

# 用于局部放电探测的超声光纤传感方法

吴凌峰<sup>1,2</sup>, 贺红亮<sup>2</sup>, 魏晓勇<sup>1</sup>, 冯玉军<sup>1</sup>, 张福平<sup>2</sup>, 刘雨生<sup>2</sup>,  
高志鹏<sup>2</sup>, 谢庆海<sup>2</sup>, 陶天炯<sup>2</sup>, 翁继东<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 国际电介质研究中心, 陕西 西安 710049;

2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所 冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621000)

**摘要:**局部放电是一种有效的高压部件绝缘性能检测方法, 可通过声、光及电等信号的探测来有效预报绝缘劣化程度。该文建立了基于局部放电超声信号检测的光纤传感器测试系统, 使用 Mach-zehnder 光干涉法来检测声信号导致的光程差, 测算测量回路的微小机械形变。实际测试结果表明, 该系统具有高的测试灵敏度, 可精确测量纳米级的机械形变, 准确反映局部放电过程引起的超声信号。采用该光纤传感系统可对多层陶瓷器件的局部放电进行跟踪测量。

**关键词:**局部放电; 超声波; Mach-zehnder 光干涉法; 光纤传感; 多层陶瓷器件

**中图分类号:** TM835.4      **文献标识码:** A

## Ultrasonic Fiber Sensing Method for Partial Discharge Detection

WU Lingfeng<sup>1,2</sup>, HE Hongliang<sup>2</sup>, WEI Xiaoyong<sup>1</sup>, FENG Yujun<sup>1</sup>, ZHANG Fuping<sup>2</sup>, LIU Yusheng<sup>2</sup>,  
GAO Zhipeng<sup>2</sup>, XIE Qinghai<sup>2</sup>, TAO Tianjiong<sup>2</sup>, WENG Jidong<sup>2</sup>

(1. Key Lab. of Electronic Ceramic and Devices, Ministry of Education, International Center for Dielectric Research, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Lab. of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** The partial discharge is an effective method to detect the insulation performance of high voltage components, and the degree of insulation degradation can be effectively predicted by the detection of sound, light, electricity and other signals. The optical fiber sensor test system based on the ultrasonic signal detection method of partial discharge is set up in this paper. The Mach-zehnder interferometer is used to detect the optical path difference caused by the acoustic signals and to detect the micro mechanical deformation in the measurement circuit. The practical test results show that the proposed system has a very high sensitivity, the mechanical deformation at nano-scale can be accurately measured and accurately reflect the ultrasonic signals caused by partial discharge. Using this optical fiber sensing system, the partial discharge of multilayer ceramic devices can be tracked and measured.

**Key words:** partial discharge; ultrasonic; Mach-zehnder optical interferometry; fiber sensing; multilayer ceramic device

## 0 引言

局部放电的检测是以局部放电所产生的各种现象为根据, 通过表述这些现象的物理量来表征局部放电的状态, 进而通过局部放电状态判断目标的绝缘状态。局部放电过程不仅伴随着电荷的转移和电能的损耗, 同时还伴随着电磁辐射、超声波、光、热及新物质生产的现象。由于这些现象的存在, 局部放电的检测手段也较多。对局部放电的检测方法可分

为电气测量和非电测量两大类。电气测量主要检测局部放电产生的电脉冲, 非电测量主要包括超声波检测法<sup>[1]</sup>、荧光检测<sup>[2]</sup>、红外检测<sup>[3]</sup>及化学检测法<sup>[4]</sup>等。超声波检测法具有抗干扰能力强的优点, 可用于多传感器的故障声学定位, 近年来已广泛应用于电气设备的局部放电检测中<sup>[5]</sup>。

超声波检测法包括压电式和光纤传感式。压电式用压电超声波探头对局部放电产生的超声波信号

收稿日期: 2016-06-06

基金项目: 中国工程物理研究院基础外协基金资助项目(2013-008420-168F)

作者简介: 吴凌峰(1990-), 男, 江西抚州人, 博士生, 主要从事高压器件无损检测方法的研究。通信作者: 贺红亮, 研究员, 主要从事冲击波物理与爆轰物理的研究。E-mail: honglianghe@caep.cn.

进行检测,对探头的电磁屏蔽性能要求较高,而光纤传感器则用光信号传播信息,在电磁屏蔽方面具有优良的性能,且信号传输损耗小,绝缘性能好。司文荣<sup>[6]</sup>等将光纤传感器应用于局部放电的超声检测,研究发现,与常规超声波探头相比,光纤传感器有着纤细柔顺适用于特殊场合,信号传输损耗小,绝缘性好,不受电磁干扰等优点。Abbas Zargari 等使用 Fabry-perot 型的光纤传感器,用于局部放电的超声检测中,研究发现,与传统压电式传感器相比,光纤传感器具有更高的精度<sup>[7]</sup>。Paltauf G 使用 Mach-zehnder 型干涉检测装置用于超声信号的检测<sup>[8]</sup>,但未见用于局部放电检测的报道。

本文建立了一套适用于局部放电超声检测的 Mach-zehnder 型光纤传感系统,对这套系统进行了实验标定,用于高压多层陶瓷器件的超声振动检测,测算出超声波所引起的位移量。结果表明,这套实验系统可适用于局部放电的超声检测,且具有很高的灵敏度。

## 1 实验原理

### 1.1 光干涉检测超声的原理

其实验原理如图 1 所示。

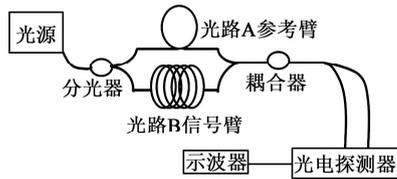


图 1 Mach-zehnder 型超声检测原理图

激光从光源出来后,经分光器分为 A、B 两束, A 路激光经参考臂光纤直接进入耦合器,而 B 路激光经信号臂的光纤进入耦合器,信号臂的光纤按照圆周方式缠绕在被测样品上,两束光在耦合器中干涉。当信号臂上光纤接收到超声波时,光纤的光程会发生轻微的改变,导致干涉光的光强发生改变。信号臂和参考臂上激光信号的幅值分别为  $E_1$  和  $E_2$ ,则干涉光可表示为

$$E = E_1 \cos(\omega t + \phi_1) + E_2 \cos(\omega t + \phi_2) \quad (1)$$

式中: $\omega$  为激光的角频率; $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为信号臂和参考臂上激光的初始相位。

相干光的光强  $I$  可表示为

$$I = E^2 = E_1^2 \cos^2(\omega t + \phi_1) + E_2^2 \cos^2(\omega t + \phi_2) + E_1 E_2 \cos[2\omega t + (\phi_1 + \phi_2)] + E_1 E_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2)$$

由于激光的频率很高,光电转换器无法响应这么高的频率,因此式(2)中的前 3 项无法探测。 $\phi_1 - \phi_2$  表明两路信号的相位差,在未接收到超声波信号时,两路信号的原始光程差为  $L$ ,由于超声波导致的光程差为  $\Delta L$ ,则光强随时间的变化为

$$I(t) = A + E_1 E_2 \cos[2\pi(L + \Delta L(t))/\lambda] \quad (3)$$

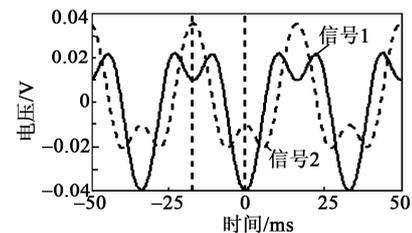
式中: $A$  为常数; $\lambda$  为激光的波长。

这样就建立了光强与超声波导致的光程差间的函数关系。通过记录相干光光强的变化,可推算超声波所引起的光程差。

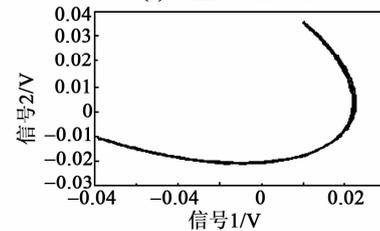
实验中使用了  $3 \times 3$  耦合器的分光可把激光分为相位差为  $120^\circ$  的两路信号,这有利于精确的计算超声波所引起的位移量。

### 1.2 实验数据的处理

由式(3)可看出,理想情况下,光强与位移量之间为三角函数关系,如果只有一路信号,那么通过解反三角就可计算得到超声波引起的位移量,但这种计算在实际实验中并不精确,反三角的计算及实验中的干扰会导致较大误差,因此,我们利用  $3 \times 3$  耦合器来获得两路信号,提高计算的准确度。由于这两路信号的相位差并非精确的  $120^\circ$ ,因此,实验中需用耦合器得到的两路激光信号的光强作出李萨茹图形,典型的信号如图 2 所示。



(a) 典型原始测试结果



(b) 典型的李萨茹图形

图 2 典型原始测试结果及典型的李萨茹图形

图 2(a) 为 1 个周期性运动情况下测试到的实验结果,由于  $3 \times 3$  光耦分光,图中信号 1、2 是将相干光信号错开  $120^\circ$  相位导致的。图中虚线部分正好是半个运动周期,图中曲线的 M 型和 W 型表示运动方向发生了反向。图 2(b) 是图 2(a) 中测试结

果所作出的李萨茹图形。由于两者相位差接近  $120^\circ$ ，因此，李萨茹图形为椭圆。拟合的李萨茹图形如图 3 所示，由李萨茹图形中椭圆的相位变化，可推算出光纤的位移量。

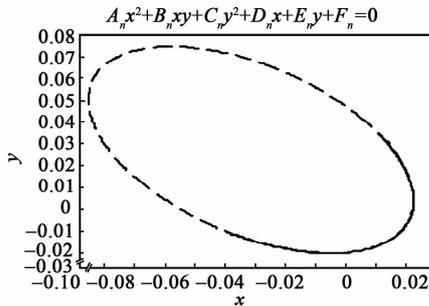


图 3 李萨茹图形的椭圆拟合

## 2 实验系统及实验结果

### 2.1 实验系统的检验标定

对系统的标定采取了如图 4 所示的方法，样品是一个被环氧包裹的陶瓷堆，将光纤在这个样品上紧密缠绕 60 圈作为信号臂，参考臂则不经过任何物体。当给样品施加 30 kHz 的正弦交流电后，样品上将产生 1 个 30 kHz 的超声信号，且这个信号的强弱可通过施加在样品两端的电压来调控。

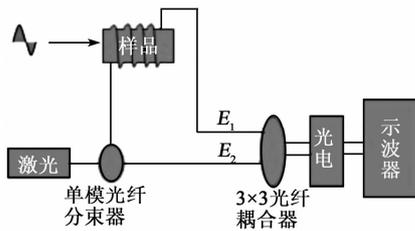


图 4 实验系统标定的原理图

正弦交流电加载后，示波器将采集到如图 2(a) 所示的信号，经过数据处理，1 个电压周期内，光纤的位移量变化如图 5 所示。由图可看出，位移和电压的频率一致，但两者的相位不同，可确定这不是电压源导致的干扰信号。

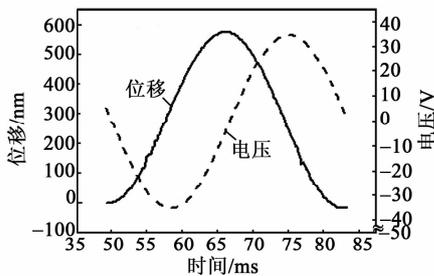


图 5 电压周期内位移量的变化

在频率固定时，不断改变电压值，位移的最大值

将随着电压的改变而改变，结果如图 6 所示。

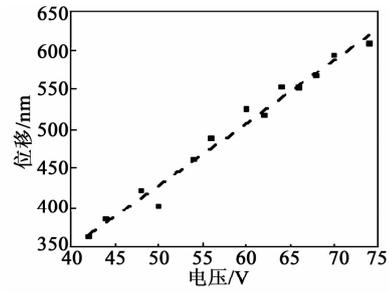


图 6 位移幅值随交流电压幅值的变化

由图 6 可看出，位移的幅值和交流电压的幅值几乎呈正比关系，这与压电材料在较低电压下的物理性质一致。图 4、5 的结果也说明了测试到的信号是压电材料因外加交流电压的作用而产生的超声振动信号。所能测量的最小位移量为 300 nm，最小可测位移量受光波波长的影响，当光纤中的光程变化小于 300 nm 时，将无法通过李萨茹图形拟合出椭圆。300 nm 的光程变化对应样品周长上的变化小于 4 nm，因此，这种方法在测试超声振动信号时具有很高的灵敏度。

### 2.2 实验系统的应用

实际样品在高压情况下工作，当样品的绝缘性有缺陷时就会产生局部放电，局部放电的同时会伴随着超声波的产生，引起振动，从而导致光纤中光程改变。实际测试中，超声信号引起的振动没有标定系统时那样规律，因此，实际测试得到的信号没有标定时期的规则。

图 7 为实测中的典型信号。通过振动信号可计算出整个运动周期内的位移。

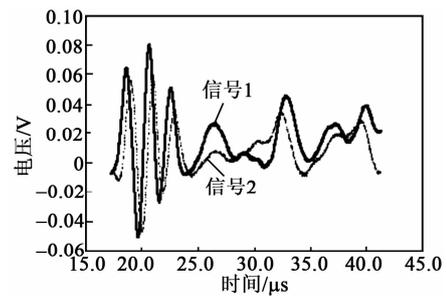


图 7 实测中的典型信号

图 8 为这种典型信号的结果经过计算还原成位移量变化。对样品在  $80 \mu s$  的时间窗口内进行测试，并对局部放电情况进行统计分析，表 1 为在不同电压下对一个高压器件进行局部放电测试的实验结果。由表可看出，随着电压的升高，局部放电的次数有增多的趋势，且局部放电的最大强度也在增强。

而从局部放电所需时间来判断,局部放电所产生的超声信号频率应为 30~200 kHz。

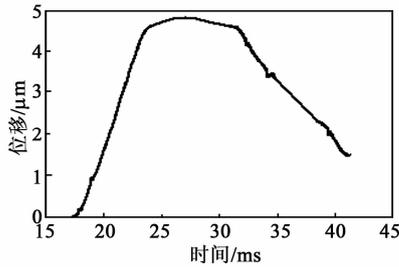


图 8 典型振动信号的位移

表 1 部分局放脉冲的光纤测试结果

电压/kV	最大振动位移量/nm	振动上升沿时间/ $\mu$ s
17.0	1 700	16.00
18.5	580	7.10
	570	3.65
20.0	300	2.40
	3 100	2.00
	300	1.20
21.5	3 000	16.00
	2 730	6.00
	1 050	6.00
	3 600	9.00
23.0	2 410	14.00
	1 400	16.00
	1 650	17.00
	1 700	17.00
	4 610	12.00

综上所述,光纤干涉法对于微小位移很敏感,采用多圈缠绕光纤法可进一步增强位移检测的灵敏度,用于检测高压绝缘部件中因局部放电引起的超声信号,具有灵敏度高、无电磁干扰等技术优势。

### 3 结束语

本文通过光干涉法实现了对局部放电产生的超声振动信号进行测试。从标定的情况看,这种检测法具有高的灵敏度,且在实际的局部放电测试中,此方法也很好地检测出样品的局部放电,表明其可作为局部放电的一种新的检测手段。同时,光纤具有纤细可弯曲的特点,因此,对于形状结构复杂的小型器件,这种检测法具有一定的优势。另一方面,利用超声波来检测局部放电的方法已广泛得到应用,但

对于局部放电产生超声波的详细机理,还未能得到一致性的认识,这种检测方法提出了一个新的检测思路。

### 参考文献:

- [1] LI D, LIANG J, BU K, et al. Ultrasonic detection of partial discharge on typical defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 72-75.
- [2] MANGERET R, FARENC J, AI B, et al. Optical detection of partial discharges using fluorescent fiber[J]. Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 1991, 26(4): 783-789.
- [3] ZHANG X, YAO Y, TANG J, et al. Actuality and perspective of proximate analysis of SF<sub>6</sub> decomposed products under partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 37-42.
- [4] HUDON C, BARTNIKAS R, WERTHEIMER M R. Effect of physico-chemical degradation of epoxy resin on partial discharge behavior[J]. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 1995, 2(6): 1083-1094.
- [5] 郭俊, 吴广宁, 张血琴, 等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 29-35.  
GUO Jun, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 29-35.
- [6] 司文荣, 李军浩, 袁鹏, 等. 超声-光法在高压电器设备局部放电检测中的应用[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 59-63.  
SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. Application of acousto-optical partial discharge detection to high voltage equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 59-63.
- [7] ZARGARI A, BLACKBURN T R. Application of optical fibre sensor for partial discharge detection in high-voltage power equipment[C] //S. l. : IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomen, 1996, 2: 541-544.
- [8] PALTAUF G, NUSTER R, HALTMEIER M, et al. Photoacoustic tomography using a Mach-Zehnder interferometer as an acoustic line detector[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3352-3358.