

电缆接头多物理场耦合监测数据的时空关联性分析

罗辉联

杭州雅全科技有限公司 浙江 杭州 310000

摘 要：电缆接头作为电力传输关键部位，其运行状态直接影响电力系统稳定性。对电缆接头多物理场耦合监测数据进行时空关联性分析意义重大。本研究首先介绍多物理场监测数据的获取方式及预处理流程，以保证数据准确性与可用性。接着阐述时间序列、空间分析及时空联合分析等方法，深入剖析电缆接头温度场、电场与磁场的时空特性以及多物理场综合时空关联。进而基于时空关联性构建故障预警模型，实现对电缆接头故障的有效预警。研究成果为电力系统电缆接头的状态监测与故障预防提供科学依据与技术支撑，有助于提升电力传输的可靠性与安全性。

关键词：电缆接头；多物理场；时空关联性；故障预警

1 引言

在现代电力传输网络中，电缆接头扮演着极为关键的角色，是保障电力稳定输送的核心枢纽。一旦电缆接头出现故障，可能引发大面积停电事故，给社会生产和人们生活带来严重影响。随着电力需求增长与电网规模的不断扩大，对电缆接头运行状态的精准监测和分析变得尤为迫切。传统监测手段仅关注单一物理量，难以全面反映电缆接头复杂的运行状况。多物理场耦合监测技术应运而生，通过同时监测温度场、电场、磁场等多个物理量，能更深入、准确地把握电缆接头状态。在此基础上，开展时空关联性分析，挖掘数据在时间和空间维度的潜在联系，为实现高效故障预警与运维决策提供关键支撑，对提升电力系统可靠性意义深远。

2 多物理场监测数据获取与预处理

2.1 监测系统组成与原理

监测系统主要由传感器、数据传输模块和数据处理中心构成。传感器作为前端感知元件，针对温度场，常采用热电偶或光纤光栅传感器，利用材料的热电效应或

光波长变化特性，将温度信号精准转换为电信号或光信号；对于电场和磁场监测，分别运用电容式传感器和霍尔传感器，依据电场感应电容变化、磁场引发霍尔效应产生电信号。数据传输模块通过有线或无线通信方式，把传感器采集的信号实时传输至数据处理中心。数据处理中心负责汇总、整理和初步分析数据，其工作原理是基于数字信号处理技术，将模拟信号转换为数字信号，以便后续深入处理与分析，确保监测数据的准确性与及时性。如图一表一所示：

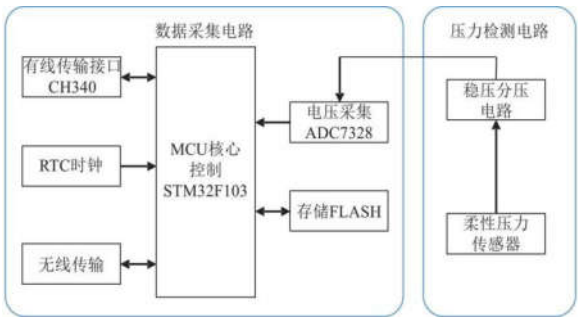


图1 传感器监测电路总体设计框图

表1 监控设备参数表

设备名称	型号	测量范围	精度	用途
温度传感器	PT100	-200℃-850℃	±0.15℃	测量电缆接头温度
电场传感器	ET-100	0-100kV/m	±1%	测量电缆接头电场强度
磁场传感器	HMC5883L	-8G-8G	±0.5%	测量电缆接头磁场强度
数据采集器	NI-USB-6216	多种信号类型	多种精度指标	采集传感器数据

2.2 数据采集策略与流程

数据采集策略依据电缆接头运行特点和监测需求制定。在采集频率上,正常运行时设定为较低频率,如每15分钟采集一次,以便把握长期运行趋势;当检测到物理量出现异常波动时,自动切换至高频采集,如每1分钟采集一次,及时捕捉变化细节。采集流程从传感器启动开始,传感器按设定频率获取物理量数据,随后通过传输线路将数据发送至数据采集器。数据采集器对数据进行初步校验,剔除明显错误数据,再将有效数据打包传输至数据处理中心。在整个流程中,建立严格的数据质量控制机制,定期对传感器进行校准,保障采集数据的可靠性,为后续分析提供坚实基础^[1]。

2.3 数据预处理方法

数据预处理是确保分析结果准确性的关键环节。针对数据清洗,通过设定合理阈值,识别并去除超出正常范围的异常值,对于缺失值,采用线性插值、K近邻算法等方法进行填补,使数据完整可用。数据标准化则运用Z-score标准化或最小-最大标准化方法,将不同物理量数据统一到相同量纲和取值范围,消除数据量纲差异对分析的干扰,提升分析模型的收敛速度和精度。对于高维数据,采用主成分分析(PCA)等降维技术,在保留关键信息的前提下降低数据维度,减少计算量,提高分析效率,为时空关联性分析提供高质量的数据。

3 时空关联性分析方法

3.1 时间序列分析方法

时间序列分析在电缆接头多物理场耦合监测数据处理中极为关键。常用的ARIMA模型,即自回归滑动平均模型,通过对历史数据的自回归项与滑动平均项构建方程,能够有效捕捉数据随时间的变化规律。例如,依据以往温度监测数据,ARIMA模型可预测未来一段时间内电缆接头的温度走势,帮助运维人员提前预判潜在风险。而SARIMA模型,作为季节性自回归滑动平均模型,适用于处理具有季节性特征的数据,能精准剖析数据在不同季节周期下的波动特点,像某些地区因季节变化导致的用电负荷波动,反映在电缆接头温度等物理量上的周期性变化,SARIMA模型可进行针对性分析^[2]。

3.2 空间分析方法

空间分析方法聚焦于研究物理场在空间上的分布规律。空间自相关分析是其中重要手段,它能衡量某一位置的物理量与相邻位置物理量之间的相似程度。以电缆接头的电场分布为例,通过空间自相关分析,可以了解电场强度在不同空间位置的关联特性,判断是否存在异常区域。空间插值如克里金插值,能根据已知监测点

的数据,对未监测区域进行合理估算,从而绘制出连续的物理场空间分布图谱。比如在确定电缆沿线磁场分布时,利用克里金插值,结合有限监测点的磁场数据,可得到整个电缆路径上的磁场分布情况,为全面掌握物理场空间状态提供支持。

3.3 时空联合分析模型

时空联合分析模型整合时间与空间因素,更全面地解析多物理场监测数据。时空立方体模型通过将时间作为第三维度,与空间二维相结合,直观展示物理量在不同时间和空间位置的变化情况。例如,将电缆接头温度数据按时间顺序在时空立方体中呈现,能清晰看到温度随时间推移在不同空间位置的演变过程。时空自回归模型则考虑了时间上的自相关性以及空间位置的相互影响,通过构建包含时间和空间滞后项的回归方程,深入挖掘数据中时空交织的内在联系^[3]。这种模型能综合分析不同时刻、不同位置的多物理场数据,为电缆接头状态评估提供更精准的依据。

4 电缆接头多物理场时空关联特性

4.1 温度场时空特性

在时间维度上,电缆接头温度受负载电流、环境温度周期性变化的影响。白天用电高峰,负载电流大,接头温度升高;夜晚负载降低,温度随之下降。季节性环境温度波动也会使接头温度呈现周期性变化,夏季高温时整体温度偏高,冬季则偏低。在空间维度,热量以接头为中心向周围介质传导,导致温度分布不均匀。靠近导体部分温度高,绝缘层及外层温度逐渐降低。不同材料的热导率差异进一步加剧了这种空间分布的复杂性。例如,金属导体热导率高,热量传导快;而绝缘材料热导率低,热量积聚明显。分析这些时空特性,能为温度监测点布局及故障预警提供科学依据。

4.2 电场与磁场时空特性

在电力传输系统中,从时间特性的角度深入剖析,电场强度与磁场强度同负载电流之间存在着紧密且动态的关联。当负载电流出现突变情况时,电场和磁场会迅速做出响应,瞬间发生改变。尤其是在交流输电系统里,电场和磁场更是遵循着与电流一致的频率,有规律地进行周期性变化,这种周期性波动贯穿于电力传输的始终^[4]。

从空间特性来看,电场分布并非孤立存在,而是与电缆接头的几何结构、绝缘介质特性深度耦合。在电缆接头的绝缘薄弱区域,电场极易发生畸变,进而产生电场集中现象,这对电缆接头的绝缘性能构成潜在威胁。磁场则围绕载流导体呈现环形分布,其强度随着与导体

距离的变化而有规律地增减。

深入研究电场与磁场的时空特性意义重大,不仅能够精准评估电缆接头的绝缘性能,及时检测出潜在缺陷,还能有效避免电磁干扰对周边设备造成不良影响,为电力系统的稳定、安全运行筑牢基础。

4.3 多物理场综合时空关联

多物理场之间存在复杂的相互作用和时空关联。温度变化会影响材料的电学性能,进而改变电场分布;电场的变化又会引起电流的改变,从而影响发热和温度场。磁场与电场相互耦合,共同作用于电缆接头。在负载突变等特殊工况下,多物理场的动态响应相互交织,呈现出复杂的时空演化模式。例如,当接头局部过热时,绝缘材料性能下降,电场发生畸变,可能引发局部放电,而局部放电又会产生脉冲磁场,进一步影响周围电场和温度场。深入研究这种综合时空关联,有助于全面掌握电缆接头运行状态,准确预测故障发展趋势。

5 基于时空关联性的故障预警研究

5.1 故障特征提取与识别

在电缆接头多物理场耦合监测数据时空关联性分析的基础上,深入挖掘故障特征。通过对不同故障场景下多物理场数据的变化规律进行研究,筛选出与故障紧密相关的特征量,如特定区域温度的异常上升速率、电场强度的突变幅度等。利用数据挖掘技术,从海量监测数据中精准提取这些特征。采用机器学习中的分类算法,如支持向量机、随机森林等,构建故障识别模型。通过大量标注样本对模型进行训练,使其能够准确区分正常状态和各类故障状态,为后续故障预警提供可靠依据^[5]。

5.2 故障预警模型构建

基于提取的故障特征,结合时空关联性分析结果构建故障预警模型。考虑到多物理场数据的时间序列特性和空间分布特点,选用合适的建模方法,如长短时记忆网络(LSTM)与地理加权回归相结合的模型。利用历史监测数据对模型进行训练,调整模型参数以优化性能。在训练过程中,充分考虑不同环境因素和运行工况对电缆接头状态的影响,提高模型的泛化能力。同时,引入实时数据更新机制,使模型能够根据最新监测数据动态调整预警阈值,实现对电缆接头故障的实时、精准预警。

5.3 预警效果验证与分析

运用实际监测数据对构建的故障预警模型进行全面

验证。将模型预警结果与实际故障情况进行对比,评估模型的准确率、召回率、误报率等关键性能指标。分析不同故障类型下模型的预警效果,找出模型存在的不足之处,如对某些隐蔽性故障预警不及时等。针对这些问题,深入探讨原因,如数据特征提取不够全面、模型参数设置不合理等。通过优化数据处理方法、改进模型结构或调整参数等措施,不断提升预警模型的性能,使其能够更好地应用于实际电力系统电缆接头的故障预警,保障电力系统安全稳定运行。

6 结语

本研究围绕电缆接头多物理场耦合监测数据的时空关联性展开,成功揭示了多物理场在时间和空间维度的复杂联系。通过搭建监测体系获取数据,运用多种分析方法剖析其特性,建立起故障预警模型。研究成果为电缆接头状态评估提供了新思路,能够提前察觉潜在故障隐患,对提升电力系统稳定性与可靠性意义重大。然而,研究也存在一定局限。数据采集受限于传感器精度与分布密度,时空分析模型在复杂工况下的适应性有待提升。未来,需开发高精度传感器,优化布置方案,同时探索更先进的分析模型,进一步挖掘数据价值,实现对电缆接头全方位、精细化监测,为电力行业发展注入新动力。

参考文献

- [1]曾令诚,侯澳港.三芯电缆接头轴向温度反演模型及其材料参数敏感性分析[J].高电压技术,2024,(09):3865-3873.
- [2]张泽权,蔡新景.基于有限积分法的电力电缆中间接头局部放电电磁波传播特性[J].电测与仪表,2023,60(14):114-119.
- [3]尚英强,周小楠,熊俊,焦宇阳,冀然,丁一铭.计算高压隧道电缆空间热场分布的场路耦合数值模拟方法:CN119670393A[P].2025-03-21.
- [4]吴怀娜,许烨霜,沈水龙,刘艳滨.软土地区基坑降水对下方越江隧道的影响[J].上海交通大学学报,2012,46(01):53-57.
- [5]陈学文,吴莲,张家伟,吴婷,谢腾辉.载流线圈和有限长直螺线管磁场的理论分析与讨论[J].大学物理,2019,38(10):10-14+23.