

DOI : 10.3901/JME.2012.11.055

# 模块化产品族演进创新方法研究\*

侯亮 王浩伦 穆瑞 黄伟 林文广 赖荣燊

(厦门大学机电工程系 厦门 361005)

**摘要:** 针对当前产品族动态演进机制和系统化创新方法研究的不足, 提出模块化产品族在技术层次上的创新演进方法。通过构建产品族的需求—功能—技术(Requirement-function-technology, R-F-T)映射关系模型, 分析当前模块化产品族的技术状况, 并通过 GM(1,1)模型预测模块化产品族的未来技术重要度情况; 在企业内部数据的支持下, 通过对模块化产品族初始问题的分析, 集成应用创新思维通用理论和传统 TRIZ (OTSM - TRIZ)的问题流网络(Problem flow network, PFN)技术识别并解决产品族中多个冲突问题; 在技术重要度预测和新功能模块—技术关联矩阵(Function module-technical matrix, FMTM) 的基础上, 以平台比率为依据, 通过计算概念化产品族中功能模块的多样性程度, 获得概念化产品族规划方案。对小型轮式装载机产品族进行了实例分析, 并验证了该方法的有效性。

**关键词:** 模块化 产品族演进 创新设计 OTSM-TRIZ 问题流网络

**中图分类号:** TH122

## Research on the Evolution & Innovation for Modular Product Family

HOU Liang WANG Haolun MU Rui HUANG Wei LIN Wenguang LAI Rongshen

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

**Abstract:** Focusing on the shortage of dynamic evolutionary mechanism and systematic innovation methods of current product family, an innovative and evolutionary method at the technical level of modular product family is put forward. The current technical condition of the modular product family is analyzed by constructing requirement-function-technology (R-F-T) mapping model of product family, and the importance of future technology of modular product family is predicted by GM (1,1) model. The multiple conflicts of product family is identified and resolved using PFN technology in the OTSM -TRIZ process, through the analysis of the initial problem of modular product family in support of enterprise data. Moreover, based on prediction of technology importance and the new function module-technical matrix (FMTM), the conceptual planning of product family is obtained by calculating the diversity of function modules of conceptual product family according to platform ratio. An analysis example of product family of small wheel loader show the effectiveness of the method.

**Key words:** Modular Product family evolutionary Innovation design OTSM-TRIZ Problem flow network

## 0 前言

实施大批量定制生产模式成功与否的关键在于面向大批量定制的产品设计技术, 基于平台战略的产品族设计被认为是解决面向大批量定制产品设计的有效解决方法<sup>[1]</sup>。近年来, 多样化、动态化的客户需求和不确定性的竞争环境已经对可持续的产品族形成了挑战, 如何保持产品族持续动态创新、提升产品的创新能力及自身竞争能力已成为企业面临

的难题之一。目前, 对产品族动态演进的研究主要集中于企业产品战略管理等方面<sup>[2]</sup>, 而从工程设计角度产品族创新设计主要体现在针对产品族中多样性需求、通用性、成本、产品性能等之间的冲突通过优化技术进行折中均衡, 但是还没有专门针对世代产品族的复杂技术系统进行创新设计使其演进的方法。为此, 本文提出了模块化产品族在概念设计阶段上的演进创新方法, 对产品族创新设计过程进行了系统化的研究。

## 1 产品族创新

产品族(包括产品平台)设计是近年大规模定制

\* 国家自然科学基金(70772093, 71172055)、科技部创新方法工作专项(2011M020400)、国家科技支撑计划(2011BAF11B00-01)和福建省科技重大(2011H6024)资助项目。20110616 收到初稿, 20111130 收到修改稿

产品设计的主要手段与研究热点,提出了许多方法和策略,文献[3-4]中对此作了归纳和总结。而在产品族创新设计研究方面,有学者主要在参数化产品族设计方法的基础上考虑到动态和不确定因素并提出一些设计理念,如面向产品变异的设计<sup>[5]</sup>、柔性产品族设计<sup>[6]</sup>、产品族可适应性设计<sup>[7]</sup>、可重构产品族设计<sup>[8]</sup>、稳健性产品族设计<sup>[9]</sup>等。其共同点在于通过构建和求解多目标组合优化模型,目的是为获得既能提高产品族通用性又能降低企业生产成本或又能改善产品性能和质量的最优平衡点。优化技术是产品族从一种过时状态演化为能够满足当前需求状态的方法,但由于客户需求的继承性,参数化产品族设计变量的变化(放大或缩小)<sup>[3]</sup>进而在产品族演进过程中添加新的零部件会使产品族结构体系变得庞大,造成产品数据管理困难<sup>[10]</sup>。针对模块化产品族演化, MARTIN 等<sup>[5]</sup>提出了影响产品功能模块发生设计更改的世代变型指标时间维和耦合指标空间维。因而时间维度的产品族设计相对于当前空间维度的产品族设计而言,创新性及多样性是产品族演进过程的主要内容。另外,产品族创新设计的关注点在未来的多样化客户需求,基于预测技术的客户需求分析<sup>[11]</sup>成为产品族创新设计的重要一环,对模块化产品族进行模块操作(模块的删除、更新、替换、添加等)<sup>[12]</sup>,并要求延续上代产品族的最大化通用性和最小化成本。尽管在产品族演进过程中模块操作方法可促进模块化产品族的动态演进,但却往往忽视了产品族技术系统的整体性和复杂性,例如局部模块操作,不一定能使产品族整体技术系统达到最优,或使成本提高,或使制造装配复杂化。

从产品族的功能—行为—结构(Function-behavior-structure, FBS)模型<sup>[13]</sup>角度可看出上述产品族创新设计研究主要集中在结构层上。为了尽可能地提高产品结构的相似性和重用性,降低生产成本,优化折中是最常用的方法。然而,对于产品族在概念设计阶段的创新还少有相关研究出现。从低中高三种创新层次上来看,上述产品族优化设计偏重于结构成本和时效性,其创新程度较低。综合 F-B-S 模型和产品族创新层次,针对模块化产品族创新设计问题确定本文的研究范围是在技术层次上研究模块化产品族创新及概念化产品族规划设计。

## 2 模块化产品族创新过程模型

### 2.1 模块化产品族创新问题描述

假设当前( $t$  时段)模块化产品族  $P_F'$  包含有不同系列个性产品  $P_\alpha'$  对应各个细分市场区间  $S_\alpha'$ , 满足不同个性需求。在产品族技术层面上,产品的技术

分别由通用技术  $T_C'$  和个性技术  $T_V'$  组成,即  $\{T_C', T_V'\} \in P_F'$ ; 其中,通用技术属于产品平台  $P_P'$ , 即  $T_C' \in P_P'$ ; 个性技术属于个性产品,即  $T_V' \in P_\alpha'$ 。不难发现,在未来( $t+1$  时段)的模块化产品族的技术目标  $TS_T^{t+1}$  是当前模块化产品族技术现状  $TS_T^t$  通过技术变化  $T_C$  获得的,而这些技术变化  $T_C$  的本质是模块化产品族中的一系列与技术相关的问题  $\{pb_k\} = P_B$  ( $k=1, 2, \dots, K$ ) 被解决或改善,而这些问题在模块化产品族中以功能模块 FM 相对应的实例结构  $S_F$  为载体形成了一个复杂的问题网络(Networks of problems, NPs)。随着若干问题的解决,作为技术系统的模块化产品族也将发生相应的变化,而这种变化主要体现在模块化产品族三个方面的创新: 模块化产品族中模块个体的创新升级,如模块技术水平提升,像计算机硬盘容量的升级更新; 模块个体之间关系的创新,如模块间接口的改善或模块与模块集成设计; 模块化产品族的整体架构发生变化,如大众汽车底盘模块在产品族中通用程度提高。另外在基于平台的产品族创新设计中,平台的创新能够深刻影响到产品族体系结构的改变,而产品族的创新设计不一定能够使其平台发生改变,因而平台创新是产品族创新设计的核心内容。

因此,模块化产品族在技术层次上的演进创新主要研究内容有三点: 在需求变化情况下,模块化产品族各功能对应的技术重要度变化及通用程度情况分析; 通过分析产品族技术创新问题流网络,选择并通过技术解决产品族中若干冲突问题;

在技术重要度预测基础上,重新构建和分析产品族技术通用程度,在不同平台比率情况下选择最佳概念化的模块化产品族规划设计方案。为此建立了模块化产品族在概念设计阶段的创新演进过程模型,如图 1 所示。该过程主要由创新对象分析、创新实施过程和新概念化产品族规划三个部分组成。

下面将重点介绍各个组成部分。

### 2.2 在技术层次模块化产品族分析

#### 2.2.1 R-F-T 过程模型

为了获得产品族的技术重要度和产品族技术多样性系数,构建了 R-F-T 过程模型,即从市场需求映射到产品族各功能再到各技术上,其间分别通过需求—功能矩阵和功能—技术矩阵。与 QFD 方法相比,在获得产品族各功能重要度的同时还获得相应的产品族功能模块。如图 2 所示,产品族 R-F-T 过程模型。

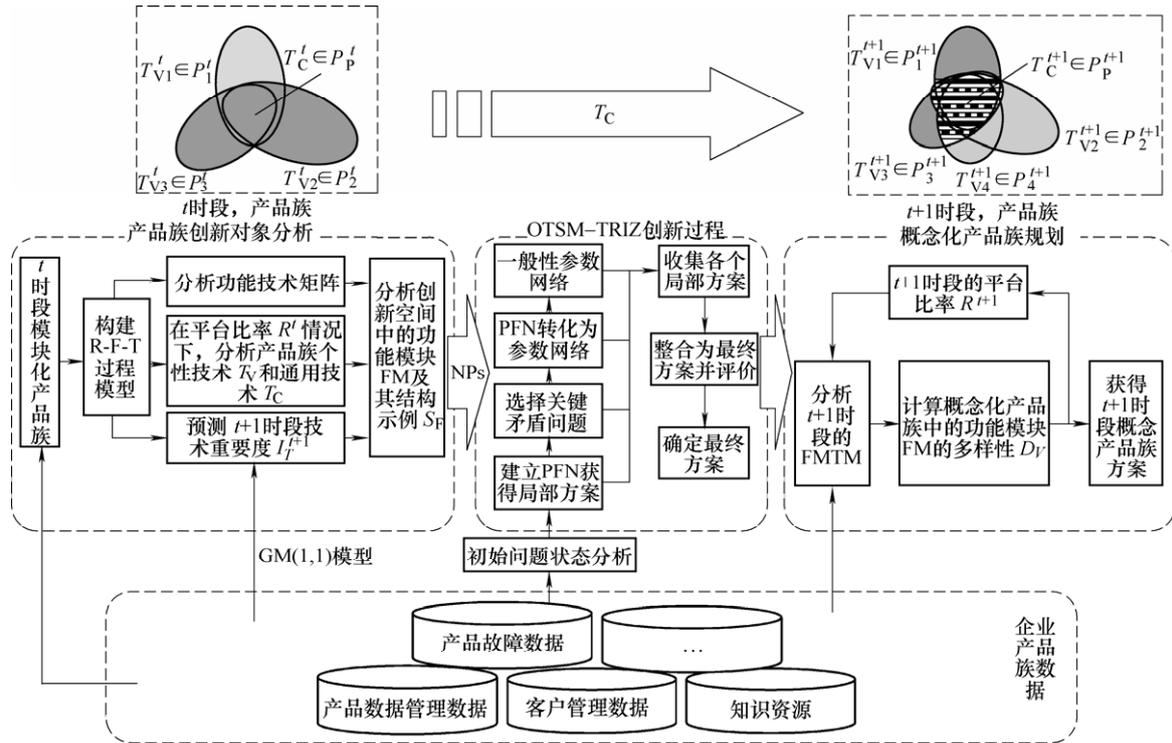


图1 模块化产品族创新设计过程模型

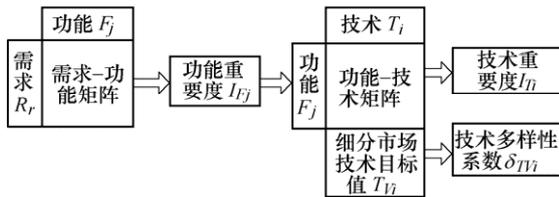


图2 产品族 R-F-T 过程模型

(1) 客户需求分析。客户需求分析是整个 R-F-T 过程的起点，其客观性会影响后续的功能和技术重要度的分析。为此，并采用三角模糊数方法来对客户需求属性的重要性进行评价，客户需求属性的重要性使用 1~9 等级来表示，用  $\tilde{R}_{qr} = [l_{qr}, m_{qr}, u_{qr}] \forall r = 1, 2, \dots, R$  表示客户  $q$  对客户需求  $r$  的低、中、高三个偏好值，通过式(1)、(2)计算客户需求  $r$  的重要度

$$\tilde{I}_{cr} = \left[ \frac{\sum_{q=1}^Q l_{qr}}{\sum_{q=1}^Q \sum_{r=1}^R u_{qr}}, \frac{\sum_{q=1}^Q m_{qr}}{\sum_{q=1}^Q \sum_{r=1}^R m_{qr}}, \frac{\sum_{q=1}^Q u_{qr}}{\sum_{q=1}^Q \sum_{r=1}^R l_{qr}} \right] \quad (1)$$

$$I_{cr} = \rho \tilde{I}_{cr}^L + (1 - \rho) \tilde{I}_{cr}^R \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (2)$$

式中， $Q$  为客户数量。 $\tilde{I}_{cr}$  的左评价值为  $\tilde{I}_{cr}^L = (l_r + m_r) / 2$ ；右评价值  $\tilde{I}_{cr}^R = (m_r + u_r) / 2$ ， $\rho$  为程度分辨系数，一般取  $\rho = 0.5$ 。

而对于不同时段  $t_l (l=1,2,3,4)$  的客户需求，通过对企业不同地区、行业的客户进行需求调查以及产

品销售历史数据分析，经过归纳和整理，同样可以获得不同时段的需求重要度  $I_{cr}^{t_l}$ ，其中， $t_4$  为当前时段，其他为过去历史时段。

(2) 产品族功能与技术重要度分析。在获得各时段客户需求重要度的基础上，构建客户需求—功能关联矩阵(RFM)，其中采用 0、1、3、9 等级表示之间的关联程度，“0”表示需求和功能之间没有关联关系，“9”表示需求和功能之间的关联关系很强。计算功能  $F$  在时段  $t_l (l=1,2,3,4)$  的重要度

$$I_{Fj}^{t_l} = \sum_{r=1}^R I_{cr}^{t_l} \times z_{rj} \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

式中， $I_{cr}^{t_l}$  为相应  $t_l$  时期的客户需求重要度， $z_{ij}$  为 R-F 的关联矩阵值， $n$  为功能数目。

同理，技术重要度计算

$$I_{Ti}^{t_l} = \sum_{j=1}^n I_{Fj}^{t_l} \times z_{ji} \quad i=1,2,\dots,H \quad (4)$$

式中， $z_{ji}$  为 F-T 关联矩阵值， $i$  为技术数目。

在上述 4 个不同时段的技术重要度数据的基础上，采用文献[8]中基于 GM(1,1)模型的技术重要度预测方法来实现下一时段的技术趋势分析。

### 2.2.2 当前(t时段)模块化产品族技术分析

产品族分析主要是为了识别产品族中的各产品通用技术构成的产品平台，即识别产品族中的通

用技术  $T_C$  和个性技术  $T_V$ 。在图 2 产品族 R-F-T 过程模型中,通过功能—技术矩阵以及根据式(4)获得产品族中各技术重要度  $I_{T_j}$ 。同时,在功能—技术矩阵下方的各细分市场技术目标值  $T_{Vi}$  是产品族在不同细分市场上应用的产品平台战略,并由此分析可得到对于概念化产品族的平台技术,例如  $T_V$  的多样性较低,则可以将来作为概念化产品族中的通用技术  $T_C$ 。为了有效衡量产品族中技术的多样性,设定产品族技术多样性指数  $\omega_{TVi}$ ,用来量化描述产品族中技术的多样性程度。根据式(5)可以得到

$$\omega_{TVi} = I_{Ti} \delta_{TVi} \quad (5)$$

式中,  $\delta_{TVi}$  为产品族中第  $i$  个技术的技术多样性系数,由式(6)得到

$$\delta_{TVi} = \frac{\sigma_{TVi}}{\mu_{TVi}} \quad (6)$$

式中,  $\sigma_{TVi}$  和  $\mu_{TVi}$  分别是细分市场技术目标值的标准差和均值。

为了更能体现在产品族中各个技术多样性程度的相对重要性,可由技术多样性相对重要度  $\eta_i$  来确定各自的排序情况,根据式(7)可以得到

$$\eta_i = \frac{\omega_{TVi} - \omega_{TVi}^{\min}}{\omega_{TVi}^{\max} - \omega_{TVi}^{\min}} \quad i = 1, 2, \dots, H \quad (7)$$

对于技术多样性相对重要度较低的技术则有可能是产品族中通用技术  $T_C$ ,并影响技术层次上的产品族中功能模块的通用性程度。因而,产品族中通用技术的多少决定了产品平台在技术层次上的规模大小,为此,设定产品平台比率来表示产品族中通用技术的比率多少。如果产品平台比率为 1,则说明所有产品的个性技术消失,产品族则由同一种产品构成;如果产品平台比率为 0,则说明产品族中的产品中都没有通用技术。当然,产品平台比率具体取值是受到市场需求、市场竞争产品、企业产品战略等因素决定,因而,在  $t$  时段,若取产品平台比率  $R^t = \eta^*$ ,当  $\eta^* \geq \eta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, h$ , 且  $h < H$ , 则  $h$  个技术为该产品族的通用技术,并属于  $t$  时段的产品平台  $P_p^t$ ,  $T_C^t = \{T_{C1}^t, \dots, T_{Ch}^t\} \in P_p^t$ 。其余的为个性技术  $T_{Vi}^t$ ,  $i = h + 1, \dots, H$ 。

在产品族技术重要度预测和当前技术通用性分析的基础上,分析产品族中各技术优势和重要度变化情况,在技术层次上确定产品族的技术创新空间中对应的功能模块 FM 及对应的实例结构  $S_F$ ,在企业产品数据基础上分析其所涉及的相关问题。由于产品族是一个复杂的技术系统,所获得的一系列问题之间存在复杂的关联关系,因而需要进一步应

用有效的创新方法来解决产品族技术创新空间的问题。

### 2.3 基于 OTSM-TRIZ 的创新问题解决模型

#### 2.3.1 创新思维通用理论

随着 TRIZ 理论的演化发展,一方面 ARIZ 算法在复杂性工程类问题中的广泛应用;另一方面,不断提高和完善 ARIZ 算法在实践应用的效率,直到 1985 年形成了较完整和统一的算法理论,如 ARIZ85-C。但研究者发现传统 TRIZ(包括 ARIZ 算法)已经不能满足复杂系统中工程与非工程领域冲突问题的需要,以 ALTSHULLER 为代表的研究者为了提高 TRIZ 解决复杂的多学科交叉问题的能力,提出了将传统 TRIZ 转变成问题解决的一般性方法,即“创新思维通用理论”(General theory of powerful thinking),俄文缩写为 OTSM<sup>[14]</sup>。

问题流网络 PFN 方法在 OTSM 理论中具有重要的地位,通过 PFN 方法可同时表达和分析若干冲突问题。在这一过程中经常集成应用如下 4 个重要技术: 新问题技术,这是 OTSM 所特有的技术,以确保正确定义问题; 典型解决方法技术,被用来测试问题解决的可能性或通过传统 TRIZ 或其他 OSTM 技术获得局部方案; 矛盾技术,包括精简和解决冲突问题的机制,基于 ARIZ 算法能有效获得解决方案或局部方案,能够挖掘特殊子问题深层次的根源; 问题流技术,这也是 OTSM 特有的技术,能够处理出现的子问题流,也能够提供管理 PFN 问题解决过程的机制和规则。因此,集成应用 OTSM 和传统 TRIZ (OTSM-TRIZ)来分析产品族复杂技术系统并确定其中存在的多个冲突问题(如技术矛盾或物理矛盾或其他非工程冲突问题),予以解决。

#### 2.3.2 基于 OTSM-TRIZ 产品族冲突问题解决过程

(1) 构建产品族问题网络。通过对企业产品基础数据的整理和分析,分别列出与产品族当前问题状况相关的各类问题,进而形成产品族初始问题状况分析形成产品族初始问题表,通过使用 OTSM 技术将初始问题表转化成问题网络。该网络是依据于图论思想,其中节点表示各类问题  $P_b$  或局部方案  $P_s$ ,有向连线表示各节点之间的关系,如依赖或影响、包含或属于等。在产品族问题网络构建过程中,有些问题会生成新的子问题以及局部方案,这些子问题可以应用 OTSM-TRIZ 方法来解决。另外,对局部方案好的方面和坏的方面进行分析,可以导致一些先前未出现或某专业领域未知的新问题。当产品族问题网络构建的足够稳定时,从中确定一些关

键问题,进而揭示关键问题背后的一系列冲突矛盾。

(2) 构建产品族矛盾网络。为挖掘产品族中这些关键问题的深层次原因,通过调查 ARIZ 规则和 OTSM 中的矛盾技术将这些关键问题表达成冲突矛盾,进而构建成产品族的矛盾网络,其中包含了产品族机构体系中的元素以及环境要素(这与问题网络中关键问题有关联)。图3中节点是与特殊问题相关的参数和元素(系统或环境要素);连线表示问题中的积极参数或消极参数值。图3为基于 ARIZ\_1.1 的 OTSM 矛盾系统。下一步是寻找矛盾网络中问题状况的资源,以及根据 ARIZ 规则和 OTSM 的矛盾技术将矛盾网络转化为参数网络。

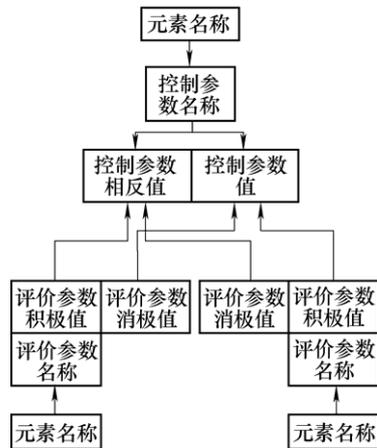


图3 基于 ARIZ\_1.1 的 OTSM 矛盾系统

(3) 产品族中具体问题的参数网络及方案评价。在 OTSM 将物理矛盾称之为“参数矛盾”,如汽车参数“质量”使“减少燃料的消耗”与“行使稳定性”产生了冲突。在 OTSM 中物理矛盾网络被认为是参数网络,对于其中包含的问题可以利用 OTSM-TRIZ 工具箱进行解决。依据产品族中具体问题状况的特殊性可以将矛盾网络转化为一般性和特殊性参数网络。其中一般性参数网络可由某一知识领域的客观规律来解决,此过程也可能产生新的特殊参数矛盾,在每个特殊状况中能更快发现新特殊问题的根源,这也是有助于问题解决和方案评价的原因。这些问题相关信息可用于构建和比较最终方案或评价贯彻问题解决过程的局部方案。

### 2.4 概念化产品族规划方案

模块化产品结构是依据客户不同的技术属性特征要求并由不同的物理结构元素(零部件等)有机构成的,零部件的通用性程度由细分市场中的技术多样性决定对其选配与否。因而,模块化产品族中个性化的产品设计的关键在于产品平台在技术层次上的规划。在对当前(*t*时段)产品族创新之后,面向

未来(*t+1*时段)的产品族设计,产品平台的规划是核心内容。在新的细分市场的需求背景下以及在考虑技术重要度预测和客户需求偏好多样性程度的基础上规划产品族中的通用性和差异性。为了计算概念化产品族中的各功能模块(FM)的多样性程度(DV),在构建 *t+1* 时段的功能模块—技术矩阵(FMTM)的基础上确定概念化产品族模块多样性程度及相对重要度,见表1所示。

表1 基于 FMTM<sup>t+1</sup> 获得模块多样性程度及相对重要度

FMTM <sup>t+1</sup>	F <sub>M1</sub>	F <sub>M2</sub>	...	F <sub>Mk</sub>	...	F <sub>Mm</sub>	I <sub>T</sub> <sup>t+1</sup>	
通用技术	T <sub>C1</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	...	C <sub>1k</sub>	...	C <sub>1m</sub>	I <sub>T1</sub> <sup>t+1</sup>
...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	T <sub>Ch</sub>	C <sub>h1</sub>	C <sub>h2</sub>	...	C <sub>hk</sub>	...	C <sub>hm</sub>	I <sub>Th</sub> <sup>t+1</sup>
个性技术	T <sub>V(h+1)</sub>	V <sub>(h+1)1</sub>	V <sub>(h+1)2</sub>	...	V <sub>(h+1)k</sub>	...	V <sub>(h+1)m</sub>	I <sub>T(h+1)</sub> <sup>t+1</sup>
...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	T <sub>VH</sub>	V <sub>H1</sub>	V <sub>H2</sub>	...	V <sub>Hk</sub>	...	V <sub>Hm</sub>	I <sub>TH</sub> <sup>t+1</sup>
D <sub>V</sub>	由式(8)计算 D <sub>Vk</sub>							
I <sub>FM</sub> <sup>t+1</sup>	由式(9)计算 I <sub>FMk</sub> <sup>t+1</sup>							

概念化产品族中的技术类型仍有两种:通用技术 T<sub>C</sub> 和个性技术 T<sub>V</sub>。这两类型的比例由给定的产品平台比率所决定。在 FMTM 中功能模块与技术之间的相关程度等级可以分为 0/1/3/9,“0”表示关联等级最低,“9”表示关联等级最高。因而,根据表1,由式(8)计算概念化产品族中功能模块的多样性程度

$$D_{V_k} = \frac{X_{V_k}}{X_{C_k}} \quad (8)$$

产品族中各功能模块的相对重要度

$$I_{FMk}^{t+1} = \frac{X_{V_k} - X_{C_k}}{\sum_{k=1}^m X_{V_k} + \sum_{k=1}^m X_{C_k}} \quad (9)$$

式(8)和式(9)中的 X<sub>Ck</sub> 和 X<sub>Vk</sub> 分别是该产品族中通用技术和个性技术重要度值(k=1,2,..., m),为产品族中的功能模块的数量。X<sub>Ck</sub> 和 X<sub>Vk</sub> 可由以下公式获得

$$X_{V_k} = \sum_{i_v=1}^{I_v} I_{Tiv}^{t+1} V_{ivk} \quad (10)$$

$$X_{C_k} = \sum_{i_c=1}^{I_c} I_{Tic}^{t+1} C_{ick} \quad (11)$$

式中, I<sub>C</sub>、I<sub>V</sub> 分别是通用技术和个性技术的数量, I<sub>C</sub>+I<sub>V</sub>=H; V<sub>ivk</sub> 和 C<sub>ick</sub> 分别是 FMTM 中个性技术和通用技术与功能模块之间的相关程度等级,即 V<sub>ivk</sub>,

$C_{ick} \{0,1,3,9\}$ 。

因而，在不同平台比率  $R^{t+1}$  的情况下，通过计算概念化产品族中功能模块 FM 的多样性程度  $D_{V_k}$  和相对重要度  $I_{FMk}^{t+1}$  来确定产品族设计方案。

### 3 案例分析

对于某工程机械制造企业生产的小型轮式装载机(小装)，其用户定位于小型基础设施场、农场种植园、小空间工作的矿场或码头等国内外低中高档市场。其中 16 系列和 18 系列组成一产品族。该小装产品的模块化程度很高，是一种典型的定制产品。每种新机型大多是在已有或基型产品上进行变型设计，例如选配不同型号的柴油机或配置不同规格档次的驾驶室等，因而同一系列通用程度很高，而系列间的共享程度很低。另外同系列产品在技术上出现了同质化的现象，与竞争对手相比没有突出技术点。基于此种情况，以下将以该小型轮装产品族为实例，具体阐述如何利用产品族创新方法推动该产品族演进为下一代产品族。

#### 3.1 模块化产品族分析

根据企业对小型轮装产品的客户需求的分析，确定以下 6 项客户需求：性价比(R1)、安全性(R2)、易操作性(R3)、低噪声(R4)、节能性(R5)和美观性(R6)。根据企业内部的市場销售和客戶管理的历史数据，由于小型轮装的特点，客户需求变化相对缓慢，拟以两年为周期分析需求信息。依据模糊三角数方法及式(1)和式(2)确定各客户需求在各时段的重要度，见表 2 所示各时段客户需求重要度。

表 2 客户需求周期性重要度

需求	重要度 $I$			
	时段 $t_1$ (03-04)	时段 $t_2$ (05-06)	时段 $t_3$ (07-08)	时段 $t_4$ (09-10)
R1	0.228	0.231	0.225	0.223
R2	0.171	0.174	0.173	0.176
R3	0.160	0.158	0.165	0.167
R4	0.119	0.125	0.123	0.128
R5	0.218	0.202	0.195	0.180
R6	0.132	0.137	0.145	0.149

以当前  $t_4(09-10)$  的客户需求重要性作为例子研究小装产品族在功能和技术方面的重要度情况。其中小装产品族的功能、功能模块以及技术分别详见表 3 和表 4。因而分别构建需求—功能矩阵(RFM)和功能—技术矩阵(FTM)，并根据式(3)和式(4)分别

确定小装产品族在当前的各个功能和技术的重重要度，如表 5 和表 6 所示。

表 3 小装产品族的功能及主要功能模块

序号	功能	功能模块	序号	功能	功能模块
F1	提供动力	FM1 动力	F6	制动	FM8 制动
F2	调节	FM2 双变	F7	支撑	FM9 车架
F3	传动	FM3 驱动桥 FM4 传动轴	F8	执行	FM10 工作装置 FM11 属具装置
F4	变速操纵	FM5 变速操纵	F9	保护	FM12 驾驶室
F5	提供液压	FM6 转向液压 FM7 工作液压			

表 4 小装产品族的技术表

代号	技术	代号	技术
T1	整机质量	T8	最大掘起力
T2	额定功率	T9	卸载距离和高度
T3	铲斗容量	T10	三项和(提升时间)
T4	额定载荷	T11	油箱容量(燃油和液压油)
T5	档位/最大速度	T12	最大噪声
T6	最大牵引力	T13	外形尺寸
T7	最小转弯半径		

表 5 需求—功能矩阵及当前时段  $t_4$  的各功能重要度

	$I_c$	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
R1	0.22	9	3	9	3	9	1	9	3	3
R2	0.17	0	3	9	3	3	9	9	9	9
R3	0.16	1	9	1	9	3	9	0	9	1
R4	0.12	9	3	3	0	9	0	0	1	3
R5	0.18	9	1	1	0	9	0	3	0	0
R6	0.14	0	0	0	0	1	0	3	1	9
$I_F$	4.94	3.26	4.32	2.70	5.95	3.31	4.57	4.03	4.14	

根据表 2 的客户需求周期性重要度，基于 GM(1,1)模型的技术重要度预测方法来实现小装产品族技术趋势分析。表 7 中  $t_5$  时段为技术重要度预测值，其中小误差概率  $p$  均大于 0.95，方差比  $c$  均小于 0.35(除 T3 外)，模型精度复合“良好”标准，证明 GM(1,1)模型对技术重要度拟合和预测的有效性。图 4 为小装产品族技术重要度趋势图，T12 的重要度最大；T1、T5、T6 重要度较大且变化平稳，这需要提高平台共享能力，另外 T2、T8、T10、T11、T12 的重要度有下降趋势，说明技术优势和重要度正在消失。同时，这也为企业提供了开展技术创新战略的依据。由式(5)~(7)得到表 8 所示小装产品族技术通用程度分析，其中根据企业当前战略和各因素影响，取平台比率  $R^t = 20\%$ ，可以发现通用技术有 T2、T6、T7、T9、T11、T13；个性技术有 T1、T3、T4、T5、T8、T10、T12。从图 4 和表 8 可以看出，当前小装产品族在技术层次上有改进的空间。

表6 功能—技术矩阵及当前时段  $t_4$  的各技术重要度

功能	$I_F$	重要度 $I$												
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
F1	4.946	9	9	1	1	3	3	0	3	1	3	9	9	3
F2	3.264	3	9	0	0	9	9	0	1	1	1	3	9	3
F3	4.322	3	3	1	3	9	9	0	1	1	0	1	9	3
F4	2.700	3	3	1	3	9	9	0	1	1	0	1	1	3
F5	5.957	3	9	3	9	0	1	0	9	3	9	9	9	1
F6	3.310	9	0	0	1	9	0	0	0	0	0	0	1	0
F7	4.578	3	1	1	9	1	1	9	3	3	1	3	3	3
F8	4.033	3	9	9	3	0	0	0	1	0	0	0	0	3
F9	4.145	3	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	3	3
$I_T$	161.301	189.444	70.714	140.381	145.925	122.092	41.202	96.504	50.982	76.293	128.675	198.58	89.921	

表7 小装产品族技术周期性重要度及预测结果分析

	重要度 $I$												
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
$t_1$	162.672	192.759	70.705	142.670	144.742	122.089	41.769	99.637	51.901	79.478	133.617	202.488	89.919
$t_2$	162.639	192.141	70.811	142.657	145.277	122.461	41.958	99.095	51.887	78.811	132.66	202.278	90.278
$t_3$	161.682	190.506	70.647	141.147	145.329	121.972	41.418	97.594	51.300	77.415	130.407	199.833	89.875
$t_4$	161.301	189.444	70.714	140.381	145.925	122.092	41.202	96.504	50.982	76.293	128.675	198.580	89.921
$t_5$	160.540	188.014	70.627	139.132	146.16	121.806	40.775	95.165	50.490	75.019	126.641	196.556	89.668
方差比 $c$	0.113	0.050	0.462	0.087	0.153	0.390	0.128	0.037	0.079	0.024	0.029	0.084	0.325
小误差概率 $p$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表8 小装产品族技术通用程度分析 ( $R^{t4} = 20\%$ )

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
$IR_T$	161.301	189.444	70.714	140.381	145.925	122.092	41.202	96.504	50.982	76.293	128.675	198.580	89.921
H	6 200	60	0.8	1 700	25	52	4 350	65	2 630	9.5	216	83	32.162
目 M	6 000	59	1	1 800	22	53	4 350	65	2 630	9.5	216	90	32.091
标 L	5 830	59	1	1 800	23	53	4 450	50	2 600	9	216	93	31.607
值 $\sigma_{Tvi}$	151.20	0.47	0.09	47.10	1.25	0.47	47.10	5.00	14.10	0.24	0	4.20	0.25
$\mu_{Tvi}$	6 010.0	59.3	0.9	1 766.7	23.3	52.7	4 383.3	60.0	2 620.0	9.3	216.0	88.7	31.9
$\omega_{Tvi}$	4.058	1.501	6.843	3.743	7.829	1.089	0.443	8.042	0.274	1.963	0	9.406	0.704
$\eta_i$ (%)	43.14	15.96	72.75	39.79	83.23	11.58	4.71	85.50	2.91	20.87	0	100.00	7.48
$T_C/T_V$	$T_V$	$T_C$	$T_V$	$T_V$	$T_V$	$T_C$	$T_C$	$T_V$	$T_C$	$T_V$	$T_C$	$T_V$	$T_C$

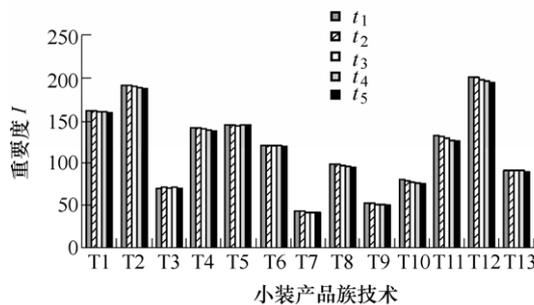


图4 小装产品族技术重要度趋势图

3.2 小装产品族中冲突问题解决

从企业现有数据库中收集并整理与小装产品族相关的问题, 整编成小装产品族的问题分析列表, 如表9所示(部分)。根据问题分析表中描述问题的

状况及相互之间的关系, 构建小装产品族问题流网络, 如图5所示。其中在此基础上分析各类特殊问题, 并由此转换为矛盾网络。由于篇幅限制, 下面解释其中一个典型问题: 驱动桥半轴断裂问题 Pb15。由于湿式制动器通过制动液压系统提供油压推动活塞, 使得动摩擦片6和静摩擦片7相互摩擦, 产生摩擦力矩从而达到制动的效果。如图6a所示, 改进前有动静摩擦片6、7产生的摩擦力矩通过支架5直接传递到半轴11上, 当某些极限工况时将超出半轴30CrMnTi材料的屈服强度和扭转疲劳强度极限, 从而发生断裂。因而, 该参数矛盾可以定义为, 既要避免半轴断裂, 又要实现制动半轴的效果。根据TRIZ理论中的抽取和借助中介物原理, 产生

制动行星架 5 继而制动半轴的方案 改进后见图 6b。

表 9 小装产品族的问题列表(部分)

代码	描述	代码	描述
Pb1	整机振动噪声	Pb9	铰接结构不灵活
Pb2	柴油机噪声	Pb10	后车架抗冲击能力差
Ps3	采用吸声海绵/隔音材料	Pb11	后车架焊接工艺复杂
Pb4	双变系统噪声	Ps12	后车架借用件
Pb5	驾驶室舒适性和安全性	Pb13	柴油机与后车架配合不好
Ps6	驾驶室底座减振器	Ps14	可拆卸固定底座
Ps7	工程座椅	Pb15	驱动桥半轴断裂
Pb8	驾驶室向后视野有限制		

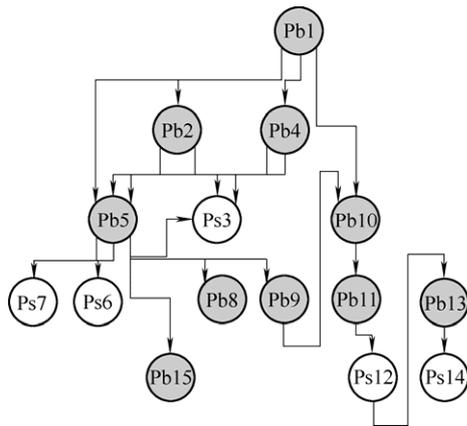
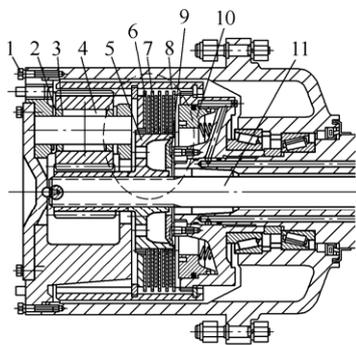
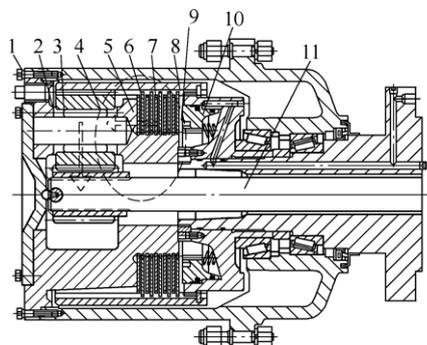


图 5 小装产品族问题流网络(部分)



(a) 改进前



(b) 改进后

图 6 驱动桥半轴断裂问题解决前后对比

1. 螺栓垫圈 2. 垫片 3. 挡圈 4. 滚针 5. 行星轮架
6. 动摩擦片 7. 静摩擦片 8. 内齿圈 9. 垫片 10. 活塞 11. 半轴

针对小装产品族中的各类问题进行有效的解决, 并得到局部方案, 然后又将这些局部方案整合成该时段小装产品族创新的最终方案。对于局部方案和最终方案的评价, 在实现主要功能需求的条件下企业主要考虑该方案的可操作性和经济性。如 16 和 18 两个系列产品的后车架统一为一种通用型的后车架, 从工艺流程上省去了许多更换工装的时间和成本, 从结构设计上集成了原先两者的优点。因而, 最后将创新设计的最终方案作为新的技术取代原先小装产品族中的技术, 形成新的技术层次上的小装产品族。但还需要考虑公司发展战略和满足目标市场客户需求的变化, 实现产品族在技术层面上进行有效的规划。

### 3.3 小装概念化产品族规划方案

在小装产品族中冲突问题解决的最终方案的基础上, 针对不同细分市场的需求企业对小装的各细分市场的目标值进行了调整, 结合技术重要度预测值对下一时段( $t_5$  时段)的小装产品族技术通用程度进行了分析, 见表 10。可以发现小装产品族中的通用技术有 T6、T7、T9、T11、T13; 若取平台比率  $R^{t_5} = 15%$ , 小装产品族中的通用技术有 T6、T9、T11、T13; 若取平台比率  $R^{t_5} = 10%$ , 小装产品族中的通用技术有 T9、T13。

在获得不同平台比率和小装产品族通用技术的情况下, 构建  $t_5$  时段的功能技术矩阵(FMTM<sup>t<sub>5</sub></sup>), 由式(8)、(10)、(11)可以得到该小装产品族中功能模块的多样性程度  $D_V$ 。表 11 为概念化产品族规划分析( $R^{t_5} = 20%$ )。同理, 可以得到平台比率为 15% 和 10% 情况下的产品族功能模块的多样性程度值。同时根据式(9)~(11)计算获得产品族中各个功能模块的相对重要度  $I_{FMk}^{t+1}$ 。将此分别同平台比率 10% 和 20% 情况下的产品族功能模块的多样性程度值来分析在  $t_5$  时段的概念产品族规划方案, 如图 7 所示, 不同平台比率情况下概念化产品族中功能模块划分。图 7a 平台比率  $R^{t_5} = 10%$  情况下, 产品族中平台模块由功能模块 FM={FM1, FM2, FM3, FM4, FM5, FM6, FM9, FM10, FM12} 组成, 而个性化功能模块包括 FM7, FM8 和 FM11; 图 7b 平台比率  $R^{t_5} = 20%$  情况下, 产品族中平台模块由功能模块 FM={FM1, FM2, FM3, FM4, FM5, FM6, FM7, FM9, FM10, FM12} 组成, 而个性化功能模块包括 FM8 和 FM11。

表 10 小装产品族技术通用程度分析 ( $R^{t5} = 20\%$ )

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
$IR_T$	160.54	188.014	70.627	139.132	146.16	121.806	40.775	95.165	50.49	75.019	126.641	196.556	89.668
H	6 200	60	0.8	1 700	25	52	4 350	65	2 630	9.5	216	83	32.162
M	6 200	60	1	1 800	23	53	4 700	60	2 630	9.5	216	90	32.091
L	5 830	59	1	1 800	23	53	4 450	60	2 600	9.0	216	90	31.607
$\sigma_{TVi}$	174.400	0.471	0.090	47.100	0.943	0.470	147.200	2.357	14.100	0.234	0	3.300	0.250
$\mu_{TVi}$	6 076.7	59.7	0.9	176.7	23.7	52.7	4 500.0	61.7	2 620.0	9.3	216.0	87.7	31.95
$\omega_{TVi}$	4.607	1.484	6.835	3.709	5.822	1.086	1.333	3.637	0.272	1.883	0	7.405	0.702
$\eta_i$ (%)	62.21	20.04	92.00	50.09	78.62	14.67	18.00	49.12	3.67	25.43	0	100.00	9.48
$T_C/T_V$	$T_V$	$T_V$	$T_V$	$T_V$	$T_V$	$T_C$	$T_C$	$T_V$	$T_C$	$T_V$	$T_C$	$T_V$	$T_C$

表 11  $t_5$  时段小装概念化产品族规划分析 ( $R^{t5} = 20\%$ )

FMTM <sup>t5</sup>	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7	FM8	FM9	FM10	FM11	FM12	TC/TV	$I_T^{t5}$
T1	9	3	3	3	3	1	3	9	3	3	3	3	$T_V$	160.540
T2	9	9	9	3	3		9	0	1	1	9	0	$T_V$	188.014
T3	1	0	0	1	1	1	3	0	1	9	9	0	$T_V$	70.627
T4	1	0	0	3	3	0	9	1	9	9	3	1	$T_V$	139.132
T5	3	3	9	9	9	0	0	9	1	1	0	1	$T_V$	146.160
T6	3	9	9	9	9	0	1	0	1	1	0	1	$T_V$	121.806
T7	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	0	0	$T_C$	40.775
T8	3	1	1	1	1	0	9	0	3	9	1	0	$T_V$	95.165
T9	1	1	1	1	1	0	3	1	3	9	0	1	$T_C$	50.490
T10	3	1	1	0	0	1	9	0	1	9	0	0	$T_V$	75.019
T11	9	3	0	1	1	3	9	0	3	0	0	0	$T_C$	126.641
T12	9	9	9	9	9	3	9	1	3	1	0	3	$T_V$	196.556
T13	1	3	3	3	3	1	1	0	3	3	3	3	$T_C$	89.668
$D_V$	5.02	8.07	20.40	13.00	13.00	1.91	5.11	61.30	2.75	4.18	12.34	4.63		
$I_{FM}^{t5}$	0.13	0.12	0.11	0.10	0.10	0.02	0.14	0.05	0.07	0.09	0.06	0.03		

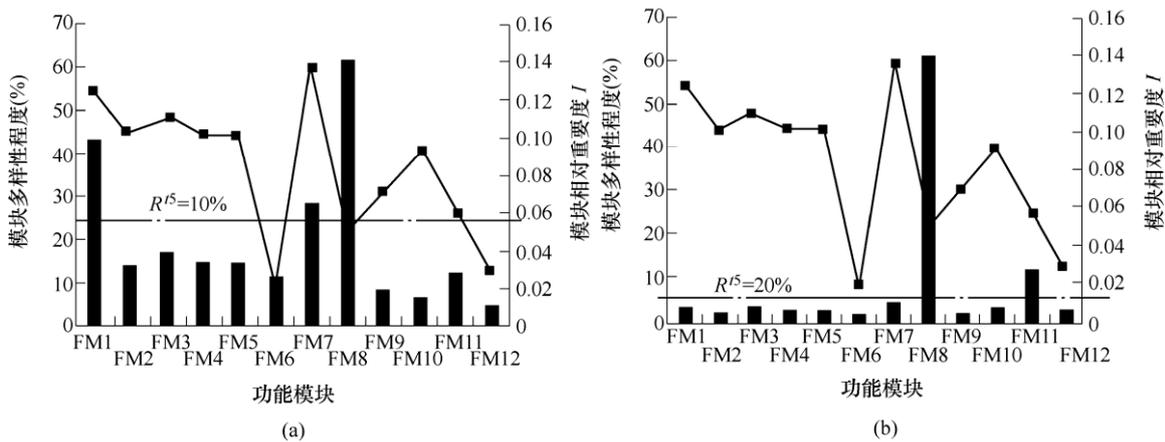


图 7 概念化产品族功能模块划分

■ 模块多样性程度    ■ 模块相对重要度

## 4 结论

(1) 针对以往在工程设计领域对产品族演进机理研究的不足和产品族创新设计程度不高的缺点，基于 F-B-S 模型提出模块化产品族在技术层次上的

创新方法并实现概念化产品族的规划设计。

(2) 建立了模块化产品族演进创新的系统化过程，包括创新对象分析、创新实施过程和新概念化产品族规划 3 个步骤：在需求变化情况下，模块化产品族各功能对应的技术重要度变化及通用程度情况分析；通过分析产品族技术创新问题流网

络,选择并通过技术解决产品族中若干冲突问题;

在技术重要度预测基础上,重新构建和分析产品族技术通用程度,在不同平台比率情况下选择最佳概念化的模块化产品族规划设计方案。

(3)应用某企业小型轮装产品族演进创新实例描述了该方法的应用过程,验证了该方法的有效性及其所具有的实用价值,该方法为企业管理者、决策者和工程设计者等提供了复杂产品族的技术系统的演进和系统化创新的思路。

### 参 考 文 献

- [1] JIAO J J , TSENG M M. Customizability analysis in design for mass customization[J]. Computer-Aided Design , 2004 , 36(8) : 745-757.
- [2] MEYER M H , TERTZAKIAN P , UTTERBACK J M. Metrics for managing research and development in the context of the product family[J]. Management Science , 1997 , 43(1) : 88-111.
- [3] SIMPSON T W. Product platform design and customization : Status and promise[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design , Analysis and Manufacturing , 2004 , 18(1) : 3-20.
- [4] JIAO J J , SIMPSON T W , SIDDIQUE Z. Product family design and platform-based product development : A state-of-the-art review[J]. Journal of Intelligent Manufacturing , 2007 , 18(1) : 5-29.
- [5] MARTIN M V , ISHII K. Design for variety : Development standardized and modularized product platform architectures[J]. Research in Engineering Design , 2002 , 13(4) : 213-235.
- [6] SUH E S , WECK O , KIM I Y , et al. Flexible platform component design under uncertainty[J]. J. Intelligent Manufacturing , 2007 , 18 : 115-126.
- [7] 陈永亮,褚巍丽,徐燕申.面向可适应性的参数化产品平台设计[J].计算机集成制造系统,2007,13(5):877-884.  
CHEN Yongliang , CHU Weili , XU Yanshen. Adaptability-oriented parametric product platform design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems , 2007 , 13(5) : 877-884.
- [8] 李中凯.产品族可重构设计理论与方法及其在大型空分装备中应用研究[D].杭州:浙江大学,2009.
- LI Zhongkai. Theories and methodologies for product family reconfigurable design and application in large scale air separation systems[D]. Hangzhou : Zhejiang University , 2009.
- [9] DOLAN B , LEWIS K. Robust product family consolidation and selection[J]. Journal of Engineering Design , 2008 , 19(6) : 553-569.
- [10] 徐新胜,程鑫.基于直接进化理论的产品族结构自适应方法[J].计算机集成制造系统,2010,16(3):469-475.  
XU Xinsheng , CHENG Xin. Self-adaptive methods of product family architecture based on directed evolution theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems , 2010 , 16(3) : 469-475.
- [11] WU H H , SHIEH J I. Using a Markova chain model in quality function deployment to analyze customer requirements[J]. Int. J. of Adv. Manuf. Technology , 2006 , 30 : 141-146.
- [12] 侯亮,唐任仲,徐燕申.产品模块化设计理论、技术与应用研究进展[J].机械工程学报,2004,40(1):56-61.  
HOU Liang , TANG Renzhong , XU Yanshen. Review of theory , key technologies and its application of modular product design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2004 , 40(1) : 56-61.
- [13] JIAO J , TSENG M M. Fundamentals of product family architecture[J]. Integrated Manufacturing Systems , 2000 , 11(7) : 467-483.
- [14] CAVALLUCCI D , KHOMENKO N. From TRIZ to OSTM-TRIZ : Addressing complexity challenges in inventive design[J]. International Journal of Product Development , 2007 , 4(1/2) : 4-21.

作者简介:侯亮(通信作者),男,1974年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为大规模定制、创新设计等现代设计理论与方法。

E-mail : hliang@xmu.edu.cn

王浩伦,男,1981年出生,博士研究生。主要研究方向为大规模定制、产品族创新设计。

E-mail : haolun123@163.com

穆瑞,女,1982年出生,博士。主要研究方向为创新设计、面向再制造的产品设计。

E-mail : iris\_murui@yahoo.com.cn