

# 光学电流互感器传感头色散特性对系统 灵敏度影响研究\*

王政平 李庆波 齐 异 黄宗军 史金辉

(哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 以琼斯矩阵为数学工具, 利用理论分析和计算机仿真的方法研究了块状玻璃光学电流互感器传感头的色散特性对系统灵敏度的影响, 并进行了实验验证. 在光学电流互感器系统中, 光源的驱动电流与环境温度改变, 都会造成光源峰值波长移动. 而在传感头中主要是由单层保偏反射膜的反射相移、光学玻璃的 Verdet 常数以及光学玻璃内的线性双折射这三个因素的色散特性, 使得光学电流互感器的灵敏度随光源波长的变化而改变. 研究结果表明, 这种色散特性会对输出曲线的尺度因子产生明显的影响. 因此, 光源的恒温控制与光源驱动电流的恒流控制是必要的. 本研究结果可为光学电流互感器的研究设计人员提供有用的参考.

**关键词** 光学电流互感器; 法拉第效应; 互感头; 色散

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A

## 0 引言

电子式(含光学)电流互感技术是对电力输送工业中现有超高压大电流计量与线路保护技术的革命性变革. 块状光学玻璃电流互感器(Bulk Glass Optical Current Transformer; BGOCT)就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. 为了克服反射相移对 BGOCT 的不利影响, 研究者们先后提出了互补反射棱镜对、临界角反射、保偏膜反射等传感头设计方案<sup>[1~4]</sup>. 但在以往的研究与设计, 大多数研究者都假定光源输出波长恒定不变, 因此很少讨论系统中各个光学元件色散特性可能会对系统产生的影响. 但真实的情况是, 当光源驱动电流发生变化或光源周围温度发生变化时, 光源输出的波长就会发生改变, 进而通过各光学元件的色散特性影响系统的性能. 本文报道了光源中心波长在 1290 nm 附近变化时, 传感头的色散特性对系统灵敏度的影响的研究结果. 在传感头中由于单层保偏反射膜的反射相移、光学玻璃的 Verdet 常数以及光学玻璃残余应力导致的线性双折射这三个因素都具有随波长改变的色散特性, 所以这三方面的综合影响就是整个传感头的色散特性对系统的影响. 因在已知的资料中, 尚未发现类似的研究报告或报道, 故希望本文报告的研究结果对光学电流互感系统的研究设计有一定的参考价值.

## 1 光源中心波长特性实验结果

对武汉电信器件公司生产的 LED3S403 光源中心波长随驱动电流及环境温度变化的规律进行的实验结果表明: 在 16℃ 环境下, 驱动电流由 15 mA 变化到 80 mA 时, 光源输出光中心波长从 1290 nm 变化到 1315 nm; 在 60 mA 驱动电流下, 环境温度由 10℃ 变化到 30℃ 时, 光源输出光中心波长从 1292 nm 变化到 1302 nm. 因此, 本文研究内容针对的波长变化选定在 1290 nm 到 1315 nm 范围之内.

## 2 反射相移的色散特性

对反射相移色散特性及其对 OCT 灵敏度影响的研究结果<sup>[5]</sup>表明: 无论对于理想的还是实际的情形, 当光源中心波长从 1290 nm 变化到 1315 nm 时, 保偏膜的反射相移都会有 2°~3° 的变化, 使得反射过程已不再是严格意义下的保偏反射了.

## 3 Verdet 常数的色散特性

对 Verdet 常数色散特性及其对 OCT 灵敏度影响的研究结果<sup>[6]</sup>表明: 对于 ZF-7 光学玻璃而言, 当光源中心波长从 1290 nm 变化到 1315 nm 时, 其 Verdet 常数由  $7.222 \times 10^{-6}$  rad/A 降低到了  $7.028 \times 10^{-6}$  rad/A.

## 4 线性双折射的色散特性

对线性双折射色散特性及其对 OCT 灵敏度影响的研究结果<sup>[7]</sup>表明: 在 1290 nm 到 1315 nm 波长变化范围内, 单位长度线性双折射由 0.2333°/cm 变

\*黑龙江省自然科学基金(F01-02)资助  
Tel: 0451-2518226 Email: zpwang@hrbeu.edu.cn  
收稿日期: 2004-10-11

化到  $0.2287^\circ/\text{cm}$ .

### 5 BGOCS 灵敏度受到的综合影响

保偏反射式 BGOCT 传感头的研究细节<sup>[4]</sup>, 传感头中的光学过程可用琼斯矩阵表示为

$$E_{\text{out}} = F_4 R_3 F_3 R_2 F_2 R_1 F_1 E_{\text{in}} \quad (1)$$

此处  $E_{\text{out}}$  是输出电矢量,  $F_i$  表示第  $i$  条光路的传输矩阵 ( $i=1,2,3,4$ ),  $R_i$  表示第  $i$  个反射面上发生的反射效应的反射矩阵 ( $i=1,2,3$ ),  $E_{\text{in}}$  为输入线偏光的电矢量, 注意它们都是波长的函数.

输出电矢的  $p$ -分量和  $s$ -分量的光强分别为  $J_p = E_p^* \cdot E_p$  与  $J_s = E_s^* \cdot E_s$ . 此处  $E_p^*$  和  $E_s^*$  分别是与  $E_p$  和  $E_s$  对应的复共轭函数. 经信号处理后的输出结果为

$$U_{\text{out}} = \frac{J_s - J_p}{J_s + J_p} \quad (2)$$

尺度因子是表征系统灵敏度的参数, 其定义为  $S = U_{\text{out}}/I$ , 即输出曲线的斜率. 尺度因子也是波长  $\lambda$  的函数, 即

$$S = H(\lambda) \quad (3)$$

根据式(1)~(3), 利用软件 MathCAD7.0 计算出归一化尺度因子色散曲线如图 1. 其中在计算反射相移时, 保偏膜厚度采用的是工程实际中会产生  $-2^\circ$  相移的膜厚.

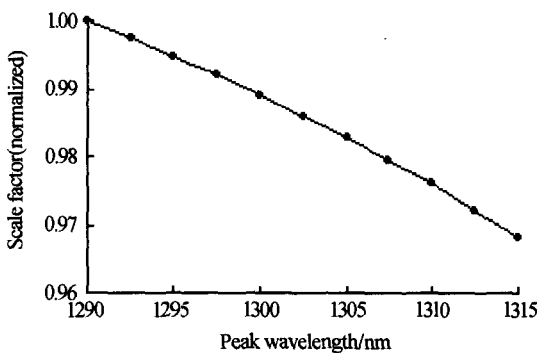


图 1 尺度因子(归一化)色散曲线  
Fig. 1 Dispersion of the scale factor (normalized)

从图1, 当光源波长从 1290 nm 变化到 1315 nm 时, 归一化尺度因子由 1 降到了 0.9682, 降低了 3.18%. 这已经远大于电流互感器国家标准 0.2 级标准准确级的规定. 因此, 在光学电流互感器设计中, 必须对光源采取恒温、恒流控制的技术措施, 以保证光源波长的稳定性, 从而保证系统灵敏度的稳定性.

### 6 实验验证

针对上述理论分析, 进行了实验验证. 实验装置图如图 2.

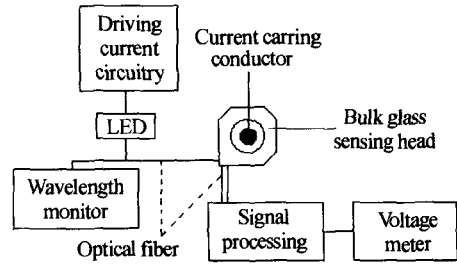


图 2 实验装置  
Fig. 2 Experimental set-up

实验中使用武汉电信器件公司生产的 LED3S403 型 SLD 作为光源. 光源的驱动电流由驱动电路调控光源的工作波长. 光源出射光经过尾纤进入 Y 型耦合器分束, 一束入射进光纤光谱仪(信息产业部电子第四十一研究所生产的 AV6361 光纤光谱分析仪)用于监控波长, 另一束进入传感单元(起偏器、玻璃传感头、检偏器和两个光电探测器), 通过传感单元后的信号进入信号处理电路, 其输出电压由电压表测出. 光源和传感单元放置在重庆实验仪器有限公司生产的五环牌 TP2000 型温度试验箱中保持恒温  $16^\circ\text{C}$ . 实验得到尺度因子(归一化)随入射光峰值波长变化的色散曲线如图 3.

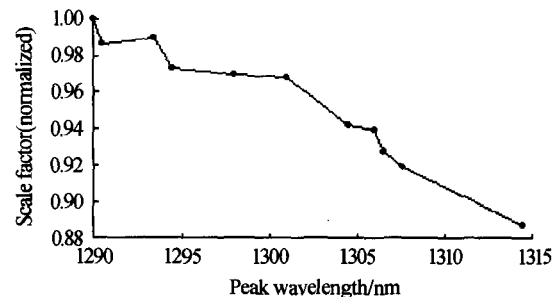


图 3 实验结果尺度因子(归一化)色散曲线  
Fig. 3 Experimental result showing the dispersion of the scale factor (normalized)

从实验结果可以看出, 随着入射光峰值波长从 1290 nm 变化到 1315 nm, 归一化尺度因子从 1 变化到 0.887087, 下降了 11.3%. 对比前面的理论分析数据 3.18%, 可以看出两个结果有所不同. 造成这种情况的可能原因包括: 传感头反射面上保偏膜的反射相移超过  $-2^\circ$ , 使其色散对系统灵敏度的影响比理论计算的更大; 光源线宽的光谱平均效应的影响在理论模型中没有考虑; 三个光学参量色散特性对系统灵敏度影响可能存在联合效应; 可能还存在目前未知的其它因素. 尽管如此, 理论分析结果与实验结果的变化趋势还是一致的, 所以可以得出结论——光源出射光峰值波长的移动造成的传感头的色散对系统灵敏度的影响是无法忽略的, 这一点 BGOCS 的研究者必须加以考虑.

## 7 结论

本文对保偏膜式块状玻璃光学电流互感器的色散特性对系统输出灵敏度的整体影响进行了理论分析和计算机仿真以及实验验证. 研究表明, 由于光源的驱动电流发生变化, 或者光源所处的环境温度发生变化所造成的光束峰值波长移动, 会由于保偏反射膜的反射相移, 光学玻璃的 Verdet 常数, 以及光学玻璃残余内应力导致的线性双折射折这三个方面的色散特性而对保偏膜式块状玻璃光学电流互感器输出曲线的尺度因子造成明显影响. 这意味着在实际系统中, 必须对光源采取恒流和恒温措施, 以保证光学电流互感器达到国家标准所要求的准确度.

### 参考文献

- 1 Sato T, Takahashi G, Inul Y. Method and apparatus for optically measuring a current. *European Patent Application*, Appl. No: 831022. 10. B, Publication No: 0 088 419 A1, 1983
- 2 Ning Y N, Chu B C B, Jackson D A. Miniature Faraday current sensor based on multiple critical angle reflections in a bulk-optic ring. *Opt Lett*, 1991, **16**(24): 1996~1998
- 3 Rochford K B, Rose A H, Deeter M N, et al. Faraday effect current sensor with improved sensitivity-bandwidth product. *Opt Lett*, 1994, **19**(22): 1903~1905
- 4 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**: 455~458
- 5 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
- 6 王政平, 李庆波, 齐异, 等. Verdet 常数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
- 7 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

## Study of the Effect of the Sensing Head Dispersion Property Upon the Sensitivity of a Bulk-glass Optical Current Transformer

Wang Zhengping, Li Qingbo, Qi Yi, Huang Zongjun, Shi Jinhui

Science School, Harbin Engineering University, Harbin 150001

Received date: 2004-10-11

**Abstract** The dispersion property of the optical glass sensing head and its effect upon the sensitivity of a bulk-glass optical current transformer were theoretically analyzed by taking the Jones' Matrix as a mathematical tool, simulated with a computer and verified with an experiment. In an optical current sensing system, when the fluctuations of the driving current or the ambient temperature of the optical source occurs, the peak wavelength of the source would change. It would result in the fluctuation of the sensitivity of the system because of the existing of the dispersions of the reflection-induced retardance, Verdet constant and the linear birefringence inside the sensing head. The investigation results showd that the dispersions would obviously affect the scale factor of the system. Therefore, it was necessary to stabilize the driving current and the ambient temperature of the optical source by some technical means. These results might be useful for the researchers and designers who works in the optical current sensing technical area.

**Keywords** Optical current transformer; Faraday effect; Sensing head; Dispersion



**Wang Zhengping** a professor and supervisor of the students for Ph. D. degrees at Harbin Engineering University (HEU), was born in 1949 in Heilongjiang Province of China, receiving 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. He was the member of AAAS, NYAS and OSA. He is the member of SPIE now. His primary areas of research include fiber-optic sensing technology, thin film optics and optical metrology. More than sixty papers reflecting the research work of him or his group have been published, among which

15 have been embodied by SCI, 18 by EI and 5 by IST.