文章编号：1002-2082(2008)06-0990-05

基于光纤耦合器的声发射传感器

马良柱，常　军，刘统玉，霍佃恒
（山东科学院 激光研究所， 山东 济南 250014）

摘　要：为检测变压器内局部放电产生的声发射信号，介绍了一种基于特殊光纤熔融拉锥耦合器型声发射传感器。它是利用声波引起的扰动改变耦合器两臂光功率输出的特点来检测声发射信号。实验结果表明：此种传感器在10 kHz～250 kHz范围内对声发射信号有良好响应，在155 kHz灵敏度为5.6×10^{-6} V/Pa，噪声为1.8 Pa声压，有望在复合材料与结构、电力无损检测方面得到应用。

关键词：光纤传感器；声发射；超声；熔融拉锥过度耦合器
中图分类号：TN25　　**文献标志码**：A

Acoustic emission sensor based on fiber coupler

MA Liang-zhu, CHANG Jun, LIU Tong-yu, HUO Dian-heng
(Laser Institute, Shandong Academy of Science, Jinan 250014, China)

Abstract: An acoustic emission (AE) sensor based on over fused-taper fiber coupler is introduced to detect the acoustic emission signal produced by partial discharge in transformer. The AE sensor detects the AE signal according to the turbulence caused by the acoustic wave, which may change the optical power output of the two coupling arms. The experimental results prove that such kind of sensor has a flat response to AE in 10 kHz～250 kHz and its typical sensitivity is 5.6×10^{-6} V/Pa with a noise of 1.8 Pa at 155 kHz.

Key words: fiber sensor; acoustic emission; ultrasound; over fused-taper fiber coupler

引言

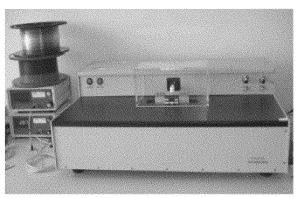
声发射技术是指利用仪器检测、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术，在材料研究、压力容器评价和复合材料结构等方面的研究与应用已取得了明显效果[1]。在电力变压器使用寿命的后期，通过对其绝缘状态等实现无损在线检测及故障早期预警具有重要意义。变压器局部放电是状态检测的重要手段，变压器局部放电超声信号频谱较宽，且能量大都集中在50 kHz～250 kHz频段。传统的压电陶瓷类超声传感器受电磁干扰比较严重，在强电场环境下其有效性受到很大制约，因此对于基于光纤的声发射检测技术的研究具有重要意义。光纤声发射传感器目前主要是光纤干涉仪类型，它的优点是灵敏度很高，缺点是结构复杂，成本高，易受温度漂移和外界干扰的影响[2]。其他报道的超声传感器的设计是基于光学反射和多涂层技术，同样存在结构复杂，条件要求苛刻，不实用[2]。本文介绍的光纤声发射传感器具有成本低、结构简单、不受温度漂移影响的特点，它以单模光纤耦合器作为基本结构，通过在熔融拉锥过程中改变一些结构参数，使之对外界环境（温度、压力、振动等）有较灵敏的响应，从而实现对这些信号的检测[3]。

收稿日期：2008-01-17；　修回日期：2008-07-11
基金项目：863计划子课题“新型实用高灵敏度纤栅式地震检波器的研制”；国家科技支撑计划子课题(2006BAK04B02)
作者简介：马良柱(1983－)，男，山东昌乐人，工程师，主要从事光纤声发射、振动、加速度传感器方面的研究工作。
E-mail：xiaoma1357@163.com

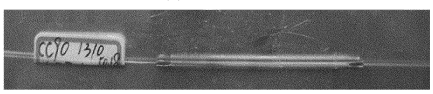
1 光纤熔融拉锥过度耦合器的制备及工作原理

1.1 制备

把2根中间除去涂覆层的清洁单模光纤扭绞后平行放于拉锥工作台(图1(a))的马达支架上,由真空吸槽吸住,然后移入氢氧焰进行加热并同时拉伸,在此过程中同时监测耦合器的分光比和附加损耗,直到拉至预设参数后再进行封装。此时耦合区已形成2个锥形部分和一个细腰的结构,熔锥区的几何形状是拉伸速度、光纤的预张力和火焰温度及形状的函数。典型的耦合器具有一个耦合腰区(长约5 mm,直径约10 μm)和2个锥形部分(每段长约3 mm)。封装时用V型石英槽保护,石英槽的两端用353环氧树脂胶固定,两固定点间距约为30 mm,拉制完成的耦合器如图1(b)所示。



(a) 拉锥工作台



(b) 耦合器

图1 熔融拉锥设备及拉制完成的耦合器实物(90个耦合周期)

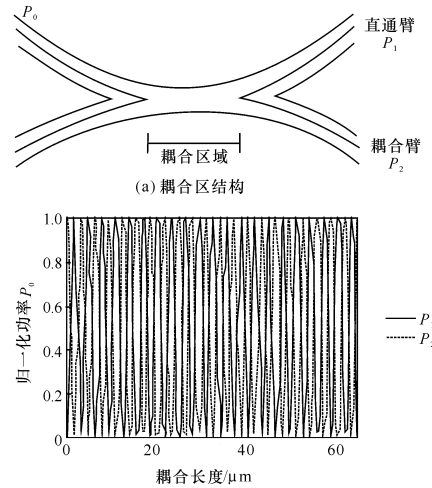
Fig. 1 Fabrication equipment of fused-taper coupler and fabricated coupler ($cc=90$)

1.2 结构特点

图2(a)所示为耦合器耦合区的典型结构,在耦合区域由于2光纤包层合并在一起,纤芯足够逼近,因此耦合器为2波导构成的弱耦合结构[2]。根据弱耦合模理论分析可知,相耦合的2波导中的场各保持该波导独立存在时的场分布和传输系数,耦合的影响仅表现在场的复数振幅变化上。根据局部耦合模式理论的分析[2],如果记输入光功率为P_0,直通臂的光功率输出为P_1,耦合臂为P_2,则有:

$$\left.\begin{aligned} P_1(l)&=P_0\cos^2\{\int_0^l C(z)\mathrm{d}z\}\\ P_2(l)&=P_0\sin^2\{\int_0^l C(z)\mathrm{d}z\}\\ P_1(l)+P_2(l)&=P_0 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中:$C(z)$是沿耦合区分布的耦合系数;l为有效耦合长度。由(1)式可见,2输出功率P_1和P_2均为周期变换函数,光功率P_0在2耦合光纤间周期性地切换,且周期变化的快慢与耦合系数$C(z)$及拉伸长度l相关。



(a) 耦合区结构

(b) 2臂功率输出与耦合长度的关系

图2 耦合器结构示意图及其2臂能量输出随耦合长度变化曲线

Fig. 2 Structure diagram of coupler and variation of power output with coupling length

根据(1)式作出图2(b),它给出了理论上2臂光功率输出随耦合长度的变化,可以看出2臂输出光强随耦合长度延长发生能量的完全交换。耦合长度越长,能量的完全交换所要求的耦合长度变化就越短,也就是耦合器2臂输出能量变化对耦合长度的变化更加灵敏,故增加能量转换周期会增加耦合器式传感器的灵敏度。

1.3 过度耦合器检测声发射/超声的原理

声光效应指的是光波导介质中光波与声波的相互作用,是弹光效应的表现之一[4]。声波在介质中传播引发的应力场会导致介质折射率的变化,当外部声场作用于耦合器时,会在耦合器的环氧连接端激发出内部的声波,这个声波沿着耦合区传播导致应变场沿耦合区的扰动。耦合器的锥形区起到应变集中的作用,在细腰区入射声波的效果被放大[4]。入射声波传播引起的动态应变场在光弹作用和机械作用下使耦合区折射率和有效耦合长度发生改变,引起耦合系数$C(z)$和有效耦合长度l的变化,后者在耦合器输出功率的变化中起主要作用。耦合器受到声波扰动后其功率输出[5]可表示为

$$P_1(l,t)=P_0\cos^2\{\int_0^l C(z)[1+\varepsilon(z,t)]\mathrm{d}z\}$$
$$P_2(l,t)=P_0\sin^2\{\int_0^l C(z)[1+\varepsilon(z,t)]\mathrm{d}z\} \quad (2)$$

式中$\varepsilon(z,t)$是由入射声波引起的沿耦合区的动态应变分布,对于正弦声波扰动$\varepsilon(z,t)$[5]可表示为

$$\varepsilon(z,t)=\varepsilon_0(z)\cos(\frac{2\pi}{\Lambda}-2\pi ft)$$

式中:Λ和f分别对应声波的波长和频率;$\varepsilon_0(z)$是有效应变幅度,取决于声功率、耦合效率、耦合区的直径和材料的性质等。扰动导致耦合器耦合臂和直通臂输出光功率的变化,光功率的变化携带了声波的幅度和频率的信息,且2臂变化趋势相反。故其差分输出$\Delta P_s=\Delta P_1-\Delta P_2=2\Delta P_1=-2\Delta P_2$,这种强度解调的方法具有结构简单、成本低、工作稳定的特点。为消除光源光功率P_0起伏对系统的影响,后级输出P_s采用:

$$P_s=(P_2-P_1)/(P_2+P_1)=$$
$$(P_2-P_1)/(P_0\cdot\chi) \quad (3)$$

将(1)式带入(2)式并对(2)式取微分,化简整理得:

$$\mathrm{d}P_s=\frac{-2}{\chi}\sin\{\int_0^l C(z)[2+2\varepsilon(z,t)]\mathrm{d}z\} \quad (4)$$

由此可见,最后输出由于取差分输出放大了动态应变场的作用,且与光源功率P_0及线路损耗没有关系。χ表示耦合器的附加损耗,对于特定耦合器是定值。

2 实验与结果

2.1 过度耦合器光功率输出与施加应变的关系

将用作传感器的过度耦合器和应变片粘贴于悬臂梁上,耦合器的输入端接宽带光源,2个输出端分别接至HP 86142A型光谱仪以观察对其施加不同应变时输出能量的变化,施加应变的数值通过数字应变仪(朗斯测试公司LC-1004-2)得到。结果如图3所示,A(实线)代表不施加应变时传感器的输出光谱,B(间断线)和C(点间断线)分别代表施加110 με和220 με时的输出光谱,可以看出,当施加220微应变时直通臂(Output1)在1 308.5 nm处光强从−3.03 dB(实线)变为−3.49 dB(点间断线),在1 316 nm处光强从−5.1 dB(实线)变为−5.94 dB(点间断线),其他波长处亦有显著能量变化,这验证了过度耦合器检测声发射/超声的可行性。

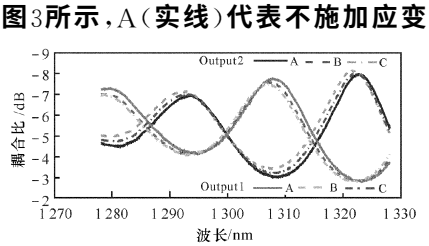


图3 施加110 με(间断线)和220 με(点间断线)时过度耦合器输出光谱

Fig. 3 Transmission spectrum of over-coupled coupler when exerting strain of 110 με and 220 με

2.2 光纤耦合器声波/超声解调方案及结果

典型的光纤声发射/超声解调方案如图4所示,宽带光源发出的光经隔离器进入传感器的一端,经过传感器分为2路后进入解调仪器内部分别送探测器进行光电转换并放大得到V_1和V_2,模拟

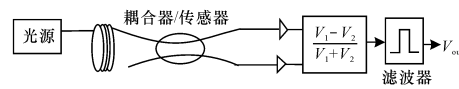


图4 基于光纤耦合器的声发射/超声检测系统

Fig. 4 AE/ultrasound detecting system based on fiber coupler

电路计算单元对V_1和V_2按照(4)式进行计算得到信号电压值V:

$$V=G\frac{V_1-V_2}{V_1+V_2}+V_{\mathrm{offset}} \quad (5)$$

式中:G为放大器增益;V_{offset}为放大器的后级直流漂移调整,它可在光电转换不饱和的情况下灵活地消除不同传感器不同损耗造成系统灵敏度不一致的影响,是一种实用方便的调整方法。由(3)式可知模拟除法运算可以消除光源强度起伏和线路连接损耗对最终信号的影响,对运算后的信号放大后送10 kHz~250 kHz带通滤波器后得到末级输出信号,通过数字示波器或者经数据采集卡送计算机通过软件显示。图5(a)中下面的线对应光纤传感器对低频振动/声波的低频响应,上面的线对应应变仪的输出,其中1 mV代表1个微应变,图5(b)给出当对悬臂梁实施一次敲击时(模拟高频振动)光纤耦合器和应变仪的输出响应,可以看出光纤耦合器对高频振动/声波的响应优势。这种解调方案在应用时需要1进2出3根光缆,这给实用带来一定困难。

2.3 压电陶瓷片声源试验

用压电陶瓷片标定光纤声发射传感器的示意图如图6所示,函数发生器的双通BNC一端接至PZT,另一端接到示波器1通道作参考。光纤声发

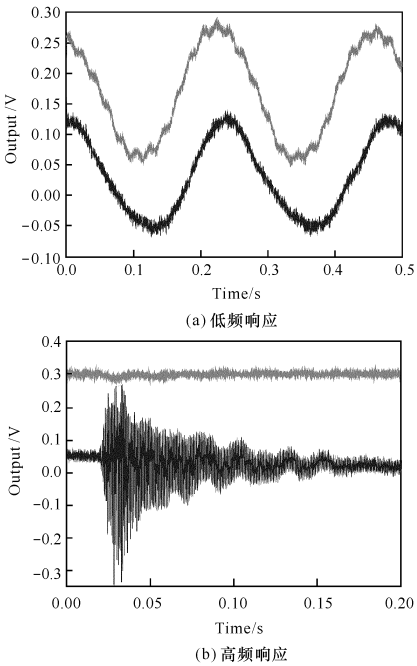


图5 应变仪与常规光纤声发射/超声传感器的低频响应与高频响应对比

Fig. 5 Contrast of low-and high-frequency response obtained by digital strain amplifier and optic fiber AE sensor

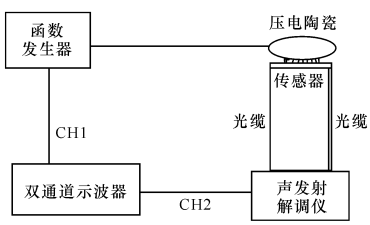


图6 压电陶瓷片标定声发射传感器实验示意图

Fig. 6 Experiment diagram of AE sensor calibrated by PZT calibration block

射传感器用刚性胶水粘贴在陶瓷片表面,声发射解调仪输出接到示波器的2通道显示。由于没有在整个频带内响应平坦的超声源,本文采用中介法对光纤声发射传感器进行标定,采用美国 Physical Acoustic 公司的 Model R15 压电陶瓷作声源[6],R15S 探头与光纤声发射传感器同时接收,在 155 kHz 处根据R15S 传感器的灵敏度手册查表得到声源的相当声压,这样就可得光纤传感器的灵敏度为 5.6×10^{-6} V/Pa,噪声相当于 1.8 Pa 声压。本

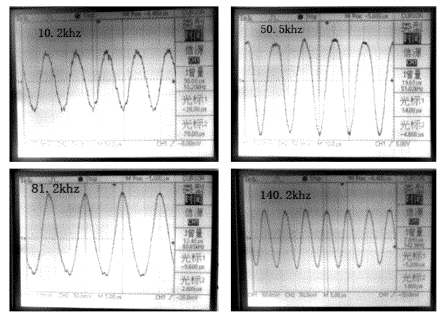


图7 光纤声发射传感器在激励信号频率为 10.2 kHz,50.5 kHz,81.2 kHz,140.2 kHz 时的响应

Fig. 7 Response of fiber AE sensor when frequency of excitation signal is 10.2 kHz, 50.5 kHz, 81.2 kHz, 140.2 kHz respectively

文采用了宇海电子陶瓷公司的谐振频率为 18 kHz, 36 kHz, 64 kHz, 86 kHz, 104 kHz, 116 kHz,150 kHz 的压电陶瓷片对传感器进行了试验(见表1),发现在每个陶瓷片的第一谐振频率处都能还原激励波形(图7),在反谐振频率处基本无响应,在其他频段断续出现响应区与死区,参考相关文献可知这与陶瓷片的幅度频率响应曲线规律一致,故认为只要陶瓷片振动达到一定幅度,过度耦合器式传感器对超声(10 kHz~150 kHz)的响应是平坦的,带内响应不平坦是由压电陶瓷片的输出对频率的非线性造成。对单一频率的超声响应不如压电陶瓷传感器,声发射是一个频段的超声,压力容器的声发射频谱集中在 20 kHz~200 kHz,岩石的声发射频谱大致分布在 1 kHz~100 kHz 范围,复合材料的频谱在 1 kHz~150 kHz 分布,光纤耦合器用作上述领域的声发射检测是合适的。工业上的声发射仪标定常用 2.5 cm HB 铅笔芯折断的方法对传感器进行标定,铅芯折断的典型频谱如图8(a)所示,光纤声发射传感器检测到的波形如图8(b)所示。

表1 声发射传感器对A,B,C 3个PZT 的响应点

Table 1 Response of fiber AE sensor towards three PZTs

陶瓷	光纤传感器响应点/kHz
A 谐振 (80.6 kHz)	10.2,18.18,27.3,33.2,35.4,40.2,50.5,63.1,77.5,81.2,92.4,110.4,123,140.5
B 谐振 (104.447 kHz)	12.93,36.2~37.8,40.4,48.6,55.7~56.3(峰)~57.6,70.8,84.7~86.7~88,100.8~106.2,112.1,150.8
C 谐振 (115.2 kHz)	11.4,100.5~104.6,114~116.1(峰)~120.6,140~155.4(峰2)~163.3

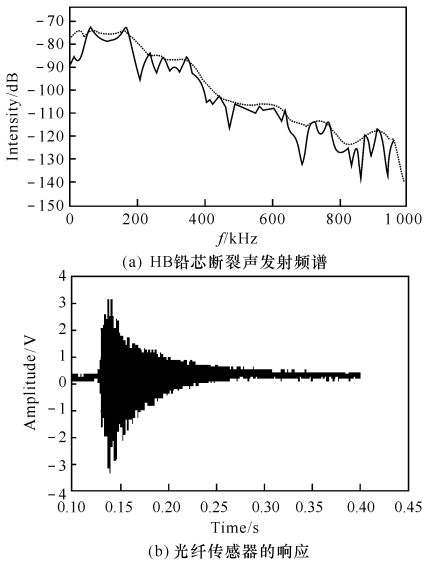


图8 HB铅芯断裂声发射频谱与光纤传感器的响应

Fig. 8 Emission spectrum of HB pencil break and response of fiber AE sensor

2.4 讨论

上述光纤声发射传感器由于是三端口器件即一个传感器需要3根光纤,为了实用方便,可以对上述三端口传感器进行改造。其一是在耦合器的一个输出端连接一个光纤反射镜(fiber reflect mirror),使传感器成为一个单端口反射式传感器;其二是把传感器的2个光纤输出端直接熔融连接形成光纤环形反射器(fiber loop mirror)以得到进一步简化[7]。

3 结论

耦合器式光纤声发射/超声传感器克服了传统压电式传感器易受干扰、谱频响应窄的缺点,作为一种强度调制型传感器,与其他类型的光纤声发射传感器相比具有结构简单、制作容易、检测方便且稳定的特点。介绍了其工作原理和实验方案及结果,讨论了用压电陶瓷标定传感器的方法和结果,该传感器有望在金属或复合材料与结构的无损探伤、电力无损检测等领域得到应用。

参考文献:

[1] 袁振明,马羽宽,何泽云. 声发射技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1985:12-50.
YUAN Zhen-ming, MA Yu-kuan, HE Ze-yun. Application of AE technology[M]. Beijing: China Machine Press,1985:12-50. (in Chinese)

[2] 孙圣和,王廷云,徐影,等. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002:118-145.
SUN Sheng-he, WANG Ting-yun, XU Ying, et al. Optic fiber measurement and sensing technology [M]. Harbin: HIT Press, 2002: 118-145. (in Chinese)

[3] CHEN R, FERNANDO G F, BUTLER T, et al. A novel ultrasound fibre optic sensor based on a fused-tapered optical fibre coupler[J]. Measure Science Technology, 2004,15(6):1490-1495.

[4] ZHANG J,FARWELL S G,KOCH C,et al. Measurements and analyses of the fields in fused tapered single-mode fiber couplers[J]. Applied Optics, 1989,28(9):2026-2030.

[5] BIRKS T A, YUAN S, GREEN R, et al. The acousto-optic effect in single-mode fibre tapers and couplers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1996,14(7):2519-2529.

[6] LIU T, FERNANDO G F, RAO Y J, et al. Simultaneous strain and temperature measurements using a multiplexed fiber Bragg grating sensor and an extrinsic Fabry-Perot sensor[J]. J. Smart Struct. Mater., 1998,7(4):550-556.

[7] CHANG J, MA L, LIU T, et al. Fiber optic vibration sensor based on over coupled fused coupler[J]. SPIE, 2006,6595:6595C-1-6.