

# 电缆接头故障的声磁联合检测方法

何嘉轩 李许斌 李 祥

嘉兴市恒光电力建设有限责任公司南湖分公司 浙江 嘉兴 314033

**摘要：**本文聚焦电缆接头故障的声磁联合检测方法。先剖析故障机理，构建声磁信号模型并分析时空关联性。接着设计声磁协同感知检测系统，涵盖架构、采集处理、同步校准、传感器选型布置及抗干扰设计。最后提出多模态特征融合与智能诊断方法，包括特征级融合策略、故障分类模型和定位算法。经实验验证，该方法可精准识别与定位故障，为电缆接头运维提供有效支撑。

**关键词：**电缆接头故障；声发射检测；电磁信号；联合检测

引言：电缆接头作为电力系统连接的关键部件，其故障严重影响系统运行安全。故障类型多样，演化过程复杂，传统检测方法存在局限性。声发射检测能捕捉内部物理过程信号，电磁信号可反映电气参数异常，二者联合检测可实现优势互补。本文深入探究电缆接头故障机理与声磁信号特性，设计声磁协同感知检测系统，提出多模态特征融合与智能诊断方法，为电缆接头故障检测提供新思路。

## 1 电缆接头故障机理与声磁信号建模

### 1.1 典型故障类型及演化过程

电缆接头是电力系统连接的核心部件，其故障类型与演化过程直接影响系统运行安全，主要包括接触不良、绝缘老化、机械损伤及热失效四类。接触不良源于安装偏差或长期振动，导致接触面氧化、松动，接触电阻升高引发局部发热；绝缘老化由电-热-力耦合作用导致，绝缘材料出现裂纹、碳化，性能逐步下降直至击穿短路；机械损伤受安装拉扯、环境腐蚀等影响，接头外壳变形、密封失效，水汽杂质侵入加速损坏；热失效因过载、散热不良，接头温度超标，引发材料熔融甚至燃烧。故障演化遵循“初始缺陷积累—性能渐进退化—突发故障触发”规律，初期仅存在微观缺陷，无明显异常，随损伤劣化突破临界阈值，引发短路、断路等恶性故障，且各故障相互耦合，如接触不良产生的高温会加速绝缘老化，需明确各类故障的演化特征与临界阈值，为检测提供依据。

### 1.2 声发射信号产生机理与传播模型

声发射信号是电缆接头故障演化中，内部材料变形、裂纹扩展等物理过程释放的弹性波，其产生机理与故障类型、演化阶段密切相关。接触松动时，接触面微振动摩擦产生100kHz-1MHz高频弹性波，幅值随接触压力降低而增大；绝缘裂纹扩展时，裂纹尖端应力集中

引发材料断裂，产生突发式声发射信号，幅值峰值达数伏，频率分布较宽；热失效导致材料熔融汽化时，产生20kHz-200kHz低频强信号，持续时间较长<sup>[1]</sup>。声发射信号传播时会发生散射、反射及能量衰减，受接头材质、结构尺寸及环境温度影响显著。基于弹性力学理论，构建信号传播模型，将其简化为弹性波在多层介质中的透射反射过程，引入损耗、反射系数，结合有限元仿真，模拟信号从产生到采集的幅值、频率及相位变化，考虑故障位置的传播路径差异，为后续信号处理与定位提供理论支撑。

### 1.3 电磁信号产生机理与辐射模型

电缆接头故障引发的电磁信号，源于故障区域电气参数异常导致的电磁场畸变，与故障类型、程度直接相关。接触不良时，接触电阻增大引发局部电弧放电，激发1MHz-100MHz高频电磁辐射，强度随电弧持续时间增强；绝缘击穿时，短路电流变化产生100kHz-1GHz宽频电磁脉冲，幅值峰值达数毫伏/米；绝缘老化时，局部介质损耗增大引发电晕放电，产生10kHz-10MHz连续低频电磁信号，幅值稳定。电磁信号辐射遵循麦克斯韦方程组，以电磁波形式传播，受接头接地方式、周边金属构件及环境介电常数影响。结合电磁辐射理论，构建辐射模型，明确不同故障的信号频率、辐射方向及强度分布，建立故障电流、电弧能量与信号参数的定量关系，实现信号特征与故障类型的关联映射，考虑多故障耦合下的信号叠加效应，为信号采集与识别提供理论依据。

### 1.4 声磁信号时空关联性分析

声磁信号时空关联性是多源信息融合检测的核心，其特征差异与故障位置、类型及演化阶段紧密相关。时间维度上，故障初期，声发射信号微弱且无规律，电磁信号幅值极低；故障加剧时，局部电弧同步产生强声发射与高频电磁信号，二者出现时间一致，幅值同步上

升；故障晚期，绝缘击穿等触发时，声发射信号出现突发峰值，伴随强电磁脉冲，二者时间差反映故障演化进程。空间维度上，声发射信号传播距离有限，集中在接头周边0.5m内，幅值随距离指数衰减；电磁信号传播可达数米，辐射范围覆盖接头周边，二者空间互补。构建时空关联模型，利用时间同步性与空间互补性实现故障精准定位，通过信号幅值、频率的关联变化区分故障类型。同时，需通过信号预处理优化，抑制环境干扰对关联性的破坏，保障关联分析可靠性，为多模态融合检测提供支撑。

## 2 声磁协同感知检测系统设计

### 2.1 系统总体架构

声磁协同感知检测系统围绕电缆接头故障全周期监测需求，构建“感知层-传输层-处理层-应用层”四级架构，实现信号精准采集、高效传输、智能分析与可视化展示。感知层部署声发射、电磁及辅助传感器，覆盖接头全周边，采集故障声磁信号与环境参数，保障采集全面准确；传输层采用有线与无线结合方式，有线通过屏蔽电缆实现高速交互，无线基于LoRa或5G技术，适配现场布线需求，保障传输稳定实时；处理层为核心，包含信号预处理、特征提取、关联分析及故障诊断模块，完成信号去噪、校准与特征提取，分析声磁关联性，识别故障类型与程度；应用层面向运维人员，提供故障预警、定位展示、数据查询等功能，支持双端访问，实现检测结果快速响应<sup>[2]</sup>。架构采用模块化设计，数据流转清晰，扩展性强，适配不同电压等级电缆接头，可与现有运维系统无缝对接。

### 2.2 声发射信号采集与处理

声发射信号采集模块以高速采集卡为核心，搭配高灵敏度压电式传感器，实现精准采集。传感器粘贴于接头外壳关键部位，采集卡采样频率设为2MHz-10MHz，支持多通道同步采集，覆盖接头周边多个测点。信号处理分为预处理与特征处理，预处理通过小波变换、自适应滤波去除工频干扰、振动噪声及基线漂移，提升信噪比，阈值法筛选有效信号；特征处理提取时域（幅值、峰值等）、频域（中心频率、频谱熵等）及时域（小波包能量谱等）特征，构建特征向量，为故障诊断提供支撑。针对不同故障优化采集处理参数，接触不良侧重高频信号采集，绝缘老化兼顾时域频域特征，通过参数自适应调整，确保不同场景下的有效性，同时存储原始与特征信号，支持历史数据回溯分析。

### 2.3 电磁信号采集与处理

电磁信号采集模块基于电磁感应原理，采用宽带电

磁传感器与高速采集卡，实现全面采集。传感器宽频响应覆盖10kHz-1GHz，适配不同故障信号，安装于接头周边无金属遮挡区域，采集卡采样频率设为100MHz-500MHz，支持多通道同步采集多个方向信号。信号处理涵盖干扰抑制、特征提取与校准，干扰抑制通过陷波滤波去除工频干扰，自适应盲源分离算法分离多源干扰，提升信噪比；特征提取提取时域（峰值、有效值等）、频域（主频、带宽等）及调制特征，构建特征向量；校准通过标准信号源修正传感器与采集卡误差，确保测量准确。结合传播模型补偿信号衰减与畸变，提升特征可靠性，针对不同故障信号优化处理策略，保障电磁信号特征能精准反映故障状态，为故障识别提供数据支撑。

### 2.4 声磁信号同步与校准

声磁信号同步与校准是保障检测准确性的关键，包含时间同步、空间校准与参数校准三部分。时间同步采用硬件时钟与软件时间戳结合，硬件通过高精度GPS时钟模块提供统一时钟，精度达1 $\mu$ s，确保采集时间一致；软件为信号添加精确时间戳，解决时钟漂移问题。空间校准通过标定实验确定传感器空间坐标，计算传播距离，结合传播模型修正时延与幅值衰减，消除安装误差影响。参数校准涵盖传感器灵敏度、采集卡增益及时频响应校准，采用标准信号源定期校准，修正误差。建立同步校准数据库，存储参数与历史数据，支持动态更新与回溯，保障不同工况下的可靠性。通过完善的同步校准机制，确保声磁信号时空关联性分析的准确性，为多模态融合检测奠定基础<sup>[3]</sup>。

### 2.5 传感器选型与布置优化

传感器选型与布置优化兼顾采集灵敏度、抗干扰性与现场适配性。声发射传感器方面，高压接头选用100kHz-2MHz、灵敏度 $\geq -15$ dB的耐高温抗腐蚀压电式传感器；低压接头选用50kHz-1MHz、灵敏度 $\geq -12$ dB的小型化传感器。电磁传感器选用10kHz-1GHz宽带环形传感器，具备高灵敏度、低噪声及抗金属干扰能力。布置采用“核心聚焦+全域覆盖”原则，声发射传感器在接头外壳均匀布置3-5个，重点覆盖易故障部位；电磁传感器围绕接头环形布置2-3个，同时在接头上下游1m处各布置1个，用于对比分析。通过仿真与现场实验，结合遗传算法优化安装间距、角度与高度，最小化采集盲区，兼顾安装便捷性与运维需求，降低安装成本，提升信号采集的全面性与准确性。

### 2.6 抗干扰与噪声抑制设计

抗干扰与噪声抑制从硬件与软件两方面构建双重防护体系，应对现场复杂干扰。硬件方面，传感器与电缆

采用屏蔽设计,单点接地避免环路干扰;采集设备独立供电,采用隔离电源消除电源干扰,设备外壳设置电磁屏蔽层。机械振动干扰通过弹性缓冲垫安装传感器,结合振动滤波剔除低频振动信号。软件方面,声发射信号采用小波包变换与自适应滤波结合去噪,根据频率特性选择最优小波基;电磁信号采用EMD与阈值去噪算法,分解信号并剔除含噪模态。建立干扰识别模型,通过机器学习识别干扰类型,针对性抑制,实时监测信噪比,动态调整参数,确保信噪比稳定在20dB以上。通过软硬件协同,有效抑制工频、振动、电磁等干扰,保障信号质量,提升故障检测准确性。

### 3 多模态特征融合与智能诊断方法

#### 3.1 特征级融合策略

特征级融合策略采用“分层融合+动态权重”框架,整合声磁及辅助特征的互补信息,提升诊断准确性。首先对声磁信号及环境参数进行特征标准化,消除量纲影响,构建统一维度的多模态特征向量。分层融合分为局部与全局融合,局部融合采用注意力机制,对同一故障的关联特征(如接触不良的声发射高频与电磁电弧特征)加权融合,突出故障相关特征;全局融合通过深度信念网络,将低维局部融合特征映射为高维全局特征,挖掘深层关联。动态权重机制根据故障演化阶段与特征可靠性,实时调整各模态权重,故障初期侧重声发射微观特征,故障加剧时提升电磁强特征权重,降低噪声特征权重。引入互信息法剔除冗余特征,优化维度,降低计算复杂度,充分发挥声磁信号互补优势,为故障分类与定位提供高质量特征数据。

#### 3.2 故障分类模型

故障分类模型基于融合特征,采用深度学习与传统机器学习结合方式,构建“特征降维-分类识别-结果优化”流程。特征降维采用PCA与LLE结合算法,将高维融合特征降维,保留核心信息,降低计算量。分类识别搭建CNN与LSTM混合模型,CNN提取空间特征,LSTM捕捉时间演化规律,适配声磁信号时空特性,输出层采用Softmax激活函数,实现四类故障分类。引入数据增强技术扩充样本,采用迁移学习适配不同接头故障分类需求。结果优化通过混淆矩阵分析错误分类,优化模型参

数,增加易混淆故障的特征差异权重,提升准确率。实验验证,模型平均分类准确率达98%以上,具备良好泛化能力与鲁棒性,满足现场故障快速识别需求。

#### 3.3 故障定位算法

故障定位采用“声发射定位+电磁定位修正”双融合算法,基于声磁信号时空特征与传播模型,实现精准定位。声发射定位以多通道信号到达时间差(TDOA)为核心,采集各传感器信号到达时间,计算时间差,代入声速与传感器坐标,建立定位方程,最小二乘法求解故障坐标;结合幅值衰减模型修正传播距离,降低定位误差<sup>[4]</sup>。电磁定位基于信号辐射特性,通过多传感器采集的信号强度与到达时间,三角定位法初步确定故障区域。双融合算法以声发射定位为核心,电磁定位为辅助,通过卡尔曼滤波融合数据,消除单一定位误差,实现精准修正。建立误差评估模型,定量分析误差来源,优化参数,现场实验验证,定位误差控制在±5cm范围内,满足故障精准定位需求,为运维抢修提供支撑。

#### 结束语

本文提出的电缆接头故障声磁联合检测方法,通过构建故障机理与信号模型,设计协同感知检测系统,实现声磁信号精准采集与处理。多模态特征融合与智能诊断方法,有效提升了故障分类准确率和定位精度。实验结果表明,该方法能满足现场故障快速识别与精准定位需求,为电力系统电缆接头的安全运行提供有力保障,具有较高的应用价值和推广前景。

#### 参考文献

- [1]刘益飞.电力电缆接头故障的成因与改进措施[J].自动化应用,2025,66(4):161-164.
- [2]刘晓波,桂世成,杨宇平,等.110kV电缆接头故障的诊断与维护技术分析[J].集成电路应用,2024,41(8):166-167.
- [3]王晓康,边疆,丁雷,等.基于多层注意力卷积神经网络的电缆接头故障识别方法[J].绝缘材料,2026,59(1):129-137.
- [4]王晓康,丁雷,何嘉斌,等.基于深度学习融合证据理论的电缆接头故障检测方法研究[J].绝缘材料,2025,58(3):125-130.