

# 基于 Kano-AHP 的农用植保无人机设计

黄佳锐, 林建德, 冯涛

(福建工程学院 设计学院·海峡工学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 为提升用户对植保无人机的满意度, 基于 Kano-AHP 模型提出一种农用植保无人机的创新设计方案。系统集成卡诺模型(Kano)和层次分析法(AHP)的优势, 明确了无人机各个模块的需求及其重要程度, 在 Kano 模型中对需求权重进行功能分析和排序, 得到各评价指标。最后对产品方案收集到的数据构建判断矩阵, 完成检验与评估, 确定了最佳设计方案。结果表明: Kano-AHP 模型能够有效地映射从需求分析到功能设计的有效反馈, 这在一定程度上弥补了传统产品设计依赖主观经验进行设计的不足, 使产品设计更具科学性与有效性。

**关键词:** 工业设计; 农用植保无人机; 卡诺模型; 层次分析法

**中图分类号:** TB472

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2023)01-0097-06

## Design of agricultural plant protection UAV based on Kano-AHP

HUANG Jiarui, LIN Jiande, FENG Tao

(School of Design · Straits College of Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** In order to improve users' satisfaction with agricultural plant protection unmanned aerial vehicles (APPUAVs), this study proposed an innovative design scheme of APPUAV based on Kano-AHP model. The research systematically integrated the advantages of Kano and AHP, defines the requirements and importance of each module of UAV. Through the functional analysis and ranking of demand weights in the Kano model, the evaluation index scheme was obtained. Finally, a judgment matrix was constructed on the data collected from the product scheme, inspection and evaluation were completed, and the best design scheme was determined. Results show that the Kano-AHP model can effectively map the effective feedback from requirement analysis to function design, which, to some extent, makes up for the deficiency of traditional conceptual design relying on subjective experience; it makes conceptual design more scientific and effective.

**Keywords:** industrial design; unmanned aerial vehicle for agricultural plant protection; Kano model; analytic hierarchy process

目前关于植保无人机的研究多集中在技术实现与作业系统构建领域, 对用户需求和产品造型设计的相关研究比较少。在用户需求识别研究中, 池宁骏等<sup>[1]</sup>将 Kano 模型与极端用户法相结合应用于电动代步车设计, 解决了 Kano 模型中反向需求和魅力型需求识别问题; 唐甜甜等<sup>[2]</sup>将 Kano 模型和人体测量学相结合进行衣柜存储布局功能模块研究, 提升了产品精度; 陈正凯<sup>[3]</sup>基于 Kano 模型分析用户购买和使用校园文创产品的需求, 优化了校园文创产品设计。在产品设计

创新中, 梁浩等<sup>[4]</sup>应用 Kano 模型构建了血压计的用户需求矩阵, 给出血压计外观与结构的设计方案; 刘付勤<sup>[5]</sup>综合运用了层次分析法(AHP)和功能分析法(FAST), 降低了人为主观因素的误差影响, 强化了定量分析的优势; 邴媛<sup>[6]</sup>在 Kano 模型的基础上运用 AHP 法建立农机造型构成因子评价层次结构体系, 计算出权重向量, 通过实例验证了这两种方法结合评价的可行性。因此, 结合 Kano 模型和 AHP 法应用于植保无人机设计能有效识别出用户需求, 具有科学性和可行性。

1 基于 Kano 和 AHP 的模型构建

Kano 模型由日本学者狩野纪昭于 1984 年提出,通过构建有针对性的产品质量要素,旨在解决产品设计开发过程中用户需求量化分析问题<sup>[7]</sup>。Kano 模型通过对用户需求进行分类和优先级的排序,分析用户需求对用户满意的影响,体现了产品性能和用户满意之间的非线性关系<sup>[8]</sup>。但在识别需求权重时精度不高,在不同层级的用户需求识别中缺乏定量分析的方法。层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)由美国运筹学家 T. I. Saaty 在上世纪 70 年代提出,该方法通过锚定系统目标,在明确决策规划的准则和条件后,

建立多层次的递进结构。而层级间的权重排序,则是根据专家意见和分析者的客观判断结果来计算需求的权重排序,对同一层次元素两两比较的重要性进行定量描述,通过一致性检验后选择合适的决策<sup>[9]</sup>。但 AHP 法评价指标过多时,后期数据处理比较困难,会影响到层次序列间的一致性,甚至不能通过一致性检验环节。因此,本研究将由 Kano 模型获取的用户需求评价指标进行归纳,以此将用户需求属性进行划分,进而将二级指标归纳为一级指标,使其适用于 AHP 法进行数据分析与检验。以此为基础构建层次分析模型,通过构建判断矩阵对用户需求指标进行权重计算,并对结果进行一致性检验,构建的模型流程如图 1 所示。

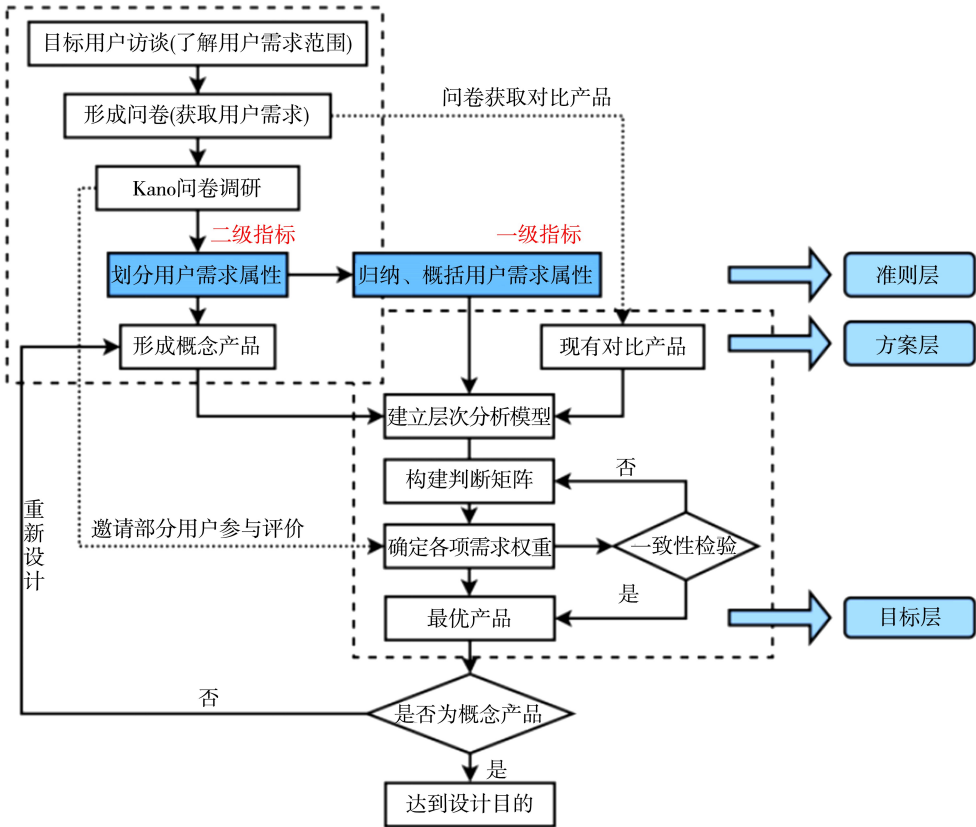


图 1 模型流程图

Fig.1 Model flow chart

2 基于 Kano 模型的目标用户分析

2.1 问卷调查

Kano 问卷设计为了区分用户对于产品/服务具备某功能时的评价和不具备某功能时的评价,对于每个特性的调研问题需要分别提供正向和反

向的问题设置<sup>[10]</sup>。而在做 Kano 模型分析前,需要对目标用户进行需求调研,通过采用矩阵量表的形式让用户对功能进行正面和负面评价,问卷问题设置形式如表 1 所示。问卷数据采集后采用李克特量(Likert-type scale)评分进行赋值,将“喜欢”——“不喜欢”的选项由高到低依次标识为 5~1 分。

表 1 Kano 问卷设计形式

Tab.1 Kano questionnaire design form

需求项	喜欢	理应如此	无所谓	勉强接受	不喜欢
提供该需求	5	4	3	2	1
不提供该需求	5	4	3	2	1

2.2 Kano 模型的需求满意度分析

在开发设计产品过程中,为了更好识别用户需求,在 Kano 模型中将产品和服务的质量属性分为 6 种类型:(*M*) 必备属性;( *O*) 期望属性;( *A*) 魅力属性;( *I*) 无差异属性;( *R*) 反向属性, *Q* 为可疑结果,正常情况下用户评价不会出现这个结果,除非问题设置不合理,亦或顾客没能理解题干,在填写问卷时出现谬误。

根据用户的选择结果,将每个功能需求进行统计,对功能属性归类后计算出 Better-Worse 系数,若该产品某功能实现后可以增加用户满意度,则该系数标识为 *S*,反之,消除该功能后用户的需求若得不到满足,则用户满意度的减量用 *D* 表示。

具备该项功能的 Better 系数:

$$S=\frac{A+O}{A+O+M+I}$$

(1)

不具备该项功能的 Worse 系数:

$$D=-\frac{O+M}{A+O+M+I}$$

(2)

其中,Better 系数为增加功能后的满意系数,越接近 1,表示对用户满意度上升的影响越明显,其上升得也越快。Worse 表示为消除该功能后的不满意系数,越接近-1,用户满意度下降的影响越大,其下降速率越快。因此,Better-Worse 系数体系中,应优先考虑实施系数绝对分值高的功能需求。

算出每项功能需求的 Better-Worse 系数之后,求出所有项功能需求 Better-Worse 系数均值,以 Worse0 为横坐标,Better0 为纵坐标,将系数值范围划分为 4 个区域,第一象限为期望属性(*O*),第二象限为魅力属性(*M*),第三象限为无差异属性(*I*),第四象限为必备属性(*M*)。

2.3 植保无人机用户需求展开

综合目标用户访谈与问卷调研结果分析的内容,应用 KJ(亲和图法)对用户需求展开整理,确定 *i* 项需求,记为 CR<sub>*i*</sub>(*i*=1,2,⋯,*i*)。

具体处理步骤为:首先整理所获取的需求信息,将其转化为语义清晰简明的描述,并筛选语义重复或相近含义的需求项;之后整理需求项,将同类的需求项归为一组;对需求分组进行重命名。

整理后共得到用户需求项 23 项,需求展开结果见表 2。

表 2 植保无人机的用户需求展开

Tab.2 Expansion table of user requirements for plant protection UAV

一次水平	编号	二次水平
功能设计	CR <sub>1</sub>	肥料飞播、播撒功能
	CR <sub>2</sub>	饲料投放
	CR <sub>3</sub>	病虫害监测
	CR <sub>4</sub>	农作物诊断
	CR <sub>5</sub>	作物授粉
	CR <sub>6</sub>	精准测量面积
	CR <sub>7</sub>	手势控制
	CR <sub>8</sub>	智能作业
	CR <sub>9</sub>	机身带有屏幕
造型、结构、 材质设计	CR <sub>10</sub>	轻量化材质
	CR <sub>11</sub>	一体化造型
	CR <sub>12</sub>	模块化设计
	CR <sub>13</sub>	可以折叠
	CR <sub>14</sub>	搬运方便
	CR <sub>15</sub>	仿生造型
	CR <sub>16</sub>	设计简洁
	CR <sub>17</sub>	色彩具有辨识度
	CR <sub>18</sub>	色彩多样化
	CR <sub>19</sub>	流线型设计
	CR <sub>20</sub>	大载重能力、大容量药箱
	CR <sub>21</sub>	大喷嘴
	CR <sub>22</sub>	药箱、电池方便取出
	CR <sub>23</sub>	旋翼带有防护装置

根据 Kano 模型分类对照表对搜集的调研问卷进行属性统计,23 项农机设计需求质量类型统计和分类如表 3 所示。

表 3 卡诺问卷结果  
Tab.3 Kano questionnaire results

编号	A	O	M	I	R	Worse	Better	类别
CR <sub>1</sub>	33	7	23	9		-0.58	0.47	M
CR <sub>2</sub>	28	13	18	14		-0.45	0.39	I
CR <sub>3</sub>	14	15	11	29	3	-0.49	0.58	A
CR <sub>4</sub>	15	35	13	9		-0.44	0.29	I
CR <sub>5</sub>	13	38	12	9		-0.38	0.44	I
CR <sub>6</sub>	14	15	11	32		-0.36	0.58	A
CR <sub>7</sub>	13	18	7	34		-0.42	0.56	A
CR <sub>8</sub>	16	30	17	9		-0.42	0.56	A
CR <sub>9</sub>	18	33	14	7		-0.38	0.42	I
CR <sub>10</sub>	36	8	17	11		-0.67	0.69	O
CR <sub>11</sub>	20	37	14	1		-0.69	0.71	O
CR <sub>12</sub>	17	15	8	31	1	-0.36	0.40	I
CR <sub>13</sub>	22	34	11	5		-0.35	0.43	I
CR <sub>14</sub>	16	19	8	29		-0.65	0.64	O
CR <sub>15</sub>	18	31	11	9		-0.65	0.71	O
CR <sub>16</sub>	17	21	30	5		-0.35	0.61	A
CR <sub>17</sub>	20	10	33	10		-0.71	0.79	O
CR <sub>18</sub>	12	23	28	7	2	-0.32	0.45	I
CR <sub>19</sub>	29	15	18	10		-0.63	0.78	O
CR <sub>20</sub>	15	29	22	5		-0.38	0.49	I
CR <sub>21</sub>	15	30	22	6		-0.61	0.71	O
CR <sub>22</sub>	37	7	20	7	1	-0.70	0.52	M
CR <sub>23</sub>	27	11	32	2		-0.59	0.41	M

最后,以 Worse 为横轴,Better 为纵轴,Better-Worse 系数平均值(-0.53,0.56)为原点,构建四象限图对产品功能需求进行优先级分析。确定了植保无人机设计必备属性 *M* 包括:CR<sub>1</sub> 肥料飞播、播撒功能;CR<sub>22</sub>旋翼带有防护装置;CR<sub>23</sub>药箱、电池方便取出。期望属性包括:CR<sub>10</sub>轻量化材质、CR<sub>11</sub>一体化造型、CR<sub>14</sub>搬运方便、CR<sub>15</sub>仿生造型、CR<sub>17</sub>色彩具有辨识度、CR<sub>19</sub>流线型设计、CR<sub>21</sub>大喷嘴设计。植保无人机魅力属性功能包括:CR<sub>3</sub> 病虫害监测、CR<sub>6</sub> 精准测量面积、CR<sub>7</sub> 手势控制、CR<sub>8</sub> 智能作业、CR<sub>16</sub>设计简洁。

3 植保无人机设计因子的层次分析

3.1 基于 AHP 法的需求权重计算

在获取评价指标后,采用 1~9 标度法对评价指标中各指标两两比较,以此构建成对判断矩阵,进而计算各层标度的乘积:

$$M_i = \prod_{j=1}^m b_{ij}(i = 1, 2, \cdots, n)$$

(3)

式中, $b_{ij}$ 代表第  $i$  行第  $j$  列中的需求指标, $m$  代表需求指标量。接下来,判断各层标度乘积的几何平均值:

$$a_i = \sqrt[m]{M_i}(i = 1, 2, \cdots, n)$$

(4)

计算相对权重:

$$W_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^m a_i}$$

(5)

计算最大特征根:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_{W_i}}{W_i}$$

(6)

式中, $B_{W_i}$ 表示向量  $B_W$  第  $i$  个分量, $n$  代表阶数。最后进行结果一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(7)

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

(8)

式中,CR 为判断性矩阵的一致性比率;RI 为随机一致性指标。当  $CR \leq 0.1$  时,即认为判断矩阵具有满意一致性。如果  $CR > 0.1$ ,则未通过,说明判断矩阵存在错误,需经检查调整后再次进行计算,1~9 阶的 RI 如表 4 所示。

表 4 判断矩阵 RI 值  
Tab.4 RI value of the judgement matrix

矩阵阶数 <i>n</i>	RI
1	0
2	0
3	0.52
4	0.89
5	1.12
6	1.26
7	1.36
8	1.41
9	1.46

3.2 AHP 法评价

运用 AHP 法建立无人机机造型构成因子的评价层次结构模型。综合 Kano 模型调查问卷分

析和专家意见后,将评价指标归结为准则层的共 5 种,如图 2 所示。

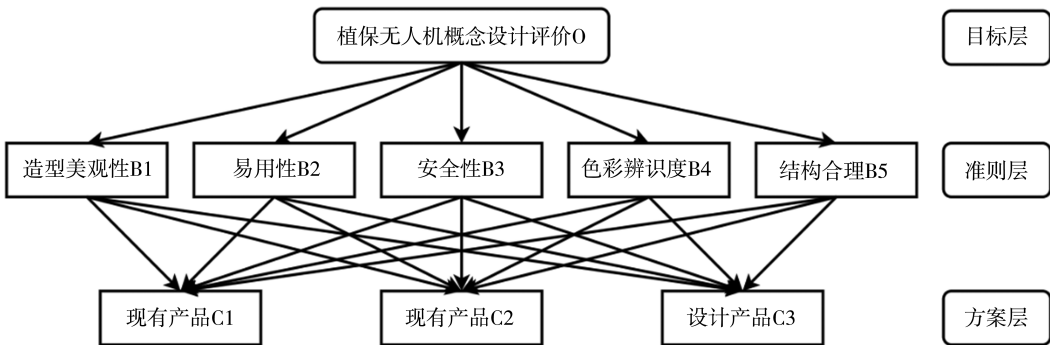


图 2 层次结构模型  
Fig.2 Hierarchical structure model

为保证判断矩阵数据来源的多元性,增强研究结果的客观性,本研究根据层次结构模型让参与评价人员对各评价指标打分,在此过程中邀请无人机设计师 3 人,职业飞手 3 人,设计专业教师 4 人,有植保无人机实际使用和操作经验的农民 10 人共 20 人组成评价小组。采用 1~9 标度法对准则层的 5 个维度进行两两评价打分。

以第 1 层要素为依据,对第 2 层要素构建最佳选择评价矩阵如下:

$$O=\begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/8 & 2 & 1/2 \\ 5 & 1 & 1/3 & 4 & 2 \\ 8 & 3 & 1 & 8 & 5 \\ 1/2 & 1/4 & 1/8 & 1 & 1/4 \\ 2 & 1/2 & 1/5 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

以第 2 层要素为依据,对第 3 层要素建立构建要素层判断矩阵如下:

$$B_1=\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/4 \\ 1/2 & 1 & 1/5 \\ 4 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$
$$B_2=\begin{bmatrix} 1 & 6 & 4 \\ 1/6 & 1 & 1/2 \\ 1/4 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$
$$B_3=\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/8 \\ 3 & 1 & 1/3 \\ 8 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$
$$B_4=\begin{bmatrix} 1 & 2 & 7 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_5=\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

目标层(O)对应的准则层( $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$ )的权重值分别为 0.066 7, 0.226 5, 0.528 8, 0.046 4, 0.131 8;造型美观性  $B_1$  对应的各个产品权重值分别为 0.199 8, 0.116 8, 0.683 3;易用性  $B_2$  对应的各个产品权重值分别为 0.701 0, 0.106 1, 0.192 9;安全性  $B_3$  对应的各个产品权重值分别为 0.081 9, 0.236 3, 0.681 7;色彩辨识度  $B_4$  对应的各个产品权重值分别为 0.630 1, 0.261 4, 0.108 5;结构合理度  $B_5$  对应的各个产品权重值分别为 0.648 3, 0.229 7, 0.122 0。为了确保测试人员评价时的思维一致性和判断矩阵相容性,由式(5)~(8)对各判断矩阵做一致性检验,验证在评价过程中参与人员评价思维的一致性及各判断矩阵的相容性。

表 5 结果一致性检验  
Tab.5 Result consistency test

评价指标	CR
O	0.028 9
B <sub>1</sub>	0.023 6
B <sub>2</sub>	0.008 8
B <sub>3</sub>	0.001 5
B <sub>4</sub>	0.033 6
B <sub>5</sub>	0.003 6



根据表 4 的信息,所有结果的 CR 值均小于 0.1,通过一致性检验,因此判定数据为有效。进一步代入数据计算各要素对目标层的总权重。

$$\begin{bmatrix} 0.199\ 8 & 0.701\ 0 & 0.081\ 9 & 0.630\ 1 & 0.648\ 3 \\ 0.116\ 8 & 0.106\ 1 & 0.236\ 3 & 0.261\ 4 & 0.229\ 7 \\ 0.683\ 3 & 0.192\ 9 & 0.681\ 7 & 0.108\ 5 & 0.122\ 0 \\ 0.066\ 7 & 0.226\ 2 & 0.528\ 8 & 0.046\ 4 & 0.131\ 8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.322\ 9 \\ 0.199\ 2 \\ 0.470\ 8 \end{bmatrix}$$

根据以上矩阵计算结果,得到排序结果为 C3>C1>C2。因此,设计方案 C3 为该评价体系下的最优产品。

3.3 方案评估

对农用植保无人机的设计方案 C3 进行 1:1 模型制作。随后,邀请 5 位无人机工程师与 11 位机械设计研究者对该方案进行满意度评分与人机尺寸验证。对该设备进行主观评分的评分区间设

置为 0~50 分,其中 1~10 分代表“很差”,11~20 分代表“较差”,21~30 分代表“一般”,31~40 分代表“好”,41~50 分代表“很好”,各评分指标同上。最后,取综合平均值作为评估参考,计算得出评分结果为 34.7,表明该方案具有可行性。

4 结论

本研究将 Kano 法与 AHP 法相结合,对农用植保无人机进行造型设计与方案评估,在对用户需求分析的基础上进行分类,判断各设计目标间的优先级,通过算法验证了概念设计的合理性。在此基础上有效地筛选出目标用户的心理需求,并通过构建层次分析模型进行方案评价,证明了设计方案 C3 是用户的偏好目标。该模型促进了方案决策的科学性与客观性,可为同类农用植保产品的设计研发提供参考思路。本研究后续将进一步收集实机反馈数据,参考设计领域专家的建议,以增加研究的科学性和完整性。

参考文献:

[1] 池宁骏,王弓月.基于卡诺模型和极端用户法的电动代步车设计[J].包装工程,2022,43(16):162-169.

[2] 唐甜甜,李雪莲.基于 Kano 模型的定制衣柜存储布局功能模块研究[J].设计,2022,35(6):100-103.

[3] 陈正凯,徐婷.基于卡诺模型的高校文创产品设计研究[J].北京印刷学院学报,2021,29(12):60-62.

[4] 梁浩,刘卓,张芳燕.基于用户需求建模的血压计造型设计[J].机械设计,2015,32(8):126-128.

[5] 刘付勤,李丽凤,刘长新.集成 AHP-FAST 的城市消防车概念设计[J].包装工程,2021,42(22):129-137.

[6] 邴媛,张建敏.基于 Kano 模型与层次分析法的农机造型设计研究[J].机械设计,2022,39(4):149-155.

[7] 李永锋,刘焕焕,朱丽萍.基于卡诺模型与联合分析的老年人 APP 用户体验优化设计方法[J].包装工程,2021,42(2):77-85.

[8] 陈姗姗,洪文进,苗钰,等.儿童矫正内衣智能监护服务系统设计[J].针织工业,2021(10):59-62.

[9] 程永胜,徐骁琪,卜俊,等.基于 KE 和 AHP 理论的汽车造型意象评价方法研究[J].现代制造工程,2020(7):102-109.

[10] 韦艳丽,李安,徐曦,等.基于 Kano-QFD 的云养宠 APP 可用性设计研究[J].包装工程,2022,43(2):378-386.

(责任编辑:方素华)