

基于 AHP-FKANO 模糊分析法的 医用消毒机器人设计评估

史蕊丹, 石元伍, 周俊杰, 曹洁
(湖北工业大学, 武汉 430068)

摘要: **目的** 为有效预防和控制医院感染, 提高医院环境的宜人性, 增加用户满意度, 在探讨影响医用消毒机器人的设计因素时, 合理地确定用户需求偏好及其优先程度。**方法** 首先通过文献研究、实地观察、半结构化访谈和问卷调查等前期调研法, 获得用户需求, 并对其进行公信度测评, 从而得到医用消毒机器人设计方案评价指标体系, 然后通过层次分析法得到初始权重, 根据模糊 Kano 确定的属性系数将初始权重进行修正, 以得到更加科学、合理的综合权重, 最后运用模糊数学理论对整体设计方案和各个指标进行评价。**结论** 通过医用消毒机器人的实例验证了该方法的可靠性和可行性, 并且基于 AHP-FKANO 的模糊分析法, 能够有效分析出用户需求的重要度和不同需求的情感倾向, 可以为医用消毒产品设计方案的选择和优化提供参考。

关键词: 医用消毒机器人; 需求分析; 模糊层次分析法; 模糊 KANO

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)08-0128-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.08.017

Design Evaluation of Medical Disinfection Robot Based on AHP-FKANO Fuzzy Analysis

SHI Rui-dan, SHI Yuan-wu, ZHOU Jun-jie, CAO Jie
(Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: In order to effectively prevent and control nosocomial infection, improve the humanization of hospital environment, and increase user satisfaction, the user preference and priority should be reasonably determined when discussing the design factors of medical disinfection robot. First of all, through literature research, field observation, semi-structured interview and questionnaire survey and other preliminary research methods, the user needs are obtained and the public reliability evaluation is carried out, so as to obtain the evaluation index system of medical disinfection robot design scheme; then, the initial weight is obtained by AHP, and the initial weight is modified according to the attribute coefficient determined by fuzzy Kano to get more scientific and more comprehensive. Finally, fuzzy mathematics theory is used to evaluate the overall design scheme and each index. The reliability and feasibility of the method are verified by an example of a medical disinfection robot. The fuzzy analysis method based on AHP-FKANO can effectively analyze the importance of user requirements and the emotional tendency of different needs, which can provide reference for the selection and optimization of the design scheme of medical disinfection products.

KEY WORDS: medical disinfection robot; demand analysis; fuzzy analytic hierarchy process; fuzzy Kano

医院是集合了患者、家属和医务工作者等人员的
密集场所, 其具有人流量大、人员复杂等特点, 极易

造成各种病原体传播的风险, 严重威胁到医院内人员
的安全。医院感染不仅是医疗质量管理中的一个非常

收稿日期: 2021-11-24

作者简介: 史蕊丹 (1994—), 女, 硕士生, 主攻医用智能产品设计、交互与体验设计。

通信作者: 石元伍 (1971—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为医用智能产品设计、老年人产品设计。

重要的问题,而且已成为日趋突出的世界公共卫生问题。根据相关研究表明,全球每年有数以亿计的患者在接受医疗服务时发生感染而导致病情加重,更有甚者还会危及生命,并且由于患者的住院时间延长,将带来患者的诊疗费用增加、医务人员的工作量加重等一系列后果^[1]。2019 年国内爆发了新型冠状病毒肺炎 (COVID-19),它是由新型冠状病毒 (SARS-CoV-2) 引起的急性呼吸道传染病^[2],传染性强且人群普遍易感。2020 年 9 月 24 日,青岛市某医院隔离观察期间有人离开封闭区进入 CT 室进行检查,由于防护、消毒工作不规范,引发了院内外一系列感染问题,所以医院环境质量和医院内人员健康安全又一次引起了大家的高度重视。

医用消毒产品能有效预防和控制医院感染,为用户提供一个更加健康、宜人的医院环境。随着科技的发展,现阶段计算机技术和人工智能已经渗透到医疗领域的方方面面^[3]。相比于传统消毒产品及人工消毒,医用消毒机器人具有消毒更彻底,以及高效、安全、灵敏等特点,因此越来越受到大家的关注。目前市面上的医用消毒机器人多重功能的实现,忽视了用户的情感需求,造型同质化严重,导致用户体验感不佳。产品始终是为服务,因此产品的研发和规划需要以满足用户需求为核心基础,以提高用户满意度为目标^[4]。笔者通过 AHP 与 FKANO 组合赋权,综合考虑用户需求优先级和偏好,得到更加科学、合理的综合权重^[5],根据模糊数学理论对整体方案和各个指标分别进行评价,使产品设计评价更加

合理、客观。

1 医用消毒机器人概述

医用消毒机器人由微电脑控制,可实现实时实地监测医院环境质量并做出反馈,能有效降低医院感染率。产品主要分为感知监测模块、控制操作模块、移动模块、消毒净化模块。

1) 感知监测模块。机器人通过安装的测距传感器、红外线传感器、VOC 传感器、激光粉尘传感器等各类传感器来获取室内空气质量、自身的位置等基本信息,例如高精度传感器检测 PM 2.5、甲醛、甲苯、温度及湿度等多项指标,并通过监测指示灯的颜色变化来显示实时、实地的环境质量。

2) 控制操作模块。微电脑通过对各种信息进行分析处理,并结合产品的功能按键和 APP 远程操作 2 种模式,来完成对产品功能的实现。

3) 移动模块。不同算法和类别的导航,其灵敏度和路线规划的智能程度有很大区别,常见的导航方式按照灵敏度从大到小依次为 dToF (时间飞行测距) > 激光导航 > 视觉导航,3D 结构光的物体识别避障效果远高于红外传感器,消毒净化模块细分为消毒与净化 2 个子模块。

4) 消毒方式主要分为物理消毒和化学消毒两大类,笔者以物理消毒方式——紫外线灯进行消毒为例,净化模块依据不同科室的位置和环境,来设置不同的净化功能模块。产品主要工作流程见图 1。

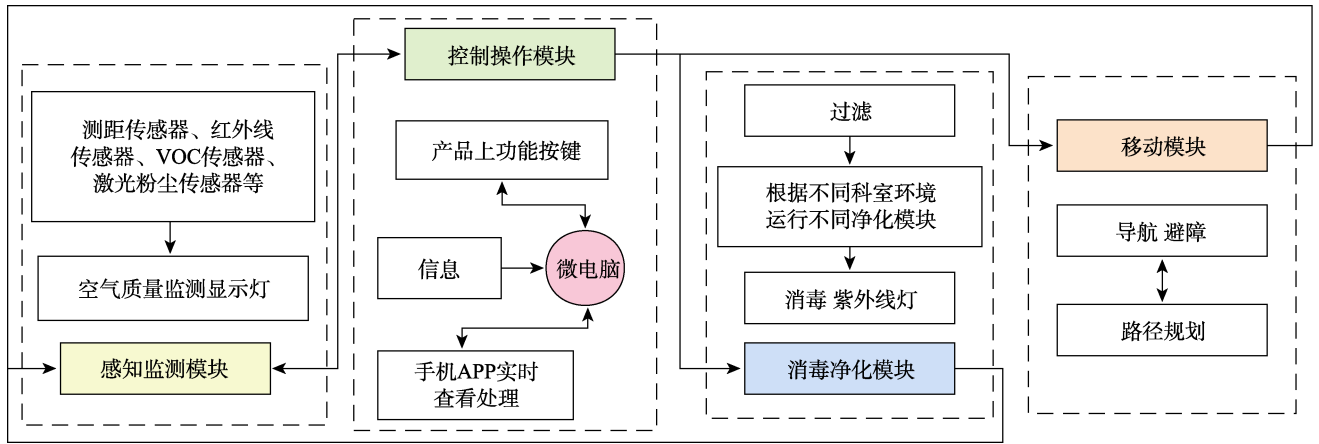


图 1 产品主要工作流程
Fig.1 Main work flow chart of the product

1.1 用户需求分析

用户需求的获取是产品设计的关键和前提,因此获取产品需求信息时,一般要遵循全面性、深入性、广泛性、突出性和建议性 5 个原则^[6]。首先通过前期调研确定初始指标,其次通过公信度评测将值低于 0.5 的指标进行剔除,最终构建出医用消毒机器人的设计方案评价指标体系。

1.1.1 初始评价指标

通过对医用消毒产品的特征市场进行调研,并查阅相关文献资料,在医院采用实地观察法对目标进行一段时间的调研,同时也对医院工作人员、患者和家属进行半结构化访谈,并对专家和用户进行问卷调查。通过有针对性地制订调研问卷可以发现,用户对医用消毒机器人的需求主要集中在以下几个方面:智

能监测及反馈功能,产品内置感应器,可以实时、实地智能监测当前环境质量并快速做出反馈;消毒净化功能结构模块,产品主要通过紫外线灯进行消毒,紫外线不能直接与用户接触,在实现产品功能结构时,需要考虑安全性;操作界面设计,由于产品具有特殊性,所以需要由专业人员进行操作,APP 界面风格简约符合医院的环境定位,可以使专业人员操作更加高效;考虑到产品在白天也会工作,因此噪音要小,以提供宜人的医院环境;产品造型简洁、大方,色彩干净、柔和。

共收集 23 个初始指标,并将安全性、舒适性、便利性指标作为医用消毒机器人设计评价指标体系的一级指标。

1.1.2 最终评价指标

选用公信度评测方法对指标进行筛选^[7]。邀请专家团队 120 人,包括医护人员、病患、家属、医院采购人员、技术人员及设计师。通过问卷形式,让专家团队从 23 个初始评价指标中选择对产品本身有重要影响的评价指标,共发出 110 份问卷,去掉 3 份不合理的问卷,得到 107 份有效问卷。指标公信度公式如下:

$$H = \frac{G}{N} \tag{1}$$

式(1)中, H 为指标公信度; G 为选择该指标的专家人数; N 为有效问卷的数量。剔除 H 值低于 0.5 的指标,最后得到 9 个子准则层指标,分别为结

构合理 A_1 、技术成熟 A_2 、专人操作 A_3 、造型美观 B_1 、色彩柔和 B_2 、低噪音 B_3 、实时监测 C_1 、及时反馈 C_2 和交互界面 C_3 ,见表 1。

表 1 医用消毒机器人设计方案评价指标体系
Tab.1 Evaluation index system for design scheme of medical disinfection robot

目标层	医疗环境消毒产品的评价 X		
准则层	安全性 A	舒适性 B	便利性 C
子准则层	结构合理 A_1	造型美观 B_1	实时监测 C_1
	技术成熟 A_2	色彩柔和 B_2	及时反馈 C_2
	专人操作 A_3	低噪音 B_3	交互界面 C_3

2 基于 AHP-FKANO 的模糊评价法设计思路

评价设计思路分为 2 个阶段,即用户需求分析阶段和设计评价阶段。需求分析阶段:首先通过层次分析法对需求进行分阶判断、权重计算、一致性检验等。FKANO 通过对用户需求进行模糊卡诺问卷,根据卡诺评估表进行评估,得到模糊 KANO 调查结果表,对用户需求属性进行分类,并确定属性系数。最后用 FKANO 得到的属性系数来修正层次分析法获得的初始权重,从而得到综合权重。设计评价阶段:专家根据评价集对产品指标进行打分,并构建模糊关系矩阵,各评价指标综合权重和对应评价指标的模糊关系矩阵通过合成运算,进而得到综合评价结果向量。基于 AHP-FKANO 的模糊评价法设计思路见图 2。

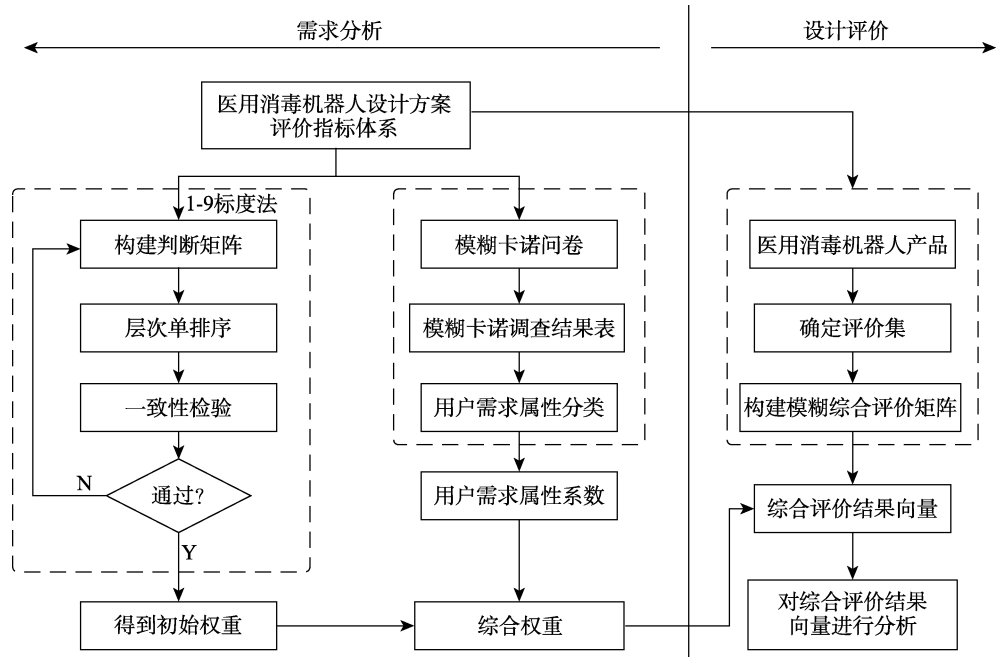


图 2 基于 AHP-FKANO 的模糊评价法设计思路
Fig.2 Design idea of fuzzy evaluation based on AHP-FKANO

2.1 模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评

价法,能有效减少评价主体的主观因素和不确定信息对决策过程的影响,使评价过程更加客观、合理^[8-9],

因此常用来解决多属性评价与决策中的指标权重问题。具体评价过程如下。

- 1) 确定评价指标集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 。
- 2) 确定评语等级评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 评价等级一般为很满意、满意、一般、不满意、很不满意。
- 3) 建立模糊关系矩阵:
- $$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{23} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$
- 4) 确定各评价指标的权向量: $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。
- 5) 合成模糊综合评价结果向量:

$B = W \cdot R =$

$$(w_1, w_2, \dots, w_m) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{23} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} =$$

$(b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (3)$

2.2 权重的确定

2.2.1 层次分析法确定初始权重的方法

层次分析法是由美国运筹学专家 Saaty 在 1970 年提出的一种解决多目标复杂问题的决策方法。它是将与决策有关的指标分成目标层、准则层、子准层等, 然后进行定性 & 定量相结合的分析决策^[10]。采用 1—9 标度法 (见表 2), 对评价体系中各评价指标进行两两比较, 以此构建判断矩阵, 然后把判断矩阵的最大特征向量的分量作为相应的系数, 最后计算出准则层和各子准则层评价指标所对应的权重。AHP 法计算权重共有 4 种方法^[11]: 特征向量法、最小二乘法、几何平均法、算术平均法。以下选择常用的算术平均法, 具体步骤如下所述。

表 2 元素相对重要性的比例标度
Tab.2 Scale of relative importance of elements

标度值	相对重要性含义
1	评价指标 A 和 B 一样重要
3	评价指标 A 比 B 稍微重要
5	评价指标 A 比 B 明显重要
7	评价指标 A 比 B 强烈重要
9	评价指标 A 比 B 绝对重要
2, 4, 6, 8	重要程度介于两者之间

- 1) 对判断矩阵每列元素做归一化处理:

$$\overline{C}_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_{k=1}^n C_{kj}} \quad (4)$$

式中: $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

- 2) 按行相加归一化后的判断矩阵:

$$\overline{W}_i = \sum_{j=1}^n \overline{C}_{ij} \quad (5)$$

- 3) 将相加得到的向量归一化处理, 即为近似特征根:

$$W_i = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{j=1}^n \overline{W}_j} \quad (6)$$

- 4) 进行一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(CW)_i}{nW_i} \quad (8)$$

式中: CR 为判断矩阵的一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为最大特征值; n 为判断矩阵阶数。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

式中: CR 为判断矩阵的一致性比率; RI 为随机一致性指标;

当 $CR < 0.1$ 时, 即认为判断矩阵具有满意的一致性, 否则就要重新调整矩阵。1—9 阶 RI 值见表 3。

表 3 1—9 阶判断矩阵 RI 值
Tab.3 RI value of judgment matrix of order 1-9

n	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2.2.2 FKANO 确定的调整系数

模糊卡诺是针对传统 KANO 模型对用户需求满意度具有的模糊性特点而提出来的。传统 Kano 模型只允许顾客选择一个最满意的答案, 见表 4。模糊 Kano 调研允许顾客对不止一个选项给予满意度数值, 用区间[0,1]内的某个模糊满意度值, 来表示用户对产品各指标的满意度^[6], 每行数值和为 1, 从而使顾客的需求分类调查更加准确, 见表 5。KANO 模型将用户需求分为 5 类: 兴奋型需求 A、期望型需求 O、无差异型需求 I、反向型需求 R、必备需求 M^[12]。具体步骤: 采用模糊卡诺问卷调查表进行调研; 根据 Kano 评估表, 使用频数最大法确定评价指标所属类别, 见表 6; 确定顾客满意程度的属性系数 λ_j ($j = 1, 2, \dots, m$)。 λ_j 值由评审专家依据经验来选取^[8,13], 卡诺类别 A、O、M、I 对应的属性系数 λ_j 值分别取 3、2、1、0。

表 4 传统卡诺问卷调查
Tab.4 Traditional Kano questionnaire

产品的功能	满足	必须这样	中立	可忍受	不满足
可实现			√		
不能实现					√

表 5 模糊卡诺问卷调查
Tab.5 Fuzzy Kano questionnaire

产品的功能	满足	必须这样	中立	可忍受	不满足
可实现	0.3	0.4	0.2	0.1	
不能实现				0.7	0.3

表 6 Kano 评估
Tab.6 Kano assessment

需求指标	不具备				
	满意	理当如此	无所谓	勉强可以	不能接受
满意	Q	A	A	A	O
理当如此	R	I	I	I	M
无所谓	R	I	I	I	M
勉强可以	R	I	I	I	M
不能接受	R	R	R	R	Q

2.2.3 综合权重确定的方法

层次分析法得到的初始权重为 w_j ，模糊 KANO 得到权重调整系数为 λ_j ，可以得出各个评判指标的最终权重 w_j^{adj} 如下：

$$w_j^{adj} = \frac{W_j \lambda_j}{\sum_{j=1}^m W_j \lambda_j}, j = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

3 实例验证

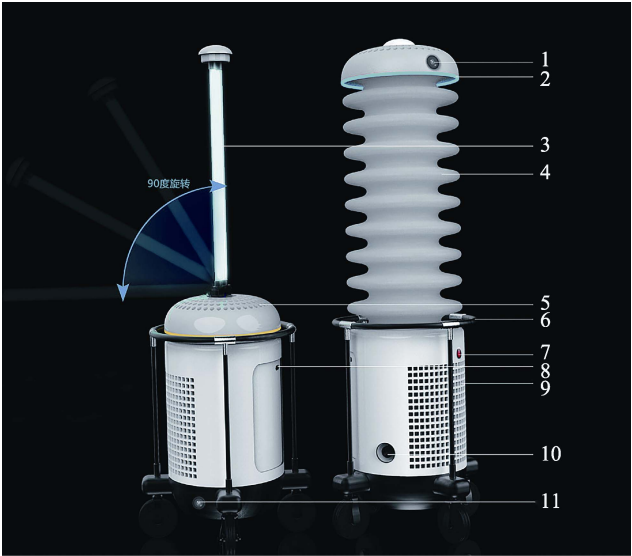
3.1 评价对象

根据前期调研结果，并将已有的计算机技术和人工智能结合到具体设计方案中，根据安全性 A、舒适性 B、便利性 C 等 3 种设计要素对医用消毒机器人进行分析设计，见图 3—5。



图 3 产品工作场景
Fig.3 Product work scenario diagram

1) 安全性 A。产品侧面进风，上端出风；产品中部侧面设有红色紧急开关按钮，并且手机 APP 操作有权限设置；通过按压可以打开滤网模块控制板，方便后期维护；智能监测模块通过高精度传感器可以灵敏检测 PM2.5、甲醛、甲苯、温度及湿度等多项指标，并通过监测指示灯颜色变化可以显示实时实地的环境质量；升级版的 dToF 模组激光扫描的建图速度



1—激光传感器；2—监测显示灯；3—UVC 灯；4—保护外壳；5—出风口；6—人机移动与保护环；7—紧急开关按钮；8—面板按钮；9—进风口；10—电源；11—3D 结构光传感器。

图 4 医用消毒机器人产品
Fig.4 Medical disinfection robot product map

更快，且不再需要激光发射孔和接收孔，还能做成全封闭式的，可以防止落灰引起的硬件故障，产品底部侧面的前部是 3D 结构光传感器模组，可以精确感知前方物体形态数据，实时、精准避障，使建图和避障的可靠性更高；出风口下的弹性保护外壳在微电脑控制下可以伸缩，有人时，紫外线灯不裸露，只对空气进行消毒，无人时，紫外线灯可以裸露并且能在智能系统控制下旋转 90°，对物体表面和空气都能进行全面、彻底的消毒；根据医院不同科室位置、环境的不同，设置 5 种净化功能模块，分别为 HEPA 模块、活性炭模块、ACF 模块、光催化模块及负离子模块，模块化的设计可以方便专业人员进行更换；考虑到产品的使用环境，以及服务的用户的特殊性，专业工作人员可以通过 APP 实时实地查看，使操作更加高效、安全。产品所使用的传感技术、智能控制技术、路径规划技术、计算机技术及对应的传感器、控制器等已广泛应用于各种高端、智能产品，例如人脸识别手机、无人驾驶汽车、扫地机器人等。

2) 舒适性 B。产品的外观造型以简单圆柱体为主，无多余装饰，整体流畅、平滑、简约；产品主体采用白色 ABS 塑料，局部搭配黑色、银色和红色，保护外壳为弹性复合 PVC 材质，轮子为黑色 ABS+

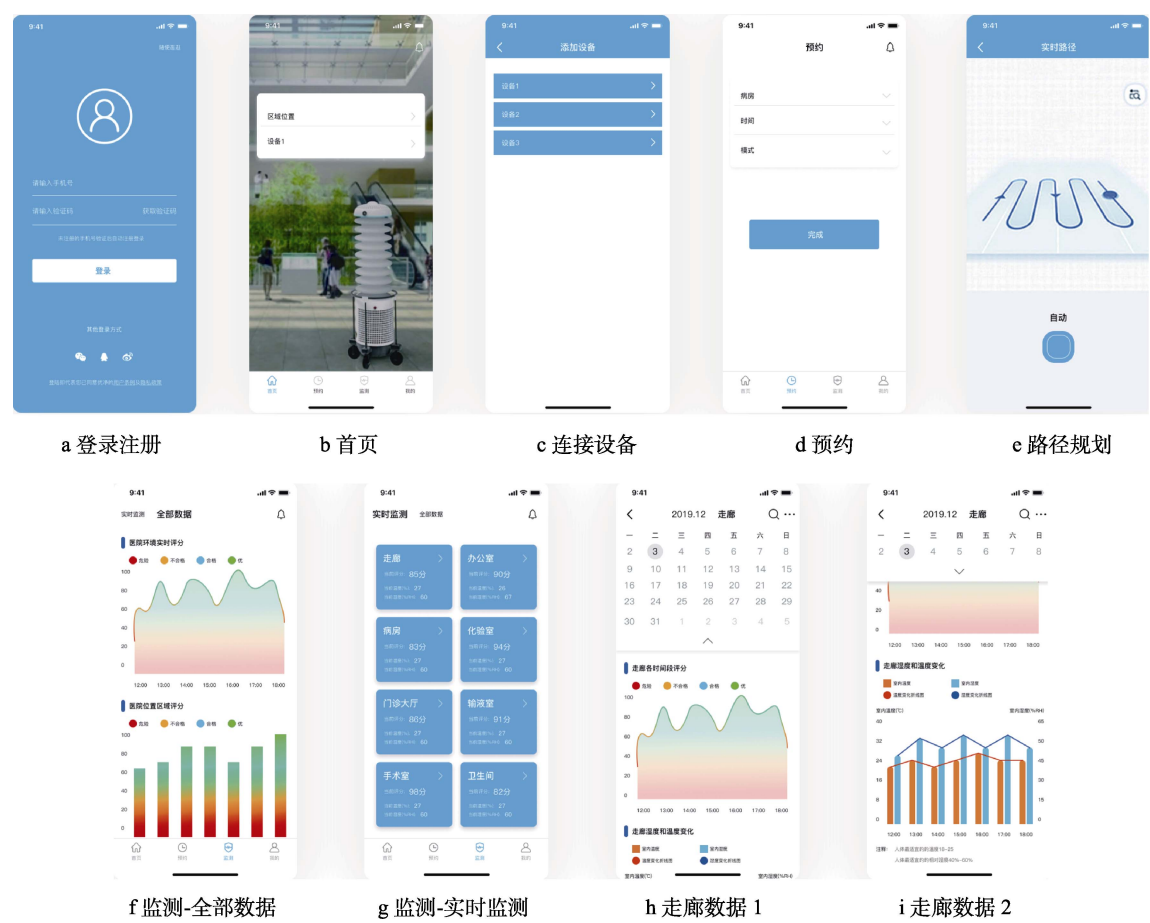


图 5 医用消毒机器人 APP 界面 (部分)
Fig.5 APP interface of the medical disinfection robot (partial)

聚氨酯橡胶,产品整体与服务的环境和用户有较好的融合,给人以专业、安全、信赖的感觉^[14];产品的消毒、净化工作主要分为主动和被动 2 种,该产品采用被动式,即通过风机将产品周围空气吸入产品内部进行过滤、净化、消毒后排出,产品主要的噪音来自产品内部的风机,安装低分贝的风机,能有效降低噪音。

3) 便利性 C。高精度传感器可以实时实地监测环境质量,拥有产品顶部监测指示灯颜色变化和手机 APP 显示 2 种反馈形式;产品 APP 界面分为首页、预约、监测和我的 4 个一级页面,界面风格高效、简约,颜色以蓝色和白色为主,整体设计符合医院环境,一级监测页面有实时监测和全部数据 2 个页面,可以方便专业人员查看医院整体和医院具体位置的空气质量,二级监测页面的日期模块采用折叠设计,可以便于专业人员进行查看及操作,数据信息通过可视化表现,能帮助专业人员实时实地更高效地监测、分析医院环境,并作出反馈。

3.2 层次分析法确定设计方案评价指标初始权重

邀请 25 名专家,并运用 1—9 标度法对图 3—5 的医用消毒机器人的产品评价体系中的各评价指标进行两两比较,从而构造判断矩阵,并依据式(4)—(9)进行计算,得到安全性、舒适性、便利性权重,

并对其一致性进行检验,见表 7。

表 7 准则层指标权重及一致性检验					
Tab.7 Index weight and consistency test of criterion layer					
评价指标	权重	$\lambda_{\max}$	CI	RI	CR
X	(0.655 5,0.157 8, 0.186 7)	3.029 2	0.014 6	0.58	0.025 2

根据表 7 可知,一级评价指标对应的判断矩阵的 CR 值小于 0.1,一致性检验通过。同理计算出子准则层的权重并进行一致性检验,见表 8。

表 8 子准则层指标权重及一致性检验			
Tab.8 Index weight and consistency test of sub criteria layer			
评价指标	权重	CR	一致性检验是否通过
A	(0.405,0.375,0.220)	0.045 1	是
B	(0.363,0.323,0.314)	0.037 0	是
C	(0.418,0.312,0.270)	0.013 6	是

3.3 FKANO 确定属性系数

针对用户情感偏好,采用 FKANO 模型进行需求

分类。邀请 120 名专家，通过发放 FKANO 问卷来获取实验数据，去掉 3 份不合理问卷和 2 份空白问卷，得到有效问卷 115 份。对结果进行统计分析，见表 9。

表 9 模糊 Kano 调查结果
Tab.9 Fuzzy Kano survey result

准则层	子准则层	M	A	I	O	R	类别
安全性 <i>A</i>	结构合理 A_1	76	23	6	10	0	M
	技术成熟 A_2	50	30	7	28	0	M
	专人操作 A_3	39	27	13	28	8	M
舒适性 <i>B</i>	造型美观 B_1	21	40	18	30	6	A
	色彩柔和 B_2	30	24	23	38	0	O
	低噪音 B_3	34	40	11	25	5	A
便利性 <i>C</i>	实时监测 C_1	36	30	10	32	7	M
	及时反馈 C_2	36	15	14	50	0	O
	交互界面 C_3	20	34	15	40	6	O

由表 9 的统计结果可得出，必备需求 M 包括：结构合理 A_1 、专人操作 A_3 、实时监测 C_1 和技术成熟 A_2 。期望型需求 O 包括：色彩柔和 B_2 、及时反馈 C_2 和交互界面 C_3 。兴奋型需求 A 包括：造型美观 B_1 、低噪音 B_3 。

3.4 综合权重确定

将层次分析法得到的初始权重和 FKANO 得到的属性系数代入式（10）求得综合权重，见表 10。

表 10 各指标权重调整
Tab.10 Weight adjustment for each indicator

准则层	子准则层	初始权重	属性系数	最终权重
安全性 <i>A</i>	结构合理 A_1	0.405	1	0.405
	技术成熟 A_2	0.375	1	0.375
	专人操作 A_3	0.220	1	0.220
舒适性 <i>B</i>	造型美观 B_1	0.363	3	0.406 799
	色彩柔和 B_2	0.323	2	0.241 315
	低噪音 B_3	0.314	3	0.351 886
便利性 <i>C</i>	实时监测 C_1	0.418	1	0.329 134
	及时反馈 C_2	0.312	1	0.245 669
	交互界面 C_3	0.270	2	0.425 197

3.5 方案模糊综合评价

依据李克特量表 5 分制量化各个指标的用户满意度^[15]， $V=\{\text{很满意，满意，一般，不满意，很不满意}\}=\{5,4,3,2,1\}$ ，邀请专家分别对每个指标进行等级打分，数据归一化处理后评价结果如下。

安全性综合评价变换矩阵：

$$R_A = \begin{bmatrix} 0.45 & 0.4 & 0.1 & 0.05 & 0 \\ 0.5 & 0.2 & 0.15 & 0.1 & 0.05 \\ 0.25 & 0.45 & 0.15 & 0.1 & 0.05 \end{bmatrix}$$

舒适性综合评价变换矩阵：

$$R_B = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.15 & 0.15 & 0 \\ 0.35 & 0.5 & 0.1 & 0.05 & 0 \\ 0.35 & 0.45 & 0.1 & 0.05 & 0.05 \end{bmatrix}$$

便利性综合评价变换矩阵：

$$R_C = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.35 & 0.4 & 0.15 & 0.05 & 0.05 \\ 0.35 & 0.35 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

通过式(3)，可得出安全性评价向量：

$$B_A = (0.405, 0.375, 0.22) \cdot \begin{bmatrix} 0.45 & 0.4 & 0.1 & 0.05 & 0 \\ 0.5 & 0.2 & 0.15 & 0.1 & 0.05 \\ 0.25 & 0.45 & 0.15 & 0.1 & 0.05 \end{bmatrix} = (0.424\ 75, 0.336, 0.129\ 75, 0.079\ 75, 0.029\ 75)$$

舒适性评价向量：

$$B_B = (0.406\ 799, 0.241\ 315, 0.351\ 886) \cdot \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.15 & 0.15 & 0 \\ 0.35 & 0.5 & 0.1 & 0.05 & 0 \\ 0.35 & 0.45 & 0.1 & 0.05 & 0.05 \end{bmatrix} = (0.370\ 34, 0.401\ 046, 0.120\ 34, 0.090\ 68, 0.017\ 594)$$

便利性评价向量：

$$B_C = (0.329\ 134, 0.245\ 669, 0.425\ 197) \cdot \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.35 & 0.4 & 0.15 & 0.05 & 0.05 \\ 0.35 & 0.35 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{bmatrix} = (0.366\ 457, 0.345\ 827, 0.187\ 717, 0.087\ 717, 0.012\ 283)$$

由此可构造出总体指标模糊综合评价矩阵：

$$T = \begin{bmatrix} 0.424\ 75 & 0.336 & 0.129\ 75 & 0.079\ 75 & 0.029\ 75 \\ 0.370\ 34 & 0.401\ 046 & 0.120\ 34 & 0.090\ 68 & 0.017\ 594 \\ 0.366\ 457 & 0.345\ 827 & 0.187\ 717 & 0.087\ 717 & 0.012\ 283 \end{bmatrix}$$

该款医疗消毒机器人的最终评价向量：

$$B = (0.655\ 5, 0.157\ 8, 0.186\ 7) \cdot \begin{bmatrix} 0.424\ 75 & 0.336 & 0.129\ 75 & 0.079\ 75 & 0.029\ 75 \\ 0.370\ 34 & 0.401\ 046 & 0.120\ 34 & 0.090\ 68 & 0.017\ 594 \\ 0.366\ 457 & 0.345\ 827 & 0.187\ 717 & 0.087\ 717 & 0.012\ 283 \end{bmatrix} = (0.405\ 281, 0.348\ 099, 0.139\ 088, 0.082\ 962, 0.024\ 571)$$

结果表明，40.528 1%的评估者对该方案整体评价很满意，34.809 9%的评估者对该方案整体评价满意，13.908 8%的评估者对该方案整体评价一般，8.296 2%的评估者对该方案整体评价不满意，2.457 1%的评估者对该方案整体评价很不满意，按照最大隶属度原则，这款医用消毒机器人的综合评级结果为很满意，验证了该方案具有一定的科学合理性。

为了更直观地看到用户对不同指标的满意度，并对设计方案做进一步分析和改进，将各向量根据评价

等级分数表, 算出各评价因素的具体评价价值见表 11。

表 11 各指标权重评分值
Tab.11 Weight value of each index

一级指标		二级指标	
一级指标名称	一级指标分值	二级指标名称	二级指标分值
安全性 A	4.046 25	结构合理 A_1	4.25
		技术成熟 A_2	4
		专人操作 A_3	3.75
舒适性 B	4.015 858	造型美观 B_1	3.95
		色彩柔和 B_2	4.15
		低噪音 B_3	4
便利性 C	3.966 461	实时监测 C_1	4
		及时反馈 C_2	3.95
		交互界面 C_3	3.95

根据表 11 各指标评价价值可知, 一级指标安全性 A 的评价价值为 4.046 25, 舒适性 B 的评价价值为 4.015 858, 便利性 C 的评价价值为 3.966 461, 用户对产品方案安全性和舒适性比较满意。对二级指标层评分发现, 结构合理 A_1 、色彩柔和 B_2 这 2 个指标用户满意度较好, 而技术成熟 A_2 、低噪音 B_3 、实时监测 C_1 分值为 4, 表明这 3 个方面的设计基本符合用户的要求。其他指标的分值处于一般等级, 且分值都接近 4, 说明这些指标可以通过进一步分析来改进, 从而得到更高的用户满意度。

4 结语

在医用消毒机器人设计中, 由于该产品服务的环境和用户具有特殊性及其复杂性, 所以需要采用更加客观、科学、可量化的方法来进行评估。文中通过层次分析法来确定各指标权重, 带有主观性且未能准确反映用户真实需求的不足, 引入模糊卡诺法对其进行修正, 可以帮助决策者更加科学、准确地对设计方案进行评价。基于 AHP-FKANO 模糊分析法对产品设计方案进行综合性和细致化的评价, 能够直观地分析出用户需求优先程度和不同需求的情感偏好, 方便后续有针对性地结合技术来深入改进产品, 从而提高用户满意度, 并提升产品市场竞争力。后续笔者将从 2 个维度进行深入分析: 时间维度, 为了延长产品生命周期需要考虑动态变化的用户需求, 并结合大数据和深度学习, 以得到需求变化轨迹, 从而为后续优化产品设计提供数据参考; 空间维度, 分析不同地区的用户需求和偏好的差异, 并结合地区经济、环境等特征要素, 分析差异的根源, 更加全面、客观地了解用户需求和偏好。

参考文献:

[1] 郑英杰. 医院感染学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2017.
ZHENG Ying-jie. Nosocomial Infection[M]. Shanghai:

Fudan University Press, 2017.
[2] 袁月, 陈竹, 杨兴龙, 等. 新型冠状病毒肺炎定点医院收治医疗机构医院感染预防与控制措施[J]. 中华医院感染学杂志, 2020, 30(6): 817-820.
YUAN Yue, CHEN Zhu, YANG Xing-long, et al. Novel Coronavirus Pneumonia Fixed Point Medical Institutions Nosocomial Infection Prevention and Control Measures[J]. Chinese Journal of Nosocomial Infection, 2020, 30(6): 817-820.
[3] 田伟. 我国医用机器人的研究现状及展望[J]. 骨科临床与研究杂志, 2018, 3(4): 193-194.
TIAN Wei. Research Status and Prospect of Medical Robots in China[J]. Journal of Orthopedic Clinical and Research, 2018, 3(4): 193-194.
[4] 贺雪岚, 熊建新. 服务设计理念下的产品设计创新方法[J]. 包装工程, 2017, 38(20): 286-289.
HE Xue-lan, Xiong Jian-xin Innovative Methods of Product Design under the Concept of Service Design[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(20): 286-289.
[5] 石元伍, 韩珊. 基于 QFD 和 Kano 模型的医疗服务机器人造型设计研究[J]. 机械设计, 2017, 34(12): 121-125.
SHI Yuan-wu, HAN Shan. Modeling Design of Medical Service Robot based on QFD and Kano Models[J]. Machine Design, 2017, 34(12): 121-125.
[6] 白涛, 李中凯. 基于模糊 Kano 模型的顾客需求重要度计算方法[J]. 中国机械工程, 2012, 23(8): 975-980.
BAI Tao, LI Zhong-kai. Calculation Method of Customer Demand Importance Based on Fuzzy Kano Model [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(8): 975-980.
[7] 张文召, 吕健, 赵慧亮, 等. 基于 R-KANO 与 G-TOPSIS 法的产品设计方案多目标决策方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(7): 146-150.
ZHANG Wen-zhao, LYU Jian, ZHAO Hui-liang, et al. Multi Objective Decision Making Method of Product Design Scheme Based on R-kano and G-topsis[J]. Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2019(7): 146-150.
[8] 胡东方, 李奕辰, 李彦兵. 基于卡诺和人工免疫系统的顾客需求产品设计[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(10): 2536-2546.
HU Dong-fang, LI Yi-chen, LI Yan-bing. Customer Demand Product Design Based on Carnot and Artificial Immune System[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(10): 2536-2546.
[9] 齐继阳, 任丽娜, 高健, 等. 基于模糊层次分析法的海洋平台健康评估[J]. 机械设计与制造, 2016(6): 218-221.
QI Ji-yang, REN Li-na, GAO Jian, et al. Research on Evaluation of Health Status of Offshore Platforms Structure in Service[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(6): 218-221.
[10] 邹涛, 时昀. 层次分析法在儿童自行车设计中的应用[J]. 包装工程, 2019, 40(2): 161-166.
ZOU Tao, SHI Yun. Application of Analytic Hierarchy

- Process in the Design of Children's Bicycle[J]. Packaging engineering, 2019, 40(2): 161-166.
- [11] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- DENG Xue, LI Jia-ming, ZENG Hao-jian, et al. Analysis and Application of Analytic Hierarchy Process Weight Calculation Method[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.
- [12] 陈梅梅, 谢松年. 基于改进 Kano 模型的 B2C 网站顾客满意度影响研究[J]. 情报科学, 2016, 34(2): 83-86.
- CHEN Mei-mei, XIE Song-nian. Research on the Influence of B2C Website Customer Satisfaction Based on Improved Kano Model[J]. Information Science, 2016, 34(2): 83-86.
- [13] 唐中君, 龙玉玲. 基于 Kano 模型的个性化需求获取方法研究[J]. 软科学, 2012, 26(2): 127-131.
- TANG Zhong-jun, LONG Yu-ling. Research on the Method of Individual Demand Acquisition Based on Kano Model[J]. Soft Science, 2012, 26(2): 127-131.
- [14] 田少煦, 申品品, 郭昱竹. 基于眼动跟踪技术的色彩情感研究[J]. 现代传播(中国传媒大学学报), 2015, 37(6): 70-76.
- TIAN Shao-xu, SHEN Pin-pin, GUO Yu-zhu. Color Emotion Research Based on Eye Tracking Technology[J]. Modern communication (Journal of Communication University of China), 2015, 37(6): 70-76.
- [15] 汪柳, 邱越, 褚晓伟, 等. 基于眼动实验的电助力自行车电池盒隐蔽性设计评价[J]. 包装工程, 2020, 41(6): 247-251.
- WANG Liu, QIU Yue, CHU Xiao-wei, et al. Evaluation of Concealment Design of Electric Bicycle Battery Box Based on Eye Movement Experiment[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(6): 247-251.

责任编辑: 马梦遥

(上接第 114 页)

- [13] 乔现玲, 余晓庆, 李阳, 等. 基于感性工学在产品质感调和设计模型研究[J]. 包装工程, 2016, 37(14): 68-72.
- QIAO Xian-ling, YU Xiao-qing, LI Yang, et al. Research on Product Texture Harmony Design Model Based on Perceptual Engineering[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(14): 68-72.
- [14] 孙凌云, 孙守迁, 许佳颖. 产品材料质感意象模型的建立及其应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(2): 283-289.
- SUN Ling-yun, SUN Shou-qian, XU Jia-ying. Establishment and Application of Texture Image Model of Product Materials[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2009, 43(2): 283-289.
- [15] 苏建宁, 李鹤歧, 李奋强. 产品设计中的感性意象定位研究[J]. 兰州理工大学学报, 2004(2): 40-43.
- SU Jian-ning, LI He-qi, LI Fen-qiang. Research on Perceptual Image Positioning in Product Design [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004(2): 40-43.
- [16] 黄茜, 陈飞虎. 四大色彩体系对比分析研究[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 266-272.
- HUANG Xi, CHEN Fei-hu. Comparative Analysis of Four Color Systems[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 266-272.
- [17] 刘征宏, 潘伟杰, 吕健. 基于多元线性回归的多维感性工学模型构建[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(12): 15-18.
- LIU Zheng-hong, PAN Wei-jie, LYU Jian. Construction of Multidimensional Perceptual Engineering Model Based on Multiple Linear Regression[J]. Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2015(12): 15-18.

责任编辑: 马梦遥

(上接第 127 页)

- [14] 刘建伟, 黄祖钦, 廖燕军. 高压线防冰除冰机器人的设计[J]. 机床与液压, 2014, 42(21): 42-45.
- LIU Jian-wei, HUANG zu-qin, LIAO Yan-jun. Design of Antiicing and Deicing Robot for High Voltage Line[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2014, 42(21): 42-45.
- [15] 焦玉成, 俞娟, 杜逸鸣. 基于 PLC 与触摸屏的码垛工业机器人操作系统设计[J]. 包装工程, 2019, 40(23): 174-179.
- JIAO Yu-cheng, YU Juan, DU Yi-ming. Design of Operation System for Palletizing Industrial Robot Based on PLC and Touch Screen[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(23): 174-179.
- [16] 杨林, 马宏伟, 王川伟. 校园巡检机器人智能导航与控制[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(6): 1013-1020.
- YANG Lin, MA Hong-wei, WANG Chuan-wei. Intelligent Navigation and Control of Campus Inspection Robot[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(6): 1013-1020.
- [17] 贾计东, 张明路. 人机安全交互技术研究进展及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2020, 56(3): 16-30.
- JIA Ji-dong, ZHANG Ming-lu. Research Progress and Development Trend of Human-Computer Safety Interaction Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3): 16-30.

责任编辑: 马梦遥