



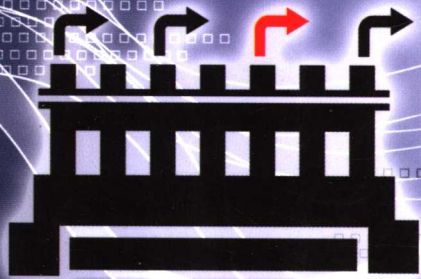
21世纪高等职业技术教育 机电一体化专业规划教材  
数控技术

# 数控机床结构

## 原理与应用

■ 主编 陈子银 陈为华

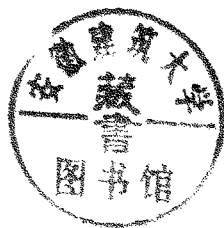
Shukong jichuang jiegou  
yuanli yu yingyong



21 世纪高等职业技术教育机电一体化·数控技术专业规划教材

# 数控机床结构 原理与应用

主 编 陈子银 陈为华  
副主编 黄美英



 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本教材以培养技能型人才为依据,根据目前企业单位的用人需求而编写,介绍了数控机床的基础知识、检测装置、数控系统与插补、伺服系统、机械结构、常用数控机床及附件、工业机器人、柔性制造系统、计算机集成制造系统、通信以及检测调试与维护等内容。全书按照常用数控机床基本构成、先进制造技术、通信及调试与维护几个部分来讲述,内容全面、综合,深入浅出,既考虑到目前数控机床应用的实际情况,又考虑到数控机床的发展趋势。

本书适于作为数控技术、机电一体化、机械制造及自动化、模具设计与制造等专业教学和技能考核培训用书,也可作为各本科院校教学参考书以及工厂操作、编程、设计与维修等技术工人的自学参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

数控机床结构 原理与应用 / 陈子银, 陈为华主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2006. 8

ISBN 7-5640-0775-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 081135 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 27.75

字 数 / 550 千字

版 次 / 2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 3000 册

定 价 / 32.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 李绍英

---

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

# 出版说明

当前，高度发达的制造业和先进的制造技术已经成为衡量一个国家综合经济实力和科技水平的重要标志之一，成为一个国家在竞争激烈的国际市场上获胜的关键因素。

如今，中国已成为制造业大国，但还不是制造业强国。我们要从制造业大国走向制造业强国，必须大力发展以数控技术为主的先进制造技术，提高计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）的技术水平。

制造业要发展，人才是关键。尽快培养一批高技能人才和高素质劳动者，是先进制造业实现技术创新和技术升级的迫切要求。高等职业教育既担负着培养高技能人才的任务，也为自身的发展提供了难得的机遇。

为适应制造业的深层次发展和数控技术的广泛应用，根据高等职业教育发展与改革的新形势，北京理工大学出版社组织知名专家、学者，与生产制造企业的技术人员反复研讨，以教育部《关于加强高职高专人才培养工作的若干意见》等文件对高职高专人才培养的要求为指导思想，确立了“满足制造业对人才培养的需求，适应行业技术改革，紧跟前沿技术发展”的思路，编写了这套高职高专教材。本套教材力图实现：以培养综合素质为基础，以能力为本位，把提高学生的职业能力放在突出位置，加强实践性教学环节，使学生成为企业生产服务一线迫切需要的高素质劳动者；以企业需求为基本依据，以就业为导向，增强针对性，又兼顾适应性；课程设置和教学内容适应技术发展，突出机电一体化、数控技术应用专业领域的新知识、新技术、新工艺和新方法；教学组织以学生为主体，提供选择和创新的空間，构建开放、富有弹性、充满活力的课程体系，适应学生个性化发展的需要。

本套教材的主要特色有：

1. 借鉴国内外职业教育先进教学模式，顺应现代职业教育教学制度的改革趋势；
2. 以就业为导向，进行了整体优化；
3. 理论与实践一体化，强化了知识性和实践性的统一。

本套教材适合于作为高职高专院校机电一体化、数控技术、机械制造及自动化、模具设计与制造等专业的课程教学和技能培训用书。

北京理工大学出版社

# 前 言

本书是根据国家教育部数控技术应用专业技能紧缺型人才培养方案与劳动和社会保障部制定的有关国家职业标准及相关的职业技能鉴定规范,结合编者多年的教学实践经验编写而成。

随着我国工业化进程的加速、产业结构的调整和升级,数控技术在现代企业大量应用,使制造业朝着数字化的方向迈进。同时经济发展对高素质技能人才的需求不断上升,当前急需一大批能够熟练掌握数控技术基本知识和能力的数控应用型高素质人才。

数控技术已开始在各个领域普及,而数控技术在制造业的应用比较成熟并诞生了新型的机电一体化产品——数控机床。目前,数控机床正以其精度高、效率高、操作方便等独特优点在工厂中广泛应用,大有取代传统机床的趋势。

基于目前数控教学的特点,编者根据多年的一线操作和教学经验,并借鉴一直在机加工岗位从事操作人员的经验,编写了《数控机床结构 原理与应用》一书。

本书共 11 章,全面细致地介绍了数控机床的相关基础知识、数控机床的检测装置(主要有编码器、光栅、磁栅、感应同步器、旋转变压器和测速发电机)、数控系统相关知识和插补原理(逐点比较法、数字积分法)、数控机床的伺服系统、常用数控机床及附件、数控机床典型机械结构、工业机器人、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统、数控机床的通讯以及数控机床检测调试与维护。

本书在编写时注意了既保证所介绍内容的系统性、新颖性和实用性,又体现精简的原则;既注重知识的传授,又强调思考及分析问题的方法,本书取材新颖,内容由浅入深、循序渐进,图文并茂,实例丰富,着重于应用;理论部分突出简明性、系统性、实用性和先进性。

本书由江苏联合职业技术学院徐州机电分院的陈子银老师和盐城技师学院陈为华老师主编。其中第1、2章由徐州机电分院黄美英编写；第3、7、8、9、10章由徐州机电分院陈子银编写；第4章由徐州机电分院崔广军编写；第5章由徐州机电分院崔广军、陈子银共同编写；第6、11章由徐州机电分院王东斌、陈子银共同编写。另外，本书在编写中得到了武汉华中数控股份有限公司潘安远工程师的大力支持和技术指导，徐州机电分院屈新安校长、任国兴主任、王慎南主任和胥继伟书记的大力支持和帮助；同时得到了操作一线的数控车床操作工、数控铣床操作工、加工中心操作工和电切工等技师、高级技师传授的宝贵经验；此书的资料提供者，主要有张星、韩腾、赵荣幸、张春梅、陈海荣等同志，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中错误缺点在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

# 目 录

<b>第 1 章 数控机床的基础知识</b> .....	(1)
1.1 数控机床的产生与发展趋势 .....	(2)
1.2 数控机床的工作原理与分类 .....	(8)
1.3 数控机床坐标系 .....	(14)
1.4 数控机床的主要指标 .....	(18)
本章小结 .....	(29)
思考与练习题 .....	(30)
<b>第 2 章 数控机床检测装置</b> .....	(31)
2.1 概述 .....	(32)
2.2 编码器 (码盘) .....	(34)
2.3 光栅 .....	(40)
2.4 磁栅 .....	(45)
2.5 感应同步器 .....	(48)
2.6 旋转变压器 .....	(53)
2.7 测速发电机 .....	(55)
2.8 激光在机床位置检测上的应用 .....	(56)
本章小结 .....	(58)
思考与练习题 .....	(59)
<b>第 3 章 数控系统与插补原理</b> .....	(60)
3.1 数控系统基本原理 .....	(60)
3.2 数控系统硬件 .....	(81)
3.3 数控系统软件 .....	(84)
3.4 可编程控制器 (PLC) 介绍 .....	(87)
3.5 数据处理 .....	(94)



3.6	插补 .....	(103)
3.7	逐点比较法 .....	(106)
3.8	数字积分法 .....	(118)
3.9	数据采样插补法 .....	(122)
	本章小结 .....	(125)
	思考与练习题 .....	(125)
<b>第4章</b>	<b>伺服系统 .....</b>	<b>(128)</b>
4.1	伺服系统的组成与分类 .....	(128)
4.2	步进电动机 .....	(135)
4.3	伺服电动机 .....	(140)
	本章小结 .....	(145)
	思考与练习题 .....	(145)
<b>第5章</b>	<b>数控机床典型机械结构 .....</b>	<b>(146)</b>
5.1	数控机床机械结构的特点 .....	(147)
5.2	数控机床的主传动系统 .....	(148)
5.3	数控机床的进给传动系统 .....	(159)
5.4	数控机床的导轨 .....	(172)
5.5	刀库与自动换刀装置 .....	(179)
5.6	数控回转工作台与分度工作台 .....	(196)
5.7	气-液压系统、润滑系统与排屑装置 .....	(208)
	本章小结 .....	(216)
	思考与练习题 .....	(216)
<b>第6章</b>	<b>常用数控机床及附件 .....</b>	<b>(218)</b>
6.1	数控车床 .....	(219)
6.2	数控铣床与加工中心 .....	(226)
6.3	电切削加工机床 .....	(242)
6.4	束流加工 .....	(265)
6.5	数控机床用附件 .....	(267)
	本章小结 .....	(280)
	思考与练习题 .....	(280)

<b>第7章 工业机器人</b> .....	(282)
7.1 工业机器人的发展 .....	(282)
7.2 工业机器人的组成与分类 .....	(286)
7.3 工业机器人的控制技术 .....	(291)
7.4 工业机器人的编程技术 .....	(298)
本章小结 .....	(301)
思考与练习题 .....	(301)
<b>第8章 柔性制造系统 (FMS)</b> .....	(303)
8.1 FMS 的形成与发展 .....	(303)
8.2 FMS 的分类与特点 .....	(309)
8.3 FMS 的组成、工作原理及作用 .....	(311)
8.4 FMS 自动加工系统 .....	(314)
8.5 FMS 零件运储系统 .....	(317)
8.6 FMS 的信息流系统 .....	(324)
8.7 FMS 的控制系统 .....	(326)
本章小结 .....	(327)
思考与练习题 .....	(327)
<b>第9章 计算机集成制造系统 (CIMS)</b> .....	(328)
9.1 CIMS 的产生与发展 .....	(328)
9.2 CIMS 的基本概念与组成 .....	(330)
9.3 CIMS 的体系结构 .....	(336)
9.4 CIMS 的建模方法 .....	(340)
9.5 CIMS 中的先进制造模式 .....	(341)
本章小结 .....	(353)
思考与练习题 .....	(354)
<b>第10章 数控机床通信</b> .....	(355)
10.1 数控机床通信基础 .....	(355)
10.2 网络数控 .....	(385)
本章小结 .....	(396)
思考与练习题 .....	(396)

<b>第 11 章 数控机床的检测调试与维护</b> .....	(397)
11.1 数控机床的安装 .....	(397)
11.2 数控机床的调试 .....	(400)
11.3 数控机床的检测与验收 .....	(401)
11.4 数控机床的选型 .....	(406)
11.5 数控机床维修的基本要求 .....	(415)
本章小结 .....	(431)
思考与练习题 .....	(431)
<b>参考文献</b> .....	(432)

# 第 1 章

## 数控机床的基础知识

### ■ 本章要点

1. 了解数控机床的产生、发展过程以及发展趋势。
2. 掌握数控机床的特点与应用范围。
3. 掌握数控机床的工作原理，能够正确判别数控机床的类型和选型。
4. 掌握数控机床坐标系、工件坐标系以及坐标系（轴）命名原则，熟练绝对坐标与增量坐标的概念与应用。
5. 掌握数控机床的精度和运动性能指标，熟悉常用数控机床与数控系统的主要参数。

随着科学技术的发展和竞争的激烈，一种适合于产品更新换代快、品种多、质量和生产率高、成本低的自动化生产设备的应用已迫在眉睫。而数控机床则能适应这种要求，能满足目前的生产需求。

1948年，美国帕森斯公司在研制加工直升机叶片轮廓检验用样板的机床时，首先提出了应用电子计算机控制机床来加工样板曲线的设想。后来受美国空军委托，帕森斯公司与麻省理工学院伺服机构研究所合作进行研制工作。1952年试制成功第一台三坐标立式数控铣床。后来，又经过改进并开展自动编程技术的研究，于1955年进入实用阶段，这对于加工复杂曲面和促进美国飞机制造业的发展起了重要作用。

1958年，我国开始研制数控机床，于1975年研制出第一台加工中心。目前，在数控技术领域，我国同先进国家之间还存在不小的差距，但这种差距正在缩小。数控技术的应用也从机床控制拓展到其他控制设备，如数控电火花线切割机床、数控测量机和工业机器人等。

## 1.1 数控机床的产生与发展趋势

### 1.1.1 数控机床的产生与发展过程

1946年,世界上第一台电子计算机诞生了,它为人类进入信息社会奠定了基础。六年后,即在1952年,计算机技术应用到了机床上,在美国诞生了第一台数控机床。从此,传统机床产生了质的变化。近半个世纪以来,数控机床经历了两个阶段和六代的发展。

#### 1. 数控(NC)阶段(1952—1970年)

早期计算机的运算速度低,这对当时的科学计算和数据处理影响还不大,但不能适应机床实时控制的要求。人们不得不采用数字逻辑电路制成一台机床专用计算机作为数控系统,被称为硬件连接数控(Hard-Wired NC),简称为数控(NC)。随着元器件的发展,这个阶段历经了三代,即1952年第一代——电子管;1959年第二代——晶体管;1965年第三代——小规模集成电路。

#### 2. 计算机数控(CNC)阶段(1970年以后)

直到1970年,通用小型计算机业已出现并成批生产,其运算速度比20世纪五六十年代有了大幅度的提高,这比逻辑电路专用计算机成本低、可靠性高。于是将它移植过来作为数控系统的核心部件,从此进入了计算机数控(CNC)阶段。1971年,美国Intel公司在世界上第一次将计算机的两个最核心的部件——运算器和控制器,采用大规模集成电路技术集成在一块芯片上,称为微处理器(Micro-Processor),又称中央处理单元(简称CPU)。1974年,微处理器被应用于数控系统。这是因为小型计算机的功能太强,控制一台机床能力有多余,但不及采用微处理器经济合理,而且当时的小型计算机的可靠性也不理想。虽然早期的微处理器的速度和功能都还不够,但可以通过多处理器结构来解决。因为微处理器是通用计算机的核心部件,故仍称为计算机数控。到了1990年,PC(个人计算机,国内习惯称其为微机)的性能已发展到很高的阶段,可满足作为数控系统核心部件的要求,而且PC的生产批量很大,价格便宜,可靠性高。数控系统从此进入了基于PC的阶段。

总之,计算机数控阶段也历经了三代,即1970年第四代——小型计算机;1974年第五代——微处理器;1990年第六代——基于PC(国外称为PC-Based)。

数字控制(Numerical Control)简称数控,是利用数字指令对机械动作进行控制的方法。它具有如下特点。

- (1) 可用不同的字长表示不同精度的信息,表达信息准确。
- (2) 可进行逻辑、算术运算,也可以进行复杂的信息处理。
- (3) 可不用改动电路或机械机构,通过改变软件来改变信息处理的方式,具有柔性化。

数控系统 (Numerical Control System) 是采用数字控制的系统。

计算机数控系统 (Computer Numerical Control) 是用计算机控制实现数控功能的系统。

数控机床 (Numerical Control Machine Tools) 是用数字指令进行控制的机床, 机床的所有运动, 包括主运动、进给运动与各种辅助运动都是用输入数控装置的数字信号来控制的, 其加工过程可用如图 1-1 所示的框图来描述。

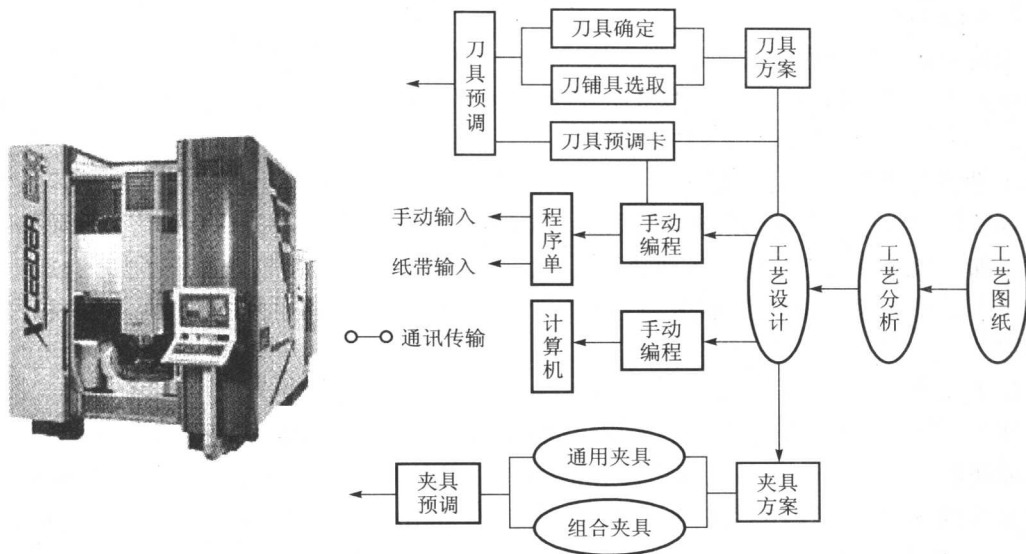


图 1-1 数控机床的加工过程

数控技术 (Numerical Control Technology) 是用数字量及字符发出指令并实现自动控制的技术。目前, 计算机辅助设计与制造 (CAD/CAM)、柔性制造系统 (FMS)、计算机集成制造系统 (CIMS)、敏捷制造 (AM) 和智能制造 (IM) 等先进制造技术都建立在数控技术的基础上。

数控加工技术是指高效、优质地实现产品零件特别是复杂零件加工的技术, 它是自动化、柔性化、敏捷化和数字化制造加工的基础与关键技术。

计算机辅助设计和制造简称 CAD/CAM, 是以计算机作为主要技术手段, 处理各种数字信息与图形信息, 辅助完成从产品设计到加工制造整个过程的各项活动。模具 CAD/CAM 技术的主要特点是设计与制造过程的紧密联系——设计制造一体化, 其实质是设计和制造的综合计算机化, 主要设计与制造加工的是各类模具零件。目前, 这类软件较多, 典型的 CAD/CAM 软件主要有 Master CAM、CAXA、I-DEAS、UG、CATIA 等, 其中, 我国应用较多的有 Master CAM、CAXA、Pro/E、UG 等软件。

## 1.1.2 数控机床的特点

数控机床具有较普通机床切削加工无法比拟的优点。

### 1. 对加工对象的适应性强

适应模具等产品单件生产的特点，为模具的制造提供了合适的加工方法。

### 2. 加工精度高

当前的数控装置脉冲当量达到了 0.001 mm，而且运动执行机构的误差（如反向间隙、螺距误差等）均可以通过数控系统的误差补偿计算予以消除，因此，数控机床的加工精度较高，大大适应了模具高精度的加工要求。

### 3. 生产效率高、经济效益好

零件加工所需的时间包括机动时间和加工辅助时间两部分。数控机床的快速移动和停止采用了加、减速措施，提高了运动速度，且保证了定位精度，有效地缩短了加工时间。同时，由于数控机床对市场需求的响应快，生产效率高，使总成本下降，因此可获得良好的经济效益。

### 4. 可靠性高

衡量可靠性的重要量化指标是平均无故障时间（MTBF），即一台数控机床在使用中两次故障间隔的平均时间，一般用总工作时间除以总故障次数来计算。目前，世界先进的 CNC 系统的 MTBF 约为 10 000 ~ 100 000 h，大部分在 10 000 ~ 30 000 h，而我国的 MTBF 大于等于 1 500 h。

### 5. 减轻了操作者的劳动强度

数控机床加工是自动进行的，工件加工过程不需要人工干预，且自动化程度较高，大大改善了操作者的劳动强度。

### 6. 有利于生产管理的现代化

数控机床使用数字信息与标准代码处理、传递信息，使用了计算机控制方法，为计算机辅助设计、制造及管理一体化奠定了基础。

### 7. 具有很强的通信功能

数控机床通常具有 RS-232 接口，有的还备有 DNC 接口，可与 CAD/CAM 软件的设计与制造相结合。高档机床还可与 MAP（制造自动化协议）相连，接入工厂的通信网络，适应于 FMS、CIMS 的应用要求。

当然，数控机床在应用中也有其不足之处，包括以下几个方面。

- (1) 初始投资大。
- (2) 维护工作量大。
- (3) 对操作者的技能水平要求较高。

### 1.1.3 数控机床的应用

数控机床具有普通机床不具备的许多优点,数控机床的应用范围正在不断扩大,但目前它并不能完全代替普通机床,也还不能以最经济的方式解决机械加工中的所有问题。数控机床最适合加工具有以下特点的工件。

- (1) 多品种小批量生产的工件。
- (2) 形状结构比较复杂的工件。
- (3) 需要频繁改型的工件。
- (4) 价格昂贵、不允许报废的关键工件。
- (5) 需要最少周期的急需工件。
- (6) 批量较大、高精度、高要求的工件。

由于数控机床的自动化加工可减少操作工人,生产效率高。因此,用数控机床加工在经济上也是可行的。

由于数控系统本身的复杂性增加了维修的技术难度和维修费用,因此广泛推广数控机床的最大障碍是设备的初始投资大。

考虑到上述种种原因,在决定选择数控机床加工时,需要进行科学的技术经济分析,使数控机床发挥它最大的经济效益。

### 1.1.4 数控机床的发展趋势

回顾数控机床的发展,其主要经历了三个阶段:NC阶段、CNC阶段和ONC阶段。NC与CNC的主要区别在于:NC的内部结构为硬接线系统,机床的控制功能不能轻易改变;CNC的内部结构为软接线系统,机床的控制功能随系统控制程序(软件)的变化而变化。

为了满足市场和科学技术发展的需要,为了达到现代制造技术对数控技术提出的更高的要求,当前,世界数控技术及其装备发展趋势主要体现在以下几个方面。

#### 1. 高速、高效、高精度、高可靠性

要提高加工效率,首先必须提高切削和进给速度,同时还要缩短加工时间;要确保加工质量,必须提高机床部件运动轨迹的精度,而可靠性则是上述目标的基本保证。为此,必须要有高性能的数控装置作保证。

(1) 高速、高效。机床向高速化方向发展,可充分发挥现代刀具材料的性能,不但可大幅度提高加工效率、降低加工成本,而且还可提高零件的表面加工质量和精度。超高速加工技术对制造业实现高效、优质、低成本生产有广泛的适用性。

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。超高速加工特别是超高速铣削与新一代高速数控机床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,欧、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 ~ 100 000 r/min)、高速且高加/减速度的进给运动部件(快移速度 60 ~ 120 m/min, 切削进给速度高达 60 m/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材料和磨料磨具, 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解决, 应不失时机地开发应用新一代高速数控机床。

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度、高响应速度的实时处理, 由于采用了新型刀具, 车削和铣削的切削速度已达到 5 000 ~ 8 000 m/min 以上; 主轴转数在 30 000 r/min (有的高达 100 000 r/min) 以上; 工作台的移动速度(进给速度), 在分辨率为 1  $\mu\text{m}$  时, 为 100 m/min (有的到 200 m/min) 以上, 在分辨率为 0.1  $\mu\text{m}$  时, 为 24 m/min 以上; 自动换刀速度在 1 s 以内; 小线段插补进给速度达到 12 m/min。一方面根据高效率、大批量生产的需求和电子驱动技术的飞速发展以及高速直线电机的推广应用, 另一方面根据新产品更新换代周期的加快, 模具、航空、军事等工业的加工零件不但复杂而且品种增多。因此, 开发出一批高效、高速响应的数控机床以满足模具、汽车和农机等行业的需求势在必行。

(2) 高精度。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。其精度从微米级到亚微米级, 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、超精密研磨抛光以及超精密特种加工(三束加工及微细电火花加工、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, 以适应现代科技的发展。

精密化是为了适应高新技术发展的需要, 也是为了提高数控机床的性能、质量和可靠性, 减少其装配时的工作量从而提高装配效率。随着高新技术的发展和对数控机床性能与质量要求的提高, 机床用户对机床加工精度的要求也越来越高。为了满足用户的需要, 近 10 多年来, 普通级数控机床的加工精度已由  $\pm 10 \mu\text{m}$  提高到  $\pm 5 \mu\text{m}$ , 精密级加工中心的加工精度则从  $\pm (3 \sim 5) \mu\text{m}$ , 提高到  $\pm (1 \sim 1.5) \mu\text{m}$ 。

(3) 高可靠性。高可靠性是指数控系统的可靠性要高于被控设备的可靠性在一个数量级以上, 但也不是可靠性越高越好, 仍然是适度可靠, 这是因为它是商品, 受性能价格比的约束。对于每天工作两班的无人工厂而言, 如果要求在 16 h 内连续正常工作, 无故障率  $P(t) = 99\%$  以上, 则数控机床的平均无故障运行时间 MTBF 就必须大于 3 000 h。MTBF 大于 3 000 h, 对于由不同数量的数控机床构成的无人化工厂差别就大多了。只对一台数控机床而言, 如果主机与数控系统的失效率之比为 10:1 (数控的可靠比主机高一个数量级), 此时数控系统的 MTBF 就要大于 33 333.3 h, 而其中的数控装置、主轴及驱动等的 MTBF 就必须