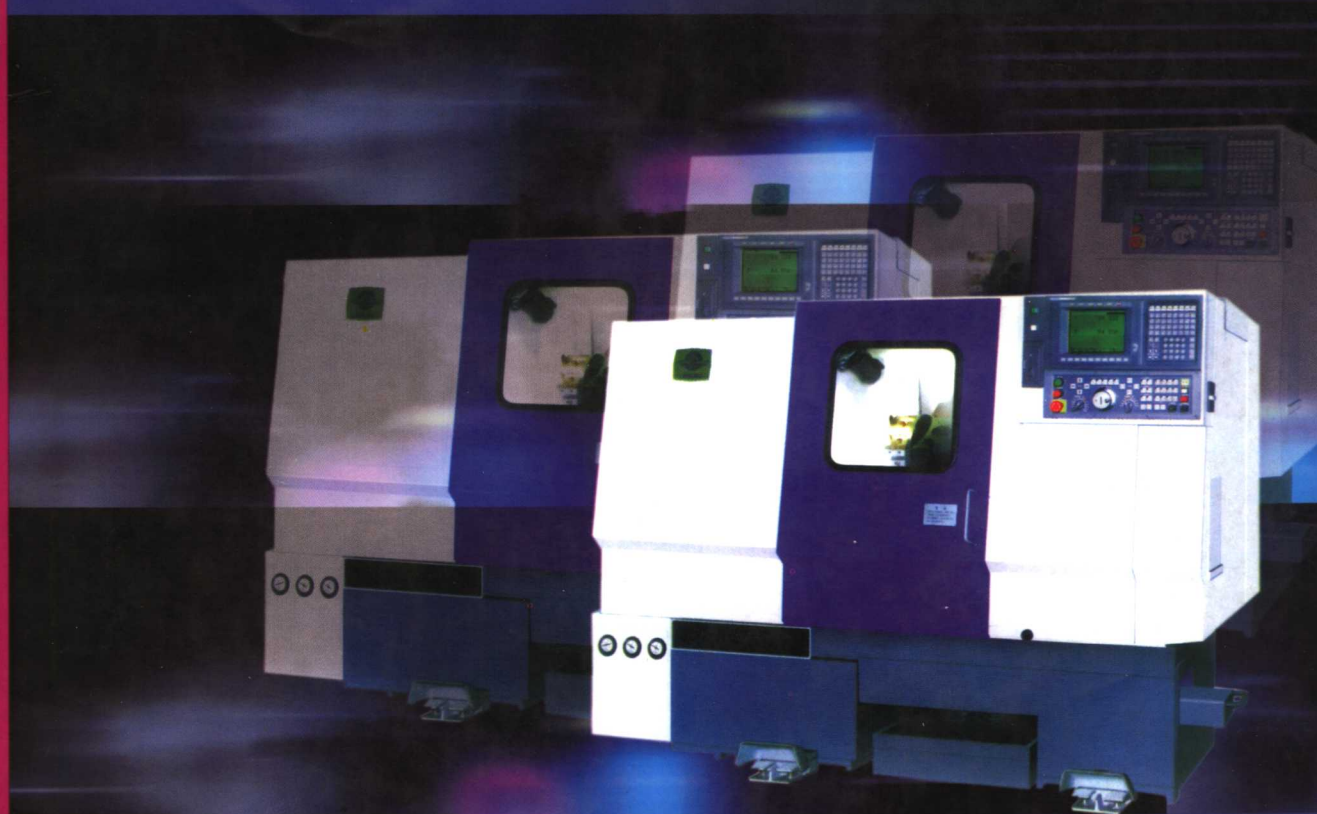


高职高专机电类规划教材



数控机床及其应用

李善术 主编



机械工业出版社
China Machine Press



全书共分七章：数控机床概述，数控机床程序编制，计算机数控(CNC)系统，数控机床的机械部件与结构，进给伺服驱动及主轴驱动系统，数控机床用可编程控制器，数控机床的使用和维修。每章后附有适当的习题与思考题，便于学生复习。

本书可以作为高职数控技术应用专业、数控技术加工专业、机电一体化专业、机械制造专业的教材，也可作为大专、中职、职大、电大师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床及其应用/李善术主编. —北京：机械工业出版社，2001.5
高职高专机电类规划教材
ISBN 7-111-08567-1

I. 数… II. 李… III. 数控机床-高等学校：技术学校-教材
IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第09950号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑：邓海平 版式设计：霍永明 责任校对：张媛
封面设计：方芬 责任印制：路琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2003年7月第1版·第3次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·20.25印张·501千字
定价：26.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在各学校多年使用《数控机床及其应用》教材的实际教学基础上,广泛征求教师、专家意见,结合高等职业技术教学特点和大纲精神,重新进行编写的机电类专业教材。

本着职业技术教育以应用为主的教学原则,适当增加了“数控机床的程序编制”一章的内容,除保留数控车床、数控铣床程序编制内容外,增加了加工中心程序编制等内容,以满足数控加工技术的发展。原第七章内容取消,改为第六章“数控机床用可编程控制器”,为学生实际调试数控机床奠定基础。增加第七章“数控机床的使用与维修”,并对其它章节的相关内容也做适当的调整,以满足厂矿企业对数控机床使用维修人员的需求。第四章“数控机床的机械结构与部件”也做了恰当的修改。为了满足课程设计和毕业设计教学需要,保留了“经济型CNC装置硬件结构”、“普通机床数控化改造”等课节内容。经编写后,教材的内容既突出应用为主,又能使学生对数控机床有全面的认识;既讲述基本原理,又注意理论与实际的结合;每章都附有适当的思考题及习题。

数控机床涵盖科学技术最新成果,课程内容涉及面广。考虑到机电类各专业对该课程内容需求的侧重不同,教材的各章节内容相对独立,以便于在教学中根据专业设置、学生知识结构情况及教学计划时数等灵活选用相关章节,组织教学。例如,数控机床加工、机械制造、模具制造类专业,应以第二章“数控机床程序编制”为主,适当选取其它章节内容进行教学;数控机床调试维修类专业,应当对数控机床全面了解,侧重第四章“数控机床的机械部件与结构”、第六章“数控机床用可编程控制器”、第七章“数控机床的使用与维修”以及第五章“伺服驱动系统”等;数控技术应用类专业,则应以第三章“计算机数控(CNC)系统”、第五章“伺服驱动系统”和第六章“计算机用可编程控制器”为主组织教学。第一章“数控机床概述”对各类专业来说,都是重点,通过该章的讲述,使学生尽快的建立起数控机床的完整概念。

本书可以满足职业技术学院机电类专业的教学要求,可供大专、职大、电大师生及工程技术人员参考。

本书由陕西工业职业技术学院李善术主编,付维亚主审。参加修编的有赵云龙、刘向红、周永喜、刘清、段文洁等,周永喜在绘制插图和文字整理工作中做了大量的工作,在此表示感谢。同时对多年来参预、关心该教材编写,对该教材提出过宝贵建议和意见,使用该教材的各兄弟院校的教师们表示由衷感谢。

因教材涉及内容广泛,编者水平有限,难免出现错误和处理不妥之处,请读者批评指正。

编者
于咸阳

目 录

前言

第一章 数控机床概述 1

第一节 数控机床简介 1

一、计算机促进了数控机床的发展 1

二、自动化加工与数控机床 1

三、数控机床的产生 2

第二节 数控机床的组成、工作原理 和特点 2

一、数控机床的组成及工作原理 2

二、数控机床的特点 7

第三节 数控机床的分类 8

一、按工艺用途分类 8

二、按控制的运动轨迹分类 9

三、按控制方式分类 11

四、按功能分类 13

第四节 数控机床的发展趋势 13

一、机床结构的发展 13

二、计算机控制性能的发展 14

三、伺服驱动系统的发展 14

四、自适应控制 15

五、计算机群控 15

六、柔性制造系统 16

习题与思考题 18

第二章 数控机床的程序编制 19

第一节 程序编制的基本知识 19

一、程序编制的内容 19

二、程序编制方法 21

三、数字控制标准与穿孔带代码 21

四、程序中的信息字和程序格式 23

五、数控机床的坐标系和运动方向的 规定 26

第二节 数控机床加工工艺分析 27

一、数控机床的选择和加工工序的 安排 28

二、工件的装夹和换刀点位置的确定 28

三、确定加工路线 30

四、数控机床加工刀具的选择 32

五、数控机床的刀具配备 33

六、切削用量的选择 37

第三节 常用准备功能和辅助功能 37

一、坐标系有关指令 38

二、快速点定位指令——G00 40

三、直线插补指令——G01 40

四、圆弧插补指令——G02、G03 41

五、暂停(延时)指令——G04 43

六、返回参考点指令——G27、G28、 G29 44

七、刀具半径自动补偿指令——G41、 G42、G40 44

八、刀具长度偏置指令——G43、G44 46

九、辅助功能 M 简介 46

第四节 数控车床的程序编制 47

一、数控车床的编程特点 47

二、车削固定循环程序 48

三、螺纹切削指令 53

四、车刀刀具补偿 55

五、车削加工编程实例 59

第五节 数控铣床的程序编制 60

一、数控铣床的加工实例和编程特点 60

二、数控铣床的刀具补偿功能 63

三、固定循环功能 67

四、用户宏指令 72

第六节 加工中心的程序编制 76

一、卧式加工中心的标准坐标系 76

二、加工中心的自动换刀过程 77

三、换刀指令及换刀程序 77

四、卧式加工中心的编程实例 78

第七节 数控编程的数学处理 84

一、已知非圆曲线方程式的数学处理 84

二、列表曲线的数学处理简介 90

第八节 计算机自动编程 90

一、自动编程概述 90

二、JB 数控语言及其源程序 92

第九节 CAD/CAM 概述 99

一、CAD/CAM 的发展趋势 99

二、图形交互编程系统简介 100

三、在 PC 机上实现图形交互编程 101

习题与思考题 106

第三章 计算机数控 (CNC) 系统 109

第一节 CNC 系统的基本概念	109	二、滚珠丝杠螺母副	173
一、CNC 系统简介	109	三、进给系统传动齿轮间隙的消除	179
二、CNC 装置的组成	109	第四节 自动换刀装置	182
三、CNC 装置的工作流程	110	一、数控车床刀架	182
四、CNC 装置的数据转换流程	111	二、加工中心自动换刀系统	186
五、CNC 数控系统的特点	113	第五节 分度工作台和回转工作台	191
第二节 CNC 系统的硬件结构	114	一、分度工作台	191
一、大板式结构和模块化结构	114	二、数控回转工作台	194
二、单微处理器结构	114	习题与思考题	196
三、多微处理器结构	115	第五章 伺服驱动系统	197
四、主要硬件元件功能	117	第一节 概述	197
第三节 经济型 CNC 装置硬件结构	123	一、伺服驱动系统的概念	197
一、经济型 CNC 装置简介	123	二、伺服系统的组成和工作原理	198
二、8031 单片机	125	三、伺服系统的分类	199
三、存储器扩展电路	126	四、进给伺服电动机类型	199
四、面板操作键和方式选择开关	129	第二节 步进电动机开环伺服系统	200
五、强电接口电路	130	一、步进电动机	200
六、键盘显示器接口电路	131	二、步进电动机的性能指标	203
第四节 软件插补方法	132	三、步进电动机开环控制	204
一、逐点比较插补法	133	四、混合式步进电动机	210
二、直线插补运算	134	第三节 闭环伺服驱动系统	212
三、圆弧插补运算	138	一、直流伺服电动机控制	212
四、数字积分插补原理	143	二、交流伺服电动机控制	220
第五节 进给速度控制	149	第四节 主轴驱动	225
一、进给速度给定	149	一、数控机床对主轴驱动的要求	225
二、进给速度控制	150	二、直流主轴电动机	225
三、步进电动机升降速控制	152	三、交流主轴电动机	226
第六节 系统软件结构简介	154	四、主轴定向控制(准停)	227
一、子程序结构	154	第五节 检测元件	228
二、中断型软件结构	154	一、数控机床对检测元件的要求与检测	
三、前后台型软件结构	156	元件的分类	228
习题与思考题	157	二、旋转变压器	229
第四章 数控机床的机械结构与		三、脉冲编码器	231
部件	159	四、绝对值脉冲编码器	233
第一节 数控机床的结构组成及特点	159	五、光栅测量装置	234
一、数控机床机械结构的主要组成	159	六、磁尺测量装置	239
二、数控机床机械结构的主要特点	159	七、感应同步器	240
第二节 数控机床的主传动系统及主轴		习题与思考题	244
部件	166	第六章 数控机床用可编程控制器	245
一、数控机床的主传动系统	166	第一节 概述	245
二、主传动系统的分类	167	一、PLC 与 RLC 在数控机床上的应用	
三、典型的主传动系统及部件	168	比较	245
第三节 数控机床进给系统机械传动部分		二、数控机床用 PLC	246
的元件	173	第二节 数控机床的控制对象及接口	
一、对进给系统的性能要求	173	信号	248

一、NC 侧与 MT 侧的概念	248	第二节 安装与调试	283
二、数控机床接口	248	一、机床初就位	283
三、输入、输出信号规范	249	二、机床连接	283
第三节 梯形图工作原理	250	三、数控系统的连接和调试	284
一、梯形图结构	251	四、通电试车	286
二、梯形图与继电器逻辑电路在操作上的差别	251	五、机床精度和功能的调试	287
三、高级顺序和低级顺序	252	六、试运行	288
四、输入信号同步处理	252	第三节 数控机床的验收	288
五、顺序处理时间的计算	253	一、概述	288
六、顺序程序的执行	254	二、机床的几何精度检查	288
第四节 典型 PLC 指令系统和编程	255	三、数控柜的外观检查	289
一、基本指令	255	四、机床的定位精度检查	290
二、功能指令	255	五、机床的切削精度检查	292
第五节 梯形图应用举例	264	六、机床性能及 NC 功能试验	294
一、润滑系统自动控制梯形图	264	七、机床的外观检查	295
二、刀库自动选刀控制梯形图	270	第四节 数控机床的使用与维修	296
三、故障报警显示梯形图	271	一、机床使用要点	296
习题与思考题	275	二、数控机床维修的基本概念	300
第七章 数控机床的使用与维修	276	三、预防性维护	301
第一节 数控机床的选用	276	四、常见故障分类	303
一、确定典型加工工件	276	第五节 普通机床数控化改造	304
二、数控机床规格的选择	276	一、改造的一般步骤	304
三、机床精度的选择	277	二、普通机床数控化改造实例	305
四、数控系统的选择	279	习题与思考题	313
五、工时和节拍的估算	279	附录	314
六、自动换刀装置的选择及刀柄的配置	280	附录 A EIA RS-244A 代码	314
七、数控机床驱动电动机的选择	282	附录 B ISO-840 代码	314
八、机床选择功能及附件的选择	283	附录 C 数控机床用 EIA 编码表	315
九、技术服务	283	附录 D 数控机床用 ISO 编码表	316
		参考文献	317

第一章 数控机床概述

第一节 数控机床简介

一、计算机促进了数控机床的发展

20 世纪最伟大的发明之一计算机的出现和应用,为人类提供了实现机械加工工艺过程自动化的理想手段。当科技人员首次把计算机作为一种信息处理装置移植到古老机床中时,一种新的产品——数控机床诞生了。随着计算机的发展,数控机床也得到迅速的发展和广泛的应用,特别是加工中心(MC, Machining Center)、直接数字控制系统(DNC, Direct Numerical Control)、柔性制造系统(FMS, Flexible Manufacturing System)、计算机集成制造系统(CIMS, Computer Integrated Manufacturing System)、智能制造系统(IMS, Intelligent Manufacturing System)等的出现,使数控机床已成为现代制造技术的基础,同时使人们对传统的机床传动及结构的观念发生了根本的转变。数控机床水平的高低和拥有量的多少,是衡量一个国家工业现代化的重要标志。

数控机床以数字信息技术为基础,集传统的机械制造技术、微电子技术、计算机技术、成组技术、现代控制技术、传感检测技术、信息处理技术、网络通信技术、液压气动技术、光机电一体化等技术的最新成果而迅速发展和广泛应用,使得普通机械加工设备逐渐被高效率、高精度的数控机床所取代,从而形成了巨大的生产力,导致机械制造业发生根本的变化。

二、自动化加工与数控机床

在机械制造行业中,长期以来,人们探索如何实现机械加工工艺自动化。因为实现自动化,不仅可以提高产品的质量,提高生产率,降低成本,而且能改善工人的劳动条件。

传统的机械制造行业如汽车、拖拉机、家用电器等行业中采用的自动机床、组合机床和专用自动生产线实现机械加工自动化,这种自动化设备适合大批量的生产条件,并需要很大的资金以及较长的生产准备时间。机床生产厂、国防部门等机械制造行业,其生产特点是加工批量小,改型频繁,零件的形状复杂,而且精度要求高,采用专用自动化机床显然不合理,因为经常改装、调整专用自动化机床是不可能实现的,长期以来只能采用普通机床进行加工。在市场竞争日趋激烈,为满足市场不断变化的需要,必须改变产品单一且长期不变的生产方式,开发研制新产品,改变大批大量的生产格局。这种传统的机械加工自动设备和普通机床的缺点日益暴露,它们不能适应市场竞争要求,采用高质量、高效益和多品种小批量柔性生产方式已是现代企业生存与发展的必要条件。而数控机床能极其有效地解决这一系列矛盾,为加工出精度高、形状复杂的单件、小批量零件提供自动加工手段。

机床数字控制技术,简称机床数控技术,是以数字化的信息处理实现机床自动控制的一门技术。采用数字化信息处理控制的机床称为数字控制机床,简称数控机床。

数控机床把刀具和工件之间的相对位置,机床电动机的起动和停止,主轴变速,工件松开夹紧,刀具的选择,冷却泵的起动、停止等各种操作和顺序动作等信息用数码化的数据记录在控制介质(如穿孔带或磁带)上,然后将数字信息送入数控装置或计算机,经过译码、运

算,发出各种指令控制机床伺服系统或其它执行元件,使机床自动加工出所需工件。

数字化信息的处理是在数字控制系统进行。最初的数字控制(NC, Numerical Control)系统是由数字逻辑电路构成的,因而称为硬件数控系统。随着计算机技术的发展,硬件数控系统已逐渐被淘汰,被计算机数控(CNC, Computer Numerical Control)系统取代。CNC系统完全由软件处理数字信息,具有真正意义上的柔软性,可以处理逻辑电路难以处理的复杂信息,使数控机床的性能大大提高。

数控机床的突出特点是当加工工件改变时,除了重新装夹工件和更换刀具之外,只需要更换含有该工件加工信息的介质(例如穿孔带),而不需要对数控机床作任何调整。这种灵活、通用并能迅速适应工件变更的特性,称为柔性。传统的自动加工机械不具备柔性特点。

数字控制和顺序控制是两个不同的概念。数字控制过程是自动化控制过程,进行自动控制的指令,是由数字控制系统对数字化信息经过信息处理(运行软件)后生成的,并对各种动作的位移量、速度和顺序实现自动控制。顺序控制只能控制各种自动加工动作的先后顺序,对运动部件的位移量不能控制,位移量的改变是靠预先调整好尺寸的档块等方式实现。

三、数控机床的产生

第一台数控机床是为了适应航空工业制造复杂工件的需要产生的。1952年,美国麻省理工学院和帕森斯公司合作研制成功了世界上第一台具有信息存储和信息处理功能的新型机床,即数控机床。之后,随着电子技术,特别是计算机技术的发展,数控机床不断更新换代。

第一代数控机床从1952年至1959年,采用电子管元件;第二代数控机床从1959年开始,采用晶体管元件;第三代数控机床从1965年开始,采用集成电路;第四代数控机床从1970年开始,采用大规模集成电路及小型通用计算机。第五代数控机床从1974年开始,采用微处理器或微型计算机。

我国从1958年开始研制数控机床,1975年又研制出第一台加工中心。改革开放以来,由于引进国外的数控系统与伺服系统,使我国的数控机床在品种、数量和质量方面都得到迅速发展。从1986年开始,我国数控机床开始进入国际市场。目前我国有几十家机床厂能够生产数控机床和数控加工中心。我国经济型数控机床的研究、生产和推广工作取得了很大进展,对机床技术改造起到了积极推动作用。

数控技术不仅用于数控机床的控制,还用于控制其它机械设备,例如数控线切割机、自动绘图机、数控测量机、数控编织机、数控剪裁机、机器人等。

目前,在数控技术领域,我国同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。随着我国国民经济迅速发展,随着企业设备改造和技术更新的深入开展,各行业对数控机床的需要量将大幅度增加,这将有力地促进数控机床的发展。

第二节 数控机床的组成、工作原理和特点

数控机床是一种利用信息处理技术进行自动加工控制的金属切削机床,是数控技术运用的典范。熟悉数控机床的组成,不仅能掌握数控机床的工作原理,同时掌握了数控技术在其它行业的应用。

一、数控机床的组成及工作原理

数控机床由输入介质、人机交互设备、计算机数控装置、进给伺服驱动系统、主轴伺服

驱动系统、辅助装置、可编程控制器（PLC，Programmable Logic Controller）、反馈装置和适应控制装置等部分组成，如图 1-1 所示。各部分的工作原理简叙如下。

1. 控制介质

要对数控机床进行控制，就必须在人与数控机床之间建立某种联系，这种联系的中间媒介物就是控制介质，又称为信息载体。在使用数控机床之前，先要根据零件图上规定的尺寸、形状和技术条件，编出工件的加工程序，将加工工件时刀具相对于工件的位置和机床的全部动作顺序，按照规定的格式和代码记录在信息载体上。需要在数控机床上加工该工件时，把信息载体上存放的信息（即工件加工程序）输入计算机控制装置。常用的控制介质有穿孔带、穿孔卡、磁盘和磁带。

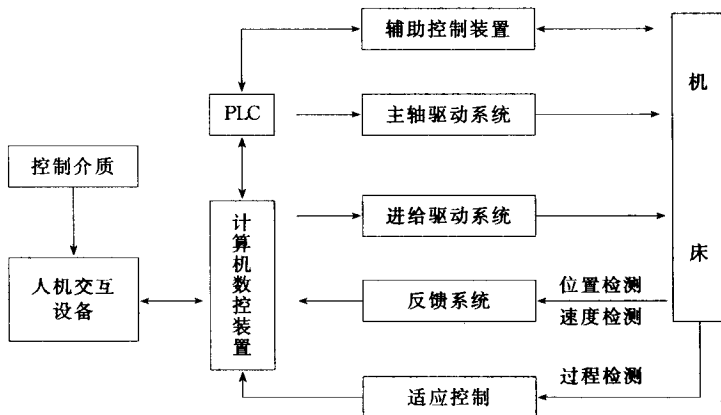


图 1-1 数控机床的组成框图

传统的方式是将编制好的程序记录在穿孔带上，穿孔带是八单位标准黑色穿孔纸带的简称，它的尺寸如图 1-2 所示。穿孔纸带每行共有 9 个孔，其中 $\phi 1.17\text{mm}$ 的小孔是同步孔， $\phi 1.33\text{mm}$ 孔为信息孔。信息采用代码形式按规定格式存储在穿孔带上。所谓代码就是由一些信息孔按标准排列的一行二进制图案，每一行代码分别表示一个十进制数或一个英文字母或一个功能符号。国际上通用 EIA 代码和 ISO 代码（见附录 A 和附录 B）。穿孔带上的代码信息可由光电阅读机送入计算机控制装置。

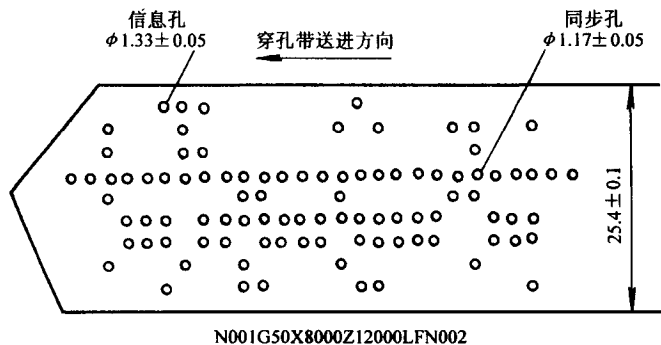


图 1-2 八单位标准穿孔纸带

随着计算机技术的发展，在计算机中的通用外设存储装置也融入数控系统，例如计算机中的软、硬磁盘驱动器作为存储零件的介质引入数控系统。与穿孔纸带相比，磁盘存储密度大，存取速度快，存取方便，所以应用越来越广泛。

2. 人机交互设备

数控机床在加工运行时，通常都需要操作人员对数控系统进行状态干预和输入控制介质存放的加工程序，对输入的加工程序进行编辑、修改和调试，同时数控系统要显示数控机床运行状态等，也就是数控机床要具有人机联系的功能。具有人机联系功能的设备统称人机交互设备。

键盘和显示器是数控系统不可缺少的人机交互设备，操作人员可通过键盘和显示器输入

简单的加入程序、编辑修改程序和发送操作命令,即进行手工数据输入(MDI, Manual Data Input),因而键盘是交互设备中最重要的输入设备。数控系统通过显示器提供必要的信息,根据数控系统所处的状态和操作命令的不同,显示的信息可以是正在编辑的程序,或是机床的加工信息。简单的显示器是由若干个数码管构成的,能显示的信息有限;高级的数控系统一般都配有CRT显示器或点阵式液晶显示器,显示信息丰富。低档的CRT显示器或液晶显示器只能显示字符,高档显示器还能显示加工轨迹图形。

光电阅读机是一种传统的人机交互设备,也称读带机,它的作用是将穿孔带上的代码逐行地转换成数控装置可以识别和处理的电信号。图1-3是其结构示意图。灯泡5发出的光,经过透镜4会聚成一条窄光带,再穿过穿孔带6照到九个光敏元件10上,九个光敏元件与穿孔带上八个信息孔和一个同步孔的位置一一对应。由于穿孔带上有孔或无孔使光敏元件受光或不受光而改变阻值,再转换为电压高低变化的电信号,输入数控装置。走带时,先起动小电动机2带动

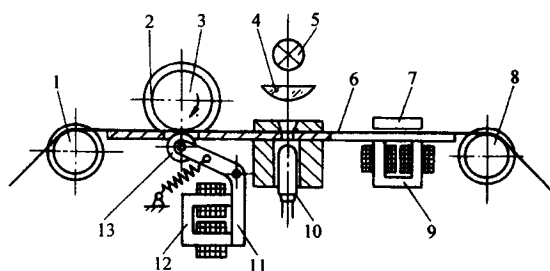


图 1-3 光电阅读机结构示意图

1、8—导向轮 2—电动机 3—主动轮 4—透镜
5—灯泡 6—穿孔带 7、11—衔铁 9、12—电
磁铁 10—光敏元件 13—压轮

主动轮3,这时制动电磁铁9断电,起动电磁铁12吸合衔铁11,使压轮13把穿孔带压向主动轮3,主动轮带动绕在左右导向轮1和8上的穿孔带自右向左移动。当穿孔带代码出现程序结束的信息时,制动电磁铁9将衔铁7吸合,将穿孔带夹住并停止送带。穿孔带移动速度可达200行/s。

3. 计算机数控(CNC)装置

数控装置是数控机床的中枢,目前,绝大部分数控机床采用微型计算机控制。数控装置由硬件和软件组成,没有软件,计算机数控装置就无法工作;没有硬件,软件也无法运行。图1-4中双点划线框内包含的部分是数控装置硬件结构框图,它由运算器、控制器(运算器和控制器构成CPU)、存储器、输入接口、输出接口等组成。

输入接口接收由穿孔带阅读机送入的代码信息,经过识别与译码之后送到指定存储区,作为控制与运算的原始数据。读带过程是在光电阅读机控制程序的控制下进行的。简单的加工程序可用手动数据输入方式(MDI)输入,即在键盘控制程序的控制下,操作人员直接用键盘把工件加工程序输入存储器。数控机床的加工过程可概括为数据处理、插补运算、位置控制三个基本部分,整个过程在系统管理程序的控制下有条不紊地进行工作。

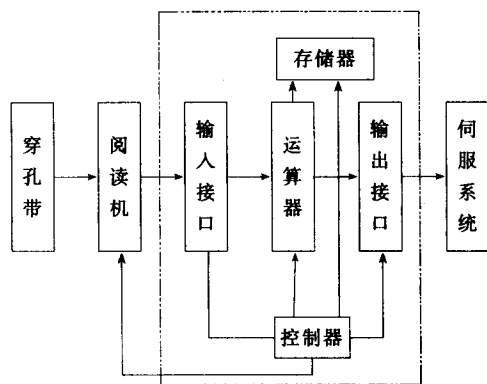


图 1-4 数控装置结构框图

4. 进给伺服驱动系统

进给伺服驱动系统由伺服控制电路、功率放大电路和伺服电动机组成。进给伺服系统的性能,是决定数控机床加工精度和生产效率的主要因素之一。

伺服驱动的作用,是把来自数控装置的位置控制移动指令转变成机床工作部件的运动,使工作台按规定轨迹移动或精确定位,加工出符合图样要求的工件。因为进给伺服驱动系统是数控装置和机床本体之间的联系环节,所以它必须把数控装置送来的微弱指令信号,放大成能驱动伺服电动机的大功率信号。

常用的伺服电动机有步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机。根据接收指令的不同,伺服驱动有脉冲式和模拟式,而模拟式伺服驱动方式按驱动电动机的电源种类,可分为直流伺服驱动和交流伺服驱动。步进电动机采用脉冲驱动方式,交、直流伺服电动机采用模拟式驱动方式。

进给伺服驱动系统是控制数控机床工作台或移动刀架的位置控制系统。为了保证数控机床的加工精度,一般要求定位精度为 $0.01 \sim 0.001\text{mm}$,精密数控机床要求达到 0.0001mm ;要求响应要快,稳定性要好,为保证系统的跟踪精度,要求动态过程在 200ms 甚至几十毫秒以内,同时要求超调量要小;要求进给速度在 $0 \sim 24\text{m/min}$ 能正常工作,高性能数控机床要求在 $0 \sim 240\text{m/min}$ 可以连续调整;要求在低速进给时输出较大的转矩。

脉冲当量是衡量数控机床精度的重要参数。数控装置输出一个脉冲信号(一个移位节拍指令)使机床工作台移动的位移量叫做脉冲当量,用 δ 表示。进给伺服驱动系统定位精度越高,脉冲当量越小,常用脉冲当量有 0.01mm/P 、 0.05mm/P 、 0.001mm/P ,精密数控机床要求达到 0.0001mm/P 。

5. 主轴驱动系统

机床的主轴驱动系统和进给伺服驱动系统差别很大,机床主轴的运动是旋转运动,机床进给运动主要是直线运动。早期的数控机床一般采用三相感应同步电动机配上多级变速箱作为主轴驱动的主要方式。现代数控机床对主轴驱动提出了更高的要求,要求主轴具有很高的转速(液压冷却静压主轴可以在 20000r/min 的高速下连续运行)和很宽的无级调整范围,能在 $1:100 \sim 1:1000$ 内进行恒转矩调整和在 $1:10 \sim 1:30$ 内进行恒功率调整;主传动电动机应具有 $2.2 \sim 250\text{kW}$ 的功率,既要能输出大的功率,又要求主轴结构简单,同时数控机床的主驱动系统能在主轴的正反方向都可以实现转动和加减速。

为了使数控车床进行螺纹车削加工,要求主轴和进给驱动实现同步控制;在加工中心上为了能自动换刀,还要求主轴能实现正反方向和加速、减速控制;在加工中心上为了保证每次自动换刀时刀柄上的键槽对准主轴上的端面键,以及精镗孔后退刀时不会划伤已加工表面,要求主轴能进行高精度的准停控制;为了保证端面加工质量,要求主轴具有恒线速度切削功能;有的数控机床还要求具有角度分度控制功能。现代数控机床绝大部分采用交流主轴驱动系统,由可编程控制器进行控制。

6. 辅助控制装置

辅助控制装置包括刀库的转位换刀,液压泵、冷却泵等控制接口电路,电路含有的换向阀电磁铁,接触器等强电电气元件。现代数控机床采用可编程控制器进行控制,所以辅助装置的控制电路变得十分简单。

7. 可编程控制器

可编程控制器的作用是对数控机床进行辅助控制,其作用是把计算机送来的辅助控制指令,经可编程控制器处理和辅助接口电路转换成强电信号,用来控制数控机床的顺序动作、定时计数、主轴电机的起动、停止,主轴转速调整,冷却泵起停以及转位换刀等动作。可编程

控制器本身可以接受实时控制信息同数控装置共同完成对数控机床的控制。

可编程控制器 (PC, Programmable Controller) 是一种以微处理器为核心的通用型工业控制装置, 能在使用条件较差的工业环境下应用。由于最初研制这种装置的目的是为了解决机械设备的逻辑及开关量控制, 故也把它称可编程逻辑控制器 (PLC, Programmable Logic Controller)。当 PLC 用于控制机床顺序动作时, 也可称为可编程机床控制器 (PMC, Programmable Machine Controller)。现在通常用 PLC 表示可编程控制器, 而用 PC 表示个人计算机 (Personal Computer)。

PLC 采用存放在程序存储器中的编程程序进行工作, 编程程序包括逻辑运算、顺序控制、定时计数和算术运算等操作指令, 并通过输出数字量或模拟量形式控制机械设备的生产过程。

在 PLC 出现之前, 机床的动作顺序控制是以机床当前运行状态为依据, 控制机床按规定好的动作依次有序地工作, 实现动作顺序控制的手段是传统的继电器逻辑电路 (RLC, Relay Logic Circuit)。这种电路是将继电器、接触器、开关、按钮等电气分立元件用导线连接而成的控制回路, 由于继电器逻辑电路存在体积大、耗电量多、寿命短、可靠性差、动作迟缓、柔性低、不易扩展等许多缺点, 逐渐被 PLC 组成的顺序控制系统所取代。现在 PLC 已成为数控机床不可缺少的控制装置。

CNC 和 PLC 协调配合共同完成数控机床的控制, 其中 CNC 主要完成与数字运算和管理有关的功能, 如工件程序的编辑、插补运算、译码、位置伺服控制等, PLC 主要完成与逻辑运算有关的动作, 如工件装夹、刀具的更换、冷却液的开停等辅助动作; 它还接受机床操作面板的控制信息, 一方面直接控制机床的动作, 另一方面将一部分指令送往 CNC 用于加工过程的控制。

数控机床上使用的 PLC 可以分成两类: 一类是 CNC 生产厂家为实现数控机床的顺序动作控制, 而将 CNC 和 PLC 综合起来设计, 称为内装型 PLC, 内装型 PLC 是 CNC 装置的一部分; 另一种是以独立专业化的 PLC 生产厂家的产品实现数控机床的顺序控制功能, 称独立型 PLC。

内装型 PLC 与 CNC 之间的信息传送在 CNC 内部进行, PLC 与机床 (MT, Machine Tool) 之间信息传送通过 CNC 的输入/输出接口电路实现。这种类型的 PLC 不能独立工作, 只是 CNC 向 PLC 功能的扩展, 两者不能分离。内装型 PLC 可与 CNC 共用一个 CPU, 如西门子的 SINUMERIK810、820 等数控系统, 也可以单独使用一个 CPU, 如 FANUC 的 0 系统和 15 系统, 美国 A-B 公司 8400、8600 等。由于 CNC 功能和 PLC 功能在设计时一同考虑, 因而这种类型的数控系统在硬件和软件整体结构上合理、实用, 性能价格比高, 适用于同类型或类型变化不大的数控机床。由于 PLC 和 CNC 之间没有多余的连线, 并且 PLC 上的信息能通过 CNC 显示器显示, PLC 的编程更为方便, 而且故障诊断功能和系统的可靠性也有提高。

数控机床生产厂家也可选用独立型 PLC, 特别是当数控机床的功能扩展和变更时, 如向 FMC、CIMS 发展时, 不至于使原数控系统做很大的变动。独立型 PLC 与 CPU 之间通过输入/输出接口连接。

目前国内引进的 PLC 产品有百种之多, 著名的有西门子公司 SIMATIC 系列, 日本立石公司的 OMRON-SYS-MAC 系列, 以及日本 FANUC 公司的 PMC 系列。本教材第七章对日本立石公司的 OMRON 作简明介绍。

8. 反馈系统

反馈系统的作用是通过测量装置将机床移动的实际位置、速度参数检测出来，转换成电信号，并反馈到 CNC 装置中，使 CNC 能随时判断机床的实际位置、速度是否与指令一致，并发出相应指令，纠正所产生的误差。

测量装置安装在数控机床的工作台或丝杠上，相当于普通机床的刻度盘和人的眼睛。按有无检测装置，CNC 系统可分为开环与闭环系统，而按测量装置安装的位置不同又可分为闭环与半闭环数控系统。开环数控系统的控制精度取决于步进电动机和丝杠的精度，闭环数控系统的精度取决于测量装置的精度。因此，检测装置是高性能数控机床的重要组成部分。

9. 适应控制

数控机床工作台的位移量和速度等过程参数可在编写程序时用指令确定，但是有一些因素在编写程序时是无法预测，如加工材料机械特性的变化引起切削力变化，加工现场的温度等，这些随机变化的因素也会影响数控机床的加工精度和生产效率。适应控制 (AC, Adaptive Control) 的目的，就是企图把加工时出现的随机因素对加工的影响减到最小。

适应控制是采用各种传感器测出加工过程中的温度、转矩、振动、摩擦、切削力等因素的变化，与最佳参数比较，若有误差及时补偿，以期提高加工精度或生产率。目前适应控制仅用于高效率 and 加工精度高的数控机床，一般数控机床很少采用。

10. 机床

数控机床是高精度和高生产率的自动化加工机床，与普通机床相比，应具有更好的抗振性和刚度，要求相对运动面的摩擦因数要小，进给传动部分之间的间隙要小。所以其设计要求比通用机床更严格，加工制造要求精密，并采用加强刚性、减小热变形、提高精度的设计措施。

二、数控机床的特点

在大批量生产条件下，采用机械加工自动化可以取得较好的经济效益。大批量生产中加工自动化的基础是工艺过程的严格性，从而可以建立自动流水线。对于小批量的产品生产，由于生产过程中产品品种的变换频繁，批量小，加工方法的区别大，因此实现加工自动化存在相当的难度，不能采用大批量生产的刚性自动化方式。因此，大力发展柔性制造技术成为机械加工自动化必然出路。

柔性制造技术实际上是由计算机控制的自动化制造技术，包含计算机数控的单台加工设备和各种规模的自动化制造系统。所以数控机床是实现柔性自动化的重要设备。与其它加工设备相比，数控机床具有如下特点：

(1) 适应性强，适合加工单件或小批量复杂工件 在数控机床上改变加工工件时，只需要重新编制新工件的加工程序，更换新的穿孔带或用手动方式输入工件程序，就能实现新工件加工。数控机床加工工件时，只需要简单的夹具，所以改变加工工件后，也不需要制作特别的工装夹具，更不需要重新调整机床。因此，数控机床特别适合单件、小批量及试制新产品的工件加工。

(2) 加工精度高，产品质量稳定 数控机床的脉冲当量普遍可达 0.001mm/P ，传动系统和机床结构都具有很高的刚度和热稳定性，工件加工精度高，进给系统采用消除间隙措施，并对反向间隙与丝杠螺距误差等由数控系统实现自动补偿，所以加工精度高。特别是因为数控机床加工完全是自动进行的，这就消除了操作者人为产生的误差，使同一批工件的尺寸一致性好，加工质量十分稳定。

(3) 生产率高 工件加工所需时间包括机动时间和辅助时间。数控机床能有效地减少这两部分时间。数控机床主轴转速和进给量的调速范围都比普通机床的范围大, 机床刚性好, 快速移动和停止采用了加速、减速措施, 因而既能提高空行程运动速度, 又能保证定位精度, 有效地降低了加工时间。

数控机床更换工件时, 不需要调整机床。同一批工件加工质量稳定, 无需停机检验, 故辅助时间大大缩短。特别是使用自动换刀装置的数控加工中心机床, 可以在一台机床上实现多工序连续加工, 生产效率的提高更加明显。

(4) 减轻劳动强度、改善劳动条件 数控机床加工是自动进行的, 工件加工过程不需要人的干预, 加工完毕后自动停车, 这就使工人的劳动条件大为改善。

(5) 良好的经济效益 虽然数控机床价格昂贵, 分摊到每个工件上的设备费用较大, 但是使用数控机床可节省许多其它费用。例如, 工件加工前不用划线工序, 工件安装、调整、加工和检验所花费的时间少, 特别是不要设计制造专用工装夹具, 加工精度稳定, 废品率低, 减少了调度环节等, 所以总体成本下降, 可获得良好经济效益。

(6) 有利于生产管理的现代化 数控机床使用数字信息与标准代码处理、传递信息, 特别是在数控机床上使用计算机控制, 为计算机辅助设计、制造以及实现生产过程的计算机管理与控制奠定了基础。

第三节 数控机床的分类

目前数控机床的品种很多, 通常按下面四种方法进行分类。

一、按工艺用途分类

1. 一般数控机床

最普通的数控机床有钻床、车床、铣床、镗床、磨床和齿轮加工机床。图 1-5 是 CK7815 数控车床, 图 1-6 是 XK5040 数控铣床。它们和传统的通用机床工艺用途相似, 但是它们的生产率和自动化程度比传统机床高, 都适合加工单件、小批量和复杂形状的工件。

2. 数控加工中心

这类数控机床是在一般数控机床上加装一个刀库和自动换刀装置, 构成一种带自动换刀装置的数控机床。图 1-7 是 XH754 型卧式加工

中心, 图 1-8 是 TH5632 型立式加工中心。这类数控机床的出现打破了一台机床只能进行单工种加工的传统概念, 实行一次安装定位, 完成多工序加工方式。例如 TH5632 型立式加工中心, 它的刀库容量是 16 把刀具, 在刀具和主轴之间有一换刀机械手, 工件一次装夹后, 可自动连续进行铣、钻、镗、铰、扩、攻螺纹等多种工序加工。数控加工中心因一次安装定位完

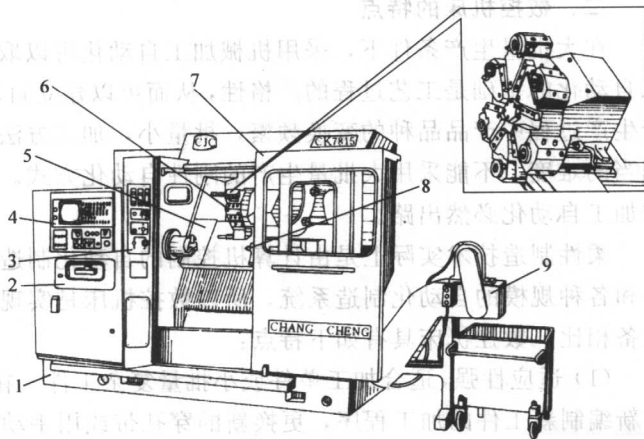


图 1-5 CK7815 数控车床

- 1—床体 2—光电读带机 3—机床操作台 4—数控系统
操作面板 5—倾斜 60°导轨 6—刀盘 7—防护门
8—尾架 9—排屑装置

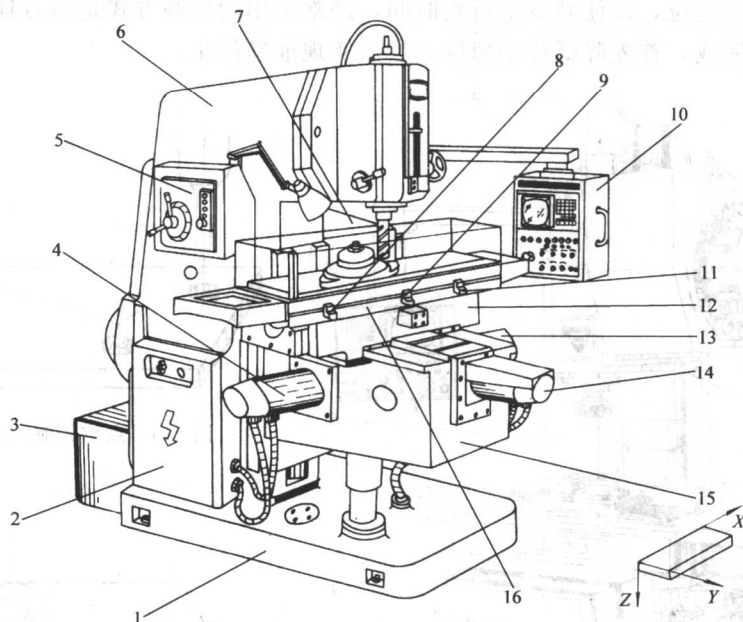


图 1-6 XK5040A 型数控铣床

1—底座 2—强电柜 3—变压器箱 4—升降进给伺服电动机 5—主轴变速手柄和按钮板 6—床身立柱 7—数控柜 8、11—纵向行程限位保护开关 9—纵向参考点设定挡铁 10—操纵台 12—横向溜板 13—纵向进给伺服电动机 14—横向进给伺服电动机 15—升降台 16—纵向工作台

成多工序加工，避免了因多次安装造成的误差，减少机床台数，提高了生产效率和加工自动化程度。

3. 多坐标轴数控机床

有些复杂的工件，例如螺旋桨、飞机发动机叶片曲面等用三坐标数控机床无法加工，于是出现了多坐标轴的数控机床，其特点是控制轴数较多，机床结构比较复杂。坐标轴的轴数取决于加工工件的工艺要求。

二、按控制的运动轨迹分类

1. 点位控制

点位控制数控机床只要求获得准确的加工坐标点的位置。由于数控机床只是在刀具或工件到达指定位置后才开始加工，刀具在工件固定时执行切削任务，在运动过程中并不进行加工，所以从一个位置移动到另一个位置的运动轨迹不需要严格控制。数控钻床、数控坐标镗床和数控冲床等均采用点位控制。图 1-9 是点位控制加工示意图。因为这类机床最重要的性能指标是要保证孔的相对位

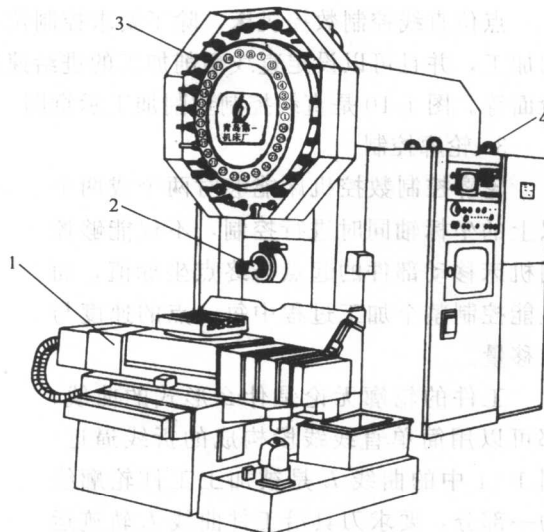


图 1-7 XH754 型卧式加工中心

1—工作台 2—主轴 3—刀库 4—数控柜

置,并要求快速点定位,以便减少空行程时间,经常采用的控制方式是当刀具或工件接近定位点时,分两步完成,首先降低移动速度,然后实现准确停止。

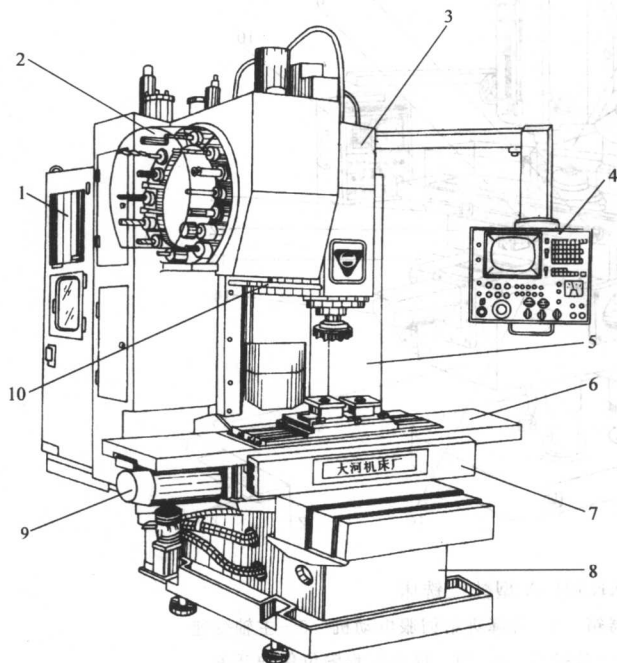


图 1-8 TH5632 型立式加工中心

- 1—数控柜 2—刀库 3—主轴箱 4—操纵台 5—驱动电源柜 6—纵向工作台 7—滑座 8—床身
9—X 轴进给伺服电动机 10—换刀机械手

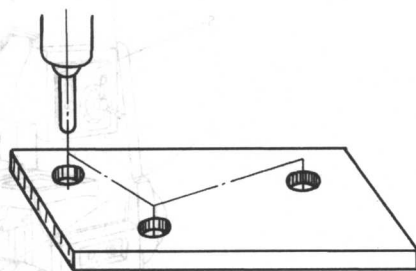


图 1-9 点位控制加工示意图

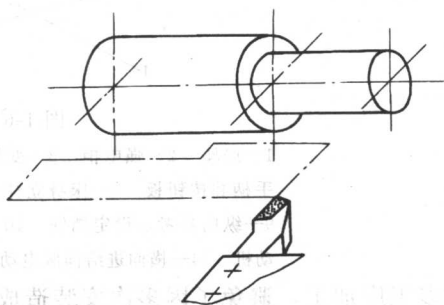


图 1-10 直线控制加工示意图

2. 点位直线控制

点位直线控制数控机床,除了要求控制位移终点位置外,还能实现平行坐标轴的直线切削加工,并且可以设定直线切削加工的进给速度。例如在车床上车削阶梯轴,铣床上铣削台阶面等。图 1-10 是直线控制切削加工示意图。

3. 轮廓控制

轮廓控制数控机床能够对两个或两个以上的坐标轴同时进行控制,不仅能够控制机床移动部件的起点与终点坐标值,而且能控制整个加工过程中每一点的速度与位移量。

工件的轮廓无论是什么形式的曲线,都可以用简单直线线段构成的折线逼近。图 1-11 中的曲线 L 是被加工工件轮廓线的一部分,要求刀具沿工件曲线 L 轨迹运动,进行切削加工,以此为例解释数控系统是怎样控制加工过程每一点的速度与位移

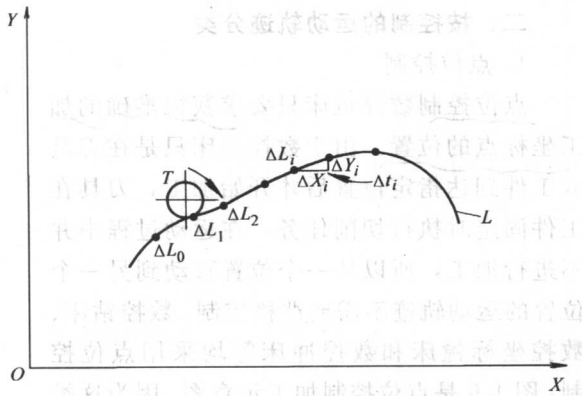


图 1-11 数控机床加工原理

量。现将曲线 L 分解成 $\Delta L_0, \Delta L_1, \dots, \Delta L_i$ 等线段。

设 切削 ΔL_i 时间为 Δt_i

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=0}^{\infty} \Delta L_i = L$$

$$\Delta L_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$$

则 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 折线线段之和接近曲线。即如果在 Δt_i 时间内, 在 X 坐标及 Y 坐标方向移动量分别为 $\Delta x_i, \Delta y_i$, 则进给速度

$$v_i = \frac{\Delta L_i}{\Delta t_i} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x_i}{\Delta t_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta t_i}\right)^2}$$

若 $\Delta v = \text{常数}$ 保持不变时, 称为恒定进给速度。

刀具以恒定速度沿折线移动时, 由于 ΔL_i 的斜率是不断的变化, 因此进给速度在 X 方向及 Y 方向的分速度 Δv_{xi} 与 Δv_{yi} 之间的比值 $\Delta v_{xi}/\Delta v_{yi}$ 在不断的变化。数控装置连续地自动控制 X 和 Y 两个坐标方向运动速度的比值, 就可以实现工件轮廓曲线的数控加工。当然, 用折线逼近实际曲线, 存在一定的误差, 但由于数控机床的脉冲当量通常是 $0.01\text{mm/P} \sim 0.001\text{mm/P}$, 误差在允许范围内。

在进行曲线加工时, 可以给定一个数学函数式模拟线段 ΔL_i 。根据给定的数学函数, 在理想的工件轨迹或轮廓曲线上的已知点之间, 进行数据点的密化, 即确定若干中间点, 这种方法称为插补。

工件的轮廓为一条任意直线时, 给出该直线两端点的坐标值, 数控装置根据端点坐标值, 进行插补, 控制刀具加工运动, 加工出工件轮廓线, 称为直线插补。按照圆弧或其它二次曲线提供的相关坐标信息, 进行插补, 加工出圆弧曲线, 称为圆弧插补、二次曲线插补。处理这些插补的算法, 称为插补运算。

图 1-12 是两坐标轮廓控制数控机床的工作原理图。根据输入的关于工件轮廓的形状信息, 插补器进行插补运算, 根据运算结果, 实时地向各坐标轴发出速度控制指令 (如 $\Delta v_{x0}, \Delta v_{y0}; \Delta v_{x1}, \Delta v_{y1}; \dots, \Delta v_{xi}, \Delta v_{yi}; \dots$), 通过

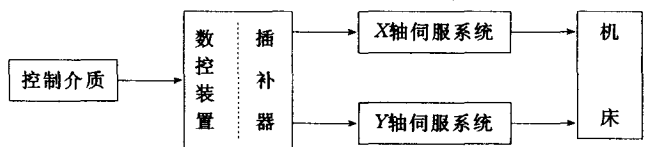


图 1-12 两坐标轮廓控制的工作原理图

伺服电动机使机床工作台沿坐标轴作相应动作, 实现折线逼近, 加工出工件轮廓线。点位直线控制和轮廓控制的根本区别是前者没有插补器, 所以只能加工沿坐标轴的直线。插补运算原理详见第三章。

用插补器能控制两坐标轴完成平面内任意线段加工的数控机床, 称两轴联动数控机床; 用插补器能控制三坐标轴完成三坐标空间内任意线段加工的数控机床, 称三轴联动数控机床。例如三轴两联动数控铣床, 在任一时刻只能控制任意两轴联动, 任意两轴联动可以通过指令设定, 有时称两轴半联动。

三、按控制方式分类

数控机床按照对被控量有无检测反馈装置可分为开环控制和闭环控制两种。在闭环系统中, 根据测量装置安放的部位又分为全闭环控制和半闭环控制两种。