

# 基于公理设计的产品结构设计模型研究

苏珂<sup>1,2</sup>, 徐聪<sup>3</sup>

(1. 山东省科学院自动化研究所, 济南 250013; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院)艺术设计学院, 济南 250353; 3. 齐鲁工业大学(山东省科学院)机械与汽车工程学院, 济南 250353)

**摘要:** **目的** 为了满足客户的实际需求, 缩短产品设计周期, 避免传统设计方法生成产品结构的过程中易产生设计耦合的潜在问题。**方法** 以结构设计作为主要目的, 提出一种基于公理设计的产品结构设计模型(Axiomatic Design Based Structural Design, ADBSD)。该模型在质量功能展开(Quality Function Deployment, QFD)的基础上, 采用KANO模型的赋值计算规则, 获得总体客户功能需求权重值, 作为结构设计的总功能需求, 输入公理设计框架流程中的“Z”字型映射中; 并运用TRIZ技术冲突、发明原理等工具进行设计优化, 在设计初期解决设计参数之间的冲突问题, 得到完整的产品设计结构。**结果** 通过对小空间自走式消防装备进行设计研究, 阐述了运用ADBSD进行产品结构设计的优势, 验证了该方法的可行性。**结论** 该模型为产品创新设计过程提供了新思路 and 理论参考。

**关键词:** 产品结构设计; 公理设计; QFD; KANO; TRIZ

中图分类号: TB472 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)10-0136-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.10.021

## Axiomatic Design Based Structural Design Model

SU Ke<sup>1,2</sup>, XU Cong<sup>3</sup>

(1. Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250013, China; 2. School of Art and Design, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China)

**ABSTRACT:** The work aims to satisfy the actual requirements of customers, shorten product design cycle and avoid the potential problem of design coupling in the process of generating product structure by traditional design method. Taking the structural design as the main purpose, an axiomatic design based structural design (ADBSD) model was proposed. Based on the quality function deployment (QFD), the value assignment calculation rule of KANO model was used to obtain the weight value of the overall customer function requirement. The weight value was used as the total functional requirement of the structural design to be entered into the “Z” font mapping in the process of axiomatic design framework. Technology conflicts, invention principles and other tools of TRIZ were used to optimize the design, solving the conflict between design parameters in the early stage of the product design, and a complete product structure design was obtained. The advantages of ADBSD for product structure design were explained and the feasibility of the proposed method was verified through the research on the design of self-propelled fire-fighting equipment in small spaces. The ADBSD model provides new ideas and theoretical references for the product innovation design process.

**KEY WORDS:** product structure design; axiomatic design; QFD; KANO; TRIZ

收稿日期: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405252); 教育部青年基金资助项目(14YJCZH131); 山东省专业学位研究生教学案例库:《产品创新设计》案例库(SDYAL17048); 齐鲁工业大学国际合作项目(QLUTGJHZ2018022)

作者简介: 苏珂(1980—), 女, 山东人, 博士, 山东省科学院自动化研究所副教授, 齐鲁工业大学(山东省科学院)艺术设计学院副教授, 主要研究方向为产品设计认知、产品创新方法等。

通信作者: 徐聪(1992—), 女, 山东人, 齐鲁工业大学(山东省科学院)机械与汽车工程学院硕士生, 主攻人机工程与产品设计。

随着科学技术的迅猛发展,市场与客户的需求不断发生变化,新产品的开发面临着极大的挑战,企业对于产品结构的开发也提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。这迫使企业针对产品结构进行改进设计或再设计,实现在缩短新产品开发周期的同时满足客户不断变化的需求<sup>[2]</sup>。传统的产品设计过程为产品信息由抽象到具体并逐渐细化的过程。其中极易产生的变动性与不确定性也多出现在结构设计部分。

对于产品结构设计的实现,国内外学者做了大量的研究,邵伟平<sup>[3]</sup>等,运用公理设计理论(Axiomatic design, AD)完成了减速器结构的设计分析实例,一方面反映出 AD 获取客户需求方式的不同决定了结果是否客观全面;另一方面当涵盖的设计因素较多时,使用 AD 的独立公理化解结构耦合的过程会变得较为繁琐,影响结构设计的周期和质量。华中生<sup>[4]</sup>等,引入功能约束条件并结合 TRIZ,完成了汽车安全气囊的结构设计,证明了 TRIZ 能够从技术参数的角度解决设计矛盾,但在定义冲突时不能做出准确的辨别。Su J C<sup>[5]</sup>等应用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 求算需求权重,运用独立公理对设计因素进行筛选,用于指导复杂结构设计的实现。Hintersteiner J D<sup>[6]</sup>等运用 AD 理论,建立了指导控制的模块设计结构。Guenov M D<sup>[7]</sup>等提出了产品设计过程的模块化拆分,采用判断矩阵来表征 AD 映射关系中的潜在冲突。

由上述研究可知,结构设计是一个需要多因素多角度综合考量的复杂过程,单一理论较难实现,因此本文提出了基于公理设计的产品结构设计模型,将客户需求量化地引入 AD,运用 AD 设计流程与 TRIZ 工具的优势互补,解决产品结构设计较易产生的技术冲突,得到完整的产品设计模块结构<sup>[8]</sup>。

### 1 公理设计过程

公理设计是一个由上到下的层级式设计过程<sup>[9]</sup>,“Z”字型映射关系将各个设计域联系起来,依靠判断矩阵对映射关系建立准确的表达。本文所涉及的公理设计过程见图 1。

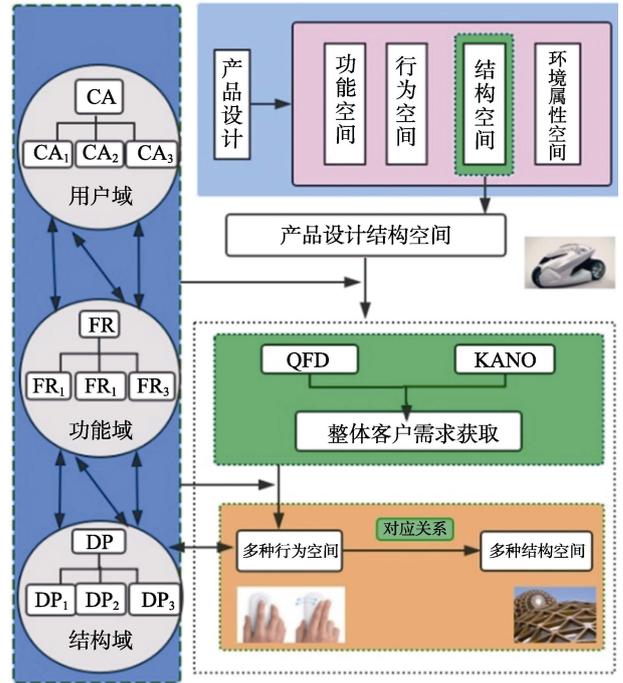


图 1 公理设计过程  
Fig.1 Process of axiomatic design

#### 1.1 “需求-功能”转化过程

基于 AD 的设计原则,“需求-功能”的转化过程,即  $\{CA_s\}$  与  $\{FR_s\}$  两个设计域之间建立联系的过程,对应着客户功能需求的获取过程。当前客户需求获取的方法有德尔菲法<sup>[10]</sup>、AHP 法<sup>[11]</sup>、QFD<sup>[12]</sup>、KANO 模型<sup>[13]</sup>等,将这些方法进行比较,见表 1。

因此,本研究采用集成的 QFD-KANO 方法,可以弥补两者的不足,得到更为全面的整体客户需求。

#### 1.2 “功能-结构”转化过程

根据 AD 的设计原则,“功能-结构”的转化过程,就是对  $\{FR_s\}$  与  $\{DP_s\}$  两个设计域之间的联系建立映射,整体过程分为“同层级之间”与“不同层级之间”两个层面的相互映射关系,“Z”字型映射见图 2。

表 1 客户需求获取方法比较  
Tab.1 Comparison of customer demand acquisition methods

| 客户需求获取方法 | 研究过程   | 优点                   | 缺点                   |
|----------|--|----------------------|----------------------|
| 德尔菲法     | 针对某一问题向专家进行匿名多回合调查,获得需求权重。                   | 最终结果可以代表所有专家的统一意见。   | 专家主观判断影响较大,耗时较长。     |
| AHP 法    | 就某一问题请多名专家依照 1~5 阶 saaty 判断标准做出判定,计算得出相对重要度。 | 实现了权重的量化。            | 专家主观判断影响较大。          |
| QFD      | 根据设计要求的不同,将需求转化为定量参数,得到不同的权重值。               | 实现需求信息合理且有效地转化。      | 简单地认为各工程特征之间为线性关系。   |
| KANO     | 根据需求程度的不同,依据 KANO 模型计算得到需求权重。                | 动态分析过程实现了需求信息的最大化利用。 | 传统的 KANO 可能会导致结果的偏差。 |

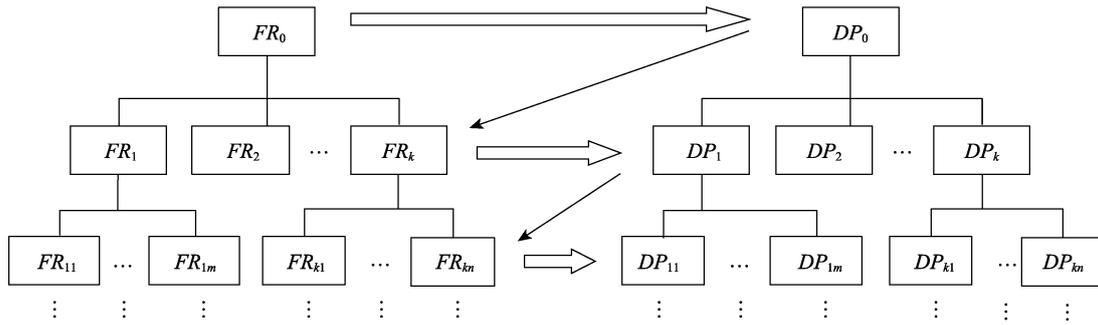


图2 “Z”字型映射  
Fig.2 “Z” font mapping form

对于复杂产品的结构设计，为了将“功能-结构”之间的联系表达得客观且准确，可添加行为域  $\{BE_s\}$  作为过渡域，在遵循 AD 的映射规则的同时对结构之间存在的行为关系进行描述，更好地完成产品结构的设计实现。

## 2 ADBSD 模型

ADBSD 模型，将产品结构设计作为最终的实现目标。第一步：完成总体客户需求的获取。根据 KANO 模型参数化不同的客户需求，输入质量功能展开的多层级架构得到客户总体需求。第二步：完成“功能-结构”的转化。首先将客户总体需求功能化，作为 AD 中功能域与结构域“Z”字型映射的输入，运用 AD 的独立公理对得到的映射关系判断矩阵进行耦合性检验，然后运用 TRIZ 冲突解决理论，解决较为复杂的设计耦合问题。该过程见图 3。

### 2.1 客户功能需求的获取

提出 QFD-KANO 计算模型，整合综合需求以及定向需求  $CA_s$  与功能需求  $FR_s$  的分析量化。

#### 2.1.1 QFD 的多层级结构

QFD 的多层级结构即多层级质量屋的构建，见图 4，FR 的权重包括绝对权重  $AI_j$  和相对权重  $RI_j$ 。质量屋中的各参数有下列关系：

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1 \tag{1}$$

$$AI_j = \sum_{i=1}^m w_i R_{ij} \tag{2}$$

$$RI_j = \frac{AI_j}{\sum_{j=1}^n AI_j} \tag{3}$$

其中  $CA_i$  为第  $i$  个客户需求； $FR_j$  为第  $j$  个功能需求； $w_i$  为  $CA_i$  的相对重要度； $R_{ij}$  为  $CA_i$  和  $FR_j$  间的相关系数； $AI_j$  为  $FR_j$  的绝对权重； $RI_j$  为  $FR_j$  的相对权重； $m$  为客户需求数 ( $i=1,2,\dots,m$ )； $n$  为产品功能需

求数 ( $j=1,2,\dots,n$ )。

#### 2.1.2 KANO 模型

将 25 种需求在 KANO 模型需求分类评估表中展开，对应的需求分类有兴奋需求 (A)、期望需求 (O)、基本需求 (M)、反向需求 (R)、无关紧要需求 (I)、问题需求 (Q)。

根据不同受访客户对于某一  $CA_i$  的不同定义，分别确定需求类型 M, O, A, I 的需求比例，记为  $E_i, F_i, G_i, H_i$ 。由此可得：

$$S_i = \frac{G_i + F_i}{G_i + F_i + E_i + H_i} \tag{4}$$

$$T_i = \frac{E_i + F_i}{G_i + F_i + E_i + H_i} \tag{5}$$

其中  $S_i$  表示具备此属性客户满意度的提升率； $T_i$  表示不具备此属性客户满意度的下降率。

由此可得  $CA_i$  的相对权重为：

$$w_i = \max \left( \frac{S_i}{\sum_{i=1}^m S_i}, \frac{T_i}{\sum_{i=1}^m T_i} \right) \tag{6}$$

综上，QFD-KANO 计算模型的具体步骤如下。

- 1) 制定相关调查问卷，选定相关客户进行匿名调查。
- 2) 按照 KANO 模型的客户需求分类规则，整理调查结果，以 5, 3, 1, 0 的赋值规则为不同需求进行重要度评价；
- 3) 利用公式 (4)、(5)、(6) 计算  $S_i, T_i, w_i$ ；
- 4) 构建  $CA$  与  $FR$  间的关系矩阵，利用公式 (2)、(3) 最终确定各  $FR$  相对权重和绝对权重。。

## 2.2 结构设计过程

在公理设计中，功能域与结构域之间的映射关系可以表示为：

$$\{FR_s\} = A \{DP_s\} \tag{7}$$

式中， $A$  表示设计矩阵， $FR_s$  和  $DP_s$  分别为功能要求集和设计参数集<sup>[14]</sup>。 $\{FR_s\} = \{FR_1, FR_2, FR_3, \dots, FR_n\}$ ， $\{DP_s\} = \{DP_1, DP_2, DP_3, \dots, DP_n\}$ ，具体可以描述为：

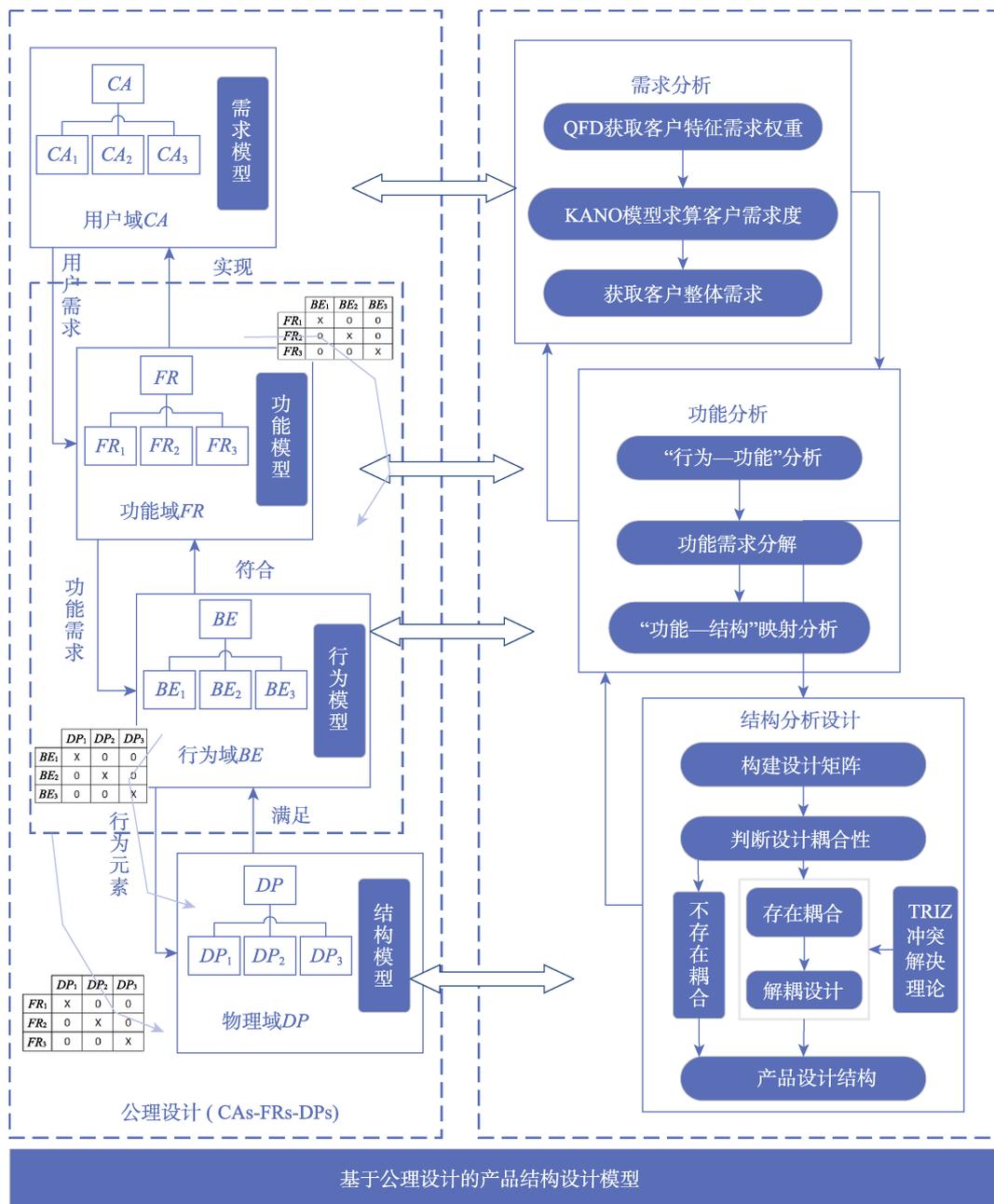


图 3 基于公理设计的产品结构设计模型  
Fig.3 Axiomatic design based structural design

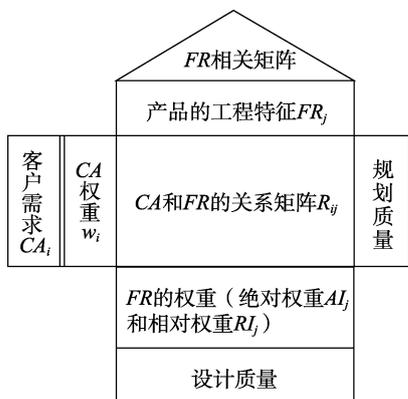


图 4 质量屋结构  
Fig.4 Structure of the house of quality

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ \vdots \\ FR_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ \vdots \\ DP_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中， $a_{ij}$ 表示对应元素之间的关联程度，通常用 X 和 0 来表示，X 表示强相关，0 表示弱相关或无关。

在 AD 设计原则中，可以根据矩阵的形式判断产品功能需求的分解是否彻底。对角矩阵为独立设计，满足独立性则可以被 AD 接受；三角矩阵为解耦设计，其他形式的矩阵为耦合设计，两者都需要进行解耦过程。

### 3 应用实例

国家高度重视重点场所的安全问题，因此无人值守的大型仓储区域成为消防监控重地。针对这一问题，本研究以小空间自走式消防灭火装备结构设计为例，运用 ADBSD 模型对其进行功能分析与结构设计。

#### 3.1 客户功能需求权重的确定

根据产品设计 24 性能<sup>[15]</sup>制定消防灭火装备调查问卷，并对 60 位有经验的消防员进行目标客户的匿名需求调查，整理调查结果后得到 57 份有效问卷。以“小空间”、“自主动力”作为定向需求，与问卷结果综合获取 CA。根据 AD 理论规则对 FR 进行合理的描述，结果见表 2。

根据 QFD 的多层级质量屋框架，建立 CA 与 FR 的相关矩阵，依据 KANO 模型进行需求重要度的赋值并确定  $R_j$  的取值，根据式 (6) 计算用户需求权重  $w_i$ ，根据式 (2)、(3) 计算不同 FR 的绝对重要度  $AI_j$  以及相对重要度  $RI_j$ ，功能需求权重见表 3。

综上，得出了满足整体客户需求的产品功能需求价值排序。设计师在结构设计过程中，应尽量满足高权重值功能需求层级下的各层级需求，在保证低权重值功能基本实现的基础上，可做产品结构的取舍。

#### 3.2 结构设计

基于模块化设计理念<sup>[16]</sup>，将消防灭火装备的整体结构根据调查结果拆分成六大功能模块，根据功能需求价值排序逐一分析，实现小空间自走式消防灭火装备的结构设计。

监测功能分解映射-外部控制部分见表 4，对  $FR_{51}$  进行功能分解后，根据公式(8)得到判断矩阵：

$$\begin{bmatrix} FR_{511} \\ FR_{512} \\ FR_{513} \\ FR_{514} \\ FR_{515} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & X \\ 0 & 0 & 0 & X & X \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} DP_{511} \\ DP_{512} \\ DP_{513} \\ DP_{514} \\ DP_{515} \end{bmatrix} \quad (9)$$

得到的结构设计判断矩阵为三角阵，需要采取调整结构顺序的方式，进行解耦设计。由  $FR_{511}$ 、 $FR_{512}$ 、 $FR_{513}$ 、 $FR_{514}$ 、 $FR_{515}$  变换为  $FR_{511}$ 、 $FR_{512}$ 、 $FR_{515}$ 、 $FR_{514}$ 、 $FR_{513}$  ( $\{DP_s\}$  跟随  $\{FR_s\}$  做相应变化) 之后得到新的判断矩阵为：

$$\begin{bmatrix} FR_{511} \\ FR_{512} \\ FR_{515} \\ FR_{514} \\ FR_{513} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 \\ 0 & 0 & X & X & X \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} DP_{511} \\ DP_{512} \\ DP_{515} \\ DP_{514} \\ DP_{513} \end{bmatrix} \quad (10)$$

表 2 小空间自走式消防灭火装备用户需求与功能需求对照

Tab.2 Congruent relationship of user requirements and functional requirements for self-propelled fire-fighting equipment in small spaces

| 客户需求 { CA <sub>s</sub> }         | 功能需求 { FR <sub>s</sub> } |
|----------------------------------|--------------------------|
| 应对复杂多变的火场环境 CA <sub>1</sub>      | 灭火功能 FR <sub>1</sub>     |
| 在小空间仓储环境下作业 CA <sub>2</sub>      | 小空间作业 FR <sub>2</sub>    |
| 降低火场内部的烟尘含量 CA <sub>3</sub>      | 除烟功能 FR <sub>3</sub>     |
| 行进方式为自走式 CA <sub>4</sub>         | 自走式行进方式 FR <sub>4</sub>  |
| 能对仓库/火灾现场勘探并实时反馈 CA <sub>5</sub> | 监测功能 FR <sub>5</sub>     |
| 灭火装备的能源需求 CA <sub>6</sub>        | 能源供应 FR <sub>6</sub>     |

表 3 功能需求权重

Tab.3 Weight of functional requirements

|                     | FR <sub>1</sub> | FR <sub>2</sub> | FR <sub>3</sub> | FR <sub>4</sub> | FR <sub>5</sub> | FR <sub>6</sub> | w <sub>i</sub> |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| CA <sub>1</sub>     | 3               | 3               | 0               | 0               | 0               | 1               | 5              |
| CA <sub>2</sub>     | 0               | 0               | 5               | 0               | 3               | 5               | 3              |
| CA <sub>3</sub>     | 1               | 1               | 0               | 0               | 3               | 0               | 0              |
| CA <sub>4</sub>     | 5               | 1               | 3               | 0               | 0               | 1               | 0              |
| CA <sub>5</sub>     | 0               | 3               | 0               | 5               | 5               | 0               | 5              |
| CA <sub>6</sub>     | 0               | 5               | 0               | 5               | 5               | 0               | 5              |
| AI <sub>j</sub>     | 15              | 55              | 15              | 50              | 59              | 20              |                |
| RI <sub>j</sub> (%) | 7.01            | 25.70           | 7.01            | 23.36           | 27.57           | 9.35            |                |

表 4 监测功能分解映射-外部控制部分

Tab.4 The mapping of monitoring function decomposition - external control

|                 |                  |                           |                            |
|-----------------|------------------|---------------------------|----------------------------|
| FR <sub>5</sub> | FR <sub>51</sub> | FR <sub>511</sub> 烟尘颗粒检测  | DP <sub>511</sub> 烟尘感应结构   |
| 监               | 外                | FR <sub>512</sub> 火源监测    | DP <sub>512</sub> 红外热感应结构  |
| 测               | 部                | FR <sub>513</sub> 探测点核实   | DP <sub>513</sub> 遥感控制结构   |
| 功               | 监                | FR <sub>514</sub> 危险点发现通知 | DP <sub>514</sub> 无线通讯结构   |
| 能               | 测                | FR <sub>515</sub> 危险点定位通知 | DP <sub>515</sub> GPS 定位结构 |

表 5 监测功能分解映射-内部控制部分

Tab.5 The mapping of monitoring function decomposition - internal control

|                 |                  |                            |                          |
|-----------------|------------------|----------------------------|--------------------------|
| FR <sub>5</sub> | FR <sub>52</sub> | FR <sub>521</sub> 系统内水压监测  | DP <sub>521</sub> 水压传感结构 |
| 监               | 内                | FR <sub>522</sub> 系统内水流监测  | DP <sub>522</sub> 水流传感结构 |
| 测               | 部                | FR <sub>523</sub> 系统内电压监测  | DP <sub>523</sub> 漏电保护结构 |
| 功               | 控                | FR <sub>524</sub> 障碍物/距离监测 | DP <sub>524</sub> 距离感应结构 |
| 能               | 制                |                            |                          |

为了让可解耦设计能够被 AD 所接受，即为了达到外部监测功能的实现，需要在烟尘感应与红外感应结构定位到“危险点”后，通过无线通讯结构进行信息通报，消防人员根据反馈信息对设备做出相应的操作指令。

监测功能分解映射-内部控制部分见表 5,对  $FR_{52}$  进行功能分解后,得到判断矩阵:

$$\begin{bmatrix} FR_{521} \\ FR_{522} \\ FR_{523} \\ FR_{524} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} DP_{521} \\ DP_{522} \\ DP_{523} \\ DP_{524} \end{bmatrix} \quad (11)$$

得到的判断矩阵为独立设计矩阵,可以被 AD 接受。

小空间作业功能-行为分解映射见表 6,对  $FR_2$  进行功能分解,引入了行为域对功能需求进行描述,得到判断矩阵:

$$\begin{bmatrix} BE_{21} \\ BE_{22} \\ BE_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ 0 & X & X \\ X & 0 & X \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \end{bmatrix} \quad (12)$$

得到的判断矩阵内部耦合度过高,不能被 AD 接受,运用 TRIZ 从功能出发对外壳结构进行解耦设计:针对  $DP_{21}$ 、 $DP_{22}$  与  $DP_{23}$  产生的冲突,可以用 39 个通用工程参数进行矛盾转化。改善的参数:No.31,物体产生的有害因素。恶化的参数:No.27,可靠性。在转化过程中,对于问题中存在多对冲突的情况,一般选取主要冲突来解决。

通过查询技术冲突解决矩阵,得到可利用的发明原理:No.24 借助中介物原理、No.2 分离原理、No.40 复合材料原理、No.39 惰性环境原理。

根据 No.24 和 No.2 将消防机器人的工作结构与外壳结构作分离处理。对于  $FR_2$ ,结合中介物原理与复合材料原理,选择兼具柔韧性与耐火性的复合材料,作为消防机器人的工作模块与外壳模块的连接结构。

自走式行进方式功能分解映射见表 7,对  $FR_4$  进行功能分解后,得到判断矩阵:

$$\begin{bmatrix} FR_{41} \\ FR_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} DP_{41} \\ DP_{42} \end{bmatrix} \quad (13)$$

得到的判断矩阵为解耦设计矩阵,可以被 AD 接受。

能源供应功能分解映射见表 8,对  $FR_6$  进行功能分解后,得到判断矩阵:

$$\begin{bmatrix} FR_{61} \\ FR_{62} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} DP_{61} \\ DP_{62} \end{bmatrix} \quad (14)$$

得到的判断矩阵为独立设计矩阵,可以被 AD 接受。

除烟、灭火功能-行为分解映射见表 9,对  $FR_1$ 、 $FR_3$  的分解,采用  $BE_1$  与  $BE_3$  进行描述。此时可以进行功能合并,水经高压后产生的细小水珠可以迫使环境中的烟尘沉降,达到除烟的目的;扑灭

表 6 小空间作业功能-行为分解映射  
Tab.6 The mapping of small space working function - behavior decomposition

|              |                    |                    |
|--------------|--------------------|--------------------|
| $FR_2$ 小空间作业 | $BE_{21}$ 体积较小     | $DP_{21}$ 外壳结构     |
|              | $BE_{22}$ 小范围内产生作用 | $DP_{22}$ 角度调节结构   |
|              | $BE_{23}$ 自身降温     | $DP_{23}$ 360°旋转结构 |

表 7 自走式行进方式功能分解映射  
Tab.7 The mapping of self-propelled travel mode function decomposition

|                |                    |                   |
|----------------|--------------------|-------------------|
| $FR_4$ 自走式行进方式 | $FR_{41}$ 适应多种复杂地形 | $DP_{41}$ 履带式行进结构 |
|                | $FR_{42}$ 行动安全平稳   | $DP_{42}$ 移动控制结构  |

表 8 能源供应功能分解映射  
Tab.8 The mapping of energy supply function decomposition

|             |                  |                   |
|-------------|------------------|-------------------|
| $FR_6$ 能源供应 | $FR_{61}$ 无需外接水源 | $DP_{61}$ 内置水箱结构  |
|             | $FR_{62}$ 无需外接电源 | $DP_{62}$ 内置供电组结构 |

表 9 除烟、灭火功能-行为分解映射  
Tab.9 The mapping of smoke removal, fire extinguishing function - behavior decomposition

|             |             |           |                  |
|-------------|-------------|-----------|------------------|
| $FR_3$ 除烟功能 | $BE_3$ 沉降烟尘 | $FR_7$ 产生 | $DP_{71}$ 增压结构   |
| $FR_1$ 灭火功能 | $BE_1$ 扑灭火源 | 细水雾       | $DP_{72}$ 水雾细化结构 |

火源的功能也可一并实现。该过程符合 AD 中信息公理的设计原则,最终得到增压与水雾细化两个结构。

### 3.3 结果展示

上述小空间自走式消防灭火装备的结构设计过程可做产品结构模块化的表达,见图 5。

为产品结构模块进行相应的结构优化,得到小空间自走式消防灭火装备的整体结构设计,见图 6。

## 4 结语

ADBSD 模型在结构设计过程中,根据客户的整体需求与定向需求通过 QFD-KANO 计算模型可作出量化的综合评价。公理设计理论融合 TRIZ 的新产品结构设计过程,避免了结构设计存在的高耦合性,有利于新产品开发面向多变的市场环境进行快速响应。通过小空间自走式消防灭火装备的结构设计实例,证明了设计模型的可行性。ADBSD 模型提高了综合结构设计过程的容错性与合理性,为产品结构的概念化生成提供了新的思路。

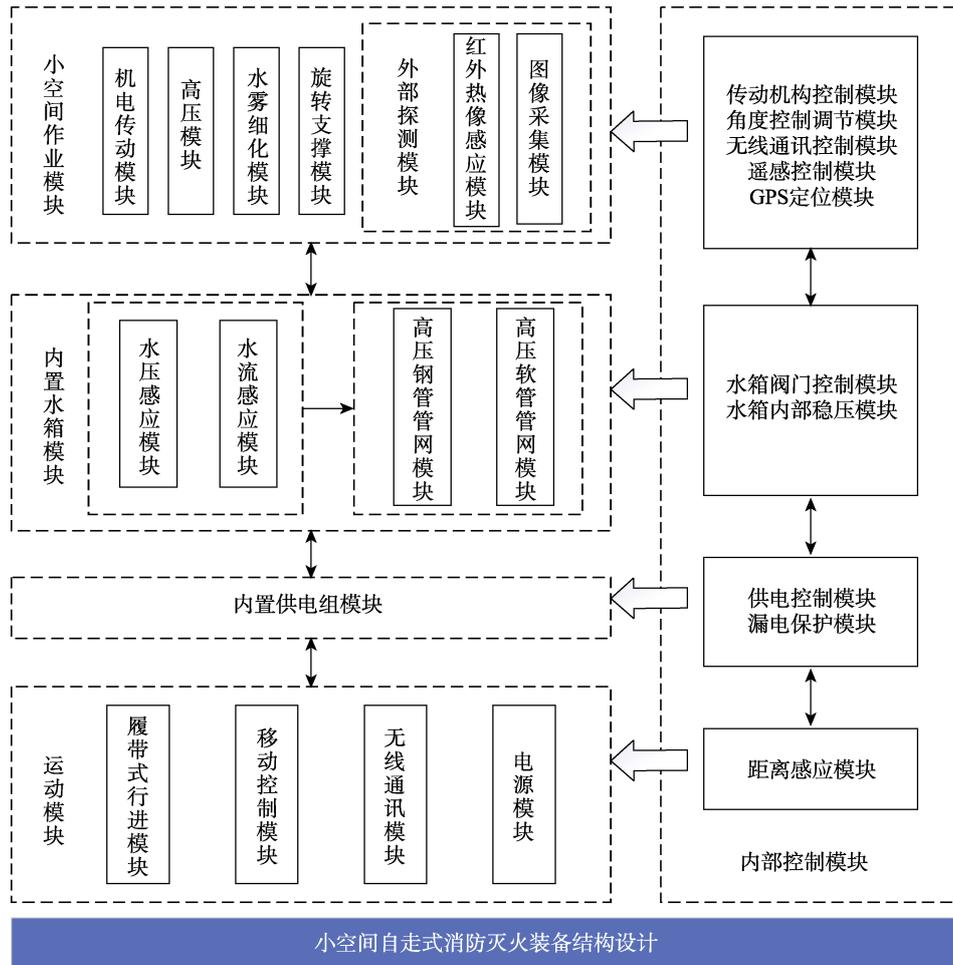
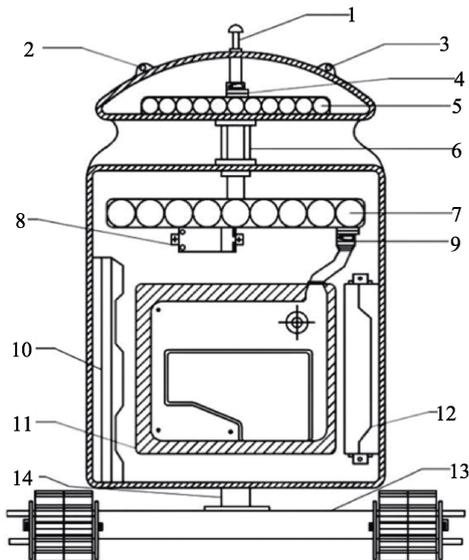


图5 小空间自走式消防灭火装备结构模块化表达

Fig.5 Modular expression for the structure of self-propelled fire-fighting equipment in small spaces



1-高压细水雾喷头; 2-红外热像探测器; 3-图像采集探测器; 4-稳压泵组; 5-高压软管网; 6-升降板; 7-高压钢管管网; 8-增压控制器; 9-水流传感器; 10-供电组; 11-内置水箱; 12-控制器; 13-履带轮; 14-运动接受控制器

图6 小空间自走式消防灭火装备结构设计示意图

Fig.6 Structural design diagram for self-propelled fire-fighting equipment in small spaces

参考文献:

[1] 容芷君, 李名, 但斌斌, 等. 面向产品设计结构的聚类分层分析[J]. 武汉科技大学学报, 2015, 38(3): 190-196.  
RONG Zhi-jun, LI Ming, DAN Bin-bin, et al. Analysis of Clustering Hierarchy for Product Design Structure[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2015, 38(3): 190-196.

[2] 侯亮, 唐任仲, 徐燕申. 产品模块化设计理论、技术与应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 56-61.  
HOU Liang, TANG Ren-zhong, XU Yan-shen. Review of Theory, Key Technologies and Its Application of Modular Product[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(1): 56-61.

[3] 邵伟平, 曾鹏飞. 基于公理设计理论的减速器产品结构分析[J]. 沈阳理工大学学报, 2009, 28(6): 5-8.  
SHAO Wei-ping, ZENG Peng-fei. Structural Analysis of Speed Reducer Product Based on Axiomatic Design Theory[J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2009, 28(6): 5-8.

[4] 华中生, 顾立白, 汪炜. 基于 TOC 与 TRIZ 的产品概念设计方法及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(6): 19-24.

- HUA Zhong-sheng, COULIBALY S, WANG Wei. TOC & TRIZ Based Product Design Method and Its Application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(6): 19-24.
- [5] SU C Y, CHEN S J, LIN L. A Structured Approach to Measuring Functional Dependency and Sequencing of Coupled Tasks in Engineering Design[J]. Computers & Industrial Engineering, 2003, 45(1): 195-214.
- [6] JASON D. Hintersteiner, Amrinder S N. Integrating Software into Systems: An Axiomatic Design Approach[C]. Vancouver: IEEE, 1999.
- [7] GUENOV M D, BARKER S G. Application of Axiomatic Design and Design Structure Matrix to the Decomposition of Engineering Systems[J]. Systems Engineering, 2010, 8(1): 29-40.
- [8] CHENG X, CHEN C. Applying Independence Axiom and Design Structure Matrix to Product Module division[C]. New York: IEEE, 2010.
- [9] 宋玉银, 蔡复之, 张伯鹏, 等. 概念设计与结构设计的信息集成技术研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998(2):51-54.  
SONG Yu-yin, CAI Fu-zhi, ZHANG Bo-peng, et al. Study of information integration of product conceptual design and structure design[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 1998(2): 51-54.
- [10] 孔造杰, 郝永敬. 用权重概率综合系数法确定 QFD 中用户要求重要性[J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(2): 65-67.  
KONG Zao-jie, HAO Yong-jing. Determine the Importance of Customer Requirement in QFD Using Importance Probability Comprehensive Coefficient Method[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2001, 7(2): 65-67.
- [11] 苏珂, 刘雪娇. 基于知情构造理论的新产品开发方法研究[J]. 机械设计, 2017(12): 105-110.  
SU Ke, LIU Xue-jiao. Research of New Product Development Method Based on Informed Tectonic Theory[J]. Journal of Machine Design, 2017(12): 105-110.
- [12] 耿立沙, 孔造杰, 耿立校. QFD 顾客需求重要度确定方法创新研究[J]. 当代经济管理, 2016, 38(9): 20-25.  
GENG Li-sha, KONG Zao-jie, GENG Li-xiao. A Creative Study on the Method of Determining the Importance of Customer Requirements in QFD[J]. Contemporary Economic Management, 2016, 38(9): 20-25.
- [13] 王玉豪. 产品个性化需求转换与模块化设计评价研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
WANG Yu-hao. Research and Application of Product Personalized Requirement Conversion and Modular Design Evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [14] 徐聪. 基于公理设计理论的新产品开发方法研究与应用[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2019.  
XU Cong. Research and Application on New Product Development Based on Axiomatic Design Theory[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2019.
- [15] 夏雪. 基于公理化设计的氧化铝陶瓷素坯管自动磨切加工设备研发[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
XIA Xue. R&D of Automatic Grinding and Cutting Equipment for Alumina Ceramic Flan Based on Axiomatic Design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [16] 肖人彬, 程贤福, 陈诚, 等. 基于公理设计和设计关联矩阵的产品平台设计新方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 94-103.  
XIAO Ren-bin, CHENG Xian-fu, CHEN Cheng, et al. New Approach to Product Platform Design Based on Axiomatic Design and Design Relationship Matrix[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 94-103.