

基于模块化功能分解的大型复杂构造产品造型设计方法

李伟湛, 杨先英

(重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: **目的** 提高大型复杂构造产品在概念设计的可控性与创意效率, 探索从功能分析到创意的迭代过程。**方法** 依据产品功能布局与各个部件的相互作用关系, 分析进行功能模块化定义的条件与原理, 从不同功能层进行功能分解, 通过图形化的方式展开功能示意, 梳理模块化概念设计的基本过程; 以一款平地机产品为例, 对其驾驶舱、动力舱、车身、作业模块等功能区分及布列进行规划分析, 形成不同的划分组合, 提供不同的造型选择, 利用工业设计的创意方法, 在此基础上展开外观造型创意, 利用计算机辅助设计软件进行创意方案的设计表达, 最后基于方案的效果进行概念化设计评价。**结果** 完成该产品的概念设计, 验证模块化功能分解的效果。**结论** 在概念设计阶段, 模块化的功能分解方法有效引导了设计团队的创意方向, 为大型复杂产品提供了创意设计参考。

关键词: 构造; 模块化; 分解; 概念设计; 工业设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)16-0134-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.16.020

The Modeling Design Method for the Large Complex Products Based on Modular Functional Decomposition

LI Wei-zhan, YANG Xian-ying

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the controllability and creative efficiency of large complex products in concept design, and to explore the iterative process from functional analysis to creativity. According to the interaction between product functional layout and various components, the conditions and principles of functional modularization definition were analyzed, functional decomposition was carried out from different functional layers, functional schematic diagram was drawn through graphical mode, and the basic process of modular concept design was combed. Taking the land leveler product as an example, the functional differentiation and layout of its cab, engine compartment, vehicle body and operation module were planned and analyzed to form different division combinations and provide different modeling choices. Based on the industrial design creative methods, the appearance modeling creativity was developed, and the computer aided design software was used to design and express the creative scheme. Finally, concept design evaluation was carried out based on the effect of the scheme. The concept design of the product was completed and the effects of modular functional decomposition were verified. In the stage of concept, the modular functional decomposition method effectively guides the creative direction of the design team and provides creative design reference for large complex products.

KEY WORDS: construction; modular; decomposition; concept design; industrial design

大型复杂构造产品由于其组成部件多, 在产品开发前期一般采用简化的概念设计先行展开创意。这些产品的特点是体积较大, 产品设计相对复杂, 技术要

求的标准高, 对于实际的工作环境适应能力要求非常高^[1]。在简化方法中, 模块化设计概念在此类产品设计中具有普遍性。此前, 国外学者 Browning 及魏

收稿日期: 2019-05-12

基金项目: 重庆市教育委员会资助项目 (KJ1500525); 重庆市基础与前沿研究计划项目 (cstc2017jcyjAX0248)

作者简介: 李伟湛 (1980—), 男, 广东人, 硕士, 重庆交通大学副教授, 主要研究方向为工业设计方法、计算机辅助设计。

小鹏的研究团队,针对复杂产品设计的多学科耦合集成问题,提出了面向复杂产品的多层次进化式设计理论与方法,提高了复杂产品设计的智能性^[2];刘夫云进行了复杂定制产品开发设计关键技术研究^[3];林忠钦针对复杂装备的数字化设计问题进行了研究^[4];张树有基于工程语义的产品设计信息模糊交互建模技术,研究了产品设计中工程语义的表达、传递与驱动的理论和方法^[5];Yu,孙亚东针对复杂机械产品设计意图驱动设计原理、方法及应用研究^[6-7]。本文基于以上方法,从模块化进一步分解功能与展开过程,对产品的外观造型进行设计分析与研究,以获得让设计人员更易应用的创意设计方法。

1 产品功能模块分析

模块是产品系统或服务系统相对独立并有可换性的功能部件和单元。机械产品的系统中,模块是一组具有相同功能的组合要素。模块化设计是一种分解重组的方式,是通过换元、移植创新的思维,基于产品系统设计整合创新的方法,目的是提高系统的多样性、多元化、经济性和标准化的需求。依据产品系统的相关需求信息,考虑产品模块间的相互关系,可根据产品核心功能输出效率,采用质量功能展开(Quality Function Deployment, QFD)矩阵和模糊评价方法,确定各产品模块的重要度,从而识别出产品再设计模块^[8]。在模块构建及组合创意中,具有一定的模糊性,需要根据设计目标通过研究方法进行梳理与确定^[9]。

以汽车产品为例,其车身构造是一个较为大型、复杂的系统。福特汽车第一条生产线诞生后,很快就面临着消费者对汽车多样化的需求,由此进行了通过确定核心模块的方法生产出外形各异的车型。大众汽车对紧凑型、中级车分别进行了MQB平台模块的设计,以实现同一个汽车底盘应用于不同车型,进而提高了车型技术的共用性。雷诺日产利用CMF模块化平台划分功能模块,组合出两厢、三厢、SUV和MPV车型。丰田汽车启动全球架构,提高零部件层级的共用性;其通用率从20%左右,提高到了80%。此外,国内外车企推出MLB、MMB、UKL、MFA、MRA等不同类型的模块化平台,提高设计共用,增加差异化的可控性。与此同时汽车通过模块化设计,减少平台数量,以福特汽车为例,汽车平台由原来的27个减少到了8个,其核心模块的利用率大大增加。在当今市场竞争激烈的环境下,汽车制造企业为了降低生产风险和成本,提高生产灵活性和敏锐性,研发团队在汽车的构造系统中,引入模块化的设计思想。将车身构造根据其特定的功能分为几个模块,再将模块从车型、车身、部件、组件、零件等进行层级分解,然后根据生产的车型进行模块的组合。这种生产组织形式,大大提高了生产适应性和研发生产效率。汽车车身构造模块化层级,见图1从左到右为汽车产品的模

块层级细分。汽车企业通过多层次模块化组合,形成了多种系列的车型,满足了消费者细致化的需求,也大大提高了配套生产的效率。

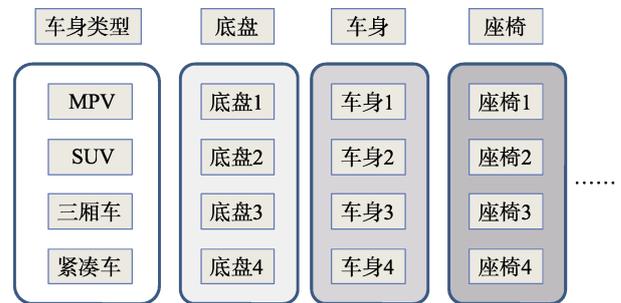


图1 汽车车身构造模块化层级

Fig.1 The modular layer of car body

在生产制造端,生产企业在大规模定制下可基于类物料清单的概念,进行产品族模型的建立和基于约束的产品配置方法,有效提高产品设计效率。

2 模块化功能分解原理及过程

2.1 条件与需求分析

采用模块化设计是一种较为独特的设计思想,其设计的存在需要考虑使用条件、经济性、需求必要性等多方面的因素。设计团队对设计对象的条件、需求等系统因素展开分析,了解设计对象功能实现的模块化优势。通过分析、评估,确定采用模块化的设计方法。

模块化设计所面对的设计条件和要求,往往都是多功能条件、多用途兼顾、可变功能条件的需求。如产品组合对空间的可变性要求,收纳与摆放两个功能切换高频率的要求,兼顾家用与外出携带的多种功能要求等。

为确定模块化产品设计应用的使用时机和条件,可根据产品的使用条件、核心功能组成、维护需求,进行观察。

2.2 功能元分解

模块化的概念有利于复杂产品功能的分解。可对产品系统的功能输出进行构成单元的分解,确定模块化布局的核心模块与非核心模块。模块功能的分解可从以下几个层级进行。

2.2.1 产品层级分解

主要关注产品的系列化与产品族群区分,以产品的系列化为对象,对产品功能类别进行模块功能分解。如以工程机械——平地机产品为例,可从使用功能需求角度,进行产品族及系统构成层级的分类。依据核心功能模块,可分为动力组、作业组、驾驶舱、车架平台4个基础模块。通过分解产品模块,提供产品系列化拓展的多种组合。

2.2.2 部件层级分解

部件是组成产品的独立模块,这也是最常见的模块化设计应用的层级。平地机可分为驾驶室、动力舱、底盘、工作组等不同部件。部件模块化可以获得不同的构造形式,具有明显的模块化设计痕迹和视觉元素。部件模块之间的结构连接,影响着外观造型的基本方向。卫军朝等人根据设计结构矩阵(Design Structure Matrix, DSM)架构约束条件下模块划分的算法,采用了模块度 Q 函数来作为模块划分的优化目标,即:

$$Q = \frac{1}{l^w} \sum_{i,j \in V} \left\{ C_{ij} - \frac{k_i^w k_j^w}{l^w} \right\} \delta_{m_i, m_j} \quad (1)$$

其中: V 是 DSM 中所有构件的集合; C_{ij} 是 DSM

的元素; $l^w = \sum_{i,j \in V} C_{ij}$; $k_i^w = \sum_{j \in V} C_{ij}$; m_i 是包含节点 i 的模块; 如果 $m_i = m_j$, 则 $\delta_{m_i, m_j} = 1$, 反之, $\delta_{m_i, m_j} = 0$ 。模块度 Q 的最大值为 1, Q 值越大, 表示系统划分后的模块化程度越高。采用 Q 函数作为优化目标的优点, 在于 Q 值的最大值固定, 用户很容易判断一个系统在模块划分之后模块化程度的高低^[11]。

2.2.3 零件层级分解

零件模块化是产品设计范畴里基本的模块元层级划分, 基于产品系列化考虑, 从基本的功能进行模块组合, 再进行整体的外观设计。如上文所述的平地机构造的模块化设计思想, 将其底盘部件进一步细分成传动、车架、悬挂等基本的零件模块元, 组合形成新的设计方案后, 再进行整体化的设计。

从零件层的功能流分解的视角, 对模块元进行划分, 功能流的形式分为物料流、能量流和信息流。基于功能流的模块划分, 通过物料、能量和信息流实现产品各功能的分解或聚合, 实现对产品模块的定性划分^[12]。其中, 通过部件之间的静态、动态关系, 建立功能输入与输出的相关程度, 如某个参数的输入输出关系矩阵。

其中, 每个矩阵单元 $s_k(I_i, O_j)$ 为考虑第 k 类参数时, 第 j 个功能的输入对第 i 个功能的输出的相关程度, 如将输入输出功能分列, 则 $s_k(I_1)$ 为输入功能, $s_k(O_1)$ 为输出功能。在观察其相关程度时, 假定有 5 类指标参数分析功能的相关程度指数, 其中第 k 类参数的相关度, 对总相关度的影响系数为 W_k , 由于产品功能总和是目标设定的, 则各类参数的影响系数之和等于 1:

$$\sum_{k=1}^5 W_k = 1 \quad (2)$$

2.2.4 功能图展开

模块化的分解完成后, 通过功能布局进行平面化图形排列, 可获得直观的、初步的布局方案, 即将功

能模块简化为方块方式, 展现模块化设计的基础构造体系, 拓展产品的基层逻辑关系。如将某产品的功能模块分为 A、B、C、D 这 4 个部分, 其中确定 A 为核心模块, 不能更换, 其他 3 个模块可根据应用情况作置换。不同的功能分解逻辑见图 2, 如 $A+B+C+D$ 的基本组合方案。也可根据功能应用频率划分为 $A+(B+C)+D$ 的组合方案。还可分为 $A+(B+C+D)$ 的组合方案, 即 A 是核心模块, B、C、D 是部件或零件模块, 可更换。通过这样的划分, 形成不同的组合方案。确定基本的方案后, 对某个方案进行细化造型的差异化探索, 如将基础组合方案进行差异化展开, 获得细化分解形态, 进而形成不同的结构雏形及外观造型, 基于同一功能分解的多种模块方案见图 3。

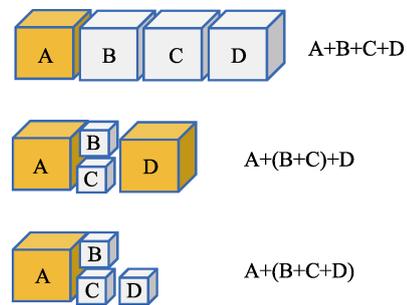


图 2 不同的功能分解逻辑
Fig.2 Different logic of functional decomposition

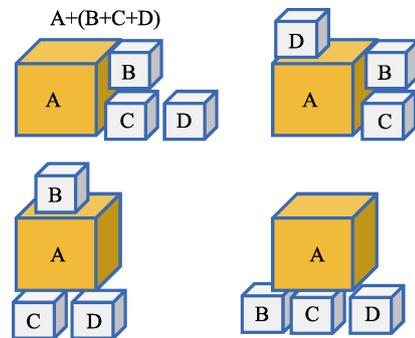


图 3 基于同一功能分解的多种模块方案
Fig.3 Different module solutions based on the same functional decomposition

2.2.5 概念方案快速迭代

经过功能分解、展开、组合后, 获得不同的模块化组合方案, 此时由工业设计师通过手绘、设计效果图、数字化建模或可视化等各种设计表现的方式, 将组合方案的整体外观直观地展现出来, 以便对模块化设计初期方案进行直观评估, 有效控制设计风险。

2.2.6 设计评估

工业设计方法在概念设计阶段需进行快速评估, 一般从功能目标实现效果、可实现性、易维修性、可持续性、整体外形效果等几个方面进行设计评价, 为后期的优化提供方向。每项指标需建立相应的评价机制与内容, 如安苗苗等人采用模糊层次分析法, 计算

得到了模块化设计中各评价指标的评价结果^[13]；针对工程机械产品色彩的项目评价，杨帆等人基于数理评价进行了色彩意象的设计研究^[14]。

3 案例分析与过程创意设计

本文以一款平地机大型工程设备为设计对象，进行模块化的设计过程分析与工业设计过程研究。

3.1 功能分解与展开

根据功能划分原则，确定以下主要的功能模块：D 动力舱（Driving，红色）；H 驾驶舱（Human，绿色）；P 底盘及车架（Planning，橙色）；M 平地铲模块（Moving，蓝色）；I 导向车轮组（Index，灰色）；S 支撑车轮组（Supporting，黑色）。平地机产品的功能划分见图 4。

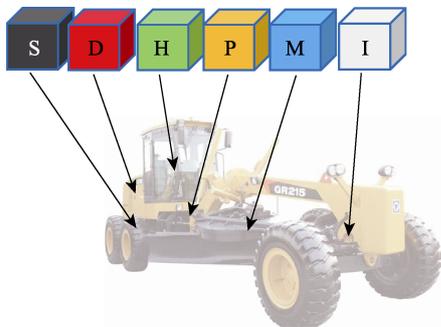
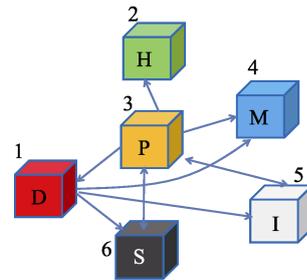


图 4 平地机产品的功能划分
Fig.4 The function division of land leveler

依据功能分解及相互关系的原则可知，底盘及车架是支撑整个工程车的主体，其形态造型是可变化的，从功能输入输出的关系来看，P 对其他每个模块

均有支撑和连接的作用；H 驾驶舱是由底盘支撑，对其他模块不产生直接的关系，在设计过程中，需要注意保持驾驶舱操作视野的开阔性。D 动力舱模块由 P 支撑，同时对 M、S、I 等模块均有动力输出。产品功能关系见图 5。平地机产品这 6 组基本模块的功能关系中，有 8 组单向或者相互的输入输出关系。同时，根据车身支撑及作业要求，M、S、I 模块必须同时接触地面。通过逻辑关系的分析，可由创意人员编译功能关系，利用系统软件进行理性的组合创意。

根据图 5 可知，模块 P 对多个部件均产生不同程度的功能输入输出关系，为连接各模块的单元，其基础造型将根据整体布局进行设计，在概念设计阶段对造型影响不大，可定义为被动型模块，前期暂作省略。利用工业设计发散的思维方法，对其余 5 个模块进行概念组合造型创意，表达出各个模块之间的功能布局，可获得不同形式的雏形，模块组合形式具体 6。多种组合方案如图 6a，再选定差异化较明显的其中 5 种组合方案，进行基本功能形态的推演，基础造型方案如图 6b。



注：1 动力舱；2 驾驶舱；3 底盘及车架；4 平地铲模块；5 导向车轮组；6 支撑车轮组

图 5 功能关系
Fig.5 The functional relationship

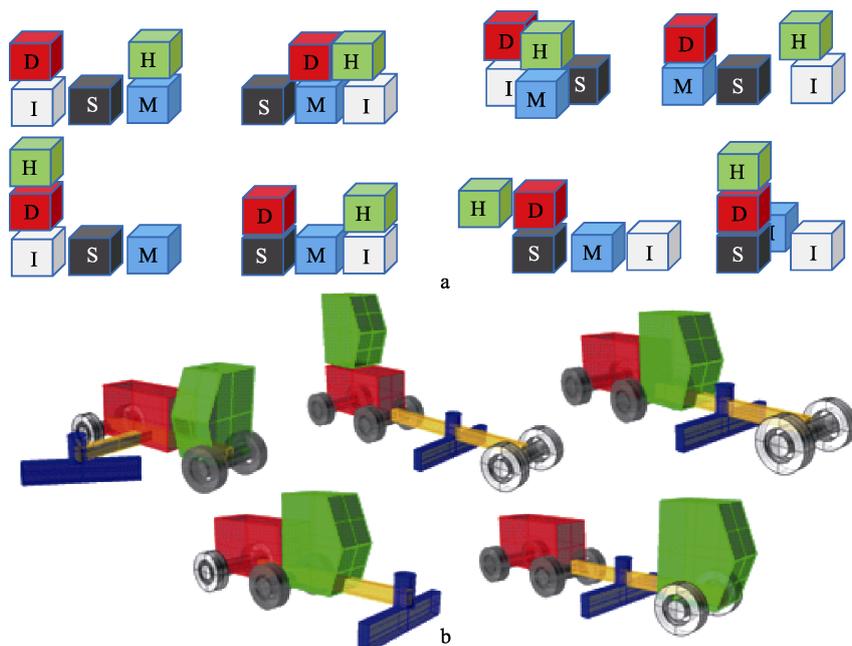


图 6 模块组合形式
Fig.6 The module combinations

3.2 工业设计创意迭代

根据以上组合形式,以图 6b 为基础进行外观造型创意,由设计人员通过发散、汇聚及讨论,获得相应的平地机雏形创意方案,见图 7a。设计人员依据该工程机械产品在实际应用中的操作范围可见、车身

稳定性、转向性、通过性、作业效率等要求,对设计方案进行评估筛选及迭代,获得更明确的设计方案,最后进行细致的草图绘制,见图 7b。

设计人员继续优选创意方案并利用计算机辅助方法,对设计方案进行二维平面设计方案的精细化表达及三维数据构建,平地机的计算机辅助设计见图 8。

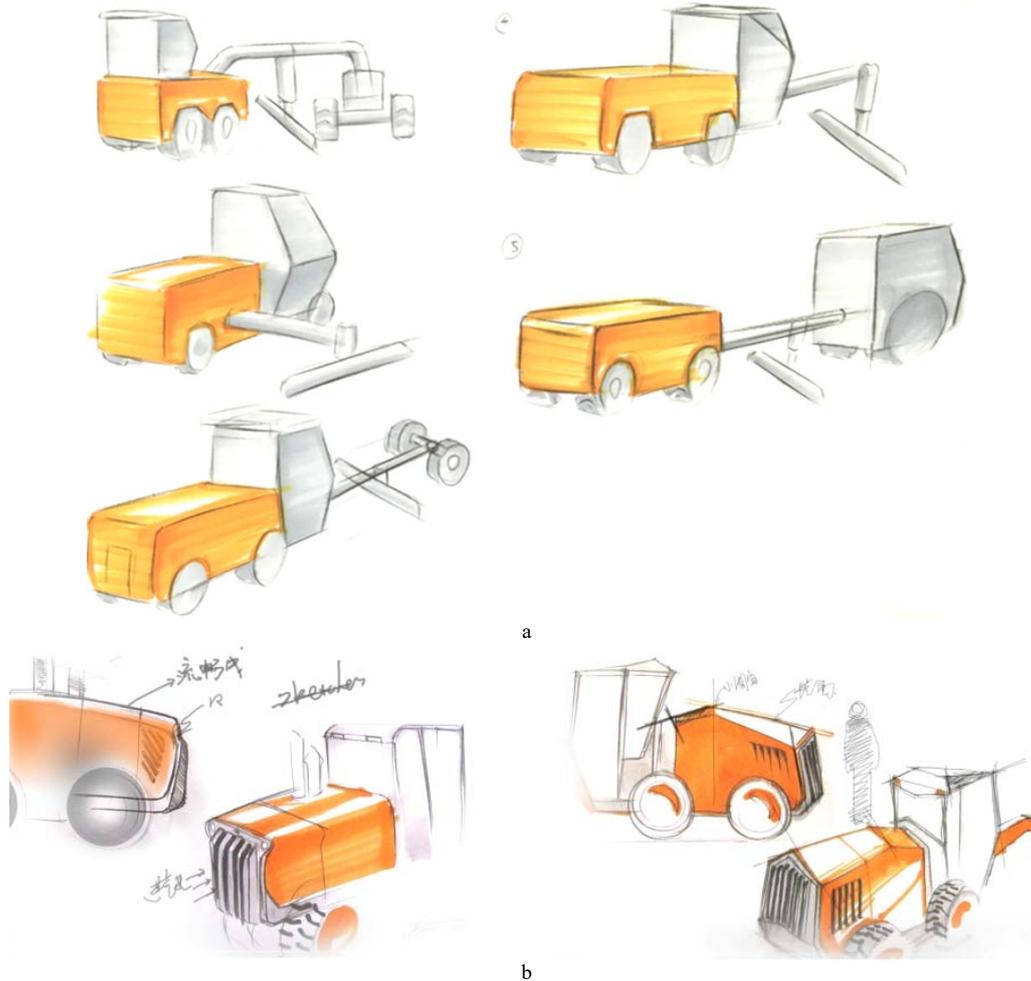


图 7 平地机
Fig.7 Land leveler



图 8 平地机的计算机辅助设计
Fig.8 The CAD picture of land leveler

3.3 设计评价

根据设计人员完成的二维、三维概念方案,从人机交互尺寸、功能范围、装配关系、可维护性、整体

外观等方面,进行直观的视觉评价。如需要进行细致的评价,可基于三维数据,进行计算机辅助仿真、动态分析、结构性能、人机工程学、色彩调查等方法,进行深入的评价^[15]。

4 结语

大型复杂构造产品的设计流程具有较强的系统性,每一阶段的细致程度都可能影响下一阶段的进度与效率。本文利用模块化的分解与功能展开的思路,以平地机产品为例,在产品概念设计阶段,利用功能分解、功能关系及工业设计方法进行探索,获得直观的结果,为大型复杂构造产品的工业设计提供参考。由于生产水平及创新发展程度的差异,工业设计在大型复杂产品规划、设计中的地位和作用,还有待提高,需进一步探索其提升的路径。

参考文献:

- [1] 周广, 常生德. 关于大规模机械定制工程的产品设计探究[J]. 煤炭技术, 2013, 32(2): 238—239.
ZHOU Guang, CHANG Sheng-de. Exploration about Large-scale Machinery Custom Engineered Products Design[J]. Coal Technology, 2013, 32(2): 238—239.
- [2] WEI Xiao-peng. Multi-objective Optimization Conceptual Design of Product Structure Based on Variable Length Gene Expression[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering(English Edition), 2011, 24(1): 42—49.
- [3] BROWNING T R, EPPINGER S D. Modeling Impacts of Process Architecture on Cost and Schedule Risk in Product Development[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2002, 49(4): 428—442.
- [4] 伍建伟, 刘夫云, 鲍家定. 转动惯量合成定理矩阵形式推导及其在汽车动力总成系统中的应用[J]. 现代制造工程, 2018(8): 53—57.
WU Jian-wei, LIU Fu-yun, BAO Jia-ding. Composition Theorem of the Moment of Inertia Derived by Using Matrix and Its Application in Automobile Powertrain System[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(8): 53—57.
- [5] 林忠钦, 来新民, 金隼. 复杂产品制造精度控制的数字化方法及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 103—113.
LIN Zhong-qin, LAI Xin-min, JIN Sun. Digital Methods of Complex Product Manufacturing Precision Control and Its Development Trend[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 103—113.
- [6] YU G, YU Y, LIU A. Joint Optimization of Complex Product Variant Design Responding to Customer Requirement Changes[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, 30(1): 397—408.
- [7] 孙亚东, 张旭, 宁汝新, 等. 基于层次化设计结构矩阵的复杂产品研发过程研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 166—175.
SUN Ya-dong, ZHANG Xu, NING Ru-xin, et al. Research on Development Process of Complex Product Based on Multi-level Design Structure Matrix[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 166—175.
- [8] SMITH S, SMITH G, SHEN Y. Redesign for Product Innovation[J]. Design Studies, 2012, 33(2): 160—184.
- [9] 周鹏辉, 马红占, 陈东萍, 等. 基于模糊随机故障模式与影响分析的产品再设计模块识别[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(10): 1189—1195.
ZHOU Peng-hui, MA Hong-zhan, CHEN Dong-ping, et al. Identification of Product Redesign Modules Based on Fuzzy Radom Failure Mode and Effects Analysis[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(10): 1189—1195.
- [10] 徐晓飞, 史明华, 陈立. 大规模定制下工程机械产品配置设计研究[J]. 制造业自动化, 2009, 31(11): 34—54.
XU Xiao-fei, SHI Ming-hua, CHEN Li. Research on Mass Customization in the Product Configuration of Engineering Machine[J]. Manufacturing Automation, 2009, 31(11): 34—54.
- [11] 卫军朝, 张国渊, 闫秀天. 架构约束条件下产品模块识别的可视化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(5): 936—945.
WEI Jun-chao, ZHANG Guo-yuan, YAN Xiu-tian. A Visual Method for Identifying Modules Considering Architectural Constraints[J]. Journal of Computer-Aided Design&Computer Graphics, 2018, 30(5): 936—945.
- [12] 张付英, 段晶莹, 宋娜娜, 等. 面向产品可持续设计的模块化划分方法[J]. 包装工程, 2017, 38(19): 142—147.
ZHANG Fu-ying, DUAN Jing-ying, SONG Na-na, et al. Modular Division Method for Sustainable Design of Products[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19): 142—147.
- [13] 安苗苗, 肖狄虎. 基于摩托罗拉手机模块化设计的定量评价研究[J]. 包装工程, 2018, 39(14): 172—176.
AN Miao-miao, XIAO Di-hu. Quantitative Evaluation Based on Modular Design of Motorola Mobile Phone[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(14): 172—176.
- [14] 杨帆, 任家骏, 李娟莉, 等. 基于数理评价方法的挖掘机色彩意象设计[J]. 包装工程, 2017, 38(22): 246—250.
YANG Fan, REN Jia-jun, LI Juan-li, et al. Color Image Design of Mine Excavator Based on Evaluation Method[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(22): 246—250.
- [15] 周爱民, 苏建宁, 阎树田, 等. 产品形态审美综合评价的非线性信息动力学模型[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 150—159.
ZHOU Ai-min, SU Jian-ning, YAN Shu-tian, et al. Nonlinear Information Dynamics Model of Synthetic Evaluation on Product Form Aesthetic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 150—159.