

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.04.001

徐苓娜, 蒋陈林, 何高辉, 等. 光纤传感器赋能电力设备智能监测与安全保障: 原理、应用与展望 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(4): 2-15.

# 光纤传感器赋能电力设备智能监测与安全保障: 原理、应用与展望

徐苓娜<sup>1</sup>, 蒋陈林<sup>1</sup>, 何高辉<sup>1</sup>, 陈伟根<sup>2</sup>

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715;

2. 重庆大学 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044

**摘要:** 近年来, 智能传感器技术凭借其自校准、自适应及高精度等特性, 已成为电力设备状态监测的关键技术。其中, 光纤传感器因具有抗电磁干扰、高灵敏度、分布式测量及本征安全等突出优势, 在强电磁环境下的电力设备监测中展现出独特价值, 逐渐成为智能电网感知层的核心技术之一。系统梳理了光纤传感器的主要类型及其传感机理, 重点评述了其在变压器、气体绝缘开关设备(Gas-Insulated Switchgear, GIS)、输电线路及电力电缆等关键设备中, 关于温度、应变、局放及多参量融合监测方面的研究进展与应用现状, 分析了当前技术推广面临的主要瓶颈, 并对多参量协同感知、智能化诊断及物联网融合的发展趋势进行了展望, 以期光纤传感器技术在电力系统安全稳定运行中的深化应用提供理论参考与技术支持。

**关键词:** 光纤传感器; 电力设备; 状态监测; 智能感知;

安全保障

中图分类号: TM76; TP212

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2026)04-0002-14

## Optical Fiber Sensors Empower Intelligent Monitoring and Safety Assurance of Power Equipment: Principles, Applications and Prospects

XU Lingna<sup>1</sup>, JIANG Chenlin<sup>1</sup>, HE Gaohui<sup>1</sup>, CHEN Weigen<sup>2</sup>

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China

收稿日期: 2026-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52507197)。

作者简介: 徐苓娜, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事电力设备在线监测与故障智能诊断、光谱在检测与分析中的应用研究。

通信作者: 陈伟根, 教授, 博士研究生导师。

**Abstract:** In recent years, intelligent sensor technology, with its characteristics of self-calibration, self-adaptation and high precision, has become a key support for the condition monitoring of power equipment. Among them, optical fiber sensors, due to their outstanding advantages such as anti-electromagnetic interference, high sensitivity, distributed measurement and intrinsic safety, have demonstrated unique value in the monitoring of power equipment in strong electromagnetic environments and have gradually become one of the core technologies of the perception layer in the smart grid. This paper systematically reviews the main types of optical fiber sensors and their sensing mechanisms, and focuses on reviewing the research progress and application status of their temperature, strain, partial discharge and multi-parameter fusion monitoring in key equipment such as transformers, gas-insulated switchgear (GIS), transmission lines and power cables. It also analyzes the main bottlenecks faced by current technology promotion and looks forward to the development trends of multi-parameter collaborative perception, intelligent diagnosis and Internet of Things (IoT) integration, with the aim of providing theoretical reference and technical support for the in-depth application of optical fiber sensing technology in the safe and stable operation of power systems.

**Key words:** optical fiber sensors; power equipment; condition monitoring; intelligent perception; safety guarantee

随着电力系统向高电压、大容量、智能化方向快速发展,电能已成为支撑现代社会稳定运转的基础能源,对工业生产、商业运营及民生保障具有不可替代的战略价值<sup>[1]</sup>。电力设备作为电能传输与变换的核心载体,其运行可靠性直接决定电网安全水平与供电质量。然而,在长期运行过程中,设备绝缘材料易受电、热、机械应力及环境因素的协同作用而发生老化、劣化,导致故障概率显著上升,若未能及时预警处置,可能引发连锁故障,造成大面积停电、设备损毁甚至火灾爆炸等重大安全事故<sup>[2]</sup>。因此,构建高效、精准的电力设备状态监测体系,对保障电网安全运行具有重要的工程意义。

当前,智能电网建设对设备监测提出了实时化、全域化、智能化的更高要求。传统人工巡检、热电偶/热电阻测温等监测手段存在明显局限:电磁兼容性差、空间分辨率低、响应滞后且难以实现分布式测量,已无法满足复杂电磁环境下电力设备多物理场耦合监测的需求<sup>[3]</sup>。相较而言,光纤传感器凭借抗电磁干扰、电气绝缘、本征安全、耐腐蚀及可分布式测量等独特优势,在电力设备状态感知与故障预警领域展现出广阔的应用前景<sup>[4]</sup>,尤其适用于气体绝缘开关设备(Gas-Insulated Switchgear, GIS)、变压器等易受强电磁干扰及易燃易爆场景。近年来,光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)、分布式光纤传感、干涉型光纤传感等技术日趋成熟,已在变压器绕组热点温度、开关柜局部放电、输电线路覆冰及应变监测等场景实现工程化应用。

本文系统阐述光纤传感技术的核心类型与传感机理,重点梳理其在变压器、GIS、输电线路及电缆等关键电力设备中的智能监测应用进展,深入剖析当前技术推广面临的主要瓶颈,并从多参量融合感知、边缘智能诊断及数字孪生集成等维度展望其发展趋势,以为光纤传感技术在电力设备全寿命周期健康管理中的深度应用提供理论参考与技术支持。

## 1 光纤传感器技术核心类型与工作原理

### 1.1 光纤布拉格光栅(FBG)

FBG 是通过测量光栅反射或透射光谱变化来感知物理量的光学传感器,通过在纤芯内形成周期性折射率变化,从而反射特定波长的光,其反射光波长称之为布拉格波长。布拉格波长的计算如式(1)所示:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中： $\lambda_B$  为布拉格波长； $n_{\text{eff}}$  为有效折射率； $\Lambda$  为光纤光栅周期。

FBG 传感器原理如图 1 所示，当光纤温度或应力改变时，基于热光效应和弹光效应，光纤的有效折射率和光栅周期会发生改变，从而导致布拉格波长随之变化。基于该原理，FBG 可对温度和应变进行测量。FBG 的优点是只对波长进行测量，所以光强波动不影响测量结果<sup>[5]</sup>。FBG 常作为点式传感器进行应用，因此对于输电线路等长线路监测场景存在覆盖不全面、难以实现无盲区测量的问题。针对这一问题，目前主流解决方案是使用波分复用(WDM)、时分复用(TDM)等技术，将多 FBG 串联组网，扩大监测范围。

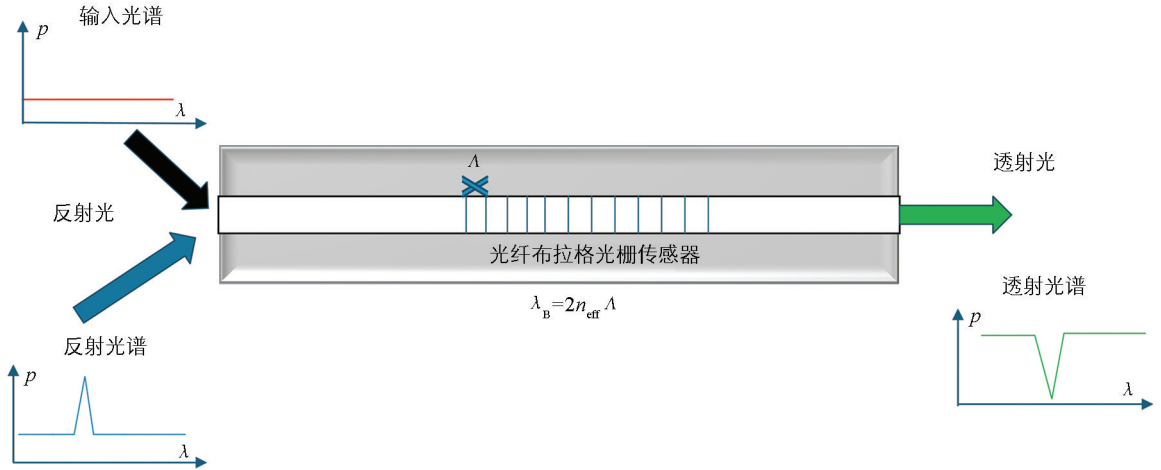


图 1 FBG 传感器原理图

## 1.2 分布式光纤传感

分布式光纤主要基于光的后向散射进行环境感知。光纤散射主要分为瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射。瑞利散射属于弹性散射，通过光纤线路损耗进行测量，光的频率不发生改变。布里渊散射和拉曼散射属于非弹性散射，两者均可分为斯托克斯光和反斯托克斯光。其中，布里渊散射的斯托克斯光和反斯托克斯光均受温度和应变影响，从而使光的频率发生改变；拉曼散射则只有反斯托克斯光受温度影响，光的散射示意如图 2 所示。

基于拉曼散射的分布式光纤传感器多用于电缆温度测量，但单模光纤的拉曼散射很弱，因此常用多模光纤作为传感光纤。拉曼散射通过斯托克斯光与反斯托克斯光功率比值表征温度，从而对温度进行监测。

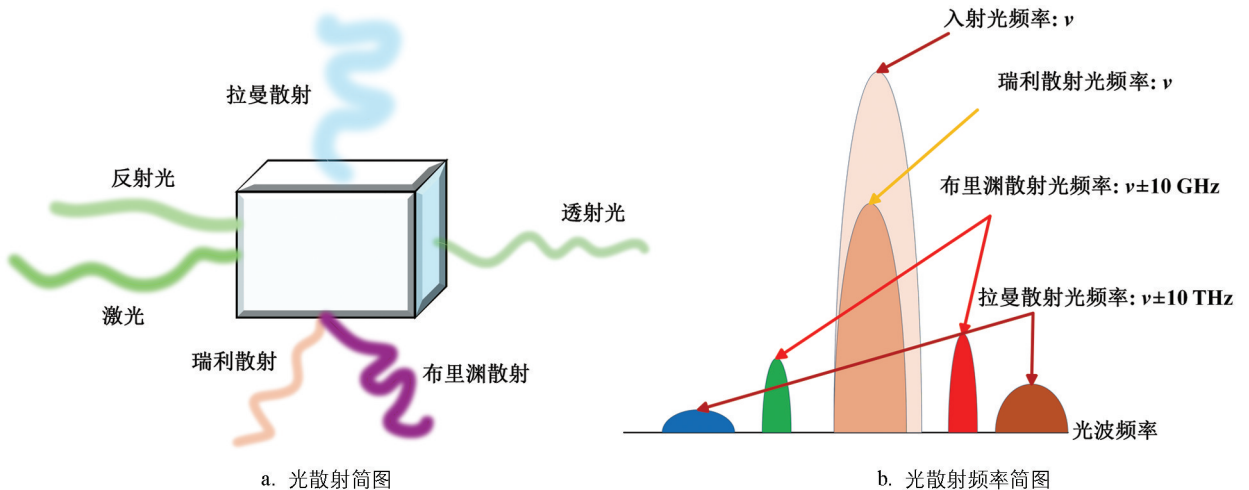


图 2 光的散射示意图

基于布里渊散射的布里渊光时域反射(BOTDR)、布里渊光时域分析(BOTDA)传感技术常用于架空输电线路的温度监测，由于布里渊散射的频移与温度和应变成正比，因此可凭借频移变量计算温度和应变的

变化量, 如式(2)所示:

$$\Delta\nu_B = C_B^T \Delta T + C_B^e \Delta\epsilon \quad (2)$$

式中:  $\Delta\nu_B$  为布里渊频移变化量;  $C_B^T$  为布里渊频移温度系数;  $C_B^e$  为布里渊频移应变系数;  $\Delta T$  为温度变化量;  $\Delta\epsilon$  为应变变化量。

基于瑞利散射的相位敏感光时域反射( $\varphi$ -OTDR)传感被广泛应用于声波和振动监测中。由于瑞利散射不改变光的频率, 因此可通过光的干涉方式, 对光强或光的相位进行测量, 从而得到温度和应变的变化<sup>[6]</sup>。

### 1.3 干涉型光纤传感

干涉型光纤传感的原理是: 通过将光源发出的光经耦合器分成两束光, 一束对外界环境变化进行探测, 称传感臂; 另一束则置于封闭环境, 用于与传感臂干涉, 称参考臂。两路光发生干涉后, 干涉光强可通过式(3)测得:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3)$$

式中:  $I_1$ 、 $I_2$  分别为传感臂和参考臂光强;  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别为传感臂和参考臂相位差;  $\varphi_1 - \varphi_2$  为干涉光相位变化, 当外界环境发生改变时, 导致干涉光相位变化, 通过测量干涉光相位变化量即可实现电气量的测量。

根据传感臂和参考臂干涉结构不同, 干涉仪分为迈克尔孙(Michelson)干涉仪、马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)干涉仪、赛格纳克(Sagnac)干涉仪和珐珀(Fabry-Perot, F-P)干涉仪4种结构类型<sup>[7]</sup>, 具体结构如图3所示。

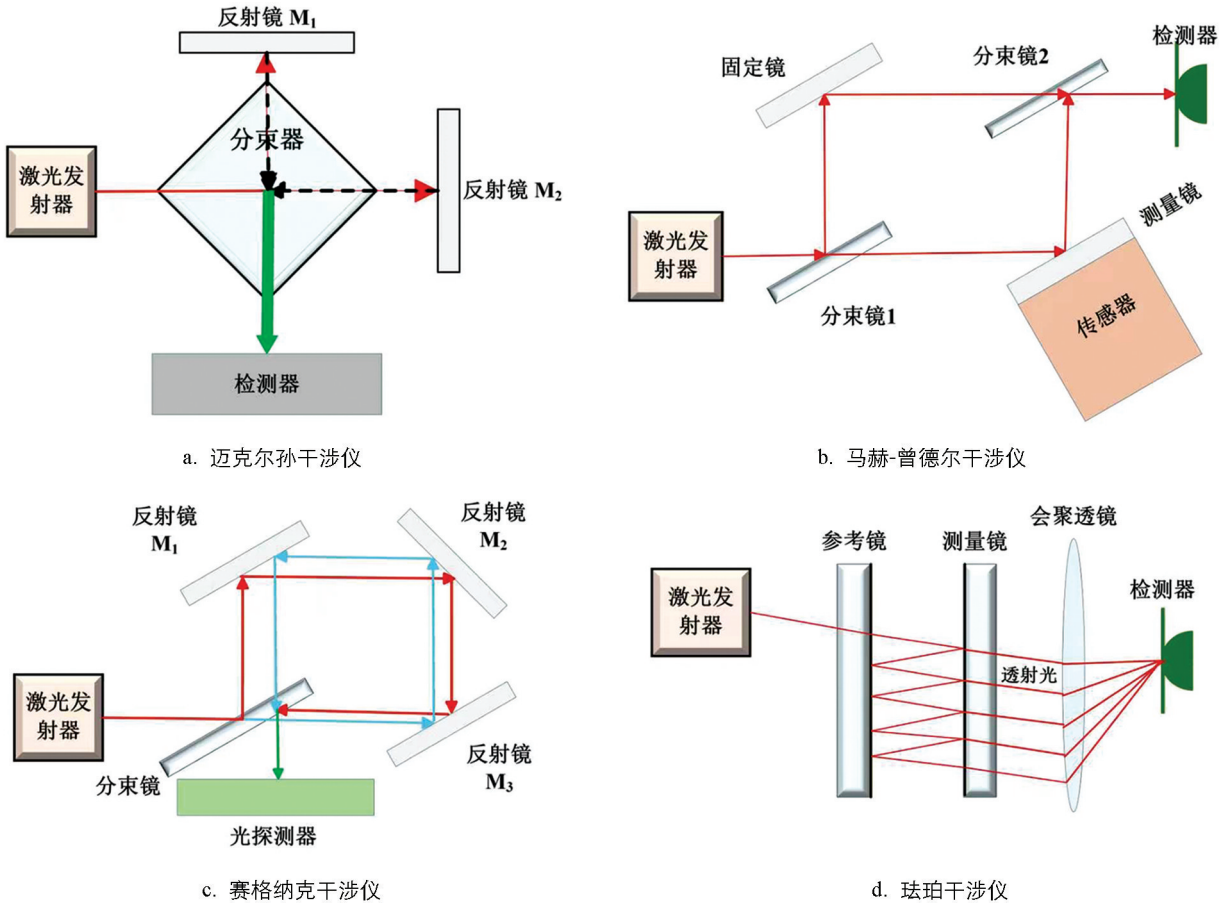


图3 干涉仪结构

迈克尔孙干涉仪将入射激光通过分束镜分成两束光, 得到的两束光经过反射镜反射形成干涉图样, 通过图样中条纹的变化可实现位移等参数的测量; 马赫-曾德尔干涉仪则设置两个分束镜, 入射激光在第一个分束镜分为两束光, 两束光经过不同路径在第二个分束镜重新会合, 从而形成干涉图样; 赛格纳克干涉

仪则将入射激光分为两束光, 让它们在同一环路沿相反方向循环一周后会合得到干涉图样; 珐珀干涉仪通过光在两面平行的高反射率镜子间来回反射形成干涉。

目前, 干涉型光纤传感技术主要应用于电力设备的局部放电监测和光纤电流传感器研发, 在输电线路领域则多用于电缆线局部放电监测<sup>[8]</sup>。

表 1 列出了不同光纤传感器的技术对比。

表 1 光纤传感器技术对比

技术类型	典型机理	主要监测内容	适用的典型电力设备与场景
FBG	通过布拉格波长变化表征外界变化; 可复用扩点	温度、应变	变压器绕组点式热点测温、内部应变/变形辅助; 开关柜触头/接点温度点测
分布式传感	通过光的散射感知外界环境变化(拉曼散射、布里渊散射、瑞利散射)	温度、应变、振动、声波	输电线路舞动、覆冰等监测; 电缆局放、温度监测与热点识别
干涉型传感	借由传感臂与参考臂干涉, 通过干涉光相位变化得到被测量变化	局放超声、压力、振动等	GIS 局放超声监测、变压器局放监测
其他传感(荧光)	通过荧光强度、荧光寿命等测量	温度	开关柜触头、电缆接头等节点测温

## 2 光纤传感器在主要电力设备监测中的应用

### 2.1 变压器监测

变压器作为电能转换的核心设备, 绕组热点是引发绕组烧毁的核心故障诱因, 而传统热电偶测温存在电磁干扰大、绕组内置安装困难、无法实现全域监测的缺陷, 光纤传感技术凭借抗电磁干扰、本征安全、高灵敏度的特性, 成为变压器温度监测的核心技术方案。

在变压器温度监测方面, 主要涵盖光纤光栅传感器、分布式传感器等多类型传感器。光纤光栅传感器常在点式温度监测中使用, 将其置于绕组之中, 保证了热交换的时效性, 能够有效降低温度测量误差, 李贤良等<sup>[9]</sup>通过使用聚酰亚胺涂层的光纤光栅传感器成功验证其对变压器温度监测的有效性, 灵敏度达  $10.275 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。针对变压器绕组全域温度覆盖需求, 基于 BOTDR 传感技术和 BOTDA 传感技术的分布式光纤传感器可通过对变压器绕组全长覆盖, 实现变压器绕组温度的全面监测, 在低压、高压区域的绕组温度监测上均具有较高精度, 温度测量误差约为  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[10]</sup>, 可弥补点式温度监测的覆盖盲区。

除绕组温度外, 变压器油温也是变压器温度监测的一大重点, 其反映了变压器的健康状况, 也是判断变压器绝缘老化的重要因素之一<sup>[11]</sup>。针对变压器油温监测, 张知先等<sup>[12]</sup>提出 F-P 干涉型传感器通过感应 F-P 探头腔长变化, 使用光谱傅里叶算法对腔长变化解耦, 可实现对变压器绝缘油油温的测量与监测, 还能实现  $52.78 \text{ pC}$  局部放电监测, 但该方法对温度传感的灵敏度和精度较低, 仍需进一步改进。张石等<sup>[13]</sup>通过分布式光频域反射(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR)传感技术和 FBG 传感技术对变压器油温进行监测, 结果与热电偶方法和红外热像仪所得一致, 说明了 OFDR 技术与 FBG 技术在油温监测方面具有有效性。Sun 等<sup>[14]</sup>提出一种基于 FBG 的复合传感器, 实现对变压器油温度和流速的同时检测, 并通过实验验证该传感器在静态温度测量时灵敏度为  $37.09 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 温度分辨率为  $0.03 \text{ }^\circ\text{C}$ , 动态时最大误差仅为  $0.694 \text{ }^\circ\text{C}$ 。Akre 等<sup>[15]</sup>使用 2 个相同 FBG 构成 F-P 腔, 成功实现对变压器温度、振动和变压器油水分的三重监测, 并且与热电偶传感器相比温度误差仅为  $0.1\sim 0.9 \text{ }^\circ\text{C}$ , 实现多维功能的有效集成。荧光光纤传感器也可用于温度测量, 通过对荧光强度、荧光寿命等参数的精准测定, 从而实现温度的测量。晋成凤等<sup>[16]</sup>通过对荧光寿命进行测量, 搭建变压器热点监测平台, 并通过实际使用得到系统的响应时间小于  $200 \text{ ms}$ , 具有良好热稳定性与调度能力, 为预防瞬时过载所引发的绕组烧毁提供宝贵的决策时间。光纤传

传感器在变压器温度监测中的应用如表 2 所示。

表 2 光纤传感器在变压器温度监测中的应用

监测内容	物理量	监测技术	监测性能	参考文献
温度	绕组温度	FBG	置于变压器绕组中,灵敏度达 10.275 pm/°C	[9]
	绕组温度	分布式光纤 (BOTDA、BOTDR)	实现绕组全覆盖,低压、高压区域温度测量误差约为 1 °C	[10]
变压器油温	FBG 复合传感		静态时灵敏度为 37.09 pm/°C,温度分辨率为 0.03 °C,动态时最大误差仅为 0.694 °C	[14]
复合参数	FBG		温度、振动和油水分的三重监测,与热电偶传感器相比温度误差仅为 0.1~0.9 °C	[15]
变压器油温	荧光光纤传感		搭建变压器热点监测平台,实际使用得到系统的响应时间小于 200 ms	[16]

变压器绕组变形多由短路电动力、温度应力等因素引发,变形后导致绕组绝缘距离减小、电场分布畸变,最终引发局部放电甚至绝缘击穿。针对变压器绕组变形监测,主要通过应变监测实现,光纤传感器在变压器绕组变形监测中的具体应用情况如表 3 所示。将分布式光纤传感器与绕组导线贴合,可通过光纤应变直接反映绕组状态。陈子明等<sup>[17]</sup>通过 BOTDR 对变压器绕组变形产生的微小声波实时监测,再由小波变换技术进行降噪,在信噪比为 16.7 dB 时,超声监测精度达 100%;在信噪比为 11.2 dB 时,监测精度仍有 93.53%,显著降低了噪声在变压器绕组变形监测中的影响。刘云鹏等<sup>[18]</sup>通过短路实验验证分布式光纤传感器在应变监测中的准确性、稳定性和可靠性,并借助 BOTDA 实现空间分辨率 20 cm、精度±19.5 με 的变压器内部应变监测。俎树英<sup>[19]</sup>则利用 BOTDA 技术在变压器内部或周围布设分布式传感器,结合时分复用技术,搭建起分布式传感监测系统,将变压器绕组变形监测误差控制在±12 με 内。

表 3 光纤传感器在变压器绕组变形监测中的应用

监测内容	物理量	监测技术	监测性能	参考文献
绕组变形	声波	BOTDR+小波变换	信噪比为 16.7 dB 时,超声监测精度达 100%;信噪比为 11.2 dB 时,监测精度仍有 93.53%	[17]
	应变	BOTDA	空间分辨率 20 cm、精度±19.5 με 的变压器内部应变监测	[18]
	应变	BOTDA+时分复用	将变压器绕组变形监测误差控制在±12 με 内	[19]

变压器局部放电多产生于绝缘介质的气隙、气泡中,是绝缘劣化的早期特征,局部放电会产生宽频带的超声信号,干涉型光纤传感器凭借高超声灵敏度、宽频带的特性,成为变压器局部放电监测的核心技术,其中光纤 F-P 传感器因响应频率高、灵敏度高等优点成为研究热点,光纤传感器在变压器局部放电监测中的应用如表 4 所示。刘峰等<sup>[20]</sup>将光纤 F-P 传感器阵列内置于变压器内部,结合多信号分类算法(Multiple Signal Classification, MUSIC),实现变压器油中双局部放电电源的定位。Qian 等<sup>[21]</sup>开发出结合 F-P 腔与 FBG 的复合探头,实验所得该探头的灵敏度显著高于压电传感器(PZT),并显著提高灵敏度检测范围,未来还可通过引入不同频率谐振膜片实现对变压器局放的全方位监测。

表 4 光纤传感器在变压器局部放电监测中的应用

监测内容	物理量	监测技术	监测性能	参考文献
局部放电	超声波	F-P 传感器+多信号分类算法	实现变压器油双局部放电电源定位	[20]
		F-P 腔+FBG	灵敏度检测范围显著高于 PZT 传感器	[21]

图 4 展现了光纤传感器在变压器监测中的应用, 光纤传感器通过对变压器各参数的精准监测, 能够对绕组过热、变形及局部放电等故障进行提前预警, 有效避免变压器绝缘击穿、绕组烧毁等重大安全事故的发生, 从源头上筑牢电能输送转换的安全基础。目前, 光纤传感器虽已在变压器状态监测中取得显著进展, 但仍存在部分问题需进行改进。在温度监测方面, 点式测温中光纤光栅的稳定性易受温度变化、封装材料、封装形式等影响, 且其解调器价格昂贵, 难以大规模推广应用。对于分布式测温, 温度与应变交叉敏感问题以及噪音消除问题仍需进一步解决。在绕组变形监测中, 传感器的长期稳定性问题以及布置位置选择还需加以改进。在局放监测中, 干涉型光纤传感器的稳定性较低以及线性双折射问题还有待突破。针对光纤传感器在变压器中的应用, 在优化传感器布置的基础上, 寻求经济效应更高的解调方式、效果更优的温度应变分离技术, 并围绕监测的长期稳定性、精确性实现进一步突破。

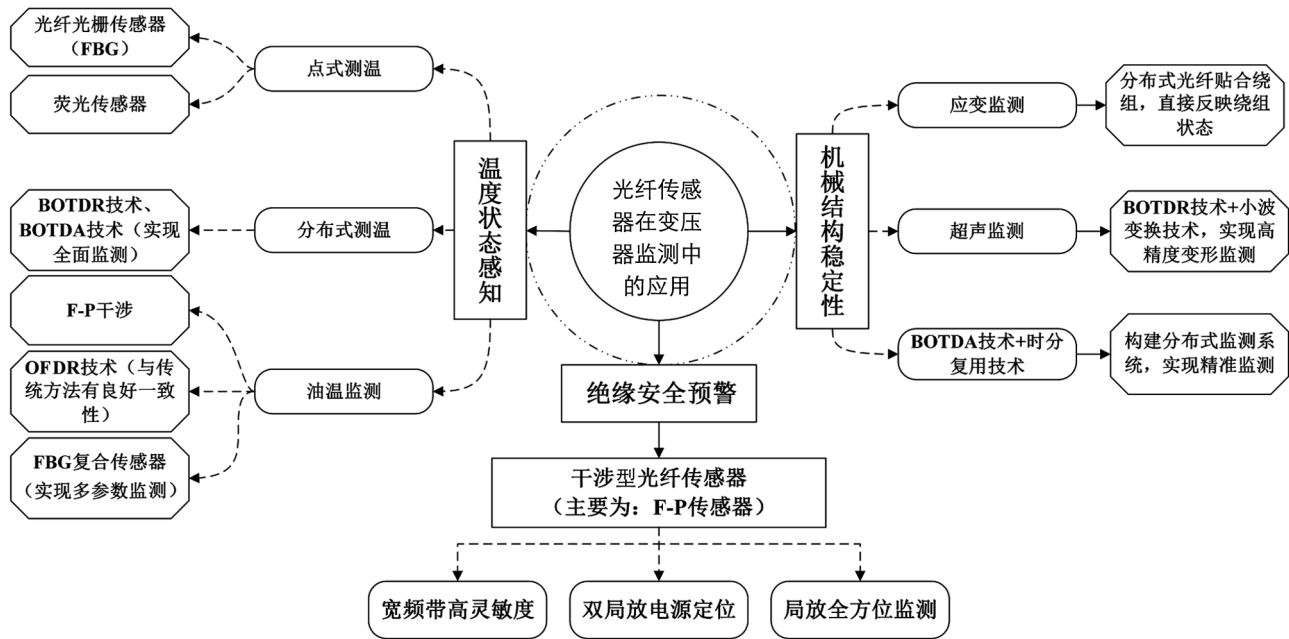


图 4 光纤传感器在变压器监测中的应用

## 2.2 开关柜与气体绝缘开关设备 (GIS) 监测

高压开关柜是电力系统中主要的电力设备, 起到电力传输和分配的重要作用, 其触头、电缆接头、内部走线等部位因接触电阻过大易产生过热现象。传统红外测温需断电操作、无法实现实时在线监测、电阻测温受电磁干扰大等缺点, 已无法满足开关柜温度监测需求, 而光纤传感器抗电磁干扰能力强、本征安全等特性已成为开关柜温度监测的重要发展方向之一。目前, 针对开关柜温度监测的光纤测温技术包括感光型光纤测温技术和传光型光纤测温技术 2 种<sup>[22]</sup>。感光型光纤测温技术包含光纤光栅和分布式光纤测温 2 种, 使用光纤光栅传感器测温时, 可直接将光纤光栅传感器粘在被测点, 结合波分复用技术、光纤光栅解调技术和温度与应变区分测量技术(如多光纤光栅结合、封装), 并通过算法解析温度与应变具体数值, 从而精确监测开关柜温度<sup>[23-24]</sup>。传光型光纤测温技术则主要应用于荧光光纤传感器, 通过在开关柜触头、电缆接头、内部走线等部位安装荧光光纤传感器, 结合监控主机与软件系统, 从而实现开关柜各温度实时采集监测<sup>[25]</sup>。

GIS 以其占地面积小、可靠性高、维护成本低等特点被广泛用于电力系统当中。绝缘劣化是 GIS 故障的主要原因, 局放则是绝缘劣化的重要特征, 因此对于局放进行监测是保障 GIS 安全运行的重要手段。光纤非本征型 Fabry-Perot 干涉 (EFPI) 传感器以其设计灵活、珐珀腔介质多样等特点备受关注。王赞等<sup>[26]</sup>通过将 EFPI 传感器内置于 GIS 中, 能够有效实现对局放超声信号的监测, 其灵敏度是 PZT 的 2 倍。Wang 等<sup>[27]</sup>通过 EFPI 传感器采集局放超声信号并提取单个超声脉冲信号, 凭借概率神经网络 (PNN) 和支持向量

机(SVM)2种方法均实现了平均识别率85%以上的局放信号识别。宋雨轩等<sup>[28]</sup>则通过在GIS中内置Michelson光纤超声传感器,结合由数字比例积分微分控制的光纤相位反馈系统,实现对8.8 pC的尖端放电、15.3 pC的自由颗粒放电以及53.5 pC的沿面放电监测,为多放电类型识别与监测提供有力支撑。在实际应用中,低频信号使干涉型光纤传感器初始相位随机变化,张猛等<sup>[29]</sup>据此提出基于相位跟踪反馈的抗干扰方法,并通过实验验证其能够有效抑制1.8 kHz以下低频噪声影响。陈荣等<sup>[30]</sup>则基于Michelson干涉仪,通过双回路反馈的形式,有效降低了振动引起的工作点漂移以及单次反馈累积的低频相位波长,实现对最低视在放电量5.2 pC局放声信号的监测。胡庆雄等<sup>[31]</sup>基于分布式弱反射光栅传感器,并结合长短期记忆网络变换(LSTM)实现对GIS局放的精确监测,并较传统算法有效提升信噪比7.0 dB。光纤传感器在开关柜与GIS监测中的应用如表5所示。

表5 光纤传感器在开关柜与GIS监测中的应用

监测内容	物理量	监测技术	监测性能	参考文献
开关柜温度	温度	FBG/分布式光纤	触头、接电测温,精确监测温度	[23]、[24]
		荧光光纤	实时采集开关柜各触头、接头温度	[25]
GIS局部放电	超声波	EFPI	灵敏度为PZT的2倍	[26]
		EFPI+PNN/SVM	实现平均识别率85%以上的局放信号识别	[27]
		Michelson干涉	实现8.8 pC的尖端放电、15.3 pC的自由颗粒放电及53.5 pC的沿面放电监测	[28]
		Michelson干涉	实现对最低视在放电量5.2 pC局放声信号监测	[30]
		分布式弱光栅传感器+LSTM	实现局放的精确监测,提升信噪比7.0 dB	[31]

光纤传感器通过对开关柜关键节点温度的实时监测,可让工作人员及时发现触头、接头过热问题,避免烧蚀引发的开关柜故障;而对GIS局放信号的高精度监测,有助于提前识别绝缘劣化趋势,防止内部放电影响GIS正常运行,有力保障了电网配电环节安全稳定运行。对于光纤传感器在开关柜以及GIS中的应用,在温度测量中,感光型光纤测温技术因参数交叉敏感问题,可靠性较差,应用上需进一步提升参数分离能力,提高技术可靠性。而传光型光纤测温技术则存在感温材料自身灵敏性以及与光纤耦合的问题,导致测温灵敏度仍有不足,需进一步研究更合适的感温材料,提高测温灵敏度。局放监测方面,低频信号会对传感器监测造成不良影响,虽已有研究证明可减少相应影响,但仍需进一步提升测量的抗噪声性能。

### 2.3 架空输电线路监测

架空输电线路是电网远距离电能输送的核心载体,多穿越丘陵、山区等复杂地理环境,舞动和覆冰是其最主要的自然灾害故障:覆冰会导致线路载荷骤增,而覆冰导线在风的激励下产生的低频、大振幅舞动,会引发导线断线、铁塔倒塌,进一步加剧线路损伤,甚至引发相间短路。传统覆冰与舞动监测手段受环境限制,定位精度低,无法实现长距离实时监测,光纤传感技术可依托目前输电线路中广泛应用的光纤复合架空电缆(OPGW)所配备的冗余光纤,实现对架空输电线路覆冰与舞动的长距离、无盲区、多参量监测。

针对输电线路舞动的监测,可将光纤光栅传感器分层布置在导线部位,通过应变获取振动信号,从而直接获得导线舞动情况,但难以获得大范围的导线舞动情况<sup>[32]</sup>,因此针对大范围舞动监测常使用分布式光纤传感器。分布式光纤传感器中常使用偏振光时域反射(POTDR)技术进行舞动监测,也可利用 $\varphi$ -OTDR传感技术实现对线路舞动的识别与监测<sup>[33]</sup>。李为等<sup>[34]</sup>提出一种基于矢量孤子偏振解调原理的光纤扭转传感器,利用时域拉伸-色散傅里叶变换技术,能够对架空输电线路扭转信息进行快速解调,并通过实验证明

该扭转传感器扭曲灵敏度为  $0.36 \text{ nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 。实际情况中, 输电线路舞动与扭转常相互耦合, Zhai 等<sup>[35]</sup>设计了一种基于 FBG 的三臂悬梁结构传感器, 通过 4 只 FBG 的差分配置, 实现同时监测并解耦输电线路舞动与扭转, 舞动灵敏度达  $9.95 \times 10^{-3} \text{ nm}/\text{cm}$ , 扭转灵敏度达  $7.21 \times 10^{-3} \text{ nm}/\text{rad}$ , 为输电线路实际的复杂情况监测提供了一定的技术基础。

冬季线路覆冰厚度与线路温度、应变呈显著相关性, 可使用分布式光纤传感器(如 BOTDA、BOTDR)对温度和应变进行监测, 进而反映输电线路覆冰情况, 实现对输电线路覆冰长距离、连续、高精度监测<sup>[36-37]</sup>; 还可通过在输电线路沿段布置多个光纤光栅传感器, 监测输电线路应变变化情况, 从而间接实现覆冰情况监测, 该方法目前能够实现 100 km 长距离监测, 但所需传感器数量多、成本高, 仍需进一步改进<sup>[38]</sup>。Jia 等<sup>[39]</sup>研究了基于分布式光纤传感技术的输电线路导线振动与应力信号采集方式, 实现对输电线路各类覆冰问题的精确监测, 其中冻雨型与混合雾凇型覆冰监测准确率达 98%, 湿雪型覆冰准确率达 97%。光纤传感器在架空输电线路监测中的应用如表 6 所示。

表 6 光纤传感器在架空输电线路监测中的应用

监测内容	物理量	监测技术	监测性能	参考文献
舞动	振动	光纤传感	扭曲灵敏度为 $0.36 \text{ nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	[34]
		FBG	舞动灵敏度达 $9.95 \times 10^{-3} \text{ nm}/\text{cm}$ , 扭转灵敏度达 $7.21 \times 10^{-3} \text{ nm}/\text{rad}$	[35]
覆冰	应变	FBG	能够实现 100 km 长距离监测	[38]
	振动+应变	分布式光纤	冻雨型与混合雾凇型覆冰监测准确率达 98%, 湿雪型覆冰准确率达 97%	[39]

光纤传感器的应用实现了对架空输电线路舞动、覆冰等故障的全维度监测与故障精准定位, 为线路检修、融冰等提供精确依据, 切实保障了电网远距离输送的安全性与可靠性。目前, 光纤传感器在架空输电线路的应用还存在传统光谱分析仪扫描检测速度低且成本高昂、覆冰舞动机理复杂、实际参数与理想参数间不协调等问题, 还需要对解调方式进一步优化, 以降低成本, 并且建立准确机理模型, 为状态监测的准确性提供基础。

## 2.4 电缆监测

电缆, 尤其是埋地电缆, 具有隐蔽性、安全性、稳定性等特性, 被广泛用于城市配电网中, 主要起到传输电能与电信号的作用, 其故障监测与定位长期以来是行业技术痛点。电缆过热多由负载过大、接触电阻过大、绝缘老化等因素引发, 过热会加速电缆绝缘劣化, 最终引发绝缘击穿。分布式光纤温度传感器, 如基于 BOTDR、BOTDA 技术的传感器, 可通过短路电流的热效应, 实现对电缆全长度的连续温度监测, 有效识别热点所在位置, 在实际应用过程中, 可将 BOTDR 与 BOTDA 结合使用, 以达到更好的温度监测效果<sup>[40-41]</sup>。通过基于拉曼散射的分布式光纤传感器, 结合 ZigBee 无线传感网络与 Labview 监测系统, 可实现对电缆温度的实时监测、数据处理与故障预警<sup>[42]</sup>。

局部放电是电缆绝缘劣化的关键指标与重要征兆, 多产生于电缆接头、终端等薄弱部位, 并且局部放电会产生宽频带的超声和振动信号。目前, 光纤光栅式、分布式以及干涉型光纤传感器均可用于电缆局放监测中。光纤光栅式传感器可通过 FBG 对局放导致的温度变化进行监测, 从而实现对局放进行识别与监测。分布式光纤传感器(如  $\varphi$ -OTDR)则主要通过检测局放发生时产生的振动信号, 结合差值低消法、小波包法等进行振动信号去噪, 经过解调后对局放进行高精度度监测与识别<sup>[43-44]</sup>。干涉型光纤传感器主要对局放产生的超声信号进行监测。传统压电传感器监测微弱局放存在盲区, 针对该问题, 郭小凯等<sup>[45]</sup>基于 Sagnac 干涉光纤传感器, 采用一个光纤环路形成共路径光纤干涉仪, 有效抵消低频信号对干涉的影响, 能够测量由电测法校准的最大放电量为 738 pC 的超声脉冲。邢超等<sup>[46]</sup>通过引入声光调制器

与 RF 相位增益检波器的解调方案,设计干涉型超声探头,比传统 PZT 方法具有更低的检测下限与更高的超声信号检测,有效验证了光纤传感器局放监测相较于传统 PZT 法具有显著优势。郝宇杰等<sup>[47]</sup>通过设计啁啾脉冲调制  $\varphi$ -OTDR 系统,采用频分复用技术,实现了对电缆局放的精准定位,并且后向瑞利散射信号信噪比提升了 12.2 dB,超声信号检测信噪比提升了 4.1 dB,采样频率提升至 100 kHz。光纤传感器在电缆监测中的应用如表 7 所示。

表 7 光纤传感器在电缆监测中的应用

监测内容	物理量	监测技术	监测性能	参考文献
电缆过热	温度	分布式光纤 + Zigbee + Lab-view	对电缆温度的实时监测、数据处理与故障预警	[42]
局部放电	超声信号	Sagnac 干涉	能够测量最大放电量 738 pC 的超声脉冲	[45]
		干涉光纤传感 + 声光调制器 + RF 相位增益检波器	具有更低检测下限与更高超声信号检测	[46]
		$\varphi$ -OTDR 技术	后向瑞利散射信号信噪比提升了 12.2 dB, 超声信号检测信噪比提升了 4.1 dB, 采样频率提升至 100 kHz	[47]

光纤传感器在电缆中的应用不是单一参数堆叠,而是声-热多维信息深度耦合,能够对电缆过热热点和局部放电精确定位,并提前预警电缆绝缘劣化、过热击穿等风险,有效避免因电缆故障引发的城市配电网停电、电缆起火等事故,保障城市配电网安全稳定运行。为使光纤传感器在电缆中更好地工作,可进一步针对传感器超声灵敏度较低、分布式检测中“距离-带宽积”存在制约关系、点式探测组网困难、难以实现无盲区监测等问题进行深入研究,以期对电缆监测进一步赋能。

## 3 光纤传感器的技术挑战与发展方向

### 3.1 核心技术挑战

目前,光纤传感器在电力设备智能监测的应用虽已有良好发展,但仍面临一些技术挑战:

一是成本与标准化问题。目前,光纤传感器核心部件成本居高不下,元器件面临供应长期不稳定的问题,并且复杂系统集成管理能力仍存在显著短板,限制了其大规模的应用<sup>[48]</sup>。此外,缺乏统一的行业标准也阻碍了不同产品与系统的互联操作。

二是环境适应性与长期稳定性问题。电力设备运行环境复杂多变,包括高低温、高湿、强电场、机械振动和化学腐蚀等。光纤传感器及其封装材料需要在这些恶劣环境下保持长期稳定性和可靠性<sup>[49]</sup>。例如,在高温环境下高温大应变光纤传感器涂覆层老化、胶黏剂失效等问题,可能导致传感器性能衰退或脱落<sup>[50]</sup>;阵列复用形式对光纤传感器阵列光路可靠性有显著影响,仍需要优化设计以提高阵列可靠性<sup>[51]</sup>。

三是参数交叉敏感度问题。由于大部分光纤对温度和应变都具有较高敏感度,两者间容易相互影响,从而导致监测结果误差较大。算法优化与硬件补偿是目前工程上的普适性解决方案,但部分算法的基础仍是传感器采集的数据,因此如何从传感机理层面根本性抑制交叉敏感仍需进一步深入研究<sup>[52]</sup>。

除上述问题外,还有光纤传感器多参数集成、高效数据处理、优化传感器的复用技术等系列问题仍需研究者深入研究,才能让光纤传感器在为未来电力设备智能监测中发挥更大效能。

### 3.2 未来发展方向

随着技术的不断进步,未来光纤传感器在电力设备监测的发展将聚焦于以下方面:

一是新型光纤传感材料与结构。通过开发更高灵敏度、更宽测量范围、更好环境适应性的光纤传感器材料与结构,包括研发对温度、压力、化学等因素响应更灵敏的材料,如耐腐蚀的改性聚亚酰胺材料、纳米陶瓷涂层材料等,能够有效帮助光纤传感器在各种环境中保持长期稳定性和可靠性,并提升其功能特

性<sup>[53]</sup>；也可积极推动传感器封装技术优化，减少封装对传感器带来的不利影响。

二是模块化与标准化。要加大基础研究和共性技术研发投入并推进供应链优化，如推动企业为主导、高校和科研院所深度参与的研发机制，共同攻克技术壁垒，以降低核心成本。此外，积极推广光纤传感器模块化与标准化的设计理念，如设置标准化体系，规定光纤传感器在接口形态、通信协议等方面的最低兼容性要求，为光纤传感器大规模复用与组网提供基础。同时，也能提高光纤传感器的互换性与可维护性，促进技术的普及应用。

三是多参数融合感知。随着电力设备的不断发展，多参数融合感知已成为光纤传感器发展的一条重要路径。通过光纤不同模式下有效折射率不同，或不同传播路径下光的相位差产生的模式干涉，传感器能够实现多参数(如温度、应变等)同时测量，可满足未来电力设备更加全面的监测需求<sup>[54]</sup>，如实现局放的多方位监测，架空输电线舞动、扭转、应变等多参数测量。

四是同深度学习算法、物联网等新兴领域结合。光纤传感器目前已同传统机械学习相结合，但其依赖于手工特征提取，可能导致信息缺失与模型性能限制，并且在处理高维数据时可能面临“维度灾难”，影响信息准确度。深度学习算法的引入可帮助光纤传感器提高系统适应性与模型泛化能力，如 CNN 与循环神经网络的使用可实现特征融合，提高适应能力，而生成对抗网络可提高泛化能力，并满足复杂工业环境的多样性需求<sup>[55]</sup>。通过与边缘计算技术结合，在靠近传感器端进行数据预处理与技术分析，能够减轻中心服务器负担，提高响应速度<sup>[56]</sup>。同时，将光纤传感器系统与物联网相融合，将光纤传感器设置在物联网关键节点，有利于关键节点状态实时感知与数据传输，帮助物联网提高效率<sup>[57]</sup>，能够为电力设备智能监测进一步赋能。

目前，光纤传感器的技术挑战与未来发展方向如图 5 所示。

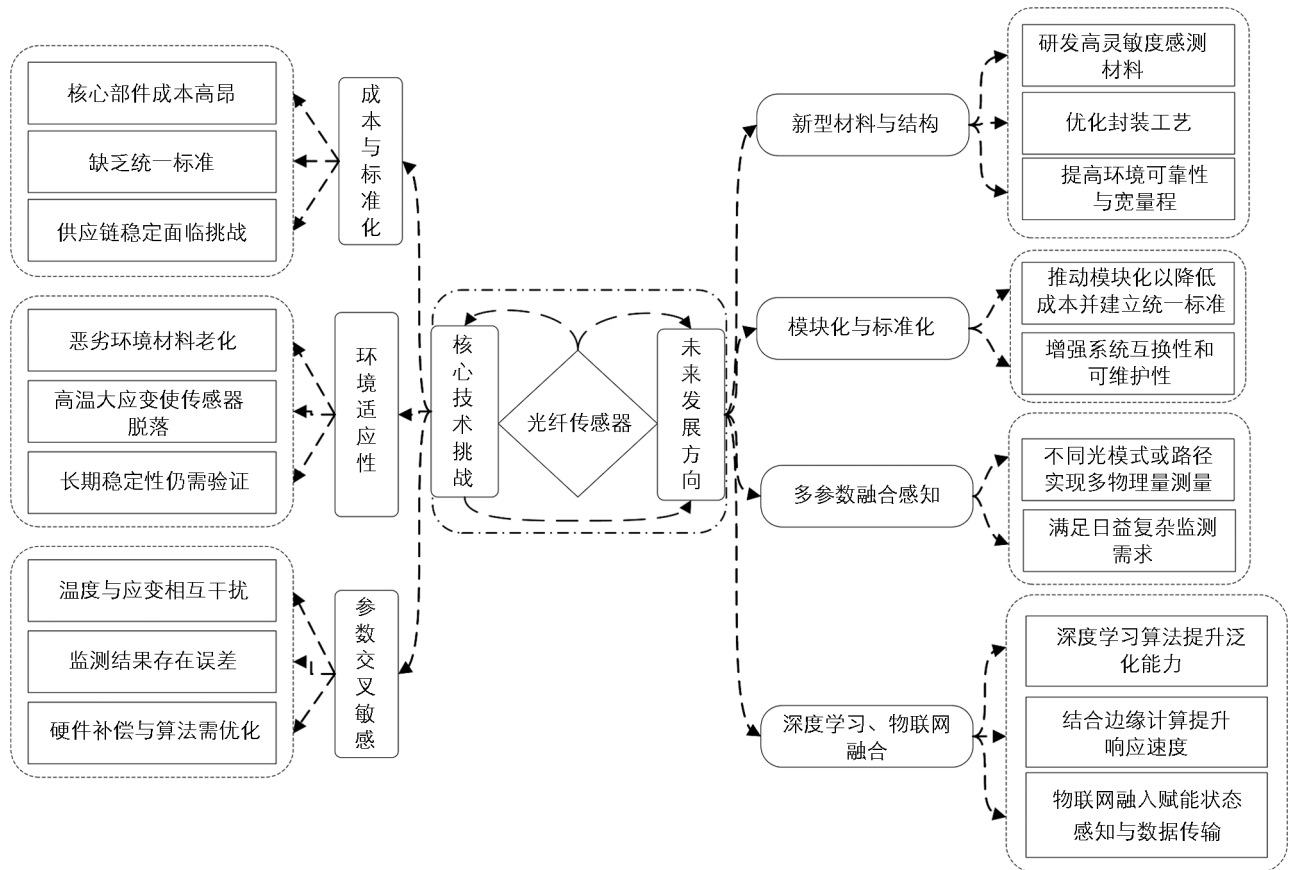


图 5 光纤传感器的技术挑战与未来发展方向

## 4 结语

本文系统综述了光纤传感技术在电力设备智能监测领域的研究进展。首先,阐述了FBG、分布式光纤传感及干涉型光纤传感等核心技术的传感机理与性能特点;然后,重点分析了其在变压器绕组温度与油中溶解气体监测、开关柜局部放电监测、GIS多物理场感知、输电线路覆冰与舞动监测及电缆本体温度分布监测等典型场景中的应用现状与关键技术;最后,针对传感可靠性、长期稳定性、多参量融合及系统集成等当前面临的主要挑战进行了深入剖析。研究表明,光纤传感器凭借其抗电磁干扰、电气绝缘、分布式测量及本征安全等独特优势,已成为电力设备状态感知与故障预警的核心技术手段之一,在保障电网安全稳定运行中发挥着不可替代的作用。

尽管当前技术在极端环境适应性、多物理场耦合解耦、海量数据智能处理及全寿命周期成本优化等方面仍存在瓶颈,但随着新型功能光纤材料、边缘智能算法及深度学习算法的持续突破,光纤传感技术正朝着多参量协同感知、自诊断自校准、与一次设备深度融合的方向演进。未来,面向新型电力系统的建设需求,光纤传感器将与物联网、人工智能及电力电子等技术深度融合,构建“感知-传输-诊断-决策”一体化的电力设备智能监测体系,为电网设备的全景状态感知、主动预警防控及智慧运维决策提供更加坚实的技术支撑,助力电力系统向高可靠、高弹性、高智能化方向转型升级。

### 参考文献:

- [1] 何军,侯炎伦,王妮,等. 电力企业安全生产防控技术分析[J]. 中国高新科技, 2025(6): 35-37.
- [2] 魏建波,杨忠玉. 电力自动化设备故障原因分析及维修对策的研究[J]. 家电维修, 2025(5): 146-148.
- [3] 何辰靖,李志波,赵强. 光纤布拉格光栅应变传感器应用综述[J/OL]. 光通信研究, 1-9 [2026-02-05]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1266.TN.20241218.0826.002>.
- [4] LEVINA T M, BILALOVA D N. Methods of Diagnostics of Electrical Equipment by Fiber-Optic Sensors on the Faraday Effect [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1155(1): 012053.
- [5] 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.
- [6] 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/OL]. 光通信研究, 1-16 [2026-01-29]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1266.TN.20250530.1328.004>.
- [7] 叶子帆,邓威航,陈帅君. 光纤振动传感技术在电力设备在线监测中的应用与研究进展[J]. 电工技术, 2025(3): 7-11, 16.
- [8] 樊卓杨,吴超,王霞. 光纤传感技术在电力设备监测领域的研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(10): 1-12.
- [9] 李贤良,唐毅博,詹江杨,等. 光纤光栅传感器在变压器多参量智能监测中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 154-160.
- [10] 张际,刁杨华,范洵,等. 基于光纤传感技术的变压器高温区域典型热源定位[J]. 粘接, 2024, 51(11): 170-174.
- [11] NILAKANTA MEITEI S, BORAH K, CHATTERJEE S. Review on Monitoring of Transformer Insulation Oil Using Optical Fiber Sensors [J]. Results in Optics, 2023, 10: 100361.
- [12] 张知先,雷嘉丽,陈伟根,等. 基于多参量光纤F-P传感的变压器局部放电与油温传感方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 58-65.
- [13] 张石,张博,夏晖,等. 基于分布式光纤传感器的变压器油温度实时监测研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(8): 153-157.
- [14] SUN S Z, MAO Y H, DENG M, et al. Research on Fiber Bragg Grating Based Composite Sensing of Flow Velocity and Temperature in Oil Immersed Transformers [J]. Measurement Science and Technology, 2026, 37(1): 015110.

- [15] AKRE S, FOFANA I, YÉO Z, et al. On the Feasibility of Monitoring Power Transformer's Winding Vibration and Temperature along with Moisture in Oil Using Optical Sensors [J]. *Sensors*, 2023, 23(4): 2310.
- [16] 晋成凤, 卞全, 沈瑶宇, 等. 光纤测温在变压器热点监测中的应用研究 [J]. *电力系统装备*, 2025(8): 9-11, 31.
- [17] 陈子明, 曹晓晖, 陈啟豪, 等. 基于分布式光纤传感的变压器绕组变形超声检测方法 [J]. *机械制造与自动化*, 2025, 54(1): 212-217.
- [18] 刘云鹏, 李欢, 高树国, 等. 分布式光纤传感在大型变压器温度和绕组变形监测中的应用研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(16): 6126-6135.
- [19] 俎树英. 分布式光纤传感支持下的变压器绕组变形检测方法分析 [J]. *设备监理*, 2024(3): 62-65.
- [20] 刘峰, 史衍省, 张帅男, 等. 基于 F-P 光纤传感器的变压器油中双局部放电源定位研究 [J]. *电工电能新技术*, 2024, 43(8): 1-9.
- [21] QIAN G C, CHEN W G, WU K J, et al. Research on Transformer Omnidirectional Partial Discharge Ultrasound Sensing Method Combining F-P Cavity and FBG [J]. *Sensors*, 2023, 23(24): 9642.
- [22] 杨威, 吴明孝, 石磊, 等. 高压开关柜触头温度监测技术的研究综述与展望 [J]. *电工电气*, 2022(6): 1-7, 13.
- [23] 邢翔宇, 尤宏伟, 王森, 等. 光纤光栅传感器在煤矿 35 kV 开关柜中温度监测的应用研究 [J]. *当代化工研究*, 2024(24): 128-130.
- [24] 刘少泽, 雒浪, 蓝文军, 等. 开关柜电气接点温度监测技术的分析与应用 [J]. *科学技术创新*, 2021(34): 23-25.
- [25] 徐明磊, 闫建成, 丛林. 荧光光纤测温在开关柜重要节点测温的应用 [J]. *电子元器件与信息技术*, 2024, 8(2): 112-115.
- [26] 王赞, 郑理威, 陈忠贤, 等. 基于光纤 EFPI 传感器的 GIS 局部放电研究 [J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(2): 67-75.
- [27] WANG Z, LIU Z Q, QIAO L L, et al. Research on Partial Discharge Pattern Recognition in GIS Based on EFPI Sensor [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2024, 19(1): 577-584.
- [28] 宋雨轩, 陈伟根, 张知先, 等. 基于光纤迈克尔逊干涉仪的 GIS 内置局部放电超声传感技术 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(8): 3088-3097.
- [29] 张猛, 周宏扬, 马国明, 等. 光纤 GIS 局放超声检测系统相位反馈控制 [J]. *高电压技术*, 2020, 46(12): 4138-4145.
- [30] 陈荣, 李松原, 贺春, 等. 基于双回路反馈的光纤干涉式 GIS 局部放电超声传感系统研究 [J]. *高压电器*, 2024, 60(8): 99-105, 112.
- [31] 胡庆雄, 罗金文, 刘绍勇, 等. 基于弱反射光纤光栅长期记忆网络变换的 GIS 局部放电监测 [J]. *光学与光电技术*, 2025, 23(4): 57-61.
- [32] 蔡吉磊, 杨现鑫. 光纤光栅传感器在输电线路监测中的应用 [J]. *光源与照明*, 2025(10): 36-39.
- [33] 王敏学, 李黎, 周达明, 等. 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, 45(9): 3591-3600.
- [34] 李为, 邓建中, 曾嘉, 等. 基于脉冲激光快速响应传感的输电线路监测系统 [J]. *自动化技术与应用*, 2025, 44(6): 117-121.
- [35] ZHAI T, ZHANG W, WU J H, et al. Fiber Bragg Grating-Based Sensing System for Real-Time Monitoring of Galloping and Torsional Behavior in Overhead Transmission Lines [J]. *Optics Express*, 2025, 33(20): 42711-42724.
- [36] 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, 43.
- [37] 许志成. 输电线路覆冰监测与智能融冰技术的应用 [J]. *光源与照明*, 2025(10): 218-220.
- [38] 张毅, 程正军, 刘洋. 输电线路覆冰在线监测研究进展与发展趋势 [J]. *电力大数据*, 2024, 27(6): 32-42.
- [39] JIA B Y, XIA Y W, LIU H L, et al. Online Sensing Method for Transmission Line Conductor Ice Cover Based on Fiber Optic Sensing Information Fusion and Continuous Wavelet Decomposition [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024,

56(9): 1418.

- [40] 常恩山. 基于光纤传感器的 OPPC 在线实时监测系统研究 [J]. 环境技术, 2023, 41(5): 113-119.
- [41] 王牧, 高有伦, 陈春银, 等. 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.
- [42] 张雨婷. 基于拉曼分布式光纤传感的高压电缆温度监测研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [43] 韩毓. 基于光纤振动传感技术的电缆放电故障检测 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2022.
- [44] 曹靖. 基于分布式光纤振动传感的高压电缆局部放电在线监测 [J]. 机电工程技术, 2025, 54(8): 168-172.
- [45] 郭小凯, 孙廷玺, 陈浩. 基于萨格奈克光纤传感技术的电缆接头局部放电声测法检测技术研究 [C] // 全国第十一次电力电缆运行经验交流会论文集. 北京: 中国电力科学研究院, 2020: 217-221.
- [46] 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.
- [47] 郝宇杰, 张红娟, 高妍, 等. 基于分布式光纤传感的电缆局部放电检测系统研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2025(2): 57-62.
- [48] 湛玉新. 光纤传感器技术在高科技产业中的应用与发展 [J]. 高科技与产业化, 2025, 31(7): 61-63.
- [49] 李天梁, 郭金秀, 吴冬健, 等. 基于光纤传感的极端环境下装备制造与运行状态监测技术现状与发展 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(8): 27-53.
- [50] 谭跃刚, 崔任鑫, 刘繁. 高温大应变光纤传感器性能劣化观测与失效机理分析 [J]. 光通信技术, 2021, 45(9): 15-19.
- [51] 林琳, 赵二刚, 陈小宝. 组阵复用方式对光纤传感器阵列光路可靠性影响研究 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2025(4): 13-16.
- [52] SUN Y T, MA H Z. Progress of Fiber Bragg Grating Sensors in State Perception of Electrical Equipment [J]. Measurement, 2023, 222: 113691.
- [53] TUV A L, AKATOV M S, OPEKUNOVA A A, et al. Overview of Fiber Optic Sensor Applications [C] // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), January 29-31, 2024, Saint Petersburg, Russian Federation. IEEE, 2024: 91-94.
- [54] 魏长胜. 基于干涉原理的光纤多参量传感技术研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
- [55] 史一凡, 冒燕, 徐小强, 等. 基于机器学习的光纤传感技术研究进展 [J]. 激光技术, 2025, 49(6): 882-892.
- [56] 康宇昊. 边缘计算在输电线路监测通信组网中的应用分析 [J]. 技术与市场, 2024, 31(11): 50-53, 60.
- [57] 何春燕, 费莉, 郑秋菊. 基于光纤通信的物联网关键节点状态实时感知研究 [J]. 激光杂志, 2025, 46(2): 179-184.

责任编辑 柳剑