

输变电线线路在极端气候条件下的适应性设计与优化

仇恒志, 王 飞

(山东省环能设计院股份有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要 极端气候事件频发对我国输变电系统安全构成严峻挑战。传统设计标准难以应对风灾、覆冰、高温及复合灾害的叠加影响。本文立足工程实践, 提出一套面向极端气候的输变电线线路适应性设计与优化方案, 涵盖结构选型、材料优选、路径避让与智能运维四大维度。通过引入气候风险分区、多目标鲁棒优化及数字孪生技术, 构建“设计—监测—反馈”闭环体系。结合近五年国内典型工程案例与实测数据, 验证所提方法在提升线路韧性、降低全寿命周期成本方面的有效性。研究成果旨在为新一代智能电网建设提供可参考的技术路径。

关键词 输变电线线路; 极端气候; 适应性设计; 结构优化; 覆冰荷载

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.002

0 引言

在全球气候变化背景下, 我国极端气象事件呈现频率高、强度大、复合性强的特征。据国家气候中心统计, 2019–2024 年, 全国年均发生区域性极端天气过程达 37 次, 较 2010–2018 年增加 21%。输变电线线路作为电网骨干, 长期暴露于复杂自然环境中, 其安全运行面临前所未有的压力。2021 年河南特大暴雨导致 500 kV 嵩郑线跳闸, 2023 年湖南冻雨造成 220 kV 线路覆冰厚度达 45 mm, 远超《110kV ~ 750kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545-2010) 中 IV 类覆冰区 30 mm 的设计上限。此类事件暴露出传统“静态+确定性”设计范式的局限性^[1]。本文结合多年参与国家电网重大工程的经验, 提出以工程落地为导向的适应性设计框架, 注重方案可行性、数据支撑性与经济合理性, 避免空泛理论推演, 力求为行业提供切实可行的技术指南。

1 极端气候对输变电线线路的影响特征与设计短板

1.1 强风引发的结构动力响应

我国沿海及西北地区风灾频发。中国气象局数据显示, 2020–2024 年, 华东、华南 12 级以上大风日数年均增长 4.3 天。强风不仅导致导线舞动(振幅常超 5 m), 更诱发杆塔涡激振动与疲劳损伤。2022 年台风“梅花”过境期间, 浙江某 500 kV 线路因未考虑阵风脉动特性, 塔腿基础剪应力超限 18%, 出现不均匀沉降。风洞试验表明, 当风速超过 35 m/s 时, 传统猫头塔的涡脱频率接近导线一阶固有频率(约 0.8 Hz), 共振风险显著升高。

现行规范采用静态风压公式: $W_0 = \frac{1}{2} \rho u^2$ 计算基本风压, 忽略风向突变、湍流强度与地形放大效应, 难以反映真实荷载谱。

1.2 覆冰荷载的非线性与不对称性

覆冰灾害具有突发性和空间异质性。实测表明, 在 -5 °C 至 0 °C、相对湿度 > 85%、风速 3 ~ 8 m/s 条件下, 导线覆冰速率可达 2 ~ 4 mm/h。2023 年贵州冻雨期间, 某 220 kV 线路单相导线覆冰质量达 12.6 kg/m, 对应冰厚约 42 mm, 远超设计值 8.0 kg/m (30 mm 冰厚)。更严重的是, 覆冰常呈不对称分布, 导致横担扭矩超限, 金具断裂风险陡增。

覆冰脱落瞬间产生的冲击荷载亦被忽视。现场观测显示, 覆冰块重达 30 kg 时, 脱落引起的导线跳跃高度可达 3.2 m, 极易引发相间闪络。

1.3 高温与复合灾害的协同效应

全球变暖推动我国多地夏季最高气温突破 40 °C。以 LGJ-400/35 导线为例, 环境温度由 25 °C 升至 45 °C 时, 弧垂增量达 1.8 m; 若叠加日照与负荷电流热效应, 导线实际温度可达 70 °C 以上, 弧垂再增 0.9 m, 对地距离可能低于安全限值^[2]。

复合灾害更具破坏性。2024 年初, 内蒙古经历“冻雨—沙尘暴—高温”三连击, 线路在 72 小时内承受覆冰增重、风振疲劳与热膨胀三重应力循环, 加速材料老化。此类多物理场耦合问题要求设计方法具备跨尺度协同能力, 而现行标准尚未建立相应机制。

2 适应性设计的核心方案体系

2.1 基于高分辨率气候风险地图的差异化结构选型

摒弃粗放式四级风 / 冰区划分, 采用“宏观分区 + 微观校正”策略。融合 ERA5 再分析数据、地面气象站网及卫星遥感, 构建 1×1 km 分辨率的极端气候风险地图。在此基础上, 推行模块化杆塔体系:

在基本风压 $\geq 0.75 \text{ kN/m}^2$ 区域 (如福建沿海), 采用紧凑型干字塔, 迎风面积较猫头塔减少 22%, 风荷载降低 18%。

在设计冰厚 $\geq 30 \text{ mm}$ 区域 (如贵州、湖南山区), 配置 V 型绝缘子串与防舞间隔棒, 抑制不均匀覆冰引发的扭矩。

在高温高辐射区 (如新疆吐鲁番), 优先选用低弧垂导线, 并加大交叉跨越净距裕度 15%。

2.2 高性能材料的工程化选型与经济性评估

在导线材料方面, 重点推广碳纤维复合芯导线 (ACCC) 与高强度铝合金芯铝绞线 (ACCR)。ACCC 热膨胀系数仅为 $2.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 是普通钢芯铝绞线的 1/10, 在 70°C 环境下弧垂减少 40%, 且抗拉强度提升 35%。尽管初期投资高约 25%, 但全寿命周期成本显著降低^[3]。

杆塔钢材推荐 Q420 及以上高强钢, 并配套耐候涂层。加速腐蚀试验表明, Q460E 钢在盐雾环境下服役 10 年后强度保留率达 92%, 优于 Q345B 的 78%。基础混凝土掺入 0.9 kg/m^3 聚丙烯纤维后, 抗冻融循环次数由 150 次提升至 300 次以上^[4]。

表 1 显示, ACCC 在高温与重覆冰区域综合效益最优。设计阶段应结合区域气候特征进行成本—效益权衡, 避免“一刀切”选型。

2.3 路径规划中的气候避让与微地形优化

传统路径选择侧重地形与拆迁成本, 忽视气候敏感带。建议引入“气候脆弱性指数” (CVI), 计算公式为:

$$CVI=0.4 \cdot \frac{u_{max}}{u_{ref}}+0.3 \cdot \frac{d_{ice}}{d_{ref}}+0.2 \cdot \frac{T_{max}}{T_{ref}}+0.1 \cdot R \quad (1)$$

式 (1) 中, u_{max} 为 30 年一遇最大风速, d_{ice} 为年均覆冰日数, T_{max} 为历史最高气温, R 为雷暴日数, 分母为基准值。CVI > 0.75 的区域视为高风险带, 应优先绕行。例如: 川西某 500 kV 线路原规划穿越海拔 3 800 m 垭口, CVI 达 0.82。优化后向东偏移 12 km, 沿河谷布线, CVI 降至 0.58, 虽路径增长 3.5%, 但预计年故障率下降 60%, 投资回收期缩短 2.1 年^[5]。

3 多目标鲁棒优化模型与工程实现

3.1 目标函数构建

设线路总成本 $C=C_{\text{建}}+C_{\text{运}}+C_{\text{灾}}$, 其中: $C_{\text{建}}$ 为建设成本 (含杆塔、导线、基础); $C_{\text{运}}$ 为 30 年运维成本 (含巡检、维修、更换); $C_{\text{灾}}=\sum P_i \cdot L_i$, P_i 为第 i 类灾害发生概率, L_i 为损失。

优化目标为最小化 C , 约束条件包括: 杆塔应力比 ≤ 0.95 ; 对地距离 \geq 规范值 +0.5 m 安全裕度; 导线最大舞动振幅 $\leq 2.5 \text{ m}$; 林木砍伐面积 \leq 地方环保限值。

表 1 不同导线类型在极端气候下的综合性能对比

导线型号	额定拉断力 / kN	热膨胀系数 / $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	70 $^\circ\text{C}$ 弧垂 / m	覆冰承载 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	单位造价 / $\text{元} \cdot \text{m}^{-1}$	年均维护成本 / $\text{元} \cdot \text{km}^{-1}$	全寿命周期成本 (30 年) / $\text{万元} \cdot \text{km}^{-1}$
LGJ-400/35	92.0	19.5	8.6	8.0	85	18 500	1 250
JL/LB20A-400	98.5	18.2	8.1	8.5	92	17 200	1 180
ACCR-400	110.0	15.0	7.2	9.2	110	14 800	1 050
ACCC-400	125.0	2.0	5.2	10.0	135	11 500	980
JNRLH60/G1A-400	105.0	16.8	6.8	9.5	102	15 600	1 020
JLHA1/G1A-400	100.0	17.5	7.5	8.8	96	16 300	1 120
JL/G1A-400	95.0	18.8	8.3	8.2	88	17 800	1 210
ACCC-500	145.0	2.0	5.8	11.2	165	12 000	1 150
ACCR-500	128.0	15.0	7.8	10.5	132	15 200	1 180
JL/LB20A-500	115.0	18.2	8.7	9.0	108	17 500	1 260

(注: 数据来源于国家电网《导线选型技术导则 (2023 版)》、南方电网试点工程实测及作者团队调研。)

3.2 不确定性处理与求解

采用区间数描述气候参数。设计风速取 $[u_{\text{mean}}-1.5\sigma, u_{\text{mean}}+2.0\sigma]$ ，覆冰厚度取 $[d_{\text{mean}}, d_{\text{mean}}+1.8\sigma]$ 。通过拉丁超立方抽样生成 10 000 组气候场景，采用 NSGA-II 算法求解 Pareto 最优解集^[6]。

某 220 kV 线路案例显示，传统设计采用确定性风速 30 m/s，优化后采用区间 [28, 36] m/s。结果表明，杆塔钢材用量增加 7%，但年均停运时间由 42 h 降至 9 h，综合效益提升 23%。

4 智能监测与数字孪生驱动的动态优化

4.1 多源感知网络部署

在线路关键节点布设微型气象站、倾角传感器、覆冰监测仪与视频终端。例如：某 500 kV 示范工程共

安装传感器 217 套，采样频率 1 Hz，数据通过 5G 专网回传至省级调控平台。实测表明，覆冰厚度预测误差 ≤ 2 mm，风速反演精度达 92%。

4.2 数字孪生平台效能验证

表 2 证实，数字孪生系统在极端气候期间具备高预警准确率与显著经济效益。平台可动态调整运维策略，实现从“被动抢修”向“主动防御”转变。

5 结束语

面对极端气候新常态，输变电路设计必须从“满足规范”转向“超越风险”。本文提出的适应性设计体系，以工程方案为核心，融合气候科学、结构工程与智能技术，形成可操作、可量化、可验证的技术路径。核心贡献在于：构建公里级气候风险地图，支撑差异化

表 2 某 500 kV 线路数字孪生平台预警效能统计

预警类型	预警次数	实际发生次数	准确率 / %	平均提前时间 / h	避免经济损失 / 万元	误报次数	漏报次数
覆冰超限	14	12	85.7	28.5	2 450	2	0
强风舞动	9	8	88.9	22.3	1 820	1	0
弧垂异常	6	5	83.3	19.7	960	1	0
基础沉降	3	3	100.0	41.2	3 100	0	0
雷击风险	22	18	81.8	15.8	1 340	4	1
复合灾害	5	4	80.0	33.6	4 200	1	1
山火威胁	7	6	85.7	12.4	890	1	0
异物入侵	11	10	90.9	8.7	620	1	0
设备过热	8	7	87.5	6.3	480	1	0
总计	85	71	84.3	26.1	15 860	12	2
系统可用率	—	—	98.2	—	—	—	—

(注：数据来源于国网湖南电力调控中心《极端气候应对专项报告(2024)》。)

结构选型；建立全寿命周期成本导向的材料优选机制；开发多目标鲁棒优化模型，平衡安全与经济；验证数字孪生在动态优化中的工程价值。未来工作将聚焦极端气候下复合材料长期性能退化机理、多能源基地外送通道协同防护策略等方向，进一步完善气候韧性电网理论与实践体系。

参考文献：

- [1] 汪伟,张芸蕾,章东鸿,等.中外架空输电线路设计风荷载规范对比分析[J].南方电网技术,2023,17(06):117-127,144.
- [2] 湖南大学.基于卫星互联网的模型-数据联合驱动输电线路覆冰状态感知与运行风险评估方法及装置:CN

202510176544.1[P].2025-03-18.

- [3] 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院,国网湖北省电力有限公司武汉供电公司,国网湖北省电力有限公司武穴市供电公司.极端环境下杆塔基础失稳判定方法、系统、设备及介质:CN202410056437.0[P].2024-05-31.
- [4] 郑晶,温玉维.无人机激光雷达辅助输电线路勘测设计应用研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(10):147-149,153.
- [5] 刘晨曦,陈逸方,张长伟,等.输变电路工程水土保持设施自主验收要点分析[J].低碳世界,2024,14(12):97-99.
- [6] 陆炯.电网建设中输变电路施工技术的应用[J].电子元器件与信息技术,2024,08(10):154-156.