

机电
一体化
数控系
统设计

赵松年

戴志义

主编

机械工业出版社

机电一体化数控系统设计

主编 赵松年 戴志义
主审 裴仁清
编写人员 赵松年 戴志义 姜 旻 华卫平 孙宝成
袁亦祥 陆 宁 黄 勇 言 朝



机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

本书分析数控系统的各个组成部分,包括机械、硬件和软件。重点介绍了数控的插补原理、手工与自动编程、数控系统软件的各种程序模块与调试过程。附有部分实例供参考。在此基础上,解剖一台二维开环数控工作台设计的全过程。课堂教学的同时,辅以相应的实验和课程设计,培养学生具有数控系统的基本设计能力。

本书可作为高等工科院校机电类专业机电一体化方向的本科教材或研究生参考书,也可供有关的生产、科研、设计部门的工程技术人员参考。

与本书配套的有数控机床录像、实验与生产两用小型 2.5 维数控钻铣床、二维与三维自动编程软件、实验指导书与课程设计指导书。

机电一体化数控系统设计

赵松年 戴志义 主编

*

责任编辑:徐彤 版式设计:冉晓华

封面设计:赵松年 责任校对:刘志文

责任印制:许瑾

*

机械工业出版社出版发行(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

无锡轻工业学院印刷厂印刷

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 15³/₄·字数 403.2 千字

1994 年 5 月北京第 1 版·1994 年 5 月无锡第 1 次印刷

印数 0001—3000 定价:15.00 元

*

ISBN 7-111-04259-X/TM·530(X)

前 言

本书是配合当前机电一体化蓬勃发展、加强数控系统设计能力培养的教材。数控是现代机械系统、机器人、FMS、CAD/CAM 等高新技术的基础,是计算机控制机械的桥梁,是机械柔性自动化的重要手段。编著者在教学和科研实践中体会到,微机数控系统的成功关键,在于机械的精度、硬件的可靠性和软件的柔性。本书着重这三个方面特别是软件从理论设计到调试的全过程的介绍。本书在介绍了插补原理、手工与自动编程、硬件接口、系统软件、机械系统等数控系统的各种基本组成部分的设计方法之后,详细介绍了一台开环数控 X-Y 工作台的整个设计、计算、调试过程,最后介绍闭环控制系统的工作原理。学生在学习的同时,可在经本教材介绍硬件线路和软件模块并详细剖析的、与本教材配套的实验与生产两用小型 2.5 维数控钻铣床上进行各项分析实验和软件功能实验,再完成课程设计这一重要实践性教学环节。通过以上理论与实践结合的、以点带面、加强可模仿性的学习方法,培养学生设计数控系统的基本能力。

参加本书编著的有:上海机械学院赵松年、陆宁(一、七章,八章部分);无锡轻工业学院戴志义、黄勇(二、六章,三、八、九章部分);姜、言朝(四、五章,九章部分);上海工业大学华卫平(十章);南京航空学院孙宝成(三章部分);上海机床研究所袁亦祥(三章部分)。赵松年、戴志义担任主编。上海工业大学裴仁清担任主审。在教材出版过程中,中国机电一体化技术应用协会、无锡市电脑数控技术有限公司提供了财力物力的援助。无锡轻工业学院贝康明、刘振东,上海机械学院周亮、邓建国等在演算例题、验证程序中作了不少工作,在此一并致谢。

机电一体化是机械工业技术和产品发展的重要方向。编写更好更快地培养学生设计能力的教材,是我们的共同任务。本书仅是编著者所作探索努力的一部分。限于水平,疏漏失误之处欢迎读者批评指正。最后,向本书引用的有关资料的国内外作者致意。

编著者

1993.6

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
§ 1-1 机电一体化的概念	(1)
§ 1-2 数控的概念与发展	(1)
§ 1-3 NC 与 CNC	(2)
§ 1-4 数控系统的类型分析	(4)
§ 1-5 数控机械的自由度	(6)
§ 1-6 数控标准	(7)
§ 1-7 本书的目的与任务	(10)
第二章 数控的数学原理——插补与拟合	(11)
§ 2-1 概 述	(11)
§ 2-2 逐点比较法直线插补原理	(11)
§ 2-3 逐点比较法圆弧插补原理	(17)
§ 2-4 数字积分法插补概述	(24)
§ 2-5 按步积分(DDA 法)直线插补原理	(25)
§ 2-6 DDA 法圆弧插补	(30)
§ 2-7 多维线性插补原理	(34)
§ 2-8 按时间积分的(时间分割法)插补原理	(36)
§ 2-9 插补原理小结	(39)
§ 2-10 非圆曲线拟合原理	(40)
第三章 数控编程及数控自动编程语言	(43)
§ 3-1 概 述	(43)
§ 3-2 ISO 数控程序标准简介	(45)
§ 3-3 手工编程	(49)
§ 3-4 坐标读取编程	(51)
§ 3-5 二坐标 SKG 数控自动编程语言	(54)
§ 3-6 三坐标 SMAPT 数控自动编程语言	(69)
§ 3-7 刀具半径自动补偿原理	(82)
第四章 数控系统的硬件设计	(89)
§ 4-1 概 述	(89)
§ 4-2 MCS-51 单片微机的最小系统	(91)
§ 4-3 I/O 接口的扩展及输入输出设计	(92)
§ 4-4 外部数据存储器的扩展	(97)
§ 4-5 数码显示器的接口设计	(99)
§ 4-6 键盘接口技术	(102)

第五章 数控机械的开环控制系统	(104)
§ 5-1 开环系统的工作原理	(104)
§ 5-2 步进电机	(104)
§ 5-3 脉冲驱动电源	(110)
§ 5-4 脉冲分配与速度控制	(113)
第六章 数控系统软件设计	(117)
§ 6-1 概 述	(117)
§ 6-2 程序设计过程	(118)
§ 6-3 开环数控中系统软件的内容	(120)
§ 6-4 控制步进电机环行分配程序	(121)
§ 6-5 数控系统速度控制程序设计	(124)
§ 6-6 传动间隙及传动误差软件补偿程序设计	(130)
§ 6-7 插补程序设计	(132)
第七章 机电一体化机械系统设计	(144)
§ 7-1 概 述	(144)
§ 7-2 传动部件	(147)
§ 7-3 导 轨	(158)
第八章 机电一体化数控系统设计实例	(166)
§ 8-1 数控工作台简介	(166)
§ 8-2 X-Y 数控工作台机械系统设计	(170)
§ 8-3 数控工作台计算机硬件设计	(174)
§ 8-4 数控工作台系统程序设计	(187)
第九章 数控系统的软硬件调试	(202)
§ 9-1 MCS-51 单片机开发工具	(202)
§ 9-2 硬件系统的调试	(208)
§ 9-3 软件调试	(212)
第十章 数控机床的闭环驱动系统	(219)
§ 10-1 概 述	(219)
§ 10-2 闭环系统的位置检测方法	(221)
§ 10-3 交直流伺服电机及其驱动系统	(226)
§ 10-4 脉冲-相位调制式伺服控制系统	(231)
§ 10-5 鉴幅型位置伺服控制系统	(234)
§ 10-6 采用光码盘的伺服系统	(237)
附录 BESK-FANUC B4、B8 型永磁直流伺服电动机	(244)

参考文献

第一章 绪 论

§ 1-1 机电一体化概念

机电一体化是当今世界机械工业发展的一种必然趋势,是机械学、微电子学和信息科学三者有机结合的一门综合科学,将在我国科学技术和国民经济建设中占据重要的战略地位。机电一体化技术是由微电子技术、计算机技术(信息技术)与精密机械技术结合的复合技术。综合这种技术的产品即机电一体化产品,应用这种技术生产及制造产品的过程即机电一体化工艺。诚然,微电子技术和计算机技术的应用范围很广,不是机电一体化所能包括的。这里所说的机电一体化技术,主要是微电子技术和计算机技术“结合”或者“化”到机械技术中来,从而使机械产品或制造方法得到深刻的改造和提高。

虽然机电一体化的许多关键技术和产品是美国人发明的,但是“机电一体化”这个词,乃是日本在70年代初取英文 Mechanics(机械学)的前半部和 Electronics(电子学)的后半部构成 Mechatronics 一词后,我国译作“机电一体化”(或“机械电子学”、或“机械电子化”)而出现的,现已为全世界所接受。目前机电一体化的意义很多,但对于机械产品而言,日本机械振兴协会经济研究所于1981年提出的定义具有通用性,即:“机电一体化这个词,乃是在机构的主功能、动力功能、信息与控制功能上引进了电子技术,并将机械装置与电子设备以及软件等有机结合而成系统的总称。”这个定义体现了机电一体化技术和机电一体化产品的基本内容和特征。

机械技术历史悠久,即使从以蒸汽机的发明为代表的第一次产业革命开始到现在,也已有200多年的历史了。微电子技术有70多年的历史,但长期以来没有重视与机械技术结合。机械技术与微电子技术通过信息技术为媒介的结合,自本世纪40年代提出设想,50年代形成产品,60年代开始出现日益蓬勃的研究开发形势直到今天,发展速度还在不断增长。

机械技术与微电子技术结合的重大影响,表现为对传统机械的重新定义。事实上,传统的纯机械的产品如果不改造,发展已经受到限制。1984年美国机械工程师协会(ASME)的一个专家组在给美国国家科学基金会的报告中明确提出,现代机械应定义为:“由计算机信息网络协调与控制的、用于完成包括机械力、运动和能量流等动力学任务的机械和(或)机电部件相互联系的系统。”由此可见,一台现代化的机器必然是一个机电一体化的机械系统,它的核心是计算机控制的伺服系统。而数控机械系统则是典型的机电一体化产品。

§ 1-2 数控的概念与发展

从原理上看,数控是一种形→数、数→形的转换技术,或者是用数字描述运动量进而来控制运动的技术。这种把几何信息或运动信息转换成数字信息,然后由数字信息来控制 and 实现运动的方法称为数字控制。虽然运动量以外的其他物理量或变量也可转换为数字量,也可用数字量来控制这些物理量或变量,例如压力、温度、电量的数字控制方法,但从1952年美国麻省理工学院研制出第一台数控机床并把这种技术命名为数字控制(Numerical Control)之后,数控

(NC)这个名词几乎已成为机械运动控制的专用名词。因此,一般情况下所说的数控技术中并不包括其他物理量在数模、模数转换中的数字式的控制技术。

其实,数字式的控制技术在工业中早有应用。如编织纺织品花纹、织物图案商标时,用按要求打孔的穿孔卡片来织造各种不同的图案,实质上,就是一种数控技术。这种技术的应用要比1952年美国第一台三坐标数控机床的问世早很多年,但当时并没有受到社会和机械行业的应有重视。直到50年代之后,全世界的机械制造业才开始意识到,数控技术将给机床的发展带来一个全新的方向。我国从1958年开始,有些高等院校和科研单位也已研制出这种新型的金属切削机床——数控机床,到60年代已经成功地自行设计和制造数控线切割机 and 简单的数控铣床。由于受当时微电子技术水平的限制,这些数控系统是由晶体管或小规模集成电路构成的NC系统,称为硬件数控。到70年代,由于微处理机和国外数控机床的引进,在我国逐渐用微处理机替代了硬件逻辑电路,实现了从NC到CNC(Computer Numerical Control)的转变。

近年来,数控技术除在机床制造业中掀起了一场“数控革命”外,在其他机械行业中也已开始被重视和开发。诸如电脑绣花机、衣料开片机、数控气割机、自动绘图机、雕刻机以及一些电脑控制的新型自动机械,其中大部分实质上是CNC系统组成的数控机械。

机械的计算机控制或“电脑机械”中,除了一些简单的开关量控制外(这部分功能可由可编程程序控制器(PLC)来实现),较高层次的机械运动控制无不是用数控技术作为中间媒介。可以说:数控技术是计算机与机械运动控制之间的必不可少的桥梁。在当今的计算机时代和信息社会中,把数控技术作为机械行业向机电一体化转变的知识阶梯和桥梁是完全必要的。早在60年代初,美国就有人提出:计算机控制的中心技术是数控技术,“是过去10年技术发展中最优秀的一种”。这种评价足以说明数控技术在整个机械行业发展中的作用和地位。

§ 1-3 NC 与 CNC

数控技术是一种控制机械运动的技术,使用这种技术的机械即为数控机械。数控机械一般由数控装置、伺服驱动系统和机械执行系统三部分组成,如图1-1所示。

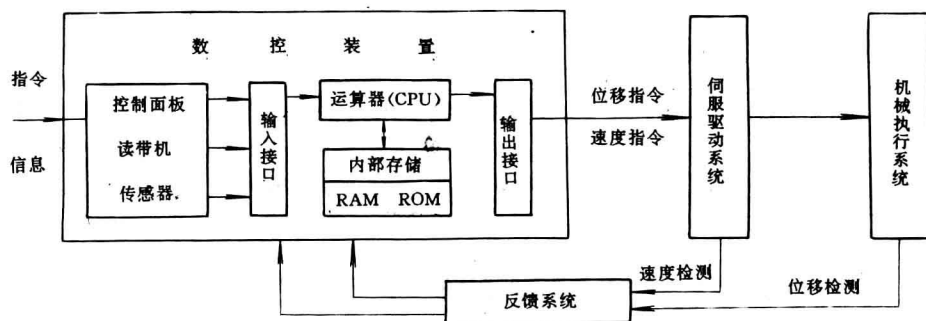


图 1-1 数控机械基本构成

操作者按对某种机械的具体功能要求编制程序作为指令信息,记录在信息载体(穿孔带、穿孔卡、磁带、磁盘等)上,然后输入(或通过键盘直接键入)数控装置。数控装置接受并自动译解指令信息,经过预先编排好的处理、计算,使伺服驱动系统和机械执行系统(伺服电机及其机械执行系统、液压伺服系统等)去执行这些指令,实现指定运动。有的还可以监测执行情况,随

时纠正执行系统的运行。由此可见,数控机械的中心是数控装置。

数控装置的发展,经历了电子管(1952年)、晶体管(1959年)、集成电路(1965年)、大规模集成电路及小型通用计算机(1970年)、微处理器或微型计算机(1974年)这几代的变化。其中计算机的引入使数控装置由各种硬件电路组合而成的硬件数控(NC)转为由小型计算机或微型计算机为主的软件数控(CNC)。

硬件数控系统的控制逻辑,是由固定接线的硬件结构组成的专用计算机来实现的,制成后就不易改变,柔性差。软件数控系统则不同,是由小型通用计算机通过事先编存在只读存储器(ROM)中的系统程序软件控制执行装置,实现控制逻辑。改变系统软件就改变了控制逻辑,因而与NC系统相比增强了柔性,且可修改、增添更完善的功能。CNC系统较易实现多轴联动的插补,以及采用能提高精度的插补方法,提高了机械的工作精度。CNC系统简化了硬件结构,意味着减少了NC系统中焊点、接插点、连接线等出现的故障。CNC系统能简化用户编制的工作程序,减少了差错;还能将用户工作程序一次输入存储器,避免了NC系统在工作过程中频繁开动光电输入机等造成的几乎占总故障数50%的故障。CNC系统易于设置各种诊断程序,可以进行故障预检和自动查找,而NC系统是很难做到的。凡此种种,使CNC系统的工作可靠性比NC系统提高了1~2个数量级。

CNC系统的性能是优越的,但只是在把成本很低的微处理器和微型计算机用于CNC系统,大大提高了其性能价格比之后,才使CNC系统以压倒优势占领了数控市场。使用微处理器或微型计算机后,数控装置的体积大大减小,以至可以和机械本体做成一体,这也是“机电一体化”的一个典范。

由NC系统向CNC系统发展是一个总的趋势,即所谓“硬件软化”。但是软件数控中,若一切功能均由计算机指令来实现,则计算机内部的运算处理工作将非常繁忙,甚至达不到系统的速度要求。例如在快速连续插补时,往往不能满足速度要求。近年来由于超大规模集成电路技术的发展,利用硬件电路速度快的优点,把CNC中一些大量占用计算机实时控制时间的程序模块固化在硬件芯片中,大大提高了运算和处理速度。这即所谓“软件硬化”。“硬件软化”和“软件硬化”这两种趋势,必然相互渗透、彼此补充,使数控装置的功能不断扩大。

归纳起来,数控系统特别是CNC系统有如下特点:

1. 生产对象的柔性自动化 柔性即可变性。这里是生产对象的可变性。如机械加工中,专为某一产品(零件)设计的机械自动线或自动机,一旦该产品淘汰,这些自动线或自动机亦将随之淘汰,或者必须花很多时间和很大精力去改造,使之适应新产品。这类自动线或自动机称为刚性自动线。

由数控机械组成的自动线及数控机械本身则是完全柔性的。当需要改变产品时,仅需改变输入数控机械的程序(用户软件)就能适应新的产品的生产需要,而不需改变机械部分和控制部分的硬件。这个特点正适应当前社会需求多变而产品更新周期短的市场竞争需求。

2. 实现复杂的运动 能实现普通机械难以实现或无法实现的运动,能加工普通机床难以加工或无法加工的零件。普通机械很难实现轨迹为三次以上曲线的运动,金属切削机床也很难加工出诸如螺旋桨、汽轮机叶片之类的空间曲面,而数控机械、数控机床则可以实现几乎是任意轨迹的运动和加工任何形状的空间曲面。这一特点不能不说是一项重大的技术突破。当今的数控机床可以不用齿轮副组成的内联系传动链加工螺纹和齿轮(包括变距螺纹和异型齿轮),当今的数控机械可以不用凸轮和连杆机构来实现各种运动轨迹和改变运动速度(包括用凸轮连杆无法实现的运动轨迹和速度控制)。这一特点不能不说是传统机械学的重大冲击。

3. 精度高 就传统的金属切削机床来说,被加工零件所能达到的最高精度,不会高于机床本身精度的 1/3,这还不包括人为的错误因素。因此,传统的机械加工的最终精度受到加工机床本身所能达到的精度的限制。但是,数控机床的加工精度将不完全受控于加工机床本身的精度,在加工过程中可以实时检测反馈修正误差来获得更高的精度。这一点就冲破了提高精度的极限概念。当前数控系统已从 16 位机发展到 32 位机、64 位机和多 CPU 系统,最小设定单位从 $1\mu\text{m}$ 发展到 $0.1\sim 0.01\mu\text{m}$,就是实证。

4. 可靠性高 数控机械总的设计指导思想是机械功能电子化、电子功能软件化。前者是指原来由机械传动实现的运动规律尽可能用电子逻辑来替代。例如原先的齿轮、凸轮、连杆等运动副和传动链可以用计算机插补、检测等控制功能来完成,这就减少了传动副数量,也减少了摩擦磨损,从而延长了机械的寿命,减少了机械误差。后者是指硬件的软化,这就是 CNC 替代 NC 的方向。由于软件不会“磨损”,也不会“接触不良”,其可靠性几乎是绝对的。更重要的是数控技术可以排除人为的操作和测量误差,总的生产可靠性大大提高。

5. 生产率高 数控系统减少了工件更换工位的运输时间,缩短了设备的调整时间,降低了对工夹具的要求,免除了划线等生产准备时间,工作中省去了多次测量、检查的时间。工作速度也逐渐加快。如数控机床的工作进给速度已从 $3\sim 5\text{m}/\text{min}$ 提高到 $15\sim 30\text{m}/\text{min}$,快速进给速度已达 24(设定单位为 $0.1\mu\text{m}$) $\sim 240\text{m}/\text{min}$ (设定单位为 $1\mu\text{m}$)。这些都使生产率不断提高。

6. 经济性好 数控技术是生产柔性自动化的基础,单就产品更新周期短这一点,其经济价值就无法估计,加之可用于多品种轮换生产,这两点是其他自动线的经济性所无法比拟的。过去存在着计算机价格高和管理不易的缺点,而今微机价格直线下降,微机技术逐步普及,数控机床与普通机械的价格比已经逐步转化。虽然目前高精度数控设备的价格还比较高,对维护,操作人员的要求也较高,但经济型数控系统的成本已大为降低,性能却在不断提高,CNC 系统的性能价格比已为广大企业所接受。

数控技术的发展,除了数控系统本身的数 \rightarrow 形或数 \rightarrow 运动的各组成部分的发展之外,还有一个重要的方面,就是形 \rightarrow 数或运动 \rightarrow 数的描述问题。

几乎从数控技术研究开始时起,如何将几何形体或运动量自动转换为数字信息的问题就同时开始研究。1955 年美国最早研制出的自动编程语言(Automatically Programmed Tools 简称 APT),为这种形 \rightarrow 数的描述提供了自动作业的可能。此后各国相继研制了模式不一的各种近似于 APT 的派生语言。我国亦有各种利用计算机几何求解功能设计出的各种自动编程语言。本书介绍的两坐标与三坐标插补数控自动编程语言,作为简明的学习模式比较合适。

§ 1-4 数控系统的类型分析

数控系统有不同的分类方法,按数控装置对机械的控制方式分类时,选择哪一种数控系统主要取决于机械的功能要求。按伺服系统的控制原理分类时,选择哪一种数控系统则取决于工作精度和速度要求。

一、按数控装置对机械的控制方式分类

1. 点位控制系统 点位控制系统控制决定机械中的运动部件相对于其他部分运动完毕时的终点位置,而对运动定位过程中的运动轨迹没有要求或没有严格要求,在运动过程中也不进行工作如切削加工等。为提高生产率和保证定位精度,在从一个定位点向另一个定位点运动的

过程中,控制得到较大的正负加速度值很重要。数控钻床、数控冲床、搬运机械手等都属此类。

2. 直线运动控制系统 直线运动控制系统控制运动部件以一定速度沿某一方向直线移动并同时进行工作或切削加工。这类机械必须具有直线插补功能。除控制运动速度外,还要控制其他部件的运动如机床主轴转速、刀具选择等。

3. 连续(轮廓、轨迹)控制系统 连续控制系统在机械工作过程中不间断地控制运动部件相对其他部件沿着两个或两个以上坐标轴同时运动的轨迹(平面或空间曲线)。这就必须具有轮廓控制的直线与圆弧插补功能。除保证轨迹的精度外,还要控制运动的速度变化,如机床进给速度的统一以保证整个加工表面的表面粗糙度一致。也要保证上述两种控制系统所控制的各种运动和各项功能,以及其他辅助功能的实现。数控机床、绘图机、绣花机、衣料开片机、气割机和某些数控加工中心都属此类。

二、按伺服装置的控制原理分类

1. 开环伺服系统 不设检测反馈装置的系统称为开环伺服系统。如图 1-2a 所示开环伺服系统,一般使用功率步进电机接受数控装置发来的经过功率放大的一个指令脉冲,转过一个步距角,再经连接或减速装置带动滚珠丝杠副,把旋转运动转化为工作部件的直线移动(或转动)。移动量由脉冲数决定,移动速度由脉冲频率决定。位移精度主要取决于步进电机的步距角精度和齿轮、丝杠等传动件的传动精度,因此开环伺服系统的定位精度较低,一般为 $\pm 0.01 \sim 0.1\text{mm}$ 。受步进电机最高频率的限制,速度不能太高。另外,一般功率步进电机温升高、噪声大、效率低。开环伺服系统虽然存在上述缺点,但结构简单,调试维修较方便,成本较低,使其具有较高的性能价格比,广泛应用于各种经济型数控机床、裁剪绣花等服饰机械。

近年来功率步进电机技术得到发展,配以精密的谐波传动或蜗轮副,可得到小于 $0.5\mu\text{m}$ 的脉冲当量,大大提高了开环伺服系统的精度。

2. 全闭环伺服系统 如图 1-2b 所示,设有装在传动链末端的工作部件上的检测反馈线(角)位移的传感元件,以直接检测反馈直线(旋转)运动工作部件如工作台(回转台)的移动(转动)量,并与数控装置的指令移动(转动)量比较,两者的差值经过放大,控制伺服电机带动工作部件继续向减小差值的方向运动,直到反馈量与指令量相符,差值为零时停止。全闭环伺服系统的定位精度主要取决于位移检测反馈元件的精度,为增大工作稳定性,在传动链中还装有增加系统阻尼的速度传感元件,以随时检测反馈工

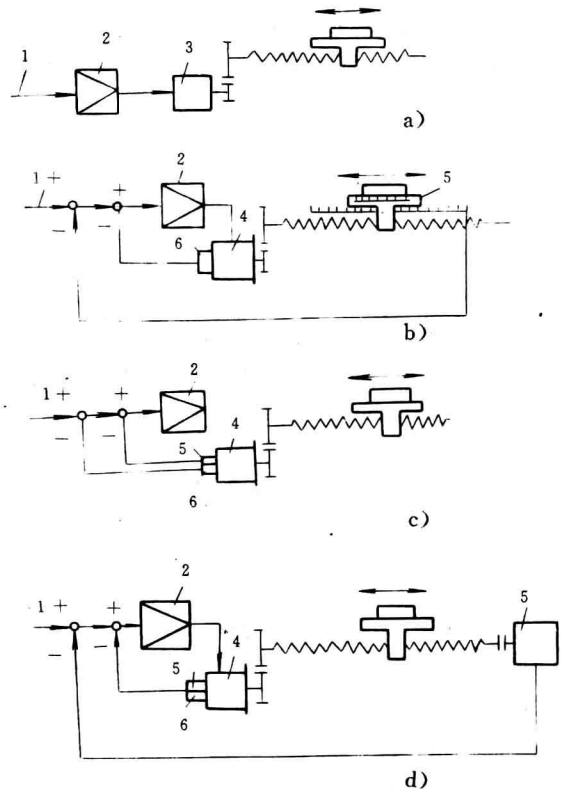


图 1-2 伺服系统分类

- 1—信息指令 2—数控装置 3—步进电机
4—伺服电机 5—位置检测器 6—速度检测器
a)开环 b)全闭环 c)半闭环 I d)半闭环 II

作部件的速度。为此全闭环伺服系统的定位精度一般可达 $\pm 0.001 \sim 0.003\text{mm}$ 。随着检测反馈系统的改进,近年来分辨率已达 0.000001mm 。由于使用伺服电机,不受开环系统步进电机脉冲频率的限制,速度也加快很多,从而大大提高了生产率。全闭环伺服系统主要用于精度和速度较高的数控机床、绕线机、三坐标测量仪等。

虽然全闭环伺服系统存在以上优点,但结构复杂,成本高。而且,控制理论认为全闭环伺服系统的精度取决于检测反馈元件的精度,但若机械结构因素(如导轨摩擦、工作台惯性)和传动装置因素(如传动间隙)达不到要求,这些非线性因素将使调试工作产生困难,伺服特性降低并产生振荡。

3. 半闭环伺服系统 如图 1-2c、d 所示,设有装在从伺服电机到滚珠丝杠之间整个传动链中任一旋转运动元件上的检测反馈角位移的传感元件,以间接检测反馈并控制工作部件的运动速度。由于从传感器所在的运动元件到传动链末端的工作部件之间所有传动件的制造安装精度影响着整个系统的精度,半闭环伺服系统的定位精度一般为 $\pm 0.005 \sim 0.01\text{mm}$ 。也正由于从传感器所在运动元件到传动链末端工作部件之间所有传动件和惯性较大的工作台等都在反馈系统之外,使系统稳定性得到改善,调试较易。角位移检测反馈元件较之线位移检测反馈元件简单,成本较低。同时装有速度传感器,运动速度较高。为此半闭环伺服系统应用广泛,如各种数控机床、加工中心、工业机器人等都有应用。

全闭环和半闭环伺服系统中使用的伺服电机使机械的工作速度和生产率大大提高。长期以来,由于直流伺服电机结构和调速技术较为简单,因而使用普遍。但受电刷和换向器限制,寿命和速度难以进一步提高,现正逐步由交流伺服电机取代。当然,交流伺服电机结构和调速技术较复杂,功率越大,技术困难就越多。

§ 1-5 数控机械的自由度

自由度一般指机械具有确定运动时所必须给定的独立运动参数的数目。相对于笛卡儿坐标而言,一般是指沿 X、Y、Z 三坐标轴直线移动的三个直线坐标和绕着 X、Y、Z 三坐标轴旋转的三个旋转坐标共六个坐标或称 6 轴。但数控机械不受空间六个自由度的限制,在数控机械上,只要存在一个能独立运动的直线轴或旋转轴,就称为有一个轴或一个坐标。如果有三个能独立运动但相互平行的直线轴,也称为 3 轴或 3 坐标。因此,数控机械可能不止六个自由度(6 轴、6 坐标),如高达 30 轴的数控机床,其中必然有一些轴是相互平行的。

数控机械在完成连续(轮廓、轨迹)控制的过程中,要求若干个轴同时动作或同时控制若干个坐标,称为联动。以数控机床为例,如图 1-3 所示,用棒铣刀加工外凸轮,工件相对于刀具的轨迹是平面曲线,则为 X-Y 轴联动。若铣刀一次不能加工整个凸轮宽度,而是每次加工凸轮部分宽度后,自动沿 Z 轴向下周期进给(与 X、Y 轴不联动)一段凸轮宽度,重新按轨迹循环一次,则称为 2.5 轴联动。图 1-4 所示三轴联动加工空间曲面,条件是曲面任一点的法向截面的曲线形状与刀具的轮廓母线一致。若如图 1-4 所示的空间曲面是旋转

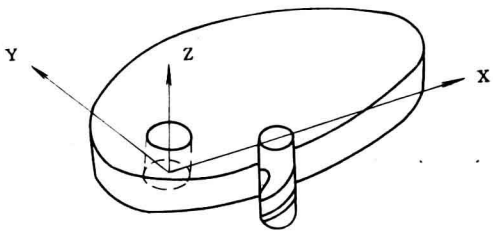


图 1-3 外凸轮加工

叶轮叶片的一部分,则还要加上叶轮的旋转运动,成为 4 轴或 5 轴联动。

加工同样的空间曲面,所选择的刀具不同,联动数也不相同。图 1-5 所示加工同样的空间曲面,若用球头棒铣刀,且刀头半径小于空间曲面上任一凹点的曲率半径的 90%,则 3 轴联动即可。若用球头棒铣刀,且刀头半径符合上述条件,但在某些点上球头棒铣刀的圆柱部分产生干涉,刀具在切削到这些点时,必须同时绕某个轴旋转,则为 4 轴联动。若用球头棒铣刀而不满足 4 轴联动的条件,或用端铣刀,则刀具要加上绕 1 或 2 个轴的旋转,成为 5 轴或 6 轴联。

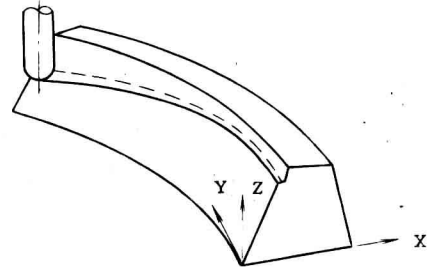


图 1-4 3 轴联动

目前数控机床的重要技术指标为几轴几联动。如 4 轴 3 联动数控铣床,具有四个独立运动的轴,其中任意三个都可联动。轴数中一般总先有移动轴后有旋转轴。如 4 轴 3 联动即三个直线和一个旋转轴。可令三个直线轴联动,也可令任两个直线轴和一个旋转轴联动。这就

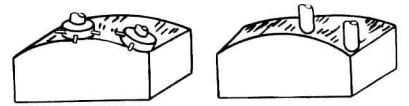


图 1-5 联动比较

要求编程者在选择联动轴时,要详细分析待加工曲面的技术要求和刀具条件。例如,要求加工图 1-6 所示凹曲面,取刀具轴线平行 Z 轴,而刀具分圆柱端铣刀和球头刀两种。若刀具为圆柱端铣刀,则轨迹控制 2 轴联动可为沿 X 轴的移动和绕 Z 轴的转动,周期进给为沿 Z 轴的移动。若刀具为球头刀,则轨迹控制 2 轴联动可为沿 X 轴和 Z 轴的移动,周期进给为绕 Z 轴的转动。两种方案均为 2.5 联动。前者加工的表面粗糙度较均匀,后者则小半径处的表面粗糙度与大半径处的表面粗糙度将有差别。由上所述,在加工同样的空间连续曲面时,也可根据不同的表面状况和刀具条件,随时变换联动方式。特别对复杂的、离散点表示的空间曲面,要考虑切削速度、进给量等条件,分析几种方案的优缺点,并征求有经验的操作者的意见,定出加工方案后编制程序。

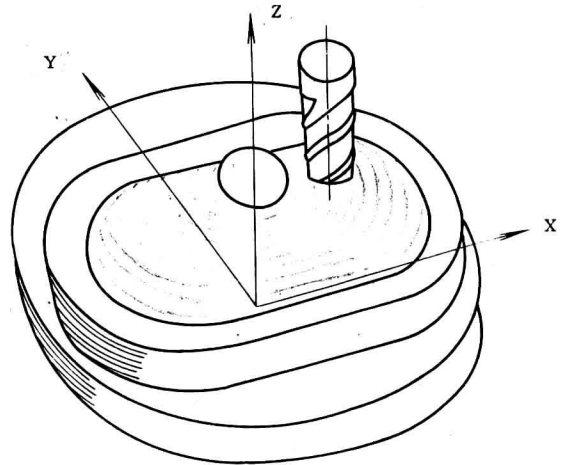


图 1-6 曲面加工

§ 1-6 数控标准

数控技术和数控系统是在金属切削机床上发展起来的,但其工作原理是控制机械动作,对于各种工作机械都通用,只需根据各自控制的具体对象不同,增减一些功能。在数控系统的发展过程中,各机床制造厂和数控装置制造厂各自为政,许多基本参量不能统一,没有通用性,因

而影响数控系统的发展。鉴于这种混乱情况,美国的全国航空和宇宙航行局在 1963 年首先制定了一个 NAS938 标准。随后国际标准化组织(ISO)在 1968 年提出了 ISO R841 数控标准。日本在 1971 年制订了 JIS B6310-1971《数控机床的坐标和运动的符号》标准。世界各国随后逐步制定了各种标准。我国在 1982 年实施了 GB3168-82《数控机床操作指示形象化符号》、JB3050-82《数字控制机床编码字符》、JB3051-82《数字控制机床坐标和运动方向的命名》、JB3112-82《数字控制机床自动编程用输入语言》。在 1983 年实施了 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》,1987 年实施了 GB8129-87《机床数字控制术语》等标准。这些标准基本上都是一致的,目的是要把数控的各种术语、符号、代码、语言、格式等都用标准统一起来。

一、坐标轴和运动符号的规定

JB3051-82《数字控制机床坐标和运动方向的命名》规定了标准坐标系机床坐标和运动的符号。不管是刀具还是工件移动的机床,都看作是刀具相对于静止的工件移动的。对于安装在机床上的工件,机床的直线运动的坐标系用右手定则,如图 1-7 所示。加工程序用建立在工件的右手直角坐标系作为标准坐标系来编制。标准坐标系中各坐标轴的确定方法如下:

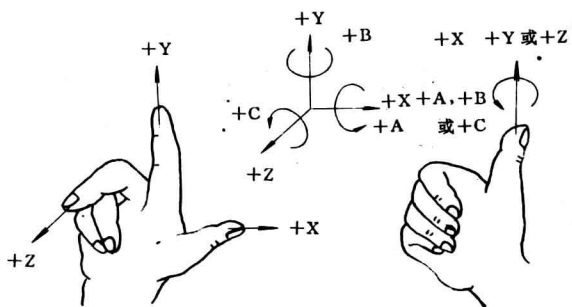


图 1-7 右手直角坐标系

(一) Z 坐标

1. 对于工件旋转的机床(车床、内、外圆磨床等) Z 坐标取为与工件旋转轴平行,取从主动轴看刀具的方向作为其正方向。

2. 对于刀具旋转的机床(铣床、钻床、镗床等)

1) 主轴方向固定的机床,Z 坐标取与主轴平行(如各种升降台铣床、立式钻床、立式镗床、卧式镗铣床)。

2) 主轴方向不固定而可转动。在转动范围内,主轴如能与标准坐标系的一根坐标平行时,就取该坐标系为 Z 坐标(如龙门铣床等)。主轴若能与标准坐标系的两根以上的坐标平行时,则取垂直于主轴安装面的方向作为 Z 坐标。

3) 取从工件看刀具旋转轴(主轴)方向作为其正方向。

3. 对于工件刀具都不旋转的机床(牛头刨床、单臂刨床等) Z 坐标取与机床的工件安装面垂直,取工件与刀具的间隔增加方向为其正方向。

(二) X 坐标

1. 对于工件旋转的机床 在与 Z 坐标垂直的平面内,取刀具的运动方向为 X 坐标,取刀具离开主轴旋转中心线的方向作为其正方向。

2. 对于刀具旋转的机床

1) Z 坐标处于水平时,X 坐标在与 Z 坐标垂直的平面内取水平方向,取面向 Z 坐标正方向的左手方向为正方向。

2) Z 坐标处于垂直时,X 坐标取由工作台面面向立柱时的左右方向,并取其右手方向为正。但对于龙门式与龙门移动式的机床,以面对机床为正面,人的视线方向为 X 坐标的正方向。

3. 对于工件和刀具都不旋转的机床 取 X 坐标与切削运动方向平行,并以切削运动方向

作为正方向。当主切削运动的方向与 Z 坐标重合时, X 坐标取由工作台面面向立柱时的左右方向, 并取其右手方向作为正方向。

(三) Y 坐标

坐标取与 Z、X 坐标垂直的方向, 其正方向应使两根坐标轴构成标准坐标系。

以上标准坐标系确定以后, 机床坐标的决定方法如下:

1) 在工件相对刀具作主体运动的机床上, 与工件运动方向平行的坐标的正方向和标准坐标系的正方向相反。

2) 在刀具相对工件作主体运动的机床上, 与刀具运动方向平行的坐标的正方向和标准坐标系的正方向一致。

以上确定的是直线移动的符号。旋转运动或摆转运动的符号规定如下: 用 A、B、C 分别表示围绕坐标轴 X、Y、Z 旋转或摆动的符号, 以向标准坐标系坐标的正方向旋进时的右螺旋方向作为正方向。但在工件相对刀具作主体运动的机床上, 其正方向与上述相反。图 1-8~图 1-12 示出各种机床的标准坐标系的坐标和机床的坐标。

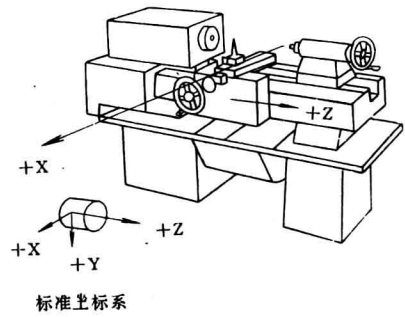


图 1-8 普通车床

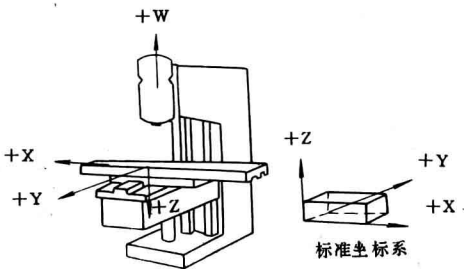


图 1-9 立式钻床

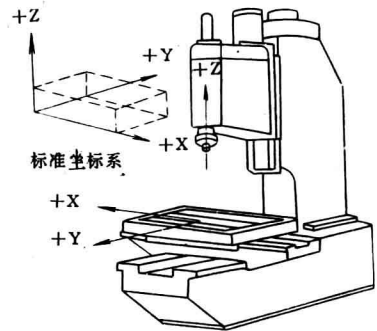


图 1-10 立式升降台铣床

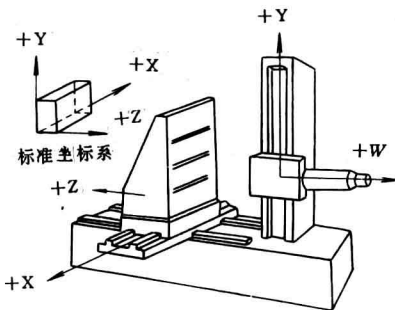


图 1-11 卧式镗铣床

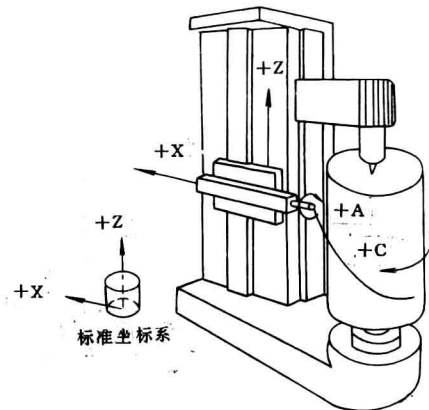


图 1-12 立式绕线机

二、准备功能和辅助功能代码

准备功能和辅助功能是数控机床控制程序段格式中最主要的功能。准备功能 G 代码规定了各种控制动作的要求,如直线插补或圆弧插补、加减速、刀具补偿、刀具偏置、进给量、主轴转速等。辅助功能 M 代码规定了各种辅助动作的要求,如程序停止或结束、主轴顺或逆时针方向旋转、冷却液开关、主轴或进给速度范围、工件位置等。这两种代码在本书下面章节中列出并说明。

§ 1-7 本书的目的与任务

当前机电一体化技术和数控系统发展迅速。本书的目的和任务,就是培养学生的数控系统设计能力。在有限的教学时间内,使机械专业的本科生和从事机械设备和产品设计的科技人员学会数控系统设计,是本书的教学目的。

作为一本专业课教材,除了知识培养之外,必须强调能力培养,不能使学生“只会说不会干”。学生在学了先行课程《电子技术》、《微机原理与接口技术》、《机电一体化机械系统设计》和机械工程有关课程的基础上,经过以本教材为中心的讲课、实验、课程设计三个教学环节,应该具有设计一台较简单的经济型数控设备的能力,包括机械总体和结构设计能力、硬件系统设计能力和软件系统设计能力。由于机械系统设计能力有《机电一体化机械系统设计》课程和机械工程有关课程作为基础,本课程只提示性地应用这些基础知识;硬件系统设计能力有《电子技术》和《微机原理与接口技术》课程作为基础,本课程也只需要提示性地应用这些基础知识。作为 CNC 系统,本课程应该重点解决软件系统设计能力的培养问题。

选择什么内容作为本教材的中心,我们认为:教材应有实际性,在全面介绍数控系统的各个方面的基础上,解剖典型,以点带面,点面结合。作为本科生的学习,教材的水平必须适当,只能选择经济型开环数控系统作为典型。选择一台 2 联动数控 X-Y 工作台,解剖其机械结构、硬件系统特别是软件系统,辅以相应的实验设备的解剖,对照硬件系统线路图和实物印制板,使学生形象具体地认识硬件系统及其信息控制工作方式,合乎“开发右脑”的创新教学原则。学生掌握了经济型开环数控系统的设计方法,辅以本教材适当的闭环数控系统分析,就为进一步学习闭环数控系统设计打下了基础。

如何把中心内容让学生学到手,我们认为:作为中等程度的本科生为主要对象,教材应具有可模仿性,使学生先熟悉一整套的典型内容,再在此基础上发展。以软件设计为例,教材中若只有框图,高水平的学生固然可能自己编出程序来,中等程度的学生就往往是事倍功半。何况程序的总体结构设计和随后的调试往往是软件质量和软件是否能用于实际的关键。基于这种指导思想,我们把自己水平不高的,虽经实践检验但必然还存在问题的系统程序模块写出来,抛砖引玉,不但就教于读者,更希望学生能在此基础上活跃思想,设计出更完善的软件。

以能力培养为主,以点带面,教材具有实际性和可模仿性,就是我们的指导思想,也是完成本书教学目的和任务、培养学生的数控系统设计能力的方法。作为一门新课程体系的一种尝试,希望通过教学实践不断改进,为推动我国机电一体化事业的进一步发展而努力。

第二章 数控的数学原理——插补与拟合

§ 2-1 概 述

空间形体或平面图形均可分解为若干个可供研究的基本单元。就平面图形来说,总可分解为直线、圆弧和其他曲线的组合。数控技术中的轨迹控制就是使刀具(笔或其他工具)相对于工件(或图样)作出符合轨迹的相对运动。

自古道“没有规矩,难成方圆。”在常规的机械加工中,车、铣、刨等工序均是有规矩可循,车圆时有其本身的回转中心和半径;加工直线时有机床导轨保证。但数控技术中却要不用“规矩”制造方圆。要做到这一点必须从理论上进行突破性探讨。就圆来说,圆的数学定义是“一组到定点等距离的点的集合”,圆规作图正符合这个原理。实际上无论用什么方法加工或绘制的圆与理论上的圆总是有差别的。用圆规作图或在机床上车削圆形也不可能绝对精确,仅仅是制造精度愈高误差愈小而已。引入“误差”这个概念之后,假如用一种近似方法能够得到圆的轨迹并使误差在允许范围之内,这种方法,在数学上称之为数值逼近。插补及拟合则是数值逼近法在图形处理上的具体应用。

插补是对一些低次方程曲线的逼近计算,一般有一次插补、二次插补、三次插补。高次方程插补从理论上来说是可以的,但实际实现起来比较困难。拟合是对由型值点组成的曲线用简单的曲线进行逼近的计算,这些型值点可以是离散点,也可以是高次曲线上的有限点。简言之,所谓插补实际上是用一连串的折线去逼近已知曲线或直线;所谓拟合则是用一些简单的曲线去逼近复杂的曲线,而这些简单的曲线(一次或二次)还必须进一步用插补的方法去逼近。对于空间曲线及空间曲面,其插补和拟合的原理同平面处理相似,是用空间折线去逼近空间曲线;用简单曲面去逼近复杂的空间曲面。

§ 2-2 逐点比较法直线插补原理

逐点比较法是一种代数运算法,其特点是能逐点计算和判别运动偏差,并逐点纠正以逼近理论轨迹。

逐点比较法的理论误差是一个脉冲当量。在整个插补过程中每走一步均需完成四个工作节拍,这四个工作节拍是:

1. 偏差判别 判别当前运动点偏离理论曲线的位置,从而决定下一步应进给的坐标及方向。
2. 进给控制 确定进给坐标及进给方向,以逼近理论曲线。
3. 新偏差计算 进给一步之后到达新的位置,造成新的偏差,计算出偏差值,并作为下一步判别的依据。
4. 终点判别 线段均有终点,每走一步必须查询一次,若到达终点,则停止插补,否则重复1~4工作节拍。工

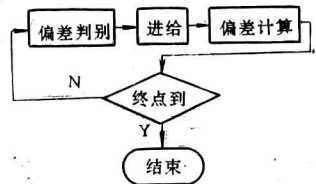


图 2-1 逐点比较法插补流程