

上海大学教材建设基金资助项目

SHUKONG JISHU

数控技术

主编 王志明

上海大学出版社

上海大学教材建设基金资助项目

SHUKONG JISHU

数控技术

编著者 谢德幸 邱志王 员人陈冬
主 编 宋 宋
副主编 宋 宋

主编 王志明

上海大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

数控技术/王志明主编. —上海: 上海大学出版社,
2009. 6

ISBN 978-7-81118-454-9/TG·002

I. 数... II. 王... III. 数控机床 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 061910 号

参编人员 王志明 李勇康 翟宇毅
宋 进 林砺宗 陆 筠
责任编辑 刘志强 封面设计 柯国富

数 控 技 术

王志明 主编

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人: 姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海第二教育学院印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 18.5 字数 450 000

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1~2100

ISBN 978-7-81118-454-9/TG·002 定价: 41.60 元

内 容 提 要

该书是根据机械工程类专业教学指导委员会教材建设规划精神,组织了多年从事数控机床教学、科研与生产教学的专家、老师编写,全面、系统地介绍了现代数控机床的各方面及相关基础知识。全书共六章,内容包括绪论、数控编程技术、计算机数控系统、数控机床结构特点、数控机床伺服系统的控制原理、典型数控机床简析。重点介绍了机床数字控制基础、数控编程基础及技巧、计算机数控系统、数控机床伺服系统。每章结束均有一定数量的思考题,在书的末尾还附录专业缩略语英汉对照和切削参数表,供编程时使用。

该书取材新颖,重点着眼于 20 世纪 90 年代初以来的新发展、新成果,并注重内容的先进性、科学性和实用性。该书可作为数控机床应用专业、数控加工专业、机械制造专业、机电一体化专业的学生选用。同时,该书又可作为数控技术人员的培训教材,也可供从事数控工作的工程技术人员作为参考书使用。

前 言

在现代制造业中,数控机床是提高产品质量和劳动生产率必不可少的物质手段。机械制造业的生产方式、产业结构、管理方式等因数控机床的广泛使用而发生深刻的变化,它的关联效益和辐射能力更是难以估计。

众所周知,机床数控技术的迅速发展带动了制造业技术的飞速发展,使传统的制造工艺发生了显著的变化。制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础是数控机床,现代制造业的潮流——CAD/CAM、FMS、CIMS等,都是建立在数控机床之上。因此,数控机床是体现国家综合国力水平及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,是当今制造业的发展方向。有关专家曾经预言,今后几年机械制造行业的竞争,其实质是数控的竞争。

本书是根据机械工程类专业教学指导委员会教材建设规划精神,组织了多年从事数控技术教学、科研与生产教学的专家、老师编写。在编写过程中,力求取材新颖,重点着眼于20世纪90年代初以来的新发展、新成果,并注重内容的先进性、科学性和实用性,较全面地阐述了数控机床的丰富内涵。

本书通俗易懂,涉及面广,内容丰富,可操作性强,适合机械类专业应用型本科教育使用;可作为应用型本科院校的机械工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、机电一体化等专业教材,也可作为成人高等教育的同类专业教材用书,还可作为广大自学者及工程技术人员自学参考书。

本书第一章、第六章由王志明编写,第二章由李永康编写,第三章由翟宇毅编写,第四章由王志明、陆筠编写,第五章由宋进编写。王志明完成了稿件的主编工作,林砺宗对稿件进行了审阅,邓明亮、卜宇红、王玉超完成了整体校验工作。本书编写是参阅了有关院校、工程、公司的一些教材、资料与文献,也得到了陈勇和阚树林教授的支持,在此表示感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中不足之处敬请专家、同仁及读者斧正。

编 者

2008年12月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 数控技术与数控机床概述	1
一、数控技术与数控机床定义	1
二、数控机床的组成及各部分的功能	1
三、数控机床的加工步骤	3
第二节 数控机床的特点	4
一、对零件加工的适应性好	4
二、能加工出形状复杂的零件	5
三、加工精度高,加工质量稳定	5
四、生产效率高	5
五、减轻工人劳动强度	5
六、易于建立计算机通讯网络	5
第三节 数字控制系统	5
一、概述	5
二、点位控制系统、点位直线控制系统与轮廓控制系统	5
三、开环控制系统、半闭环控制系统与闭环控制系统	6
四、多功能与经济型数控系统	7
五、适应控制系统与直接数控系统	7
第四节 数控机床的常见种类	8
一、数控车床	8
二、数控铣床	10
三、数控磨床	12
四、加工中心	12
五、电火花机床	13
六、数控线切割机床	14
七、数控回转冲床	14

第五节 数控技术与数控机床的发展	15
一、数控技术的发展过程	15
二、数控系统与数控机床的发展趋势	16
 第二章 数控编程技术	20
第一节 数控编程的基础知识	20
一、数控编程的基本概念	20
二、数控机床坐标系和运动方向的规定	20
三、数控编程的特征点	24
四、直线插补、圆弧插补及刀具补偿	25
五、数控编程的内容与步骤	27
六、程序编制的方法	28
第二节 数控加工零件工艺性分析	29
一、零件图纸上尺寸数据的给出应符合编程方便的原则	29
二、零件各加工部位的结构工艺性应符合数控加工的特点	29
三、切削刀具的选择与切削用量的确定	30
四、加工路线的确定	31
第三节 数控编程技术	34
一、数控编程的标准与代码	34
二、程序结构与格式	38
三、常用编程指令	41
四、子程序	46
五、固定循环切削指令	47
六、SINUMERIK 数控系统的编程举例	55
第四节 图形交互式编程	59
一、图形交互式编程	59
二、MasterCAM 软件简介	59
三、型腔零件数控加工编程实例	61
 第三章 计算机数控系统	83
第一节 计算机数控系统的组成与计算机的功用	83
一、CNC 系统的组成	83
二、CNC 系统中计算机的功用	85

第二节 数控系统的模块化设计	89
一、模块化设计的概述	89
二、总线标准	90
三、总线功能模块	93
四、模块化数控系统举例	95
第三节 计算机数控系统的控制基础——插补	96
一、插补的基本概念	96
二、逐点比较插补法	98
三、数字积分插补法(DDA)	107
四、数据采样插补	115
第四节 数控系统的硬件结构	118
一、常规数控系统硬件结构	119
二、开放式数控系统的硬件结构	122
第五节 数控系统的软件结构	124
一、常规的 CNC 软件结构特点	124
二、CNC 系统的软件结构模式	127
三、开放式 CNC 软件结构	131
第六节 数控机床控制中的可编程逻辑控制器 PLC	132
一、可编程控制器 PLC 与机床的关系	132
二、可编程控制器的分类	133
三、可编程控制器在数控机床上的应用——机床专用 FANUC-PLC 简介	134
 第四章 数控机床的机械结构特点	 141
第一节 数控机床对机械结构的要求	141
一、较高的机床静、动刚度	141
二、减少机床的热变形	142
三、减少运动间的摩擦和消除传动间隙	142
四、提高机床的寿命和精度保持性	142
五、减少辅助时间和改善操作性能	142
第二节 数控机床的总体布局	143
一、满足多刀加工的布局	143
二、满足换刀要求的布局	143

三、满足多坐标联动要求的布局	144
四、适应快速换刀要求的布局	144
五、适应多位加工要求的布局	145
六、适应可换工作台要求的布局	145
七、工件不移动的机床布局	145
八、为提高刚度减小热变形要求的布局	145
九、并联机床的布局特点	146
第三节 数控机床主传动系统	147
一、数控机床对主传动的要求	147
二、数控机床主传动的配置方式	147
三、主轴部件	148
第四节 数控机床的进给传动系统	155
一、数控机床对进给传动系统的要求	155
二、数控机床的进给传动系统	155
第五节 数控机床的导轨	164
一、数控机床对导轨的基本要求	164
二、数控机床常用的导轨	165
第六节 数控机床回转工作台	167
一、数控回转工作台	167
二、分度工作台	169
第七节 数控机床换刀系统	170
一、自动换刀装置的形式	170
二、刀库	172
三、换刀机械手	176
 第五章 数控伺服系统	 181
第一节 伺服系统基本知识	181
一、伺服系统静态性能指标	181
二、伺服系统的动态性能指标	182
三、伺服系统的基本要求	184
四、伺服驱动系统的分类与组成	184
五、常用伺服执行部件	185
第二节 直流伺服电动机及其驱动技术	186

一、永磁式直流伺服电机结构和工作原理	186
二、直流电机的基本特性	187
三、直流伺服电机调速方法	189
四、直流伺服电机的特性曲线	190
五、直流伺服电机的驱动单元结构和工作原理	191
六、直流伺服电机 PWM 调速技术	192
七、直流驱动装置应用实例	194
第三节 交流伺服电动机及其驱动技术	195
一、同步交流伺服电机	195
二、异步交流伺服电动机	196
三、交流电机调速方法	197
四、交流伺服电机的矢量控制技术	198
五、同步交流伺服电机(PMSM)的驱动控制	201
六、异步交流伺服电机的驱动控制	203
七、交流伺服驱动控制系统的主电路	205
八、交流驱动装置应用	207
第四节 步进电机	208
一、步进电动机结构与工作原理	209
二、步进电机的控制方法	210
三、步进电动机的运行性能	210
四、步进电机的驱动装置	213
五、步进电机驱动装置应用实例	217
第五节 位置与速度检测	218
一、光电编码器	218
二、光栅尺	220
三、旋转变压器	222
第六节 数控进给伺服系统	224
一、数控机床对进给伺服系统的要求	224
二、数控进给伺服系统结构	225
三、数控进给伺服系统的工作原理	227
四、数控进给伺服系统的位置控制方法	227
第七节 主轴运动控制	234
一、基本知识	234

二、数控机床主轴电机的驱动控制方法	236
三、主轴分段无级变速原理	238
四、主轴准停控制	239
第八节 数控伺服系统的应用	241
一、伺服系统与数控系统的信号连接	242
二、伺服系统与市电电源的连接	243
三、伺服系统的运动控制要求、动力输出要求分析	244
 第六章 典型数控机床简析	248
第一节 FV-800 机床的用途、布局及技术参数	248
一、机床的用途	248
二、FV-800 立式加工中心的特点	248
三、FV-800 立式数控加工中心的布局	249
四、机床的主要技术参数	249
五、机床的传动系统	250
六、机床主要部件的结构	250
第二节 FV-800 数控系统的硬件、软件结构	253
一、FV-800 数控系统的硬件结构	255
二、FANUC Oi-MA 系统的软件结构简介	270
第三节 FANUC Oi-MA 数控系统的程序编制	271
一、FANUC Oi-MA 数控系统的功能指令	271
二、FANUC Oi-MA 系统的程序编制	276
 附录 1 常用《机床数控技术》缩略语英汉对照	279
附录 2 常用刀具的切削参数	280
 参考文献	284

第一章 绪 论

随着生产技术的不断发展,对机械产品性能及生产效率提出了越来越高的要求。机械加工工艺过程的自动化是实现上述要求的重要措施之一。而在当前,随着数控技术的发展,机械加工自动化已由刚性自动化向着柔性自动化方向发展,其中最典型的应用就是数控机床。综观整个机械制造行业,单件小批量生产约占加工总量的 80%。这些产品具有加工批量小、改型频繁、零件形状复杂、精度要求高等特点,传统的机加工设备很难满足要求。而运用了数控技术的数控机床在这些领域中很好地解决了上述问题,在造船、航天、航空、机床、重型机械等领域有广阔的发展前景,成为机加工行业的主流。数控技术发展的基础是微电子的发展,虽然数控技术不是附属于数控机床,但它是随着数控机床而发展起来的。现代数控技术不仅应用于切削机床,同时还应用于其他多种机械设备,如机器人、三坐标测量机、电火花切割机、编织机和剪裁机等。

第一节 数控技术与数控机床概述

一、数控技术与数控机床定义

按照 ISO 标准的定义,数控技术是指用数字化信息对机床运动及其加工过程进行自动控制的一种方法,简称数控(Numerical Control, NC)。由于现代数控均采用计算机进行控制,也称为计算机数控(Computerized Numerical Control, CNC)。

数控系统(Numerical Control System)是指进行数字化信息控制所具备的软件、硬件。也就是说,实现机床运动及加工过程自动控制所需的硬件与软件称为数控系统。数控系统的核心是数控装置(Numerical Controller)。

数控机床(NC Machine)是采用了数控技术进行控制的机床。数控机床又称数字控制机床,是将机床加工过程中的各种运动、工件的形状、尺寸等各种零件信息以及机床的其他辅助功能,用由字母、数字、符号构成的代码来表示,通过控制介质把这些代码输入到数控装置,数控装置经过译码、运算等处理,发出相应的动作指令,经伺服系统,自动控制刀具与工件的相对运动,加工出所需要的零件。数控机床集成了计算机、精密测量、精密伺服控制、机床设计等先进技术,它和机器人被称为当今世界上最典型的机电一体化产品,是现代制造业的基础。

二、数控机床的组成及各部分的功能

虽然数控技术的应用非常广泛,但最为典型的是数控机床,所以本书主要讲述数控技术

的应用载体数控机床的相关内容。

数控机床由控制介质、输入/输出装置、数控系统、伺服系统和反馈装置、辅助装置及机床本体组成,组成框图如图 1-1 所示。图中,虚线部分就是数控系统。各部分的功能如下:

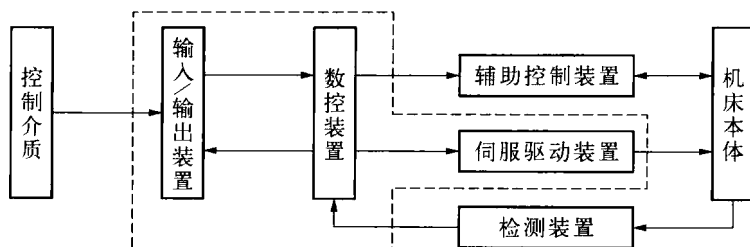


图 1-1 数控机床组成

(一) 控制介质

控制介质又称信息载体,是用来确定人与机床之间的某种联系的中间媒介物,在它上面记载了数控机床全部的加工信息,如零件加工的工艺参数、工艺过程、位移数据、切削速度等。控制介质随数控装置类型的不同而异,可以有多种形式,常用的有纸带、磁带、磁盘等。除此之外,还有些数控系统采用 RS232C/RS422A/RS449 等通讯接口,即通过计算机直接将程序输入到数控装置中。在 CAD/CAM 集成系统中,零件的加工程序通过 CAD/CAM 软件自带的后置处理与通讯程序,直接将程序输入到数控系统中。

(二) 数控系统及其组成

数控机床的核心就是数控系统,数控系统主要控制各坐标轴的运动,包括方向、位置与速度,其控制的信息主要来源于数控程序。根据其控制对象与控制内容,数控系统必须具备输入/输出装置、数控装置、伺服驱动这三部分。

1. 输入/输出装置

数控机床的输入/输出装置的功能较多,包括数控加工程序、切削参数及坐标轴位置、检测开关的状态等的输入/输出。键盘与显示器是最基本的输入/输出装置,计算机是最常用的输入/输出设备。

2. 数控装置

数控装置是数控系统的核心,它的任务是对输入/输出装置传送的信息进行合理的运算处理,把它们转化为伺服系统能接收的指令信号,并按照程序中规定的加工顺序,驱动机床执行部件完成相应动作。它的组成如图 1-2 所示。

(1) 输入装置。接收控制介质输出的代码,经识别与译码分别送入相应存储器内。

(2) 控制器。接收输入装置的指令,根据指令要求来控制运算器与输出装置,以实现机床的各种操作及控制整机的工作循环。

(3) 运算器。接收控制器的指令,将输入装置送入的数据进行各种运算,并不断向输出装置输出结果,使伺服系统执行所要求的运动。对复杂零件的轮廓控制系统,运

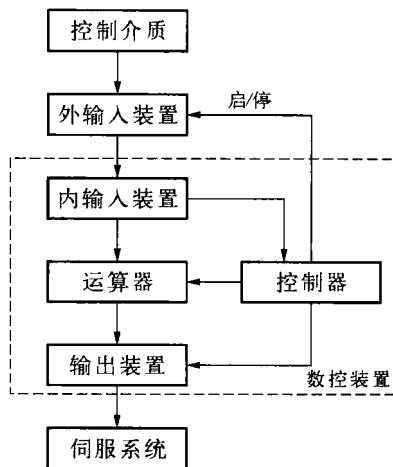


图 1-2 数控装置的组成

算器的主要功能是进行插补运算。

(4) 输出装置。根据控制器的指令将运算器送来的计算结果输送到伺服系统。

总之,数控装置是将输入/输出装置传送的信息转换成伺服系统所能接收信息的一种装置,是实现机床自动化的重要环节。数控装置分专用数控装置与通用数控装置。

3. 伺服驱动

伺服驱动系统由伺服电动机与伺服驱动装置组成,它的任务是接收来自数控装置的指令信息,将其转化为相应坐标轴的进给运动与精确定位运动,使执行机构的进给速度、方向和位移量严格按指令信息要求执行,以加工出符合图纸要求的零件。

一般来说,指令脉冲数量决定机床移动的距离,指令脉冲频率决定机床移动的速度。发送指令脉冲信号的数控装置能够以很高的速度与精度进行计算,关键在于伺服系统能以多高的速度与精度去执行。数控机床的精度与快速响应性主要取决于伺服系统,所以伺服精度和动态响应是影响数控机床加工精度、表面质量与生产率的重要因素之一。因此,数控机床的伺服系统应具备较好的快速响应性,能灵敏而准确地跟踪指令信号。现在常用的有直流伺服系统与交流伺服系统。

上述介绍的是数控系统基本组成,根据控制系统的性能与设备的具体要求,其配置与组成具有很大的差别,但基本组成不变。

4. 检测装置

闭环控制的数控机床是利用检测元件来实现位置与速度的精确控制。检测装置的作用是将检测对象的实际参数(位置、速度等)经信号变换后反馈给控制系统的比较环节。现常用的速度控制检测元件有直流测速发电机与脉冲编码器,位置检测元件有旋转变压器、感应同步器和磁尺等。这些内容在机械测试相关课程中已有详细叙述,本书不再赘述。

5. 机床本体

机床本体包括主传动系统、进给传动系统、机床回转工作台、自动换刀系统和机床床身、立柱等部件。由于数控机床是自动加工机床,中间无需人工干预,所以在机械设计制造中的精度、刚度、抗振性等方面比普通机床有更高的要求。同时,要求机床运动表面的摩擦要小,传动部件间隙要小,传动误差的自动消除性好,传动变速系统易于实现自动化,同时还要考虑床身变形、排屑设计等方面的要求。

总之,与普通机床相比,数控机床的外观造型、整体布局、传动系统、刀具系统、操作系统和结构等均发生了很大变化。这种变化满足了数控技术的要求,也充分发挥了数控机床的特点。

6. 辅助控制装置

数控系统的指令中有专用的辅助指令,分别控制着刀具交换、冷却润滑装置启停、工件的夹紧与放松等。除了上述功能外,通过机床上检测开关的状态,将其译码、逻辑运算和放大后驱动相应单元或执行机构,带动机床机械部件及液压气动等辅助装置完成规定指令的动作。这些功能一般通过数控系统的底层 PLC 控制完成。

三、数控机床的加工步骤

数控机床加工零件的主要步骤如下:

(一) 零件加工程序单的编制

在数控机床加工零件时,首先要分析图纸,根据图纸上标注的零件的形状、尺寸、工艺、

技术条件等要求制定合理的工艺流程,确定走刀路径,设定坐标系,然后进行数值计算,确定各基点、节点(如运动轨迹的起始点、曲线的插补点等)的坐标值,再根据编程手册的规定编制程序单。

(二) 控制介质的制备

程序单编制好以后,进行介质制作。介质可以是磁盘、光盘、穿孔带等。

(三) 控制程序的传输

控制介质不同,输入装置也不同。如软盘用软驱读入,纸带用纸带阅读机读入,也可以通过 RS232C/RS422A/RS449 通信接口,直接将程序输入到 CNC 装置的存储器中。

(四) 数控程序的处理与输出

根据读入零件的加工信息进行必要的逻辑与算术运算,然后为各坐标的伺服系统分配进给脉冲。

(五) 数控程序的执行

伺服系统接收到进给脉冲信号后进行转换与放大,驱动机床按预定的轨迹运动,进行零件加工。流程图如图 1-3 所示。

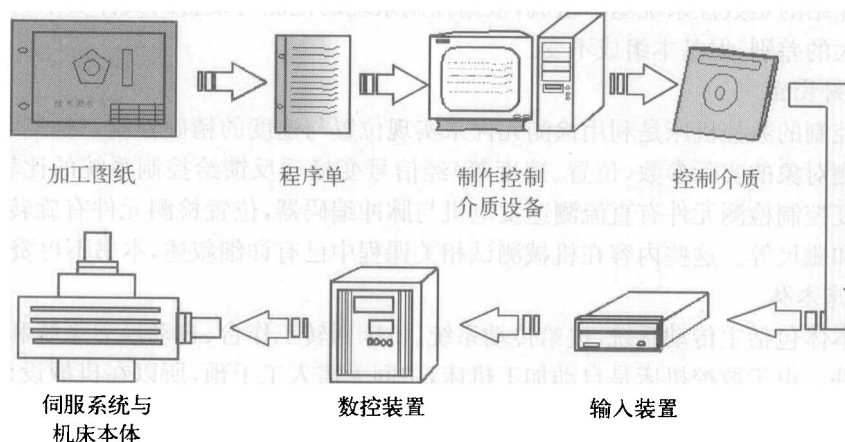


图 1-3 数控加工流程图

第二节 数控机床的特点

数控机床是采用数控技术的机械设备中最具代表性的一种,从数控机床所具有的许多优点中可以看出数控技术的特点。

一、对零件加工的适应性好

因为数控加工的工作方式主要是按程序单上的程序进行工作,所以不同的程序单就可以在数控机床上加工出不同的零件。对于不同零件的加工,除相应更换加工刀具和解决工件装夹方式外,只需改变相应的加工程序即可。这一点有效地解决了单件小批量、多品种产品的自动化生产问题,尤其适应当前市场对产品的要求。

二、能加工出形状复杂的零件

现代数控系统基本上都能实现 2 轴、3 轴及多轴的联动。现在有些国产数控系统具备 5 轴、6 轴联动功能,有效地解决了复杂曲面、曲线加工的问题。

三、加工精度高,加工质量稳定

数控机床的机械传动系统和结构具有很高的精度与刚度,且数控系统能对加工精度进行补偿与校正,所以它比普通机床具有更高的加工精度。同时,数控系统的工作为全自动的工作方式,它自始至终在指定的控制指令下工作,有效地消除了因操作者的技术水平与情绪变化等因素对加工质量的影响,所以数控加工具有较高的加工精度。它的尺寸精度一般在 $0.005\sim 0.010\text{ mm}$ 之间,不受零件结构复杂因素的影响。同时,在它加工过程中,自始至终地按控制介质执行加工,所以产品生产的一致性,加工质量稳定可靠。

四、生产效率高

在数控加工中,往往是一次装夹后完成零件所有的加工工序,所以它减少了许多更换工艺装备的时间。尤其当使用具备自动换刀功能的加工中心时,刀具可自动更换与补偿,在切削加工中可采用最佳切削参数与走刀路线。同时,数控机床加工中检测过程次数少,有些数控机床能自动进行检测。这些功能大大缩短了辅助时间,从而提高了生产率。

五、减轻工人劳动强度

数控机床的加工是由控制介质上的程序来控制。操作人员只需装拆工件,装载刀具,并监督机床的运动,这大大减轻了工人的劳动强度。

六、易于建立计算机通讯网络

数控机床是以数字信息作为控制信息,易于与 CAD 系统连接,形成 CAD/CAM 一体化系统,是 FMS、CIMS 等现代化制造技术的基础。

第三节 数字控制系统

一、概述

数控机床上的数字控制系统,形式较多,以适应不同用途的需要。根据控制系统的特点,可分为点位控制系统、点位直线控制系统与轮廓控制系统。按控制方式可分为开环控制系统、半闭环控制系统与闭环控制系统。根据功能的多少,又可分为多功能数控系统和经济型数控系统。在数控系统发展的基础上,又出现了较为先进的适应性控制系统和直接数控系统等。

二、点位控制系统、点位直线控制系统与轮廓控制系统

(一) 点位控制系统

点位控制系统仅控制刀具相对于工件的位置,即从一点移动到另一点的准确位置,而不控制点与点之间的路径轨迹。在移动过程中,刀具与工件不接触,不进行切削,例如数控钻

床控制系统,如图 1-4 所示。

(二) 点位直线控制系统

除控制点与点之间的准确位置外,还要求从一点到另一点之间的运动按直线移动,并能控制位移的速度。这类系统与点位控制系统之间的区别是它从一个点到另一个点的过程中需要进行切削加工。例如,图 1-5 数控铣床用直线控制系统来铣削固定位置的直线。

(三) 轮廓控制系统

能够同时对两个或两个以上的坐标联动进行连续控制,不仅要控制起点和终点的准确位置,而且对瞬时的位移与速度进行严格的不间断的控制。具有这种控制系统的机床可以加工曲线和曲面,例如具有 2 轴、2.5 轴或更多坐标轴联动的数控铣床、车削中心等。图 1-6 为 2 坐标轮廓控制机床的工作原理图。

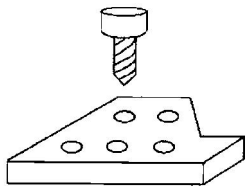


图 1-4 点位控制加工示意图

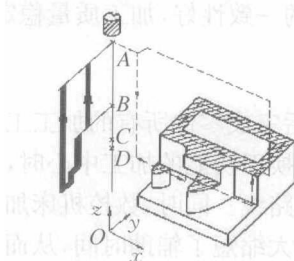


图 1-5 点位直线控制加工示意图

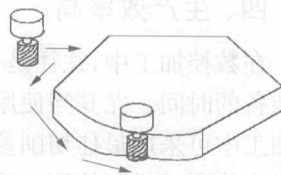


图 1-6 轮廓加工示意图

三、开环控制系统、半闭环控制系统与闭环控制系统

(一) 开环控制系统

开环系统就是指不带反馈装置的控制系统。通常使用步进电机或电液脉冲马达作为驱动机构。典型的开环系统如图 1-7 所示的步进电机驱动系统。开环系统结构简单,成本低,但由于没有反馈,其精度受步进电机的步距误差、机械传动链误差等影响。

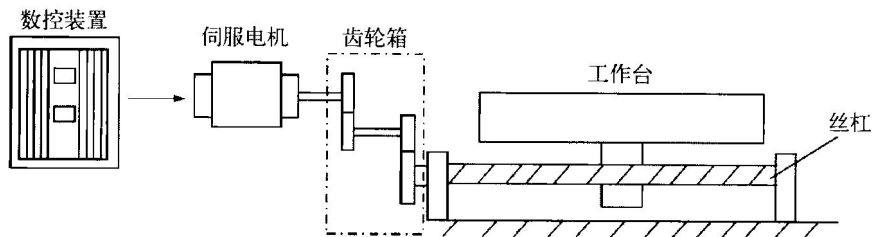


图 1-7 开环控制系统

(二) 半闭环控制系统

半闭环控制系统有反馈系统,检测装置安装在丝杠或伺服马达端部。如图 1-8 所示,用安装在进给丝杠上的检测元件来检测伺服马达或丝杠的回转角,间接测出机床最终运动部件(工作台)的位移,经反馈装置输入数控装置,与输入指令位移量进行比较,用二者的差值来控制机床运动部件的运动。由于惯性较大的机床移动部件不包括在闭环之内,系统的调试比较方便,并有很好的稳定性。虽然机械传动链的误差无法得到校正与消除,但是随着现代传动元件与新结构的出现,能保证传动部件有较好精度与精度保持性,所以在一般情况