

# 虚拟现实辅助结构 可装配性设计

Virtual Reality Aided Structural Assemblability Design

姚寿文 陈 科 姚泽源 编著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

装配是产品设计的核心,对产品的生产效率、性能和成本有着重要的影响。面向装配设计(design for assembly, DFA)作为一种现代设计技术,在工业发达国家得到广泛应用,产生了巨大的经济效益。本书从产品设计出发,针对产品装配中的手工装配,分析了结构可装配性的影响因素、设计原则以及可装配性评价方法。同时,针对产品可装配性的验证,介绍了虚拟现实输入、输出以及虚拟手、碰撞检测和装配约束建模方法,结合 Unity3D 设计了总体框架、平台架构以及多层级零件建模等内容,通过实例演示了虚拟现实技术的装配设计辅助验证功能。

本书可供机械工程技术人员参考,也可作为大专院校相关专业师生的教材或参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

虚拟现实辅助结构可装配性设计 / 姚寿文, 陈科,  
姚泽源编著. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2022. 1

ISBN 978-7-5763-0862-4

I. ①虚… II. ①姚… ②陈… ③姚… III. ①虚拟现  
实-设计 IV. ①TP391.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 014884 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68944723(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 16.5

字 数 / 349 千字

版 次 / 2022 年 1 月第 1 版 2022 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 78.00 元

责任编辑 / 吴 博

文案编辑 / 李丁一

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

# 序 言

任何产品都是为人而设计，为人所用，都是为了满足客户需求。产品也是一个企业的立足根本，好的产品是企业由小变大、由弱变强的关键。没有好的产品，企业就成为无源之水。

20世纪80年代以来，全球化在世界范围日益凸显，如产品生产全球化。一个产品价值链，如设计、制造和销售，由分布在不同国家的不同公司共同完成。OEM（Original Equipment Manufacturer，原始产品制造商）是产品全球化的组织形式。全球跨国公司都是从全球的OEM厂商，获得公司产品所需的零件或部件，通过总装厂进行产品装配后投向全球市场，是生产全球化的典型范式。

国务院于2015年5月印发的部署全面推进实施制造强国战略的文件《中国制造2025》，是中国实施制造强国战略第一个十年的行动纲领。实施“中国制造2025”，推动我国制造业由大变强，不仅在一般消费品领域，更要在技术含量高的重大装备等先进制造领域勇于争先。产品设计是产品成本、产品质量和产品开发周期的决定性因素。面向装配的设计（design for assembly, DFA）作为一种先进的产品设计技术，是提高产品在全球竞争力的核心。其中，可装配性设计既能有效缩短产品开发周期，延长产品生命周期，又可提高产品的价值含量和竞争能力，是振兴我国机械制造业的关键技术之一。

以人为本，永远都是任何产品设计的核心。本书中，以人为本为主要关注由零件形成产品的阶段，即装配阶段。本书面向机械结构，重点围绕可装配性设计中的结构因素和人机工程因素，对结构可装配性进行了详细的分析。同时，基于虚拟现实技术的沉浸性、交互性和构想性，分析和设计了结构可装配性验证平台。在结构上，本书可分为两部分，第一部分系统讨论了影响产品装配的结构因素和人因因素，并重点讨论了零件的搬运、插入、连接和紧固等可影响产品装配性因素，总结了手工装配的一些设计原则，以Boothroyd DFA为例介绍了可装配性设计流程。第二部分围绕虚拟现实辅助装配，系统地介绍了虚拟现实技术，包括人机交互传感器、头戴显示系统以及人机交互设计，同时为了实现基于物理的产品装配仿真，介绍了产品装配过程中的碰撞检测和装配建模的过程，最后基于Unity3D引擎开发了虚拟装

配平台，以某传动装置的三轴为例，对可装配性中涉及的结构因素进行了验证。

由于虚拟现实辅助技术尚未系统地提出，正在发展之中，因此本书所涉及的部分内容属于探索性，还不成熟，起到抛砖引玉的作用，希望广大的虚拟现实爱好者参与这个新兴领域，为虚拟现实技术在工业上的应用做出贡献。鉴于此，本书中会存在一些不严密之处，有些疏漏，敬请读者谅解和指正。

2021年8月

# 前 言

可装配性设计作为一种先进的设计技术，已在工业化国家产生了巨大的经济效益。虚拟现实辅助结构可装配性设计是虚拟现实技术在结构可装配性设计上的应用。具有沉浸性、交互性和构想性三大特点的虚拟现实技术是激发设计者灵感的重要保证，符合人类对事物的认知过程。

结构可装配性设计涉及的研究范围很广，包括大量的结构设计因素、公差因素和复杂的人因因素等。然而，受限于目前虚拟现实无标记人机交互传感器（如手势捕捉传感器 Leap Motion、人体动作捕捉传感器 Kinect 等）的精度限制，全面依赖于虚拟现实技术进行结构可装配性设计尚有不足。鉴于此，本书以可装配性影响因素为基础，尽可能利用虚拟现实的优点，重点解决人工装配中可装配性设计的一些结构因素和人因因素。

本书面向机械结构，进行可装配性介绍，要求读者具有一定的机械结构设计知识。此外，机械零件在虚拟环境中的运动涉及零件位姿变化，读者必须具备一些基本的计算机图形学知识。

本书以人工装配为依据进行结构编排。第 1 章介绍了产品装配过程、装配的实现方法、装配工艺和可装配性评价，引出虚拟现实可装配性设计，为后续内容的开展提供基础。第 2 章讨论了产品可装配性的一些设计因素，重点介绍了零件装配、产品可装配性设计对装配工艺的影响，并系统地介绍了零件数量、结构设计因素、公差因素的影响，提出了防错设计的必要性，同时从人机工程角度，讨论了人的视线、装配空间和提高装配人员效率的人机工程因素。第 3 章针对手工装配中可装配性的零件搬运和零件插入两个影响因素进行了分析。对产品装配中涉及零件大量的紧固和连接，第 4 章单独介绍了螺纹连接和过盈连接。第 5 章进行了结构可装配性设计介绍，并以 Boothroyd 方法介绍了可装配性评价的 DFA 方法。从第 6 章开始，围绕虚拟现实辅助可装配性设计进行系统的梳理，首先介绍了虚拟现实中重要的输入输出传感器、虚拟手和虚拟人体建模。为了尽可能使虚拟装配符合实际装配，第 7 章介绍了虚拟现实环境下基于物理的建模以及行为建模，重点介绍了包围盒以及包围盒的相交检测和碰撞检测。第 8 章进

行了虚拟现实辅助装配建模，包括零件数据信息、装配约束。第9章开展了虚拟现实辅助结构可装配性验证，简要介绍了Unity3D、虚拟现实辅助装配平台架构，重点介绍了虚拟现实辅助装配的零件建模、约束求解和交互操作，并以某传动装置的三轴为例进行了装配，和实际产品装配进行了对比。最后一章补充介绍了计算机图形学中的一些基本数学知识，以及前述章节中零件运动和约束建模中涉及的数学，便于读者更好理解。

本书适合作为机械类专业高年级本科生、研究生的教材使用，也可供相关研究人员或技术人员作为“虚拟现实+领域”的视野拓展。

本书由北京理工大学姚寿文、姚泽源和陈科编写，姚寿文负责全书主编和统稿，姚泽源负责第2章和第7章的编写，陈科负责对装配工艺进行编写。

本书中部分素材来源于国家自然科学基金资助面上项目(51370788、51975051)的研究内容，对此表示感谢。同时本书的编写还得到了王瑀、张清华、林博、常富祥、胡子然、粟丽辉、丁佳等研究生的帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中疏漏难免存在，敬请广大读者批评指正。

编者  
2021年8月

# 目 录

## CONTENTS

---

---

---

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论 .....           | 001 |
| 1.1 产品设计 .....           | 001 |
| 1.1.1 产品开发模式变革 .....     | 002 |
| 1.1.2 产品质量与产品设计的关系 ..... | 003 |
| 1.2 产品装配 .....           | 004 |
| 1.2.1 产品的装配过程 .....      | 006 |
| 1.2.2 机械装配的类型和方法 .....   | 008 |
| 1.3 装配的实现 .....          | 012 |
| 1.3.1 人的因素 .....         | 012 |
| 1.3.2 装配机械的使用 .....      | 012 |
| 1.3.3 装配顺序 .....         | 013 |
| 1.3.4 装配中的防差错处理 .....    | 015 |
| 1.4 装配工艺规程 .....         | 016 |
| 1.4.1 装配工作的原则 .....      | 016 |
| 1.4.2 装配工艺规划前的技术准备 ..... | 016 |
| 1.4.3 装配工艺设计的主要内容 .....  | 017 |
| 1.5 可装配性设计与评价 .....      | 017 |
| 1.5.1 面向装配的设计 .....      | 017 |
| 1.5.2 可装配性评价 .....       | 018 |
| 1.6 虚拟现实技术 .....         | 019 |
| 1.6.1 虚拟现实及其特点 .....     | 019 |
| 1.6.2 虚拟现实发展简史 .....     | 021 |
| 1.6.3 虚拟现实辅助可装配性设计 ..... | 023 |
| 1.7 本书结构 .....           | 025 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>第 2 章 产品可装配性设计因素</b> .....    | 027 |
| 2.1 零件装配基本概念 .....               | 027 |
| 2.1.1 装配特征 .....                 | 027 |
| 2.1.2 装配关系 .....                 | 028 |
| 2.1.3 装配操作 .....                 | 030 |
| 2.1.4 装配自由度 .....                | 031 |
| 2.1.5 单特征装配和多特征装配 .....          | 031 |
| 2.2 产品可装配性对装配工艺的影响 .....         | 033 |
| 2.2.1 产品可装配性的基本概念 .....          | 033 |
| 2.2.2 产品可装配性对装配工艺过程的影响 .....     | 033 |
| 2.2.3 影响产品可装配性的主要设计因素 .....      | 034 |
| 2.3 零件数量的影响 .....                | 035 |
| 2.3.1 减少零件数量 .....               | 036 |
| 2.3.2 标准化、通用化、模块化 .....          | 040 |
| 2.4 结构设计因素 .....                 | 042 |
| 2.4.1 零件简化 .....                 | 042 |
| 2.4.2 稳定的基座 .....                | 045 |
| 2.4.3 零件容易抓取 .....               | 046 |
| 2.4.4 减少零件装配方向 .....             | 047 |
| 2.4.5 导向特征 .....                 | 048 |
| 2.4.6 先定位后固定 .....               | 049 |
| 2.4.7 零件约束 .....                 | 049 |
| 2.5 公差因素 .....                   | 051 |
| 2.5.1 装配公差分析与综合 .....            | 052 |
| 2.5.2 考虑装配公差的产品设计原则 .....        | 054 |
| 2.5.3 考虑公差的设计途径 .....            | 055 |
| 2.6 防错设计 .....                   | 056 |
| 2.7 人机工程因素 .....                 | 059 |
| 2.7.1 避免视线受阻 .....               | 059 |
| 2.7.2 避免装配操作受阻 .....             | 060 |
| 2.7.3 避免操作人员（或消费者）受到伤害 .....     | 060 |
| 2.7.4 减少工具的使用种类、避免使用特殊的工具 .....  | 061 |
| 2.7.5 设计特征辅助产品的装配 .....          | 061 |
| 2.7.6 装配空间设计 .....               | 061 |
| <b>第 3 章 手工装配的可装配性因素分析</b> ..... | 063 |
| 3.1 影响产品可装配性的因素 .....            | 063 |

|              |                                   |            |
|--------------|-----------------------------------|------------|
| 3.1.1        | 零部件因素 .....                       | 063        |
| 3.1.2        | 工艺因素 .....                        | 063        |
| 3.1.3        | 系统因素 .....                        | 063        |
| 3.2          | 影响搬运操作时间的因素分析 .....               | 064        |
| 3.2.1        | 零件对称性对搬运时间的影响 .....               | 064        |
| 3.2.2        | 零件厚度对搬运时间的影响 .....                | 065        |
| 3.2.3        | 零件尺寸对搬运时间的影响 .....                | 066        |
| 3.2.4        | 零件质量对搬运时间的影响 .....                | 067        |
| 3.2.5        | 双手操作对搬运时间的影响 .....                | 067        |
| 3.2.6        | 综合因素的影响 .....                     | 067        |
| 3.3          | 影响插入操作时间的因素分析 .....               | 067        |
| 3.3.1        | 零件倒角对插入时间的影响 .....                | 067        |
| 3.3.2        | 位置阻碍和视角限制对插入时间的影响 .....           | 071        |
| 3.3.3        | 位置和视角限制对铆接操作的影响 .....             | 072        |
| 3.3.4        | 保持方位操作对插入时间的影响 .....              | 074        |
| 3.3.5        | 装配方向对插入时间的影响 .....                | 075        |
| <b>第 4 章</b> | <b>装配中的连接与紧固 .....</b>            | <b>076</b> |
| 4.1          | 概述 .....                          | 076        |
| 4.1.1        | 连接的重要性 .....                      | 076        |
| 4.1.2        | 连接的目的 .....                       | 076        |
| 4.1.3        | 常用的连接方法与分类 .....                  | 076        |
| 4.1.4        | 连接方法的选用 .....                     | 077        |
| 4.2          | 螺纹连接的工艺性 .....                    | 078        |
| 4.2.1        | 螺纹连接的基本类型及运用 .....                | 078        |
| 4.2.2        | 螺纹连接的装配工艺 .....                   | 080        |
| 4.2.3        | 螺纹连接在设计时的考虑 .....                 | 083        |
| 4.3          | 过盈连接的工艺性 .....                    | 085        |
| 4.3.1        | 过盈连接的工作原理 .....                   | 085        |
| 4.3.2        | 过盈连接的装配方法 .....                   | 085        |
| 4.3.3        | 过盈连接在设计时的考虑 .....                 | 087        |
| <b>第 5 章</b> | <b>手工装配中的可装配性设计及 DFA 方法 .....</b> | <b>089</b> |
| 5.1          | 手工装配的工艺特点 .....                   | 089        |
| 5.2          | 手工装配的一般设计准则 .....                 | 091        |
| 5.2.1        | 影响手工搬运的一般设计原则 .....               | 091        |
| 5.2.2        | 影响手工插入与固定的一般设计原则 .....            | 095        |
| 5.3          | 产品的可拆卸性和维修性设计 .....               | 101        |

|              |                                      |            |
|--------------|--------------------------------------|------------|
| 5.3.1        | 设置合理的调整环节 .....                      | 101        |
| 5.3.2        | 具有良好的可达性 .....                       | 101        |
| 5.3.3        | 提高产品拆卸与维修操作方便性 .....                 | 101        |
| 5.3.4        | 考虑零件磨损后修复的可能性和方便性 .....              | 103        |
| 5.4          | 可装配性评价的 DFA 方法 .....                 | 104        |
| 5.4.1        | Boothroyd 方法 .....                   | 104        |
| 5.4.2        | 手工搬运操作评价分类模型 .....                   | 105        |
| 5.4.3        | 手工插入和紧固操作评价分类模型 .....                | 107        |
| 5.4.4        | Boothroyd DFA 方法实例——风机活塞可装配性设计 ..... | 109        |
| <b>第 6 章</b> | <b>虚拟现实输入输出及人机交互</b> .....           | <b>114</b> |
| 6.1          | 手势识别设备 Leap Motion 传感器 .....         | 114        |
| 6.1.1        | Leap Motion 的原理 .....                | 114        |
| 6.1.2        | Leap Motion 检测的信息 .....              | 115        |
| 6.1.3        | Leap Motion 采用的算法 .....              | 116        |
| 6.1.4        | Leap Motion 的应用 .....                | 117        |
| 6.2          | 人体捕捉设备 Kinect .....                  | 121        |
| 6.2.1        | Kinect 概述 .....                      | 121        |
| 6.2.2        | Kinect 骨骼追踪原理 .....                  | 122        |
| 6.2.3        | Kinect for Windows SDK 的功能与介绍 .....  | 124        |
| 6.3          | HTC Vive 虚拟现实系统 .....                | 125        |
| 6.3.1        | 立体显示概述 .....                         | 125        |
| 6.3.2        | HTC Vive 构成 .....                    | 127        |
| 6.3.3        | HTC Vive 安装过程 .....                  | 130        |
| 6.3.4        | Lighthouse 定位系统 .....                | 132        |
| 6.4          | 虚拟手建模与交互 .....                       | 134        |
| 6.4.1        | 虚拟手模型 .....                          | 135        |
| 6.4.2        | 虚拟手模型驱动方式 .....                      | 136        |
| 6.4.3        | 虚拟手型模型 .....                         | 137        |
| 6.5          | 虚拟人体建模与交互 .....                      | 139        |
| 6.5.1        | 坐标标定 .....                           | 140        |
| 6.5.2        | 数据传输 .....                           | 141        |
| 6.5.3        | 数据融合 .....                           | 142        |
| <b>第 7 章</b> | <b>虚拟现实物理及行为建模</b> .....             | <b>147</b> |
| 7.1          | 包围盒模型 .....                          | 147        |
| 7.1.1        | 轴向包围盒 .....                          | 148        |
| 7.1.2        | 方向包围盒 .....                          | 148        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 7.1.3 包围球 .....                   | 150        |
| 7.1.4 凸包 .....                    | 152        |
| 7.2 包围盒相交性 .....                  | 155        |
| 7.2.1 计算四方体间相交性 .....             | 155        |
| 7.2.2 计算球体间相交性 .....              | 158        |
| 7.2.3 计算四方体-球体相交性 .....           | 158        |
| 7.3 刚体碰撞检测 .....                  | 159        |
| 7.3.1 凸体之间的碰撞检测 .....             | 160        |
| 7.3.2 计算凸体间最近点的 GJK 算法 .....      | 161        |
| 7.3.3 终止条件 .....                  | 166        |
| 7.4 行为建模 .....                    | 166        |
| 7.4.1 虚拟控制手柄的行为建模 .....           | 167        |
| 7.4.2 徒手交互的行为建模 .....             | 169        |
| <b>第 8 章 虚拟现实辅助装配建模 .....</b>     | <b>172</b> |
| 8.1 虚拟现实辅助装配建模结构 .....            | 172        |
| 8.2 零件数据信息 .....                  | 174        |
| 8.2.1 几何外形信息数据 .....              | 174        |
| 8.2.2 物理属性数据 .....                | 174        |
| 8.2.3 几何装配特征数据 .....              | 174        |
| 8.2.4 碰撞包围体数据 .....               | 175        |
| 8.3 零件数据信息的提取及重构 .....            | 177        |
| 8.4 装配约束的定义和求解算法 .....            | 182        |
| 8.5 单一及多约束下动态装配的约束识别和约束管理逻辑 ..... | 187        |
| <b>第 9 章 虚拟现实辅助结构可装配性验证 .....</b> | <b>191</b> |
| 9.1 Unity3D 简介 .....              | 191        |
| 9.2 Unity3D 物理引擎 PhysX .....      | 192        |
| 9.2.1 刚体 .....                    | 192        |
| 9.2.2 碰撞体 .....                   | 193        |
| 9.2.3 角色控制器 .....                 | 195        |
| 9.2.4 关节 .....                    | 196        |
| 9.3 虚拟现实辅助装配平台架构 .....            | 198        |
| 9.3.1 MVC 框架 .....                | 198        |
| 9.3.2 虚拟现实辅助可装配性架构 .....          | 199        |
| 9.4 虚拟现实辅助装配的多层级零件建模 .....        | 201        |
| 9.4.1 零件层次结构模型 .....              | 201        |
| 9.4.2 几何外形属性 .....                | 202        |

|               |                                   |            |
|---------------|-----------------------------------|------------|
| 9.4.3         | 物理属性数据 .....                      | 203        |
| 9.4.4         | 几何装配特征数据 .....                    | 204        |
| 9.4.5         | 碰撞包围盒数据 .....                     | 205        |
| 9.5           | 基于自由度限制算法约束计算 .....               | 206        |
| 9.6           | 虚拟现实辅助装配的人机交互操作 .....             | 210        |
| 9.6.1         | 虚拟手无标记交互操作 .....                  | 210        |
| 9.6.2         | 虚拟环境下实时信息显示界面 .....               | 212        |
| 9.7           | 某传动装置装配实例 .....                   | 213        |
| 9.7.1         | 虚拟装配的虚拟环境搭建 .....                 | 214        |
| 9.7.2         | 虚拟环境下传动轴的动态装配过程 .....             | 214        |
| 9.7.3         | 信息反馈辅助装配机制 .....                  | 220        |
| <b>第 10 章</b> | <b>3D 数学基础及欧拉角计算 .....</b>        | <b>224</b> |
| 10.1          | 3D 向量运算 .....                     | 224        |
| 10.2          | 矩阵运算规则 .....                      | 226        |
| 10.3          | 3D 几何变换 .....                     | 230        |
| 10.3.1        | 三维基本几何变换 .....                    | 230        |
| 10.3.2        | 三维组合变换 .....                      | 235        |
| 10.4          | 三维观察与投影变换 .....                   | 237        |
| 10.4.1        | 三维观察流程 .....                      | 237        |
| 10.4.2        | 三维观察坐标系 .....                     | 237        |
| 10.4.3        | 从世界坐标系到观察坐标系的变换 .....             | 238        |
| 10.4.4        | 投影变换 .....                        | 239        |
| 10.4.5        | 平行投影 .....                        | 240        |
| 10.4.6        | 透视投影 .....                        | 242        |
| 10.5          | 从旋转矩阵中计算欧拉角 .....                 | 244        |
| 10.5.1        | 旋转矩阵 .....                        | 244        |
| 10.5.2        | 广义旋转矩阵 .....                      | 245        |
| 10.5.3        | 计算 $\theta$ 两个可能的值 .....          | 245        |
| 10.5.4        | 计算 $\psi$ 的值 .....                | 245        |
| 10.5.5        | 计算 $\phi$ 的值 .....                | 246        |
| 10.5.6        | $\cos(\theta) \neq 0$ 的两种解法 ..... | 246        |
| 10.5.7        | $\cos(\theta) = 0$ 的解法 .....      | 246        |
| <b>参考文献</b>   | .....                             | <b>249</b> |

# 第1章 绪 论

从18世纪60年代第一次工业革命开始,工业生产至今已经历200多年的发展,从最开始的家庭小作坊生产,到后来大规模流水线生产,再到如今全球化生产,工业产品的设计原则、设计方法、生命周期管理等概念经历了多次蜕变。工业产品的设计方法也由最开始的经验设计,转变为后来的规范化、公理化设计,发展到如今的DFX(面向产品生命周期各环节的设计)。

装配是产品生命周期中至关重要的环节之一。因不考虑可装配性(assembly)的产品设计所带来的装配复杂度增加导致的产品总体成本提高,远高于考虑零件可装配性而提高单个零件的生产复杂度导致的产品总体成本提高。由于设计理念、方法、工具的不统一,“抛墙”式设计仍然存在,无法在产品初期对产品全生命周期的可装配性进行全面的考虑。

可装配性是产品的一种固有特性。通常来说,可装配性被定义为产品由分离的零件或组件组装成具有功能性的整体的容易程度。面向装配设计是实现产品可装配性设计的关键技术。本章以结构可装配性设计为出发点,介绍产品设计、产品装配、装配的实现、装配工艺规程,并结合虚拟现实简要介绍虚拟现实辅助结构可装配性的概念,提出了本书架构,为全书的内容展开奠定基础。

## 1.1 产品设计

“设计”来源于希腊语“construere”,意思是拼合造物。所谓设计,从广义上说,是指通过分析、创造与综合来构思具有某种特定功能的系统活动。设计是以知识为基础的,这种知识是由创造力、智慧、意识、知觉和感受构成的。设计的特点如下。

(1) 设计的结果往往取决于人的知识、经验和思考方法。

(2) 设计的解空间通常很大,且结果往往不唯一。

(3) 设计的知识可分为静态的、精确的、确定性的知识和动态的、模糊的、不确定性的知识等。

产品设计是一种基于知识的设计,设计能否成功,取决于其中现代设计知识的含量,知识含量越高,设计的产品竞争力越强。同时,产品的设计是一种面向用户的设计,若要获取用户满意,产品设计要求覆盖产品的全生命周期。

### 1.1.1 产品开发模式变革

产品的开发模式已从原始开发模式，经历传统开发模式，达到了面向装配和制造的开发模式，即在设计阶段考虑制造与装配，以消除因设计失误导致的生产与装配问题，降低产品开发成本，提高开发效率。

在很久以前，当制造业刚刚兴起的时候，人们所能制造的产品很简单，相应的制造工艺也简单，因此产品的设计和制造都由一个人来完成，这样的开发模式称为原始产品开发模式。随着社会的发展，产品的结构和制造工艺也越来越复杂，都需要很强的专业知识，已无法由同一个人完成，而且原始开发模式效率太低。根据亚当·斯密的劳动分工理论，分工越细，效率越高，产品开发过程分为产品设计阶段和产品制造阶段，分别由机械工程师和制造工程师负责。在产品的设计阶段，机械工程师关注的是如何实现产品的功能、外观和可靠性等要求，制造工程师进行产品的制造和装配，这就是传统的产品开发模式，虽大幅提高了产品开发的效率，但在设计和制造之间沟通很少甚至没有沟通，因此传统的产品开发模式也称为“抛墙”式设计，如图 1-1 所示。“我们设计，你们制造”是传统产品开发模式的典型特点。

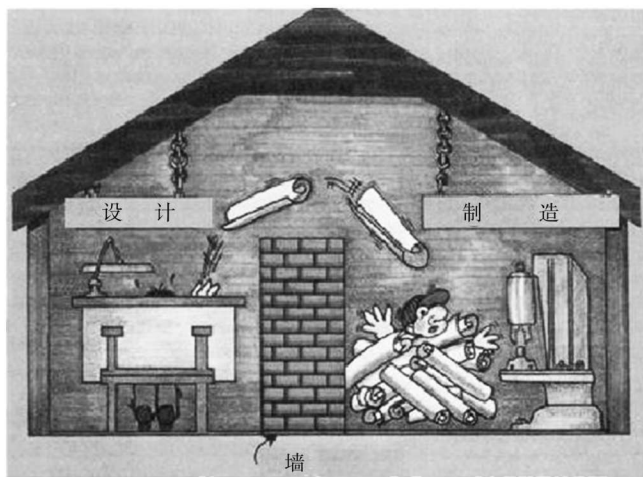


图 1-1 “抛墙”式设计

进入现代社会，企业之间的竞争日益激烈，消费者对产品更加挑剔，企业必须以更低的成本、更短的时间和更高的质量来提高产品的竞争力。而传统的开发模式使得产品的开发过程变成了设计、制造、修改设计、再制造的反复循环，造成产品设计修改多、产品开发周期长、产品开发成本高、质量低等问题。很明显，产品设计和制造的脱节是造成上述后果的根本原因。设计和制造不应该是先后顺序关系，而是“你中有我，我中有你”的关系。在产品的设计阶段必须考虑到制造和装配对产品的设计的要求，制造和装配越早介入设计，对产品的开发越有利。在产品的设计阶段，引入制造和装配的要求，使得机械工程师设计的产品具有很好的可制造性和可装配性，从根本上避免产品开发后期出现的制造和装配质量问题。

遗憾的是，有些企业对质量的认识依然停留在产品质量等于制造质量的初级阶段，愿意投入巨资购买昂贵的制造设备和引进国外先进的制造技术，却不愿意投入资金引进国外先进的产品设计理论和技术。“中国制造”占领了全球市场，但产品的质量还有待进一步提高。

### 1.1.2 产品质量与产品设计的关系

从产品开发模式的历史演变可以看出，产品开发的发展史实际上就是产品设计思想的发展历史。在产品开发中，产品设计扮演着举足轻重的角色。产品设计决定了产品结构、产品材料、产品制造和装配方法，决定了产品的成本，同时也决定了产品质量和产品的开发周期。图 1-2 为产品开发投入成本分布及各阶段对产品成本的影响。可以看出，虽然产品设计阶段的成本仅仅占整个产品开发投入成本的 5%，但决定了 75% 的产品成本，并很大程度上影响了材料、劳动力和管理的成本。

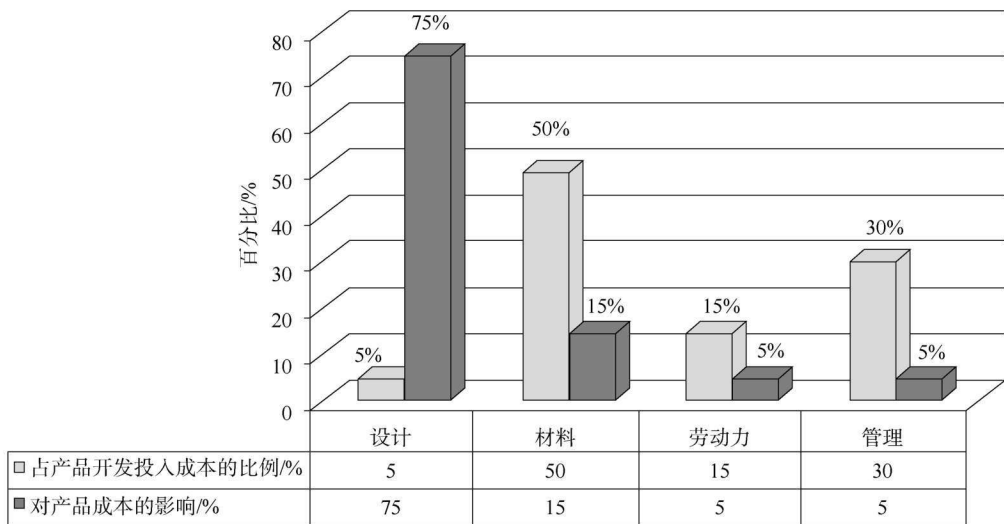


图 1-2 产品开发投入成本分布及各阶段对产品成本的影响

此外，产品设计决定了产品的质量。随着社会发展和科技进步，顾客对产品和服务的期望越来越高，企业对自身的产品质量提出更高的要求。既然产品质量在企业的生存环境中如此重要，那么产品的质量来自哪里呢？

答案是：产品质量是设计出来的。日本质量大师 Taguchi 认为：产品质量首先是设计出来的，然后才是制造出来的。20 世纪初，德国人把质量定义为：优秀的产品设计加上精致的制造。这样的指导思想，使得日本和德国的产品质量有目共睹。根据统计，80% 左右的产品质量问题是由设计引起的，20% 的产品质量问题是由后期制造和装配引起的。图 1-3 为产品质量问



图 1-3 产品质量问题产生根源的二八原则

题产生的二八原则，说明了产品设计对产品质量的重要性。换句话说，如果产品设计很完善，就能够避免 80% 的产品质量问题；而无论产品制造多么完美，也只能避免 20% 的产品质量问题，对另外 80% 的产品质量问题无能为力。

在产品设计中，面临着多方面的要求，如来自客户或消费者的要求、来自制造方面的要求、来自装配方面的要求、来自测试方面的要求、来自成本的要求以及来自环保、易拆卸和易维护等要求。在众多要求中，虽然来自客户或消费者的要求是排在第一位的，但从产品成本、开发周期而言，归根结底，装配是产品设计的关键。因为产品基本上都是由多个零件装配而成，虽然机械工程师可以在三维（3D）软件中把一个产品的组装关系绘制得很完美，而事实上不一定标志产品能够组装，或以最高装配质量和最低成本组装起来。因此，在 20 世纪六七十年代，人们根据实际设计经验和装配操作实践，提出了一系列有利于装配的建议，以帮助设计人员设计出容易装配的产品。1977 年，Geoffrey Boothroyd 教授第一次提出了“面向装配的设计”，并被广泛接受。1982 年，Boothroyd 教授在《自动化装配》中，提出了一套评估零件可装配性的体系，开发了面向装配的设计软件。图 1-4 为传统设计与面向装配、制造设计的产品开发流程。从图 1-4 可以看出，传统的产品开发需要多次反复，效率低，成本高，而面向制造和装配的设计是自上而下的产品开发，提高了效率，降低了成本。

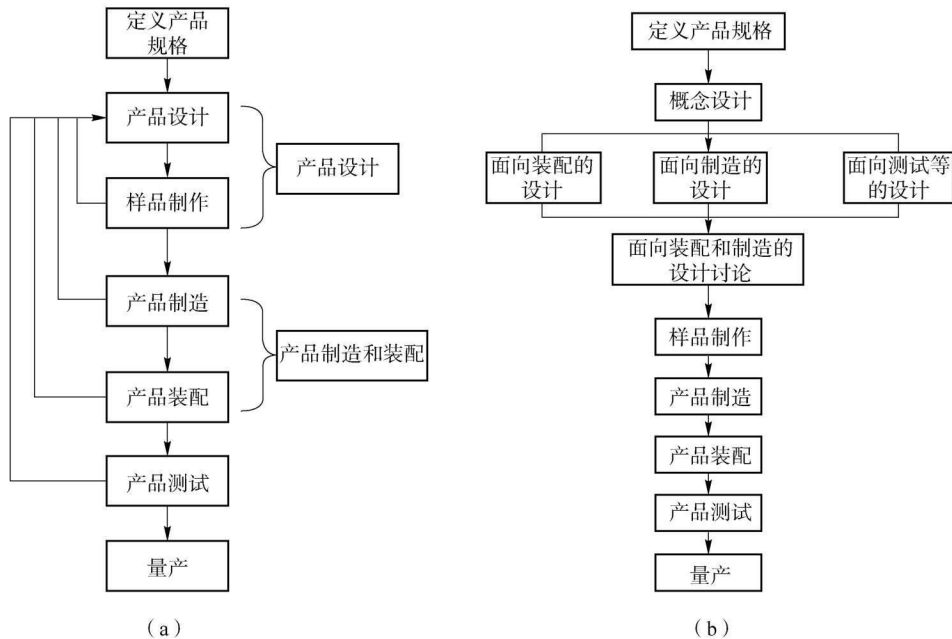


图 1-4 传统设计与面向装配、制造设计的产品开发流程  
(a) 传统设计；(b) 面向制造和装配的设计

## 1.2 产品装配

在制造产品过程中，装配是工厂生产最后的工艺过程。产品的综合技术指标如性能、

可靠性、寿命等，主要是在零件加工合格后通过最后的装配工艺过程来实现和保证的，不同的产品设计对产品最终的装配工艺过程中的效率、装配质量、装配成本等有着重要的影响。产品设计中所表现出来的对装配工艺的影响称为产品的装配工艺性或可装配性。同时产品的可装配性也对产品在使用过程中维修的方便性和经济性有一定影响。

随着产品设计和制造技术的不断发展，各种新材料、新原理、新工艺在产品设计和制造中大量使用，毛坯加工与机械加工的自动化程度迅速发展，大大节省了人力与制造费用，同时专业化的生产分工和基于供应链的制造模式，使得装配所需费用在整个产品制造费用中所占的比重日益加大，因此，迫切要求提高装配工作的技术经济性和效率。在产品设计的早期对产品的装配工艺性进行分析，按照可装配性设计准则进行产品设计，不仅可以提高最终产品装配的质量和效率，还可以在总体上提高产品质量，降低成本，缩短产品的开发和制造周期。

由于产品的性能要求、工作原理、零件材料、组成结构和连接方式的差异，产品的装配工艺方法也不尽相同，产品设计中需要考虑的装配工艺性问题也不同。由于装配是产品制造过程的最后阶段，产品及其零部件的装配工艺性在产品的组成零件加工结束后便基本确定，因此装配工艺性应当在产品的设计阶段就充分考虑。装配工艺性又与装配方式、方法和组织形式等有关，因此它是一个较为复杂的问题。

装配是指把多个零件组装成产品，使得产品能够实现相应的功能并体现产品的质量。从装配的概念可以看出，装配包含三层含义：①把零件组装在一起；②使产品实现相应的功能；③体现产品的质量。装配不是简单地把零件组装在一起，更重要的是组装后产品能够实现相应的功能，体现产品的质量。

对于任何一种产品而言，在经过零件加工制造并成为产品之前，都需要经过装配的过程。装配工序是产品装配过程中最基本的元素。一个典型的产品装配工序包括以下关键操作：（人或机器人）识别零件、抓取零件、移动零件到装配位置、调整零件到正确位置、固定零件和功能测试。

装配工序有好坏和优劣之分，不同的装配工序对产品的影响千差万别。从装配质量、装配效率和装配成本等方面看，最好的装配工序和最差的装配工序特征如表 1-1 所示。

表 1-1 最好的装配工序和最差的装配工序特征

| 最好的装配工序            | 最差的装配工序  |
|--------------------|--|
| 零件很容易识别            | 零件很难识别   |
| 零件很容易被抓起和放入装配位置    | 零件不容易被抓取，容易掉到某些位置  |
| 零件能够自我对齐到正确的位置     | 零件需要操作人员不断地调整才能对齐  |
| 固定之前，零件只有唯一正确的装配位置 | (1) 在固定之前，零件能够放到两个或两个以上位置<br>(2) 很难判断哪一个装配位置是对的<br>(3) 零件在错误的位置可以被固定 |
| 快速装配，紧固件很少         | 螺钉、螺柱、螺母的牙型、长度、头型多种多样，令人眼花缭乱   |