

高等学校教材

数控应用技术

► 张志义 主编



化学工业出版社

教材出版中心

高 等 学 校 教 材

数 控 应 用 技 术

张志义 主编



化 学 工 业 出 版 社
教 材 出 版 中 心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

数控应用技术/张志义主编. —北京: 化学工业出版社,
2004.12

高等学校教材

ISBN 7-5025-6374-1

I. 数… II. 张… III. 数控机床-程序设计-高等学校-
教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 123603 号

高等学校教材

数控应用技术

张志义 主编

责任编辑: 程树珍

责任校对: 洪雅妹

封面设计: 于剑凝

*

化学工业出版社

出版发行

教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 344 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6374-1/G·1624

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

随着现代加工业的迅猛发展，数控加工设备的应用日趋普及。各种制造业越来越多采用数控技术以提高产品的精度和生产率，这就对数控机床的编程、操作等技术人员的要求也越高。为此，数控技术的教学和应用就应强调培养的实用性和先进性。本书以介绍数控应用技术为主，又将数控机床所用到的各学科最新知识介绍给大家。

数控技术是一门理论性和实践性很强的课程。它是一门综合的多学科使用技术，涉及到机械、电气、液压、检测及计算机等相关学科，具有很强的系统性和实用性。因此，本书从原理和实用的角度出发，介绍了数控机床的产生及发展，详细阐述了数控机床的组成及工作原理；数控插补原理（逐点比较法、数字积分法）；结合实例讲述数控编程技术（如数控车床、数控铣床、加工中心、数控线切割）。

随着计算机技术和先进制造技术的发展，现代加工向着无图纸加工方向发展。其中 CAD/CAM/CAPP 等计算机辅助设计、制造、工艺已广泛应用到数控加工制造中。本书结合数控机床特点，介绍了 CAD/CAM 的概念及编程步骤，并结合实例介绍了 CAXA、UG、Solid Works、Pro/E 等计算机辅助设计软件系统。使读者能了解现代编程技术和使用方法，能更有效地完成数控技术的学习和操作。

本书第 1、2 章由孙蓓编写，第 4 章由张志义编写，第 6 章由张玉峰编写，第 3、5 章及附录由罗春阳编写，全书由张志义主编并统稿。

本书在编写中参阅了国内外的教材和文献，在此谨表谢意。

恳请读者对教材中的不足之处提出宝贵意见和建议。

编者

2004 年 10 月

目 录

1 绪论	1
1.1 数控机床的产生与发展	1
1.1.1 数控机床的产生	1
1.1.2 数控机床的发展史	2
1.1.3 数控机床的优点	3
1.2 数控机床的组成与基本工作过程	3
1.2.1 数控机床的组成	4
1.2.2 数控机床的基本工作过程	5
1.3 数控机床的分类	6
1.3.1 按机床运动的控制轨迹分类	6
1.3.2 按伺服控制方式分类	7
1.3.3 按数控系统的功能水平分类	8
1.3.4 按加工工艺及机床用途的类型分类	9
1.4 数控技术的发展趋势和研究方向	9
思考题	15
2 数控机床组成及工作原理	16
2.1 计算机数控系统	16
2.1.1 CNC 系统功能及基本工作过程	16
2.1.2 CNC 系统的硬件结构及软件结构	18
2.2 伺服驱动控制系统	22
2.2.1 伺服系统概述	22
2.2.2 步进电机伺服系统	27
2.2.3 交/直流电机伺服系统	30
2.2.4 位置控制原理	32
2.3 位置检测装置	32
2.3.1 检测装置概述	32
2.3.2 脉冲编码器	33
2.3.3 光栅测量装置	35
2.4 数控机床的机械结构	37
2.4.1 主传动的机械结构	37
2.4.2 主轴调速方法	41
2.4.3 进给传动机械结构	44
2.5 辅助装置	50
2.5.1 回转工作台	50
2.5.2 液压和气动系统	51

2.5.3	润滑系统	52
2.5.4	冷却系统	52
2.5.5	排屑装置	52
2.5.6	ATC 刀具自动交换	53
思考题		57
3	轮廓加工的数学基础	59
3.1	逐点比较法	60
3.1.1	逐点比较法插补直线	60
3.1.2	逐点比较法插补圆弧	63
3.1.3	逐点比较法的改进	66
3.2	数字积分法	69
3.2.1	数字积分法插补直线	69
3.2.2	数字积分法插补圆弧	71
思考题		73
4	数控机床的程序编制	74
4.1	程序编制的方法与步骤	74
4.1.1	概述	74
4.1.2	数控编程的一般步骤	74
4.1.3	数控机床编程的方法	76
4.2	程序编制的基础知识	78
4.2.1	程序结构与格式	78
4.2.2	功能字	80
4.3	坐标系	85
4.3.1	坐标轴的运动方向及其命名	85
4.3.2	机床坐标系与工件坐标系	86
4.4	常用编程指令	87
4.4.1	数控车床编程	87
4.4.2	数控铣床编程	112
4.4.3	加工中心编程	147
4.4.4	数控线切割机床的编程	154
思考题		157
5	编程实例	160
5.1	数控车床编程实例	160
5.2	数控铣床编程实例	164
5.3	加工中心编程实例	170
5.4	数控线切割编程实例	173
6	CAD/CAM 简介	174

6.1 CAD/CAM 基本概念	174
6.1.1 CAD	174
6.1.2 CAM	175
6.1.3 CAD/CAM 集成	176
6.2 CAD/CAM 自动编程	180
6.2.1 CAD/CAM 自动编程的特点	180
6.2.2 CAD/CAM 自动编程基本步骤	181
6.3 典型 CAD/CAM 软件介绍	182
6.3.1 CAXA 系统	182
6.3.2 UG 系统	183
6.3.3 Solid Works 系统	183
6.3.4 CIMATRON 系统	184
6.3.5 Master CAM 系统	184
6.3.6 Pro/E 系统	185
6.4 CAD/CAM 应用实例——UG	185
6.4.1 数控程序的编制	185
6.4.2 数控程序后处理	187
6.4.3 编制数控加工程序——鼠标凹模编程示例	195
附录	209
附录 1 华中世纪星数控车床 G 准备功能表	209
附录 2 西门子 802D 数控铣床 G 准备功能表	210
附录 3 西门子 802S 数控车床 G 准备功能表	211
附录 4 FANUC 0-MD 数控铣床 G 准备功能表	212
参考文献	215

1 绪 论

1.1 数控机床的产生与发展

1.1.1 数控机床的产生

现代科学技术和社会生产的不断发展,对机械加工提出了越来越高的要求。机械加工过程的自动化、智能化是实现上述要求的最重要措施之一。它不仅能提高产品的质量,提高生产效率,降低生产成本,还能大大减轻工人的劳动强度,改善工作环境。

在机械制造业中,并不是所有产品的零件都具有很大的批量,单件与小批量生产的零件(批量为10~100件)约占机械加工总量的80%以上。尤其是造船、航天、航空、机床、重型机械以及国防等行业,其生产特点是加工批量小、改型频繁、零件形状复杂且精度要求高。采用专业化程度很高的自动化机床加工这类零件就显然很不合适,因为生产过程中需要经常改装与调整设备。对于专业生产线来说,这类改装与调整有时是不可能实现的。各类仿形加工机床虽已部分解决了小批量、复杂零件的加工,但在更换零件时必须制造靠模、调整机床,不但消耗大量的手工劳动,延长了生产准备周期,而且由于靠模误差的影响,零件精度很难达到较高的要求。

为解决上述这些问题,满足多品种、小批量的自动化生产,迫切需要一种灵活的、通用的、能够适应产品频繁变化的自动化机床。

数字控制(Numerical Control,简称NC或数控)机床就是在这样的背景下诞生并发展起来的。它极其有效地解决了上述一系列矛盾,为单件、小批量生产精密复杂零件提供了自动化加工手段。数控机床将加工过程所需的各种操作(如主轴变速、松夹工件、进刀与退刀、开车与停车、选择刀具、供给切削液等)步骤,以及刀具与工件之间的相对位移量等都用数字化的代码来表示,通过介质(如穿孔纸带或磁盘以及通讯网络等)将数字信息送入专用或通用的计算机。计算机对输入的信息进行处理与运算,发出各种指令来控制机床的伺服系统或其他执行元件,使机床自动加工出所需要的工件。数控机床与其他自动机床的一个显著区别在于,当加工对象改变时,除了重新装夹工件和更换刀具外,只需更新程序即可,不需要对机床作任何调整。

1952年美国帕森斯公司(Parsons)和麻省理工学院(MIT)合作研制成功世界上第一台三坐标数控铣床,用它来加工直升飞机叶片轮廓检查用样板。这是一台采用专用计算机进行运算与控制的直线插补轮廓控制数控铣床。1955年,该类机床进入实用化阶段,在复杂曲面的加工中发挥了重要作用。

1.1.2 数控机床的发展史

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

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 年代提出的。当时，美国北密执安的一个小型飞机工业承包商帕森斯公司（Parsons Co.）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。1949 年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。经过三年时间的研究，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。

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。这就是 APT（Automatically Programmed Tools）自动编程的开始。

1955 年美国空军花费巨额经费订购了大约 100 台数控机床。此后两年，数控机床在美国进入迅速发展阶段，市场上出现了商品化数控机床。1958 年美国克耐·杜列克公司（Kearney&Trecker Co.）在世界上首先研制成功了带自动换刀装置的数控机床，称为“加工中心”。

1959 年，计算机行业研制出晶体管元器件，因而数控装置中广泛采用晶体管和印制电路板，从而跨入第二代数控时代。同时美国航空工业协会（AIA）和麻省理工学院共同发展 APT 程序语言。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。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。除了 ATP 数控语言外，又发展了许多自动编程语言。

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

1965 年，出现了小规模集成电路。由于它体积小、功耗低，使数控系统的可靠性得以进一步提高，标志数控系统发展到第三代。

以上三代，都是采用专业控制计算机的硬逻辑数控系统。装有这类数控系统的机床为普通数控机床（简称 NC 机床）。

1967 年，英国首先把几台数控机床联接成具有柔性的加工系统，这就是最初的 FMS（Flexible Manufacturing System，柔性制造系统）。之后，美、德、日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系统（CNC）。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，称为第四代数控。而由计算机直接对许多机床进行控制的控制系统，称为直接数控系统（DNC）。

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。近 20 年来，微处理器数控系统的数控机床得到了飞速发展和广泛应用，这就是第五代数控系统（MNC）。20 世纪 80 年代初，国际上又出现了柔性制造单元 FMC（Flexibie Manufacturing Cell）。

FMC 和 FMS 被认为是实现 CIMS（Computer Integrated Manufacturing System，计算机集成制造系统）的必经阶段和基础。

1.1.3 数控机床的优点

(1) 广泛的适应性

由于采用数字程序控制，当生产品种改变时，只要重新编制零件程序，就能够实现对新零件的自动化生产。这对当前市场竞争中产品不断更新换代的生产模式是十分重要的，它为解决多品种、中小批量零件的自动化加工提供了极好的生产方式。

(2) 精度高、质量稳定

数控机床是按照预定程序自动工作的，一般情况下工作过程不需要人工干预，这就消除了操作者人为产生的误差。在设计制造机床主机时，通常采取了许多措施，使数控机床的机械部分达到较高的精度。数控装置的脉冲当量（或分辨率）目前可达 $0.01 \sim 0.0001 \text{mm}$ ，同时可以通过实时检测反馈，修正误差或补偿来获得更高的精度。因此，数控机床可以获得比机床本身精度更高的加工精度。尤其是产品稳定（即零件加工的一致性）是过去任何机床所不及的，它与操作者的思想情绪和熟练程度几乎无关。由于零件加工的一致性，给下一道工序的加工或总装工序的互换性都带来许多方便。

(3) 生产效率高

数控机床能够减少零件加工所需的机动时间与辅助时间。数控机床的主轴转速和进给量的范围比通用机床大，每一道工序都能选用最佳的切削用量。良好的机械结构刚性允许数控机床进行大切削用量的强力切削，从而有效地节省了机动时间。数控机床移动部件在定位中均采用加速和减速措施，并可选用很高的空行程运动速度，缩短了定位和非切削时间。由于采用了自动换刀、自动交换工作台和装夹工件，还可在同一台机床（加工中心）上同时进行车、铣、镗、钻、磨等各种粗、精加工，即在一台机床上实现多道工序的连续加工，因此它不仅减少了辅助时间，并且由于集中了工序使其既减少了零件周转和装夹次数，又减少了半成品零件的堆放面积，给生产调度管理带来极大的方便。另外由于一机多用，减少了设备台数和厂房占地面积。

(4) 减轻劳动强度、改善生产条件

由于数控机床是按所编程序自动完成零件加工的，所以操作者一般只需装卸工件和更换刀具，按下循环启动按键，即可由机床自动完成加工。这样大大减轻了操作者的劳动强度，改善了生产条件，减少了对熟练技术工人的需求，并可实现 1 个人管理多台机床的加工。

(5) 能实现复杂零件的加工

普通机床难以实现或无法实现轨迹为二次以上的曲线或曲面的运动，如螺旋桨、气轮机叶片之类的空间曲面。而数控机床由于采用了计算机插补技术和多坐标联动控制，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，适用于各种复杂曲面的零件加工。

(6) 有利于现代化生产管理

采用数控机床加工，能很方便地准确计算零件加工工时、生产周期和加工费用，并有效地简化了检验以及工装夹具和半成品的管理工作。利用数控机床的通信接口，采用数控信息与标准代码输入，适宜与计算机联网，实现计算机辅助设计、制造及管理一体化，即成为实现 CIMS 技术的基础。

1.2 数控机床的组成与基本工作过程

数控机床的主要组成部分与基本工作过程见图 1-1。

1.2.1 数控机床的组成

数控机床一般由数控系统、伺服系统、主传动系统、强电控制柜、机床本体和各类辅助装置组成。图 1-1 中实线部分是一种较典型的现代数控机床构成框图，加上虚线部分即可表示数控加工的基本工作过程。对具体各类不同功能的数控机床，其组成部分略有差异。

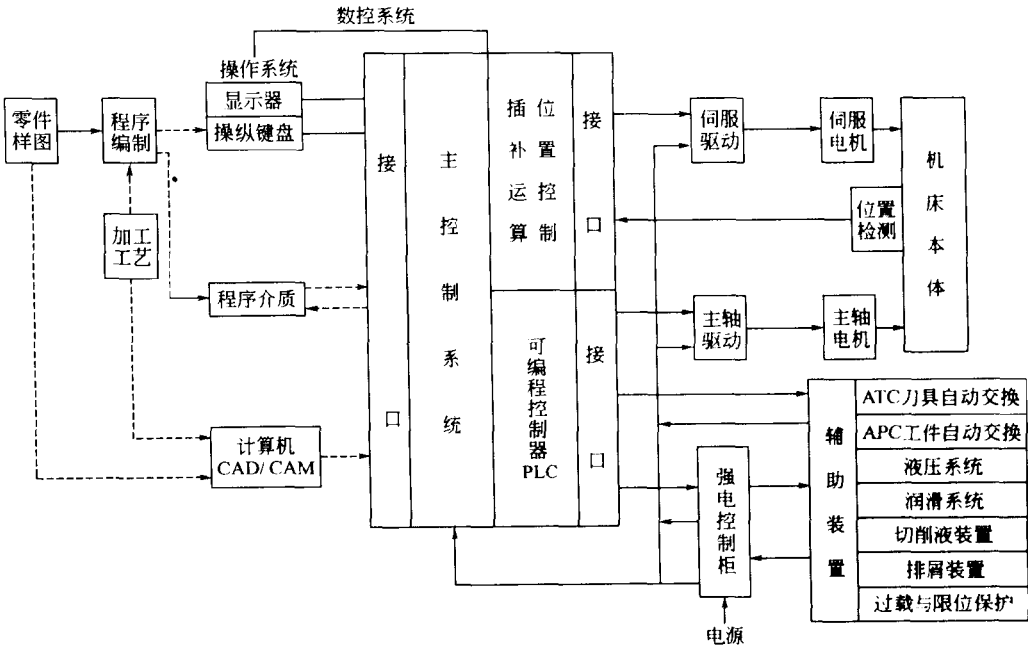


图 1-1 数控机床的主要组成部分与基本工作过程示意

(1) 数控系统

数控系统是机床实现自动加工的核心。主要由操作系统、主控制系统、可编程控制器、各类输入输出接口等组成。其中操作系统由显示器和操纵键盘组成，显示器有数码管、CRT、液晶等多种形式。主控制系统与计算机主板有所类同，主要由 CPU、存储器、控制器等部分组成。数控系统所控制的一般对象是位置、角度、速度等机械量；温度、压力、流量等物理量。其控制方式又可分为数据运算处理控制和时序逻辑控制两大类。其中主控制器内的插补运算模块就是根据所读入的零件程序，通过译码、编译等信息处理后，进行相应的刀具轨迹插补运算，并通过与各坐标伺服系统的位置、速度反馈信号比较，从而控制机床各个坐标轴的位移。而时序逻辑控制通常主要由可编程控制器 PLC 来完成。它根据机床加工过程中的各个动作要求进行协调，按各检测信号进行逻辑判断，从而控制机床各个部件有条不紊地按序工作。

(2) 伺服系统

伺服系统是数控系统与机床本体之间的电传动联系环节。主要由伺服电动机、驱动控制系统及位置检测反馈装置等组成。伺服电动机是系统的执行元件，驱动控制系统则是伺服电动机的动力源。数控系统发出指令信号与位置检测反馈信号比较后作为位移指令，再经驱动控制系统功率放大后，驱动电动机运转，从而通过机械传动装置拖动工作台或刀架运动。

(3) 主传动系统

主传动系统是机床切削加工时传递转矩的主要部件之一。一般分为齿轮有级变速和电气无级调速两种类型。较高档的数控机床都要求实现无级调速，以满足各种加工工艺的要求。它主要由主轴驱动控制系统、主轴电动机和主轴机械传动机构等组成。

(4) 强电控制柜

强电控制柜主要用来安装机床强电控制的各种电气元器件。其功能除了提供数控、伺服等一类弱电控制系统的输入电源，以及各种短路、过载、欠压等电气保护外，主要在可编程控制器 PLC 的输出接口与机床各类辅助装置的电气执行元器件之间起桥梁连接作用，即控制机床辅助装置的各种交流电动机、液压系统电磁阀或电磁离合器等。主要起到扩展接点数和扩大触点容量等作用。另外，它也与机床操作面板的有关手控按钮连接。强电控制柜由各种中间继电器、接触器、变压器、电源开关、接线端子和各类电气保护元器件等构成。它与一般的普通机床电气类似，但为了提高对弱电控制系统的抗干扰性，要求各类频繁启动或切换的电动机、接触器等电磁感应器件中均必须并接 RC 阻容吸收器，对各种检测信号的输入均要求用屏蔽电缆连接。

(5) 辅助装置

辅助装置主要包括 ATC 刀具自动交换机构、APC 工件自动交换机构、工件夹紧放松机构、回转工作台、液压控制系统、润滑装置、切削液装置、排屑装置、过载与限位保护功能等部分。机床加工功能与类型不同，所包含的部分也不同。

(6) 机床本体

机床本体指的是数控机床机械结构实体。它传统的普通机床相比较，同样由主传动机构、进给传动机构、工作台、床身以及立柱等部分组成。但数控机床的整体布局、外观造型、传动机构、刀具系统及操作机构等方面都发生了很大的变化。这种变化的目的是为了满足数控技术的要求和充分发挥数控机床的特点，归纳起来有以下几点。

a. 采用高性能主传动及主轴部件 具有传递功率大、刚度高、抗振性好及热变形小等优点。

b. 进给传动采用高效传动件 具有传动链短、结构简单、传动精度高等特点，一般采用滚珠丝杠副、直线滚动导轨副等。

c. 有较完善的刀具自动交换和管理系统 工件在加工中心类机床上一次安装后，能自动的完成或者接近完成工件各面的加工工序。

d. 有工件自动交换、工件夹紧与放松机构 如在加工中心类机床上采用工作台自动交换机构。

e. 床身机架具有很高的动刚度和静刚度。

f. 采用全封闭罩壳 由于数控机床是自动完成加工，为了操作安全，一般采用移门结构的全封闭罩壳，对机床的加工部位进行全封闭。

1.2.2 数控机床的基本工作过程

首先根据零件图样，结合加工工艺进行程序编制，然后通过键盘或其他输入设备送入数控系统后再经过调试、修改，最后把它存储起来。加工时就按所编程序进行有关数字信息处理。一方面通过插补运算器进行加工轨迹运算处理，从而控制伺服系统驱动机床各坐标轴，使刀具与工件的相对位置按照被加工零件的形状轨迹进行运动，并通过位置检测反馈以确保其位移精度。另一方面按照加工要求，通过 PLC 控制主轴及其他辅助装置协调工作，如主

轴变速、主轴齿轮换挡、适时进行 ATC 刀具自动交换、APC 工件自动交换、工件夹紧与放松、润滑系统的开停、切削液的开关，必要时过载或限位保护起作用，控制机床运动迅速停止。

数控机床通过程序调试、试切削后，进入正常批量加工时，操作者一般只要进行工件上下料装卸，再按下程序自动循环按钮，机床就能自动完成整个加工过程。

对于零件程序编制分为手动编程和自动编程。手动编程是指编程员根据加工图样和工艺，采用数控编程指令（目前一般都采用 ISO 数控标准代码）和指定格式进行程序编写，然后通过操作键盘送入数控系统内，再进行调试、修改等。对于自动编程，目前已较多的采用了计算机 CAD/CAM 图形交互式自动编程，通过计算机有关处理后，自动生成数控程序，可以通过接口直接输入数控系统内。

1.3 数控机床的分类

数控机床的品种规格繁多，分类方法不一。根据数控机床的功能和结构，一般可以按下面四种原则来进行分类。

1.3.1 按机床运动的控制轨迹分类

（1）点位控制数控机床

其特点是只要求控制机床移动部件从一点移动到另一点的准确定位。至于点与点之间移动的轨迹（路径和方向）并不严格要求，各坐标轴之间的运动是不相关的。

这类机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床等，其相应的数控装置称为点位控制数控系统。

（2）直线控制数控机床

直线控制数控机床也称为平行控制数控机床，其特点是除了控制点与点之间的准确定位外，还要控制两相关点之间的移动速度和轨迹。但其路线只是与机床坐标轴平行的直线，也就是说同时控制的坐标轴只有一个（即数控系统内不必具有插补运算功能），一般只能加工矩形、台阶形零件。

这类机床主要有数控车床、数控铣床、数控磨床等，其相应的数控装置称为直线控制数控系统。

（3）轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床也称为连续控制数控机床，其控制特点是能够对两个或两个以上运动坐标的位移和速度同时进行连续相关的控制。在这类控制方式中，要求数控装置具有插补运算的功能。

这类机床主要有数控车床、数控铣床、数控线切割机床、加工中心等，其相应的数控装置称为轮廓控制数控系统。它按所控制的联动坐标轴数不同，可分为以下几种主要形式。

a. 二轴联动 主要用于数控车床加工曲线旋转面或数控铣床等加工曲线轮廓柱面，如图 1-2（a）所示。

b. 二轴半联动 主要用于三轴以上控制的机床，其中两个轴互为联动，而另一个轴作周期进给。如在数控铣床上用球头刀加工三维空间曲面，如图 1-2（c）所示。

c. 三轴联动 一般分为两类，一类就是 X、Y、Z 三个直线坐标轴联动，比较多地用于

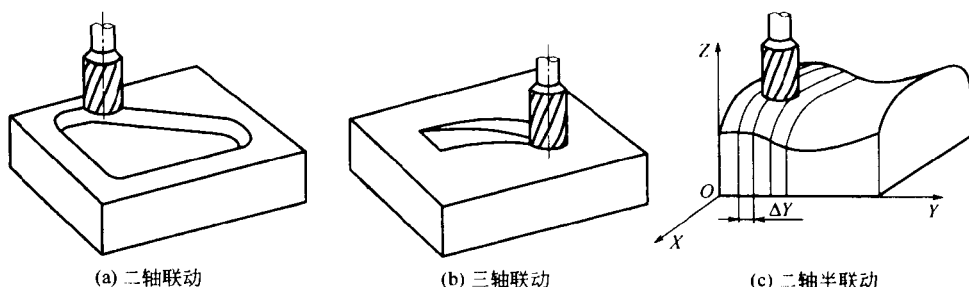


图 1-2 不同形式铣削的联动轴数

数控铣床、加工中心等。如用球头铣刀加工三维空间曲面，如图 1-2 (b) 所示。另一类是除了同时控制 X 、 Y 、 Z 其中两个直线坐标轴联动外，还同时控制围绕其中某一直线坐标轴旋转的旋转坐标轴。如车削加工中心，它除了控制纵向 (Z 轴)、横向 (X 轴) 两个直线坐标轴联动外，还同时控制围绕 Z 轴旋转的主轴 (C 轴) 联动。

d. 四轴联动 即同时控制 X 、 Y 、 Z 三个直线坐标轴与某一旋转坐标轴联动。图 1-3 为同时控制 X 、 Y 、 Z 三个直线坐标轴与一个工作台回转轴联动的数控机床。

e. 五轴联动 除了同时控制 X 、 Y 、 Z 三个直线坐标轴联动以外，还同时控制围绕这些直线坐标轴旋转的 A 、 B 、 C 旋转坐标轴中的两个坐标，即形成同时控制五个轴联动。这时刀具可以被定在空间的任意方向，如图 1-4 所示。比如控制切削刀具同时绕着 X 轴和 Y 轴两个方向摆动，使得刀具在其切削点上始终保持与被加工的轮廓曲面成法线方向，以保证被加工曲面的圆滑性，提高其加工精度和减小表面粗糙度等。

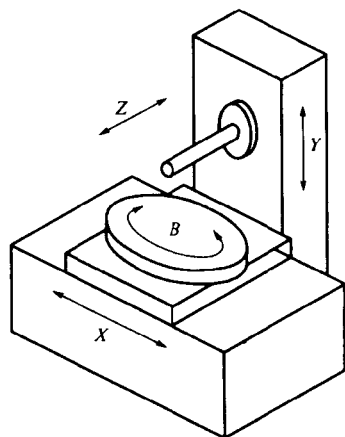


图 1-3 四轴联动的数控机床

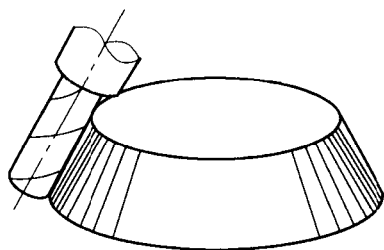


图 1-4 五轴联动的数控加工

1.3.2 按伺服控制方式分类

(1) 开环控制机床

开环控制机床的进给伺服系统是开环的，即没有检测反馈装置。其驱动电机只能采用步进电机。此类电机的主要特征是控制电路每变换一次指令脉冲信号，电动机就转动一个步距角，并且电动机本身就有自锁能力。驱动控制系统的结构框图见图 1-5。数控系统输出的进给指令信号通过环行分配器来控制驱动电路，它以变换脉冲个数来控制坐标位移量，以变换脉冲频率来控制位移速度，以变换脉冲的分配顺序来控制位移方向。因此该控制方式的最大特点是：控制方便，结构简单，价格便宜。由于机械传动误差不经过反馈校正，位移精度一般不高。世界上早期的数控机床均采用该种控制方式。目前由于驱动电路的改进和发展，仍有较多系统采用该种控制方式。一般经济型数控机床或在旧设备数控改造中均广泛采用此种方式。另外此类控制方式所配的数控装置也多由单片机或单板机构成，使得整个控制系统的价格较低。

(2) 闭环控制机床

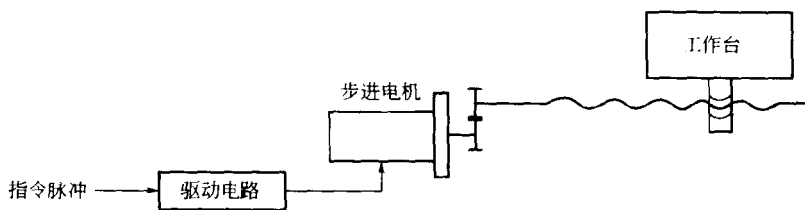


图 1-5 开环控制机床

按位置反馈检测元件的安装部位不同，它又分为全闭环和半闭环两种控制方式。

a. 全闭环控制 如图 1-6 所示。其位置反馈采用直线位移检测元件，安装在机床床鞍部位上，即直接检测机床的直线位移量。通过反馈可以消除从电动机到机床工作台整个机械传动链中的传动误差，得到很高的机床静态定位精度。但是，整个闭环系统的稳定性校正很困难，系统的设计和调整也都相当复杂。全闭环控制系统的控制精度高，但是要求机床的刚性高，对机床的加工、装配要求高，调试复杂，而且设备成本高。因此全闭环控制方式主要用于精度要求很高的数控坐标镗床、数控精密磨床等。

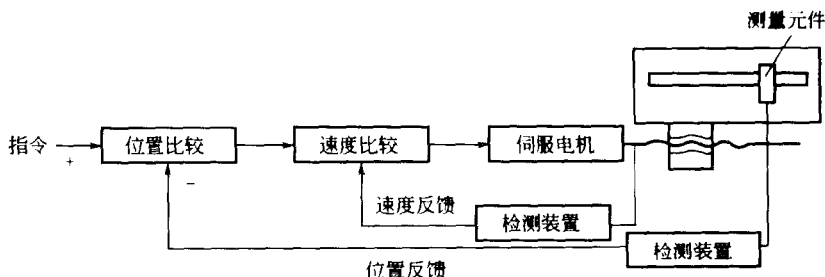


图 1-6 全闭环控制机床

b. 半闭环控制 如图 1-7 所示，其位置反馈采用转角检测元件，直接安装在伺服电机或丝杠端部。由于大部分机械传动环节未包括在系统闭环环路内，因此可以获得较稳定的控制特性。丝杠等机械传动误差不能通过反馈来随时校正，但是可采用软件定值补偿的方法来适当提高其精度。这种控制系统的控制精度高于开环控制系统，调试比全闭环控制系统容易，设备成本介于开环与全闭环控制系统之间。目前，大部分数控机床采用这种半闭环控制方式。

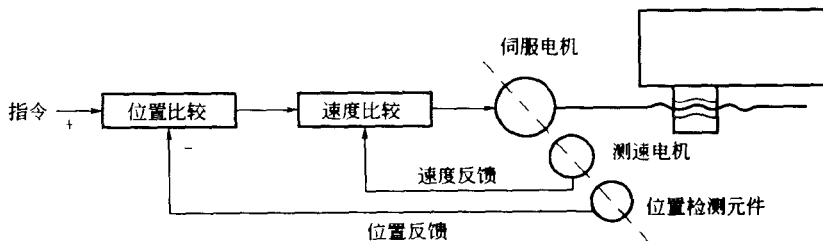


图 1-7 半闭环控制机床

1.3.3 按数控系统的功能水平分类

按数控系统的功能水平，通常把数控系统分为低、中、高三类。低、中、高三档的界限是相对的，不同时期，划分标准也会不同。就目前的发展水平来看，可以根据表 1-1 的一些

功能及指标，将各种类型的数控系统分为低、中、高档三类。其中经济型数控属于低档数控，中高档数控一般称为全功能数控或标准型数控。

表 1-1 数控系统不同档次的功能及指标表

功 能	低 档	中 档	高 档
系统分辨率	10μm	1μm	0.1μm
G00 速度	3~8m/min	10~24m/min	24~100m/min
伺服系统	开环及步进电动机	半闭环及交、直流伺服	半闭环及交、直流伺服
联动轴数	2~3 轴	2~4 轴	5 轴或 5 轴以上
通信功能	无	RS-232 或 DNC	RS-232、DNC 或 MAP
显示功能	数码管显示	CRT：图形、人机对话	CRT：三维图形、自诊断
内装 PLC	无	有	强功能内装式 PLC
主 CPU	8 位 CPU、16 位 CPU	16 位 CPU、32 位 CPU	32 位 CPU、64 位 CPU
结构	单片机或单板机	单微处理机或多微处理机	分布式多微处理机

1.3.4 按加工工艺及机床用途的类型分类

据不完全统计，目前数控机床的品种规格已达 500 多种，按其基本用途可以划分为四大类。

(1) 金属切削类

金属切削指采用车、铣、镗、铰、钻、磨、刨等各种切削工艺的数控机床。它又可以分为以下两类。

a. 普通型数控机床 如数控车床、数控铣床、数控磨床等。

b. 加工中心 其主要特点是具有自动换刀机构的刀库。工件经过一次装夹后，通过自动更换各种刀具，在同一台机床上对工件各加工面连续进行铣（车）、镗、钻、铰、攻螺纹等多种工序的加工。如镗铣加工中心、车削中心、钻削中心等。

(2) 金属成型类

金属成型类指采用挤、冲、压、拉等成形工艺的数控机床。常用的有数控压力机、数控折弯机、数控弯管机等。

(3) 特种加工类

特种加工类主要有数控电火花线切割机、数控电火花成型机、数控火焰切割机、数控激光加工机等。

(4) 测量、绘图类

测量、绘图类主要有三坐标测量仪、数控对刀仪、数控绘图仪等。

1.4 数控技术的发展趋势和研究方向

数控技术的应用不但给传统制造业带来革命性的变化，使制造业成为工业化的象征，而且随着数控技术的不断发展和应用领域的扩大，它对国计民生等一些重要行业（IT、汽车、轻工、医疗等）的发展起着越来越重要的作用。因为这些行业所需装备的数字化已是现代发展的大趋势。当前世界上数控技术及其装备的发展呈现如下发展趋势。

(1) 高速、高精密化

新一代数控机床（含加工中心）只有通过高速化大幅度缩短切削工时才可能进一步提高

其生产率。这与超高速加工特别是高速加工中心的开发应用紧密相关。20 世纪 90 年代以来,德、美、日各国争相开发应用新一代高速数控机床,加快机床高速化发展步伐。高速主轴单元(电主轴,转速 15 000~100 000r/min)、高速且高加/减速度的进给运动部件(快移速度 60~120m/min,切削进给速度高达 60m/min)、高性能数控和伺服系统以及数控工具系统都出现了新的突破,达到了新的技术水平。随着超高速切削机理、超硬耐磨长寿命刀具和磨料磨具、大功率高速电主轴、高加/减速度直线电机驱动进给部件以及高性能控制系统(含监控系统)和防护装置等一系列技术领域关键技术的解决,应不失时机地开发应用新一代高速数控机床。为了实现高速、高精加工,与之配套的功能部件如电主轴、直线电机得到了快速的发展,应用领域进一步扩大。

依靠快速、准确的数字量传递技术对高性能的机床执行部件进行高精密密度、高响应速度的实时处理。由于采用了新型刀具,当分辨率为 $1\mu\text{m}$ 时切削速度在 100m/min(有的到 200m/min)以上,分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ 时切削速度在 24m/min 以上;自动换刀速度在 1s 以内;小线段插补进给速度达到 12m/min。根据高效率、大批量生产需求和电子驱动技术的飞速发展,高速直线电机的推广应用,已开发出一批高速、高效及高速响应的数控机床。

从精密加工发展到超精密加工(特高精度加工),是世界各工业强国致力发展的方向。其精度从微米级,乃至纳米级($<10\text{nm}$),其应用范围日趋广泛。超精密加工主要包括超精密切削(车、铣)、超精密磨削、超精密磨研抛光以及超精密特种加工(微细电火花加工、微细电解加工和各种复合加工等)。随着现代科学技术的发展,对超精密加工技术不断提出了新的要求。新材料及新零件的出现,更高精度要求的提出等,都需要超精密加工工艺,发展新型超精密加工机床,完善现代超精密加工技术,以适应现代科学技术的发展。

现代科学技术与生产的发展,对机械加工与测量提出了越来越高的精度要求。加工精密化不只是发展新技术的需要,而且也是提高普通机电产品性能质量、寿命和可靠性的需要,同时还是减少机械产品装配的修配工作量,提高装配效率的需要。故机床的加工精度有提高的趋势。如近 10 年来,普通级数控机床的加工精度已由原来的 $\pm 10\mu\text{m}$ 提高到 $\pm 5\mu\text{m}$ 和 $\pm 2\mu\text{m}$;精密级从 $\pm 5\mu\text{m}$ 提高到 $\pm 1.5\mu\text{m}$,最高可达 $\pm 1\mu\text{m}$ 以内。主轴回转精度为 $0.02\sim 0.05\mu\text{m}$ 、加工圆度为 $0.1\mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 为 $0.003\mu\text{m}$ 的超精密机床,已有多种产品在市场上出现。2000 年普通加工和精密加工的精度与 1980 年比,分别提高了 4~5 倍,定位精度达到微米级、纳米级。

效率、质量是先进制造技术的主体。高速、高精密度加工技术可极大提高效率,提高产品质量和档次,缩短生产周期和提高市场竞争能力。为此日本先端技术研究会将其列为 5 大现代制造技术之一,国际生产工程学会(CIRP)将其确定为 21 世纪的中心研究方向之一。如在轿车工业领域,年产 30 万辆的生产节拍是 40 秒/辆,而且多品种加工是轿车装备必须解决的重点问题之一。在航空和宇航工业领域,由于其加工的零部件多为薄壁和薄筋,刚度很差,材料为铝或铝合金,因此只有在高切削速度和切削力很小的情况下,才能对这些零部件进行加工。近来采用对大型整体铝合金坯料“掏空”的方法来制造机翼、机身等大型零件,以替代多个零件通过众多的铆钉、螺钉和其他联结方式拼装大型零部件,使构件的强度、刚度和可靠性得到提高。这些都对加工装备提出了高速、高精度和高柔性的要求。

从 EMO2001 展会情况来看,高速加工中心进给速度可达 80m/min,甚至更高,空运行速度可达 100m/min 左右。目前世界上许多汽车厂,已经采用以高速加工中心组成的生产线部分替代组合机床。美国 CINCINNATI 公司的 Hyper Mach 机床进给速度最大达 60m/min,