

基于响应面法的光伏清扫机器人结构优化设计

罗彦英, 梅益*, 江明会

贵州大学机械工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年9月20日; 录用日期: 2023年11月8日; 发布日期: 2023年11月15日

摘要

针对光伏清扫机器人质量较大、平稳性差及运行过程中容易发生偏摆等问题, 首先对光伏清扫机器人结构进行了优化设计; 其次在保证机器人结构的强度和刚度情况下, 实现轻量化设计。以车架杆子厚度、防偏架厚度以及上下端板子的厚度作为设计变量, 以机器人质量最轻、等效应力最小和变形最小作为目标函数, 通过Box-Behnken试验方法设计了57个样本点, 构建了响应面近似数学模型, 并采用多目标遗传算法求最优解。结果表明: 优化后的光伏清扫机器人的质量降低到18.35 kg, 降低了30.9%, 实现对机器人的轻量化设计。

关键词

光伏清扫机器人, 响应面法, Box-Behnken测试, 多目标遗传算法, 轻量化设计

Structural Optimization Design of Photovoltaic Cleaning Robot Based on Response Surface Method

Yanying Luo, Yi Mei*, Minghui Jiang

College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Sep. 20th, 2023; accepted: Nov. 8th, 2023; published: Nov. 15th, 2023

Abstract

Aiming at the problems of large mass, poor smoothness and deflection during operation of the cleaning robot, firstly, the structure of the photovoltaic cleaning robot was optimized. Secondly, in order to ensure the strength and stiffness of the robot structure, lightweight design is realized.

*通讯作者。

With the thickness of the frame pole, the thickness of the anti-deflection frame and the thickness of the upper and lower end plates as the design variables, and the lightest mass, minimum equivalent stress and minimum deformation of the robot as the objective function, 57 sample points were designed by Box-Behnken test method. The response surface approximate mathematical model was constructed, and the optimal solution was obtained by multi-objective genetic algorithm. The results show that the mass of the optimized photovoltaic cleaning robot is reduced to 18.35 kg, which is reduced by 30.9%, realizing the lightweight design of the robot.

Keywords

Photovoltaic Cleaning Robot, Response Surface Model, Box-Behnken Test, Multi-Objective Genetic Algorithm, Lightweight Design

Copyright © 2023 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

当前生态环境的污染与不可再生能源的巨大消耗之间的关系日益恶化[1] [2] [3] [4] [5]; 而随着太阳能电池板组件技术的不断发展和发电成本的降低, 光伏发电产业进入了快速发展的时期, 未来或将成为潜力最大、增长最快的新型能源[6]。但是由于光伏组件长期处于室外, 容易被灰尘、落叶等覆盖, 使光伏板的发电效率和使用寿命受到影响[7] [8] [9]。因此需要对光伏板进行定期清洗, 来提高光伏发电效率[10] [11] [12] [13]。目前市面上大型光伏电站普遍使用的清洁机器人, 普遍存在质量较大、越障能力较差及在清扫过程中容易发生偏摆, 导致机器人卡死等问题。为了解决上述存在的问题, 需设计挂板式光伏清扫机器人的结构; 以及在保证机器结构的强度、刚度的条件下, 对机器人结构进行轻量化处理具有重大的研究意义和经济价值。

国内外诸多学者对机器人结构轻量化设计均进行了研究, 如陈清朋等将 ANSYS 和 ABAQUS 有限元软件相结合, 利用变密度拓扑优化方法, 实现对机翼肋板的轻量化设计[14]; 栾宪超等利用基于非支配排序的 NSGA-II 和基于分解的 MOEA-D 多目标遗传算法对具备肌肉注射功能的蛇形机器人结构参数进行了优化[15]; Shanmugasundar G 等利用 ANSYS 对 5 自由度码垛机器人进行了结构优化设计, 成功减少了机器人的总质量[16]。Shihao Liu 等提出了一种集零阶优化、参数舍入、结构再优化于一体的二次优化设计方法, 用其开发了具有参数化设计、轻量化设计等功能的龙门机床轻量化结构优化设计系统, 完成某龙门机床龙门架的轻量化结构优化设计, 优化了龙门架的结构参数[17]; Ya-Li Ma 提出了一种复杂结构件受力 - 性能 - 结构一体化结构拓扑与尺寸协同优化的轻量化设计方法; Luthfi A 等提出了一种基于 A-Flow 人形机器人行走运动临界姿态的轻量级腿结构优化设计方法, 临界姿态可以从行走运动过程中机器人身体各关节的最大力和力矩中获得, 从有限元分析(FEA)结果可以实现 A-Flow 仿人机器人的腿部结构轻量化设计[18]。

本文对光伏清扫机器人结构进行优化设计, 在保证机器人强度和刚度的情况下, 达到轻量化设计的目的。以车架杆子厚度、防偏架厚度以及上下端板子的厚度作为设计变量, 通过 Box-Behnken 试验方法进行实验设计, 构建了响应面近似数学模型; 以机器人质量最轻、等效应力最小和变形最小作为目标函数, 采用基于响应面模型的多目标遗传算法求最优解, 实现对机器人的轻量化设计。

2. 光伏机器人结构分析

2.1. 光伏机器人结构

由于光伏清扫机器人的质量较大，且在运行过程车身受重力的分力影响，容易出现偏摆、卡死等问题。即针对上述问题对悬挂式光伏清扫机器人结构部分进行优化设计，如图 1 所示。

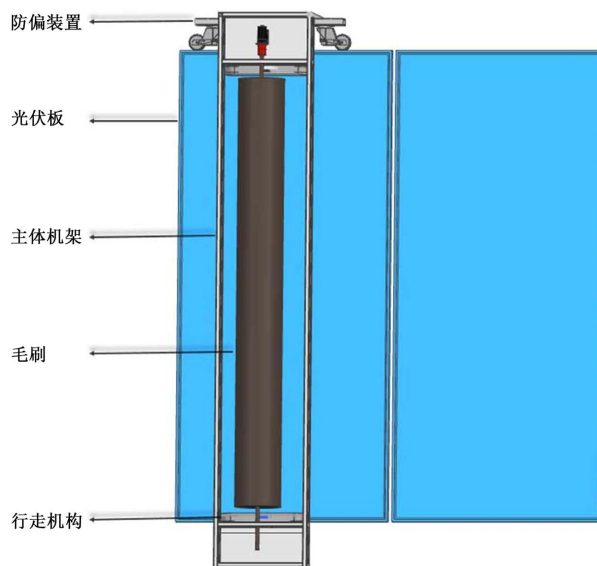


Figure 1. Photovoltaic cleaning robot 3D structure diagram
图 1. 光伏清扫机器人三维结构图

由图 1 可知，光伏清扫机器人结构设计主要包括防偏摆装置、清扫模块、行走机构、车架等部分。其中光伏清扫机器人车架采用相同截面尺寸的杆件“回”字形型材焊接而成，防偏架也选用“回”字形型材。光伏清扫机器人结构的主要设计参数，如表 1 所示。

Table 1. Main design parameters of photovoltaic cleaning robot structure

表 1. 光伏清扫机器人结构主要设计参数

参数名称	数值	单位
主体外形尺寸	2595 * 440 * 400	mm
带防偏架总宽	700	mm
车架杆件截面尺寸	20 * 20 * 3 (厚度)	mm
上端板尺寸	400 * 200 * 2.5	mm
下端板尺寸	400 * 170 * 2	mm
防偏架截面尺寸	70 * 30 * 2 (厚度)	mm

2.2. 光伏机器人工作原理

当驱动电机转动时，带动驱动轮转动，机器人沿着光伏板前进或后退；与此同时启动清扫电机，清扫电机输出轴旋转，电机输出轴与毛刷之间采用联轴器连接，将电机旋转运动传递给毛刷，毛刷旋转对光伏板组件进行清扫工作。

3. 光伏清洁机器人有限元分析

3.1. 有限元模型建立及处理

由于光伏清扫机器人的结构比较复杂,先对其进行简化处理,简化后的结构如图2所示。将几何模型导入 ANSYS Workbench 有限元分析软件中,并对其各部件赋予材料属性,光伏清扫机器人各部件的材料属性如表2所示;对其进行网格划分;添加载荷时,将毛刷、电机等复杂零部件采用等效远程载荷处理。

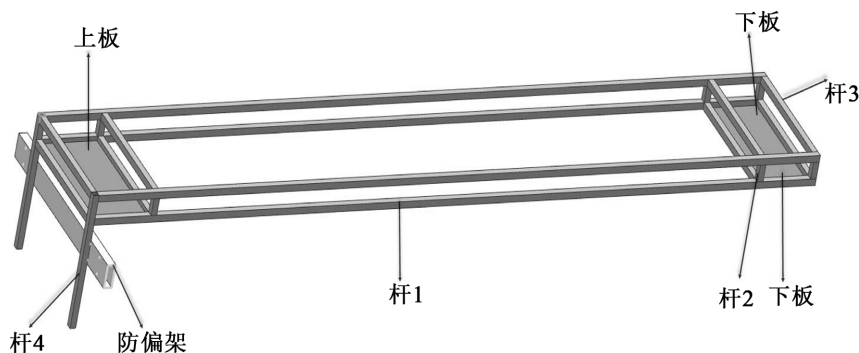


Figure 2. Simplified structure diagram of photovoltaic cleaning robot
图2. 简化的光伏清扫机器人结构图

Table 2. Material properties of cleaning machine components
表2. 清扫机部件材料属性

名称	材料	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	密度/(g·cm ⁻³)
支撑架	0Cr18Ni9	206	0.25~0.3	205	7850
杆件/防偏架	Q235A	212	0.288	235	7860
上下端板	20号钢	206	0.3	245	7850

由于光伏电站一般建在日照充足和风力较大的偏远地区,因此在施加载荷时,还需要考虑风力因素。根据国家气象局发布的风力等级表,再结合光伏电站的现场情况,选取风力等级为6级的强风进行模拟分析,查表可得知风速大小为10.8~13.8 m/s。

由动量定理,推导出风力 F 的计算公式为:

$$F = \rho A V_{wind}^2 \quad (1)$$

式(1)中:

ρ ——空气密度,标准大气压下,空气密度为1.29 kg/m³;

A ——接触面积, m²;

V_{wind} ——风速, m/s。

由于风力的方向变化比较复杂,风力仅选取沿光伏清扫机器人行走方向相反的方向,施加到机器人的迎风侧面上,此时受到的阻力为最大值,光伏板清扫机器人处于极限负载工况。分析可知机器的侧面积为风力的接触面积,根据式(1)计算得侧面积大小为1.038 m²,选取风速大小为12.5 m/s,按照上述公式计算得风力大小约为209.22 N。然后对机器人进行仿真分析。

3.2. 仿真结果分析

综上所述, 通过静力学仿真分析, 得到简化后机器人质量为 26.559 kg, 且机器人的总变形云图如图 3、等效应力云图如图 4 所示。

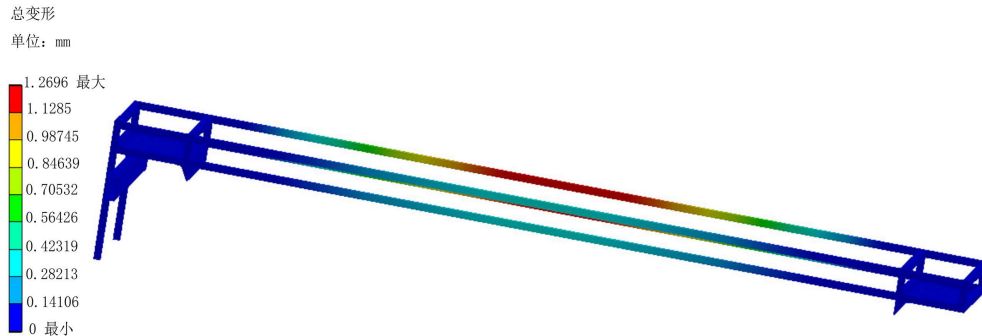


Figure 3. Total deformation cloud image of robot

图 3. 机器人变形云图

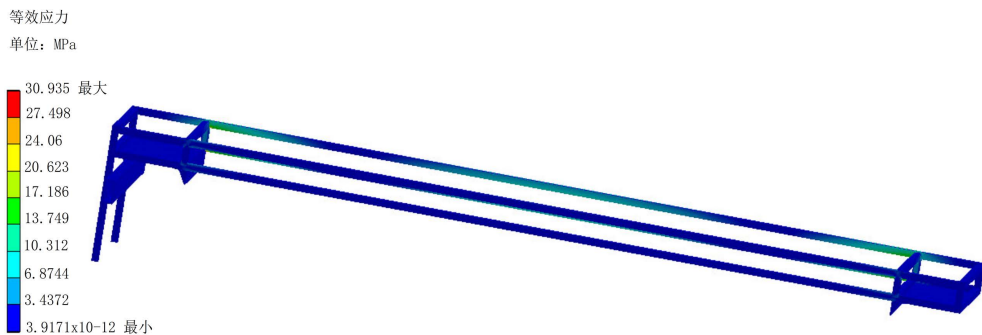


Figure 4. Robot equivalent stress nephogram

图 4. 机器人等效应力云图

由仿真结果可知: 光伏清扫机器人结构在外载荷作用下, 在杆 3 处产生的最大应力为 30.935 MPa, 其材料的屈服强度为 235 MPa, 安全系数足够大; 最大变形出现在杆 1 中间位置, 且最大变形量为 1.2696 mm。

4. 基于响应面模型的多目标遗传优化

光伏清扫机器人轻量化是在其结构刚度和强度满足要求的前提下, 实现机器人的质量减轻。

4.1. 响应面近似模型构建

真实的数学模型在多目标优化问题中难以建立, 需要较长时间和高精度分析来计算出目标值, 从而导致模型优化效率低; 而近似模型的应用能够有效提高优化效率。常用的近似数学模型有响应面(RSM)模型、径向基(RBF)神经网络模型、Kriging 模型等。其中, 响应面模型能够通过少量的实验在局部取值范围内比较精确的逼近函数关系, 且用简单的数学模型表现出来, 通过对回归模型的选取, 能够拟合复杂的响应关系。它具有较好的鲁棒性、系统性以及实用性较强, 且适用范围广。

在实验中将光伏清洗机器人车架各杆件的厚度、上下端板厚以及防偏杆的厚度作为优化变量, 且将防偏架、杆 1、杆 2、杆 3、杆 4、上端板、下端板厚度分别定义为变量 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 , 且优化变量的取值范围如表 3 所示。且本次实验采用 Box-behnken 方法进行设计, 共生成 57 个设计点, 构建的二阶响应面近似模型为:

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} x_i x_j x_j + \varepsilon \tag{2}$$

式(2)中:

- $f(x)$ ——响应函数;
- a_0 、 a_i 、 a_{ii} 、 a_{ij} ——回归系数;
- x_i 、 x_j ——第 i 、 j 个设计变量;
- ε ——误差项。

Table 3. Design variable value
表 3. 设计变量取值

设计变量/mm	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
初始值	3	3	3	3	3	5	3
上限	2	1.5	1	1	1	2	1
下限	3	3	3	3	3	5	3

其中部分实验样点及计算结果, 如表 4 所示。

Table 4. Part thickness Box-behnken experiment design
表 4. 零件厚度 Box-behnken 实验设计

实验点	设计变量/mm							目标函数		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	质量/kg	等效应力/MPa	总变形/mm
1	2.5	2.25	2	2	2	3.5	2	20.33453	40.14471	1.497125
2	2.5	2.25	2	1	1	2	2	17.89413	49.46561	1.526342
3	2.5	2.25	2	3	1	2	2	21.06853	33.3739	1.484696
4	2.5	2.25	2	1	3	2	2	18.68773	49.18998	1.524572
5	2.5	2.25	2	3	3	2	2	21.86213	33.30804	1.483103
6	2.5	2.25	2	1	1	5	2	18.55893	49.10102	1.526191
7	2.5	2.25	2	3	1	5	2	21.73333	33.30775	1.484564
8	2.5	2.25	2	1	3	5	2	19.35253	49.10244	1.524407
...										
57	2.5	3	3	2	2	5	2	24.33868	38.12256	1.281563

将实验设计数据拟合成与变量 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 相关的数学模型; 但是由于构建的响应面模型与实际数学模型有一定误差, 所以用决定系数 R^2 对响应面的精度进行衡量, 数值越接近 1, 响应面的拟合度越高。 R^2 的结果如表 5 所示, 拟合度如图 5 所示。

由表 5 可知, 三个响应面拟合数学模型的决定系数均接近 1, 误差不超过 0.2%; 且由图 5 可知, 机

器的质量、总变形和等效应力对应的点均分布在对角线附近，表明实验设计点与真实值拟合较好，因此构建的响应面模型满足结构优化设计的精度要求。且它的 3D 响应面如图 6 所示。

Table 5. The fitting coefficient R^2
表 5. 拟合系数 R^2

响应面	R^2
质量	1
总变形	0.99972
等效应力	1

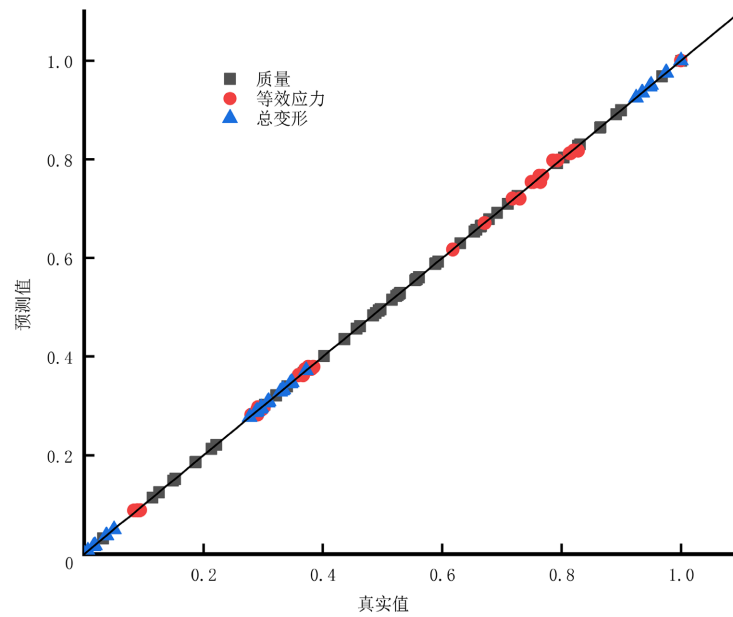
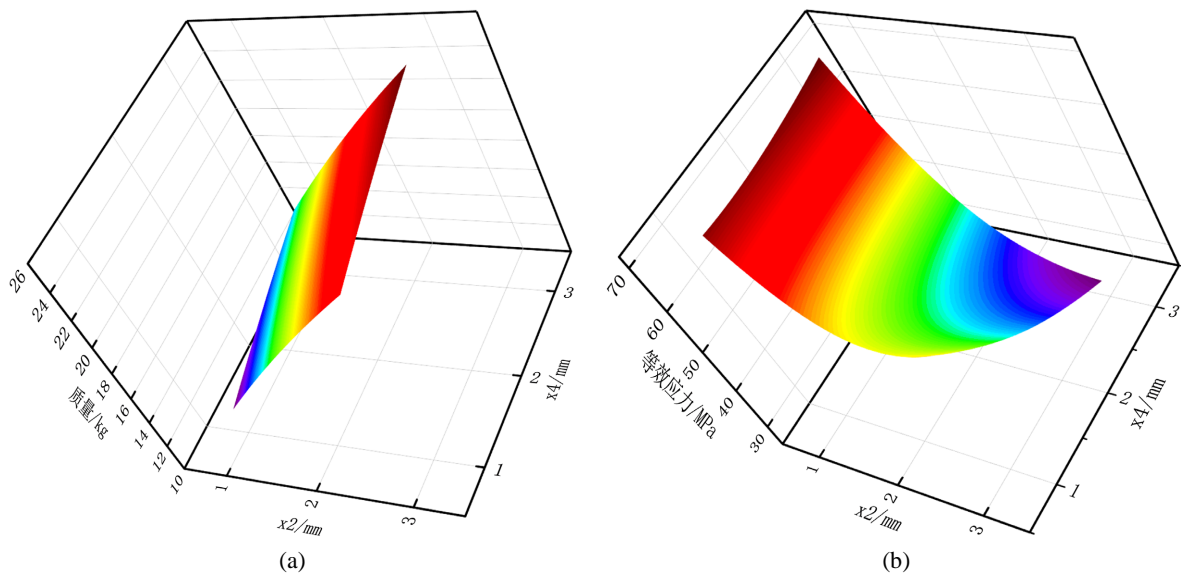


Figure 5. Photovoltaic panel installation diagram
图 5. 响应面拟合度



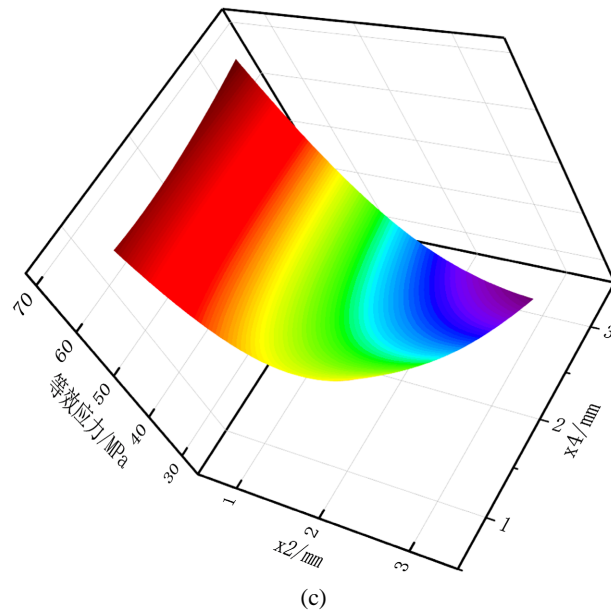


Figure 6. Robot response surface diagram. (a) Quality response surface diagram; (b) Equivalent stress response surface diagram; (c) Deformation response surface diagram

图 6. 机器人响应面图。(a) 质量响应面图；(b) 质量响应面图；(c) 变形响应面图

4.2. 基于多目标遗传优化算法的零件厚度多目标优化

对光伏清扫机器人结构优化的目的主要是实现轻量化的目的，即在减轻重量的同时又要保证结构的强度要求。因此以车架各杆件厚度、防偏架厚度和上下板厚度为设计变量，以机器人质量最小、等效应力最小和变形最小作为目标函数，数学模型可描述为

$$\begin{cases} \min f(x) = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) \\ \sigma \leq 235 \text{ MPa} \\ s \leq 2 \text{ mm} \\ x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) \end{cases} \quad (3)$$

其中式(3)中，

f ——目标函数；

σ ——机器人所受最大等效应力；

s ——所受的总变形；

x ——尺寸优化设计变量。

利用多目标遗传(MOGA)算法对响应面模型进行迭代优化，初始样本点数为 7000，最大允许帕累托百分比为 70%，经过 13 次迭代收敛，从而获得 Pareto 最优解。将优化设计变量圆整以后，并将其更新到有限元模型中进行有限仿真计算，得到优化后的总变形和等效应力云图，如图 7 和图 8 所示；且机器人结构优化前后的参数如表 6 所示。根据表 6 中机器人优化前后的结果可知，优化后机器人质量为 18.35 kg，与优化前的重量相比减少了 30.9%；同时优化后的最大变形量为 1.6686 mm，优化后等效应力为 38.177 MPa，与优化前相比增加了 7.242 MPa，但仍然小于其屈服极限，实现对光伏清扫机器人的轻量化设计。

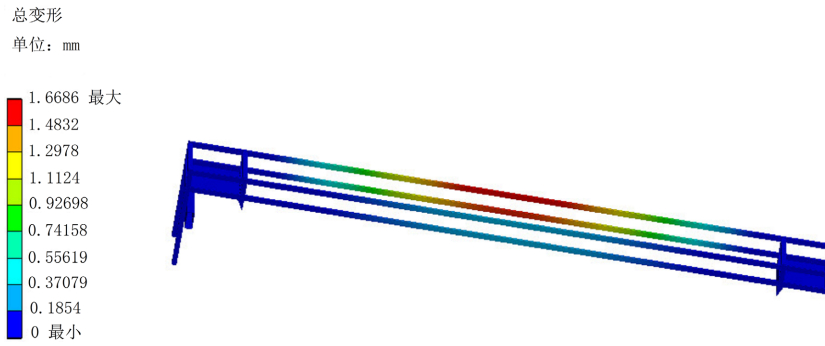


Figure 7. Optimized total deformation cloud image
图 7. 优化后总变形云图

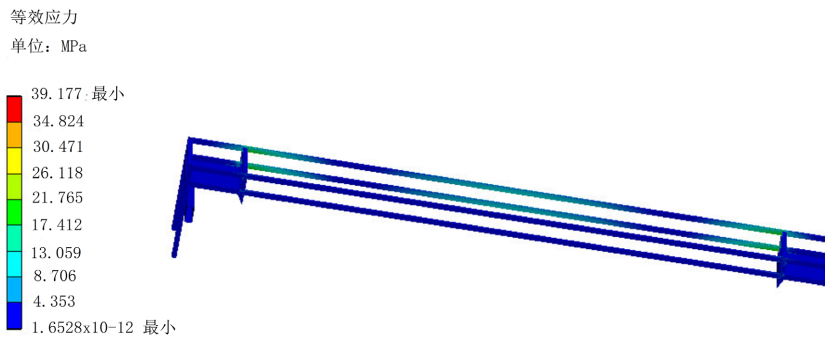


Figure 8. The optimized equivalent stress nephogram
图 8. 优化后的等效应力云图

Table 6. Comparison of robot parameters before and after optimization
表 6. 机器人优化前后参数对比

优化变量	x_1/mm	x_2/mm	x_3/mm	x_4/mm	x_5/mm	x_6/mm	x_7/mm	质量/kg	最大总变形/mm	最大等效应力/MPa
优化前	3	3	3	3	3	5	3	26.5559	1.2696	30.935
优化后	2	1.9	1	2.7	1	2	1	18.35	1.6686	38.177

5. 结论

针对光伏清扫机器人质量较大, 易导致其在清扫过程中发生偏摆等问题, 对机器人结构进行优化设计。首先, 对光伏清扫机器人结构进行有限元仿真分析; 其次, 以车架杆子、防偏架以及上下端子板的厚度作为设计变量, 以机器人质量最轻、等效应力最小和变形最小作为目标函数, 通过 Box-Behnken 方法设计了 57 个试验样本点, 且构建的响应面拟合数学模型的决定系数 R^2 均接近 1, 即满足结构优化设计的精度要求; 最后, 在保证机器人结构的强度和刚度情况下, 采用多目标遗传算法, 对机器人进行了优化, 得到 Pareto 最优解, 优化后的光伏清扫机器人的质量降低到 18.35 kg, 减重率达到 30.9%, 实现了对清扫机器人轻量化设计。

基金项目

- 1) 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020] 2Y058 号);
- 2) 贵阳科技计划项目(筑科合同[2022] 5-38)。

参考文献

- [1] 王维利. 全球太阳能光伏政策研究及其产业发展趋势[J]. 化学试剂, 2018, 40(12): 1152-1156.
- [2] 武平, 郭巍, 晋春杰, 等. 浅谈我国电力与能源现状及解决途径[J]. 电气技术, 2018, 19(5): 1-4.
- [3] 任东明. “十三五”可再生能源发展展望[J]. 科技导报, 2016, 34(1): 133-138.
- [4] 金红光, 隋军. 可再生能源的热利用与综合利用[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 208-215.
- [5] 赵良, 白建华, 辛颂旭, 等. 中国可再生能源发展路径研究[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 178-184.
- [6] Mctigue, J.D., Jose, C., Greg, M., *et al.* (2018) Hybridizing a Geothermal Power Plant with Concentrating Solar Power and Thermal Storage to Increase Power Generation and Dispatch Ability. *Applied Energy*, **228**, 1837-1852. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.064>
- [7] 欧惠, 查国君, 李黎明, 等. 光伏电站的投资前景分析[J]. 可再生能源, 2012, 30(10): 19-21.
- [8] 孔凡太, 戴松元. 我国太阳能光伏产业现状及未来展望[J]. 中国工程科学, 2016, 18(4): 51-54.
- [9] Jiang, H., Lu, L. and Sun, K. (2011) Experimental Investigation of the Impact of Airborne Dust Deposition on the Performance of Solar Photovoltaic (PV) Modules. *Atmospheric Environment*, **45**, 4299-4304. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.084>
- [10] 孟伟君, 朴铁军, 司德亮, 等. 灰尘对光伏发电的影响及组件清洗研究[J]. 太阳能, 2015(2): 22-27.
- [11] 曲宏伟, 王靖雯. 积灰对光伏板输出特性影响理论和试验研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2335-2340.
- [12] 刘锋, 孙震, 姚春利, 等. 光伏电池板清洁技术研究综述[J]. 清洗世界, 2016, 32(5): 26-29.
- [13] 龚芳馨, 刘晓伟, 王靓. 光伏电站太阳能板的清洁技术综述[J]. 水电与新能源, 2015(5): 71-73.
- [14] 陈清朋. 面向增材制造的机械产品拓扑结构优化设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [15] 栾宪超, 常健, 王聪, 等. 主动关节履带式蛇形救援机器人结构参数多目标优化设计[J]. 机器人, 2022, 44(3): 267-280.
- [16] Shanmugasundar, G., Sivaramakrishnan, R., Meganathan, S., *et al.* (2019) Structural Optimization of an Five Degrees of Freedom (T-3R-T) Robot Manipulator Using Finite Element Analysis: Materials Today-Proceedings. *International Conference on Advances in Materials, Manufacturing and Applied Sciences (ICAMMAS)*, **16**, 1325-1332. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.231>
- [17] Liu, S., Du, Y. and Lin, M. (2019) Study on Lightweight Structural Optimization Design System for Gantry Machine tool. *Concurrent Engineering-Research and Applications*, **27**, 170-185. <https://doi.org/10.1177/1063293X19832940>
- [18] LIuthfi, A., Subhan, K.A., Eko, B.H., *et al.* (2018) Generate an Optimum Lightweight Legs Structure Design Based on Critical Posture in A-Flow Humanoid Robot: International Conference on Mechanical, Electronics, Computer, and Industrial Technology. *International Conference on Mechanical, Electronics, Computer, and Industrial Technology (MECnIT)*, **1007**, 012070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1007/1/012070>