

分布式光纤超声传感器用于检测电缆接头放电故障

陈浩¹, 徐阳^{1*}, 钱森², 陈川², 郭经红², 苏磊³¹西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;²全球能源互联网研究院电力传感技术研究所, 北京 102209;³伦敦玛丽女王大学工程和材料学院, 伦敦 E1 4NS

摘要 光纤传感技术的长距离传输和分布式检测的优势在电缆线路的状态监测领域具有很大的应用价值。利用相位敏感型光时域反射仪(Φ -OTDR)对电缆接头故障诊断中的局部放电进行研究。瑞利散射相干光信号具有随机特性,其方差变量可作为弱小超声信号的检测量。在电缆局部放电实验中,将 5 个光纤环传感器绕制在电缆接头上特定的超声监测点,以此来验证 Φ -OTDR 系统的分布式定位检测能力。实验同时对比了局部放电的电测法和光纤声测法的信号特征,并利用压电传感器来校正 5 个光纤环传感器的位置,以验证 Φ -OTDR 分布式光纤超声传感器在局部放电测量中的特性。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 光时域反射仪; 瑞利散射

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0306001

Distributed Fiber-Optic Ultrasonic Sensor Applied in Detection of Discharging Fault of Power Cable Joint

Chen Hao¹, Xu Yang^{1*}, Qian Sen², Chen Chuan², Guo Jinghong², Su Lei³¹State Key Laboratory of Power Equipment and Electrical Insulation, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;²Department of Sensing Technology for Electric Power, Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China;³School of Engineering and Materials Science, Queen Mary University of London, London E1 4NS, UK

Abstract The optical fiber sensing technology has the advantages of long-distance transmission and distributed detection, therefore having great application potential in the field of cable line condition monitoring. In this paper, a phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ -OTDR) is used to interrogate partial discharges in the fault diagnosis of power cable joints. By virtue of stochastic features of the Rayleigh scattering coherent signal, the signal variance is chosen as a detection quantity of the weak ultrasonic signal. In the partial discharge experiment, five fiber loop sensors were wrapped around some ultrasonic monitoring points on the cable joint, to prove the distributed locating capability of the Φ -OTDR system. The signal characteristics of the electrical measurement method and fiber-optic acoustic measurement method for local discharge were compared, and the positions of the five fiber loop sensors were calibrated by a piezoelectric sensor, which verified the features of the Φ -OTDR distributed ultrasonic fiber sensors in partial discharge measurements.

Key words fiber optics; fiber-optic sensors; optical time domain reflectometry; Rayleigh scattering

OCIS codes 060.2370; 120.4825; 290.5870

收稿日期: 2020-04-24; 修回日期: 2020-08-15; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(51577149)、国家重点研发计划(2016YFB0900704)

* E-mail: xuyang@xjtu.edu.cn

1 引言

将泛在物联网技术融入电网的各层级应用是构建自动化和高效互联的智能电网体系的基础支撑。光纤传感技术在过去的 40 年中是传感测量领域的研究热点,它结合了光纤特有的可对多物理量进行感知和可进行远距离高速通信的能力。相比于电学传感器,光纤传感器在电力设备的现场监测中具有不易受到电磁干扰的技术优势,并且在变压器的油中局部放电、油温、油中溶解气体监测^[1-2],陆地电缆的分布式测温 and 动态载流量监测^[3],海底电缆的锚害监测^[4],架空线(尤其在新敷设的光缆复合架空地线)的分布式测温^[5],覆冰引起的线缆应力应变监测^[6-7],以及高空风速引起的架空导线舞动监测^[8]等方面得到应用。电缆线路的长距离和分布式特点特别适合光纤传感技术发挥其传和感一体的优势。电缆运检阶段的定期诊断测试通常采用局部放电实验来评估电缆运行中可能提前发现的绝缘缺陷,局部放电产生的瞬态脉冲形式的超声波可被用来对缺陷进行无损检测和定位^[9]。Juarez 等^[10]最早发现相位敏感型光时域反射传感技术(Φ -OTDR)可对人走过地面产生的压力波进行检测,地理光纤传感具有非常高的灵敏度并且能完全分布式地给出光纤沿线的扰动模式。蔡海文等^[11]综述了相干瑞利散射应用于分布式光纤声波传感的技术进展和瓶颈,该技术在传感系统的性能提升和面对不同应用领域的设计优化方面还存在诸多亟待解决的重要问题^[12]。Rohwetter 等^[13]研究了商业化的 Φ -OTDR 产品在电缆绝缘局部放电超声检测中的应用,该产品能检测到超过 1 nC 的等效放电量。Bao 等^[14]综合分析了基于瑞利散射效应的 Φ -OTDR 分布式光纤传感技术检测微弱超声波的灵敏度限制条件和增大其响应带宽的技术途径。对电缆中的局部放电超声进行分布式测量是电缆行业的实际需求, Φ -OTDR 光纤传感具有高灵敏度和在远距离传感范围内进行全分布式检测的能力,有可能为电缆局部放电的超声检测提供一种切实可行的技术解决途径。然而, Φ -OTDR 系统在提高检测灵敏度和增大响应带宽以利于提取局放信号特征、解决 Φ -OTDR 的空间分辨率和探测距离之间的矛盾^[15]、抑制激光器相位噪声和光纤中的相干瑞利噪声(CRN)、区分局部放电产生的超声信号和外界环境的声波扰动等方面^[16]的性能还有待提高。本文利用 Φ -OTDR 光纤传感系统对电缆接头局部放电产生的超声波进行分布式定

位检测;分析了 Φ -OTDR 的定位区间并选取随机信号方差作为定位检测参量;设计了 Φ -OTDR 的相干检测回路以对电缆接头上布置的 5 个光纤环传感器进行定位、检测,通过局部放电实验来验证 Φ -OTDR 系统对宽频带弱信号的检测能力,并对 Φ -OTDR 光纤传感和局部放电的电测法得到的超声信号的特征进行对比分析,最后还用电信号驱动压电传感器以对 Φ -OTDR 系统中的光纤环传感器进行定位校正。

2 Φ -OTDR 光纤传感对超声信号的定位检测

2.1 Φ -OTDR 定位区间分析

Φ -OTDR 光纤传感技术用到了高相干度的窄线宽或单频激光器,这导致瑞利散射光(RBS)在不同散射中心之间的相位差也被计算到光纤检测端口探测的瑞利散射光信号中。这种依赖于局部散射点相位变化的光纤 Φ -OTDR 技术可被用于多种物理量扰动的分布式传感测量。由于其内在的本征干涉效应, Φ -OTDR 传感技术具有很高的灵敏度,尤其适用于振动、超声波这类产生动态形变的状态检测。

OTDR 技术的一项关键参数是空间分辨率,其定义为 $W=c\tau/2n$,其中 c 和 n 分别是真空中的光速和光纤芯层的折射率, τ 是脉冲探测光的脉冲宽度。 Φ -OTDR 通常采用声光调制器或电光调制器生成光脉冲,其脉冲上升时间一般在 ns 数量级,因此 Φ -OTDR 中所用的光脉冲宽度一般为几十 ns,则空间分辨率至少在 m 数量级。但是电气设备的缺陷尺寸一般在 mm 数量级,局部放电产生微弱的声发射信号,其声波的有效传播距离由于介质衰减的影响一般在 1 m 内。利用 Φ -OTDR 技术检测超声波的原理如图 1 所示,图 1 给出了光纤中受到脉冲光照射的一段空间分辨单元(宽度为 W)内部瑞利散射光的干涉过程。瑞利散射光指散射中心尺度远小于光波波长(单模光纤的常规通信波段是 $1.55 \mu\text{m}$)的散射光, W 宽度区段内包含了数量巨大的散射点,这些散射中心产生的瑞利散射光都会对在光纤端口检测的散射光信号有所贡献,而其中只有部分区段的光纤受到超声波的扰动,该区段在图 1 中表示为区间 $[z_0, z_0 + \Delta]$ (其中 Δ 为超声波作用范围),只有在该区间内产生的散射光才会携带超声波传感参量信息。

瑞利散射光的场强可以表示为^[17]

$$E_{\text{RBS}} = E_0 \exp(-2\alpha z_0) \sum_{k=1}^M r_k \exp(j\varphi_k) = E_0 \exp(-2\alpha z_0) \cdot A \exp(j\phi), \quad (1)$$

式中： E_0 为入射光场强； α 为光纤的衰减系数； z_0 为超声波作用的起始位置； r_k 和 φ_k 分别为第 k 个散射点的散射系数和相位； A 和 ϕ 分别为通过对复数进行求和得到的合成幅值和相位。不同散射光之间相互干涉的叠加场满足

$$A^2 = \sum_{k=1}^M r_k^2 + 2 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M r_i r_j \cos(\varphi_i - \varphi_j), \quad (2)$$

$$\tan \phi = \frac{\sum_{k=1}^M (r_k \sin \varphi_k)}{\sum_{k=1}^M (r_k \cos \varphi_k)}. \quad (3)$$

(2)式等式右边第一项是散射光的非相干叠加项,第二项是相干叠加项,它和任意两个散射点之间的相位差有关。

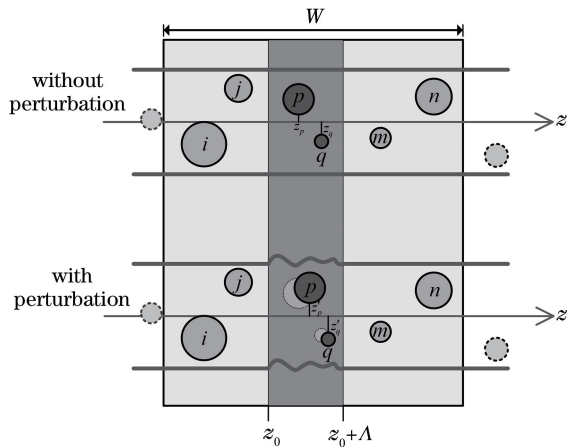


图 1 基于光纤中瑞利散射光干涉效应的超声检测

Fig. 1 Ultrasonic detection based on interferometric effect of Rayleigh scattering light in optical fiber

如图 1 所示,当光纤的 $[z_0, z_0 + \Delta]$ 区段受到超声扰动时,该段光纤发生微小的形变,导致其内部的各个散射点之间的相对位置都发生变动,比如,标签为 p 的散射点的坐标位置由 z_p 变为 z'_p ,标签为 q 的散射点的坐标由 z_q 变为 z'_q ,这导致这两个散射点之间的光程差发生变化。但是,其他没有进入超声波作用范围的光纤区段则不会有变化。所以(2)式右边的相干叠加项应当被分为 3 个子集,如图 1 所示,子集 A 的散射点序号用 i, j 表示,位于光纤空间分辨宽度(W)内受到超声作用前的区段,所有包含 $\cos(\varphi_i - \varphi_j)$ 的叠加项是不含有超声扰动信息的;子集 B 的散射点序号用 m, n 表示,位于光纤空间分辨宽度(W)内超声作用后的区段,类似于子集 A,那些 $\cos(\varphi_m - \varphi_n)$ 的叠加项也不会提供超声信息;子集 C 就是在超声作用区段以内的所有散射点,其序号用

p, q 表示,受到扰动后,这些散射点的位置发生变化,所以,其余的干涉叠加项,包括 $\cos(\varphi_p - \varphi_q)$ 、 $\cos(\varphi_p - \varphi_i)$ 、 $\cos(\varphi_p - \varphi_m)$ 都会包含探测超声波信号。从上面的分析可知:1) Φ -OTDR 光纤传感测量的是整个空间分辨单元内的所有瑞利散射光信号的总体贡献,即使扰动区段 $\Delta < W$;2) 利用 Φ -OTDR 进行分布式测量和定位得到的超声扰动位置范围要比真实的超声作用范围更宽。这是因为,如图 1 所示,在探测脉冲光的前边沿刚进入超声扰动区域时,就会检测到瑞利散射光的变化;同样地,在探测脉冲光的后边沿即将离开超声扰动区域时,也会检测到散射光的变动信号。所以,在光纤进端检测到的瑞利散射光的变化区间是 $[z_0 - W, z_0 + \Delta]$,大于并且超前真实的超声扰动区间 $[z_0, z_0 + \Delta]$ 。

2.2 Φ -OTDR 定位检测参量

单模光纤中的瑞利背向散射光是极微弱的,其光功率大约要比入射光功率低 4 个数量级。采用相干检测方法^[18]可以提高检测散射光信号的信噪比。相干检测法中由平衡差分放大电路得到的电信号具有下面的形式:

$$s(t) = 2GRE_{\text{L0}}E_0A_s(t)\cos[\omega_{\text{IF}}t + \phi_s(t) + \phi_n], \quad (4)$$

式中: R 和 G 分别是光电探测器中光电二极管的响应函数和低噪声放大器的增益; E_{L0} 是参考本振光的场强; E_0 是进入光纤的探测光场强; ω_{IF} 是由声光调制器(AOM)引入的频移量,起到载波中频(IF)的作用; ϕ_n 表示光纤系统的相位噪声; t 为时间; $A_s(t)$ 和 $\phi_s(t)$ 分别代表瑞利散射光干涉叠加后的合成幅值和相位,二者表示合成的散射光携带探测脉冲光行进入到光纤中的特定位置($z_0 = ct/2n$)所感知的光纤的状态信息,即将要检测的传感参量。为了从检测信号 $s(t)$ 中提取出超声扰动引起的 $A_s(t)$ 或 $\phi_s(t)$ 的变化,首先需要去除载波中频 ω_{IF} 的调制。利用解析信号的复函数形式可以得到 $s(t)$ 的包络信号,定义: $s(t) = 2\text{Re}[s_a(t)]$,即对应的复解析信号 $s_a(t)$ 的实部等于检测信号 $s(t)$ 的一半^[19]。则 $s(t)$ 的包络信号 $A_s(t) = 2|s_a(t)|$,在此忽略了(4)式中的所有常数系数。

Φ -OTDR 传感技术将重复脉冲光连续不断地注入探测光纤,则可以生成一个包络信号的时间序列 $A_s^i(t)$,依次按照间隔周期 $T_i = i\Delta t$ (其中 $i = 1, 2, \dots, N_0$, N_0 是连续注入脉冲光的次数, Δt 是重复脉冲周期)排列,利用这个时间序列信号 $\{A_s^i(t)\}$ 可监测光纤沿线任意位置的动态扰动传感参量,其空

间分辨率取决于探测光脉冲的宽度。

Φ -OTDR 分布式定位检测通过如下算法实现: 将任意时间点 $t = t_c$ (对应光纤位置 $z_c = ct_c/2n$) 的包络信号写成集合 $I_c = \{A_s^1, A_s^2, \dots, A_s^{N-1}, A_s^N\}$, 其中 N 表示数据集的长度, 其物理意义是利用 Φ -OTDR 散射光曲线对超声波扰动信号进行离散化采样的采集点数。将集合 I_c 中的元素视为随机变量, 使用统计方法求出其标准差:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_s^i - \bar{A}_s^i)^2}, \quad (5)$$

式中: \bar{A}_s^i 为集合 I_c 中所有元素 A_s^i 的算数平均值; σ_r 为标准差, 用来表示在一段时间内光纤受超声扰动下瑞利散射光信号的变化幅度, 该变量可用作 Φ -OTDR 系统对外界扰动响应的定位检测参量。

3 实验和结果分析

3.1 电缆接头放电故障检测实验

使用 Φ -OTDR 光纤传感技术测量电缆接头在发生放电故障时的超声波信号的实验装置如图 2 所示。图 2 下半部分点线框中是 Φ -OTDR 光纤测量光路/电路。本文选用的外腔式单频激光器(LD)的工作波长是 $1.55 \mu\text{m}$, 洛伦兹线宽是 50 kHz , 输出功率是 30 mW 。连续光波先被第一个光纤耦合

器(FC1)分成两路, 耦合比是 $90:10$, 其中 90% 的光功率进入声光调制器(AOM)被调制成脉冲光波, 余下的 10% 作为本振参考光(LO)。声光调制器是利用任意波形发生器(AWG)来驱动生成调制脉冲光的装置, 实验中生成脉冲光的主要参数是: 脉冲宽度为 31.2 ns , 重复脉冲周期为 $10 \mu\text{s}$ 。声光调制器引入的频率偏移是 200 MHz , 并且由于其插入损耗过大 (6 dB), 所以使用掺铒光纤放大器(EDFA)来补偿并进一步放大脉冲光能量。重复光脉冲经由光纤环形器(CIR)进入 2 端口, 脉冲在光纤中传播, 产生的瑞利背向散射光返回到光纤进端, 再次经过环形器进入 3 端口, 得到待检测的瑞利散射光信号(RBS)。通过相干检测回路, 瑞利散射光和本振参考光(LO)在第 2 个光纤耦合器(FC2)内耦合并发生干涉, 利用平衡放大光电探测器(BPD)检测到相干光信号。FC2 是常规的 $50:50$ 光纤耦合器, BPD 是 350 MHz 高速宽带的光电探测器, 用以检测中频信号($\omega_{IF} = 200 \text{ MHz}$)。最后通过多通道高速示波器进行同步采集, 示波器通道 CH1 采集光纤入射端口的重复脉冲光信号, 示波器通道 CH2 采集检测回路的相干光信号, 这两个信号均已被转化成电信号。示波器的采样率为 2.5 GSa/s , 数据时长为 1 ms 。示波器通道 CH3 预留给高压实验回路的电压测量

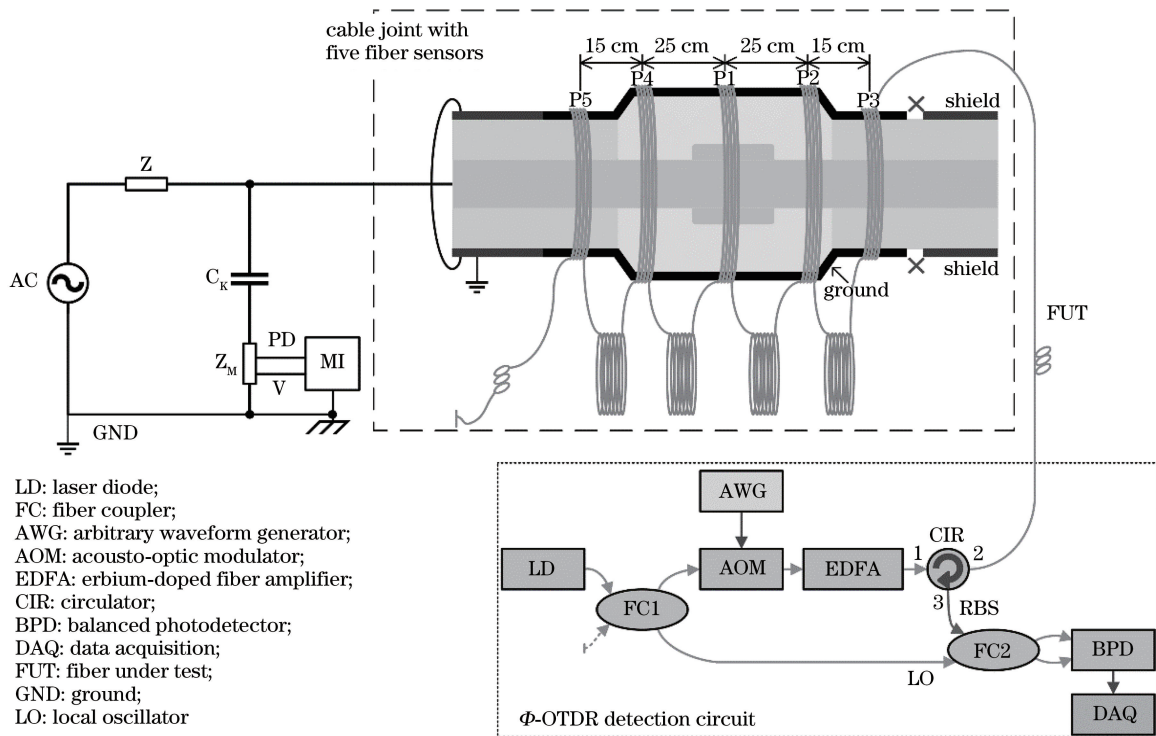


图 2 Φ -OTDR 光纤传感器检测电缆接头放电故障的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for discharging fault detection of cable joint with Φ -OTDR fiber-optic sensors

端,用于同步采集交流局部放电测量中的工频相位信号。

图 2 上半部分是交流局部放电测试回路以及电缆接头上光纤传感器的分布。图 2 的上、下两部分通过测试光纤(FUT)连接,以保证测试端和高压端的电气隔离。所用 FUT 是一段总长为 728 m 的单模光纤,在其[530.0 m, 586.0 m]区间内熔接了一段长度为 56 m 的弯曲不敏感单模光纤用作传感段,该段光纤只有纤芯和涂层结构,缠绕在电缆接头外表面的特定位置;其他区段的光纤都是带外护套的,以避免在实验现场遭受外力破坏。被试电缆接头是额定电压为 8.7 kV 的交联聚乙烯绝缘电缆单

芯预制式中间接头,电缆导体对地的线电压额定值是 15 kV,电缆导体横截面是 300 mm^2 ,电缆(包含接头)长度是 165 cm,电缆外护套直径是 37.5 mm,接头部分外护套直径是 54 mm。在电缆接头上设置 5 个监测点,将其从右到左分别标记为 P3、P2、P1、P4 和 P5,在这些标记点上各缠绕一段长度约为 3.12 m 的弯曲不敏感光纤用作超声信号传感,每两个相邻的光纤环之间用一段 10 m 长的光纤分隔,并将其与被试电缆间做隔音处理,这种分隔有利于定位超声检测信号,使其免受相邻光纤环上超声信号的影响。表 1 所示为 5 个传感光纤环的绕制和布置参数。

表 1 5 个传感光纤环的绕制和布置参数

Table 1 Winding and layout parameters of five sensing fiber loops

Monitoring point ID	Position on power cable	Diameter of the cable (body or joint) /mm	Number of turns of fiber loop
P3	Right junction between cable body and joint	37.8	27
P2	Right edge of cable joint; spacing between P2 and P3 is 15 cm	52.3	19
P1	Middle point of cable joint; spacing between P1 and P2 is 25 cm	55.1	19
P4	Left place of cable joint; spacing between P1 and P4 is 25 cm	54.6	19
P5	Left junction between cable body and joint; spacing between P4 and P5 is 15 cm	37.2	27

在被试电缆接头内部人为设置了绝缘缺陷,接头一端的屏蔽层接地,另一端屏蔽层断开,这样可在局部放电实验时进行悬浮放电。局部放电实验电路采取国标 GB/T 7354-2018^[20]推荐的测试回路,如图 2 左上部分所示,由工频无局放实验变压器(AC)、噪声抑制滤波器(Z)、耦合电容(C_K)、检测阻抗(Z_M)和局部放电测量仪器(MI)等进行电气连接。使用均压罩将高压引线连接到被试电缆接头的导体线芯,使用铜屏蔽网将被试电缆接头套入到电缆接头外护套上,并和电源地线可靠接地。另外,还需从检测阻抗的分压输出端(V)分出一路信号接入 Φ -OTDR 光纤测量回路中的高速采集卡通道 CH3,以与光纤声测法进行相位同步。

局部放电实验首先确定电缆接头缺陷试样的局部放电起始电压(PDIV)。采用电测法测量作为对比,在实验电压增加到 5 kV 时系统产生重复性局部放电信号,即电测法的 PDIV。按照文献[20]中规定的校准程序对电测法实验回路进行校准,在 PDIV 为 5 kV 时,局部放电量为 356 pC。实验电压加到 20 kV 时,电测法标定的局部放电量达到 3542 pC;采用光纤声测法时, Φ -OTDR 光纤测量系统能够在设定的超声监测点 P1 和 P2 观测到定位检测峰,此时的信噪比超过 2:1。所以,光纤声测法

的 PDIV 为 20 kV。将实验电压提高到 30 kV,局部放电量是 4929 pC,此时采用 Φ -OTDR 光纤测量系统得到的 σ_r - Z_c 定位检测曲线如图 3 所示。数据集 $\{A_s^i(t)\}$ 的长度 $N=100$,是通过将 CH2 采集的相

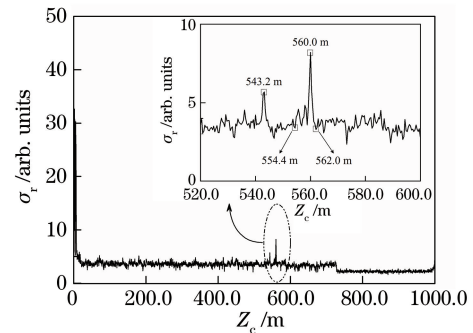


图 3 Φ -OTDR 光纤传感系统对电缆接头缺陷放电产生的超声波进行分布式定位检测得到的 σ_r - Z_c 曲线,实验电压是 30 kV,电测法标定的局部放电量是 4929 pC。插图是超声波监测点附近的放大图

Fig. 3 σ_r - Z_c curve obtained by distributed location detection using Φ -OTDR fiber-optic sensing system for acoustic wave generated by partial discharging in power cable joint with defect. Test voltage is 30 kV, and electrically calibrated partial discharge quantity is 4929 pC. Inset is enlarged diagram near acoustic wave monitoring position

干光信号波形(时长 1 ms)按 CH1 同步的重复脉冲光信号序列(周期 10 μ s)进行时间分割得到的。利用 σ_r - Z_c 曲线可对超声波扰动信号在光纤长度方向上进行分布式定位检测,在 FUT 的整个区段内,只有在虚线椭圆框(插图中[520.0 m, 600.0 m]区间)中出现了比较明显的峰,最大峰值出现在 560.0 m,其他较明显的峰在[554.4 m, 562.0 m]范围内,第二峰值出现在 543.2 m,其他位置难以辨识。

Φ -OTDR 光纤测量系统可以连续快速地触发 100 次采集信号,每一次采集时长为 1 ms,这是因为局部放电产生的超声波脉冲信号的持续时间一般也不会超过 1 ms。取图 3 中[500 m, 600 m]区间内 σ_r 的最大值作为每一个 1 ms 采集时间内的超声波幅

值,对在 CH3 上同步采集的工频电压波形,利用反正弦函数以及相位映射算法计算得到这个 1 ms 时长的超声波对应的交流局部放电相位值。通过对 100 个超声波信号进行工频相位同步就可得到交流局部放电测量中常用的放电相位谱图(PRPD),如图 4(a)所示。作为对比,在图 4(b)中同时给出实验电压为 30 kV 时由电测法测量的 PRPD,不同的是,电测法的测量时间是 10 s,放电重复率达到 6735 次/s。光纤声测法得到的 PRPD 只记录了 100 ms 时间内的放电超声波信号,其有效放电次数小于 100 次,更是远小于电测法的放电次数;从 PRPD 的大致形状可以看出, Φ -OTDR 光纤传感系统测量得到的是由被试电缆接头缺陷的局部放电产生的超声波信号。

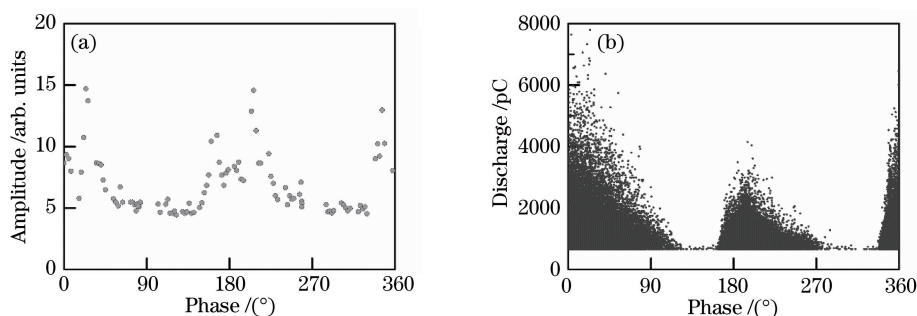


图 4 对电缆接头缺陷进行工频交流局部放电测量得到的放电相位谱图(PRPD),实验电压为 30 kV。(a)基于 Φ -OTDR 光纤传感系统的声测法得到的 PRPD;(b)基于符合 GB/T 7354—2018 局部放电测量系统的电测法得到的 PRPD
Fig. 4 Phase-resolved partial discharge diagram (PRPD) obtained by partial discharge measurement with power frequency alternating voltage on cable joint with defect. Test voltage is 30 kV. (a) PRPD obtained by acoustic measurement method based on Φ -OTDR fiber-optic sensing system; (b) PRPD obtained by electric measurement method based on partial discharge measurement system in compliance with GB/T 7354—2018

由于局部放电活动具有间歇性和随机性,在 [500 m, 600 m] 区间内不同实验电压下的方差分布如图 5 所示。为清楚地显示 PDIV 在 20 kV 时可能

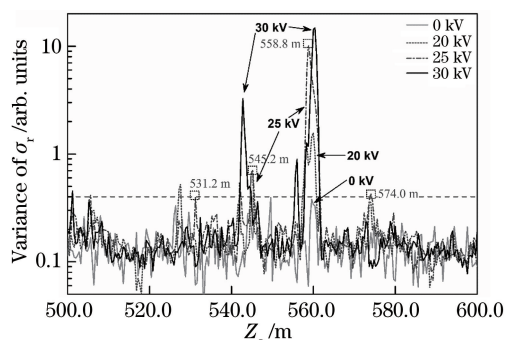


图 5 电缆接头上各超声监测点位置的定位参数 σ_r 的方差值和实验电压的相关性。超声监测时间是 100 ms
Fig. 5 Variation of variance of location parameter σ_r of acoustic wave monitoring positions on cable joint with test voltage. Acoustic monitoring time is 100 ms

出现的较小峰,对纵坐标轴进行了分段处理。从图 5 可见, σ_r 的方差峰值出现在一些特定的位置,比如对于 PDIV 为 20 kV 的曲线,在 531.2, 545.2, 558.8, 574.0 m 处 σ_r 的方差峰值均超过 0.4,这些峰在背景噪声中易被辨识,这 4 个峰值位置正好位于在电缆接头上设置的其中 4 个监测点 P3、P2、P1 和 P4 附近,定位误差不超过 2.6 m。其次,随着实验电压的增加, σ_r 的方差峰值处具有更高的信噪比,例如,在不施加电压时, σ_r 的方差值都在 0.4 以下,PDIV 为 20 kV 时的 σ_r 的方差峰值是 1.6,检测信噪比为 12 dB;在 30 kV 时, σ_r 的方差峰值达到了 14.7,信噪比为 31 dB。这种 σ_r 的方差峰值和所加实验电压的相关性进一步证明 Φ -OTDR 光纤传感系统检测到的超声波信号来自电缆接头缺陷引发的局部放电。

3.2 超声监测点定位校正实验

为了获取所设计的 5 个光纤环(表 1)在测试光

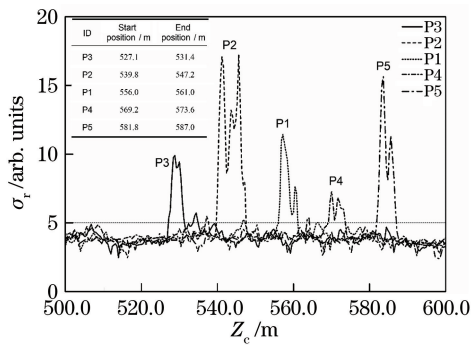


图 6 将表 1 中设计的 5 个传感光纤环安装在超声监测点时进行定位校正实验得到的 σ_r-Z_c 曲线

Fig. 6 σ_r-Z_c curves obtained by location calibration experiments in which five sensing fiber loops designed in Table 1 are mounted on ultrasonic monitoring positions

纤中的准确位置,可以采用压电传感器进行反向驱动以产生超声波信号,对每一个超声监测点进行定位校正。使用 PAC 公司的 WS α 型声发射传感器 (AE sensor),驱动信号为单频正弦波,频率为 200 kHz,峰-峰电压值为 5 V。实验中依次将 AE 传感器安装在如表 1 中所示的 P3、P2、P1、P4 和 P5 监测点位置,并使传感器紧贴光纤环上。从 Φ -OTDR 光纤传感系统测得的 σ_r-Z_c 定位检测曲线如图 6 所示。图中标示出的 5 个监测点的定位区间可用来标定在电缆接头局部放电实验中检测到的定位峰所属的超声监测点位置。从图 6 还可看出,AE 传感器激发的超声波只在与之紧贴的光纤环上能检测到 σ_r 定位峰,未见在多个监测点位置上同时检测到峰值。

声信号在电缆及接头制造所用的绝缘材料中的声速和传输衰减系数的测试数据对局部放电测量是非常重要的,可用来确定超声传感器的安装位置以及定位局放源。被试电缆的主绝缘材料是交联聚乙烯 (XLPE),预制式电缆接头中常用的绝缘材料是硫化液态硅橡胶 (LSR)。文献 [21] 中给出了这两种绝缘材料中纵波的声速和衰减系数的实验数据。在室温为 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,200 kHz 单频超声波的衰减系数分别是 0.74 dB/cm (XLPE) 和 0.35 dB/cm (LSR),图 7 所示为根据声波衰减公式 $p = p_0 \cdot 10^{-\alpha z/20}$ (其中 α 是声衰减系数; z 是传播距离; p_0 和 p 分别是声波在起点和坐标 z 处的振幅) 计算得到的 200 kHz 单频超声波的归一化幅值随传输距离的衰减规律。对于 XLPE 和 LSR 这两种传播介质,超声波信号在分别到达 27 cm 和 57 cm 时,其幅值就衰减到 10%。可见,对电缆进行局部放电的声检测受

限于其绝缘材料比较大的声衰减系数,这导致有效的声探测范围限制在约 1 m 以内。作为对比,50 kHz 超声波在室温下的空气和六氟化硫 (SF_6 , 一种高压开关设备中常用的绝缘气体) 中的衰减系数分别为 10^{-2} dB/cm 和 0.26 dB/cm^[9]。

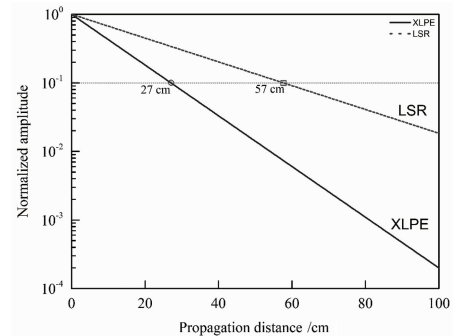


图 7 根据声波衰减公式 $u = 10^{-\alpha z}$ 计算得到的超声波归一化幅值随传输距离的变化曲线。在室温 20 $^{\circ}\text{C}$ 下,200 kHz 的单频超声波在 XLPE 和 LSR 两种材料中的衰减系数分别为 0.74 dB/cm 和 0.35 dB/cm^[21]

Fig. 7 Normalized amplitude varying with propagation distance according to acoustic wave attenuation formula $u = 10^{-\alpha z}$. At room-temperature of 20 $^{\circ}\text{C}$, the attenuation coefficients for XLPE and LSR are 0.74 dB/cm and 0.35 dB/cm, respectively, for the single frequency acoustic wave with frequency of 200 kHz^[21]

4 结 论

研究了 Φ -OTDR 光纤传感技术在电缆附件故障诊断中的局部放电声测法中的应用,希望能利用光纤传感的长距离和分布式测量的优势来解决电力设备状态监测领域的技术瓶颈。在构建的 Φ -OTDR 光纤超声传感系统中放置 5 个光纤环传感器,将其分别绕制在电缆接头上特定的超声监测位置,选取瑞利散射光信号的随机方差作为检测微小信号的参量。在电缆接头缺陷局部放电实验中, Φ -OTDR 光纤系统在 4 个传感器监测点上检测到局部放电的超声波信号,对比实验表明基于 Φ -OTDR 的声测法在 PDIV 为 20 kV 时能检测到相当于 3500 pC 时的电测法标定的放电量。最后利用压电传感器对超声监测点进行了定位校正,这有助于判定 Φ -OTDR 的定位检测曲线 (σ_r-Z_c 曲线) 中光纤环传感器的准确位置,实验观测到的定位误差不超过 2.6 m。

参 考 文 献

- [1] Chai Q, Luo Y, Ren J, et al. Review on fiber-optic

- sensing in health monitoring of power grids [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(7): 072007.
- [2] Wang X H, Zhang W C, Zhao H, et al. Impact of liquid insulation on characteristic parameters of fiber Fabry-Perot partial discharge induced ultrasound sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0406005.
王学会, 张伟超, 赵洪, 等. 液体绝缘对光纤法布里-珀罗局放超声传感器特性参数影响 [J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0406005.
- [3] Yan Y X, Su X Y, Xiao C Q. Fiber optic distributed temperature sensor application in power cable online monitoring in Xiamen [J]. *High Voltage*, 2008, 34(S1): 64-66.
严有祥, 苏雪源, 肖传强. 分布式光纤测温系统在厦门电缆运行监测中的应用 [J]. *高电压技术*, 2008, 34(S1): 64-66.
- [4] Lv A, Li J. On-line monitoring system of 35 kV 3-core submarine power cable based on φ -OTDR [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 273: 134-139.
- [5] Lu L D, Liang Y, Li B L, et al. Experimental study on location of lightning stroke on OPGW by means of a distributed optical fiber temperature sensor [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 65: 79-82.
- [6] Mao N Q, Ma G M, Li C R, et al. High sensitive FBG load cell for icing of overhead transmission lines [C]//Proceedings of 25th International Conference on Optical Fiber Sensors, April 24-28, 2017, Jeju, South Korea. Washington: SPIE, 2017.
- [7] 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.
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.
- [8] Ma G M, Li Y B, Mao N Q, et al. A fiber Bragg grating-based dynamic tension detection system for overhead transmission line galloping [J]. *Sensors*, 2018, 18(2): E365.
- [9] Harrold R T. Acoustical technology applications in electrical insulation and dielectrics [J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1985, EI-20(1): 3-19.
- [10] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [11] Cai H W, Ye Q, Wang Z Y, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing technology based on coherent Rayleigh scattering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050001.
蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050001.
- [12] Ye Q, Pan Z Q, Wang Z Y, et al. Progress of research and applications of phase-sensitive optical time domain reflectometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0600001.
叶青, 潘政清, 王照勇, 等. 相位敏感光时域反射仪研究和应用进展 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0600001.
- [13] Rohwetter P, Eisermann R, Krebber K. Random quadrature demodulation for direct detection single-pulse Rayleigh C-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(19): 4437-4444.
- [14] Bao X Y, Zhou D P, Baker C, et al. Recent development in the distributed fiber optic acoustic and ultrasonic detection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3256-3267.
- [15] Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1006005.
王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1006005.
- [16] Zhang X P, Zhang Y X, Wang F, et al. The mechanism and suppression methods of optical background noise in phase-sensitive optical time domain reflectometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 070707.
张旭苹, 张益昕, 王峰, 等. 相位敏感型光时域反射传感系统光学背景噪声的产生机理及其抑制方法 [J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 070707.
- [17] Wójcik A K. Signal statistics of phase dependent optical time domain reflectometry [D]. College Station: Texas A&M University, 2006: 7-11.
- [18] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [C]//2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), November 13-16, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [19] Mandel L, Wolf E. *Optical coherence and quantum optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [20] State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. National standard (recommended) of the people's republic of China: high-voltage test techniques: partial discharge measurements. GB/T

7354—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 高电压试验技术局部放电测量 GB/T 7354—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[21] Buchholz U, Jaunich M, Stark W, et al. Acoustic data of cross linked polyethylene (XLPE) and cured liquid silicone rubber (LSR) by means of ultrasonic and low frequency DMTA[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 558-566.