

一种新型联排挂式光伏设备清洁小车

李瑞琳

武汉理工大学 湖北武汉 430000

【摘要】设计了一种新型联排挂式光伏太阳能板清洁小车，通过气缸双导轨结构、稳定云台机构使得小车在行进过程中面对不同倾斜角度的光伏板能够调节清洁系统的水平角度以及竖直角度的功能；同时应用了梯形丝杆升降结构，保证了清洁小车高度可调，提高了小车处理多排光伏板的能力；设计的清洁系统通过雾化辊刷以及除尘平板拖能够有效保证光伏板的清洁程度；设计的自行走驱动系统能够较为便捷地时联排挂式机器人换排工作，提升小车的工作效率。

【关键词】光伏清洁机器人；光伏组件；行走机构；辊刷清洁

【基金项目】

国家大学生创新创业训练计划资助项目；光伏发电中清洁能源的应用，（项目编号：S202410497075）。

1 研究目的

1.1 作品研究背景及意义

光伏发电作为一种可再生能源技术，其核心在于通过光生伏特效应将太阳能直接转换为电能，为人类社会提供了绿色的、清洁的、可持续的能源解决方案。然而大气条件和其他环境影响不断地影响着光伏电站的状态。沉积在组件表面的污垢和其他种类的污染剂可防止或减少阳光的直射，对系统单元的产量产生负面影响。所有杂质都对光伏系统的效率构成了巨大的风险^[1]。

定期清洗光伏组件是光伏电站运维过程中的重要环节，而光伏组件清洗技术对清洗效果的影响较大，而传统的人工清洗和机械清洗局限性较大，清洗效果无法得到保证^[2]，并且对光伏设备的损害较大，因此设计一种能够高效清洁光伏设备的机械具有重大的意义。

2 研究内容

2.1 总体方案设计

本文设计的联排挂式清洁小车主要包括的机构：换排运动机构、挂式清洗机构、气缸双导轨微调机构、梯形丝杆

传动机构以及云台稳定结构。其中，换排运动系统能够在行进和转弯时识别到与光伏板的距离以及光伏板每排的边缘，实现机械的控距与换行；挂式清洗机构包括清洁辊刷以及除尘平板拖，能够实现光伏板的清洁；气缸导轨结构能够根据控制系统的信息实现上端辊刷的角度、高度的微调，保证了辊刷距离光伏板的高度；毛刷连接的电机能够自动调速；梯形丝杆传动机构能够带整车进行高度调节；云台能够通过连接减震轮稳定下来，并且随着丝杆带动蜗杆下端进行高度调节^[4]。（见图1）

2.2 气缸双导轨机构

本文设计的气缸双导轨机构由气缸、斜向导轨以及横向导轨构成，本文采用的气缸主要由活塞、活塞杆、导向环、一定行程的气缸壁、电磁气动阀、横向导轨以及斜向导轨构成。

当联排挂式清洗小车在运行途中遇到一些坑洼、凹凸不平的地形^[2]，因此，当上端一侧的车轮在遇到地形凹陷时，能够通过电磁阀将气缸的进气口打开，并将压缩气体通过进气口输入到气腔内部，而后通过活塞将活塞杆顶起并一定高度，使得清洁系统上端维持原位^[3]；当上端一侧的车轮在遇到地形图凸起时，通过电磁阀打开气缸的排气口，

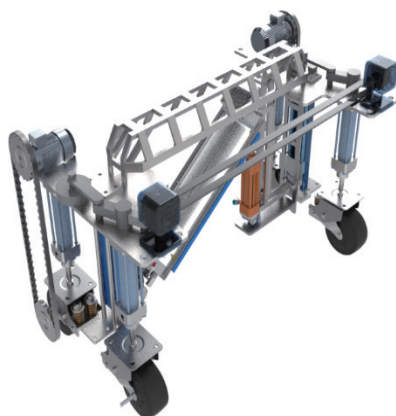


图1 总体装置图



图2 气缸双导轨机构

压缩气体则从排气口排出，稳定了清洁系统上端的高度，保证了其与光伏板距离的稳定。

当联排式小车换行时，由于不同排的光伏板的倾斜角度不同，因此，通过活塞杆上升时，会通过清洁系统上端的滚轮与斜向导轨间滑动，改变其与水平面的角度，同时斜向导轨上端的滚轮又能在水平的导轨中滑动，为调整角度带来的水平方向位置变更预留水平位移。（见图2）

2.3 小车行走机构

2.3.1 驱动机构设计

由于不同的使用环境，行走机构需要采用合适的行走速度，设计合适的行走机构整体重量，以保证竖直方向上的动力传递以及行走时的稳定性和足够的工作效率。本次行走机构需要在沙漠中进行稳定的工作，沙漠中地面松软且凹凸不平，因此需要采用可以提供较大传递动力的链传动。同时，链传动更适应复杂的行走环境，不易出现打滑现象，且可以提供精确的传动比。综上，选择链传动以作为行走机构的竖直方向的传动方式。如下图，电机由直流电源驱动，驱动齿轮运动，再通过链传动机构将机械能传递给轮轴，驱使车轮旋转，机构整体开始行走。

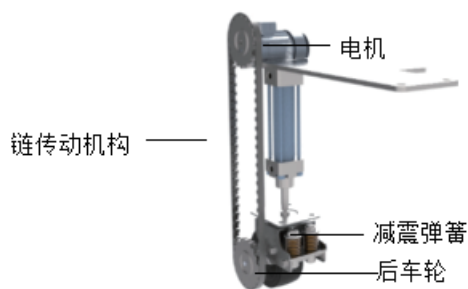


图3 后轮驱动机构

2.3.2 转向机构设计

为保证该行走模式在复杂地况中行走，该行走机构采用通过性较高的跨排式行走，预留了较高的底盘高度。行走机构采用了跨排行走的方式，两侧为麦克纳姆轮，中间部分为架空放置的清洁机构，可以通过联排式的光伏板。车轮转向采用阿克曼转向原理。根据阿克曼转向几何设计^[6]的前车轮，沿着弯道转弯时，利用四连杆的相等曲柄使内侧轮的转向角比外侧轮大大约2~4度，使四个轮子路径的圆心大致上交会于后轴的延长线上瞬时转向中心，让小车可以顺畅的转弯。

2.4 梯形丝杆传动机构

为保证在换排时以及横排运动时清洁系统下端也能保持在合理的高度，本文应用了一种梯形丝杆模组，其中包括丝杆导轨、梯形牙螺杆以及螺母座。其中，螺母座能够绑定云台以及清洁系统下端进行竖直高度的调整。当换排或突遇较高的位置变化时，梯形丝杆能够带动螺母座进行高度变换，由电机将旋转动力以及高度信息输入到螺纹死杠

轴上，同时通过螺纹丝杠轴与梯形螺母上的梯形螺纹互相啮合，将旋转动力继续传输使螺母座带动稳定云台沿着丝杠的轴向做竖直方向上的直线运动。

2.5 毛刷清洁机构

现有小型光伏清洁机器人大多都靠履带式实现跨排作业、联排挂式机器人通常使用轨道来实现换排作业。但针对这两种作业方式，前者无法保证其在光伏板的稳定性，同时长久的在光伏板运行，势必会对光伏板造成一定的损伤；而后者则降低了效率，同时增加了铺设轨道的成本，不利于大规模光伏板铺设的经济效益^[7]。

本文设计的联排式清洗车旋转机构固定在毛刷的一端，能够在运行时控制毛刷的旋转速度，针对不同的灰尘覆盖程度进行转速的调整提高了联排式清洗的效率。

3 技术方案、待解决的难题及预期成效

3.1 清洁方案可行性分析

由于干燥的光伏组件表面较为光滑，对灰尘阻滞作用小，因此未使用水清洁的光伏板积沙量较少。而沙漠地区空气中充满细小的沙粒和尘土颗粒，这些颗粒容易附着在光伏板的表面，随着时间的推移，形成一层阻挡阳光的灰尘。如果采用有水清洁，水在清洁过程中会与这些细小的沙尘颗粒混合，形成泥浆。这种泥浆可能会在光伏板表面残留，并且干燥后形成坚硬的污垢，不仅影响板面的光透过率，还会难以清除，增加后续清洁的难度，提高清洁成本，造成水资源的浪费^[7]。

无水清洁设备可以更灵活地适应沙漠中的极端气候条件，如高温或强风，适合持续清洁，而有水清洁在极端气候下可能不方便操作，因此，无水清洁在沙漠环境中不仅更环保，还更经济高效。

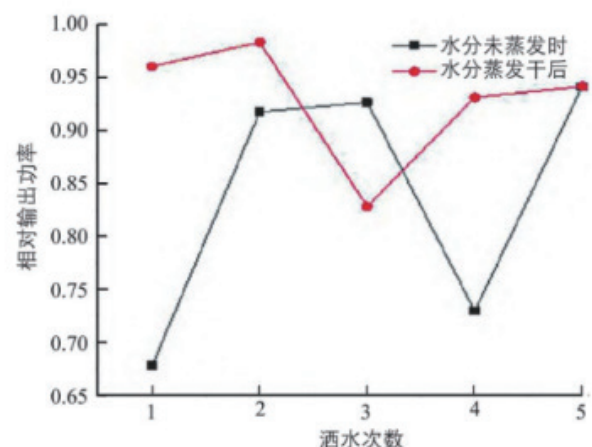


图4 洒水次数对光伏设备输出功率的影响

3.2 丝杆机械运动可行性

3.2.1 动态运动可行性

丝杆作为大负载高精度的升降装置，在工作过程中，丝

杆主要承受轴向力、摩擦力矩和驱动力矩的作用，这些力导致丝杆内部产生扭转应力和压缩应力，使丝杆产生扭转和弯曲变形。这里主要是对此处的丝杆在改变辊刷角度时进行应力分析。

首先定义实常数和材料属性，其材料参数如表1所示，丝杆的材料45钢。随后以6级精度划分丝杆，得到网格划分图^[9]。

表1 丝杆材料参数

材料参数	弹性模量/GPa	密度/(kg/m ³)	泊松比
数值	210	7850	0.269

在结构分析中求解丝杆的自由振动固有频率和振型时，由于阻尼对固有频率和振型的影响非常小，因此可以忽略阻尼的作用。这样，丝杆的无阻尼自由振动微分方程可以表示为：

$$M \cdot \ddot{\delta} + K \delta = 0 \quad (2)$$

式中， M 为结构质量矩阵，无量纲；

上式中 $\ddot{\delta}$ 为加速度矢量，无量纲；

上式中 K 为结构刚度矩阵无量纲；

上式中 δ 为比例位移矢量，无量纲。

丝杆的振动可分为八个固有模式，低阶模式对结构振动和动态特性影响最大。因此，模态分析通常只需计算前几阶的频率和振型即可。分析结果显示不同的振动云图，除第八阶外，其他相邻阶次的振型均为正交的弯曲振动，区别在于极值点数量不同。

对于丝杆，转速和频率的关系为：

$$n = 6f \quad (2)$$

式中， n 为转速，单位为r/min；

上式中 f 为频率，单位为Hz。

当丝杆的旋转速度达到临界转速时，其挠度将达到最大值，导致剧烈的振动。这种情况不仅会影响丝杆的传动精度，还可能导致丝杆损坏。通过计算丝杆的各阶固有频率，可以得出相应的临界转速。由于该升降丝杆的最高工作转速为1500r/min，远低于其临界转速2965.44 r/min，因此丝杆的应用是合理的，能够有效避开共振区，确保丝杆在工作中的稳定性，具有可行性。

3.2.2 平稳性与同步性

机构使用的丝杆产品精度可以至0.1mm，且含反齿隙附件的精度可至0.04mm，梯形丝杆采用梯形螺纹，通常具有较大的接触面，因此摩擦阻力较高，这在低速传动时提供了一定的自锁特性，但也会影响高速下的平稳性^[10]。因此，它更适合中低速传动，能够在此范围内保持较高的平

稳性，并且提供了较高的刚性，因此在承受较大载荷时可以保持良好的传动稳定性。

4 创新点与项目特色

1. 通过设计气缸双导轨结构、稳定云台机构使得小车在行进过程中面对地形的凹凸不平具有调节清洁系统的水平角度以及竖直角度的功能，同时设计了可自动转向的行走驱动机构。

2. 本文应用了视觉识别系统、梯形丝杆升降结构，保证了清洁小车在运行时的高度可调，提高了小车处理多排光伏板的能力以及由二者自锁性带来的高度稳定性。

3. 将稳固云台连同梯形丝杆结合控制联排挂式清洁小车的高度以及水平角度，保证了清洁小车运行时的稳定性。

参考文献：

- [1] 高凌云. 太阳能电池板除尘新技术[J]. 现代物理知识, 2010, 22 (05): 52. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2010.05.023.
- [2] 陈纳新, 刘震, 陈一锋, 李俊. 光伏组件表面清洁技术的研究及应用进展[J]. 太阳能, 2023, (08): 72-78.
- [3] 杜彦亭, 范鸿澄. 无触点可控行程气缸[J]. 液压工业, 1988 (03): 15-17.
- [4] 韩利生. 用N型组件、新型支架和自动清洁装置为光伏治沙提供组合方案[C]//上海市太阳能学会. 第十八届中国太阳级硅及光伏发电研讨会 (18th CSPV) 论文集. [出版者不详], 2022: 37. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.059762.
- [5] 闫梦迪, 钱亚楠, 朱玉婷. 水清洁对光伏组件输出功率的影响[J]. 太阳能, 2022 (07): 47-52. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20210506.01.
- [6] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[第三版第三卷][M]. 机械工业出版社. 2006.
- [7] 付锦. 光伏电池板清洁机器人的设计与实现[D]. 华中科技大学, 2017.
- [8] 王华. 光伏电站清洁机器人道路识别方法研究[D]. 兰州理工大学, 2023. DOI: 10.27206/d.cnki.ggs-gu.2023.000789.
- [9] 杨兴林, 陈友喜, 曾忠平. 基于ANSYS某升降平台梯形丝杆的动态分析[J]. 制造业自动化, 2014, 36 (05): 70-7
- [10] 庄子糠, 方嘉炜, 黄庆典, 等. 玻璃清洁机器人的研究和应用分析[J]. 科技与创新, 2019 (14): 148-149

作者简介：

李瑞琳 (2001.11-), 女, 汉族, 云南曲靖人, 本科, 研究方向: 机械工程。