

DOI:10.13196/j.cims.2015.04.002

考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成

杨 涛, 杨 育⁺, 张东东

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:为提升方案生成的准确性和客户满意度,针对传统的 product innovation conceptual design 方案生成过程未充分考虑终端客户需求偏好的问题,提出考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成新方法。该方法运用 Kano 模型实现对产品创新设计各功能属性的需求偏好分类;将形态学分析的适用范围拓展到概念层,展开产品创新概念设计方案原理解的组合性分析;建立以客户需求偏好满足度、产品创新成本和产品创新度为目标的三目标优化模型,并采用改进的快速非支配排序遗传算法对该优化模型求解,得到一系列基于 Pareto 解集的最优产品创新概念设计方案。以电冰箱产品创新概念设计方案生成为例,验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词:概念设计方案;Kano 模型;形态学分析;多目标进化算法;Pareto 最优;电冰箱创新设计

中图分类号:TH166 **文献标识码:**A

Generation of product innovation conceptual design schemes for considering the demand preferences of customers

YANG Tao, YANG Yu⁺, ZHANG Dong-dong

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Aiming at the problem that the demand preferences of customers was not considered in traditional products innovation process, a generation method of product innovation conceptual design schemes was proposed to enhance the accuracy of schemes generation and improve the customer satisfaction. Kano model was used to classify the attribute of product innovation design features based on the analysis of customers' demand preferences. The application scope of morphological analysis was extended to concept level so as to analyze the combination capability of principle solutions to conceptual design schemes. A multi-objective optimal model was established to optimize customer demand preference satisfaction, product innovation cost and product innovativeness, and an improved fast and elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) was applied to solve the model. A serial of conceptual design schemes were presented in the form of Pareto optimal set. A refrigerator innovation design scheme generation was taken as an example to verify the feasibility and effectiveness of this method.

Key words: conceptual design scheme; Kano model; morphological analysis; multi-objective evolutionary algorithm; Pareto optimal; refrigerator innovation design

0 引言

概念设计主要完成产品创新概念设计方案的生成、评价与选择,是产品创新设计过程中最重要、最

关键、最能体现产品创新性的环节^[1]。其中,概念设计方案的生成是一个建立客户需求、产品功能、原理方案之间映射关系,实现响应客户需求和偏好的、满足创新需求和技术经济指标约束的各种可能存在方

收稿日期:2014-07-31; **修订日期:**2014-12-04。Received 31 July 2014; accepted 04 Dec. 2014.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071173, 71401019);贵州省软科学研究计划资助项目(黔科合 R 字[2013]LKC2030);重庆市科委自然科学基金资助项目(cstcjjA90014)。 **Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 71071173, 71401019), the Guizhou Provincial Soft Scientific Research Program, China(No. [2013]LKC2030), and the Natural Science Foundation of Chongqing CSTC, China(No. cstcjjA90014).

案的求解过程,关系到产品最终设计方案的创新性、实用性以及客户满意度,是产品创新概念设计过程的重要环节。

目前,已有不少学者对产品设计方案生成的相关问题进行了研究,如 Huang 等^[1]应用计算机智能生成满足客户需求的产品概念设计方案并供后续评价选择;Hsiao 等^[2]以自行车产品外观设计为分析对象,从功能分析角度列举各功能解,采用形态学矩阵法组合出该自行车产品外观设计的方案解集,供后续评价选择;Lo 等^[3]结合质量功能配置(Quality Function Deployment, QFD)与三维形态学矩阵分析法对客户需求下的产品变型设计概念方案生成方法进行研究,采用计算机辅助概念设计(Computer Aided Conceptual Design, CACD)系统进行方案实现;张利等^[4]在对物料清单(Bill of Material, BOM)的结构特征和属性特征进行分析的基础上,提出基于 BOM 形式的产品概念设计方案求解方法;宋慧军等^[5]提出顾客需求域、功能域、行为域和载体域映射模式的概念设计方案生成模型;杨明顺等^[6]提出基于模糊优选和证据推理的产品设计方案组合决策模型。上述研究主要从客户对产品的需求出发,求解出一组满足客户需求的可行设计方案,缺乏对客户的需求偏好特征的考虑。然而,客户对产品的需求从本质上说是对产品各个功能属性的需求^[7],即客户在选择或购买产品时,不仅会考虑产品所具有的功能属性,还会就这些功能属性表达自己的期望和偏好。特别地,对于创新性产品设计而言,当其满足或超额满足客户的某些兴奋需求类或期望需求类功能属性时,客户的满意度会大幅度提升,而当其缺失这类功能属性时,则会造成客户满意度的急剧下降或达不到期望的产品创新要求。

期望与偏好属于客户的情感因素。总结往年学者在产品设计中提出的情感设计研究,研究成果主要体现在情感设计理论和情感因素对设计产品接纳程度影响的研究。如 RAVINDRA 通过实证研究发现,在不同文化背景下,产品的实用功能和娱乐功能的比例不同,消费者购买动机产生的大小也随之不同^[8];ALIE 等从企业组织文化和管理的角度研究了企业的情感和学习能力对产品创新设计和企业绩效等方面的影响^[9];侯臻敏等提出情感化设计的哲学根源和心理学根源,并针对情感化设计的源头——“用户为中心的设计”理念做了详细分析^[10]。客户需求偏好反映的是客户对产品的需要、兴趣和

爱好,如果能在产品创新概念设计方案生成阶段充分考虑客户的需求偏好特征并指导后期的产品创新设计活动,则对企业提升产品创新设计方案生成的准确性、提高客户的满意度和产品创新设计的成功率等具有重要的现实意义。因此,在结合情感设计的研究成果的基础上,还有待将客户需求偏好这一情感因素作为产品设计重点考虑因素进行研究。

为使企业产品创新概念设计方案的生成过程充分考虑终端客户的需求偏好特征,获得满足企业产品创新要求并反映客户需求偏好的产品创新概念设计方案,本文在前人的研究基础上,对产品创新过程中考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成展开研究,以期提高产品创新概念设计方案生成的准确性和创新产品的客户满意度,并以电冰箱产品创新设计中概念设计方案的生成过程为例验证所提方法的可行性和有效性。

1 考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成过程模型

通过采集客户对目标产品的功能、性能等个性化需求,完成客户需求、产品功能和产品结构之间的映射关系,即明确总功能、功能分解、建立产品结构图,将其细化成可以与具体产品结构相映射的功能单元即功能元^[11]。在此基础上,结合企业产品创新方法库、知识库、实例库及产品专利库等,通过检索、匹配、变型设计等操作,为功能结构图中的每项产品功能结构单元寻求相应的功能属性解(功能元解)。与传统的产品创新概念设计方案生成不同的是,上述功能属性解的形成还需考虑客户对产品不同功能属性的不同需求偏好,即通过引入描述客户满意度与产品特性相互关系的 Kano 模型对各功能属性的客户需求偏好进行分类,通过采用形态学矩阵法组合出产品创新概念设计方案,构筑解空间,最后综合考虑产品创新设计相关的性能及指标约束,构造出以客户需求偏好满足度 $F(S)$ 、产品创新成本 $F(C)$ 和产品创新度 $F(I)$ 三个量化目标函数组成的多目标优化模型,并采用基于改进的快速非支配排序遗传算法(fast and elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)对该优化模型进行求解,获得由 Pareto 最优解构成的产品创新概念设计方案集。

由上述分析过程可知,产品创新概念设计方案的生成具有明显的层次性,包括客户需求信息的获

取与转换、产品创新原理方案设计、概念设计方案的筛选和概念设计方案的生成等几个过程。其中客户需求的获取及转换在文献[12]已有较详尽的分析。考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成过程模型如图 1 所示。

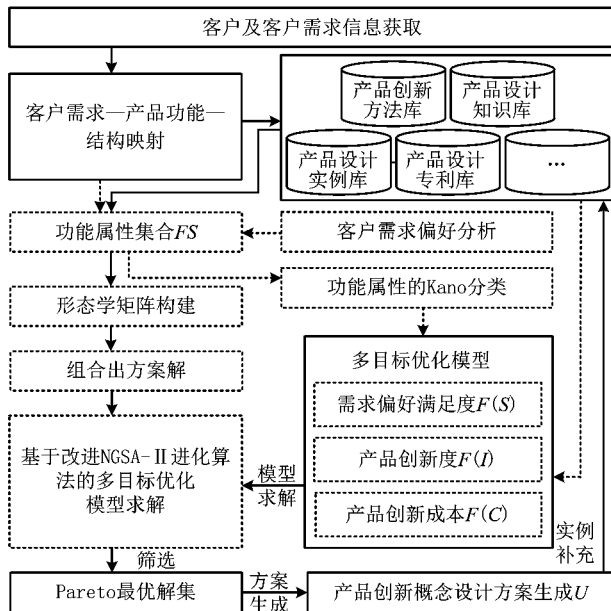


图1 考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成过程模型

1.1 基于 Kano 模型的产品功能属性客户需求偏好分类

准确获取并分析整理客户的需求偏好信息,对产品创新设计活动至关重要^[13]。产品创新设计过程中,客户往往根据自身的需求偏好或以往的使用经验对创新产品的功能属性设计提出一定要求,例如其更期望创新产品设计应具备哪些功能属性,哪些功能属性在创新设计中应重点被考虑等。因此,企业在确定满足相应产品功能和客户需求的产品功能属性集的基础上,还需对产品不同功能属性的客户需求偏好进行分析,并根据分析结果对客户需求偏好进行分类,以指导产品创新概念设计方案的生成,以此达到提升产品创新概念设计方案生成的准确性和提高创新产品客户的满意度的目的。

Kano 模型为用户偏好需求分类提供了理论依据。Kano 模型是 Kano 博士提出的反映产品表现与用户感知之间关系的分析模型,该模型将客户需求信息分为基本需求、兴奋需求、期望需求、问题需求、相反需求和无关紧要需求几类^[14-15]。因此,为了更好地识别各产品功能属性的客户需求偏好的类型,本文引入 Kano 模型对其进行分析。产品创新

设计是一种在已有产品基础上采用新技术、新工艺进行改进新产品的过程,该设计过程的提出主要是为满足额外的客户需求。然而,由于客户需求个性化、多样化的现状,导致客户对产品不同功能属性的需求偏好存在不同,为了能够更好地指导产品创新设计,需要对客户的偏好信息进行有效区分和识别。其中,最简单有效的方法是采用 Kano 问卷调查表,表中的客户要求分别给出创新产品具备某项功能属性和不具备某项功能属性时两种情况下的需求偏好和满意度,并采用{满足,必须这样,保持中立,可以忍受,不满足}对其进行表达。将上述两个问题进行整合,可以得到各产品功能属性的客户需求偏好分类评估表(如表 1^[16]),其中:A 表示兴奋需求,Q 表示问题需求,R 表示相反需求,I 表示无关紧要需求,O 表示期望需求,M 表示基本需求。采用 Kano 问卷调查表和分类评估表对客户需求偏好信息进行分析统计,去除结果中的问题需求和相反需求,然后利用频数最大优选法^[15]可以实现对产品各功能属性的有效分类,在此基础上建立相应的 Kano 类功能属性集合。

表 1 Kano 模型分类评估表

用户需求	产品不具备某功能属性					
	满足	必须这样	保持中立	可以忍受	不满足	
产品	满足	Q	A	A	A	O
具备	必须这样	R	I	I	I	M
某	保持中立	R	I	I	I	M
功能	可以忍受	R	I	I	I	M
属性	不满足	R	R	R	R	Q

1.2 基于形态学矩阵的产品创新原理方案设计

以往的设计方法不能很好地在概念层实现原理解的组合性能讨论,造成很多问题在后期详细设计分析时才被发现,增加了设计成本,降低了设计效率^[17]。形态学分析(Morphological Analysis, MA)由物理学家 Fritz Zwicky 博士首次提出,已在人因工程^[2]、设计工程^[17]和制造工程^[18]等众多领域进行广泛应用。它是以系统的分析和综合为基础、用集合代数的表达方法描述系统形态和分类问题的学科,其目的是对问题所有可能解的组合和可行性进行讨论。在获得满足相应产品功能和客户需求的产品功能属性解的基础上,通过采用 MA 法进行各功能属性的合理组合,得到多个实现总功能的产品创新原理方案解。如表 2 较清晰地描述了上述原理解

的形成过程。

表 2 形态学矩阵

功能元 FR_s	功能属性 FS_s						
	1	2	...	k	...	l	
1	FR_1	FS_{11}	FS_{12}	...	FS_{1k}	...	FS_{1l}
2	FR_2	FS_{21}	FS_{22}	...	FS_{2k}	...	FS_{2l}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
j	FR_j	FS_{j1}	FS_{j2}	...	FS_{jk}	...	FS_{jl}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
f	FR_f	FS_{f1}	FS_{f2}	...	FS_{fk}	...	FS_{fl}

基于形态学矩阵分析的产品创新原理方案设计的基本步骤如下:

步骤 1 确定功能属性集。结合企业产品创新方法库、设计知识库、实例库和产品专利库等,采用匹配、映射和变型设计等操作尽可能列出实现各功能元 FR_j 的所有可能功能属性 FS_j , $FS_j = \{FS_{j1}, FS_{j2}, \dots, FS_{jk}\}$ 为产品功能属性集,其中 FS_{jk} 为某功能元 FR_j 需求的第 k 个可选功能属性。各属性之间保持相互独立,以扩大方案组合的潜力,增大获取更佳创新方案的可能性。

步骤 2 建立形态学矩阵。列出产品的功能元与各相应的功能属性,建立构造原理解的形态学矩阵。

步骤 3 构筑方案解空间。假设产品功能属性间的组合均有效,则可以通过从每项功能特征中选取一种功能属性进行合理组合,生成该产品创新概念设计方案的原理解并构筑方案解空间。共有 $\prod_{j=1}^f n_{jl}$ 个解,其中 n_{jl} 表示实现功能元 FR_j 的可选功能属性 FS_j 的数量。

步骤 4 可行设计方案生成。上述生成的方案原理解并不能确保所有的产品创新概念设计方案均具有很好的综合性能,因此需要结合企业的产品创新实际,综合考虑各种设计性能和指标约束,从中筛选出综合性能较好的可行概念设计方案。

1.3 产品创新概念设计方案生成的多目标决策优化模型构建

在上述产品创新原理方案设计分析的基础上,为生成满足客户需求偏好的、企业产品创新要求的可行产品概念设计方案,需要综合考虑产品创新设计过程中的各种性能指标及设计约束。首先,产品设计的成功与否在很大程度上取决于客户需求偏好

的实现与满足程度,因此产品创新概念设计方案的生成过程应该以客户需求偏好满足度为主要依据,从而可以与产品创新设计的最初目标相吻合,提高方案生成的准确性和产品的客户满意度;其次,产品创新性是产品是否具有竞争能力的关键,因此对于创新性产品设计而言,还应确保生成的设计方案具有较强的创新性;最后,产品创新设计中一个重要的因素是产品创新成本,由于产品创新设计中每个功能属性的选取都会影响产品创新的总费用,方案的生成过程还应考虑到创新成本的约束。综上所述,产品创新概念设计方案的生成问题可以归为以客户需求偏好满足度 $F(S)$ 、产品创新成本 $F(C)$ 和产品创新度 $F(I)$ 为目标的多目标综合优化问题,如图 2 所示。

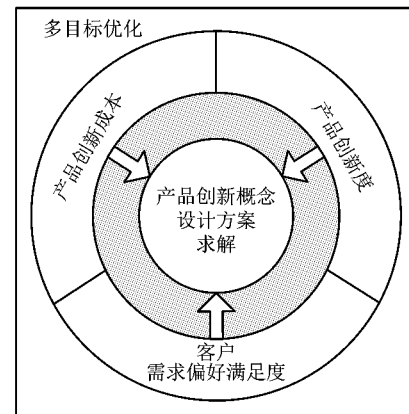


图2 产品创新概念设计方案的多目标决策方法

为了方便建模,首先定义如下决策变量:

定义 1 x_{ijk} ($i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,f, k=1,2,\dots,l$) 是一个 0-1 变量,若方案集中第 i 个创新方案 U_i 的第 j 个功能元的第 k 个功能属性被选中,则 $x_{ijk}=1$, 否则 $x_{ijk}=0$ 。

定义 2 y_{ijk} ($i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,f, k=1,2,\dots,l$) 是一个 0-1 变量,根据客户的需求偏好分析结果,若方案集中第 i 个创新方案 U_i 的第 j 个功能元的第 k 个功能属性属于 A 类偏好需求,则 $y_{ijk}=1$, 否则 $y_{ijk}=0$ 。

定义 3 z_{ijk} ($i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,f, k=1,2,\dots,l$) 是一个 0-1 变量,根据客户的需求偏好分析结果,若方案集中第 i 个创新方案 U_i 的第 j 个功能元的第 k 个功能属性属于 O 类偏好需求,则 $z_{ijk}=1$, 否则 $z_{ijk}=0$ 。

1.3.1 客户需求偏好满足度

根据 Kano 问卷调查表收集到的客户对各产品

功能属性的需求偏好信息,对所构筑方案解空间中任意方案的客户需求偏好满足度 $F(S_i)$ 进行分析。客户需求偏好满足度目标函数可定义为

$$F(S_i) = [\omega_1 \sum_{j=1}^f \sum_{k=1}^l x_{ijk} \cdot y_{ijk} + \omega_2 \sum_{j=1}^f \sum_{k=1}^l x_{ijk} \cdot z_{ijk}] / f. \quad (1)$$

式中 $F(S_i)$ 表示创新方案 U_i 具备某功能属性时对客户需求偏好满足度的影响程度。式(1)将 A 与 O 类偏好需求数目之和作为分子,主要考虑当该创新概念方案所对应的概念产品中具有满足客户兴奋需求(A)和期望需求(O)的产品功能属性时,将会使创新产品充分地体现客户需求偏好特征,满足创新产品的客户需求偏好并极大地提升客户的满意度,其中 ω_1 和 ω_2 分别表示 A 类和 O 类属性所占的比重, $0 \leq \omega_1, \omega_2 \leq 1, \omega_1 + \omega_2 = 1$, 其大小可根据企业的实际情况确定。

1.3.2 产品创新成本

产品创新成本分为可变成本和固定成本两类。在此,本文将产品创新设计过程的可变成本定义为产品功能属性选择所能影响的成本,例如电冰箱产品设计中实现保温功能的内胆材质的选取有若干可选功能属性,产品创新设计团队希望通过采用新技术、新工艺或新材料来增加材质的耐腐蚀性和稳定性等,但同时会增加产品创新设计的成本。产品创新的固定成本定义为产品设计的平台成本、管理成本等,是与产品功能属性配置不相关的成本^[19]。在此,产品创新成本目标函数可定义为

$$F(C_i) = \sum_{j=1}^f \sum_{k=1}^l c_{jk}^{var} x_{ijk} + C_{fix}. \quad (2)$$

式中: $F(C_i)$ 表示生成的第 i 个概念设计方案 U_i 所对应的产品创新成本; c_{jk}^{var} 表示实现第 j 个功能特征的第 k 个功能属性的可变成本,可采用成本调查法或结合企业产品设计知识库、产品实例库等方法获得; C_{fix} 表示固定成本。

1.3.3 产品创新度

1982 年,Booz^[20] 等将新颖度(newness)概念引入产品创新度的测度中。产品新颖度是指综合考虑实现该产品功能或生产该产品的技术与市场上同类产品之间的差异程度,新颖度高,表明市场中尚未出现与该创新产品直接比较的同类产品^[21]。企业在产品创新设计过程中,往往会采用某些新技术、新工艺和新方法等,使创新产品具备既有产品所不具备的功能属性,从而满足一些未被发现的客户需求,提

高创新产品的市场竞争力。在具体定义产品创新度之前先介绍其相关定义。

定义 4 产品功能属性相似度。产品创新设计过程中,各产品功能属性的选取与市场上已有的越相似,创新产品功能属性相似度越大,反之越小。用 $Sim(FS_{jk})$ 表示产品功能属性相似度参数, $Sim(FS_{jk}) \in [0, 1]$, $Sim(FS_{jk})$ 的具体值可通过采用欧氏距离、Person 相关系数等相似度测度方法获得。通过功能属性的组合,第 i 个概念设计方案所对应的创新产品的平均相似度表示为

$$D_i = \sum_{j=1}^f \sum_{k=1}^l Sim(FS_{jk}) x_{ijk} / f. \quad (3)$$

产品创新设计功能属性的相似度值越大,组合出的创新产品平均相似度就越高,创新产品的新颖性越差,新颖度就越低;反之,该创新产品的新颖性越好,新颖度越高。产品创新度目标函数可定义为

$$F(I_i) = e^{-\frac{D_i}{2}}. \quad (4)$$

式中 $F(I_i)$ 表示生成的第 i 个概念设计方案 U_i 所对应的产品创新度,主要通过度量各产品功能属性的相似度,进而对组合成的创新产品的相似度进行衡量来实现。函数 $f(x) = e^{-\frac{x}{2}}$ 称为产品创新度量函数,随着产品上市时间的增长,创新产品不再新颖,因此选取其为度量函数非常符合实际。

1.3.4 多目标优化模型

通过以客户需求偏好满足度的目标函数最大化、产品创新成本的目标函数最小化、产品创新度的目标函数最大化为优化目标,可建立如下产品创新概念设计方案生成的多目标决策优化模型及其约束:

$$F(x) = [\max F(S_i), \min F(C_i), \max F(I_i)]. \quad (5)$$

相关约束条件为

$$\begin{aligned} n_i(A) &\leq \sum_{j=1}^f \sum_{k=1}^l x_{ijk} \cdot y_{ijk}, \\ n_i(O) &\leq \sum_{j=1}^f \sum_{k=1}^l x_{ijk} \cdot z_{ijk}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\forall 1 \leq k \leq l, 1 \leq j \leq f, \sum_{k=1}^l x_{ijk} = 1; \quad (7)$$

$$D_i^* \leq D_i; \quad (8)$$

$$F_{\min}(C_i^{var}) \leq F(C_i^{var}) \leq F_{\max}(C_i^{var}). \quad (9)$$

式中: $n_i(A)$ 和 $n_i(O)$ 分别表示该创新产品所要求包含的兴奋需求和期望需求类产品功能属性最低数目, $F_{\max}(C_i^{var})$ 和 $F_{\min}(C_i^{var})$ 分别表示单一设计方案可变成本的上限和下限。

2 基于改进 NSGA-II 的多目标决策优化模型求解

对上述多目标决策模型的求解属于典型的带约束多目标优化(Multi-objective Optimization, MO)问题,处理此问题的常用方法包括将多个优化目标转化为单目标优化问题的单目标优化算法和多目标求解算法。单目标优化虽然能够找到问题的最优解,但并不能保证 Pareto 最优,而且单目标优化问题不能并行地搜索到多个可供选择的最优解,难以满足多目标决策的灵活性要求^[22]。因此,本文采用多目标求解算法。目前,多目标求解算法中较有代表性的有多目标遗传算法(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)、小生境遗传算法(Niched Pareto Genetic Algorithm, NPGA)、强度帕累托进化算法(Strength Pareto Evolutionary Algorithm, SPEA)、SPEA2(the improved SPEA)、非支配排序遗传算法(Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA)、NSGA-II 等。其中 NSGA-II 在问题空间搜索能力、解的分布和覆盖度等方面比其他许多优秀算法优越,被认为是目前比较成熟的 MOGA,已成功用于许多工程优化设计问题^[23-24]。

2.1 改进的 NSGA-II 算法

NSGA 的基本思想是用分级选择法突出好的个体,以及用小生境方法维持优秀个体子种群的稳定。Deb 等^[25]在其基础上进一步改进,称为 NSGA-II。基于 NSGA-II 的算法中关键是对各种算子的设计,包括选择算子、交叉算子和变异算子。在此采用全新的能够处理整形变量的 Laplace 交叉算子和幂变异算子,对 NSGA-II 算法进行改进。

(1)Laplace 交叉算子^[23] 设有两个父代 x_i^{f1} 和 x_i^{f2} ,产生的两个子代 x_i^{z1} 和 x_i^{z2} 的表达式为

$$\begin{aligned} x_i^{z1} &= x_i^{f1} + \beta_i |x_i^{f1} - x_i^{f2}|; \\ x_i^{z2} &= x_i^{f2} + \beta_i |x_i^{f1} - x_i^{f2}|. \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\beta = \begin{cases} a - b \log(u_i) & r_i \leq 0.5 \\ a + b \log(u_i) & r_i \geq 0.5 \end{cases}$, u_i 和 r_i 为区间 $[0, 1]$ 的随机数, a 为位置参数, b 为刻度参数。

对 Laplace 算子进行改进,对父代个体中的每一对变量执行 Laplace 交叉算子。对父代个体 x^{f1} 和 x^{f2} 中的第 1 对变量 x_1^{f1} 和 x_1^{f2} 执行交叉算子,得到两个子代个体 x_1^{z1} 和 x_1^{z2} 。

$$\begin{cases} x^{f1} \rightarrow x_1^{f1} & x_2^{f1} & x_3^{f1} & x_4^{f1} \\ x^{f2} \rightarrow x_1^{f2} & x_2^{f2} & x_3^{f2} & x_4^{f2} \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} x^{z1} \rightarrow x_1^{z1} & 0 & 0 & 0; \\ x^{z2} \rightarrow x_1^{z2} & 0 & 0 & 0. \end{cases} \quad (11)$$

此时,子代中第 2 对变量的取值范围已经发生变化,并更新为

$$S_2^{z1} = S - \{x_2^{f1}\}, S_2^{z2} = S - \{x_2^{f2}\}. \quad (12)$$

若 $x_2^{z1} \equiv x_2^{z2}$ 或者 $x_2^{z1} \equiv x_2^{z2}$,则将 x_2^{z1} 和 x_2^{z2} 修正为 $x_2^{z1} = \min(|S_2^{z1} - x_2^{z1}|)$ 和 $x_2^{z2} = \min(|S_2^{z2} - x_2^{z2}|)$ 。

类似地,进行上述操作,直到父代中的每对变量执行完交叉操作,得到新的子代个体。

(2)幂变异算子^[23] 变异后新个体的表达式为

$$x_i^z = \begin{cases} x_i^f - s(x_i^f - x_i^l), & t < r; \\ x_i^f + s(x_i^u - x_i^f), & t \geq r. \end{cases} \quad (13)$$

式中: $s = (s_1)^k$, s 为区间 $[0, 1]$ 的随机数; x_i^u 和 x_i^l 分别为变量 x_i 的上下线; r 为区间 $[0, 1]$ 的随机数; k 为变异指数; $t = x_i^f - x_i^l / (x_i^u + e - x_i^l)$ 。

2.2 多目标决策模型的求解过程

在建立相应的多目标决策模型的基础上,采用改进的 NSGA-II 算法对模型进行求解,可以实现概念设计过程中的求解功能,生成满足各种技术指标约束的综合性能最优的产品创新概念设计方案(即 Pareto 最优解)。在此,将产品创新概念设计方案生成的多目标决策模型求解过程描述如图 3 所示。

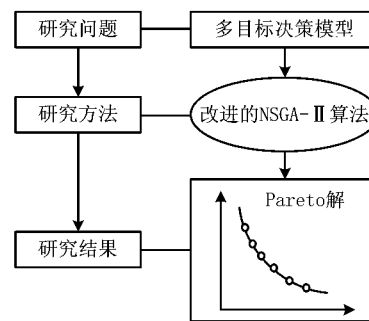


图3 多目标决策模型求解过程示意图

3 案例分析

以 H 公司某型号电冰箱产品创新设计中概念设计方案的生成过程为例,验证所提方法的可行性和有效性。按照电冰箱的产品功能组成,建立该型号电冰箱产品的功能结构图,如图 4 所示。通过前期对企业细分市场需求的调研并对客户需求信息的分析与整理,发现产品材料使用的环保性、设计的时尚性和个性化、产品制冷性、低噪性、功能多样性等是主流消费需求。针对这类消费需求,本文基于课题组建立的“网络化客户协同产品创新支持平台”,以市场主流消费需求为导向,对该型号电冰箱产品

的创新设计方案生成问题进行研究。

续表 3

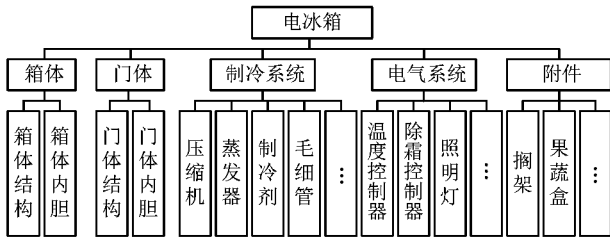


图4 该型号电冰箱产品功能结构图

根据前文提出的考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成过程模型,首先将获取到的客户对电冰箱产品功能、性能等需求信息映射到产品功能结构要求上,然后结合企业的产品设计知识库、方法库和实例库等,进一步确定满足该型号电冰箱产品创新设计各功能元需求的功能属性集合。本例中,该企业拟选取该电冰箱产品门体、内胆材质、制冷系统等八个产品功能结构作为产品创新设计对象,通过与部分客户、供应商和某科研院所组成的客户协同产品创新小组,设计并给出满足上述产品创新设计各功能元需求的产品功能属性解集。例如,在创新设计过程中,由于内胆材质的设计是影响产品环保性、制冷性的关键,可将客户对产品设计的目标转换为对内胆材质指标的具体要求。在此基础上,通过设计 Kano 调查问卷并结合 Kano 模型分类评估表,得到各产品功能属性的 Kano 类别,并利用 MA 法建立产品创新概念方案设计的形态学分析矩阵。产品创新设计各功能的属性信息和参数意义如表 3 所示。为了方便估计和比较,假设各设计

表 3 产品创新设计各功能属性信息以及参数意义

功能元 FR_j	功能属性 FS_k	Kano 类	c_{FR}	$Sim (FS_{jk})$
内胆材质 FR_1	FS_{11} ABS 材质	I	0.070	0.91
	FS_{12} ABS+HIPS 材质	A	0.029	0.45
	FS_{13} 改进耐油 HIPS 材质	A	0.147	0.32
	FS_{14} 优质钢板	O	0.139	0.73
门把手 FR_2	FS_{21}	O	0.210	0.63
	FS_{22}	O	0.122	0.52
	FS_{23}	I	0.147	0.32
	FS_{24}	A	0.259	0.27
	FS_{25}	M	0.037	0.48

冷凝器 FR_3	FS_{31} 百叶窗内藏式冷凝器	I	0.10	0.52
	FS_{32} 丝管式外挂冷凝器	O	0.13	0.35
	FS_{33} 丝管式壁挂冷凝器	M	0.20	0.49
	FS_{34} 百叶窗外挂式冷凝器	A	0.15	0.23
...
辅助功能 FR_8	FS_{81} ①+③	M	0.137	0.32
	FS_{82} ②+④	A	0.355	0.28
	FS_{83} ①+②+③	O	0.279	0.37
	FS_{84} ③+④+⑤	A	0.413	0.18
	FS_{85} ③+⑤	O	0.231	0.34
	FS_{86} ①+④	M	0.103	0.69

注:①自动制冰储冰;②外取饮料功能;③开门限时自动报警;④远程网络控制;⑤断电延迟保护

方案的固定费用相等,采用一种范围为 0~1 的费用指标表示可变费用,其值由企业的产品研发团队给出,值越大表示费用越高。

通过从每项功能特征中选取一种功能属性进行合理组合,生成该电冰箱产品创新概念设计方案的原理理解并构筑方案解空间,其设计方案原理解构过程如图 5 所示。通过图 5 可知组合出的解空间很大。

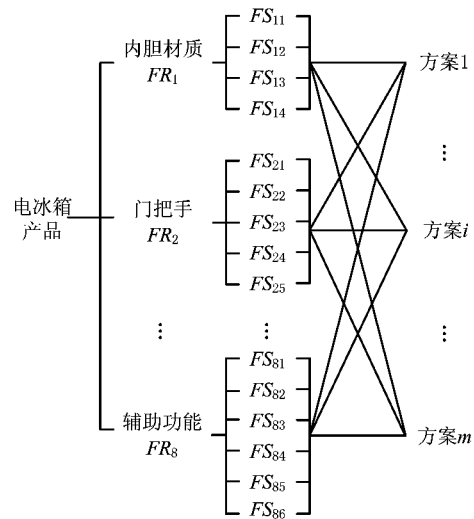


图5 基于形态学分析的产品创新概念方案设计

下面为获得满足企业产品创新需求以及反映客户需求偏好特征的产品创新设计方案,采用改进后的 NGSA-II 算法对满足多目标约束的可行产品创新概念设计方案集进行求解。根据对目标市场客户群体进行划分,企业计划推出一款面向中端客户群体的电冰箱产品,并要求该产品具备 A 类偏好需求

数目为 4, O 类偏好需求数目为 2, 且产品的可变成成本变化范围为 [2.5, 3.5]。基于上述信息, 设定相关约束条件为 $n_i(A) \geq 4, n_i(O) \geq 2, D_i \geq 0.35, F(C_i^{pr}) \in [2.5, 3.5]$, 通过采用实数编码方式, 设内部种群规模 $N=100$, 最大进化代数 $G_{max}=200$, 适应度函数为所设定的目标函数, 交叉概率 $P_c=0.9$, 变异概率 $P_m=0.05$, 终止条件为最大进化代数。根据上述条件, 对表 3 中的数据进行归一化处理, 在 MATLAB R2010a 程序环境下进行编译和运行, 优化过程和结果分别如图 6 和图 7 所示。图 8 所示为

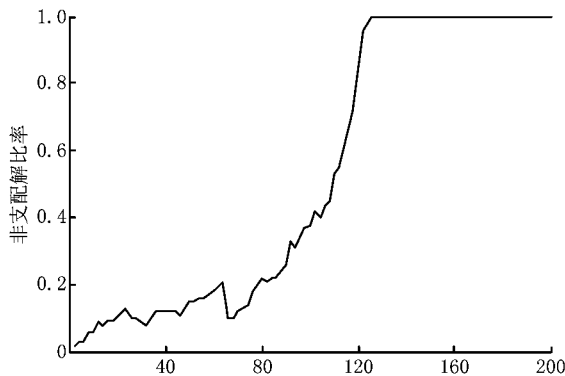


图6 优化过程图

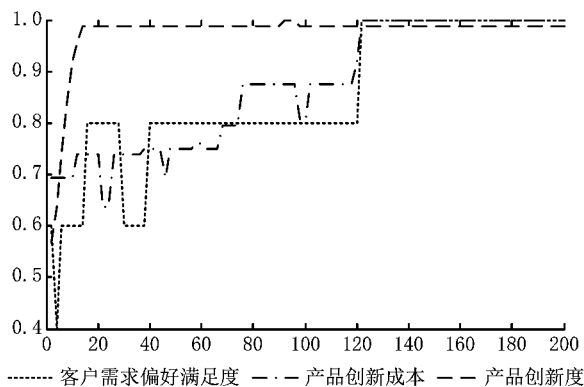


图7 各个目标的进化历程

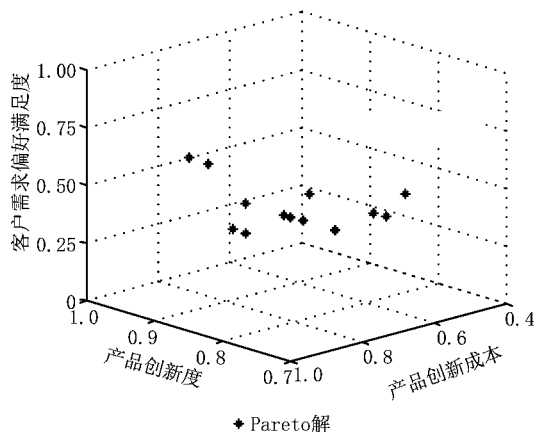


图8 Pareto最优解

得到的 Pareto 最优解, 对应的 13 个代表产品创新概念设计方案结果的 Pareto 最优解集, 如表 4 所示。企业可根据实际客户需求对生成的产品创新概念设计方案集进行进一步优选, 从而指导后期的产品创新详细设计。

表 4 三目标优化时的 Pareto 解集及对应产品创新概念设计方案信息

编号	方案	方案说明
1	方案 U_1	$FS_{12} + FS_{21} + FS_{33} + FS_{42} + FS_{51} + FS_{61} + FS_{74} + FS_{83}$
2	方案 U_2	$FS_{14} + FS_{23} + FS_{33} + FS_{43} + FS_{52} + FS_{63} + FS_{73} + FS_{84}$
3	方案 U_3	$FS_{12} + FS_{22} + FS_{34} + FS_{41} + FS_{51} + FS_{61} + FS_{72} + FS_{83}$
4	方案 U_4	$FS_{13} + FS_{22} + FS_{32} + FS_{42} + FS_{52} + FS_{61} + FS_{73} + FS_{84}$
5	方案 U_5	$FS_{13} + FS_{24} + FS_{32} + FS_{44} + FS_{53} + FS_{63} + FS_{72} + FS_{85}$
6	方案 U_6	$FS_{12} + FS_{22} + FS_{31} + FS_{42} + FS_{52} + FS_{62} + FS_{74} + FS_{83}$
7	方案 U_7	$FS_{13} + FS_{24} + FS_{33} + FS_{44} + FS_{51} + FS_{61} + FS_{73} + FS_{84}$
8	方案 U_8	$FS_{14} + FS_{24} + FS_{31} + FS_{44} + FS_{54} + FS_{61} + FS_{73} + FS_{85}$
9	方案 U_9	$FS_{12} + FS_{22} + FS_{32} + FS_{41} + FS_{52} + FS_{62} + FS_{72} + FS_{83}$
10	方案 U_{10}	$FS_{12} + FS_{25} + FS_{33} + FS_{44} + FS_{53} + FS_{62} + FS_{74} + FS_{82}$
11	方案 U_{11}	$FS_{13} + FS_{22} + FS_{31} + FS_{44} + FS_{53} + FS_{61} + FS_{72} + FS_{85}$
12	方案 U_{12}	$FS_{14} + FS_{22} + FS_{34} + FS_{43} + FS_{52} + FS_{61} + FS_{72} + FS_{82}$
13	方案 U_{13}	$FS_{12} + FS_{22} + FS_{31} + FS_{44} + FS_{54} + FS_{62} + FS_{73} + FS_{83}$

4 结束语

客户需求偏好作为指导产品创新设计的重要组成要素, 对实现企业的产品创新设计目标具有重要影响。本文针对传统的产品创新概念设计方案生成过程未充分考虑终端客户需求偏好的问题, 研究了考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成新方法, 以期提升产品创新概念设计方案生成的准确性, 提高创新产品的客户满意度。本文的贡献如下:

(1) 将 Kano 模型应用到产品创新概念设计方案生成过程中, 建立了考虑客户需求偏好的产品创

新概念设计方案生成优化模型,为生成满足客户需求和体现客户需求偏好的产品创新概念设计方案提供了解决思路。

(2)将客户需求偏好满足度最大、产品创新成本最低和产品创新度最大同时作为优化目标,构建了产品创新概念设计方案生成的多目标决策优化模型,为企业合理生成满足客户需求及偏好的、创新需求及技术经济指标约束的最优产品创新概念设计方案提供了决策依据。

(3)构建了基于改进 NSGA-II 的多目标决策优化求解方法,从而得到了一系列基于 Pareto 最优解构成的产品创新概念设计方案解集,为产品创新概念设计方案的生成提供了技术支撑。

未来将综合考虑制造商、分销商等不同主体需求偏好的产品概念设计方案生成。

参考文献:

- [1] HUANG H Z, LIU Y, LI Y, et al. New evaluation methods for conceptual design selection using computational intelligence techniques[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(3): 733-746.
- [2] HSIAO S W, KO Y C. A study on bicycle appearance preference by using FCE and FAHP[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2013, 43(4): 264-273.
- [3] LO C H, TSENG K C, CHU C H. One-step QFD based 3D morphological charts for concept generation of product variant design[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(11): 7351-7363.
- [4] ZHANG Li, ZHANG Jianjun, REN Qile, et al. Scheme solving model for product conceptual design based on BOM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 97-102 (in Chinese). [张利, 张建军, 任启乐, 等. 基于 BOM 的产品概念设计方案求解技术[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 97-102.]
- [5] SONG Huijun, LIN Zhihang. A model of generating schemes in product conceptual design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(5): 342-346 (in Chinese). [宋慧军, 林志航. 产品概念设计方案生成模型[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(5): 342-346.]
- [6] YANG Mingshun, LI Yan, LIN Zhihang. Combinatorial decision-making on product outline schemes evaluation & optimum selection[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(4): 540-545 (in Chinese). [杨明顺, 李言, 林志航. 产品总体设计方案评价与优选的组合决策[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(4): 540-545.]
- [7] REN Bin, ZHANG Shuyou, YI Guodong. Configuration design of complex products based on fuzzy multi-attribute decision-making[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 108-116 (in Chinese). [任彬, 张树有, 伊国栋. 基于模糊多属性决策的复杂产品配置方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 108-116.]
- [8] RAVINDRA C. Design for affect: emotional and behavioral consequences of the tradeoffs between hedonic and utilitarian attributes[D]. Austin, Tex., USA: The University of Texas, 2003.
- [9] ALIE A, HALIT K, JOHN C B, et al. Emotional and learning capability and their impact on product innovativeness and firm performance[J]. Technovation, 2007, 27(9): 501-513.
- [10] HOU Zhenmin. The origin, evolution and future developmental needs of emotional design[J]. Art and Design, 2008(7): 20-22 (in Chinese). [侯臻敏. 情感化设计的根源、成熟及未来的发展需要[J]. 艺术与设计, 2008(7): 20-22.]
- [11] BO Ruifeng, HUANG Hongzhong, WU Weidong. Application of ant algorithm to scheme solving for conceptual design[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 39(11): 1236-1240 (in Chinese). [薄瑞峰, 黄洪钟, 吴卫东. 蚂蚁算法在概念设计方案求解中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2006, 39(11): 1236-1240.]
- [12] XING Qingsong, YANG Yu, LIU Aijun, et al. Research on generating process of product innovation projects based on QTF in customer collaborative design[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(15): 2101-2109 (in Chinese). [邢青松, 杨育, 刘爱军, 等. 客户协同设计中基于 QTF 的产品创新方案生成研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(15): 2101-2109.]
- [13] ZHOU Jianqiang, ZHAO Yanwei, HONG Huanhuan, et al. Coordination method of extension conductive transformation for performance conflict based on requirement-driven[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(6): 1205-1215 (in Chinese). [周建强, 赵燕伟, 洪欢欢, 等. 基于需求驱动的性能冲突可拓传导变换协调方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(6): 1205-1215.]
- [14] CHEN C C, CHUANG M C. Integrating the Kano model into a robust design approach to enhance customer satisfaction with product design[J]. International Journal of Production Economics, 2008, 114(2): 667-681.
- [15] NIE Da'an, LI Yan, MA Guanglin, et al. Simultaneous multi-product design method based on customer requirements classification[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(6): 1131-1137 (in Chinese). [聂大安, 李彦, 麻广林, 等. 基于用户需求分类的同步多产品设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(6): 1131-1137.]
- [16] MATZLER K, HINTERHUBER H H. How to make product development projects more successful by integrating Kano's model of customer satisfaction into quality function deployment[J]. Technovation, 1998, 18(1): 25-38.
- [17] LIU Xize, QI Guoning, FU Jianzhong, et al. A design process model of integrated morphological matrix and conflict resolving principles[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(12): 2243-2251, 2258 (in Chinese).

- [刘曦泽, 祁国宁, 傅建中, 等. 集成形态学矩阵与冲突解决原理的设计过程模型[J]. 浙江大学学报:工学版, 2012, 46(12): 2243-2251, 2258.]
- [18] LUO S J, FU Y T, KORVENMAA P. A preliminary study of perceptual matching for the evaluation of beverage bottle design[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2012, 42(2): 219-232.
- [19] LUO Xinggang, CAI Liqing, KWONG C K. Multi objective optimization method for product family design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(7): 1345-1355 (in Chinese). [雒兴刚, 蔡莉青, C·K·KWONG. 产品族设计的多目标优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(7): 1345-1355.]
- [20] BOOZ E, ALLEN J, HAMILTON C. New product management for the 1980's[M]. New York, N. Y., USA; Booz-Allen, Hamilton Inc., 1982.
- [21] WEI Hanhua, TIAN Yezhuang, YANG Yang, et al. Product innovativeness and innovative performance: the moderating effect of technological turbulence[J]. Research and Development Management, 2011, 23(2): 8-16 (in Chinese). [卫汉华, 田也壮, 杨洋, 等. 产品创新度与创新绩效: 技术波动程度的调节作用[J]. 研究与发展管理, 2011, 23(2): 8-16.]
- [22] FANG Weiguo, SHI Ruifeng. Pareto genetic algorithms for multi-objective optimization of aircraft conceptual design[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(8): 668-672 (in Chinese). [方卫国, 师瑞峰. 飞机方案多目标优化的 Pareto 遗传算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(8): 668-672.]
- [23] ZHANG Dongdong, ZHENG Ling. Study on the vibration control of the ACLD plate based on the multi-objective optimization design[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2014, 4(1): 50-55 (in Chinese). [张东东, 郑玲. 基于多目标优化设计的主动约束层阻尼板振动控制研究[J]. 汽车工程学报, 2014, 4(1): 50-55.]
- [24] LIU Haiqiang, QI Guoning, ZHANG Taihua, et al. Research on multi-disciplinary process modeling of conceptual design for complex product[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(3): 517-522 (in Chinese). [刘海强, 祁国宁, 张太华, 等. 复杂产品概念设计多学科过程建模方法研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2009, 43(3): 517-522.]
- [25] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

作者简介:

- 杨涛(1985—),男,安徽宿州人,博士研究生,研究方向:工业工程、产品创新设计、产品可靠性设计等, E-mail: yangtao061@sina.com;
- 杨育(1971—),男,四川成都人,教授,博士生导师,研究方向:大规模定制、客户协同创新、协同设计等,通信作者, E-mail: yuyang@cqu.edu.cn;
- 张东东(1986—),男,山西晋城人,博士研究生,研究方向:结构震动噪声控制。