



卓越工程师教育培养机械类创新系列规划教材

机械制造装备设计

主 编 芮延年 卫瑞元

副主编 齐文春 纪小刚 吴 健 周淑霞



科学出版社

卓越工程师教育

计划教材

机械制造装备设计

主 编 芮延年 卫瑞元

副主编 齐文春 纪小刚 吴 健 周淑霞

编 委 郭开波 杨建锋 曹 毅 满增光

主 审 陈再良 王传洋

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是“卓越工程师教育培养机械类创新系列规划教材”之一，是根据“机械设计制造及其自动化”专业教学指导委员会讨论通过的指导性教学计划以及相应的“十二五”教材编写计划组织编写而成。

本书将机床设计、夹具设计、刀具设计、工业机器人设计、检测系统设计、物流系统设计和智能制造系统与装备等内容合为一门专业课程，构成了一个新的课程体系。

本书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。本书内容与生产实践紧密相连，取材精练，深入浅出，并通过设计范例进一步说明机械制造装备设计的方法和步骤，方便读者学习和应用。

本书是机械工程学科的专业课程用书，本书既适用于高等工科大学“机械设计制造及其自动化”专业以及相关专业的教学，也可供从事机械制造装备设计及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/芮延年，卫瑞元主编. —北京：科学出版社，2017.6
卓越工程师教育培养机械类创新系列规划教材

ISBN 978-7-03-052964-0

I. ①机… II. ①芮…②卫… III. ①机械制造—工艺装备—设计—高等学校—教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 116429 号

责任编辑：邓 静 张丽花 / 责任校对：郭瑞芝
责任印制：霍 兵 / 封面设计：迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本：787×1092 1/16
2017 年 6 月第一次印刷 印张：20

字数：490 000

定价：50.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

版权所有，违者必究！未经本社许可，数字图书馆不得使用

《卓越工程师教育培养机械类创新系列规划教材》

组织委员会

主任：芮延年 胡华强

委员：（以姓名首字母为序）

陈 炜 冯志华 郭兰中 花国然 匡 敏 刘春节 刘 忠
秦永法 石怀荣 唐文献 王广勋 王树臣 谢志余 郁汉琪
曾亿山 张秋菊 朱 伟 周 海 左晓明

编写委员会

顾问：闻邦椿（院士）

主任：芮延年 陈 炜 张秋菊

副主任：（以姓名首字母为序）

郭兰中 刘会霞 刘 忠 秦永法 唐文献 谢志余 曾亿山
朱瑞富 左晓明

委员：（以姓名首字母为序）

戴立玲 封士彩 高征兵 龚俊杰 顾 锋 顾 荣 管图华
何高清 侯永涛 华同曙 化春键 黄 娟 刘道标 刘 新
刘征宇 马伟民 毛卫平 倪俊芳 平雪良 齐文春 钱 钧
盛小明 宋昌才 孙 进 唐火红 田玉冬 王德山 王汉成
王建胜 卫瑞元 吴朝阳 解乃军 薛云娜 杨 莉 姚辉学
袁 浩 张 洪 张洪丽 张建梅 张兴国 仲高艳 周建华
朱益民 竺志大
秘 书：邓 静

总 序

“卓越工程师教育培养计划”是贯彻落实《国家中长期教育改革和规划纲要（2010—2020年）》和《国家中长期人才发展规划纲要（2010—2020年）》的重大改革项目，也是促进我国由工程教育大国迈向工程教育强国的重大举措。旨在培养造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才，为国家走新型工业化发展道路、建设创新型国家和人才强国战略服务，对促进高等教育面向社会需求培养人才，全面提高工程教育、人才培养质量具有十分重要的示范和引导作用。

科学出版社以教育部“卓越工程师教育培养计划”为准则，以面向工业、面向世界、面向未来，培养造就具有工程创新能力强、适应经济社会发展需要的卓越工程技术人才为培养目标，组织有关专家、学者、教授编写了本套《卓越工程师教育培养机械类创新系列规划教材》。

本系列教材力求体现的最大特点是，在每本教材的编写过程中，根据授课内容，引入许多相关工程实践案例，这些工程实践案例具有知识性、典型性、启发性、真实性等特点，它可以弥补传统教材森严乏味的局限性，充分调动学生学习的积极性和创造性，引导学生拓宽视野、重视工程实践、培养解决实际问题的能力。通过编者精心收集组织的实际工程案例让学生明白为什么学习、学成能做什么，从而激发学生学习的内在动力和热情，使学生感到学有所用。

本系列教材除了主教材之外，还配套有多媒体课件，以后还将逐步完善建设配套的学习指导书、教师参考书，最终形成立体化教学资源网，方便教师教学，同时有助于学生更好的学习。

我们相信《卓越工程师教育培养机械类创新系列规划教材》的出版，将对我国普通高等教育的发展起到创新探索的推动作用，对机械工程人才的培养以及机械工业的发展产生积极有效的促进作用。

中国科学院院士、东北大学教授 闻邦椿

2014年5月10日

前言

本书是“卓越工程师教育培养机械类创新系列规划教材”之一。本书在满足教育部教学指导委员会制定的教学基本要求的基础上,参考教育部制定的《“卓越工程师教育培养计划”通用标准(征求意见稿)》和机械工程学会制定的《卓越工程师教育培养计划机械行业专业标准》编写完成。针对课程特点,本书的编写思路从工科学生的人才培养目标和学生特点出发,秉承“学以致用”的原则,以“激发学生兴趣”为着眼点。

内容安排上每章既有导读,又有工程案例,理论结合实际,突出学生工程应用能力的训练和培养,便于组织教学和实践,也便于开设“机械制造装备设计”课程的院校灵活选用。本书在教学使用过程中,并非全部内容都要讲解,可根据专业、课时的多少进行删减,有些内容和工程案例可在学生试验、课程设计和毕业设计时作为参考。

本书是为机械制造装备设计相关专业的本、专科学生提供最新技术的教材,也是为培养高素质的机械制造装备设计和应用人才提供的最新培训教材,还是为从事机械制造装备设计及应用的工程技术人员提供最新的参考图书。

随着社会进步和科学技术的发展,机械制造业的生产模式发生着巨大的变革,从单机生产模式向智能制造系统生产模式发展。与生产模式的变革相适应,机械制造装备包括加工装备、物流装备、测控装备及控制系统等也发生了很大变化。装备功能部件(如高速电主轴、伺服电机、直线电机、高精度滚珠丝杠、静压导轨、高性能传感器等),工业机器人, CAD、CAE、CAM 计算机辅助设计和辅助制造软件,材料技术,电子技术,计算机网络技术以及智能制造等技术的发展,为现代机械制造装备设计提供了新的支撑条件。

本书将机床设计、夹具设计、刀具设计、工业机器人设计、检测系统设计、物流系统设计和智能制造系统与装备等内容合为一门专业课程,构成一个新的课程体系。书中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。本书内容与生产实践紧密相连,并通过设计范例进一步说明机械制造装备设计方法和步骤,方便读者学习和使用。

全书共 9 章,包括绪论、金属切削机床设计、机床典型部件设计、金属切削机床夹具设计、金属切削刀具设计、机械加工检测装置、机械制造物流系统设计、智能制造系统与装备、机械制造装备设计范例。

本书由苏州大学芮延年、卫瑞元担任主编,负责编写第 1、8、9 章;苏州科技大学齐文春、江南大学纪小刚、常熟理工学院吴健、山东交通学院周淑霞担任副主编,负责编写第 2、3、4 章;苏州大学郭开波、苏州科技大学杨建锋、江南大学曹毅、常熟理工学院满增光参编,负责编写第 5、6、7 章。全书由苏州大学陈再良教授、王传洋教授主审。

在本书编写过程中,参考了其他同行作者的一些资料和研究成果,在此一并致谢。

限于作者的水平,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者
2017 年 1 月

目 录

第1章 绪论	1	2.3.2 运动参数	45
1.1 概述	1	2.3.3 动力参数及一般计算方法	46
1.1.1 机械制造生产模式的演变	2	2.4 主传动系统设计	50
1.1.2 机械制造的作用、地位和 发展趋势	5	2.4.1 主传动系统分类和传动方式	50
1.1.3 机械制造装备的作用、 地位和发展趋势	7	2.4.2 分级变速主传动系统设计	52
1.2 机械制造装备的分类	11	2.4.3 无级变速主传动系统的设计	61
1.2.1 加工装备	11	2.5 进给传动系统设计	62
1.2.2 工艺装备	13	2.5.1 进给传动系统的特点、 转速和组成	62
1.2.3 仓储输送装备	14	2.5.2 机械进给传动系统的设计 特点	63
1.2.4 辅助装备	15	2.5.3 电气伺服进给系统	64
1.3 机械制造装备的设计类型和 方法	15	习题与思考	66
1.3.1 设计类型	15	第3章 机床典型部件设计	67
1.3.2 一般产品开发设计方法及 步骤	16	3.1 概述	67
1.4 机械制造装备设计的评价	25	3.2 变速箱结构及传动轴和变速 机构	68
1.4.1 评定指标	25	3.2.1 变速箱结构及传动轴	68
1.4.2 价值分析	28	3.2.2 变速机构	72
1.4.3 设计评价	29	3.3 主轴部件设计	75
习题与思考	32	3.3.1 主轴部件设计应满足的 基本要求	76
第2章 金属切削机床设计	33	3.3.2 主轴的传动方式	78
2.1 概述	33	3.3.3 主轴部件结构设计	79
2.1.1 机床产品的分类	34	3.4 滚珠丝杠副传动选型设计	90
2.1.2 机床产品设计要求	36	3.4.1 滚珠丝杠副结构类型和特点	90
2.1.3 机床产品设计的方法	37	3.4.2 滚珠丝杠副的代号和标注 方法	91
2.1.4 机床设计步骤	38	3.4.3 滚珠丝杠副轴向间隙的调整与 预紧	93
2.2 金属切削机床总体设计	39	3.4.4 滚珠丝杠副结构的选择 计算	94
2.2.1 机床系列型谱的制定	39	3.5 支承件设计	95
2.2.2 机床运动原理方案设计与 分析	41	3.5.1 支承件设计的基本要求	95
2.2.3 表面形成的方法	42	3.5.2 支承件的材料	96
2.2.4 非表面形成的运动	44	3.5.3 支承件力学分析	97
2.3 机床主要参数的设计	44		
2.3.1 尺寸参数	44		

3.5.4 机座或机架的设计	98	5.5 常用刀具的选择	161
3.6 导轨设计	103	5.5.1 车刀	161
3.6.1 导轨的功用和分类	103	5.5.2 铣刀	163
3.6.2 导轨的设计要求	104	5.6 孔加工刀具	165
3.6.3 导轨截面形状选择和导轨 间隙调整	104	5.7 齿轮加工刀具	167
3.6.4 导轨的材料	108	习题与思考	169
3.6.5 导轨的验算	109	第6章 机械加工检测装置	170
3.6.6 滚动导轨	111	6.1 概述	170
3.6.7 静压导轨	112	6.1.1 光学检测装置及其类型	171
习题与思考	114	6.1.2 电磁检测装置及其类型	172
第4章 金属切削机床夹具设计	115	6.1.3 电量检测装置及其类型	172
4.1 概述	115	6.1.4 其他检测装置及其类型	173
4.1.1 机床夹具的组成	116	6.2 机床运动位移检测装置	174
4.1.2 夹具的分类	117	6.2.1 电感式传感器	174
4.2 六点定位原理	118	6.2.2 电容式位移传感器	177
4.3 常用定位元件及约束状态	120	6.2.3 光栅尺原理及其应用	179
4.3.1 支承钉	120	6.2.4 感应同步器	181
4.3.2 支承板	120	6.2.5 角数字编码器	182
4.3.3 定位销	121	6.2.6 激光干涉测量原理	185
4.3.4 V形块	122	6.2.7 三坐标测量仪	189
4.4 定位误差的分析与计算	122	6.3 加工系统在线测量与监测	193
4.5 夹紧机构设计	126	6.3.1 孔径的自动测量	193
4.5.1 夹紧力三要素分析	126	6.3.2 探针式红外自动测量系统	194
4.5.2 常用夹紧机构设计	128	6.3.3 加工误差在线检测与 补偿系统	195
4.5.3 典型机床的夹具	133	6.3.4 在线检测加工尺寸和刀具磨损 情况	196
4.5.4 组合夹具的设计	137	6.3.5 用探针在线检测刀具状态	196
习题与思考	139	6.3.6 刀具状态的智能化在线监控 系统	196
第5章 金属切削刀具设计	141	习题与思考	197
5.1 概述	141	第7章 机械制造物流系统设计	198
5.2 刀具的几何角度及切削要素	142	7.1 概述	198
5.2.1 切削运动与切削用量	142	7.2 制造业物流系统总体设计	201
5.2.2 刀具的几何参数	144	7.2.1 生产物流系统的布置方式	201
5.2.3 刀具角度及工作角度	146	7.2.2 精益生产方式物流系统 布置	202
5.3 切削基本理论的应用	149	7.2.3 物流设备及其选择与设计 要求	203
5.3.1 工件材料的切削加工性	149	7.3 上、下料装置设计	203
5.3.2 切削液的选用	150	7.3.1 卷状料上料装置	204
5.3.3 刀具几何参数的合理选择	152		
5.3.4 切削用量的合理选择	155		
5.4 刀具材料	156		
5.4.1 刀具材料类型	156		
5.4.2 常用的刀具材料	157		

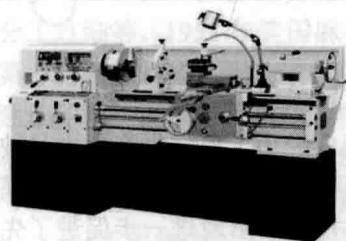
7.3.2 棒状料上料装置.....	204	8.4 智能制造装备.....	256
7.3.3 件料上料机构.....	206	8.4.1 智能制造装备国内外发展	
7.4 上、下料机器人(机械手).....	208	现状.....	257
7.4.1 机器人的基本构成.....	209	8.4.2 智能制造装备关键技术.....	260
7.4.2 机器人的结构形式和运动		8.4.3 精密、超精密和智能机床	
形态分类.....	210	产品.....	271
7.4.3 机器人主要技术参数.....	212	习题与思考.....	275
7.4.4 机器人主要部件.....	213	第9章 机械制造装备设计范例	276
7.5 物流输送装置的设计.....	224	9.1 机械制造装备设计基本方法.....	276
7.5.1 带式输送机.....	224	9.2 C6140卧式车床数控化改造	
7.5.2 螺旋输送机.....	227	设计(范例1).....	277
7.5.3 辊子输送机.....	229	9.2.1 概述.....	277
7.5.4 链板输送机.....	232	9.2.2 总体方案的确定.....	278
7.5.5 悬挂输送机.....	234	9.2.3 进给传动部件的计算和	
7.5.6 自动运输小车.....	236	选型.....	280
7.6 自动化立体仓库.....	237	9.3 激光加工机的设计(范例2).....	287
7.6.1 自动化立体仓库的分类.....	237	9.3.1 概述.....	287
7.6.2 自动化立体仓库的构成.....	238	9.3.2 轴的伺服传动系统设计.....	288
7.6.3 自动化立体仓库总体设计.....	242	9.3.3 x轴的伺服传动系统设计.....	291
习题与思考.....	246	9.4 机械手自动控制(范例3).....	294
第8章 智能制造系统与装备	247	9.4.1 设计任务与控制要求.....	294
8.1 概述.....	247	9.4.2 控制方案.....	295
8.2 智能制造系统模式.....	250	9.5 钻床夹具设计(范例4).....	298
8.3 智能制造关键技术.....	251	9.5.1 设计任务.....	298
8.3.1 先进制造基础技术.....	252	9.5.2 加工工艺分析与设计.....	299
8.3.2 新一代信息技术.....	253	9.6 成形车刀的计算与设计	
8.3.3 人工智能技术.....	254	(范例5).....	303
8.3.4 制造优化技术.....	255	9.6.1 设计任务.....	303
8.3.5 大数据分析决策支持		9.6.2 圆体成形车刀设计.....	303
技术.....	256	习题与思考.....	309
		参考文献	310

第1章 绪 论

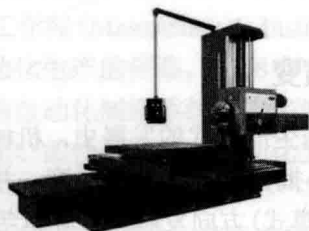
1.1 概 述

制造业是国民经济的支柱产业，是制造生产资料和生活资料的主要部门，是一个国家经济发展、社会进步和人民生活水平提高的基本保证，无论在工业经济时代还是在信息技术时代，制造业都是国民经济的基础。而机械制造业是制造业的核心，其机械制造装备又是机械制造业的基础，直接为机械制造业提供生产用装备；同时间接为非机械制造业提供生产用机械设备，因此机械制造装备是机械制造业乃至整个制造业发展的基础，机械制造装备的发展水平是一个国家工业水平的重要标志。

随着社会需求的变化和科学技术的发展，机械制造业的生产模式发生着巨大的变革。与生产模式的变革相适应，机械制造装备的组成也发生了很大变化，目前，正在从传统的单机生产模式(单台机床及工装)向先进生产模式(数控机床及自动化)方向发展；但是，无论是单机生产模式还是先进生产模式都涉及机械制造装备问题；本书重点介绍机械制造装备设计，常见机械制造装备如图 1-1 所示。



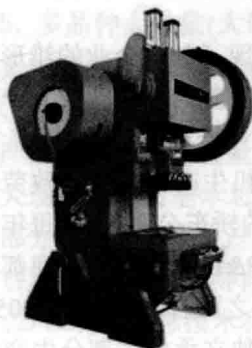
(a) 车床



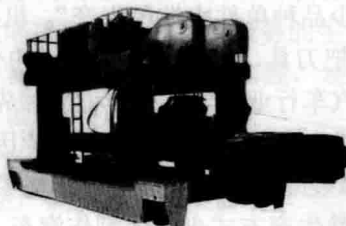
(b) 镗床



(c) 加工中心



(d) 冲床



(e) 锻压机



(f) 焊接机器人工作站

图 1-1 常见机械制造装备

本章知识要点 ▶▶

(1) 了解机械制造生产模式的演变过程, 机械制造作用、地位和发展趋势, 机械制造装备设计所涉及的内容, 机械制造装备的发展方向。

(2) 掌握机械制造装备的设计基本方法和设计水平的评价方法。

兴趣实践 ▶▶

(1) 到学校机械实习工厂或附近的机械制造企业去参观访问。

(2) 用学到的基本评价方法, 对你熟悉的机电类产品(如洗衣机)进行设计水平评价。

探索思考 ▶▶

机械制造装备的设计基本方法很多, 如创新设计、变形设计和模块化等, 它们各自特点是什么? 各适用于什么场合?

预习准备 ▶▶

(1) 翻阅制造业发展史, 简要阅读了解机械制造生产模式的演变过程。

(2) 重点阅读机械制造装备, 如车床、铣床、镗床等机床, 它们各自特点和作用。

1.1.1 机械制造生产模式的演变

纵观近 300 年来世界机械制造生产模式的发展史, 机械制造业经历了单件生产、少品种小批量、少品种大批量、多品种小批量生产模式的过渡, 并随着科学技术的进步正向大规模定制生产模式(多品种大批量生产模式)方向发展。计算机等先进技术的出现进一步促进了先进制造生产模式的发展。

1. 手工与单件生产

17 世纪~1830 年, 在专业化协作分工、蒸汽动力机的基础上出现了制造企业的雏形工厂式的制造厂, 人类社会的生产率开始出现大幅度的飞跃。到大约 1900 年, 制造业成为一个重要的产业, 其主要生产模式是“少品种单件小批量生产”。机械制造业推行的是“刚性”生产模式, 基本上是“一个工人、一把刀具、一台机床”进行的个人单机生产模式, 导致劳动生产率低下, 产品质量不稳定。如汽车行业, 当时处于世界领先地位的轿车公司 P&L 每年只制造几百辆汽车, 而且所造的汽车没有两辆是完全相同的, 原因在于 P&L 所有的承包商都不采用标准的计量器具, 装配时, 依靠装配工的熟练程度来修整零件, 使之配合良好。到 1905 年, 欧洲已有几百家这类公司采用单件生产方式少量地制作汽车, 这些独立承担大部分生产任务的小工厂没有能力开发新技术, 以至于当时新产品开发的速度较为缓慢。

2. 少品种小批量(成组技术)

20 世纪 50 年代末 60 年代初成组技术传入东欧和西欧各国。成组技术是一门生产技术科

学,在机械零件加工方面的应用,是将多种零件按其工艺的相似性分类,以形成零件族,把同一零件族中生产量小的零件汇集成生产量大的组,从而使小批量生产能获得接近大批量生产的经济效益。把成组技术原理应用于生产组织和计划管理,制定成组生产作业计划,组织成组生产,可节省设备投资,从而达到高效与经济的目的。成组技术是解决当前手工作坊式落后生产模式的基本途径,适应多品种小批量生产和研制的需要。60年代以后,日本、美国也积极采用成组技术,并取得了显著的经济效果。自70年代以后,美国和其他先进工业国家已认识到,要想进一步发挥数控机床的优越性,必须与成组技术相结合,并用成组技术指导它的应用。目前,现代成组生产单元已广泛应用到数控机床和加工中心。

3. 少品种大批量(刚性生产线)

20世纪20年代,Whitney提出了互换性和大批量生产,Oliver Eons把传送带引入制造系统,在Taylor的科学管理的支撑下,与当时的电气化、标准化与系列化相结合,Henry Ford开创了机械自动流水线生产,出现了少品种大批量生产的模式,又称为底特律式自动化,成为各国纷纷仿效的制造生产模式,制造业开始了第一次生产模式的转换。这种新的大量生产方式给制造业带来一场重大变革,它推动了工业化的进程和经济高速发展,为社会提供了大量的经济产品,促进了市场经济的发展。其主要特征是少品种大批量生产、塔形多层次的垂直领导和严格的产品节拍控制,称这种少品种大批量生产模式为刚性生产线。刚性生产线大大提高了生产效率,从而降低了产品成本,但这是以损失产品的多样性为代价的。到90年代,少品种大批量生产方式达到了顶峰。

4. 柔性自动化生产阶段(多品种少批量)

从20世纪50年代开始,随着生产环境的变化,人们逐渐认识到刚性自动化的不足。大批量生产少数产品品种的局限性越来越大,包括对市场和用户需求的应变能力较低以及劳动分工过细等。1952年美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)试制成功第一台数控铣床,揭开了柔性自动化生产的序幕。1968年英国莫林公司和美国辛辛那提公司建造了第一条由计算机集中控制的自动化制造系统,定名为柔性制造系统。70年代出现了各种微型机数控系统、柔性制造单元、柔性生产线和自动化工厂等。

柔性制造系统主要特征如下。

- (1) 工序集中,无固定节拍,物料非顺序输送将高效率和高柔性融为一体。
- (2) 生产成本低,具有较强的灵活性和适应性。

5. 多品种大批量(大规模定制生产)

大规模定制(Mass Customization, MC)是一种在系统整体优化的思想指导下,集企业、顾客、供应商和环境于一体,充分利用企业已有的各种资源,根据顾客的个性化需求,以大量生产的低成本、高质量和高效率提供定制产品和服务的生产模式。

大规模定制的基本思想是:将定制产品的生产问题,通过产品结构和制造过程的重组全部或部分转化为批量生产。具有以下特征。

- (1) 以客户需求为导向。
- (2) 以现代信息技术和先进生产制造技术为支撑。
- (3) 以客户细分的产品结构模块化、零部件和生产工艺通用化及标准化为平台段。

6. 并行工程

并行工程(Concurrent Engineering, CE),也称并行设计(Concurrent Design)或同期工程

(Simultaneous Engineering), 其概念是由美国国防部防御分析研究所于 1988 年 12 月首先提出的。并行工程是一种系统的集成方法, 采用并行方法处理产品设计及相关过程, 包括制造和支持过程。这种方法力求使产品开发人员从一开始就能考虑到产品从概念设计到产品报废的整个产品生产周期中的所有因素, 包括产品质量、成本、作业调度及用户需求。它通过组成多学科产品开发队伍, 改进产品开发过程, 利用各种先进的计算机辅助工具和产品数据管理 (Product Data Management, PDM) 等技术手段, 使产品开发的早期阶段能及早考虑下游的各种因素, 达到缩短产品开发周期、提高产品质量、降低产品成本的目的。它要求各有关部门人员在产品开发的早期阶段就要介入, 而且参与每一个有关环节, 强调各个部门的“协同工作”, 即产品设计师、工艺师、财务分析人员、生产计划人员以及采购供应、市场营销人员在开始时就集合在一起, 把设计思想“传递下去”, 变成各部门之间的“共同任务”, 充分利用集体智慧, 获取有效的知识和经验, 使产品设计能更好地满足用户要求, 大大减少设计中的返工现象, 从而缩短产品开发周期, 降低成本。

7. 敏捷制造

1988 年美国通用汽车公司和里海大学共同提出敏捷制造 (Agile Manufacturing, AM) 战略, 于 1990 年向社会半公开; 1990 年日、美、加、澳等国及西欧各国联合进行 10 年期的智能制造系统 (Intelligent Manufacturing System, IMS) 的研究与开发; 1992 年德、美两国提出精益生产。1994 年德国提出改变工业组织结构的分形公司 (Fractal Company)。从 1991 年开始, 以美国为首的各发达国家对敏捷制造进行了大量广泛的研究。

1992 年, 由美国国会和工业界在里海大学建立了美国敏捷制造企业协会 (Agile Manufacturing Enterprise Forum, AMEF)。从 1994 年开始, 由 AMEF 牵头, 有近百家公司和大学研究机构就敏捷制造的 6 个领域 (集成产品与过程开发/并行过程、人的问题、虚拟企业、信息与控制、过程与设备、法律障碍) 进行了研究与实践。其主要特性如下。

- (1) 并行特性。把时间上有先后顺序的活动转变为同时考虑和尽可能同时进行处理的活动。
- (2) 整体特性。将制造系统看成一个有机整体, 设计、制造、管理等过程不再是一个个相互孤立的单元而是将其纳入一个系统考虑。
- (3) 协同特性。特别强调人们的群体协调作用, 包括与产品全生命周期 (设计、工艺、制造、质量、销售、服务等) 的有关部门人员组成的小组协同工作。

8. 精益生产

精益生产 (Lean Production, LP) 这一概念, 是由美国麻省理工学院倡导的国际机动车研究小组, 用了 5 年时间全面总结日本丰田汽车公司等 90 余家汽车企业生产方式后提出来的。精益生产是相对大批量生产而言的, 其注重时间效率, 其焦点是识别整个价值流, 使价值增值流动并应用顾客拉动系统, 使价值增值行为在最短的时间内流动, 找出创造价值的源泉, 消除浪费, 在稳定的需求环境下以最低的成本及时交付高质量的产品。

精益生产以准时制 (Just in Time, JIT) 为核心, 寻求精益的方式进行产品开发、生产和销售。精益生产方式起源于日本丰田汽车公司, 早期精益生产具有如下几个特征。

- (1) 消除浪费。其核心思想是降低成本来增加企业获利的空间。
- (2) 看板管理。为实现准时制生产和降低库存, 大野耐一提出看板管理的生产方式, 将所需要的零件, 在需要的时候, 按需要的数量不多不少地供给各工序, 也就是所谓的三及时。
- (3) 快速变换程序。所谓快速变换程序是通过快速变换机种或快速换模技术, 快速变换程序来提高快速反应能力及流程效率, 减少有效作业时间的浪费。

进入 21 世纪以来,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产品的整个制造过程。快速响应市场已成为制造业今后发展的主要方向。

现代设计方法、先进制造技术、计算机和网络信息化技术的发展,使得先进制造生产模式不断涌现。技术的革新促进了智能制造系统的出现,人-机系统趋向于智能化。

制造生产模式的改变推动了生产力的发展,而计算机等技术的革新则促进了制造生产模式的先进化,这反映出科学技术是改变生产力的第一要素。

1.1.2 机械制造的作用、地位和发展趋势

机械制造业是国民经济的基础产业,它的发展不仅直接影响国民经济各部门的发展,也影响国计民生和国防力量的加强,因此各国都把机械制造业的发展放在首要位置。随着机械产品国际市场竞争的日益加剧,各大公司都把高新技术注入机械产品的开发中,作为竞争取胜的重要手段。

大量研究表明,在国民经济生产力构成中,制造技术的作用占 60%以上。美国认为社会财富的来源中机械制造业占 68%;当今制造科学、信息科学、材料科学、生物科学等四大支柱科学相互依存,但后三种科学必须依靠制造科学才能形成产业和创造社会物质财富。而制造科学的发展也必须依靠信息科学、材料科学和生物科学的发展,机械制造业是任何其他高新技术实现工业价值的最佳集合点。例如,快速原型成形机(3D 打印)、虚拟轴机床、智能结构与机器人等,已经远超出了纯机械的范畴,而是集机械、电子、控制、计算机、材料、信息等众多技术于一体的现代机电一体化设备,充分体现了综合科学和个性化发展的内涵。

从美国来看,自第二次世界大战以来,美国对机械制造业的发展十分重视。从 20 世纪 50 年代以来,在美国大学中设置工业工程专业,培养机械制造系统人才,着眼于世界市场竞争,企图霸占国际制造业市场。50 年代初,当第一台数控机床在美国麻省理工学院诞生以后,美国在机械制造业中采取的主导政策是走数控和计算机群控技术模式,实现机械制造业中占主导地位的中小批量生产自动化的道路,以提高生产效率。但是由于忽略了市场的多变性和人因的作用,在与德、日的竞争中未能占上风,而使得美国的机械制造业每况愈下,一度认为机械制造业已成“夕阳工业”。经济的衰退,使美国决策者不得不重新调整自己的产业政策,先后制定并实施了一系列振兴制造业的计划,并特别将 1994 年确定为美国的制造技术年,制造技术是当年美国财政重点扶持的唯一领域。从概念上实现了从柔性制造到敏捷制造的转化,把宏观的国际市场需求与具体的公司生产密切结合,充分发挥人的因素,形成对市场的快速反应,并提出了敏捷制造的新概念。措施和理念的改变,使得先进制造技术在美国得到了长足的发展,促进了美国经济的全面复苏,重新占领了许多原先失去的市场。

“工业 4.0”项目由德国联邦教研部与联邦经济技术部联手资助,在德国国家工程院、弗劳恩霍夫协会、西门子公司等德国学术界和产业界的建议和推动下形成,并已上升为国家级战略。“工业 4.0”项目在 2013 年 4 月的汉诺威工业博览会上正式推出,其目的是提高德国工业的竞争力,在新一轮工业革命中占领先机。德国所谓的工业四代(工业 4.0)是指以智能制造为主导的第四次工业革命,或革命性的生产方法。该战略旨在通过充分利用信息通信技术和网络空间虚拟系统-信息物理系统(Cyber-Physical System)相结合的手段,将制造业向智能化转型。

“工业 4.0”项目主要分为以下三大主题。

一是智能工厂,重点研究智能化生产系统及过程,以及网络化分布式生产设施的实现。

二是智能生产,主要涉及整个企业的生产物流管理、人机互动以及 3D 技术在工业过程中的应用等。该计划将特别注重吸引中小企业参与,力求使中小企业成为新一代智能化生产技术的使用者和受益者,同时也成为先进工业生产技术的创造者和供应者。

三是智能物流,主要通过互联网、物联网、物流网,整合物流资源,充分发挥现有物流资源供应方的效率,而需求方,则能够快速获得服务匹配,得到物流支持。

为了国家发展的需要,2015 年 5 月 8 日中华人民共和国国务院(简称国务院)印发了《中国制造 2025》的通知,《中国制造 2025》提出,坚持“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”的基本方针,坚持“市场主导、政府引导,立足当前、着眼长远,整体推进、重点突破,自主发展、开放合作”的基本原则,通过“三步走”实现制造强国的战略目标:第一步,到 2025 年迈入制造强国行列;第二步,到 2035 年我国制造业整体达到世界制造强国阵营中等水平;第三步,到新中国成立一百年时,我国制造业大国地位更加巩固,综合实力进入世界制造强国前列。

机械制造业是我国第一大工业部门,素有“工业心脏”之称。进入 21 世纪以来,我国机械制造业得到了快速发展。据统计资料表明,2000 年我国机械工业总产值仅为 1.44 万亿元,至 2005 年达 4.18 万亿元,2010 年达 14.38 万亿元,2015 年机械工业总产值为 28.50 万亿元,为 2000 年的 20.35 倍,年均复合增长率达到 25%。现在,我国机械工业的销售额超过了德国、日本和美国,跃居世界第一,成为全球第一的机械制造大国。

自“十一五”以来,我国围绕能源、材料、交通运输、农业及国防等领域发展的需要,开发出了一批具有自主知识产权的机械产品,如 100 万 kW 级超临界和超超临界火力发电机组;1000kV 特高压交流输变电设备和+800kV 直流输电成套设备;30 万吨/年合成氨设备;12000m 石油钻机;五轴联动龙门加工机床、五轴联动叶片加工中心;1080t 履带起重机。机械装备的国内市场自给率已经超过了 85%,重大技术装备自主化取得了较大突破。

随着重大技术不断取得突破,我国机械工业代表性产品的国际地位明显提升,高端产品所占比例逐渐提高。例如,机床产值自 2009 年以来一直位居世界首位,达 153 亿美元;机床行业产品结构不断优化,金属切削机床数控化率已经提高到 50%以上;自 2006 年以来,我国发电设备产量连续超过 1 亿 kW,占世界总产量的 50%左右,遥遥领先于世界其他国家,其中超临界、超超临界火力发电机组所占比例超过 40%;汽车工业实现了跨越式发展,从 2000 年的 207 万辆到 2009 年首次突破千万辆大关,跃居世界首位,2015 年,我国汽车产销量均超过 2450 万辆,创全球历史新高,连续 7 年蝉联全球第一。

自从步入 21 世纪以来,全球制造业的发展速度越来越快,制造业正朝着制造全球化、制造敏捷化、制造网络化、制造虚拟化、制造智能化和制造绿色化等方向发展。

1. 制造全球化

近年来由于 Internet/Intranet 技术和交通手段的飞速发展,制造全球化的研究和应用得以迅速发展,其前沿内容主要有如下几方面。

(1) 市场的国际化,产品销售的全球网络化。

(2) 产品设计和开发的国际合作。

(3) 制造企业在世界范围内的重组与集成,如动态联盟。

(4) 制造资源的跨地区、跨国家的协调、共享和优化利用。

(5) 制造全球化的体系结构。

2. 制造敏捷化

制造敏捷化是面向制造环境和制造过程的一种制造模式,其研究内容主要有以下方面。

(1) 柔性,包括机器、流程、人、组织的运行柔性和扩展柔性等。

(2) 重组,通过重组、重构的方式来增强对市场、新产品开发的快速响应能力。

(3) 快速化的集成设计和制造技术,如快速原型制造(Rapid Prototyping/Parts Manufacturing, RPM)、集成设计法。

3. 制造网络化

基于网络的制造,主要研究内容包括以下几个方面。

(1) 企业内部的网络化,以实现制造过程的集成。

(2) 企业与制造环境的网络化,实现制造环境与企业中工程设计、管理信息等系统的集成。

(3) 企业与企业间的网络化,实现企业间的资源共享、组合与优化利用。

4. 制造虚拟化

虚拟制造又称拟实制造,实际上就是实现产品制造的数字化。它是以制造技术和计算机仿真技术为基础,集现代制造工艺、计算机图形学、并行工程、人工智能、人工现实技术和多媒体技术等多种高新技术于一体,由多学科知识形成的一种综合系统技术。它通过建立系统模型将现实制造环境和制造过程映射到计算机及其相关技术所支撑的虚拟环境中,在虚拟环境下模拟现实制造环境和制造过程,并对产品制造及制造系统的行为进行预测和评价。

5. 制造智能化

所谓智能制造系统是一种由智能机器、人类专家共同组成的人机一体化智能系统,它在制造过程中能进行智能活动,如分析、推理、判断、构思和决策等。智能制造技术旨在使人与智能机器合作共事,从而扩大、延伸和部分地取代人类专家在制造过程中的脑力劳动,以实现制造过程的优化。

6. 制造绿色化

绿色制造是环境影响和资源效率的现代制造模式,其目的是使产品在从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的全生命周期中,对环境的影响最小,资源利用率最高。

制造业一方面创造人类财富,但同时又是环境污染的主要源头。制造业导致环境污染的根本原因是资源消耗和废弃物的产生。制造业的发展必须考虑到自然生态环境的长期承载能力,使环境和资源既能满足当代经济发展的需要,又能满足人类长远生存发展的需求,即制造业的发展必须以实现人与自然的和谐发展为基础前提,实现制造业的可持续发展。

绿色制造涉及的方面非常广泛,包括产品的全生命周期和多生命周期,主要有绿色设计、绿色材料、绿色工艺、绿色包装和绿色处理。绿色制造是未来制造业企业通向21世纪国际市场的通行证,是目前和将来制造业应该予以充分考虑和重视的一个重大问题。

1.1.3 机械制造装备的作用、地位和发展趋势

机械制造生产能力和制造水平,主要取决于机械制造装备的先进程度。机械制造装备的核心为金属加工机床。一个国家的机床工业水平在很大程度上代表着这个国家的工业生产能力和技术水平。

机械制造装备由四大部分组成,如下所述。

(1) 加工设备。加工设备主要是指金属加工机床,其加工方法为锻压、铸造、切割、连接

及其他方法等。因此,金属加工机床可分为锻造机床、铸造机床、切割机床、连接机床等。切割机床包括分割机床、切削机床、去除机床等。切削机床就是习惯上所称的金属切削机床,它是由专业机床厂生产的。

另外,还有专用非标准机械加工设备,它们是为某一个特定工件,完成某一个工序自行设计制造的专用机床,简称为专机。

特种加工机床也属于加工设备范畴,在此不进行讨论,将在有关课程中加以讨论。

(2)工艺装备。工艺装备通常是指机械制造过程中所用到的刀具、模具、夹具、量具、工具等的总称(简称为工装)。机械制造本身离不开工艺装备的应用。工艺装备的水平直接反映了一个工厂技术能力的强弱。

(3)工件输送装备。工件输送装备主要是指坯料、半成品或成品在车间内工作地点间的转移输送装置,以及机床的上、下料装置。

(4)辅助装备。辅助装备包括清洗剂、排屑装置和计量装置等。

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,现代化机械制造装备的发展呈如下趋势。

1. 向高性能化方向发展

高性能化一般包含高速化、高精度、高效率和高可靠性。新一代计算机数控(Computer Numerical Control, CNC)系统就是以满足此“四高”而诞生的。它采用 64 位或者 128 位 CPU 结构,以多总线连接,高速数据传递。在分辨精度高($0.1\mu\text{m}$)的情况下,系统仍是有高速度(100m/min),可控及联动坐标达 16 轴,并且有丰富的图形功能和自动程序设计功能。如瑞士米克朗五轴联动铣削加工中心、日本马扎克七轴联动车铣加工中心等机床,都具备高性能化特点。

在高性能数控系统中,除了具有直线、圆弧、螺旋线插补等一般功能外,还配置有特殊函数插补运算,如样条函数插补等。微位置段命令用样条函数来逼近,保证了位置、速度、加速度都具有良好的性能,并设置专门函数发生器、坐标运算器进行并行插补运算。

在数字伺服控制中使用超高速数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP),并应用了现代控制理论的各种算法,如鲁棒控制、前馈控制和特定方式下的加、减速控制等控制策略以及非线性补偿技术,可在系统中进行在线控制和非线性补偿等。在给定精度要求下,可使响应速度大幅度提高。前馈控制可使位置跟踪误差消除,同时使系统位置控制达到高速响应,加、减控制能在高速下准确定位。如德马吉森精机公司生产的 DMU210P 主卧转换加工中心,最高转速 8000r/min ,重复定位精度 $\leq 1\mu\text{m}$ 。

其他方面如法国 IBAG 公司磁悬浮轴承的高速主轴最高转速可达 $15 \times 10^4\text{r/min}$;加工中心换刀速度达 1.5s。切削速度方面,目前硬质合金刀具和超硬材料涂层刀具车削和铣削低碳钢的速度达 500m/min 以上,而陶瓷刀具可达 $800 \sim 1000\text{m/min}$,比高速钢刀具 $30 \sim 40\text{m/min}$ 的速度提高数十倍。系统可靠性方面,采用了冗余、故障诊断,自动检错、纠错,系统自动恢复,软、硬件可靠性等技术予以保证,使得这种机床具有高性能,即高速、高效、高精度和高可靠性。它代表了机床高性能的发展方向。

2. 智能化趋势

人工智能在机床中的研究日益得到重视,数控机床的智能化就是其重要应用。数控机床的智能化通过各类传感器对切削加工前后和加工过程中的各种参数进行监测,并通过计算机系统作出判断,自动对异常现象进行调整与补偿,以保证加工过程的顺利进行,并保证加工