

输电线路电磁环境影响分析与防治措施

邹 析

准格尔旗浩普电力勘测设计有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010399

摘 要：输电线路电磁环境影响可控，需融合技术优化（如导线布置、设备选型）、智能监测（物联网+大数据）及公众协同（科普+联防）三重策略。选址避开居民区、学校及生态保护区；新建工程强制开展电磁环境影响评价（含类比监测与理论计算），智能监测体系，建立“四年一轮”变电站电磁环境监测机制，应用物联网技术实时预警。推广可视化装置，实现外破风险智能识别。社区宣传实测数据（如对比家用电器电磁强度），破除辐射误解；联动政府、施工单位共建防护网。

关键词：输电线路；电磁环境影响分析；防治

由电流产生，与电压无关，可穿透建筑物和人体，三相电流在远距离处磁场相互抵消。磁感应强度随电流增大而升高，但普遍远低于国标限值。

1 输电线路电磁辐射原理及特性

1.1 电磁场形成原理。电场产生：由导线与大地间的电压差形成，强度随电压等级升高而增强（如500kV线路下方电场强度达5.0~10.0kV/m）。磁场产生：由导线中流动的电流激发，强度与电流大小成正比，与电压无关。非辐射本质：工频电磁场频率仅50Hz，波长长达6000km，导线长度远小于波长，无法形成有效的电磁辐射能量发射。国际权威机构明确将输变电设施产生的电磁场定义为“工频电场”和“工频磁场”，而非电磁辐射。

1.2 核心电磁特性。电场特性，电压依赖性：电场强度与线路对地电压成正比，随电压等级升高显著增强。空间分布可调性：导线排列方式直接影响地面场强，倒三角排列比水平排列降低场强约22.32%；提高导线对地高度可有效减小地面电场强度。屏蔽效应：建筑物、树木等导体会扭曲电场分布，产生局部屏蔽作用。磁场特性，电流依赖性：磁场强度仅与导线电流大小相关，与线路电压无关。穿透性：50Hz低频磁场可穿透大多数物体（如建筑物、人体），不受常规障碍物屏蔽。抵消效应：三相电流相位差120°，在远距离处磁场相互抵消，强度趋近于零。电晕特性，发生条件：导线表面电场强度超过空气击穿阈值（通常 > 30kV/m）时，产生电晕放电。衍生效应：产生可听噪声（“吡吡”声），恶劣天气（雨雪）时加剧；引发无线电干扰，影响通信质量。影响因素：导线直径（直径越大电晕越弱）、表面光洁度及环境湿度、污染程度。

1.3 辐射属性分类。输电线路电磁场属于极低频非电

离辐射（频率50Hz），能量仅为可见光的百万分之一，无法破坏生物分子结构，与X光、核辐射等电离辐射有本质区别。特性总结综合电场、磁场、电晕三类作用机制，覆盖电压/电流关联性、空间调控性、穿透性等核心参数，并澄清非辐射本质。

2 输电线路电场磁场特性分析

2.1 电场特性。电压依赖性，电场强度与线路电压成正比，500kV线路下方电场可达5.0~10.0kV/m；三相电场在空间呈旋转矢量分布。空间分布规律，垂直衰减：距地面高度1.5m处场强最高，向地面方向指数衰减；水平衰减：以导线投影为中心，距边导线数米外场强降至4kV/m以下；排列方式影响：倒三角排列比水平排列降低地面场强22.32%。可控性与屏蔽，增加导线对地高度可显著降低地面电场（如17m高度比7m降低50%以上）；建筑物、树木等导体可扭曲并屏蔽电场。

2.2 磁场特性。电流依赖性，磁场强度仅与电流大小成正比，与线路电压无关；110kV线路典型磁感应强度约0.106μT。空间分布规律，横向衰减：磁感应强度随与导线距离增大而迅速降低，最大值位于边相导线下方；纵向抵消：三相电流相位差120°，远距离处磁场相互抵消趋近于零。强穿透性，50Hz低频磁场可穿透建筑物、人体等非铁磁性物质，常规障碍物无法屏蔽。

2.3 电晕衍生效应，发生条件：导线表面场强 > 30kV/m时触发空气电离。噪声与干扰：产生可听噪声（雨雪天气加剧）及无线电干扰；噪声强度与导线直径、表面光洁度负相关。

2.4 环境安全边界。电场限值：我国标准为4kV/m（公众区域）；磁场限值：100μT（仅为家用电器磁场的1/10~1/100）；实测案例：新疆110kV变电站磁感应强度仅0.106μT（为国标0.1%）。

3 复杂电磁环境对输电线路的影响

3.1 干扰效应加剧。无线电通信干扰，输电线路电晕放电产生的宽频电磁波（0.15~30MHz）与复杂环境中的其他电磁信号叠加，导致中短波频段通信质量下降（如广播、雷达信号失真）。并行架设线路的电磁场叠加效应进一步放大干扰强度，尤其在330kV以上高电压等级线路中更显著。设备控制信号紊乱，密集电磁波可能通过线缆耦合或空间辐射侵入线路监测装置，引发继电保护系统误动作或数据采集异常。

3.2 电晕特性恶化。可听噪声与无线电干扰增强，复杂电磁环境加剧导线表面电场畸变，使电晕放电概率增大，尤其在雨雾天气可听噪声（“吡吡”声）强度提升。导线表面污秽物在强电磁场作用下更易引发电晕，导致无线电干扰范围扩大。绝缘子闪络风险升高，背景电磁噪声可能干扰绝缘子周围电场分布，降低其沿面耐压能力，增加污闪事故概率。

3.3 防护与监测挑战。屏蔽措施失效，低频磁场（50Hz）因强穿透性难以被常规屏蔽层阻隔，在复杂环境中叠加效应更明显。建筑物、树木等对电场的局部屏蔽作用在无序电磁场中被削弱。监测精度下降，多源电磁信号导致工频电场/磁场监测设备信噪比降低，影响环境评估准确性。复杂电磁环境通过叠加干扰（通信失真）、恶化电晕（噪声/放电加剧）及穿透屏蔽三重机制威胁输电线路安全。防治需以规划避让为基础，融合设计优化（如逆相序排列）与主动屏蔽（如屏蔽线），并依托智能监测实现动态管控。

4 输电线路电磁辐射对人体健康的影响

4.1 工频电磁场的非辐射本质。非电离属性：输电线路频率为50Hz（波长6000km），属极低频电磁场，能量仅为可见光的百万分之一，无法破坏生物分子结构，与X射线等电离辐射有本质区别。国际标准将其定义为“工频电场”和“工频磁场”，而非“电磁辐射”。

4.2 健康影响评估。科学共识，无直接致病证据：世界卫生组织（WHO）多次评估指出，长期暴露于输电线路工频电磁场（ $< 100\mu\text{T}$ ）无明确致癌或致病风险。我国实测数据：110kV变电站磁感应强度仅 $0.106\mu\text{T}$ （为国标限值0.1%），500kV线路下方磁场 $\leq 10\mu\text{T}$ （远低于安全阈值）。潜在争议与限制，敏感人群的可能反应：极少数对电磁敏感者可能出现头痛、失眠等主观不适，但研究未证实与工频场的因果关系。长期暴露的保守建议：部分国家建议避免在高压线附近长期居住（磁场 $> 0.4\mu\text{T}$ 区域），属预防性措施，非危害确认。防护建议，科学认知：输电线路工频场强度远低于安全限值，恐慌源于

对“电磁辐射”概念的误解。实际防护：建筑物墙体可使电场衰减90%以上，保持与边导线水平距离 $> 20\text{m}$ 可进一步降低暴露。

5 输电线路科学选址与规划的防治措施

5.1 生态避让与敏感区规避。生态红线避让，路径选择避开自然保护区、水源涵养区等生态敏感区，优先利用现有廊道（如道路、河流并行带）减少植被破坏。对鸟类迁徙通道区域，采用高跨设计（塔高增加20%以上）或安装驱鸟装置，降低碰撞风险。电磁环境预评估，通过仿真计算预判线路对周边通信基站、医疗设备的电磁干扰强度，确保距敏感设施水平距离 $\geq 50\text{m}$ 。三跨”特殊要求，跨越高速铁路/高速公路时：采用独立耐张段设计，交叉角 $\geq 45^\circ$ （困难地段 $\geq 30^\circ$ ）；杆塔结构重要性系数 ≥ 1.1 ，全塔防松设计；安装分布式故障诊断装置+视频监控。

5.2 地形适应性优化，微地形处理，山区斜坡地段：采用不等高基础设计，确保塔腿落差 $> 3\text{m}$ 时基础顶面高差 $\leq 1.5\text{m}$ 。冻土区：基础埋深低于冻土层0.5m以上，回填砂石防冻胀。灾害风险防控，舞动区：15mm冰区“三跨”线路覆冰设计值增加10mm（导线）、15mm（地线）；雷击高发区：缩小保护角至 $\leq 10^\circ$ ，加强接地网敷设密度。

5.3 动态调整机制。施工前二次复核，采用无人机航测+人工复测校验路径，对新增跨越物（如施工临时设施）即时修正杆塔坐标。协同治理平台，建立林业、电力、规划部门联合审批机制，实现林木砍伐与线路迁改同步申报。

6 输电线路施工期环境保护措施

6.1 扬尘精细化防控。裸土全覆盖，基础施工区采用 ≥ 2000 目密目防尘网苫盖裸露土方，风力 > 4 级时增设喷淋装置，PM10扩散量减少60%以上。砂石运输车辆全封闭改装+出场冲洗，轮胎带泥量 $< 5\%$ 。智能抑尘系统，无人机巡航监测扬尘热点，联动智能雾炮定向降尘（射程 $\geq 50\text{m}$ ）。

6.2 生态修复专项措施。表土资源化利用，施工前剥离30cm优质表土，腐殖土改良后集中堆存（坡度 $\leq 30^\circ$ ，苫盖防雨布），回填利用率 $\geq 95\%$ 。立体植被重建，采用“草种喷播+灌木栽植+乔木补种”三级修复：优先选用狗牙根、紫穗槐等本土固碳植物；塔基周边种植低矮灌木丛，形成生态缓冲带。

6.3 生物多样性保护。栖息地避让，鸟类繁殖期（3-5月）暂停敏感区施工，塔顶加装驱鸟器+人工鸟巢补偿。绿色通道建设，山区采用直升机吊装（减少地表扰

动80%)或架空索道运输,保留原生植被走廊。

6.4 施工废弃物管控。分类减量化:钢筋废料回收率 $\geq 90\%$,混凝土碎块就地夯实作路基。危废专项处置:废机油等用专用容器密封存储,移交有资质单位处理。

6.5 实时监测与执法。物联监管平台,施工现场部署噪声扬尘在线监测仪,数据实时传输至环保部门监管平台。联合执法机制,环保部门每周巡查+公益检察监督,对未落实苫盖措施处10万元/次顶格罚款。通过“源头防控-过程修复-智慧监管”闭环管理,实现施工活动与生态保护的动态平衡。

7 输电线路运营期管理策略

7.1 智能巡检体系建设。无人机+北斗监测,无人机搭载红外/可见光双光谱设备,实现杆塔螺栓松动、绝缘子破损等缺陷识别精度 $> 90\%$;地质灾害风险区部署北斗倾斜沉降监测终端(如华测G20),实时预警杆塔位移 $> 2\text{mm}$ 或倾斜 $> 0.5^\circ$ 的异常状态。RFID无源无线测温,在环网柜、变压器等关键节点安装RFID温度标签,每15分钟回传数据,精准定位过热点(误差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)并自动告警。

7.2 外力破坏协同防控。通道隐患治理,跨越公路/铁路段安装限高架+激光雷达防撞系统,外破事件发生率下降90%;盗窃高发区应用智能视频监控(AI识别剪线行为并联动报警)。政企联防机制,联合林业、公安部门开展线下树障清理专项行动,保障导线对树木距离 $\geq 5\text{m}$;依据《电力设施保护条例》(2025版)查处线下违章施工,罚款额度提升至10万元/次。

7.3 制度与能力保障。人才梯队建设,推行“无人机操作+智能诊断”双资质认证,技术人员年均培训 ≥ 60 学时;管理制度升级,建立“一线一档”电子台账,整合气象预警、设备状态、巡检记录等数据;执行《输变电建设项目环境保护技术要求》(HJ 1113-2020),定

期开展电磁环境复测。运营期管理需构建“智能监测驱动设备维护、联防联控阻断外破风险、制度人才支撑长效运行”三位一体体系,最终实现:故障停运时间缩短50%;设备使用寿命延长30%;公众投诉率下降至0.5次/百公里年。

7.4 输电线路电磁环境长期监测与评估方法。监测体系架构,核心监测参数,交流线路:工频电场强度(量程 $1\text{V/m}\sim 30\text{kV/m}$)、工频磁感应强度,直流线路:合成电场、离子流密度(湿度 $\leq 80\%$ 时测量),辅助参数:无线电干扰($0.15\sim 30\text{MHz}$ 频段),可听噪声(符合IEC 61672标准), $0.1\text{MHz}\sim 6\text{GHz}$ 背景电磁值(含通信基站干扰)。长期监测实施方法,固定点布设规范,变电站:围墙外5m设主测点,敏感侧加密至3个点,架空线路:以导线弧垂最低点投影为中心,垂直方向按5m间距布点($0\sim 50\text{m}$ 范围),数据采集:工频参数:每秒采样10次,每15秒输出有效值。直流合成场:连续30分钟记录,取E95统计值。动态监测技术,轨道式监测车:沿预设轨道自动巡航,恶劣天气避障,实时回传云端数据,无人机载系统:搭载激光雷达与红外相机,实现通道三维建模与放电点定位。环境适应性控制,气象条件:无雨雾、风速 $\leq 2\text{m/s}$ (直流场强测量),人员距离:探头与操作者 $\geq 2.5\text{m}$,距固定物体 $\geq 1\text{m}$ 。

总之,未来电磁环境保护将形成“材料革新阻断污染源-智能网络实现精准管控-法规倒逼产业升级”的三维体系,推动生态环境与数字技术协同发展。

参考文献

- [1]王红.输电线路电磁环境影响分析与防治策略.2023.
- [2]张欣航.输电线路电磁环境影响分析与防治措施探讨.2022.