

数控加工理论 与实用技术

王爱玲 李梦群 冯裕强 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



数控加工理论与实用技术

王爱玲 李梦群 冯裕强 编著

机械工业出版社

本书是从理论的角度研究数控加工技术的。全书共分9章, 主要内容包括数控基础知识概论、数控加工中的数学基础、复杂零件数控加工工艺、复杂形状零件数控加工的刀具轨迹计算、数控加工仿真、后置处理、数字化测量与数控仿形技术、计算机数控系统及数控加工实例分析。

本书是面向博士生、硕士生、高年级本科生的数控加工理论和实用技术教材, 内容涵盖面宽, 同时也可高层次的数控加工技术人才的培养和相关技术人员及研究人员的提高提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控加工理论与实用技术/王爱玲, 李梦群, 冯裕强
编著. —北京: 机械工业出版社, 2009.5

ISBN 978-7-111-26325-8

I. 数… II. ①王…②李…③冯… III. 数控机床—加工
IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 021617 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李万宇 责任编辑: 李万宇 章承林

版式设计: 张世琴 责任校对: 申春香

封面设计: 姚 毅 责任印制: 李 妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2009 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·26 印张·503 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-26325-8

定价: 58.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010)68326294

购书热线电话: (010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010)68351729

封面无防伪标均为盗版

前 言

制造业是国民经济和国防建设的基础性产业。先进制造技术是振兴传统制造业的技术支撑和发展趋势,是直接创造社会财富的主要手段,谁先掌握先进制造技术,谁就能够占领市场。数控技术是现代制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础,离开了数控技术,先进制造技术就成了无本之木。数控技术的广泛使用给机械制造业生产方式、产业结构、管理方式带来深刻的变化,它的关联效益和辐射能力更是难以估计。数控技术及数控装备已成为关系国家战略地位和体现国家综合国力水平的重要基础性产业,其水平高低是衡量一个国家制造业现代化程度的核心标志。实现加工机床及生产过程数控化,已经成为当今制造业的发展方向。

我国数控技术及产业尽管在改革开放后取得了显著的成就,开发出具有自主知识产权的数控平台,例如,以 PC 机为基础的总线式、模块化、开放型的单处理器平台和多处理器平台;具有自主版权的基本系统;研制成功并联运动机床等。但是,我国数控装备与先进国家相比,还存在着明显的差距;另外,我国许多企业数控设备利用率很低,数控技术的优势功能得不到充分发挥。随着我国从制造业大国向制造业强国的挺进,数控技术正在普及,数控设备正在大量投入使用。但数控技术人才奇缺现状在全国各地显得十分普遍,尤其是高层次的数控加工技术人才更是严重短缺。数控人才的培养,特别是高层次的人才培养在于高等教育及继续工程教育的具体实施,其关键是为各层次的数控人才提供适用的教材和参考书。

中北大学机械工程与自动化学院机械工程系,1995 年就开设了“机床数控技术”和“制造自动化技术”两个专业方向。王爱玲负责的“机床数控技术”是省级精品课程。“中北大学数控技术教学基地”是省级教学团队,2005 年数控实验基地被列为教育部数控技术应用领域技能型紧缺人才培养培训基地。2007 年王爱玲本人获“第三届高等学校教学名师奖”。在产学研结合方面,从 1985 年开始,中北大学机械工程系与企业合作共同消化吸收引进的多种数控设备、配套研发自动编程系统及 DNC 通用接口装置。1995 年开办本科数控技术专业的同时,注重企业技术人员的继续工程教育,至今已开办了 50 多期现代数控技术高级班、普及班和各种专项班,为 80 多个企事业单位 5000 多名从事数控技术的工程技术人员进行了数控技术培训。从 1996

年开始,中北大学引进数控加工中心,直接从事军用、民用复杂产品及复杂模具的数控编程和加工,获得了20多项国家级、省部级科技进步和优秀教学成果奖,并取得了良好的社会效益和声誉,也形成了一支具有丰富的数控技术教学、科研经验和实践经验的师资队伍。

在教材建设及著作方面,由王爱玲为学科带头人,目前已形成近40多位教师参加的“数控全系列”(内容含数控理论、技术、培训、实训操作、概论等)教材、著作编写团队。“数控全系列”教材及著作力求从理论、技术、应用三个层面,为我国普及和提高数控技术需求做贡献。《数控加工理论与实用技术》正是从理论的角度充实“数控全系列”。本书是面向博士生、硕士生、高年级本科生的数控加工理论和实用技术教材,内容涵盖面宽,希望对高层次的数控加工技术人才的培养和相关技术人员及研究人员的提高能起到一定作用。

本书由王爱玲教授、博士生导师担任主编。全书共有9章,其中,第1、2章由中北大学王爱玲教授编写;第3、6、8章及第9章第1、2节由李梦群博士、教授编写;第4、5、7章及第9章第3、4节由集美大学冯裕强博士、副教授编写,沈兴全博士、教授为第2章提供了部分内容。

2005年写了本书的初稿,并请作者的导师北京航空航天大学朱心雄教授审阅。朱先生仔细审阅了书稿,逐章逐节提出了修改意见。在感激朱先生的同时,深为自己做学问的浮浅而自责,于是我们三位作者决定在参阅大量的文献资料后,重新编著本书。我们要再次感谢朱心雄教授对本书书稿提出了宝贵的意见和建议。还要感谢王爱玲教授的几位硕士研究生管政、李文亮、郭卫卫、王连生等同学为本书电子文档的排版所付出的辛勤劳动。

由于数控技术在不断地发展之中,希望广大的使用者将使用本书的意见和信息及时反馈给作者,以便充实提高。由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免有错误和疏漏,恳请读者批评指正。

作者

王爱玲

目 录

前言

第 1 章 概论 1

1.1 数控技术与数控机床 的基本概念 1

1.1.1 数字控制 1

1.1.2 数控机床 2

1.1.3 机床数字控制的原理 2

1.1.4 数控机床的组成及特点 4

1.2 数控机床分类 5

1.2.1 按运动控制的特点分类 5

1.2.2 按伺服系统的控制方式 分类 8

1.2.3 按数控系统功能水平 分类 9

1.2.4 按工艺用途分类 10

1.2.5 按所用数控装置的构成 方式分类 11

1.3 数控机床技术的发展历 程、现状与发展趋势 11

1.3.1 发展历程 11

1.3.2 技术现状与发展趋势 12

1.4 数控编程技术的发展历 程、现状与发展趋势 21

1.4.1 发展历程 21

1.4.2 技术现状与发展趋势 22

1.5 先进制造技术与数控 装备 24

1.5.1 先进制造技术的内涵 24

1.5.2 先进制造技术的发展

战略 27

1.5.3 先进制造技术及装备 31

第 2 章 数控加工中的数学

基础 37

2.1 圆弧样条 37

2.1.1 圆弧样条的构造方法 37

2.1.2 圆弧样条的光顺处理 44

2.2 局部坐标下的分段三次 样条 45

2.3 B 样条简介 48

2.3.1 B 样条的定义 49

2.3.2 B 样条的几个重要性质 56

2.3.3 3 阶、4 阶均匀 B 样条 曲线的几何特性 58

2.3.4 B 样条曲线的反算 问题 64

2.4 有理 B 样条曲线、 曲面 65

2.4.1 3 种等价的 NURBS 曲线 方程 66

2.4.2 权因子对 NURBS 曲线 形状的影响 68

2.4.3 各种圆弧的 2 次 NURBS 表示 71

2.4.4 各种 2 次曲线弧的 2 次 NURBS 表示 72

2.5 抛物线拟合 73

2.6 曲线的 2 次逼近 75

2.6.1 直线逼近 75

2.6.2 双圆弧逼近	76	3.5.7 编程误差及其控制	107
第3章 复杂零件数控加工工艺 ...	80	第4章 复杂形状零件数控加工	
3.1 数控加工中的坐标系	80	的刀具轨迹计算	109
3.1.1 数控机床坐标系和运动		4.1 二维曲线、轮廓和型腔	
方向	80	加工刀具轨迹计算	109
3.1.2 工件坐标系	82	4.1.1 曲线加工	109
3.1.3 局部坐标系	83	4.1.2 二维轮廓加工	115
3.2 机床与刀具	83	4.1.3 型腔加工刀具轨迹计算 ...	120
3.2.1 数控机床的分类	83	4.2 3坐标曲面加工刀具	
3.2.2 数控铣床类型及其工艺		轨迹计算	125
的特点	84	4.2.1 刀位计算	125
3.2.3 刀具类型及其工艺特点		4.2.2 刀具轨迹的生成方法	126
与刀具选择注意事项	86	4.2.3 进给步长的确定	129
3.3 复杂形状零件数控加工		4.2.4 加工误差分析及补偿	
工艺	89	方法	132
3.3.1 二维轮廓加工	89	4.2.5 切削行距计算	134
3.3.2 二维型腔加工	91	4.2.6 残留高度误差的补偿	135
3.3.3 2坐标联动的3坐标行		4.2.7 避免刀具干涉	137
切法加工曲面	92	4.3 4坐标曲面加工刀具	
3.3.4 3坐标曲面加工	92	轨迹计算	141
3.3.5 4坐标加工	95	4.3.1 零件和刀具的几何	
3.3.6 5坐标曲面加工	96	描述模型	142
3.3.7 曲面粗加工	98	4.3.2 加工误差分析	146
3.4 切削参数的选择与优化 ...	98	4.4 5坐标曲面加工刀具	
3.4.1 切削参数的选择	98	轨迹计算	149
3.4.2 切削参数的优化	100	4.4.1 刀位数据及其计算	149
3.5 其他工艺问题	104	4.4.2 环形刀端铣曲面加工	
3.5.1 加工工序的划分	104	刀位计算方法	150
3.5.2 工步的划分	105	4.4.3 侧铣数控加工刀位计	
3.5.3 顺序的安排	106	算方法	153
3.5.4 数控加工工序与普通		4.4.4 干涉检查与处理	156
加工工序的衔接	106	4.5 基于留量模型的加工	
3.5.5 工件装夹方式的确定	106	路径生成技术	160
3.5.6 对刀点与换刀点的确定 ...	106	4.5.1 基于留量的加工几何	

模型	160	6.4.2 运动变换关系	213
4.5.2 基于留量的补加工	165	6.4.3 机床各轴运动计算	215
第5章 数控加工仿真	168	6.5 非线性运动误差校核	
5.1 数控加工仿真系统结构	169	与处理	217
5.2 几何仿真	171	6.5.1 非线性运动误差校核与	
5.2.1 线框仿真	171	处理方法	217
5.2.2 图像空间法	172	6.5.2 非线性运动误差的控制	
5.2.3 空间分割法	175	研究进展	218
5.2.4 离散矢量法	178	6.6 进给速度的校核与修正	219
5.2.5 直接实体建模法	182	6.6.1 进给速度的校核与修正	
5.2.6 精度验证	182	方法	219
5.2.7 碰撞干涉检验	185	6.6.2 加减速控制研究进展	222
5.3 加工过程物理仿真	188	第7章 数字化测量与数控	
第6章 后置处理	196	仿形技术	223
6.1 后置处理主要任务及		7.1 数控仿形中的数据测量	223
通用后置处理系统设		7.1.1 测头及其分类	223
计的前提条件	196	7.1.2 数控仿形的测量方式和	
6.1.1 后置处理主要任务	196	测头运动控制方式	225
6.1.2 通用后置处理系统设计		7.1.3 数控仿形中的测量规划	225
的前提条件	197	7.2 接触式仿形中的测头	
6.2 通用后置处理系统原理		运动控制	229
及程序结构	198	7.2.1 接触式数控仿形的分类	229
6.2.1 通用后置处理系统原理	198	7.2.2 接触式测头的运动控制	230
6.2.2 通用后置处理程序结构	199	7.3 非接触式仿形的测头	
6.3 多坐标机床的结构形式		运动控制	233
与运动变换	201	7.4 数字化仿形加工的数据	
6.3.1 5坐标数控机床的结构		处理	235
类型	201	7.4.1 多视数据的对齐	235
6.3.2 5坐标机床的运动求解	202	7.4.2 数据平滑、精简及误	
6.3.3 机床运动求解的进展	208	差点的识别和去除	241
6.4 任意结构的5坐标机床		7.4.3 测量数据测头半径补偿	245
运动计算	210	7.4.4 离散数据中的孔洞修补	248
6.4.1 运动结构模型	211	7.4.5 三角形网格生成	250
		7.4.6 由三角形网格生成数控	

程序·····	251	8.5.3 SDI 的算法原理·····	302
7.4.7 直接由数据点云生成数控		8.5.4 SDI 的技术关键·····	305
程序·····	253		
第8章 计算机数控系统 ·····	260	第9章 数控加工实例分析 ·····	306
8.1 数控系统的程序指令 ·····	260	9.1 常用 CAD/CAM 软件	
8.1.1 程序指令与程序结构·····	260	概述·····	306
8.1.2 其他功能 ·····	262	9.1.1 计算机辅助数控编程	
8.2 数控系统的硬件组成 ·····	264	发展概况 ·····	306
8.2.1 硬件组成 ·····	265	9.1.2 CAD/CAM 集成数控	
8.2.2 专用体系结构 ·····	266	编程系统原理 ·····	307
8.2.3 基于通用 PC 的体系		9.1.3 CAD/CAM 集成数控编程	
结构·····	275	系统的功能分析 ·····	308
8.2.4 开放式体系结构 ·····	276	9.1.4 CAD/CAM 集成数控编程	
8.2.5 华中I型数控系统简介 ·····	284	系统应用概述 ·····	342
8.3 数控系统软件 ·····	285	9.2 二维加工 ·····	345
8.3.1 软件组成与工作过程·····	285	9.2.1 二维加工概述 ·····	345
8.3.2 软件特点 ·····	287	9.2.2 表面粗加工 ·····	349
8.3.3 华中 I 型数控系统软件		9.2.3 二维轮廓加工 ·····	355
简介·····	291	9.2.4 二维型腔加工 ·····	363
8.4 插补与位置控制 ·····	292	9.2.5 整圆铣削 ·····	372
8.4.1 刀具补偿 ·····	292	9.3 汽车泵体上壳压铸模型	
8.4.2 CNC 的轨迹插补与进给		芯的 3 轴曲面加工 ·····	378
速度控制 ·····	293	9.4 基于 UG 的整体叶轮 5	
8.4.3 位置控制 ·····	297	轴加工 ·····	385
8.5 曲面实时插补技术 ·····	299	9.4.1 加工工艺方案 ·····	387
8.5.1 SDI 的功能与信息输入 ···	300	9.4.2 数控加工参数设置 ·····	388
8.5.2 SDI 的结构和工作流程 ···	302	参考文献 ·····	393

第 1 章 概 论

1.1 数控技术与数控机床的基本概念

1.1.1 数字控制

数字控制(Numerical Control)是用数字化信号对机床的运动及其加工过程进行控制的一种技术方法。

数控技术是用数字信息对机械运动和工作过程进行控制的技术,是现代化工业生产中的一门新型的、发展十分迅速的高新技术。数控装备是以数控技术为代表的新技术,对传统制造产业和新兴制造业的渗透形成的机电一体化产品,即所谓的数字化装备。其技术范围所覆盖的领域有机械制造技术,微电子技术,信息处理、加工、传输技术,自动控制技术,伺服驱动技术,检测监控技术,传感器技术,软件技术等。数控技术及装备是发展新兴高新技术产业和尖端工业,如信息技术及其产业,生物技术及其产业,航空、航天等国防工业产业的使能技术和最基本的装备。它在提高生产率、降低成本、保证加工质量及改善工人劳动强度等方面,都有突出的优点;特别是在适应机械产品迅速更新换代、小批量、多品种生产方面,各类数控装备是实现先进制造技术的关键。

数控技术包括数控系统、数控机床及外围技术,其组成如图 1-1 所示。

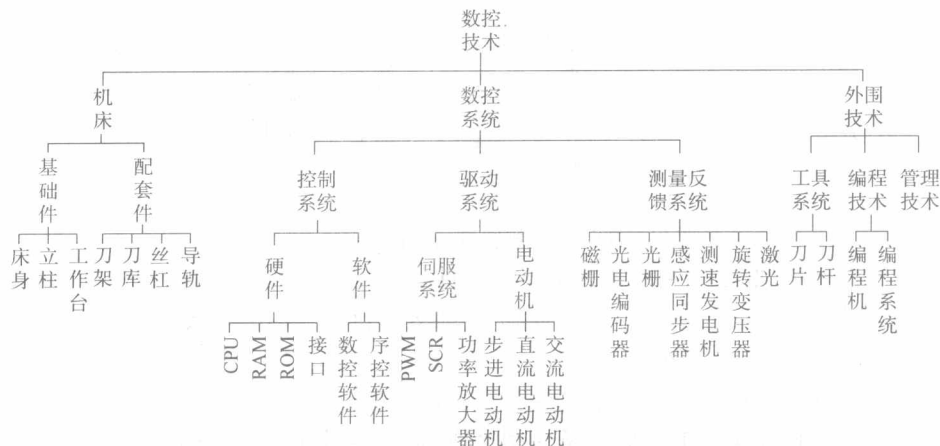


图 1-1 数控技术的组成

1.1.2 数控机床

数控机床是采用了数控技术的机床,或者说是装备了数控系统的机床。国际信息处理联盟(International Federation of Information Processing, IFIP)第五技术委员会,对数控机床作了如下定义:数控机床是一种装了程序控制系统的机床。该控制系统能逻辑地处理具有使用号码或其他符号编码指令规定的程序。

定义中所提的程序控制系统,就是数控系统(Numerical Control System)。数控系统是一种控制系统,它自动输入载体上事先给定的数字量,并将其译码,再进行必要的信息处理和运算后,控制机床动作和加工零件。最初的数控系统是由数字逻辑电路构成的专用硬件数控系统。随着微型计算机的发展,硬件数控系统已逐渐被淘汰,取而代之的是计算机数控系统(Computer Numerical Control),简称 CNC。CNC 系统是由计算机承担数控中的命令发生器和控制器的数控系统。由于计算机可完全由软件来确定数字信息的处理过程,从而具有真正的“柔性”,并可以处理硬件逻辑电路难以处理的复杂信息,使数字控制系统的性能大大提高。

1.1.3 机床数字控制的原理

金属切削机床加工零件,是操作者依据工程图样的要求,不断改变刀具与工件之间相对运动的参数(位置、速度等),使刀具对工件进行切削加工,最终得到所需要的合格零件。

数控机床的工作,简言之就是用数字信息来控制机床的运动。机床的所有运动,包括主运动、进给运动及各种辅助运动,都是用输入数控装置的数字信号来控制的。具体而言,数控机床的工作过程如图 1-2 所示。

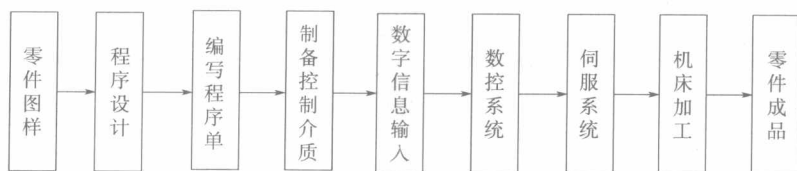


图 1-2 数控机床工作过程

1) 根据被加工零件图中所规定的零件的形状、尺寸、材料及技术要求等,制定工件加工的工艺过程、刀具相对工件的运动轨迹、切削参数以及辅助动作顺序等,进行零件加工程序设计。

2) 用规定的代码和程序格式编写零件加工程序单。

3) 按照程序单上的代码制备控制介质(制作穿孔带、磁盘等)。

4) 通过输入装置把变为数字信息的加工程序输入给数控系统。

5) 起动机床后, 数控系统根据输入的信息进行一系列的运算和控制处理, 将结果以脉冲形式送往机床的伺服机构, 如步进电动机、直流伺服电动机、电液脉冲马达等。

6) 伺服机构驱动机床的运动部件, 使机床按程序预定的轨迹运动, 从而加工出合格的零件。

数控机床的加工, 是把刀具与工件的运动坐标分割成一些最小的单位量, 即最小位移量, 由数控系统按照零件程序的要求, 使坐标移动若干个最小位移量 (即控制刀具运动轨迹), 从而实现刀具与工件的相对运动, 完成对零件加工。

刀具沿各坐标轴的相对运动, 以脉冲当量 δ 为单位 (mm/脉冲)。

当进给轨迹为直线或圆弧时, 数控装置则在线段的起点和终点坐标值之间进行“数据点的密化”, 求出一系列中间点的坐标值; 然后按中间点的坐标值, 向各坐标输出脉冲数, 保证加工出需要的直线或圆弧轮廓。

数控机床的工作内容如图 1-3 所示。

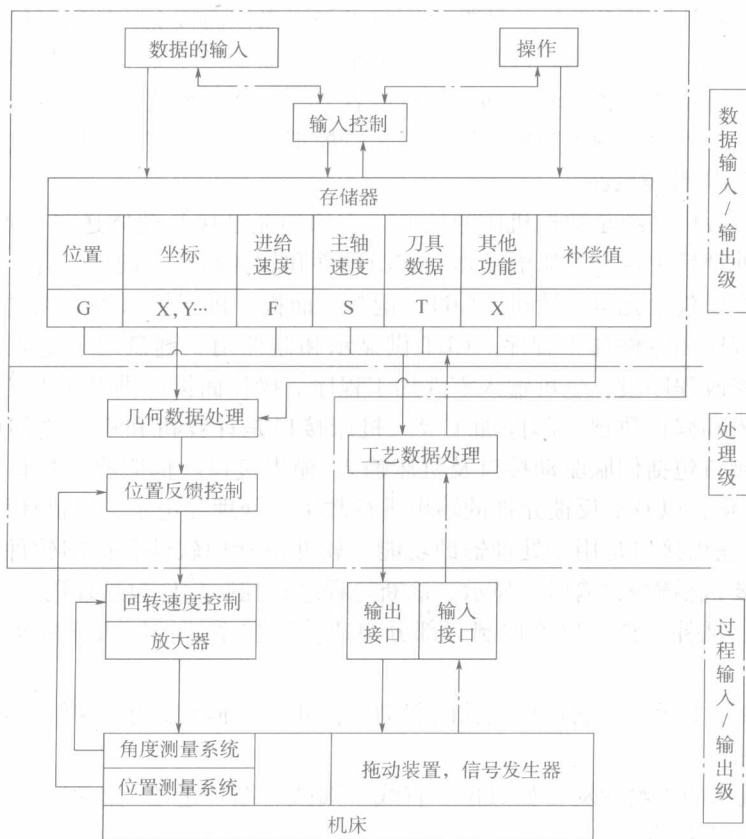


图 1-3 数控机床的工作内容

1.1.4 数控机床的组成及特点

数控机床是典型的数控化设备,一般由信息载体、计算机数控系统、伺服系统和机床本体四部分组成,如图 1-4 所示。

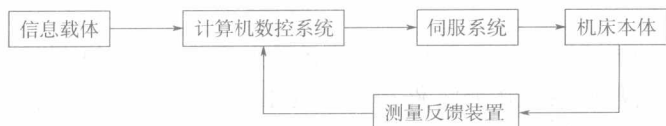


图 1-4 数控机床的组成

1. 信息载体

信息载体又称控制介质,用于记录数控机床上加工一个零件所必需的各种信息,如零件加工的位置数据、工艺参数等,以控制机床的运动,实现零件的机械加工。常用的信息载体有穿孔带、穿孔卡、磁带、磁盘等,并通过相应的输入装置将信息输入到数控系统中。数控机床也可采用操作面板上的按钮和键盘将加工信息直接输入,或通过串行口将计算机上编写的加工程序输入到数控系统。高级的数控系统可能还包含一套自动编程机或者 CAD/CAM 系统。由这些设备实现编制程序、输入程序、输入数据,以及显示、模拟仿真、存储和打印等功能。

2. 计算机数控系统

计算机数控系统是数控机床的核心。它的功能是接受载体送来的加工信息,经计算和处理后去控制机床的动作。它由硬件和软件组成。硬件除计算机外,其外围设备主要包括光电阅读机、CRT、键盘、面板、机床接口等。光电阅读机是输入系统程序和零件加工程序。CRT 供显示和监控用。键盘用于输入操作命令及编辑、修改程序段,也可输入零件加工程序。操作面板可供操作人员改变操作方式、输入和修正数据、起停加工等。机床接口是计算机和机床之间联系的桥梁,机床接口包括伺服驱动接口及机床输入/输出接口。伺服驱动接口主要是进行数/模转化,以及对反馈元件的输出进行数字化处理并记录,以供计算机采样;机床输入/输出接口是用于处理辅助功能。软件由管理软件和控制软件组成。管理软件主要包括输入/输出、显示、诊断等程序;控制软件包括译码、刀具补偿、速度控制、插补运算、位置控制等部分组成。数控系统控制机床的动作可概括如下:

1) 机床主运动。它包括主轴的起动、停止、转向和速度选择,多坐标控制(多轴联动)。

2) 机床的进给运动,如点位、直线、圆弧、循环进给的选择,坐标方向和进给速度的选择等。

3) 刀具的选择和刀具的补偿(长度、半径)。

4) 其他辅助运动。如各种辅助操作,工作台的锁紧和松开,工作台的旋转与分度,以及冷却泵的开、停等。

5) 故障自诊断。由于数控系统是一个十分复杂的系统,为使系统故障停机时间减至最少,数控装置中设有各种诊断软件,对系统运动情况进行监视,及时发现故障,并在故障出现后迅速查明故障类型和部位,发出报警,把故障源隔离到最小范围。

6) 通信和联网功能。

3. 伺服系统

它是数控系统的执行部分,包括驱动机构和机床移动部件,它接受数控装置发来的各种动作命令,驱动受控设备运动。伺服电动机可以是步进电动机、电液马达、直流伺服电动机或交流伺服电动机。一般来说,数控机床的伺服驱动,要求有好的快速响应性能,能灵敏而准确地跟踪由数控装置发出的指令信号。

4. 测量反馈装置

该装置由测量部件和响应的测量电路组成,其作用是检测速度和位移,并将信息反馈给数控装置,构成闭环控制系统。没有测量反馈装置的系统称为开环控制系统。

常用的测量部件有脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器、光栅和磁尺等。

5. 机床本体

机床本体是数控机床的主体,是用于完成各种切割加工的机械部分,包括床身、立柱、主轴、进给机构等机械部件。机床是被控制的对象,其运动的位移和速度以及各种开关量是被控制的。数控机床采用高性能的主轴及进给伺服驱动装置,其机械传动结构得到了简化。

为了保证数控机床功能的充分发挥,还有一些配套部件,如冷却、排屑、防护、润滑、照明、储运等一系列装置,以及辅助装置,如程编机和对刀仪等。

1.2 数控机床分类

机床数控系统的种类很多,为了便于了解和研究,可从不同的角度对其进行分类。

1.2.1 按运动控制的特点分类

按照机床的运动轨迹可把机床数控系统分为三大类:

1. 点位控制系统(Point to Point Control System)

点位控制系统只控制机床移动部件的终点位置,而不管移动所走的轨迹如何,可以一个坐标移动,也可以两个坐标同时移动,在移动过程中不进行切削。

为保证定位精度,可在移动过程中采用如图 1-5 所示的分级降速、连续降速或单向定位等方法提高定位精度。数控钻床、数控镗床、数控冲床等都属于点位控制系统。

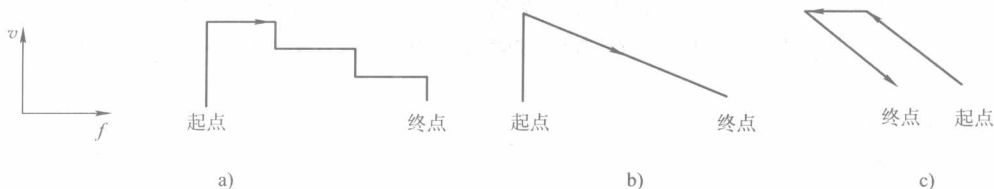


图 1-5 点位控制定位方式

a) 分级降速 b) 连续降速 c) 单向定位

2. 直线切削控制系统 (Straight Cut Control System)

直线切削控制系统控制刀具或工作台,以适当的速度按平行于坐标轴的方向直线移动,并可对工件进行切削。这类系统也能按 45° 进行斜线切削,但不能按任意斜率进行切削。简易数控车就属于直线切削控制系统;也可将点位控制系统和直线切削控制系统结合在一起,成为点位/直线切削控制系统,数控镗床属于这一类系统。

3. 连续切削控制系统 (Contouring Control System)

连续切削控制系统又称轮廓控制系统。它可对刀具与工件相对移动的轨迹进行连续控制,能加工曲面、凸轮、锥度等复杂形状的零件。数控铣床、数控车床、数控磨床均采用连续控制系统。连续控制系统的核心装置就是插补器。插补器的功能是按给定的尺寸和加工速度,用脉冲信号使刀具或工件走任意斜线或圆弧,分别称为直线插补器和圆弧插补器。高级的连续控制系统的插补器还具有抛物线、螺旋线插补功能。

连续切削控制系统按同时控制且相互独立的轴数,可以有 2 轴控制,2.5 轴控制,3、4、5 轴控制等。2 轴控制指的是可以同时控制 2 轴,但机床也许多于 2 轴,如 X 、 Y 、 Z 三个移动坐标轴。同时控制 X 、 Z 坐标和 Y 、 Z 坐标时,可以进行图 1-6 所示的曲线形状加工;也可以加工图 1-7 所示形状的零件。2.5 轴控制是指 2 个轴连续控制,第三个轴点位或直线控制,从而实现 3 个主要轴 X 、 Y 、 Z 的二维控制。3 轴控制是指同时控制 X 、 Y 、 Z 三个坐标,这样刀具在空间的任意方向都可移动,因而能够进行三维的立体加工,如图 1-8 所示。4 轴控制是指同时控制 4 个坐标运动,即在 3 个平动坐标之外,再加 1 个旋转坐标。同时控制 4 个坐标的数控机床如图 1-9 所示,可用来加工叶轮或圆柱凸轮。5 轴控制中的 5 个轴是 3 个平动 X 、 Y 、 Z 轴,再加上围绕这些直线坐标旋转的旋转坐标 A 、 B 、 C 中的 2 个坐标,形成同时控制 5 个坐标,这时刀具可以给定在空间的任意方

向。因而当进行图 1-10 所示的曲面切削时,可以使刀具对曲面经常保持一定角度,也可以进行图 1-11 所示零件侧面的切削。此外,在一次装卡的情况下,能实现任意方向的孔加工。由于刀具可以按数学规律导向,使之垂直于任何双曲线平面,因此特别适合于加工涡轮机叶片、机翼等。

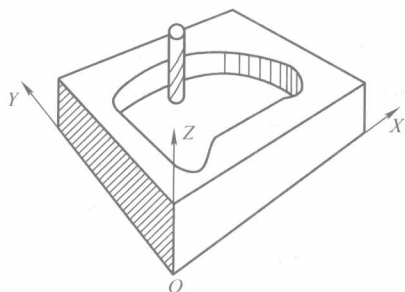


图 1-6 同时控制 2 个坐标的轮廓控制(一)

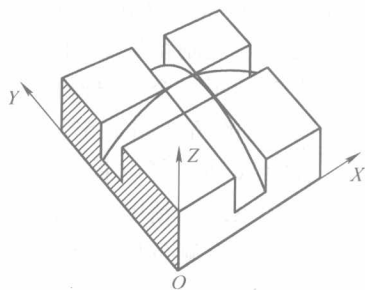


图 1-7 同时控制 2 个坐标的轮廓控制(二)

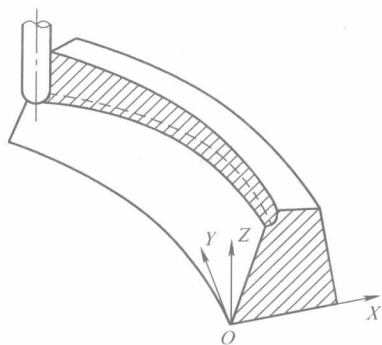


图 1-8 3 轴联动的数控加工

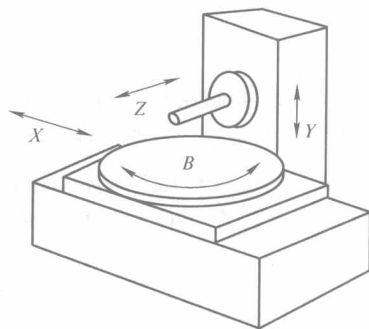


图 1-9 同时控制 4 个坐标的数控机床

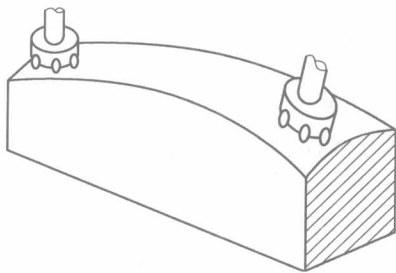


图 1-10 5 轴联动的数控加工(一)

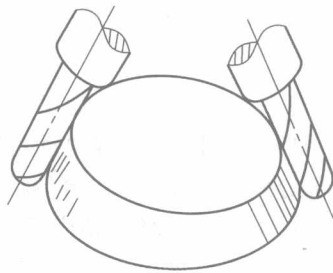


图 1-11 5 轴联动的数控加工(二)

1.2.2 按伺服系统的控制方式分类

伺服系统包括驱动机构和机床移动部件，是数控系统的执行部分。按其控制原理可分为以下三类：

1. 开环控制系统(Open Loop Control System)

典型的开环控制系统如图 1-12 所示，是采用步进电动机的伺服系统。对于数控装置发来的每一个进给脉冲，经驱动线路放大并驱动步进电动机转动一个步距（即一个固定的角度如 1.5° ），再经减速齿轮带动丝杠旋转，并通过丝杠螺母副传动工作台移动。可以看出，工作台的移动量与进给脉冲的数量成正比。显然，这种开环系统的精度完全依赖于步进电动机的步距精度，以及齿轮、丝杠的传动精度，它没有测量反馈矫正措施，所以对高精度的数控机床往往不能满足要求；但开环系统的结构简单、调试容易、造价低，在数控机床的发展过程中占有一定的重要地位，现在仍普遍采用。



图 1-12 开环控制系统方框图

2. 半闭环控制系统(Semi-closed Loop Control System)

如图 1-13 所示，半闭环控制系统采用装在丝杠上或伺服电动机上的角位移测量元件，测量丝杠或电动机轴的转动量，间接地测量工作台的移动量。它的优点就是不论工作台位移的长短，角位移测量元件是制成 360° 的，可循环使用。

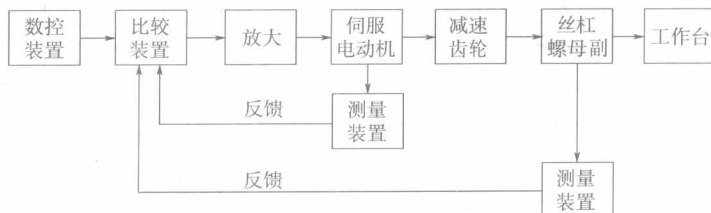


图 1-13 半闭环控制系统方框图

半闭环就是用丝杠（或电动机轴）的转动量与数控装置的命令相比较（闭环）；而另一部分丝杠-螺母-工作台的移动量不受闭环控制（开环），故称为半闭环。显然，从理论上讲半闭环的精度低于闭环，但半闭环调试方便，稳定性好，角位移的测量元件简单、廉价，所以配备传动精度较高的齿轮、丝杠的半闭环系统得到广泛应用。

3. 闭环控制系统(Closed Loop Control System)

如图 1-14 所示，闭环控制系统采用直线位移测量元件，测量机床移动部件