

• 四川大学建校 130 周年特刊约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202600732



本刊网刊

月基太阳能立式电站系统构型设计与强度稳定性分析

马楷涛¹, 谢和平^{1,2*}, 张国庆^{1,3}, 宋磊³

(1. 深圳大学 广东省深地科学与地热能开发利用重点实验室, 广东 深圳 518060; 2. 四川大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 深圳大学 机电与控制工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要:月球南极基地长期运行依赖稳定、可扩展的能源供给。受极区低太阳高度角、局部地形遮挡、近地月尘扰动、有限月表空间及月震长持续振动等因素影响,传统近地平铺式光伏阵列在光照获取、污染防治、空间利用和结构安全方面面临多重约束。针对上述问题,提出月基太阳能立式电站构想,将高位布设、立体阵列构型、细长支撑、月壤锚固与候选减振措施纳入统一框架,形成“环境约束—空间构型—支撑尺度—基础锚固—结构稳定控制”的协同设计路径。围绕该构想,设计幡旗式、树冠展开式和风车式 3 类阵列,并依据已有月尘活动与极区光照研究,将 10 m 作为兼顾环境条件和结构部署可行性的概念参考高度。以 10 kW 级光伏系统为对象,在 10~30 m 范围内开展杆件强度、稳定与挠度分析,采用被动土压力模型估算锚固尺度,并结合一阶固有频率分析提出调谐质量阻尼器候选方案。已有研究为高位布设的月尘风险缓解和光照改善潜力提供了环境依据;本文结构计算表明,随布设高度增加,对杆件刚度和基础抗倾覆能力的要求同步提高,挠度为杆件截面主要控制条件,锚固尺度随支撑高度和安全系数增大而增大,部分工况的一阶固有频率可能进入本文采用的月震分析频带。建立了面向月球特殊环境的光伏电站系统构型与结构协同设计方法,可为月面高位光伏设施的场址化设计、参数优化和工程验证提供参考。

关键词:月球基地;光伏阵列;月尘防护;月震;结构稳定性

中图分类号: TM615; V476.1; TU352

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)05-0001-18

随着现代航天技术的发展,人类对深空的探索逐渐由科学认知向资源利用和长期空间活动拓展。近年来,深空探测任务的持续推进加深了人类对太阳系天体环境、资源禀赋及演化规律的认识,也为未来星际探索和空间生存体系构建提供了新的可能性^[1]。作为距离地球最近的天然卫星,月球凭借其独特的空间位置、资源潜力和环境条件,被普遍认为是未来开展深空探索与长期驻留的重要前沿平台^[2-3]。近年来,中国嫦娥系列探测任务、美国阿耳忒弥斯计划及国际月球科研站等项目持续推进,推动月球探索逐步由短期科学探测向长期驻留和资源开发方向发展^[4-5]。在此背景下,建设可持续运行的月球基地成为未来深空活动的重要发展方向,而稳定可靠的能源供给则是支撑月面设施长期运行的关键基础。

实现长期、稳定、可靠的能源供给体系,是月球资源开发利用与基地建设面临的核心挑战之一^[6]。月球

距离地球约 38 万 km,能源运输成本极高,且其表面缺乏大气与磁场的保护,使地球能源模式难以直接移植。目前可用于月球的能源形式主要包括光伏发电、聚光太阳能发电、放射性同位素核电池、太空核反应堆、热电发电技术等,各类技术均存在一定的优势与局限^[7]。光伏发电可直接利用月面太阳辐射,但受制于无光照的月夜期;聚光太阳能发电结合热机循环与月壤储热实现热电转换^[8],但在真空环境下的散热问题仍有待突破;放射性同位素核电池依赖同位素衰变放热与热电材料进行发电,可实现全时段供电且寿命较长,但其能量密度有限,并存在放射性安全风险,需远离人类活动区域^[9];太空核反应堆虽被视为理想的太空能源^[10],但因需搭载厚重的屏蔽材料及远距离输电等问题,在地月运输与月面部署方面仍面临较大挑战;基于月表昼夜温差及月壤深处温差的热电发电技术,目前因热电材料无法在 90~400 K 全温域内实现

收稿日期:2026-08-08 修回日期:2026-08-26 网络出版日期:2026-09-11

作者简介:马楷涛(2002—),男,博士生(导师:谢和平院士)。研究方向:深地科学与绿色能源. E-mail:2552211003@mails.szu.edu.cn

* 通信作者:谢和平,中国工程院院士, E-mail: xiehp@scu.edu.cn

高效转换且发电效率较低,若要满足大规模用电需求仍需开展大量研究与工程实践^[11-14]。综合权衡各类能源形式的技术成熟度与工程适配性,原位太阳能凭借其资源可再生性、获取便捷性及系统可靠性,仍是现阶段最具现实可行性的月面能源解决方案^[15]。其中,光伏发电因构型简洁、无运动部件、免维护周期长且能直接耦合月表高通量太阳辐射,成为该方案的核心技术载体。月球近似真空的环境使太阳辐射几乎无大气衰减,为光伏阵列实现高效光电转换提供了天然优势,因此光伏发电已确立为国际月球探测任务能源系统的主流配置路线^[16]。

尽管光伏技术在地面能源系统中已趋于成熟,但月球特殊且极端的环境条件仍对其长期稳定运行提出严峻挑战。月表缺乏大气和全球性磁场保护,光伏系统长期受到空间辐射、剧烈热循环及微陨石撞击等环境作用,可能引起材料性能退化和结构耐久性下降。在与本文构型设计直接相关的环境因素中,月尘污染是影响月面光伏系统长期服役的重要问题之一^[17]。月尘具有较强的静电黏附性和磨蚀性^[18],易附着于光伏组件表面并造成光学遮挡与表面损伤,从而降低组件输出性能^[19];未来月面着陆、巡视及工程活动还可能进一步加剧近地月尘扰动。与此同时,月球极区特殊光照条件与月震环境分别对高位光伏阵列的受光能力和结构稳定性构成约束。月球南极部分高地具有较高的长期光照潜力,是未来月面能源设施的重要候选区域^[20],但极区太阳高度角长期较低,环形山、山脊及局部起伏地形容易形成遮挡,影响近地光伏阵列的有效受光时间;已有研究表明,适当提高设备离地高度可在部分候选区域改善太阳可见性。另一方面,提高阵列布置高度虽然有利于降低近地月尘暴露并改善局部光照条件,但也会增加支撑结构长细比及其对横向扰动的敏感性。月震具有衰减缓慢、持续时间较长等特点,当其频率成分与高位细长结构的固有频率接近时,可能引起动力响应放大,并增加杆件变形、连接松动及基础失稳的风险^[21]。因此,高位布置所带来的环境适应性收益需要与结构强度、锚固稳定性及抗震能力协同考虑。现有研究多集中于光伏材料、防护涂层及主动除尘等方面,而针对阵列离地高度、支撑构型及其与月尘、地形光照和月震动力环境之间协同关系的研究仍相对不足。

基于上述问题与研究空白,本文提出一种以高位布置和支撑结构优化为核心的月基太阳能立式电站构想。通过调控光伏组件离地高度并设计立体化支撑构型,一方面降低近地高尘环境下的月尘暴露与沉积风险;另一方面减弱极区低太阳高度角条件下近场地

形及相邻设施遮挡,改善光照可达性。同时,针对高位细长结构在月震扰动下可能产生的动力响应问题,引入固定锚固与被动减振措施,以提高系统长期服役的结构稳定性与可靠性。通过上述设计,形成兼顾月尘防护、光照获取、空间利用与结构安全的月面光伏系统构型,为未来月球基地能源设施的工程化部署提供参考。

1 月球特殊环境对光伏电站的影响

月球特殊的空间位置与表面环境对光伏电站的能源获取和长期服役构成了多重约束。极区虽具有较好的长期光照潜力,但低太阳高度角使光伏阵列易受局部地形遮挡;与此同时,月面带电月尘沉积会影响组件透光与发电性能,月震则对高位支撑结构及基础稳定性提出动力安全要求。此外,空间辐射、极端温度循环、真空环境及微陨石撞击等因素还会持续影响光伏材料、连接部件与结构系统的耐久性。这些环境因素共同构成月面光伏阵列构型选择、高度确定及结构设计的重要边界条件。

1.1 极区低太阳高度角下的地形遮挡

月球极区具有独特的太阳光照条件,是未来月球基地及光伏能源系统的重要候选部署区域。月球自转轴相对于黄道法线的倾角仅约 1.5° ,远小于地球约 23.3° 的黄赤交角,使极区太阳在全年运行过程中长期接近地平线。受此影响,部分环形山内部及局部洼地长期处于永久阴影,而部分环形山缘、山脊和局部高地则能够获得较长时间的太阳照射。Speyerer 和 Robinson^[20]基于月球勘测轨道飞行器相机多时相影像研究发现,月球极区存在年光照率接近 94% 的局部区域,其最长连续遮蔽时间仅约 43 h。此类高光照区域邻近永久阴影区,同时具有较稳定的热环境和较长时间获取太阳能的能力,因此被认为是长期月面驻留及太阳能设施的重要候选场址。

然而,极区良好的年平均光照条件并不意味着光伏阵列能够持续获得太阳辐射。由于太阳高度角较低,太阳视线与月表近似平行,环形山缘、山脊及局部起伏均可能成为太阳光传播路径上的障碍,使地形阴影沿水平方向延伸较远,因此极区光照条件对局部地形和设备离地高度尤为敏感。Bussey 等^[22]利用 Kaguya 激光高度计地形数据研究月球南极光照条件,发现 Shackleton 环形山附近部分高地具有较高的长期光照率,其中两处相距不足 10 km 的区域综合光照时间可达到月球年的 94%。Mazarico 等^[23]进一步利用月球勘测轨道飞行器激光高度计地形数据开展长期模拟,结果表明,Shackleton 环形山边缘部分位置每年可连续

受光约 240 d,最长连续完全黑暗时间约 1.5 d;同时研究指出,对于部分原本具有良好光照条件的区域,仅约 10 m 的高度提升即可明显改善平均光照率并缩短连续阴影时间。这表明极区光照可利用性不仅取决于宏观选址,还受到阵列离地高度与近场地形之间几何关系的显著影响。

光伏组件高度对极区受光条件的影响在更高分辨率地形研究中得到进一步验证。Gläser 等^[24]基于月球勘测轨道飞行器激光高度计构建的 20 m/pixel 数字地形模型,对 Shackleton 与 de Gerlache 环形山之间的 Connecting Ridge 开展覆盖约 19 a 月球进动周期的光照模拟;结果表明,在其筛选出的有利位置上,组件离地 2 m 时累计光照时间比例为 92.27%,提高至 10 m 后达到 95.65%,提高约 3.38 个百分点,且最长连续阴影期通常仅为 3~5 d;其分析还表明,组件高度增加能够越过部分近场地形形成的局部地平线,从而减少太阳受到遮挡的时间。

针对光伏发电本身,Sun 等^[25]进一步将数字高程模型、太阳辐射分布及光伏系统参数相结合,对月球南极光伏发电潜力进行了区域尺度评估。该研究将年发电量超过 3 000 kW·h/m² 的区域定义为杰出发电潜力区域。模拟结果显示,当光伏组件由月表高度 0 提升至 10 m 时,该类区域面积由约 2.7×10⁵ m² 扩大至 4.2×10⁶ m²,约为原来的 15.6 倍;同时,连续休眠时间小于 3 d 的区域面积也由 1.4×10⁴ m² 扩大至 2.2×10⁵ m²。上述研究从光照时间与实际发电潜力两个层面共同表明,在极区低太阳高度角条件下,适当提高光伏组件离地高度能够减弱近场地形遮挡、扩大高光照和高发电潜力区域。因此,除场址选择与组件姿态优化外,离地高度亦可作为月球极区光伏系统设计的重要参数,并为本文提出的高位立式光伏阵列提供光照环境方

面的设计依据。

1.2 月尘沉积与静电作用

月尘主要由长期微陨石撞击和月表物质破碎形成^[26],通常具有粒径细、棱角尖锐、易带电和附着性强等特征。这些特性使月尘对月球表面装备构成显著威胁,特别是对光伏发电系统而言,月尘的沉积会导致太阳能电池板效率大幅下降、维护成本增加,同时月尘自带的静电荷可能引起电弧放电而损坏设备,并最终影响月球基地的能源可持续性。

阿波罗 17 号宇航员尤金·塞尔南和哈里森·施密特在日出前或日落后的低太阳高度角下观察到地平线方向出现的明亮水平光带或光晕及径向条纹^[27]。经研究发现,这些现象是由高度约数米至数十米、受静电抬升的细小月尘对太阳光的向前散射所致。静电抬升使尘埃颗粒在光伏阵列表面反复沉积和再悬浮,导致持续的遮挡和光学性能退化,同时月尘的静电效应会放大其对光伏板的附着能力,尤其在光照区与阴影区的电位差下,尘埃颗粒易于带电并吸附到带相反电荷的表面。综合阿波罗与 Surveyor 任务的月尘观测、嫦娥探测任务的表面污染记录、LADEE/LDEX 对月球高空尘埃的原位探测及相关静电抬升与尘埃输运模型研究,月尘在不同扰动机制和粒径条件下可表现出近地迁移、静电抬升、弹道输运及高空稀薄尘云等不同活动特征。鉴于现有观测尚不足以建立统一、连续的月尘浓度-高度分布关系,本文依据月尘主要来源、动力机制及典型活动尺度,将其概括为表 1 所示的工程示意分区。表 1 中,高度区间用于表征不同机制的主要影响尺度,并非严格的物理分界,其具体分布仍受场址地形、光照条件、等离子体环境及月面工程活动等因素影响,需结合原位监测与月尘输运模型进一步校核。

表 1 用于工程概念分析的月尘垂向活动机制及示意尺度^[28-31]

Tab. 1 Vertical activity mechanisms and indicative scales of lunar dust for engineering concept analysis ^[28-31]				
区间	高度/m	主导机制	典型粒径范围	分布特征与浓度变化
近地层	0~2	机械扰动(着陆、车轮、行走、气流冲击)	微米至百微米级	机械扰动可形成局部高浓度扬尘;较大颗粒主要活动于近月表并快速再沉积,其空间分布受扰动强度、粒径及距离影响
低层电抛升层	2~10	光照—阴影边界附近静电场作用	微米级	受太阳辐射和等离子体环境控制,细颗粒可发生间歇性抬升、迁移与再沉积
高层电抛升区	10~30	晨昏线及局部强电场作用	亚微米、微米级	尘粒可经历弹道式抛升与再沉积,其活动尺度受粒径、太阳入射条件及局部电场环境影响
暂态高空层	> 30	微陨石撞击抛射	以亚微米颗粒为主	尘埃数密度较低,主要表现为微流星体撞击抛射形成的稀薄高空尘云

表 1 所列区间反映了不同月尘来源及动力机制下的典型活动尺度。近地层月尘主要受着陆器喷流、车辆行驶及人员活动等机械扰动影响,可在扰动源附近形成局部高浓度扬尘,其中较大颗粒主要活动于近月表并较快再沉积,其空间分布受扰动强度、粒径及距

扰动源距离等因素控制。此类月尘沉积于光伏组件后,易造成入射光遮挡及表面磨蚀,是月面工程活动条件下需要重点考虑的污染来源。

低层电抛升层主要受光照—阴影边界附近静电场及等离子体环境影响,微米级细颗粒可发生间歇性

抬升、迁移与再沉积,并可能通过静电作用附着于光伏组件表面,对组件透光性能产生持续影响。随着颗粒尺度进一步减小,在晨昏线或局部较强电场条件下,亚微米至微米级尘粒可能获得更大的垂向运动尺度,并经历弹道式抛升与再沉积过程,其活动范围受粒径、太阳入射条件及局部电场环境共同影响。

数十米以上的高空尘埃则主要与微流星体撞击抛射有关,整体数密度较低,可形成稀薄的月球高空尘云。相较于近地机械扬尘和静电迁移尘,该类高空尘埃对光伏组件的直接沉积风险相对有限,但仍构成月面设备长期暴露环境的一部分。总体而言,不同月尘来源在粒径、带电状态及运动尺度上存在明显差异,表 1 所示高度区间主要用于工程概念分析,并非严格的物理分层。对高位光伏阵列而言,提高组件离地

高度有助于降低其对近地机械扰动尘和部分静电迁移尘的直接暴露,但具体防尘效果仍需结合场址环境、工程活动强度及月尘输运模型进一步评估。

1.3 月震环境与结构响应

月球月震是指月球内部或表面发生的地震活动。月震研究莫基于 1969 年至 1977 年的阿波罗被动地震实验网络^[32],4 台长寿命地震仪共记录约 12 500 个可识别事件,形成了迄今唯一可靠的月震目录。随着月球基地建设计划的推进,月震已成为基地选址、结构设计以及长期驻留安全评估的核心制约因素之一,直接影响工程可靠性与风险管理。根据阿波罗目录及后续重分析,月震通常分为深源月震、热月震、撞击事件和浅源月震 4 类,其观测特征与立式结构设计关注点见表 2。

表 2 月震分类及其规律^[33-34]

Tab. 2 Classification and characteristics of lunar seismic events^[33-34]

类型	震源深度	震级范围	阿波罗目录记录数量	主要成因	特点与危害评估
深源月震	约 600~1 200 km	1.3~3.0	约 7 082 次	地球潮汐力作用	数量最多,周期性明显,危害较小,主频范围约为 0.1~1.0 Hz
热月震	月表或近表层	极小	超过 12 000 次	昼夜温差导致热应力变化	能量极小,仅在近台站可检测,规律性极强
撞击事件	月表	不等(局部较高)	约 1 743 次(陨石撞击)	陨石或人工物体撞击	非内源震动,局部能量大,但无持续危害
浅源月震	约 50~220 km	最大约 5.5 级	仅 28 次	月球内部构造应力释放	能量最大,潜在危害最强,持续时间长

在整体震级普遍较低的前提下,月震仍对月球表面工程结构构成不容忽视的威胁。其根本原因在于月球内部高度干燥、缺乏类似地球上大量水分和熔融岩浆等能够有效吸收地震波并耗散振动能量的介质,导致月震一旦发生,振动衰减极为缓慢,持续时间往往可达数十分钟,甚至接近一小时^[35]。因此,月球表面的永久性结构设计不仅需要评估月震作用下的瞬时动力响应,还必须系统考虑长时间反复振动所引发的材料疲劳累积、结构性能退化及共振放大等问题。

月震活动是月球基地结构安全面临的关键动力学环境载荷之一,其震源深度与能量释放机制的差异直接决定了致灾效应的多样性。不同类型月震对立式光伏结构的影响与其发生频次、能量水平和频率成分有关。深源月震单次能量相对较低,但发生较为频繁,可构成结构长期运行过程中的背景扰动;浅源月震发生次数较少,但能量水平和地表运动幅值可能更高,是高位细长结构需要重点考虑的极端动力事件。对于本文提出的立式光伏电站,较大的支撑杆长细比可能导致侧向变形和振动响应放大,并增加杆件疲劳、连接松动及阵列姿态偏移的风险。因此,后续设计需同时考虑基础锚固、结构固有频率控制和附加减振措施。

1.4 空间辐射环境及其影响

月球表面缺乏大气和全球性磁场屏蔽,光伏阵列将长期直接暴露于银河宇宙射线、太阳粒子事件和太阳风等空间辐射环境中。不同辐射源在粒子组成、能量水平及作用时间尺度上存在明显差异:银河宇宙射线具有高能、持续作用的特点,太阳粒子事件表现为突发性高通量辐照,而太阳风则以持续的低能带电粒子作用为主。上述辐射环境可通过位移损伤、电离损伤、表面充电及材料溅射等途径影响光伏组件的长期性能,其主要特征及影响机制见表 3。

由表 3 可知,不同辐射源对光伏系统具有不同的作用方式。银河宇宙射线和太阳粒子事件中的高能粒子可在光伏电池材料中产生位移损伤和电离效应,并可能引起盖片透过性能及电池输出特性的长期退化,其中太阳粒子事件还具有短时间内辐照通量显著增加的特点;太阳风能量相对较低,但长期作用可引起组件表面充电、材料溅射及表面性质演化。辐射损伤程度与电池材料、防护层及屏蔽条件、累积辐照剂量和任务周期等因素密切相关。因此,空间辐射成为月面光伏组件材料选择与长期服役设计的重要环境约束。鉴于本文重点研究高位立式阵列的构型与结构稳定性,辐射环境仅作为组件选型和系统长期服役的边

表 3 月表辐射分类及其规律^[36-37]

Tab. 3 Classification and characteristics of lunar surface radiation^[36-37]

辐射类型	来源与特点	典型能量范围	发生频率与持续时间	对光伏电池的主要影响
银河宇宙射线	来自太阳系外的高能质子、氢核和重离子,受太阳活动调制	MeV 至 TeV 量级	持续存在,随太阳活动周期变化	位移与电离损伤;影响程度取决于材料、屏蔽和累积通量
太阳粒子事件	太阳耀斑或日冕物质抛射产生的高能粒子,以质子为主	可达 GeV 量级	突发,持续数小时至数天	短时高通量可增加位移损伤、电离效应和充电风险
太阳风	太阳持续释放的低能等离子体,包括质子、电子和α粒子	约 0.5~10.0 keV	持续存在,随太阳活动与局部地区等离子体环境变化	表面充电、材料溅射与长期表面性质演化

界条件,具体性能衰减仍需结合辐照试验及寿命模型进一步评估。

1.5 极端温度与热循环效应

月表温度随纬度、地形、局部时刻和材料热物性显著变化;赤道附近典型昼夜温度可由约 127℃降至约-183℃,温差最高达 310℃,且昼夜各持续约 14 个地球日^[38]。这种剧烈热循环源于月球无大气层保护,导致白天直接受太阳辐射快速升温,夜晚仅靠辐射向太空散热。而高温会显著降低光伏阵列电池转换效率,并加速材料老化与热应力损伤;低温则使材料变脆,电池性能衰减;反复热胀冷缩会产生微裂纹,长期累积将降低阵列寿命与输出稳定性。巨大温差引起支撑结构、机械机构的热膨胀与收缩,导致结构变形、翘曲、连接松动或阵列对准偏差;反复热循环引发材料疲劳与裂纹,尤其在真空环境中局部温度梯度大,易产生热冲击;机械部件在低温下润滑剂可能凝固,在高温下发生膨胀卡阻,严重影响系统可靠性和整体稳定性。因此,为应对这些挑战,月表光伏电站需选用低热膨胀系数材料,配备被动或主动热控系统,并通过热真空循环测试确保整体结构的长期耐久性。

1.6 其他环境因素影响

除前述主要环境因素外,月面光伏系统还受到长周期昼夜交替、高真空散热及微陨石撞击等环境因素影响,这些因素也对光伏系统构成一定威胁。

月球自转周期约为 29.5 个地球日,在月球低纬度区最长有连续约 14.75 个地球日的漫长月夜。在此期间,光伏电站因无法捕获太阳辐射而停止发电,为实现持续供电,必须配备大容量能源存储系统或将电站部署在月球高纬度地区,以显著延长日照时间、缩短黑暗期。

月球表面处于高真空环境,无大气对流与传导散热途径,热量只能通过辐射形式向太空散发。白天在强烈太阳辐射下,光伏阵列温度迅速升高,若热量无法及时散逸,将导致电池工作温度过高、转换效率显著下降^[39]。因此,需采用高效辐射散热涂层、多层隔热组件或主动热控措施,确保阵列维持在适宜温度区间。

此外,月球表面频繁遭受微陨石高速撞击,这些微陨石虽多数直径仅为微米至毫米级,但动能巨大,撞击光伏板时会在表面形成坑洼、裂纹甚至穿孔,直接破坏电池结构、降低发电面积并增加漏电风险^[40]。长期累积将显著缩短阵列寿命。为减轻此影响,需在光伏板表面加装耐冲击防护层,以提高抗微陨石撞击能力。综上,月面光伏系统需同时应对极区低太阳高度角下的地形遮挡、月尘污染、月震动力响应以及空间辐射、极端热循环和微陨石撞击等多重环境约束。这些因素共同影响阵列的光照获取、组件长期耐久性 及支撑结构安全,并构成后续既有月面立式光伏方案比较及高位阵列构型与结构参数设计的重要环境依据。

2 月面光伏阵列结构研究进展

在早期探月任务中,光伏发电已成为月球表面最成熟、最可靠的能源供给形式之一。以美国阿波罗计划及中国嫦娥系列探测任务为代表,这些任务普遍采用传统的刚性或折叠式太阳能阵列结构。例如,嫦娥四号着陆器搭载的折叠式光伏帆板在月球背面实现了长期稳定运行,充分验证了光伏技术在真空、高辐照、强温差等极端月表环境下的初步可行性。然而,随着月球任务由短期探测向长期驻留和持续运营转变,光伏系统面临的关键限制因素逐渐显现,其中月尘沉积问题尤为突出。研究表明,月壤颗粒具有粒径分布宽、形貌尖锐、表面带电性强等特征,在微重力和太阳风作用下易发生悬浮、迁移并附着于光伏表面。这种高黏附性尘埃会显著降低入射光透过率,引发光吸收遮挡、表面磨损加剧及散射损失等问题^[41]。阿波罗任务期间宇航员观测到的地平线光辉现象,从侧面揭示了月尘在电磁力驱动下的悬浮与再沉积机制,进一步凸显了尘埃对光伏系统长期稳定运行的潜在威胁。

美国国家航空航天局(NASA)率先提出一种 10 kW 级可重新定位的悬挂式太阳能电池阵列概念,如图 1^[42]所示。该方案采用成对的柔性太阳能电池毯,自由悬挂于水平横臂之下,横臂由垂直、细长的可伸缩桅杆支撑,整体结构固定于可展开的三脚架基座上。该

设计充分利用月球低重力环境,通过重力作用实现阵列的自然展开与张紧,从而显著简化了部署机构并降低了系统质量与体积需求。同时,NASA以10 kW级光

伏阵列系统为基础进行拓展研究,通过调整光伏板面积及其长宽比进行了系统性的计算与方案设计,旨在实现1 MW级的功率需求^[43]。

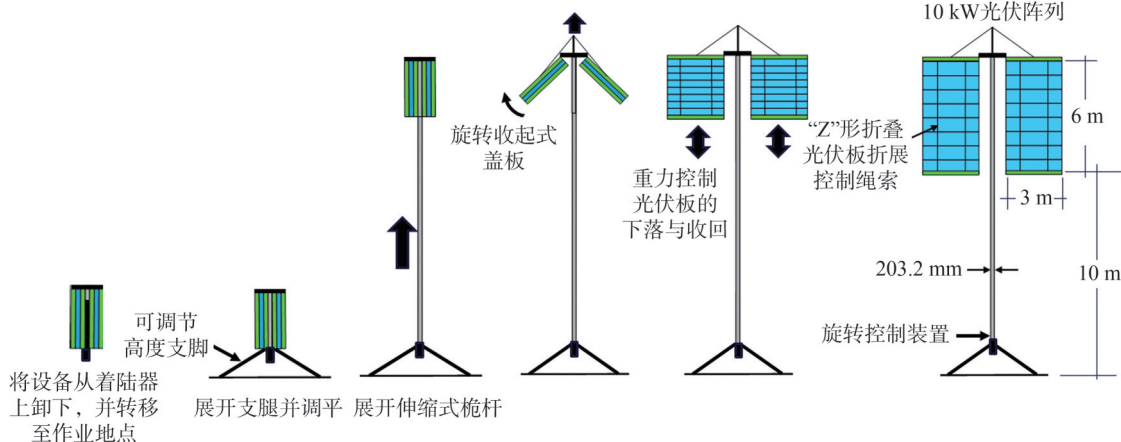


图1 NASA 10 kW可重新定位太阳能阵列^[42]
Fig. 1 NASA's 10 kW relocatable solar array^[42]

尽管NASA提出的可重新定位悬挂式太阳能阵列在质量效率与部署简化方面具有显著优势,同时可以进行拓展设计,但该方案在长期固定运行和大规模能源供给方面仍存在若干结构性与工程性不足。在结构安装方面,可展开三脚架主要依赖自重与几何稳定性,在月球低重力环境下抗扰能力有限,缺乏与月壤形成可靠力学耦合的深层锚固,更适用于临时或可撤收能源单元,难以满足长期、固定式能源基础设施需求。在动力学与振动控制方面,悬挂式柔性电池毯不可避免地引入低频摆动模态,由于月球真空环境下阻尼不足,振动衰减缓慢,因此易引发结构疲劳、部件磨损及输出功率波动,而方案中尚缺乏针对月球环境的有效阻尼设计。在系统扩展与基础设施集成方面,该悬挂式独立单元更适合作为分散或应急电源,在功率规模提升、阵列扩展及与基地其他设施协同方面受限,且在拓展为长期固定式基地能源系统方面具有一定的挑战。

此外,Folditure公司基于其专有的金字塔铰链技术,开发了新型10 kW月球表面太阳能电池阵列方案,包括Sunflake太阳能电池阵列及超紧凑三脚架塔,如图2^[44]所示。该方案采用稳定的基础支撑结构,可适应最大约15°的地形倾角,并通过将阵列整体抬升至距月表约10 m的高度,以减弱地形遮挡对发电性能的影响。金字塔铰链作为一种受折纸启发的机械展开结构,使平面化组件在展开后形成刚性三维构型,为高展开比光伏结构提供了新的工程实现路径。随后,在NASA SBIR项目支持下,该技术进一步拓展至50 kW级Sunflake XL阵列^[45],体现出良好的设计可扩展性。

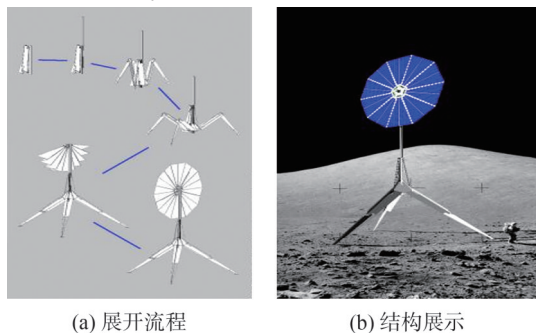


图2 Sunflake太阳能阵列及超紧凑型三脚架塔^[44]
Fig. 2 Sunflake solar array and ultra compact tripod tower^[44]

尽管Folditure公司基于金字塔铰链技术提出的Sunflake系列太阳能电池阵列在高展开比、结构紧凑性及一定程度的地形适应性方面展现出显著优势,但从月球基地长期运行与大规模能源基础设施的工程需求出发,该设计仍存在若干值得关注的局限性。在结构安装方面,Sunflake阵列仍以三脚架塔式基础为核心支撑形式,缺乏与月壤形成深度力学耦合的锚固机制,这一特征使其难以直接承担月球基地中长期、不可移动式能源骨架的角色。从长期可靠性角度看,金字塔铰链作为多自由度展开机构,在赋予系统高度可展开性的同时,也引入了多个潜在的结构薄弱环节。复杂的铰链与锁定机制在月球真空、高低温循环及月尘环境下,可能面临润滑失效、磨损加剧及卡滞风险,其长期服役可靠性仍有待系统性验证。此外,阵列整体抬升至距月表约10 m高度,却未配置相应的动态减振与抗扰措施,这会放大结构对月震等低频扰动载荷的响应幅度,可能威胁阵列的姿态稳定与发电输出的连续性。

既有月面立式光伏概念重点解决轻量收纳、快速

展开、位置调整和高位受光等问题,为基地级电源提供了重要技术基础。然而,面向长期固定运行,还需要对阵列构型与基础锚固、杆件静力控制、月震动力响应及维护策略联合评价。本文据此提出3类固定式立体阵列,并以单杆支撑方案开展可追溯的初步结构计算,同时将高位阵列、固定锚固和候选减振装置纳入同一概念框架,建立可供后续场址光照、月尘沉积和结构动力分析共同调用的系统构型,识别杆件尺寸、锚固长度、固有频率和阻尼参数之间的约束关系。

3 月基太阳能立式电站构型与结构设计

在对前述环境约束与既有方案比较的基础上,本文面向长期月面供电任务提出月基太阳能立式电站构想。系统由高位光伏阵列、可展开/跟踪机构、细长支撑杆、月壤锚固基础和可选减振装置组成,构型设计首先回答组件如何布置与受光,随后再由强度、稳定和动力分析确定支撑尺度。

该结构体系的总体设计理念围绕以下两个核心目标展开:其一,通过提升光伏阵列的布置高度,降低其对着陆器喷流、车辆运行及人员活动等形成的近地机械扰动尘的直接暴露,同时改善极区低太阳高度角条件下的局部受光条件;其二,利用立式空间布局实现光伏阵列的垂直分布,在有限占地条件下显著提高单位月表面积的光伏布置能力,从而提升系统整体发电效率与功率密度。此外,针对月球表面低重力、高刚性地表及月震等环境特征,在结构设计中引入固定锚固与抗震阻尼协同作用的整体构型思路,以增强系统对月震与动态载荷的适应能力。通过将光伏阵列、支撑结构与阻尼装置进行一体化设计,该立式光伏结构体系在满足高位受光需求的同时,兼顾了长期运行条件下的结构稳定性与安全性,为月球基地能源系统提供了一种具有工程可行性的创新解决方案。

3.1 立式光伏阵列构型设计

采用立杆式高位布置,并提出幡旗式、树冠展开式和风车式3类阵列。三者分别侧重于缩短有效支撑长度、多层空间布置和辐射对称展开。比较了其几何布局、受力路径与适用场景,但不直接给出未经光照模拟和月尘试验验证的效率增益,折叠、驱动和锁定机构也作为后续工程细化内容。

3.1.1 幡旗式构型

幡旗式结构的设计灵感源于古代幡旗竖立展开的形态特征。传统幡旗通过较大的展开面积和高位布置形式增强视觉识别性,这种高位展开、扩大覆盖范围的空间特征为光伏阵列布局提供了启发。如图3所示,将光伏阵列整体抬升并固定于立柱结构之上,形

成竖向高位布置形式。该布局通过提升光伏组件离地高度,使其与近月表主要机械扰动源保持一定垂向距离,降低组件受到局部扬尘直接沉积的风险,从而减缓月尘沉积对发电性能的影响。不同于传统悬挂式“幡旗”构型,本文对支撑体系进行了结构优化:光伏组件不再采用顶部悬挂方式,而是将支撑位置调整至组件垂向几何中心,通过减小组件重心与支撑点之间的偏移,降低支撑杆底部附加弯矩。在满足阵列离地高度需求的同时,该设计缩短了支撑杆有效长度,降低杆件自重及材料需求,并进一步改善结构抗倾覆性能。此外,结构集成转角与仰角双自由度驱动机构,可根据太阳方位角和高度角变化调整组件姿态,提高不同光照条件下的太阳辐照接收能力。

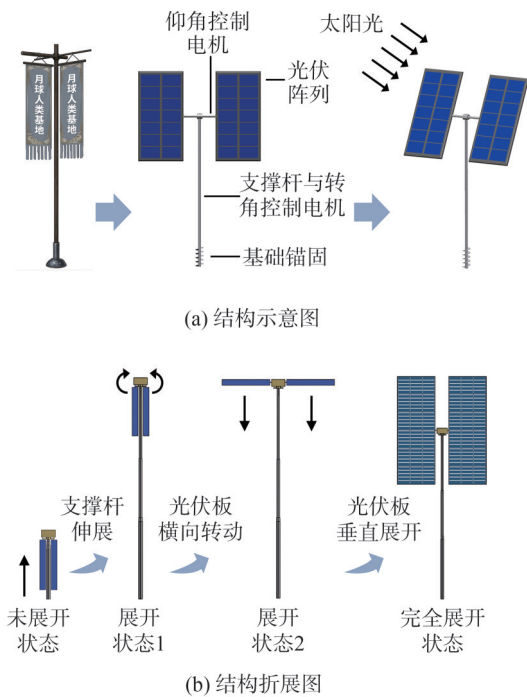


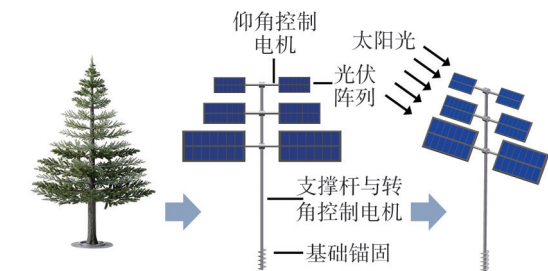
图3 幡旗式光伏阵列构型

Fig. 3 Pennant-type photovoltaic array configuration

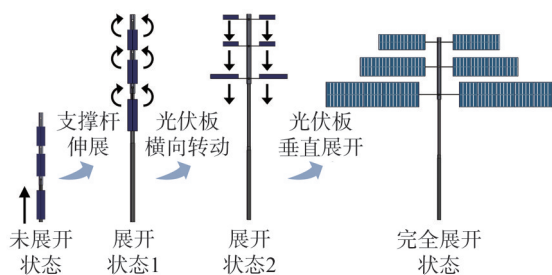
3.1.2 树冠展开式构型

树冠展开式构型受仿生学思想启发,借鉴树冠结构中叶片多高度、多方向展开的空间布局特征,如图4所示,构建一种多层级、立体化的光伏阵列形式。在月面可利用空间受限的条件下,阵列通过将垂直方向分层布置与水平方向辐射式展开相结合,提高光伏组件布置密度与有效受光面积,从而提升单位占地面积的能源获取能力,实现空间利用效率与能量获取能力的协同优化。此外,多层分级结构有助于增强系统对低太阳高度角入射辐照的接收能力,并通过配置太阳跟踪控制电机,使光伏阵列能够根据太阳高度角变化调整姿态,提高复杂光照条件下的能源获取水平。在具体结构实现上,每块光伏组件均以其几何中心轴作为

单点支撑,使组件受力更加均衡,同时减少额外支撑构件数量,在降低结构质量的同时兼顾阵列刚度与运行稳定性。



(a) 结构示意图



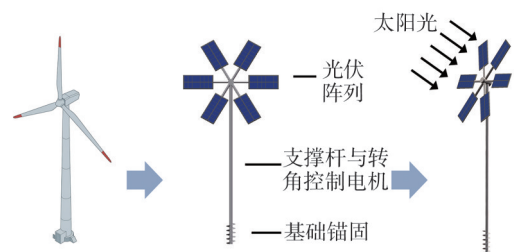
(b) 结构折展图

图 4 树冠展开式光伏阵列构型

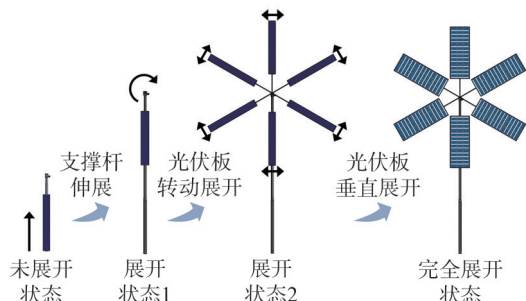
Fig. 4 Canopy-deployment photovoltaic array configuration

3.1.3 风车式构型

风车式构型借鉴传统风车叶片的辐射对称几何布局形式,如图 5 所示,将多块光伏组件作为“叶片”围绕



(a) 结构示意图



(b) 结构折展图

图 5 风车式光伏阵列构型

Fig. 5 Windmill-type photovoltaic array configuration

中心旋转轴呈辐射状布置,形成规则对称的旋转式立体阵列结构。该布局通过多方向展开增加光伏组件的有效受光面积,并利用结构对称性改善整体受力均衡,提高复杂光照条件下的太阳辐照获取能力。在月球低纬度区域及昼夜过渡区域,该构型通过多方位组件协同布置,有助于接收不同方位角的低高度太阳辐照。同时,中心旋转节点的设计使阵列能够根据太阳高度角变化调整组件姿态,提高不同光照条件下的能量获取水平,实现多方向辐照环境下的布局优化。各光伏组件同样采用以几何中心轴为单点支撑的受力方式,使组件具有明确的受力路径,并在减少支撑构件数量的同时兼顾结构稳定性、质量控制与抗振需求。

本文提出的 3 种立式光伏构型可根据具体任务场景与工程约束条件进行针对性选型或组合部署。例如:在极区近似连续日照环境中,可优先采用有利于提升发电连续性的构型;在低纬度地区,则更侧重于满足峰值功率与单日总发电量最大化的需求;而在地形起伏显著或地质条件复杂区域,则需优先考虑结构适应性与锚固稳定性的优化配置。通过面向任务特征的构型匹配与系统集成,可实现不同应用场景下能源获取能力与结构可靠性的协同提升。3 种构型的共同设计目标是在月昼期间实现对太阳辐射的高效捕获与能量稳定转换,在复杂环境扰动与长期服役条件下保持可靠运行,从而为月球基地持续运行提供稳定且可靠性高的能源支撑。

3.2 高位布设与支撑设计约束

由前述月尘活动特征可知,不同来源和粒径的月尘具有不同的垂向运动尺度,其中,着陆器喷流、车辆行驶、人员活动及设备运行等机械扰动产生的扬尘对近月表区域影响尤为直接,较大颗粒在抛射后主要发生近地迁移和再沉积,而细颗粒还可能在静电作用下进一步迁移。因此,在未来月球基地工程活动逐渐增加条件下,近地布置的光伏组件将更容易受到局部扬尘沉积及反复扰动的影响。提高组件离地高度,可增大其与主要近地扰动源之间的垂向距离,从空间布局上降低机械扬尘直接沉积和再污染的风险。由于月尘活动同时受到场址位置、光照条件、等离子体环境及工程活动等因素影响,高位布设在本文中主要作为降低近地月尘暴露风险的被动结构措施。

除月尘因素外,极区低太阳高度角条件下的地形遮挡也是高位布设的重要依据。前述研究表明,随着设备离地高度增加,部分月球南极候选区域由局部地形造成的太阳遮挡能够得到缓解,10 m 尺度下长期光照条件及高光伏发电潜力区域范围均表现出明显改善。因此,提高阵列高度不仅有助于降低近地月尘扰

动的直接影响,还可改善极区太阳辐射的可达性,使离地高度成为月面光伏系统环境适应性设计的重要参数。

综合近地月尘暴露与极区光照条件,本文将10 m作为高位立式光伏阵列的概念设计参考高度。该高度并非由单一环境因素确定,而是综合考虑降低月尘污染风险、改善低太阳高度角条件下光照及结构部署可行性所选取的工程参考尺度。对于具体月面场址,适宜布设高度还应结合局部地形、太阳轨迹、月尘活动特征及周边工程设施分布进一步确定。与此同时,提高阵列高度也会增加支撑杆长细比、根部弯矩及结构对低频动力扰动的敏感性,并相应提高基础锚固与部署难度。因此,高位布设需要在环境适应性收益与结构安全之间进行协调。本文以10 m参考高度作为参数分析起点,并将分析范围向更高尺度扩展至30 m,以覆盖高位立式构型可能涉及的较宽高度区间,使杆件截面需求、锚固尺度及固有频率等关键结构参数随高度增加的变化趋势得到充分体现。本文将30 m仅作为参数敏感性分析的概念上限,用于识别高位化所带来的主要结构约束,并非推荐或最优布设高度。由此,后续将在10~30 m外露长度范围内开展支撑杆强度与刚度、基础锚固抗倾覆能力及结构动力特性分析。

4 月基太阳能立式电站构型的强度稳定性分析

本文结构分析定位于工程概念设计阶段,主要目的在于建立可追溯的简化力学模型,确定高位立式光伏结构的主要参数尺度,并识别支撑高度、杆件截面、基础锚固及动力特性之间的主要约束关系,而非给出最终工程定型参数。为此,将系统简化为由单桩锚固基础、薄壁圆管支撑杆和等效阵列质量组成的结构体系,并采用分阶段分析方法:首先,根据10 kW级光伏阵列的面积与质量确定上部荷载,基于弯曲、剪切、整体稳定和挠度条件分析支撑杆截面尺度;随后,利用月壤被动土压力模型估算不同支撑高度对应的锚固需求;最后,通过一阶固有频率分析识别高位结构与月震频带发生动力耦合的可能性,并给出调谐质量阻尼器的概念参数。所得结果主要用于方案比较、参数量级确定及关键约束识别,实际工程设计仍需进一步考虑连接节点柔度、月壤-锚固-上部结构耦合、局部构造与高阶动力响应等因素。

4.1 支撑杆结构设计与验算

4.1.1 设计参数与计算假设

多结太阳能电池(尤其是三结砷化镓电池)作为先进空间光伏技术已广泛应用于航空航天领域。其具

有优异的抗辐射能力与约30%的高转换效率,同时具备较长服役寿命,能够满足月球表面长期供电任务需求。本文据此选择三结砷化镓光伏电池作为月球表面10 kW级光伏发电阵列的核心发电单元。

空间环境中太阳辐照度约为 $1\,361\text{ W/m}^2$,结合典型空间用Ⅲ-V多结电池30%~34%的效率,可获得约 $350\sim 450\text{ W/m}^2$ 的理论单位面积输出功率。考虑月尘覆盖、辐射退化及长期服役不确定性等因素,工程上取保守值 300 W/m^2 作为设计参考功率密度。据此,若目标装机容量为10 kW,理论所需面积约为 33.3 m^2 ,考虑组件排布、边缘非有效面积及长期性能退化裕度,最终取所需光伏阵列面积为 36 m^2 。以目前NASA与国际上光伏单元质量密度作为参考,系统级(含支撑与封装)质量密度约为 1.5 kg/m^2 。为了保证可靠性并兼顾工程安全裕度,本文选取质量密度为 2.0 kg/m^2 作为系统级设计参考值,则光伏阵列总质量为72 kg。

4.1.2 支撑杆材料与截面参数

考虑月球低重力环境及结构长期服役稳定性,支撑结构需兼具高比强度、高比刚度及优良热稳定性,因此选用石墨/环氧复合材料(弹性模量为 $1.3\times 10^{11}\text{ Pa}$,抗压强度为1 500 MPa,抗剪强度为80 MPa,密度为 $1\,550\text{ kg/m}^3$)。

支撑杆采用薄壁圆管结构,为控制薄壁圆管截面比例并便于比较概念参数,取外径 D 与壁厚 t 比为50;局部壳屈曲仍需在后续工程设计中结合复合材料铺层、初始缺陷及热应力另行校核。截面几何参数计算如下:

$$d = D - 2t \quad (1)$$

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad (2)$$

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) \quad (3)$$

$$W = \frac{I}{D/2} \quad (4)$$

式(1)~(4)中, d 为杆件截面内径, D 为杆件截面外径, t 为杆件壁厚, A 为杆件截面面积, I 为杆件截面对中性轴的截面惯性矩, W 为杆件抗弯截面模量。

4.1.3 荷载模型与内力计算

在上部支撑结构计算中,以月表处杆-基础连接截面作为理想固结边界。该边界条件用于获得上部杆件在水平月震等效荷载作用下传递至基础的剪力和根部弯矩,并作为后续锚固抗倾覆验算的荷载输入。月球重力加速度取 1.62 m/s^2 ,Ruiz等^[46]通过概率地震危险性分析得到阿波罗17号着陆点在475 a重现期下的峰值地面加速度为 1.52 m/s^2 。鉴于月球南极尚缺乏可直接用于工程设计的场址相关地震危险性结果,本

文暂采用阿波罗 17 号场址的概率危险性分析结果作为概念参数输入,用于识别结构尺度和动力敏感性,不代表南极具体场址的设计地震动。本文系统荷载及内力计算如下:

$$m_{\text{rod}} = \rho_{\text{rod}} Ah \quad (5)$$

$$m_{\text{total}} = m_{\text{panel}} + m_{\text{rod}} \quad (6)$$

$$V_{\text{max}} = F_h = a_s m_{\text{total}} \quad (7)$$

$$N = m_{\text{total}} g_m \quad (8)$$

$$M_{\text{max}} = a_s h (m_{\text{panel}} + \frac{1}{2} m_{\text{rod}}) \quad (9)$$

式(5)~(9)中: m_{rod} 为支撑杆质量; ρ_{rod} 为支撑杆材料密度; h 为支撑杆外露高度; m_{total} 为不含地下锚固段的系统总等效质量; m_{panel} 为光伏阵列质量; V_{max} 为杆件最大截面剪力; F_h 为水平月震作用下的等效水平惯性荷载; a_s 为水平月震加速度,取 1.52 m/s^2 ; N 为杆件轴向压力; g_m 为月球表面重力加速度,取 1.62 m/s^2 ; M_{max} 为杆件根部最大弯矩。

4.1.4 支撑杆强度、稳定与挠度验算

在上述分阶段简化模型中,上部支撑杆以月表连接截面为理想固结边界,视为底端固结、顶端自由的悬臂结构,并据此进行弯曲强度、剪切强度、整体稳定性及挠度控制验算。其中,主要将杆件顶端允许侧向挠度限值作为概念设计阶段的刚度与正常使用性能控制指标,用于避免高位细长支撑结构产生过大的侧向变形,并减小阵列姿态偏移及连接部位附加变形。考虑目前尚无针对月面立式光伏支撑结构的专用挠度限值,地面钢结构服务性设计中,侧移限值通常根据结构功能和附属构件变形能力确定,并不存在统一强制值;工程实践中常采用约 $h/300$ 量级的侧移控制作为参考。本文参考常规工程结构整体侧移控制的数量级,取 $0.003h$ 作为参数分析中的控制值,较 $h/300$ 收紧约 10%,作为概念设计阶段的刚度控制条件。该取值不作为月面结构的规范性限值,实际工程设计仍需结合光伏阵列允许姿态偏差、跟踪机构精度、连接节点变形及具体任务要求进一步确定。

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{W} \leq \frac{\sigma_c}{n_s} \quad (10)$$

$$\tau_{\text{max}} = \frac{2V_{\text{max}}}{\pi Dt} \leq \frac{\tau_s}{n_s} \quad (11)$$

$$P_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 EI}{(2h)^2} \geq n_s N \quad (12)$$

$$\delta_{\text{tip}} = \frac{a_s m_{\text{panel}} h^3}{3EI} + \frac{a_s m_{\text{rod}} h^3}{8EI} \leq \delta_{\text{lim}} \quad (13)$$

$$\delta_{\text{lim}} = 0.003h \quad (14)$$

式(10)~(14)中: σ_{max} 为杆件最大弯曲正应力; σ_c 为材

料抗压强度; τ_{max} 为杆件最大剪应力; τ_s 为材料抗剪强度; P_{cr} 为欧拉临界荷载; δ_{tip} 为杆件顶端总侧向挠度; δ_{lim} 为顶端允许侧向挠度; n_s 为结构验算安全系数,本文取 2; E 为支撑杆材料弹性模量。基于上述 4 个控制条件计算,得到杆件直径与长度关系曲线如图 6 所示。

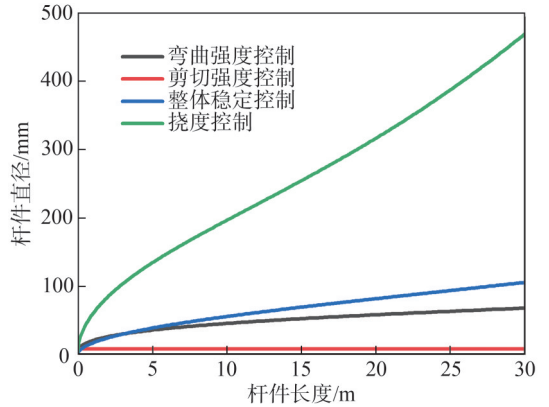


图 6 4 种设计约束下杆件所需外径随外露杆件长度的变化
Fig. 6 Required outer diameter of the support rod versus exposed member height under four design constraints

图 6 表明,在本文给定材料参数、荷载模型、安全系数及挠度控制条件下,不同验算条件对杆件截面尺寸的约束程度存在明显差异。随着支撑高度增加,挠度控制所需外径增长最为显著,并在 10~30 m 分析范围内构成杆件截面设计的主要控制条件;整体稳定条件次之,弯曲强度控制相对较弱,剪切强度对外径的约束最小。这表明,对于本文所研究的高位细长支撑结构,截面尺寸主要受结构刚度而非材料强度控制。

在 30 m 分析上限处,挠度控制条件对应的杆件外径为 470 mm。综合考虑各验算条件并在后续锚固与动力参数分析采用统一截面,本文选取 500 mm 作为典型设计外径,可覆盖 10~30 m 范围内的最不利静力控制要求,并保留一定的截面裕度。在本文采用的 $D/t=50$ 截面比例条件下,对应壁厚取 10 mm。需要说明的是,500 mm 外径主要用于概念设计阶段的参数尺度确定和不同高度工况之间的统一比较,并非针对具体高度优化得到的最小或最终工程截面;实际设计仍需进一步考虑连接柔度、局部屈曲、热应力、制造与安装偏差及实际组件荷载等因素。

4.2 锚固长度计算与抗倾覆验算

前述固结边界用于上部支撑结构的简化计算,并不意味着实际月壤-锚固体系具有无限大的平移和转动刚度。实际结构中,上部杆件产生的水平剪力和根部弯矩需通过埋入月壤中的锚固段向周围介质传递,其稳定性取决于月壤侧向反力、锚固几何尺寸及场址力学参数等因素。因此,以上部结构计算得到的根部最大弯矩作为外部需求,采用被动土压力方法估算月

壤可提供的抗倾覆力矩,以判断不同支撑高度条件下所需的锚固尺度。需要说明的是,该方法仅用于概念阶段比较支撑高度与锚固尺度之间的关系,未显式考虑锚固段侧向位移、转角及月壤非线性变形所引起的基础柔度。实际工程设计中应进一步建立杆件-锚固-月壤耦合模型,根据具体场址的月壤分层、界面特性和循环荷载条件确定基础等效刚度及承载能力。

表 4 为阿波罗计划时期实测月壤的主要物理力学参数。针对锚固段抗倾覆设计,其稳定性主要依赖于月壤提供的被动土反力矩。根据 Carrier 等^[47]的系统研究,月壤的堆积密度、黏聚力及内摩擦角均呈现随深度增大而增大的趋势。

表 4 月壤物理力学参数^[47]

Tab. 4 Physical and mechanical parameters of lunar regolith^[47]

深度/cm	堆积密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{^\circ})$
0~15	1.45~1.55	0.44~0.62	41~43
0~30	1.53~1.63	0.74~1.10	44~47
0~60	1.61~1.71	1.30~1.90	48~51

由表 4 可知,月壤的堆积密度、黏聚力和内摩擦角总体随统计深度增加而增大。考虑本文主要开展概念阶段的锚固尺度分析,为保持计算模型简洁,将锚固影响范围内的月壤等效为均质介质,并采用 0~60 cm 深度范围内的代表性参数进行计算,即月壤密度取 $1\,660\text{ kg/m}^3$ 、黏聚力取 1.6 kPa 、内摩擦角取 49° 。该处理并非对不同深度参数进行加权平均,而是采用代表性等效参数描述浅层月壤的整体承载特征,用于分析支撑高度与锚固尺度之间的基本关系。需要说明的是,实际月壤力学性质具有明显的深度依赖性和场址差异,均质化处理未考虑不同深度月壤强度变化及其对被动土压力分布的影响。因此,本文所得锚固长度主要用于概念设计阶段的尺度估算和参数比较,不作为实际工程锚固长度的最终设计值。后续设计应结合具体场址的月壤分层参数,采用分层积分、数值分析或月壤-锚固结构耦合模型进一步校核。依据准静力法下的被动土理论,抗倾覆计算如下:

$$M_p(l) \geq n_a M_{\max}(h)$$

(15)

$$M_p(l) = B \left(\frac{1}{6} K_p \gamma l^3 + cl^2 \sqrt{K_p} \right)$$

(16)

$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

(17)

$$\gamma = \rho_s g_m$$

(18)

式(15)~(18)中: $M_p(l)$ 为锚固段周围月壤被动土压力提供的抗倾覆力矩; $M_{\max}(h)$ 为上部支撑结构传递至月表连接截面的根部最大弯矩; l 为锚固段埋置长度; n_a

为锚固抗倾覆验算安全系数; B 为锚固段等效作用宽度,本文按圆管外径取 0.5 m ; K_p 为 Rankine 被动土压力系数; γ 为月壤重度; ρ_s 为月壤堆积密度。

图 7 反映了在本文等效月壤参数、准静力被动土压力模型及给定安全系数条件下,支撑杆外露高度与所需锚固尺度之间的变化关系。由图 7 可知:随着支撑高度增加,上部结构传递至基础的根部弯矩增大,相应抗倾覆需求提高,所需锚固长度亦呈增加趋势;安全系数提高时,锚固尺度进一步增大。该结果主要用于概念设计阶段识别高位支撑结构与地下锚固需求之间的尺度关系,为不同高度方案的比较提供参考,并不代表具体场址条件下的最终锚固长度。实际月面工程中,锚固能力还受到月壤分层特征、密实状态、黏聚力与内摩擦角、桩-土界面特性、安装扰动及循环动力作用等因素影响,最终锚固参数需结合场址原位探测结果,通过分层月壤模型、数值分析及模拟月壤试验进一步确定。对于螺旋桩等异型锚固形式,其叶片与月壤之间的机械啮合作用具有提高抗拔及侧向承载能力、降低所需锚固尺度的潜力,但具体效果仍需结合月壤条件和锚固构型进一步验证。

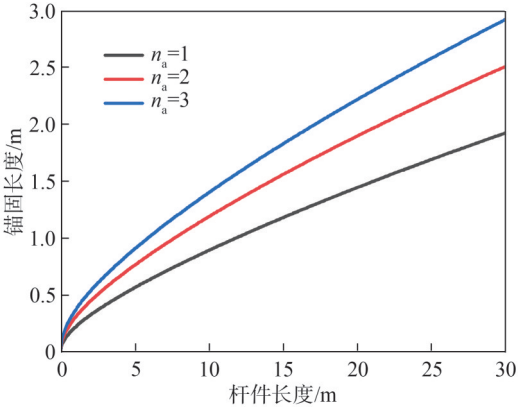


图 7 不同安全系数下所需锚固长度随支撑杆外露长度的变化

Fig. 7 Variation of required anchorage lengths with member heights for different safety factors

4.3 结构抗震分析与设计

4.3.1 结构固有频率分析

在概念动力分析中,同样沿用上部结构月表连接截面理想固结的边界假定,将系统简化为具有顶端集中质量和杆件分布质量的悬臂梁。该模型主要用于识别支撑高度变化对一阶固有频率的影响及其与月震频带发生重叠的可能性。实际月壤、锚固体系具有有限的侧向和转动刚度,基础柔度可能改变系统整体刚度及固有频率,因此本文所得频率结果应视为理想固结条件下的初步估计,后续仍需结合土、结构相互作用模型进一步校核。本文中结构的一阶侧向等效刚度

及系统一阶固有频率计算如下:

$$k_{eq} = \frac{3EI}{h^3} \quad (19)$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \quad (20)$$

$$m_{eq} = m_{panel} + \beta m_{rod} \quad (21)$$

式(19)~(21)中: k_{eq} 为等效刚度; f_1 为一阶固有频率; m_{eq} 为等效质量; β 为悬臂杆一阶振型对应的杆件等效质量系数,本文取0.23。

图8为结构一阶侧向固有频率随支撑杆外露高度的变化。由图8可知,当光伏支撑杆件长度位于10~30 m范围时,其一阶固有频率可能落入月震特征频率区间。频率范围的重叠表明,高位细长结构存在动力响应放大的可能,但是否发生明显共振及其响应幅值的大小仍取决于实际月震输入、结构阻尼和基础柔度等因素。因此,有必要进一步评估该高度范围内结构的动力响应特征,并根据目标模态和场址月震条件研究相应的减振措施。

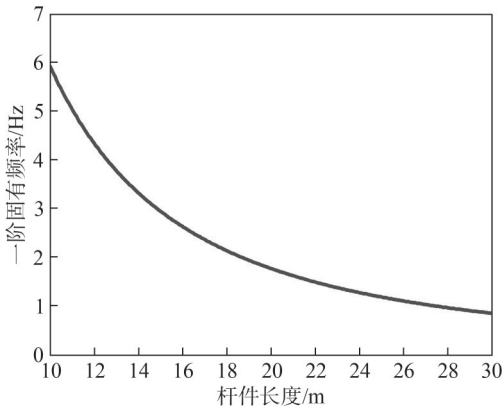


图8 结构一阶侧向固有频率随支撑杆外露长度的变化

Fig. 8 Variation of first-order natural frequencies with exposed member heights

4.3.2 结构减振概念设计

月震具有衰减缓慢、持续时间较长等特点,高位细长结构在特定频率条件下可能产生较大的动力响应,因此有必要在结构设计中考虑相应的振动控制措施。受航空航天工程对质量、可靠性及系统复杂度的约束,候选减振装置应具有构型相对简单、作用机理明确且便于长期运行等特点。调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)已在高层建筑、风机等细长结构的振动控制中得到广泛研究,其通过针对目标模态进行调谐,可在特定频率范围内降低主体结构的振动响应。鉴于本文高位单杆支撑结构以第一阶侧向模态为主要分析对象,因此将TMD作为一种候选减振措施进行概念参数设计。

TMD通过使附加质量系统的固有频率与主体结

构目标模态频率相匹配,在结构振动过程中产生相对运动,从而分担和耗散部分振动能量,有助于降低目标模态附近的结构响应。该类装置无需复杂的主动控制系统,在月面长期无人值守条件下具有潜在应用优势。但其实际减振效果仍受到月震输入频谱、主体结构阻尼、多阶模态、基础柔度,以及低重力、真空和热循环环境等因素影响,因此本文仅对其开展简化模型下的概念参数分析,如图9所示,其工程适用性仍需进一步验证。

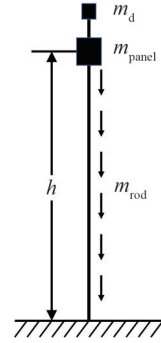


图9 TMD参数计算的简化结构模型

Fig. 9 Simplified structural model for TMD parameters calculation

TMD的主要设计参数包括布置位置、附加质量、刚度及阻尼系数。本文将光伏支撑结构简化为顶端具有等效集中质量的竖向悬臂体系,并以第一阶侧向模态作为主要控制对象。对于理想悬臂结构,第一阶模态位移在杆件顶部达到最大,因此将TMD布置于支撑杆顶部,以提高其对目标模态的控制效应。

在图9单自由度简化模型的基础上,采用Den Hartog经典理论确定TMD的理论调谐参数,计算如下:

$$m_d = \mu m_{eq} \quad (22)$$

$$r_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (23)$$

$$f_d = r_{opt} f_1 \quad (24)$$

$$\omega_d = 2\pi f_d \quad (25)$$

$$\zeta_{d,opt} \approx \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (26)$$

$$k_d = m_d \omega_d^2 \quad (27)$$

$$c_d = 2m_d \omega_d \zeta_{d,opt} \quad (28)$$

式(22)~(28)中: μ 为TMD与主体结构等效质量之比,一般取0.03~0.05,本文概念设计取0.05; m_d 为TMD附加质量; r_{opt} 为TMD相对于主体结构目标模态的最佳调谐频率比; f_d 为TMD调谐固有频率; ω_d 为TMD固有圆频率; $\zeta_{d,opt}$ 为TMD最佳阻尼比; k_d 为TMD弹簧刚度; c_d 为TMD阻尼系数。

以外径 500 mm、壁厚 10 mm 及支撑高度 10~30 m 为参数范围,将 TMD 布置于支撑杆顶部,计算其质量、刚度及阻尼参数随支撑高度的变化关系,结果如图 10 所示。

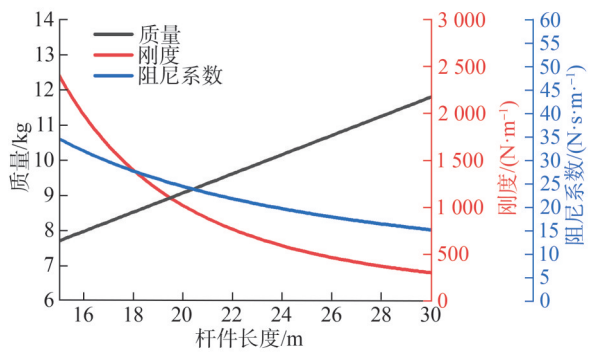


图 10 TMD 主要参数随支撑杆外露长度的变化
Fig. 10 Variation of TMD parameters with exposed member height

上述参数用于确定候选 TMD 的基本尺度,并不代表实际月震作用下的最终优化设计;后续仍需结合多自由度结构模型和月震时程输入对其减振效果及参数鲁棒性进行验证。

基于上述参数分析,为了便于集中展示典型方案的结构与减振参数,本文选取支撑杆外露高度 15 m 作为代表性工况。该方案采用阵列面积为 36 m²、质量为 72 kg 的 10 kW 级光伏阵列,支撑杆取外径 500 mm、壁厚 10 mm 的薄壁圆管;在单自由度简化模型及 Den Hartog 理论条件下,对应结构与 TMD 的主要参数如表 5 所示。

表 5 月基太阳能立式电站典型概念参数
Tab. 5 Typical conceptual parameters of vertical lunar photovoltaic power station

参数	典型值	说明
支撑杆外露高度 h/m	15	代表性分析工况
光伏阵列面积 A_{pv}/m^2	36	10 kW 级阵列
光伏阵列质量 $m_{\text{panel}}/\text{kg}$	72	按 2 kg/m^2 设计质量密度
支撑杆外径 D/mm	500	典型统一分析截面
支撑杆壁厚 t/mm	10	$D/t=50$
结构一阶固有频率 f_1/Hz	2.957	理想固结简化模型
TMD 质量比 μ	0.05	概念设计取值
TMD 质量 m_d/kg	7.723	Den Hartog 理论参数
TMD 自振频率 f_d/Hz	2.816	目标模态调谐参数
TMD 阻尼系数 $c_d/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	34.72	理论调谐参数
TMD 刚度 $k_d/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	2 410	理论调谐参数
TMD 布置位置	支撑杆顶部	第一阶模态位移较大位置

5 总结与未来展望

5.1 主要结论

本文面向月球基地长期能源供给需求,提出一种高位立式光伏电站设计构想,并从光伏阵列构型、支撑结构、月壤锚固及附加减振等方面开展了概念设计与初步分析。主要结论如下:

1) 基于前述月尘活动与极区光照研究,高位布设具有降低组件对近地机械扰动尘直接暴露、改善部分南极候选场址光照可达性的潜力。本文将 10 m 作为概念设计的参考布设下限,该高度并非月尘浓度的物理分界,而是综合月尘暴露风险、极区光照改善效果及结构部署可行性确定的工程参考尺度,其最终取值仍需结合具体场址的光照模型、月尘输运和原位观测进一步优化。

2) 提出幡旗式、树冠展开式和风车式 3 种立体化光伏阵列构型,分别利用高位竖向展开、多层空间布置和辐射对称布局,提高有限占地条件下的光伏组件布设能力。其中,幡旗式构型将组件支撑位置设置在垂向几何中心附近,在保持组件下缘离地高度基本不变的条件下,可降低支撑节点标高,缩短支撑杆外露长度,并减小水平等效荷载作用下的杆底弯矩。各构型的实际受光增益、组件遮挡及跟踪能耗仍需进一步量化。

3) 针对高位细长支撑结构可能面临的抗倾覆和月震动力响应问题,提出单桩锚固与调谐质量阻尼器相结合的结构设计思路。固有频率初步分析表明,在本文设定的结构参数范围内,部分工况下结构一阶频率可能与月震分析频带发生重叠,存在放大动力响应的可能。调谐质量阻尼器可作为控制目标模态响应的候选减振措施,但其布置位置和设计参数仍需通过多自由度动力模型及月震时程分析进一步确定。

5.2 研究局限与未来工作

本文目前主要完成了月基高位立式光伏电站的构型提出与参数尺度分析,距离面向具体场址的工程设计仍需进一步开展环境适应性、结构可靠性及系统集成验证。后续研究应由概念构型可行性分析逐步转向场址化设计、关键部件试验和系统级验证。

首先,应面向月球南极候选场址开展光照-地形-月尘联合评价。极区太阳高度角、局部地形起伏及月尘活动均具有明显的空间差异,单一高度参数难以适用于不同场址。后续可结合高分辨率数字高程模型、逐时太阳轨迹、周边工程活动范围及月尘输运模型,建立以年发电量、连续遮蔽时间、月尘暴露程度和结构代价为主要指标的多目标评价方法,从而实现阵列

高度、布设位置和组件姿态的协同优化。

其次,地下锚固及月壤-结构相互作用是高位能源设施工程化过程中需要重点突破的基础问题。真实月壤在密实度、颗粒组成和力学参数方面具有明显的深度依赖性和场址差异,高位阵列运行过程中还可能受到组件转动引起的质心变化、安装偏差、月震循环作用及基础差异变形等影响。后续需结合月面浅层地质探测,建立分层月壤条件下的桩-土相互作用模型,并通过模拟月壤试验研究直桩、螺旋桩、多点浅层锚固等不同形式的抗拔、侧向承载和抗倾覆特性,以形成适应不同地下结构条件的锚固方案。

再次,结构动力学分析需要由理想化单杆模型进一步拓展至完整系统。实际高位光伏结构包含组件、转动与锁定机构、支撑杆、连接节点、锚固基础等多个耦合部件,其动力响应还受到基础柔度、结构阻尼、高阶模态和热循环引起的参数变化影响。后续应建立多自由度或有限元模型,引入场址相关月震时程,对结构频率漂移、模态耦合、疲劳累积及减振装置参数鲁棒性进行分析,并进一步评价连接与减振部件在低重力、真空、月尘和大温差循环条件下的长期可靠性。

在部署方式方面,高位光伏系统可沿固定式与移动式两类技术路线进一步发展。固定式方案适合构建长期运行的基地骨干能源节点,便于与锚固基础、输配电网络及其他基础设施进行一体化设计,但初期对基础施工要求较高,建成后场址调整能力有限。另一种可能的技术路线是将可展收能源杆集成于月球车或移动平台,使能源单元能够根据任务区域、地形和光照条件进行转移部署,具有较强的机动供能能力。但移动式方案同时增加了重复展开与锁定、行驶振动、月尘侵入、月夜低温生存、机构寿命及系统质量与成本等问题。尤其在能源杆展开工作状态下,移动平台同样需要满足抗倾覆和姿态稳定要求,因此,可进一步研究可收放支撑足、多点浅层锚固及“移动—驻停—锚固—展开”一体化部署方式。未来固定式与移动式方案可根据任务阶段和用能需求形成互补,而非相互替代。

最后,还需从单体结构研究进一步扩展至月面能源系统集成与验证。3种立体阵列在实际运行中可能涉及组件间遮挡、跟踪能耗、局部热积累、转动惯量及维护路径等系统问题,同时还需与储能、输配电、热控和月面施工装备协同设计。后续可按照“部件级—子系统级—系统级”的路径开展模拟月壤锚固试验、热真空与月尘环境试验、缩比动力试验及长周期展收可靠性试验,并最终结合月面示范任务对高位光伏系统的能源收益、部署效率和长期可靠性进行综合验证。

参考文献:

- [1] Zhang Wei, Cheng Qinkun, Li Junlin. Technical progress in the utilization and exploitation of small celestial body resources[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 208: 219–255.
- [2] Ouyang Ziyuan. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(3): 351–358. [欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(3): 351–358.]
- [3] Robinot J, Rodat S, Abanades S, et al. Review of *in-situ* oxygen extraction from lunar regolith with focus on solar thermal and laser vacuum pyrolysis[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 234: 242–259.
- [4] Smith M, Craig D, Herrmann N, et al. The Artemis program: An overview of NASA's activities to return humans to the moon[C]//Proceedings of the 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2020: 1–10.
- [5] Pei Zhaoyu, Xu Zhihai, Zou Yongliao, et al. Development idea of optical surveillance system of international lunar research station(invited)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(18): 1811001. [裴照宇, 徐之海, 邹永廖, 等. 国际月球科研站光学监视系统发展设想(特邀)[J]. *光学学报*, 2024, 44(18): 1811001.]
- [6] Pei Zhaoyu, Wang Qiong, Jiang Shengyuan, et al. Development prospect of in situ resource utilization activities in lunar research stations[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(1): 9–21. [裴照宇, 王琼, 姜生元, 等. 面向月球科研站的原位资源利用活动展望[J]. *前瞻科技*, 2024, 3(1): 9–21.]
- [7] Zheng Jiaxin, Sun Licheng, Long Xiting, et al. Electricity generation for lunar bases during construction and operation: Key technologies, challenges and development roadmap[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 236: 790–809.
- [8] Liu Zekuan, Wen Lili, Liu Pengyue, et al. Evaluation of the energy system variable operating conditions under the lunar environment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 269: 126095.
- [9] Li Tailin, Liu Youhong, Zhang Yingzeng, et al. Comprehensive modeling and characterization of the General-Purpose Heat Source Radioisotope Thermoelectric Generator for solar system missions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 248: 123278.
- [10] El-Genk M S. Space nuclear reactor power system concepts with static and dynamic energy conversion[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(3): 402–411.
- [11] Xie Heping, Zhang Guoqing, Luo Tong, et al. Scheme and design of a lunar large-depth and in-situ condition-holding coring robot system[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(2): 1–9. [谢和平, 张国庆, 罗通, 等. 月球大深度保真取芯探矿机器人系统构想与设计[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(2): 1–9.]

- [12] Xie Heping, Gao Tianyi, Long Xiting, et al. Design and performance of a modular 1 kilowatt-level thermoelectric generator for geothermal application at medium-low temperature[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 298: 117782.
- [13] Xie Heping, Zhang Guoqing, Li Cunbao. Scheme of underground space utilization of lunar thermostatic layer[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(1): 1–8. [谢和平, 张国庆, 李存宝. 月球恒温层地下空间利用探索构想[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(1): 1–8.]
- [14] Xie Heping, Li Cunbao, Sun Licheng, et al. Conceptualization of in-situ energy support technology on the Moon[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(3): 1–9. [谢和平, 李存宝, 孙立成, 等. 月球原位能源支撑技术探索构想[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(3): 1–9.]
- [15] Song Lei, Zhang Guoqing, Wang Yaohui, et al. A review of the construction of the supporting energy system for the lunar base[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2025, 12: 1609140.
- [16] Ren Depeng, Li Qing, Xu Yingqiao. Preliminary research on the lunar base energy system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(6): 561–568. [任德鹏, 李青, 许映乔. 月球基地能源系统初步研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(6): 561–568.]
- [17] Rittenhouse J J, Boeringa Z L, Han Daoru, et al. Lunar dust mitigation for solar cells *via* ultrasonic vibrations[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 228: 474–485.
- [18] Horányi M, Szalay J R, Kempf S, et al. A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon[J]. *Nature*, 2015, 522(7556): 324–326.
- [19] Zanon P, Dunn M, Brooks G. Current lunar dust mitigation techniques and future directions[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 213: 627–644.
- [20] Speyerer E J, Robinson M S. Persistently illuminated regions at the lunar poles: Ideal sites for future exploration[J]. *Icarus*, 2013, 222(1): 122–136.
- [21] Watters T R, Schmerr N C. Paleoseismic activity in the Moon's Taurus-Littrow valley inferred from boulder falls and landslides[J]. *Science Advances*, 2025, 11(31): eadu3201.
- [22] Bussey D B J, McGovern J A, Spudis P D, et al. Illumination conditions of the south pole of the Moon derived using Kaguya topography[J]. *Icarus*, 2010, 208(2): 558–564.
- [23] Mazarico E, Neumann G A, Smith D E, et al. Illumination conditions of the lunar polar regions using LOLA topography[J]. *Icarus*, 2011, 211(2): 1066–1081.
- [24] Gläser P, Scholten F, De Rosa D, et al. Illumination conditions at the lunar south pole using high resolution Digital Terrain Models from LOLA[J]. *Icarus*, 2014, 243: 78–90.
- [25] Sun Wengan, Wang Qiliang, Zhang Junke, et al. Comprehensive assessment of photovoltaic designs and power generation potential at the Lunar South Pole[J]. *Energy*, 2025, 335: 137922.
- [26] Colwell J E, Batiste S, Horányi M, et al. Lunar surface: Dust dynamics and regolith mechanics[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): 2005RG000184.
- [27] Rennilson J J, Criswell D R. Surveyor observations of lunar horizon-glow[J]. *The Moon*, 1974, 10(2): 121–142.
- [28] Colwell J E, Robertson S R, Horányi M, et al. Lunar dust levitation[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2009, 22(1): 2–9.
- [29] Wang Yongjun, Li Detian, Kong Fenglian, et al. *In situ* investigation of charged dust particles above the lunar surface at the Chang'E-5 landing site[J]. *Space Science & Technology*, 2025, 5: 234.
- [30] Szalay J R, Horányi M. The search for electrostatically lofted grains above the Moon with the Lunar Dust Experiment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(13): 5141–5146.
- [31] You Jilin, Zhang Xiaoping, Zhang Haiyan, et al. Analysis of plume-lunar surface interaction and soil erosion during the Chang'E-4 landing process[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 185: 337–351.
- [32] Nunn C, Garcia R F, Nakamura Y, et al. Lunar seismology: A data and instrumentation review[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(5): 89.
- [33] Tamama Y, Civilini F, Husker A, et al. Classifying thermal moonquakes recorded in Apollo 17 lunar seismic data using cross-correlation and diurnal temperature variations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2025, 130(9): e2024JE008921.
- [34] Onodera K. New views of lunar seismicity brought by analysis of newly discovered moonquakes in Apollo short-period seismic data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, 129(7): e2023JE008153.
- [35] Latham G V, Ewing M, Press F, et al. Passive seismic experiment[J]. *Science*, 1970, 167(3918): 455–457.
- [36] Verduci R, Romano V, Brunetti G, et al. Solar energy in space applications: Review and technology perspectives[J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12(29): 2200125.
- [37] Fogtman A, Baatout S, Baselet B, et al. Towards sustainable human space exploration—Priorities for radiation research to quantify and mitigate radiation risks[J]. *npj Microgravity*, 2023, 9: 8.
- [38] Paige D A, Foote M C, Greenhagen B T, et al. The lunar reconnaissance orbiter diviner lunar radiometer experiment[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1): 125–160.
- [39] Li Ji, Xu Wei, Yang Jie, et al. Key technological challenges and systemic solutions for lunar base energy systems designed for long-term deployment needs[J]. *npj Space Exploration*, 2026, 2: 12.

- [40] Boonmongkolras P, Kim S H, Kim Y Y, et al. Challenges and advances of photovoltaic power and rechargeable battery systems for space applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(30): e25129.
- [41] Gaier J R. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions: NASA/TM-2005-213610/REV1 [R]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, 2007.
- [42] Pappa R, Taylor C, Warren J, et al. Relocatable 10 kW solar array for lunar south pole missions: NASA/TM-20210011743 [R]. Hampton: National Aeronautics and Space Administration, 2021.
- [43] Doggett W R, Heppler J, Mahlin M K, et al. Towers: Critical initial infrastructure for the moon[C]//Proceedings of the AIAA SCITECH 2023 Forum. National Harbor: AIAA, 2023: AIAA2023-0383.
- [44] National Aeronautics and Space Administration. Sunflake Solar Array and Ultra Compact Tripod Tower (UCTT)[EB/OL]. (2026-01-22)[2026-08-22]. <https://techport.nasa.gov/projects/113528>.
- [45] Gendell A. 50 kW elevated lunar solar array system using an origami-inspired reverse-action pyramid hinge array [C]//Proceedings of the 21st European Space Mechanisms and Tribology Symposium. Lausanne, 2025.
- [46] Ruiz S, Cruz A, Gomez D, et al. Preliminary approach to as-

sess the seismic hazard on a lunar site[J]. *Icarus*, 2022, 383: 115056.

- [47] Carrier W D, Olhoeft G R, Mendell W. Physical properties of the lunar surface[M]//Heiken G H, Vaniman D T, French B M, eds. *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*. New York: Cambridge University Press, 1991: 475-594.

【校友简介】



谢和平, 力学与能源工程专家, 中国工程院院士(2001年当选), 曾任国务院学位委员会委员、原煤炭工业部科技教育司司长、中国矿业大学校长、四川大学校长、四川省科协主席, 为中共十七届候补委员、十二届全国人大代表。现任四川大学教授、深圳大学特聘教授、深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室主任、四川大学学术委员会主任, 兼任教育部科学技术委员会主任、国家碳中和专家委员会委员等。长期从事岩石力学、深地科学与绿色能源(地热、CCUS与低碳技术、海水制氢)等基础研究及工程实践。已出版10余本中英文专著, 在*Nature*、*Nature Energy*等期刊发表500余篇论文, 入选中国十大科学进展。牵头两度荣获国家自然科学奖二等奖、国家科技进步奖二等奖等五项国家科技奖项。

Configuration Design and Strength and Stability Analysis of a Vertical Lunar Photovoltaic Power Station System

MA Kaitao¹, XIE Heping^{1,2*}, ZHANG Guoqing^{1,3}, SONG Lei³

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract:

Objective Elevated photovoltaic deployment at the lunar south pole can reduce direct exposure to mechanically disturbed near-surface dust and improve solar visibility under persistently low solar elevation angles. However, it also imposes greater requirements on support stiffness, anchorage, and dynamic response. Existing concepts have generally treated array geometry, deployment mechanisms, foundation anchorage, and vibration control as separate design issues. Therefore, a vertical lunar photovoltaic power station system was proposed to integrate environmental constraints, three-dimensional array configuration, support sizing, regolith anchorage, and structural stability within a unified conceptual framework. The objectives were to clarify the engineering basis for elevated deployment, develop candidate array configurations, identify the governing structural constraints over a representative range of heights, and establish the parameter range of a candidate tuned mass damper for the first lateral mode.

Methods Three elevated photovoltaic array configurations were developed. In the pennant-type configuration, the support point was positioned near the vertical geometric center of the photovoltaic assembly to reduce the effective cantilever length while maintaining the required clearance between the lower edge of the array and the lunar surface. In the canopy-deployment configuration, modules were distributed at multiple elevations and azimuthal directions to improve three-dimensional spatial utilization. In the windmill-type configuration, modules were arranged radially around a central joint to provide a comparatively balanced load transfer path and multi-azimuthal orientation. Published observations of lunar dust and simulations of south polar illumination were used to establish the environmental rationale for elevated deployment. A height of 10 m was adopted as a conceptual reference rather than as a universal threshold for dust concentration. A 10 kW class photovoltaic system was adopted for structural analysis. The design power density was 300 W/m²; an array area of 36 m² and an array mass of 72 kg were used after accounting for

module layout and long-term performance degradation. The support was idealized as a thin-walled circular graphite/epoxy cantilever. Exposed support heights from 10 to 30 m were examined, with 30 m used only as the upper bound of the conceptual sensitivity analysis. Bending strength, shear strength, Euler buckling stability, and serviceability-level deflection were evaluated, with the allowable top deflection set to 0.003 times the exposed support height. A horizontal moonquake acceleration of 1.52 m/s^2 and lunar gravity of 1.62 m/s^2 were adopted as conceptual inputs. The support–foundation connection was treated as ideally fixed for the upper structure calculations, and the resulting base actions were transferred to a separate anchorage model. For the anchorage analysis, the regolith was represented by an equivalent homogeneous medium with a density of $1\,660 \text{ kg/m}^3$, cohesion of 1.6 kPa , and an internal friction angle of 49° . A quasi-static Rankine passive earth pressure formulation was used to estimate the resisting moment and compare the required anchorage lengths for different support heights and safety factors. For the dynamic assessment, the structure was reduced to a cantilever model incorporating the photovoltaic array mass and distributed support mass. The first lateral natural frequency was calculated as a function of exposed support height. A tuned mass damper (TMD) was introduced as a candidate first-mode vibration control device. It was positioned near the top of the support, where the first-mode displacement was largest, and its parameters were determined using the classical Den Hartog relationships with a mass ratio of 0.05.

Results and Discussions The three configurations provided distinct geometric and structural options. The pennant-type configuration reduced the effective support length and the support node elevation required to achieve a prescribed clearance between the module bottom and the lunar surface. The canopy-deployment configuration increased the utilization of vertical and azimuthal deployment space, whereas the windmill-type configuration provided radial symmetry and a comparatively direct load transfer path. These configurations were treated as candidate architectures because mutual shading, tracking requirements, deployment reliability, and maintenance requirements remain site dependent. Published terrain-based simulations indicated that increasing equipment height from 2 to 10 m at favorable south polar sites increased the cumulative illumination fraction from 92.27% to 95.65%. Regional photovoltaic assessments further indicated that increasing module elevation from 0 to 10 m increased the area with annual generation potential above $3\,000 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^2$ from approximately 2.7×10^5 to $4.2\times 10^6 \text{ m}^2$. These data supported the use of 10 m as an engineering reference scale for improving illumination but did not establish a universal optimum height. Elevated deployment was therefore interpreted as a site-dependent environmental and structural trade-off. Within the adopted material properties, load model, safety factors, and height range, the required support diameter was governed primarily by the deflection criterion, followed by global buckling stability; bending and shear strength requirements were less restrictive. At an exposed support height of 30 m, the diameter required to satisfy the deflection criterion was approximately 470 mm. A representative outer diameter of 500 mm and a wall thickness of 10 mm were therefore adopted for subsequent anchorage and dynamic analyses. The elevated slender support was governed primarily by stiffness rather than material strength. The anchorage analysis showed that the required anchorage length increased with exposed support height and safety factor because the root bending moment increased with elevation. The calculated lengths represented comparative parameter scales rather than final foundation dimensions. Actual performance will depend on regolith layering, local strength, anchor–regolith interface behavior, installation disturbance, cyclic loading, and anchorage geometry. The staged use of an ideal fixed boundary for the upper structure and a passive pressure model for the foundation clarified that the two assumptions were applied at different analytical stages. The first lateral natural frequency decreased as the exposed support height increased, and part of the investigated range could overlap with the frequency range adopted for the moonquake analysis. This overlap indicated the possibility of response amplification rather than inevitable resonance. For the representative 15 m case, the calculated first lateral natural frequency was 2.957 Hz. With a TMD mass ratio of 0.05, the conceptual TMD mass was 7.723 kg, the tuning frequency was 2.816 Hz, the damping coefficient was $34.72 \text{ N}\cdot\text{s/m}$, and the stiffness was approximately 2.41 kN/m . These values defined a theoretical tuning scale and did not constitute a validated lunar seismic control design.

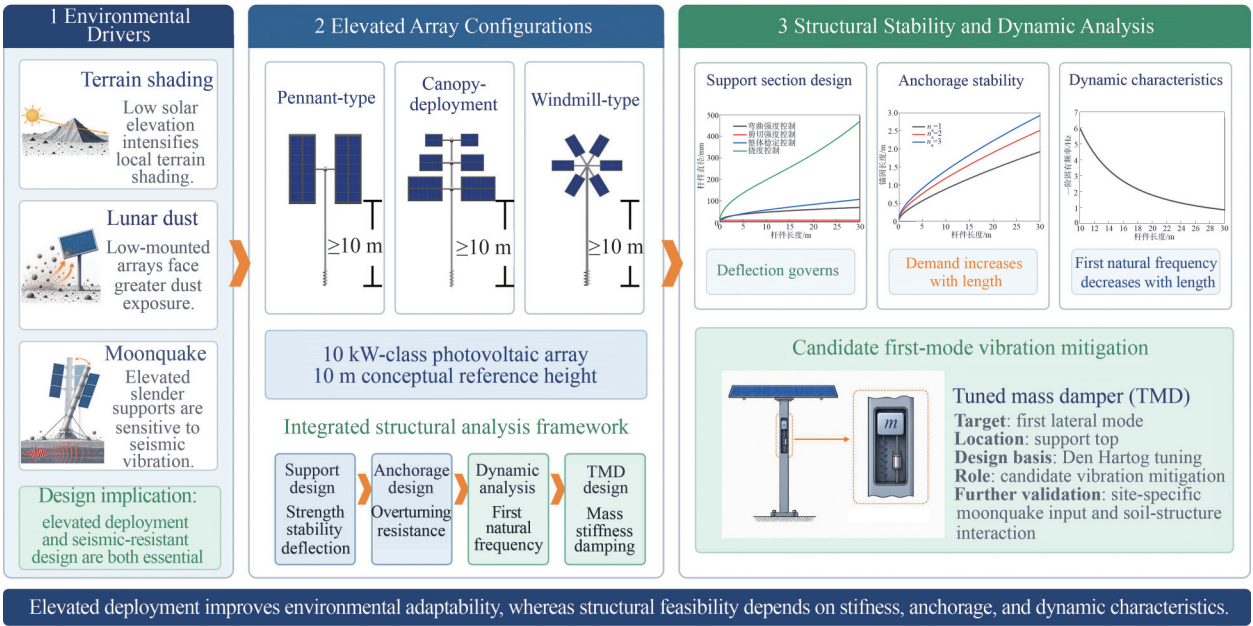
Conclusions Elevated photovoltaic deployment at the lunar south pole should be treated as a system-level trade-off linking dust exposure, terrain-limited illumination, spatial utilization, support stiffness, anchorage demand, and dynamic response. The proposed pennant-type, canopy-deployment, and windmill-type photovoltaic array configurations provided a common basis for comparing three-dimensional layouts and load transfer characteristics. Under the adopted conceptual assumptions, deflection governed support sizing, the required anchorage scale increased with support height and safety factor, and the first lateral natural frequency decreased with increasing height. A TMD could serve as a candidate measure for controlling the first lateral mode, but its effectiveness requires verification using multi-degree-of-freedom models, site-specific seismic inputs, and environmental testing. Fixed photovoltaic installations may serve as long-term backbone power nodes, whereas retractable photovoltaic systems mounted on mobile platforms may provide complementary distributed power. Both approaches require reliable stabilization and anchorage during operation. The proposed framework provides a basis for site-specific optimization, layered regolith–anchor interaction analysis, coupled dynamic modeling, and staged ground verification of elevated lunar photovoltaic systems.

Key words: lunar base; photovoltaic array; lunar dust mitigation; moonquake; structural stability

Graphical abstract:

Vertical Lunar Photovoltaic Power Station System

Configuration design and strength and stability analysis for long-term lunar base power supply



(编辑 李轶楠)

引用格式: Ma Kaitao,Xie Heping,Zhang Guoqing,et al.Configuration design and strength and stability analysis of a vertical lunar photovoltaic power station system[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(5):1-18.[马楷涛,谢和平,张国庆,等.月基太阳能立式电站系统构型设计与强度稳定性分析[J].工程科学与技术,2026,58(5):1-18.]