

光伏区与风电场集电线路交叉施工安全技术研究

张 浩 魏海洋 薛 兵 叶 智 杨志鹏

中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 615500

摘 要：在新能源项目集中开发区域，新建光伏电站与既有风电场共存的现象日益普遍。当光伏电站的集电线路需穿越既有风电场的集电线路时，便形成了复杂的地下管线交叉作业场景，其施工安全风险尤为突出。本文以凉山州美姑县 940MW 光伏电站 EPC 总承包 III 标段工程为实例，深入剖析了在高海拔（海拔 2800-3500m）、地质条件复杂（古生界二叠系上统峨眉山玄武岩及第四系残坡积层）且存在 16 处轨迹交叉点的严苛环境下，如何通过精准探测、科学设计、精细施工与严密管控等一系列关键技术措施，有效保障交叉施工的安全。重点论述了“管线雷达（GPR）+ 电缆路径仪”双法探测、水平定向钻（拉管法）非开挖施工技术的应用、以及贯穿全过程的安全组织保障体系，旨在为同类工程提供一套系统、可靠、可复制的安全技术解决方案。

关键词：光伏电站；风电场；集电线路；交叉施工；水平定向钻；安全技术

引言

国家“双碳”战略推动风光大基地建设，风、光协同开发带来地下交叉施工新挑战。新建光伏集电线路常与带电运行的风电集电线路交叉，安全风险极高，被列为“超危大工程”，须专项方案并专家论证。以凉山州美姑县 940MW 光伏项目 III 标段为例，其 35kV 集电线路长 35.2km，与既有风电电缆交叉 16 处，地处高山陡坡（最大坡度 45°），地质为玄武岩及残坡积层，覆盖层厚 0.4~1.5m，局部更厚，交通依赖山皮石路和乡道，施工条件艰苦。本文从工程概况、核心难点、关键技术及保障体系四方面，系统阐述此类交叉施工的安全技术要点，对保障安全、稳定运行及新能源高质量发展

具有重要意义。

1 工程概况与交叉施工难点分析

1.1 工程基本情况

本项目位于四川省凉山彝族自治州美姑县境内，直流侧装机容量 376.75MW，交流侧装机容量 323.1MWp，共包含 13 条 35kV 集电线路回路^[1]。集电线路采用 ZC-YJLW03-26/35kV-1×500mm² 交联聚乙烯绝缘皱纹铝套电力电缆，直埋敷设。项目地处高山峡谷地貌，海拔高程在 2800m 至 3500m 之间，属典型的高寒山区气候，昼夜温差大，雨季集中，对施工组织提出了严峻挑战。

1.2 交叉施工的核心难点

表 1：典型交叉点既有电缆与拟建电缆埋深统计（节选）

点位编号	既有电缆埋深/m	拟建电缆埋深/m	备注
1#	0.90~1.00	1.50	/
2#	0.53~0.60	1.10	/
3#	1.50~1.65	0.70	未交叉
6#	1.15~1.50	0.70	上方穿过
9#	1.30~1.40	0.70	上方穿过
13#	0.67~0.76	1.26	/

本工程最突出的技术与安全难点在于与既有风电场集电线路的交叉施工。经现场初步排查，项目共有 16 处轨迹交叉点。这些交叉点构成了施工安全的重大风险源，具体难点体现在以下三个方面：

1.2.1 带电作业风险高，容错空间极小

既有风电场集电线路处于运行状态，一旦施工过程中不慎损伤其电缆外护套或绝缘层，极易导致短路、接地故障，轻则造成局部停电，重则引发触电伤亡事故和火灾。因此，施工过程必须确保与既有电缆保持绝对安全的净距，严禁任何形式的直接接触或挤压。

1.2.2 地质条件复杂, 轨迹控制难度大

交叉点区域的地层包括松散的残坡积层(含碎石、块石)和坚硬的风化玄武岩。在松散地层中钻进易发生塌孔、偏斜;在坚硬岩层中扩孔则效率低下且震动大^[2]。如何在这种“上软下硬”的复合地层中精确控制钻进轨迹,是确保安全穿越的关键技术难题。

1.2.3 施工方法受限, 传统开挖不可行

对于大部分交叉点,若采用传统的明挖方式,不仅会大面积破坏既有风电场的运行环境,更会在开挖过程中对下方或上方的带电电缆构成直接威胁。因此,必须采用非开挖技术,以最小的地面扰动实现安全穿越。

2 光伏区与风电场集电线路交叉施工安全关键技术措施

2.1 精准探测与轨迹设计——安全施工的前提

“知己知彼,百战不殆”。在交叉施工前,对既有电缆的精确定位是所有安全措施的基础。项目方案对此提出了极为严格的要求:

2.1.1 双法联合探测

作业前,采用管线雷达(GPR)+电缆路径仪双法探测。管线雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)能够发射高频电磁波穿透地层,通过接收不同介质界面的反射信号,生成地下管线的二维或三维图像,可有效识别金属、非金属管线及地层分界面。而电缆路径仪则通过感应或直连的方式,精确定位带电电缆的位置、走向和埋深。两种方法相互验证、互为补充,可以最大程度地消除探测盲区,绘制出1:100精度的“地层-电缆综合剖面图”,为后续的轨迹设计提供精确的空间数据。

2.1.2 人工探坑验证

在每处交叉点,仅靠仪器探测仍不足以完全规避风险。方案进一步要求:“每处交叉点人工开挖探坑,确认原有电缆走向,埋深,数量等参数”。探坑尺寸应不小于1.5m(长)×1.0m(宽)×1.5m(深),开挖时必须使用木制或竹制工具,严禁使用铁锹等金属工具,以防误伤电缆。通过直观的目视检查,可以最终核实仪器数据的准确性,并探明电缆的实际保护状况(如是否有PVC或钢管保护管、保护管的规格型号等),为后续的轨迹设计提供最可靠的依据^[3]。同时,方案强调探坑开挖后应及时用原土回填并夯实,恢复地貌,确保现场安全。

2.1.3 科学优化轨迹

基于精准的探测数据,轨迹设计遵循“安全避让、最小扰动、经济可行”的原则。方案明确指出:“优先选择从既有电缆下方0.5m以上穿越,若受地质条件限制无法下穿,则保证上方穿越净距不小于0.5m,严禁斜

穿或近距离侧穿”。这个0.5m的安全距离是基于电缆运行热胀冷缩、土壤沉降以及施工误差等因素综合考虑的安全裕度。同时,严格控制入土角与出土角在8°~12°之间,避免急弯对孔壁造成过大扰动。轨迹曲线应平滑过渡,曲率半径不得小于150倍的管道外径,以减少回拖阻力和对孔壁的扰动。

2.2 水平定向钻(拉管法)精细化施工——安全穿越的核心

水平定向钻技术是非开挖穿越既有管线的核心手段。项目方案对其施工全过程进行了精细化的分解和控制。

2.2.1 设备就位与系统调试

基座采用枕木铺垫夯实,避免残坡积松散土层导致机位沉降位移。钻机选用额定回拖力不小于100吨的大型水平定向钻机,以满足长距离、大口径穿越的需求。更重要的是,在风电场强电磁干扰环境下,有线导向系统的定位精度至关重要,方案要求“校验有线导向系统,确保定位误差不超过±5cm”。同时,针对不同地层配制专用护壁泥浆,泥浆配方为:膨润土(5%-8%)+纯碱(0.3%-0.5%)+降失水剂(0.1%-0.2%),泥浆粘度控制在45-55s(马氏漏斗粘度),以保证孔壁稳定,防止塌孔。

2.2.2 导向孔钻进实时监控

采用有线导向仪,实施监测拉管轨迹,每钻进1m测一次高程和方位。通过高频次的数据采集和实时比对,一旦发现轨迹偏差超出允许范围(高程偏差 $\leq \pm 5\text{cm}$),必须立即停止钻进,回退至最后合格点,重新调整钻进参数后继续推进,严禁强行纠偏。方案还特别指出,在遇残坡积碎石层时,应降低钻进速度至0.5-1m/min,切换为“低扭矩、高泵压”模式,利用泥浆的悬浮能力携带碎石;在全风化玄武岩层时,则需适当提高泥浆粘度至60s,并增加泥浆循环量,防止缩径塌孔^[4]。钻进过程中,操作手、导向员、安全员三方必须保持实时通讯,形成闭环控制。

2.2.3 分级扩孔与压力控制

扩孔是为后续回拖管道创造空间,但也是最容易对既有电缆造成挤压的工序。方案对此有严格规定:“采用 $\Phi 150 \rightarrow \Phi 250 \rightarrow \Phi 350$ 的分级扩孔工艺”,即先用 $\Phi 150\text{mm}$ 的扩孔器进行预扩,再用 $\Phi 250\text{mm}$ 的扩孔器进行主扩,最后用 $\Phi 350\text{mm}$ 的扩孔器进行终扩,以减小单次扩孔的扰动和扭矩。最关键的是,“扩孔时严格控制泥浆压力,防止溢浆、顶挤既有电缆”,明确要求“泥浆压力不超过1.5MPa”。在遇到强风化玄武岩时,

还需更换镶齿岩石扩孔钻头,采用间歇式作业(钻进 10 分钟,停机 5 分钟),以减少持续震动对周围环境的影响。扩孔完成后,必须进行洗孔作业,直至返出泥浆清澈无杂质为止。

2.2.4 护套管回拖与孔洞注浆

光伏电缆预先穿入 PE100 级、SDR17 系列、公称外径为 $\Phi 250\text{mm}$ 的高密度聚乙烯(HDPE)护套管后进行回拖,可有效保护电缆免受泥浆侵蚀和机械损伤。回拖过程采用“匀速低张力模式”,回拖速度控制在 $2\sim 3\text{m/min}$,回拖力不得超过计算值的 80%,并实时监测回拖力、扭矩和泥浆压力。回拖完成后,立即进行孔洞注浆回填,采用水灰比为 0.5:1 的纯水泥砂浆,通过预留的注浆孔自下而上分段注入,填充孔洞间隙,防止后期地表沉降对电缆造成二次伤害,注浆压力严格控制在 $0.3\sim 0.5\text{MPa}$ 之间,避免压力过大对既有电缆产生挤压。方案还要求回拖完成后进行通球试验,使用直径为管道内径 85%的清管器,检查管内通畅性。

2.3 传统直埋段的安全防护——全面覆盖的风险管控

对于少数 3 处可采用人工开挖的交叉点(3#、6#、9#),方案同样制定了周密的安全措施。首先,必须在开挖前再次通过人工探坑确认既有电缆位置,并采用特制的木质或复合材料横担对既有电缆进行悬吊保护,悬吊间距不大于 2m。其次,开挖过程必须全程由专职安全员旁站监护,作业人员必须穿戴 10kV 等级的绝缘鞋、绝缘手套,并使用木柄或玻璃钢柄的绝缘工具。开挖深度严禁超过探明的既有电缆埋深。最后,新电缆敷设及回填时需格外小心,回填土中不得含有直径大于 50mm 的石块等硬物,并分层夯实。此外,对于非交叉区域的直埋施工,方案也强调了通用的安全规范,如电缆埋深不得小于 0.8m(穿越道路时不得小于 1.0m)、上下各铺设 100mm 厚软土或细砂作为缓冲层、加盖混凝土保护板(C20, $200\text{mm}\times 500\text{mm}\times 50\text{mm}$)、距地面 300mm 处设置黄色警示带、并在直线段每隔 50m、转角处、接头处设置电缆标识桩,这些措施共同构成了一个全方位、立体化的安全防护网络。

3 安全组织与保障体系

再完美的技术方案也需要强有力的组织体系来保障执行。项目方案构建了一个多层次、全覆盖的安全管理架构。(1)健全的组织机构,成立以项目经理为组长的安全领导小组,下设抢险、救护、疏导、保障、善后、

调查六个专业小组,并在各工区设立应急管理小组,形成了三级应急组织体系。明确了项目经理作为安全生产第一责任人的核心地位,以及项目总工、安全总监、生产经理等关键岗位的安全职责。(2)全面的风险辨识与交底,方案详细列出了包括“触电伤害”、“机械伤害”、“坍塌”在内的多项职业健康安全危险源,并针对性地制定了防控措施。所有施工人员在进场前必须接受详细的安全技术交底,明确施工任务、安全注意事项和应急措施。(3)完善的应急预案,针对可能发生的触电、火灾、电缆损伤、机械伤害等事故,方案制定了详细的应急处置程序。明确了应急救援路线、联络医院(美姑县人民医院)及联系方式,并配备了包括急救箱、担架、应急灯在内的专用应急物资。同时,定期组织应急演练,确保所有人员熟悉应急流程。(4)严格的验收与检查制度,方案建立了从班组自检、互检到专检,再到监理单位验收的四级质量与安全检查体系。对导向孔轨迹、扩孔记录、回拖力等关键参数进行全过程记录和复核,确保每一个环节都符合安全标准。

4 结语

光伏与风电集电线路交叉施工属高风险、高技术工程。通过对凉山美姑县 940MW 光伏项目 III 标段的深入研究,得出四点核心结论:一是精准探测是前提,须融合管线雷达、路径仪与人工探坑,实现毫米级定位;二是非开挖技术(如水平定向钻)是关键,需精细控制轨迹、泥浆参数及地质适应性;三是全过程风险管控必不可少,覆盖策划、施工到验收各环节,建立标准化作业流程;四是组织保障是根本,需健全权责清晰、响应迅速的安全与应急体系。项目实践验证了“精准探测先行、非开挖主导、全程管控、组织保障”综合策略的有效性,为全球类似新能源交叉施工提供了可复制的安全技术范本,具有重要推广价值。

参考文献

- [1] 周建英. 凉山: 光伏风电绘就生态能源协同新景 [N]. 凉山日报(汉), 2025-05-20(007). DOI:10.28542/n.cnki.nlsrh.2025.001047.
- [2] 韩方伟, 刘海峰, 刘大千, 等. 基于风电和光伏工程的储能系统设计与实施 [J]. 光源与照明, 2025, (12): 146-148.
- [3] 黄梦魇. 风电与光伏发电中的关键技术研究 [J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(08): 123-125.
- [4] 常中飞. 风电与太阳能光伏互补发电系统的集成与优化 [J]. 电力设备管理, 2024, (23): 107-109.