

# 基于虚拟感性工学的农业装备形态设计

刘明远<sup>1,2</sup>, 贺成柱<sup>1</sup>, 邹建强<sup>1</sup>

(1.甘肃省机械科学研究院有限责任公司, 兰州 730030; 2.兰州理工大学, 兰州 730050)

**摘要:** **目的** 探究农业装备形态设计中约束要素与虚拟现实技术结合进行创新设计的方法, 旨在快速响应目标市场需求, 提高设计对象研发成功率和设计质量, 减少设计耗时。**方法** 首先, 采用虚拟体验、访问调研和统计词频的方法, 以定性和定量相结合的方式来确定产品意象。其次, 利用形态分析法提取目标产品品牌风格特征, 邀请设计师在意象约束下设计意象几何形态, 二者组成混合原型库。然后, 利用形状文法将混合原型库中的品牌风格特征与意象几何形态进行形态融合, 以完成主体形态设计。最后, 构建基于交互式虚拟体验场景的设计环境, 在空间约束下完成目标产品的整体形态设计与评审。**结果** 以青贮饲料圆草捆打捆机为例, 验证了感性工学结合虚拟现实技术, 在农业装备形态设计中的有效性和实用性。**结论** 从意象、品牌风格、空间约束和虚拟设计的角度, 提出虚拟感性工学下的农业装备形态设计方法。该方法可以有效提高农业装备形态的设计进度和成功率, 并为相关领域的产品形态设计提供思路。

**关键词:** 感性工学; 虚拟现实; 形状文法; 农业装备; 形态设计

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)06-0041-08

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.06.005

## Agricultural Equipment Form Design Based on Virtual Kansei Engineering

LIU Ming-yuan<sup>1,2</sup>, HE Cheng-zhu<sup>1</sup>, ZOU Jian-qiang<sup>1</sup>

(1.Gansu Academy of Mechanical Sciences Co., LTD, Lanzhou 730030, China;

2.Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to explore the method of combining constraint elements in the form design of agricultural equipment with virtual reality technology to carry out innovative design, so as to quickly respond to the needs of the target market, improve the success rate of design objects and design quality, and reduce design time. Firstly, the methods of virtual experience, interview survey and word frequency statistics are used to determine the product image constraint positioning in a combination of qualitative and quantitative methods; secondly, the morphological analysis method is adopted to extract the brand style characteristics of the target product, designers are invited to design image geometric forms under the constraints of the image, and the two form a hybrid prototype library; then, the shape grammar is used to form the fusion of the brand style features and the image geometry in the mixed prototype library to complete the main form design; finally, a design environment is build based on interactive virtual experience scenes, and the overall form design and review of the target product under space constraints are completed. With the silage round baler as an example, the effectiveness and practicability of the perceptual engineering combined with virtual reality technology in the form design of agricultural equipment are verified. From the perspective of image, brand style, space constraints and virtual design, a method of agricultural equipment form design under virtual perceptual engineering is proposed. This method effectively improves the progress and success rate of agricultural equipment form design, and provides ideas for product form design in related fields.

**KEY WORDS:** kansei engineering; virtual reality; shape grammar; agricultural equipment; form design

收稿日期: 2021-11-30

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0700105-3)

作者简介: 刘明远 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为产品设计。

我国经济已步入以创新驱动和提质增效为重点的新阶段,但制造业整体自主创新设计能力薄弱,传统的制造业生产方式将被数字化、智能化、网络化设计所取代<sup>[1]</sup>。农业装备生产商是否能以最快的速度发现生产市场急需的产品,决定了其产品是否具有竞争力,并取决于是否有科学、高效的设计方法来支持研发过程<sup>[2]</sup>。当前,人们对虚拟现实技术在农业装备领域的应用高度重视,同时也取得了一定的成绩<sup>[3]</sup>。利用虚拟现实技术设计产品可以快速得到符合生产加工要求的模型,并使用优化方法不断对设计模型进行处理,最终得到生产加工的数字模型<sup>[4]</sup>。通过提取产品设计中人的感性认知要素,结合虚拟现实技术来完成产品的设计与评价,这对缩短产品设计周期和降低研发成本具有重要意义。

## 1 研究方法与流程

### 1.1 感性工学

感性工学(Kansei Engineering, KE)发源于日本,其目的是将人对产品感性的认识转化为理性的设计元素,并将其运用到产品设计中的理论和技术<sup>[5]</sup>。目前主流的感性认知量化方法分为2个部分,一部分是心理层面的SD调查法<sup>[6]</sup>、专家访谈<sup>[7]</sup>等,另一部分是生理层面的眼动实验<sup>[8]</sup>、脑电实验<sup>[9]</sup>等。感性工学通过研究消费者情感认知及产品属性间的关系来指导设计<sup>[10]</sup>,Quan等<sup>[11]</sup>将深度学习技术和感性工学相结合,以女性大衣设计为例,验证了将用户偏好映射到产品设计中的有效性和可行性。Ariyanti等<sup>[12]</sup>通过市场调研,利用感性工学知识和质量功能展开方法,设计出既能引起购买者兴趣又低价、实用的调味料包装。付成杰等<sup>[13]</sup>运用感性工学理论和灰关联分析法,得到眼镜框架造型要素和意象之间的相关程度并指导设计。苏建宁等<sup>[14]</sup>通过研究产品品牌风格和流行趋势,利用感性工学和形状文法,提出了品牌风格下机械装备造型创新设计方法。

将感性工学理论应用于产品设计中,体现了以人为本的设计理念,能有效满足消费者对产品的审美需求,提高产品市场份额。

### 1.2 虚拟现实技术

虚拟现实<sup>[15]</sup>(Virtual reality, VR)是融合了计算机仿真、图像处理、传感器等多种科技成果的复合技术,拥有虚拟体验、人机交互和联想性等特征,为产品形态设计提供了模拟现实场景的人机交互设计模式。根据使用对象交互方式和沉浸程度的不同<sup>[16]</sup>,将虚拟现实分为桌面式虚拟现实、沉浸式虚拟现实和增强型虚拟现实等。

孙远波等<sup>[17]</sup>通过构建虚拟现实实验系统,验证了

车辆人机交互设计方案虚拟评价系统的可用性。严褒<sup>[18]</sup>通过分析造型设计中的影响因素,总结提出产品虚拟交互设计的新方法。Kim等<sup>[19]</sup>通过ICIDO软件构建的虚拟场景,提出了在沉浸式环境中的水下武器设计验证方法。

数字化设计改变了传统的农业装备研发模式,开创了农业装备研发设计新领域,有效解决了农业装备研发的长周期性和高投入等难题。虚拟现实技术作为数字化设计的一部分,它的应用不仅节约了制作样机的成本和生产时占用的空间资源,而且实现了结构设计师、形态设计师、用户、行业专家之间的无障碍沟通与交流,打破了跨学科融合设计技术交流的壁垒,不仅缩短了产品研发周期,而且保证了产品加工图纸的精确性,能有效指导产品设计和生产,使企业生产效率得到最大化。

### 1.3 虚拟感性工学

虚拟感性工学(Virtual Kansei Engineering, VKE)<sup>[20]</sup>将虚拟现实技术融合到感性工学理论,通过虚拟仿真环境的构建,将人的感性认知在虚拟环境下表达达到产品设计中,完成相关的设计及评审。随着科技的不断进步,虚拟现实技术在农业装备设计研发中的应用得到进一步普及。虚拟产品设计将低保真模型和高保真模型转换到虚拟环境中<sup>[21]</sup>,设计师通过计算机绘图软件建立一个低精度的模型,然后通过虚拟体验的方式进行方案设计,在虚拟环境中不断优化产品细节,依据约束要素优化改进模型直到得出最优方案,最后生成高精度模型进行评价。

研究构建了在农业装备形态设计过程中融合感性工学和虚拟现实技术进行创新设计的方法,通过感性工学理论和方法获取圆草捆打捆机设计组成要素并完成主体形态设计,利用虚拟现实技术完成整体设计与评价,获得最优设计方案,在提高产品用户认可度的同时,减少了研发时间和成本。

### 1.4 虚拟感性工学下的农业装备形态设计方法

虚拟感性工学下的农业装备形态设计方法,主要包含主体形态设计、整体形态设计、虚拟验证与评价,见图1。

首先,对畅销目标装备进行市场调研,提取设计要素,利用虚拟交互体验、访谈调查法和热词词频分析法,对目标装备形态意象约束明确定位,采用形态分析法提取品牌风格特征,邀请设计师根据意象定位完成几何形态原型设计,获得混合原型库,采用形状文法<sup>[22]</sup>进行形态融合设计,完成创新形态设计。然后,构建虚拟体验研发系统,依靠产品结构部件,在形态空间约束下生成设计方案。最后,在虚拟交互环境中进行方案评审,对评审结果进行合理分析,获得最佳形态设计方案。

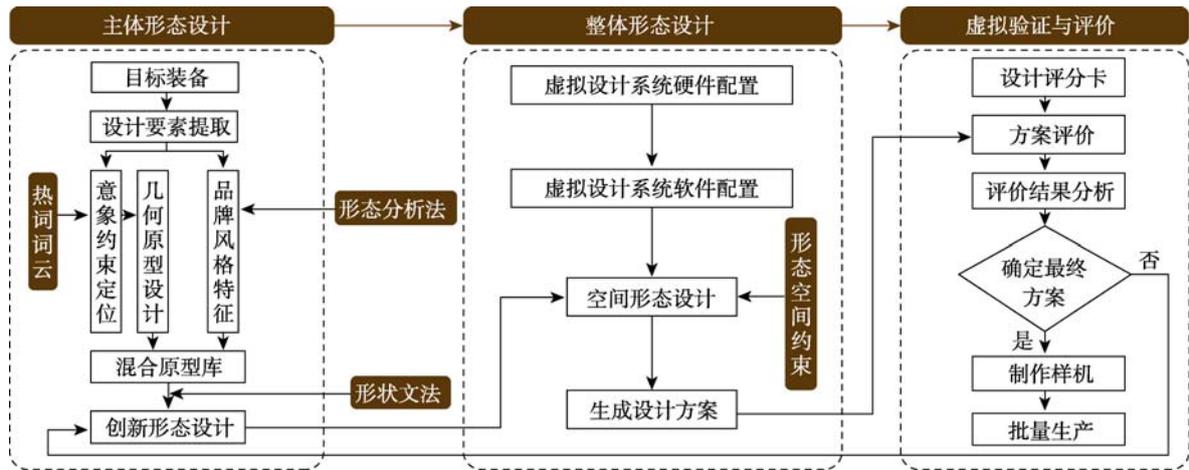


图 1 虚拟感性工学下的农业装备形态设计方法

Fig.1 Agricultural equipment form design method under virtual perceptual engineering

## 2 主体形态设计

以青贮饲料打捆机作为案例进行研究,该产品结构复杂,自动化程度高,市场需求大,为提高在同类产品中的市场竞争力,现对其进行全新形态设计,充分提取设计要素,在继承品牌风格的前提下,利用感性工学知识挖掘设计元素,增强产品识别性,进一步满足人们对形态的美感要求。

### 2.1 提取设计要素

#### 2.1.1 意象定位

意象定位是为了让产品设计无限接近使用者的审美需要。首先从农机网站收集市场畅销青贮饲料打捆机 30 款,并整理其产品简介和客户评语,获取 60 个意象约束词,邀请装备制造相关专家将相似的打捆机样本和约束词进行剔除,获得具有代表性的打捆机样本 10 款,以及意象定位词 30 个。然后收集这 10 款打捆机的等轴侧图各一张,使用 CorelDRAW 绘图软件将打捆机代表性样本的等轴侧图背景统一调整为白色,灰度处理以消除涂装色对实验的干扰。图片处理好后依次导入犀牛 6 软件,通过遮罩工具将透明度项调整为 5%,得到打捆机最终样本,见图 2。30 个意象定位词构成情感知觉词汇库,见图 3。最后邀请 20 位专业人员(打捆机用户 10 人,设计师 5 人,装备制造专家 5 人)进行打捆机意象定位调研,受访者在犀牛 6 软件中对虚拟三维打捆机样本进行观察,之后从虚拟打捆机样本中选出 5~10 款各自认为较好的产品,对照情感知觉词汇库,对选出的每款打捆机使用至少 2 个情感知觉词进行描述,并将每位受访者对不同打捆机的描述词进行记录。通过 Python 软件开发词频统计程序,对所有记录的描述词进行统计分析,最后得到意象约束词云图及其出现频率,见图 4。图中字号越大代表词频越高,按照词频高低确定打捆机意象定位词,即力量感和简洁感。



图 2 打捆机样本

Fig.2 Bundling machine sample

硬朗感	大气感	层次感	科技感	整体感
智能感	稳重感	简洁感	现代感	精细感
品质感	创新感	力量感	安全感	品牌感
工艺感	耐用感	坚硬感	高效感	易操作感
环保感	机械感	未来感	可靠感	人机感
设计感	紧凑感	体量感	仿生感	精密感

图 3 情感知觉词汇库

Fig.3 Vocabulary of emotional perception

#### 2.1.2 品牌风格提取

品牌风格传承着企业的文化与精神,影响着产品设计风格,在产品形态上主要表现为涂装和局部细节特征造型设计等,设计过程中刻意保留部分特征延续到其他系列产品从而形成独特的品牌风格。通过提取打捆机生产企业所有的产品特征,归纳出其品牌风格以具有力量感的直线为主,折线为辅,主体为绿色,辅色为灰色和黑色。采用形态分析法,通过 CorelDRAW 绘图软件提取打捆机品牌风格特征,得到打捆机设计原型,见图 5。由于进料口和料仓结构的限制,此次设计不对二者的形态进行重新设计。

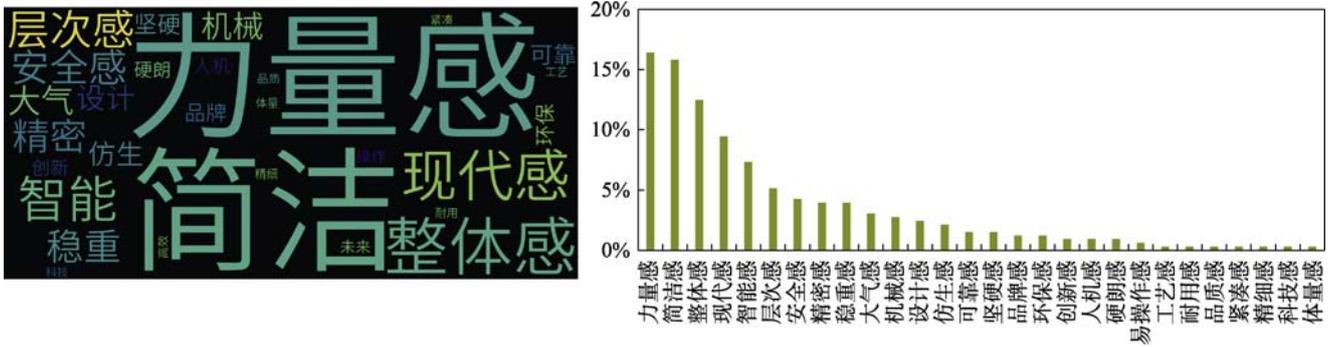


图4 意象约束词云及被使用频率  
Fig.4 Image constraint word cloud and frequency of use

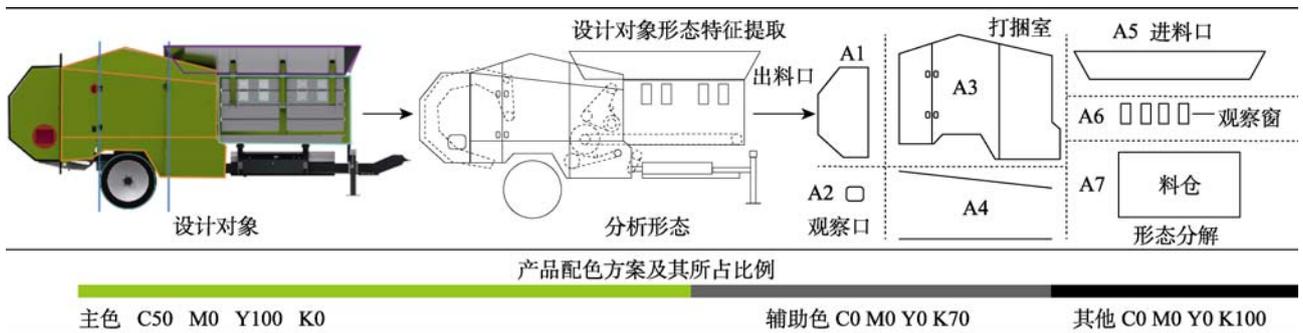


图5 品牌风格设计原型  
Fig.5 Brand style design prototype

## 2.2 创新形态设计

### 2.2.1 几何形态原型设计

邀请工作经验 3 年以上的机械行业设计师和工

业设计师各 3 名,围绕力量感、简洁感意象定位进行关联性二维几何形态绘制。通过设计师内部筛选,最终确定了 10 款具有代表性的几何形态组成创新几何形态原型库,见表 1。

表 1 几何形态原型库  
Tab.1 Geometric prototype library

T1	T2	T3	T4	T5
T6	T7	T8	T9	T10

### 2.2.2 形态融合

形态融合旨在快速、有效地完成产品的创新设计。采用形态融合设计方法,不仅能提高设计效率,而且能使产品设计方案无限接近使用者的意象认知,这有助于企业在市场竞争中获取先机。利用形状文法,将设计原型和创新几何形态进行形态融合,由此获得新形态。

运用 7 种形状文法原则,对圆草捆打捆机进行形态融合设计,分别是置换(S1)、增删(S2)、缩放(S3)、

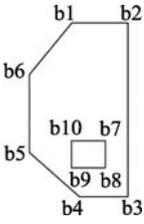
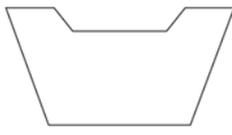
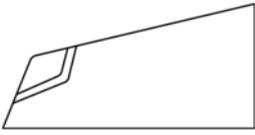
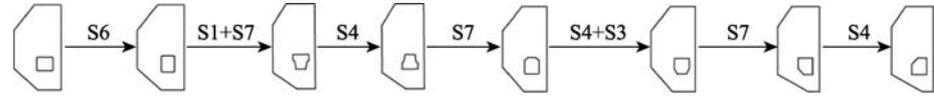
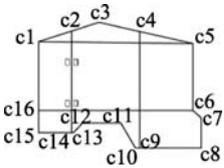
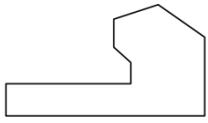
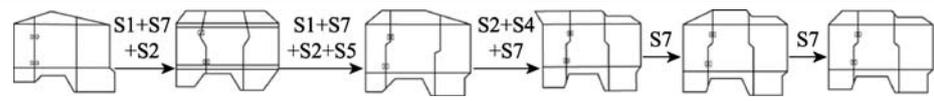
镜像(S4)、复制(S5)、旋转(S6)、坐标微调(S7)。出料口和打捆室形态融合流程,见表 2。

## 3 整体形态设计

### 3.1 虚拟设计系统硬件配置

运用 4 台投影仪、3 台图形工作站、1 套 ART 动态捕捉传感器、1 副 Optitrack 动态捕捉眼镜、1 个 HTC 无线遥控手柄、1 块投影显示屏、2 台图形融合机,以及 15 副 3d 眼镜构建沉浸式虚拟现实环境。

表 2 形态融合设计  
Tab.2 Form fusion design

a 出料口形态融合演绎过程				
出料口形态特征	几何形态原型			
A1、A2	T9	T7	T3	
<p>输入原型</p> 				
<p>组合规则：在形态演绎过程中首先要保证打捆和出料口结构之间的空间距离，以形态设计追随机械结构展开，主要参考具有直线造型和倒角的 3 个几何原型进行形态演绎</p>				
<p>执行形状文法</p> 				
<p>尺寸约束/mm</p>	$300 < b1b2 < 500$ $970 < b2b3 < 1000$	$120 < b3b4 < 500$ $480 < b5b6 < 970$	$b2b6 < 490$	
b 打捆室形态融合演绎过程				
打捆室形态特征	几何形态原型			
A3	T8	T10	T5	
<p>输入原型</p> 				
<p>组合规则：在形态演绎过程中考虑到钣金加工要求和突出硬朗感意象，形态设计以具有丰富折线造型的参考对象为主，选择打捆室和 3 个几何原型进行形态演绎</p>				
<p>执行形状文法</p> 				
<p>尺寸约束/mm</p>	$1200 < c3c8$	$250 < c8c11 < c3c13 < 950$	$1000 < c1c8 < 1600$	

### 3.2 虚拟设计系统软件配置

运用 MotioninJoy Gamepad tool、Motive、ActiveVR、MakeReal3D 这 4 款软件构建虚拟设计评价系统，其中 MakeReal3D 及 ActiveVR 为北京朗迪锋公司自主研发的工业虚拟现实仿真平台，该软件具有交互性、逼真性、精确性、兼容性等特点。

### 3.3 空间形态设计

空间约束旨在探索产品结构与形态设计的均衡点，既是形式追随功能，也是功能迎合形式的设计表现，能最大限度降低产品的生产成本。

首先，机械工程师和产品设计师需要深度合作，对打捆机的功能需求进行分析并构建三维模型。然后，根据空间约束条件和主体形态设计方案进行虚拟

设计，结合形态融合方案，对打捆机出料口和打捆室的形态进行组合，以打捆机三维结构模型为出发点划分其空间布局。利用犀牛 6 软件进行粗模搭建，利用 Makereal3D 的在线模式将粗模导入其内部，在已搭建好的交互式虚拟设计环境中对粗模进一步优化，直到得到可用于生产的精细模型。最后，参照企业标准色进行涂装效果展示，见图 6。

### 3.4 方案生成

设计方案直观体现了产品设计的最终效果。由 6 位具有丰富设计工作经验的设计师在虚拟交互环境下，采用上述研究方法进行方案设计，最终得到多款打捆机设计方案，经过装备制造专家、生产代表、机械设计师、工业设计师、客户对方案的初步挑选，最终获得 6 款设计方案，见表 3。

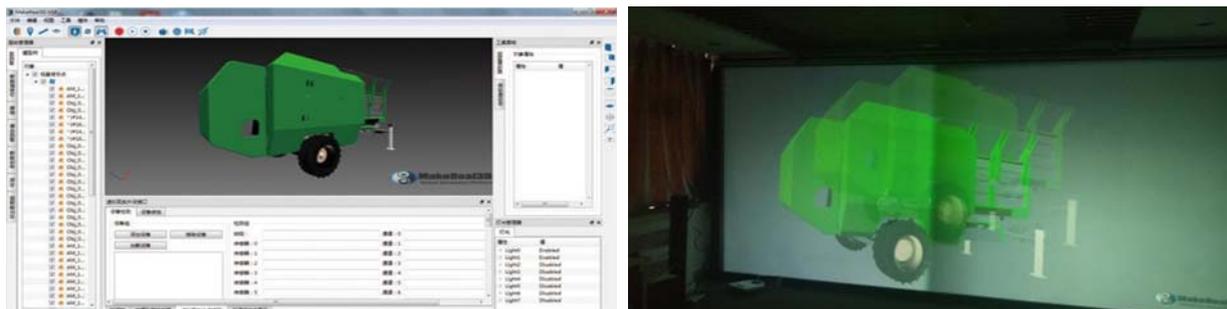


图6 空间形态设计  
Fig.6 Space form design

表3 初步设计方案  
Tab.3 Preliminary design scheme

方案 1	方案 2	方案 3
方案 4	方案 5	方案 6

## 4 虚拟验证与评价

### 4.1 设计评分卡

为快速获取装备制造专家、生产代表、机械设计师、工业设计师、客户对设计方案的评审结果，设计

了专用评分卡，见图7。每个方案效果图对应一张评分卡，评分卡上有4个评价目标，每个评价目标后面有5个分数等级可选择，分别对应1~5分，数值1代表最不符合，数值2代表不符合，数值3代表基本符合，数值4代表符合，数值5代表很符合，评价人员根据自身情况进行评价打分。



图7 评分卡  
Fig.7 Scorecard

### 4.2 方案评价

此次方案评价主要围绕打捆机形态设计是否符合农机装备形式追随功能的设计原则，形态尺寸是否符合实际加工要求及有无结构干涉展开。邀请评价人员15人，其中机械行业专家4人，机械结构、电控、液压、控制程序设计师各1人，形态设计师4人，企业代表1人，用户2人，工作人员在虚拟环境下分别对6款方案进行展示。方案评价见图8。展示内容包

括：第1步，虚拟漫游，见图8a，目的在于展示打捆机形态设计方案，检验整机形态是否协调；第2步，尺寸测量和关键点标记，见图8b，尺寸测量用于检验形态设计是否符合人机尺寸设计要求，关键点标记的目的是标记打捆机形态设计中的主要特征，便于评审人员做出评价；第3步，拆分和虚拟剖视设计对象，见图8c—8d，旨在验证打捆机装配关系是否正确，机械结构设计有无缺陷，运动部件之间有无干涉等，评价人员使用评分卡根据演示内容进行现场打分。

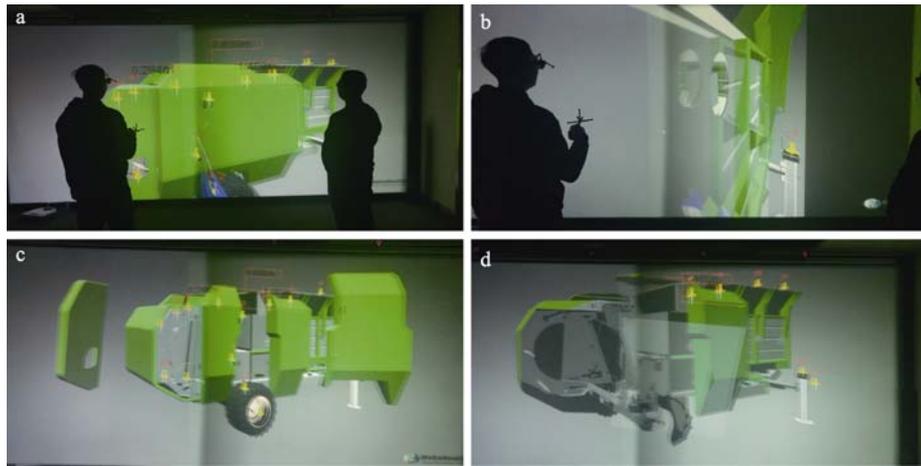


图 8 方案评价  
Fig.8 Program evaluation

### 4.3 评价结果分析

根据评审专家现场打分结果，共收集到有效评分卡 90 张，按产品方案分为 6 类，统计每张评分卡的数值并计算出平均值，获得评审专家评价价值。依次计算出每个方案 15 张评分卡专家评价价值的平均值，得到每个方案综合评价价值。统计综合评价价值并制作柱状图，结果显示 6 款方案的综合评价价值在 3.9~4.5 分，均大于评价中间值 3 分，见图 9。综上，6 款方案均符合设计定位，其中方案 3 评分排第 1，其形态通过形状文法演化而来，最为符合力量感、简洁感的意象定位，验证了此研究方法的有效性，最终虚拟样机方案，见图 10。

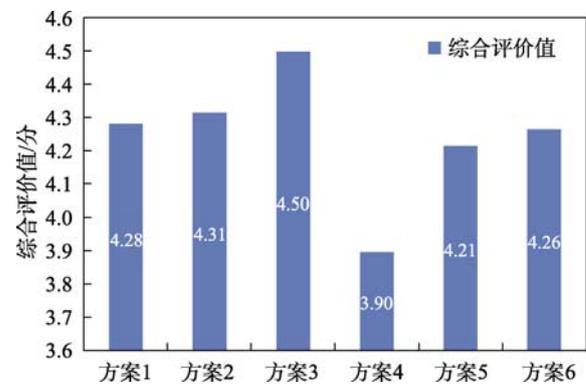


图 9 评价结果  
Fig.9 Evaluation results



图 10 虚拟样机效果  
Fig.10 Virtual prototype renderings

## 5 结语

从感性认知与虚拟设计的角度，提出虚拟感性工学下的农业装备形态设计方法。通过感性工学理论提取设计要素，指导并完成主体形态设计。通过虚拟现实技术构建虚拟仿真实验系统，实现了空间约束下的产品整体形态设计与评价，将两者结合应用于圆草捆打捆机形态设计，在保证功能、结构合理的情况下，得到参评人员认可的设计方案。该方法不仅缩短了产品的开发周期，而且减少了空间资源的占用和人力物力的投入，提高了企业新产品开发的进度和效率。

### 参考文献：

[1] 创新设计发展战略研究项目组. 制造业创新设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017: 3-16.  
Innovative Design Development Strategy Research Project Team. Innovation Design of Manufacturing[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017: 9-10.

[2] 刘宏新, 王登宇, 郭丽峰, 等. 先进设计技术在农业装备研究中的应用分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 1-18.  
LIU Hong-xin, WANG Deng-yu, GUO Li-feng, et al.

- Development of Advanced Design Technology and Its Application in Agricultural Equipment. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 1-18.
- [3] 杜岳峰, 傅生辉, 毛恩荣, 等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 1-17.  
DU Yue-feng, FU Sheng-hui, MAO En-rong, et al. Development Situation and Prospects of Intelligent Design for Agricultural Machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 1-17.
- [4] 张自敏, 樊艳英, 陈冠萍, 等. 农业数字化车间制造过程研究—基于物联网和智能大数据云存储[J]. 农业化研究, 2019, 41(10): 229-233.  
ZHANG Zi-min, FAN Yan-ying, CHEN Guan-ping, et al. Research on the Manufacturing Process of Agricultural Machinery Digital Workshop: Based on the Internet of Things and Smart Large Data Cloud Storage[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 229-233.
- [5] 林丽, 郭主恩, 阳明庆. 面向产品感性意象的造型优化设计研究现状及趋势[J]. 包装工程, 2020, 41(2): 65-79.  
LIN Li, GUO Zhu-en, YANG Ming-qing. Current Research Situation and Trend of Product Image-based Modeling Optimization[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(2): 65-79.
- [6] QIU K, SU J N, ZHANG X X, et al. Evaluation and Balance of Cognitive Friction: Evaluation of Product Target Image Form Combining Entropy and Game Theory[J]. Symmetry, 2020, 12(9): 1-19.
- [7] 徐骁琪, 程永胜, 陈国强. 基于 AHP 法的房车造型评价方法及应用研究[J]. 机械设计, 2020, 37(6): 140-144.  
XU Xiao-qi, CHENG Yong-sheng, CHEN Guo-qiang. Evaluation Method and Application of RV Modeling Based on AHP Method[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(6): 140-144.
- [8] KÖHLER M, FALK B, SCHMITT R. Applying Eye-Tracking in Kansei Engineering Method for Design Evaluations in Product Development[J]. International Journal of Affective Engineering, 2015, 14(3): 241-251.
- [9] DENG L, WANG G H. Application of EEG and Interactive Evolutionary Design Method in Cultural and Creative Product Design[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2019(9): 1-16.
- [10] 丁满, 程语, 黄晓光, 等. 感性工学设计方法研究现状与进展[J]. 机械设计, 2020, 37(1): 121-127.  
DING Man, CHENG Yu, HUANG Xiao-guang, et al. Status and Progress of Kansei Engineering Design Method[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(1): 121-127.
- [11] QUAN H F, LI S B, HU J J. Product Innovation Design Based on Deep Learning and Kansei Engineering[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 1-17.
- [12] ARIYANTI F D, CHAN S. Kansei Engineering, Manova and Quality Function Deployment to Design Bottle Packaging and Seasoning Quality[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020(26): 1-8.
- [13] 付成杰, 毕延刚, 沈学会. 基于感性工学的框架眼镜造型意象研究[J]. 包装工程, 2020, 41(2): 269-275.  
FU Cheng-jie, BI Yan-gang, SHEN Xue-hui. The Shape Image of Frame Glasses Based on Kansei Engineering[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(2): 269-275.
- [14] 苏建宁, 李晓晓, 王鹏, 等. 面向品牌风格的机械装备制造型创新设计研究[J]. 包装工程, 2019, 40(18): 28-34.  
SU Jian-ning, LI Xiao-xiao, WANG Peng, et al. Innovative Design of Mechanical Equipment Form for Brand Style[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(18): 28-34.
- [15] 曹国忠, 贺蕾, 于晶晶. 虚拟交互辅助产品外观设计流程研究[J]. 机械设计, 2019, 36(12): 134-139.  
CAO Guo-zhong, HE Lei, YU Jing-jing. Study on Appearance Design Flow of Virtual Interactive Assistant Products[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(12): 134-139.
- [16] 范文洁. 沉浸式虚拟现实技术下的产品设计评价研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2016.  
FAN Wen-jie. Research on Product Design Evaluation Based on Immersive Virtual Reality Technology[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2016.
- [17] 孙远波, 董一辰, 高若琳, 等. 车辆人机交互设计虚拟评价系统构建与应用[J]. 包装工程, 2019, 40(2): 17-22.  
SUN Yuan-bo, DONG Yi-chen, GAO Ruo-lin, et al. Construction and Application of Virtual Evaluation System for Vehicle Human-Machine Interaction Design[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(2): 17-22.
- [18] 严褒. 基于虚拟现实技术的工业产品造型设计[J]. 现代电子技术, 2019, 42(3): 184-186.  
YAN Bao. Industrial Products Modeling Design Based on Virtual Reality Technology[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(3): 184-186.
- [19] KIM H, LEE H, LEE S, et al. A Case Study on Design Verification for Supportability of Weapon System Based on Virtual Reality[J]. Journal of the KIMST, 2016, 19(1): 76-83.
- [20] 何灿群, 王松琴. 感性工学的方法与研究探讨[J]. 装饰, 2006(10): 16.  
HE Can-qun, WANG Song-qin. Approach of Kansei Engineering and Academic Exploration[J]. Zhuangshi, 2006(10): 16.
- [21] 代明远, 王明江, 肖利伟, 等. 工程机械产品虚拟设计应用综述[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 128-134.  
DAI Ming-yuan, WANG Ming-jiang, XIAO Li-wei, et al. Review on Virtual Design Applications of Engineering Machinery Products[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(3): 128-134.
- [22] 王伟伟, 杨延璞, 杨晓燕, 等. 基于形状文法的产品形态创新设计研究与实践[J]. 图学学报, 2014, 35(1): 68-73.  
WANG Wei-wei, YANG Yan-pu, YANG Xiao-yan, et al. Method of Product Form Design Based on Shape Grammar[J]. Journal of Graphics, 2014, 35(1): 68-73.