

## 光纤分布式声传感系统在GIS耐压测试中的应用

黄涛, 孙恒东, 蒋骏, 王章轩, 杨永前, 陈金林

### Application of optical fiber distributed acoustic sensing system in GIS insulation withstand voltage test

引用本文:

黄涛,孙恒东,蒋骏,王章轩,杨永前,陈金林. 光纤分布式声传感系统在GIS耐压测试中的应用[J]. *激光技术*, 2023, 47(4): 459–462.

HUANG Tao,SUN Hengdong,JIANG Jun,WANG Zhangxuan,YANG Yongqian,CHEN Jinlin. Application of optical fiber distributed acoustic sensing system in GIS insulation withstand voltage test[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(4): 459–462.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 变压器油中溶解一氧化碳气体的光纤传感技术

引用本文: 马凤翔, 赵跃, 李辰溪, 等. 变压器油中溶解一氧化碳气体的光纤传感技术[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 829–834.

### 2. 聚类分析在分布式光纤振动传感系统中的应用

引用本文: 唐文靖, 印新达, 闫奇众, 等. 聚类分析在分布式光纤振动传感系统中的应用[J]. *激光技术*, 2015, 39(6): 854–857.

### 3. 基于光栅阵列的列车高精度定位测速方法研究

引用本文: 王沁宇, 童杏林, 张翠, 等. 基于光栅阵列的列车高精度定位测速方法研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 46–51.

### 4. 分布式光纤预警系统在成品油管道安防中的应用

引用本文: 黄伟, 潘俊宇. 分布式光纤预警系统在成品油管道安防中的应用[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 897–901.

### 5. 基于FPGA的光纤光栅温度传感器高速解调系统

引用本文: 王伟, 张天阳, 陈海滨, 等. 基于FPGA的光纤光栅温度传感器高速解调系统[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 849–853.

文章编号: 1001-3806(2023)04-0459-04

## 光纤分布式声传感系统在 GIS 耐压测试中的应用

黄涛, 孙恒东, 蒋骏, 王章轩, 杨永前, 陈金林

(国网江苏省电力有限公司建设分公司 项目管理中心, 南京 210000)

**摘要:** 气体绝缘开关设备(GIS)在国家电网变电站建设领域应用广泛,通常在 GIS 设备投产之前需要做绝缘耐压试验,以对现场故障设备进行定位。为了进行更快速有效的定位,针对实际应用环境,利用分布式声传感系统(DAS)和相位敏感光时域反射仪,通过光纤自身的反向瑞利散射信号,进行多波长多路径调制解调,由光纤实时监测 GIS 管道的不同位置的振动信号,减少测试盲点。结果表明,所研制的 DAS 系统能够实现对 GIS 故障设备进行实时快速准确的定位,定位精度可达到 3 m 内。该研究对于 GIS 现场故障的及时排除和维修处理,保障电力设备安全运行具有较好的参考价值。

**关键词:** 传感器技术;光纤分布式声传感系统;气体绝缘开关设备;耐压测试

**中图分类号:** TP212.9 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.04.003

### Application of optical fiber distributed acoustic sensing system in GIS insulation withstand voltage test

HUANG Tao, SUN Hengdong, JIANG Jun, WANG Zhangxuan, YANG Yongqian, CHEN Jinlin

(Project Management Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd. Construction Branch, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Gas insulated switchgear (GIS) is widely used in the construction of State Grid Substations, and it is usually necessary to do insulation withstand voltage tests before GIS is put into production. To locate faulty equipment on site, according to the practical application environment, a fast and effective method was presented to locate the fault equipment in GIS insulation withstand voltage test by using distributed acoustic sensing (DAS) system. Through the back Rayleigh scattering signal of the optical fiber itself, the phase heterodyne was adopted phase-sensitive optical time-domain reflectometer ( $\varphi$ -OTDR) multi wavelength multi path modulation and demodulation method, which can visually and real-time monitor the optical fiber vibration signals at different positions of the metal shell of the GIS system to reduce the test blind spots. The experimental test results show that, fast and accurate positioning of fault equipment in GIS can be realized with the developed DAS system, and the positioning accuracy can reach within 3 m. It has a good reference value for timely troubleshooting and maintenance of GIS field faults and ensuring the safe operation of power equipment.

**Key words:** sensor technique; optical fiber distributed acoustic sensing system; gas insulated switchgear; withstand voltage test

## 引 言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、母线、连接件和出线终端等组成。GIS 带电部分全部密封于惰性 SF<sub>6</sub> 气体中,不与外部接触,不受外部环境的影响,

大大提高了可靠性。GIS 具有小型化、可靠性高、安全性好、维护方便等优势,不仅在高压、超高压领域被广泛应用,而且在特高压领域也被使用。根据《气体绝缘金属封闭开关设备现场耐压及绝缘试验导则》(DL/T555-2004)要求,GIS 设备在正式投产之前应当做耐压测试<sup>[1-2]</sup>。因此,探索 GIS 绝缘耐压测试中的新方法至关重要。若在耐压测试过程中发生击穿故障,由于 GIS 部件处于密闭空间中,导致无法快速定位故障位置,因此当前急需解决快速定位故障位置的问题。本文作者从实践角度出发,提出一种基于相位敏感光时域反射仪(phase-sensitive optical time-domain reflectometer,  $\varphi$ -OTDR)的分布式声传感系统(distributed a-

基金项目: 国家电网有限公司科技基金资助项目 (SGJSJS00XMJS2100116)

作者简介: 黄涛(1987-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为通信领域。

E-mail: 549984231@qq.com

收稿日期: 2022-06-08; 收到修改稿日期: 2023-02-24

oustic sensing, DAS) 测试方法。 $\varphi$ -OTDR 技术与其它传感技术相比,具有探测距离远、灵敏度高、响应速度快等优点<sup>[3]</sup>。GIS 在做耐压测试过程中,由于所有部件都密闭在金属接地的外壳中,加上复杂的现场环境,普通传感设备难以实时精确定位故障位置。而光纤 DAS,在现场只有传感光缆,实时监视设备在场外,测试现场没有任何电子元器件,也不需要额外的信号传输,不受环境干扰,剧本实时监测等优势。采用 DAS 技术可以实时监测 GIS 管道的不同位置的振动信号,通过多波长调制解调和多路径调制解调,达到减少测试盲点的目的,对 GIS 中的故障设备进行精确定位检测。

## 1 光纤分布式声传感系统

### 1.1 光纤 DAS 简介

DAS 是一种利用普通通信光纤作为传感介质,光纤自身的反向瑞利散射信号,能够精确有效测量光纤所受应力变化的全分布式光纤传感系统<sup>[4-6]</sup>。图 1 是 DAS 系统反向瑞利散射信号示意图。

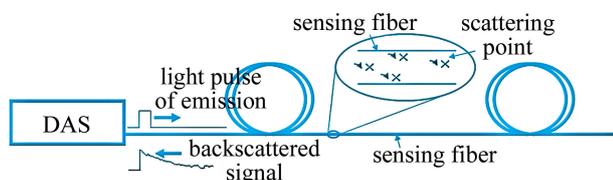


图 1 DAS 系统反向瑞利散射信号示意图

Fig. 1 Schematic diagram of back Rayleigh scattering signal of DAS system

当光脉冲信号入射一段光纤后,激光在传播的光纤路径上会产生瑞利散射光,部分散射光方向与光纤前进方向相反,反向瑞利光沿光纤反向继续传播,抵达激光发射端。类似于相机闪光灯拍摄原理,在拍摄瞬间发射光脉冲,胶卷对返回的光曝光形成胶片底片。区别在于两者光线不同,相机曝光底片的光是反射光,DAS 系统利用的是散射光。

利用散射光原理,当外界声音信号震动引起所在位置光纤应力发生变化,即对光纤的折射率产生影响,最终都会导致反向瑞利散射信号发生相应的变化。DAS 利用这个反向瑞利散射信号的变化,提取到该位置在不同时刻的应力信号,从而实现对该位置外界信号的定量测量。

### 1.2 DAS 光路调制解调原理

已知两束光强为  $A$ 、角频率为  $\omega$  的激光,干涉后的光强信号  $I$  为:

$$I = 2A + 2A\cos(\omega t + \psi) \quad (1)$$

式中, $t$  是时间, $\psi$  是光纤收到外界物理信号影响导致的相位变化信号。

通过高通滤波器,即可得到光强信号  $I$  的交流部分  $I_{AC}$ :

$$I_{AC} = 2A\cos(\omega t + \psi) \quad (2)$$

式中,角频率  $\omega$  是系统通过声光调制器调制上去的,属于已知信号,所以可以利用正交调制/解调算法解调出未知的待测信号  $\psi$ 。

由于  $\omega$  是已知信号,可以得到本地信号  $S_1, S_2$ :

$$S_1 = \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$S_2 = -\sin(\omega t) \quad (4)$$

让  $I_{AC}$  和  $S_1$  混频得:

$$I_{AC} \times S_1 = 2A\cos(\omega t + \psi) \times \cos(\omega t) = A\cos(2\omega t + \psi) + A\cos\psi \quad (5)$$

过滤其中高频部分  $\cos(2\omega t + \psi)$ ,得到信号  $S_1$ :

$$S_1 = A\cos\psi \quad (6)$$

让  $I_{AC}$  和  $S_2$  混频得:

$$I_{AC} \times S_2 = 2A\cos(\omega t + \psi) \times [-\sin(\omega t)] = -A\sin(2\omega t + \psi) + A\sin\psi \quad (7)$$

过滤其中高频部分  $\sin(2\omega t + \psi)$ ,得到信号  $S_2$ :

$$S_2 = A\sin\psi \quad (8)$$

用  $S_2/S_1$ ,得到:

$$S_2/S_1 = \tan\psi \quad (9)$$

再用反正切运算,即可得到待测信号  $\psi$ 。

### 1.3 DAS 光路系统架构

为了从反向瑞利散射信号的变化解调出不同位置的外界信号,DAS 系统可以利用激光调制解调结构对发出的激光脉冲进行调制,在此基础上对返回的反向瑞利散射信号做解调,得到不同位置的外界信号。图 2 是 DAS 系统激光调制解调示意图。

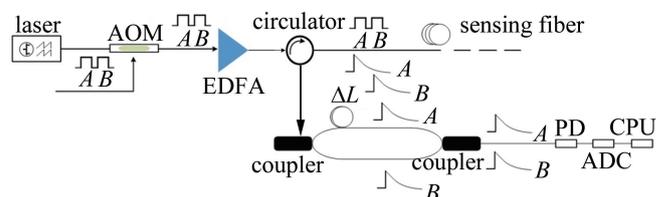


图 2 DAS 系统激光调制解调图

Fig. 2 DAS system laser modulation and demodulation diagram

激光器采用窄线宽的单波长激光器,工作波长 1550 nm。系统通过声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)调制激光器发出的激光,从而产生不同频率及不同时间间隔(角频率相差  $\omega$ )的两束激光脉冲  $A$  和  $B$ ,这两个激光脉冲经过掺铒光纤放大器(erbium doped fiber application amplifier, EDFA)放大,通过环形

器后进入待测量光纤,从而形成对应的两束反向瑞利散射信号 A 和 B,这两束反向瑞利散射信号经环形器输入到耦合器后,A 路经过延迟,B 路不延迟,这样在光纤内同一位置的两束不同频率的反向瑞利散射信号就会产生干涉效果,干涉后的光强信号通过光电探测器(photodetector,PD)变为电信号,再通过模数转换器(analog to digital converter,ADC)转换为数字量,并利用中央处理器(central processing unit,CPU)的解调算法,从而解调出对应位置的相位信号(即待测信号)。

## 2 DAS 在 GIS 绝缘耐压测试中的应用

通常情况下,DAS 系统的传感器即是物理光缆(光纤),所以 DAS 可以较为容易地同时监视长达几十千米光缆沿途的振动信号,特别适合应用在油气管道、道路桥梁、轨道交通、安防监控等需要长距离监测的应用场景<sup>[7-11]</sup>。

目前 DAS 系统的分辨率达到 1 m,即光纤每隔 1 m 生成一个监测点,在实际的变电站耐压测试中,DAS 系统可根据 GIS 设备长度动态生成若干监测点位,并实时监测数据情况。图 3 是光缆部署示意图(蓝色胶带)。按照图 3 部署方式,将光缆铺设至 GIS 管道上,即可监测内部振动信号,通过 DAS 系统实时展示信号数据。



图 3 光缆部署示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fiber optic cable deployment

图 4 是 DAS 系统实时监视瀑布图。其中横轴表示光缆上每米分段的监测点,即通道号,纵轴表示时间(单位为 s),右侧图例表示信号强弱,黄色代表最强,蓝色代表最弱。图 4 中通道 250 左右出现持续的振动信号,表明在光缆 250 m 左右存在一个稳定的、规律性的振动信号。通过观察瀑布图可以监测实际事件的发生。

DAS 系统实时监视不同通道的时域图如图 5 所示。可同时监测光纤若干通道情况,当现场出现故障时,能够结合瀑布图 2 维视图中颜色的深浅快速发现

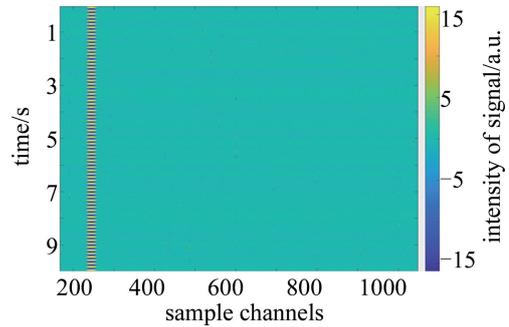


图 4 DAS 系统实时监视瀑布图

Fig. 4 Real-time monitoring waterfall diagram of DAS system

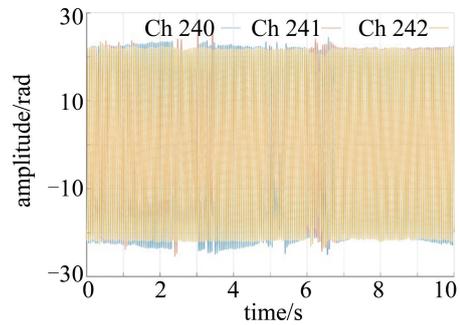


图 5 DAS 系统实时监视不同通道时域图

Fig. 5 Time-domain diagram of different channels monitored by DAS system in real time

问题,便于定位现场故障位置,可直接监测光纤信号的整体情况,当出现异常时,结合颜色深浅快速定位异常位置。

在 GIS 设备耐压测试过程中,一旦发生击穿故障,其监测点的信号强度远远大于其它正常监测点的信号强度,通过 DAS 系统将信号直观地反映出来,从而快速、有效地定位故障点位置。图 6 是异常情况下 DAS 系统实时监视瀑布图。

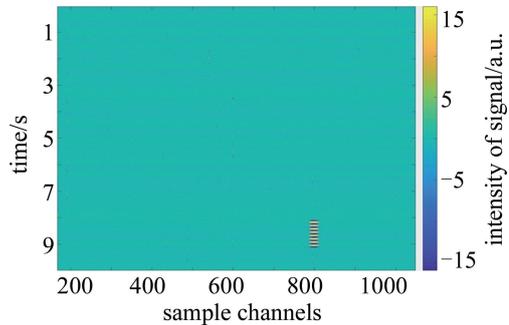


图 6 异常情况下 DAS 系统实时监视瀑布图

Fig. 6 Real-time monitoring waterfall diagram of DAS system under abnormal conditions

如图 6 所示,从 DAS 系统实时监视瀑布图中可以看到,从第 8 s 开始,在 800 通道附近产生了异常信号,持续大约 1 s。通过实地检测,发现实际故障设备出现在约 816 m 处,与 DAS 实时监视系统的监测定位

结果吻合,定位精度在3 m范围内。

### 3 结论

提出了一种利用光纤分布式声传感系统,对GIS绝缘耐压试验过程中发生故障的设备快速有效的定位方法。结合多次变电站耐压测试结果可知,DAS系统在耐压测试中可以实时且直观地反应现场GIS管道的振动信号。实验结果表明,发生击穿故障时,DAS能够快速捕获到异常,对于故障点定位的精度,通过现场测试和数据分析,定位精度可以达到3 m内。本研究结果可为GIS现场故障排除和维修处理工作提供及时便利的有效手段。

#### 参 考 文 献

- [1] LI B, GUO B H. Code for field handover test of gas insulated metal enclosed switchgear; DL/T 618-2011 [S]. Beijing: National Energy Administration, 2011 (in Chinese).  
李博, 郭碧红. 气体绝缘金属封闭开关设备现场交接试验规程: DL/T 618-2011[S]. 北京: 国家能源局, 2011.
- [2] GUO B H. Guide for field withstand voltage and insulation tests of gas insulated metal enclosed switchgear; DL/T 555-2004 [S]. Beijing: National Energy Administration, 2004 (in Chinese).  
郭碧红. 气体绝缘金属封闭开关设备现场耐压及绝缘试验导则: DL/T 555-2004[S]. 北京: 国家能源局, 2004.
- [3] WANG Zh W, KONG Y, DING W, *et al.* Composite optical fiber bring about remote sensitive to vibration of  $\varphi$ -OTDR [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(4): 436-440 (in Chinese).  
王振伟, 孔勇, 丁伟, 等. 复合光纤对  $\varphi$ -OTDR 振动传感远程敏感 [J]. *激光技术*, 2021, 45(4): 436-440.
- [4] WANG Y, YUAN H, LIU X, *et al.* A comprehensive study of optical fiber acoustic sensing [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 85821-85837.
- [5] ZUO J, ZHANG Y, XU H, *et al.* Pipeline leak detection technology based on distributed optical fiber acoustic sensing system [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 30789-30796.
- [6] WU M Sh. High performance optical fiber quasi distributed acoustic sensor for hydrophone applications [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2020: 32-45 (in Chinese).  
吴梦实. 面向水听器应用的高性能光纤准分布式声波传感器 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020: 32-45.
- [7] GU J F, LU B, YANG J Q, *et al.* Distributed acoustic sensing based on multi-core fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0706003 (in Chinese).  
顾金凤, 卢斌, 杨竣淇, 等. 多芯光纤分布式声传感 [J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0706003.
- [8] YANG H W, CHEN Y M, PENG J, *et al.* GIS AC withstand voltage test development trend [J]. *Yunnan Electric Power*, 2018, 46(3): 54-57 (in Chinese).  
杨宏伟, 陈宇民, 彭晶, 等. GIS 交流耐压试验发展趋势 [J]. *云南电力技术*, 2018, 46(3): 54-57.
- [9] ZHONG Y, CHEN Y, ZHANG Ch N, *et al.* Analysis of management and control of keypoints of GIS equipment installation and test in substation [J]. *Electric Engineering*, 2020(17): 103-105 (in Chinese).  
仲宇, 陈好, 张春宁, 等. 变电站 GIS 设备安装与试验关键点管控分析 [J]. *电工技术*, 2020(17): 103-105.
- [10] LONG X F. Analysis and research on breakdown mechanism of GIS equipment [J]. *Science & Technology Information*, 2017, 15(36): 65-67 (in Chinese).  
龙雄峰. GIS 设备耐压击穿机理分析研究 [J]. *科技资讯*, 2017, 15(36): 65-67.
- [11] LI J H, CHE B, HAN X T, *et al.* Field impulse withstand test and partial discharge detection for ultra high voltage gas insulated switchgear equipment [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(11): 3659-3665 (in Chinese).  
李军浩, 车斌, 韩旭涛, 等. 特高压气体绝缘组合开关设备现场冲击耐压试验及局部放电测量 [J]. *高电压技术*, 2015, 41(11): 3659-3665.