第 50 卷 第 12 期：5310-5317 高电压技术 Vol.50, No.12: 5310-5317
2024 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232404

传感光纤熔接准直角对光纤电流互感器的误差影响及其评估策略

陈争光[1]，徐子立[2]，岳长喜[2]，李嘉鑫[2]，彭　耐[3]，徐敏锐[4]
（1. 国家电网有限公司设备管理部，北京 100032；2. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074；
3. 上海康阔光智能技术有限公司，上海 200135；4. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心，南京 210019）

摘　要：全光纤电流互感器具有安全性高、抗电磁干扰、频响范围宽等突出优势，已广泛应用于直流电流测量，然而其测量精度受到光纤传感环熔接角度准直偏差的干扰。为此基于耦合模方程与琼斯矩阵建立了光纤电流传感数学模型，理论分析了光纤电流互感器存在传感环熔接误差时的温度特性与非线性误差特性。针对实际熔接偏差分布特性提出了全光纤电流互感器在现场二次熔接后的全电流范围测量误差评估策略，理论计算的全光纤电流互感器比差与实测值在全电流范围内一致。该文提出的非线性误差评估方法能够在不进行全电流范围试验情况下判断现场熔接后的全光纤电流互感器是否满足测量精度要求，有效保障了光纤电流互感器二次熔接后的测量精度。
关键词：全光纤电流互感器；保偏光纤熔接；琼斯矩阵；非线性误差；准直偏离角

Error Characteristics and Evaluation Strategy of Collimation Angle of Sensing Optical Fiber for Fiber Optical Current Transformers

CHEN Zhengguang[1], XU Zili[2], YUE Changxi[2], LI Jiaxin[2], PENG Nai[3], XU Minrui[4]
(1. Equipment Management Department of State Grid, Beijing 100032, China; 2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. Comcore Optical Intelligence Technologies Co., Ltd., Shanghai 200135, China; 4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Marketing Service Center, Nanjing 210019, China)

Abstract：The all-optical-fiber current transformer, known for its high safety, resistance to electromagnetic interference, and wide frequency response range, has been widely used in DC current measurement. However, its measurement accuracy is affected by the misalignment angle of the optical fiber sensing loop during fusion splicing. In this paper, a mathematical model for optical fiber current sensing is established based on the coupled mode equations and the Jones matrix theory, and the temperature characteristics and nonlinearity error of all-optical-fiber current transformer with fusion splicing errors are analyzed. A method is proposed to calculate the measurement error of the all-optical-fiber current transformer over the entire current range after on-site secondary fusion splicing based on the actual distribution characteristics of fusion splicing errors. The theoretically calculated deviations of the all-optical-fiber current transformer match the measured values over the entire current range. The nonlinearity error assessment method presented in this paper can determine whether the all-optical-fiber current transformer meets measurement accuracy requirements after on-site fusion splicing on condition that a full current range test is not conducted, thus measurement accuracy can be effectively ensured after the secondary fusion splicing of the all-optical fiber current transformer.
Key words：fiber optic current transformers; polarization-maintaining fiber fusion; Jones matrix; non-linear error; deviation of collimation angle

0　引言

超/特高压直流输电工程是我国跨区域电能输送的骨干网络，光纤电流互感器(fiber optic current transformer，FOCT)作为其关键的电流量测设备，系统投运数量已超过 1 800 台，且逐年上升，其电流测量的准确性直接关系到系统的安全稳定运行[1-4]。

FOCT 采用干涉型反射互易式光学结构，主要由光纤传感环、光纤绝缘子和采集单元组成，光纤传感的测量准确性主要由传感环的温度特性及电流

基金资助项目：国家电网公司科技项目(5500-202155473A-0-5-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-202155473A-0-5-ZN).

测量的非线性误差特性决定[5-9]。

目前国内外科研机构和生产厂家提出了光纤传感环的温度补偿技术和非线性误差补偿技术，实验室环境条件下，补偿后的光纤电流互感器的准确度满足 0.5 级的工程要求。Klaus Bohnert、Blake James 和 Shayne X 等人提出了采用光纤波片对传感环进行被动式温度补偿的方法，在无须温度测量的情况下可实现满足 0.2 级测量精度的传感环[10-12]。文献[13]推导出温度对全光纤电流互感器的数学模型，量化研究了 FOCT 的比差随温度漂移问题，提出了温度补偿方法，满足 0.2 级准确度要求。Hung-chia Huang、Peng Nai 等人提出一种一体化波片传感光纤的设计方案，该方法在 1 根完整的保偏光纤中实现具有波片功能的偏振变换以及电流测量功能，具有较强的抗干扰能力和温度特性一致好的优势[14-17]。

在光纤电流互感器的检测方法和试验设备方面，文献[18]提出了实验室模拟断路器耦联振动条件下的试验方法，研究了振动对电子式电流互感器的输出影响的原因。文献[19]提出了基于模块交错并联的暂稳态控制和变压器一体化设计方案，研制了直流标准试验电源和数字校验仪，满足 0.2 级直流互感器现场校准和暂态特性试验的技术要求。文献[20]提出了基于合成概率法的光学电流互感器的运行可靠性评价方法，建立了状态量数值及变化趋势与运行状态的关联关系。

然而，目前国内外对于 FOCT 的误差特性研究及测量性能提升方案都是基于实验室环境条件，实际在工程现场，即使是采用与实验室熔接时相同的光纤熔接机及熔接参数，熔接后光纤传感环的熔接角与出厂时仍存在一定偏差，从而对光纤电流互感器的测量精度产生影响。在温度特性方面，由于光纤电流互感器各个器件产生的测量误差不是单独作用的，光束在互感器光路中依次通过各个光学器件，其在传播路径末端的所产生的系统测量比差是各个器件所产生测量比差的耦合，因此有必要研究光纤电流互感器的传感环熔接误差对其温度特性的影响。在非线性误差方面，虽然采取全电流范围内的比差标定能够较好地补偿测量非线性误差。然而现场熔接与厂内熔接偏差过大时仍会导致出厂前所进行的补偿失效，此时在进行现场标定参数校准后，也无法满足全测量范围内的精度要求。

针对上述问题，本文建立了光纤电流互感器传感的熔接误差数学模型，分析了环境温度以及光纤传感环熔接偏差对光纤电流互感器误差的影响机制，理论推导证明了全光纤电流互感器的传感环熔接误差不会影响其温度特性，并试验验证经过温度补偿的光纤电流互感器在不同的熔接角误差下测量精度均能够满足要求。此外，基于所建立的数学模型，评估了存在传感环熔接误差情况下的测量精度与非线性误差特性，并进一步提出了一种用于计算全光纤电流互感器在现场重新熔接后的全电流范围测量误差的方法，根据该方法理论推导得到的全光纤电流互感器比差在全电流范围内与实测值基本一致，所提出的非线性误差评估方法能够在不进行全电流范围试验情况下判断现场熔接后的 FOCT 是否满足测量精度要求，有效保障了光纤电流互感器二次熔接后的测量精度。

1 典型光学电流互感器结构与工作原理

干涉型反射互易式光纤电流传感器主体由采集单元和传感环两部分组成，具体光路结构如图 1 所示。

其工作过程如下：光源产生的光通过耦合器分光(分光比为 50:50)后分成 2 束强度接近一致的光，其中 1 路进入探测器对光源功率进行监视；另 1 束光作为传感光进入光纤起偏器，经过起偏器后的光变成线偏振光，偏振方向与相位调制器成轴 45°对准熔接。进入调制器时，传感光从 1 束线偏振光变成 2 束相互正交的线偏振光，相位调制器可以调制这 2 束线偏振光之间的相位差。从调制器出来的正交线偏振光分别进入传输光纤的快轴和慢轴，传播到传感环。正交光进入传感环后先进入 1 段具有偏振变换功能的光纤段，将正交线偏振光转变成正交

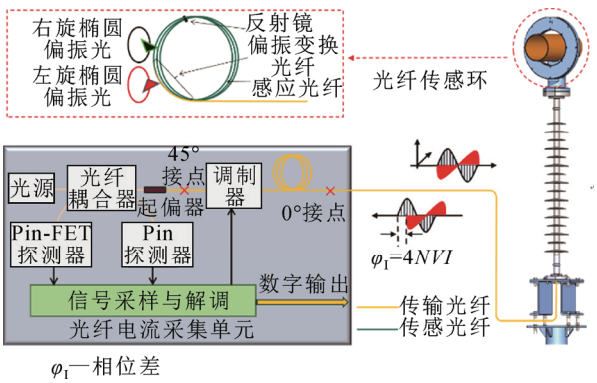


图 1 典型光纤电流互感器原理结构图

Fig.1 Structure diagram of typical fiber optical current transformer

椭圆偏振光，正交椭圆偏振光进入传感光纤部分，受法拉第效应(旋光效应)影响，在电流磁场的作用下相互正交的椭圆偏振光产生相位差，最后在传感光纤的尾端经反射镜,两正交光相互交换传输通道，沿光纤线路返回，电流产生的相位差加倍。返回的相互正交的 2 束具有相位差的光在起偏器发生干涉，其干涉光强与电流相位差相关，通过探测干涉光强以实现电流测量的目的。式(1)为理想状况下，探测光强与一次电流关系。

$$I_{\mathrm{O}}=\frac{I_{\mathrm{in}}}{2}(1+\cos(4VNI+\varphi)) \tag{1}$$

式中：I_{in} 为输入光强；I_{O} 为探测光强；V 为 Verdet 常数；N 为传感光纤匝数；I 为一次电流；φ 为调制器相位。

2 熔接偏差引起的光纤传感环误差特性

2.1 熔接偏差导致的非线性误差理论模型

采用琼斯矩阵对传感回路中光学器件建模，实际的传感回路以起偏器发送作为起点，回传至起偏器发生干涉作为终点。以与起偏方向分别为±45°的方向为光学坐标轴向的 x 轴和 y 轴，延光纤传播反向为 z 轴。

起偏器输出光的琼斯矢量描述记为 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{I}}$，即：

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{I}}=\begin{bmatrix}\cos45^\circ\\ \sin45^\circ\end{bmatrix}\boldsymbol{E}_0 \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{E}_0$ 为起偏器光强度。

调制器的入射(出射)光纤与偏振器的出射光纤皆为高双折射(high-birefringence，HB)光纤，且呈45°熔接，即调制器入射(出射)光纤的快轴与系统主轴为 0°。

相位调制器正向传输琼斯矩阵 $\boldsymbol{J}_{1\mathrm{F}}$ 和反传输琼斯矩阵 $\boldsymbol{J}_{1\mathrm{B}}$ 分别为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{J}_{1\mathrm{F}}=\begin{bmatrix}\exp\left(-\mathrm{i}\varphi_{\mathrm{TE}}(t+\tau)\right) & 0\\ 0 & \exp\left(-\mathrm{i}\varphi_{\mathrm{TM}}(t)\right)\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{J}_{1\mathrm{B}}=\begin{bmatrix}\exp\left(-\mathrm{i}\varphi_{\mathrm{TE}}(t)\right) & 0\\ 0 & \exp\left(-\mathrm{i}\varphi_{\mathrm{TM}}(t+\tau)\right)\end{bmatrix}\end{cases} \tag{3}$$

式中：φ_{TE}、φ_{TM} 分别为调制器在横电模(transverse electric mode，TE)和横磁模(transverse magnetic mode，TM)上的调制相位；τ 为传感回路渡越时间；t 为传播时间。

传输光纤/光缆 $\boldsymbol{J}_{2\mathrm{F}}$(正向)和 $\boldsymbol{J}_{2\mathrm{B}}$(反向)琼斯矩阵分别为：

$$\boldsymbol{J}_{2\mathrm{F}}=\boldsymbol{J}_{2\mathrm{B}}=\begin{bmatrix}\exp\left(-\mathrm{i}\beta_x L\right) & 0\\ 0 & \exp\left(-\mathrm{i}\beta_y L\right)\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：β_x 和 β_y 分别为传输光纤快轴和慢轴的传播常数；L 为偏振变换段长度。

传输光纤与传感环熔接工艺误差准直偏离角度的传输矩阵描述为光缆 $\boldsymbol{J}_{3\mathrm{F}}$(正向)和 $\boldsymbol{J}_{3\mathrm{B}}$(反向)，

$$\begin{cases}\boldsymbol{J}_{3\mathrm{F}}=\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{J}_{3\mathrm{B}}=\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}\end{cases} \tag{5}$$

式中：θ 为准直偏离角度。

传感光纤的快慢轴之间存在耦合，且同时受法拉第效应作用，其传输特性可用光纤耦合模方程描述：

$$\begin{cases}\mathrm{d}\boldsymbol{E}/\mathrm{d}z=\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{E}\\ \boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}\mathrm{j}\left(\dfrac{\Delta\beta}{2}\right)+\cos\left(NVI\mathrm{d}z\right) & \tau(z)-\sin\left(NVI\mathrm{d}z\right)\\ \tau\left(z\right)+\sin\left(NVI\mathrm{d}z\right) & \cos\left(NVI\mathrm{d}z\right)-\mathrm{j}(\Delta\beta/2)\end{bmatrix}\end{cases} \tag{6}$$

式中：z 为光纤位置；$\boldsymbol{E}$ 为光纤位于 z 处的光场电矢量强度；β 为光纤线双折射；$\tau(z)$为传感光纤扭转描述函数。

$$\tau(z)=\begin{cases}\tau_0(1+\cos\dfrac{\pi(L-z)}{L}),\ z\le L\\ \tau_0,\ z>L\end{cases} \tag{7}$$

式中：τ_0 为感应部分旋转率。

反射镜琼斯矩阵 $\boldsymbol{J}_4$ 描述为：

$$\boldsymbol{J}_4=\begin{bmatrix}-1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix} \tag{8}$$

根据传输矩阵以及耦合模方程求解，计算可得传感光回传至起偏器处光强 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{O}}$ 为：

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{O}}=\boldsymbol{J}_{1\mathrm{B}}\boldsymbol{J}_{2\mathrm{B}}\boldsymbol{J}_{3\mathrm{B}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}\left(\boldsymbol{J}_4\boldsymbol{F}_{\mathrm{F}}\left(\boldsymbol{J}_{3\mathrm{F}}\boldsymbol{J}_{2\mathrm{F}}\boldsymbol{J}_{1\mathrm{F}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{I}}\right)\right) \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{F}_{\mathrm{F}}(\cdot)$和 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}(\cdot)$分别表示对传感环正向传输耦合模方程与反向传输耦合模方程求解；$\boldsymbol{E}_{\mathrm{I}}$ 表示输入光琼斯矩阵。

获得电流相对强度与 2 束干涉光相位差成正比，相位差表达式为：

$$\varphi_{\mathrm{T}}=\begin{pmatrix}\mathrm{angle}(\left|E_{OX}+E'_{OX}\right|+i\left|E_{OX}-E'_{OX}\right|)+\\ \mathrm{angle}(\left|E_{OY}+E'_{OY}\right|+i\left|E_{OY}-E'_{OY}\right|)\end{pmatrix}\Big/4 \tag{10}$$

式中：angle(·)表示求解复数相位角函数；E_{OX} 为出射光 X 轴偏振分量；E'_{OX} 为出射光 X 轴偏振分量的偏差；E_{OY} 为出射光 Y 轴偏振分量；E'_{OY} 为出射光 Y 轴偏振分量的偏差。

存在熔接偏差时的理论测量误差表达式为：

$$\sigma=\frac{\varphi_{\mathrm{T}}-\varphi_0}{\varphi_0}\times 100\% \tag{11}$$

式中：φ_{T}、φ_0 分别为有、无熔接偏差标定对应的电流引起的干涉相位。

文中建立的非线性误差数学模型适用于不同技术路线与材料选型设计的 FOCT，根据实测数据调参即可计算非线性误差随 1/4 波片熔接误差的变化特性，且模型中所涉及的参数均有成熟的选取与测量手段，保障了模型实际应用过程中的普适性。以具体实施为例，传感光纤参数为 $\Delta\beta$=4.5 mm，τ_0=1 600 rad/m，L=0.3 m，N=20，初始光功率 E_0=1。通过对干涉相位的求解与误差计算，获得了传感环熔接偏差 θ 分别为 0°、1°、2°、2.5°、3°、3.5°，4°、4.5°、5°时 FOCT 相对测量误差随被测电流的变化，见图 2。可知：1）FOCT 的测量比差整体呈非线性变化，且比差大小与非线性度均随着输入电流增加而增加；2）FOCT 的比差大小与非线性度均随着传感环熔接误差增加而增加。因此，当现场熔接误差与厂内熔接误差的偏差过大时，在大电流输入情况下其非线性误差曲线差别较大，厂内的非线性误差补偿在现场会失效。

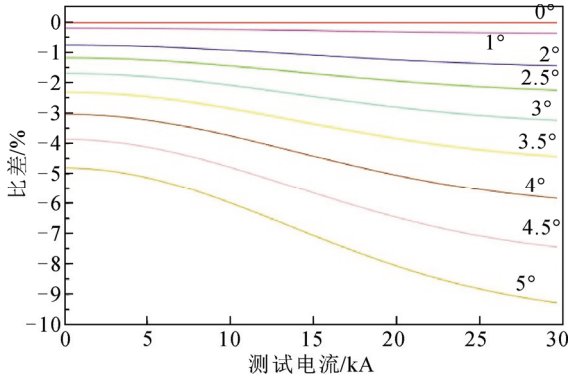


图 2 传感环随熔接角度准直偏差的非线性误差

Fig.2 Nonlinear error of the sensor coils about the fusion angle alignment deviation

2.2 熔接偏差影响温度特性理论模型

温度变化会显著影响光纤性能，从而导致 FOCT 测量误差。2.1 节分析了 FOCT 存在传感环熔接误差时的非线性误差，未考虑环境温度的变化，本节进一步分析熔接偏差对 FOCT 温度特性的影响。FOCT 的温度误差主要由 2 个因素——Verdet 常数及温致线性双折射导致。Verdet 常数随温度变化会产生明显波动，其数值 V 的温度特性模型为：

$$V(T)=V_0+\Delta V=V_0\left(1+7\times10^{-5}(T-25)\right) \tag{12}$$

式中：T 为环境温度；V_0 为环境温度为 25 ℃时传感光纤的 Verdet 常数；ΔV 为 Verdet 常数变化量。

进一步考虑环境温度变化所引起的光纤温致双折射，即：

$$\Delta\delta=\frac{\pi n^3(1+\upsilon)(p_{12}-p_{11})\Delta\alpha(T-T_0)}{6\lambda(1-2\upsilon)} \tag{13}$$

式中：υ 为泊松比；p_{12}、p_{11} 为纤芯的光弹张量；$\Delta\alpha$ 为纤芯及包层的热膨胀系数差，℃$^{-1}$；λ 为入射光波长；T_0 为参考温度；n 为折射率；$\Delta\delta$ 为光纤温致双折射。

采取文献[21]中 FOCT 传感光纤典型参数，为 n=1.46，υ=0.17，p_{12}=0.27，p_{11}=0.121，$\Delta\alpha=10^{-10}$，λ=1 310 nm，T_0=298.15 K。将参数代入式(13)可得温致线性双折射相位差为：$\delta_{\mathrm{t}}=3.26\times10^{-5}(T-25)$。传感光纤固有双折射一般取 $\delta_0=0.006$ rad/m，则单位长度的传感光纤的双折射相位差为：

$$\delta=3.26\times10^{-5}(T-25)+0.006 \tag{14}$$

综合考虑上述温度对 Verdet 常数及光纤双折射的影响，传感光纤的琼斯矩阵可以表示为：

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}\cos\Delta l+\mathrm{j}\dfrac{\delta L_1}{\Delta}\sin\Delta l & \dfrac{-4V(t)NI}{\Delta l}\sin\Delta l\\ \dfrac{-4\Delta V(t)NI}{\Delta l}\sin\Delta l & \cos\Delta-\mathrm{j}\dfrac{\delta L_1}{\Delta l}\sin\Delta l\end{bmatrix} \tag{15}$$

式中：L_1 表示入射光经过的光纤长度；$\Delta l=\delta L+4\left(V_0+\Delta V\right)NI$。

为更直观分析传感环熔接误差对 FOCT 温度特性的影响，不失一般性的，设置 Verdet 常数、温致线性双折射及 1/4 波片熔接角 3 个变量，基于器件的理想琼斯矩阵建模，不考虑传感光纤的模式耦合。

1/4 波片的 $\boldsymbol{J}_{2\mathrm{F}}$(正向)和 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{B}}$(反向)琼斯矩阵描述为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{J}_{2\mathrm{F}}=\begin{bmatrix}\cos\theta' & -\sin\theta'\\ \sin\theta' & \cos\theta'\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & \exp(\mathrm{i}\dfrac{\pi}{2})\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta' & \sin\theta'\\ -\sin\theta' & \cos\theta'\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{J}_{2\mathrm{B}}=\begin{bmatrix}\cos\theta' & \sin\theta'\\ -\sin\theta' & \cos\theta'\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & \exp(\mathrm{i}\dfrac{\pi}{2})\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta' & -\sin\theta'\\ \sin\theta' & \cos\theta'\end{bmatrix}\end{cases} \tag{16}$$

式中：θ' 为 1/4 波片的熔接角，理论值为 45°。

传感光回传至起偏器处光强 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{O}}$ 为：

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{O}}=\boldsymbol{J}_{1\mathrm{B}}\boldsymbol{J}_{2\mathrm{B}}\boldsymbol{J}_{3\mathrm{B}}\boldsymbol{J}_{3\mathrm{F}}\boldsymbol{J}_{2\mathrm{F}}\boldsymbol{J}_{1\mathrm{F}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{I}} \tag{17}$$

所求解干涉光强表达式为：

$$I_{\mathrm{O1}}=\boldsymbol{E}_{\mathrm{O}}\cdot\boldsymbol{E}_{\mathrm{O}}^{*}=\frac{1}{4}I_0\left(1\pm2NV(t)\sin(2\theta)\frac{\sin(2\delta L)}{\delta L}I\right) \tag{18}$$

式中：$\boldsymbol{E}_{\mathrm{O}}$ 与 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{O}}^{*}$ 分别为为出射光复振幅与复振幅的共轭。

经过双光路检测法后，FOCT 输出信号为：

$$I_{O2}=\frac{I_{O1+}-I_{O1-}}{I_{O1+}+I_{O1-}}=2NV(t)\sin(2\theta)\frac{\sin(2\delta L)}{\delta L}I \quad (19)$$

式中：I_{O1+}、I_{O1-}分别为 1/2π、−1/2π 偏振情况下的干涉光强；取光纤环匝数 N=10，半径 R=0.25 m。

则 FOCT 的比差计算表达式为：

$$\varepsilon=\frac{I_{O2}(\theta_1',t)-I_{O2}(0,25)}{I_{O2}(0,25)} \quad (20)$$

仿真计算 FOCT 的比差随环境温度及 1/4 波片熔接角度的变化如图 3 所示。

由图 3 可知，1/4 波片的熔接角度固定时，FOCT 比差随着环境温度增加而线性变化；环境温度固定时，FOCT 比差随着熔接角度呈正弦变化。环境温度为 25 ℃、熔接角度为 45°时，FOCT 比差为 0。且在不同熔接角度下，FOCT 随温度变化的线性度相同，证明光纤传感环的熔接角度误差不会改变 FOCT 的温度特性。

2.3 实际熔接偏差分布特性

根据上述理论模型，传感环熔接误差会显著影响 FOCT 全电流范围内的非线性误差，本节试验分析传感环在实际熔接过程中的熔接偏差分布特性，为 2.4 节的工程现场二次熔接质量判定方法提供理论依据。尽管保偏光纤熔接机针对特定的光纤熔接角度准直精度可达 0.6°，但工程应用过程中存在多种因素造成准直角度偏差。光纤电流互感器的保偏光纤熔接多为保偏光缆与光缆或光缆与紧套光纤之间的熔接，考虑到野外作业以及对接点的保护，在熔接时往往存在待熔接光纤加持后张力过大以及扭转形变与应力情况，在这种情况下难以保证保偏光纤熔接的精度。以采用折射率成像角度准直算法的保偏熔接机为例，当被熔接光纤存在扭转或形变情况时，其熔接误差可以高达 5°。如图 4 所示，采取高偏振光源作为入射光，基于保偏光纤熔接机对 2 段保偏光纤进行 20 次熔接测试，并依据式(21)通过消光比 R_E 测试评估实际的熔接准直偏离角度 φ_0。

$$R_E=20\lg\cot\varphi_0 \quad (21)$$

获得角度误差分布见表 1 所示，由表可知 20 次熔接测试中 75%熔接误差在 1°~3°之间，未见超过 5°的熔接误差。

2.4 工程现场二次熔接质量判定

根据 2.3 节实际熔接偏差分布特性，光纤电流互感器在工程现场安装与出厂熔接偏差难以做到完全一致，此时光纤电流互感器与出厂时具有不同的非线性误差特性，互感器原有非线性误差补偿可能失效，即使现场重新标定后，由于不具备全范围校准条件进行非线性补偿，工程现场光纤电流互感器不能满足全范围内测量精度要求。

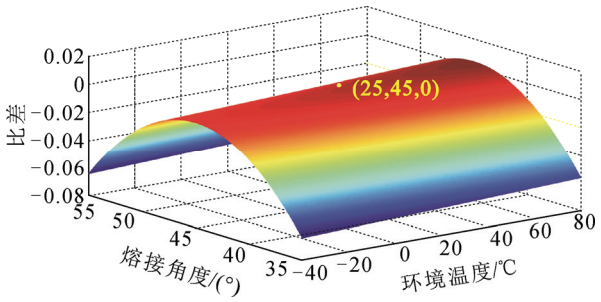


图 3 测量比差随环境温度及 1/4 波片熔接角度变化

Fig.3 Ratio error verse temperature and splicing angle of 1/4 wave plate

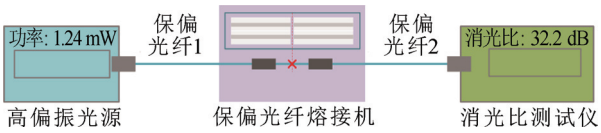


图 4 通过消光比测试评估实际的熔接角度误差

Fig.4 Evaluating actual weld angle error by extinction ratio test

表 1 光纤熔接角度偏差统计

Table 1 Optical fiber fusion angle deviation statistics

熔接角度偏差范围	角度偏差对应消光比范围/dB	次数
φ<1°	R_E>35.2	1
1°<φ<3°	25.6<R_E<35.2	14
3°<φ<5°	21.1<R_E<25.6	5
φ>5°	R_E<21.1	0

针对该问题提出一种用于评估传感环二次熔接后 FOCT 的全电流范围内比差计算方法。依据表 1 的光纤熔接角度偏差统计，假定现场熔接偏差为最大熔接偏差 $\varphi=5°$，则此时 FCOT 的全电流范围内比差为 $\varepsilon_2(5,I)$，I 为输入电流强度。实测 10%额定电流情况下出厂前电流 I_1 与现场电流 I_2，计算二者偏差为：

$$\Delta I=\frac{I_2-I_1}{I_1} \quad (22)$$

依据现场假设比差 $\varepsilon_2(5,I)$ 与实测偏差 ΔI，结合图 2 所示非线性误差理论模型，计算得到出厂前的熔接误差 φ_1 及对应的非线性误差 $\varepsilon_1(\varphi_1,I)$。则现场的理论非线性误差表达式为：

$$\varepsilon_2(\varphi,t)=\varepsilon_0+\left(\varepsilon_2(5,t)-\varepsilon_1(\varphi_1,t)\right) \tag{23}$$

式中：ε_0为出厂前实测全电流非线性误差。依据上述模型即可在不进行全电流范围试验情况下对现场传感环熔接二次熔接后的测量误差进行评估。

3 试验验证

3.1 熔接误差全电流全温度试验验证

为验证熔接角度对 FOCT 全温线性度的影响，以基于一体化波片改善温度特性的 FOCT 为例，选取 3 个具有不同熔接角度传感通道的 FOCT(A 套)做对比试验。其中标准熔接通道为 CHA-1，熔接偏差<5°的通道为 CHA-2，熔接偏差>5°的通道为 CHA-3。

采取温箱拷机试验，将被测样品的传感环及保偏光纤等户外部件置于温度箱内，采集单元等户内部件置于 25 ℃室温条件，通过校验仪采集测量误差。温度变化控制参照 GB/T 20840.6 的要求，以室温 25 ℃为起点，由 25 ℃升温至 70 ℃，再由 70 ℃降温至–40 ℃，最后由–40 ℃回到常温 25 ℃，1 个温度循环内试验结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出，在额定电流输入下，具有不同熔接角度的 3 套样品在全温度范围下均表现出较高的测量精度，测量误差在–0.015%~0.089%之间。试验结果表明 FOCT 的温度特性改善方案不会受到现场熔接角的影响，与理论推导结果一致。

为验证熔接角度对 FOCT 全电流线性度的影响，选取 3 个具有不同熔接角度传感通道的 FOCT(B 套)做对比试验。其中标准熔接通道为 CHB-1，熔接偏差<5°的通道为 CHB-2，熔接偏差>5°的通道为 CHB-3。额定电流为 3 000 A，将输入电流大小从额定电流的 10%调节至 1 000%，全量程精度试验结果如图 6 所示。

从试验结果可以看出，在输入电流为额定值的 10%时，CHB-2(熔接角误差<5°)与 CHB-3(熔接角误差>5°)传感环均在光纤电流互感器的精度要求范围内，然而随着输入电流增大，CHB-3 传感环的测量精度会逐渐劣化，在输入为 1 000%额定电流时误差增至–10.329%，而 CHB-2 传感环在全电流输入下测量精度变化不显著。试验结果与 2.1 节理论分析一致，表明熔接角误差对测量精度的影响在小电流输入时不显著，该影响随着输入电流增大会趋于明显。

3.2 非线性误差评估方法试验验证

3.1 节试验结果表明传感环的熔接角度偏差较大时会显著影响 FOCT 的非线性误差，为验证本文提出的非线性误差特性评估方法的有效性，采用标准电流源、电子式互感器校验仪以及 1 台额定电流为 3 000 A 的 FOCT 进行验证。其精度要求输入电流为 300~4 500 A 时，误差<0.2%；输入电流为 4 500~9 000 A 时，误差<1%；输入电流为 9 000~30 000 A 时，误差<2%。

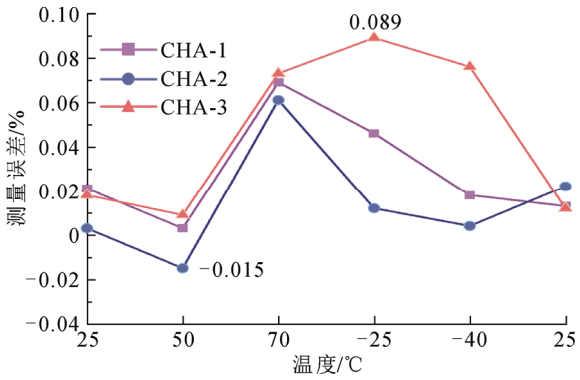


图 5 不同熔接角的全温线性度响应

Fig.5 Full temperature linearity response at various fusion angles

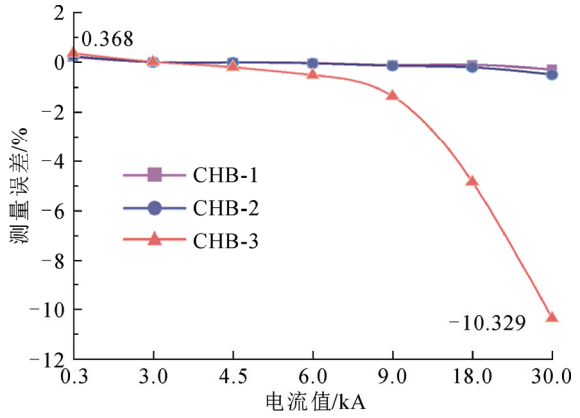


图 6 不同熔接角的全电流性度响应

Fig.6 Full current linearity response at various fusion angles

在厂内按生产流程进行标定及非线性补偿，实际出厂精度测试情况为输入电流为300~4 500 A时，误差<0.2%；输入电流为 4 500~9 000 A 时误差<0.5%；输入电流为 9 000~30 000 A 时，误差<1.5%；测试方法见图 7。

将传感环断开并进行二次熔接以模拟现场熔接情况，熔接后进行电流测试。被测标准电流为300 A，实际测试电流为 295.5 A，测量偏差为–1.5%。由于实际测试值在出厂标定情况下仍然小于实际值，则二次熔接比出厂有更大的角度偏差。考虑熔

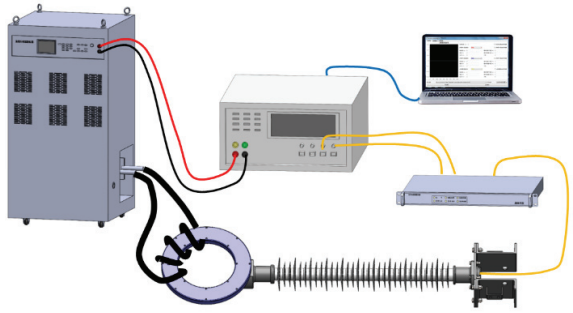


图 7 光纤电流互感器误差测试示意图

Fig.7 Schematic diagram of error test of FOCT

接角度偏差最大的情况，即假定此次熔接角度偏差为 5°。根据图 2 非线性误差曲线计算，在 300 A 测试电流下与 5°熔接误差相差 1.5%所对应的熔接角度偏差为 4.2°。根据模型计算 FOCT 在未经补偿且熔接角度偏差分别在 4.2°和 5°时的非线性误差曲线，计算 2 条曲线之间的差值，并叠加出厂测试误差(见图 8 中矩形点线)，获得在此次熔接下理论误差曲线(见图 8 中三角形点线)。通过施加全范围电流对模拟熔接后的光纤电流互感器进行误差测试，获得现场测试误差曲线(见图 8(a)中圆形点线)。

图中现场理论误差与现场测试误差均超出 0.2%的精度要求范围。由于理论计算时假设现场熔接偏差为最大偏差 5°，而实际熔接角度偏差比计算所采用的角度更低，因此计算所得理论误差略高于测试误差，但是 2 条曲线线性度基本一致，验证了本文所提出的现场理论误差评估方法的有效性。

将传感环断开再一次模拟现场情况进行传感环熔接，同样施加 300 A 标准电流进行测试，实际测试电流为 298 A，相比出厂偏差–0.7%。依据上一次对熔接误差的评估，出厂最大偏差为 4.2°，依据模型计算，输入电流为 300 A 时，与熔接偏差 4.2°误差相差–0.7%所对应的熔接偏差为 4.6°。计算 FOCT 在未经补偿情况下熔接角度偏差分别在 4.2°和 4.6°时的非线性误差曲线及 2 条曲线之间的差值。将计算差值叠加出厂测试误差(图 8(b)中矩形点线)，获得在此次熔接下理论误差曲线(图 8(b)中三角形点线)。施加全范围电流对模拟熔接后的光纤电流互感器进行误差测试，获得现场测试误差曲线。将不同误差曲线进行对比分析，如图 8(b)所示。

现场理论误差与测试误差均在 0.2%的精度要求范围内，2 条曲线线性度基本一致。图 8(a)与图 8(b)对比说明所提出的评估策略在熔接误差较大与

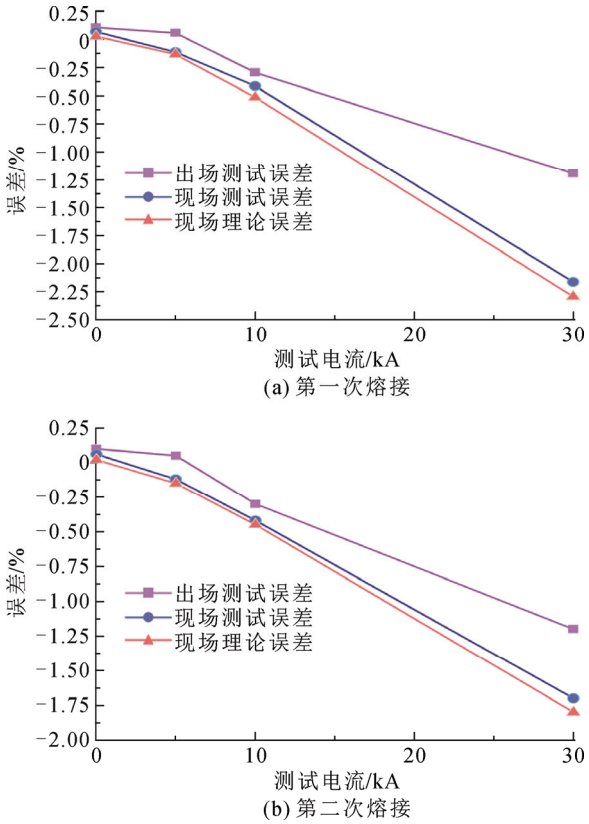


图 8 出厂、理论、实际非线性误差值对比

Fig.8 Factory, theoretical and practical nonlinear error values

较小时均能准确预测 FOCT 的非线性误差，从而为工程现场判断熔接后测量准确性提供依据。

4 结论

1）基于耦合模方程与琼斯矩阵理论分析了 FOCT 存在传感光纤熔接误差时的非线性误差及温度特性，分析与试验结果表明 FOCT 的熔接误差不会影响其温度特性；而熔接误差较大时，在大输入电流下 FOCT 非线性误差会明显上升。

2）基于 FOCT 的实际熔接偏差分布特性，提出了一种用于评估 FOCT 现场二次熔接后全电流范围内测量误差的方法，理论计算所得 FOCT 比差在全电流范围内与实测值一致。所提出的非线性误差评估方法能够在不进行全电流范围试验情况下判断现场熔接后的 FOCT 是否满足测量精度要求，对于现场缺乏大电流试验条件情况下保障 FOCT 测量精度具有重要意义。

参考文献 References

[1] 马为民，吴方劼，杨一鸣，等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术，2014，40(8)：2429-2439.

MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.

[2] 王兰若，李 荡，张树华，等. 基于隧穿磁阻效应的随器量测电流传感器研究[J]. 电力信息与通信技术，2022，20(1)：100-106.
WANG Lanruo, LI Dang, ZHANG Shuhua, et al. Research on current sensor for in-device measurement based on tunnelling magnetoresistance effect[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(1): 100-106.

[3] 史荣斌，王思涵，马国明，等. 基于声聚焦结构的局部放电光纤超声传感技术[J]. 中国电机工程学报，2022，43(21)：8518-8526.
SHI Rongbin, WANG Sihan, MA Guoming, et al. Optical fiber ultrasonic sensing for partial discharge based on acoustic focusing structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 43(21): 8518-8526..

[4] 周 峰，李 鹤，李文婷，等. 大电流测量传感技术综述[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1905-1920.
ZHOU Feng, LI He, LI Wenting, et al. Review of high current measurement and sensing technology[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1905-1920.

[5] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京：科学出版社，2003：157-158.
LIAO Yanbao. Polarization optics[M]. Beijing, China: Science Press, 2003: 157-158.

[6] 王 霞，樊卓杨，吴 超，等. 双光纤温度补偿法测量高温下电缆与附件界面压力的方法[J]. 高电压技术，2023，49(7)：3072-3081.
WANG Xia, FAN Zhuoyang, WU Chao, et al. Double-optical-fibre temperature compensation method used for interface pressure measurement between cable and accessory at high temperatures[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3072-3081.

[7] 张嘉伟，叶子帆，王 倩，等. 基于 F-P 光纤泄漏电流传感器的绝缘子状态监测[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2915-2923.
ZHANG Jiawei, YE Zifan, WANG Qian, et al. Insulator condition monitoring based on F-P optical fiber leakage current sensor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2915-2923.

[8] 韩春阳，徐浩东，石 磊，等. 具有温度自补偿功能的宽频带光纤电场传感器[J]. 高电压技术，2023，49(7)：3082-3089.
HAN Chunyang, XU Haodong, SHI Lei, et al. Broadband optical fiber electric field sensor with temperature self-compensation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3082-3089.

[9] 李 奇，李传生，梁 波，等. 光纤直流大电流传感器非线性机理及校准技术[J]. 计量学报，2021，42(4)：409-414.
LI Qi, LI Chuansheng, LIANG Bo, et al. Nonlinear mechanism and calibration technology of fiber-optic DC high current sensor[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(4): 409-414.

[10] BOHNERT K, BRANDLE H, BRUNZEL M G, et al. Highly accurate fiber-optic DC current sensor for the electro winning industry[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(1): 180-187.

[11] BLAKE J, TANTASWADI P, DE CARVALHO P T. In-line Sagnac interferometer current sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 116-121.

[12] SHORT S X, TSELIKOV A A, DE ARRUDA J U, et al. Imperfect quarter-waveplate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(7): 1212-1219.

[13] 程 嵩，郭志忠，张国庆，等. 全光纤电流互感器的温度特性[J]. 高电压技术，2015，41(11)：3843-3848.
CHENG Song, GUO Zhizhong, ZHANG Guoqing, et al. Temperature characteristic of fiber optic current sensor[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3843-3848.

[14] HUNG H C. Microwave approach to highly irregular fiber optics[M]. New York, USA: Wiley-Interscience Publication, 1998: 33-36.

[15] HUNG C H. Practical circular-polarization-maintaining optical fiber[J]. Applied Optics, 1997, 36(27): 6968-6975.

[16] PENG N, HUANG Y, WANG S B, et al. Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(17): 1668-1671

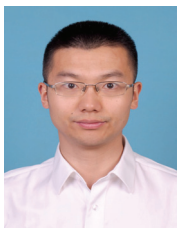
[17] 彭 耐. 偏振旋转反射干涉式光纤电流传感器及关键技术研究[D]. 武汉：华中科技大学，2013.
PENG Nai. The research on the fiber optic current sensor based on polarization rotated reflection interferometer & the key technology[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science & Technology, 2013.

[18] 胡 蓓，叶国雄，黄 华，等. 电子式电流互感器振动试验方法研究[J]. 电测与仪表，2013，50(8)：62-67.
HU Bei, YE Guoxiong, HUANG Hua, et al. Research on the ECT vibrating test methods[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(8): 62-67.

[19] 张 杰，胡媛媛，刘 飞，等. 高压直流互感器现场校验关键技术[J]. 高电压技术，2016，42(9)：3003-3010.
ZHANG Jie, HU Yuanyuan, LIU Fei, et al. Critical technology of on-site calibration system for DC electronic instrument transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 3003-3010.

[20] 肖 燕，李 军，庞福滨，等. 基于合成概率法的光学电流互感器运行可靠性[J]. 电网技术，2022，46(1)：336-342.
XIAO Yan, LI Jun, PANG Fubin, et al. Operation reliability of optical current transformer based on synthetic probability[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 336-342.

[21] 柴永峰. 光纤电流互感器测量准确度研究[D]. 武汉：华中科技大学，2021.
CHAI Yongfeng. Research on measurement accuracy of fiber-optical current transformer[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2021.



陈争光
1988—，男，博士，高工
主要从事直流输电控制保护、电力系统继电保护技术研究工作
E-mail: zhengguang-chen@sgcc.com.cn

CHEN Zhengguang
Ph.D.
Senior engineer



徐子立(通信作者)
1984—，男，硕士，教授级高工
主要从事数字化计量及智能量测技术的研究工作
E-mail: xuzili@epri.sgcc.com.cn

XU Zili
Professor
Corresponding author

收稿日期 2023-12-29 修回日期 2024-05-29 编辑 曾文君