

面向设计的产品模块划分方法^{*}

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】 提出了面向产品设计的模块划分方法。首先对产品子结构间的功能和结构相关性进行了分析,应用模糊树图聚类算法,探讨了模块的聚类形成过程,得到多种模块划分方案。然后,基于信息熵理论,以模块化产品设计中的横系列设计复杂度、纵系列设计复杂度和更新换代设计复杂度为优化目标,建立了面向设计的模块划分方案数学评价模型,对模糊树图法聚类得到的多个方案进行评价,从而得到最合理的模块划分方案。最后,以石材花线制品加工设备为例,验证了该方法的有效性和合理性。

关键词: 模块化设计 模块划分 模糊树图 复杂度

中图分类号: TH16

文献标识码: A

Module Partition Method for Product Design

Wang Rijun Zhang Jinsheng Ge Peiqi Wang Zhi

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

Abstract

A module partition method for product design was proposed. Firstly, fuzzy dendrogram clustering algorithm was used to illustrate the generating process of modules based on the correlativity analysis of function and structure between the sub-structures of product and then several module partition programs were obtained. Secondly, based on information entropy theory, mathematical evaluation model of module partition program for product design which considering the complexity of cross-series design, longitudinal series design and replacement design as the optimization goal was established, by which module partition programs obtained from fuzzy dendrogram clustering algorithm can be evaluated in order to get the most reasonable module division program. Lastly, straight-lead flower-line products machining equipment was used to illustrate the validity and rationality of the proposed method.

Key words Modular design, Module partition, Fuzzy dendrogram, Complexity

引言

产品模块的划分是模块化设计的关键环节,围绕模块的划分国内外学者进行了大量研究,其中面向产品生命周期的模块划分是研究热点。文献[1~2]从装配、维修、回收和升级等角度进行零部件的相关性分析,然后聚类为模块;文献[3]在模块聚类分析的基础上,从产品的绿色性的角度进行模块划分结果的优化;文献[4~6]在对零部件聚类分析的基

础上,从制造、装配、成本等角度建立数学评价模型进行划分方案的优选;文献[7]从减少装配时间的角度进行模块结构的设计。

可见,面向产品生命周期的模块划分的研究大多是围绕着产品的制造、装配、维修和回收等方面,而面向产品设计对模块划分的影响却鲜有研究。近年来,随着全球化竞争的加剧,客户需求日益多样化,产品种类不断翻新,新产品不断出现,因此,新产品的的设计成为公司保持竞争优势的关键。在模块划

分中考虑产品设计的影响因素,可使划分得到的模块结构更合理,更有利于新产品的设计。因此,本文提出面向设计的产品模块划分方法,综合考虑产品的功能和结构的相关性,采用模糊树图聚类法对产品进行模块划分,得到多种模块划分方案。并从系统论的角度,考虑面向设计的各种影响因素,建立模块划分方案数学评价模型,以获取最优的划分方案。

1 模块划分方案的形成

功能和结构独立是模块最基本的要求。首先从功能和结构的角进行产品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。

1.1 功能相关性分析

功能相关性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^[8]。

在此基础上,定义功能相关性的评价准则,如表 1 所示。

表 1 功能相关性

Tab.1 Functional correlations of substructures

相关度	相关性分析
1.0	两子结构为完成父功能必须成对使用,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
0.0	两子结构之间毫无联系

1.2 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。归纳起来,主要从接触类型^[3]、联接类型和配合方式 3 个方面衡量子结构之间的结构相关性。表 2 描述了这 3 方面的评价准则。

表 2 结构相关性

Tab.2 Structural correlations of substructures

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

1.3 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。相关度构造算法如下

$$r_{ij} = \begin{cases} \omega_f r_{ij}^f + \omega_s r_{ij}^s & (i \neq j) \\ 1 & (i = j) \end{cases}$$

其中 $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$
 式中 r_{ij}^f —— 元素间的功能相关度

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

r_{ij}^s ——元素间的结构相关度

r_{ij}^k ——第 k 个结构相关准则的相关度

w_f ——功能相关准则的权重系数

w_s ——结构相关准则的权重系数

w_s^k ——第 k 个结构相关准则的权重系数

n ——产品的子结构个数

各准则权重系数的确定可采用层次分析法(AHP)^[9]或者市场调查、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 。

1.4 基于模糊树图的模块聚类

由于子结构之间的关系矩阵 R ,建立产品的模糊树图^[10]。通过选取不同的阈值 λ ,对模糊树图的边进行截割,可得到每个 λ 值所对应的模块划分方案。

2 面向设计的模块划分方案评价

对模糊树图进行截割的阈值 λ 越大,则模块数越多,而模块粒度越细,反之则模块数越少,模块粒度越粗(定义模块粒度 $a = 1/\lambda$)。即通过选取不同的阈值 λ ,可得到多种模块划分方案。因此,需要对各种方案进行评价,从而选取最佳模块划分方案。

在信息论中,熵可用作某事件不确定度的量度。而对于一个系统,信息熵可以用来度量系统的有序化程度及其不确定性,该不确定性则直接决定了一个系统能否实现^[4,6,11]。每一个模块划分方案可以看作一个系统^[4],考虑设计方面的要求,这个系统存在着信息熵(复杂度),该模块划分方案是否合理以及能否实现直接取决于该复杂度的大小,因此可通过计算每种模块划分方案的复杂度来选取最合理的划分方案。

客户和市场的需求变化以及技术进步等各方面因素直接催生了一个新产品的的设计。总的来说,一个模块化新产品的的设计常见的有3种类型:横系列模块化设计、纵系列模块化设计以及由于技术进步等因素影响的产品更新换代设计。因此,本文主要从这3方面讨论面向设计的模块划分方案复杂度。

2.1 横系列模块化设计复杂度

横系列模块化设计是指在基型产品的基础上,通过变更、增加或减少某些特定模块而形成变型产品。即对产品的某些部分进行变更,这涉及到两方面问题:哪些部分需要经常变更以及其装拆难度如何。因此,从以下两方面定义横系列模块化设计复

杂度:

(1) 横系列设计复杂度定义为

$$H(D_{h1}) = -\frac{1}{m_a} \sum_{i=1}^n [h_i \ln h_i + (1-h_i) \ln(1-h_i)] \quad (1)$$

式中 m_a ——与模块划分粒度 a 对应的模块数

h_i ——第 i 个子结构的横系列相对变化率

(2) 横系列装配复杂度定义为

$$H(D_{h2}) = -\sum_{i=1}^{m_a} \frac{n_i(a)}{n} \ln \frac{n_i(a)}{n} \quad (2)$$

式中 $n_i(a)$ ——模块划分粒度为 a 时第 i 个模块所包含的子结构个数

将需要经常变更的子结构独立出来形成模块有利于产品的横系列模块化设计,因此,从横系列设计的角度倾向于将产品细分。然而模块划分越细则模块越多,装配越复杂,装配精度低的概率越大,因此,从横系列装配的角度,模块划分越粗、模块数量越少越好。

2.2 纵系列模块化设计复杂度

纵系列模块化设计是在同一类型中对不同规格的基型产品进行模块化设计。纵系列模块化设计常常会导致一些零部件结构形式或尺寸的变化,使这些可能存在系列化变型的零部件独立出来构成模块。因此,该角度倾向于将产品细分。纵系列模块化设计复杂度定义为

$$H(D_v) = -\frac{1}{m_a} \sum_{i=1}^n [v_i \ln v_i + (1-v_i) \ln(1-v_i)] \quad (3)$$

式中 v_i ——第 i 个子结构的纵系列相对变化率

2.3 更新换代设计复杂度

当前市场的激烈竞争以及技术的飞速发展使得产品的设计开发、更新换代日益加速。因此,产品中的某些零部件在其物理寿命尚未结束之时,就已被升级的零部件所替代,即功能寿命已经终止^[2]。因部分零部件升级而废弃整个产品,显然造成了资源的极大浪费。但如果将因为技术进步等原因需经常升级的零部件分离开,单独作为一个模块,在升级时直接更换这个模块,就方便了模块化产品的及时升级换代。从该角度出发,产品细分有利于产品的升级。因此,模块划分方案的更新换代设计复杂度定义为

$$H(D_l) = -\frac{1}{m_a} \sum_{i=1}^n [l_i \ln l_i + (1-l_i) \ln(1-l_i)] \quad (4)$$

式中 l_i ——第 i 个子结构的相对功能寿命

式(1)、(3)和(4)中的 h_i 、 v_i 和 l_i 可采用层次分

析法^[9]得到。

2.4 面向设计的模块划分方案数学评价模型

综合式(1)~(4)建立的面向设计的模块划分方案数学评价模型为

$$\min\{H(D) = H(D_{h1}) + H(D_{h2}) + H(D_v) + H(D_l)\} \quad (5)$$

对于每种模块划分方案可计算得到 $H(D)$, 当 $H(D)$ 最小时, 所对应的模块划分方案即为面向设计的最优模块划分方案。

2.5 模块划分结果调整

在模块划分的整个过程中, 一些参数的确定在很大程度上往往依赖于设计人员的经验, 例如功能和结构相关度的确定以及横系列、纵系列相对变化率的确定等, 这将导致模块划分的结果会存在某些偏差。因此, 需要根据实际情况, 对划分得到的最终结果进行适当的分析调整, 以得到最合理的模块划分方案。

3 应用实例

以石材花线制品加工设备作为实例来验证所提出的模块划分方法, 其功能是实现石材花线制品的加工, 设备结构如图 1 所示。

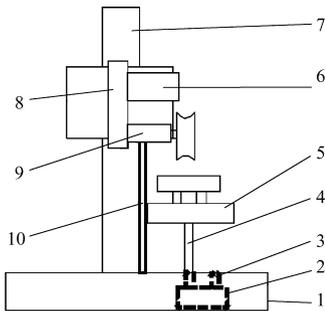


图 1 直位花线加工设备结构图

Fig.1 Structure of straight-lead flower-line products machining equipment

- 1.底座 2.减速器 3.伺服电动机 4.丝杠螺母副 5.工作台
- 6.主电动机 7.立柱 8.胶带传动系统 9.主轴 10.导轨

根据石材花线制品加工设备的功能、结构相关准则, 计算子结构间的相关度, 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 2 所示。

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。

由层次分析法得到各子结构的横系列相对变化率 h_i 、纵系列相对变化率 v_i 以及相对功能寿命 l_i , 如表 3 所示。

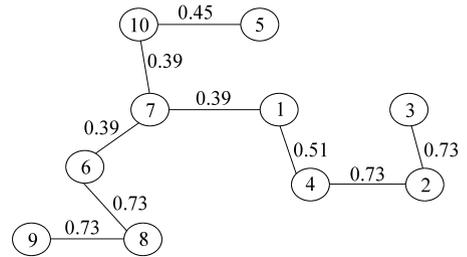


图 2 直位花线制品加工设备的模糊最大生成树

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

表 3 子结构的横系列相对变化率 h_i 、纵系列相对变化率 v_i 以及相对功能寿命 l_i

Tab.3 Relative functional life l_i and relative rate of change of cross-series h_i and longitudinal series v_i of substructures

子结构	h_i	v_i	l_i
1	0.027	0.047	0.074
2	0.027	0.019	0.016
3	0.027	0.089	0.016
4	0.073	0.197	0.031
5	0.210	0.197	0.190
6	0.153	0.019	0.189
7	0.027	0.197	0.074
8	0.301	0.019	0.189
9	0.128	0.019	0.190
10	0.027	0.197	0.031

利用式(1)~(5)计算得到每种模块划分方案的复杂度, 如表 4 所示。当 $\lambda = 0.39$ 时, 模块划分工作失去了意义, 因此该方案不予考虑。

可见, 面向设计的模块划分方法倾向于将产品细分。当阈值 λ 为 0.73, 即模块数为 6 时, 总复杂度最小。考虑到子结构 10(导轨)与子结构 7(立柱)

表 4 各种模块划分方案复杂度

Tab.4 Complexity of each module partition program

λ	m_a	复杂度					模块划分方案
		$H(D_{h1})$	$H(D_{h2})$	$H(D_v)$	$H(D_l)$	$H(D)$	
0.45	4	0.704	1.28	0.712	0.729	3.425	{6, 8, 9}, {5, 10}, {7}, {1, 3, 2, 4}
0.51	5	0.563	1.418	0.570	0.583	3.143	{6, 8, 9}, {5}, {10}, {7}, {1, 3, 2, 4}
0.73	6	0.469	1.642	0.475	0.486	3.072	{6, 8, 9}, {5}, {10}, {7}, {1}, {3, 2, 4}
1	10	0.282	2.3	0.285	0.292	3.159	设备的 10 个子结构各成一个模块

装配在一起,结合紧密,因此,将二者归为一个模块。经调整后,得到最终的模块划分方案,如图3所示。

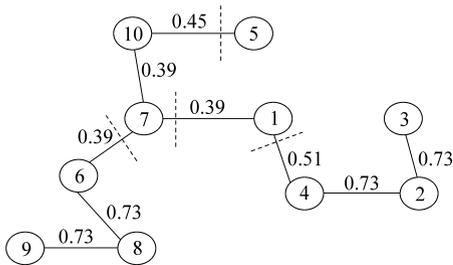


图3 石材花线制品加工设备模块划分

Fig.3 Module partition of flower-line products machining equipment

4 结论

(1) 在对产品的子结构进行功能和结构相关性分析的基础上,采用模糊树图法将子结构聚类为模

块。该划分方法保证了模块功能和结构的独立性,同时,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,使得模块划分工作变得更加合理、简单。

(2) 在信息熵理论的基础上,以模块化产品设计中的横系列设计复杂度、纵系列设计复杂度和更新换代设计复杂度为优化目标,建立面向设计的模块划分方案数学评价模型,对模糊树图法聚类得到的多个方案进行优选,从而得到最合理的模块划分方案。

(3) 实例证明,面向设计的模块划分方法充分考虑了产品生命周期中的设计阶段对模块划分结果的影响,使得划分得到的模块更有利于产品的再设计。这种划分方法简单易操作,尤其适用于市场需求变化较快需要经常再设计的产品。

参 考 文 献

- Gu P, Sosale S. Product modularization for life cycle engineering[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 1999, 15(5): 387~401.
- 唐涛, 刘志峰, 刘光复, 等. 绿色模块化设计方法研究[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(11): 149~154.
Tang Tao, Liu Zhifeng, Liu Guangfu, et al. Research on the methodology of green modular design [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(11): 149~154. (in Chinese)
- 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.
- Tsai Y T, Wang K S. The development of modular-based design in considering technology complexity [J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 119(3): 692~703.
- 贡智兵, 李东波, 史翔. 面向产品配置的模块形成及划分方法[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(11): 160~167.
Gong Zhibing, Li Dongbo, Shi Xiang. Module generation and module partition method for product configuration [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(11): 160~167. (in Chinese)
- 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.
Pan Shuangxia, Gao Fei, Feng Peien. Module partition method research under the circumstances about mass customization [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(7): 1~6. (in Chinese)
- Stone R B, McAdams D A, Kayyalethekkel V J. A product architecture-based conceptual DFA technique [J]. *Design Studies*, 2004, 25(3): 301~325.
- 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.
- 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- 胡宝清. 模糊理论基础 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- 张学文. 组成论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- 王日君, 张进生, 葛培琪, 等. 基于公理设计与模糊树图的集成式模块划分方法 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(4): 179~183.
Wang Rijun, Zhang Jinsheng, Ge Peiqi, et al. Integrated module division method based on axiomatic design and fuzzy dendrogram [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(4): 179~183. (in Chinese)