



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

现代机械工程系列精品教材



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材



# Computer Numerical Control Machine Tools and Programming

# 数控机床与编程

主 编 ◎ 郑 堤

第 3 版

副主编 ◎ 张 建 王春海 陈廉清



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
现代机械工程系列精品教材  
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 数控机床与编程

第3版

主 编 郑 堤  
副主编 张 建 王春海 陈廉清  
参 编 梁雅琴 詹建明  
主 审 王先逵



机械工业出版社

本书以实际应用为出发点,在简要介绍数控技术的历史、现状和发展趋势,数控技术原理,数控系统功能与结构原理,以及数控机床的使用、维护与管理的基础上,结合大量工程实例,详细介绍了数控机床的结构与特点,重点介绍了数控机床(包括数控车床、铣床和加工中心)的加工工艺特点、手工编程方法,简要介绍了计算机辅助编程步骤和软件等。

本书兼顾了课堂教学及自学的特点和需要,每章都附有一定数量的习题与思考题,有助于读者加深对本书内容的理解及检验学习效果。

本书配有 CAI 课件,便于采用现代化手段进行教学。

本书可作为高校机械类本科生的专业课或选修课教材,也可供成人教育或数控技术培训使用,还可供从事数控加工与管理的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

数控机床与编程/郑堤主编.—3版.—北京:机械工业出版社,2019.3

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系列精品教材  
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 普通高等教育“十一五”  
国家级规划教材

ISBN 978-7-111-61614-6

I. ①数… II. ①郑… III. ①数控机床-程序设计-高等学校-教材  
IV. ①TG659.022

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 283518 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:刘小慧 责任编辑:刘小慧

责任校对:肖琳 封面设计:张静

责任印制:孙炜

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2019 年 4 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14.5 印张·354 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61614-6

定价:39.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-68326294

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

# 第3版前言

《中国制造2025》战略发展规划的正式颁布与实施，开启了我国智能制造时代的序幕，预示着在未来智能制造系统中将扮演重要角色的数控机床、工业机器人以及其他各种自动化、智能化装置的应用将会越来越普及，需求量将会越来越大。近几年，我国东南沿海制造业比较发达的省份相继提出并实施了“两化融合，机器换人”工程，积极主动地为智能制造的实施铺平道路。因此，数控机床必将成为制造业企业必备的重要生产装备，数控机床与编程技术也必将成为机电类专业人才所必备的专业知识。

本书自2005年第1版问世以来，得到许多高校师生的认可，大约被70余所高校选为机电类专业教材。其间编者于2010年进行了第1次修订，并先后获得普通高等教育“十一五”国家级规划教材、“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材的荣誉。近年来为满足我国制造业发展和企业对应用型人才提出的新要求，编者再次对本书进行修订。

此次修订的主要内容包括：

1) 针对“两化融合，机器换人”和“智能制造”的需要，增加了数控机床与工业机器人等其他自动化装置集成的相关内容，如数控机床联网通信接口、上下料机器人等。

2) 为使读者能够更加直观、形象地阅读和理解相关内容，增加了数控机床及其主要零部件结构的立体图片。

3) 因受学时限制，也为了缩小新版教材的篇幅，删除了“数控机床计算机辅助编程（第六章）”，并把“计算机辅助数控编程简介”作为第五节编入“数控机床的手工编程（第五章）”中。

4) 对第2版中的错误或不当的内容和表达方式进行了更正，对因技术进步导致业已陈旧的内容和数据进行了更新。

参加本书修订工作的有：浙江大学宁波理工学院、宁波大学科技学院郑堤（第一章），浙江大学宁波理工学院詹建明（第六章），广东海洋大学张建（第二章），宁波工程学院陈廉清（第三章），中北大学梁雅琴（第四章，第五章的第一、二节），北华航天工业大学王春海（第五章的第三~五节）。

本书的修订参考了许多公开或未公开发表的相关资料，采纳了许多读者的意见和建议，在此一并表示衷心的感谢。

清华大学王先逵教授对本书提出了宝贵的意见和建议，特此致谢。

限于编者水平，书中疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者  
于宁波

## 第 2 版前言

改革开放以来，特别是进入 21 世纪以来，伴随着我国工业经济的迅速崛起，许多中小企业陆续完成了艰苦的原始积累过程，科技创新意识逐步增强，科技创新投入不断增加，加速了我国制造业从“中国制造”向“中国创造”的转变。蕴含创新成果的高新技术产品需要采用先进制造装备来生产。因此，数控机床开始大量进入中小企业的生产车间，掌握数控技术的应用型人才已经成为企业的迫切需求。为了服务传统产业的转型升级，针对企业需要，培养一大批数控紧缺人才，几乎所有地方普通高校的机电类专业都将数控机床与编程技术作为一门重要的专业课程列入其教学计划。

本书正是为了适应这一经济形势发展的需要，在机械工业出版社的组织和支持下，联合 5 所普通地方高校具有多年数控机床与编程技术教学和科研经验的教师共同编写而成的。本书自 2005 年第 1 版问世以来，由于在体系结构和内容上充分考虑了应用型本科院校的教学特点，具有较明显的特色，尤其是比较适合针对企业的需要进行应用型人才培养，因此受到了各兄弟院校同仁的厚爱，4 年内已有十余所普通地方高校选用本书作为授课教材，另有许多企业工程技术人员选用本书作为自学参考书。本书于 2008 年被教育部列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书的修订，一方面针对编者使用过程中发现的若干不足之处以及因形势发展而需及时更新之处，另一方面充分采纳了读者陆续反馈的一些中肯意见和建议。修订的内容主要包括：1) 对重要概念或名词（如插补、对刀、电主轴等）进行了更加准确、详尽的阐释；2) 按照常用数控系统（如 FANUC）的编程规则对部分数控加工程序实例进行了补充、修改与完善；3) 对不太清楚的插图进行了重绘或替换；4) 对有关数控技术和数控行业发展的数据进行了更新。

参加本书修订工作的有：浙江大学宁波理工学院郑堤（第一、七章）、广东海洋大学张建（第二章）、宁波工程学院陈廉清（第三章）、华北工学院梁雅琴（第四章，第五章一、二节）、北华航天工业学院王春海（第五章三、四节，第六章）。

本书在编写和修订过程中参考了许多已公开或未公开发表的各类有关资料，采纳了许多老师和读者的意见和建议，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中错误、疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

于浙江大学宁波理工学院

# 第 1 版前言

本书是在 2004 年 4 月由中国机械工业教育协会机电类学科教学委员会和机械工业出版社联合举办的应用型高等工程教育机械类专业年会上提出的“21 世纪高校机电类规划教材”之一，由宁波大学、湛江海洋大学、北华航天工业学院、宁波工程学院、华北工学院五所院校合作编写的。

数控机床自 20 世纪 50 年代问世以来，随着微电子技术、集成电路技术、计算机与信息处理技术、伺服驱动技术和精密机械技术的进步而得到迅速发展。目前，数控系统已经经历了从电子管、晶体管、集成电路到小型计算机、微型计算机等五代的演变，正在进入基于工业 PC 的第六代发展阶段；数控机床品种从数控铣床、数控车床发展到各种加工中心机床和柔性制造系统，几乎所有机械制造装备都有相应的数控产品；数控机床的应用已经从大中型企业普及到更加广泛的中小型企业甚至家庭作坊。据资料介绍，2004 年，我国数控机床消费量近 8 万台，机床产值数控化率已达 32.7%；数控机床正在适应技术与经济发展的需要，向智能化、开放化、网络化、高速化、精密化和复合化方向发展。

“数控机床”或“数控技术”课程早在 20 世纪 80 年代就被普遍列入高等学校机械类专业的教学计划，但其教材和教学内容均侧重于数控机床或数控技术的研究，面向数控机床应用的内容则被忽视。随着高等教育大众化时代的到来，以及我国制造业的迅速崛起，对数控机床应用人才的需求更加迫切，更多的高等院校机械类专业毕业生将主要从事数控机床的应用与管理。据资料介绍，我国近几年数控应用专业人才的缺口高达几十万人，而且随着制造业信息化的不断向前推进，需求数量还将进一步扩大。针对这种社会需求的变化，有必要进一步加强数控机床应用人才的培养，在有关数控机床的课程中强调实用性知识的讲授，并在数控机床教材中加强实用性知识的介绍。本书就是基于上述需要而编写的。

本书共分七章。第一章介绍数控技术与数控机床的基本概念、原理、特点、分类等，以及数控机床的发展历史、现状与趋势；第二章介绍数控系统及数控装置的结构与工作原理；第三章介绍数控机床的机械结构；第四章介绍数控加工与编程基础；第五章介绍数控机床手工编程的原理及方法；第六章介绍数控机床计算机辅助编程原理及方法；第七章介绍数控机床的购置、使用与维护保养。本书内容丰富，深入浅出，既注意与先修课程的衔接，又避免相互重复，并将侧重点放在了实际应用上。本书还有配套的 CAI 课件，以便于教学。

参加本书编写的有：宁波大学郑堤（第一章）、广东海洋大学张建（第二章）、北华航天工业学院王春海（第五章第三、四节，第六章）、宁波工程学院陈廉清（第三章）、华北工学院梁雅琴（第四章，第五章第一、二节）、宁波大学潘晓彬（第七章）。本书由郑堤担任主编，张建、王春海、陈廉清担任副主编，上海理工大学李郝林教授担任主审。

本书在编写过程中参考了许多已公开出版或未公开出版的有关资料，在此向这些资料的作者致以衷心的感谢。

限于编者水平，书中错误、疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者  
于宁波大学

# 目 录

第3版前言

第2版前言

第1版前言

第1章 绪论	1
1.1 数控技术基本概念与原理	1
1.2 数控机床	2
1.3 数控机床的发展	8
习题与思考题	14
第2章 数控系统及工作原理	15
2.1 概述	15
2.2 数控插补原理	21
2.3 数控补偿原理	30
2.4 位移与速度检测	36
2.5 伺服驱动与控制	43
2.6 CNC 装置	60
2.7 CNC 系统中的可编程序控制器 (PLC)	71
习题与思考题	77
第3章 数控机床的机械结构	79
3.1 数控机床的结构和性能要求	79
3.2 常见数控机床的布局	81
3.3 数控机床的主传动系统及主轴组件	87
3.4 进给系统的机械传动机构	95
3.5 数控机床的床身与导轨	107
3.6 数控机床的刀库与换刀装置	110
3.7 数控机床回转工作台	119
3.8 数控加工用辅助装置	126
习题与思考题	130
第4章 数控加工与编程基础	132
4.1 数控加工工艺特点	132
4.2 数控加工工艺分析与设计	133
4.3 数控加工的格式与标准数控代码	141
4.4 数控编程中的数值计算	155
习题与思考题	161

第 5 章 数控机床的手工编程	162
5.1 手工编程的特点、方法与步骤	162
5.2 数控车床的手工编程	163
5.3 数控铣床的手工编程	173
5.4 加工中心的手工编程	182
5.5 计算机辅助数控编程简介	195
习题与思考题	199
第 6 章 数控机床的购置、使用与维护	202
6.1 数控机床的购置	202
6.2 数控机床的使用与管理	207
6.3 数控机床的维护与保养	211
习题与思考题	219
参考文献	221

# 第1章

## 绪论

### 1.1 数控技术基本概念与原理

数字控制技术，简称数控技术（Numerical Control, NC），是采用数字指令信号对机电产品或设备进行控制的一种自动控制技术。数控技术与传统的设备自动控制技术的一个显著区别在于，数控技术不仅具有顺序逻辑控制功能，而且更重要的是具有关于运动部件位置的坐标控制功能，即具有采用数字指令信号对设备的坐标运动进行控制的功能。

数控技术的基本原理是，将被控设备末端执行部件的运动（或多个末端执行部件的合成运动）纳入到适当的坐标系中，将所要求的复杂运动分解成各坐标轴的简单直线运动或回转运动，并用一个满足精度要求的基本长度单位（Basic Length Unit, BLU）对各坐标轴进行离散化，由电子控制装置（即数控装置）按数控程序规定的运动控制规律产生与基本长度单位对应的数字指令脉冲对各坐标轴的运动进行控制，并通过伺服执行元件加以驱动，从而实现所要求的复杂运动。

数控技术的核心是插补与驱动。插补装置的功用是将期望的设备运动轨迹沿各坐标轴微分成具有与运动轨迹相应时序的基本长度单位，并转换成可控制各坐标轴运动的数字指令脉冲序列。驱动装置是指伺服驱动系统，其功用是将插补装置输出的数字指令脉冲进行转换与放大，驱动执行元件，实现由数字指令脉冲序列规定的坐标运动，并最终由各坐标运动合成所期望的运动轨迹。对应于插补装置输出的每一个数字指令脉冲，伺服驱动系统末端执行部件所实现的理论位移被称为脉冲当量，它是系统所能控制的最小位移，又称系统的控制分辨率，一般取为基本长度单位。

早期数控功能是采用硬件数字电路实现的。现代数控功能均采用微型计算机来实现，因此又称为计算机数字控制技术，简称计算机数控（Computer Numerical Control, CNC）。计算机数控技术属于先进制造技术，是现代制造业实现柔性自动化的基础，也是计算机集成制造（Computer Integrated Manufacturing, CIM）、智能制造（Intelligent Manufacturing, IM）、虚拟制造（Virtual Manufacturing, VM）等先进制造技术或生产模式的基础。

计算机数控技术广泛应用于各种机电产品或设备的控制，如各种数控机床（CNC Machine Tools）、三坐标测量机（Coordinate Measuring Machines, CMM）、工业机器人（In-

dustrial Robots, IR)、绘图机 (Drawing Machines)、3D 打印机 (3D Printers) 等均采用数控技术原理进行运动控制。

## 1.2 数控机床

### 1.2.1 数控机床的组成与工作原理

数控机床是采用数控技术对工作台运动和切削加工过程进行控制的机床, 是典型的机电一体化产品, 是数控技术的最典型应用。典型数控机床的组成如图 1-1 所示, 包括程序编制、数控装置、伺服驱动系统、强电控制系统、检测反馈系统和机床本体六大组成部分, 其中数控装置与伺服驱动系统、强电控制系统、检测反馈系统又合称为数控系统。

实际上, 程序编制并非数控机床的物理组成部分。但从逻辑上讲, 数控机床的加工过程必须按数控加工程序的规定进行, 数控加工程序编制是数控机床加工的一个重要环节。因此, 常将采用数控指令系统所进行的数控加工程序编制列入数控机床的组成部分。数控装置是数控机床的运算和控制系统, 目前均采用微型计算机及其外设和各种接口电路实现。伺服驱动系统负责将数控装置输出的控制指令信号

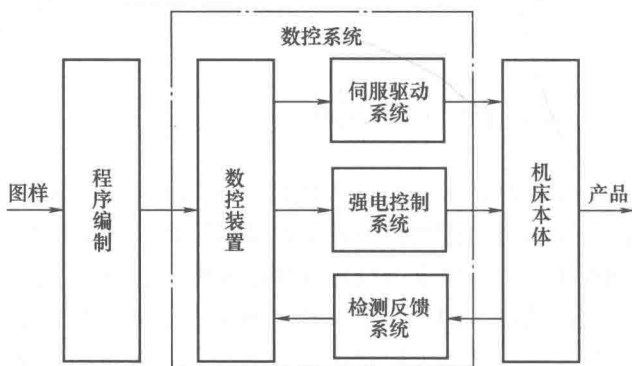


图 1-1  
典型数控机床组成框图

放大, 并驱动机床工作台按照程序规定的轨迹运动, 其输入为电信号, 输出为机床的位移、速度和力。强电控制系统是介于数控装置和机床的机械与液压部件之间的各种开关执行电器的控制系统, 主要实现各种辅助功能控制 (如机床起停、换刀、切削液开关等控制), 目前多由数控装置内置的可编程机床控制器 (Programmable Machine Controller, PMC) 来实现。机床本体是实现切削加工的主体, 对加工过程起支撑作用, 数控机床的精度、精度保持性、刚度、抗振性、低速运动平稳性、热稳定性等主要性能均取决于机床本体。检测反馈系统负责将机床各坐标轴的实际位移检测出来, 并将其反馈到数控装置与程序规定的指令位移相比较, 以实现闭环反馈控制, 提高加工精度。开环控制的数控机床, 没有检测反馈系统。

在数控机床上加工零件时, 首先应根据零件图样的要求, 结合所采用的数控机床的功能、性能和特点, 确定合理的加工工艺, 编制相应的数控加工程序, 并采用适当的方式将程序输入到数控装置。在数控机床加工过程中, 数控装置对数控加工程序进行编译、运算和处理, 输出坐标控制指令到伺服驱动系统, 顺序逻辑控制指令到 PMC, 通过伺服驱动系统和 PMC 驱动机床刀具或工件按照数控加工程序规定的轨迹和工艺参数运动, 从而使机床精确地加工出符合图样要求的零件。

## 1.2.2 数控机床的分类

数控技术与数控机床同步产生，同步发展。世界上最早出现的数控机床是一台三坐标数控铣床，诞生于1952年。之后，随着数控技术的不断发展、完善和广泛应用，数控机床的种类日益繁多。为便于研究和使用的，人们从不同的角度将数控机床分成不同的类型，常见的有下述几种分类方法。

### 1. 按数控机床的加工工艺分类

根据数控机床的加工工艺不同，并与传统机床的称谓相对应，可将数控机床分为数控车床、数控铣床、加工中心、数控钻床、数控磨床、数控镗床、数控剪板机、数控折弯机、数控电加工机床、数控三坐标测量机等，其中加工中心可将多种工艺内容集中在同一台机床上实现，具有自动换刀功能，可在工件一次装夹后连续自动地完成铣削、钻削、镗削、铰孔、扩孔、攻螺纹等多道工序的加工。常见的加工中心有车削加工中心和镗铣类加工中心。为了缩短上下料辅助时间，提高加工效率，便于进入自动化生产系统，越来越多的加工中心配置了自动更换工作台功能。

### 2. 按数控机床运动轨迹控制方式分类

按数控机床运动轨迹的控制方式可将数控机床分成点位控制和连续控制两大类。

(1) 点位控制数控机床 点位控制数控机床的特点是，只要求控制刀具相对于工件在机床加工空间内从某一加工点运动到另一加工点的精确坐标位置，而对两点之间的运动轨迹原则上不进行控制，且在运动过程中不作任何加工，如图1-2所示。典型的点位控制数控机床有数控钻床、数控镗床、数控冲床等。这类机床无须插补器，其基本要求是定位精度、定位时间和移动速度，对运动轨迹无精度要求。

(2) 连续控制数控机床 连续控制数控机床的特点是，不仅要求控制刀具相对于工件在机床加工空间内从某一点运动到另一点的精确坐标位置，而且要求对两点之间的运动轨迹进行精确控制，且能够边移动边加工，如图1-3所示。典型的连续控制数控机床有数控车床、数控铣床、加工中心、数控激光切割机床等。这类机床用于加工二维平面轮廓或三维立体轮廓，因此又称为轮廓控制数控机床。这类机床的数控系统带有插补器，以精确实现各种曲线或曲面的加工。

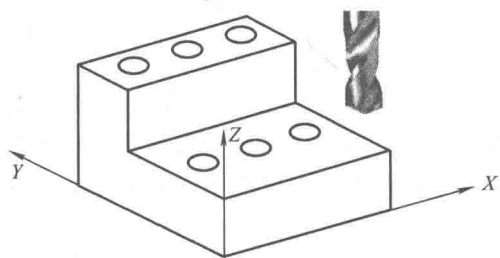


图 1-2

数控钻床点位控制示意图

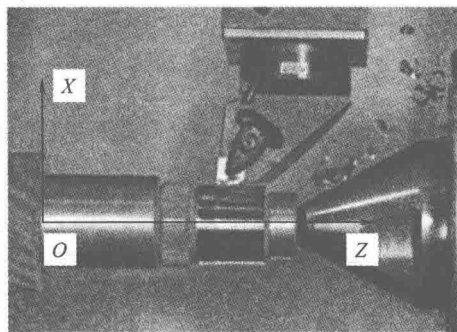


图 1-3

数控车床连续控制示意图

### 3. 按伺服系统控制方式分类

按所采用的伺服系统控制方式不同,可将数控机床分成开环、闭环和半闭环控制数控机床三类。

(1) 开环控制数控机床 开环控制的数控机床上没有位置检测与反馈装置,数控系统仅按照数控加工程序的规定发出位置控制指令信号,而对机床的实际执行情况不加任何检测,因此机床结构简单、成本低,但加工精度也低。这类机床一般是负载不大、精度不高的经济型数控机床,常采用步进电动机或电液步进电动机作为执行元件,其结构如图 1-4 所示。

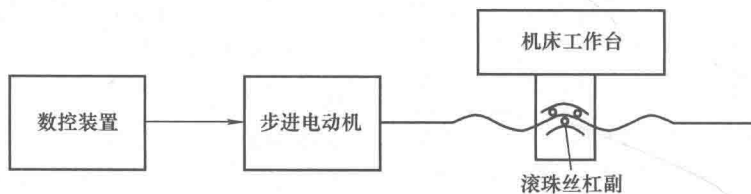


图 1-4

开环控制数控机床

(2) 闭环控制数控机床 闭环控制数控机床上有完善的位置检测与反馈装置,直接对机床末端执行部件的实际位置进行检测与反馈,并根据指令位置与实际位置的偏差对机床运动进行控制,因此机床加工精度高,但结构复杂、成本高。这类机床一般是负载较大的大型或重型数控机床或高精度数控机床,常采用直流或交流伺服电动机、伺服液压缸或液压马达作为执行元件,其结构如图 1-5 所示。

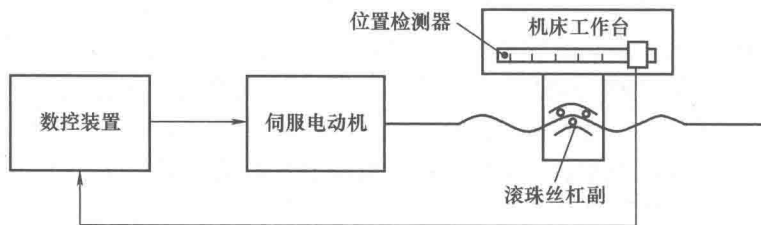


图 1-5

闭环控制数控机床

(3) 半闭环控制数控机床 半闭环控制数控机床是介于开环和闭环控制数控机床之间的一类机床,其控制原理与闭环控制数控机床相同,所不同的是其检测元件不直接检测机床末端执行部件的实际位置,而是通过对执行元件的输出或伺服传动机构中间某个环节的输出进行检测,依据检测点到末端执行部件的传动关系推算出末端执行部件的实际位置,其结构如图 1-6 所示。这类数控机床与闭环控制的数控机床一样采用了闭环反馈控制,但由于检测元件所安装的位置不同而将机械系统的大部分机构封闭在反馈控制环之外,因此机床结构和伺服控制系统的复杂程度、加工精度与成本等均介于开环和闭环控制数控机床之间,是目前应用最广、数量最大的一类数控机床,目前企业中使用的大部分全功能数控机床均为半闭环控制的数控机床。

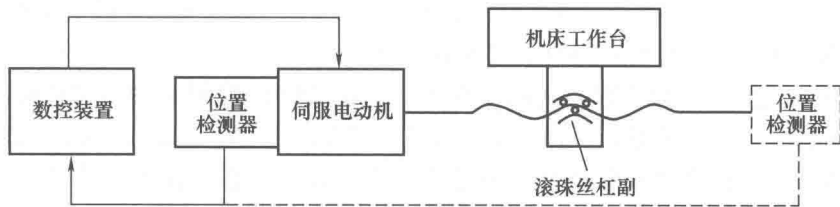


图 1-6

半闭环控制数控机床

#### 4. 按数控机床功能强弱分类

按功能强弱可将数控机床分为经济型数控机床、全功能数控机床和高端数控机床。

(1) 经济型数控机床 经济型数控机床又称简易数控机床，主要采用功能较弱、价格低廉的经济型数控装置，多为开环控制，其机械结构与传统机床结构差异不大，刚度与精度均较低。由于这类机床经济性好，因此在我国中小企业应用广泛。目前国产数控仪表机床多为经济型数控机床，有些企业还以自用为目的，采用经济型数控装置对传统机床进行适当改造，获得经济型数控机床。经济型数控机床的脉冲当量一般在  $0.001\sim 0.01\text{mm}$  范围内。

(2) 全功能数控机床 全功能数控机床又称普及型数控机床，采用功能完善、价格较高的数控装置（如日本的 FANUC、德国的 SIEMENS 以及国产的广州 GSK、华中 HNC 等系统中的中高端数控装置等），采用闭环或半闭环控制，直流或交流伺服电动机驱动，在机械结构设计上充分考虑了强度、刚度、抗振性、低速运动平稳性、精度、热稳定性和操作宜人等方面的要求，能实现高速、强力切削或高精度产品加工。这类机床是企业生产中的关键设备，随着我国制造业的迅速发展，在企业中得到了越来越普遍的应用。全功能数控机床的脉冲当量一般在  $0.1\sim 1\mu\text{m}$  范围内。

(3) 高端数控机床 高端数控机床是指五轴以上闭环联动控制、能加工复杂形状零件的数控机床，或者工序高度集中、具备高度柔性、智能化的数控机床，或者可进行超高速、精密、超精密甚至纳米加工的数控机床，这类机床性能很好，但价格也很高，以往仅用在特别需要的场合，近年来在我国制造业快速发展的驱动下，高端数控机床的需求呈快速上升趋势。高端数控机床的脉冲当量一般为  $0.1\mu\text{m}$ ，甚至更小。

#### 5. 按控制联动坐标轴数分类

按所能控制联动坐标轴数目的不同，数控机床还可分成两坐标、三坐标、四坐标和五坐标等数控机床。两坐标数控机床主要用于加工二维平面轮廓；三坐标数控机床主要用于加工三维立体轮廓；四坐标和五坐标数控机床主要用于加工空间复杂曲面、特殊零件型面或结构复杂、精度要求高、难加工的箱体类零件。

### 1.2.3 数控机床的特点

数控机床既不同于自动化的程序控制专用机床和仿型机床，也不同于手工操作的通用机床，它实际上是可编程的、具有坐标控制功能和顺序逻辑控制功能的柔性自动化通用机床。在数控机床上加工不同的零件时，只需根据不同零件图样要求编制相应的零件数控加工程序，并将程序输入到数控机床，则数控机床就可不同程序的控制下加工出不同的零件。数控机床加

工一般不需要复杂工装,因此特别适合单件小批、形状复杂、精度要求高的零件加工。

与传统机床相比,数控机床具有下述显著特点:

(1) 自动化程度高 数控机床上的零件加工是在程序的控制下自动完成的。在零件加工过程中,操作者只需完成装卸工件、装刀对刀、操作键盘、起动加工、加工过程监视、工件质量检验等工作,因此劳动强度低,劳动条件明显改善。数控机床是柔性自动化加工设备,是制造装备数字化、智能化的主角,是计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)、柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)、计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)、智能制造系统(Intelligent Manufacturing System, IMS)等柔性自动化制造系统的重要底层设备。

(2) 加工精度高 数控机床的控制分辨率高,机床本体强度、刚度、抗振性、低速运动平稳性、精度、热稳定性等性能均很好,具有各种误差补偿功能,机械传动链很短,且采用闭环或半闭环反馈控制,因此本身具有较高的加工精度。由于数控机床的加工过程自动完成,排除了人为因素的影响,因此加工零件的尺寸一致性好、合格率高、质量稳定。

(3) 生产率高 一方面,数控机床主运动速度和进给运动速度范围大且无级调速,快速空行程速度高,结构刚性好,驱动功率大,可选择最佳切削用量或进行高速强力切削,与传统机床相比,切削时间明显缩短;另一方面,数控机床加工可免去划线、手工换刀、停机测量、多次装夹等加工准备和辅助时间,从而明显提高生产效率。此外,有些数控机床采用双工作台结构,使工件装卸的辅助时间与机床的切削时间重合,进一步提高了生产效率。

(4) 对工件的适应性强 数控机床具有坐标控制功能,配有完善的刀具系统,可通过数控编程加工各种形状复杂的零件,还可通过主运动和进给运动速度的合理匹配适应多种难加工材料零件的加工。数控机床属于柔性自动化通用机床,在不需对机床和工装进行较大调整的情况下,即可适应各种批量的零件加工。

(5) 有利于生产管理信息化 数控机床按数控加工程序自动进行加工,可以精确计算加工工时、预测生产周期,所用工装简单,采用刀具已标准化,因此有利于生产管理的信息化。现代数控机床正在向智能化、开放化、网络化方向发展,可将工艺参数自动生成、刀具破损监控、刀具智能管理、故障诊断专家系统、远程故障诊断与维修等功能集成到数控系统中,并可在计算机网络和数据库技术支持下将多台数控机床集成为柔性自动化制造系统,为企业制造信息化、“机器换人”工程、智能制造提供底层设备基础。

#### 1.2.4 数控机床坐标系

数控机床最重要的功能是坐标控制功能。数控机床坐标系是设计、制造和使用数控机床的基础。为了统一数控机床的坐标系以便于数控机床的设计与制造,保证同类数控机床零件加工程序的通用性以便于数控机床的应用,国际标准化组织于1974年制定了有关数控机床坐标系的国际标准ISO 841—1974(2006年该标准更新为ISO 841—2006)。与该国际标准等效,我国于1999年颁布了行业标准JB/T 3051—1999《数控机床坐标和运动方向的命名》。下面简要介绍标准中有关数控机床坐标系的规定及坐标轴的确定方法。

##### 1. 数控机床坐标系

数控机床坐标系采用右手笛卡儿直角坐标系,如图1-7所示。该坐标系规定了 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个相互垂直的直线坐标轴和分别绕三个直线坐标轴回转的回转坐标轴 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 。坐标系中

各坐标轴应与机床各主要导轨平行,坐标轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的正向采用右手定则确定,坐标轴  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的正向采用右手螺旋定则确定。

通常在命名数控机床坐标系时,总是假定工件不动,刀具相对于工件运动,则坐标系用  $XYZABC$  表达;若刀具不动,工件相对于刀具运动,则相应的坐标系用  $X'Y'Z'A'B'C'$  来表达。两种坐标系中的正运动方向正好相反。

数控机床在设计、制造和使用过程中涉及几种不同的坐标系,分别是机床坐标系、工件坐标系、绝对坐标系和相对坐标系、附加坐标系等。

(1) 机床坐标系 机床坐标系是机床上固有的坐标系,并设有固定的坐标原点,称为机床零点或机械零点。该坐标系由数控机床制造商提供,机床出厂时该坐标系就已确定,用户不能轻易修改。该坐标系与机床的位置检测系统相对应,是数控机床的基准,机床每次上电开机后,应首先使运动部件返回机床零点,对机床坐标系进行校准。

(2) 工件坐标系 工件坐标系可以任意设置,它是为方便编程和加工由编程人员在编制零件数控加工程序时设置的,不同的零件或不同的编程人员可以根据习惯或工艺特点而采用不同的工件坐标系。工件坐标系的设置主要考虑工件形状、工件在机床上的装夹方法以及刀具加工轨迹计算等因素,一般以工件图样上某一固定点为原点,沿平行于各装夹定位面设置各坐标轴,按工件坐标系中的尺寸计算刀具加工轨迹并编程。加工时,通过对刀和坐标系偏置等操作建立起工件坐标系与机床坐标系的关系,将工件坐标系置于机床坐标系中,如图 1-8 所示,其中  $XOY$  为机床坐标系,  $X_1O_1Y_1$  为工件坐标系。数控装置则根据两个坐标系的相互关系将加工程序中的工件坐标系坐标转换成机床坐标系坐标,并按机床坐标系坐标对刀具的运动轨迹进行控制。因此,采用工件坐标系进行编程时,可以不考虑加工时所采用的具体机床的坐标系及工件在机床上的装夹位置,为编程人员带来很大方便。

(3) 绝对坐标系和相对坐标系 绝对坐标系是指刀具运动轨迹上所有点的坐标值均从某一固定坐标原点计量的坐标系。相对坐标系(又称增量坐标系)是指刀具运动轨迹的终点坐标是相对于起点计量的坐标系。绝对坐标系和相对坐标系是为了编程方便而采用的,可通过标准数控代码  $G90$ (绝对坐标指令代码)和  $G91$ (相对坐标指令代码)进行转换。在图 1-9 中,若  $A$  点为刀具起点,  $B$  点为刀具终点,采用绝对坐标系时,坐标系原点在  $O$  点,编程终点坐标为  $X_B=12$ ,  $Y_B=15$ ;采用相对坐标系时,坐标原点在  $O_1(A)$  点,编程终点坐标为  $X_{1B}=-18$ ,  $Y_{1B}=-20$ 。

(4) 附加坐标系 如果机床在主坐标系  $XYZABC$  的坐标运

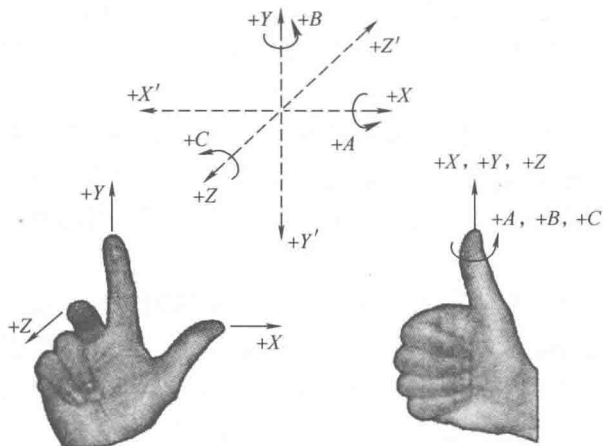


图 1-7

数控机床坐标系

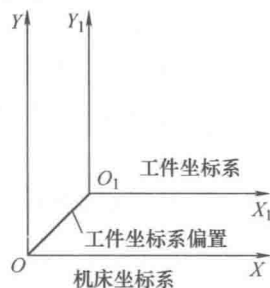


图 1-8

机床坐标系与工件坐标系的相互关系

动之外还有与之平行的坐标运动,则可分别用 $U$ 、 $V$ 、 $W$ 、 $P$ 、 $Q$ 、 $R$ 来指定相应的坐标轴,构成附加坐标系 $UVW PQR$ 。附加坐标系一般仅在大型数控机床上出现。

## 2. 数控机床坐标轴的确定

在使用数控机床编制数控加工程序时,应首先了解机床坐标系及其各坐标轴的运动方向。一般情况下,可根据机床使用说明书或按相关标准来确定。下面简要介绍一般的确定方法。

(1)  $Z$ 轴及其方向 对于有主轴的机床,如车床、铣床、钻镗床等, $Z$ 轴与主轴轴线平行;对于没有主轴的机床,如刨床等,或多主轴机床,如龙门式轮廓铣床等, $Z$ 轴与工件装夹面(即工作台面)的法线平行。

使刀具远离工件或使工件尺寸增大的运动方向为 $Z$ 轴的正方向。

由于 $Z$ 轴特征明显,容易识别,故一般应首先确定 $Z$ 轴及其方向。

(2)  $X$ 轴及其方向  $X$ 轴一般位于与主轴轴线垂直或与工件装夹面平行的水平面内。

在工件旋转的机床上,如车床等, $X$ 轴垂直于主轴轴线且平行于横向滑板,使刀具远离工件或使工件尺寸增大的运动方向为 $X$ 轴的正方向。

在刀具旋转的机床上,若主轴是水平的,如卧式铣床等,则逆着 $Z$ 轴正向由刀具(主轴)向工件看, $X$ 轴的正向指向右边;若主轴是垂直的,如立式铣床等,则由刀具向立柱看, $X$ 轴的正向指向右边。

(3)  $Y$ 轴及其方向  $Y$ 轴及其方向可在已经确定好 $Z$ 轴和 $X$ 轴的基础上,按右手定则来确定。

图1-10~图1-12给出了几种常见机床的坐标系,其中 $XYZ$ 为刀具相对于工件运动的坐标系, $X'Y'Z'$ 为工件相对于机床运动的坐标系。对于立式和卧式加工中心,可分别参照立式铣床和卧式镗铣床来确定坐标系。

对于立式和卧式加工中心,可分别参照立式铣床和卧式镗铣床来确定坐标系。

## 1.3 数控机床的发展

### 1.3.1 数控机床发展简史

数控技术起源于美国,起因于军工发展的需要。1948年,美国人帕森斯(John Parsons)提出了采用穿孔卡片存储机床坐标位置信息并控制机床按坐标位置进行工件表面轮廓加工的设计。基于这一设想,帕森斯作为经理的美国帕森斯公司(Parsons Co.)于

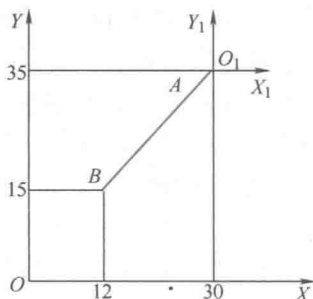


图 1-9

绝对坐标系与相对坐标系

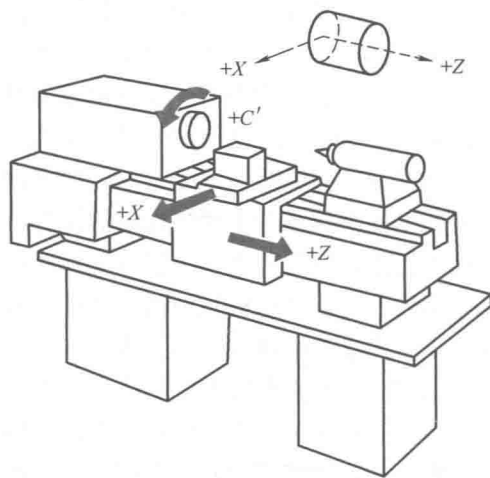


图 1-10

车床坐标系

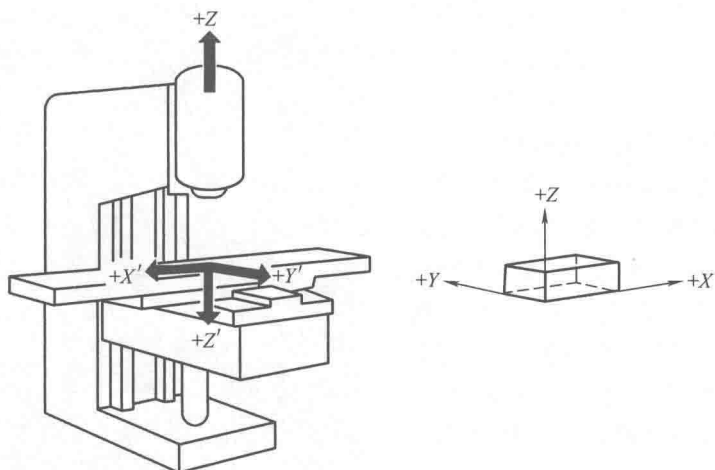


图 1-11

立式铣床坐标系

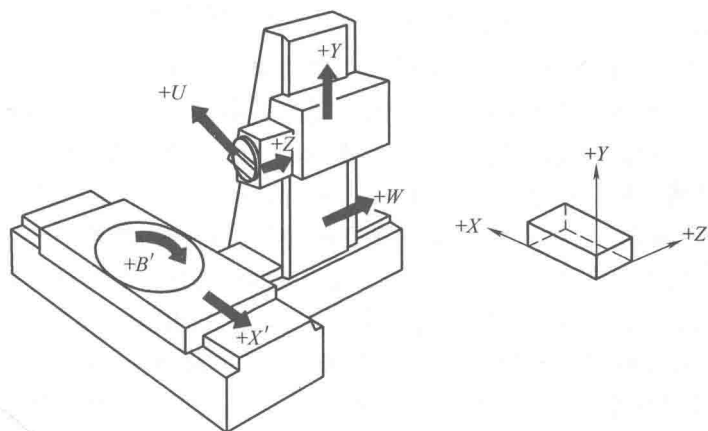


图 1-12

卧式镗铣床坐标系

1949年承担了为美国空军研究开发直升机螺旋桨叶轮轮廓检验样板加工机床的任务。在麻省理工学院伺服机构实验室（Servo Mechanism Laboratory of the Massachusetts Institute of Technology）的合作下，经过三年的研究，于1952年试制成功世界上第一台数控机床，这是一台采用穿孔带作为输入介质、按脉冲乘法器直线插补原理进行三坐标连续控制的铣床，其数控装置采用电子管元件制造，体积比机床本体还大，如图1-13所示。

自第一台数控机床问世之后，数控技术在机械制造领域得到迅速推广，目前几乎所有的机床生产厂商都在生产数控机床，数控机床的品种也由数控铣床发展到数控车床、加工中心、数控冲压机床、数控剪板机、数控折弯机、数控切割机，几乎所有传统生产装备都有相应的数控产品；此外，由于数控技术的应用，许多过去没有的新装备也在不断涌现，如数控三坐标测量机、数控绘图机、3D打印机、工业机器人等。