



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定
全国机械行业高等职业教育“十二五”规划教材
模具设计与制造专业

模具数控加工技术

全国机械职业教育模具类专业教学指导委员会 组编
武友德 彭雁 钟成明 主编

第2版

MUJU SHUKONG
JIAGONG JISHU



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠 电子 课件



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定
全国机械行业高等职业教育“十二五”规划教材
模 具 设 计 与 制 造 专 业

模具数控加工技术

第2版

全国机械职业教育模具类专业教学指导委员会 组编

主编 武友德 彭雁 钟成明（企业）

参编 杨金凤 曹素兵 杨保成

徐斐（企业） 吴勤（企业）

杨松凡（企业） 李珊琳（企业）

主审 冷真龙 罗大兵（企业）



机械工业出版社

本书为“十二五”职业教育国家规划教材，经全国职业教育教材审定委员会审定。

本书共6个单元，分别为课程认识、模具数控加工技术基础、模具零件的数控车削加工技术、模具零件的数控铣削加工技术、模具零件的加工中心加工技术及模具零件的数控电火花线切割加工技术。

除了基础单元部分外，每个单元均按照模具企业中模具零件加工岗位的能力要求，分析本单元承担的任务，选择合适的载体，并基于零件加工的工作流程将实际生产案例有机地融入教学内容中，做到课堂教学与生产实际的有机结合。

本书可以作为高等职业院校模具设计与制造专业学生用书，也可作为企业技术人员的参考资料。

本书配套有电子课件，凡选用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教育服务网 www.cmpedu.com，注册后免费下载。咨询邮箱：cmp-gaozhi@sina.com。咨询电话：010-88379375。

图书在版编目（CIP）数据

模具数控加工技术/武友德，彭雁，钟成明主编. —2版.
—北京：机械工业出版社，2016.10
“十二五”职业教育国家规划教材 经全国职业教育
教材审定委员会审定
ISBN 978-7-111-55099-0

I. ①模… II. ①武…②彭…③钟… III. ①模具-
数控机床-加工-高等职业教育-教材 IV. ①TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 244967 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：于奇慧 责任编辑：于奇慧
责任印制：常天培 责任校对：陈秀丽
北京京丰印刷厂印刷
2017 年 1 月第 2 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·14.5 印张·353 千字
0 001—1 900 册
标准书号：ISBN 978-7-111-55099-0
定价：31.00 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

网络服务

服务咨询热线：010-88379833 机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649 机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

前 言

“模具数控加工技术”课程是模具设计与制造专业的一门主干课程。为建设好该课程，利用示范建设这个有利时机，在中国机械工业联合会的指导下，由全国机械职业教育模具类专业教学指导委员会牵头，联合企业，组建了课程开发团队并进行教材的编写。

为了使“模具数控加工技术”课程符合高素质应用型技能人才的培养目标和专业技术领域职业岗位的任职要求，课程开发团队按照行业引领、企业主导、学校参与的思路，经过认真分析模具企业中模具设计、模具制造、模具装配与调试等岗位的职业能力要求，制订了相应岗位的《职业能力标准》，并依据本标准明确课程内容，按照企业相应岗位的工作流程组织课程内容。

本书的编写始终以模具数控加工岗位职业能力要求的典型工作任务为依托，以基于工厂的典型模具零件的数控加工的真实加工过程为导向，结合企业实际零件制造的工作流程，在分析完成每个流程所必需的知识和能力结构、并归纳课程主要工作任务的基础上，选择合适的载体构建主体学习单元；采用任务驱动、项目导向，以职业能力培养为重点，将真实的生产过程融入教学的全过程中。

本书共6个单元，分别为课程认识、模具数控加工技术基础、模具零件的数控车削加工技术、模具零件的数控铣削加工技术、模具零件的加工中心加工技术及模具零件的数控电火花线切割加工技术。

本书由学校与企业合作编写，由四川工程职业技术学院武友德教授、辽宁机电职业技术学院彭雁副教授和东方汽轮机有限公司钟成明高级工程师联合担任主编，由四川工程职业技术学院冷真龙教授和东方电机股份有限公司罗大兵高级工程师联合担任主审。四川工程职业技术学院武友德教授、东方汽轮机有限公司钟成明高级工程师共同编写第1、2单元，武友德执笔；辽宁机电职业技术学院彭雁副教授、第二重型机械集团公司徐斐高级工程师共同编写第3单元，彭雁执笔；四川工程职业技术学院曹素兵、第二重型机械集团公司杨松凡高级工程师共同编写第4单元，曹素兵执笔；四川工程职业技术学院杨保成、东方电机股份有限公司吴勤高级工程师共同编写第5单元，杨保成执笔；四川工程职业技术学院杨金凤副教授、中国第二重型机械集团公司李珊琳高级工程师共同编写第6单元，杨金凤执笔。

在本书的编写过程中，四川机械工业数控技术应用与培训中心、四川工程职业技术学院数控技术中心的老师和技术人员提供了大量资料和许多宝贵的经验，并对全书进行了审阅，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
教学单元1 课程认识	1
1.1 课程的性质和定位	1
1.2 本课程内容与其他课程内容的衔接	1
1.3 教学方法与学习方法	2
教学单元2 模具数控加工技术基础	3
2.1 数控机床概述	3
2.1.1 数控机床的产生	3
2.1.2 数控机床的组成、控制原理及特点	3
2.1.3 数控机床的分类	6
2.1.4 数控机床的发展	11
2.2 数控编程基础	14
2.2.1 数控机床的坐标系	14
2.2.2 数控程序的格式与编制	18
练习与思考题	20
教学单元3 模具零件的数控车削加工技术	21
3.1 任务引入	21
3.2 相关知识	21
3.2.1 数控车床概述	21
3.2.2 数控车削加工工艺基础	24
3.2.3 数控车削加工编程	29
3.2.4 数控车床编程方法	32
3.3 任务实施	49
3.3.1 典型模具零件的数控车削加工程序编制	49
3.3.2 典型模具零件的数控车削加工	50
企业专家点评	59
练习与思考题	60
教学单元4 模具零件的数控铣削加工技术	61
4.1 任务引入	61
4.2 相关知识	61
4.2.1 数控铣床概述	62
4.2.2 数控铣削加工工艺基础	66
4.2.3 数控铣削加工的程序编制	68
4.2.4 西门子8MC系统的R参数编程	85
4.3 任务实施	95
4.3.1 典型模具零件的数控铣削加工程序编制	95
4.3.2 典型模具零件的数控铣削加工	97
企业专家点评	109
练习与思考题	109
教学单元5 模具零件的加工中心加工技术	110
5.1 任务引入	110
5.2 相关知识	111
5.2.1 加工中心概述	111
5.2.2 加工中心的结构及工作方式	114
5.2.3 加工中心的加工对象	115
5.2.4 加工中心加工工艺基础	117
5.2.5 加工中心的编程特点	129
5.2.6 加工中心常用编程指令	131
5.2.7 孔加工固定循环功能	142
5.2.8 加工中心换刀方式与编程	151
5.3 任务实施	156
5.3.1 工艺分析	156
5.3.2 编制并填写零件的数控加工工艺文件	157
5.3.3 确定并绘制进给路线	159
5.3.4 数控程序的编制	161
5.3.5 加工中心零件加工	166
企业专家点评	175
练习与思考题	175
教学单元6 模具零件的数控电火花线切割加工技术	176
6.1 任务引入	176
6.2 相关知识	177
6.2.1 数控电火花线切割的加工原理和特点	177
6.2.2 数控电火花线切割机床	178

6.2.3 数控电火花线切割编程	184	6.3.1 模具零件分析与坯料的准备	216
6.2.4 数控电火花线切割计算机辅助 编程	198	6.3.2 数控电火花线切割编程与 加工	217
6.2.5 数控电火花线切割机床的加工 与操作	206	企业专家点评	222
6.3 任务实施	216	练习与思考题	222
		参考文献	223

教学单元1 课程认识

1.1 课程的性质和定位

模具设计与制造专业主要面向模具行业、企业的模具设计、模具制造和模具装配与调试等岗位，相关技术人员也可在机械制造企业从事产品的制造加工和装配等工作。随着科学技术的发展，机械行业的产品，特别是模具产品的结构日趋复杂，精度和性能要求日趋提高，因此，对生产设备——机床也相应地提出了高效率、高精度和高自动化等方面的要求。为满足人们的需要，产品需日益更新，且呈多品种、单件小批的趋势发展。为了适应这种趋势，必须找到一种能解决单件、小批、多品种，特别是复杂型面零件加工的自动化、高精度设备，数控机床就是在此背景下产生的。数控机床加工技术是利用数控设备、根据不同的工艺要求来完成零件加工的技术。操作人员技术水平的高低直接影响数控机床功能的发挥，并直接影响产品的质量和生产效益。

高职高专模具设计与制造专业主要面向企业的设备操作、模具零件制造工艺与工装设计及模具产品装配与调试等岗位，培养高素质、高技能型人才。

在模具产品的生产和制造过程中，首先必须进行模具的设计，然后完成模具零件的加工，最后进行模具产品的装配与调试。模具零件的制造离不开检测量具或量仪、刀具、夹具及机床等工艺装备。模具制造的工艺文件是指导生产不可缺少的技术文件，工艺文件反映的主要内容包含零件生产加工过程中使用的刀具及参数、量具、机床设备及切削用量等。

“模具数控加工技术”课程是模具设计与制造专业一门主干专业课程，它围绕模具生产加工岗位的能力要求，强化模具零件加工工艺的应用，使学生具备分析和解决生产过程中遇到的一般问题的能力；能依据工艺文件的要求，合理选择刀具、机床和切削用量；能编写数控加工程序，并输入、调试和修改程序；能操作数控车床、数控铣床、加工中心及电火花线切割机床等常用数控设备，完成模具零件的加工和测量。

“模具数控加工技术”课程主要讲授数控车削加工技术、数控铣削加工技术、加工中心加工技术及数控电火花线切割加工技术，使学生具备全面的模具制造能力。

1.2 本课程内容与其他课程内容的衔接

“模具数控加工技术”课程是学生在学习完“模具成型设备”“模具设计”“模具制造工艺与工装”等主干专业课程的基础上，进行综合应用的一门课程。该课程与其他各课程之间衔接紧密，是培养学生的模具制造能力的主要课程。

“模具成型设备”课程主要讲述模具产品成型的主要方法和设备，这些内容与“模具设计”课程关联性很大；当模具设计好后，在“模具制造工艺与工装”课程中进行零件的加工工艺编制，由于模具零件（特别是腔模）结构复杂，往往要用到数控加工或特种加工。

因此,“模具数控加工技术”就是要解决模具设计完成后的制造问题。因此,本课程是模具设计与制造专业重要的专业主干课程,只有学好本课程,才能保障该专业“制造能力”的培养,才能保证专业培养目标的实现。

1.3 教学方法与学习方法

由于本课程对理论与实践的要求都很高,所以必须强化理论与实践的有机结合,充分利用行业、企业优势,大力推行“校企合作、工学结合”的教学模式,做到理论与实践并重,强化应用能力的培养。

教师的教学方法如下:

- 1) 采取任务驱动的教学模式。
- 2) 完善实践教学资源,开发多种教学手段。
- 3) 引入企业典型案例,理论联系实际开展教学。

学生的学习方法如下:

- 1) 了解本课程的重要性。
- 2) 重视本课程的学习,端正学习态度。
- 3) 强化理论钻研,拓展相关知识面。
- 4) 深入实验室,认真做好实验。
- 5) 深入校内生产实训基地,全面了解企业生产过程,切实了解各类常用刀具及其在生产中的使用方法。

教学单元2 模具数控加工技术基础

2.1 数控机床概述

2.1.1 数控机床的产生

对于大批大量生产的产品,如汽车、拖拉机及家用电器的零件,为了提高产量和质量,广泛采用组合机床、凸轮控制的多刀多工位机床,以及专用的自动生产线和自动化车间进行加工。但是应用这类专用机床和生产设备,生产准备周期长,产品更新及修改加工工艺时产生的费用较高,制约了产品的更新换代。在制造行业中,单件与小批产品占70%~80%,这类产品的零件一般都采用通用机床来加工,通用机床的自动化程度不高,基本上由人工操作,难以提高生产效率和保证产品质量。特别是一些由曲线、曲面组成的复杂零件,只能借助划线和样板用手工操作的方法来加工,或利用靠模和仿形机床来加工,其加工精度和生产效率仍会受到很大的限制。

数控机床可以实现单件、小批量、多品种,特别是复杂型面零件加工的自动化,并保证加工质量。1952年,美国PARSONS公司与麻省理工学院(MIT)合作研制了第一台坐标数控铣床,它综合应用了电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测及新型机械结构等多方面的技术成果,是一种新型的机床,可用于加工复杂曲面零件。该铣床的研制成功是机械制造行业中的一次技术革命,使机械制造业的发展进入了一个新的阶段。从第一台数控机床问世到现在,数控技术的发展非常迅速,几乎所有品种的机床都实现了数控化。数控机床的应用领域也从航空工业部门逐步扩大到汽车、造船及建筑等民用机械制造行业。此外,还出现了金属成形类数控机床,如数控折弯机、数控弯管机及数控冲压机等;随后又出现了特种加工数控机床,如数控线(电极)切割机、数控火焰切割机及数控激光切割机床等;其他还有数控绘图机、数控三坐标测量机等;特别是相继出现的自动换刀数控机床(即加工中心, Machining Center)、直接数字控制系统(即计算机群控系统, DNC——Direct Numerical Control)、自适应控制系统(AC——Adaptive Control)、柔性制造系统(FMS——Flexible Manufacturing System)及计算机集成(综合)制造系统(CIMS——Computer Integrated Manufacturing System)等,进一步说明,数控机床已经成为组成现代机械制造生产系统,实现计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助检验(CAT)及生产管理等全部生产过程自动化的基本设备。

2.1.2 数控机床的组成、控制原理及特点

1. 数控机床的组成

数控机床的组成如图2-1所示。

(1) 程序编制及程序载体 数控程序是数控机床自动加工零件的工作指令。在对零件

进行工艺分析的基础上,确定零件坐标系在机床坐标系中的相对位置,即零件在机床上的安装位置、刀具与零件相对运动的尺寸参数、零件加工的工艺路线或加工顺序、切削加工的工艺参数及辅助装置的动作等,得到零件的所有运动、尺寸及工艺参数等加工信息,然后由用文字、数字和符号组成的数控代码,按规定的方法和格式,编制零件加工的数控程序单。编制程序的工作可由人工进行,或者在数控机床以外用自动编程计算机系统来完成;对于比较先进的数控机床,可以在其数控装置上直接编程。编好的数控程序,存放在便于输入到数控装置的一种存储载体上,如磁卡、磁盘等,采用哪一种存储载体取决于数控装置的设计类型。

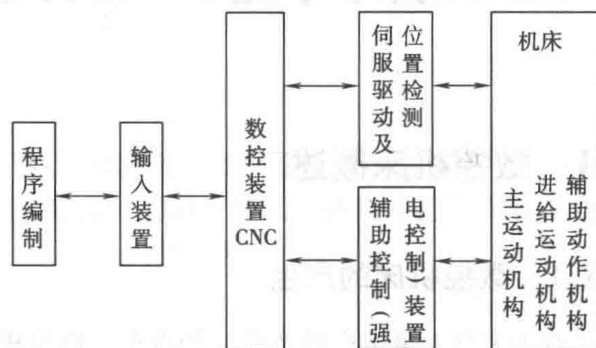


图 2-1 数控机床的组成

(2) 输入装置 输入装置的作用是将程序载体上的数控代码变成相应的电脉冲信号,传送并存入数控装置内。根据程序存储介质的不同,输入装置可以是光电阅读机、录放机或软盘驱动器。有些数控机床不用任何程序存储载体,而是将数控程序单的内容通过数控装置上的键盘,用手工方式(MDI方式)输入,或者将数控程序由编程计算机通过通信方式传送到数控装置。

(3) 数控装置及强电控制装置 数控装置是数控机床的核心,它接收输入装置送来的脉冲信号,经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行编译、运算和逻辑处理后,输出各种信号和指令控制机床的各个部分,进行规定的、有序的动作。这些控制信号中,最基本的信号是由插补运算决定的各坐标轴(即做进给运动的各执行部件)的进给位移量、进给方向和速度指令,经伺服驱动系统驱动执行部件做进给运动。此外还有主运动部件的变速、换向和起停信号,选择和更换刀具的刀具指令信号,切削液的开关,工件和机床部件的松开、夹紧,以及分度工作台转位等辅助指令信号。

强电控制装置是介于数控装置和机床机械、液压部件之间的控制系统。其主要作用是接收数控装置输出的主运动变速、刀具的选择与更换及辅助装置动作等指令信号,经必要的编译、逻辑判断和功率放大后直接驱动相应的电器、液压、气动和机械部件,完成指令规定的动作。行程开关和监控检测等开关信号也要经过强电控制装置送到数控装置进行处理。

(4) 伺服驱动系统及位置检测装置 伺服驱动系统由伺服驱动电路和伺服驱动装置(如伺服电动机)组成,并与机床上的执行部件和机械传动部件组成数控机床的进给系统,根据数控装置发来的速度和位移指令控制执行部件的进给速度、方向和位移。每个做进给运动的执行部件都配有一套伺服驱动系统。伺服驱动系统有开环、半闭环和闭环之分。在半闭环和闭环伺服驱动系统中,还需使用位置检测装置,间接或直接测量执行部件的实际进给位移,并与指令位移进行比较,将误差转换、放大后控制执行部件的进给运动。

(5) 机床的机械部件 数控机床的机械部件包括主运动部件、进给运动执行部件、工作台、拖板及其传动部件和床身立柱等支撑部件,以及冷却、润滑、排屑、转位和夹紧等辅助装置。对于加工中心类的数控机床,还有存放刀具的刀库、更换刀具的机械手等部件,如图 2-2 所示的 TH5632 立式加工中心。数控机床机械部件的组成与普通机床相似,但传动机构要求更为简单,在精度、刚度及抗震性等方面要求更高,而且其传动和变速系统要便于实

现自动化控制。

2. 数控机床的控制原理

数控机床是一种高度自动化的机床，在加工工艺与加工表面成形方法上，与普通机床是基本相同的，最根本的不同点在于实现自动化控制的原理与方法上。数控机床是用数字化的信息来实现自动控制的，将与加工零件有关的信息——工件与刀具相对运动轨迹的尺寸参数（如进给量）、切削加工的工艺参数（如主运动和进给运动的速度、背吃刀量等）及各种辅助操作（主运动变速、刀具更换、切削液开停及工件的夹紧与松开等）等，用规定的文字、数字和符号组成的代码，按一定的格式编写成加工程序单，再将加工程序输入到数控装置中，由数控装置经过分析处理后，发出各种与加工程序相对应的信号和指令控制机床进行自动加工。该数字控制的原理与过程通过上述数控机床的各个组成部分来完成。

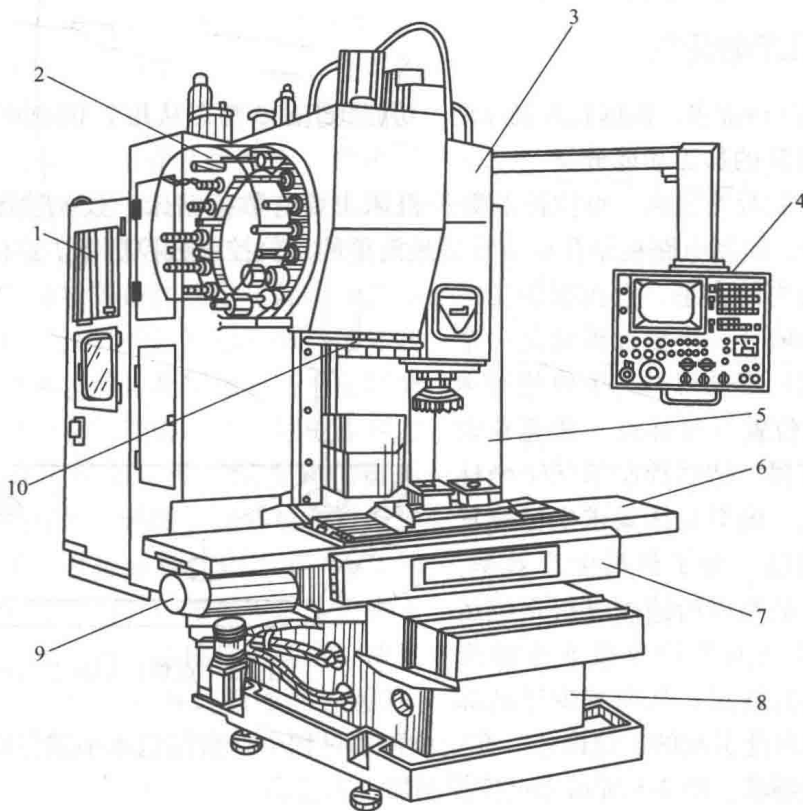


图 2-2 TH5632 立式加工中心

1—数控柜 2—刀库 3—主轴箱 4—操纵台 5—驱动电源柜 6—纵向工作台
7—滑座 8—床身 9—X 轴进给伺服电动机 10—换刀机械手

3. 数控机床的特点

数控机床在机械制造业中得到了日益广泛的应用，其特点如下：

1) 能适应不同零件的自动加工。数控机床是按照被加工零件的数控程序进行自动加工的。当改变加工零件时，只要改变数控程序，不必更换凸轮、靠模、样板或钻模等专用工艺装备。因此，它的生产准备周期短，有利于机械产品的更新换代。

2) 生产效率和加工精度高，加工质量稳定。数控机床可以采用较大的切削用量，有效地节省了机动工时。自动变速、自动换刀和其他辅助操作自动化等功能使辅助时间大为缩

短,而且无须工序间的检验与测量,所以比普通机床的生产率高3~4倍,甚至更高。同时,由于数控机床本身的精度较高,还可以利用软件进行精度校正和补偿;且数控机床是根据数控程序自动进行零件加工的,可以避免人为的误差,不但加工精度高,而且质量稳定。

3) 能高效优质地完成复杂型面零件的加工。

4) 工序集中,一机多用。数控机床,特别是自动换刀的数控机床,在一次装夹的情况下,几乎可以完成零件的全部加工,这样既可以减少装夹误差,节约工序之间的运输、测量和装夹等辅助时间,还可以节省机床的占地面积,带来较高的经济效益。一台数控机床可以代替数台普通机床。

5) 数控机床是一种高技术含量的设备,导致数控机床的价格较高,而且要求具有较高技术水平的人员来操作和维修。尽管如此,使用数控机床的经济效益还是很高的。

2.1.3 数控机床的分类

数控机床的品种很多,根据其控制原理、功能和组成,可以从几个不同的角度进行分类。

1. 按数控机床的加工功能分类

(1) 点位控制数控机床 点位控制数控机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床及三坐标测量机等,印制电路板钻孔机应算是最简单的点位控制数控机床。点位控制的数控机床用于加工平面内的孔系,它控制加工平面内的两个坐标轴(一个坐标轴就是一个方向的进给运动)带动刀具与工件相对运动,从一个坐标位置(坐标点)快速移动到下一个坐标位置,然后控制第三个坐标轴进行切削加工。该类机床要求坐标位置有较高的定位精度,为了提高生产效率,机床采用设定的最高进给速度进行定位运动,在接近定位点前进行分级或连续降速,以便低速趋近终点,从而减少运动部件的惯性过冲和由此引起的定位误差。在定位移动过程中,数控机床不进行切削加工,对运动轨迹没有任何要求。图2-3所示为点位控制加工示意图。

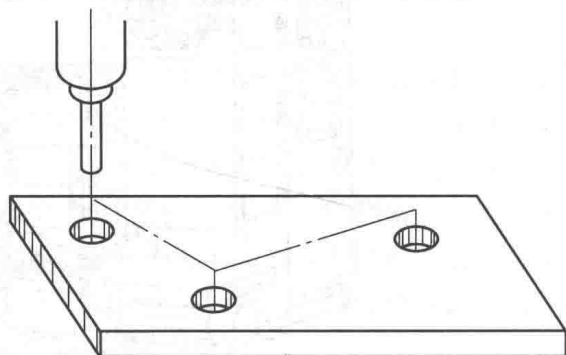


图 2-3 点位控制加工示意图

(2) 直线控制数控机床 直线控制数控机床可控制刀具或工作台以适当的进给速度,沿着平行于坐标轴的方向进行直线移动和切削加工,进给速度根据切削条件可在一定范围内调整。直线控制的简易数控车床,只有两个坐标轴,可用于加工台阶轴。直线控制的数控铣床有三个坐标轴,可用于平面的铣削加工。现代组合机床采用数控进给伺服系统,驱动动力头带着多个轴箱沿轴向进给,进行切削加工,它也可以算作一种直线控制的数控机床。图2-4所示为直线控制加工示意图。

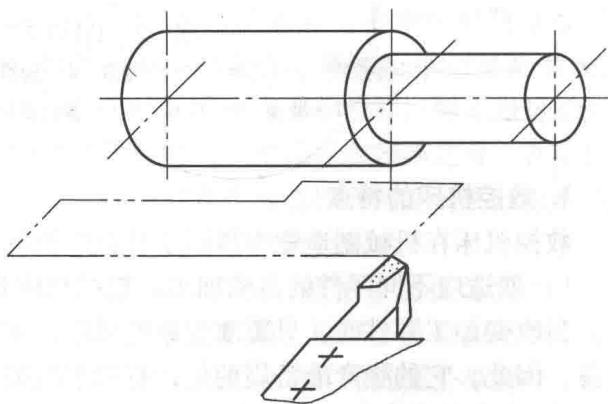


图 2-4 直线控制加工示意图

工示意图。

(3) 轮廓控制数控机床 轮廓控制数控机床分为平面轮廓加工的数控机床和空间轮廓加工的数控机床。平面轮廓加工的数控机床有车削曲面零件的数控车床和铣削曲面轮廓的数控铣床，其加工零件的轮廓形状如图 2-5 所示。零件的轮廓可以由直线、圆弧或任意平面曲线（如抛物线、阿基米德螺旋线等）组成。不管零件轮廓由何种线段组成，加工时通常用小段直线来逼近曲线轮廓，如图 2-5c 所示。在数控铣床上用圆柱铣刀铣削轮廓面时，数控系统控制刀具中心相对工件在单位时间内，同时在两个坐标轴方向上移动 Δx_i 、 Δy_i ，刀具中心对工件的合成位移 ΔL_i ，则由轮廓曲线的等距线上的点 I' 移到点 J' ，从而在工件上加工出一小段直线 IJ ，来逼近轮廓曲线上的 IJ 圆弧。连续控制两个相对位移分量 Δx_i 、 Δy_i ，便可加工出多段小直线组成的折线来逼近曲线轮廓。进给分量 Δx_i 、 Δy_i 由合成进给速度、单位时间、轮廓曲线的数学公式 $y=f(x)$ 、刀具半径 R 及加工余量 δ 确定的刀具中心对零件轮廓的偏移量 ($D=R+\delta$) 等条件确定，并由数控系统实时计算获得。这样的运算称为插补运算和刀具半径补偿运算。用计算所得的两个位移分量分别指令两个坐标轴同时运动，这种控制方式称为两坐标联动控制。用半径为 R 的圆弧切削刃车刀车削曲面零件时，同样也要进行插补运算与刀具半径补偿运算。用半径 $R=0$ 的切削刃车刀进行加工时，可根据工件的轮廓直接运算，不需考虑刀具中心偏移的问题，故无须进行刀具半径补偿的运算，只作插补运算。能够进行两坐标联动控制的数控机床，一般也能够进行点位和直线控制。

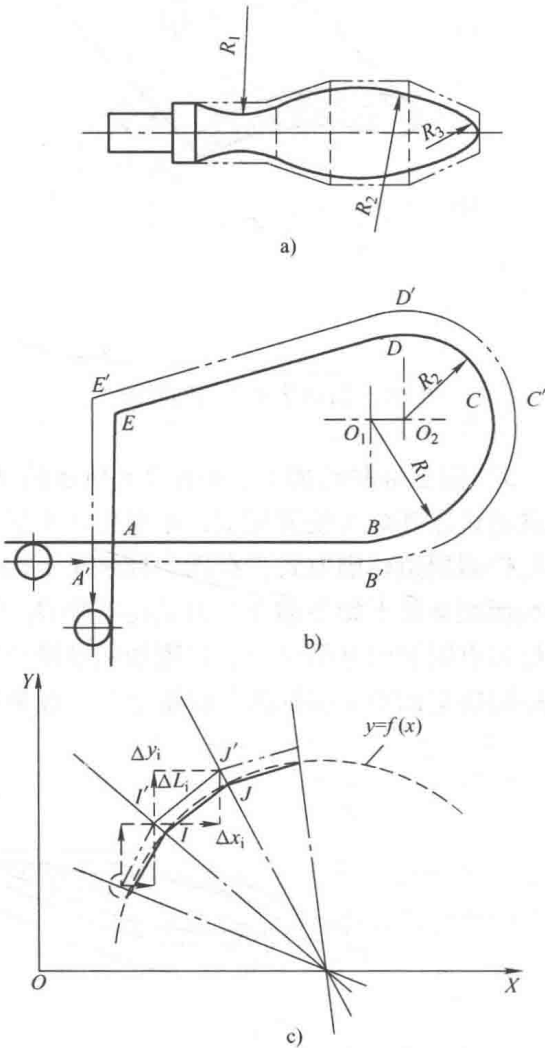


图 2-5 数控加工平面轮廓的成形

空间轮廓加工的数控机床根据轮廓形状和刀具形状的不同有以下几种加工方法。

- 1) 在三坐标控制两坐标联动的机床上，用“行切法”进行加工。也有将这种方法称为两轴半控制的，即 X 、 Y 、 Z 三轴中任意两轴做插补运动，第三轴做周期性进给运动，刀具采用球头铣刀，如图 2-6 所示。在 Y 向分为若干段，球头铣刀沿 XZ 平面的曲线进行插补加工，当一段加工完后，进给 Δy ，再加工另一相邻曲线，如此依次用平面曲线来逼近整个曲面。其中， Δy 根据表面粗糙度的要求及刀具的半径选取，球头铣刀的球半径应尽可能选得大一些，以减小表面粗糙度 Ra 值，增加刀具刚度和散热性能。但在加工凹面时，球头半径必须小于被加工曲面的最小曲率半径，以免产生切削刃干涉。
- 2) 三坐标联动加工。图 2-7 所示为内循环滚珠螺母的回珠器示意图，其滚道母线 SS' 为

一空间曲线，它可用空间直线去逼近，可在有空间直线插补功能的三坐标联动机床上加工。但是编程计算较复杂，其加工程序可采用自动编程系统来编制。

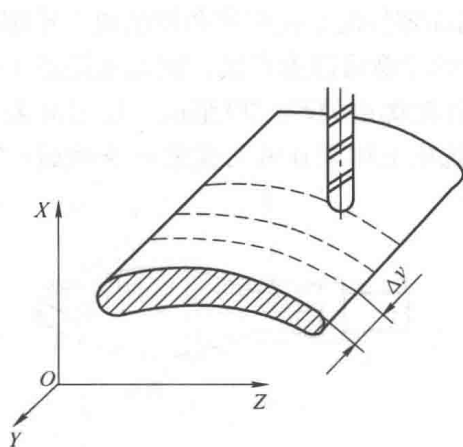


图 2-6 行切法加工空间轮廓

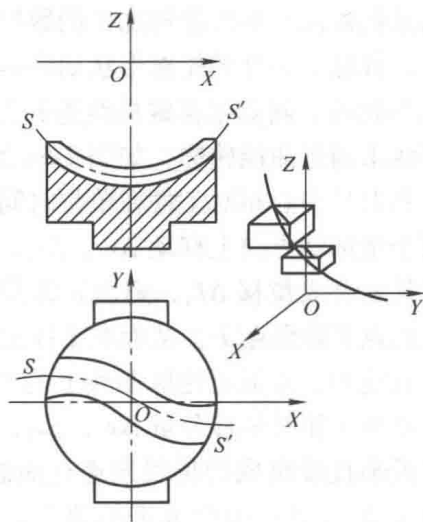


图 2-7 三坐标联动加工

3) 四坐标联动加工。如图 2-8 所示的飞机大梁，其加工表面是直纹扭曲面，若用三坐标联动机床和球头铣刀加工，不但生产率低，而且零件表面的表面粗糙度也很差。可以采用圆柱铣刀周边切削方式，在四坐标机床上加工，除三个移动坐标的联动外，为保证刀具与工件型面在全长上始终贴合，刀具还应绕 O_1 （或 O_2 ）作摆动联动。此摆动运动导致直线移动坐标要有附加的补偿移动，其附加运动量与摆心的位置有关，也需在编程时进行计算。加工程序要决定四个坐标轴的位移指令，以控制四轴联动加工，因此编程是相当复杂的。

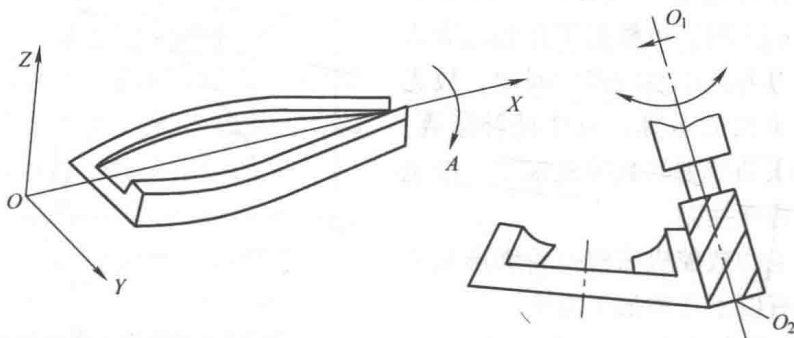


图 2-8 四坐标联动加工

4) 五坐标联动加工。所有的空间轮廓几乎都可以用球头铣刀按“行切法”进行加工。对于一些大型的曲面轮廓，零件的尺寸和曲面的曲率半径都比较大，改用面铣刀进行加工可以提高生产率、减少加工的残留量（减小表面粗糙度 Ra 值），如图 2-9 所示。用面铣刀加工时，刀具的端面与工件轮廓在切削点处的切平面重合（加工凸面），或者与切平面成某一夹角（加工凹面），亦即刀具轴线与工件轮廓的法线平行或成某一夹角（该夹角可以避免产生切削刃干涉）。加工时，切削点 $P(x, y, z)$ 处的坐标与法线 n 的方向角 θ 是不断变化的，

故刀具刀位点 O 的坐标与刀具轴线的方向角也要作相应的变化。目前的数控机床在编制加工程序时都是根据零件曲面轮廓的数学模型,计算出每一个切削点对应的刀位点 O 的坐标与方向角(即刀位数据),通过程序输入到数控系统,以控制刀具。刀位点的坐标位置可以由三个直线进给坐标轴来实现,刀具轴线的方向角则可以由任意两个绕坐标轴旋转的转角合成实现。因此,用面铣刀加工空间

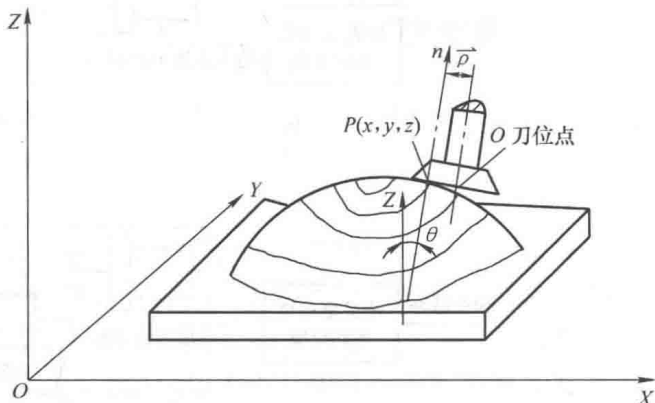


图 2-9 五坐标联动加工

曲面轮廓时,需控制五个坐标轴(三个直线坐标轴和两个圆周进给坐标轴)进行联动。五轴联动的数控机床是功能最全、控制最复杂的一种数控机床,五坐标联动加工的程序编制也是最复杂的,应使用自动编程系统来编制。

上述分类主要是基于数控机床的加工功能。如果从控制轴数和联动轴数的角度来分类,数控机床可分为两轴联动数控机床、三轴控制两轴联动数控机床、三轴联动数控机床及五轴联动数控机床等。

2. 按工艺用途分类

(1) 普通数控机床 普通数控机床有数控钻床、数控车床、数控铣床及数控镗床等。它们和传统的通用机床的工艺用途相似,但是它们的生产率和自动化程度比传统机床高,都适合于单件、小批和复杂形状零件的加工。

(2) 加工中心 加工中心是在一般数控机床的基础上,加装一个刀库和自动换刀装置,构成一种带自动换刀装置的数控机床,如图 2-2 所示的 TH5632 立式加工中心。这类机床的突出特点是,打破了一台机床只能进行单工种加工的传统概念,可在一次装夹定位后完成多工序加工。

(3) 多坐标轴数控机床 有些复杂的工件,如螺旋桨、飞机发动机叶片曲面等,用三坐标数控机床无法加工,于是出现了多坐标轴数控机床。其特点是控制轴数较多,机床结构比较复杂。

3. 按进给伺服系统的类型分类

(1) 开环数控机床 开环数控机床采用开环进给伺服系统,图 2-10 所示为典型的开环进给伺服系统。其中,图 2-10a 所示为由功率步进电动机驱动的开环进给系统,数控装置根据要求的进给速度和进给量,输出一定频率和数量的进给指令脉冲,经驱动电路放大后,每一个进给脉冲驱动功率步进电动机旋转一个步距角,再经减速齿轮、滚珠丝杠螺母副,转换成工作台的一个当量直线位移。对于圆周进给,一般通过减速齿轮、蜗杆副带动转台进给一个当量角位移。由于功率步进电动机的输出转矩有限,不足以驱动较大的工作台等部件,可采用由小型号的步进电动机与液压扭矩放大器组成的电液脉冲电动机作为驱动装置,它可以输出较大的转矩,能驱动较大的工作台执行进给运动,如图 2-10b 所示,这类机床的速度及精度都较低。图 2-10a 的方案多用于经济型数控机床或对旧机床的改造,图 2-10b 的方案已不再采用了。

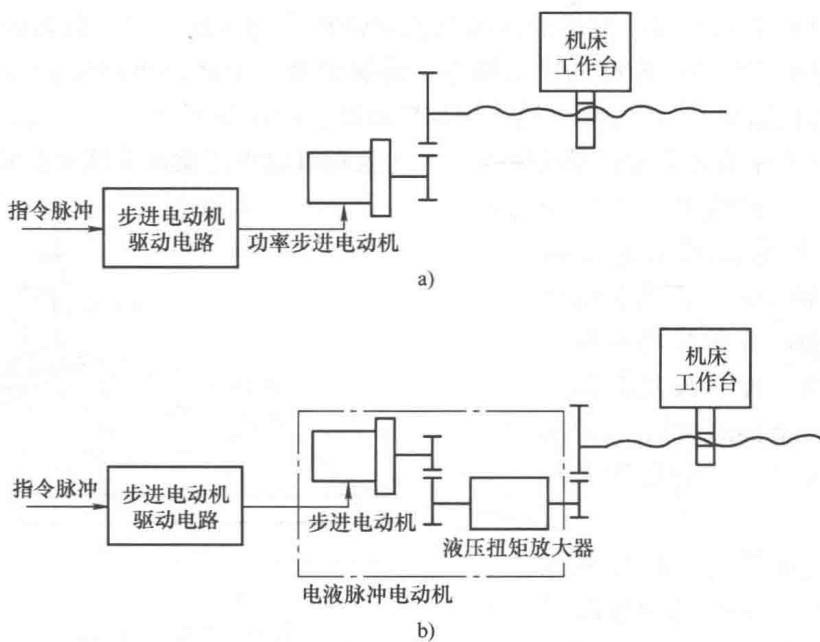


图 2-10 开环进给伺服系统

(2) 半闭环数控机床 如图 2-11a 所示, 将位置检测装置安装在驱动电动机的端部, 或安装在传动丝杠端部 (见图 2-11a 中的虚线), 间接测量执行部件的实际位置或位移, 这种系统就是半闭环进给系统。半闭环系统可以获得比开环系统更高的精度, 但它的位移精度比闭环系统低, 但比闭环系统更易于实现系统的稳定性。现在大多数数控机床都采用半闭环进给伺服系统。

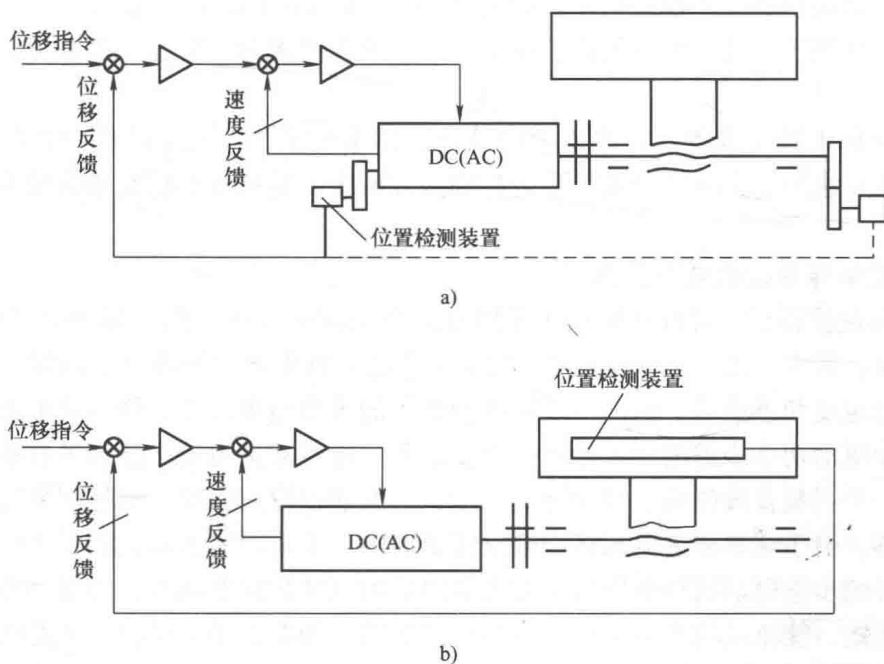


图 2-11 闭环、半闭环进给伺服系统

(3) 闭环数控机床 闭环数控机床的进给伺服系统是按闭环原理工作的。图 2-11b 所示为典型的闭环进给系统。数控装置将位移指令与位置检测装置测得的实际位置反馈信号进行比较, 根据其差值及指令进给量的要求, 按一定规律进行转换, 得到进给伺服系统的新的位移指令。另一方面, 利用和伺服电动机同轴刚性连接的测速元器件, 实测驱动电动机的转速, 得到速度反馈信号, 将它与速度指令信号进行比较, 以其比较的结果即速度误差信号, 对伺服电动机的转速进行校正。利用上述的位置控制和速度控制两个回路, 可以获得比开环进给系统精度更高、速度更快、驱动功率更大的特性指标。如图 2-11b 所示, 闭环进给系统的位置检测装置安装在系统末端的执行部件上。

4. 按数控装置类型分类

(1) 硬线数控机床 硬线数控机床使用硬线数控系统, 它的输入处理、插补运算和控制功能都通过专用的固定组合逻辑电路来实现。不同功能的机床, 其组合逻辑电路也不相同。改变或增减控制、运算功能时, 需要改变数控装置的硬件电路。因此, 硬线数控机床的通用性、灵活性差, 制造周期长, 成本高。20 世纪 70 年代初期以前的数控机床基本上都属于这种类型。现代数控机床不再采用硬线数控系统。

(2) 计算机数控机床 计算机数控机床使用计算机数控系统, 即软线数控系统。这种数控系统的硬件电路是由小型或微型计算机再加上通用或专用的大规模集成电路制成。数控机床的主要功能几乎全部由系统软件来实现, 所以不同功能的机床其系统软件也就不同, 而修改或增减系统功能时, 不需变动硬件电路, 只需改变系统软件。因此, 计算机数控机床具有较高的灵活性, 硬件电路基本是通用的, 有利于大量生产, 提高质量和可靠性, 缩短制造周期, 以及降低成本。早在 20 世纪 60 年代初期就出现了计算机数控机床, 但是直到 20 世纪 70 年代中期以后, 随着微电子技术的发展和微型计算机的出现, 以及集成电路的集成度不断提高, 计算机数控系统才得到不断发展和提高。目前, 几乎所有的数控机床都采用了计算机数控系统。

除了上述四种分类方法以外, 还可以从其他角度对数控机床进行分类。例如, 金属切削类数控机床可分为数控车床、数控铣床等; 金属成形类数控机床可分为数控折弯机、数控弯管机及数控冲床等; 数控特种加工机床可分为数控线切割机、数控激光加工机、数控火焰切割机及数控等离子体切割机等。

2.1.4 数控机床的发展

随着科学技术的发展和制造技术的进步, 产品质量和品种多样化的要求日益提高, 中、小批生产的比重明显增加, 促使数控机床不断向着高效率、高质量、高柔性和低成本的方向发展。另外, 数控机床作为柔性制造单元、柔性制造系统及计算机集成制造系统的基础设备, 对其中的数控装置、伺服驱动系统、程序编制、检测监控及机床主机等组成部分提出了更高的要求。

1. 数控系统的发展

数控系统的发展是数控技术和数控机床发展的关键。电子元器件和计算机技术的发展推动了数控系统的发展。最初的数控系统使用电子管器件, 后来使用晶体管和印制电路板, 20 世纪 60 年代末期开始使用小规模集成电路器件, 这些都是所谓的硬线数控系统。20 世纪 70 年代以来, 随着计算机技术的发展, 出现了以小型计算机、微处理器为核心的计算机数控系