



普通高等教育“十二五”规划教材

SHUKONG JISHU

数控技术

李 伟 魏国丰 主 编
齐建家 国绍文 须 莹 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

SHUKONG JISHU

数控技术

主 编 李 伟 魏国丰
副主编 齐建家 国绍文
编 写 刘桂波 王 巍
窦建华 陈佳莹
主 审 汤双清



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书包括9个项目，主要内容有：数控机床的选用，数控加工工艺规划，典型零件数控加工，数控机床轨迹控制，数控机床控制系统设计、进给伺服系统设计、主传动系统设计、总体结构设计，以及故障诊断与典型案例分析。

本书主要为培养应用型机械类工程师和CDIO工程教育模式教学改革试点专业提供配套教材，可作为高等学校机电类专业本科生的教材，也可供从事数控技术、数控机床设计的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控技术/李伟, 魏国丰主编. —北京: 中国电力出版社, 2011.8
普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-2036-9

I. ①数… II. ①李…②魏… III. ①数控机床—高等学校—教材
IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第166425号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011年8月第一版 2011年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.75印张 485千字

定价 34.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

数控技术是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础；数控技术的应用是提高制造业的产品质量和劳动生产率必不可少的重要手段；数控机床是国防工业现代化的重要战略装备，是关系到国家战略地位和体现国家综合国力水平的重要标志。数控技术是最典型的、应用最广泛的机电光一体化综合技术，这就要求机械类专业应用型本科学生具备一定的机床数控技术理论知识及应用技能。

目前很多高等院校已启动实施卓越工程师教育培养计划，也有很多高等院校开展 CDIO 工程教育模式的研究与实践。教育部《关于实施卓越工程师教育培养计划的若干意见》中指出：卓越工程师教育培养计划是为贯彻落实党的十七大提出的走中国特色新型工业化道路、建设创新型国家、建设人力资源强国等战略部署，贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010～2020 年）》实施的高等教育重大计划。为此，黑龙江工程学院老师编写了此书，本书的编写依据本校卓越工程师教育培养计划，遵循工程的集成与创新特征，以强化工程实践能力、工程设计能力与工程创新能力为核心，重构课程体系和教学内容，加强跨专业、跨学科的复合型人才培养，着力推动基于问题的学习、基于项目的学习、基于案例的学习等多种研究性学习方法，加强学生创新能力训练。

为适应卓越工程师教育培养计划及 CDIO 工程教育模式教学改革的需要，按照应用型机械工程师培养的行业专业标准，本书对教学内容作了精心安排。本书在编写过程中，注重学生能力培养，以项目设计、工作过程为导向，确定能力标准、知识点，以数控机床设计、速度进给设计、典型零件生产加工过程等为切入点组织教学，在项目实施过程中开展教学，训练学生技能，突出教、学、做一体化的教学模式，其特色在于注重应用性、先进性、综合性及学生能力培养。

本书由黑龙江工程学院李伟、魏国丰担任主编，齐建家、国绍文、须莹担任副主编，全书由李伟统稿，由三峡大学汤双清主审。全书共分 9 个项目，其中项目 1 由窦建华编写，项目 2 由须莹编写，项目 3 由魏国丰编写，项目 4 由王巍编写，项目 5 由齐建家编写，项目 6 中 6.1、6.2、6.3 由刘桂波编写，6.4、6.5 由陈佳莹编写，项目 7 由国绍文编写，项目 8 和项目 9 由李伟编写。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2011 年 6 月

目 录

前言

项目 1 数控机床的选用	1
1.1 数控技术的产生及特点	1
1.2 数控系统的组成及分类	3
1.3 数控技术的发展	8
1.4 数控机床的选型	11
1.5 数控机床的安装和调试	17
项目 2 数控加工工艺规划	20
2.1 数控加工的工艺处理	20
2.2 零件的工艺分析	25
2.3 数控加工工艺规程的制定	26
2.4 数控铣削加工工艺分析	32
2.5 数控车削加工工艺分析	41
2.6 典型零件的数控加工工艺举例	49
项目 3 典型零件数控加工	53
3.1 数控机床的坐标系	53
3.2 数控编程的种类及步骤	57
3.3 数控编程的标准和结构格式	58
3.4 数控程序编制过程中的数值计算	61
3.5 数控铣床的编程	63
3.6 数控车床的编程	87
3.7 加工中心程序编制	107
3.8 数控加工自动编程简介	111
项目 4 数控机床轨迹控制	117
4.1 概述	117
4.2 基准脉冲插补	117
4.3 数据采样法插补	128
4.4 数控装置的进给速度与加减速控制	131
4.5 纳米插补功能简介	134
项目 5 数控机床控制系统设计	136
5.1 CNC 系统组成及硬件结构	136
5.2 开放式数控系统的体系结构	140
5.3 控制系统软件的组成及结构	142

5.4	可编程控制器 (PLC) 控制系统	150
5.5	CNC 装置的接口电路	155
5.6	蓝牙技术在数控机床中的应用	160
项目 6	数控机床进给伺服系统设计	162
6.1	数控机床对进给伺服系统的设计要求	162
6.2	数控机床的进给驱动系统	163
6.3	数控机床检测装置	177
6.4	数控机床进给系统的机械结构	188
6.5	进给传动系统的设计	200
项目 7	数控机床主传动系统设计	216
7.1	概述	216
7.2	数控机床的主运动部件	219
7.3	主传动系统设计	227
项目 8	数控机床总体结构设计	247
8.1	数控机床总体方案设计	247
8.2	数控机床的结构和性能要求	250
8.3	数控机床的总体布局	255
8.4	数控机床的床身设计	260
8.5	数控机床刀库与自动换刀装置	263
8.6	数控机床回转工作台	275
8.7	数控机床排屑装置	281
项目 9	数控机床的故障诊断与典型案例分析	283
9.1	概述	283
9.2	数控机床机械故障诊断与维护	292
9.3	数控系统故障诊断与维护	298
9.4	常见伺服系统故障及诊断	306
参考文献		309

项目1 数控机床的选用

1.1 数控技术的产生及特点

1.1.1 数控技术的产生

微电子技术、自动信息处理、数据处理以及电子计算机的发展,给自动化带来了新的理念,推动了机械制造自动化的发展。

生产企业广泛采用自动机床、组合机床和以专用机床为主的自动生产线,多刀、多工位和多面同时加工,成年累月地进行着单一产品零件的高度自动化生产。这种生产方式需要巨大的初期投资和很长的生产准备周期,因此,仅适用于批量较大的零件生产。目前,单件与小批量生产的零件占机械加工总量的80%左右。航空、航天、船舶、机床、重型机械和军工类的产品,不但加工批量小,而且加工零件形状比较复杂,精度要求也很高,还需要经常改型。为有效地解决复杂、精密、小批多变的零件加工问题,满足高质量、高效益和多品种、小批量的柔性生产方式的要求,数控机床应运而生。数控技术因具有高精度、高生产率、适应性好等特点,在机械制造业中得到日益广泛的应用(美国的数控机床已占机床总数的80%以上)。

采用数字控制技术进行机械加工的思想,最早是在20世纪40年代初提出的。当时,美国一个小型飞机工业承包商帕森斯公司在制造飞机框架及直升机叶片轮廓用样板时,利用全数字电子计算机对轮廓路径进行数据处理,并考虑了刀具直径对加工路径的影响,提高了加工精度。其后帕森斯公司正式接受美国空军委托,在麻省理工学院伺服机构试验室的协助下,开始从事数控机床的研制工作。经过3年的研究,于1952年试制成功世界第一台数控机床试验性样机。这是一台采用脉冲乘法器原理的直线插补三坐标连续控制铣床,这便是数控机床的第一代。

尽管这种初期数控机床采用电子管和分立元件硬接线电路进行运算和控制,体积庞大而且功能单一,但采用了先进的数字控制技术,且具有普通设备和各种自动化设备无法比拟的优点,具有强大的生命力,它的出现开辟了工业生产技术的新纪元。从此,数控技术在全世界得到了迅速的应用和发展。

1953年,美国空军与麻省理工学院协作,开始从事计算机自动编程的研究。1955年,美国空军订购了大约100台数控机床。此后2年,美国数控机床进入迅速发展阶段,市场上出现了商品化数控机床。1958年,美国克耐·杜列克公司(Keaney & Trecker Co.)在世界上首先研制成功带自动换刀装置的数控机床,称为加工中心。1960年以后,点位控制机床在美国得到迅速发展,数控技术不仅在机床上得到了实际应用,而且逐步推广到冲压机、绕线机、焊接机、火焰切割机、包装机和坐标测量机等。仅数控机床就有数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床、数控镗床以及数控加工中心等。在程序编制方面,已由手工编程逐步发展到采用计算机自动编程。

从1960年开始,德国、日本等先进工业国家都陆续开发、生产及使用了数控机床。

1967年,英国首先把几台数控机床连接成具有柔性的加工系统,这就是最初的柔性制

造系统 (Flexible Manufacturing System, FMS)。之后, 美国、日本及欧洲等国家和地区也相继进行开发与应用。

随着计算机技术的发展, 小型计算机的价格急剧下降。小型计算机开始取代专用数控计算机, 数控的许多功能由软件程序实现, 这样组成的数控系统称为计算机数控 (Computer Numerical Control, CNC) 系统。1970 年, 在美国芝加哥国际机床展览会上, 首次展出了这种系统。而由计算机直接对许多机床进行控制的控制系统, 称为直接数控 (Direct Numerical Control, DNC) 系统。1970 年前后, 美国英特尔公司开发和使用微处理器。1974 年美国、日本等国首先研制出以微处理器为核心的数控系统。微处理机数控系统的数控机床得到了飞速发展和广泛应用。

20 世纪 80 年代初, 国际上又出现了柔性制造单元 (Flexible Manufacturing Cell, FMC)。FMC 和 FMS 被认为是实现计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System, CIMS) 的必经阶段和基础。

1.1.2 数控加工的特点

(1) 数控机床与普通机床的区别:

- 1) 数控机床具有手动、机动、程序控制自动加工功能, 加工过程一般不需人工干预。
- 2) 数控机床一般具有 CRT (阴极射线管) 显示功能、自动报警显示等辅助功能。
- 3) 数控机床主传动和进给传动采用直流或交流无级调速伺服电动机, 无变速箱。
- 4) CNC 机床一般具有工件测量系统。
- 5) 最显著区别是当加工工件改变时, 数控机床只改变加工程序, 不需对机床作较大的调整。

(2) 与普通机床相比, 数控机床具有以下特点:

1) 可以加工具有复杂型面的工件。具有良好的加工柔性, 加工零件的适应性强、灵活性好。由于数控机床能实现多个坐标的联动, 所以数控机床能完成复杂型面的加工, 特别是对于可用数学方程式和坐标点表示的形状复杂的零件, 加工非常方便。当改变加工零件时, 数控机床只需更换零件加工的数控程序。因此, 生产准备周期短, 数控机床的适应性非常强。

2) 加工精度高、加工质量稳定。对于同一批零件, 由于使用同一机床、刀具及同一加工程序, 刀具的运动轨迹完全相同, 且数控机床是根据数控程序自动进行加工, 可以避免人为的误差, 这就保证了零件加工的一致性好且质量稳定。数控机床有较高的加工精度, 一般在 $0.005\sim 0.1\text{mm}$ 之间。数控机床的加工精度不受零件复杂程度的影响, 机床传动链的反向齿轮间隙和丝杠的螺距误差等都可以通过数控装置自动进行补偿, 同时还可以利用数控软件进行精度校正和补偿。

3) 生产效率高。数控机床上可以采用较大的切削用量, 有效地节省了机动工时。数控机床还有自动换速、自动换刀和其他辅助操作自动化等功能, 使辅助时间大为缩短, 而且无需工序间的检验与测量, 所以生产率比普通机床高 $3\sim 4$ 倍甚至更多。

数控机床的主轴转速及进给范围都比普通机床大。目前数控机床的最高进给速度可达到 100m/min 以上, 最小分辨率达 $0.01\mu\text{m}$ 。一般来说, 数控机床的生产能力约为普通机床的 3 倍, 甚至更高。数控机床的时间利用率高达 90% , 而普通机床仅为 $30\%\sim 50\%$ 。

4) 减轻了劳动强度, 改善了劳动条件。在输入程序并启动后, 数控机床就自动地连续

加工,直至零件加工完毕。这样就简化了工人的操作,使劳动强度大大降低。

5) 有利于生产管理现代化。工时和工时费用可以精确估计,生产管理水平得到提高,便于实现生产计划调度,简化和减少了检验、工具夹具准备等管理工作。可实现计算机管理与控制。

6) 数控加工是计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)/计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)技术和先进制造技术的基础。工序集中、一机多用是数控机床的普遍特点。特别是带自动换刀的数控加工中心,在一次装夹的情况下,几乎可以完成零件的全部加工工序,一台数控机床可以代替数台普通机床。这样可以大大减小装夹误差,节约工序之间的运输、测量和装夹等辅助时间,还可以节省车间的占地面积,带来较高的经济效益。

1.1.3 数控机床适用范围

数控技术有效地解决了结构复杂、精密、贵重、小批多变、急需的零件加工问题,能满足高质量、高效益和多品种、小批量的柔性生产方式的要求。

数控机床在如下一些零件的加工中,更能显示出它的优越性:

- (1) 多品种、小批量而又轮番生产的零件,新产品试制的零件;
- (2) 几何形状复杂的零件,精度要求高、需要最短生产周期的零件;
- (3) 在加工过程中必须进行多种工序加工的零件;
- (4) 切削余量大的零件,用普通机床加工需要昂贵的工装设备的零件;
- (5) 必须严格控制公差(即公差带范围很小)的零件;
- (6) 经常改型,工艺设计会经常变化的零件;
- (7) 价格昂贵,不允许报废的关键零件,加工过程中的错误会造成严重浪费的贵重零件;
- (8) 需全部检测的零件等。

1.2 数控系统的组成及分类

1.2.1 数控技术的基本概念

数字控制技术,简称数控(Numerical Control, NC)。它是利用数字化的信息对机械运动及加工过程进行控制的一种方法。装备了数控系统的机床称为数控机床。

数控程序的程序段,由数字0~9,字母X、Y、Z、S、T、F、M等,符号“+”、“-”、“.”等组成。这些数字和符号都要转换成二进制数字代码输入机床的数字控制装置(即控制机床的专用计算机)中,经过计算机计算处理、发出指令,通过伺服控制装置驱动机床各部件运动,完成空间曲线的加工。由于指令是以二进制数字代码表示的,所以称这种控制为数字控制。数字控制是与机床控制密切结合而发展起来的,因此,人们习惯把机床数控简称为数控或NC,用这种控制技术控制的机床就称为数控机床。数控装置和伺服控制部分统称为数控系统。机床的数字控制是近代发展起来的一种自动控制技术,是用数字化信息实现机床控制一种方法。

数控机床是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础,其水平的高低和拥有量是衡量一个国家工业现代化的重要标志,数控机床已成为关系到国家战略地位和体现国家综合

国力的重要基础性产品。

数控机床的基本技术主要有精密机械技术、计算机及信息处理技术、自动控制理论和伺服驱动技术、精密检测和传感技术、网络和通信技术。

1.2.2 数控机床的组成

数控机床的组成框图如图 1-1 所示，其中除机床本体之外的部分统称为计算机数控（CNC）系统。

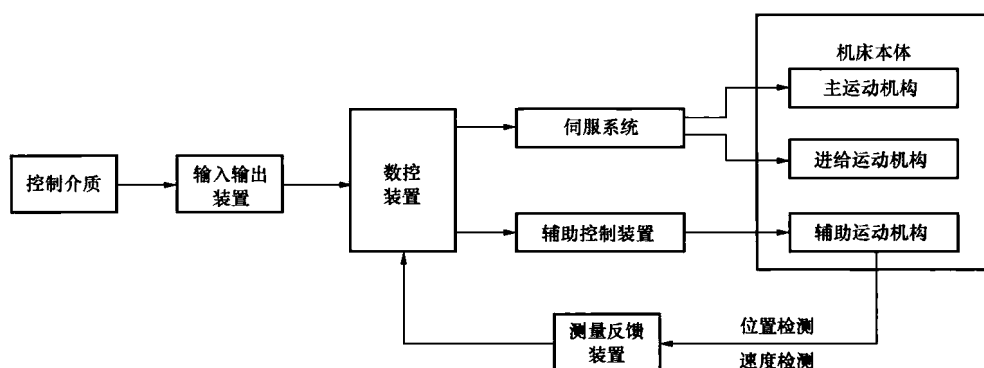


图 1-1 数控机床的组成框图

1. 控制介质

对机床进行控制，要在人与机床之间建立某种联系，这种联系的中间媒介物称为控制介质或程序载体。控制介质可以是穿孔带、磁带、磁盘等。

2. 输入输出装置

输入输出装置主要实现程序编制、程序和数据的输入及显示、存储、打印等。键盘、磁盘机、光电阅读机等是数控机床的典型输入设备。除上述以外，还可以用串行通信的方式输入。由键盘直接输入给数控装置，称为手动数据输入（Manual Date Input, MDI）方式。数控系统一般配有 CRT 显示器或发光二极管（LED）点阵式液晶显示器，显示的信息较丰富，并能显示图形。操作人员通过显示器获得必要的信息。功能较先进的数控机床可能还包括一套自动编程机或 CAD/CAM 系统。

3. 数控装置

数控装置是数控机床的核心，它接受来自输入设备的程序和数据，并按输入信息的要求完成数值计算、逻辑判断和输入输出控制等功能。主要包括微处理器 CPU（控制器、运算器）、存储器、局部总线、外围逻辑电路以及与 CNC 系统的其他组成部分联系的接口（输入输出装置）等。数控机床的 CNC 系统完全由软件处理数字信息，因而能够实现真正的柔性化，可处理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。

介于数控装置与被控设备之间的强电控制装置，其功能是接受数控装置或可编程控制器（控制主轴、刀具、工作台、工件夹紧和松开、冷却液等）的输出信号，经编译、逻辑判断及功率放大直接驱动相应的执行元件。

数控装置的主要功能如下：

（1）多坐标控制（多轴联动）。

(2) 插补计算功能(如直线、圆弧和其他曲线插补)。

(3) 程序输入、编辑和修改功能(人机对话、手动数据输入、上位机通信输入)。

(4) 故障自诊断功能。由于数控系统是一个十分复杂的系统,为使系统故障停机的时间减至最少,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。

(5) 补偿功能。补偿主要包括刀具半径补偿、刀具长度补偿、传动间隙补偿、螺距误差补偿等。

(6) 信息转换功能。主要包括 EIA/ISO 代码转换、英制/米制转换、坐标转换、绝对值/增量值转化等。

(7) 多种加工方式选择。可以实现多种加工方式循环、重复加工、凸凹模加工和镜像加工等。

(8) 辅助功能。辅助功能也称 M 功能,用来规定主轴的启停和转向、切削液的接通和断开、刀具的更换等。

(9) 显示功能。用显示屏显示程序、参数、各种补偿量、坐标位置、故障源代码等。

(10) 通信和联网功能。

4. 伺服系统

伺服单元(驱动电路)是数控装置和机床本体的联系环节,它把来自数控装置的微弱指令信号放大成控制驱动装置的强电大功率信号。根据接收指令的不同,伺服单元有脉冲式和模拟式之分,而模拟式伺服单元按电源种类又可分为直流伺服单元和交流伺服单元。

驱动装置把经放大的指令信号变为机械运动,通过简单的机械连接部件驱动机床,使工作台精确定位或按规定的轨迹作严格的相对运动,最后加工出图纸所要求的零件。与伺服单元相对应,驱动装置有步进电动机、电液脉冲马达、直流伺服电动机和交流伺服电动机等。

伺服单元和驱动装置可合称为伺服驱动系统,它是数控系统的执行部分,是机床工作的动力装置,CNC 装置的指令要靠伺服驱动系统付诸实施,所以,伺服驱动系统是数控机床的重要组成部分。从某种意义上说,数控机床功能的强弱主要取决于 CNC 装置,而数控机床性能的好坏主要取决于伺服驱动系统。

5. 机床本体

机床本体是数控机床的主体,是用于完成各种加工的机械部分,包括执行部件及其支撑辅助部件。执行部件是加工运动的实际执行部件,主要包括主运动、进给运动等运动部件,还包括切削液控制、排屑、储运等辅助执行部件。

6. 测量反馈装置

测量反馈装置也称反馈元件,通常安装在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,它把机床工作台的实际位移、速度及当前环境参数加以检测,转变成电信号反馈给 CNC 装置,供 CNC 装置与指令值比较产生误差信号,以控制机床向消除该误差的方向移动。测量反馈装置是高性能数控机床的重要组成部分,有效地改善了系统的动态特性,大大提高了工作效率和工件的加工精度。

1.2.3 数控基本原理

(1) 制订工艺过程。首先根据被加工零件图样所规定的零件形状、尺寸、材料及技术要求等,确定零件加工的工艺过程、工艺参数、几何参数及切削用量、刀具的运动轨迹等,进

行程序设计。

(2) 数控加工程序的编制。根据数控机床编程手册规定的代码和程序格式编写零件加工程序单。

(3) 存储。将程序代码存储到控制介质。

(4) 输入。把零件程序、控制参数和补偿数据输入数控装置。有纸带阅读机输入、键盘输入、磁带输入、磁盘输入及通信输入等方式。

(5) 译码、刀具补偿、插补、输出控制指令。按照一定的语法规则将信息解释成计算机能够识别的数据形式,并按一定的数据格式存放在指定的内存专用区域。在加工过程中译码,即计算机进行加工控制时,利用空闲时间对后面的程序段进行扫描,称为解释。编译是将整个输入程序作为源程序,一次编译完。

(6) 位置控制和机床加工。伺服机构接受数控系统发出的指令,经驱动电路放大处理,驱动机床的运动部件,使机床按程序预定的轨迹运动。

1.2.4 数控机床的分类

数控机床的品种和规格繁多,分类方法不一。根据数控机床的功能和组成,一般可分为以下几类。

1. 按运动方式(机械加工的运动轨迹)分类

(1) 点位控制系统[见图1-2(a)]。刀具从某一位置移到下一位置的过程中,不考虑其运动轨迹,只要求刀具能最终准确到达目标位置。刀具移动过程中不切削,一般采用快速运动。其移动过程可以是先沿一个坐标方向移动,再沿另一个坐标方向移动到目标位置,也可沿两个坐标同时移动。为保证定位精度和减少移动时间,一般先高速运行,当接近目标位置时,再分级降速,慢速趋近目标位置。这类数控机床主要有数控钻床、数控镗床和数控冲床等。

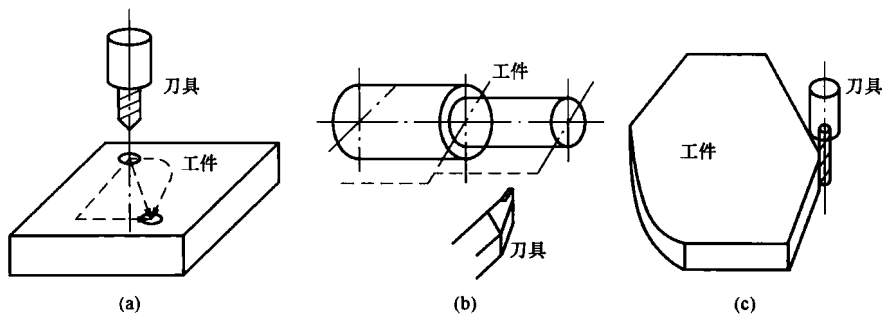


图 1-2 按照机械加工的运动轨迹分类

(a) 点位控制系统; (b) 点位直线控制系统; (c) 轮廓控制系统

(2) 点位直线控制系统[见图1-2(b)]。这类数控机床不仅要控制点与点之间的精确定位,而且要控制两相关点之间的位移速度和路线。其路线一般由与各坐标轴平行的直线或与坐标轴成 45° 的斜线组成。由于刀具在移动过程中要切削,所以对于不同的刀具和工件,需要选择不同的切削用量。这类数控机床通常具备刀具半径和长度补偿功能,以及主轴转速控制功能,以便在刀具磨损或换刀具后能得到合格的零件。典型机床有简易数控车床和简易数控铣床等。这些数控机床在一般情况下有2~3个可控轴,但同时可控制的只有一个轴。

(3) 轮廓控制系统 [见图 1-2 (c)]。这类机床的数控装置能够同时控制两坐标轴或两个以上的轴,对位置和速度进行严格的不间断控制。它具有直线和圆弧插补、刀具补偿、机床轴向运动误差补偿、丝杠的螺距误差和齿轮的反向间隙误差补偿等功能。该类机床可加工曲面、叶轮等复杂形状的零件。典型机床有数控车床、数控铣床、加工中心等。

2. 按伺服系统的控制原理(控制方式)分类

(1) 开环控制系统(见图 1-3)。这类数控机床不带有位置检测装置,数控装置将零件程序处理后,输出数字指令信号给伺服系统,驱动机床运动。指令信号的流程是单向的。这类数控机床的伺服驱动部件通常选用步进电动机。受步进电动机的步进精度和工作频率以及传动机构传动精度的影响,开环控制的数控机床的速度和精度都较低。但由于其具有结构简单、成本较低、调试维修方便等优点,仍广泛应用于经济型、中小型数控机床。

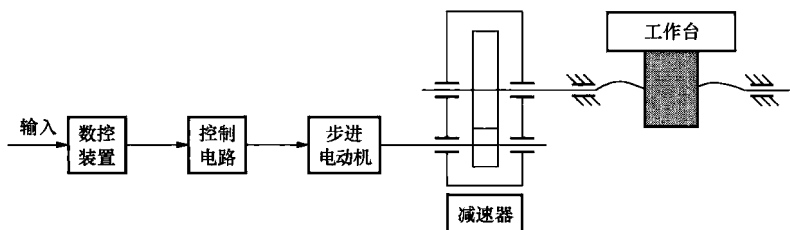


图 1-3 开环控制系统原理框图

(2) 闭环控制系统(见图 1-4)。这类数控机床带有检测装置,它随时接受在工作台端测得的实际位置反馈信号,安装在工作台的位置传感器(比如光栅)把机械位移转变为电量,反馈到位置比较电路与指令位置值相比较,得到的差值经过放大和变换,驱动工作台向减少误差的方向移动。如果不断有指令信号输入,那么工作台就不断跟随信号移动,只有在指令信号与反馈信号的差值为零时,工作台才静止,即工作台的实际位移量与指令位移量相等时,工作台才停止运动。在闭环系统中还装有增加系统阻尼的速度测量元件,将实际速度与进给速度相比较,并通过速度控制电路对电动机的运动状态随时进行校正,从而减少因负载等因素变动而引起的进给速度波动,提高位置控制的质量。因为机床工作台也被纳入了控制环,所以这类数控机床称为闭环控制的数控机床。

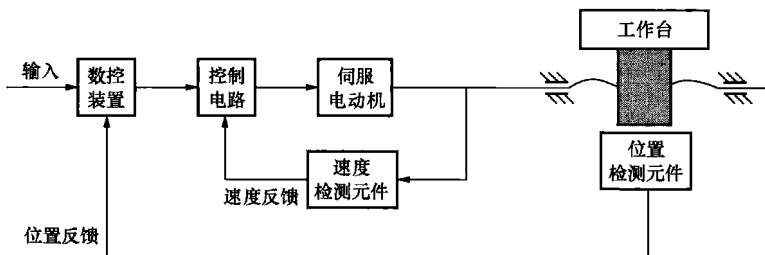


图 1-4 闭环控制系统原理框图

闭环控制可以消除包括工作台传动链在内的误差,所以定位精度高、速度调节快,但由于工作台惯量大,给系统的设计和调整带来很大的困难,主要是系统的稳定性受到不利的影响。

闭环控制系统主要用于一些精度要求很高的数控铣床、超精车床和超精铣床等。

(3) 半闭环控制系统 (见图 1-5)。半闭环控制的数控机床与闭环控制的数控机床的区别在于: 半闭环控制机床的检测反馈信号不是来自工作台, 而是来自电动机端或丝杠端连接的测量元件。由于实际位置的反馈值是通过间接测得的伺服电动机的角位移算出来的, 因而其控制精度没有闭环控制的机床高, 但机床工作的稳定性却由于大惯量工作台被排除在控制环外而提高, 调试方便, 因而广泛用于数控机床中。

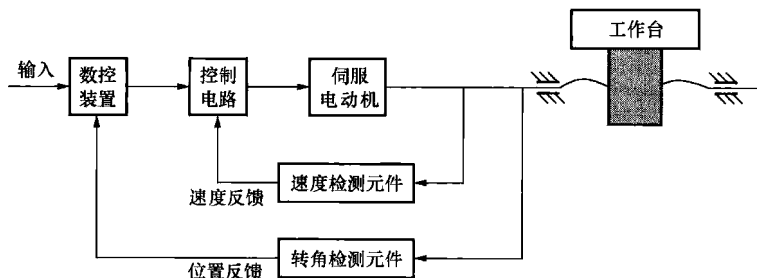


图 1-5 半闭环控制系统原理框图

3. 按功能水平 (数控机床的性能) 分类

数控机床按所使用的数控系统的配置及功能分类, 可分为高档型、普通型和经济型。对数控机床按功能水平进行分类主要看其主要技术参数、功能指标和关键部件的功能水平。

(1) 高档数控系统 (高级型)。64 位 CPU (微处理器), 闭环控制交流伺服驱动, 5 轴以上联动, 进给分辨率 $0.1\mu\text{m}$, 进给速度大于等于 24m/min 。内装 PLC, 具有通信、联网监控管理功能。

(2) 中档数控系统 (普通型)。16 或 32 位微处理器, 半闭环交流或直流伺服驱动, 4 轴以下联动, 进给分辨率 $1\mu\text{m}$, 进给速度 $15\sim 24\text{m/min}$ 。具有人机对话功能, RS-232 通信接口。

(3) 低档数控系统 (经济型)。合理简化系统, 以降低产品价格。采用单片机或单板机, 开环步进电动机驱动, 3 轴以下联动, 进给分辨率 $10\mu\text{m}$, 进给速度小于等于 $4\sim 15\text{m/min}$ 。

4. 按用途分类

(1) 金属切削类数控机床。依据切削方式的不同有数控车、数控铣、数控钻、数控磨、数控镗床、数控加工中心等。

(2) 金属成型类数控机床。主要有数控折弯机、组合冲床、数控弯管机、数控压力机等。

(3) 数控特种加工机床。主要有数控线切割机床、数控电火花加工机床、数控火焰切割机、数控激光切割机床。

(4) 其他类型的数控设备。主要有自动装配机、多坐标测量机、自动绘图机、工业机器人等。

1.3 数控技术的发展

1.3.1 我国数控机床发展情况

我国从 1958 年开始研究数控机床, 当时, 一些高等院校、科研单位研制出试验性样机,

是从电子管起步的。从 20 世纪 70 年代开始,数控技术在车、铣、镗、磨、齿轮加工、电加工等领域全面展开,数控加工中心在上海、北京研制成功。但由于电子元器件的质量和制造工艺水平差,数控系统的可靠性、稳定性也较差,因此没有广泛应用。在此时期,数控线切割机由于结构简单、使用方便、价格低廉,广泛应用于模具加工。数控车削加工、点位加工和加工中心及三坐标数控加工的自动编程系统和语言也研制成功,有的已在生产中应用。

20 世纪 80 年代,我国从日本 FANUC 公司引进了 3、5、6、7 等系列的数控系统和直流伺服电动机、直流主轴电动机等制造技术,还引进了美国 GE 公司的 MCI 系统和交流伺服系统,德国西门子公司的 VS 系列晶闸管调速装置,并进行了商品化生产。这些系统可靠性高,功能齐全。与此同时,还自行开发了 3、4、5 轴联动的数控系统以及双电动机驱动的同步数控系统(用于火焰切割机)和新品种的伺服电动机,推动了我国数控机床的发展,使我国数控机床在性能和质量上产生了质的飞跃。

1985 年,我国数控机床的品种有了新的发展。数控机床品种不断增多,规格齐全。许多技术复杂的大型数控机床、重型数控机床都相继研制出来。为了跟踪国外现代制造技术的发展,北京机床研究所研制出了柔性制造单元和柔性制造系统。这个时期,我国在引进、消化国外技术的基础上,进行了大量开发工作。一些较高档次的数控系统(如 5 轴联动技术)、分辨率为 $0.02\mu\text{m}$ 的高精度数控系统、数字仿型数控系统、为柔性单元配套的数控系统都相继开发出来,并制出样机。

目前我国数控机床生产厂有数百家,生产数控机床配套产品的企业有千余家,产品品种包括八大类 2000 种以上。目前已新开发出数控系统近百余种,不仅有经济型、普及型而且还有高级多轴联动数控系统,包括具有自主知识产权的高档数控系统产品如全数字高档数控装置、全数字驱动装置及交流伺服电动机、主轴电动机、大扭矩力矩电动机及其驱动装置、五轴联动工业机器人、五轴联动立式加工中心等。“九五”、“十五”期间数控机床发展已进入实现产业化阶段,新开发的国产数控机床产品接近国际先进水平,为支持国家重点项目建设提供了一批高水平数控机床。

在机床工业发展的同时,也应看到不足,与国际先进水平相比,我国数控机床产业还存在不小的差距,具体体现在:①超精密数控车床和加工中心机床主轴从设计结构分析、材料选择、制造工艺、关键配套件到检测技术和检测仪器都有待提高;②高速加工中心(主轴转速 $20\,000\text{r/min}$ 以上)所需的数控系统国内暂时还不能配套;③精密机床配套的高精度检测元件,如直线光栅尺、圆光栅尺等,仍然依赖进口;④能自动补偿正反向间隙的精密滚珠丝杠是高精度数控机床的关键配套件之一,国内尚无厂家生产。正确分析存在的差距,并采取相应的措施,努力缩小与国际先进水平的差距,是我国机床行业继续奋斗的目标。

1.3.2 数控机床的技术发展趋势

1. 高速化、高精密化

(1) 高速切削。受高生产率的推动,高速化已是现代机床技术发展的重要方向之一。机床高速化既表现在主轴转速上,也表现在工作台快速移动和进给速度的提高,以及刀具交换、托盘交换时间的缩短,并且具有高加(减)速率。

高速切削机床主轴因高转速减少了切削力,也减小了切削深度,有利于克服机床振动,排屑率大大提高,热量被切屑带走,传入零件中的热量减低,热变形大大减小,提高了加工精度,也改善了加工面粗糙度。因此,经过高速加工的工件一般不需要精加工。主轴高速化

的手段是采用电主轴（内装式主轴电动机），即主轴电动机的转子轴就是主轴部件，从而可大大提高主轴转速。

（2）高精度加工。高精度加工是高速加工技术和数控机床广泛应用的必然结果。以前汽车零部件的加工精度要求在 0.01mm 数量级上，但随着计算机硬盘、高精度液压轴承等精密零件的增多，精整加工所需精度已提高到 0.1 μ m，加工精度进入了亚微米范围。

要提高数控设备的加工精度，除提高机械设备的制造精度和装配精度外，还可通过减小数控系统的控制误差和采用补偿技术来实现。在减小 CNC 系统控制误差方面，通常采用提高数控系统的分辨率、以微小程序段实现连续进给、使控制单位精细化、提高 CNC 位置检测精度以及位置伺服系统采用前馈控制与非线性控制等方法。在补偿技术方面，除采用齿隙补偿、丝杆螺距误差补偿和刀具误差补偿等技术外，近年来设备的热变形误差补偿和空间误差综合补偿技术已成为世界范围的研究热点。研究表明，综合误差补偿技术的应用可使加工误差减小。

2. 高可靠性

数控机床的可靠性是数控机床产品质量的一项关键性指标。数控机床能否发挥其高性能、高精度、高效率，并获得良好的效益，关键取决于其可靠性。

衡量可靠性重要的量化指标是平均无故障工作时间（Mean Time Between Failures, MTBF）。

3. 复合化加工

机床的复合化加工是通过增加机床的功能，减少工件加工过程中的多次装夹、重新定位、对刀等辅助工艺时间，来提高机床利用率。复合化加工减少了辅助工序，减少了夹具和所需机床数量，因此降低了整体加工和机床维护费用。

复合化加工有两重含义：①工序和工艺的集中，即在一台机床上一次装夹可完成多工种、多工序的任务；②工艺的成套，即企业向着复合型发展，以期为用户提供成套服务。

4. 控制智能化

（1）加工过程自适应控制技术。通过监测加工过程中刀具磨损、破损、切削力、主轴功率等信息并反馈，利用传统的或现代的算法进行调节运算，实时修调加工参数或加工指令，使设备处于最佳运行状态，以提高加工精度和设备运行的安全性，降低工件表面粗糙度。

（2）加工参数的智能优化与选择。将加工专家或技工的经验、切削加工的一般规律与特殊规律，按人工智能系统中知识表达的方式建立知识库存入计算机，以加工工艺参数数据库为支撑，建立专家系统，并通过它提供经过优化的切削参数，使加工系统始终处于最优和最经济的工作状态，从而提高编程效率和加工工艺技术水平，缩短生产准备时间。目前已开发出带自学习功能的神经网络电火花加工专家系统。

（3）故障自诊断功能。故障诊断专家系统为数控设备提供了一个包括二次监测、故障诊断、安全保障和经济策略等方面在内的智能诊断及维护决策信息集成系统。

采用智能混合技术，可在故障诊断中实现以下功能：故障分类、信号提取与特征提取、故障诊断专家系统、维护管理。

（4）智能化交流伺服驱动装置。目前已开始研究能自动识别负载并自动调整参数的智能化伺服系统，包括智能主轴交流驱动装置和智能化进给伺服装置。这种驱动装置能自动识别电动机及负载的转动惯量，并自动对控制系统参数进行优化和调整，使驱动系统获得最佳运

行状态。

5. 互联网络化

网络化、数字化以及新的制造理念深刻地影响着目前的制造模式和制造观念。网络功能正逐渐成为现代数控机床、数控系统的特征之一。诸如现代数控机床的远程故障诊断、远程状态监控、远程加工信息共享、远程操作（危险环境的加工）、远程培训等都是以网络功能为基础的。

1.4 数控机床的选型

对制造型企业来说，提高生产能力往往从生产管理、制造工艺、生产设备等方面入手进行技术改造，而这些方面又是互为影响和制约的。对生产设备的选择以及数控机床的更新、维修、采购等必须考虑到机床使用、管理上如何取得最优经济效益等问题。

所选择的设备可能用于产品零件的一部分工序加工，也可能用于全部工序加工。制造水平的高低首先取决于工艺过程的设计，它将决定用什么方法和手段来加工，从而也决定了对使用设备的基本要求，这也是对生产进行技术组织和管理的依据。设备选择的基本要求确定后，还要根据市场上能提供什么样技术水平的装备来选择。中小批量生产的制造企业，选择数控机床来替代旧机床或增强生产能力已是发展趋势。

1.4.1 数控机床选型的一般原则

选择数控机床是综合性技术问题。如何从品种繁多、价格不一的设备中选择合适的设备，如何使这些设备在制造中充分发挥作用而且能满足企业未来的发展，如何正确、合理地选购与主机配套的附件、工具、软件技术、售后技术服务等，使采购的设备能达到较好的投入产出比，这些问题都是数控设备应用企业必须细致考量、认真权衡的重要课题。本节从以下几个方面给出机床选型的参考原则。

1. 按加工零件种类选择基本机床类型

企业根据技术改造和生产发展需要，确定有哪些零件、哪些工序准备用新的加工设备来完成，要考虑到产品发展的远景规划。首先对生产零件进行分组归类，确定加工对象的典型零件类别。典型工件族按外形可以分为菱形类（箱体类）、板类、回转体类（盘、套、轴、法兰）和异形类等；按加工精度要求又可分普通级和精密级等。

（1）对回转体类（盘、套、轴、法兰）工件，直径 600mm 以下，一般选用卧式数控车床。

（2）对回转体类（盘、套、轴、法兰）工件，直径 600mm 以上，一般选用立式数控车床。

（3）对复杂回转体类（盘、套、轴、法兰）工件，含定向型面加工、孔加工，一般选用卧式全功能数控车床或车削中心。

（4）对简单箱体类、异形类、型腔模具工件，如果加工余量大（粗加工），而且以型面加工为主，一般选用数控铣床。

（5）对箱体类、异形类、型腔模具工件，如果加工余量小（精加工），而且以单面孔系加工为主，工序集中的，一般选用立式加工中心。

（6）对箱体类、异形类、型腔模具工件，如果加工余量小（精加工），而且以多面孔系