

光伏项目工程建设中的全过程精细化管理实践

黄毅 解顺

国华(宁夏)新能源有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16823

[摘要] 在全球能源结构加速转型的背景下,光伏产业作为清洁能源体系中的关键一环,其工程项目的规模持续扩大、复杂程度不断提升。为应对这一趋势,推行覆盖项目全周期的精细化管理已成为提升建设效能的重要途径。依托系统化流程、标准化规范与数据驱动手段,精细化管理可显著优化投资控制、强化进度与质量监管,实现资源高效配置与风险有效防控,最终提升项目整体效益。本文立足于光伏项目全生命周期,结合实际工程案例,深入剖析设计、采购、施工及运维各阶段精细化管理的具体实施路径,并提出融合数字化技术、完善标准体系、加强专业人才培养等策略,以构建可持续的长效管理机制,为推动光伏项目高质量发展提供理论依据与实践指导。

[关键词] 光伏项目; 全过程管理; 精细化; 工程实践

中图分类号: TK519 **文献标识码:** A

Practice of Whole-Process Refined Management in Photovoltaic Project Construction

Yi Huang Shun Xie

Guohua (Ningxia) New Energy Co., Ltd.

[Abstract] Against the backdrop of the accelerated global energy structure transformation, the photovoltaic industry, as a key component of the clean energy system, has witnessed continuous expansion in project scale and increasing complexity. To adapt to this trend, implementing refined management covering the entire project cycle has become a crucial approach to enhance construction efficiency. Relying on systematic processes, standardized norms, and data-driven methods, refined management can significantly optimize investment control, strengthen schedule and quality supervision, achieve efficient resource allocation and effective risk prevention, and ultimately improve overall project benefits. Based on the whole life cycle of photovoltaic projects and combined with practical engineering cases, this paper deeply analyzes the specific implementation paths of refined management in the stages of design, procurement, construction, and operation and maintenance. Furthermore, it proposes strategies such as integrating digital technologies, improving standard systems, and strengthening professional talent cultivation to build a sustainable long-term management mechanism, thereby providing theoretical basis and practical guidance for promoting the high-quality development of photovoltaic projects.

[Key words] Photovoltaic Project; Whole-Process Management; Refinement; Engineering Practice

1 引言: 光伏产业发展的管理挑战与精细化需求

在全球“双碳”目标驱动下,光伏发电已成为新增装机规模最大的可再生能源类型。根据中国光伏行业协会数据,2024年我国光伏发电新增装机277.57GW,同比增长28%,累计装机突破800GW。然而,在行业高速扩张背景下,光伏项目建设普遍面临多重管理痛点:①成本失控风险因组件价格波动与施工变更频繁而加剧,②支架安装偏差、电缆敷设不规范等质量隐患问题直接影响发电效率,③常因土地流转滞后、投资成本增加、设备供货延迟等因素延迟并网节点。

2 光伏项目全过程精细化管理体系构建

2.1 管理框架设计: 基于PDCA循环的动态控制模型

全过程精细化管理需构建“目标分解-过程监控-偏差纠正-持续改进”的动态控制机制,形成覆盖项目全生命周期的闭环管理体系。以项目全生命周期为横轴,以质量、成本、进度、安全为纵轴,可构建四维管理矩阵:在质量维度,需严格执行ISO9001标准,通过组件EL测试、支架焊缝检测、现场施工检查等12项关键质量控制点实现全流程质量追溯;成本维度则需采用挣值分析(EVM)技术,通过实时监控计划值(BCWS)、挣值(BCWP)、实际

成本 (ACWP) 的动态关系, 提前识别成本偏差并制定纠偏措施; 进度维度需应用关键路径法 (CPM) 优化施工网络图, 通过压缩关键线路工期缩短总工期, 同时利用蒙特卡洛模拟评估工期风险; 安全维度则需推行LEC风险评价法, 对高空作业、电气调试、交通运输、密闭空间等高风险环节实施分级管控, 建立“风险识别-评估-控制-复查”的闭环机制。

2.2 数字化赋能: BIM+GIS+IoT的智能管理平台

数字化技术是精细化管理的核心支撑。某山地光伏项目通过集成BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)与IoT(物联网)技术, 构建了三维可视化智能管理平台。在设计阶段, BIM技术可模拟光伏阵列在不同地形条件下的排布方案, 通过日照辐射分析优化组件倾角与间距, 减少土地使用面积约12%; 施工阶段, 无人机倾斜摄影技术可定期生成实景模型, 与BIM设计模型进行动态对比, 及时发现支架安装偏差、电缆敷设错误等问题, 偏差纠正响应时间缩短至2小时内; 运维阶段, 部署的环境监测传感器可实时采集温度、湿度、风速等数据, 结合设备状态监测终端采集的电流、电压、温度等参数, 通过机器学习算法实现发电量预测准确率提升至92%, 故障预警时间提前72小时。该平台数据表明, 数字化管理使项目资源利用率提高约35%, 运维成本降低约22%。

3 分阶段精细化管理实践路径

3.1 设计阶段: 价值工程驱动的方案优化

设计阶段是项目成本与性能的决定性阶段。某项目采用价值工程 (VE) 方法, 通过功能分析与成本估算, 对组件选型、支架设计、集电线路等关键方案进行系统性优化。在组件选型环节, 对比单晶PERC与HJT组件的初始投资、发电效率、衰减率等参数, 结合当地光照资源与电价政策, 计算全生命周期度电成本 (LCOE), 最终选择性价比更优的PERC组件; 支架设计环节, 针对山地地形特点, 对比固定式、固定可调式、单轴跟踪式三种支架的经济性, 发现固定可调式支架虽初始投资增加约8%, 但年发电量提升3.2%, 投资回收期仅增加0.5年; 场内集电线路优化环节, 通过GIS技术分析地形高程数据, 采用“之”字形路径规划替代传统分支直线敷设方式, 减少集电线路电缆用量约8km, 节约直接成本约240万元, 同时降低线路压降损失^[1]。优化后项目全投资内部收益率 (IRR) 由7.8%提升至约8.3%, 投资回收期缩短约0.8年。

3.2 采购阶段: 供应链协同的成本控制

光伏设备价格波动与供应链风险是采购阶段的核心挑战。某项目建立“战略采购+动态调价”机制, 通过供应链协同实现成本可控。组件采购方面, 与头部厂商签订框架协议, 锁定60%产能, 剩余40%通过期货市场对冲价格风险, 2023年至2024年硅料价格波动期间, 项目组件成本较市场均价低0.05元/W; 逆变器采购采用VMI(供应商管理库存)模式, 供应商根据项目进度计划动态调整库存, 减少项目方库存资金占用300万元, 同时避免缺货导致的工期延误; 物流优化方面, 开发运输路径规划算法, 综合考虑道路条件、运输距离、装卸时间等因素, 优化后单趟运输成本降

低15%, 运输时效提升20%。项目实际采购成本较预算节约8.2%, 且未出现因设备短缺导致的工期延误。

3.3 施工阶段: 标准化作业的质量管控

施工阶段是质量形成的关键环节。某项目制定《光伏施工工艺标准图集》, 明确28项关键工序操作规范, 通过标准化作业实现质量可控。支架安装环节, 采用激光水平仪进行基础定位, 垂直度偏差控制在±8mm以内; 组件铺设环节实施“三检制”(自检、互检、专检), 每组组串的组件安装后需进行外观、接地、倾角三项检查, 组件破损率由行业平均0.3%降至0.1%; 施工用电的电气施工环节严格执行“三相五线制”, 接地电阻测试合格率达100%, 避免因接地不良引发的设备损坏风险^[2]。

3.4 运维阶段: 预测性维护的效能提升

运维阶段是项目收益持续性的保障。某项目构建“状态监测-故障诊断-运维调度”闭环体系, 通过预测性维护提升运维效能。智能诊断方面, 基于SCADA系统采集的设备运行数据, 结合机器学习算法建立故障预测模型, 可提前72小时预测逆变器IGBT模块故障, 故障发现时间较传统定期巡检缩短90%; 无人机巡检方面, 搭载红外热成像仪与可见光相机, 对组件进行PID效应、热斑、隐裂等缺陷检测, 单日巡检容量达50MW, 较人工巡检效率提升5倍; 备件管理方面, 应用ABC分类法优化库存结构, A类备件(如逆变器功率模块)采用“零库存”模式, 由供应商直送现场, B类备件(如电缆接头)设置安全库存, C类备件(如螺栓)采用经济批量采购, 关键备件满足率保持98%以上。

4 精细化管理的保障机制

4.1 组织保障: 矩阵式管理架构

精细化管理的有效实施需依托科学的组织架构。某项目建立“项目部+专业组”的矩阵式组织, 项目部负责整体协调与目标管控, 专业组(如设计组、采购组、施工组、手续组)负责具体业务执行。明确质量、安全、成本等职能线条的权责边界, 例如质量经理对设计、采购、施工全流程质量负总责, 拥有“一票否决权”, 可直接叫停不符合质量标准的工序; 成本经理负责编制资金使用计划, 监控预算执行情况, 对超支项目需提交专项分析报告^[3]。该架构避免了部门间推诿现象, 项目决策效率提升。

4.2 制度保障: 标准化作业流程

标准化是精细化管理的基石。某项目编制《光伏项目管理手册》, 涵盖12个管理模块、87项制度文件, 形成覆盖全生命周期的管理标准体系。例如, 《施工变更管理办法》规定: 单次变更金额超过50万元需经公司总经理办公会审批, 50万元以下变更由项目经理组织技术、成本、采购部门联合评审, 变更申请需附变更原因、方案对比、成本影响等分析材料, 防止随意变更导致的成本失控; 《质量奖惩制度》明确质量责任追溯机制, 对质量事故实行“四不放过”原则(原因未查清不放过、责任未落实不放过、整改未到位不放过、教训未总结不放过), 同时设立质量改进奖励基金, 对提出有效改进建议的团队或个人给予奖励^[4]。

4.3 人才保障: 复合型团队建设

精细化管理的实施需要高素质人才队伍支撑。某项目实施“光伏+工程管理”双导师制培养计划,要求项目经理同时具备一级建造师与安全认证资格,技术负责人需掌握BIM建模、Project进度计划、数据分析等数字化技能。项目团队中,具备数字化技能人员占比达60%,其中4人获得机器学习工程师认证,3人具备无人机驾驶资质。通过定期组织技术交流与案例分享会,团队形成了“数据驱动决策”的管理文化,例如在支架安装偏差分析中,技术人员通过采集1000组安装数据,建立偏差分布模型,发现地形坡度是导致偏差的主要因素,进而优化了施工工艺。

5 实践案例: 某50MW山地光伏电站项目

项目地点: 中国西南某山区,地形复杂(坡度 15° – 35°),海拔800–1200米,植被覆盖率高。

项目规模: 50MW,采用单晶PERC双面双玻组件,固定支架+少量平单轴跟踪系统。

项目周期: 2023年9月–2024年6月(10个月)。

核心挑战: 地形复杂导致施工难度大、设备运输困难、生态保护要求高、工期紧张。

5.1 全过程精细化管理实践

项目规划阶段: 使用无人机激光雷达(LiDAR)扫描,生成高精度数字高程模型(DEM),识别坡度、植被覆盖、阴影遮挡区域。结合GIS系统模拟全年太阳轨迹,优化组件排布,减少阴影损失,提升发电量3%。委托第三方机构进行环境影响评估(EIA),划定生态敏感区(如古树、水源地),调整支架基础位置,避免破坏。制定“边施工边修复”方案,施工后立即覆盖草籽,减少水土流失。

设计阶段: 针对山地坡度差异,设计3种标准化支架(15° 、 25° 、 35°),减少非标定制成本12%。采用热镀锌钢结构,防腐等级C5,适应高湿度环境。使用BIM建模模拟电缆敷设路径,减少弯曲半径不足导致的损耗,电缆长度优化节省8%。预留物联网接口,集成智能运维系统(如无人机巡检、AI故障诊断),降低后期改造成本。

施工阶段: 将场地划分为10个施工区,每区配置独立施工队,避免交叉作业干扰。修建临时施工道路(宽度4.5米,坡度 $\leq 8\%$),采用模块化运输架,单趟运输量提升40%。租赁直升机吊运大型设备(如逆变器、变压器)至山顶,缩短工期15天。每块组件粘贴唯一二维码,记录生产批次、安装位置、测试数据,实现全生命周期追溯。关键工序(如支架焊接、电缆接头)采用无损检测(X射线/超声波),一次验收合格率提升至99.2%。实施“安全积分制”,工人每日佩戴智能安全帽(含定位、跌倒报警功能),违规

操作自动扣分并预警。

山区防雷接地电阻 $\leq 4\Omega$,远低于国家标准(10Ω),确保设备安全。

运维阶段: 部署无人机自动巡检系统,每周生成热成像报告,识别组件故障、接线松动等问题。利用AI算法分析SCADA数据,提前30天预测逆变器故障,非计划停机时间减少60%。安装植被生长监测摄像头,结合土壤湿度传感器,动态调整灌溉方案,确保植被覆盖率 $\geq 85\%$ 。

5.2 管理成效与数据对比

表1 项目管理成效

指标	传统管理方式	精细化管理后	提升幅度
项目工期	14个月	10个月	-28%
单位kW投资成本	3.5元/W	2.7元/W	-22%
发电量首年衰减率	2.5%	2.1%	-16%
运维成本	0.04元/kWh	0.03元/kWh	-25%
生态修复合格率	85%	98%	+15.3%

6 结语

光伏项目全过程精细化管理是行业高质量发展的必然选择,也是企业高质量发展的必由之路。当前实践表明,通过动态控制模型、数字化平台、标准化作业等手段,可显著提升项目成本、质量、进度管控水平,通过全过程精细化管理提升项目收益率。未来研究需进一步探索以下方向:一是AI深度应用,利用大模型实现施工方案自动生成与风险智能预警,例如通过强化学习算法优化施工机械调度路径;二是全生命周期碳管理,建立从原材料生产到退役回收的碳足迹追踪体系,开发碳减排量化模型;三是新型电力系统适配,研究光伏+储能+氢能的协同优化管理策略,例如通过数字孪生技术模拟不同储能配置下的系统运行效率。通过持续管理创新与技术赋能,光伏项目将真正成为推动能源革命的核心载体。

[参考文献]

- [1]肖钟巍,杨泽春,何英健,等.大型光伏项目全过程质量管理研究[J].工程建设与设计,2024,(20):245–247.
- [2]刘振涛.光伏发电工程全过程项目管理实践分析[J].四川建材,2024,50(05):224–226.
- [3]徐海龙.全过程项目管理在光伏发电工程中的应用[J].光源与照明,2022,(08):72–74.
- [4]肖刚.南宁W村EPC分布式光伏发电项目过程管理研究[D].广西大学,2021.