

# 一种适应变压器内部环境的高灵敏光学压力感知方法

冀茂<sup>1</sup>, 黄猛<sup>1</sup>, 郑玉平<sup>2</sup>, 齐波<sup>1\*</sup>, 滕皓楠<sup>1</sup>, 郑伟<sup>1</sup>, 潘书燕<sup>2</sup>, 李成榕<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;  
2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏省 南京市 211106)

## High Sensitive Pressure Optical Sensing Method Adapted to Transformer Internal Environment

Ji Mao<sup>1</sup>, HUANG Meng<sup>1</sup>, ZHENG Yuping<sup>2</sup>, QI Bo<sup>1\*</sup>, TENG Haonan<sup>1</sup>, ZHENG Wei<sup>1</sup>,  
PAN Shuyan<sup>2</sup>, LI Chengrong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;  
2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** With pressure monitoring of the transformer oil tank, we can grasp the pressure change process caused by gas production when serious internal defects occur, and take timely measures to ensure the safe operation of the transformer. Existing pressure sensors are generally metal-encapsulated or with air chamber structure, which poses a threat to the insulation of transformers if used directly inside. To this end, this paper proposed a new insulation-friendly optical pressure sensing method with temperature compensation. The fiber grating was encapsulated with fluorosilicone rubber inside and supplemented by an epoxy resin shielding shell on the outside. At the same time, the proposed structure adopted the double grating cross arrangement, which further improved the pressure measurement sensitivity, and the pressure sensitivity reached 15pm/kPa while avoiding the interference of the temperature rise. The results prove that the sensing structure is suitable for all kinds of oil-immersed power equipment, and can operate normally in a discharge environment, completely record the oil pressure changes caused by the breakdown of the oil gap, and sensitively sense small pressure changes in early failures.

**KEY WORDS:** transformer; oil pressure measurement; highly sensitive optical sensing; temperature compensation

**摘要:** 对变压器油箱进行压力监测可在内部发生严重缺陷时,掌握由产气引起的压力变化过程,及时采取措施保障变

压器安全运行。现有压力传感器普遍采用金属封装或具有空气腔结构,若直接用于变压器内部会对其绝缘构成威胁。为此,该文提出一种兼具温度补偿的绝缘友好型光学压力感知方法,内部采用氟硅橡胶封装光纤光栅,并在外部辅以环氧树脂屏蔽壳。同时,采用双光栅交叉布置方式,在避免变压器缺陷引起温度升高对传感器压力测量准确性造成干扰的同时,进一步提高压力测量灵敏度,压力灵敏度达 15pm/kPa。结果表明,该传感结构适用于各类油浸式电力设备内部,可在放电环境中正常运行,并完整记录油隙击穿引起的油压变化,能在早期故障时灵敏感知到小幅压力变化。

**关键词:** 变压器; 油压测量; 高灵敏光学传感; 温度补偿

## 0 引言

油浸式电力变压器作为电力系统中的核心主设备,是电能传输通道的关键节点,其安全稳定运行对电力系统的可靠性和能源互联网的建设至关重要<sup>[1]</sup>。变压器作为电网最昂贵的核心主设备之一,占变电站总投资的 10%~20%。截至 2020 年,我国现有 220kV 及以上变压器约 19326 台<sup>[2]</sup>。大型电力变压器一旦发生故障,会造成大面积区域电能供应中断,对电力系统稳定性与可靠性产生严重影响<sup>[3-5]</sup>。CIGRE 在 2015 年发布的变压器故障原因统计报告中指出,约 63%的变压器故障为内部故障<sup>[6]</sup>。变压器一旦发生内部故障,故障点周围的变压器油会在高温作用下迅速气化,并推动附近绝缘油流动,使得油箱内部压力急剧升高<sup>[7]</sup>,进而导致油箱

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1866603)。

Project Supported by Joint Funds of National Natural Science Foundation of China (U1866603).

开裂甚至起火爆炸，威胁电网安全。

为及时发现变压器内部严重缺陷，提高电力系统的稳定性。一方面，在油浸式变压器上加装大量压力保护装置以快速排出故障期间的高压油气，如防爆膜、压力释放阀等，但这类装置不能实时监测压力变化；另一方面，利用物联网技术，安装压力传感器等各类传感装置对变压器运行状态进行全方位监测，实现变压器状态透明化<sup>[8-9]</sup>，以发现缺陷引起的物理量异常变化，及时检修或停运。但常规机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 压力传感器在复杂环境下易受电磁干扰，在信号测量、传输等方面稳定性一般。而光纤压力传感器可避免以上缺陷<sup>[10]</sup>，且对异常量响应快速，具备在复杂环境下灵敏测量油压的可能性<sup>[11]</sup>。

目前，光学压力传感器的研究已较为成熟。2000 年，南开大学刘云启等将光纤光栅封装于聚合物中，保护光栅的同时提高了压力感知灵敏度，得到的压力灵敏系数相当于裸光栅的 31.7 倍<sup>[12]</sup>。但聚合物封装的压力传感器处于液体环境中时，光栅会在轴向和径向均受到压力作用。泊松效应使得轴向应变在径向压力的作用下减小，降低了测量的准确性和灵敏度。在此基础上，有学者将封装了光纤光栅的聚合物胶粘固定于厚壁金属圆筒中构成增敏罐型压力传感结构，在起到增敏作用的同时提高了传感器的抗干扰能力。相比于裸光栅，这类传感器的压力灵敏系数提高了 1722 倍<sup>[13]</sup>。但其仅进行了灵敏度标定试验，未对其在液体环境中的实测效果进行验证。除了聚合物封装的传感器，Jun Huang 等研究了一种膜片式光纤光栅压力传感器，将 2 个裸光栅直接粘贴在一个圆形膜片上，内部为空心腔体，通过测量进入空腔内介质的压力得到待测环境的压力，该传感器灵敏度达 1.57pm/kPa，并具有温度补偿功能<sup>[14]</sup>。

光纤压力传感器的成熟推动了各行业压力监测手段的更新。王永洪等利用光纤光栅传感器研究静压沉桩贯入特性，通过实验验证发现，相比传统的轮辐式压力传感器，光纤光栅应变传感器灵敏度更大，线性度更好<sup>[15]</sup>；Camilo 等提出一种基于硅基光纤光栅的液位传感器，将硅基光纤光栅嵌入环氧树脂膜片中，配合标准温度传感器进行温度补偿，液位灵敏度可达 2.8pm/mm<sup>[16]</sup>；同样利用光纤光栅传感器，王永祥等规划了传感器的安装位置，提高了轨道占用检测的可靠性与稳定性<sup>[17]</sup>。

油浸式变压器内部复杂的电磁环境对光学压力传感器提出了更高的要求。常见的光纤压力传感器大多采用金属膜片作为压力敏感元件，或者利用硅膜片形成空气腔结构，对变压器绝缘构成潜在威胁。而增敏罐型传感结构在油浸环境中使用可能存在以下问题：一方面，聚合物与屏蔽壳紧密贴合，二者间的阻尼会使聚合物弹性体在受到轴向应力时应变减小，且屏蔽壳限制了聚合物的自由形变，间接影响了光纤光栅的轴向应变；另一方面，当变压器油温升高，聚合物的膨胀增大了与屏蔽壳之间的摩擦，进一步阻碍了轴向应变，降低了其测量灵敏度<sup>[18-19]</sup>。同时，外界温度变化会影响光纤压力传感器测量准确性，变压器发生缺陷时，温度迅速升高，有效的温度补偿手段对于变压器内部的压力传感结构至关重要<sup>[20]</sup>。

此外，变压器在内部电弧故障下，压力在短时间内从十几 kPa 上升到几十甚至几百 kPa，若不能及时监测到压力上升，油箱就可能发生破裂甚至爆炸，这就要求传感器具备较高的灵敏度，及时感知到压力波动。此外，箱体振动会使变压器油向传感器频繁施加压力，使其受到噪声干扰，用于油压测量的传感器具备较高信噪比，以在实际工况中感知由早期缺陷引起的压力变化。

综上，本文提出一种用于复杂环境下变压器油压高灵敏测量的光学感知方法。该方法基于波长解调型光纤光栅，利用改进增敏罐型传感器可以屏蔽外界无关压力的特性，保证内部增敏聚合物只受到开口方向的压力作用而产生形变；并配合双光栅交叉布置，实现温度补偿。经测试，所研传感器压力灵敏度达 15pm/kPa，可有效避免温度变化对压力测量造成的干扰，通过实测油隙击穿时的压力波形，验证了传感器在复杂环境油压测量的可行性和有效性。

## 1 基于光纤光栅的油压传感结构

### 1.1 聚合物封装的压力感知结构

基于光纤光栅的油压传感结构如图 1 所示，包括用于屏蔽其他方向压力的外部环氧树脂屏蔽壳和内部压力增敏的氟硅橡胶聚合物。内外构件之间留有间隙，并通过 4 个圆环形连接块进行连接固定。

该结构使用弹性模量较大的材料屏蔽无关方向压力，内外结构之间的油隙为聚合物自由形变提供了空间，消除了屏蔽壳对聚合物伸缩时的阻碍。此外，传感结构整体采用非金属材料，对变压器内

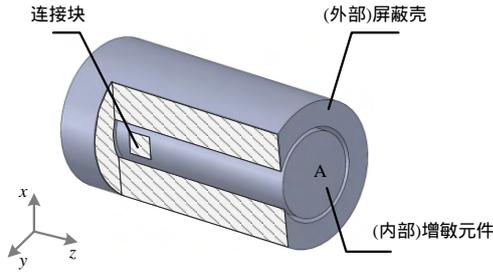


图1 聚合物封装的压力感知结构半剖图

Fig. 1 Half-section view of polymer-encapsulated pressure-sensing structures

部绝缘也不会造成威胁。

定义  $E$  为内部聚合物的弹性模量； $\mu$  为泊松比。根据广义胡克定律，内部聚合物在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上受到的应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  与其在对应方向上发生的应变  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$  的关系如下：

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} [\varepsilon_x + \mu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} [\varepsilon_y + \mu(\varepsilon_x + \varepsilon_z)] \\ \sigma_z = \frac{E}{1-\mu^2} [\varepsilon_z + \mu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \end{cases} \quad (1)$$

当图1区域A受到压力  $F$  作用时，即式(1)中  $\sigma_x=0$ ， $\sigma_y=0$ ， $\sigma_z=-F$ ，求得内部增敏元件轴向应变如下：

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu^2 + 2\mu + 1}{2\mu + 1} \frac{F}{E} \quad (2)$$

光纤光栅纵向应变引起的中心波长的漂移一般认为受弹光效应影响，波导效应忽略<sup>[21]</sup>。因此，光纤光栅轴向应力灵敏系数为

$$k_p = \left\{ \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \mu_t (P_{11} + P_{12})] - 1 \right\} \varepsilon_z / E \quad (3)$$

式中： $n_{\text{eff}}$  为光纤光栅的有效折射率； $P_{11}$ 、 $P_{12}$  为光纤的弹光系数； $\mu_t$  为光纤的泊松比。将式(2)代入式(3)，可得该传感结构的轴向压力灵敏度为

$$k_p = \frac{0.784}{E} \left( \frac{\mu^2 + 2\mu + 1}{2\mu + 1} \right) \quad (4)$$

### 1.2 双光栅交叉的温度补偿结构

变压器内温度的改变也会引起光纤光栅中心波长的漂移<sup>[22]</sup>。因此设计传感结构时不得不考虑温度补偿，以去除测量中温度引起中心波长漂移导致的测量误差<sup>[23]</sup>。本文所提传感结构采用双光栅交叉方式进行温度补偿，如图2所示。

图2为封装于聚合物内部的两根交叉布置的光纤光栅。由于液体的压强仅与密度和深度有关，因

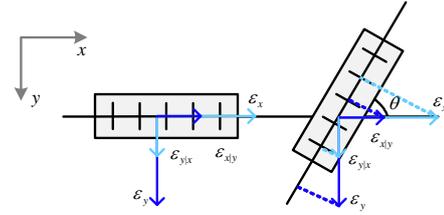


图2 双光栅交叉布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double grating cross layout

此处于变压器油中的光纤光栅轴向和径向受力基本相同，设其在轴向和径向受力产生的形变分别为  $\varepsilon_x$  和  $\varepsilon_y$ ，均为  $\Delta\varepsilon$ ，根据泊松效应可分别得到  $\varepsilon_x$  对应的径向应变  $\varepsilon_{y/x} = \mu\varepsilon_x$  及  $\varepsilon_y$  对应的轴向应变  $\varepsilon_{x/y} = \mu\varepsilon_y$ 。

在液体流动这类复杂应力场内，由轴向应力引起的光纤光栅中心波长漂移占主要地位<sup>[21]</sup>。因此，不考虑两光栅径向应变的情况下，二者在轴向上发生的应变分别如下：

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_{x/y} = \varepsilon_x + \mu\varepsilon_y = (1 + \mu)\Delta\varepsilon \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_x \cos\theta - \varepsilon_y \sin\theta - \varepsilon_{y/x} \sin\theta + \varepsilon_{x/y} \cos\theta = \\ (1 + \mu)\Delta\varepsilon (\cos\theta - \sin\theta) \end{cases} \quad (5)$$

假设测量过程中油域温度变化量  $\Delta T$ ，综合压力和温度的影响，两光栅中心波长漂移量为

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = K_{T1}\Delta T + K_{\varepsilon1}(1 + \mu)\Delta\varepsilon \\ \Delta\lambda_2 = K_{T2}\Delta T + K_{\varepsilon2}(1 + \mu)\Delta\varepsilon (\cos\theta - \sin\theta) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $K_{T1}$ 、 $K_{T2}$  为两根光栅自身的温度灵敏系数； $K_{\varepsilon1}$ 、 $K_{\varepsilon2}$  为其自身的应变灵敏系数。尽管光纤本身会受热膨胀从而影响温度灵敏系数，变压器环境中温度变化远低于石英材料的软化点 2700，因此完全可以忽略温度对热膨胀系数的影响，且认为热膨胀系数在测量范围内始终保持常数<sup>[21]</sup>；同时，光纤光栅在不接近光纤本身的断裂极限时可认为是一理想弹性体，遵循胡克定律，故其自身的温度灵敏系数与应变灵敏系数仅与材料相关，且由于两根光栅处于同一波段，因此二者本身的温度灵敏系数和压力灵敏系数一致，有：

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = K_{\varepsilon}(1 + \mu)\Delta\varepsilon(1 - \cos\theta + \sin\theta) \quad (7)$$

由式(7)可知，取二者波长变化量的差值，不仅实现了温度补偿，同时通过改变夹角  $\theta$  获得不同的灵敏度。为了取得最大灵敏度，将 2 根光纤光栅垂直布置，即  $90^\circ$  时，压力灵敏系数最大，为  $2K_{\varepsilon}(1 + \mu)$ 。

## 2 复杂环境下高灵敏传感结构的实现

### 2.1 传感结构的设计

用于复杂环境下油压高灵敏感知的光学传感

结构需将光纤光栅紧紧封装于橡胶内部，以保证压力传递效果。有学者在制作时把橡胶切成两部分，将光纤胶粘固定于橡胶内部<sup>[24]</sup>，但这种方法在橡胶受力传递到光纤过程中会多经过一层介质，影响压力测量效果；同时，胶粘很难保证介质之间没有气泡，一旦出现气泡，就会威胁变压器的安全运行。

传统复杂橡胶成型采用浇注的方式，但这类方式对设备要求高，不宜在实验室开展。本文借助金属模具选择热硫化成型的方式，将固体生胶布满模具，测量光纤光栅沿轴向放置于中心轴线上，温补光纤光栅沿径向布置，两光栅经预拉伸后用模具上的凹槽和夹具进行固定。将模具置于平板硫化机上进行热成型，硫化成型后的橡胶采用连接块固定于环氧树脂屏蔽壳内部。

对该结构的静态灵敏度进行仿真。仿真得到聚合物在 0~415Pa 时的应变结果，根据光纤光栅应变与中心波长相对变化的关系(如式(8))，得到中心波长相对变化与端面所受压力关系如图 3 所示。图 3 中斜率为该传感器灵敏度，约为  $9.36 \times 10^{-3}/\text{MPa}$ 。

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = 0.78\varepsilon_z \quad (8)$$

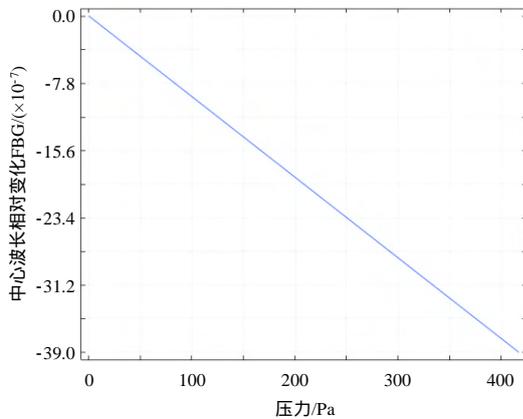


图 3 光纤光栅中心波长相对变化与端面所受压力关系  
Fig. 3 Relation between the relative change of FBG center wavelength and the pressure on the end face

### 2.2 热膨胀对不同结构测量灵敏度的影响

分别对 2 种结构的传感器建模，其中增敏罐型压力传感结构如图 4 所示。在开口处施加压力，从 0 上升到 0.4MPa，设置体积参考温度为 273.15K，传感器模型温度为 353.15K，用于模拟变压器内正常工况下的温度，用端面位移变化率衡量传感器在受热膨胀后的灵敏度。

353.15K 下，两种结构的压力传感器端面位移-压力变化曲线如图 5 所示。本文所提结构端面位移变化率大约为  $-0.8\text{mm}/\text{MPa}$ ，增敏罐型压力传感器

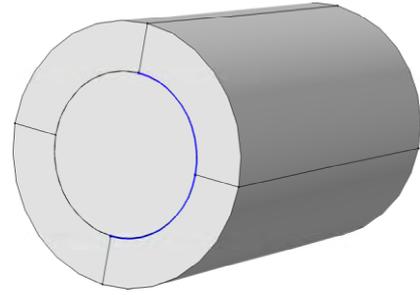


图 4 增敏罐型压力传感结构

Fig. 4 Structure of enhancing sensitivity pot

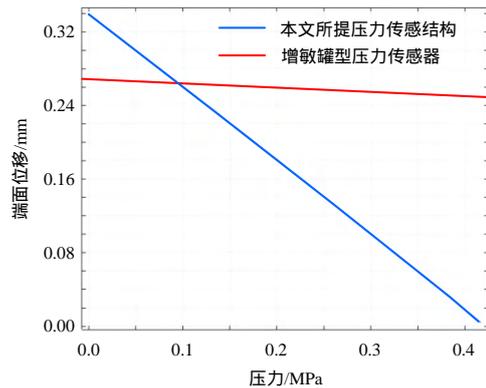
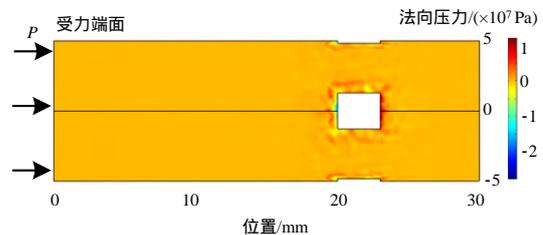


图 5 2 种结构压力传感器端面位移变化情况

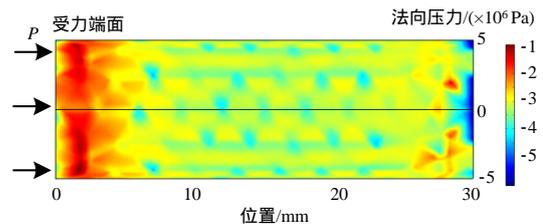
Fig. 5 Displacement changes of the end faces of pressure sensors with two structures

的端面位移变化率约为  $-0.05\text{mm}/\text{MPa}$ 。可见在聚合物受热膨胀后，本文所提的感知方法较传统增敏罐型结构的灵敏度高出一个数量级，这是因为温度升高，内部聚合物及外部屏蔽壳尺寸都会变大，二者相互挤压，接触面上压力增大，聚合物位移时受到的摩擦力也大，阻碍了轴向上的自由伸缩。

为验证上述猜想，对比 2 种传感器内部聚合物侧表面在 0.4MPa 下受到的法向压力。由图 6(a)可



(a) 本文所提压力传感器结构



(b) 传统增敏罐型压力传感器

图 6 2 种压力传感器侧面所受压力的法向分量  
Fig. 6 Normal component of the pressure on the sides of the two pressure sensors

知,本文所提压力传感器在 353.15K、0.4MPa 时,侧表面法向压力接近于 0Pa,仅在连接块受到较大压力,但光纤光栅封装于在 5~15mm 处,此处受力对传感器测量并无影响,也间接说明屏蔽壳与内部增敏元件之间所留 1mm 间隙可以为聚合物受热膨胀提供足够的空间。图 6(b)中,增敏罐型压力传感器侧表面受到的法向压力平均值超过 0.2MPa 相应地,在内部聚合物伸缩时会受到较大的摩擦力,验证了对这一结构在高温环境中灵敏度减小的分析。

### 2.3 传感器屏蔽无关方向应力有效性验证

传感器一般固定于油道中,开口侧面向待测区域用于感知流体压力,另一端固定,图 7 为模拟这一环境所建立的二维模型,其中蓝色标记为本文所提出的压力传感结构沿轴向的截面,灰色部分为油流,在左右两侧分别设置出、入口模拟变压器油的流动。

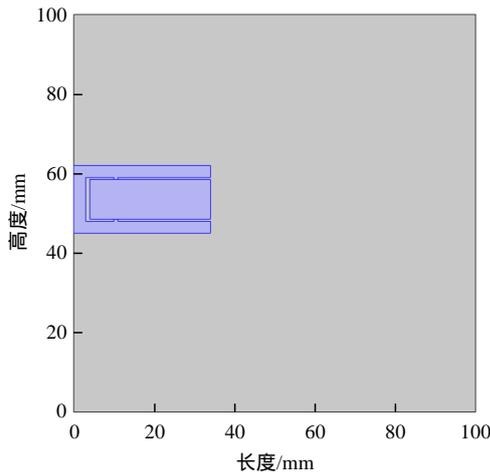


图 7 传感器油压测量仿真模型  
Fig. 7 Simulation model of sensor oil pressure measurement

当变压器内部发生匝间故障时,故障位置的压力震源可看作球面波向四周传递<sup>[25]</sup>,流体在同一截面速度不会处处相等,正对震源中心位置的油流速最大,并向两侧逐渐减小。因此,入口处油流速在任一时刻下,高度 50mm 处流速最大,并呈抛物线型向两侧对称减小。

图 8 展示了在 0.2、0.4 和 2s 时传感结构所受压力、体积应变及油流速的示意图。在这一过程中,内部增敏元件聚合物始终发生均匀应变,随着流速增大,油流冲击对传感器表面施加的压力也越来越大,应变量也逐渐增大。图 9 为这一过程中各个时间点其端面受到的压力与所发生应变的关系图,二者始终为线性关系,且此情况下传感器的压力灵敏

系数约为  $9.36 \times 10^{-3} / \text{MPa}$ ,与本文 2.1 节静态仿真中得到的结果一致,说明该结构可用于流体环境中压力的连续测量。

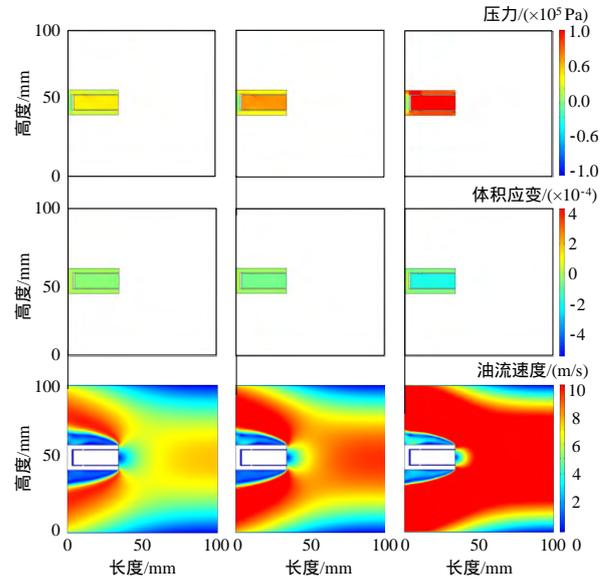


图 8 不同时刻各物理量示意图

Fig. 8 Schematic diagram of physical quantities at different times

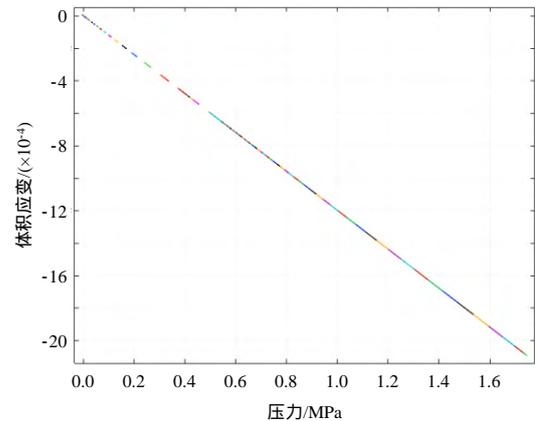


图 9 传感器开口受到的压力及体积应变关系图

Fig. 9 Pressure and volume strain diagram of the sensor

### 2.4 传感结构对变压器绝缘的影响

为及时准确地测得早期缺陷引起的油压变化,结合变压器安装环境的简易性和可行性,传感器可在以下位置进行安装:1)绕组端部的油隙中;2)绕组层间的垫块中。按照图 10 所示流程<sup>[26]</sup>计算绝缘裕度,以评估传感结构对变压器内部绝缘的影响。

以某 110kV 变压器实际尺寸为基准搭建仿真模型,忽略高中压绕组角环、静电环以及调压绕组。同时考虑到绕组对称性和仿真计算速度,取绕组上半部分 30°扇形区域进行建模,如图 11 所示。其中,高中低压绕组施加电压为 110kV/35kV/10.5kV。油、垫块相对介电常数分别取为 2.2 和 4.4;压力传感器

相对介电常数按照对绝缘威胁最大的情况设置，即假设通体采用氟硅橡胶制成，取 6。

以安装位置 1) 为例，低压中压绕组附近电位线、电力线分布情况如图 12 所示。图中 a—f 为传感器安装在绕组端部形成的油隙。油隙中电力线

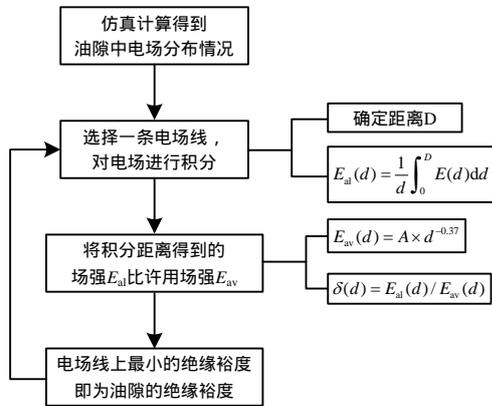


图 10 绝缘裕度计算流程  
Fig. 10 Insulation margin calculation process

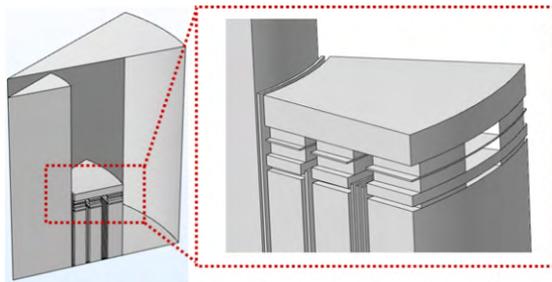


图 11 仿真模型  
Fig. 11 Simulation model

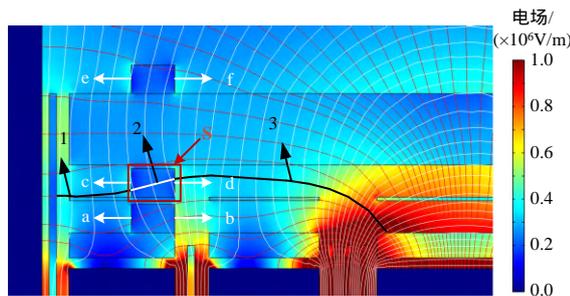


图 12 传感器安装在绕组层间油隙电位线、电力线分布  
Fig. 12 Potential line and power line distribution when the sensor is installed in the oil gap between the winding layers  
越长，电场强度许用值越低，取图 12 中间位置的传感器进行分析，即红色标记 S，其中 1—3 分别表示电力线经过的油隙或传感器部分。按照图 10 所示流程计算对距离积分得到的场强  $E_{al}$  和该位置的许用场强  $E_{av}$ ，并求得各处油隙的绝缘裕度  $\delta(d)$ 。其中，传感器安装于含饱和气体的油纸间隙，取该位置处 1mm 局放起始场强经验值  $A$  为  $18.5^{[27]}$ 。各处油隙绝缘裕度计算结果如表 1 所示。可知，安装在

绕组层间油隙后，各位置处绝缘裕度均大于变压器要求的绝缘裕度 1.2。采用同样的方法计算，安装在绕组层间垫块后的绝缘裕度也均大于 1.2。因此，该传感结构可安装于变压器内部进行测量，且不会对其绝缘造成威胁。

表 1 传感器安装在绕组层间油隙前后不同位置场强对比及安装传感器后的绝缘裕度

Table 1 Comparison of field strength at different positions before and after installing the sensor in the oil gap between winding layers and insulation margin after installing the sensor

不同位置的油隙	无传感器时的场强/(kV/mm)	有传感器时的场强/(kV/mm)	有传感器时绝缘裕度
a	0.26	0.34	16.02
b	0.41	0.53	4.36
c	0.28	0.38	14.38
d	0.33	0.45	4.34
e	0.28	0.39	14.00
f	0.28	0.37	15.08

### 3 实验验证及分析

#### 3.1 压力灵敏度标定实验

采用标准压力源对所研传感器进行标定，确定其灵敏度及其线性度。根据《GB/T 15478-2015 压力传感器性能试验方法》<sup>[28]</sup>，分别记录 3 次正行程、反行程下不同压力对应的中心波长，并求得正、反行程下中心波长的平均值，最后取二者的平均值作为传感器在每个校准点下的数据。

实验所用到的标准压力表量程范围为 0~2.5MPa，准确度为  $\pm 0.05\%$  F.S.。所用解调仪为美国 LUNA 公司生产的 MOI Si255 系列。

按照上述步骤对传感器在 0~100kPa 范围内，按照 10kPa 间隔逐次加压，进行灵敏度校验。取各压力点下传感器中心波长的平均值作为该点的数据，拟合得到传感器的中心波长-压力曲线，其斜率即为传感器的灵敏度，如图 13 中红线所示。

实测传感器灵敏度为 15pm/kPa，相关系数达 99%。图 13 中蓝色标记为各校准点下光栅中心波长的标准差，可知数据无明显分散性。高灵敏传感器可对早期缺陷引起的压力异常进行感知，并配合其他量实现变压器故障识别及保护<sup>[29]</sup>。

#### 3.2 温度补偿验证实验

根据 1.2 节，传感器实际测量中，用测量光纤光栅波长漂移减去温补光纤光栅波长漂移，所得结果略去了温度项，因此不会得到相应的温度灵敏

度。通过测量传感器在不受力的情况下，45~125 范围内两光纤光栅波长漂移情况，观察其受温度的影响程度。测量结果如图 14 所示。

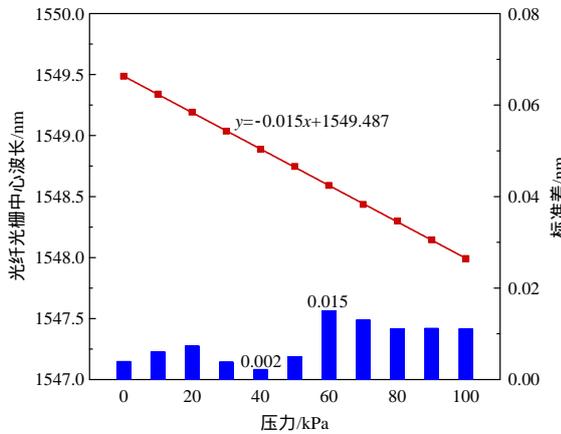


图 13 压力灵敏度标定曲线

Fig. 13 Pressure sensitivity calibration curve

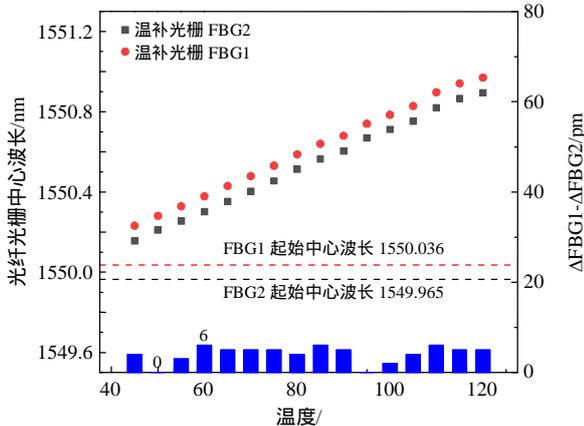


图 14 45~125 内温度补偿效果示意图

Fig. 14 Schematic diagram of temperature compensation effect within 45~125

由图 14 可知，同一批次光纤光栅的温度灵敏系数一致，在 45~125 范围内，当传感器不受外力作用时，其波长漂移差值在 6pm 范围内波动，均值约 4.06pm。变压器由于缺陷引起的压力变化至少在几十 kPa，而由于温度变化引起的波长漂移差值相当于传感器受到约 0.4kPa 压力，实际工况中可忽略不计。

为了进一步验证所提温度补偿手段有效，对传感器施加 10kPa 外力，观察其中心波长漂移量在不同温度下的变化情况，实验结果图 15 所示。

图 15 中，测量光栅的中心波长漂移大于温补光栅，得到的二者漂移量差值即为 10kPa 压力对应的传感器中心波长，均值约为 152.25pm，与无外力时对比，变化约 148.19pm，计算得灵敏度约 14.82pm/kPa，与 3.1 节中测得的常温下静态压力灵敏度 15pm/kPa 接近。因此可认为传感器所采用的

温度补偿手段有效。

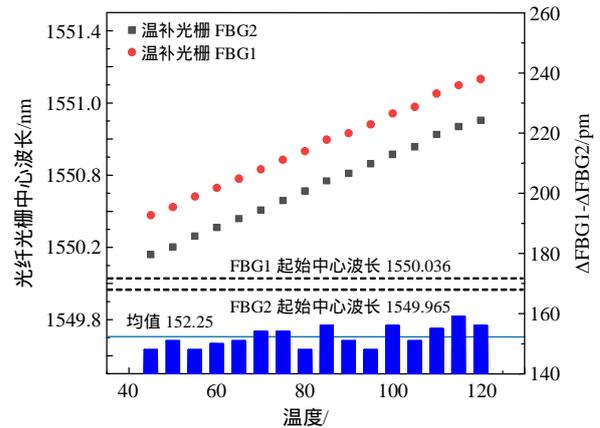


图 15 10kPa 下，45~125 内温度补偿效果示意图

Fig. 15 Schematic diagram of temperature compensation effect within 45~125 at 10kPa

### 3.3 信噪比测试

用于变压器油压测量的传感结构在正常工况下会不断受到油流冲击产生的小幅压力干扰，传感器的高灵敏感知必然能监测到这一压力波动。而变压器内缺陷发展到故障过程中，压力会迅速上升，若传感器不能在干扰中灵敏感知到由缺陷引起的压力变化，故障会进一步发展从而影响变压器正常运行。这就要求传感器具有较高的信噪比，以便有效监测变压器放电产生的压力信号。

为了测试所研感知方法的上述性能，将传感器置于水箱中并固定，采用注汽爆破法产生冲击波，以“有效波长漂移”作为衡量传感器对信号捕捉能力的指标<sup>[30]</sup>，即式(9)中  $K_{RMS}$ 。

$$K_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 / n} \quad (9)$$

式中： $\lambda_i$  为第  $i$  个点的中心波长； $n$  为采集点的总个数。

记  $K_{RMS\_eff}$  为有效信号(即注汽爆破导致的水压变化信号)的“有效波长漂移”， $K_{RMS\_n}$  为噪声信号(传感器置于水中测得的压力信号)的“有效波长漂移”，二者比值即为信噪比 SNR。

图 16 为冲击波产生后解调仪记录的参考传感器与本文所研传感器波长漂移情况，所用到的参考传感器为国内某公司生产的金属膜片式光纤光栅压力传感器。实验共进行 3 次，分别计算测试传感器及参考传感器的信噪比，如表 2 所示。

由表 2 可知，本文所研传感器信噪比显著高于参考传感器。配合高灵敏感知特性，可在变压器油流扰动下测得缺陷引起的压力变化。

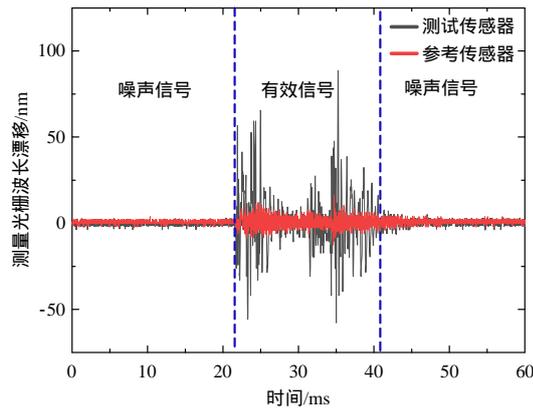


图 16 测试传感器与参考传感器测得波形对比  
Fig. 16 Comparison of waveforms measured by test sensor and reference sensor

表 2 测试传感器与参考传感器信噪比  
Table 2 Signal to noise ratio of test sensor and reference sensor

实验次数	传感器	$K_{RMS\_eff}$	$K_{RMS\_n}$	信噪比 SNR
第 1 次	测试传感器	12.966	1.884	6.883
	参考传感器	2.779	1.036	2.683
第 2 次	测试传感器	15.971	2.050	7.789
	参考传感器	2.588	1.981	1.307
第 3 次	测试传感器	30.746	2.493	8.322
	参考传感器	3.684	2.477	1.488

### 3.4 放电过程中油压感知实验

利用柱状电极进行油隙击穿实验，实验布置示意图如图 17 所示。将传感器布置在电极周围，进行放电环境下压力传感器性能验证实验。目的在于检验传感系统(包含光纤光栅压力传感器、光纤及后端解调设备)在放电环境下的工作状态；以及传感器能否完整记录由放电引起的油压变化。

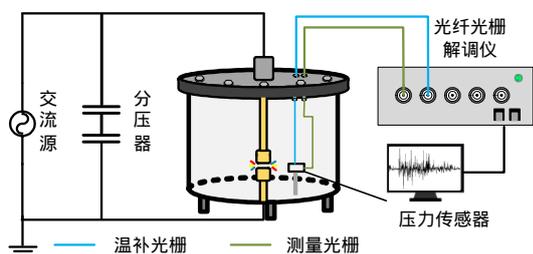


图 17 处于放电腔体内部的压力传感器

Fig. 17 Pressure sensor inside discharge chamber

实验所用变压器油为 KI25 号变压器油，油隙长约 5mm，传感器固定在腔体内距离电极约 3cm 处，后端光纤经贯通器引出后连接至离放电位置 5m 的解调仪上。

油隙从放电到击穿过程中，传感器保持正常工作状态，放电始终在油隙间发展，且在多次击穿试

验后，传感器表面无碳化，无烧毁痕迹，说明传感器在放电环境中可以正常工作。

图 18 为这一过程中压力传感器测得的油压波形，其在油隙击穿瞬间能明显感知到压力变化，从放大波形来看，中心波长在短时间内从初始位置上升到峰值，传感器能及时捕捉到击穿导致的压力激增，并对击穿后油液波动引起的油压变化进行完整记录。当油液稳定后，其波长依旧可以恢复到初始值。

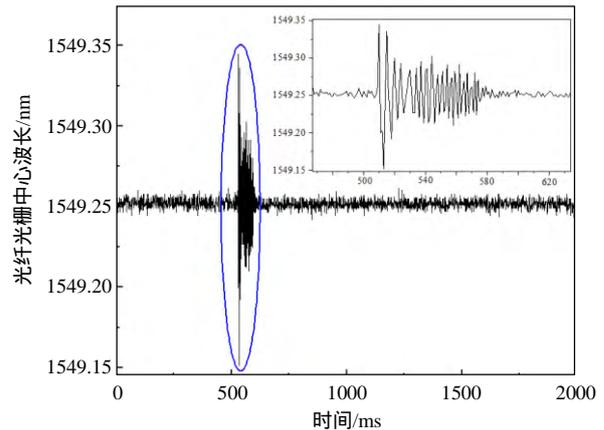


图 18 压力传感器记录的击穿过程压力波形  
Fig. 18 Pressure waveform at the moment of breakdown recorded by the pressure sensor

## 4 结论

本文提出一种用于油浸式电力变压器内部进行压力监测的高灵敏光学传感方法，主要结论如下：

- 1) 利用氟硅橡胶封装光纤光栅，并在外部安装环氧树脂屏蔽壳屏蔽其他方向无关应力。采用双光栅垂直交叉法，解决应变/温度交叉敏感的同时，进一步提高了压力测量灵敏度。实测传感器灵敏度高达 15pm/kPa，相关系数达 99%。
- 2) 本文所提传感结构凭借无金属封装、无空气腔的特点，可在放电环境中正常工作，并完整记录油隙击穿引起的压力信号变化。
- 3) 本文所提光学感知方法适用于各类油浸式电力设备内部压力监测。将传感器放置于设备内部，可避免早期故障引起的小幅压力在传播过程中衰减导致的感知不明显或无法感知的问题。

## 参考文献

[1] 王维俭, 王祥珩, 王赞基. 大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 205-206.  
WANG Weijian, WANG Xiangheng, WANG Zanji.

- Analysis and relay protection of internal faults in large generators and transformers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 205-206(in Chinese).
- [2] 国家能源局, 中国电力企业联合会. 2020 年全国电力可靠性年度报告[R]. 2021.  
National Energy Administration, China Electric Power Enterprise Federation. 2020 national annual report on power reliability[R]. 2021(in Chinese).
- [3] TASCHLER E. Tank rupture resistance: CIGRE-IEC, Montreal, QC, Canada, 2016[C].
- [4] ROSEBERG T, JANKOVIC I, HEDDING R. Transformer tank rupture - A protection engineer's challenge[C]//2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers(CPRE). College Station, TX, USA: IEEE, 2017: 1-29.
- [5] BRODEUR S, DASTOUS J B. Design and testing of an arc resistant power transformer tank[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 699-706.
- [6] ABI-SAMRAN, ARTEAGA J, DAROVNY B, et al. Power transformer tank rupture and mitigation — A summary of current state of practice and knowledge by the task force of IEEE power transformer subcommittee [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1959-1967.
- [7] 闫晨光, 张保会, 郝治国, 等. 电力变压器油箱内部故障压力特征建模及仿真[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 179-185.  
YAN Chenguang, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Modeling and simulation of pressure characteristics of power transformer tanks' internal faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 179-185(in Chinese).
- [8] 齐波, 张鹏, 张书琦, 等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1522-1538.  
QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1522-1538(in Chinese).
- [9] 徐征宇, 张书琦, 廖和安, 等. 传感光纤与变压器电磁线一体化技术[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6816-6826.  
XU Zhengyu, ZHANG Shuqi, LIAO He'an, et al. Integration technology of sensing optical fiber and transformer electromagnetic wire[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6816-6826(in Chinese).
- [10] YAACOB M M, ALSAEDI M A, RASHED J R, et al. Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors [J]. Photonic Sensors, 2014, 4(4): 325-337.
- [11] MA Guoming, QIN Weiqi, DU Yue, et al. A centimeter resolution GIS insulator strain distribution measurement method based on OFDR[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(8): 2962-2969.
- [12] 刘云启, 郭转运, 刘志国, 等. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器[J]. 中国激光, 2000, 27(3): 211-214.  
LIU Yunqi, GUO Zhuanyun, LIU Zhiguo, et al. High-sensitivity fiber grating pressure sensor with polymer jacket[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(3): 211-214(in Chinese).
- [13] 张颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. 光学学报, 2002, 22(1): 89-91.  
ZHANG Yin, LIU Zhiguo, GUO Zhuanyun et al. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(1): 89-91(in Chinese).
- [14] HUANG Jun, ZHOU Zude, WEN Xiaoyan, et al. A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation[J]. Measurement, 2013, 46(3): 1041-1046.
- [15] 王永洪, 张明义, 马加骁, 等. 光纤布拉格光栅用于黏质土中静压沉桩贯入特性的测量研究[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 34-43.  
WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, MA Jiayao, et al. Measurements of penetration characteristics of jacked piles in clayey soil based on fiber Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 34-43(in Chinese).
- [16] DÍAZ C A R, LEAL-JUNIOR A G, ANDRE P S B, et al. Liquid level measurement based on FBG-embedded diaphragms with temperature compensation[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(1): 193-200.
- [17] 王永祥, 何海涛, 邓木玲, 等. 基于光纤光栅压力传感器的轨道占用检测方法研究[J]. 广州航海学院学报, 2019, 27(4): 55-58.  
WANG Yongxiang, HE Haitao, DENG Muling, et al. Research on track occupancy detection method based on fiber Bragg grating pressure sensor[J]. Journal of Guangzhou Maritime University, 2019, 27(4): 55-58 (in Chinese).
- [18] 刘世奎. 结构力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
LIU Shikui. Structural mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008(in Chinese).
- [19] ZOU Xiaoping, ZHANG Liangying, YAO Xi, et al. Product property between thermal expansion and piezoelectricity in piezoelectric ceramic-polymer composites[C]//9th International Symposium on Electrets(ISE 9) Proceedings. Shanghai, China: IEEE, 1996: 1030-1035.

- [20] CUI Chunsheng ,MA Tiehua .The research of temperature compensation technology of high-temperature pressure sensor[C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology . Harbin , China : IEEE , 2011 : 2267-2270 .
- [21] 黎敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008 .  
LI Min , LIAO Yanbiao . Optical fiber sensor and its application technology[M] Wuhan : Wuhan University Press , 2008(in Chinese) .
- [22] 靳伟, 阮双琛. 光纤传感技术新进展[M]. 北京: 科学出版社, 2005 .  
JIN Wei , RUAN Shuangchen . New progress of optical fiber sensing technology[M] . Beijing : Science Press , 2005(in Chinese) .
- [23] LEAL-JUNIOR A G , THEODOSIOU A , MARQUES C , et al . Compensation method for temperature cross-sensitivity in transverse force applications with FBG sensors in POFs[J] . Journal of Lightwave Technology , 2018 , 36(17) : 3660-3665 .
- [24] 刘明尧, 卢一帆, 张志建, 等. 基于聚合物封装的光纤布拉格光栅压力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2016 , 37(10) : 2392-2398 .  
LIU Mingyao , LU Yifan , ZHANG Zhijian , et al . FBG pressure sensor based on polymer packaging[J] . Chinese Journal of Scientific Instrument , 2016 , 37(10) : 2392-2398(in Chinese) .
- [25] YANG Xian , LIN Chunyao , ZHOU Dan , et al . Dynamic pressure analysis and protection of transformer in internal arcing fault by FEM[C]//2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies .Changsha ,China : IEEE , 2015 : 882-887 .
- [26] 官澜. 特高压变压器主绝缘校核与优化研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014 .  
GUAN Lan . Research on verification and optimization of UHV transformer main insulation[D] . Beijing : China Electric Power Research Institute , 2014(in Chinese) .
- [27] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014 .  
XIE Yucheng . Power transformer handbook[M] . Beijing : Machinery Industry Press , 2014(in Chinese) .
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 15478-2015 压力传感器性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016 .  
General Administration of Quality Supervision , Inspection and Quarantine of the People's Republic of China , Standardization Administration of the People's Republic of China . GB/T 15478-2015 Test methods of the performances for pressure transducer/sensor[S] . Beijing : China Standards Press , 2016(in Chinese) .
- [29] 闫晨光, 郝治国, 张保会. 基于压力特征的变压器数字式保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2015 , 35(24) : 6405-6412 .  
YAN Chenguang ,HAO Zhiguo ,ZHANG Baohui .Power transformer digital protection based on internal pressure characteristics[J] . Proceedings of the CSEE , 2015 , 35(24) : 6405-6412(in Chinese) .
- [30] 刘磊, 于淼, 杨瑞娟, 等. 小波去噪用于光纤拉曼温度传感系统(英文)[J]. 中国激光, 2013 , 40(6) : 25-229 .  
LIU Lei , YU Miao , YANG Ruijuan , et al . Wavelet denoising applied in optical fiber Raman temperature sensor system[J] .Chinese Journal of Lasers ,2013 ,40(6) : 225-229(in English) .



冀茂

收稿日期: 2022-01-29。

作者简介:

冀茂(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为电气设备先进传感监测与故障诊断, m.ji@ncepu.edu.cn ;

\*通信作者: 齐波(1980), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断、空间电场/电荷测量技术、新型介电材料的研制与应用, lqicb@163.com。

(编辑 胡琳琳)

# High Sensitive Pressure Optical Sensing Method Adapted to Transformer Internal Environment

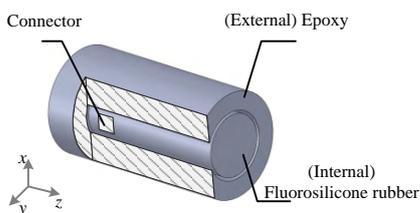
JI Mao<sup>1</sup>, HUANG Meng<sup>1</sup>, ZHENG Yuping<sup>2</sup>, QI Bo<sup>1</sup>, TENG Haonan<sup>1</sup>, ZHENG Wei<sup>1</sup>,  
PAN Shuyan<sup>2</sup>, LI Chengrong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power university); 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute))

**KEY WORDS:** transformer; oil pressure measurement; highly sensitive optical sensing; temperature compensation

When a serious defect occurs inside the transformer, a large amount of gas will be generated. If it is not handled in time, it may cause the oil tank to crack or even catch fire and explode. Therefore, it is important to monitor the pressure of the transformer oil tank. The complex electromagnetic environment inside the oil-immersed transformer places higher requirements on the optical pressure sensor. Common optical fiber pressure sensors generally use metal diaphragms as pressure sensitive elements, or use silicon diaphragms to form air cavity structures, which poses a potential threat to transformer insulation.

This paper proposes a novel insulation-friendly optical pressure sensing method, as shown in Fig. 1. The fiber grating is encapsulated with fluorosilicone rubber inside, and the shielding shell is made of epoxy resin outside. There is a gap between the inside and outside, and the connection block is used for connection and fixation.



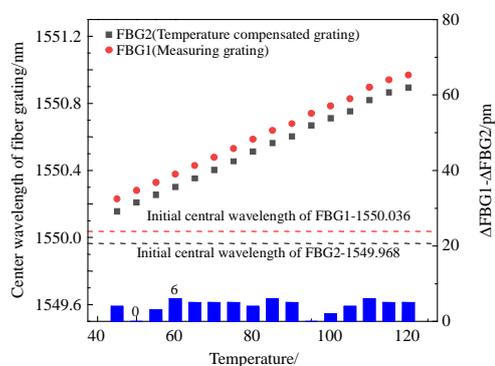
**Fig. 1 Half-section view of polymer-encapsulated pressure-sensing structures**

The sensing structure cooperates with the double grating vertical cross method, which further improves the pressure measurement sensitivity while solving the strain/temperature cross sensitivity. As shown in Fig. 2, the measured sensitivity of the sensor is as high as 15pm/kPa.

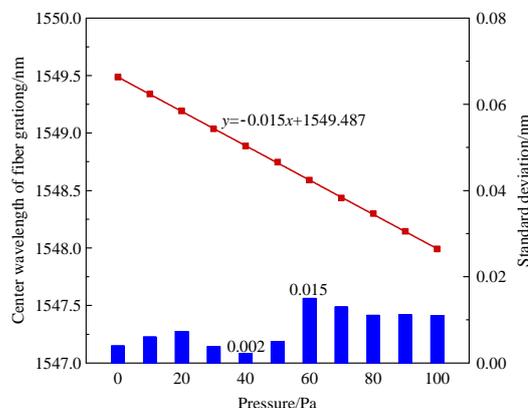
The wavelength drift of the sensor caused by temperature in the range of 45~125 is equivalent to the pressure of about 0.4kPa on the sensor as shown in Fig. 3, which is negligible in actual working conditions, indicating that the adopted temperature compensation method is effective.

Finally, the pressure waveform of oil gap breakdown is measured by this sensor as shown in

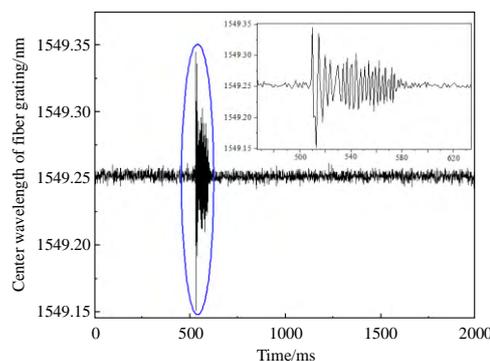
Fig. 4. The results show that the sensor can work normally in the discharge environment and completely record the pressure waveform caused by the breakdown.



**Fig. 3 Schematic diagram of temperature compensation effect within 45 ~ 125**



**Fig. 2 Pressure sensitivity calibration curve**



**Fig. 4 Pressure waveform at the moment of breakdown recorded by the pressure sensor**