

“十二五”普通高等教育本科规划教材

 全国本科院校机械类 **创新型** 应用人才培养规划教材

# 先进制造与工程仿真技术

主 编 李 彬  
主 审 邓建新

包含最新技术发展  
注重工程实际应用  
强调实战演习



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

. 013045546

TH164-43  
05

“十二五”普通高等教育本科规划教材  
全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

# 先进制造与工程仿真技术

主 编 李 彬  
参 编 任小中  
主 审 邓建新



TH164-43  
05



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS



北航

C1653840

## 内 容 简 介

本书从先进制造技术的发展出发,详细地论述了先进制造技术的内涵和体系结构,系统地介绍了先进制造技术的基本内容、关键技术和最新的发展,阐述了工程仿真技术中的有限元理论基础,并给予相应的仿真实例。本书内容全面、新颖,在力求保持系统性和完整性的基础上,更注重介绍一些实用、先进、相对成熟的制造与仿真技术。全书共分为:绪论、先进制造工艺技术、先进设计与制造自动化技术、工程仿真技术中的有限元基础、工程仿真技术的应用实例 5 个章节。

本书可作为高等院校机械工程、工业工程、管理工程及制造相关专业的教材和教学参考书,也可作为制造业工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

先进制造与工程仿真技术/李彬主编. —北京:北京大学出版社, 2013. 5

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-22541-7

I. ①先… II. ①李… III. ①机械制造工艺—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①TH16-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 101731 号

书 名: 先进制造与工程仿真技术

著作责任者: 李 彬 主编

策 划 编 辑: 童君鑫 宋亚玲

责 任 编 辑: 宋亚玲

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-22541-7/TH·0346

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 372 千字

2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

随着 CAD/CAE/CAM 技术的日益成熟和计算机技术的不断发展,产品的设计与制造方法、方式随之也发生了根本性的改变,为了更好地满足社会的发展,现代企业越来越关注产品质量、产品的开发周期和开发成本,先进制造与工程仿真技术作为产品制造与工程应用中的重要技术,其价值日益突显。

先进制造技术在传统制造技术基础上不断吸收机械、电子、信息、材料、能源和现代管理等方面的成果,并将其综合应用于产品设计,是制造、检测、管理、销售、使用、服务的制造全过程,以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产,提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力的制造技术总称,也是取得理想技术经济效益的制造技术的总称。工程仿真技术是以相似原理、系统技术、信息技术以及仿真应用领域的相关专业知识技术为基础,以计算机系统和相关的物理效应设备及仿真器为工具,利用模型对系统进行工程研究的一门多学科的综合性的技术。

本书具有以下特点。

(1) 内容全面、新颖,包括工程仿真技术中的有限元理论基础、工程仿真技术实例等各个方面,基本能够反映近年来国内外先进制造与工程仿真技术的最新发展。

(2) 注重工程应用,侧重内容的前沿性、综合性和交叉性,尽量避免与先导专业课程的重复,在力求保持技术系统性和完整性的前提下,更注重介绍适用先进、前沿和相对成熟的技术。

(3) 在内容上不仅着重基础知识、应用技术和方法,而且在相关章节中还插入了编者已经完成的各种项目实例和最近研究成果。

(4) 以“讲清原理、理论联系实际、学以致用”为指导思想,遵循适用性原则。力求体现基础性、课程知识的连贯性和工程实际应用性,既强调理论阐述,又注重案例分析和实战演习。

(5) 各章后均附有习题,包括简答题和扩展分析题,达到讲授与自学相结合的目的。

(6) 主编为本书制作了高品质电子课件,并增加了许多课外资料,方便教师上课使用。

本书由洛阳理工学院机械工程系李彬博士、副教授及河南科技大学机电工程学院任小中教授编写。全书共分为 5 章,其中第 1、2、4、5 章由李彬编写,第 3 章由任小中编写。全书由李彬统稿并担任主编。

本书承蒙山东大学机械工程学院博士生导师邓建新教授审稿,在审阅过程中,邓建新教授提出了很多珍贵的建议和意见,在此表示衷心感谢。感谢洛阳理工学院机械工程系常家东主任、赵红霞主任在全书的编写过程中给予编者很多有益指导。本书参考了大量的国内外

书籍、论文，在此向这些文献的作者表示诚挚的谢意。

由于先进制造与工程仿真涉及的学科知识面非常广泛，远非我们的知识、能力所能覆盖，加之时间仓促，书中可能存在纰漏，恳请广大师生、读者不吝赐教！

主 编

E-mail: libinman@gmail.com

于河南洛阳

2013 年 3 月

# 目 录

## 第 1 章 绪论 ..... 1

- 1.1 制造与制造系统概述 ..... 3
  - 1.1.1 制造与制造技术 ..... 3
  - 1.1.2 制造系统 ..... 3
  - 1.1.3 制造业与装备制造业 ..... 4
- 1.2 先进制造技术的产生和发展 ..... 7
  - 1.2.1 先进制造技术的产生与定义 ..... 7
  - 1.2.2 先进制造业的发展概况 ..... 7
  - 1.2.3 先进制造技术的体系、分类与特点 ..... 14
  - 1.2.4 先进制造技术的发展趋势 ..... 16
- 1.3 工程仿真技术的提出和发展 ..... 21
  - 1.3.1 工程仿真技术的概念 ..... 21
  - 1.3.2 工程仿真技术的特点 ..... 22
  - 1.3.3 工程仿真技术的作用 ..... 22
  - 1.3.4 工程仿真技术的现状与发展趋势 ..... 23
- 习题 ..... 25

## 第 2 章 先进制造工艺技术 ..... 26

- 2.1 先进制造工艺的概述 ..... 27
  - 2.1.1 先进制造工艺的定义、内涵、特点及地位 ..... 27
  - 2.1.2 先进制造工艺的发展概况 ..... 29
  - 2.1.3 先进制造工艺的发展趋势 ..... 30
- 2.2 先进切削加工理论及发展现状 ..... 31
  - 2.2.1 切削颤振的产生及抑制 ..... 31
  - 2.2.2 切削摩擦学及其应用 ..... 42
  - 2.2.3 加工精度保障技术 ..... 48
  - 2.2.4 切削参数优化及专家系统 ..... 53

- 2.3 先进切削加工刀具技术 ..... 57
  - 2.3.1 陶瓷刀具 ..... 57
  - 2.3.2 涂层刀具 ..... 66
  - 2.3.3 自润滑刀具 ..... 72
- 2.4 高速切削技术 ..... 78
  - 2.4.1 高速加工特征与机理 ..... 78
  - 2.4.2 高速切削机床 ..... 82
  - 2.4.3 高速切削刀具与刀柄 ..... 86
  - 2.4.4 高速切削工艺 ..... 87
- 2.5 超精密加工技术 ..... 88
  - 2.5.1 超精密加工内涵与特征 ..... 88
  - 2.5.2 镜面铣技术及其应用 ..... 90
  - 2.5.3 金刚石切削技术及其应用 ..... 92
  - 2.5.4 超精密磨削技术及其应用 ..... 95
- 2.6 快速原型制造技术 ..... 97
  - 2.6.1 快速原型制造技术的产生与发展 ..... 97
  - 2.6.2 快速原型制造技术的原理 ..... 98
  - 2.6.3 典型快速原型制造技术的工艺方法 ..... 99
  - 2.6.4 快速原型制造技术的应用 ..... 101
- 2.7 先进特种加工技术 ..... 101
  - 2.7.1 特种加工技术概况 ..... 101
  - 2.7.2 电火花加工及其应用 ..... 103
  - 2.7.3 超声波加工及其应用 ..... 104
  - 2.7.4 激光加工及其应用 ..... 104
  - 2.7.5 水射流加工及其应用 ..... 105
- 习题 ..... 107

## 第 3 章 先进设计与制造自动化技术 ..... 109

- 3.1 先进设计技术概述 ..... 110



|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 3.1.1 | 先进设计技术的内涵与特点             | 110 |
| 3.1.2 | 先进设计技术的体系                | 112 |
| 3.1.3 | 先进设计技术的发展趋势              | 113 |
| 3.2   | 逆向工程设计                   | 115 |
| 3.2.1 | 逆向工程设计的概述                | 115 |
| 3.2.2 | 逆向工程设计的基本方法              | 116 |
| 3.2.3 | 逆向工程设计的基本步骤和关键技术         | 118 |
| 3.2.4 | 逆向工程设计的应用举例——发动机气道曲面反求   | 122 |
| 3.3   | 模块化设计                    | 124 |
| 3.3.1 | 模块化设计的基本概念和方法            | 124 |
| 3.3.2 | 机械模块化设计的分类               | 124 |
| 3.3.3 | 模块化设计过程                  | 126 |
| 3.3.4 | 模块化设计的关键技术               | 126 |
| 3.3.5 | 模块化设计的应用举例——成形磨齿机的模块化设计  | 127 |
| 3.4   | 全生命周期设计                  | 130 |
| 3.4.1 | 全生命周期设计的内涵与特点            | 130 |
| 3.4.2 | 并行设计的概念、特征与关键技术          | 131 |
| 3.4.3 | 绿色设计的概念、特征与关键技术          | 133 |
| 3.4.4 | 全生命周期设计的应用举例——汽车的全生命周期设计 | 136 |
| 3.5   | 制造自动化技术的概述               | 138 |
| 3.5.1 | 制造自动化技术的内涵和形式            | 138 |
| 3.5.2 | 制造自动化技术的现状               | 139 |
| 3.5.3 | 制造自动化技术的发展趋势             | 140 |
| 3.6   | 工业机器人技术                  | 141 |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 3.6.1 | 工业机器人的组成与分类            | 141 |
| 3.6.2 | 工业机器人的控制与编程技术          | 143 |
| 3.6.3 | 工业机器人的应用案例             | 146 |
| 3.7   | 柔性制造技术                 | 148 |
| 3.7.1 | 柔性制造系统概述               | 148 |
| 3.7.2 | 柔性制造的加工系统              | 153 |
| 3.7.3 | 柔性制造的工件与刀具运储系统         | 157 |
| 3.7.4 | 柔性制造的控制系统              | 164 |
| 3.7.5 | 柔性制造系统的应用案例——汽车工业的柔性制造 | 165 |
|       | 习题                     | 168 |

## 第4章 工程仿真技术中的有限元理论基础

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 4.1   | 工程仿真中有限元法的概述      | 171 |
| 4.1.1 | 有限元法的发展过程         | 171 |
| 4.1.2 | 有限元法的基本思路         | 174 |
| 4.1.3 | 有限元法分析过程          | 175 |
| 4.1.4 | 有限元法的应用简介         | 178 |
| 4.2   | 弹性力学的基本原理与有限元分析   | 183 |
| 4.2.1 | 弹性力学基本概念          | 183 |
| 4.2.2 | 弹性力学的基本方程         | 188 |
| 4.2.3 | 平面问题的基本理论         | 191 |
| 4.2.4 | 弹性力学中的能量原理        | 194 |
| 4.2.5 | 基于弹性力学的有限元求解法     | 195 |
| 4.3   | 仿真工程中常用有限元软件简介    | 207 |
| 4.3.1 | ANSYS 有限元软件简介及应用  | 207 |
| 4.3.2 | Abaqus 有限元软件简介及应用 | 211 |
| 4.3.3 | DEFOEM 有限元软件简介及应用 | 214 |
|       | 习题                | 216 |

## 第 5 章 工程仿真技术的应用实例 ... 217

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 5.1 基于 DEFOEM 的钻削加工有限元仿真 .....         | 218 |
| 5.1.1 麻花钻三维模型的建立 .....                 | 218 |
| 5.1.2 工件材料模型的建立 .....                  | 218 |
| 5.1.3 磨损模型设定 .....                     | 221 |
| 5.1.4 网格划分与求解的设定 .....                 | 221 |
| 5.1.5 钻削参数与材料属性的设定 .....               | 222 |
| 5.1.6 钻削仿真的前处理 .....                   | 223 |
| 5.1.7 钻削有限元仿真结果及分析 .....               | 227 |
| 5.2 基于 Abaqus 的机车用合成闸瓦工作过程的有限元仿真 ..... | 229 |
| 5.2.1 机车用合成闸瓦工作过程的仿真背景 .....           | 229 |
| 5.2.2 合成闸瓦三维模型的建立 .....                | 229 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 5.2.3 合成闸瓦模型前处理的设定 .....              | 230 |
| 5.2.4 摩擦作用的建立及加载 .....                | 233 |
| 5.2.5 闸瓦网格划分与求解的设定 .....              | 234 |
| 5.2.6 合成闸瓦工作过程的有限元仿真结果及分析 .....       | 235 |
| 5.3 基于 ANSYS 的桥式起重机主梁工作过程的有限元仿真 ..... | 238 |
| 5.3.1 桥式起重机主梁工作过程的仿真背景 .....          | 238 |
| 5.3.2 计算机仿真设计中文件交换简介 .....            | 238 |
| 5.3.3 桥机箱形梁结构有限元建模与静力分析 .....         | 241 |
| 5.3.4 桥机箱形梁结构动力特性分析 .....             | 243 |
| 习题 .....                              | 246 |

|            |     |
|------------|-----|
| 参考文献 ..... | 247 |
|------------|-----|

# 第1章 绪论



## 本章教学要点

本章阐述了制造业及制造技术的地位和发展,从先进制造技术的发展引出,论述了先进制造技术的定义、特点、体系结构、分类,介绍了先进制造技术的产生、发展状况,总结了先进制造技术的发展趋势。通过分析工程仿真技术的概念、特点、作用和现状,总结了工程仿真技术的发展趋势。



## 本章教学要求

- ☆ 掌握先进制造技术的内涵、技术构成、体系结构、分类。
- ☆ 了解先进制造技术产生的背景与发展趋势。
- ☆ 了解先进制造技术的发展背景、相关工业发达国家制造业的发展状况,以及我国先进制造技术领域在国际上的地位以及与发达国家之间的差距。
- ☆ 了解工程仿真技术的概念、特点、作用和现状。



## 导入案例

航空航天工业是战略性工业,也是高新技术最为富集的领域,可以体现出一个国家科学技术发展水平的高低。我国近年来在航空航天领域获得了较快的发展,天宫一号与神八的对接成功,标志着我国的航空航天事业向前迈了一大步。我国在民航客机部分零部件制造和总装方面也积累了一些经验,与此同时我国在型号飞机的研制方面也取得了令人瞩目的成就。但总体来讲,我国的飞机制造业距离发达国家,特别是美国,还有较大的差距。随着航空工业的发展,对现代飞机性能要求的不断提高,飞机结构设计发生了很大变化。新一代飞机普遍采用由大型整块毛坯直接“掏空”加工而成的具有复杂槽腔、筋条、凸台和减轻孔等特征的整体结构件,如整体框、梁、蜂窝等零件,如图 1.1、图 1.2 所示。与传统的铆接和螺栓连接的飞机组合结构件相比,采用整体结构设计的优点在于可以使飞机机体零件数量大大减少,缩短了零件制造周期;减轻了飞机装配工作量;提高了飞机的装配协调性,减少铆接零件的同时减少了铆接装配变形;飞机机体结构效率成倍提高。例如,某飞机的铝—钛合金整体结构的机翼与其铝合金铆接结构机翼相比,结构效率提高了 3 倍,抗疲劳能力提高了 4~6 倍,大幅度地提高了机身寿命和可靠性。

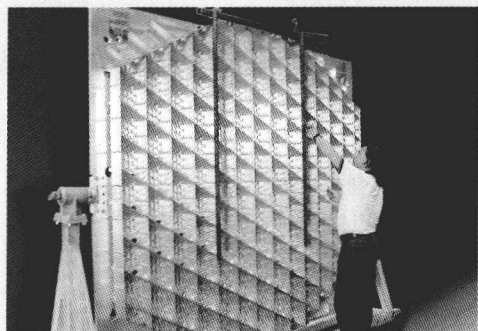


图 1.1 某飞机整体隔框类零件

(外形尺寸: 2438mm×2431mm×120mm;

壁厚: 0.381mm; 底厚: 0.508mm;

毛坯质量: 2272kg; 零件质量: 36.4kg)

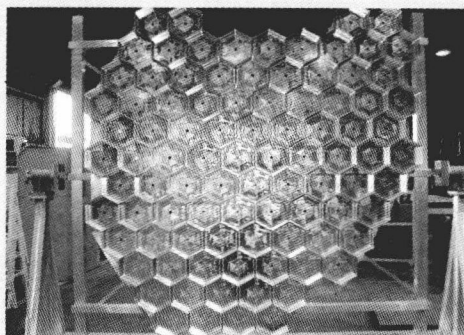


图 1.2 某飞机整体蜂窝类零件

(外形尺寸: 2362mm×2210mm×82.6mm;

壁厚: 0.305mm; 底厚: 0.381mm;

毛坯质量: 1818kg; 零件质量: 16kg)

到 2011 年底,我国已经花费了大量资金引进先进的飞机制造装备,在设备的先进性和自动化水平上与发达国家基本相当。其中,中国的航空工业几大飞机制造厂,如沈飞公司、成飞公司、西飞公司相继引进了大型高速数控加工设备。但是,由于我国长期忽视先进切削工艺基础理论和加工技术的研究和积累,在大型航空整体结构零部件的加工制造时,在制造工艺上(机床系统稳定性的确定、工件的装夹、刀具的使用、切削参数的选择、工件的变形与校形等)遇到很多困难,导致高端设备的低效率使用,甚至工件报废。因此,我国航空航天工业乃至装备制造业的迅速发展,仍然离不开对加工技术进行系统和深入的研究,其中先进制造与加工模拟技术将日益成为重中之重的高新技术,这样才能保证我国的重大工程和国家安全有相应的技术储备,在世界竞争中处于不败之地。

## 1.1 制造与制造系统概述

### 1.1.1 制造与制造技术

制造一词来源于拉丁语词根 manu(手)和 facer(做)。制造是人类按照所需目的,运用主观掌握的知识和技能,借助于手工或客观可以利用的物质工具,采用有效的方法,将原材料转化成最终物质产品,并投放市场的全过程。人们周围许许多多的日常用品,例如电脑、水杯、书桌等都是制造的实例,这些用品是人们运用所掌握的知识、技能,借助于各种生产手段,加工物质原料形成最终产品并投放市场的产物。

制造又可以分为狭义的制造和广义的制造。狭义的制造是指生产车间内与物流有关的加工和装配过程。广义的制造是指产品整个生命周期内一系列相互联系的生产活动,不仅包括了具体的工艺过程,还包括市场分析、产品设计、质量控制、生产过程管理、营销、售后服务,直至产品报废处理等在内的整个产品寿命周期的全过程。

在产品生产中,使原材料转化为产品过程所施行的各种手段的总和,称为制造技术。它是制造业为国民经济建设和人民生活生产中各种必需物质所使用的一切生产技术的总称,并且是将原材料和其他生产要素经济合理地转化为可直接使用的具有较高附加值的成品、半成品和技术服务的技术群。产品的制造过程包括产品的市场调研、产品设计、产品零部件制造及装配、产品销售及售后服务4个环节,是完成制造活动所需的一切手段的总和。

制造技术是按照人们所需的目的,运用知识和技能,利用客观物资工具,将原材料物化为人类所需产品的工程技术,即使原材料成为产品而使用的一系列技术的总称。制造技术也有狭义和广义之分。狭义制造技术只涉及加工和装配过程。广义制造技术涉及生产活动的各个方面和生产的全过程。

传统的制造技术主要由设计技术、制造工艺与装配技术和生产组织与管理技术3个部分构成。设计技术由设计理论、设计方法和设计手段组成,表现为以强度、刚度、寿命等为设计理论的产品功能及结构设计,以平面设计为表现形式的手工绘图设计。制造工艺技术由制造工艺、装配工艺、制造装备、制造质量控制等技术组成,制造工艺是以切削加工、铸造、锻造、焊接为主的机械制造工艺,装配是零件的实物顺序装配。生产组织与管理主要按功能划分,实行多层次、多环节的顺序流程制造。

### 1.1.2 制造系统

制造系统是指制造过程及其所涉及的硬件、软件和人员组成的一个将制造资源转变为产品的有机整体。制造系统涉及产品生命周期,包括市场分析、产品设计、工艺规划、加工过程、装配、运输、产品销售、售后服务及回收处理等全过程或部分环节。其中,硬件包括厂房、生产设备、工具、刀具、计算机及网络等;软件包括制造理论、制造技术(制造工艺和制造方法等)、管理方法、制造信息及其有关的软件系统等;制造资源包括狭义制造资源和广义制造资源;狭义制造资源主要指物能资源,包括原材料、坯件、半成品、能源等;广义制造资源还包括硬件、软件、人员等。

制造系统特性包含了结构特性、转变特性和程序特性。结构特性是指制造系统可视为



若干硬件的集合体。为使硬件充分发挥效能,必须有软件支持。转变特性主要指从技术角度出发,如何使转变过程更有效进行。制造系统的程序特性主要指从管理角度出发,如何使生产活动达到最佳化。

图 1.3 为某汽车制造系统的生产物流示意图,从狭义来看,整个汽车制造系统主要是由加工、装配和调试三大部分组成。从广义来看,汽车制造系统的作用就是将原材料转变成成品的整个过程周期,这个过程又可以分为三个阶段。第一阶段为获取阶段。这个阶段包含了原材料的获取、库存和初步加工。第二阶段为转变阶段。这个阶段包含了零件加工、零件库存、装配和调试。第三阶段为分配阶段。这个阶段包含了成品库存、最终销售和售后服务。目前研究的先进制造技术等内容主要集中在第二阶段,实际上在未来的发展中第一和第二阶段的研究可能会起到至关重要的作用。

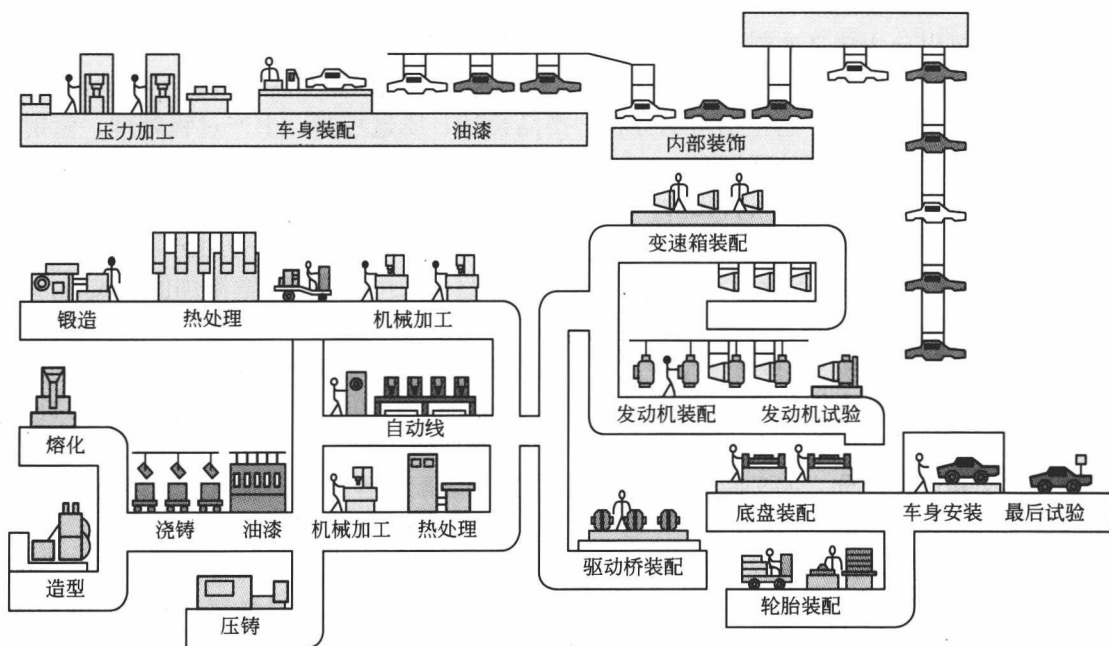


图 1.3 某汽车制造系统的生产物流示意图

### 1.1.3 制造业与装备制造业

制造业是将制造资源利用制造技术,通过制造过程,转化为供人们使用或利用的工业品或生活消费品的行业。最初制造业是用机器代替手工,从作坊形成工厂;逐渐地,制造业从单件生产方式发展成大量生产方式;现代制造业是柔性化、集成化、智能化和网络化的制造系统。进入 21 世纪,世界经济结构正在发生重大而深刻的变革,但制造业依然是世界各发达与发展中国家加快经济发展、提高综合国力的重要途径。装备制造业是各个工业化或后工业化国家的主导产业之一。

装备制造业又称装备工业,主要是指资本品制造业,是为满足国民经济各部门发展和国家安全需要而制造各种技术装备的产业总称。

按照国民经济行业分类,其产品范围包括机械、电子和兵器工业中的投资类制成品,

分属于金属制造业、通用装备制造业、专用设备制造业、交通运输设备制造业、电器装备及器材制造业、电子及通信设备制造业、仪器仪表及文化办公用装备制造业7个大类。

按照装备功能和重要性,装备制造业主要包括以下三方面内容。

(1) 重大的先进的基础机械,即制造装备的装备——工作“母机”,主要包括数控机床(NC)、柔性制造单元(FMC)、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(DIMS)、工业机器人、大规模集成电路及电子制造设备等。

(2) 重要的机械、电子基础件,主要是先进的液压、气动、轴承、密封、模具、刀具、低压电器、微电子和电力电子器件、仪器仪表及自动化控制系统等。

(3) 国民经济各部门,包括农业、能源、交通、原材料、医疗卫生、环保等,科学技术、军工生产所需的重大成套技术装备,如矿产资源的井采及露天开采设备,大型火电、水电、核电成套设备,超高压交、直流输变电成套设备,石油、化工、煤化工、盐化工成套设备,黑色和有色金属冶炼轧制成套设备,民用飞机、高速铁路、地铁及城市轨道车、汽车、船舶等先进交通运输设备,污水、垃圾及大型烟道气净化处理等大型环保设备,大江大河治理、隧道挖掘和盾构、大型输水输气等大型工程所需重要成套设备,先进适用的农业机械及现代设施农业成套设备,大型科学仪器和医疗设备,先进大型的军事装备,通信、航管及航空航天装备,先进的印刷设备等。

制造业在国民经济中具有重大意义,在发达国家中,制造业创造了约60%的社会财富、约45%的国民经济收入;据统计,美国68%的社会财富来自于制造业;国际生产工程科学院CIRP在1999年的报告中指出:在国家生产力的构成中,制造技术的作用一般占55%~65%;在许多国家的科技发展计划中,先进制造技术都被列为优先发展的科技。

我国是一个制造业大国,尚处于工业化进程之中,在未来相当长的时期里,制造业仍将在国民经济中占主导地位。新中国成立以来,我国在经济建设上虽然走过一些弯路,但值得庆幸和骄傲的是,老一代领导人高瞻远瞩,“一五”时期集中力量建设了以156个重点项目为代表的工业体系,其中装备制造业68项,一重、哈电、西电就是当时建设起来的,其后又进行了大规模的“三线”建设,为我国装备制造业发展在更大区域布局。经过几十年特别是改革开放以来的发展壮大,我国建立起了门类齐全、具有相当规模和一定技术水平的装备制造业体系,世界上只有美、日、德、俄等少数国家能做到这一点,这是我国继劳动力优势之后的又一国际优势,有力地保障了我国现代化建设。近年来,国际上对我国和印度的发展势头一致看好,一些学者特别是西方一些学者认为,从长远看,印度在软件开发、语言等方面比中国更有优势。但与中国相比,印度至少有一个弱点,那就是没有建立起独立自主的装备制造业体系,因此其发展受到的制约较多。例如近年印度的电力需求也增长较快,但其发电设备主要从国外进口,包括从中国进口,而我国的发电设备主要是国内生产。印度的这一差距是短期内难以赶上的。在新一轮国际产业结构调整中,我国正逐步成为世界最重要的制造业基地之一。出于商业垄断或政治考虑,工业发达国家或跨国公司一直封锁尖端装备对中国的出口和关键技术的转让,装备制造业在保障供给、维护国家安全方面的重要性更为突出。因此中国要走富国、强国之路,大力发展装备制造业是必然的选择。

装备制造业是科学技术和知识转化为生产力的最具深度、最有影响的产业。技术装备作为技术载体,是科研成果转化为生产力的媒介和桥梁,是科研成果从潜在效益转化为现实效益的重要手段。技术装备是技术含量高、附加价值大、产业关联度大以及出口贸易利



益较大的商品。因而,技术装备是工业发达国家以及工业发展中国家在国际市场上竞相角逐的重点,也是世界贸易的主导商品和增长速度最快的商品。

高端装备制造业是指制造装备业的高端领域,可以从3个角度理解。一是技术上高端,表现为知识、技术密集,体现多学科和多领域高、精、尖技术的交叉与集成。二是价值链高端,具有高附加值特征。三是产业链的核心部位,发展水平决定产业链的整体竞争力。高端制造产业既包括传统制造业的高端部分,也包括新兴产业的高端部分。



#### 知识链接

对于振兴装备制造业及培育发展高端装备制造业,我国政府已颁布的政策可以说是给予了足够的支持,这些政策文件是:《国务院关于加快振兴装备制造业的若干问题》;《国家中长期科学和技术发展纲要(2006—2020年)》;《2009—2011年装备制造业调整和振兴规划》。目前,培育高端装备制造产业,成为装备制造业“由大到强”转变的关键突破口,转变发展方式是当务之急。目前,主要存在的问题在于:依赖资源和资金的大规模投入的粗放发展方式,是导致一般产品产能过剩的主要原因,形成某些领域的恶性竞争,这样下去不仅是效率问题,而且是扰乱市场秩序、严重阻碍高端产品发展的关键问题。由于要素大量投入,也导致了区域结构趋同化,盲目追求GDP和地方财政增长,加剧区域内重复投资和产能过剩现象,甚至加剧资源浪费和环境污染。

为了解决高端制造业目前存在的问题,工业与信息化部等部门将高端装备制造业“十二五”规划在发展方向上着眼于五个细分行业:航空、航天、高速铁路、海洋工程、智能装备。预计到2015年,高端装备制造业年销售产值将在6万亿元以上;力争到2020年,高端装备制造业销售产值占装备制造业销售产值的30%以上,国内市场满足率超过25%。

“十二五”期间装备制造业的发展思路可总体概括为“一个战略、一个目标”。“一个战略”是调整转型、创新升级;结构调整主攻方向为产业技术结构和企业组织结构。创新升级是大力推行自主创业,促进产业优化升级。

“一个目标”指的是推进装备制造业由大变强,主要包括以下几点。

(1) 自主创新能力显著提高。突破和掌握一批重点领域的核心技术,形成一批自主技术和标准,重大技术装备自主化能力和水平大幅提升,科技重大专项取得阶段性成果,全行业新产品率超过30%,获专利授权数年均增速达到50%,科技进步对经济增长的贡献率大幅提高。

(2) 产业结构优化升级。传统装备制造业素质进一步提高,战略性新兴产业形成局部优势,现代制造服务业快速发展,形成一批具有国际竞争力的大企业集团和国际知名品牌,发展一批具有全球影响力的装备制造集聚区,新兴产业产值占全行业工业总产值的比重达到15%,大型企业集团制造服务业收入占其销售收入比重达到30%以上。

(3) 发展的协调性明显增强。常规装备制造业水平位居世界前茅,重大成套装备、高技术装备和高技术产业所需的装备自主化率达到80%,基础配套能力大幅提升,关键零部件、基础件自主化率达到80%,通用零部件基本满足国内需求。

(4) 发展质量和效益稳步提高。全要素生产率明显提高,工业增加值率达到35%左右,经济效益综合指数高于国家工业平均水平,在优化结构、提高效益基础上,实现装备制造业平稳协调健康发展。

(5) 可持续能力进一步增强。工业万元增加值能耗、水耗逐步下降;企业清洁生产审批比率、工业固体废物利用率逐步提升,循环经济和绿色产业体系基本形成。

高端装备制造产业必然成为带动整个装备制造产业升级的重要引擎,成为战略性新兴产业发展的重要支撑。把高端装备制造业作为战略性新兴产业重点培育和发展是走上创新驱动、内在增长轨道的必然选择,是今后相当长一段时期内的重点举措。我国面对全球竞争加剧,环境资源约束日趋严峻和高级人才短缺等挑战,必须从战略的高度重视以发展高

端装备制造业来推动整个装备制造业的振兴,更有效地为各领域新兴产业提供装备和服务的保障。

## 1.2 先进制造技术的产生和发展

### 1.2.1 先进制造技术的产生与定义

先进制造技术是美国于20世纪80年代末期提出的,1993年,美国政府批准了由联邦科学、工程与技术协调委员会(FCCSET)主持实施的先进制造技术计划(Advanced Manufacturing Technology, AMT),此计划是美国根据本国制造业面临的挑战和机遇,为增强制造业的竞争力和促进国家经济增长首先提出的。其根本原因在于其美国的竞争力不断减弱,贸易逆差过大,许多原来占优势的产品都在竞争中败给日本。为此,美国政府和业界投入了大量的资金进行研究,总结并提出了一系列先进制造技术的新理论。这些战略在短短几年内,就收到了良好的效果,部分被日本占领的市场被重新夺回。此后,欧洲各国、日本以及亚洲新兴工业化国家如韩国等也相继作出响应。

目前,先进制造技术的定义与内涵是在传统制造技术基础上不断吸收机械、电子、信息、材料、能源和现代管理等方面的成果,并将其综合应用于产品设计,是制造、检测、管理、销售、使用、服务的制造全过程,以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产,提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力的制造技术总称,也是取得理想技术经济效果的制造技术的总称。即为了适应现代生产环境及市场的动态变化,在传统制造技术基础通过不断吸收科学技术的最新成果而逐渐发展起来的一个新兴技术群。

### 1.2.2 先进制造业的发展概况

强大的制造基础对国家的经济和军事力量是至关重要的。一个国家只有生产得好,才能生活得好。工业发达的各国都把先进制造技术作为国家级关键技术和优先发展领域。尽管决定国家综合竞争力的因素有多种,但先进制造业的基础地位不能忽视。20世纪90年代以来,美国、日本、德国、中国等都针对先进制造技术的研发提出了国家级发展计划,旨在提高本国制造业的国际竞争能力。

#### 1. 美国

长期以来,制造业始终是支撑美国经济增长和社会就业的重要力量。从1895年到2009年,美国一直是世界制成品生产的领头羊,也是拉动世界经济增长的中流砥柱。2009年,美国制造业贡献了近1.6万亿美元的增加值,占GDP的11.2%;2010年,美国工业制成品出口1.1万亿美元,占总出口的86%;制造业从业人数1150万人,占总就业人数的9%。从历史上看,美国的制造业一直与研发活动紧密相连,为技术进步提供了重要动力。全美专利总量的90%属于制造业,全美研究开发经费总投入量的2/3也来源于制造业。

实际上,在进入21世纪以后,随着发展环境的深刻变化,美国制造业的领先地位和竞争力正变得岌岌可危。制造业占美国GDP比重从1957年的27%下降到2009年的11%



左右,制造业就业岗位从1998年的1760万下降到了2010年底的1160万。2003年,凭借机械、汽车、化工和金属等主要产品的带动,德国总出口值超过美国。2009年,中国又超过德国,美国只能屈居世界第三。在美国的家具、服装、纺织品、电子信息等制造业全球转移步伐不断加快的同时,美国制造业平均周工资基本保持不变,这表明自1980年以来大多数美国人生活水平并没有提高。

美国制造业丧失领导力的领域,不仅局限于低技术产业中的低工资岗位,也开始向高端领域延伸。长期以来,美国在先进技术制造产品上拥有相对优势,但从2001年开始其贸易顺差变为逆差,2010年逆差额甚至达到了810亿美元。美国高新技术产业的出口占全球市场的份额也从20世纪90年代末的20%下降到2008年的11%左右。此外,美国在制造业研发优势上持续不断地被其他国家蚕食,甚至是美国自己发明或创新的笔记本电脑、平板显示器、锂离子电池等产品,也在不断丧失竞争能力。比如,亚洲公司目前能设计除苹果以外的几乎每一个美国手机和笔记本电脑品牌的产品。这种知识和制造能力的转移也将对国家安全有影响,增加了美国在关键安全系统方面受到假冒或恶意攻击的风险。

长期以来,美国的经济学家和决策者之间一直在争论失去制造业及其就业机会是否事关重大。一些专家认为,随着收入的增长、生产率的提高,就业从农业转向制造业,再从制造业转向服务业,这是经济发展的自然规律。但美国必须要挽回其在制造业的领导地位,理由主要有以下几点。

(1) 基于包括高精密工具和先进材料等新技术的制造业,可以为美国工人提供高品质、高报酬的就业机会。高科技制造业的壮大可以培养更好的工人,也可以通过使用先进技术为美国提供更多高附加值的工作。据统计,制造业的平均时薪比服务业约高22%。近期一项研究表明,如果能够提供更好的税收优惠政策和更好的工人,在新英格兰地区的先进制造业每年可提供7500~8500个平均工资80000美元的职位。目前,美国制造业的就业形势非常危急,不仅生产岗位减少,研发岗位也在减少。过去几年中,美国公司在本土以外的研发支出增速已达到了其国内消费率增速的3倍。同时,美国约28万中小型企业不得不离岸研发,否则它们将无法与外国公司竞争。这些趋势使得美国制造业提供的就业岗位越来越少,美国应尤其针对制造业高技术岗位转移的问题,迅速采取措施。

(2) 能够适应和开发新技术的强大制造业,是确保美国在创新领域继续保持领导地位的关键。尽管跨境、实时交流的信息技术已实现,地理邻近带来的人与人的知识交流仍是促进创新的最关键因素。特别是在以现代科学为基础的产业,常常需要一批有不同学科背景的技术人才进行有效沟通才能实现创新。然而,技术和创新往往跟随生产环节而转移到国外,承接国可利用设计和生产之间的协同作用,得以跨越到下一代技术。这就是美国的节能汽车先进电池技术和太阳能电池板落后于其他国家的原因。由于制造企业占美国本土约70%的工业研发,并雇佣了国内63%的科学家和工程师,制造业日益增加的向外转移已直接影响美国的创新能力。如果美国本土没有强大的制造业,尤其是没有先进制造业的发展,就不可能仍然保持世界创新“发动机”的地位。

(3) 拥有先进技术和工艺的本土制造能力,对国家安全至关重要。美国的国家安全来自对国外生产的从原材料到先进组件等产品的获取能力,但不可逆转的供应链全球化趋势带来了风险。2006年国防情报局就曾指出,如果美国在战略上依赖外国的关键产品,或者美国工业基地振兴需要很长的时间,在未来军事冲突中,都将造成巨大的风险。2010年的“四年防务评估”也强调,“在中长期内必须拥有一个有足够制造能力、能维护自身

技术优势的强大工业基地，并能为我国军事力量提供强大的保障。”当制造外包出去时，不仅本国生产高科技产品的能力减弱，而且满足突发战略需求的技术和人才也在流失。美国应将先进制造业提到与关键防御能力同等重要的高度。

为了巩固美国制造业竞争优势并确保其在世界制造强国中的领先地位，美国总统科技顾问委员会(PCAST)于2011年6月向美国总统奥巴马呈交了题为《确保美国在先进制造业的领先地位》的专题报告。报告认为，虽然100多年来美国始终在制造业方面占据世界领先地位，但是近几十年来美国的制造业正在迅速衰退。报告呼吁政府、企业与学术界紧密合作，以振兴美国的先进制造业、确保其制造强国霸主地位。根据该项议案和建议，奥巴马总统提出并启动了美国“先进制造伙伴(Advanced Manufacturing Partnership, AMP)”计划，并投入5亿美元推动这项工作。



#### 知识链接

### 先进制造伙伴(AMP)计划

创新思想总是起源于个别的科学家和企业家，他们来自于佐治亚理工学院、加州大学、斯坦福大学等这样的名校。但是因为不可能立即得到回报，许多公司往往不会向早期的创新投资，这正需要政府的介入。在美国的历史上，像电话、微波、飞机引擎、互联网等这些改变世界的发明创造，也正是由于政府以战略高度汇聚人才、投入关键资金才得以实现。AMP计划就是要在顶尖大学、最具有创新能力的制造商和联邦政府之间建立合作伙伴关系，通过构筑官、产、学、研各方紧密合作的工作机制，集聚人才，引导投资，制定先进制造技术发展路线，尽快使新技术、新创意从实验室走向工厂，不但创造就业，增强中小企业竞争力，而且实现未来若干年内使美国稳坐制造业领袖地位的目标。

主要内容如下。

(1) 强化关系国家安全的关键产业本土制造能力。从2011年夏季开始，国防部、国土安全部、能源部、农业部和商务部等部委机构将初期投入3亿美元，与产业界合作投资于关系美国国家安全关键产业和美国关键产业长期发展的创新技术。起初的投资方向包括小型大功率电池、先进合成材料、金属加工、生物制造和替代能源等。

(2) 缩短先进材料从开发到推广应用的时间。美国政府将启动一项名为“材料基因组”的计划，共投入1亿多美元。部分资金用于通过研究、培训和基础设施建设等方式，使美国企业发现、开发、制造和推广应用先进材料的速度提高一倍。先进材料制造将催生产值高达数十亿美元的产业群，从而能应对先进制造业、清洁能源和国家安全等方面提出的挑战。

(3) 投资发展新一代机器人。国家科学基金会(NSF)、国家航空航天局(NASA)、国家卫生健康研究院(NIH)和农业部将总共投入7000万美元来支持新一代机器人研发。这些机器人将使工人、外科医生、医护人员、士兵和宇航员获得执行关键艰巨任务的能力。

(4) 研究开发创新型的节能制造工艺。能源部将整合现有和预算的基金，初期投入1.2亿美元，来开发节能制造工艺和材料，使美国公司能以更少的能源制造更多的产品，从而减少制造成本。

AMP计划还提出了其他配套项目，主要包括以下几点。

(1) 美国国防先进研究项目局将开发新技术，以大大缩短从设计、建造到测试成品的产品周期，以使企业能满足国防部的要求，目标是将产品周期缩短5倍以上。

(2) 麻省理工学院、卡内基梅隆大学、佐治亚理工学院、斯坦福大学、加州大学伯克利分校和密歇根大学六大名校形成联合协作框架，共享先进制造和创新项目方面的资源。这些大学还将与产业界、联邦政府机构合作，发现研究机会，并为关键技术编制合作研究路线图。

(3) 商务部将在2012财年初期投入1200万美元组建“先进制造技术联合体”，以公私合作方式来共