

# 机电产品模块化

## 设计方法和案例

顾新建 杨青海 纪杨建 顾巧祥◎编著

Mechatronic Product Modular Design Methods and Cases



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 机电产品模块化 设计方法和案例

顾新建 杨青海 纪杨建 顾巧祥 编著

机械工业出版社

本书对机电产品模块化设计需求、现状、方法、案例和发展方向等作了全面的分析和介绍,建立了机电产品模块化方法体系结构,对产品模块化的概念、过程和方法进行统一的描述和详尽的介绍,对不同层次的、产品生命周期不同阶段、不同行业的机电产品模块化方法和案例作了全面介绍和分析,提出了模块化产品生命周期评价指标和产品模块化程度评价指标,介绍了课题组所开展的轮式装载机模块化的实践,总结了工业汽轮机模块化实践经验,分析了机电产品的产品模块化方法的发展趋势。本书的特点是内容新颖、案例丰富、系统性强。

本书的目的是使读者能够对机电产品模块化设计概念、方法和过程有比较清楚和系统的把握,对机电产品模块化设计案例有全面的了解,掌握机电产品模块化设计平台的建立方法和理论,掌握基于设计平台的产品配置设计和变型设计方法,以满足机电企业开展模块化设计的需求,推动机电产品模块化的深入开展。

本书可供机械设计、机电工程、工业工程、管理和计算机等相关专业的工程技术和管理人员,以及研究生、本科生阅读和参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机电产品模块化设计方法和案例/顾新建等编著. —北京:机械工业出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-111-44554-8

I. ①机… II. ①顾… III. ①机电设备—工业产品—模块化—设计  
IV. ①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第254068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:李万宇 责任编辑:李万宇

版式设计:常天培 责任校对:薛娜

封面设计:陈沛 责任印制:张楠

北京振兴源印务有限公司印刷

2014年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm · 18印张 · 2插页 · 440千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-44554-8

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

策划编辑:(010) 88379732

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

中国制造业三十年来的发展突飞猛进，过去的短缺经济变成剩余经济、买方市场变为卖方市场，资源瓶颈现象日益突出，环境污染警报频频，劳动力工资节节攀升，人们对产品越来越挑剔，与发达国家的技术水平拉近而惨遭打压，与低工资国家的工资水平距离拉开导致制造企业转移，一个新的危机正在出现，即所谓的“中等收入陷阱”。

中国制造业向何处去？途径似乎清晰：

- 通过技术创新，实现产品的升级转型：由低端产品向高端产品升级，由劳动密集型制造业向高新技术产业转型。

- 通过分工合作，实现产品的大批量定制。

- 通过产品服务，向服务要效益，争取客户，同时支持节能减排。

但如何做？从何做起？却使人困惑。

一种古老而又年轻的方法——模块化设计方法值得学习和应用。

模块化设计历史悠久，古老的建筑、家具乃至活字印刷中都有模块化的身影。

说它年轻，西方学者在 2012 年初推出的第三次工业革命的概念中将模块化视为主要代表性技术之一。

事实上，模块化已经为我们带来了许多好处，例如，它的应用使计算机、手机等产品的性价比快速提升。

但是，还有更多产品的模块化需要我们去开发，更大范围的模块化需要我们去实现。

未来，当我们设计新产品时，通过快速搜索和组合已有的零部件模块 CAD 模型，就可以快速形成我们所设想的产品；我们可以快速找到制造这些零部件模块的企业，它们专门制造这些模块，所以成本低、质量好、交货期短；模块化使得产品设计和制造变得简单便捷，甚至使普通消费者也可以 DIY（自己动手做）产品；产品报废了，许多模块可以重用；大规模生产的标准模块，可以节省大量能源。

通过模块化，模块创新日益重要，成为产品创新的驱动力，例如当今的计算机和汽车。这为我国的中小企业创新带来了有利条件。

通过模块化，产品创新更加高效。因为可以利用现有模块，减少大量的重复性工作。

通过模块化，协同分工细化，模块批量增加，生产效率提高，产品成本降低，同时又能帮助实现节能减排。

总之，通过模块化，有助于实现“创新中国”、“美丽中国”和“高效中国”。

本书主要内容如下：

第 1 章对机电产品模块化设计的相关概念进行了定义；分析了机电产品模块化的需求，主要从创新设计、大批量定制和绿色制造的角度进行分析；讨论了机电产品模块化设计的发展概况。

第 2 章建立了机电产品模块化方法体系结构（Y 模型），试图对产品模块化的概念、过程和方法进行统一的描述；充分考虑了新产品和已有产品这两种不同对象的模块化方法，确

定了产品模块化过程和方法；将产品模块化的工作分为“模块化产品平台构建”和“订单产品模块化设计”两大部分。模块化产品平台构建过程又进一步分为“产品模块化”和“产品模块化建模”两部分；将产品模块化融合在产品开发的整个过程中；强调了模块化设计对环境友好的作用；澄清了模块化、系列化和标准化之间的关系。模块化产品平台构建中充分考虑了模块化、系列化、标准化三方面内容。

第3章研究了不同层次的机电产品模块化在产品生命周期不同阶段的需求，对不同层次的模块化方法进行了比较：①分析了面向工程项目的、面向整体解决方案的、面向企业产品线的和面向模块化工厂的等不同类型成套装置的案例，介绍了模块化锅炉、可重组制造系统、分离模块航天器等案例；②研究了整机层模块化的特点，分析了基于不同生产模式的模块化设计方法，以及产品模块化在不同生产模式中的作用，对产品平台做了分析和介绍；③研究了部件层模块化的特点，介绍了基于同一零部件模块重复组合的部件，介绍了开放的部件层模块化方法，介绍了零件库的原理、意义和案例；④研究了零件层模块化的特点、零件结构特征单元模块化方法，介绍了模块化虚拟零件的概念。

第4章介绍了不同机电行业产品模块化与大批量定制生产的现状，分析了不同行业产品模块化的原理、需求和效益；进行了不同行业产品模块化方法的比较；介绍了制造装备的特点；分析了不同行业产品模块化的特点及对模块化的需求；介绍了不同行业产品模块化的案例。

第5章从产品生命周期角度分析了机电产品模块化设计和评价的需求；讨论了模块化产品的生命周期设计方法，提出了模块化产品的生命周期优化模型和面向产品生命周期的配置设计方法；介绍了面向产品服务、再制造和可回收的产品模块化方法，将模块化与环境化设计紧密集成考虑；提出了模块化产品生命周期评价指标和产品模块化程度评价指标。

第6章介绍了依据产品模块化方法所开展的轮式装载机模块化的实践，分析了工业汽轮机模块化案例。

第7章分析了机电产品的产品模块化方法的发展趋势，着重分析了Web2.0技术对产品模块化方法的影响，并介绍了中国机械产品模块化技术路线图，提出了面向产品模块化的环境建设内容，讨论了面向产品模块化的信息技术和信息管理系统的关系，提出了机电产品模块化设计的技术体系标准。

本书可供机械设计、机电工程、工业工程、管理和计算机等专业工程技术和管理人员，以及研究生、本科生阅读和参考。

由于本书涉及的范围比较广，所研究的问题比较新也比较复杂，这些实为作者学力所不逮，书中定会有不少谬误之处，恳请各位专家学者批评指正。

作者

于求是园

2013年8月

# 目 录

## 前言

## 第1章 绪论

1.1 机电产品模块化设计的发展概况 .....	1	1.2.3 机电产品模块化的外延定义 .....	15
1.1.1 三次工业革命 .....	1	1.3 机电产品模块化的需求分析 .....	18
1.1.2 国外机电产品模块化设计的发展概况 .....	2	1.3.1 机电产品开发设计对模块化的需求 .....	18
1.1.3 国内机电产品模块化设计的发展概况 .....	6	1.3.2 机电产品大批量定制对模块化的需求 .....	20
1.2 基本概念和定义 .....	8	1.3.3 机电产品绿色制造对模块化的需求 .....	22
1.2.1 产品开发和设计的概念和定义 .....	8	1.4 本书的框架 .....	26
1.2.2 产品模块化的概念和定义 .....	10	参考文献 .....	27

## 第2章 机电产品模块化设计方法

2.1 产品模块化设计的过程模型 .....	28	2.3.1 阐明任务, 确定需求 .....	59
2.1.1 产品模块化设计的“Y”模型 .....	28	2.3.2 零部件 ABC 分析 .....	60
2.1.2 模块化产品平台构建过程 .....	28	2.3.3 产品功能系列化和模块化规划 .....	62
2.1.3 模块化产品平台充实维护过程 .....	30	2.3.4 结构模块优化 .....	62
2.1.4 订单产品模块化设计过程 .....	31	2.4 产品模块化建模方法 .....	63
2.2 新产品模块化方法 .....	32	2.4.1 标准模块设计和模块接口定义 .....	63
2.2.1 市场分析, 确定需求 .....	32	2.4.2 模块化产品平台总体构建 .....	71
2.2.2 确定功能原理和功能模块及系列化规划 .....	37	2.4.3 产品结构系列化设计 .....	72
2.2.3 寻找原理方案及总体结构规划 .....	46	2.4.4 模块化产品平台充实维护 .....	75
2.2.4 结构模块划分 .....	47	2.5 订单产品模块化设计方法 .....	76
2.2.5 建立产品编码和名称字典 .....	50	2.5.1 产品配置设计方法 .....	76
2.3 已有产品模块化方法 .....	59	2.5.2 产品变型设计方法 .....	78
		参考文献 .....	80

## 第3章 不同层次的产品模块化方法

3.1 不同层次的产品模块化的需求及框架 .....	82	方法的比较 .....	84
3.1.1 不同层次的产品模块化需求 .....	82	3.2 成套装置层的模块化 .....	84
3.1.2 不同层次的产品模块化 .....		3.2.1 成套装置层模块化概述 .....	84
		3.2.2 分布式装置 .....	88
		3.2.3 可重组制造系统 .....	88

3.2.4 分离模块航天器	90	3.4.2 基于同一零部件模块 重复组合的部件	103
<b>3.3 整机层模块化</b>	91	3.4.3 开放的部件层模块化方法	104
3.3.1 整机层模块化概述	91	3.4.4 Web 零件库	105
3.3.2 基于客户订单分离点的 产品生产模式	95	<b>3.5 零件层模块化</b>	107
3.3.3 产品平台	98	3.5.1 零件层模块化概述	107
<b>3.4 部件层模块化</b>	101	3.5.2 零件结构特征单元模块化方法	107
3.4.1 部件层模块化概述	101	3.5.3 模块化虚拟零件	109
		参考文献	110

## 第4章 不同机电行业的产品模块化

<b>4.1 不同机电行业产品模块化的 特点和需求</b>	111	4.3.4 铁路机车	129
4.1.1 不同机电行业产品模块化与 大批量定制生产现状	111	4.3.5 城市轻轨车辆	132
4.1.2 不同行业产品的模块化原理 及需求和效益	113	4.3.6 船舶	133
4.1.3 机械、电子和软件 模块化方法的比较	114	4.3.7 飞机	136
<b>4.2 制造装备模块化案例</b>	115	4.3.8 航天器	139
4.2.1 制造装备模块化概述	115	<b>4.4 动力设备模块化案例</b>	139
4.2.2 变型机床	117	4.4.1 动力设备模块化概述	139
4.2.3 数控机床	118	4.4.2 变电站	140
4.2.4 组合机床	121	4.4.3 发动机	141
4.2.5 工业机器人	121	4.4.4 电动机	142
4.2.6 起重机	123	4.4.5 锅炉	143
<b>4.3 运输装备模块化案例</b>	124	<b>4.5 家电及电子设备机械 模块化案例</b>	143
4.3.1 运输装备模块化概述	124	4.5.1 家电模块化概述	143
4.3.2 汽车	124	4.5.2 彩电	146
4.3.3 装甲车辆	127	4.5.3 冰箱	147
		4.5.4 电子设备机械	148
		参考文献	149

## 第5章 面向生命周期的机电产品模块化及其评价

<b>5.1 产品生命周期设计和评价的 定义和需求</b>	151	<b>5.2 模块化产品的生命周期设计</b>	157
5.1.1 产品生命周期设计和 评价的定义	151	5.2.1 模块化产品的生命 周期优化模型	158
5.1.2 产品生命周期设计的需求	153	5.2.2 面向产品服务的产品 模块化设计	161
5.1.3 产品生命周期设计对产品 模块化的需求	154	5.2.3 面向再制造的产品模块化设计	164
5.1.4 产品生命周期成本 (LCC) 分析的需求	156	5.2.4 面向可回收的产品模块化设计	165
		5.2.5 面向产品生命周期的配置设计	167
		5.2.6 预先计划的产品改进设计	173

5.3 产品模块化效益评价指标 .....	173	5.3.5 满足客户多样化需求 (U) 的评价指标 .....	187
5.3.1 产品模块化效益评价 指标总体结构 .....	173	5.3.6 产品和过程的环境友好性 (E) 的评价指标 .....	190
5.3.2 企业反应速度 (T) 的 评价指标 .....	174	5.4 产品模块化程度评价指标 .....	193
5.3.3 产品质量 (Q) 的评价指标 .....	179	参考文献 .....	195
5.3.4 产品成本 (C) 的评价指标 .....	183		

## 第6章 机电产品模块化实践和案例

6.1 轮式装载机模块化实践 .....	196	6.2.2 零部件 ABC 分析 .....	217
6.1.1 阐明任务, 确定需求 .....	196	6.2.3 产品功能系列化和模块化规划 ..	218
6.1.2 零部件 ABC 分析 .....	198	6.2.4 结构模块优化 .....	223
6.1.3 产品功能系列化和模块化规划 ..	198	6.2.5 建立产品编码体系和名称字典 ..	223
6.1.4 结构模块优化 .....	203	6.2.6 标准模块设计和模块接口定义 ..	227
6.1.5 建立产品编码体系和名称字典 ..	207	6.2.7 模块化产品平台总体构建 .....	228
6.1.6 标准模块设计和模块接口定义 ..	207	6.2.8 产品结构系列化设计 .....	231
6.1.7 模块化产品平台总体构建 .....	210	6.2.9 模块化产品平台充实维护 .....	233
6.1.8 模块化产品平台充实维护 .....	212	6.2.10 产品配置设计 .....	235
6.1.9 产品配置设计 .....	212	6.2.11 产品变型设计 .....	237
6.2 工业汽轮机模块化案例 .....	215	参考文献 .....	244
6.2.1 阐明任务, 确定需求 .....	215		

## 第7章 产品模块化方法的发展趋势

7.1 产品模块化过程和方法 的发展趋势 .....	245	标准化方法 .....	256
7.1.1 影响产品模块化发展 的关键因素 .....	245	7.2.5 基于标签的产品和零部件自 组织分类编码方法 .....	257
7.1.2 产品模块化发展的方向 .....	246	7.3 产品模块化技术的展望 .....	262
7.2 基于 Web2.0 的产品 模块化方法 .....	248	7.3.1 中国机械产品模块化技术路 线图 .....	262
7.2.1 基于 Web2.0 的产品协同 模块化方法 .....	248	7.3.2 面向产品模块化的环境建设 .....	265
7.2.2 基于 Web2.0 的零件库自组织 建设和维护方法 .....	249	7.3.3 面向产品模块化的信息技术 和信息管理系统 .....	265
7.2.3 零件协同标准化方法 .....	252	7.3.4 机电产品模块化设计的 技术体系标准 .....	270
7.2.4 跨企业的协同零件名称		参考文献 .....	271
缩略语表 .....	272		
后记 .....	275		



# 第1章

## 绪论

本章首先从三次工业革命及机电产品模块化设计的发展概况谈起,使读者对模块化有一个初步的概念;然后对机电产品的模块化设计的相关概念进行了定义;分析了创新设计、大批量定制和绿色制造对机电产品模块化的需求;最后给出了本书的框架。

### 1.1 机电产品模块化设计的发展概况

#### 1.1.1 三次工业革命

模块化的发展与生产方式的演变密切相关。生产方式的演变与产品批量、种类的关系如图1-1所示。从图中可以看出,生产方式的演变是一个渐进发展、螺旋式上升的过程。

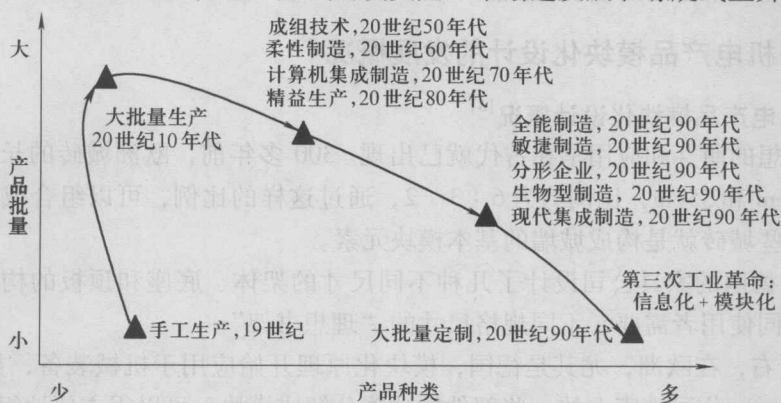


图1-1 生产方式的演变与产品批量、种类的关系

#### 1. 第一次工业革命<sup>[1]</sup>

18世纪60年代,英国蒸汽机的发明和应用是第一次工业革命开始的标志,以机器取代了手工工具,使生产效率得到了很大提高。资本主义由工场手工业过渡到大机器生产,在生产领域和社会关系上引起了根本性变化,同时开始了城市化的进程。但此时采用的是单件生产方式,其特点是每种产品仅生产一台(件)或少数几台(件),品种繁多,产品标准化程度低,产品设计和制造周期长、成本高、对员工的技术水平要求高。

#### 2. 第二次工业革命

20世纪初,亨利·福特发明完善了流水线大批量生产(Mass Production)方式,掀起了第二次工业革命。福特汽车公司利用这种生产方式取代了欧洲企业领先若干世纪的单件生产方式,其T型汽车因而称霸全球。大批量生产是在市场环境相对稳定的情况下,根据企业对

市场的预测,以批量产品为特征的生产活动。其主要特点是采用标准的制造过程和标准化的零部件,通过规模经济效应,降低生产成本,提高产品质量。但其难以满足客户越来越多的个性化需求,难以对市场的变化作出快速响应。

### 3. 第三次工业革命正发生在我们的身边<sup>[2]</sup>

第三次工业革命正发生在我们的身边,其特点是“信息化+模块化”,实现大批量定制(Mass Customization)的生产方式。

第二次世界大战以后,随着大批量生产的应用和普及,市场上同类产品的数量急剧增加。在某些领域里,已经开始出现产品相对过剩的情况,供过于求的买方市场逐渐形成,同类产品的竞争日益激烈。

在买方市场中,客户有了更大的选择余地,客户需求呈现多样化和个性化,同时,要求产品价格低、交货快。

信息技术是大批量定制的催化剂。CAX(如CAD、CAPP、CAM等)技术、数控机床、工业机器人、柔性制造单元和系统使产品设计制造的效率和柔性有了极大的提高。又如,3D打印机能够通过层层叠加材料快速生产个性化的产品,目前已能定制汽车配件、手机套、鞋和衣服等,能“打印”汽车的变速器箱,还可以使液压泵的弯孔非常平滑,这是传统机械难以加工出来的。

仅有信息技术是不够的,还需要系统优化技术(模块化设计、并行工程、精益生产等)的支持,如大众汽车公司的模块化产品平台。

## 1.1.2 国外机电产品模块化设计的发展概况

### 1. 国外机电产品模块化设计概况<sup>[3]</sup>

模块化思想的萌芽和应用早在古代就已出现。300多年前,欧洲城砖的长、宽、高分别为104cm、52cm和35cm,比例约为6:3:2,通过这样的比例,可以组合成各种形状和尺寸的城墙,这些城砖就是构成城墙的基本模块元素。

1900年,德国的家具公司设计了几种不同尺寸的架体、底座和顶板的构件,用它们可以组成满足不同使用者需要、不同规格尺寸的“理想书架”。

1920年左右,在欧洲,尤其是德国,模块化原理开始应用于机械装备,如弗里茨-韦尔纳(Fritz-Werner)公司铣床上的一些部件按功能分解成模块,可以很方便地组装出满足客户需求的产品。又如德国联合车床厂车床的模块化主轴箱系统共有63个不同的齿轮,可以通过选择、搭配组合成60种不同的主传动系统,分别用于丝杠车床、光杆车床、六角车床以及卧式深孔钻床等不同产品。美国也制定了以19in为核心的机箱面板尺寸标准。

1920年,北欧的货车公司斯堪尼亚(Scania-Vabis)在困境中实施了不同车型之间的部件通用化,既实现了多品种生产,又降低了管理成本、提高了生产效率。

1930年,德国提出了“模块化构造”的设计方法。由于用这种方法设计制造的机床具有很好的经济效益,因而模块化设计思想得到了理论界和工业界的普遍重视。

第二次世界大战极大促进了模块化技术在舰船和飞机生产中的应用,如德国U型潜艇的模块化船体,划分为6个模块的美国B-24重型轰炸机。

20世纪50年代,欧美一些国家正式提出“模块化设计”概念,自此模块化设计越来越引起广泛的重视。随着各行业专家学者的研究,其理论和应用技术逐渐完善,模块化设计成

为各类机械产品研发中普遍采用的一种现代化设计方法。

20世纪50年代中期,前苏联的斯·帕·米特罗范诺夫发表了《成组工艺科学原理》。模块化是成组技术(GT)的主要内容。成组技术是一门工程技术科学,研究如何识别和发掘生产活动中有关事物的相似性,并充分利用这些相似性,即把相似的问题归类成组,寻求解决这一组问题相对统一的最优方案,以取得所期望的经济效益。成组技术传入各国后被积极采用并取得了进展。如德国阿亨工业大学奥匹兹教授研制了奥匹兹分类编码系统,日本开发了零件分类编码系统KC-1、2及KK-1、2、3。英国成组技术的发展重点是在生产单元的建立方面。1995年,美国总统办公厅科技政策办公室公布的第三个双年度国家关键技术报告中,把成组技术作为200个专项技术之一<sup>[4]</sup>。

1964年,IBM开发出世界上最早的模块化计算机系统IBM/360,大大提高了计算机的创新速度。IBM/360之前的计算机设计,属于相互依赖型设计,产品中任何一个元件的改变都会引起整个系统的变化,若要以其为基础派生新产品是很困难的。

20世纪60年代,出现了模块化的工业汽轮机、模块化集装箱、模块化武器系统等<sup>[5]</sup>。

20世纪70年代,模块化产品在建筑机械行业得到迅速发展。例如,瑞典的林德(Linden)公司的Linden 8000模数系列平头塔机引入了塔机模块化的新思维,使不同级别与型号的塔机能够共用同一个标准模数系统,从而极大地提高了塔机的适应性和灵活性<sup>[6]</sup>。德国德马格(Demag)公司所设计和制造的单梁吊车改为模块化设计后,其设计费用仅为单台设计时的12%,生产成本减少45%。

20世纪70年代,国际电工委员会(IEC)开始全面着手进行电子设备尺寸系列标准化工作,为电子设备机械结构的模块化奠定了基础。随后,由于大规模集成电路的发展,电子行业成为模块化应用最为成功的行业之一。

20世纪80年代,随着市场竞争的日益激烈以及产品更新换代的节奏加快,工业发达国家竞相开发模块化系列机电产品,同时,由于CAD技术以及成组技术等各种新技术的发展,推动了模块化技术的进一步发展,其应用的范围更广,应用的程度更深。模块化设计理论的研究得到了进一步的重视。

20世纪80年代,日本索尼公司(Sony)仅利用4个基础平台的随身听(Walkman)产品,生产出250余种随身听。这250种随身听无论在价位、功能和款式上都有很大的区别,可以满足客户的各种不同需求。

20世纪90年代,德国大众公司(Volkswagen)在A平台上生产四个品牌的十余种轿车。这十余种轿车分布在不同的大众公司分厂中生产。瑞典模块化管理(MM)公司提出了一种比较系统实用的模块化设计方法,曾在海尔集团进行推广应用。

## 2. 国外产品设计方法研究概况

模块化设计是一种全世界范围内应用的重要产品设计方法,因此需要对国外产品设计方法研究情况作一简要介绍。

长期以来,设计人员一直把创造性和直觉作为产品开发设计的基础。直到20世纪中叶,设计工作的真正方法化还只局限于部分领域的为数不多的论文研究范围之内。

1963年,德国召开了名为“关键在于设计”的全国会议,指出针对设计方法的研究迫在眉睫。随后欧洲各国都开始了设计方法的研究,逐渐形成了当今设计方法学的体系。

20世纪中叶开始,设计方法学的研究发展有三个方向:

1) 关键方法学。以 Kesselring<sup>[7]</sup> 为代表, 研究设计过程中的要点及准则, 通过对设计原理和关键要素进行深入研究以及定性定量的分析, 简化设计过程。在此前提下, 扩展了数学方法在设计中的应用空间。

2) 实践方法学。以 Leyer<sup>[8]</sup> 为代表, 针对产品结构进行设计研究, 强调原理的应用, 但此阶段对原理的应用方法还停留在设想-试验-改进的阶段, 是典型的实践方法学。

3) 严格方法学。Hansen<sup>[9]</sup> 等人将设计定义为技术系统, 进而对设计过程进行了严格的定义, 从设计任务的获取、分析、评价开始进行精细的研究, 然后以严密的科学逻辑导出后续工作的要点。严格方法学方面的典型代表还有 Mueller、Hubka、Koller 等人<sup>[10][11][12]</sup>。

20 世纪末至 21 世纪初, 产品设计方法学的研究进入总结前人精华进行升华的阶段。这一时期的主要代表有 Ehrenspiel<sup>[13]</sup> 和 Pahl、Beitz 教授<sup>[14]</sup>。Ehrenspiel 希望在已有的设计方法体系中加入成本要素, 从成本估算和成本评价两方面对设计内容进行约束, 这无疑提高了对设计人员的要求。Pahl/Beitz 的设计方法学研究对现代设计理论的发展产生了深远的影响, 包括设计过程的划分、设计阶段的实现、设计方法的应用, 很好地用系统思想诠释了设计的实现及其方法的应用。两人对设计方法的研究也为 VDI 2221<sup>[15]</sup> 和 VDI 2222<sup>[16]</sup> 两大设计技术准则的产生做出了突出贡献, 直到今天这两个准则也是德国设计领域的最高标准<sup>[17]</sup>。下面就分别介绍 VDI 2221 准则中的产品开发设计一般进程和 Paul/Beitz 的产品开发设计一般进程。

#### (1) VDI 2221 准则中的产品开发设计一般进程 (系统化设计方法)

在德国几所著名大学教授提出的系统创新设计思路的基础上, 德国工程师协会提出产品的创新设计过程可以程序化。该准则认为产品开发设计一般进程可分为: 产品计划、任务确定、开发设计、实现应用四个阶段, 实现此四个阶段, 需要经过任务的明确和细化、确定功能原理及其结构、寻求原理方案及其结构、划分成可实施的模块、标准模块设计、产品总体设计、详细设计和编制使用说明书七个步骤 (图 1-2), 并对每个步骤都公布了一系列指导

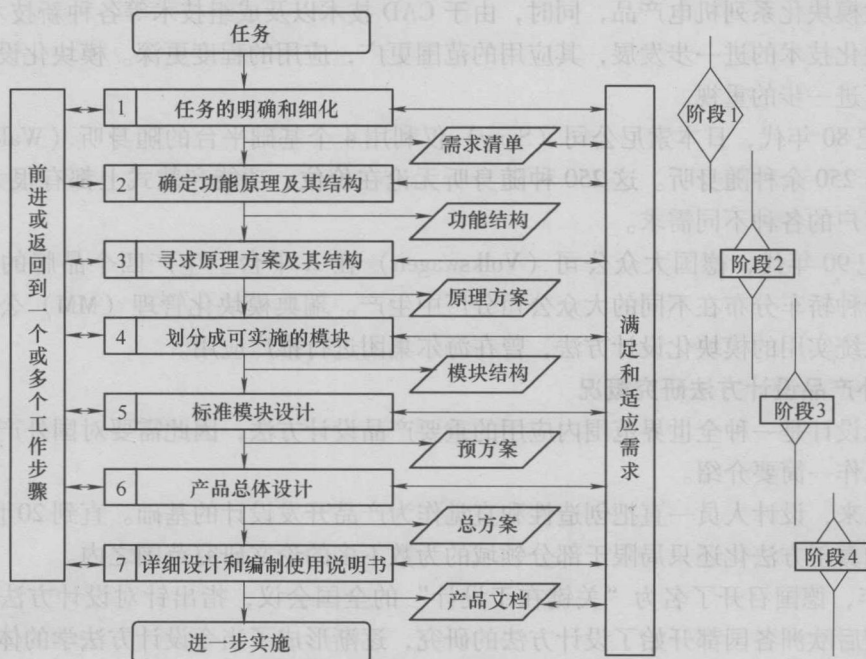


图 1-2 产品开发设计的一般进程 (来源: VDI 2221)

性文件 VDI 2220、VDI 2221 和 VDI 2222。

## (2) Paul/Beitz 的产品开发设计一般进程

Paul 和 Beitz 是德国经典设计理论的代表，他们分别在 BBC 公司和 AEG-Telefunken 重型机械公司长期进行大型机电产品的设计工作，在产品设计方面积累了大量的经验，在此基础上他们提出了产品开发设计的一般进程（图 1-3）。

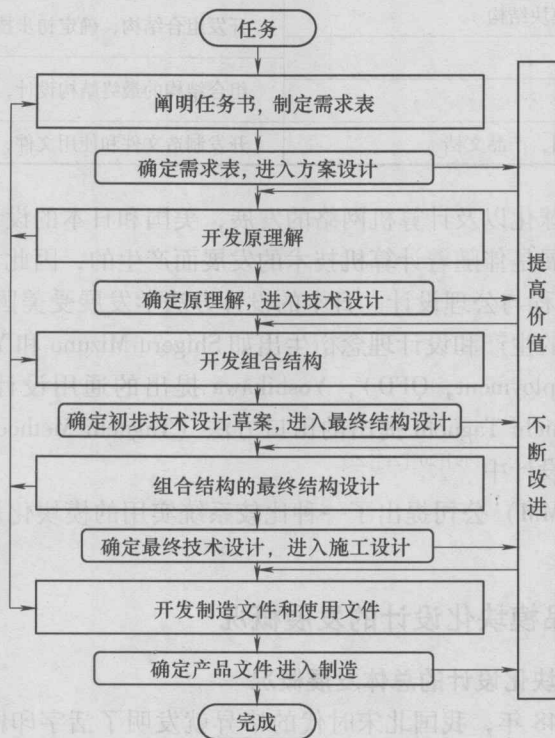


图 1-3 产品开发设计的一般进程（来源：Paul/Beitz）

Paul 和 Beitz 提出的产品开发设计的一般进程包括阐明任务书、方案设计、技术设计和施工设计四个主要阶段，其中：

1) 阐明任务书阶段是根据客户需求确定产品设计要求等方面信息，即提出解要求、存在条件及其重要性。

2) 方案设计阶段主要是在原理方面确定一个解，即通过抽象化来认识本质问题，建立功能结构，并寻求合适的作用原理将其组合成作用结构来确定原理解（解决原理）。

3) 技术设计阶段主要是从作用结构或原理解出发，从技术和成本角度来确定完整的产品结构。

4) 施工设计阶段主要通过最终确定所有零部件的形状、尺寸和表面质量，确定所有材料、检验制造可行性及最终成本，来补充产品的结构，并完成实现物理模型所需的有关图样和其他资料。

表 1-1 对德国 VDI 2221 准则与 Paul 和 Beitz 教授所提出的产品开发设计的一般进程进行了比较。

表 1-1 VDI 2221 准则与 Paul 和 Beitz 产品开发设计的一般进程的比较

VDI 2221 工作步骤和结果	Paul/Beitz 工作步骤和结果
1. 任务的明确和细化, 需求清单	阐明任务书, 确定需求表
2. 确定功能原理及其结构, 功能结构	开发原理解, 确定原理解
3. 寻求原理方案及其结构, 原理方案	
4. 划分成可实施的模块, 模块结构	开发组合结构, 确定初步技术设计草案
5. 标准模块设计, 预方案	组合结构的最终结构设计, 确定最终技术设计
6. 产品总体设计, 总方案	
7. 详细设计和编制使用说明, 产品文档	开发制造文件和使用文件, 确定产品文件

另外, 随着经济全球化以及计算机网络的发展, 美国和日本的设计方法学也有长足的进步。美国的设计方法发展是伴随着计算机技术的发展而产生的, 因此大多从计算机实现角度考虑设计<sup>[18]</sup>, 如并行工程与公理设计。日本的设计方法学发展受美国自动化和 CAD 技术影响较深, 但其追求高效的生产和设计理念衍生出如 Shigeru Mizuno 和 Yoji Akao 的质量功能配置 (Quality Function Deployment, QFD), Yoshikawa 提出的通用设计理论 (General Design Theory, GDT) 以及 Genichi Taguchi 提出的田口方法 (Taguchi Methods) 等理论, 力求将质量与效率的提高延伸到设计中<sup>[19][20][21][22]</sup>。

瑞典模块化管理 (MM) 公司提出了一种比较系统实用的模块化设计方法, 曾在海尔集团进行推广应用。

### 1.1.3 国内机电产品模块化设计的发展概况

#### 1. 国内机电产品模块化设计的总体发展概况

早在公元 1041—1048 年, 我国北宋时代的毕昇就发明了活字印刷术, 在雕版印刷中运用了模块化基本方法和原则<sup>[1]</sup>。

1958 年, 哈尔滨工业大学研究车、钻、镗、铣、刨、磨机床的共性和个性, 设计了积木化机床, 并且取得了成效<sup>[23]</sup>。

20 世纪 70 年代末至 80 年代初, 我国一些制造企业陆续开始研究和逐步应用模块化设计原理, 进行新产品开发或系列设计, 取得了一定的成果。例如: 原北京第一机床厂利用模块化原理进行龙门铣床的设计, 几年中为客户生产了模块化的标准型、变型、专门化中段龙门铣床 20 多种; 原杭州汽轮机厂通过引进德国西门子 (Siemens) 公司的技术在三系列模块化工业汽轮机的开发中取得了显著效益。

1983 年, 我国引进斯太尔 91 系列车型, 同时引入了欧洲的模块化思想和方法。原四川汽车制造厂于 1990 年确立了以模块化为核心的系列化开发机制, 获益颇丰<sup>[23]</sup>。

原上海仪表机床厂和上海市机床研究所对仪表车床进行模块化设计, 通过合理规划和组织, 在较短时间内完成 13 个品种的设计和制造。

中国国内的部分电子产品和半导体生产商也开始或已经引进了模块化的生产模式。

原机械电子工业部在 1989—1991 年共计把 86 项模块化设计项目列入了《机械电子工业第一批产品现代设计计划表》中。这些模块化设计项目涉及机床、加工中心、磨具、照相机、泵、电表、电机等。为了解决模块的制造和生产管理方法问题, 在此期间分别发布了多

项指导性技术文件，为模块化设计与生产管理提供了帮助。

原国防科工委曾为了缩短武器装备研制周期，提高其质量、可靠性和综合保障能力，把开展模块化技术的研究与应用作为发展国防科技和武器装备的一项基本政策，在20世纪90年代投入巨资，全面开展军事装备模块化的研究、设计、试制工作。

我国早在20世纪60年代初，就在纺织机械、飞机、机床等机械制造业中推广应用成组技术，并取得了较好的效果。成组技术研究和推广应用的高潮始于20世纪80年代初，“六五”期间成组技术被列为行业试点项目，“七五”期间被作为技术攻关子项目，“八五”期间被列为重点推广应用项目。中国机械工程学会成组技术专业委员会为模块化设计技术做出了很大贡献，在成组编码、成组设计、成组工艺、成组夹具、成组管理等方面的理论和实践都取得了不少成果。

李春田先生对模块化进行了系统的研究，认为模块化研究是现代标准化前沿<sup>[1]</sup>。

## 2. 国内机电产品模块化设计发展中存在的问题

但是对于我国多数生产企业来说，模块化的应用还只停留在初级阶段。由于传统的原因，企业“大而全”、“小而全”的现象严重，企业组织结构不合理，协同水平低，处于分散经营的状况，造成了地区间、行业间、企业间的生产能力重复配置，也使大中小企业各自的优势得不到发挥，资源不能有效利用，失去了分工效益和规模效益，导致技术进步慢，工业整体效益差，竞争力不强<sup>[24]</sup>。例如，我国机电工业外购零部件占机电工业总产值的比重仅为45%，而美国这一比重高达80%。又如，我国机床行业从业人数几乎是世界各工业发达国家机床行业从业人数的总和，而销售额低于后者的二十分之一。我国高档机床大部分依赖国外进口，其中原因之一是我国机床行业的“中场产业”，即零部件产业不发达，品种少，产业化程度低，不能满足市场要求，不得不依赖进口。

## 3. 国内模块化技术成为热门研究方向

图1-4为中国知网中主题为“模块化”的文献篇数按年份排序。可以看到10多年来，模块化的文献增加速度很快。这表明模块化已经成为人们的研究热点。2013年7月28日，在百度中输入关键词“模块化”，搜索到3千3百万个网页。

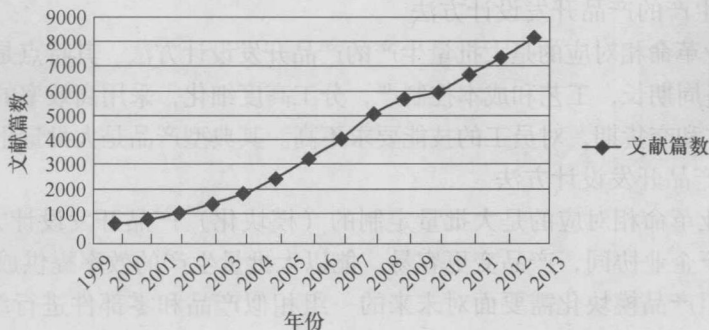


图1-4 中国知网中主题为“模块化”的文献篇数按年份排序

模块化技术应用成为新的热门方向的原因主要是：

1) 满足客户个性化和多元化的需要。随着人们生活水平的提高，对产品和服务的个性化和多元化需要越来越迫切。模块化技术可以在满足客户个性化和多元化需要的同时，降低

产品成本和缩短产品生产周期。

2) 降低成本的需要。随着我国经济的发展,员工工资的增加,按照世界银行的标准,2010年我国人均国内生产总值达到4400美元,已经进入中等收入偏上国家的行列。我国的传统制造企业面临低收入国家的越来越激烈的竞争,越南等东南亚国家代工产业的兴起,使得我国劳动密集型产业的比较优势不再明显。但是,我国人口众多,需要保持较高的就业率,劳动密集型产业不可放弃。因此,需要通过利用模块化技术,降低产品制造成本。

3) 产品和制造绿色化的需要。绿色化是我国可持续发展的关键瓶颈。目前我国制造业的环境污染和资源消耗现象很严重,这种发展模式是不可持续的。模块化技术可以提高生产效率,显著降低资源消耗,对减少环境污染也有一定作用。

4) 信息技术应用的需要。人类已经进入了信息时代。信息化技术为企业开展产品模块化带来了很大便捷,特别是对于促进企业间的模块化具有重要作用。信息技术还促进了模块化技术的应用深度和广度。因为模块化涉及大量产品的集成优化以及面向产品全生命周期的优化,没有信息技术的支持,难以实现这些优化。

## 1.2 基本概念和定义

### 1.2.1 产品开发和设计的概念和定义

#### 1. 三次工业革命中的三种产品开发设计方法

相对于三次工业革命,产品开发设计方法也有三种:

##### (1) 单件产品开发设计方法

与第一次工业革命相对应的是单件产品开发设计方法。这是一种“单打一”的开发设计方法,亦被称为“依赖型设计”<sup>[1]</sup>或“整体式设计”。其特点是:设计效率低,依靠员工的技能保证产品质量,制造成本高,零部件之间的互换性差,当然个性化程度高。其典型产品是单件生产的汽车。

##### (2) 大批量生产的产品开发设计方法

与第二次工业革命相对应的是大批量生产的产品开发设计方法。其特点是:产品开发设计周期长,生产准备周期长,工艺和成本控制严,分工高度细化,采用高效率的生产线和工装保证产品质量、成本和交货期,对员工的技能要求不高。其典型产品是大批量生产的汽车。

##### (3) 模块化产品开发设计方法

与第三次工业革命相对应的是大批量定制的(模块化)产品开发设计方法。其特点是:产品模块化,便于企业协同,产品变更容易,能以大批量生产的效率提供成本低、交货期短的个性化产品。但产品模块化需要面对未来的一组相似产品和零部件进行统一规划和设计,往往有较大难度。

在前两种产品开发设计方法中,产品开发与产品设计是一体的。而模块化产品开发设计方法则包括产品开发和产品按订单设计两个阶段,其关系如图1-5所示。

#### 2. 模块化产品开发

产品开发是指创造性研制新产品,或者改良原有产品。模块化产品开发过程主要包括:需求分析(市场分析、确定需求)、创造性设计(确定功能原理及其结构)和产品模块化



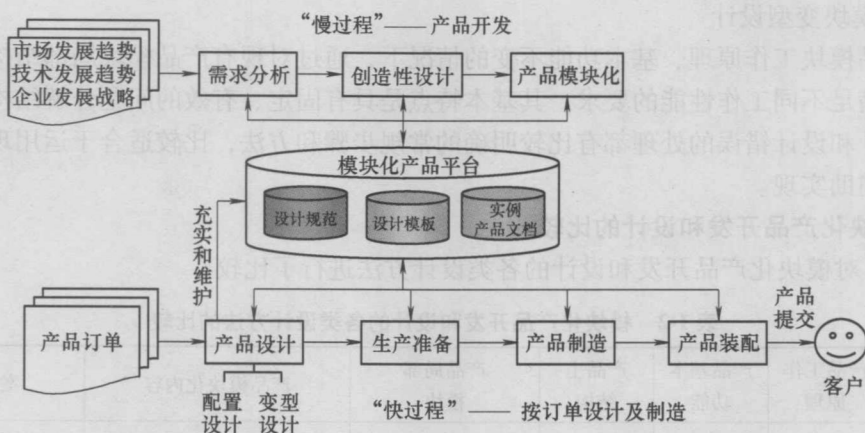


图 1-5 产品开发和产品按订单设计两个阶段的关系

(开发模块化产品平台)三个部分,如图 1-5 所示。这是一个“慢过程”,需要较长的时间。例:模块化工业汽轮机产品平台的开发。

其中的创造性设计又可分为:

1) 原始创新设计:即创新出一种全新的技术和产品。其基本特点是设计目标的描述是不完全和不确定的,而且没有现成有效的问题分解模式和对子问题的设计规划。整个设计过程是发散的,无常规可循,一般来说取决于设计者的创造性思维<sup>[25]</sup>。

在原始创新设计中需要尽可能利用现有的成熟模块,以提高创新速度,节约成本。

2) 集成创新设计:即将现有的不同的技术进行组合,得到新的产品和技术。如果现有的产品模块化程度较高,那么集成创新就会变得容易。

3) 适应性设计:又称跟随创新设计。适应性设计是在保持产品原理、方案基本不变的前提下,在原有产品的基础上,对产品的某些局部功能和结构进行修改,以适应某种新要求。从整体上看,适应性设计的目标是确定的,并存在较为固定的问题分解模式,但对于产品的某些子模块来说,其实现的技术手段往往具有较大的变化,需要进行创造性设计。徐燕申等人将适应性设计应用于机床模块化设计中,提出了适应性模块、适应性产品平台、适应性接口等概念<sup>[26]</sup>。

产品模块化过程一般可以包括:产品系列化和模块化规划;模块划分,接口定义;建立产品编码体系和名称字典;通用模块设计;模块化产品平台总体构建等。具体内容将在第 2 章展开介绍。

### 3. 模块化产品设计(又称按订单设计)

产品设计是指从分析产品订单、确定产品设计任务书起到确定产品结构为止的一系列技术工作的准备和管理。模块化产品设计可分为产品配置设计、模块变型设计等。这是一个“快过程”,要求快速满足客户的需求。例:工业汽轮机的按订单设计等。

模块化产品设计包括:

#### (1) 产品配置设计

在产品工作原理、基本功能、模块结构不变的情况下,对现有模块进行组合,得到满足客户需求的个性化产品。