

文章编号:1000-582X(2012)09-022-08

客户需求驱动的柔性平台功能模块识别方法

李中凯¹,程志红¹,杨金勇¹,丁力平²

(1. 中国矿业大学 机电工程学院,江苏 徐州 221116;
2. 南京航空航天大学 机电学院,南京 210016)

摘要:为了实现柔性产品平台概念设计中需求分析、功能建模、模块识别和类别设置的集成,构建自顶向下映射和自底向上反馈模型,提出客户需求驱动的柔性平台功能模块识别方法。考虑客户需求的模糊特征,引入模糊 Kano 模型进行需求分类;提出需求类别扩展法构建物料流、能量流和信号流表达的产品功能模型;基于启发规则识别产品功能模块,根据所满足的需求类别,设置基本模块、柔性模块和个性模块的类别。避免了模块规划的复杂数学运算,实现了客户需求分析和模块规划方法的融合。液压支架平台的功能模块规划实例,证明了设计方法的有效性。

关键词:产品开发;概念设计;柔性产品平台;功能模块;液压支架

中图分类号:TH122

文献标志码:A

Customer requirements motivated functional module identification method for flexible platform

LI Zhongkai¹, CHENG Zhihong¹, YANG Jinyong¹, DING Liping²

(1. School of Mechatronics Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A customer requirements motivated flexible platform functional module identification method is proposed to integrate requirement analysis, functional modeling, modular identification and module classification in the conceptual design stage of flexible product platform, based on the model of top-down mapping and bottom-up feedback. Because of the fuzzy characteristic of customer requirements, a fuzzy Kano model is introduced to classify the information of needs. A requirements' hierarchical expanding method is presented to construct the product function model represented with the material flow, energy flow and signal flow. Three heuristic rules are used to identify functional modules, and the basic, flexible and individualized modular types are set up according to the satisfied requirements' classification. Thus, the complex mathematical computation for modular planning can be avoided, and customer requirement analysis is merged with the modular planning process. The effectiveness of the method is illustrated through the functional module planning for hydraulic support platform.

Key words: product development; conceptual design; flexible product platform; functional module; hydraulic support

收稿日期:2012-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005237, 51105200);中国博士后科学基金资助项目(20100471407)

作者简介:李中凯(1980-),男,中国矿业大学副教授,研究方向:产品族设计与产品平台开发、复杂机电产品集成设计方法,(E-mail)lizk@cumt.edu.cn.

产品族设计和产品平台开发是实现面向大规模定制设计的有效手段。柔性产品平台^[1]不同于传统的模块化或参数化平台,它在保持基本模块通用的基础上,通过柔性模块的变异设计实现产品性能的调节,并通过个性模块的添加或移除选配辅助功能,适合于面向订单设计(engineering to order, ETO)类复杂机电产品^[2]的核心平台设计。客户需求信息的获取与处理是产品平台设计的需求来源,概念设计阶段平台功能模块规划是模块结构详细设计的基础。因此,有必要对客户需求驱动的功能模块识别方法进行研究,构建柔性产品平台以支持大规模定制设计。

在需求驱动的产品平台设计研究中,主要包括需求获取与处理方法、产品平台模块规划方法和模块化产品配置设计方法。在需求获取与处理方面,文献[3]建立了基于本体表达的客户需求拓展模型,为产品族横系列和纵系列设计提供需求指导。文献[4]采用关联分析和模糊聚类,实现模糊需求向技术参数的映射。文献[5]使用 Kano 模型分类客户需求信息,采用质量功能配置将客户满意度自顶向下分解到组件设计参数。文献[6]通过客户需求的重要度和频率来确定产品核心需求和差异化需求。上述研究关注于客户需求向产品模型的映射,但是,需求分类的细致程度不足,不能支持柔性平台的适应性调节。在需求驱动的产品平台模块规划方面,文献[7]将灰关联度聚类模型运用于客户需求的量化与聚类过程,从客户需求中分析出基本和辅助功能模块。文献[8]提出基于灵敏度分析的产品族规划方法,通过客户需求、功能属性、结构设计等固有灵敏度关系分析,实现客户需求满足和模块体系结构的权衡。文献[9]提出基于离散选择分析和产品通用性指数的产品模块化设计方法,构建模块规划的多目标优化模型,使用遗传算法求解。但是,基于灵敏度分析和进化计算的模块规划方法,对产品数学模型依赖度高,限制了该类方法在产品概念设计阶段的应用。在需求驱动的产品配置设计中,文献[10]提出基于本体映射的产品配置方法,建立客户需求本体和产品族实例本体,通过本体映射实现客户需求特征参数与实例特征参数之间的多级匹配。文献[11]建立产品性能和客户需求相关度模型,采用模拟退火算法寻求最优变量配置方案。文献[12]提出以客户为中心的产品建模和配置方法,对客户需求进行模式聚类,建立产品与或树表达方案,使用粗糙集算法进行模式约简。但是,配置模块的类别划分不够清晰。

综上所述,当前产品平台模块规划方法中由于存在需求分类细致度不足,产品数学模型依赖度高和模块类别划分不足的问题,需要研究响应客户需求的柔性产品平台模块规划方法,提高产品平台响应客户需求信息的能力。因此,笔者建立平台模块识别的“V”型设计过程模型,包括客户需求自顶向下映射至功能模型和功能模块自底向上反馈满足需求的过程;提出基于模糊 Kano 模型、扩展式功能建模、启发规则划分和模块类别设置的柔性平台功能模块识别集成方法,解决概念设计阶段柔性产品平台的功能模块规划问题,为后续的模块结构变异设计和适应性配置设计提供基础。

1 设计过程建模

1.1 设计映射模型

基于 Kano 分类模型^[13],将客户需求类别定义为基本需求、性能需求和个性需求等,各需求类别描述如下:1)基本需求。产品必须包括的基本功能项,具备该功能无法显著提高满意度,而不具备该功能则显著降低客户满意度。2)性能需求。客户满意度随产品性能指标的提高而发生线性提高。3)个性需求。具备该需求项则客户满意度显著提高,而不具备该需求客户满意度不发生显著降低,表现出可使客户满意度大幅提升的特点。

柔性产品平台的组成模块根据不同的功能特征可分为基本模块、柔性模块和个性模块^[14]。其中,基本模块,是组成一个产品时提供基本功能和必须包括的功能模块,可满足客户基本功能需求;柔性模块,是提供不同性能等级的可参数化功能模块,在产品体系结构中必选一个实例,用于满足客户的差异化性能需求;个性模块,是特殊的、补充的或根据客户特别要求定制的模块,可以根据功能需要选择或不选择该类模块,满足客户对产品功能的个性需求。

建立图 1 所示的功能模块识别“V”过程模型,总体采用自顶向下映射、产品内部分解和自底向上反馈的过程。

首先分类多项客户需求信息,获得需求满足的优先级;进而基于物料、能量和信号流表达的需求类别扩展法,建立产品功能模型,并基于流转关系进行功能模块的规划;然后分析各模块所满足的需求项及其类别,设置功能模块所属的类别,完成面向平台设计的功能模块规划。

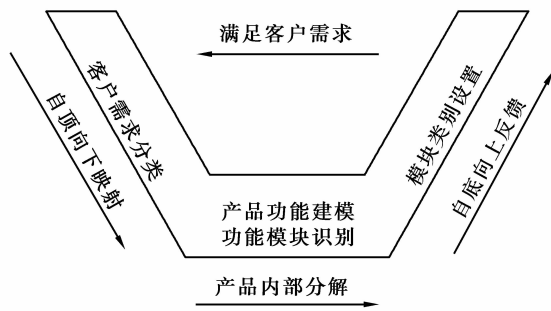


图 1 功能模块识别的“V”型过程模型

1.2 总体设计流程

建立客户需求驱动的柔性平台模块化设计流程如图 2 所示,包括需求获取与处理阶段、平台概念设计阶段和结构详细设计阶段。重点描述前两阶段的设计,设计步骤描述如下。

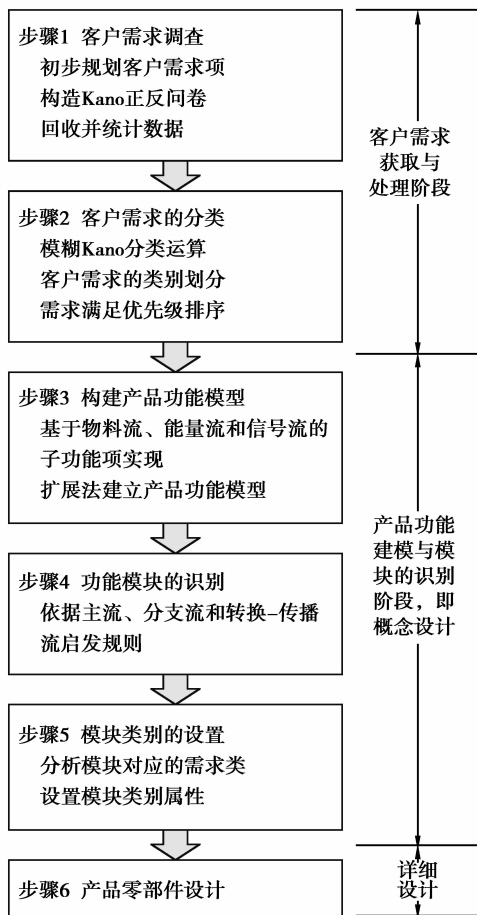


图 2 客户需求驱动的产品模块化设计流程

步骤 1 客户需求调查。采用 Kano 模型客户需求分析方法,设计相应的调查问卷并发放。需考虑客户的地区、年龄、收入等特征信息,并扩大调研数据量以提高反馈准确率。

步骤 2 基于调研数据的客户需求分类。对调研数据进行一致性处理,保证数据的有效性;使用 Kano 分类模型对客户需求进行类别划分,重点区分基本需求、性能需求和个性需求项,精简无关紧要等需求项。

步骤 3 构建产品功能模型。使用物料流、能量流和信号流传递法实现满足需求的子功能模型;采用层次扩展法逐步累加各项功能需求,形成产品整体功能模型。

步骤 4 功能模块的识别。以产品功能模型为基础,使用主流、分支流和转换-传播流启发规则进行产品功能模块识别,并记录模块的组成。

步骤 5 模块类别的设置。分析功能模块所满足需求项的类别,设置功能模块所属的基本模块、柔性模块和个性模块类别,作为模块结构设计的辅助信息。

步骤 6 产品零部件设计。详细设计阶段是依据产品的功能模块对产品进行结构实现的过程,设计产品零部件,并进行基于计算机辅助工程的整机仿真分析。

2 需求驱动的平台功能模块设计

2.1 模糊 Kano 模型需求分类

传统 Kano 模型对需求信息构建正反调查问卷,如图 3(a)所示,根据客户的满足、必须、中立、忍受或不满足选项,对照表 1 的需求分类表和隶属频度决定需求项所属的类别。其中, M 表示基本需求 (must be), O 表示性能需求 (one-dimensional), A 表示个性需求 (attractive), I 表示无关需求 (indifferent), R 表示反向需求 (reverse), Q 表示问题需求 (questionable)。

受单值客户问卷的影响,导致传统 Kano 模型分类精度不足。考虑到客户对需求项满意度存在模糊的特点,引入模糊 Kano 模型需求分类方法^[15]。调查问卷改造为允许客户对各调查项赋予模糊满意度数值,各数值介于[0,1]区间,行元素之和为 1,模糊 Kano 问卷如图 3(b)所示。

	满足	必须这样	保持中立	可以忍受	不满足		满足	必须这样	保持中立	可以忍受	不满足
正向	0	1	0	0	0	正向	0.2	0.5	0.3	0	0
反向	0	0	0	1	0	反向	0	0	0	0.5	0.5

(a)传统Kano问卷

(b)模糊Kano问卷

图 3 模糊与传统 Kano 问卷形式对比

表 1 Kano 模型需求分类规则

正向问题	反向问题				
	满足	必须这样	中立	可忍受	不满足
满足	Q	A	A	A	O
必须这样	R	I	I	I	M
中立	R	I	I	I	M
可忍受	R	I	I	I	M
不满足	R	R	R	R	Q

客户需求的正确提取和高覆盖度是保证 Kano 分类有效性的前提,可使用客户交流、头脑风暴和特征扩展等方法构建需求列表。设需求分类集合包含 m 项客户需求, n 个调查客户。模糊 Kano 模型的分类步骤如下。

步骤 1 对 1 项需求 1 个客户的正反问卷 $P_{1 \times 5}$ 和 $N_{1 \times 5}$,生成交互矩阵

$$S_{5 \times 5} = P_{1 \times 5}^T \times N_{1 \times 5} \quad (1)$$

步骤 2 矩阵 S 对照 Kano 分类表 1,生成各需求类别的隶属度向量

$$T = \left\{ \frac{v_1}{M}, \frac{v_2}{O}, \frac{v_3}{A}, \frac{v_4}{I}, \frac{v_5}{R}, \frac{v_6}{Q} \right\} \quad (2)$$

式中 v_i 为 1 项需求 1 个问卷中,对各需求类别的隶属度, $0 \leq v_i \leq 1, i=1, 2, \dots, 6$ 。其中, $v_1 = s_{25} + s_{35} + s_{45}, v_2 = s_{15}, v_3 = s_{12} + s_{13} + s_{14}, v_4, v_5, v_6$ 同理,且 $\sum_{i=1}^6 v_i = 1$ 。

步骤 3 对该需求项的所有调查客户,重复步骤 1、2,生成该需求项的模糊隶属度矩阵 $F_{N \times 6}$ 。

步骤 4 取阈值 α ,当 $F_{i,j} \geq \alpha$ 时 ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, 6$),认为需求属于对应的类别, $N_{i,j} = 1$,否则, $N_{i,j} = 0$,生成该需求项的隶属矩阵 N 。统计 N 矩阵中需求隶属的频度,频度最高的类别为该需求项的类别。

步骤 5 对每项客户需求,重复步骤 1~4,完成所有客户需求的类别分析。

当 N 矩阵中各需求类别隶属频度相同时,需求类别隶属的优先级为 $M > O > A > I$,即基本需求 > 性能需求 > 个性需求 > 无关紧要需求。

2.2 层次扩展的产品功能建模

任何一个系统在其内部各环节之间及与外部环境之间都在不断进行着物料、能量和信号的交换,在时间和空间上形成物料流、能量流和信号流^[16]。提出基于需求类别的扩展式产品功能建模方法,如图 4 所示,各建模步骤描述如下。

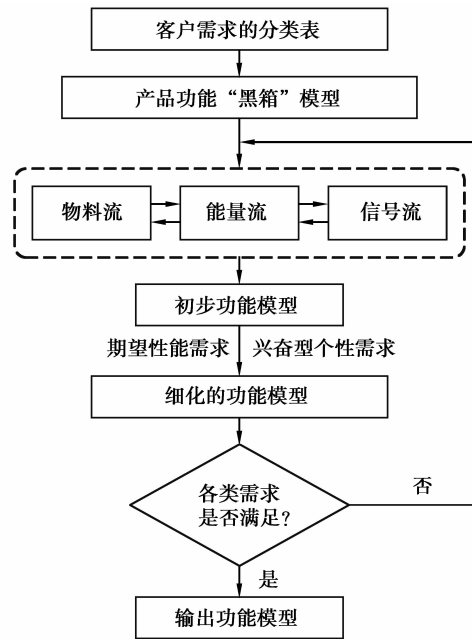


图 4 产品功能模型的建模流程

步骤 1 建立产品功能“黑箱”模型。根据客户需求分类表,提取产品的各项功能,规划产品输入和输出的物料、能量和信号,构建满足客户需求的“黑箱”模型。该步骤的重点是清晰描述输入和输出产品的物料、能量和信号。

步骤 2 根据基本功能需求,依次建立物料流、能量流和信号流的传递模型。首先使用物料流描述物料从输入为起点,经处理、传输等步骤,流出产品的过程;然后使用能量流描述能量的输入、转换、传输和输出过程;进而在物料和能量流图基础上,建立信号流控制与传输过程,实现产品的动作控制。该步骤的重点是通过物料、能量和信号流的交互,形成产品初步功能模型,满足客户的基本功能需求。物料、能量和信号流规划应依次进行,着重描述细节功能项,不考虑产品结构的实现。

步骤 3 添加性能需求和个性需求,实现细化的功能模型。性能需求是期望产品提供不同的性能等级,可通过相关功能模块的变异设计或替换实现;个性需求的功能模块通过接口并联于产品总功能模型,与其他模块形成选配功能。该步骤的重点是实现产品的客户需求差异化功能项。

步骤 4 判断各类客户需求是否能够由功能模型满足。若满足需求,则输出功能模型,作为后续功能模块识别的数据源;否则,返回步骤 2,细化功能实现过程。

2.3 启发规则的功能模块识别

文献^[17-18]提出的主流、分支流和转换-传播

流规则,可对流转关系表达的产品功能模型进行模块规划。3类启发规则的模块划分方法为:1)主流。一种流转关系从进入产品开始,到流出产品终止,或在系统内发生转换终止,该流所经历的功能项组成一个功能模块。2)分支流。一种流转关系在某接口处发生分支,形成几个平行的功能分支流,则这些分支流各自形成功能模块,发生流分解处为模块接口。3)转换-传播流。对流转关系进行转换和传递的多个功能项可组成一个功能模块。

使用流转规则划分出的功能模块可能出现重复、是子模块或父模块的情况,需要对功能模块进行后续处理。依据公理化设计^[19]中的独立公理,尽量保证功能模块与客户需求的一一对应关系,使总体功能模块数量最少。

建立功能模块识别流程如图 5 所示。基于产品功能模型,依次使用主流、分支流和转换-传播流得到各自的功能模块集合;进而根据识别出模块的重复或嵌套情况,分析功能模块所满足的需求项;依据独立公理,排除冗余模块,建立功能模块与需求项的一一对应关系,有利于减少模块结构设计的耦合影响。

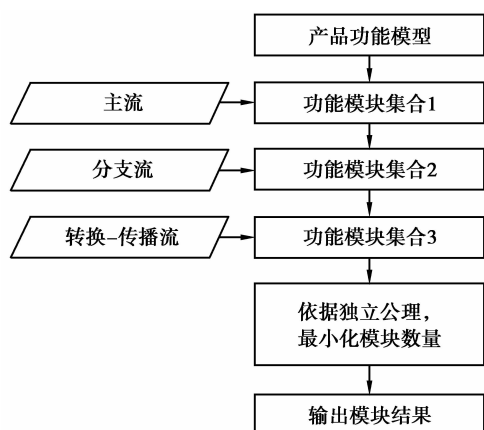


图 5 基于启发规则的功能模块识别

2.4 产品平台模块类别的设置

对识别出的功能模块,可根据模块功能属性进一步决定模块所属类别,其识别特征是:

1)若功能模块可在平台派生的多个产品中通用,为产品提供基本功能,则设置为基本模块。

2)若功能模块可通过变异设计或替换,提供不同性能指标,满足客户的不同性能需求,则设置为柔性模块。

3)若功能模块是提供客户可选配的差异功能,呈现出大幅度提高客户满意度的特点,则可归类为个性模块。

在需求驱动的柔性平台功能模块识别方法中,

模块划分的细致和准确程度还依赖于产品功能建模的准确性,同时,规则的使用还需要一定的专家经验。但是,由于不需要建立产品的数学模型,该方法具有较广的应用范围。设计者可根据产品调节效果优劣,细化产品的功能模型,直到获得满意的柔性平台模块规划方案。

3 实例

3.1 液压支架需求获取与处理

大型液压支架^[20]是综采成套装备中的重要支护设备,它维持工作面安全作业空间,并推移工作面采运设备。在一个工作面中,多台支架协同动作,实现自动化采掘支护。客户根据围岩地质条件、工作面高度和特殊矿压环境等因素,定制支架的支撑阻力、支护高度等性能参数,液压支架是典型的 ETO 类复杂机电产品。

结合项目合作企业,列举液压支架的部分客户需求项,如表 2 所示。构建需求项的模糊 Kano 问卷,向企业的煤矿支架用户发送 56 份调查问卷,收回有效问卷 50 份。

表 2 液压支架的待调查客户需求设置

需求代号	需求描述
R_1	移架速度快
R_2	防爆照明系统
R_3	支架初撑力大
R_4	液压系统可靠性高
R_5	放顶煤尾梁
R_6	远程自动控制
R_7	支护强度满足需求
R_8	外形简洁,颜色统一

基于调查反馈数据,使用模糊 Kano 模型进行需求处理,获得各客户需求项隶属情况如表 3 所示,标记每行向量的最大值,表示需求属于相应类别。

表 3 实际调查获得需求项属于各分类的频度

需求项	M	O	A	I	R	Q
R_1	11	14	12	9	0	0
R_2	10	9	13	9	0	0
R_3	7	14	14	9	0	0
R_4	14	9	14	14	0	0
R_5	13	12	15	7	0	0
R_6	14	9	13	10	0	0
R_7	14	12	10	10	0	0
R_8	14	11	11	15	0	0
隶属项和	3	2	2	1	0	0

分析表 3 可得:

1) 液压系统高可靠性 R_4 、远程自动控制 R_6 和支护强度满足 R_7 是产品的基本需求,需要优先满足;2) 移架速度快 R_1 和支架初撑力大 R_3 属于性能需求,不同客户期望不同的性能指标;3) 防爆照明系统 R_2 和放顶煤尾梁 R_5 满足客户的特殊功能需求,属个性需求类;4) 外观需求 R_8 属于无关紧要需求,可在功能规划阶段暂不考虑。

3.2 支架功能模块识别与分类

液压支架以高压乳化液作为动力源,通过液压缸将流体动能转换为推力,配合控制信号完成支架的升柱、支撑、降柱、推移工作循环。建立支架功能“黑箱”模型,如图 6(a)所示。

液压支架的基本功能可总结为可靠支撑和可靠控制,根据图 6(a)和 2.2 节步骤 2,首先使用物料流

和能量流表达支架的支撑模型,进而配合信号流表达支架的控制模型,形成初步的功能模型如图 6(b)所示。对初步功能模型的细化操作体现在:1)不同支撑力和移架速度的性能需求表现为模型中的立柱、泵站等组件的柔性调节;2)放顶煤等个性需求可加入到初步功能模型;3)对子功能项进行细化和排列。因此,形成支架的整体功能模型如图 6(c)所示。

采用主流、分支流和转换-传播流识别的功能模块如图 6(c)中虚线框所示。乳化液经输入、传送和分配,进而发生转换,则依据主流规则组成动力分配模块 2。流体动能经分配后发生分支,进行动力转换并传递,如动力转换为支撑力,并支撑底板和顶板之间的空间等。依据分支流和转换-传播流规则,形成功能模块 3~模块 6。转换-传播流规则可识别出防爆照明模块 1 和放顶煤功能模块 7。

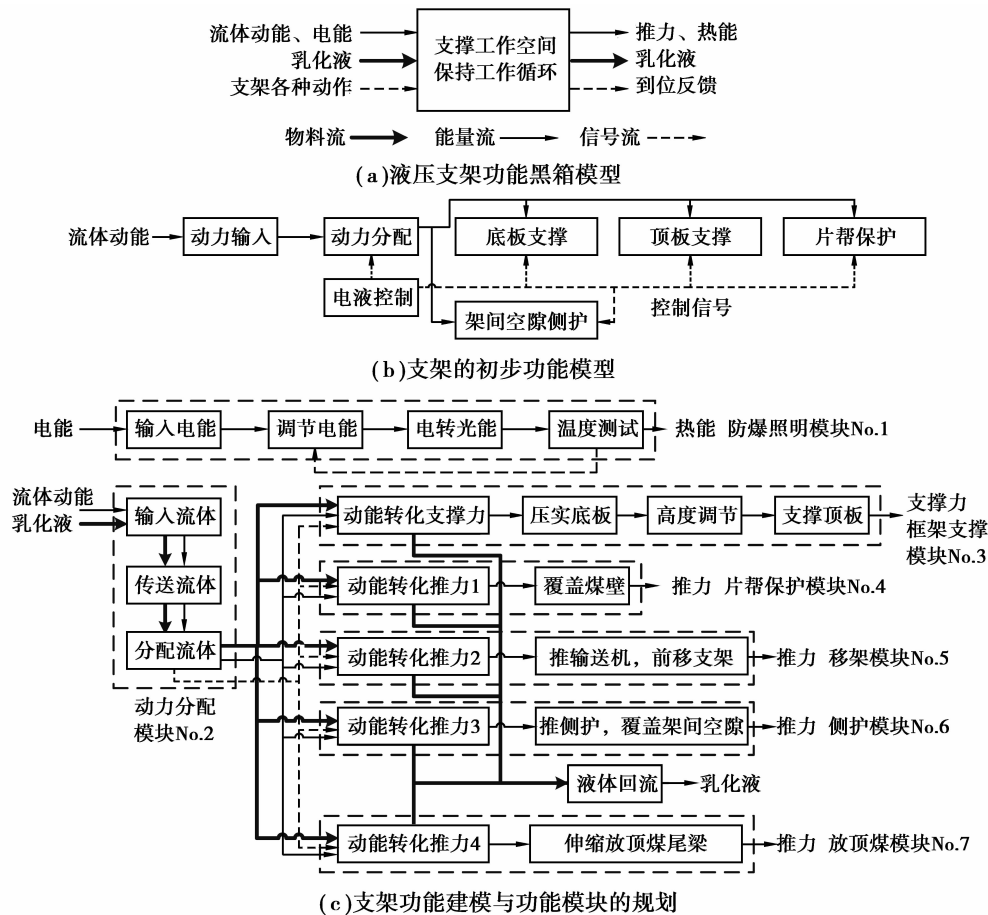


图 6 基于流转分析的液压支架功能模块规划

根据模块的功能,模块类别可设置为:

- 1) 流体分配模块 2 可在同平台的各型号支架间通用,提供动力分配的基本功能,为基本模块。
- 2) 模块 3、4、5、6 提供支架的整体支护功能,但性能指标可调节,为柔性模块。
- 3) 模块 1 和模块 7 提供可选配的功能,为个性模块。

3.3 方案有效性分析

复制液压支架的调查反馈数据,将每行向量中的最大值元素赋值为 1,其他元素赋值为 0;有多个元素值相同时,按照 $M > O > A > I > R > Q$ 的优先级赋值,构建传统 Kano 模型的调查数据。对比传统 Kano 模型、模糊 Kano 模型阈值 $\alpha = 0.4$ 和 $\alpha =$

0.5 时的需求分类效果,如表 4 所示。

表 4 需求分类效果对比

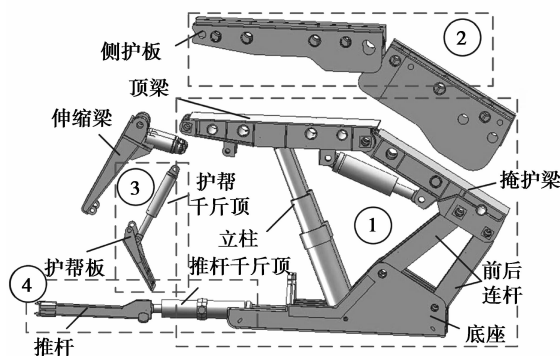
分类变量	传统 Kano	模糊 Kano	
		$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$
M	R_6, R_7	R_4, R_6, R_7	R_4, R_6, R_7
O	R_1, R_3, R_4	R_1, R_3	R_1, R_3
A	R_2, R_5	R_2, R_5	R_2, R_5
I	R_8	R_8	R_8

从表 4 可以看出:1)传统 Kano 和模糊 Kano ($\alpha=0.4$)相比,传统 Kano 未区分出无关需求 R_8 ,且 R_4 的类别重要度降低,表明由于采用模糊问题选项,模糊 Kano 模型具有比传统 Kano 模型更高的分类精度;2)模糊 Kano 的分类阈值不同,仅引起表 3 中隶属频度数值不同,对表 4 中需求分类结果无显著影响,证明了模糊 Kano 模型具有分类阈值的鲁棒性特征。

以大采高掩护式液压支架(图 7(a))为例,构建三维实体造型如图 7(b)所示,分析液压支架功能模块规划的效果。图 6(b)中模块 3 提供基本支护功能,对应图 7(b)中底座、顶梁、掩护梁、前后连杆和立柱组成的区域 1。其中,立柱提供动力转换功能,底座、连杆和掩护梁组成调高机构,保持顶梁前端运动轨迹为近似直线。



(a)掩护式液压支架装配体



(b)液压支架三维造型与模块规划

图 7 液压支架的实体和模块化组合

侧护千斤顶和侧护板组成侧护功能模块 No. 6,为图 7(b)中区域 2;护帮千斤顶和护帮板形成动力提供与传递组合,实现片帮保护功能,为图 7(b)中区域 3,实现模块 4 的片帮保护功能。通过实际产品结构分析,证明了所提出功能模块识别方法的有效性。

4 结 论

为在产品概念设计阶段识别产品组合的功能模块,提出需求驱动的柔性平台模块识别集成方法。采用模糊 Kano 模型需求分类法,提出需求类别扩展法,细化了产品功能模型的建模步骤,进而使用启发规则进行功能模块识别,并根据功能模块对应的需求类别,设置模块的类别。大型液压支架平台模块化设计实例,证明了模糊 Kano 模型需求分类的高效性和鲁棒性;通过与实际产品结构对比,证明了模块划分的正确性。基于特征的功能模块识别自动化算法,是需要进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] 杨亚楠,史明华,肖新华. 基于可适应模块化产品平台的产品族设计方法研究[J]. 机床与液压,2008,36(5):260-263.
YANG Yanan, SHI Minghua, XIAO Xinhua. The research of products family design based on AMPP[J]. Machine Tool and Hydraulics,2008,36(5):260-263.
- [2] 国家自然科学基金委工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011-2020)[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [3] 常燕,武建伟,潘双夏,等. 基于本体表达的客户需求拓展分析[J]. 浙江大学学报:工学版,2009,43(3):430-433.
CHANG Yan, WU Jianwei, PAN Shuangxia, et al. Customer requirements expansion analysis based on ontology description [J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science,2009,43(3):430-433.
- [4] 蒋建东,张立彬,胥芳,等. 面向大批量定制生产的小型农业作业机客户需求模型的构建研究[J]. 农业工程学报,2005,21(9):98-102.
JIANG Jiandong, ZHANG Libin, XU Fang, et al. Model for customer requirements of small agricultural machinery product under mass customization [J]. Transactions of the CSAE,2005,21(9):98-102.
- [5] Yadav O P, Goel P S. Customer satisfaction driven quality improvement target planning for product development in automotive industry[J]. International Journal of Production Economics, 2008, 113 (2):

- 977-1011.
- [6] Stone R B, Kurtadikar R, Villanueva N, et al. A customer needs motivated conceptual design methodology for product portfolio planning[J]. *Journal of Engineering Design*, 2008, 19(6):489-514.
- [7] 常艳,潘双夏,郭峰,等. 面向模块化设计的客户需求分析[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2008, 42(2):248-252.
CHANG Yan, PAN Shuangxia, GUO Feng, et al. Customer requirement analysis for modular design[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2008, 42(2):248-252.
- [8] 李柏姝,雒兴刚,唐加福. 基于灵敏度分析的产品族规划方法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(15):117-124.
LI Baishu, LUO Xinggang, TANG Jiafu. Sensitivity analysis-based method for product family design[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(15):117-124.
- [9] Chen S L, Jiao R J, Tseng M M. Evolutionary product line design balancing customer needs and product commonality [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2009, 58(1):123-126.
- [10] 但斌,姚玲,经有国,等. 基于本体映射面向模糊客户需求的产品配置研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(2):225-232.
DAN Bin, YAO Ling, JING Youguo, et al. Product configuration oriented to fuzzy customer requirement based on ontology mapping[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(2):225-232.
- [11] 王海军,孙宝元,张建明,等. 客户需求驱动的产品配置设计[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(4):85-91.
WANG Haijun, SUN Baoyuan, ZHANG Jianming, et al. Modular product configuration design for customer requirement driven engineering[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(4):85-91.
- [12] Hong G, Xue D Y, Tu Y L. Rapid identification of the optimal product configuration and its parameters based on customer-centric product modeling for one-of-a-kind production[J]. *Computers in Industry*, 2010, 61(3):270-279.
- [13] Sharif A M M, Tamaki J. Analysis of Kano-model-based customer needs for product development [J]. *System Engineering*, 2011, 14(2):154-172.
- [14] 李中凯,朱真才,程志红,等. 基于联合分析和定量指数的柔性产品平台多目标规划方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(8):1757-1765.
LI Zhongkai, ZHU Zhencai, CHENG Zhihong, et al. Multiobjective planning for flexible product platform based on conjoint analysis and quantitative indices[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(8):1757-1765.
- [15] Lee Y C, Huang S Y. A new fuzzy concept approach for Kano's model[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3):4479-4484.
- [16] 龙妍,黄素逸,刘可. 大系统中物质流、能量流与信息流的基本特征[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2008, 36(12):87-90.
LONG Yan, HUANG Suyi, LIU Ke. Basic characteristics of material flow, energy flow and information flow in large-scale systems[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2008, 36(12):87-90.
- [17] Stone R B, Wood K L, Crawford R H. A heuristic method for identifying modules for product architectures[J]. *Design Studies*, 2000, 21(1):5-31.
- [18] Chandrasekaran B, Stone R B, Mcadams D A. Developing design templates for product platform focused design [J]. *Journal of Engineering Design*, 2004, 15(3):209-228.
- [19] 张根保,曾海峰,王国强,等. 复杂机电产品质量特性解耦模型[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(5):7-15.
ZHANG Genbao, ZENG Haifeng, WANG Guoqiang, et al. Decoupling model of quality characteristics for complicated electromechanical products[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(5):7-15.
- [20] 王忠宾,赵啦啦,李舒斌,等. 支撑掩护式液压支架的优化设计[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(9):1037-1042.
WANG Zhongbin, ZHAO Lala, LI Shubin, et al. Optimization design for hydraulic-support of standing shield [J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(9):1037-1042.

(编辑 张 莘)