

山地光伏电站项目施工管理智慧化研究思考

陈驰

湖北工业大学土木建筑与环境学院

摘要：随着“双碳”战略的深入推进，我国新能源光伏产业迅猛发展，装机容量持续高速增长。伴随国家土地资源政策调整，光伏项目建设重心逐渐向地形复杂、自然条件严峻的山区转移。山地光伏项目因其特殊地理环境，在施工组织与管理面临诸多挑战。随着物联网（IoT）、建筑信息模型（BIM）、人工智能（AI）等新一代信息技术的迭代升级，智慧化施工管理为山地光伏项目建设提供了重要支撑。本文系统分析山地光伏项目施工管理中的关键难点，结合智慧化技术应用，提出施工管理优化策略与实施建议，并结合工程实例进行剖析，为提升项目管理水平、降低开发风险、保障投资效益提供参考。

关键词：绿色发展；山地光伏；项目管理；智慧基建；人工智能

近年来，我国光伏产业实现跨越式发展。2025 年 1-5 月，全国光伏发电新增装机容量达 2 亿千瓦，截至 2025 年 5 月，累计装机容量历史性突破 10 亿千瓦，占全国发电总装机容量的 30%^[1]，规模居全球首位。随着平原地区土地资源日益紧张，光伏建设主力正向山地、丘陵地区转移。然而，山地环境下地形起伏大、地质条件复杂、交通运输困难，给光伏电站施工带来一系列技术与管理挑战^[2]。传统的施工管理方法难以应对多作业面、高动态、高风险的山地施工场景，亟需引入智慧化技术手段提升项目管理水平。

智慧施工管理通过集成物联网（IoT）、建筑信息模型（BIM）、人工智能（AI）等信息技术，实现工程全过程的数字化、可视化和智能化决策^[3]。目前，相关研究多集中于一般建设工程，针对山地光伏这一特殊场景的系统性研究仍较为缺乏。本文结合工程管理理论与施工实践，探讨山地光伏项目智慧化管理的应用框架与技术路径，以期提升项目综合效益提供参考。

1 山地光伏项目的主要特点

1.1 山地光伏项目的竞争优势

（1）土地资源利用优势。项目多布局于荒山、荒坡、丘陵等未利用或低效利用开发的土地，解决了当前光伏发展与农林争地矛盾以及破坏环境风险，符合国家光伏开发政策导向，这是核心优势。部分山地可以探索“农林光互补”模式，提高综合收益水平。

（2）发电性能优势。山区海拔较高，空气稀薄，尘埃较少，太阳辐射强度大，气温较低，有利于光伏组件的工作温度，进而提升发电转换效率。部分山地的自然倾斜角适宜，可减少支架用量，实现最佳发电倾角布置。

（3）政策与市场优势。多数山地光伏项目位于

偏远经济欠发达地区，享有政策支持，区域清洁能源电力供应缺乏，光伏发电就近消纳优势明显，可为当地经济发展提供绿色动力。

（4）社会环境效益。科学规划建设有助于水土保持与生态修复，实现“光伏治山”，与“光伏治沙”异曲同工。项目还可为当地农户提供就业机会，促进增收，实现经济与环境双赢。

1.2 山地光伏项目施工特点

（1）地形地质复杂，成本控制难度大：山地地形起伏大、地质条件多变，勘察设计需借助无人机航测与 LiDAR 激光雷达等技术，获取高精度三维实景模型，服务于土方计算、基础设计与施工规划。复杂地形导致土方工程量和基础施工存在较大不确定性，成本控制难度高。施工道路修筑成本占比上升，盘山道路与后期检修道路建设难度大。以湖北枣阳某 300MW 项目为例，新建及改造道路总长约 45 千米。

（2）协调管理难度高：电力市场化改革持续推进，新能源上网电价逐步放开，对项目成本与工期提出更高要求。受复杂地质地形制约，工程进度协调、人员设备调度、组件安装及输电线路敷设等施工组织难度显著高于平原项目。

（3）设备材料运输与存储困难：山地路况差，大型组件、支架及箱变等设备运输难度大，对转弯半径与爬坡能力要求高。受场地限制，现场存储能力有限，需精细规划采购与物流调度，以控制额外成本。

（4）作业效率低，多作业面并行安全风险高：大型机械设备使用受限，施工多依赖小型化、履带式山地专用设备，工效较低。项目用地规模常达数千亩，被地形分割为数十乃至上百个作业面，跨区域交叉作业增多，相互干扰大。赶工期间外包队伍大量进场，安全管理风险突出。高边坡坍塌、临边坠落、恶劣天气引发的滑坡、

泥石流等自然灾害进一步加剧施工风险。

(5) 设计方案动态调整频繁: 施工过程中常面临诸多约束, 需根据现场实际持续优化设计方案。如集电线路敷设受地形限制, 需动态调整地理与架空方案; 土地征租与地方协调困难可能导致设计变更。部分项目尝试应用柔性支架等新技术, 也带来方案反复调整。

1.3 山地光伏项目施工管理常见问题

(1) “以包代管”现象普遍: 多数业主采用 EPC 总承包模式, 分包后管理职责虚化, 过度依赖合同条款, 忽视施工过程中的安全、质量、进度与造价控制。征地、阻工、合规手续等问题常推诿于总包单位, 导致工期延误与质量缺陷。

(2) 设备采购与仓储管理不足: 光伏组件占项目总投资约 50%, 其采购策略直接影响项目收益。部分项目未结合建设进度科学采购, 或超前囤积或临时高价采购, 价格波动导致造价失控。大量组件仓储期间管理成本高, 且面临火灾、盗窃及资产积压风险。

(3) 运维需求前期考虑不充分: 项目建设未充分考虑后期运维便利性, 如检修通道设计缺失、植被控制措施不足, 投产后运维难度大。山区灌木、竹林生长迅速, 易引发遮挡与火灾风险。

(4) 合规管理存在漏洞: 部分项目触碰耕地与生态保护红线, 土地性质识别不准、未批先建、批少占多、“以组代征”等问题频发。环评与水保措施落实不到位, 施工中削减排水沟、挡土墙等设施, 诱发地质灾害, 损坏农田与水库。

2 山地光伏项目智慧化管理技术应用场景

随着科技日新月异、快速迭代升级, 山地光伏项目全周期智慧化管理不再是“天方夜谭”、“锦上添花”, 而是“雪中送炭”的必然需要和选择, 不同阶段可以采用不同的技术, 保障了项目全周期管理智慧化, 提升了解决难题的路径和手段, 对在新能源上网电价市场化改革大潮下提升项目核心竞争力有着积极意义。

2.1 前期勘察与设计阶段

主要核心目的是测算发电潜力和最小化测算投资运营成本。主要可以运用以下两种技术路线。

(1) 智慧化宏观选址与资源评估

无人机激光雷达扫描: 通过机载 LiDAR 获取高精度三维地形数据, 生成数字高程模型, 通过精确的计算坡度、坡向、遮蔽情况, 指导项目设计, 如组件排布、阴影分析等, 可提供基础。

卫星遥感与气象数据分析: 前期可研时, 可调取当地历史气象数据、卫星云图等材料, 精准评估场址的太阳能总辐射量、气温、风速等自然资源条件, 作

出技术分析。

AI 辅助场址优选: 利用人工智能算法, 将项目重点影响因素, 如光照资源、地形地质、电网接入距离、生态红线、电力市场等, 统筹进行测算, 筛选出最优场址布局。

(2) 智能化系统设计与仿真

AI 自动排布设计: 基于三维地形数据, 在满足结构安全和电气规范等要求前提下, 通过 AI 算法自动生成一些最优的组件布局及设备安装方案, 实现土地资源的最大化应用, 找准合适倾角, 减少光照损失。

数字化孪生模型: 项目建设前期, 通过数字化技术构建项目的数字孪生体 (Project Digital Twin)。在虚拟模型中模拟不同设计方案下的发电效率、土方工程量、电缆长度、道路规划等, 进行多方案比选, 给工程控价出谋划策, 助力于项目决策。

智能电气设计: 应用 AI 进行电气系统设计优化, 合理布置逆变器与箱变位置, 优化线路或电缆敷设路径, 最大限度降低线损与材料成本。

2.2 项目施工建设阶段

此阶段的核心任务是保障施工安全、质量、进度与成本的控制。目前, 广泛运用的是智慧工地系统。智慧工地系统是一种融合 IoT、大数据、云计算、AI 及区块链等先进信息技术的综合性管理系统, 旨在通过数字化和智能化手段提升工地的施工效率、安全性和可持续性^[4]。

(1) 智慧工地管理

BIM 技术应用: 将设计阶段的数字孪生模型导入施工管理, 实现设计、采购、施工一体化协同, 减少变更和浪费。

无人机进度监控: 定期航拍, 通过图像识别技术自动比对工程实际进度与计划进度, 及时发现偏差。

人员与设备定位管理: 为人员和机械设备佩戴 GPS (全球导航定位系统)、BDS (北斗导航定位系统) 或 UWB (超宽带技术) 定位标签, 可以实现实时位置的追踪、电子围栏、SOS 报警, 加强风险管控, 保障施工安全。

智能土方平衡: 基于精确的三维模型, 计算最优的挖填方案, 减少土石方运输量和外弃量, 保护生态环境。

(2) 智慧化物流与安装

无人驾驶运输车/缆车系统: 在陡峭、危险的山地区域, 使用无人驾驶设备运输材料和组件, 降低人工风险和成本。

自动化/半自动化安装机械: 开发或采用适用于坡地的专用机械, 辅助进行桩基施工、支架和组件安装,

提高效率和质量。

2.3 电站竣工投产运行维护阶段

这是智慧化应用价值体现最集中的阶段，核心是提升发电效率、降低运维成本、保障电网安全。

(1) 智能监控与诊断

无人机自动巡检：替代传统人工巡检，无人机搭载红外热成像和可见光相机，可快速扫描整个电站，自动识别热斑、二极管故障、灰尘遮挡、植被侵占等异常。

AI 图像识别分析：自动分析无人机拍摄的图像，精准定位故障组件并生成维修工单，极大提升巡检效率和准确性。

大数据性能分析：实时采集每串组串、每台逆变器的发电数据，通过大数据平台进行横向（同类设备）和纵向（历史数据）对比，精准诊断性能劣化、绝缘异常等隐性故障。

(2) 智能化清洗与指导除杂草、灌木

智能清扫机器人：针对山地坡度大、清洗难的问题，采用适应坡地地形的智能清洗机器人，根据预设路线或平台指令进行自动清洗。

基于气象数据的精准清洗策略：系统综合分析降雨预报、灰尘积累模型和电价因素，智能制定最优清洗计划，实现降本增效。

无人机监测植被：定期监测场区植被生长情况，预测其对组件的遮挡风险，指导精准除草作业。

当然，在运营交易策略制定、后期处置回收等环节都可以采用一些先进技术，降低成本和用工，提升智慧化水平。

3 智慧基建管理系统应用实例分析

随着新能源开始发展，一个集团公司有时会有几十到数百个项目同时建设，运用传统方式管理掌控存在较大困难，同时总部和区域公司的项目管理人员也

不多，管理工作量很大，无法实时掌握项目的具体情况。另外，传统方式也缺乏对项目可量化的监管机制，缺少系统性数据积累和分析。

对于项目部人员来说，有的项目体量大、工程复杂程度高、项目周期紧，对项目管理能力要求很高。但是，受制于现实情况，项目管理工作还比较粗放，存在着工期不合理、材料损坏浪费、措施虚设、用工超量、返工维修、安全疏管、竣工决算慢等问题，不利于项目高质量建设。

因此，多家中央企业集团开发运用了“智慧基建系统”。下面，就以某集团智慧基建管理系统为例，来探讨智慧系统建设方面的认识。

3.1 智慧基建管理系统的主要功能

系统可以对基建项目的安全、质量、进度、物资、档案、人员进行管理和信息展示，实现基建项目全过程“数字化管理、实景化展示、智慧化决策”。通过该系统，项目管理人员能够快速识别安全风险、质量问题和人员履职情况，及时处理项目建设期间的问题，进而提升管理效能。

系统可以实现集团、区域、项目“三级管理”，百个以上基建项目、万名以上基建人员、百万级基建数据同步接入。“基建沙盘”能够直观显示项目地形地貌和设备信息，动态显示工程进度、人员位置、施工环境等信息。系统包含PC端和App移动端，信息采集数字化、便捷化，数据真实性、实用性和沟通效率明显提升。系统可以实现报表编制智能化、造价管控动态化，实现管理规范化，助力项目降本增效。系统通讯接口可订制，信号全面覆盖、性价比突出，同时兼顾了运维需求。

3.2 智慧基建管理系统总体架构

主要架构如图1所示。

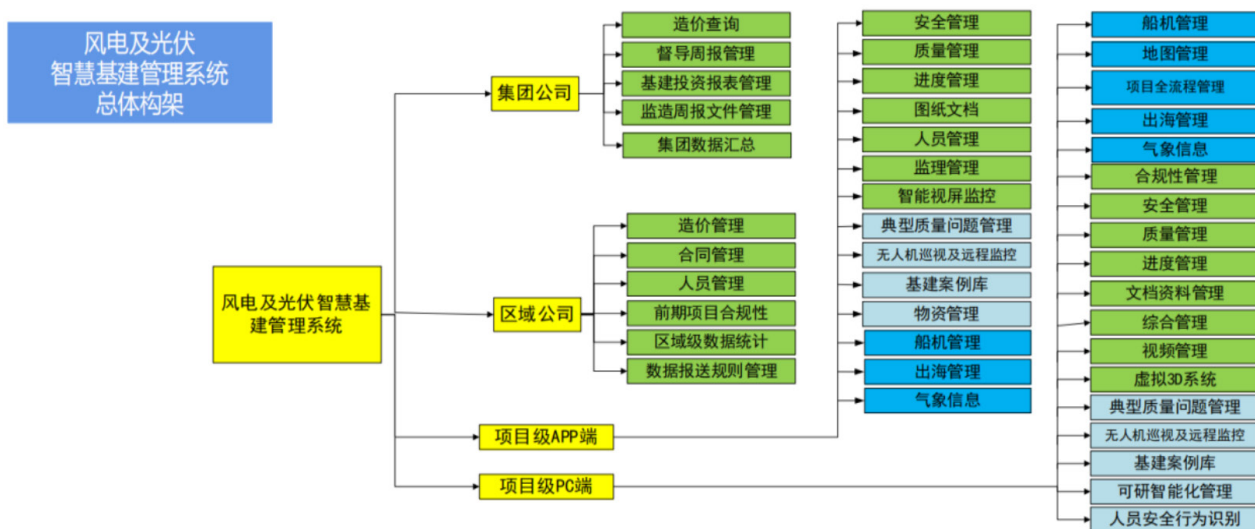


图1 系统总体架构图

3.3 智慧基建管理系统主要应用实践

(1) 安全管理。该模块可以实现将发现的安全问题录入,选择检查项目(即问题所在位置、类型、简单描述、添加照片、整改人、验收人、抄送人、整改期限),完成安全任务的新建与提交,然后传送到整改人进行整改并提交处理结果,验收人对整改情况进行验收,经抄送人再次审核通过方可结束流程。

(2) 质量管理。该模块主要包含质检管理、质量验收、质量通病管理、样板工程、质量检查、验收档案管理内容。可以实现质量数据实时采集。质量验收流程化,准确划分检验批,监理方可进行现场验收并提供现场验收照片等材料留档。质量通病管理模块梳理了光伏板、升压站和集电线路中常见的质量问题,同步提供有关规范和标准,帮助指导现场人员开展质量监督。

(3) 进度管理。该模块以工程验收状态作为进度管理的主线,严格执行施工质量验收及评定项目划分标准,将三级网络进度计划与各验收状态实时关联,真实展示工程的进度状态和偏差。实时显示施工进度、人员位置和环境信息等。主要有“工程进度”、“形象进度”、“每日进度”、“基建沙盘”(图2)、“进度报表”等子模块。

该系统还配置了“监理管理”、“造价及自动化办公”、“人员管理”、“物资及出图管理”等模块,可以实现项目全周期智慧化管理,为现场管理人员减负增效,助力各级管控风险,提升了相关管理水平。

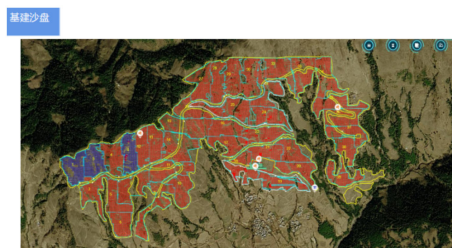


图2 基建沙盘展示图

4 结语

综上所述,山地光伏项目施工管理具有自身优势和难点,在破解这些问题,推动施工管理智慧化上行业上虽然进行了探索布局,迈向了一个新的发展阶段,解决了一些突出问题。但是,随着第四次工业革命带来的深入变革,一个真正前沿的智慧基建管理系统,不应仅仅是管理的“辅助工具”,而应该成为项目管理的“决策大脑”和“自动驾驶系统”,让系统拥有“眼睛”(IoT感知)、“大脑”(AI分析决策)和“手脚”(自动化执行),最终实现项目管理的高度自主与优化,真正将项目打造成优质工程,提升核心竞争力。

参考文献:

- [1] 国家能源局.2025年上半年光伏发电建设运行情况[R].北京:国家能源局,2025.
- [2] 李哲,王磊.复杂地形光伏电站施工关键技术研究[J].太阳能学报,2024,45(2):210-215.
- [3] 张强,刘洋.基于BIM与IoT的智慧工地系统构建与应用[J].土木工程与管理学报,2023,40(4):78-84.
- [4] 陆广萍.光伏电站设计建设的关键技术研究[J].中国科技纵横,2023(1):125-127.