

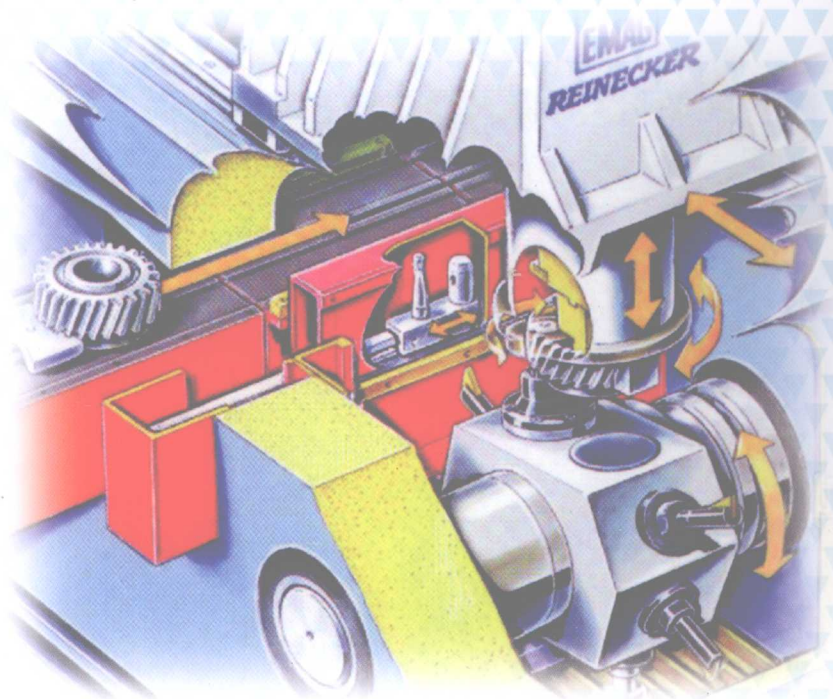


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械制造装备设计

第3版

关慧贞 冯辛安 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
荣获 2002 年全国普通高等学校优秀教材二等奖

机械制造装备设计

第 3 版



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，曾荣获 2002 年全国普通高等学校优秀教材二等奖。

本书第 3 版是根据 1998 年“机械制造及其自动化”专业教学指导委员会讨论通过的指导性教学计划，并将原计划中有关机械制造装备设计的内容，包括机床设计、机器人设计、夹具设计、工业自动化设计等按新的专业课程体系，以及相应的“十一五”教材编写计划组织编写的。着重介绍机械制造装备设计的基本原理和方法，并反映国内外的先进技术和发展趋势。

全书共分七章。第一章为机械制造及装备设计方法，第二章为金属切削机床设计，第三章为典型部件设计，第四章为工业机器人设计，第五章为机床夹具设计，第六章为物流系统设计，第七章为机械加工生产线总体设计。为便于教学，本书配有多媒体电子教案。

本书适用于高等院校“机械设计制造及其自动化”专业以及相关专业的，也可供从事机械制造装备设计和研究的工程技术人员和研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造装备设计/关慧贞、冯辛安主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2009.11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-28500-7

I. 机… II. ①关…②冯… III. 机械制造-工艺装备-设计-高等学校-教材 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 184564 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 韩冰 版式设计: 霍永明

封面设计: 张静 责任校对: 张晓蓉 责任印制: 杨曦

唐山丰电印务有限公司印刷

2010 年 1 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 28.75 印张 · 708 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-28500-7

定价: 40.00 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

社服务中心: (010)88361066

销售一部: (010)68326294

销售二部: (010)88379649

读者服务部: (010)68993821

网络服务

门户网站: <http://www.cmpbook.com>

教材网: <http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

第3版前言

《机械制造装备设计》一书是根据1998年“机械设计制造及其自动化”专业教学指导委员会推荐的指导性教学计划编写的。本书是机械类专业的专业设计课程用书，将机床设计、夹具设计、工业自动化、工业机器人等内容合为一门课程，构成一个新的课程体系。本课程的目的和要求是：阐明机械制造装备是发展国民经济的重要基础及其技术现状和发展趋势；掌握机械制造装备先进的设计原理和方法；具备一定的机械制造装备总体设计和结构设计能力。本书作为“九五”、“十五”规划教材出版使用已近十年了，普遍反映良好，并获得教育部2002年优秀教材二等奖。为进一步提高教材质量，反映近几年来科技发展的新成就，根据“十一五”国家级规划教材计划，对本教材进行了修订。

本书第3版共分七章，修订后的章节及内容有所变动，如第一章机械制造及装备设计方法中，概述部分作了修订，介绍了机械制造业生产模式的演变，重点结合国家“十五”、“十一五”的发展状况论述了机械制造装备的发展趋势。第二章金属切削机床设计，着重介绍了金属切削机床设计的基本理论、金属切削机床总体设计，以及主传动系、进给传动系和机床控制系统设计。第三章典型部件设计，包括主轴部件、支承件、导轨、机床刀架和自动换刀装置设计，本次对机床刀架和自动换刀装置设计部分作了修订。第四章工业机器人设计，介绍了工业机器人的基本原理，增加了运动功能设计举例。第五章改动较小。第六章物流系统设计改动较大，包括物流系统基础知识、物流系统的总体设计、机床上下料装置的设计、机床间工件输送装置的设计、自动化仓库设计。第七章机械加工生产线总体设计，加强了机械加工生产线的总体布局设计和柔性制造系统的内容深度。为便于教学，本书配有多媒体电子教案。

本书由大连理工大学关慧贞、冯辛安任主编，并共同修订了第一章，关慧贞修订了第二章第四至六节和第三章；西安理工大学黄玉美任副主编，并修订了第二章的第一至三节和第四章；大连理工大学朱泓、吴宏基、徐文骥和孙玉文分别修订了第三章、第五章、第六章和第七章。

全书由王先逵教授、丛明教授主审。

本书可供高等工业院校“机械设计制造及其自动化”专业以及相关专业的教学用书，也可供从事机械制造装备设计和研究的工程技术人员和研究生参考。

限于编者的水平，书中错误或不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

第 2 版前言

根据 1998 年“机械设计制造及其自动化”专业教学指导委员会指导性教学计划而编写的,“九五”部级重点教材《机械制造装备设计》已出版使用四年,普遍反应良好,并获得教育部 2002 年全国普通高等学校优秀教材二等奖。本书将原机械制造类教学计划中有关机械制造装备的设计内容,包括机床设计、夹具设计、工业自动化、工业机器人等合为一门课程,构成一个新的专业类设计课程体系。本课程的目的和要求是明了机械制造装备是发展国民经济的重要基础及其技术现状和发展趋势;掌握机械制造装备先进的设计原理和方法;具有一定的机械制造装备总体设计和结构设计能力。

为进一步提高教材质量,反映近几年来科技发展的新成就,根据“十五”国家级规划教材计划,对本书进行了修订。第 2 版的教材体系基本保持原样,部分章节作了变动。如新增了第三章第十节“机床控制系统设计”;改动较大的有第六章和第七章;第六章加强了工厂物流系统的总体设计;第七章加强了机械加工生产线的总体布局设计和柔性制造系统的内容深度。

为便于教学,本书配有多媒体电子教案,需要者可根据书末“信息反馈表”索取。

本书由大连理工大学冯辛安主编,并改编了第一、二章;西安理工大学黄玉美任副主编,并改编了第三章的第一至三节和第四章;大连理工大学关慧贞任副主编,并改编了第三章的第四至十节;大连理工大学吴宏基改编了第五章;西安理工大学张广鹏和李言分别改编了第六章和第七章。全书由清华大学王先逵教授主审。

本书可供高等工业院校“机械设计制造及自动化”专业以及相近专业作为教学用书,也可供从事机械制造装备设计和研究的工程技术人员和研究生参考。

限于编者的水平,书中错误或不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

目 录

第 3 版前言	
第 2 版前言	
第一章 机械制造及装备设计方法	1
第一节 概述	1
第二节 机械制造装备应具备的主要功能	6
第三节 机械制造装备的分类	10
第四节 机械制造装备设计的类型	15
第五节 机械制造装备设计的方法	17
第六节 机械制造装备设计的评价	32
习题与思考题	55
第二章 金属切削机床设计	57
第一节 概述	57
第二节 金属切削机床设计的基本理论	62
第三节 金属切削机床总体设计	75
第四节 主传动系设计	88
第五节 进给传动系设计	117
第六节 机床控制系统设计	128
习题与思考题	139
第三章 典型部件设计	142
第一节 主轴部件设计	142
第二节 支承件设计	161
第三节 导轨设计	171
第四节 机床刀架和自动换刀装置设计	184
习题与思考题	216
第四章 工业机器人设计	218
第一节 概述	218
第二节 工业机器人运动功能设计	226
第三节 工业机器人传动系统设计	232
第四节 工业机器人的机械结构 系统设计	241
第五节 工业机器人的控制	255
第六节 工业机器人在机械制造系统中的 应用	266
习题与思考题	270
第五章 机床夹具设计	272
第一节 机床夹具的功能和应满足 的要求	272
第二节 机床夹具的类型和组成	273
第三节 机床夹具定位机构的设计	275
第四节 机床夹具夹紧机构的设计	290
第五节 机床夹具的其他装置	302
第六节 可调整夹具的设计	307
第七节 组合夹具设计	310
第八节 机床夹具设计步骤	313
第九节 典型机床夹具的设计要求	319
习题与思考题	323
第六章 物流系统设计	328
第一节 物流系统基础知识	328
第二节 物流系统的总体设计	333
第三节 机床上下料装置的设计	354
第四节 机床间工件输送装置的设计	368
第五节 自动化仓库设计	381
习题与思考题	392
第七章 机械加工生产线总体设计	393
第一节 概述	393
第二节 生产线工艺方案的设计	396
第三节 生产线专用机床的总体设计	404
第四节 机械加工生产线的总体布局设计	421
第五节 柔性制造系统	430
习题与思考题	447
参考文献	449
读者信息反馈表	451

第一章 机械制造及装备设计方法

第一节 概 述

21 世纪是制造业高度信息化的世纪，伴随着电子技术和信息技术的发展，制造业出现了惊人的变化。

一、机械制造生产模式的演变

在 20 世纪 50 年代前，机械制造业推行的是“刚性”生产模式，自动化程度低，基本上是“一个工人、一把刀、一台机床”，导致劳动生产率低下，产品质量不稳定；为提高效率和自动化程度，采用“少品种、大批量”的做法，强调的是“规模效益”，以实现降低成本和提高质量的目的。在 20 世纪 70 年代，主要通过改善生产过程管理来进一步提高产品质量和降低成本。

从 20 世纪 80 年代起，我国开始实行改革开放政策，引进西方的先进制造技术，同时与西方国家进行接触与广泛的合作。机械制造装备中较多地采用了数控机床、机器人、柔性制造单元和系统等高新技术的集成，来满足产品个性化和多样化的要求，以满足社会各消费群体的不同要求。机械制造装备普遍具有“柔性化”、“自动化”和“精密化”的特点，以便更好地适应市场经济的需要，适应多品种、小批量生产和经常更新品种的需要。随着计算机技术、电子技术、先进制造技术的飞速发展，这些高新技术也被广泛地应用于制造业各个领域，加速了制造业的发展和变革进程。

在产品的设计过程中，采用计算机辅助绘图、辅助设计、三维造型、特征造型。利用计算机辅助工程分析软件，可以对零件、部件和产品的受力、受热、受振等各种情况进行工程分析、计算和优化设计。在工艺设计中采用计算机技术、辅助编制工艺规划、选择刀具、选择或设计卡具。利用软件技术，产生刀具轨迹的数控代码，经过前、后置处理，便获得可以在数控机床或加工中心上对零件进行加工的程序；通过仿真解决诸如刀具磨损补偿、避免干涉碰撞等问题。各种优化生产技术应运而生，包括物料需求规划的 MRP、制造资源规划 MRPII、考虑按设备瓶颈组织和优化生产的 OPT、考虑最优库存并准时生产 (JIT)、企业制造资源计划 ERP 等。此外，在加工现场，除数控车床、加工中心外，在线的三坐标测量机、柔性制造单元 (FMC) 和柔性制造系统 (FMS)、各种自动化物流系统 (如立体仓库、自动导引小车等)、控制生产线的可编程序控制器 (PLC) 等，也开始被广泛使用。计算机图形学同产品设计技术的结合产生了以数据库为核心，以图形交互技术为手段，以工程分析计算为主体的计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 系统。将 CAD 的产品设计信息转化为产品的制造、工艺规划等信息，使加工机械按照预定的工序和工步进行组合和排序，选择刀具、夹具、量具，确定切削用量，并计算每个工序的机动时间和辅助时间，这就是计算机辅助工艺规划 (Computer Aided Process Planning, CAPP)。将包括制造、监测、装配等方面

的所有规划,以及面向产品设计、制造、工艺、管理、成本核算等所有信息数字化,转换为计算机所能理解的,并被制造过程的全阶段所共享,从而形成了所谓的 CAD/CAE/CAPP/CAFD/CAM;上述系统构成了当前数字化制造中的数字化设计系统。改革开放三十多年来,为了对世界生产进行快速响应,逐步实现社会制造资源的快速集成,要求机械制造装备的柔性化程度更高,采用虚拟制造和快速成形制造技术。数控技术和装备作为制造业的核心加工技术,人们对其性能和技术都提出了更高的要求。

20世纪末期,数字化设计与制造的应用也日趋广泛。数字化制造是指在虚拟现实、计算机网络、快速原型、数据库和多媒体等支撑技术下,根据用户需求,迅速收集资源信息,对产品信息、工艺信息和资源信息进行分析、规划和重组,实现产品设计和功能仿真,进而快速生产出满足用户性能要求的产品的整个制造过程。快速响应市场成为制造业发展的一个主要方向。为了快速响应市场,出现了许多新的生产制造模式,例如敏捷制造(Agile Manufacturing)、精益-敏捷-柔性(LAF)生产系统、快速可重组制造、全球制造等。其中LAF生产系统是全面吸收精益生产、敏捷制造和柔性制造的精髓,包括了全面质量管理(TQC)、准时生产(Just in Time, JIT)、快速可重组制造和并行工程等现代生产和管理技术,是21世纪很有发展前景的先进制造模式。这种全新的生产制造模式的主要特点是:以用户的需求为中心;制造的战略重点是时间和速度,并兼顾质量和品种;以柔性、精益和敏捷作为竞争的优势。现代飞速发展的高新技术对制造业起的作用越来越大,产品又由“大批量生产”方式向“中小批量生产”,甚至“个性化生产”的方式转变,以满足竞争激烈的市场需求。

目前,中国装备制造业进入了前所未有的全面振兴的发展时期,我们通过引进发达国家装备制造业大量的先进技术,进行消化、吸收再创新,为我国装备制造业的复兴创造了加速发展的良好环境和有利条件,为新世纪的发展打下了坚实的基础。

二、制造业的作用及现状

制造业是国民经济发展的支柱产业,也是科学技术发展的载体及使其转化为规模生产力的工具与桥梁。装备制造业是一个国家综合制造能力的集中体现,重大装备研制能力是衡量一个国家工业化水平和综合国力的重要标准。

现在,我国正值“十一五”建设期间,国家将振兴装备制造业作为推进产业结构优化升级的主要内容。数控机床是振兴装备制造业的重点之一。按照立足科学发展、着力自主创新、完善体制机制、促进社会和谐总思路,组织实施国家自主创新能力建设规划和高技术产业发展规划,大力加强自主创新支撑体系建设,着力推进重大产业技术与装备的自主研发,实现高技术产业由大到强的转变,全面提升我国的自主创新能力和国际竞争力,为调整经济结构、转变经济增长方式,实现全面建设小康社会的奋斗目标奠定坚实基础。

以机床制造业为例,在我国已形成各具特色的六大发展区域:东北地区是我国数控车床、加工中心、重型机床和锻压设备、量刃具的主要开发生产区,沈阳机床行业、大连机床行业、齐齐哈尔重型数控企业、哈尔滨量具刃具企业的金属切削机床产值约占全国金属切削机床产值的三分之一,对全国金属切削机床行业发展影响巨大;东部地区数控磨床产量占全国四分之三,其中长江三角洲地区,成为磨床(数控磨床)、电加工机床、板材加工设备、工具和机床功能部件(滚珠丝杠和直线导轨副)的主要生产基地;西部地区重点发展齿轮加

工机床,其中西南地区重点发展齿轮加工机床、小型机床、专用生产线以及工具,西北地区主要发展齿轮磨床、数控车床和加工中心、工具和功能部件;中部地区主要发展重型机床和数控系统,重型机床产值占全国六分之一,武汉重型机床集团有限公司生产的重型机床数量占全国重型机床数量的十分之一,生产数控系统的企业代表之一是武汉华中数控股份有限公司;环渤海地区包括北京、天津等,主要发展加工中心和液压压力机,北京主要发展加工中心、数控精密专用磨床、重型数控龙门铣床和数控系统,天津主要发展锥齿轮加工机床和各种液压压力机;珠江三角洲地区是数控系统的生产基地,生产数控车床和数控系统、功能部件等。这些生产区域的产品和起到的重要作用,表明我国自主创新和高技术产业发生了历史性的巨大变化,获得了突飞猛进的发展。

三、机械制造装备的发展趋势

随着制造业生产模式的演变,对机械制造装备提出了不同的要求,使现代化机械制造装备的发展呈如下趋势:

1. 向高效、高速、高精度方向发展

效率、质量是先进制造技术的主体,高速和高精度加工是制造技术永无止境的追求。高速、高精度加工技术可使数控系统能够进行高速插补、高实时运算,在高速运行中保持较高的定位精度,极大地提高效率,提高产品的质量和档次,缩短生产周期和提高市场竞争能力。近十年来,在加工精度方面,普通级数控机床的加工精度已由 $10\mu\text{m}$ 提高到 $5\mu\text{m}$,精密级加工中心则从 $3\sim 5\mu\text{m}$,提高到 $1\sim 1.5\mu\text{m}$,并且超精密加工精度已开始进入纳米级($0.01\mu\text{m}$)。精密、高效也是世界电加工机床发展的主流。

2. 多功能复合化、柔性自动化的产品成为发展的主流

从近几届国内外举办的国际机床展览上展出的装备情况来看,新颖的高技术含量的展品逐年增加。国际上多功能复合加工机床的发展不再以简单的零件加工为主,而是以结构复杂、形状各异的箱体类零件加工或更为复杂的零件加工为发展趋势。展出的机床类型很多,有最新的复合加工机床、五轴加工机床、纳米加工机床、新型并联加工机床等,展示出世界制造装备的精华,展示了世界制造技术发展的最新动向。

例如,超声波铣削、激光铣削等不同加工组合的复合机床品种逐渐增多;五至九轴控制、各种形式的五轴联动车铣复合中心、车削中心的功能齐全、完备;由单台数控加工设备和上下料机构构成的柔性制造单元(FMC)、柔性制造系统(FMS)、柔性制造线(FML)的类型不断变化,品种不断增加。柔性制造系统(FMS)是一个由计算机集成管理和控制、高效率地制造某一类中小批量多品种零部件的自动化制造系统,通常包括多台数控机床,由集中的控制系统及物料搬运系统连接起来,可在不停机的情况下实现多品种、中小批量的加工及管理;能根据制造任务或生产环境的变化迅速进行调整;可以在装夹工位、加工设备、交换工作站之间运送及储存工件的运储系统;同时,还可以配置切屑收集、工件清洗等配套设备,以适应多品种、中小批量生产。柔性制造线(FML)其加工设备可以是通用的加工中心、CNC机床;亦可采用专用机床或NC专用机床。对物料搬运系统柔性的要求低于柔性制造系统,但生产率更高。它是以离散型生产中柔性制造系统和连续生产过程中的分散型控制系统(DCS)为代表,其特点是实现生产线柔性化及自动化。柔性制造工厂(FMF)是由计算机系统和网络,通过制造执行系统(MES),将设计、工艺、生产管理及制造过程的

所有柔性单元(FMC)、柔性线(FML)连接起来,配以自动化立体仓库,实现从订货、设计、加工、装配、检验、运送至发货的完整的数字化制造过程。它将制造、产品开发及经营管理的自动化连成一个整体,是以信息流控制物质流的智能制造系统(IMS)为代表,实现整个工厂的柔性化及自动化。

3. 实施绿色制造与可持续发展战略

制造业在创造丰富物质产品的同时,消耗掉了大量资源和能源,并对环境造成了严重的污染。绿色制造是综合考虑环境影响和资源效益的现代制造模式,是人类可持续发展战略在制造业中的体现,是落实科学发展观、建设中国制造“生态文明”的要求。实现绿色制造可从绿色制造过程设计、绿色生产与工艺、绿色切削加工技术、绿色供应链研究、机电产品噪声控制技术、绿色材料选择设计、绿色包装和使用、绿色回收和处理等方面着手,主要研究内容有废旧机械装备再制造综合评价与再设计技术、废旧机械零部件绿色修复处理与再制造技术、废旧机械装备再制造信息化提升技术、机械装备再制造与提升的成套技术及标准规范,以及废旧机械装备产业化实施模式等。绿色制造的研究及推广应用,推动“中国绿色制造”;并以此促进我国制造业降低资源消耗,减少环境污染;应对绿色贸易壁垒,提升中国制造业市场竞争力。

4. 智能制造技术和智能化装备有了新的发展

20世纪50年代末出现的人工智能技术,它主要包括专家系统、人工神经网络和遗传算法等。它是控制论、计算机科学、数理逻辑、神经生理学、心理学等许多学科互相渗透而产生的边缘科学。于是,人们开始借助于现代的工具和方法,通过集成传统制造技术、计算机与自动化科学、信息技术和人工智能等发展了一种新型的制造技术与系统——智能制造技术与系统,它将人工智能应用于机械制造装备中,使机器智能化。机器智能化是智能制造的主要研究内容之一,它是智能制造系统的物理基础,包括智能加工机床、工具和材料传送、检测和试验装备等,要求具有加工任务和加工环境的广泛适应性,能够在环境和自身的不确定变化中自主实现最佳行为策略。智能制造是面向世纪的先进制造模式,提高底层加工设备的智能性是智能制造系统的重要研究课题。以装备中的机床为例,当前智能机床是在数控机床和加工中心的基础上实现的,它与普通自动化机床的主要区别在于除了具有数控加工功能外,还具有感知、推理、决策、控制、通信、学习等智能功能。目前国外研究机构在产品结构越来越复杂,而产品精度要求越来越高,交货时间越来越短的情况下,认为提高加工设备的智能性、可靠性和加工精度是提高企业竞争力的主要途径。

对智能机床的定义是:机床能对自己进行监控,可自行分析众多与机床、加工状态、环境有关的信息及其他因素,然后自行采取应对措施来保证最优化的加工。换句话说,机床进化到可发出信息和自行进行思考的水平,结果是机床可自适应柔性和高效生产系统的要求。例如在IMTS2006展览中,日本公司展出的“智能机床”(Intelligent Machine)是具有四大智能的数控机床:当各坐标轴运动时,由于加减速速度产生的振动会影响加工精度、表面粗糙度、刀尖磨损程度和加工时间,它可进行主动振动控制,将振动减至最小;对机床部件因运动或运作产生的热及室温的变化所产生的定位误差,采用智能热屏障技术对热位移进行控制,进行自动补偿,使其值为最小;当操作工人为了调整、测量、更换刀具而手动操作机床时,一旦“将”发生碰撞(即在发生碰撞前一瞬间),设立智能安全屏障以防止部件碰撞,运动立即自行停止;还有语音提示信息系统,当工人手动操作和调整时,用语音进行提示,

以减少由于工人失误而造成的问题，表明它具备思想能力。日本 OKUMA（大隈）公司展出了名为“Thinc”的智能数字控制系统（Intelligent Numerical Control System）。

美国国家标准技术研究所下属的制造工程控制实验室（MEL）认为，智能机床是具有如下功能的数控机床或加工中心：

1) 机床能够感知其自身的状态和加工能力，并能够进行自我标定，预测机床在不同的状态下所能达到的加工精度，将相关的信息以标准协议的形式存储在不同的数据库中，以便机床内部的信息流动、更新和被操作者查询。

2) 为使机床在最佳状态下完成加工，机床具有能够监视和优化自身加工行为的能力，它能够自校准、自诊断、自修复和自调整，发现误差并补偿误差。它所有的智能组件能够预测出即将出现的故障，以提示机床需要维护和进行远程诊断。

3) 它可以根据在加工过程中获得的数据或在线测量的数据，估计出最终产品的精度，能够对所加工工件的质量进行评估。

4) 它能够根据加工中和加工后获得的数据来更新机床的应用模型，具有自学习的能力。

5. 我国自主创新和高新技术的发展

我国在“十一五”建设期间，企业自主创新能力不断提高，拥有自主知识产权的产品不断涌现，成果喜人。例如，重庆机床集团生产的 YS3116CNC7 七轴四联动数控高速干切自动滚齿机和 YKS3132 六轴四联动数控滚齿机，以其先进的技术水平和柔性化加工特点，提升了制齿行业技术创新能力，为加速我国汽车、摩托车行业设备升级换代作出了贡献。尤其是七轴四联动数控高速干切自动滚齿机，体现了以人为本的设计理念。该产品是针对汽车、摩托车行业大批量、高精度的齿轮加工要求而设计开发，拥有全部知识产权，可实现七轴数字控制及四轴联动自动干式切削，不需要切削油，实现了绿色环保加工，加工效率是湿式切削的 2~3 倍，床身的对称结构和护罩的防护结构，使排屑器能从床身中部迅速地将炙热的切屑排除，保证了干式高速切削的需要，是具有国际先进水平的国家重大技术装备。

高新技术中的直接驱动技术正在日趋完善，与传统的“旋转伺服电动机+滚珠丝杠”等机床驱动方式相比，最高速度可提高数十倍，加速度可提高几倍。直接驱动技术的应用推动了当前数控机床向高速、高效、高精度、智能性、环保化的方向发展。因为，高速切削加工进给系统要实现快速伺服控制和误差补偿，必须具备很高的定位精度和重复定位精度，直接驱动技术正是适应了高速、超高速加工，生产批量大、要求定位运动多、速度和方向频繁变化场合的需要。例如，适用于汽车零部件生产线和精密模具制造；也适用于超长行程的高速加工中心，航空航天制造业中的轻合金、薄壁和金属去除率大的整体构件“镂空”加工；更适用于要求高动态特性、高速随动性、高灵敏的动态精密定位、超精密加工（例如新一代的 D1D 电加工机床、DED 数控曲轴磨床、D1D 纳米机床等）。直线电动机除了应用于高速加工中心外，在磨床、锯床、激光切割机、等离子切割机、线切割机、等机床设备上，力矩电动机直接驱动的应用也相当普遍，如旋转和分度工作台、万能回转铣头、摆动和旋转轴、旋转刀架，动态刀库、主轴等等，其最典型的应用当属五轴铣床。

综上所述，现代制造业今后的发展将是以创新、提升、优化为主要模式，未来的中国制造业已不能仅仅满足于“制造”，而是要进一步发展成为“智造”，即用知识、用头脑去创新、去创造，这样才能缩短差距，实现赶超，由制造大国变为制造强国和“智造大国”。

第二节 机械制造装备应具备的主要功能

机械制造装备应具备的主要功能中,除了一般的功能要求外,应强调柔性化、精密化、自动化、机电一体化、节材节能、符合工业工程和绿色工程的要求。

一、一般的功能要求

机械制造装备应满足的一般功能包括:

1. 加工精度方面的要求

加工精度是指加工后零件对理想尺寸、形状和位置的符合程度,一般包括尺寸精度、表面形状精度、相互位置精度和表面粗糙度等。满足加工精度方面的要求应是机械制造装备最基本的要求。

影响机械制造装备加工精度的因素很多,与机械制造装备本身有关的因素有其几何精度、传动精度、运动精度、定位精度和低速运动平稳性等。

2. 强度、刚度和抗振性方面的要求

为了提高加工效率,切削速度越来越高,切削力越来越大。机械制造装备应具有足够的强度、刚度和抗振性。提高强度、刚度和抗振性,不能一味地加大制造装备零部件的尺寸和质量,成为“傻、大、黑、粗”的产品。应利用新技术、新工艺、新结构和新材料,对主要零件和整体结构进行设计,在不增加或少增加质量的前提下,使装备的强度、刚度和抗振性满足规定的要求。

3. 加工稳定性方面的要求

机械制造装备在使用过程中,受到切削热、摩擦热、环境热等的影响,会产生热变形,影响加工性能的稳定性。对于自动化程度较高的机械制造装备,加工稳定性方面的要求尤为重要。提高加工稳定性的措施是减少发热量,散热和隔热,均热、热补偿、控制环境温度等。

4. 耐用度方面的要求

机械制造装备经过长期使用,因零件磨损、间隙增大,原始工作精度将逐渐丧失。对于加工精度要求很高的机械制造装备,耐用度方面的要求尤为重要。提高耐用度应从设计、工艺、材料、热处理和使用等多方面综合考虑。从设计角度,提高耐用度的主要措施包括减少磨损、均匀磨损、磨损补偿等。

5. 技术经济方面的要求

投入机械制造装备上的费用将分摊到产品成本中去。如产品产量很大,分摊到每个产品的费用较少;反之,产品的产量较少,甚至是单件,过大地在机械制造装备上投资,将大幅度地提高产品的成本,削弱产品的市场竞争力。因此不应盲目地追求机械制造装备的技术先进程度和无计划地加大投入,而应该进行仔细的技术经济分析,确定机械制造装备设计和选购方面的指导方针。

二、柔性化

柔性化在这里有两重含义,即产品结构柔性化和功能柔性化。

产品结构柔性化是指产品设计时采用模块化设计方法和机电一体化技术,只需对结构作少量的重组和修改,或修改软件,就可以快速地推出满足市场需求的,具有不同功能的新产品。

功能柔性化是指只需进行少量的调整或修改软件,就可以方便地改变产品或系统的运行功能,以满足不同的加工需要。数控机床、柔性制造单元或系统具有较高的功能柔性化程度。在柔性制造系统中,不同工件可以同时上线,实现混流加工。这类加工装备投资极大,研制周期长,使用和维护涉及的技术难度大,应通过认真的技术经济分析,认为有利可图时才可考虑采用。

要实现机械制造装备的柔性化,不一定非要采用柔性制造单元或系统。专用机床,包括组合机床及其组成的生产线,也可设计成具有一订的柔性,完成一些批量较大、工艺要求较高的工件加工。其柔性表现在机床可进行调整以满足不同工件的加工。调整方法如采用备用主轴、位置可调主轴、工夹量具成组化、工作程序软件化和部分动作实现数控化等。

三、精密化

随着市场竞争的国际化,对产品技术性能的要求越来越苛刻,制造精度的要求越来越高。为提高产品的质量,许多工厂还不断地压缩工件制造的公差带,机械制造装备的精密化成为普遍发展的趋势,从微米级发展到亚微米级,乃至纳米级。在这种情况下,采用传统的措施,一味提高机械制造装备自身的精度已无法奏效,需采用误差补偿技术。误差补偿技术可以是机械式的,如为提高丝杠或分度蜗轮的精度采用的校正尺或校正凸轮等。较先进的是采用数字化技术,仔细分析各种引起加工误差的因素,建立误差的数学模型 $\xi = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。式中, ξ 是由众多因素 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 引起的综合误差。引起误差的因素有机械制造装备的热变形、几何误差、传动误差、运动误差、定位误差和工艺系统的弹性变形等。将误差的数学模型存入计算机,在加工时,由传感器不断地将引起误差的因素测出,输入计算机,算出将产生的综合误差 ξ ,然后由误差补偿装置按算出的综合误差进行补偿。

四、自动化

机械制造装备实现自动化后,除了可以提高加工效率和劳动生产率,还可以提高产品质量的稳定性,改善劳动条件等。自动化有全自动和半自动之分:全自动是指能自动完成工件的上料、加工和卸料的生产全过程;半自动则需人工完成上下料。实现自动化的方法从初级到高级依次为:凸轮控制、程序控制、数字控制和适应控制等。

凸轮控制是采用凸轮机构控制多个部件的运动,使之互相协调地工作。改变工作循环需更换或调整凸轮。

程序控制指工作程序和定位尺寸可以根据不同的加工对象选择,但不能控制运动轨迹。改变工作程序一般采用电气插销和电开关组成的矩阵板式程序设定装置;改变定位尺寸一般采用定位开关、尺寸鼓或多级挡铁等。程序控制可分为固定程序控制和可变程序控制。固定程序控制一般采用继电器控制系统,可变程序控制则采用可程序控制器(Programmable Logic Controller, PLC),改变工作程序只需改写或更换 PLC 中的可编程只读存储器(Electrically Programmable Read-Only Memory, EPROM)。

数字控制除了可控制工作程序外，还可以控制运动轨迹，一般采用专门的数控装置。数控装置是一台专用计算机，根据读入的指令和数据，进行处理和运算，根据处理和运算的结果去控制伺服机构或其他执行机构完成要求的动作。指令和数据以一定格式的程序形式录在穿孔带或软磁盘上，可长期保存，随加工对象不同而改换。

适应控制能按事先给定的评价指标在加工过程中根据实际工作条件（如材料硬度的变化、刀具磨损等）自动地改变加工系统的参数（如切削用量等），使加工过程始终按照给定的评价指标进行。主要用于毛坯余量、硬度、工件刚度和切削面积变化较大、空程较多、工件精度要求较高，以及工件材料费用、刀具成本和机床成本较高的工作条件。适应控制分约束适应控制、最佳适应控制和学习适应控制等。

约束适应控制是按事先规定的条件，如最大功率、最大转矩、最高温度等，在加工过程中，由控制系统自动调节工作参数，始终在约束条件范围内进行加工。

最佳适应控制是按事先给定的评价指标，如最高生产率、最小成本等，以及这些指标与切削参数之间的关系（即目标函数），在加工过程中，控制系统不断对所有参数进行测量，比较并计算出相应的参数校正值，下达给执行机构进行修正，使机床始终处于最佳参数下工作。

学习适应控制有“学习”能力，能够根据现场加工结果，自动分析造成偏离最佳目标的原因，并修改评价函数使之适合现实的加工条件以保证达到预期目标。

五、机电一体化

机电一体化是指机械技术与微电子、传感检测、信息处理、自动控制和电力电子等技术，按系统工程和整体优化的方法，有机地组成的最佳技术系统。机电一体化系统和产品的通常结构是机械的，用传感器检测来自外界和机器内部运行状态的信息，由计算机进行处理，经控制系统，由机械、液压、气动、电气、电子及它们的混合形式的执行系统进行操作，使系统能自动适应外界环境的变化，机器始终处于正常的工作状态。故设计机电一体化产品要充分考虑到机械、液压、气动、电力电子、计算机硬件和软件的特点，充分发挥各自的特点，进行合理的功能搭配，将不同类型的元件和子系统用“接口”连接起来，构成一个完整的系统。这个系统应该是功能强、质量好和故障率低、节能和节材、性能价格比高，具有足够的“结构柔性”。

采用机电一体化技术设计的产品可以获得如下几方面的功能：

1. 对机器或机组系统的运行参数进行巡检和控制

运行参数是指压力、流量、温度、转速、物料成分等。将巡检测得的参数与设定值进行比较，如果超出许可范围，可采用显示、报警等方式通知操作者，进行操作指导，或提示操作者故障的情况和发生位置，也可由系统自动控制运行条件，使各项运行参数恢复正常。

2. 对机器或机组系统工作程序的控制

现代自动化机械的动作十分复杂，传统的控制系统是采用大量的继电器，装置笨重、可靠性差、耗能多。采用可编程序控制器或单片机系统可以方便地实现复杂的控制任务，并可明显地提高控制系统的智能化程度和可靠性，也可以提高系统的“结构柔性”。

3. 用电子技术代替传统产品中机械部件完成的功能，简化产品的机械结构

例如采用电力电子技术代替机床的变速箱，用数控系统代替原来机械、液压的刀架驱动系统等。未来产品的结构应该是机械结构越来越简单，而电子系统越来越复杂。这样的结构

具有较高的可靠性，维修方便，性能价格比高，便于组织社会化的大生产。

六、节材

我国产品设计水平低，选取的安全系数一般偏大，造成产品“肥头大耳”，造成所谓的结构性材料浪费；又由于工艺水平落后，铸造和锻造过程中金属回收率低，毛坯的加工余量大，不仅浪费了原材料，也浪费了加工工时和能源，造成所谓的工艺性材料浪费。因此，有必要采用现代设计法，合理地选取安全系数，对主要零部件进行精确计算和优化，改进产品的结构，采用先进的制造装备提高材料的利用率。

七、符合工业工程要求

工业工程是对人、物料、设备、能源和信息所组成的集成系统进行设计、改善和实施的一门学科。其目标是设计一个生产系统及其控制方法，在保证工人和最终用户健康和安全的条件下，以最低的成本生产出符合质量要求的产品。

早期的工业工程主要是为提高效率、减低成本而采用以动作研究和时间研究为主的科学管理方法，并且主要是建立在定性和经验的基础上，研究的也只是作业现场的较小范围。随着计算机、运筹学和系统工程等新兴科学技术的出现和应用，工业工程可以定量分析为主，研究整个大系统的工作效率和成本的优化。

产品设计符合工业工程的要求是指：在产品开发阶段，充分考虑结构的工艺性，提高标准化、通用化程度，以便采用最佳的工艺方案，选择最合理的制造设备，减少工时和材料的消耗；合理地进行机械制造装备的总体布局，优化操作步骤和方法，减少操作过程中工人的体力消耗；对市场和消费者进行调研，保证产品合理的质量标准，减少因质量标准定得过高造成不必要的超额工作量。

优化操作步骤和方法应进行作业程序的分析。完成一项作业需要进行一系列的操作，每个操作沿一定的路线进行，称之为作业程序。作业程序中的操作越多，路线越长，所耗费的人力与时间就越多，效率越低，成本也越高。对作业程序进行分析，是为了取消不必要的操作，合并和简化重复和繁琐的工作，合理分配两手的工作负荷，优化操作次序，缩短操作路线和操作时间，以达到减少机器的空闲时间，提高工作的舒适性，减轻工人的疲劳程度，重新组织一个效率更高的作业程序的目标。

八、符合绿色工程要求

企业必须纠正不惜牺牲环境和消耗资源来增加产出的错误做法，使经济发展更少地依赖地球上的有限资源，而更多地与地球的承载能力达到有机的协调。这就是所谓的绿色工程要求。按绿色工程要求设计的产品称绿色产品。绿色产品设计在充分考虑产品的功能、质量、开发周期和成本的同时，优化各有关设计要素，使得产品从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个生命周期中，对环境的影响最小，资源利用效率最高。

绿色产品设计考虑的内容很广泛，包括产品材料的选择应是无毒、无污染、易回收、可重用、易降解的；产品制造过程应充分考虑对环境的保护，资源回收，如废弃物的再生和处理，原材料的再循环，零部件的再利用等；产品的包装也应充分考虑选用资源丰富的包装材料，以及包装材料的回收利用及其对环境的影响等。

原材料再循环的成本一般较高,应考虑经济上、结构上和工艺上的可行性。为了零部件的再利用,应通过改变材料、结构布局和零部件的连接方式等来实现产品拆卸的方便性和经济性。

第三节 机械制造装备的分类

机械制造过程是从原材料开始,经过热、冷加工,装配成产品,对产品进行调试和检测、包装和发运的全过程,所使用的装备类型繁多,大致可划分为加工装备、工艺装备、仓储传送装备和辅助装备四大类。

一、加工装备

加工装备是指采用机械制造方法制作机器零件的机床。机床是制造机器的机器,也称工作母机,其种类很多,包括:金属切削机床、特种加工机床、快速成形机、锻压机床、塑料注射机、焊接设备、铸造设备和木工机床等。特种加工机床传统上归于金属切削机床类中。近年来,特种加工机床已发展为一个较大的门类,为叙述方便,这里将它作为一大类机床进行介绍。塑料注射机、焊接设备、铸造设备和木工机床等可参阅塑料制品加工、材料热加工和木工行业方面的有关书籍,这里不作介绍。

(一) 金属切削机床

金属切削机床是采用切削工具或特种加工等方法,从工件上除去多余或预留的金属,以获得符合规定尺寸、几何形状、尺寸精度和表面质量要求零件的加工设备。金属切削机床的种类繁多,可按如下特征进行分类:

1. 按机床的加工原理进行分类

按机床的加工原理的不同可分为:车床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、铣床、刨(插)床、拉床、特种加工机床、切断机床和其他机床等12类。其他机床如锯床、键槽加工机床、珩磨研磨机床等。

2. 按机床的使用范围进行分类

按机床的使用范围可分为:通用机床、专用机床和专门化机床。

(1) 通用机床 通用的金属切削机床可加工多种尺寸和形状的工件的多种加工面,故又称万能机床。其结构一般比较复杂,适用于单件或中小批量生产。

(2) 专用机床 专用机床是用于特定工件的特定表面、特定尺寸和特定工序加工的机床,是根据特定的工艺要求专门设计和制造的,生产率和自动化程度均高,结构比通用机床简单,多用于成批和大量生产。组合机床及其自动线是其中的一个大分支,包括大型组合机床及其自动线、小型组合机床及其自动线、自动换刀数控组合机床及其自动线等。

(3) 专门化机床 专门化机床的特点介于通用机床和专用机床之间,用于对形状相似尺寸不同的工件的特定表面,按特定的工序进行加工。这类机床如精密丝杠机床、曲轴机床等,生产效率一般较高。

此外,机床还可以按其加工精度分为:普通、精密和高精度机床;按其自动化程度分为:普通、半自动和自动机床;按其控制方式分为:程控、数控、仿形机床等。

(二) 特种加工机床

近十年来,为满足国防和高新科技领域的需要,许多产品朝着高精度、高速度、高温、高压、大功率和小型化方向发展。采用特种加工技术,可使用全新的工艺方法,解决上述用常规加工手段难以甚至无法解决的许多工艺难题,例如大面积镜面加工、深孔甚至弯孔加工、脆硬难切削材料加工和微细加工等。特种加工机床近年来发展很快,按其加工原理可分成:电加工、超声波加工、激光加工、电子束加工、离子束加工、水射流加工等机床。

1. 电加工机床

直接利用电能对工件进行加工的机床,统称电加工机床。一般仅指电火花加工机床、电火花线切割机床和电解加工机床。

电火花加工机床是利用工具电极与工件之间的脉冲放电现象从工件上去除微粒材料达到加工要求的机床,主要用于加工硬的导电金属,如淬火钢、硬质合金等。按工具电极的形状和电极是否旋转,电火花加工可进行成形穿孔加工、电火花成形加工、电火花雕刻、电火花展成加工、电火花磨削等。

电火花线切割机床是利用一根移动的金属丝作电极,在金属丝和工件间通过脉冲放电,并浇上液体介质,使之产生放电腐蚀而进行切割加工的机床。当放置工件的工作台在水平面内按预定轨迹移动时,工件便可切割出所需要的形状。如金属丝在垂直其移动方向的平面内不与铅直线平行,可切出上下截面不同的工件。

电解加工机床是利用金属在直流电流作用下,在电解液中产生阳极溶解的原理对工件进行加工的机床,电解加工又称电化学加工。加工时,工件与工具分别接电源的正负极,两者相对缓慢进给,并始终保持一定的间隙,让具有一定压力的电解液连续从间隙中流过,将工件上的被溶解物带走,使工件逐渐按工具的形状被加工成形。采用机械的方法,如砂轮去除工件上的被溶解物,称阳极机械加工。

2. 超声波加工机床

利用超声波能量对材料进行机械加工的设备称为超声波加工机床。加工时工具作超声振动,并以一定的静压力压在工件上,工件与工具间引入磨料悬浮液。在振动工具的作用下,磨粒对工件材料进行冲击和挤压,加上空化爆炸作用将材料切除。超声波加工适用于特硬材料,如石英、陶瓷、水晶、玻璃等材料的孔加工、套料、切割、雕刻、研磨和超声电加工等复合加工。

3. 激光加工机床

采用激光能量进行加工的设备统称为激光加工机床。激光是一种高强度、方向性好、单色性好的相干光。利用激光的极高能量密度产生的上万摄氏度高温聚焦在工件上,使工件被照射的局部在瞬间急剧熔化和蒸发,并产生强烈的冲击波,使熔化的物质爆炸式地喷射出来以改变工件的形状。激光加工可以用于所有金属和非金属材料,特别适合于加工微小孔($\phi 0.01 \sim \phi 1\text{mm}$ 或更小)和材料切割(切缝宽度一般为 $0.1 \sim 0.5\text{mm}$)。常用于加工金刚石拉丝模、钟表的宝石轴承、陶瓷、玻璃等非金属材料 and 硬质合金、不锈钢等金属材料的小孔加工及切割加工。

4. 电子束加工机床

电子束加工是指在真空条件下,由阴极发射出的电子流为带高电位的阳极吸引,在飞向阳极的过程中,经过聚焦、偏转和加速,最后以高速和细束状轰击被加工工件的一定部位,