

山地光伏电站运维难点与应对措施

杨明进

中核汇能贵州能源开发有限公司，贵州 贵阳 550081

DOI:10.61369/EPTSM.2026070027

摘 要： 山地光伏电站因地形起伏剧烈、设备分散且微气候多变，其运维难度远超平坦地面电站。本文系统梳理了山地环境带来的地形破碎、局地气象灾害及交通不便等原生挑战，深入分析了阴影失配加剧、支架基础失稳、电气散热隐患等设备可靠性难题，并探讨了清洗水源匮乏、植被管控矛盾及故障定位低效等生产管理痛点。针对上述问题，文章从技术防护体系与运维管理模式两个维度提出了综合性应对策略，包括应用地形自适应支架、构建无人机智能巡检系统、建立微气象灾害预警机制，以及推行区域化集控、实施季节性运维调度和水肥一体化生态管护等，旨在为山地光伏电站实现本质安全与高效运营提供系统性解决思路。

关 键 词： 山地光伏；运维难点；智能诊断；生态管护；灾害预警

Challenges in the Operation and Maintenance of Mountainous Photovoltaic Power Plants and Countermeasures

Yang Mingjin

China Nuclear Huineng Guizhou Energy Development Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081

Abstract： Mountainous photovoltaic power plants face significantly greater challenges in operation and maintenance due to the severe topographical variations, scattered equipment, and unpredictable microclimates, as compared to those located on flat terrain. This paper outlines the inherent difficulties arising from mountainous environments, such as fragmented terrain, localized weather disasters, and poor transportation conditions. It also analyzes issues related to equipment reliability, including increased shadowing effects, instability of support structures, and problems with electrical heat dissipation. Additionally, it addresses challenges in production management, such as a lack of water for cleaning, difficulties in controlling vegetation, and inefficient fault detection. To address these issues, the paper proposes comprehensive strategies from two perspectives: technical protection systems and operation and maintenance management methods. These include the use of terrain-adaptive support structures, the development of intelligent drone inspection systems, the establishment of early warning systems for microclimate disasters, as well as regional centralized control, seasonal operation scheduling, and integrated ecological management of water and nutrients. The aim is to provide systematic solutions for ensuring the safe and efficient operation of mountainous photovoltaic power plants.

Keywords： mountainous area photovoltaics; operational challenges; intelligent diagnosis; ecological management; disaster early warning

引言

在“双碳”目标驱动下，光伏电站的开发重心已从平原荒漠大规模向地形复杂的山地丘陵地带转移。山地光伏利用难以耕作的坡地资源，极大缓解了用地矛盾，但其陡峭的坡度、破碎的地块以及多变的微气候环境，给精细化运维带来了前所未有的严峻考验。传统粗放式的人工巡检与被动响应模式，在面对遮挡失配、基础沉降、水源匮乏等复合难题时显得捉襟见肘，导致发电效率锐减与运营成本高企。如何在保障安全的前提下，通过技术创新与管理变革突破山地运维的瓶颈，实现全生命周期的降本增效，已成为决定山地光伏资产能否保值增值的核心命题。

一、山地环境带来的运维挑战

（一）地形破碎与设备分散

山地光伏电站大多依山而建，场区内沟壑交错、坡向变化大，因此光伏阵列只能被分割成一个个小的方阵。这样就造成巡检和检修的距离变长，运维人员在崎岖的山坡上无法携带重物快速移动，大量的时间被浪费在路上。由于设备高度分散，造成通信线缆敷设和电力传输损耗增大，集中式监控系统信号盲区增多，故障时隔离、倒闸操作非常麻烦，给运维团队的体力分配和调度逻辑带来很高的要求。

（二）微气候复杂与局地气象灾害

山区地形对于大气环流有明显的抬升、扰动作用，在山脊、谷地等地形处会出现不同于区域天气预报的局地微气候。迎风坡和背风坡的光照辐射量、风速以及湿度都有很大差别，所以同一个站点的不同地方发电效率的离散程度很高。更严重的是狭窄的峡谷风道效应会使风速瞬间达到破坏性的水平，使组件被掀翻或者支架变形，短时强降雨容易引起汇水坡面上滑坡或者泥石流，给户外电气设备带来直接的物理毁灭性危险，大大加大了预防性维护的难度。

（三）交通不便与人员通达困难

山地光伏场址一般远离城镇，进山的道路大多是简易碎石路或者土路，路面狭窄、弯急、临崖。雨季到来之后，路面变得泥泞湿滑，有的地方还会被山洪冲毁，使得运维车辆根本无法靠近作业现场。人员只能背着工具走很远的山路去攀爬，大大减少了有效的工作时间，也加大了由于高空作业造成的危险。当设备出现重大突发故障的时候，大型吊装和运输机械不能及时到达抢修地点，从而造成故障停机时间被人为地强制延长，给电力系统造成严重的电量损失。

二、设备可靠性与技术难点

（一）阴影遮挡与失配损失加剧

由于山地起伏地形造成山体自身的阴影以及相邻阵列之间因为高程不同而产生的前后排动态阴影，要比平地电站复杂得多，并且很难避免。大面积、不规则的遮挡会使得组件串联回路出现严重热斑效应和电流失配现象，普通的旁路二极管只能做局部保护，不能彻底解决组串级功率塌陷问题。如果组件布置没有按照精细化三维阴影模拟来进行安排，在日照充足的时段里，一些子阵就会一直处在低效发电的状态当中，从而造成电站实际发电量远远低于设计时所预估的数值。

（二）支架基础稳定性风险

山地光伏基础施工大多要面对强风化岩层或者残坡积土，地质情况非常复杂多变。传统的钢筋混凝土独立基础在陡坡处容易因为回填土不密实而造成滑移，微小的不均匀沉降就会使整个支架结构出现几何变形，从而导致组件隐裂、连接件应力疲劳断裂。另外，由于地形原因所用的高桩基础或者锚杆基础，在长时间的风致振动以及干湿交替的作用下容易产生锈蚀松动的现

象，一旦遇到极端强风，就会造成大面积的支架连续性倾覆连锁反应。

（三）设备散热与电气安全问题

山地低洼密闭区域空气对流弱，逆变器、汇流箱等发热设备如果直接暴露在烈日之下并且没有辅助通风的话，很容易因为长时间的高温工作而使电子元器件加速老化降容。复杂的地形造成接地网埋设深度不一致，很多地方岩石裸露造成接地电阻过大，在雷雨天气容易受到雷击反击伤害精密仪器。同时由于昼夜温差大造成的凝露现象十分严重，潮湿的空气和灰尘混在一起附着在接线端子上容易产生爬电通路，进而引发短路拉弧之类的电气火灾危险。

三、生产运行管理难点

（一）清洗水源获取与节水灌溉

山地光伏大多建在缺水干旱的阳坡上，地表径流很少，地下水埋藏很深，开采成本很高。由于组件表面灰尘、鸟粪等污染物不断积累，如果不及时清洗就会造成透光率急剧下降，但是大规模的水车拉水清洗会带来巨大的运输成本以及坡道作业的安全隐患。常规的漫灌式冲洗既浪费宝贵的水资源又会冲刷坡面土壤使基座裸露。所以，在没有水或者缺水的情况下怎样有效地去除污垢，打破越洗越亏的恶性循环，就是影响山地电站收益的主要管理障碍。

（二）组件清扫与植被管控矛盾

雨季丰沛的降水使光伏板下的野草疯长起来，当草木的高度超过了组件底部的时候，就会造成动态局部遮挡，并且影响到下面的通风散热。但是粗暴地使用除草剂会造成土壤污染并且腐蚀金属支架，人工机械割草在陡坡上工作强度大、次数多。如果任其发展，秋冬季枯萎的干草就成了一个重大火灾危险源。因此运维方陷入了一种“割了长、长了割”的恶性循环当中，寻找一种可以控制植被高度、不会破坏土壤环境的低成本长效控制方法就显得十分迫切。

（三）故障定位与检修效率提升

大型山地电站组串数量多、地形遮挡视线，用传统的手工 IV 测试仪逐串检测，就像大海捞针一样。监控系统出现低效告警的时候，由于地势阻碍造成通讯延迟或者中断，运维人员很难迅速准确地找到原因是因为组件本身的老化、连接器虚接还是阴影遮挡所引起的。陡峭的山坡上换一块几十公斤重的光伏板一般要两个人配合，并且还要搭建临时的索道才能完成工作，这样就大大增加了单次检修的时间，严重影响整个电站的有效可用小时数。

四、应对措施：技术防护体系

（一）地形自适应支架与柔性基础

对于复杂的坡度，应该用大跨度、高净空的柔性索桁架支架系统，利用钢索的抗拉强度跨越沟壑来减少桩基的数量，允许一定的支座位移来适应不均匀沉降。推广使用微型钢管桩或者预钻

式锚杆等非开挖柔性基础，可以随着地形的变化快速地打入到深层基岩中去，不会因为大面积的开挖而造成边坡失稳。支架立柱用多向调节节点，达到东西坡和南北坡向准确追光的目的，依靠自身结构的韧性来吸收风振能量，从本质上降低基础倾覆、组件隐裂的风险。

（二）智能诊断与无人机巡检

构建设备级智能 IV 曲线同步扫描及大数据对比诊断系统，可以自动发现组串内部微小电流失配问题，由原来的被动报警变为现在的主动预知。使用带有 RTK 高精度定位功能的双光无人机开展常规巡检工作，用红外热成像自动检测出组件热斑、隐裂以及接线盒虚接等热点，并且依靠 AI 图像算法去排除伪缺陷，从而给出准确的故障点坐标导航。此模式可以省去人工在陡峭山坡上徒手攀爬的过程，把几天的人工巡检时间缩短到几个小时内，大大提高了消缺闭环的速度。

（三）微气象监测与灾害预警

在场区迎风垭口、汇水冲沟等重要地方布置微型气象传感网格，把瞬时最大风速、降雨量和边坡位移形变的数据传送到后台。根据以往的灾害数据来创建山洪以及大风预警算法模型，一旦检测到某个参数超出了预先设定好的警戒值之后，就会立刻启动相应的防风措施，使跟踪架自动调节至大风防护角度，并且固定下来。另外提前开启低洼地区设备区的排水设施，在短临预警发出的时候通知运维人员迅速离开危险地带，形成一道数字的纵深防线来抵御山区局地强对流灾害。

（四）组件自清洁纳米涂层与防污疏导

对于陡坡组件清洗困难、水费昂贵的问题，可以规模化地给陡坡组件涂覆有光催化活性的超亲水纳米涂层。该涂层在紫外线照射时会分解有机污渍，利用雨水自然铺展形成的一层均匀水膜来清除表面浮尘以及鸟粪等残留物，在微雨天气里就可以达到自洁的目的。另外在组件底沿边框处加装导水胶条，用物理方法引导积灰泥流，防止下边缘因为积水蒸发而产生泥带遮挡。该种被动式防污技术大大降低了人工攀爬陡坡的危险性，从物理化学界面的角度出发保证了山地阵列整个生命周期内都有很高的透光率。

五、应对措施：运维管理模式

（一）区域化集控与少人值守

打破单站独立运维的孤岛模式，以县域或者流域为单位建立

区域智能集控中心，用光纤环网把周边零散山地电站的监控权和调度权上收到中心。在保证数据安全的前提下进行远程操作并全部采集数据，在场站侧只留少量保安、应急人员做恶劣天气后现场特巡工作。该种集中监控、区域维检的方式大大减少了重复性的劳动力支出，依靠专业的后台专家团队远程指导来完成故障处理工作，使劳动生产率得到了极大的提高。

（二）季节性运维策略与应急调度

按照山地气候节律动态调整作业重心，在雨季到来之前集中进行排水沟清淤、防雷检测、基础加固等预防性工作，把隐患消灭在萌芽之中。冬季凝冰期停止水洗作业，改为干式清扫或者物理除冰，防止组件被冻裂。建立以中心场站为依托、辐射到各个站点的快速反应抢修队伍，采取巡检、消除缺陷、验收一体化的方式开展工作。提前同工程机械租赁公司签好陡坡作业的特种吊装合同，在出现基础沉降或者组件大面积损坏的时候，可以迅速调集应急物资以及重型设备到现场进行抢通。

（三）水肥一体化与生态固土管护

改变粗暴清杂的思想，采用浅根系固氮草种来控制高度，用植物的蒸腾作用降低地表温度、减少扬尘，从而创造有利于发电的局地微气候。对于清洗问题，使用高压微雾无人清扫车加装回收水系统的方式达到低水耗、无水渍的效果。同时在坡面上设置集雨系统，将棚顶的雨水汇集起来，再通过水肥一体化滴灌的方式把水分送到板下植被上，抑制了恶性杂草的生长，生物根系网络加固了表层土体，形成了防火隔离带，达到光伏发电和水土保持相互促进的目的。

六、结语

山地光伏电站的运维就是一场在地形、气象和设备工况这三者之间寻找动态平衡的精细化管理战役。对于由于地形破碎造成的交通隔绝、基础失稳，由于微气候突然变化而引起的遮挡和气象灾害，由于水源缺乏和植被控制所造成的复合型矛盾，单靠一种技术改进或者管理改善是无法解决的。只有坚持系统思维，把高适应性的柔性支架结构同数字化智能诊断技术紧密结合在一起，依靠区域化的集控开展季候性预判式的调度工作，并且巧妙地用生态循环来消除板下的杂草和水土流失问题，才有可能创建起牢固的“技防+人防+物防”综合防护体系，从而达到山地复杂地形中光伏资产高效、安全、可持续运行的目的。

参考文献

- [1] 景杰, 高波, 杨国萍, 等. 山地光伏组件安装工艺及运维技术分析 [J]. 电力设备管理, 2025, (14)243-245.
- [2] 王世光, 葛序尧, 祝人杰, 等. 山地光伏支架设计价值工程的研究与应用 [C]// 中国建设科技集团股份有限公司, 中南建筑设计院股份有限公司, 湖北省勘察设计协会, 湖北省土木建筑学会. 第十届建筑结构技术交流会论文集 (上册) [出版者不详], 2025: 157-161.
- [3] 张文瑜. 浅谈山地光伏发电项目升压站的选址设计优化 [J]. 太阳能, 2024, (10)99-106.
- [4] 丁一凡. 山地光伏电站设计和运维若干关键问题研究 [D]. 浙江大学, 2021.
- [5] 王宏伟. 山地光伏建设项目安全生产管理对策研究 [J]. 科技创新导报, 2019, 16(24)148+150.