

## 全光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片制作工艺

李建中, 李泽仁, 张登洪, 温伟峰, 田建华, 王荣波

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 根据全光纤电流互感器(FOCT)的光路结构及其工作原理, 分析了  $\lambda/4$  波片的制作效果对 FOCT 的影响, 研究了  $\lambda/4$  波片的制作工艺, 得出了影响波片制作效果的主要因素。通过选择合适的材料和工艺方法, 获得了性能优异的全光纤  $\lambda/4$  波片。试验结果表明: 该方法制作的波片提高了 FOCT 的性能, 使其满足了 0.2S 级测量用电子式电流互感器的准确度要求。

**关键词:**  $\lambda/4$  波片; FOCT; 偏振消光比; 偏振度

**中图分类号:** TP212.14; TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2167-06

## Fabrication of $\lambda/4$ wave plate for fiber optic current transducer

Li Jianzhong, Li Zeren, Zhang Denghong, Weng Weifeng, Tian Jianhua, Wang Rongbo

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The topology and operational principle of fiber optic current transducer (FOCT) were introduced, and the  $\lambda/4$  wave plate affecting the performance of FOCT were analyzed. The fabrication of  $\lambda/4$  wave plate was studied and several factors that affect the fabrication were introduced, according to the analysis, the improved  $\lambda/4$  wave plate that meet the claims is manufactured by using suitable material and method. The experimental results show that the FOCT's measurement precision is improved by using the improved  $\lambda/4$  wave plate, and the FOCT can satisfy the accuracy requirements of the 0.2S class can be satisfied by the FOCT, meeting the requirements of digital substation.

**Key words:**  $\lambda/4$  wave plate; FOCT; polarization extinction ratio; degree of polarization

收稿日期: 2012-12-14; 修订日期: 2013-01-16

基金项目: 中国物理研究院科学技术发展基金(2009B0201013)

作者简介: 李建中(1982-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事光电测试及光纤传感技术方面的研究。Email: jianzhong265@163.com

## 0 引言

电流互感器是电网中最普遍、最基本的高压设备之一,它肩负着两个重要的使命:(一)为电能的计量提供参数,(二)为继电保护提供动作的依据。随着电网的发展,目前广泛使用的传统电磁式电流互感器有着重大缺陷,例如高电压等级时绝缘极为困难、输出为模拟量、磁饱和等,满足不了国内智能电网发展战略的新要求,从而急需开发出一种新型的电流测量装置。国内外研究人员最终把目光集中在数字化的电子式电流互感器上,其中全光纤电流互感器(Fiber Optic Current Transducer, FOCT)极具代表性,其技术是最先进的,是目前电流互感器的主要发展方向<sup>[1-3]</sup>。

国内外有很多单位对 FOCT 展开了深入地研究,但由于其技术难度较大,绝大多数仍停留在理论研究或实验尝试阶段,仅有极个别研制成功。FOCT 的研制方案借鉴了光纤陀螺技术<sup>[4-6]</sup>,它们的光路结构、检测方法、关键技术等内容几乎完全一样,区别仅在于 FOCT 比光纤陀螺多了一种关键器件—— $\lambda/4$  波片,由于无法借鉴较为成熟的光纤陀螺技术,导致该器件成为 FOCT 研制过程中最大的难点之一。

FOCT 一般采用全光纤型的  $\lambda/4$  波片,国内外对其温度补偿方法进行了研究<sup>[7-8]</sup>,但未见具体制作方法的报道。然而,由于该器件存在保偏光纤对轴角度的精密控制和毫米级光纤长度的精确截取这两大制作难点<sup>[8]</sup>,导致其制作效果无法实现最优,常见报道的最优指标仅为消光比 2 dB<sup>[9]</sup>,在波片本身无法达到优异性能的情况下,即使进行温度补偿,也无法满足 FOCT 的要求,导致 FOCT 的准确度无法达到 0.2 S 级(误差低于 0.2%)<sup>[9-10]</sup>。全光纤  $\lambda/4$  波片的两大制作难点是国际上光纤传感领域的共有难题,目前还缺乏完善的制作工艺研究,无有效的解决方法见。因此,该器件成为 FOCT 研制过程中最大的瓶颈。

阐述了全光纤  $\lambda/4$  波片的一种制作及优化方法,并制作出了高性能的波片样品,解决了 FOCT 无法研制成功并达到高准确度测量的瓶颈。实验表明,采用该波片后,FOCT 样机的测量准确度实现了国标中最高 0.2 S 级。

## 1 制作原理及误差分析

FOCT 的结构如图 1 所示,光源输出光经过耦合

器后,先由光纤起偏器起偏,形成一束线偏振光,再被  $45^\circ$  熔接点等分为两束正交的线偏振光,并分别沿保偏光纤的快轴和慢轴传输。依照信号处理单元给出的调制信号,相位调制器对两束正交线偏振光进行同步调制。随后,被调制过的两束光经由光纤延迟线传输至传感单元,经过  $\lambda/4$  波片后,分别转变为左旋和右旋的圆偏振光,并进入传感光纤。在待测电流产生的磁场的作用下,由于 Faraday 效应,传感光纤中的这两束圆偏振光会以不同的速度传输,产生相位差。在由传感光纤端面的反射镜反射后,两束圆偏振光的偏振模式互换,并反方向穿过传感光纤,从而再次和磁场相互作用,使 Faraday 效应产生的相位差加倍。两束圆偏振光通过  $\lambda/4$  波片后,恢复为两个正交的线偏振光,但交换了偏振轴向,并在起偏器处发生干涉。携带相位信息的干涉光信号经由耦合器进入探测器,转化电信号输出,再在后端进行信号处理,最终得到待测电流值。

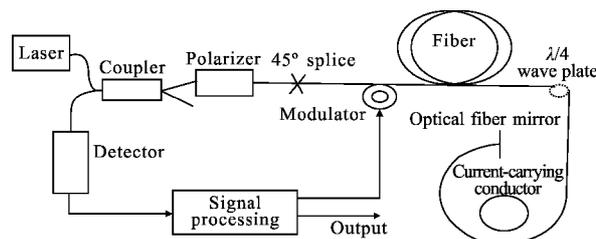


图 1 反射式 Sagnac 型 FOCT 的原理图

Fig.1 Scheme of the reflecting Sagnac FOCT

$\lambda/4$  波片为 FOCT 最关键的器件之一,其作用是将传输线路上的线偏振光转换为用于传感的圆偏振光,从而利用 Faraday 效应进行电流检测。

FOCT 一般采用全光纤型的  $\lambda/4$  波片,其制作原理很简单,由两段保偏光纤以  $45^\circ$  对轴熔接,再截取后端光纤(即波片光纤)的  $1/4$  拍长长度制作而成,但在制作过程中存在两大难点:(一)保偏光纤对轴角度无法精确控制到  $45^\circ$ , 会存在一定的偏差;(二)由于保偏光纤的拍长一般为几毫米(国际上的最高指标也只能达到 20 mm 左右),因此很难精确的截取  $1/4$  拍长长度。两大制作难点使全光纤  $\lambda/4$  波片无法实现理想的性能指标,导致 FOCT 也存在误差,达不到电力系统的计量要求。

两段保偏光纤  $45^\circ$  对接的作用是将前端保偏光纤输入的线偏振光等分为两份(或两个模式)并注入

后端保偏光纤的两个正交轴中。保偏光纤熔接机的对轴准确度主要由马达旋转准确度和 CCD 分辨率决定,在目前国际上的相关产品中,马达旋转准确度一般在  $\pm 0.2^\circ$  左右,CCD 分辨率一般为  $\pm 0.5^\circ$  左右,因此,全自动熔接时的对轴准确度一般低于  $\pm 0.7^\circ$ ,即波片制作时的对轴角度在  $45^\circ$  上存在  $\pm 0.7^\circ$  以上的偏差,使被分开的两束光(模式)不等量,导致经波片转化后的圆偏振光的圆度不好,从而严重影响了波片及 FOCT 的性能。

截取后端保偏光纤  $1/4$  拍长长度的作用是使两个等量模式产生  $\pi/2$  的相位延迟,其原理如下所述,由于存在双折射,偏振光在保偏光纤中传输时,其两个模式之间的相位延迟为:

$$\delta = (2\pi/Lp) \cdot z \quad (1)$$

式中: $Lp$  为保偏光纤的拍长; $z$  为截取光纤的长度,可知  $z$  必须精确的等于  $Lp/4$ , 才能满足  $\delta = \pi/2$  的要求,即才能制成理想的  $\lambda/4$  波片(理论上也可截取  $3/4$  拍长长度,即相位延迟为  $3\pi/2$ ,但波片光纤越长就越容易受外界环境干扰),可将输入的线偏振光转化为理想的圆偏振光。当存在截取长度误差时,两个模式之间的相位延迟会偏离  $\pi/2$ , 即无法将输入光转化为理想的圆偏振光,而被转化成椭圆偏振光,导致波片性能退化。

光纤非常细且韧性较强,只能使用专用的光纤切割刀,才能保证截断后的光纤具有平滑且清洁的端面,从而可以和其他光纤进行熔接。光纤切割刀包含一个专用刀片、一个特定的夹具(夹持住光纤,以便切割)和其他一些附属部件。波片光纤的起始点为一个熔接点,困难的是,熔接点处于光纤内部,在光纤外部很难辨识出熔接点并确定其位置,起点未知,从而不能使用精密工具对波片光纤进行长度测量并将该长度对应的位置放于刀片正上方以进行切割。此外,切点处的一小段光纤是悬空放置的,量长度或移动光纤时会让光纤轻微晃动,产生长度测量误差或移动长度误差。

综上所述,很难使波片光纤  $1/4$  拍长长度对应的位置精确的处于刀片正上方,其偏差  $\varepsilon$  与波片性能的关系为:

$$\delta' = (2\pi/Lp) \cdot (Lp/4 + \varepsilon) = \pi/2 + (2\pi/Lp) \cdot \varepsilon \quad (2)$$

$$\Delta\delta = (2\pi/Lp) \cdot \varepsilon \quad (3)$$

目前,国内外均未见报道过能有效降低截取长

度误差的方法,在制作全光纤波片时,大多凭操作者的经验进行尝试性的操作,偏差较大,假设偏差  $\varepsilon$  为  $0.2\text{ mm}$ (对于目前采用的常规方式,该值已是极低的截取长度误差了),且使用最长拍长的保偏光纤,以目前市面上的最高指标  $20\text{ mm}$  为例,可得:

$$\Delta\delta = (2\pi/20) \cdot 0.2 = 0.0628 = 3.6^\circ \quad (4)$$

即相位延迟偏离  $\pi/2(90^\circ)$  了  $3.6^\circ$ ,偏离了理想值的  $1/25$ ,使波片性能退化并造成了 FOCT 较大的测量误差。

## 2 制作及优化方法

针对目前制作全光纤  $\lambda/4$  波片时的难点,文中提出了一种优化方法及装置,如图 2 所示,所需器材包含保偏光纤、SLED 光源、光纤起偏器、偏振分析仪和保偏光纤熔接机。

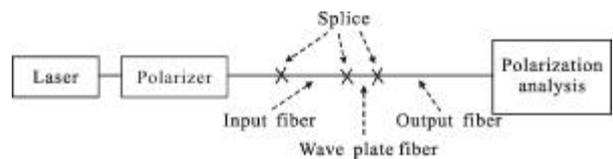


图 2 全光纤  $\lambda/4$  波片的制作装置

Fig.2 Fabrication of  $\lambda/4$  wave plate

将光源输出光经过光纤起偏器起偏,生成一束线偏振光,作为制作波片时用于监测的信号光。

将起偏器尾纤与波片输入端光纤(均为保偏光纤)分别放入两个光纤夹具中,采用半自动熔接方式在保偏光纤熔接机里初步对准,波片输入端光纤的另一端接入偏振分析仪,对传输光的偏振消光比(PER)和偏振度(DOP)进行实时检测,调节熔接机的马达,手动旋转波片输入端光纤,当传输光的 PER 和 DOP 均达到最大值时,进行放电熔接,即精确的实现了轴熔接。该结论的依据是,只有两段保偏光纤的快慢轴达到了精确对准,传输光的 PER 和 DOP 才能全部达到最大值,即熔接点后的传输光才能无损失的保持住输入光的偏振态。

将波片输入端光纤与波片光纤进行  $45^\circ$  熔接,操作流程为:将两段光纤分别放入两个光纤夹具中,采用半自动熔接方式在保偏光纤熔接机里初步对准,波片光纤的另一端则接入偏振分析仪,对传输光的 PER 和 DOP 比进行实时检测,调节熔接机的马达,手动旋转波片光纤,当传输光的 PER 达到最小值且

DOP 达到最大值时,进行放电熔接,即精确的实现了  $45^\circ$  熔接。该结论的依据是,当两段保偏光纤的轴向旋转  $45^\circ$  对准时,传输光被等分为两份,总的 PER 达到最小值(一般接近零),但 DOP 不变。波片光纤为保偏光纤,一般为椭圆纤芯型(该类型不仅具有弯曲及扭曲不敏感的特性,温度依赖性也非常低),此外,应尽量选择长拍长的光纤,以降低制作难度。

截取波片光纤的  $1/4$  拍长长度,操作流程为:将波片输入端光纤、 $45^\circ$  熔接点与波片光纤组成的光纤段从熔接机中取出(不松开光纤夹具),以光纤夹具的外沿为起点(并非通常的以波片光纤的起始点即  $45^\circ$  熔接点为起点),用游标卡尺(一般选择 50 个分格的卡尺)在夹具(而非光纤)上量好所需的  $1/4$  拍长长度,再以夹具外沿为准,将光纤段在夹具上整体向波片输入端光纤的方向移动所量长度,然后将夹具夹持住的光纤段放入光纤切割刀中,即可将所需截取长度的切割点精确的放置于刀片正上方,这样,切割后的新光纤段就包含有波片输入端光纤、 $45^\circ$  熔接点和仅剩  $1/4$  拍长长度的波片光纤。

进行测试,即将波片光纤接入偏振分析仪,对传输光(此时已被转化为圆偏振光)的 PER 和 DOP 进行检测,当 PER 低于 2.0 dB 且 DOP 高于 95% 时(圆偏振光的特性),即可认为制作出了理想的全光纤  $\lambda/4$  波片,否则重复上述步骤。

将波片光纤和波片输出端光纤进行熔接,其中输出端光纤为能够传输圆偏振光的低双折射光纤或单模光纤,因此该熔接点为普通光纤的熔接,采用熔接机的普通熔接方式即可满足要求。

将波片输入端光纤前的熔接点切断,如图 3 所示,输入端光纤、波片光纤、输出端光纤、 $45^\circ$  熔接点和普通光纤熔接点组成了一个包含尾纤的、完整的全光纤  $\lambda/4$  波片。此外,制作好的波片还可采用一定的措施加以保护,以降低其对外界环境变化的敏感性。

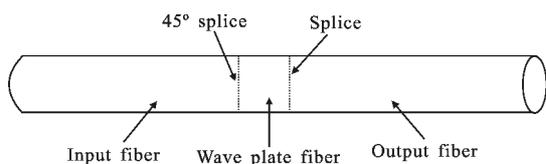


图 3 全光纤  $\lambda/4$  波片的完整结构

Fig.3 Structure of the  $\lambda/4$  wave plate

上述制作方法的创新点及其优势如下:

(1) 放弃熔接机的全自动熔接方式,即放弃通过 CCD 分辨光纤图像来判断快慢轴的传统方式,而采用文中所述的熔接方式后,通过偏振分析仪的测试值来判断快慢轴,可使对轴准确度大幅提高到  $0.2^\circ$  (依靠熔接机自身的发展,该指标还有较大的提升空间),即熔接机马达本身的旋转准确度,而消除了 CCD 较低的分辨率对光纤对轴的负面影响,从而使对轴误差大幅低于目前的制作水平。此外,文中采用的熔接方式通用于任意类型的保偏光纤,改进了全自动熔接方式的熔接程序有限,无法对特殊类型的保偏光纤(制作波片时可能涉及到)进行熔接的缺陷,同时还解决了更换保偏光纤类型后必须更换熔接程序的弊端,提高了熔接效率。

(2) 对熔接效果及波片性能的验证,不仅采用了检测 PER 的传统方式,还同时对 DOP 进行检测,通过对比验证来提高熔接质量。此外,全光纤  $\lambda/4$  波片输出光的 PER 最低时,即可表征两端光纤主轴  $45^\circ$  对准且输出光为圆偏振光,也可表征输出光为非偏振光即器件完全制作失败,从而通过 DOP 对比验证后,还可以解决仅凭 PER 一项参数无法真正证明波片制作效果的弊端。

(3) 在熔接保偏光纤时,放弃了目前通常采用的熔接机熔接好后再用偏振分析仪检测的被动检测方式(弊端在于检测效果不理想时需要切断光纤熔接点并重新熔接),而在调节马达旋转光纤轴向时就用偏振分析仪进行实时监测,测试值达到要求后才放电熔接,这种主动检测方式的优势在于光纤熔接时的调试、优化及重新制作都更灵活,测试值不理想时仅需继续旋转两端光纤轴向,从而提高了波片的制作效率。

(4) 对于波片光纤  $1/4$  拍长长度的截取,采用所述方法后,解决了无法确定波片光纤起始位置(即截取长度的起点)导致的无法确定切割点精确位置(波片光纤上离起始点  $1/4$  拍长长度的点)的问题。利用 50 个分格的游标卡尺将截取长度误差控制在  $0.02\text{ mm}$  左右,远高于目前的制作水平。此外,目前国内外均未见报道过能有效降低长度误差的截取方法,大多凭操作者的经验,通常需要尝试数次后才能有一次效果较好,效率很低,而文中的截取方法及装置简单可靠,具有非常好的可操作性及重复性,可一次完成,提高了制作效率。

### 3 实验结果

利用文中所述的方法,在实验室内制作了一批全光纤  $\lambda/4$  波片,其中输入端光纤选用熊猫型保偏光纤,波片光纤选用椭圆纤芯型保偏光纤,输出端光纤选用低双折射光纤,制作好的波片的指标为:偏振消光比均小于 1.0 dB 且偏振度均大于 96%。

利用自制波片研制了 FOCT 样机,如图 4 所示,其中选择的元器件为 SLED 光源、PIN-FET 光探测器、直波导光学相位调制器和全光纤起偏器。

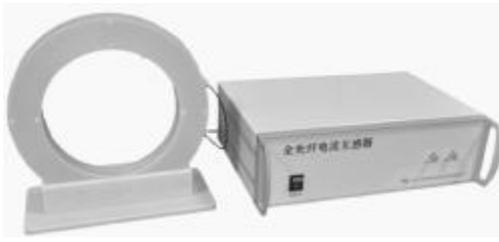


图 4 研制的 FOCT 样机

Fig.4 Outside view of fiber optical current transducer

采用大电流发生器(交流,有效值 0~5000 A, 50 Hz)作为测试电流源,并以 0.01 级(误差低于 0.01%)的标准电流互感器为基准,按照国标要求,搭建了一套准确度校检系统,以之校检 FOCT 样机的测量准确度。

同时加载交流电流(有效值 70.7 A)和直流电流(有效值 100 A,约等于交流电流的峰值),两者叠加,样机的数字输出如图 5 所示。图 5 中交流信号向上偏移了一个直流分量,且该偏移量等于交流信号的峰值,这与所加载的交流 and 直流的数值相吻合。

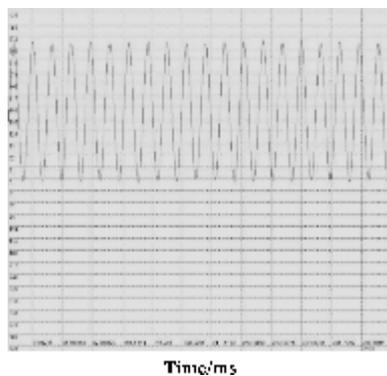


图 5 样机数字输出同时加载交流电流和直流电流

Fig.5 FOCT's output with AC and DC current

样机额定一次电流值  $I_{pr}$  为 100~4000 A,根据国

标要求,在  $I_{pr}$  的 1%~120%范围内,实测电流值  $i_{测}$  的测量误差如表 1 所示,其中标准电流值 Real current  $i_{标}$  指 0.01 级标准电流互感器对待测电流进行检测得到的电流值(为有效值,误差低于 0.01%),单位为 A;样机解调信号的数字输出 Digital outputs 指样机对待测电流进行解调后输出的数字量;样机解调出的电流值 Demodulated current  $i_{解}$ ,指样机解调信号的数字输出乘以一个固定变比得到的数值,表征解调输出的电流值(有效值),单位为 A;电流误差 Error 为  $i_{标}$  和  $i_{解}$  之间的误差。

根据表 1 的数据,可得到全量程范围内的误差曲线,如图 6 所示,可以直观的看出在全量程范围内的实测误差均满足 0.2 S 级测量准确度的要求。

表 1 测试点及各点的误差

Tab.1 Experimental result of the sensor

Real current /A	Digital outputs	Demodulated current/A	Error
4 711.470 1	7 019.560 36	4 710.055 29	-0.03%
3 996.705 2	5 953.198 98	3 994.537 40	-0.05%
3 502.755 4	5 219.715 32	3 502.377 14	-0.01%
2 983.418 8	4 446.383 57	2 983.479 22	0.00%
2 518.409 5	3 753.317 24	2 518.438 59	0.00%
2 030.776 3	3 027.587 87	2 031.481 39	0.03%
1 511.867 9	2 252.214 04	1 511.213 25	-0.04%
1 029.537 6	1 533.229 63	1 028.781 86	-0.07%
798.251 8	1 188.498 56	797.470 73	-0.10%
604.257 7	899.946 69	603.855 29	-0.07%
400.582	596.689 81	400.372 94	-0.05%
215.436 2	321.096 88	215.452 82	0.01%
110.488 4	164.762 52	110.554 01	0.06%
92.162 2	137.440 66	92.221 32	0.06%
78.884 9	117.634 31	78.931 45	0.06%
62.204 4	92.718 69	62.213 32	0.01%
48.583 1	72.516 52	48.657 86	0.15%
41.710 6	62.056 07	41.639 00	-0.17%
31.867 4	47.566 37	31.916 56	0.15%
23.181 8	34.504 59	23.152 24	-0.13%
10.123 5	15.045 89	10.095 64	-0.28%
5.251 6	7.849 98	5.267 26	0.30%
1.028 9	1.542 79	1.035 20	0.61%

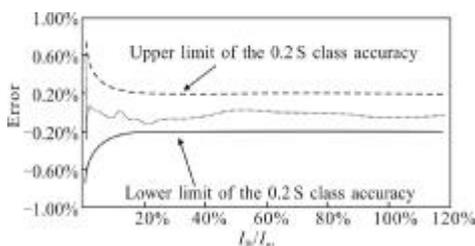


图 6 FOCT 误差曲线

Fig.6 Curve of FOCT's scale factor error

## 4 结论

文中通过一系列的优化措施,解决了目前国内外在制作全光纤  $\lambda/4$  波片时的两大难点——保偏光纤对轴角度的精密控制和毫米级波片光纤  $1/4$  拍长度的精确截取,为制作全光纤  $\lambda/4$  波片和研制满足应用要求的 FOCT 样机奠定了基础。

采用文中所述的方法制作全光纤  $\lambda/4$  波片并实际应用于研制的 FOCT 样机后,经测试,样机在额定一次电流 100~4 000 A 范围内均实现了 0.2 S 级测量准确度。

## 参考文献:

- [1] Bohnert K, Gabus P, Brandle H. Fiber-optic DC current sensor for the electro-winning industry [C]//17th Int Conference on Optical Fiber Sensors Burges Belgium, 2005.
- [2] Wang Jingfei, Liang Jingwei, Dong Qianmin, et al. Study of sensing coil errors in in-line sagnac interferometer current transducer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48, 102303: 1-6. (in Chinese)  
王景飞, 梁京伟, 董前民, 等. 反射式 Sagnac 干涉光纤电流互感器的传感头误差研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48, 102303: 1-6.
- [3] Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, et al. Influence of SLD's power attenuation on scale factor of closed-loop fiber optic current transformer [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2458-2461. (in Chinese)  
张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 光源功率衰减对闭环光纤电流互感器变比影响研究 [J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2458-2461.
- [4] Shu Jiantao, Li Xuyou, Wu Lei, et al. Vibration error restrain technology for high-precision fiber optic gyroscope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2201-2206. (in Chinese)  
舒建涛, 李绪友, 吴磊, 等. 高精度光纤陀螺振动误差抑制技术 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2201-2206.
- [5] Li Min, Song Ningfang, Zhang Chunxi, et al. Dynamic characteristics test of fiber optic gyroscope based on cross-correlation identification [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 723-727. (in Chinese)  
李敏, 宋凝芳, 张春熹, 等. 采用相关辨识的光纤陀螺动态特性测试方法 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 723-727.
- [6] Wang Weiqiang, Liu Jun, Lu Jun. Technology of time division multiplexing closed-loop control for three-axis fiber optic gyroscopes [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2195-2200. (in Chinese)  
王维强, 刘军, 鲁军. 三轴光纤陀螺的分时复用闭环控制技术 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2195-2200.
- [7] 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.
- [8] Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, et al. Temperature compensation methods of  $\lambda/4$  wave plate for fiber optic current sensor [J]. Transactions Of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 55-59. (in Chinese)  
张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 光纤电流互感器  $\lambda/4$  波片温度误差补偿 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 55-59.
- [9] Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Chaoyang, et al. Research on temperature characteristic of quarter-waveplate and its effect on fiber optical current transformers [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(7): 596-603. (in Chinese)  
王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 光纤电流互感器  $\lambda/4$  波片温度特性及其影响研究 [J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 596-603.
- [10] Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, et al. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 42-46. (in Chinese)  
张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 42-46.