# 基于逆压电效应的In-line Sagnac 反射式光纤电压互感器

于 佳,张春熹,王夏霄,冯秀娟

(北京航空航天大学 惯性技术重点实验室,北京 100191)

摘 要:介绍了一种基于石英晶体逆压电效应的光纤电压互感器(FOVT)。传感头由两段分别缠绕在石 英晶体上的等长保偏光纤构成,两段光纤之间 90°熔接实现两正交偏振模式互补,采用非互易的法拉第 旋光器实现 In-line Sagnac 反射式干涉仪结构。阐述了其工作原理,借助琼斯矩阵得到其干涉表达式,并 推导出检测相位与待测电压成线性关系,结合数字闭环模型计算出互感器变比,并以此为标准衡量互感 器测量精度及稳定性。实验结果表明:待测电压大于 3000 V 时,变比的非线性误差小于 0.2%。 关键词:逆压电效应; Sagnac 干涉仪; 双折射 中图分类号:TM933.22 文献标志码:A 文章编号: 1007-2276(2014)12-4017-06

# Reflective In-line Sagnac interferometer-type fiber optical voltage sensor based on converse piezoelectric effect

Yu Jia, Zhang Chunxi, Wang Xiaxiao, Feng Xiujuan

(Key Laboratory on Inertial Science and Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A reflective Sagnac interferometer-type fiber optical voltage sensor based on the converse piezoelectric effect of quartz crystal was demonstrated. The sensor head consisted of two polarization-maintaining fiber sections with equal length bonded to the circumferential surface of each quartz transducer. The two fiber sections were spliced by 90° to balance differential group delay induced by the intrinsic birefringence. A non-reciprocal faraday rotator was utilized to interrogate the quasi-in-line Sagnac-type reflective interferometer. The principle of the sensor was investigated and the expression of the interference was deduced by using Jones Matrix. The linear relationship between the detectable phase and the voltage to be measured was confirmed by analyzing the mathematic model of sensor head and the scale factor of the sensor was calculated associated with the digital closed-loop model. The experiment shows that the nonlinear error of the scale factor is less than 0.2% when the measured voltage is more than 3 000 V.

Key words: converse piezoelectric effect; Sagnac-type interferometer; birefringence

收稿日期:2014-04-05; 修订日期:2014-05-07

作者简介:于佳(1985-),女,博士生,主要从事光纤电流互感器方面的研究。Email:yujia1985@aspe.buaa.edu.cn 导师简介:张春熹(1965-),男,教授,博士,主要从事光纤传感器技术、光纤陀螺等方面的研究。Email:zhangchunxi@buaa.edu.cn

# 0 引 言

电压互感器是电力系统最基本的测量设备,为 电力系统提供用于计量、保护和控制的必要信息,其 精度及可靠性与电力系统的安全、可靠和经济运行 密切相关。数字化变电站及智能电网的建设、超高压 及特高压输电项目的实施对传统电压互感器提出了 严峻的挑战。不同于传统的电磁式电压互感器提出了 严峻的挑战。不同于传统的电磁式电压互感器,光学 电压互感器是利用光纤传感技术和光电子技术来实 现电力系统电压测量的新型互感器,它能够克服传 统互感器固有的缺点,具有检测精度高、频响范围 宽、动态范围大、绝缘难度低、无铁磁共振、安全性 好、体积小、质量轻、结构简单等一系列优点<sup>[1]</sup>。

光学电压互感器的测量原理是依据存在于某些 晶体材料中的物理效应,这些物理效应包括电光效 应(包括 Pockels 效应、Kerr 效应)及逆压电效应。目 前国内外对光学电压互感器研究比较成熟的方案为 基于 Pockels 效应的块状晶体方案<sup>[2-3]</sup>及基于逆压电 效应模间干涉方案<sup>[4-5]</sup>,但基于 Pockels 效应的块状晶 体方案光路系统中需要晶体、偏振器、波片和起偏器 等分立光学器件,分立器件间的粘接难以保证长期 运行的稳定性和测量精度;而基于逆压电效应的模 间干涉方案检测算法复杂。文中介绍了一种基于逆 压电效应的 In-line Sagnac 反射式光纤电压互感器 (FOVT),通过引入非互易器件法拉第旋光器使两束 正交偏振光波产生模式互换,实现了互易性逆压电 效应的测量,该系统具有互易性结构,因此对环境扰 动(如温度、振动等)具有很强的免疫能力。

文中首先介绍了该 FOVT 的基本原理,对其电 压敏感机理进行了理论分析,并借助琼斯矩阵对光 路系统建立数学模型,得到数字闭环 FOVT 的实际 变比,最后给出了样机实验测试交流电压的结果并 进行分析。

#### 1 基本原理

图 1 为基于逆压电效应的 In-line Sagnac 反射 式 FOVT 的原理框图<sup>[6]</sup>。其基本原理为:SLD 光源发 出的光经环形器,由集成光学相位调制器起偏为两 束模式相同的线偏振光,经 PBS 合光分别进入保偏 延迟光纤的快、慢轴。经过法拉第旋光器之后,这两 束正交模式的线偏振光偏振面旋转 45°,进入两段传 感光纤中 (第一段传感光纤的偏振主轴相对于法拉 第旋光器输入尾纤的主轴旋转 45°,此时两束线偏光 的偏振方向仍与传感光纤的主轴方向平行)。两段长 度相等、90°对轴熔接的传感光纤分别缠绕在两个极 轴 X 方向相反的石英晶体上,两束线偏光交替地沿 传感光纤的快、慢轴上传输,双折射相位差相互抵 消,仅保留了由石英晶体逆压电效应引入的相位差。 经反射镜反射后两束线偏光原路返回,逆压电效应 引入的相位差加倍,通过法拉第旋光器后,偏振面再 次旋转 45°,实现偏振模式互换,即原来沿保偏光纤 快轴传输的线偏光此时沿慢轴传输,原来沿保偏光 纤慢轴传输的光现在沿快轴传输。携带被测信号的 两束线偏光在集成光学相位调制器处发生干涉,经 环行器进入探测器。





理想情况下,两束线偏光分别经历了保偏延迟 光纤和两段等长传感光纤的快、慢轴,只是前后顺序 不同,因此,光路结构实现互易,相位差仅由待测电 压引起的石英晶体形变决定。

干涉信号经光电探测器转换为电信号后,经前 置放大,由 A/D 转换为数字信号进入以 FPGA 为核 心的数字信号处理单元。数字信号处理单元完成 FOVT 的数字闭环信号检测,其中关键的技术为方 波偏置调制、数字相关检测和阶梯波反馈调制<sup>[7]</sup>。数 字方波经 D/A 转换为模拟信号,通过相位调制器在 光路中引入±π/2 的偏置相移,保证系统工作于灵敏 度最高的正交工作点,被测电压被调制到高频信号 上,避免了 1/f 噪声的影响;利用数字相关检测技术 对 A/D 转换的数字信息进行解调处理,实现了强噪 声背景下电压信号的有效提取,能够消除电路长期 漂移的影响,并为闭环检测提供误差信号;对误差信 号进行累加,形成数字阶梯波,经 D/A 转换形成模 拟阶梯波,施加到相位调制器上产生反馈相移,抵消 电压信号产生的逆压电效应相移,实现系统闭环。

#### 2 电压敏感机理分析

FOVT 的传感头由石英晶体、两段等长传感光 纤和反射镜组成,其传感机理为:在被测电压的作用 下,逆压电效应导致的晶体形变使得传感光纤的长 度及两个偏振主轴的折射率发生变化,两束正交线 偏光之间产生与被测电压有关的相位差,通过检测 该相位差即可得到被测电压。

石英晶体是典型的压电晶体<sup>[8]</sup>,具有电阻抗高、 介电常数低、对温度依赖性很小并且有很好的长期 稳定性等优点,因此在该系统中选用石英晶体来敏 感电压,该石英晶体为圆柱形,圆柱的轴向方向为石 英晶体极轴 X 轴的方向。石英晶体的逆压电效应模 量矩阵为:

$$\begin{vmatrix} S_{1} \\ S_{2} \\ S_{3} \\ S_{4} \\ S_{5} \\ S_{6} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ -d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & -2d_{11} & 0 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} E_{x} \\ E_{y} \\ E_{z} \end{bmatrix}$$
(1)

式中:d<sub>11</sub>=-2.31×10<sup>-12</sup> C/N,d<sub>14</sub>=-7.27×10<sup>-12</sup> C/N。由公 式(1)可知,只有在 X 方向施加电场会使 Y 轴产生正 应变。正应变为伸缩效应,使石英晶体圆柱圆周长度 发生周期性伸缩效应。Y、Z 方向的电场不会使晶体 的圆周长度发生变化,因此在实际应用中可以避免 其他方向的干扰电场的影响。而石英晶体周期性应 变使缠绕在其上的光纤也产生了周期性的应变,使 光纤的长度 L(对应于光纤的弹性变形)和折射率 n (对应于光纤的弹光效应)发生变化。光纤中的初始 相位为:

$$\varphi = \beta L$$
 (2)

式中:β为光纤的传播常数。

由应变造成的光相位的改变为:

$$\Delta \varphi = \beta \Delta \mathsf{L} + \mathsf{L} \Delta \beta = \beta \mathsf{L} \frac{\Delta \mathsf{L}}{\mathsf{L}} + \mathsf{L} \frac{\delta \beta}{\delta \mathsf{n}} \Delta \mathsf{n} + \mathsf{L} \frac{\delta \beta}{\delta \mathsf{D}} \Delta \mathsf{D} \qquad (3)$$

式中:L为光纤的长度;n为光纤材料的折射率。公式(3)右边第一项是光纤长度变化引起的相位变化(对应于光纤的弹性变形),第二项是光纤折射率变化引

起的相位变化 (对应于光纤的弹光效应),第三项是 纤芯直径的变化引起的相位变化 (对应于光纤的光 波模式的色散效应)。一般 ΔD 引起的相位变化比前 两项要小两、三个数量级,可以忽略<sup>[9]</sup>。

石英晶体 X 轴方向施加电场后, YZ 平面由于 Y 方向产生正应变而发生形变, 形变后 YZ 平面曲线参 数方程为:

$$y = \frac{r\cos\theta}{\sqrt{(\sin\theta)^2 + \frac{(\cos\theta)^2}{(1 - d_v F_v)}}}$$
(4)

$$z = \frac{r\sin\theta}{\sqrt{(\sin\theta)^2 + \frac{(\cos\theta)^2}{(1 - d_1 E_x)}}}$$
(5)

式中:r为发生形变前石英晶体圆柱半径;-dn为逆 压电系数;Ex为X轴方向施加的电场强度。由此可 通过积分得到:

$$\Delta \mathbf{r} = \int_{0}^{2\pi} \sqrt{(d\mathbf{y})^{2} + (d\mathbf{z})^{2}} \, d\theta - 2\pi \mathbf{r} = -d_{11} \mathbf{E}_{\mathbf{x}} \pi \mathbf{r}$$
(6)

公式(6)为单圈光纤产生的长度变化,由此可得 长度为L的光纤产生的长度变化为:

$$\Delta L = N\Delta r = \frac{L}{2\pi r} (-d_{11}E_x\pi r) = -\frac{1}{2}Ld_{11}E_x$$
(7)

弹光效应引起的光纤折射率的变化可以等效为 形变后光纤的弯曲双折射与形变前光纤的弯曲双折 射之差<sup>[10]</sup>:

$$\Delta \boldsymbol{\beta} = (-3.7 \times 10^7) \mathbf{R}^2 \left( \kappa^2 - \frac{1}{\mathbf{r}^2} \right)$$
(8)

式中: κ为光纤发生形变后的曲率; 2R为光纤的外直 径。由于光纤发生形变后各点的曲率都不同, 各点的 弯曲双折射也不同, 通过积分可以求得弹光效应引 起光纤折射率变化导致的相位变化值:

$$\Delta \beta \mathbf{r} = \int_{0}^{2\pi r} (-3.7 \times 10^{7}) \mathbf{R}^{2} \left( \kappa^{2} - \frac{1}{r^{2}} \right) d\mathbf{r} = -(3.7 \times 10^{7} \mathbf{R}^{2}) \mathbf{d}_{11} \mathbf{E}_{x} \pi / \mathbf{r}$$
(9)

公式(9)为单圈光纤折射率变化引起的相位延迟变化,由此可得长度为L的光纤引起的相位延迟变化为:

$$\Delta\beta L = N\Delta\beta r = \frac{L}{2\pi r} (-(3.7 \times 10^{7} R^{2}) d_{11} E_{x} \pi/r) = -(3.7 \times 10^{7} R^{2}) d_{11} L E_{x}/2r^{2}$$
(10)

由公式(3)、(7)、(10)可得:

$$\Delta \varphi = \beta \Delta \mathbf{L} + \mathbf{L} \Delta \beta = -\left( (3.7 \times 10^7 \mathrm{R}^2) / 2r^2 + \frac{1}{2} \beta \right) \mathrm{d}_{11} \mathrm{L} \frac{\mathrm{U}}{\mathrm{d}}$$
(11)

式中:L为缠绕在晶体上光纤的长度;d为施加待测

电压的两电极之间的距离。

由于两石英晶体的极轴 X 方向相反,在施加相同电压时在两段传感光纤中产生的相位差大小相等,方向相反,即

$$\Delta \varphi_2 = -\Delta \varphi_1 \tag{12}$$

而光在传感光纤中往返传输两次,因此最终检 测到的相位差为 4Δφ。由公式(11)可以看出,在两晶 体两段分别施加待测电压 U 与传感光纤中传播光波 的相位变化 4Δφ 成线性关系,其比例系数为:

$$k = \frac{4\Delta\varphi}{U} = \frac{-2((3.7 \times 10^{7} R^{2})/r^{2} + \beta)d_{11}L}{d}$$
(13)

### 3 光路系统数学模型

该 FOVT 光路系统中各光学器件理想的琼斯矩 阵模型如下<sup>[11-12]</sup>,其中字母下标 F 表示前向通道,B 表示逆向通道,U 表示上分支,D 表示下分支。

(1) SLD 光源:

$$\mathbf{E}_{in} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{x} \\ \mathbf{E}_{y} \end{bmatrix}$$
(14)

(2)集成光学相位调制器具有偏振器、分束器和 相位调制功能,正向传输时起平均分光作用,反向传 输时起干涉合光作用

上分支:

$$M_{IUF} = \frac{1}{2} e^{j[\varphi(t-\gamma)]/2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(15)

$$M_{IUB} = \frac{1}{2} e^{j\varphi(1)/2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(16)

下分支:

$$M_{IDF} = \frac{1}{2} e^{j(-[\varphi(t-\tau)]/2)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(17)

$$M_{IDB} = \frac{1}{2} e^{j(-\varphi(t)/2)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(18)

式中: $\varphi(t-\tau)$ 、 $\varphi(t)$ 分别为相位调制器在 t- $\tau$ 和 t 时刻 产生的相位差; $\tau$ 为光在延迟光纤中的传输时间。

(3) 偏振分束器正向传输时起合光作用,反向传输时起分光作用

上分支:

$$\mathbf{M}_{\mathsf{PUF}} = \mathbf{M}_{\mathsf{PUB}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{19}$$

下分支:

$$M_{PDF} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$
(20)

$$\mathbf{M}_{PDF} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(21)

(4) 延迟光纤:

$$\mathbf{M}_{\mathrm{DF}} = \mathbf{M}_{\mathrm{DB}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \mathrm{e}^{\mathrm{j}\beta} \end{bmatrix}$$
(22)

式中:β为保偏光纤本征双折射引起的相位差。

(5) 法拉第旋光器:

$$M_{FF} = M_{FB} = \begin{bmatrix} \cos 45^{\circ} & -\sin 45^{\circ} \\ \sin 45^{\circ} & \cos 45^{\circ} \end{bmatrix}$$
(23)

(6) 45°对轴:

$$\mathsf{M}_{45^\circ\mathrm{F}} = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix}$$
(24)

$$\mathbf{M}_{45^{\circ}B} = \begin{bmatrix} \cos 45^{\circ} & -\sin 45^{\circ} \\ \sin 45^{\circ} & \cos 45^{\circ} \end{bmatrix}$$
(25)

$$\mathbf{M}_{S,F} = \mathbf{M}_{S,B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\varphi_{1}} \end{bmatrix}$$
(26)

式中: φ<sub>1</sub>为该段光纤由于逆压电效应引起的相位差。 (8) 90°熔点:

$$\mathbf{M}_{90^{\circ}F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$
(27)

$$\mathbf{M}_{\mathbf{90^{\circ}B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ -\mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$
(28)

$$\mathbf{M}_{S_2F} = \mathbf{M}_{S_2B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\varphi_2} \end{bmatrix}$$
(29)

式中: φ<sub>2</sub>为该段光纤由于逆压电效应引起的相位差。 (10)反射镜:

$$\mathbf{M}_{\mathsf{mirror}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(30)

由于法拉第旋光器使返回到延迟光纤的两正交 偏振光传输模式互换,前向通道在上分支传播的光 波反射回来后在下分支传输:

$$\mathsf{E}_{up} = \alpha \mathsf{M}_{\mathsf{IDB}} \mathsf{M}_{\mathsf{PDB}} \mathsf{M}_{\mathsf{DB}} \mathsf{M}_{\mathsf{FB}} \mathsf{M}_{\mathsf{45^{\circ}B}} \mathsf{M}_{\mathsf{S}_{1}\mathsf{B}} \mathsf{M}_{\mathsf{90^{\circ}B}} \mathsf{M}_{\mathsf{S}_{2}\mathsf{B}} \mathsf{M}_{\mathsf{mirror}} \mathsf{M}_{\mathsf{S}_{2}\mathsf{F}} \cdot$$

$$M_{90^{\circ}F}M_{S,F}M_{45^{\circ}F}M_{FF}M_{DF}M_{PUF}M_{IUF}M_{in}$$
(31)

前向通道在下分支传播的光波反射回来后在上 分支传输:

$$\mathsf{E}_{\mathsf{down}} = \alpha \mathsf{M}_{\mathsf{IUB}} \mathsf{M}_{\mathsf{PUB}} \mathsf{M}_{\mathsf{DB}} \mathsf{M}_{\mathsf{FB}} \mathsf{M}_{\mathsf{45^{\circ}B}} \mathsf{M}_{\mathsf{S_1B}} \mathsf{M}_{\mathsf{90^{\circ}B}} \mathsf{M}_{\mathsf{S_2B}} \mathsf{M}_{\mathsf{mirror}} \mathsf{M}_{\mathsf{S_2F}} \boldsymbol{\cdot}$$

 $M_{90^{\circ}F}M_{S,F}M_{45^{\circ}F}M_{FF}M_{DF}M_{PDF}M_{IDF}M_{in}$ (32)

式中:α为光路系统的光学损耗。

干涉仪的输出光强为:

$$I = |E_{up} + E_{down}|^2 = \frac{1}{2} \alpha^2 E_x^2 (1 + \cos(4\Delta \varphi + \varphi(t) - \varphi(t - \tau))) (33)$$
  
由公式(13)、(31)可得:

$$I = \frac{1}{2} \alpha^2 E_x^2 (1 + \cos(kU + \varphi(t) - \varphi(t - \tau)))$$
(34)

式中:k为相位与施加待测电压的线性比例系数。

#### 4 数字闭环 FOVT 的变比

根据 IEC60044-7 电子式电压互感器标准规定: 实际电压变比为实际一次电压与实际二次电压之 比<sup>[13]</sup>。对于数字输出的 FOVT,其实际电压变比应为 实际一次电压与实际二次输出数字量之比,即

$$SF = \frac{S_{out}}{11}$$
(35)

而 FOVT 数字闭环检测中的阶梯波反馈采用了 数字相位斜波技术<sup>[14]</sup>,可以得到 FOVT 的数字输出 量与相应的反馈相移相位台阶 φ 对应的驱动电压 的关系为:

$$\frac{\Delta V(t)}{V_{pp}} = \frac{S_{out}(t)}{2^{N}}$$
(36)

式中: $V_{pp}$ 为阶梯波反馈相移为  $2\pi$ 时对应的输出电 压; $\Delta V(t)$ 为阶梯波反馈相移台阶  $\phi$ ,对应的驱动电 压; $S_{out}(t)$ 为 FOVT 的数字量输出;N 为 D/A 转换器 的位数。

对相位调制器来说:

$$\phi_{\rm f} = K_{\rm fp} \Delta V(t) \tag{37}$$

式中:K<sub>p</sub>为相位调制器的调制系数。

实现数字闭环后,干涉信号的交流分量为0,

$$\phi_{\rm f} = -4\Delta \varphi = -k\mathbf{U} \tag{38}$$

由公式(33)~(36)可得,FOVT的实际变比为:

$$SF = \frac{S_{out}}{U} = \frac{2^{N}k}{K_{fp}V_{pp}}$$
(39)

### 5 实验及结果

根据上述传感机理搭建了实验系统,进行了交流电压传感实验,实验系统中光源采用中心波长为 1 310 nm、谱宽为 42 nm 的 SLD 光源,其去相干长度 为 42.9 μm,法拉第旋光器的尾纤即传感光纤采用长 飞的熊猫保偏光纤,其双折射率差为 5×10<sup>-4</sup>,因此在 光纤中的去相干长度为 8.58 cm,法拉第旋光器的尾 纤长为 10 m,将其均匀缠绕在石英晶体上,同时取 等长的熊猫保偏光纤在末端端面镀反射镜与其 90° 熔接<sup>[15-16]</sup>。

信号检测采用数字闭环检测方案,未加电压时 光电探测器及相位调制器的输出信号如图 2 所示。 图中,1 为光电探测器的输出信号,2 为相位调制器 对应的阶梯波复位信号,通过 PC 机采集计算得到该 光路的固定偏置为 1.83π,与阶梯波台阶复位数一致, 通过测试得到该光路的干涉对比度为 0.94,基本接 近 1,说明由两段光纤互补实现的光路互易性良好。



图 2 光电探测器及阶梯波信号 Fig.2 Signal of PIN-FET output and ramp wave

用该实验系统测量 50 Hz 工频电压, 被测电压 由 220 V 市电经一个自耦调压器(0~250 V)和升压变 压器(变比为 2:22.5)获得。在 1 000~6 000 V 范围内 测量的实验数据及线性拟合如图 3 所示。计算表 明,待测电压在 3 000 V 以上,非线性误差小于0.2%, 在 3 000 V 以下由于逆压电效应产生的相位差很小, 信噪比低,所以检测精度低。



## 6 结 论

互易性的光路结构对环境扰动(如温度、振动) 有很强的免疫能力,为实现该结构,文中的 FOVT 在 传感头处用两段等长的保偏光纤 90°熔接使光纤双 折射造成的群延迟为 0,并利用法拉第旋光器使从 传感光纤返回来的两正交偏振光波的模式互换。实 验数据表明该光路系统的固定偏置为 1.81π,干涉对 比度为 0.94,具有良好的互易性;在测量 50 Hz 工频 电压时,在 3 000 V 以上非线性误差小于 0.2%。

#### 参考文献:

- [1] Ye Miaoyuan, Xiao Xia. Optic-electric transformer (一)-the basic equipment for measuring V, I of power system in the 21th [J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2003 (4): 11-16. (in Chinese)
  叶妙元,肖霞.光电互感器 (一)—21世纪电力系统电压电流测量的基本设备 [J]. 广东输电与变电技术, 2003(4): 11-16.
- [2] Christensen L H. Design, construction, and test of a passive optical prototype high voltage instrument transformer [J].
   IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10 (3): 1332-1337.
- [3] Rahmatian F, Jaeger N A F. High accuracy optical electric field and voltage sensors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002: 411-414.
- [4] Bohnert K, DeWit G C, Nehring J. Coherence-tuned interrogation of a remote elliptical-core, dual-mode fiber strain sensor [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(1): 94-103.
- [5] Bohnert K, Pequignot P. Inherent temperature compensation of a dual - mode fiber voltage sensor with coherence - tuned interrogation [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(4): 598-604.
- [6] Wildermuth S, Bohnert K, Brändle H. Interrogation of a birefringent fiber sensor by nonreciprocal phase modulation
   [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22 (18): 1388-1390.
- [7] Liu Qingqing. Research on detection circuit hardware platform of fiber optic current transformer based on virtual instrument[D]. Beijing: Beihang University, 2007. (in Chinese) 刘晴晴. 基于虚拟仪器的光纤电流互感器检测电路硬件平 台研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.

- [8] Bohnert K M, Nehring J. Fiber-optic sensing of electric field components [J]. Applied Optics, 1988, 27(3):4814-4818.
- [9] Liao Yanbiao. Polarization Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 337. (in Chinese)
   廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 337.
- [10] Ulrich R, Rashleigh S C, Eickhoff W. Bending-induced birefringence in single-mode fibers [J]. Optics Letters, 1980, 5(6): 273-275.
- [11] Liao Yanbiao, Wei Guanghui, Ha Liuzhu, et al. Matrix Optics [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1995: 144 -178. (in Chinese)
  廖延彪,魏光辉,哈流柱,等.矩阵光学[M].北京: 兵器工 业出版社, 1995: 144-178.
- [12] Frosio G, Dandliker R. Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor [J]. Applied Optics, 1994, 33(25): 6111-6122.
- [13] IEC 60044 -7 -1999 Instrument transformers -Part 7: Electronic voltage transformers[S]. 1999.
- [14] Lefevre H C. The Fiber-Optical Gyroscope [M]. Zhang Guicai, Wang Wei, translated. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 114-120. (in Chinese) Lefevre H C. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才, 王巍, 译. 北京: 国 防工业出版社, 2002: 114-120.
- [15] Zhang Chen, Yi Xiaosu, Yang Yanming, et al. Effects of degree of polarization of SLD on the performance of fiber optic gyroscope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 590-596. (in Chinese)
  张辰, 伊小素,杨艳明,等. 超辐射发光二极管偏振度对光 纤陀螺性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 590-596.
- [16] Xu Xiaobing, Yi Xiaosu, Zhang Chunxi. Parameter s modeling of super-luminescent diode and its compensation technology
   [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 352-355. (in Chinese)

徐小斌, 伊小素, 张春熹. 超辐射发光二极管参数建模及 其补偿技术[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 352-355.