

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.001

# 一种改进的绿色模块化设计方法研究\*

姜星月,张秀芬\*

(内蒙古工业大学 机械工程学院,内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:**针对 SMITH 提出的基于原子理论的绿色模块化设计方法中绿色约束单一、模块合并缺乏工程知识支持等问题,提出了一种改进的绿色模块化设计方法。将产品中的模块映射为原子,零部件映射为带正电荷的原子核和带负电荷的电子,通过零部件间的库仑力进行了模块划分;设计了再利用、再制造、材料回收等多重绿色约束矩阵和计算规则,对库仑力计算公式进行了修正;提出了基于准则的模块合并方法,将已有的工程知识有机融入到模块合并过程中;最后,以台灯为对象,应用所提方法进行了绿色模块化设计,并给出了改进方案。研究表明:改进后的方法所得模块划分结果较原方法有所减少,多重绿色约束的引入和基于准则的模块合并方法不仅提高了产品的绿色性,而且提高了方法的可操作性。

**关键词:**模块化设计;多重绿色约束;台灯;原子理论

**中图分类号:**TH122

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2019)05-0451-07

## An improved green modular design method

JIANG Xing-yue, ZHANG Xiu-fen

(College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of single green constraints and lack of engineering knowledge support in SMITH's green modular design method based on atomic theory, an improved green modular design method was presented. The modules in the product were considered as atoms, and the components were mapped to nuclei with positive charge and electrons with negative charge. Thus, modules were divided by coulomb forces between components. The green constraint matrix including reuse, remanufacturing and material recovery constraints and calculation rules were designed to modify the coulomb force calculation formula. In addition, a modular merging method based on criteria was proposed to integrate the existing engineering knowledge into the modular merging process. Finally, taking the desk lamp as the object, the green modular design was carried out with the proposed method, and the improvement scheme was given. The results indicate that the number of modules obtained by the improved method is less than that of the original method. Furthermore, the introduction of multiple green constraints and the combination of modules based on criteria not only improve the greenness of products, but also improve the operability of the method.

**Key words:** modular design; multiple green constraints; lamp; atomic theory

## 0 引言

绿色设计强调在产品全生命周期内着重考虑产品的环境属性并将其作为设计目标,模块化设计则以面向模块和功能分析为主要特征,能够通过模块的选择

与组合快速形成产品系列。将绿色设计思想与模块化设计方法结合起来形成了绿色模块化设计方法<sup>[1]</sup>。绿色模块化设计通过模块的替换、升级、选择、组合来更新产品或构成不同新的产品,对于产品重用、升级、维修和废弃后的拆卸、回收处理具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期:2018-11-08

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51565044);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2017MS(LH)0510);内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划资助项目(NJYT-17-B08);内蒙古工业大学科学研究项目(ZS201017)

**作者简介:**姜星月(1991-),女,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,主要从事产品绿色设计方面的研究。E-mail:1350075567@qq.com

**通信联系人:**张秀芬,女,博士,教授、硕士生导师。E-mail:xxff\_6188@163.com

国内外学者对该领域进行了大量研究。例如, SMITH 等<sup>[4]</sup>将原子理论的概念引入到模块化设计中,提出了基于原子理论的绿色模块化方法;NICOLAS 等<sup>[5]</sup>面向再制造设计开发了模块聚类工具;TSENG 等<sup>[6]</sup>提出了一种支持绿色设计的、面向产品生命周期的模块化设计方法;YU 等<sup>[7]</sup>提出了基于群遗传算法的面向产品生命周期的模块化设计方法;李名<sup>[8]</sup>将可拆卸设计准则与模块化设计方法结合起来以提高产品的可拆卸性。

综上所述,绿色模块化设计是标准化与多样性、绿色性的有机结合,通过模块的通用与组合得到模块化产品,从而降低了生产和管理成本,从不同角度提高了产品的绿色性能。现有研究从多个方面对绿色模块化设计方法进行了研究,但从可操作性方面考虑,SMITH 提出的绿色模块化设计方法最具可操作性,但存在绿

色约束单一化、模块合并缺乏知识支持等缺点。

为此,本研究将对其进行改进,通过引入多重绿色约束、模块合并准则等,以进一步提高该方法在进行产品绿色设计方面的有效性,并通过台灯绿色模块化设计对改进方法进行应用验证。

## 1 原子理论模块化设计方法分析

SMITH 等将原子理论的概念应用于绿色模块化设计中。在该方法中,产品中的模块映射为原子,具有较多接触关系的节点(零件或部件)映射为带正电荷的原子核,与原子核相邻节点映射为带负电荷的电子。基于原子理论的模块化方法通过计算零部件间的库仑力进行模块划分,具体步骤如图 1 所示。

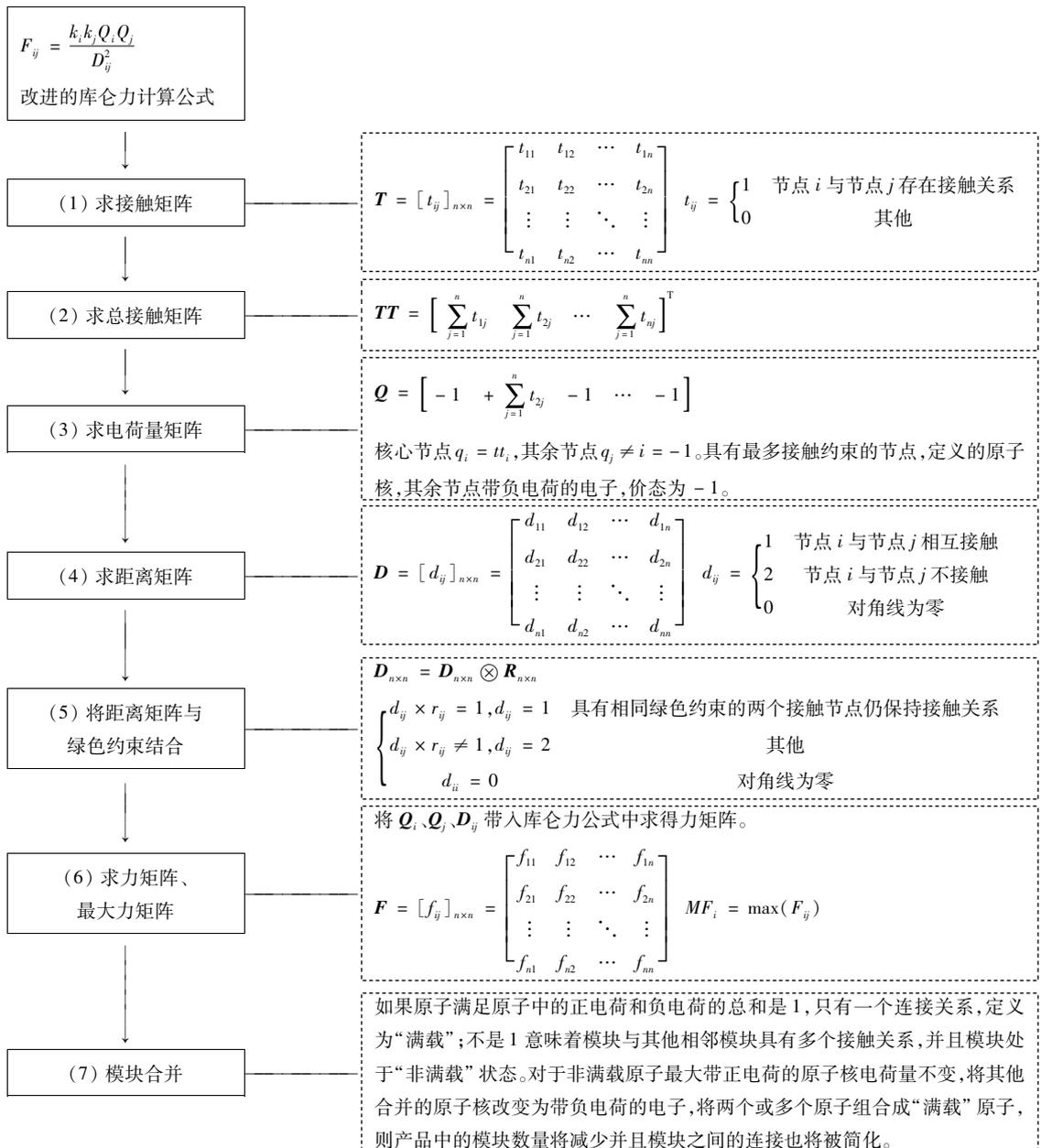


图 1 文献 4 方法流程图

该方法较为简单,但在第5步只考虑了单一的绿色约束,第7步模块合并的方法缺乏认知经验支持。针对以上问题本文对该方法进行改进。

## 2 方法改进

### 2.1 多重绿色约束

原方法绿色约束只考虑了材料回收,没有考虑重用、再制造等回收方式对产品的影响,为了更加全面地提高产品的绿色性能,本文将回收、重复使用和再

$$r_{ij}^1 = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 都可材料回收,或都不可回收} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

当  $k = 2$  时,为重用约束矩阵:

$$r_{ij}^2 = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 都可重复使用,或都不可重复使用} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

当  $k = 3$  时,为再制造约束矩阵:

$$r_{ij}^3 = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 都可再制造,或都不可再制造} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

将多重绿色约束矩阵  $R^k$  与距离矩阵  $D$  的

制造定义为多重绿色约束,并将多重绿色约束添加到产品设计中以形成绿色模块。定义约束矩阵  $R^k$  为多重绿色约束矩阵,即:

$$R^k = [r_{ij}^k]_{n \times n} = \begin{bmatrix} r_{11}^k & r_{12}^k & \cdots & r_{1n}^k \\ r_{21}^k & r_{22}^k & \cdots & r_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1}^k & r_{n2}^k & \cdots & r_{nn}^k \end{bmatrix} \quad (1)$$

$R^k$  的元素  $r_{ij}^k$  定义如下:

当  $k = 1$  时,为材料回收矩阵:

Hadamard 积记为  $D * R^k$ ,得到新的距离矩阵  $D^e$ <sup>[9]</sup>:

$$D_{n \times n}^e = D_{n \times n} * R_{n \times n}^1 * R_{n \times n}^2 * R_{n \times n}^3 = [d_{ij}^e]_{n \times n} = \begin{bmatrix} d_{11} \times r_{11}^1 \times r_{11}^2 \times r_{11}^3 & \cdots & d_{1n} \times r_{1n}^1 \times r_{1n}^2 \times r_{1n}^3 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} \times r_{n1}^1 \times r_{n1}^2 \times r_{n1}^3 & \cdots & d_{nn} \times r_{nn}^1 \times r_{nn}^2 \times r_{nn}^3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{cases} d_{ij} \times r_{ij}^1 \times r_{ij}^2 \times r_{ij}^3 = 1, d_{ij}^e = 1 & \text{具有相同绿色约束的两个接触节点仍保持接触关系} \\ d_{ij} \times r_{ij}^1 \times r_{ij}^2 \times r_{ij}^3 \neq 1, d_{ij}^e = 2 & \text{其他} \\ d_{ii}^e = 0 & \text{对角线为零} \end{cases} \quad (6)$$

### 2.2 模块合并准则

将某些模块合并为一个新的模块,可以将模块间的功能、信息和物质等交互作用转化为模块内部的交互作用,达到节约材料和便于废弃后的重用、回收与处理的目的。

模块化设计中的设计规则分为两类<sup>[5,9-11]</sup>:一类是所有模块研发团队都必须遵守的基本准则,主要用于保证子模块组合后能够达到预定的设计目标;另一类是研发团队内部自行达成的规则。

梳理后的合并准则如表1所示。

表1 模块合并准则

分类	模块合并准则
看得见的准则	(1) 模块使用同一种材料,或改进后可以使用同一种材料; (2) 模块相互接触、无相对运动且有刚性联接; (3) 模块中没有标准件、通用件和外购外配件; (4) 模块合并后不会影响到产品的可拆卸性和可装配性; (5) 经历相同生命周期的部件应分组在同一模块中,例如,可维护性,可升级性,可拆卸性,可重用性和可回收性;
看不见得准则	(6) 具有相同再制造、再利用或报废性的部件应分组在同一模块中; (7) 模块合并要考虑模块的生产成本、拆卸操作的成本和对环境的影响程度; (8) 模块具有相似的技术周期、服务和维护要求。 团队内部自行达成的准则

### 2.3 模块化设计步骤

和多重约束矩阵;

(1) 获取产品接触信息、回收信息,构建接触矩阵

(2) 根据图1所示的(1~4)流程获得接触矩阵、





从表3的电荷量矩阵  $Q$  可以得出,零件 1、2、5、6、10 和 14 是带正电荷的原子核,电荷量分别为 +5, +4, +6, +4, +9 和 +4。库仑常数一般设为  $k=1$ ,但当电荷量矩阵中有拥有相同正价态的原子核时, $k$  值逐

渐增加以更好地区分模块。零件 2、6 和 14 具有相同的价态 +4,所以定义  $k_2=1, k_6=2, k_{14}=3$ 。

将距离矩阵  $D^e$  和上述常数代入库仑力公式,可得出台灯的力矩阵  $F$ ,如表 9 所示。

表 9 台灯的力矩阵  $F$

零件号	零件号																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	0	-20	1.25	5	-7.5	-10	1.25	1.25	1.25	-11.25	1.25	1.25	1.25	-15	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
2	-20	0	1	1	-6	-8	1	1	1	-9	1	1	1	-12	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1.25	1	0	-0.25	1.5	8	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
4	5	1	-0.25	0	1.5	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
5	-7.5	-6	1.5	1.5	0	-12	1.5	1.5	1.5	-54	1.5	1.5	1.5	-18	6	6	6	6	1.5	1.5	1.5	1.5
6	-10	-8	8	2	-12	0	2	2	2	-18	2	2	2	-24	2	2	2	2	2	2	2	2
7	1.25	1	-0.25	-0.25	1.5	2	0	-1	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
8	1.25	1	-0.25	-0.25	1.5	2	-1	0	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
9	1.25	1	-0.25	-0.25	1.5	2	-0.25	-0.25	0	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
10	-11.25	-9	2.25	2.25	-13.5	-72	2.25	2.25	2.25	0	2.25	2.25	2.25	-27	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
11	1.25	1	-0.25	-0.25	1.5	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	0	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
12	1.25	1	-0.25	-0.25	1.5	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	0	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
13	1.25	1	-0.25	-0.25	1.5	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	0	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
14	-15	-12	3	3	-18	-24	3	3	3	-27	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3
15	1.25	1	-0.25	-0.25	6	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
16	1.25	1	-0.25	-0.25	6	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
17	1.25	1	-0.25	-0.25	6	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
18	1.25	1	-0.25	-0.25	6	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
19	1.25	1	-0.25	-0.25	1.5	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25
20	1.25	1	-0.25	-0.25	1.5	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25
21	1.25	1	-0.25	-0.25	1.5	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25
22	1.25	1	-0.25	-0.25	1.5	2	-0.25	-0.25	-0.25	2.25	-0.25	-0.25	-0.25	3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0

根据表 9,可以获得其最大力矩阵  $MF$ ,即  $MF = [+5, +1, +8, +5, +6, +8, +3, +3, +3, +2.25, +3, +3, +3, +3, +6, +6, +6, +6, +3, +3, +3, +3]$

将最大库仑力相同的零件聚为一类,则由  $MF$  矩阵可知:

$$MF_1 = MF_4 = +5; MF_2 = +1; MF_3 = MF_6 = +8;$$

$$MF_5 = MF_{15} = MF_{16} = MF_{17} = MF_{18} = +6;$$

$$MF_7 = MF_8 = MF_9 = MF_{11} = MF_{12} = MF_{13} = MF_{14} =$$

$$MF_{19} = MF_{20} = MF_{21} = MF_{22} = +3; MF_{10} = +2.25。$$

因此,初始模块为  $[1, 4], [2], [3, 6], [5, 15, 16, 17, 18], [7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 19, 20, 21, 22], [10]$ 。

在初始模块的基础上,应用表 1 所示模块合并准则对其进行再合并,模块划分结果如图 3 所示。

### 3.2 实验结果分析

将本文改进后的方法获得的模块划分结果与原

SMITH 方法模块划分结果进行比较,如表 10 所示。

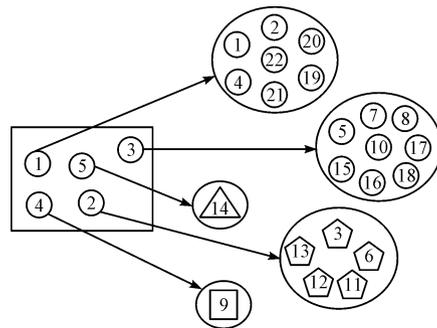


图 3 模块划分结果图

○—根据看得见的准则得到的使用同一种材料,或改进后可以使用同一种材料的模块;△—标准件,根据看得见的准则,标准件不能模块化;□—由看不见的准则改变了结构的模块,此处指开关改进设计为旋转开关;◇—由看不见的准则获得的替换零件,此处指传统灯管由 LED 灯管所代替

表 10 模块划分结果比较

方法名称	划分结果	模块个数
SMITH 等的方法	$[1, 2, 4, 21, 22][3][6, 19, 20][7, 8, 9, 10][5, 15, 16, 17, 18][11, 12, 13, 14]$	6
改进的方法	$[1, 2, 4, 19, 20, 21, 22][3, 6, 11, 12, 13][5, 7, 8, 10, 15, 16, 17, 18][9][14]$	5

由表 10 可知:改进后的方法所得模块个数更少;此外,改进的方法考虑了多重绿色约束、模块合并准则,使得划分结果更符合绿色设计需求。

### 3.3 台灯再设计

根据上述模块划分结果,对台灯进行再设计,具体要点为:(1)台灯采用全铜材质一体式灯体,使材质统

一便于回收;(2)原台灯使用传统灯管,LED灯管集门路、变压器、保险丝于一体,用LED灯管代替传统灯管,LED灯管具有低光衰、散热性强、光源持久稳定等优点;(3)通过转动开关,可调节灯光强度应对不同的照明需求;(4)灯管与支架通过转角座连接,可根据要求调整角度,更符合人机要求;(5)台灯尺寸为250 mm × 450 mm × 160 mm,设计风格简洁、现代。

改进后的台灯爆炸图如图4所示。

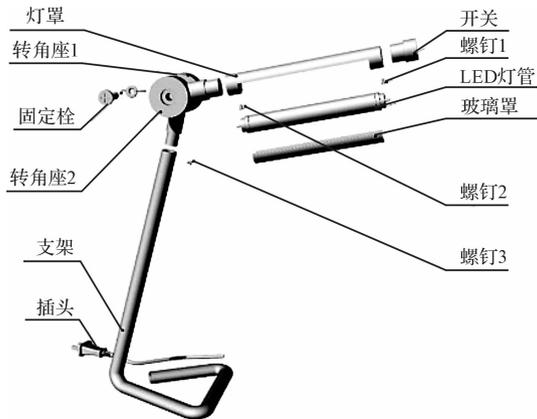


图4 改进后的台灯爆炸图

改进后的台灯效果图如图5所示。



图5 改进后的台灯效果图

由上图可见,模块化设计大大简化了台灯的结构和材料种类,提高了其绿色性能。

## 4 结束语

针对SMITH提出的基于原子理论的绿色模块化设计方法存在的绿色约束单一、模块合并缺乏知识支撑等问题,本文提出了一种改进的绿色模块化设计方法。

该方法考虑了重用、再制造、材料回收等多重绿色约束,从多角度提高了产品的绿色性能;用模块合并准则代替原子的满载与组合模块合并方法,便于产品设

计师通过模块合并准则得出符合不同设计要求的模块解决方案,且提高了方法的可操作性;通过一个台灯的设计案例证明了改进后的方法划分的模块数少于原始方法;根据模块划分结果进行了台灯再设计,设计结果证明了本文所提方法简化了产品结构和材料种类,改善了台灯的绿色性能。

该方法需要构建多个矩阵,如何实现这些矩阵的自动化获取还需进一步的研究。

## 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 韩卫国,苏颜丽,祁飞鹤. 基于产品设计系统思维的家产品模块化设计[J]. 包装工程,2017,38(10):115-119.
- [3] 杨善来,丁毅,谈国荣,等. 基于模块化的矿车参数化方法研究[J]. 机电工程,2016,33(12):1436-1441.
- [4] SMITH S, YEN C C. Green product design through product modularization using atomic theory[J]. *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*, 2010,26(6):790-798.
- [5] NICOLAS T, DOMINIQUE M, OLIVIER P. Modifying module boundaries to design remanufacturable products: the modular grouping explorer tool[J]. *Journal of Engineering Design*, 2013,24(8):546-574.
- [6] TSENG H E, CHANG C C, LI J D. Modular design to support green life-cycle engineering[J]. *Expert Systems with Applications*, 2008,34(4):2524-2537.
- [7] YU S, YANG Q, TAO J, et al. Product modular design incorporating life cycle issues-group genetic algorithm (GGA) based method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011,19(9):1016-1032.
- [8] 李名. 面向拆卸的产品模块化设计方法研究[D]. 武汉:武汉科技大学机械与自动化学院,2015.
- [9] 许晓云,高博宁,李智. 基于几何思维的模块化产品设计方法[J]. 艺术科技,2016,29(6):272.
- [10] 孙锐,刘晓飞,董萍,等. 产品模块化设计新方法研究[J]. 制造业自动化,2016,38(5):98-101.
- [11] 尚东阳,赵树国,姜阳,等. 基于模块化设计的全自动纸箱包装机[J]. 轻工机械,2017,35(5):6-11.
- [12] SONEGO M, ECHEVESTE M E S, DEBARBA H G. The role of modularity in sustainable design: a systematic review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018(176):196-209.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

姜星月,张秀芬. 一种改进的绿色模块化设计方法研究[J]. 机电工程,2019,36(5):451-457.

JIANG Xing-yue, ZHANG Xiu-fen. An improved green modular design method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(5):451-457.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>