

doi:10.3788/gzxb20174611.1106003

光纤环保温腔体设计及其性能分析

杨汉瑞, 杨燕, 黄蔚梁, 刘晶晶, 李勇勇

(东北电力大学 自动化工程学院, 吉林 132012)

摘 要: 为了改善光纤电流互感器温度性能, 设计了引入保温腔体的光纤环传感头结构. 在光纤环受温度扰动引起的热致相位差基础上, 推导并建立了光纤电流互感器系统输出误差离散化数学模型, 利用有限元分析软件分别建立了光纤环自身和光纤环配合保温腔体的有限元模型, 仿真分析了在不同温度载荷下, 保温腔体的热性能和采用设计的传感头光纤电流互感器的温度性能. 仿真实验结果表明: 所设计的保温腔体能有效控制光纤环中各匝光纤的温度变化范围, 减缓光纤的温变速率, 均化光纤环温度场; 采用设计的传感头的光纤电流互感器系统输出误差范围明显减小, 有效提高了系统测量精度. 这对高精度的光纤电流互感器的制作和应用具有重要意义.

关键词: 光纤电流互感器; 热致相移; 保温腔体; 有限元法; 温变速率

中图分类号: TM452

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)11-1106003-9

Design and Performance Analysis of a Fiber Optic Ring Heat-off Spool

YANG Han-ruì, YANG Yan, HUANG Wei-liang, LIU Jing-jing, LI Yong-yong

(School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: A sensor head design scheme by adding a heat-off spool to the fiber coil is studied to improve the Fiber Optic Current Sensor (FOCT) temperature performance which is vital to the precision of FOCT. The discretized mathematical model of the output error of the FOCT system is deduced and established based on the thermal phase difference caused by the temperature disturbance of the fiber coil. Then, the finite element model of the fiber coil itself and the fiber coil with the heat-off spool is established respectively by using the finite element analysis software, and the thermal performance of the heat-off spool and the temperature performance of the FOCT with new sensor head under different temperature loading schemes are simulated and analyzed. Simulation results show that the heat-off spool actually can control the temperature change range of each fiber in the fiber coil, slow down the temperature change rate of the fiber, equalize the temperature field of the fiber coil. Besides, the output error range of FOCT system with the proposed sensor head is obviously reduced, and the system measurement accuracy be improved effectively, which is important for the high-precision FOCT's production and application.

Key words: Fiber optic current sensor; Thermal-induced phase shift; Heat-off spool; Finite element method; Variable rate of temperature

OCIS Codes: 060.2370; 140.6810; 120.1880

0 引言

与传统电磁式电流互感器相比, 基于法拉第效应的 Sagnac 式光纤电流互感器 (Fiber Optic Current Sensor, FOCT) 具有体积小, 质量轻, 精度高, 绝缘性良好, 动态范围广, 安全性高, 输出信号与现代数字控制

基金项目: 吉林市科技发展计划 (No.20156404) 和东北电力大学博士科研启动基金 (No.BSJXM-201419) 资助

第一作者: 杨汉瑞 (1986—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感与光电检测技术. Email: yanghanrui1208@163.com

收稿日期: 2017-05-31; **录用日期:** 2017-07-13

<http://www.photon.ac.cn>

和保护系统兼容等优势^[1-4],在智能电网和高压变电站的计量、控制与保护中具有潜在的应用价值^[5].但是当前光纤电流互感器的性能易受环境温度扰动影响,使其在较宽温度范围内(通常为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}-60\text{ }^{\circ}\text{C}$)难以达到0.2级测量精度标准^[6].而光纤环受热引起的热致相位差直接影响光纤电流互感器的温度性能,为此国内外提出了许多改善光纤环温度性能的试验与方法^[7-8],包括对光纤环热退火、采用具有低应力光学系数的光纤、扭转光纤以及光子晶体光纤绕制光纤环^[9-12];采用具有较小温度依赖性的延迟器或由金属涂层的熊猫型偏振保持光纤组成的温度补偿元件来平衡光纤环 Verdet 常数的温度依赖性^[5,13];采用人工神经网络等算法^[14]进行补偿.这些措施虽然在一定程度上抑制了温度漂移,但同时也存在造价昂贵、结构复杂和实时性难以保证等问题.

为克服现有技术不足,进一步更有效地抑制光纤环受热引起的热致相位差对光纤电流互感器温度性能的影响,本文在深入剖析了光纤环受温度扰动产生的热致相移与温变速率之间线性关系的基础上,提出一种改善光纤传感头的保温腔体设计方案,以减小光纤环温变速率、均化光纤环温度场、提高系统测量精度,有望在系统结构简单、成本低、适用温度范围广的基础上提高其测量精度.

1 理论模型

Sagnac 式光纤电流互感器主要由高压和低压两部分组成.高压部分由绕制于通电导线周围的光纤敏感环和保偏光纤组成,低压部分包括光源、耦合器,铌酸锂相位调制器(Y波导), $\lambda/4$ 波片,光电探测器和信号处理单元,系统结构图如图1所示^[15].

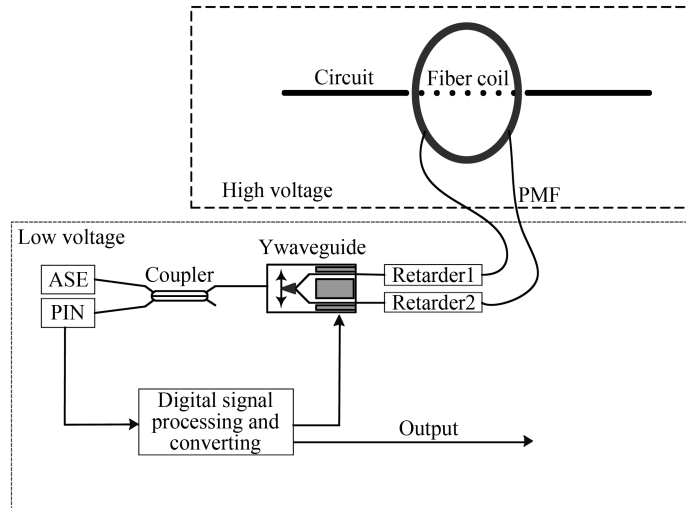


图1 光纤电流互感器原理

Fig.1 Schematic diagram of fiber optic current transformer

利用琼斯矩阵建立 Sagnac 式光纤电流传感器的理想输出模型为^[16-17]

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_0 [1 + \cos 2F] \quad (1)$$

式(1)中, I_0 为光源输出光强, F 为 Faraday 相位差, $F = NVI$,其中 N 是环绕电流导线的光纤环圈数, V 是传感光纤的维尔德常数, I 是导线中的电流.

当光纤环圈中有瞬时环境温度扰动时,光纤线圈的温度变化引起的非互易相移与 Faraday 相移无法区分,为光纤电流互感器测量精度带来不可忽略的漂移,由光纤环产生的热致相移表示为

$$\Delta\varphi_E = \beta_0 \int_0^L \left[\frac{\partial n}{\partial T} \hat{T}(l, t) \right] (L - 2l) dl \quad (2)$$

另一个等价热致相移误差公式为

$$\Delta\varphi_E = \beta_0 \int_0^{\frac{L}{2}} \left\{ \frac{\partial n}{\partial T} [\hat{T}(l, t) - \hat{T}(L - l, t)] \right\} (L - 2l) dl \quad (3)$$

式中 $\hat{T}(l, t)$ 和 $\hat{T}(L - l, t)$ 是光纤相对应片段温度的偏导数分布, β_0 是真空中传播常数, $\partial n / \partial T$ 是折射率

温度系数, $(L - 2l)$ 为与位置相关的权因子。

为了对光纤环产生的热致相移进行定量分析,将光纤环从三维模式简化为二维模式,总长度为 L 的光纤分为 M 层,每一层共有 N 匝,整个光纤环等效成 MN 匝光纤,离散化后的表达式为

$$\Delta\varphi_E = \beta_0 \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{i=1}^{MN} \dot{T}(l_i, t)(L - 2l_i - dl_i) dl_i \quad (4)$$

式中 $\dot{T}(l_i, t)$ 为第 i 匝光纤处的温变速率, l_i 为第 i 匝光纤的起始点坐标长度,且第 i 匝光纤的绕制长度为 dl_i [18]。

考虑有热致相移时的光电探测器响应为

$$I'_{out} = \frac{1}{2} I_0 [1 + \cos(2F + \Delta\varphi_E)] \quad (5)$$

利用式(1)、(4)、(5)可得系统输出误差比表达式为

$$\epsilon = \frac{I'_{out} - I_{out}}{I_0} \times 100\% = \frac{\frac{1}{2} I_0 [\cos(2F + \Delta\varphi_E) - \cos(2F)]}{I_0} \times 100\% \quad (6)$$

由式(6)可知,热致相移与有效 Faraday 相移耦合在一起难以消除,在光纤电流互感器的输出中产生大的偏置误差影响其测量精度,而通过式(4)可知,光纤环产生的热致相移与光纤环温变速率和光纤环温度场关系密切,所以抑制环境温度扰动对光纤环的影响成为提高光纤电流互感器系统测量精度的关键。

2 抑制方案设计及有限元传热模型

光纤环是光纤电流互感器的核心部件,由式(2)、(3)可知,光纤环受温度扰动引起的热致相移与该段光纤位置有关的权因子和温度变化率有关。因此,为抑制温度扰动,可以通过减缓外界温度的刺入,在一定程度上减小 $\dot{T}(l, t)$ 和 $\dot{T}(L-l, t)$ 的大小,也可以通过均化光纤环的温度场,进一步减小 $[\dot{T}(l, t) - \dot{T}(L-l, t)]$ 的差值。基于此设想,本文为光纤环引入保温腔体,设计了一种新型的光纤传感头结构,来提高光纤环的温度稳定性。

2.1 保温腔体有限元传热模型

保温腔体具有内外两层导热腔体和夹层绝热空气介质,一定程度上实现快速均化外部热流-减缓热流传导-进一步均化热流的三重效果。图 2 为加保温腔体的光纤环有限元模型。

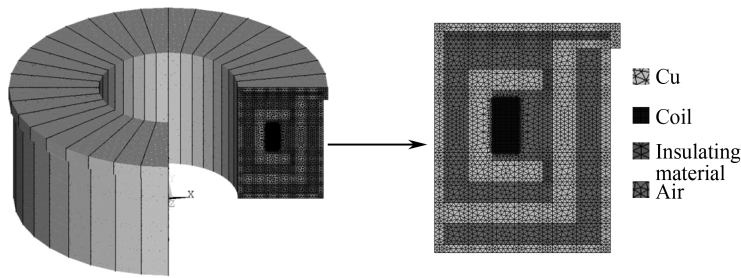


图 2 保温腔体有限元模型

Fig.2 Finite element model of heat-off spool

为定量分析保温腔体对光纤环环境温度扰动的抑制效果,采用 ANSYS 有限元分析软件分别对未加保温腔体的光纤环和加保温腔体的光纤环进行有限元仿真。考虑到有限元仿真的效率问题,结合光纤环自身及保温腔体特点,针对未加保温腔体的光纤环和加保温腔体的光纤环的仿真可简化为对二者的横截面进行分析,光纤环处节点位置代表每匝光纤在截面上的位置。仿真后分别提取光纤环各匝光纤的温度数据,然后采用式(4)二维热致误差离散化数学模型计算热致误差。

2.2 参数计算与选取

结合保偏光纤绕制而成的光纤环中各组材料的物理参数,综合计算出光纤环的仿真几何参数如表 1。表 2 为仿真加保温腔体的光纤环时所需光纤环及腔体材料的热力学参数。

表 1 光纤环仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the fiber coil

Parameters	QAD
Fiber length L	992,828.2 m
Clockwise fiber length	496,431.05 m
Anticlockwise fiber length	496,397.15 m
Number of winding layer	40
Number of loop per layer	68
Inner radius of the coil R_1	0.055 m
Inner radius of the coil R_2	0.0605 m
Coil height H	0.13 m
Effective index of fiber core n	1.44
Thermo-optic coefficient $\partial n/\partial T$	1.0×10^{-5}

表 2 光纤环及腔体材料的热力学参数

Table 2 The thermodynamic parameters of fiber coil and spool

Parameters	Cu	Fiber core	Glue	Insulating material
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8 900	2 203	970	2 520
Specific heat $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	384	703	1 600	2 000
Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	390	1.38	0.21	1.6

在 ANSYS 仿真实验中设定光纤环的四周与空气进行自然对流换热, 换热系数为 $5 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$, 对光纤环施加变温载荷方案为: 先设定初始温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 保持 30 min , 温度以 $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的温变速率从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, 在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 60 min , 再以 $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的温变速率从 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $60 \text{ }^\circ\text{C}$, 在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 保持 60 min , 以 $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的温变速率从 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 降温到 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 60 min , 仿真实验的温度载荷曲线如图 3 所示^[19].

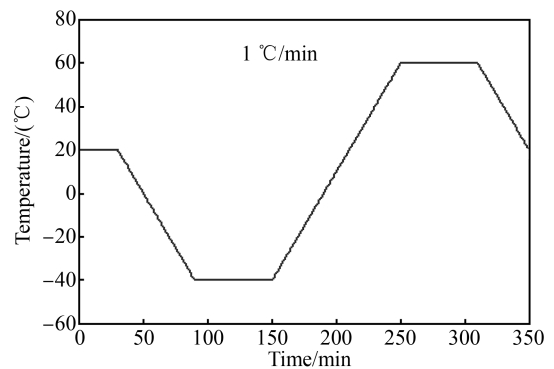


图 3 仿真实验温度载荷曲线

Fig.3 Temperature excitation curve of simulation test

3 有限元仿真及结果分析

3.1 保温腔体对光纤环热致相移误差的抑制作用

为验证所设计的保温腔体对抑制外界复杂温度扰动的能力, 分别对未加保温腔体的光纤环和加保温腔体的光纤环进行有限元仿真, 设计验证方案为: 给仿真对象四周施加全变温的温度激励, 即仿真对象的上侧、下侧、内侧和外侧同时加载图 3 所示的温度载荷。

经过 ANSYS 有限元仿真解算后, 根据四极环的绕环顺序提取每一匝光纤的温度值, 图 4(a)、(b) 分别为从未加保温腔体的光纤环和加保温腔体的光纤环有限元仿真结果中提取的光纤环各匝光纤温度随时间的变

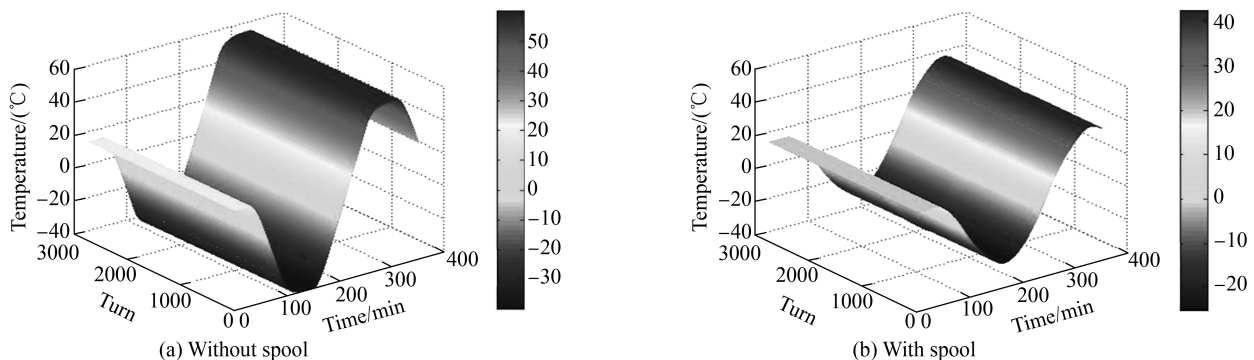


图 4 各匝光纤的温度变化

Fig.4 The temperature variations of each turn fiber

化趋势,图 5(a)、(b)分别为二者各匝光纤的温度变化速率的变化情况,其中 X 轴为施加温度的时间,Y 轴为光纤环中光纤的匝数,图 4 和图 5 的 Z 轴分别表示光纤环中各匝光纤随时间变化的温度值和温度变化速率值.由图 4(a)、(b)对比可知,各匝光纤整体温度变化趋势相同,加保温腔体的光纤环各匝光纤温度分布上下限在一定程度上有所降低,其主要原因是保温腔体能减缓热传导.图 5(a)、(b)对比可见,加保温腔体的光纤环各匝光纤的温度变化率上下限同样在一定程度上有所降低,二者在保温时间段内的温度变化率最小几乎接近为零,根据理论推得在这些时间段位置将不存在由温度扰动引起的热致误差.因此,所设计的保温腔体能够控制外界温度的刺入从而减缓光纤环温变速率.

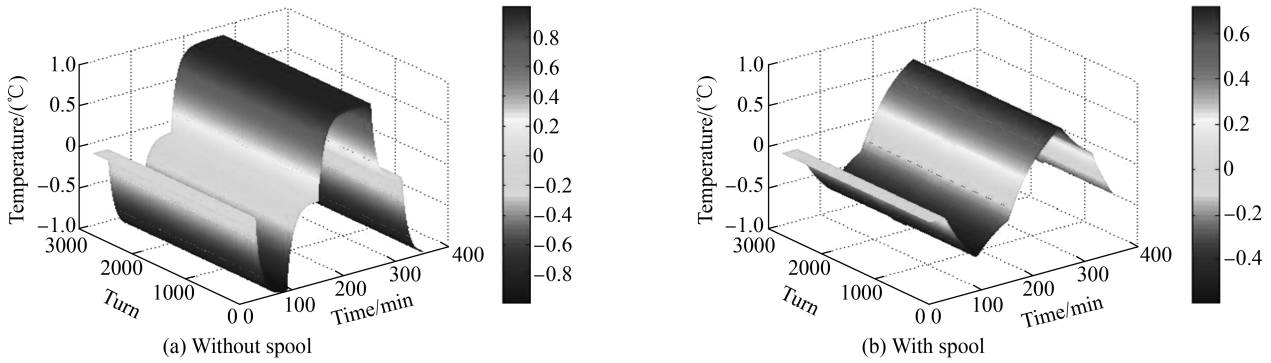


图 5 各匝光纤的温度变化速率
Fig.5 Temperature change rate of each turn

将未加保温腔体的光纤环和加保温腔体的光纤环仿真结果中提取的各匝光纤在整段仿真时间内的温度变化率和各匝光纤的位置因子带入离散化的系统输出误差比模型式(6)中,得到两种情况下光纤电流互感器的系统输出误差对比曲线图如图 6.

由图 6 可知,光纤环加保温腔体的光纤电流互感测量精度比光纤环本身提高了两倍左右.综上,加保温腔体的传感头设计方案能有效减缓外界温度刺入,控制光纤环温度变化范围和光纤环温变速率范围,减小光纤电流互感器的系统输出误差,抑制环境温度扰动.

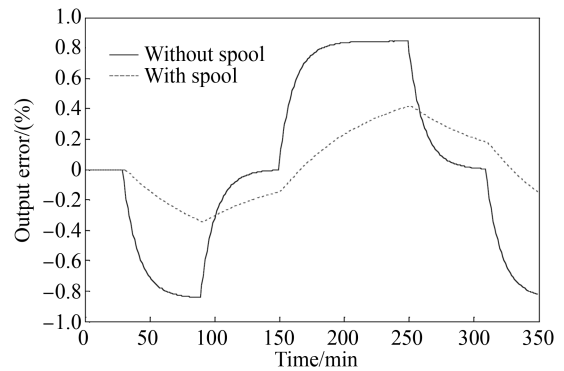


图 6 光纤电流互感器系统热致误差对比
Fig.6 FOCT system output errors comparison

3.2 保温腔体对径向温度扰动的均化作用

根据四极环绕环特点可知,其光纤段相对于光纤环中点两侧对称,与径向温度扰动相关的热致非互易相移能较好地抑制.然而光纤环实际绕制过程中需不断进行交叉缠绕,张力和角度难以把握,不能实现真正意义上的空间对称.当光纤环径向存在非对称热源时,光纤环自内向外或自外向内各层光纤之间会形成随时间变化的温度梯度,产生较大的热致非互易相移掺杂在法拉第相移中无法区分.为验证保温腔体对径向温度扰动的抑制作用,模拟热源在光纤环径向产生的温度变化情况,在 ANSYS 仿真中,对未加保温腔体的光纤环和加保温腔体的光纤环施加径向非对称温度激励,温度激励方案为:仿真对象上侧和下侧的温度激励恒为 60 °C,内侧温度激励恒为 0 °C,外侧激励为图 3 所示的变温载荷方案.

对未加保温腔体的光纤环和加保温腔体的光纤环仿真所提取的各匝光纤温度变化趋势如图 7(a)、(b)所示,由图 7(a)可知,光纤环中各匝温度变化的整体趋势与外部变温载荷趋势相近,中间部分的光纤温度变化明显下凹,即光纤中点处的温度变化与光纤两端存在较大差异,并且在曲线末端存在不均匀的锯齿波现象,即光纤环中各匝光纤的温度分布不均匀,主要是光纤环径向载荷差异所致.而由图 7(b)可见,光纤中间部分与两侧温度变化没有明显差异,每匝光纤的温度变化趋势相近且均匀,可见保温腔体有效均化了光纤环径向温度扰动.图 8 为未加保温腔体和加保温腔体的光纤环受相同径向温度扰动导致的系统输出误差对比曲线图,可见加保温腔体的传感头减小了光纤电流互感器系统输出误差范围且基本控制在±0.2%以内,提高了单侧受温度扰动系统的测量精度.

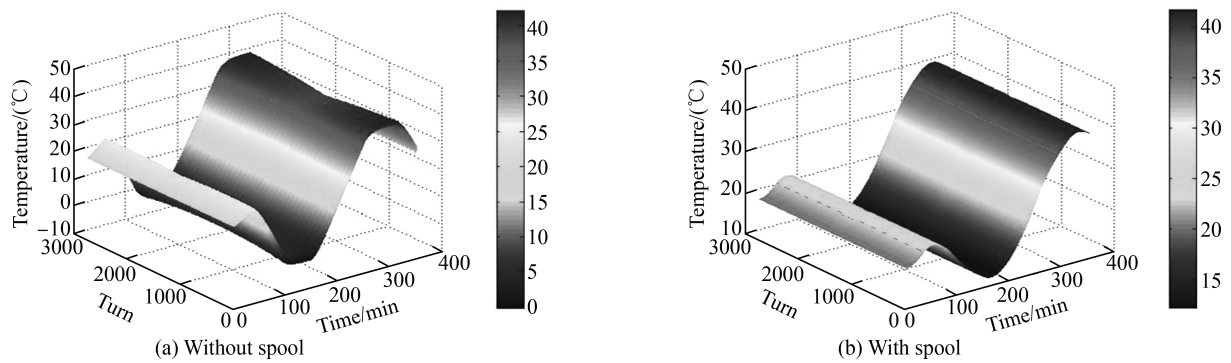


图7 径向非对称载荷下各匝光纤的温度变化

Fig.7 The temperature variations of each turn fiber under the radial asymmetric temperature excitation

3.3 施加保温腔体对轴向温度扰动的均化作用

理想情况下,四机对称光纤环对抑制轴向热流引起的温度梯度造成的热致相移误差是无效的,为了证明保温腔体对轴向温度梯度的抑制作用,利用ANSYS仿真软件分别对未加保温腔体的光纤环和加保温腔体的光纤环施加轴向非对称的温度激励,温度激励方案为:仿真对象内侧和外侧的温度激励恒为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,下侧温度激励恒为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,上侧激励为图3所示的变温载荷。

图9(a)、(b)为未加保温腔体的光纤环和加保温腔体的光纤环各匝光纤温度变化趋势,由图9(a)可见,由于光纤环内外侧以及下侧都施加的固定温度载荷,只有截面的上侧加载变化温度载荷,因此整个光纤环表现的是上侧变温的温度趋势.当加载轴向非对称载荷时,光纤环相邻层上的光纤具有相似的温度特点,但光纤的温度变化趋势图具有明显的厚度,并且在温度变化趋势图末梢存在锯齿波,即每一层上的光纤温度随光纤环上下两侧所受的温度载荷的差异性有较大不同.而由图9(b)可知,在轴向非对称温激励条件下,配合保温腔体的光纤环各层光纤自上而下存在的温度差异性得到控制,说明保温腔体具备均化轴向温度扰动的能力.根据所提温度数据分析计算光纤环与施加保温腔体后系统输出误差曲线如图10所示,由图10可知,加保温腔体后光纤电流互感器系统输出误差范围明显减小且很容易控制在 $\pm 0.2\%$ 范围之内,说明所设计的保温腔体能减缓外界复杂热流对光纤环的影响,有效提高系统测量精度。

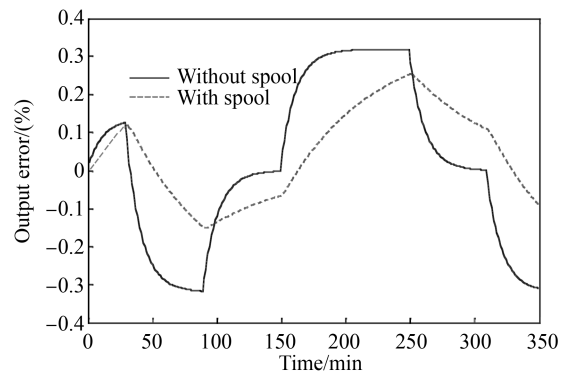


图8 径向非对称载荷下系统热致误差对比

Fig.8 System output errors comparison under the radial asymmetric temperature excitation

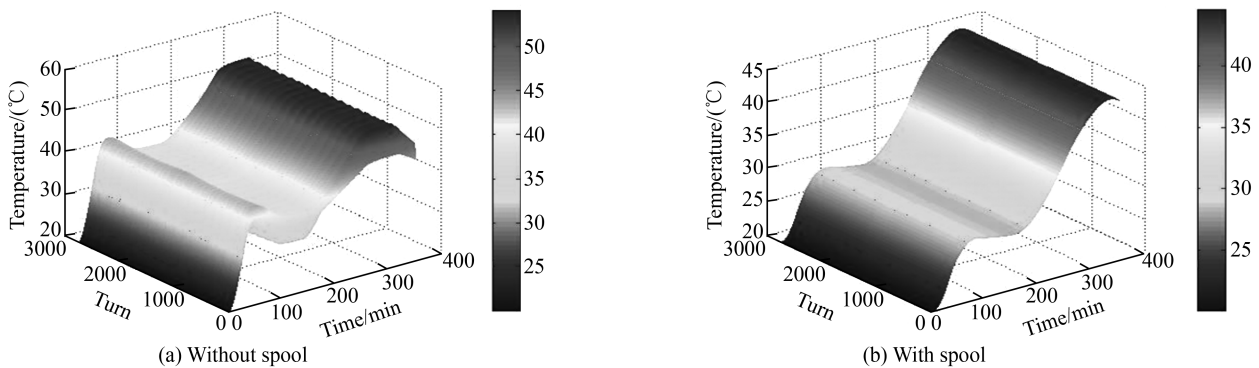


图9 轴向非对称载荷下各匝光纤的温度分布

Fig.9 The temperature variations of each turn fiber under the axial asymmetric temperature excitation

3.4 保温腔体在实际温度环境下的仿真和性能分析

为进一步说明光纤环加保温腔体的光纤电流互感器具有更好的温度性能,现模拟我国地理位置相差较大的三个城市海南海口市、黑龙江黑河市和新疆阿克苏市2017年7月4日这一天中的温度变化情况,验证

保温腔体对不同区域和长时间温度变化扰动的抑制效果.表3为三个城市一天从0~24时的实际温度变化情况.

在图11给出各个城市的实际温度变化情况,和模拟的仿真温度即给仿真对象加载的实际温度载荷.对在不同城市、不同温度变化情况下的光纤环自身和光纤环搭配相应的保温腔体进行仿真解算,最终光纤电流互感器系统输出误差如图12所示.由图12可见,光纤环加保温腔体的光纤电流互感器在不同地域、长时间范围内、不同温变情况下系统输出误差范围都有一定程度的缩小,再次说明保温腔体能够提升系统测量精度,使系统拥有更好的温度性能.

表3 海口、黑河、阿克苏市2017年7月4日24小时温度值
Table 3 The 24 hours temperature value (°C) in Haikou, Heihe, Aksu City in July 4, 2017

City	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Haikou	27	27	27	27	27	27	27	27	28	29	31	31	31	31	31	31	30	29	28	28	28	27	27	27	27
Heihe	21	21	19	19	19	19	22	24	27	30	32	32	33	34	34	34	34	33	31	28	26	24	23	22	22
Aksu	23	23	22	22	21	21	21	21	22	23	24	26	26	27	28	28	29	29	29	29	28	27	25	24	23

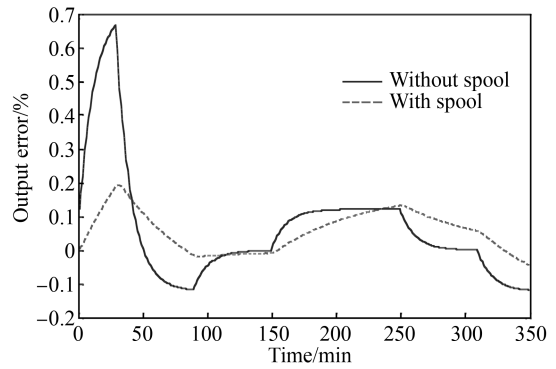


图10 轴向非对称载荷下系统热致误差对比
Fig.10 System output errors comparison under the axial asymmetric temperature excitation

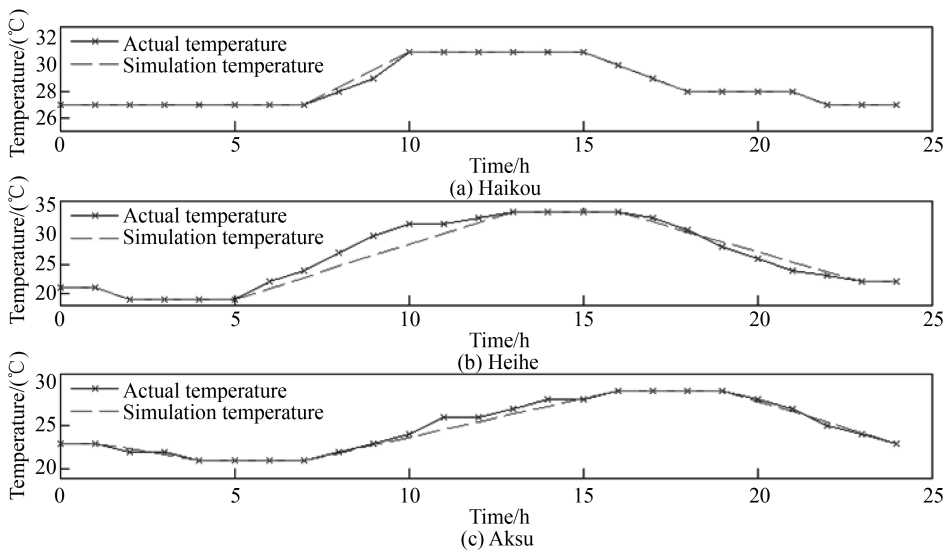
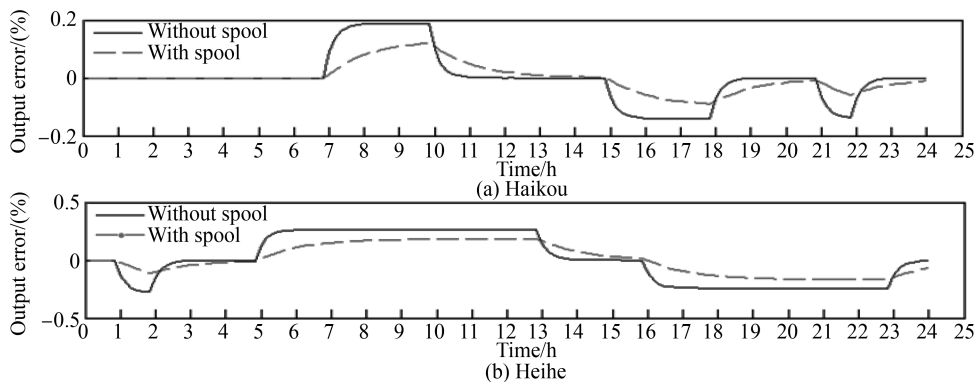


图11 温度变化曲线
Fig.11 Temperature change curve



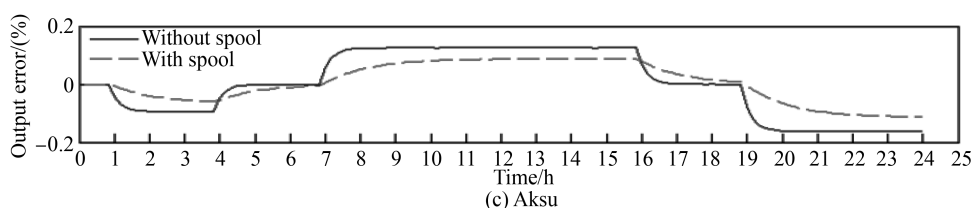


图 12 系统输出误差对比
Fig.12 System output errors comparison

4 结论

针对光纤环受环境温度扰动问题,提出一种抑制光纤电流互感器温度输出误差的光纤环保温腔体设计方案.结合有限元分析方法,定量分析了在复杂温度环境下,保温腔体的热性能表现和采用新型传感头的光纤电流互感器的温度性能.在不同温度载荷方案下,保温腔体可以降低各匝光纤温度分布上下限,减缓光纤温度变化速率;在时变对称温度载荷下,采用新型传感头的光纤电流互感器输出误差范围比光纤环本身减小了 1/2;在非对称温度载荷下,保温腔体能均化光纤环非对称温度场,且加保温腔体的系统温度输出误差范围控制在 $\pm 0.2\%$ 范围内,最后通过模拟不同区域的实际温度情况,验证了保温腔体在不同环境和长时间下的有效性.后期将通过优化改进保温腔体,更好的提升系统测量精度.

参考文献

- [1] KIYOSHI K. Development of fiber-optic current sensing technique and its applications in electric power systems[J]. *Photonic Sensors*, 2014, **4**(1): 12-20.
- [2] XIAO Zhi-hong, CHENG Song, ZHAGN Guo-qing, *et al.* Research on sensitivity characteristic of fiber optic current transformer[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, **37**(1): 212-216.
肖智宏,程嵩,张国庆,等.全光纤电流互感器灵敏度特性研究[J].*电力自动化设备*,2017,**37**(1):212-216.
- [3] HUANG Ai-xian, ZHAGN Hao, QIU Yi-shen, *et al.* Application of stokes vector method on the full-fiber current sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6): 699-704.
黄爱显,张昊,邱怡申,等.斯托克斯矢量法在全光纤电流传感器中的应用[J].*光子学报*,2013,**42**(6):699-704.
- [4] YANG Yu-qiang, YANG Qun, GE Wei, *et al.* Temperature compensated GMM-FBG current sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(10): 2377-2383.
杨玉强,杨群,葛伟,等.温度自动补偿超磁致伸缩材料布拉格光栅光纤电流传感器[J].*光学精密工程*,2016,**24**(10): 2377-2383.
- [5] SASAKI K, TAKAHASHI M, HIRATA Y. Temperature-insensitive sagnac-type optical current transformer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(12): 2463-2467.
- [6] NAZARÉ F V B D, WERNECK M M, OLIVEIRA R P D, *et al.* Development of an optical sensor head for current and temperature measurements in power systems[J]. *Journal of Sensors*, 2013, **2013**(1): 1-12.
- [7] SAMIMI M H, AKMAL A A S, MOHSENI H. Optical current transducers and error sources in them: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(9): 4721-4728.
- [8] YANG Han-rui, YANG Yan, SHANG Si-fei, *et al.* Present research situation of all-fiber-optical current transformer[J]. *Journal of Northeast Dianli University*, 2017, **37**(3): 90-96.
杨汉瑞,杨燕,尚思飞,等.全光纤电流互感器的研究现状[J].*东北电力大学学报*,2017,**37**(3):90-96.
- [9] LI Y, ANDREAS F, ROBERT W, *et al.* A study on different types of fiber coils for fiber optic current sensors[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, **605**: 283-286.
- [10] ZHANG H, QIU Y S, HUANG Z T, *et al.* Temperature and vibration robustness of reflecting all-fiber current sensor using common single-mode fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(22): 4311-4317.
- [11] CHU W S, KIM S M, OH M C. Integrated optic current transducers incorporating photonic crystal fiber for reduced temperature dependence[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(17): 22816-22825.
- [12] ZHANG R, LU H Q, LIU Y, *et al.* Polarization-maintaining photonic crystal fiber based quarter waveplate for temperature stability improvement of fiber optic current sensor[J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, **60**(12): 963-969.
- [13] BOHNERT K, GABUS P, NEHRING J, *et al.* Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(2): 267-276.
- [14] ZIMMERMANN A C, BESEN M, ENCINAS L S, *et al.* Improving optical fiber current sensor accuracy using artificial neural networks to compensate temperature and minor non-ideal effects[C]. SPIE, 2011.
- [15] WANG L H, CAO M, LIU Q C, *et al.* Modeling and verification of polarization errors in Sagnac fiber optic current

- sensor[J]. *Optik*, 2015, **126**(20): 2743-2746.
- [16] WANG L H, JI J F, BO Q S, *et al.* Modeling and simulation of polarization errors in Sagnac fiber optic current sensor [J]. *Optik*, 2014, **125**(17): 4770-4775.
- [17] WANG Jia, HOU Hong-lu, XU Jin-tao. Sagnac fiber-optic current sensor without vibration sensitivity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 57-61.
王嘉,侯宏录,徐金涛. 一种新型 Sagnac 式光纤电流传感器[J]. 光子学报,2010,**39**(1):57-61.
- [18] LI Xu-you, LING Wei-wei, XU Zhen-long, *et al.* Effect of double-cylinder winding on temperature performance of interferometric fiber optic gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(8): 38-43.
李绪友,凌卫伟,许振龙,等. 双柱型绕法对干涉式光纤陀螺温度性能的影响[J]. 光学学报,2016,**36**(8):38-43.
- [19] LI Xu-you, ZHANG Chun-mei, LIU Hua-bing, *et al.* Simulation and a nalysis on temperature performance of fiber ring by 16-polar symmetrical winding method[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016, **24**(6): 780-785.
李绪友,张春梅,刘华兵,等. 光纤环十六极对称绕法温度性能的仿真与分析[J]. 中国惯性技术学报,2016,**24**(6):780-785.