



肖艳秋,杨先超,崔光珍,等. 基于谱聚类算法的复杂机械产品模块划分方法[J]. 轻工学报,2021,36(1): 73-81.

XIAO Y Q, YANG X C, CUI G Z, et al. Module partition method for complex mechanical products based on spectral clustering algorithm[J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(1): 73-81. DOI:10.12187/2021.01.010

中图分类号:TH122 文献标识码:A 文章编号:2096-1553(2021)01-0073-09

# 基于谱聚类算法的复杂机械产品模块划分方法

## Module partition method for complex mechanical products based on spectral clustering algorithm

肖艳秋,杨先超,崔光珍,夏琼佩,周坤,张福东,夏苑菲  
XIAO Yanqiu, YANG Xianchao, CUI Guangzhen, XIA Qiongpei, ZHOU Kun,  
ZHANG Fudong, XIA Yuanfei

郑州轻工业大学 机电工程学院,河南 郑州 450002  
College of Mechanical and Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry,  
Zhengzhou 450002, China

### 关键词:

模块划分;谱聚类;功能-流-结构模型;数值型设计结构矩阵

### Key words:

module partition;  
spectral clustering;  
function-flow-structure  
model;numerical design  
structure matrix (NDSM)

**摘要:**针对复杂机械产品系统维数高、单元数量大所引起的多维度强耦合设计制造难题,提出了一种基于谱聚类算法的模块划分方法.该方法基于功能-流-结构分解法实现了对产品的层次化分解,应用模糊数学定义特征元素之间的相关性,在此基础上构建了基于数值型设计结构矩阵的产品零部件关联关系模型,通过引入谱聚类算法将零部件聚类问题转化为图的最优划分问题,构建了基于模块内平均内聚度和模块间平均耦合度的模块划分评价指标,进而实现了产品的模块划分.实例验证结果表明,该方法能有效降低复杂机械产品设计和制造的复杂度,是科学有效的.

收稿日期:2020-06-24

基金项目:河南省重大科技专项(创新引领专项)(191110210100);河南省重点研发与推广专项(212102210063)

作者简介:肖艳秋(1980—),男,河南省开封市人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为数字化设计与制造.

**Abstract:** Aiming at the multi-dimensional and strong coupling problem of design and manufacturing caused by the high dimensionality of systems and large number of units of complex mechanical products, a module partition method based on spectral clustering algorithm was proposed. The hierarchical decomposition of products was realized based on the function-flow-structure decomposition method, and fuzzy mathematics was used to define the correlation between feature elements. On this basis, the association relation model of product parts based on numerical design structure matrix was constructed. By introducing the spectral clustering algorithm, the component clustering problem was transformed into the optimal division problem of the graph, and the evaluation index of module division based on the average cohesion within the module and the average coupling between the modules was constructed to realize the module division of the products. The results of the examples showed that the method could effectively reduce the complexity of the design and manufacturing of complex mechanical products, and the method was scientifically effective.

## 0 引言

在全面推进实施制造强国的发展战略中,复杂机械产品的设计与制造能力是我国综合实力的重要体现之一<sup>[1]</sup>. 由于复杂机械产品存在多主体、多层次、多变量,单元之间多耦合、强关联等属性,造成复杂机械产品设计周期长、制造工艺复杂、转运安装难等问题. 模块化设计方法设计的模块具有独立性、灵活性等特点,能有效降低系统复杂性,缩短设计与制造时间,因此被广泛应用于复杂机械产品的设计与制造过程.

模块划分作为模块化设计的关键环节,在学术界得到了广泛研究. R. B. Stone 等<sup>[2]</sup>提出了主流、分支流和转换-传递函数链3种启发式方法,实现了产品初始模块的识别和划分. 罗石林等<sup>[3]</sup>运用模糊综合评价方法构建了农机产品零件的关联度模型,实现了模块划分方法在农机领域的应用. 聂庆峰<sup>[4]</sup>建立了基于产品功能-行为-结构模型,并提出了产品设计结构矩阵(Design Structure Matrix, DSM)自动构建方法,解决了定性分析产品零件关联度时主观性较强的问题. 肖艳秋等<sup>[5]</sup>为建立物理产品与服务模块之间的关系,基于DSM提出了一种模糊一致判断矩阵的方法,构建了融合服务类产品的结构模型. 李颖等<sup>[6]</sup>运用自组织映射(Self-organizing Maps, SOM)算法,对基于产品相关度

的数值型设计结构矩阵(Numerical Design Structure Matrix, NDSM)进行聚类计算,并提出了以模块内聚性和耦合性为指标的划分结果评价方法. 程贤福等<sup>[7]</sup>针对零件之间关系的非对称性和模块之间不同的依赖关系,提出了一种模块划分方法,解决了模块划分阈值设定的主观性和模块度准则的不完善性. 周开俊等<sup>[8]</sup>通过揭示产品模块划分的本质,提出了统一的划分方法,实现了产品的再设计. 郑维强等<sup>[9]</sup>面向复杂机械产品提出了一种模糊关联的模块划分方法,解决了零件间关联关系模糊的问题,实现了零件间关联关系的量化. 贾士雄<sup>[10]</sup>针对传统盾构机再制造存在资源消耗大的问题,提出了再制造与模块化设计相结合的方法,得到了经济、绿色的盾构机再制造方案. Z. P. Han 等<sup>[11]</sup>提出了一种基于多角度相关信息和复杂网络社区结构的模块划分方法,解决了机械CAD模型重用的问题. 综上所述,虽然学者们对模块划分进行了多方面的探索,但仍存在产品建模过程不清晰、聚类算法需指定模块个数等问题.

谱聚类(Spectral Clustering, SC)算法<sup>[12-13]</sup>是一种基于图论的聚类算法,较其他聚类算法(如K-means, Single linkage等)具有执行简单、聚类效果较优等特点,目前被广泛应用于图像分割、文本聚类等领域. 高尚兵等<sup>[14]</sup>针对图像分割计算量大、结果不准确等问题,提出了一种

新的基于超像素的谱聚类图像分割算法,得到了比较理想的图像分割效果;吴肖琳等<sup>[15]</sup>为实现复杂产品模块化组织的可视化识别及协同设计,提出了一种基于谱聚类复杂产品模块发现方法.复杂机械产品具有多耦合、强关联的属性,而谱聚类算法具有解决重叠结构等特点.鉴于此,本文拟应用功能-流-结构模型和NDSM提出一种基于谱聚类算法的模块划分方法,应用谱聚类算法将零部件的聚类转化为图划分问题,对复杂机械产品进行模块划分,以缩短产品设计制造周期,为复杂机械产品的并行协同设计和制造提供理论支撑,提高我国重大装备制造业的核心竞争力.

## 1 产品功能-流-结构模型的构建

对零部件之间的功能特性、物理特性、结构特性进行综合分析:采用自顶向下的分解方式,对产品的功能-结构进行分解,利用功能黑箱模型<sup>[16]</sup>建立产品的流模型;借助模糊评价指标和功能-流-结构模型,进行基于层次化视角的产品零部件之间的相关性分析;将分解出来的相关性关系用NDSM表示,得到产品零部件之间的综合相关性矩阵.

### 1.1 产品功能-流-结构层次化模型

**1.1.1 产品功能模型** 按照层次分解的方法,将产品满足用户需求的功能分解为:总功能FA、次级功能FT、子功能FS、功能元FE.分解得到的产品功能树如图1所示,构建的产品功能四层次可拓矩阵PF如下:

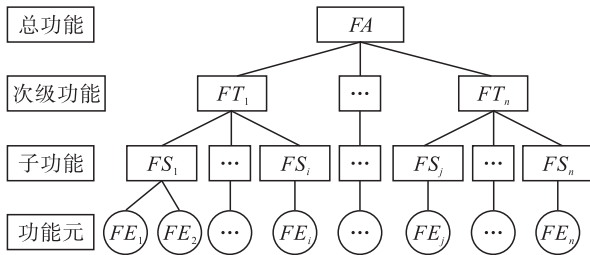


图1 产品功能树

Fig. 1 Tree diagram of product function

$$PF = \begin{bmatrix} FA & FT_1 & FS_1 & FE_1 \\ & FT_2 & FS_2 & FE_2 \\ & \vdots & \vdots & \vdots \\ & FT_n & FS_n & FE_n \end{bmatrix}$$

其中,FA由n个FT、FS和FE组成.

**1.1.2 产品流图模型** 借助黑箱模型,将产品内部的传递关系分为:能量流、物质流、信息流.通过建立产品流传递模型,实现产品内部信息传递的可视化,产品的流图模型如图2所示.

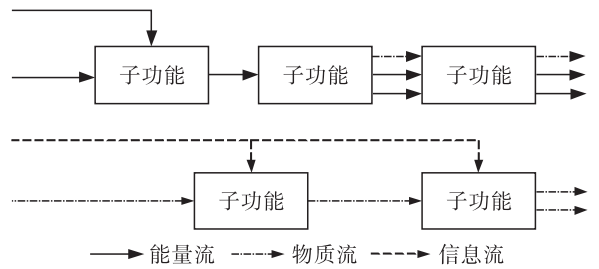


图2 产品的流图模型

Fig. 2 Flow diagram model of product

**1.1.3 产品结构模型** 针对复杂机械产品,基于产品物料清单(Bill of Materials, BOM)将产品结构分解为:产品SA、部件ST、组件SC、零件SP.分解得到的产品结构树如图3所示,构建的产品结构四层次可拓矩阵PS如下:

$$PS = \begin{bmatrix} SA & ST_1 & SC_1 & SP_1 \\ & ST_2 & SC_2 & SP_2 \\ & \vdots & \vdots & \vdots \\ & ST_n & SC_n & SP_n \end{bmatrix}$$

其中,SA由n个ST、SC和SP组成.

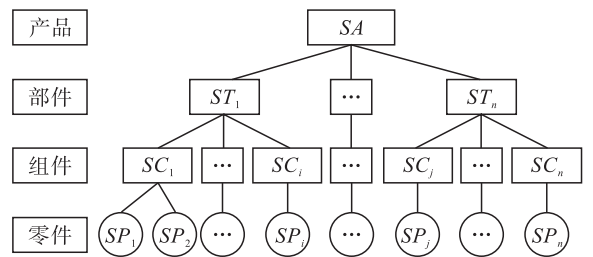


图3 产品结构树

Fig. 3 Tree diagram of product structure

### 1.2 零部件之间的相关性 NDSM

通过模糊评价的方法构建零部件之间的相关性 NDSM 来表示不同特征元素之间的关联程度. NDSM 中的元素依据零部件之间的相关性关系用 0~1 之间的实数表示. 本文从功能、流、结构 3 个角度出发, 建立产品的综合相关性 NDSM, 3 个角度的权重分别用  $\omega_F$ 、 $\omega_H$ 、 $\omega_S$  表示, 且  $\omega_F + \omega_H + \omega_S = 1$ , 权重的大小应用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 求得. 综合相关性 NDSM 获取方法如图 4 所示.

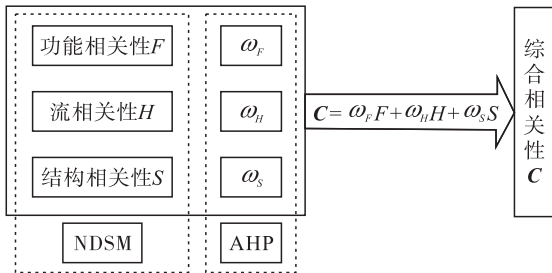


图 4 综合相关性 NDSM 获取方法  
Fig. 4 Comprehensive correlation NDSM acquisition method

**1.2.1 功能相关性 NDSM** 通过功能分解模型得到产品的功能元, 其功能相关性定义如表 1 所示, 其中两零部件功能相关值  $f_{ij}$  越大, 表示两零部件功能元相关程度越高. 所构建产品的功能相关性 NDSM 为

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nn} \end{bmatrix}$$

**1.2.2 流相关性 NDSM** 流相关性即零件之

表 1 功能相关性定义

Table 1 Definition of function correlation

功能相关性描述	$f_{ij}$
一个功能元离开另一个功能元无法实现	1.0
一个功能元高度依赖另一个功能元	0.7
一个功能元依存另一个功能元	0.5
功能元之间无任何关系	0

间的物理相关性, 由能量流、物质流和信息流的传递来表现. 流相关性定义如表 2 所示, 其中两零部件物理相关值  $h_{ij}$  越大, 表示零部件之间的物理相关程度越高. 所构建产品的流相关性 NDSM 为

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{nn} \end{bmatrix}$$

表 2 流相关性定义

Table 2 Definition of flowchart correlation

物理相关性描述	$h_{ij}$
存在能量流的流图关系	1.0
存在物质流的流图关系	0.7
存在信息流的流图关系	0.5
无流图关系	0

**1.2.3 结构相关性 NDSM** 通过产品结构模型可看出产品结构层次化关系, 依照零部件之间的连接关系, 定义产品的结构相关性 (见表 3), 其中两零部件结构相关值  $s_{ij}$  越大, 表示两零部件结构相关程度越高. 所构建产品的结构相关性 NDSM 为

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{bmatrix}$$

**1.2.4 综合相关性 NDSM** 基于功能相关性 NDSM、流相关性 NDSM 和结构相关性 NDSM, 运用线性叠加方法所构建产品的综合相关性 NDSM 为

表 3 结构相关性定义

Table 3 Definition of spatial correlation

结构相关性描述	$s_{ij}$
不可拆分 (如焊接等)	1.0
连接紧密, 难以拆分 (如铆接等)	0.7
易拆分的连接 (如螺纹、键槽等)	0.5
无连接关系	0

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

其中,  $c_{ij} = \omega_f f_{ij} + \omega_H h_{ij} + \omega_S s_{ij}$ .

## 2 基于谱聚类算法的模块划分

### 2.1 谱聚类算法原理

谱聚类算法首先通过求解杰卡尔德相似度、高斯相似度、余弦相似度等得到样本空间的相似度矩阵  $W$ ; 然后应用图论的方法将样本点作为图的节点(用向量  $V$  表示)、相似度矩阵  $W$  作为图的边构建样本空间的图模型  $G = (V, W)$ . 以二分法进行图划分的损失函数为  $cut(A_1, A_2)$ ,  $q$  表示图划分.

$$\begin{cases} cut(A_1, A_2) = \sum_{i \in A_1, j \in A_2} \omega_{ij} \\ q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \\ q_i = \begin{cases} k_1, i \in A_1 \\ k_2, i \in A_2 \end{cases} \\ q^T L q = \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (q_i - q_j)^2 \right) \\ q^T q = n \end{cases} \quad (1)$$

由式 ① 可知, 离散求解划分方案  $q$  非常困难, 为此借鉴瑞丽熵 (Rayleigh Quotient) 的性质, 将损失函数的求解转化成求解相似矩阵拉普拉斯矩阵 (Laplacian Matrix) 的特征值和特征向量, 从而将离散形式的聚类转化为连续特征向量的图最优划分. 在谱聚类算法中, 度矩阵  $D$  为

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_n \end{bmatrix}$$

其中, 度矩阵主对角线的元素为  $d_i = \sum_{j=1}^n \omega_{ij}$ .

拉普拉斯矩阵和规范化的拉普拉斯矩阵求解方程分别见式 ② 和式 ③.

$$L = D - W \quad (2)$$

$$L_{\text{sym}} = D^{-\frac{1}{2}} L D^{-\frac{1}{2}} = E - D^{-\frac{1}{2}} W D^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中  $E$  为单位矩阵.

### 2.2 模块划分步骤

传统谱聚类需要人为确定并输入样本空间的聚类个数, 为避免主观因素的影响, 本文采用可以自动确定聚类个数的自适应谱聚类算法<sup>[18]</sup>对机械产品进行模块划分, 步骤如下.

**步骤 1** 将产品综合相关性 NDSM 转换为算法输入的相似矩阵, 即  $W = C$ .

**步骤 2** 构造产品综合相关性 NDSM 的度矩阵  $D$ , 即将矩阵  $W$  的第  $i$  行求和, 分别作为度矩阵  $D$  的主对角线元素.

**步骤 3** 构造产品综合相关性 NDSM 的拉普拉斯矩阵, 即按照式 ③ 求解出规范化的拉普拉斯矩阵  $L_{\text{sym}}$ .

**步骤 4** 求解  $L_{\text{sym}}$  的特征值和特征矩阵, 使得  $L_{\text{sym}} x = \lambda x$ ; 将求解得到的特征值按照从大到小排列为  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ , 相应的特征向量分别为  $e_1, e_2, \dots, e_n$ , 而后, 采用本征间隙法<sup>[19]</sup>求解产品特征值的本征间隙  $\{g_1, g_2, \dots, g_{n-1} \mid g_i = \lambda_n - \lambda_{n+1}\}$ , 在本征间隙序列中依次寻找, 找到第一个极大值, 其所对应的本征间隙下标即为聚类个数  $k = \arg \min \{g_i - g_{i-1} > 0 \text{ 且 } g_i - g_{i+1} > 0\}$ .

**步骤 5** 取前  $k$  个特征值所对应的特征向量并构造矩阵  $X = (x_{ij})_{n \times k} = [e_1, e_2, \dots, e_k]_{n \times k}$ , 而后求得矩阵  $X$  的单位化矩阵  $Y = (y_{ij})_{n \times k}$ , 其中  $y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_j x_{ij}^2}}$ .

**步骤 6** 将聚类个数  $k$  和矩阵  $Y$  作为聚类算法的输入变量, 进行产品模块划分 (聚类), 从而得到产品的模块划分结果. 其中, 矩阵  $Y$  的每一行元素表示新样本空间的坐标值.

步骤7 依据步骤6获得的划分结果,以模块内平均内聚度  $I_a$  (见式④) 和模块间平均耦合度  $E_a$  (见式⑤) 作为划分结果量化指标。

$$I_a = \frac{\sum_{k=1}^m I_k}{m} \quad (4)$$

$$E_a = \frac{\sum_{p=1}^{m-1} \sum_{q=p+1}^m E_{p,q}}{m(m-1)/2} \quad (5)$$

其中,  $m$  表示划分结果中模块的数量; 模块

$k$  的内聚度  $I_k = \frac{\sum_{i=n_k}^{m_k} \sum_{j=n_k}^{m_k} c_{i,j}}{(m_k - n_k + 1)^2}$ , 这里  $n_k, m_k$  分别表示第  $k$  个模块内的第一个零件和最后一个零件的序号,  $c_{i,j}$  表示两个零件之间的综合相关性; 模块  $p$  和模块  $q$  之间的耦合度  $E_{p,q} =$

$$\frac{\sum_{i=n_p}^{m_p} \sum_{j=n_q}^{m_q} c_{i,j} + \sum_{i=n_q}^{m_q} \sum_{j=n_p}^{m_p} c_{i,j}}{2(m_p - n_p + 1)(m_q - n_q + 1)}$$

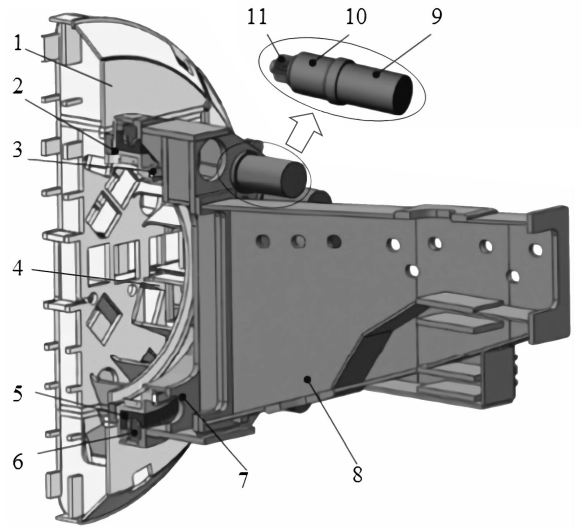
### 3 实例验证

本文以某型号隧道掘进机 (Tunnel Boring Machine, TBM) 刀盘驱动系统为例来验证本文提出的模块划分方法的有效性。TBM 是一种典型的复杂机械产品, 其核心部件刀盘驱动系统主要由刀盘、齿圈、小齿轮、减速器、刀盘法兰、转接法兰、支撑架、电机、主梁等零部件组成<sup>[20]</sup>, TBM 刀盘驱动系统结构如图 5 所示, 其主要零件如表 4 所示。

SC 在 Windows 8.1 Professional 操作系统下采用 Python 语言编程实现, 实验的硬件环境为 Intel (R) Core (TM) i7 - 4500U CPU、8 GB RAM。

#### 3.1 TBM 刀盘驱动系统功能 - 流 - 结构层次化模型

根据 1.1, 构建的 TBM 刀盘驱动系统功能树、流图模型、结构树分别如图 6—8 所示。



1. 刀盘; 2. 刀盘法兰; 3. 齿圈; 4. 转接法兰; 5. 轴承内圈; 6. 轴承外圈; 7. 支撑架; 8. 主梁; 9. 电机; 10. 减速器; 11. 小齿轮。

图 5 TBM 刀盘驱动系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of TBM cutter drive system

表 4 TBM 刀盘驱动系统主要零部件清单

Table 4 Main component

list of TBM cutter drive system

序号	名称	数量/个	序号	名称	数量/个
1	刀盘	1	7	支撑架	1
2	刀盘法兰	1	8	主梁	1
3	齿圈	1	9	电机	10
4	转接法兰	1	10	减速器	10
5	轴承内圈	1	11	小齿轮	10
6	轴承外圈	1			

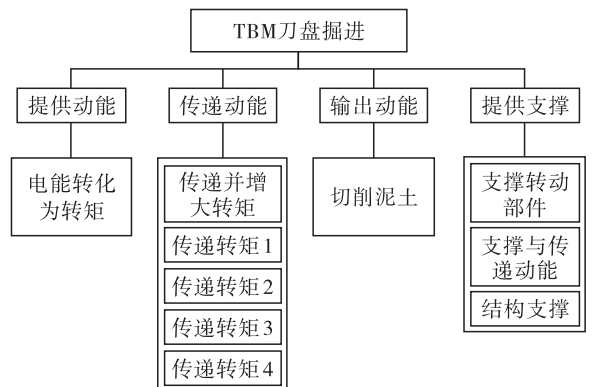


图 6 TBM 刀盘驱动系统功能树

Fig. 6 Tree diagram of TBM cutter drive system function



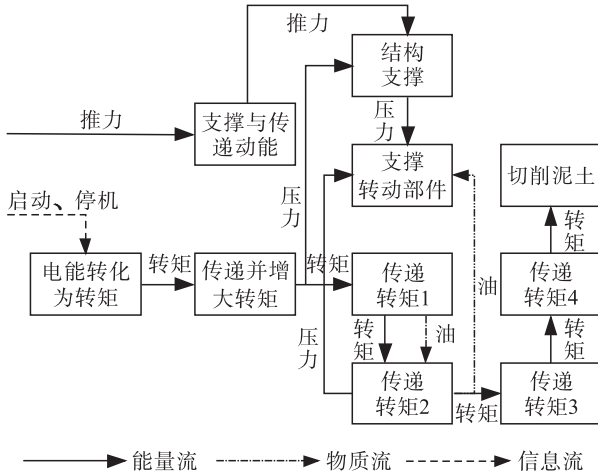


图7 TBM刀盘驱动系统流图模型

Fig.7 Flow model diagram of TBM cutter drive system

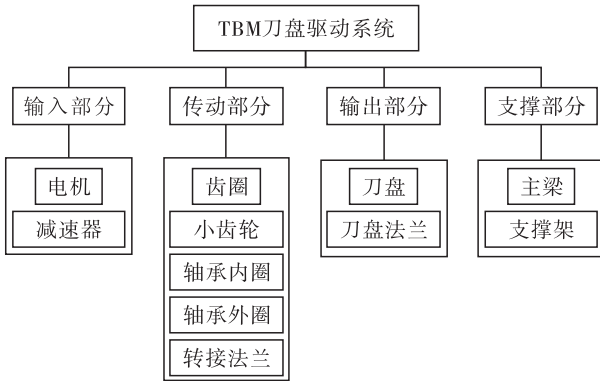


图8 TBM刀盘驱动系统结构树

Fig.8 Tree diagram of TBM cutter drive system structure

3.2 TBM刀盘驱动系统相关性 NDSM

采用产品功能-流-结构模糊评价指标,根据TBM刀盘驱动系统功能-流-结构层次化模型,得到的TBM刀盘驱动系统功能相关性NDSM、流相关性NDSM、结构相关性NDSM分别如表5-7所示.应用层次分析法得到TBM刀盘驱动系统功能、流、结构的权重分别为 $\omega_F=0.1$ 、 $\omega_H=0.2$ 、 $\omega_S=0.7$ ,结合表5-7,得到TBM刀盘驱动系统综合相关性NDSM如表8所示.

3.3 案例求解

由表8构建的TBM刀盘驱动系统图模型

表5 TBM刀盘驱动系统功能相关性 NDSM

Table 5 Function NDSM of TBM cutter drive system

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0.7	0.5	0.7	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5
2	0.7	1	0.5	0.7	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5
3	0.5	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5
4	0.7	0.7	0.5	1	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5
5	0	0	0	0	1	1	0.7	0.5	0	0	0
6	0	0	0	0	1	1	0.7	0.5	0	0	0
7	0	0	0	0	0.7	0.7	1	0.5	0	0	0
8	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	1	0	0	0
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	1	0.7	0.5
10	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0.7	1	0.7
11	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0.5	0.7	1

表6 TBM刀盘驱动系统流相关性 NDSM

Table 6 Flow NDSM of TBM cutter drive system

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.5	0	0
2	1	1	0.5	1	0.5	0.5	0	0	0.5	0	0
3	0.5	0.5	1	1	1	0.7	0	0	0.5	0	0
4	0.5	1	1	1	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5
5	0.5	0.5	1	0	1	1	0.7	0	0.5	0	0
6	0	0.5	0.7	0	1	1	0.7	0	0.5	0	0
7	0	0	0	0	0.7	0.7	1	0.7	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0.7	1	0	0	0
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	1	1	1
10	0	0	0	0.5	0	0	0	0	1	1	1
11	0	0	0	0.5	0	0	0	0	1	1	1

表7 TBM刀盘驱动系统结构相关性 NDSM

Table 7 Structure NDSM of TBM cutter drive system

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.7	1	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0.7	1	0.5	0	0	0	0	0
4	0	0.5	0.7	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	1	0.7	0.5	0	0	0	0
6	0	0	0.5	0	0.7	1	0.5	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0.5	0.5	1	0.5	0.7	0.7	0
8	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0.7	0	1	0.7	0.5
10	0	0	0	0	0	0	0.7	0	0.7	1	0.7
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.7	1

表8 TBM刀盘驱动系统综合相关性 NDSM

Table 8 Complex NDSM of TBM cutter drive system

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0.76	0.15	0.17	0.1	0	0	0	0.15	0.05	0.05
2	0.76	1	0.15	0.62	0.1	0.1	0	0	0.15	0.05	0.05
3	0.15	0.15	1	0.74	0.9	0.49	0	0	0.15	0.05	0.05
4	0.17	0.62	0.74	1	0	0	0	0	0.15	0.15	0.15
5	0.1	0.1	0.9	0	1	0.79	0.56	0.05	0.1	0	0
6	0	0.1	0.49	0	0.79	1	0.56	0.05	0.1	0	0
7	0	0	0	0	0.56	0.56	1	0.54	0.49	0.49	0
8	0	0	0	0	0.05	0.05	0.54	1	0	0	0
9	0.15	0.15	0.15	0.15	0.1	0.1	0.49	0	1	0.76	0.6
10	0.05	0.05	0.05	0.15	0	0	0.49	0	0.76	1	0.76
11	0.05	0.05	0.05	0.15	0	0	0	0	0.6	0.76	1

如图9所示. 通过谱聚类算法计算, TBM刀盘驱动系统的本征间隙序列在  $i = 4$  时有第一个极大值, 故可得出划分目标的模块数量  $k = 4$ , 所对应的特征值为  $\lambda = [1.101, 1.001, 0.963, 0.932]$ , 对应的特征向量如表9所示, 将降维后的特征向量和求得的模块数量作为输入, 即得到 TBM刀盘驱动系统的划分方案.

模块的划分结果为  $[1, 1, 3, 1, 3, 3, 2, 2, 0, 0, 0, 0]$ , 如表10所示, 即某型号 TBM刀盘驱动系统可以分成4个模块:  $m_0 = [电机, 减速器, 小齿轮]$ ,  $m_1 = [刀盘, 刀盘法兰, 转接法兰]$ ,  $m_2 =$

$[支撑架, 主梁]$ ,  $m_3 = [齿圈, 轴承内圈, 轴承外圈]$ . 划分结果的平均内聚度为  $I_a = 0.6908$ 、平均耦合度为  $E_a = 0.0759$ , 均优于其他划分方案. 由图9和表10可以看出, 通过谱聚类算法所划分出来的 TBM刀盘驱动系统, 降低了其复杂度, 符合当下盾构机制造、运输、装配等方面的需求.

### 4 结语

本文提出了一种基于谱聚类算法的模块划分方法, 构建了产品的功能-流-结构模型及其相对应的相关性 NDSM, 并用谱聚类算法将模块划分问题转化为图划分问题. 对某型号 TBM

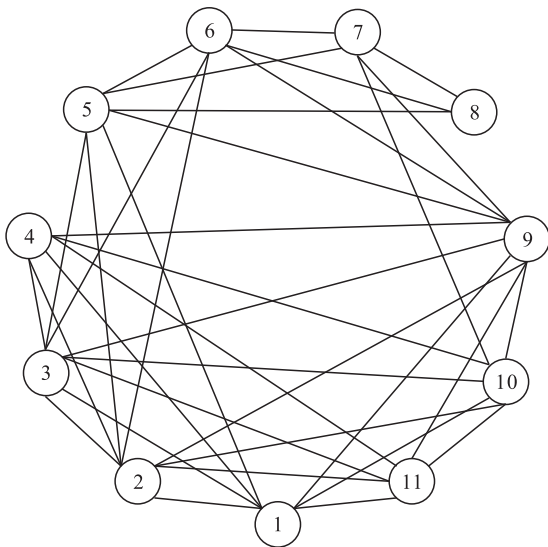


图9 TBM刀盘驱动系统图模型

Fig. 9 Diagram model of TBM cutter drive system

表9 TBM刀盘驱动系统特征向量

Table 9 Feature vector matrix of

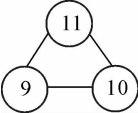
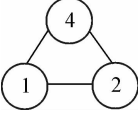
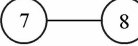
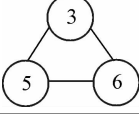
TBM cutter drive system

序号	1	2	3	4
1	-0.30	0.21	0.27	-0.35
2	-0.33	-0.04	-0.37	-0.07
3	-0.31	-0.03	-0.49	-0.08
4	-0.28	-0.12	-0.52	-0.09
5	-0.22	0.62	0.03	0.63
6	-0.33	0.39	-0.04	0.02
7	-0.33	0.16	0.31	-0.35
8	-0.30	-0.3	0.14	0.09
9	-0.33	-0.07	0.3	-0.27
10	-0.30	-0.38	0.20	0.34
11	-0.27	-0.37	0.17	0.39



表 10 TBM 刀盘驱动系统划分结果

Table 10 Partition results of TBM cutter drive system

模块	图划分结果
$m_0 = [9, 10, 11]$	
$m_1 = [1, 2, 4]$	
$m_2 = [7, 8]$	
$m_3 = [3, 5, 6]$	

刀盘驱动系统进行的实例验证结果表明,本文方法能有效降低复杂机械产品设计和制造的复杂度,验证了该方法的有效性.未来研究工作将应用可拓矩阵建立面向生命周期的细粒度产品模型,进一步提高复杂机械产品多维度、强耦合设计制造的效率.

### 参考文献:

[1] 黄群慧,贺俊.中国制造业的核心能力、功能定位与发展战略——兼评《中国制造 2025》[J].中国工业经济,2015(6):5.

[2] STONE R B, WOOD K L, CRAWFORD R H. A heuristic method for identifying modules for product architectures[J]. Design Studies, 2000, 21(1):5.

[3] 罗石林,何苗,李建尧,等.基于模糊综合评价法的农机零件关联度计算及模块划分[J].中国农业科技导报,2019,21(2):77.

[4] 聂庆峰.基于 FBS 模型的产品模块划分方法研究[J].装备制造技术,2013(6):49.

[5] 肖艳秋,李启,李浩.基于 DSM 的融合服务类产品结构建模方法研究[J].郑州轻工业学院学报(自然科学版),2015,30(5):64.

[6] 李颖,应保胜,容芷君,等.基于 SOM 的产品设计结构模块划分及其评价[J].武汉科技大学学报,2018,41(4):301.

[7] 程贤福,罗珺怡.考虑两两模块之间关联关系的产品模块划分方法[J].机械设计,2019,36(4):72.

[8] 周开俊,贡智兵,童一飞.面向再设计的产品模块划分方法[J].中国机械工程,2015,26(15):112.

[9] 郑维强,刘振宇,刘达新,等.基于模糊关联的复杂产品模块化设计方法及其应用[J].机械工程学报,2015,51(5):130.

[10] 贾士雄.基于再制造的产品模块化设计[D].石家庄:石家庄铁道大学,2018.

[11] HAN Z P, MO R, YANG H C, et al. Module partition for mechanical CAD assembly model based on multi-source correlation information and community detection [J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems & Manufacturing, 2018, 12(1):1.

[12] VON LUXBURG U. A tutorial on spectral clustering [J]. Statistics & Computing, 2007, 17(4):395.

[13] 蔡晓妍,戴冠中,杨黎斌.谱聚类算法综述[J].计算机科学,2008,35(7):14.

[14] 高尚兵,周静波,严云洋.一种新的基于超像素的谱聚类图像分割算法[J].南京大学学报(自然科学版),2013,49(2):169.

[15] 吴肖琳,樊蓓蓓.基于改进谱聚类算法的复杂产品模块发现方法研究[J].计量与测试技术,2019,46(4):66.

[16] 刘晓敏,简兆辉,王自伟,等.产品创新功能结构特征建模方法[J].中国工程机械学报,2011,9(1):7.

[17] 蔡晓妍,戴冠中,杨黎斌.谱聚类算法综述[J].计算机科学,2008,35(7):14.

[18] 李金泽,徐喜荣,潘子琦,等.改进的自适应谱聚类 NJW 算法[J].计算机科学,2017,44(增刊 1):424.

[19] 孔万增,孙志海,杨灿,等.基于本征间隙与正交特征向量的自动谱聚类[J].电子学报,2010,38(8):1980.

[20] 马宏辉.TBM 刀盘驱动系统动力学特性分析与实验研究[D].大连:大连理工大学,2017.