

# 液体绝缘对光纤法布里-珀罗局放 超声传感器特性参数影响

王学会, 张伟超\*, 赵洪, 陈起超, 魏宁

哈尔滨理工大学电气与电子工程学院工程电介质及其应用技术教育部重点实验室  
黑龙江省电介质工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

**摘要** 非本征光纤法布里-珀罗(F-P)传感器已被用于液-固复合绝缘局部放电检测,但存在液体黏滞阻尼和附加质量影响传感器固有频率和灵敏度的问题。采用有限元方法计算传感膜片在油和空气介质中受迫振动幅频响应,并分析不同温度下传感器幅频特性和灵敏度。提出 F-P 传感器的液体隔离结构,消除介质对其参数的影响。制备 F-P 传感器并构建实验系统,测试不同温度下两种结构传感器的幅频特性。实验结果表明:液体绝缘油中,F-P 传感器因黏滞阻尼和附加质量导致固有频率下降约 0.58,幅频曲线带宽变大,响应幅值降低;液体介质温度升高,传感器固有频率增加,幅频曲线带宽变小,响应幅值增加,灵敏度变大;液体隔离结构的 F-P 传感器不受介质黏滞阻尼和附加质量影响。

**关键词** 光纤光学;非本征法布里-珀罗传感器;湿模态分析;幅频特性;温度影响

**中图分类号** TN253

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201838.0406005

## Impact of Liquid Insulation on Characteristic Parameters of Fiber Fabry-Perot Partial Discharge Induced Ultrasound Sensor

Wang Xuehui, Zhang Weichao, Zhao Hong, Chen Qichao, Wei Ning

*Key Laboratory of Dielectrics Engineering of Heilongjiang Province, Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China*

**Abstract** Extrinsic fiber Fabry-Perot (F-P) sensor could detect partial discharge in liquid-solid composite insulation, but natural frequency and sensitivity of F-P sensor are affected by viscous damping and added mass of liquid insulation. We use finite element analysis method to simulate the amplitude-frequency response characteristics of F-P sensor under forced vibration in air and liquid insulation medium, and analyze the amplitude-frequency characteristics and sensitivity of F-P sensor at different temperatures. We propose the F-P sensor with isolating liquid insulation structure to eliminate the effect of medium and design an experiment system to measure amplitude-frequency response curves of F-P sensors at different temperatures. The experimental results show that due to viscous damping and added mass of liquid, natural frequency of F-P sensor in liquid insulation transformer oil is 0.58 times of that in air, the bandwidth of amplitude-frequency curve becomes wider, and the harmonic response amplitude decreases. Furthermore, the temperature of liquid medium increases, the natural frequency of F-P sensor increases, the bandwidth of amplitude-frequency becomes narrower, and the harmonic response amplitude and sensitivity increase. It's found that F-P sensor with isolating liquid insulation structure are immune to media viscous

**收稿日期:** 2017-07-10; **收到修改稿日期:** 2017-11-17

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金(51607049)、黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPY-SCT-2016160)

**作者简介:** 王学会(1992—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感及高压绝缘测试等方面的研究。

E-mail: 1378355182@qq.com

**导师简介:** 赵洪(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高电压绝缘技术方面的研究。

E-mail: hongzhao@hrbust.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: weichaozhang@163.com

damping and additional mass.

**Key words** fiber optics; extrinsic Fabry-Perot sensor; wet modal analysis; amplitude-frequency characteristic; temperature effect

**OCIS codes** 060.2310; 120.2230; 120.3180; 130.6010

## 1 引 言

电力设备绝缘故障是其可靠运行的威胁之一,而局部放电(PD)是绝缘破坏的初期表现,也是导致设备绝缘故障的主要因素<sup>[1]</sup>。在线检测局部放电可及早发现潜伏故障,减小经济损失。局部放电检测声发射检测法具有灵敏度高、电磁干扰小的特点<sup>[2]</sup>,被广泛应用于在液-固复合绝缘电力设备(如油浸电力变压器)的局部放电在线检测和定位中<sup>[3]</sup>。

局部放电检测声发射检测法主要有压电超声检测法和光学检测法两种。压电超声检测法需要将压电陶瓷(PZT)传感器安装于设备壳体之外<sup>[4-6]</sup>,存在电磁干扰问题,声波沿设备外壁多路径传播影响局部放电源定位<sup>[7]</sup>。光学检测法使用的光纤传感器体积小,可将传感器置于绝缘介质内部,测量油介质中传输的超声波<sup>[8]</sup>,提高测量以及定位精度,光学检测法具有灵敏度高、抗电磁干扰等优点,因此已成为电力设备在线检测的主要方法之一<sup>[9-11]</sup>。

光纤法布里-珀罗(F-P)传感器具有结构简单、尺寸小、灵敏度高、受环境影响小等优点,被广泛应用于各种物理量的测量中<sup>[12-14]</sup>,已成为目前传感器研究热点<sup>[15-17]</sup>。非本征型光纤 F-P 传感器的传感元件是由耦合膜片和光纤尾纤端面组成的 F-P 腔体,利用膜的弹性效应感应声波,可用于测量液体中的局放超声波<sup>[18]</sup>。文献已针对 F-P 传感器用于局放检测中工作点的选择、解调,以及传感器的制作方法进行了研究<sup>[19-20]</sup>,但现有文献在设计局放 F-P 超声传感器时仅计算耦合膜片在空气介质中的动力学特性,对于液体绝缘电介质(如变压器油)以及液体绝缘电介质温度等对传感器参数特性的影响分析较少。而局放检测环境多为液体绝缘电介质,且电力设备液体绝缘电解质存在温度变化,这均会影响 F-P 传感器的固有频率和检测灵敏度。本文针对传感器所处的液体电介质环境,对 F-P 传感膜片在空气和绝缘油中的振动特性进行了理论分析;利用有限元方法仿真了 F-P 传感膜片在两种介质中受迫振动时的幅频响应特性;仿真分析了不同温度下绝缘油黏性阻尼系数和附加质量对传感膜片幅频特性和灵敏度的影响规律;根据多光束干涉原理制备了

F-P 传感器,建立 F-P 传感器幅频测试系统进行对比实验研究,验证了液体绝缘介质对 F-P 传感器局放检测的影响,并且提出了具有隔离液体介质的 F-P 传感器结构,该结构可以消除液体介质对其振动特性影响。

## 2 理论分析

### 2.1 F-P 传感器基本结构及工作原理

非本征光纤 F-P 传感器的 F-P 腔由平行放置的光纤尾纤和石英膜片耦合组成,结构如图 1 所示。由光源发出的光经光纤传输进 F-P 腔,在腔体内不断反射、折射,最终在腔的两侧发生干涉现象,形成相位差恒定、波长相同的相干光并由光纤输出。

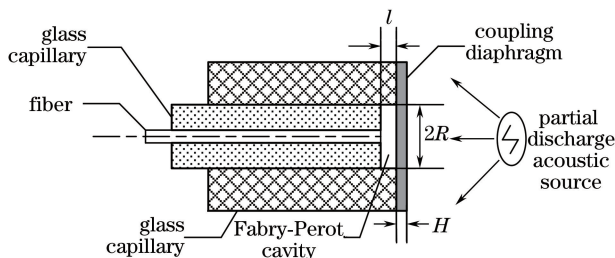


图 1 非本征光纤 F-P 传感器结构示意图

Fig. 1 Diagram of extrinsic fiber F-P sensor structure

根据多光束干涉理论,F-P 腔的反射光输出光强为<sup>[20]</sup>

$$I(\lambda, l) = I_0(\lambda) \cdot \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi n l / \lambda)}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi n l / \lambda)}, \quad (1)$$

式中: $I_0(\lambda)$ 为入射光光强; $R_1$ 、 $R_2$ 分别为尾纤端面与耦合膜片的反射率; $l$ 为 F-P 腔长; $\lambda$ 为入射光波长; $n$ 为腔内介质折射率。当介质为空气时  $n = 1$ 。局部放电产生的超声波作用于耦合膜片会引起膜片振动,导致 F-P 腔长改变,从而调制入射光波引起输出光强变化,解调反射光波输出光强信号就可获得局放声波信息。

### 2.2 传感器的静压灵敏度及频响特性

石英膜片作为局放超声波与光波的耦合元件,其振动灵敏度与频率响应决定了 F-P 传感器局放检测的灵敏度,因此研究膜片的固有频率与振型对传感器的设计以及局放检测灵敏度极其重要。石英

膜片的灵敏度和幅频特性与其结构参数有关,四周完全约束的圆形石英膜片的一阶固有(谐振)频率为<sup>[21]</sup>

$$f = \frac{10.21}{2\pi} \sqrt{\frac{Eg}{(1-\nu^2)\rho}} \cdot \frac{H}{R^2} = 14.84 \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)\rho}} \cdot \frac{H}{R^2}, \quad (2)$$

式中:石英的杨氏模量  $E=73.73$  GPa;泊松系数  $\nu=0.17$ ;密度  $\rho=2210$  kg/m<sup>3</sup>;  $H$  为膜片厚度,单位为  $\mu\text{m}$ ;  $R$  为圆形膜片有效半径,单位为 mm;  $f$  为谐振频率,单位为 kHz;  $g$  为重力加速度,取  $9.8$  m/s<sup>2</sup>。

根据 F-P 传感器工作原理,腔长变化只与膜片的中心位移有关,膜片圆心处的静压灵敏度为

$$S = \frac{3(1-\nu^2)}{16E} \cdot \frac{R^4}{H^3} = 2.47 \times 10^{-6} \frac{R^4}{H^3}, \quad (3)$$

式中:静压灵敏度  $S$  的单位为 m/Pa。

由(2)、(3)式计算厚度为  $50$   $\mu\text{m}$ 、直径为  $1.8$  mm的膜片的一阶固有频率为  $169.7$  kHz,静压灵敏度为  $1.29 \times 10^{-11}$  m。利用有限元仿真软件 ANSYS Workbench 仿真计算得到膜片的位移分布云图和幅频特性曲线如图 2 所示。

通过分析可知,膜片在固有频率附近振动位移陡增,幅频特性对膜片的振动响应影响极大,由于局部放电诱发的超声波信号频率在  $50 \sim 500$  kHz 之间,为设计高灵敏度的传感器,应使膜片的一阶固有频率接近局部放电发出超声信号的主频率。由(3)式可知,膜片厚度  $H$  越小灵敏度越高,但受膜片制造工艺的限制,膜片加工最小厚度为  $30$   $\mu\text{m}$ ,因此设计两个实验传感器膜片厚度为  $40$   $\mu\text{m}$  和  $30$   $\mu\text{m}$ ,通过调整约束直径将传感器一阶固有频率设计在局放超声频段。

### 2.3 振动力学分析基本理论

非本征 F-P 传感器工作在液体绝缘油即变压器油中,油的黏滞效应会对膜片振动带来阻尼,一般认为会使谐振的品质因素  $Q$  值下降、灵敏度下降、带宽变宽,也会使固有频率值发生改变。为了获得传感器在变压器油中的幅频特性,需要分析传感器在变压器油中的振动,这涉及到振动力学以及流体与固体相互耦合等知识。

#### 2.3.1 空气中动力学分析

对于离散的具有  $n$  个自由度系统的结构,其动力学方程为

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} = \mathbf{F}_s, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{M}_s$ 、 $\mathbf{C}_s$ 、 $\mathbf{K}_s$  分别为结构的质量、阻尼、刚度矩

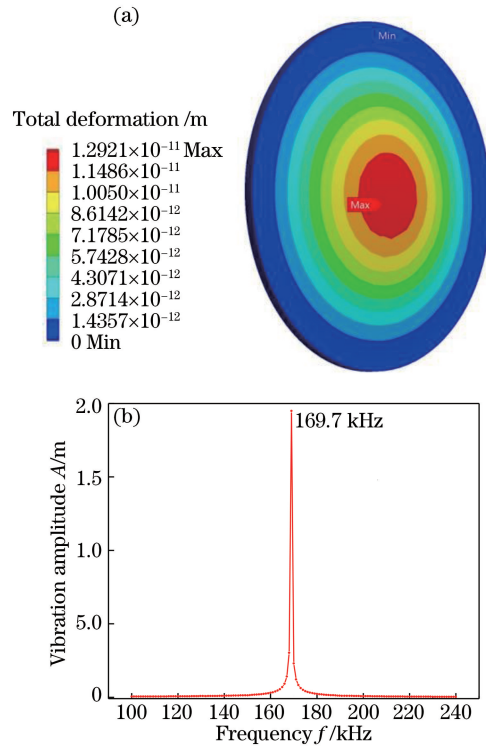


图 2 (a)单位应力下膜片位移分布图;  
(b)一阶固有频率幅频特性曲线

Fig. 2 (a) Displacement distribution of diaphragm under unit stress; (b) the first order natural frequency amplitude-frequency characteristic curve

阵; $\mathbf{u}$ 、 $\dot{\mathbf{u}}$ 、 $\ddot{\mathbf{u}}$  分别为固体质点的位移、速度、加速度矩阵; $\mathbf{F}_s$  为外部结构激励矩阵。模态分析时,振动为自由振动,故  $\mathbf{F}_s = \mathbf{0}$ ;而结构在空气中振动时空气阻尼很小,可认为是无阻尼的理想情况,即  $\mathbf{C}_s = \mathbf{0}$ 。因此,膜片在空气中的无阻尼自由振动模态方程为

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} = \mathbf{0}. \quad (5)$$

通过求解(5)式的行列式即可得出特征行列式以及特征频率即固有频率。

#### 2.3.2 液体中流固耦合动力学方程

非本征光纤 F-P 传感器工作在变压器油中,膜片在油中的振动涉及到流体与固体相互耦合的问题,比在空气中的振动复杂。首先,当膜片在油中振动时,膜片周围的油在黏性力、惯性力等力的作用下会附着在膜片表面并随之一起振动,这相当于振动系统的质量增大,油的附加质量改变了膜片振动系统的质量分布。另外,变压器油因膜片的振动而流动因此有了动能,考虑到油具有黏性,流动时会产生内摩擦阻力、消耗能量,具有阻尼效应,导致振动能力衰减和固有频率改变。因此,对油中的膜片进行模态分析应考虑油的附加质量以及黏性阻尼效应。

与空气中的干膜态对应,求解液体中的模态问题称为湿模态分析。

进行湿模态分析时,将流体压力和质点位移作为基本未知量,通过求解结构动力学方程和流体波动方程矩阵得到特征频率。进行湿模态分析时假设流体是可压缩的且不流动,则由流体 Navier-Stokes 方程:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla^2 p, \quad (6)$$

式中: $c$  为流体中声速; $p$  为流体声学压力。利用伽辽金法建立流固耦合有限元方程并化简,其中流体域的表达式为<sup>[19]</sup>

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{C}_f \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_f \mathbf{p} = \mathbf{F}_f - \rho_0 \mathbf{R}^T \ddot{\mathbf{u}}, \quad (7)$$

固体域的动力学方程为

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} = \mathbf{F}_s + \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}, \quad (8)$$

将(7)式和(8)式联立得离散的流固耦合时域有限元方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \rho_0 \mathbf{R}^T & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & -\mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_f \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{M}_f$  为流体质量矩阵; $\mathbf{C}_f$  为流体域阻尼矩阵; $\mathbf{K}_f$  为流体刚度矩阵; $\mathbf{R}$  为流固耦合矩阵,即流体与固体耦合界面上每个节点处的有效面积,它将界面上的流体压力转换成结构的载荷; $\mathbf{F}_f$  为流体附加激励矩阵; $\mathbf{p}$ 、 $\dot{\mathbf{p}}$ 、 $\ddot{\mathbf{p}}$  分别为固体质点的位移、速度、加速度矩阵; $\rho_0$  为流体平均密度。各矩阵相应单元的表达方式为<sup>[22]</sup>

$$\mathbf{M}_f = \bar{\rho}_0 \iiint_{\Omega_f} \frac{1}{\rho_0 c^2} \mathbf{N} \mathbf{N}^T dV, \quad (10)$$

$$\mathbf{C}_f = \bar{\rho}_0 \iiint_{\Omega_f} \frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} (\nabla \mathbf{N})^T (\nabla \mathbf{N}) dV, \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_f = \bar{\rho}_0 \iiint_{\Omega_f} \frac{1}{\rho_0} (\nabla \mathbf{N})^T (\nabla \mathbf{N}) dV, \quad (12)$$

$$\mathbf{R}^T = \iint_{\Gamma_f} \mathbf{N}' \mathbf{r}^T \mathbf{N}'^T dS, \quad (13)$$

$$\mathbf{M}_s = \iiint_{\Omega_s} \rho_s \mathbf{N}'^T \mathbf{N} dV, \quad (14)$$

$$\mathbf{C}_s = \iiint_{\Omega_s} c_s \mathbf{N}'^T \mathbf{N} dV, \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_s = \iiint_{\Omega_s} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV, \quad (16)$$

式中: $\mu$  为流体动力黏度; $\bar{\rho}_0$  为流体域密度常数; $\Omega_f$

为流体域; $\Gamma_f$  为流固耦合接触面; $\mathbf{N}$  为流体域压力节点插值函数; $\mathbf{N}'$  为固体域位移节点插值函数; $\mathbf{r}$  为流固耦合接触面法向量; $\Omega_s$  为固体域; $\rho_s$  为固体密度; $c_s$  为固体结构阻尼系数; $\mathbf{B}$  为固体应变关系矩阵; $\mathbf{D}$  为固体结构弹性常数。

对时域方程进行变形得频域方程

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \rho_0 \mathbf{R}^T & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & -\mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_f \end{bmatrix}, \quad (17)$$

式中: $\omega$  为振动角频率; $\dot{\mathbf{U}}$ 、 $\dot{\mathbf{P}}$  分别为结构位移和流体压力的向量形式。

### 3 变压器油对 F-P 幅频特性影响仿真分析

#### 3.1 湿模态模型建立

利用 ANSYS Workbench Design Molder 软件建立 F-P 传感器置于变压器油中检测的三维几何模型,仿真两个 F-P 传感器在变压器油中的振动。传感器尺寸分别为:F-P1 的直径 1.8 mm,厚度 40  $\mu\text{m}$ ;F-P2 的直径 1.0 mm,厚度 30  $\mu\text{m}$ 。所建立的几何模型由 F-P 腔、膜片、玻璃毛细管和变压器油组成,其中,F-P 腔内为空气;传感器外围由变压器油包围;膜片与毛细管材料均为石英,实际制作过程是将膜片固定到玻璃毛细管上,计算机建模将二者合并为一体处理,膜片的有效半径即为 F-P 腔半径。几何模型建立后,对所建立模型进行有限元网格剖分。

#### 3.2 F-P 传感器在变压器油中的幅频响应

根据振动力学理论,F-P 传感器在变压器油中振动时,主要受变压器油黏性阻尼的影响,需对所用变压器油的动力黏度进行实验检测。利用石油产品黏度测定仪[如图 3(a)所示],按照中华人民共和国标准 GB/T265《石油产品运动黏度测定法和动力黏度计算法》,对所用变压器油在 20~80  $^{\circ}\text{C}$  进行动力黏度检测,测得不同温度下的变压器油动力黏度值如表 1 所示,动力黏度随温度的变化曲线如图 3(b)所示。由图 3(b)可以看出,变压器油黏度随温度升高而降低。

石英膜片、变压器油和空气在 20  $^{\circ}\text{C}$  的物性参数如表 2 所示,将材料参数值代入模型中。在膜片法向方向施加激励,利用谐响应分析中的完全求解法进行求解,通过扫频得到膜片的幅频特性曲线。完

表 1 空气和变压器油参数随温度变化表

Table 1 Air and transformer oil parameters vary with temperature

Temperature $T / ^\circ\text{C}$	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$		Acoustic Velocity $c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		Dynamic viscosity $\mu / (\text{mPa} \cdot \text{s}^{-1})$	
	Air	Transformer oil	Air	Transformer oil	Air	Transformer oil
20	1.205	879	343	1420	0.0181	18.48
30	1.165	873	348	1355	0.0186	12.45
40	1.128	867	355	1290	0.0191	8.64
50	1.093	860	360	1225	0.0196	6.30
60	1.060	854	366	1160	0.0200	4.27
70	1.029	848	371	1095	0.0205	3.35
80	1.000	842	377	1030	0.0210	3.06

表 2 在 20 °C 下相关材料参数表

Table 2 Related material parameter list at 20 °C

Material	Density	Young's modulus	Poisson	Acoustic velocity	Dynamic viscosity
	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E / \text{GPa}$	ratio $\nu$	$c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\mu / (\text{mPa} \cdot \text{s}^{-1})$
Quartz	2210	73.73	0.17	—	—
Transformer oil	879	—	—	1420	18.48
Air	1.204	—	—	343	0.0181

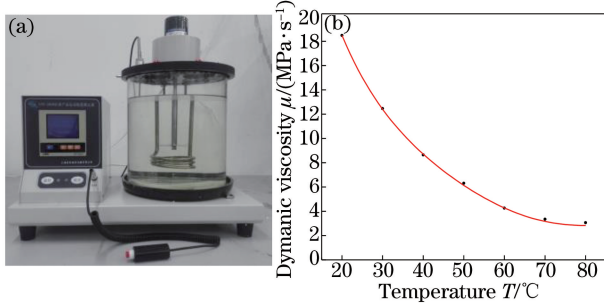


图 3 (a)变压器油动力黏度检测装置;  
(b)变压器油动力黏度随温度变化曲线

Fig. 3 (a) Photograph of transformer oil dynamic viscosity detection device; (b) transformer oil dynamic viscosity varies with temperature

成传感器在变压器油中的仿真后,将变压器油参数替换为空气参数,即可得到 F-P1、F-P2 在空气中的幅频响应,并将其与变压器油中的结果进行对比,如图 4 所示。F-P1 在变压器油和空气中的固有频率分别为:44 kHz、135 kHz;F-P2 在变压器油和空气中的固有频率分别为:122 kHz、327 kHz。

F-P 传感器在变压器油中的固有频率大大降低,响应带宽增大,以及振动幅值降低如图 4 所示。这是由于变压器油的动力黏度与密度和空气相差很大,导致膜片在变压器油中振动黏性阻尼以及油的附加质量很大。为了定量衡量变压器油介质对于 F-P 传感器膜片振动模式的影响,定义一个无量纲的参数  $k$ ,其定义公式为

$$k = 1 - \frac{f_t}{f_a}, \quad (18)$$

式中: $k$  为膜片一阶固有频率较空气中的下降系数;

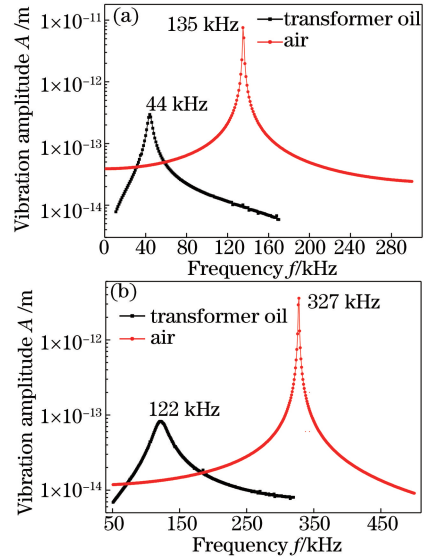


图 4 20 °C 空气和变压器油中 F-P 传感器幅频特性仿真图。  
(a) F-P1; (b) F-P2

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic simulation charts of (a) F-P1 and (b) F-P2 sensors in air and transformer oil at 20 °C

$f_t$  为膜片在油中的固有频率; $f_a$  为膜片在空气中的固有频率。由(18)式计算得,F-P1 和 F-P2 的固有频率下降系数分别为 0.67 和 0.63。

### 3.3 变压器油温度对 F-P 传感器幅频响应的影响

由于变压器实际运行时油箱内变压器油的温度并不是常温的,而是高温的,因此需研究油温变化对 F-P 传感器幅频特性的影响。空气和变压器油参数随温度变化如表 1 所示。仿真分析时,设置不同温度下变压器油和 F-P 空气腔对应的参数值即可得到不同温度下传感器的幅频特性曲线,如图 5 所示。

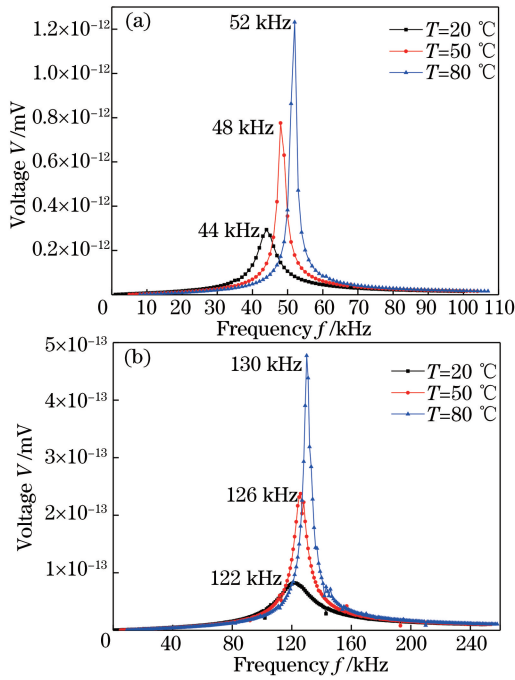


图 5 F-P 传感器在 20、50、80 °C 变压器油中的幅频特性仿真图。(a) F-P1; (b) F-P2  
Fig. 5 Amplitude-frequency characteristic simulation charts of (a) F-P1 and (b) F-P2 sensors in transformer oil at 20 °C, 50 °C, and 80 °C

如图 5 所示,随着温度升高,膜片的一阶固有频率升高、响应带宽变小、振动幅值和灵敏度变大,这是因为温度升高使变压器油的黏度和密度降低,导致其黏性阻尼系数和附加质量变小。

## 4 测试实验

### 4.1 实验测试系统结构

建立非本征光纤 F-P 传感器超声测量系统,如图 6 所示。将制备的 F-P 传感器和 PZT(型号 SR-15)置于充满变压器油的油箱中,油箱内油温可通过控温系统线性调节,设置到实验温度后油温可以保持不变。数字信号发生器与 PZT 相连,驱动 PZT 发射幅值相同、频率范围为 20~500 kHz 的声波信号。光纤 F-P 传感器作为声波信号接收端置于油箱内,并与 PZT 保持相同高度。F-P 传感器解调系统采用中心波长为 1550 nm 的分布式反馈激光器(DFB)为光源。激光经 2×1 耦合器馈入到 F-P 传感器后,干涉反射光再经同一耦合器导入光电转换器。F-P 传感器耦合超声波信号后经上述解调系统解调转换为电信号输出至示波器显示,利用 F-P 传感器对不同频率超声波信号的电压响应幅值获得幅频特性。

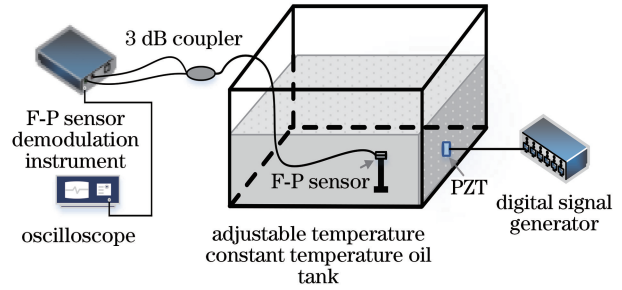


图 6 非本征光纤 F-P 传感器超声测量系统  
Fig. 6 Extrinsic fiber F-P sensor ultrasonic measurement system

### 4.2 F-P 传感器幅频响应测试

按 3.2 节仿真中的 F-P 传感器参数制备的传感器如图 7 所示。对制备的传感器按图 6 所示的测量系统进行实验,分别测试 F-P1、F-P2 在 20, 50, 80 °C 下的幅频曲线,测量结果如图 8 所示。

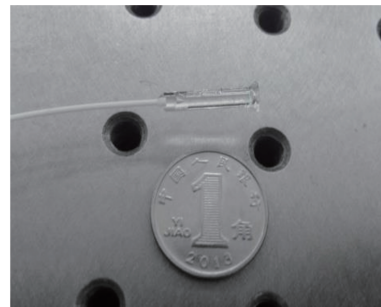


图 7 F-P 传感器样品  
Fig. 7 F-P sensor sample

通过对 F-P 传感器在不同温度下进行幅频特性测试可得到其在不同温度条件下的一阶固有频率,如表 3 所示。图 9 为 F-P 传感器固有频率随油温度变化曲线。

表 3 F-P 传感器固有频率表  
Table 3 Natural frequency of F-P sensors

F-P	$f_a$ /kHz	$f_1$ /kHz (20 °C)	$f_1$ /kHz (50 °C)	$f_1$ /kHz (80 °C)	$k$
F-P1	133	58	63	67	0.56
F-P2	323	132	137	143	0.59

根据表 3, F-P1、F-P2 在变压器油温为 20, 50, 80 °C 时振动的固有频率分别为: 58、63、67 kHz; 132、137、143 kHz。由图 9 可知,固有频率值随着油温的升高而增加,但增加幅度并不大,大约油温升高 30 °C、固有频率增加 5 kHz 左右。由图 8 可知,随着油温的增加,幅频特性曲线的曲线带宽变窄,响应幅值变大,灵敏度增加。这是因为随着油温升高,变压器油的动力黏度以及密度降低,导致黏性阻尼和油的附加质量降低,使固有频率增加和幅频特性

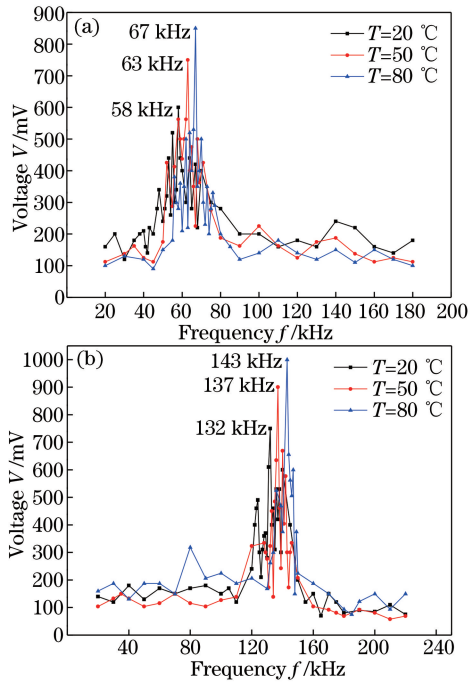


图 8 F-P 传感器在 20、50、80 °C 变压器油中的幅频特性。(a) F-P1；(b) F-P2

Fig. 8 Amplitude-frequency characteristics of (a) F-P1 and (b) F-P2 sensors in transformer oil at 20 °C, 50 °C, and 80 °C

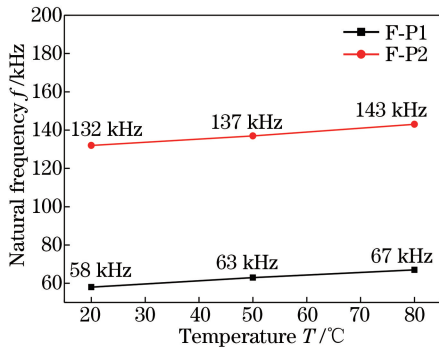


图 9 F-P 传感器固有频率随变压器油温度变化曲线

Fig. 9 Natural frequency of the F-P sensors varies with the transformer oil temperature curve

曲线带宽变窄。该实验结果与 3.3 中仿真结果基本一致。

完成在不同温度的变压器油中的幅频特性测试实验后,再对同一只传感器进行空气中幅频特性测试。由于声波在空气中的衰减很大,因此不能直接在空气中进行幅频特性测试,需利用变压器油作为声波传播介质。这就要求对传感器进行封装处理,以隔绝变压器油。封装后的传感器结构如图 10(a)所示。为了保证 F-P 传感器封装后结构的稳定性,在封装结构与传感器之间加入固定约束填充物。封装后的 F-P 传感器实物如图 10(b)所示。

图 11 所示为封装结构的 F-P1 和 F-P2 分别在 20、50、80 °C 绝缘油介质中的幅频响应曲线,随着温

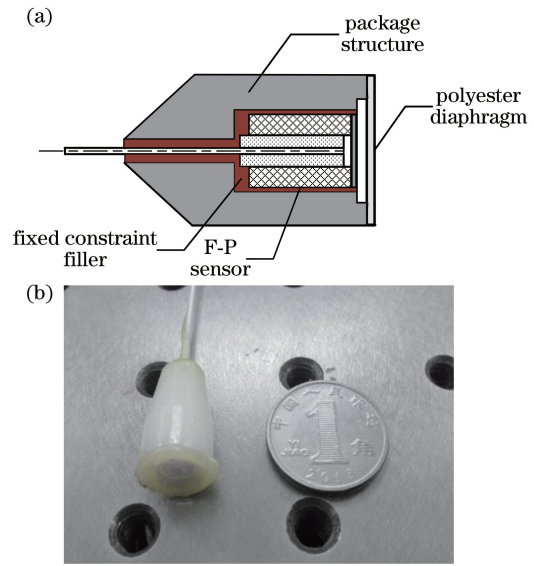


图 10 F-P 传感器封装后示意图。(a)结构图；(b)实物图  
Fig. 10 Packaged F-P sensor diagram.

(a) Structure diagram; (b) photograph of real product

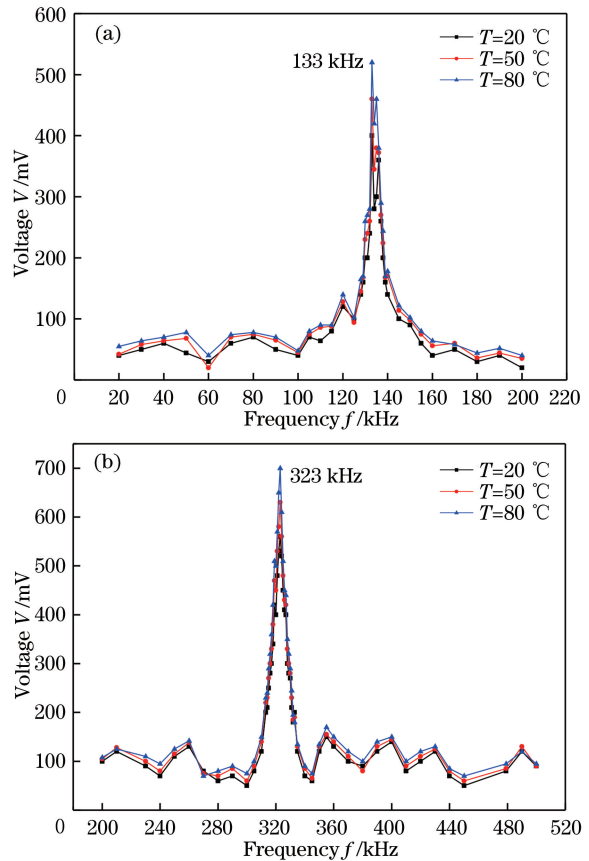


图 11 F-P 传感器空气中 20、50、80 °C 下幅频特性。

(a) F-P1；(b) F-P2

Fig. 11 Amplitude-frequency characteristics of (a) F-P1 and (b) F-P2 sensors in air at 20 °C, 50 °C, and 80 °C

度的升高, F-P1 和 F-P2 传感器的固有频率基本不变, 并且带宽无变化。固有频率处的响应幅值随温度的升高变大, 可能是由于声波通过变压器油传播到达传感器, 而变压器油的黏度和密度随温度的增加而减小, 声波的衰减随黏度和密度的减小而减小。

对比 20 °C 下非封装结构和封装结构 F-P 传感器在液体绝缘中的幅频特性, 如图 12 所示。传感器 F-P1 和 F-P2 封装结构的固有频率分别在 133 kHz 和 323 kHz 附近, 而非封装结构的固有频率分别在 58 kHz 和 132 kHz 附近, 且非封装结构 F-P 幅频曲线带宽较宽。这是由于非封装结构 F-P 传感器膜片直接接触变压器油, 变压器油产生黏滞阻尼和附加质量。

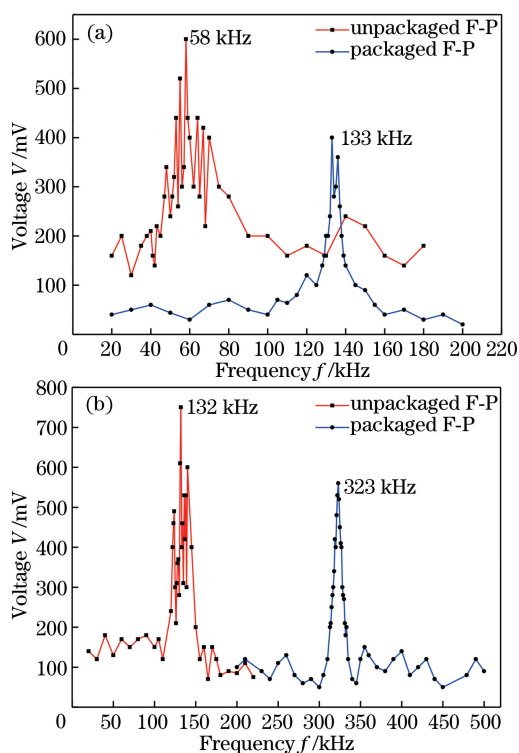


图 12 20 °C 时封装结构和非封装结构 F-P 传感器在变压器油中幅频特性对比。(a) F-P1; (b) F-P2

Fig. 12 Amplitude-frequency characteristic charts of F-P sensors with packaged and unpackaged structures in transformer oil at 20 °C. (a) F-P1; (b) F-P2

另外, 对于封装结构 F-P 传感器, 超声波信号需经过变压器油、聚酯薄膜和空气隔层后到达石英传感膜片, 声波从一种声阻抗率的介质传播进入到另一种声阻抗率的介质时, 部分声波能量进入另一种介质, 其余的能量会因反射造成能量衰减; 折射入聚酯薄膜的声波还要经过空气隔层才能到达石英膜片, 因此封装结构 F-P 传感器幅频特性曲线在峰值处响应出现低于非封装结构幅频曲线峰值现象。综

上分析可认为, F-P1 和 F-P2 传感器的幅频曲线测试结果与 3.2 中图 4 仿真结果一致。

## 5 结 论

根据振动力学理论, 通过对 F-P 传感器的振动特性的理论分析和有限元仿真计算, 探讨了相同结构尺寸的 F-P 传感器在空气和绝缘液体中的幅频特性, 以及液体绝缘介质温度对传感器特性的影响。构建了 F-P 传感器幅频特性检测实验系统, 对所制备的两个 F-P 传感器进行实验对比, 测得 F-P 传感器在 20, 50, 80 °C 变压器油中的幅频曲线, 测试结果与仿真分析相一致。提出了 F-P 传感器隔离液体介质的封装结构, 并将其与未封装传感器在液体介质中的幅频特性测试结果对比, 表明对传感器进行外封装处理可以消除绝缘液体对其特性参数的影响。理论分析和实验研究结果表明: 局部放电 F-P 传感器膜片在变压器油中由于黏滞阻尼效应和附加质量作用, 固有频率较空气中低, 下降系数约为 0.58; 同时变压器油介质使幅频特性曲线带宽变大, 振动能量衰减; 随油温升高, 黏性阻尼和附加质量作用减小, 传感器膜片固有频率增加, 幅频特性曲线带宽变小, 响应幅值增加, 灵敏度变大。

## 参 考 文 献

- [1] Dong B, Han M, Sun L, *et al.* Sulfur hexafluoride-filled extrinsic Fabry-Pérot interferometric fiber-optic sensors for partial discharge detection in transformers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(18): 1566-1568.
- [2] Wang C J, Jia Z B, Gu Y K, *et al.* Experimental research and analysis on acoustics emission from interior discharge of noncomposite insulators [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(10): 146-151. 王成江, 贾智斌, 顾玉凯, 等. 非合成绝缘子内部放电声发射试验及分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(10): 146-151.
- [3] Li Y Q, Chen Z Y, Lü F C, *et al.* Pattern recognition of transformer partial discharge based on acoustic method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(2): 108-111. 李燕青, 陈志业, 律方成, 等. 超声波法进行变压器局部放电模式识别的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(2): 108-111.
- [4] Posada J E, Garcia-Souto J A, Rubio-Serrano J. Multichannel optical-fibre heterodyne interferometer for ultrasound detection of partial discharges in power transformers [J]. *Measurement Science and*



- Technology, 2013, 24(9): 094015.
- [5] Lim K, Kang S, Lee K, *et al.* Partial discharge signal detection by piezoelectric ceramic sensor and the signal processing[J]. Journal of Electroceramics, 2004, 13(2): 487-492.
- [6] Lin D, Jiang L, Li F, *et al.* On-line partial discharge monitoring and diagnostic system for power transformer[J]. Tsinghua Science & Technology, 2005, 10(5): 598-604.
- [7] Sakoda T, Nieda H, Ando K. Characteristics of elastic waves caused by corona discharges in an oil-immersed pole transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(2): 276-283.
- [8] Lima S E U, Frazao O, Farias R G, *et al.* Mandrel-based fiber-optic sensors for acoustic detection of partial discharges-a proof of concept[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2526-2534.
- [9] Zhu T, Xu M, Rao Y J, *et al.* Miniature humidity sensor based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow core fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1592-1596.  
朱涛, 徐敏, 饶云江, 等. 基于空芯光纤的集成式全光纤法-珀干涉式湿度传感器[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1592-1596.
- [10] Zhao H, Li M, Zhang Y, *et al.* Characteristics of output signal of extrinsic fiber Fabry-Perot acoustic sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(6): 1018-1024.  
赵洪, 李敏, 张影, 等. 非本征法珀型超声传感器输出信号的特征[J]. 光学精密工程, 2008, (06): 1018-1024.
- [11] Duan D W, Zhu T, Rao Y J, *et al.* A miniature extrinsic Fabry-Perot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 17-20.  
段德稳, 朱涛, 饶云江, 等. 基于空芯光子晶体光纤的微型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 17-20.
- [12] Fu X H, Zhang J P, Fang Y C, *et al.* Tapered double-cladding fiber temperature sensor based on surface temperature sensitive thin-film[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0810001.  
付兴虎, 张江鹏, 方一程, 等. 基于表面温敏薄膜的锥形双包层光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0810001.
- [13] Wang H, Zhou W C, Li K W, *et al.* Label-free biosensing characteristics of micro/nano-fiber coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0306005.  
汪海, 周文超, 李凯伟, 等. 微纳光纤耦合器无标生物传感特性[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0306005.
- [14] Zhang Y, Zhu X S, Shi Y W. Hollow optical fiber surface plasmon resonance sensor based on light intensity detection[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0606001.  
张珂, 朱晓松, 石艺尉. 光强检测型空芯光纤表面等离子体共振传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0606001.
- [15] Jo W, Akkaya O C, Solgaard O, *et al.* Miniature fiber acoustic sensors using a photonic-crystal membrane[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 785-792.
- [16] Li C C, Wang M, Xia W, *et al.* A novel Fabry-Perot micro-displacement sensor based on intensity demodulation method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0628001.  
李春成, 王鸣, 夏巍, 等. 基于 F-P 腔强度解调的微小位移传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0628001.
- [17] Zhu J L, Wang M, Cai D Y, *et al.* A fiber Fabry-Perot micro pressure sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0428002.  
朱佳利, 王鸣, 蔡东艳, 等. 光纤法布里-珀罗微压传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0428002.
- [18] Yu B, Kim D W, Deng J, *et al.* Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers[J]. Applied Optics, 2003, 42(16): 3241-3250.
- [19] Wang X, Li B, Xiao Z, *et al.* An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15(3): 521-527.
- [20] Bi W H. Mathematical model for fiber-optical non-symmetrical Fabry-Perot interferometric cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(7): 873-878.  
毕卫红. 本征不对称光纤法布里-珀罗干涉仪的理论模型[J]. 光学学报, 2000, 20(7): 873-878.
- [21] Jiang L P. Engineering elastic mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.  
江理平. 工程弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [22] Lei F. Dynamic response research of submarine flexible structure with fluid-solid interaction [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.  
雷凡. 水下柔性结构流固耦合动力效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.