

高等学校教材

机床数控技术

刘文信 孙学礼 主编

机械工业出版社

机床数控技术

机械

19659

15

70659
L74

高等学校教材

机床数控技术

主编 刘文信 孙学礼
编者 刘文信 孙学礼 张晓洲 由守志
张元玺 牛宽裕 赵军 曲讷
主审 许传俊



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书主要是以数控机床为对象,阐述了计算机数控系统的工作原理、组成及其在数控机床上的应用。

全书共分八章,主要内容包括数控编程、计算机数控系统硬件和软件设计、伺服进给系统和测量元件、数控机床中常用传动元件以及刀具和工具等,最后以J₁CJK6146微机数控车床为例说明数控机床的操作及编程。

本书内容精练,通俗易懂,机电结合,实用性强,取材和叙述上力求便于讲授和自学,可作为高等工科院校机械类专业教学用书,特别适用于机电一体化专业使用,也可供从事数控技术的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机床数控技术/刘文信,孙学礼主编。—北京:机械工业出版社,1995

书名原文:自動車用ABSの研究

ISBN 7-111-04639-0

I. 机…

I. ①刘…②孙…

Ⅱ. 机床-数字控制-技术

Ⅳ. TG502.35

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第16456号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:张一萍 版式设计:王颖 责任校对:肖新民

封面设计:姚毅 责任印制:王国光

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1995年7月第1版·1995年7月第1次印刷

787mm×1092mm¹/16·11.25印张·271千字

0 001—6 200 册

定价:12.00元

前 言

为了适应科学技术的发展，促进数控技术在生产中的应用，满足工科院校机械类专业的教学要求，我们学校和工厂相结合，在教学、科研和生产实践的基础上，编写出《机床数控技术》一书。

通过本书的学习，能较好地了解和掌握计算机数控系统的工作原理、组成及其在机床中的应用，可以合理地设计和选用一般的计算机数控系统及其控制下的机械传动装置。

本书由山东工业大学刘文信、孙学礼主编。第一章由青岛职工大学张晓洲和刘文信编写，第二章由刘文信和山东建材机械厂由守志编写，第三、四章由孙学礼编写，第五章由济南第一机床厂张元玺编写，第六章由刘文信和山东建材机械厂牛宽裕编写，第七章由山东工业大学赵军编写，第八章由济南第一机床厂曲讷和刘文信编写。

本书由山东工业大学许传俊教授主审。

在编写过程中，得到山东建材机械厂、济南第一机床厂和山东工业大学等有关专家、教授的支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平所限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评和指正。

编 者

1994年10月

目 录

第一章 机床数控技术概论	1	第一节 函数跟踪法插补原理	58
第一节 数控机床概述	1	一、插补原理	58
一、数控机床的产生	1	二、函数跟踪法插补圆弧	59
二、国内外数控机床发展情况	1	三、函数跟踪法插补其它二次曲线	61
三、数控机床的工作原理和组成	5	第二节 函数跟踪法插补程序设计	62
第二节 数控机床的分类	6	一、程序设计的一般过程	62
一、按机械运动的轨迹分类	6	二、函数跟踪法插补中的有关约定	62
二、按进给伺服系统的类型分类	6	第三节 逐点比较法插补程序设计	68
三、按所用数控装置的构成方式分类	7	一、第 I 象限直线插补程序	68
第二章 数控机床的程序编制	8	二、不同象限的直线插补	70
第一节 概述	8	三、圆弧的逐点比较法插补	72
一、数控机床加工的程序编制	8	第四节 数字积分法插补程序设计	75
二、程序编制的分类	8	一、第 I 象限直线插补程序	75
第二节 手工编程	9	二、积分法插补圆弧程序	76
一、程序编制的工艺处理	9	三、左移规格化概念	77
二、数控机床的坐标系统	11	四、速度控制概念	78
三、数控编程的基础知识	13	第五节 微机数控系统监控程序	79
四、数控系统的功能简介	16	一、键处理及显示程序	79
五、数控编程的数值计算	24	二、输入数据处理程序	81
六、程序编制举例	26	三、诊断程序	81
第三节 自动编程简介	28	第六节 刀具位置补偿和半径补偿	83
一、概述	28	第五章 数控机床的伺服系统及位置测	
二、APT 数控语言	29	量	85
第三章 微机数控硬件及接口	35	第一节 概述	85
第一节 输入/输出接口	35	一、数控机床对伺服系统的要求	85
一、输入/输出控制方式	35	二、伺服系统常用的驱动元件	85
二、输入/输出接口的编址方式	37	第二节 开环位置伺服系统——步进电动	
三、输入/输出接口器件	37	机驱动系统	85
第二节 机床控制设备接口	42	一、步进电动机及其工作原理	85
一、数字输入/输出电路	42	二、步进电动机的特性参数及选择	86
二、模拟输入/输出电路	44	三、步进电动机的控制与驱动	88
第三节 通信显示接口	46	第三节 直流伺服电动机及其速度控制	90
第四节 微机控制系统及接口应用实例	47	一、直流伺服电动机及其特性	90
一、微机控制系统硬件组成	47	二、直流伺服电动机的速度控制	92
二、控制软件	55	三、晶体管脉宽调制 (PWM) 系统及其工	
第四章 微机数控软件设计	58	作原理	93

四、脉宽调制器和控制线路.....95	四、计算举例124
第四节 交流伺服电动机简介.....96	第七章 数控机床所用刀具及自动换刀
一、概述.....96	系统129
二、交流伺服电动机及其特性.....96	第一节 概述129
第五节 位置测量及其电路.....98	一、数控机床对刀具的要求129
一、概述.....98	二、数控机床所用刀具材料的类型及
二、旋转型测量元件及其电路.....99	选择130
三、直线型测量元件及其电路101	第二节 数控机床所用刀具的结构
第六章 数控机床常用传动元件106	及特点136
第一节 概述106	一、数控车床所用刀具及其装夹136
一、数控机床进给系统机械传动	二、数控镗铣床及加工中心所用刀具及其
的特点106	装夹139
二、数控机床对机械传动的要求106	第三节 数控机床刀具管理系统简介143
第二节 同步带传动106	一、刀具管理系统143
一、同步带传动的特点106	二、刀具状态监测系统144
二、同步带传动的计算步骤107	三、对刀仪144
第三节 联轴节和齿轮传动110	第四节 数控机床自动换刀原理与装置146
一、联轴节及其消除间隙机构110	一、数控车床自动换刀原理与方法146
二、齿轮传动消除间隙的方法110	二、数控镗铣床及加工中心自动换刀原理
第四节 数控机床上的导轨类型111	与方法148
一、概述111	第八章 微机数控在机床中的应用151
二、导轨的种类和特点111	第一节 J ₁ CJK6146 微机数控车床的操作说
三、滚动导轨的特点、结构形式	明151
和计算112	一、J ₁ CJK6146 微机数控车床的配置及功
第五节 滚珠丝杠螺母副传动115	能介绍151
一、工作原理及特点115	二、系统上电及选择工作方式153
二、结构型式115	三、编辑工作方式154
三、消除间隙和调整预紧的方法115	四、手动连续及手动步进给工作方式155
四、滚珠丝杠螺母副代号、精度等级和标	五、自动工作方式158
注方法117	六、参数设置160
五、滚珠丝杠螺母副的设计计算119	七、参考点工作方式161
六、滚珠丝杠螺母副的验算120	第二节 J ₁ CJK6146 微机数控车床的编程
七、滚珠丝杠螺母副的设计步骤121	说明162
第六节 等效转动惯量和等效转矩的计算122	一、指令代码及其功能简介162
一、概述122	二、程序段的编制165
二、伺服电动机的选择计算122	三、编程举例171
三、等效转动惯量和等效转矩的计算123	参考文献174

第一章 机床数控技术概论

第一节 数控机床概述

随着社会生产和科学技术的迅速发展,机械产品的性能和质量不断提高。目前,机械加工单件、小批量生产占大多数,对机床不仅要求具有高的精度和生产效率,而且还要灵活、通用,能迅速适应加工零件的变更。

数字控制机床简称数控机床,是50年代发展起来的新型自动化机床。它较好地解决了形状复杂、精密、小批、多变的零件加工问题,具有适应性强、加工精度高、稳定的加工质量和高生产效率的优点。它综合应用了电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密测量和新型机械结构等多方面的技术成果,是今后机床控制的发展方向。随着机床数控技术的迅速发展,数控机床在机械制造中的地位将越来越重要。

一、数控机床的产生

第一台数控机床是适应航空工业制造复杂零件的需要而产生的。1948年,美国帕森斯公司(Parsons Co)在研制加工直升飞机叶片轮廓用检查样板的加工机床任务时,提出了数控机床的初始设想。1949年,帕森斯公司正式接受委托,与麻省理工学院伺服机构试验室合作,开始从事数控机床的研制工作。经过三年时间的研究,于1952年试制成功世界上第一台数控机床样机,这是一台直线插补三坐标立式铣床,其数控系统全部采用电子管,也称第一代数控系统。后来又经过三年的改进和自动程序编制的研究,于1955年进入实用阶段,一直到50年代末,由于价格和技术上的原因,数控机床局限在航空工业中应用,品种也多为连续控制系统。到了60年代,由于晶体管的应用,数控系统提高了可靠性且价格开始下降,一些民用工业开始发展数控机床,其中多数是钻床、冲床等点位控制的机床。数控技术不仅在机床上得到实际应用,而且逐步推广到焊接机、火焰切割机等,使数控技术不断地扩展应用范围。

二、国内外数控机床发展情况

1. 国外数控机床的发展 自1952年美国研制成数控铣床以来,随着电子技术、计算机技术、自动控制和精密测量技术的发展,数控机床也在迅速地发展和不断地更新换代,先后经历了电子管、晶体管、小规模集成电路、小型计算机和微型计算机数控系统等五个发展阶段。现在微机数控系统基本取代了以往的普通数控系统,形成了第五代数控系统。

目前,世界上主要工业发达国家的数控机床已进入批量生产阶段,如美国、俄罗斯、日本、德国、法国等,其中日本发展最快。1977年时,日本年产数控机床仅5400多台,到1988年,日本年产数控机床约为50000台,数控化率达70%,居世界第一位。而当今世界数控技术具有代表性的厂家(或公司)有:日本的FANUC(法那克)公司、德国的SIEMENS(西门子)公司、美国的A-B(ALLEN-BRADLEY)公司和意大利的A-BOSZA公司等。

随着数控技术的迅速发展,数控机床的应用领域也从航空工业部门逐步扩大到汽车、造船、机床、建筑等民用机械制造行业。

从70年代中期开始,随着微电子技术的发展,机床数控系统由硬线数控进入了软线数控的新阶段。

软线数控是采用微处理器及大规模或超大规模集成电路组成的数控系统。它具有很强的程序存储能力和控制功能。这些控制功能是由一系列控制程序(即存储在系统内的管理程序)来实现的。软线数控系统通用性很强,几乎只需改变软件,就可以适应不同类型机床控制要求,具有很大的柔性。这种数控系统称为现代数控系统,也称为计算机数控——Computer Numerical Control,简称CNC。

为了区分,我们把硬线数控称作“数控”——Numerical Control,简称NC。

现代数控系统是新一代生产技术——柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)等的技术基础。世界上工业发达国家都把发展数控技术作为机械工业发展的战略重点,将数控机床向深度和广度发展列入工业发展的重要内容。所以把握现代数控系统的发展趋向具有重要的意义。概括起来,现代数控系统的发展趋向如下。

(1) 高速化

1) 选用高速32位微处理器 微处理器是现代数控系统的核心部件,它既是运算单元,又是控制单元。因此,微处理器的位数及运算速度直接关系到提高数控机床的加工速度,采用32位微处理器芯片和多微处理机系统是提高生产率的直接手段。

高速32位微处理器的采用,使数控系统的输入、译码、计算和输出等环节都在高速下完成,并可提高数控系统的分辨率及实现连续小程序段的高速、高精度加工。

日本FANUC公司生产的FS-15系统,就采用了32位微处理器和32位数据的多标准总线多微处理机系统,使系统的运算速度比16位的数控系统提高了2倍。快速进给速度达到100m/min(当分辨率为1 μ m),进给速度达到24m/min(当分辨率为0.1 μ m)。其它厂家也相继推出配置32位微处理器的数控系统。

2) 提高多轴控制水平 新型数控机床具有多轴控制功能,为了提高加工效率,可以实现多刀同时加工的多刀架控制;在柔性制造单元(FMC)上实现自动换刀装置及自动交换工件的交换工作台的控制;对曲线、曲面及特殊型面的加工,实现多轴联动控制等。现代数控系统一般可控制轴数为3~15轴,同时控制轴数(即联动)为3~6轴。

3) 配置高速、强功能内装可编程控制器(PMC) 配置并提高可编程控制器的运行速度也是提高数控机床加工速度的重要手段。新型的PMC具有专用的CPU,基本指令运算速度可达到0.25 μ m/步。强功能的内装可编程机床控制器能满足CNC机床的控制要求,可编程步数扩大到8000~12000步;也可满足DNC和FMC的控制要求,可实现CNC机床多轴联动以外的工件装卸或传递、测量、刀具储存和交换,以及CNC机床其它辅助装置的专用控制功能。

(2) 多功能

1) 具有多种监控、检测及补偿功能 为了提高数控机床的效率及加工精度,对现代数控机床配置了各种检测装置,如刀具磨损及破损的检测、机床精度及热变形的检测等。与之相适应,现代数控系统要具备刀具寿命管理、刀具长度补偿、刀尖补偿、爬行补偿、实时热变形补偿等多种补偿功能。

2) 彩色CRT图形显示 大多数现代数控系统采用CRT图形显示,可以进行二维图形的轨迹显示,有的还可以实现三维彩色动态图形的显示。

3) 人机对话功能 借助CRT, 利用键盘, 可以实现程序的输入、编辑、修改和删除等功能, 此外还具有前台操作、后台编辑的功能。大量采用菜单选择操作方式, 操作更加简便。

4) 自诊断功能 现代数控系统具有硬件、软件及故障的自诊断功能, 提高了可维修性和机床的使用效率。

5) 很强的通信功能 现代数控系统, 除了能与编程机、绘图机等外设通信外, 还能与其它CNC系统通信或与上级计算机通信, 以实现多台数控机床控制的要求。所以, 除了RS-232串行接口外, 还有RS-242和DNC等多种通信接口。

数控机床要由单机数控进入柔性制造系统(FMS), 进而形成计算机集成制造系统(CIMS), 就需要数控系统具有更高的通信功能。

(3) 智能化 在现代数控系统中, 引进了适应控制技术。在数控机床工作中, 大约有30余种变量直接或间接影响加工效果, 如工件毛坯余量不匀, 材料硬度不一致, 刀具磨损或破损, 工件变形、机床热变形、润滑或冷却液等因素。这些变量是事先难以预知的, 编制加工程序时多依据经验数据, 实际加工时, 很难用最佳参数进行切削。适应控制技术则能根据切削条件的变化而自动调整并保持最优工作状态, 从而取得好的经济效果。为了达到高的加工精度和较好的表面质量, 机床能够自动选择最佳切削用量, 从而提高了零件的加工精度、切削的生产率和刀具的寿命。

现代数控系统智能化的发展, 目前主要体现在以下几方面:

- 1) 工件自动检测, 自动定心。
- 2) 刀具磨损和破损检测及自动更换刀具。
- 3) 刀具寿命及刀具收存情况管理。
- 4) 负载监控。
- 5) 数据管理。
- 6) 维修管理。
- 7) 利用反馈控制实时补偿失动量的功能。
- 8) 根据加工时的热变化, 对滚珠丝杠等伸缩具有实时热变形补偿功能等。

另外, 国外正在研究根据人的语言声音来控制机床的技术, 由机床自己辨认图样并进行自动CNC加工的技术等, 向着使机床具有更高人工智能的方向发展。

(4) 高精度化 以加工中心为例, 其主要精度指标——直线坐标的定位精度和重复定位精度, 都有了提高。普通精度级加工中心: 定位精度由 $\pm 0.012\text{mm}/300\text{mm}$ 提高到 $\pm 0.005 \sim \pm 0.008\text{mm}/300\text{mm}$ 。精密级加工中心: 定位精度由 $\pm 0.005\text{mm}/$ 全行程提高到 $\pm 0.0015 \sim \pm 0.003\text{mm}/$ 全行程。重复定位精度由 $\pm 0.002\text{mm}$ 提高到 $\pm 0.001\text{mm}$ 。

为了提高加工精度, 除了在机床结构总体设计、主轴箱、进给系统采用低膨胀系数材料、通入恒温油等措施外, 在控制系统方面的措施是:

1) 采用更精密的脉冲当量 目前脉冲当量已从 0.001mm 减小到 0.0001mm , 以提高定位精度和重复定位精度。

2) 采用交流数字伺服系统 伺服系统的质量, 直接关系到CNC机床的加工精度。采用交流数字伺服系统, 伺服电动机的位置、速度及电流环路等参数都实现了数字化, 因此排除了模拟电路的非线性误差和调整误差以及电压和温度漂移等因素的影响, 实现了几乎不受

机械负载变化影响的高速响应的伺服系统。

3) 采用前馈控制 过去的伺服系统,是把伺服电动机位置的检测信号与位置指令之差,乘以位置环的增益 G 值,作为速度指令。这种控制方式在以进给速度 V 加工时,伺服系统的追踪滞后是 V/G ,当进行拐角加工或圆弧切削时影响加工精度。

所谓前馈控制,就是在原来的控制系统上加上指令各阶导数的控制,它能使伺服系统的追踪滞后减少 $1/2$,提高了拐角加工精度。

4) 机床静止摩擦的非线性控制 对于具有较大摩擦驱动系统的数控机床,过去的CNC系统,没有采取有效的控制,使圆弧切削的圆度较差。新型数字伺服系统具有补偿机床驱动系统摩擦的非线性控制,能改善圆弧切削的圆度。

(5) 高可靠性 数控系统工作的可靠性直接关系到数控机床的稳定工作,高可靠性是数控机床重要的指标,可从以下几方面加以解决。

1) 从数控系统的可靠性设计入手 选用高质量的印制电路板和元器件,建立从元器件筛选、稳定产品的制造工艺,以及性能测试等一套完整的质量保证体系。

最新的数控系统,如FANUC16系统采用了三维插装技术,与平面高密度插装技术相比,进一步提高了印制电路板上电子零件的插装密度,使控制装置更加小型化,进而将典型的硬件结构进行集成化,做成专用芯片,为提高数控系统的可靠性,提供了保证。

2) 模块化、标准化和通用化 现代数控系统,性能越来越完善,功能越来越多样,也促使系统的硬件、软件结构实现了模块化、标准化和通用化。

“三化”的实现,不但便于组织开发、生产、应用,而且提高了制作和运行的可靠性,并便于用户的维修和保养。

选择不同的标准化模块,便可组成各种不同数控机床的控制系统,便于现代数控系统进一步扩展和升级,促进数控技术向深度和广度方面发展。

近年来,机械制造业向多品种、小批量、产品更新换代加速等方向发展,要求产品的设计、制造、检测、生产管理和市场信息组成一个统一整体。这就出现了更高级的计算机集成制造系统。在高度自动化的CIMS内部,信息流和物流按一定的规律传递、处理和变换,形成一个以市场需求和原材料准备为输入,以合格产品为输出的、具有多级反馈和计算机控制的动态系统。随着高新技术的不断涌现,世界上的机械制造业向更高层次发展。

2. 我国数控技术的发展 我国从1958年由北京机床研究所和清华大学等单位首先研制数控机床,并试制成功第一台电子管数控机床。1965年,北京第一机床厂开始生产三坐标数控铣床。在60年代末和70年代初期,针对非圆齿轮特殊零件研制的晶体管数控铣床取得一定的成果。1972年,清华大学研制成功集成电路数控系统,1973~1979年,全国生产数控机床约4100多台。20多年来,我国的数控机床在研制和推广方面取得了一定成绩,但数控机床产量仍然很低,其功能和可靠性与先进国家相比差距也较大。

从80年代初开始,随着我国改革开放政策的实施,先后从日本、美国、德国(前西德)等国家引进先进的数控技术,如北京机床研究所从日本FANUC公司引进FANUC 5、7、3、6数控系统,上海机床研究所引进美国GE公司的MTC-1数控系统等。在引进、消化、吸收国外先进技术的基础上,北京机床研究所又开发出BS03经济型数控系统和BS04全功能数控系统,航空航天部706所研制出MNC864数控系统等,进而推动了我国数控技术的发展,使我国数控机床在品种上、性能上以及水平上均有了新的飞跃。仅1985年的统计资料表明,

我国数控机床的品种已达80多种，生产数控机床约有2000多台，已投入使用的数控机床有：数控车床、数控铣床、数控磨床、数控镗铣床、立式和卧式加工中心等，已使我国数控机床生产开始跨入一个新的发展阶段。

三、数控机床的工作原理和组成

1. 数控机床的工作原理 数控机床加工零件时，首先应编制零件的加工程序，这是数控机床的工作指令。将加工程序输入到数控装置，再由数控装置控制机床主运动的变速、起停，进给运动的方向、速度和位移量，以及其它如刀具选择交换、工件夹紧松开和冷却润滑的开、关等动作，使刀具与工件及其它辅助装置严格地按照加工程序规定的顺序、轨迹和参数进行工作，从而加工出符合要求的零件。

2. 数控机床的组成 根据上述工作原理、数控机床主要由控制介质、数控装置、伺服系统和机床本体等四部分组成，其组成框图如图 1-1 所示。

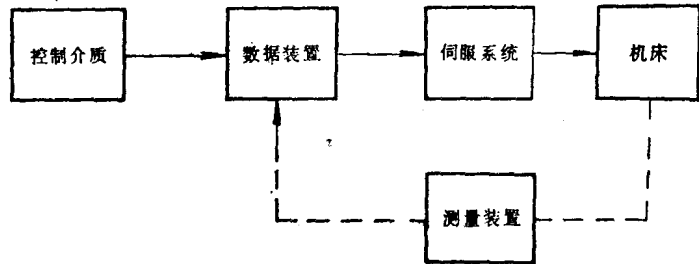


图1-1 数控机床的组成

控制介质上记载的加工信息要经输入装置输送给数控装置。常用的输入装置有光电纸带输入机、磁带录音机和磁盘驱动器等。对于用微机控制的数控机床，也可用操作面板上的按钮和键盘将加工程序直接用键盘输入，并在CRT显示器上显示。

(2) 数控装置 数控装置是数控机床的核心，它的功能是接受输入装置输入的加工信息，经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行译码、运算和逻辑处理后，发出相应的脉冲送给伺服系统，通过伺服系统控制机床的各个运动部件按规定要求动作。

(3) 伺服系统及位置检测装置 伺服系统由伺服驱动电动机和伺服驱动装置组成，它是数控系统的执行部分。由机床上的执行部件和机械传动部件组成数控机床的进给系统，它根据数控装置发来的速度和位移指令控制执行部件的进给速度、方向和位移量。每个进给运动的执行部件、都配有一套伺服系统。伺服系统有开环、闭环和半闭环之分，在闭环和半闭环伺服系统中，还需配有位置测量装置，直接或间接测量执行部件的实际位移量。

(4) 机床本体及机械部件 数控机床的本体及机械部件包括：主运动部件，进给运动执行部件如工作台、刀架及其传动部件和床身立柱等支承部件，此外还有冷却、润滑、转位和夹紧等辅助装置。对于加工中心类的数控机床，还有存放刀具的刀库，交换刀具的机械手等部件。数控机床的本体和机械部件的结构，其设计方法基本同普通机床，只是在精度、刚度、抗振性等方面要求更高，尤其是要求相对运动表面的摩擦系数要小，传动部件之间的间隙要小，而且其传动和变速系统要便于实现自动化控制。

第二节 数控机床的分类

数控机床的种类很多，分类方法不一。根据数控机床的功能和组成，归纳起来可按下列三种方法进行分类。

一、按机械运动的轨迹分类

1. 点位控制系统 点位控制系统又称点到点控制系统。它控制刀具相对于工件定位点的坐标位置，对定位移动的轨迹并无要求，因为在定位移动过程中是不进行切削加工的。为了提高生产效率和保证定位精度，采用机床设定的最高进给速度，而在接近终点前进行分级或连续降速，实现低速趋近终点，从而可以减少运动部件因惯性引起的定位误差。

属于点位控制系统的数控机床有数控钻床、数控坐标镗床及数控测量机等。

2. 直线控制系统 直线控制系统是指能控制刀具或工作台以给定的速度，沿着平行于某一坐标轴方向进行直线切削加工的控制系統，该系统也可以沿与坐标轴成 45° 的斜线进行直线切削加工，但不能沿任意斜率的直线进行直线切削加工。

直线控制的数控车床只有两个坐标轴，可用于台阶轴加工，直线控制的数控铣床，有三个坐标轴，可用于平面铣削加工，一般的简易数控系统均属于直线控制系统。

将点位控制和直线控制结合起来的控制系统称为点位一直线控制系统，该系统同时具有点位控制和直线控制的功能。数控镗铣床、加工中心等一般采用点位一直线控制系统。

3. 连续控制系统 连续控制系统又称轮廓控制系统，该系统能对刀具相对零件的运动轨迹进行连续控制，以加工任意斜率的直线、圆弧、抛物线或其它函数关系的曲线。它与点位直线控制系统的主要差别在于系统中有一插补器，分别控制伺服系统中的每一坐标轴。这类数控机床的数控装置功能是齐全的，能够同时控制 $2 \sim 5$ 个坐标轴联动。能够进行连续控制的数控机床，一般也能够进行点位和直线控制。

二、按进给伺服系统的类型分类

数控装置发出的指令信号（脉冲或电压），通过伺服驱动系统驱动机床各运动部件运动。按进给伺服系统的类型有以下三种：

1. 开环伺服系统 这种控制方式通常不带有位置测量元件，伺服驱动元件多为步进电动机或电液脉冲马达，输入的数据经过数控系统的运算分配输出指令脉冲。指令脉冲控制步进电动机或电液脉冲马达转动，再经过传动机构，使执行部件移动或转动。

这种控制方式对执行机构的动作情况是不进行检测的，指令发出去不再反馈回来，称为开环控制，如图1-2所示。

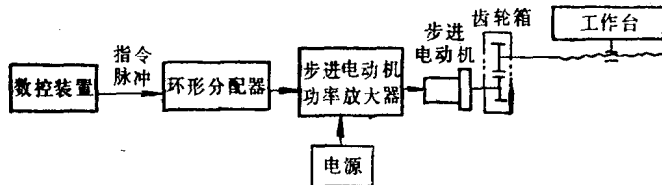


图1-2 开环伺服系统

这种控制方式调试方便，维修简单，成本低，但控制的精度和速度受到限制，一般适用于精度要求不高的中、小型数控机床上。

2. 闭环伺服系统 这种控制方式必须具备测量元件，其控制系统如图1-3所示。

一般测量元件直接安装在工作台上，当指令值发送到位置比较电路时，此时若工作台没

有移动, 没有反馈量, 指令值使得伺服电动机转动, 并带动工作台移动, 此时测量元件将工作台实际位移量反馈回去, 在位置比较电路中, 与指令值进行比较, 用比较后得到的差值进行控制, 直至差值消除为止, 这就叫闭环控制。

这种控制方式的优点是精度高, 速度快, 但调试和维修比较复杂, 成本高, 一般用于运动速度和精度要求较高的大、中型数控机床上。

3. 半闭环伺服系统

其控制系统如图1-4所示。

这种控制方式对工作台的实际位置不进行检测, 而是通过与伺服电动机有联系的测量元件间接测量出伺服电动机的转角, 进而推算出工作台实际位移量, 用此值

与指令值进行比较, 用差值实现控制。从图1-4可以看出, 由于工作台没有完全包括在控制回路内, 带动工作台移动的滚珠丝杠误差不能补偿, 因而称之为半闭环伺服系统。

半闭环伺服系统介于开环和闭环之间, 精度比开环高, 调试却比闭环容易, 成本也比闭环低, 是一般数控机床常应用的一种伺服系统。目前这种伺服系统适用于大型数控机床上。

三、按所用数控装置的构成方式分类

1. 硬线数控系统 硬线数控系统使用硬线数控装置, 它的输入处理、插补运算和控制功能, 都由专用的固定组合逻辑电路来实现, 不同功能的机床, 其组合逻辑电路也不相同。改变或增减控制、运算功能时, 需要改变数控装置的硬件电路。因此通用性和灵活性差, 制造周期长, 成本高。70年代初期以前的数控机床基本上属于这种类型。

2. 软线数控系统 软线数控系统也称计算机数控系统, 它使用软线数控装置。这种数控装置的硬件电路是由小型或微型计算机再加上通用或专用的大规模集成电路制成, 数控机床的主要功能几乎全部由系统软件来实现, 所以不同功能的数控机床其系统软件也就不同, 而修改或增减系统功能时, 也不需变动硬件电路, 只需改变系统软件。因此, 具有较高的灵活性, 同时由于硬件电路基本上是通用的, 这就有利于大量生产、提高质量和可靠性、缩短制造周期和降低成本。从70年代中期以后, 随着微电子技术和微型计算机的出现, 以及集成电路的集成度不断提高, 计算机数控系统才得到不断的发展和提高, 目前几乎所有的数控机床采用了软线数控系统。

除了上述三种分类以外, 还有其它的分类方法, 例如, 按控制轴数与联动轴数可分为几轴控制几轴联动等多种数控机床; 按数控机床功能多少可分为经济型数控机床和全功能数控机床等。

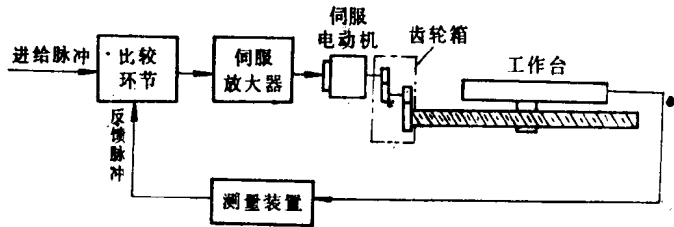


图1-3 闭环伺服系统

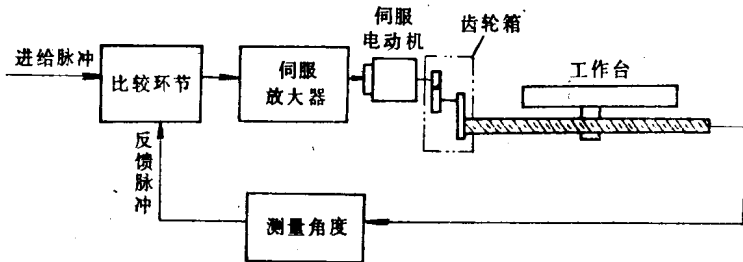


图1-4 半闭环伺服系统

第二章 数控机床的程序编制

第一节 概 述

一、数控机床加工的程序编制

在通用机床加工时，首先是根据零件图样，确定零件的装夹方法，选择刀具的类型，确定刀具的加工顺序及切削用量等，上述一系列事项都要由操作者自己来判断和确定，然后进行加工。使用数控机床加工时，虽然也要经过上述过程，但是将上述事项都记录在指令带上，然后由数控机床按照指令带上的指令进行加工，而操作者的任务只是装卸刀具和工件、调整机床、按动开关以及监视加工情况等。从分析零件图开始，到获得数控机床所需控制介质的全部过程，称为程序编制。它是数控机床加工准备过程中的重要组成部分。程序编制的过程可分为以下几个步骤。

1. 编写工艺规程 工艺规程是指研究与加工有关的一切事项，如根据零件图样计算加工尺寸，确定加工顺序和加工方法等，其中主要内容如下。

1) 在图样上确定坐标原点，以坐标原点为基准计算各点的加工尺寸，即进行数值计算。

2) 选择合理的加工顺序和路线。

3) 确定刀具的类型及尺寸。

4) 选择切削用量和切削液等。

2. 编制加工程序单 依据工艺规程，按照加工顺序把各种动作所需要的刀具、刀具位移量、移动方向和轨迹等指令内容用规定的符号填写在规定的格式表内。

3. 制备指令带 根据加工程序单，用穿孔机将程序单上的内容转换成代码并自动地在纸带上穿孔，最后制成指令带，也称纸带。

4. 指令带的校验和修改 消除因制备指令带所出现的错误。

5. 首件的试切加工 通过试切加工，进一步校核零件程序的正确性。

二、程序编制的分类

程序编制分为手工编程和自动编程。

1. 手工编程 上述几方面的工作几乎都由人工来完成的叫做手工编程，或称人工编程。在编程过程中，尽管可以采用一些高效的计算机进行数值计算，但从编写算式，记录数据、填写程序单直至手工穿孔、校验等都需要大量的人工完成。

2. 自动编程 应用计算机进行上述编程，并制成指令带的过程称为自动编程，或称计算机辅助编程。

对加工形状简单的零件，大部分用手工编程是合适的，例如，用点位控制加工孔时，用手工计算坐标值是很容易的。但对于在轮廓控制的情况下，加工圆或直线以外的曲线所构成的轮廓时，则其计算比较困难和麻烦，如加工螺旋桨或复杂形状的凸轮以及三坐标刻模加工等，使用手工编程需要很长的时间，一般采用自动编程。本章主要介绍手工编程的有关问题。

第二节 手工编程

手工编程的格式和方法，一般是随数控机床的类型而有所不同，但大体的过程是一样的，这一过程可用图 2-1 表示。

一、程序编制的工艺处理

在数控机床上加工零件时，首先遇到的问题是在工艺分析的基础上，编程人员根据数控机床的性能，零件的加工要求等合理地编制加工程序。

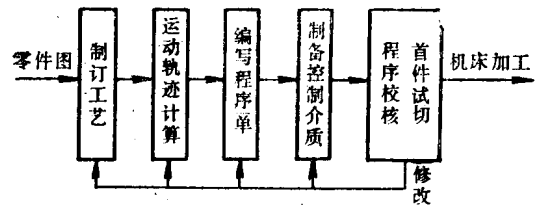


图2-1 程序编制的一般过程

1. 选择刀具和确定切削用量 根

据零件的加工要求，选择不同类型的标准刀具或专用刀具，使刀具安装、调整方便，刚性好，精度高等，一般粗、精加工使用不同的刀具。

在编程时，往往要规定刀具的结构尺寸和调整尺寸，特别是对自动换刀的数控机床，刀具安装到机床之前，应根据编程时确定的参数，在加工前调整到所需要的尺寸。

必须确定每道工序的切削用量，一般根据有关的手册查取或结合实践经验用类比的方法确定。切削用量包括：主轴转速、切削深度和宽度、进给速度等。

主轴转速 n (r/min) 应根据允许的切削速度和工件(或刀具)直径来选择，其计算公式为：

$$n = 1000 v / (\pi d)$$

目前，根据有关资料，摘录常用的切削速度值列表 2-1，供设计时参考选用。

表2-1 常用切削速度 v

(m/min)

工序	工件材料 刀具材料	铸 铁		钢及其合金		铝及其合金		铜及其合金	
		高 速 钢	硬 质 合 金	高 速 钢	硬 质 合 金	高 速 钢	硬 质 合 金	高 速 钢	硬 质 合 金
		钻 孔	15~25	—	10~20	—	50~70	—	20~50
扩	通孔	10~15	30~40	10~20	35~60	30~40	—	30~40	—
	沉孔	8~12	25~30	8~14	30~50	20~30	—	20~30	—
镗	粗镗	20~25	35~50	15~30	50~70	80~150	100~200	80~150	100~200
	精镗	30~40	60~80	40~50	90~120	150~300	200~400	150~200	200~300
铣	粗铣	10~20	40~60	15~25	50~80	150~200	350~500	100~150	300~400
	精铣	20~30	60~120	20~40	80~150	200~300	300~800	150~250	400~500
铰 削		6~10	30~50	6~20	20~50	50~70	200~250	20~50	60~100
攻 螺 纹		2.5~5	—	1.5~5	—	5~15	—	5~15	—
车 削		—	60~100	15~25	60~110	150~200	300~450	60~100	150~200

计算的主轴转速 n 最后要根据机床说明书中选取该机床有的或较接近的转速。

进给速度（或进给量） f 值通常根据加工精度和表面质量的要求选取，常用的 f 值列表 2-2。

表2-2 常用的进给速度 f 值

(mm)

工序及刀具参数		工件材料	铸 铁		钢及其合金		铜、铝及其合金		
			刀具材料		高速钢	硬质合金	高速钢	硬质合金	高速钢
		高速钢	硬质合金	高速钢	硬质合金	高速钢	硬质合金	高速钢	硬质合金
钻 孔 (mm/r)	钻头直径	3~12	0.05~0.20	—	0.05~0.15	—	0.05~0.20	—	
		12~50	0.18~0.5	—	0.15~0.30	—	0.20~0.50	—	
扩 孔 (mm/r)	扩孔直径	10~25	0.15~0.25	—	0.10~0.25	—	0.15~0.25	—	
		25~50	0.25~0.40	—	0.20~0.40	—	0.25~0.40	—	
铰 孔 (mm/r)	铰孔直径	6~20	0.30~0.80		0.30~0.50		0.3~1.0		
		20~50	0.80~1.5		0.50~0.60		1.0~1.5		
铣 削	每齿走刀量	粗 铣	0.10~0.20	0.15~0.35	0.15~0.35	0.20~0.40	0.15~0.30	0.20~0.40	
		精 铣	0.03~0.10	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.20	0.03~0.08	0.05~0.10	
镗 削 (mm/r)	粗镗	0.40~1.20		0.30~0.70		0.40~1.5			
	精镗	0.05~0.15		0.05~0.15		0.05~0.10			
车 削 (mm/r)	粗车	1.0~2.0		1.0~2.0		1.0~2.0			
	精车	0.05~0.20		0.05~0.15		0.10~0.20			

切削深度根据机床、工件和刀具的刚度来决定，在刚度允许的条件下，应尽可能使切深等于工件的加工余量，这样可以减少走刀次数，提高生产效率。为了保证加工表面的质量，一般留有精加工余量。

2. 装夹方法和对刀点 在分析零件图样后，应选择合理的定位基准和装夹方法。在数控机床上装夹零件时，可由机床本身找正零件上的加工点，故一般可采用通用夹具。与普通机床上加工零件一样，装夹零件时应按照定位基准与设计基准重合这个原则。

在数控加工时，还要确定“对刀点”，对刀点是刀具相对零件运动的起点。对刀点可以在零件上，也可以在零件外（如在夹具或机床上），但必须与零件的定位基准有一定的关系。加工过程中需要换刀时，还要确定换刀点，换刀点应在零件的外部，以免换刀时碰伤工件。

3. 确定加工路线 加工路线是指加工过程中刀具运动的轨迹和运动方向。加工路线应保

证零件的加工精度和表面质量，仅举几例说明如下。

(1) 孔加工路线的确定 如果有多个孔之间的位置精度要求较高，如何安排镗孔路线就显得十分重要，安排不当就有可能把坐标轴的反向间隙带入加工中，直接影响孔的位置精度，如图 2-2 是说明加工 4 个孔的路线示意图。

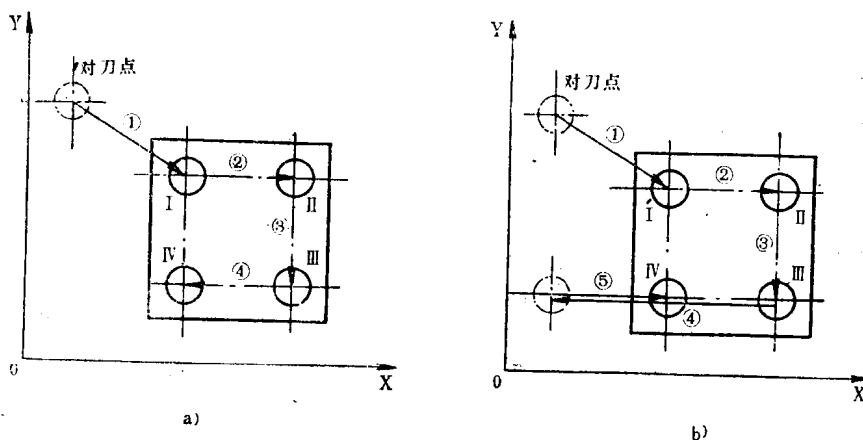


图2-2 两种孔系加工路线方案

a) 方案 1 b) 方案 2

从图中不难看出，图 2-2 a 由于 IV 孔与 I、II、III 孔的定位方向相反，这样 X 向的反向间隙会使定位误差增加，而影响 IV 孔与 III 孔的位置精度。图 2-2 b 是当加工完 III 孔后没有直接在 IV 孔处定位，而是多运动了一段距离，然后折回来在 IV 孔处进行定位，这样 I、II、III 和 IV 孔的定位方向是一致的，避免了反向间隙误差的引入，从而提高了 III 孔与 IV 孔的孔距精度。

(2) 铣切内、外圆时加工路线的确定 铣切整圆时，要安排刀具从切向进入圆周铣削加工，当整圆加工完毕之后，不要在切点处取消刀具补偿和退刀，要安排一段沿切线方向连续运动的距离，这样可以减少刀具在切入、切出点的停留时间，减少接刀的痕迹，提高加工表面质量。切削外圆加工路线如图 2-3 所示。

(3) 刀具轴向进给的切入与切出的确定 用钻头钻孔，应使空程最短，并考虑加工时刀具的轴向运动尺寸，当刀具到达孔底部后，应安排刀具快速退出工件，该尺寸由被加工工件的孔深决定，但还应考虑刀具引入距离 ΔZ ，如图 2-4 所示，图中，引入距离 ΔZ 见表 2-3。

二、数控机床的坐标系统

在数控机床上加工零件时，刀具与工件的相对运动，必须在确定的坐标系中，才能按规定的程序进行加工。

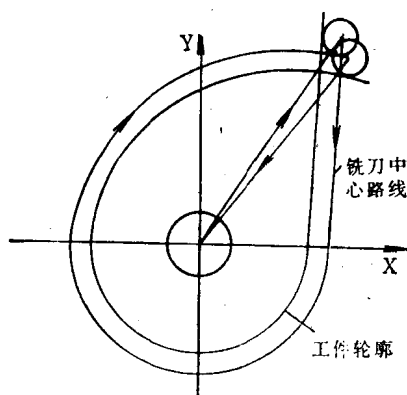


图2-3 加工外轮廓的刀具路线