

全光纤电流互感器传感头的设计、制作及封装工艺

李建中, 李泽仁, 田建华, 雷江波

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 商用化的全光纤电流互感器(FOCT)的误差一般要求小于0.2%,传感头是决定该类传感器测量准确度的关键因素。论述了FOCT的光路结构、工作原理及研制难点,分析了传感头对FOCT性能的影响,并对传感头的设计、制作及封装制作工艺进行了深入研究。通过选择合适的材料和工艺方法,可避免各种负面效应对FOCT的不利影响,获得具备优异的环境适应性、可靠性和稳定性的传感头,试验结果表明,通过该方法实际制作出的传感头提高了FOCT的性能,使其满足了0.2 S级测量用电子式电流互感器的准确度要求。

关键词: 全光纤电流互感器; 传感头; 线性双折射; $\lambda/4$ 波片

中图分类号: TP212.14; TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2143-07

Design, fabrication and encapsulation of sensing head for Fiber Optic Current Transducer

Li Jianzhong, Li Zeren, Tian Jianhua, Lei Jiangbo

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

Abstract: The error of commercial Fiber Optic Current Transducer (FOCT) must be less than 0.2%, the sensing head is a key factor for high-accuracy current sensing. The topology, operational principle and difficulties of fiber optic current transducer were introduced, and the sensing head affecting the performance of fiber optic current transducer was analyzed. The design, fabrication and encapsulation of sensing head were studied. The improved sensing head that can avoid all kinds of negative effects was manufactured by using suitable material and method, which has excellent environment adaptability, reliability and stability. The experimental results show that the measurement precision of fiber optic current transducer is improved by using the improved sensing head, and the FOCT can satisfy the accuracy requirements of the 0.2 S class measuring electronic transducer, meeting the requirements of digital substation.

Key words: FOCT; sensing head; linear birefringence; quarter wave plate

收稿日期: 2014-11-13; 修订日期: 2014-12-09

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2013B0403059)

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

电流互感器作为输电网络中最重要的设备之一,为电能计量和继电保护提供测量参数和动作依据。在输电网络快速发展的背景下,常用的电磁式电流互感器出现了重大的缺点,例如高压时绝缘困难、模拟输出、动态范围有限等,不能满足输电网络的发展要求,因此需要一种新型的电流测量技术以及实用化的装置。近年来,随着相关技术的发展,全光纤电流互感器(Fiber Optic Current Transducer, FOCT)成为目前最先进的一种电流测量技术,可以较好地解决传统互感器存在的多个问题,代表了该领域的发展趋势^[1-3]。

国际上目前有大量的机构研究 FOCT 技术并研制样机,但因为较高的难度,只有个别单位能够研制出满足高准确度测量要求的样机。

FOCT 的技术基础来源于较为成熟的光纤陀螺^[4-6],两者的关键内容基本相同,区别仅为 FOCT 最关键的部件——感应待测电流信息的传感头是光纤陀螺不具备的。由于无法从光纤陀螺的研究经验中得到参考,导致传感头成为 FOCT 的技术瓶颈。

FOCT 传感头包含光纤传感部分及其封装保护装置,其中光纤传感部分包含全光纤 $\lambda/4$ 波片、传感光纤、光纤端面反射镜等多个光纤器件。FOCT 的最大难点是传感头中传感光纤的线性双折射效应,以及传感光纤 Verdet 常数和光纤 $\lambda/4$ 波片相位延迟的温度效应,这些负面效应会严重影响 FOCT 的性能,导致其准确度不能实现 0.2 S 级^[7-9](误差小于 0.2%)。对于满足实际应用要求的传感头,以及能够综合解决各种负面效应的设计、制作及封装方法,目前仍然是国内外的共有难题。

描述了 FOCT 传感头的一种设计、制作及封装方法,可以避免各种负面效应的不利影响,并采用该方法制作出了样品,使所研制的 FOCT 样机可以实现高准确度测量。利用上述传感头后,实验显示,所研制的 FOCT 样机达到了国标中最高 0.2 S 级测量准确度,并具有优异的测量稳定性。

1 基本原理及存在问题

FOCT 的光路如图 1 所示,激光器输出足够功率

的光信号,通过耦合器(或环形器)和起偏器后成为一束线偏振光。光路中存在一个 45° 熔接点,将上述线偏振光均等地分割成相互正交的两束线偏振光,并沿保偏光纤的快慢轴分别传输。两束相互正交的线偏振光被光纤相位调制器调制后,经由一定长度的保偏光纤传输到传感头,并被全光纤 $\lambda/4$ 波片分别转化成左旋圆偏振光和右旋圆偏振光。由于法拉第效应,传感光纤中传输的两束圆偏振光在电流所致磁场的作用下,将会产生一定的相位差(与电流的大小成比例)。经过传感头内部的反射镜后,上述的两束圆偏振光将会互换偏振模式并反向传回传感光纤,在磁场的作用下使法拉第效应导致的相位差增大一倍。两束正交的圆偏振光反向传输到 $\lambda/4$ 波片,被该器件重新转换成相互正交的两束线偏振光(但偏振轴向互换),然后回到光纤起偏器并产生干涉。干涉信号中携有待测电流所致的相位信息,通过光电转换和信号处理后,可得到待测电流的具体数值。

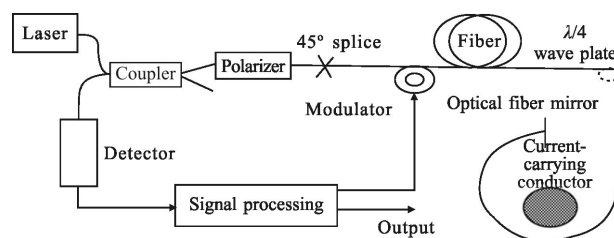


图 1 反射式 Sagnac 型全光纤电流互感器的原理图

Fig.1 Scheme of the reflecting Sagnac FOCT

FOCT 的传感头包含光纤传感部分及其外部的封装保护装置,其中光纤传感部分包含全光纤 $\lambda/4$ 波片、传感光纤(一般为低双折射光纤或单模光纤)、光纤端面反射镜等全光纤器件,绕制在一个骨架上,用于感应电流信息,外部装置则由绝缘材料制作而成,用于封装和保护光纤传感部分(全光纤器件极易损坏,不能长期暴露在空气中)。FOCT 的最大难点是光纤传感部分中传感光纤的线性双折射效应(产生一个与 Faraday 效应难以区分的误差信号),以及传感光纤 Verdet 常数和光纤 $\lambda/4$ 波片相位延迟的温度效应(测值不稳定,随温度波动),这些负面效应会严重影响互感器的工作性能,使其无法满足实际应用的需求。

传感光纤的线性双折射会造成偏振光偏振面的旋转,产生一个与电流 Faraday 效应无法区分的误差信号,对 FOCT 的性能造成严重影响,这是 FOCT 一

直难以实用化的关键原因之一。线性双折射不仅可由光纤本身固有的特性引起,还会由温度、外应力、弯曲等外界因素引起,且消除线性双折射较为困难。根据已有研究,最有效的方法是在传感光纤中引入大量的圆双折射,以抑制线性双折射,具体措施是在一个环形传感骨架上螺旋缠绕传感光纤,如图2所示(仅为操作方法的示意图,便于理解具体的绕制方式,在实际制作传感头时,传感光纤应紧贴骨架绕制),该方法不仅可以加入大量的圆双折射,且加入的圆双折射不易随温度变化或时间推移而改变,具备较好的稳定性和可靠性。

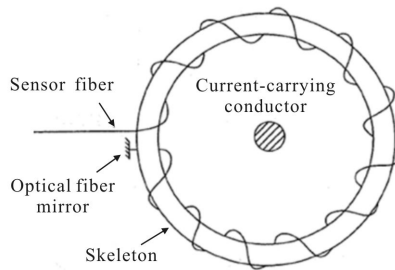


图2 用于绕制光纤传感部分的骨架

Fig.2 Sensing skeleton of FOCT

传感光纤的 Verdet常数是衡量其 Faraday 效应的主要参数,它与 FOCT 的变比成正比,而 Verdet 常数是温度的函数。光纤 $\lambda/4$ 波片相位延迟的误差(与标准值 $\pi/2$ 相比)会使 FOCT 的尺度因子随之变化,导致输出不稳定,降低了测量准确度,使其达不到国标要求的 0.2 S 级,严重时甚至会导致互感器输出的数据无效。光纤 $\lambda/4$ 波片的相位延迟也是温度的函数,此外,如果波片受到应力作用,也会对其相位延迟产生影响。

综上所述,要研制成功 FOCT,并达到满足国标要求的测量准确度,以及长期应用时的可靠性和稳定性,必须设计并制作出能解决线性双折射、Verdet 常数温度效应、光纤 $\lambda/4$ 波片相位延迟温度效应等关键问题的传感头。

2 实施方法

针对所述难点,提出一种新型的 FOCT 传感头,能有效解决目前存在的各种负面效应,其具体设计、制作及封装方法如下所述。

加工制作传感骨架,用于绕制光纤传感部分。骨

架采用石英玻璃制作,为环形结构,横截面为圆形,表面光滑,如图2所示,可采用光学加工、机械加工或其他方式进行制作,其结构简单,制作较为容易。

加工制作传感头的下盖和上盖,用于封装和保护光纤传感部分。下盖为环状结构,其外形和具体结构如图3所示,大小与传感骨架相匹配:内表面加工有一个环状凹槽,凹槽的外径大于环形传感骨架的外径,内径小于骨架内径,深度大于骨架横截面直径的 $1/2$,并沿圆周方向相同距离处均匀加工有数个相同规格的卡槽。下盖的外表面上加工有数个用于固定连接的螺纹孔。上盖的外形和结构与下盖基本一致,区别仅在于多了一个内含引线孔的引线头(如图3所示),引线孔的内径与保偏光缆的外径一致,一般为 3 mm 或 0.9 mm。传感头上、下盖的制作材料为尼龙、铝合金、绝缘橡胶等绝缘材料,采用机械加工或其他方式制作,其结构简单,制作较为容易。

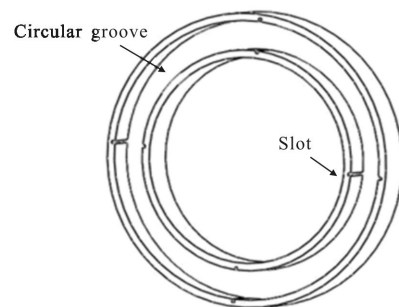


图3 传感头下盖的外形和具体结构

Fig.3 Structure of the lid of the sensing head

加工制作底座,用于放置传感头。底座的结构如图4所示,其上表面加工有一个圆弧形凹槽,尺寸

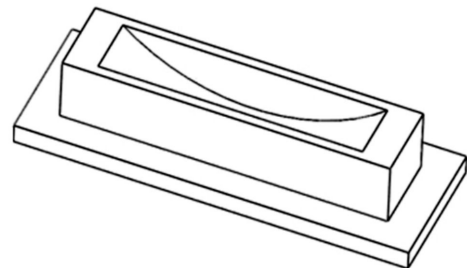


图4 传感头底座的外形和具体结构

Fig.4 Structure of the base of the sensing head

与传感头下盖相匹配:凹槽的弧度与下盖的弧度一致,宽度为下盖厚度的两倍,最大深度无严格的限制,超出传感头下盖外径的 $1/10$ 即可,便于放置封

装好的下盖和上盖。底座的具体形状及外部尺寸并无限制,可根据实际应用情况随意调整,其制作材料为尼龙、铝合金、绝缘橡胶等绝缘材料,采用机械加工或其他方式进行制作。

加工制作卡具。卡具外形如图 5 所示,其大小与传感骨架环状凹槽的卡槽相匹配;卡具厚度与卡槽的宽度一致,长度为卡槽长度的 1/2,高度为卡槽深度的 2 倍,内侧开口大小与传感骨架的横截面外径一致。由于其独特形状,两个卡具可配套使用,相互契合,共同构成一组完整的卡具套件,用于固定传感骨架。卡具的制作材料为尼龙、铝合金、绝缘橡胶等绝缘材料,可与传感头上、下盖的制作材料相同,采用机械加工或其他方式进行制作,其结构简单,制作较为容易。

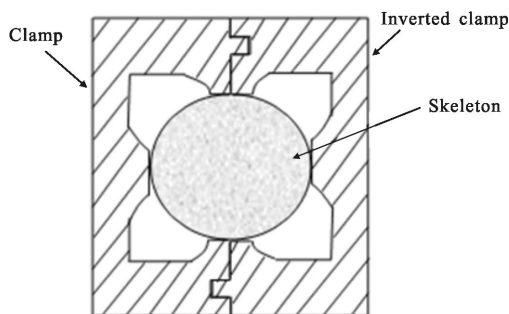


图 5 卡夹具和传感骨架的示意图

Fig.5 Clamp and skeleton of the sensing head

熔接光纤传感部分,并绕制在传感骨架上。传感光纤、全光纤 $\lambda/4$ 波片和光纤端面反射镜熔接在一起,构成了 FOCT 的光纤传感部分,再将整个光纤传感部分套进石英细管中加以保护,并如图 2 所示,采用螺旋缠绕的方式,均匀并紧贴绕制在传感骨架上,缠绕圈数和各圈的具体位置并无限制,从而传感光纤的长度可随意调整。

熔接光纤传感部分和用于传输传感信号的保偏光缆,从上盖的引线头中引出,并将光缆外部的保护套和引线孔用胶进行粘贴,以固定光缆。

装配传感头。将绕制有光纤传感部分的传感骨架放置于下盖(或上盖)的凹槽中,并在卡槽处通过卡具固定(固定方式如图 5 所示),绕制的光纤传感部分从骨架和卡具之间的小孔中穿过,从而可以利用卡具在卡槽处同时固定传感骨架和光纤传感部分。用上盖(或下盖)盖住下盖(或上盖),进行整体封装,并在螺孔处用螺钉进行固定,最后放置于传感头底

座上,如图 6 所示。

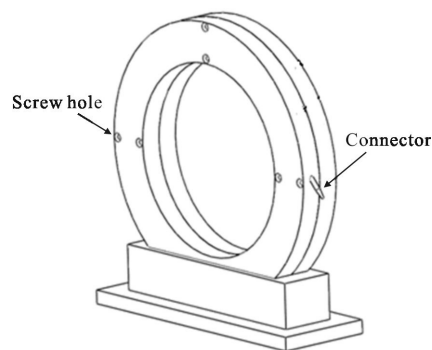


图 6 FOCT 传感头的整体结构

Fig.6 Overall structure of FOCT sensing head

所述方法通过一系列优化措施,能够消除或大幅度降低线性双折射、Verdet 常数温度效应、光纤 $\lambda/4$ 波片相位延迟温度效应等各种负面效应对系统的不利影响,解决了目前国内外在设计与制作 FOCT 传感头时的难点,为成功研制满足应用要求的 FOCT 奠定了基础。

优点一,传感骨架和光纤传感部分需加以固定,以避免传感头内部部件和光纤传感部分发生晃动,从而降低 FOCT 的稳定性和可靠性,目前通常使用胶进行粘贴固定,但该方式存在较大的弊端,严重影响 FOCT 性能:传感光纤在粘贴点受到应力,产生线性双折射效应并降低测量准确度;光纤、骨架、胶等材料的热膨胀系数不一致,温度变化时会使传感光纤再次受到应力作用,产生额外的线性双折射效应并降低了温度适应性;长期使用过程中胶的粘性会退化,降低了可靠性。文中采用特制卡具,不仅可以在凹槽中固定传感骨架,还可以固定光纤,该固定方式稳定可靠,避免了用胶固定光纤的种种弊端。

优点二,目前通常使用的传感骨架(一般采用金属材料制作)的热膨胀系数与光纤不一致,当外界温度变化时,骨架热膨胀系数过大(向外挤压光纤)或过小(光纤环在骨架上变松并悬空)均会对 FOCT 的性能产生不利影响,文中采用石英玻璃制作传感骨架,该材料与光纤的热膨胀系数一致,可大大增强 FOCT 在外界温度变化时的环境适应性和测量稳定性。

优点三,现有方法制作的传感头,由于骨架形状和沟槽位置的因素,光纤传感部分只能采用平面渐开螺旋的方式,沿圆周方向放置于环形骨架上的沟槽中,该骨架及光纤绕制方式无法有效地降低光纤

传感部分受线性双折射的负面影响,文中采用无沟槽的环形传感骨架(横截面为圆形),并采用螺旋缠绕的方式绕制光纤传感部分,可大幅度增大光纤传感部分的圆双折射,以之降低甚至消除线性双折射的负面影响,提升 FOCT 的性能。

优点四,随应用场合的不同,传感头的额定工作电压并不一致,传感光纤长度必须随之进行适当调整,传统方式制作的传感头,传感光纤的总长度与沟槽长度匹配,其值固定,无法实时调整,文中采用无沟槽的环形传感骨架,光纤传感部分螺旋缠绕在骨架上,没有缠绕圈数和各圈具体缠绕位置的限制,从而传感光纤的长度可实时调整,直至满足额定工作电压的要求。

优点五,传感头的引线部分使用保偏光缆,具备较大优势:保护套可以保护光纤,避免光纤被意外折断,并降低光纤被空气腐蚀氧化的程度;便于装配,降低了传感头的制作难度;降低传感信息传输过程中受外界干扰的影响程度。

优点六,裸光纤在绕制时容易折断,降低了传感头的制作效率,采用石英细管(热膨胀系数与光纤一致)保护,可降低绕制难度,增大传感头的制作效率。

优点七,上盖、下盖、底座、卡具、传感骨架等机械部件的结构简单,加工制造难度小,便于批量生产。

优点八,上盖和下盖将光纤传感部分较好地进行了密闭封装,增强了光纤传感部分与外界环境的温度隔离性,降低了传感头受外界环境因素(尤其是温度)的干扰程度。

3 实验结果

根据文中所阐述的方案,制作了数个 FOCT 传感头样品,并利用该传感头研制了一套 FOCT 样机,如图 7 所示。

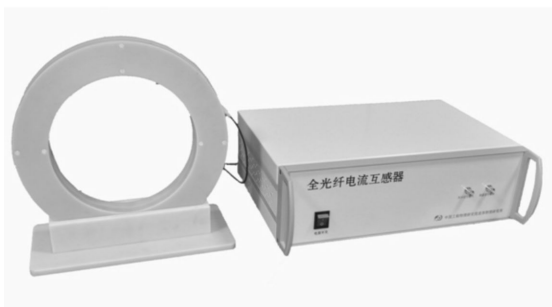


图 7 自研 FOCT 样机的实物图

Fig.7 Outside view of FOCT

根据国家标准的规定,设计了一套电流互感器的准确度检验装置^[9],其关键部件主要包括大电流源和标准电流互感器,前者可以产生 0~5 000 A(RMS)的 50 Hz 电流,后者具备 0.01 级(误差小于 0.01%)的基准准确度。

首先检测样机的模拟输出及其波形质量。电流信息经样机检测后,其模拟输出可接入数据采集卡并在采集卡自带的软件上显示(也可在示波器上显示),以表征电流信息,如图 8 所示,所加载的交流电流为有效值 100 A,可见解调出的电流信号波形质量较好,信噪比高、正弦特征明显且峰值稳定。

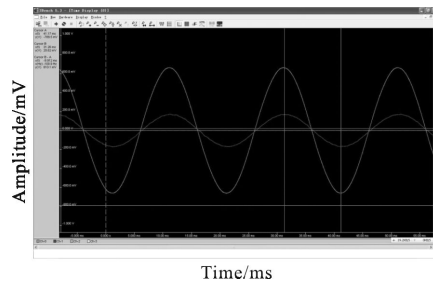


图 8 加载交流电流时的样机模拟输出

Fig.8 FOCT's analog output with AC current

其次检测样机的数字输出及其波形质量。加载 100 A 的直流和有效值 70.7 A 的交流(峰值约等于 100 A),交直流叠加后,图 9 所示信号即为 FOCT 样机的数字输出。从图 9 中的电流信号可看到,交流信号(表征交流电流)具有一个大小约等于其峰值的直流偏置量(表征直流电流),与电流源加载的交直待测电流的大小完全吻合。

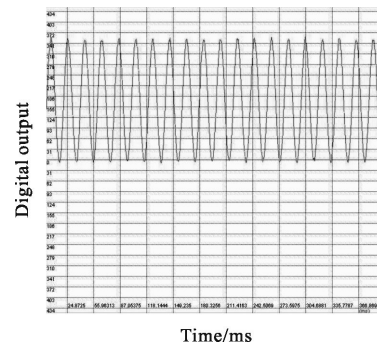


图 9 加载交直流时的样机数字输出

Fig.9 FOCT's digital output with AC and DC current

最后检测样机的测量准确度。额定一次电流拟设定为 100~4 000 A,在其 1%~120%范围内的实测

数据如表 1 所示。Real current 为标准电流互感器检测得到的电流值 (误差小于 0.01%, 可作为基准), Digital outputs 为样机在检测待测电流后输出的数字量, Demodulated current 为 Digital outputs 乘以一个系数(样机的特征参数, 固定值)得到的数值 (表征样机检测得到的电流值), Error 为 Demodulated current 以 Real current 为基准计算得到的测量误差。

利用表 1, 可获得 1%~120%范围内的线性曲线和误差曲线, 如图 10 所示和图 11 所示, 可以直观地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, 且线性度较好。

表 1 传感器测试结果

Tab.1 Experimental result of the sensor

Real current /A	Digital outputs	Demodulated current/A	Error
4 826.352 9	7 193.694 6	4 827.688 4	-0.03%
4 003.803 6	5 963.367 9	4 002.016 2	0.04%
3 511.623 7	5 230.895 0	3 510.453 6	0.03%
2 999.514 9	4 471.136 2	3 000.579 5	-0.04%
2 506.169 7	3 732.365 1	2 504.790 2	0.06%
2 009.886 1	2 995.236 6	2 010.103 3	-0.01%
1 503.311 3	2 239.213 7	1 502.736 3	0.04%
1 006.769 3	1 499.976 4	1 006.634 2	0.01%
789.364 5	1 176.236 9	789.372 6	0.00%
596.796 4	889.136 7	596.699 6	0.02%
403.621 9	601.659 3	403.773 6	-0.04%
206.562 8	308.031 6	206.720 0	-0.08%
109.326 5	162.835 3	109.278 8	0.04%
90.323 6	134.721 8	90.411 8	-0.10%
77.846 3	116.122 6	77.929 9	-0.11%
63.100 2	94.169 7	63.197 3	-0.15%
46.698 8	69.678 1	46.761 0	-0.13%
40.989 7	61.129 7	41.024 1	-0.08%
30.367 1	45.195 3	30.330 6	0.12%
22.103 7	32.882 9	22.067 7	0.16%
11.336 2	16.937 7	11.366 9	-0.27%
5.639 9	8.377 0	5.621 8	0.32%
1.053 6	1.577 9	1.058 9	-0.51%

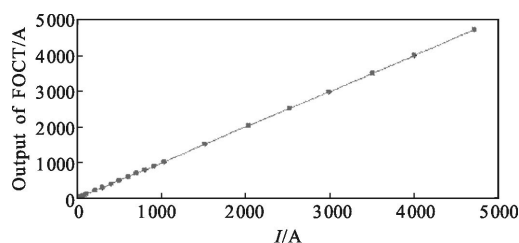


图 10 全量程范围的解调信号线性度

Fig.10 Linearity of FOCT's output

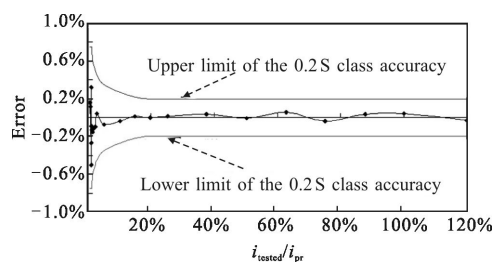


图 11 样机在全量程范围的误差

Fig.11 Curve of FOCT's error

为了验证应用该传感头后 FOCT 样机的测量稳定性, 对样机连续进行了 15 天的测试, 其变比 Transformation ratio 稳定度(等同于 FOCT 的测量稳定度) 如图 12 所示, 可见该传感头增强了系统的稳定性, 使其长时间的变比偏差均小于 0.2% 的国标要求。

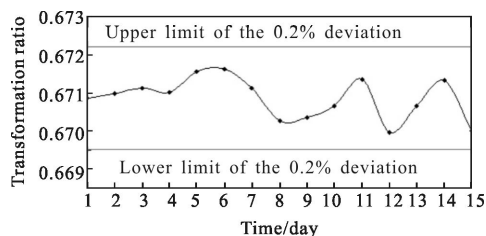


图 12 FOCT 的测量稳定度

Fig.12 Stability of FOCT's output

4 结论

文中所述方案较好地解决了 FOCT 传感头的设计与制作难题, 可以大幅度降低线性双折射、Verdet 常数温度效应、光纤 $\lambda/4$ 波片相位延迟温度效应等负面效应对系统的影响, 为制作高性能的 FOCT 传感头和研制高准确度的 FOCT 样机提供了技术基础。

根据文中阐述的方案制作出了一批传感头样品, 并利用该样品研制了一套 FOCT 样机。在准确度检验系统提供的基准下, 经过实际测试, 所研制样机的准确度达到了 0.2 S 级, 并具备较好的测量稳定度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Li Jianzhong, Li Zeren, Zhang Denghong, et al. Open-loop detection of fiber optic current transducer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1648-1653. (in Chinese)
李建中, 李泽仁, 张登洪, 等. 基于开环检测系统的全光纤电流互感器研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1648-1653.
- [3] Li Jianzhong, Li Zeren, Zhang Denghong, et al. Fabrication of $\lambda/4$ wave plate for fiber optic current transducer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2167-2172. (in Chinese)
李建中, 李泽仁, 张登洪, 等. 全光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片制作工艺研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2167-2172.
- [4] Han Zhengying, Gao Han, Gao Yesheng, et al. Effect of strain distribution measurement of fiber coil on FOG performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4128-4132. (in Chinese)
韩正英, 高涵, 高业胜, 等. 光纤环应力分布测试对光纤陀螺性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4128-4132.
- [5] Zhao Xijing, Liu Guangbin, Wang Lixin, et al. Compensation for FOG temperature drift based on adaptive neuro-fuzzy inference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 790-794. (in Chinese)
赵曦晶, 刘光斌, 汪立新, 等. 光纤陀螺温度漂移自适应网络模糊推理补偿[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 790-794.
- [6] Li Jing, Wang Wei, Wang Xuefeng, et al. Scale factor of photonic crystal fiber-optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4082-4087. (in Chinese)
李晶, 王巍, 王学锋, 等. 光子晶体光纤陀螺标度因数特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4082-4087.
- [7] Zhang Chaoyang, Lei Linxu, Wang Chenghao. Low current measurement error analysis of digital closed-loop fiber optic current transformer [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012(10): 7-11. (in Chinese)
张朝阳, 雷林绪, 王成昊. 数字闭环光纤电流互感器小电流测量准确度分析[J]. 仪表技术与传感器, 2012(10): 7-11.
- [8] Zhang Mingzhu, Li Kaicheng, Li Zhenxing, et al. Design of calibration technology of electronic transformers based on high-precision acquisition card [J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(15): 114-118. (in Chinese)
张明珠, 李开成, 李振兴, 等. 基于高精度采集卡的电子式互感器校验系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 114-118.