

基于公理设计与模糊树图的集成式模块划分方法^{*}

王日君 张进生 葛培琪 王志

(山东大学机械工程学院, 济南 250061)

【摘要】 提出了一种公理设计和模糊树图相结合的集成式模块划分方法。首先采用公理设计的功能域-物理域的映射变换框架进行产品的逐级分解,在分解得到的设计矩阵均为对角阵的情况下,分解得到的子结构满足了功能和结构的独立性,可单独作为一个模块,完成模块划分。若得到的设计矩阵为三角阵或者满矩阵,则对分解得到的子结构进行功能和结构相关度的分析,采用模糊树图聚类法将子结构聚类为模块。通过实例验证了该方法的有效性和合理性。

关键词: 产品设计 模块划分 公理设计 模糊树图 聚类算法

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A

Integrated Module Division Method Based on Axiomatic Design and Fuzzy Dendrogram

Wang Rijun Zhang Jinsheng Ge Peiqi Wang Zhi

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract

An integrated module division method based on the combination of axiomatic design and fuzzy dendrogram was proposed. The product was divided step by step using the framework of zigzagging map between the functional domain and physical domain of axiomatic design. In the case that the design matrix are diagonal matrices, the substructures of the division meet the functional and structural independence and can be considered as a separate module, then the division of module can be ended. When the design matrix are triangle matrices or full rank matrices, the correlation of function and structure between the substructures were analyzed and then fuzzy dendrogram was used to cluster the substructures into modules. An example was used to illustrate the validity and rationality of the proposed approach.

Key words Product design, Module division, Axiomatic design, Fuzzy dendrogram, Clustering algorithm

引言

产品模块划分是模块化设计的关键环节,国内外许多学者对其进行了研究。文献[1]提出了启发式模块划分方法,但只考虑了功能,没有考虑结构的干涉问题。文献[2]通过计算零部件连接件的工程参数进行零部件的聚类,但没有考虑模块功能的独立性。文献[3~5]从不同的角度计算零部件之间的相关度,将零部件聚类为模块。但这种自底向上的

基于底层零部件的聚类方法,运算量大,模块划分过程复杂。

本文考虑模块功能和结构独立性要求,提出公理设计和模糊树图相结合的集成式模块划分方法。

1 基于公理设计的模块划分

1.1 公理设计理论

公理设计将设计问题划分为4个域:用户域、功能域、物理域和过程域,每个域中都有各自的元素,

即用户需求(customer needs,简称CNs)、功能要求(function requirements,简称FRs)、设计参数(design parameters,简称DPs)和工艺变量(process variables,简称PVs)。产品的设计过程可描述为彼此相邻两个域之间参数的相互转换映射过程^[6-7]。

公理设计中包括两条重要的公理^[6-7]:公理1(功能独立性公理):映射变换过程中保证功能要求之间的独立性;公理2(信息量最少公理):信息量最少的设计是最好的设计方案。

本文着重应用功能独立性公理,在此加以阐述。公理设计通过功能域与物理域之间的映射来探求满足功能要求的设计参数。功能要求和设计参数之间的关系为

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,m} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

设 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,m} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix}$

\mathbf{A} 称为设计矩阵,表征产品设计。

设计矩阵有3种形式:对角阵、三角阵和满矩阵。只有设计矩阵是对角阵或三角阵时,设计才能满足独立公理。设计矩阵是满矩阵时将导致一个耦合设计。公理设计通过相邻的两个设计域之间进行“之字形”映射变换来进行产品设计,同时,应用两个设计公理作为评判产品设计质量优劣的标准,指导设计者在整个设计过程中,针对每一级不同的设计方案做出正确的设计决策^[6-7]。

1.2 基于公理设计的模块划分

基于公理设计的产品模块划分是指以功能独立性公理为依据,应用公理设计的功能域-物理域的分析框架,通过功能-结构(分别用 R 、 P 表示)之间的“之字形”映射变换对产品进行模块的划分,并在分解过程中确定各个级别设计矩阵,通过设计矩阵来判断并确保每个级别各功能和结构的独立性。图1所示为基于公理设计的产品模块划分模型。

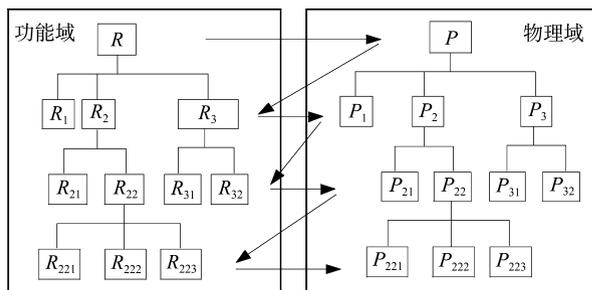


图1 基于公理设计的模块划分模型

Fig. 1 Module division model based on axiomatic design

(1) 功能和结构独立性的判断

在每一级分解完成时都要进行功能和结构独立性的评价,判断依据是功能独立性公理,即只有在设计矩阵是对角阵的情况下,产品的分解才能保证功能和结构的独立性。此时功能域与物理域一一对应,分解得到的各子结构在功能和结构上相互独立,可单独定义为一个模块。

(2) 功能-结构分解的层次

功能-结构分解的过程可视为模块划分的过程,因为分解得到的子结构保证了功能和结构的独立性,可直接作为模块。就本质来讲,可以把产品从任意层次上进行划分,形成该级别的模块。不同类型的产品,其模块划分的层次也往往不同,因此,模块划分的层次需结合实际产品情况确定。

基于公理设计的模块划分,通过功能独立性公理保证了功能和结构的独立性,这种自顶向下的划分方法尤其适用于机床等零部件数量庞大的大型复杂产品。若采用传统的自底向上的划分方法,即以最基本的零部件为对象进行聚类,往往会导致巨大的计算量。机械产品具有明显的分级特性,适合于这种模块划分方法。

2 基于模糊树图的模块划分

设计矩阵为三角阵或满矩阵时,公理设计分解得到的子结构无法保证功能和结构的独立性,因此每个子结构不能作为单独的模块。而公理性方法也无法描述各子结构之间的关系,因此在这种情况下,以公理设计分解得到的子结构为基本单元,利用模糊树图聚类法进行模块的划分。首先从功能和结构的角进行子结构间相关性的分析,然后应用模糊树图聚类方法将各子结构聚类为模块。

2.1 功能相关性分析

功能交互主要体现在各子结构之间的物质流、能量流、信息流和力流的转换和传输上。将各子结构按照物质、能量、信息和力流的传输和转换关系联接成一个系统,即可得到产品的功能结构图^[1]。功能结构图清楚地表示了各子结构之间的功能交互作用关系。在此基础上,定义功能相关性的评价准则,见表1。

2.2 结构相关性分析

结构相关性是指零部件之间的空间、几何关系,主要包括装配、排列、定位、联接等。主要从接触类型^[2]、联接类型和配合方式3个方面衡量零部件之间的结构相关性。表2为其评价准则。

表 1 功能相关性评价准则

Tab.1 Evaluation criteria of functional correlations

相关度	相关性分析
1.0	两个子结构必须成对使用,缺一不可
0.8	两子结构之间存在能量联系
0.6	两子结构之间存在信息联系
0.4	两子结构之间存在作用力联系
0.2	两子结构之间存在物质联系
0	两子结构之间毫无联系

2.3 相关度计算

以 r_{ij} 表示子结构间的相关度,即交互作用程度。相关度构造算法为

$$r_{ij} = \begin{cases} \omega_f r_{ij}^f + \omega_s r_{ij}^s & (i \neq j) \\ 1 & (i = j) \end{cases} \quad (i, j \in \{1, 2, \dots, n\})$$

其中

$$r_{ij}^s = \begin{cases} \sum_{k=1}^3 \omega_s^k r_{ij}^{s,k} & (i \neq j) \\ 1 & (i = j) \end{cases} \quad (i, j \in \{1, 2, \dots, n\})$$

式中 r_{ij}^f ——元素间的功能相关度
 r_{ij}^s ——元素间的结构相关度
 $r_{ij}^{s,k}$ ——第 k 个结构相关准则的相关度
 ω_f ——功能相关准则的权重系数
 ω_s ——结构相关准则的权重系数
 ω_s^k ——第 k 个结构相关准则的权重系数

各准则的权重系数可以采用层次分析法(AHP)^[8]或市场调查、经验分析的方式得到。3个结构相关准则分别指子结构间的接触类型准则、联接类型准则和配合方式准则。由计算得到的各子结构之间的相关度,可建立子结构之间的关系矩阵 R 。

表 2 结构相关性评价准则

Tab.2 Evaluation criteria of structural correlations

结构相关子准则	相关度	相关性分析
子结构间接触类型	1.0	两子结构之间为多面接触
	0.8	两子结构之间为多点接触
	0.6	两子结构之间为单面接触
	0.4	两子结构之间为单线接触
	0.2	两子结构之间为单点接触
	0	两子结构之间无接触
子结构间联接类型	1.0	两子结构之间为永久联接,不可拆分,如焊接
	0.8	两子结构之间为固定联接,难以拆分,如采用压力配合建立的联接
	0.6	两子结构之间为固定联接,较难拆分,如键槽
	0.4	两子结构之间为固定联接,容易拆分,如螺栓、销联接
	0.2	两子结构之间为移动联接,可以拆分,如移动副联接、弹簧联接
	0	两子结构之间没有联接关系
子结构间配合方式	1.0	两子结构之间为永久联接,不可拆分
	0.8	两子结构之间的配合有严格的公差要求
	0.6	两子结构之间的配合有公差要求但不严格
	0.4	两子结构之间的配合有尺寸要求
	0.2	两子结构之间有联接关系但没有配合要求
	0	两子结构之间没有联接关系

2.4 基于模糊树图的模块聚类

产品各子结构之间的关系可以采用模糊关系图 $G = (V, R^*)$ 来表示, V 是一个以 N 个子结构为节点的集合, R^* 是由关系矩阵 R 得到的节点之间的模糊相似关系。

若 $E = \{e_k = v_i v_j \mid R^*(v_i, v_j) > 0; v_i, v_j \in V\}$, 则称 $G^* = (V, E)$ 是 $G = (V, R^*)$ 的基础图^[9]。边 $v_i v_j$ 赋权 $\omega(v_i v_j) = r_{ij} (i \neq j)$ 。

设 T 是 G 的生成树,若对于 G 的一切生成树 T' 都有

$$\sum_{e \in E(T')} \omega(e) \leq \sum_{e \in E(T)} \omega(e)$$

则称 T 是模糊图 G 的最大生成树^[9]。最大生成树描述了节点之间的模糊等价关系,因此可用来对产品进行模块的划分。根据最大生成树中的 $\omega(e)$, 选取不同的阈值 λ , 对 T 中 $\omega(e) < \lambda$ 的边进行截割, 得到的各个子树就是 T 在 λ 水平上的一个模块划分方案。

3 应用实例

以石材花线制品加工设备为实例来验证所提出的模块划分方法。设备结构如图 2 所示。

首先采用基于公理设计的模块划分方法,对该设备的总功能和结构进行逐级映射分解。将设备分解至第2级,得到10个子结构为:底座 P_{11} 、立柱 P_{12} 、伺服电动机 P_{21} 、减速器 P_{22} 、丝杠螺母副 P_{23} 、导轨 P_{24} 、工作台 P_{25} 、主电机 P_{31} 、胶带传动系统 P_{32} 、主轴 P_{33} 。分解得到每一级的设计矩阵

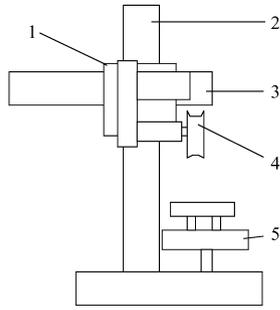


图2 直位花线加工设备结构简图

Fig.2 Structure of straight-lead flower-line products machining equipment

1.托板 2.立柱 3.横梁
4.动力头 5.升降工作台

$$\begin{cases} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_{11} \\ R_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} P_{11} \\ P_{12} \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_{31} \\ R_{32} \\ R_{33} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} P_{31} \\ P_{32} \\ P_{33} \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_{21} \\ R_{22} \\ R_{23} \\ R_{24} \\ R_{25} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} P_{21} \\ P_{22} \\ P_{23} \\ P_{24} \\ P_{25} \end{cases}$$

若各级设计矩阵均为对角阵,则划分得到的10个子结构可单独作为功能模块或者若干子结构任意合并为一个模块,则模块划分结束。然而上述矩阵在每一级分解中,均存在三角阵,因此,采用基于公理设计的模块划分方法无法实现模块的划分,需要进一步采用模糊树图法完成模块的划分工作。

根据子结构间功能和结构相关度评价准则,对子结构之间进行功能和结构相关度分析,最后综合得到子结构之间的模糊关系矩阵 R ,见表3。

表3 石材花线制品加工设备的模糊关系矩阵 R

Tab.3 Fuzzy matrix R of straight-lead flower-line products machining equipment

	P_{11}	P_{12}	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	P_{31}	P_{32}	P_{33}
P_{11}	1	0.39	0.39	0.39	0.51	0	0	0	0	0
P_{12}		1	0	0	0	0.39	0	0.39	0.39	0.39
P_{21}			1	0.73	0	0	0	0	0	0
P_{22}				1	0.73	0	0	0	0	0
P_{23}					1	0	0.39	0	0	0
P_{24}						1	0.45	0	0	0
P_{25}							1	0	0	0
P_{31}								1	0.73	0
P_{32}									1	0.73
P_{33}										1

根据子结构之间的模糊关系矩阵,运用模糊树图方法的生成步骤,得到其模糊最大生成树,如图3所示。

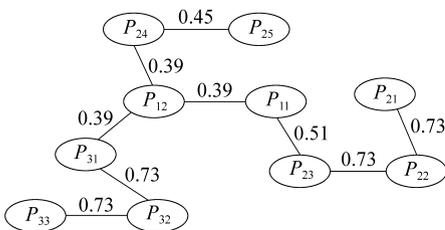


图3 直位花线制品加工设备的模糊最大生成树

Fig.3 Fuzzy dendrogram of straight-lead flower-line products machining equipment

取不同的阈值 λ 对模糊最大生成树进行截割,可以生成不同的模块划分方案 (M_i 为划分得到的模块):① $\lambda = 0.39$:设备的10个子结构组合成一

个模块。② $\lambda = 0.45$: $M_1 = \{P_{31}, P_{32}, P_{33}\}, M_2 = \{P_{24}, P_{25}\}, M_3 = \{P_{12}\}, M_4 = \{P_{11}, P_{21}, P_{22}, P_{23}\}$ 。③ $\lambda = 0.51$: $M_1 = \{P_{31}, P_{32}, P_{33}\}, M_2 = \{P_{24}\}, M_3 = \{P_{25}\}, M_4 = \{P_{12}\}, M_5 = \{P_{11}, P_{21}, P_{22}, P_{23}\}$ 。④ $\lambda = 0.73$: $M_1 = \{P_{31}, P_{32}, P_{33}\}, M_2 = \{P_{24}\}, M_3 = \{P_{25}\}, M_4 = \{P_{12}\}, M_5 = \{P_{11}\}, M_6 = \{P_{21}, P_{22}, P_{23}\}$ 。⑤ $\lambda = 1$:设备的10个子结构各成为一个模块。

考虑到模块的数量不宜过多,结合直位花线加工设备的特点,采取第3个模块划分方案,最终得到: $\{P_{31}, P_{32}, P_{33}\}, \{P_{24}\}, \{P_{25}\}, \{P_{12}\}$ 和 $\{P_{11}, P_{21}, P_{22}, P_{23}\}$ 。

4 结束语

提出了公理设计和模糊树图相结合的集成式模

块划分方法。实例证明,基于公理设计的模块划分方法充分利用了机械产品结构上的分级特性,采用自上而下逐级分解的划分方法,使模块的划分变得简单易行。而模糊树图聚类法与遗传算法等聚类方法相比复杂度低、易于操作。公理设计和模糊树图

相结合的集成式模块划分方法,采用自顶向下的产品模块划分模式,既保证了模块的功能和结构的独立性,又能以较少的计算工作量完成模块的划分。这种划分方法简单易操作,尤其适用于结构具有分级特性的大型复杂产品。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Tseng H E, Chang C C, Li J D. Modular design to support green life-cycle engineering [J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(5): 2 524~2 537.
- 3 Gu P, Sosale S. Product modularization for life cycle engineering [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1999, 15(5): 387~401.
- 4 Tseng H E, Chang T S, Yang Y C. A connector-based approach to the modular formulation problem for a mechanical product [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 24(8): 161~171.
- 5 Kreng V B, Lee T P. Modular product design with grouping genetic algorithm——a case study [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2004, 46(3): 443~460.
- 6 Suh N P. *The principle of design* [M]. New York: Oxford University Press, 1990.
- 7 Suh N P. 公理设计——发展与应用 [M]. 谢友柏, 袁小阳, 徐华, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- 8 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- 9 胡宝清. 模糊理论基础 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.

(上接第 160 页)

- 6 张军, 王一鸣, 毛文华, 等. 棉花冠层叶面积的动态模拟 [J]. *农业机械学报*, 2007, 38(6): 117~120.
Zhang Jun, Wang Yiming, Mao Wenhua, et al. Dynamic simulation of leaf area in cotton canopy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(6): 117~120. (in Chinese)
- 7 张军. 棉花生长结构功能模拟模型研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
Zhang Jun. Study on structural-functional simulation model of cotton growth [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 8 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1 629~1 635.
Ni Jiheng, Luo Weihong, Li Yongxiu, et al. Simulation of leaf area and dry matter production in greenhouse tomato [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1 629~1 635. (in Chinese)
- 9 Reynolds J F. Modeling the effects of elevated CO₂ on plants: extrapolating leaf response to a canopy [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 61(1~2): 69~94.
- 10 Ross J. *The radiation regime and architecture of plant stands* [M]. Hague, Netherland: Dr Junk J Publisher, 1981.
- 11 Campbell G S. Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 49(3): 173~176.
- 12 Campbell G S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 36(4): 317~321.
- 13 Lemeur R. A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, Jerusalem artichoke, corn and soybean canopies using actual stand structure data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1973, 12: 229~247.