

# 产品族通用性决策、评价及其应用研究

赖荣燊<sup>1</sup> 侯亮<sup>1</sup> 吴永明<sup>1,2</sup> 王浩伦<sup>3</sup>

(1.厦门大学 物理与机电工程学院 福建 厦门 361005 2.贵州大学 现代制造技术教育部重点实验室 贵州 贵阳 550003 ;  
3.华东交通大学 机电工程学院 江西 南昌 330013)

**摘要** :作为产品族规划或再设计的关键环节,通用性决策有效缓解产品系列繁殖的负面效应,成为企业资源整合的重要手段。通过研究产品族通用性相关文献,回顾了产品族通用性的基本概念并分析了通用性决策在产品族设计中的关键作用。基于通用性决策过程,着重从零部件层次、正反两个方面论述了通用性对产品族全生命周期各阶段成本的影响,总结了基于产品族体系结构的通用性评价指标和面向参数化产品族的通用性评价指标,分析了通用性与产品性能、通用性与市场绩效之间的权衡模型及其应用,最后讨论了目前研究中的不足之处并指出了产品族通用性的未来研究方向。

**关键词** :产品族 ;通用性 ;成本效应 ;评价指标 ;权衡模型

中图分类号 :TH16 ;F273.1 文献标识码 :A 文章编号 :1001-3997(2016)04-0005-04

## Research on Commonality Decision , Evaluation and its Application for Product Family

LAI Rong-shen<sup>1</sup> , HOU Liang<sup>1</sup> , WU Yong-ming<sup>1,2</sup> , WANG Hao-lun<sup>3</sup>

(1.Department of Mechanical and Electrical Engineering , Xiamen University , Fujian Xiamen 361005 , China 2.China Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology , Ministry of Education , Guizhou University , Guizhou Guiyang 550003 , China 3.School of Mechanical & Electrical Engineering , East China Jiaotong University , Jiangxi Nanchang 330013 , China)

**Abstract** As a key link in product family/platform planning or redesign , commonality decision effectively alleviates the negative effects of product line propagation , leading to an important measure in enterprise resources integration. Via analysis of pertinent literatures on product family commonality , basic concepts were reviewed and the pivotal role of commonality decision in product family design was demonstrated firstly. Then , based on the process of commonality decision , impacts of commonality on costs at each stage of the whole lifecycle were discussed from component level and both positive and negative aspects , evaluation indexes both based on the product family architecture and for parametric product family were summarized , tradeoff models between commonality and product performance and between commonality and market performance were examined in detail. Finally , deficiencies in recent researches were pointed out and future research directions were discussed.

**Key Words** Product Family ; Commonality ; Cost Effect ; Evaluation Index ; Tradeoff Model

## 1 引言

为实现以大批量生产的高效率、高质量、低成本和短交货期向客户提供多样化和个性化的定制产品,越来越多企业实施基于平台的产品族开发策略<sup>[1]</sup>。其中,产品平台规划是产品族设计成功与否的关键。从本质上看,产品族/产品平台规划或再设计是一个多目标权衡和优化问题,其核心为通用性决策,即通用性和多样性之间的权衡。通用性太高使得产品缺乏个性、派生产品性能非最优化等,通用性过低则导致设计开发成本与制造成本太高。通用性决策作为企业产品平台开发和运营管理的关键环节,受到包括市场需求、产品特性、企业生产能力、全生命周期成本和政策法规等因素的影响。科技发展和竞争加剧导致产品种类剧增、企业

内/间协作增强,作为产品多样化管理和企业资源整合的有效手段,通用性研究重要性日益凸显并将面临新的课题和挑战。通过文献研究,回顾了通用性相关概念并分析了其内在联系;基于通用性决策过程,论述了通用性的全生命周期成本效应,总结了通用性评价指标并分析了通用性与性能、通用性与市场绩效的权衡模型与应用,最后提出了通用性的热点研究方向。

## 2 通用性决策过程

客户需求个性化、多样化导致产品及其零部件种类剧增、企业管理难度增大和制造成本提高。基于产品平台的产品族设计开发方法通过在不同产品变型间共享零部件或工艺过程等能够有效缓解这一困境,在满足客户需求的同时降低产品成本和过程复杂程度。

来稿日期 2015-08-20

基金项目 国家自然科学基金资助项目(71172055) 科技部创新方法工作专项(2011HM020400) 厦门市科技计划项目(3502Z20125017)

作者简介 赖荣燊(1983-)男 福建长汀人 博士研究生 主要研究方向 大规模定制设计、产品族规划;

侯亮(1974-)男 河南许昌人 博士研究生 博士生导师 教授 主要研究方向 CAX 现代设计理论和方法

产品族是指基于产品平台衍生的、响应特定细分市场客户个性化需求的、具有特定特征或功能的一组相似产品,其中每个成员被称为产品变型,产品平台是所有产品变型的共享元素集合。产品族设计的基本思想是实施“平台战略”,即基于产品平台配置个性化模块或调节扩展变量向市场提供多样化产品以满足客户个性化需求。通用性是产品族的基本特性和产品平台的核心特征,通用性决策,即根据企业发展战略,识别产品研发和生产等领域的通用模块、工艺或参数等,是产品族设计的主要任务和关键环节。

通用性决策并不是一个孤立环节,它影响企业整个价值链,合理决策必须综合考虑多功能领域信息,如采购与库存、工程设计、生产制造、销售与财务管理等。通用性决策过程主要包括以下环节:分析不同通用方案的总成本效应;分析通用性对产品族性能或市场绩效的影响;借助通用性评价指标构建权衡模型并采用优化算法进行求解。目前在论及通用性成本效应时,通常定性假设最大化通用性将使产品族总成本最小化<sup>[2]</sup>。通用性导致零部件或产品种类减少且性能偏离单独设计时的最优性能,影响客户多样化选择以及对高/低端产品变型的价值感知,进而影响产品族总体市场绩效。综上所述,产品族通用性研究总体框架,如图1所示。

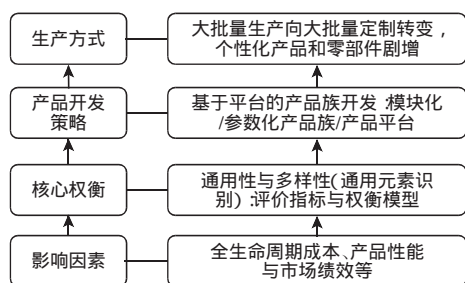


图1 通用性研究总体框架

Fig.1 General Framework of Commonality Research

### 3 通用性成本效应

降低成本是大批量定制生产模式下产品族策略实施的主要目标,因此,成本效应分析成为通用性决策的重要环节,是通用性研究热点。成本仅仅是产品族通用性决策中的一个变量(其它还包括收益和产品性能等),而对通用性的成本效应进行重点分析主要有两个原因:(1)在大部分情况下成本都是主要的决策变量(即使不是最重要的);(2)工程设计文献中通常假设性能或市场绩效损失是在可接受范围之内。鉴于通用性定义的抽象层次和量化分析的可行性,多数研究人员基于物料清单从零部件层次分析通用性对成本的影响,因此本节面向产品族全生命周期着重阐述零部件通用性的成本效应。

#### 3.1 库存成本

库存成本是通用性研究中最先涉及且最为广泛的领域。文献[3]综合通用性模型(两产品/单一通用零件模型、多产品/多通用零件模型、其他模型)和考虑因素(产品数、通用零件数、产品BOM层数、单位产品零件数、规划周期、产品需求分布、成本计量、服务水平指标、通用零件配置策略等)进行了十分详尽的研究总结。

#### 3.2 产品开发成本

产品开发成本受零部件通用性的影响相比库存成本更大,文献<sup>[4]</sup>在构建零部件通用性问题模型时也将产品开发成本作为总

成本函数的主要元素,并确定为零部件通用性的关键驱动因素。产品开发成本包括工程设计成本、草图绘制成本、计算机处理成本和设计管理成本等,零部件通用性避免针对功能相似产品的重复研发工作、减少所需设计和测试的零部件总数而降低上述各部分成本;另一方面,通用零部件需要满足其取代的不同独特零部件所执行的功能,导致通用零部件过度设计、开发成本增加。

#### 3.3 制造成本

零部件通用性对制造成本的影响体现为以下几个方面:首先,零部件通用性可以降低固定生产成本,如特定加工设备、工具和其他固定生产成本投资等;其次,零部件通用性一方面通过生产规模效应降低单位可变成本,另一方面可能导致通用零部件功能过剩,单位可变成本增加<sup>[5]</sup>;最后,零部件通用性减少个性零部件种类,降低制造过程管理费用。

#### 3.4 使用与回收成本

产品使用阶段成本包括设备操作成本、维护成本、故障处理成本和备件持有成本等。零部件通用性从维护时间、维护工资率、必需的维护工具、工人培训、替换零部件成本和可用性等方面降低产品使用阶段的成本。此外,零部件通用性可以降低产品回收过程中主要的构成成本。综上所述,考察通用性对产品族总成本的影响时必须以全生命周期视角构建合理的总成本结构模型,从正反两个方面综合考虑通用性对各个阶段成本的影响。基于通用性的成本效应分析,设计人员可以得到不同通用化方案的成本节约程度。

### 4 通用性评价指标

为了评估产品族在降低成本方面的能力,进一步分析通用性程度与成本节约情况之间的量化关系,构建通用性指标以评估通用性程度十分必要。基于相关文献研究和总结,将通用性评价指标归结为基于产品族模块化体系结构的通用性指标和面向参数化产品族的通用性指标两类。

#### 4.1 基于模块化体系结构

研究人员基于不同的研究目的,面向产品族模块化体系结构的不同抽象层次(产品族、产品平台、模块、零部件、零部件特征等)根据可以获取的信息,如客户需求、产品及其构成模块或零部件的功能结构、几何形状和材料、制造和装配工艺过程、成本等,提出一系列通用性指标,如文献<sup>[6]</sup>在指标比较分析基础上,综合考虑产品族中每种产品的所有零部件的形状和尺寸、材料、制造和装配工艺、成本和容许的多样性等提出CMC,基于产品族复杂网络或类物料清单表达方式,文献<sup>[7]</sup>将同一种类零部件归为一个模块(零部件模块),通过构建零部件模块网络并计算分析对零部件模块通用性有重要影响的五个参数,即零部件模块的出度、入度、介数、使用次数和使用产品数,提出基于网络模型的零部件模块通用性指标GPCI等等。

#### 4.2 面向参数化产品族

针对参数化产品族通用性程度测量,文献<sup>[8]</sup>提出产品族罚函数PPPF用于识别参数化产品族中的通用参数和扩展参数,该指标将设计参数取值视为连续数据,通过设计参数取值向量之间的“距离”评价产品族通用性。此外,部分学者将设计参数取值视为离散数据,基于参数不相同取值的数目统计构建通用性指标,如Huang等<sup>[9]</sup>提出的CD。

### 5 通用性权衡模型及应用

通用性应用大都建立在这样一种潜在假设基础之上,即最大化零部件、模块或平台通用性将使设计、生产及管理成本最小化。另一方面,学者们也探讨了通用性的不足之处,如零部件过度设计、产品性能偏离和同类产品的市场争夺等。因此,通用性与多样性之间的权衡必须综合考虑通用性对产品全生命周期成本、产品性能和市场绩效等因素的影响。描述了通用性与多样性之间的权衡模型,成本和市场绩效均随着通用性程度提高而呈下降趋势,企业根据其目标制定通用性决策,如图2所示。

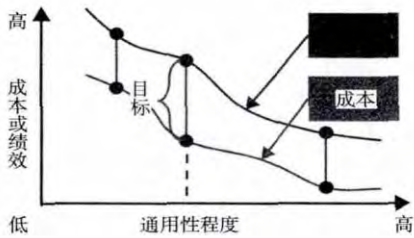


图2 通用性与多样性之间的权衡  
Fig.2 Tradeoff between Commonality and Diversity

#### 5.1 权衡模型

国内外学者基于不同的考虑因素和优化目标,提出了多种权衡模型和优化算法以寻求最优的通用性决策,大体上可以归纳为两类:通用性与性能之间的权衡,通用性与市场绩效之间的权衡。

##### 5.1.1 通用性与性能—多目标优化

通用性与性能之间的权衡主要应用于参数化产品族设计过程中,一般过程为:基于参数化产品族表达方式构建通用性指标,通过基于平台衍生的产品变型与独立优化的产品变型之间的比较得到总体性能损失指数,综合其他约束条件构建以通用性最大化及总体性能损失最小化的多目标约束优化模型并采用不同算法进行求解。如文献[10]针对平台通用性与实例产品性能的平衡问题,基于多平台产品族设计空间的二维染色体表达方式,提出了混合协同进化的产品族优化设计方法,使用第二代非支配排序遗传算法和粒子群优化算法以并行方式搜索每个通用性等级下满足约束的产品族优化方案。然而,通用性与性能之间的权衡主要考虑不同通用性水平下实例产品对理想设计目标的满足程度,忽略了平台通用性对产品质量或成本等方面的影响,难以全面评价产品族设计方案的优劣。

##### 5.1.2 通用性与市场绩效—利润最大化

通用性与市场绩效之间的权衡主要应用于企业通用性策略实施的实证研究中,并侧重于零部件通用性研究,其过程主要包括:零部件通用性的成本效应分析,零部件通用性对零部件或产品效用、客户价值认知直至市场绩效的影响分析,以利润最大化为目标构建优化模型。如文献[11]分析了某国际制造企业中电动工具产品族,重点分析产品开发成本和制造成本,综合生产、市场和会计等功能部门的信息并考虑需求的价格弹性,将通用性决策归结为净现值投资决策问题,提出混合整数非线性优化模型,以利润最大化为目标寻求最优的通用性决策。

然而,研究者们仅考虑通用性在产品族实施过程某阶段的

成本效应;此外,市场绩效通过基于客户购买行为的离散选择分析或基于客户偏好的联合分析方法估计各种产品变型的市场需求并结合销售价格计算,突出通用性对市场绩效的影响而忽略企业品牌和营销策略等因素。

#### 5.2 工业应用

通用性策略的工业应用十分广泛并不乏成功的实例,涉及汽车产业、飞机产品、消费电子、电动工具和服务业等。例如,通过在大众、奥迪、西亚特和斯柯达等四种车型中共享底盘、驱动系统和行走装置等,大众汽车每年节省的开发和资产成本达到15亿美元;波音公司在其新一代波音737的4种机型间有98%的机身零部件通用性、95%~100%的地面支援设备通用性和100%的发动机通用性,且新一代737和传统型737之间具有驾驶舱通用性,实现产品的快速开发并降低制造成本和管理费用。

### 6 研究展望

综上所述,研究者围绕产品族通用性开展了广泛研究并得以成功应用。然而,目前研究仍存在一些不足之处,如注重提高通用性所带来的好处,忽略了产品多样性所带来的效益;成本效应分析主要侧重于产品实现过程的某一环节(如采购与库存、设计开发或制造装配等)而没有从全局角度进行研究,通用性评价与权衡大多是静态的,没有考虑日新月异的技术和变幻莫测的市场等对产品族实施过程的影响等。随着网络技术、信息技术和先进设计/制造技术的不断发展以及产品族实施过程动态性研究的不断深入,通用性研究将面临更多新的课题。

#### 6.1 通用性的全局视角

全局视角下的通用性研究主要包含以下两层含义:(1)面向产品族全生命周期对产品族通用性进行分析;(2)分析产品族通用性对大批量定制生产总体目标(低成本、高质量和短交货期)的影响。

目前,通用性权衡主要面向设计阶段和制造阶段,而很少涉及零部件采购、产品销售和使用/回收等阶段,通用性权衡主要在成本与客户性能需求之间或在成本与市场绩效之间进行,而很少考虑通用性对交货期的影响以及通用性对产品族生命周期各阶段产品质量的影响。此外,权衡目标为企业短期利润最大化为主,而很少从企业可持续发展角度出发设定更为合理的目标,如提高客户满意度、优化供应链等。因此,进行通用性分析和构建通用性权衡模型时必须从全局视角考虑产品族通用性对产品族全生命周期(分阶段)成本、质量和交货期的综合影响,如图3所示。

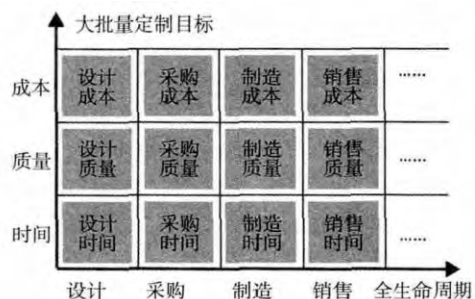


图3 通用性全局视角  
Fig.3 Global Perspective of Commonality

## 6.2 通用性和网络化设计/制造

在全球化市场竞争中,客户对个性化产品的上市时间、质量、成本和服务等方面(简称TQCS,衡量企业竞争能力的重要指标)的要求不断提高,这对企业产品开发和产品族策略实施提出了严峻挑战。作为有效的应对方法,网络化设计/制造基于Internet/Intranet/Extranet技术实现企业之间、企业与客户之间以及企业内部不同部门之间的信息共享、协同设计、并行设计和定制设计等,实现分散制造资源的有效利用和共享,快速响应客户需求,成为广大制造企业关注的焦点。网络化设计/制造环节中的通用性决策研究主要包括以下几点:首先,企业间设计和制造资源的通用性分析是实现动态联盟内部信息共享的重要一环;其次,网络化设计/制造增强企业设计知识透明度,向大规模定制“增加外部多样性,减少内部多样性”原则提出挑战,增加通用性决策难度;再者,随着制造企业信息化的推广和深化,从供应链或动态联盟角度出发探讨企业内不同部门或企业之间零部件或过程通用性也将是通用性研究的一个重要领域,其中如何构建有效且高效的通用性与多样性权衡模型是一大难题<sup>[12]</sup>。

## 6.3 通用性与产品族动态实施过程

产品族实施过程包括产品族建模优化、基于产品平台的配置设计、变型产品生产和市场营销四个阶段,具有明显的动态性,技术革新、市场需求变化和政策法规调整等都将直接或间接影响产品族实施过程中各个环节的关键决策和应对策略,推动产品平台创新升级、产品族体系结构更新和变型产品再配置等。

产品平台/产品族规划完成后,企业在产品族动态实施过程中依据市场需求变化配置设计和制造变型产品满足客户个性需求,其中,配置设计制约着其后的制造、装配和销售等活动,对实施绩效起着决定性影响。此外,在产品族实施过程中的不同时期,企业内外动/静态因素(如市场需求变化、原材料价格波动、企业组织结构与内部治理机制调整等)影响配置设计过程中通用性决策以及总体绩效。因此,深入分析产品族实施过程中动/静态因素的影响机制,探索产品族通用性与成本、通用性与绩效曲线的变化规律,如图4所示。制定合理通用性决策以实现某一时期内产品族总体利润最大化,将成为产品族实施过程控制的关键所在。

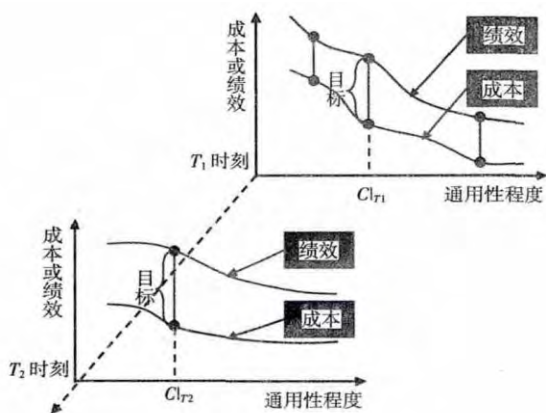


图4 产品族动态实施过程中通用性决策

Fig.4 Commonality Decision-making in Dynamic Implementation Process of Product Family

## 7 总结

通用性是企业缓解产品系列繁殖的负面效应的有效机制,也是企业资源整合的有效手段。通用性的好处以规模效应和风险分担效应体现;也可能对产品性能和市场绩效产生负面影响,因此有必要合理规划通用性以减少产品内部多样化并增加产品外部多样化,实现通用性和多样性之间的平衡。需要指出的是,目前通用性的成本效应分析与其应用过程的假设前提之间存在明显的脱节现象,因此,企业制定通用性决策时必须综合考虑并量化产品族全生命周期成本、性能和收益效应,实现企业总体利润最大化并提升客户满意度。此外,随着产品族动态实施过程研究的不断深入、网络和信息技术的发展和电子商务的崛起以及制造企业信息化的推广,目前通用性研究则略显不足,建议从全局视角并结合网络化设计、产品族动态实施过程扩展产品族通用性研究。综上所述,在研究相关文献基础上,回顾了通用性基本概念,综述了通用性决策过程中所涉及的成本效应、通用性评价指标、权衡模型及其相关应用,最后总结了目前研究中的不足之处并讨论了其未来研究方向。

## 参考文献

- [1] MEYER M, LEHNERD A. The Power of Product Platforms: Building Value and Cost Leadership [M]. New York: The Free Press, 1997.
- [2] FARRELL R S, SIMPSON T W. Improving cost effectiveness in an existing product line using component product platforms [J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(11): 3299-3317.
- [3] WAZED M A, AHMEDS, NUKMAN Y. Commonality in manufacturing resources planning—issues and models: a review [J]. European Journal of Industrial Engineering, 2010, 4(2): 167-188.
- [4] RAMDAS K, SAWHNEY M S A. A cross-functional approach to evaluating multiple line extensions for assembled products [J]. Management Science, 2001, 47(1): 22-36.
- [5] SUBRAMANIAN R, FERGUSON M E, BERIL TOKTAY L. Remanufacturing and the component commonality decision [J]. Production and Operations Management, 2013, 22(1): 36-53.
- [6] THEVENOT H J, SIMPSON T W. A comprehensive metric for evaluating component commonality in a product family [J]. Journal of Engineering Design, 2007, 18(6): 577-598.
- [7] 樊蓓蓓, 祁国宁, 俞涛. 基于网络分析法的模块化产品平台中零部件模块通用性分析 [J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(5): 918-925. (Fan Bei-bei, Qi Guo-ning, Yu Tao. Network analysis method for commonality of parts modules in modular product platform [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(5): 918-925.)
- [8] MESSAC A, MARTINEZ M P, SIMPSON T W. Introduction of a product family penalty function using physical programming [J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 124: 164-172.
- [9] HUANG G Q, LIL, LOTHAR S. Genetic algorithm-based optimisation method for product family design with multi-level commonality [J]. Journal of Engineering Design, 2008, 19(5): 401-416.
- [10] 李中凯, 谭建荣, 冯毅雄. 基于混合协同进化算法的可调节产品族优化设计 [J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(8): 1457-1465. (Li Zhong-kai, Tan Jian-rong, Feng Yi-xiong. Optimal design for scale-based product family based on hybrid co-evolutionary algorithms [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(8): 1457-1465.)
- [11] ANS R, DEGRAEVE Z, SCHEPENS L. Analysis of an industrial component commonality problem [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 186(2): 801-811.
- [12] HELMS M M, AHMADI M, JIH W J K. Technologies in support of mass customization strategy: exploring the linkages between e-commerce and knowledge management [J]. Computers in Industry, 2008, 59(4): 351-363.