

文章编号: 1001- 2486(2007) 03- 0103- 06

# 基于图分割的机械系统概念模块划分\*

龚京忠, 邱 静, 李国喜

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**为更好地实现机械系统的模块化设计, 在基于功能-行为-概念结构(function-behavior-conceptual structure, FBCS)的产品概念设计过程中引入面向产品概念要素的图分割聚类算法, 建立了一种面向 FBCS 的产品概念模块划分方法。以堆垛机推拉机构为例, 分析了根据产品的总体目标特征, 进行产品功能、行为、概念结构求解与功能分解迭代的产品概念设计分解方法。为描述概念产品, 提出黑箱法和 IDEF0 功能描述方法相结合的概念产品建模方法, 以建立产品子功能-概念结构模型。在此基础上, 建立了产品概念要素(功能、行为、概念结构、接口)的相关关系分析方法, 并引入图分割聚类算法进行产品概念要素聚合, 以实现产品概念模块的划分。推拉机构的概念模块划分证明该方法是可行和有效的。

**关键词:**概念设计; 图分割; 聚类算法; 模块划分; 概念模块

中图分类号: TH122 文献标识码: A

## Conceptual Module Identifying for Mechanism Based on Graph Partitioning

GONG Jing-zhong, QIU Jing, LI Guo-xi

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

**Abstract:** To better actualize product's modular design, the clustering algorithm based on graph partitioning for product's conceptual elements was introduced into the process of product's conceptual design on basis of FBCS (function, behavior, conceptual structure), and a FBCS-based method for product's conceptual module identifying was presented. Stacker's push-puller is taken as a type example while the method of product's conceptual design was analyzed. The method achieved the iterative transforming from function to behavior, from behavior to conceptual structure, from conceptual structure to sub function according to the product's general technology characteristic. To describe the conceptual product, the conceptual product's modeling method which combined black box with function description of IDEF0 was presented to construct the product's function-conceptual structure model. Then, the correlation analysis approach of product's conceptual elements (function, behavior, conceptual structure, interface) was established. To realize the identifying of product's conceptual module, the clustering algorithm based on graph partitioning was adopted to converge product's conceptual elements. This method was proved to be feasible and effective by identifying of the push-puller's conceptual module.

**Key words:** conceptual design; graph partitioning; clustering algorithm; module identifying; conceptual module

现代武器装备日益向着多样化、高性能、短周期、高可靠性、高机动性、良好的维修性和经济性发展。大批量定制生产既具有大批量生产的高效率、低成本, 又具有单件生产那样的高客户满意度<sup>[1]</sup>, 大批量定制生产是实现武器装备上述特点的重要制造模式。模块化设计是目前比较普遍采用的产品现代设计方法, 是实现产品系列化和多样化发展、大批量定制的基础, 实践证明它对于缩短系列化产品研制周期、降低产品生产费用及使用后的维修费用、加快产品标准化与系列化有明显作用。因此, 在武器装备研制过程中, 开展模块化设计是发展国防科技和武器装备的重要手段, 对缩短装备研制周期, 提高质量、可靠性和综合保障能力具有重要作用。模块划分是模块化设计的关键环节, 是实现产品模块创建的基础。

产品概念设计是从客户需求开始, 进行产品功能分解、原理求解、零部件构形、装配布局、概念产品评价<sup>[3]</sup>的过程。在产品的概念设计过程中, 进行产品的模块划分与创建, 以综合考虑功能、行为、概念结

\* 收稿日期: 2006- 12- 26

基金项目: 国家部委基金资助项目(51318010407)

作者简介: 龚京忠(1969-), 男, 副教授, 博士生。

构、接口等产品概念要素之间的相关关系;建立产品的概念模块,以提高模块内部的聚合程度、降低模块之间的耦合程度,使模块易于通用化、标准化、系列化,提高产品的可维修性和质量。

### 1 基于 FBCS 的产品概念设计

#### 1.1 自顶向下的产品概念设计分解

产品概念设计是从用户需求入手,通过 QFD(quality function deploy)方法映射产品的技术特征及其目标值<sup>[4]</sup>,其中包含了产品的总体功能及其目标值;并由总体功能及其目标值进行功能-行为-概念结构(FBCS)的迭代映射与分解。功能-行为转换、行为-结构映射、结构-功能分解是按照功能→行为→概念结构→功能的映射与求解方法,由产品的总体功能开始经过正向推理求解其实现行为,由行为推理求解产品功能的载体与行为的实现——概念结构,分解概念结构的子功能,持续进行该过程<sup>[5]</sup>,分解到概念结构有现成的零部件、模块或通过设计人员判断比较容易实现,就完成产品的功能分析、分解、概念设计过程,如图 1 所示。以上求解过程中,一个功能可由多种行为实现,一个行为可由多种概念结构实现,这样就会形成数种求解方案,如何确定可行方案,可以采用以下方法:(1)在功能推理原理过程中,加入功能目标约束,缩小解的空间<sup>[5]</sup>;(2)对推理获得的每一层次的行为、概念结构、功能进行相容性分析,对存在互斥现象的方案进行排除;(3)采用信息熵表达产品,计算产品分解的层次、实现的难易程度的复杂度,对各产品概念方案进行评价,确定最佳方案。

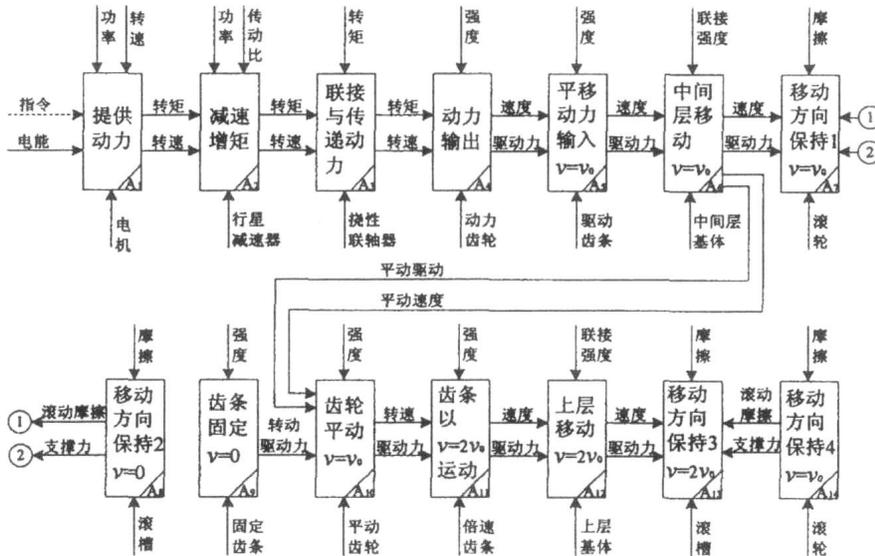


图 1 产品的子功能-概念结构模型

Fig. 1 Sub function- conceptual structure model of product

舰载堆垛机推拉机构是堆垛机的存取货机构,堆垛机通过推拉机构推、拉托盘实现立体库物料的交换。推拉机构由固定层、中间层、上层的三层差速叠移实现物料托盘的推拉。对推拉机构展开概念设计,自顶向下的推拉机构设计分解模型如图 2 所示。

#### 1.2 产品子功能-概念结构模型建立

通过前面的分析,经过 FBCS 的迭代过程可以实现产品功能的层次展开,但功能、行为、概念结构之间的相关关系等并没有表现出来。采用黑箱法和 IDEF0 功能描述方法相结合的概念产品建模方法建立产品的子功能-概念结构模型。黑箱法采用方框表示产品的功能,方框的输入、输出表示该功能与外界的物质、能量、信息交换;而 IDEF0 方法中,除方框表示功能、输入输出表示功能之间的接口外,还有支撑和控制,因此,这里把这两种方法结合起来,形成概念产品的建模方法。该方法中,方框表示产品功能,其左端表示功能的输入,右端表示功能的输出,上端表示功能的约束,下端表示实现功能的概念结构,右下角表示功能编号,粗实线表示功能之间的物质流,细实线表示功能之间的能量流,虚线表示功能之间的信息流。功能之间由流经产品的物质流、能量流和信号流<sup>[2]</sup>连接起来形成产品的子功能-概念结构模型。图 1 是根据图 2 产品分解模型的底层子功能及其概念结构建立的子功能-概念结构模型。

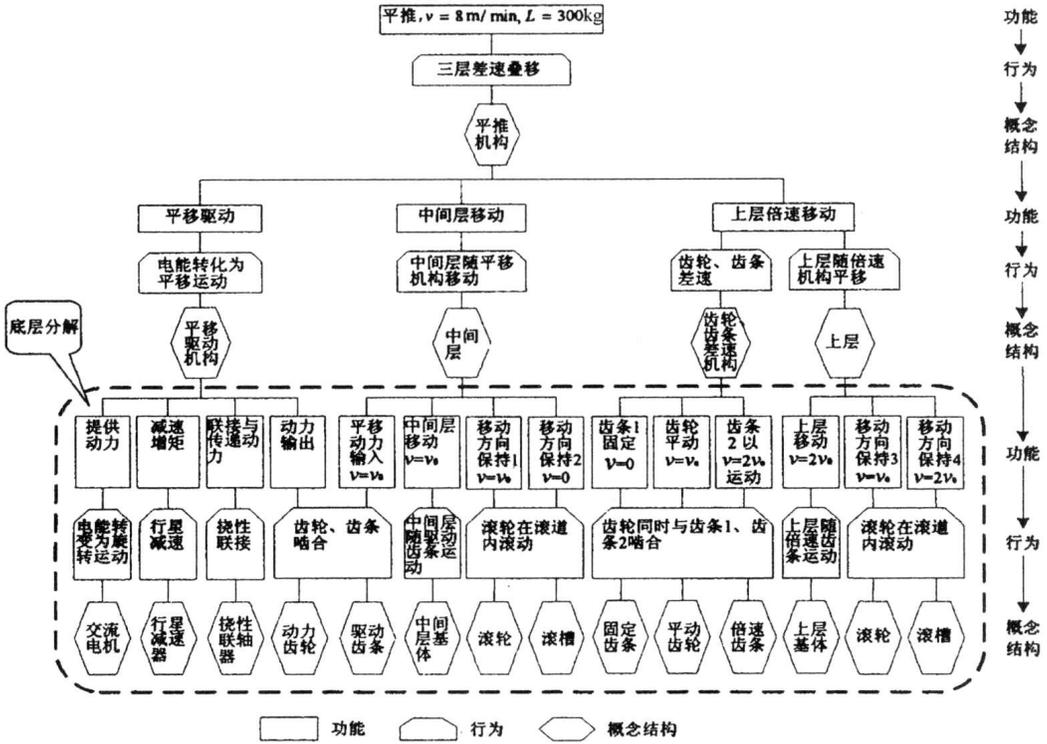


图2 自顶向下的推拉机构设计分解模型

Fig. 2 Top-down conceptual design model for push-puller

## 2 产品概念模块划分

### 2.1 产品概念要素的相关性分析

根据产品的子功能-概念结构模型,各子功能之间的相互关系主要包括功能、行为、概念结构、接口等的相互作用关系,其中接口主要包括子功能之间的物质流、能量流、信息流联系。若子功能之间存在一定的功能、行为、概念结构、接口等的关系,则子功能相关。如表1所示,子功能、子功能的行为之间通过模糊分级给出其相关性;子功能的概念结构之间存在装配或联接的关系,通过模糊分级给出其装配或联接的相关性<sup>[1,6]</sup>;子功能之间的物质、能量、信息联系的权值可以采用层次分析法(AHP法)得出,分别为:0.464,0.382,0.154,由于子功能之间可能存在物质、能量、信息或者两者以上的联系,因此,表中给出了其相互组合情况下的相关值,如子功能之间同时存在能量、信息联系,则 $r_{ij}^k = 0.382 + 0.154 = 0.536$ 。

概念模块划分时,既要考虑概念模块功能的相对独立性,又要考虑其结构的相对独立性,被划分模块的功能及其概念结构具有相对独立性。为了表达子功能之间的相关性,引入相关度的概念:子功能 $DF_i$ 、 $DF_j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ )之间的相关程度,用 $r_{ij}$ 表示<sup>[7]</sup>。显然相关度有如下性质: $r_{ii} = 1$ ,  $r_{ij} = r_{ji}$ ,则子功能之间的相关度算法如下:

$$r_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^m w_k r_{ij}^k, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$$

其中, $w_k$ ——第 $k$ 种相关性的权值系数,采用AHP法可以得出子功能之间的各相关项目如功能、行为、概念结构、接口的权值系数: $w_1 = 0.122$ ,  $w_2 = 0.263$ ,  $w_3 = 0.558$ ,  $w_4 = 0.057$ 。 $r_{ij}^k$ ——第 $k$ 种相关性的相关值; $n$ ——子功能-概念结构模型中包含子功能-概念结构的个数。

表1 子功能-概念结构之间的相关性

Tab.1 Relativity of sub function- conceptual structure

相关项目	相关性	相关值 $r_{ij}^k$	含 义
功能	缺一不可	1.0	子功能 $A_i, A_j$ 为完成其父功能而存在, 缺一不可
	相互影响	0.5	子功能 $A_i$ 是为更好地增强(抑制)子功能 $A_j$ 而存在
	无	0.0	子功能 $A_i, A_j$ 不相关
行为	可以共存	1.0	子功能 $A_i, A_j$ 的行为之间存在运动一致性的约束关系
	不能共存	0.0	子功能 $A_i, A_j$ 的行为之间存在运动不一致的约束关系
概念结构	极强	1.0	子功能的概念结构间永久联接, 不可拆分, 如采用焊接、粘合、铆接和金属浇注等建立的联接
	较强	0.8	子功能的概念结构间大过盈配合, 难以拆卸, 如采用冷缩、热压、压力配合建立的联接
	适中	0.6	子功能的概念结构间小过盈、过渡配合, 如采用较小压力装配
	一般	0.4	子功能的概念结构间间隙配合, 容易装拆
	较弱	0.2	子功能的概念结构间大间隙配合, 关系疏松
	无	0.0	子功能的概念结构间无联接关系
接口	物质、能量、信息	1.0	子功能间存在物质、能量、信息联系
	物质、能量	0.846	子功能间存在物质、能量联系
	物质、信息	0.618	子功能间存在物质、信息联系
	能量、信息	0.536	子功能间存在能量、信息联系
	物质	0.464	子功能间存在物质联系
	能量	0.382	子功能间存在能量联系
	信息	0.154	子功能间存在信息联系
	无	0.0	子功能间无联系

## 2.2 基于图分割的产品概念要素聚类

图2中的子功能-概念结构之间存在相关关系, 可以采用无向图  $G$  来表示产品子功能-概念结构模型中子功能-概念结构之间的关系, 图的结点  $x_i$  表示子功能-概念结构, 图的边  $e_{ij}$  表示子功能-概念结构之间的联系。

$$G = [X, E], \quad X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad E = \{e_{ij} = (x_i, x_j) | x_i, x_j \in X\} \quad i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$$

表示子功能-概念结构相关关系的无向图  $G$  的分割算法<sup>[8]</sup>如下:

Step 1: 确定无向图  $G$  的边  $E$  的权值  $w(e)$ 。根据子功能-概念结构之间的相关度  $r_{ij}$  定义无向图  $G$  中连接边  $E$  的权值  $w(e_{ij}) = r_{ij}$ 。

Step 2: 断开权值  $w(e)$  较小的边。给定相关度  $r_{ij}$  的阈值  $r_0$ , 从无向图  $G$  中移出权值小于阈值  $r_0$  的边, 形成结点集  $X$  上的图  $G' : G' = \{(X, E') | E' = E - \{e' | w(e') < r_0\}\}$ , 获得包含在图  $G'$  中的所有子图

$$G_i: G' = \bigcup_{i=1}^m G_i.$$

Step 3: 确定聚类。断开连接后, 相互连通的结点构成的子图  $G_i$  属于一个聚类, 其对应的子功能-概念结构被划分在同一概念模块内。

以上算法可以实现根据不同阈值  $r_0$  进行动态聚类。

基于图1中的子功能-概念结构, 对功能之间的相关性进行分析, 并按照表1计算各子功能之间的相关度, 如:  $r_{21} = (w_1, w_2, w_3, w_4) \times (r_{21}^1, r_{21}^2, r_{21}^3, r_{21}^4)^T = 0.122 \times 1 + 0.263 \times 1 + 0.558 \times 0.6 + 0.057 \times 0.382 \approx 0.742$ , 其中,  $(r_{21}^1, r_{21}^2, r_{21}^3, r_{21}^4) = (1, 1, 0.6, 0.382)$  表示“提供动力”和“减速增矩”子功能为完成“平移驱动”的不可或缺的功能, 子功能的行为“电能转变为旋转运动”与“行星减速”存在运动一致性的约束关系, 子功能的概念结构“电机”与“行星减速器”可以采用“适中”的联接关系, 子功能之间仅存在“转矩”与“转速”等“能量”传递关系。由此确定连接边  $E$  的权值, 从而建立子功能-概念结构相关关系的无向图  $G$ , 如图3所示。

无向图图  $G$  分割时, 若给定模块划分粒度(阈值)  $r_0 = 0.7$ , 按照以上图分割方法可以建立如图4所示的无向图  $G'$ 。这样, 图  $G'$  的连通部分就是子功能-概念结构聚类的结果, 每一个连通部分构成一个概念模块。

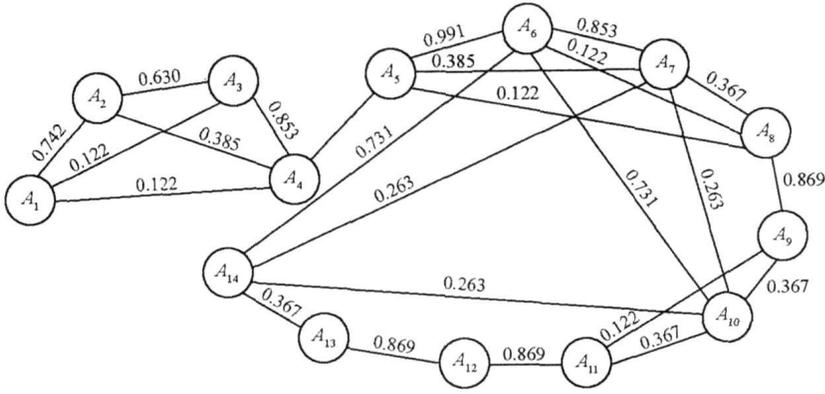


图3 表示子功能-概念结构相关关系的无向图

Fig. 3 Undirected graph for describing relativity of sub function-conceptual structure

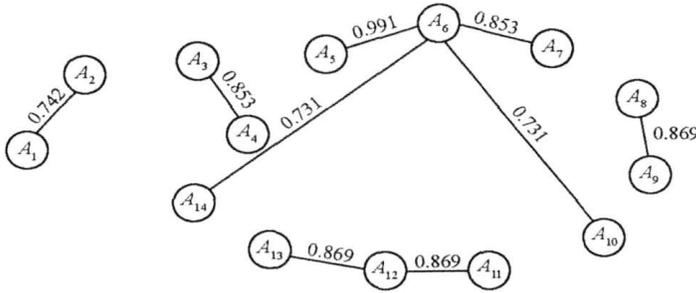


图4 无向图的分割

Fig. 4 Division of undirected graph

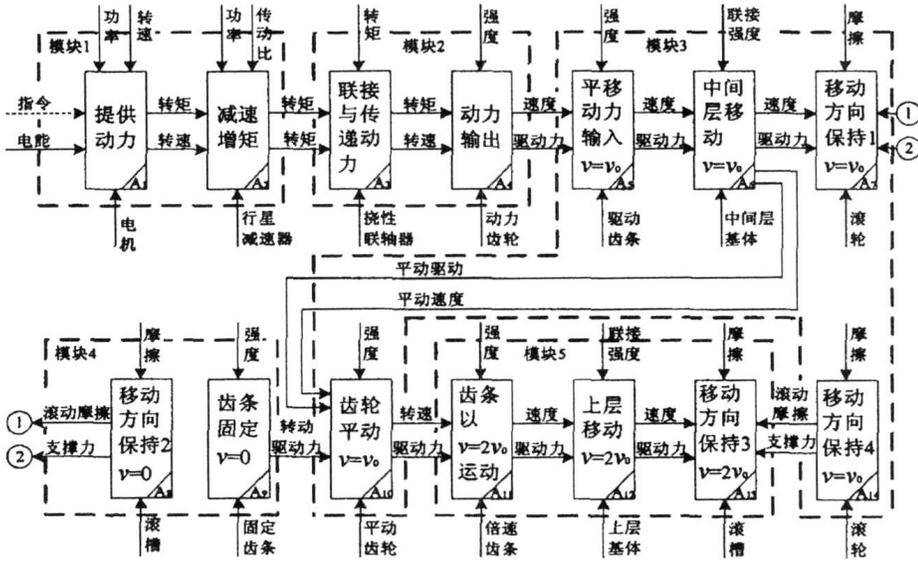


图5 产品概念模块划分模型

Fig. 5 Conceptual module identifying model of product

图4还原为子功能-概念结构模型,可以得到如图5表示的产品概念模块划分模型,从而实现产品概念的模块划分,划分的模块为:模块1= {A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>}、模块2= {A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>}、模块3= {A<sub>5</sub>, A<sub>6</sub>, A<sub>7</sub>, A<sub>10</sub>, A<sub>14</sub>}、模块4= {A<sub>8</sub>, A<sub>9</sub>}、模块5= {A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub>, A<sub>13</sub>}。

Step 4: 根据图5,以新建立的概念结构模块为单元重复步骤 Step 1、Step 2,直到 n 个子功能聚合为一个大大类为止,则可以得到产品的层次性概念模块。

产品概念模块划分方案取决于模块划分的粒度,阈值 r<sub>0</sub> 越大,模块划分越细,即可以根据产品的特性要求对子功能-概念结构进行动态聚类。只要确定一个概念模块划分粒度度量值 r<sub>0</sub>,就可以根据该

给定度量值确定相应的模块划分方案。

若给定堆垛机推拉机构概念设计分解最底层的概念结构,如表2所示,则可以根据划分的子功能-概念结构模块展开模块的结构设计。堆垛机推拉机构概念模块的初步的结构设计方案如表3所示。

表2 堆垛机推拉机构概念设计分解最底层的概念结构

Tab.2 The bottom conceptual structure for push-puller's conceptual design decomposition

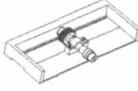
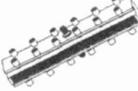
表2 堆垛机推拉机构概念设计分解最底层的概念结构

Tab.2 The bottom conceptual structure for push-puller's conceptual design decomposition

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7, A_{14}$	$A_8, A_{13}$	$A_9$	$A_{10}$	$A_{11}$	$A_{12}$
交流电机	行星减速器	挠性联轴器	动力齿轮	驱动齿条	中间层基体	滚轮	滚槽	固定齿条	平动齿轮	倍速齿条	上层基体
											

表3 推拉机构概念模块结构设计方案

Tab.3 Structure design scheme for push-puller's conceptual module

模块名称	三维模型	说明
驱动动力		由 $A_1, A_2$ 子功能聚合而成,即交流电机与行星减速器装配联接成一个模块。
动力输出		由 $A_3, A_4$ 子功能聚合而成,即动力齿轮与挠性联轴器装配联接成一个模块。该动力齿轮是一个组件,包括轴、轴承及其支撑体。
中间滑架		由 $A_5, A_6, A_7, A_{10}, A_{14}$ 子功能聚合而成,即驱动齿条、中间层基体、滚轮、平动齿轮等装配联接成一个模块。其中驱动齿条、中间层基体融为一体,即在中间层基体上加工齿条。
固定齿条		由 $A_8, A_9$ 子功能聚合而成,即滚槽与固定齿条联接建立一个模块。该滚槽与固定齿条融为一体,即在固定齿条上加工出滚槽。
上层滑架		由 $A_{11}, A_{12}, A_{13}$ 子功能聚合而成,即倍速齿条、上层基体、滚槽联接建立一个模块。该倍速齿条、滚槽与上层基体融为一体,即在上层基体上加工出齿条、滚槽。

### 3 结论

本文以堆垛机推拉机构为例,在基于 FBCS 的产品概念设计过程中,引入图分割聚类算法,实现了机械系统的概念模块划分。该方法既考虑自顶向下的产品概念设计分解,又考虑自底向上的产品概念要素如功能、行为、概念结构、接口等的相关性与聚合,从而有效地建立产品概念模块体系,提高产品模块的内聚程度,更好地支持产品结构模块的设计。

### 参考文献:

- [1] 潘双夏,高飞,冯培恩. 批量客户化生产模式下的模块划分方法研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 1-6.
- [2] Gunnar E, Alexon Y, Anders A. Modularity——The Basis for Product and Factory Reengineering[J]. Annals of CIRP, 1996, 45(1): 1-6.
- [3] Stone R B, Wood K L, Crawford R H. Product Architecture Development with Quantitative Functional Models[C]// 1999 ASME Design Engineering Technical Conference, 1999, 12: 1-13.
- [4] Stone R B, Wood K L, Crawford R H. A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architectures[J]. Design Studies, 2000, 21(1): 5-31.
- [5] Zong M D, Cai Y, Liu X D, et al. A Multi-perspective Hierarchical Division Approach for a Product in Its Modular Design[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(5): 552-556.
- [6] Gu P, Sosale S. Product Modularization for Life Cycle Engineering[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1999, 15(5): 387-401.
- [7] Juliana H. Impacts of Supplier-buyer Relationships on Modularization in New Product Development[J]. European Journal of Purchasing & Supply Management, 1999, 5(3/4): 197-209.
- [8] 邓家, 韩晓建, 曾硝, 等. 产品概念设计-理论、方法与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 104-105.
- [9] 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.
- [10] 宋慧军, 林志航. 基于改进 Freeman-Newell 模型的机械产品概念设计过程研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 54-58.
- [11] 王海军, 孙宝元, 王吉军, 等. 面向大规模定制的产品模块化设计方法[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2004, 10(10): 1172-1176.
- [12] 姜慧, 徐燕申, 谢艳, 等. 机械产品模块化划分方法的研究[J]. 制造技术与机床, 1999(3): 7-9.
- [13] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 46-48.