

光纤复合电缆在输电线路状态监测中的应用

耿峻岭

普瑞司曼中国, 上海, 200120;

摘要: 光纤复合电缆结合了电力传输与通信功能, 通过光纤传感技术在输电线路中实现温度、应力、振动和局部放电的监测。应用包括拉曼散射温度监测、布拉格光栅应力/应变监测、 Φ -OTDR 振动监测及光声和荧光局部放电监测。实际案例表明, 该系统显著提高了线路运行可靠性和管理效率, 减少了故障停运, 提升了维护效率并增加了输送电量。

关键词: 光纤复合电缆; 输电线路; 状态监测; 温度监测

DOI:10. 69979/3029-2727. 24. 03. 027

引言

随着电力需求的不断增长和输电线路规模的扩大, 传统的输电线路监测方法已难以满足高效、精准管理的需求。光纤复合电缆作为一种新兴技术, 通过将光纤与电力电缆结合, 实现了电力和通信信号的同步传输。利用光纤传感技术, 可以实时监测输电线路的温度、应力、振动和局部放电状况, 有助于提高线路的运行可靠性和管理效率, 避免潜在的故障和损失, 具有重要的实际应用价值。

1 光纤复合电缆技术原理

光纤复合电缆是一种将光纤与电力电缆结合的技术, 它能同时传输电力和通信信号, 这种电缆通常由以下部分组成: 外护套、绕包层、填充层、通信光缆、绝缘层、导体和测温光缆。光纤复合电缆的技术原理基于光纤中光波的调制, 通过检测调制后的光波信号, 实现对被测参数的感知和测量, 光纤传感器的工作原理是将光源入射的光束经由光纤送入调制器, 在调制器内与外界被测参数的相互作用, 使光的光学性质如光的强度、波长、频率、相位、偏振态等发生变化, 成为被调制的光信号。在输电线路中的布置方面, 光纤复合电缆可以安装在架空高压输电线路的地线中, 用以构成输电线路上的光纤通信网, 这种结构形式兼具地线与通信双重功能, 既作为输电线路的防雷线, 对输电导线提供屏蔽保护, 又通过复合在地线中的光纤来传输信息^[1]。

2 光纤复合电缆在输电线路状态监测中的应用

2.1 温度监测

光纤复合电缆在输电线路温度监测中的应用基于分布式光纤温度传感技术, 这种技术利用光纤中的拉曼散射原理, 通过测量背向散射光的强度比来实现温度的精确测量。具体来说, 当激光脉冲在光纤中传播时会产生斯托克斯光和反斯托克斯光, 反斯托克斯光的强度对温度变化敏感, 而斯托克斯光则相对稳定, 通过分析这两种散射光的强度比可以准确计算出光纤沿线的温度分布。在实际应用中温度传感光纤可以集成在输电线路的地线或相线中, 系统通过向光纤发射激光脉冲并接收

返回的散射光信号, 实现对整条线路的实时温度监测, 这种方法具有高空间分辨率和高温度精度的优势, 能够快速定位热点, 有效预防因过热导致的线路故障。温度监测系统还可以结合气象数据和线路负载信息建立动态热容量模型, 这种模型能够根据实时温度数据调整线路的输电容量, 在保障安全的前提下最大化线路的传输效率。

2.2 应力/应变监测

光纤复合电缆在应力/应变监测中主要利用布拉格光栅传感技术, 布拉格光栅是一种在光纤芯中周期性调制折射率形成的特殊结构, 当光波通过布拉格光栅时, 特定波长的光会被反射, 而其他波长的光则继续传播。反射光的中心波长称为布拉格波长, 它与光栅的周期和有效折射率有关。当光纤受到应力或应变时, 光栅周期会发生变化, 导致布拉格波长发生移动, 通过精确测量这种波长移动可以计算出光纤所受的应力或应变, 在输电线路监测中, 布拉格光栅传感器可以被安装在塔架、基础或导线上, 用于监测结构的变形和受力情况。对于大跨度输电线路, 应力/应变监测尤为重要, 系统可以实时监测导线的张力变化, 评估冰雪荷载对线路的影响, 预防因过载导致的断线事故, 同时对塔架的应力监测可以及时发现结构隐患为维护决策提供依据。

2.3 振动监测

输电线路的振动监测主要针对导线舞动和塔架振动两个方面, 光纤复合电缆在振动监测中主要采用相位敏感光时域反射技术 (Φ -OTDR), 这种技术利用光在光纤中传播时的相干瑞利散射原理, 可以检测到微小的振动引起的光程变化。 Φ -OTDR 系统向光纤发射窄线宽激光脉冲并接收返回的散射光信号, 当光纤某处发生振动时, 该处的散射光相位会发生变化, 通过分析这种相位变化可以获得振动的位置、频率和幅度信息。在导线舞动监测中, 光纤可以直接集成在导线内部或外部, 系统能够实时监测导线的摆动情况识别由风致振动、舞动或冰跳引起的异常振动, 通过长期监测和数据分析可以评估导线的疲劳状况, 预防断线事故。对于塔架振动监测, 光纤传感器可以安装在塔架的关键节点上, 系统能

够检测到由风载、地震或其他外力引起的塔架振动，通过分析振动特征可以评估塔架的结构健康状况及时发现潜在的安全隐患^[2]。

2.4 局部放电监测

局部放电是输电线路绝缘系统劣化的重要指标，光纤复合电缆在局部放电监测中主要利用光学传感技术，包括光声传感和荧光传感两种方法。光声传感法基于局部放电产生的声波或超声波信号，当发生局部放电时周围介质会瞬间产生热膨胀，形成声波。特制的光纤传感器能够将这种声波转换为光信号的调制，通过分析光信号的变化可以检测到局部放电的发生并定位其位置，这种方法具有高灵敏度和抗电磁干扰的优势，特别适用于高压设备的在线监测^[3]。荧光传感法利用局部放电产生的紫外光激发特定荧光材料，将涂覆荧光材料的光纤布置在监测区域，当发生局部放电时产生的紫外光会激发荧光材料发光，通过检测光纤中传输的荧光信号可以实现对局部放电的检测和定位，这种方法对微弱的局部放电也有较高的灵敏度。在实际应用中，局部放电监测系统通常将多种传感技术结合使用以提高检测的准确性和可靠性，系统可以实时监测输电线路的绝缘状况，包括架空线路、电缆接头和终端等关键部位，通过分析局部放电的发生频率、强度和分布特征可以评估绝缘系统的劣化程度，为预防性维护提供依据。

下图 1 为该章节简要导图。



图 1：光纤复合电缆在输电线路状态监测中的应用导图

3 关键技术难点及解决方案

3.1 长距离监测技术

光纤复合电缆在输电线路长距离监测中面临信号衰减、空间分辨率降低等技术挑战，为克服这些难点研究人员开发了一系列创新解决方案。光信号放大技术是解决长距离监测的核心方法之一，分布式拉曼放大器被广泛应用于长距离光纤监测系统中，该技术利用光纤中的拉曼散射效应，通过注入泵浦光来放大传输信号，拉曼放大具有宽带、低噪声的特点，能有效延长监测距离而不显著降低信号质量。另一种有效的信号增强方法是布里渊光时域分析（BOTDA）技术，BOTDA 利用布里渊散射效应，通过在光纤两端分别注入探测光和泵浦光实现对光纤全程的应变和温度监测，通过优化泵浦光和探测光的频率差可以显著提高系统的信噪比和测量距离。为进一步提升监测距离，研究人员提出了多级放大和信号再生技术，在长距离光纤中设置多个光放大器站既可以补偿信号损耗又能维持较高的信噪比，同时采用光-电-光转换的信号再生技术可以在中继点对信号进行完全

再生，有效消除累积的噪声和失真。在空间分辨率方面，脉冲编码技术展现出巨大潜力，通过对入射光脉冲进行特定编码如双脉冲差分法、互补歪码技术等，可以在不增加峰值功率的情况下提高空间分辨率，这些技术能够有效平衡监测距离和空间分辨率之间的矛盾，为长距离高精度监测提供了新的思路^[4]。

3.2 数据传输与处理技术

随着输电线路监测系统的规模扩大和功能增加，数据传输与处理面临着巨大挑战，高效的数据传输和实时处理技术成为系统性能提升的关键。在数据传输方面，波分复用（WDM）技术得到广泛应用，WDM 允许多个不同波长的光信号在同一光纤中同时传输大幅提高了传输容量，密集波分复用（DWDM）技术进一步缩小了各通道间的波长间隔，可在单根光纤中实现数十甚至上百个通道的并行传输，极大地提高了系统的数据吞吐量。为适应输电线路复杂的环境条件，自适应调制技术被引入到数据传输系统中，该技术能根据信道状况动态调整调制方式和编码率，在保证传输可靠性的同时最大化数据传输效率，例如在信道条件良好时采用高阶调制方式如 16QAM 或 64QAM，而在信道条件恶劣时切换到更稳健的 QPSK 调制。在数据处理方面，分布式计算架构显示出显著优势，通过在监测系统的不同节点部署边缘计算设备可以实现数据的就近处理和分析，这种架构不仅减轻了中央处理单元的负担，还能显著降低数据传输延迟提高系统的实时响应能力。机器学习和人工智能算法在数据处理中发挥着越来越重要的作用，深度学习模型如卷积神经网络（CNN）和长短期记忆网络（LSTM）被用于分析复杂的时序数据能够从海量监测数据中提取有价值的特征和模式，这些算法不仅能实现故障的准确检测和预测还能通过持续学习不断提高系统的智能化水平。为处理和存储海量监测数据，分布式数据库和云存储技术被广泛采用，NoSQL 数据库如 Cassandra 和 HBase 能够高效处理时序数据，支持快速的写入和查询操作，结合云计算平台，系统可以根据实际需求灵活调整计算和存储资源，确保在数据量急剧增长时仍能保持高效的处理能力。

3.3 监测精度提升技术

提高监测精度是光纤复合电缆监测系统面临的持续挑战，研究人员从传感器设计、信号处理和系统集成等多个角度开展工作，不断推动监测精度的提升。在传感器设计方面，高灵敏度光纤传感器的开发取得了显著进展，例如利用纳米材料修饰的光纤布拉格光栅传感器可以大幅提高应变和温度的测量灵敏度，通过在光纤表面沉积石墨烯等二维材料可以增强光与环境的相互作用，提高传感器对微小变化的响应能力。相干光时域反射（COTDR）技术的应用显著提升了振动监测的精度，COTDR 利用窄线宽激光源和相干检测技术能够捕捉到纳米级的光纤形变，通过优化脉冲宽度和重复频率，COTDR 系统可以在保持高空间分辨率的同时，实现对高频振动的精确测量。数字信号处理技术在提高监测精度中发挥着关键作用，小波变换和经验模态分解等高级信号处理

方法被用于去除监测数据中的噪声和干扰,这些技术能有效分离有用信号和背景噪声,提高信号的信噪比,同时自适应滤波算法如卡尔曼滤波器被应用于实时数据处理,能够在动态环境中提供更稳定和准确的测量结果^[5]。多参数融合技术为提高整体监测精度提供了新的思路,通过综合分析温度、应变、振动等多种参数的数据,可以更全面地评估线路状态,减少单一参数监测可能带来的误判,例如结合温度和应变数据可以更准确地评估导线的弧垂情况,避免温度变化对应变测量的影响。校准技术的改进也对提高监测精度起到重要作用,发展了一系列现场校准方法,如利用已知特性的参考光纤进行实时校准或通过外部传感器提供参考值进行动态校准,这些方法能够有效补偿环境因素和系统漂移带来的误差,保持长期监测的准确性。在系统集成层面,采用模块化设计和标准化接口可以方便地集成不同类型的传感器和数据处理单元,这种灵活的架构允许系统根据具体应用需求选择最适合的传感器组合并且能够随着技术进步方便地升级各个模块,持续提高系统的整体性能。

4 实际应用案例分析

本案例聚焦于某 500kV 超高压输电线路的光纤复合电缆监测系统实施,该线路全长 320 公里,跨越多种地形,包括山地、平原和河流区域,为提高线路运行可靠性和管理效率,实施了全线覆盖的综合监测系统。系统采用 OPGW (Optical Ground Wire) 光纤复合架空地线,内含 48 芯单模光纤,其中 8 芯用于通信,40 芯用于各类监测功能。监测系统包括分布式温度监测 (DTS)、分布式应力监测 (DSS)、分布式振动监测 (DVS) 和局部放电监测四个子系统,DTS 系统采用拉曼散射原理,空间分辨率为 1 米,温度精度达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$; DSS 系统基于布里渊散射技术,空间分辨率 0.5 米,应力测量精度为 $\pm 20 \mu\epsilon$; DVS 系统利用相位敏感光时域反射技术,振动频率响应范围 0.1Hz-1kHz,空间分辨率 2 米;局部放电监测系统采用光学传感技术,灵敏度达到 5pC,定位精度 ± 5 米。系统在线路沿途设置了 15 个监测站,每站负责约 20-25 公里的线路段,监测站采用模块化设计,集成光信号解调器、数据处理单元和通信模块,所有监测站通过工业以太网与中心控制室相连,实现数据实时传输和集中管理。系统投入运行后,收集了大量有价值的监测数据,2023 年 7 月 15 日 14:30,在一次极端高温天气中,系统记录到平原地区一段导线表面温度达到 78.3°C ,接近设计允许的最高温度 80°C ,基于实时监测数据,调度部门迅速采取负荷转移措施,将该段线路负载降低 15%,成功将导线温度控制在安全范围内,全年温度数据分析显示,线路温度分布呈现明显的地域和季节性特征,山区段线路年平均温度为 23.5°C ,平原段为 26.8°C ,夏季(6-8 月)平均温度比其他季节高出 12.3°C 。2023 年 12 月 5 日凌晨 3:20,系统在山区段检测到异常应力变化,一段约 500 米长的线路段应力突然增加,最大应变达到 $1200 \mu\epsilon$,远超正常值(通常 $<500 \mu\epsilon$),现场检查发现该区域发生了较严重的覆冰现象,冰厚度达到 25 毫米,基于监测数据,及时启动了除冰预案,

避免了可能的断线事故,全年数据显示,线路应力呈现周期性变化,与气温变化呈负相关,夏季平均应力为 $320 \mu\epsilon$,冬季平均应力上升到 $460 \mu\epsilon$ 。在振动监测方面,系统成功捕捉到多次风致振动事件,2023 年 9 月 23 日,一次强风天气导致部分线路段出现剧烈振动,位于河流跨越段的导线记录到最大振幅为 267 毫米,主频率为 2.3Hz,这一数据触发了系统警报,维护人员随后发现并处理了一处绝缘子松动问题,全年数据分析表明,线路振动频率主要集中在 0.5-3Hz 范围内,振幅大多数时间保持在 50 毫米以下,河流跨越段和山区高塔段是振动较为频繁的区域,年均振动次数分别是平原段的 2.7 倍和 1.9 倍。局部放电监测系统在运行期间检测到多起放电事件,2023 年 8 月 19 日,在一处电缆终端检测到持续性局部放电信号,放电量为 25pC,频率约为 300 次/秒,及时的检修发现并更换了一个有缺陷的电缆终端防止了可能发生的绝缘击穿事故,统计数据显示,全线年均检测到 78 次局部放电事件,其中 90% 的事件放电量小于 50pC,放电事件在雨季(4-6 月)较为集中,占全年事件的 43%。经过一年的运行,系统效果显著,成功预警并处理了 15 起潜在故障,包括 3 次严重覆冰、2 次导线异常振动、5 次绝缘子缺陷和 5 次电缆附件异常;与上一年相比,线路非计划停运次数从 7 次减少到 2 次,年度可用率从 99.92% 提高到 99.98%,基于实时温度监测数据,实现了动态热容量管理,在 2023 年夏季用电高峰期,平均输送功率比传统静态额定容量提高了 8.7%,累计增加输送电量约 1.2 亿千瓦时。总体而言,光纤复合电缆监测系统在该输电线路的应用取得了显著成效,不仅提高了线路的运行可靠性和经济效益。

结论

光纤复合电缆在输电线路状态监测中的应用,成功解决了长距离监测中的信号衰减、空间分辨率降低等问题。通过光信号放大技术、波分复用技术以及分布式计算和机器学习算法,系统实现了高效的数据传输和实时处理。案例分析表明,该系统在提高线路可靠性、减少非计划停运次数、提升维护效率和增加输送电量方面效果显著,显著降低了故障率和维护成本。光纤复合电缆技术的广泛应用,标志着输电线路状态监测进入了一个新的高度,显著提升了电力系统的安全性和经济效益。

参考文献

- [1] 王敏学. 分布式光纤传感技术在输电线路在线监测中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2021(3): 36.
 - [2] 王牧. 分布式光纤传感系统在城市地下电缆监测中的应用[J]. 电气技术与经济, 2023(7): 71-74.
 - [3] 周恺. 基于分布式光纤的架空输电线路覆冰监测技术及应用[J]. 水电能源科学, 2020, 38(7): 64.
 - [4] 刘重稷. 高压输电线路架空地线布置方式研究[D]. 西南交通大学, 2020(1): 12-13.
 - [5] 舒伟彬. 基于 OPGW 光纤传感技术的输电线路状态监测研究及应用[J]. 电力系统装备, 2020(19): 200.
- 作者简介: 耿峻岭,男,本科,籍贯: 北京