

一种基于径向偏振解调的线性光学电流传感器

谭巧^{1,2}, 徐启峰¹, 黄奕钊¹, 项宇锴¹

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;
2. 闽江学院 计算机科学系, 福建 福州 350108)

摘要: 提出了一种基于径向偏振解调的线性光学电流传感器。采用集磁式传感头, 由两块导磁板将气隙磁场引出, 直通式光路由通光孔经过气隙磁场, 不需要反射棱镜, 根除了反射相移, 有利于改善传感器的稳定性。采用径向偏振光栅将法拉第旋转角转换为环形光斑的同步转动, 由四象限探测器对光斑定位得到待测电流。经理论分析和实验验证, 传感器的测量模式与光强无关, 法拉第旋转角测量范围为 $\pm 43^\circ$, 测量准确度 0.2S 级。

关键词: 光学电流传感器; 直通光路; 法拉第旋转角; 四象限探测器; 偏振光栅
中图分类号: O432.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0222003

A linear optical current transducer based on radial polarization demodulation

Tan Qiao^{1,2}, Xu Qifeng¹, Huang Yifan¹, Xiang Yukai¹

(1. College of Electric Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Computer Science, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A linear optical current transducer (OCT) based on radial polarization demodulation was proposed. A magnetic concentration ring with an air gap was selected as the sensing head, in which two magnetizer plates were used to lead out the magnetic field of air gap, and the straight optical path passed through the air gap by light apertures. The reflecting prism was not needed so that the reflection-induced retardation was eliminated, which helped to improve the stability of the transducer. A radially polarized grating was employed to convert the Faraday rotation angle into the rotation of a circular facula, which was detected by a four-quadrant detector, and then the measured current could be obtained after signal processing. The theoretical analysis and experimental results show that this new OCT has a measurement range of $\pm 43^\circ$ in Faraday rotation angle and the advantage of optical power independent, meeting the national standard of 0.2S accuracy class.

Key words: optical current transducer; straight optical path; Faraday rotation; four-quadrant detector; polarization grating

收稿日期: 2017-08-05; 修订日期: 2017-10-03

作者简介: 谭巧(1981-), 女, 副教授, 博士生, 主要从事光学传感器方面的研究。Email: tqfeiji@163.com

导师简介: 徐启峰(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能电网测量新技术方面的研究。Email: Ranger123098@163.com

0 引言

光学电流传感器 (Optical Current Transducer, OCT) 是电能计量和继电保护的重要设备, 具有绝缘性能好、响应速度快、无暂态磁饱和、频带宽、数字化等优点, 符合智能电网发展的需求, 有望取代传统的电磁式电流^[1-3]。

OCT 主要分为全光纤型和混合型两大类: 前者传光、传感均采用光纤, 后者传光用光纤、传感用磁光晶体、磁光玻璃或磁光薄膜等。其中混合型 OCT 的传感结构大多为集磁式, 将棱镜、偏振片、磁光材料等光学器件置于铁芯气隙中, 因此气隙要足够大, 但大气隙影响集磁性能^[4], 光路中的入射棱镜与反射棱镜引入反射相移, 使线偏光退偏为椭圆偏光, 降低了测量灵敏度。目前双正交反射保偏、反射面镀膜保偏和临界角反射保偏等^[5]消除反射相移的方法, 效果均不理想, 仅保偏膜反射相移引起的测量误差就高达 1.55%, 远不能满足 0.2S 级的准确度要求。

需要强调的是, 不管何种类型的 OCT, 其检测方式都是基于马吕斯定律的偏振光光强检测, 测量结果具有光功率相关性, 易受光功率波动的影响; 利用正弦函数小角度时的近似线性测量法拉第旋转角, 导致动态测量范围和测量谐波的能力有限。此外, 温漂和线性双折射产生的随机噪声降低了 OCT 长期运行的稳定性与可靠性, 制约了 OCT 的实用化。近年来有文献提出了一些解决方法, 如采用气隙磁场强度温漂补偿方法^[6]; 双光路法使温漂互补^[7]; 设置 1/4 波片初始相位角抵消 Verdet 常数的温漂^[8], 等等。以上研究主要集中在光路、磁场或算法补偿方面, 在检测模式上没有突破, 仍通过检测光强实现法拉第旋转角的近似线性测量, 使 OCT 具有光功率相关性、非线性测量等缺点。

文中提出了一种基于径向偏振解调的直通光路式 OCT。采用集磁式直通光路结构, 简化了磁路与光路, 消除了反射相移, 优化了磁场分布, 并有效减小了传感头的尺寸与重量; 采用径向检偏结合四象限定位的检测模式, 实现了电流的线性测量。具体的技术路线是: 利用径向偏振光栅将法拉第旋转角转换为明暗相间的环形光斑图像的同步旋转, 通过四象限探测器定位光斑得到待测电流值。这种检测模式与光功率无关, 测量结果不受光源功率波动和光路损耗等因素的影响, 无近似线性问题, 使附加线双

折射的影响显著减小, 系统的动态测量范围和灵敏度大大提高。实验结果表明, 新型 OCT 可直接测量 $\pm 43^\circ$ 以内的法拉第旋转角, 准确度达到了 0.2S 级。

1 传感头的设计

1.1 直通光路结构

传统集磁式 OCT^[9] 的结构如图 1(a) 所示, 通过两个直角反射棱镜将光导入及导出, 反射面的反射相移混叠在法拉第旋转角中, 同时反射相移存在温漂问题。此外, 大气隙 (20 mm 以上) 导致漏磁多, 气隙磁场分布不均匀。

直通光路式 OCT 的结构如图 1(b) 所示, 两块带有通光孔的长方形纯铁片 (导磁板) 引出气隙磁场, 磁光薄膜放置在导磁板中间, 偏振光经通光孔穿过磁光薄膜。直通光路不需要直角反射棱镜, 消除了反射相移的影响; 气隙磁场中只有 μm 厚度的磁光薄膜, 大大降低了应力线双折射的影响; 气隙小于 5 mm, 磁场分布明显改善。图 2 给出了两种传感结构的磁场分布对比图, 可见直通光路的磁场分布更加均匀。

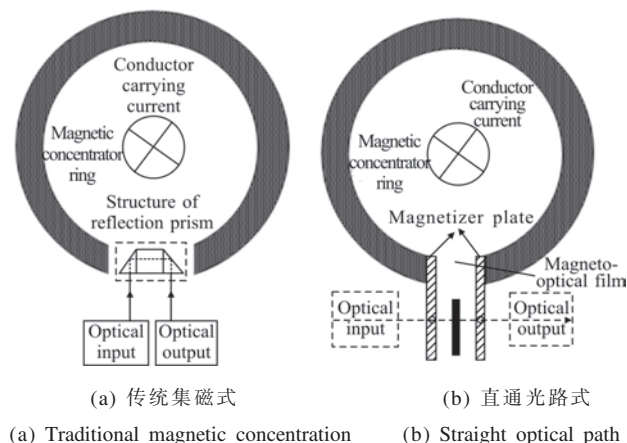


图 1 两种传感结构

Fig.1 Two sensing structure

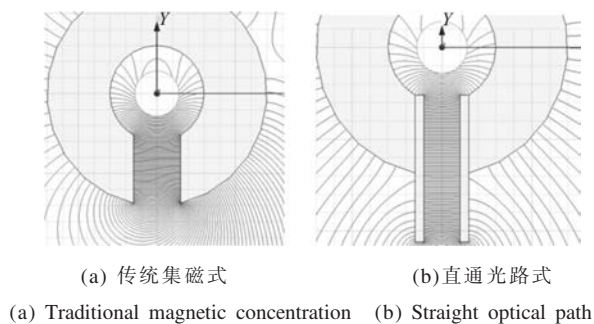


图 2 两种传感结构的磁场分布对比

Fig.2 Magnetic field distributions of the two sensing structures

设定传感器的额定电流为 300 A, 基于 Ansoft Maxwell 软件, 得到直通光路的优化结构参数如表 1 所示。

表 1 优化后传感单元各参数

Tab.1 Parameters of the sensing unit after optimization

Magnetic concentration ring		Magnetizer plate	
Inner radius/mm	25	Aperture diameter/mm	5
Outer radius/mm	35	Length/mm	45
Width/mm	25	Width/mm	25
Air gap space L_{air} /mm	15	Thickness/mm	5
		Air gap length L_{gap} /mm	5

1.2 传感光路分析

直通光路 OCT 的传感光路如图 3 所示, 光源发出的光经准直起偏后形成线偏振光并通过磁光薄膜, 经扩束放大后通过径向偏振光栅, 得到一个明暗相间的环形光斑, 光斑与偏振光的偏振面同步旋转, 由四象限探测器测量光斑图像的旋转角, 经换算得到实时电流值。

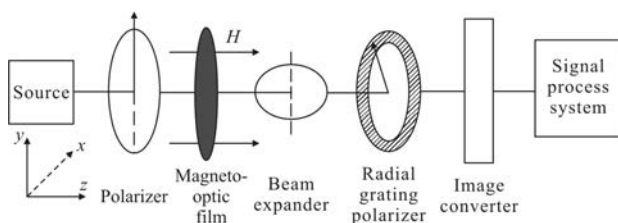


图 3 直通光路 OCT 的传感光路

Fig.3 Sensing optical path of straight optical path OCT

图 3 中, 起偏器的透光轴位于系统 x 方向, 光源发出的光通过起偏器后其偏振面与 x 轴方向平行, 振幅为 A , 入射偏振光的琼斯矢量为:

$$E_{in} = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在磁场的作用下, 通过磁光薄膜的线偏振光的偏振面旋转了 θ 角, 其琼斯矩阵为:

$$T_C = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

径向偏振光栅^[10]是一种亚波长铝金属光栅, 其结构如图 4 所示, 其特点是光栅刻槽(即 TM 波透振

方向)在 360° 的环形区域内沿径向均匀分布。

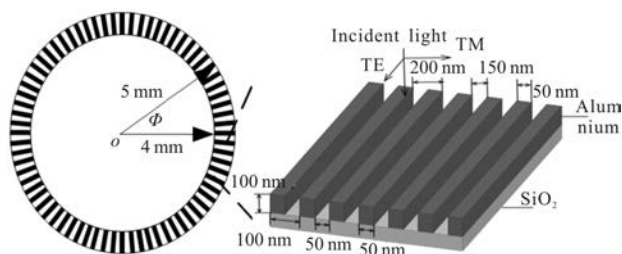


图 4 径向偏振光栅示意图及实物图

Fig.4 Schematic diagram and physical map of radially polarized grating

在系统坐标下, 径向偏振光栅的琼斯矩阵可表示为^[11]:

$$G_T = t_\phi \begin{bmatrix} \sin^2\phi & -\sin\phi\cos\phi \\ -\sin\phi\cos\phi & \cos^2\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: ϕ 为光栅的方位角(ϕ 角从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 逐渐变化); t_ϕ 为入射光在切向的透过率, 即图 4 中所示 TM 波的透过率。经径向偏振光栅检偏后, 出射光的琼斯矢量为:

$$E_{out} = G_T \cdot T_C \cdot E_{in} = A t_\phi \begin{bmatrix} \sin^2\phi\cos\theta - \sin\phi\cos\phi\sin\theta \\ -\sin\phi\cos\phi\cos\theta + \cos^2\phi\sin\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

输出光强为:

$$I_{out} = E_{out}^+ E_{out} \quad (5)$$

式中: 光矢上标“+”表示对光矢的厄米运算。考虑到光栅刻槽只分布在内外半径之间, 光栅的其他区域都不透光, 对公式(5)进行计算得到:

$$I_{out} = \begin{cases} A^2 t_\phi^2 \cdot \sin^2(\phi - \theta) & R_1 < \rho < R_2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ρ 为径向偏振光栅的半径; R_1, R_2 分别为其内半径和外半径。由公式(6)可知, ϕ 角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化, 当 $\theta = \phi$ 时, 输出光强为 0, 对应光斑的暗纹中心。

令法拉第旋转角 θ 分别为 $-45^\circ, 0^\circ$ 和 45° , 由公式(6)得到经偏振光栅解调后的光强分布在 $\pm 45^\circ$ 区域内对称分布且形状固定, 如图 5 所示。当 $\theta = 0^\circ$ 时,

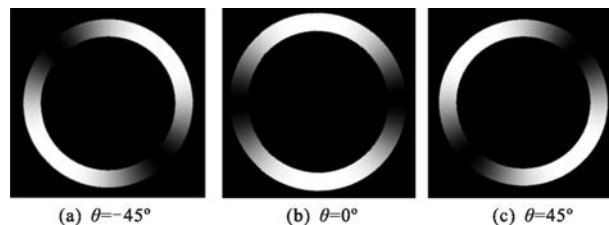


图 5 经径向偏振光栅后的光斑图像

Fig.5 Facula image after the radially polarized grating

光斑的暗纹中心处于水平 x 方向,亮纹中心位于垂直 y 方向。当 θ 变化时,环形光斑整体随 θ 同步转动,且保持固定的强度分布。光斑旋转的角度 β 即为法拉第旋转角 θ :

$$\beta = \theta \quad (7)$$

1.3 四象限探测器图像检测原理

四象限探测器即象限光电池,是由四个面积相等、形状相同、位置对称、却又相互独立的光电二极管组成,分别位于四个象限 A, B, C, D 内,如图 6 所示^[12-13]。

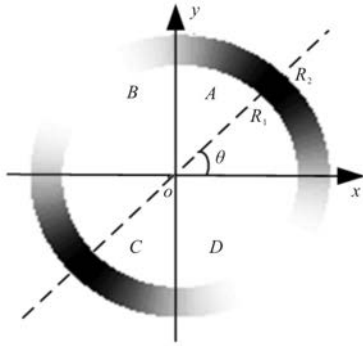


图 6 四象限探测器的图像检测原理

Fig.6 Image detection principle of four quadrant detector

当输出光斑照射到四象限探测器时,它被分为四部分,并由相应的光电二极管将探测到其光能量 E_A, E_B, E_C, E_D 对应四个象限光强分布函数的积分值,经化简变为:

$$E_A = \frac{1}{2} A^2 t_\phi^2 (R_2^2 - R_1^2) \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\sin 2\theta}{2} \right] \quad (8)$$

$$E_B = \frac{1}{2} A^2 t_\phi^2 (R_2^2 - R_1^2) \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\sin 2\theta}{2} \right] \quad (9)$$

$$E_C = \frac{1}{2} A^2 t_\phi^2 (R_2^2 - R_1^2) \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\sin 2\theta}{2} \right] \quad (10)$$

$$E_D = \frac{1}{2} A^2 t_\phi^2 (R_2^2 - R_1^2) \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\sin 2\theta}{2} \right] \quad (11)$$

将公式(8)~(11)经如下运算可得:

$$F = \frac{(E_B + E_D) - (E_A + E_C)}{E_A + E_B + E_C + E_D} = \frac{2}{\pi} \sin 2\theta \quad (12)$$

四个象限的光能量经光电二极管转变为光电流信号,大小与光能量呈正比,比例系数设为 k 。光电流经增益为 G 的电路放大后,得到输出电压:

$$U_i = G \cdot I_i = G \cdot k \cdot E_i = K \cdot E_i \quad (i = A, B, C, D) \quad (13)$$

式中: $K = Gk$ 为比例系数。将公式(13)带入公式(12),得到法拉第旋转角为:

$$\beta = \theta = \frac{\arcsin\left(\frac{2}{\pi} F\right)}{2} = \frac{\arcsin\left[\frac{2}{\pi} \cdot \frac{(U_B + U_D) - (U_A + U_C)}{U_A + U_B + U_C + U_D}\right]}{2} \quad (14)$$

考虑到反正弦函数的多值性,因此将角度变化限制在 $\pm 43^\circ$ 的范围内,以实现精确测量。

待测电流 i 与法拉第旋转角 θ 的关系为:

$$i = \frac{L_{gap}}{V l_c \cdot 4\pi \times 10^{-3}} \cdot \theta \quad (15)$$

式中: L_{gap} 为集磁环气隙长度; l_c 为磁光薄膜厚度; V 为磁光薄膜的费尔德常数。

当光源的输出波动时,入射光的振幅 A 变为 A' ,输出光强也相应变为:

$$I_{out}' = \begin{cases} A'^2 t_\phi^2 \cdot \sin^2(\phi - \theta) & R_1 < \rho < R_2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

可见,光强波动只是改变了输出光强的大小,强度因子由 $A^2 t_\phi^2$ 变为 $A'^2 t_\phi^2$,对光强分布并没有影响,环形光斑图像的整体明亮程度发生了改变,但条纹的位置保持不变。根据公式(8)~(11),可知四个光电二极管所探测到的光能量因子变为 $A'^2 t_\phi^2$;再由公式(13)和(14)知,该因子 $A'^2 t_\phi^2$ 在计算中被相互抵消。因此,通过四象限探测器检测光斑图像的方法不受光源波动的影响。

2 实验验证

2.1 实验系统

实验系统如图 3 所示,光源采用单横模 LD 光源,工作波长为 808 nm,输出功率为 30 mW,光斑直径为 3 mm。采用 Bi-Gd-YIG 磁光薄膜,808 nm 波长时的费尔德常数 V 为 $1.5 (^\circ)/\text{cm} \cdot \text{Oe}$,其磁饱和和磁场强度约为 139 kA/m。

实验系统的额定电流为 300 A,考虑到其测量范围要求为 1%~120%的额定电流,并由表 1 可知气隙长度为 5 mm,故根据公式(15),可以算出磁光薄膜的厚度为:

$$l_c = \frac{45^\circ \times 5 \times 10^{-3}}{1.5 \times 4\pi \times 10^{-3} \times 10^2 \times 509} = 235 \mu\text{m} \quad (17)$$

取磁光薄膜的厚度为 220 μm ,在 300 A 额定电流时的法拉第旋转角为 35.2° ,在 120%额定电流时的法拉第旋转角为 42.2° ,符合测量范围的要求。

经通光孔出射后的光束经扩束镜放大 10 倍,光斑直径变为 30 mm,整个圆形光斑覆盖了径向偏振光栅,形成一个带有明暗条纹的环形光斑。磁光薄膜位于两块导磁板之间,为了防止各器件之间受振动影响发生相对移动或角度偏移,对器件进行了一体化封装。将集磁环、导磁板、磁光薄膜、扩束镜和径向偏振光栅安装在固定模具内,如图 7 所示。

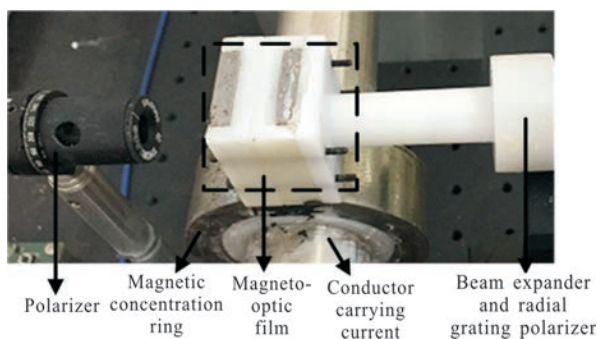


图 7 传感头光路部分

Fig.7 Optical path of the sensing head

经光栅出射后的环形光斑被四象限探测器接收(型号 OSQ100-IC,光敏面积为 10 mm×10 mm,响应时间为 50 ns,波长响应范围为 400~1 100 nm),四路输出电流信号经 I/V 转换器后转变为电压信号,由高速 A/D 芯片采样(型号 ADS5263,转换速率 100 MSPS,总采样的时间为 40 ns),由 DSP(型号 TMS320F28335,主频 150 M)将采样数据带入公式(14)和(15)计算得到电流值。此系统采样频率设为 4 kHz,即一个工频周期内采样 80 个点,每个采样点之间间隔为 250 μs。四象限探测器的信号处理电路对每个采样点的处理时间小于 1 μs。

2.2 实验结果

室温环境下,调节大电流发生器输出 1%~120% 的额定电流,采用 0.05 级电磁式电流作为标准 CT,采用 NT700 电子式校验仪检验 OCT 的误差,结果满足 0.2S 级的要求^[14],如表 2 所示。

表 2 基本准确度实验数据

Tab.2 Experimental data of basic accuracy

Percentage of the rated current	Ratio difference	Phase difference/(°)
1%	+0.184 5%	+10.45
5%	+0.112 3%	+6.21
20%	-0.085 2%	-3.81
100%	-0.071 6%	-2.19
120%	-0.082 9%	-2.08

2.3 线性 OCT 光功率无关性验证

直通光路线性 OCT 的一大优点是光功率无关性,文中对此进行了实验验证。实验装置如图 8 所示,在激光源和起偏器之间加上一块衰减片,通过调节衰减片可调整光源输出光强。

电流设置为额定电流 300 A,此时光斑旋转角为 35.2°。调节衰减片,使输出光强分别为原始光强的 50%,70%和 90%,结果显示光斑旋转角没有变化,说明光功率变化不影响测量结果。

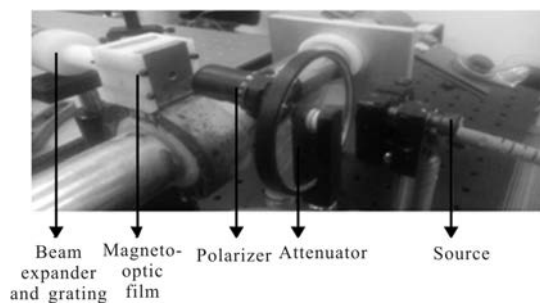


图 8 光功率无关性验证实验

Fig.8 Verification experiment for optical power independence

2.4 线性双折射的影响

文中采用的 Bi-Gd-YIG 磁光薄膜厚度为 220 μm,其固有线性双折射低于 0.01 (°)/cm。额定电流时磁光薄膜的固有线双折射误差约为 0.000 005%,可以忽略不计。

2.5 温度的影响讨论

四象限探测器存在暗电流温漂问题,但其四个光电二极管由同一个光敏面切割而成,具有相同的性能,暗电流变化情况基本一致,公式(12)中的分子变化部分可以相互抵消,分母变化部分数值变大,产生的误差很小。径向偏振光栅是温度不敏感器件,理论上该型 OCT 的温漂不大,但需要进一步的定量研究。

3 结论

文中提出了一种基于径向偏振光栅的直通光路式线性 OCT,其技术特点是:(1)由两块导磁板将气隙磁场引出,光路在集磁环外,没有反射棱镜,消除了反射相移;(2)用径向偏振光栅将法拉第旋转角转化为光斑的同步转动,用四象限探测器检测光斑信号,实现了电流的线性测量;(3)测量模式具有光功率无关性,从而避免了光强波动的影响,改善了

OCT 的温漂问题;(4) 采用超薄的磁光薄膜,由磁光器件带来的线性双折射问题可忽略不计;(5) 光路简单、易于组装调试,具有很好的实用性,测量范围为 $\pm 43^\circ$,测量准确度满足 0.2S 级。

参考文献:

- [1] Kucuksari S, Karady G G. Experimental comparison of conventional and optical current transformers[J]. *IEEE Trans Power Del*, 2010, 25(4): 2455–2463.
- [2] Wang Jiaying, Guo Zhizhong, Zhang Guoqing, et al. Experimental investigation on optical current transducer's long-term operation stability [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(6): 37–41. (in Chinese)
- [3] Di Rongguang, Liu Shibing. Research status quo and development of optical current transducer [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 26(8): 98–100. (in Chinese)
- [4] Huang Shize, Guo Qiyi. Simulation of transient characteristics for air gapped core current transformer [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(8): 1719–1723. (in Chinese)
- [5] Wang Zhengping, Kang Chong, Zhang Xueyuan, et al. Research and progress in bulk optical glass electronic current transformers [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2004, 41(11): 41–45. (in Chinese)
- [6] Li Chao, Xu Qifeng. Electromagnetic-thermal coupled analysis of optical current transducer with magnetic concentrator [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(10): 2857–2866. (in Chinese)
- [7] Chen Jinling, Li Hongbin, Liu Yanbing. A novel method to improve the temperature stability of optical current transformer [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(04): 97–101. (in Chinese)
- [8] Xiao Hao, Liu Boyang, Wan Shiwei, et al. Temperature error compensation technology of all-fiber optical current transformer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(21): 91–95. (in Chinese)
- [9] Wei Zhaobin, Xue Ye, Yang Yintang, et al. Compensation method for the saturation of magnetism gathering OCT [J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(3): 6–10+18. (in Chinese)
- [10] Xu Canhua, Xu Qifeng. Research on characteristics of axially symmetric polarized beams with a nanometer subwavelength metal grating[J]. *Appl Phys Express*, 2013, 6(2): 032501.
- [11] Tan Qiao, Xu Qifeng, Xie Nan, et al. An optical voltage sensor based on radial polarization grating [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(1): 158–164.
- [12] Zhang Hui, Chen Yunshan, Geng Tianwen, et al. Study on main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1217002. (in Chinese)
- [13] Chen Yong, Zhu Tianrui, Li Rui. Design and realization of the angle-measurement algorithm of the four-quadrant detector based on the interpolation algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 544–547. (in Chinese)
- [14] Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 2840/8–2007 Instrument transformers—Part 8: Electronic current transformers[S]. Beijing: Standard Press of China, 2007. (in Chinese)