

电缆中间接头在线监测装置在电力监理的应用

赵泉

惠州市新科创工程建设监理有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i8.21629

[摘要] 电缆中间接头是电缆线路的薄弱环节,传统监理巡检依赖人工目测和手持红外点温仪,存在检测范围有限、数据难以追溯、无法发现内部隐患等问题。本文介绍一种集成红外环绕扫描、内部温湿度检测与气路循环采样的监测装置,可实现接头全表面360° 温度扫描(精度 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$)、内部气体温湿度检测及气密性综合判断,单个接头检测耗时约2分钟。检测数据自动记录并形成可追溯档案,有助于提升监理巡检的科学性与数据化水平。

[关键词] 电缆中间接头; 在线监测; 电力监理; 红外测温; 气密性检测

中图分类号: TM246 文献标识码: A

Application of Online Monitoring Devices for Cable Intermediate Joints in Power Supervision

Quan Zhao

Huizhou Xinkechuang Engineering Construction Supervision Co., Ltd

[Abstract] Cable intermediate joints are weak links in cable lines. Traditional supervision inspections rely on manual visual checks and handheld infrared spot thermometers, which suffer from limited detection coverage, difficult data traceability, and inability to identify internal hidden hazards. This paper introduces a monitoring device integrating infrared circumferential scanning, internal temperature and humidity detection, and gas circulation sampling. It enables 360° temperature scanning of the entire joint surface (accuracy $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$), internal gas temperature and humidity detection, and comprehensive gas tightness assessment, with each joint inspection taking approximately 2 minutes. The detection data is automatically recorded and forms a traceable archive, enhancing the scientific and data-driven nature of supervision inspections.

[Key words] cable intermediate joint; online monitoring; power supervision; infrared temperature measurement; airtightness test

引言

电缆中间接头部位的事故发生率远高于电缆本体,已成为影响线路安全的主要薄弱点之一。主要成因是该部件的安装在现场完成,受制于施工条件和环境因素,其质量控制难度往往大于工厂预制件。当接头一旦失效,可能导致非计划停电,甚至引发火灾等次生事故。因此,准确把握其运行状态、及时发现潜在隐患,成为影响工程安全问题发生的重要因素。

监理单位作为工程建设“五方责任主体”之一的角色,在电力工程建设与运维中负责质量控制和状态监督。当前传统的巡检主要依靠人工目测和手持红外点温仪,只能测量单点温度,无法获取接头全表面温度分布,也难以判断内部受潮和密封状态。检测结果还依赖人员经验,缺乏量化数据记录。从这个角度看,研发能够全面评估电缆中间接头状态的检测装置,有其现实必

要性。针对上述问题,本文提出一种集成红外环绕扫描、内部温湿度检测与气路循环采样的在线监测装置,旨在实现电缆接头多维度状态信息的同步获取与融合诊断,为电力监理巡检提供更具科学性和数据化水平的检测手段。

1 电缆中间接头故障成因与监测需求

近年来,围绕电缆接头温度异常故障频发,国内外学者开展了大量在线监测技术研究,逐步形成了“传感—通信—处理—预警”一体化的技术体系^[1]。现有研究设计了基于DSP与FPGA双核芯片的远程在线监测系统,通过建立由护套温度反算接头内部温度的热阻模型,间接实现温度异常故障的在线识别^[2]。又有面向全长382 km的高压电缆线路,部署了涵盖传感层、通信层、数据处理层与用户接口层的温度在线监测系统,实际运行12个月的预警准确率达97%^[1]。

1.1 故障成因分析

电缆中间接头故障具有多元耦合特征。统计表明, 非外力破坏电缆跳闸中接头/终端故障占比90%, 全国超70%电缆爆炸发生于接头处^[3], 主要诱因为工艺不良、应力集中及潮气侵入引发的过热、局放与绝缘破坏^[3-4]。

1.2 常见故障类型

电缆中间接头在长期运行中容易出现各类故障, 常见的类型有:

(1) 过热。广东电网统计显示, 剔除外力破坏后接头故障占电缆类故障62% (为本体故障近5倍)。在接头故障成因中, 施工质量与运维老化引发的接触不良过热最为突出^[5]。过热主因包括压接不良致接触电阻偏大、绝缘受损引发局放升温及长期过负荷积热。过热具潜伏性, 早期检出可低成本处置。

(2) 受潮。受潮多由密封失效致水分侵入引起。有研究显示, 水分侵入后会在XLPE-SiR界面形成水膜引发电场畸变 (最大场强可达3.19 MV/m) 及局放击穿^[6]。受潮早期外观不可见但内部湿度可测, 某市年受潮事故达70余起^[6], 表明受潮是接头运行中不可忽视的隐性隐患。研究指出护层环流、温升与湿度的多参量协同研判是提升绝缘劣化识别率的关键路径^[7]。

(3) 密封失效。密封结构在长期运行中可能因材料老化、热胀冷缩、机械振动等原因出现微小裂纹, 导致密封性能下降, 成为导致受潮故障的直接原因。

1.3 在线监测的技术需求

如110kV应力锥错位案例所示^[3], 顶管通道轴向偏移产生的持续机械应力可使应力锥与半导电断口搭接尺寸发生毫米级的微量位移, 进而引发场强畸变与绝缘击穿。此类潜伏性缺陷在早期仅靠单一电气检测手段 (如时域反射法、频域反射法) 难以有效识别^[4]。现有方案聚焦单一或局部温度, 存在测温盲区。缺乏对接头内部受潮/气密同步检测, 多参数融合判据的阈值设定多以经验为依据, 尚缺乏系统的理论推导与实验室标定^[7]等不足。故监测装置需满足全表面测温、内部温湿度检测、多参数融合及数据追溯要求。

2 国内外研究现状

2.1 现有监测技术

目前电缆接头在线监测的主流技术包括分布式光纤测温 (DTS)、局部放电检测和红外热成像三种。虽然DTS利用拉曼散射效应实现电缆沿线连续测温, 定位精度达 $\pm 1\text{m}$ 、温度分辨率优于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ^[8]。但其空间分辨率受限于 $0.5\sim 2\text{m}$, 对小尺寸接头的局部过热存在平滑效应, 且无法感知内部湿度与气密性。而局部放电检测通过捕捉绝缘劣化早期的微弱放电信号实现缺陷预判, 对微观缺陷敏感^[9], 在强电磁环境中易误报, 且无法表征过热与受潮故障。传统红外热成像虽非接触、直观快速, 但检测视角受限难以实现全表面 360° 覆盖。而且数据依赖人工记录难以形成可追溯档案。

2.2 现有研究的不足

综合上述分析, 现有技术普遍存在检测维度单一、全表面覆盖不足、数据可追溯性差等共性问题。针对上述不足, 本文提出

一种集成红外环绕扫描、内部温湿度检测与气路循环采样的多参数融合在线监测装置, 旨在弥补现有技术在电缆接头多维状态感知上的短板。

3 装置结构设计

3.1 总体结构

本装置主要由固定机构、环绕扫描机构、内外温度检测系统、气路循环与湿度检测系统、自适应仿形机构五部分组成, 装置整体结构如图1所示。装置采用抱箍式安装方式, 可方便地固定于电缆中间接头外部, 无需对接头本体进行改造。

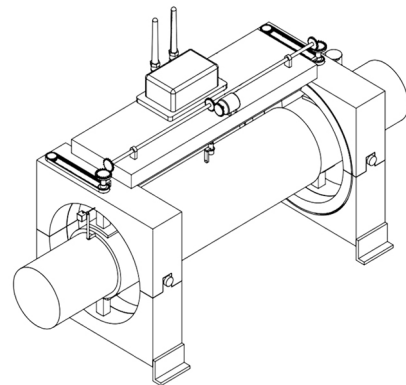


图1 电缆中间接头监测装置结构示意图

3.2 固定机构

固定机构采用抱箍式设计, 由两个半环形的固定座组成。固定座内径可根据电缆接头尺寸调整, 通过螺栓锁紧实现可靠固定。单人即可完成安装和拆卸, 操作时间不超过3分钟。

3.3 环绕扫描机构

环绕扫描机构用于实现接头全表面温度检测, 由周向旋转机构和轴向移动机构两部分构成, 通过单电机驱动和棘轮切换来完成两种运动模式的转换, 具体如下:

(1) 周向旋转机构包含齿圈、转向齿轮和第二电机, 驱动红外测温探头沿接头周向旋转, 完成 360° 扫描。

(2) 轴向移动机构则由双向丝杆和移动块组成, 带动探头沿接头轴向扫描。两种运动之间的切换依靠棘轮机构实现: 电磁铁控制棘爪的啮合状态, 使两种运动交替进行, 从而完成全表面覆盖扫描。利用棘轮机构实现单电机的运动模式切换的功能, 提高结构上的紧凑性。

3.4 内外温度检测系统

外表测温单元选用红外测温探头, 安装在环绕扫描机构的移动块上。该探头测量范围 $-20^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$, 精度 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。扫描时, 探头沿接头周向和轴向运动, 按设定的角度间隔和距离间隔采集温度数据点, 最终生成接头表面的温度分布图谱。内部测温单元使用热敏电阻, 安装于出气壳体的内部气流通道中, 测量范围 $-40^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$, 精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

3.5 气路循环与湿度检测系统

设有气路循环与湿度检测系统, 具体运行原理为: 风机装置

设置在出气壳体的出口端,当工作时产生负压时,接头内部的气体经进气壳体的进气口。气体被吸入后,流经出气壳体后排出。湿度传感器置于出气壳体的气流通道中,用于检测流经气体的相对湿度。将温度传感器与湿度传感器集成在同一气路中,有别于单一参数检测装置。

3.6 自适应仿形机构

为使红外测温探头与被测表面保持恒定距离,装置配置了一套由伸缩壳、弹簧和活动球组成的自适应仿形机构。当装置安装在不同直径的接头上时,其伸缩壳在弹簧作用下自动伸缩,令探头与接头表面维持约10mm的距离。该结构克服了传统固定支架灵活性差的局限。

4 检测原理与关键技术

4.1 红外测温原理

红外测温依据物体表面温度与红外辐射能量的对应关系,探头接收辐射能量后经光电转换计算得出表面温度。实际测量时,发射率参数需根据电缆接头外表面材质进行设置。

4.2 多参数融合判断逻辑

装置采集外表温度、内部温度和内部湿度三组数据,按预设逻辑综合判断接头状态。针对故障成因的复杂性及单参数监测盲区,本文提出的多参数融合判断兼顾了过热、受潮及气密性失效等多重隐患的早期捕获^[7]。

判据中的温差阈值设定参考了DL/T 664《带电设备红外诊断应用规范》中电流致热型设备的缺陷诊断原则(相对温差 $\geq 35\%$ 为一般缺陷, $\geq 80\%$ 为严重缺陷),结合电缆中间接头表面散热特性与同类比较法,将早期预警温差设定为 5°C (温和预警)与 10°C (显著过热),以在缺陷萌芽期即实现捕捉。湿度差阈值则依据绝缘界面受潮劣化的工程统计特征(内部与外部湿度差超过 $10\%\sim 15\%\text{RH}$ 时常伴随密封失效风险)进行设定^[10]。具体判据如下:

(1) 正常状态下,外表温度分布均匀,最高与最低温差不得超过 5°C ;内部温度与外表平均温差小于 3°C ;内部相对湿度与环境相对湿度差值在 $10\%\text{RH}$ 以内。

(2) 出现过热时,外表温度分布不再均匀,出现局部高温区域,局部最高温度与外表平均温差超过 10°C ,内部温度也明显高于外表平均温度。

(3) 受潮的判断依据是内部相对湿度比环境高出 $15\%\text{RH}$ 以上,或内部湿度呈持续上升趋势。若同时满足过热和受潮条件,则判定为复合故障。

4.3 气密性检测方法

采用湿度阈值法和趋势分析法相结合。湿度阈值法设定内部相对湿度上限阈值(如 $80\%\text{RH}$),超过阈值判定为密封失效。趋势分析法连续监测湿度变化趋势,若湿度持续上升(如每小时上升超过 $5\%\text{RH}$),即使未达阈值也判定为存在密封失效风险。

5 装置在电力监理巡检中的应用

5.1 部署方式

本装置有两种部署方式:

便携式部署适用于日常巡检。监理人员将装置装入工具箱,到达现场后快速安装于待检接头,检测完成后拆卸转至下一检测点。这种部署方式灵活机动,适用于多个分散检测点的巡检任务。

临时安装部署适用于对疑似故障接头进行短时连续监测。将装置安装于目标接头,设定监测时间(如24小时或48小时),装置自动定时采集数据并记录。监测结束后回收装置并导出数据进行分析。

5.2 检测流程

检测流程按以下步骤执行:

(1) 先将装置安装至接头。清洁接头外表面,将装置套入并对准中部位置,锁紧螺栓固定。

(2) 随后启动检测程序。接通电源,装置自检通过后,风机启动建立气路循环,同时环绕扫描机构带动红外测温探头沿周向和轴向运动。

(3) 系统自动记录扫描过程中的温度数据和湿度数据。扫描完成后生成温度分布图和湿度曲线,并根据预设逻辑给出接头状态评估结论。

(4) 检测结果实时显示于屏幕,数据自动保存至本地存储器,也可通过USB接口导出检测报告。

(5) 最后拆卸装置。松开锁紧螺栓,取下装置清洁后放入工具箱,转至下一个检测点或结束任务。

5.3 电力监理应用场景

(1) 场景一:新建工程验收。在某 220kV 变电站验收中,装置检出某接头内部湿度 $78\%\text{RH}$ (环境 $55\%\text{RH}$ 且持续爬升),按照装置预设的判据,这种情况指向密封失效风险。监理人员将结果反馈至施工方拆解确认密封圈未就位,更换后复测湿度降至 $58\%\text{RH}$ 。这表明量化检测可提前发现肉眼无法察觉的安装缺陷。

(2) 场景二:监理日常管理。在运行中巡检和故障排查场景中,该装置同样发挥了重要作用。例如在某 110kV 线路巡检中,装置检出2个接头存在局部过热(温差 12°C 和 15°C),经停电检修确认为压接不良所致。在故障排查中,装置同时提供温度与湿度数据,帮助快速判断故障类型,为维修方案制定提供了依据。

5.4 数据管理与追溯

在线监测装置区别于传统检测,优势在于可把检测数据自动存入本地存储器。数据记录范围涵盖了检测时间、检测位置、检测参数、状态评估结论以及检测人员签名等内容。管理人员可通过USB接口将数据导出至计算机,形成电子版的巡检记录档案。该档案支持按线路、时间、状态等维度进行分类检索和统计分析,能够为监理单位的质量管理和状态跟踪提供数据支撑。

6 应用效果与分析

6.1 巡检方式对比

本装置与传统巡检方式多维度对比情况如下表所示:

表1 本装置与传统巡检方式的对比

对比项	传统巡检方式	本装置
检测手段	人工目测+手持红外点温仪	红外环绕扫描+内部温湿度检测
检测范围	表面单点温度, 存在盲区	全表面温度+内部温湿度, 全覆盖
数据记录	人工记录, 易丢失难追溯	自动记录, 电子化归档, 可追溯
故障识别能力	仅能发现明显外部异常	可识别早期过热、受潮等隐性隐患
检测效率	单个接头约 5 分钟	单个接头约 2 分钟
人员依赖性	依赖经验, 主观性强	量化检测, 客观可靠

表1对比表明, 本装置在检测范围、数据记录、故障识别能力和检测效率四个方面均优于传统方式, 尤以全覆盖检测和内部隐患识别能力最为突出。

7 结语

本文所述在线监测装置将红外环绕扫描、内部温湿度检测与气路循环采样三项功能集于一体。可同时获取接头外表面温度分布、内部温湿度等参数。检测数据可自动存入本地存储器, 每次记录包含时间、位置、参数及评估结论, 便于后期查阅和统计分析。相较于传统巡检手段, 其在检测范围和维度上的拓展优势明显。在电力工程中的应用范围广泛, 常见场景包括新建工程验收、运行中定期巡检和故障后排查定位, 三种场景各有侧重。以上探讨基于装置的结构设计、检测原理及应用案例, 其在长期

现场运行中的实际表现, 还需更多工程实践来验证。

[参考文献]

[1]李梦阳.电网工程中高压电缆接头温度在线监测技术研究[J].自动化应用,2025,66(3):225-228.

[2]李岩,刘玉娇,胡凡,等.电力电缆接头温度异常故障远程在线监测系统的设计[J].自动化技术与应用,2024,43(6):90-93, 102.

[3]李成坤,傅雪婷,袁鼎发,等.一起110kV电力电缆中间接头故障分析[J].农村电气化,2026(2):65-68.

[4]戴彦文,曾旭文,朱启凌.配电网电缆线路故障检测及故障源定位研究[J].光源与照明,2025(1):96-98.

[5]李通,李顺尧.10kV电缆终端头烧毁故障的分析[J].电工电气,2020(12):74-76.

[6]黄成龙,赵一帆,胡冉,等.10kV电缆中间接头受潮XLPE-SiR绝缘界面放电演化分析[J].广东电力,2024,37(6):120-128.

[7]晋伟平,杨永昆,王明勇,等.高压电力电缆故障诊断与预警技术应用研究[J].云南电力技术,2026,54(3):18-21.

[8]胥海东,向兆军,苏莉君,等.基于DTS技术的煤矿电缆载流量分析研究[J].煤矿机械,2024,45(8):41-44.

[9]黄凯,肖哲.基于改进小波包的电力电缆接头局部放电检测技术研究[J].电工技术,2026(8):196-198,202.

[10]DL/T664-2025带电设备红外诊断应用规范[S].

作者简介:

赵泉(1987--),男,汉族,湖北省荆州市人,本科,工程师,研究方向: 电力工程智慧监理。