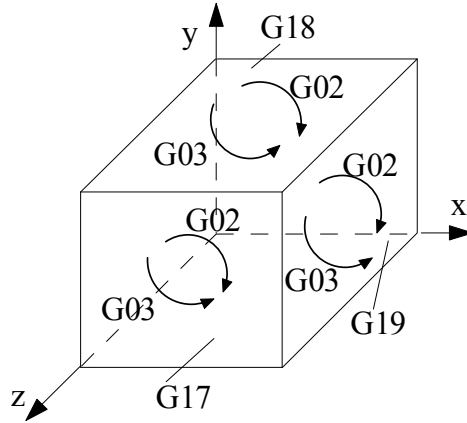


图 6-14 顺圆、逆圆及坐标平面示意

(3) G02、G03—圆弧插补指令

G02: 顺时针方向, G03: 逆时针方向

格式 1: G02 (G03) G17 X-- Y-- I-- J-- F--;
 G02 (G03) G18 X-- Z-- I-- K-- F--;
 G02 (G03) G19 Y-- Z-- J-- K-- F--;

I、J、K 分别为圆弧的起点到圆心的矢量的分矢量在 X、Y、Z 轴上的投影。

格式 2: G02 (G03) G17 X-- Y-- R-- F--;
 G02 (G03) G18 X-- Z-- R-- F--;
 G02 (G03) G19 Y-- Z-- R-- F--;

R 为圆弧半径, 圆心角 $\leq 180^\circ$ 时, R 值取正号; $180^\circ < \text{圆心角} < 360^\circ$ 时, R 值取负号, 整圆不能用 R。

G02、G03 插补指令只能在坐标平面内进行。

顺、逆方向规定: 沿圆弧所在平面的另一坐标轴向负方向看去, 刀具相对于工件的转动方向是顺时针方向为 G02, 逆时针方向为 G03。见图 6-14 所示。

G00、G01、G02、G03 为同一组续效指令。

(4) G04——暂停指令

命令刀具暂停进给, 仅在所出现的程序段起作用。

格式: G04 X (P) --;

例如: G04 X4—刀具停止送进, 暂停 4 秒后继续;

G04 P4—刀具停止送进, 暂停 0.004 秒后继续;

2、与坐标字有关的 G 代码

(1) G90——绝对坐标编程 (系统默认状态)

绝对坐标值是相对编程零点的坐标值。

(2) G91——增量坐标编程

增量坐标值是刀具运动的终点相对于起始点的坐标值增量。

(3) 坐标平面指令

G17—指定 X-Y 平面（系统默认为 X-Y 平面）

G18—指定 Z-X 平面

G19—指定 Y-Z 平面

指令直线与圆弧插补及刀具补偿所在的平面。

(4) 公英制选择指令

G21—公制（默认为公制）

G20—英制

对大多数数控（如 FANUC）系统，X10 与 X10. 代表不同的含义。X10. 表示 X 轴方向移动 10mm；而 X10 表示在 X 轴方向移动 10 个脉冲当量，若脉冲当量为 0.01mm/脉冲，移动量为 0.1mm。因此，要习惯小数点编程。

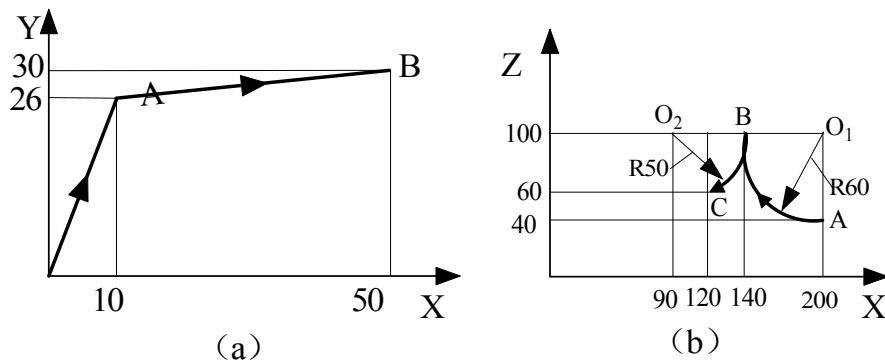


图 6-15 例 6-1、例 6-2 示意图

例 6-1，如图 6-15 (a)，当前刀位点在原点，要求快速定位在 A 点，然后直线插补到 B，分别用绝对坐标和相对坐标编程。

绝对坐标编程：

```
G90 G00 X10. Y26.;
```

```
G01 X50. Y30. F100.;
```

相对坐标编程：

```
G91 G00 X10. Y26.;
```

```
G01 X40. Y4. F100.;
```

例 6-2，如图 6-15 (b)，当前刀位点在 A 点，要求圆弧插补到 B 点，再圆弧插补到 C 点。用绝对坐标、格式 1 形式程序如下：

```
G90 G18 G03 X140. Z100. I0 K60. F100.;
```

```
X120. Z60. I-50. K0;
```

三、常用的 M 指令

(1) M00—程序暂停

在完成该程序段其他指令后，用以停止主轴转动、进给和切削液，以便执行某一固定的手动操作，如手动变速、手动换刀、手动测量等。此后，须重新按下“循环开”按钮，才能继续执行下面的程序。

(2) M01—计划(任选)暂停

与 M00 功能相似,所不同的是,需要操作人员预先按下面板上的任选暂停按钮确认这个指令,否则这个指令不起作用,继续执行下面的程序段。该指令常用于关键尺寸的抽样检查或有时需要临时停车。

(3) M02—程序结束

放在最后一个程序段中,以表示加工结束。命令主轴停转,进给停止,冷却液关闭。并使数控系统处于复位状态。

(4) M30—程序结束

与 M02 功能相似,当数控介质是穿孔纸带时,指令光电阅读机倒带。

(5) M03、M04、M05—分别为主轴正转、反转、停转。

所谓主轴正转:沿 Z 向工件表面看去,主轴顺时针方向旋转。

所谓主轴反转:沿 Z 向工件表面看去,主轴逆时针方向旋转。

主轴停止旋转是在该程序段其它指令执行完成后才能停止。一般在主轴停止的同时,送进制动和关闭切削液。

(6) M07、M08、M09—分别命令 2[#]冷却液(雾状)开、1[#]冷却液(液状)开、冷却液关闭。

(7) M06—换刀指令。它是手动或自动换刀用的指令,常用于加工中心机床刀库换刀前的准备动作。

(9) M10、M11—运动部件的夹紧及松开。

(10) M19 主轴定向停止。即指令主轴准停在预定的角度位置上。自动换刀宏程序中要用到该指令。手动上刀时也要用到该指令。

§ 6-3 机床坐标系与工件坐标系

机床数字控制实际上是对指令点(或称刀架参考点)的坐标进行控制,无论是编程人员还是操作人员,首先必须掌握坐标的概念,也就是要掌握机床坐标系与工件坐标系的区别和联系,下面分别予以说明。

一、机床零点与机床坐标系

机床零点或称机床原点(Machine Origin)是制造厂商设置在机床上的一个物理位置,是机床运动坐标计数的起始点。

机床坐标系建立在机床原点之上,是机床上固有的坐标系。

机床参考点(Reference Point 或称为校准点)是制造厂商在机床上用行程开关设置的一个物理位置。它与机床原点的相对位置在机床出厂前已经调整好了,可以用变量设置其数值。机床参考点与机床原点可以重合,也可以不重合。

开机后,首先要进行手动回参考点操作,当某一坐标轴返回参考点后,该轴的参考点指示灯亮,同时将该轴机床坐标值赋一个初值,当机床参考点与机床零点重合时,该值即为零,当两者不重合时,该值即为两者的距离,这样就建立起了机床坐标系。当执行了急停操作后,要执行手动回参考点操作,然后才能进行其它操作。

二、工件零点与工件坐标系

工件坐标系（或叫编程坐标系）是编程人员在编程时使用的。程序中的坐标值就是在该坐标系下的坐标值。

编程人员选择工件上的某一点为原点，建立一个新的坐标系，称为工件坐标系。在这个坐标系内编程可以简化坐标计算，便于数学处理。编程原点的选择原则：尽量与设计基准重合，而且便于测量其在机床坐标系上的坐标值。

在程序中，用 G92，G54~G59 建立工件坐标系，实现坐标平移。用 G53 回到机床坐标系。

三、建立工件坐标系

建立工件坐标系就是给出工件零点在机床坐标系中的坐标值，当工件坐标系建立后，数控系统就可以将工件坐标系中的坐标换算成机床坐标系的坐标值，从而实现了指令点坐标进行控制。

1、G92—设置工件零点

格式：G92 X-- Y-- Z-- ；

其中 X、Y、Z 的值是指令点在工件坐标系中的坐标值。数控机床开机，完成手动回参考点操作，机床坐标系就建立起来了。这时，无论指令点移动到什么位置，它在机床坐标系中的坐标值，系统都是已知的。G92 指令通过给出指令点在工件坐标系中的坐标值，间接地给出了工件零点在机床坐标系中的坐标值。

如图 6-16 所示，G92 X30. Y20. Z25. ;如果指令点在机床坐标系中的坐标值为 (X100,Y100,Z100) ,那么，工件零点在机床坐标系中的坐标值为 (X70,Y70,Z75)。

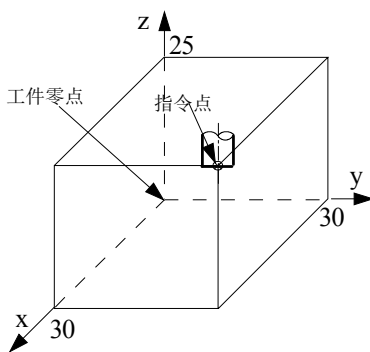


图 6-16 G92 用法示意图

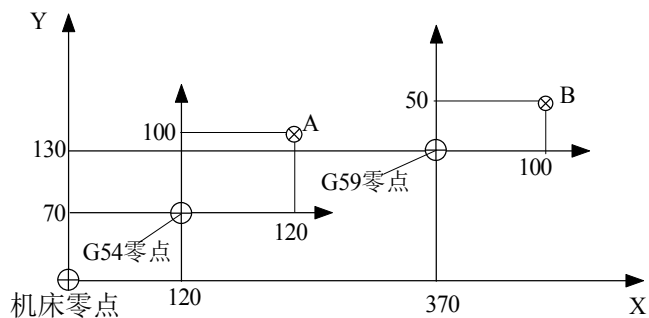


图 6-17 G54~G59 用法示意图

2、G54~G59—设置工件零点

在数控程序执行前，将工件零点在机床坐标系上的坐标值测量出来，用 MDI (Manual Data Input) 方式，存储在控制系统的零点偏移寄存器中，许多控制系统具有几个零点偏移寄存器 (G54~G59)。寄存器位置 1 中的偏移值使用 G54 生效，位置 2 使用 G55 生效，等等。

如图 6-17 所示，将 (120, 70) 和 (370, 130) 用 MDI 方式分别储存在 G54 和 G59 寄存器中。指令点从当前位置快速定位到 A 点，再快速定位到 B 点的程序如下：

G54 G00 X120. Y100. ;

G59 X100. Y50. ;

G92 后面要跟坐标值，因此须占一个单独程序段，该程序段不产生运动。使用 G92 设置工件零点时，程序执行前，必须保证刀具处于加工起始点，该点称为起刀点。

使用 G54~G59 建立工件坐标系时，该指令可单独指定，也可与其它指令在同一程序段使用，如果该程序段中有位置指令就会产生运动。使用该指令前，需要事先用 MDI 方式输入该坐标系的零点在机床坐标系上的坐标值。

四、VMC-1000 立式加工中心的坐标系统

VMC-1000 立式加工中心有 X、Y、Z 三个直线坐标轴和一个旋转轴 A，使用的是 FANUC-0i 系统，其屏幕显示的坐标如图 6-18 所示（图中坐标值为英制）。其中相对坐标（Relative）是以开机时位置为零点，指令点相对该零点的坐标值；开机后，数控系统将 G54 坐标系作为默认坐标系，绝对坐标（Absolute）是指在 G54 坐标系中的坐标值；机床坐标（Machine）显示指令点在机床坐标系中的坐标值；要移动的距离（Distance to go）显示在命令执行过程中还有多少距离要移动，随坐标轴移动该值逐渐变小，到终点时该值为零。在该数控系统中，G53 为非续效指令，也就是说 G53 只在它所在的程序段起作用，该程序段执行结束后，再给坐标值，又是指原工件坐标系中的坐标值。不同的数控系统默认设置可能有所不同，在编程和操作时要以具体机床为准。

Relative:		Absolute:	
X	12.3115 inch	X	2.3115 inch
Y	16.0000 inch	Y	6.0000 inch
Z	94.0000 inch	Z	7.0000 inch
A	0.0000 inch	A	0.0000 inch
Machine:		Distance to go:	
X	0.000 mm	X	0.6884 inch
Y	0.000 mm	Y	0.0000 inch
Z	0.000 mm	Z	0.0000 inch
A	0.000 mm	A	0.0000 inch

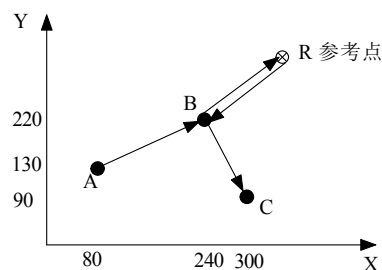


图 6-18 FANUC-0i 数控系统屏幕显示的坐标

图 6-19 G28 与 G29 指令示意图

该加工中心开机执行完手动回参考点操作后，机床坐标系坐标值为 (X0.000,Y0.000,Z687.000)，说明 X、Y 轴参考点与机床原点重合，Z 轴参考点在机床原点上方 687.000mm 处。

五、自动返回参考点 G27、G28、G29

1、G27—返回参考点

利用这条指令可以检验刀具是否能够定位到参考点上。

格式：G27 X—Y—Z—；

指令中 X—Y—Z—分别代表参考点在工件坐标系中的坐标值，执行该指令后，如果刀具可以定位到参考点上，则相应的参考点指示灯就点亮。使用该指令应注意以下几点：

①假如不要求每次执行程序时，都执行返回参考点的操作，应在该指令前加上“/”，以便在不需较验时，跳过该程序段。

②若希望执行该程序段后让程序暂停，应于该程序段后加上 M00 或 M01 指令，否则程序将不停止而继续执行后面的程序段。

③在刀具补偿方式中使用该指令，刀具到达的位置将是加上补偿量的位置，此时刀具将不能到达参考点因而参考点指示灯也不亮，因此执行该指令前，应先取消刀具补偿。

2、G28—自动返回参考点

执行这条指令，可以使刀具以点位方式经中间点快速返回到参考点，中间点的位置由这指令后面的坐标值 X—Y—Z—所决定。

格式： G28 X—Y—Z—；

指令中 X—Y—Z—表示中间点，其坐标值可以用绝对坐标值也可以用相对坐标值，但这要取决于 G90 方式还是 G91 方式。设置中间点，是为防止刀具返回参考点时与工件或夹具发生干涉。

使用这条指令时，应注意以下问题：

①通常 G28 指令是用于自动换刀，原则上应在执行该指令前取消各种刀具补偿。

②在 G28 程序段中不仅记忆移动指令坐标值，而且记忆了中间点的坐标值。换句话说对于在使用 G28 的程序段中没有被指令的轴，以前 G28 中的坐标值就作为那个轴的中间点坐标值。例如：

G90 G00 X100.0 Y200.0 Z300.0；

G28 X400.0 Y500.0；(中间点是 x400.0, y500.0；指令 X, Y 轴回参考点)

G28 Z600.0；(中间点是 z600.0；指令 Z 轴回参考点)

3、G29—自动从参考点返回

执行这条指令，可以使刀具从参考点出发，经过一个中间点到达由这个指令后面的 X—Y—Z—坐标值所指令的位置。中间点的坐标由前面的 G28 所规定，因此这条指令应与 G28 指令成对使用。

格式： G29 X—Y—Z—；

指令中 X—Y—Z—是到达点的坐标，由 G90/G91 状态决定是绝对坐标值还是相对坐标值，若为相对坐标值时，则是指到达点相对 G28 中间点的相对坐标值。

在选择 G28 之后，这条指令不是必需的，使用 G00 定位有时可能更为方便。

下面是 G28 和 G29 应用举例：

如图 6-19 所示，加工后刀具已定位到 A 点，取 B 点为中间点，C 点为执行 G29 时应到达的点，则程序如下：

G28 G90 X240.0 Y220.0；(刀具以快速点定位方式经由 B 点到达参考点 R)

T11 M06；(换上第 11 号刀具)

G29 X300.0 Y90.0；(刀具经 B 点以快速定位方式到达 C 点)。

§ 6-4 刀具半径补偿与长度补偿

在数控机床上，安装刀具的刀架（如车床）和主轴头（如铣床和钻床）上必须设置一个指令点（或称刀架参考点），该点在开机并完成手动回参考点操作后应与机床参考点重合，在数控机床加工中，CNC 系统是通过对手指令点的控制来实现对刀具的位置控制，进而生成刀具轨迹。但实际切削时是使用刀尖或刀刃边缘完成切削的。这样就需要在指令点（刀架参考点）与刀具切削点之间进行偏置，从而使数控系统的控制对象由指令点变换到刀尖或刀刃边缘。

这种变换过程称之为刀具补偿。

当采用不同尺寸的刀具加工同一轮廓尺寸零件，或使用同一名义尺寸的刀具，但因刀具磨损也会引起刀具尺寸的变化时，为了保证切削点轨迹不变，指令点的运动轨迹必须发生相应变化。

为了方便编程和不改变已制备好的程序，可利用刀具补偿功能，只需将刀具尺寸值或变化值输入数控系统，数控系统就可以自动地对刀具尺寸变化进行补偿，进而自动生成指令点的运动轨迹。刀具补偿可分为刀具半径补偿和长度补偿两大类。对于圆周切削的铣刀需要一个半径补偿值，对于同时进行圆周和端面切削的铣刀则需要一个半径补偿值和一个长度补偿值，对于车刀，需要两个长度补偿值，对于精密加工还应考虑刀尖半径补偿，如图 6-20 所示。

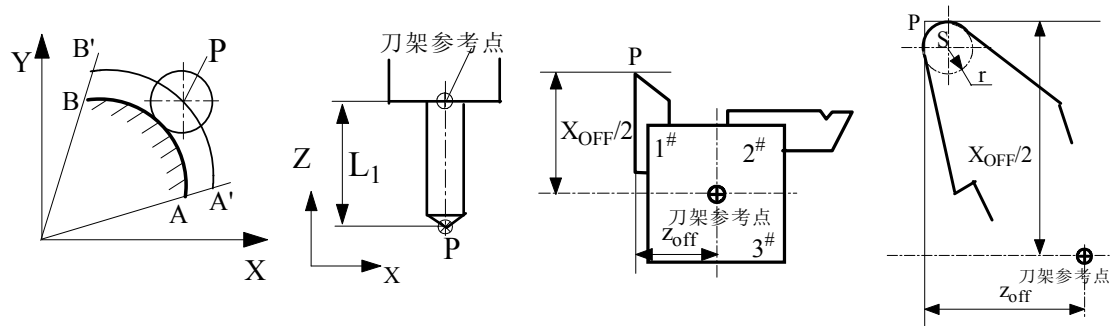


图 6-20 不同刀具补偿示意图

一、刀具半径补偿

刀具半径补偿是 CNC 系统根据编程轨迹（零件廓形）和立铣刀或其它圆头刀具的半径自动生成刀具中心的轨迹，并自动进行起刀、退刀和零件轮廓中拐角过渡的运算，这种刀具半径补偿功能被称为 C 功能刀补。早期的 CNC 系统曾具有一种 B 刀补功能，只能处理单个程序段补偿，要由编程人员额外编程进行拐角过渡，编程复杂，现在已被 C 功能刀补代替。

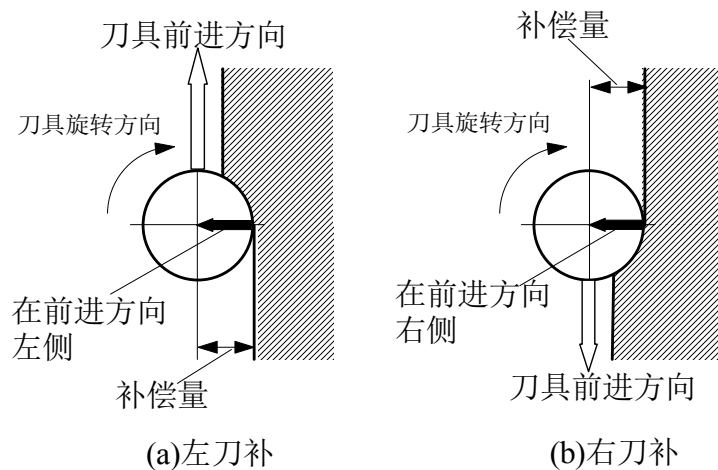


图 6-21 刀具半径补偿方向

1、G41、G42、G40—刀具半径补偿指令

G41—左补偿指令，刀具中心位于编程轨迹前进方向的左边，如图 6-21(a)所示。

G42—右补偿指令，刀具中心位于编程轨迹前进方向的右边，如图 6-21(b)所示。

G40—取消刀具半径补偿。

刀具半径补偿的执行过程可分为建立刀补、执行刀补和撤销刀补三个步骤。

(1) 建立刀补，格式为：

G00 (G01) G41 (G42) D-- X-- Y-- (F--);

其中 X-- Y--为编程轨迹起点坐标，D--为刀补号，表示刀具半径补偿值存储地址，也有的 CNC 系统规定不写刀补号，系统通过换刀时使用的刀具编号，即 T 功能字提取刀补数据。该程序段规定刀具中心从起始位置起以快速定位速度 (G00 时) 或以由 F-- (G01 时) 规定的进给速度移动刀具，使刀具圆周与编程轨迹切于坐标点 X-- Y--处，刀具中心位于该点编程轨迹的法线上，并根据左右补偿要求偏离一个刀具半径，如图 6-22 所示。当轮廓轨迹第一个程序段为圆弧插补时，则用坐标点处圆弧的切线来确定刀位点的位置。刀补启动程序段一般不能用 G02 或 G03，也不能用在非运动功能程序段中。要正确设计启刀路线，避免干涉，如图 6-22(a)双点划所示，在启动刀补时要产生过切现象。

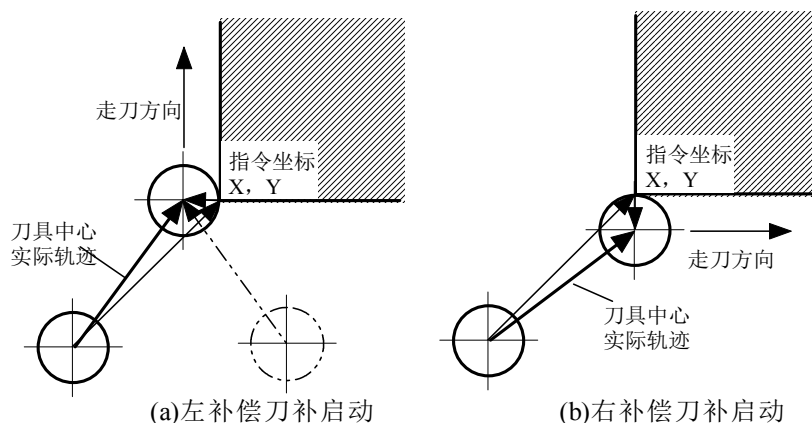


图 6-22 刀补启动时刀具运动轨迹示意图

(2) 执行刀补，刀具中心按照偏离编程轨迹一个刀具半径状态，即沿编程轨迹的等距线做切削运动。在编程中注意不要使用非插补运动功能程序段。因为系统在执行刀具半径补偿时必须同时处理两个以上程序段，因为要按第一个程序段运动，但要根据第二个程序段进行拐角处理。若某一程序段中无轨迹运动功能，有些数控系统就会引起运行错误。

(3) 撤销刀补，编程轨迹加工完后应立即撤销刀补，以免造成错误。其格式为：

G00 (G01) G40 X-- Y-- (F--);

其中 X-- Y--为刀具运动的终点坐标。执行完该程序段后，刀具半径补偿功能被撤销，刀具中心停止在坐标点 X-- Y--处，刀具中心的运动轨迹如图 6-23 所示。设计退刀轨迹时，也要避免发生干涉，如图 6-23(a)双点划线所示。

2、拐角处理

一般数控系统都具有直线插补和圆弧插补功能，所以拐角可以分为直线与直线、直线与圆弧、圆弧与直线、圆弧与圆弧四种形式。但处理拐角时圆弧可以用交点处的切线替代，这

就变成了直线与直线一种情况。当指定 G62 时，在拐角处自动执行进给倍率功能。

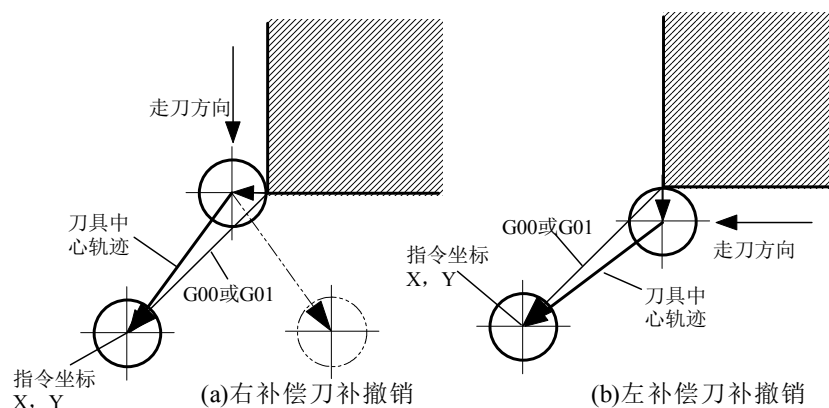


图 6-23 撤销刀补时刀具中心轨迹示意图

根据交点处工件两侧轮廓线段的夹角 α 可分为下列三种类型，如图 6-24 所示。

(1) 当 $360^\circ > \alpha > 180^\circ$ 时，如图 6-24 (a) 所示，刀具中心轨迹比编程轨迹短，并且在尖角处有切不到的地方。

(2) 当 $180^\circ > \alpha \geq 90^\circ$ 时，如图 6-24 (b) 所示，刀具中心轨迹比编程轨迹长。

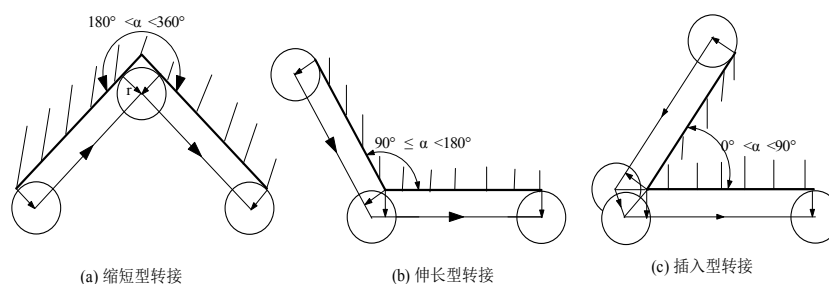


图 6-24 拐角处刀具中心轨迹

(3) 当 $90^\circ > \alpha > 0^\circ$ 时，如图 6-24 (c) 所示，刀具中心轨迹不但比编程轨迹长，而且又附加了一段直线。

3、刀具半径补偿功能的应用

在应用刀具半径补偿功能之前，必须将刀具的半径值用 MDI 方式输入到刀具半径补偿值寄存器中。刀具半径补偿功能主要应用在如下两个方面。

(1) 当因磨损、重磨或换新刀而引起刀具半径改变后，不必修改程序，只要在偏置表中输入不同值即可。如图 6-25(a)所示，当用 1#刀加工时，将其半径值 r_1 输入到刀具偏置寄存器中；当用 2#刀加工时，将刀具偏置寄存器中的值改为 r_2 ，不必修改程序。

(2) 用同一程序，同一尺寸的刀具，利用刀具半径补偿，可进行粗、精加工。如图 6-25(b)所示，粗加工之前，在刀具偏置寄存器中输入值为 $r + \Delta$ ，加工中刀具中心位置在 P_1 点，加工后在工件表面留有 Δ 精加工余量；精加工前，将刀具偏置寄存器值改为 r ，加工中刀具中心位置在 P_2 点。

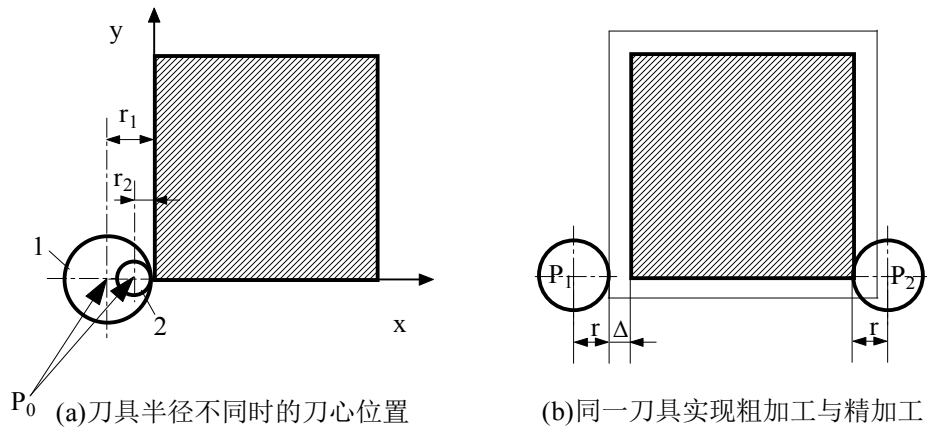


图 6-25 刀具半径补偿应用示意图

如图 6-26 所示，被加工工件轮廓为 ABCD，考虑到减小接刀痕迹，走刀路线为 F→B→C→D→E。刀具中心轨迹为 O→f→b→c→d→e→O。刀具半径值 r 存放在 D01 刀偏寄存器中。工件程序如下：

```

%0001
N10 G90 G92 X0 Y0;           *设置工件坐标系，工件原点为 O
N20 G00 G41 D01 X20. Y10. S500 M03; *启动刀补，刀心轨迹为 O→f; 否则为 O→F
N30 G01 Y50 F100;           *执行刀补，刀心轨迹为 f→b
N40 X50;                     *执行刀补，刀心轨迹为 b→c
N50 Y20;                     *执行刀补，刀心轨迹为 c→d
N60 X10;                     *执行刀补，刀心轨迹为 d→e
N70 G00 G40 X0 Y0 M05;      *撤消刀补，刀心轨迹为 e→O。若不撤消刀补，刀心不能到 O
N80 M30;

```

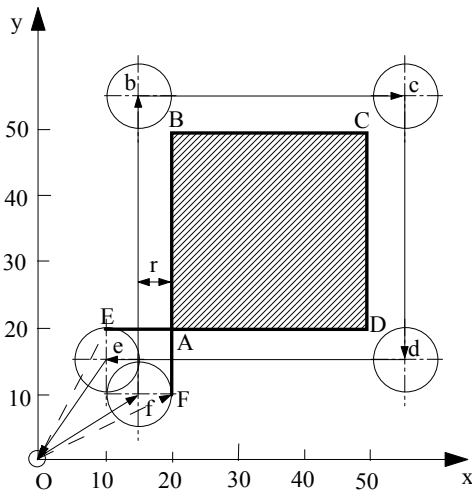


图 6-26 刀具半径补偿应用举例

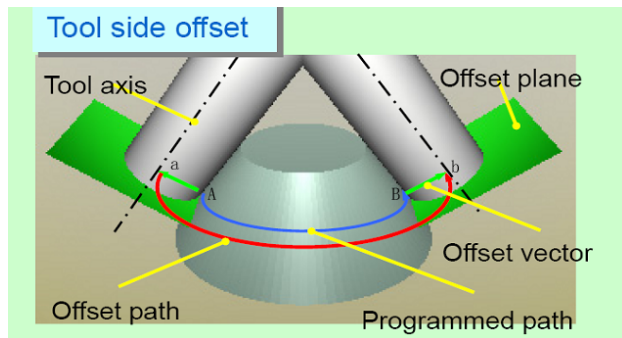


图 6-27 五轴加工时刀具半径补偿示意图

前面讲的刀具半径补偿都是在基本坐标平面内，图 6-27 所示为五轴加工时刀具半径补偿

的情况。对于平底立铣刀，刀位点为刀具轴线与底面的交点。如果不执行刀偏，刀位点轨迹应与编程路径（Programmed path）A→B重合；执行刀具半径补偿后，刀位点轨迹为偏置路径（Offset path）a→b，偏置平面（Offset plane）与编程轨迹点处的法平面重合，刀位点位于偏置平面（Offset plane）内。

二、刀具长度补偿—G43、G44、G49

在用多把刀具对工件进行切削加工时，将刀具安装到机床上，其长度是各不相同的，图6-28为在立式铣削加工中心机床上用刀柄安装钻头、立铣刀和球头铣刀的示意图，E点为刀架参考点，P点为刀位点，刀具长度分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 ，程序中的Z坐标值应该是刀位点P的位置，所以，在一次安装情况下，用多把刀具对工件进行加工时，必须有刀具长度补偿功能。

刀具长度补偿的作用是将指令点由刀架上参考点E平移到刀位点P上。其实现过程如下：坐标指令Z值为刀位点P的坐标值， $Z+L$ 即为刀架参考点E的坐标值。这就需要在加工前，测量出各个刀具的长度L值，将该值存放在刀具长度偏置寄存器中，在程序中用寄存器号来调用该长度值。

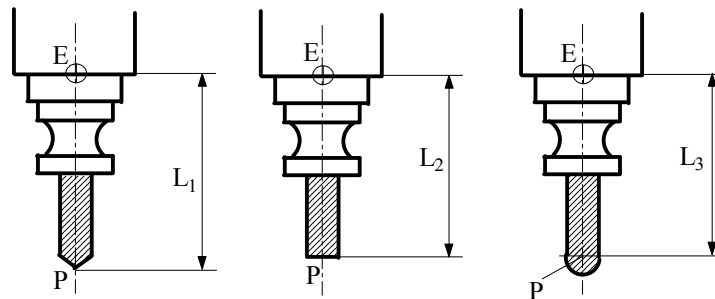


图 6-28 刀具安装后其长度示意图

G43—轴向正补偿指令。指令坐标值加长度寄存器中的值为刀架参考点坐标值。

G44—轴向负补偿指令。指令坐标值减长度寄存器中的值为刀架参考点坐标值。

G49—撤销长度补偿。

刀具长度补偿执行过程也分为建立刀补、执行刀补和撤销刀补三个步骤。

(1) 建立长度补偿，格式如下：

G00 (G01) G43 (G44) H-- Z-- (F--);

其中 H--为刀补号，表示刀具长度值存贮地址，该程序段规定刀位点从起始位置起以快速定位速度（G00 时）或以由 F--（G01 时）规定的进给速度移动到 Z--处。建立长度补偿就是将指令点从刀架参考点平移到刀位点。

(2) 执行长度补偿。Z 坐标值即为刀位点坐标值。

(3) 撤销长度补偿，格式如下：

G00 (G01) G49 H-- Z-- (F--);

刀架上参考点移动到指令坐标 Z--处。撤销长度补偿就是将指令点由刀位点又平移回刀架参考点上。

图 6-29 是长度补偿的一个应用实例。已知机床为 FANUC 6M 系统,加工位置如图。加工步骤如下:

- ①机床主轴端面在 A 平面, 主轴内没有刀具;
- ②由 A 上升到 B 换刀(刀号为 01, 刀具长 200mm, 寄存器号上 H11);
- ③刀尖快速下降到 A 平面;
- ④主轴启动, 正转, 转速 300r/min;
- ⑤刀尖快速下降至 R 平面;
- ⑥钻孔到孔深(进给速度为 120mm/min), 孔底暂停 2 秒;
- ⑦刀尖快退到 A 平面, 主轴停转;
- ⑧主轴端面上升到 B 平面, 取下刀具;
- ⑨主轴端面返回到 A 面, 停机。

加工程序如下:

```
%0002
N10 G92 G90 X0 Y0 Z0 ;
N20 G00 Z250. ; * (指令点为刀架参考点)
N30 T01 M06 ; *换 01#刀
N40 G43 Z0 H11 ; *建立长度补偿
N50 M03 S300 ;
N60 Z-97. ; *执行刀补
N70 G01 Z-153. F120 ; *执行刀补
N80 G04 X2.0 ;
N90 G00 Z0 M05 ; *执行刀补
N100 G49 Z250. *撤销长度补偿, 指令点为刀架参考点
T00 M06 ;
Z0 ;
M02 ;
```

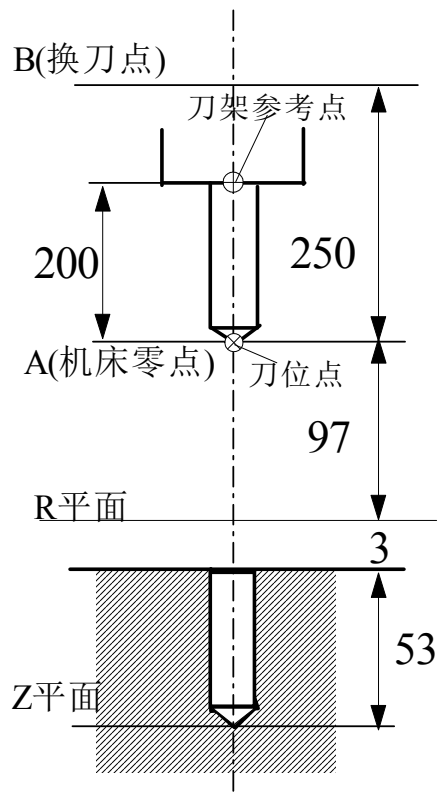


图 6-29 刀具长度补偿应用实例

§ 6-5 固定循环和子程序

有些加工操作的工艺顺序是固定不变的, 如钻孔、镗孔、攻丝等孔加工工艺, 变化的只是坐标尺寸, 移动速度, 主轴旋转等。利用固定循环和子程序功能, 能简化编程工作, 并且可以缩短程序, 节省存储器。

一、孔加工固定循环

1、固定循环的动作

一般孔加工包括下列五个动作(如图 6-30 (a) 所示):

动作 1: X 轴和 Y 轴的定位 (G00);

动作 2: 快速移动到 R 点 (G00);

- 动作 3: 孔加工 (G01);
- 动作 4: 孔底动作 (G04);
- 动作 5: 返回到 R 点或初始点 (G00 或 G01 到 R)。

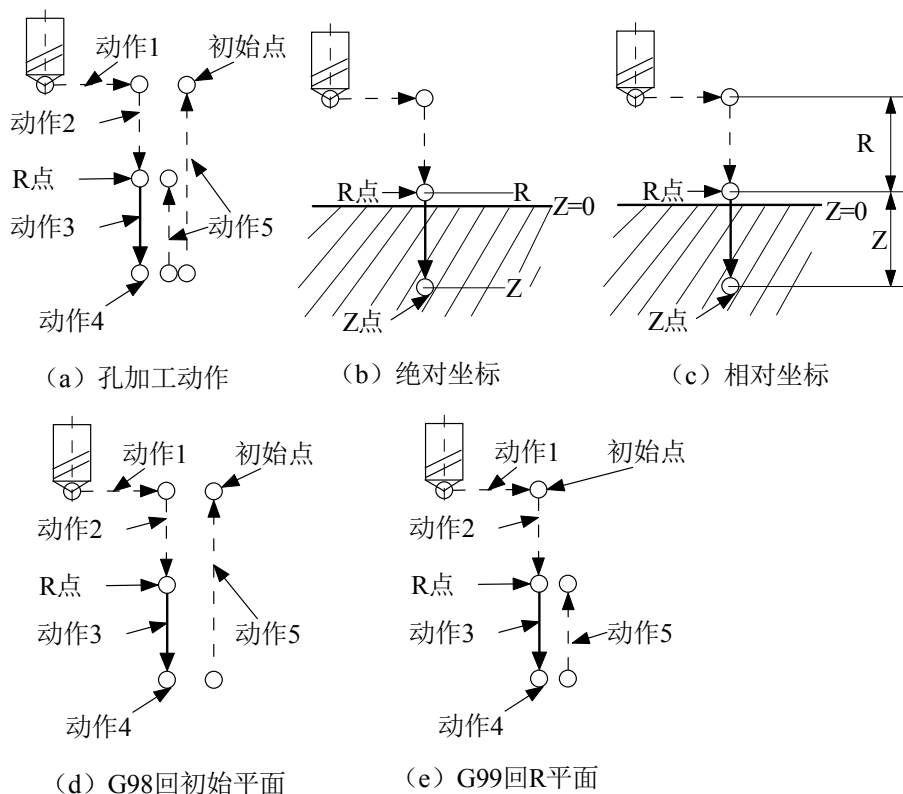


图 6-30 孔加工循环动作示意图

2、命令格式说明

G90 (G91) G98 (G99) Gxx X-- Y-- Z-- R-- Q-- P-- F-- K--;

其中 Gxx 为孔加工方式，指令为 G73~G89

X-- Y--: 指定加工孔的位置，使用绝对坐标还是相对坐标与 G90 或 G91 的选择有关。

Z-- R--: 在绝对坐标编程 (G90) 情况下，是指 Z 点与 R 点的绝对坐标值 (如图 6-30 (b) 所示); 在相对坐标编程 (G91) 情况下，Z 是指 Z 点对 R 点的相对坐标值、R 是指 R 点对初始点的相对坐标值 (如图 6-30 (c) 所示);

Q--: 在 G73 或 G83 方式中用来指定每次的加工深度，在 G76 或 G87 方式中规定位移量。Q 值的使用一律用增量值而与 G90 或 G91 的选择无关。

G98 动作 5 快速回初始点 (如图 6-30 (d) 所示);

G99 动作 5 快速回 R 点 (如图 6-30 (e) 所示);

P--: 用来指定刀具在孔底的暂停时间 (动作 4)，与在 G04 中指定 P 的时间单位一样，以 0.001 秒为单位，不使用小数点。

F--: 指定孔加工切削 (动作 3) 进给速度。这个指令是模态的，即使取消了固定循环在

其后的加工中仍然有效。

K--: 指令孔加工重复的次数, 忽略这参数时就认为是 L1。如果程序中选择了 G90 方式, 刀具在原来孔的位置重复加工, 如果选择 G91 则用一个程序段就能实现分布在一条直线上的若干个等距孔的加工。K 这个指令仅在指定的程序段中才有效。

孔加工方式的指令以及 Z、R、Q、P 等指令都是模态的, 只是在取消补偿时才被清除, 因此只要在开始时指令了这些指令, 在后面连续的加工中不必重新指定。如果仅仅是某个孔加工数据发生变化 (如孔深有变化), 仅修改需要变化的数据即可。

取消孔加工方式用 G80, 而如果中间出现了任何 01 组的 G 代码, 则孔加工的方式也会自动取消。因此, 用 01 组的 G 代码取消固定循环其效果与 G80 是完全一样的。

FANUC-0i 固定循环功能如表 6-4 所示。

表 6-4 孔加工固定循环

G 代码	钻削(-Z 向)	在孔底动作	回退(+Z 向)	功能
G73	间歇进给	—	快速移动	高速深孔钻: 间歇切削进给直到孔底, 每次进给深度用相对值+Q 给出, 退刀量由内部参数设定。
G74	切削进给	停刀→主轴正转	切削进给	左旋攻丝循环
G76	切削进给	主轴定向停→径向移动 Q	快速移动	精镗孔循环
G80	—	—	—	取消固定循环
G81	切削进给	—	快速移动	钻孔循环
G82	切削进给	停止进给	快速移动	钻孔循环, 镗孔循环
G83	间歇进给	—	快速移动	深孔钻: 间歇切削进给直到孔底, 进给深度用相对值+Q 给出, 每次退回 R 面, 再快速进给到上次加工面之上, 距离由内部参数设定。
G84	切削进给	停刀→主轴反转	切削进给	攻丝循环
G85	切削进给	—	切削进给	镗孔循环
G86	切削进给	主轴停止	快速移动	镗孔循环
G87	切削进给	主轴正转	快速移动	背镗孔循环
G88	切削进给	进给停止、主轴停	快速移动	镗孔循环
G89	切削进给	停止进给	切削进给	在孔底停止, 其它与 G85 相同

当在固定循环中指定刀具长度补偿 (G43, G44 或 G49) 时, 在定位到 R 点的同时启动长度补偿。

3、固定循环指令 (FANUC-0i 系统)

以下对各种孔加工方式作一简要说明:

(1) G73—高速深孔钻循环

指令格式为 G73 X-- Y-- Z-- R-- Q-- F-- ;

孔加工动作如图 6-31(a)所示, 通过 z 轴方向的间断进给可以较容易地实现断屑与排屑。用 Q 写入每一次的加工深度 (增量值且用正值表示), 退量 d 在参数 5114 中设定。

(2) G83—排屑深孔钻循环

指令格式为 G83 X-- Y-- Z-- R-- Q-- F-- ;

孔加工的动作如图 6-31(b)所示, 与 G73 略有不同的是每次刀具间歇进给后回退至 R 点平面。此处的 d 表示刀具间断进给每次下降时由快进转为工进的那一点到前一次切削进给下降的点之间的距离, 距离 d 在参数 5115 中设定。当要加工的孔较深时可采用此方式。

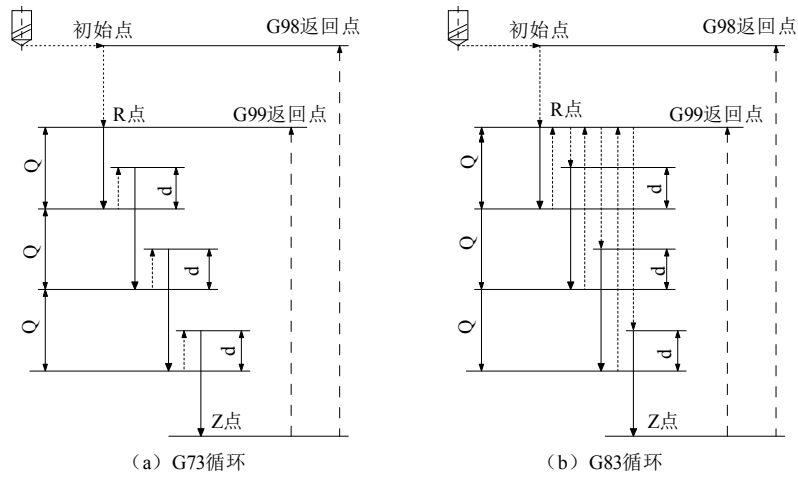


图 6-31 G73 循环与 G83 循环

(3) G76—精镗孔循环

指令格式为 G76 X-- Y-- Z-- R-- Q-- P-- F-- ;

孔加工的动作如图 6-32(a)所示, P 表示在孔底有暂停, oss 表示主轴定向停, Q 表示刀具移动量。刀具从初始点快速移动到 R 点, 以 F 指令的速度切削到孔底, 主轴在固定的旋转位置停止, 刀具以刀尖的反方向移动退刀, 快速退回到 R 点 (或初始点), 刀尖回到原来的平面位置, 主轴正转。需要注意的是, Q (在孔底的偏移量) 是在固定循环内保存的模式值, 必须小心指定, 因为它也作 G73 和 G83 的切削深度。采用这种方式镗孔可以保证提刀时不至于划伤内孔表面。

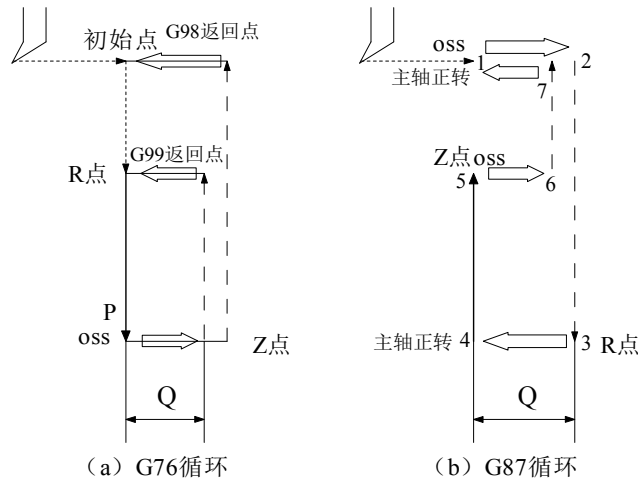


图 6-32 G76 循环与 G87 循环

(4) G87—反镗孔循环

指令格式为 G87 X-- Y-- Z-- R-- Q-- F-- ;

反镗孔的动作如图 6-32(b)所示, x 轴和 y 轴定位后, 主轴定向停止, 刀具以与刀尖相反的方向按 Q 值给定的偏移量偏移, 快速定位到孔底 (R 点), 在这里刀具按原偏移量 (Q 值)

返回，然后主轴正转，沿 z 轴向上加工到 Z 点，在这个位置主轴再次定向停止后，刀具再次按原偏移量反向移动，然后主轴向孔的上方快速移动到初始平面，并按原偏移量返回后主轴正转，继续执行下一个程序段。采用这种循环方式时，只能让刀具返回到初始平面而不能返回到 R 点平面，因为 R 点平面低于 Z 点平面。本指令的参数设定与 G76 通用。

(5) 钻孔 G81 与镗孔 G82

G81 的指令格式为 G81 X-- Y-- Z-- R-- F--;

G82 的指令格式为 G82 X-- Y-- Z-- R-- P-- F--;

G82 与 G81 相比，唯一不同之处是 G82 在孔底增加了暂停（延时），因而适用于镗孔或镗阶梯孔，而 G81 是用于一般的钻孔。

(6) 精镗孔 G85 与精镗阶梯孔 G89

G85 的指令格式为 G85 X-- Y-- Z-- R-- F--;

G89 的指令格式为 G89 X-- Y-- Z-- R-- P-- F--;

这两种孔加工方式，刀具是以切削进给的方式加工到孔底，然后又以切削进给的方式返回到 R 点平面，因此适用于精镗孔等情况，G89 在孔底有延时。

(7) 攻右旋螺纹 G84 与攻左旋螺纹 G74

指令格式为 G84 (G74) X-- Y-- Z-- R-- F--;

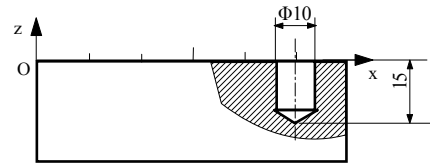
编程时，要根据主轴转速与螺纹螺距计算 F 值。G84 指令主轴在孔底反转，返回到 R 点平面后主轴恢复正转；G74 指令主轴在孔底正转，返回到 R 点平面后主轴恢复反转。在攻螺纹期间忽略进给倍率且不能停车，即使使用了进给保持，加工也不停止，直到完成该固定循环。

(8) G86—镗孔循环

指令格式为 G85 (G86) X-- Y-- Z-- R-- F--;

G85 循环方式，在加工到孔底后，主轴以进给速度返回。

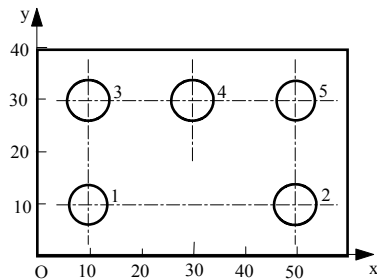
G86 循环方式，加工到孔底后主轴停止，快速返回到 R 点平面（用 G99 时）或初始平面（用 G98 时）后，主轴再重新启动。采用这种方式加工，如果连续加工的孔间距较小，可能出现刀具已经定位到下一个孔加工的位置而主轴尚未到达规定的转速，显然不允许出现这种情况，为此可以在各孔动作之间加入暂停 G04，以使主轴获得规定的转速。在使用固定循环 G74 与 G84 时也有类似的情况，同样应注意避免。



(9) G88—镗孔循环

指令格式为 G88 X-- Y-- Z-- R-- P-- F--;

刀具到达孔底后延时，主轴停止且系统进入进给保持状态，在此情况下可以执行手动操作，按循环启动按钮，刀具快速返回到 R 点平面（用 G99 时）或初始平面（用 G98 时），然后主轴正转。



4、编程举例

加工 6-33 所示孔的程序如下：(FANUC-0i 系统)

图 6-33 孔加工循环例题图


```

%0003
G92 X0 Y0 Z30.0 ;
S300 M03;
G91 G00 X10.0 Y10.0;
G99 G81 Z-18.0 R-27.0 F60;      *加工孔 1
X40.0 ;                          *加工孔 2
X-40.0 Y20.0;                    *加工孔 3
X20.0 K2                          * 加工孔 4 与孔 5
G00 X0 Y0 Z30.0 M05;            *取消孔加工循环
M30;

```

当要加工很多相同的孔时，应认真研究孔分布的规律，尽量简化程序。本例中上一排孔按等间距线性分布，可以使用重复固定循环加工，即用地址 K 规定重复次数。采用这种方式编程要用相对坐标（G91）方式。

二、子程序

1、子程序的概念

当被加工零件上有若干处具有相同的轮廓形状，或加工中出现具有相同轨迹的走刀路线时，在编制的加工程序的若干位置上，包含有一连串在写法上完全相同的内容，为了简化程序可以把这些重复的程序段单独抽出，按一定的格式编成子程序，并像主程序一样将它们存储到程序存储器中。在主程序执行中如果需要某一子程序的内容时，可以通过一定格式的子程序调用指令来调用该子程序，子程序执行完了又可以返回到主程序，继续执行后面的程序段（如图 6-34 所示）。

为了进一步简化程序，可以让子程序调用另一个子程序，这称为子程序的嵌套。编程中可以采用多少级嵌套与数控系统有关，如 FANUC-0i 系统最多可以四级嵌套。编程中使用较多的是二重嵌套，其程序的执行情况如图 6-34 所示。

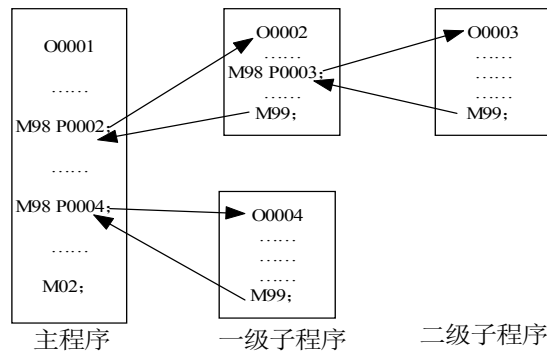


图 6-34 子程序结构示意图

2、子程序的构成与调用（M98、M99）

如图 6-34 所示，子程序以 M99 结束。M99 的功能是回到调用处。

调用子程序用 M98，指令格式为 M98 P--- L--;

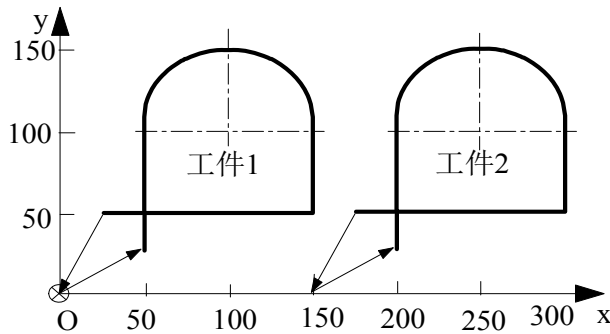
P 后面的数字为子程序号，L--为重复调用次数，当不指定重复次数时，子程序调用只一

次。

如图 6-35 所示，一次装夹两个工件，利用子程序功能，可以简化编程。程序如下：
(FANUC-0i 系统)

```
主程序
%0004 ;
G90 G54 G00 X0 Y0 S1000 M03;
Z100.0 ;
M98 P100 ;
G90 G00 X150. ;
M98 P100 ;
G90 M05 ;
M30 ;
```

```
子程序
%100 ;
G91 G00 Z-95.0 ;
G41 X50.0 Y30.0 D01 ;
G01 Z-15. F100.0 ;
Y70.0 ;
G02 X100.0 R50.0 ;
G01 Y-50.0;
X-120.0 ;
G00 Z110.0;
G40 X-30.0 Y-50.0;
M99
```



6-35 多个工件重复加工

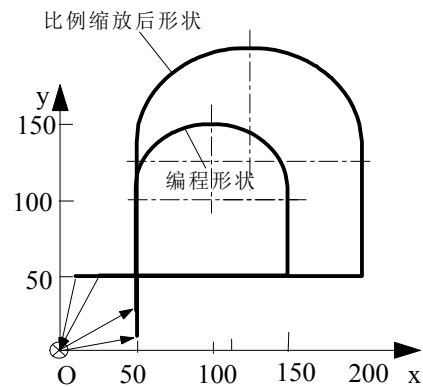


图 6-36 比例缩放举例

现代的 CNC 系统大多具有比例缩放、坐标旋转和镜像功能，这些功能只有与子程序功能共同使用，才能达到简化编程的目的，下面介绍这些功能的使用方法（指令为 FANUC-0i 系统规定的指令）。

3、比例缩放—G51、G50

其功能是编程的形状按指定的比例被放大或缩小。

(1) 沿所有轴以相同的比例放大或缩小，启动缩放命令格式如下：

```
G51 X-- Y-- Z-- P--;
```

其中 X-- Y-- Z--为比例缩放基点绝对坐标值，P--为缩放比例系数。

(2) 沿各轴以不同的比例放大或缩小，启动缩放命令格式如下：

```
G51 X-- Y-- Z-- I-- J-- K--;
```

其中 I-- J-- K--分别是 x、y、z 各轴对应的缩放比例。

G50—取消缩放方式。G51 与 G50 必须在单独的程序段内指定。

缩放比例的最小输入增量单位是 0.001 或 0.000001，取决于参数 No.5407#7 的设定。用参数 No.5400#0 设定执行缩放的坐标轴。如果比例 P 未在程序段 (G51 X-- Y-- Z-- P--) 中指定，则使用参数 (No.5411) 设定的比例。如果省略 X-- Y-- Z--，则 G51 指令的刀具位置作为缩放中心，比例 (I、J、K、P) 不能用小数。

比例缩放对刀具半径补偿值，刀具长度补偿值无效。

在下面的固定循环中，z 轴的移动缩放无效：深孔钻循环 (G83、G73) 的切入值 Q 和返回值 d；精镗循环 (G76)、背镗孔循环 (G87) 中 x 轴和 y 轴的偏移量 Q；手动运行时，移动距离不能用缩放功能增减。

在缩放状态，不能指令返回参考点的 G 代码 (G27、G28、G29) 和设置工件坐标系指令 (G54~G59, G92)。若必须指令这些 G 代码，应在取消缩放功能后指定。

加工图 6-36 所示轮廓的主程序如下：子程序如上例。

```
%0005 ;  
G90 G92 X0 Y0 Z100.0;  
S1000 M03;  
M98 P100 ; (加工编程形状)  
G51 X50. Y50. Z0 I1500 J1500 K1000 ;(x 与 y 轴缩放 1.5 倍, z 缩放 1 倍)  
M98 P100 ;  
M30 ;
```

4、镜像功能—G51.1, G50.1

当工件相对于某一轴具有对称形状时，可以只对工件的一部分进行编程，利用镜像功能和子程序，能加工出工件的对称部分，这就是镜像功能。当某一轴的镜像有效时，该轴执行与编程方向相反的运动。

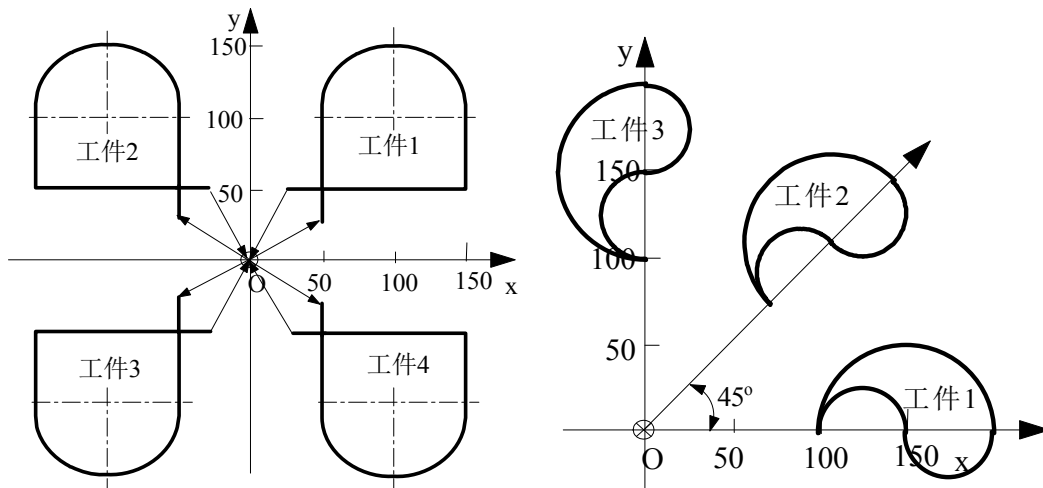


图 6-37 镜像功能举例

指令格式如下：

G51.1 X-- Y--; 建立镜像
.....

G50.1 X-- Y--; 取消镜像

其中 X-- Y--指定对称轴或对称点。

在指定平面对某个轴镜像时，使下列指令发生变化：圆弧插补 G02 与 G03 互换，顺时针与逆时针互换，半径补偿 G41 与 G42 互换。

在镜像状态，不能指令返回参考点的 G 代码（G27、G28、G29）和设置工件坐标系指令（G54~G59，G92）。若必须指令这些 G 代码，应在取消镜像功能后指定。

加工图 6-37 所示轮廓的主程序如下：子程序如上例。

```
%0006;
G90 G92 X0 Y0 Z100.0;
S1000 M03;
M98 P100;      *（加工编程形状，工件 1）
G51.1 X0;      *(建立以 y 轴为对称轴的镜像
M98 P100;      *（加工工件 2）
G50.1 X0      *取消以 y 轴为对称轴的镜像
G51.1 X0 Y0   *建立以 X0 Y0 为对称点的镜像
M98 P100;      *（加工工件 3）
G51.1 X0 Y0   *取消以 X0 Y0 为对称点的镜像
G51.1 Y0;     *建立以 y 轴为对称轴的镜像
M98 P100;     *（加工工件 4）
G50.1 Y0;     *取消以 y 轴为对称轴的镜像
M30;
```

5、坐标系旋转—G68、G69

使用该功能可将编程形状旋转一个角度加工，另外，如果工件的形状由许多相同的图形组成，则可将图形单元编成子程序，然后用主程序的旋转指令调用。

用 G68 建立坐标系旋转，指令格式如下：

G17 (G18、G19) G68 α -- β -- R--;
.....

G69; 取消坐标系旋转

其中 α -- β --是旋转中心的绝对坐标值，α -- β --代表 x、y、z 中的两个，由 G17、G18、G19 坐标平面指令指定，当省略 α -- β --时，认为 G68 程序段的刀具位置为旋转中心。R--角度位移，正值表示逆时针旋转，有效数据范围为-360.000° ~360.000°。参数 No.5400#0 指定回转角总为绝对值还是根据指定的 G90 或 G91 确定绝对值或增量值。

在坐标系旋转之后，执行刀具半径补偿和刀具长度补偿。

图 6-38 旋转功能举例

在坐标系旋转方式中,不能指令返回参考点的G代码(G27、G28、G29)和设置工件坐标系指令(G54~G59,G92)。若必须指令这些G代码,应在取消坐标系旋转功能后指定。

加工图 6-38 所示轮廓的程序如下:

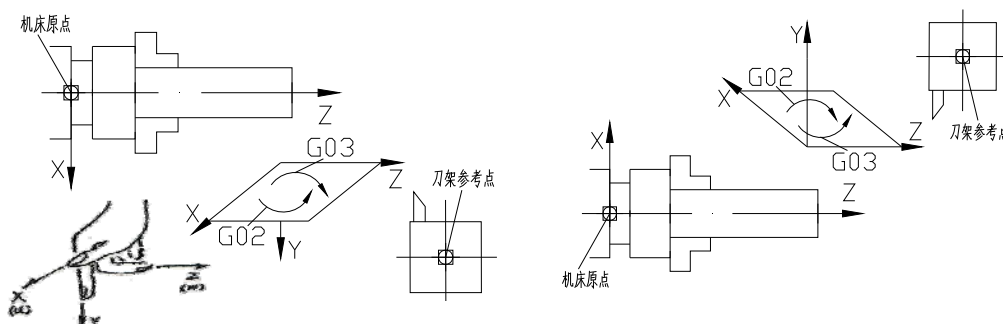
主程序	子程序
%0007;	%200;
G90 G92 X0 Y0 Z10;	G00 G41 D01 X100.0;
S1000 M0S;	Z-10;
M98 P200; * (加工工件 1)	G02 X200.0 I50.0;
G68 X0 Y0 R45; *建立坐标系旋转	G02 X150.0 I-25.0;
M98 P200; * (加工工件 2)	G02 X100.0 R-25.0;
G69; *取消坐标系旋转	G01 Z10.0;
G68 X0 Y0 R90; *建立坐标系旋转	X0;
M98 P200; * (加工工件 3)	M99
G69; *取消坐标系旋转	
M30;	

§ 6-6 数控车床编程基础

一、数控车床坐标系

一般的数控车床通常只有 X 轴和 Z 轴, X 轴正向视刀架相对于主轴的位置而定。数控车床刀架布置有两种情况,如图 6-39 所示,当刀架在操作者与主轴之间时, X 轴正向指向操作者(如图 6-39(a)所示),这时 Y 轴正向向下,圆弧插补 G02 和 G03 的轨迹方向如图 6-39(a)所示。当刀架在主轴对面或在主轴上面时, X 轴正向与圆弧插补 G02 和 G03 的轨迹方向如图 6-39(b)所示。

数控车床上的回转体零件的径向尺寸都是以直径值表达的,因而在用绝对坐标值编程时,以直径值编程;用增量坐标值编程时,以径向实际位移量的两倍值编程并有正、负方向(正号省略)。一般的数控车床, X 和 Z 为绝对坐标值, U 和 W 为相对坐标值,并且两组坐标可以混合使用。



(a)刀架在主轴与操作者之间

(b)刀架在对面或在上

图 6-39 刀架位置与坐标方向示意图

二、 刀具长度补偿和半径补偿

1、 刀具长度补偿

在加工过程中，数控系统控制的是刀架参考点的位置，屏幕上显示的机床坐标值就是该点的坐标值，而且，数控车床的刀架可以夹持多把刀具，每一把刀具的刀尖（刀位点）相对于刀架参考点的距离各不相同（如图 6-40 所示），所以，必须使用长度补偿功能，将控制点由刀架参考点偏置到刀位点上，这样才能进行多刀加工。

在加工前，要测量出各把刀具的长度值，然后输入到刀具偏置寄存器中。程序中用 T 指令调用，如 T0102：调用 01#号刀具，长度补偿寄存器为 02#号。刀具长度测量方法有如下三种。

①试切法：如图 6-40 所示，将已知直径和长度的工件装在卡盘中，1#刀具在“点动操作”工作方式下，以较小进给速度分别试切工件外圆和端面，则 $X_{off}=X-X_1$ ， $Z_{off}=Z-Z_1-Z_2$ ，然后将 X_{off} 、 Z_{off} 存入指定刀偏寄存器中。

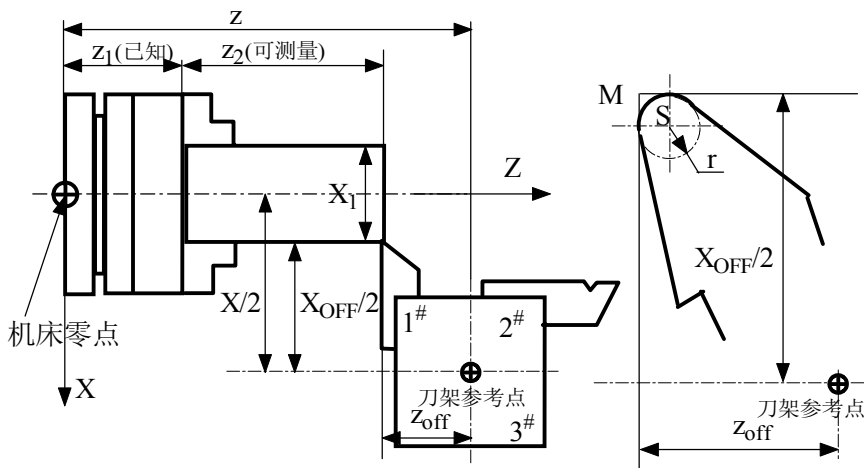
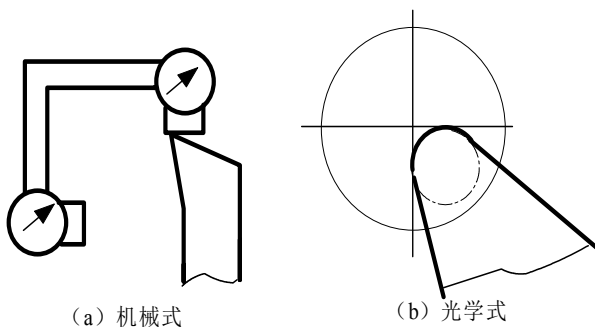


图 6-40 车刀刀偏值的测量方法

②采用对刀仪测量：对刀仪分为机械式和光学式（如图 6-41 所示）。光学式对刀仪具有投影放大镜，十字线的交点为基准点，当对刀仪在机床上固定后，该基准点相对于机床坐标系原点的尺寸距离固定不变，该尺寸值由机床制造厂通过精确测量预置在机床参数内，必要时可通过参数设置来适当修正。对刀前需先回机床参考点，建立机床坐标系。然后通过手动，把装夹在刀架上的刀具移动至对刀仪位置。通过微调使所对刀具的刀尖对准光学投影放大镜的十字中心基准点上，有些系统可



(a) 机械式

(b) 光学式

19 图 6-41 用对刀仪对刀示意图

以自动计算出刀偏值并储存。

③机床外部的测量：在机床上进行刀具测量的最大缺点是测量的同时不能进行加工。特别是对于具有大数目刀具容量的机床，这个问题更加突出。由于这一原因，现在可以使用刀具调整设备在刀具没有安装到机床的时候测量刀具，通过计算机与 CNC 的通讯在线传送给 CNC 系统。

需要说明的是，对刀误差不可能完全消除，而且刀具在使用一定时间后磨损，这些都会影响零件的加工精度。所以当试加工后发现工件尺寸不符合要求时，可根据零件实测尺寸进行刀偏值修正。

2、刀具半径补偿

为提高刀具寿命和表面加工质量，车刀片的刀尖一般都有一个半径不大的圆弧 (r_c)，从图 6-40 和图 6-41 所示对刀方法可以看出，在 X 向和 Y 向对刀时，分别是用刀尖圆弧的圆周与工件或对刀仪接触，这样对刀后，当启动刀具长度补偿时，刀位点是假想的刀尖 M 点（实际不存在）。当加工外圆和端面时，误差不大，但当切削斜面或圆弧时，就会出现欠切和过切现象，如图 6-42 所示。

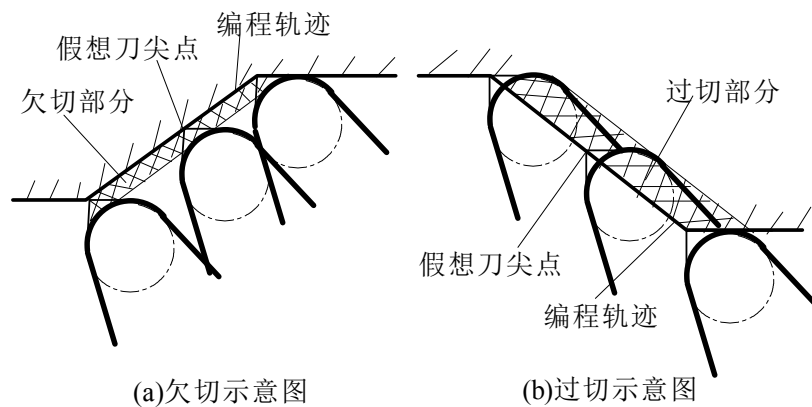


图 6-42 以假想刀尖为刀位点的欠切和过切示意图

为避免欠切和过切现象，要启动刀具半径补偿。指令如下：

G41—左补偿指令，刀具中心位于编程轨迹前进方向的左边。

G42—右补偿指令，刀具中心位于编程轨迹前进方向的右边。

G40—取消刀具半径补偿。

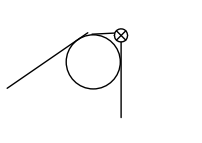
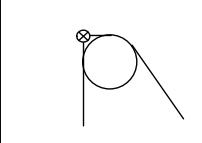
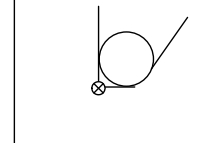
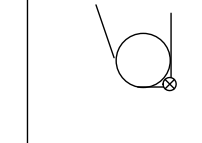
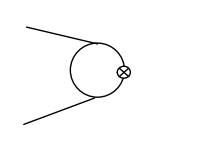

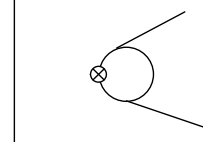
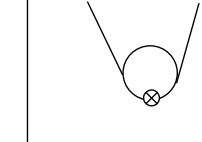
要注意的是，当车床坐标系如图 6-39(a)所示时，刀具左补偿和右补偿与图示顺圆和逆圆有相同的规律。

刀具半径补偿的执行过程可分为建立刀补、执行刀补和撤销刀补三个步骤。启动刀具半径补偿时，刀具补偿寄存器号由 T 指令最后两位数字给出。

启动刀具半径补偿后，刀位点是刀尖圆弧中心 S 点。编程时按零件轮廓数据编程，启动刀具半径补偿后，系统会自动计算出刀尖圆弧中心轨迹。

由于车刀刀尖位置不同，在设置刀偏值时，不但要输入刀尖圆弧半径 r 值，而且要输入假想刀尖位置编号。如表 6-5 所示

表 6-5 假想刀尖号码

假想刀尖号码1	假想刀尖号码2	假想刀尖号码3	假想刀尖号码4
			
假想刀尖号码5	假想刀尖号码6	假想刀尖号码7	假想刀尖号码8
			

如图 6-43 所示零件。

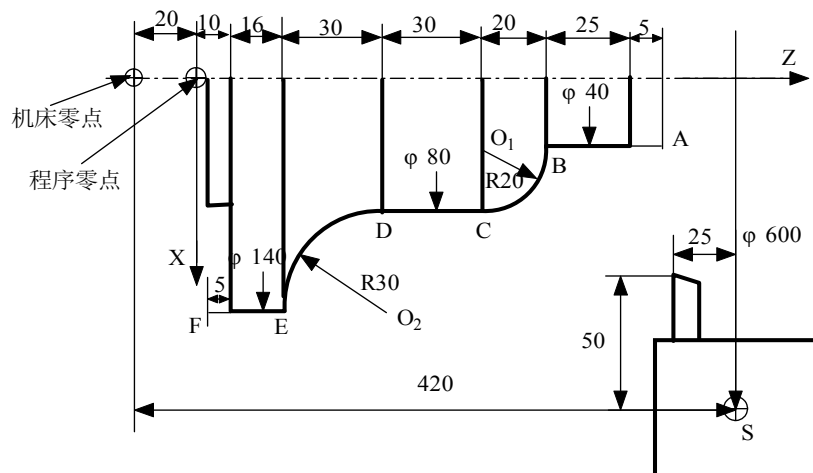


图 6-43 车削加工

加工路线为：快速定位到 A 点，启动长度和半径补偿→工进，执行刀补 B→C→D→E→F→回起刀点，撤消刀补。进给速度 35mm/min；主轴转速 350r/min。在加工前，刀偏表中的值如下表。

补偿号	X 轴偏置值	Y 轴偏置值	刀尖半径值	假想刀尖号
02	100	25	3	2

数控加工程序如下：

%0014 ；

N1 G92 X600. Z400. ；

*设置工件坐标系

N2 G00 G42 X40. Z136. T0102 S350 M03 ；

*启动长度补和半径补偿

N3 G01 W-30. F35. ；

*工进到 B, 相对坐标

N4 G03 X80. W-20. R20. ; *到 C
 N5 G01 W-30. ; *到 D
 N6 G02 X140. W-30. R30. ; *到 E
 N7 G01 W-21. ;
 N8 G00 G40 X600. Z400. T0100 M05 ; *回起刀点,撤消刀补
 N9 M30 ;

在程序段 N2 中, 用 T0102 启动刀具长度补偿, 用 G42 启动半径补偿, 半径补偿寄存器号由 T0102 中的 02 给出。程序段 N8 中用 T0100 撤消长度补偿, G40 撤消半径补偿。程序段 N2 和 N3 中逆圆插补和右补偿是由 Y 正向向其相对方向看去来判断。在程序段 N4 中 X80. 是绝对坐标, W-30.是相对坐标。

三、恒线速切削

恒线速度切削也叫固定线速度切削, 它的含意是在车削非圆柱形内、外径时, 车床主轴转速可以连续变化, 以保持实时切削位置的切削线速度不变(恒定)。中挡以上的数控车床一般都有这个功能。使用此功能不但可以提高工效, 还可以提高加工表面的质量, 即切削出的端面或锥面等的表面粗糙度一致性好。用 G96 指定恒线速切削, 如 G96 S120, 指定切削线速度为 120m/min; 用 G97 指定恒转速切削, 如 G97 S120, 指定主轴转速 120r/min; G96 与 G97 是同一组的模态指令, 一般数控车床开机后, CNC 默认状态为 G97。在恒线速切削状态下, 当径向尺寸较小时, 主轴转速会变得很高, 即出现“飞车”现象, 非常危险, 为了避免这种现象产生, 必须限制主轴的最高转速, 在 FANUC-0i 数控系统中用 G92 指令限制最高转速(注: 这是 G92 的另一用途), 如 G92 S3000, 限制最高转速不超过 3000r/min。下面用图 6-44 所示工件的斜面和端面切削程序说明恒线速切削指令的使用方法及注意事项。

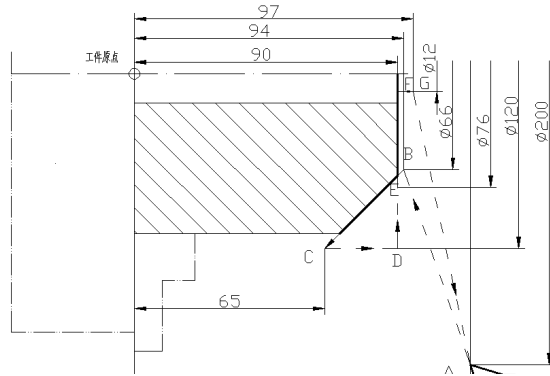


图 6-44 恒线速切削例题图

刀具的运动轨迹为 A→B→C→D→E→F→G→A, 虚线表示快速移动, 实线表示切削进给, 粗实线表示被加工表面。切削的线速度设为 200m/min, 最高转速设为 3000r/min, 工件程序如下:

```
%0008
N1 G92 G90 X200. Z150.;
N2 G97 S965 M03; *恒转速, 965r/min, 主轴正转
N3 G00 X66. Z94. M08; *快速定位到 B 点
N4 G92 S3000 *主轴最高转速设定为 3000r/min
N5 G96 S200 G01 X120. Z65. F0.1; *恒线速度为 200m/min, 工进到 C 点
N6 G97 S684 G00 Z94.; *恒转速, 主轴加速, 快速定位到 D 点
N7 S838 X76; *主轴再加速, 快速定位到 E 点
```

N8 G96 S200 G01 X12. ;
 N9 Z97. M09 ;
 N10 G00 X200. Z150. M05 ;
 N11 M02 ;

*恒线速度为 200m/min, 工进到 F 点
 *工进到 G 点
 *快速定位到 A 点, 主轴停转

这里将 3000r/min 限速编入 N4 段内, 这个“G92 S3000”指令也可提前到前面任何位置, 在本例中只要在 N5 段前都可以。在车削端面时, E 点主轴转速为 838 r/min, 随着径向尺寸减小, 主轴加速, 如果不限最高转速, 当切到 F 点时, 主轴转速将达到 5307 r/min; 有了“G92 S3000”限速后, 当主轴转速达到 3000r/min 时, 主轴转速不再提高。

要注意这个功能一般不能用在快进 (G00) 程序段内。换句话说, 在 G96 程序段开始之后、G97 程序段之前, 一般不能出现 G00 程序段。本例中, 如果把 N6 中的 G97 和 N8 中的 G96 去掉, 虽然端面仍可作恒线速度切削, 但在执行 N7 段即从 D 点快速到达 E 点过程中主轴会突然加速, 从 530r/min 急升到 838r/min。如果刀具已到达 E 点而主轴尚未升到 838r/min, 那么刀具就会在 E 点等待, 直到主轴升到 838r/min 再开始切削端面。

另外, 最好算出 G96 起始点的主轴转速, 然后把转速变化量分摊到前面的 G00 程序段中。本例中, C 点主轴转速为 530r/min, 到 D 点主轴加速到 684 r/min, 到 E 点主轴再加速到 838r/min, 两个 G00 程序段分别加速 154r/min, 保证主轴转速平衡过度。B 点的主轴转速为 965 r/min, 安排在 N2 中, 主轴由静止加速到 965 r/min 后, 刀具再快速定位到 B 点。

四、车削固定循环程序

现代数控车床大多具备各种不同形式的固定循环功能, 如内外圆柱面与圆锥面、切槽、端面、螺纹等固定循环指令。按固定循环的复杂性可分为简单固定循环与复合固定循环。所谓简单固定循环是指一条循环指令程序段只作一个加工表面的一次固定循环动作, 而复合固定循环是指一条循环指令程序段可进行多个加工表面并多次分层循环的动作。

应注意的是: 各种数控车床固定循环的指令代码与程序格式不尽相同, 必须按使用说明书的规定编程。以下简介 FANUC 系统的固定循环功能 (部分)。

1、内外圆简单固定循 (G77)

(1) 矩形切削循环 (如图 6-45 所示), 指令格式:

G77 X (U) -- Z (W) -- F--;

图示 1、2、3、4 为循环路线, R 表示快速, F 为进给速度。当用绝对坐标编程时, 用 2 (F) 运动终点的绝对坐标 x、z 值; 当用增量坐标编程时, 用 u、w 增量值及其方向编程。

(2) 锥度切削循环 (如图 6-46 所示)

指令格式: G77 X (U) -- Z (W) -- I-- F--;

与图 6-45 相比, 只增加了地址 I。I 是指定 1 (R) 的行程为 u/2 与 I 的代数值相加。I 值

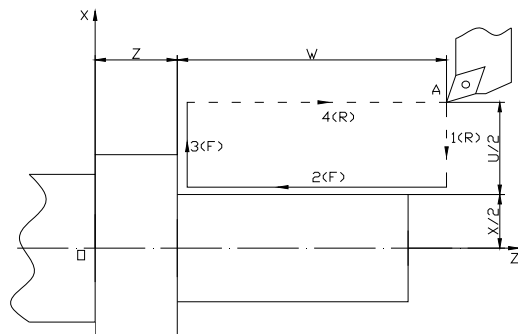


图 6-45 矩形切削循环

为锥度大、小端直径尺寸差的 1/2。图 6-45 (a) 的 u 与 I 都为负值 ($u < 0, I < 0$)，加工正锥度外圆；图 6-45 (b) 的 I 取正值，锥度与图 6-45 (a) 相反。同理：当刀尖向上，若 $u > 0, I > 0 (w < 0)$ ，或 $u < 0, I < 0 (w < 0)$ ，则可加工内锥度，且两者锥度相反。图 6-45 则为 $I=0$ 的形式。

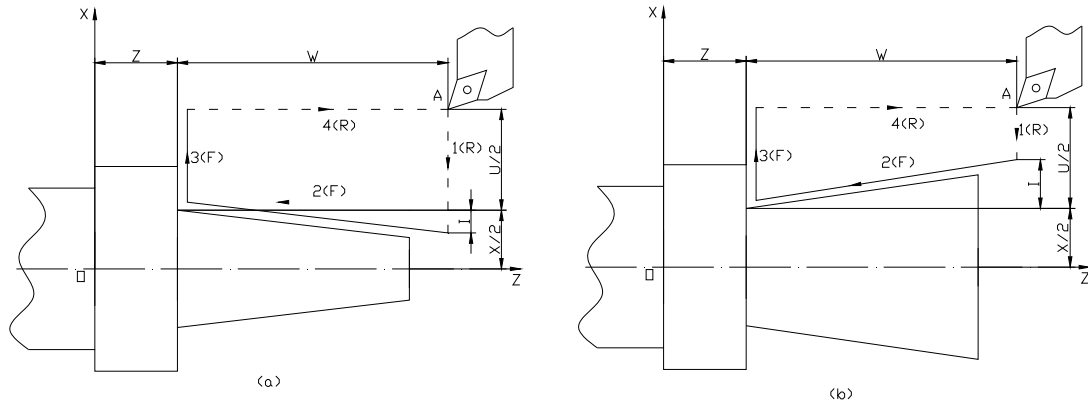


图 6-46 锥面切削循环

2、螺纹简单固定循环 (G78) (如图 6-47 所示)

格式：直螺纹 G78 X (U) -- Z (W) -- F--;

锥螺纹 G78 X (U) -- Z (W) -- I-- F--;

格式中的 F 为螺距，其余与 G77 相同。

螺纹的尾部 $r \times 45^\circ$ 为斜向退刀。推荐的 r 值为： $0.64 \leq F < 1.28$ 时 r 为 1.28；

$1.28 \leq F < 2.56$ 时 r 为 2.56； $2.56 \leq F < 5.12$ 时 r 为 5.12；（其余略）。 $Z (W)$ 数值包括切入距离，一般为 $(3 \sim 5) F$ 。螺纹是分层切削的，粗车时每次背吃量应为递减。

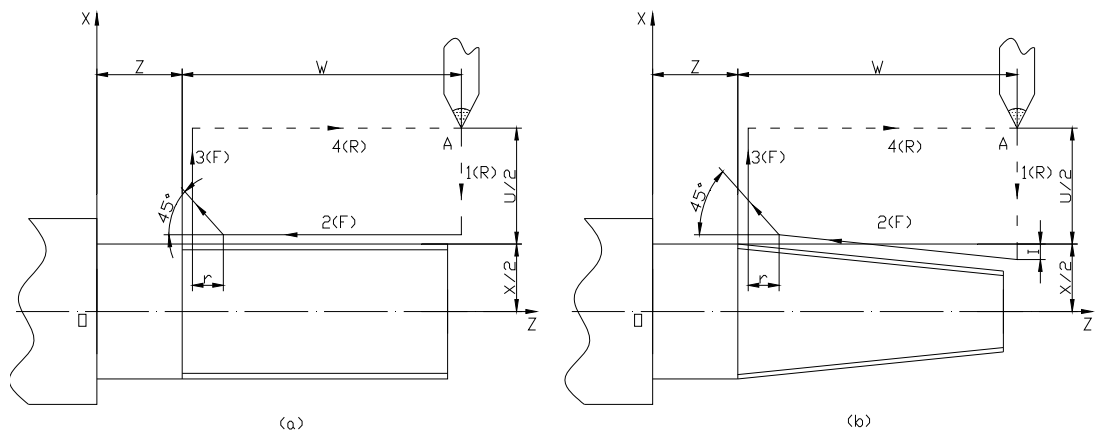


图 6-47 螺纹切削循环

3、纵向粗车复合固定循环（G71）及精车复合循环（G70）

当用棒料毛坯加工台阶轴类零件时，可用 G71 及 G70 编程。如图 6-48 所示，A-G-H-I-J-K-M-R 为零件表面，C 为循环起始点。

Δd 为粗车背吃刀量， Δu 为径向精车余量， Δw 为轴向精车余量。走刀路线如图 6-48 所示，当走刀至工件表面只剩下精车余量时（由 CNC 系统判别），粗加工循环结束，刀具回到循环起始点。

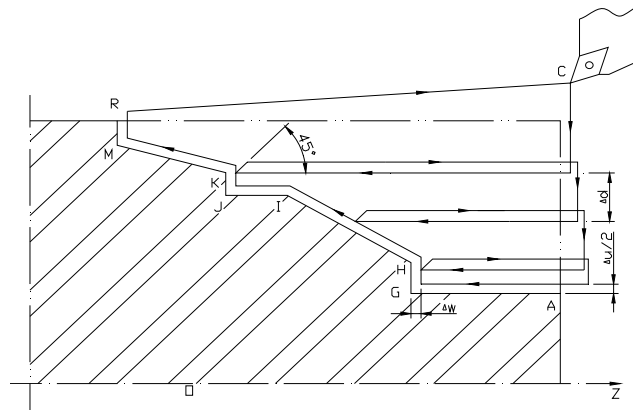


图 6-48 纵向粗车复合循环

G71 指令格式：

G71 P(ns) Q(nf) U(Δu) W(Δw) D(Δd) F-- S-- T--;

其中，ns 为精加工程序中第一个程序段号，nf 为精加工程序中最末一个程序段号。

G70 指令格式：G70 P(ns) Q(nf);

它包含按零件轮廓 A-G-H-I-J-K-M-R 走刀的精车程序，用 G00、G01 等指令编程，并指定精车的 F、S、T（G71 的 F、S、T 对 G70 无效）。

图 6-48 所示程序如下：（FANUC 系统）

.....

N002 G00 X_C Z_C S-- M03;

*循环起始点 C

N003 G71 P004 Q011 U0.3 W0.3 D3.0 F0.25; *粗车循环设定，精车余量 0.3

N004 G00 X_A Z_A S--;
 N005 G01 Z_G F0.15;
 N006 X_H;
 N007 X_I Z_I;
 N008 Z_J;
 N009 X_K;
 N010 X_M Z_M;
 N011 X_R;
 N012 G70 P004 Q011;
 N013 M02;

*实际编程时要考虑刀具引入设置 A 点
 *A→G
 *G→H
 *H→I
 *I→J
 *J→K
 *K→M
 *M→R
 *调用精车程序加工

粗车程序结束后，自动留精车余量 0.3；N012 精车程序结束时，刀具自动返回循环开始点 C。

4、轮廓粗车复合固定循环（G73）

轮廓（仿形、封闭）粗车复合循环适用于铸、锻毛坯按工件轮廓形状分层粗加工，如图 6-49 所示。该指令也是与 G70 一起使用。其指令格式如下：

G73 P(ns) Q(nf)
 I(Δi) K(Δk) U(Δu)
 W(Δw) D(Δd) F-- ;

其中，Δi、Δk 分别为径向、轴向粗切总余量，每层余量由系统自行分配；Δd 为循环次数。其余与 G71 及 G70 编程相同。

另外，车削还有端面加工循环和切槽循环等。

五、编程举例

车削零件如图 6-50 所示。该零件已在卧式车床上进行了粗加工，本工序只需要进行精加工，即需加工圆柱面、圆锥面、圆弧、切槽、倒角及螺纹。图中 φ85mm 圆柱面不加工。选用具有直线、圆弧插补功能的数控车床加工该零件。

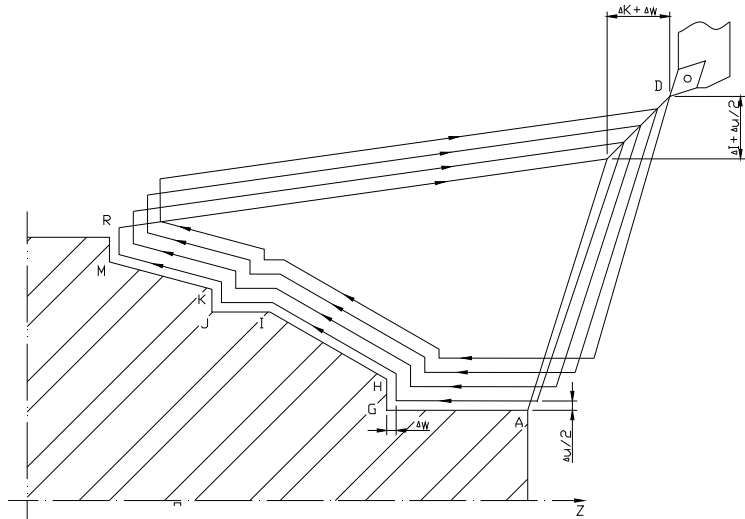


图 6-49 轮廓粗车复合循环

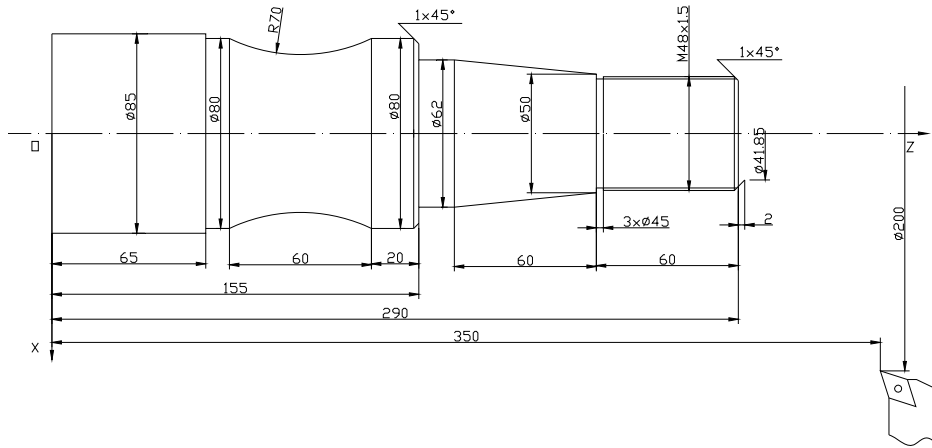


图 6-50 车削零件图

加工过程采用三爪卡盘夹紧 $\phi 85\text{mm}$ (工件左端圆柱面), 右端面使用顶尖。选用 3 种刀具进行加工, T1 为菱形刀片, 精车外径; T2 为宽 3mm 的切槽刀, 切 $3\text{mm} \times \phi 45\text{mm}$ 退刀槽; T3 为 60° 螺纹车刀。

该零件的计算较为简单, 由图纸尺寸可直接进行编程。螺纹加工中 $M48\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 实际外径取 $d=48\text{mm}-0.1 \times 1.5\text{mm}=47.85\text{mm}$; 总切深 $h=0.63 \times 1.5\text{mm}$; 内径 $d'=48\text{mm}-1.36 \times 1.5\text{mm}=45.96\text{mm}$ 。工件坐标系如图 6-50 所示。切削加工程序如下:

```

%0009;
N1 G92 X200. Z350.;
N2 G00 X41.8 Z292. S31 M03 T0101 M08; *主轴正转, 启动 01#长度补偿
N3 G01 X47.85 Z289. F15; *倒角
N4 W-59.; *切  $\phi 47.85\text{mm}$  圆柱面
N5 X50.; *车端面
N6 X62. W-60.; *车圆锥面
N7 Z155.; *车  $\phi 62\text{mm}$  圆柱面
N8 X78.; *车端面
N9 X80. W-1.; *倒角
N10 W-19.; *车  $\phi 80\text{mm}$  圆柱面
N11 G02 W-60. R70.; *车圆弧
N12 G01 Z65.; *车  $\phi 80\text{mm}$  圆柱面
N13 X90.; *退刀
N14 G00 X200. Z350. M05 T0100 M09; *撤消刀补, 回起刀点
N15 X51. Z230. S23 M03 T0202 M08; *换 02#刀, 启动 02#刀补
N16 G01 X45 F10; *切槽
N17 G04 X0.5; *进给暂停 0.5 秒

```

N18	X51.;	*退刀
N19	G00 X200. Z350. M05 T0200 M09;	*撤消刀补,回起刀点
N20	X52. Z296. S22 M03 T0303 M08	*车螺纹起始位置
N21	G78 X47.2 Z231.5 F1.5	*车螺纹
N22	X46.6;	*第二刀
N23	X46.1;	*第三刀
N24	X45.8;	*第四刀
N25	G00 X200. Z350. M05 T0300 M09;	*撤消刀补,回起刀点
N26	M30;	*程序结束

§ 6-7 变量参数编程与用户宏程序

在常规的主程序和子程序内，几乎所有的功能字，尤其是尺寸字，都有严格的地址和随后的数字。该数值可用一个可赋值的代号来代替，这个代号被称为变量。含有变量的子程序叫做用户宏程序。宏程序功能使得加工路径有一定规律可循的编程工作变得简单。另外，数控机床上的一些附件，如工件测头、对刀仪等，都要通过宏程序来实现其功能。

一、变量的种类

普通加工程序直接用数值指定 G 代码和移动距离，例如，G01 和 X100.0。使用用户宏程序时，数值可以直接指定或用变量指定。当用变量时，变量值可用程序或用 MDI 面板上的操作改变。如#1=#2+100; G01 X#1 F300。

数控程序中的变量用变量符号 (#) 和后面的变量号指定，如#1。表达式可以用于指定变量号，此时，表达式必须封闭在括号中，如#[#1+#2-12]。当在程序中定义变量时，小数点可以省略，例如当定义#1=123 时，变量#1 的实际值是 123.000。被引用变量的值根据地址最小设定单位自动地舍入，例如脉冲当量为 0.001mm 时，#1=12.3456; G00 X#1; 实际指令值为 G00 X12.346。改变引用变量的值的符号，要把负号 (-) 放在#的前面，例如 G00X-#1。当引用未定义的变量时，变量及地址字都被忽略，例如，当变量#1 的值是 0，变量#2 的值是空时，G00 X#1 Y#2 的执行结果为 G00X0。程序号、顺序号和任选程序段跳转号不能使用变量，例如下面情况不能使用变量：%#1; /#2 X100.0; N#3 Y200.0。

宏程序中的变量有三类：局部变量、公用变量、系统变量。

1、局部变量 (#1~#33)

如表 6-6 所示，共有 33 个局部变量，每一个局部变量对应一个字母地址，以便于在调用语句中赋值。由表可以看出：I、J、K 变量共有十组，有些地址与 I、J、K 共用一个变量。

这些变量可在一个宏程序中使用，也可在另外几个宏程序中重复使用。当它们有嵌套关系时，包括主程序在内，同一个变量最多可重复用 5 次，因此，最多有四层嵌套。重复用的变量在各自程序中互不影响。但在同一个程序中不能重复使用。

表 6-6 局部变量表

变量	地址	变量	地址	变量	地址
#1	A	#12	K	#23	W J

#2	B		#13	M	I	#24	X	K
#3	C		#14		J	#25	Y	I
#4	I		#15		K	#26	Z	J
#5	J		#16		I	#27		K
#6	K		#17	Q	J	#28		I
#7	D	I	#18	R	K	#29		J
#8	E	J	#19	S	I	#30		K
#9	F	K	#20	T	J	#31		I
#10		I	#21	U	K	#32		J
#11	H	J	#22	V	I	#33		K

在调用宏程序时，自变量对局部变量赋值；局部变量在程序中储存数据。只在它所在的程序中起作用，在系统上电、复位、急停及执行 M02、M30 指令后被初始化为空。在有些逻辑关系上，<空>不同于 0，所以不要使用没有赋值的变量。

在同一个调用语句中可同时对 I、J、K 地址进行多次赋值，被赋值的变量与 I、J、K 的排列顺序有关，排列在前面的地址从变量号较小的开始赋值，如：

G65 P---- A1 C2 I3 J4 I5 K6 K7 ; 赋值结果为#1=1, #3=2, #4=3, #5=4, #7=5, #9=6, #12=7。

2、公用变量（#100~#199；#500~#999）

它们能够在任何主程序、子程序中被调用。直接用#i=<表示式>的形式来赋值和调用，如： $\#100=\#2+1-\#8*\text{COS}[\#1]$ ；也可以通过控制面板赋值。当断电时，#100~#199 初始化为<空>；#500~#999 为保存型变量，即使断电其数据也不丢失。

3、系统变量（#1000~）

它们是系统固定用途的变量，可以被任何程序使用。有些是只读的，有些可以赋值或修改。

如#2000~#2999 中的内容是刀具半径补偿量。零件程序中半径补偿号 D 字母后面的数值与 2000 相加可得到补偿值的地址；如：D08 的值可由#[2000+08]得到，#2000 中的值永远是零，因此 D00 的值永远为零。在编程中如果要用到诸如程序段终点在工件坐标系中的坐标值（X=#5001, Y=#5002）等，可以查系统说明书。

二、变量的运算

在程序中对变量可以进行数值运算和逻辑运算。数值运算包括加、减、乘、除等算术运算；SIN（正弦）、ASIN（反正弦）、COS（余弦）、ACOS（反余弦）、TAN（正切）、ATAN（反正切）、AQRT（平方根）、LN（以 e 为底对数）和 EXP（指数）等函数运算；以及 BIN（从二进制到十进制转换），BCD（从十进制到二进制转换），ROUND（四舍五入取整），FIX（舍去小数位取整），MOD（取余），ABS（绝对值）等数据处理。

逻辑运算有：AND（与）、OR（或）、XOR（异或）、NOT（非）、GT（大于）、GE（大于等于）、EQ（等于）、NE（不等于）、LE（小于等于）、LT（小于）。逻辑运算返回“真”或“假”，用在条件语句或循环语句。

三、转移和循环命令

1、无条件转移命令：GOTO

格式：GOTO N；如 GOTO 100；转移到 N100 程序段。

2、条件转移语句

IF [逻辑表达式] GOTO N; 如 IF [#1 GT 2] GOTO 100; 如果#1 大于 2, 转移到 N100 程序段。

3、循环语句

格式: WHILE [逻辑表达式] DO M

.....

END M

可以嵌套。

4、死循环

格式: DO M

.....

END M

四、宏程序调用命令

宏程序由三部分组成: ①宏程序名, % (或字母 P、O) 后接 4 位自然数。②宏程序主体。③宏程序结束指令 M99。如果在宏程序中遇有 M02、M30 时程序结束返回。宏程序名和结束指令与子程序相同, 但调用命令不相同。

1、非模态调用 (G65)

格式: G65 P---- L-- A- B- (等地址及赋值);

P 后面跟被调用的宏程序号; L 后的数值是宏程序执行次数, 缺省为 1 次; A- B-.....等是局部变量地址, 必须是表 6-5 中所列出的。

非模态调用的宏程序只能在被调用后执行 L 次。程序执行 G65 后面的程序段时不再调用。

2、模态调用 (G66、G67)

格式: G66 P---- L-- A- B-.....;

X-- Y-- ;

..... ;

G67 ; 取消宏程序调用命令。

在 G66 程序段调用宏程序 L 次, 在它下面的程序段又调用宏程序 L 次,, 直到 G67 程序, 撤消调用。

若 G66 所在的程序段中含有坐标移动字, 则在执行完坐标移动后调用宏程序。

执行次数 L 及局部变量均可用表达式赋值, 如:

G66 P1002 L[#1+1] A[12*6] B[sin#10];

五、宏程序及调用举例

编制一个宏程序加工孔, 如图 6-51 所示, 孔径由刀具保证, 第一个孔与 X 轴夹角为 A (#1), 其它孔间隔角为 B (#2), 钻孔数为 H (#11), 中心圆半径为 I (#4), 中心圆圆心 X (#24) 坐标值, 中心圆圆心 Y (#25) 坐标值, 钻孔深 Z (#26), 快速趋近点 R (#18) 坐标, 切削进给速度 F (#9)。指令可以用绝对值或增量值指定。顺时针方向钻孔时 B 应指定负值。

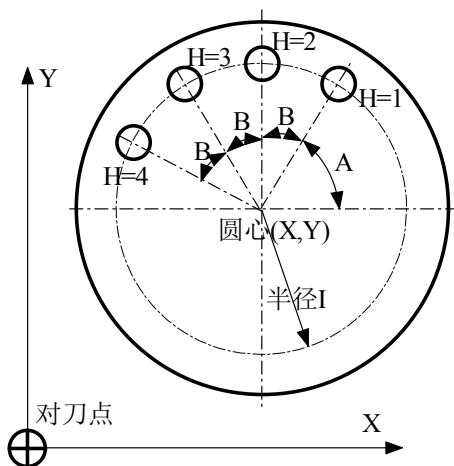


图 6-51 被加工孔的位置

第一个孔与 X 轴夹角为 0 度，其它间隔角为 45 度，共 5 个孔的宏程序调用程序如下。

```
%0010;
G90 G92 X0 Y0 Z100.0 ;
S1500 M03 ;
G65 P9100 X100. Y80. R5. Z-50. F500. I100. A0 B45. H5;
M30;
```

用户宏程序如下：

```
%9100;
#3=#4003 ; * (G90 时, #4003=90; G91 时, #4003=91)
IF [#3 EQ 90] GOTO 1 ;
#24=#5001 + #24 ; *刀具在工件坐标系中的当前 X 值
#25=#5002 + #25 ; *刀具在工件坐标系中的当前 Y 值
N1 WHILE [#11 GT 0] DO 1
  #5 = #24 + #4 * COS[#1] ; *计算孔 1X 坐标值
  #6 = #25 + #4 * SIN[#1] ; *计算孔 1Y 坐标值
  G90 G99 G81 X#5 Y#6 Z#26 R#18 F#9 ; *孔加工
  #1 = #1 + #2 ; *计算下一个孔与 X 轴夹角
  #11 = #11-1 ; *孔数减 1
END 1 ;
G#3 G80 ; *恢复到原坐标方式
M99 ;
```

§ 6-8 CAD/CAM 编程软件概述

一、CAM 软件发展过程

自 20 世纪 50 年代以来，为了使数控程序员从繁琐的手工编程工作中解脱出来，人们一直在研究各种自动编程技术。

20 世纪 50 年代中期，美国研制了最早的 APT（Automatically Programmed Tools）系统。该系统经过了多次改进，在 70 年代发展成熟，成为当时普遍使用的自动编程系统。由于受当时计算机技术的限制，人们无法在计算机上通过生成零件图形来进行自动编程，因此使用 APT 系统前，先用词汇式的语言来描述零件的几何形状、机床运动顺序和工艺参数，即编制一个零件加工源程序。该程序不同于前面介绍的手工编制的加工程序，它不能直接控制机床，必须经过计算机编译程序的处理，才能生成加工程序。零件加工的源程序所使用的数控语言又称为 APT 语言。由于使用 APT 系统，编程人员仍然要从事繁琐的预编程工作，对于复杂工件，编程时间与数控加工时间之比竟达 30: 1。

近三十年来，随着计算机技术的发展，计算机辅助设计（CAD）与制造（CAM）逐渐走向成熟。目前以 CAD/CAM 一体化集成形式的软件已成为数控加工自动编程系统的主流。这些软件可以采用人机交互方式对零件的几何模型进行绘制、编辑和修改，从而得到零件的几何模型。然后对机床和刀具进行定义和选择，确定刀具相对于零件表面的运动方式、切削加工参数，便能生成刀具轨迹。最后经过后置处理，即按照特定机床规定的文件格式生成加工程序。某些软件还具有加工轨迹的仿真功能，以用于验证走刀轨迹和加工程序的正确性。使用这类软件对加工程序的生成和修改都非常方便，大大提高了编程效率。

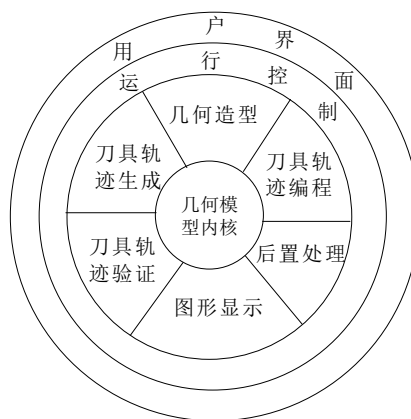


图 6-52 CAD/CAM 集成数控编程系统组成

二、CAD/CAM 集成数控编程系统简介

1、CAD/CAM 集成数控编程系统的基本原理

(1) CAD/CAM 系统的组成

一个集成化的 CAD/CAM 数控编程系统，一般由几何造型、刀具轨迹生成、刀具轨迹编程、刀具轨迹验证、后置处理、图形显示、几何模型内核、运行控制和用户界面等部分组成，它们的层次结构如图 6-52 所示。

在 CAD/CAM 集成数控编程系统中，几何模型内核是整个系统的核心。在几何造型模块中，常用的几何模型包括表面模型（Surface Model）、实体模型（Solid Model）和加工特征单元模型（Machining Feature Cell Model）。在集成化的 CAD/CAM 系统中，应用最为广泛的几何模型表示方法是边界表示（B-Rep: Boundary Representation）和结构化实体几何（CSG: Construction Solid Geometry）。在现代 CAD/CAM 系统中，最常用的几何模型内核主要有两种，分别为 Parasolid 和 ACIS。

多轴刀具轨迹生成模块直接采用几何模型中加工（特征）单元的边界表示模式，根据所选用的刀具及加工方式进行刀位计算，生成数控加工刀具轨迹。

刀具轨迹编辑根据加工单元的约束条件对刀具轨迹进行裁剪、编辑和修改。

刀具轨迹验证一方面检验刀具轨迹是否正确，另一方面检验刀具是否与加工单元的约束面发生干涉和碰撞。

图形显示贯穿整个设计与加工编程过程的始终。

用户界面提供用户一个良好的交互操作环境。

运行控制模块支持用户界面所有的输入输出方式到各功能模块之间的接口。

(2) CAD/CAM 系统的基本功能要求

一个典型 CAD/CAM 集成系统，总的来说，一般应具有以下几大功能模块。

①造型设计：包括二维草图设计、曲面设计、实体和特征设计、曲线曲面的编辑（过渡、拼接、裁剪、等距和投影等）、NC 加工特征单元的定义等。对于单个零件的 CAD/CAM 集成数控编程系统，不一定要求有装配功能。但对于型腔模具 CAD/CAM 集成数控编程系统来说，型腔和型芯的自动生成具有十分重要的意义。

②二维工程图自动生成：在三维几何造型设计的基础上，自动生成二维工程图，并具有标注尺寸的功能。对于单一功能的数控编程系统，二维工程图功能不一定非有不可。

③数控加工编程包括多坐标加工刀具轨迹生成、刀具轨迹编辑、刀具轨迹验证和通用后置处理等。

一个典型的 CAD/CAM 集成数控编程系统，其数控加工编程模块一般应具备以下功能。

编程功能：如点位、轮廓、平面区域、曲面区域、约束区域、约束面/线的控制加工等编程功能。

刀具轨迹计算方法：如常见的参数线法、截平面法和投影法等。

刀具轨迹编辑功能：包括诸如轨迹的快速图形显示，轨迹的编辑与修改，轨迹的几何变换，轨迹的优化编排，轨迹的读入与存储。

刀具轨迹的验证功能：轨迹的快速或实时显示，截面法验证，动态图形显示等。

2、CAD/CAM 集成数控编程系统的应用

(1) 了解系统的功能与使用方法

在使用一个 CAD/CAM 集成数控编程系统进行零件数控加工编程之前，应对该系统的功能及使用方法有一个比较全面的了解。

①了解系统的总体功能

对于 CAD/CAM 集成数控编程系统，首先应了解其总体功能框架，包括造型设计、二维工程绘图、装配、模具设计、制造等功能模块，以及每一个功能模块所包含的内容，特别应关注造型设计中的草图设计、曲面设计、实体造型以及特征造型的功能，因为这些是数控加工编程的基础。

②了解系统的数控加工自动编程能力

一个系统的数控编程能力主要体现在以下方面。

适用范围：如车削、铣削、线切割（EDM）、雕刻等。

可编程的坐标数：点位、二坐标、三坐标、四坐标以及五坐标。

可编程的对象：多坐标点位加工编程，表面区域加工编程（是否具备多曲面区域的加工编程），轮廓加工编程，曲面交线及过渡区域加工编程，型腔加工编程，曲面通道加工编程等。

是否具备刀具轨迹的编辑功能和刀具轨迹验证（仿真）的功能。

系统的界面和使用方法。

系统对文件的管理方式。

对于一个零件的数控加工编程，最终要得到的是能在指定的数控机床上完成该零件加工的正确的数控程序，该程序是以文件形式存在的。在实际编程时，往往还要构造一些中间文件，如零件模型、几何元素（曲线、曲面）的数据文件、刀具文件、刀位文件、刀位源文件、机床数据文件等。在使用之前应该熟悉系统对这些文件的管理方式以及它们之间的关系。

（2）分析加工零件

当拿到待加工零件的零件图样或工艺图样（特别是复杂曲面零件和模具图样）时，首先应当对零件图样进行仔细的分析，内容包括：

①分析待加工表面。一般来说，在一次加工中，只需对加工零件的部分表面进行加工。这一步骤的内容是：确定待加工表面及其约束面，并对其几何定义进行分析，必要的时候需对原始数据进行一定的预处理，确保所有几何元素的定义具有唯一性。

②确定加工方法。根据零件毛坯形状以及待加工表面及其约束面的几何形状，并根据现有机床设备条件，确定零件的加工方法及所需的机床设备和工夹量具。

③确定编程原点及编程坐标系。在零件毛坯上选择一个合适的编程原点及编程坐标系（也称为工件坐标系）。

（3）对待加工零件进行几何造型

这是数控加工编程的第一步。对于 CAD/CAM 集成数控编程系统来说，一般可根据几何元素的定义方式，在前面零件分析的基础上，对加工表面及其约束面进行几何造型。

（4）确定工艺步骤并选择合适的刀具

一般来说，可根据加工方法和加工表面及其约束的几何形态选择合适的刀具类型及刀具尺寸。但对于某些复杂曲面零件，则需要对加工表面及其约束面的几何形态进行数值计算，根据计算结果才能确定刀具类型和刀具尺寸。这是因为，对于一些复杂曲面零件的加工，希望所选择的刀具加工效率高，同时又希望所选择的刀具符合加工表面的要求，且不与非加工表面发生干涉或碰撞。但在某些情况下，加工表面及其约束面的几何形态数值计算很困难，只能根据经验和直觉选择刀具，这时，便不能保证所选择的刀具是合适的，在刀具轨迹生成之后，需要进行一定的刀具轨迹验证。

（5）刀具轨迹的生成及编辑

对于 CAD/CAM 集成数控编程系统来说，一般可在所定义加工表面及其约束面（或加工单元）上确定其外法向矢量方向，并选择一种走刀方式，根据所选择的刀具（或定义的刀具）和加工参数，系统将自动生成所需的刀具轨迹。所要求的加工参数包括：安全高度、主轴转速、进给速度、线性逼近误差、刀具轨迹间的残留高度、切削深度、加工余量、进刀/退刀方式等。当然，对于某一加工方式来说，可能只要求其中的部分参数。一般来说，数控编程系统对所要求的加工参数都有一个缺省值。

刀具轨迹生成以后，如果系统具备刀具轨迹显示及交互编辑功能，则可以将刀具轨迹显示出来，如果有不太合适的地方，可以在人工交互方式下对刀具轨迹进行适当的编辑与修改。

刀具轨迹计算的结果存放在刀位源文件之中。

(6) 刀具轨迹验证

如果系统具有刀具轨迹验证功能,可以对可能过切、干涉与碰撞的刀位点,采用系统提供的刀具轨迹验证手段进行检验。

值得说明的是,对于非动态图形仿真验证,由于刀具轨迹验证需大量应用曲面求交算法,计算时间比较长,最好是在批处理方式下进行,检验结果存放在刀具轨迹验证文件之中,供分析和图形显示用。

(7) 后置处理

根据所选用的数控系统,调用其机床数据文件,运行数控编程系统提供的后置处理程序,将刀位源文件转换成 G 代码格式的数控加工程序。

三、目前流行的 CAD/CAM 软件

CAD/CAM 软件经过几十年的发展,先后走过大型机、小型机、工作站、微机时代,每个时代都有当时流行的 CAD/CAM 软件。现在,工作站和微机平台 CAD/CAM 软件已经占据主导地位,并且出现了一批比较优秀、比较流行的商品化软件。下面介绍几种目前比较流行的软件。

1、UG (Unigraphics)

UG 是美国 UGS (Unigraphics Solutions) 公司的主要产品。该软件不仅具有复杂造型和数控加工的功能,还具有管理复杂产品装配、进行多种设计方案的对比分析和优化等功能。该软件具有较好的二次开发环境和数据交换能力。其庞大的模块群为企业提供了从产品设计、产品分析、加工装配、检验,到过程管理、虚拟运作等全系列的技术支持。由于软件运行对计算机的硬件配置有很高要求,其早期版本只能在小型机和工作站上使用。随着微机配置的不断升级,早已开始在微机上使用。目前该软件在国际 CAD/CAM/CAE 市场上占有较大的份额。

UC CAD/CAM 系统具有丰富的数控加工编程能力,是目前市场上数控加工编程能力最强的 CAD/CAM 集成系统之一,其主要编程功能包括:

①平面铣 (planer mill)。实现对平面零件 (由平面和垂直面构成的零件) 的粗加工和精加工。

②型腔铣削 (cavity mill)。主要对曲面零件进行粗加工,是三轴加工。

③固定轴曲面轮廓铣 (fixed contour)。主要用于以三轴方式对零件曲面进行半精加工和精加工。根据不同的加工对象,固定轴曲面轮廓铣可实现多种加工方式。

④可变轴曲面轮廓铣 (variable contour)。与固定轴曲面轮廓铣比较,可变轴曲面轮廓铣是以五轴方式对比较复杂的零件表面进行半精加工和精加工。

⑤顺序铣 (sequential mill): 是以三轴或五轴方式实现精加工。其原理是以铣刀的侧刃加工零件侧壁,端刃加工零件的底面。

⑥车削 (turning) 加工编程。

⑦线切割 (wire-edm) 加工编程。

⑧孔加工 (hole-making) 编程。

2、Pro/Engineer

Pro/Engineer 是美国 PTC (Parametric Technology Corporation) 公司研制和开发的软件,

它开创了三维 CAD/CAM 参数化的先河。该软件具有基于特征、全参数、全相关和单一数据库的特点，可用于设计和加工复杂的零件。另外，它还具有零件装配、机构仿真、有限元分析、逆向工程、同步工程等功能。该软件也具有较好的二次开发环境和数据交换能力。

Pro/Engineer 系统的核心技术具有以下特点：

①基于特征。将某些具有代表性的平面几何形状定义为特征，并将其所有尺寸存为可变参数，进而形成实体，以此为基础进行更为复杂的几何形状的构建。

②全尺寸约束。将形状和尺寸结合起来考虑，通过尺寸约束实现对几何形状的控制。

③尺寸驱动设计修改。通过编辑尺寸数值可以改变几何形状。

④全数据相关。尺寸参数的修改导致其他模块中的相关尺寸得以更新。如果要修改零件的形状，只需修改一下零件上的相关尺寸。

3、CATIA

CATIA 是最早实现曲面造型的软件，它开创了三维设计的新时代，它的出现，首次实现了计算机完整描述产品零件的主要信息，使 CAM 技术的开发有了现实的基础。目前 CATIA 系统已发展成从产品设计、产品分析、加工、装配和检验，到过程管理、虚拟运作等众多功能的大型 CAD/CAM/CAE 软件。

CATIA (NC MILL) 系统具有菜单接口和刀具轨迹验证能力，其主要编程功能除了常用的多坐标点位加工编程、表面区域加工编程、轮廓加工编程、型腔加工编程外，还有以下特点：

①在型腔加工编程功能上，采用扫描原理对带岛屿的型腔进行行切法编程：对不带岛屿的任意边界型腔（即不限于凸边界）进行环切法编程。

②在雕塑曲面区域加工编程功能上，可以连续对多个零件面编程，并增加了截平面法生成刀具轨迹的功能。

与上述两个软件相比，该软件曲面功能比较强，目前在飞机和汽车制造业用的较多。

4、Mastercam

Mastercam 是由美国 CNC Software 公司推出的基于 PC 平台上的 CAD/CAM 软件，它具有很强的加工功能，尤其在对复杂曲面自动生成加工代码方面，具有独到的优势。由于 Mastercam 主要针对数控加工，零件的设计造型功能不强，但对硬件的要求不高，且操作灵活、易学易用且价格较低，受到中小企业的欢迎。因此该软件被认为是一个图形交互式 CAM 数控编程系统。其主要功能有：

①点位加工编程。

②二维轮廓加工编程。

③二维型腔加工编程。

④三维曲线加工编程。

⑤三维曲面加工编程。可按线框和曲面两种方法进行编程。

⑥参数线法加工编程。

⑦截平面法加工编程。

⑧投影法加工编程。

5、CIMATRON

CIMATRON 是以色列 Cimatron 公司提供的 CAD/CAM/CAE 软件,是较早 在微机平台上实现三维 CAD/CAM 的全功能系统。它具有三维造型、生成工程图、数控加工等功能、具有各种通用和专用的数据接口及产品数据管理 (PDM) 等功能。该软件较早在我国得到全面汉化,已积累了一定的应用经验。

6、CAXA 制造工程师

CAXA 制造工程师是由我国北京北航海尔软件有限公司研制开发的全中文、面向数控铣床和加工中心的三维 CAD/CAM 软件。它基于微机平台,采用原创 Windows 菜单和交互方式,全中文界面,便于轻松地学习和操作。它全面支持图标菜单、工具条、快捷键。用户还可以自由创建符合自己习惯的操作环境。它既具有线框造型、曲面造型和实体造型的设计功能,又具有生成二至五轴的加工代码的数控加工功能,可用于加工具有复杂三维曲面的零件。其特点是易学易用、价格较低,已在国内众多企业和研究院所得应用。

下面以 UG 软件铣削加工编程为例,介绍自动编程过程。

四、零件的加工造型

UG 的三维造型一般过程是:首先创建一个草图,然后对草图进行拉伸、旋转或沿导引线扫掠而形成体特征,以上过程视零件的复杂程度可以重复多次,后建的体特征与先建的体特征通过布尔运算形成一个实体,再对此实体进行倒圆角、倒斜角、制孔、抽壳、阵列、镜像等特征操作完成全部造型。

草图是特征,是有约束的一组被命名的位于特定平面上的二维曲线和点。用于形成拉伸,旋转或扫描特征。反映模型某一截面的大致轮廓。草图有下列特点:

全相关—创建于草图的特征和草图相关。修改草图时相关体特征也自动修改。

全参数化—通过尺寸和几何约束,来捕捉设计意图 (Design Intent), 其参数可修改。

当需要参数化地控制一组曲线,进而控制模型的整体或局部时,就需要使用草图。

如果 UG 的基本成型特征(长方体、圆柱体、圆锥体、球)难于构造模型的话,你可以使用基本曲线(Explicit curves)和草图(Sketch)来建模,但基本曲线无参数、不能编辑,而草图曲线有参数、可编辑及重定位。

下面举例说明 UG 三维造型基本方法。

1、通过拉伸造型

图 6-53 为一个壳体零件,

其主要造型过程如下:

(1) 在工作坐标系 (WCS) 的 XC-YC 平面上创建草图,尺寸约束为 $\phi 600\text{mm}$,几何约束为圆心与坐标系原点重合,完成草图。拉伸,高度 300mm,形成一个圆柱。边倒角, R25mm。外壳,壁厚 10mm。

(2) 4 个底座造型。选择 XY 平面,画圆,几何约束为圆心在 X 轴上,

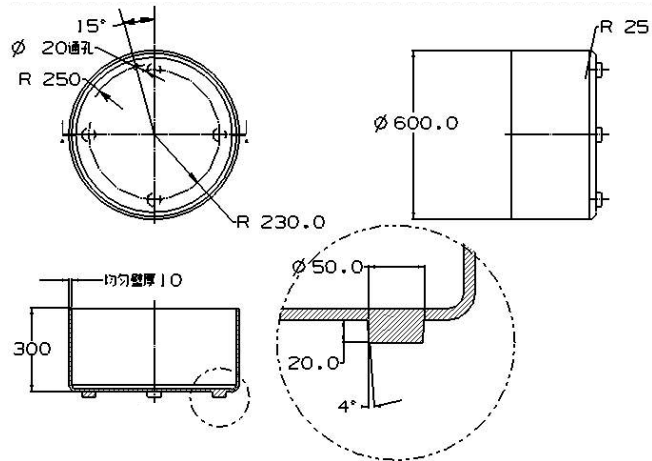


图 6-53 壳体零件二维图

尺寸约束圆心与原点距离为 115 mm、 $\phi 50$ mm，完成草图。拉伸，高度-20 mm，求和，拔模角 4° 。环形阵列，数目为 4。

(3) $\phi 20$ mm 通孔。在 XY 平面上建草图，完成草图后，拉伸时，求差。创建的三维模型如图 6-54 所示。



图 6-54 壳体零件三维模型

2、通过旋转造型

图 6-55(a)为一回转体零件，其主要造型过程如下：

(1) 工作坐标系 (WCS) 的原点选在底面与轴线的交点，Z 轴与回转轴线重合。建立草图，选择 YC-ZC 平面，画出回转体最大截面的大致形状，几何约束为底边与坐标轴平行，尺寸约束如图 6-56 所示，加上约束后原来的 Z 轴为旋转中心旋转，起始角为 0° ，结束角为 360° 。草图平面，草图界面上都显示 XC-YC。

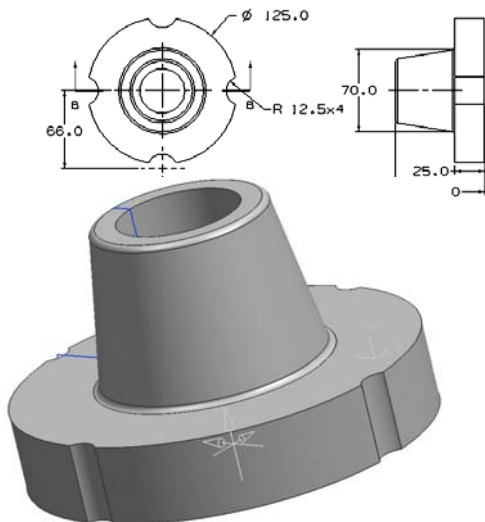


图 6-55(b) 回转体零件三维图

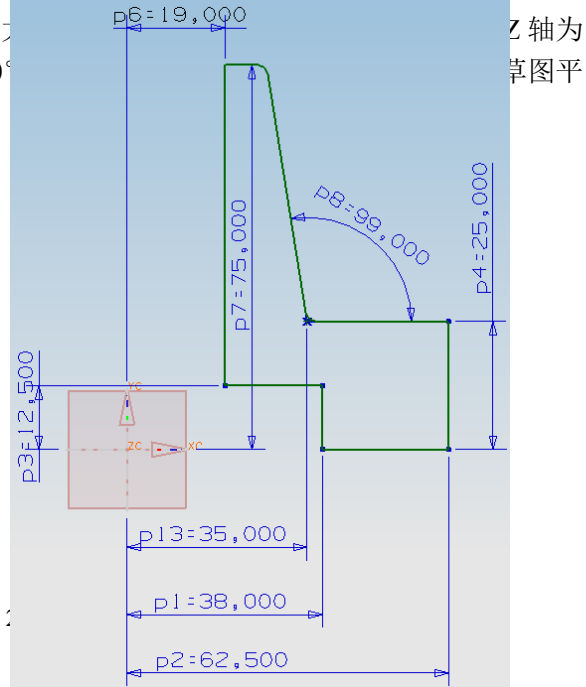


图 6-56 回转体零件草图

(2) 四个弧形槽造型：选底面为草图平面，画圆，几何约束为圆心与 XC 轴重合，尺寸约束为 R12.5mm。完成草图，拉伸，求差。环形阵列，数目为 4。完成的三维造型如图 6-55(b) 所示。

加工造型与设计造型虽然所运用的造型手段相同，但要达到的目的不同。零件设计造型的目的是构建设计者需要的零件形状，凡属零件上的几何要素都要通过造型表达出来。零件加工造型则是以加工零件的一个或若干表面为目的，运用 CAD 的各种造型方法构建加工所需要的几何模型。

加工造型有时并不需要完整地构建零件的整个轮廓，只要将与加工有关的几何要素表达出来即可。加工造型构建的几何模型不一定要与零件的形状和尺寸一致，因为加工需要按照一定的工序逐渐改变毛坯的形状，加工造型只为当前将要进行的工序服务。有时还要进行毛坯造型。

五、UG 铣削加工编程

用 UG CAM 数控编程的步骤如图 6-57 所示。

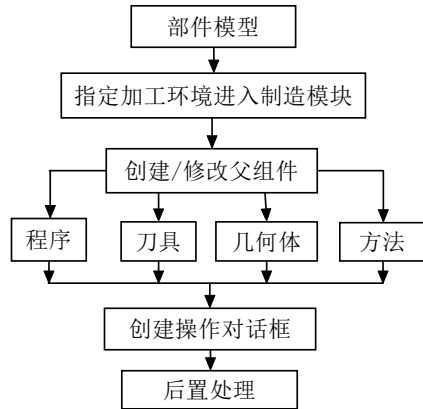


图 6-57 UG CAM 数控编程步骤

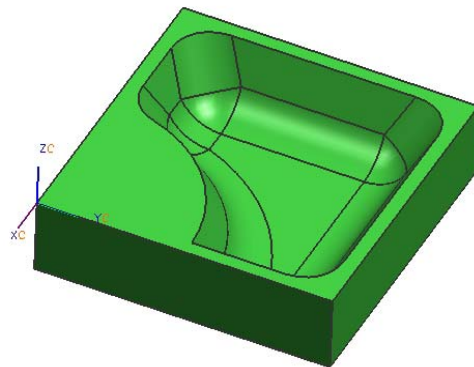


图 6-58 铣削部件模型

下面以图 6-58 所示部件为例，介绍 UG CAM 数控编程过程。此零件是一个 $104 \times 104 \times 25$ 的方体，中间有一复杂型腔，拔模角为 30° 。

毛坯为方料，粗加工用型腔铣（CAVITY-MILL），刀具为 r5 球头铣刀。精加工用等高轮廓铣（ZLEVEL-PROFILE），刀具为 D20R2 立铣刀。

1、设置加工环境

在建模状态下，单击“起始”→“加工”（如图 6-59 所示），即可进入加工模块，如图 6-60 所示。

Cam-general 加工环境是一个基本的 CAM 环境，选择 mill_contour（轮廓铣），然后单击“初始化”。

2、创建程序、刀具、几何体、方法

（1）创建程序：单击“创建程序”（如图 6-61 所示），出现创建程序对话框（如图 6-62 所示），在名称处输入 PROGRAM_1，这是数控程序的名称。

（2）创建刀具：执行“创建刀具”命令，出现创建刀具对话框，名称处输入 r5，单击“应用”，球直径输入 10，长度 50，刃口长度 35，刀具号 1，单击“显示刀具”，刀具显示在坐标原点处。同样创建立铣刀 D20R2。



图 6-59 进入加工模块

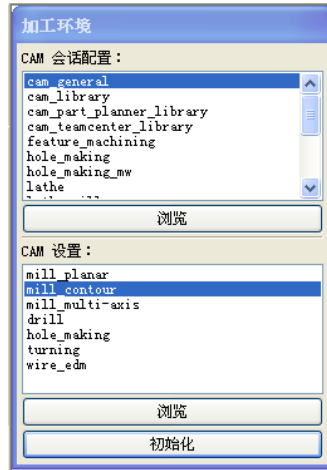


图 6-60 初始化加工环境



图 6-61 创建工具栏



图 6-62 创建程序对话框

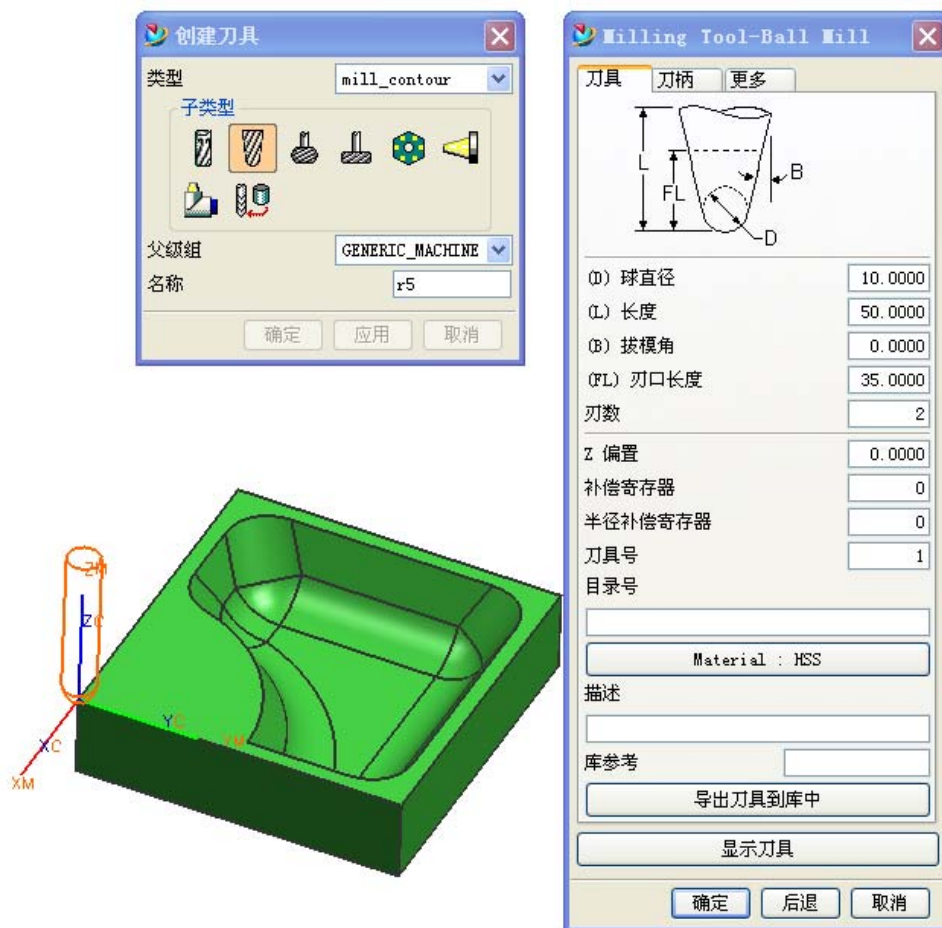


图 6-63 创建刀具对话框

(3) 创建几何：执行“创建几何”命令，出现创建几何对话框（如图 6-64 所示），在这里设置加工坐标系（MCS）及安全平面（刀具快速移动面）、工件几何体和毛坯几何体。

在缺省状态下，加工坐标系（MCS）与建模时的工作坐标系（WCS）相同。如果加工坐标系（MCS）与工件坐标系（MCS）不同，在此修改坐标原点与坐标轴方向。在本例中，两者相同。在名称处输入 MCS。安全平面选在距离 MX-MY 平面 30mm 处。图中三角形所示。

在创建铣削几何时，父级组输入 MCS，名称输入 MILL_GEOM，则 MILL_GEOM 继承 MCS 所设置的全部参数。

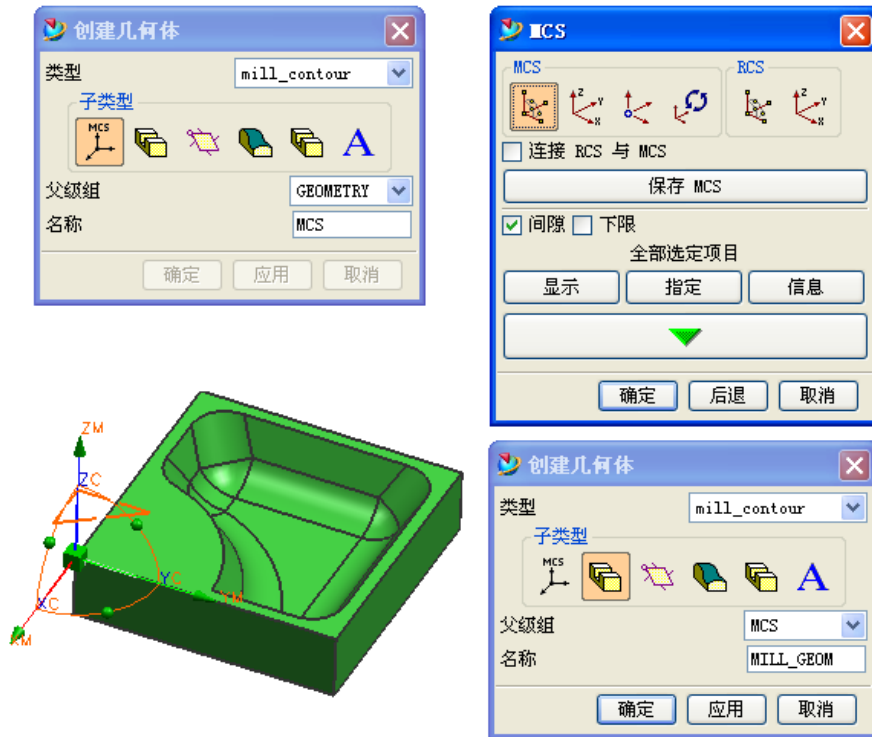


图 6-64 创建几何体对话框

(4) 创建方法：执行“创建方法”命令，出现创建加工方法对话框（如图 6-65 所示），在名称处输入 MILL_R，部件余量处输入 0.5mm，为精加工留 0.5mm 余量。同理设置精加工方法 MILL_F。

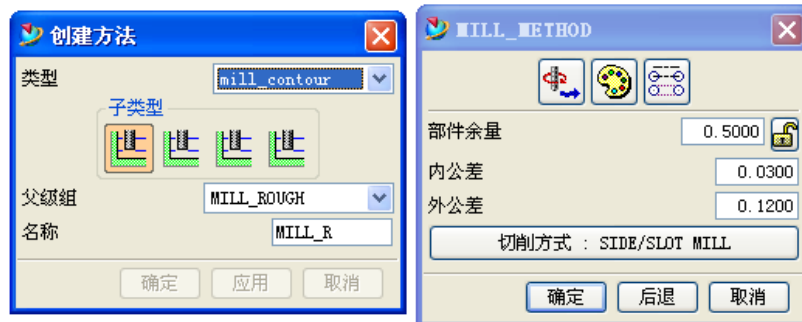


图 6-65 创建加工方法对话框

上述四个父级节点，在创建操作中可以直接引用。如果不做上述工作，也可以在创建操作中来。

3、创建操作—粗加工

执行“创建操作”命令，出现创建操作对话框，如图 6-66 所示。选择子类型为型腔铣，

输入上述四个父级节点，名称处输入 CAVITY_MILL1。每一刀的全局深度（轴向深度）为 2mm。



图 6-66 创建操作对话框

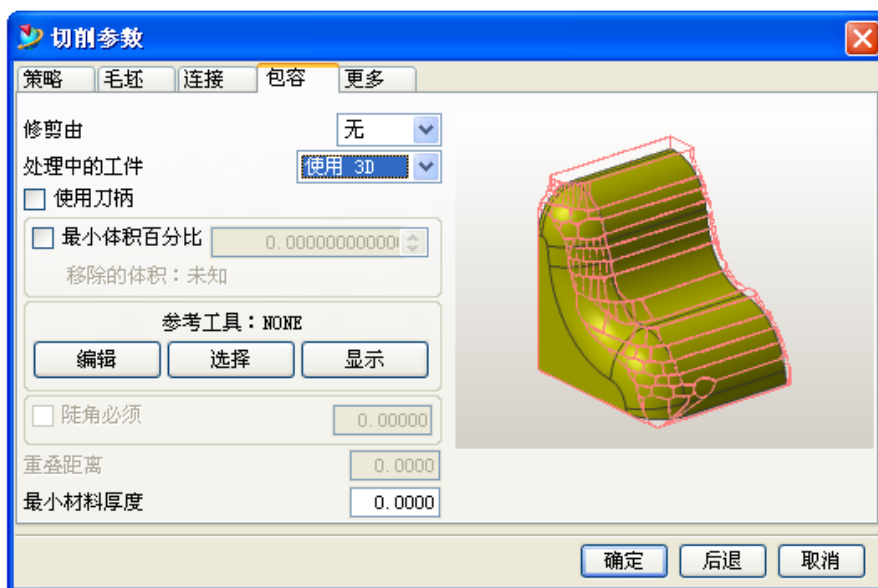


图 6-67 创建操作中切削参数对话框

单击对话框中的“切削”，出现切削参数对话框，如图 6-67 所示。在处理中的工件（IPW-In_process workpiece）处选择使用 3D。3D IPW 是指一道加工工序完成后剩余的材料，又叫中间毛坯。只要在建立操作时，使用相同的几何体（本例名为 MILL_GEOM），那么本道工序的 IPW 就是下一操作的毛坯。

另外设置切削用量及进刀退刀方式等。生成的刀具轨迹如图 6-68 所示。加工后的 3D IPW 如图 6-69 所示，将成为精加工的毛坯。

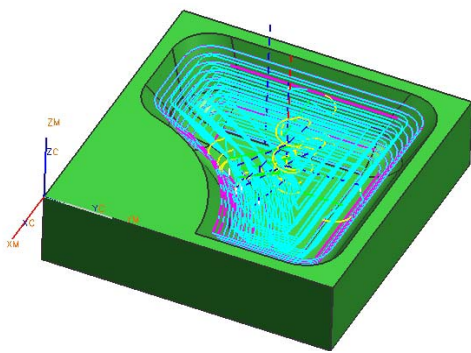


图 6-68 刀具轨迹示意图

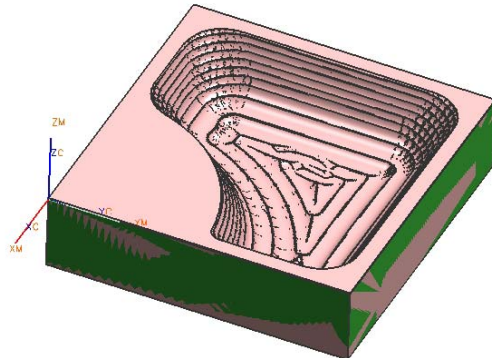


图 6-69 加工后的 3D IPW

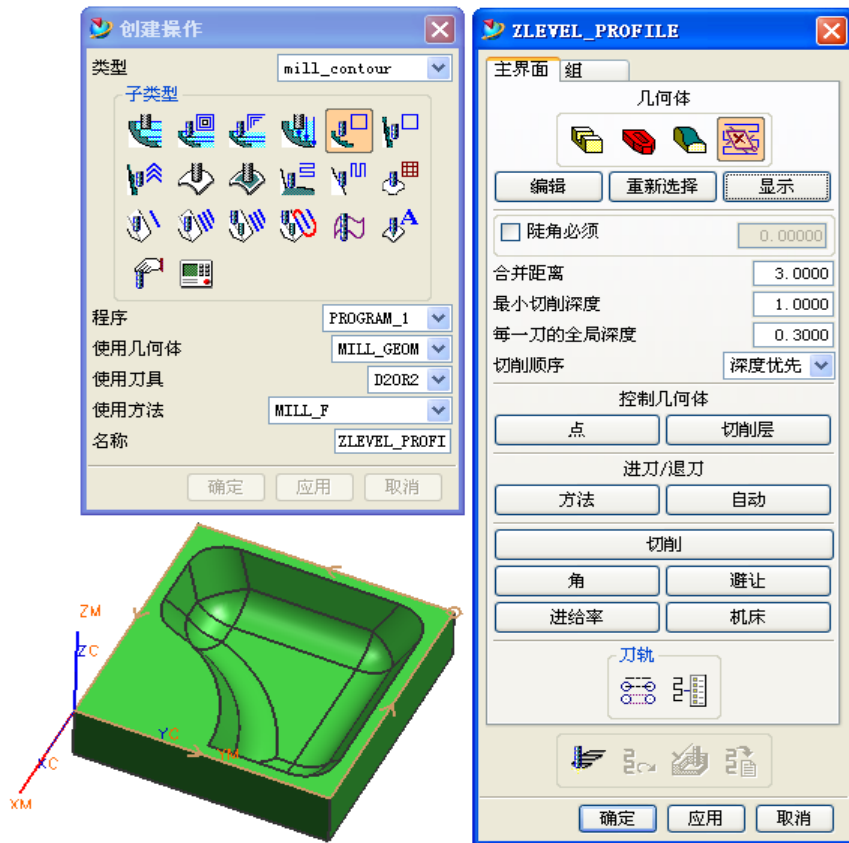


图 6-70 等高轮廓铣操作对话框

4、创建操作—精加工

执行“创建操作”命令，选择子类型为等高轮廓铣，四个父级节点输入如图 6-70 所示。每一刀的全局深度选为 0.3mm。修剪边界如图所示。

设置进刀/退刀方式、切削速度等，然后生成刀具轨迹如图 6-71 所示。

操作导航器如图 6-72 所示。在操作导航器中，程序、刀具、几何体、方法四个父级节点的作用一目了然。

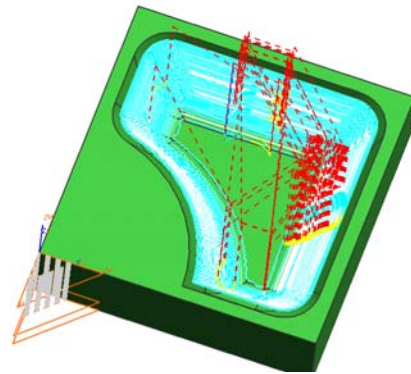


图 6-71 精加工刀具轨迹示意图

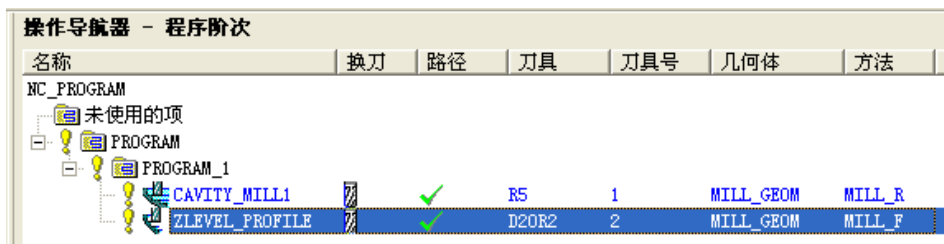


图 6-72 操作导航器图

5、后置处理—生成 G 代码程序

在操作导航器中选择 CAVITY_MILL1 操作，执行“后置处理”命令，选择 3 轴铣，生成数控加工程序如下：

```
%  
N0010 G40 G17 G90 G70  
N0020 G91 G28 Z0.0  
N0030 T01 M06  
N0040 G0 G90 X-2.6067 Y2.1192 S1451 M03  
N0050 G43 Z1.1811 H00  
N0060 Z.1378  
N0070 G3 X-2.4572 Y2.3913 Z-.0591 I.1495 J.0949 K.0475 F13.1  
N0080 G1 X-2.5517 F8.7 M08  
N0090 G3 X-2.5518 Y2.2965 I205.8271 J-.4065  
N0100 G2 X-2.4572 Y2.3913 I2.3972 J-2.2997  
N0110 G1 X-2.3207 Y2.2494 F14.5  
N0120 G2 X-1.9013 Y2.5882 I2.1661 J-2.2526 F8.7  
N0130 G1 X-2.4572 Y2.5881  
N0140 X-2.748 F14.5
```


.....

N7230 X-3.0945 Y1.2308 I-158.8345 J.5748 F14.5
 N7240 X-3.0961 Y1.0601 I-158.83 J1.33 F8.7
 N7250 G3 X-3.0276 Y1.0112 I.0441 J-.0108
 N7260 G2 X-2.9004 Y1.0323 I.1221 J-.3411
 N7270 X-2.7618 Y1.0027 I-.0051 J-.3622 F14.5
 N7280 X-1.2952 Y2.541 I2.5649 J-.977
 N7290 X-1.1276 Y2.6077 I1.0983 J-2.5153 F8.7
 N7300 G3 X-1.0328 Y2.7423 I.0037 J.0981
 N7310 X-1.0253 Y2.9333 I-.1167 J.1002
 N7320 G2 X-1.3805 Y2.9181 I-.9798 J18.8608
 N7330 X-2.8831 Y2.9282 I-.6246 J18.876 F14.5
 N7340 X-3.0276 Y2.9355 I.878 J18.8659 F8.7
 N7350 G3 X-3.0894 Y2.9119 I-.0167 J-.049
 N7360 G2 X-3.0891 Y2.7314 I-158.8351 J-.3511
 N7370 X-3.0904 Y1.8876 I-158.8354 J-.1706 F14.5
 N7380 G3 X-2.9732 Y1.6609 I.2756 J-.0012
 N7390 G0 Z1.1811
 N7400 M02
 %

也可以在操作导航中选中 PROGRAM_1, 执行“后处理”命令, 粗加工和精加工生成一个 G 代码程序。

思考和作业题

1. 数控编程中工艺处理的主要内容是什么?
2. 三坐标联动与三坐标两轴联动加工曲面有何特点?
3. 字母 N、G、X、F、S、T、M、D 在数控程序中各代表什么功能字?
4. 简述 G00 与 G01 有何不同之处?
5. 什么是模态 G 指令和非模态 G 指令, 用 G00, G01, G02, G03, G04 具体说明?
6. 有的 M 指令与同一程序段坐标移动指令同时开始执行, 有的 M 指令是同一程序段坐标移动指令执行完后开始, 具体说明下列常用 M 指令开始的时刻: M00、M01、M03、M04、M05、M07、M08、M09、M02、M30。
7. 下列 M 指令中哪些是续效指令, 哪些不是续效指令: M00、M01、M03、M04、M05、M07、M08、M09、M02、M30。
8. G02 与 G03 如何判定? 圆心坐标如何表示?
9. G04 与 M01 有何不同?
10. 什么是机床零点和机床参考点? 二者有何关系? 开机后, 首先要回参考点, 其目的是什么?

11. 什么是机床零点和机床坐标系？什么是工件零点和工件坐标系？程序中的坐标值是指哪个坐标系下的坐标值？工件坐标系与机床坐标系的关系是如何建立的？

12. 如图 6-73 所示，O 为机床原点，A(-250,-125,-12)，B 点与 A 点处于等高面内，B 点距 A 点为(12,12)，刀具从 O 点快速移动到 A 点，以 A 点为参考点，在 B 点用 G92 指令建立加工坐标系。写出程序，并指出哪点是工件原点。

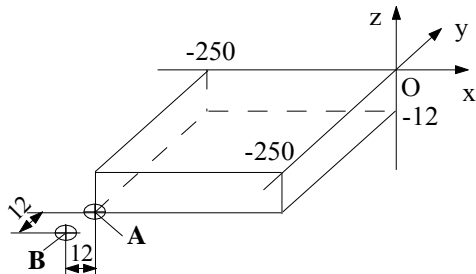


图 6-73 习题 12 示意图

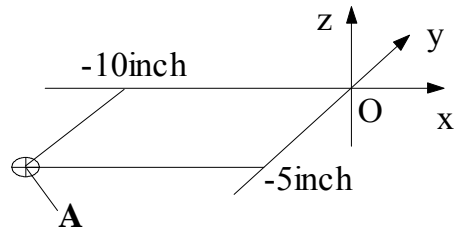


图 6-74 习题 13 示意图

13. 如图 6-74 所示，已知程序开始时，刀具处于机床原点 O，A 为编程零点。

①用 G92 先建立加工坐标系，然后快移至 A 点，写出程序段表示。

②先快移至 A 点，再以 A 点为参考点用 G92 建立加工坐标系，写出程序段表示。

③若使用固定偏置 G54，其中存数 X、Y、Z 应何值。

14. 试述刀具半径补偿与长度补偿的应用及补偿方法。

15. 钻镗固定循环有哪几种？其指令格式、应用场合是什么？

16. 子程序与主程序有什么不同？什么是子程序嵌套？

17. 为什么说比例缩放功能、坐标旋转功能和镜像功能必须与子程序功能共同使用才能起到简化编程的目的。

18. 何谓恒线速切削，在什么情况下使用？对加工质量有什么影响？

19. 车削加工程序用什么指令调用刀具长度补偿？

20. 宏程序中的变量分为哪几种？

21. 子程序与宏程序有何异同？调用指令分别是什么？

第七章 数控程序编制

§ 7-1 孔系加工程序编制

孔加工一般在数控钻床、镗床和加工中心机床上进行，数控铣床上也可以实现孔加工。孔加工编程时，没有复杂的数学处理，所以编程比较简单。孔径尺寸由刀具保证，孔距的位置尺寸精度取决于数控系统和机械系统的精度。编程中坐标系统的选择尽量与图纸尺寸的标注方法一致，这样不但减少尺寸换算，而且容易保证加工精度。程序中要正确使用孔加工循环指令。

图 7-1 和图 7-2 是某厂空压机产品的吸气阀盖头，零件材料为 HT200 灰铸铁，生产类型为批量生产。用配有 BEIJING-FANUC 0i-MA 控制系统的 VMC-1000 立式加工中心加工。分两次装夹，上加工中心加工前定位面 B、C 和定位孔 $\phi 76$ 、 $\phi 50$ 已加工完毕。现将在加工中心上加工的内容及程序介绍如下：

一、加工 B 面上的孔

图 7-1 所示，加工内容为 $\phi 85$ 孔（原始尺寸为 $\phi 76$ ）、 $\phi 55$ 孔（原始尺寸为 $\phi 50$ ）、14 个 $\phi 13$ 孔和 4 个 $\phi 14$ 孔。

1、工艺处理

(1) 工件安装

该零件为批量生产，因此用专用夹具安装工件。定位基准为平面 C 和 $\phi 76$ 、 $\phi 50$ 两孔，由于 $\phi 76$ 孔中心为该零件的主设计基准，故右边用圆柱销，左边用菱形销。用压板夹紧，并使用辅助支撑抵消夹紧力和切削力。

(2) 确定编程原点

根据工艺分析，工件坐标系原点 X_0 、 Y_0 选在 $\phi 76$ 中心，与主设计基准重合， Z_0 设在工件上表面 30mm 处，如图 7-1 所示。

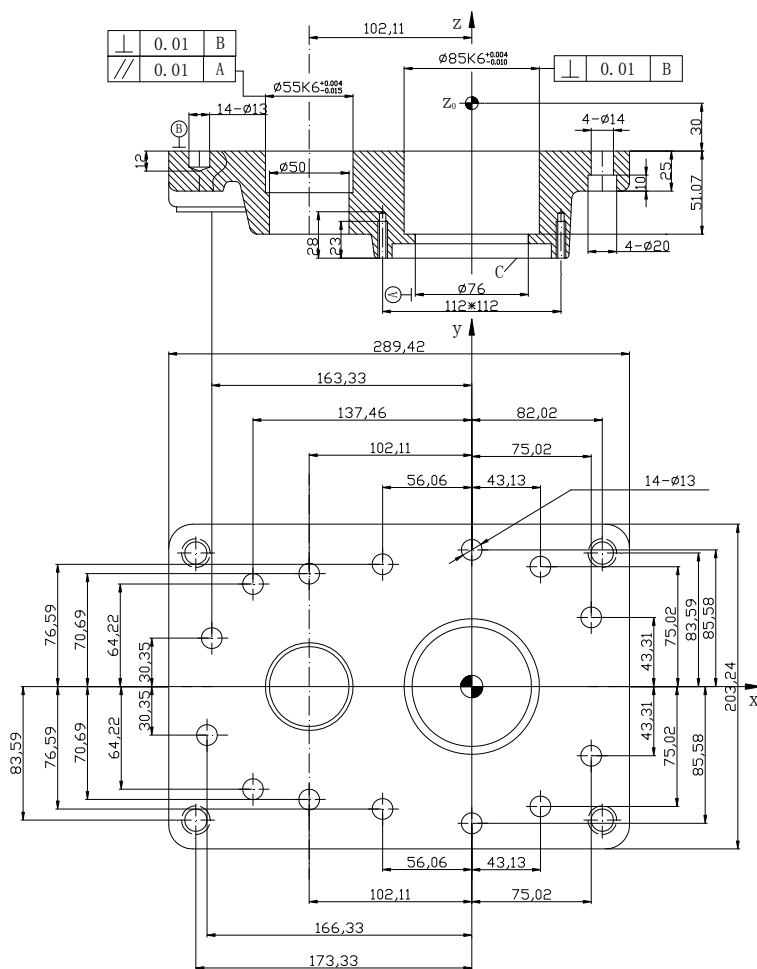


图 7-1 空压机吸气阀盖头加工示意图之一

可以根据夹具上的圆柱销和定位平面，找出编程原点在机床坐标系中的坐标值，然后将该值用 MDI 方式输入到 G55 中。程序中直接调用该坐标系。

(3) 确定加工工步及各种工艺参数

零件加工前所确定的各种参数是否恰当、合理，直接影响加工的效率和经济性。而合理确定这些参数，则主要取决于编程人员的经验。要综合考虑工件的材料、生产类型、加工精度和表面质量要求、刀具类型及刀具材料、机床、冷却系统等。加工内容及具体参数如表 7-1 和表 7-2。

表 7-1 数控加工工艺卡

产品型号	零件名称	零件图号	夹具名称	程序名称	材料	使用设备	编制人	较核人	审核人	
	吸气阀盖头		专用夹具	0010	HT200	VMC-1000				
工步号	加工内容		刀具号	刀具名称	刀具规格/mm	刀具补偿号	主轴转速/r/min	进给速度/mm/min	切削深度/mm	加工余量/mm
1	粗镗 $\phi 85$ 孔到尺寸 $\phi 82$		T1	镗刀	$\phi 82$	H1	233	93	50.77	6
2	半精镗 $\phi 85$ 孔到尺寸 $\phi 84.4$		T2	镗刀	$\phi 84.4$	H2	301	90	51.07	2.4
3	精镗 $\phi 85$ 孔到尺寸 $\phi 85$		T3	镗刀	$\phi 85$	H3	243	29	51.07	0.6
4	粗镗 $\phi 55$ 孔到尺寸 $\phi 52.5$		T4	镗刀	$\phi 52.5$	H4	363	108	25.75	2.5
5	半精镗 $\phi 55$ 孔到尺寸 $\phi 54.5$		T5	镗刀	$\phi 54.5$	H5	363	90	26	2
6	精镗 $\phi 55$ 孔到尺寸 $\phi 55$		T6	镗刀	$\phi 55$	H6	315	38	26	0.5
7	用钻孔定中心用的中心钻，钻 $14-\phi 13$ 孔		T7	中心钻	$\phi 18$	H7	530	80	4	
8	钻 $14-\phi 13$ 孔		T8	麻花钻	$\phi 13$	H8	587	88	12	
9	用钻孔定中心用的中心钻，钻 $4-\phi 14$ 孔		T7	中心钻	$\phi 18$	H7	530	80	4	
10	钻 $4-\phi 14$ 孔		T9	麻花钻	$\phi 14$	H9	545	82	28	

表 7-2 刀具调整卡

产品型号	零件名称	零件图号	夹具名称	程序名称	材料	使用设备	编制人	较核人	审核人
	吸气阀盖头		专用夹具	0010	HT200	VMC-1000			
刀具号(T)	刀具名称	刀具规格/mm	刀具偏置值	用途		刀具材料			
1	单刃镗刀	$\phi 82$	H1	粗镗孔		YG8			
2	单刃镗刀	$\phi 84.4$	H2	半精镗孔		YG8			
3	单刃镗刀	$\phi 85$	H3	精镗孔		YG3X			
4	单刃镗刀	$\phi 52.5$	H4	半精镗孔		YG8			
5	单刃镗刀	$\phi 54.5$	H5	半精镗孔		YG8			
6	单刃镗刀	$\phi 55$	H6	精镗孔		YG3X			
7	钻孔定中心用的中心钻	$\phi 18$	H7	钻定位孔		高速钢(HSS)			
8	麻花钻	$\phi 13$	H8	钻 $14-\phi 13$ 孔		高速钢(HSS)			
9	麻花钻	$\phi 14$	H9	钻 $4-\phi 14$ 孔		高速钢(HSS)			

2、数值计算

数值计算结果如图 7-1 所示，各孔的坐标值用公差带中心对应的尺寸表示。

3、编制程序

将表 7-1 数控加工工艺卡中各工步的加工内容，用数控指令表达出来。 $14-\phi 13$ 孔和 $4-\phi 14$ 孔，加工过程是首先钻定位孔，然后钻孔，为了简化程序，孔的平面位置分别用子程序表示。数控加工程序如下：

主程序

%0010

N1 T1; *T1 移动到机械手换刀位置（工步 1 开始）

N2 M06; *机械手换刀

N3 G00 G90 G55 X0 Y0; *刀具移动到 G55 坐标系 X0 Y0 处

N4 G43 H1 Z0 S233 M03 M08; *启动长度补偿，刀尖移动到 Z0 处，主轴正转

N5 G98 G85 Z-80.77 R-28. F93.; *镗到孔底后，以进给速度返回 R，再快速回 Z0

N6 G00 G49 Z200. M05 M09; *撤消镗孔循环，刀架参考点到 Z200 处，主轴停

N7 T2; *（工步 2 开始）

N8 M06;

N9 G43 H2 Z0 S301 M03 M08; *启动长度补偿

N10 G89 Z-81.07 R-28. P2000 F90.; *G89 与 G85 不同之处在于孔底可以停留

N11 G00 G49 Z200. M05 M09;

N12 T3; *T3 精镗刀（工步 3 开始）

N13 M06;

N14 G43 H3 Z0 S243 M03 M08;

N15 G76 Z-81.07 R-28. Q0.5 P2000 F29.; *G76 精镗孔循环

N16 G00 G49 Z200. M05 M09; *至此 $\phi 85$ 孔加工完毕

N17 T4; *（工步 4 开始）

N18 M06;

N19 X-102.11; *在平面内，快速定位到 $\phi 55$ 轴线处

N20 G43 H4 Z0 S363 M03 M08;

N21 G85 Z-55.75 R-28. F108.;

N22 G00 G49 Z200. M05 M09;

N23 T5; *（工步 5 开始）

N24 M06;

N25 G43 H5 Z0 S363 M03 M08;

N26 G89 Z-56.0 R-28. P2000 F90.;

N27 G00 G49 Z200. M05 M09;

N28 T6; *（工步 6 开始）

N29 M06;

N30 G43 H6 Z0 S315 M03 M08;

N31 G76 Z-56.0 R-28. Q0.5 P2000 F38.;

N32 G00 G49 Z200. M05 M09; *至此 $\phi 55$ 孔加工完毕

N33 T7; *（工步 7 开始，钻 14- $\phi 13$ 孔的定位孔）

N34 M06;

N35 X75.02 Y43.31;

N36 G43 H7 Z200. S530 M03 M08;

N37 G81 Z-34. R-28. F80; *G81 钻孔循环
 N38 M98 P2004; *调用 14- φ 13 孔位子程序
 N39 G00 G49 Z200. M05 M09;
 N40 T8; *(工步 8 开始, 钻 14- φ 13 孔)
 N41 M06;
 N42 X75.02 Y43.31;
 N43 G43 H8 Z200. S587 M03 M08;
 N44 G81 Z-42. R-28. F88;
 N45 M98 P2004;
 N46 G00 G49 Z200. M05 M09;
 N47 T7; *(工步 9 开始, 钻 4- φ 14 孔的定位孔)
 N48 M06;
 N49 X82.02 Y83.59;
 N50 G43 H7 Z200. S530 M03 M08;
 N51 G81 Z-34. R-28. F80;
 N52 M98 P2005;
 N53 G00 G49 Z200. M05 M09;
 N54 T9; *(工步 10 开始, 钻 4- φ 14 孔)
 N55 M06;
 N56 X82.02 Y83.59;
 N57 G43 H9 Z200. S545 M03 M08;
 N58 G81 Z-58. R-28. F82;
 N59 M98 P2005;
 N60 G00 G49 Z200. M05 M09;
 N61 T00;
 N62 M06; *将 T9 送回刀库
 M02; *(主程序结束)

钻 14- φ 13 孔的孔位子程序

%2004

N1 X43.13 Y75.02;
 N2 X0 Y85.58;
 N3 X-56.06 Y76.59;
 N4 X-102.11 Y70.69;
 N5 X-137.46 Y64.22;
 N6 X-163.33 Y30.35;
 N7 X-163.33 Y-30.35;
 N8 X-137.46 Y-64.22;

钻 4- φ 14 孔的孔位子程序

%2005

N1 X-173.33 Y83.59;
 N2 X-173.33 Y0-83.59;
 N3 X82.02 Y0-83.59;
 N4 M99

N9 X-102.11 Y-70.69;
 N10 X-56.06 Y-76.59;
 N11 X0 Y-85.58;
 N12 X43.13 Y-75.02;
 N13 X75.02 Y-43.31;
 N14 M99;

二、加工 C 面上的孔及螺孔

本工序加工内容为：

φ100 孔、4-M6 螺孔、4-φ20 沉头孔。

工件用专用夹具安装，采用一面两孔定位，φ85 孔处用圆柱销，φ55 孔处用菱形销，压板夹紧。

工件坐标系如图 7-2 所示。加工前以圆柱销和底平面为基准测量出编程原点在机床坐标系中的坐标值，用 MDI 方式输入到 G56 中。

加工内容及具体参数如表 7-3 和表 7-4。

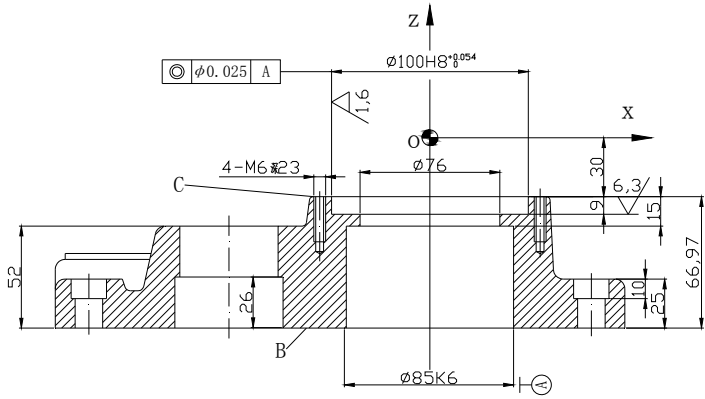


图 7-2 空压机吸气阀盖头加工示意图之二

表 7-3 数控加工工艺卡

产品型号	零件名称	零件图号	夹具名称	程序名称	材料	使用设备	编制人	较核人	审核人	
	吸气阀盖头		专用夹具	0011	HT200	VMC-1000				
工步号	加工内容		刀具号	刀具名称	刀具规格/mm	刀具补偿号	主轴转速/r/min	进给速度/mm/min	切削深度/mm	加工余量/mm
1	铣 φ100 至 φ99.4		T10	立铣刀	φ20	H10、D01、D02、D03	477	48	9	5-单边 4-单边 2.4单
2	精镗孔 φ100		T11	镗刀	φ100	H11	238	28	9	0.6
3	用钻头定中心用的中心钻，钻 4-M6 孔		T7	中心钻	φ18	H7	530	80	3	
4	钻 4-M6 底孔		T12	麻花钻	φ5	H12	955	95	28	
5	攻丝 4-M6		T13	丝锥	φ6	H12	500	50	23	
6	铰沉头孔 4-φ20		T14	铰钻	φ20	H14	320	32	10	

表 7-4 刀具调整卡

产品型号	零件名称	零件图号	夹具名称	程序名称	材料	使用设备	编制人	较核人	审核人
	吸气阀盖头		专用夹具	0011	HT200	VMC-1000			
刀具号(T)	刀具名称	刀具规格/mm	刀具偏置值	用途		刀具材料			
10	立铣刀	φ20	H10、D01[值 17]、D02[值 13]、D03[值 10.6]	半精加工孔 φ100		高速钢(HSS)			
11	单刃镗刀	φ100	H11	精加工孔 φ100		YG3X			
12	麻花钻	φ5	H12	钻螺纹底孔		高速钢(HSS)			
13	丝锥	φ6	H13	攻螺纹		高速钢(HSS)			
14	铰钻(导柱 φ13.5)	φ20	H14	铰沉头孔		高速钢(HSS)			

编程中要用到的数值如图 7-1 和图 7-2 所示。加工四个沉头孔可以用到上面的子程

序%2005。加工四个螺孔时，首先用中心钻钻定位孔，然后用麻花钻钻螺纹底孔，最后用丝锥攻锥，为简化编程，孔的位置用子程序来表示。工件程序如下：

```

%0011;
N1 T10;                * (工步 1 开始)
N2 M06;
N3 G00 G90 G56 X0 Y0;  *刀具移动到 G56 坐标系 X0 Y0 处
N4 G43 H10 Z0;        *启动长度补偿，刀尖移动到 Z0 处
N5 G01 Z-39. F100 S477 M03 M08; *工进至被加工孔底
N6 G42 D01 X-50. F48;  *启动半径补偿
N7 G02 I50.;          *加工一圈
N8 G01 G40 X0;        *撤消刀补，刀具中心到 X0 Y0 处
N9 G42 D02 X-50.      *启动半径补偿
N10 G02 I50.;         *加工一圈
N11 G01 G40 X0;       *撤消刀补，刀具中心到 X0 Y0 处
N12 G42 D03 X-50.;
N13 G02 I50.;
N14 X0 Y50. I50.      *刀具多走一段，减小接刀痕迹
N15 G00 G40 X0 Y0;
N16 G49 Z200. M05 M09;          *(工步 1 结束)
N17 T11;                *(工步 2 开始)
N18 M06;
N19 G43 H11 Z0 S238 M03;
N20 G76 Z-39. R-28. Q13. P2000 F28. M08; *G76 精镗孔循环
N21 G00 G49 Z200. M05 M09;
N22 T7;                *(工步 3 开始，钻螺纹定位孔)
N23 M06;
N24 X56. Y56.          *在平面上定位到第 1 个孔处
N25 G43 H7 Z0 S530 M03;
N26 G98 G81 Z-33. R-28. F80. M08;
N27 M98 P2006
N28 G00 G49 Z200. M05 M09;
N29 T12;                *(工步 4 开始，钻螺纹底孔)
N30 M06;
N31 X56. Y56.
N32 G43 H12 Z0 S955 M03 M08;
N33 G81 Z-58. R-28. F95.
N34 M98 P2006;
N35 G00 G49 Z200. M05 M09;

```


N36 T13; *(工步 5 开始, 攻丝)
 N37 M06;
 N38 X56. Y56.;
 N39 G43 H13 Z0 S500 M03 M08;
 N40 G84 Z-53. R-28. P2000 F50.; *G84 攻丝循环, 在孔底处主轴反转工进退到 R
 N41 M98 P2006;
 N42 G00 G49 Z200. M05 M09;
 N43 T14; *(工步 6 开始, 铤钻 4- ϕ 20 沉头孔)
 N44 M06;
 N45 X82.02 Y83.59;
 N46 G43 H14 Z200. S320 M03; M08
 N47 G98 G82 Z-81.97 R-28. P2000 F32.; *G82 与 G81 不同在于 G82 在孔底可以暂停
 N48 M98 P2005;
 N49 G00 G49 Z200. M05 M09;
 T00; *将刀具送回刀库
 M06;
 M02;

子程序, 4-M6 孔的位置

%2006
 N1 X-56. Y56.;
 N2 X-56. Y-56.;
 N3 X56. Y-56.;
 M99;

§ 7-2 平面轮廓加工程序编制

平面轮廓曲线可以分为三种类型：由直线和圆弧构成的简单轮廓曲线，可以用已知方程表示的曲线，列表曲线。加工时一般用立铣刀两轴联动切削，可以在数控铣床和镗铣加工中心机床上完成。立铣刀的圆柱表面和端面上都有切削刃，它们可同时进行切削，也可单独进行切削，圆柱表面的切削刃为主切削刃，端面上的切削刃为副切削刃，端面刃主要用来加工与侧面相垂直的底面。编程中要以工件实际轮廓曲线作为编程轨迹，灵活应用刀具半径补偿功能实现粗精加工，并且要注意刀具的切入和切出以及轴向的进刀方式。

图 7-3 和图 7-4 是某油田设备上的推力槽形凸轮零件，材料为灰铸铁 HT300，生产类型为小批量生产。用配有 BEIJING-FANUC 0i-MA 控制系统的 VMC-1000 立式加工中心加工槽轮曲线，在上加工中心之前，其它表面均已加工完毕。现将加工第一面曲线轮廓的编程过程介绍如下。

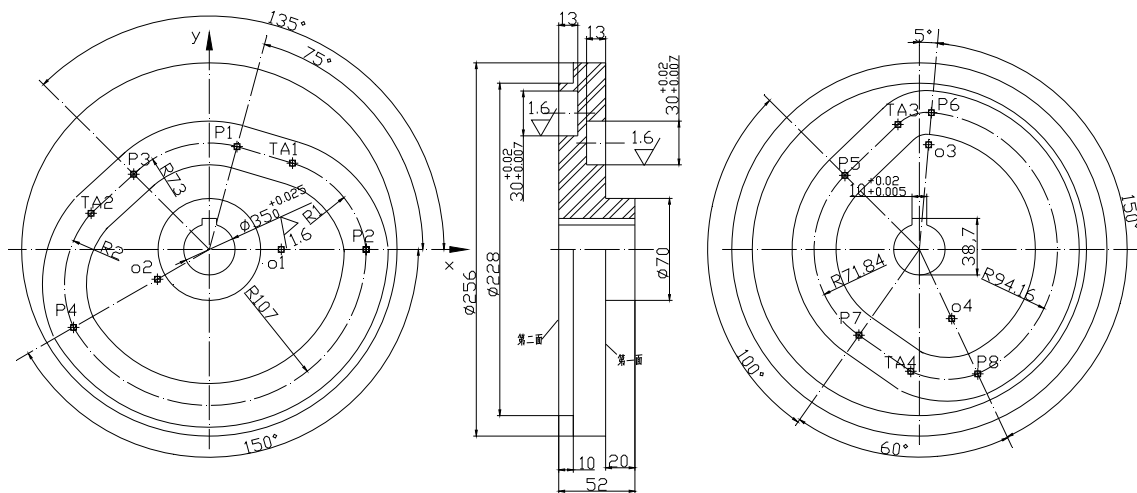


图 7-3 推力槽形凸轮零件图

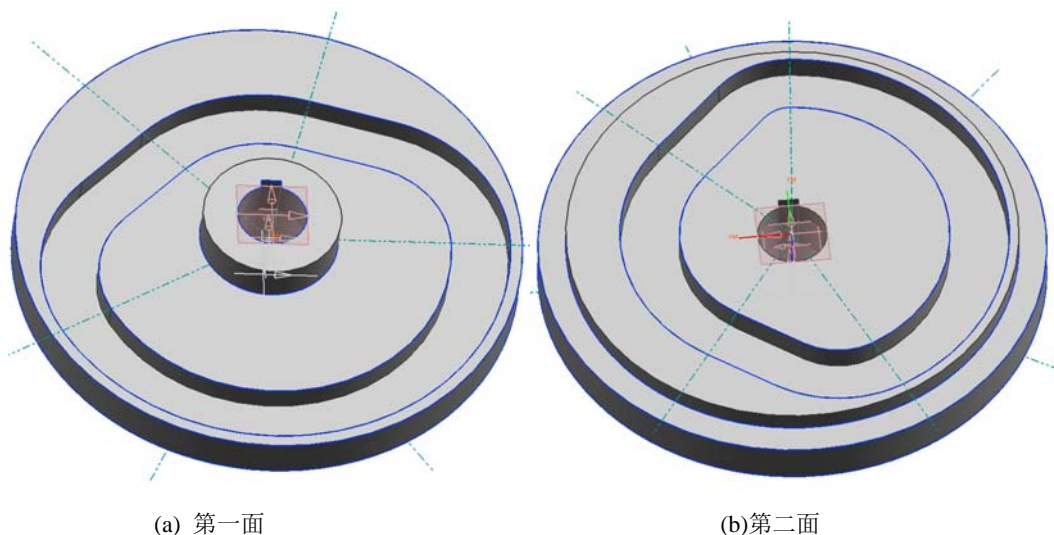


图 7-4 推力槽形凸轮立体图

一、工艺处理

1、工件安装

用专用夹具安装工件，以第二面、 $\phi 35^{+0.025}$ (H7)孔和键槽作为定位基准，开口垫圈和螺母夹紧。

2、确定编程原点

由零件图可知， $\phi 35^{+0.025}$ 孔中心为曲线的设计基准，工件坐标系原点 X_0 、 Y_0 选在 $\phi 35^{+0.025}$ 孔中心，与主设计基准重合， Z_0 设在第一面上，通过测量夹具上的圆柱销和定位平面确定编程原点在机床坐标系中的坐标值，然后将该值用 MDI 方式输入到 G55 中。程序中直接调用该坐标系。

3、确定加工工步及各种工艺参数

用二把 $\phi 25\text{mm}$ 六刃高速钢立铣刀，分别用于粗加工、半精加工（T3）和精加工（T4）。为保证顺利下刀到要求槽深，要先用 $\phi 25\text{mm}$ 的钻头（T1）钻出底孔，然后再用 $\phi 25\text{mm}$ 的键槽铣刀（T2）将孔底铣平。粗加工（开槽）分两层加工完成，以避免Z向吃刀过深，半精加工和精加工不分层，一刀完成。粗加工与半精加工不分逆铣和顺铣，为了保证表面质量，精加工时要用顺铣。加工内容及具体参数如表 7-3 和表 7-4。

表 7-3 数控加工工艺卡

产品型号	零件名称	零件图号	夹具名称	程序名称	材料	使用设备	编制人	较核人	审核人	
	槽形凸轮		专用夹具	0012	HT300	VMC-1000				
工步号	加工内容		刀具号	刀具名称	刀具规格/mm	刀具补偿号	主轴转速/r/min	进给速度/mm/min	切削深度/mm	加工余量/mm
1	钻进刀孔		T1	麻花钻	$\phi 25$	H1	305	30	12.5	
2	钻进刀孔		T2	键槽铣刀	$\phi 25$	H2	254	12	13	
3	粗铣（开槽）		T3	立铣刀	$\phi 25$	H3	190	57	8、5	
4	半精铣		T3	立铣刀	$\phi 25$	H3、D3	190	57	13	2.2
5	精铣		T4	立铣刀	$\phi 25$	H4、D4	509	92	13	0.3

表 7-4 刀具调整卡

产品型号	零件名称	零件图号	夹具名称	程序名称	材料	使用设备	编制人	较核人	审核人
	槽形凸轮		专用夹具	0012	HT300	VMC-1000			
刀具号(T)	刀具名称	刀具规格/mm	刀具偏置值	用途		刀具材料			
1	麻花钻	$\phi 25$	H1	钻进刀孔		高速钢（HSS）			
2	键槽铣刀	$\phi 25$	H2	钻进刀孔		高速钢（HSS）			
3	立铣刀	$\phi 25$	H3、D3（值为2.2）	粗铣槽、半精铣槽		高速钢（HSS）			
4	立铣刀	$\phi 25$	H4、D4(值为2.5)	精铣槽		高速钢（HSS）			

4、走刀路线

编程轨迹为槽的对称中心线，立铣刀 T3 从预制孔（P1 点）下刀到切深，沿编程轨迹顺时针铣削一周，开槽分两层切削，底面不需要留精加工余量；然后启动刀具半径补偿，左补偿，补偿量为 2.2mm，沿编程轨迹铣一周，切除外侧余量，为精加工留 0.3mm 的余量，撤消刀具补偿回到 P1 点；启动刀具右补偿，补偿量为 2.2mm，沿编程轨迹铣一周，切除内侧余量，为精加工留 0.3mm 的余量，撤消刀具半径补偿；抬刀，至此，粗加工和半精加工完成。立铣刀 T4 在 TA1 点下刀到槽底，启动刀具半径右补偿到 P1 点，补偿量为 2.5mm，逆时针走刀（顺铣加工）切削一周，再切削到 P1 点，再走到 P3 点以减少接刀痕迹，撤消半径补偿到 TA2 点，抬刀，至此，外侧精加工完成。立铣刀 T4 在 P1 点下刀到槽底，启动刀具半径右补偿到 TA1 点，半径补偿值为 2.5mm，铣削一周到 TA1 点，再走到 TA2 点以减少接刀痕迹，撤消刀具半径补偿到 P3 点，抬刀，至此内侧精加工完成。

二、数学处理

槽轮轮廓是由圆弧和直线构成的曲线，数学处理的任务是计算出各个基点的坐标值。下面分析曲线的构成。

圆弧 P2-P4 半径为 R107，圆心坐标为 X0, Y0；圆弧 P1-P3 半径为 R73，圆心坐标为 X0, Y0；过 P1 点做圆弧 P1-P3 的切线 P1-TA1，过渡圆弧 P2-TA1 与圆弧 P2-P4 相切于 P2 点，并与切线 P1-TA1 相切于 TA1 点。同理，直线 P3-TA2 与圆弧 P1-P3 相切于 P3 点，过渡

圆弧 P4-TA2 与圆弧 P2-P4 相切于 P4 点并与直线 P3-TA2 相切于 TA2 点。轮廓曲线是由 4 段圆弧和 2 段直线构成。数学处理的关键是计算切点 TA1 (TA2) 的坐标值和过渡圆弧圆心 O1 (O2) 点的坐标值。现将切点 TA1 与过渡圆圆心 o1 的坐标值及过渡圆半径 R1 计算过程介绍如下:

r_1 与 α_1 为小圆弧半径与极角(P1 点), r_2 与 α_2 为大圆弧半径与极角(P2 点)。则 P1 点的坐标值为 $X_1 = r_1 \cos \alpha_1$, $Y_1 = r_1 \sin \alpha_1$; P2 点的坐标值为 $X_2 = r_2 \cos \alpha_2$, $Y_2 = r_2 \sin \alpha_2$ 。直线

O- P1 的方程为 $y = \frac{Y_1}{X_1} x = kx$ 。则与之垂直的切线 P1-TA1 斜率为 $k_1 = -\frac{1}{k} = -\frac{X_1}{Y_1}$, 该切线

的方程为 $y = k_1 x + b$, 其中 $b = Y_1 - k_1 X_1$ 。表示成一般形式为:

$$a_1 x + b_1 y + c_1 = 0 \quad (7-1)$$

其中 $a_1 = k_1; b_1 = -1; c_1 = b = Y_1 - k_1 X_1$ 。

设 o1 的坐标为 (x_0, y_0) , 根据线段 o1-TA1 垂直于线段 P1-TA1, 线段 o1-TA1 长度等于线段 o1-P2 长度, 有下式成立:

$$(x_0 - X_2)^2 + (y_0 - Y_2)^2 = \left(\frac{a_1 x_0 + b_1 y_0 + c_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \right)^2 \quad (7-2)$$

直线 O- P2 的方程为 $y = \frac{Y_2}{X_2} x = k_2 x$, 过渡圆圆心 o1 点在直线 O- P2 上, 则有下式成立:

$$y_0 = \frac{Y_2}{X_2} x_0 = k_2 x_0 \quad (7-3)$$

式(7-2)与式(7-3)联立, 由于二次方程有两个解, 选取其中一个合理解, 得到 o1 的坐标值 (x_0, y_0) 。

直线 o1-TA1 与直线 O- P1 (其斜率为 $k = \frac{Y_1}{X_1}$) 平行, 则直线 o1-TA1 方程为:

$$y = kx + b \quad (7-4)$$

其中 $b = y_0 - k x_0$ 。联立式(7-1)与式(7-4)得 TA1 坐标值 (x_1, y_1) 。从而计算出过渡圆半

径 R1。

同理计算出其它三个圆心坐标和三个切点坐标值。实际编程中是用 VB 编制一个程序，输入值为小圆弧半径 r_1 与极角(P1 点) α_1 ，大圆弧半径 r_2 与极角(P2 点) α_2 为，计算出过渡圆弧圆心坐标值和切点（过渡圆弧起点）坐标值，程序界面如图 7-5 所示。

第一面各基点坐标值如表 7-4 所示。

表 7-4 第一面各基点坐标值

点	x 坐标	y 坐标
P1	18.894	70.513
TA1	61.694	59.044
R1	61.127	
P2	107.000	0
P4	-92.665	-53.500
R2	61.127	
TA2	-82.950	20.287
P3	-51.619	51.619

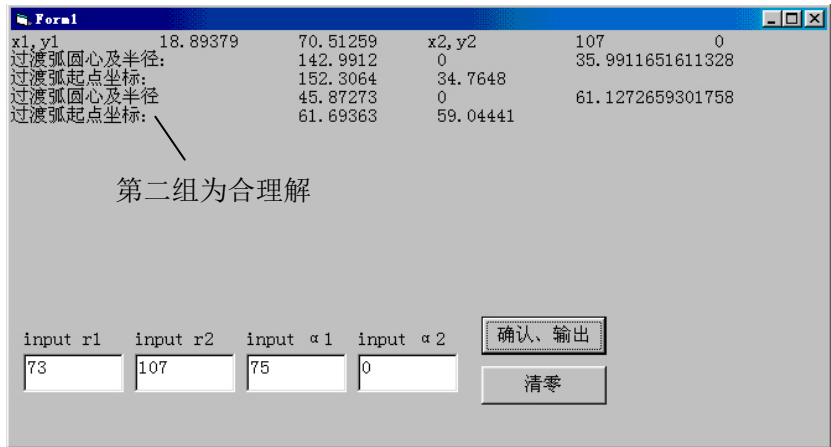


图 7-5 计算过渡圆圆心坐标值和半径值及切点坐标值的 VB 程序界面

三、编制程序

将表 7-3 数控加工工艺卡中各工步的加工内容以及走刀路线，用数控指令表达出来，由于刀具在水平面内沿编程轨迹反复走刀，为简化编程，并考虑到精加工时的顺铣，编制两个子程序，%2007 为顺圆子程序，刀具路径为 AT1→P2→P4→TA2→P3→P1；%2008 为逆圆子程序，刀具路径为 P1→P3→TA2→P4→P2→AT1。子程序如下：

%2007 *顺时针走刀

G02 X107. Y0 R61.127;

G02 X-92.665 Y-53.5 R107.;

G02 X-82.95 Y20.287 R61.127;

G01 X-51.619 Y51.619;

G02 X18.894 Y70.513 R73.;

M99;

%2008 *逆时针走刀

G03 X-51.619 Y51.619 R73.;

G01 X-82.95 Y20.287;

G03 X-92.665 Y-53.5 R61.127;

G03 X107. Y0 R107.;

G03 X61.694 Y59.044 R61.127;

M99;

主程序如下：

%0012;

G40 G49 G90;

T1; *钻头(工步 1 开始)

M06;

G00 G55 X18.894 Y70.513; *刀具在换刀平面上定位在 P1 点

G43 H1 Z10.;

G01 Z-12.5 S305 M03 F30 ;	*钻孔深到 12.5mm
G00 G49 Z200. M05;	*抬刀, 撤消刀具长度补偿, 主轴停转
T2;	*键槽铣刀(工步 2 开始)
M06;	
X18.894 Y70.513;	
G43 H2 Z10.;	
G01 Z-13 S254 M03 F13;	
G00 G49 Z200. M05;	
T3;	*立铣刀(工步 3 开始)
M06;	
X18.894 Y70.513;	
G43 H3 Z10.;	
G01 Z-7. S190 M03 F13;	*Z 向进刀深 7mm
G01 X61.694 Y59.044 F57;	
M98 P2007;	*顺时针铣一周到 P1
Z-13. F13;	*Z 向进刀到孔深 13mm
X61.694 Y59.044 F57;	
M98 P2007;	*顺时针铣一周到 P1 (开槽结束)
G41 D3 X61.694 Y59.044 ;	*启动刀具半径左补偿到 TA1 点
M98 P2007;	*铣外侧
X61.694 Y59.044 ;	*到 TA1 点 (外侧半精加工结束)
G40 X18.894 Y70.513;	*撤消刀具半径补偿, 回到 P1 点
G42 D3 X61.694 Y59.044 ;	*启动刀具半径右补偿到 TA1 点
M98 P2007;	
X61.694 Y59.044 ;	(内侧半精加工结束)
G40 X18.894 Y70.513;	*撤消刀具半径补偿, 回到 P1 点
G00 G49 Z200. M05;	*抬刀
T4;	*精加工开始
M06;	
X61.694 Y59.044 ;	*在换刀平面定位到 TA1 点
G43 H4 Z10.;	
G01 Z-13. S509 M03 F13;	*Z 向工进到槽底
G42 D4 X18.894 Y70.513 F92;	*启动刀具半径补偿到 P1 点
M98 P2008;	*逆时针切削一周, 到 TA1 点
X18.894 Y70.513;	*切到 P1
M98 P2008;	*到 TA1 点, 多切削一周, 以减小接刀痕迹
G40 X18.894 Y70.513;	*撤消刀具半径补偿, 到 P1 点 (外侧精加工结束)
G42 D4 X61.694 Y59.044 ;	*启动半径右补偿到 TA1 点

M98 P2007;	*顺时针铣一周到 P1 点
X61.694 Y59.044 ;	*再切削到 TA1 点
M98 P2007;	*到 P1 点, 多走一周以减小接刀痕迹
G40 X61.694 Y59.044 ;	* (内侧精加工结束)
G00 G49 Z200. M05;	*抬刀
T0;	
M06;	*将刀具送回刀库
M02;	*程序结束

§ 7-3 解析曲面加工程序编制

在数控加工中,把可以用数学方程描述的曲面称为解析曲面。加工这种曲面一般是用球头铣刀,2.5轴行切加工或3轴行切加工,现在的数控铣床大多数具有三轴联动功能,而且3轴行切加工比2.5轴行切加工表面质量好,所以,3轴行切加工用的比较多。

图7-6为加工某设备搅拌桨叶片型面锻模的曲面示意图,曲面方程为 $z = a \frac{y}{x}$, 其中 $a = \frac{42.5}{\pi}$, 加工范围 $x \in [30,108]$, $y \in [-30,30]$ 。工件材料为Cr12,单件生产。

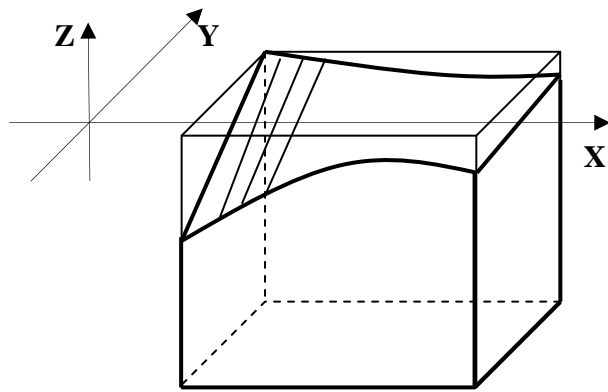


图 7-6 搅拌桨锻模曲面示意图

用XA5032AK数控铣床加工曲面,在加工曲面之前,上表面已加工完毕。选用半径为5mm的球头铣刀,3轴加工。现将曲面加工的数控程序编制过程介绍如下。

一、工艺处理

1、工件安装

由于是单件生产,工件装夹在铣床用平口台虎钳上。

2、确定编程原点

工件坐标系如图7-6所示。用试切法对刀,工件毛坯如图7-6细线所示,以毛坯上表面左侧棱边中心为对刀点。对刀方法如下:用球头铣刀的圆周刃分别试切毛坯的前面和后面,得到的两个y坐标取平均值即为对刀点在机床坐标系中的y坐标值;用球头铣刀的圆周刃试切毛坯左侧面,得到的x坐标值加上铣刀圆周半径即为对刀点在机床坐标系中的x坐标值;用铣刀球头试切毛坯上表面得到的z坐标值(球心为刀位点)即为对刀点在机床坐标系中的z坐标值;至此,对刀点在机床坐标系中的坐标值为已知数。现在假设曲面的最高点(X30.Y30.Z13.535)与毛坯上表面等高(如图7-6所示),如果将刀具移动到对刀点上方10mm处,则设置工件坐标系指令为G92 X30.Y0 Z23.535。需要注意的是,加工过程是逐层切削的,要搞清楚刀点z向距上表面高度值与切削深度的关系。

3、确定加工方法和走刀路线

刀具选用半径为5mm的整体硬质合金球头立铣刀,刀具型号为F4AL1000ADN30(齿数4,直径10mm,直柄,螺旋角30°)。主轴转速选择2000rpm(圆周最大切削速度约为63m/min),进给速度为200mm/min(每转进给量为0.1mm/r)。

由曲面方程可知,当x为一定值时,z与y是线性函数关系,为了编程方便,行循环选在x轴方向,考虑到加工后的表面粗糙度,精铣时行距选为0.5mm,步长选为1mm。首先令x=30(第1行),考虑到切入段,切入点(第1个节点)选为(30,-37),y坐标加1,得到第2个节点(30,-35),y坐标再加1,得到第3个节点,依次加工到第一行的最后一个节点(30,37),抬刀,回到第一行第一个节点的上方,x坐标加一个行距,切削第2行,以此类推,依次铣削完整整个曲面。对于每一行都是从y的负值处开始向正值方向铣削,是为了每一行都是顺铣。

二、数学处理

三坐标联动加工要求:球头刀的中心要落在上述各个节点处曲面的法线上,并且与该节点距离为5。由空间解析几何与向量代数可知,在各个节点处球头刀中心点坐标值可以通过该点的法向量方向余弦求出,计算过程如下:

$$\text{曲面方程为: } f(x, y, z) = z - a \frac{y}{x} = 0 \quad (7-5)$$

分别对x,y,z求一阶偏导数:

$$f'_x = -(-a \frac{y}{x^2}) = \frac{z}{x} \quad (7-6)$$

$$f'_y = -\frac{a}{x} \quad (7-7)$$

$$f'_z = 1$$

法矢量的模为:

$$M = \sqrt{f_x'^2 + f_y'^2 + f_z'^2} \quad (7-8)$$

法矢量的方向余弦为:

$$\cos \alpha = \frac{f'_x}{M} \quad (7-9)$$

$$\cos \beta = \frac{f'_y}{M} \quad (7-10)$$

$$\cos \gamma = \frac{f'_z}{M} \quad (7-11)$$

设 r 为球头刀半径值, x_0, y_0, z_0 为一个节点的坐标值, 则与该点对应的刀具中心坐标值为:

$$x = x_0 + r \cos \alpha \quad (7-12)$$

$$y = y_0 + r \cos \beta \quad (7-13)$$

$$z = z_0 + r \cos \gamma \quad (7-14)$$

二、编制程序

在三坐标联动行切中, 在同一行上, 每次增加一个步长得到下一个节点, 一行加工完成后, 增加一个行间距得到下一行, 从一个节点的坐标值可以按一定规律计算出下一个节点的坐标值, 所以, 可以应用宏指令中的计算功能和循环功能编程。加工程序如下:

```
%0013;
G90 G92 X30. Y0 Z23.535;          *设置工件坐标系
G00 Y-37. S2000 M03 M08;        *刀具快速移动到第一行第一节点上方
#30=5;                            *设球刀半径
#1=30;                             *X 轴起点坐标
WHILE [#1 LE 108] DO 1;          *行循环开始
#2=-37                             *Y 轴起点坐标
WHILE [#2 LE 37] DO 2;          *步长循环开始
#3=13.535*#2/#1;                *计算 Z 轴坐标值
#4=#3/#1;                         *X 偏导 式(7-6)
#5=-13.535/#1;                  *Y 偏导 式(7-7)
#6=SQRT(#4*#4+#5*#5+1);         *法矢量的模 式(7-8)
#7=#4/#6;                        *方向余弦 cos α 式(7-9)
#8=#5/#6;                        *方向余弦 cos β 式(7-10)
#9=1/#6;                          *方向余弦 cos γ 式(7-11)
#10=#1+#30*#7;                  *球心 X 值 式(7-12)
#11=#2+#30*#8;                  *球心 Y 值 式(7-13)
#12=#3+#30*#9;                  *球心 Z 值 式(7-14)
G01 X#10 Y#11 Z#12 F200.;       *工进
#2=#2+1;                         *Y 加步长 2 得下一节 Y 坐标值
END 2;                            *步长循环结尾
G01 Z[#12+10]                   *一行加工完后抬刀
G00 Y-37.;                       *快速移动到行 Y 向起点处
#1=#1+0.5;                       *行距为 0.5
END 1;                            *行切循环结尾
```


线。

以已加工出的 $\phi 12 \pm 0.02$ 内孔及左端面为定位基准，用长心轴及端面定位工件。工件右端面用压板、螺母夹紧，用三爪自定心卡盘夹持心轴，一次装夹完成粗精加工。

采用阶梯切削路线切削外形，圆弧分 4 次走刀，圆锥部分用相似斜线车锥法分三次走刀切完。

精加工余量为 0.5mm，最后自右向左精车外轮廓面。

(2) 刀具及切削用量选择

根据加工要求，考虑加工时刀具与工件不要发生干涉，选择安装菱形刀片的可转位机夹外圆车刀完成粗、精加工。刀片材料为涂层硬质合金。

粗加工时，切削速度为 85m/min，对应主轴转速为 500r/min；进给量为 0.2mm/r，对应进给速度为 100mm/min。精加工时，切削速度为 140 m/min，对应主轴转为 800 r/min；进给量为 0.1mm/r，对应进给速度为 80mm/min。

(3) 确定工件坐标系

以工件右端面与轴心线的交点为工件原点，建立工件坐标系。由于尺寸要求严格，对刀采用手动试切对刀的方法把工件右端面与毛坯外圆面的交点作为对刀点，采用“手动”和“步进”方式操纵机床，具体操作步骤如下所述。

①回机床参考点：回第一参考点（机床参考点），建立机床坐标系。然后将坐标系键拨到第二坐标系。

②对刀：主轴正转，先用车刀的刀尖紧靠工件右端面，按设置编程零点键，CRT 屏幕上显示 X、Z 坐标值都清成零（即 X0，Z0）；然后再将工件外圆表面车一刀，保持 X 向尺寸不变，Z 向退刀，当 CRT 上显示的 Z 坐标值为零时，再按设置编程零点键，CRT 屏幕上显示 X、Z 坐标值都清为零（即 X0，Z0）。退出刀具，主轴停转，用卡尺测量车过的工件外径尺寸（如 $\phi 58 \text{ mm}$ ），然后将刀具移动到 X42、Z20 处，该点为起刀点，则起刀点在工件坐标系中的坐标值为 X100，Z20。现在再次按设置编程零点键，CRT 屏幕上显示 X、Z 坐标值都清成零（即 X0，Z0），到此为止，对刀完成，并为自动加工做好了准备。

2、基点计算比较简单，具体值见程序。程序如下：

```
%0014;
N1 G92 X100 Z20;           *设置工件坐标系
N2 G00 Z2 S500 M03;
N3 X55;
N4 G01 Z-18.5 F100 M08;    *粗车外圆  $\phi 54$  至  $\phi 55$ 
N5 G00 X60;
N6 Z2;
N7 X51;
N8 G01 Z-10 F100;         *粗车一刀外圆得  $\phi 51$ 
N9 G91 G02 X3 Z-1.5 I3 K0; *粗车一刀圆弧得 R1.5
N10 G90 G01 X60;         *工进切出
N11 G00 Z2;
```

N12 X48;	
N13 G01 Z-10 F100;	*粗车二刀外圆得 $\phi 48$
N14 G91 G02 X6 Z-3 I6 K0;	*粗车二刀圆弧得 R3
N15 G90 G01 X60;	*工进切出
N16 G00 Z2;	
N17 X45;	
N18 G01 Z-10 F100;	*粗车第三刀得 $\phi 45$
N19 G91 G02 X9 Z-4.5 I9 K0;	*粗车三刀圆弧得 R4.5
N20 G90 G01 X60;	*工进切出
N21 G00 Z2;	
N22 X42;	
N23 G01 Z-4 F100;	*粗车第四刀外圆得 $\phi 42$
N24 G91 X3 Z-1.5;	*粗车圆锥一刀
N25 G90 X50;	*工进切出
N26 G00 Z2;	
N27 X39;	
N28 G01 Z-4 F100;	*粗车第五刀外圆得 $\phi 39$
N29 G91 X6 Z-3;	*粗车圆锥二刀
N30 G90 X50;	
N31 G00 Z2;	
N32 X36;	*精车外圆
N33 G01 Z0 F80 S800;	
N34 G91 X2 Z-1;	*车右端面倒角
N35 Z-3;	*精车外圆得 $\phi 38$
N36 X6 Z-3;	*精车锥面
N37 Z-3	
N38 G02 X10 Z-5 I5 K0	*精车圆弧
N39 G01 Z-2;	*精车外圆得 $\phi 54$
N40 X-3 Z-1.5;	*左端面倒角
N41 G90 G00 X60;	
N42 G74 M05 M09;	*回参考点(起刀点)
N43 M30;	

该车床所用的大森数控系统不要求小数点编程。

二、套筒零件加工程序设计实例

采用华中数控系统数控车床，加工如图 7-8 所示的套筒零件。毛坯为模锻件，直径为 $\phi 150$ mm、轴长 40 mm，材料为 Q235。批量生产。

该件分两次装夹，首先以 $\phi 120$ 外圆及轴肩为定位基准，用三爪卡盘夹持工件，加工大端面及内孔；然后以 $\phi 112$ 内孔及大端面为定位基准，用三爪卡盘外表面夹持工件，加工小端面。

1、加工大端面程序编制

(1) 工艺处理

毛坯为模锻件，余量相对均匀，编程零点选在工件加工后的端面与轴线相交处，类似于定距装刀。

加工内容与具体参数如表 7-5 所示。

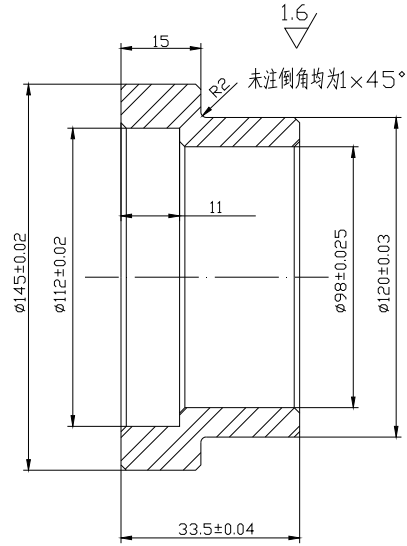


图 7-8 盘类套筒零件加工实例

表 7-5 数控加工工艺卡

产品型号	零件名称	零件图号	夹具名称	程序名称	材料	使用设备	编制人	较核人	审核人
	套筒		三爪卡盘	0015	Q235				
工步号	加工内容	刀具号	刀具名称	刀具规格/mm	刀具补偿号	主轴转速/r/min	进给速度/mm/min	加工余量/mm	留余量/mm
1	车削端面	T02	内孔车刀	菱形刀片	02	219	21	3.25	0
2	粗加工 $\phi 98$ 孔至 $\phi 97.5$	T02			02	219	33	5(径向)	0.5(径向)
3	粗加工 $\phi 112$ 至 $\phi 105$	T02			02	219	33	7.5 径	7 径向
4	粗加工 $\phi 112$ 至 $\phi 111.5$	T02			02	219	33	6.5 径	0.5 径
5	车 $\phi 112$ 端面倒角,精车 $\phi 112$ 孔,车内部轴肩面, $\phi 98$ 孔倒角,精车 $\phi 98$ 孔	T02			02	219	21	0.5 径	0
6	粗车 $\phi 145$ 至 $\phi 146$	T01	外圆车刀	方刀片	01	219	33	4 径向	1 径向
7	精车 $\phi 145$	T01			01	219	21	1 径向	0
8	$\phi 145$ 端面倒角	T01			01	219	21		0

(2) 将加工内容编制成数控程序如下。数值计算比较简单，见程序中的数据。

%0015

N1 G92 X160. Z100.; *设置工件坐标系

N2 M03 S219;

N3 M06 T0202; *换内孔车刀

N4 G90 G00 X95. Z5. M08; *(工步 1)快速定位到 $\phi 95$, 距端面 5 mm 处

N5 G81 X152. Z0 F21; *加工端面

N6 G80 X97.5 Z-37. F33; *(工步 2)粗加工 $\phi 98$ 内孔,留径向余量 0.5 mm

N7 G00 X97.; *快速定位至 $\phi 97$ 直径处

N8 G80 X105 Z-9.5 F33; *(工步 3)粗加工 $\phi 112$

N9 G80 X111.5 Z-9.5 F33; *(工步 4)粗加工 $\phi 112$,留径向余量 0.5 mm,端面余量 0.5 mm

N10 G00 X116. Z1.; *快速定位到 $\phi 116$,距端面 1 mm 处

N11 G01 X112. Z-1.F21; *(工步 5)倒角 $1 \times 45^\circ$, $\phi 112$ 处

N12 Z-10.; *精加工 $\phi 112$ 内孔

N13 X100.; *精加工孔底平面
 N14 X98. Z-11.; *内孔中间端面倒角
 N15 Z-37.; *精加工 $\phi 98$ 内孔
 N16 G00 X95 M09; *快速退刀至 $\phi 95$ 直径处
 N17 Z10.;
 N18 X160. Z100. T0200; *清除刀偏, 回起刀点
 N19 M06 T0101; *换加工外圆的正偏刀
 N20 G00 X152. Z2. M08; *快速定位到 $\phi 150$ 直径, 距端面 2 mm 处
 N21 G80 X146. Z17. F32; *(工步 6)粗加工 $\phi 145$ 外圆
 N22 G80 X145. Z17. F21; *(工步 7)精加工 $\phi 145$ 外圆
 N23 G00 X141. Z1.;
 N24 G01 X147. Z-2. F21 M09; *(工步 8)倒角 $1 \times 45^\circ$, $\phi 145$ 端面处
 N25 G00 T0100 X160. Z100.; *清除刀偏, 回起刀点
 N26 M05;
 N27 M02;

2、加工小端面程序编制

加工内容与具体参数如表 7-6 所示。

表 7-6 数控加工工艺卡

产品型号	零件名称	零件图号	夹具名称	程序名称	材料	使用设备	编制人	较核人	审核人	
	套筒		三爪卡盘	0016	Q235					
工步号	加工内容		刀具号	刀具名称	刀具规格/mm	刀具补偿号	主轴转速/r/min	进给速度/mm/min	加工余量/mm	留余量/mm
1	粗车端面		T03	45° 端面刀	方刀片	03	265	39	3.25	0.5
2	$\phi 120$ 孔口倒角, 精车端面		T03			03	265	26	0.5	0
3	粗车 $\phi 120$ 外圆		T04	外圆车刀	菱形刀片	04	265	39	3 径向	0.5 径
4	$\phi 120$ 外圆端面倒角, 精车 $\phi 120$, 车圆弧 R2, 车轴肩端面, 轴肩端面倒角		T04			04	265	26	0.5 径	0

数控程序如下:

```
%0016
N1 G92 X160. Z100.;
N2 M03 S265;
N3 M06 T0303; *45° 端面车刀
N4 G90 G00 X95. Z5.; *快速定位到  $\phi 95$ , 距离端面 5 mm 处
N5 G81 X130. Z0.5 F39 M08; *(工步 1)粗加工端面
N6 G00 X96. Z2.; *快速定位到  $\phi 96$ , 距离端面 2 mm 处
N7 Z-2.;
N7 G01 X100. Z0 F26; *(工步 2)  $\phi 98$  端面倒角  $1 \times 45^\circ$ 
N8 X130. M09; *精修端面
N9 T0100 X160. Z100.; *清除刀偏, 回起刀点
```

N10 M06 T0202;	*换加工外圆的正偏刀
N11 G00 X130. Z2.;	*快速定位到 $\phi 130$, 距离端面 2 mm 处
N12 G80 X120.5 Z-16.5 F39 M08;	*(工步 3) 粗加工 $\phi 120$ 外圆, 留径向余量 0.5mm
N13 G00 X116. Z1.;	
N14 G01 X120. Z-1. F26;	*(工步 4) $\phi 120$ 端面倒角 $1 \times 45^\circ$
N15 Z-16.5;	*精加工 $\phi 120$ 外圆
N16 G02 X124. Z-18.5 R2.	*加工 R2 圆弧
N17 G01 X143.;	*精修轴肩面
N18 X147. Z20.5 M09;	*倒角 $1 \times 45^\circ$
N19 G00 T0200 X160. Z100.;	*清除刀补, 回起刀点
N20 M05;	
N21 M02;	

需要说明的是, 不同的数控系统, 指令规定会有区别; 同一数控系统, 版本不同, 指令规定也会有所不同; 同一版本的数控系统, 其功能还取决于伺服系统和机床的机械性能, 所以, 在编程前要仔细阅读机床使用说明书。

思考和作业题

1、在 FANUC 系统数控机床上铣削图示零件, O_1 为加工起始点, O 为工件坐标系原点。主轴转速设为 1500r/min, 进给速度设为 100mm/min。刀具长度存在 H01 中、半径值存在 D01 中。

刀具路径为: O_1 快进、启动长度补偿至距上表面 20 处, 主轴正转, 工进至 O_2 进给速度为 100mm/min \rightarrow 快进、启动半径补偿至 $O \rightarrow$ 工进 $B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow O$ 撤消半径补偿至起刀点, 主轴停止 \rightarrow 撤消长度补偿至 O_1 , 程序结束。

程序要求: 绝对坐标编程, 用 G92 设置工件坐标系, 小数点编程。可以不写程序段号, 程序段以 “;” 结尾。

2、如图 7-10 所示, 用 $\phi 10\text{mm}$ 的钻头 T01 钻 #1~#6 通孔, 再用 $\phi 20\text{mm}$ 的键槽铣刀 T02 加工孔 #7~#10, 然后用 $\phi 95\text{mm}$ 的镗刀 T03 加工 #11~#13 通孔 (已经有底孔)。T01、T02、

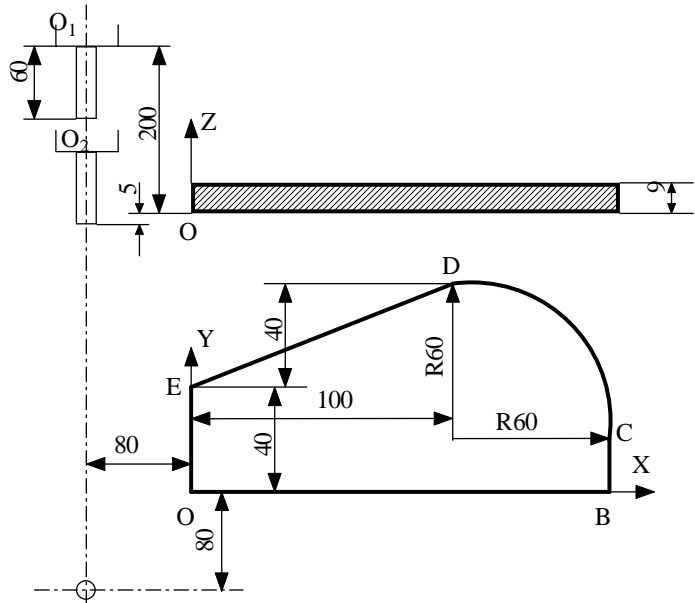


图 7-9 习题 1 加工示意图

T03 的偏置值分别存在 No.11、No.15、No.31 寄存器中。
程序的起点在机床参考点。

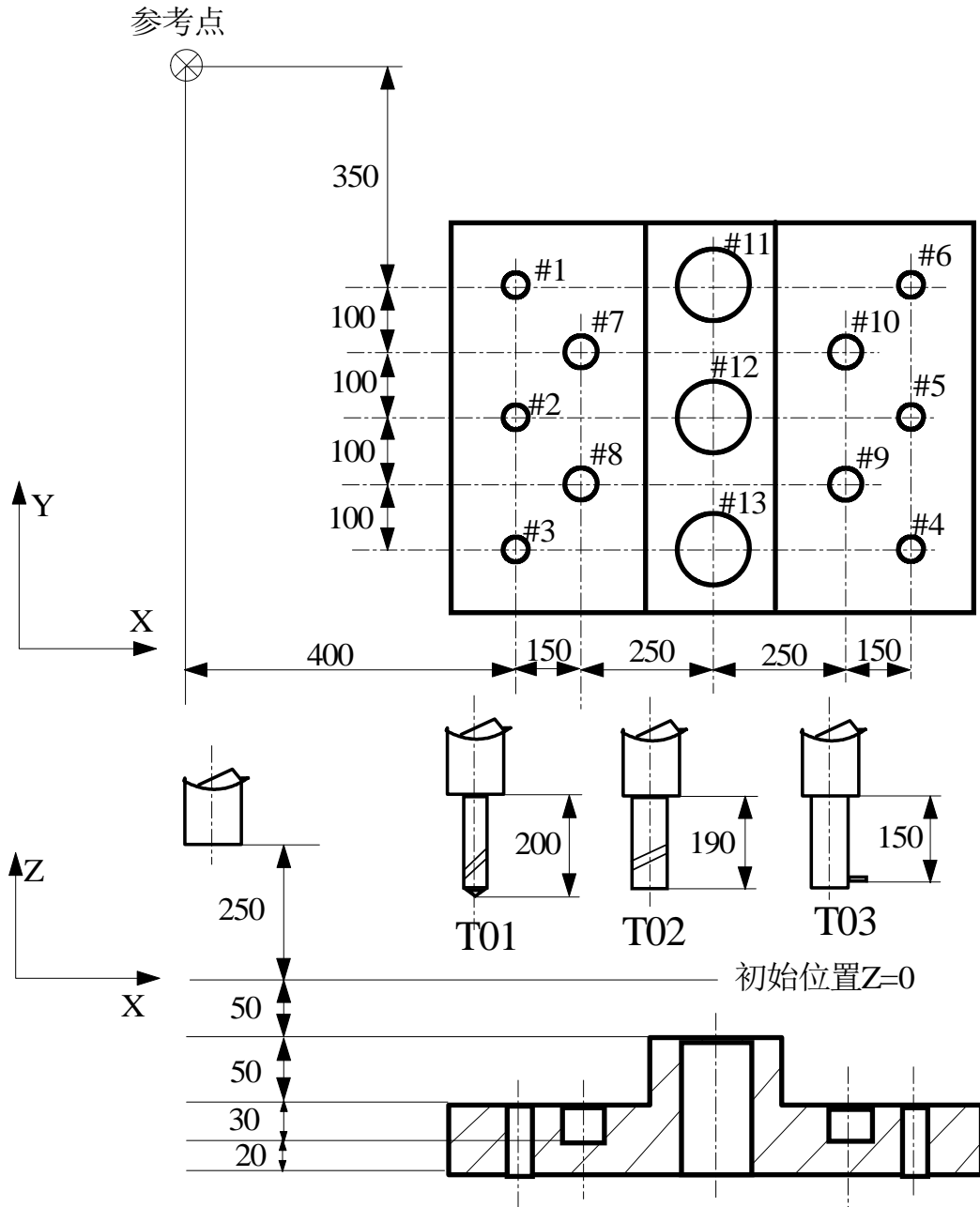


图 7-10 习题 2 加工示意图

3、图 7-11 所示凸轮，编制轮廓精加工程序。

在立式数控铣床上两轴联动加工，工件以中心 R10 孔定位并夹紧，选用 $\phi 16$ 平底立铣刀，主轴转速 300rpm（切削速度 15m/min），进给量 100mm/min，考虑到减少接刀痕迹、顺铣等因素，走刀路线如图所示。

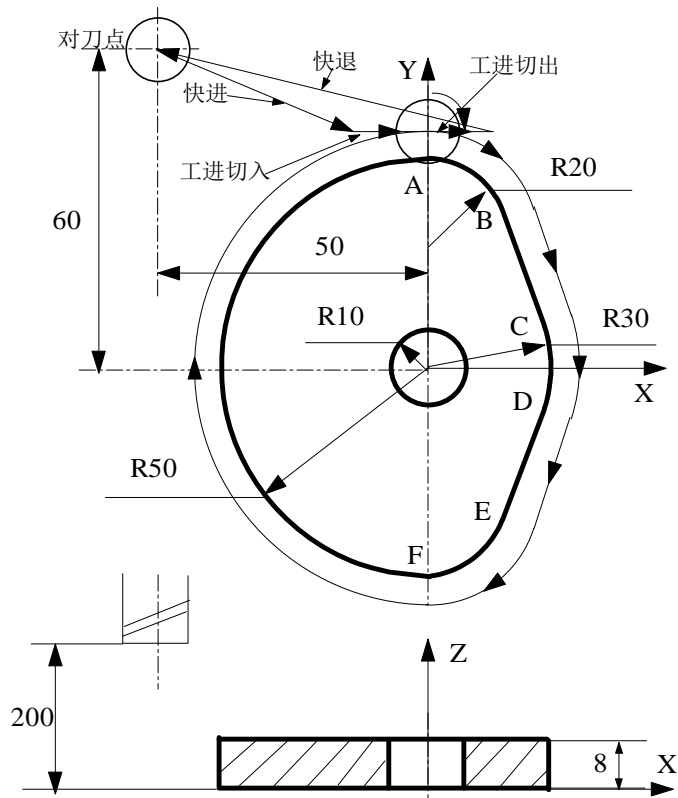


图 7-11 习题 3 加工示意图

4、在 FANUC 系统的数控车床上加工图 7-12 所示零件。切削速度为 100m/min，进给量为 0.1mm/r。走刀路线如图所示。要求恒线速度切削，主轴最高转速为 3000r/min。试编写数控加工程序。

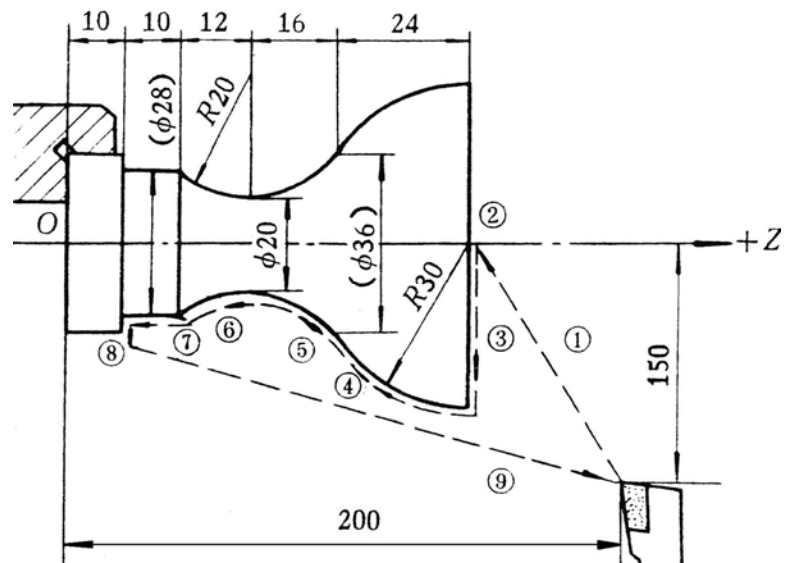


图 7-12 习题 4 加工示意图

第八章 程编中的数学处理

数学处理的目的是计算出程序编制中要输入的刀具路径坐标值。一般来讲，图纸上给出的零件有以下三类：

第一类：圆弧、直线轮廓零件。对于这种零件轮廓，由于数控装置一般都具有直线插补和圆弧插补功能，因此，只需要计算各基点（基点：即两相邻几何元素的交点或切点）坐标。

第二类：已知方程描述的曲线（非圆曲线）轮廓零件。对于这类曲线，如果数控装置的插补功能与零件轮廓相符合，则只进行基点计算，否则，还要进行节点计算。节点：按照程编允许误差，对非圆曲线进行分割，然后将分割点用直线或圆弧进行连接以便对曲线进行逼近。非圆曲线上的这些分割点称为节点。

第三类：列表轮廓零件。不能用方程描述，而是以离散的坐标点给出（描述）的曲线和曲面，前者叫列表曲线轮廓零件，后者称为列表曲面或自由曲面轮廓零件。如对于这类曲线（曲面），首先要构造一条样条曲线（曲面），即对离散的列表点给出一个数学描述，建立数学模型，再按照处理第二类零件的数学处理方法，进行基点和节点的计算。

本章主要介绍第二类和第三类零件的数学处理方法。

§ 8-1 非圆曲线（平面）轮廓的数学处理

在数控加工中，把用数学方程式描述的轮廓形状的零件称为非圆曲线轮廓零件。如常见的凸轮类零件，多数是以方程式给出零件轮廓数据的。渐开线、摆线、阿基米德螺线、对数螺线等是在生产实践中最典型的几种非圆曲线零件，其方程式如下：

$$\text{渐开线} \quad \begin{cases} x = a(\cos \theta + \theta \sin \theta) \\ y = a(\sin \theta - \theta \cos \theta) \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \rho = a / \cos \alpha \\ \theta = \text{tg} \alpha - \alpha \end{cases}$$

$$\text{摆线} \quad \begin{cases} x = a(t - \sin t) \\ y = a(1 - \cos t) \end{cases}$$

$$\text{阿基米德螺线} \quad \rho = A + B\theta$$

$$\text{对数螺线} \quad \rho = Ae^{B\theta}$$

除此之外，还有其它类型或组合型的非圆曲线零件。如图 8-1 所示几种非圆曲线轮廓零件的例子。

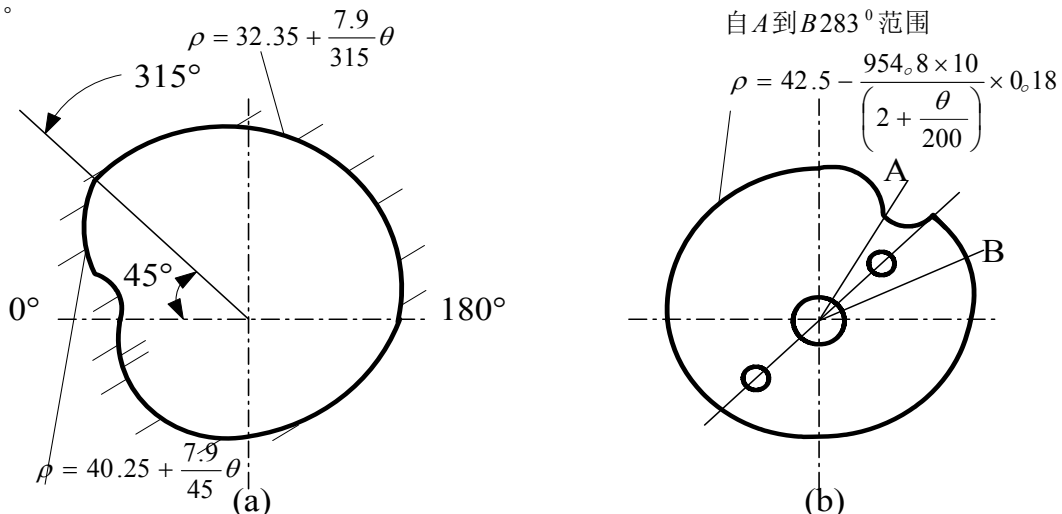


图 8-1 几种非圆曲线轮廓零件的实例

非圆曲线轮廓形状可以是 $y=f(x)$ 或 $x=f(y)$ 直角坐标系的形式给出，也可以用 $\rho=f(\theta)$ 极坐标形式给出。以极坐标给出的零件轮廓，如果需要都很容易通过坐标变换为直角坐标系来描述。不管是哪一种类型的非圆曲线零件，在编程时所需要解决的问题基本上是相同的，即：

(1) 选择插补方式，即采用直线插补还是采用圆弧插补去逼近非圆曲线；

(2) 计算插补点的坐标。用直线逼近时，计算插补节点坐标；用圆弧逼近时，计算各圆弧的起点、终点和圆心坐标；

(3) 根据给出的原始方程和刀具半径，计算出刀具中心轨迹的坐标；

(4) 按数控系统输入格式要求，采用手工或计算机辅助编程方式，编制加工程序。

当这类零件的轮廓曲线是用连续的折线逼近时，数控系统要求输入的信息是直线的坐标数据。在编程的过程中主要考虑的问题是，如何将零件轮廓曲线分割成一段段的直线，并保证有足够的加工精度。

一、等插补段法（等弦长法）

这种方法是使每个插补段的长度相等，由于曲线的曲率不同，因而插补误差不等。数控加工程序编制时必须使产生的最大误差小于或等于允许的插补误差，即 $\delta_{\max} \leq \delta_{\text{允}}$ ，以满足加工精度要求。一般情况都是假设最大误差产生在曲线曲率半径最小处，并沿曲线的法向计量。见图 8-2 所示，这种假设虽然不够严格，但加工实践表明，大多数情况下是适用的。

1、确定最小曲率半径

设曲线方程为 $y=f(x)$ ，其曲率半径 R 为

$$R = \frac{[1+(y')^2]^{3/2}}{y''} \quad (8-1)$$

将上式对 x 求一次导数，即

$$\frac{dR}{dx} = \frac{3(y'')^2 y' [1+(y')^2]^{1/2} - [1+(y')^2]^{3/2} y'''}{(y'')^2} \quad (8-2)$$

并令 $\frac{dR}{dx} = 0$ ，得

$$3(y'')^2 y' - [1+(y')^2] y''' = 0 \quad (8-3)$$

由此式可以求得最小曲率半径处的 x 值，将该值代入 R 式中可得出曲线的最小曲率半径 R_{\min} 。

2、确定步长 l

如图 8-2 所示

$$\left(\frac{l}{2}\right)^2 = R_{\min}^2 - (R_{\min} - \delta_{\max})^2 = R_{\min}^2 - (R_{\min} - \delta_{\text{允}})^2$$

解此式得 $l \approx 2\sqrt{2R_{\min}\delta_{\text{允}}}$ (8-4)

3、确定节点坐标

从曲线的起点 $a(x_a, y_a)$ 开始，并以它为圆心，以 l 为半径作圆，其方程为

$$(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 = (2\sqrt{2R_{\min}\delta_{允}})^2 \quad (8-5)$$

求出上式与 $y=f(x)$ 的交点 (x_b, y_b) ，此点即为曲线上的第一个插补点。以后再以 (x_b, y_b) 为圆心，以 l 为半径作圆，逐步求出其余各点坐标

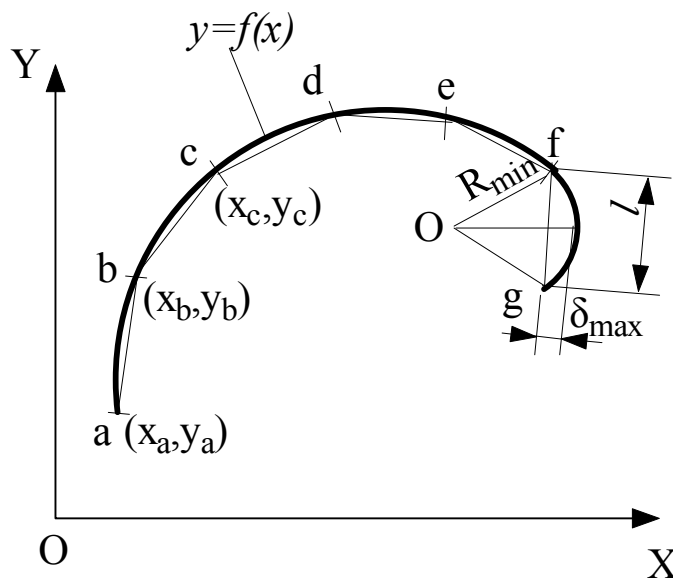


图 8-2 等插补段法求节点坐标

二、等插补误差法

这种方法是使各插补段的插补误差相等，并小于或等于允许的插补误差 ($\delta_{允}$)，这种确定插补长度和节点坐标的方法称为等插补误差法。由于曲线上的曲率是不同的，因此按此方法确定的插补段长度是不相等的，因此又叫“变步长法”。这种方法的优点是插补段数比“等插补段法”少，这对一些大型和形状复杂的非圆曲线零件具有较大的意义。

如果零件轮廓曲线的原始方程为 $y=f(x)$ ，允许的插补误差为 $\delta_{允}$ ，按等插补误差法计算节点坐标的步骤如下：

(1) 以曲线起点为圆心，以允许的误差 $\delta_{允}$ 为半径，作圆 a (见图 8-3 所示)，其方程为

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \delta_{允}^2 \quad (8-6)$$

(2) 作圆 a 与曲线 $y=f(x)$ 的公切线，得二切点 (X_0, Y_0) ， (X_1, Y_1) 。

由于曲线方程 $y=f(x)$ 和圆 a 的方程是已知的，所以可以求出该公切线方程

$$y = kx + b$$

式中 $k = \tan \alpha$ 。由图 8-3 知

$$k = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} \quad (8-7)$$

欲求出 X_1, Y_1 和 X_0, Y_0 需解联立方程组：

$$\begin{aligned} f'(X_1) &= \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} \\ f(X_1) &= Y_1 \\ F'(X_0) &= \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} \\ F(X_0) &= Y_0 \end{aligned} \quad (8-8)$$

式中 $y=f(x)$ 表示圆的方程，由式 (8-8) 求出 X_0, Y_0, X_1, Y_1 后，即可按式 (8-7) 求得 k 。

(3) 过圆心点 (X_0, Y_0) ，作斜率为 k 的直线：

$$y - y_0 = k(x - x_0) \quad (8-9)$$

(4) 求直线和曲线 $y=f(x)$ 的交点，即求方程

$$\begin{cases} y = f(x) \\ y = k(x - x_0) + y_0 \end{cases} \quad (8-10)$$

的交点 (x_1, y_1) 。于是 (x_1, y_1) 便是第一个插补节点的坐标。

(5) 再从 (x_1, y_1) 点开始重复上述过程，可求得其余插补节点的坐标。

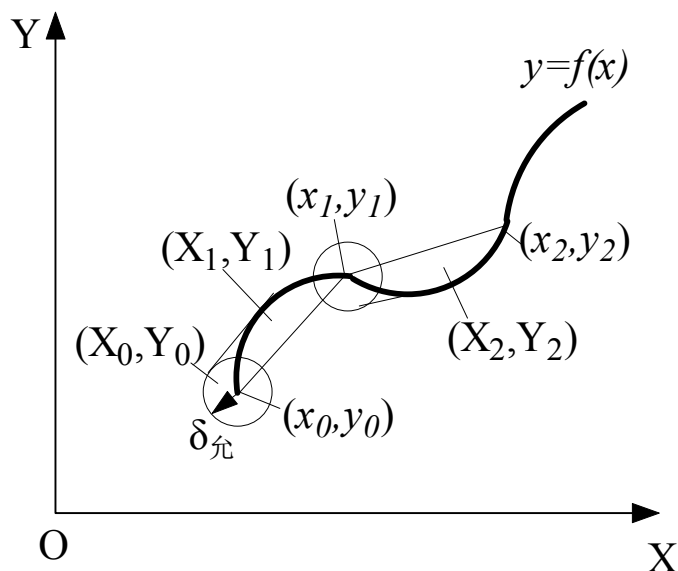


图 8-3 等插补误差

三、其它方法

1、等距法

无论“等插补段法”还是“等插补误差法”其计算方法都比较复杂，在生产实际中经常采用其它直线逼近非圆曲线的计算方法。等距法就是其中的一种，其特点是使每个插补段的一个坐标增量相等，即在直角坐标系中使相邻两节点的 X 坐标增量或 Y 坐标增量相等；在极

坐标系中，相邻节点间的转角增量或向径坐标增量相等。

2、逐点逼近法

由于“等插补误差法”计算比较复杂，在实际应用中，以等插补误差直线逼近节点计算法的原理为依据，把解方程组、求节点坐标的过程简化为线性的数学模型，以便方便地按此模型计算出节点坐标。这种方法就是逐点逼近法。其基本步骤如下：

(1) 设初始值，使起点 $x_a = x_{\min}$ ，如图 8-4 所示。

(2) 在自变量 x 的方向上，以允许插补误差 δ 递增逐点扫描判断，使曲线上节点的切线与以 δ 为半径的误差圆相切。在实际计算中，判断曲线每次递增的节点处切线与圆的交点是否存在，一旦交点不存在，即在自变量 x 的方向上退出一个 δ ，并将该点 T 近似作为圆与曲线的公切线 PT ，同时计算出公切线的斜率 k 。

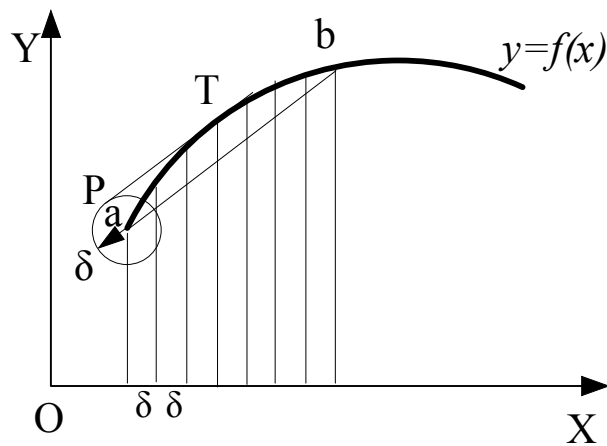


图 8-4 逐点逼近法

(3) 继续在自变量 x 的方向上以 δ 递增逐点扫描判断，直到递增节点与 a 点的连线与 PT 平行。在计算中，判断连线与 PT 斜率的方向，若连线斜率相对于 PT 的方向改变，即在 x 方向上退出一个 δ ，并将该点 b 近似作为 a 点平行于 PT 公切线与曲线的交点，求得所求节点 b 的坐标。

以 b 点作为起点，重复 (2)、(3) 步骤，并在每次重复步骤之前，要判断 x 之值是否大于给定的 x_{\max} 。若大于，则取最后一个点的 x 值为 x_{\max} ，并终止程序。

3、用圆弧插补非圆曲线

非圆曲线采用圆弧插补时，其插补方法有多种，但其共同点是要计算出各段圆弧的起、终点坐标和圆心坐标以及半径。实际应用中，经常采用上述的“等插补段法”或“等插补误差”法计算轮廓上的节点坐标，然后用三点定一圆的圆弧插补方法计算出各段圆弧的圆心坐标和半径。其步骤如下：

(1) 通过 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3)$ 三点作圆。圆的方程式为：

$$\begin{vmatrix} x^2 + y^2 & x & y & 1 \\ x_1^2 + y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

(2) 求圆心坐标

$$\begin{cases} x_{o1} = -\frac{D}{2} \\ y_{o1} = -\frac{E}{2} \end{cases}$$

(3) 计算圆弧半径

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 + E^2 - 4F}$$

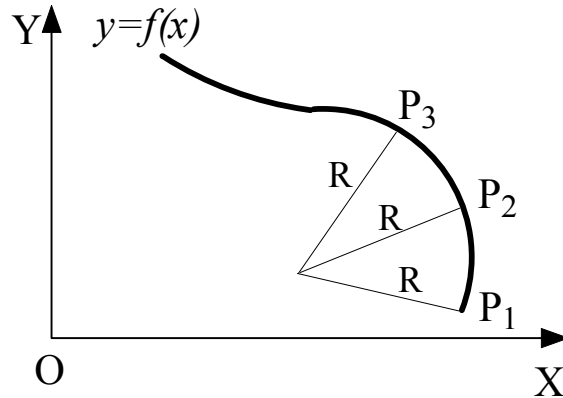


图 8-5 三点求圆

§ 8-2 列表曲线轮廓零件编程中的数学处理

列表坐标点给出的零件轮廓，其中一些列表轮廓本来是有原始方程的，但其方程式比较复杂，不使用通常数学表达式表示，设计零件时，设计人员根据精度要求，计算出其坐标数据，并以表格形式标示在零件图纸上，这样的零件也标称为列表轮廓零件；而在航空、航天、造船、汽车及一般机器制造工业的生产实际中，通常所说的列表轮廓的列表数据几乎都是由实验或测绘等方法取得的，如飞机的机头罩、梁、肋、框，发动机的叶片，样板、凸轮、模具等等。图 8-6 是某型号飞机的机翼，它的形状是由风洞实验求得的。构成这种曲面的方法是先用测量法取得若干个截面形状，而每个截面形状又是由几十个点的坐标确定的。检测机翼截面形状的样板，则是列表曲线轮廓零件的例子。在这种情况下，不论列表曲线零件或是曲面零件，其上各点坐标之间没有严格的连接规律。但在这类零件的技术要求中，往往规定所得曲线或曲面要光滑地通过所有的坐标点，而且精度高的 $\pm 0.01\text{mm}$ ，表面粗糙度要求 $\text{Ra}0.8\sim 1.6$ 。

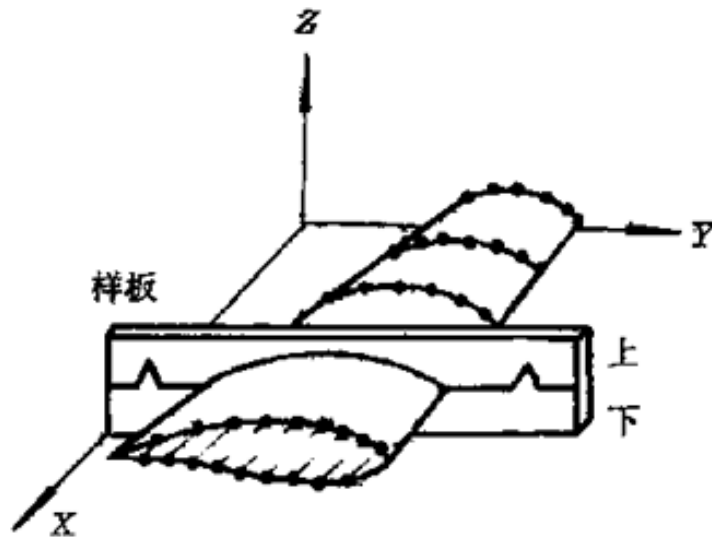


图 8-6 列表曲线（曲面）的例子

这类列表轮廓零件在以传统的工艺方法加工时，其加工质量完全取决于钳工的技术水平，且生产效率极低。现在广泛采用数控机床加工，虽然使产品质量易于保证，生产效率提高，但加工程序编制上遇到了较大的困难。其难点之一是在与这类零件比那些用数学方程式描述的曲线（如凸轮类零件）和曲面（如球面、螺旋面等）复杂，因而数学模型建立比较麻烦。用数学方程式描述的零件轮廓，编程时可以直接用该方程式作为数学处理的原始方程，进行插值计算、斜率计算等；对列表轮廓必须选择某一数学方程来描述（拟合）所处理的曲线或曲面，根据它来进行与程序编制有关的各种计算。此外，由于一般的数控机床的控制系统通常仅有直线、圆弧插补功能，不能加工任意的轮廓曲线，这就存在着如何控制刀具中心的运动轨迹逼近被加工的曲线或曲面问题，需要进行复杂的处理，才能获得特定数控机床的加工程序。由此可知，编制这类零件的加工程序比直线—圆弧轮廓零件要困难的多，再用手工编程方法是不可能完成的。必须借助计算机辅助编程系统来完成。

一、列表曲线零件（计算机辅助）编程的思路

1、列表曲线零件（计算机辅助）编程的流程图

列表曲线轮廓零件（计算机辅助）编程的流程，可以用框图表示在图 8-7 上，即根据零件图纸分析原始数据和进行工艺处理，然后（由计算机进行）数学处理和后置处理，最后获得零件的加工程序单。

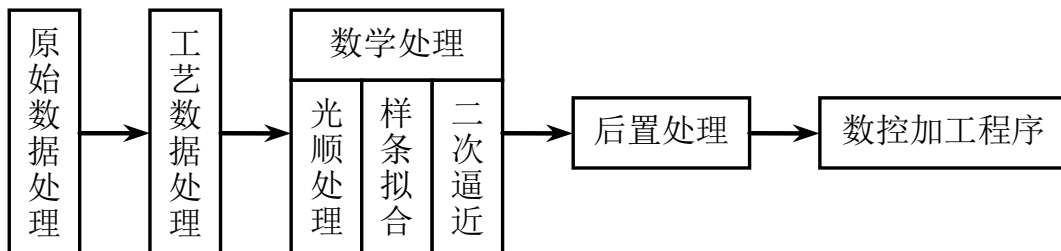


图 8-7 列表曲线轮廓零件（计算机辅助）编程流程

2、列表曲线零件（计算机辅助）编程步骤

列表曲线零件编程步骤和其它直线-圆弧轮廓零件和非圆曲线轮廓零件编程一样，仅具体内容完全不同。

(1) 工艺分析

即明确加工内容和技术要求，并在此基础上确定零件的装夹方法、加工路线、加工用量等工艺参数。

(2) 数学处理

数学处理就是选定一个描述列表曲线的数学方程式，并要求方程式表示的零件轮廓曲线应该通过给定的型值点（坐标点），或与所给定的型值点位置之差在允许的误差范围内，根据它计算插值点的坐标、斜率等，一般称之为第一次逼近；其次在决定插值密度时，还要考虑数控机床控制机的插补功能。例如控制机仅具有直线插补和圆弧插补功能，则必须将第一次逼近的结果数据进一步处理成直线或圆弧数据，这被称之为编程中的第二次逼近。当然，有时也可以采用一、二次逼近统一起来的处理方法，即直接用分段圆弧逼近列表曲线，使得编程工作得以简化，但不是什么情况下都可以的。

我们知道，如果将所有的点用一个方程式来描述，就会使方程式过于复杂，有时甚至是不可能的。因此，通常一个列表曲线轮廓形状是用许多参数不同的同样方程式来描述的。一般用来描述列表曲线轮廓形状的数学方程式应满足如下条件：

方程式表示的零件轮廓曲线应该通过给定的型值点（坐标点），或与所给定的型值点位置之差在允许的误差范围内；

方程式力求简单，一般为二次曲线方程，最多是三次曲线方程；

曲线应光滑连接，特别是由几个曲线方程式表示列表曲线时，方程式之间的连接处应光滑，即在连接点处有连续的一阶导数或二阶导数；

方程式所描述的轮廓曲线应与给出的型值点的轮廓曲线凸凹性一致，即不应增加新的拐点，以满足工程上加工精度的要求。

满足上述要求的列表曲线函数逼近法很多，除早期的牛顿插值等方法外，近些年发展起来的有样条插值法和一些列表曲线新的拟合方法。如目前在生产实际中常用的三次样条、圆弧样条、双圆弧样条、参数样条、B样条等数学方法。

光顺处理，它处于曲线拟合之前。“光顺”是一个工程术语，包括“光滑”和“顺眼”两方面含义。要得到一条光滑且看起来舒服顺眼的列表曲线，其给出的型值点坐标数据必须准确无误。实际上由于很多列表点数据是通过实验方法测量得出的，或通过测绘得出，必然存在误差，而且这种误差是随机的，可正可负，可在局部范围内产生，也可在整个范围内产生。用这种数据描述曲线，其宏观轮廓外形是满足要求的，只是一些或个别点产生误差而造成不光顺。所以在编程时首先要通过“光顺处理”对输入的列表点坐标数据进行检查，找出坏点予以修正，以正确的数据进行曲线拟合处理。

(3) 后置处理

经过数学处理后，虽然得到了逼近列表曲线的直线或圆弧的数据，但还不能直接用于数控加工，必须按确定的加工路线和所用的数控机床控制机的输入要求，对直线或圆弧数据进一步加工和编排，最后输出加工程序单。这主要是因为不同的数控机床控制机其程序格式有很大的差异，所以后置处理结果是专用的。

二、三次样条曲线

1、三次样条函数定义

三次样条函数是对绘图员借助于“样条”(一根富有弹性的木条或有机玻璃条)用手工绘制模线的数学模拟。绘图员绘制模线时,先是使“样条”产生弹性弯曲,并使其初步通过各型值点,然后在各点处分别用“压铁”压住,经过适当的调整,便形成了一条所需要的曲线(图 8-8)。如果把“样条”看成是弹性细梁,压铁看成作用在这梁的某些点上的集中载荷,那就把上述画模线的过程在力学上抽象为求弹性细梁在外加集中载荷下产生的弯曲变形。

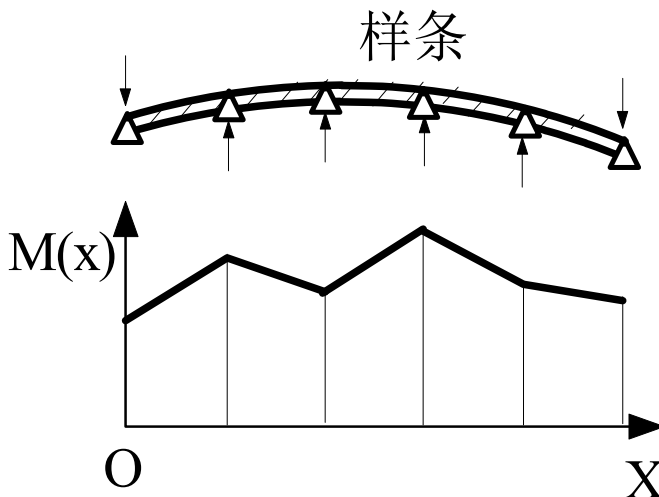


图 8-8 “样条”的弹性弯曲

切出相邻压铁之间的一段梁来看,只有梁的两端有集中力作用,因此弯矩 $M(x)$ 在这段梁内是线性函数,从整个梁来看,弯矩是连续的折线函数(见图 8-9)。下面将予以证明。

根据欧拉公式有

$$\frac{1}{R(x)} = \frac{M(x)}{EJ}$$

式中 $M(x)$ 是弯矩、 $R(x)$ 是曲率半径随着点的位置而变化。 E 为杨氏模量、 J 是几何惯性矩,当梁的材料和形状确定后,是不变的常数。由于平面曲线 $y=f(x)$ 的曲率为

$$R(x) = \frac{[1+(y')^2]^{\frac{3}{2}}}{y''}$$

因此有

$$\frac{y''}{[1+(y')^2]^{\frac{3}{2}}} = \frac{M(x)}{EJ}$$

对于“小挠度”曲线。即 $|y'| \ll 1$ 的曲线,上述方程近似于

$$y''(x) = \frac{M(x)}{EJ} \quad (8-11)$$

由于在各小段上 $M(x)$ 是线性函数,由上式可知,在各小段上,函数 $y(x)$ 是 x 的三次多项式。在整个梁上, $y(x)$ 就是分段三次函数,但它具有直到二阶的连续导数。这一力学背景导致了数学上的三次样条函数概念的建立。

现给出三次样条函数的定义。设在区间 $[x_0, x_n]$ 上有点列 $x_0 < x_1 < \dots < x_n$, 对应纵坐标为

x	x ₀	x ₁	x ₂ ...	x _n
y	y ₀	y ₁	y ₂ ...	y _n

若有函数 $y(x)$ 适合下列条件:

- ① $y(x_i) = y_i \quad (i=0, 1, 2, \dots, n)$;
- ② $y(x)$ 在整个区间 $[x_0, x_n]$ 上有二阶连续导数;
- ③ 在每个子区间 $[x_{i-1}, x_i]$ ($i=1, 2, \dots, n$) 上 $y(x)$ 是 x 的三次多项式。

则称 $y(x)$ 是关于已知插值条件的三次样条函数, 由样条函数构成的曲线称为样条曲线。

2、用型值点处的二阶导数表示的三次样条曲线 $y(x)$

由上述知, 因为样条函数的二阶导数是线性的, 故在子区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 上有

$$y''(x) = ax + b \quad (8-12)$$

设在点 x_{i-1}, x_i 处的二阶导数表示为 M_{i-1}, M_i , 则有

$$ax_{i-1} + b = M_{i-1}$$

$$ax_i + b = M_i \quad \text{解得 } a, b \text{ 为}$$

$$a = \frac{M_i - M_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad b = \frac{M_{i-1} \cdot x_i - M_i \cdot x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}$$

设 $h_i = x_i - x_{i-1}$ 并将上式代入式 (8-12), 则

$$y''(x) = \frac{x_i - x}{h_i} M_{i-1} + \frac{x - x_{i-1}}{h_i} M_i \quad (8-13)$$

其中 $x_{i-1} < x < x_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$

将式 (8-13) 连续积分两次, 并利用条件 $y(x_{i-1}) = y_{i-1}, y(x_i) = y_i$, 得一方程组解出积分常数, 加以整理后得:

$$y'(x) = -\frac{(x_i - x)^2}{2h_i} M_{i-1} + \frac{(x - x_{i-1})^2}{2h_i} M_i - \frac{h_i}{6} (M_i - M_{i-1}) + \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} \quad (8-14)$$

$$y(x) = \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} M_{i-1} + \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i} M_i + (y_{i-1} - \frac{h_i^2}{6} M_{i-1}) \frac{x_i - x}{h_i} + (y_i - \frac{h_i^2}{6} M_i) \frac{x - x_{i-1}}{h_i} \quad (8-15)$$

式 (8-15) 就是 $S(x)$ 在每个子区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 上的公式。它是一个三次多项式, 式中未知数 $M_{i-1}, M_i (i=1, 2, \dots, n)$, 共 $n+1$ 个。为了求出未知数 M_0, M_1, \dots, M_n , 可以利用 $y(x)$ 在 x_i 处具有一阶连续导数条件, 由式 (8-14) 得 $y'(x)$ 在 x_i 处的左右极限为

$$y'(x_i^-) = \frac{h_i}{6} M_{i-1} + \frac{h_i}{3} M_i + \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i}$$

$$y'(x_i^+) = -\frac{h_{i+1}}{3} M_i - \frac{h_{i+1}}{6} M_{i+1} + \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}}$$

根据连续条件 $y'(x_i^-) = y'(x_i^+)$, 经整理可得三个相邻型值点上二阶导数关系式:

$$(1 - \alpha_i) M_{i-1} + 2M_i + \alpha_i M_{i+1} = \beta_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (8-16)$$

$$\text{式中 } \alpha_i = \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}} \quad \beta_i = 6 \frac{\frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i}}{h_i + h_{i+1}}$$

式(8-16)称为“M关系式”，它是一个有 $n-1$ 个方程的线性方程组，含 $n+1$ 个未知数 M_0, M_1, \dots, M_n ；这完全确定它们，还必须再加上两个端点条件。常用的端点条件有：

① 给出首末两端点处的二阶导数 M_0 、 M_n 。通常令 $M_0 = 0$ ， $M_n = 0$ ，几何意义为：在 x_0 左边以及的 x_n 右边各与直线相切。称为自由端点。

② 给出首末两端点处的一阶导数 y'_0 、 y'_n 。这时可应用 $y'(x_i^-)$ 和 $y'(x_i^+)$ 表达式分别写出 x_0 与 x_n 二端点的一阶导数表达式，然后得到

$$y'_0 = -\frac{h_1}{3}M_0 - \frac{h_1}{6}M_1 + \frac{y_1 - y_0}{h_1}$$

$$y'_n = \frac{h_n}{6}M_{n-1} + \frac{h_n}{3}M_n + \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n}$$

将上述两式与式(8-16)联立，得到由 $n+1$ 个方程组成的线性方程组

$$\begin{cases} -\frac{h_1}{3}M_0 - \frac{h_1}{6}M_1 = y'_0 - \frac{y_1 - y_0}{h_1} \\ (1 - \alpha_1)M_0 + 2M_1 + \alpha_1M_2 = \beta_1 \\ \dots\dots \\ (1 - \alpha_i)M_{i-1} + 2M_i + \alpha_iM_{i+1} = \beta_i \\ \dots\dots \\ (1 - \alpha_{n-1})M_{n-1} + 2M_n + \alpha_{n-1}M_n = \beta_n \\ \frac{h_n}{6}M_{n-1} + \frac{h_n}{3}M_n = y'_n - \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} \end{cases}$$

由于 M 关系式是三对角线方程组，即它的系数矩阵是三对角线方阵，因此可用“追赶法”求解。求出各点 M 值后，即得出三次样条函数及各点的一阶导数值。

3、用型值点处一阶导数表示的三次样条曲线

为方便起见，我们先来解决在 $[0, 1]$ 区间上带一阶导数的插值问题。设自变量为 u ，

$0 \leq u \leq 1$ ，对应于两个端点的函数值与一阶导数分别为 y_0, y_1, y'_0, y'_1 。根据埃尔米特

(Hermite) 插值，可以在两个端点之间构造一段三次曲线。设该曲线段的方程为

$$y(u) = a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3$$

对 u 求导后有

$$y' = a_1 + 2a_2u + 3a_3u^2$$

将四个已知条件代入以上两式，

$$\begin{cases} y_0 = y(0) = a_0 \\ y_1 = y(1) = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 \\ y'_0 = y'(0) = a_1 \\ y'_1 = y'(1) = a_1 + 2a_2 + 3a_3 \end{cases}$$

可解得方程的四个系数 a_0 、 a_1 、 a_2 和 a_3 。

$$\begin{cases} a_0 = y_0 \\ a_1 = y'_0 \\ a_2 = 3y_1 - 3y_0 - 2y'_0 - y'_1 \\ a_3 = 2y_0 - 2y_1 + y'_0 + y'_1 \end{cases}$$

从而得到

$$y(u) = (2y_0 - 2y_1 + y'_0 + y'_1)u^3 + (3y_1 - 3y_0 - 2y'_0 - y'_1)u^2 + y'_0u + y_0$$

可以改写成

$$y(u) = y_0(2u^3 - 3u^2 + 1) + y_1(-2u^3 + 3u^2) + y'_0(u^3 - 2u^2 + u) + y'_1(u^3 - u^2)$$

令

$$\begin{cases} F_0(u) = 2u^3 - 3u^2 + 1 \\ F_1(u) = -2u^3 + 3u^2 \\ G_0(u) = u^3 - 2u^2 + u = u(u-1)^2 \\ G_1(u) = u^3 - u^2 = u^2(u-1) \end{cases} \quad (8-17)$$

则曲线方程为

$$y(u) = y_0F_0(u) + y_1F_1(u) + y'_0G_0(u) + y'_1G_1(u) \quad (8-18)$$

式中 $F_0(u)$ 、 $F_1(u)$ 、 $G_0(u)$ 、 $G_1(u)$ 称为埃尔米特基函数或三次混合函数，注意有

$$F_0(u) + F_1(u) \equiv 1$$

由 $y(u)$ 表达式可以看出， F_0 、 F_1 专门控制端点的函数值对曲线形状的影响，而同端点的导数无关； G_0 、 G_1 专门控制端点的一阶导数对曲线形状的影响，而同端点的函数值无关。或者说 F_0 、 G_0 控制左端点的影响， F_1 、 G_1 控制右端点的影响。图 8-9 为 $F_0(u)$ 、 $F_1(u)$ 、 $G_0(u)$ 、 $G_1(u)$ 的图形。

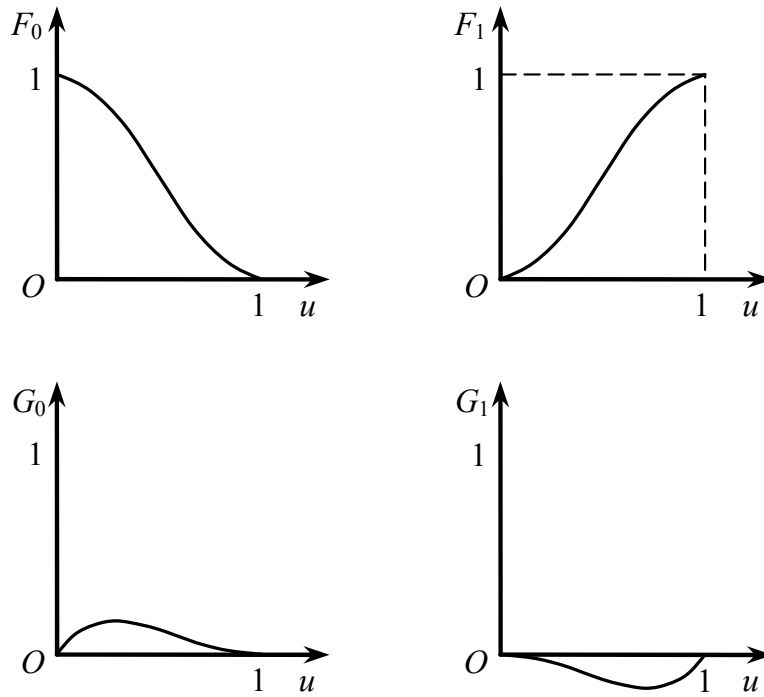


图 8-9 $F_0(u)$ 、 $F_1(u)$ 、 $G_0(u)$ 、 $G_1(u)$ 的图形

现在来解决在区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 上带一阶导数的插值问题。设对应区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 端点的函数值与一阶导数值分别为 y_{i-1} 、 y_i 、 m_{i-1} 、 m_i 。此时可以进行变量转换：

$$u = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} = \frac{x - x_{i-1}}{h_i}$$

式中 $h_i = x_i - x_{i-1}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 且有

$$y'_u = y'_x \frac{dx}{du} = y'_x h_i$$

仿 $y(u)$ 可以写出

$$y_i(x) = y_{i-1} F_0(u) + y_i F_1(u) + h_i [m_{i-1} G_0(u) + m_i G_1(u)] \quad (8-19)$$

写成矩阵形式

$$y_i(x) = [F_0(u) \quad F_1(u) \quad G_0(u) \quad G_1(u)] \begin{bmatrix} y_{i-1} \\ y_i \\ h_i m_{i-1} \\ h_i m_i \end{bmatrix}$$

$$= [1 \quad u \quad u^2 \quad u^3] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{i-1} \\ y_i \\ h_i m_{i-1} \\ h_i m_i \end{bmatrix} \quad (8-20)$$

($i=1, 2, \dots, n$)

用上述方程式确定的 $y(x)$ ，它本身及其一阶导数 $y'(x)$ 在 $[x_0, x_n]$ 上的连续性，是由各段的插值条件保证的，不论 m_0 、 m_1 、 \dots 、 m_n 取什么值， $y(x)$ 及 $y'(x)$ 总是连续的。但是若

任意地选取 m_0, m_1, \dots, m_n 。就不能保证 $y''(x)$ 在 $[x_0, x_n]$ 上连续, 所以 m_i 应满足某些条件。

对 (8-19) 求两次导后, 得到

$$y_i''(x) = \frac{y_{i-1}F_0''(u)}{h_i^2} + \frac{y_iF_1''(u)}{h_i^2} + \frac{m_{i-1}G_0''(u)}{h_i} + \frac{m_iG_1''(u)}{h_i} \quad (8-21)$$

由于

$$\begin{cases} F_0''(u) = 12u - 6 \\ F_1''(u) = -12u + 6 \\ G_0''(u) = 6u - 4 \\ G_1''(u) = 6u - 2 \end{cases}$$

对于第 i 段曲线的末点 ($u = 1$) 有

$$y_i''(x_i) = \frac{6y_{i-1}}{h_i^2} + \frac{6y_i}{h_i^2} + \frac{2m_{i-1}}{h_i} + \frac{4m_i}{h_i} \quad (8-22)$$

对于第 $i+1$ 段曲线的始点 ($u = 0$) 有

$$y_{i+1}''(x_i) = \frac{6y_i}{h_{i+1}^2} + \frac{6y_{i+1}}{h_{i+1}^2} - \frac{4m_i}{h_{i+1}} - \frac{2m_{i+1}}{h_{i+1}} \quad (8-23)$$

若 $y'(x)$ 在 $x = x_i$ 处连续, 则 $y_i''(x_i) = y_{i+1}''(x_i)$, 即

$$\frac{6y_{i-1}}{h_i^2} + \frac{6y_i}{h_i^2} + \frac{2m_{i-1}}{h_i} + \frac{4m_i}{h_i} = \frac{6y_i}{h_{i+1}^2} + \frac{6y_{i+1}}{h_{i+1}^2} - \frac{4m_i}{h_{i+1}} - \frac{2m_{i+1}}{h_{i+1}}$$

整理后有

$$\frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}} m_{i-1} + 2m_i + \frac{h_i}{h_i + h_{i+1}} m_{i+1} = 3 \left(\frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}} \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} + \frac{h_i}{h_i + h_{i+1}} \cdot \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} \right) \quad (8-24)$$

引入记号

$$\lambda_i = \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}}, \mu_i = 1 - \lambda_i$$

$$c_i = 3 \left(\frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}} \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} + \frac{h_i}{h_i + h_{i+1}} \cdot \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} \right)$$

则 (8-20) 式可以写成

$$\lambda_i m_{i-1} + 2m_i + \mu_i m_{i+1} = c_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (8-25)$$

此式称为 m 关系式。虽然此时还不知道各节点上的 m_i , 但可以通过这些为保证二阶导数连续而建立起来的关系式解出 m_i 。以上这些关系式是包含 m_0, m_1, \dots, m_n 这 $n+1$ 个未知量的线性方程组, 方程的个数是 $n-1$ 个, 还不足以完全确定这些 m_i 。为了完全确定它们, 还必须添加两个条件。这两个条件通常根据对边界节点 x_0 与 x_n 处的附加要求来提供, 所以

称为端点条件，常用的端点条件有：

(1) 已知曲线在两端点处的斜率 m_0 与 m_n ，这时 (8-25) 就化成关于 $n-1$ 个未知量 m_1, \dots, m_{n-1} 的 $n-1$ 个线性方程，其中第一个方程为

$$2m_1 + \mu_1 m^2 = c_1 - \lambda_1 m_0$$

第 $n-1$ 个方程为

$$\lambda_{n-1} m_{n-2} + 2m_{n-1} = c_{n-1} - \mu_{n-1} m_n$$

从而即可以求出唯一的解。

(2) 给定曲线在两端点处的二阶导数 M_0 与 M_n ，这时可以在 (8-21) 中令 $i=0$ 及左端为 M_0 ，得

$$2m_0 + m_1 = \frac{3(y_1 - y_0)}{h_1} - \frac{h_1}{2} M_0 = c_0$$

在式 (8-22) 中令 $i=n$ 及右端为 M_n ，得

$$m_{n-1} + 2m_n = \frac{3(y_n - y_{n-1})}{h_n} - \frac{h_n}{2} M_n = c_n$$

特别当 $M_0 = 0$ 或 $M_n = 0$ 时，这种端点条件称为自由端点条件。当曲线在端点处出现拐点或与以直线相切时，就可以用这种端点条件。

在求出 m_i 后，分段三次曲线即可确定，整条曲线的表达式为

$$y(x) = y_i(x) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (8-26)$$

4、三次样条函数曲线的双圆弧拟合

列表曲线用三次样条函数描述后，并不能直接用于编写数控加工程序，必须将第一次逼近的结果数据进一步处理成直线或圆弧数据，这被称之为编程中的第二次逼近。

三次样条插值过程见图 8-10 所示，其中数据输入内容是：型值点的纵、横坐标，插值点的横坐标以及端点条件。输出结果包括了各点（给出的型值点和插值点）的坐标和一阶、二阶导，这给应用圆弧插补逼近三次样条曲线的第二次数学描述带来了极大的便利。

所谓双圆弧拟合是指在样条曲线上的每两个相邻节点（型值点和插值点）之间，利用已知的样条端点斜率，作两段彼此相切的圆弧来代替原来的一段三次样条曲线。

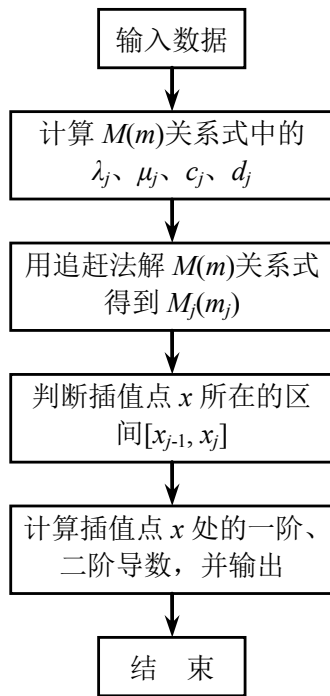


图 8-10 三次样条插值程序流程图

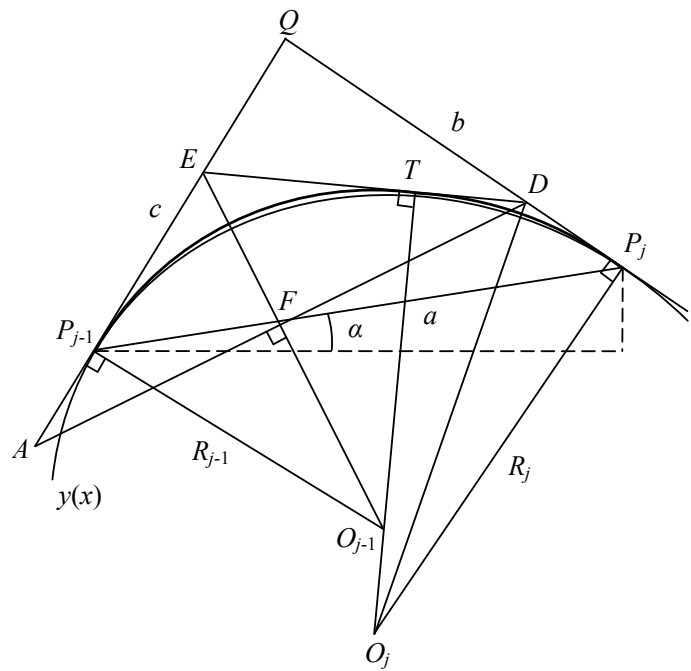


图 8-11 用圆弧插补样条曲线

如图 8-11 所示，已知由样条函数 $y(x)$ 描述的列表曲线上相邻两点 P_{j-1} 、 P_j 的坐标及一阶导数，便可求出相切的两段圆弧。

图中 Q 是过 P_{j-1} 、 P_j 的切线的交点，取适当的长度 l ，在 P_jQ 上截取 $\overline{P_jD} = l$ ，并在 QP_{j-1} 的延长上截取 $\overline{P_{j-1}A} = l$ ，连接 AD 。作 AD 的中垂线，交 $P_{j-1}Q$ 于 E ，交 AD 于 F 。连接 ED 。过 P_{j-1} 作 $P_{j-1}Q$ 的垂线交于 EF 的延长线于 O_{j-1} ，过 O_{j-1} 作 ED 的垂线，交 ED 于 T 点。过 P_j 作 P_jQ 的垂线与 $O_{j-1}T$ 的延长线交于 O_j 。分别以 O_{j-1} 、 O_j 为圆心，以 $O_{j-1}P_{j-1}$ 、 O_jP_j 为半径作圆弧，则此二圆弧必相切于 T 点。

由于两段圆弧切点 T 的位置与 l 的大小有关，只要给出适当的 l 值，就可以对对应求出一个切点 T ，所以切点有无穷多个，并可以证明 T 的轨迹为一个过 P_{j-1} 、 P_j 和 $\triangle QP_{j-1}P_j$ 内心的圆。

下面给出切点 T 为 $\triangle QP_{j-1}P_j$ 内心时的算法。

(1) 切点 T 坐标计算

第一步计算出 $\triangle QP_{j-1}P_j$ 的边长

根据已知点 P_{j-1} 、 P_j 的坐标及一阶导数 y'_{j-1} 和 y'_j ，则有方程

$$\begin{cases} y_Q = y'_{j-1}(x_Q - x_{j-1}) + y_{j-1} \\ y_Q = y'_j(x_Q - x_j) + y_j \end{cases}$$

解上述方程得到 x_Q 、 y_Q ，即 Q 点坐标。

根据 $\triangle QP_{j-1}P_j$ 的顶点坐标，分别计算出三角形的边长 a 、 b 、 c （见图 8-11）。

第二步计算 \overline{EP}_{j-1} 和 \overline{DP}_j

设 $\triangle QP_{j-1}P_j$ 的内切圆半径为 r , 三角形的高位 h , 则

$$\triangle QP_{j-1}P_j \text{ 的面积} = \frac{1}{2}ah = \frac{1}{2}r(a+b+c)$$

即得

$$\frac{h}{r} = \frac{a+b+c}{a}$$

另外

$$\frac{h}{r} = \frac{b}{\overline{DP}_j}$$

于是的
$$\overline{DP}_j = \frac{ab}{a+b+c} \quad (\overline{DP}_j = \overline{DT})$$

同理可求得

$$\overline{EP}_{j-1} = \frac{ac}{a+b+c} \quad (\overline{EP}_{j-1} = \overline{ET})$$

第三步求切点 T 的坐标

因为 E 点坐标为

$$\begin{cases} x_E = x_{j-1} + \frac{\overline{EP}_{j-1}}{c}(x_Q - x_{j-1}) \\ y_E = y_{j-1} + \frac{\overline{EP}_{j-1}}{c}(y_Q - y_{j-1}) \end{cases}$$

所以切点 T 的坐标为

$$\begin{cases} x_T = x_E + \frac{\overline{ET}}{a}(x_j - x_{j-1}) \\ y_T = y_E + \frac{\overline{ET}}{a}(y_j - y_{j-1}) \end{cases}$$

(2) 圆心 O_{j-1} 和 O_j 的坐标

设 $K_1 = tg\alpha$, 则 \overline{TO}_{j-1} 直线方程为

$$y = \frac{1}{-K_1}(x - x_T) + y_T$$

设 $K_2 = y'_{j-1}$, 则 \overline{TO}_{j-1} 直线方程为

$$y = \frac{1}{-K_2}(x - x_{j-1}) + y_{j-1}$$

解以上二式的 O_{j-1} 的坐标为

$$\begin{cases} x_{o_{j-1}} = \frac{K_2(x_T + K_1 y_T) - K_1(x_{j-1} + K_2 y_{j-1})}{K_2 - K_1} \\ y_{o_{j-1}} = \frac{(x_{j-1} - K_2 y_{j-1}) - (x_T - K_1 y_T)}{K_2 - K_1} \end{cases}$$

同理，解的 $\overline{O_j P_j}$ 和 $\overline{TO_j}$ 直线方程（设 $K_3 = y'_j$ ），可得 O_j 的坐标

$$\begin{cases} x_{o_j} = \frac{K_1(x_j + K_3 y_j) - K_3(x_T + K_1 y_T)}{K_1 - K_3} \\ y_{o_j} = \frac{(x_T - K_1 y_T) - (x_j - K_3 y_j)}{K_1 - K_3} \end{cases}$$

(3) 求半径 R_{j-1} 和 R_j

$$R_{j-1} = \sqrt{(x_{o_{j-1}} - x_{j-1})^2 + (y_{o_{j-1}} - y_{j-1})^2} \quad (8-27)$$

$$R_j = \sqrt{(x_{o_j} - x_j)^2 + (y_{o_j} - y_j)^2} \quad (8-28)$$

上述用两段相切的圆弧逼近样条曲线时，如何控制圆弧偏离轮廓外形的最大量不超过允许的插补误差呢？其控制插补精度的方法如下：

把图 8-11 中 T 点附近放大，见图 8-12 所示。插补精度是以三次样条函数 $y(x)$ 为基准来检查的，为便于计算，以切点 T 的法线上距 $y(x)$ 的距离 ε 表示误差。如图 8-12 所示，因为误差值数量比较小，可以近似地认为 VqT 是一直角三角形。于是有

$$\varepsilon = (y_v - y_T) \cos \alpha \quad (8-29)$$

式中 y_v 可以由“ x_T ”值代入 $y(x)$ 表达式中求得， $\cos \alpha$ 由 P_{j-1} 、 P_j 坐标求得（参见图 8-11）。

若 $\varepsilon > \delta$ ，则在中间加密一点，即令

$$x_{j-1} + \frac{\Delta x_{j-1}}{2} \Rightarrow x_j$$

这里 Δx_{j-1} 是加密前 P_{j-1} 与 P_j 沿 x 轴的步距。然后以加密后的“ x_j ”代入 $y(x)$ 式中，得出加密后的“ y_j ”值，于是在 P_{j-1} 、 P_j （新点）两点间再作双圆弧。

这样重复前述插补方法，直到 $\varepsilon \leq \delta$ 为止。

5、三次样条曲线的直线逼近

用直线段插补三次样条曲线，虽然插补段数较多、程序长、又增加了尖角过度处理等问题，但有时因机床控制系统插补功能的限制，或因编程的需要，在加工一些曲线轮廓零件仍然采用直线逼近方法。

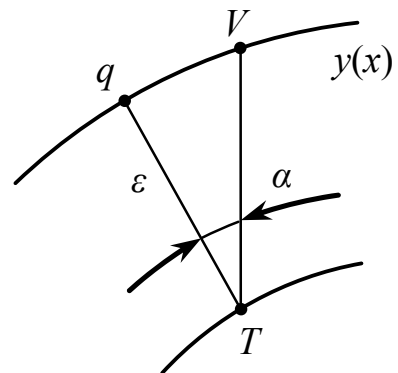


图 8-12 圆弧插补的精度控制

用直线插补三次样条函数曲线的方法有多种，这里仅以“逐点比较法”为例说明直线逼近三次样条函数曲线的方法。

假如图纸上给出一组型值点 $P_j(x_j, y_j)$ ($j=1, 2, 3, \dots, n$)，首先用三次样条函数描述构造一条三次样条曲线 $y(x)$ ，见图 8-13 所示。然后用逐点比较法确定直线插补段长度 和进行节点坐标计算。

首先考察三次样条曲线 $y(x)$ 上 $P_j P_{j+1}$ 段（见图 8-13）。在 $[A, B]$ 区间中点 M 处的 \overline{HG} 为

$$\overline{HG} = \frac{\overline{HN}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$$

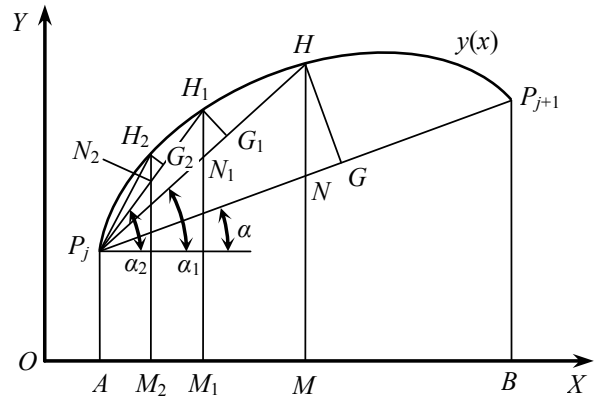


图 8-13 逐点比较法直线插补

式中 α 为弦线 $\overline{P_j P_{j+1}}$ 对 x 轴的倾角。

当 $\overline{HG} \leq \delta_{允}$ （程序编制时允许误差）时，在

$[A, B]$ 区间不在加密， $P_j P_{j+1}$ 样条弧直接用弦线 $\overline{P_j P_{j+1}}$ 近似。

当 $\overline{HG} > \delta_{允}$ 时，则需要，在 $[A, B]$ 区间上加密一点，此时应进一步考察 $P_j H$ 段。于是

在 $[A, M]$ 区间上取中点 M_1 ，其 $\overline{H_1 G_1}$ 为

$$\overline{H_1 G_1} = \frac{\overline{H_1 N_1}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1}}$$

式中 α_1 为弦线 $\overline{P_j H}$ 对 x 轴的倾角。

同理当 $\overline{H_1 G_1} \leq \delta_{允}$ 时，在 $[A, M]$ 区间不在加密， H 点便是第一个加密点，进而用同样的方法考察 HP_{j+1} 段。

当 $\overline{H_1 G_1} > \delta_{允}$ 时，则需要，在 $[A, M]$ 区间上加密一点，此时应进一步考察 $P_j H_1$ 段。于是

是在 $[A, M_1]$ 区间上取中点 M_2 ，其 $\overline{H_2 G_2}$ 为

$$\overline{H_2 G_2} = \frac{\overline{H_2 N_2}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2}}$$

式中 α_2 为弦线 $\overline{P_j H_1}$ 对 x 轴的倾角。

当 $\overline{H_2 G_2} \leq \delta_{\mu}$ 时，在 $[A, M_1]$ 区间不在加密， H_1 点便是第一个加密点，进而用同样的方法考察 $H_1 P_{j+1}$ 段。

当 $\overline{H_2 G_2} > \delta_{\mu}$ 时，则需要加密，在 $[A, M_1]$ 区间上要加密，进一步作法仿照上述过程重复进行。

进行逐段比较时，只要将横坐标 M, M_1, M_2 等代入 $y(x)$ 表达式中，便可计算出加密点 H, H_1, H_2 等的坐标及一阶导数。

6、三次样条的局限性、解决办法及使用中的几个问题

三次样条在曲线拟合中得到了广泛应用，它有许多优点，如能达到二阶连续，在构造样条时，只须事先给出很少的导数信息等等。但也确实存在一些局限性，其中主要是：

- (1) 只能处理平面曲线；
- (2) 只能处理小挠度的曲线；
- (3) 必须是单值函数，即 $x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n$ ；
- (4) 局部修改时牵涉到整个样条的重新计算；
- (5) 不能解决具有垂直切线的问题；
- (6) 当曲线中夹有直线段时拟合效果不好；
- (7) 在拟合有二阶导数不连续的曲线时，例如在直线与圆弧结合处，将产生较大的波动。

对于问题一、二、四可以用 B 样条等方法避免，而参数样条可以克服问题三和五。下面介绍解决第七个和第八个问题的处理方法。

在实际问题中，有时会遇到在一条曲线中夹有与曲线段相切的一段或多段直线的情况。若统一用三次样条函数去拟合，一方面对于直线部分拟合不好，同时在直线与曲线的连接处还会产生不应有的波动；若分段拟合，程序处理上又不方便。现介绍一种解决这一问题的方法，使得整条曲线具有统一的表达式，同时在直线段上严格为直线，而在直线与曲线的连接处不产生额外的波动。

前述 (8-25) 式加上端点条件可以用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} 2 & \mu_0 & & & & & & & & & & & 0 \\ \lambda_1 & 2 & \mu_1 & & & & & & & & & & \\ & & \dots & \dots & \dots & & & & & & & & \\ & & & \lambda_{i-1} & 2 & \mu_{i-1} & & & & & & & \\ & & & & \lambda_i & 2 & \mu_i & & & & & & \\ & & & & & \dots & \dots & \dots & & & & & \\ & & & & & & \lambda_{n-1} & 2 & \mu_{n-1} & & & & \\ 0 & & & & & & & \lambda_n & 2 & \mu_n & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ \dots \\ m_{i-1} \\ m_i \\ \dots \\ m_{n-1} \\ m_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \dots \\ c_{i-1} \\ c_i \\ \dots \\ c_{n-1} \\ c_n \end{bmatrix} \quad (8-30)$$

如果 $P_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ 、 $P_i(x_i, y_i)$ 两点之间为直线，只要在 (8-30) 中令

在平面上给出点列 $P_i(x_i, y_i)$ ($i=0,1,2,\dots,n$), 与型值点 P_i 相对应的累加弦长为

$$s_0=0$$

$$s_k = \sum_{i=1}^k l_i = \sum_{i=1}^k |P_{i-1}P_i| = \sum_{i=1}^k \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$$

$$(k = 0,1,2,\dots,n)$$

由此可得到如下数据表

	0	1	2		n
	0	1	2		n
	0	1	2		n

分别作插值函数 $x=x(s)$, $y=y(s)$ 。它们有 $x(s_i)=x_i$ 、 $y(s_i)=y_i$, 在 (s_0, s_n) 上二次连续可导, 都是 s 的分段三次多项式。

$x=x(s)$, $y=y(s)$ 可以用前面的三次样条去构造。

此种方法可以处理有垂直切线的曲线及封闭曲线可以得到较好的效果。有人采用累加弦长参数样条来拟合单位圆 (即圆心在坐标原点、半径为 1 的圆), 取圆上均匀分布的点作型值点

点, 用 $\delta_1 = |\sqrt{x^2(s) + y^2(s)} - 1|$ 来度量关于半径的误差, 结果如下:

型值点数	$ \delta r $
4	< 0.01
8	0.00112
12	0.000165

以上结果说明参数样条能有效地解决垂直切线问题。

因为参数 s 是曲线的近似弧长, 可以近似地认为

$$ds^2 = [dx(s)]^2 + [dy(s)]^2$$

即

$$\left[\frac{dx(s)}{ds} \right]^2 + \left[\frac{dy(s)}{ds} \right]^2 = 1$$

所以有

$$\left| \frac{dx}{ds} \right| \leq 1, \left| \frac{dy}{ds} \right| \leq 1$$

因此累加弦长参数样条能解决“大挠度”的问题。

四、圆弧样条

圆弧样条曲线, 就是使用圆弧这个最简单的二次多项式的数学表达式模拟样条, 分段合成一阶导数连续的曲线。其基本思路是: 在平面上给出 n 个型值点 $P_i(x_i, y_i)$ ($i=1,2,\dots,n$),

要求过每一个点作一段圆弧，且是相邻圆弧在相邻两点的弦的垂直平分线上相切。这样构成的曲线，总体上是一阶导数连续，分段等曲率的圆弧。因为有 n 个点，所以共有 n 段圆弧。如图 8-14 所示

由图中可知，这种方法是采用局部坐标系，能处理大挠度曲线，并且直接输入零件图纸上给出的型值点坐标，一次逼近列表曲线。

如图 8-15 所示，由于圆弧样条的算法中采用局部坐标系，所以取相邻型值点的弦线 $\overline{P_{j-1}P_j}$ 为 U 轴，与其对应的垂线为 V 轴。过 P_j 点的圆弧切线与弦 $\overline{P_{j-1}P_j}$ 、 $\overline{P_jP_{j+1}}$ 之间的夹角（弦切角）分别为 β_j 、 α_j ，两弦线之间的夹角为 φ_j ，于是由于切线的连续性可得

$$\alpha_j + \beta_j = \varphi_j$$

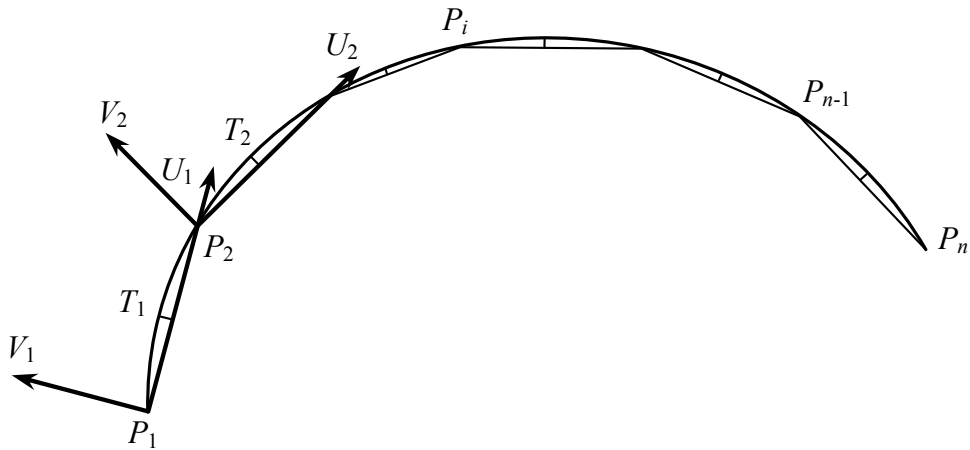


图 8-14 圆弧样条的作法

需要注意的是： α_j 、 β_j 是按在型值点左右侧来区分的， P_j 点右侧为 α_j ， P_j 点左侧为 β_j 。弦线夹角 φ_j 为一代数量，它可以通过型值点的坐标计算出来。 α_j 、 β_j 规定取锐角，且按图 8-16 取正负号。当曲线有拐点时，则两弦切角一正一负。对于曲线的起点只有 α_1 ，而曲线的终点只有 β_n 。

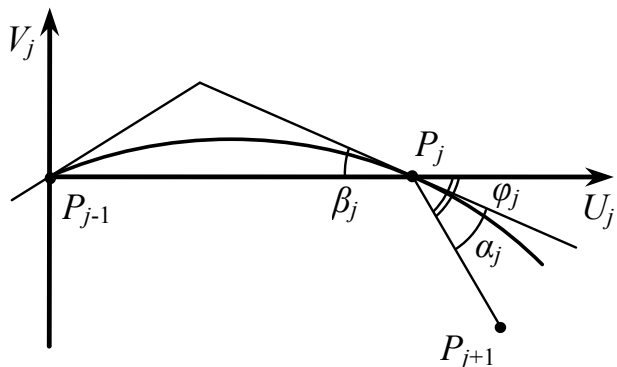


图 8-15 弦线夹角的计算

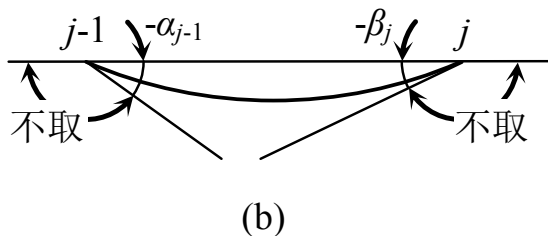
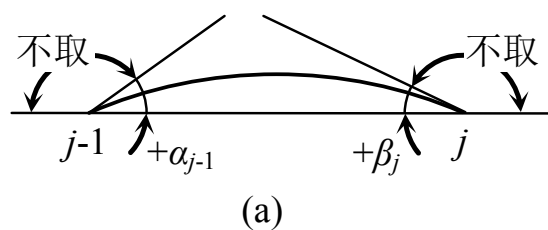


图 8-16 α_j 、 β_j 的取法

1、切点 T 坐标、圆心坐标、曲率及半径计算

图 8-17 中 $P_{j-1}T$ 、 P_jT 分别是通过 P_{j-1} 和 P_j 的两段圆弧，两圆弧的切点 T 落在弦长 $\overline{P_{j-1}P_j} = L_j$ 的中垂线上。

已知 $\overline{P_{j-1}T} = \overline{P_jT}$ ， $\Delta P_{j-1}TP_j$ 的内角和为 180° ，所以有

$$\angle TP_{j-1}P_j + \angle TP_jP_{j-1} + \gamma = \pi$$

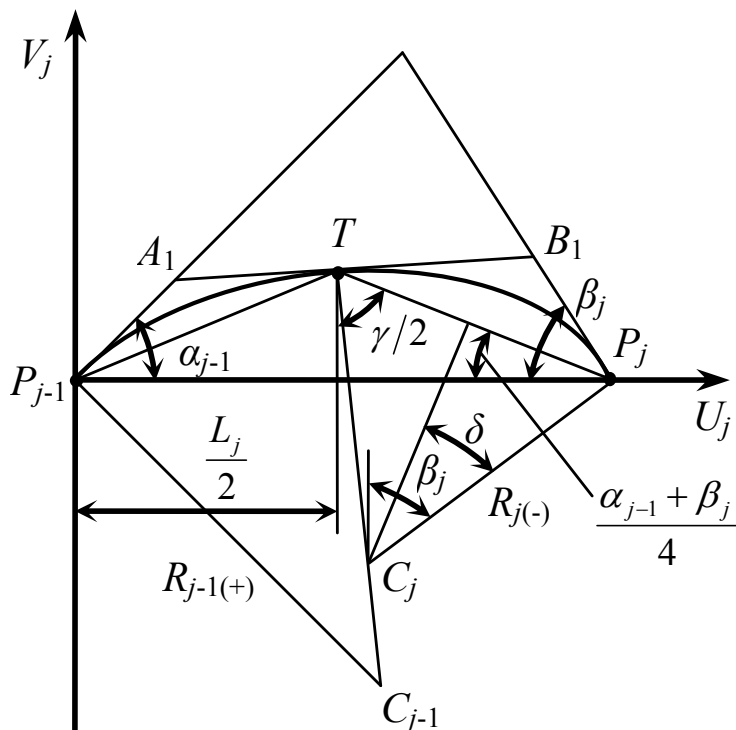


图 8-17 切点、圆心、曲率及半径的计算

由于 A_1TB_1 为一直线，且 ΔA_1TP_{j-1} 和 ΔB_1TP_j 都是等腰三角形，所以有

$$(\alpha_{j-1} - \angle TP_{j-1}P_j) + \gamma + (\beta_j - \angle TP_jP_{j-1}) = \pi$$

上述两式相加得

$$\alpha_{j-1} + 2\gamma + \beta_j = 2\pi$$

$$\gamma = \pi - \frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{2} \quad (8-33)$$

由式(8-33)可以看出,当 α_{j-1} 、 β_j 给定后, γ 角是确定的,而与T点位置无关。只有圆才有这种性质(同弧所对应的圆周角相等)。所以在三次样条双圆弧分析中,知道T点的位置有无穷多个,这里证明了T点的轨迹是过 P_{j-1} 、 P_j 、 $\Delta P_{j-1}QP_j$ 内心的圆。

因为

$$\angle TP_jP_{j-1} = \frac{\pi - \gamma}{2} = \frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{4}$$

所以切点T的坐标计算公式为

$$\begin{cases} U_T = \frac{L_j}{2} \\ V_T = \frac{L_j}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{4} \end{cases} \quad (8-34)$$

(j=2,3,...,n)

因为

$$\overline{P_jT} = \frac{L_j}{2 \sin \frac{\gamma}{2}} = \frac{L_j}{2} \cdot \frac{1}{\cos \frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{4}}$$

$$\delta = \beta_j - \frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{4} = \frac{3\beta_j - \alpha_{j-1}}{4}$$

所以 P_j 点处左边(加下标(-))的圆弧半径和曲率计算公式为

$$R_{j(-)} = \frac{L_j}{4} \cdot \frac{1}{\cos \frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{4} \sin \frac{3\beta_j - \alpha_{j-1}}{4}} \quad (8-35)$$

$$\rho_{j(-)} = -\frac{1}{R_{j(-)}} = -\frac{4}{L_j} \cos \frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{4} \sin \frac{3\beta_j - \alpha_{j-1}}{4} \quad (8-36)$$

这里应注意的是,以上推导中假定 β_j 为正时,曲线为凸的,即 $\rho_{j(-)} < 0$ 。为了使凸曲线的半径取正值,在曲率公式中人为的加了一个负号。

圆心 C_j 的坐标为

$$\begin{cases} U_{C_{j(-)}} = L_j - R_{j(-)} \sin \beta_j \\ V_{C_{j(-)}} = -R_{j(-)} \cos \beta_j \end{cases} \quad (8-37)$$

同理，可以求得 P_{j-1} 点右边圆弧的圆心坐标、半径即曲率（加下标 (+)）。不过此时对应的 $\delta = (3\alpha_{j-1} - \beta_j) / 4$ ，于是有

$$\begin{cases} U_{C_{j-1(+)}} = R_{j-1(+)} \sin \alpha_{j-1} \\ V_{C_{j-1(+)}} = -R_{j-1(+)} \cos \alpha_{j-1} \\ \rho_{j-1(+)} = -\frac{4}{L_j} \cos \frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{4} \sin \frac{3\alpha_{j-1} - \beta_j}{4} \\ R_{j-1(+)} = -\frac{1}{\rho_{j-1(+)}} \end{cases} \quad (8-38)$$

由以上切点坐标、圆心坐标、曲率及半径计算公式中可以看出只要当 α 、 β 确定了。则圆弧样条曲线就可以具体作出。

2、节点弦切角关系式

在圆弧样条中，要求过节点 P_j 两侧的圆弧应是同一个圆，即

$$\rho_{j(-)} = \rho_{j(+)}$$

从而有

$$4\lambda_j \cos \frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{4} \sin \frac{3\beta_j - \alpha_{j-1}}{4} - 4\mu_j \cos \frac{\alpha_j + \beta_{j+1}}{4} \sin \frac{3\alpha_j - \beta_{j+1}}{4} = 0 \quad (8-39)$$

式中 $\lambda_j = \frac{L_{j+1}}{L_j + L_{j+1}}, \mu_j = 1 - \lambda_j = \frac{L_j}{L_j + L_{j+1}}$

式 (8-39) 就是圆弧样条的弦切角关系式，只要从中解出各节点 α 、 β 角，整条曲线形状也就确定了。但该关系式是非线性方程组，难以直接求解，需要作线性化处理。利用

$\alpha_j + \beta_j = \varphi_j$ ，并通过恒等变换，仿照三次样条函数的 $M(m)$ 关系式，建立以下横等式：

$$\begin{aligned} \lambda_j \alpha_{j-1} + 3\alpha_j + \mu_j \alpha_{j+1} &= \lambda_j \alpha_{j-1} + 3(\lambda_j + \mu_j) \alpha_j + \mu_j (\varphi_{j+1} - \beta_{j+1}) \\ &= \lambda_j \alpha_{j-1} + 3\lambda_j (\varphi_j - \beta_j) + 3\mu_j \alpha_j + \mu_j (\varphi_{j+1} - \beta_{j+1}) \\ &= 3\lambda_j \varphi_j + \mu_j \varphi_{j+1} + \mu_j (3\alpha_j - \beta_{j+1}) + \lambda_j (\alpha_{j-1} - 3\beta_j) \\ &= b_j + G_j \end{aligned}$$

式中

$$b_j = 3\lambda_j\varphi_j + \mu_j\varphi_{j+1}$$

$$G_j = \mu_j(3\alpha_j - \beta_{j+1}) + \lambda_j(\alpha_{j-1} - 3\beta_j)$$

引入式 (8-39) 后得

$$G_j = \mu_j[(3\alpha_j - \beta_{j+1}) - 4\cos\frac{\alpha_j + \beta_{j+1}}{4}\sin\frac{3\alpha_j - \beta_{j+1}}{4}]$$

$$+ \lambda_j[(\alpha_{j-1} - 3\beta_j) - 4\cos\frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{4}\sin\frac{\alpha_{j-1} - 3\beta_j}{4}]$$

于是可得方程组

$$\lambda_j\alpha_{j-1} + 3\alpha_j + \mu_j\alpha_{j+1} = b_j + G_j$$

$$(j = 2, 3, 4, \dots, n-1) \quad (8-40)$$

式中 b_j 是已知的线性部分，是 φ 的数量级，为主要项。 G_j 是包含未知数 α 、 β 的非线性部分，大约是 φ^3 的数量级，它的作用是使节点左右两边的圆弧为同一个圆，所以成为修正项。

与三次样条函数的 $M(m)$ 关系式一样，方程组含有 n 个未知数，而方程只有 $n-2$ 个，故必须补充两个端点方程。

3、端点条件的确定

(1) 给出两端点的弦切角 α_1 、 β_n

当给出 n 个型值点 $P_i(x_i, y_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)，已知首端点弦切角 α_1 ，而末端只有 β_n ，故在方程组 (8-40) 中令 $\alpha_n = \beta_n$ ，代入式 (8-40) 后，

对于 P_1 点：

$$3\alpha_1 + \mu_1\alpha_2 = b_1 + G_1$$

$$\mu_1 = 0, \quad b_1 = 3\alpha_1, \quad G_1 = 0 \quad (8-41)$$

即

对于 P_n 点：

$$\lambda_n\alpha_{n-1} + 3\beta_n = b_n + G_n$$

$$\mu_n = 0, \quad b_n = 3\beta_n, \quad G_n = 0 \quad (8-42)$$

即

(2) 给出两端点的曲率 ρ_1 、 ρ_n 。首端的曲率由式 (8-38) 得

$$-L_2\rho_1 - 4\cos\frac{\alpha_1 + \beta_2}{4}\sin\frac{3\alpha_1 - \beta_2}{4} = 0$$

因为

$$\alpha_2 = \varphi_2 - \beta_2$$

故弦切角方程写成

$$3\alpha_1 + \alpha_2 = (\varphi_2 - L_2\rho_1) + (3\alpha_1 - \beta_2 - 4\cos\frac{\alpha_1 + \beta_2}{4}\sin\frac{3\alpha_1 - \beta_2}{4})$$

相当于

$$\begin{cases} \mu_1 = 1 \\ b_1 = \varphi_2 - L_2\rho_1 \\ G_1 = 3\alpha_1 - \beta_2 - 4\cos\frac{\alpha_1 + \beta_2}{4}\sin\frac{3\alpha_1 - \beta_2}{4} \end{cases} \quad (8-43)$$

对于末端曲率，由式 (8-36) 得

$$\rho_n = -\frac{4}{L_n} \cos \frac{\alpha_{n-1} + \beta_n}{4} \sin \frac{3\beta_n - \alpha_{n-1}}{4}$$

同理，弦切角方程可写成

$$-\alpha_{n-1} + 3\beta_n = -L_n \rho_n + (3\beta_n - \alpha_{n-1} - 4 \cos \frac{\alpha_{n-1} + \beta_n}{4} \sin \frac{3\beta_n - \alpha_{n-1}}{4})$$

相当于

$$\begin{cases} \lambda_n = -1 \\ b_n = -L_n \rho_n \\ G_n = 3\beta_n - \alpha_{n-1} - 4 \cos \frac{\alpha_{n-1} + \beta_n}{4} \sin \frac{3\beta_n - \alpha_{n-1}}{4} \end{cases} \quad (8-44)$$

4、方程组及其解法

由方程组 (8-40) 及端点条件构成求 n 个未知数 α_j 的 n 个方程形成的方程组为：

$$\begin{cases} 3\alpha_2 + \mu_1\alpha_2 = b_1 + G_1 \\ \lambda_2\alpha_1 + 3\alpha_2 + \mu_2\alpha_3 = b_2 + G_2 \\ \lambda_2\alpha_2 + 3\alpha_3 + \mu_3\alpha_4 = b_3 + G_3 \\ \dots\dots\dots \\ \lambda_{n-1}\alpha_{n-2} + 3\alpha_{n-1} + \mu_{n-1}\alpha_n = b_{n-1} + G_{n-1} \\ \lambda_n\alpha_{n-1} + 3\alpha_n = b_n + G_n \end{cases}$$

写成矩阵形式

$$A\alpha = B + G \quad (8-45)$$

其中

$$A = \begin{Bmatrix} 3 & \mu_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \lambda_2 & 3 & \mu_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_{n-1} & 3 & \mu_{n-1} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \lambda_n & 3 \end{Bmatrix} \quad \alpha = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_{n-1} \\ \alpha_n \end{Bmatrix} \quad B = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{Bmatrix} \quad G = \begin{Bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \dots \\ G_{n-1} \\ G_n \end{Bmatrix}$$

解方程 (8-45)，可以先忽略高阶项 G ，用追赶法去解 $A\alpha = B$ ，可以得到 α 的一次近似解 $\alpha_j^{(1)} (j=1,2,\dots,n)$ 。它的几何解释是在节点处保证一阶光滑，但节点左右两边不是同一个圆，半径略有差别。 $\alpha_j^{(1)}$ 的上标 (1) 是指第一次迭代所得到的 α 角。利用 $\alpha_j + \beta_j = \varphi_j$ 关系，可以求得 $\beta_j^{(1)}$ 。

将 $\alpha_j^{(1)}$ 、 $\beta_j^{(1)}$ 带入 G_j 的表达式中求出 $G_j^{(1)}$ 。这样方程组 (8-45) 的右端为已知，就可以进

行第二次迭代，求得 $\alpha_j^{(2)}$ 、 $\beta_j^{(2)}$ 和 $G_j^{(2)}$ ，等等。迭代过程的一般形式为

$$A\alpha^{(k)} = B + G(\alpha^{(k-1)}) \quad k=2,3,\dots$$

式中 k 为迭代次数。当迭代过程满足条件

$$\max_{1 \leq j \leq n} |\alpha_j^{(k+1)} - \alpha_j^{(k)}| < \varepsilon \quad k=2,3,\dots$$

时，迭代结束。实际迭代次数取决于原始型值点的分布和迭代精度要求 ε 。一般情况下迭代二、三次，多则六、七次就可满足要求。例如正弦曲线，从 0° 到 90° 分成十等分，当给定误差为 ε 为 10^{-5} 弧度时，只需迭代一次。

6、圆弧样条使用中的几个问题

(1) 圆弧样条的适用范围

圆弧样条规定过每个型值点 P_j 作一段圆弧，由前述知 P_j 点左右的曲率分别为

$$\rho_{j(-)} = -\frac{1}{R_{j(-)}} = -\frac{4}{L_j} \cos \frac{\alpha_{j-1} + \beta_j}{4} \sin \frac{3\beta_j + \alpha_{j-1}}{4}$$

$$\rho_{j(+)} = -\frac{4}{L_{j+1}} \cos \frac{\alpha_j + \beta_{j+1}}{4} \sin \frac{3\alpha_j - \beta_{j+1}}{4}$$

要使曲线保凸，则要求 P_j 点不是拐点，即

$$\rho_{j(-)} \neq 0, \quad \rho_{j(+)} \neq 0$$

于是有

$$3\beta_j - \alpha_{j-1} > 0, \quad \alpha_{j-1} / \beta_j < 3$$

$$3\alpha_j - \beta_{j+1} > 0, \quad \alpha_j / \beta_{j+1} < 3$$

关系存在。这说明要相邻弦切角之比保持在 $1/3 \sim 3$ 之间。当违反这个关系时就要进行如下处理：

若曲线本身不应有拐点，但由于曲线转折较大而型值点又分布较稀时，就应使型值点加密。例如在 P_j 和 P_{j+1} 之间加密一点 P'_j 。现在 P'_j 的位置常取在 $\overline{P_j P_{j+1}}$ 的中垂线上，即切点 T 的位置（见图 8-17）。根据前述， P'_j 点在局部坐标系下的坐标为：

$$\begin{cases} U'_j = \frac{L_{j+1}}{2} \\ V'_j = \frac{L_{j+1}}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_j + \beta_{j+1}}{4} \end{cases} \quad (8-46)$$

若曲线本身有拐点，相邻弦切角之比不在 $1/3 \sim 3$ 范围内是正常的。在这种情况下可取 P_j 点左边弦切角 β_j 为钝角，所得的两段圆弧为外切。

(2) 坐标变换

当计算出 α_j 、 β_j ($j=1,2,\dots,n$) 后, 便可以代入切点、圆心坐标等计算公式中计算出各分段圆弧的参数。由于这些都是局部坐标系中的值, 必须转换到总体坐标系 (XOY) 中。图 8-18 所示为切点坐 T (或加密点 P'_j) 的坐标转换的例子。图中 α 为 $\overline{P_j P_{j+1}}$ 与 X 轴的夹角, 则有

$$\cos \alpha = \frac{x_{j+1} - x_j}{L_{j+1}}, \sin \alpha = \frac{y_{j+1} - y_j}{L_{j+1}}$$

所以, 切点在总体坐标系下的坐标为

$$\begin{cases} x_T = x_j + \frac{L_{j+1}}{2} \cos \alpha - \left(\frac{L_{j+1}}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_j + \beta_{j+1}}{4} \right) \sin \alpha \\ y_T = y_j + \frac{L_{j+1}}{2} \sin \alpha + \left(\frac{L_{j+1}}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_j + \beta_{j+1}}{4} \right) \cos \alpha \end{cases}$$

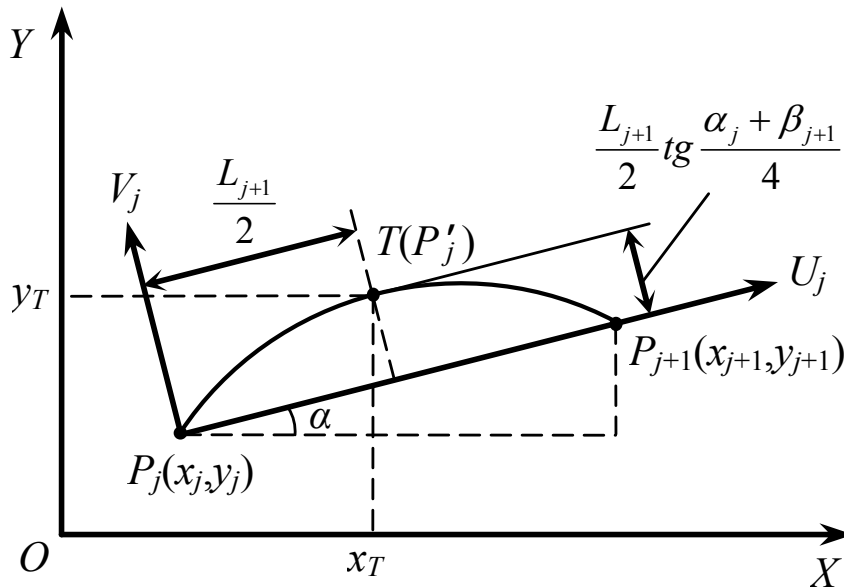


图 8-18 坐标转换方法

(3) 关于相邻圆弧曲率比

圆弧样条的一阶导数是连续的, 而二阶导数不连续, 但要控制二阶导数 (或者说曲率) 不要变化太大, 而且是逐渐变化, 则只控制两相邻圆弧的曲率比

$$K_j = \frac{\rho_{j-1(+)} }{\rho_{j-1(-)}} = \frac{\sin \frac{3\alpha_{j-1} - \beta_j}{4}}{\sin \frac{3\beta_j - \alpha_{j-1}}{4}}$$

即可。实践表明一般取 $1 \leq K_j \leq 10$ 或 $0.1 \leq K_j \leq 1$ 是可以满足工艺和设计要求。

(4) 关于计算精度控制

列表曲线经圆弧样条拟合后, 其计算精度没有一个比较标准。但是由于在实际计算中发现三次样条与手工绘制模线比较吻合, 故以局部三次样条作为标准来控制精度, 见图 8-19, 要求

$$|V_{\text{切}} - V_3| < \varepsilon$$

式中 $V_{\text{切}}$ 为相邻圆弧切点的局部坐标；

V_3 为该段上局部三次样条上相应点的局部坐标；

ε 为给定的误差。

如上述条件不满足，则将此切点作为新的型值点补入，重新迭代拟合，直到小于给定误差为止。

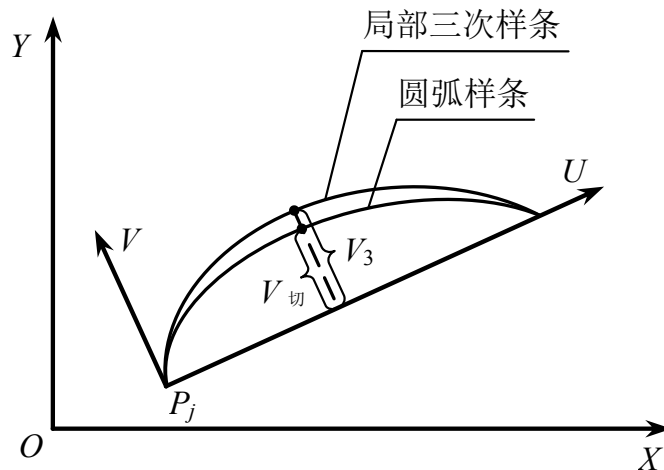


图 8-19 拟合精度的控制方法

五、均匀 B 样条曲线

近几年来，B 样条曲线和曲面法在数控加工中越来越多的得到应用，这是因为他具有很好的几何性质及计算程序简单、计算速度快等优点。

图 8-20 表示一段三次 B 样条曲线，它是由特征多边形四个顶点 V_i 、 V_{i+1} 、 V_{i+2} 、 V_{i+3} 构成的，其构造过程如下：

三次 B 样条曲线段的起点 $r_i(0)$ 落在 $\Delta V_i V_{i+1} V_{i+2}$ 的中线 $V_{i+1}m$ 上靠近 V_{i+1} 的 $1/3$ 处，起点的切矢 $r_i'(0)$ 平行于 $\Delta V_i V_{i+1} V_{i+2}$ 的底边 $\overline{V_i V_{i+2}}$ ，长度为其一半。起点的二阶导矢量 $r_i''(0)$ 等于中线向量 $\overline{V_{i+1}m}$ 的二倍。终点 $r_i(1)$ 的情况同起点对称，这里不再重复。根据上述几何性质就可以大体上确定一个三次 B 样条曲线段的行状。如图 8-20 粗实线所示部分。

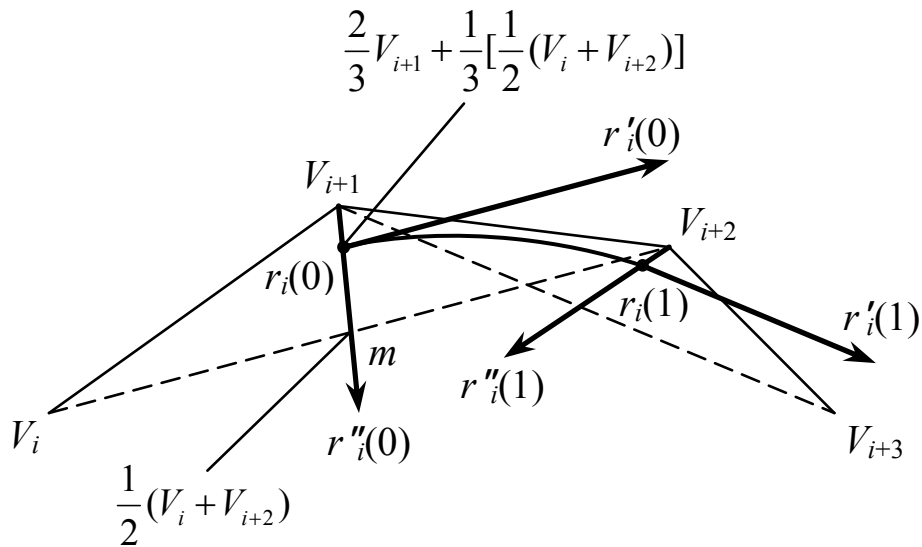


图 8-20 三次 B 样条曲线的绘制

1、四阶三次均匀 B 样条曲线段

样条曲线的基本思想时，既分段又连续，B 样条曲线自然也不例外，我们先讨论各分段特性，然后再讨论分段间的连续性问题。

(1) 三次 B 样条基

样条的基函数可以由多种方法推导，方法不同，基函数的表达式也会有所不同，但实质完全一致。现直接引出工程上经常应用的三次 B 样条基函数的矩阵表达式。推导在后面介绍。

三次 B 样条基函数为：

$$\begin{cases} N_{0,4}(u) = \frac{1}{3!}(1 - 3u + 3u^2 - u^3) \\ N_{1,4}(u) = \frac{1}{3!}(4 - 6u^2 + 3u^3) \\ N_{2,4}(u) = \frac{1}{3!}(1 + 3u + 3u^2 - 3u^3) \\ N_{3,4}(u) = \frac{1}{3!}(u^3) \end{cases}$$

写成矩阵表达式：

$$[N_{0,1}(u), N_{1,1}(u), N_{2,1}(u), N_{3,1}(u)] = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} u^3 & u^2 & u & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & 6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8-47)$$

$N_{j,4}(u)(j=0,1,2,3,4)$ 是一组重要的基函数，利用它和四个相邻顶点线性组合，就构作了一段四阶三次均匀 B 样条曲线段。

(2) B 样条曲线段

$$r_i(u) = \sum_{j=0}^3 N_{j,4}(u) \cdot V_{i+j} \quad (8-48)$$

于是由式 (8-48) 得

$$\begin{cases} r_i(0) = \frac{1}{6}(V_i + 4V_{i+1} + V_{i+2}) = V_{i+1} + \frac{1}{3}[\frac{1}{2}(V_i + V_{i+2}) - V_{i+1}] \\ r_i(1) = \frac{1}{6}(V_{i+1} + 4V_{i+2} + V_{i+3}) = V_{i+2} + \frac{1}{3}[\frac{1}{2}(V_{i+1} + V_{i+3}) - V_{i+2}] \\ r_i'(0) = \frac{1}{2}(V_{i+2} - V_i) \\ r_i'(1) = \frac{1}{2}(V_{i+3} - V_{i+1}) \\ r_i''(0) = (V_{i+2} - V_{i+1}) + (V_i - V_{i+1}) \\ r_i''(1) = (V_{i+3} - V_{i+2}) + (V_{i+1} - V_{i+2}) \end{cases} \quad (8-49)$$

2、三次 B 样条曲线

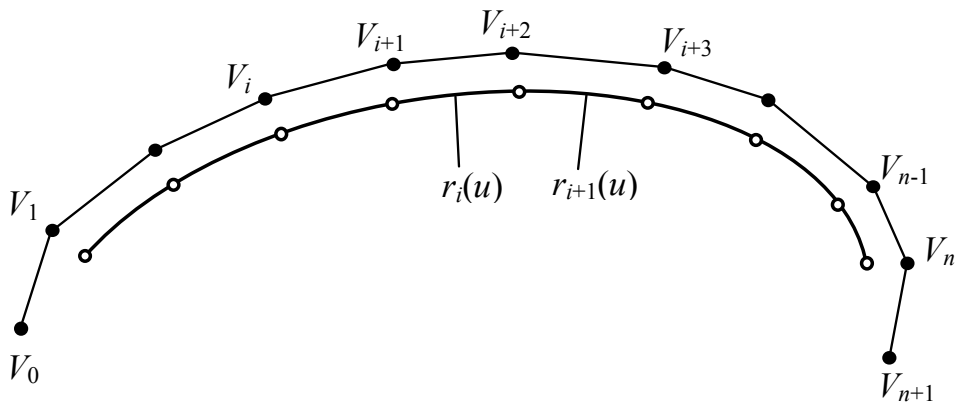


图 8-21 多段 B 样条曲线

已知 $n+2$ 个按顺序排列的位置矢量 V_0, V_1, \dots, V_{n+1} (图 8-21) 即 B 特征多边形顶点的矢量; 设 $N_{0,4}(u), N_{1,4}(u), N_{2,4}(u), N_{3,4}(u)$ 分别是 u 的三次多项式。顺次以相邻的四个顶点 $V_{i+1}, V_{i+2}, V_{i+3}, V_{i+4}$ 作为一组, 共得到 $n-1$ 个线性组合。

$$\begin{aligned} r_i(u) &= \begin{bmatrix} N_{0,4}(u) & N_{1,4}(u) & N_{2,4}(u) & N_{3,4}(u) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ V_{i+2} \\ V_{i+3} \end{bmatrix} \\ &= N_{0,4}(u)V_i + N_{1,4}(u)V_{i+1} + N_{2,4}(u)V_{i+2} + N_{3,4}(u)V_{i+3} \\ &\quad (i=0,1,2,\dots,n-2 \quad ; \quad 0 \leq u \leq 1) \end{aligned} \quad (8-50)$$

因为在整条曲线上, 各段曲线满足光滑连续条件, 即连接点处保持 C^2 连续。所以下列等

式应成立：

$$r_i(1) = r_{i+1}(0)$$

$$r_i'(1) = r_{i+1}'(0)$$

$$r_i''(1) = r_{i+1}''(0)$$

于是有 $r_i(1) - r_{i+1}(0) = 0$

将 $u = 1$ 代入第 i 段曲线方程， $u = 0$ 代入第 $i + 1$ 段曲线方程，得到

$$[N_{0,4}(1)V_i + N_{1,4}(1)V_{i+1} + N_{2,4}(1)V_{i+2} + N_{3,4}(1)V_{i+3}] - [N_{0,4}(0)V_{i+1} + N_{1,4}(0)V_{i+2} + N_{2,4}(0)V_{i+3} + N_{3,4}(0)V_{i+4}] = 0$$

即

$$N_{0,4}(1)V_i + [N_{1,4}(1) - N_{0,4}(0)]V_{i+1} + [N_{2,4}(1) - N_{1,4}(0)]V_{i+2} + [N_{3,4}(1) - N_{2,4}(0)]V_{i+3} + N_{3,4}(0)V_{i+4} = 0$$

为使上式成立，则必须

$$\begin{cases} N_{0,4}(1) = 0 \\ N_{1,4}(1) - N_{0,4}(0) = 0 \\ N_{2,4}(1) - N_{1,4}(0) = 0 \\ N_{3,4}(1) - N_{2,4}(0) = 0 \\ N_{3,4}(0) = 0 \end{cases} \quad (8-51)$$

同理，为了在连接处 C^1 阶连续，下式必须成立

$$\begin{cases} N'_{0,4}(1) = 0 \\ N'_{1,4}(1) - N'_{0,4}(0) = 0 \\ N'_{2,4}(1) - N'_{1,4}(0) = 0 \\ N'_{3,4}(1) - N'_{2,4}(0) = 0 \\ N'_{3,4}(0) = 0 \end{cases} \quad (8-52)$$

为了在连接点处 C^2 连续，下式必须成立

$$\begin{cases} N''_{0,4}(1) = 0 \\ N''_{1,4}(1) - N''_{0,4}(0) = 0 \\ N''_{2,4}(1) - N''_{1,4}(0) = 0 \\ N''_{3,4}(1) - N''_{2,4}(0) = 0 \\ N''_{3,4}(0) = 0 \end{cases} \quad (8-53)$$

再考虑到四个顶点重合的情况，即 $V_i = V_{i+1} = V_{i+2} = V_{i+3}$ ，这时第 i 段曲线化为一个点，即 $r_i(u) = V_i$ ，因此有附加条件

$$N_{0,4}(u) + N_{1,4}(u) + N_{2,4}(u) + N_{3,4}(u) \equiv 1 \quad (8-54)$$

$N_{0,4}(u)$ 、 $N_{1,4}(u)$ 、 $N_{2,4}(u)$ 、 $N_{3,4}(u)$ 分别是 u 的三次多项式，共有十六个待定系数，上述式(8-51)、(8-52)、(8-53)、(8-54) 构成十六个线性方程组，解此方程组得到

$$\begin{cases} N_{0,4}(u) = \frac{1}{3!}(1 - 3u + 3u^2 - u^3) \\ N_{1,4}(u) = \frac{1}{3!}(4 - 6u^2 + 3u^3) \\ N_{2,4}(u) = \frac{1}{3!}(1 + 3u + 3u^2 - 3u^3) \\ N_{3,4}(u) = \frac{1}{3!}(u^3) \end{cases} \quad (8-55)$$

式(8-55)正是前述的三次 B 样条基。在(8-50)式中特征多边形顶点 V_{i+j} 和三次 B 样条基函数 $N_{j,4}(u)(j=0,1,2,3)$ 线性组合得到 $r_i(u)$ 。当参数 u 从 0 变化到 1 时，上述描绘出 i 段曲线。各段曲线在连接点处保持 C^2 阶连续。由于 $N_{j,4}(u)$ 是三次 B 样条基，所以上述曲线称为 B 样条曲线。

将式(8-55)代入(8-50)得到 B 样条曲线的公式为

$$\begin{aligned} r_i(u) &= \sum_{j=0}^3 N_{j,4}(u) V_{i+j} \\ &= [N_{0,4}(u) \quad N_{1,4}(u) \quad N_{2,4}(u) \quad N_{3,4}(u)] \begin{bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ V_{i+2} \\ V_{i+3} \end{bmatrix} \\ &= [1 \quad u \quad u^2 \quad u^3] \frac{1}{3!} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ V_{i+2} \\ V_{i+3} \end{bmatrix} \\ &= [1 \quad u \quad u^2 \quad u^3] M_B \begin{bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ V_{i+2} \\ V_{i+3} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8-56)$$

($i=0,1,2,\dots,n-2; 0 \leq u \leq 1$)

3、B 样条曲线的几何性质

(1) 直观性

B 样条曲线的形状决定于 B 特征多边形，而且曲线和多边形相当逼近。如图 8-22 所示。

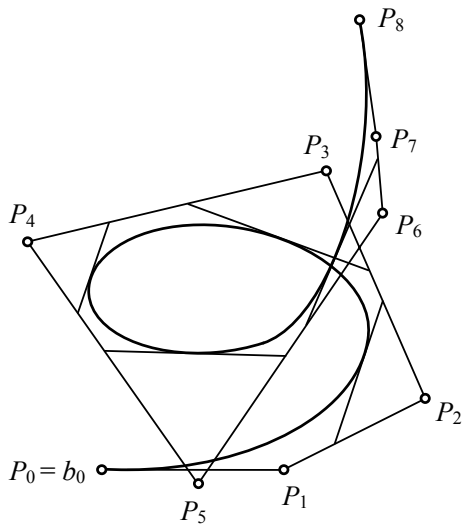


图 8-22 B 样条曲线的直观性

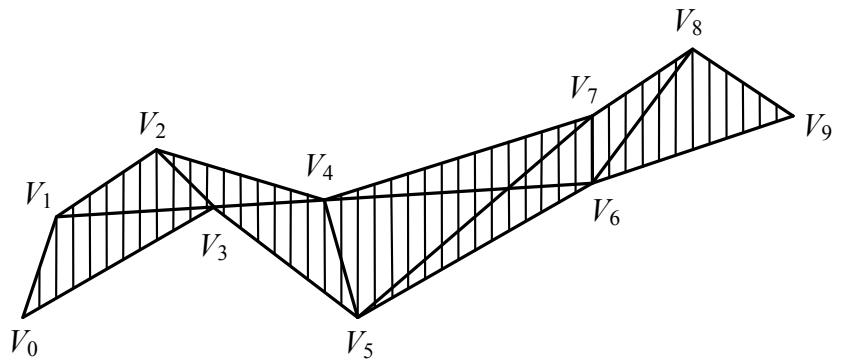


图 8-23 B 样条曲线的凸包性

(2) 局部性

由于三次 B 样条曲线段 $r_i(u)$ 仅有四个顶点矢量确定，而与其它顶点无关，所以改变特征多变性的某一顶点矢量，只对相邻的四个曲线段产生影响，而对其它曲线段不会引起变化。

(3) 凸包性

由于 $N_{0,4}(u) + N_{1,4}(u) + N_{2,4}(u) + N_{3,4}(u) \equiv 1$ 及 $0 \leq u \leq 1$ ，曲线段必在 V_i 、 V_{i+1} 、 V_{i+2} 、 V_{i+3} 所张成的凸包内。就是说，三次 B 样条的每一曲线段必定落在决定该曲线段的相邻四个顶点张成的凸包之内，而整条 B 样条曲线必定落在这种相继的四个多边形顶点所组成的凸包的并集之中，见图 8-23 所示。

(1) 保凸性

如果三次 B 特征多边形 $V_i V_{i+1} V_{i+2} V_{i+3}$ 是凸的，则三次 B 样条曲线段 $r_i(u)$ 也一定是保凸的。

(2) 对称性

由于三次 B 样条基函数有对称性

$$N_{j,4}(u) = N_{3-j,4}(1-u) \quad (j = 0,1,2,3)$$

所以，把特征多边形的顶点 V_0 、 V_1 、... V_n 反序排成 V_n 、 V_{n-1} 、... V_0 ，按 B 样条曲线方程构造曲线，将沿相反的方向描绘出同一条曲线。

(3) 几何不变性

B 样条曲线不随坐标系的改变而改变。

4、三次 B 样条曲线的几种退化情况

三次 B 样条曲线的几种退化情况在实际工作中很有用。下面简介：

(1) 四顶点共线

四个相邻顶点共线，构造的 B 样条曲线则退化为直线，如图 8-24 所示。

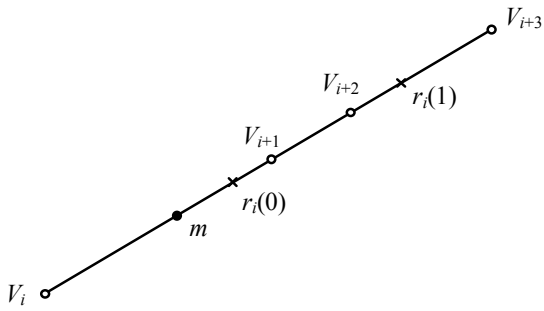
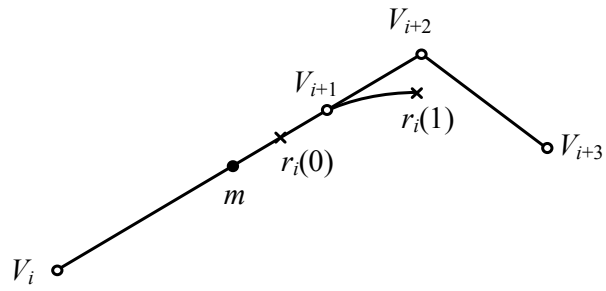


图 8-24 四顶点共线情况图



8-25 三点共线情况

(2) 三顶点共线

如图 8-25 所示，B 样条曲线段的起点 $r_i(0)$ 所在的位置为： $r_i(0)V_{i+1} = \frac{1}{3}mV_{i+1}$ ，且 $r_i(0)$ 处的曲率 $K=0$ 。利用这一点可以设计出需要的拐点。

(3) 两顶点重合

这种情况相当于三顶点共线，三次 B 样条曲线段的端点 $r_i(0)$ 满足关系式： $r_i(0)V_{i+1} = 1/6V_iV_{i+1}$ ，而且端点曲率 $k=0$ ，如图 8-26 所示。

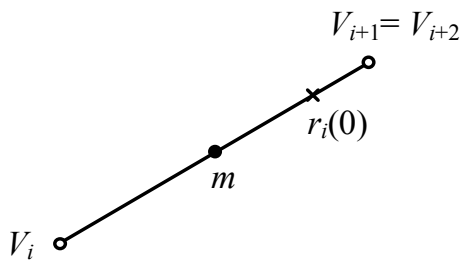
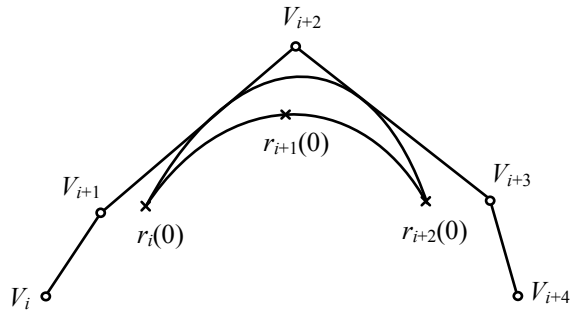


图 8-26 两顶点重合图



8-27 三个顶点重合

(4) 三顶点重合

为了构作含有尖角的 B 样条曲线，可以取三次重合顶点，即把一个顶点重复取三次，如图 8-27 所示。由顶点 $V_i, V_{i+1}, V_{i+2}, V_{i+3}, V_{i+4}$ 可以定义两段三次 B 样条曲线 $r_i(0)r_{i+1}(0)r_{i+2}(0)$ ，且有 C^2 连续。若把 V_{i+2} 看作为重复的两个顶点，即顶点 $V_i, V_{i+1}, V_{i+2}, V_{i+2}, V_{i+3}, V_{i+4}$ 可以构成三段 B 样条曲线段 $r_i(0)AV_{i+2}Br_{i+2}(0)$ 。若把 V_{i+2} 看作为重复的三个顶点，即顶点 $V_i, V_{i+1}, V_{i+2}, V_{i+2}, V_{i+2}, V_{i+3}, V_{i+4}$ 可以构成四段 B 样条曲线段 $r_i(0)AV_{i+2}Br_{i+2}(0)$ 。三重合顶点 V_{i+2} 处，曲线斜率不连续形成尖点，而且两侧含有直线 AV_{i+2} 和 $V_{i+2}B$ 。在尖点处斜率尽管不连续，然而对于参数样条来说，确实是达到了 C^2 连续，因为在三重点处的一阶和二阶导矢都退化为零。

上述退化情况表明：如果我们想在样条曲线上造一段直线，只要使四个顶点共线就可以了；为了使样条曲线和特征多边形相切，可以采用三顶点共线或两重顶点的技巧；要使样条曲线通过某一顶点，即在曲线上使之形成一个尖点，可以运用三重顶点的技巧。

5、三次 B 样条曲线的算法

从已知 B 特征多边形顶点 $\{V_i\}$ 计算三次 B 样条曲线的结点 $\{P_i\}$ 以及曲线上的任意点，是逼近问题，称为正算。而从已知型值点 $\{P_i\}$ 反推多边形顶点 $\{V_i\}$ ，是应用于插值的反算问题，称为反算。

(1) 正算

给定 B 特征多边形顶点 $\{V_i\}$ ，构作三次 B 样条曲线，按 (8-56) 计算曲线上的结点 $\{P_i\}$ 以及曲线上任意点的位置矢量，在此不再赘述。

(2) 反算

在许多实际工程问题中，经常是在零件图纸上给出的一批型值点，希望用 B 样条来拟合这些点，然后求出其它需要的插值点。这时，必须首先求出 B 样条特征多边形顶点。才能构造 B 样条曲线，并对曲线进行插值计算。

设平面上给出 $n+1$ 个有序型值点 $\{P_i\}$ ($i=0,1,2,\dots,n$)，求特征多边形顶点位置矢量 $\{V_i\}$ ($i=-1,0,1,\dots,n,n+1$)。从 (8-49) 中的第一、第二式可以看出，反算问题可以归结为下列线性方程组的求解：

$$\frac{1}{6}(V_{i-1} + 4V_i + V_{i+1}) = P_i \quad (i=0,1,2,\dots,n) \quad (8-57)$$

由于式 (8-57) 方程组有 $n+3$ 个未知数，而方程只有 $n+1$ 个，所以必须根据端点条件补充两个方程。

给出两端点切矢量，即

$$\begin{cases} \frac{1}{2}(V_1 - V_{-1}) = P'_0 \\ \frac{1}{2}(V_{n+1} - V_{n-1}) = P'_n \end{cases} \quad (8-58)$$

将式 (8-57) 分别与 (8-58) 联立，消去 V_1 和 V_{n-1} 得：

$$\begin{cases} \frac{2}{6}V_{-1} + \frac{4}{6}V_0 = P_0 - \frac{P'_0}{3} \\ \frac{4}{6}V_n + \frac{2}{6}V_{n+1} = P_n + \frac{P'_n}{3} \end{cases} \quad (8-59)$$

由式 (8-57) 和式 (8-59) 构成三对角线性方程组可以用追赶法解出特征多边形各顶点

位置矢量。

6、B 样条曲线在程编中的二次逼近

用 B 样条曲线段拟合列表轮廓曲线，还必须进行二次逼近，即用直线段（或用圆弧段）代替 B 样条曲线段来组成所要求的轮廓形状。曲线用直线段来逼近，需要确定步长。它是依据所算出的误差而定。误差 δ 是实际曲线与取代这段曲线的直线之间的最大法向距离（见图 8-28 (a)）。这个最大的误差 δ 通常在 u 到 $u+\Delta u$ 这个曲线段的中间，即 $r(u+\frac{1}{2}\Delta u)$ 处。

为计算最大法向偏差，用直线连接曲线两端点 $r(0)$ 和 $r(1)$ ，在此，须满足两端点条件为 $u=0$ 和 $u=1$ （见图 8-28 (b)）。

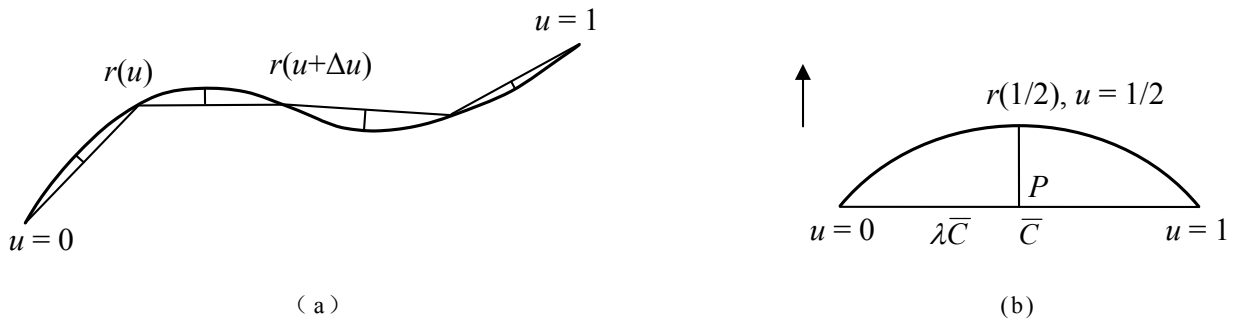


图 8-28 线性逼近的误差的计算

把弦线 $r(0)r(1)$ 记作 \bar{C} ，矢量 P 表示曲线上某点 $r(\frac{1}{2})$ 到 $r(0)r(1)$ 的垂线，则

$$P = r(\frac{1}{2}) - r(0) - \lambda \bar{C} \quad (8-60)$$

式中 \bar{C} 与 P 正交，即

$$\bar{C} \cdot P = 0$$

于是有

$$\begin{aligned} \bar{C} \cdot [r(\frac{1}{2}) - r(0) - \lambda \bar{C}] &= 0 \\ \lambda &= \frac{\bar{C} \cdot [r(\frac{1}{2}) - r(0)]}{|\bar{C}|^2} \end{aligned} \quad (8-61)$$

把式 (8-61) 带入 (式 (8-60)，得

$$P = r(\frac{1}{2}) - r(0) - \frac{\bar{C} \cdot [r(\frac{1}{2}) - r(0)]}{|\bar{C}|^2} \cdot \bar{C} \quad (8-62)$$

一般情况下，最大法向偏差的估算取 $\lambda \approx \frac{1}{2}$ ，可得如下简化公式：

$$P = r\left(\frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2}[r(1) + r(0)] \quad (8-63)$$

在加密点时，计算出 $|P|$ ，若 $|P| \leq \delta$ ，表示插密点符合要求，否则必须在进一步加密，直到满足 $|P| \leq \delta$ 的条件为止，这样一步一步的分割曲线，所有的直线段逼近的误差必定在允许的范围内。

五、列表曲线的光顺方法及其应用

光顺是一个工程术语，包括“光滑”、“顺眼”两方面的含义。要得到一条光滑，而且看起来舒服顺眼的列表曲线，其给出的型值点坐标数据必须准确无误。

光顺是工程上的概念，光滑是数学上的概念；光顺要求光滑，但光滑不等于光顺。

曲线光顺的必要条件及充分条件：

必要条件：一是曲线应光滑，至少一阶导数连续；

二是曲线的走向，其凸凹要符合设计要求，无多余拐点，也就是所谓的保形要求。

充分条件：即要求曲线的曲率大小变化均匀。

编程时，首先要通过“光顺处理”。列表曲线光顺方法中，一类是，对输入的列表点坐标数据进行检查，找出“坏点”予以修正，以正确的数据进行曲线拟合处理，这种方法属于局部光顺法，例如局部回弹法，圆率法；另一类如最小能量法，一次可调整几个点，在整条曲线范围内修改量较大，这种方法属于整体光顺法。下面介绍常用的局部回弹法。

1、局部回弹法

该法是一种选点修改的曲线光顺方法，是对手工光顺的直接模拟。为了保证曲线光滑，采用三次样条函数插值待光顺的型值点列。

其光顺过程分粗光顺和精光顺，其准则是：粗光顺准则是曲线应光滑，至少一阶导数连续，或曲率符号符合设计要求（即无多余拐点）；精光顺的准则是曲率的曲率变化均匀。

（1）粗光顺的目标与修改方法

粗光顺的目标：根据设计要求，将整条曲线分成凸或凹区间，分界点为拐点。由三次样条计算出各型值点处的二阶导数，根据其符号便可判断曲线的凹凸情况。

设 P_n 是给定的二阶导数的符号（取+1或-1），在每段凸、凹的曲线区间内，当 $P_n \cdot y_i'' < 0$ 时，则点 (x_i, y_i) 即为该段曲线内不光顺点，或称“坏点”。

按上述方法找出曲线上的坏点，通常不止一个，应修改其中“最坏点”。手工光顺曲线时，回弹力最大的点为“最坏点”。

根据材料力学弹性梁各点的回弹力取决于该点处的剪切跃度

$$e_i = y'''(x_i^+) - y'''(x_i^-)$$

式中 $y'''(x_i^+)$ 、 $y'''(x_i^-)$ 分别是曲线第 i 个型值点处的单边三阶导数。回弹力最大的点为“最坏点”，应满足

$$e_{ik} = \max_j |e_{ij}| \quad (j=1,2,\dots,l)$$

式中 l 是曲线“坏点”的个数。

粗光滑的修改方法：仿照手工光滑的方法，将最坏点处的“压铁”除去，让样条自有回弹到平衡位置，或让其回弹一部分后重新“压住”，记录最坏点的坐标为 (x_{ik}, y_{ik}) ，并放弃该点，按其余点构成新的样条函数，求出函数值 \dot{y}_{ik} 如图 8-29。

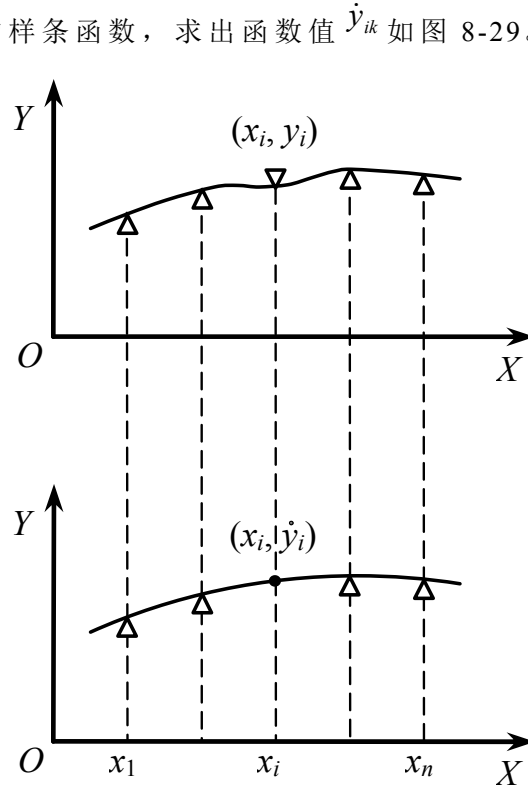


图 8-29 坏点的修改方法

则完全回弹时的纵坐标修改量为 $(\dot{y}_{ik} - y_{ik})$ ，为使回弹量不致过大，通常采用部分回弹量为修改量，即令

$$\Delta \dot{y} = a(\dot{y}_{ik} - y_{ik}), \quad 0 < a < 1$$

a 为回弹系数，一般取 $a = 0.3$ 。用 $(x_{ik}, y_{ik} + \Delta \dot{y})$ 代替坏点 (x_{ik}, y_{ik}) ，重新作样条函数，重复上述找坏点及修改过程，直到无坏点为止。

(2) 精光滑的目标与修改方法

精光滑的目标：在 y_i'' 同号区间内， $(y_{i+1}'' - y_i'')(y_i'' - y_{i-1}'') < 0$ 最多只允许出现一次，否则就是不光顺。

§ 8-3 列表曲面的数学处理

在航空、航天、造船、汽车等行业中，有不少是以三维地坐标点 (x,y,z) 表示的自由曲面（或叫雕塑曲面）如图（8-30），由于这些由实验或测绘取得的点列之间没有一定的连接规律，所以数学模型的建立、数控加工程序的编制、切削加工等均比较麻烦。

传统的加工方式是采用电脉冲加人工修的加工方法，不仅效率低，工期长，并难以保证产品的设计要求。随着计算机技术、数控机床和数控加工技术的发展，自由曲面的设计、制造，已经由传统的手工作业方式，转变为计算机辅助设计、制造的方式，不但提高了生产效率，保证了质量，而且降低了生产成本。

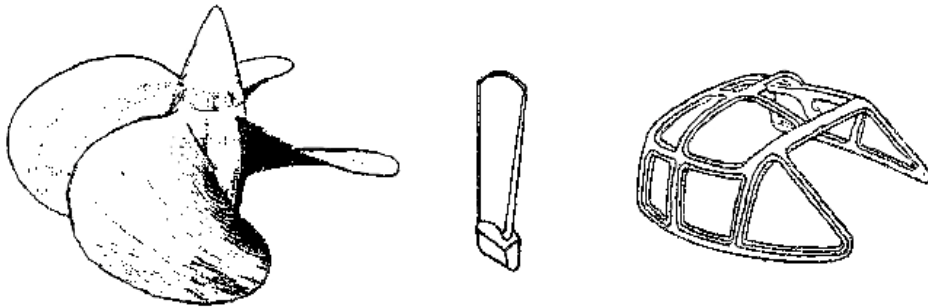


图 8-30 自由曲面零件

一、雕塑曲面的数控加工

曲面数控加工时，最理想的状态是在切削曲面时，刀具轴线与零件表面所形成的角度保持不变。这一要求，只有五坐标联动控制加工才能实现。以设计图纸上几何信息为基础构造的雕塑曲面，无论采用什么机床进行加工，所给出的刀位数据均为位置坐标 (x,y,z) 和法向量 (i,j,k) ，如图 8-31 所示，三坐标控制加工时的 (i,j,k) 是用来计算球头刀中心坐标的，而五坐标加工用的 (i,j,k) 是直接用来控制刀具的摆动，能随时使刀具的轴线与加工表面的法线重合。

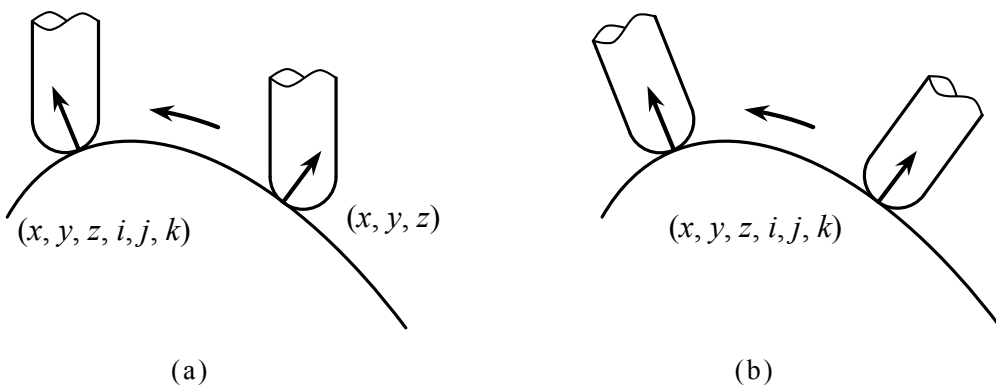


图 8-31 三坐标控制和五坐标控制

但因五坐标联动的数控机床价格昂贵，所以多用于加工精度高以及必须用五坐标加工的曲面（即不用这种机床就难以加工出合格的零件）。

当曲面的精度不是很高时，一般采用三坐标加工，所用的数控机床或加工中心都具有 X、Y、Z 坐标同时控制加工的功能。有时，对一些较简单且精度要求不高的曲面，在没有三坐标联动机床的情况下，也可以采用两坐标联动的三坐标铣床加工，此时，以机床的两个坐标

作联动、第三个坐标按一定的周期进给的方法加工，即所谓的“二个半”坐标加工，又叫坐标加工。

三坐标曲面零件加工通常采用球头铣刀，使用其它形状的刀具加工曲面容易导致干涉而损伤毗邻表面。一般来说，曲面加工用的球头铣刀的半径应选得大些，有利于加工质量，增加刀具的刚度、散热和寿命等，但球头铣刀半径不应大于曲面最小曲率半径。而五坐标曲面加工能采用的刀具类型比较多，如平底立铣刀、圆角铣刀、球头铣刀等等。

1、雕塑曲面零件计算机辅助编程简介

数控加工列表曲面零件,需要做好工艺分析以及曲面的定义、计算和编程。工艺分析主要是根据被加工曲面零件的型面特点选择合理的刀具、夹具和用几个坐标控制加工，以及选定行距、步长等。曲面的定义、计算和编程主要是选定曲面的拟合方法和刀位数据计算，并把刀位数据经后置处理程序转化为数控加工程序单。图 8-32 为曲面加工准备的流程图。

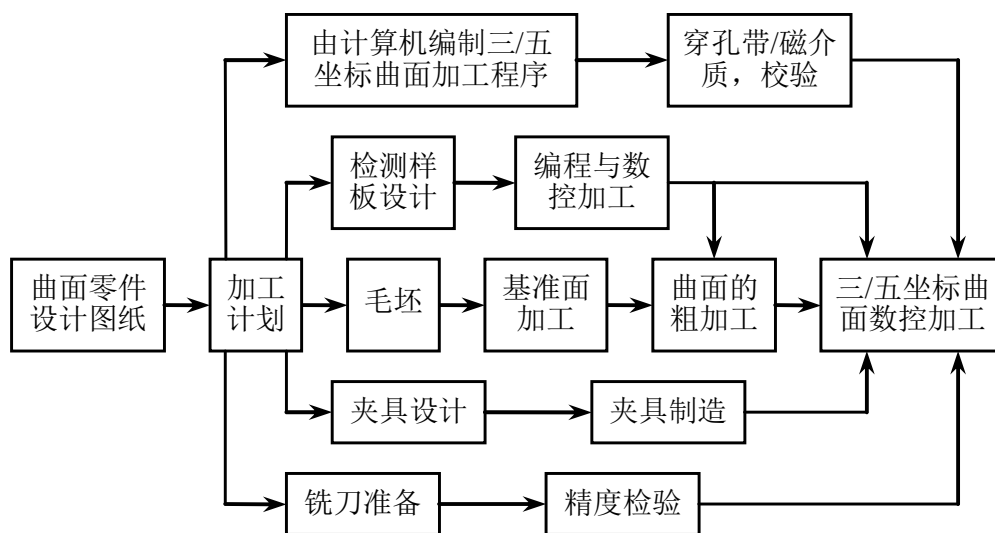


图 8-32 曲面加工准备工作流程

2、雕塑曲面的加工方法

三坐标曲面的切削方法是用球头铣刀，以行切法（又叫行距法）加工，即曲面由球头铣刀一行一行的加工，每加工完一行后，铣刀要沿一个坐标方向移动一个行距 S （图 8-34），直至将整个曲面加工出来为止，如图 8-33 所示。

在用三坐标联动加工时，球头铣刀沿着曲面一行一行连续切削，最后获得整张曲面。

应用球头铣刀“行切法”加工结果如图 8-34 所示，图中(a)表示刀具沿行距方向上残留的高度 H 。图(b)表示在三坐标联动加工时，铣刀沿切削方向一般是空间直线插补。在两坐标联动的三坐标加工时，铣刀沿切削方向可以是直线插补，也可以是圆弧插补。

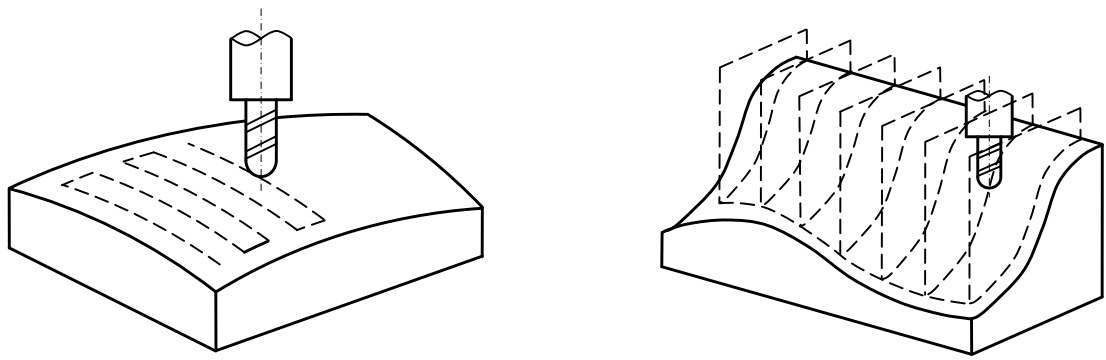


图 8-33 曲面的行切法加工

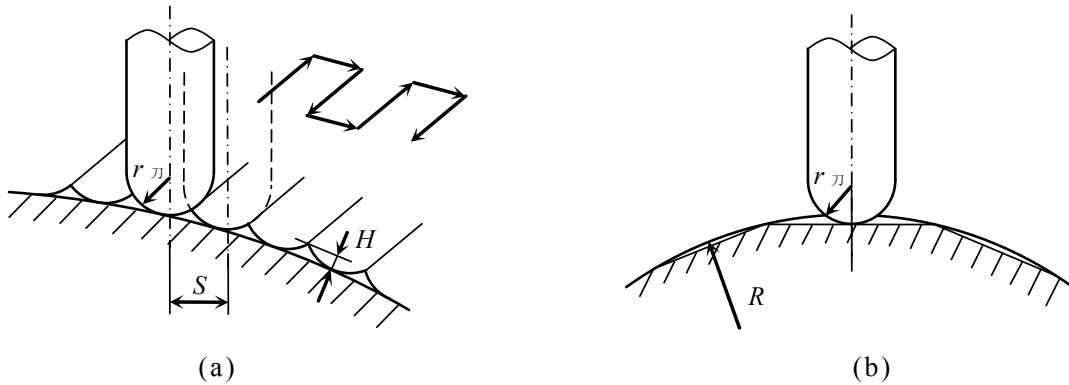


图 8-34 行切法的加工结果

实现“行切法”加工的数控程序编制方法，通常是按球头铣刀中心轨迹编程（如图 6-3 与图 6-4 所示）。

五坐标曲面加工方法可以用图 6-6 来说明，平底刀具轴线垂直于曲面，并随着去免曲率变化刀具轴线方向也不断变化；曲面也是一行一行的被切削，因而在两行之间的产生不大的残留高度，它取决于曲面的表面粗糙度的要求。

二、雕塑曲面零件编程的思路

1、雕塑曲面零件编程的流程图

雕塑曲面零件数控加工程序编制的流程图见 8-35 所示，其过程与曲线的编程类似。

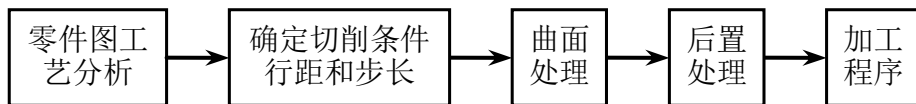


图 8-35 雕塑曲面零件编程的流程图

2、零件的图纸分析和工艺分析

零件的图纸分析，主要是从几何上分析一下曲面的特点、原始数据给出情况及边界条件，从而为走到路线、曲面处理方法的选择做好准备。

工艺分析，主要从工艺角度根据曲面零件的特点、加工精度、表面粗糙度、材料、刀具、切削用量、机床等工艺条件，来确定定位基准和夹紧方法、对刀点、走到路线、机床（采用几坐标联动加工）、刀具的选择及尺寸等工艺参数。

一般曲面走刀路线的设计，主要根据曲面本身的特点、精度和表面粗糙度要求、图纸上的几何数据给出情况和曲面处理是否简单，应使走刀路线尽可能得短，程序段计算简单。

2、行距和步长（插补段长度）的确定

由于曲面一般都是采用行切加工，这时行距 S 和步长 L 的大小将影响零件曲面的精度、

表面粗糙度和程序段长度。

我们首先讨论三坐标曲面加工时行距 S 的计算。如图 8-36, S 的大小将与曲面上残留的沟纹高度 H 大小有关, S 大则 H 大, 以加工表面质量差。若加工的是平面 (图 8-36 (a)),

则 $S = 2 \cdot \overline{ad}$ 。

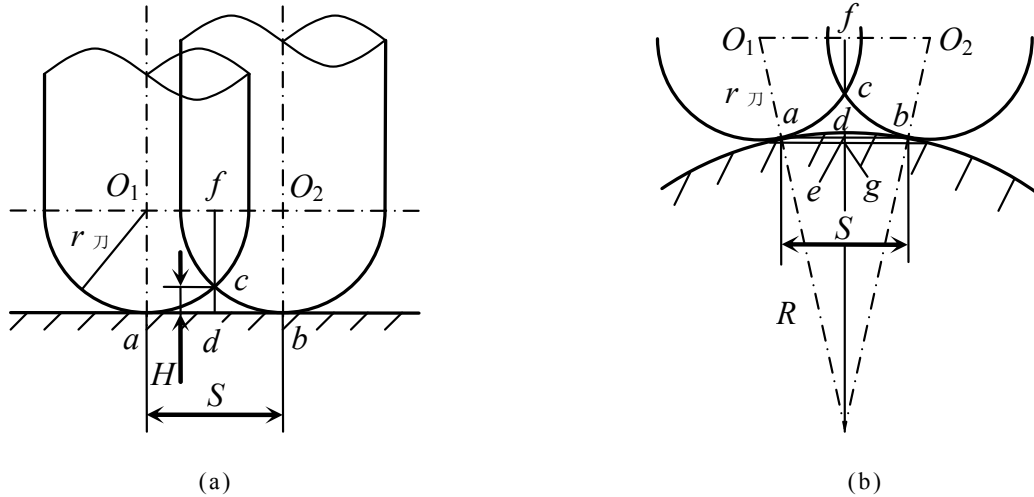


图 8-36 三坐标曲面行距 S 的计算

而
$$\overline{ad} = \overline{O_1f} = \sqrt{r_{刀}^2 - f_c^2} = \sqrt{r_{刀}^2 - (r_{刀} - cd)^2} = \sqrt{2r_{刀}cd - cd^2}$$

因为
$$\overline{cd} = H$$

所以
$$S = 2\sqrt{H(2r_{刀} - H)}$$

对于曲面, 可取 a 点或 b 点的曲率半径作圆, 用这样近似法求行距 S (图 8-36 (b))

$$S = 2 \cdot \overline{ae}$$

而
$$\overline{ae} = \overline{O_1f} \cdot \frac{R}{r_{刀} + R}$$

而

当球头刀半径与零件曲面上曲率半径 R 相差较大, 而且在一定表面粗糙度条件下 H 较小时可近似取:

$$\begin{aligned} O_1f &= \sqrt{r_{刀}^2 - f_c^2} = \sqrt{r_{刀}^2 - (f_g - cg)^2} \\ &\approx \sqrt{r_{刀}^2 - (r_{刀} - H)^2} = \sqrt{H(2r_{刀} - H)} \end{aligned}$$

所以

$$S = 2\sqrt{H(2r_{刀} - H)} \cdot \frac{R}{r_{刀} \pm R}$$

式中当被加工零件的曲面在 ab 段内是凸时取“+”号；是凹时取“-”号，曲面曲率半径 R 是一个变量，因此，在编程是可以每加工一行计算一个 S 值。

对于五坐标加工，若采用端铣刀切削时，其行距 S 的计算公式可由图 8-37 所示的关系中导出：

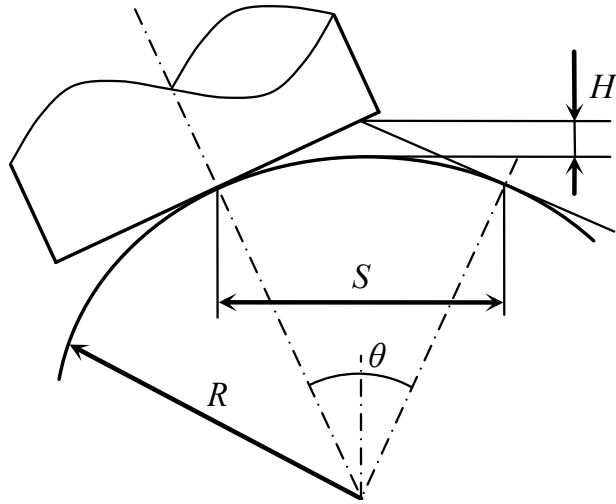


图 8-37 五坐标曲面加工 S 的计算图

因为 $\cos \frac{\theta}{2} = \frac{R}{R+H}$ $\sin \frac{\theta}{2} = \frac{S}{2R}$

所以

$$\left(\frac{R}{R+H}\right)^2 = 1 - \left(\frac{S}{2R}\right)^2$$

整理得

$$\frac{4R^2 - S^2}{4R^2} = \frac{R^2}{R^2 + 2RH + H^2}$$

将上式展，并消去 H^2 ，有 $H = S^2 \left(\frac{1}{8R} + \frac{H}{4R^2} \right)$ ，同样考虑到 $H \ll R$ ，H 可以进为

$$H = S^2 \left(\frac{1}{8R} \right)$$

于是五坐标曲面加工的行距 S 的计算公式为

$$S \approx \sqrt{8RH}$$

对于加工每一行时，在切削方向的步长 L（插补段长度）的确定方法，与自由曲线加工时步长计算方法相同，在此不再赘述。

4、曲面处理

曲面处理，即曲面的定义和计算，是曲面计算机辅助编程中重要部分，其关键在于选择一种适合于计算、描述雕塑曲面的数学方法。这种方法应具有以下一些特点：

- 用尽可能少的几何信息来定义雕塑曲面，并且这些几何信息易于由程编人员提供；
- 所定义的曲面要容易在图形显示终端上进行显示，并能方便地改变原始输入数据，对

构造的曲面进行修改和控制；

- 应能控制多个曲面片容易连接成整张曲面；
- 能对现有的曲面进行插值或逼近计算，计算出的数据满足数控加工的需要。

满足上述要求的曲面处理方法很多，如孔斯曲面法（Coons）、贝齐尔曲面法、B样条曲面法等等。它们共同点是属于曲面片法，即是将任意复杂的曲面分割成适当的若干小块（曲面片），每一曲面片分别用参数方程加以描述，然后再选择适当曲面片与曲面片之间的连接条件，使边界上的一阶导数和二阶导数连续，最后便可获得达到一定精度要求的整张曲面。

(1) 孔斯（Coons）曲面

孔斯（Coons）曲面的双三次曲面片矢量方程(见图 8-38)，为

$$V(u, w) = [U][M][B][M]^T[W]^T \quad (8-64)$$

矩阵 U 和 W 分别由参数 u 和 w 组成，其中 u、w 从 0 变化到 1，切都具有三次性质，即

$$\begin{cases} [U] = [u^3 & u^2 & u & 1] \\ [W] = [w^3 & w^2 & w & 1] \end{cases}$$

M 为系数矩阵，由沿曲面片边界的曲面确定，并表示为

$$[M] = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

B 为边界条件矩阵，它包括了两曲面片边界有关的全部信息，并分别为四个子矩阵，即

$$[B] = \begin{bmatrix} [P] & [P'_w] \\ [P'_u] & [T_{uw}] \end{bmatrix}$$

式中：P 举证为包含四个角点坐标， P'_u 和 P'_w 为四个角点上分别对 u 和 w 的导矢，T 为扭矢矩阵，包含四个角点的混合偏导数。

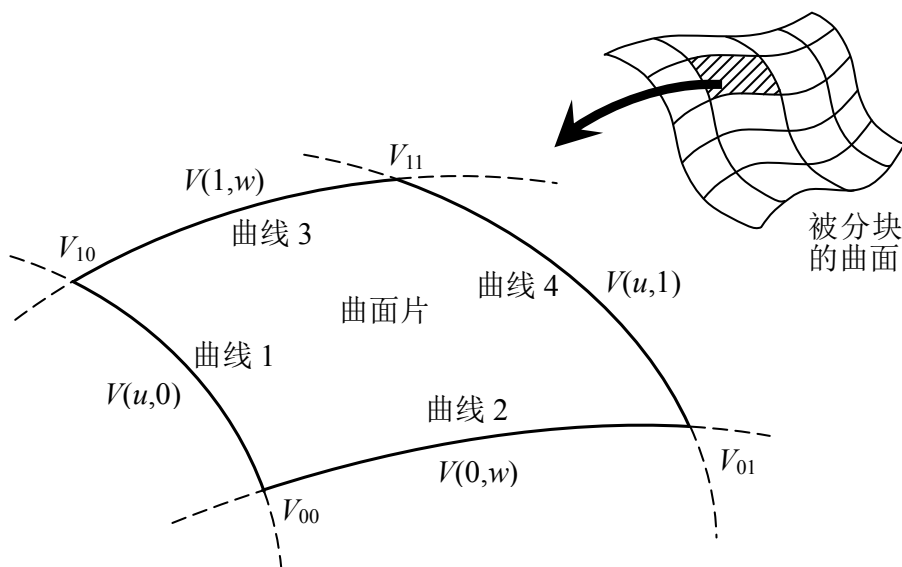


图 8-38 孔斯 (Coons) 双三次曲面片

为了理解 Coons 曲面片的矢量方程, 用图 8-40 所示的曲面片来说明, 给定的边界曲线函数 $V(u, w)$ 为三次曲线的形式。例如曲线 1 为

$$V(u, w) = Au^3 + Bu^2 + Cu + D$$

式中的 A、B、C、D 为系数, 可以通过设定曲面片边界上的导矢和位置的连续性求得。

如图 8-38 所示, 为所有的参数 u 何 w 规定如下的简化表示符号:

角点坐标表示, 如 $V_{10} = V(1, 0)$

导矢表示, 如 $V_{10w} = \frac{\partial}{\partial u} V(1, 0)$

扭矢表示, 如 $V_{10uw} = \frac{\partial^2}{\partial u \partial w} V(1, 0)$

于是方程式 () 一般可以写成如下的形式

$$V(u, w) = [u^3 \quad u^2 \quad u \quad 1][M] \begin{bmatrix} V_{00} & V_{01} & V_{00w} & V_{01w} \\ V_{10} & V_{11} & V_{10w} & V_{11w} \\ V_{00u} & V_{01u} & V_{00uw} & V_{01uw} \\ V_{10u} & V_{11u} & V_{10uw} & V_{11uw} \end{bmatrix} [M]^T \begin{bmatrix} w^3 \\ w^2 \\ w \\ 1 \end{bmatrix}$$

在实际应用中, 用 B_x 、 B_y 、 B_z 分别表示防城 () 中的 B 的各元素的 X、Y、Z 分量所构成的 4×4 方阵。于是可以根据给定 u 和 w 参数, 按下式计算出曲面片上任一点 x 、 y 、 z 的坐标值:

$$\begin{cases} x = [U][M][B_x][M]^T[W]^T \\ y = [U][M][B_y][M]^T[W]^T \\ z = [U][M][B_z][M]^T[W]^T \end{cases} \quad (8-65)$$

计算 M 矩阵的例子如下:

在式 (8-64) 中, 曲面片边界曲线是以三次形式表达的。从该方程出发, 建立三次函数上坐标位置、导矢与系数 A、B、C、D 之间联系, 则矩阵 M 中的各元素便可求得。

沿 u 向的边界曲线方程为

$$F(u) = Au^3 + Bu^2 + Cu + D$$

或用矩阵形式表示为

$$F(u) = [u^3 \quad u^2 \quad u \quad 1][A \quad B \quad C \quad D]^T$$

导矢为

$$\frac{\partial}{\partial u} F(u) = [3u^2 \quad 2u \quad 1 \quad 0][A \quad B \quad C \quad D]^T$$

如果考虑曲线的起点 ($u=0$) 和终点 ($u=1$), 则有

$$\begin{cases} F(0) = D \\ F(1) = A + B + C + D \\ F'(0) = C \\ F'(1) = 3A + 2B + C \end{cases}$$

或写成

$$\begin{bmatrix} F(0) \\ F(1) \\ F'(0) \\ F'(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = [m][c]$$

若令

$$[M] = [m]^{-1}$$

$$\text{则} \quad [A \ B \ C \ D]^T = [M][F(0) \ F(1) \ F'(0) \ F'(1)]$$

应用一般矩阵方法计算, 则有

$$[M] = [m]^{-1} = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

应用孔斯 (Coons) 曲面法在数控编程时, 首先得工作是在工艺分析基础上, 将曲面分块、编号, 再根据所确定的行程和步长得曲面片的参数 u 、 w 值, 再去计算曲面片上的插补点坐标以及插补点切矢, 为计算刀具轨迹坐标做好准备。

(2) B 样条曲面

B 样条曲面具有良好的局部性, 便于对曲面形状的控制, 因此在实践中应用非常广泛。下面就以 B 样条曲面为例, 对曲面的处理方法予以介绍。

① B 样条曲面的数学描述

若给定控制顶点 $V_{k,l} (k = 0, 1, 2, \dots, n-1; l = 0, 1, 2, \dots, m-1)$, 基函数为 $N_{k,n}, N_{l,m}$, 则任意次 B 样条曲面定义式为

$$S(u, w) = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{m-1} N_{k,n}(u) N_{l,m}(w) V_{k,l}$$

$$(0 \leq u, w \leq 1)$$

当 $n = m = 4$ 时, 为 4×4 阶 (3×3 次) B 样条曲面, 它是最常用的双三次 B 样条曲面。于是可推出 3×3 次 B 样条曲面的矩阵表示为

$$S(u, w) = [U][L][V][L]^T[W]^T \quad (8-66)$$

式中

$$[U] = [u^3 \quad u^2 \quad u \quad 1]$$

$$[L] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{6} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{0,0} & V_{0,1} & V_{0,2} & V_{0,3} \\ V_{1,0} & V_{1,1} & V_{1,2} & V_{1,3} \\ V_{2,0} & V_{2,1} & V_{2,2} & V_{2,3} \\ V_{3,0} & V_{3,1} & V_{3,2} & V_{3,3} \end{bmatrix}$$

$$[W] = [w^3 \quad w^2 \quad w \quad 1]$$

② B 样条曲面的构造

对于均匀 B 样条曲面，由上述的 B 样条曲面的定义式，当固定 w 对 u 而言，是 $(n-1)$ 次 B 样条曲线；固定 u 对 w 而言，是 m 阶 $(m-1)$ 次 B 样条曲线。B 样条曲面是由两族 B 样条曲线交织而成的。

双三次均匀 B 样条曲面片，由给定空间 16 个点的位置矢量的端点（顶点），并按序排成 4×4 方阵来定义，每延伸 4 个控制顶点，就延伸一小块曲面。

双三次 B 样条曲面的生成可按下列两步进行：

1) 沿 w 向生成 B 样条曲线 $S(w)$ （见图 8-39），可以写出曲线 $S_0(w), S_1(w), S_2(w), S_3(w)$ 的表达式如下：

$$S_0(w) = [V_{0,0}, V_{0,1}, V_{0,2}, V_{0,3}] [L]^T [W]^T$$

$$S_1(w) = [V_{1,0}, V_{1,1}, V_{1,2}, V_{1,3}] [L]^T [W]^T$$

$$S_2(w) = [V_{2,0}, V_{2,1}, V_{2,2}, V_{2,3}] [L]^T [W]^T$$

$$S_3(w) = [V_{3,0}, V_{3,1}, V_{3,2}, V_{3,3}] [L]^T [W]^T$$

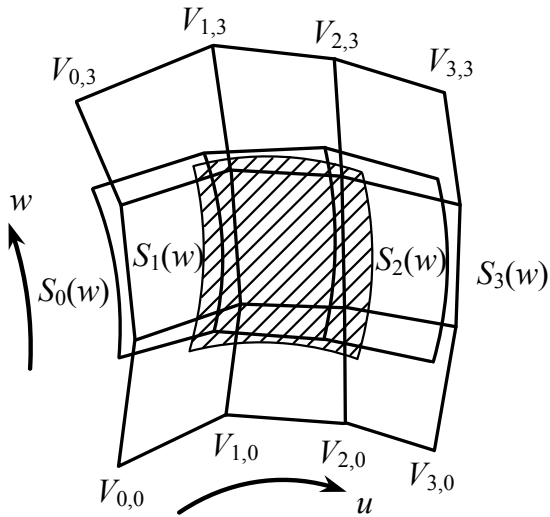
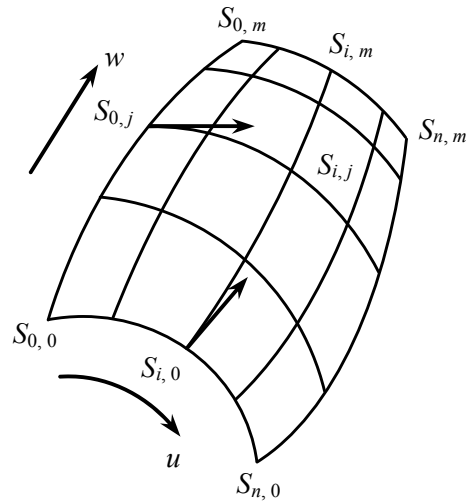


图 8-39 均匀三次 B 样条曲面图



7-40 双三次 B 样条曲面的反求

2) 沿 u 向生成 B 样条曲线 $S(u)$ ，此时可以认为是顶点沿 $S(w)$ 线滑动，每一组顶点对应相同的参数 w ，当 w 值从 0 变化到 1 时，便构作出均匀三次 B 样条曲面，其表达式为

$$S(u, w) = [U][L][S_0(w) \ S_1(w) \ S_2(w) \ S_3(w)]^T$$

将前面的 $S_0(w)$ 、 $S_1(w)$ 、 $S_2(w)$ 和 $S_3(w)$ 式代入上式后，即得到 B 样条曲面的公式

$$s(u, w) = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{m-1} N_{k,n}(u) N_{l,m}(w) V_{k,l}$$

3) 由已知型值点网格构造曲面和插值计算

对于编制三坐标曲面至五坐标曲面加工程序来说，主要是依据零件图纸上给出的列表坐标数据，所以必须讨论由已知的型值点网格构造出双三次 B 样条曲面并进行插值计算。为此需要由这些已知的型值点反求出与之相对应的控制网格顶点。

由已知型值点反求控制网格顶点的过程与上面介绍的由控制网格顶点构作 B 样条曲面的过程恰恰相反。这就是曲面反算问题。

如图 8-40 所示，首先对 u 向的 $n+1$ 组型值点，

按 B 样条曲线的反求算法，得到各条插值曲线的特征

多边形顶点 $Q_{i,j} (i = -1, 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, m)$ 。

然后，将 $Q_{i,j}$ 看作在 w 方向的 $m+1$ 组型值点列，在按 B 样条曲线的反求算法得到

$V_{i,j} (i = -1, 0, 1, \dots, n, n+1; j = -1, 0, 1, \dots, m, m+1)$ 。此批 $V_{i,j}$ 就是双三次 B 样条曲面控制（特征）网

格的顶点，利用它可以算出曲面上任意的位置矢量。

下面讨论边界条件的处理问题：

在沿 u 向和 w 方向进行特征多边形顶点的反求时，可按需要选取不同的边界条件。

从 $S_{i,j}$ 反算 $Q_{i,j}$ 所需的端点条件按曲面给定的边界条件 $\frac{\partial S}{\partial u}(i=0, m; j=0, 1, \dots, m)$ ，这是显而易见的。

的。从 $Q_{i,j}$ 反算 $V_{i,j}$ 所需的端点条件可根据曲面边界条件 $\frac{\partial S}{\partial w}(i=0, 1, \dots, n; j=0, m)$ 及二阶混合偏

导矢 $\frac{\partial^2 S}{\partial u \partial w}(i=0, n; j=0, m)$ 换算。换算方法如下：

由 $Q_{i,j}$ 反求 $V_{i,j}$ 时，对任一个 i 值而言（即暂时将 i 值固定），把 u 向曲线顶点 $Q_{i,j}(j=0, 1, 2, \dots, m)$ 当作型值点，在 w 方向反求顶点。根据三次 B 样条曲线的端点性质，在 $Q_{i,j}$ 处的切矢量为

$$Q'_{i,0} = \frac{1}{2}(V_{i,1} - V_{i,-1})$$

这样，问题就转化为如何求出顶点矢量差 $(V_{i,1} - V_{i,-1})$ ，见图 8-41，图中“ \bullet ”表示曲面上型值

$S_{i,j}(i=0, \dots, n; j=0, \dots, m)$ ；“ \times ”表示 u 向线顶点 $Q_{i,j}(i=1, 0, \dots, n+1; j=0, \dots, m)$ ；“ \circ ”表示曲面

控制网格顶点 $V_{i,j}(i=-1, 0, \dots, n+1; j=-1, 0, \dots, m+1)$ 。

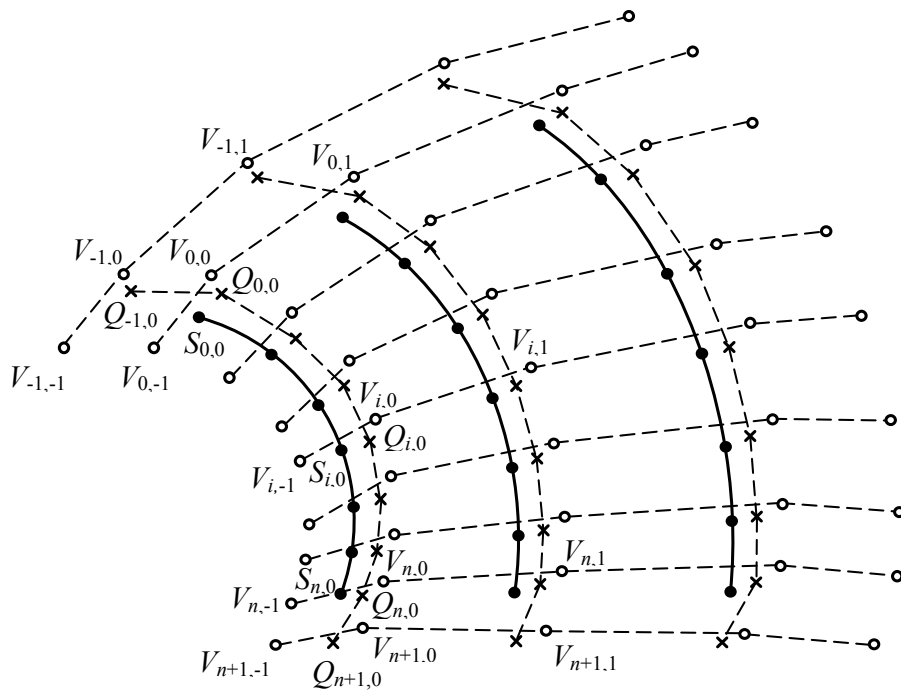


图 8-41 边界条件

从曲面方程求导可得

$$\left. \frac{\partial S}{\partial w} \right|_{i,0} = \frac{1}{12}(V_{i-1,1} - V_{i-1,-1}) + \frac{1}{3}(V_{i,1} - V_{i,-1}) + \frac{1}{12}(V_{i+1,1} - V_{i+1,-1})$$

$$(i = 0, 1, \dots, n)$$

$$\left. \frac{\partial^2 S}{\partial u \partial w} \right|_{i,0} = -\frac{1}{4}(V_{i-1,1} - V_{i-1,-1}) + \frac{1}{4}(V_{i+1,1} - V_{i+1,-1})$$

$$(i = 0, n)$$

(8-67)

因为 $\left. \frac{\partial S}{\partial w} \right|_{i,0} (i = 0, 1, \dots, n)$ 和 $\left. \frac{\partial^2 S}{\partial u \partial w} \right|_{i,0} (i = 0, n)$ 为曲面已知边界条件, 将 $(V_{i,1} - V_{i,-1})(i = -1, 0, \dots, n+1)$ 看成未知数, 上面式(8-67)恰好提供了 $(n+3)$ 个方程。解此线性方程组即可求出顶点矢量差 $(V_{i,1} - V_{i,-1})$ 。在另一端同样可以求得顶点矢量差 $(V_{i,n+1}, V_{i,n-1})$, 从而问题得到解决。

在求出控制(特征)网格顶点之后, 即可对曲面进行插补计算。

5、刀位数据的计算

我们知道, 编制三坐标曲面加工程序时, 通常需要计算与被加工曲面等距的刀具中心轨迹坐标数据, 如图 8-42 中 Q 点坐标值。不论采用哪种三轴联动的机床, 只要球头刀半径相同, 刀心轨迹是固定的, 机床运动轨迹都一样。

根据前述的关于行距、步长的确定方法, 可以计算出曲面的一系列加工参数 $\{u, w\}$ 。利用曲面的数学定义式和现有的加工参数 (u, w) , 可产生加工曲面所需要的刀具轨迹上任一点坐标数据。为此需要计算出曲面上每一点处的单位法矢量, 再乘以球头刀半径 $r_{刀}$, 便找出球头刀中心在该点的空间位置。

如图 8-43 所示, 设曲面的矢量方程为 $S = S(u, w)$, 其参数方程为

$$x = x(u, w), y = y(u, w), z = z(u, w)$$

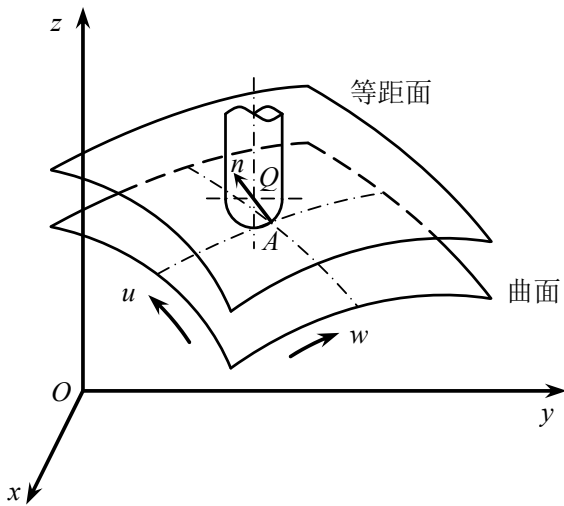


图 8-42 等距面上 Q 与曲面上 A 的关系

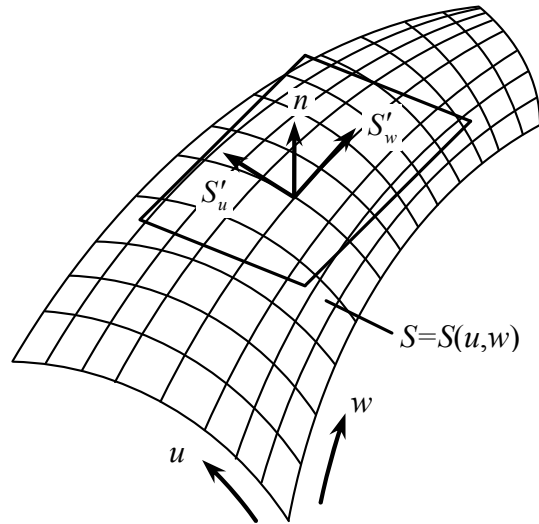


图 8-43 曲面的法矢量

取曲面上任一点关于参数 u 及 w 的切矢量，分别记作 S'_u, S'_w ，则有

$$\begin{aligned} S'_u &= (x_u, y_u, z_u) \\ S'_w &= (x_w, y_w, z_w) \end{aligned}$$

式中 $x_u, y_u, z_u, x_w, y_w, z_w$ 分别为 X, Y, Z 关于参数 u 和 w 的偏导数，于是法矢

$$n = S'_u \times S'_w = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_u & y_u & z_u \\ x_w & y_w & z_w \end{vmatrix}$$

记

$$n = (n_x, n_y, n_z)$$

其中

$$n_x = \begin{vmatrix} y_u & z_u \\ y_w & z_w \end{vmatrix}, n_y = \begin{vmatrix} z_u & x_u \\ z_w & x_w \end{vmatrix}, n_z = \begin{vmatrix} x_u & y_u \\ x_w & y_w \end{vmatrix}$$

记

$$S = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}$$

则法矢的方向余弦分别为

$$\cos \alpha = \frac{n_x}{S}, \cos \beta = \frac{n_y}{S}, \cos \gamma = \frac{n_z}{S}$$

于是球头刀中心的坐标按下式计算：

$$\left\{ \begin{array}{l} x_Q = x_A + r_{\text{刀}} \cos \alpha \\ y_Q = y_A + r_{\text{刀}} \cos \beta \\ z_Q = z_A + r_{\text{刀}} \cos \gamma \end{array} \right. \quad (8-68)$$

思考与作业题

1. 什么是非圆曲线轮廓零件？编制此类零件需要作怎样的数学处理。
2. 什么叫“等插补段法”和“等插补误差法”？它们在进行非圆曲线逼近时插补段长度和节点坐标计算过程有什么不同？
3. 列表曲线轮廓零件加工程序编制时首要任务是选择一种曲线描述方法，试说明对所选择的方法有哪些要求，并说明满足这些要求的曲线描述方法常用的有哪几种
4. 简述列表曲线轮廓零件计算机辅助编程的大致过程。
5. 简述三次样条函数的定义，三次样条函数在实际应用中有什么限制和问题？
6. 用三次样条逼近列表曲线后，为什么还要二次逼近？二次逼近有哪些方法？
7. 已知由三次样条函数 $y(x)$ 描述的列表曲线轮廓上相邻两个节点 P_1 、 P_2 的坐标及一阶导数（切线），试用作图法画出两段相切的圆弧，并证明两圆弧切点的轨迹为一圆。
8. 试根据三次样条插值法的算法，画出逐段比较法逼近三次样条曲线的较详细框图。要求输入为离散的列表点、插补精度、端点条件等，输出为可直接用于编写数控加工程序相关数据。
9. 试用高级语言编制用双圆弧段法逼近三次样条曲线的计算程序，并调试计算。已知样条曲线上节点坐标：(15,10)、(20, 20)、(22, 30)、(45, 50)、(75, 40)，允许插补误差为 0.01mm。
10. 以累加弦长为参数样条曲线有什么优点？
11. 何谓圆弧样条曲线？它是怎样构成的？有什么优点？
12. 简述方程式 (8-45) $A\alpha = B + G$ 等解法，并说明 G 的几何意义。
13. 什么是三次 B 样条曲线段和曲线？为什么在数控编程中常用 B 样条的反算法？
14. B 样条曲线有什么几何特性？
15. 已知 B 样条的控制顶点 V_i 、 V_{i+1} 、 V_{i+2} 、 V_{i+3} ，试画出 B 样条曲线段。如 V_i 、 V_{i+1} 、 V_{i+2} 、 V_{i+3} 共线，B 样条曲线又如何？
16. 编制列表去曲线加工程序时，为什么要对原始数据进行光滑处理？曲线光滑的准则是什么？
17. 简述列表曲面轮廓零件计算机辅助编程的大致过程。
18. 确定曲面加工的行距和步长主要依据是什么？行距和步长对曲面加工程序编制和加工有何重要意义？
19. 列表曲面加工程序编制时首要任务是选择一种曲面描述方法，试说明对所选择的方法有哪些要求，并说明满足这些要求的曲面描述方法常用的有哪几种？
20. 什么是曲面片法？试简述孔斯 (Coons) 曲面法和 B 样条曲面法在数控加工中应用方

法，各有什么特点？

参 考 文 献

- 1 王润孝主编. 机床数控原理与系统. 西安: 西北工业大学出版社, 1996
- 2 范炳炎编著. 数控加工程序编制. 北京: 航空工业出版社, 1995
- 3 王永章等编著. 机床的数字控制技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995
- 4 王仁德, 赵春雨, 张耀满编著. 机床数控技术. 沈阳: 东北大学出版社, 2002
- 5 杨有君主编. 数字控制技术与数控机床. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 6 姚永刚, 田效伍, 芦家成编. 机电传动与控制技术. 北京: 中国轻工业出版社, 2005
- 7 李运华等编著. 机电控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003
- 8 邵俊鹏, 董玉红主编. 机床数控技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995
- 9 陈国呈编著. 变频调速技术. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 10 许大中编著. 晶闸管无换向器电机. 北京: 科学出版社, 1984
- 11 BEIJING-FANUC 0i-MA 系统操作说明书
- 12 许友谊, 李金伴主编. 数控机床编程技术. 北京: 化学工业出版社, 2005
- 13 许祥泰, 刘艳芳编著. 数控加工编程实用技术. 北京: 机械工业出版社, 2003
- 14 吴祖育, 秦鹏飞主编. 数控机床. 上海: 上海科学技术出版社, 2007
- 15 朱晓春, 吴祥, 任皓. 数控技术. 北京: 机械工业出版社, 2001.5
- 16 林宋, 田建君. 现代数控机床. 北京: 化学工业出版社, 2003.8
- 17 赵玉刚, 宋现春, 童桂英, 刘迎春. 数控技术. 北京: 机械工业出版社, 2003.6
- 18 杨继昌, 李金伴. 数控技术基础. 北京: 化学工业出版社, 2004.3
- 19 毕毓杰. 机床数控技术. 北京: 机械工业出版社, 1995.10
- 20 王贵明. 数控实用技术. 北京: 机械工业出版社, 2000.7