

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.09.005

## 用于油浸式电力变压器内部压力测量的传感器结构设计

冀 茂, 齐 波, 黄 猛, 李成榕

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 由于油浸式电力变压器内部复杂的多物理场环境, 常见的光纤光栅传感器结构如金属膜片式或F-P空气腔式不能用于内部各处压力的感知测量。文中针对长期高温油浸电磁环境, 提出了一种可以对油体中单一方向进行压力测量的高灵敏度的光纤光栅传感结构。接着, 文中建立了该传感结构静态应变模型及聚合物热膨胀模型, 并利用有限元分析软件进行仿真, 结果表明所设计结构可准确用于压力的测量, 而且可以有效避免传统增敏罐型压力传感器由于聚合物热膨胀导致的灵敏度降低的问题。文中为用于油浸式电力变压器内部压力测量的传感结构设计提供了一种切实可行的思路, 配合相应的橡胶聚合物, 可以用于对高温油浸环境中各个位置压力的直接测量, 且不会对变压器内部绝缘造成威胁。

**关键词:** 油浸式电力变压器; 传感结构; 压力测量; 聚合物热膨胀; 有限元仿真

### Structure Design of Sensors for Internal Pressure Measurement in Oil-immersed Power Transformers

JI Mao, QI Bo, HUANG Meng, LI Chengrong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Due to the complex multi-physics environment inside the oil-immersed pressure transformer, common fiber grating sensor structures such as metal diaphragm or F-P air cavity type cannot be used for the sensory measurement of internal pressure. Aiming at the long-term high-temperature oil-immersed electromagnetic environment, a high-sensitivity fiber grating sensor structure that can measure the pressure in a single direction in the oil is proposed. Next, this article establishes the static strain model of the sensor structure and the thermal expansion model of the polymer, and analyzes it with FEM simulation. The results show that the designed structure can accurately measure the pressure. In addition, it can effectively avoid the problem of reduced sensitivity of the traditional enhancing sensitivity pot due to the thermal expansion of the polymer. This paper provides a practical idea for the design of the sensor structure used for the internal pressure measurement of oil-immersed power transformers. With the corresponding rubber polymer, it can be used to directly measure the pressure at various positions in the oil, and will not pose a threat to the transformer's internal insulation.

**Key words:** oil-immersed power transformers; structure of sensors; pressure measurement; thermal expansion of polymer; FEM simulation

## 0 引言

油浸式电力变压器是电力系统中能量传递和电压转换的枢纽设备, 一旦发生故障, 将会造成大

量电能输送中断, 对电力系统供电的可靠性与稳定性产生严重影响<sup>[1]</sup>。根据CIGRE 2015年发布的变压器故障原因统计报告, 63%的变压器故障为内部故障<sup>[2]</sup>。其中, 电弧放电导致的后果最为严重。电弧

收稿日期: 2020-06-07; 修回日期: 2020-07-10

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目资助(U1866603)。

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

放电期间,高温会迅速气化故障点周围的绝缘油,使得油箱内部压力急剧升高,进而导致油箱开裂甚至爆炸<sup>[3]</sup>。

目前,已有大量压力保护装置用于油浸式变压器以实现快速排出故障产生的高压油气<sup>[4]</sup>。但这些装置只能起到保护作用,并不能对压力进行实时监测,且在电弧放电期间,其动作特性并不满足要求<sup>[5-10]</sup>。光纤传感器不受电磁干扰,且灵敏度较高<sup>[11]</sup>。此外,对于异常量的快速响应也使光学传感器有了成为适合电力变压器监测传感器的可能<sup>[12]</sup>。

经过较长一段时间的发展,光纤压力传感器的研究已经相对成熟。2000年,南开大学刘云启将光纤光栅封装于有机聚合物中,在对压力增敏的同时起到保护光栅的作用,其压力灵敏系数相当于裸光栅的31.7倍<sup>[13]</sup>。但采用聚合物封装的压力传感器处在液体或气体容器中时,光栅不光受到轴向压力,在径向上同样会受到压力的作用。由于泊松效应,径向压力的作用会使得由轴向压力引起的轴向应变和折射率的变化减小,降低了压力测量的准确性。因此,有学者设计了一种增敏罐的封装方法,即将压力敏感聚合物采用胶粘或其它方式固化于厚壁金属圆筒中,光纤光栅置于圆筒轴线上,并施加一定的预应力封装于聚合物中。金属套筒用于屏蔽其他方向应力,只允许开口方向的压力使聚合物产生轴向应变。这一封装结构在起到增敏效果的同时增强了传感器的抗干扰能力,并将传感器的压力灵敏度系数相比于裸光栅提高了1 722倍<sup>[14]</sup>。除了以上提到的采用波长调制的光纤光栅压力传感器,目前研究较多的还有光纤压力法珀传感器<sup>[15]</sup>,张韬杰等人选用硅膜片作为压力敏感元件,利用MEMS技术将其与镀了高反膜和增透膜的Pyrex7740号玻璃片键合,构成采用双光束干涉原理的光纤F-P压力传感器,该传感器在0~1 MPa范围内腔长变化灵敏度达到1.445  $\mu\text{m}/\text{MPa}$ <sup>[16]</sup>。光纤压力传感器的成熟也推动了各行业压力监测手段的更新。王永洪等人利用光纤光栅传感器研究静压沉桩贯入特性,通过试验验证发现,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,能准确体现静压沉桩的贯入特性<sup>[17]</sup>;蒋善超等人提出一种微型光纤光栅土压力传感器,实测其压力灵敏度为5.9  $\text{nm}/\text{MPa}$ ,可测实际量程为225 kPa,过载能力上限值为300 kPa,实现了光纤传感器在土体介质中的压力测量<sup>[18]</sup>;同样利用光纤光栅传感器,王永祥等人巧妙地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>[19]</sup>。

油浸式变压器内部复杂的电磁环境以及物理量之间的相互耦合对压力传感器结构提出了更高的要求。目前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,或者利用硅膜片与光纤形成空气腔结构,都会对变压器的绝缘造成潜在威胁。长期高温油浸环境也给增敏罐型压力传感器带来一系列问题。一方面,聚合物与屏蔽壳之间的阻尼会使聚合物弹性体在受到外界轴向应力时应变减小,且屏蔽壳限制了聚合物在外界应力作用下的自由形变,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,聚合物的膨胀时增大了与屏蔽壳之间的摩擦,阻碍了轴向应变,从而降低了其测量灵敏度<sup>[20-25]</sup>。文[26]曾在金属套管与聚合物之间涂覆有机硅导热橡胶,以此克服二者之间的粘接与摩擦,但导热胶难以在高温环境中正常工作,且金属套管的封装方式也不适用于电力设备内部。

基于此,文中设计了一种适用于油浸式电力变压器内部压力测量的传感结构。该结构利用了增敏罐型传感器可屏蔽外界无关压力的作用,保证内部增敏聚合物只受到开口方向感知的压力作用而产生形变,又通过在屏蔽壳与聚合物之间设置可供油流完全流通的间隙,使内部聚合物在受热膨胀或挤压时自由形变,不会受到屏蔽壳摩擦或阻碍,最大程度提高了对开口方向压力测量的准确性。文章首先分析了所设计传感结构受力特性,接着建立了传感器的静态应变模型及聚合物热膨胀模型;最后对传感器进行仿真验证,检验了其压力灵敏系数及所设计的结构对消除热膨胀影响的作用。所设计传感器结构适用于各类高温油浸电磁环境内部压力的测量。

## 1 传感结构受力特性分析

适用于油浸式变压器内部压力监测的传感结构见图1、2。图1中(外部)屏蔽壳用来屏蔽其他方向的压力,(内部)增敏聚合物作为压力敏感元件,光纤光栅在施加一定预应力后封装于压力增敏元件内,尾纤从后端穿出。内外构件之间留有间隙,通过4个梯台连接块进行连接,即图2中方形,其直接与外部屏蔽壳浇注在一起,固化后将内部聚合物嵌套在屏蔽壳中。外部屏蔽壳弹性模量远大于内部聚合物,因此这一结构既保留了增敏罐的优势,即只将图1中A区域作为受力面,用于对压力进行感知,保证了传感器测量时的方向性;同时,内外构件间的油隙也为聚合物的自由形变提供了空间,消除了屏蔽壳对内部增敏聚合物的阻碍;此外,所用材

料可选择与变压器油介电常数相近的耐油橡胶对内部绝缘也不会造成威胁。

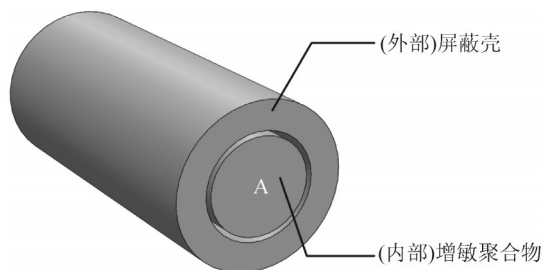


图1 适用于变压器内部压力监测的传感器结构图

Fig. 1 Structure diagram of sensor suitable for transformer internal pressure monitoring

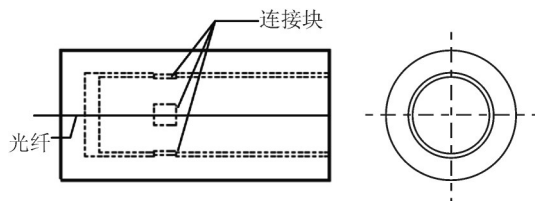


图2 所提传感器结构的主视图与侧视图

Fig. 2 Front view and side view of the proposed sensor structure

当该结构受力面受到压力 $P$ 的作用时,此时,内部聚合物在各个方向的受力情况为

$$\begin{cases} \sigma_x = 0 \\ \sigma_y = 0 \\ \sigma_z = -P \end{cases} \quad (1)$$

根据广义胡克定律有

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

式(1)-(2)中: $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 分别为内部聚合物在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上受到的应力; $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$ 分别为对应方向上的应变; $E$ 为内部聚合物的弹性模量; $\mu$ 为其泊松比。根据式(1)-(2),求得聚合物的轴向应变为

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu^2 + 2\mu + 1}{2\mu + 1} \frac{P}{E} \quad (3)$$

由于聚合物收缩带动内部光纤光栅产生轴向应变,因此式(3)即为光纤光栅的轴向应变。光纤光栅中心波长的漂移受到弹光效应与波导效应的共同影响,就纵向应变灵敏度而言,波导效应对其影响较小,一般可以忽略。因此,光纤光栅轴向应力灵敏系数为

$$k_p = \left\{ \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \mu_f(P_{11} + P_{12})] - 1 \right\} |\varepsilon_z| / E \quad (4)$$

式(4)中: $n_{\text{eff}}$ 为光纤光栅的有效折射率,以纯熔

融石英光栅为例,一般为1.456; $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 为光纤的弹光系数,分别取0.121和0.270; $\mu_f$ 为光纤的泊松比,取0.17;将式(3)代入式(4),可得所提传感结构轴向压力灵敏度为

$$k_p = \frac{0.784}{E} \left( \frac{\mu^2 + 2\mu + 1}{2\mu + 1} \right) \quad (5)$$

从式(5)可以看出,压力灵敏度 $k_p$ 取决于聚合物材料的弹性模量 $E$ 和泊松比 $\mu$ 。通过选择不同的材料来满足对传感结构灵敏度的要求。

## 2 传感结构模型的建立

### 2.1 静态应变模型

考虑到聚合物材料正常工作时均发生线性应变,列写聚合物材料的平衡微分方程

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f} \quad (6)$$

式(6)中: $\rho$ 为聚合物材料的密度; $\mathbf{u}$ 为其位移场; $d_a$ 为聚合物的阻尼系数; $\boldsymbol{\sigma}$ 为其柯西应力张量; $\mathbf{f}$ 为其单位体积力。

静态仿真是为了验证敏感元件在外界应力下的应变情况,物理本构方程为胡克定律<sup>[20]</sup>,在不考虑非线性应变(粘性应力、塑性应变、蠕变等)的情况下,有

$$\mathbf{S} - (\mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_{\text{ext}}) = \mathbf{C} \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) \quad (7)$$

式(7)中: $\mathbf{S}$ 为应力; $\mathbf{S}_0$ 为材料的预应力; $\mathbf{S}_{\text{ext}}$ 为外部应力; $\mathbf{C}$ 为弹性矩阵,不同性质的材料弹性矩阵不同; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为材料的弹性应变; $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 为材料的预应变。

最后,材料受到外界应力产生应变的同时会相应地产生位移,建立应变—位移的关系式为

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}] \quad (8)$$

式(8)中, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为总应变。

### 2.2 材料的热膨胀模型

聚合物材料受热时会发生热膨胀,使得其形状尺寸等发生变化<sup>[21]</sup>。传统增敏罐压力传感器在聚合物发生热膨胀时,内部增敏元件会因金属屏蔽壳阻碍而在径向上受到挤压,根据式(9),泊松效应产生的 $-\mu(\sigma_x + \sigma_y)/E$ 会影响其轴向应变,进而降低了这一工况下的压力灵敏度。

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (9)$$

橡胶受热时,其体积变化在较宽范围内服从下列线性方程

$$V_T = V_{T0}(1 + \alpha \Delta T) \quad (10)$$

式(10)中, $\alpha$ 为橡胶的体积膨胀系数; $V_T$ 和 $V_{T0}$ 分

别为温度在  $T$  和  $T_0$  时橡胶的体积。为了在仿真中描述这一过程,需在式(7)的基础上加入由热膨胀导致的应变变量,即

$$S - (S_0 + S_{ext}) = C \cdot [\varepsilon - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{th})] \quad (11)$$

式(11)中,  $\varepsilon_{th}$  为热应变。

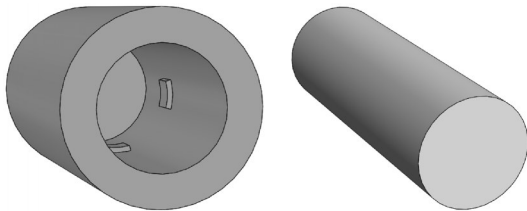
### 3 仿真及结果

在有限元仿真软件中搭建见图2的传感结构模型,参数见表1。内部增敏元件为常见耐油橡胶,外部屏蔽壳选择环氧树脂。

表1 所搭建传感器模型各部分参数

Table 1 Parameters of each part of the sensor model				
结构	名称	参数	名称	参数
内部压力增敏元件	半径/mm	5	长度/mm	30
	弹性模量/Pa	$1 \times 10^8$	泊松比	0.48
外部屏蔽壳	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 200	热膨胀系数/K	$150 \times 10^{-6}$
	间隙/mm	0.5	厚度/mm	3
	弹性模量/Pa	$1 \times 10^9$	泊松比	0.38
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 600	热膨胀系数/K	$6.0 \times 10^{-5}$

将传感结构分为两部分进行建模见图3。内部聚合物与外部屏蔽壳是两个独立的集合单元,二者之间会有力的传递但接触面不会穿透。为了完整表现二者的关系,在建模时将内部聚合物与外部屏蔽壳按照装配体处理,二者接触的位置定义为“接触对”,其中源边界为连接块,目标边界为内部聚合物。在划分网格时,源边界大小设置为常规,目标边界设置为较细,采用自由三角形网格,以获得更好的收敛性。求解器采用 GMRES 迭代求解器,误差估计因子 40,最大中间迭代次数为 100 次。



(a) 外部屏蔽壳几何模型 (b) 内部聚合物几何模型

图3 传感器几何模型

Fig. 3 Sensor geometry model

#### 3.1 压力灵敏系数验证

对于接触面上的压力,采用增广拉格朗日法进行计算。这一方法一方面可以满足求解接触对模型的需要;另一方面对求解器的选择没有限制,有利于模型的快速求解。此外,由于力控制结构问题较难收敛,因此在求解时利用连续参数逐步加载压力,端面受到的边界载荷随时间的变化见图4。

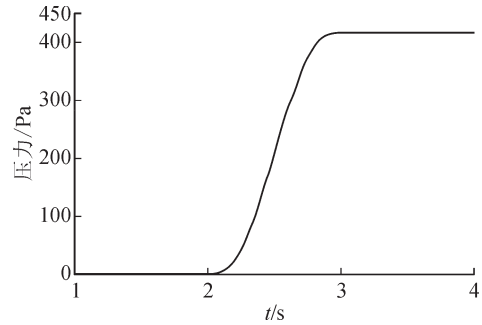


图4 端面所受边界载荷随时间变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the change of the boundary load on the end face with time

内部敏感元件中心截面在该压力作用下体积应变示意图见图5。横纵坐标表示敏感元件的位置坐标。从图5中可以看出,在该边界载荷作用下,内部聚合物整体发生自由均匀形变。只有与连接块相接触的位置发生了较大陡度的应变,但光纤位于聚合物中轴线上,因此这一部分较大陡度的应变并不影响光纤光栅的准确测量。

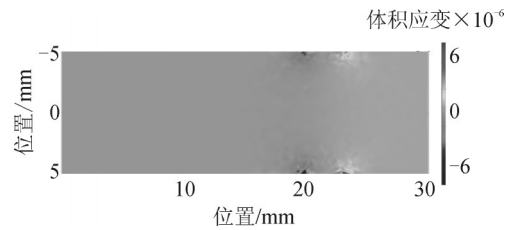


图5 内部聚合物轴向截面体积应变示意图

Fig. 5 Schematic diagram of volumetric strain of internal polymer axial section

光纤光栅受到轴向压缩时,其应变与中心波长相对变化的关系式为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = 0.78\varepsilon_z \quad (12)$$

根据式(12),进一步求得该传感结构内部FBG中心波长相对变化与端面所受压力关系示意图见图6。斜率即为压力灵敏度,约  $9.36 \times 10^{-3}$  MPa,与通过式(5)计算得到的理论结果( $8.76 \times 10^{-3}$  MPa)相近,相比于裸光栅的  $1.98 \times 10^{-6}$  MPa 的压力灵敏度增大了 4 000 多倍。

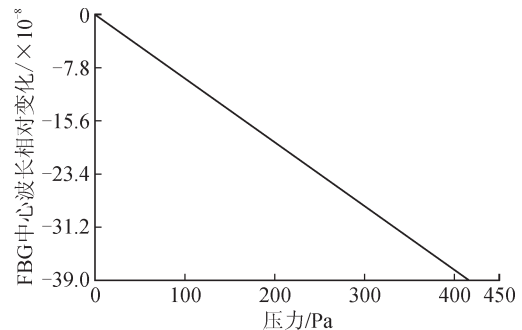
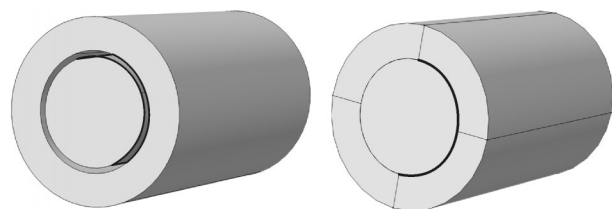


图6 不同压力作用下FBG中心波长相对变化情况

Fig. 6 The relative change of the center wavelength of FBG caused by different pressures

### 3.2 热膨胀对两种结构测量灵敏度的影响

根据前文分析,传统增敏罐型压力传感器在热膨胀时聚合物伸缩会受到外部屏蔽壳的摩擦阻碍,进而影响灵敏度。本节通过仿真验证文中所提传感结构可以改善这一现象。对两种结构的传感器建模见图7。并进行如下仿真:在开口处施加压力,数值从0上升到0.4 MPa,设置体积参考温度273.15 K,传感器模型温度为353.15 K,用于模拟变压器内正常工况下的温度,记录传感器受力面发生的位移与所受压力的变化情况。由于光纤紧密嵌入在内部聚合物中,端面伸缩会直接带动内部光纤在轴向上产生应变,因此端面位移变化率可以用来衡量聚合物封装的光纤传感器在受热膨胀后的灵敏度。



(a) 文中所提压力传感器结构 (b) 传统增敏罐型压力传感器

图7 两种结构压力传感器几何模型

Fig. 7 Geometric models of two pressure sensor structures

两种结构压力传感器在353.15 K下端面位移随所受压力的变化示意图见图8。从图8中可以看出,文中所提结构端面位移变化率大约为-0.8 mm/MPa,增敏罐型压力传感器的端面位移变化率约为-0.05 mm/MPa。可见在聚合物受热膨胀后,文中所提的压力传感测量结构灵敏度要比传统增敏罐型压力传感器高出一个数量级,这主要是因为增敏罐型压力传感器内部聚合物及外部屏蔽壳在温度升高时尺寸都会变大,二者相互挤压,接触面上压力增大,由此导致端面受力后发生位移的过程中受到较大的摩擦力,阻碍了内部聚合物轴向上的自由伸缩。

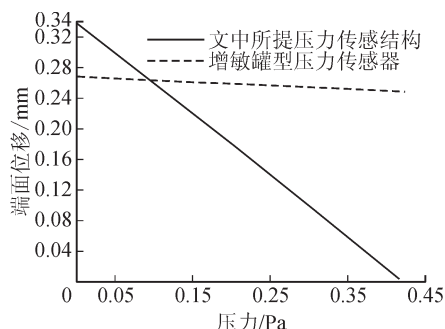
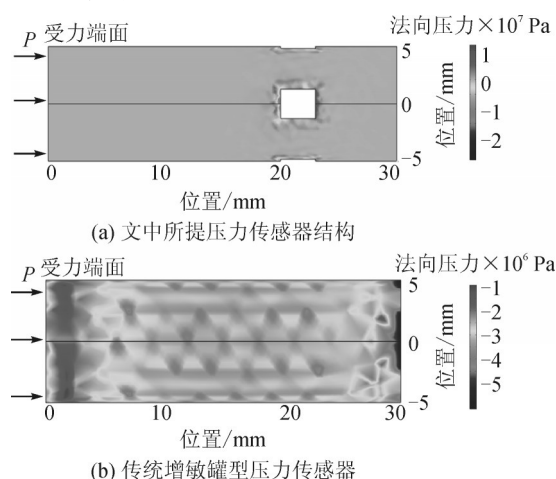


图8 两种结构压力传感器端面位移变化情况

Fig. 8 Displacement changes of the end faces of pressure sensors with two structures

两类传感器内部聚合物侧表面(即图7粗线)在0.4 MPa下受到的法向压力见图9。从图9(a)可以看出文中所提压力传感器在353.15 K,端面受到0.4 MPa压力时,侧表面法向压力接近于0 Pa,只有在连接块附近受到较大的法向压力,但光纤光栅处于传感器靠近受力端面的位置,大约在5~15 mm处,因此这一部分受力对光纤光栅的测量并无影响。图9(b)展示了增敏罐型压力传感器在该工况下侧表面受到的法向压力,其平均值超过0.2 MPa,相应地,在内部聚合物伸缩时会受到较大的摩擦力,这也验证了先前对这一结构在热膨胀时灵敏度减小的原因分析。



(a) 文中所提压力传感器结构 (b) 传统增敏罐型压力传感器

图9 两种结构压力传感器侧面所受法向压力

## 4 结语

文中提出了一种适用于油浸式变压器内部压力测量的传感结构设计思路,通过理论计算及验证,配合相应的封装材料,其压力测量灵敏度可达到裸光栅的4 000多倍。该传感结构可以有效避免传统增敏罐型压力传感器由于热膨胀导致的灵敏度降低的问题,并可用于流体环境中进行单一方向压力的测量。

文中所提传感结构可用于各类高温油浸电力设备内部压力测量。由于该传感结构在测量时可以屏蔽其他无关方向的应力,因此对安装位置也无特殊需求,可灵活安置于油道或绕组附近,使其开口面向待测位置,另一端支架固定或高温胶粘即可。同时所用到的材料也不会对电力设备内部绝缘造成威胁。外部屏蔽壳可选择硬质环氧树脂,其作为长期用于变压器中的酯类材料,较高的弹性模量与优秀的耐油性能符合对于屏蔽壳的要求。内部增敏聚合物可采用耐油橡胶,如氟硅橡胶、聚氨

酯或丁腈橡胶等,这类橡胶具备优异的耐油性以及橡胶基本的力学性质,在提高光纤光栅对于压力探测灵敏度的同时能够忍受长期的高温油浸环境。

### 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.
- [2] ABI-SAMRA N, 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
- [3] CIGRE WG A2.37. Transformer Reliability Survey[R]. CIGRE: CIGRE WG A2.37, 2015.
- [4] 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.
- [5] 电力变压器突变压力继电器现场检测规范: ICS 19.060—2019[S]. 2019.  
On-site test specification for power transformer sudden change pressure relay: ICS 19.060—2019[S]. 2019.
- [6] PERIGAUD G, MULLER S, BRESSY G D E, et al. Contribution to the study of transformer tank rupture due to internal arcing development of a computer simulation tool[C]// Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [7] 武星,王瑜,殷晓刚,等.电力设备状态评价系统的开发与应用[J].高压电器,2020,56(6):7-12.  
WU Xing, WANG Yu, YIN Xiaogang, et al. Development and application of power equipment status evaluation system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 7-12.
- [8] 朱嘉坤,吴军二,安婷婷.压力保护在油浸电力变压器非电量保护中的应用和整定[J].工业仪表与自动化装置, 2019(1):91-94.  
ZHU Jiakun, WU Juner, AN Tingting. Application and setting of pressure protection in non-electric parameter protection of oil-immersed power transformer[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2019(1): 91-94.
- [9] 蒲天骄,乔骥,韩笑,等.人工智能技术在电力设备运维检修中的研究及应用[J].高电压技术,2020,46(2): 369-383.  
PU Tianjiao, QIAO Ji, HAN Xiao, et al. Research and application of artificial intelligence in operation and maintenance for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 369-383.
- [10] 代杰杰,宋辉,盛戈峰,等.采用LSTM网络的电力变压器运行状态预测方法研究[J].高电压技术,2018,44(4): 1099-1106.  
DAI Jiejie, SONG Hui, SHENG Gehao, et al. Prediction method for power transformer running state based on LSTM network[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1099-1106.
- [11] YAACOB M M, ALSAEDI M A, RASHED J, et al. Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors[J]. Photonic Sens., 2014, 4(4): 325-337.
- [12] MA G M, QIN W Q, DU Y, et al. A centimeter resolution GIS insulator strain distribution measurement method based on OFDR[J]. IEEE Sens. J., 2018, 19(8): 2962-2969.
- [13] 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.
- [14] 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 Ying, 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.
- [15] XIONG Yanling, REN Naikui, WU Mingze, et al. Sensitivity-enhanced FBG demodulation system with multi-sideband filtering method[J]. Optics Communications, 2017(382): 246-252.
- [16] 张爽.光纤珩珀传感器在应力/压力测试方面的应用研究[D].成都:电子科技大学,2018.  
ZHANG Shuang. Research on the application of fiber F-P sensor in stress/pressure test[D]. Chengdu: School of Information & Communication, 2018.
- [17] 张韬杰,江毅,马维一.一种高精度MEMS光纤F-P压力传感器[J].激光与光电子学进展,2019,56(17): 314-318.  
ZHANG Taojie, JIANG Yi, MA Weiyi. A high fineness optical F-P pressure sensors based on MEMS[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 314-318.
- [18] 王永洪,张明义,马加骁,等.光纤布拉格光栅用于黏性土中静压沉桩贯入特性测量研究[J/OL].光学学报:1-18.2020-04-13.https://kns-cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20200110.1505.014.html.  
WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, MA Jiayao, et al. Measurements of penetration characteristics of jacked piles in clayey soil based on fiber bragg gratings[J/OL]. Acta Optica Sinica: 1-18.2020-04-13. https://kns-cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20200110.1505.014.html.
- [19] 蒋善超,陈永明,王宁,等.微型光纤光栅土压力传感器量程及其过载能力分析研究[J].自动化与仪器仪表, 2020(1):44-46.  
XUE Shanchao, CHEN Yongming, WANG Ning, et al. Research on measurement range and overload capacity of FBG soil pressure sensor based on pneumatic calibration

(下转第45页)

- [16] 代杰杰, 宋辉, 杨祎, 等. 基于深度信念网络的变压器油中溶解气体浓度预测方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8):359-364.  
DAI Jiejie, SONG Hui, YANG Yi, et al. Concentration prediction of dissolved gases in transformer oil based on deep belief networks[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):359-364.
- [17] DAI J, SONG H, SHENG G, et al. Dissolved gas analysis of insulating oil for power transformer fault diagnosis with deep belief network[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2017, 24(5):2828-2835.
- [18] 曹渝昆, 何健伟. 基于RA-DNN的电力变压器故障分类方法[J]. 自动化装置与设备, 2019(2):98-107.  
CAO Yukun, HE Jianwei. Power transformer fault classification method based on RA-DNN[J]. Automation Devices & Equipments, 2019(2):98-107.
- [19] HINTON G E. A practical guide to training restricted boltzmann machines[J]. Momentum, 2012, 9(1):599-619.
- [20] HECHT-NIELSEN R. Theory of the backpropagation neural network[C]//International 1989 Joint Conference on Neural Networks. Washington, DC, USA:IEEE, 1989: 65-93.
- [21] VT S E, SHIN Y C. Radial basis function neural network for approximation and estimation of nonlinear stochastic dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5(4): 594-603.
- [22] DUVAL M, DEPABLA A. Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases[J]. Electrical Insulation Magazine IEEE, 2002, 17(2):31-41.
- [23] 崔宇, 侯慧娟, 苏磊, 等. 考虑不平衡案例样本的电力变压器故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 33-41.  
CUI Yu, HOU Huijuan, SU Lei, et al. Fault diagnosis method for power transformer considering imbalanced class distribution[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 33-41.
- [24] 王有元, 周立玮, 梁玄鸿, 等. 基于关联规则分析的电力变压器故障马尔科夫预测模型[J]. 高电压技术, 2018, 44(4):1051-1058.  
WANG Youyuan, ZHOU Liwei, LIANG Xuanhong, et al. Markov forecasting model of power transformer fault based on association rules analysis[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1051-1058.
- [25] 邓冉, 朱永利, 刘雪纯, 等. 基于L2-VAE的局部放电未知信号识别方法[J]. 广东电力, 2019, 32(9):69-77.  
DENG Ran, ZHU Yongli, LIU Xuechun, et al. Pattern recognition of unknown signals for partial discharge based on L2-VAE[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(9):69-77.

任双赞(1981—), 男, 高级工程师, 主要研究变压器在线监测及状态诊断技术(E-mail: 154889311@qq.com)。

徐尧宇(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究变压器绝缘状态评估。

李元(1984—), 男, 副教授, 主要研究变压器故障预警与健康管理。

王怡静(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究智能学习算法与电力设备故障诊断技术。

张冠军(1970—), 男, 教授, 主要研究电力设备的故障诊断和状态评估技术。

(上接第38页)

- system[J]. Automation & Instrumentation, 2020(1):44-46.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 江磊, 沈烈, 郑强. 聚合物的热膨胀[J]. 功能材料, 2004(2):142-144.  
JIANG Lei, SHEN Lie, ZHENG Qiang. The thermal expansion of polymer[J]. Journal of Functional Materials, 2004(2): 142-144.
- [23] 苏波. 流固耦合方程的建立及耦合数据传递[C]//庆祝刘锡良教授八十华诞暨第八届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津大学:全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2008:704-709.  
SU bo. Establishment of fluid-structure coupling equation and coupling data transfer[C]//Proceedings of the 8th National Symposium on Modern Structural Engineering. Tianjin University: Academic Committee of National Symposium on Modern Structural Engineering, 2008:704-709.
- [24] 朱文, 赵晓凤. 油液金属颗粒对500kV变压器出线装置电场的影响[J]. 广东电力, 2018, 31(7):112-118.  
ZHU Wen, ZHAO Xiaofeng. Influence of oil metallic particles on electric field of 500 kV transformer outlet device[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 112-118.
- [25] 董锦涛, 李德波, 周杰联, 等. 220kV变压器短路状态绕组受力数值模拟[J]. 广东电力, 2018, 31(7):124-129.  
DONG Chuntao, LI Debo, ZHOU Jieliang, et al. Numerical simulation on winding force of 220 kV transformer in short-circuit condition[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7):124-129.
- [26] 孙安, 乔学光, 贾振安, 等. 聚合物封装光纤布拉格光栅传感器温度压力特性研究[J]. 中国激光, 2005(2):224-227.  
SUN An, QIAO Xueguang, JIA Zhen'an, et al. Temperature and pressure responsive characteristics of polymer packaged fiber bragg grating with large dynamic range[J]. Chinese Journal of Lasers. 2005(2):224-227.
- 冀茂(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断(E-mail: m.ji@ncepu.edu.cn)。