



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校机械工程及自动化

机械设计制造及其自动化



专业系列教材

# 机械制造装备设计

主 编 黄玉美  
副主编 王润孝 梅雪松

 高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校机械工程及自动化专业系列教材  
机械设计制造及其自动化

# 机械制造装备设计

主 编 黄玉美  
副主编 王润孝 梅雪松  
参 编 李 言 张广鹏  
主 审 王先逵



高等教育出版社

## 内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,包括先进机械制造装备的加工装备、物流装备、测控装备三方面内容,反映了先进的机械制造装备较完整的体系。本书将加工装备的机床,物流装备中的机器人、自动导航物流车,测控装备的坐标测量机等具有坐标运动的运动学原理和运动功能设计的共性知识统一到“机械制造装备设计方法”一章中;将机床、机器人、坐标测量机等数控装备的数控系统共性知识统一到“数控装备 CNC 系统设计”一章中,建立了相关章节设计知识的纵向联系,同时避免同类共性知识在各章中重复介绍。在介绍机械制造装备的基本设计知识与原理的基础上,本书突出了新知识、新技术、新结构、新元件和新成果的介绍。

本书共 10 章,由机械制造装备设计领域学术造诣深、富有教学经验及教材编写经验和设计实践经历的教授负责编写,条理清楚,图文并茂。本书可作为普通高等学校机械设计制造及其自动化及相关专业的教材,其新知识、新成果的介绍也可供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/黄玉美主编. —北京:高等教育出版社, 2008. 6

ISBN 978 - 7 - 04 - 023614 - 9

I. 机… II. 黄… 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(2008)第 067337 号

策划编辑 卢 广 责任编辑 薛立华 封面设计 李卫青 责任绘图 朱 静  
版式设计 余 杨 责任校对 胡晓琪 责任印制 尤 静

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010 - 58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京铭成印刷有限公司	畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787 × 1092 1/16	版 次	2008 年 6 月第 1 版
印 张	31.75	印 次	2008 年 6 月第 1 次印刷
字 数	770 000	定 价	39.20 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 23614 - 00

# 前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

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,从单机生产模式向制造系统生产模式发展。与生产模式的变革相适应,机械制造装备的组成也发生了很大变化,机械制造系统生产模式的机械制造装备包括加工装备、物流装备及测控装备。数控技术、机电一体化技术、功能部件、CAD技术和虚拟样机仿真技术的发展,为机械制造装备设计提供了新的支撑条件,机械制造装备的设计方法和技术也在发生着深刻变革。机械制造装备设计课程的教学目的和要求是:阐明机械制造装备是发展国民经济的重要基础,介绍加工装备、物流装备及测控装备的基础知识、先进技术和发展趋势,使学生掌握先进机械制造装备的设计方法,具备一定的机械制造装备总体设计和结构设计的能力。

本书编写的指导思想是将加工装备、物流装备及测控装备的共性知识集中介绍,既介绍基本设计知识,同时介绍先进的设计知识和方法,并融入一定的设计实践知识。

本书由西安理工大学黄玉美任主编,并负责编写第1、2、3、6章;西北工业大学王润孝任副主编,并负责编写第5、9章;西安交通大学梅雪松任副主编,并负责编写第4、8章;西安理工大学李言负责编写第10章;西安理工大学张广鹏负责编写第7章;西北工业大学库祥臣参加了第5章的编写;西安交通大学徐学武参加了第8章的编写;西安理工大学李淑娟参加了第10章的编写;西安理工大学杨新刚、高锋、韩旭熠参加了第1、2、3、6章的编写。

全书由清华大学王先逵教授主审。

本书可作为普通高等工科院校机械设计制造及其自动化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

2006年9月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1	2.3 设计类型及方法	25
1.1 机械制造装备与制造业的 关系 .....	1	2.3.1 设计类型 .....	25
1.1.1 机械制造业与产品 .....	1	2.3.2 创新设计方法 .....	26
1.1.2 机械制造装备与 制造业的关系 .....	3	2.3.3 模块化变型设计方法 .....	27
1.2 机械制造装备与市场竞 争的关系 .....	4	2.4 坐标运动类装备运动学原理 与方案设计方法 .....	28
1.2.1 市场变化对机械制 造装备的要求 .....	4	2.4.1 运动学基本原理 .....	28
1.2.2 机械制造装备适应 市场竞争的对策 .....	5	2.4.2 求解运动原理方案的 方法 .....	29
1.3 机械制造生产模式的发 展 .....	5	2.4.3 机床运动原理方案 设计方法 .....	30
1.3.1 机械制造生产活动的 基本功能 .....	5	2.4.4 机器人运动原理方案 设计方法 .....	53
1.3.2 机械制造生产模式的 变革 .....	5	2.4.5 自动导航物流小车运动 方案设计 .....	64
1.4 机械制造装备的发展趋 势与组成 .....	10	思考题与习题 .....	71
1.4.1 机械制造装备的发 展趋势 .....	10	<b>第 3 章 金属切削机床设计</b> .....	73
1.4.2 机械制造装备的组 成 .....	10	3.1 机床设计方法与步骤 .....	73
思考题与习题 .....	13	3.1.1 机床设计应满足的 基本要求 .....	73
<b>第 2 章 机械制造装备设计方 法</b> .....	14	3.1.2 机床设计内容与方 法的变革 .....	75
2.1 设计的基本要求 .....	14	3.1.3 机床设计步骤 .....	77
2.2 设计内容及过程 .....	21	3.2 金属切削机床总体设计 .....	78
2.2.1 产品规划阶段 .....	21	3.2.1 机床系列型谱的制 订 .....	78
2.2.2 方案设计阶段 .....	22	3.2.2 机床运动原理方案 设计与分析 .....	79
2.2.3 技术设计阶段 .....	24	3.2.3 机床传动原理方案 设计 .....	80
2.2.4 施工设计阶段 .....	24	3.2.4 机床的总体结构方 案设计 .....	81
2.2.5 设计过程的评价与 迭代 .....	25	3.2.5 机床主要参数的设计 .....	84

3.3 主运动系统设计 .....	94	4.2.3 常用定位元件及约束 状况 .....	183
3.3.1 主运动系统传动形式 .....	94	4.2.4 定位方式及定位误差 计算 .....	190
3.3.2 机械传动的主运动 系统设计 .....	95	4.3 夹具的夹紧设计 .....	197
3.3.3 机电结合传动的主运 动系统设计 .....	114	4.3.1 工件的夹紧要求及夹紧 装置结构特点 .....	197
3.3.4 零传动的主运动 系统设计 .....	115	4.3.2 夹紧力的三要素 分析 .....	198
3.3.5 主轴组件设计 .....	119	4.3.3 基本夹紧机构设计 .....	202
3.4 进给运动系统设计 .....	134	4.3.4 其他夹紧机构简介 .....	210
3.4.1 进给运动系统传动 形式 .....	134	4.4 机床夹具的其他装置设计 .....	215
3.4.2 机械传动的进给运动 系统设计 .....	134	4.4.1 分度装置 .....	216
3.4.3 机电结合变速进给传动 系统设计 .....	136	4.4.2 对刀及导向装置 .....	221
3.4.4 零传动进给系统 .....	141	4.4.3 对定装置 .....	223
3.4.5 进给运动系统的运动 功能部件 .....	143	4.4.4 动力装置 .....	224
3.5 导轨设计 .....	144	4.5 组合夹具及应用 .....	227
3.5.1 导轨类型方案选择 .....	144	4.5.1 组合夹具的特点 .....	228
3.5.2 滑动导轨 .....	147	4.5.2 组合夹具的分类 .....	228
3.5.3 滚动导轨 .....	157	4.5.3 组合夹具系统的元件及 功用 .....	230
3.5.4 柔性铰链导轨 .....	161	4.5.4 组合夹具的装配 过程 .....	233
3.6 支承件设计 .....	161	4.5.5 组合夹具的装配实例 .....	234
3.6.1 支承件的设计要求 .....	161	思考题与习题 .....	237
3.6.2 支承件的材料 .....	162	<b>第5章 功能部件设计</b> .....	239
3.6.3 支承件的结构设计 .....	164	5.1 概述 .....	239
思考题与习题 .....	173	5.2 机床刀架设计 .....	240
<b>第4章 机床夹具设计</b> .....	174	5.2.1 机床刀架装置的 功能 .....	240
4.1 概述 .....	174	5.2.2 对机床刀架装置的基本 要求 .....	240
4.1.1 机床夹具的分类和 基本组成 .....	174	5.2.3 机床刀架装置的 类型 .....	241
4.1.2 机床夹具设计过程 .....	177	5.2.4 机床刀架结构 .....	243
4.1.3 夹具设计简例 .....	177	5.2.5 机床刀架装置的转位 机构 .....	246
4.2 工件定位设计 .....	179	5.2.6 机床刀架装置的定位	
4.2.1 工件定位原理 .....	179		
4.2.2 工件定位的约束分析 .....	181		

机构 .....	247	6.3.3 驱动方式选择 .....	290
5.2.7 机床刀架装置夹紧力的 计算 .....	249	6.4 工业机器人的机械结构 系统设计 .....	291
5.2.8 数控机床刀架的 选用 .....	249	6.4.1 工业机器人的手臂和 机座 .....	291
5.3 机床刀库设计 .....	250	6.4.2 工业机器人的手腕 .....	295
5.3.1 刀库的类型 .....	250	6.4.3 工业机器人的末端 执行器 .....	305
5.3.2 链式刀库的构成 .....	253	6.5 机器人操作机示例 .....	310
5.3.3 刀库驱动电动机的 选择 .....	257	6.6 工业机器人的控制 .....	315
5.3.4 自动换刀装置的 形式 .....	258	6.6.1 工业机器人控制系统的 构成 .....	315
5.3.5 刀具的自动选择 .....	260	6.6.2 工业机器人的位置伺服 控制 .....	317
5.3.6 换刀机械手 .....	263	6.6.3 工业机器人其他控制 方式 .....	320
5.4 机床回转工作台的设计 .....	267	6.6.4 机器人智能技术 .....	325
5.4.1 回转工作台的基本 要求和类型 .....	267	6.7 工业机器人在机械制造系统 中的应用 .....	327
5.4.2 分度工作台 .....	268	6.7.1 单机形式应用 .....	327
5.4.3 数控回转工作台 .....	269	6.7.2 在机械制造系统中的 应用 .....	327
思考题与习题 .....	274	思考题与习题 .....	331
<b>第6章 工业机器人设计</b> .....	276	<b>第7章 机械制造物流系统设计</b> .....	332
6.1 工业机器人描述方法 .....	276	7.1 概述 .....	332
6.1.1 工业机器人的工作 原理 .....	276	7.1.1 工厂物流系统设计的 意义 .....	332
6.1.2 工业机器人的构成及 分类 .....	276	7.1.2 物流系统的基本构成 .....	332
6.1.3 工业机器人运动描述 方法 .....	278	7.1.3 物流设备及其选择与 设计要求 .....	333
6.2 工业机器人的设计方法 .....	282	7.2 物流输送装置 .....	333
6.2.1 工业机器人的设计 方法 .....	282	7.2.1 输送机装置 .....	333
6.2.2 工业机器人设计内容与 步骤 .....	282	7.2.2 随行夹具 .....	335
6.3 工业机器人传动系统设计 .....	284	7.2.3 随行工作台站 .....	336
6.3.1 工业机器人的受力 分析 .....	284	7.2.4 有轨小车 .....	337
6.3.2 工业机器人的传动 系统设计 .....	285	7.2.5 自动导引小车 .....	338
		7.2.6 移栽机 .....	343
		7.3 物流交换装置 .....	344

7.3.1	托盘交换装置	344	装置	401
7.3.2	上下料机械手	345	8.4.2 刀具磨损、破损检测	
7.3.3	料斗式上料装置	347	装置原理及其应用	403
7.3.4	料仓式上料装置	351	8.4.3 主轴温度监控原理	
7.4	仓储装置	353	及其应用	410
7.4.1	自动化立体仓库及其		思考题与习题	412
	类型	354	<b>第9章 数控装备 CNC 系统</b>	
7.4.2	自动化立体仓库总体		设计	414
	设计	357	9.1 CNC 系统的组成及类型	414
7.4.3	托盘	362	9.1.1 CNC 系统的组成	414
7.4.4	堆垛机	364	9.1.2 CNC 系统的分类	416
	思考题与习题	367	9.2 CNC 系统的硬件设计	419
<b>第8章 机械加工检测装置</b>		368	9.2.1 按硬件制造方式对	
8.1	机械加工中检测、监测装置		数控系统硬件结构	
	功能和类型	368	的分类	419
8.1.1	光学检测装置及其		9.2.2 根据所用的 CPU 对	
	类型	368	数控系统硬件结构	
8.1.2	电磁检测装置及其		进行分类	420
	类型	369	9.2.3 开放式数控系统的	
8.1.3	电量检测装置及其		体系结构	426
	类型	369	9.3 CNC 系统的软件设计	430
8.1.4	其他检测装置及其		9.3.1 CNC 系统软硬件的	
	类型	370	界面	430
8.2	机床运动位移检测装置	371	9.3.2 CNC 系统软件的工作	
8.2.1	光栅尺原理及其		过程	431
	应用	371	9.3.3 CNC 系统控制软件的	
8.2.2	感应同步器原理及		结构特点	432
	其应用	374	9.3.4 常见 CNC 系统的软件	
8.2.3	编码器	376	结构	434
8.2.4	旋转变压器	379	9.4 机床的数控系统设计	436
8.2.5	激光干涉仪原理及其		9.4.1 数控车床的基本设计	
	应用	381	要求	437
8.3	加工精度的脱机检测装置	385	9.4.2 数控车床的设计过程	438
8.3.1	测长仪和测长机	385	思考题与习题	447
8.3.2	工具显微镜	390	<b>第10章 自动化制造系统总体</b>	
8.3.3	三坐标测量机	392	设计	448
8.4	加工系统的监测装置	401	10.1 概述	448
8.4.1	机床精度校准检测			



10.1.1 制造系统的概念 .....	448	设计 .....	475
10.1.2 制造系统的分类 .....	448	10.4.1 规划的系统方法 .....	476
10.2 自动线的总体设计 .....	451	10.4.2 系统结构选择和确定 对机床的要求 .....	478
10.2.1 自动线的组成和类型 及工件传输方法 .....	451	10.5 FMS 总体设计及独立工位的 配置 .....	484
10.2.2 自动线设计与建造时 应考虑的因素 .....	456	10.5.1 FMS 总体方案设计 ..	484
10.2.3 自动线总体设计流程 及方法 .....	457	10.5.2 FMS 各独立工位及其 配置原则 .....	488
10.2.4 自动线工艺方案的 拟订 .....	459	10.5.3 FMS 的物料储运系统 及其配置 .....	489
10.2.5 生产线专用机床 总体设计 .....	463	10.5.4 FMS 总体平面布局 ..	492
10.2.6 自动线的评价 .....	471	10.6 柔性制造系统实例 .....	493
10.3 柔性制造系统 .....	474	10.6.1 实例 1 .....	493
10.3.1 柔性制造系统的概念 及组成 .....	474	10.6.2 实例 2 .....	494
10.3.2 柔性制造系统类型 ..	475	思考题与习题 .....	495
10.4 柔性制造系统的规划与 设计 .....	475	<b>参考文献</b> .....	496

# 第1章 绪 论

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，单机生产模式的机械制造装备主要是加工装备(机床及工装)，属于单机型机械制造装备；而先进的机械制造系统生产模式的机械制造装备则包括了加工装备、物流装备及测控装备，属于系统型机械制造装备。

## 1.1 机械制造装备与制造业的关系

### 1.1.1 机械制造业与产品

所谓制造业就是为人类社会生产产品的产业。人类社会所需的产品包括物质生活用产品(衣、食、住、行等方面)、精神生活用产品(学习、文化娱乐、通信等方面)、安全防卫用产品(消防、保卫、军事等方面)、科学研究与探索用产品(光、机、电、物理、化学等实验方面)、生产用产品(生产上述各类产品所用的设备产品)。

#### 1.1.1.1 产品的分类

人类社会需求的产品可划分为如图 1.1 所示的两大类：一类为机械类产品，一类为非机械类产品。

#### 1. 机械类产品

机械类产品又可分为如下三种类型：

(1) 生活类机械产品 如汽车、飞机、轮船、枪支等。从用途上看，它是直接供人们生活使用的。为了与机械类产品大类中的其他机械产品区分，把它称为生活类机械产品。

(2) 机械设备 如食品机械。从产品的大类来看，它本身属于机械类产品，但从用途来看，它是用来生产糕点、糖果等食品的生产设备，属于生产类机械产品。为了与机械类产品大类中的其他机械产品区分，把用来生产非机械类产品的机械称为机械设备。其他如农业机械、矿山机械、冶金机械、化工机械、纺织机械、发电机械等机械产品都属于机械设备。

(3) 机械制造装备 如机床。从产品的大类来看，它本身属于机械类产品；但从用途来看，它可以用来生产生活类机械产品(如汽车等)、机械设备(如食品机械等)、机械制造装备

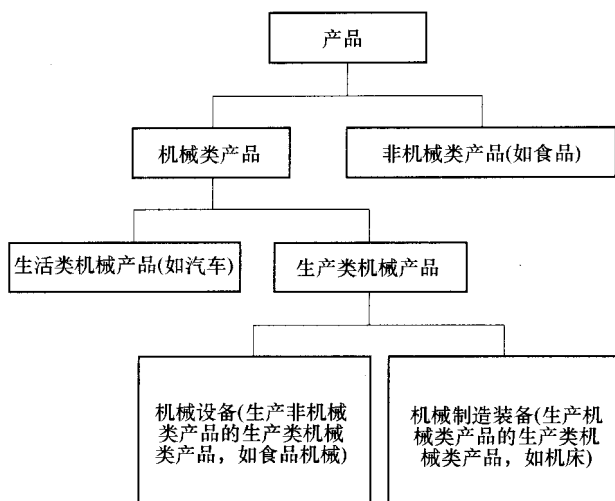


图 1.1 产品的分类

(如用机床来生产机床)等机械产品的生产设备, 它也属于生产类机械产品。为了与机械类产品大类中的其他机械产品区分, 特别是为了与用来生产非机械类产品的机械设备区分, 把用来生产机械类产品的机械称为机械制造装备。

机械制造装备又可以分为单机型和系统型两大类。例如单台机床独立运转属于单机型机械制造装备; 又如自动化机械生产线和近年来发展起来的由加工装备(如机床)、物流装备(如工件、随行夹具、切屑等的自动运送装置、自动交换装置及自动仓储装置)及测控装备(如加工质量检测、监视、控制装置)等硬件装备组成的柔性机械制造系统, 它们也是用来生产机械类产品的, 也属于机械制造装备, 属于系统型机械制造装备。

## 2. 非机械类产品

如服装、食品、光学、电子、通信等产品属于非机械类产品。实际上有的非机械类产品中也包含了部分机械元件, 如传感器的壳体, 只是它不是传感器的主要元件而已。

### 1.1.1.2 机械制造业与产品的关系

与产品的分类相对应, 制造业也可以分为如下两大类。

#### 1. 机械制造业

机械制造业是生产机械类产品(包括生活类机械产品、机械设备、机械制造装备)的产业。

#### 2. 非机械制造业

非机械制造业是生产非机械类产品的产业, 如服装、食品、光学、电子、通信等制造业。

由于非机械制造业是生产非机械类产品的, 因此只与非机械类产品有关。而机械制造业既与机械类产品直接有关, 又与非机械类产品间接有关。

(1) 直接关系 机械制造业直接生产各类机械产品(包括生活类机械产品、机械设备、机械制造装备), 因此机械制造业与机械类产品是直接关系。

(2) 间接关系 机械制造业可以用来生产机械设备, 而机械设备又用来生产非机械类产品, 因此机械制造业与非机械类产品又有间接关系。

上述制造业与产品的关系示于图 1.2。机械制造业既可直接生产机械类产品，又间接为非机械类业提供设备，因此机械制造业是制造业的核心和主体。

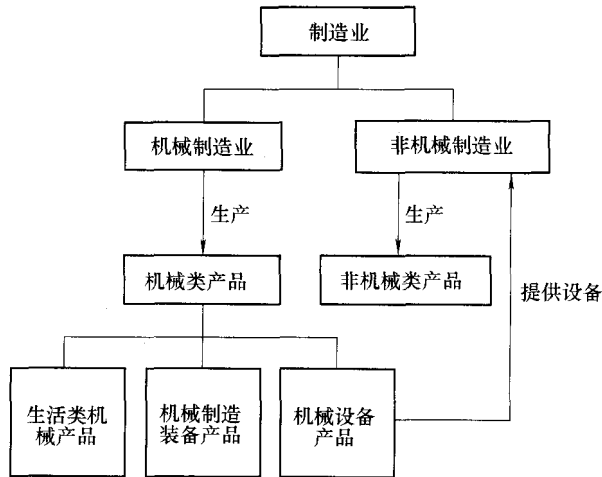


图 1.2 机械制造业与产品的关系

制造业是一个国家的经济发展支柱。而机械制造业既与机械类产品有关，又与非机械类产品有关，可以说人类社会需求的产品几乎都与机械制造业有关，因此机械制造业的水平与能力标志着一个国家的科技水平和经济及国防实力。

### 1.1.2 机械制造装备与制造业的关系

如前所述，制造业可以分为机械制造业和非机械制造业。而机械制造业又可以按其生产的产品类型分为如下三类：

- (1) 生活类机械产品制造业 它是直接生产生活类机械产品的产业，如汽车制造业。
- (2) 机械设备类制造业 它是生产机械设备的产业，如食品机械制造业。
- (3) 机械装备类制造业 它是生产机械装备的产业，如机床制造业。

机械制造装备与制造业的关系如图 1.3 所示。从图 1.3 可以看出，机械装备制造业直接为生活类机械产品制造业、机械设备制造业及机械装备制造业本身提供机械制造装备；机械设备制造业又为非机械制造业提供生产设备。机械制造装备几乎与整个制造业都有关系，可以说机械制造装备是制造业的基础。

从上述的关系分析中还可以看出，机械装备制造业是直接为机械制造业提供装备、间接为非机械制造业提供机械设备的产业，或者说机械制造装备是生产机械产品用的机

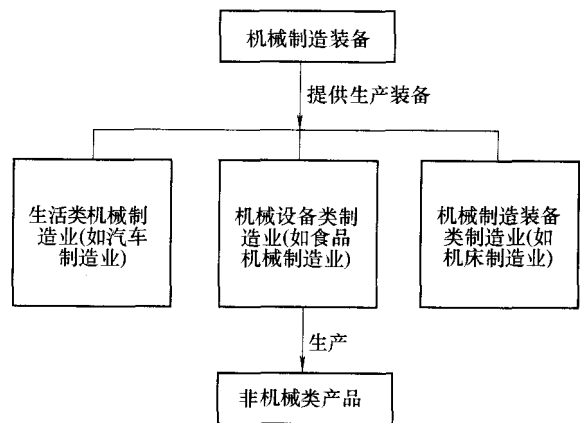


图 1.3 机械制造装备与制造业的关系

械(或称生产母机),其水平和技术要求更高。没有高水平的机械制造装备,不可能生产出高精密的光学元件,不可能生产出高集成度的微电子元件,不可能生产出高复杂度的军用零件。因此,机械制造装备的水平 and 生产能力是影响和制约其他产业发展的关键因素,是评价一个国家制造业水平和实力的最重要指标,是应该优先发展的产业。

## 1.2 机械制造装备与市场竞争的关系

### 1.2.1 市场变化对机械制造装备的要求

传统的市场竞争要素主要是:物美(质量好)、价廉(成本低)。随着经济的发展和科技的进步,人们的生活方式、消费观念已经发生了很大变化,需要富有个性和时尚的商品。社会对产品的需求在向多元化、个性化的方向转变,而且产品更新快。因此多品种、小批量生产的模式将成为主流。企业要赢得市场,仅靠物美价廉已经不够了,必须快速推出市场需求的多样化新产品,即具有快速响应市场需求的能力。此外,售后服务也成了竞争的要素。新的市场竞争要素是:时间(T—time)、质量(Q—quality)、成本(C—cost)、服务(S—service),即所谓的TQCS。也就是如何将顾客满意的新产品以最短的时间、最好的质量、最低的成本、最优的服务推向市场。

影响TQCS的因素是多方面的,机械制造装备是制造业的基础,是机械制造业的生产装备。下面从机械制造装备的角度,对竞争要素进行分析。

#### 1. 时间要素

为了快速响应市场,缩短新产品投放市场的时间,对机械制造装备提出了如下要求:

(1) 提高装备的柔性,即提高装备的适应能力,当要推出新产品时,不需或少需增添新的生产装备,减少生产装备的准备时间。

(2) 提高加工装备的自动化程度及生产率,减少工件的加工作业时间。

(3) 提高机械制造装备的配套性(加工、物流、测控),组成自动化生产系统,提高生产过程的自动化程度,减少辅助作业时间。

#### 2. 质量要素

为了提高产品的质量,对机械制造装备提出了如下要求:

(1) 提高机械制造装备自身的质量,以保证用它加工出高质量的产品。

(2) 提高机械制造装备的自动化程度,避免人工操作对加工质量的影响,以保证加工质量的一致性、稳定性。

#### 3. 成本要素

为了降低产品的生产成本,对机械制造装备提出了如下要求:

(1) 提高装备的柔性,减少新增装备资金的投入,从而减少单件工件分摊的设备成本。

(2) 提高机械制造装备的自动化程度及生产率,减少工件的制造成本。

#### 4. 服务要素

提高装备的可靠性、可维护性,减少维修频度,提高维修的方便性。

### 1.2.2 机械制造装备适应市场竞争的对策

从上述竞争要素分析可以看出,市场竞争对机械制造装备的主要要求是:提高柔性、提高生产率、提高单机装备及制造系统装备的自动化程度。但是这些要求对机械制造装备来说往往是矛盾的,例如:①一般来说机械制造装备的柔性与其生产率往往是矛盾的,如专用机床生产率高,但柔性差;通用机床的柔性好,但生产率相对较低。②一般来说机械制造装备的自动化程度和其价格及其资金投入是矛盾的,自动化程度高,生产率就高,但价格也高,一次性资金投入较大,特别是自动化生产系统,一次性资金投入更大。

机械制造装备应该如何适应竞争要素的变化,可根据如下情况确定对策:

(1) 创新开发机械制造装备时,若无确定的应用对象群,应综合考虑既要提高其柔性,又要提高其生产率;若有确定的应用对象群,可根据对象群的特点,或者以提高装备的柔性为主,但又不降低其生产率;或者以提高生产率为主,但又不降低其柔性。

(2) 在开发或选择使用机械制造装备时,应综合考虑提高装备的柔性、生产率、自动化程度、企业的投资能力及企业的产品生产批量(参见1.3.2节)。

## 1.3 机械制造生产模式的发展

### 1.3.1 机械制造生产活动的基本功能

机械制造生产过程应包括毛坯生产、加工生产、装配生产三部分生产活动。以下以机械加工生产为例,说明机械制造生产活动应具备的基本功能。

(1) 加工功能 加工功能就是在加工生产活动中利用机床完成对工件的各种加工,如切削加工、非切削加工(如电加工、激光加工)、清洗等。

(2) 物流功能 这里的物是对工件(包括毛坯、半成品、成品)、刀具、夹具、切屑等在加工生产活动中需要流动的物料的总称。物流功能就是在加工生产活动中由物流装备或人工完成物料的搬运、交换、存储。

(3) 测控功能 由测控装备或人工对加工生产活动的加工质量及活动的运行状态进行检测、监视、控制及维护。机械加工生产模式不同,测控功能差别很大。最基本的测控功能是在加工生产现场由检测装备或人工完成工件加工质量的检测。

机械制造生产过程的毛坯生产、加工生产、装配生产三部分生产活动的基本功能相同,只是具体内容不同而已。

### 1.3.2 机械制造生产模式的变革

当今制造业的产品市场竞争异常激烈,为了适应变化迅速的市场需求、提高竞争力,现代制造企业必须解决好TQCS问题,即以最短的时间、最好的质量、最低的成本、最优的服务来响应市场、满足顾客的需求。机械制造业传统的生产模式已不再适应目前的市场竞争。国内外已经提出了一些先进制造模式,如柔性制造系统(flexible manufacturing system, FMS)、计算机集成制造系统(computer integrated manufacturing system, CIMS)、精益生产(lean production, LP)、

敏捷制造 (agile manufacturing, AM)、虚拟制造 (virtual manufacturing, VM)、全能制造 (holonic manufacturing, HM)、可重构制造系统 (reconfigurable manufacturing system, RMS)、大规模定制 (mass customization, MC) 模式等。

从制造生产过程的功能看, 可以把制造生产模式划分为两大类: 单机生产模式 (一台装备独立运转) 和制造系统生产模式 (具备加工功能、物流功能和测控功能, 各种功能集成协调运转)。而制造系统生产模式又可划分为刚性生产系统 (线) 模式、柔性生产系统模式和二者相结合的复合生产系统模式。

一方面随着社会需求的发展, 要求机械制造生产模式发生与之相适应的变革; 另一方面随着科学技术的进步, 完成机械制造生产活动基本功能所用的机械制造装备的种类越来越多、功能越来越强、水平越来越高, 机械制造装备的发展为机械制造生产模式的变革提供了有力的支撑条件。下面从机械制造装备的角度, 介绍四种机械制造生产模式。

### 1. 单机生产模式

传统的小批量生产用的单机生产模式采用的机床为普通万能机床或万能型数控机床, 单台机床独立运转完成加工功能, 物流功能和检测功能大多由人工完成, 或物流装备、检测装备单机独立运转完成。其特点如下:

(1) 加工装备柔性好 即加工装备的适应能力强, 可以适应各种工件的加工, 当加工对象变更时, 无需准备新的机床, 有的需要准备夹具等工装, 有的连工装也不需准备。其优点是不需要新的装备准备时间或准备时间短, 缩短了装备的准备周期; 不需要新的装备资金投入或新增资金投入少, 减少了单件工件分摊的设备成本。

(2) 自动化程度低 生产率由加工时间和辅助时间所决定, 而自动化程度是影响辅助时间的主要因素。普通万能机床的自动化程度很低; 单机工作的万能型数控机床虽然加工的自动化程度高, 但物流功能和检测功能大多仍由人工完成, 使整个机械制造生产活动的自动化程度仍然低下。其缺点是整个机械制造生产活动的自动化程度低, 辅助时间长, 降低了生产率, 从而加长了制造周期、增加了制造成本。

(3) 总生产率低 如上所述, 生产率由加工时间和辅助时间所决定, 单机生产模式的辅助时间长; 而且采用的是万能机床, 万能机床与专用机床相比加工效率要低。因此单机生产模式总的生产率低。

(4) 质量一致性差 普通万能机床的自动化程度很低, 加工精度受操作工人的技术水平和精神状态影响大, 加工精度的稳定性、一致性差。

(5) 制造装备资金投入少 制造装备资金投入少, 尤其是新增装备投资很少 (如有时要新增夹具) 或不需新增投资。

(6) 适合单件小批量生产 从上述对单机生产模式的优缺点分析可以看出, 其生产模式的柔性和生产效率二者是相互矛盾的。对单件小批量生产而言, 制造装备柔性好的要求是主要的, 生产效率方面的要求相对而言是次要的, 单机生产模式柔性好, 缩短了制造装备的准备周期, 不需要或减少了新增资金投入, 减少了单件工件分摊的设备成本; 对大批量生产而言, 单机生产模式整个生产活动的自动化程度低、生产效率低, 加长了制造周期、增加了制造成本。因此单机生产模式适合单件小批量生产使用, 如适合资金力量弱、产品品种较多而批量小的中小企业, 或维修、新产品试制、科学研究及实验等情况的单件小批量生产使用。

近年来数控机床在企业的应用逐年增加,在经济实力雄厚的企业,数控机床的数量增加很快,就连一些中小企业也开始有了数控机床。数控机床的使用,提高了加工精度的稳定性和加工效率。但是一般的数控机床仍然是万能机床。在单机生产模式中,即使使用了数控机床,主要是提高了加工功能的自动化程度、加工效率及加工精度的稳定性,而物流和检测功能变化不大,因此使用万能数控机床的单机生产模式的主要特点(制造装备柔性好、整个制造生产活动自动化程度低及生产效率低、适合单件小批量生产)基本变化不大。

## 2. 大规模生产模式

传统的大规模生产(mass production,MP)模式是为大批量生产某一种零件而设计的,故其生产模式又可称为专用生产线(dedicated manufacturing lines,DML)模式。大规模生产模式所用的机械制造装备(加工、物流和测控)基本是专用的,但这些制造装备不是独立工作,而是组成系统进行协调工作,因此,大规模生产模式属于制造系统类型的生产模式。其特点如下:

(1) 属于刚性系统生产模式 所谓大规模生产模式就是指刚性自动生产线,或称流水线。它的加工功能主要由专用机床和专用夹具完成;物流功能大多由专用的传送带完成(或由人工和其他搬运装置共同完成),物流的路线也是固定的;检测功能由专用的检测装置在检测工位完成(或由人工抽检)。可以说它的加工功能、物流功能、测控功能基本上(或大部分)是自动连续完成的,即加工生产活动是自动进行的,已经形成了加工生产系统(线)。但制造装备几乎没有柔性,当加工对象变更时,必须重新制造装备,属于刚性系统生产模式。其缺点是准备新的制造装备所需的准备时间长,新增制造装备需要投入的资金大。

(2) 自动化程度高 其优点是加工系统(线)自动运转,自动化程度高,辅助时间短,效率高,缩短了制造周期,减少了每个工件的生产成本。

(3) 生产率高 专用机床的加工效率高;而且生产线辅助时间又短,因此整个生产活动的总生产率高。

(4) 质量一致性好 自动化加工,质量一致性、稳定性好。

(5) 制造装备资金投入大 一次性资金投入大,而且产品更新时,制造装备几乎要全部更新,新增投资大。

(6) 适合大批量生产 对于大批量生产而言,生产率是主要的,而制造装备的柔性是次要的,因为批量大、生产率高,新装备的准备时间可由高生产率补偿一部分;新装备的资金投入虽然大,但由于批量大,每个工件分摊的设备成本费并不大,而且生产率高会使加工成本降低,总的成本降低;整个机械制造生产活动的自动化程度高,加工质量的一致性好、稳定性好。所以大规模生产模式适合大批量生产,是20世纪最具竞争力的生产方式。主要用于资金力量强、产品品种单一而批量大的大中型企业的大批量生产。

## 3. 柔性制造系统模式

随着社会的发展,物质条件越来越丰富,科技支撑条件越来越高,社会需求的产品在向多样化、个性化方向发展,产品更新换代快。因此市场多变,为了快速响应市场,提高竞争力,生产在向多品种、小批量方向发展,即多品种、小批量生产将成为主流。由于品种多,虽然每一个品种是小批量,但总的生产量是大的。因此多品种小批量生产不仅要求制造装备柔性好,还要求生产率高。但柔性好和生产率高两者对机械制造装备的要求是矛盾的,单机生产模式和大规模生产模式的优缺点恰恰相反,上述两种生产模式都不能满足多品种小批量生产的要求。



为了满足多品种小批量生产的要求,就出现了一种称为柔性制造系统(FMS)的生产模式,对加工而言,也可称为柔性加工系统。其中“柔性”的含义是制造装备的功能具有柔性,适应能力强,采用的机床主要是万能型数控机床;“系统”的含义是加工、物流、检测功能一体化,形成一个系统;而且物流的路线也是容易更改或是随机自由变化的,物流的柔性也好。柔性制造系统模式的特点如下:

(1) 制造装备柔性好 所谓制造装备的柔性好,就是制造装备的功能多,适应对象的能力强。制造装备的柔性可以分为:①制造装备具有空间上的柔性,指制造装备可以同时(或生产现场即时重构后)适应多种零件(某一类或几类零件族)的加工,从占地空间上看,一个(条)柔性制造系统相当于多个制造系统的功能,故称为装备的空间柔性;②制造装备具有时间上的柔性,即当企业的产品更新时,可以经过制造装备重组重构,以适应新的产品加工,从时间上看,今天在柔性制造系统中使用的装备,两三年后产品变了,该装备经过重组重构后,还可在新的柔性制造系统中使用,故称为装备的时间柔性。

装备的空间柔性和时间柔性的作用不同,由于装备的柔性与其生产率是矛盾的,一般来说,装备的功能越强,柔性越好,但生产率就有可能下降。因此可以给装备设置一些固定的基本功能(在不影响生产率的前提下赋予更多基本功能);还可以通过即时重构和重组重构再给装备增加一些可变的的功能。

装备的即时重构和重组重构区别在于:①所谓即时重构,就是制造系统的活动不停止运行,根据加工对象的变化,即时快速更换某个部件(如有的柔性制造系统在几秒之内就可以完成机床的主轴头更换),赋予加工装备新的功能,以适应另一种零件或另一种工序的加工。②所谓装备重组重构,就是装备可以方便地进行重组重构(如配置或更换新的部件、元件),构成功能不同的新装备,以适应更新后产品加工的需要。装备的空间柔性和时间柔性都是为了适应多品种、小批量生产的需要,但前者主要是为了适应产品个性化、多样化的需要,后者主要是为了适应产品更新换代快的需要。

(2) 自动化程度高 高水平的柔性制造系统模式的机械制造装备(加工、物流和测控)自动化程度高。

(3) 生产率 生产率比单机生产模式高,但比大规模生产模式还是要低,这是由于目前的柔性制造系统模式的加工装备采用的大都是万能数控机床,而刚性大规模生产模式的加工装备采用的是专用机床,专用机床比万能机床的加工效率高。

(4) 质量一致性好 高水平的柔性制造系统的机床是数控机床,加工质量一致性、稳定性好。

(5) 资金投入 系统建设一次性资金投入大,但系统的适应能力强,当加工对象类零件族有变化时,新增资金投入不大。

(6) 适合生产批量 由于柔性制造系统的柔性高,但生产率比大规模生产模式低,所以主要适合多品种、小批量生产,但随着制造装备即时重构技术和能力的提高,也可用于中等批量的生产。

#### 4. 可重构制造系统

传统的大规模生产模式采用的专用生产线(DML)是刚性的,当批量很大时,采用这种生产方式生产的零件成本相对较低,但随着全球竞争的加剧,这种生产方式已经很难满足产品不