

35kV输电线路设备状态检修关键技术及故障处置分析

索展亮, 石晓龙

国网甘肃省电力公司陇南市供电公司两当县供电公司, 甘肃两当742400

DOI: 10.62836/gse.v3i3.1498

摘要: 陇南山区35kV输电线路多沿山地、沟谷分布, 汛期强降雨及边坡、通道变化会叠加设备本体风险。本文结合输电运检, 将巡视记录、红外热像、绝缘检测、无人机影像、杆塔基础与通道环境以及历史缺陷放在同一设备对象下核对, 讨论接点发热、绝缘子劣化、导线金具异常和山区通道风险。异常发现后结合工况、环境继续复核分级, 检修后复测并回填记录。

关键词: 35kV输电线路设备; 状态检修; 输电运检; 状态评价; 故障处置

Key Technologies for Condition-Based Maintenance and Fault Handling of 35 kV Transmission Line Equipment

Chenliang Suo, Xiaolong Shi

Liangdang County Power Supply Company, Longnan Power Supply Company, State Grid Gansu Electric Power Co., Ltd., Liangdang742400, Gansu

Abstract: The 35 kV transmission lines in the mountainous area of Longnan are mostly distributed along mountains and valleys, where heavy rainfall during the flood season and changes in slopes and line corridors may compound equipment risks. In transmission operation and maintenance, patrol records, infrared thermograms, insulation tests, UAV images, tower foundations, corridor environments, and historical defects are correlated under the same equipment object. Joint overheating, insulator deterioration, conductor and fitting abnormalities, and mountain-corridor risks are discussed. After an abnormality is detected, it is rechecked and graded in combination with operating conditions and environmental factors; after maintenance, re-testing is performed and the results are fed back into the records.

Keywords: 35 kV transmission line equipment; condition-based maintenance; transmission operation and maintenance; condition assessment; fault handling

1 引言

35kV线路承担区域供电、站间联络及重要用户接入等任务。陇南山地沟谷明显,部分线路跨坡、跨沟布设;进入汛期后,强降雨还可能带来坡体滑动、泥石流和基础冲刷。同一条线路上的绝缘子、金具、接续部位和杆塔基础,受扰程度很难一致。固定周期检修便于排计划,却不一定与实际状态合拍。有的部件多年变化不大,有的缺陷会在连续降雨、大风或边坡变化后加快暴露。时间节点只能说明计划到了,不能代替对设备和通道状态的判断。

近几年,输电线路运检研究逐步转向状态感知、状态评估与多源数据协同。吴晨曦等针对输电线路状态评估准确率问题,构建“先聚类、再回归”的状态画像与评估模型:利用自组织神经网络对原始状态数据进行降维,自适应提取代表性特征信息,再将特征数据输入双向LSTM,通过前向与反向学习建立输电线路核心数据与状态之间的非线性映射关系[1];卞蓓蕾等针对前端感知装置类型多、版本迭代快及可靠性存在差异的问题,搭建感知层装置可信度评估模型,并设置五类典型应用场景,将多源数据融通、工作场景构建、人机协同配合、巡检策略优化和应急处置纳入立体巡检系统[2];冯迎春、李敏采用无人机搭载激光雷达采集线路点云数据,先进行点云金字塔分档管理、粗差点剔除和均匀化抽稀,再分析抽稀后点云数据的多尺度特征并设计分类器,识别线路当前工况、最大工况及导线风偏角[3]。上述研究形成了状态画像、立体巡检和点云识别等技术路径。陇南山区35kV线路还要把设备缺陷与坡体、沟谷、降雨后的通道变化一起判断,才能确定何时处理、作业范围以及处置先后。本文研究35kV架空输电线路本体及附属设备,站内一次设备不在本文范围内。

2 35kV输电线路设备状态检修的技术基础

2.1 状态对象与主要状态量

35kV输电线路日常运检关注导线、绝缘子、金具、杆塔、接续部位以及杆塔基础和通道。连接

部位对接触电阻、负荷起伏较敏感;绝缘子易受污秽、潮湿、裂纹和老化影响;导线、金具还长期承受风振、覆冰等作用。陇南山区线路另需关注基础冲刷、边坡变形、落石和沟谷洪水。温度、外观、放电、机械状态、基础与边坡状态、通道环境和历史缺陷只有落到具体杆塔、具体部件上,后续比较才有意义。

2.2 状态信息获取与异常筛查

巡视中看到的异常只是后续判断的起点。地面巡视先查异物、锈蚀、松脱和通道变化,高处构件或视线盲区再用无人机补查;红外测温找异常发热点,绝缘检测核对电气性能变化。陇南汛期还要把杆塔基础、边坡和沟道纳入同一轮检查,强降雨后重点核对冲刷、滑塌和通道受阻。比如负荷刚有明显增加,某接点温度偏高,先排除工况影响;相近条件下连续复测仍偏热,且温差继续扩大,再列为重点缺陷追查。

2.3 状态评价与检修决策逻辑

状态评价到了现场,判断通常是交叉进行的。异常能不能复测出来,和上一次相比变化快不快,失效后会影响到什么,当前工况还能不能留观察时间,这些信息需要放在一起看。线路重要程度、设备所在区段和外部环境会进一步影响处理顺序。以温升为例,低负荷下偶尔测到一次偏高,可以安排复测;相同位置连续升温,又处在重要线路或薄弱连接部位,原有检修时间就不宜照搬。

3 35kV输电线路设备状态检修关键技术

3.1 红外测温以趋势和同类比较识别热缺陷

接续金具、耐张线夹、引流板等连接部位一旦出现氧化、压接质量下降或紧固状态变化,接触电阻会随之上升,带负荷运行时容易形成局部发热。红外测温操作方便,但热像不能离开当时工况单独解释,负荷、风速、日照、材料发射率都可能改变读数。陈泊远、刘宏杰提出基于红外成像技术的线路检修运维方法,利用红外扫描获取输电线路热成像信息,经红外图像分割提取图

像前景,根据线路温升、最大温差确定最大相对温差,并据此检测线路运行故障[4]。DL/T 664—2025对带电设备红外诊断中的现场检测、诊断方法、诊断依据、异常分级及处理作出规范[5]。实际巡视时,可先比较同类设备,再回看同一测点以前的热像,并核对负荷和环境。热点在可比条件下重复出现后,再去查接触面、压接质量和紧固状态,判断会更有依据。

3.2 绝缘状态检测需区分外观缺陷与性能劣化

绝缘子出现缺口、裂纹、污秽或伞裙损伤,影像一般能够看见,但外观轻重不能直接等同于绝缘性能下降程度。陇南沟谷区连续降雨或高湿时,表面泄漏和放电现象更容易显现。季世超等提出基于改进YOLOv5的轻量化绝缘子缺陷检测算法:以轻量型Ghost卷积替换普通卷积,采用重复加权BiFPN替换原特征提取网络,并引入CA坐标注意力机制,以提高模型对不同尺度缺陷的特征提取能力和主干特征提取效率[6]。这类图像识别方法适合提高缺陷筛查效率,但现场定级仍需回到设备本体。瓷、玻璃绝缘子出现疑似劣化,可配合零值或劣化检测;发现异常放电,可用紫外等手段辅助定位。同一串绝缘子在高湿天气反复放电,或已出现结构性破损,应把更换安排往前提。

3.3 无人机巡检服务于缺陷复核而非单独成链

人工巡视仍是35kV线路运检的基础手段,但陇南山区陡坡、深沟和跨谷区段较多,高处金具、绝缘子串、杆塔基础周边及部分通道死角并不容易看清。无人机适合补查这些位置,强降雨后还能快速查看边坡滑塌、基础冲刷和树障变化。DL/T 1482—2023对架空输电线路无人机巡检方式、巡检内容、作业要求以及资料整理等环节提出统一技术要求[7]。巡检影像需与杆塔号、部件编码对应,形成可追溯的缺陷记录;复杂山地背景下的识别结果仍应由人工复核。

3.4 多源信息融合用于判断缺陷发展程度

温度、图像和巡视记录分开看时,很多异常

都缺少上下文。把资料按“设备—部件—时间”连续整理,前后变化会清楚一些。一个热异常可以调历史热像核对,一个外观缺陷可以追看位置和范围有没有扩大,通道环境变化也能和过去的消缺记录放在一起看。宋丽等针对输电线路运维检修中的电网、设备和人员风险,梳理16项关键风险因素,采用熵权法进行风险因素组合权重赋权,并基于云模型开展风险评估;该方法识别出11项重点风险因素,实施风险管控后再评价,中度风险发生概率由26%降至0.9%[8]。这类研究把风险识别、权重确定、风险评估和管控后再评价连成一个完整过程。35kV基层运检更看重数据能不能持续留存、后续人员能不能看懂,以及能否直接支持检修计划;模型做得复杂,却缺少连续数据,现场价值反而有限。

4 典型故障的形成机理与状态特征

4.1 连接部位发热表现为电阻变化与负荷耦合

压接点、螺栓连接处和线夹是线路上较常见的发热位置。接触面氧化、受力松动或有效接触面积减小以后,接触电阻升高,负荷增加时局部温度也会抬升。多次热循环又会继续影响接触状态。发现热点后,仅看一个温度值容易误判,还要对照同类点、当时负荷和热点具体位置。若只更换表面已经变色的部件,接触面和紧固问题没有处理,同一位置仍有再次发热的可能。

4.2 绝缘子劣化由表面环境与结构缺陷共同推动

绝缘子受环境影响比较直接。污秽、潮湿、裂纹、破损和材料老化都可能造成状态变化,陇南不同海拔、坡向和沟谷区段的湿度、风场也有差别。巡视发现污闪痕迹、局部破损或持续放电后,应连同天气、所在区段和历史记录一起核对。某处总在连续降雨或高湿条件下重复异常,后续巡视应把这一时段列为重点,检修安排也要前移。

4.3 导线与金具异常体现机械损伤的累积效应

导线断股、金具磨损、销钉脱落和螺栓松动多

为逐步发展。小范围损伤在平稳工况下可能暂时不影响送电，遇到大风、覆冰或局部强对流后，发展速度可能增加。陇南跨沟、跨坡区段还要留意杆塔受力和基础周边变化，边坡滑移或冲刷可能改变原有受力状态。检查时应把损伤位置、受力情况和前几次记录放在一起比较。同一杆塔反复松动，只做重复紧固还不够，还要继续查安装质量、受力状态或振动来源。

4.4 外部环境会改变原有巡视节奏

陇南山区线路外部环境变化常快于设备本体。孙涛等针对强降水诱发陇南电网地质灾害建立风险评估与预警方法[9]；白剑锋等将关联规则与证据理论用于输电线路水土流失地质灾害风险评估[10]。对35kV线路而言，强降雨、边坡、基础和通道应作为联动风险因素。汛期重点核查滑坡、泥石流和基础冲刷区段，大风后检查异物及金具受力，高湿天气关注绝缘状态，巡视频次随天气预警和通道状态动态调整。

5 基于状态评价的故障处置分析

5.1 异常复核把“检测信号”变成“设备缺陷”

检测出现异常后，一般还不能直接进入检修安排。红外热点先核对负荷、测量角度和环境，图像异常要排除遮挡、反光，放电迹象还要考虑天气和现场干扰。完成这些复核，再调同一部件以前的巡视、检测和消缺记录，看异常是不是第一次出现、

范围有没有变化、原来处理过的问题是否复发。资料核到这里，是否需要停电、作业范围划到哪里，才有比较可靠的判断基础。

5.2 状态等级应直接对应检修动作

按处置紧迫程度，班组可以把现场动作分成跟踪、计划、优先和紧急几个层次，缺陷等级仍按企业现行规程执行。状态稳定、异常没有连续发展的，先保留运行并复测；缺陷确认但变化较慢的，纳入计划检修；异常扩大并涉及绝缘、机械完整性或杆塔基础稳定性的，处理时间前移。陇南进入强降雨过程后，原本处于跟踪状态的通道或边坡异常，也可能因为环境变化提高处置优先级。明显影响运行安全的，应及时处理。典型状态信息与故障处置的对应关系见表1。

5.3 典型故障处置采用闭环流程

连接部位发热能够比较完整地反映这一处置过程。红外巡视发现热点，先核对负荷、环境和测量条件；在相近工况下再次出现，再检查线夹、引流板、紧固状态，并翻看此前热像。原因基本明确后，才确定停电范围和消缺内容。检修结束后还要在条件允许时做复测，并把异常位置、判断原因、处理措施和复测结果写回设备档案。下一次同一位置温度再有变化，前面的记录就能直接作为比较依据。35kV输电线路设备状态检修关键技术与故障处置流程见图1。

表1. 典型状态信息与故障处置对应关系

状态信息	复核重点	风险判断	处置级别与动作
连接部位持续温升	同类点温差、负荷变化、接触面及紧固状态	热缺陷持续发展，可能引起接点烧损	跟踪→计划：缩短复测间隔；异常持续时安排停电消缺
绝缘子破损、污秽或放电迹象	可见缺陷、潮湿条件、放电特征及历史缺陷	绝缘裕度下降，恶劣天气下闪络风险上升	计划→优先：清扫或更换；反复放电或结构损伤时提高处置级别
导线断股、金具松动磨损	损伤范围、受力位置、振动及历史检修记录	机械强度或连接可靠性下降	计划→优先：纳入计划检修；损伤扩展较快时提前安排处理
强降雨、滑坡泥石流、树障及外破等环境异常	杆塔基础冲刷、边坡变化、通道受阻及安全距离	基础稳定或通道安全条件受影响，风险可能快速上升	优先→紧急：雨后复核重点区段；持续冲刷、变形或安全距离受侵占及时处置

注：处置级别用于说明检修紧迫度变化，具体缺陷定级和触发条件应按企业现行规程执行。

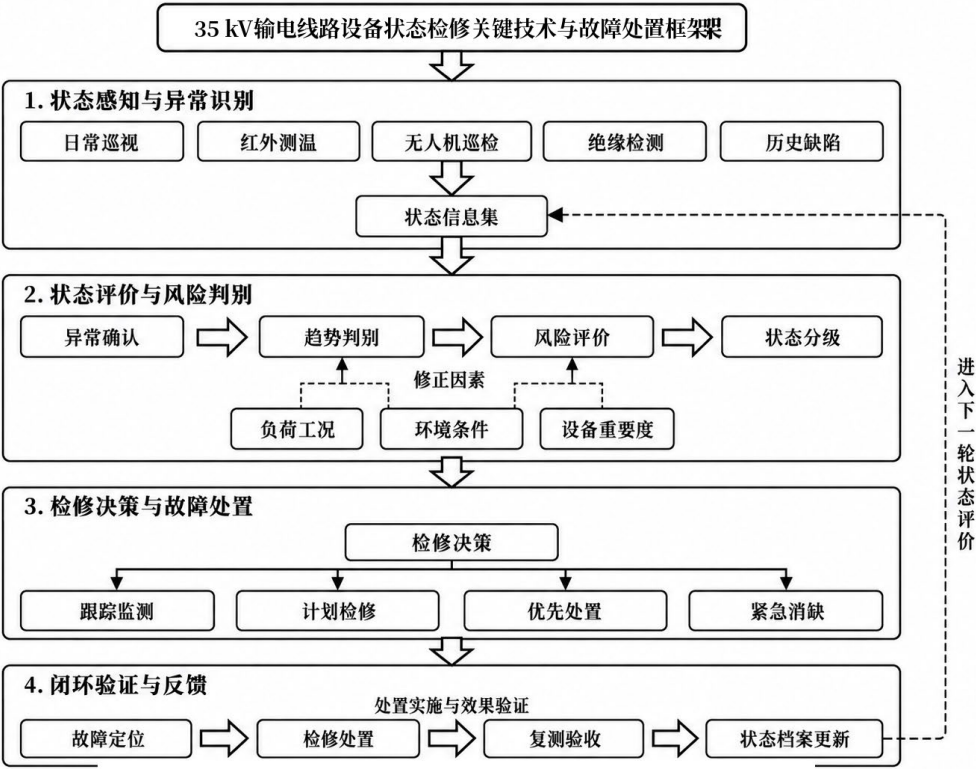


图1. 35kV输电线路设备状态检修关键技术与故障处置流程图

5.4 状态档案更新决定下一轮判断质量

检修结束后，设备资料要同步更新。缺陷位置、发现方式、原因判断、处理措施、复测结果以及当时环境，都应归到同一设备对象下。重复发热、松动或季节性放电可以标出“复发”，下一次评价时先看这些历史记录。资料积累几年以后，某类部件在哪些位置容易出问题、什么环境下容易再次出现，班组会看得更清楚，这类信息往往比单独一张检修记录更有用。

6 状态检修实施中的优化要点

6.1 数据可比性比单次数据精度更影响趋势判断

单次检测记录很详细，如果负荷、天气、测量位置这些背景信息没有留下，过一段时间仍难比较。陇南山区线路还应记录强降雨、大风以及杆塔基础、边坡和通道变化。现场记录至少固定设备对象、测点位置和必要工况，照片、热像、巡视结论归入同一设备档案。人员调整后，新接手人员可以

顺着历史记录查看变化。

6.2 检测结论需要设置明确的检修触发条件

状态检测中常见的问题，是报告写了“关注”或“异常”，班组仍要再判断什么时候复测、什么时候转计划检修。对常见缺陷，可把触发动作写得更具体。陇南山区还应把强降雨预警、边坡变形、基础冲刷和通道突变作为外部触发条件；这类条件变化较快，不能等到原定周期再统一处理。线路重要程度或缺陷发展速度变化时，处理时间也要同步调整。

6.3 处置复盘应追查故障诱因是否被消除

一次复测合格，只能说明处理后的当前状态。原来造成缺陷的条件还在不在，需要另外判断。接点发热处理以后，若受力和连接结构没有改善，同一位置仍可能再次升温；绝缘子完成清扫，但污染源一直存在，表面状态也会重新变差。把这类复发原因记入设备档案，后续巡视就能直接找到重点，不用每次重新判断。

7 结论

陇南山区35kV输电线路状态检修, 设备本体和气象、边坡、通道环境需要放在一起判断。红外测温发现热异常, 无人机和可视化巡检补充高处结构、跨沟跨坡区段及雨后通道观察, 绝缘检测核对电气性能变化。单次结果与同类设备、历史记录和实际工况比较后, 再进入检修安排。接点发热、绝缘劣化、导线金具损伤以及强降雨引起的基础、边坡和通道风险, 处理后都应复测并回填资料。记录连续, 重复缺陷和环境诱发风险更容易识别。

参考文献

- [1]吴晨曦,李博亚,孙弼洋,等.基于双向长短期记忆网络的输电线路状态画像与评估[J].浙江电力,2022,41(10):34-41.
- [2]卞蓓蕾,江炯,刘鹏.输电线路人机协同立体巡检系统设计[J].浙江电力,2022,41(5):61-68.
- [3]冯迎春,李敏.基于无人机搭载激光雷达的输电线路智能巡检研究[J].微型电脑应用,2022,8(9):66-69.
- [4]陈泊远,刘宏杰.基于红外成像技术的配电网输电线路检修运维方法[J].电工技术,2024,45(5):114-116.
- [5]国家能源局.DL/T 664—2025带电设备红外诊断应用规范[S].2025.
- [6]季世超,曲星合,宋庆彬,等.基于改进YOLOv5的轻量化绝缘子缺陷检测算法[J].浙江电力,2023,42(12):64-72.
- [7]国家能源局.DL/T 1482—2023架空输电线路无人机巡检作业技术导则[S].2023.
- [8]宋丽,李鹏,许文韬,等.基于云模型的输电线路运维检修风险评估[J].浙江电力,2023,42(9):108-116.
- [9]孙涛,李玥,王津,等.强降雨诱发陇南电网地质灾害风险评估及预警方法研究[J].干旱气象,2024,42(5):813-823.
- [10]白剑锋,高峰,吴振.基于关联规则和证据理论的输电线路水土流失地质灾害风险评估[J].四川电力技术,2024,47(1):15-21.