

四川省精品课程教材

数控技术 及加工编程

主编 周利平 副主编 尹洋 董霖 主审 吴能章

SHUKONG JISHU JI JIAGONG BIANCHENG



西南交通大学出版社
<http://press.swjtu.edu.cn>

四川省精品课程教材

数控技术及加工编程

主 编 周利平

副主编 尹 洋 董 霖

主 审 吴能章

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

全书共分 8 章,系统地介绍了数控技术基本概念、CNC 插补原理、刀补原理、数控伺服系统的类型、伺服电动机及调速、位置检测装置及其应用;通过实例详细介绍了数控编程的基本知识和数控车床、数控铣床、加工中心的手工编程方法,以及基于 UG 平台的图形交互式自动编程方法;同时,结合现代数控机床的发展情况,介绍了数控机床的机械传动结构及刀具交换装置。本书内容丰富,力求体现数控技术的新发展和新成果,并在每章后配有复习思考题。

本书可以用作高等工科院校机械设计制造及自动化专业的本科教材,也可用作职业技术学院的同类专业教材,还可供从事数控技术及相关工程技术人员参考。

本书同时配有《数控技术及加工编程实训教程》,供读者通过书中设计的实践教学内容掌握数控技术基本理论。

图书在版编目(CIP)数据

数控技术及加工编程 / 周利平主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2007.3

ISBN 978-7-81104-516-1

I. 数… II. 周… III. 数控机床—高等学校—教材
IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 022387 号

数控技术及加工编程

主编 周利平

*

责任编辑 王 旻

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

西南交通大学印刷厂印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 14.75

字数: 370 千字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-516-1

定价: 24.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

现代制造业是国民经济和国防建设的基础性产业，数控技术是现代制造业的基础技术，是提高产品质量和劳动生产率必不可少的手段，是实现柔性自动化（FMS）、计算机集成制造（CIMS）和工厂自动化（FA）的基础。数控技术的发展和水平标志着一个国家的综合国力水平，学习和掌握数控技术已经成为制造业从业人员必备的技能。

为了适应数控技术的发展和人才培养的需要，我们申报了 2005 年四川省教育厅精品课程“数控技术概论及加工编程”建设项目并已被批准立项。在实施四川省新世纪教改项目工程过程中，进一步进行了人才培养模式和课程体系的改革，重组了课程教学内容。在总结多年教学经验的基础上，编写了这本与四川省精品课程“数控技术概论及加工编程”相配套的教材。

数控技术是集现代精密机械、计算机、自动控制、液压气动、精密测量等多学科领域最新成果为一体的综合应用技术，数控技术的教学应强调培养的系统性和实用性。本书在编写中，力求反映数控技术及其应用系统的基础知识、核心技术和最新成就，并兼顾工程实践能力的培养，在内容上注重先进性、科学性和实用性，在文字叙述上力求通俗易懂、逻辑严谨、便于教学。

本书共分 8 章，在第 1、2、3 章中，从原理的角度出发，简要介绍了数控技术基本概念、数控加工原理和数控机床的组成、分类和发展，介绍了 CNC 插补原理、刀补原理、数控伺服系统的类型、伺服电动机及调速、位置检测装置及其应用。由于数控加工与普通加工的本质区别在于数控加工是用程序控制机床实现自动加工，由此可见，数控加工程序的编制在数控技术应用中所占的重要位置。为此，在第 4、5、6、7 章中，从应用的角度出发，详细介绍了数控编程的基本知识，包括数控编程基本概念、编程步骤、工艺处理和数学处理方法，并根据 ISO 标准，按 FANUC、SIEMENS、华中数控等系统的编程格式要求，结合实例介绍了数控车床、数控铣床、加工中心的手工编程方法和循环功能、子程序、用户宏程序技术的应用，同时介绍了基于 UG 平台的图形交互式自动编程方法。随着数控技术的高速发展，数控机床的机械传动结构发生了巨大的变化，结合现代数控机床的发展情况，在第 8 章中介绍了数控机床的机械传动结构及数控机床的刀具交换装置。

本书主要用作高等工科院校机械设计制造及其自动化专业的本科教材，也可用作职业技术学院的同类专业教材，还可供从事数控技术的相关工程技术人员参考。为便于课程教学，本教材将有关实践教学内容放在配套的《数控技术及加工编程实训教程》一书中。

本书由西华大学长期从事数控技术教学的老师编写，周利平担任主编，尹洋、董霖担任副主编。各章编写分工为：周利平编写第 1、6、8 章，董霖编写第 4、7 章，尹洋编写第 2、5 章，邓志平编写第 3 章。

全书由西华大学吴能章教授主审，并提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

作为四川省精品课程教材，本书得到了四川省教育厅、西华大学教务处和机械工程和自动化学院的大力支持，在此也一并致谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者不吝指正。

编 者

2007 年 2 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 数控加工原理	1
1.2 数控机床组成与分类	4
1.3 数控机床与数控技术的发展	8
复习思考题	13
第2章 数控机床的控制原理	14
2.1 概 述	14
2.2 逐点比较法	17
2.3 数字积分法	25
2.4 时间分割插补法	34
2.5 刀具半径补偿	37
复习思考题	43
第3章 数控机床的驱动与位置控制	44
3.1 概 述	44
3.2 常用伺服执行元件	48
3.3 进给驱动	58
3.4 数控机床的检测装置	62
复习思考题	78
第4章 数控编程基础	80
4.1 数控编程基本概念	80
4.2 数控机床坐标系	85
4.3 常用编程指令	88
复习思考题	98
第5章 数控编程中的工艺分析及数学处理	99
5.1 零件的加工工艺分析	99
5.2 数控加工工艺文件	113
5.3 数控编程中的数学处理	115

复习思考题	124
第 6 章 数控编程技术	125
6.1 数控车床编程	125
6.2 数控铣床及加工中心编程	141
6.3 子程序和用户宏程序	156
6.4 数控铣床及加工中心编程举例	164
复习思考题	172
第 7 章 自动编程	174
7.1 概 述	174
7.2 图形交互式自动编程	174
7.3 UG 简介	174
7.4 UG NX 数控加工综合实例	175
复习思考题	197
第 8 章 数控机床机械传动结构与装置	199
8.1 数控机床的总布局	199
8.2 数控机床的主传动系统	204
8.3 数控机床的进给传动系统	209
8.4 数控机床自动换刀装置	218
复习思考题	228
参考文献	230

第 1 章 绪 论

数控技术，是综合了计算机、自动控制、电机、电气传动、测量、监控、机械制造等学科领域最新成果而形成的一门边缘科学技术，是现代先进制造技术的基础和核心，对制造业实现柔性制造（Flexible Manufacturing, FM）、计算机集成制造（Computer Integrated Manufacturing, CIM）、网络化制造（Networked Manufacturing, NM）起着举足轻重的作用。由于数控技术较早地应用于机床设备，本书主要讨论机床数控技术。

数字控制（Numerical Control, NC）是用数字化信号对设备运行及其加工过程进行控制的一种自动化技术，简称数控。数控机床就是采用了数控技术的机床。根据国际信息处理联盟（International Federation of Information Processing, IFIP）第五技术委员会对数控机床的定义：“数控机床是一个装有程序控制系统的机床，该系统能够逻辑地处理具有使用代码，或其他符号编码指令规定的程序。”（定义中所指的程序控制系统就是所说的数控系统）数控机床是一种利用数字信息通过计算机进行控制的高效、能自动化加工的机床，它能够按照机床规定的数字化代码，把各种机械位移量、工艺参数、辅助功能（如刀具交换、冷却液开与关等）表示出来，经过数控系统的逻辑处理与运算，发出各种控制指令，实现要求的机械动作，自动完成零件加工任务。在被加工零件或加工工序变换时，它只需改变控制的指令程序就可以实现新的加工。所以，数控机床是一种灵活性很强、技术密集度及自动化程度很高的机电一体化加工设备。

1.1 数控加工原理

1.1.1 数控机床的加工运动

机械加工是由切削的主运动和进给运动共同完成的，控制主运动以得到合理的切削速度，控制进给运动以得到各种不同的加工表面。金属切削机床加工零件，是操作者根据图样的要求，不断改变刀具与工件之间的运动参数（位置、速度、……），使刀具对工件进行切削加工，最终得到需要的合格零件。数控机床加工，是把刀具与工件的坐标运动分割成一些最小的单位量，即最小位移量，由数控系统按照零件加工程序的要求，使相应坐标移动若干个最小位移量，从而实现刀具与工件相对运动的控制，以完成零件的加工。

在三坐标的数控机床中，各坐标的运动方向通常是相互垂直的，即各自沿笛卡儿坐标系的 X 、 Y 、 Z 轴的正负方向移动。如何控制这些坐标运动来完成各种不同的空间曲面的加工，是数字控制的主要任务。在三维空间坐标系中，空间任何一点都可以用 X 、 Y 、 Z 的坐标值来

表示，一条空间曲线也可以用三维函数来表示。怎样控制各坐标轴的运动才能完成曲面加工呢？下面用二维空间的曲线加工方法加以说明。

如图 1-1 所示，在平面上，要加工任意曲线 L 的零件，要求刀具 T 沿曲线轨迹运动，进行切削加工。将曲线 L 分割成 l_0 、 l_1 、 l_2 、 $\dots$ 、 l_i 等线段，用直线（或圆弧）代替（逼近）这些线段，当逼近误差 δ 相当小时，这些折线段之和就接近了曲线。即曲线加工时刀具的运动轨迹与理论上的曲线（包括直线）不吻合，而是一个逼近折线。由数控机床的数控装置进行计算、分配，通过两个坐标轴最小单位量的单位运动（ Δx ， Δy ）的合成，不断连续地控制刀具运动，不偏离地走出直线（或圆弧），从而非常逼真地加工出平面曲线。

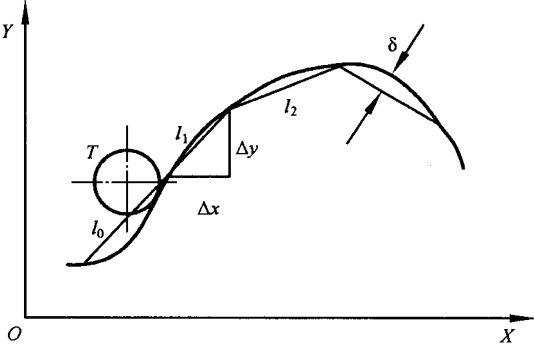


图 1-1 数控机床运动控制原理

这种在允许的误差范围内，用沿曲线（精确地说，是沿逼近函数）的最小单位移动量合成的分段运动代替任意曲线运动，以得出所需要的运动，是数字控制的基本构思之一。它的特点是不仅对坐标的移动量进行控制，而且对各坐标的速度及它们之间的比率都要进行严格控制，以便加工出给定的轨迹。

1.1.2 数控机床的工作工程

数控机床的加工过程，就是将加工零件的几何信息和工艺信息编制成程序，由输入部分送入计算机。经过计算机的处理、运算，按各坐标轴的位移分量送到各轴的驱动电路，经过转换、放大去驱动伺服电动机，带动各轴运动，并进行反馈控制，使各轴精确走到要求的位置。如此继续下去，各个运动协调进行，实现刀具与工件的相对运动，一直加工完零件的全部轮廓。

数控机床的工作过程大致可分为以下几步：

1. 数控编程

首先根据零件加工图纸进行工艺处理，对工件的形状、尺寸、位置关系、技术要求进行分析，然后确定合理的加工方案、加工路线、装夹方式、刀具及切削参数、对刀点、换刀点，同时还要考虑所用数控机床的指令功能。工艺处理后，根据加工路线、图纸上的几何尺寸，计算刀具中心运动轨迹，获得刀位数据。如果数控系统有刀具补偿功能，则只需要计算出轮廓轨迹上的坐标值。根据加工路线、工艺参数、刀位数据及数控系统规定的功能指令代码及程序段格式，编写数控加工程序（NC 代码）。

2. 程序输入

数控加工程序通过输入装置输入到数控系统。目前，采用的输入方法主要有软驱、USB 接口、RS232C 接口、MDI 手动输入、分布式数字控制（Distributed Numerical Control, DNC）接口、网络接口等。数控系统一般有两种不同的输入工作方式：一种是边输入边加工，DNC

即属于此类工作方式；另一种是一次将零件数控加工程序输入到计算机内部的存储器，加工时再由存储器一段一段地往外读出，软驱、USB 接口即属于此类工作方式。

3. 译 码

NC 代码是 NC 编程人员在 CAM 软件上生成或手工编制的，是文本数据，它的表达可以较容易地被编程人员直接理解，但却无法为硬件直接使用。输入完成后，即进行译码处理。输入的程序中含有零件的轮廓信息（如直线的起点和终点坐标，圆弧的起点、终点、圆心坐标，孔的中心坐标、孔的深度等），切削用量（进给速度、主轴转速），辅助信息（换刀、冷却液开与关、主轴顺转与逆转等）。数控系统以程序段为单位，按照一定的语法规则把这些程序解释、翻译成计算机内部能识别的数据格式，并以一定的数据格式存放在指定的内存区内。在译码的同时还完成对程序段的语法检查，一旦有错，立即给出报警信息。

4. 数据处理

数据处理一般包括刀具补偿、速度计算以及辅助功能的处理。刀具补偿有刀具半径补偿和刀具长度补偿。刀具半径补偿的任务是根据刀具半径补偿值和零件轮廓轨迹计算出刀具中心轨迹。刀具长度补偿的任务是根据刀具长度补偿值和程序值计算出刀具轴向实际移动值。速度计算是根据程序中所给的合成进给速度计算出各坐标轴运动方向的分速度。辅助功能的处理主要完成指令的识别、存储、设标志，这些指令大都是开关量信号，现代数控机床由 PLC 控制。

5. 插 补

数控加工程序提供了刀具运动的起点、终点和运动轨迹，而刀具从起点沿直线或圆弧运动轨迹走向终点的过程则要通过数控系统的插补软件来控制。插补的任务就是通过插补计算程序，根据程序规定的进给速度要求，完成在轮廓起点和终点之间的中间点的坐标值计算，也即数据点的密化工作。

6. 伺服控制与加工

伺服系统接受插补运算后的脉冲指令信号或插补周期内的位置增量信号，经放大后驱动伺服电机，带动机床的执行部件运动，从而加工出零件。

1.1.3 数控机床的特点

数控机床是一种高效、新型的自动化机床，具有广泛的应用前景。与普通机床相比具有以下特点：

1. 适应性强

数控机床由于采用数控加工程序控制，当加工对象改变时，只要改变数控机床的加工程序就能适应新零件的自动化加工，而不需要改变机械部分和控制部分的硬件，因此，能适应当前市场竞争中对产品不断更新换代的要求，较好地解决了多品种、小批量产品的生产自动化问题。

2. 精度高，质量稳定

数控机床的传动件，特别是滚珠丝杠，制造精度很高，装配时消除了传动间隙，并采用了提高刚度的措施，因而传动精度很高。机床导轨采用滚动导轨或粘贴摩擦系数很小且动、静摩擦系数很接近的以聚四氟乙烯为基体的合成材料，因而减小了摩擦阻力，消除了低速爬行。在闭环、半闭环伺服系统中，装有精度很高的位置检测元件，并随时把位置误差反馈给计算机，使之能够及时地进行误差校正。因而使数控机床获得很高的加工精度。数控机床的一切动作都是按照预定的程序自动工作，与手工操作比较，数控机床没有人为干扰，因而加工质量稳定。

3. 生产效率高

数控机床的进给运动和多数主运动都采用无级调速，且调速范围大，可选择合理的切削速度和进给速度，提高切削效率，有效地减少加工中的切削工时；数控机床还具有自动换刀、自动交换工作台和自动检测等功能，可实现在一次装夹后几乎完成零件的全部加工，这样不仅可减少装夹误差，还可减少半成品的周转时间，并且无需工序间的检验与测量，使辅助时间大为缩短。因此，与普通机床相比，数控机床生产效率高出3~4倍。对于复杂型面的加工，生产效率可提高十倍，甚至几十倍。

4. 减轻劳动强度，改善劳动条件

利用数控机床进行加工，只要按图纸要求编制零件的加工程序，然后输入并调试程序，安装坯件进行加工，监督加工过程并装卸零件，这样大大减轻了操作者的劳动强度。此外，数控机床一般都具有较好的安全防护、自动排屑、自动冷却、自动润滑装置，操作者的劳动条件也得到很大的改善。

5. 有利于生产管理现代化

数控机床是使用数字信息作为控制信息，用数控机床加工能准确计算零件的加工时间，这样有利与计算机连接，构成由计算机控制和管理的生产系统，实现生产过程的科学管理和信息化管理。

6. 使用、维护技术要求高

数控机床是综合多学科、新技术的产物，价格昂贵，设备一次性投资大；相应地，高技术产品一定要求有较高水平的技术工人进行机械操作和维护。

1.2 数控机床组成与分类

1.2.1 数控机床的组成

数控机床是由普通机床演变而来的，它的控制采用计算机数字控制方式，各个坐标方向

的运动均采用单独的伺服电动机驱动，取代了普通机床中联系各坐标方向运动的复杂机械传动链。一般来说，数控机床由机床本体、数控系统、机电接口等组成，如图 1-2 所示。

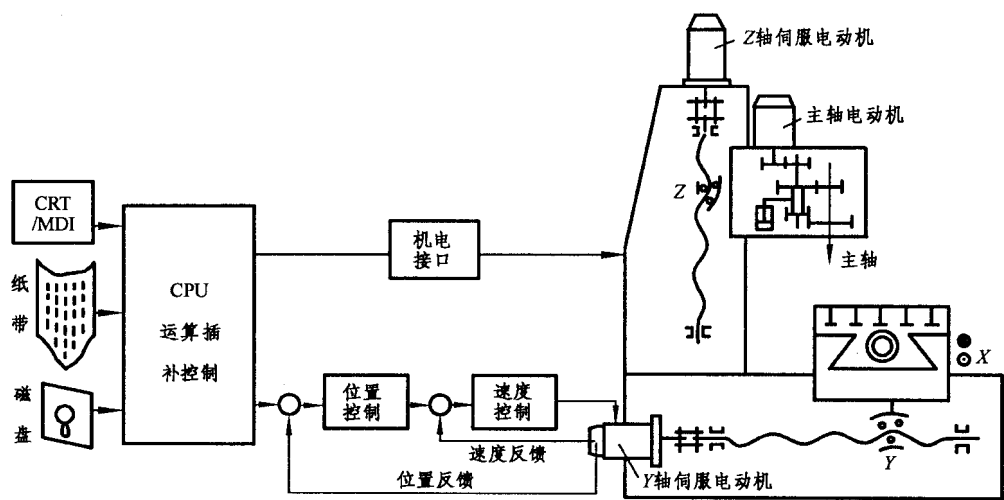


图 1-2 数控机床的组成

1. 机床本体

机床本体包括机床的主运动部件、进给运动部件、执行部件和底座、立柱、刀架、工作台等基础部件。数控机床是一种高精度、高效率 and 高度自动化机床，要求机床的机械结构应具有较高的精度和刚度，精度保持性要好，主运动、进给运动部件运动精度要高。数控机床的主运动、进给运动都由单独的电动机驱动，传动链短、结构较简单。机床的进给传动系统一般均采用精密滚珠丝杠、精密滚动导轨副、摩擦特性良好的滑动（贴塑）导轨副，以保证进给系统的灵敏和精确。在加工中心上还具备有刀库和自动交换刀具的机械手。同时还有一些良好的配套设施，如冷却、自动排屑、防护、可靠的润滑、编程机和对刀仪等，以利于充分发挥数控机床的功能。

2. 数控系统

数控系统由输入输出装置、计算机数控（Computer Numerical Control, CNC）装置、伺服系统、检测系统、可编程控制器（Programmable Logic Control, PLC）等组成。数控系统输入装置可以通过多种方式输入数控加工程序和各种参数、数据（如前所述），一般配有 CRT 或液晶显示器作为输出设备显示必要的信息，并能显示图形。CNC 装置是数控系统的核心，用以完成加工过程中各种数据的计算，利用这些数据由伺服系统将 CNC 装置的微弱指令信号通过解调、转换和放大后驱动伺服电动机，实现刀架或工作台运动，完成各坐标轴的运动控制；检测系统主要用于闭环和半闭环控制，用以检测运动部件的坐标位置，进行严格的速度和位置反馈控制；PLC 用来控制电器开关器件，如主轴的启动与停止、各类液压阀与气压阀的动作、换刀机构的动作、冷却液的开与关、照明控制，等等。

3. 机电接口

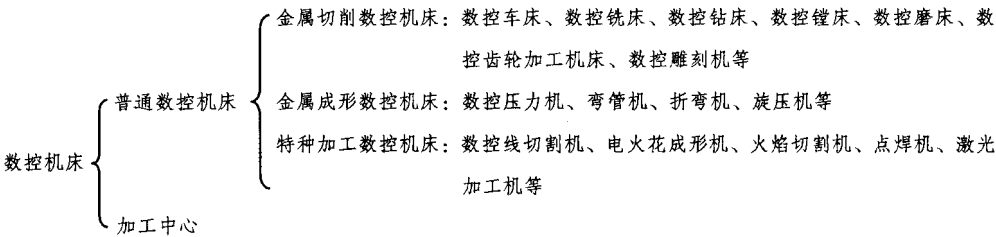
PLC 完成上述开关量的逻辑顺序控制，这些逻辑开关量的动力是由强电路提供的，而

这种强电路是不能与低压下工作的控制电路或弱电线路直接连接，必须经过机电接口电路转换成 PLC 可接收的信号。

1.2.2 数控机床的分类

随着数控技术的发展，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组成的不同，可以从多种角度对数控机床进行分类，通常从以下三个方面进行分类：

1. 按工艺用途分类



加工中心是一种带有自动换刀装置的数控机床，它的出现打破了一台机床只能进行一种工艺加工的传统概念，能实现工件在一次装夹后自动地完成多种工序的加工。为扩大加工范围和减少辅助时间，有些加工中心还能自动更换工作台、刀库和主轴。

2. 按运动控制方式分类

(1) 点位控制数控机床。只要求控制机床的运动部件从一点到另一点的精确定位，对其移动的运动轨迹则无严格要求，在移动过程中刀具不进行切削加工。主要用在数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床、数控点焊机、数控测量机等。为提高生产率又保证定位精度，空行程时以机床设定的最高进给速度快速移动，在接近终点前进行分级或连续降速，然后再以低速准确运动到终点位置，减少因运动部件惯性引起的定位误差。如图 1-3 所示。

(2) 直线控制数控机床。在点位控制基础上，除了控制点与点之间的准确定位外，还要求运动部件按给定的进给速度，沿平行于坐标轴或与坐标轴成 45° 的方向进行直线移动和切削加工，如图 1-4 所示。目前，具有这种运动控制的数控机床已很少。

(3) 轮廓控制数控机床。轮廓控制（又称连续控制）数控机床的特点是机床的运动部件能够实现两个或两个以上的坐标轴同时进行联动控制。它不仅要求控制机床运动部件的起点与终点坐标位置，而且对整个加工过程每一点的速度和位移量也要进行严格的、不间断的控制，使刀具与工件间的相对运动符合工件加工轮廓要求。这种控制方式要求数控装置在加工过程中不断进行多坐标之间的插补运算，控制多坐标轴协调运动。这类数控机床可加工曲线和曲面，如图 1-5 所示。

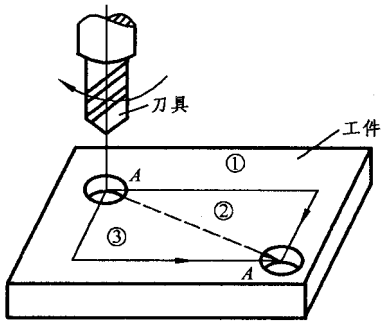


图 1-3 数控钻床加工示意图

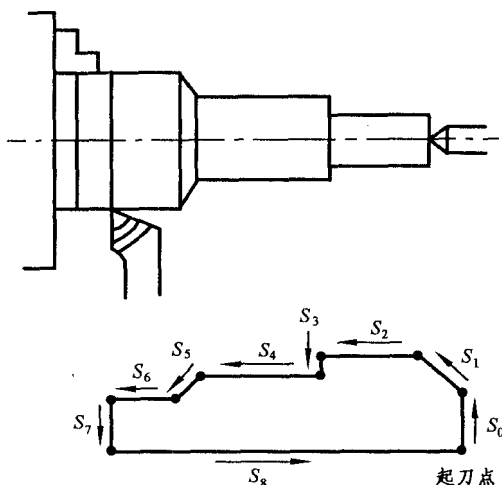


图 1-4 直线控制数控车床加工示意图

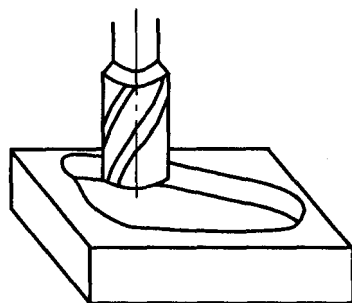


图 1-5 两坐标轮廓控制数控铣床加工示意图

3. 按伺服系统控制方式分类

(1) 开环控制数控机床。开环控制数控机床不带位置检测装置。数控装置发出的控制指令直接通过驱动电路控制伺服驱动电机的运转，并通过机械传动系统使执行机构（刀架、工作台）运动，如图 1-6 所示。开环控制数控机床结构简单、价格便宜，控制精度较低，目前在国内外多用于经济型数控机床，以及对旧机床的改造。

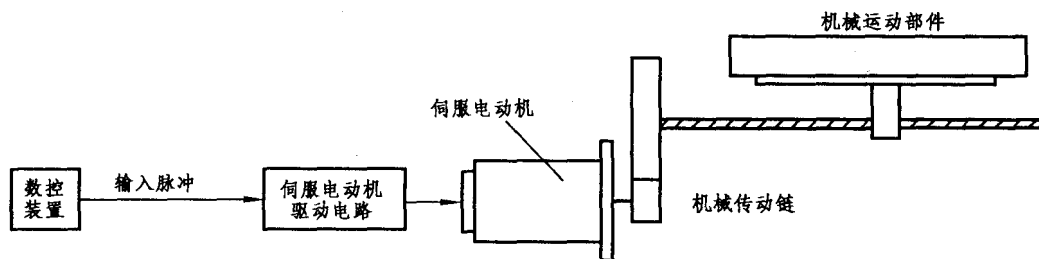


图 1-6 开环控制系统框图

(2) 闭环控制数控机床。闭环控制数控机床带有位置检测装置，而且检测装置装在机床运动部件上，用以把坐标移动的准确位置检测出来并反馈给数控装置，将其与插补计算的指令信号相比较，根据差值控制伺服电机工作，使运动部件严格按实际需要的位移量运动，如图 1-7 所示。

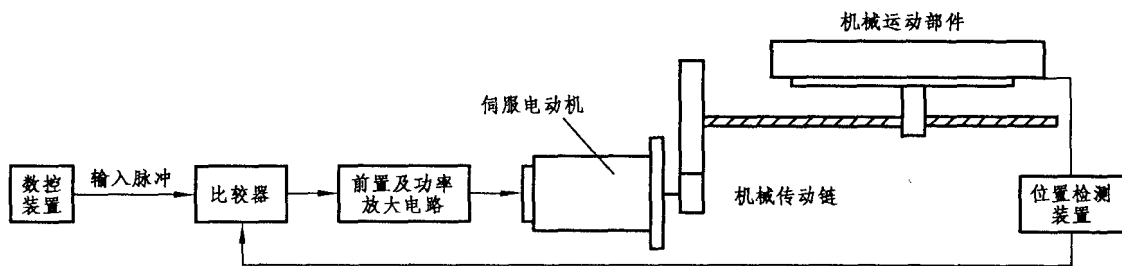


图 1-7 闭环控制系统框图

从理论上讲，闭环控制系统中机床工作精度主要取决于测量装置的精度，而与机械传动系统精度无关。因此，采用高精度测量装置可以使闭环控制系统达到很高的工作精度。但是由于许多机械传动环节都包含在反馈回路内，而各种反馈环节具有丝杠与螺母、工作台与导轨的摩擦，且各部件的刚性、传动链的间隙等都是可变的，因此，机床的谐振频率、爬行、运动死区等造成的运动失步，可能会引起振荡，降低了系统稳定性，调试和维修比较困难。且结构复杂、价格昂贵。

(3) 半闭环控制数控机床。半闭环控制数控机床也带有位置检测装置，与闭环控制数控机床的不同之处是检测装置装在伺服电动机或丝杠的尾部，用测量电动机或丝杠转角的方式间接检测运动部件的坐标位置，如图 1-8 所示。由于电动机到工作台之间的传动部件有间隙、弹性变形和热变形等因素，因而检测的数据与实际的坐标值有误差。但由于丝杠螺母副、机床运动部件等大惯量环节不包括在闭环内，因此可以获得稳定的控制特性，使系统的安装调试方便，而且半闭环系统还具有价格较便宜、结构较简单、检测元件不容易受到损害等优点，因此，半闭环控制正成为目前数控机床首选的控制方式，广泛用于加工精度要求不是很高的数控机床上。

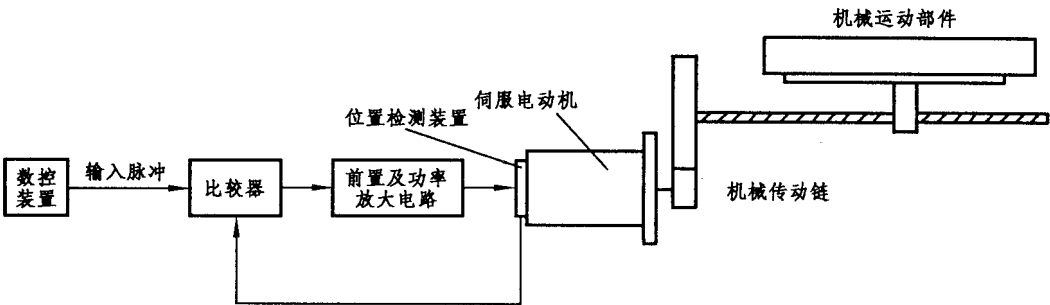


图 1-8 半闭环控制系统框图

除了以上三种基本分类方法外，还有其他的分类方法，如：按控制坐标数和联动坐标数分类，有两轴、两轴半、三轴、四轴、五轴联动以及三轴两联动、四轴三联动等；按控制装置类型分类，有硬件数控、计算机数控（又称软件数控）；按功能水平分类，有高、中（普及型）、低（经济型）档数控等。

1.3 数控机床与数控技术的发展

数控机床的研制最早是从美国开始的。20 世纪 40 年代世界上首台数字电子计算机的诞生，使数控机床的出现成为可能。1948 年，美国帕森斯公司（Parsons Co.）在研制加工直升机叶片轮廓检验样板的机床时，首先提出了用电子计算机控制机床加工复杂曲线样板的设想，受美国空军的委托与麻省理工学院（MIT）伺服机构研究所进行合作研制，于 1952 年研制成功了世界上第一台用专用电子计算机控制的三坐标立式数控铣床，其数控系统采用电子管。研制过程中运用了自动控制、伺服驱动、精密测量和新型机械结构等方面的技术成果。后来又

经过改进,于1955年实现了产业化,并批量投放市场,但由于技术上和价格上的原因,只局限在航空工业中应用。数控机床的诞生,对复杂曲线、型面的加工起到了非常重要的作用,同时也推动了美国航空工业和军事工业的发展。1960年开始,德国、日本、中国等国家都开始陆续开发、生产和使用数控机床。

随着微电子和计算机技术的不断发展,数控机床的数控系统一直在不断更新,到目前为止已经历了2个阶段和6代的变化。

第1阶段的数控系统主要是由硬件连接构成,成为硬件数控(NC):采用电子管的为第1代(1952—1959年);采用晶体管分离元件的为第2代(1959—1965年);采用小、中规模集成电路的为第3代(1965年开始)。

第2阶段数控系统的功能主要由软件完成,称为计算机数控(CNC),又称软件数控:从1970年开始,采用大规模集成电路的小型通用计算机数控系统为第4代;1974年,微处理器开始用于数控系统,发展到第5代;1990年,出现了基于个人计算机(PC)为平台的数控系统,进入到第6代数控系统。

第6代数控系统由于采用了工业控制级的PC机,除了具有通用PC机的卓越性能之外,其可靠性指标平均无故障间隔时间(Mean Time Between Failures, MTBF)已从10 000 h提高到了125个月。随着PC机产品的频繁升级换代,且PC机上几乎所有的新技术都能应用于数控系统,使数控系统更新期大大缩短。由于提供了开放式平台,开发出了可供数控系统应用的极为丰富的软件资源,使数控功能得到了极大的扩展。凡是在PC机上可运行的CAD/CAM等软件都能在数控系统中运行。与早期数控装置相比,基于PC机平台的数控系统不仅使控制轴的数目大大增多,而且其功能也远远超出了控制刀具运动轨迹和机床动作的范畴,并且能够完成自动编程、自动检测、故障诊断与网络通信等功能。

随着科学技术的发展,世界先进制造技术不断兴起,超高速切削、超精密加工等技术的应用,柔性制造系统的迅速发展和计算机集成系统的不断成熟,对数控技术提出了更高的要求。当今数控技术正在朝着以下几个方向发展:

1.3.1 高生产率

速度、精度和效率是机械制造技术的关键性能指标。高生产率主要体现在高速加工和机床功能复合化两个方面。

1. 高速加工

高速数控加工源于20世纪90年代初,以电主轴和直线电机的应用为特征。传统机床,不论是普通机床还是数控机床,从电动机到执行部件,往往要经过一系列的带、齿轮、离合器、丝杠螺母副等中间机械传动环节,造成很大的转动惯量,使工作部件的运动无法达到高速加工所要求的速度和加速度;当工作部件在启动、加减速、反向和停车时,这些机械元件中发生的弹性变形、摩擦磨损和反向间隙等,会产生工作部件运动的滞后现象及其他许多非线性误差,影响了对运动指令的快速反应。此外,这个传动链在高速运转时还会造成巨大的振动与噪声,影响高速加工的精度、表面质量,并对生产环境造成严重的噪声污染。

为了满足高速加工的要求,高速机床应尽量缩短机床传动链的长度,最好取消从电动机

到工作部件之间的一切中间传动环节，使电动机和机床的工作部件合二为一，从而使传动链的长度等于零，实现机床的“零传动”。

“零传动”是现代高速机床的基本特征，它不但大大简化了机床的传动与结构，更重要的是提高了机床的动态灵敏度、加工精度和工作可靠性。这是为满足高速加工要求而出现的一种新型传动方式，是近十年来机床设计理论和制造技术的一个重大创新。

目前，实现主轴超高速运转的方法主要是采用电主轴。电主轴是将主轴和电动机集成在一起的结构，取消了主传动链中的一切中间传动环节，是实现高速机床主运动系统“零传动”的典型结构。现有数控机床主轴转速一般可达 $15\,000\sim 30\,000\text{ r/min}$ ，采用电主轴的主轴转速可高达 $100\,000\text{ r/min}$ 。

为了保证高速切削加工具有高的轮廓精度，必须同时提高轴向进给速度和轴向进给的加、减速度，对高速进给系统的要求不仅仅能够达到高速运动，而且要求瞬时达到高速、瞬时准停等，所以要求具有很大的加速度及很高的定位精度。传统的伺服电机+滚珠丝杠的进给传动方案由于受自身结构的限制已经不能满足要求。目前，国外的一些机床公司在其高速机床产品上采用了直线电机快速进给单元，取消了进给电机和执行部件（工作台、溜板等）的一切中间传动环节，把机床的进给传动链长度缩短为零，实现了机床进给的“零传动”。

直线电机启动的推力大，可以实现大范围的加速和减速，动体质量小，易于实现高速运行，并且在任意速度下可以实现平稳移动。由于没有运动转换机构，整个进给单元结构简单，静、动刚度大，噪声小，重量轻，维修方便，实现了电机对工作台的直接驱动，同时，直线电动机的次级是一段一段连续铺在机床床身上的，次级铺到哪里，初级（工作台）就可运动到哪里，不管有多远，对整个进给系统的刚度没有任何影响，这点是滚珠丝杠所望尘莫及的。直线电机在高速机床上的成功应用，是进给传动设计理论和生产技术上的重大变革，是 20 世纪 90 年代机床制造技术上的一个新的技术高峰。

高速加工还要求数控系统的运算速度快、采样周期短（有些系统的速度环、位置环为 0.1 ms ），要求数控系统具有足够的超前路径加（减）速优化预处理能力，即应具有超前程序段预处理能力，有些系统可提前处理 2 500 个程序段，在多轴联动控制时，可根据预处理缓冲区里的 G 代码规定的内容进行加（减）速优化处理。为保证加工速度，第 6 代数控系统可在每秒钟内进行 $2\,000\sim 10\,000$ 次进给速度的改变。

2. 功能复合化

数控机床的功能复合化是指工件在一台机床上一次装夹后，通过自动换刀、旋转主轴头或转台等各种措施，完成多工序、多表面的复合加工。如 20 世纪 70 年代出现了车削中心，在数控车床的回转刀架上增加了动力刀架，能驱动刀具做回转运动，可进行钻、扩、铰、攻螺纹、镗、铣等加工，并使主轴具有 C 轴功能。20 世纪 80 年代又出现了双主轴车削中心，两个主轴同步同心回转，当一个主轴夹持的工件加工完后，主轴不停止转动，另一个主轴移过来，同步夹紧已加工端，再接续加工，可实现回转件的全部加工，提高了生产率。20 世纪 90 年代出现的车铣中心，增加了大功率刀具驱动轴，刀具轴具有 B 轴和 Y 轴功能，有刀库和换刀机构，能进行车、铣、钻、镗等加工。有的车削中心在回转刀架上安装了第二主轴和砂轮轴，可实现外磨，在第二主轴上也可安装齿轮刀具，加工带轴的齿轮和蜗轮，甚至可实现 X、Y、Z、B、C 五轴联动，用指型铣刀加工弧齿锥齿轮等。到了 21 世纪，出现了将一台立车、