

面向大规模定制的 堆垛机快速设计与 动态分析

赵利平 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书针对大规模定制的批量生产方法应用于堆垛机的产品设计与开发,阐述了快速设计与动态分析平台的框架体系的建立及过程。其具体包括:绪论、基于参数化的模块化设计理论研究、基于三维参数化的变型设计研究、基于参数化的动态分析研究、堆垛机快速设计平台开发技术研究,以及结论、创新点与展望。

本书适于机械产品设计研发人员,以及大专院校相关专业高年级学生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

面向大规模定制的堆垛机快速设计与动态分析/
赵利平著. —北京:机械工业出版社, 2010.8

ISBN 978-7-111-31618-3

I. ①面… II. ①赵… III. ①堆垛机—设计 IV. ①
TH246.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 161129 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:沈红 责任编辑:沈红 版式设计:霍永明
责任校对:李秋荣

2010 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

140mm×203mm·6.25 印张·165 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-31618-3

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

大规模定制 (Mass Customization, MC) 是基于产品族零部件和产品结构的相似性、通用性, 利用标准化、模块化等技术建立的一种批量生产方法。目的是缩短新产品开发周期, 快速为顾客提供低成本、高质量的定制产品。大规模定制已成为 21 世纪制造业的主流生产模式。

本书在 MC 思想的指导下, 以实现产品快速设计为目标, 基于参数化原理, 研究了参数化模块化设计、参数化变型设计、动态分析等新方法; 并结合堆垛机产品研究了面向大规模定制的快速设计技术构成体系, 初步建立了堆垛机快速设计与动态分析平台, 并应用到堆垛机的设计与开发中, 具体研究内容如下:

1) 论述了大规模定制的技术体系。包括: 大规模定制的基本原理 (包括相似性、重用性和全局性原理), 面向大规模定制的开发设计技术, 面向大规模定制的管理技术; 面向大规模定制的制造技术; 面向大规模定制的支撑技术。重点研究了大规模定制环境下的产品开发过程, 综述了模块化设计和三维参数化变型设计的研究现状, 找出了当前面向大规模定制的现代机械产品设计中存在的问题; 进而提出了一套完整的面向大规模定制的模块化和参数化变型设计有机结合的方法体系, 并以堆垛机为研究对象, 提出了该产品设计开发中存在的问题, 以及阐述了面向大规模定制的堆垛机快速设计与动态分析平台的研究内容和研究意义。

2) 论述了机械产品模块化的相关概念。在研究传统模块的横系列、纵系列、跨系列及全系列的基础上, 提炼了机械产品模块的设计类型, 扩展了模块化产品族的设计模式, 提出了基于产品族产品系列的模块化产品规划方法和三维参数化变型柔性模块

的创建技术流程；选取某型号双立柱式巷道堆垛机作为实施对象，按照堆垛机功能结构，根据企业实际需求，采用分级模块的思想，确定了各模块的性能参数，基本结构布局，几何尺寸系列，各模块之间的结合形式；在分析主模型的基础上，对之进行系列参数扩展，以满足产品系列型号中全部产品组装的需求。

3) 基于产品主模型与零件主文档原理，提出了机械产品三维参数化变型设计流程，分析了特征级、零件级、部件级、产品级的四级变型设计的实现方法；通过对装配布局草图、事物特性表、机械产品的三维全息模型等关键变型设计技术的研究与应用，解决了设计计算与三维模型数据接口的集成，产品装配失效问题，实现了堆垛机产品级的三维变型设计，验证了面向大规模定制模块化参数化变型设计有机结合的设计技术体系。

4) 针对大规模定制对快速设计的要求，基于实验模态和有限元分析理论，研究了基于变型设计参数化有限元分析流程，在参数化模型的基础上确定了巷道堆垛机上横梁、下横梁、货叉、立柱的几何结构尺寸参数和工程载荷、约束参数，建立了应用于有限元分析的简化模型，进行结构强度、动态特性、动力性能、刚度、疲劳寿命等有限元分析，及时了解所开发的新产品的性能，并将分析数据反馈给设计计算部分，初步形成闭环产品快速开发系统。解决了设计模型与分析模型快速集成，改进了产品开发流程，为堆垛机的提速、降噪、运行安全方面提供了理论及数据参考。通过对可参数驱动的真实产品进行了实验模态分析，修正有限元模型，实现产品可靠的动态设计。

5) 针对大规模定制技术对设计平台的要求，构造了面向大规模定制的堆垛机快速设计平台的框架体系。重点研究了设计平台的组织结构和开发方法，主要从二次开发方式、API函数的应用结构层次、机械产品变型设计的知识表达模式、数据库支撑模块、设计计算模块、参数化变型设计驱动程序实现、变型设计实例的记录、定制菜单等方面论述了堆垛机快速设计平台的开发与实现。围绕企业需求，提炼了堆垛机设计知识，基于 SolidWorks

设计平台，开发了堆垛机产品专用参数化变型设计系统，初步将面向大规模定制的产品快速设计平台在堆垛机上实现了应用。创造性地将远程故障诊断接受模块集成在该平台中，在堆垛机实际运行工作地点与环境远程采集到的故障诊断数据，直接为堆垛机的整体结构设计和相关模块参数设计提供指导。

本书提出了三维参数化变型柔性模块的创建方法与过程；通过研究装配草图、设计计算与三维模型数据接口的集成、事物特性表、产品级三维变型设计技术，提出了面向大规模定制的模块化参数化变型设计有机结合的设计技术体系，为实现机械产品的大规模定制，奠定了坚实的设计基础；通过研究特征级、零件级、部件级的三维参数化变型设计方法，首次提出了三维参数化变型柔性模块的创建方法与过程，实现了堆垛机的产品级参数化变型设计，设计效率较传统的设计方法相比提高3倍以上，降低出错返工率5%以上，增强了企业的快速响应市场个性化的能力；基于实验模态和动态设计思想，进行了相应的工作模态和实验模态分析，解决设计模型的在线校核，促使设计模型一次性快速生成，从而提升了产品开发流程的快速性和可靠性，解决了设计模型与分析模型快速集成；首次开发了面向大规模定制的堆垛机产品快速设计与动态分析工具平台，使产品的设计具有拓展延伸功能，设计范围的推广空间更大，可组合性提高。

本书是以笔者的科研项目为基础扩展而成。笔者研究工作是熊诗波教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。在课题研究期间，导师从研究工作选题、实验设计、方案确定、课题研究、报告撰写等方面都给予了极大的支持和关心。

在研究工作期间：得到太原理工大学李文英教授、杨杰明教授在实验设计和具体实验工作上的协助和指导，在具体的测试研究工作中，得到熊晓燕博士、梁义维博士、张继平博士的大力帮助，在研究过程中，始终得到课题组王宗彦教授鼎力配合和全力支持。同时得到协作单位太原刚玉物流工程有限公司董良总经理、王东升总经理、孙卫东高工、宋联营高工、郝隆誉高工的积

极支持。在此向您们表示衷心的感谢。

在研究工作过程中，还得到研究所任芳博士、梁义维博士、王然风博士、马维金博士、杨铁梅博士等的指点和鼓励，在此向各位表示衷心谢意。

赵利平

于太原理工大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 大规模定制 (MC) 时代与设计方式的变革	1
1.2 模块化设计发展现状	8
1.3 参数化变型设计的研究现状	12
1.4 大规模定制发展状况及本书研究的主要内容	23
第 2 章 基于参数化的模块化设计理论研究	25
2.1 模块化设计的相关概念	25
2.2 模块的结构类型	26
2.3 机械产品模块划分方法	27
2.4 模块的设计类型	30
2.5 模块化产品族的两种设计模式	31
2.6 巷道堆垛机模块划分与三维参数化变型模块的建立	34
2.7 小结	40
第 3 章 基于三维参数化的变型设计研究	41
3.1 变型设计的定义	41
3.2 变型设计的形式	42
3.3 变型设计的层次	42
3.4 产品主模型与零部件主文档	47
3.5 事物特性表及其应用	49
3.6 机械产品三维参数化变型设计流程	50
3.7 机械产品的三维全息模型	52
3.8 小结	53
第 4 章 基于参数化的动态分析研究	55
4.1 参数化有限元分析的技术流程	55
4.2 堆垛机结构强度及货叉挠度分析	56
4.3 门架的模态分析	68

4.4 载货台结构动态分析	78
4.5 堆垛机噪声源分析与控制	86
4.6 振动与噪声测试和机理分析	105
4.7 堆垛机模态分析	113
4.8 堆垛机噪声测试与声源定位分析	137
4.9 小结	149
第5章 堆垛机快速设计平台开发技术研究	151
5.1 面向大规模定制的堆垛机快速设计平台构成	151
5.2 堆垛机快速设计平台的开发	153
5.3 设计案例分析——堆垛机三维参数化变型设计	161
5.4 模块间的接口与组合	179
5.5 平台的实现	181
5.6 小结	182
第6章 结论、创新点与展望	183
6.1 结论	183
6.2 创新点	184
6.3 展望	185
参考文献	186

第1章 绪 论

1.1 大规模定制（MC）时代与设计方式的变革

1. 大规模定制的概念与特征

随着 21 世纪经济发展的全球化，市场竞争日益激烈，产品的设计技术创新和个性化将成为企业争夺市场的主要手段。对产品的需求正向多元化、经济型的方向转变，而市场的国际化及其进一步细分促使买方市场逐渐形成，传统的相对稳定市场正朝动态多变、混沌的方向转变。企业生产经营活动已经从原先以产品为中心和以市场为中心转变为以客户的需求为中心。按照客户的个性化需求提供一对一的产品和服务，成为企业在激烈的竞争中生存和发展的主要手段。在这种情况下，大规模定制（Mass Customization, MC）生产模式得到了迅速的发展，成为 21 世纪制造业的主流生产模式。它具有如下特征：

1) 大规模定制是一种集企业、客户、供应商和环境等于一体，在系统思想指导下，用整体优化的观点，充分利用企业已有的各种资源，在标准化技术、现代设计方法、信息技术与先进制造技术等的支持下，面向客户的个性化需求，以大批量生产的低成本、高质量和高效率提供定制产品和服务的生产方式。

2) 大规模定制将大批量生产和定制生产有机地融合在一起。大规模定制以大批量的效益进行定制产品的生产，而产品却是按照客户的个性化需求定制。大规模定制综合了大批量生产的低成本、高质量、短交货期以及定制生产满足客户个性化、多样化需求的优点，有利于企业在当今市场中的生存和发展。

3) 大规模生产方式的核心思想是通过保持生产系统的稳定性以及对设计与生产系统进行有效控制取得效率，而大规模定制则是力图通过提高设计与生产系统的柔性和快速反应能力实现产

品变型和个性化。

MC 生产模式的目的是以大规模生产模式的效率和成本为客户提供及时满意的个性化商品,能够生产出符合客户共性需求的标准件并根据客户的个性化需求灵活地加以改造与组装,以形成令客户完全满意的产品。不同于以往的大规模生产方式,MC 力图解决生产高效率、低成本和客户需求个性化之间的矛盾,其涵盖了产品的全生命周期过程。MC 实现了用户需求的个性化和大规模生产的有机结合,是比较适合中国国情的一种先进制造技术,也是新世纪中现代设计与制造技术的主流发展方向之一,正在逐步成为信息时代企业的重要生产模式之一。表 1-1 展示了当前不同产品的大规模定制。

表 1-1 不同产品的大规模定制方法^[1]

产品类型	研发	设计	制造	装配	销售	典型案例
汽车	不同公司的零部件通用化	组合设计	大批量预制模块化的零部件	混流型流水线	按功能和结构进行定制	福特汽车发动机的模块化、福特公司汽车的网上定制
家电	从方便定制的角度进行新产品的研发	组合设计	大批量预制模块化的零部件、个别零部件定制	混流型流水线	按结构进行定制	海尔、伊莱克斯的冰箱定制
计算机	模块化、标准化	组合设计	大批量预制模块化的零部件	混流型流水线	按结构进行定制	戴尔计算机公司的网上直销
服装	样片设计、面料图案设计	变型设计、面料图案设计	面料定制、自动化裁剪	混流型流水线、专业化分工	专卖店定制、网上定制	雅戈尔公司的西装定制

(续)

产品类型	研发	设计	制造	装配	销售	典型案例
机床	模块化	变型设计、组合设计	大批量预制模块化的零部件、部分零部件定制	单件装配	按结构进行定制	德国 SHW 全系列化、模块化工具铣床
飞机	区分基本件、可选件和待定件	变型设计	批量预制基本件和可选件, 定制待定件	单件装配	协同设计, 确定设计方案	波音公司 777 飞机开发
船舶	模块化	变型设计、组合设计	基于中间产品导向作业分解原理与相似性原理	分道生产线	协同设计, 确定设计方案	美国海狼级潜艇的模块化设计制造

2. 大规模定制技术的技术体系与技术原理

大规模定制技术的技术体系由五个具有密切联系的部分组成: 大规模定制的基本原理 (包括相似性、重用性和全局性原理)、面向大规模定制的开发设计技术、面向大规模定制的管理技术、面向大规模定制的制造技术、面向大规模定制的支撑技术。大规模定制技术的技术体系如图 1-1 所示^[1]。

其中 CIM 集成 (Computer Intergrated Manufacture) 是计算机集成制造的缩写; BPR (Business Process Reengineering) 是业务流程重组的缩写。

大规模定制的技术原理:

(1) 相似性原理 大规模定制的关键是识别和利用大量不同产品和过程中的相似性。通过充分识别和挖掘存在于产品以及过程中的几何相似性、结构相似性、功能相似性和过程相似性, 利用标准化、模块化、系列化等方法减少产品内部的多样化, 提

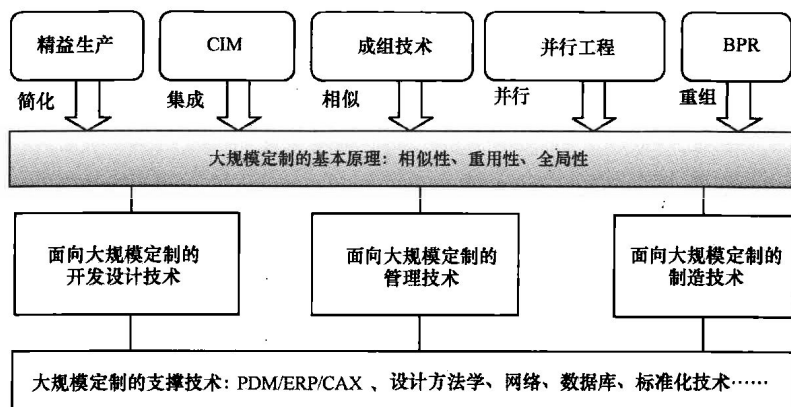


图 1-1 大规模定制技术的技术体系描述

高零部件和生产过程的可重用性。

(2) 重用性原理 相似性原理是重用性原理的前提和基础，在定制产品和服务中存在着大量可重新组合和可重复利用的单元。通过采用标准化、模块化和系列化等方法，充分挖掘和利用这些单元，将定制产品的生产问题通过产品重组和过程重组转化为或部分转化为批量生产问题，从而以较低的成本、较高的质量和较快的速度生产出个性化的产品，支持大规模定制的实现。

(3) 全局性原理 实施大规模定制是一项工作量很大、难度很高的系统工程，不仅与设计技术、制造技术和管理技术有关，还与人们的思维方式和价值观念有关。因此，为了成功实施大规模定制，必须对上述各方面有一个全局性的思考。

3. 大规模定制环境下设计方式的转变

通常情况下，可以将一个产品中的零部件分成新设计零部件、适应性设计零部件、变型设计零部件和标准件四种类型。在产品开发设计中应该尽量减少新设计零部件和适应性设计零部件的数量，加大变型设计零部件和标准件的比例，用尽可能少的零部件种类组合成尽可能多种类的产品，即以尽可能少的产品内部多样化，产生尽可能多的产品外部多样化。大规模定制环境下设计方式的转变如图 1-2 所示。

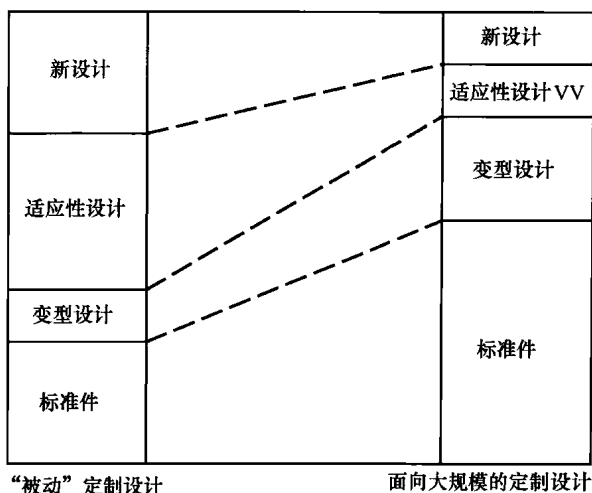


图 1-2 设计方式的转变

新设计零部件是根据客户的需求技术成熟度低，对产品成本、生产周期和产品质量的影响最大。在产品开发设计中应该尽量减少这类零部件的数量。

适应性设计零部件是在原有零部件的基础上作适当处理（如改变已有零部件的形状或拓扑关系等）后得到的零部件。适应性设计技术要求较高，对产品的成本、生产周期和质量的影响也比较大，也应尽量减少这类零部件的数量。

变型设计零部件不改变已有零部件的基本功能、原理和总体结构，仅改变原有零部件的尺寸、局部结构形式和工程约束，以适应新的需求。在科学的建模方法以及 CAD/CAE 技术支持下可以高效地实现变型设计。在产品设计中应该尽量提高这类零部件在产品中的比例。在产品设计中还应该尽可能地使用标准件（企业通用件），这样做既有成本方面的优点，又能保证产品的质量和生产周期。

4. 面向大规模定制的产品开发设计过程

根据产品开发过程的特点，把产品开发过程进一步细分为三个部分，如图 1-3 所示。

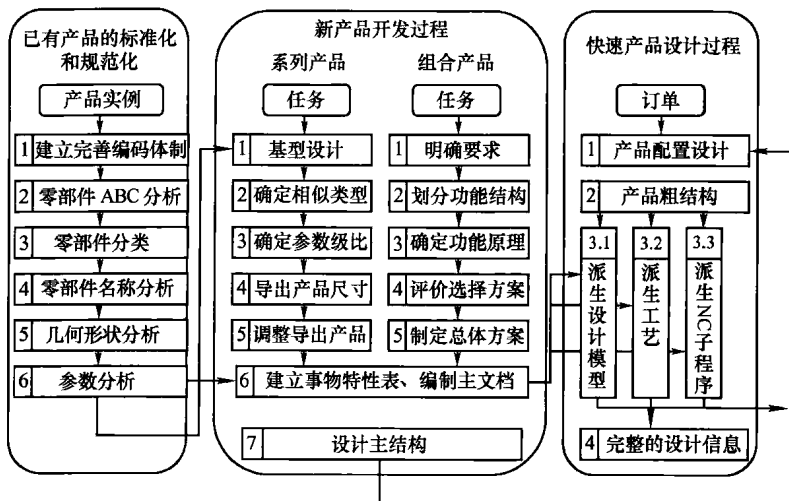


图 1-3 三种产品开发过程

(1) 已有产品的标准化和规范化过程 步骤如下:

1) 建立完善的编码体系。

2) 进行零部件 ABC 分析, 了解零部件的分布情况; 每一个机械产品都是由专用零部件 A、企业自制变型零部件 B、标准件和外购件 C 构成。通常 B、C 类零件将占到组成产品零部件总数的 90%。

3) 进行零部件分类, 为系统地进行零部件管理打好基础。

4) 进行零部件名称分析, 建立数据字典, 规范零部件的命名。

5) 进行零部件几何形状分析, 为有效的变型设计做好准备。

6) 进行零部件参数分析, 增大零部件批量。

7) 建立事物特性表、主文档以及产品的主结构, 为进行快速产品设计打好基础。

(2) 新产品开发过程 按照产品构成的情况, 可以将新产品开发过程分为系列产品开发过程和组合产品开发过程。

1) 系列产品开发过程。所谓系列产品是指那些在某个确定

的应用范围内按照一定的规律划分其参数等级,用相同的方法实现相同功能和相同工作原理的技术对象(整机、部件或零件),这些技术对象应该尽可能用相同的方法进行制造。系列产品具有多种参数和性能指标,以满足不同用户的需要,这些参数和性能指标之间具有一定的公比级差。同时系列产品具有相同的功能、工作原理和尽可能相同的制造方法。

系列产品的设计原理:在基型的基础上,遵循相似性原理计算导出产品的参数和尺寸。系列产品的开发可以归纳为以下步骤:①基型设计;②确定相似类型;③确定参数和尺寸的公比级差;④计算导出产品的参数和尺寸;⑤调整理论计算的结果,确定结构尺寸和参数;⑥编制主文档;⑦设计主结构。

2) 组合产品开发过程。所谓组合产品是指用不同结构模块通过合理的组合而实现不同功能的技术对象(整机、部件或零件)。组合产品是系列产品的进一步细化。实际上,组合产品中的各种结构块也被划分成不同的参数等级,因而其结构块也是一个产品系列。与系列产品最大的区别是,组合产品是为了满足各种不同功能需求而用确定的结构块组合成功能变型产品。

组合产品的开发在很大程度上是一种创造性的过程。组合产品的开发大致可以分为以下步骤:①明确要求;②划分功能结构;③确定分功能作用原理;④评价和选择方案;⑤制定总体技术方案;⑥编制主文档;⑦设计主结构。

(3) 快速产品设计过程 快速产品设计过程是在主文档和主结构的基础上,根据订单需求进行配置设计,形成完整的产品定义、生产过程描述和生产过程控制等信息的过程。

图 1-3 描述了快速产品设计过程。从图中可以看出,快速产品设计的基础是建立完整的主文档和产品主结构。在产品主结构的基础上,通过产品配置设计形成了产品的粗结构,其描述了配置产品实例的基本结构。然后在产品主文档的支持下,快速派生出产品零部件的各种技术文档,如模型和工程图、工艺过程规划、NC 子程序、安装说明等。

模块化设计与参数化变型设计技术始终贯穿于产品的开发过程中,模块化与参数化设计技术在分析产品结构体系基础上完成产品系列、模块系列的规划和构建^[2],并根据用户的要求选择模块修改其参数快速拼装成模块化产品。通过上述分析可以发现确定基型产品,建立产品的主结构是实现产品快速设计的关键。

1.2 模块化设计发展现状

1. 产品的模块化设计

模块化设计是在对一定范围内的不同功能或相同功能不同性能、不同规格的产品进行功能分析的基础上,划分并设计出一系列功能模块,再通过模块的选择和组合就可以构成不同的产品,以满足市场的不同需求。它是特征尺寸模块化、参数系列化、结构典型化、零部件通用化、组装积木化的综合体,是标准化的高级阶段。模块化设计是以功能分析为基础,通过功能相同而性能用途不同的各模块的互联组合而实现各种基型产品和变型产品设计的,这是变型设计的基础。

模块化设计包括模块的创建和模块的综合两个过程。模块创建包括功能模块的划分过程和功能模块的结构设计过程;模块综合则是根据具体设计要求,并进行功能分解,从模块集中选择合适的模块实现分解功能,最终将分功能模块组合形成产品。

广义模块化设计是传统模块化概念的延伸,它具有模块化设计的所有基本特点。由于在模块系统分析创建的过程中,它将工程设计参数作为模块划分、组合的主要依据之一,因此它能够满足有结构优化要求的产品模块化设计的需要^[3]。广义模块化设计目的是使产品设计、制造能够快速响应市场,根据所提出的设计参数,选择或设计出最优的模块结构,并由此组成最优的产品结构。

(1) 国外 模块化思想本身来源比较早。早在1900年,德国一家家具公司就用模块化原理设计出一款所谓的“理想书架”,该设计将书架划分为底座、架体和顶板三种模块,其中架体具有

几种不同的尺寸，用户可根据需要选择不同的架体组成合乎自己要求的“理想书架”。这是现在知道的最早按照模块化原理设计的产品之一。此后，模块化这种设计思想和理论还得到各行业专家学者进一步的研究和应用，进行了概括和总结，并正在逐步形成“模块化设计理论”。

1920 年左右，在欧洲，尤其是德国，模块化原理开始应用于机械产品的设计中。德国的氟里茨·韦尔纳（Fritz-Wenxe）公司设计的铣床，就是把铣床上的一些部件按功能划分成模块而进行设计和制造的，可以很方便地组装成符合客户需求的产品。

到 20 世纪 50 年代，经过大量的摸索和实践，欧美专家正式地、系统地把模块化设计作为一种先进的设计方法提出来。这种设计方法由此开始逐渐得到重视，随着各行业专家学者的研究，其理论和应用技术得到不断的发展和完善，模块化设计已成为各类机械产品研发中普遍采用的一种设计方法。比如：德尔福系统公司就相继推出了座舱、接口盘制动、车门、前端、集成空气/燃油等模块。汽车厂商方面则以全球范围作为空间，进行汽车模块设计的选择和匹配，优化汽车设计方案，将汽车装配生产线上的部分装配劳动转移到装配生产线以外的地方去进行。

模块化设计首先是针对机床产品设计所提出来的，因此模块化机床产品在工业发达国家已经十分普遍，诸如模块化车床、铣床、钻床、镗床和磨床等。除此之外，模块化设计思想也被应用到其他领域。

20 世纪 70 年代，瑞典的 Linden 公司首先将模块化设计的方法应用到塔机产品的开发过程中，用有限的模块有机组合成适用于各种具体施工需要的塔式起重机。他们采用 61 个标准模块和一些非模块零部件配件，经过选择，理论上可组成 4 万多种不同性能的上回转塔式起重机，它们的起重力矩从 10tm 到 800 tm，臂头吊重从 1t 到 70t，幅度最长达 10m，固定式高度最高达 145m。

此外，在 2005 年，西门子公司还采用模块化设计思想推出