

高压输电线路高海拔冻土灾害演化规律与防治技术研究

王琳

南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘要：本文聚焦高海拔冻土区高压输电线路灾害问题，分析该区域地理环境特征与线路工程特点，揭示冻土物理力学性质变化、灾害形成机理、发展过程及影响因素。研究冻土灾害监测方法、数据处理与预警模型建立技术，提出工程、生物及综合防治措施。综合防治强调多技术协同与全生命周期管理，实践表明可延长工程寿命、降低成本，为高海拔冻土区输电线路安全运行提供技术支撑。

关键词：高压输电线路；高海拔冻土；灾害演化规律；防治技术

1 高海拔冻土区高压输电线路工程概况

1.1 高海拔冻土区地理环境特征

高海拔冻土区多分布在青藏高原、新疆天山及横断山脉等地，地理环境高寒特征显著。该区域平均海拔超4000米，年均气温-4℃至-7℃，昼夜温差超20℃，极端低温达-45℃。冻土分布广，多年冻土占中国冻土总面积70%，厚度9米至百余米，呈北厚南薄、北连续南岛状分布。地质以冰碛物等为主，成土年龄短，寒冻风化主导形成石海等独特地貌。地表植被稀疏，多为高原特有植物，覆盖率不足30%，生态系统脆弱。水文条件复杂，河流径流量季节波动大，地下冰丰富，冻融作用形成多种微地貌。地形坡度多大于15°，斜坡稳定性差，切向冻胀力易致土体位移。气候变暖使冻土退化加快，近50年青藏高原多年冻土面积缩减约15%，活动层增厚，工程地质灾害风险加剧。

1.2 高压输电线路工程特点

高海拔冻土区高压输电线路工程呈“三高三复杂”特征。地质条件高风险，冻土流变性使基础强度衰减，杆塔年均沉降5-10厘米，铁塔倾斜率超规范值2-3倍。施工窗口期受限，有效施工期仅4-6个月，要避开雨季和冻融交替期，施工质量控制难^[1]。运维保障要求高，需建立协同监测体系，青藏联网工程部署2000余监测点。工程结构复杂，要应对冻胀等多种作用。技术体系涵盖12项关键技术，人工冻结法缩短基础施工期30%，植被移植技术使周边植被覆盖率恢复超85%。经济性复杂，单公里造价较平原地区增2-3倍，但防控技术可减少后期维护成本60%以上，青藏工程累计挽回经济损失超3亿元。

2 高海拔冻土灾害演化规律研究

2.1 冻土物理力学性质变化规律

高海拔冻土的物理力学性质随温度、含水量及应力状态呈现显著非线性变化。冻土中的未冻水含量与温度

呈负相关，当温度从0℃降至-5℃时，未冻水体积减少约60%，导致土体孔隙冰填充率提升，抗剪强度增加2-3倍。然而，冻土的长期流变性使其强度随时间衰减，在-3℃条件下，冻土瞬时抗压强度可达5-8MPa，但经过30天蠕变后强度降低40%以上。冻融循环引发土体结构损伤，青藏高原冻土区实测数据显示，经历10次冻融循环后，冻土黏聚力下降35%，内摩擦角减小12°，导致地基承载力显著降低。含冰量是决定冻土性质的关键因素，富冰冻土（含冰量>20%）在融化时体积收缩率可达15%，形成融化固结沉降，而少冰冻土（含冰量<10%）则以冻胀变形为主。

2.2 冻土灾害形成机理

冻土灾害的形成是热-力-水耦合作用的结果。热融滑塌的触发机制源于冻土层融化导致抗剪强度骤降，当坡度超过15°时，融水渗入土体裂隙形成润滑层，引发重力失稳。青藏铁路沿线调查显示，热融滑塌多发生于阳坡，其规模与地下冰厚度呈正相关，地下冰厚度每增加1米，滑塌体积扩大2.3倍。冻胀灾害则由水分迁移主导，在封闭系统中，冻胀力可达200-300kPa，足以使混凝土基础开裂。2021年西藏某冰川湖溃决事件中，湖岸冻土层融化使抗剪强度从150kPa降至40kPa，最终导致溃决洪峰流量达3000m³/s。

2.3 冻土灾害发展过程模拟

数值模拟技术为揭示冻土灾害演化规律提供重要手段。基于有限元法的热-力耦合模型可模拟冻土温度场与应力场的动态变化，青藏高原冻融过程模拟表明，在年均温升高2℃的情景下，活动层厚度将增加1.8米，导致路基沉降速率提升至8cm/年。流固耦合模型被用于分析泥石流启动机制，模拟结果显示，当冻土融水含沙量超过40%时，泥石流启动临界坡度从25°降至18°。分布式光纤传感网络与InSAR技术的结合，实现了冻土变形毫米级

监测,如青藏联网工程中,通过布设2000个监测点,成功捕捉到0.5mm/目的微小变形,为灾害预警提供数据支撑。机器学习算法在灾害预测中展现潜力,某研究团队利用LSTM神经网络,基于气温、降水等12个参数,实现了冻土滑坡发生概率的周尺度预测,准确率达82%。

2.4 冻土灾害影响因素分析

冻土灾害的演化受自然与人为因素共同控制。气候变暖是首要驱动因子,近50年青藏高原多年冻土面积缩减15%,活动层厚度平均增加0.5米/年,导致热融灾害频率上升30%。地形坡度对灾害类型具有决定性作用,坡度<10°时以融沉为主,10°-25°易发冻胀,>25°则热融滑塌占主导^[2]。植被覆盖通过调节地表能量平衡影响冻土稳定性,实测数据显示,植被覆盖率每提高10%,冻土年均地温降低0.3°C,融沉量减少25%。人类工程活动加剧灾害风险,青藏铁路某标段因施工扰动导致地下冰暴露,引发3处热融滑塌,直接经济损失超2000万元。另外,地震活动通过破坏冻土结构加速灾害发育,2008年汶川地震后,川西冻土区热喀斯特湖数量增加40%,面积扩大65%。

3 高海拔冻土灾害监测与预警技术研究

3.1 冻土灾害监测方法

高海拔冻土灾害监测需综合运用多学科技术手段,形成“空-天-地-内”一体化监测体系。卫星遥感技术通过热红外波段反演地表温度场,结合InSAR干涉测量实现毫米级形变监测,如Sentinel-1卫星数据可捕捉0.1mm/目的冻土蠕变,青藏高原某区域监测显示,2018-2022年冻土区年均沉降速率达3.2cm。无人机激光雷达(LiDAR)可获取高精度地形数据,其点云密度达50点/m²,能有效识别热融滑塌、融冻泥流等微地貌变化,在川藏公路某路段监测中,提前3个月发现0.5m³的土体位移异常。地面传感器网络是核心监测手段,分布式光纤传感(DTS)可同时测量温度与应变,在青藏联网工程中,沿输电线路布设的2000km光纤实现每10米间隔的连续监测,成功预警3起冻胀导致的杆塔倾斜事件。此外,原位监测设备如热敏电阻、冻胀仪等,可获取地下5m深度内的地温梯度(0.03-0.05°C/cm)和冻胀量(年均0.8-1.2cm),为灾害机理研究提供基础数据。

3.2 监测数据采集与处理

数据采集需兼顾时空分辨率与设备耐久性。地温监测采用铂电阻温度计,量程覆盖-50°C至50°C,精度达±0.1°C,采样频率设置为1次/小时以捕捉日变化;形变监测采用GNSS接收机,水平精度±2mm,垂直精度±5mm,结合北斗三号卫星实现分钟级数据更新。多源数据融合

是关键处理环节,通过卡尔曼滤波算法将InSAR形变数据(空间分辨率20m)与GNSS点数据(空间分辨率1km)融合,可使监测精度提升至±1.5mm。大数据分析技术用于挖掘灾害前兆信息,某研究团队利用LSTM神经网络对青藏公路10年监测数据建模,发现地温日较差超过8°C、形变速率突破0.3mm/日时,热融滑塌发生概率增加70%。数据可视化平台通过三维地质建模与动态模拟,实现灾害演化过程的直观展示,如中国科学院冻土工程国家重点实验室开发的“冻土灾害数字孪生系统”,可实时渲染500km²范围内的冻土状态变化,为应急决策提供科学依据^[3]。

3.3 冻土灾害预警模型建立

预警模型构建需融合多物理场耦合机制与机器学习算法。基于热-力-水耦合的数值模型可模拟冻土灾害发展过程,如COMSOL Multiphysics软件建立的冻融循环模型,通过输入气温、降水等参数,可预测未来30天地温变化(误差<0.5°C)和形变量(误差<15%)。统计模型则利用历史灾害数据建立预警阈值,青藏铁路沿线研究表明,当年均地温升至-1.2°C、活动层厚度超过3.5m时,热融滑塌风险等级提升至橙色预警。机器学习模型显著提升预警时效性,某团队开发的XGBoost模型,基于地温、含冰量、坡度等12个特征参数,实现冻土滑坡72小时预警,准确率达89%,较传统模型提升22%。模型验证需结合实地观测数据,如2022年青海玛多地震后,预警系统通过监测地温骤升2.3°C、形变速率达5mm/日,提前48小时发布红色预警,成功避免输电线路倒塔事故。另外,动态修正机制通过实时反馈监测数据优化模型参数,使预警系统适应气候变化影响,青藏高原某监测站数据显示,动态修正后模型预警提前量从24小时延长至72小时,虚警率降低18%。

4 高海拔冻土灾害防治技术研究

4.1 工程防治措施

高海拔冻土区工程防治以“抗冻融、控变形、保稳定”为核心,形成多技术协同的防治体系。基础加固技术中,热棒-装配式组合基础通过热棒主动导热降低地温(年均降温3-5°C),结合装配式混凝土模块快速施工,使青藏铁路某路段基础沉降量控制在5mm/年以内;碎石护坡通过空气对流调节坡面温度(日温差减小60%),在川藏公路热融滑塌治理中,使坡体稳定性提升40%。隔热层技术采用XPS挤塑聚苯板(导热系数≤0.03W/(m·K)),在输电线路杆塔基础中铺设50cm厚隔热层,使基础升温幅度降低70%,有效抑制冻胀破坏。排水系统优化方面,横向盲沟(间距10m)与纵向排水管(直

径30cm)组合,可降低地下水位1.5-2.0m,在青藏联网工程中使冻土融沉量减少35%。新型材料应用显著提升防治效果,如纳米改性混凝土(抗冻等级达F500)在-40°C环境中仍保持95%抗压强度,用于冻土区桥梁墩柱施工后,裂缝发生率降低80%;形状记忆合金(SMA)阻尼器通过相变耗能,使输电塔风振响应降低60%,保障极端气候下的结构安全。

4.2 生物防治措施

生物防治借助植被重建与生态调控,构建“植被-土壤-冻土”协同防护机制。植物根系固土上,深根植物如高山柳、金露梅,根系穿透深达2-3m,其网络结构使土体抗剪强度提升25-30%。青藏公路边坡治理中,植被覆盖率从15%升至75%,坡面侵蚀模数降低90%。地表覆盖调节上,人工种植苔藓(覆盖度>80%)提高地表反照率0.2,减少30%太阳辐射吸收,多年冻土区活动层厚度减少0.8-1.2m;秸秆覆盖层(10cm厚)抑制蒸发,减少40%冻融循环次数,缓解路基冻胀。微生物固土利用巴氏芽孢杆菌诱导碳酸钙沉淀,冻土区试验中,3次灌浆后土体无侧限抗压强度达1.2MPa,提升3倍。生态廊道建设恢复物种连通性,三江源地区“植被带+动物通道”网络使生物多样性指数提升22%,促进地表能量平衡调节。

4.3 综合防治技术

综合防治注重“工程-生物-监测”协同与动态优化,形成全生命周期防治体系。时空耦合设计上,青藏铁路采用“热棒+遮阳棚+排水沟”组合,依冻土类型差异化配置,使冻害发生率从12%降至3%以下。智能调控系统集成地温传感器(精度±0.1°C)、形变监测仪(分辨

率0.1mm)与自动控制模块,某输电线路示范工程中灾害响应时间缩至10分钟^[4]。数值模拟-实测反馈机制通过COMSOL软件建立冻土热-力耦合模型,结合现场数据修正参数,预测精度达90%,指导措施优化。全生命周期管理涵盖各阶段,川藏铁路用BIM技术建立数字孪生模型,实现防治效果可视化评估与风险预警,减少返工成本1.2亿元。实践表明,该技术可使冻土区工程寿命超50年,运维成本降低60%,保障可持续发展。

结束语

高海拔冻土区高压输电线路灾害防治意义重大。本文系统研究灾害演化规律与防治技术,形成涵盖监测、预警、防治的完整技术体系。未来,随着气候变化与工程需求变化,需持续优化技术,加强多学科交叉融合,提升灾害防治智能化水平,保障输电线路安全稳定运行,推动高海拔冻土区电力事业可持续发展。

参考文献

- [1] 杨风利,张宏杰,范荣全,李正,扎西.高海拔输电线路风荷载特性及铁塔杆件内力分析[J].建筑钢结构进展,2022,24(09):86-94.
- [2] 武超,逯宪斌,罗福星,谢忠明,郭树峰.高海拔地区避雷器在线智能监测技术分析[J].中国设备工程,2022,(11):136-138.
- [3] 高健,唐占元,安之焕,殷万玲,卢志超,陈杰,范庆虎.无人机摄影测量用于高海拔电力工程的探索与设想[J].青海电力,2020,39(04):52-55.
- [4] 刘鹏.浅析电力工程及其输电线路设计与施工的技术问题[J].科技风,2021(01):193-194.