

基于模糊 Kano 模型和可拓创新法的特种运载抱罐车设计

陈国强^a, 郝亚苹^a, 申正义^b, 赵晨光^a, 张芳兰^a
(燕山大学 a.艺术与艺术学院 b.机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: **目的** 结合模糊 Kano 模型和可拓创新法, 解决特种运载抱罐车目前同质化严重、用户满意度低等问题。**方法** 提出基于模糊 Kano 模型和可拓创新法相结合的创新设计方法。首先, 对特种运载抱罐车展开可拓分析, 建立物元模型, 进行拓展分析并利用模糊 Kano 模型, 输出质量要素的重要程度, 提取关键设计要素。其次, 结合用户需求的数据分析结果, 利用可拓变换方法将所构建的特种运载抱罐车物元数学表征模型进行变换, 获取新的产品创意模型。最终利用优度评价法获取最优方案。**结果** 通过对特种运载抱罐车的优化设计, 实现在外观造型、安全性能以及功能特征等方面的提升。**结论** 证明集成模糊 Kano 模型和可拓创新方法相结合的设计方法能够提高特种运载抱罐车的用户满意度和市场竞争力。

关键词: 特种运载抱罐车; 可拓创新法; 模糊 Kano 模型; 产品设计

中图分类号: TB472 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)06-0205-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.06.022

Design of Special Carrying Tank Car Based on Fuzzy Kano Model and Extension Innovation Method

CHEN Guo-qiang^a, HAO Ya-ping^a, SHEN Zheng-yi^b, ZHAO Chen-guang^a, ZHANG Fang-lan^a
(a. School of Art and Design, b. School of Mechanical Engineering, Yanshan University,
Hebei Qinhuangdao 066004, China)

ABSTRACT: The work aims to combine the fuzzy Kano model and the extension innovation method to solve the problems of serious homogeneity and low user satisfaction of special carrying tank cars. An innovative design method based on the combination of the fuzzy Kano model and the extension innovation method was proposed. First of all, the extension analysis was carried out on the special carrying tank cars. A matter-element model was established. The expansion analysis was carried out and the fuzzy Kano model was used to output the importance of the quality elements and extract the key design elements. Secondly, combined with the data analysis results of the user's needs, the matter-element mathematical representation model of the special carrying tank cars was transformed by the extension transformation method, and a new product creative model was obtained. Finally, the optimal solution was obtained through the goodness evaluation method. Through the optimized design of the special carrying tank cars, the appearance, safety performance and functional characteristics were improved. It is proved that the design method combining the integrated fuzzy Kano model and the extension innovation method can improve the user satisfaction and market competitiveness of the special tanker.

KEY WORDS: special carrying tank car; extension innovation method; fuzzy Kano model; product design

无轨运输抱罐车是钢铁行业不可或缺的重型机械装备^[1], 能够实现冶金渣安全、高效运输, 对钢铁行业的发展有极大的促进作用^[2]。可拓创新法和模糊

Kano 模型在产品设计领域中已得到广泛应用。李仔浩等^[3]通过可拓设计方法及逆向思维模式, 提出产品创意设计流程, 并用实例验证了该设计流程的可行性

收稿日期: 2022-10-23

基金项目: 国家社科基金艺术学项目 (21BG125)

作者简介: 陈国强 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高端装备创新设计理论及方法。

通信作者: 郝亚苹 (1996—), 女, 硕士生, 主攻高端装备创新设计。

和合理性。杨刚俊等^[4]通过论述可拓学的物元模型及菱形思维方法,对比 TRIZ 理论解决矛盾的方法,提出两者相结合的创新设计方法,并验证了可行性; Zhang 等^[5]以可拓学的创新方法为基础,对南航机场自助航站楼进行创新设计,证明可拓学的创新方法可提升设计的科学性和效率。Gu^[6]为了解决核电厂人机界面设计中颜色差异和工作性能之间的对立问题,提出一种可拓物元分析方法,将该方法应用于人机界面的设计中,有效提高了工人工作的操作效率。王军等^[7]将可拓分析和 TRIZ 中发明问题解决原理相结合,提出两者相结合的创新设计方法,并通过营地手推车的实例设计证明集成设计方法能够提高设计问题的解决效率。陈香等^[8]利用 TOPSIS 法对用模糊 Kano 模型分类后的需求要素的重要度进行筛选和排序,得到合理的设计方案,提出两者相结合的产品设计方法,并以实例验证了可行性。廖勇强^[9]利用 Kano 模型将用户需求转化为设计要素,并在下肢骨骼机器人各个结构部件的设计中应用可拓学的基元理论,解决了设计中部件之间存在的矛盾。

利用可拓创新法解决设计问题具有一定的优势,但在用户需求要素获取上存在明显不足,同时在重要程度排序上较为模糊,对关键需求要素提取不够精确,模糊 Kano 模型可有效解决此问题。本文提出基于模糊 Kano 模型和可拓创新法的设计流程,在设计应用中充分发挥集成理论互补的优势,为特种运载抱罐车的设计研究提供方法基础。

1 特种运载抱罐车现状分析

通过对国内外特种运载抱罐车的调研分析,国外对于特种运载抱罐车的研究较国内早且完善^[10]。起初,国内钢铁企业为了满足自身对于冶金渣运输的需求,主要靠进口国外的设备。国内自主研发的国产抱罐车相对较少,不能满足市场需求,经过相关企业加大对特种运载抱罐车研发投入的力度,针对国内企业生产的特种运载抱罐车产品,相关技术的研究不断有新的突破,车辆组件国产率逐渐提高,一些具有代表性的企业已经可以自主生产出针对不同用户需求和的工作环境的产品。

随着产品的迭代更新速度不断加快,目前,特种运载抱罐车承载量、控制系统等各方面性能不断完善,但存在造型呆板杂乱、安全性不高和功能细节完善度低等问题,以致用户的满意度未达到理想期望值。本文以 SPC70 型号的特种运载抱罐车为设计对象,见图 1,进行优化设计。该产品目前在以下几个方面存在一定的问题:

- 1) 外观造型: 同质化严重, 缺少设计感。
- 2) 功能特征: 功能较单一, 不能满足用户需求。
- 3) 安全性能: 安全防护措施少, 安全性问题频发。
- 4) 人机协调: 操作流程复杂, 未充分考虑用户



图 1 SPC60 特种运载抱罐车
Fig.1 SPC60 special carrying tank car

的使用习惯与基本认知, 导致工作效率较低。

- 5) 品牌文化: 品牌识别性较弱。

2 集成创新设计流程

2.1 模糊 Kano 需求模型概述

Kano 模型是由日本教授狩野纪昭提出的能够有效提高产品用户满意度的分析方法^[11]。在产品的设计开发中, 该方法可以协助设计师获取用户需求, 并根据科学评估方法将用户需求进行归类, 获取需求的优先级, 进而获取用户满意度和产品相关属性之间的关系, 促使产品更加符合用户的要求。

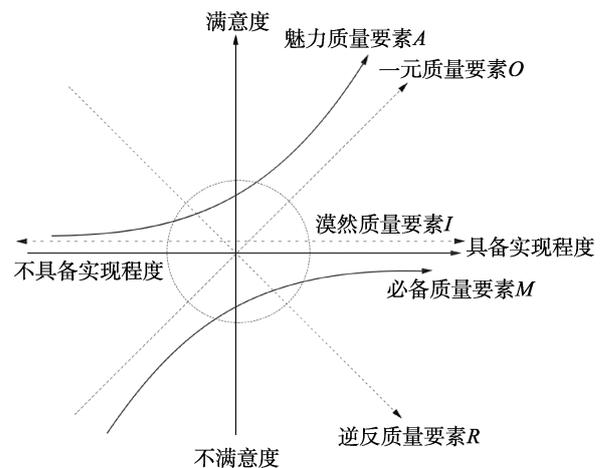


图 2 Kano 需求模型图
Fig.2 Diagram of Kano need model

Kano 模型将产品的服务质量要素分为 5 类^[12], 见图 2。基本型需求 (M) 是指用户认为产品所必须具备的属性或功能, 该需求不满足用户时, 用户满意

度会极大降低, 当满足用户时, 不影响用户满意度; 期望型需求 (O) 是指该类需求满足用户时, 用户满意度会极大提升, 当不满足时, 满意度不会提升, 两者之间为线性关系; 魅力质量要素 (A) 是指当不具备该类需求时, 用户满意度不会有明显改变, 当具备时, 用户满意度则会极大提升; 无差异型需求 (I) 是指该类需求的存在或不存在都不会对用户满意度造成影响; 反向型需求 (R) 是指提供该类需求反而会降低用户的满意度^[13]。

模糊 KANO 模型弥补了传统 KANO 模型方法中用户给定确定性答案的缺陷, 在用户问卷调查中利用区间模糊数 $[0,1]$ 代表某个要素的需求程度, 用户根据需求的重要度进行打分, 模糊思维更有利于解决设计中的不确定问题^[14], 能够更精确地获取用户的关键需求, 为产品的设计实践奠定基础。

2.2 可拓创新法概述

可拓创新法是快速产生有效创意的方法之一, 其体系具有模型化、可变化、收敛化和整体化的特点^[15]。可拓创新法可表达产品设计中的矛盾问题^[16], 而且能利用可拓学中可拓变换和可拓推理两个主要工具, 为设计中的矛盾问题提供解决方案^[17]。应用可拓创新法的四个步骤如下:

步骤一: 物元可拓模型的建立, 表达形式见式 (1), 其中 N 表示分析的对象, C_1 表示该对象具有的某个特征, V_1 表示该对象关于此特征的量值。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N, C_1, V_1 \\ C_2, V_2 \\ \vdots \\ C_n, V_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

步骤二: 拓展分析。主要包括发散分析、相关分析和蕴含分析等分析方法, 其中发散分析是比较常用和简单的一种分析方法, 即对物元中的对象、特征或量值进行发散。

步骤三: 可拓变换, 根据拓展分析的结果, 运用可拓变换相关方法, 形成新的解决方案; 主动变换, 主要包括分解、增删、扩缩、置换变换等, 增删变换即存在一个物元 M_{oi} , 并且 $TM_{oi} = M_{oi} \oplus M_{ot}$, 即存在一种变换 T , 使 $TM_{oi} = M_{oi} \oplus M_{ot}$, 则称变换 T 为物元 M_{oi} 的增加变换, 记作 $TM_{oi \oplus M_{ot}}$ 。置换变换指在对象、特征、量值三者中, 一个或多个因素发生改变; 传导变换: 如果存在一个物元 M_{oi} 发生主动变换 T_{i1} 导致物元 M_{ot} 发生变换 T_{i2} , 使 M_{ot} 变为 M_{ot} , 则称 T_{i2} 为 T_{i1} 的一阶传导变换, 记作 $T_{i1} T_{ik}$ 。

步骤四: 优度评价。从技术、经济和社会等方面, 选取衡量指标, 确定权系数, 建立关联函数, 计算优度, 筛选出优度最高的设计方案, 具体流程见图 3。

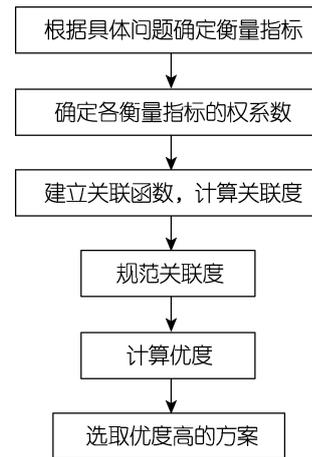


图 3 优度评价流程图

Fig.3 Flow chart of goodness evaluation

2.3 集成设计流程

目前, 产品的更新迭代速度逐步加快, 需求的类型也越来越多, 这导致产品必须以多样化的形式来满足不同人群的需求, 然而越来越复杂的产品设计环境需要科学的理论方法来引领设计实现。显然, 单一的设计方法已经无法支撑越来越复杂的设计要求, 因此, 集成化的理论研究十分必要, 它能够弥补单一理论的缺陷, 在产品设计领域成为更多学者的选择。特种运载抱罐车属于特殊性质的大型机械装备。工作环境的特殊性, 以及自身功能结构的复杂性, 使研发难度大、生产周期长, 设计相对复杂, 单一的设计理论知识无法满足需求。本课题提出可拓创新方法与模糊 Kano 需求模型集成的设计流程, 并运用在特种运载抱罐车的创新设计中, 能够解决设计中的矛盾问题, 输出用户满意度高的设计方案, 提高特种运载抱罐车在市场上的竞争力和用户满意度。流程图见图 4, 具体设计流程如下:

1) 建立特种运载抱罐车的初始可拓模型, 找到设计的出发点和切入点。

2) 初始产品模型的拓展分析: 利用文献研究、用户访谈及调查问卷的形式结合文献资料, 对特种运载抱罐车基础需求信息进行调研分析。结合整理出的基础需求信息, 利用发散分析方法对初始可拓模型进行拓展分析。

3) 需求属性归类 and 数据分析: 通过模糊 Kano 模型, 建立模糊矩阵、求解用户需求的隶属度向量、获取用户需求的属性类型, 计算需求要素的 Better-Worse 满意度系数和权重值。

4) 可拓变换建模, 输出新创意: 结合步骤三求出需求要素的所属类型及权重, 利用可拓变换方法将步骤二中的拓展分析结果进行可拓变换, 获取新的创意方案。

5) 创新方案的优选: 对获取的创意模型展开设计实践, 输出不同的设计方案。利用优度评价法对设

设计方案进行综合评价, 选取优度较高的设计方案。

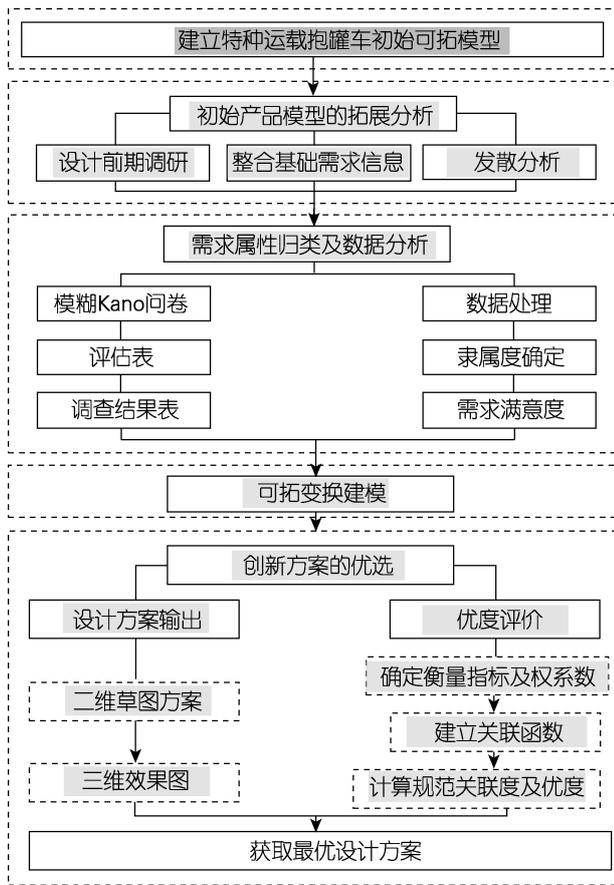


图4 模糊 Kano 模型和可拓创新法集成的设计流程图
Fig.4 Design flow chart of fuzzy Kano model and extension innovation method integration

3 设计实践应用

3.1 特种运载抱罐车可拓模型的建立

在多维物元模型中, 设计者和用户能以更直观的方式了解目前产品的相关信息。特种运载抱罐的物元模型如下:

$$M_0 = \begin{bmatrix} N, & \text{外观造型} & \text{一般} \\ & \text{功能特征} & \text{搬运钢渣} \\ & \text{安全性能} & \text{低} \\ & \text{人机协调} & \text{低} \\ & \text{品牌文化} & \text{不相符} \\ & \text{成本} & \text{高} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.2 初始产品模型的拓展分析

结合特种运载抱罐车的基础需求信息, 对最初建立的多维物元模型进行可拓分析。确定用户对特种运载抱罐车的需求是外观造型、功能特征、安全性能、品牌文化、人机协调、价格等方面, 经过拓展分析分别对应 M_{01} — M_{06} 。

- $M_{01} \left\{ \begin{array}{l} M_{11} = (N_{11}, \text{外观造型, 简约}) \\ M_{12} = (N_{12}, \text{外观造型, 稳重感}) \\ M_{13} = (N_{13}, \text{外观造型, 机械感}) \\ M_{14} = (N_{14}, \text{外观造型, 创新性}) \\ M_{15} = (N_{15}, \text{外观造型, 设计感}) \\ M_{16} = (N_{16}, \text{外观造型, 风格统一性}) \\ M_{17} = (N_{17}, \text{外观造型, 装饰性设计}) \\ M_{18} = (N_{18}, \text{外观造型, 多配色搭配}) \\ M_{19} = (N_{19}, \text{外观造型, 包裹性设计}) \end{array} \right.$
- $M_{02} \left\{ \begin{array}{l} M_{21} = (N_{21}, \text{功能特征, 向导指示}) \\ M_{22} = (N_{22}, \text{功能特征, 转运钢渣}) \\ M_{23} = (N_{23}, \text{功能特征, 智能监控}) \\ M_{24} = (N_{24}, \text{功能特征, 机动灵活}) \\ M_{25} = (N_{25}, \text{功能特征, 障碍物监测}) \\ M_{26} = (N_{26}, \text{功能特征, 远程操控}) \\ M_{27} = (N_{27}, \text{功能特征, 工作状态指示灯}) \end{array} \right.$
- $M_{03} \left\{ \begin{array}{l} M_{31} = (N_{31}, \text{安全性能, 警示条}) \\ M_{32} = (N_{32}, \text{安全性能, 警示灯}) \\ M_{33} = (N_{33}, \text{安全性能, 隔热板}) \\ M_{34} = (N_{34}, \text{安全性能, 报警装置}) \\ M_{35} = (N_{35}, \text{安全性能, 驾驶室防护}) \\ M_{36} = (N_{36}, \text{安全性能, 轮胎防护链条}) \\ M_{37} = (N_{37}, \text{安全性能, 扶手地面防滑}) \\ M_{38} = (N_{38}, \text{安全性能, 应急支腿}) \end{array} \right.$
- $M_{04} \left\{ \begin{array}{l} M_{41} = (N_{41}, \text{人机协调, 驾驶视野开阔}) \\ M_{42} = (N_{42}, \text{人机协调, 方便维修设备}) \\ M_{43} = (N_{43}, \text{人机协调, 扶梯高度适宜}) \\ M_{44} = (N_{44}, \text{人机协调, 驾驶环境舒适}) \end{array} \right.$
- $M_{05} \left\{ \begin{array}{l} M_{51} = (N_{51}, \text{品牌文化, 企业元素}) \\ M_{52} = (N_{52}, \text{品牌文化, 涂装表达}) \\ M_{53} = (N_{53}, \text{品牌文化, 象征元素}) \end{array} \right.$
- $M_{06} \{ M_{61} = (N_{61}, \text{价格, 120 ~ 200万}) \}$

3.3 需求属性归类和数据分析

利用拓展分析方法得到的离散分析模型 M_{01} — M_{06} 几乎包含了所有特种运载抱罐车预期的特点。结合上述模型, 将需求信息结合模糊 KANO 调查问卷整理出预设问题, 填写问卷者利用模糊区间[0,1]对正反两方面的问题进行评分, 见表1, 此次问卷通过线上线下两种方式发放给用户, 共计发放115份, 最终回收有效问卷共计100份, 回收率为87%。由表1的问卷可得到用户需求的相关信息, 以此进行分析和整理, 并根据表2进行评估, 判别各设计要素所属的类别, 实施过程如下:

1) 建立模糊矩阵: 依据表 1, 以设计要素 M_{11} 为例, 具备此要素的矩阵为 $X=[0.5 \ 0.4 \ 0.1 \ 0 \ 0]$, 不具备时矩阵为 $Y=[0 \ 0 \ 0 \ 0.2 \ 0.8]$, 则根据表 2 生成的交互评价矩阵为:

$$S = X^T Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.32 \\ 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0.08 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

表 1 模糊 Kano 问卷表
Tab.1 Fuzzy Kano questionnaire

类别	编号	设计要素	用户需求	满意	理应如此	无所谓	可接受	不满意
外观造型	M_{11}	对于简约的造型您认为如何?	具备	0.5	0.4	0.1	0	0
			不具备	0	0	0	0.2	0.8
			∴	∴	∴	∴	∴	∴
功能特征	M_{21}	对于向导指示的功能您认为如何?	具备	0.5	0.4	0.1	0	0
			不具备	0	0	0	0.2	0.8
			∴	∴	∴	∴	∴	∴
安全性能	M_{31}	对于警示条的作用您认为如何?	具备	0.5	0.4	0.1	0	0
			不具备	0	0	0	0.2	0.8
			∴	∴	∴	∴	∴	∴
人机协调	M_{41}	对于视野开阔您认为如何?	具备	0.5	0.4	0.1	0	0
			不具备	0	0	0	0.2	0.8
			∴	∴	∴	∴	∴	∴
品牌文化	M_{51}	对于企业元素的体现您认为何?	具备	0.5	0.4	0.1	0	0
			不具备	0	0	0	0.2	0.8
			∴	∴	∴	∴	∴	∴

表 2 Kano 评估表
Tab.2 Kano evaluation

用户需求	产品不具有某种特征				
	满意	理应如此	无所谓	可接受	不满意
满意	Q	A	A	A	O
应如此	R	I	I	I	M
无所谓	R	I	I	I	M
可接受	R	I	I	I	M
不满意	R	R	R	R	Q

2) 将表 2 的 Kano 评估表和矩阵 S 相结合可求出设计要素 M_{11} 的隶属向量 T 。根据表 2, 矩阵 S 中必备要素 M 为 S_{25} 、 S_{35} 、 S_{45} , 因此可以计算出必备要素 M 的隶属向量 $t_m=0.32+0.08+0=0.4$, 同理可以得到其他需求要素的隶属度, 由此可以得到设计要素 M_{11} 的隶属向量 $T_{f1} = \left(\frac{M}{0.4}, \frac{O}{0.4}, \frac{I}{0.1}, \frac{A}{0.1}, \frac{R}{0}, \frac{Q}{0} \right)$ 。

3) 同一个设计要素有可能表现为多个质量要素, 在此引入置信度水平 α , 如 T 中某要素值 $\geq \alpha$, 则用 1 表示该要素, 否则用 0 表示。则 $T_{M_{11}} = (1, 1, 0, 0, 0)$, 同时出现两个 1 时按照顺序取值, 要素 M_{11} 为必备要素 M 。

4) 通过对问卷调查表进行多次筛选和归类, 将得出的结论按照重要程度进行排序和归类。按照 M 、 A 、 I 、 R 的顺序对设计要素进行类别定义, 见表 3。

5) 对用户需求满意度进行 Better-Worse 计算。不同需求类型用户第 i 种用户需求所占比例, 分别记为 A_i 、 M_i 、 O_i 、 I_i 。利用功能属性归类的百分比公式进行计算, 式 (3) 中 S_i 表示添加此功能后的满意系数, 式 (4) 中 D_i 表示去掉此功能后的不满意系数。式 (5) 中设第 i 项用户需求的权重为 ω_i 。根据式 (5) 和调研的数据进行计算, 可直观地看到各个设计要素所属的质量要素类型及权重。

$$S_i = \frac{A_i + O_i}{A_i + O_i + M_i + I_i} \tag{3}$$

$$D_i = -1 \cdot \frac{A_i + O_i}{A_i + O_i + M_i + I_i} \tag{4}$$

$$\omega_i = \max \left\{ \frac{S_i}{\sum_{i=1}^m S_i}, \frac{|D_i|}{\sum_{i=1}^m |D_i|} \right\} \tag{5}$$

3.4 可拓变换建模

结合模糊 Kano 模型的需求分析结果, 对可拓模型 $M_{01} - M_{06}$ 进行可拓变换, 以获取新的产品创意模

表3 特种运载抱罐车质量要素分析及权重表
Tab.3 Analysis and weight of quality elements of special carrying tank cars

类别	编号	设计要素	隶属向量					SI	DI	权重 ω	类型	
			N_M	N_O	N_A	N_I	N_R					N_Q
外观造型	M_{11}	简约	55	32	9	4	0	0	0.41	0.87	0.051	M
	M_{12}	稳重感	24	22	52	2	0	0	0.74	0.46	0.042	A
	M_{13}	机械感	13	17	22	48	0	0	0.39	0.3	0.038	I
	M_{14}	创新性	17	20	49	14	0	0	0.69	0.37	0.039	A
	M_{15}	设计感	18	20	55	7	0	0	0.75	0.38	0.042	A
	M_{16}	风格统一性	20	15	10	65	0	0	0.25	0.35	0.032	I
	M_{17}	装饰性设计	13	15	70	2	0	0	0.85	0.28	0.048	A
	M_{18}	多配色搭配	24	49	20	7	0	0	0.69	0.73	0.043	O
	M_{19}	包裹性设计	19	55	22	4	0	0	0.77	0.74	0.043	O
功能特征	M_{21}	向导指示	65	15	18	2	0	0	0.33	0.80	0.047	M
	M_{22}	转运钢渣	68	9	20	3	0	0	0.29	0.77	0.046	M
	M_{23}	智能监控	36	44	13	7	0	0	0.57	0.80	0.047	O
	M_{24}	机动灵活	29	57	11	3	0	0	0.68	0.86	0.051	O
	M_{25}	障碍物监测	23	19	46	12	0	0	0.65	0.42	0.037	A
	M_{26}	远程操纵	23	15	54	8	0	0	0.69	0.38	0.039	A
	M_{27}	工作状态指示灯	18	17	61	4	0	0	0.78	0.35	0.044	A
安全性能	M_{31}	警示条	62	18	18	2	0	0	0.36	0.80	0.047	M
	M_{32}	警示灯	24	59	14	3	0	0	0.73	0.83	0.049	O
	M_{33}	隔热板	49	35	13	3	0	0	0.48	0.84	0.050	M
	M_{34}	报警装置	20	23	51	9	0	0	0.74	0.43	0.042	A
	M_{35}	驾驶室防护	23	42	25	10	0	0	0.67	0.65	0.038	O
	M_{36}	轮胎防护链	25	15	45	15	0	0	0.60	0.40	0.034	A
	M_{37}	扶手地面防滑	32	17	43	8	0	0	0.60	0.49	0.034	A
	M_{38}	应急支腿	58	15	14	13	0	0	0.29	0.73	0.043	M
人机协调	M_{42}	驾驶视野开阔	62	9	20	9	0	0	0.29	0.71	0.042	M
	M_{43}	方便维修设备	20	17	55	8	0	0	0.72	0.37	0.041	A
	M_{44}	扶梯高度适宜	17	28	43	12	0	0	0.71	0.45	0.04	A
	M_{45}	驾驶环境舒适	23	55	12	10	0	0	0.67	0.78	0.046	O
品牌文化	M_{51}	企业元素	23	14	54	9	0	0	0.68	0.37	0.038	A
	M_{52}	涂装表达	32	17	41	10	0	0	0.58	0.49	0.033	A
	M_{53}	象征元素	21	15	56	8	0	0	0.71	0.36	0.04	A

型。所建立的可拓模型 $M_{01}—M_{06}$ 基本包括了所有预期的产品特性。因此在进行可拓变换时，主要采用添加或删除变换的方式。

1) 对 $M_{01}—M_{06}$ 进行可拓变换如下：

$$T_{11}M_{01} = M_{11} \oplus M_{15} \oplus M_{18} \oplus M_{19} = M'_{011}$$

$$T_{12}M_{02} = M_{21} \oplus M_{22} \oplus M_{23} \oplus M_{24} \oplus M_{25} = M'_{012}$$

$$T_{13}M_{03} = M_{31} \oplus M_{32} \oplus M_{35} \oplus M_{38} = M'_{013}$$

$$T_{14}M_{04} = M_{41} \oplus M_{43} = M'_{014}$$

$$T_{15}M_{05} = M_{51} \quad T_{16}M_{06} = M_{61}$$

则上述变换为： $T_1 = T_{11} \wedge T_{12} \wedge T_{13} \wedge T_{14} \wedge T_{15} \wedge T_{16}$ ，

由此可得到的产品创意模型为： $M_{011} = M'_{011} \wedge$

$$M'_{012} \wedge M'_{013} \wedge M'_{014} \wedge M_{51} \wedge M_{61}$$

$$T_1 M_0 = M_{011} =$$

N	外观造型	简约
	外观造型	多配色搭配
	外观造型	包裹性设计
	外观造型	设计感
	功能特征	转运钢渣
	功能特征	向导指示
	功能特征	智能监控
	功能特征	机动灵活
	功能特征	障碍物监测
	安全性能	警示条
	安全性能	驾驶室防护
	安全性能	应急支腿
	安全性能	警示灯
	人机协调	扶梯高度适宜
	人机协调	驾驶视野开阔
	品牌文化	企业元素
	价格	155万

2) 对 $M_{01} \sim M_{06}$ 进行可拓变换如下:

$$T_{21} M_{01} = M_{11} \oplus M_{14} \oplus M_{17} \oplus M_{18} \oplus M_{19} = M'_{021};$$

$$T_{22} M_{02} = M_{21} \oplus M_{24} \oplus M_{27} \oplus M_{28} \oplus M_{29} = M'_{022}$$

$$T_{23} M_{03} = M_{31} \oplus M_{33} \oplus M_{35} \oplus M_{36} \oplus M_{38} = M'_{023}$$

$$T_{24} M_{04} = M_{41} \oplus M_{42} = M'_{024}$$

$$T_{25} M_{05} = M_{51} \oplus M_{52} = M'_{025} \quad T_{26} M_{06} = M_{62}$$

则上述变换为: $T_2 = T_{21} \wedge T_{22} \wedge T_{23} \wedge T_{24} \wedge T_{25} \wedge T_{26}$

由此可得到的产品创意模型为: $M_{021} = M'_{021} \wedge$

$$M'_{022} \wedge M'_{023} \wedge M'_{024} \wedge M'_{025} \wedge M_{62}$$

$$T_1 M_0 = M_{021} =$$

N	外观造型	多配色搭配
	外观造型	简约
	外观造型	包裹性设计
	外观造型	装饰性设计
	外观造型	创新性
	功能特征	转运钢渣
	功能特征	智能监控
	功能特征	机动灵活
	功能特征	工作状态指示灯
	功能特征	障碍物监测
	安全性能	警示条
	安全性能	隔热板
	安全性能	应急支腿
	安全性能	驾驶室防护
	安全性能	轮胎防护链
	人机协调	方便维修设备
	人机协调	驾驶视野开阔
	品牌文化	涂装表达
	品牌文化	企业元素
	价格	165万

3) 对 $M_{01} \sim M_{06}$ 进行可拓变换如下:

$$T_{31} M_{01} = M_{11} \oplus M_{15} \oplus M_{18} \oplus M_{19} = M'_{031};$$

$$T_{32} M_{02} = M_{21} \oplus M_{22} \oplus M_{23} \oplus M_{24} \oplus M_{25} = M'_{032}$$

$$T_{33} M_{03} = M_{31} \oplus M_{32} \oplus M_{35} \oplus M_{38} = M'_{033}$$

$$T_{34} M_{04} = M_{41} \oplus M_{43} = M'_{034}$$

$$T_{35} M_{05} = M_{51} \quad T_{36} M_{06} = M_{63}$$

则上述变换为: $T_3 = T_{31} \wedge T_{32} \wedge T_{33} \wedge T_{34} \wedge T_{35} \wedge T_{36}$

由此可得到的产品创意模型为: $M_{031} = M'_{031} \wedge$

$$M'_{032} \wedge M'_{033} \wedge M'_{034} \wedge M_{51} \wedge M_{63}$$

$$T_1 M_0 = M_{031} =$$

N	外观造型	多配色搭配
	外观造型	简约
	外观造型	包裹性设计
	外观造型	装饰性设计
	外观造型	设计感
	功能特征	转运钢渣
	功能特征	智能监控
	功能特征	机动灵活
	功能特征	工作状态指示灯
	功能特征	远程操控
	安全性能	警示条
	安全性能	报警装置
	安全性能	应急支腿
	安全性能	驾驶室防护
	安全性能	扶手地面防滑
	人机协调	方便维修设备
	人机协调	驾驶视野开阔
	品牌文化	涂装表达
	品牌文化	企业元素
	价格	175万

3.5 创新方案的优选

经过可拓变换获取三个新的产品创意模型分别为 M_{011} 、 M_{021} 、 M_{031} 。根据创意模型展开设计实践, 输出三套设计方案, 三个方案的草图见图 5, 效果图见图 6。利用优度评价法对方案进行综合评价, 选出最优解。

确定衡量指标: 特种运载抱罐车的衡量指标主要从技术、经济、社会等方面进行考虑, 结合前文的调研分析结果, 确定特种运载抱罐车方案选择的衡量指标集为:

$$MI = \{MI_1, MI_2, MI_3\} = \left\{ \begin{array}{l} MI_1 = \{\text{用户需求, 需求度高}\} \\ MI_2 = \{\text{技术, 有创新且能实现}\} \\ MI_3 = \{\text{成本, 120} \sim \text{200万}\} \end{array} \right\}$$

将三个衡量指标按照不同的要求划分为不同的子指标, 成本 $MI_3 = \{120 \sim 200\text{万}\}$, 用户需求 $MI_1 \in \{\text{高, 一般}\}$, 技术: $MI_2 \in \{\text{根本性创新, 一般创新, 无创新}\}$



图5 草图方案
Fig.5 Sketch plan



图6 效果图
Fig.6 Renderings

确定权系数：权系数的大小直接影响方案综合优度的高低，为了方案评价结果的合理性，在咨询相关专家和资料调研的基础上，确定各级衡量指标的权系数。使 MI_1, MI_2, MI_3 的权系数为 $\alpha_1 = 0.3, \alpha_2 = 0.3, \alpha_3 = 0.4$ 。

建立关联函数，衡量指标 MI_1 用户需求，此衡量指标无法用具体数值衡量，可利用离散型关联函数进行表达，如下：

$$K_1(x) = \begin{cases} 1, & \text{高} \\ 0, & \text{一般} \end{cases}$$

三个方案的关联度分别为： $K_{11}(x) = 0, K_{12}(x) = 1, K_{13}(x) = 0$ 。

衡量指标 MI_2 技术创新程度，此衡量指标无法用具体数值衡量，可利用离散型关联函数进行表达，如下：

$$K_2(x) = \begin{cases} 1, & \text{根本性创新} \\ 0, & \text{一般性创新} \\ -1, & \text{无创新} \end{cases}$$

经分析三种方案都属于一般性创新，关联度分别为： $K_{21}(x) = 0.2, K_{22}(x) = 0.5, K_{23}(x) = 0.3$ 。

衡量指标 MI_3 成本，最佳成本区间为 135~200 万，最佳成本为 167.5 万，即最优点在中间，正域值为 $X = \langle a, b \rangle = \langle 135 \text{万}, 200 \text{万} \rangle$ ， $M = \frac{a+b}{2} = 167.5 \text{万}$ ，此指标的简单关联函数如下：

$$K_3(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{b-a}, & x \leq \frac{a+b}{2} \\ \frac{2(b-x)}{b-a}, & x \geq \frac{a+b}{2} \end{cases} \quad (6)$$

三个方案的关联度分别为： $K_{31}(155) = 0.615,$

$K_{32}(165) = 0.923, K_{33}(175) = 0.769$ 。

计算规范关联度：根据式 (7) 可计算出三个方案的规范关联度见表 4。

$$K_i(O_j) = \frac{K_i(O_j)}{\max |K_i(x)|} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

表4 不同方案的规范关联度
Tab.4 Normative relevance of different plans

M_{011}	M_{021}	M_{031}
0	1	0
0.4	1	0.6
0.67	1	0.83

计算优度：求解三个方案的优度，见式 (8)：

$$C(Z_j) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \cdot \begin{bmatrix} k_{1j} \\ k_{2j} \\ \vdots \\ k_{nj} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot k_{ij} \quad (8)$$

$C(Z_1) = \alpha_1 \cdot k_{11}, \alpha_2 \cdot k_{21}, \alpha_3 \cdot k_{31} = 0.328$ ； $C(Z_2) = \alpha_1 \cdot k_{12}, \alpha_2 \cdot k_{22}, \alpha_3 \cdot k_{32} = 0.85$ ； $C(Z_3) = \alpha_1 \cdot k_{13}, \alpha_2 \cdot k_{23}, \alpha_3 \cdot k_{33} = 0.422$
优度计算结果为，方案二优度值最高 $C(Z_2) = 0.85$ ，即方案二为最优方案。方案二的效果图和细节展示见图 7 和图 8，尺寸图见图 9。

1) 外观造型方面：整体采用直线、斜切和倒角造型，简约且具有几何美学；动力舱和驾驶舱采取包裹性设计，改变部件杂乱裸露的状态，具有整体性和创新性，见图 7 中 1 和 2；多配色方案，以黄加黑和白加黑为主要色彩搭配，见图 9。

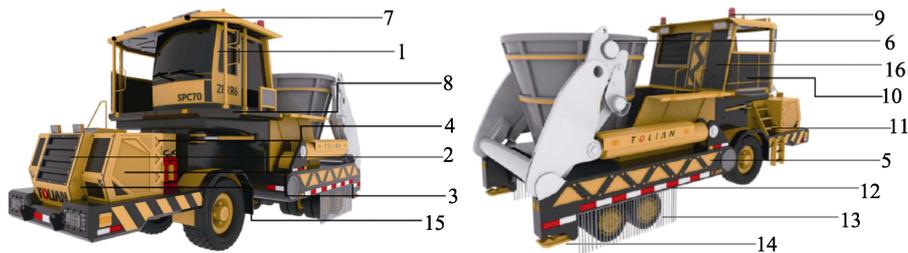
2) 功能特征方面：在满足基本功能转运冶金渣的基础上（见图 7 中 6），增加智能监控功能见图 7 中 7，可实时监测周围环境，保证车辆运行的安全性；转向切角设计，增加特种运载抱罐车转弯时的机动灵

活性, 见图 7 中 8; 工作状态指示灯见图 7 中 9, 增强功能配置与造型设计的统一性。

3) 安全性能方面: 警示标志, 见图 7 中 5、12; 驾驶室接近罐体的部分增加隔热板见图 7 中 16, 提高驾驶员使用中的安全性; 应急支腿设计保证冶金渣运输的安全性, 见图 7 中 14; 轮胎防护链条见图 7 中 13, 防止运输过程中高温冶金渣的喷溅造成轮胎损坏。

4) 人机协调方面: 可拆卸设计, 方便维修设备, 提高作业效率, 见图 7 中 3; 增加前车窗面积, 扩大驾驶视野, 见图 7 中 1。

5) 品牌文化方面: 增加企业元素的表达, 提高企业的辨识度, 如 logo 的应用; 将鲨鱼牙齿作为载体并抽象为三角形, 运用在涂装的表达中, 三角形代表稳定性, 象征特种运载抱罐车的力量感, 有一定的警示作用, 见图 7 中 4、5。



1—包裹性设计的驾驶舱; 2—包裹性设计的动力舱; 3—可拆卸挡板; 4、5—三角形涂装; 6—渣罐; 7—监控; 8—转向斜角设计; 9—警示灯; 10—护栏; 11—楼梯; 12—反光条; 13—防护链条; 14—应急支腿支架; 15—支架; 16—隔热板。

图 7 方案二展示

Fig.7 Diagram of Plan 2



图 8 细节展示

Fig.8 Diagram of details



图 9 方案二 M₀₂₁

Fig.9 M₀₂₁ of Plan 2



图 10 方案二不同视图展示

Fig.10 Different view display of Plan 2

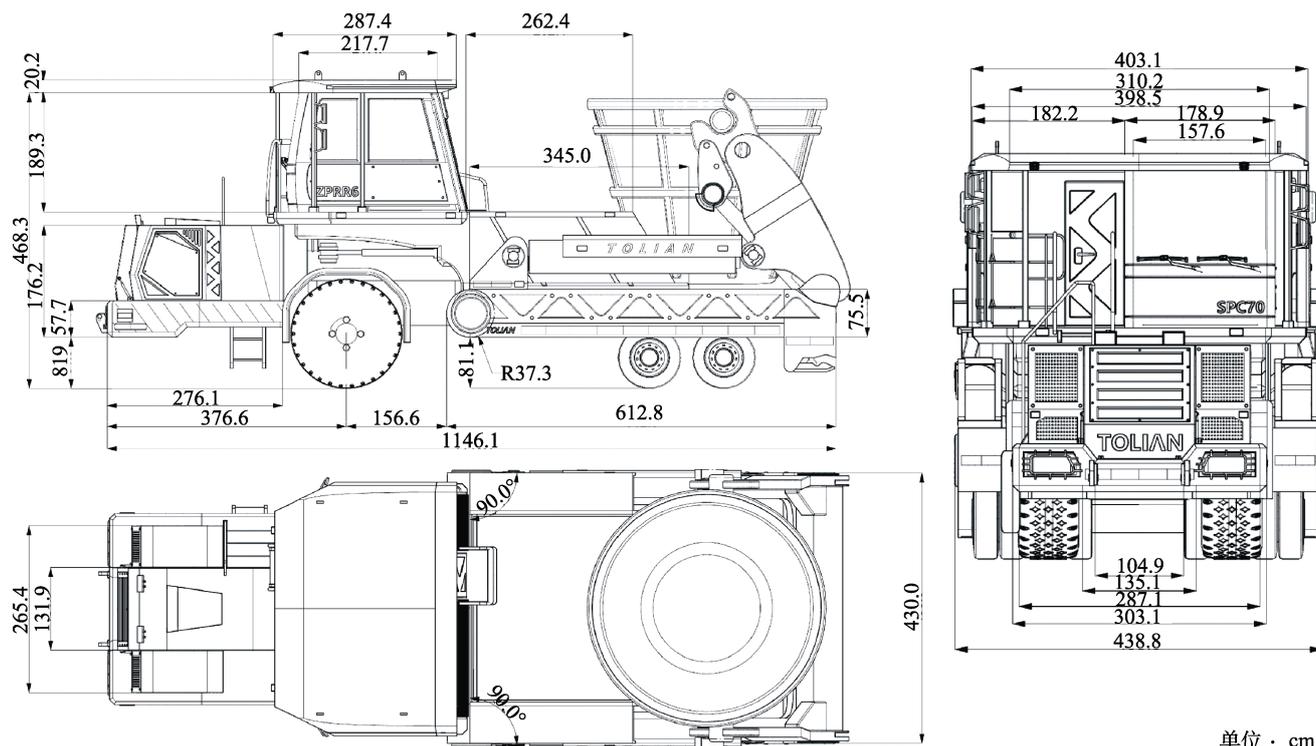


图 11 方案二尺寸图

Fig.11 Dimensional drawing of Plan 2

单位: cm

4 结语

特种运载抱罐车自身属性特点和工作环境的特殊性导致设计相对复杂。本文提出集成可拓创新法和模糊 Kano 模型的创新设计流程对特种运载抱罐车展开设计研究,通过基元理论建立特种运载抱罐车的形式化模型,利用模糊 Kano 需求模型对用户需求进行分析以确定特种运载抱罐车设计要素特征集。结合模糊 Kano 需求模型输出的质量要素所属类型及权重值,进行拓展变换输出不同的设计方案,最后利用优度评价方法,筛选出最优解。结果表明,可拓创新法和模糊 Kano 模型集成设计流程能有效解决特种运载抱罐车设计中存在的问题,可为其他同类产品的的设计提供一些参考。

参考文献:

- [1] 李利民, 蔡安江. 轮胎式渣罐车发展现状与趋势分析[J]. 机电信息, 2017(24): 124-125.
LI Li-min, CAI An-jiang. Development Status and Trend Analysis of Tire Slag Tank Car[J]. Mechanical and Electrical Information, 2017(24): 124-125.
- [2] 罗利军, 李静, 刘立志. 100t 抱罐车全液压制动系统设计[J]. 中国新技术新产品, 2017(11): 9-10.
LUO Li-jun, LI Jing, LIU Li-zhi. Design of Full Hydraulic Braking System for 100t Tank Car[J]. New Technology And New Products of China, 2017(11): 9-10.
- [3] 李仔浩, 杨春燕. 基于逆向设计的产品可拓创意生成方法[J]. 机械设计, 2019, 36(12): 127-133.
LI Zi-hao, YANG Chun-yan. Product Extension Creative Generation Method Based on Reverse Design[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(12): 127-133.
- [4] 杨刚俊, 余隋怀, 初建杰. 基于可拓学模型的产品创新设计方法[J]. 包装工程, 2011, 32(18): 30-33.
YANG Gang-jun, YU Sui-huai, CHU Jian-jie. A New Product Innovation Design Method Based on Extenics Model[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(18): 30-33.
- [5] Zhang C, Wei X, Liang Y. Airport Self-service Terminal Design Based on Extenics[J]. Boletín Técnico/Technical Bulletin, 2017, 55(12): 202-212.
- [6] GU Peng-fei. Extenics Matter-Element Analysis on Dilemma Problem in HMI Design of Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 350: 176-181.
- [7] 王军, 孙帅. 基于可拓创新法和 TRIZ 理论的营地手推车折叠机构设计[J]. 图学学报, 2021, 42(5): 866-872.
WANG Jun, SUN Shuai. Design of Folding Mechanism of Camping Stroller Based on Extension Innovation Method and TRIZ Theory[J]. Journal of Graphics, 2021, 42(5): 866-872.
- [8] 陈香, 邱大鹏. 基于模糊 Kano 模型与 TOPSIS 法的产品设计研究[J]. 图学学报, 2019, 40(2): 315-320.
CHEN Xiang, QIU Da-peng. Research of Product Design Based on Fuzzy-Kano Model and TOPSIS[J]. Journal of Graphics, 2019, 40(2): 315-320.

(下转第 240 页)