

# 农业机器人造型研究与设计

常瑜, 唐琳

(天津商业大学, 天津 300134)

**摘要:** **目的** 为更好地满足用户需求, 完善农业机器人造型设计方法。**方法** 采用形态分析法分析设计样本, 提取农业机器人造型设计要素及其类目; 通过层次分析法计算各造型要素及类目的权重值并进行设计决策, 融合权重值不同的设计要素, 形成新的造型设计方案集。最终, 通过模糊综合评价法得出最优设计方案。以采摘机器人造型设计开发为例, 验证了设计流程的科学性。**结论** 作为现代农业智能机械化产品, 运用模糊综合层次分析法进行设计决策将有助于提高农业机器人造型设计过程的科学性, 形成符合用户需求的造型意象。

**关键词:** 产品设计; 农业机器人; 设计流程; 层次分析法; 模糊综合评价

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)18-0111-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.18.022

## Modeling Research and Design of Agricultural Robot

CHANG Yu, TANG Lin

(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

**ABSTRACT:** The work aims to better meet the user needs and improve the modeling design method of agricultural robot. Morphological analysis was used to analyze design samples. The elements and categories of agricultural robot modeling design were extracted. The weight value of each modeling element and category was calculated by AHP, and the design decision was made. The design elements with different weights were combined to constitute a new set of modeling design schemes. Finally, the optimal design scheme was obtained by fuzzy comprehensive evaluation. Taking the modeling design development of picking robot as an example, the scientific nature of the design process was verified. As a modern agricultural intelligent mechanized product, FAHP used for the design decision will help improve the scientific nature of modeling design process of agricultural robot to form the modeling image that conforms to the user needs.

**KEY WORDS:** product design; agricultural robot; design flow; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

近年来, 在国家政策支持和引导下, 为进一步提高农业生产效率和改善生产模式, 农业机械行业快速发展<sup>[1]</sup>。其中, 农业机器人可以有效地提高劳动效率, 其相关技术的研发已成为农业机械化的核心<sup>[2-4]</sup>。然而, 目前农业机器人研究的重点在控制系统、机械结构方面, 研究造型设计的较少, 作为机械设计主导的农业机器人产品, 其造型设计将受到不同要素的限制, 如机器人作业对象的生物特性、工作空间的静态与动态相结合的障碍物<sup>[5]</sup>、使用者专业知识限制等<sup>[6]</sup>,

这就对农业机器人造型设计提出了新的要求, 并着重体现在造型设计要素的筛选与提取过程中, 因此, 本文将基于对设计样本的分析, 运用层次分析法进行造型设计决策, 探讨农业机器人造型设计流程, 以期完善农业机器人造型设计的复合意象, 更好地满足用户需求, 服务于农业生产。

### 1 农业机器人造型设计要素分析

农业机器人作为功能性产品, 目的在于参与农业

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 天津市教育科学规划资助项目 (HEYP5006); 天津市企业科技特派员项目“基于耦合特性分析的农业机器人造型设计研究与应用”

作者简介: 常瑜 (1986—), 男, 山西人, 硕士, 天津商业大学讲师, 主要研究方向为工业设计、产品创新设计、服务设计。

通信作者: 唐琳 (1980—), 男, 黑龙江人, 硕士, 天津商业大学副教授, 主要研究方向为产品设计、创新设计方法。

生产活动并提高生产效率。传统农业机器人主要的参与方式表现为两类,第一是直接使用成熟工业机器人辅助进行农业生产;第二是针对实际使用情境研发专门的机电系统,以实现替代性劳作<sup>[6]</sup>,但是,这两种传统机器人在实际使用中适用性差,无法进行功能拓展,造成了使用率低的问题,反而增加了农业生产过程中的投入。近年来研究具有开放式结构的机器人成为热点<sup>[7]</sup>,本文基于此对农业机器人的造型设计进行探讨。鉴于特殊的使用环境,农业机器人主要结构包括视觉装置、末端执行器、车身主体、行走装置和传感器等<sup>[6]</sup>,而不同的末端执行器形成了不同的功能,如采摘、植保等。农业机器人见图1,其中视觉装置(A部分)、末端执行器(B部分)、车身主体(C部分)、行走装置(D部分)与造型设计密切相关,可视为造型的设计要素,要素间相互衔接共同生成了农业机器人整体形态,为使用者提供了可被感知的视觉特征。



图1 农业机器人  
Fig.1 Agricultural robot

国内外的相关文献中,能够紧密结合产品设计研发的研究较少,能够指导产品造型设计实践的研究相对更少。对于农业机器人而言,如何形成符合用户感性意象需求的整体造型设计成为一个问题。影响这个问题求解的因素集中在两点,一是造型设计要素多,二是设计要素间关系复杂。要素众多且关系复杂的设计要素间极易形成冲突,产生用户体验较差的整体造型设计,因此,量化分析设计要素多且复杂的关系将是农业机器人造型设计的关键。本文将以视觉装置、末端执行器、车身主体、行走装置为主要造型设计要素展开分析,完善农业机器人造型设计。

## 2 农业机器人造型设计流程

传统的造型设计过程中,要素的融合主要依靠设计师的创造性思维,目前量化分析模型的介入可以更好地进行设计决策<sup>[8]</sup>,形成更丰富的产品形态,本文将运用层次分析法为农业机器人造型设计提供决策,层次分析法在设计评价中运用较多<sup>[9-11]</sup>,鲜有在设计决策中使用,但其通过构建层次模型可以对方

案层要素进行权重分析,为进一步的造型要素选择提供重要参考。

### 2.1 基本流程

在具体的设计实践中,设计流程见图2。该流程同时可以适用于多数具有开放式结构农业机器人及同类产品的设计开发。

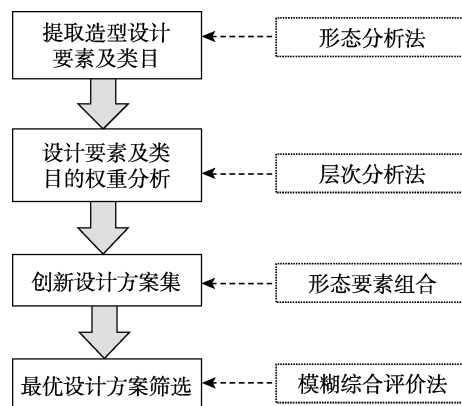


图2 设计流程  
Fig.2 Design flow

第一,收集设计样本,要注重样本选择的数量与代表性。运用形态分析法提取具有代表性形态特征的农业机器人造型设计要素及其类目。

第二,运用层次分析法完成设计决策,即对造型设计要素及类目进行选择。主要通过构建判断矩阵计算对于最优造型设计目标,各设计要素及类目的权重值及其排序。

第三,将设计要素中权重值不同的类目进行重构,得出造型创新设计方案集。

第四,运用模糊综合评价法对造型创新设计方案集进行评价,筛选出最优设计方案。

### 2.2 设计要素及类目权重分析的关键点

设计要素及类目间重要程度的量化分析比较复杂,引入层次分析法能够处理此类多特征比较的问题<sup>[8]</sup>,对造型设计要素及类目的选定进行决策。依据 Saaty 提出的层级构造方式<sup>[12]</sup>,将目标层设定为“最优造型设计方案”,准则层设定为“设计要素”,方案层设定为“设计要素的类目”,具体的设计要素及类目将运用形态分析法对典型设计实例进行归纳总计得出。再通过层次分析法相关的计算方法,可得出针对农业机器人造型设计而言,设计要素及其类目的权重值及排序。基本计算过程如下。

第一,构建判断矩阵。在构造判断矩阵前,针对某一目标,相关的要素进行两两比较的标度值,判断矩阵标度设定见表1,标度的具体数值表明参与对比的要素之间重要程度,据此构造判断矩阵。第二,计算权重值及判断矩阵的一致性分析。本文将利用 Yaahp 层次分析法软件计算。

表 1 判断矩阵标度  
Tab.1 Judgment matrix scale

标度	重要程度	涵义
1	同等重要	两要素对指定属性重要程度相同
3	稍微重要	某要素比另一要素稍微重要
5	明显重要	某要素比另一要素明显重要
7	强烈重要	某要素比另一要素强烈重要
9	绝对重要	某要素比另一要素绝对重要
2, 4, 6, 8	中间值	折中
标度倒数	反比较	某要素对另一要素的标度为 $x$ , 反之则为 $1/x$

### 2.3 创新设计方案的模糊综合评价

造型设计决策的结果通常具有参与评价者的主观性,因此,为了评价结果的客观性,需构造能够处理造型设计中多要素融合的评价办法。学者扎德在 20 世纪 60 年代便提出了模糊集合的概念<sup>[13]</sup>,关键在于使用模糊数学理论对模糊对象进行量化分析。可见,在产品造型设计的评价中使用该方法,可有效解决设计要素较多、主观判断模糊的困境。具体评价过程如下。

第一,选定用于造型设计评价的要素集合,构建设计评价的等级及对应的标准。评价等级可表示为  $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{\text{优秀, 良好, 合格, 不合格}\}$ ,同时为各等级赋值,用  $H = (90, 80, 60, 50)^T$  表示,形成评价等级与分值间的对应关系。

第二,根据设计要素的权重值,确定造型设计准则层的权重向量,用字母  $w$  表示。然后建立合理的专家组,专家对评价对象打分。其中,关键点在于建立适用于农业机器人造型设计的评价指标,上文分析可知,与农业机器人造型设计相关的设计要素为视觉装置、末端执行器、车身主体、行走装置,同时,产品造型与功能应相互契合,因此,基于此构建农业机器人造型设计评价指标,形成设计要素与评价指标之间的对应关系。

具体而言,针对视觉装置的评价指标为工作对象感知能力。农业机器人工作的重要前提是能够识别工作对象及位置<sup>[14]</sup>,可以减少作业时间<sup>[15]</sup>,视觉装置的选择将影响机器人对工作对象的感知能力。针对末端执行器的评价指标为有效工作范围。农业机器人主要依靠末端执行器对工作对象进行作业,末端执行器的形态将对有效工作范围产生影响。针对车身主体的评价指标为质量体积比。车身主体是农业机器人视觉装置、末端执行器、传感器等主要构件的载体<sup>[14]</sup>,需在保证质量的条件下缩小体积,形成结构紧凑、形态美观的造型。针对行走装置的评价指标为路面适应能力。通过研究可知,可移动平台是农业机器人的基础<sup>[14]</sup>,体现了其相应的运动能力,移动机器人相关标准<sup>[16]</sup>对机器人在路面适应能力提出了要求,在造型设

计方面,行走装置的选择将影响路面适应能力。

在进行创新设计方案的模糊综合评价时,本文将工作对象感知能力、有效工作范围、质量体积比、路面适应能力作为农业机器人整体造型设计的评价指标,评价结果与准则层各设计要素的权重向量对应。在具体的打分过程中,仅统计专家打分的次数以降低评分的主观性,以此确定各指标与评语等级间的关联性,构建准则层对具体造型创新设计方案的模糊综合评价矩阵,可用字母  $S_n$  表示( $n$  为造型设计方案的数量)。

第三,依据单因素模糊综合评价矩阵,计算得出准则层对造型设计方案的的评价权重(用字母  $P_n$  表示, $n$  为造型设计方案的数量),计算公式如下:

$$P_n = w \cdot S_n \quad (1)$$

最后,计算百分制评价结果(用字母  $N$  表示),公式如下:

$$N = P_n \cdot H \quad (2)$$

## 3 设计实例

依据上文所述设计流程进行农业采摘机器人造型设计,农业采摘机器人主要工作对象包括水果、蔬菜、棉花等农作物,具有典型的功能,包括行走、视觉获取和解析,机械手执行等方面<sup>[17]</sup>,能够在造型设计中实现多要素融合。

### 3.1 设计要素及类目提取

本文基于样本分析,对设计要素及类目进行提取,其中设计要素的类目主要表现为特征线,而通过特征线入手进行造型设计是汽车车身设计的典型方法之一<sup>[18]</sup>,可适用于农业机器人造型设计过程。首先,通过互联网、书籍、采摘机器人市场调研等渠道收集设计样本,并与机器人技术研究者及产品造型设计师进行访谈,确定了 15 款产品作为代表性样本。其次,运用形态分析法对 15 个研究样本造型设计要素进行分析和提取。草莓采摘机器人的造型设计要素及类目分析见图 3,分析可知其主要造型设计要素包含机械臂、车身主体及行走装置,其中机械臂形态为圆柱形

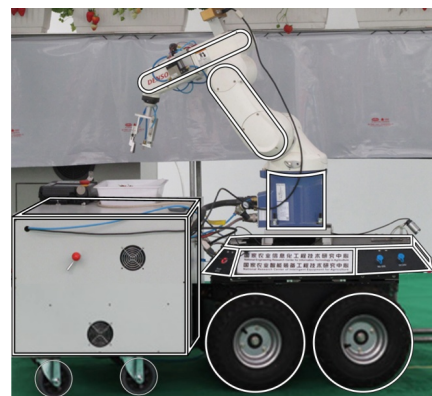
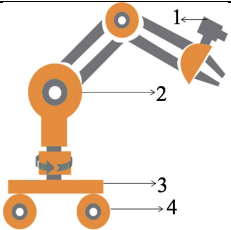


图 3 草莓采摘机器人的造型设计要素及类目分析  
Fig.3 Analysis of modeling design elements and categories of strawberry picking robot

和条形组成，车身主体为方形且采用了轮式行走装置。以此类推，将 15 个设计样本的分析结果进行归

纳，见表 2，该组设计要素及类目的分析结果将进一步构建设计决策模型提供有效的评价指标。

表 2 设计要素及类目  
Tab.2 Design elements and categories

设计要素	类目			
	1 视觉装置	固定型	可移动式	—
	2 机械臂（手）	圆柱形	条形	不规则形
	3 车身主体	方形	圆形	不规则形
	4 行走装置	履带式	轮式	—

3.2 设计要素及类目的权重分析

基于层次分析法构建设计决策模型，展开对农业采摘机器人造型设计要素及类目的权重分析。首先，目标层为最优造型设计方案，用字母 A 表示。其次，确定准则层。上文对农业机器人的研究可知，视觉装置、末端执行器、车身主体、行走装置与造型设计的关联性强，结合农业采摘机器人代表性样本的分析，将总结归纳的 4 个关键性设计要素，即视觉装置、机

械臂（手）、车身主体和行走装置作为层次分析模型中的准则层的指标，分别用字母  $B_1, B_2, B_3, B_4$  表示。最后，方案层则选取各设计要素对应的类目，包含 10 个指标，即固定型、可移动式、圆柱形、条形、不规则形（机械臂）、方形、圆形、不规则形（车身）、履带式和轮式，分别用字母  $B_{11}, B_{12}, B_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{31}, B_{32}, B_{33}, B_{41}, B_{42}$  表示，以此形成设计决策模型，见图 4。据此，通过对各指标的评价研究进行设计决策。

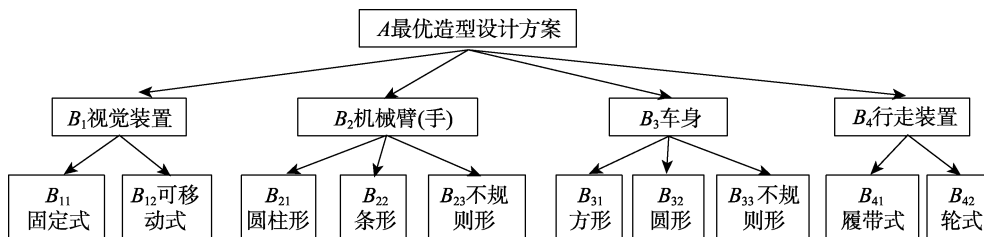


图 4 农业采摘机器人造型设计决策模型  
Fig.4 Decision model for modeling design of agricultural picking robot

农业采摘机器人用户群体较为特殊，因此，参与针对层次分析法中准则层及方案层中设计指标评价的用户主体，包含农业机器人科研工作者、农业生产管理者、农民用户、设计学类专业研究生等，参与调

研人数共 25 人。具体分析如下。  
第一，构造判断矩阵并计算权重，依据表 1 判断矩阵标度对指标间重要程度赋值，视觉装置判断矩阵标度的统计结果见表 3，通过平均值计算结果显示视

表 3 视觉装置判断矩阵标度的统计结果  
Tab.3 Statistical results of judgment matrix scale of visual device

用户	视觉装置类目间重要程度标度值		用户	视觉装置类目间重要程度标度值		用户	视觉装置类目间重要程度标度值	
	固定式	可移动式		固定式	可移动式		固定式	可移动式
用户 1	1/4	4	用户 10	1/5	5	用户 19	1/4	4
用户 2	1/4	4	用户 11	1/3	3	用户 20	1/5	5
用户 3	1/5	5	用户 12	1/4	4	用户 21	1/3	3
用户 4	1/4	4	用户 13	1/4	4	用户 22	1/4	4
用户 5	1/4	4	用户 14	1/5	5	用户 23	1/4	4
用户 6	1/4	4	用户 15	1/5	5	用户 24	1/5	5
用户 7	1/5	5	用户 16	1/3	3	用户 25	1/4	4
用户 8	1/3	3	用户 17	1/4	4			
用户 9	1/5	5	用户 18	1/4	4			

觉装置判断矩阵中，指标“可移动式”的标度为 4，指标“固定式”为 1/4。以此类推，同时利用 Yaahp 层次分析法软件计算，各项结果见表 4—8，评价结果均通过了一致性检验。

表 4 最优造型设计方案判断矩阵及权重  
Tab.4 Judgment matrix and weight of optimal modeling design scheme

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	权重 w	一致性结果
B <sub>1</sub>	1	1/4	1/6	1/3	0.0649	0.0383
B <sub>2</sub>	4	1	1/2	3	0.2902	
B <sub>3</sub>	6	2	1	5	0.5177	
B <sub>4</sub>	3	1/3	1/5	1	0.1273	

表 5 视觉装置准则判断矩阵及权重  
Tab.5 Judgment matrix and weight of visual device

B <sub>1</sub>	B <sub>11</sub>	B <sub>12</sub>	权重 w	一致性结果
B <sub>11</sub>	1	1/4	0.2000	0.0000
B <sub>12</sub>	4	1	0.8000	

表 6 机械臂（手）准则判断矩阵及权重  
Tab.6 Judgment matrix and weight of robot arm (manipulator)

B <sub>2</sub>	B <sub>21</sub>	B <sub>22</sub>	B <sub>23</sub>	权重 w	一致性结果
B <sub>21</sub>	1	4	6	0.6910	0.0516
B <sub>22</sub>	1/4	1	3	0.2176	
B <sub>23</sub>	1/6	1/3	1	0.0914	

第二，将方案层中各设计要素及类目的权重值进行合成，形成权重排序，以此作为农业采摘机器人造型设计的参考，具体排序结果见图 5。

表 7 车身准则判断矩阵及权重  
Tab.7 Judgment matrix and weight of body

B <sub>3</sub>	B <sub>31</sub>	B <sub>32</sub>	B <sub>33</sub>	权重 w	一致性结果
B <sub>31</sub>	1	1/4	1/2	0.1365	0.0176
B <sub>32</sub>	4	1	3	0.6250	
B <sub>33</sub>	2	1/3	1	0.2385	

表 8 行走装置准则判断矩阵及权重  
Tab.8 Judgment matrix and weight of walking device

B <sub>4</sub>	B <sub>41</sub>	B <sub>42</sub>	权重 w	一致性结果
B <sub>41</sub>	1	3	0.7500	0.0000
B <sub>42</sub>	1/3	1	0.2500	

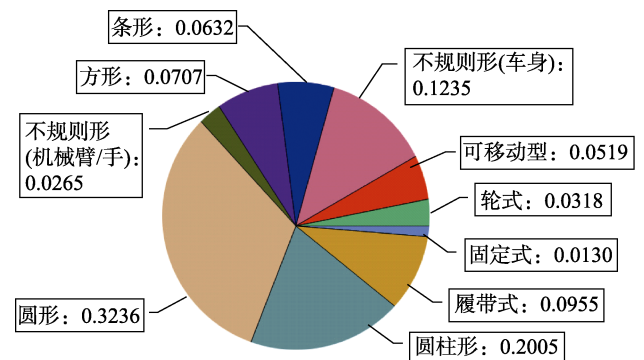


图 5 设计类目权重排序  
Fig.5 Weight order of design category

### 3.3 创新设计方案

根据上文的权重分析，对农业采摘机器人造型设计要素及类目进行设计决策，将权重值较高的造型设计要素进行融合，初步完成创新设计方案集，见图 6。

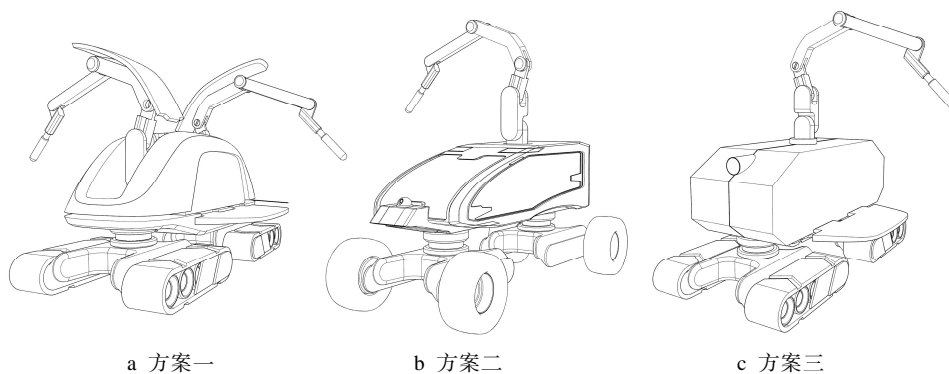


图 6 创新设计方案集  
Fig.6 Innovative design scheme set

具体而言，在设计要素及类目的选择上，方案一选择了圆形的车身、圆柱形的机械臂、可移动式视觉装置、履带式行走装置进行造型设计；方案二选择了不规则形车身、圆柱形机械臂、可移动式视觉装置、轮式行走装置进行造型设计；方案三选择了方形车

身、圆柱形机械臂、固定式视觉装置、履带式行走装置进行造型设计。

### 3.4 模糊综合评价

通过造型设计要素及类目的决策研究，形成创新

设计方案集,选择5名产品造型设计专家对创新方案集进行评价。将上文归纳的农业机器人造型设计评价指标,即路面适应能力、质量体积比、工作对象感知能力、有效工作范围作为评价依据,对各造型设计方案进行整体评价,评价等级表示为 $V=\{V_1, V_2, V_3, V_4\}=\{\text{优秀, 良好, 合格, 不合格}\}$ ,同时为各等级赋值,用 $H=(90, 80, 60, 50)^T$ 表示,形成评价等级与分值间的对应关系。结合上文的相关公式,对设计方案进行模糊综合评价。

第一,由表4—8可知,农业采摘机器人造型设计决策模型中,准则层各设计要素的权重向量为 $w_A=(0.0649, 0.2902, 0.5177, 0.1273)$ 。

第二,统计专家打分的次数,保证评分的客观性,依据具体的统计数据构建准则各指标对于设计方案的模糊综合评价矩阵, $S_1$ 表示方案一模糊综合评价矩阵; $S_2$ 表示方案二的模糊综合评价矩阵; $S_3$ 表示方案三的模糊综合评价矩阵。具体打分数据统计结果如下。

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

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

第三,上文可知,通过对准则层各设计要素的分析得出评价指标,据此将专家评价结果与准则层各设计要素的权重向量相乘,计算出准则层对3个造型设计方案的评价权重向量,结果如下:

$$P_1 = w_A \cdot S_1 = (0.4906, 0.4255, 0.0710, 0.0000)$$

$$P_2 = w_A \cdot S_2 = (0.1746, 0.3165, 0.4960, 0.0000)$$

$$P_3 = w_A \cdot S_3 = (0.0965, 0.2639, 0.6267, 0.0000)$$

第四,计算百分制结果,方案一 $N_1 = P_1 \cdot H = 82.45$ ;方案二 $N_2 = P_2 \cdot H = 70.79$ ;方案三 $N_3 = P_3 \cdot H = 67.40$ 。可知,造型设计方案一为方案集中的最优解,进一步完成最终效果图,实现了造型设计优化。车身及行走装置造型设计见图7,机械臂(手)及视觉装置造型设计见图8。其中,隐藏式的机械臂造型利于形成紧凑、美观的车身造型,同时车身侧面可通过旋转机构形成工作台,用于放置农作物收集箱等;视觉装置隐藏在机械手中,可跟随机械臂(手)移动,提高工作对象感知能力,及时捕捉工作画面。



图7 车身及行走装置造型设计  
Fig.7 Modeling design of body and walking device



图8 机械臂(手)及视觉装置造型设计  
Fig.8 Modeling design of robot arm(manipulator) and visual device

## 4 结语

本文在农业机器人造型设计过程中,通过确定造型设计要素及类目,结合层次分析法和模糊综合评价法完成了要素及类目的权重分析,以此形成造型设计决策,形成了产品造型设计方案集并确定其中的最优解,构建了农业机器人造型设计流程。主要结论如下。

第一,产品造型设计要素及类目的获取需要客观、科学的样本分析,在分析过程中要注重要素之间的衔接逻辑,文中通过15个典型设计样本的分析,从整体造型的视角提炼设计要素及类目。第二,在实际设计过程中,25名专业用户对各个判断矩阵中指标间重要程度进行标度,运用层次分析法对统计结果进行了计算分析,能够保证造型设计要素及类目选择的科学性与客观性,提高设计的工作效率。同时,由5名专家对方案集进行模糊综合评价,确定最终方案,该农业采摘机器人造型设计方案中,采用了权重值为0.3236(排序为1)的圆形车身、权重值为0.2005(排序为2)的圆柱形机械臂、权重值为0.0519(排序为7)的可移动式视觉装置以及权重值为0.0955(排序为4)的履带式行走装置,验证了设计决策模型的可行性。第三,基于模糊综合评价法的农业机器人造型设计流程也适用于其他装备类产品,本文仅以农业采摘机器人为例进行说明。在推广到同类及其他产品设计中时,需要对设计要素及类目进行有针对性的分析。

## 参考文献:

- [1] 王沈策,刘德顺,文星. 品牌体验视角下的农机产品

- 造型设计[J]. 包装工程, 2017, 38(2): 105—109.  
WANG Shen-ce, LIU De-shun, WEN Xing. Agricultural Machinery Modeling Design Based on Brand Experience[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(2): 105—109.
- [2] 姬伟, 罗大伟, 李俊乐, 等. 果蔬采摘机器人末端执行器的柔顺抓取力控制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 19—26.  
JI Wei, LUO Da-wei, LI Jun-le, et al. Compliance Grasp Force Control for End-effector of Fruit-vegetable Picking Robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(9): 19—26.
- [3] 易中懿, 胡志超. 农业机器人概况与发展[J]. 江苏农业科学, 2010(2): 390—393.  
YI Zhong-yi, HU Zhi-chao. General Situation and Development of Agricultural Robot[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2010(2): 390—393.
- [4] 关宇, 杨晓京, 姜涛. 农业机器人多传感器信息融合技术的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(25): 14127—14128.  
GUAN Yu, YANG Xiao-jing, JIANG Tao. Research Advances on the Multisensor Information Fusion of the Agricultural Robot[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(25): 14127—14128.
- [5] 周俊, 程嘉煜. 基于机器视觉的农业机器人运动障碍目标检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 154—158.  
ZHOU Jun, CHENG Jia-yu. Moving Obstacle Detection Based on Machine Vision for Agricultural Mobile Robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 154—158.
- [6] 赵匀, 武传宇, 胡旭东, 等. 农业机器人的研究进展及存在的问题[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 20—24.  
ZHAO Yun, WU Chuan-yu, HU Xu-dong, et al. Research Progress and Problems of Agricultural Robot[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 20—24.
- [7] 陈帝伊, 陈建海, 马孝义. 农业机器人关键技术及应用研究进展[J]. 农机化研究, 2010, 32(5): 207—211.  
CHEN Di-yi, CHEN Jian-hai, MA Xiao-yi. Agricultural Robot Key Technology and Application Study Progress[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(5): 207—211.
- [8] 苏建宁, 陈肖, 张书涛, 等. 基于进化算法的产品造型创新设计方法研究[J]. 工程设计学报, 2016, 23(2): 136—142.  
SU Jian-ning, CHEN Xiao, ZHANG Shu-tao, et al. Product Styling Innovative Design Method Based on Evolutionary Algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2016, 23(2): 136—142.
- [9] 王钰明, 王其东, 陈黎卿. 面向多目标满意度的分动器设计方案优选[J]. 机械设计, 2015, 32(2): 68—72.  
WANG Yu-ming, WANG Qi-dong, CHEN Li-qing. Design Scheme Selection for Transfer Case Based on Multi-objective Satisfaction[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(2): 68—72.
- [10] 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.
- [11] 龚艳, 张晓, 刘燕, 等. 基于层次分析法的植保机械适用性综合评价方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 73—78.  
GONG Yan, ZHANG Xiao, LIU Yan, et al. Comprehensive Evaluation Method for the Applicability of Plant Protection Machinery Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 73—78.
- [12] SAATY T L, VARGAS L G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process[M]. New York: Springer US, 2012.
- [13] 常瑜, 刘宝顺, 唐琳. 基于层次分析法的扫地车造型模糊综合评价方法及应用[J]. 机械设计, 2017(3): 121—125.  
CHANG Yu, LIU Bao-shun, TANG Lin. Research and Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation Method of Sweeping Vehicle Modeling Based on AHP[J]. Journal of Machine Design, 2017(3): 121—125.
- [14] 孙承庭, 胡平. 智能移动式水果采摘机器人设计——基于机器视觉技术[J]. 农机化研究, 2016, 38(8): 179—183.  
SUN Cheng-ting, HU Ping. Design of Intelligent Mobile Fruit Picking Robot: Based on Machine Vision Technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(8): 179—183.
- [15] 吕继东, 赵德安, 姬伟. 苹果采摘机器人目标果实快速跟踪识别方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 65—72.  
LYU Ji-dong, ZHAO De-an, JI Wei. Fast Tracing Recognition Method of Target Fruit for Apple Harvesting Robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 65—72.
- [16] GB/T 12642—2013, 工业机器人性能规范及其试验方法[S].  
GB/T 12642-2013, Industrial Robot Performance Specification and Test Method[S].
- [17] 王玲, 姬长英. 农业机器人采摘棉花的前景展望与技术分析[J]. 棉花学报, 2006, 18(2): 124—128.  
WANG Ling, JI Chang-ying. Technical Analysis and Expectation for Cotton Harvesting Based on Agricultural Robot[J]. Cotton Science, 2006, 18(2): 124—128.
- [18] 周力辉, 赵国伟. 装甲车辆车身造型研究与设计[J]. 包装工程, 2017, 38(2): 82—86.  
ZHOU Li-hui, ZHAO Guo-wei. Styling Analysis and Design of Armored Vehicles[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(2): 82—86.