doi:10.13756/j.gtxyj.2026.250089.
光传感与检测技术
田瑞,刘纲,周亮,等. 光纤传感技术在电网安全监测领域的应用[J]. 光通信研究, 2026(5):196-206.
Tian R, Liu G, Zhou L, et al. Application of Fiber Optic Sensing Technology in the Field of Power Grid Safety Monitoring[J]. Study on Optical Communications, 2026(5):196-206.

光纤传感技术在电网安全监测领域的应用

田 瑞[1],刘 纲[1],周 亮[1],蔡 超[2],秦知航[1],桂恒立[1],程 哲[1],陈可儿[1],
王章颍[1],范存政[3],甘义霖[3],闫志君[3],孙琪真[3]
(1. 国网湖北省电力有限公司武汉供电公司,武汉 430074; 2. 国网湖北省电力有限公司,武汉 430074;
3. 华中科技大学 光学与电子信息学院,武汉 430074)

摘要:光纤传感技术由于其高灵敏度、抗电磁干扰和长距离传感的优势,在电网安全监测领域中展现了广阔的应用前景。文章综述了光纤传感技术在架空电缆和埋地电缆监测中的最新研究进展,包括点式、干涉式和分布式光纤传感器在电缆覆冰、舞动、雷击及外破监测中的应用。通过对现有技术的总结与分析,指出了光纤传感技术在电网安全监测中的潜力和面临的挑战,为未来研究和应用提供参考。

关键词:光纤传感技术;电网安全监测;架空电缆;埋地电缆;分布式传感
中图分类号:TN929 **文献标志码**:A

Application of Fiber Optic Sensing Technology in the Field of Power Grid Safety Monitoring

TIAN Rui[1], LIU Gang[1], ZHOU Liang[1], CAI Chao[2], QIN Zhihang[1], GUI Hengli[1], CHENG Zhe[1], CHEN Keer[1], WANG Zhangying[1], FAN Cunzheng[3], GAN Yilin[3], YAN Zhijun[3], SUN Qizhen[3]
(1. State Grid Wuhan Electric Power Supply Company, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 3. Huazhong University of Science and Technology, School of Optical and Electronic Information, Wuhan 430074, China)

Abstract: Optical fiber sensing technology, with its advantages of high sensitivity, resistance to electromagnetic interference, and long-distance sensing, demonstrates broad application prospects in the field of power grid safety monitoring. This paper reviews the latest research developments in optical fiber sensing technologies for overhead and underground cable monitoring, including the application of point, interferometric, and distributed optical fiber sensors in monitoring cable icing, swinging, lightning strikes, and external damage. Through a summary and analysis of existing technologies, this paper highlights the potential and challenges of optical fiber sensing technologies in power grid safety monitoring, providing references for future research and applications.
Key words: fiber optic sensing technology; power grid safety monitoring; overhead cables; buried cables; distributed sensing

0 引 言

中国是一个幅员辽阔的大国,具有庞大的电力传输网络。截至2024年底,我国220 kV及以上输电线路回路长度已达840 000 km。伴随国内经济持续增长,全社会电力负荷稳步提升,我国正加快推进电力“三大基地”和“六大重点工程”建设,电网规模持续扩容,电压等级也不断提高,电力系统的安全性和稳定性问题愈发突出[1]。高铁、地铁核心廊道、城市核心负荷区对供电连续性与电网运行安全等级要求严苛;大型区域电网接入机组容量大、局部负荷集中,系统故障易诱发连锁反应,造成大面积停电。以武汉东湖新技术开发区为例,截至2022年底,共有配电线路517条,总长度为3 136.38 km,其中电缆长度为2 426.05 km,架空线路为710.33 km,电缆化率达到77.35%。由于配电电缆的分散和隐蔽性,中低压电缆运行状态的监测非常困难,一旦发生故障,极易导致配电网络长期瘫痪,对国家及民众造成重大的经济财产损失。因此,亟需发展新型长距离、全天候、实时智能的全光纤电力电缆运行状态综合监测系统,以实时掌握电网的准确运行情况,及时发现潜在隐患,从而保障城市中电力系统的安全稳定。

近年来,光纤传感技术迅猛发展[2],由于其具有

收稿日期:2025-03-13; 修回日期:2025-05-22; 纸质出版日期:2026-10-10
基金项目:国网武汉供电公司城市电缆网监测资助项目(5215A0230006)
作者简介:田瑞(1982-),女,湖北武汉人。本科,主要研究方向为配电运检。
通信作者:秦知航。E-mail: qinzhihang@qq.com
© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

长距离、高灵敏、抗电磁干扰和耐腐蚀等优势，非常适用于电网监测，目前已在埋地电网、架空电网等多个场景进行测试与验证，但尚未形成完整的监测体系[3]。此外，由于光纤传感技术与传统电网传输领域之间存在知识壁垒，使得两个领域的研究人员及从业人员对另一行业缺乏深刻的认识，限制了光纤传感技术在电网安全监测领域的进一步发展及大规模应用。

为此，本文分别从光纤传感技术分类、电网典型监测场景需求双维度梳理现有研究成果，采用交叉对比分析总结各类光纤传感方案的适用边界，系统评述光纤传感电网监测技术发展现状。

1　电缆安全监测领域中的光纤传感器

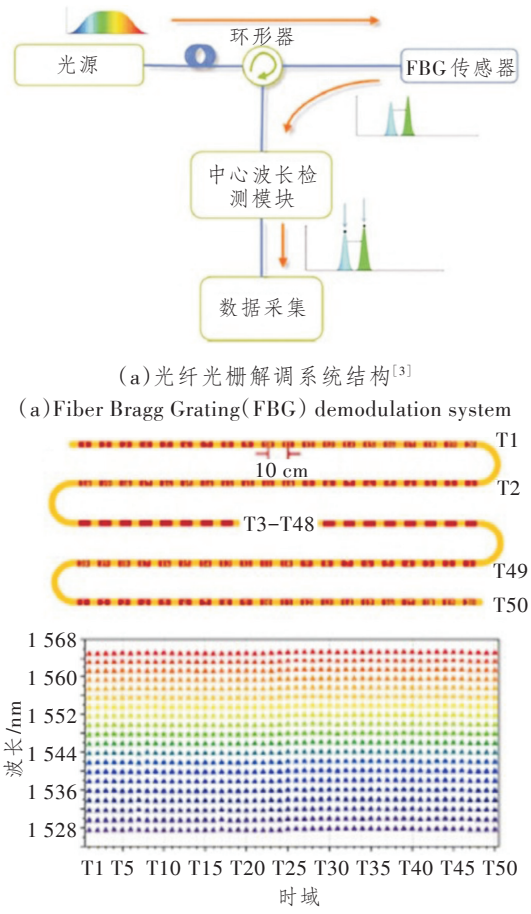
从光纤传感技术角度，可根据光纤的应用形态分为点式光纤传感器[4]、干涉式光纤传感器[5]、分布式光纤传感器[6]，分别实现单点监测、线路监测及分布式线路监测，探测物理参量包括温度、应变、振动和声波等。其中，点式传感可实现对监测物理量的精确感知，但传感点数受限，难以大规模复用。干涉式传感器及分布式传感器可实现长距离传感，更适用于长距离架空电缆及埋地电缆的监测，也可利用线路中已有的通信用光缆进行监测。

1.1　光纤布拉格光栅传感器

光纤布拉格光栅传感器是一种通过测量光栅反射或透射光谱的变化来感知外界物理量的光学传感器，如图 1 所示，其典型系统结构如图 1(a)所示[3]，其核心原理为在光纤纤芯刻写周期性折射率调制结构，当入射光波长与光栅调制周期匹配时，对应波长光信号会沿原路反射，该特征反射波长定义为布拉格波长，计算公式为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \tag{1}$$

式中，λ_B 为布拉格波长，n_{eff} 为有效折射率，Λ 为光栅周期。温度、应变载荷会依托光纤热光效应、弹光效应同步改变有效折射率与光栅周期，进而引发布拉格波长偏移，依托该物理机制可定量解算光纤沿线温度、应变绝对值，且支持对静态稳态信号持续测量。对于电网监测等长线路监测场景，点式传感器存在覆盖范围小、难以无盲区探测的缺点。一种典型的解决办法是点式传感器的复用。华中科技大学团队采用时分波分复用的方式可实现密集光栅阵列探测，已实现 1 000 个传感点位的监测，其方案如图 1(b)所示[7]。



(a)光纤光栅解调系统结构[3]

(a)Fiber Bragg Grating(FBG) demodulation system

(b)时分波分光纤光栅复用技术[7]

(b) Time and wavelength division fiber grating multiplexing technology

图 1　光纤布拉格光栅传感器

Figure 1　Point type fiber Bragg grating sensor

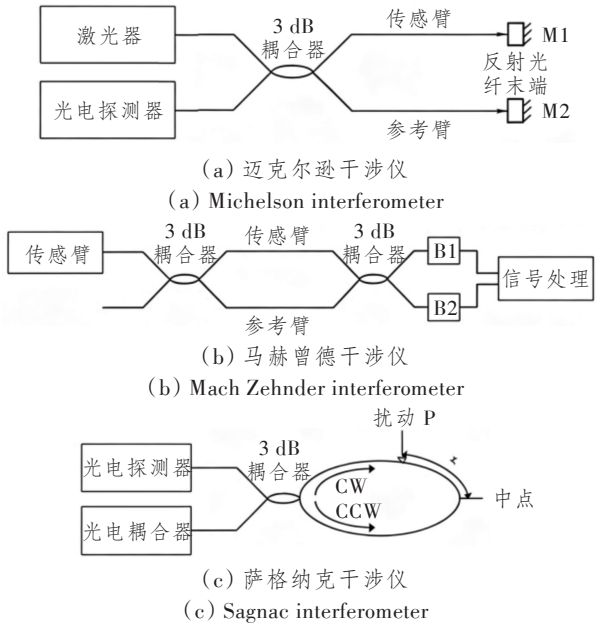
1.2　干涉式光纤传感器

为解决点式 FBG 传感覆盖范围有限、线路监测存在盲区的问题，干涉式光纤传感技术逐步得到推广应用[5]。该方案以整段光纤作为感知介质，通过解调干涉光相位变化捕捉外界环境扰动；光纤应变与光相位偏移呈线性对应关系，因此相位解调是环境参量反演的核心手段。干涉传感相位分辨率可达纳米、微弧度量级，动态响应带宽覆盖 MHz 频段，适配超声波、爆炸冲击波等瞬态冲击信号监测。干涉式传感系统利用耦合器将探测激光分为两路：一路为传感臂，直接接触被测环境，接收外界扰动调制；另一路为参考臂，隔绝外部干扰，用于与传感臂光束发生干涉。两路光束耦合干涉后由光电探测器接收，输出干涉光强表达式为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\varphi_1 - \varphi_2), \tag{2}$$

式中，I_1 与 I_2 分别为传感臂与参考臂的光强，φ_1 与 φ_2 分别为传感臂与参考臂的相位，因此，外界环境

对传感臂的调制通过相位 φ_1 的变化反映在干涉信号强度中，通过探测光强变化或解调相位信息实现环境参量检测。按照传感臂与参考臂的干涉结构不同，可分为迈克尔逊干涉仪、马赫曾德干涉仪、萨格纳克干涉仪三种，如图 2 所示。



（a）迈克尔逊干涉仪

（a）Michelson interferometer

（b）马赫曾德干涉仪

（b）Mach Zehnder interferometer

（c）萨格纳克干涉仪

（c）Sagnac interferometer

图 2　干涉式光纤传感器结构[5]

Figure 2　Structure of interferometric fiber optic sensor[5]

1.3　分布式光纤传感器

分布式光纤传感依托光纤内部后向散射光实现沿线全域连续感知。光在光纤介质中传输时，光子与光纤微观粒子发生相互作用，激发出时变极化偶极子并辐射二次光波，该物理现象称为光散射[8]。在石英光纤中，主要存在三种散射类型：瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射。基于散射光频率偏移特性，可将散射划分为弹性散射与非弹性散射：瑞利散射属于弹性散射，散射光频率与入射光保持一致；布里渊散射、拉曼散射为非弹性散射，散射光相对入射光存在固定频移。3 类散射频谱分布如图 3 所示，其中布里渊散射频移约 11 GHz，拉曼散射频移约 13 THz。散射光频率降低的称为斯托克斯光，频率增加的称为反斯托克斯光。由于 3 种散射光信号对外界环境具有不同的响应特性，可分别用于不同参量的感知。例如，对于布里渊散射，其频率会随着环境温度和应变变化，因此监测其频移可实现温度和应变的感测[9]，布里渊散射在温度方面动态范围为−200～+700 ℃，灵敏度约为 1 MHz/℃，在应变方面动态范围常规光纤应变率约±1.5%，特殊光纤可达±5%，应变灵敏度约为 0.03 MHz/N。可探测距离约为 30～100 km；对于拉曼散射，其反斯托克斯光能量随温度变化，因此，斯托克斯光和反斯托克斯光的功率比值可用于表征温度，实现温度的探测[10]。拉曼散射动态范围通常覆盖−200～+1 000 ℃，灵敏度约 0.8%～1.5%/℃，可探测距离通常为 10～30 km；对于瑞利散射，其光信号频率与光源频率一致，因此可基于干涉的方式对光相位进行探测，从而实现对声波和振动的探测[11]。在光纤的散射中，后向散射光通常用于分布式传感。在接收端，由于不同位置产生的后向散射信号所经历的飞行时间不同，因此到达接收端的时间也不同，正是基于这一特点，分布式传感可实现光纤不同位置的分别探测。

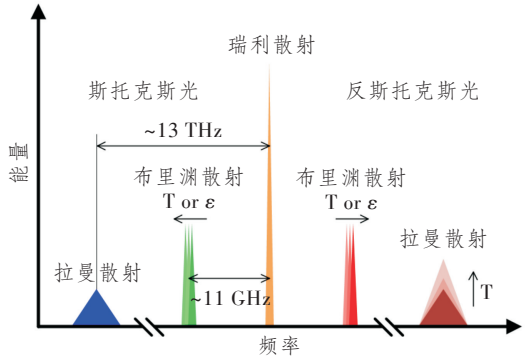


图 3　石英光纤散射频谱

Figure 3　Silica fiber scattering spectrum

2　架空电缆中光纤传感技术的应用

架空电缆是最为常见的高压电力输送方式，是我国全国电力结构布局的最关键一环。目前，光纤传感技术在架空电缆领域的应用主要体现在覆冰/舞动监测、雷击监测方面。

2.1　电缆覆冰/舞动监测

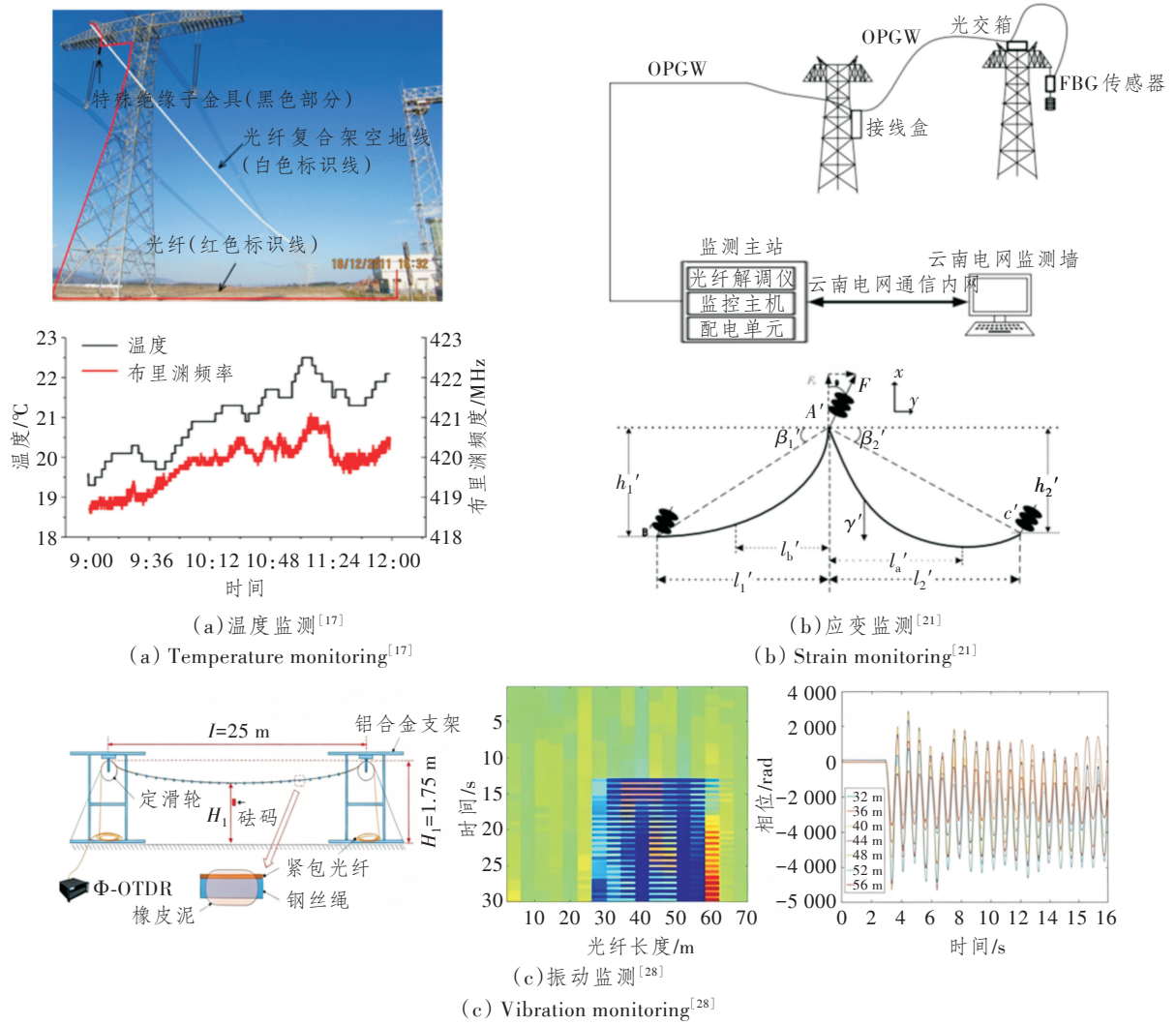
我国地域辽阔，山地、丘陵占比高，不同区域海拔、气候条件差异显著，冬季冻雨、降雪易引发架空导线表面覆冰，严重时诱发线路坍塌、断线等事故。环境温度低于 0 ℃时，空气中水汽在导线表面凝结形成冰挂、冰柱，即线路覆冰故障。覆冰会大幅增加导线自重，在风载荷激励下极易诱发低频、大振幅的导线舞动，进一步造成导线断线、杆塔倾覆、区域性停电等安全事故[12]，严重威胁电网稳定运行，因此覆冰在线监测是线路冰灾防控的关键技术手段。

光纤复合架空电缆（Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire，OPGW）已在输电线路大规模普及，可复用缆内冗余光纤搭建分布式传感系统，依托实时在线、全域无盲区的优势完成导线覆冰全段监测[13]。根据监测物理量的不同，可分为温度监测、应力监测和振动监测 3 种。除对单一参量进行

监测外，还可对上述多个参量进行同时检测，以提升监测可靠性[14-15]。

已有研究表明，覆冰区段与无冰区段的单位时长温度差值和覆冰厚度呈线性相关[16]，图 4 所示为电缆覆冰/舞动监测技术，通过分布式拉曼传感技术或分布式布里渊传感技术可实现电缆的覆冰监测。2013 年，华南理工大学将布里渊光时域反射技术（Brillouin Optical Time Domain Reflectometry，BOTDR）与光纤布拉格光栅技术（Fibber Bragg Gratting，FBG）结合，对输电线路的温度进行监测，监测精度误差小于 1.8 ℃[17]；武汉大学基于等值比热容特征对覆冰区域与非覆冰区域的区分，实现了 75 km 输电线路的覆冰监测，其温度误差小于 2 ℃[18]；南京大学基于“积温”特征，也实现了长期长距离的覆冰监测[19]。

通过监测应变同样能够实现电缆覆冰监测。一种方式是在电缆塔端接入点式应变传感器，通过感知电缆压力间接监测电缆覆冰情况[20-21]，如图 4(b)所示，通过监测斜拉应力可实现 0.147 mm 精度的覆冰厚度监测；另一种方式利用复合电缆中的光纤实现分布式应变监测，2020 年，哈尔滨工业大学在 500 kV 的高压线路中利用分布式布里渊传感技术进行了电缆应变传感，监测精度约为±20 με[22]，不仅能实现实时覆冰监测，还能排除由历史覆冰带来的应力异常隐患。



（a）温度监测[17]
（a）Temperature monitoring[17]

（b）应变监测[21]
（b）Strain monitoring[21]

（c）振动监测[28]
（c）Vibration monitoring[28]

图 4　电缆覆冰/舞动监测技术

Figure 4　Cable icing/dancing monitoring technology

除对覆冰本身带来的温度与应变进行监测，还能对产生巨大威胁的“舞动”本身进行监测，这种监测方式更为直接与准确。有研究表明，根据振动的诱因及覆冰类型，振动可分为次档距振动、电晕振动、微风振动以及舞动四种[23-24]，其中次档距振动与电晕振动危害较小，微风振动最为频繁，易使输电

线路产生疲劳断裂，而电缆舞动具有频率低、振幅大等特性，对输电线路危害极大。为实现对电缆舞动的监测，2019年电子科技大学采用偏振敏感光时域反射技术（Polarization Optical Time Domain Reflectometer，POTDR）对输电线路的电缆舞动进行监测并在30 km长的输电线路上进行验证，定位精度可达2 m，最小可实现0.9 Hz的低频舞动监测[25]；进一步的，太原理工大学及哈尔滨工业大学利用监测保真度更高的相位光时域反射技术（Phi-Optical Time-domain Reflectometer，phi-OTDR），对电缆舞动及微风振动现象进行监测，验证了监测的有效性[26-27]；2021年，南京大学建立了输电线路振动模型，实现了对电缆舞动状态的定量分析，可利用舞动信号实现覆冰厚度的反演预测，预测厚度误差<10%[28]，如图4(c)所示。

表1　电缆覆冰/舞动监测技术汇总

Table 1　Summary of cable icing/dancing monitoring technologies

监测内容	物理量	监测技术	监测指标	文献
电缆覆冰/舞动	温度	BOTDR	温度误差小于1.8 ℃、未实现定量覆冰监测	[17]
	温度	BOTDR	温度误差2 ℃、实现山区75 km覆冰监测	[18]
	温度+振动	BOTDR+DAS	68 km电缆720 h长期舞动监测	[19]
	应变	FBG+神经网络	拉力灵敏度0.008 3 nm/N，覆冰误差0.147 mm	[20]
	振动	POTDR	定位精度2 m，检测范围30 km，监测频率<0.9 Hz	[25]
	振动	phi-OTDR	监测长度1.5 km，舞动信噪比13.98 dB，监测频率<1 Hz	[26]
	振动	phi-OTDR	通过舞动监测覆冰，覆冰厚度误差<10%	[28]

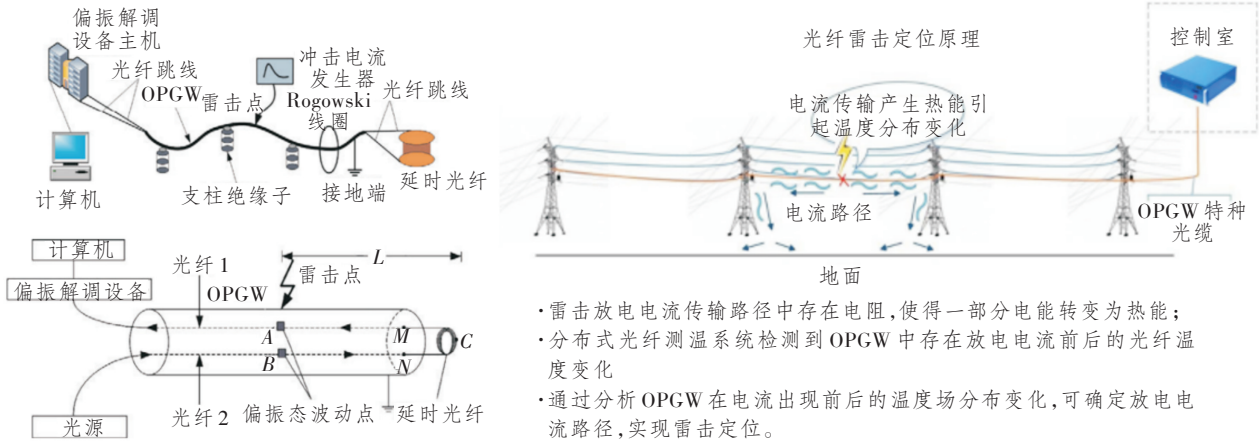
2.2　电缆雷击监测

除覆冰、导线舞动外，雷击是架空输电线路高发灾害故障。雷击会击穿导线外层防护结构，降低线路机械强度，大幅提升接地短路、导线断裂故障风险，严重威胁线路安全稳定运行。但输电线路跨度大、雷击发生位置随机，传统运维仅能在雷击故障发生后开展故障点排查。近年来国内外围绕OPGW光纤雷击定位开展大量研究，证实分布式光纤传感可通过偏振态变化、温升效应两类路径实现雷击事件监测与精准定位[23]。光纤偏振监测的原理是法拉第磁光效应，当电缆受到雷击时，强大的脉冲电流会引发强磁场，使得光纤中探测光的偏振态发生急剧变化，这一变化会导致光信号产生剧烈跳变。因此，通过监测光纤链路的偏振态变化，即可轻易实现雷击监测。进一步的，基于光信号的到达时间可实现对不同电缆位置的独立实时监测，实现对雷击位置的定位。图5所示为电缆雷击监测技术，如图5(a)所示，基于偏振态监测方法，武汉大学实现了定位精度小于1%的雷击监测，但定位误差仍在近百米级[29]。光纤温度检测基于雷击产生的热效应，通过监测电缆链路的温度分布及温度“突变”可实现雷击监测，由于BOTDR具有高分辨特性，可实现米级分辨率的雷击监测。2013年，南京大学基于BOTDR系统进行了架空电缆的雷击监测，定量分析了线缆雷击后产生的温度变化[30]；2018年，华南理工大学构建了雷击的温度效应模型，分析了实际场景中雷击点附近的温度分布，进行了如图5(b)所示的验证[31]，温度检测波动小于±2 ℃。

表2　电缆雷击监测技术汇总

Table 2　Summary of cable lightning strike monitoring technologies

监测内容	物理量	监测技术	监测指标	文献
雷击监测	磁场	POTDR	定位误差<100 m (1%)，灵敏度高	[29]
	温度	BOTDR	分辨率>1 m	[30]
	温度	BOTDR	分辨率>1 m，温度精度±2 ℃	[31]



(a)偏振态监测[29]　(b)温度场监测[31]

(a) Polarization state monitoring[29]　(b) Temperature field monitoring[31]

图 5　电缆雷击监测技术

Figure 5　Cable lightning strike monitoring technology

3　埋地电缆中光纤传感技术的应用

对比架空线路，埋地电缆具备隐蔽性强、运行安全、占地少和运维整洁等优势，广泛应用于城市核心区、工业园区配电网。伴随城市化的推进，电缆敷设规模、运行电压等级同步提高，系统运行安全管控压力持续增大。高铁、地铁廊道、城市人口密集区域对供电连续性要求严苛，统计表明，电缆局部放电、第三方施工外力破坏是埋地电缆故障两大主要诱因，亟需配套在线监测装置实现隐患提前识别、及时预警。

3.1　电缆外破监测

随着城市基建、轨道施工、道路改扩建工程持续推进，施工机械外力挖掘极易损伤地下电缆，第三方入侵已成为埋地电缆安全运行核心隐患。现有异物入侵监测手段包含电学检波、红外摄像、人工现场巡检三类[32-34]。但针对埋地电缆的异物入侵监测存在着感知范围大、背景噪声极强、干扰事件众多等问题，现有的技术检测方法无法同时兼顾长距离探测、大噪声背景下的入侵事件提取、实时高效探测的需求。基于现有技术现状，长距离监测技术及入侵智能识别技术需进一步研究。

相位敏感性光时域反射的分布式声波传感技术具有高灵敏、长距离等优势，可在复杂、恶劣环境中实现大范围及高灵敏的实时探测[35]，因此基于上述优势与特点的传感系统非常适用于埋地电缆的第三方入侵检测。当入侵事件出现后，事件信息与电缆周边结构会发生相互作用，进而激发出应力声波，其中，声波的强弱、传播范围、音调高低反映了入侵事件的强度、作用区域及频率特征。这说明，应力声波携带着丰富的物理信息，这些物理信息包括强度、频率、偏振和相位等参数，能从多个维度体现事件的特征。基于分布式声波传感(Distributed Acoustic Sensing，DAS)/分布式振动传感(Distributed Vibration Sensing，DVS)技术依托与声波具有线性关系的相位信息实现声波感知，通过探测不同位置的光相位变化，可对入侵事件进行全波形解析，从而得到埋地电缆的声场分布，进而实现对异常入侵事件的识别[36]。

但实际应用时，光纤中存在强度衰落效应，使得链路中存在解调失效的部分，形成坏道，在声场分布中形成干扰，影响异常声波信号的识别。此外，在分布式应用中，存在众多未知结构，例如空腔、电缆沟和不同土质结构等等，复杂结构对不同光纤位置的作用方式及作用效果难以探明，难以通过人工探查或建模模拟[37]。例如，在地下结构监测中，不同土质的密度、成分与光纤具有不同的耦合状态，同一信号也会具有不同的光纤响应。面对复杂情况，常用的信号处理方法鲁棒性差，无法实现复杂工况下的准确监测，而人工判断更依赖于成熟经验，无法实现长距离管网的在线识别[38]。此外，由于实际情况中存在繁杂的干扰，极易出现的异常事件的漏报、误报的问题[39]。因此高鲁棒性智能识别算法是埋地电缆外破监测的核心研究方向。

机器学习算法可有效滤除环境噪声，通过特征拟合区分正常背景信号与入侵扰动，自适应放大差异特征构建分类模型，实现多类第三方施工事件精准识别。基于神经网络的智能识别架构可显著降低 DAS 系统误报、漏报率，支撑长距离电缆全域高

精度入侵预警。当前主流识别流程分为两步：信号多维度特征提取、特征输入分类器完成事件判定，可根据监测场景优化特征提取方式与网络结构，提升识别适配性[40-42]。2019年，电子科技大学基于卷积神经网络（Convolutional Neural Networks，CNN）结合支持向量机（Support Vector Machine，SVM）实现了6类事件的识别，平均准确率达到98%[43]；2020年，四川大学利用时空矩阵，采用CNN结合长短期记忆网络（Long Short-Term Memory，LSTM）的方案实现了5类事件的识别，准确率达90%[44]；2020年，电子科技大学基于CNN网络与双向长短期记忆网络（Bidirectional Long Short-Term Memory，BiLSTM）对6类异物入侵事件进行识别，准确率达97%[45]；2021年，隐马可夫模型（Hidden Markov Model，HMM）也被用于特征提取技术中，与CNN网络结合可实现97.8%的识别准确率[46]。然而，现有的特征提取方法存在着噪声大、串扰和信息提取不全的问题[47]。在模式识别网络上，也存在着网络与环境不匹配的问题[48]。因此，在埋地电缆的入侵监测中，需要获得与第三方入侵事件匹配的特征提取方法和环境特异性优化的神经网络算法，才能实现入侵事件的有效识别。

表3　电缆外破监测技术汇总

Table 3　Summary of external cable breakage monitoring technologies

数据形式	模型	识别任务	识别准确率(%)	文献
时序向量	CNN+SVM	6类	98	[43]
时-空矩阵	CNN+LSTM	5类	90	[44]
时-空矩阵	CNN+BiLSTM	6类	97	[45]
时序向量	CNN+HMM	6类	97.8	[46]

3.2　电缆局部放电监测

通常电力电缆的局部放电是在绝缘介质中的气隙里产生，当电力电缆运行时，电力电缆导体的交流电电压加载到气隙上，电压上升过压时气隙被电离产生放电，电压下降低压时气隙电离熄灭放电停止，在交流电场作用下，气隙的体积会膨胀与收缩，这个气隙体积交变过程，会在绝缘层产生疏密波，即产生一段宽频带的声波信号。

目前，光纤点式传感器、光纤干涉式传感器及光纤分布式传感器均被用于局部放电监测中。对于点式传感器，国内外研究者均基于FBG传感器实现了异常放电信号的监测，放电量可达300 pC[49-50]。在干涉式传感器方面，华北电力大学设计了干涉型超声探头，实现了40 kHz放电信号的高灵敏探测[51]；东北大学基于直线型萨格纳克干涉仪结构实现了高压电缆的局部放电与定位，定位精度可达16 m[52]；德国研究者基于迈克尔逊干涉仪实现了光纤超声传感，通过制作超声探头的方式实现了测试块内部的局部放电情况，实现了40 kHz亚pC量级的放电监测[53]；上海大学进一步设计了高灵敏增敏探头，实现了灵敏度1.7 rad/(m·Pa)，探测频带达到150 kHz的放电超声探测[54]。上述异常放电探测方法均为点式探测，灵敏度高，但组网困难，多用于电缆接头处等异常放电关键区域，难以实现全链路无盲区的监测。由于埋地电缆具有距离长、巡检困难等特点，分布式检测需求逐渐增加，相干光时域反射仪[55-56]及相位敏感光时域反射仪[57-58]均被用于电缆的超声监测中，最小定位精度可至1.9 m。然而，目前想要真正应用还需克服以下两大瓶颈：一是分布式声波传感中长距离探测与宽频带探测之间的“距离-带宽积”制约关系；二是现有技术的超声灵敏度需要进一步提升。

表4　局部放电监测技术汇总

Table 4　Summary of partial discharge monitoring technologies

监测内容	监测技术	具体效果	文献
点式	高敏FBG	信噪比提升50 dB，灵敏度10 pC	[49]
	FBG	频率216 kHz，灵敏度300 pC	[50]
	干涉型超声探头	信噪比42 dB，超声频率40 kHz	[51]
	Sagnac干涉仪	频率6 kHz，定位精度16 m	[52]
	迈克尔逊干涉仪	频率40 kHz，灵敏度~pC级	[53]
	迈克尔逊干涉仪	频率150 kHz，灵敏度1.7 rad/(m·Pa)	[54]
分布式	COTDR	频率72 kHz，监测范围200 m	[55]
	Phi-OTDR	电压20 kV，定位误差2.6 m	[56]
	COTDR	监测范围120 m，灵敏度29.7 pC	[57]
	DAS	监测范围1 125 m，定位误差1.9 m	[58]

4　结束语

本文系统梳理光纤传感技术在电网安全监测领域的研究现状，从传感技术分类、电网故障监测需求双维度，分别评述架空线路覆冰、导线舞动、雷击监测，埋地电缆第三方外破、局部放电监测场景下各类光纤传感方案的技术特征，采用交叉对比分析归纳现有技术优势与短板。光纤传感依托高灵敏度、抗电磁干扰的核心优势，在电网多场景监测中具有较大应用潜力，但当前技术普遍存在长距离全域探测与高精度测量难以兼顾的固有制约。为此，一方面，可针对电网多参量监测需求，设计结合大范围分布式探测技术与高精度点式探测技术的综合监测系统，实现全电缆链路普检、特殊区域重点筛查的多尺度监测模式，以实现大范围、高精度的电网安全监测系统；另一方面，基于分布式传感技术天然的大范围监测优势，进一步提高其探测性能，若在探测精度、探测频带等方面达到点式光纤传感器的水平，未来有望在电网安全检测领域发挥更大的作用。

参考文献：

[1] 赵东升，赵旭升，彭玉清. 现代电力通信网的安全防护措施研究[J]. 中国新通信，2025，27(3)：4–6.
Zhao D S，Zhao X S，Peng Y Q. Research on Security Protection Measures of Modern Electric Power Communication Network[J]. China New Telecommunications，2025，27(3)：4–6.

[2] Zhang X，Zhu H，Jiang X，et al. Distributed Fiber Optic Sensors for Tunnel Monitoring：A State-of-the-Art Review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2024，16(9)：3841–3863.

[3] 马国明，王思涵，秦炜淇，等. 输电线路运行状态光纤感知研究与展望[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3032–3047.
Ma G M，Wang S H，Qin W Q，et al. Research and Prospect in Optical Fiber Sensing of Transmission Line Operating Conditions[J]. High Voltage Engineering，2022，48(8)：3032–3047.

[4] Krizan D，Stipal J，Nedoma J，et al. Embedding FBG Sensors for Monitoring Vital Signs of the Human Body：Recent Progress over the Past Decade[J]. APL Photonics，2024，9(8)：081201.

[5] Dandridge A. Fiber Optic Sensors based on the Mach–Zehnder and Michelson Interferometers[J]. Fiber Optic Sensors：An Introduction for Engineers and Scientists，2011：231–275.

[6] Zhou Y，Zhang Y N，Yu Q，et al. Application of Machine Learning in Optical Fiber Sensors[J]. Measurement，2024，228：114391.

[7] Xiao X，Song Q，Zhao W，et al. Hybrid Coding Ultra-Weak Fiber Bragg Grating (UWFBG) Array for High Spatial Resolution Temperature Sensing[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego，CA，USA：IEEE，2023：10116970.

[8] Wriedt T. A Review of Elastic Light Scattering Theories. Particle & Particle Systems Characterization：Measurement and Description of Particle Properties and Behavior in Powders and other Disperse Systems，1998，15(2)：67–74.

[9] Yang G，Zeng K，Wang L，et al. Simultaneous Sensing of Temperature and Strain with Enhanced Performance Using Forward Brillouin Scattering in Highly Nonlinear Fiber[J]. Optics Letters，2023，48(13)：3611–3614.

[10] Zhang M，Zhang J，Qiao L，et al. Distributed Fiber Optic Raman Thermometer and Applications[M]//Novel Optical Fiber Sensing Technology and Systems. Singapore：Springer Nature Singapore，2024：293–371.

[11] Gomes D F，Brusamarello B，Weber G H，et al. Phase Reconstruction Challenge for Dynamic Signal Measurement in Optical Fiber Distributed Sensors based on Rayleigh Backscatter and Φ-OTDR[C]//2024 IEEE Photonics Conference (IPC). Rome，Italy：IEEE，2024：10799546.

[12] 胡毅. 输电线路大范围冰害事故分析及对策[J]. 高电压技术，2005，31(4)：14–15.
Hu Y. Analysis and Countermeasures for Large Area Accident Cause by Icing on Transmission Line[J]. High Voltage Engineering，2005，31(4)：14–15.

[13] 杨斌，皋魏，席刚. Φ-OTDR分布式光纤传感系统的关键技术研究[J]. 光通信研究，2012(4)：19–22.
Yang B，Gao W，Xi G. Key Technologies for Φ-OTDR-based Distributed Fiber-Optic Sensing Systems[J]. Study on Optical Communications，2012(4)：19–22.

[14] 李翠，夏炳森，林斌，等. 基于多维参量分布式光纤传感的架空输电线路覆冰监测技术[J]. 光电子技术，2024，44(1)：38–46.
Li C，Xia B S，Lin B，et al. Overhead Transmission Line Icing Monitoring Technology based on Multi-dimensional Parametric Distributed Optical Fiber Sensing[J]. Optoelectronic Technology，2024，44(1)：38–46.

[15] 李先锋，徐志钮，郭一帆，等. 基于光纤传感的输电线路覆冰监测技术应用评述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版)，2023，50(2)：22–34.
Li X F，Xu Z N，Guo Y F，et al. Review of Application of Icing Monitoring Technology for Transmission Lines based on Optical Fiber Sensing[J]. Journal of North China Electric Power University，2023，50(2)：22–34.

[16] 孙金祥. 多参量光纤传感关键技术及其应用研究[D]. 北京：北京邮电大学，2022.
Sun J X. Research on Key Technology and Application of Multi-Parameter Optical Fiber Sensing[D]. Beijing：Beijing University of Posts and Telecommunications，2022.

[17] Luo J，Hao Y，Ye Q，et al. Development of Optical Fiber Sensors based on Brillouin Scattering and FBG for On-Line Monitoring in Overhead Transmission Lines[J]. Journal of Lightwave Technology，2013，31(10)：1559–1565.

[18] 覃兆宇，刘卫新，潘哲哲，等. 光纤布里渊分布式输电线路覆冰识别技术[J]. 光电工程，2016，43(10)：6–11.
Qin Z Y，Liu W X，Pan Z Z，et al. Optical Brillouin Distributed Ice-Coating Identification Technology on Transmission Line[J]. Opto-Electronic Engineering，2016，43(10)：6–11.

[19] 刘品一. 基于融合型分布式光纤传感的输电线覆冰舞动监测[D]. 南京：南京大学，2017.
Liu P Y. The Research on the Measurement of the Icing and Galloping Transmission Line based on the Combined Distributed Optical Fiber Sensor[D]. Nanjing：Nanjing University，2017.

[20] 杨俊. 基于FBG拉力与倾角传感的导线覆冰监测研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2019.
Yang J. Research on Conductor Icing Monitoring based on FBG Tension and Inclination Sensing[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2019.

[21] 钱君霞，郭家兴. 光纤振动信号的特征提取与识别方法综述[J]. 光通信研究，2024(6)：230116.
Qian J X，Guo J X. Overview of Feature Extraction and Recognition Methods for Fiber Optic Vibration Signals[J]. Study on Optical Communications，2024(6)：230116.

[22] 夏猛，汤晓惠，王颖，等. 基于BOTDA/R的在运光纤复合架空地线光缆应变监测对比分析[J]. 光学学报，2020，40(15)：1506001.
Xia M，Tang X H，Wang Y，et al. Comparative Analysis of Strain Monitoring of the Installed Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire Using BOTDA/R[J]. Acta Optica Sinica，2020，40(15)：1506001.

[23] 赵瀚识. 相位敏感型光纤时域反射计(Φ-OTDR)用于电缆舞动监测的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2017.
Zhao H S. Φ-OTDR based Vibration Monitoring of Transmission Lines[D]. Harbin：Harbin Engineering University，2017.

[24] 唐元春，李翠，黄宁，等. 基于分布式光纤传感的架空输电线路舞动与雷击监测技术进展[J]. 光电子技术，2023，43(4)：337–346.
Tang Y C，Li C，Huang N，et al. Overhead Transmission Line Dancing and Lightning Strike Monitoring Technology based on Distributed Optical Fiber Sensing[J]. Optoelectronic Technology，2023，43(4)：337–346.

[25] 肖垚. 电力线缆全光纤动静态多参数监测及趋势预测方法[D]. 成都：电子科技大学，2019.
Xiao Y. All-Fiber Dynamic and Static Multi-Parameter Monitoring and Trend Prediction Method for Power Cable[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2019.

[26] 童镎力. 输电线缆舞动在线监测系统研究[D]. 太原：太原理工大学，2022.
Tong T L. Research on Monitoring System of Conductor Galloping of Transmission Lines[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2022.

[27] 贾国栋. 长距离输电线路风致振动光纤监测方法研究[D]. 太原：太原理工大学，2023.
Jia G D. Research on Wind-Induced Vibration Monitoring of Long-Distance Power Transmission Line Using Optical Fiber Sensing Method[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2023.

[28] Ding Z W，Zhang X P，Zou N M，et al. Phi-OTDR based On-Line Monitoring of Overhead Power Transmission Line[J]. Journal of Lightwave Technology，2021，39(15)：5163–5169.

[29] 龚庆武，冯瑞发，李伟，等. 基于OPGW光偏振态的输电线路雷击点定位方法[J]. 高电压技术，2016，42(2)：612–618.
Gong Q W，Feng R F，Li W，et al. Location Method for Lightning Striking OPGW based on the State of Polarization of Light[J]. High Voltage Engineering，2016，42(2)：612–618.

[30] 王健健，李永倩. 分布式光纤传感技术在OPGW监测中的应用现状[J]. 光通信研究，2018(3)：25–27.
Wang J J，Li Y Q. Progress on Distributed Optical Fi-

ber Sensing Technology in OPGW Monitoring [J]. Study on Optical Communications, 2018(3): 25–27.

[31] 李为. 基于温度场的OPGW光缆状态监测及雷击定位技术研究[D]. 广州：华南理工大学, 2018.
Li W. Research on Condition Monitoring and Lightning Location Technology of OPGW Optical Cable based on Temperature Field[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.

[32] 刘广. 基于巡检机器人的变电站安全运维系统设计研究[J]. 灯与照明, 2025, 49(1): 142–145.
Liu G. Design and Research of Substation Safety Operation and Maintenance System based on Inspection Robot[J]. Light & Lighting, 2025, 49(1): 142–145.

[33] 陈静. 变电运维工作中红外测温技术的应用研究[J]. 光源与照明, 2024(6): 63–65.
Chen J. Research on Application of Infrared Temperature Measurement Technology in Substation Operation and Maintenance [J]. Lamps & Lighting, 2024 (6): 63–65.

[34] 童圣凯, 杨俊武, 童小寒, 等. 架空输电线路三维立体影像巡检技术的应用研究[J]. 山西电力, 2025(1): 31–35.
Tong S K, Yang J W, Tong X H, et al. Study on the Application of Three-Dimensional Image Inspection Technology for Overhead Transmission Lines [J]. Shanxi Electric Power, 2025(1): 31–35.

[35] Fouda B M T, Wang L, Zhang W, et al. Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry-Based Audio Excitation Signal Demodulation and Reproduction [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 7001414.

[36] 张均伟, 蓝波, 黄嘉庚, 等. 基于分布式光纤传感的光缆防外破监测研究[J]. 光通信研究, 2022(5): 53–57.
Zhang J W, Lan B, Huang J G, et al. Monitoring and Early Warning System for Anti-Breakage of Optical Cable based on Distributed Optical Fiber Vibration Sensing [J]. Study on Optical Communications, 2022(5): 53–57.

[37] Peng Z, Jian J, Wen H, et al. Distributed Fiber Sensor and Machine Learning Data Analytics for Pipeline Protection Against Extrinsic Intrusions and Intrinsic Corrosions[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 27277.

[38] He T, Li H, Zhang S, et al. A Surveillance System for Urban Utility Tunnel Subject to Third-Party Threats based on Fiber-Optic DAS and FPN-BiLSTM Network [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1–9.

[39] Zhang S, He T, Li H, et al. Modified Data Augmentation Integration Method for Robust Intrusion Events Recognition with Fiber Optic DAS System[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(1): 453–462.

[40] Wu H, Liu X, Xiao Y, et al. A Dynamic Time Sequence Recognition and Knowledge Mining Method based on the Hidden Markov Models (HMMS) for Pipeline Safety Monitoring with Φ-OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(19): 4991–5000.

[41] He T, Sun Q, Zhang S, et al. A Dual-Stage-Recognition Network for Distributed Optical Fiber Sensing Perimeter Security System [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(13): 4331–4340.

[42] 张鑫雯,邹瑞,宋成,等.基于多尺度特征提取的网络入侵检测方法[EB/OL]. (2025-03-06)[2025-03-13]. https ：//doi. org/10. 20165/j. cnki. ISSN1673-629X. 2025. 0053.
Zhang X W, Zou R, Song C. A Network Intrusion Detection Method Based on Multi-scale Feature Extraction [J/OL]. Computer Technology and Development, 1-9 [2025-03-20]. https://doi. org/10. 20165/j. cnki. ISSN1673-629X. 2025. 0053.

[43] Wu H, Chen J, Liu X, et al. One-Dimensional CNN-Based Intelligent Recognition of Vibrations in Pipeline Monitoring with DAS [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(17): 4359–4366.

[44] Li Z, Zhang J, Wang M, et al. Fiber Distributed Acoustic Sensing Using Convolutional Long Short-Term Memory Network: A Field Test on High-Speed Railway Intrusion Detection [J]. Optics Express, 2020, 28(3): 2925.

[45] Wu H, Yang M, Yang S, et al. A Novel DAS Signal Recognition Method based on Spatiotemporal Information Extraction with 1DCNNs-BiLSTM Network [J]. IEEE Access, 2020, 8: 119448–119457.

[46] Wu H, Yang S, Liu X, et al. Simultaneous Extraction of Multi-Scale Structural Features and the Sequential Information with an End-to-End MCNN-HMM Combined Model for Fiber Distributed Acoustic Sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39 (20): 6606–6616.

[47] 吴慧娟, 刘欣雨, 饶云江. 基于Φ-OTDR的光纤分布式传感信号处理及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021,58(13):1306003.
Wu H J, Liu X Y, Ran Y J. Processing and Application of Fiber Optic Distributed Sansing Signal based on Φ –OTDR [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306003.

[48] Zhang S, Li H, Fan C, et al. Adaptive Decentralized AI Scheme for Signal Recognition of Distributed Sensor Systems[J]. Opto-Electronic Advances, 2024, 7(12): 240119.

[49] Czaszejko T, Stephens J A D. Toward acoustic detection of partial discharges in high voltage cables[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Insulated Power Cables. Paris, France: Jicable, 2015: E8.2.

[50] 程养春, 李日东, 吴旭涛, 等. 基于FBG的电缆XLPE绝缘局部放电检测研究[J]. 宁夏电力, 2019(6): 26–34.
Cheng Y C, Li R D, Wu X T, et al. Research on Partial Discharge Detection of Cable Insulation based on FBG[J]. Ningxia Electric Power, 2019(6): 26–34.

[51] 邢超, 乔辉, 田源, 等. 基于声光调制及RF相位检波的光纤干涉型局部放电超声传感方法研究[J]. 高压电器, 2025, 61(3): 152–159.
Xing C, Qiao H, Tian Y, et al. Study on Fiber Interferometric Partial Discharge Ultrasonic Sensing Method based on Acoustic-Optic Modulation and RF Phase Detection[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(3): 152–159.

[52] Song Z, Guo M, Wang Q. A Partial Discharge Detection and Localization System for High Voltage Cable based on Long-Tailed Sagnac Interferometric Fiber Optic Sensor: SONGet Al[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2017, 59(9): 2132–2136.

[53] Rohwetter P, Habel W, Heidmann G, et al. Acoustic Emission from DC Pre-Treeing Discharge Processes in Silicone Elastomer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 52–64.

[54] Zhang T, Pang F, Liu H, et al. A Fiber-Optic Sensor for Acoustic Emission Detection in a High Voltage Cable System[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2026.

[55] Rohwetter P, Eisermann R, Krebber K. Distributed Acoustic Sensing: Towards Partial Discharge Monitoring[C]//Proceedings of SPIE Conference on 24th International Conference on Optical Fibre Sensors. Curitiba, Brazil:SPIE, 2015: 96341C.

[56] 陈浩, 徐阳, 钱森, 等. 分布式光纤超声传感器用于检测电缆接头放电故障[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0306001.
Chen H, Xu Y, Qian S, et al. Distributed Fiber-Optic Ultrasonic Sensor Applied in Detection of Discharging Fault of Power Cable Joint[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0306001.

[57] Song Y, Tian H, Jia Z, et al. Distributed Partial Discharge Acoustic Signal Detection and Localization Technology for GIL with Built-in Fiber Optics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(14): 5068–5076.

[58] Liu Z, Yang S, Chen Q, et al. Partial Discharge Distributed Locating in Power Cable Joints Using Φ-OTDR Optical Fiber System[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(9): 14404–14412.