

教育部高职高专规划教材

数控原理与数控机床

第二版

张柱银 熊显文 主 编
杜 军 叶 涛 副主编
明兴祖 主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是根据全国高职高专专门课开发指导委员会制定的数控原理与数控机床课程的基本要求和教材编写大纲,遵循“理论联系实际,体现应用性、实用性、综合性和先进性,激发创新”的原则而编写的。该书紧紧围绕机床数控技术的能力培养,突出理论与实践的结合,着重培养学生适应现代控制技术的需要。

该书先从机床数控技术的基本概念入手,重点突出计算机数控系统、数控机床位置检测装置、数控机床的进给伺服系统、主轴驱动及控制、数控机床的辅助控制、典型数控机床、数控机床的总体设计、机床数控技术应用等内容。

本书内容丰富,重点突出,重视实践技能的培养。本书各章均附有小结和习题,以便于归纳总结,及时巩固所学知识。

本书可作为高职高专院校数控技术应用、模具设计与制造、机电一体化、机械设计制造、计算机应用、冶金机械及控制技术等机械类各专业的三年制、五年制高职高专及中等职业技术教育的教材,也可供数控技术培训及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控原理与数控机床/张柱银,熊显文主编.—2版.
北京:化学工业出版社,2008.6
教育部高职高专规划教材
ISBN 978-7-122-02891-4

I. 数… II. ①张…②熊… III. 数控机床-高等学校:
技术学院-教材 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第068565号

责任编辑:高钰
责任校对:王素芹

文字编辑:张绪瑞
装帧设计:高峰

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京市振南印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张17 $\frac{3}{4}$ 字数452千字 2008年7月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00元

版权所有 违者必究

第二版前言

数控机床是典型的机电一体化产品，它综合了计算机技术、自动控制技术、自动检测技术、液压与气动技术以及精密机械技术等。数控机床的高精度、高效率决定了发展数控机床是当前中国机械制造技术改造的必由之路，它是未来制造业自动化的基础。随着数控机床的大量使用，在高职高专数控技术应用专业和其他机电类专业中普及数控原理与数控机床的基础知识就显得尤为重要。同时，通过对数控原理与数控机床的学习，可提高学生的知识综合运用能力。

本教材在第一版的基础上，根据编者的实践和教学经验，从数控机床的组成这一角度出发，系统地介绍了机床数控技术的基础知识。在深度和广度上，一方面注意知识面 and 知识点的掌握程度，另一方面注意本教材与系列教材中其他课程的衔接，同时兼顾新技术和新知识在机床数控技术中的应用。在教学过程中发现，在本课程中介绍数控机床位置检测装置便于学生更好地掌握数控技术，因而在第二版的相关章节增加了数控机床位置检测装置。

本教材共分九章，每章均附有小结与习题，以便于学习时归纳总结，及时巩固所学的知识。第一章对数控的基本概念、数控机床的分类、机床数控技术的发展及有关规定进行简单介绍。第二章对数控系统的基本原理、插补原理、数控系统的硬件结构和软件结构、典型计算机数控系统进行介绍。第三章介绍数控机床位置检测装置，主要介绍旋转变压器、感应同步器、光栅、磁栅、脉冲编码器等结构与工作原理等。第四章对数控机床的进给伺服系统进行介绍，包括直流和交流伺服驱动控制、开环系统的进给运动控制、闭环系统与驱动装置的信号连接等。第五章介绍数控机床的主轴驱动及控制。第六章介绍数控机床的辅助控制，包括 PLC 控制，M、S、T 功能的实现等。第七章介绍典型数控机床，包括数控车床、数控铣床、数控加工中心机床等。第八章介绍数控机床的总体设计，包括数控机床的结构设计、总体布局以及普通机床的数控化改造等。第九章介绍机床数控技术的应用，包括数控机床的故障诊断与维修、选用、安装调试以及管理等。

本书第二版由张柱银、熊显文任主编，杜军、叶涛任副主编，参编的人员有：第一章由张柱银和龙光涛编写，第二章由熊显文和张柱银编写，第三章由杜军和熊显文编写，第四章由张柱银和杜军编写，第五章由桂伟和廖兆荣编写，第六章由杨静云和陈思义编写，第七章由陈思义和叶涛编写，第八章由张柱银和叶涛编写，第九章由叶涛和杨顺田编写。全书由张柱银教授负责统稿与定稿。

本书第二版仍然由明兴祖教授主审。

虽然是第二版，但限于编者的水平和经验，书中难免有欠妥或疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2008年3月

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

第一版前言

数控机床是典型的机电一体化产品，它综合了电子计算机、自动控制、自动检测、液压与气动以及精密机械等方面的技术。数控机床的高精度、高效率决定了发展数控机床是当前中国机械制造业技术改造的必由之路，是未来工厂自动化的基础。随着数控机床的大量使用，在高职高专数控技术应用专业和其他机电类专业中普及数控原理与数控机床的基础知识就显得尤为重要。同时，通过对数控原理与数控机床的学习可提高学生的知识综合能力。

本教材根据编者的实践和教学经验，从数控机床的组成这一角度出发，系统地介绍了机床数控技术的基础知识。在深度和广度上，一方面注意知识面和知识点的掌握程度，另一方面注意本教材与系列教材中其他课程的衔接，同时兼顾新技术和新知识在机床数控技术中的应用。如本书将有关传感器的章节删去，安排在《检测技术》中进行讲解。

本教材的教学参考学时为 84 学时，其特点是通过由浅入深的讲解，着重强调知识的实际应用，以适应高职教育的教学要求。本书共分 8 章，每章均附有小结与习题，以便于归纳总结，及时巩固所学知识。第一章对机床数控的基本概念、数控机床的分类、机床数控技术的发展及有关规定进行简单介绍。第二章对数控系统的基本原理、插补原理、数控系统的硬件结构和软件结构、典型计算机数控系统进行介绍。第三章对数控机床的进给伺服系统进行介绍，包括直流和交流伺服驱动控制、开环系统的进给运动控制、闭环系统与驱动装置的信号连接等。第四章介绍数控机床的主轴驱动及控制。第五章介绍数控机床的辅助控制，包括 PLC 控制，M、S、T 功能的实现等。第六章介绍典型数控机床，包括数控车床、数控铣床、数控加工中心机床等。第七章介绍数控机床的总体设计，包括数控机床的结构设计、总体布局以及普通机床的数控化改造等。第八章介绍机床数控技术的应用，包括数控机床的故障诊断与维修、选用、安装调试以及管理等。

本书由张柱银任主编，陈思义任副主编，其中第一章由张柱银和龙光涛编写，第二章由何国旗和张柱银编写，第三章由米国际和张柱银编写，第四章由廖兆荣编写，第五章由杨静云和陈思义编写，第六章由陈思义编写，第七章由张柱银编写，第八章由杨顺田编写。全书由张柱银负责统稿和定稿。

本书由明兴祖副教授主审。

限于编者的水平和经验，书中难免有欠妥或错误之处，恳请广大读者批评指正。

编者
2003 年 4 月

目 录

第一章 机床数控技术概述	1		
第一节 机床数字控制的基本概念	1	一、数字控制技术与数控机床的产生和发展 ...	7
一、机床的数字控制技术	1	二、我国数控技术发展概况	7
二、机床数字控制的原理	1	三、机床数控技术的发展趋势	8
三、数控机床及加工特点	2	第四节 实现数控机床的有关规定	9
第二节 数控机床的组成及分类	3	一、数控机床程序编制的有关规定	9
一、数控机床的组成	3	二、数控机床的坐标系	12
二、数控机床的分类	4	本章小结	15
第三节 机床数控技术的发展	7	习题一	15
第二章 计算机数控系统	17		
第一节 概述	17	三、插补方法的分类	37
一、CNC系统的组成	17	四、逐点比较法	38
二、CNC装置的结构	17	五、数字积分法	44
三、CNC装置的工作过程	18	六、数字脉冲乘法器	51
四、数控系统的分类	18	七、数据采样插补法	51
五、计算机数控系统的特点	19	八、粗插补与精插补	53
第二节 计算机数控系统的基本原理	20	第四节 计算机数控系统的硬件结构	54
一、零件程序的输入	20	一、经济型数控系统硬件结构	54
二、数控加工程序的译码	20	二、标准型数控系统硬件	65
三、刀具半径补偿	21	第五节 计算机数控系统软件结构	72
四、刀具长度补偿	27	一、经济型数控系统软件	72
五、速度计算	27	二、标准型数控系统软件	77
六、位置控制原理	29	第六节 典型计算机数控系统介绍	78
七、误差补偿原理	30	一、概述	78
八、加减速控制	32	二、FANUC数控系统6	79
第三节 插补原理	37	本章小结	85
一、插补的基本概念	37	习题二	86
二、对插补器的基本要求	37		
第三章 数控机床位置检测装置	87		
第一节 概述	87	第三节 感应同步器	91
一、数控机床对位置检测装置的要求	87	一、感应同步器的工作原理	91
二、位置检测装置类型	87	二、感应同步器的工作方式	92
第二节 旋转变压器	89	三、感应同步器的应用	93
一、旋转变压器的结构和工作原理	89	第四节 光栅	94
二、旋转变压器工作方式	90	一、光栅的分类	94
三、旋转变压器的应用	91	二、光栅的结构与工作原理	94

三、光栅位移的数字转换系统	96	一、脉冲编码器的分类与结构	100
第五节 磁栅	97	二、增量式光电脉冲编码器	101
一、磁栅的组成部分	98	三、绝对式脉冲编码器	101
二、磁栅的工作原理	98	本章小结	103
第六节 脉冲编码器	100	习题三	103
第四章 数控机床的进给伺服系统	104		
第一节 概述	104	一、交流伺服电动机	121
一、伺服系统的组成	104	二、同步交流电动机的速度控制	122
二、对进给伺服系统的基本要求	104	第五节 进给系统的机械传动部件	124
三、伺服系统的分类	106	一、数控机床对进给系统机械部分的基 本要求	124
第二节 开环进给伺服系统	107	二、进给传动系统的典型机构	125
一、步进电动机的组成、特点及分类	107	第六节 闭环系统与驱动装置的信号连接 ...	131
二、步进电动机的工作原理、主要参数 及特性	108	一、位置比较实现的方式	132
三、步进电动机的驱动与控制	111	二、速度控制信号的实现方式	133
第三节 直流伺服驱动控制	115	第七节 进给运动参数的设置	134
一、直流伺服电动机的基本结构及工作 原理	115	一、进给运动控制参数的设置	134
二、直流伺服电动机的类型及特点	115	二、坐标轴的零点与参考点的设置	137
三、直流伺服电动机的速度控制	116	本章小结	141
第四节 交流伺服驱动控制	121	习题四	141
第五章 主轴驱动及控制	143		
第一节 概述	143	二、主轴轴承的配置	156
一、对主轴驱动的要求	143	三、主轴的润滑	156
二、主轴驱动装置及其工作特性	145	四、主轴的密封	157
第二节 主轴驱动的速度控制	146	第四节 主轴驱动装置与数控装置的信号 连接	158
一、直流主轴速度控制	146	一、主轴转速指定信号及连接	158
二、交流主轴速度控制	148	二、其他开关量控制信号及连接	158
三、主轴分段无级变速及控制	153	本章小结	161
第三节 主轴部件	156	习题五	163
一、刀具的装夹	156		
第六章 数控机床的辅助控制	164		
第一节 概述	164	一、典型 PLC 的介绍	170
一、PLC 的结构与特点	164	二、M、S、T 功能的实现	175
二、PLC 的基本编程方法	166	第四节 数控机床的其他辅助装置	183
第二节 数控机床 PLC 控制	167	一、润滑装置	183
一、数控机床 PLC 的分类	167	二、自动排屑装置	186
二、PLC 与外部的信息交换	169	本章小结	188
第三节 M、S、T 功能的实现	170	习题六	188
第七章 典型数控机床	189		
第一节 数控车床	189	一、数控车床的功能与分类	189

二、数控车床的典型结构	190	四、立式加工中心	209
第二节 数控铣床	196	五、卧式加工中心	210
一、数控铣床的功能与分类	196	第四节 电加工机床	211
二、数控铣床的典型结构	197	一、数控电火花成形加工机床	211
第三节 数控加工中心	202	二、数控电火花线切割机床	213
一、数控加工中心的功能与分类	202	本章小结	216
二、自动换刀装置	203	习题七	217
三、对刀仪	208		
第八章 数控机床的总体设计	218		
第一节 数控机床的结构设计	218	六、数控机床总布局的其他趋向	233
一、数控机床结构设计的要求	218	第三节 数控机床各单元的连接	234
二、提高机床的结构刚度	219	一、总体概要	234
三、提高机床的抗振性	223	二、操作单元与 CNC 单元的互连	234
四、提高低速进给运动的平稳性和运动精度	225	三、CNC 及 PLC 与伺服单元的连接	235
五、减少机床的热变形	227	四、PLC 与主轴单元的连接	235
第二节 数控机床的总体布局	228	五、电气控制单元的连接	236
一、总布局与工件形状、尺寸和重量的关系	228	六、华中 I 型数控单元外部连接详图	237
二、运动分配与部件的布局	229	第四节 普通机床的数控化改造	237
三、总布局与机床的结构性能	230	一、机床数控改造的条件	237
四、自动换刀数控卧式镗铣床的总布局	232	二、机床改造的主要类型	237
五、机床的使用要求与总布局	233	三、机床数控化的改造	238
		本章小结	241
		习题八	241
第九章 机床数控技术应用	242		
第一节 数控机床的故障诊断与维修	242	一、机床外观的检查	261
一、数控机床维修概述	242	二、机床几何精度的检查	262
二、数控机床的故障诊断	245	三、机床定位精度的检查	263
三、数控机床的故障维修	246	四、机床切削精度的检查	264
四、现场维修注意事项	250	五、机床性能及数控系统性能检查	265
第二节 数控机床的选用	250	六、数控机床的管理	266
一、数控机床的选型	250	第五节 数控机床的通信和网络技术	267
二、加工中心的使用技术	254	一、数据通信的基本概念	267
第三节 数控机床的安装与调试	258	二、网络标准与协议	270
一、机床的安装	258	三、现场总线接口	273
二、数控机床的试车调试	259	本章小结	274
第四节 数控机床的检测、验收与管理	261	习题九	274
参考文献	276		

第一章 机床数控技术概述

第一节 机床数字控制的基本概念

一、机床的数字控制技术

数字控制 (Numerical Control) 是近代发展起来的一种自动控制技术, 是用数字化的信息实现机床控制的一种方法。数字控制机床 (Numerically Controlled Machine Tool) 是采用了数字控制技术的机床, 简称数控 (NC) 机床。数控机床是一种装有数控系统的机床, 该系统能逻辑地处理具有使用数字号码或者其他符号编码指令规定的程序。数控系统是一种控制系统, 它能自动完成信息的输入、译码、逻辑运算, 从而控制机床的运动和加工过程。

数控机床是近代发展起来的具有广阔发展前景的新型自动化机床, 是高度机电一体化化的产品。

二、机床数字控制的原理

数控机床的加工, 首先要将被加工零件图上的几何信息和工艺信息数字化, 按规定的代码和格式编成加工程序。信息数字化就是把刀具与工件的运动坐标分割成一些最小单位量, 即最小位移量。数控系统按照程序的要求, 经过信息处理、分配, 使坐标移动若干个最小位移量, 实现刀具与工件的相对运动, 完成零件的加工。

在钻削、镗削或攻螺纹等孔加工中, 如图 1-1(a) 所示, 使刀具在一定时间内, 刀具中心从 P 点移动到 Q 点, 即刀具在 x 坐标和 y 坐标移动规定量的最小单位量, 它们的合成量为 P 点至 Q 点间的距离。但是, 刀具轨迹没有严格控制, 可以先使刀具在 x 坐标上由 P 点向 R 点移动, 然后再使刀具沿 y 坐标从 R 点移动到 Q 点。也可以两个坐标以相同的速度, 使刀具移动到 K 点, 这时, y 坐标值已达到规定的位移量, 然后刀具沿 x 坐标方向由 K 点移动到 Q 点。这样的控制称为点到点的控制 (Point to Point Control), 其特点是严格控制用最小位移量表示的两点间的距离。

在轮廓加工中, 如图 1-1(b) 所示的任意曲线 L 。要求刀具 T 沿曲线轨迹运动, 进行切削加工。对于数控机床, 可以将曲线 L 分割为 $l_0, l_1, l_2, l_3, \dots, l_i$ 等若干段。用直线段 (或圆弧) 代替 (逼近) 这些曲线段, 当逼近误差 δ 相当小时, 这些折线段之和就接近了曲线。数控系统通过最小单位量的单位运动合成, 不断地连续控制刀具运动, 不偏离地走出直线 (或圆弧), 从而非常逼真地加工出曲线轮廓。这种在允许误差范围内, 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, 是数控的基本构思之一。上述的这种控制方法称为轮廓控制或连续轨迹控制 (Contouring 或 Continuous Path Control)。轮廓控制的特点是不但对坐标的移动量进行控制, 对各坐标的速度及它们之间的比率也进行控制。

在进行曲线加工时, 可以用给定的数学函数来模拟曲线上分割出的线段 l_i 。根据给定的

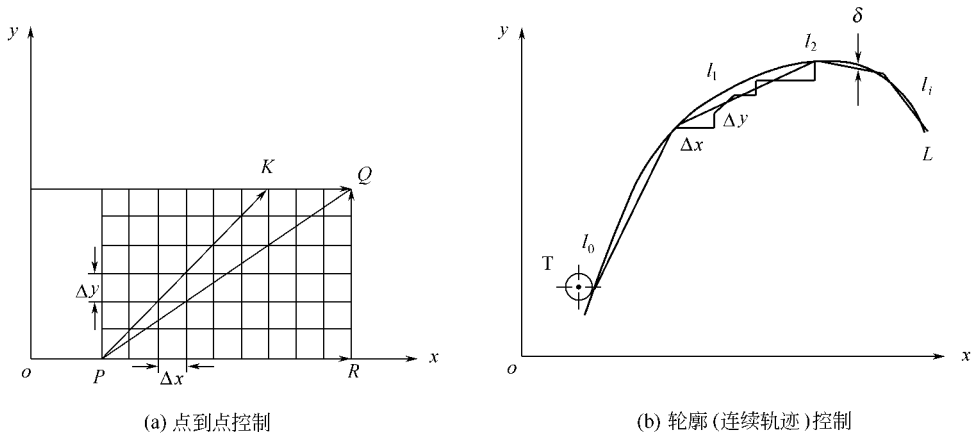


图 1-1 用单位运动来合成任意运动

已知函数，如直线、圆弧或高次曲线，在被加工轨迹或轮廓上的已知点之间进行数据点的密化，确定一些中间点的方法，称为插补（Interpolation）。插补的算法，称为插补运算。

机床的数字控制是由数控系统完成的。数控系统包括数控装置、伺服驱动装置、可编程控制器和检测装置。数控装置是用于机床数字控制的特殊用途的计算机，它能接收零件图纸加工要求的信息，进行插补运算，实时地向各坐标轴发出速度控制指令及切削用量。伺服驱动装置能快速响应数控装置发出的指令带动机床各坐标轴运动，同时能提供足够的功率和扭矩。伺服驱动装置按其工作原理可分为两种控制方式：关断控制和调节控制。关断控制是将指令值与实测值在关断电路的比较器中进行比较，相等后发出信号，控制结束。这种方式用于点位控制。调节控制是数控装置发出运动的指令信号，伺服驱动装置快速响应跟踪指令信号。检测装置将位移的实际值检测出来，反馈给数控装置中调节电路比较器，有差值就发出信号，不断比较指令值与反馈的实测值，不断地发出信号，直到差值为零，运动结束。这种方式用于连续轨迹控制。

可编程控制器用于开关量控制，如主轴的启停、刀具更换和冷却液开关等信号。检测装置用在调节控制中，检测运动的实际值并反馈给数控装置，从而实现差值控制。从理论上讲，它的检测精度决定了数控机床的加工精度。

三、数控机床及加工特点

数控（Numerical Control）机床，是由数字程序实现控制的机床，即数控技术在机床控制中的具体应用。数控机床不仅具有自动换刀装置，而且具有工件自动进给、装卸、刀具寿命检测系统、排屑等各种附加装置，可以进行长时间的无人运转加工。当今的数控机床已经在机械加工行业中占有非常重要的地位，是柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）、自动化工厂（FA）的基本构成单位。

数控机床对零件的加工过程，是严格按照加工程序中所规定的参数及动作执行的。它是一种高效能自动或半自动机床，与普通的机床相比，具有以下特点。

① 适应范围广。数控机床是按照编制好的加工程序实现自动化加工的，当改变加工对象时，只需按照新的对象，重新编制加工程序，输入到数控系统中。因此，可适应各种不同类型零件的加工。

② 工序集中。数控机床在结构和功能设计时，就充分考虑了工序集中，使机床在粗加

工时有足够的刚度，在精加工时又有可靠的精度。因此，一次装夹可实现粗加工到精加工的不同工序，减少了机床、夹具的数量，也减少了因重新装夹造成的误差，同时还能够缩短转序、等待和装夹等辅助时间。

③ 生产率高。由于数控机床在结构设计上采用了有针对性的设计，因此，加工时可以采用较大的切削用量。特别是一些重切数控机床，其切削用量可以是普通机床的十几倍，加上自动换刀等辅助动作的自动化，使得数控机床的生产效率非常高。

④ 加工精度高。数控机床在进给机构中采用了滚珠丝杠螺母机构，并增加了消除丝杠螺母间隙的机构，使机械传动误差尽可能小；还利用软件进行精度校正和补偿，使传动误差进一步减小；由于加工过程是程序控制，减少了人为因素对加工精度的影响，这些措施不仅保证了较高的加工精度，同时还保证了较高的质量稳定性。

⑤ 能进行复杂型面的加工。数控机床不仅可以控制多轴运动，还可以驱动多轴联动，使刀具在三维空间中能实现多种轨迹的加工，因此可以完成复杂型面的加工。

⑥ 减轻工人的劳动强度。由于数控机床实现自动化或半自动化加工，许多辅助动作均由机床完成，因此工人的劳动量减少。

第二节 数控机床的组成及分类

一、数控机床的组成

数控机床一般由控制介质、数控装置、伺服系统、测量反馈装置和机床主机组成，如图 1-2 所示。现将各组成部分简单地介绍。

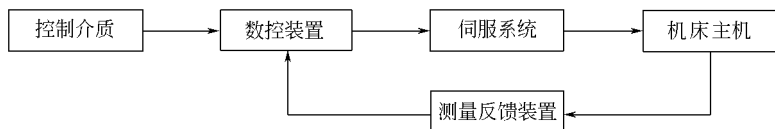


图 1-2 数控机床的组成

1. 控制介质

控制介质是存储数控加工所需要的全部动作和刀具相对于工件位置信息的媒介物，它记载着零件的加工程序。数控机床中，常用的控制介质有穿孔带（也称数控带）、穿孔卡片、磁带和磁盘等。在数控机床产生的初期，人们使用的是 8 单位（8 孔）穿孔纸带，并规定了标准信息代码 ISO（国际标准化组织制定）和 EIA（美国电子工业协会制定）两种代码。尽管穿孔纸带趋于淘汰，但是规定的标准信息代码仍然是数控程序编制、制备控制介质唯一遵守的标准。

2. 数控装置

数控装置是数控机床的核心，现代数控机床都采用计算机数控装置，即 CNC（Computerized Numerical Control）装置。它包括微型计算机的电路、各种接口电路、CRT 显示器、键盘等硬件以及相应的软件。数控装置能完成信息的输入、存储、变换、插补运算以及实现各种控制功能。它具备的主要功能如下。

- ① 多坐标控制（多轴联动）。
- ② 实现多种函数的插补（直线、圆弧、抛物线等）。

③ 多种程序输入功能（人机对话、手动数据输入、由上级计算机及其他计算机输入设备的程序输入），以及编辑和修改功能。

④ 信息转换功能，即 EIA/ISO 代码转换、英制/公制转换、坐标转换、绝对值/增量值转换、计数制转换等。

⑤ 补偿功能，即刀具半径补偿、刀具长度补偿、传动间隙补偿、螺距误差补偿等。

⑥ 多种加工方式选择。可以实现各种加工循环、重复加工、凹凸模加工和镜像加工等。

⑦ 具有故障自诊断功能。

⑧ 显示功能，用 CRT 可以显示字符、轨迹、平面图形和动态三维图形。

⑨ 通信和联网功能。

3. 伺服系统

伺服系统是接收数控装置的指令，驱动机床执行机构运动的驱动部件。包括主轴驱动单元（主要是速度控制）、进给驱动单元（主要有速度控制和位置控制）、主轴电机和进给电机等。一般来说，数控机床的伺服驱动系统，要求有好的快速响应性能，以及能灵敏而准确地跟踪指令功能。现在常用的是直流伺服系统和交流伺服系统，而交流伺服系统正在取代直流伺服系统。

4. 测量反馈装置

该装置可以包括在伺服系统中，它由检测元件和相应的电路组成，其作用是检测速度和位移，并将信息反馈回来，构成闭环控制。没有测量反馈装置的系统称为开环系统。常用的测量元件有脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器、光栅和磁尺等。

5. 机床主机

机床主机是数控机床的主体。包括床身、主轴、进给机构等机械部件。数控机床的主机结构有下面几个特点。

① 由于采用了高性能的主轴及进给伺服驱动装置，数控机床的机械传动结构得到了简化，传动链较短。

② 数控机床的机械结构具有较高的动态特性、动态刚度、阻尼精度、耐磨性以及抗热变形性能。适应连续地自动化加工。

③ 较多地采用高效传动件，如滚珠丝杠副直线滚动导轨等。

为了保证数控机床功能的充分发挥，还有一些配套部件（如冷却、排屑、防护、润滑、照明、储运等一系列装置）和附属设备（程编机和对刀仪等）。

二、数控机床的分类

按照不同的分类方式，数控机床有不同的类型。目前，数控机床品种齐全，规格繁多。为了研究数控机床，可以从不同的角度和按照多种原则对其进行分类。

（一）按数控机床的运动轨迹分类

1. 点位控制数控机床

这类数控机床的数控装置只要求精确地控制一个坐标点到另一个坐标点的定位精度，而不管从一点到另一点是按照什么轨迹运动。在移动过程中不进行任何加工。为了精确定位和提高生产率，首先系统高速运行，然后进行 1~3 级减速，使之慢速趋近定位点，减小定位误差。这类数控机床主要有数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床和数控测量机等。

2. 直线控制数控机床

这类数控机床不仅要求具有准确的定位功能，而且要求从一点到另一点之间按直线运动

进行切削加工。其路线一般由和各轴线平行的直线段组成（也包括 45° 的斜线）。运动时的速度是可以控制的，对于不同的刀具和工件，可以选择不同的切削用量。这一类数控机床包括数控车床、数控镗铣床、加工中心等。

3. 轮廓控制数控机床

这类数控机床的数控装置能同时控制两个或两个以上坐标轴，具有插补功能。对位移和速度进行严格的不间断的控制。具有轮廓控制功能，即可以加工曲线或者曲面零件。轮廓控制数控机床包括两坐标及两坐标以上的数控铣床，可加工曲面的数控车床、加工中心等。现代数控机床绝大部分都具有两坐标或两坐标以上联动的功能。

按照联动（同时控制）轴数分，可以分为 2 轴联动、2.5 轴联动、3 轴联动、4 轴联动、5 轴联动等数控机床。2.5 轴联动是指三个主要控制轴（ x 、 y 、 z 轴）中，任意两个轴联动，另一个是点位或直线控制。

（二）按伺服系统的类型分类

1. 开环控制数控机床

这类数控机床没有检测反馈装置，数控装置发出的指令信号的流程是单向的，开环控制系统框图如图 1-3 所示，其精度主要决定于伺服系统的性能，这类机床比较稳定，调试方便。适用于经济型、中小型机床。

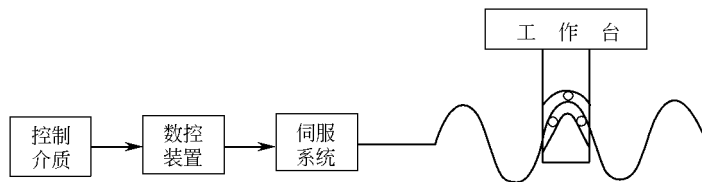


图 1-3 开环控制系统框图

2. 闭环控制数控机床

这类机床数控装置中插补器发出的指令信号与工作台端测得的实际位置反馈信号进行比较，根据其差值不断控制运动，进行误差修正，直至差值消除时为止。如图 1-4 所示为闭环控制系统框图。采用闭环控制的数控机床可以消除由于传动部件在制造中存在的精度误差给工件加工带来的影响，从而得到很高的精度。但是，由于很多机械传动环节包括在闭环控制的环路内，各部件的摩擦特性、刚性以及间隙等都是非线性量，直接影响伺服系统的调节参数。因此，闭环系统的设计和调整都有较大的难度，设计和调整得不好，很容易造成系统的不稳定。因此，闭环控制数控机床主要用于一些精度要求很高的加工中心、超精车床、超精磨床等。

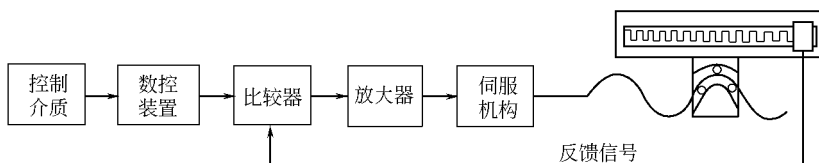


图 1-4 闭环控制系统框图

3. 半闭环控制数控机床

大多数数控机床采用半闭环控制系统，它的检测元件装在电机或丝杠的端头。如图 1-5

所示为半闭环控制系统框图。这种系统的闭环环路内不包括机械传动环节，因此可以获得稳定的控制特性。由于采用高分辨率的测量元件（如脉冲编码器），可以获得比较满意的精度与速度。

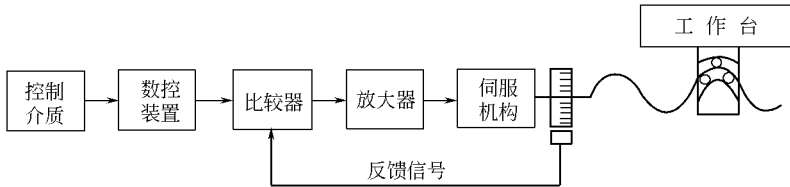


图 1-5 半闭环控制系统框图

（三）按工艺用途分类

1. 金属切削类数控机床

这类机床和传统的通用机床产品种类一样，有数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床、数控镗床以及加工中心机床等。数控加工中心机床是带有自动换刀装置，在一次装夹后，可以进行多种工序加工的数控机床。

2. 金属成型类数控机床

如数控折弯机、数控弯管机、数控回转头压力机等。

3. 数控特种加工及其他类型数控机床

如数控线切割机床、数控电火花加工机床、数控激光切割机床、数控火焰切割机、数控三坐标测量机等。

（四）按功能水平分类

按功能水平的不同可以把数控机床分为高、中、低（经济型）档三类。该种分法没有一个确切的定义。但可以给人们一个清晰的一般水平概念。数控机床水平的高低由主要技术参数、功能指标和关键部件的功能水平来决定。以下几个方面可作为评价数控机床档次的参考条件。

1. 分辨率和进给速度

分辨率为 $10\mu\text{m}$ ，进给速度为 $8\sim 15\text{m}/\text{min}$ 为低档；分辨率为 $1\mu\text{m}$ ，进给速度为 $15\sim 24\text{m}/\text{min}$ 为中档；分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ ，进给速度为 $15\sim 100\text{m}/\text{min}$ 为高档。

2. 多坐标联动功能

低档数控机床最多联动轴数为 $2\sim 3$ 轴，中、高档则为 $3\sim 5$ 轴以上。

3. 显示功能

低档数控一般只有简单的数码管显示或简单的阴极射线管（Cathode Ray Tube, CRT）字符显示。中档数控有较齐全的 CRT 显示，不仅有字符，而且还有图形、人机对话、自诊断等功能。高档数控还有三维动态图形显示。

4. 通信功能

低档数控无通信功能。中档数控有直接数控（也称群控）（Direct Numerical Control, DNC）或 RS232 接口。高档数控有制造自动化协议（Manufacturing Automatiom Protocol, MAP）等高性能通信接口，具有联网功能。

5. 主中央处理单元（Central Processing Unit, CPU）

低档数控一般采用 8 位 CPU，中、高档数控已经由 16 位 CPU 发展到 32 位、64 位 CPU，并用具有精简指令集的 RISC 中央处理单元。

此外,进给伺服水平以及 PLC 可编程控制器的功能也是衡量数控档次的标准。

经济型数控是相对于标准数控而言的,不同时期,不同国家含义是不一样的。经济型数控是根据实际机床的使用要求,合理地简化系统功能、降低成本的产物。区别于经济型数控,把功能比较齐全的数控系统称为全功能数控,或称为标准型数控。

第三节 机床数控技术的发展

一、数字控制技术与数控机床的产生和发展

1947年,美国的 Parson 公司在生产直升机机翼检验样板时,为了提高精度和效率,提出了用穿孔卡片来控制机床的方案,这一方案迎合了美国空军为开发航天及导弹产品的需要,于是得到了美国空军的经费支持,开始研究以脉冲方式控制机床各轴的运动,进行复杂轮廓加工的装置。1949年与麻省理工学院(MIT)的伺服机构研究所开始共同研究,到1952年,完成了能进行三轴控制的铣床样机,取名为“Numerical Control”,这就是第一台数控机床,并立即生产了100台。

从此以后,许多厂家开始了数控机床的研制、开发和生产。美国 Keaney&Treckre 公司在1959年开发成功了具有刀库、换刀装置和回转工作台的数控铣床。从此加工中心出现了,并逐步成为数控机床的主力。

数控机床的发展大至经历了以下六个阶段。

第一阶段,1952年由 Parson 公司和麻省理工学院联合研究开发的第一台电子管数控系统。

第二阶段,1960年,出现了晶体管和印刷电路板的数控系统。

第三阶段,1965年,出现了小规模集成电路的数控系统。

第四阶段,1970年,出现了小型计算机数控系统的硬件,并以软件形式实现数控功能的数控系统。

第五阶段,1974年,出现微处理器或微型计算机数控系统。

第六阶段,20世纪90年代后期,出现了 PC+CNC 智能数控系统。以 PC 机为控制系统的硬件部分,Windows NT 为 PC 机的操作系统平台,在 PC 机上安装 NC 软件系统,即为加工中心的控制系统。德国 Roeders 公司生产的 RFM600 型加工中心就是典型的 PC+CNC 系统。PC+CNC 系统的优点集中表现为如下几点。

① 与 PC 硬件的完全通用,使数控系统能随着 PC 技术的升级而升级,系统维护方便。

② 充分共享 PC 丰富的软件资源。

③ 由于 PC 机有标准化的接口,方便地联入局域网及 Internet,易于实现网络化制造。

20世纪80年代以来,数控技术的发展,形成了一批著名的专业生产厂。如德国的西门子、Bosh、Reoders,日本的三菱电机、FANUC,法国的 NUM,西班牙的 FAGOR 等。

二、我国数控技术发展概况

我国于1958年研制出了首台 NC 机床,到1979年为止,由于缺乏技术基础,总体设计实力差,各种机、电、液、气配套基础元件、NC 系统不过关,我国 NC 机床无法正式生产,也无法在生产中正式使用。从1980年起,先后引进日、德、美、西班牙的 CNC 系统,各种 NC 机床,各类机、电、液、气基础元件等进行合作生产,提高了产品的质量,解决了

可靠性问题，由此 NC 机床开始在我国批量生产，并正式用于生产制造。1980 年，我国 NC 机床产量为 692 台，至 1999 年，产量达 9007 台，2000 年超万台，各类 NC 全切机床、成形机床、激光加工机床等在品种上已经系列化。但对于中、高档次的数控机床还得依靠进口。

目前，我国自主开发的比较成功的数控系统有华中 I 型、中华 I 型、航天 I 型、蓝天 I 型四个数控系统平台。以华中 I 型为例，它是典型的 PC+CNC 系统，主要技术特色如下。

- ① 独创的 SDI 曲面直接插补算法。
- ② $1\mu\text{m}$ 、 $24\text{m}/\text{min}$ 高精度高速控制。
- ③ 支持 NT、Novell、Internet 网络。
- ④ 具有 CAD/CAM/CNC 集成化的功能。

我国的数控技术与国际先进水平相比，存在的差距主要表现在两个方面。

其一，数控系统和数控机床的稳定性差，两者与国外产品比较见表 1-1。

表 1-1 国内外数控系统数控机床平均无故障时间

h

国内		国外	
数控系统	数控机床	数控系统	数控机床
$1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$	300	$7 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$	500

其二，我国数控系统成套性差，数控装置、驱动、电机不配套，伺服驱动、主轴驱动的性能和可靠性比国外产品低，高精度、高速度及重型设备数控系统性能、功能比国外产品差。

三、机床数控技术的发展趋势

20 世纪 90 年代开始，数控系统完成了 16 位机向 32 位机转变，伺服驱动从直流向交流全数字式转变，系统体系结构从封闭向开放转变，控制系统由专用计算机向通用计算机转变，从而使数控系统可充分利用计算机技术丰富的资源，能根据控制对象的要求，迅速、灵活地更改软硬件，并能及时吸收新技术，使数控技术的发展步伐加快。数控技术的进步突出表现在高精度、高效率，具有联网通信功能等方面。目前，高档次数控机床的性能参数指标见表 1-2。

表 1-2 高档次数控机床性能参数指标

主控制器	32 位或 64 位微处理器	主轴转速	$6 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4 \text{ r}/\text{min}$	加速度	$2g$ (g 为重力加速度)
进给驱动	交流数字伺服系统	快移速度	$90 \sim 120 \text{ m}/\text{min}$	分辨率	$0.1\mu\text{m}$ 以上
联动轴数	5 轴以上	进给速度	$24 \text{ m}/\text{min}$ 以上	换刀时间	0.4s 以上

概括起来，数控技术主要朝着下面几个方向发展。

① 体系结构开放化。基于 PC 机的开放式体系结构的数控系统已成为发展的主要方向，开放式系统能使各种应用系统有效地运行于不同的平台之上，可以与其他应用系统相互操作，提供与用户交互的统一风格。具有性价比高、维护方便、更新换代和升级快、共享计算机资源以及便于用户的二次开发。

② 控制策略的智能自适应化。智能自适应数控加工具有精度高、生产成本低、简化数控编程工作，容错性能强和提高加工效率的优点，智能自适应数控具有非常突出的工程实用价值。

③ 网络环境下的数字化。由于网络化、数字化进程的加快，使得制造业的市场、资源、

技术和人员的竞争更具全球性，而产品制造的全过程也具有网络化与数字化的特征。在这种环境下，网络数控成为各种先进制造系统的基本单元，是各种先进制造系统的技术基础，它使网络技术与数控技术实现无缝连接是数控技术持续发展的新方向之一。

④ 柔性制造系统（FMS）。它是数控机床的集成，正成为网络化制造与企业集成的核心。FMS系统实现制造单元结构上的快速重组、性能上的快速反应和决策上的优化。

第四节 实现数控机床的有关规定

数控机床控制系统所执行的是数控程序，为了能够掌握数控程序的功能和增强所编程序的通用性，必须掌握数控系统的相关规定，本节主要介绍数控程序编制的有关规定，以及坐标系统和运动方向的相关规定。

一、数控机床程序编制的有关规定

数控程序由程序段组成，每个程序段由若干个代码和数字组成，字母、数字和符号统称字符，字母也称作地址符。下面是一个实际加工程序：

```
N01 G91 G00 X20.0 Y20.0 M03;
N02 G01 Y30.0 F100;
N03 X30.0;
N04 Y-30.0;
N05 X-30.0;
N06 G00 X-20.0 Y-20.0 M05;
N07 M30;
```

上面所举的例子中，编制的程序是按照标准代码编制出来的。数控机床8单位代码标准有两种：美国电子工业协会（Electronic Industries Association, EIA）标准和国际标准化组织（International Standard Organization, ISO）标准。目前许多国家采用的是ISO标准。我国现在规定新产品一律采用ISO代码标准。

该例由七个程序段组成，每个程序段以N开头，用“；”结尾。程序中每个程序段表示一个完整的加工工步或动作，每一个代码都有确定的含义，如M05表示主轴停止。我国制定了标准的G代码，它与国际标准是等效的。但是生产数控机床的厂家都规定了自己的代码标准。因此，当在具体机床上使用这些代码时，一定要认真阅读机床的说明书。

从上面的例子可知，程序段由下列功能字组成：

N	G	X Y Z	F	S	T	M
程序段号	准备功能	坐标值	进给速度	主轴转速	刀具功能	辅助功能

1. 准备功能——G代码

G代码有100个，从G00到G99，在G后面加两位数表示不同的功能，如表1-3所示。G代码是用来规定刀具和工件的相对运动轨迹、机床坐标系、刀具补偿等多种加工操作。G代码根据分组不同有两种形式：一种是模态代码；另一种是非模态代码。表1-3中的a、c、d、e、f、h、i、j、k等各字母所对应的G代码为模态代码，也称续效代码，该代码一旦被执行，则一直到同一组的代码出现或被取消为止都有效。非模态代码只在所在的程序段中有效。表中“不指定”的意思是：标准目前还未指定功能，但以后要利用它这一项来指定功能。“永不指定”的意思是：以后也不会指定，机床厂家可以用这个G代码来指定机床的特

殊功能，不会与以后的 G 代码发生冲突。

表 1-3 G 代码功能

代 码 (1)	模态代码组别 (2)	功 能 (3)	代 码 (1)	模态代码组别 (2)	功 能 (3)
G00	a	点定位	G50	(d)	刀具偏置 0/-
G01	a	直线插补	G51	(d)	刀具偏置 +/0
G02	a	顺时针圆弧插补	G52	(d)	刀具偏置 -/0
G03	a	逆时针圆弧插补	G53	f	直线偏移,注销
G04	#	暂停	G54	f	直线偏移 X
G05		不指定	G55	f	直线偏移 Y
G06	a	抛物线插补	G56	f	直线偏移 Z
G07		不指定	G57	f	直线偏移 XY
G08	#	加速	G58	f	直线偏移 XZ
G09	#	减速	G59	f	直线偏移 YZ
G10~G16		不指定	G60	h	准确定位 1(精)
G17	c	XY 平面选择	G61	h	准确定位 2(中)
G18	c	ZX 平面选择	G62	h	快速定位(粗)
G19	c	YZ 平面选择	G63		攻螺纹
G20~G32		不指定	G64~G67		不指定
G33	a	螺纹切削,等螺距	G68	(d)	刀具偏置,内角
G34	a	螺纹切削,增螺距	G69	(d)	刀具偏置,外角
G35	a	螺纹切削,减螺距	G70~G79		不指定
G36~G39		永不指定	G80	e	固定循环注销
G40	d	刀具补偿/偏置注销	G81~G89	e	固定循环
G41	d	刀具左补偿	G90	j	绝对尺寸
G42	d	刀具右补偿	G91	j	增量尺寸
G43	(d)	刀具正偏置	G92		预置寄存
G44	(d)	刀具负偏置	G93	k	时间倒数,进给率
G45	(d)	刀具偏置 +/+	G94	k	每分钟进给
G46	(d)	刀具偏置 +/-	G95	k	主轴每转进给
G47	(d)	刀具偏置 -/-	G96	i	恒线速度
G48	(d)	刀具偏置 -/+	G97	i	每分钟转数(主轴)
G49	(d)	刀具偏置 0/+	G98~G99		不指定

2. 坐标功能——X Y Z 代码

坐标功能用来设定机床各坐标的位移量，字符后面紧跟“+”或“-”及一串数字，该数字一般以 mm 或系统脉冲当量为单位。一个程序段中有多个尺寸字时，按 X、Y、Z、U、V、W、P、Q、R、A、B、C、D、E 顺序排列。

3. 进给功能——F 代码

进给功能用来指定刀具相对于工件的进给速度。其单位一般为 mm/min。当进给速度与主轴转速有关时，如车螺纹等，进给功能代码以“F”为首，其后跟一串数字代码。如 F120，表示进给速度为 120mm/min。

4. 主轴功能——S 代码

该功能用来指定主轴转速，单位为 r/min，以代码“S”为首，后跟一串数字。如 S10000 表示主轴的转速为 10000r/min。

5. 刀具功能——T 代码

当系统具有换刀功能时，T 代码功能用来指定所需使用的刀具号，以代码“T”为首，