

实用数控技术丛书

数控原理与数控机床

罗学科 谢富春 主编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

TG659
1937

实用数控技术丛书

数控原理与数控机床

罗学科 谢富春 主编



A1111476



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

11/15/09

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

数控原理与数控机床/罗学科, 谢富春主编. —北京:
化学工业出版社, 2003. 10

(实用数控技术丛书)

ISBN 7-5025-4852-1

I. 数… II. ①罗…②谢… III. 数控机床 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 090891 号

实用数控技术丛书

数控原理与数控机床

罗学科 谢富春 主编

责任编辑: 任文斗 张兴辉

文字编辑: 韩庆利

责任校对: 蒋宇

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(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

三可市宇新装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 14 $\frac{1}{4}$ 字数 344 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4852-1/TH·146

定 价: 30.00 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

实用数控技术丛书

编写委员会

主任：罗学科

副主任：张超英 徐宏海

委员：(按姓氏笔画排序)

马天颖	王风霞	王孝忠	牛小铁	朱运利
刘 瑛	李 凯	李跃中	余圣梅	张超英
陈晓光	罗学科	周国烛	郑 青	郑张龙
赵玉侠	徐宏海	高 屏	高德文	阎红娟
谢富春	魏晓东			

序

机械制造业是国民经济的支柱产业。据统计,美国 68% 的社会财富来源于制造业,日本国民总产值的 49% 是由制造业提供的,我国的制造业在工业总产值中也占有 40% 的比例。可以说,没有发达的制造业,就不可能有国家的真正繁荣和富强。而机械制造业的发展规模和水平,则是反映国民经济实力和科学技术水平的重要标志之一。提高加工效率、降低生产成本、提高加工质量、快速更换产品,是机械制造业竞争和发展的基础,也是机械制造业技术水平的标志。

20 世纪 50 年代初第一台数控机床的出现,使制造技术的发展出现了日新月异的局面。特别是近 20 年来,随着计算机技术、信息技术和微电子技术等高新技术的发展,制造业也发生了革命性的变化。数控技术在现代企业的大量应用,使制造技术正朝着数字化的方向迈进,出现了以信息驱动的现代制造技术,其核心就是数控加工设备替代了传统的加工设备。与此同时,数控技术正在朝着高精度、高速度、高柔性、高可靠性以及复合化(工序复合化,功能复合化)的方向发展。这一领域的研究是在当前高新技术不断发展的背景下进行的,涉及许多相关领域、交叉学科。当前,在人才需求方面,除需要具有数控技术基本知识和能力的高素质人才,促进研究与开发工作的新突破外,还急需大批数控技术应用型人才,即数控编程、数控设备操作及其维修人员。而几乎大部分制造企业在这方面的人才严重不足,特别是北京、上海和南方较发达地区,对数控应用型人才更是求贤若渴,许多企业纷纷高薪聘请。为了培养国内急需的数控应用人才,各高等院校、职业技术学院纷纷举办高层次的数控类专业。然而,到目前为止还缺乏适应这类学生使用的、针对数控技术教育的系列教材和适应企业培养数控应用人才的系列参考书,《实用数控技术丛书》就是为此目的编写的。

《实用数控技术丛书》一套共 6 册,近 200 万字,内容涉及数控技术从理论到实际加工操作的各个环节。其中,《数控原理与数控机床》讲述数控技术的基本原理和数控机床的结构;《数控编程技术》详细地讲述各类数控机床和加工中心的编程原理和手工编程方法;《数控加工工艺学》则重点讲述在数控机床的应用中涉及的工艺问题,包括数控设备用刀具、夹具等工艺装备的选择和使用;《CAD/CAM 与数控自动编程技术》讲述目前大量使用的 CAD/CAM 技术和数控自动编程技术,并结合市场上常用的 MASTER CAM、CAXA 等专业软件,给出了大量的典型实例;《数控技术英语》是本专业的专业英语教材,在编写上考虑了数控专业的特点,并注意使用者的英语水平;《数控加工综合实训》是配合实践教学使用的教材,重点突出系统性、实用性和实践性的特点。

《实用数控技术丛书》既参考了国内外相关领域的书籍和资料,也融会了作者们长期以来的教学实践和研究心得,特别是北方工业大学机电中心 5 年来在国家级高职数控技术专业教学改革试点专业中的教学经验和教训。它的出版对推动机械制造企业采用新的数控技术、改造和提升传统产业将会产生积极的影响。

《实用数控技术丛书》立足于应用，面向大专院校、高职学校师生和工程技术人员。在内容组织和编排上从理论到实践、由浅入深、图文并茂、通俗易懂。丛书特别强调实践，书中的大量实例来自生产实际和教学实践。丛书不但为高职数控类专业提供了完备的系列教材，也为企业培训数控技术应用人才提供了参考书籍，对相关工程技术人员也是一套很有益的参考书。

工学博士、机械工程教授 罗学科

2003年3月于北京

内 容 提 要

本书比较全面、系统地讲述了数控系统的基本组成,各部分的主要功能和特点、工作原理等,重点突出了数控系统的应用。在数控机床的结构上,主要针对数控机床的特色,介绍了机床布局、相关机械结构和辅助装备。此外,还介绍了数控机床维修的基本知识。

本书可作为高等职业教育机电类专业中从事数控技术应用、CAD/CAM 技术应用和模具设计与制造人员的培训用书或教材,也可作为机械设计制造及自动化专业本科生的教材,还可供从事数控加工的工程技术人员参考。

目 录

第 1 章 数控技术基础	1
1.1 数控机床的系统组成及其各部分功能	1
1.1.1 数控加工的过程	1
1.1.2 数控机床的组成及其各部分的功能	1
1.2 数控机床的分类	3
1.2.1 按机床运动的控制轨迹分类	3
1.2.2 按伺服控制的方式进行分类	4
1.2.3 按数控系统的功能水平分类	6
1.2.4 按加工工艺及机床用途分类	7
1.3 数控机床的加工对象	7
1.3.1 采用数控机床加工的优势及特点	7
1.3.2 数控机床的适用范围	8
1.4 数控技术的发展方向	8
1.5 数控技术常用术语	10
第 2 章 数控检测装置	13
2.1 概述	13
2.1.1 检测装置的分类	13
2.1.2 数控测量装置的性能指标及要求	14
2.2 感应同步器	14
2.2.1 感应同步器的结构和类型	14
2.2.2 感应同步器的工作原理	16
2.2.3 感应同步器的典型应用	18
2.3 光栅位置检测装置	20
2.3.1 长光栅检测装置的结构	20
2.3.2 光栅传感器工作原理	21
2.3.3 光栅位移-数字变换电路	22
2.4 光电脉冲编码器	23
2.4.1 脉冲编码器的分类与结构	23
2.4.2 光电脉冲编码器的工作原理	24
2.4.3 光电脉冲编码器的应用	24
2.5 旋转变压器	26
2.5.1 旋转变压器的工作原理	26

2.5.2 旋转变压器的应用	27
2.6 磁尺位置检测装置	28
2.6.1 磁尺的组成	28
2.6.2 磁尺的工作原理	31
第3章 伺服驱动系统	33
3.1 概述	33
3.2 步进电动机及其控制系统	35
3.2.1 步进电动机	35
3.2.2 步进电动机的工作原理	36
3.2.3 步进电动机的特性及选用	37
3.2.4 步进电动机的控制	39
3.3 直流伺服电动机及其速度控制	41
3.3.1 直流伺服电动机及工作特性	41
3.3.2 直流伺服电动机的速度控制方法	46
3.4 交流伺服电动机及其速度控制	48
3.4.1 交流伺服电动机概述	48
3.4.2 交流电动机调速原理	51
3.4.3 变频调速技术	52
3.5 典型伺服电动机简介	55
第4章 插补原理	58
4.1 加工程序预处理	58
4.1.1 译码	58
4.1.2 刀具补偿	61
4.2 脉冲增量插补	67
4.2.1 逐点比较插补法	68
4.2.2 数字积分法	72
4.3 数据采样插补法	77
4.3.1 数据采样插补法原理	77
4.3.2 时间分割法直线插补	78
4.3.3 时间分割法圆弧插补	79
4.3.4 扩展 DDA 数据采样插补法	81
第5章 计算机数控装置与典型数控系统	84
5.1 概述	84
5.2 CNC 装置的工作原理	85
5.2.1 计算机数字控制装置的工作原理	85
5.2.2 CNC 装置的主要功能和特点	86
5.3 CNC 装置的硬件结构	88
5.3.1 单微处理器与多微处理器结构	89
5.3.2 CNC 结构	94
5.4 CNC 装置的软件结构	96

5.4.1	CNC 系统的软硬件界面	96
5.4.2	计算机数控装置的数据转换流程	97
5.4.3	CNC 系统的软件结构特点	98
5.5	数控系统中的 PLC 介绍	100
5.5.1	PLC 的工作原理	100
5.5.2	数控机床的 PLC	104
5.6	数控系统中的输入/输出与通信接口	107
5.6.1	数控系统对输入/输出与通信接口的要求	107
5.6.2	CNC 装置的显示功能及其接口	107
5.6.3	数控系统的 I/O 接口	107
5.6.4	数控系统常用串行通信接口标准	108
5.6.5	DNC 通信接口技术	110
5.6.6	数控系统网络通信接口	111
5.7	典型数控系统介绍	114
5.7.1	典型数控系统简介	114
5.7.2	FANUC 数控系统	115
5.7.3	SIEMENS 数控系统	131
5.7.4	FAGOR 数控系统	138
5.7.5	华中 HNC-21T/22M 数控系统	142
第 6 章	数控机床的机械结构与各辅助装置的结构	145
6.1	数控机床对机床结构的要求	145
6.2	数控机床的布局特点	147
6.2.1	数控车床的布局结构特点	148
6.2.2	加工中心的布局结构特点	148
6.3	虚轴数控机床简介	150
6.3.1	虚轴机床的发展及现状	150
6.3.2	虚轴机床的基本原理	153
6.3.3	虚轴机床的性能特点	153
6.3.4	虚轴机床的关键技术	154
6.3.5	虚轴机床研制的技术对策及研制和生产可能的趋势	155
6.4	数控机床的主运动部件	155
6.4.1	主传动变速(主传动链)	155
6.4.2	主轴部件结构	156
6.5	数控机床的进给运动系统	159
6.5.1	数控机床的进给传动系统	159
6.5.2	数控机床的导轨	165
6.6	数控机床各辅助装置的功能及结构介绍	169
6.6.1	自动换刀装置	169
6.6.2	APC 工件自动交换系统	175
6.6.3	回转工作台	176

6.6.4 排屑装置	181
第7章 典型数控机床结构介绍	183
7.1 机床型号的编制	183
7.2 数控车床	188
7.3 数控铣床	189
7.4 加工中心	191
7.4.1 加工中心的特点	191
7.4.2 加工中心的分类	192
7.4.3 加工中心的构成	194
7.5 电火花加工机床	195
7.6 数控线切割机床	197
第8章 数控机床常见故障诊断与维修	200
8.1 数控机床故障诊断与维修概述	200
8.1.1 数控机床故障诊断与维修的概念	200
8.1.2 数控机床故障的类型与特点	200
8.1.3 数控机床故障诊断与维修的一般方法	202
8.2 数控机床机械故障诊断	204
8.2.1 机械故障诊断方法	204
8.2.2 主要机械部件故障诊断	205
8.3 数控系统故障诊断	209
8.3.1 控制系统故障诊断	209
8.3.2 常见伺服系统故障及诊断	212
8.4 常见数控机床故障诊断与维修实例	213
8.4.1 CNC系统故障维修实例	213
8.4.2 伺服系统故障维修实例	214
参考文献	215

第 1 章 数控技术基础

数字控制机床 (Numerically Controlled Machine Tool) 简称数控机床, 随着电子技术的发展, 数控机床采用了计算机数控 (Computerized Numerical Control) 系统, 因此也称为计算机数控机床或 CNC 机床。

1.1 数控机床的系统组成及其各部分功能

1.1.1 数控加工的过程

利用数控机床完成零件数控加工的过程如图 1-1 所示, 主要内容如下。

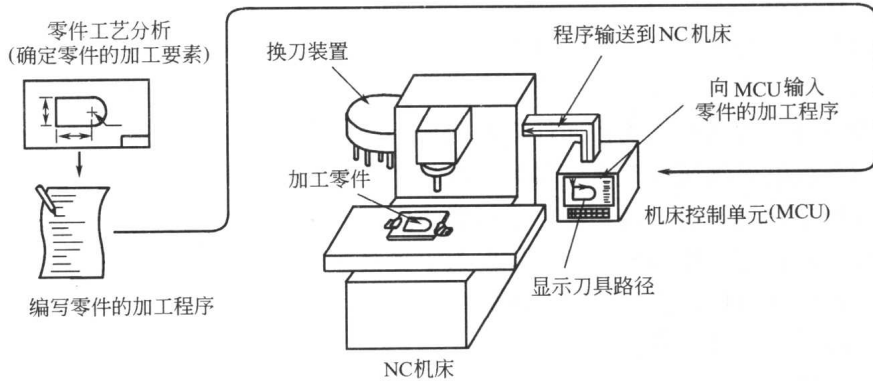


图 1-1 数控加工的过程

- a. 根据零件加工图样进行工艺分析, 确定加工方案、工艺参数和位移数据。
- b. 用规定的程序代码和格式编写零件加工程序单; 或用自动编程软件进行 CAD/CAM 工作, 直接生成零件的加工程序文件。
- c. 程序的输入或传输。由手工编写的程序, 可以通过数控机床的操作面板输入程序; 由编程软件生成的程序, 通过计算机的串行通讯接口直接传输到数控机床的数控单元 (MCU)。
- d. 将输入/传输到数控单元的加工程序, 进行试运行、刀具路径模拟等。
- e. 通过对机床的正确操作, 运行程序, 完成零件的加工。

1.1.2 数控机床的组成及其各部分的功能

数控机床一般由数控系统、包含伺服电动机和检测反馈装置的伺服系统、强电控制柜、机床本体和各类辅助装置组成, 如图 1-2 所示。

(1) 控制介质

控制介质又称信息载体, 是人与数控机床之间联系的中间媒介物质, 反映了数控加工中全部信息。

(2) 数控系统

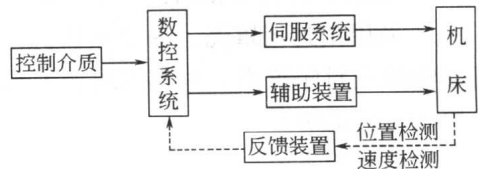


图 1-2 数控机床的系统组成框图

数控系统是机床实现自动加工的核心，是整个数控机床的灵魂所在。主要由输入装置、监视器、主控制系统、可编程控制器、各类输入/输出接口等组成。主控制系统主要由 CPU、存储器、控制器等组成。数控系统的主要控制对象是位置、角度、速度等机械量，以及温度、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模块就是根据所读入的零件程序，通过译码、编译等处理后，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、速度反馈信号的比较，从而控制机床各坐标轴的位移。而时序逻辑控制通常由可编程控制器 PLC 来完成，它根据机床加工过程中各个动作要求进行协调，按各检测信号进行逻辑判别，从而控制机床各个部件有条不紊地按顺序工作。

(3) 伺服系统

伺服系统是数控系统和机床本体之间的电传动联系环节。主要由伺服电动机、驱动控制系统和位置检测与反馈装置等组成。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。数控系统发出的指令信号与位置反馈信号比较后作为位移指令，再经过驱动系统的功率放大后，驱动电动机运转，通过机械传动装置拖动工作台或刀架运动。

(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，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 PLC 的输出接口与机床各类辅助装置的电气执行元件之间起桥梁连接作用，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。此外，它也与机床操作台有关手动按钮连接。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。它与一般普通机床的电气类似，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) 机床本体

数控机床的本体指其机械结构实体。它与传统的普通机床相比较，同样由主传动系统、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、工具系统及操作机构等方面都发生了很大变化。为了满足数控技术的要求和充分发挥数控机床的特点，归纳起来包括以下几个方面的变化。

- 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. 具有完善的刀具自动交换和管理系统。
- d. 在加工中心上一般具有工件自动交换、工件夹紧和放松机构。
- e. 机床本身具有很高的动、静刚度。
- f. 采用全封闭罩壳。由于数控机床是自动完成加工，为了操作安全等，一般采用移动门结构的全封闭罩壳，对机床的加工部件进行全封闭。

(6) 辅助装置

辅助装置主要包括自动换刀装置 ATC (Automatic Tool Changer)、自动交换工作台机构 APC (Automatic Pallet Changer)、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、过载和保护装置等。

1.2 数控机床的分类

数控机床的品种规格很多，分类方法也各不相同。一般可根据功能和结构，按下面4种原则进行分类。

1.2.1 按机床运动的控制轨迹分类

(1) 点位控制的数控机床

点位控制只要求控制机床的移动部件从一点移动到另一点的准确定位，对于点与点之间的运动轨迹的要求并不严格，在移动过程中不进行加工，各坐标轴之间的运动是不相关的。为了实现既快又精确的定位，两点间位移的移动一般先快速移动，然后慢速趋近定位点，以保证定位精度，图1-3所示为点位控制的运动轨迹。

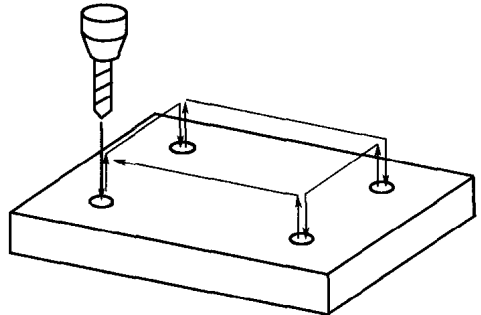


图 1-3 数控机床的点位加工轨迹

具有点位控制功能的机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床等。随着数控技术的发展和数控系统价格的降低，单纯用于点位控制的数控系统已不多见。

(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路线（轨迹），但其运动路线只是与机床坐标轴平行移动，也就是说同时控制的坐标轴只有一个（即数控系统内不必有插补运算功能），在移位的过程中刀具能以指定的进给速度进行切削，一般只能加工矩形、台阶形零件。

具有直线控制功能的机床主要有比较简单的数控车床、数控铣床、数控磨床等。这种机床的数控系统也称为直线控制数控系统。同样，单纯用于直线控制的数控机床也不多见。

(3) 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床也称连续控制数控机床，其控制特点是能够对两个或两个以上的运动坐标的位移和速度同时进行控制。为了满足刀具沿工件轮廓的相对运动轨迹符合工件加工轮廓的要求，必须将各坐标运动的位移控制和速度控制按照规定的比例关系精确地协调起来。因此在这类控制方式中，就要求数控装置具有插补运算功能，所谓插补就是根据程序输入的基本数据（如直线的终点坐标、圆弧的终点坐标和圆心坐标或半径），通过数控系统内插补运算器的数学处理，把直线或圆弧的形状描述出来，也就是一边计算，一边根据计算结果向各坐标轴控制器分配脉冲，从而控制各坐标轴的联动位移量与要求的轮廓相符合。在运动过程中刀具对工件表面连续进行切削，可以进行各种直线、圆弧、曲线的加工。轮廓控制的加工轨迹如图1-4所示。

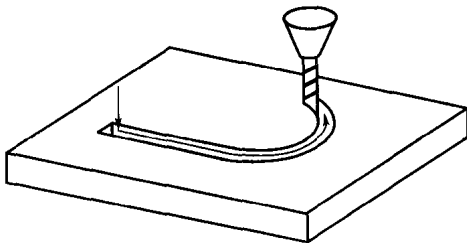


图 1-4 数控铣床的轮廓加工轨迹

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。根据它所控制的联动坐标轴数不同，又可以分为下面几种形式。

① 二轴联动 主要用于数控车床加工旋转曲面或数控铣床加工曲线柱面，如图 1-4 所示。

② 二轴半联动 主要用于三轴以上机床的控制，其中二根轴可以联动，而另外一根轴可以作周期性进给。图 1-5 所示就是采用这种方式用行切法加工三维空间曲面。

③ 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，比较多的用于数控铣床、加工中心等，如图 1-6 所示用球头铣刀铣切三维空间曲面。另一类是除了同时控制 X、Y、Z 其中两个直线坐标外，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，它除了纵向（Z 轴）、横向（X 轴）两个直线坐标轴联动外，还需同时控制围绕 Z 轴旋转的主轴（C 轴）联动。

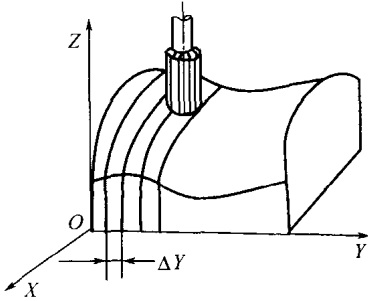


图 1-5 二轴半联动的曲面加工

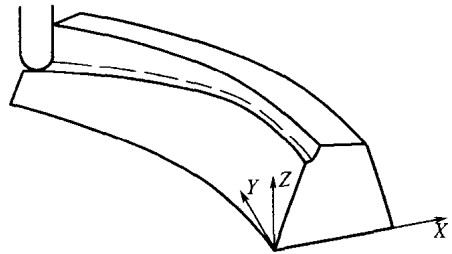


图 1-6 三轴联动的加工曲面

④ 四轴联动 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 1-7 所示为同时控制 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。

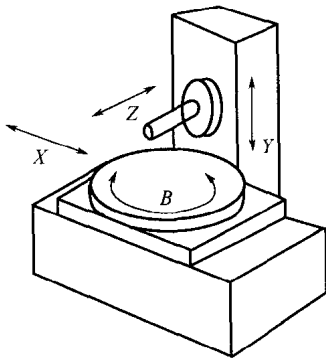


图 1-7 四轴联动的数控机床

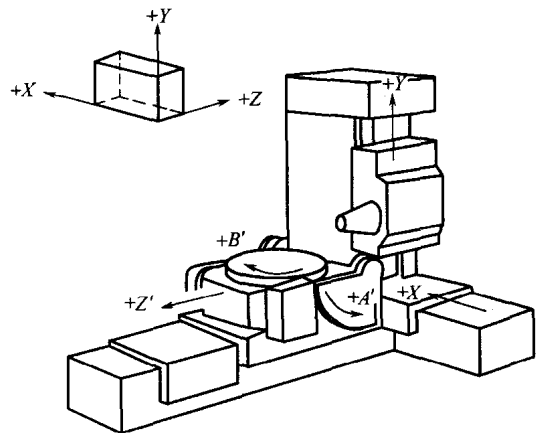


图 1-8 五轴联动的加工中心

⑤ 五轴联动 除同时控制 X、Y、Z 三个直线坐标轴联动外，还同时控制围绕这些直线坐标轴旋转的 A、B、C 坐标轴中的两个坐标轴，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 1-8 所示。比如控制刀具同时绕 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光滑性，提高其加工精度和加工效率，减小被加工表面的粗糙度。

1.2.2 按伺服控制的方式进行分类

(1) 开环控制数控机床

开环控制数控机床的进给伺服驱动是开环的，即没有检测反馈装置，一般它的驱动电动机为步进电动机，步进电动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。其控制系统的框图如图 1-9 所示，数控系统输出的进给指令信号通过脉冲分配器来控制驱动电路，它以变换脉冲的个数来控制坐标位移量，以变换脉冲的频率来控制位移速度，以变换脉冲的分配顺序来控制位移的方向。因此这种控制方式的最大特点是控制方便、结构简单、价格便宜。数控系统发出的指令信号流是单向的，所以不存在控制系统的稳定性问题，但由于机械传动的误差不经过反馈校正，位移精度不高。早期的数控机床均采用这种控制方式，只是故障率比较高，目前由于驱动电路的改进，仍有较多应用。尤其是在我国，一般经济型数控系统和旧设备的数控改造多采用这种控制方式。另外，这种控制方式可以配置单片机或单板机作为数控装置，使得整个系统的价格很低。

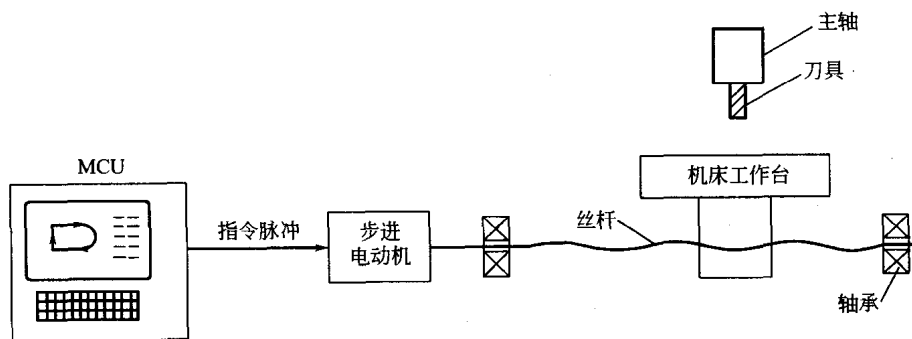


图 1-9 开环控制系统框图

(2) 闭环控制数控机床

闭环控制数控机床的进给伺服驱动是按闭环反馈控制方式工作的，其驱动电动机可采用直流或交流两种伺服电动机，并需要配置位置反馈和速度反馈，在加工中随时检测移动部件的实际位移量，并及时反馈给数控系统中的比较器，它与插补运算所得到的指令信号进行比较，其差值又作为伺服驱动的控制信号，进而带动位移部件以消除位移误差。

按位置反馈检测元件的安装部位和所使用的反馈装置的不同，它又分为全闭环和半闭环两种控制方式。

① 全闭环控制 如图 1-10 所示，其位置反馈装置采用直线位移检测元件（目前一般采用光栅尺），安装在机床的床鞍部位，即直接检测机床坐标的直线位移量，通过反馈可以消

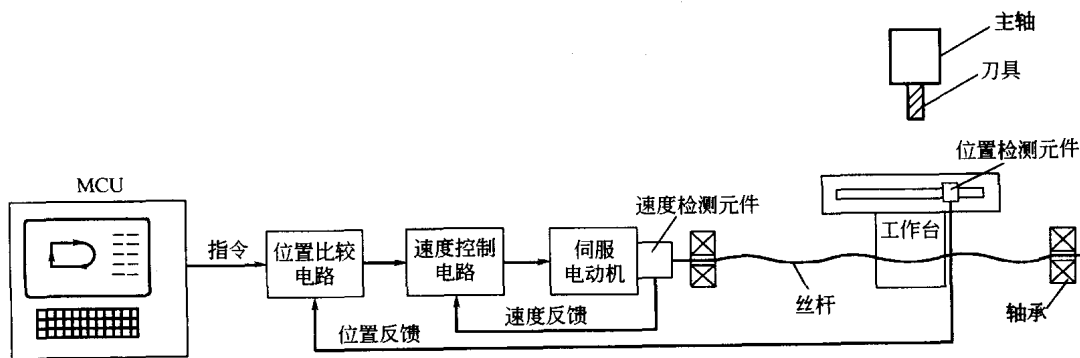


图 1-10 全闭环控制系统框图

除从电动机到机床床鞍的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，由于在整个控制环内，许多机械传动环节的摩擦特性、刚性和间隙均为非线性，并且整个机械传动链的动态响应时间与电气响应时间相比又非常大。这为整个闭环系统的稳定性校正带来很大困难，系统的设计和调整也都相当复杂。因此，这种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。

② 半闭环控制 如图 1-11 所示，其位置反馈采用转角检测元件（目前主要采用编码器），直接安装在伺服电动机或丝杠端部。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方法来适当提高其精度。目前，大部分数控机床采用半闭环控制方式。

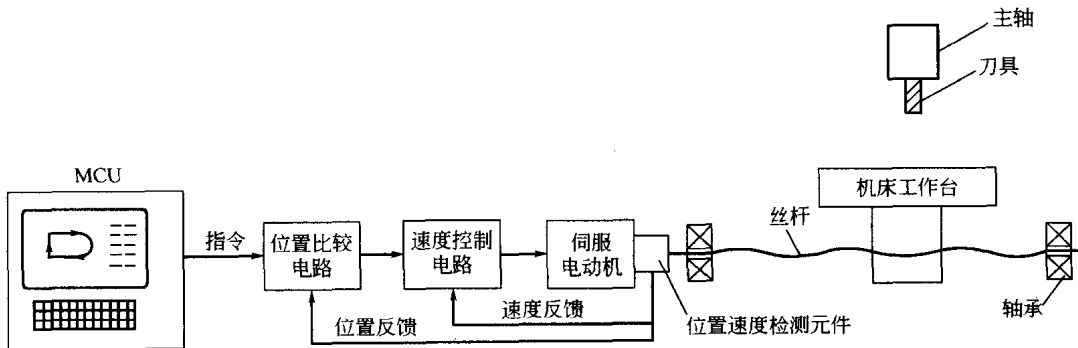


图 1-11 半闭环控制系统框图

(3) 混合控制数控机床

将上述控制方式的特点有选择的集中，可以组成混合控制的方案。如前所述，由于开环控制方式稳定性好、成本低、精度差，而全闭环稳定性差，所以为了互相弥补，以满足某些机床的控制要求，宜采用混合控制方式。采用较多的有开环补偿型和半闭环补偿型两种方式。

1.2.3 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、高三档。这种分类方式，在我国用的较多。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，中、高档一般称为全功能数控或标准型数控。在我国还有经济型数控的提法。经济型数控属于低档数控，是指由单片机和步进电动机组成的数控系统，或其他功能简单、价格低的数控系统。经济型数控主要用于车床、线切割机床以及旧机床改造等。

表 1-1 数控系统不同档次的功能及指标

功能	低档	中档	高档
系统分辨率	10 μ m	1 μ m	0.1 μ m
G00 速度	3~8m/min	10~24m/min	24~100m/min
伺服类型	开环及步进电动机	半闭环及直、交流伺服	闭环及直、交流伺服
联动轴数	2~3	2~4	5 轴或 5 轴以上
通信功能	无	RS232 或 DNC	RS232、DND、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	功能强大的内装 PLC
主 CPU	8 位、16 位 CPU	16 位、32 位 CPU	32 位、64 位 CPU
结构	单片机或单板机	单微处理器或多微处理器	分布式多微处理器