

文章编号: 1000-582X(2011)09-046-08

## 面向产品族配置的可拓关联分析方法

郭 钢<sup>1</sup>, 罗 好<sup>1,2</sup>, 汤华茂<sup>1</sup>, 徐建萍<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆科技学院 电子信息工程学院, 重庆 401331;  
3. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550003)

**摘 要:**为更好地实现快速、有效的产品配置,通过建立需求评价模型、关系映射和可拓关联规则来实现配置过程,提出了基于需求评价模型的产品族可拓配置方法。通过确定客户的需求指标建立基于需求指标的评价模型,并根据评价模型中各个指标与产品族实例的特征指标建立映射关系,由关联规则确定评价模型与实例之间的相似度,提取最具相似度的产品族实例。根据具体相似情况展开实例推理,将实例修改成为满足配置要求的产品。该方法通过减速机配置得到验证。

**关键词:**需求评价模型;产品族配置;实例推理;可拓学;关联规则

**中图分类号:**TP391

**文献标志码:**A

### Extension association analysis method for product family configuration

GUO Gang<sup>1</sup>, LUO Yu<sup>1,2</sup>, TANG Hua-mao<sup>1</sup>, XU Jian-ping<sup>3</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;  
2. School of Electronic & Information Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China; 3. Faculty of Mechanical & Science Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, P. R. China)

**Abstract:** A product family extension configuration method based on evaluation model for customer demands, relational mapping and extension association rules is introduced to better realize rapid and effective product configuration. A demand-based evaluation model is confirmed by the information of customer demands and a mapping relationship between demand-based model and characters of product family cases is built. The similarity between evaluation model and product family cases is up to the association rules and a product family case with the highest similarity can be extracted according to association rules. According to the situation of the similarity, the extracted case is modified to meet the demands of configuration with case-based reasoning method. The method is validated by a speed reducer case.

**Key words:** demand-based evaluation model; product family configuration; case-based reasoning; extenics; association rules

近年来,随着客户需求的多样化和个性化,产品配置成为大规模定制(Mass Customization, MC)下

实现客户需求的核心内容和重要支持。产品配置的重要目的是在有限的资源内,以最快的速度实现目

收稿日期: 2011-04-05

基金项目: 国家 863/CIMS 主题资助项目(2007AA04Z1B1)

作者简介: 郭 钢(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事产品设计/生产一体化管理、协同制造和制造服务管理研究, (E-mail)cquguogang@163.com。

标的最大化和多样化。目前,有基于产品族结构的产品配置<sup>[1]</sup>、基于配置规则的产品配置<sup>[2]</sup>、基于约束满足的产品配置<sup>[3]</sup>、基于事物特征表的产品配置<sup>[4]</sup>及基于实例推理的产品配置等方法<sup>[5]</sup>。其中,基于实例推理(Case-Based Reasoning, CBR)的产品设计是实现产品配置常用的行之有效的手段之一,并据调查约有75%的产品设计是基于实例来进行的<sup>[5]</sup>。

基于实例推理的方法通过研究以往相似类型问题的解决方案来解决当前的问题。目前,国内外不少文献关于基于实例的产品配置做了深入的研究。文献[6]提出在大规模定制的生产方式中运用 CBR 技术,在产品族结构的基础上建立以实例为核心的设计过程模型,以满足大规模定制环境下客户需求的多样化与个性化;文献[7]通过对客户需求的充分考虑,提出了产品族需求类和需求匹配模板的概念,通过二级实例匹配求解实现需求产品配置;文献[8]提出在产品结构树中运用 CBR 算法快速生成一种新型的产品配置 BOM 结构,从而达到减少配置时间和成本的目的,文献[9]提出将 CBR 同约束满足问题(Constraint Satisfaction Problem, CSP)相结合的配置方法,来支持配置过程的发展和设计知识的重用。可拓学原理<sup>[10]</sup>在国内的产品配置中也有一定的运用。文献[11]中将产品结构建立统一物元模型,并通过可拓变换实现产品的变形设计。文献[12]提出了建立模块物元模型,从模块的可拓性出发,从需求映射中找到符合要求的模块进行实例化,最后由模块的可拓变换而派生出横向或纵向的新产品。文献[13]通过初步的顾客需求与产品特征的映射找出满足条件的一系列产品,在经过可拓变换和二次需求输入计算相容性,判别变换的可行性,最后运用可拓聚类的方法实现产品族的模块划分。该方法的缺陷是在变换过程中需要客户二次确定需求的特征,并不能从最初就依据客户的需求进行判断。

以上配置都从需求映射或从产品族的结构变换来考虑产品的配置方法,没有从配置的评价角度作为实现配置的首要条件,即便提到配置的评价优化也是作为对配置的结果进行评价。笔者从客户的需求出发,以评价作为配置的先决条件建立基于需求评价模型的产品族配置方法,引入可拓物元模型概念,运用关联函数,从定性和定量的角度去解决配置中存在的矛盾问题。

## 1 基于需求评价模型的产品配置框架

CBR 产品族配置是指根据客户提出的新的产

品要求在过去已有的产品配置实例基础上找出与配置要求相似的产品并进行相应地变换或调整其中的局部配置来解决现行问题的配置方法<sup>[6]</sup>。该方法的优势在于能够在已有配置基础上进行少量改动即可满足要求,提高了配置的效率。对于产品实例众多,产品分支过细的企业而言,如何提高对实例的检索并找出其中最符合配置要求的实例产品是把握产品配置快速性的核心。

为了实现配置的快速性及有效性,笔者提出一种基于需求评价模型的 CBR 配置方法,如图 1 所示。产品配置的任务可以描述为:针对客户提出的需求,结合产品配置的评价目标,建立基于需求的评价模型,通过对与产品族实例特征的关联度描述,提取最具相似的实例,在满足配置约束规则的基础上,进行实例的修改、替换或更新,得到满足客户需求的配置方案。产品配置过程中的主要任务包括:基于需求的评价模型的建立;评价模型与产品族实例模型的匹配;实例的修改。

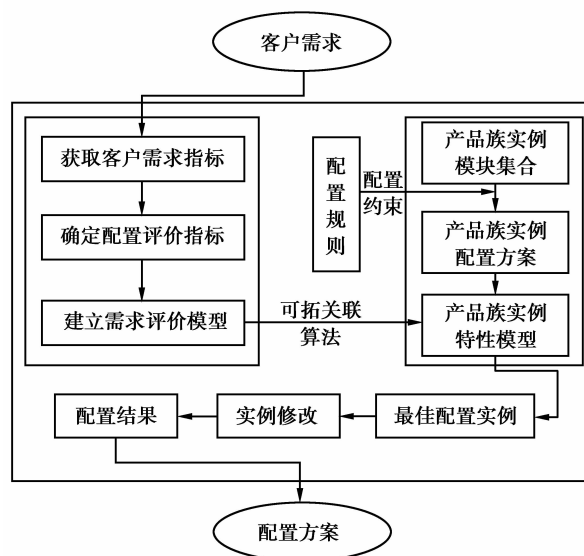


图 1 产品族实例配置框架结构

1) 产品族实例特征参数物元模型。每一个产品实例都是产品族实例特征集合中按照一定的配置规则约束条件的配置方案配置得到的产品结果,对于产品实例,用物元描述出它与其他实例具有本质区别的特征属性及其取值范围,如功能特征、技术特征及结构特征等。

2) 可拓关联规则。将客户需求特征参数建立相应的物元结构,与已有的产品族实例特征物元进行比较,运用关联分类算法将客户需求特征物元划分到与之最接近的产品族实例物元中,以此实例作为

最终配置的基础。

3)实例修改。将找出的产品族实例特征与客户需求特征进行比较,当实例与需求不一致时,进行相应的修改,得到一个更加合理的方案,其中对实例的修改按照物元中的特征参数之间存在的差异,并受到配置规则的约束来进行。

## 2 产品配置的需求评价模型

根据客户需求的不同可将产品分为需求模糊型和需求明确型。需求模糊型产品的客户需求往往是一些具有模糊性、不能直接映射到产品功能性能特性指标的需求,如:汽车的外观时尚、操纵性好、座位舒适及价位适中等。需求明确型产品的客户需求通常是一些具体的技术指标,能够明确表示对产品的功能、性能等要求。如:齿轮箱的输入功率为 55 kW,输入转速达到 1 480 r/min,速比为 35.09。

产品的配置过程是在满足客户需求的基础上找出符合需求的零部件及组合的过程。传统产品配置中,从客户需求的提出到物料库中零部件的选择需要经过 2 个阶段的关系映射才能实现:第 1 阶段是客户需求到产品功能性能指标之间关系映射;第 2 阶段是产品功能性能指标到物料库中零部件选择之间的映射。通过 2 级映射以及相应的匹配规则和零部件约束规则才能实现新产品的配置,如图 2 所示。装备类产品的配置需求能够提出对产品功能性能的具体指标要求,因此第 1 阶段的映射关系可省略,配置过程只包含第 2 阶段映射即可完成。

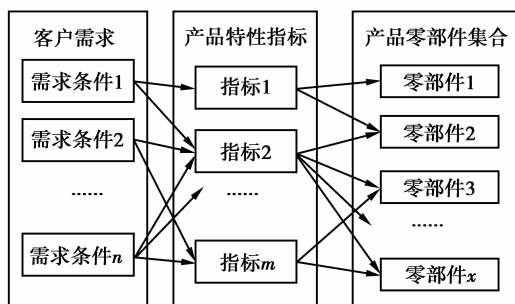


图 2 产品配置映射关系图

### 2.1 客户需求与产品评价的映射关系

在产品配置过程中,配置评价是一个重要阶段,反映出配置效果的优劣。评价是指按照预定的目的,确定研究对象的属性(指标),并将这种属性变为客观计量的计值或主观效用的行为<sup>[14]</sup>。评价指标是评价的依据和量化,随产品的设计要求和约束条件而定,主要分为技术指标和经济指标。

产品涉及的评价指标众多,产品配置的目标是最大限度地满足客户需求。从满足客户需求的角度出发,建立针对客户需求的评价指标体系是配置评价的重点。传统评价将经济评价和社会评价划分为事前评价的范畴,而将性能评价作为事后评价的范畴。文献[15]中根据不同的客户类型与产品本身的定制特点将客户需求分为功能需求型、技术需求型、结构需求型和复合需求型 4 类,针对客户需求的评价体系建立在此 4 种需求类型的基础上。目前,多数文献中提到的产品评价方法都采用传统评价的性能评价,是一种事后评价,也是一种被动评价方式,不能在配置初期及时地反映出配置的优劣程度。若在配置前就将对产品的评价指标确定下来就能引导配置过程,达到主动评价的目的并保证配置的效果。

产品配置中产品功能性能指标的选择影响着映射后的产品零部件选择,决定着最终产品的配置效果。最终配置产品是否符合客户需求的评判取决于对产品的评价。将这些因素映射到产品的功能特性中,从而将对产品的评价转换为配置的先决条件。笔者建立一种基于客户需求的评价模型,再利用评价指标映射到产品功能性能指标,提高配置的效果。如图 3 所示。

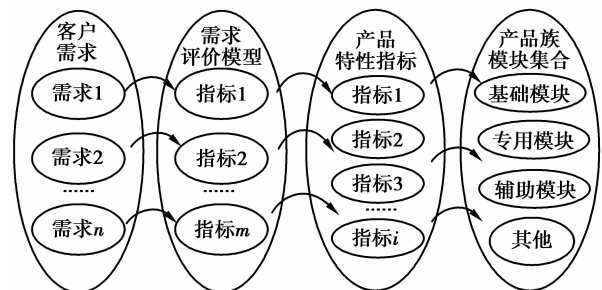


图 3 基于需求配置评价的产品配置多级映射图

根据客户需求将产品配置的评价指标可按照功能、技术和结构进行进一步分解,如图 4 所示。

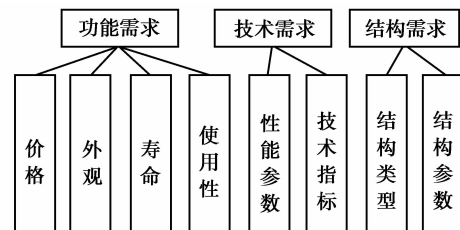


图 4 产品配置评价指标分解

### 2.2 评价指标与产品特性的映射关系

从需求评价指标到产品功能性能特性之间是一

种多对多的映射关系,一个评价的指标往往通过一个或多个产品功能性能特性共同反映。如:评价某产品的销售利润可以从产品的销售量、售价和进价3个属性来共同描述。因此,一个销售利润总量的评价指标映射到销售量、售价和进价3个特征属性。此外,2个评价指标对应的产品特性也可能存在着重复,如:评价指标销售率就由销售量和接待人数两个特征共同描述,其中的销售量特性也反映在评价指标利润总量中。如图5所示为某产品的评价指标与产品属性间的映射关系。评价指标 $E_1$ 对应于产品特性 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_3$ ,同时产品特性 $C_1$ 也反映在评价指标 $E_1$ 和 $E_2$ 中。

由于每个评价指标在整个评价体系中的重要性即权重各不相同,映射到产品特性中的每个特性的权重也存在差异。如特性 $C_1$ ,由于反映在多个评价指标中,因此它的权重值应由这2个评价指标权重的加权平均值来进行确定。

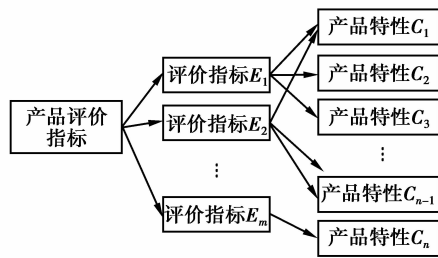


图5 评价指标与产品特性的映射关系

### 2.3 需求评价模型的建立

针对客户需求指标,引入可拓学原理,建立需求可拓物元模型 $R$ ,表达式为

$$R = \begin{pmatrix} O, & C_1, & v_1, & w_1 \\ & C_2, & v_2, & w_2 \\ & \vdots & \vdots & \vdots \\ & C_m, & v_m, & w_m \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$(i = 1, 2, \dots, m)$ 。

式中: $O$ 代表按客户需求确定的产品名称; $C = (C_1, C_2, \dots, C_i)^T$ 代表需求的目标项; $V = (v_1, v_2, \dots, v_i)^T$ 代表目标项的取值范围; $W = (w_1, w_2, \dots, w_i)^T$ 为每个需求目标项的权重, $i = 1, 2, \dots, m$ 。权重值的确定分为5个等级:基本不重要、一般重要、重要、较为重要、很重要。将这5个等级分别量化为:0.1、0.3、0.5、0.7、0.9。

将需求目标转换为评价指标时,考虑需求目标的权重,认为一定权重以上的需求项目为重点考虑的范围,即评价时的重点参考指标。如:将权重大于

等于0.3的纳入考虑范围。将转换后的各个评价指标项的权重 $\alpha_i$ 进行标准化,满足 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ 。由此建立转换后的评价物元模型 $E$ ,表达式为

$$E = \begin{pmatrix} M, & I_1, & u_1 & \alpha_1 \\ & I_2, & u_2 & \alpha_2 \\ & \vdots & \vdots & \vdots \\ & I_n, & u_n & \alpha_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中: $M$ 代表评价模型名称; $I = (I_1, I_2, \dots, I_j)^T$ 代表评价的各个指标; $U = (u_1, u_2, \dots, u_j)^T$ 代表评价指标的阈值; $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j)^T$ 代表每个指标的相对权重值,满足 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, j = 1, 2, \dots, n$ 。

## 3 基于需求评价模型的配置方法

### 3.1 测距的确定

评价模型的建立是配置条件的前提,给产品配置提供了配置的依据。根据需求评价模型要求确定是否有满足条件或可满足修改条件的产品族实例存在是产品配置的必要步骤。

通过建立评价指标与实例产品的功能性能指标之间的关联函数来评判评价模型指标与产品族实例的关联程度。评价指标通常是一个取值范围,并且每个指标的最优值都不一定是取值范围的中点,在关联函数中引入测距的概念。如:误差希望越小越好,成本希望越低越好。

按照配置的最优值与阈值范围之间关系分别选择右侧距和左侧距进行计算。若最优值大于阈值的中点即中心值,选择右侧距进行计算;反之,最优值小于中心值则选择左侧距进行计算。右侧距 $\rho_R$ 和左侧距 $\rho_L$ 的表达式分别为:

$$\rho_R(x, x_0, X_0) = \begin{cases} a - x, & x \leq x_0; \\ \frac{a - x_0}{b - x_0}(b - x), & x \in (x_0, b); \\ x - b, & x \geq b. \end{cases} \quad (3)$$

$$\rho_L(x, x_0, X_0) = \begin{cases} a - x, & x \leq a; \\ \frac{b - x_0}{a - x_0}(x - a), & x \in (a, x_0); \\ x - b, & x \geq x_0. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $X_0 = \langle a, b \rangle$ 为评价指标取值范围; $x_0$ 为评价指标的最优值; $x$ 为待评价的产品族实例功能性能指标值。

### 3.2 评价指标与产品特征之间的关联算法

关联函数用于确立评价指标与待评价的产品族



实例之间的关联程度。根据已算出的测距值建立每个评价指标与待评价的产品族实例功能性能指标之间的初等关联函数,对每个评价指标  $I_i$  建立关联函数  $k(x_i)$ ,表达式为

$$k(x_i) = \frac{\rho(x_i, x_{i0}, X_{i0})}{D(x_i, X_{i0}, X)}, \quad (5)$$

式中:  $D(x_i, X_{i0}, X)$  为点  $x_i$  与  $X_{i0} = \langle a, b \rangle$  和  $X = \langle c, d \rangle$  组成的区间套的位值,计算式为

$$D(x_i, X_{i0}, X) = \begin{cases} \rho(x_i, X) - \rho(x_i, X_{i0}), & \rho(x_i, X) \neq \rho(x_i, X_{i0}) \text{ 且 } x_i \notin X_{i0}; \\ \rho(x_i, X) - \rho(x_i, X_{i0}) + a - b, & \rho(x_i, X) \neq \rho(x_i, X_{i0}) \text{ 且 } x_i \in X_{i0}; \\ a - b, & \rho(x_i, X) = \rho(x_i, X_{i0}). \end{cases} \quad (6)$$

$X_{i0}$  和  $X$  2 个区间范围的确定是计算关联函数的基础,是确定关联程度的关键所在,直接影响着配置的结果。这 2 个基本空间的范围,即  $a, b, c, d$  4 个值的确定可采用以下 3 种方式进行:

- 1) 由专业知识和技术指标进行确定;
- 2) 由以往的历史数据确定;
- 3) 采用 80/20 统计规律确定。

以上 3 种较为常规的确定方法,通常可结合前 2 种方法来确定配置产品的空间范围值。

产品评价指标的权重在产品配置中存在的不同,相应地产品功能性能指标的权重也各不相同。为了全面反映评价指标对配置结构的影响,量化每个关联函数对配置的影响,需建立评价的综合关联函数。

首先将关联函数  $k(x_i)$  规范化,计算规范的关联函数  $k_{ip}$ ,即

$$k_{ip} = \frac{k_p(x_{ip})}{\max_{p \in \{1, 2, \dots, m\}} |k_p(x_{ip})|} \quad (7)$$

显然,规范后的关联函数  $k_{ip}$  满足  $-1 \leq k_{ip} \leq 1$ 。考虑每个评价指标的权重  $\alpha_i$  各不相同,因此建立能够全面反映评价效果的综合指标——综合关联函数,使得综合关联函数满足  $K(I) = \sum_{i=1}^n k_{ip} \alpha_i$ 。综合关联函数  $K(I)$  的大小反映出被评价的产品族实例与客户需求的接近程度。

### 3.3 实例的修改

提取的相似实例在某些特征方面不能达到评价的最优值。根据特征权重的高低排序,将需替换或更改的模块确定,并在同层次的模块族中找到满足评价指标的模块作为备选方案。

配置中模块之间的约束规则主要包括:相容、互斥和不相关,如表 1 所示。

表 1 零部件约束规则

约束规则	描述
相容	选择 A $\leq$ 选择 B
互斥	选择 A $\neq$ 选择 B
不相关	选择 A 与选择 B 无约束关系

配置过程中,依照最少修改达到最大满足的原则进行模块的更改和替换。在需要满足评价指标前提下无法找到可替换的模块时,作为待新建的模块特征进行全新设计。

## 4 实例分析

以某系列减速机齿轮箱为例,按客户需求配置一台电机功率为 630 kW,电机转速为 1 000 r/min,减速比达到 29.39 的齿轮箱减速器。

齿轮箱的主要技术参数包括:齿轮箱额定功率、输入转速和输出转速、输出机功率、安置类型、尺寸大小及润滑方式等几大部分。按照输入转速和输出转速的比值确定齿轮箱的减速级别并由此划分产品系列。同一系列齿轮箱在外形尺寸及内部箱体结构上基本一致,不同之处在于齿轮箱的速比、转速、功率等参数的确定、齿轮箱的润滑方式及箱体的组合形式上。齿轮箱产品的部分组成结构如图 6 所示。

根据每个需求指标的权重进行归一化计算,客户需求物元模型为

$$R = \begin{pmatrix} \text{减速机,} & \text{实际减速比} & 29.39 & 0.21 \\ & \text{电机转速} & 1\,000 & 0.21 \\ & \text{电机功率} & 630 & 0.17 \\ & \text{转向} & \text{逆时针} & 0.12 \\ & \text{润滑} & \text{强制润滑} & 0.07 \\ & \text{环境温度} & 23^\circ | (0^\circ, 40^\circ) & 0.07 \\ & \text{轴承类型} & \text{减摩型} & 0.03 \\ & \text{中心距} & 1\,570 \text{ mm} & 0.12 \end{pmatrix} \quad (8)$$

针对上述各客户需求指标进行分析,来确定配置评价的各个要素:

1) 齿轮箱的速比。齿轮箱输入端与输出端的转速之比。速比的大小影响着减速器的结构以及传动模块的选择。

2) 额定功率。额定功率的大小是确保齿轮箱能够在特定环境下正常工作的前提。

3)最大输入转速。齿轮箱在与原动机相连接时,保持与原动机之间的正常工作。

4)齿轮型号。齿轮的型号与额定功率息息相关,齿轮越大产生的额定功率也越大,同时也影响着整体减速机的尺寸大小,是表征配置效果的重要指标。

5)环境温度。温度大小影响着减速机的工作效率,与减速机的载荷率联系紧密。

以上五大因素能够反映出客户对产品的需求要素,同时也能作为判断配置效果的评价依据,由此建立需求评价模型:

$$I = \begin{pmatrix} \text{需求评价} & \text{减速比} & 29.39 & 0.24 \\ & \text{最大输入转速} & 1\ 000 & 0.24 \\ & \text{齿轮型号} & (630/710) & 0.18 \\ & \text{额定功率} & 630 & 0.18 \\ & \text{环境温度} & 23^{\circ}\text{C} & 0.16 \end{pmatrix}$$

将以上5个因素的评价指标映射到产品功能性

能指标中,并确定各指标取值范围,由此从客户需求到产品功能性能指标的映射关系如图7所示。

根据减速比的需求,电机的转速分为750/1 000/1 500 3种分类,本次配置中按需求选择最大输入转速为1 000的类型。由减速机中心距的大小确定齿轮的型号只能选择630或710型,其他型号不予考虑。此2项指标作为不可再更改的固定指标类型。同时缩小带评价的减速比范畴,和可以认定减速比 $n=29.39$ 属于3级减速机系列范畴,该类型减速机的减速比在22.4~90.0之间。减速比和额定功率2项指标在一定范围内可以进行选择,这2项指标作为可选指标。最后根据工作环境再确定热平衡需用功率的选择,与其他指标的选择没有特别条件的约束,作为其他指标。

根据固定指标的要求,共纳入计算范围内的产品族实例为8个,并将最终归纳的产品族实例功能性能指标表如表3所示。

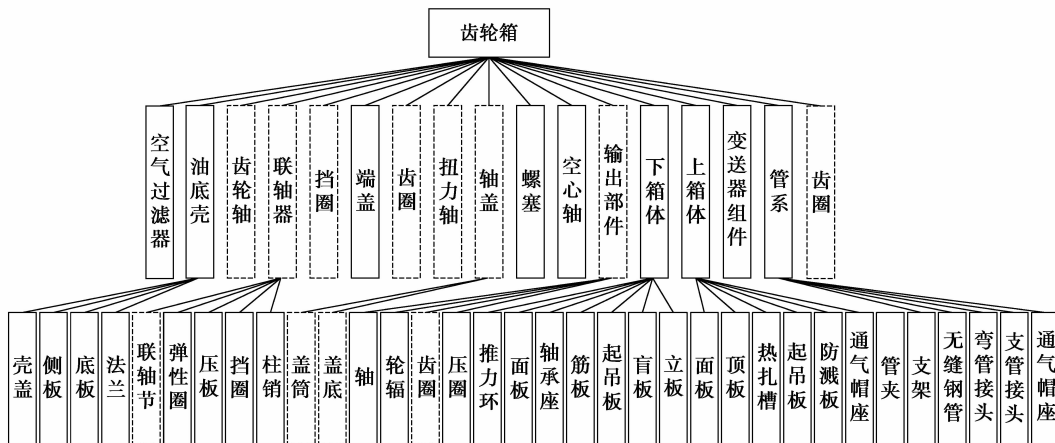


图6 齿轮箱产品结构图(部分)

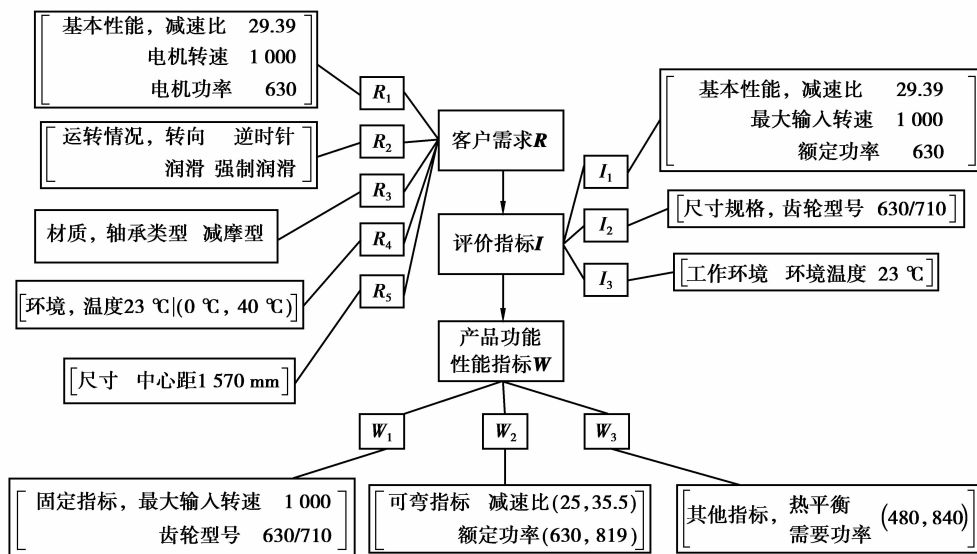


图7 客户需求到产品实例功能性能指标的转换

表3 待评价产品族实例特性

编号	名义 减速比	齿轮 型号	实际 减速比	额定 功率
1	25.0	630	24.37	843
2	25.0	710	26.13	1 200
3	28.0	630	27.41	759
4	28.0	710	29.39	1 080
5	31.5	630	31.56	674
6	31.5	710	32.22	960
7	35.5	630	32.83	590
8	35.5	710	37.22	840

由于篇幅限制,在此不再撰述计算过程。依据产品功能性能物元模型建立的取值范围,按照关联函数计算以上各个产品的需求评价指标的关联值,并进行标准化后结果如表4。

表4 待评价产品族实例的关联值

编号	名义 减速比	齿轮 型号	实际 减速比	额定 功率
1	25.0	630	-0.779	-0.296
2	25.0	710	-0.436	-1.000
3	28.0	630	-0.134	-0.129
4	28.0	710	0.268	-0.763
5	31.5	630	0.047	0.037
6	31.5	710	-0.040	-0.527
7	35.5	630	-0.161	-0.405
8	35.5	710	-1.000	-0.415

计算每个待测实例的关联度如表5所示。

表5 待评价产品族实例的综合关联度

编号	名义 减速比	齿轮 型号	综合 关联度
1	25.0	630	0.250
2	25.0	710	0.205
3	28.0	630	0.435
4	28.0	710	0.417
5	31.5	630	0.507
6	31.5	710	0.385
7	35.5	630	0.378
8	35.5	710	0.325

结果表明,根据客户需求,第5种产品实例的综合关联度最高,达到0.507,为3级减速机,名义速比为31.5,齿轮型号为630的产品最为接近客户提出的需求,再根据环境温度及工作条件可确定出热平衡需用功率为624 kW,可以选择风扇冷却。在该产品实例基础上按照零部件配置的约束规则,改变齿轮组中的输入轴、输出轴以及齿轮的配对选择即可满足配置要求,图6中虚框表示的部分为需按照客户需求进行更换或修改的零部件信息。按照配置的约束规则进行相应的筛选,最终在零部件库中找到满足要求的变换零部件,实现产品的配置。

## 5 结束语

在大规模定制的环境下,产品实例的数量和类别在不断增加,提高产品实例效率是企业必须解决的难题。针对现有配置实例种类多,配置效率低的问题,引入可拓学原理,提出建立基于客户需求的配置评价模型。与现有的配置方法相比,它从客户的需求出发,将最终评价作为配置条件来实现产品的主动配置;将评价模型的各个指标通过可拓关联规则映射到产品的特性指标中,挖掘出最具相似性的产品族实例,并进行实例修改,最终实现产品的配置,提高配置的效率。该方法在实例的修改上存在一定的人为因素干预,未来的工作将面向实例修改的优化算法研究。

## 参考文献:

- [1] BRIERE-COTE A, RIVEST L, DESROCHERS A. Adaptive generic product structure modeling for design reuse in engineer-to-order products[J]. Computers in Industry, 2010, 61(1): 53-65.
- [2] ZENG F S, JIN Y. Study on product configuration based on product model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(7/8): 766-771.
- [3] 但斌,覃燕红,王江平. 基于实例和 CSP 的产品配置方法[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(5): 511-514.  
DAN BIN, QIN YAN-HONG, WANG JIANG-PING. Product configuration method based on an authentic real case and a constraint satisfaction problem[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(5): 511-514.
- [4] LU Y J, WANG C Q. Configuration knowledge expression based on TLAC for ETO product in mass customization[C] // 2008 International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling, December 21-22, 2008, Wuhan, China. [S. l.]: IEEE, 2008: 842-846.
- [5] 王生发,顾建新,郭剑锋,等. 面向实例推理的产品设计本体建模研究及应用[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3):

- 112-117.
- WANG SHENG-FA, GU JIAN-XIN, GUO JIAN-FENG, et al. Research and application of ontology modeling for product design based on case reasoning[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3):112-117.
- [6] TSENG M M, JIAO J X. Case-based evolutionary design for mass customization [J]. Computers and Industrial Engineering, 1997, 33(1/2):319-323.
- [7] 王新,谭建荣,孙卫红. 基于实例的需求产品配置技术研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(2):146-151.
- WANG XIN, TAN JIAN-RONG, SUN WEI-HONG. Research on technology of case-based configuration for requirement product[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(2):146-151.
- [8] TSENG H E, CHANG C C, CHANG S H. Applying case-based reasoning for product configuration in mass customization environments [J]. Expert Systems with Applications, 2005, 29(4):913-925.
- [9] WANG S W, TAN J R, ZHANG S Y, et al. Case-based product configuration and reuse in mass customization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(2):233-236.
- [10] 蔡文,杨春燕,何斌. 可拓逻辑初步[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [11] 马辉,谭建荣,张树有,等. 一种面向大批量定制的产品可拓设计方法[J]. 中国机械工程, 2005, 16(15):1344-1349.
- MA HUI, TAN JIAN-RONG, ZHANG SHU-YOU, et al. Extense design method of products in domain of mass customization[J]. 2005, 16(15):1344-1349.
- [12] 白晶,秦现生,张顺琦,等. 基于模块可拓性的产品配置设计[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(11):2089-2103.
- BAI JING, QIN XIAN-SHENG, ZHANG SHUN-QI, et al. Product configuration design based on module extension [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(11):2089-2103.
- [13] 苏楠,赵燕伟,唐辉军,等. 基于可拓逻辑的产品族可配置规划研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(10):1897-1904.
- SU NAN, ZHAO YAN-WEI, TANG HUI-JUN, et al. Product family configuration planning based on extension logic[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(10):1897-1904.
- [14] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [15] 刘晓冰,袁长峰,高天一,等. 基于特征面向客户的层次型产品配置模型[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(7):527-531.
- LIU XIAO-BING, YUAN CHANG-FENG, GAO TIAN-YI, et al. Layered product configuration model based on feature and faced to customer[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(7):527-531.
- [16] 阎春平,周青华,范辉先,等. 产品本体筛检方法及其在变型设计中的应用[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5):55-61.
- YAN CHUN-PING, ZHOU QING-HUA, FAN HUI-XIAN, et al. Product ontology screening and its application in variant design[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(5):55-61.
- [17] QIU L M, ZHANG S Y, YU J X, et al. An extensible model of product configuration knowledge based on matter-element[C]//Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, October 18-20, 2008, Jinan, Shandong, China. [S. l.]: IEEE, 2008:536-542.
- [18] HELO P T. Product configuration analysis with design structure matrix[J]. Industrial Management and Data Systems, 2006, 106(7):997-1011.
- [19] 陈锋,叶世琴,姜燕,等. 产品族改进中的客户需求信息表达与映射方法[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007, 30(9):144-147.
- CHEN FENG, YE SHI-QIN, JIANG YAN, et al. Research on mapping method of customer need information in product family improvement[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(9):144-147.

(编辑 张 苹)