

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201912009



# 考虑变更传播影响的产品模块分类方法

徐昭晖, 乔虎, 安嘉祥, 何江

(西安工业大学 机电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 针对产品变更过程中遇到产品结构复杂及零部件间关联程度强的问题, 基于设计结构矩阵, 通过模糊聚类分析法, 对产品变更模块分层级研究变更传播的特点. 首先, 将产品零部件按照不同要求划分为不同的模块, 将模块作为基本元素, 根据模块间的变更依赖关系建立含权重的设计结构矩阵; 然后, 利用模糊聚类分析法对变更模块聚类, 对聚类结果分层级, 分析各层级之间的变更传播特点, 从而降低模块变更的复杂性, 提高模块变更的速度. 以某型罐式半挂车为例, 对该方法的可行性和合理性进行验证. 实验结果表明: 该方法能够有效地降低车辆变更复杂性, 并能提高车辆工程变更速度.

**关键词:** 工程变更; 设计结构矩阵; 模糊聚类; 模块化设计; 变更传播

**中图分类号:** TP 391      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2020)05-0561-07

## Classification Method of Product Modules Considering Influence of Change Propagation

XU Zhaohui, QIAO Hu, AN Jiexiang, HE Jiang

(School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Aiming at the complex product structure and strong correlation between parts in the process of product change, the characteristics of change propagation of product change modules were studied based on design structure matrix using the fuzzy clustering analysis method. First, product parts were divided into different modules according to different requirements. Taking the module as a basic element, the design structure matrix with weights was established according to the change dependence between modules. Then, the fuzzy cluster analysis method was used to cluster the changed modules and stratify the clustering results. The characteristics of change propagation between different levels were analyzed so as to reduce the complexity of module change and improve the speed of module change. The feasibility and rationality of the proposed method were verified by a kind of tank semi-trailer. The experimental results show that the proposed method can effectively reduce the complexity of vehicle change and improve the speed of vehicle engineering change.

**Keywords:** engineering change; design structure matrix; fuzzy clustering; modular design; change propagation

在经济贸易全球化的背景下, 制造企业面临着市场规则改变、相关新技术出现和客户个性化需求提升的挑战. 企业为了保持自身的市场竞争力, 满足产品多样化的需求, 就不可避免地要对产品进行工程

**收稿日期:** 2019-12-05

**通信作者:** 乔虎(1986-), 男, 副教授, 博士, 主要从事数字化设计与集成制造的研究. E-mail: qiaonwpu@hotmail.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51705392)

变更. 工程变更(engineering change, EC)<sup>[1]</sup>是产品在设计完成后, 由于市场要求更改、产品功能提升、客户需求变更、产品用途变化等原因, 对产品的形状、尺寸、装配方式、功能等进行的变更和修改. 变更传播的研究是工程变更中的主要内容, 变更传播的方向影响着工程变更的结果. 何睿等<sup>[2]</sup>提出一种基于设计结构矩阵预测变更传播影响的方法, 分析水波式传播、开花式传播和雪崩式传播 3 种传播的类型及特点; 陶芳等<sup>[3]</sup>运用设计结构矩阵和模糊层次分析的方法, 对变更任务进行分层, 评估变更元素之间的影响程度; 王际坤等<sup>[4]</sup>提出一种定性定量相结合的方法, 分析工程变更影响, 并对工程变更影响进行评估; 张勤等<sup>[5]</sup>通过工程变更管理, 对变更传播跟踪和协同感知, 预测变更传播的影响范围. 以上都是针对产品的零部件或基本元素进行变更传播的研究, 而实际中, 产品的零部件数量繁多, 若要对每个零部件进行变更研究, 任务量大且困难.

在上述研究的基础上, 本文通过模块划分将产品划分为若干个基本模块, 基于工程变更过程中模块间的变更依赖关系, 建立数字型设计结构矩阵(numeric design structure matrix, NDSM); 再利用模糊聚类分析法对产品变更模块进行聚类分层级, 分析各层级的变更传播特点.

## 1 模块划分

在现代设计方法中, 模块化设计方法是实现产品多样化的有效途径<sup>[6]</sup>. 产品的模块划分是模块化设计的基础, 对产品进行模块划分, 得到一系列模块, 再对模块进行重新组合可以得到不同功能的产品<sup>[7]</sup>. 模块划分的目的是使模块内部具有高内聚度<sup>[8]</sup>, 模块间具有低耦合度, 模块的独立性更高. 模块划分根据不同的研究对象、划分角度和划分方式, 得到不同的模块. 产品变更发生在产品的设计和使用阶段, 因此, 根据产品的结构和功能对产品进行模块划分.

1) 功能划分. 产品在设计及使用过程中, 因为市场需求的变化及用户个性化需求, 需要对产品现有功能进行变更. 因此, 在产品总功能的基础上, 按照零部件之间功能的相关程度, 分解成若干个基本功能模块, 对基本功能模块进行变更, 从而完成对产品功能的变更. 功能模块划分, 如图 1 所示.

2) 结构划分. 当市场对产品的经济要求变高时, 要着重考虑结构划分, 通过结构模块划分, 将产品划分成若干个基础部件模块, 对产品结构进行变更, 优化产品结构, 降低制造的复杂度. 结构模块划分, 如图 2 所示.

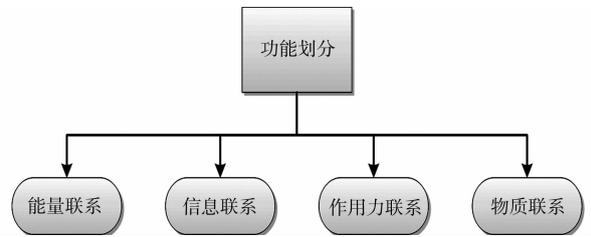


图 1 功能模块划分

Fig. 1 Functional module division

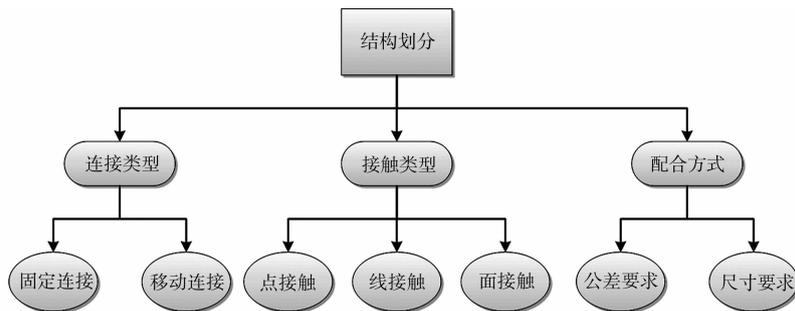


图 2 结构模块划分

Fig. 2 Structure module division

针对产品的特点及要求, 从不同的角度对产品进行模块划分, 能得到更加准确、适合的模块划分结果, 合理的模块划分是实现模块化设计的必要条件.

## 2 模块变更设计结构矩阵的建立

设计结构矩阵(design structure matrix, DSM)能够以一种系统的视角, 清楚地显示模块间的变更过程, 明确地指出变更中可能出现的反复和迭代<sup>[9]</sup>. 模块变更 DSM 的建立<sup>[10]</sup>, 是将产品划分的  $n$  个基

本模块, 根据模块间的变更关联关系构建一个矩阵, 矩阵的行和列与模块相对应, 构成一个  $n \times n$  阶方阵. 模块与模块之间的变更依赖程度不同, 因此通过五点刻度权重法<sup>[11]</sup>将模块间的依赖程度数字化. 五点刻度权重划分, 如表 1 所示.

表 1 五点刻度权重划分

Tab. 1 Five point scale weight division

刻度	权重	说明
不存在依赖性	0	模块变更不会影响其他模块变更
依赖性很弱	0.3	模块变更对其他模块产生变更影响小
依赖性较弱	0.5	模块变更可能对其他模块产生变更影响
依赖性强	0.7	模块变更会对其他模块产生变更影响
依赖性最强	1.0	模块变更必然对其他模块产生变更影响

数字型设计结构矩阵可以对模块间的变更依赖关系进行定量分析<sup>[12]</sup>. 用 0~1 之间的数字表示模块间的依赖强度, 1 表示依赖性最强, 0 表示不存在依赖性. 以 10 个模块为例, 建立产品模块变更 NDSM, 如图 3 所示.

由图 3 可知:  $a_2$  的变更会引起  $a_1, a_3, a_4, a_6, a_7, a_8, a_9$  和  $a_{10}$  的变更,  $a_1$  的变更又会引起  $a_2, a_5$  和  $a_6$  的变更, 可以观察到模块间的变更不仅存在直接变更, 还存在间接变更. NDSM 中不同数字代表不同的变更关系, 如  $a_1$  发生变更, 必然会引起  $a_2$  的变更, 并对  $a_5$  和  $a_6$  产生变更影响, 但对  $a_6$  产生的变更影响较小. 变更传播不是单一、简单的传播<sup>[13]</sup>. 当某一个模块发生变更, 由于不同模块间具有关联性, 会引起与之相关联的其他模块发生变更, 进而引起模块间的变更传播<sup>[14]</sup>. 通过建立的含权重数字型设计结构矩阵, 可以初步发现模块间变更传播的关系, 以及模块间变更传播的大致方向. 为了明确模块在变更过程中产生的变更影响范围, 以及模块变更对其他变更产生的变更传播影响, 需要对设计结构矩阵进行进一步的分析.

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
$a_1$	-	1	0	0	0.7	0.5	0	0	0	0
$a_2$	1	-	0.7	0.5	0	0.3	0.5	0.5	0.3	0.7
$a_3$	0	0.7	-	0	0	0	0	0	0	0
$a_4$	0	0.7	0	-	0	0	0	0	0	0
$a_5$	0.7	0	0	0	-	0.3	0	0	0	0
$a_6$	0.5	0.3	0	0	0.3	-	0	0	0	0
$a_7$	0	0.5	0	0	0	0	-	0.3	0	0.3
$a_8$	0	0.5	0	0	0	0	0.3	-	0	0.3
$a_9$	0	0.3	0	0	0	0	0	0	-	0
$a_{10}$	0	0.7	0	0	0	0	0.3	0.3	0	-

图 3 产品模块变更 NDSM

Fig. 3 NDSM of product module changes

### 3 变更传播模糊聚类分析的步骤

由于工程变更中存在产品结构复杂、关联性高, 以及多因素影响等特点, 所以工程变更具有复杂性和综合性. 通过模块化技术, 将产品中具有相同性质的零部件划分为一个模块, 减少参与变更过程的元素数量, 降低工程变更的复杂性. 但是, 由于模块间的组合具有多样性, 模块的归属界限不明确, 使模块间变更传播影响具有模糊性<sup>[15]</sup>. 模糊聚类分析是模糊数学中应用最多的一种方法. 利用模糊聚类分析方法, 对模块进行聚类分析, 根据聚类结果将模块变更分为不同的层级, 分析各层级的变更传播特点.

**步骤 1** 建立数据矩阵. 假设产品划分了 4 个模块, 即样本集为  $(x_1, x_2, x_3, x_4)$ . 将模块间依赖关系作为样本的特性指标, 建立的数据矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0.7 & 0.7 \\ 0 & 0.7 & 1 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (x_{i,j})_{4 \times 4}.$$

由于来源不同的数据具有不同的量纲, 为了使数据能够进行比较, 必须消除量纲的影响, 将数据进行标准化处理, 使数据都在区间  $[0, 1]$  上. 在建立的数据矩阵中, 每个数据都在区间  $[0, 1]$  内, 因此,  $\mathbf{X} = (x_{i,j})_{4 \times 4}$  满足数据标准化的要求.

**步骤 2** 建立模糊相似矩阵. 根据实际情况, 选取相似系数法、距离法或其他计算方法<sup>[16]</sup>, 确定数据矩阵中元素两两间的相似系数, 建立模糊相似矩阵  $\mathbf{R}(r_{i,j})$ , 其中,  $r_{i,j}$  表示  $x_i$  和  $x_j$  之间的相似程度.

**步骤 3** 建立模糊等价矩阵. 聚类就是依据模糊矩阵将研究的对象进行分类, 但步骤 2 建立的模糊相似矩阵满足自反性和对称性的要求, 不具有传递性, 因此, 要将其转化成模糊等价矩阵.

利用平方法将模糊相似矩阵  $\mathbf{R}$  转换为模糊等价矩阵  $\mathbf{R}^*$ . 令  $\mathbf{R}^2 = \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}$ , 再令  $\mathbf{R}^4 = \mathbf{R}^2 \cdot \mathbf{R}^2$ , 以此类推, 直到满足  $\mathbf{R}^{2^l} = \mathbf{R}^{2^{l+1}}$ , 得到一个模糊等价矩阵  $\mathbf{R}^* = \mathbf{R}^{2^l}$ .

**步骤4** 模糊聚类. 根据产品的实际结构功能, 选取不同的置信水平  $\lambda \in [0, 1]$ , 求出  $R^*$  的  $\lambda$ -截矩阵  $R_\lambda^*$ , 得到不同的分类结果, 完成变更模块聚类<sup>[17]</sup>.

依照聚类结果将变更模块进行重新排序, 选取适当的阈值  $\lambda$ , 根据模块间变更传播影响关系将其划分为3个层次. 1) 变更发起层. 这一层级中模块自身会进行变更, 模块的变更会影响其他模块的变更, 但是不会因为其他模块的变更而产生变更. 2) 变更携带层. 这一层级中的模块会因为其他模块的变更而产生变更, 同时, 还会对其他模块产生变更的影响. 3) 变更吸收层. 这一层级中模块的变更主要受其他模块变更的影响, 且该模块的变更不会对其他模块变更产生影响.

因此, 在产品进行模块变更时, 变更发起层和变更携带层中的模块是主要研究的部分. 变更发起层内的模块往往是产品内部的核心部件, 其他模块的尺寸或装配关系都根据该模块调整. 因此, 模块发起层中的模块对模块变更起决定性作用. 变更携带层中的模块, 在产品中往往起连接作用. 在模块变更过程中, 变更携带层中的模块是实现模块变更传播的关键. 在变更吸收层中, 模块变更会受到其他模块变更的影响而产生变更, 但该模块的变更不会对其他模块产生变更影响, 所以不会产生模块变更传播, 也不会对产品产生变更影响.

通过对产品变更模块进行聚类分析, 根据变更传播影响的特点, 将产品变更模块划分到不同层级, 分层级研究变更模块间的传播关系, 可以更好地发现模块间变更传播的影响, 为研究模块变更传播影响提供基础, 能更快地实现产品变更需求.

## 4 实例验证

### 4.1 罐式半挂车结构模块划分

以某型罐式半挂车(图4)为例, 根据其结构特点进行结构模块划分, 划分出罐体、走台、爬梯、牵引销、车架、支腿、护栏、工具箱、灭火器桶及尾架等10个基本模块.

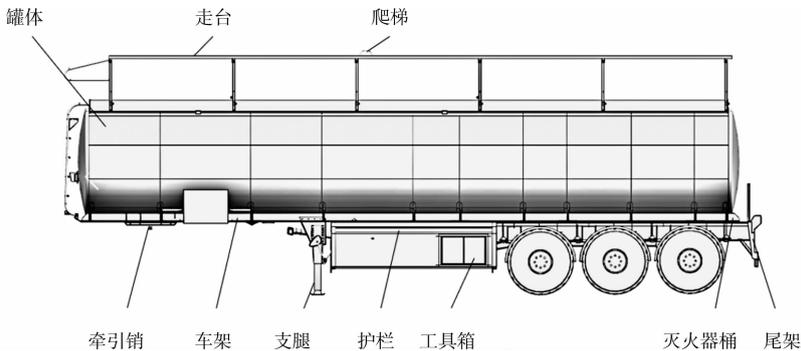


图4 某型罐式半挂车示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a type of tank semi-trailer

### 4.2 建立模块变更 NDSM

将罐式半挂车的10个基本模块用  $x_i (i=1, 2, \dots, 10)$  表示, 根据五点刻度权重法对基本模块之间的依赖程度进行数字化. 基本模块作为矩阵的行与列元素, 构建一个  $10 \times 10$  阶矩阵. 罐式半挂车 NDSM, 如图5所示.

### 4.3 模糊聚类分析

根据建立的罐式半挂车 NDSM, 基于模块间的依赖关系, 获得罐式半挂车结构模块的权重关系, 模块自身的变更依赖程度用数字“1”表示, 客观地反映模块之间的变更依赖关系. 通过模糊聚类方法完成变更模块聚类.

1) 建立原始数据矩阵为

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
$a_1$	-	1	0	0	0.7	0.5	0	0	0	0
$a_2$	1	-	0.7	0.7	0	0.3	0.5	0.5	0.3	0.7
$a_3$	0	0.7	-	0	0	0	0	0	0	0
$a_4$	0	0.7	0	-	0	0	0	0	0	0
$a_5$	0.7	0	0	0	-	0.3	0	0	0	0
$a_6$	0.5	0.3	0	0	0.3	-	0	0	0	0
$a_7$	0	0.5	0	0	0	0	-	0.3	0	0.3
$a_8$	0	0.5	0	0	0	0	0.3	-	0	0.3
$a_9$	0	0.3	0	0	0	0	0	0	-	0
$a_{10}$	0	0.7	0	0	0	0	0.3	0.3	0	-

图5 罐式半挂车 NDSM

Fig. 5 NDSM of tank semi-trailer

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0.7 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0.7 & 0.7 & 0 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0.7 \\ 0 & 0.7 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0 & 0 & 0.3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.3 & 0 & 0.3 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 1 & 0 & 0.3 \\ 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0.3 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$X = (x_{i,j})_{10 \times 10}$  中的数据都在区间  $[0, 1]$  内, 因此, 矩阵  $X$  同时是标准化数据矩阵.

2) 建立模糊相似矩阵  $R$ . 选用绝对值减数法  $r_{i,j} = 1 - c \sum_{k=1}^m |x_{i,k} - x_{j,k}|$  (取  $c = 0.1$ ), 计算模块之间的相似程度  $r_{i,j}, r_{i,j}$  值越大, 说明两个模块之间的相似程度越大, 构造模糊相似矩阵  $R(r_{i,j})$ .

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0.57 & 0.65 & 0.65 & 0.82 & 0.79 & 0.57 & 0.57 & 0.61 & 0.59 \\ 0.57 & 1 & 0.54 & 0.54 & 0.43 & 0.44 & 0.54 & 0.54 & 0.42 & 0.60 \\ 0.65 & 0.54 & 1 & 0.80 & 0.63 & 0.68 & 0.72 & 0.72 & 0.76 & 0.74 \\ 0.65 & 0.54 & 0.80 & 1 & 0.63 & 0.68 & 0.72 & 0.72 & 0.76 & 0.74 \\ 0.82 & 0.43 & 0.63 & 0.63 & 1 & 0.81 & 0.59 & 0.59 & 0.67 & 0.57 \\ 0.79 & 0.44 & 0.68 & 0.68 & 0.81 & 1 & 0.64 & 0.64 & 0.72 & 0.62 \\ 0.57 & 0.54 & 0.72 & 0.72 & 0.59 & 0.64 & 1 & 0.86 & 0.72 & 0.84 \\ 0.57 & 0.54 & 0.72 & 0.72 & 0.59 & 0.64 & 0.86 & 1 & 0.72 & 0.84 \\ 0.61 & 0.42 & 0.76 & 0.76 & 0.67 & 0.72 & 0.72 & 0.72 & 1 & 0.70 \\ 0.59 & 0.60 & 0.74 & 0.74 & 0.57 & 0.62 & 0.84 & 0.84 & 0.70 & 1 \end{pmatrix}.$$

3) 构建模糊等价矩阵  $R^*$ . 根据构建的模糊相似矩阵  $R$ , 通过逐次平方法  $R^2 = R \cdot R$ , 计算传递闭包, 经过计算得到  $R^8 = R^4 \cdot R^4$ , 因此,  $R^4$  为传递闭包, 即  $R^* = R^4$ ,  $R^*$  就是所求的模糊等价矩阵, 即

$$R^* = \begin{pmatrix} 1 & 0.60 & 0.72 & 0.72 & 0.82 & 0.81 & 0.72 & 0.72 & 0.72 & 0.72 \\ 0.60 & 1 & 0.60 & 0.60 & 0.60 & 0.60 & 0.60 & 0.60 & 0.60 & 0.60 \\ 0.72 & 0.60 & 1 & 0.80 & 0.72 & 0.72 & 0.74 & 0.74 & 0.76 & 0.74 \\ 0.72 & 0.60 & 0.80 & 1 & 0.72 & 0.72 & 0.74 & 0.74 & 0.76 & 0.74 \\ 0.82 & 0.60 & 0.72 & 0.72 & 1 & 0.81 & 0.72 & 0.72 & 0.72 & 0.72 \\ 0.81 & 0.60 & 0.72 & 0.72 & 0.81 & 1 & 0.72 & 0.72 & 0.72 & 0.72 \\ 0.72 & 0.60 & 0.74 & 0.74 & 0.72 & 0.72 & 1 & 0.86 & 0.74 & 0.84 \\ 0.72 & 0.60 & 0.74 & 0.74 & 0.72 & 0.72 & 0.86 & 1 & 0.74 & 0.84 \\ 0.72 & 0.60 & 0.76 & 0.76 & 0.72 & 0.72 & 0.74 & 0.74 & 1 & 0.74 \\ 0.72 & 0.60 & 0.74 & 0.74 & 0.72 & 0.72 & 0.84 & 0.84 & 0.74 & 1 \end{pmatrix}.$$

4) 聚类. 由大到小取一组  $\lambda (0 \leq \lambda \leq 1)$ , 确定相应的  $\lambda$ -截矩阵对罐式半挂车结构模块进行聚类. 聚类结果, 如表 2 所示. 由表 2 可知: 不同的阈值  $\lambda$  对应不同的聚类结果, 结合实际情况, 对聚类结果进行分析. 当  $\lambda = 0.74$  时, 罐式半挂车的 10 个模块聚类为 3 类, 第 I 类中包含罐体模块、走台模块和爬梯模块, 这 3 个模块共同组成了罐式半挂车的罐体部分; 第 II 类中包含车架模块; 第 III 类中包含牵引销模块、尾架模块、工具箱模块、护栏模块、灭火器桶模块和支腿模块. 在实际中, 第 II 类车架模块分别与第 I 类模块和第 III 类模块有关联关系, 但第 I 类模块与第 III 类模块不存在关联关系, 认定聚类结果合理. 因此, 选取  $\lambda = 0.74$ , 对聚类结果分析, 并完成分类.

变更发起层的变更传播特点是模块自身产生变更, 并且对其他层级模块产生变更传播影响, 但不会受其他层级模块的变更影响. 罐体模块是罐式半挂车中的核心模块, 整体车辆的结构会根据罐体模块的

变更而变更. 因此,  $\{1, 5, 6\}$  即 {罐体, 走台, 爬梯}, 这 3 个模块属于变更发起层.

变更携带层的变更传播特点是模块会受其他模块的变更传播影响, 同时, 也会对其他模块产生变更传播影响. 聚类结果中, 第 II 类中的车架模块分别与第 I 类中的模块和第 III 类中的模块有关联关系, 起连接作用. 罐体模块的变更会直接影响车架模块产生变更, 车架模块的变更又会对工具箱模块、支腿模块、护栏模块等产生变更传播影响. 因此,  $\{2\}$  即 {车架} 模块属于变更携带层.

变更吸收层的变更传播特点是模块会受其他层级模块变更传播影响, 但模块变更不会对其他层级中的模块产生影响. 牵引销模块、尾架模块、工具箱模块、护栏模块、灭火器桶模块和支腿模块与车架模块有关联关系, 车架模块的结构发生变更会影响这些模块的结构也产生相应的变更. 若工具箱模块的尺寸发生更改, 可能会对同一层级中的护栏模块的尺寸产生变更影响, 但车架模块的尺寸不会因为工具箱模块尺寸的变更而发生变更. 因此,  $\{3, 4, 7, 8, 9, 10\}$  即 {牵引销, 尾架, 工具箱, 护栏, 灭火器桶, 支腿}, 这 6 个模块属于变更吸收层.

对罐式半挂车模块进行聚类分析, 在考虑变更传播影响条件下, 完成对变更模块的分类. 根据各个层级各自的变更传播特点, 模块变更在不同层级中产生不同的变更传播影响. 以罐体模块、车架模块和支腿模块为例进行说明, 罐式半挂车模块变更传播过程, 如图 6 所示.

当变更发起层中的罐体模块为初始变更模块时, 根据该层级的变更传播特点, 罐体模块的变更会对变更携带层级中的车架模块产生变更传播影响, 进而通过车架模块的变更对变更吸收层级中的支腿模块产生变更传播影响. 由此可见, 初始变更在变更发起层级中时, 变更传播影响范围最大, 变更传播涉及大量的模块, 模块变更最为复杂.

当变更携带层中的车架为初始变更模块时, 由于该层级中只有一个模块, 因此, 同一层级中不存在变更传播关系, 车架模块的变更只会影响变更吸收层中的支腿模块等产生变更, 变更不会引起大量模块产生变更, 且变更会被少量吸收, 可能会形成开放式变更传播影响, 变更传播范围可控, 能够更好地发现变更传播路径.

当变更吸收层中的支腿模块为初始变更模块时, 根据该层级的变更传播特点, 支腿模块的变更只会影响同一层级中其他模块产生变更, 不会对车架模块产生变更传播影响, 因此, 变更传播路径相对简单, 变更传播范围较小, 变更传播影响较小.

根据不同层级模块的变更传播特点对罐式半挂车中的模块进行分类, 能够快速确定可能的变更影响范围, 选择合理的变更发起模块, 控制变更传播影响.

## 5 结论

引入模块化设计方法和模糊聚类分析法, 首先, 从产品结构和功能方面, 将产品划分为  $n$  个基本模块, 减少产品参与变更过程的个数, 降低变更过程中受影响的元素个数; 然后, 基于模块间的变更依赖关系, 建立含权重 NDSM, 发现产品模块之间的变更传播影响关系; 最后, 使用模糊聚类分析法, 根据模块

表 2 聚类结果

Tab. 2 Clustering results

聚类数目	$\lambda$	聚类结果
10	1.00	$\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}$
9	0.86	$\{7, 8\}, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{9\}, \{10\}$
8	0.84	$\{7, 8, 10\}, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{9\}$
7	0.82	$\{7, 8, 10\}, \{1, 5\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{6\}, \{9\}$
6	0.81	$\{7, 8, 10\}, \{1, 5, 6\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{9\}$
5	0.80	$\{7, 8, 10\}, \{1, 5, 6\}, \{3, 4\}, \{2\}, \{9\}$
4	0.76	$\{7, 8, 10\}, \{1, 5, 6\}, \{3, 4, 9\}, \{2\}$
3	0.74	$\{3, 4, 7, 8, 9, 10\}, \{1, 5, 6\}, \{2\}$
2	0.72	$\{1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}, \{2\}$
1	0.60	$\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$

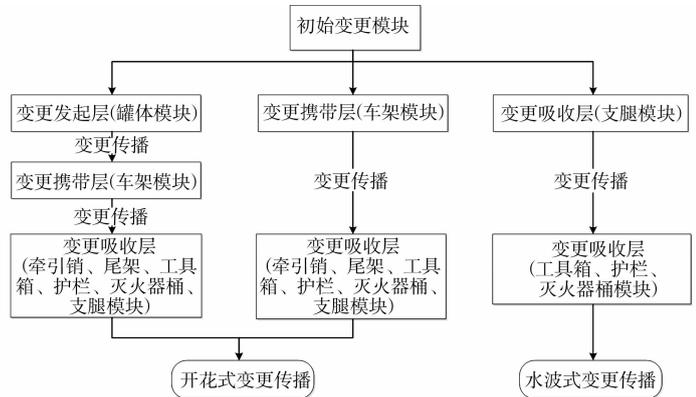


图 6 罐式半挂车模块变更传播过程

Fig. 6 Semi-trailer module change propagation process

之间的变更依赖程度,建立  $n \times n$  阶原始数据矩阵,通过相关计算得到模糊等价矩阵,基于模糊等价矩阵选取不同的阈值  $\lambda$ ,变更模块有不同的聚类结果,对结果进行分析,选取符合实际需要的阈值确定模块所属类别.以罐式半挂车为例,在分类过程中选取  $\lambda = 0.74$ ,则 10 个变更模块分别被划分到变更发起层、变更携带层和变更吸收层中,完成变更模块的分类.

利用文中提出的方法,研究产品模块变更问题,考虑到模块之间存在的变更传播影响,将变更模块进行分类,同一类别的变更模块具有相同的变更传播方式和变更传播影响.因此,其能够更加清楚地发现变更模块传播的路径,降低变更传播过程的复杂性,有利于提高产品工程变更的速度,缩短工程变更的周期.

## 参考文献:

- [1] 郑玉洁,杨育,张娜,等.复杂产品工程变更传播路径动态优化[J].计算机集成制造系统,2018,24(2):474-483. DOI:10.13196/j.cims.2018.01.019.
- [2] 何睿,唐敦兵,薛建彬.基于设计结构矩阵的工程变更传播研究[J].计算机集成制造系统,2008,14(4):656-660.
- [3] 陶芳,魏法杰.产品研制过程中工程变更传播范围和影响分析[J].工业工程,2013,16(4):98-104. DOI:10.3969/j.issn.1007-7375.2013.04.017.
- [4] 王际坤,魏法杰.工程变更影响分析与评估研究[J].工业工程,2006,9(3):32-35,79. DOI:10.3969/j.issn.1007-7375.2006.03.008.
- [5] 张勤,莫蓉,宫中伟.面向过程控制的工程变更系统研究[J].航空制造技术,2012(11):82-85,95. DOI:10.3969/j.issn.1671-833X.2012.11.015.
- [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):301-306. DOI:10.3969/j.issn.1674-3644.2018.04.010.
- [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):72-76. DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2019.04.014.
- [8] 吕健,王震,潘伟杰,等.基于层次聚类的定制产品模块划分方法研究[J].组合机床与自动化加工技术,2019(11):134-138. DOI:10.13462/j.cnki.mmtamt.2019.11.034.
- [9] ALGEDDAWY T,ELMARAGHY H. Optimum granularity level of modular product design architecture[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,2013,62(1):151-154. DOI:10.1016/j.cirp.2013.03.118.
- [10] ECKERT C,CLARKSON P J,ZANKER W. Change and customisation in complex engineering domains [J]. Research in Engineering Design,2004,15(1):1-21. DOI:10.1007/s00163-003-0031-7.
- [11] CHENG Qiang,LI Weishuo,XUE Deyi, *et al.* Design of adaptable product platform for heavy-duty gantry milling machines based on sensitivity design structure matrix[J]. SAGE Publications,2017,231(24):4495-4511. DOI:10.1177/0954406216670685.
- [12] 高琦,王昊,伍英杰.基于设计结构矩阵的变型设计过程动态规划[J].农业机械学报,2017,48(4):390-398. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.052.
- [13] 乔虎,何俊,徐昭晖,等.三维机加工工序模型的变更与维护方法[J].华侨大学学报(自然科学版),2019,40(4):457-463. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201810029.
- [14] CHAMA L A,BERTRAM O. Generating potential actuation architectures for multifunctional flight control surfaces using a Design Structure Matrix clustering algorithm[J]. CEAS Aeronautical Journal,2019,10(2):491-515. DOI:10.1007/s13272-018-0332-1.
- [15] 孙超勇,张永进,张燕军,等.基于模糊聚类分析的人机系统功能聚类方法[J].机械工程与自动化,2019(1):1-3. DOI:10.3969/j.issn.1672-6413.2019.01.001.
- [16] 顾丽娟,孙慧静,王丽英.模糊聚类分析应用于民航飞机环保性能评估[J].海军航空工程学院学报,2018,33(5):459-464. DOI:10.7682/j.issn.1673-1522.2018.05.007.
- [17] ZHU Xiubin,PEDRYCZ W,LI Zhiwu. Fuzzy clustering with nonlinearly transformed data[J]. Applied Soft Computing,2017,61:364-376. DOI:10.1016/j.asoc.2017.07.026.