

[故障定位]

水电站电缆终端故障定位及检修技术

文/王吉贤

新疆水发集团电力能源公司伊河电力公司

介绍了水电站电缆终端的常见故障类型，分析故障发生的机理，并基于超高频（UHF）法和红外热成像技术提出新型故障定位技术。同时，探讨无损检测技术、高效修复材料与工具的应用以及故障智能诊断与预警系统在故障检修中的实际应用效果，以期提高故障处理的准确性和效率。最后展示这些技术在实际工程中的应用测试与评估结果。

水电站是清洁能源的重要提供者，在当今能源结构转型中发挥着至关重要的角色。电缆终端是连接水电站主要设备与输电系统的关键节点，其稳定性和可靠性对整个电站的运行安全性和效率具有决定性影响。电缆终端故障，尤其是绝缘层老化、接头故障以及由环境因素引起的损害，经常导致系统效率下降和供电中断，甚至引发更严重的设备损害和安全事故。因此，对电缆终端的故障定位与检修技术进行深入研究，不仅能够提高故障诊断和处理的准确性，还能有效延长电缆终端的使用寿命，降低运维成本，从而保障水电站的稳定运行。

水电站电缆终端故障分析

电缆终端是水电站电缆系统中至关重要的组成部分，其稳定性直接关联到整个发电和输电系统的可靠性。电缆终端故障多发生于终端接头和绝缘层，其中绝缘层老化和接头松动是最常见的故障类型，绝缘层可能由于长期受到温度变化、湿度以及化学腐蚀的影响逐渐退化，导致绝缘性能下降，甚至发生击穿。接头部分则可能因施工质量不佳或长期机械应力作用导致接触不良或松动，进而产生过热或电弧，严重时可引起电缆火灾或功率损失。此外，电缆终端受环境因素影响显著，特别是在高

湿度和大温差的环境中，绝缘材料和接头的老化加速，故障率相应增加。在故障分析过程中，可以使用超高频（UHF）法、红外热成像技术和超声波检测等现代诊断技术，有效识别电缆终端潜在的缺陷和故障。这些技术能够在不中断电缆服务的条件下，对电缆终端的健康状态进行全面评估，然后分析收集到的测试数据，结合电缆终端的操作历史和维护记录，对故障进行准确的定位和性质分析，为后续的检修提供科学依据。

水电站电缆终端故障定位技术

1. 超高频（UHF）法

超高频（UHF）法在水电站电缆终端故障定位领域展现出显著的技术优势，尤其适用于高压电缆绝缘缺陷的检测与诊断。该技术基于电缆终端在运行过程中可能产生的局部放电现象，根据监测局部放电产生的超高频电磁波来定位故障。此技术的核心在于超高频信号具有良好的定向性和穿透性，能够有效地避免外部噪声的干扰，提高故障检测的灵敏度和准确性。在实际应用中，根据在电缆终端附近安装UHF传感器，能够捕捉到由绝缘缺陷引起的局部放电信号。这些信号被转换为电压或电流形式的信号后，以特定的信号处理算法进行分析，确定

放电的强度和位置。此外，UHF法还可以与其他诊断技术如电气测试或红外热成像技术联合使用，提供更为全面的故障诊断。该方法的应用不仅限于故障定位，还能对电缆终端的健康状况进行实时监测，从而实现预防性维护和故障预警，大大减少因电缆故障引起的电力系统停运时间及相关经济损失。

2. 红外热成像技术

水电站电缆终端故障定位中，红外热成像技术的应用较为重要，其核心原理是通过探测电缆终端及其周边环境的红外辐射，从而识别出由于故障导致的温度异常。由于电缆故障如接头松动或绝缘退化常引起局部发热，红外热成像技术能够无接触地捕捉到这些异常热点，快速直观地指出可能的故障位置。

为了提高故障检测的精确性和实时性，可以引入一种基于热图分析的算法，该算法通过实时监控电缆终端的温度分布来预测故障发展。算法的第一步是计算温度场的梯度，用以确定温度变化最显著的区域

$$\nabla T(x, y) = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中， $T(x, y)$ 是位置 (x, y) 处的温度； $\frac{\partial T}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial T}{\partial y}$ 分别是温度在 x 和 y 方向上的偏导数。

根据这一梯度计算，可以有效识别出故障区域的热点。

接着，算法使用这一梯度信息来计算每个热点区域的热能累积指数，该指数可以表示为

$$E = \int_A \nabla T(x, y) dx dy \quad (2)$$

式中， E 是热能累积指数；积分区域 A 表示被检测的热点区域。

式（2）通过积分计算出区域内总的热能累积，为故障严重性提供量化分析。

为了实现实时监控，算法进一步采用动态阈值技术对热点进行评估，阈值根据历史数据动态调整，计算公式为

$$T_{\text{threshold}} = \mu + k\sigma \quad (3)$$

式中， μ 和 σ 分别是历史温度数据的平均值和标准差； k 是调整因子。

这一动态阈值有助于适应不同环境下的温度变化，提高故障检测的可靠性。

水电站电缆终端故障检修技术

1. 无损检测技术

无损检测技术在水电站电缆终端故障检修中占

据核心地位，主要利用电磁波、声波或其他物理信号检测电缆终端的结构完整性而不损害电缆本身，是确保电力系统稳定运行的关键，这种技术依赖于精密的信号处理和模式识别算法来分析从电缆终端反射或透过的信号，从而确定潜在的缺陷或故障。例如，脉冲回波测试是一种常用的无损检测方法，它使用电磁脉冲沿电缆传播，反射波形被用来分析电缆的健康状态。其信号强度为

$$S = \frac{P_r}{P_t} \quad (4)$$

式中， P_t 是传输的脉冲功率； P_r 是接收的反射脉冲功率。

通过比较不同位置的信号强度，可以识别出损伤或缺陷区域。继续分析，可以通过计算反射系数 R 来进一步确认故障位置，该系数由下式给出

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (5)$$

式中， Z_1 和 Z_2 分别是电缆在正常区域和故障区域的阻抗。

可以量化故障前后的阻抗变化，从而更准确地定位故障位置。

对于实时监控算法，可以采用基于时间窗的信号分析技术来持续跟踪电缆状态的变化。假设电缆的标准信号模式由时间序列 $X(t)$ 表示，可以计算时间窗内的信号方差 σ^2 来评估信号的稳定性

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [X(t) - \mu]^2 dt \quad (6)$$

$$\mu = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (7)$$

式中， T 是时间窗的长度； μ 是该窗口内信号的平均值。

这种方法使得持续监测成为可能，能够实时发现信号的微小变化，及时预警潜在的故障风险。

2. 高效修复材料与工具的应用

在水电站电缆终端故障检修领域，高效修复材料与工具的应用是实现快速、经济且持久修复的关键。随着技术进步，特种聚合物材料、高导电性填充剂以及先进的密封技术已广泛应用于电缆终端的修复作业中。这些材料不仅能快速固化以恢复电缆的绝缘性能，还能提供出色的机械强度和化学稳定性，从而有效延长电缆终端的使用寿命。例如，使用硅胶或环氧树脂作为修复材料，可以在极短的时

间内实现电缆终端的绝缘恢复，其快速固化特性和优异的电气性能使得这类材料成为电缆终端故障处理的首选。此外，现代修复工具如自动化的电缆剥皮机和高精度的温控焊接设备大大提升了修复作业的效率 and 精确度，减少了人为错误的可能性，加快了故障恢复过程。为了更具体地说明这些材料和工具的应用效果，表1列出了几种常用的修复材料和工具，以及在电缆终端修复中的典型应用数据。

表1 高效修复材料与工具的应用情况

材料/工具类型	固化时间	绝缘强度 / (kV/mm)	使用寿命 /年	操作效率
硅胶	1 h	25	10	高
环氧树脂	30 min	30	15	高
自动电缆剥皮机	N/A	N/A	N/A	极高
温控焊接设备	N/A	N/A	N/A	高

这些数据显示，高效修复材料和工具不仅提升故障处理的响应速度，还保证修复质量，减少未来的维护需求。

3. 故障智能诊断与预警系统

故障智能诊断与预警系统集成了数据采集、信号处理、模式识别与机器学习技术，能够对电缆终端的运行状态进行实时监控并及时发出预警，这种高级的诊断技术能够大幅提升故障响应速度和处理精准度。系统通过在电缆终端安装多种传感器，包括温度传感器、湿度传感器以及电压和电流监测器，持续收集运行数据。随后，这些数据被传输至中央处理单元，在那里先经过噪声过滤和信号增强处理，以确保数据质量。接下来，利用先进的数据分析算法，如支持向量机（SVM）和人工神经网络（ANN），能够从历史数据中学习并识别出异常模式，当系统检测到与已知故障模式相匹配的信号时，便会自动触发警报，并根据图形用户界面向操作人员提供详细的诊断结果和可能的故障原因。此外，系统还会推荐可能的修复方案和预防措施。这种智能诊断系统不仅提高故障处理的自动化和智能化水平，而且根据预测性维护帮助减少非计划的停机时间，保证电力供应的连续性和可靠性。

技术应用测试

在本实验中，所使用的数据集主要来源于实际的传感器测量结果。这些传感器安装于模拟的水电站电缆终端环境中，以收集温度、湿度以及电压、

电流的实时数据。传感器每秒产生1个数据点，连续运行24 h，从而为每种传感器生成86 400个数据点，整个实验共生成259 200个数据点。每条数据记录包含丰富的信息，例如传感器类型（温度传感器、湿度传感器和电压电流监测器）、数据采集时间点、以及相应的环境参数值（温度、湿度、电压和电流等）。测试共进行5次，以确保结果的可靠性和系统的稳定性。测试指标包括准确率、响应时间、系统稳定性和预警准确性。准确率代表系统正确诊断故障的能力，响应时间反映系统从检测到故障到发出警报所需的时间，系统稳定性评估系统在连续运行过程中的可靠性，而预警准确性则指系统预测故障的精确度。这些指标综合反映了系统的性能和实用价值。测试数据见表2。

表2 测试数据

配置编号	准确率 (%)	响应时间/s	系统稳定性 (%)	预警准确性 (%)
1	96.23	0.58	99.84	95.61
2	97.45	0.49	99.79	96.38
3	98.12	0.45	99.93	97.29
4	95.89	0.51	99.68	94.72
5	97.75	0.43	99.86	96.55

结果显示，系统整体展现高准确率和预警准确性，同时响应时间较短，系统稳定性接近100%。这表明故障智能诊断与预警系统在实际操作中能够有效地识别和预警潜在故障，且具备快速反应和高稳定性的特点。这些结果反映系统在实时故障检测和处理方面的优越性能，验证其在水电站电缆终端故障检测应用中的实用性和可靠性。

结束语

电缆终端作为水电站电力传输系统的关键组成部分，其性能的优化与故障的有效管理对于保障水电站的经济效益和安全稳定运行至关重要。通过系统研究和应用先进的故障检测与修复技术，可以有效预防和减少电缆终端故障的发生，为水电站的可持续发展提供强有力的技术支持。因此，本文通过对水电站电缆终端的故障分析、定位及检修技术的深入研究，旨在为电缆终端的故障预防与维护提供科学、系统的解决方案，进一步推动电力工程技术的发展和应用。EA

(收稿日期：2024-12-10)