

光纤传感技术在变压器状态检测中的应用研究

杜剑波¹, 魏玉宾², 刘统玉²

(1. 河南省许昌供电公司, 河南 许昌 461000; 2. 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250014)

摘要: 实现对变压器等电力系统关键设备的状态检测, 迫切需要适合强电场环境的各种在线监测技术。简要介绍近年来兴起的相关光纤传感技术进展, 重点描述适于变压器油温、绕组温度在线监测的光纤光栅温度传感系统; 用于局放检测的光纤超声传感器; 用于变压器油溶解性气体分析的光纤多种气体监测技术。最后给出了基于全光纤传感技术的变压器状态监测方案。

关键词: 变压器; 状态检测; 光纤传感器; 温度; 绝缘; 气体分析

Study of optical fiber sensor technology applying in state detecting of transformer

DU Jian-bo¹, WEI Yu-bin², LIU Tong-yu²

(1. Xuchang Power Supply Company, Xuchang 461000, China;

2. Laser Research Institute of Shandong Sciences Academy, Jinan 250014, China)

Abstract: To detect state of key equipment of electricity power system such as transformer, it is necessary for having suitable measuring techniques on-line for the strong magnetic field environment. This paper briefly introduces the recent development related to optical fiber sensing technology, and describes in detail about FBG temperature system for transformer hotpot measuring, fiber ultrasonic sensor for local discharging detecting, fiber multi-gas monitoring technology for dissolved gases analysis. Lastly a transformer state monitoring Solution based on all fiber sensing technology is presented.

Key words: transformer; state detecting; optical fiber sensor; temperature; insulation; gas analyzing

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)23-0036-05

0 引言

电力变压器是变电站的重要设备, 是电力系统的枢纽环节, 负担着电网的升压、降压和电压调节等重任。近年来, 随着我国经济的发展和人民生活水平的提高, 用电需求量迅速增长, 电网的规模不断扩大, 电压等级不断提高, 变压器的单机容量不断增大, 导致变压器的故障率也随之增加。及时了解变压器的运行状况, 对可能发生故障的部位进行检修, 是减少变压器故障率、提高变压器运行安全性的重要措施。

状态检测的重点主要是变压器运行管理人员所关心的变压器内部故障, 其主要类型有: 各项绕组之间发生的相间短路、绕组的线匝之间发生的匝间短路、绕组或者引出线通过外壳发生的接地故障等。内部故障的表现形式可分成热故障和电故障两大类。热故障通常为变压器内部局部过热、温度升高。电故障通常指变压器内部在高电场强度的作用下, 造成绝缘性能下降或劣化的故障。根据放电的能量密度的不同, 分为局部放电、火花放电和高能

电弧放电三种故障类型。由此可见, 变压器温度和局放是状态检测的关键手段。电力变压器的各种损伤机理相互关联, 由于绝缘损伤会导致出口、绕组、铁芯局部过热; 温度过热将加速绝缘材料的分解、损坏, 进而形成恶性循环。过热和绝缘损伤的重要征兆是变压器油内析出气体成份的变化, 因此, 除对温度和局放的直接检测外, 对变压器油内的析出气体的在线检测成为状态检测的重要手段。

传统的温度检测手段主要是热电偶; 局放检测依靠高频信号检测和压电陶瓷超声传感器; 变压器油析出气体检测主要依靠半导体或电化学传感器。上述电子检测技术都取得了不同程度的成功, 但也存在局限性: 包括(1)受强电磁场和环境噪声干扰; (2)气体传感器选择性差等。

随着光电子技术的发展, 基于光纤的传感技术近年来在军事、石油、化工、医学等高端领域越来越多地得到应用, 由此带动了向传统行业的应用推广。光纤传感器在电力行业的应用包括全光纤电流电压传感器; 光纤温度、振动、压力、声发射和各种气体传感器。国内外对于上述传感器的技术及应

用研究, 从上世纪 80 年代初就已经开始。本文针对电力变压器在线检测的技术需求, 提出了基于光纤传感技术的变压器状态检测方案, 实现了变压器状态的实时在线检测。

1 光纤传感技术

光纤传感技术是伴随着光纤通信发展起来的一门多学科交叉技术。近年来研究和应用的发展都比较迅速, 目前已经研制出两千多种基于光纤的传感器, 可以用于测量温度、压力、应变、振动、超声等物理量; 气体成份, pH 值等化学量; 抗体、基因等生物量。光纤传感器与常规的电子类传感器相比有许多独特之处, 主要优点包括:

1) 传感器由玻璃纤维制成, 绝缘性能好。

2) 通过光信号的特征变化实现对外界参数敏感的功能, 传输光缆完全不带电, 具有本质安全, 适合在油气场合工作。

3) 利用光波作为传感信号, 测量不受外界电磁场干扰, 长期漂移小, 可以在高压等强电场环境下对电力设备进行长期在线检测。

4) 传感器的体积小、重量轻, 可以方便地安装在设备内部, 譬如绝缘气室内部, 变压器油箱或绕组内部进行长期监测。

5) 通过一根光纤本身可以对沿线的数千、甚至数十万个点进行分布式实时温度在线测量, 这种超强的多点检测能力, 是任何其它传感技术所无法媲美的。

6) 以光波长作为长度测量单位, 长度测量精度可达到接近纳米量级, 因此以光纤为基础的声发射、应变和温度等传感器的监测灵敏度可以达到和超过传统的电子器件。

1.1 光纤光栅温度传感器用于变压器热点的检测

变压器在运行中产生的损耗几乎都转化为热能, 一部分散到周围介质中, 一部分加热了铁心、绕组, 使绝缘强度下降、寿命缩短, 甚至发生热击穿, 变压器发生短路或冷却系统出现故障时, 绕组温度急剧上升, 甚至可能烧毁变压器。对温度的监测可以反映缺陷或故障。如果对变压器油温和绕组温度进行实时监测, 将可以及时发现故障严重程度的发展趋势, 从而提早对故障的发生进行预防措施。

光纤光栅 (FBG) 是上世纪七十年代发明的一种新技术。它是一种反射式光纤滤波器件, 通常采用紫外线干涉条纹照射一段 10 mm 长的裸光纤, 纤芯吸收紫外线发热产生永久型折射率周期变化。当入射进入光纤的波长满足公式 1 的条件时, 在光波导内传播的前向导模会耦合到后向反射模式, 形成布拉格反射。对于特定的空间折射率调制周期 (Λ)

和纤芯折射率 (n), 布拉格波长为:

$$\lambda B = 2n \Lambda \quad (1)$$

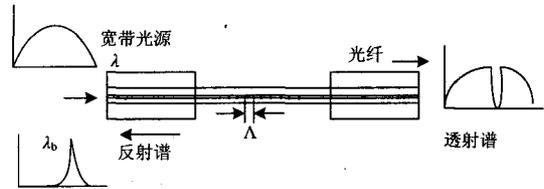


图 1 光纤光栅原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of FBG

由式 (1) 可以看出: n 与 Λ 的改变均会引起反射光波长的改变。因此, 通过一定的封装设计, 使能外界温度、应力和压力的变化导致 n 与 Λ 发生改变, 即可使 FBG 达到对其敏感的目的。FBG 中心波长与应力及温度变化的关系为

$$\Delta \lambda B = \lambda B (1 - \rho) \Delta \varepsilon + \lambda B (1 + \xi) \Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta \lambda B$ 是应力和温度变化引起的反射光中心波长的改变; $\Delta \varepsilon$ 为应力的变化; ΔT 为温度的变化量; ρ 是光纤的光弹系数; ξ 为光纤的热光系数。图 1 为光纤光栅的工作原理示意图, 宽带光源输入, 经过光纤光栅后, 在布拉格波长的窄带光谱被反射到光纤的输入端; 其余的波长透射通过。当把光纤光栅封装在绝缘外壳内部时, 外界环境温度, 经过壳体传导到光纤光栅, 使其波长发生变化。通过精确地测量反射信号的波长, 可以实现对温度的检测。多点光纤温度检测系统如图 2 所示。由于光纤光栅尺寸非常小, 可以经过合适的设计使之嵌入到物体的内部, 从而实现物体内部温度的实时检测如图 3。变压器绕组温度的最高点通常位于绕组中上部, 但在这个位置进行测量很不方便, 因此一般采用绕组的上表面温度作为变压器绕组温度的最高点。在变压器的绕组的上表面, 局部有较大的测量平面, 将光纤光栅温度传感器可以比较方便地粘贴于绕组表面。图 4 是一种用于高压变压器油温监测的传感器, 可以方便地安装在变压器油温监测孔内。

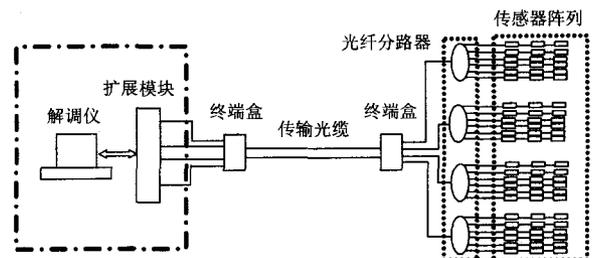


图 2 多点光纤光栅温度检测系统框图

Fig.2 System frame of multipoints FBG temperature measuring

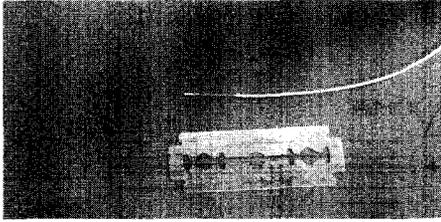


图3 小型化光纤光栅温度传感器实物图

Fig.3 A little FBG temperature sensor

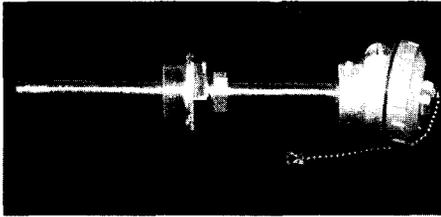


图4 用于变压器油温监测的光纤传感器

Fig.4 A transformer oil temperature fiber sensor

1.2 用于变压器局放检测的光纤振动和超声传感器

超声检测是无损检测的重要手段之一。变压器局部放电产生的超声波分两类，一是气泡或气隙内放电，特征是均匀密集、如金属板电极间的油放电。气泡击穿声频率为几至几百kHz；二是介质在高场强下游离击穿，特征是间断、大脉冲，如针对板放电，其声发射频谱更宽，且能量大都集中在50~300 kHz频段。

超声波在线检测中的噪声主要有励磁噪声、散热器风扇和油循环油泵噪声、磁滞噪声等，它们的强度超过局放信号，故必须分析、了解噪声与超声波信号的频谱特征。资料数据表明，变压器两侧面、散热器侧的噪声的频率均小于15 kHz，属于低频可听噪声。变压器铁心磁噪声频率范围为10~65 kHz。其它电压等级变压器的噪声频谱分布亦分布在小于65 kHz 频率范围。由此可见，变压器的噪声与局放超声信号的频率分布明显不同。实验和理论分析表明，传播媒质对超声吸收系数随频率的平方增长，即频率愈高，吸收系数愈大，声波在传播中的衰减愈厉害。因此系统必须利用低频段超声信号，以保证其高灵敏度，同时避开变压器铁心自身振动、噪声和其它电磁噪声等干扰。超声定位系统通带取70~180 kHz。

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。因此基于光纤的声发射检测技术的研究具有非常重要的意义。经过多年研究，我们发现基于光纤熔锥型耦合器独特设计的声发射传感技术具有很多独特的优点，包括技术简单、结构紧凑、成本低，便于工程应用等优势。传感器的结构如图5所示。

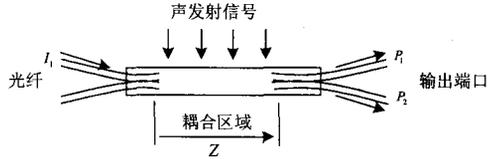


图5 光纤熔锥型耦合器声发射传感器

Fig.5 Fiber fuse tapered couple acoustic emission sensor

当声发射信号作用于耦合区域时，两路输出光 P1、P2 将受到调制，通过测量 P1、P2 的比例可以检测出声发射信号，光纤声发射传感器监测系统如图6所示，图7是传感器检测到的超声信号。

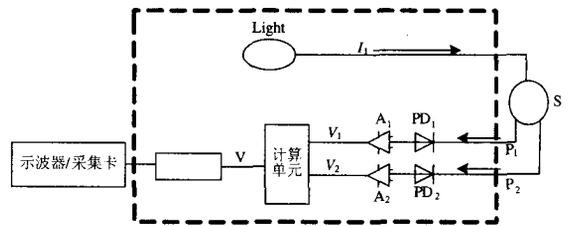


图6 光纤声发射传感器监测系统示意图

Fig.6 Diagram of fibre acoustic emission Ssensing system

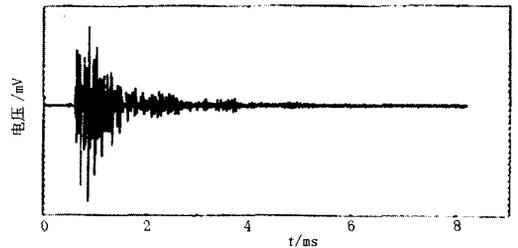


图7 光纤声发射传感器检测到的超声信号

Fig.7 Ultra-acoustic signal of fiber fuse tapered couple Acoustic emission sensor measuring

宽带光源发出光 I_i 经光纤耦合器传感器 S 分成两路 P1 和 P2，分别经过光电探测器 PD1、PD2 转换为电流信号，再经过运算放大器 A1、A2 进行放大，得到电压值 V_1 、 V_2 。模拟电路计算单元对 V_1 、 V_2 按照公式 (3) 进行计算得到电压值 V ，由带通滤波器滤波后，用数据采集卡进行记录。

$$V = G \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (3)$$

其中： G 为放大器增益。电子信号处理可以有效地消除因光源的功率变化、光纤损耗等对信号解调带来的影响。在数据处理的过程中，滤波器对提高信噪比有很重要的作用，可以有效地去除噪音，提取所需要的信号。示波器或数据采集卡可以对信号采集并根据设定的阈值把波形自动存储，以便进一步

分析。根据对压电陶瓷类声发射传感器的应用经验, 对于无损检测分析比较有价值的信号通常集中在 10 kHz 到 150 kHz 的频带内。在电路设计中采用了相应的带通滤波器。

传感器的尺寸可以根据应用环境减小, 直径可以在 3 mm 以内, 长度为 30 mm。对于高压环境的应用场合, 可以使用绝缘工程塑料作为传感器的封装材料。

1.3 用于变压器油析气体检测的光纤气体传感器

变压器油中溶解气体分析法(DGA 法)是对电力变压器内部故障早期预警及故障类型诊断等的重要手段。变压器故障特征的气体包括 H₂, CO, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂。DGA 法能够在不停电的情况下进行故障检测, 不受外界电磁场的影响, 可以定期在变压器运行过程中对其内部故障进行诊断。随着变压器油温的升高, 产气率最大的气体依次是甲烷 CH₄、乙烷 C₂H₆、乙烯 C₂H₄ 和乙炔 C₂H₂。因此, 故障温度和油中气体含量之间存在着对应关系。该方法正越来越多地成为电力系统中对油浸式电力设备进行故障诊断的监测手段。

表 1 气体、相应吸收波长以及检测灵敏度 (1 米气室)

Tab.1 Gas 、 Absorption wavelength and detection sensitivity(1m gas cell)

| 气体 | 吸收波长 | 灵敏度 (1 米气室长度) |
|-------------------------------|------------------|---------------|
| CO | 1570, 2300 nm | 10, 5 |
| CH ₄ | 1650 nm | 0.03 |
| C ₂ H ₄ | 1630 nm | 0.2 |
| C ₂ H ₂ | 1530 nm | 0.02 |
| CO ₂ | 1570, 2000 nm | 7, 0.1 |
| H ₂ S | 1570 nm | |
| O ₂ | 760.5 nm | 15 |
| C ₆ H ₆ | 1660 nm | 0.3 |
| NO | 1800 nm | 5 |
| NO ₂ | 670, 1990, 448nm | 6, 3 |
| NH ₃ | 1530 nm | 5 |
| H ₂ O | 1343, 1392 nm | |
| SO ₂ | 1361, 1151nm | |

国内外变压器在线 DGA 监测的传感器多采用半导体金属氧化物, 如 SnO₂, ZnO, Fe₂O₃, TiO₂, 等做成的电阻式半导体气敏元件。分立的半导体气敏传感器具有响应速度快的优点, 但通常存在选择性差或交叉敏感问题。根据气体在近红外波段的光谱吸收特征, 可以实现光纤气体传感器。光纤传感器具有选择性高, 长期稳定, 不受电磁场干扰等优点。

基于光纤和可调激光器的气体检测技术, 以甲烷传感器为例。图 8 为扫描可调激光器波长时得到的不同浓度甲烷气体在 1650 nm 附近的吸收光谱, 横坐标为波长的取样点, 纵坐标是气体吸收的归一化强度。

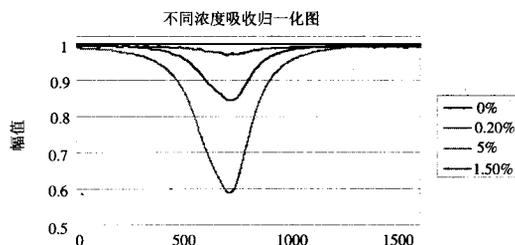


图 8 由扫描可调激光器得到的不同浓度甲烷气体在 1650 nm 附近的吸收光谱

Fig.8 Absorption spectrum of different concentration CH₄ gas nearly 1650nm by scanning tunable laser

图 9 为光纤甲烷检测仪的原理框图。一个内置的参考气室用于确定甲烷气体吸收波长的位置, 以便保障系统在检测低浓度时依然可靠工作。测试结果见图 10 精度为 0.05%。通过使用锁相放大和数字处理技术, 可以实现 10 ppm 的监测灵敏度。

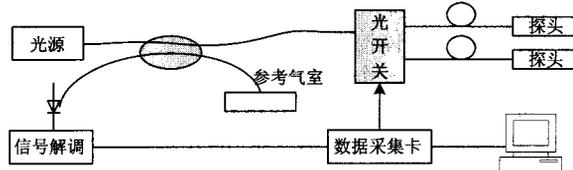


图 9 可调激光器光纤甲烷气体传感器信号检测框图

Fig.9 Schematic diagram of methane optical fiber sensor

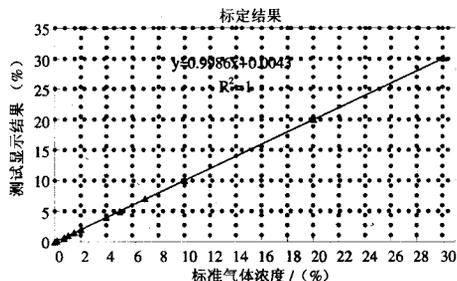


图 10 甲烷气体的标定数据

Fig.10 Methane calibrating data

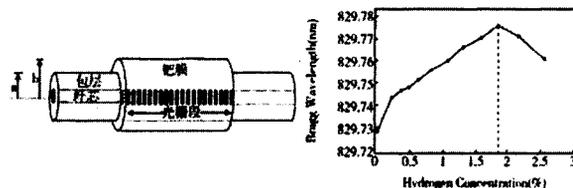


图 11 在光纤光栅上镀钯膜, 然后测量 FBG 的波长变化
Fig.11 Plating Pd-film on the surface of FBG, then measuring variation of FBG wavelength

变压器故障特征气体之一氢气在近红外波段没有吸收特征。但是金属钯对于氢的溶解度和选择性高, 所以大部分光纤氢气传感器都利用钯或钯合金薄膜作为传感材料。有氢气时, 金属钯会产生膨胀,

光纤氢传感技术就是利用这个特性，首先把在光纤的侧面或端面镀钯膜，然后测量由于氢气产生的应变或反射系数的变化。

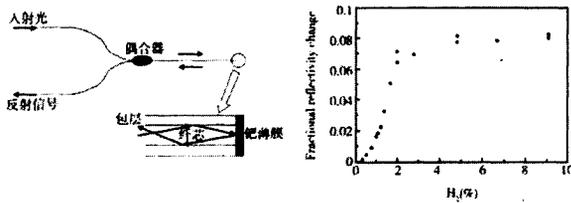


图 12 在光纤端面镀钯膜通过测量反射系数来测量氢气浓度
Fig.12 Plating Pd-film on the Surface of Fiber End ,to Measure H2 Concentration by Measuring Reflection Coefficient

2 基于全光纤传感技术的变压器状态在线检测系统方案

我们可以发挥光纤传感器的优势，将温度检测、超声波检测、气体检测等技术应用于变压器在线检测当中去，建立一个多参数的综合检测平台，对变压器的油温、局放、油析气体等重要参数进行实时检测，提高变压器运行的安全性能和事故预防处理能力。图 13 为光纤传感器在变压器内部的安装放置示意图，大致有三种传感器：温度、气体、超声等。

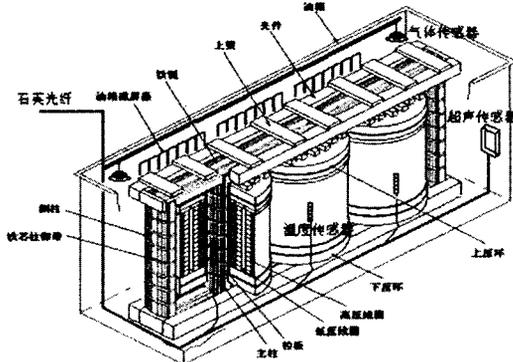


图 13 变压器内部传感器布放图
Fig.13 Sensor Deployment of Transformer Inner

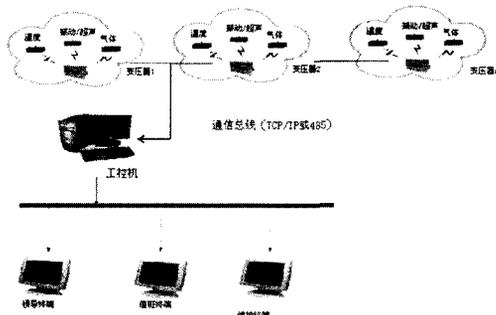


图 14 变压器安全状态在线检测系统
Fig.14 On-line Detecting System for Transformer Safety

每台变压器的监测参数都是通过光纤传输至工控机进行信号解调，非常容易实现远程在线检测，检测结果通过计算机与互联网形成一个实时在线监测网络，如图 14 所示，便于事故及时预防与处理，也为安全指挥提供便利平台。

3 结束语

电力变压器作为电力系统的关键设备，需要越来越多的关注其安全运行情况。由于电力设备运行的高压、强磁场等特殊环境，要求采取大量的先进检测手段进行状态检测。光纤传感器自诞生起，对其在电力设备系统状态的研究和应用就已经开始。三十多年来，在温度、超声、气体、电流、电压等方面的研究取得了巨大的成功。目前在电缆测温、变压器测温、设备震动检测、电流在线检测已经开始进入商品化阶段。可见基于光纤的传感技术在变压器热点检测、油析气体检测、局放检测等方面存在巨大应用潜力和优势，进一步研究提高，必将给变压器状态检测技术带来突破。

参考文献

- [1] 郭碧红, 杨晓洪. 我国电力设备在线监测技术的开发应用状况分析[J]. 电网技术, 1999, 23(8): 65-68.
- [2] 朱德恒, 谈克雄. 电绝缘诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [3] 严璋. 电气绝缘在线检测技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [4] IEC567-1992, 国际电工委员会 IEC 从充油电气设备取气样和油样及分析游离气体和溶解气体的导则[S].
- [5] 邱昌容, 王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [6] 王国利, 郝艳捧, 李彦明. 电力变压器局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工电能新技术, 2001, 20(2).
- [7] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [8] 张志鹏, (英)W.A.Gamblin. 光纤传感器原理[M]. 北京: 中国计量出版社, 1991

收稿日期: 2008-09-24; 修回日期: 2008-10-16

作者简介:

杜剑波 (1968-), 男, 工程师, 研究方向为光纤测量技术在电力系统中的应用;

魏玉宾 (1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为光纤传感; E-mail:wyb9806@163.com

刘统玉 (1963-), 男, 研究员, 研究方向为光纤传感及安全技木。