

沙漠大型光伏项目基于 LoRa 协议的光伏跟踪支架通信系统能效优化研究

陈应坚

中国能源建设集团广东火电工程有限公司

摘 要：在沙漠大型光伏项目中，光伏跟踪支架的精准控制依赖稳定高效的通信系统，而沙漠环境的沙尘衰减、温度漂移等特性对通信链路的可靠性与能效提出严苛要求。LoRa 协议凭借低功耗、广覆盖、抗干扰的技术优势，成为适配沙漠广域部署的优选方案。本文围绕沙漠光伏项目跟踪支架通信需求，开展基于 LoRa 协议的通信系统能效优化研究。首先分析 LoRa 协议核心技术与沙漠环境的适配性，明确能效优化的关键指标；随后设计融合双频冗余传输、动态功率调整与抗沙尘天线的 LoRa 通信系统架构；通过库布齐沙漠光伏基地的实验验证，对比不同通信技术的传输性能、功耗及抗沙尘能力，并验证优化系统对发电效率的提升效果；最后提出分时调度与边缘计算的能效优化策略，完成经济性分析。该研究为沙漠大型光伏项目通信系统的能效提升与成本控制提供技术支撑，具有重要工程应用价值。

关键词：沙漠光伏项目；LoRa 协议；光伏跟踪支架；通信系统；能效优化

引言

全球能源转型进程中，光伏能源作为清洁能源的重要组成部分，其开发规模持续扩大。沙漠地区拥有丰富的光照资源，成为大型光伏项目的核心布局区域，但该区域极端的自然环境也为项目建设与运维带来诸多挑战。光伏跟踪支架通过实时调整光伏组件角度追踪太阳轨迹，可显著提升发电效率，其控制指令的精准传输与状态数据的实时反馈均依赖通信系统的稳定运行。传统通信技术中，ZigBee 覆盖范围有限，4G 方案运维成本高昂，均难以适配沙漠光伏项目广域部署与低功耗运维的核心需求。LoRa 协议作为低功耗广域网技术的典型代表，具备广覆盖、低功耗、抗干扰的技术特性，为解决沙漠光伏通信难题提供了新路径。当前关于 LoRa 协议在光伏领域的应用研究多集中于常规环境，针对沙漠特殊环境的能效优化研究仍较为匮乏。基于此，本文围绕沙漠大型光伏项目基于 LoRa 协议的光伏跟踪支架通信系统能效优化展开探讨，具有重要的理论和实践意义。

1 LoRa 协议特性与沙漠环境适配性分析

1.1 LoRa 协议核心技术

LoRa 协议的核心优势源于其独特的技术设计，扩频调制技术是其实现远距离低功耗通信的基础。该技术通过调节扩频因子实现灵敏度优化，扩频因子范围覆盖 SF7 至 SF12，对应的接收灵敏度可达 -148dBm ，相较于传统 FSK/ASK 调制技术，抗干扰能力显著提升，能够有效抵御复杂环境中的信号干扰。网络拓扑设计上，LoRa 采用星型组网架构，单网关可实现 15km 半

径的覆盖范围，这种广覆盖特性无需复杂的中继设备，完美适配沙漠大型光伏项目阵列间距大、部署分散的场景需求。低功耗设计是 LoRa 协议适配光伏跟踪支架低维护需求的关键，其节点休眠电流可控制在 $1\mu\text{A}$ 以下，配合合理的功耗管理策略，能够实现长达 10 年的电池使用寿命，大幅降低沙漠光伏项目的运维成本与难度。

1.2 沙漠环境对通信的影响

沙漠环境的特殊气候与地形条件对通信系统构成多重挑战，沙尘衰减是最主要的影响因素之一。直径超过 $10\mu\text{m}$ 的沙尘颗粒会造成信号每公里 3 至 5 分贝的衰减，强沙尘暴天气下这一衰减值还会显著增加，直接影响通信链路的传输距离与稳定性。温度漂移同样不可忽视，沙漠地区昼夜温差大，高温环境会导致通信模块晶振频率偏移 $\pm 50\text{ppm}$ ，这种频率偏移会破坏时钟同步精度，进而影响数据传输的准确性^[1]。此外，沙漠地区的沙丘地形会引发信号多径效应，反射信号与直射信号相互干扰，导致误码率显著上升，实测数据显示极端地形下误码率可超过 10^{-3} ，无法满足跟踪支架精准控制的通信需求。这些环境因素共同作用，对通信系统的抗干扰能力、稳定性与适应性提出了更高要求。

1.3 能效优化需求

结合沙漠大型光伏项目的实际部署场景与运行需求，基于 LoRa 协议的光伏跟踪支架通信系统需满足明确的能效优化指标。传输距离方面，沙漠光伏项目阵列间距通常较大，通信系统需实现 5km 以上的稳定

覆盖, 确保控制指令能够精准传输至远端跟踪支架节点。可靠性是保障跟踪支架正常运行的核心前提, 要求系统误码率严格控制在 10^{-5} 以内, 数据重传率低于 1%, 避免因数据丢失或错误导致跟踪角度偏差。功耗控制直接关系到项目运维成本, 考虑到沙漠地区运维难度大, 单节点需实现日均功耗 $\leq 50\text{mAh}$ 的目标, 确保电池使用寿命达到 5 年以上的免维护要求^[2]。这些需求相互关联、相互约束, 构成了通信系统能效优化的核心目标。

2 基于 LoRa 的跟踪支架通信系统设计

2.1 系统架构

基于 LoRa 协议的光伏跟踪支架通信系统采用分层架构, 实现传感器数据采集、指令传输与远程控制的闭环运行。底层为传感器节点层, 每个跟踪支架配置一个节点, 集成角度传感器、风速仪、LoRa 模块与电机驱动器, LoRa 模块选用四信 F8L10ST 型号, 可实时采集组件角度、环境风速数据, 并接收指令驱动电机调整支架角度。中间层为网关层, 采用 470MHz 与 868MHz 双频冗余配置, 配备 27dBm 大功率 PA 增强传输能力, 外壳防护等级达 IP67 以抵御沙漠恶劣天气。网关承担数据转发功能, 通过 LoRa 链路接收节点数据后经 4G 或光纤上传云平台, 同时转发云平台控制指令至节点。顶层为云平台层, 实现数据存储、分析与控制指令生成, 通过远程监控界面掌握支架运行状态并部署控制策略^[3]。

2.2 关键技术创新

2.2.1 双频冗余传输协议

针对沙漠环境通信链路易受干扰的问题, 设计双频冗余传输协议优化通信可靠性。该协议采用主频与备频分工协作的工作机制, 选取 470MHz 作为主频用于传输控制指令, 该频段穿透能力强、信号衰减小, 能够保障控制指令的优先传输; 868MHz 作为备频用于传输状态数据, 平衡数据传输效率与链路负载^[4]。系统实时监测主频链路质量, 当主频出现故障或信号强度低于阈值时, 自动切换至备频传输, 切换时间可控制在 50ms 以内, 确保数据传输不中断。实验数据验证, 该双频冗余设计可使数据丢失率降低 90%, 显著提升了通信系统的抗干扰能力与稳定性^[5]。

2.2.2 动态功率调整算法

为平衡通信可靠性与功耗控制需求, 提出基于信号强度反馈的动态功率调整算法。该算法实时采集接收信号强度指示值, 根据 RSSI 数值动态调整节点发射功率, 发射功率调节范围为 10 至 27dBm。当节点与网关距离较近、RSSI 数值较高时, 系统自动降低发射功

率以减少功耗; 当距离增加或信号衰减加剧导致 RSSI 数值降低时, 则提高发射功率保障通信质量。实际应用效果显示, 该算法实施后节点平均功耗降低 40%, 续航时间延长 2.5 倍, 有效实现了能效优化目标。

2.2.3 抗沙尘天线设计

针对沙漠沙尘对信号传输的衰减影响, 开展抗沙尘天线结构创新设计。采用螺旋锥形天线结构, 通过优化天线辐射角度使衍射角扩大至 120° , 提升信号的覆盖范围与穿透能力, 天线增益达到 3dBi, 增强信号传输强度。同时, 在天线表面覆盖 PTFE 涂层, 该涂层具备优良的防黏附特性, 可显著降低沙尘附着率。测试数据表明, 优化后的抗沙尘天线沙尘附着率降低 80%, 有效减少了沙尘对天线性能的影响, 保障了通信链路的稳定。

3 实验验证与结果分析

3.1 实验平台搭建

为验证基于 LoRa 协议的通信系统性能及能效优化效果, 在庫布齐沙漠光伏基地搭建实验平台。该区域年均降水量 150mm, 年均风速 3.5m/s, 具备典型的沙漠气候特征, 能够真实模拟沙漠大型光伏项目的运行环境。实验测试设备包括 Agilent N8975A 频谱分析仪、Keysight 34461A 数字万用表与沙尘模拟箱, 其中频谱分析仪用于检测信号强度与传输质量, 数字万用表用于精准测量节点功耗, 沙尘模拟箱用于模拟不同浓度的沙尘环境, 开展抗沙尘性能测试。实验选取 100 个光伏跟踪支架节点, 按照实际项目部署密度布设, 网关安装于项目中心区域, 构建完整的通信测试系统。

3.2 性能对比测试

传输距离是评估通信系统适配沙漠广域部署的关键指标, 为验证 LoRa 协议的优势, 选取 470MHz、868MHz 两个 LoRa 频段与传统 ZigBee 技术开展对比测试, 不同通信技术的传输性能测试结果如表 1 所示。

表 1 不同通信技术的最大传输距离与误码率对比

频段 / 技术	最大传输距离 (km)	误码率 (1km 处)
470MHz (LoRa)	12.5	1.2×10^{-5}
868MHz (LoRa)	8.3	2.8×10^{-5}
ZigBee	1.2	1.5×10^{-3}

从表 1 数据可以看出, 470MHz LoRa 频段的最大传输距离达到 12.5km, 1km 处误码率仅为 1.2×10^{-5} , 均显著优于 868MHz LoRa 频段与 ZigBee 技术。ZigBee 技术最大传输距离仅 1.2km, 误码率高达 1.5×10^{-3} , 无法满足沙漠光伏项目的通信需求。功耗测试结果显示, LoRa 节点静态功耗为 $0.8\mu\text{A}$, 低于 ZigBee 节

点的 $1.2\mu\text{A}$ ；动态功耗方面，LoRa 节点在 27dBm 发射功率下为 60mA，ZigBee 节点在 0dBm 发射功率下为 45mA，但 LoRa 的传输距离是 ZigBee 的 10 倍以上，单位距离传输的功耗优势显著。抗沙尘测试中，在 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 的强沙尘暴模拟环境下，LoRa 信号衰减为 1.2dB/km，而 ZigBee 信号衰减达到 4.5dB/km，验证了 LoRa 协议更强的抗沙尘干扰能力。

3.3 发电效率验证

为验证通信系统优化对光伏项目发电效率的提升效果，开展为期 6 个月的连续运行测试，测试周期为 2025 年 6 月至 12 月。将优化后的 LoRa 通信系统与传统通信系统分别应用于相同规模的光伏阵列，对比两组阵列的发电量与设备故障率。测试结果显示，采用优化后 LoRa 通信系统的阵列发电量提升 18.7%，主要得益于跟踪支架控制指令的精准传输，确保光伏组件始终处于最佳受光角度。同时，系统故障率从 0.5 次/月降至 0.1 次/月，大幅降低了因通信故障导致的发电损失，提升了项目运行的稳定性。

4 能效优化策略与经济性分析

4.1 能效优化策略

提出两项能效优化策略进一步提升通信系统能效。分时调度策略依据沙漠日照强度变化调整数据传输频率：强光时段光伏组件角度调整频繁，传输频率设为每 10 分钟一次；弱光时段调整频率降低，传输频率改为每小时一次，通过减少无效传输降低节点功耗。边缘计算策略在网关侧部署轻量级 AI 模型，实时分析过滤传感器原始数据，剔除冗余与异常数据后再上传云平台。应用效果显示，该策略可减少 30% 云端传输量，既降低网关与云平台间传输功耗，也减轻云平台处理压力，提升系统响应速度。

4.2 经济性分析

从全生命周期角度开展经济性分析，对比 LoRa 通信方案与传统 4G 方案成本。结果显示，LoRa 方案单 MW 投资成本比 4G 低 22%，核心原因是其网关覆

盖范围广，减少部署数量且无需 4G 流量费用；运维成本低 35%，得益于节点低功耗与长寿命特性，降低设备更换与电池维护频次。以 100MW 沙漠光伏项目为例，收益测算表明，优化后系统年增收电费 120 万元，投资回收期缩短至 4.2 年，显著提升项目经济性与投资价值。

5 结束语

本文针对沙漠大型光伏项目跟踪支架通信系统能效优化需求，开展基于 LoRa 协议的技术研究与实践验证，核心结论如下：LoRa 协议的扩频调制、广覆盖与低功耗特性可有效适配沙漠环境通信需求，结合双频冗余传输、动态功率调整与抗沙尘天线技术创新，能显著提升通信系统可靠性与能效；实验验证表明，优化后系统最大传输距离 12.5km，误码率 1.2×10^{-5} ，单节点日均功耗满足 5 年免维护要求，配套分时调度与边缘计算策略后，项目发电量提升 18.7%，故障率显著降低；经济性分析证实，LoRa 方案较 4G 方案成本优势明显，投资回收期缩短至 4.2 年。后续可进一步探索 AI 算法与 LoRa 系统的深度融合，优化动态功率调整策略的实时性与精准性，为沙漠光伏项目智能化升级提供更强大技术支撑。

参考文献：

- [1] 夜昊, 刘志伟, 张磊, 高建伟, 袁少卿. 沙漠地区光伏支架基础选型及试验研究 [J]. 西北水电, 2024, (04): 148-155.
- [2] 李积瑜. 沙漠地区光伏电站建设中电气安全风险评估与防控策略 [J]. 电气防爆, 2024, (04): 43-46.
- [3] 刘霄, 潘德强, 杨会. 沙漠光伏电站跟踪系统的设计应用与创新研究 [J]. 科学技术创新, 2024, (11): 5-8.
- [4] 周彦. 光伏治沙: 土地荒漠化治理的中国方案 [J]. 七彩语文, 2023, (18): 2-5.
- [5] 郭瑞, 曹毅. 沙漠小型光伏热基地的可行性分析及节能建模研究 [J]. 四川水力发电, 2022, 41(06): 132-136.