

基于模块化的光伏清洁机器人创新设计研究

楼佳程, 应放天*

湖北工业大学工业设计学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年5月23日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月29日

摘要

在光伏新能源市场持续增长的背景下, 文章以解决光伏板表面污垢和沉积物的增多, 会显著降低发电效率的问题, 提升发电效率为目的进行研究。通过采用KANO模型分析用户需求, 结合模块化理念对光伏清洁机器人进行创新设计, 实现轻量化、低成本且易于维护的清洁解决方案, 提高用户使用和维护的满意度, 为相关清洁领域的产品设计提供一定参考。

关键词

光伏清洁, KANO模型, 模块化设计

Research on the Innovative Design of Photovoltaic Cleaning Robots Based on Modularization

Jiacheng Lou, Fangtian Ying*

School of Industrial Design, Hubei University of Technology, Wuhan Hubei

Received: May 23rd, 2024; accepted: Jun. 21st, 2024; published: Jun. 29th, 2024

Abstract

Against the backdrop of the continuously growing photovoltaic new energy market, this article aims to address the issue of increasing dirt and debris on the surface of photovoltaic panels, which significantly reduces power generation efficiency. The purpose of the research is to enhance power generation efficiency. By employing the KANO model to analyze user needs and integrating the concept of modularity, the article conducts innovative design research on photovoltaic cleaning robots. This research aims to achieve a lightweight, low-cost, and easy-to-maintain cleaning solu-

*通讯作者。

文章引用: 楼佳程, 应放天. 基于模块化的光伏清洁机器人创新设计研究[J]. 设计, 2024, 9(3): 1114-1123.

DOI: 10.12677/design.2024.93424

tion, thereby improving user satisfaction in usage and maintenance, and providing a reference for product design in related cleaning fields.

Keywords

Photovoltaic Cleaning, KANO Model, Modular Design

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人类对能源安全的担忧和环境恶化的焦虑, 环境可持续性已成为全球公共政策的主要目标, 可再生能源的利用和开发是维护能源安全, 加强环境保护和应对气候变化的最关键措施[1]。其中, 光伏面板的清洗就是光伏电站运营维护的主要工作之一, 对于保证光伏面板性能和延长光伏面板寿命具有关键意义。在阿拉伯半岛, 印度北部和东部等世界更干旱的地区研究发现, 沉积的尘埃使太阳能电池板发电效率降低 17% 至 25%。对于每 20~30 天进行一次太阳能电池板表面清洁, 每次清洁后发电量平均增加约 50% [2]。光伏电站的光伏面板安装高度较高, 清洁操作危险性大, 人工清洁成本高、效率低且质量难以保证, 传统清洗方式已无法满足市场需求, 如果使用常规清洁机器人清洗的固定资产投资巨大, 对电站的负担大。因此, 研究和设计一种低成本、易维护、高效率的光伏电站清洁机器人具有重要的现实意义。

2. 模块化设计概述

模块化设计是一种将复杂系统分解为独立、可互换模块的设计方法[3], 是在传统设计基础上发展起来的一种新的设计思想, 现已成为一种新技术被广泛应用, 在工业设计领域, 模块化设计已被广泛应用于电子产品、汽车制造和机器人技术中。例如, 智能手机的模块化设计允许用户轻松更换维修电池和其他组件, 提高了产品的可维护性和升级性[4]。

模块化机器人由于其可变构型设计及多功能应用场景, 在最近几十年内成为机器人领域的研究前沿和热点, 通常具有以下功能: 用户应能够轻松地分解和重新组合模块, 以构建出适应特定作业需求的机器人形态; 在构建机器人形态时, 应力求减少所需模块的数量和种类, 以简化设计并降低成本; 组装完成的模块化机器人应具备即时启动并执行实际工作任务的能力[5] [6]。

3. 光伏清洁机器人设计现状

光伏清洁机器人是为了解决传统清洁方法的不足, 以及其他清洁材料及技术的不成熟而开发的自动化设备[7]。它们能够自动在太阳能电池板上移动, 使用刷子、吸尘装置或其他清洁机制来清除灰尘和污垢。这些机器人通常由电池供电, 可以通过远程控制或预设程序进行操作, 大大提高了清洁效率, 降低了人力成本, 并减少了对电池板的潜在损害。

光伏清洁机器人常见的移动清洁车、挂轨式机器人、便携式机器人等[8]。机器人清洁方式的选择取决于多种因素, 包括成本、效率、环境条件和可维护性。随着新材料、传感器技术和自动控制技术的进步, 光伏清洁方式变得更加高效、智能和环保。例如, 一些机器人采用了自适应技术, 能够根据不同的污染程度和环境条件调整清洁策略。但是在当前市场上, 光伏清洁机器人仍旧面临着一系列挑战, 包括

清洁效率低、环境适应性差、生产成本及维护成本高等, 这些问题限制了它们的广泛应用。

4. 基于 KANO 模型的用户需求分析

4.1. 用户需求模型构建

KANO 模型, 由东京理工大学教授狩野纪昭(Noriaki Kano)提出[9], 是一种有效的需求分类和优先级排序工具。主要是通过制定问卷对目标用户进行调研, 然后根据问卷的调研结果对各个因素进行属性归类, 通过解决产品的功能来提高客户的满意度[10]。它通过分析用户对产品功能的满意度评价, 将需求分为基本型、期望型、兴奋型、无差异型和反向型五大类, 有助于企业精准识别不同类型需求与用户满意度之间的关系[11]。

结合用户对于清洁机器人的需求, 总结出 8 个用户需求功能, 分别为该光伏清洁机器人要实现高效、稳定清洁; 该光伏清洁机器人的外观要新颖, 采购价格有优势, 维护成本要低; 该光伏清洁机器人要实现轻量减材, 一体化结构设计; 该光伏清洁机器人要实现无水清洁, 无需耗水也无污水排放, 减少处理水工作; 该光伏清洁机器人要实现模块化, 功能件可方便添加更换, 适应不同光伏尺寸及倾斜度, 增加通用性; 该光伏清洁机器人要实现智能规划, 危险预警、夜间自动清洗等; 该光伏清洁机器人要配备智能触控, 智能面板控制清洗, 反向增加操作难度; 该光伏清洁机器人要能够搭载其他功能模块(如无人机、割草刀、吹尘器等)。

4.2. 问卷设计与收集

为深入研究用户行为与需求, 基于 KANO 模型设计了一套调查问卷, 主要分发渠道是线上, 配合少量线下分发, 保证信息获取的随机性和大样本性, 本次调研问卷一共回收 255 份, 其中男性 131 名, 女性 124 名。问卷第一部分主要对调查人群的基本信息有所了解, 调研人群包括光伏电站的运营者、维护人员以及相关行业人员(研发机构、设备供应商等)这三类。被调查人群的年龄主要集中在 25~60 岁年龄之间, 其中 25~30 岁年龄占整体的 28.89%, 30~35 岁年龄占整体的 57.78%, 被调查人群的文化程度不等, 其中大学专科占整体的 56.76%, 大学本科占整体的 34.55%, 研究生及以上占整体的 10.12%。

4.3. 结果统计与分析

首先对问卷数据结果进行效度和信度分析。将全部的数据导入 SPSS 分析软件进行分析, 结果显示问卷的正向问题、方向问题以及整体问卷的 Cronbach's α 值都大于 0.7, 这表明问卷的研究数据是可信的。问卷数据的 KMO 值均高于 0.8, 说明问卷的效度较好, 可以进行以下分析。

问卷中每个问题都有正反两种提问方式, 每种提问方式都有五个依次递减的意愿选项, 分析单个选项, 就是将具备和不具备功能时用户的感受进行交叉, 得到一张 5×5 的矩阵, 矩阵中不同区域代表了单个功能不同维度属性的百分比, 见表 1。将相同维度的数值统计相加后, 可得到六个属性维度的占比总和。总和最大的一个属性维度, 便是该功能的属性归属。

但是问卷的第二部分讨论的只是针对单一功能点的用户需求属性探讨, 在实际应用中, 需要针对产品的多个需求点开发。为了更准确地分析和了解用户需求, 此次采用 C. Berger 等人提出的 Better-Worse 指数分析法, 该指数包含两项判定指标: Better 和 Worse。通过 Better-Worse 指数分析法, 探究用户对光伏清洁机器人各个功能的需求类型, 对 10 个满意度评测项目进行用户需求归类, 得出相应结论和建议[12]。

具体计算公式如下:

具备后的满意系数 $\text{Better/SI} = (A + O)/(A + O + M + I)$

不具备后的不满意系数 $\text{Worse/DSI} = -1 * (O + M)/(A + O + M + I)$

Better 通常为正值, 代表如果提供某种功能属性的话, 用户满意度会提升; 正值越大, 表示对用户满意度的影响越大, 用户满意度提升的影响效果越强, 上升的也就更快。**Worse** 通常为负, 代表如果不提供某种功能属性的话, 用户的满意度会降低; 值越接近-1, 表示对用户不满意的影响最大, 满意度降低的影响效果越强, 下降得越快。通过 **Better-Worse** 指数分析法, 得到了光伏清洁机器人需求结果, 见表 2。根据 8 项功能的 **Better-Worse** 系数值, 将数值散点图划分象限, 以确立需求优先级, 见图 1。

Table 1. Quantitative attribute dimensions of the questionnaire

表 1. 问卷量化的属性维度

	如果不具备此功能					
	很喜欢	理所当然	无所谓	勉强接受	很不喜欢	
如果具备此功能	很喜欢	Q	A	A	A	O
	理所当然	R	I	I	I	I
	无所谓	R	I	I	I	I
	勉强接受	R	I	I	I	I
	很不喜欢	R	R	R	R	Q

备注: M 必备型; A 兴奋型; O 期望型; I 无差异型; R 反向型; Q 可疑。

Table 2. Better-Worse Analysis of the Questionnaire

表 2. 问卷 Better-Worse 分析

功能	KANO 属性	Better 系数	Worse 系数
该光伏清洁机器人要实现高效、稳定清洁。	期望	78.27%	-71.73%
该光伏清洁机器人的外观要新颖, 采购价格有优势, 维护成本要低。	期望	73.09%	-57.14%
该光伏清洁机器人要实现轻量减材, 一体化结构设计。	期望	61.47%	-40.86%
该光伏清洁机器人要实现无水清洁, 无需耗水也无污水排放, 减少处理水工作。	期望	60.47%	-39.53%
该光伏清洁机器人要实现模块化, 功能件可方便添加更换, 适应不同光伏尺寸及倾斜度, 增加通用性。	魅力	59.9%	-27.57%
该光伏清洁机器人要实现智能规划, 危险预警、夜间自动清洗等。	无差异	43.86%	-19.05%
配备智能触控, 智能面板控制清洗, 反向增加操作难度。	无差异	32.5%	-10.5%
光伏清洁机器人要能够搭载其他功能模块(如无人机、割草刀、吹尘器等)。	反向	24.15%	-9.23%

在满足用户需求时, 需优先处理必备型因素, 也就是用户的基本需求, 即该光伏清洁机器人要实现高效、稳定清洁。随后, 应关注期望型需求, 提升产品竞争力, 即该光伏清洁机器人的外观要新颖, 采购价格有优势, 维护成本要低; 要实现轻量减材, 一体化结构设计; 要实现无水清洁, 无需耗水也无污水排放, 减少处理水工作。最后, 努力实现用户的兴奋型需求, 提升其忠诚度, 即该光伏清洁机器人要实现模块化, 功能件可方便添加更换, 适应不同光伏尺寸及倾斜度, 增加通用性等, 而对于无差异型需求, 可忽视其对设计的干扰, 即该光伏清洁机器人要实现智能规划, 危险预警、夜间自动清洗; 也不必配备智能触控, 智能面板控制清洗, 反向增加操作难度; 包括光伏清洁机器人要能够搭载其他功能模块(如无人机、割草刀、吹尘器等)。通过满足不同层次的需求, 能引导用户形成对本产品的良好印象, 从而在市场中取得优势。

Better-Worse系数分析

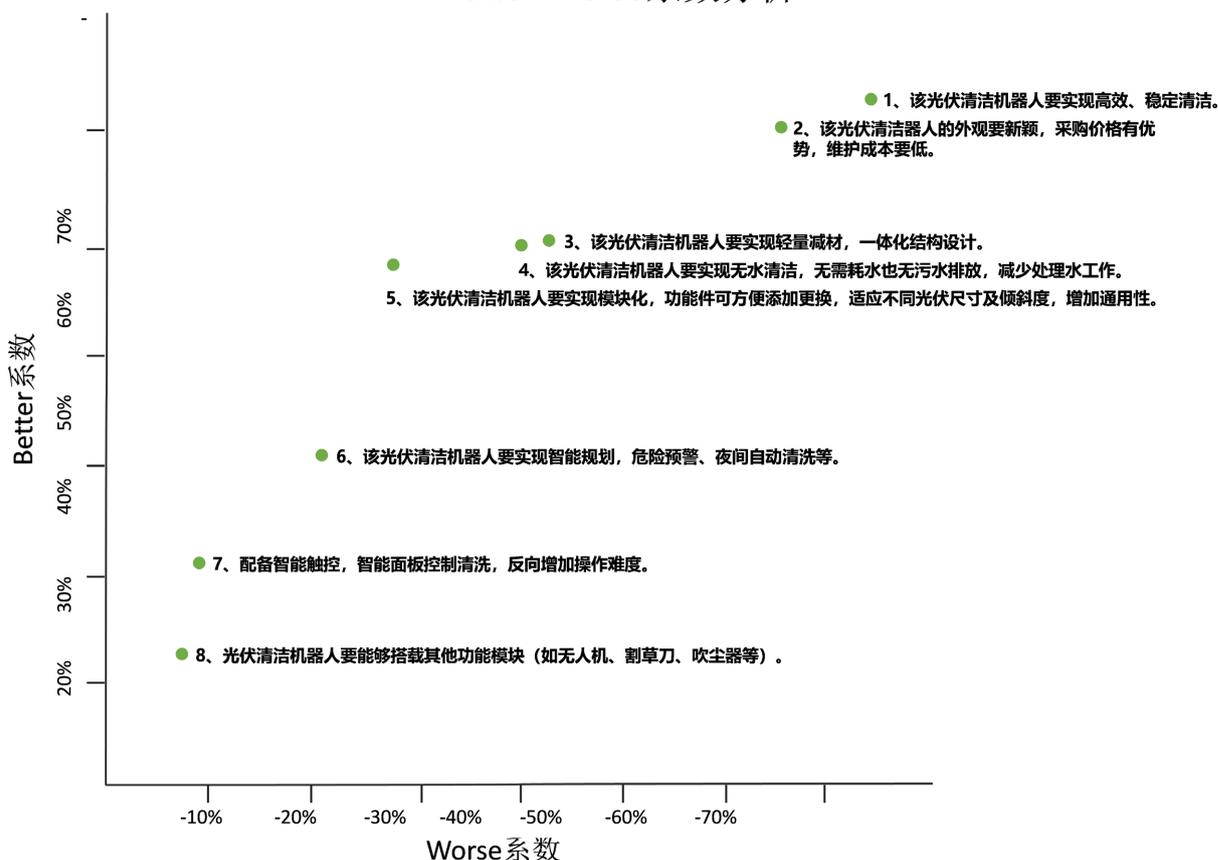


Figure 1. Functional priority

图 1. 功能优先级

5. 基于模块化的光伏清洁机器人设计实践

通过目标用户需求分析和具体使用情境分析, 我们需要深入考虑用户的痛点及解决策略, 基于前文对用户需求的研究结论开展光伏清洁机器人的设计实践, 以下主要从光伏清洁机器人的硬件设计、结构设计、可重构的功能设计和外观设计四个部分进行探讨。

5.1. 硬件设计

硬件设计方面, 为了提高清洗效果稳定性, 每个模块进行单独设计开发, 这样可以具备独立稳定的性能, 能够确保机器人在各种环境下的可靠运行。同时, 可以降低经济成本, 使机器人在出现故障时快速更换模块, 降低维修成本。

清洁模块的设计参考了目前市面上已有的光伏清洁机器人及其应用场景情况, 从调研中选取到的有参考性的两个机器人, 分别是: 库珀新能源股份有限公司的一种用于清洁光伏面板的清洁组件, 其特点在于采用连接梁连接成为整体结构的第一端部装置和第二端部装置, 在毛刷辊轴上安装有多个辊式毛刷, 结构设计合理, 清洁效率高, 清洁效果好; 北京中电博顺智能设备技术有限公司的一种光伏板清扫机器人的动力装置及光伏板清扫机器人, 其特点在于两个动力板可以通过转动连接的结构进行相对转动的同时不会影响整体结构的稳定性, 行进更加顺畅, 不会产生走斜或卡住的现象发生, 提高了整体行进能力。

滚刷清洁是一种常见的清洁方式, 适用于去除光伏板表面的污垢和灰尘。通过旋转的刷子与光伏板

表面接触, 刷子上的软质材料可以有效地清除污渍, 同时避免对光伏板造成损伤。滚刷清洁的优点在于其简单、高效和可靠性, 能够快速清洁大面积的光伏板。在设计中, 选用高品质的刷毛材料, 确保其柔软、耐用且不易磨损。同时, 为了提高动能的转化率保证续航效果, 采用的是尺寸合适且质量较轻的滚刷, 这也能减少施加的压力, 以避免对光伏板造成过度的磨损或刮痕。

采用无水的干刷式清洁技术, 确保在干刷过程中不会因为沙尘的过多堆积对光伏板面造成磨损, 没有无水的排放也保证对“农光结合”“渔光结合”等场景无污染物感染。另一方面, 无水清洁减少了水的处理和排放过程, 极大减少了设备的载重负担, 降低了能源消耗和碳排放。此外避免使用水对光伏板进行直接冲刷或浸泡, 可以减少对光伏板表面的腐蚀和损伤, 从而延长设备使用寿命。硬件设计方案见图 2。

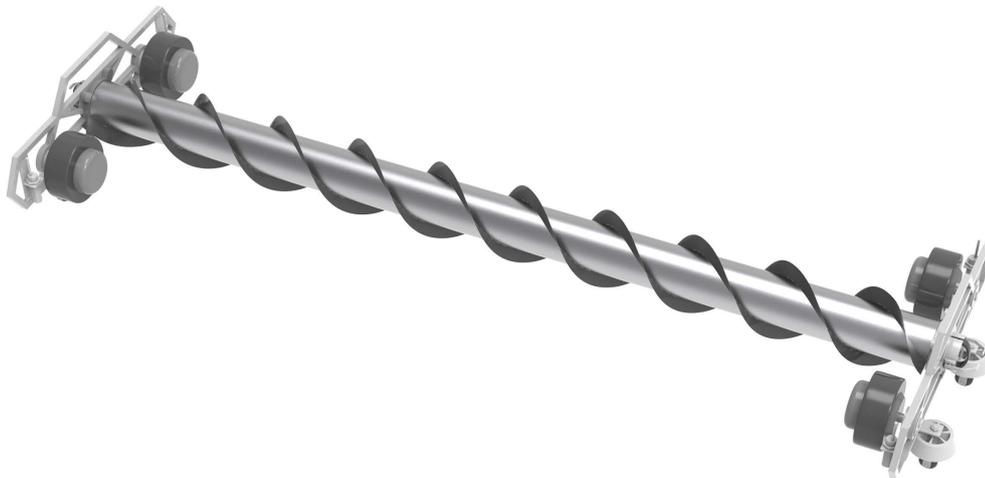


Figure 2. Hardware design scheme
图 2. 硬件设计方案

5.2. 结构设计

结构设计方面, 追求的是便于维护与保养。通过合理的布局和简洁的结构设计, 可以降低维护成本并节省时间, 使用户能够轻松进行日常的维护与保养工作。同时, 为了更好地满足环保要求, 将采用无水清洁技术。这不仅可以确保清洗过程无害, 还可以有效节约水资源和其他资源, 进一步降低能耗和排放。

结构设计是实现轻量化的关键, 设计内容涉及电源、电机、电线等部件的排布, 旨在提高机器人内部空间利用率, 减少外部冗余结构。经过调研了解到厦门蓝旭科技有限公司的一种光伏板清扫机器人, 减少了电机数量, 目的在于提供一种整体体积小、成本低、重量轻且出故障率低的光伏板清扫机器人。因此, 简化动能转化过程, 减少点击数量, 仅留下承担关键运行工作的电机是轻量化设计的一方面。

除了电机的数量的减少, 电机和电源的排布位置也很重要, 通过观察发现, 滚刷的滚轴内部有足够的空间可以放置电池和电机。由于目前针对光伏清洁机器人电机和电池内置的研究内容空缺, 参考了其他电机内置或者电池内置的机器结构, 其中比较有参考价值的是内蒙古博略达环保科技有限公司的内置动力滚刷的清扫器, 将作为内置动力源的电动滚筒设置于滚刷体的内孔中, 且电动滚筒与滚刷体的两端通过端盖密封连接, 电动滚筒的外壁带动滚刷体旋转; 深圳市博铭维智能科技有限公司的一种内置轮毂电机的滚筒驱动结构, 通过轮毂电机直接连接滚筒, 传动效率更高, 另外轮毂电机内置在滚筒内, 更有利于滚筒重心的调整。结构设计方案见图 3。

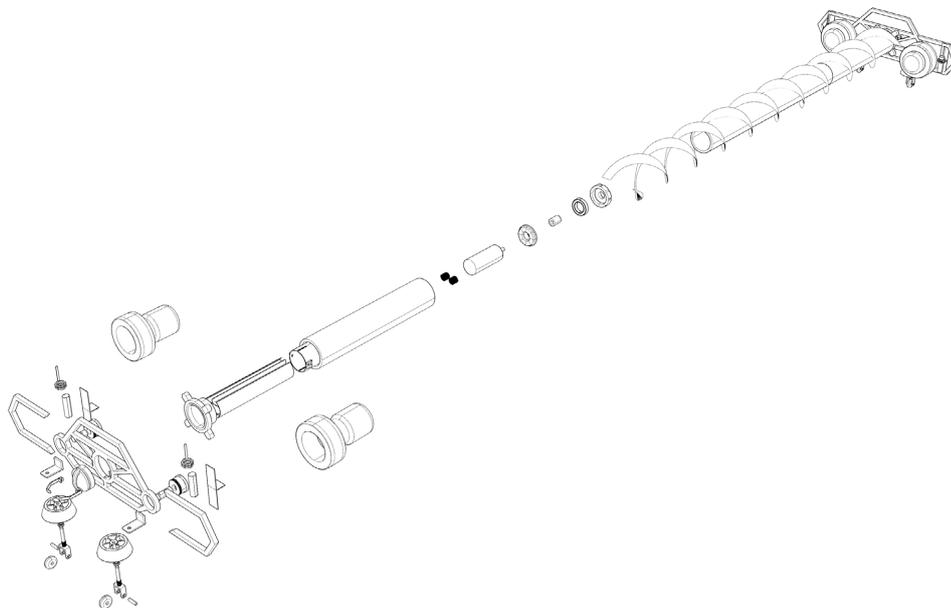


Figure 3. Structural design scheme
图 3. 结构设计方案

5.3. 可重构的功能设计

模块化的研究重点之一, 是在机器人的研发初期就将其视为一个生态网络, 而不仅仅是需要持续进行智慧升级的个体, 即倡导从更宽广的视角去设计和思考机器人的功能, 而不是局限于单一的功能或升级。为了实现这一目标, 深入研究进行单元自重构的设计。在考虑机器人设计时, 将每一个光伏清洁机器人视为一个独立而完整的单元。这些单元不仅具备独立运行的能力, 更重要的是, 它们可以通过横向或纵向的多维叠加进行组合。这种组合方式打破了传统机器人的单一形态限制, 使得机器人能够形成各种不同的结构, 这种自重构的设计理念, 使得机器人能够灵活适应不同尺寸、不同形状的光伏板。无论光伏板的尺寸大小如何变化, 机器人都能通过灵活的组合方式, 提供更为精准、个性化的清洁解决方案, 见图 4。这种设计不仅提高了清洁效率, 还扩大了清扫范围, 从而满足更大规模的清洁需求, 见图 5。

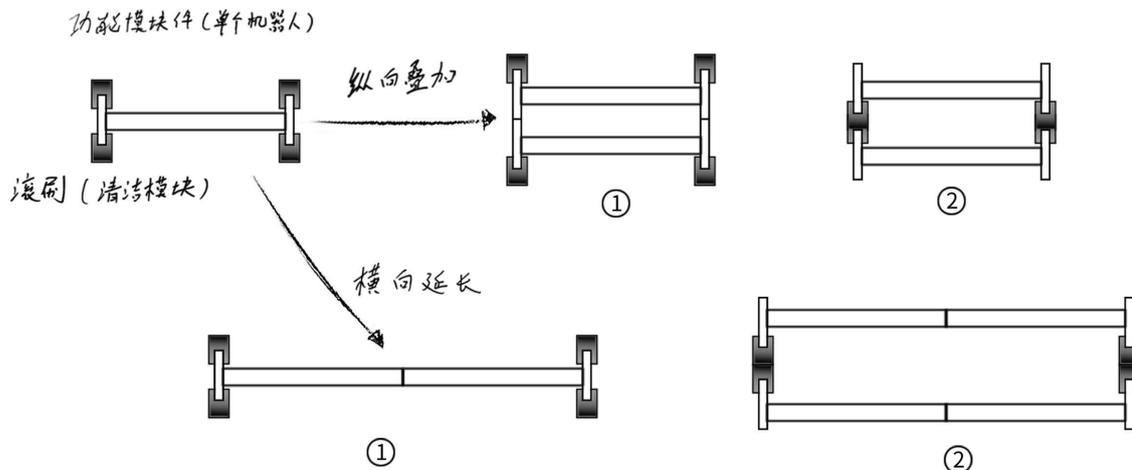


Figure 4. Unit self-reconstruction 1
图 4. 单元自重构 1

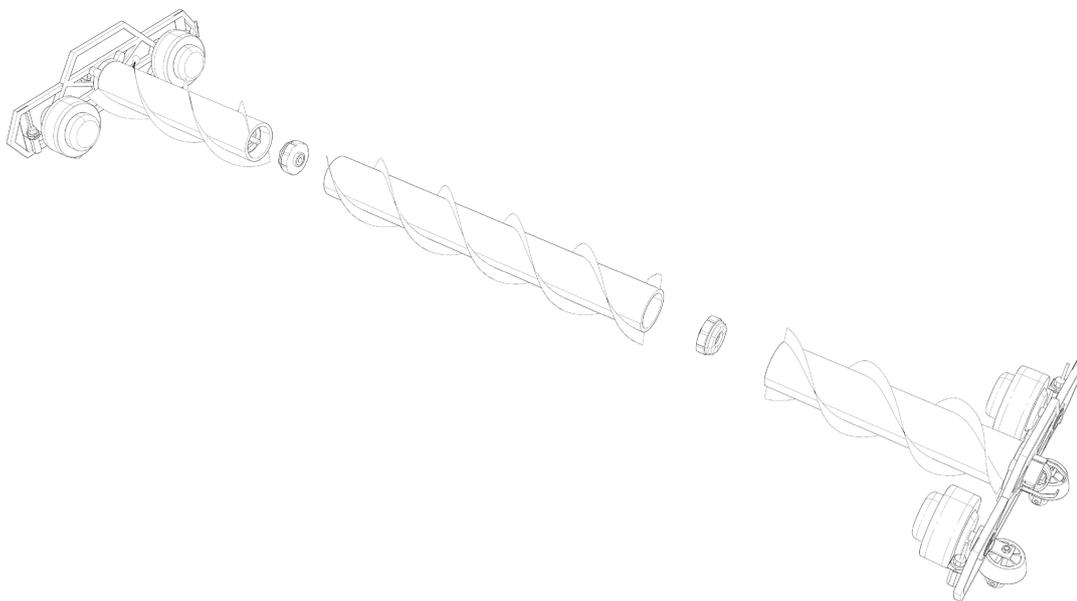


Figure 5. Unit self-reconstruction 2
图 5. 单元自重构 2

5.4. 外观设计

本课题的光伏清洁机器人主要定位工业机器人，应用场景为光伏电站，为确保机器人的外观设计与其应用场景相符，外观设计和色彩选择需要结合其实际特性和应用需求进行考虑。通过对市场上相关产品的外观风格进行搜集汇总，更全面地了解当前机器人设计的趋势和风格，见图 6。

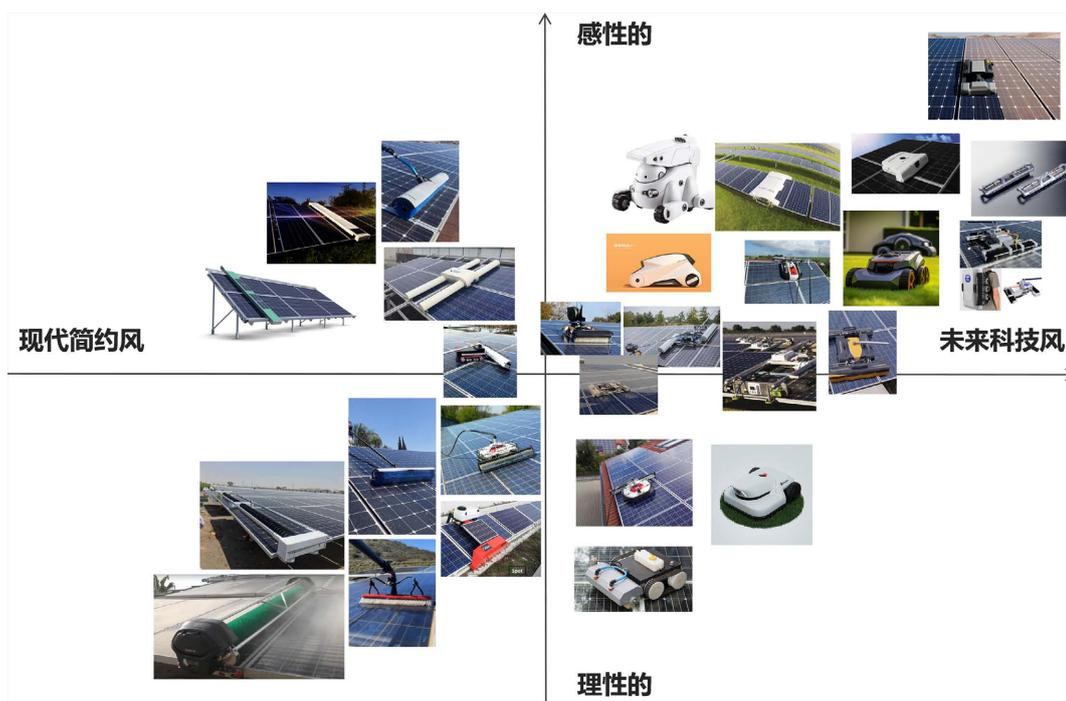


Figure 6. Four dimensions of aesthetic design
图 6. 外观设计的四个维度

从现代简约与未来科技、感性与理性的不同维度来研究不同机器人风格给人们带来的感受, 通过深入分析这些风格的特点和优缺点, 可以更好地理解用户审美和户外场景的实际需求。最终在充分考虑了用户需求、产品特性和实际应用环境后, 决定以现代简约风格作为光伏清洁机器人的外观设计灵感, 同时不增加更多的成本投入。确保光伏清洁机器人的外观设计既实用又具有吸引力, 能够满足其在光伏电站园区中的实际应用需求, 见图 7。

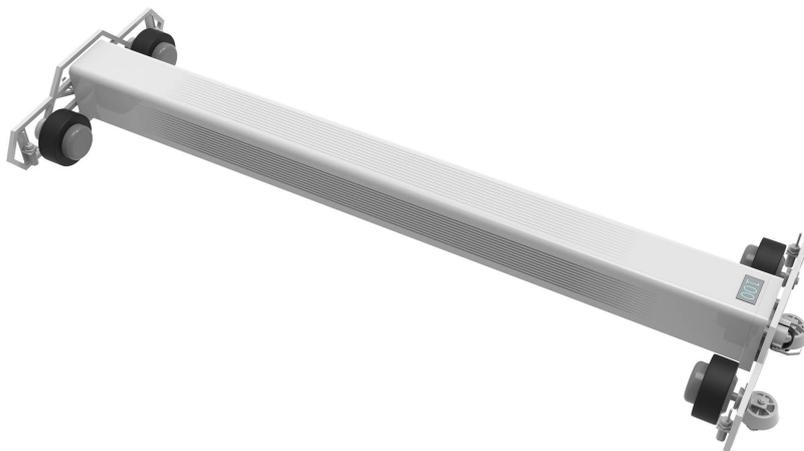


Figure 7. Rendering
图 7. 效果图

6. 结语

文章基于光伏清洁能源发展的大背景下, 针对光伏面板容易积灰导致发电效率下降的问题, 通过 KANO 模型进行用户需求分析, 基于模块化设计理念对光伏清洁机器人进行了创新设计研究与实践, 设计出了一款具有低成本、高效率, 同时兼顾通用性、易用性和稳定性的光伏清洁机器人。未来的研究需要进一步采用可持续和环保材料, 减少对环境的影响。同时模块化设计的应用要跨越更多学科, 整合机械工程、电子工程、材料科学等领域的最新研究成果, 以创造更高效、更可靠的光伏清洁机器人。

注 释

文中所有图片均为作者自绘。

参考文献

- [1] Andreopoulou, Z., Koliouka, C., Galariotis, E., Zopounidis, C. (2018) Renewable Energy Sources: Using PROMETHEE II for Ranking Websites to Support Market Opportunities. *Technological Forecasting and Social Change*, **131**, 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.007>
- [2] Bergin, M.H., Ghoroi, C., Dixit, D., Schauer, J.J. and Shindell, D.T. (2017) Large Reductions in Solar Energy Production Due to Dust and Particulate Air Pollution. *Environmental Science & Technology Letters*, **4**, 339-344. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00197>
- [3] 侯亮, 唐任仲, 徐燕申. 产品模块化设计理论、技术与应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 56-61.
- [4] 范晓宇, 模块化原理在工业设计领域的应用[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(10), 107-109.
- [5] 李树军, 张艳丽, 赵明扬. 可重构模块化机器人模块及构形设计[J]. 东北大学学报, 2004, 25(1): 78-81.
- [6] 刘明尧, 谈大龙, 李斌. 可重构模块化机器人现状和发展[J]. 机器人, 2001, 23(3): 275-279.
- [7] 曹梦楠. 分布式光伏组件清洗机器人开发及应用[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- [8] 金胜利, 等. 光伏电站组件清洁技术研究综述[J]. 能源工程, 2023, 43(5): 1-11.

- [9] 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.
- [10] 于梦豪, 侯昌昌, 崔俊杰. 基于 KANO-AHP 的老年人社区互联产品设计研究[J]. 设计, 2024, 37(8): 30-33.
<https://doi.org/10.20055/j.cnki.1003-0069.001683>
- [11] 王帅, 范蒙. 基于 KANO-AHP-QFD 的适老化换鞋座椅设计研究[J]. 包装工程, 2024, 45(10): 42-51.
<https://doi.org/10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.10.005>
- [12] 王艺生, 谭永胜. 基于 KANO 模型的高校 APP 功能需求设计研究[J]. 设计, 2022, 35(14): 137-140.