

面向 FAHP-熵权理论的装配机器人造型设计优化研究

常瑜, 刘宝顺

(天津商业大学, 天津 300134)

摘要: **目的** 装配机器人在制造业中已得到广泛应用, 为进一步丰富装配机器人的造型意象, 满足用户需求。**方法** 基于模糊综合评价法 (FAHP) 与熵权理论对装配机器人进行了造型设计流程分析。首先, 依据层次分析法 (AHP) 构建装配机器人用户需求层次模型并计算各要素初步的权重值。然后, 引入熵权理论完成各要素修正权重的分析与计算, 将各要素初步权重值与修正权重值进行拟合, 形成最终权重并排序, 以此为装配机器人造型设计提供重要依据。**结论** 最后以小型全方位装配机器人平台设计实践为例进行具体分析, 完成了小型全方位装配机器人平台造型创新设计, 并通过模糊评价筛选出最优方案。其实践过程验证了设计流程的可行性, 并提供了更好的产品造型意象。

关键词: 工业设计; 装配机器人; FAHP; 熵权理论

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)02-0091-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.02.014

Optimization of Assembly Robot Modeling Design Based on FAHP and Entropy Weight Method

CHANG Yu, LIU Bao-shun

(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: The work aims to further enrich the modeling image of assembly robot to meet the needs of users in view of that assembly robots have been widely used in manufacturing industry. The modeling design process of assembly robots was studied based on the fuzzy comprehensive evaluation method (FAHP) and the entropy weight theory. Firstly, a hierarchical model of user needs for assembly robots was constructed based on analytic hierarchy process (AHP) and the preliminary weights of each element were calculated. Secondly, the entropy weight theory was introduced to complete the analysis and calculation of the revised weights of each element, and the initial weights of each element were fitted with the revised weights to form the final weights and conduct ranking, which provided an important basis for the modeling design of assembly robots. Finally, taking the design practice of small Omni-directional assembly robot platform as an example, the specific theoretical analysis is carried out, and the innovative design of small Omni-directional assembly robot platform is formed. Through the fuzzy evaluation method, the optimal scheme is selected. The feasibility of the design process is verified by the practice process, which can provide better product modeling image.

KEY WORDS: industry design; assembly robot; FAHP; entropy weight method

智能制造已成为我国现代先进制造业新的发展方向, 其中, 装配机器人得到了广泛关注^[1]。具体而言, 装配机器人可分为两类, 即固定坐标式和移动坐标式, 两者中移动坐标式装配机器人的灵活性较高^[2],

因此, 360°可移动装配机器人在工业、农业、航空等领域成为设计热点。目前, 在具体的研发中, 装配机器人研究的重点集中在结构及标定优化等^[3-5], 美国学者 Muir 设计研发了基于麦克纳姆轮构成的全方位

收稿日期: 2020-10-12

基金项目: 天津市企业科技特派员项目 (20YDTPJC00360); 天津市教育科学“十三五”规划课题 (HE3015)

作者简介: 常瑜 (1986—), 男, 山西人, 硕士, 天津商业大学讲师, 主要研究方向为产品设计、设计评价等。

通信作者: 刘宝顺 (1962—), 男, 辽宁人, 博士, 天津商业大学副教授, 主要研究方向为机械设计、计算机辅助设计。

移动机器人平台^[6],学者 Ren 的机器人设计则使用了 MY 轮结构^[7]等。虽然总体研究造型设计的较少,但是技术的发展势必带来产品使用功能与审美功能的统一,用户对于高技术产品将会产生新的需求与认知^[8],更加注重感知体验。因此,为进一步丰富装配机器人的造型意象,满足用户需求,在设计过程中引入模糊层次分析法 (FAHP) 与熵权理论,对相关造型设计进行指导。

FAHP 在产品设计中能起关键性作用,如设计决策^[9]、结构优化^[10]、人机交互^[11]等,能够将设计问题进行层次划分并综合评价;熵权理论在主要运用在风险评估^[12]、效益评估^[13]等管理学领域。机器人产品造型意象的设计评价与选择所面对的要素相对复杂、用户需求不确定性高,如何确定其评价指标权重并完成定量评估等问题成为难点,因此,以 FAHP 与熵权理论的同时介入来处理机器人造型设计中用户需求的量化问题,能够避免设计过程的主观性、模糊性,满足用户的造型需求。

1 装配机器人设计要素解析

设计要素的解析可以为用户需求分析的量化结果提供有针对性的设计对象。传统的轮式移动机器人运动灵活性稍差^[14],日益复杂的作业环境对装配机器人提出了更高的要求,如高作业效率、工作灵活和行走速度快等,因此,全方位移动装配机器人成为主要研发对象。全方位移动装配机器人在平面上设计有若干个自由度,可实现纵向与侧向平移、机身 360° 旋转等^[15],针对特殊空间环境作业的适应性较好。航发 Compass Q2 四轮全向平台见图 1。

全方位移动装配机器人主要包含机身、行走装置、末端执行器、传感器等。其中,机身需提供稳定的平台用于安装传感器、末端执行器等;行走装置目前主要包含履带式、轮式两种类型;因工作要求不同,全方位移动装配机器人对应多种末端执行器进行模块化处理;传感器主要包含物体识别传感器、物体探伤传感器、接近觉传感器、距离传感器、力觉传感器,听觉传感器等,但传感器,尤其是外部传感器,因其需要安装在车身、行走装置或末端执行器上,也会在

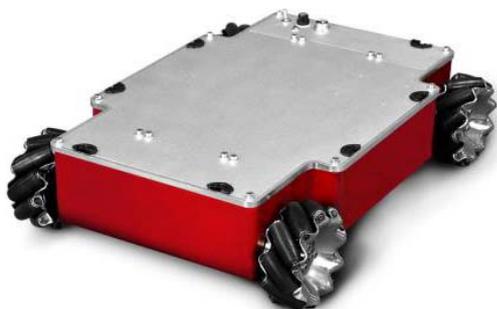


图 1 航发 Compass Q2 四轮全向平台
Fig.1 Four-wheel Omni-directional platform of Compass Q2

一定程度上影响到造型设计,目前传感器通常采用固定式。可见,在具体设计中,机身、行走装置、末端执行器与造型设计相关度较高。德国 KUKA 移动式机器人见图 2。因此,应依据用户感性意象的量化分析结果,主要针对机身、行走装置、末端执行器的安装位置进行设计,以符合功能与审美需求。

2 基于 FAHP-熵权理论的用户需求分析关键点

研究已知,层次分析法可通过构造判断矩阵和特定数学方法确定各要素的权重,并进行权重值排序,完成定性指标的定量评估。熵理论是经典的人工智能算法,最先由学者申农引入信息论,目前已经在工程技术、社会经济等领域得到了非常广泛的应用。在产品过程中,将熵权理论引入层次分析法,可提高层次分析与模糊数学方法在综合评价中的客观性与实用性,并形成创新设计开发流程(见图 3),能支撑完成基于用户感性意象分析的装配机器人造型创新设计。



图 2 德国 KUKA 移动式机器人
Fig.2 German KUKA mobile robot

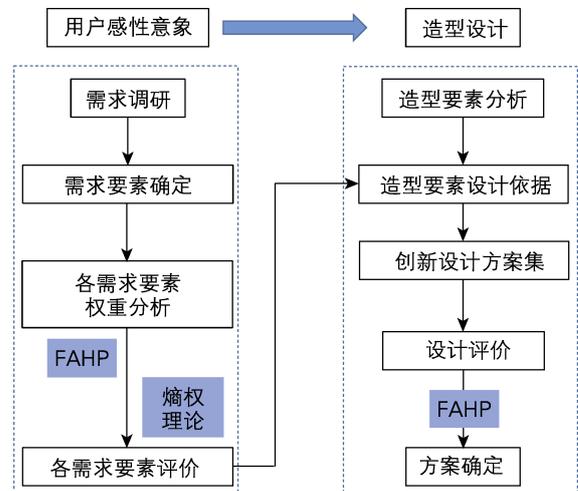


图 3 设计开发流程
Fig.3 Design and development process

2.1 构建层次分析模型

将层次分析法引入到装配机器人产品造型设计的过程中，构建层次分析模型是设计要素间权重分析的关键。依据层次分析模型可进行相关设计评价，对装配机器人造型设计要素的选择进行决策。

具体来看，目标层是要符合用户感性意象的装配机器人“最优整体方案”，准则层设定为关键的“要素类别”，方案层设定为要素类别的“设计要求”；准则层和方案层的评价对象将根据具体的设计对象进行调研、归纳与总计得出；再结合层次分析法所提供的相关计算方法，可初步得出各要素权重值及排序。具体层次分析模型构建过程见图 4。

2.2 熵权理论修正权重

运用层次分析法求解层次模型中各要素的权重值，主要依靠受调研用户的主观评价，因此，将熵权理论引入最终权重计算及排序过程，结合专家评价能够降低用户主观依赖程度，提高评价的真实度，增强各设计要素权重的客观性。具体计算基于熵权理论展开，求解修正权重（用 f_i 表示），过程如下：

第一，筛选专家进行评估，评估过程运用 5 级制评分，经归一化处理计算出基本修正权重（用 \bar{f}_i 表示）。同时，依照 5 级评价结果，求解方案层中要素归属于各评价等级（1~5 分）的概率 p_{ij} 。

第二，求解方案层中具体要素熵权系数对评价等级中各指标赋予相应的权重，其中 n 为评价等级数量。熵的介入用来计算各要素的相对重要性（用 Y_i 表示）。

$$Y_i = -\sum_{j=1}^n p_{ij} \text{Lnp}_{ij} \quad (1)$$

在公式(1)中，当 $p_{ij} (j=1,2,\dots,n)$ 接近相等时，可理解为熵值接近最大，评价越模糊，即 p_{ij} 取值相等时，熵最大，为 $Y_{\max} = \text{Lnn}$ ，用 Y_{\max} 对公式(1)进行归一化处理，可知设计要素 n_i 相对重要性的熵值（用 f'_i 表示）：

$$f'_i = \frac{1}{\text{Lnn}} \sum_{j=1}^n p_{ij} \text{Lnp}_{ij} \quad (2)$$

同理，当 $p_{ij} (j=1,2,\dots,n)$ 值相同时， $f'_i=1$ ，即 f'_i 范围为 $0 \leq f'_i \leq 1$ 。可将设计要素 n_i 的重要度定义为 $(1-f'_i)$ 。式 (2) 归一化处理，得到 n_i 的重要度权值（用 φ_i 表示）为：

$$\varphi_i = \frac{1}{m - \sum_{i=1}^m f'_i} (1 - f'_i) \quad (3)$$

其中： m 为设计要素的数目， $0 \leq \varphi_i \leq 1, \sum_{i=1}^m \varphi_i = 1$ 。

第三，求解各设计要素的修正权重，提高结果的客观性和准确性。可表示为： $f_i = \bar{f}_i + \varphi_i$ 。

第四，形成各设计要素的优选顺序。将层次模型中最终方案层各设计要素的权重值与修正权重进行拟合相加成为最终权重值，以此形成最终权重排序，为设计提供有效的参考。

3 小型全方位装配机器人平台设计实例

3.1 层次模型构建

层次模型中，将“符合用户意象的小型全方位装配机器人平台设计”设定为目标层，用字母 A 表示。然后，根据可移动装配机器人相关设计标准，结合装配机器人典型结构与设计实例中机身、行走装置、末端执行器的造型分析，针对小型全方位装配机器人平台进行设计要素的分类研究，形成面向“功能”和“形态”的两类设计要素。其中，“功能”要素用字母 b 表示，包含 b_1 轻量化、 b_2 模块化、 b_3 智能化、 b_4 机动化；“形态”要素用字母 c 表示，包含 c_1 简洁的、 c_2 安全的、 c_3 拟人的、 c_4 稳重的。具体的层次模型见图 5。

3.2 设计要素权重计算与修正

本小节内容将分为两个主要步骤进行。首先，将依据上述层次模型构建小型全方位装配机器人平台各要素的判断矩阵，并结合用户评价，运用软件 yaahp 进行辅助计算，形成初步的设计要素权重值。然后，运用熵权理论进行权重修正，具体的评价将依据行业内专家意见展开，步骤如下。

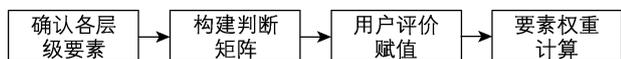


图 4 层次分析模型构建过程

Fig.4 Hierarchical analysis model construction process

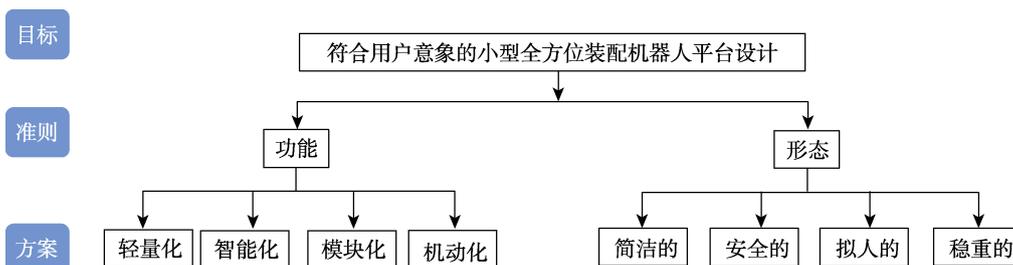


图 5 层次模型

Fig.5 Hierarchical model

确定调研用户，构建判断矩阵，并进行用户调研评价。为提高用户调研的准确性，邀请高校设计专业在校生、科技型企业从业者、产品设计师等 20 名专业型用户参与打分，对各层要素间的重要程度进行评定，具体将通过 yaahp 软件计算权重值并形成初步排序，小型全方位装配机器人平台各设计要素的初步权重情况见表 1—3。

依据熵权理论进行要素权重修正值计算。评价将依据 5 名专家的评价展开，具体计算过程参考上述公式(1)–(3)，得到个设计要素的权重修正值。然后将运用层次分析法计算得出的初步权重(用户评价)与运用熵权理论计算得出的权重修正值(即专家评价打分情况，见表 4)进行相加拟合，得出小型全方位装配机器人平台个设计要素的最终权重及排序，见表 5，为进一步的设计创新提供有效参考。

3.3 方案设计与评价

首先，依据个设计要素的权重排序，选择重要程度较高的要素作为设计重点，进而完成小型全方位装

表 1 符合用户意象的造型设计判断矩阵及权重

Tab.1 Modeling design consistent with user images judgment matrix and weight

a	b	c	权重 w
b	1	2	0.6667
c	1/2	1	0.3333

表 2 “功能” 准则判断矩阵及权重

Tab.2 Judgment matrix and weight of “function” criteria

b	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	权重 w ₁
b ₁	1	1/2	2	1/2	0.1906
b ₂	2	1	3	2	0.4182
b ₃	1/2	1/3	1	1/2	0.1205
b ₄	2	1/2	2	1	0.2707

表 3 “形态” 准则判断矩阵及权重

Tab.3 Judgment matrix and weight of “form” criteria

c	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	权重 w ₂
c ₁	1	1/2	3	2	0.2926
c ₂	2	1	3	2	0.4155
c ₃	1/3	1/3	1	1/2	0.1070
c ₄	1/2	1/2	2	1	0.1849

配机器人平台创新设计方案集，包含 3 个方案，见图 6，从左至右分别为方案 1、方案 2、方案 3。

其次，基于综合模糊评价法，对 3 个设计方案进行设计评价，具体如下。

第一，确定 5 个专家用于设计评估的要素及其对应的标准。具体而言，评价将依据层次模型中方案层的要素开展，设定 4 个评价等级，包含优秀、良好、合格、差，为方便量化处理，将 4 个等级由高到低分别赋值为 90 分、80 分、60 分和 50 分。

第二，确定各要素的权重向量。小型全方位装配机器人平台设计各要素的权重向量依据层次分析的结果(表 1—3)可知，准则层 $w_a=(0.6667\ 0.3333)$ ；方案层各评估要素的权重向量 $w_b=(0.1906\ 0.4182\ 0.1205\ 0.2707)$ ， $w_c=(0.2926\ 0.4155\ 0.1070\ 0.1849)$ 。

第三，构建模糊综合评价矩阵并生成评价结果，验证设计流程的可行性。为提高评价的客观性，具体

表 4 方案层要素基本修正权重

Tab.4 Basic revised weights of elements at scheme level

方案层要素	评价情况 (1~5 分)					总分	归一化结果 \bar{f}
	5	4	3	2	1		
b ₁	1	2	2	0	0	19	0.125
b ₂	3	2	0	0	0	23	0.151
b ₃	1	1	3	0	0	18	0.118
b ₄	1	2	2	0	0	19	0.152
c ₁	1	1	3	0	0	18	0.118
c ₂	3	2	0	0	0	23	0.151
c ₃	0	1	3	1	0	15	0.099
c ₄	0	2	3	0	0	17	0.112

表 5 设计要素的权重修正值

Tab.5 Weight correction values of design elements

设计要素	权重修正值 f_i	最终权重值	排序
b ₁	0.3300	0.5206	6
b ₂	0.4972	0.9154	1
b ₃	0.3618	0.4823	7
b ₄	0.3570	0.6277	3
c ₁	0.3246	0.6172	4
c ₂	0.4444	0.8599	2
c ₃	0.3056	0.4126	8
c ₄	0.4054	0.5903	5

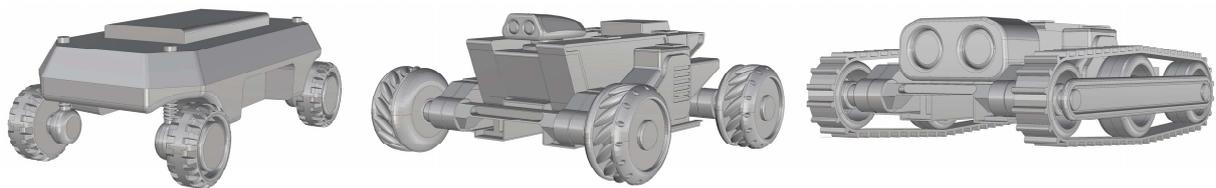


图 6 设计方案集

Fig.6 Design scheme set



图 7 设计效果

Fig.7 Design effect diagram

评价仅统计专家的打分次数，以方案 2 为例，针对准则层的评价矩阵如下（ S_1 表示“功能”的评价矩阵， S_2 表示“形态”的评价矩阵）：

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 \\ 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \end{bmatrix}$$

根据评价矩阵，计算准则层对方案 2 的评价权重（用 P_1 、 P_2 表示）如下： $P_1 = w_b * S_1 = [0.4133 \ 0.4080 \ 0.1785 \ 0]$ ， $P_2 = w_c * S_2 = [0.4249 \ 0.3572 \ 0.1381 \ 0.0798]$ 。

以此构建二级评判矩阵：

$$P = [P_1 \ P_2]^T = \begin{bmatrix} 0.4133 & 0.4080 & 0.1785 & 0 \\ 0.4249 & 0.3572 & 0.1381 & 0.0798 \end{bmatrix}$$

然后，计算方案 2 的综合评价矩阵（用字母 M 表示）和百分制评价结果（用字母 N 表示）： $M = w_a * P = [0.4172 \ 0.3911 \ 0.1650 \ 0.0266]$ ； $N = M * H = 80.07$ 。以此类推，方案 1 得分为 62.60；方案 3 得分为 70.93，可知，在方案集中，通过评价得出方案 2 为最优。

具体而言，重点针对设计要素 b_2 模块化，方案 2 平台使用了模块化结构设计，由麦克纳姆轮式的行走装置及连接件构成基本的平台底座，在底座上安装功能模块，且可根据需求选择末端执行器，适用于多种工作场景；针对设计要素 c_2 安全的，方案 2 选用扁平式的整体造型，在功能模块的形态设计上选取了较为方正的几何形态。同时，采用麦克纳姆轮式行走装置，且底座为合金材料框架，增强了整体稳定、可靠的意象；针对设计要素 b_4 机动化，方案 2 采用麦克纳姆轮式行走装置底座，具有重心低、附着系数大、抵抗翻倾良好等稳定性特征，以及转弯半径小、爬坡能力强的机动性能，对于复杂的装配环境具备较好的适应性，特别是配装麦克纳姆轮后，可满足全地形作业需求。针对设计要素 c_1 简洁的，方案通过基本的行走装置、功能模块及末端执行器进行组装，且主色为灰白色，副色为橙色、黑色和金属灰，操作界面简单明确，从而满足用户针对“简洁的”需求意象。此外，结合其他设计要素也进行了形态设计，如视觉模

块的拟人化设计。在材料选择上，以质量轻、强度高的复合材料为主等。方案 2 最终设计效果见图 7。

4 结语

在装配机器人造型设计研究中，引入模糊综合评价法（FAHP）与熵权理论，完成了要素及类目的权重分析，为装配机器人造型设计提供决策，构建了面向装配机器人造型设计的开发流程。主要结论有三点。

第一，各设计要素的权重分析通过两个步骤完成，即依据层次分析法计算各要素初步权重值，引入熵权理论完成各要素修正权重的分析与计算，拟合为最终权重并排序，从而提供了可信度更高的设计决策依据。第二，依据设计要素的权重关系分析进行了小型全方位装配机器人创新设计实践，形成 3 个方案，并进行了模糊评价。其中方案 2 评价分值最高，且方案 2 确实选取了权重较高的要素，如 b_2 模块化、 c_2 安全的、 b_4 机动化、 c_1 简洁的来进行针对性设计，因此，实践过程能够验证流程的可行性。然而值得注意的是，评价仍旧依据专家的主观打分，应在今后的研究中应提高设计验证的客观性。第三，设计流程主要通过层次分析法和熵权理论的介入，进行需求要素的权重计算和造型要素的提取，完成了用户感性意象和产品造型设计间的匹配，形成了创新方案集，并采用模糊评价筛选最优方案。因此，设计流程也适用于其他机器人产品的造型设计开发，本文仅以小型全方位装配机器人平台设计为例进行说明，尤其是在其他同类产品的开发过程中需有针对性地构建设计要素层次模型。

参考文献：

- [1] WU L, YANG X D, CHEN K, et al. A Minimal POE-based Model for Robotic Kinematic Calibration with Only Position Measurements[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 12(12): 758-763.
- [2] CHANG LONG Y E, ZEHUI T, SUYANG Y U, et al. Kinematic Analysis of an Omnidirectional Mobile Assembly Robot[J]. Robot, 2016(38): 550-556.
- [3] DONGCHEN L, JUNZHENG W, SHOUKUN W, et al.

- Omnidirectional Gait Switching Method of Electric Parallel Wheel-foot Robot Based on Velocity Vector[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019(55): 17-24.
- [4] 蒋澄灿, 芮延年. 不平路面全方位移动机器人智能控制技术的研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2017(5): 13-21.
- JIANG Cheng-can, RUI Yan-nian. Research on the Intelligent Control Technology of the Uneven Road Omnidirectional Mobile Robot[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2017(5): 13-21.
- [5] 李兵, 傅卫平, 王雯, 等. 一种基于 EIH 的装配机器人标定方法[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(7): 38-44.
- LI Bing, FU Wei-ping, WANG Wen, et al. EIH Based Calibration Method for Assembly Robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(7): 38-44.
- [6] MUIR P F, NEUMAN C P. Dynamic Modeling of Multibody Robotic Mechanisms: Incorporating Closed-chains, Friction, Higher-pair Joints, and Unactuated and Un sensed Joints[C]. San Diego: IEEE, 1988.
- [7] REN C, MA S G. Analysis and Control of An Omnidirectional Mobile Robot[C]. Piscataway: IEEE, 2013.
- [8] 常瑜, 唐琳, 田园. 基于耦合特性分析的安保机器人造型设计研究[J]. *包装工程*, 2019, 40(8): 123-129.
- CHANG Yu, TANG Lin, TIAN Yuan. Coupling Characteristics Study in Modeling Design of Security Robot[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(8): 123-129.
- [9] SHI H, LIN Z, ZHANG S, et al. An Adaptive Decision-making Method with Fuzzy Bayesian Reinforcement Learning for Robot Soccer[J]. *Information Sciences an International Journal*, 2018(4): 436-437.
- [10] AJAY G D C, SENTHIL KUMAR V S. Analysis on Critical Success Factors for Agile Manufacturing Evaluation in Original Equipment Manufacturing Industry-an AHP Approach[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(5): 880-888.
- [11] 王淼, 余隋怀, 杨延璞. 基于 AHP-GEM 模糊分析的飞机驾驶舱人机界面评价[J]. *机械设计*, 2017(2): 109-113.
- WANG Miao, YU Sui-huai, YANG Yan-pu. Human-machine Interface Evaluation of Aircraft Cockpit Based on Fuzzy AHP-GEM[J]. *Journal of Machine Design*, 2017(2): 109-113.
- [12] 熊卫红, 张宏志, 谢志成, 等. 基于云理论及熵权法的变压器潜在故障风险评估方法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(8): 132-137.
- XIONG Wei-hong, ZHANG Hong-zhi, XIE Zhi-cheng, et al. Risk Assessment of Power Transformer Potential Fault Based on Cloud Theory and Entropy Weight Method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(8): 132-137.
- [13] 闫欣欣, 袁振洲, 毛思捷. 基于熵权-TOPSIS 模型的慢行交通与城市设计协调评价方法[J]. *公路交通科技*, 2018(9): 107-114.
- YAN Xin-xin, YUAN Zhen-zhou, MAO Si-jie. Coordination Evaluation of Non-motorized Traffic and Urban Design Based on Entropy Weight-TOPSIS Model[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018(9): 107-114.
- [14] MOURIOUX G, NOVALES C, POISSON G. Omnidirectional Robot with Spherical Orthogonal Wheels: Concepts and Analyses[C]. Chengdu: IEEE, 2012.
- [15] 臧红彬, 许雄, 周颖玥, 等. 具有全方位移动和越障功能的新型机器人的设计[J]. *机械传动*, 2016(6): 63-69.
- ZANG Hong-bin, XU Xiong, ZHOU Ying-yue, et al. Design of A Novel Robot with Omni-directional Mobile and Obstacle-crossing Function[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2016(6): 63-69.