DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.02.006

光伏板清洁装置横臂轻量化设计方法

杨世强，侯玉庆

（西安理工大学 机械与精密仪器工程学院，陕西 西安 710048）

摘要： 光伏发电是一种新兴能源技术，光伏板表面清洁度对其发电效率有重要影响。为了保持光伏板表面清洁，提高发电效率，本文开发了一种光伏板清洁装置，给出了整体设计方案。结合现场安装调试，针对机械臂架过重的问题进行轻量化设计，对横臂进行拓扑优化计算，提出了三种结构优化方案，并对各方案力学性能进行对比分析，确定了较优方案。对比分析了较优方案与原方案的前六阶固有频率和振型等模态参数，为清洁装置的进一步优化提供了理论依据。

关键词： 清洁装置；轻量化设计；模态分析；光伏板清洁

中图分类号： TP202.1 **文献标志码：** A **文章编号：** 1006-4710(2018)02-0159-07

Lightweight design method for the cross arm of photovoltaic panels cleaning device

YANG Shiqiang, HOU Yuqing

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The photovoltaic power generation is an emerging energy technology. The surface cleanliness of photovoltaic panels has important impact on its power generation efficiency. A new kind of cleaning device for photovoltaic panel is developed for keeping the surface of the photovoltaic panel clean to improve the power generation efficiency, with the overall design scheme given. The prototype machine which has been installed and debugging completed shows that it is overweight. The lightweight design for the beam of cleaning device is necessary. Therefore, the topology optimization calculation for the cross arm is carried out, and three kinds of lightweight optimization schemes are presented. The mechanical properties of each scheme are analyzed, with the optimal scheme selected. The modal parameters, such as inherent frequency and modal shape, are compared between the optimal scheme and the original scheme. The theoretical basis is provided for further optimization of the cleaning device.

Key words: cleaning device; lightweight design; modal analysis; photovoltaic panel cleaning

光伏板表面清洁度对其发电效率有重要影响[1]，表面积灰的光伏组件工作时，其发电效率会降低10%到25%。实现清洁装置的低成本与高效率运行具有重要的现实意义与经济价值。最初人们使用水枪或者人工使用滚刷、清洁布等清除表面灰尘[2]，近年来随着科技的发展，出现了很多自动化大型清洁设备，比如移动装置搭载盘刷或滚刷设备的大型移动清洗车，具有较高的清洁效率[3]，但是其结构普遍笨重复杂，成本较高。大型清洁装置普遍由移动装置、机械臂装置以及末端执行部分(通常为盘刷或者滚刷)等组成[4]，由于机械臂的尺寸和结构对于清洁装置自身性能影响很大[5]，因此，如何通过结构优化实现轻量化设计并保证其足够的力学性能，对机械结构设计来说具有重要意义。

机械结构优化设计是将最优化理论和结构设计相结合，借助现代计算方法，从一系列受约束的可行解中寻求使某一目标最大或最小的参数组合，从而使设计质量得到提高[6]。为提升产品性能，降低产品耗材及成本，提升企业竞争力，国外很多大型企业在产品设计中已广泛地运用结构优化技术。易继军[7]采用拓扑优化方法对数控螺旋锥齿轮机床进行优化，进一步改进了机床的性能。赵伟基[8]对机器

收稿日期： 2017-07-25

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51475365)；陕西省教育厅省级重点实验室科学研究计划资助项目(12JS071)；陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2017JM5088)

作者简介： 杨世强，男，副教授，博士，研究方向为智能机器人控制、机电系统集成。E-mail:yangsq@xaut.edu.cn

人手臂进行分析和优化设计,找出了机械臂的薄弱环节,通过在两个分型面处加装缓冲器,减小了应力集中,减轻了手臂重量。丁渊明[9]对 6 自由度串联弧焊机器人进行分析,根据其机械臂的特点,提出了工作空间体积和特定区域的能量消耗两个性能指标,以二者为优化目标建立优化模型,利用遗传算法优化弧焊机器人机械臂的结构参数,使得机器人在焊接过程中能量的消耗得以降低。李钊等[10]采用拓扑优化方法对履带架结构形式进行合理布局,改善载荷传递路径以充分发挥材料力学性能,从而提高履带架的承载能力。

针对大型光伏发电厂的光伏板清洁问题,本文开发设计了一种光伏板清洁装置,完成了清洁装置的结构与性能分析。在此基础上,结合清洁装置运行试验,对其关键部件进行拓扑优化设计,分析对比各优化方案的力学性能,为清洁装置的进一步优化提供指导。

1 光伏板清洁装置

为了解决光伏板积灰问题,设计开发了光伏板清洁装置,对光伏组件表面灰尘覆盖层进行及时清理,方案如图 1 所示。清洁装置主要分为清洁头架和臂架两部分,横臂 1 和支撑臂 2、驱动臂 3 组成臂架,4 为支撑,5 为清洁头架。清洁头架是清洁装置的末端执行元件,安装在横臂末端。清洁装置安装在履带式移动平台之上,可实现连续排列的光伏板的清洁作业。臂架部分采用铰接平行四杆机构,驱动臂 3 转动带动清洁头架实现伸出和收回运动,清洁头架始终保持与光伏板平行的固定姿态,清洁头架安装喷水装置和旋转毛刷实现积灰清理。为减轻重量,清洁头架采用工业铝型材组装而成,毛刷通过电机驱动。

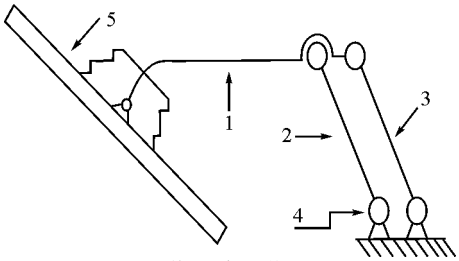
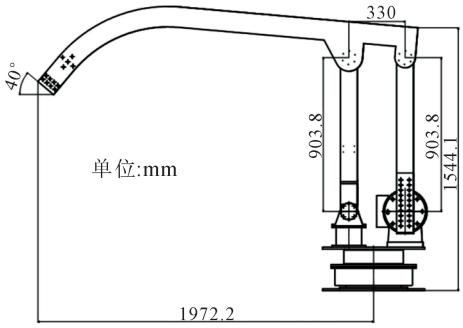


图 1 光伏板清洗装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of photovoltaic panel cleaning device

图 2(a)为臂架部分的总体设计图,平行四杆机构两条边的长度分别为 903.8 mm 和 330 mm,清洁头架初始姿态与水平面成 40°夹角,沿长度方向与光伏板安装倾角一致,宽度方向与光伏板存在一夹角,可微调。清洁装置安装在履带式液压驱动移动平台上。

前期完成的臂架实物如图 2(b)所示,根据现场装配和试验结果,现有清洁装置重量较大,移动平台负载较大。横臂前端安装清洁头架,是悬臂梁结构。横臂质量为 65.02 kg,约占臂架质量的一半,对其拓扑结构进行优化,减轻自身质量,对改善清洗头工作性能有重要意义。



(a) 臂架总体尺寸参数

(b) 臂架装配现场实物图

图 2 臂架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of beam

2 横臂的拓扑结构优化

2.1 优化方案

分析横臂受力情况,横臂的末端处两侧面受到清洁头载荷的作用力,约 1200 N,工作行进中受到由于盘刷刷毛与光伏板摩擦产生的与前进方向相反的水平方向阻力,约 300 N。正常的固定位姿清洁工作中,横臂后端的两个铰接处固定。在 Pro/Engineer 环境中建立横臂模型,导入有限元分析软件 ANSYS 系统,材料为 45 号钢。

因此,在 ANSYS 环境中,固定约束横臂的圆孔连接面,在横臂的末端两侧面分别施加沿 Z 方向各 600 N 作用力模拟清洁头的重力,沿 X 方向施加

300 N 作用力模拟工作时受到的刷毛摩擦力，约束和载荷如图 3 所示。

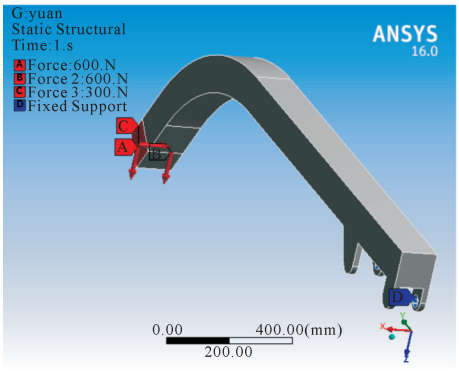
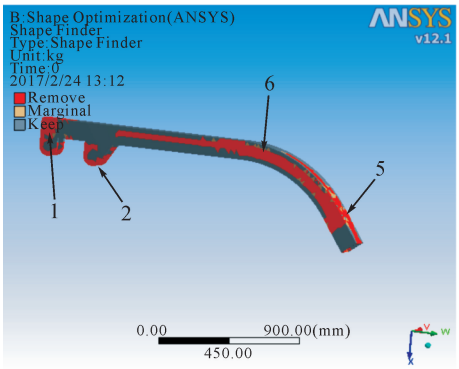


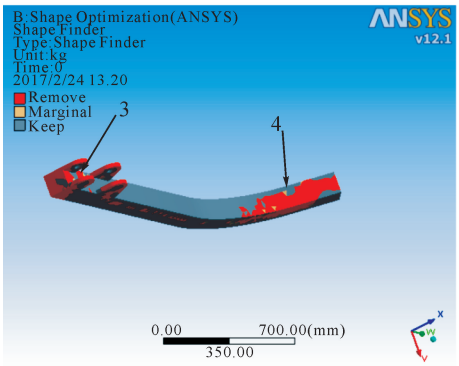
图 3　约束与载荷图

Fig. 3　Constraints and load diagram

以重量最轻为优化目标，设置质量去除百分比为 35%。求解完成后得到如图 4 所示的拓扑结构和 6 个主要的可去除区域。



(a) 去除区域示意图一

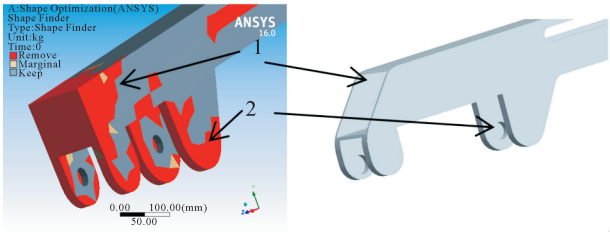


(b) 去除区域示意图二

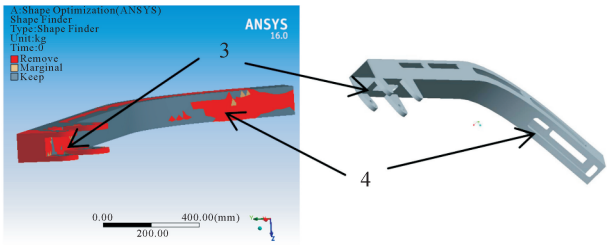
图 4　可去除区域与保留区域

Fig. 4　The removable area and reservation area

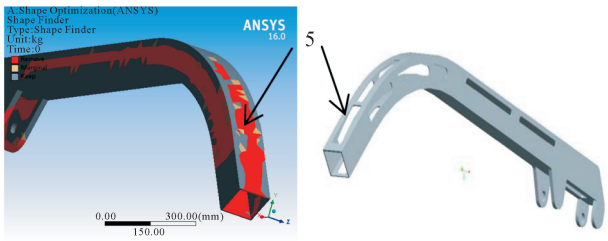
结合图 4 的结果，考虑到加工以及应力集中等情况，本文设计三种优化方案。各方案对前 5 个区域采用相同减重方式，对区域 6 设计不同减重孔，如图 5 所示。对于区域 1 和 2，如图 5(a)所示，直接去除 1 区域并缩小 2 区域尺寸；在区域 3、4 和 5 中设计一个矩形去除区域，边缘倒角处理，如图 5(b)和(c)所示。对于区域 6 采用三种不同减重孔设计：①去除较小部分建议区域，两侧面去除区域为一个支撑，形成方案一，如图 5(d)所示；②去除面积加大，侧面去除区域为两个支撑连接，形成方案二，如图 5(e)所示；③方案三去除部分与方案一类似，但不设置连接上下面的支撑，如图 5(f)所示。方案一去除率为 26.5%，方案二去除率为 29.53%，方案三去除率为 26.84%。



(a) 设计区域1、2的结构优化

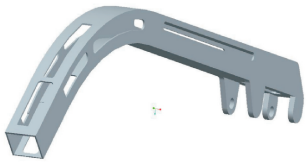


(b) 设计区域3、4的结构优化



(c) 设计区域5的结构优化

(d) 设计区域6方案一　　(e) 设计区域6方案二



(f) 设计区域6方案三

图 5　三种优化方案模型

Fig. 5　Three optimization scheme models

2.2　优化前后静力学对比分析

计算求解的结果只能作为参考[11]，需考虑应力集中等因素对改进结构的影响，使用有限元分析软件进行力学分析对比，以检验方案是否可行。对优化前后横臂的力学性能是否满足基本需求进一步分

析,约束、载荷的施加方式同图 3,在沿 Z 方向两侧面各施加 600 N 重力,沿 X 方向施加 300 N 摩擦力。计算各方案对应的横臂最大位移、最大应力和质量,如图 6 所示。

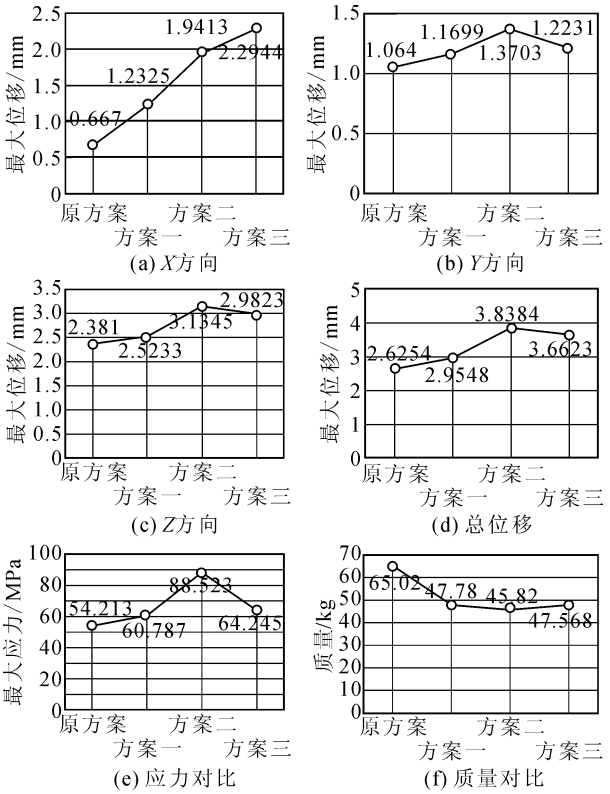


图 6　各方案最大位移、最大应力及质量对比

Fig. 6　Graph comparison of maximum displacement, maximum stress and mass of each scheme

由图 6 可知,各方案在三个方向的位移相较于原方案,都有不同程度地增加,其中方案一的增量最小,分别为 0.5655 mm(X 向)、0.1059 mm(Y 向)和 0.1420 mm(Z 向);方案二在 Y 方向和 Z 方向的增量最大,各向增量分别为 1.2743 mm(X 向)、0.3063 mm(Y 向)和 0.7535 mm(Z 向);方案三在 Y 方向和 Z 方向的位移均介于方案一与方案二之间,且其变化量更接近于方案二,而在 X 方向较原方案位移增量最大,为 1.6247 mm。总位移增量方案一最小,方案三次之,方案二最大,各向总位移增量分别为 0.3294 mm(X 向)、1.2130 mm(Y 向)和 1.0369 mm(Z 向)。应力的变化与总位移的变化类似,应力增量方案一最小,方案三次之,方案二最大;方案一二三相较于原方案的应力增量分别为 6.574 MPa、34.31 MPa 和 10.032 MPa。各方案的减重效果方案二最佳,方案一与方案三相当,方案一二三的减重量分别为 17.24 kg、19.20 kg 和 17.45 kg。经过各方案的对比,方案一的最大变形和最大应力都比较小,最大位移位置位于横臂末端边缘,最大应力位置位于去除区域的过渡孔处,如图 7 所示;方案二的位移和应力都是最大,方案三居中。

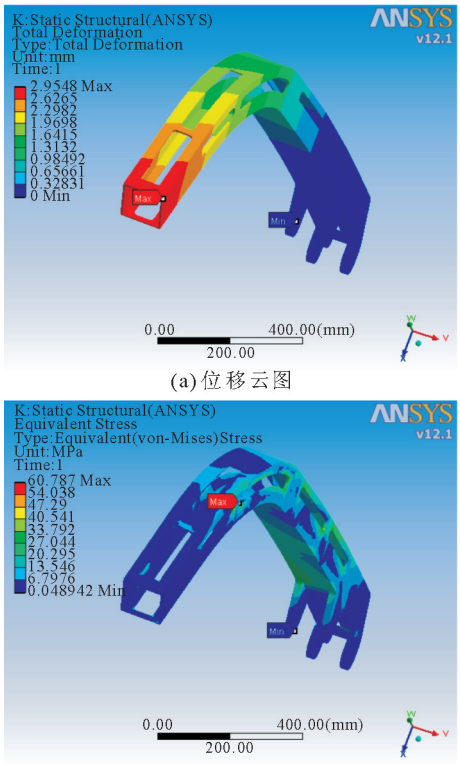


图 7　方案一总位移与应力云图

Fig. 7　Total displacement and stress cloud diagram of the scheme one

2.3　优化前后扭转力学分析

实际工作中,由于工作时毛刷与光伏板间的摩擦力作用在横臂末端,横臂的弯曲结构引起扭矩力臂,横臂存在水平方向的扭矩,在此对各方案扭转力学性能进行分析。当 X 方向分别施加 600 N 和 900 N 的摩擦力时,各方案最大变形和最大应力计算结果如图 8 所示。

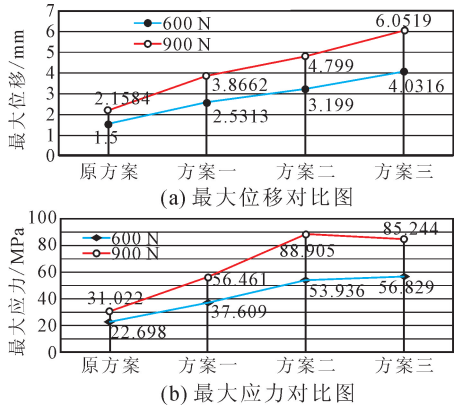
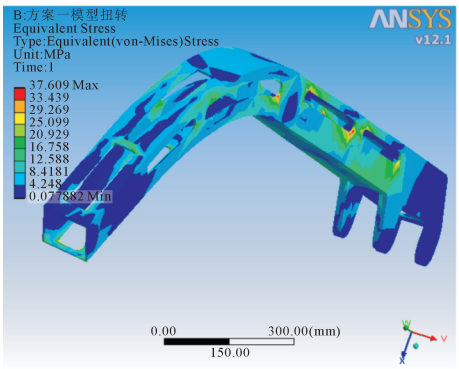


图 8　扭转工况下各方案最大位移和应力对比

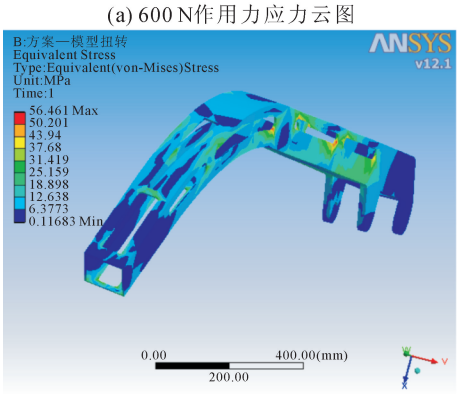
Fig. 8　Gragh comparison of maximum displacement and stress of each scheme with torsion

对比各方案变形情况可知,三种方案的位移相对于原方案均有一定程度地增加,载荷一定的情况

下，方案一、方案二和方案三的最大位移量依次增大，600 N 作用下，其相对于原方案的增量依次为 2.0313 mm、2.6990 mm 和 3.5316 mm；随着载荷的增大，其最大位移增加，且增量呈增大趋势。对比各方案最大应力计算结果可知，方案一的最大应力也是各方案中最小，达到 56.461 MPa，方案二最大，达到 88.905 MPa。图 9 为方案一在两种工作阻力作用力下的应力云图。



(a) 600 N作用力应力云图



(b) 900 N作用力应力云图

图 9　方案一扭转工况应力云图

Fig. 9　Stress cloud diagram of the scheme one with torsion

综合以上三种方案的计算结果可以看出，方案一质量减少了 17.24 kg，最大位移较优化前增加 0.3294 mm，变化最小；方案二质量减少 19.50 kg，减小量更多，但最大位移达 3.8384 mm，最大应力达 88.523 MPa，相对变化较大；方案三的应力值变化较小，但最大位移达到了 3.6623 mm。由于方案一的扭转变形最小，最大应力变化也最小，达到了相对较优的设计目标，因此，选方案一作为横臂的优化方案，进一步分析其动态性能。

3　模态分析

模态分析是结构动态分析的重要方法，通过模态分析掌握机械结构各阶模态的固有频率和振型等特性，是进行瞬态响应分析和谐响应分析等动力学分析的基础[12]。把横臂四个连接孔设置为固定约束，在 ANSYS 环境下，分别对原方案和方案一进行模态分析，采用完全法计算得到其前六阶固有频率和固有振型。图 10 为原方案与方案一固有频率对比，图 11、图 12 分别为原方案与方案一的前六阶振型云图。

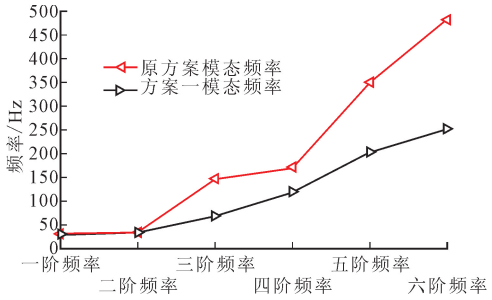
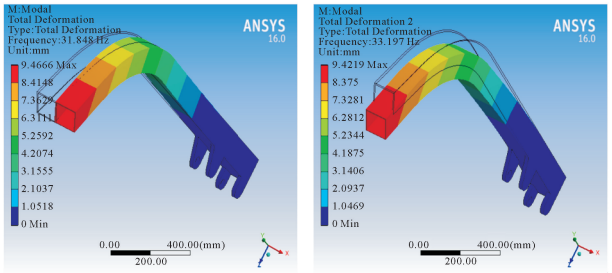


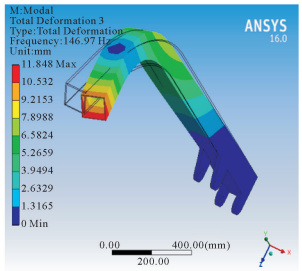
图 10　固有频率对比

Fig. 10　Natural frequency comparison diagram

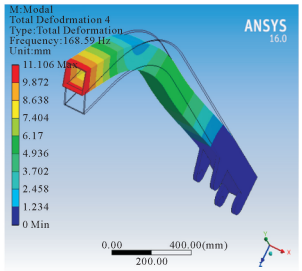


(a) 一阶振型

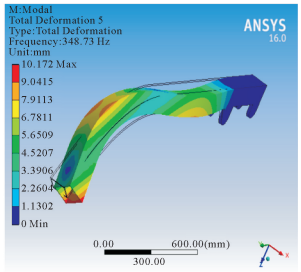
(b) 二阶振型



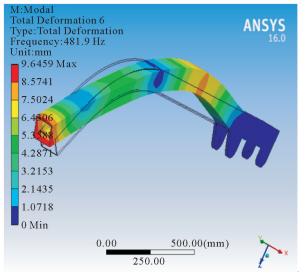
(c) 三阶振型



(d) 四阶振型



(e) 五阶振型



(f) 六阶振型

图 11　原方案横臂前六阶振型

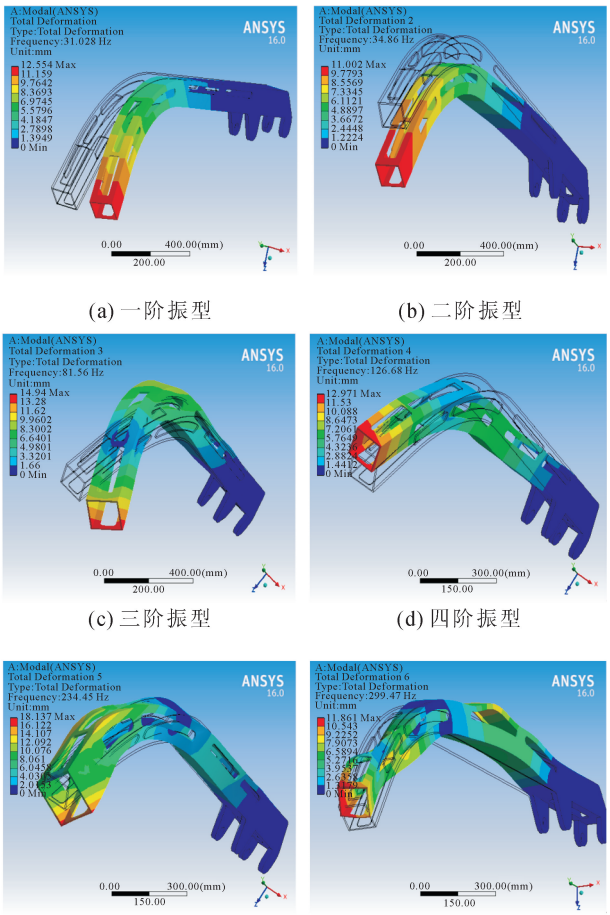
Fig. 11　First six mode shape of the beam of the original scheme

由图 10 可知，方案一各阶固有频率较原方案均有所下降，其中第一、二阶固有频率变化较小，三到六阶固有频率变化较大。对比振型云图可知，原方案和方案一第一阶振型均表现为绕 Z 轴沿 X 方向的弯曲，二阶模态振型表现为绕 X 轴沿 Z 方向的弯

曲。两方案前四阶振型基本相似,五、六阶弯曲扭转组合振型有所不同。由于去除了部分区域,较高阶扭转振型的奇点位置发生了一些移动。提取原方案与方案一横臂 X 轴、Y 轴、Z 轴及绕 X 轴 R_x、绕 Y 轴 R_y、绕 Z 轴 R_z 这 6 个方向有效模态质量,如表 1 和表 2 所示。

由表 1 与表 2 可知,方案一与原方案相比,各阶自由度有效模态质量均发生了一些改变,但是相对较小,其中前四阶占主要模态质量的自由度方向基本没有改变,第五阶的转动自由度最大的仍然是 R_z,R_x 与 R_y 大小顺序发生了颠倒,第六阶的转动自由度最大的仍然是 R_x,R_y 与 R_z 大小顺序发生了颠倒,结合两方案横臂模态振型图和各阶有效模态质量分析可以得出:

一阶模态中均是 X 和 R_z 方向的值较大,表现为绕 Z 轴沿 X 方向的弯曲;二阶模态中均是 Z 和 R_x 方向的值较大,表现为绕 X 轴沿 Z 方向的弯曲;三阶模态中均是 R_y 和 R_z 与 X 方向值较大,主要表现为绕 Y 轴的扭转,其次是绕 Z 轴沿 X 的弯曲;四阶模态中 Z 与 R_x 方向的值较大,表现为绕 X 轴沿 Z 和绕 X 轴沿 Y 方向的弯曲;五阶模态中原方案为 R_z 与 X 和 R_y 方向值较大,表现为绕 Z 轴沿 X 方向的弯曲和绕 Y 轴的扭转,方案一 R_z 与 X 和 R_x 方向值较大,表现为绕 Z 轴沿 X 方向的弯曲和绕 X 轴的扭转;六阶模态中原方案 R_x 与 R_y 和 Z 方向的值较大,表现为绕 Y 轴沿 Z 方向的弯曲和绕 X 轴扭转,方案一 R_x 与 R_z 和 X 方向的值较大,表现为绕 Z 轴沿 X 方向的弯曲和绕 X 轴扭转。



(a) 一阶振型　(b) 二阶振型　(c) 三阶振型　(d) 四阶振型　(e) 五阶振型　(f) 六阶振型

图 12　方案一横臂前六阶振型

Fig. 12　First six mode shape of the beam of the scheme one

表 1　横臂原方案各方向有效模态质量

Tab. 1　Effective modal mass in each direction of the beam of the original scheme

自由度方向	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
X	0.474 989	3.28×10^{-6}	0.112 368	9.20×10^{-8}	7.70×10^{-2}	4.10×10^{-7}
Y	2.44×10^{-7}	3.01×10^{-8}	1.09×10^{-2}	2.84×10^{-10}	2.96×10^{-6}	2.62×10^{-3}
Z	3.63×10^{-6}	0.452 801	2.05×10^{-7}	0.142 935	6.87×10^{-7}	5.69×10^{-2}
R_x	0.692 327	85 965	1.60×10^{-2}	6 134.05	1.93×10^{-2}	1 355.86
R_y	525.495	91.918 2	635.257	29.189 6	6.465 61	11.452 3
R_z	86 049.9	5.335 91	4 754.68	23.298 3	1 829.23	0.561 37

表 2　横臂方案一各方向有效模态质量

Tab. 2　Effective modal mass in each direction of the beam of the scheme one

自由度方向	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
X	0.400 876	2.22×10^{-5}	0.136 492	6.53×10^{-6}	5.81×10^{-2}	7.08×10^{-3}
Y	1.08×10^{-8}	9.44×10^{-3}	8.05×10^{-8}	7.42×10^{-2}	9.52×10^{-6}	1.64×10^{-3}
Z	1.88×10^{-5}	0.432 582	2.42×10^{-6}	0.144 248	1.07×10^{-3}	3.93×10^{-2}
R_x	2.849 05	65 720.4	0.195 334	5 188.72	24.611 9	779.354
R_y	458.905	74.935 9	404.474	24.485	8.669 61	0.842 475
R_z	61 389	9.404 11	7 792.15	16.435 1	1 326.71	115.106

总结以上结果,原方案与方案一的模态参数结果如表 3 所示,方案一固有频率略有下降,前四阶振型基本一致,五六阶振型发生了部分改变。

表 3 原方案与方案一模态对比

Tab. 3 Mode comparison between the original scheme and the scheme one

	模态阶数	1	2	3	4	5	6
原方案	频率/(Hz)	31.848	33.197	146.97	168.59	348.73	481.9
	振型	绕 X 弯曲	绕 Z 弯曲	弯扭组合	弯扭组合	弯扭组合	弯扭组合
方案一	频率/(Hz)	28.685	33.894	68.354	118.54	203.19	252.59
	振型	绕 X 弯曲	绕 Z 弯曲	弯扭组合	弯扭组合	弯扭组合	弯扭组合

4 结 语

在分析光伏板布局特点的基础上，设计开发了光伏板清洁装置，给出了设计方案。针对当前清洁装置过重的问题，对机械臂的横臂进行结构优化设计，结合拓扑计算，对所提出的三种优化方案进行力学性能对比，选择出最优设计方案。对比给出了最优方案与原方案前六阶固有频率与固有振型等模态参数的变化，对较优方案进行谐响应分析和瞬态响应分析。由计算结果可知，方案一可较好地满足工作需要，实现了横臂结构优化设计，为清洁装置的进一步优化提供了参考依据。

参考文献：

[1] 白恺，李智，宗瑾，等. 积灰对光伏组件发电性能影响的研究 [J]. 电网与清洁能源，2014，30(1)：102-108.
BAI Kai，LI Zhi，ZONG Jin，et al. Influence of dust on the power generation performance of photovoltaic panels [J]. Power System and Clean Energy，2014，30(1)：102-108.

[2] 巫江，龚恒翔，朱新才. 光伏组件自动除尘装置设计与研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版)，2014，28(3)：92-97.
WU Jiang，GONG Hengxiang，ZHU Xincai. Design and research of photovoltaic module automatic dust removal device [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science Edition)，2014，28(3)：92-97.

[3] 周利坤，刘宏昭，李悦. 清洗机器人研究现状与关键技术综述 [J]. 机械科学与技术，2014，33(5)：635-642.
ZHOU Likun，LIU Hongzhao，LI Yue. Summary for the key technologies and research status of cleaning robot [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2014，33(5)：635-642.

[4] 李昂. 光伏清洁机器人的设计与分析 [D]. 武汉：华中科技大学，2014.
LI Ang. Design and analysis of photovoltaic sloar-cleaning robot [D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2014.

[5] 汪乃茜，李德伟，席裕庚. 采用预测控制的龙门架式冗余自由度机械臂轨迹规划算法 [J]. 控制理论与应用，2016，33(8)：989-998.
WANG Naiqian，LI Dewei，XI Yugeng. The trajectory planning of redundant manipulator with gantry by using model predictive control [J]. Control Theory and Applications，2016，33(8)：989-998.

[6] 蔡新，李洪煊，武颖利. 工程结构优化设计研究进展 [J]. 河海大学学报(自然科学版)，2011，39(3)：269-276.
CAI Xin，LI Hongxuan，WU Yingli. Research progress of optimization design for engineering structure [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences)，2011，39(3)：269-276.

[7] 易继军. 结构拓扑优化方法研究及其在螺旋锥齿轮机床中的应用 [D]. 长沙：中南大学，2014.
YI Jijun. Research on method of structural topology optimization and its application in spiral bevel gear machine tool [D]. Changsha：Central South University，2014.

[8] 赵伟，殷国富，陈航，等. 基于 Solid Works 和 ANSYS 的机器人手臂性能分析与优化设计 [J]. 机械，2009，36(12)：48-50.
ZHAO Wei，YIN Guofu，CHEN Hang，et al. Property analysis and structure optimization of robotic arm based on Solid Works and ANSYS [J]. Machinery，2009，36(12)：48-50.

[9] 陈荣亮，蔡小川. 高可扩展区域分解算法及其在流体模拟和优化问题中的应用 [J]. 中国科学：数学，2016，46(7)：915-928.
CHEN Rongliang，CAI Xiaochuan. A scalable domain decomposition method and applications in simulation and optimization of fluids [J]. Scientia Sinica Mathematica，2016，46(7)：915-928.

[10] 李钊，张春光，屈福政，等. 基于多目标满意度的履带架拓扑优化研究 [J]. 机械科学与技术，2015，34(10)：1488-1492.
LI Zhao，ZHANG Chunguang，QU Fuzheng，et al. Topological optimization of crawler frame based on multi-objective satisfaction [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2015，34(10)：1488-1492.

[11] 李景奎，张义民. 非正态分布的连续体结构可靠性拓扑优化设计 [J]. 机械工程学报，2012，48(3)：154-158.
LI Jingkui，ZHANG Yimin. The reliability-based topological optimization design of continuum structural with abnormal distribution [J]. Journal of Mechanical Engineering，2012，48 (3)：154-158.

[12] 李海方，徐长生. 基于 ADAMS 的船用起重机金属结构动力学仿真 [J]. 起重运输机械，2009，(6)：19-21.
LI Haifang，XU Changsheng. Dynamic simulation of metal structure of marine crane based on ADAMS [J]. Hoisting and Conveying Machinery，2009，(6)：19-21.

(责任编辑 周 蓓)