

基于模糊商空间理论的产品粒化过程分析*

张萌, 李国喜, 龚京忠, 吴宝中

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 模块形成与划分是展开模块化设计及大规模定制生产的关键环节。为了进一步扩展产品模块化的定量分析手段, 提出了一种基于模糊商空间理论的产品粒化方法。通过引入粒度计算, 将基于相关性分析的产品模块化过程转化为基于粒度计算的产品粒化过程, 并应用模糊商空间理论对其进行了分析, 给出了基于归一化距离和综合模糊相似关系的产品粒度空间构建方法, 建立了基于两阶段优化算法的最佳产品粒层确定流程, 进而得到了最优模块划分方案, 最后以某堆垛机货叉机构为例对该方法进行了有效性验证。此方法为产品模块聚类与优化提供了一种新的数值分析和评价手段, 应用结果表明该方法具有一定的可行性和合理性, 能够有效指导产品模块化过程的实施。

关键词: 模糊商空间; 产品粒化; 分层递阶结构; 产品粒度空间; 最佳产品粒层

中图分类号: TH122 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2012)06-0181-06

Granulating process analysis of products based on the theory of fuzzy quotient space

ZHANG Meng, LI Guoxi, GONG Jingzhong, WU Baozhong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Module identification plays an important role in modular design and mass customization. In order to further extend the quantitative methodology for product modularization, an approach to product granulation based on the theory of fuzzy quotient space was proposed. The traditional product modularization based on the relativity analysis was translated into the product granulation by introducing the granular computing method, and the product granulation was analyzed by the theory of fuzzy quotient space. The product granular space was established based on the normalized distance and the integrated fuzzy similarity relation, and the optimal granular layer was obtained using a two-stage optimization algorithm. Then the optimal modularization scheme was achieved. A case of the telescopic shuttle mechanism of automatic storage/retrieval machine was studied to illustrate the validity of the proposed method. This approach offers a new way of numerical analysis and evaluation for module identifying and optimizing, and the application result shows that the proposed method is feasible and rational, which can guide the product modularization process effectively.

Key words: fuzzy quotient space; granulation; hierarchical structure; product granular space; optimal granular layer

模块化设计通过产品族模块的选择与组合, 能够实现客户化产品的批量生产以及大规模生产下的个性化定制, 有效地解决了产品品种、规格与研制周期、成本之间的制约关系。模块聚类和模块粒度优化是实施模块化设计的基础和关键, 其结果直接影响到产品的功能与性能、模块的通用程度等。产品模块形成过程可以从不同的角度展开, 如面向全生命周期^[1]、面向产品族构建^[2-3]、面向大批量定制^[4-5]、面向概念设计^[6-8]、面向配置设计^[9-11]等进行模块划分, 通过采用不同的方法求解, 如模糊聚类^[3,7]、图分割^[6]、智能算法^[9]、模糊 C 均值聚类^[10]等, 最终得到的结果也不尽相

同却又各具特点。

粒度计算是研究基于多层次粒结构的思维方式、问题求解方法、信息处理模式及其相关理论、技术和工具的学科^[12]。粒度计算的两项主要内容是构建粒结构和基于粒结构进行问题求解, 构建粒结构的过程就是问题的粒化过程。粒化是将一个整体分割成部分, 每个部分是拥有相同、相似性质的个体的集合^[13]。因此, 从粒度计算的角度看, 产品模块的形成与划分过程也就是以产品零件为论域的产品粒化过程, 然而目前尚未发现基于粒度计算的产品模块形成与划分方法的研究。

本文考虑将粒度计算的理论、技术和工具应

* 收稿日期: 2012-03-26

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 张萌(1984—), 男, 陕西西安人, 博士研究生, E-mail: z.mengdr@gmail.com;

李国喜(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: lgx2020@sina.com

用到产品模块划分中,把传统的基于相关性分析的产品模块化过程转化为基于粒度计算的产品粒化过程,从而使离散的零件有序地聚合成产品粒结构。

基于商空间的粒计算理论是目前粒度计算最主要的理论之一^[14]。将基于等价关系的商空间理论推广到以模糊等价关系为基础的商空间理论,就得到模糊商空间理论。本文基于模糊商空间理论研究产品的粒化过程,通过分析并量化影响粒化过程的一系列因子,采用归一化距离和模糊相似关系构建产品粒度空间;通过建立模块划分方案评价数学模型,基于产品粒度空间确定最佳产品粒层。从而为产品模块聚类 and 模块粒度优化提供一种新的解决方案。

1 基于模糊商空间的产品粒化过程

产品粒化过程就是将离散的零件按照自底向上的方式逐层聚合为模块的过程,可以认为零件是基本产品粒,不同层级的模块对应不同粒层的产品粒。因此,产品的模块化组成结构就是由粒和粒层构成的分层递阶结构,称为产品粒度空间。

采用三元组 (X, f, T) 表示产品零件构成, X 表示产品的所有零件, $f(\cdot)$ 表示零件的属性, T 表示零件之间的相互关系。 (X, f, T) 代表产品最细的粒度,产品粒化就是求解 (X, f, T) 的商空间 $([X], [f], [T])$, $([X], [f], [T])$ 比 (X, f, T) 的粒度粗。可以通过三种方式实现产品的粒化:对论域 X 进行粒化、对属性 f 进行粒化和对结构 T 进行粒化^[14]。本文采用对论域 X 进行粒化的方式,把结构上或功能上关系密切的零件划分为一类。

设 R 是 X 上一个模糊等价关系,令 $R_\lambda = \{(x, y) | R(x, y) \geq \lambda\}$ ($0 \leq \lambda \leq 1$), 则 R_λ 是 X 上的一个普通等价关系,称 R_λ 为 R 的截关系。令等价关系 R_λ 对应的商空间为 $X(\lambda)$, 于是: $\forall \lambda_1, \lambda_2 \in [0, 1], \lambda_1 \geq \lambda_2$, 则 $R_{\lambda_2} < R_{\lambda_1}$, $X(\lambda_2)$ 是 $X(\lambda_1)$ 的商集。商空间族 $\{X(\lambda) | 0 \leq \lambda \leq 1\}$ 按商集的包含关系构成一个有序链,即 $\{X(\lambda) | 0 \leq \lambda \leq 1\}$ 构成一个对 X 的分层递阶结构。采用传递闭包法可以将 X 上的模糊相似关系 R 改造为等价关系 \tilde{R} , \tilde{R} 与 R 的关系为: $R \rightarrow R^2 \rightarrow (R^2)^2 \rightarrow \dots \rightarrow R^{2^k} = \tilde{R}$ 。因此, X 上的模糊相似关系 R 对应的分层递阶结构 $\{X_1(\lambda) | 0 \leq \lambda \leq 1\}$ 与其改造得到的模糊等价关系 \tilde{R} 对应的分层递阶结构 $\{X_2(\lambda) | 0 \leq \lambda \leq 1\}$ 相同,即 $\forall \lambda \in [0, 1], X_1(\lambda) = X_2(\lambda)$ 。

基于此,产品的粒化问题可以表达为:(1)针对

产品零件构成 (X, f, T) , 分析并建立 X 上的模糊相似关系 R (而不用计算模糊等价关系 \tilde{R}), 求解其有序商空间族 $\{([X]_\lambda, [f]_\lambda, [T]_\lambda) | 0 \leq \lambda \leq 1\}$, 得到 X 的分层递阶结构, 即产品粒度空间。 $([X]_0, [f]_0, [T]_0)$ 是最细的粒度, 每个零件作为一个粒; $([X]_1, [f]_1, [T]_1)$ 是最粗的粒度, 所有零件构成的整体作为一个粒。 $\forall \lambda \in (0, 1)$, 都有 $[X]_1 < \dots < [X]_\lambda < \dots < [X]_0$ 。(2)面向特定的目的, 建立产品粒化评价目标函数 $\max(J(\lambda))$, 确定分层递阶结构上的最佳粒层 $([X]_{\lambda'}, [f]_{\lambda'}, [T]_{\lambda'})$, 即产品粒度空间上的最佳产品粒层。基于模糊商空间的产品粒化过程如图 1 所示。

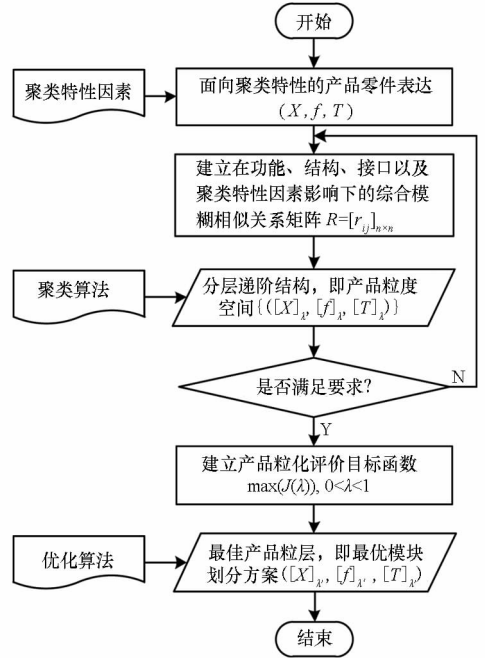


图 1 基于模糊商空间的产品粒化过程
Fig.1 Product granulation based on the fuzzy quotient space

2 产品粒度空间构建

2.1 综合模糊相似关系

模块化的设计特点就是将具有最大功能和结构相似性的零件聚合成一个模块, 形成模块内部高聚合、模块之间松耦合的产品状态。零部件之间的相关性分为功能相关、结构相关和接口相关, 其关系数值的定义规则参见文献[7]。建立零件之间的功能相关性矩阵 $T_f = [f_{ij}]_{n \times n}$ 、结构相关性矩阵 $T_s = [s_{ij}]_{n \times n}$ 和接口相关性矩阵 $T_l = [\tau_{ij}]_{n \times n}$, n 为产品零件的数量。 T_f 、 T_s 和 T_l 都具有对称性和自反性, 为模糊相似矩阵。

从不同的角度展开产品模块化形成过程或针对不同的产品模块化目标, 将对模块划分结果提出不同的要求, 称这些要求为聚类特性。面向聚

类特性进行产品零件表达,矩阵的行表示产品零件,矩阵的列表示聚类特性因素影响下的零件特征值。设有 m 个聚类特性,则 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} = [a_{ij}]_{n \times m}$, a_{ij} 表示第 i 个零件和第 j 个聚类特性因素之间的相关度,采用 0-1-3-9 约定。即当零件和聚类特性因素不相关时取 0,弱相关时取 1,一般相关时取 3,强相关时取 9。采用数量积法进行基于距离的相似性定义,将面向聚类特性的产品零件相关度矩阵转化为模糊相似矩阵 $T_c = [c_{ij}]_{n \times n}$ 。

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ \frac{1}{M} \sum_{k=1}^m \omega_k \cdot a_{ik} \cdot a_{jk} & i \neq j \end{cases} \quad (1)$$

$$M = \max_{i \neq j} \left(\sum_{k=1}^m \omega_k \cdot a_{ik} \cdot a_{jk} \right) \quad (2)$$

式中 ω_k 为聚类特性因素的影响权重,由层次分析法求解, $\sum_{k=1}^m \omega_k = 1$ 。

通过将 T_F, T_S, T_I 和 T_C 加权平均,得到产品零件综合模糊相似关系,用矩阵表示为 $R = [r_{ij}]_{n \times n}$ 。

$$R = W_F \cdot T_F + W_S \cdot T_S + W_I \cdot T_I + W_C \cdot T_C \quad (3)$$

$$r_{ij} = W_F \cdot f_{ij} + W_S \cdot s_{ij} + W_I \cdot \tau_{ij} + W_C \cdot c_{ij} \quad (4)$$

式中 W_F, W_S, W_I 和 W_C 代表权重,而且 $W_F + W_S + W_I + W_C = 1$ 。

2.2 分层递阶结构

根据模糊商空间的基本定理,下面的断言是等价的:(1) 在 X 上给定一个模糊等价关系;(2) 在 X 的某个商空间上给定一个归一化的等腰距离;(3) 给定 X 的一个分层递阶结构。由于模糊等价关系与商空间的一个归一化距离等同,故可用距离 D_λ 进行距离分析,即用等价关系 D_λ (其基 $B_\lambda = \{(x, y) \mid d(x, y) \leq \lambda\}$) 求其商空间的方法来求聚类^[14]。而从前面得到的结论我们知道,模糊相似关系对应的分层递阶结构与其模糊等价关系对应的分层递阶结构相同,即根据 X 上的模糊相似关系 $R = [r_{ij}]_{n \times n}$ 可以唯一确定 X 的分层递阶结构 $\{([X]_\lambda, [f]_\lambda, [T]_\lambda)\}$ 。所以,可以对 X 上的模糊相似关系 R 采用归一化距离求商空间的方法来进行产品粒化,即产品模块聚类。

令 $d(i, j) = 1 - r_{ij}$, 则 $D = \{d(i, j)\} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p\}$, 其中 $0 = \lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_p, 2 < p < n$ 。采用聚类算法可以得到 X 的分层递阶结构,分层递阶结构生成算法实现如下^[15]：

Step1. $i \leftarrow 1, j \leftarrow 0, k \leftarrow 0, A \leftarrow \phi, X(\lambda_i) = C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;

- Step2. $\text{Output} X(\lambda_i) = C$;
- Step3. $i \leftarrow i + 1, A \leftarrow C, C \leftarrow \phi$;
- Step4. $B \leftarrow \phi$;
- Step5. $C_j \in A, B \leftarrow B \cup C_j, A \leftarrow A \setminus C_j$;
- Step6. $\forall C_k \in A, \text{if } \exists x_j \in C_j, x_k \in C_k \text{ such that } d(j, k) \leq \lambda_i \text{ then } B \leftarrow B \cup C_k, A \leftarrow A \setminus C_k$;
- Step7. $C \leftarrow \{B\} \cup C$;
- Step8. If $A \neq \phi$ then goto Step4, otherwise if $X(\lambda_i) \neq X(\lambda_{i-1})$, output $X(\lambda_i) = C$;
- Step9. If $i = p$ or $C = \{X\}$ then goto Step10, otherwise goto Step3;
- Step10. End.

经由上述算法能够求得 X 的分层递阶结构 $\{([X]_\lambda, [f]_\lambda, [T]_\lambda)\}$, 其示意结构如图 2 所示。

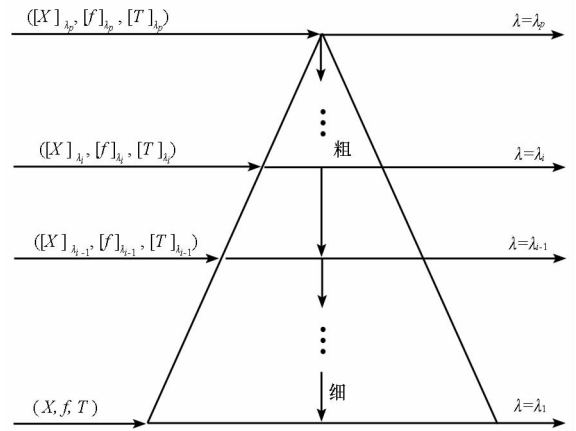


图 2 产品粒度空间的示意结构

Fig. 2 The structure of product granular space

3 最佳产品粒层确定

模块划分粒度是模块化分析中一个非常重要的概念,它直接决定了划分结果的合理性和有效性。对于特定复杂程度的产品而言,存在合适的模块化粒度区间以及最优模块化粒度,即产品粒度空间 $\{([X]_\lambda, [f]_\lambda, [T]_\lambda)\}$ 中存在某一粒层 $([X]_{\lambda'}, [f]_{\lambda'}, [T]_{\lambda'})$ 使聚类效果达到最优,即最佳产品粒层。

采用两阶段优化算法确定最佳产品粒层:第一阶段根据聚类数的有效性指标,在 X 的分层递阶结构中确定满足一定阈值或较优的若干产品粒层,抽取出合适的模块化粒度区间;第二阶段针对模块方案的优化目标,建立产品粒度评价函数,进而确定最佳产品粒层,得到最优模块化粒度。采用两阶段优化算法确定最佳产品粒层的流程如图 3 所示。

两阶段优化算法通过第一阶段去除掉不满足聚类有效性指标的产品粒层,得到有效粒层列表,

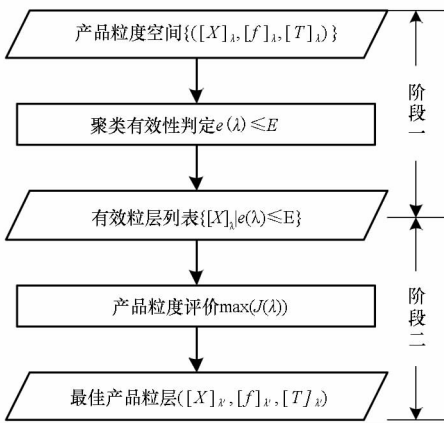


图 3 最佳产品粒层确定过程
Fig. 3 Flowchart of determination of the optimal granular layer

能够在保证算法性能的同时大大减小产品粒度评价的计算量,进而实现最佳产品粒层的快速求解。

3.1 聚类有效性判定

一个好的产品粒层应尽可能地反映产品的模块化结构,即模块内部高聚合、模块之间松耦合,对应到粒结构中,就是要求粒内零件的距离尽可能小、粒间零件的距离尽可能大。

取产品粒度空间 $\{([X]_\lambda, [f]_\lambda, [T]_\lambda)\}$ 中的某一粒层 $([X]_\lambda, [f]_\lambda, [T]_\lambda)$, 设 $X(\lambda) = \{C_1^A, C_2^A, \dots, C_q^A\}$, q 为粒的数量, C_i^A 为该粒层的第 i 个粒。粒内零件的距离的总和定义为粒内紧凑度 D_{in} , 粒间零件的距离的总和定义为粒间分离度 D_{bet} 。分别如下:

$$D_{in}(\lambda) = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \frac{\sum d(u, v)}{|C_i^A| \cdot (|C_i^A| - 1)}$$

$$u, v \in C_i^A, u \neq v \quad (5)$$

$$D_{bet}(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^q \sum_{j=i+1}^q d(g, h)}{q(q-1)}$$

$$g \in C_i^A, h \in C_j^A, i \neq j \quad (6)$$

式中 $|C_i^A|$ 表示粒内包含零件的数量, d 可以通过模糊相似矩阵 R 获得。可见, $D_{in}(\lambda)$ 越小、 $D_{bet}(\lambda)$ 越大, 说明该粒层的聚类效果越好。

于是可以通过定义有效性指标 $e(\lambda) = \frac{D_{in}(\lambda)}{D_{bet}(\lambda)}$ 来进行聚类有效性判定, 得到满足 $e(\lambda) \leq E$ (常量 E 由领域专家确定) 的若干有效产品粒层, 这些产品粒层组成有效粒层列表, 并以此为输入展开第二阶段的优化。

3.2 产品粒度评价

模块划分结果的不同会对产品设计制造的各

个环节造成影响, 且不同环节的影响程度不同。针对产品不同阶段的要求, 可以构建各种产品粒度评价函数。这些评价函数可能由多个优化目标共同构成, 如客户需求满意度、装配复杂度、变型设计复杂度、模块组合复杂度以及成本等。本文不针对某些产品研制要求建立特定的产品粒度评价函数, 而是通过对已有成果的总结构建产品粒度评价的一般模型。

设产品粒度的评价要素有 Q 个, 每一个评价要素的函数模型为 $J_i (i \in [1, Q])$, 假设这 Q 个评价要素之间相互独立, 则产品粒度评价函数为:

$$\max(J(\lambda) = \sum_{i=1}^Q W_i \cdot J_i(\lambda)), \sum_{i=1}^Q W_i = 1 \quad (7)$$

式中 W_i 为第 i 个评价要素的权重。评价函数中自变量 λ 对应不同的产品粒层, 而产品粒层处于离散状态, 因此最佳粒层确定为离散无约束优化问题。

针对第一阶段得到的有效粒层列表, 依次对其进行 $\sum_{i=1}^Q W_i \cdot J_i(\lambda)$ 求解, 选取 $\max(J(\lambda))$, 从而得到最佳产品粒层 $([X]_\lambda, [f]_\lambda, [T]_\lambda)$ 。

4 案例验证

堆垛机是自动化立体仓库的核心物流设备, 主要用途是在多层货架的巷道内来回运行, 实现货格与出、入口之间以及货格之间的物料交换。货叉机构是堆垛机的存货、取货执行机构, 通过平推、平拉托盘实现与立体仓库物料的交换。图 4 展示了货叉机构的三维装配体爆炸模型即其零件构成。

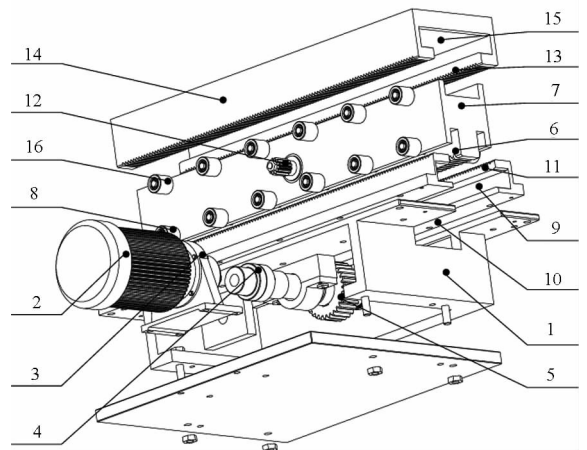


图 4 某堆垛机货叉机构的爆炸视图

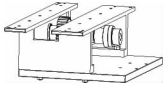

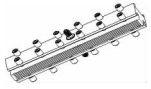


Fig. 4 Exploded view of the telescopic shuttle mechanism

1. 固定基体 2. 交流电机 3. 减速器 4. 联轴器
5. 动力齿轮 6. 驱动齿条 7. 中层基体 8. 下滚轮
9. 下滚槽 10. 下层基体 11. 固定齿条 12. 平动齿轮
13. 倍速齿条 14. 下层基体 15. 上滚槽 16. 上滚轮

函数最大的产品粒层,即得到最佳产品粒层。客户需求满意度、装配复杂度和变型设计复杂度的计算公式参见文献[9],这里直接给出计算结果: $\lambda_6 = 0.234$ 对应的粒层为最佳产品粒层。相应的模块聚类效果见表 3。

表 3 某堆垛机货叉机构最佳产品粒层

Tab.3 The optimal granular layer of the shuttle mechanism

序号	产品粒/模块	三维模型示意
1	{1,4,5}	
2	{2,3}	
3	{6,7,8,12,16}	
4	{9,10,11}	
5	{13,14,15}	

5 结论

本文从粒度计算的角度分析产品的模块化过程,将模糊商空间理论应用到产品粒化过程中,建立了基于归一化距离和综合模糊相似关系的产品粒度空间,采用两阶段优化算法确定了最佳产品粒层,为产品模块方案规划与优化提供了一种新的可行解决方案,并以某堆垛机货叉机构为对象进行了实例验证。该方法可以有效实现产品的模块聚类 and 模块粒度优化,进而提高产品的功能与性能、模块的通用程度等。同时,本文的方法还表明粒度计算的相关理论、技术、算法和工具可以用来研究产品模块化形成以及模块化设计,进一步拓展了模块化研究的范畴。

参考文献 (References)

[1] Gu P, Sosale S. Product modularization for life cycle engineering[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1999, 15(5): 387-401.

[2] Meng X H, Jiang Z H, Huang G Q. On the module identification for product family development[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007(35): 26-40.

[3] Moon S K, Kumara S R T, Simpson T W. Data mining and fuzzy clustering to support product family design [C] // Proceedings of IDETC/CIE. Pennsylvania, USA: ASME, 2006: 1-9.

[4] Charalamos D, Vincent E, Katharina G M E, et al. A classification framework for product modularization methods [C] // Proceedings of ICED11. Frederic, Denmark, 2011: 400-409.

[5] Nepal B, Monplaisir L, Singh N, et al. Product modularization considering cost and manufacturability of modules [J]. International Journal of Industrial Engineering, 2008, 15(2): 132-142.

[6] 龚京忠, 邱静, 李国喜. 基于图分割的机械系统概念模块划分[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(3): 103-108. GONG Jingzhong, QIU Jing, LI Guoxi. Conceptual module identifying for mechanism based on graph partitioning [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(3): 103-108. (in Chinese)

[7] 龚京忠, 李国喜, 邱静. 基于功能-行为-结构的产品概念模块设计研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(12): 1921-1927. GONG Jingzhong, LI Guoxi, QIU Jing. FBS-based product conceptual module design [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2006, 12(12): 1921-1927. (in Chinese)

[8] Hong E P, Park G J. Modular design method using the independence axiom and design structure matrix in the conceptual and detailed design stage [C] // Proceedings of ICAD2011, Daejeon, Korea, 2011: 134-141.

[9] 安相华, 冯毅雄, 谭建荣, 等. 基于智能聚类算法的产品粒度确定方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(4): 689-695. AN Xianghua, FENG Yixiong, TAN Jianrong, et al. Granularity decision method of product based on intelligent clustering algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16(4): 689-695. (in Chinese)

[10] Liu Y L, Zhang Z Y, Liu Z X. Customized configuration for hierarchical products: component clustering and optimization with PSO [J]. International Journal of Advanced Technology, 2011, 3(57): 1223-1233.

[11] Lee M. Product modularity: a multi-objective configuration approach[D]. Leicestershire: Loughborough University, 2010.

[12] Yao Y Y. Perspectives of granular computing [C] // The 2005 IEEE International Conference on Granular Computing, Beijing, China: IEEE, 2005: 85-90.

[13] Zadeh L A. Towards a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 19(1): 111-127.

[14] 张铃, 张钺. 问题求解的理论与应用——商空间粒度计算理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. ZHANG Ling, ZHANG bo. The theory and application of problem solving—the theory and application of quotient space granular computing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)

[15] Tang X Q, Zhu P, Cheng J X. The structural clustering and analysis of matrix based on granular space [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(11): 3768-3786.