

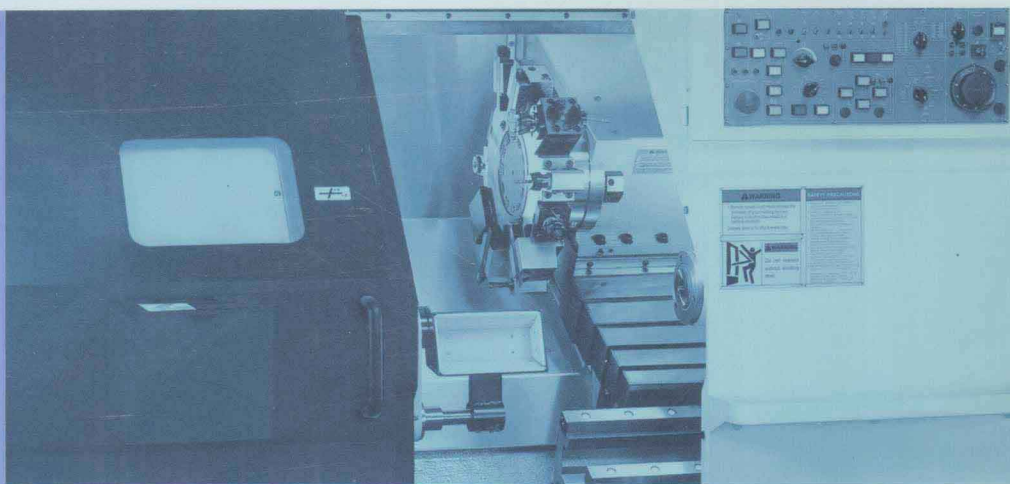


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数控机床与编程

主编 张建成 方 新

第2版



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数控机床与编程

Shukong Jichuang yu Biancheng

第2版

主 编 张建成 方 新
副主编 杜家熙 雷保珍
参 编 咎 华 饶 军 刘 伟 周广文 王桂萍
主 审 张建民



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是在方新主编普通高等教育“十一五”国家级规划教材《数控机床与编程》的基础上修订的。内容包括绪论、数控机床的主传动系统、数控机床的进给传动系统、数控机床的典型结构、加工程序编制基础、数控车削编程、数控铣削编程、数控技术的发展与应用等,共8章。

本书重点介绍数控车床、数控铣床、加工中心三类典型数控机床的结构及其相应加工程序的编制实例;介绍数控加工工艺设计方法与数控加工工艺文件的编写方法。本书同时介绍FANUC系统与SIEMENS系统;各章的实例均是企业成功的加工实例,各章的练习保证足够的工程训练;附录收有《机床数值控制 词汇》国家标准、《数控机床 坐标和运动方向的命名》机械行业标准。

本书可作为高等院校本科机械工程、机械设计制造及其自动化等相关机械类专业的教材,也可供高等专科学校、高等职业学校、成人高校等相关专业使用,并可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床与编程/张建成,方新主编.--2版.--北京:高等教育出版社,2013.7

ISBN 978-7-04-037576-3

I. ①数… II. ①张…②方… III. ①数控机床-程序设计-高等学校-教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第118081号

策划编辑	卢广	责任编辑	卢广	封面设计	李卫青	版式设计	范晓红
插图绘制	于博	责任校对	刁丽丽	责任印制	张福涛		

出版发行	高等教育出版社
社址	北京市西城区德外大街4号
邮政编码	100120
印刷	北京联兴盛业印刷股份有限公司
开本	787mm×1092mm 1/16
印张	21
字数	510千字
购书热线	010-58581118
咨询电话	400-810-0598

网 址	http://www.hep.edu.cn
	http://www.hep.com.cn
网上订购	http://www.landrac.com
	http://www.landrac.com.cn
版 次	2007年5月第1版
	2013年7月第2版
印 次	2013年7月第1次印刷
定 价	32.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。
版权所有 侵权必究
物料号 37576-00

第二版前言

随着教育部高等教育“质量工程”和“卓越工程师计划”等项目的实施,应用型本科教育对工程实践能力的培养日益受到重视。作为机械类本科专业的必修课程,数控机床与编程课程的教学理念、教学内容、教学方法和手段也在不断调整。本书第一版经过几年的使用,受到了广大读者的普遍欢迎,但同时也有许多读者针对第一版教材提出了一些宝贵意见。

结合实际需求的变化和读者反馈,本书第二版根据教材使用情况,本着保持教材原有特色,同时进一步提高学生数控技术应用能力、拓宽学生专业视野的原则,对教材内容进行了调整,编写体系仍以第一版为基础。

本次修订,主要做了如下工作:

对全书的内容体系进行局部调整,以更适应教师教学安排和符合学生认知规律,如将数控机床坐标系的内容由第1章移入第5章,同时在第6章和第7章结合具体编程指令又做了必要的调整。

根据教学实际,删除了第一版教材中大多数院校都不讲授的第8章内容“数控机床的选用、调试与维护”;为拓展本科学生的专业视野,新增第8章内容“数控技术的发展与应用”。

结合教师使用第一版教材的反馈意见,在第二版部分章节中新增了部分内容,以使新版教材的内容体系更加完整,如在第7章增加了刀具长度补偿指令的介绍,增加了生产实际中常用的子程序和镜像加工指令的介绍等。同时也对部分章节的内容根据需要进行了取舍。

本书由北京联合大学张建成、方新担任主编并统稿。参加本书修订工作的有北京联合大学张建成(第1章,第2章第3节,第3章,第8章第1、2、3、5节,附录),饶军、方新(第4章),咎华(第5章),雷保珍(第6章),刘伟(第8章第4、6、7节);吉林工程技术师范学院周广文、王桂萍(第2章第1、2、4节);河南科技学院杜家熙(第7章)。

北京理工大学张建民教授认真审阅了本书,提出了许多宝贵的修改意见和建议,在此表示衷心的感谢。

本书得到北京联合大学规划教材建设项目资助。

由于水平有限,书中还存在不足和错误之处,希望广大读者提出宝贵意见,尤其恳切希望得到从事数控技术专业教学的教育界同仁的真诚指导。

编者

2013年1月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第 1 章 绪论 1

1.1 数控机床的产生与发展 1

1.1.1 数控机床的产生 1

1.1.2 我国数控机床的现状 2

1.1.3 数控机床的发展趋势 3

1.2 数控机床的组成及工作过程 6

1.2.1 CNC 机床的组成 6

1.2.2 数控机床的工作过程 8

1.3 数控机床的特点 9

1.4 数控机床的分类 10

1.4.1 按工艺用途分类 10

1.4.2 按运动方式分类 11

1.4.3 按控制方式分类 14

1.4.4 按功能水平分类 15

1.5 数控机床的主要性能指标 16

1.5.1 运动性能指标 16

1.5.2 精度指标 17

1.5.3 可控轴数与联动轴数 17

1.6 典型数控系统 18

1.6.1 发那科系统 18

1.6.2 西门子数控系统 19

1.6.3 国产数控系统 19

本章小结 21

思考题 21

第 2 章 数控机床的主传动系统 22

2.1 对主传动系统的基本要求和变速方式 22

2.1.1 对主传动系统的基本要求 22

2.1.2 主传动的变速方式 23

2.2 数控机床的主轴部件 28

2.2.1 主轴端部结构 28

2.2.2 主轴轴承 28

2.2.3 主轴轴承的配置形式 31

2.2.4 主轴准停装置 32

2.3 典型数控机床的主轴部件 33

2.3.1 数控车床的主轴部件 33

2.3.2 数控铣床的主轴部件 36

2.3.3 加工中心的主轴部件 37

2.4 高速主轴系统和电主轴 39

2.4.1 高速主轴系统 39

2.4.2 电主轴的结构 42

2.4.3 电主轴的轴承 43

本章小结 45

思考题 45

第 3 章 数控机床的进给传动系统 46

3.1 对进给传动系统的基本要求 46

3.2 数控机床进给传动系统的基本形式 47

3.2.1 滚珠丝杠副 47

3.2.2 静压丝杠副 54

3.2.3 静压蜗杆-蜗轮条副 56

3.2.4 双齿轮-齿条副 57

3.2.5 直线电动机直接驱动 58

3.3 进给传动系统齿轮传动间隙消除方法 60

3.3.1 刚性调整法 60

3.3.2 柔性调整法 61

3.4 数控机床进给传动系统实例 64

3.4.1 MJ-50 型数控车床的进给传动系统 64

3.4.2 JCS-018A 型立式加工中心的进给传动系统 67

本章小结 68

思考题 68

第 4 章 数控机床的典型结构 69

4.1 数控机床机械结构的组成、特点及

要求	69	5.5 手工编程中的数值计算	134
4.1.1 数控机床机械结构的主要组成	69	5.5.1 基点与节点坐标的计算	134
4.1.2 数控机床机械结构的主要特点	70	5.5.2 刀具中心轨迹的计算	135
4.1.3 数控机床机械结构的基本要求	71	5.5.3 手工编程的辅助计算	136
4.2 数控机床的整体布局	72	5.5.4 平面轮廓基点坐标计算	136
4.2.1 数控车床常见布局形式	72	5.6 数控加工工艺文件的编写	137
4.2.2 加工中心常见布局形式	73	5.6.1 数控加工工艺文件的格式	138
4.2.3 高速数控机床的布局形式	75	5.6.2 数控加工工艺文件的编写要求	143
4.2.4 并联运动机床的布局形式	76	5.6.3 典型零件数控铣床加工工艺分析 实例	144
4.3 数控机床的导轨	76	5.7 自动编程简介	146
4.3.1 数控机床对导轨的基本要求	77	本章小结	148
4.3.2 数控机床导轨的种类与特点	77	思考题	149
4.3.3 塑料滑动导轨	79	第6章 数控车削编程	150
4.3.4 滚动导轨	81	6.1 数控车削编程特点及坐标系	150
4.3.5 静压导轨	84	6.1.1 数控车削编程特点	150
4.3.6 导轨的润滑与防护	85	6.1.2 数控车床的坐标系与对刀操作	151
4.4 数控机床的自动换刀装置	86	6.2 数控车削工艺	156
4.4.1 数控机床对换刀装置的基本要求	86	6.2.1 走刀路线的确定	156
4.4.2 数控车床刀架	86	6.2.2 夹具和刀具的选择	159
4.4.3 加工中心的自动换刀装置	89	6.2.3 切削用量的选择	161
4.4.4 加工中心自动换刀实例	94	6.3 数控车削编程	163
4.5 数控机床的回转工作台	99	6.3.1 基本编程方法	163
4.5.1 分度工作台	99	6.3.2 固定循环功能	169
4.5.2 数控回转工作台	103	6.3.3 螺纹加工	176
本章小结	104	6.3.4 刀具补偿功能与编程	180
思考题	104	6.4 数控车削编程综合实例	184
第5章 加工程序编制基础	106	6.4.1 综合实例一	184
5.1 概述	106	6.4.2 综合实例二	186
5.2 数控机床坐标系	107	本章小结	189
5.2.1 机床坐标系	107	练习题	189
5.2.2 工作坐标系(WCS)的设定	108	第7章 数控铣削编程	192
5.2.3 数控机床的原点与参考点	108	7.1 数控铣削编程特点及坐标系	192
5.3 手工零件编程的基础知识	109	7.1.1 数控铣削编程特点	192
5.3.1 加工程序编制的基本概念	109	7.1.2 数控铣床的坐标系与对刀操作	195
5.3.2 手工编程的方法及步骤	111	7.2 数控铣削工艺	201
5.3.3 加工程序的结构与格式	112	7.2.1 选择并确定数控铣削部位及工序 内容	201
5.3.4 加工程序指令代码	116		
5.4 数控加工工艺设计	121		
5.4.1 数控加工工艺分析	122		
5.4.2 数控加工工艺的设计	126		

7.2.2 零件图工艺性分析	201	8.2.1 封闭式数控系统的缺陷	284
7.2.3 走刀路线的确定	203	8.2.2 开放式数控系统的特征	285
7.2.4 铣削刀具的选择	206	8.2.3 开放式数控系统的类型	286
7.2.5 切削用量的选择	212	8.2.4 国内外开放式数控技术现状	287
7.3 数控铣削编程方法	213	8.3 数控加工仿真技术	288
7.3.1 基本编程方法	213	8.3.1 数控加工仿真技术的概念	288
7.3.2 固定循环功能	231	8.3.2 数控仿真基本步骤	289
7.3.3 子程序	247	8.4 宏程序	289
7.3.4 可编程镜像指令	250	8.4.1 宏程序概述	290
7.4 数控铣削编程综合实例	251	8.4.2 宏程序应用举例	292
7.4.1 综合实例一	251	8.5 多通道数控系统	293
7.4.2 综合实例二	255	8.5.1 多通道数控系统的概念	293
7.5 加工中心用加工程序编制	257	8.5.2 面向复合加工的多通道控制	294
7.5.1 加工中心特点与加工对象	257	8.6 复合加工技术和新结构机床	295
7.5.2 加工中心用加工程序编制要点	259	8.6.1 以工序集中为基础的复合加工技术	295
7.6 加工中心用加工程序编制实例	260	8.6.2 以能量复合为基础的复合加工技术	297
7.6.1 工艺分析	260	8.7 数控加工程序传输及数控机床联	
7.6.2 确定夹具、选用刀具	261	网技术	297
7.6.3 确定编程原点、对刀位置及对刀		8.7.1 传统的数控程序传输方式	298
方法	261	8.7.2 数控机床的网络化	298
7.6.4 确定加工路线	262	本章小结	301
7.6.5 确定加工所用各种工艺参数	264	思考题	301
7.6.6 数值计算	264	附录	302
7.6.7 编制程序	264	附录一 中华人民共和国国家标准 工业	
7.6.8 程序检验	264	自动化系统 机床数值控制	
7.6.9 编程实例	265	词汇	302
本章小结	274	附录二 中华人民共和国机械行业标准	
练习题	274	数控机床 坐标和运动方向的	
第8章 数控技术的发展与应用	282	命名	313
8.1 数控技术进展	282	参考文献	323
8.2 开放式数控系统	284		

第 1 章

绪 论

◆本章介绍数控机床的产生和发展、数控机床的组成及工作过程、数控机床的特点、数控机床的分类、数控机床坐标系以及数控机床的主要性能指标,旨在给出关于数控机床整体的宏观概念。

1.1 数控机床的产生与发展

新的机械加工装备都是应更高的制造工艺需求而产生的,或者说机械加工装备对促进制造技术的发展起着重要的作用。数控机床就是为了实现复杂零件的自动化加工而产生的,同时也随着制造技术发展的要求而发展。

1.1.1 数控机床的产生

1948 年,美国帕森公司(Parsons Company)接受美国空军委托,研制直升机螺旋桨叶片轮廓样板的加工设备。由于样板形状复杂多样,精度要求高,一般加工设备难以适应,于是提出了计算机控制机床的设想。1949 年,该公司与美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)伺服机构研究所合作,开始数控机床的研究,并于 1952 年试制成功世界上第一台由大型立式仿形铣床改装而成的、用专用计算机控制的三坐标立式数控铣床。研制过程中采用了自动控制、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。

数控机床的产生,不仅为复杂零件的加工提供了方便,而且加工精度高,尺寸一致性好,生产效率高,能够大大减轻工人的劳动强度,使机械制造业从刚性自动化时代进入了柔性自动化时代,因而很快受到了人们的关注。世界各国竞相投入大量的人力、物力进行研究,使数控机床得到了迅速的发展。继数控铣床、数控车床、数控钻床等单工序加工类机床之后,1959 年,克耐-杜列克公司(Keaney & Trecker Company)开发了装有自动换刀装置、能够一次装夹、多工序加工的加工中心。1967 年,英国首先把几台数控机床连接成具有一定柔性的加工系统,即柔性制造系统(flexible manufacture system, FMS)。20 世纪 80 年代初,国际上又出现了以数台加工中心为

主体,再配上工件自动装卸和监控检验装置而构成的柔性制造单元(flexible manufacture cell, FMC)。20 世纪 80 年代末 90 年代初,计算机集成制造系统(computer integrated manufacture system, CIMS)已经逐渐投入使用,并呈现出迅猛的发展态势。数控机床的数控系统已发展到以微处理机为核心的第五代,前三代均属于硬件数控,第四代是应用小型计算机的数控系统。几十年来,数控机床无论在品种、数量还是在功能上都取得了长足的进展,为机械制造业注入了新的生机和活力。

1.1.2 我国数控机床的现状

我国从 1958 年开始研究数控机床,于 1966 年研制成功晶体管数控系统,并生产出数控线切割机床、数控铣床等产品。由于受当时条件的限制,数控系统的稳定性及可靠性较差,数控机床品种不全,数量较少,数控机床的发展处于初级阶段。

20 世纪 80 年代初期,我国先后从德国、日本、美国等国家引进了一些数控系统和伺服技术,在一定程度上促进了数控机床的发展。改革开放为数控机床的发展奠定了物质基础。此时,我国研制的数控机床性能逐步提高,品种和数量不断增加。到 1985 年,我国已经拥有加工中心、数控铣床、数控磨床等 80 多个品种的数控机床,数控机床的发展进入了实用阶段。

20 世纪 90 年代以后,我国逐渐由计划经济转向市场经济,国民经济进入高速发展阶段,研究开发数控系统、应用数控机床已经成了各企业的自发行为,数控机床的发展速度逐年加快,多轴、全功能中高档数控系统及交、直流伺服系统相继研制成功,FMS 和 CIMS 也先后投入使用,数控机床的发展进入了快速阶段。

从“九五”起,我国形成了数控车床和加工中心(包括数控铣床)的产业化生产基地。从产量来看,2010 年我国机床产值和数控机床产量均列世界第一位。从技术发展水平来看,我国所生产的中档普及型数控机床的功能、性能和可靠性方面已具有较强的市场竞争力。随着“高档数控机床与基础制造装备重大专项”重点任务陆续完成,我国国产机床数控化率由“十五”末的 35.5% 提高到“十一五”末的 51.9%。我国在数控系统方面已经开发出多轴多通道、总线式高档数控装置产品。武汉华中数控股份有限公司、沈阳高精数控技术有限公司等单位已完成开放式全数字高档数控装置的生产。国产数控机床产品覆盖超重型机床、高精度机床、特种加工机床、锻压设备、前沿高技术机床等领域。特别是在五轴联动数控机床、数控超重型机床、立式卧式加工中心、数控车床、数控齿轮加工机床领域,部分技术已经达到世界先进水平。国产五轴联动数控机床品种日趋增多,改变了国际强手对数控机床产业的垄断局面,我国已进入世界高速数控机床和高精度数控机床生产国的行列,因而加速了我国从机床生产大国走向机床制造强国的进程。

尽管取得了巨大进步,我国数控机床产业仍然存在着主机大而不强、数控系统和功能部件发展滞后、高档数控机床关键技术差距大、产品质量稳定性不高、行业整体经济效益差、高档数控机床产品仍需大量从国外进口等问题。特别是在中、高档数控机床方面,与国外一些先进产品相比,仍存在比较大的差距。这是由于欧美日等先进工业国家于 20 世纪 80 年代先后完成了数控机床产业化进程,其中一些著名机床公司一直致力于科技创新和新产品的研发,引导着数控机床技术发展,如美国英格索尔公司和德国惠勒喜乐公司对用于汽车工业和航空工业高速数控铣床的发展,日本牧野公司对高效精密加工中心所作的贡献,德国瓦德里希公司在重型龙门五面加工铣床方面的开发,以及日本马扎克公司研发的车铣中心对高效复合加工的推进等等。相比之下,

我国大部分数控机床产品在技术上还处于跟踪阶段。表 1-1 以 40 号刀柄的中型加工中心为例,列出国内、外先进产品主要技术指标,由此可以看出我国在效率、精度和可靠性等方面均有明显差距。

表 1-1 中型加工中心主要技术指标对比

项 目	国 内	国 外
主轴最高转速/(r/min)	6 000 ~ 40 000	15 000 ~ 100 000
快移速度/(m/min)	24 ~ 60	60 ~ 120
金属切除率 45 钢/(cm ³ /min)	200 ~ 300	400 ~ 600
定位精度/mm(全行程)	0.01 ~ 0.016	0.004 ~ 0.006
重复定位精度/mm	0.005 ~ 0.008	0.002 ~ 0.003
平均无故障运行时间 MTBF/h	500 ~ 600	> 1000

1.1.3 数控机床的发展趋势

以数字化为特征的数控机床是柔性化制造系统和敏捷化制造系统的基础装备,其总的发展趋势是:高精化、高速化、高效化、柔性化、智能化和集成化,并注重工艺适用性和经济性。具体可归纳为下列 13 个方面。

1. 持续地提高经济加工精度

1950—2000 年的 50 年内加工精度提升 100 倍左右,即加工精度平均每 8 年提高 1 倍,当前的普通加工精度已达到 20 世纪五六十年代的精密加工水平。

随着高新技术的发展和对机电产品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 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 。

2. 推进全面高速化实现高效制造

高速化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。20 世纪 90 年代以来,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/减速度直线电动机驱动进给部件以及高性能控制系统和防护装置等一系列技术领域关键技术的解决,新一代高速数控机床加快了高速化发展步伐。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 ~ 200 m/min,切削进给速度高于 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。高速化加工另一个特点是大多从单一的高速切削发展至全面高速化,不仅要缩短切削时间,也要力求降低辅助时间和技术准备时间。

3. 复合加工机床促进新一代高效机床的形成

复合机床的含义是实现或尽可能实现工件在一台机床上一次装卡完成大部分或全部加工工序,从而达到减少机床和夹具、免去工序间的搬运和储存、提高工件加工精度、缩短加工周期和节

约作业面积的目的。复合机床根据其结构特点,分为工艺复合型和工序复合型两类。

工艺复合型为跨加工类别的复合机床,包括不同加工方法和工艺的复合,如车铣中心、铣车中心、激光铣削加工机床、冲压与激光切割复合、金属烧结与镜面切削复合等。

工序复合型应用刀具(铣头)自动交换装置、主轴立卧转换头、双摆铣头、多主轴头和多回转刀架等配置,增加工件在一次安装下的加工工序数,如多面多轴联动加工的复合机床和主副双主轴车削中心等。

4. 工艺适用性的专门化数控机床正不断涌现

通过对机床布局和创新,使对不同类型的零件加工具有最佳的适用,避免一方面出现不能发挥最佳性能,另一方面又存在功能冗余的现象。

要解决品种多样化与经济性的矛盾,这就要对机床的模块化设计提出更高的要求。近年来对并联机构机床和混联机构机床的研究以及对可重构机床(reconfigurable machine tools, RMT)技术的探索,反映了对制造装备能更方便地实现个性化、多样化发展的追求。

5. 智能化和集成化成为数字化制造的重要支撑技术

信息技术的发展及其与传统机床的相融合,使机床朝着数字化、集成化和智能化的方向发展。数字化制造装备、数字化生产线、数字化工厂的应用空间将越来越大;而采用智能技术来实现多信息融合下的重构优化的智能决策、过程适应控制、误差补偿智能控制、复杂曲面加工运动轨迹优化控制、故障自诊断和智能维护以及信息集成等功能,将大大提升成形和加工精度,提高制造效率。

6. 发展适应敏捷制造和网络化分布式的制造系统

回顾制造系统的发展历程,基本上遵循以下两个方向:①增强制造系统的智能化和自治管理功能,以提高 FMC/FMS 的快速响应能力。②发展兼顾柔性、高效、低成本和高质量且便于重构的新型制造系统,以适应不确定性的市场环境。

这类制造系统称为快速重构制造系统(rapidly reconfigurable manufacturing system, RRMS)或可重构制造系统(reconfigurable manufacturing system, RMS)。其原理为通过对制造系统中的设备配置的调整或更换设备上的功能模块来迅速构成适应新产品生产的制造系统。这就要求设备和系统不仅软件具有开放性,而且硬件也要有开放性,成为功能可重构的机床,即如前面提到的可重构机床。

7. 向大型化和微小化两极发展

能源装备的大型化及航空航天事业等的发展,需要重型立式卧式加工中心和铣车中心。

从精密加工发展到超精密加工,是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($<10\text{ nm}$),应用范围日趋广泛。超精密加工技术和微纳米技术是 21 世纪的战略高技术,正在形成一种产业。因此,需发展能适应微小型尺寸结构和微纳米加工精度的新型制造工艺和装备。微型机床同时具有高速和精密的特点,最小的微型机床可以放在掌心之中,一个微型工厂可以放在手提箱中。操作者通过手柄和监视屏幕控制整个工厂的运作。

航空航天、信息技术和国防高新技术的需求推进了超精加工技术及设备的发展。20 世纪 60 年代,美国开发出第一台商品化超精密机床,其加工尺寸精度为 $\pm 0.8\text{ }\mu\text{m}$,70 年代英国克兰菲尔德精密工程研究所批量生产的超精密车床加工的面形精度优于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,80 年代美国 LLL 实验室和 Y-12 工厂合作生产的大型超精密金刚石车床的加工平面形度达 $0.0125\text{ }\mu\text{m}$,最大加工直

径为 2 100 mm。由于晶片和光学镜片等硬脆材料加工的需要,超精密磨削和研抛以及采用光、电、化学等能源的非机械能的特种加工方法使加工精度可达到纳米级(0.001 μm)。通过机床结构设计优化,机床零部件的超精加工和精密装配,采用高精度的全闭环控制及温度、振动等动态误差补偿技术,提高机床加工的几何精度,降低形位误差、表面粗糙度等,从而进入亚微米、纳米级超精加工时代。

8. 配套装置和功能部件的品种质量日臻完善

功能部件不断向高速度、高精度、大功率和智能化方向发展,并取得成熟的应用。不仅数控系统(含数控装置和伺服驱动装置)有专业化生产厂,凡关键的通用性功能部件如高精度主轴单元、电主轴、力矩电动机、直线电动机、刀具自动交换系统、滚动导轨副、直线滚动丝杠驱动副、双摆主轴头、双摆回转台和自动转位刀塔等在国外均有一些著名的专业化生产厂,这对保证产品质量,增长整机的可靠性和降低成本起着重要的作用。

完善的高集成度的专用电路系统的研发,仍是数控系统可靠性继续增长和结构小型化的一项重要重要措施。

9. 虚拟数控机床技术

虚拟数控机床实际上是虚拟环境中数控机床的模型。与真实机床相比,虚拟数控机床应具有以下功能:(1)应具有与真实机床完全相同的结构。(2)应比真实机床具有可观性。(3)强大的网络功能,为各种真正的制造资源服务,从而提高其与外界制造资源的相互操作性,快速地、并行地组织各部门、各集团成员将新产品从设计转入生产。(4)完善的图形和标准数据接口。

虚拟数控机床的应用将给制造业带来革命性的飞跃。由于虚拟数控机床是数字模型,所以容易实现对数字模型进行显示、分析、传递和迭代更新,为设计提供并行作业可能。虚拟数控机床和各设计软件的接口,为建模提供了方便,尤其是在特定的环境下,为产品的可靠性,产品的生产全过程,工艺规范以及产品方案的工艺计划进行性能评价。强化创新水平,用经济快捷的方式提高产品设计质量,缩短产品开发周期。虚拟数控机床的强大的网络功能为真正实现远程合作提供保证。

10. 开放式数控系统

为适应数控机床普及、个性化、多品种、小批量、柔性化的要求,最重要的发展趋势是数控系统体系结构的开放性,设计生产开放式的数控系统。美国、欧盟及日本等在研究开放式数控系统方面有一定优势。由于个人计算机(personal computer, PC)所具有的开放性、低成本、软硬件资源丰富等特点,基于 PC 的开放式数控系统将成为一个主要趋势。

11. 向标准化方向发展

数控标准是制造业信息化发展的一种趋势。数控技术诞生后的 50 多年间的信息交换都是基于 ISO6983 标准,即采用 G、M 代码对加工过程进行描述,显然,这种面向过程的描述方法已越来越不能满足现代数控技术高速发展的需要。为此,国际上正在研究和制定一种新的 CNC 系统标准 ISO14649(STEP-NC),其目的是提供一种不依赖于具体系统的中性机制,能够描述产品整个生命周期内的统一数据模型,从而实现整个制造过程,乃至各个工业领域产品信息的标准化。

12. 向高可靠性方向发展

数控机床的可靠性一直是用户最关心的主要指标,它主要取决于数控系统各伺服驱动单元的可靠性。为提高可靠性,目前主要采取以下措施:(1)采用更高集成度的电路芯片,采用大规

模或超大规模的专用及混合式集成电路,以减少元器件的数量,提高可靠性。(2)通过硬件功能软件化,以适应各种控制功能的要求,同时通过硬件结构的模块化、标准化、通用化及系列化,提高硬件的生产批量和质量。(3)增强故障自诊断、自恢复和保护功能,对系统内硬件、软件和各种外部设备进行故障诊断、报警。当发生加工超程、刀损、干扰、断电等各种意外时,自动进行相应的保护。

13. 绿色化

为了追求符合环保要求的机床,干式切削和微量润滑剂切削方法因其可大大减少润滑剂的挥发而得到越来越广泛的应用。同时,机床操作者在工作时的环境、位置会被考虑得非常舒适。此外,无污染的清洁加工技术也受到极大重视。

1.2 数控机床的组成及工作过程

数控机床已由硬件数控机床(即采用硬件数控系统)发展到了 CNC 机床(computer numerical control machine tool),故本节仅介绍 CNC 机床。

1.2.1 CNC 机床的组成

CNC 机床是带有嵌入式计算机的数控机床。硬件数控机床的控制功能是由其控制系统内的电气元件功能决定的。而 CNC 机床的控制功能是在制造数控系统时通过程序代码形式存入计算机,在 CNC 机床关机时,存在只读存储器(ROM)中。CNC 机床由信息输入、数控装置、伺服驱动及检测装置、机床本体、机电接口五大部分组成。

图 1-1 所示是一台三坐标数控铣床的组成图,它是由 X、Y、Z 三个坐标来实现刀具和工件间的相对运动的立式数控铣床。从图中可以看出包括信息输入、运算控制(数控装置)、伺服驱动及检测反馈、机床本体、机电接口等部分。

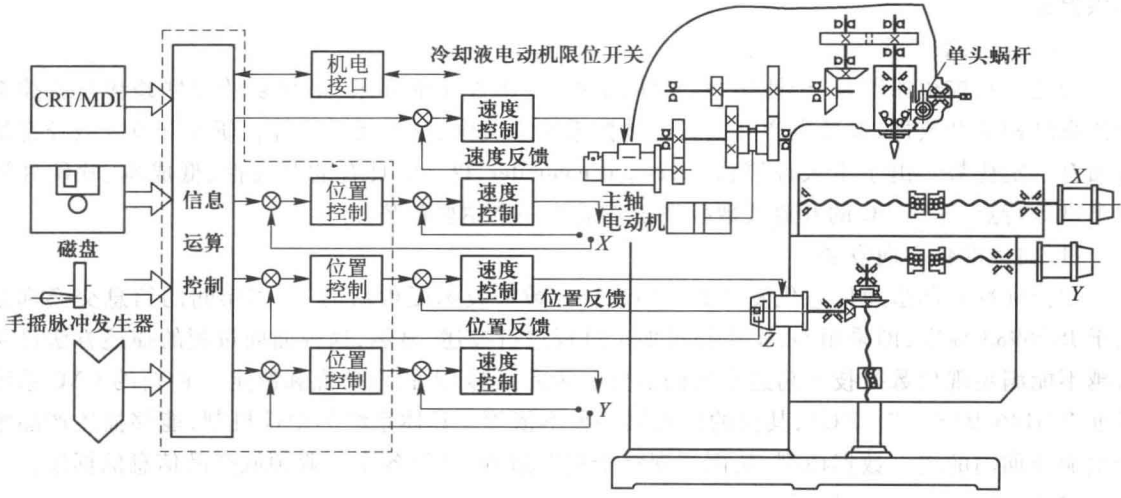


图 1-1 数控机床的组成

1. 信息输入

这一部分是数控机床的信息输入通道,加工零件的程序和各种参数、数据通过输入设备送入数控装置。早期的输入方式为穿孔纸带、磁带,目前较多采用磁盘;在生产现场,特别是一些简单的零件程序都采用按键、配合显示器(CRT)的手动数据输入(MDI)方式;手摇脉冲发生器输入多用于调整机床和对刀时使用;通过通信接口,可由上位机输入。

2. 数控装置

数控装置是由中央处理单元(CPU)、存储器、总线、输入输出接口和相应的软件构成的专用计算机,它接收到输入信息后,经过译码、轨迹计算(速度计算)、插补运算和补偿计算,再给各个坐标的伺服驱动系统分配速度、位移指令。这一部分是数控机床的核心,整个数控机床的功能强弱主要由这一部分决定。它具备的主要功能如下:

- 1) 多轴联动、多坐标控制。
- 2) 实现多种函数的插补(直线、圆弧、抛物线、螺旋线、极坐标、样条等)。
- 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,包括 EIA/ISO 代码转换,米制/英制转换、坐标转换、绝对值/增量值转换等。
- 5) 补偿功能,包括刀具半径补偿、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) 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. 伺服驱动装置及检测反馈装置

伺服驱动装置又称为伺服系统,它接受计算机运算处理后分配来的信号。该信号经过调节、转换、放大以后驱动伺服电动机,带动机床的执行部件运动,并且随时检测伺服电动机或工作台的实际运动情况,进行严格的速度和位置反馈控制。数控机床的伺服驱动装置分为主轴驱动单元(主要是速度控制)、进给驱动单元(包括速度控制和位置控制)、回转工作台和刀库伺服控制装置以及它们相应的伺服电动机等。伺服系统分为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,以步进电动机驱动的伺服系统在某些具体场合仍可采用,直线电动机系统是适应高速、高精度的一种伺服机构。在伺服系统中还包括安装在伺服电动机上(或机床的执行部件上)的速度、位移检测元件及相应电路,该部分能及时将信息反馈回来,构成闭环控制(交流数字闭环控制中还包括电流检测反馈)。常用检测装置有测速发电机、旋转变压器、脉冲编码器、感应同步器、光栅、电磁转速传感器、霍尔传感器等组成的系统。一般来说,数控机床的伺服驱动系统,要求具有很好的快速响应性能,以及能够灵敏而准确地跟踪指令的功能。所以,伺服驱动及检测反馈是数控机床的关键环节。

4. 机床本体

机床本体包括机床的主运动部件、进给运动部件、执行部件和基础部件,如底座、立柱、滑鞍、工作台(刀架)、导轨等。数控机床与普通机床不同,它的主运动和各个坐标轴的进给运动都由单独的伺服电动机(无级变速)驱动,所以它的传动链短、结构比较简单。普通机床上各个传动

链之间有复杂的齿轮联系,在数控机床上改由计算机来协调控制各个坐标轴之间的运动关系。为了保证数控机床的快速响应特性,在数控机床上普遍采用精密滚珠丝杠、直线滚动导轨副、摩擦特性良好的滑动(贴塑)导轨副。为了保证数控机床的高精度、高效率和高自动化加工,机床的机械结构应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。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、对刀仪等,以利于充分发挥数控机床的功能。

5. 机电接口

数控机床除了实现加工零件轮廓轨迹的数字控制外,还有许多其他的控制,如主轴的启动、停止,自动换刀,冷却液的开、关,工件的夹紧、松开,各种辅助交流电动机的启动、停止,电磁铁的吸合、释放,离合器的开、合,电磁铁的通、断,电磁阀的打开与关闭等。这些逻辑开关量的动力来源是由电源变压器、控制变压器、各种断路器、保护开关、接触器、功率断路器及熔断器等组成的强电路提供的,而这种强电路不能与低压下工作的控制电路或弱电线路直接连接,只能通过断路器、热动开关、中间继电器等转换成直流低压下工作的触点的开、合(关)工作,成为继电器逻辑电路或可编程序控制器(PLC)可接收的信号。

以上这些都是属于数控装置和机床之间的接口问题,统称为机电接口。解决这些问题,首先要知道机床上有哪些动作,其次是这些动作的先后顺序以及它们之间的逻辑(联锁、互锁等)关系等。

1.2.2 数控机床的工作过程

数控机床是用数字信息进行控制的机床。数控机床的工作过程是将加工零件的几何信息和工艺信息进行数字化处理,即对所有的操作步骤(如机床的启动或停止、主轴的变速、工件的夹紧或松开、刀具的选择和交换、切削液的开或关等)和刀具与工件之间的相对位移以及进给速度等都用数字化的代码表示。在加工前由编程人员按规定的代码将零件的图纸编制成程序,然后通过程序载体(如磁带、磁盘、光盘和半导体存储器等)或 MDI 方式将数字信息送入数控系统的计算机中进行寄存、运算和处理,最后通过驱动电路由伺服装置控制机床实现自动加工。其基本过程如图 1-2 所示。

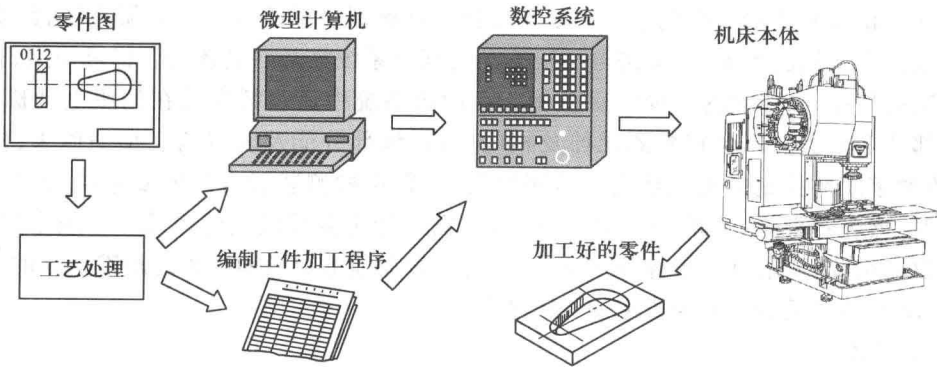


图 1-2 数控加工过程示意图

在加工前要分析零件图,拟定零件加工工艺方案,明确加工工艺参数,然后按编程规则编制

数控加工程序,通过 MDI 键盘将程序输入到机床的数控系统中,经检查无误即可启动机床,运行数控加工程序。数控装置会按照数控加工程序发出的各种控制指令自动进行加工,如果不出现故障,直到加工程序运行结束,零件加工完毕为止,或者在进行工艺处理后,用 CAM 软件在微机上进行几何造型,并自动生成数控加工程序,通过通信接口输入到机床的数控系统中,实现工件的自动化加工。

1.3 数控机床的特点

数控机床由普通机床发展演变而来,与普通机床相比,数控机床具有鲜明的特点。因此数控机床的普及率越来越高。数控机床的特点主要包括以下方面:

1. 自动化程度高

数控机床集中了机、电、数控、气、液等综合技术,从最初的单台数控机床发展到目前的单机多轴、柔性加工单元、柔性制造系统。自动运行控制形式,从最初单一纸带方式发展到目前的多种方式,包括分布式数字控制(distributed numerical control, DNC)和远程控制方式,并且可以实现多种形式的自动上下料,加工过程能对工件和刀具进行监控和测量,并能有效地补偿和修正,排屑冷却都实现了自动化。

2. 适应性强

适应性是指数控机床随生产对象变化而变化的适应能力。由于市场对产品的需求逐渐趋于多样化,实现单件、小批量产品的生产自动化是制造业的当务之急。当产品改变时,对数控机床来说,仅仅需要改变数控机床的输入程序就能适应新产品的生产需要,而不需要改变机械部分和控制部分的硬件,而且生产过程是自动完成的。因此,用数控机床生产,准备周期短、灵活性强,为多品种小批量生产和新产品的研制提供了方便条件。

3. 精度高

数控机床是按照预定程序自动工作的,工作过程一般不需要人工干预,这就消除了操作者人为产生的误差。在设计制造设备时,通常采取了许多措施,使数控机床达到较高的精度。数控装置的脉冲当量目前可达 $0.01 \sim 0.0001 \text{ mm}$,同时可以通过实时检测误差修正或补偿来获得更高的精度。

4. 功能强

数控机床利用了计算机的高速计算处理能力,实现许多复杂的数控功能,如二次曲线插补运算、多轴联动、固定循环加工、坐标偏移、图形显示、刀具补偿等,使刀具在三维空间中能实现任意轨迹,完成复杂型面的加工过程。

5. 可靠性高

数控机床零件程序的存储容量大,非常复杂的零件程序也可以一次输入存储器,方便进行程序调试和仿真试运行,确保加工安全。数控机床还易于设立各种诊断程序,能进行故障预检和自动查找,便于维修和减少停机时间。

6. 效率高

由于数控机床可采用较大的切削用量,有效地减少了加工中的切削工时。数控机床还具有自动变速、自动换刀和其他辅助操作自动化等功能,并且无需工序间的检验与测量,使辅助时间