

研究简报

基于公理化设计理论的产品配置建模方法 及其在大型化工装备中的应用

孙卫红^{1,2}, 冯毅雄²

(¹ 中国计量学院机电工程学院, 浙江 杭州 310018; ² 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

关键词: 公理设计; 产品配置模型; 配置设计; 大规模定制; 化工装备

中图分类号: TH 166

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 07-0000-0

Modeling of chemical equipment configuration model based on axiomatic design theory and its application

SUN Weihong^{1,2}, FENG Yixiong¹

(¹ School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;

² State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: By considering the characteristics of information generation of chemical industry product configuration model, a new method of constructing chemical equipment configuration model based on axiomatic design theory was presented. In this method, functional domain mapping into physical domain was introduced, functional requirements with constraints were defined as function constraint integrated component (FCIC), design parameters with feature were defined as structure feature integrated component (SFIC), and the configuration model based on SFIC was constructed by establishing database and the characteristic relationship of SFIC features. Axiomatic design made configuration modeling more scientific, and helped the designer decide more quickly and accurately. Finally, a case study of configuration design for air separation equipment was presented.

Key words: axiomatic design; product configuration model; configuration design; mass customization; chemical equipment

引 言

现代化工装备制造普遍采用大规模定制生产模式, 以大规模生产所具有的效率和质量, 设计和制造出满足不同客户群体需求的化工装备产品, 已经成为化工装备制造企业获得核心竞争优势的关键所在^[1]。其核心支撑技术——产品配置设计越来越引

起研究人员的重视^[2-3]。产品配置模型作为产品设计结果的载体, 反映了产品设计的一般进程规律, 是实现化工装备产品配置设计的基础。配置模型应具有清晰的层次结构关系, 应包含设计过程中的各种信息。因此, 配置模型信息是随着设计过程的推进而逐渐形成和完善的, 这是配置模型信息形成的显著特点。

2008-04-16 收到初稿, 2008-04-28 收到修改稿。

联系人: 冯毅雄。第一作者: 孙卫红 (1969—), 男, 副教授, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50505044)。

Received date: 2008-04-16.

Corresponding author: FENG Yixiong. E-mail: fyxtv@zju.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50505044).

关于产品配置模型的研究, 国内外学者已做了大量的工作^[4-9], 但由于配置变量间的约束关系构建复杂, 其通用性受到限制。针对目前产品配置建模方法中存在的不足, 结合产品配置模型信息形成的特点, 本文在建模过程中引入了公理化设计理论, 提出了基于公理化设计理论的化工装备产品配置建模方法。

1 公理化设计理论的引入

公理化设计^[10] (axiomatic design, AD) 是对大量成功设计案例进行分析总结, 抽象出设计过程的本质而形成的, 已成为设计领域内的科学准则。它不仅可以使设计者迅速了解设计系统内部各层间的相互关系, 而且为设计者提供了可以量化的设计评价方法。公理化设计首先进行从用户域 (customer domain) 向功能域 (function domain) 的映射, 将用户需求转化成产品的功能要求和约束, 其真正的创新性设计始于从功能域向结构域 (physical domain) 的曲折映射 (zigzagging)。公理化设计为设计者提供了以下两条公理作为评价准则。

(1) 独立性公理 维护功能要求的独立性。每个层次上同组功能要求 $\{FR_s\}$ 与其设计参数 $\{DP_s\}$ 的对应关系可用以下设计方程表示

$$\{FR_s\} = A\{DP_s\} \quad (1)$$

式中 A 为设计矩阵, 理想的设计应为非耦合设计, 要求 A 为对角阵, 即 $\{FR_s\}$ 与 $\{DP_s\}$ 中的元素个数相同。

(2) 信息公理 满足独立性公理的设计方案可能有很多种, 信息公理认为包含信息量最少的设计方案为最佳方案。每个功能信息含量定义为

$$I_i = \log_2(1/p_i) \quad (2)$$

式中 p_i 为满足该功能要求的概率。

设计者可根据以上设计公理对所有方案进行综合评价, 确定出子层功能-结构映射过程的最佳设计方案。根据每个新产生的子结构, 再进行类似以上的映射过程, 直到将产品的总功能 FR_0 分解为最底层的功能元, 形成产品完整的功能树与结构树为止。

2 化工装备功能-约束集成单元与结构-特征集成单元

为了更好地适于化工装备配置模型的表达, 本

文结合功能-结构曲折映射过程, 给出以下两个定义。

(1) 功能-约束集成单元 (function constraint integrated component, FCIC) 经过曲折映射过程得到的功能要求并非是独立存在的, 而是相互制约的。功能-约束集成单元就是产品各级层次上的功能要求与其所具有的约束信息的集成体。各层 FCIC 是组成产品功能树的基本要素。FCIC 可以用一个三元组 $G=(id, C, O)$ 表示。其中, id 为 FCIC 的标识; $C=\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 是 FCIC 的约束规则向量集合 ($m \geq 0$); $O=\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 是对 FCIC 的一组操作 ($n \geq 0$)。根据 FCIC 所处的层次, FCIC 可以分为产品级 FCIC、部件级 FCIC、组件级 FCIC 和零件级 FCIC。

(2) 结构-特征集成单元 (structure feature integrated component, SFIC) 在曲折映射过程中, 产品的层次结构关系逐渐形成, 同时, 每个零部件 (子结构) 的几何尺寸及配置约束关系等描述信息也逐渐产生。在这里, 将这些描述信息统一视为零部件的特征, 从而使特征含义得以扩充, 它不再只是几何特征, 而是包含零部件多种描述信息在内的广义概念, 本文称之为广义特征。零部件的广义特征是表达配置模型中零部件间相互关系的基础。

SFIC 是完成产品各级层次结构上功能要求的主体, 是具有共性的零部件组合而成的抽象集合, 它封装了曲折映射过程中产生的零部件所有特征属性。各层 SFIC 是组成产品结构树的基本要素。SFIC 可以用一个三元组 $L=(id, F, O)$ 表示。其中, id 为 SFIC 的标识; $F=\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ 是 SFIC 的广义特征向量集合 ($m \geq 0$); $O=\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 是对 SFIC 的一组操作 ($n \geq 0$)。SFIC 的广义特征比较复杂, 本文建立 SFIC 广义特征库对其存储, 以便后续设计的检索与知识重用。

根据 SFIC 所处的层次, SFIC 可以分为产品级 SFIC、部件级 SFIC、组件级 SFIC 和零件级 SFIC。根据功能-结构曲折映射原理, 给出了 FCIC_s-SFIC_s 的曲折映射模型, 如图 1 所示。

3 化工装备产品配置建模

由前述可知, 化工装备配置建模的核心在于进行 FCIC_s-SFIC_s 曲折映射过程。为了使以前的设计知识可以重用, 提高建模效率, 还建立了 FCIC-SFIC_s。

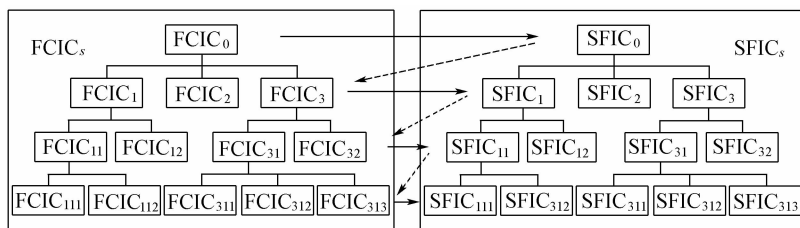


图 1 FCIC_s-SFIC_s 曲折映射模型

Fig. 1 Deviating mapping model of FCIC_s-SFIC_s

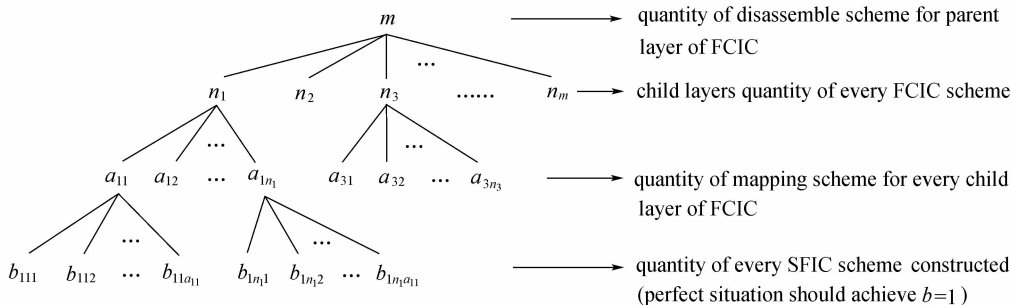


图 2 产品每个层次上同组 FCIC_s-SFIC_s 映射方案数求解模型

Fig. 2 Module for calculating mapping quantity of

same FCIC_s-SFIC_s on every layer of product

映射关系库。当需要实现某个 FCIC 时，首先检索 FCIC-SFIC_s 映射关系库中是否存在相应记录，若存在，则联合数据库将相关信息检索出来即可，若不存在，则作 FCIC-SFIC_s 映射，并将所得信息存入相应库中。

3.1 用户需求分析

随着产品的发展，化工装备用户需求也越来越趋向个性化、模糊化、动态化，基于质量功能展开 (QFD) 的需求分析方法已经难以满足这种用户需求分析要求。广义需求分析方法^[11]从需求的特性及其时间、空间分布等方面综合分析，形成由化工装备产品生命周期维、供应链维、特性维组成的多维广义需求分类体系，该体系采用可视化的需求交流平台捕获客户个性化需求，采用模糊知识快速表达客户的需求信息。

3.2 FCIC-SFIC_s 映射关系库

FCIC-SFIC_s 映射关系库存储了所有设计过的 FCIC 与 SFIC 的映射记录与关系值，方便后续设计的检索与知识重用，随着化工装备设计的进行，映射关系库也在不断地更新与进化。FCIC-SFIC_s 映射关系库主要包含 FCIC_s 和 FCIC-SFIC 两个数据表。

3.3 FCIC_s-SFIC_s 映射方案数

产品每个层次上同组 FCIC_s-SFIC_s 映射过程都

可能有多种设计方案。为使设计者更好地理解层次映射内部原理，掌控设计过程，本文给出同组 FCIC_s-SFIC_s 映射方案数 S 的计算方法。如图 2 所示，设 FCIC 分解为子层 FCIC_s 的方案数为 $m(n_1, n_2, \dots, n_m)$ ，其中， n_i 为第 i 个方案包含子层 FCIC 的个数， $i \in [1, m]$ 设每个子层 FCIC 的映射方案数为 a_{ij} ， $i \in [1, m]$ ， $j \in [1, n_i]$ 则，映射方案数 S 为

$$S = \sum_{i=1}^m \prod_{j=1}^{n_i} a_{ij} \quad (3)$$

4 实例应用

现以某化工装备制造单位产品空分装备为例，建立基于公理化设计理论的配置模型。利用广义需求分析方法分析和转化用户的定制要求，确定出产品的功能要求为驱动、动力传递、支撑、运行状态显示、操纵制动等。根据配置建模流程、FCIC-SFIC_s 映射关系库及设计公理，逐层分解确定出该型号空分装备所包含的各层结构-特征集成单元。结合 SFIC 广义特征库，定义了各层结构-特征集成单元的配规则知识，从而得出空分装备的配置模型，如图 3 所示。图 3 中主要给出了分流塔、气液分离器、空压机及冷凝装置的配置模型。零部件间存在约束关系。

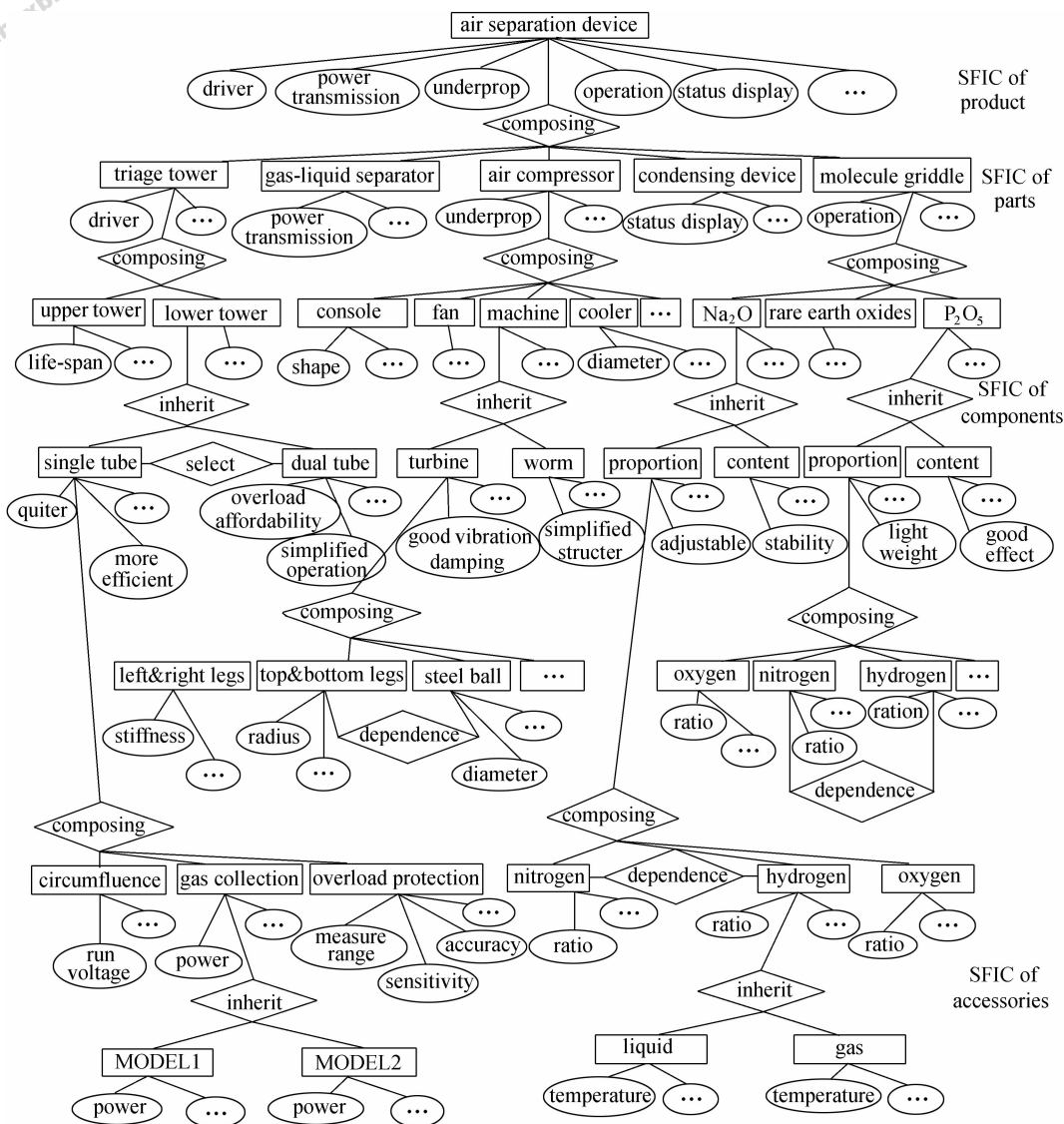


图 3 空分装备部分部件的配置模型

Fig. 3 Configuration model of some components of air separation device

5 结 论

本文提出了一种从化工装备产品配置模型信息形成的角度出发，应用公理化设计理论建立化工装备产品配置模型的方法。空分装备产品配置模型的建立表明，该方法是可行的。其主要有以下几个优点：通过引入公理化设计理论，配置建模更加科学化，设计者在选择设计方案时有了决策准则；通过定义结构-特征集成单元，将零部件与其所具有的特征信息集为一体进行管理，避免了大量规则知识的混杂及维护问题，同时，零部件间相互关系通过结构-特征集成单元的特征来建立，简化了配置变量间约束关系的复杂程度，增强了模型的通用性；

FCIC_s-SFIC_s 曲折映射过程符合化工装备产品配置模型信息形成的特点，由此形成的配置模型具有清晰的层次结构关系；根据 SFIC 广义特征库定义各层结构-特征集成单元的配规则，实现产品配置，避免了基于描述逻辑建模方法中知识表示程度与配置推理效率之间的平衡掌控问题。

References

- [1] Tu Yiliu. Production planning and control in a virtual one-of-a-kind production company. *Computers in Industry*, 1997, **34** (3): 271-283
- [2] Alexander F, Gerhard F, Dietmar J. Conceptual modeling for configuration of mass-customizable products. *Artificial Intelligence in Engineering*, 2001, **15** (2): 165-176
- [3] Sabin D, Weigel R. Product configuration frameworks—a

- survey. *IEEE Intelligent Systems*, 1998, **13** (4): 42-49
- [4] Ying-Lie O. Configuration for mass-customization and e-business//Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2002). Amsterdam: IOS Press, 2002: 11-16
- [5] Studer R, Eriksson H, Gennari J H. Ontologies and the configuration of problem-solving methods//Proceedings of the 10th Knowledge Acquisition for Knowledge-base Systems Workshop. Banff, 1996: 257-289
- [6] Mailharro D, Darr T. A classification and constraint-based framework for configuration. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 1998, **12** (4): 383-397
- [7] Yang Yujun (杨煜俊), Liu Qinghua (刘清华), Wan Li (万立), *et al.* Research on product configuration based on conditional constraint satisfaction problem. *Computer Integrated Manufacturing Systems* (计算机集成制造系
- 统), 2004, **10** (11): 1332-1337
- [8] Heinrich M, Jfingst E W. A resource-based paradigm for the configuring of technical systems from modular components//Proceedings of the 7th IEEE Conference on AI Applications (CAIA). Miami, Florida, 1991: 257-264
- [9] McGuinness D L, Wright J R. Conceptual modelling for configuration: a description logic-based approach. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 1998, **12** (4): 333-344
- [10] Suh N P. *The Principle of Design*. New York: Oxford University Press, 1990
- [11] Dai Ruoyi (戴若夷), Tan Jianrong (谭建荣), Li Tao (李涛), *et al.* Research on general requirement modeling and enable technology for mass customization. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics* (计算机辅助设计与图形学学报), 2003, **15** (4): 467-474