

保偏膜式光学玻璃电流传感头温度特性理论分析*

王政平 王晓忠 李庆波

(哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

摘 要 用理论分析和计算机仿真的方法研究了环境温度变化导致的光源中心波长移动和传感头材料 Verdet 常量与应力双折射变化对光学电流互感器输出性能的影响. 结果表明: 环境温度由 10℃ 变化到 30℃ 时, 归一化尺度因子降低了 1.379%. 其中光源中心波长随温度的变化对输出尺度因子的影响大于其他光学参量温度特性的影响. 因此, 在光学电流互感器设计中, 必须采取必要的技术措施减小或补偿传感头温度特性对系统的不利影响.

关键词 光学电流互感器; 温度特性; Verdet 常量; 线性双折射

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A

0 引言

块状光学玻璃电流互感器(Bulk Glass Optical Current Transformer: BGOCT)是电子式电流互感器中的一种. 自 1983 年 Sato 的 BGOCT 获得欧洲专利以来, 相关的研究取得了很大进展. 但在以往的研究与设计, 大多数研究者很少讨论系统中各个光学元件温度特性可能会对系统产生的影响^[1]. 真实的情况是, 当互感器环境温度发生变化时, 光源输出的波长和传感头内的某些参量就会发生改变, 进而影响系统的性能. 本文报告环境温度从 10℃ 变化到 30℃ 时, 光源中心波长和传感头内的 Verdet 常量与应力双折射的变化对系统尺度因子的影响的研究结果. 希望本报告的研究结果对光学电流互感器的研究设计有一定的参考价值.

1 Verdet 常量的温度特性

Verdet 常量的大小与所选择的材料和光学材料的工作光波长有关, 对 ZF-7 玻璃来说^[2]

$$V(\lambda) = \frac{\mu_0 \pi}{\lambda} \cdot \frac{n^2(\lambda) - 1}{n(\lambda)} \cdot (A + \frac{B}{\lambda^2 - \lambda_0^2}) \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波长; $n(\lambda)$ 为 ZF-7 玻璃的折射率色散表达式; μ_0 为磁导率; A 和 B 为取决于所选光学材料的系数; λ_0 为紫外谐振波长, 它也取决于所选光学材料. Verdet 常量单位为 rad/henry · m. 对 ZF-7 玻璃来说, 其在常温下对应的系数为

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A} \\ \lambda_0 &= 156.4 \text{ nm} \\ A &= 1.57116 \times 10^{-6} \text{ rad/T} \\ B &= 6.343 \times 10^{-19} \text{ rad} \cdot \text{m}^2/\text{T} \end{aligned}$$

文献[3]给出 Verdet 常量的另一种表达式

$$V(\lambda) = \gamma \cdot \frac{e_0}{m_0} \cdot \frac{\lambda}{2c} \cdot \frac{dn(\lambda)}{d\lambda} \quad (2)$$

式中, γ 为磁光系数; e_0/m_0 为电子的荷质比; c 为真空中的光速; λ 为光波长; $n(\lambda)$ 为材料的折射率; $dn(\lambda)/d\lambda$ 为材料的色散; Verdet 常量单位为 rad/Tesla · m. 式(2)表明随材料色散的增大, Verdet 常量越大.

如果将等式(2)乘以磁导率 μ , 则 Verdet 常量单位为 rad/henry · m. 对于抗磁介质有 $\mu = \mu_0$ ^[4], 所以可以得出

$$V(\lambda) = \mu_0 \cdot \gamma \cdot \frac{e_0}{m_0} \cdot \frac{\lambda}{2c} \cdot \frac{dn(\lambda)}{d\lambda} \quad (3)$$

式(1)和式(3)所反映的特性通常被称为 Verdet 常量的色散特性. 式(1)和式(3)拟合, 可以得到磁光系数 $\gamma = 0.875$.

当 Verdet 常量用式(3)表示时, 其与温度的关系为^[5]

$$\frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dT} = \frac{\frac{d}{dT}(\frac{dn(\lambda)}{d\lambda})}{\frac{dn(\lambda)}{d\lambda}} = \frac{\frac{d}{d\lambda}(\frac{dn(\lambda)}{dT})}{\frac{dn(\lambda)}{d\lambda}} \quad (4)$$

式中 V_0 为 20℃ 时的 Verdet 常量, 即式(3)表示的 $V(\lambda)$, 也可以记为 $V(T_0, \lambda)$. 将式(4)分离变量并从初始温度 T_0 (20℃) 到终态温度 T 积分得

$$V(T, \lambda) = V(T_0, \lambda) \cdot (1 + \int_{T_0}^T \frac{\frac{d}{d\lambda}(\frac{dn(\lambda)}{dT})}{\frac{dn(\lambda)}{d\lambda}} dT) \quad (5)$$

式(4)和(5)中 $dn(\lambda)/dT$ 可以表示为^[6]

$$\frac{dn(\lambda)}{dT} = \frac{n(\lambda)^2}{2n(\lambda) - 1} (D_0 + 2D_1(T - T_0) + 3D_2(T - T_0)^2 + \frac{E_0 + 2E_1(T - T_0)}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2}) \quad (6)$$

对于 ZF-7 重火石玻璃^[7], 式(6)中 $D_0 = 6.69 \times$

*黑龙江省自然科学基金(F01-02)资助项目
Tel: 0451-82518226 Email: zpwang@hrbeu.edu.cn
收稿日期: 2005-03-15

10^{-6} , $D_1 = 1.78 \times 10^{-8}$, $D_2 = -3.36 \times 10^{-11}$, $E_0 = 1.77 \times 10^{-6}$, $E_1 = 1.70 \times 10^{-9}$, $\lambda_{TK} = 0.269 \mu\text{m}$.

由式(6)可得在波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 时 Verdet 常量随温度的变化如图 1(图中 trace 1 表示 Verdet 常量随温度的变化; trace 2 表示常温下的 Verdet 常量).

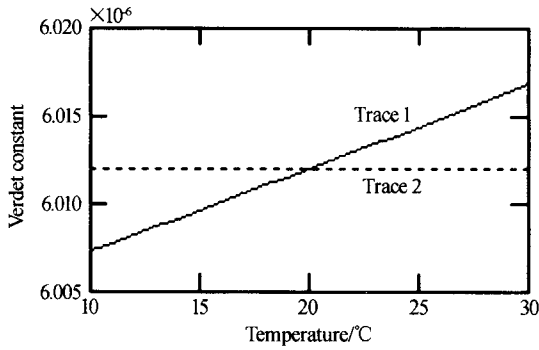


图 1 波长 1300 nm 时 Verdet 常量随温度的变化
Fig. 1 Variation of Verdet constant with temperature at wavelength 1300 nm

利用文献[1]建立的互感器模型,可得波长 1300 nm 时 Verdet 常量随温度的变化对输出尺度因子的影响如图 2. 当温度在 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 范围内变化时,输出尺度因子变化可达 0.158%.

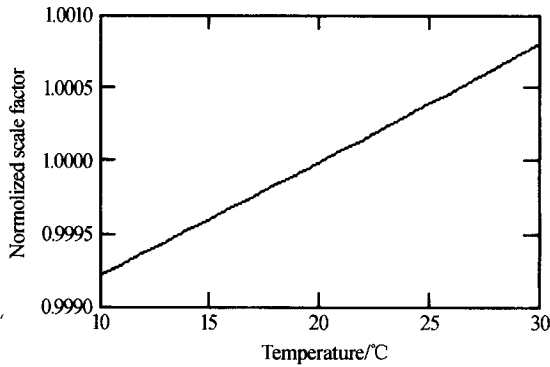


图 2 Verdet 常量随温度的变化对输出尺度因子的影响 (相对于 20°C 时尺度因子)
Fig. 2 Effect of variation of Verdet constant with temperature upon the scale factor relative to the scale factor at 20°C

2 线性双折射的温度特性

笔者对由于温度变化,传感头与周围封装材料的膨胀系数不同产生外应力,导致线性双折射量值变化对输出尺度因子影响的研究结果见文献[8]. 利用文献[8]研究结果,并用文献[9]中残余线性双折射的表达式,得到每个传感臂的线性双折射随温度的变化如图 3.

利用文献[1]建立的互感器模型,可得波长 1300 nm 时线性双折射随温度的变化对输出尺度因子的影响如图 4,其中 Verdet 常量为常温下的值. 当温度在 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 范围内变化时,输出尺度因子变

化 0.001%.

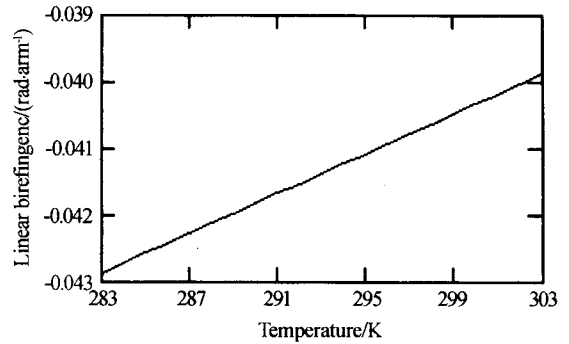


图 3 波长 1300 nm 时线性双折射随温度的变化
Fig. 3 Variation of linear birefringence with temperature at wavelength 1300 nm

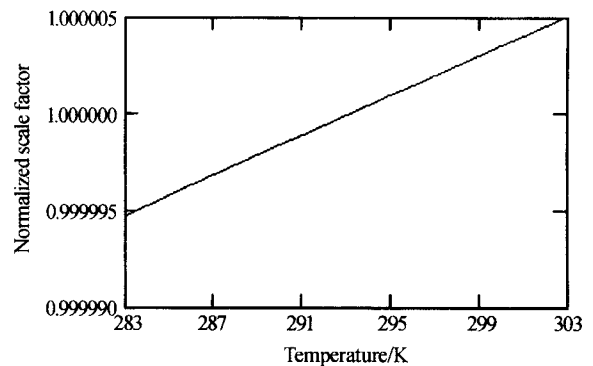


图 4 线性双折射随温度的变化对输出尺度因子的影响 (相对于 20°C 时尺度因子)
Fig. 4 Effect of variation of linear birefringence with temperature upon the scale factor relative to the scale factor at 20°C

波长 1300 nm 时,Verdet 常量和线性双折射随温度变化对输出尺度因子的联合影响如图 5. 当温度在 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 范围内变化时,输出尺度因子变化 0.146%. 可见,Verdet 常量随温度变化对输出尺度因子的影响比线性双折射的大.

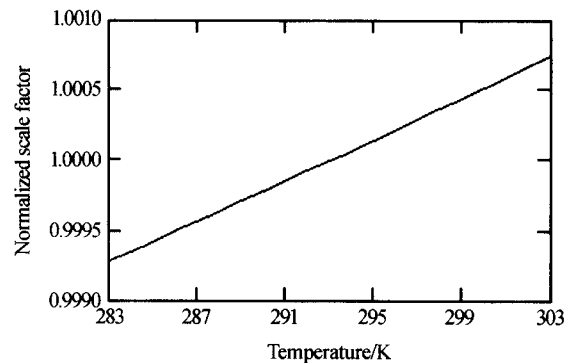


图 5 Verdet 常量和线性双折射随温度的变化对输出尺度因子的影响 (相对于 20°C 时尺度因子)
Fig. 5 Joint effect of variation of Verdet constant and linear birefringence with temperature upon the scale factor relative to the scale factor at 20°C

由于玻璃折射率随温度的变化很小(见文献[8]中公式 3~44),本文中除了在推导 Verdet 常量随

温度的变化时考虑折射率随温度的变化外,其余地方均不考虑折射率随温度的变化。

3 光源中心波长随温度变化通过传感头色散特性对输出尺度因子的影响

笔者对光源中心波长的变化通过线性双折射色散、反射相移色散和 Verdet 常量色散对输出尺度因子影响的研究结果分别见参考文献[9]~[11]。则利用文献[1]中建立的模型,并设环境温度从 10℃ 变化到 30℃ 时,光源输出中心波长从 1292 nm 线性变化到 1302 nm,得到输出尺度因子相对 20℃ 时的变化如图 6。

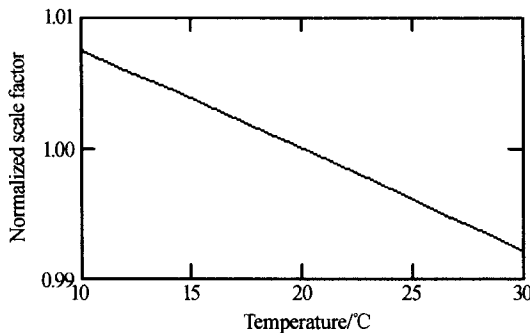


图 6 光源中心波长随温度的变化对输出尺度因子的影响
Fig. 6 Effect of variation of the central source wavelength with temperature upon the scale factor

图 6 表明:当光源波长从 1292 nm 变化到 1302 nm 时,归一化尺度因子由 1.0075 降到了 0.99207,降低了 1.543%。

4 光学电流传感器的温度特性

由以上讨论知波长是温度的函数;Verdet 常量是温度和波长的函数;反射相移是波长的函数;线性双折射是温度和波长的函数;所以尺度因子是温度的函数。当环境温度由 10℃ 变化到 30℃ 时,利用软件 MathCAD7.0 计算出系统输出尺度因子相对于 20℃ 时的变化如图 7。

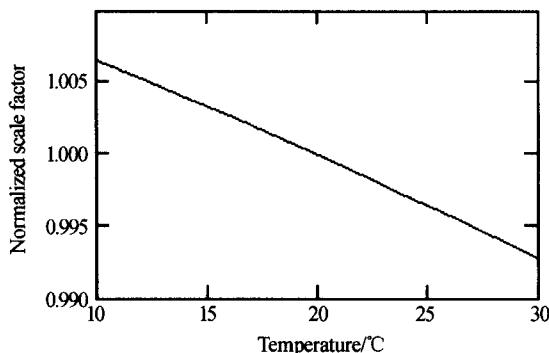


图 7 归一化尺度因子随温度的变化
Fig. 7 Variation of the normalized scale factor with temperature with its value at 20℃

从图 7 可知,环境温度由 10℃ 变化到 30℃ 时,归一化尺度因子由 1.0066 降到了 0.99281,降低了 1.379%。这比第 3 小节中单考虑光源中心波长随温度的变化对输出尺度因子的影响要小。这是由于光源中心波长随温度的变化对输出尺度因子的影响与传感头 Verdet 常量和线性双折射随温度变化对输出尺度因子的影响趋势相反,二者互相抵消了一部分。

5 结论

环境温度变化时,光源中心波长和传感头内的 Verdet 常量与应力双折射的变化对系统灵敏度的影响。结果表明:环境温度由 10℃ 变化到 30℃ 时,归一化尺度因子降低了 1.379%。这已经大于电流互感器国家标准 0.2 级标准准确级的规定。而且,光源中心波长随温度的变化对输出尺度因子的影响大于 Verdet 常量与应力双折射随温度变化的影响;因此,在光学电流互感器设计中,必须对光源采取恒温控制的技术措施,以保证光源波长的稳定性;同时对传感头采取适当措施以减小其温度变化,或采用有效的信号处理技术以保证系统灵敏度的稳定性。

参考文献

- 1 Wang Z P, Huang Z J, Kang C, et al. Optical current sensing element with single medium layers for high voltage applications. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(6): 455~458
- 2 Schott Glaswerke. The wavelength dependence of the verdet constant. *Technical Information Optical Glass*, 1985, (17): 2~4
- 3 Schott Glaswerke. Faraday effect and Verdet constant. *Technical Information Optical Glass*, 19
- 4 Ulaby F T. Fundamentals of Applied Electro-magnetics (2001 Media Edition). Science Press and Pearson Education North Asia Limited, 2002. 11~12
- 5 Williams P A, Rose A H, Day G W, et al. Temperature dependence of the Verdet constant in several diamagnetic glasses. *Applied Optics*, 1991, **30**(10): 1176~1178
- 6 SCHOTT Optical Glass 2000 Text. Section 5. 3: Temperature Dependence of Refractive Index
- 7 SCHOTT. Catalogue Optical Glass 2000. <http://www.schott.com>
- 8 吴强. 线性双折射温度特性对光学电流互感器影响的理论预报. 哈尔滨工程大学, 硕士学位论文, 2005
Wu Q. Harbin Engineering University, Thesis for Master Degree, 2005
- 9 王政平, 李庆波, 齐异, 等. 线性双折射色散对 OCS 灵敏度影响的理论研究. *光子学报*, 2005, **34**(1): 66~68
Wang Z P, Li Q B, Qi Y, et al. *Acta Photonica Sinica*,

- 2005, **34**(1): 66~68
- 10 王政平, 李庆波, 齐异, 等. Verdet 常量色散对光学电流传感器灵敏度影响的理论研究. 哈尔滨工程大学学报, 2004, **25**(2): 188~191
Wang Z P, Li Q B, Qi Y, *et al.* *Journal of Harbin Engineering University*, 2004, **25**(2): 188~191
- 11 王政平, 李庆波, 齐异, 等. 反射相移色散对 OCS 灵敏度影响的理论研究. 光子学报, 2004, **33**(9): 1115~1118
Wang Z P, Li Q B, Qi Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1115~1118

Theoretical Analysis of Temperature Characteristics of a Bulk Glass Optical Current Sensing Element with Polarization-Preserving Layers

Wang Zhengping, Wang Xiaozhong, Li Qingbo

Science School, Harbin Engineering University, Harbin 150001

Received date: 2005-03-15

Abstract The effects of the central wavelength shift of the source and the variations of the parameters of the sensing head (Verdet constant and linear birefringence) due to ambient temperature fluctuation upon the scale factor of a bulk-glass optical current transformer are theoretically analyzed and digitally simulated. The results show that the normalized output scale factor will decrease 1.379%, when the ambient temperature changes from 10°C to 30°C, among which the effect of the central wavelength shift with temperature upon the scale factor is greater than the others. Therefore, it is necessary to adopt proper technical measures to decrease or compensate the undesirable effects of the temperature characteristics of the sensing head.

Keywords Optical current transformer; Temperature characteristics; Verdet constant; Linear birefringence



Wang Zhengping a professor and doctoral supervisor at Harbin Engineering University (HEU), was born in Heilongjiang Province of China in 1949, received his B. Sc. and M. Eng. Degrees at the Dept. of Physics and the Dept. of Electronic Engineering of the HEU in 1982 and 1989, respectively. His primary areas of research include fiber-optic sensing technology, thin film optics, and optical metrology. More than seventy papers reflecting the research work of him/his group have been published, among which 18 have been embodied by SCI, 31 by EI and 10 by ISTEP.