

文章编号: 1001- 2486(2009) 05- 0075- 06

基于功能- 原理- 行为- 结构的产品模块化设计方法*

李国喜¹, 吴建忠², 张 萌¹, 龚京忠¹ 常品要¹

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;

2. 航天科工集团二院 283 厂军事代表室, 北京 100854)

摘要:把机械产品的迭代设计分解拓扑模型与模块化设计方法相结合, 提出了基于功能- 原理- 行为- 结构的机械产品模块化设计方法。主要讨论了基于功能- 原理- 行为- 结构的产品迭代设计分解原理; 分析了设计分解过程中功能 \rightarrow 原理 \rightarrow 行为 \rightarrow 结构 \rightarrow 功能的演进的纵向迭代过程; 探讨了产品设计分解的横向动态建模方法; 产品迭代设计分解过程引入模块化方法, 建立了基于功能- 原理- 行为- 结构的复杂机械系统模块化设计基本方法。

关键词:功能- 原理- 行为- 结构; 迭代设计; 模块化; 设计方法

中图分类号:TH122 **文献标识码:**A

Approach to Product Modular Design Based on FPBS

LI Guo-xi¹, WU Jian-zhong², ZHANG Meng¹, GONG Jing-zhong¹, CHANG Pin-yao¹

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

2. PLA, Military Representative Room of No. 283 Factory of CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract: By combining decomposition topology model of iterative design for mechanical products with modularization, a modular design method for mechanism based on function-principle-behavior-structure is put forward. Product iterative design decomposition principle based on function-principle-behavior-structure is mainly discussed. Portrait iterative process of function(principle)(behavior)(structure)(function) evolution during design decomposition is analyzed. Transverse dynamic modeling means of product design decomposition is clarified. Basic modular design method for complicated mechanism based on FPBS is established by introducing modularization into the product iterative design composition process.

Key words: function-principle-behavior-structure; iterative design; modularization; design method

产品设计是在设计条件与设计约束的作用下, 寻求一条物理结构与功能需求之间的复杂映射的过程, 通过设计问题求解, 使产品每个子功能都依附于具有一定拓扑结构的物理结构^[1]。产品设计是一个从抽象到具体、逐步细化、反复迭代的过程, 是从需求分析开始, 经过功能定义、原理求解、结构设计、详细设计, 最终得到满足客户需求的产品^[2]。基于功能- 原理- 结构(FPS, Function-Principle-Structure)、功能- 行为- 结构(FBS, Function-Behavior-Structure)、功能- 环境- 行为- 结构(FEBS, Function-Environment-Behavior-Structure)、功能- 行为- 机构- 结构(FBMS, Function-Behavior-Mechanism-Structure)的迭代层次映射, 使得机械产品概念设计考虑功能、环境、原理、行为、机构、结构等多种要素, 既能实现自顶向下的多层次创新设计, 又能实现自底向上的结构综合, 是建立产品概念设计拓扑模型, 实现产品系统化设计求解的重要方法^[3-5]。产品迭代设计分解过程中引入模块化设计方法, 可以有效地实现产品功构要素的聚合、配置、变型、重构, 从而实现基于产品功能、原理、行为、结构的模块化设计。

1 功能、原理、行为、结构关系

在产品设计中, 功能、原理、行为、结构之间存在着密切联系: (1) 功能是产品满足客户需求的特定工作能力的描述, 产品总体功能又可分解为许多子功能。由于产品的原理、行为、结构实现方案不同,

* 收稿日期: 2009- 04- 02

基金项目: 国家部委资助项目(51318010407, 51318010604); 湖南省科技计划重点资助项目(2007CK2011)

作者简介: 李国喜(1967-), 男, 教授, 博士生导师。

则产品功能的分解方案也不同,因此,产品总体功能往往不能直接分解为子功能。产品的子功能表示输入、输出与状态之间的转换,以及特定物理行为的抽象。产品功能通过求解原理来实现。(2)机械原理包括机械机构的转换、传动、运动等基本运动,复杂机械系统的实现原理是由这些基本原理合成。(3)构成产品实现方案的基本运动原理表现为各种原理构件的基本运动行为,这些行为可以用运动学参数来表征。因此,某一基本原理包含了多种原理构件的基本运动行为,可以通过多个运动学参数来表征。(8)结构是产品的最终表现形式,产品的功能、原理、行为均是通过具体的结构来实现。原理及其行为是功能到物理结构的桥梁。物理结构又具有多个子功能,也就是说产品功能通过原理、行为映射到物理结构,又通过物理结构分解为多个子功能。

2 产品 FPBS 设计迭代模型

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、概念产品评价的过程^[6]。

产品的设计过程是基于总体功能特征展开的,功能特征贯穿于设计过程的始终。功能作为客户需求的映射分析结果,是整个产品设计活动的驱动因素。

由功能、原理、行为、结构的关系可以看出,产品自顶向下的设计求解过程是一个进行功能 \rightarrow 原理求解,原理 \rightarrow 行为分析,原理、行为 \rightarrow 结构映射,结构 \rightarrow 功能分解的过程,是按照功能 \rightarrow 原理 \Rightarrow 行为 \rightarrow 结构 \rightarrow 功能的映射方法,进行设计迭代的过程。

从产品的总体功能开始,由功能映射其实现原理;由原理确定其运动行为;由原理、行为映射产品功能的载体与行为的实现——结构,结构包括装配体、零件、部件、特征等;分析确定结构的子功能,持续进行该过程,分解到不需再分的子功能及其对应的结构、特征集、零部件或模块^[7];或者通过以行为为中心的功能、结构解耦方法,分解到相对独立的结构或结构特征具有独立的功能、单一的行为,这样一种功能-行为-结构组件是构成产品或模块的基本功构组件或功构单元。以上 FPBS 映射建模过程符合设计思维规律,可以用来实现产品的功能分析、分解、概念设计过程,同时,也可以用来对已有的产品进行分解建模。

在以上求解过程中,一个功能可由多种原理实现,一个原理可由多种概念结构实现,这样就会形成多种求解方案,如何确定可行方案,可以采用以下方法:(1)由功能推理原理过程中,加入功能目标约束,缩小解的空间^[8];(2)对推理获得的每一层次的行为、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的复杂度^[9],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。

F 表示产品功能, V 表示性能约束或功能目标, P 表示实现功能的原理, B 表示原理的运动行为, S 表示实现原理、行为的结构。为形式化描述功构单元、表达模块的 FPBS 分解过程,采用多色集合建立模块的 FPBS 数学描述模型^[10]:

$$* \left[k, i_k, j_{k-1} \right] \rightarrow \bigwedge_{i_{k+1}=r}^{n_{k+1}, i_k} + r * \left[k+1, i_{k+1}, i_k \right]$$

* $\left[k, i_k, j_{k-1} \right]$ 表示以第 $k-1$ 层第 j_{k-1} 个结点为父结点的第 k 层第 i_k 个结点, * 可以代表功能结点 F 、行为结点 B 或结构结点 S ; n_{k+1}, i_k 表示第 k 层第 i_k 个结点在第 $k+1$ 层中的子结点数目, r 表示第 k 层第 i_k 个结点在第 $k+1$ 层中的子结点的起始序号, n_k 表示第 k 层所有结点数目。可以采用有向图来表达基于 FPBS 的产品设计分解过程,从而建立产品 FPBS 映射分解模型。

3 基于 FPBS 的产品动态建模

机械系统设计的动态模型包括功能模型、原理模型和结构模型三个视图,功能单元、原理单元、结构单元是上述三种模型的构成单元。动态模型体现功能-原理-行为-结构-功能的动态演化过程中某一层的功能或原理或结构之间的拓扑关系。

3.1 产品功能模型

机械系统的功能模型是对产品所完成的各项活动、活动之间的相互关系的一种结构化描述。产品

功能建模常用的有功能流法、IDEFO 功能描述法。功能流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。而在 IDEFO 方法中,除方框表示功能、输入输出表示功能之间的接口外,还有机制和控制。因此,这里把这两种方法结合起来,建立机械产品的建模方法。该方法中,方框表示产品功能,其左端、右端、上端、下端、右下角分别表示功能的输入、输出、约束、结构、编号,粗实线、细实线和虚线分别表示功能之间的物质流、能量流和信息流。功能之间由流经产品的物质流、能量流和信号流^[11]连接起来形成产品的功能模型。图 1 是根据产品 FPBS 设计分解模型的底层功能及其结构建立的功能模型。

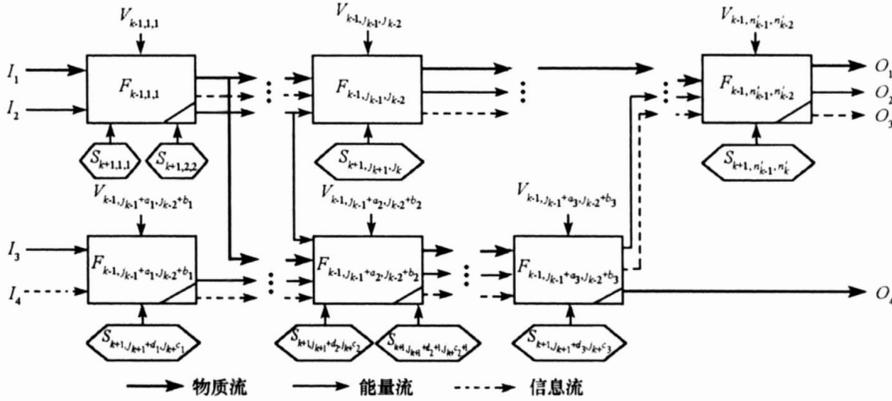


图 1 产品功能模型

Fig. 1 Product function model

由于 IDEFO 具有层次分解性,通过一套完整的严密的规则,将一个复杂的系统层层往下分解,即较高层次的一个活动可以按需要细化成一组较低层次上的活动。同样,在产品迭代过程中,产品较高层次的功能不断分解为较低层次的功能,因此,可以建立不同层次的产品功能模型。

3.2 产品原理模型

机械系统的原理模型是对实现功能的机械运动传递和运动形式转换及其之间相互关系的一种结构化描述。机械系统通过各种装置进行物质、能量、信息的转换,而这些装置是由相应的原理机构实现,实现产品的原理机构之间存在物质、能量、信息联系,而这种联系主要体现在机构运动行为的传递关系,运动行为主要包括:作用力、位移、速度、加速度、跃度、角位移、角速度、角加速度、角跃度。在具体的机械系统设计过程中,一般用原理简图表达机构及其运动之间的关系。而这里把原理单元抽象为方框表示,同时原理单元中也包含了原理构件的运动行为,原理单元之间的运动行为按照其传递方向,用带箭头的连线表示。原理单元之间由所传递、转换的运动行为连接起来构成产品的原理模型。图 2 是根据产品 FPBS 设计分解模型的底层原理单元建立的原理模型。

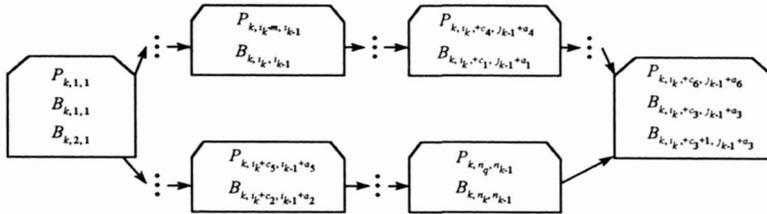


图 2 产品原理模型

Fig. 2 Product principle model

3.3 产品结构模型

机械系统的结构模型是对实现功能、原理、行为的机械结构之间融合、联接、装配关系的一种结构化描述。机械系统的物质、能量、信息以及运动行为的传递与转换最终体现在机械结构的相互关系上。由于产品设计分解模型中的结构可能是装配体、部件、零件、特征,因此,结构之间的关系存在结构特征之

间的融合、联结与装配关系,而且,按照结构之间实际可装拆的难易程度,可以定义联接结构之间的关联强度,结构之间的关联强度越高,这些结构形成模块的可能性越大。

结构的联接、装配过程是在一定的条件下进行的,且它们之间联接具有一定的先后顺序性。在机械系统的结构模型建模方法中,六边形框表示产品结构,结构之间的带箭头的连线表示结构之间的联接、装配关系以及装联顺序,双向箭头表示结构装联无顺序关系。由此就构成产品的结构模型。图3是根据产品FPBS设计分解模型的底层结构单元建立的结构模型。

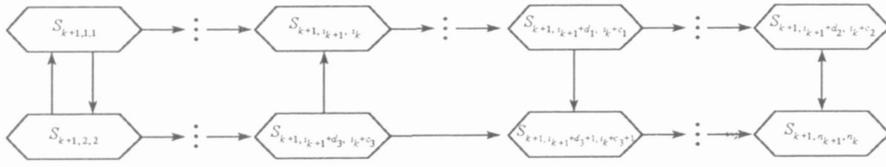


图3 产品结构模型
Fig.3 Product structure model

4 基于FPBS的产品模块化设计方法

4.1 产品模块化设计方法

模块化设计(Modular Design)是实现产品大规模定制的一种有效的先进设计方法,目前已经扩展到许多行业,并与CAD/CAE/CAM、相似性设计、成组方法等相结合,应用到产品的设计与制造过程。综合文献[12-13],对模块化设计含义阐述如下:

模块化设计是将模块化思想引入产品设计,着重解决产品品种、规格与设计制造周期、成本之间的制约关系的现代设计方法,其实质与模块化是相同的,即是对一定范围内的不同功能或相同功能不同性能、不同规格的产品进行功能分析的基础上,划分并设计出一系列功能模块,通过模块的选择和组合可以构成不同的产品,以满足市场不同需求的现代设计方法。它包括三方面的内容:(1)根据客户需求拟定产品系列型谱、确定产品主参数,进行产品总体功能设计,对产品总体功能进行原理性设计与分析,进行产品总体功能分解、建立产品功能层次模型、划分产品功能模块,从而建立产品系列的功能模块体系;(2)根据功能模块要求进行基型产品结构模块设计,对基型产品模块进行系列化,合理创建出一组模块,从而建立产品系列结构模块体系;(3)根据客户具体的产品需求确定产品的配置参数(产品技术特征),由产品的技术特征进行模块的合理选择,对产品进行组合化设计与装配,形成模块化产品方案,并进行相关的分析计算与评价,确定产品是否满足客户个性化需求。其过程如图4所示。

4.2 基于FPBS的产品模块化设计总体思路

基于功能-原理-行为-结构的产品设计迭代求解,可以实现产品功能、原理、行为、结构要素的纵向设计分解;通过功能模型、原理模型、结构模型的建立,可以横向表达各功能、原理、结构要素之间的关系。把模块化设计方法引入产品设计迭代求解过程,基于产品动态模型,通过产品模块划分、识别与创建、产品平台建立,以建立产品族模块体系;基于产品动态模型、产品族模块体系,进行产品配置设计、模块适应性变型设计、模块重构设计,以实现基于模块体系的产品定制设计。基于功能-原理-行为-结构的产品模块化设计总体思路如图5所示。

(1) 产品模块识别、划分与创建

基于产品动态模型,对产品设计要素进行关联性分析,采用聚类方法进行设计要素的聚类,形成产品模块设计方案,以建立产品概念模块;对概念模块展开结构设计,从而建立产品模块。

(2) 产品平台建立

由细分的客户需求确定产品族的基础功能、变异功能,通过功能-原理-行为-结构的设计迭代与求解,建立产品族FPBS功构分解模型底层功构单元的功能模型;以此为基础,对产品族设计要素进行相关性分析,采用谱系聚类方法进行设计要素的聚类,分别建立产品族的基础功构模块、变异功构模块;由此可以建立基础模块族、变异模块族,从而实现产品族规划。

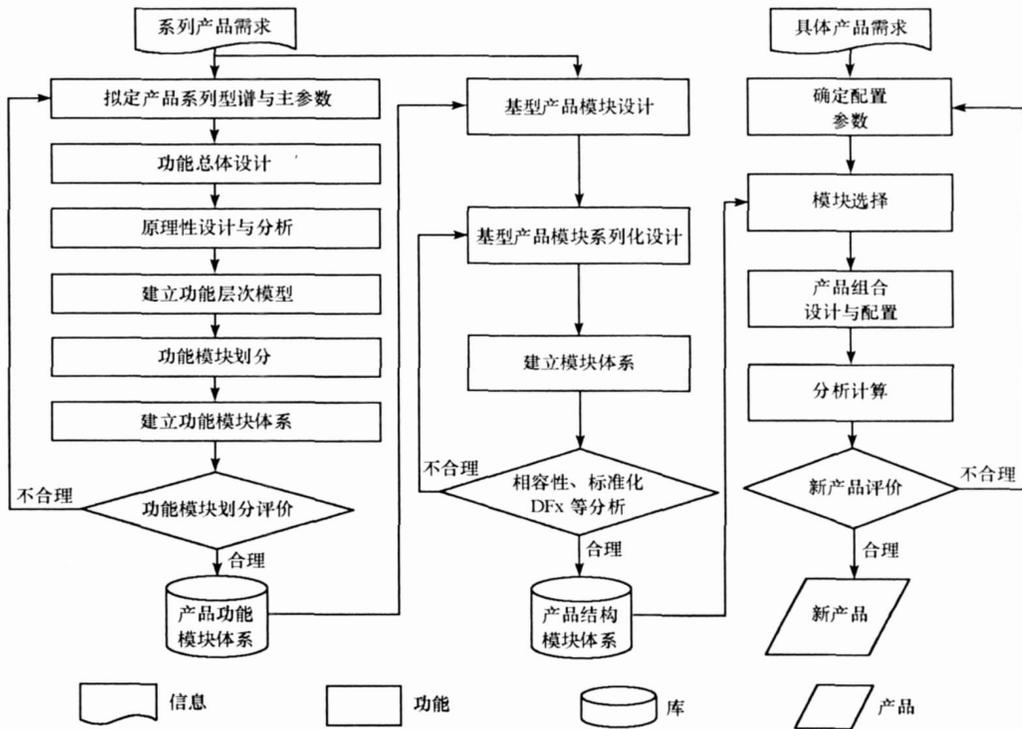


图4 产品模块化设计过程

Fig.4 Product modular design process

(3) 产品配置设计

针对客户需求,通过基于规则的 QFD 映射,确定期望父模块特征需求;从该父模块特征需求入手,采用 CBR 方法在其所属模块族的模块库中进行相似检索和匹配,确定和期望父模块最相似的模块;若存在完全可用模块,直接进入配置结果,若此存在部分可用模块,则须对其进行可拓变换;若没有可用模块,则通过 QFD 零件配置矩阵映射出父模块的下一级期望子模块;如此继续进行上述过程,依次确定各级子模块;直到得到产品的可行解。

(4) 模块适应性变型设计

建立基于功能、原理、结构的模块功构分解模型;按照模块功能或(和)性能变化的要求,确定模块分解模型中需要调整的功构单元,进行功构单元变换或替换,并进行功构单元的 FPBS 分解,从而建立新模块的功构分解模型;建立新模块的功能模型,在功能模型的约束下,进行相关结构单元的删除与聚合,实现结构或(和)特征集的综合,从而实现新模块的结构设计,建立新模块。

(5) 模块重构设计

按照新产品设计要求,从已有的产品族中抽取相关产品,进行功能-原理-行为-结构的功构分解,建立产品的 FPBS 分解模型;基于分解模型,进行客户需求(CRs)驱动的功能重构、原理重构、行为重构、结构重构,建立满足设计要求的新产品 FPBS 分解模型;通过结构单元的聚合,建立产品模块,从而实现新产品的的设计。

5 结论

在产品迭代设计分解过程中引入模块化技术,建立基于功能-原理-行为-结构的产品模块化设计方法具有如下特点:

(1) 基于功能-原理-行为-结构的循环映射可以清晰表达产品功能、原理、行为、结构要素的纵向迭代设计与功构分解过程;功能模型、原理模型、结构模型等产品动态模型横向表达产品功能、原理、结构要素之间的物质、能量、信息、运动参数联系及其联接、装配关系,从而可以建立产品设计方案。

(2) 基于产品(族)动态模型,引入模块化设计技术,按照产品功构要素之间的耦合程度进行功构要

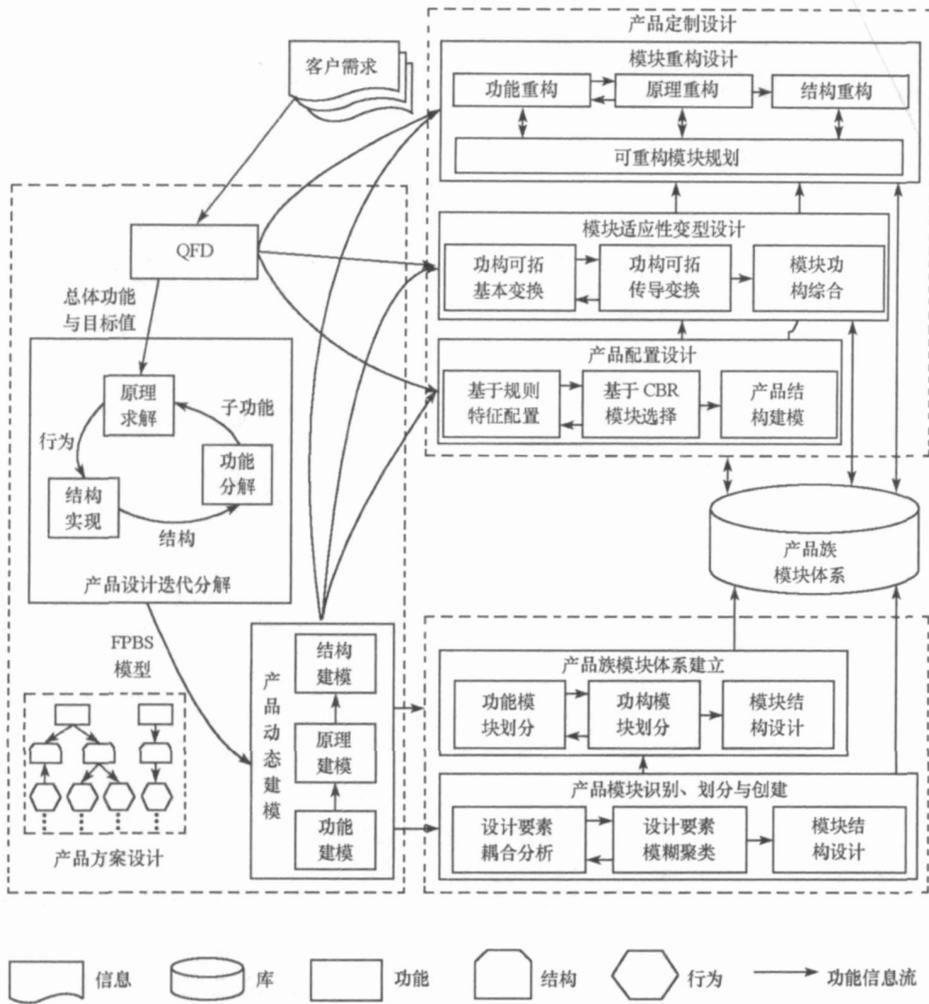


图5 产品模块化设计方法

Fig. 5 Product modular design method

素的聚合,展开模块结构设计,可以建立产品(族)模块体系。

(3) 基于产品动态模型、产品族模块体系,通过配置设计、适应性变型设计、重构设计等,可以实现新产品的快速构型,从而实现产品快速定制设计。

参考文献:

[1] 李洪杰,肖人彬. 基于功能构造的复杂产品进化设计基因模型[J]. 机械工程学报,2003,39(5):41-48.

[2] 李健. 基于功能的产品装配设计理论和研究方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2001.

[3] 祖耀,肖人彬,刘勇. 具有迭代特征的复杂机械产品概念设计模型[J]. 机械工程学报,2006,42(12):197-205.

[4] 邹慧君,梁庆华,郭为忠,等. 功能-运动行为-结构的概念设计模型及运动行为的多层表示[J]. 机械设计,2000(8):1-4.

[5] 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-CIMS,2002,8(5):342-346.

[6] 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.

[7] 龚京忠,李国喜,邱静. 基于FBS的产品概念模块设计研究[J]. 计算机集成制造系统-CIMS,2006,12(12):1921-1927.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 宋慧军,林志航. 多色集合及其在概念设计产品模型形式化描述中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2003(2):68-72.

[11] Stone R B, Wood K L, Crawford R H. A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architectures. Design Studies, January 2000, 21(1): 5-31.

[12] 贾延林. 模块化设计[M]. 北京:机械工业出版社,1993.

[13] 吴锡英. 论相似性思维与技术创新[J]. 制造业自动化,2000.