

文章编号:1005-0523(2013)02-0078-07

模块化产品族中模块和零部件通用性分析方法

王浩伦

(华东交通大学机电工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:针对产品族中模块或零部件有效的分类管理和创新对象选择的问题,提出了一种基于模块化产品族结构树的模块或零部件通用性分析方法。在模块化产品族层次结构模型的基础上,细化了模块化产品族中产品的结构层次表达。考虑零部件和模块的重用数、成本、产品品种和批量,以及尺寸形状、材料、加工装配工艺等影响因素,分别在产品族模块层和零部件层上提出了单个元件的通用性计算方法,并将零部件按自制件和采购件分别进行通用性计算。然后基于PARETO法则和元件通用程度,确定模块和零部件的类型。最后给出了用某企业轮装驱动桥产品族通用化程度的算例。

关键词:模块化;产品族;产品平台;通用性;多因素

中图分类号:TP391;TH122 **文献标志码:**A

随着市场需求和技术的变化,企业需要进行不同层次的产品平台创新(如优化创新、扩展创新和升级创新),使产品平台不断地动态更新。在此动态变化过程中,产品族结构(PFA)也将做出相应的调整和演进,其中模块或零部件功能、结构和数量等的变化影响了产品的性能、质量和成本等,因此,产品族中模块和零部件通用性成为选择模块或零部件作为创新对象和进行合理配置选择的关键节点之一。

目前,国内外对产品族通用性的研究主要集中在3个方面:①以产品族整体为对象的通用性研究。主要依据通用零部件在产品族中的数量比例关系^[1];产量、每种操作的次数和零部件成本^[2];尺寸形状、材料和制造过程^[3]。②以产品族中产品为对象的通用性研究。文献[4]通过零部件及相互关联关系和装配关系提出了百分比通用性指标;文献[5]提出了功能相似性指标(FSI)帮助模块化产品的概念开发和设计;文献[6]提出CMC评价产品族设计中每个产品的通用性;另外还有衡量参数化产品族中产品多样化(NCI, PDI)^[7]。③以产品族中零部件为研究对象,文献[8]提出GVI识别随时间变化满足市场需求的变化零部件,同时提出零部件耦合指标(coupling index)评价产品族中零部件之间的耦合关系。国内学者朱斌等^[9]通过模块实例通用度和变异模块通用度两个指标表示产品族中通用性度量;刘夫云,祁国宁等^[10]提出了基于复杂网络的零部件通用性分析方法。

综上所述,目前众多通用性指标往往通过不同的参数(如通用零部件数量、零部件成本、接口关系、制造过程等等)来度量产品族的通用性程度,并以此帮助设计者均衡产品族通用性和多样性之间的关系。然而,在产品族(或产品平台)的动态发展演进过程中,根据技术和经济分析对产品族及其组成零部件进行精细化和动态性管理,为演进路线和创新对象的选择提供支持,特别是在对产品族中模块或零部件实施复制、转移、删除等创新操作过程中,需要通过如通用性、成本、性能等指标进行评价并确定创新对象,从而使其在功能或结构上发生改变,或使其综合性能得到优化,或使其淘汰^[11]。因而,产品族中模块和零部件的

收稿日期:2013-01-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51165007,70772093);江西省科技厅软科学项目(2010DR01001);江西省教育厅研究项目(GJJ13313)

作者简介:王浩伦(1981—),男,讲师,博士,主要从事大规模定制设计,研发与技术创新管理,现代设计方法及理论。

通用性作为评价和选择产品族结构动态演进创新对象和有效管理的重要指标有必要进行进一步研究。因此,本文在模块化产品族体系结构模型的基础上,考虑零部件层和模块层上零部件和模块的重用数、成本、产品产量等其他影响因素,提出产品族单个元素的通用性计算方法,然后基于PARETO法则和元件通用程度,确定模块和零部件的类型,并以实例说明。

1 模块化产品族结构树

图1为模块化产品族结构模型。模型分为3个层次,即产品层、模块层和零部件层。其中,在零部件层次上,将企业零部件库中的零部件分为通用化零部件和个性化零部件;在模块层次上,根据大规模定制理论的基础将模块按不同类型分为通用模块、柔性模块和专用模块,最后通过配置规则将各类模块组装成的各种产品。

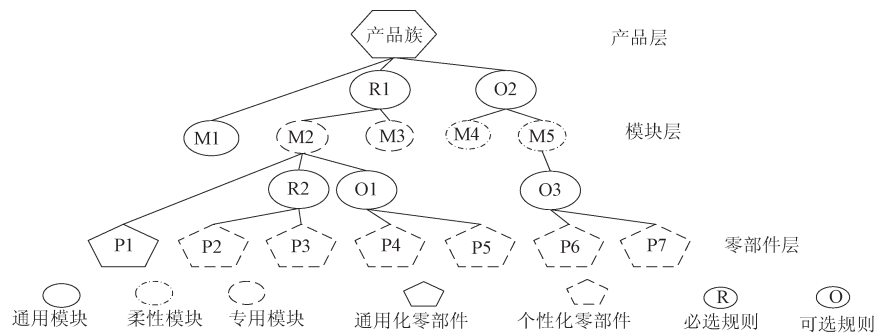


图1 模块化产品族结构模型

Fig.1 Structure model of modular product family

企业零部件库中的零部件可以通过原材料采购进而自制得到,也有通过外协或商品件采购得到。在模块层上,柔性模块和专用模块由通用化和个性化零部件组合而成,但通用模块仅由通用化零部件组成。其中,通用模块(C)在原材料采购和加工方面采用大批量生产方式,并在装配阶段全部应用到每种产品中;柔性模块(F)可以有柔性模块矩阵,即模块矩阵的一列对应某型号产品的功能模块,一行是功能模块的结构参数的系列变形;专用模块(S)根据客户需求要求特定的采购和加工。柔性模块和专用模块主要采用定制化生产方式。

假设该产品族中第*i*中产品 P_i 由*m*个通用模块 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, *n*个柔性模块 $F_i = \{F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{in}\}$ 和可任选组合的*k*个专用模块 $S_i = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{ik}\}$ 组成。根据需求,采用产品通用模块、柔性模块和专用模块集合中的不同子集组合构成不同的产品集,由此可生成不同需求产品。那么,第*i*种产品 P_i 表示为

$$P_i = C \cup F^i \cup S^i = \{C_1, C_2, \dots, C_m\} \cup \{F_1^i, F_2^i, \dots, F_n^i\} \cup \left\{ \bigcup_{j=1}^k S_j^i \right\} \quad (1)$$

对于产品族面向市场需求变化,选择合理和有效的零部件或模块形成个性化的产品,同时产品族结构体系进行优化和创新。因而,对产品族中模块层次和零部件层次上的通用性进行分析具有重大的意义。

2 模块层,零部件层通用性分析

根据产品BOM表的数据,将图1中的模型细化为图2所示的产品族中各种产品的结构层次模型。假设模块化产品族中有3个产品(P_1, P_2, P_3),在模块层有3种模块实例(M_1, M_2, M_3, M_3')组成,其中 M_3' 是 M_3 的变型设计模块。由这些模块实例组合成三种产品在零部件层有12种零部件(d_1-d_{12}, d_{12}'),其中 d_{12}' 是 d_{12} 的变型设计的零部件。图中类似“ $\times 2$ ”表示该模块或零部件在该产品中的用量为2。下面分别计算模块层上模块通用性指标和零部件层上零部件通用性指标。

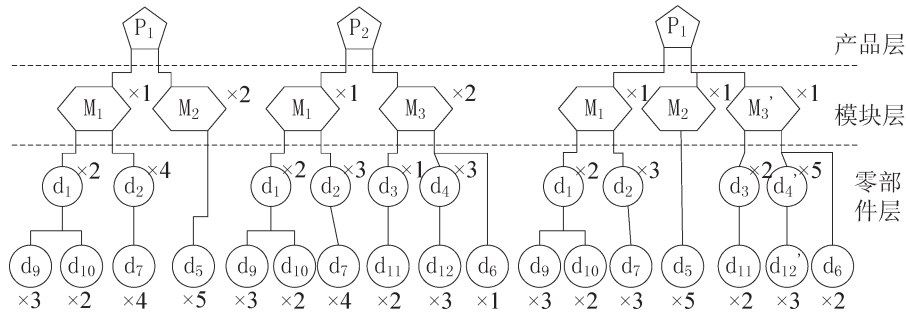


图2 产品族中产品的结构层次
Fig. 2 Structural hierarchy of products in product family

2.1 模块通用性指标

在产品族结构模块层次中,模块 j 通用程度可以用该模块在其产品族中所被 n 种产品采用的比重,可以表示为

$$C_{j(1)}^M = \frac{N_j \sum_{i=1}^n Q_{ij}}{\sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n Q_{ij} \right]} \quad (2)$$

式中: N_j 为采用模块 j 的产品种类,如 M_1 被 3 种产品都采用,那么 N_1 为 3; Q_{ij} 为模块 j 在产品 i 中的用量,如图 2 中 M_2 在产品 P_1 中的用量为 2; m 为模块层中模块的种类数,如图 2 中有 3 种模块,即 M_1, M_2, M_3 ; n 为产品族中产品种类数量。

由于不同的产品市场需求量不同,其生产的批量也不同。产品中模块的通用程度也会受到影响。

$$C_{j(2)}^M = \frac{N_j \sum_{i=1}^n (V_i Q_{ij})}{\sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n (V_i Q_{ij}) \right]} \quad (3)$$

式中: V_i 为采用模块 j 的产品生产批量。

另外,考虑到模块的成本和装配因素的影响,其中,模块成本的大小会影响设计者选择采用该模块的决定。因而,产品族中模块层次中模块 j 的通用程度的最终表达为

$$C_j^M = \frac{C_j^M N_j f_j^M \sum_{i=1}^n (V_i Q_{ij})}{\sum_{j=1}^m \left[C_j^M f_j^M \sum_{i=1}^n (V_i Q_{ij}) \right]} \quad (4)$$

式中: C_j^M 为模块 j 的成本或商品件采购价格; f_j^M 为模块 j 的装配影响比率。

2.2 零部件通用性指标

在产品族中,零部件层可以由自制件和外协或采购件组成,因而在计算零部件通用性指标时,将分别计算自制零部件通用性程度和外协或采购的零部件通用性程度。综合考虑零部件的数量、成本或市场价格、尺寸形状、材料选择、加工装配工艺等因素的影响。因而,自制零部件 k 在产品族中的通用性程度计算可以表达为

$$CI_k^C = \frac{C_k^C N_k \prod_{x=1}^4 f_{x,k}^C \sum_{i=1}^n (V_i Q_{ik})}{\sum_{k=1}^d \left[C_k^C \prod_{x=1}^4 f_{x,k}^C \sum_{i=1}^n (V_i Q_{ik}) \right]} \quad (5)$$

式中: C_k^C 为零部件 k 的成本; N_k 为采用零部件 k 的产品种类数量; $f_{x,k}^C$ ($x=1,2,3,4$) 分别是: $f_{1,k}^C$ 为零部件 k 尺寸和形状影响比率, $f_{2,k}^C$ 为零部件 k 材料选择的影响比率, $f_{3,k}^C$ 为零部件 k 制造加工工艺的影响比率, $f_{4,k}^C$ 为零部件 k 装配工艺的影响比率; Q_{ik} 为零部件 k 在产品 i 中的用量,如图2中零部件 d_9 在产品 P_1 中的用量为3。

然而,对于外协或采购件,零部件的制造加工工艺的影响因素可以忽略。因而,外协或采购零部件 k 在产品族中的通用性程度计算可以表达为

$$C_k^C = \frac{C_k^C N_k f_{1,k}^C f_{2,k}^C f_{3,k}^C f_{4,k}^C \sum_{i=1}^n (V_i Q_{ik})}{\sum_{k=1}^d \left[C_k^C \prod_{x=1}^4 f_{x,k}^C \sum_{i=1}^n (V_i Q_{ik}) \right]} \quad (6)$$

2.3 模块,零部件分类

根据PARETO法则和上述计算得到的各模块和各零部件通用性程度,可以在产品族中分别在模块层和零部件层上对模块和零部件进行分类,如表1所示。确定模块层上的通用模块,柔性模块和专用模块,其中通用模块是通用性较好的模块,约占产品族中模块总数的20%,专用模块是与客户需求有关的特殊模块,约占产品族模块总数的10%,其余的模块为柔性模块。另外,零部件层上通用化零部件约占产品族中零部件总数的20%,而个性化零部件中,约占产品族零部件总数70%的为通用性一般,即定制程度一般的零部件,约10%的零部件通用性极低,即为定制化程度较深的零部件。

表1 产品族模块和零部件分类
Tab.1 Modules & parts classification in product family

模块类型	占总量比重	说明	零部件类型	占总量比重	说明
通用模块	约20%	-	通用件	约20%	零部件通用性较高
柔性模块	约70%	-	定制件	约70%	零部件定制化程度一般
专用模块	约10%	-		约10%	零部件定制化程度较深

3 实例

为了验证通用性计算方法,以某企业轮式装载机驱动桥产品族为研究对象。该产品族中包括3种驱动桥产品,即ZL40,ZL50,ZL50E。在模块层次上有轮边减速、桥壳、制动、半轴、传动轴和差速器6个功能模块,其中制动模块和传动轴模块有多种可以选择的模块实例。如图3所示ZL50产品结构树。

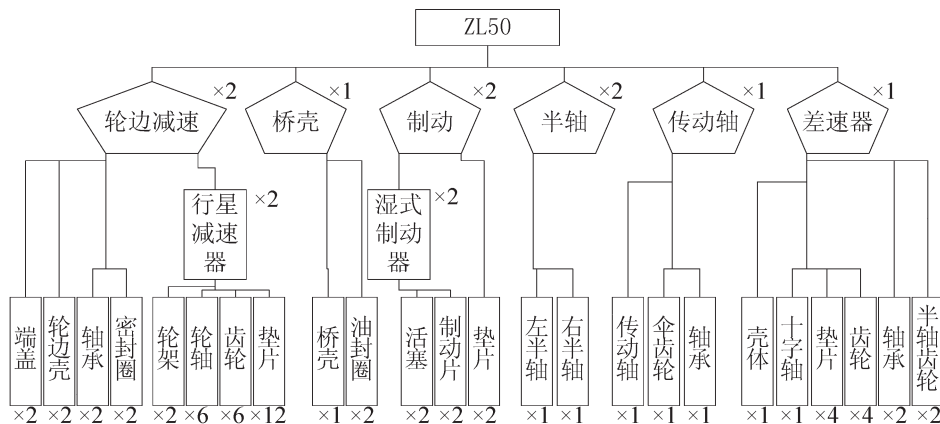


图3 ZL50产品结构树
Fig.3 Product structure tree of ZL50

3.1 模块层通用性计算

在模块层,首先需要确定模块装配影响比率 $f_{a,j}^M$,由该模块所在产品的装配设计的参数和工艺流程确定。如表2所示驱动桥产品族模块装配影响比率的确定。如桥壳模块在3种产品中装配要求是一样的,可以确定 $f_{a,j}^M$ 的值为1,若3种产品中装配要求各自不一样,则确定 $f_{a,j}^M$ 的值为1/3。同理,可以确定其他模块的 $f_{a,j}^M$ 。

表2 驱动桥产品族模块装配因素确定(部分模块)

Tab.2 Module assemble factors in drive axle family (partial)

模块	产品	变量	$f_{a,j}^M$
轮边减速 M1	ZL40	4.4	2/3
	ZL50	4.4	
	ZL50E	5.067	
桥壳 M2	ZL40	427.5	1
	ZL50	427.5	
	ZL50E	427.5	
制动 M3	ZL40	25	2/3
	ZL50	50	
	ZL50E	50	

假设 ZL40, ZL50, ZL50E 的产品分别为 100, 300, 200 台。根据公式(5)可以计算出该驱动桥产品族中模块层上的6个模块各自的通用性数值,如表3所示,模块层各模块通用性。不难看出,轮边减速模块 M_1 和差速器模块 M_6 的通用性较高,而制动模块 M_3 和传动轴模块 M_5 的通用性较低,其中模块 M_{31} 和 M_{32} 都是制动模块 M_3 的两种变形设计结构(主要是湿式制动片数量根据制动力矩大小而定),传动轴模块由于3种产品的驱动桥输入的主传动比各不相同,因而出现3种不同的传动轴模块实例。因此,各模块通用性计算值与实际情况相吻合。

表3 模块层各模块通用性

Tab.3 The commonality of modules in module layer

M_j	C_j^M	N_j	$f_{a,j}^M$	$\frac{V_{ZL40}=100}{Q_{ZL40,j}}$	$\frac{V_{ZL50}=300}{Q_{ZL50,j}}$	$\frac{V_{ZL50E}=200}{Q_{ZL50E,j}}$	$\sum_{i=1}^3 (V_i Q_{ij})$	CI_j^M	
M_1	433	3	2/3	2	2	2	1 200	0.813	
M_2	294	3	1	1	1	1	600	0.414	
M_3	M_{31}	310	3	2/3	2	0	0	200	0.097
	M_{32}	385			0	2	2	1 000	0.603
M_4		160	3	2/3	2	2	2	1 200	0.300
	M_{51}	110			0	1	0	300	0.026
M_5	M_{52}	135	3	1/3	1	0	0	100	0.011
	M_{53}	145			0	0	1	200	0.023
M_6	505	3	1	1	1	1	600	0.712	

3.2 零部件层通用性计算

在零部件层,确定 $f_{x,k}^C$ ($x=1, 2, 3, 4$) 值的方法与模块层一样,但需要指出的是零部件有自制件和采购件之分,因而在确定 $f_{x,k}^C$ ($x=1, 2, 3, 4$) 时,采购件不考虑制造因素 $f_{3,k}^C$ 。因此,对各零部件通用性计算将分别对自制件和采购件分别根据公式(5)和公式(6)进行计算。见表4零部件层各零部件通用性计算。

3.3 分析与讨论

根据PARETO法则和表3得到的各模块通用性程度,确定模块层上的轮边减速模块 M_1 和差速器模块 M_6 为通用模块,传动轴模块 M_5 为专用模块,主要由于成本较高、产品批量较低引起的,其他的模块为柔性模块。同理,在零部件层上,分别对自制件和采购件进行分类。如表4所示,在自制件中桥壳、行星轮架、端盖为通用化零部件,其他为定制化零部件;在采购件中轮边减速器的密封圈为通用化零部件,其他为定制化零部件。通过对模块和零部件的类型划分,可以对产品族中的模块和零部件进行有效地管理。另外,通用性高有利于成本的降低,但往往忽视了其技术性能提升的必要性。差速器模块 M_6 的通用性较高,但其在技术上存在多个缺陷,如差速限滑等问题。因而,可将此选作为技术创新对象。

本文选择制动模块 M_3 (其变型模块分别为 M_{31} 和 M_{32}) 中的活塞和制动片等零件进行标准化,使得制动模块 M_3 成为 ZL40, ZL50, ZL50E 驱动桥的通用模块,通过计算制动模块的通用性程度提高到了 0.748。而对于该驱动桥产品族的通用性,本文采用文献[6]所提的 CMC 方法可以计算制动模块 M_3 通用化前后的产品族整体通用性程度大小分别为 0.568 和 0.606,可以发现驱动桥产品族的通用性提高了 6.81%。由此可见,现有文献中的通用性程度计算方法不能确定产品中所要改进的结构对象,只能通过零部件计算出产品族的整体性通用程度,而本文的方法通过计算零件和模块两层的通用性可以确定产品族中改进的对象。

表4 零部件层各零部件通用性计算(部分)

Tab.4 Calculating part commonality in part layer (partial)

参 数	C_k^C	N_k	$f_{1,k}^C$	$f_{2,k}^C$	$f_{3,k}^C$	$f_{4,k}^C$	$V_{ZL40}=100$	$V_{ZL50}=300$	$V_{ZL50E}=200$	$\sum_{i=k}^3 (V_i Q_{ik})$	CI_k^M	
							$Q_{ZL40,k}$	$Q_{ZL50,k}$	$Q_{ZL50E,k}$			
自制件	轮架	75	3	1	2/3	2/3	1	2	2	2	1 200	1.027
	轮轴	12	3	1	2/3	2/3	1	6	6	6	3 600	0.493
	桥壳	288	3	2/3	1	1	1	1	1	1	600	1.479
采购件	制动片	25	3	1	2/3	-	1	2	2	2	1 200	0.926
	油封圈	6	3	2/3	1/3	-	1	2	2	2	1 200	0.074

4 结论

在企业实施MC基于平台的产品开发产品过程中,为应对市场需求和技术的不断变化,通过模块化产品族动态演进,即产品族内部模块或零部件的有选择性的取舍和有目的性的创新以及对模块或零部件进行有效地分类管理。针对这些问题并结合模块化产品族的特点提出了模块化产品族中模块零部件通用性分析方法。① 提出产品族中两个层次上某具体模块或零部件的通用性程度计算,与产品族整体通用性计算相比,该方法能够更进一步对产品族(产品平台)创新演进过程中模块或零部件选择和有效的精细化管理,降低成本以及创新的前提条件。② 综合考虑了零部件或模块的重用数、成本、产品品种、产品产量以及尺寸形状、材料、加工装配工艺等影响因素。③ 根据模块或零部件通用性分析结果对产品族中模块层中的模块分成三类,零部件层中的零部件分类成两类,以便有效地管理。这为选择合理的设计元件以及有效管理通用化和多样化之间关系提供了有效途径。但是在具体的产品族设计或重新设计过程中,设计者采用何种创新设计决策对产品族创新演进具有重要意义。因此,在本研究基础上,结合各种创新技术面向MC产品平台和产品族创新演进的机制和模式将是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] COLLIER D A. The measurement and operating benefits of component part commonality[J]. *Decision Sci*, 1981, 12(1): 85-96.
- [2] JIAO J, TSENG M M. Understanding product family for mass customization by developing commonality indices[J]. *J Eng Design*, 2000, 11(3): 225-243.
- [3] KOTA S, SETHURAMAN K, MILLER R. A metric for evaluating design commonality in product families[J]. *ASME J Mech Design*, 2000, 122(4): 403-410.
- [4] FUJITA K. Product variety optimization under modular architecture [J]. *Computer Aided Design*, 2002, 34(12): 953-965.
- [5] MCADAMS D A, STONE R B, WOOD K L. A quantitative similarity metric for design-by-analogy[J]. *ASME J Mech Design*, 2002, 124(2): 173-182.
- [6] THEVENOT H J, SIMPSON T W. A comprehensive metric for evaluating component commonality in a product family[J]. *Journal of Engineering Design*, 2007, 18(6): 577-598.
- [7] SIMPSON T W, SEEPERSAD C C, MISTREE F. Balancing commonality and performance within the concurrent design of multiple products in a product family[J]. *Concurr Eng Res Appl*, 2001, 9(3): 177-190.
- [8] MARTIN M V, ISHII K. Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures[J]. *Res Eng Design*, 2002, 13(4): 213-235.
- [9] 朱斌, 江平宇. 面向产品族的设计方法学[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(3): 1-8.
- [10] 刘夫云, 杨青海, 祁国宁, 等. 基于复杂网络的产品族零部件通用性分析方法[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(11): 75-79.
- [11] 程贤福, 熊坚, 李骏. 汽车鼓式制动器的可靠性稳健优化设计[J]. *华东交通大学学报*, 2009, 26(2): 67-71.

Commonality Analysis of Module & Part in Modular Product Family

Wang Haolun

(School of Mechanical & Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Aiming at such problems as management of the modules or parts and selection of innovation object in modular product family, an analysis method for commonality of module & part in modular product family was put forward. Based on modular product family hierarchical model (i.e. product layer, module layer, component part layer) a detailed product structure hierarchical tree was depicted. The component part commonality and module commonality in module layer and component part layer of product family were identified respectively. The formulations of the two commonalities take into account amount of component part or module, product variety, product volume, price/cost of the component part or module, size, geometry, material, manufacturing process and assembly. According to the source of component parts, the mathematical formulas of self-made parts and purchased parts were set up respectively in the component part layer. Then modules and components were classified based on the PARETO rule and the degree of commonality. Finally, an example of product family commonality of drive axle of wheel loader was given to indicate the effectiveness of the proposed method.

Key words: modularity; product family; product platform; commonality; multi-factors