

特约论文



肖旺群 博士、教授、硕士生导师,安徽工业大学艺术与 design 学院院长,香港理工大学设计学院高级访问学者。入选安徽省高校优青项目、安徽省学科带头人培育项目、安徽省首届十佳工业设计师,兼任中国工业设计协会会员、中国机械工程学会工业设计分会理事、安徽省工业设计协会常务理事。担任教育部学科评估专家、教育部学位与研究生教育发展中心评审专家以及《机械设计》《包装工程》等期刊审稿专家。主要研究方向为产品形象系统设计与感性设计,承担教育部人文社科基金项目、安徽省高校科学研究重大项目以及重大产学研项目等科研项目 60 余项,其中主持 30 余项。发表学术论文 50 余篇,其中 SCI 与 EI 检索 12 篇,出版学术专著 1 部,授权专利 20 余项,设计的产业化成果获中国设计红星奖、中国好设计奖、安徽省工业设计大赛金奖等 10 余项。

基于蚁群算法的产品形态优化设计

肖旺群,王紫雯,朱飞跃

(安徽工业大学 艺术与 design 学院,安徽 马鞍山 243032)

摘要: 为高效精准地进行产品形态优化设计,构建基于蚁群算法的产品形态优化设计模型,通过建立节点选择概率公式、动态贡献值更新方程和多目标适应度函数,并利用 Matlab 系统实现模型的运算。以水陆两栖消防供排水机器人为工程应用实例,基于广泛收集的 15 个代表性图片样本与 3 个感性意象词汇(合理的、智能的、灵巧的)样本,运用感性工学理论建立感性意象量表评价体系,并对样本进行形态解构。在 Matlab 系统中完成数据预处理、算法参数设置和迭代运算后,输出最优形态组合方案并进行三维呈现。最后利用虚拟现实(VR)仿真实验对输出方案进行分析评价,获得 11 组有效评价数据。结果表明:优化方案 2 在 3 个感性意象维度的评价均值分别提升至 4.82(合理的)、4.91(智能的)和 4.91(灵巧的),显著优于基准方案,设计的产品更加符合用户的感性需求,充分验证了该模型在实现产品形态与用户感性需求精准匹配方面的工程实用价值。

关键词: 蚁群算法;形态优化;虚拟现实技术;工业设计;感性工学;Matlab;感性需求

中图分类号: TB 472 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24171



Product Shape Optimization Design Based on Ant Colony Algorithm

XIAO Wangqun, WANG Ziwen, ZHU Feiyue

(School of Arts and Design, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: To achieve efficient and precise product shape optimization design, an ant colony algorithm-based product form optimization design model was constructed by establishing node selection probability formulas, dynamic

收稿日期: 2024-09-22

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重大项目(2022AH040051)

作者简介: 肖旺群(1978—),男,安徽安庆人,博士,教授,主要研究方向为产品形象系统设计与感性设计。

引文格式: 肖旺群,王紫雯,朱飞跃.基于蚁群算法的产品形态优化设计[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2025,42(3):253-262.

contribution value update equations, and multi-objective fitness functions, with model computation implemented using the Matlab system. Taking an amphibious firefighting water supply and drainage robot as an engineering application case, the study was based on extensively collected samples including 15 representative image samples and 3 perceptual imagery vocabulary samples (rational, intelligent, agile). Guided by Kansei engineering theory, a perceptual imagery scale evaluation system was established, and morphological deconstruction was performed on the samples. After completing data reprocess, algorithm parameter configuration, and iterative computation in the Matlab system, the optimal form combination solution was output and presented in 3D. Finally, virtual reality (VR) simulation experiments were conducted to analyze and evaluate the output solutions, yielding 11 sets of valid experimental evaluation data. The results demonstrate that optimized solution 2 achieves significantly improved mean evaluation scores of 4.82 (rational), 4.91 (intelligent), and 4.91 (agile) across the three perceptual imagery dimensions compared to the baseline solution, indicating better alignment with users' perceptual needs. This fully validates the model's engineering practicality in achieving precise matching between product form and users perceptual requirements.

Keywords: ant colony algorithm; shape optimization; virtual reality technology; industrial design; Kansei engineering ; Matlab; perceptual demand

当前设计研究呈现出明显的多学科交叉融合趋势,智能算法在工业设计领域的应用正日益受到学界关注,特别是粒子群算法、蚁群算法(ant colony optimization, ACO)、反向传播(back propagation, BP)神经网络等算法的创新运用。通过提取关键形态特征并融合智能算法实现产品形态优化已成为重要研究方向。作为一种模拟蚂蚁觅食行为的仿生优化算法,ACO凭借其出色的计算效率与容错能力在路径优化问题方面展现独特优势。产品形态直接影响用户感性体验,但传统产品形态设计方法仍难以准确捕捉用户需求。因此,开展基于ACO算法的产品形态优化研究,不仅能有效提升产品市场竞争力、精准满足消费者需求,更能优化用户使用体验并降低开发成本,具有重要的理论价值与实践意义。

蚁群算法作为一种受自然界蚂蚁觅食行为启发的智能算法,已在多个领域展现出强大的应用潜力。在交通运输领域,Goudarzi等^[1]将其用于自组织网络的实时路径优化,李世国^[2]针对非结构化环境特点实现了搜救机器人的静态路径规划,Agizza等^[3]开发了智能停车解决方案,Thiruvady等^[4]提出了基于种群的资源优化方法用于矿石运输,Morin等^[5]则通过搜救路径优化验证了算法实用性。在金融与工程预测领域,Uthayakumar等^[6]构建的财务危机预测模型提高了分类性能,刘芳等^[7]融合ACO和粒子群算法开发了爆破装药比冲量预测系统。在工业调度领域,吴昌钱等^[8]结合量子计算技术构建蚁群优化制造调度模型,提升了车间调度处理的全局搜索效率;Wang等^[9]综合考虑机器负载、能耗、交货期等因素,基于ACO与模拟退火算法提出了多属性调度规则计算方法,为复杂制造环境下的生产调度提供

了更灵活的决策支持。

近年来,为应对复杂多变的实际应用需求,学界针对蚁群算法的优化研究取得了显著进展。一方面,对于传统蚁群算法的改进。Jia等^[10]为解决蚁群算法在电动汽车路径中存在的收敛速度慢、求解质量较差等不足,提出了双层蚁群算法架构,显著提升了算法性能;吴延峰等^[11]针对传统蚁群算法在处理起始时间窗冲突时的不足,开发的改进型蚁群优化路径规划技术在物流调度领域展现出突出优势;张邦成等^[12]针对焊接机器人路径规划的特殊需求,提出了自适应精英蚁群算法,通过优化核心参数实现了算法性能的提升;高茂源等^[13]分别从启发因子、信息素及挥发因子方面改进蚁群算法,有效提升了算法的收敛速度和寻优效率。其次,在跨学科融合创新方面,Onan^[14]将自然语言处理(natural language processing, SRL)技术与蚁群算法相结合,开发的SRL-ACO文本增强框架利用语义角色标记技术,为机器学习模型自动生成高质量的增强训练数据;Jawad等^[15]整合人工神经网络、小波变换和蚁群优化技术,构建高压直流输电线路智能故障诊断系统,在保证实时性的同时大幅提升了故障类型识别的准确率。这些研究成果证明,蚁群算法在解决复杂工程问题方面具有独特优势和创新能力。但是蚁群算法在工业设计领域尚未深入涉及,尤其在产品形态优化设计方面,现有的理论研究和实践应用尚处于初级阶段。鉴于此,立足蚁群算法基本原理,构建面向产品形态优化设计的智能算法模型,以期为工业设计师提供智能化、高效率的设计辅助工具,并为智能算法与创意设计的深度融合提供理论参考。

1 产品形态优化设计模型

蚁群算法由 Dorigo 等^[16]于 1996 年提出, 其原理是蚂蚁在路径上释放信息素, 后来的蚂蚁会选择信息素浓度较高的路径, 从而形成正反馈, 最终蚁群找到最优觅食路径^[17]。根据蚁群算法的基本原理, 构建基于蚁群算法的产品形态优化设计模型, 并利用 Matlab 系统完成模型实现。

1.1 模型构建

该模型由 n 个设计要素和 m 个代表感性意象组成。设计要素指产品外观造型、部件相关关系、色彩搭配等显著影响产品直观感受的形态特征大类, 每类设计要素包含多种具体形态特征, 如色彩搭配设计要素可能包含橙黄色系、蓝色系等形态特征; 外观造型设计要素可能包含流线型、棱角型等形态特征。代表性感性意象指最能代表用户对某产品形态直观感受的形容词, 如高端的、可靠的等。设 x_1, x_2, \dots, x_n 为一个产品形态组合, F 为该形态组合的整体感性意象值, F_k 为该形态组合对第 k 个感性意象的总贡献值。基于此, 产品形态优化设计模型 Y 可

描述为:

$$\left. \begin{aligned}
 Y = \max F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max (F_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\
 F_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, F_m(x_1, x_2, \dots, x_n)), \\
 \text{s.t. } a_j \leq x_j \leq b_j, j = 1, 2, \dots, n, \\
 x_j \in Z, k = 1, 2, \dots, m,
 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中: x_j 为第 j 级设计要素, 最大可能取值为 l_j , l_j 为 x_j 的形态特征数量, $l_j = b_j - a_j + 1$; Z 为设计要素空间; a_j, b_j 为变量取值; $j = 1, 2, \dots, n$, 为设计要素的层级。

1.2 模型求解

产品形态优化设计模型的求解过程如图 1 所示。为避免产品形态设计要素之间的耦合影响, 该模型采用分级设计策略, 将多类目形态设计要素构建为多层次决策模型。每个层级独立控制产品形态的一个特定方面, 并在该层级内选择一项形态特征, 最终通过逐级组合形成完整的产品形态组合。这种分层结构确保各变量可独立调整, 而不直接干扰其他变量。例如, 在色彩搭配设计要素层级, 可选择橙黄色系作为该层级的形态特征, 而这一选择不会对产品外观造型、部件相关关系等其他层级的决策产生影响。

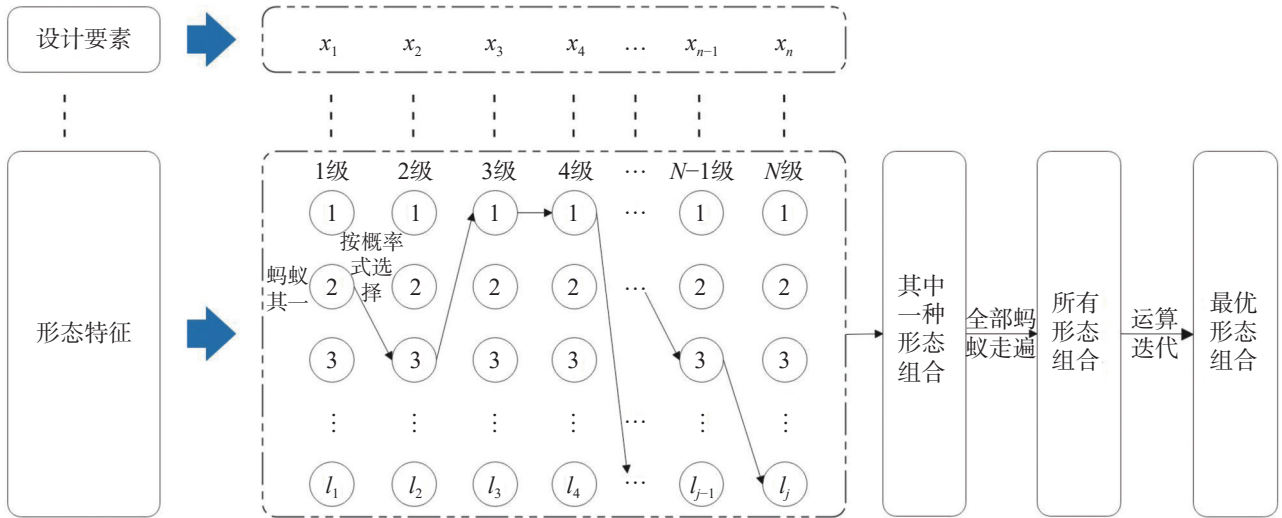


图1 产品形态优化设计模型的求解过程

Fig. 1 Solution process of the product shape optimization design model

1.2.1 概率公式与贡献值更新方程

在产品形态优化设计模型中, 每个设计要素 x_j 具有 l_j 种可选形态特征。通过从每个设计要素的形态特征中任选一项, 当 n 个设计要素全部完成选择后即构成一个完整的产品形态优化解 (x_1, x_2, \dots, x_n) 。该模型采用 N 级设计要素决策模型 ($N=n$), 第 j 级设计要素 x_j 包括 l_j 个节点, 初始状态所有蚂蚁定位于 x_1 中的节点, x_j 中选择第 i 个形态特征节点的概率如式 (2)。

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{\sum_{i=1}^{l_j} \tau_{ij}} \quad (2)$$

式中 τ_{ij} 为 x_j 中第 i 个形态特征对总意象的贡献值, 贡献值更新方程如式 (3)。

$$\tau_{ij}^{new} = \rho \tau_{ij}^{old} + \frac{F}{Q} \quad (3)$$

式中: ρ 为信息素蒸发率; F 为适应度; Q 为信息素增加强度^[18]。

1.2.2 适应度函数

在产品形态优化设计模型中, 适应度函数作为核心评价机制直接引导蚁群算法搜索方向, 其构建需要综合用户感性意象因子分析结果和产品形态特征在感性意象语义上的贡献值。利用数量化理论 I

类方法,分析得出各形态特征对感性意象的贡献值。设第 j 个设计要素中第 i 个形态特征元素对第 k 个感性意象的贡献值为 A_{ij} , 则产品形态组合对第 k 个感性意象的总贡献值 F_k 可表示为

$$F_k = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^h A_{ij} x_{ij}) \quad (4)$$

其中 x_{ij} 根据设计特征是否属于设计要素,取 0 或 1。

因子分析作为一种研究变量关系的统计方法,其核心思想是将大量可观察到的变量归纳为少数几个不可直接观测的潜在变量(即因子)^[19]。在用户感性意象的因子分析中,先筛选出具有代表性的符合用户需求的感性意象集合,再通过目标群体感性意象认知实验确定每个感性意象因子的权重系数。由此,适应度函数(F)的计算公式为

$$F = \sum_{k=1}^m w_k F_k \quad (5)$$

其中 w_k 为第 k 个意象的权重系数。

1.3 模型实现

在 Matlab 系统中实现基于蚁群算法的产品形态优化设计模型,根据蚁群算法基本原理及综合文献[20-21]设定参数:蚂蚁数量根据问题规模在 [10, 50] 范围取值;迭代次数根据收敛趋势在 [100, 500] 范围取值;信息素增加强度 Q 为常量,取值为 [0.01, 1), 以确保最优形态组合贡献的增量;信息素蒸发率 ρ 在 (0, 1) 范围取值,其大小与收敛速度负相关,与全局搜索能力正相关。蚁群算法所用的参数设置取决于问题特征与规模,需视具体分析而定。为确定参数的最优级取值范围,在设定参数前需多次试运行算法。基于蚁群算法的产品形态优化设计模型的实现流程如图 2,其主要步骤如下:

1) 数据整理。通过调研获取产品感性意象词汇并确定各感性意象权重,在解构目标产品的代表图片样本提取形态特征元素后,计算其贡献值,从而获得形态优化所需基本数据。

2) 初始化参数与数据导入。根据设计对象设置迭代次数、蚂蚁数量、信息素增加强度 Q 和信息素蒸发率 ρ , 并导入算法公式及形态优化数据。

3) 选择形态设计要素节点。每次迭代蚂蚁时,结合式(2)与 Randsample 函数采用轮盘赌选择法选择节点,每个项目各选择一个节点直到所有项目被选择,获得一个产品形态组合。

4) 计算适应度。从所有设计要素中各选择一个形态特征节点走遍后,获得形态优化组合方案,之后根据式(5)计算每个组合的适应度。

5) 更新节点贡献值。选取组合中适应度最大的组合为此次迭代的最优形态特征组合,每循环一次就按照式(3)对经过的最优形态特征组合节点更新贡献值,据此继续寻优迭代。

6) 设置结束条件。为尽可能地获得最优产品形态,设置结束条件为循环次数达到最大。

7) 输出优化结果。将得到的最优产品形态组合进行解码,输出优化结果。

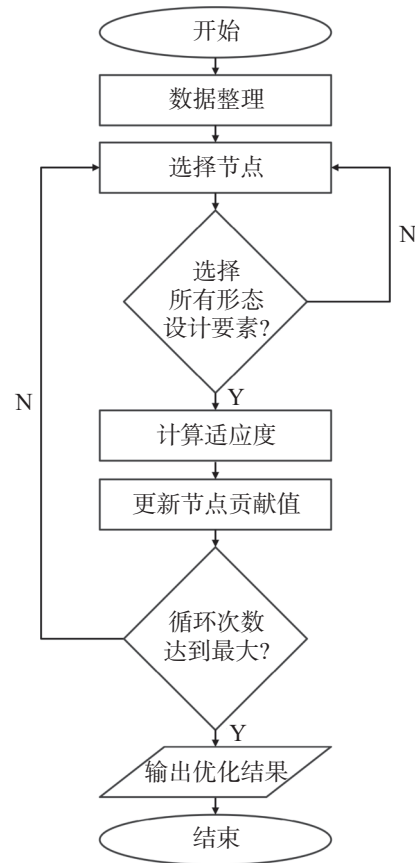


图2 Matlab 系统的模型实现流程图

Fig. 2 Flowchart of model implementation in the Matlab system

2 水陆两栖消防供排水机器人形态的优化设计

为验证构建产品形态优化设计模型的可行性,以水陆两栖消防供排水机器人为实例进行产品形态优化设计,利用 Matlab 系统输出优化方案,并开展虚拟现实(virtual reality, VR)仿真实验对优化方案进行评价。

2.1 数据获取

2.1.1 高频感性词汇

感性词汇作为用户对产品的最直观感受,对产品形态优化模型的构建十分重要。通过调研文献、

浏览网站、归纳用户评论、专业人员讨论等途径获取用户初始感性意象, 收集合适的感性词汇, 最终获得 150 个感性词汇。为使感性意象准确, 同时减轻后期实验中被试的认知负荷, 邀请专家以及相关行业人员对收集的初始感知意象进行删减归纳, 对相似或相关的感性词汇分类或合并, 移除与研究无关的词汇, 对词义相对的词汇执行配对, 并通过词典查询补充反义词, 处理后最终得到 30 组感性词汇对。为使感性意象集更加收敛, 且能够充分表达用户的情感需求, 设计调查问卷对 30 组感性词汇对进行精简。通过网络招募 170 人参与问卷, 参与人员包括工业设计专业本科生与硕士生、企业人员以及院校老师等。问卷设置勾选的感性词汇对为 10~20 组, 最终收集有效问卷 167 份。将筛选出被选择最多的 10 组感性词汇对作为水陆两栖消防供排水机器人高频感性词汇对, 并统计选择次数, 结果如表 1。

2.1.2 代表性样本

为使获取的样本更具代表性, 通过实地考察、网络搜集等渠道收集水陆两栖消防供排水机器人图片样本, 最终收集初始代表性样本 46 个, 筛选类似

表 1 10 组高频感性词汇对

Tab. 1 Ten sets of high-frequency perceptual word pairs

序号	感性词汇对	被选次数	序号	感性词汇对	被选次数
1	高端的-低廉的	95	6	平衡的-失衡的	86
2	合理的-错乱的	93	7	动感的-静态的	84
3	简洁的-复杂的	91	8	高效的-低能的	83
4	实用的-花哨的	91	9	智能的-机械的	82
5	硬朗的-圆润的	91	10	灵巧的-笨拙的	81

以及模糊不清的产品图片, 经处理得到 32 个代表性较强的机器人样本。为尽可能多地获取较优的产品形态特征且使产品形态特征更全面, 邀请设计师、专家等人员组成小组筛选代表性样本, 筛选的条件包括: 筛除同一品牌同一产品系列形态几乎相同的机器人样本图像以合理缩减代表性样本, 减轻后期实验被试的认知负荷; 同时尽可能保留产品部件具有特殊形态特征的机器人样本图片以获取更多产品形态特征元素, 为蚁群算法模型寻找最优产品形态提供更多的数据支持。经过设计小组筛选后, 获得 15 个具有代表性的样本, 结果如表 2。

表 2 15 个水陆两栖消防供排水机器人代表样本

Tab. 2 15 representative samples of amphibious fire water supply and drainage robots

编号	样本图片	编号	样本图片	编号	样本图片
B ₁		B ₁₇		B ₂₆	
B ₃		B ₁₉		B ₂₇	
B ₆		B ₂₃		B ₂₈	
B ₇		B ₂₄		B ₃₀	
B ₉		B ₂₅		B ₃₁	

2.1.3 感性认知空间

为明确水陆两栖消防供排水机器人造型的优化方向,以表1中感性词汇对的正向词汇作为优化方向进行感性认知空间的构建。对筛选出的10个正向高频感性词汇进行语义差异问卷实验,其中“1”代表相应感觉最弱,“5”代表相应感觉最强。邀请被试者参与实验,收集15个代表性样本对应10个高频感性词汇的评分并进行均值分析后,导入SPSS软件进行因子分析。采用主成分分析法作为因子载荷的抽取方法,最大方差法作为因子旋转方法,累计方差贡献率标准取值为85%以获得较高解释度。汇总主成分因子及其权重,结果如表3,得到最适合水陆两栖消防供排水机器人的代表感性意象词汇。表中:V₁表示合理的;V₂表示智能的;V₃表示灵巧的。

表3 筛选后的代表性词汇及其权重

Tab.3 Representative vocabulary after filtering and their corresponding weights

筛选后的代表性词汇	权重/%
V ₁	69.34
V ₂	18.16
V ₃	12.50

2.1.4 感性意象评价量表

以15个水陆两栖消防供排水机器人代表性样本和3组代表性感性意象词汇对为基础,设计问卷进行感性意象实验,建立水陆两栖消防供排水机器人人的感性意象评价量表。被试需基于3组代表性感性词汇分别对15个代表性样本进行评价,采用李克特7级量表打分,其中1级表示最不明显的感受,7级表示最强烈的感受。以样本B₁为例,问卷设置形式见表4。结果回收49份有效问卷,对数据进行统计、均值计算与汇总,结果如表5。

2.1.5 形态解构

邀请设计人员与用户组成小组,对水陆两栖消防供排水机器人的形态进行分析,发现:水陆两栖消

表4 李克特7级量表

Tab.4 Likert scale at level 7


 样本B ₁	感性意象		评分
	V ₁	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	
	V ₂	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	
	V ₃	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	

表5 感性意象评价量

Tab.5 The evaluation scale of perceptual imagery

样本	评价均值		
	V ₁	V ₂	V ₃
B ₃₁	3.78	3.22	3.69
B ₁	3.67	3.84	3.86
B ₂₃	4.22	3.84	4.12
B ₉	4.31	3.67	3.94
B ₂₄	3.94	3.96	4.02
B ₁₉	3.92	3.59	3.76
B ₃	4.10	3.82	3.78
B ₂₅	4.31	4.10	3.86
B ₂₆	3.76	4.08	3.88
B ₃₀	3.86	3.55	3.59
B ₂₇	3.73	3.84	3.76
B ₆	3.86	3.84	3.59
B ₁₇	4.02	3.88	4.06
B ₂₈	4.39	3.82	4.18
B ₇	4.35	4.67	4.06

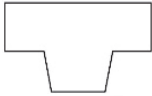
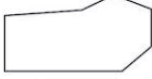
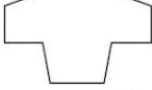




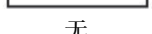
防供排水机器人的主要形态特征位于侧面,侧面形态轮廓个性较正面与顶面突出;机身散热器位于机身顶部,其形态轮廓对产品的影响相对突出;照明灯作为水陆两栖消防供排水机器人救援时的重要部件,相对机器人其他位置其对产品形态感知的影响较大。除此以外,水陆两栖消防供排水机器人整体形态布局是影响用户意象的重点,代表性样本的整体形态布局主要有两段式与三段式,故从几何线条、位置关系、材质应用、色彩搭配等方面对水陆两栖消防供排水机器人代表性样本形态进行进一步分析,汇总的代表性样本形态解构结果如表6。

表6 代表性样本的形态解构

Tab.6 Morphological deconstruction of representative samples

形态设计要素	编号	图片或文本描述	说明
主体侧面轮廓C ₁	C ₁₁		方形
	C ₁₂		下倒角方形

续表

形态设计要素	编号	图片或文本描述	说明
主体侧面轮廓 C_1	C_{13}		T形
	C_{14}		船型
	C_{15}		上倒角T形
	C_{16}		不规则四边形
散热轮廓 C_2	C_{21}		梯形
	C_{22}		直角梯形
	C_{23}		上倒角长方形
	C_{24}		长方形
	C_{25}	无	无
相关关系 C_3 (照明灯位置)	C_{31}	无	无
	C_{32}	正面	无
	C_{33}	顶面	无
相关关系 C_4 (整体布局)	C_{41}	两段式	无
	C_{42}	三段式	无
色彩搭配 C_5	C_{51}	橙黄色系	无
	C_{52}	红色系	无
	C_{53}	绿色系	无
	C_{54}	青色系	无
	C_{55}	黑色系	无

2.2 优化设计方案输出

运用 Matlab 系统获得最优形态组合, 并进行草图绘制、软件建模将优化方案三维输出。

2.2.1 最优形态组合

利用 Matlab 系统寻优前, 需将水陆两栖消防供排水机器人相应的数据导入系统。一方面, 根据各种感性意象的权重以及形态特征元素的贡献值计算, 获得基于蚁群算法的产品形态优化设计所需的基础数据; 另一方面, 由获取的水陆两栖消防供排水机器人的设计要素、代表感性词汇及其权重等得到式 (1)~(5) 中 n, m, i, j, w_k 等常量与变量的具体赋值, 如设计要素 $n=5$, 代表感性意象词汇 $m=3$ 。由此可得水陆两栖消防供排水机器人产品对应的数学模型, 在 Matlab 系统中设定模型贡献值更新方程、适应度计算函数等计算公式。

此外, 在寻优前还需合理设置算法参数, 防止算法收敛过早导致出现局部最优。参数值的最优设置是基于相关参数适宜取值范围的综合考量, 并经过 Matlab 系统多次试运行验证得出的结果。设置水陆

两栖消防供排水机器人形态优化设计模型的主要参数: 迭代次数为 100 次、蚂蚁数量为 30 只、信息素增量 $Q=0.14$ 、信息素蒸发率 $\rho=0.1$ 。此外, 蚂蚁在选择节点时可能引入随机选择的情况, 为模拟现实中蚂蚁寻找最短路径的现象, 设置蚂蚁选择下一个节点进行随机选择的概率为 15%。在此基础上对水陆两栖消防供排水机器人进行形态优化。点击 Matlab 工具栏中运行按钮运行代码, 读取导入的数据文件; 根据式 (2) 选择形态组合并由式 (4)~(5) 自动计算适应度, 通过式 (3) 求解并更新最优组合的形态特征节点贡献值, 直到达到最大的迭代次数时, 输出此次代码运行的最优形态特征组合。如图 3, 满足用户需求的水陆两栖消防供排水机器人最优形态组合编号为 $C_{13}, C_{22}, C_{33}, C_{42}, C_{52}$ 。

在此基础上, 输出每次迭代的最优信息素和的倒数曲线以及平均解质量, 结果如图 4, 5。由图 4, 5 可知: 每次迭代后, 最优解信息素和的倒数在逐渐收敛后再趋于稳定, 说明最优解的贡献值是在不断增加且趋于稳定; 每次迭代蚂蚁选择形态组合的平

均解质量值在不断增加,说明经迭代后的形态组合逐步往更符合用户需求的方向靠近,从而验证了基于蚁群算法形态优化设计模型的可行性。

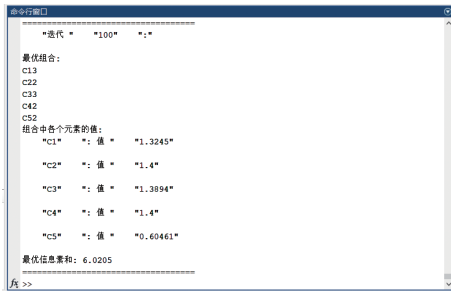


图3 输出的最优形态组合

Fig. 3 The optimal combination of output forms

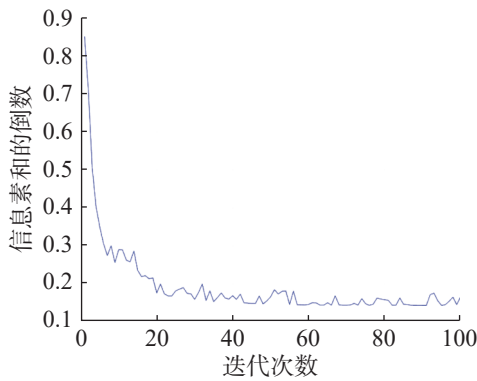


图4 最优信息素和的倒数曲线

Fig. 4 Reciprocal plot of the optimal pheromone sum

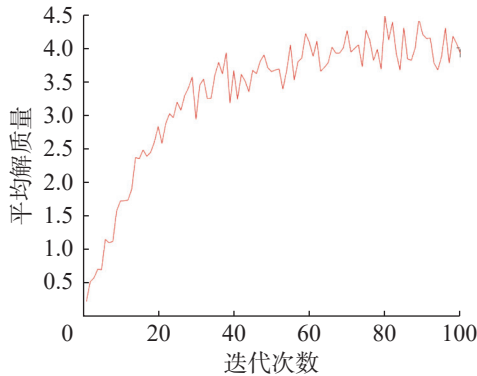


图5 平均解质量曲线

Fig. 5 Average solution quality curve

2.2.2 优化方案设计

根据上文,最优形态组合的编号为 C₁₃, C₂₂, C₃₃, C₄₂, C₅₂, 对照表 6 分析出的代表样本形态解构结果,经蚁群算法求解出水陆两栖消防供排水机器人最优形态组合,如表 7。根据得出的最优形态组合以及水陆两栖消防供排水机器人的相关技术和产品特性,结合前文得出的代表性感性意象,通过头脑风暴、小组讨论等方法激励成员发散设计灵感,通过手绘、板绘、Photoshop 等方式绘制方案草图,其中具有代表性的设计草图如图 6。

表 7 最优形态组合

Tab. 7 The optimal form combination

形态特征元素	编号	图片或文本描述
主体侧面轮廓 C ₁	C ₁₃	
散热轮廓 C ₂	C ₂₂	
相关关系 C ₃ (照明灯位置)	C ₃₃	顶面
相关关系 C ₄ (整体布局)	C ₄₂	三段式
色彩搭配 C ₅	C ₅₂	红色系

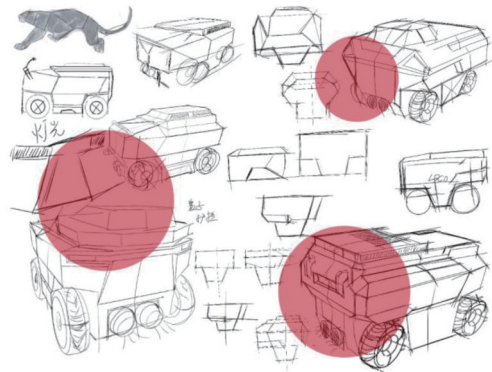


图6 设计的草图

Fig. 6 Design sketch

邀请成员召开项目组会,通过组内投票选出排名靠前的 3 种草图方案,对其进一步优化并完成初始建模与渲染,结果如图 7。图 7 中从左到右依次为方案 1, 2, 3 的产品建模渲染效果。其后进行 2 次汇报与方案评判发现,3 种方案均满足形态优化系统最终输出的形态组合。



图7 3 种设计方案的效果

Fig. 7 The effects of the three design schemes

2.3 VR 仿真实验

VR 技术能够以三维形式精确模拟和展示复杂的设计方案和环境,可弥补用户观察二维图片在空间布局、尺寸比例及光线效果等方面的体验感缺失。使用 VR 技术进行方案评价能够显著减少物理原型的制作和时间成本,可在较低成本下多次迭代和修改设计。因此,为进一步验证基于蚁群算法的产品形态优化设计模型的实用性,并从上述 3 种优化方案中寻找最符合用户感性需求的方案,利用 VR 虚

拟设备开展 VR 仿真实验对优化方案进行评价。实验过程如图 8。



图8 实验过程

Fig. 8 Experimental process

实验的第一阶段,将3个优化方案的三维模型、材质等依次导入 KeyVR 软件虚拟场景,并由被试者通过手持操作手柄进行虚拟功能体验;第二阶段,被试者观察水陆两栖消防供排水机器人并进行虚拟交互体验,包括旋转、放大、缩小等交互动作;第三阶段,被试者对水陆两栖消防供排水机器人优化方案进行满意度评分,基于李克特 7 级量表对优化方案进行感性意象评价。3 种优化方案依次评价完成,

结束实验,收集并整理最终数据。共邀请 11 名被试者参与 VR 仿真实验,得到 3 个优化方案的代表感性意象评价均值,结果如表 8。

表 8 3 个方案的感性意象评价均值

Tab. 8 Mean values of the perceptual imagery evaluation of the three schemes

优化方案	V ₁	V ₂	V ₃
方案1	4.45	4.64	4.54
方案2	4.82	4.91	4.91
方案3	4.55	4.27	4.45

比较 3 种优化方案与前文得到的 15 个代表性样本的感性意象评价均值,结果如图 9。由图 9 可知:优化方案在“合理的”“智能的”“灵巧的”等意象词汇得分较为突出,感性意象评价均值维持在 4.27 及以上;方案 2 的 3 个感性意象评价均值分别为 4.82, 4.91, 4.91, 显著大于优化前,更符合用户的感性需求,故选择方案 2 为最终方案。

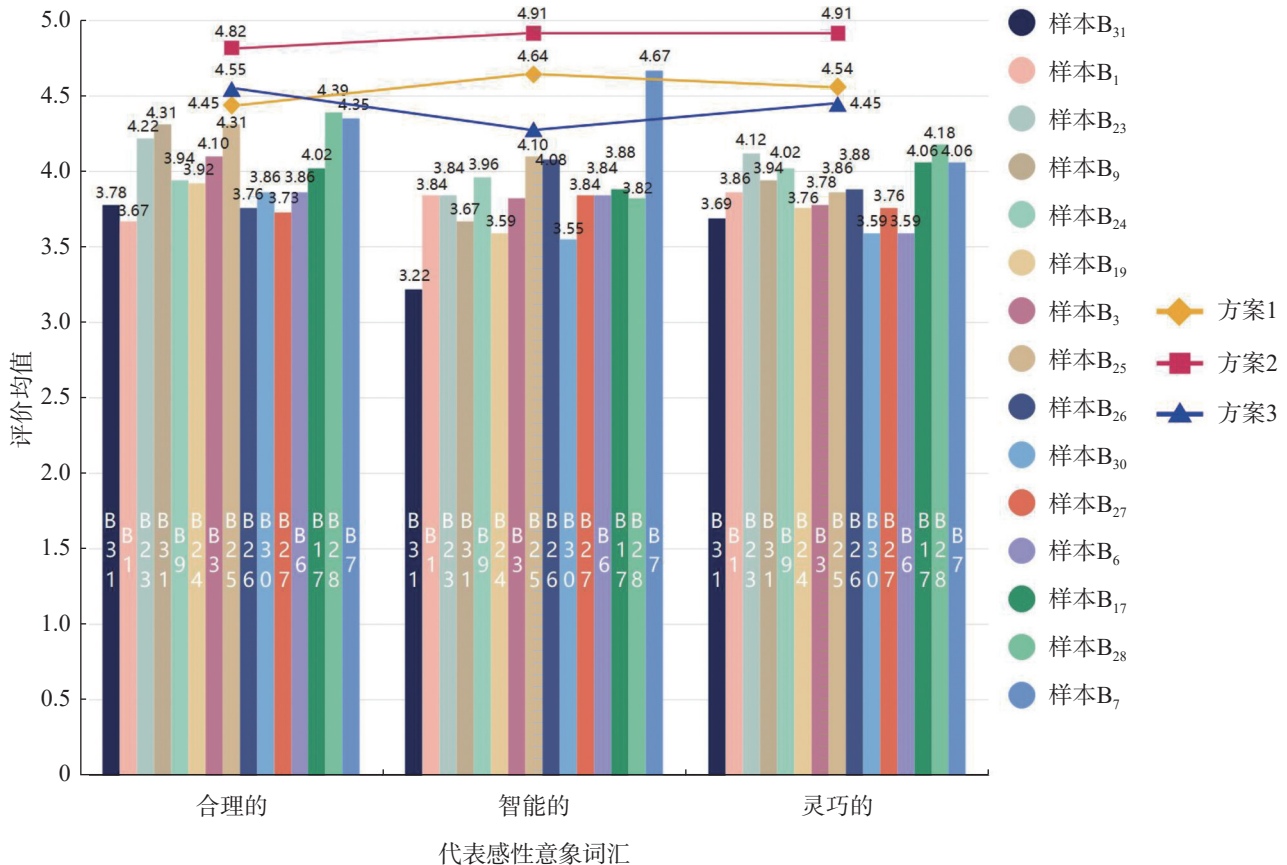


图9 代表性感性意象词汇的评价均值

Fig. 9 The average evaluation score of representative emotional imagery vocabulary

综上可看出优化方案符合设计研究构想:优化的产品形态更满足用户感性需求,构建的基于蚁群算法的产品形态优化设计模型可用于水陆两栖消防供排水机器人形态设计,模型构建方法和实现过程

可推广至其他产品形态优化设计。

3 结论

考虑产品设计感性需求与形态的相互作用,构

建基于蚁群算法的产品形态优化设计模型。选取水陆两栖消防供排水机器人作为案例,运用 Matlab 系统获得最优形态组合并三维输出,对其开展 VR 仿真实验进行评价。结果表明:3个优化方案的感性意象评价均值区间为[4.27,4.91],其中优化方案2的感性意象评价均值最高,分别为4.82,4.91,4.91,更符合用户的感性需求,验证了构建模型的可行性与实用性。由此表明,通过蚁群算法能够实现对产品各形态设计要素组合的数据处理与自动寻优,有利于高效设计出更满足用户感性需求的产品形态,本文研究为优化产品形态设计提供了新视角。

参考文献:

- [1] GOUDARZI F, ASGARI H, AL-RAWESHIDY H S. Traffic-aware VANET routing for city environments: a protocol based on ant colony optimization[J]. *IEEE Systems Journal*, 13(1): 571-581.
- [2] 李世国. 复杂环境下搜救机器人路径规划方法研究[D]. 北京: 军事科学院, 2020.
LI S G. Research on Path Planning Methods for Search and Rescue Robots in Complex Environments[D]. Beijing: Academy of Military Sciences, 2020.
- [3] AGIZZA M, BALZANO W, STRANIERI S. An improved ant colony optimization based parking algorithm with graph coloring[M]//Advanced Information Networking and Applications. Cham: Springer International Publishing, 2022: 82-94.
- [4] THIRUVADY D, NGUYEN S, SHIRI F, et al. Surrogate-assisted population based ACO for resource constrained job scheduling with uncertainty[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022, 69:101029.
- [5] MORIN M, ABI-ZEID I, QUIMPER C G. Ant colony optimization for path planning in search and rescue operations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 305(1):53-63.
- [6] UTHAYAKUMAR J, METAWA N, SHANKAR K, et al. Financial crisis prediction model using ant colony optimization[J]. *International Journal of Information Management*, 2020, 50:538-556.
- [7] 刘芳, 李士伟, 卢熹, 等. 智能算法优化 XGBoost 的聚能-爆破装药比冲量预测[J]. 小型微型计算机系统, 2024, 45(5):1076-1082.
LIU F, LI S W, LU X, et al. Impulse prediction of shaped charge and blasting charge specific based on intelligent algorithm optimized XGBoost[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2024, 45(5):1076-1082
- [8] 吴昌钱, 黄锐, 罗志伟. 基于量子蚁群算法的智能制造调度问题研究[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2023, 46(4):74-79.
WU C Q, HUANG R, LUO Z W. Research on intelligent manufacturing scheduling problem based on quantum ant colony algorithm[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 46(4):74-79.
- [9] WANG Z S, WU Y H. An ant colony optimization-simulated annealing algorithm for solving a multiload AGVs workshop scheduling problem with limited buffer capacity[J]. *Processes*, 2023, 11(3):861.
- [10] JIA Y H, MEI Y, ZHANG M J. A bilevel ant colony optimization algorithm for capacitated electric vehicle routing problem[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(10):10855-10868.
- [11] 吴延峰, 韩鹏飞, 田凯. 基于改进蚁群算法的并行时间窗车辆路径问题[J]. 物流技术, 2022, 41(6):28-32,59.
WU Y F, HAN P F, TIAN K. Vehicle routing problem with parallel time window based on improved ant colony algorithm[J]. *Logistics Technology*, 2022, 41(6):28-32,59.
- [12] 张邦成, 单玉升, 赵航, 等. 汽车白车身点焊作业多机器人路径规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(2): 51-56.
ZHANG B C, SHAN Y S, ZHAO H, et al. Research on multi-robot path planning for automobile body-in-white spot welding operation[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2024(2):51-56.
- [13] 高茂源, 王好臣. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(6):142-144,148.
GAO M Y, WANG H C. Path planning for mobile robots based on improved ant colony algorithm[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(6):142-144,148.
- [14] ONAN A. SRL-ACO: a text augmentation framework based on semantic role labeling and ant colony optimization[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2023, 35(7):101611.
- [15] JAWAD R S, ABID H. HVDC fault detection and classification with artificial neural network based on ACO-DWT method[J]. *Energies*, 2023, 16(3):1064.
- [16] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B, Cybernetics*, 1996, 26(1):29-41.
- [17] 耿振余, 陈治湘, 黄路炜, 等. 软计算方法及其军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [18] 李俊杰, 江红霞, 刘基宏. 基于改进蚁群算法的细纱定位巡检策略[J]. 棉纺织技术, 2024, 52(11):47-52.
LI J J, JIANG H X, LIU J H. Spinning spindle position inspection strategy based on improved ant colony algorithm[J]. *Cotton Textile Technology*, 2024, 52(11): 47-52.
- [19] 赵晨, 马云, 余明亮. 绿色设计视域下茶渣再生产品设计与应用实践[J]. 包装工程, 2024, 45(2):331-338,364.
ZHAO C, MA Y, YU M L. Design and application practice of tea residue recycling products from the perspective of green design[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(2): 331-338,364.
- [20] 包子阳. 智能优化算法及其 MATLAB 实例[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2020.
BAO Z Y. Intelligent Optimization Algorithms and MATLAB Examples[M]. 2nd Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [21] 史峰, 王辉, 胡斐, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
SHI F, WANG H, HU F, et al. 30 Case Studies of Intelligent Algorithms with MATLAB [M]. Beijing: Beihang University Press, 2011.