

# 面向产品可持续设计的模块化划分方法

张付英<sup>1,2</sup>, 段晶莹<sup>1</sup>, 宋娜娜<sup>1</sup>, 陈建垒<sup>1</sup>

(1.天津科技大学, 天津 300222; 2.天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222)

**摘要:** 目的 为了实现可持续产品的快速开发, 提出面向产品可持续设计的模块划分方法。方法 基于功能流模型进行产品的功能分解并建立产品的功能结构, 依据功能流的形式和关系实现产品功能模块的定性划分, 在此基础上, 基于参数流的相关性判断应用聚类分析实现模块的定量划分。将可持续性设计原则与产品生命周期特征集成, 并基于设计结构矩阵的零件相关度进行面向可持续性设计的模块划分。综合2种模块划分结果, 并从可持续性设计角度进行模块的合并、更替及再划分, 获得最优模块划分方案。结果 依据方法得到的产品模块在满足功能基础上具有可持续性, 实现了对产品的可持续设计。结论 该方法集功能与全生命周期实现了产品基于可持续性的模块划分。

**关键词:** 模块划分; 功能流; 可持续设计; 带材; 纠偏控制系统

中图分类号: TB482 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2017)19-0142-06

## Modular Division Method for Sustainable Design of Products

ZHANG Fu-ying<sup>1,2</sup>, DUAN Jing-ying<sup>1</sup>, SONG Na-na<sup>1</sup>, CHEN Jian-lei<sup>1</sup>

(1.Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China; 2.Key Laboratory of Integrated Design and On Line Monitoring of Light Industry and Food Engineering Machinery and Equipment in Tianjin, Tianjin 300222, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose a modular division method for product sustainable design to realize rapid development of sustainable products. The product functions were disassembled and the product function structure was established based on the function chain model. The qualitative division of function modules of the products was achieved based on the forms and the relations of function chain. On this basis, the quantitative division of modules was achieved by the clustering analysis according to the relativity judgment of parameter flow. The sustainable design principles and features of the product life cycle were integrated, and the modular division of sustainable design was conducted based on the component relevancy of design structure matrix. Combined with the two results of module division, the module was combined, replaced and redivided from the perspective of sustainable design, so as to achieve the best module division solution. The product module obtained in the proposed method has sustainability on the basis of satisfying the functions and realizes the sustainable design of products. This method integrating the function and the whole life cycle has achieved the modular division of products based on the sustainability.

**KEY WORDS:** modular division; function chain; sustainable design; strip; deviation control system

模块化设计是实现产品快速开发的关键技术, 对产品的结构、环境影响和资源利用起决定作用<sup>[1—2]</sup>。随着社会可持续发展的要求, 在产品的设计阶段考虑产品全生命周期中的可持续性发展, 除满足功能、性能、经济等基本需求外, 对环境负荷小、资源利用率高的面向产品的可持续性设计得到广泛关注<sup>[3—5]</sup>。

目前产品模块化设计中, 缺乏面向可持续性产品设计的模块划分方法研究。Stone 等<sup>[6]</sup>提出一种基于功能结构基础的启发式模块划分方法, 该方法虽然在多种产品上已经验证, 但过于定性, 无法针对复杂产品。Xianfu Cheng 等<sup>[7]</sup>提出了基于设计结构矩阵的产品划分方法, 使用设计结构矩阵计算模块间相关度进

而得到划分结果。孙锐、刘晓飞等<sup>[8]</sup>针对模块划分中的模糊聚类方法提出了模糊 C 均值聚类和遗传算法结合的方法提高了划分精度。可持续设计经历了以环境友好为目标的绿色设计阶段和以生态多样化为目标的生态设计阶段<sup>[9-11]</sup>。面向产品可持续的设计重点在于通过获取可持续性环境需求，并将其映射为产品的设计要求，然后根据可持续设计的准则进行设计，而面向产品可持续的模块化设计涉及较少。孟闯<sup>[12]</sup>研究了在概念设计中的产品可持续设计相关理念，通过讨论概念设计实例使产品的可持续设计概念得到进一步发展。冯春花<sup>[13]</sup>建立了基于功能结构映射的可持续设计及评价体系框架，提出了利用模块化设计实现产品可持续设计的集成设计方法。

文中基于模块化设计进行产品快速开发的基本思路，研究面向产品可持续设计的模块划分方法，并以包装过程中使用的带材纠偏控制系统为例，实现包装材料纠偏装置的可持续性相关设计及为可持续产品的快速开发提供理论指导。

## 1 面向可持续设计的产品模块划分框架

基于功能流模型建立的面向产品可持续设计的模块划分框架见图 1。该框架由用户需求、模块划分和模块划分方案 3 个步骤组成。其中模块划分由基于功能流、参数流相关性的功能模块划分和集成生命周期特征与 6R 原则的可持续模块划分两大部分组成。其中可持续的 6R 原则为：减量化准则(Reduce)、再循环准则(Recycle)、回收准则(Recover)、再制造准则(Remanufacture)、再设计准则(Redesign)和再利用准则(Reuse)。

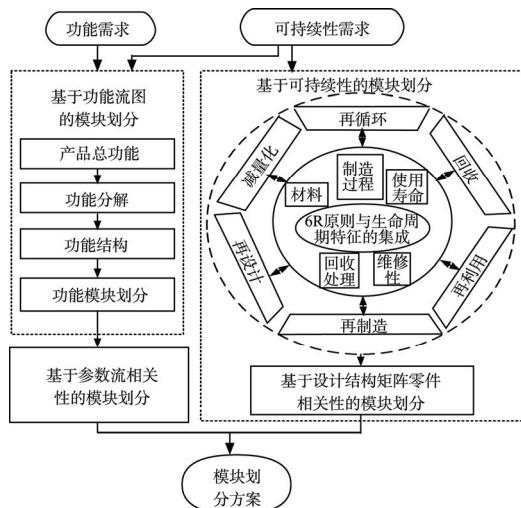


图 1 面向产品可持续设计的模块划分框架  
Fig.1 Frame of modular division for product sustainable design

1) 用户需求调研。通过市场调研，确定用户对产品的功能需求和可持续性需求。

2) 基于功能流的模块划分。根据市场调研的用户功能需求和可持续性需要，抽象产品的总功能；通过功能流模型进行功能分解，形成功能结构模型；基于功能流模型中能量流和物料流的输入输出关系，确定产品的模块划分方案。

3) 基于参数流相关性的模块划分。在基于功能流模块定性划分的基础上，通过对功能流参数相关性量化分析，确定模块划分方案。

4) 基于可持续性的模块划分。根据用户对产品的可持续性要求，将产品的 6R 原则融合于产品各生命周期阶段，生成产品的生命周期特征即材料、制造过程、使用寿命、维修性和回收处理，通过建立设计结构矩阵，依据零件各生命周期特征的相似性进行模块划分。

5) 模块划分方案的确定。综合基于参数流相关性和可持续性的模块划分结果，并考虑技术性、经济性、可持续性，确定最终的模块划分方案。

## 2 面向可持续设计的产品模块划分方法

### 2.1 基于功能流的模块划分方法

基于功能流的模块划分方法，首先通过黑箱模型（图 2）建立产品的总功能；然后进行功能分解，通过建立各功能元之间的传输关系描述产品的功能结构（图 3）；最后，依据各功能间的层次结构关系和各分功能间的物料、能量和信息流的输入输出关系，确定最终的模块划分方案。



图 2 产品的黑箱模型  
Fig.2 Black box model of product

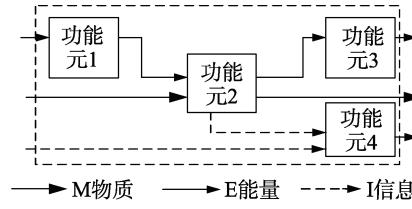


图 3 产品的功能结构  
Fig.3 Function structure of product

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。基于功能流模型的模块划分主要依据以下规则。

1) 主流规则。当某种形式的流流入串联模式的功能流后，一个或多个分功能的形式没有发生改变，流出系统或转换为其他形式，那这些分功能可以组合为模块，功能结束或转折处成为接口边界，其他流流入时需要接口，见图 4a。

2) 支流规则。并联模式的功能流中，每个分支可以组合为模块，如果模块内还有分支则可以再划分。流的分支处成为接口边界，见图4b。

3) 转换/输送规则。将流入的物料、能量或信息转换为另一种形式的分功能可以组合为模块，如果下游仍存在传递或输送的分功能，可以将该功能和转换功能组合为模块，见图4c。

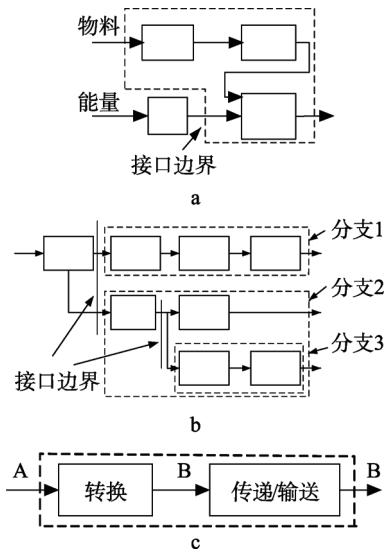


图4 功能流的3种形式  
Fig.4 Three forms of function chain

在功能流模型中，各种形式的流在流动过程时会出现传递、转换或分支，这会让模块划分更具复杂性。功能的分解粒度决定了模型的复杂程度以及最终模块数量，功能分解得越细微，则模块的数量越多，但过于细的模块划分，会失去模块化设计的最初目的。为了更准确地表达基于功能流的模块划分的动态过程，需要分析功能参数流间的输入输出关系及其相关度。

## 2.2 基于参数流相关性的模块划分方法

功能流模型清晰地表达了产品的功能结构及各功能参数随功能作用产生的变化和传递。基于参数流相关性的模块划分就是依据功能参数流间的输入输出关系及其相关度，应用聚类算法进行模块划分。

### 2.2.1 基于功能元的输入输出关系确定功能间的相关程度

基于功能流模型的功能分析，明确了输入输出参数流（物料、能量、信号）及影响因素（约束）经功能作用在各功能间产生的变化与传递。参数流的复杂程度表征了系统中功能间的相关程度。两功能间的参数流越复杂，表明它们的相关程度越大，模块划分时，越应将其划分为一个模块；相反，参数流越简单，表明2个功能的相互独立性越强，在模块划分时，可以将其划分为不同的模块。

机械产品的输入输出参数主要包括静态参数和

动态参数两大类。静态参数由几何约束（如尺寸、形状和公差等）和力学特性（如载荷、质量、材料特性，应力分布等）；动态参数则由动力参数（如位移、速度、加速度、转动惯量等）和信号参数（如接收信号、发送信号、信号稳定性、灵敏度等）组成。可根据以上4类参数分别确定功能元间输入输出的相关程度。式(1)为建立的某个参数的功能间输入和输出的相关矩阵。

$$\begin{bmatrix} 1 & \cdots & j & \cdots & n \\ 1 & S_k(I_1, O_1) & \cdots & S_k(I_1, O_j) & \cdots & S_k(I_1, O_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ i & S_k(I_i, O_1) & \cdots & S_k(I_i, O_j) & \cdots & S_k(I_i, O_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ n & S_k(I_n, O_1) & \cdots & S_k(I_n, O_j) & \cdots & S_k(I_n, O_n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $S_k(I_i, O_j)$ 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，其取值为0—5的整数。0表示完全不相关，5表示完全相关，数值越大则相关程度越大。计算相关度时，假定4类参数中第k类参数的相关度对总相关度的影响系数为 $W_k$ ，则各类参数的影响系数之和等于1，见式(2)。综合考虑4个参数时功能 $F_i$ 与 $F_j$ 之间的相关度 $R_{ij}$ 按式(3)计算。

$$\sum_{k=1}^4 W_k = 1 \quad (2)$$

$$R_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^4 W_k \times C [S(I_i, O_j) + S(I_j, O_i)], & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (3)$$

式中：C为保证 $R_{ij}$ 在[0,1]内取值的比例常数。由于功能间的输入输出相关度相加后取值是[0,10]区间内，所以取 $C=0.1$ 。根据式(3)可计算出综合考虑4个参数时各功能两两间的相关度，得到如式(4)的相关矩阵。

$$\begin{bmatrix} 1 & \cdots & i & \cdots & j & \cdots & n \\ 1 & 1 & \cdots & R_{ii} & \cdots & R_{ij} & \cdots & R_{in} \\ & & & 1 & \vdots & \vdots & & \vdots \\ i & & & 1 & R_{ji} & & R_{in} \\ & & & & 1 & \vdots & & \vdots \\ j & & & & & 1 & \cdots & R_{jn} \\ & & & & & & 1 & \vdots \\ n & & & & & & & R_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 2.2.2 基于聚类分析的模块划分

根据式(4)产品功能间的相关矩阵，基于聚类分析的模块划分过程如下所述。对任意 $R_{ij}$ ，记 $R_\lambda = \{\lambda_{R_{ij}}\}$ ，其中 $\lambda_{R_{ij}}$ 称为R的截矩阵值，其取值为：

$$\lambda_{R_{ij}} = \begin{cases} 1, & \text{当 } R_{ij} \geq \lambda, f_i \text{与 } f_j \text{ 相关} \\ 0, & \text{当 } R_{ij} < \lambda, f_i \text{与 } f_j \text{ 独立} \end{cases}$$

当 $\lambda$ 取不同值时，形成的模块划分方案不同。 $\lambda$

越小，划分的模块数目越多，因此，可根据产品的设计需求，并考虑经济性和环境属性取适当的 $\lambda$ 值。

### 2.3 基于可持续性的模块划分方法

面向产品的可持续设计除了要满足传统的产品功能需求，更要求在完整的产品全生命周期阶段，产品所具有的属性可以和环境、经济和社会的可持续性属性进行紧密的结合。将可持续设计的6R原则与产品生命周期特征相融合，通过设计结构矩阵零件的相关性判断实现面向可持续性的产品模块划分。

#### 2.3.1 6R设计原则与产品生命周期特征的融合

在面向可持续设计角度下，产品不同生命周期阶段的特征对模块划分具有重要作用。根据材料之间是否兼容，可使产品或零件在回收，重复利用和生命循环过程中判断拆卸的难易程度，材料的相互兼容性可以增加材料的循环使用率，并且可以使原生材料对环境产生更少的影响。材料进行循环后产生的环境负荷要比原生材料小的多，有利于环境的可持续发展。关于材料的相关性量化说明：使用相同材料取最大分值10；兼容性材料并使用相同工艺再循环取分值6；不完全兼容的材料并使用相同工艺再循环取分值2；不可再生材料取分值1；不兼容材料取分值0。同理可以将制造过程、使用寿命、维修性、回收处理的相关性进行量化。

#### 2.3.2 基于结构矩阵零件相关性判断的模块划分

文中使用设计结构矩阵分析零件间的相关性和独立性，进而实现产品模块划分。每个生命周期特征都影响着产品零件间的相关度，针对生命周期的材料特征，建立了材料相关性矩阵见式(5)。

$$\mathbf{M}_{\text{mate}} = \begin{bmatrix} 10 & R_{12} & R_{13} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & 10 & R_{23} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & R_{ij} & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & R_{n3} & \cdots & 10 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中， $R_{ij}$ 为零件*i*和零件*j*之间材料的相关度；*n*为零件的个数。 $R_{ij}$ 在[0,10]之间取值。同样，可得到其它生命周期特征的设计结构矩阵，即 $\mathbf{D}(M_{\text{manu}}, M_{\text{life}}, M_{\text{main}}, M_{\text{recy}})$ ，分别为零件的制造过程、使用寿命、维修性、回收处理的设计结构矩阵。针对不同的生命周期特征，由产品零件间的联接关系和相似性决定其相关度。

生命周期特征的权重直接影响着产品的模块划分，分配的权重越高，说明对产品模块划分更为重要。生命周期特征的权重可根据产品或消费者要求识别，或采用专家评分法<sup>[14]</sup>以及层次分析法<sup>[15]</sup>计算得到。

考虑权重的作用，将建立的每个生命周期特征的矩阵综合成一个总矩阵，总矩阵的各元素即为各零件之间的可持续相关性 $S_{ij}$ ，具体计算见式(6)。

$$S_{ij} = w_1 [D]_{\text{mate},ij} + w_2 [D]_{\text{manu},ij} + w_3 [D]_{\text{life},ij} + w_4 [D]_{\text{main},ij} + w_5 [D]_{\text{colo},ij} \quad (6)$$

式中： $S_{ij}$ 为零件*i*和零件*j*之间加权后的综合相关值； $w_k$ 为第*k*种(*k*=1, 2, 3, 4, 5)生命周期特征的权重系数。根据所建立的总相关矩阵，基于聚类分析，实施模块划分。

### 2.4 模块划分方案

将基于功能流的模块划分结果与基于可持续性的产品模块划分结果集成，从产品的功能与结构、经济性、可持续性等，对产品功能模块进行再划分，合并或修正，使产品模块符合可持续设计的目标，更有利与后续的可持续相关设计及实际生产要求。

## 3 实例分析

### 3.1 带材纠偏控制系统的作用及其结构

带材纠偏控制系统是纸、塑料等卷筒带材包装材料在卷曲过程中使材料边缘位置保持恒定的装置，影响着包装材料的供给质量及包装制品的成型和封合质量。目前多采用电液或气液伺服等控制装置。文中以气液伺服带材纠偏控制系统（见图5）为例说明其模块划分过程。

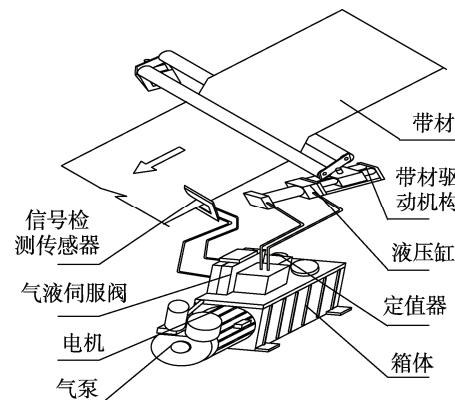


图5 带材纠偏控制系统的结构  
Fig.5 Structure of strip deviation control system

### 3.2 基于功能流的带材纠偏控制系统的模块划分

建立的基于功能流模型的带材纠偏控制系统的功能结构以及依据功能流的形式和关系划分的模块见图6，共得到了7个功能模块，分别为驱动模块、气体传输及稳压模块、油液传输及稳压模块、信号检测模块、压力设置及控制模块、执行模块、箱体模块。

### 3.3 基于参数流的带材纠偏控制系统的模块划分

根据带材纠偏控制系统的几何参数、机械特性、动力参数和信号参数，并基于参数的相对平等性，即各参数的权重取 $w_1=w_2=w_3=w_4=0.25$ ，综合考虑4个参数时，各功能两两间的相关度的相关矩阵见式(7)。应用聚类分析( $\lambda=0.75$ )划分出的模块及将功能模块映射到各个功能元的载体即产品的零部件，见表1。

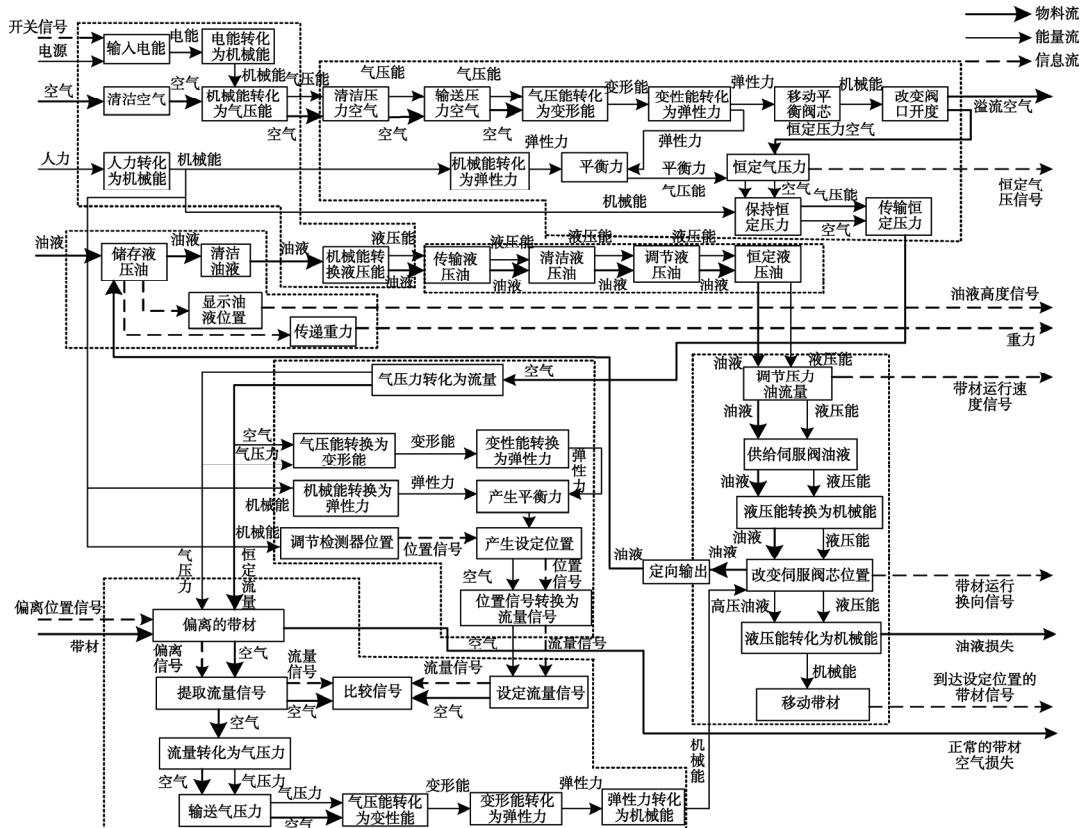


图 6 基于功能流准则的模块划分模型

Fig.6 Modular division model via function chain criterion

表 1 模块划分结果和修正说明

Tab.1 Results and correction instructions of modular division

功能模块	功能结构映射	可持续划分模块	模块修正及其说明
驱动模块	电机, 气泵, 油泵	电机	电机 (电机与泵体在制造过程等相关因素上存在较大差异, 将电机独立划分)
气体传输及稳压模块	定值器, 节流阀, 气进出口过滤器	气泵, 油泵	气泵, 气进出口过滤器
油液传输及稳压模块	溢流阀, 油进出口过滤器	气进出口过滤器, 油进出口过滤器	油泵, 油进出口过滤器 (过滤器在结构上与泵体相关密切)
信号检测模块	传感器	传感器	传感器 (不变)
压力设置及控制模块	气液伺服阀	定值器, 节流阀, 溢流阀, 气液伺服阀	气液伺服阀 (气液伺服阀在功能上与其他阀体不同, 仍独立为一个模块)
执行模块	液压缸	液压缸	液压缸 (不变)
箱体模块	箱体, 油箱附件	箱体, 油箱附件	箱体, 油箱附件 (不变)

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.525 & 0.675 & 0 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \\
 1 & 0.725 & 0.725 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.175 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0.25 & 0.825 & 0.825 & 0 & 0 & 0.375 & 0.025 & 0 & 0.025 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0.95 & 0.95 & 0.05 & 0 & 0.75 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0.95 & 0.25 & 0.25 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0.25 & 0.25 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.025 & 0 \\
 1 & 0.95 & 0.15 & 0 & 0.125 & 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0.15 & 0 & 0.125 & 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0.825 & 0.1 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0.25 & 0.575 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0.3 & 0.025 & 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0.325 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3.4 基于可持续设计的模块聚类分析

建立带材纠偏控制系统各生命周期特征的产品结构相关性矩阵, 并应用层次分析法<sup>[8]</sup>计算各生命周期特征的相对权重, 得到材料, 制造过程, 使用寿命, 维修性以及回收处理的权重依次为 0.35, 0.13, 0.17, 0.06, 0.29。

依据式(6)计算出各零件之间的可持续相关度, 得到的相关矩阵见式(8)。λ 取值为 0.5, 即可满足设计需求, 此时, 模块划分结果如表 1 第 3 列所示。基于功能和参数流的模块划分与基于可持续设计的模

块划分在模块数量和结构构成有所不同, 从可持续性设计角度出发对模块进行合并、更替及再划分等处理, 具体处理过程如表1最后1列所示。

### 3.5 模块划分方案讨论

基于功能流模型和参数流对带材纠偏控制系统的模块划分形成7个功能模块, 面向可持续设计对带材纠偏控制系统的模块划分也形成7个可持续相关模块。从可持续性设计角度对2种模块划分结果进行修正, 获得最优模块划分方案, 即{电机}、{气泵, 气进出口过滤器}、{定值器, 节流阀, 溢流阀}、{油泵, 油进出口过滤器}、{传感器}、{气液伺服阀}、{液压缸}、{箱体, 油箱附件}8个模块。各模块之间具有更高的独立性, 模块内部功能联系紧密同时又符合实际生产中的情形。如信号检测模块、压力设置及控制模块由于具有高度的装配连接性, 存在制造集成化的优点, 可以进行单独的研发以提高其性能。

$$M_s = \begin{bmatrix} 10 & 0.51 & 0.34 & 0.34 & 1.55 & 1.55 & 1.55 & 1.55 & 0.82 & 0.82 & 0.7 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 3.97 & 3.97 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.21 & 0 & 0 \\ 10 & 6.43 & 0.12 & 0.12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0.12 & 0.12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 9.66 & 6.96 & 6.96 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 6.96 & 6.96 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 9.66 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 6.82 & 6.41 & 5.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 6.41 & 5.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 5.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0.51 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 8.24 & & & & & & & & & & & & 10 & \\ & & & & & & & & & & & & & & 10 \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 4 结语

建立了面向产品可持续设计的模块划分框架, 该框架将基于功能流的模块划分方法与基于生命周期特征相似性的模块划分集成, 获得产品面向可持续性设计的模块划分方案。依据物料流、能量流和信息流所组成的功能流进行产品功能分解和聚合, 实现对产品功能模块的定性划分; 依据功能参数流间的输入输出关系及其相关度, 应用聚类分析进行了功能模块的定量划分。将6R原则与产品生命周期特征相融合, 通过设计结构矩阵零件的相关性判断实现了基于可持续性的模块划分。综合参数流和可持续性2种方法的模块划分结果, 从可持续性设计角度对划分结果进行修正, 获得最终模块划分方案。以包装过程中的边缘纠偏控制系统的模块划分过程作为实例, 验证了该方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] 高飞, 肖刚, 潘双夏, 等. 产品功能模块划分方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 29—35.  
GAO Fei, XIAO Gang, PAN Shuang-xia, et al. Method of Product Function Module Partition[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 29—35.
- [2] 王林林. 机械产品可持续改进研究设计[D]. 天津:

河北工业大学, 2015.

WANG Lin-lin. Improved Design of Sustainability for Mechanical Products[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.

- [3] 刘纪超, 李小舟, 许金凯. 产品模块化设计方法及其发展趋势[J]. 机电技术, 2015(6): 157—160.  
LIU Ji-chao, LI Xiao-zhou, XU Jin-kai. The Method and Development Trend of Product Modular Design[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2015(6): 157—160.
- [4] SPANGENBERG J H, FUAD-LUKE A, BLINCOE K. Design for Sustainability(DfS): The Interface of Sustainable Production and Consumption[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(15): 1485—1493.
- [5] MARIO F, MARGHERITA D M, MASSIMO T. Design Management for Sustainability: An Integrated Approach for The Development of Sustainable Products[J]. Engineering and Technology Management, 2014, 34: 29—45.
- [6] STONE R B, WOOD K L, CARWFORD R H. A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architectures[J]. Design Studies, 2000, 21(9): 5—31.
- [7] CHENG Xian-fu, CHEN Cheng. Applying Independence Axiom and Design Structure Matrix to Product Module Divisions[C]// Mechanic Automation and Control Engineering. Wuhan, 2010.
- [8] 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—100.  
SUN Rui, LIU Xiao-fei, DONG Ping, et al. Research on New Method of Product Modular Design[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(5): 98—100.
- [9] MICHAEL M, PARTSON D, CHARLES M. A Modular Product Design Approach for Sustainable Manufacturing in A Fuzzy Environment[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 8: 471—478.
- [10] WANG Qi, TANG Dun-bing, YIN Lei-lei, et al. A Method for Green Modular Design Considering Product Platform Planning Strategy[J]. Procedia CIRP, 2016, 56: 40—45.
- [11] 刘新. 可持续设计的观念、发展与实践[J]. 创新与设计, 2010, 7(2): 36—39.
- [12] LIU Xin. The Notion, Evolution and Practices of Sustainable Design[J]. Creativity And Design, 2010, 7(2): 36—39.  
孟闯. 产品概念设计中的可持续设计策略研究[J]. 包装工程, 2014, 35(2): 81—83.
- [13] MENG Chuang. The Sustainable Design Strategy in Product Conceptual Design[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(2): 81—83.  
冯春花. 机电产品可持续设计及其评价方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [14] FENG Chun-hua. Research on Sustainable Design and Assessment Methodology for Mechatronics Products[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.  
何立华, 王栎琦, 张连营. 基于聚类的多属性群决策专家权重确定方法[J]. 运筹与管理, 2014, 23(6): 65—72.  
HE Li-hua, WANG Yue-qi, ZHANG Lian-ying. A Method for Determining the Experts' Weights of Multi-Attribute Group Decision-Making Based on Clustering Analysis[J]. Operations Research And Management Science, 2014, 23(6): 65—72.
- [15] 邓雪, 李家铭, 曾浩健. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认知, 2012, 42(7): 93—99.  
DENG Xue, LI Jia-ming, ZENG Hao-jian. Research on Computation Methods of AHP Wight Vector and Its Applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93—99.