

基于马赫-曾德干涉仪的光纤电流互感器研究

徐元哲¹, 孙瑞丽¹, 潘文明²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 宿州供电公司, 安徽 宿州 234000)

摘要: 为进一步促进光学电流互感器(OCT)在电力系统中应用, 将光纤传感技术与磁致伸缩材料相结合, 提出了一种新型的OCT的设计方法。将干涉仪的两个臂分别沿平行于磁场方向和垂置与磁场方向回环粘贴在正方形磁致伸缩材料的两个表面上, 确保光纤均匀、对称分布, 上下表面上光纤正交排列、匝数相同, 形成双臂对称型的马赫-曾德干涉仪, 得到了一定的温度补偿, 消除了磁致伸缩材料热膨胀带来的测量影响, 测量误差为0.65%, 表明了该结构能达到温度补偿的效果, 在一定程度上解决了阻碍OCT实用化进程的测量温漂问题。

关键词: 光纤电流互感器; 马赫-曾德干涉仪; 磁致伸缩材料; 偏置磁场; 温度补偿

Study on fiber-optic current sensor based on Mach-Zehnder interferometer

XU Yuan-zhe¹, SUN Rui-li¹, PAN Wen-ming²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;
2. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 234000, China)

Abstract: Aiming at one severe problem optic current transducer (OCT) faced, temperature excursion that baffles its utility in power system, this paper presents a new method of designing OCT through combining optical fiber sensing and magnetostrictive materials. Pasting the two arms of interferometer on the two surfaces of square magnetostrictive material respectively and ensuring that the optical fiber is pasted uniformly, and the same turns optical fiber is pasted on the two surfaces, which constitutes a symmetrical type of arms M-Z interferometer. This makes fiber-optic current sensor based on the magnetostrictive material have temperature compensation. It can weaken the effects of thermal expansion of the magnetostrictive material. In the experiment, the measurement error of sensing head is 0.65%. It shows that the structure can achieve the effect of temperature compensation to some extent, so that it can meet the demands of the development of modern power system.

Key words: fiber-optic current sensors; Mach-Zehnder interferometer; magnetostrictive material; bias magnetic field; temperature compensation

中图分类号: TM45 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0071-03

0 引言

在发电、输电、变电等电力系统中, 为了提高设备的运行安全可靠性及效率, 必须对电流、电压、功率等电气参数进行测量。“准确测量任何时刻的电流瞬时值”是电流互感器(CT)的理想测量品质。广泛使用的铁磁线圈CT尽管稳态测量准确度能满足0.2级的要求, 但短路故障时存在磁路饱和现象, 动态测量能力差, 是保护装置误动和拒动的主要原因^[1]。电压等级越高, 铁磁线圈CT的绝缘结构越复杂、绝缘费用越高, 并且由于高压, 大电流存在的强电磁场干扰导致传统的CT测量准确度下降。为克服这些缺点, 人们正在研究用光纤传

感器取代传统的传感器。目前, 光纤电流互感器特以其高绝缘性、抗高电磁噪声、高线性度响应, 结构简单等诸多优点, 在高电压强电流的测量及保护领域中得到广泛的重视和研究。本文介绍了基于马赫-曾德干涉仪的光纤电流传感器, 并通过设计双臂的完全对称结构, 对温度进行了一定的补偿, 在一定程度上降低了温度的影响。且这种方法结构简单, 成本低廉。

1 原理

1.1 传感器基本原理

如图1所示^[2], 以SGQ-10光纤光学实验仪内置宽带光源为输入信号, 传感器包含两条光纤: 一

条为参考臂，另一条为传感臂。在传感臂光纤上外贴一条（或几条）或涂敷一层磁致伸缩材料，如镍条、金属玻璃等^[3]，本文用的是铽镱铁稀土超磁致伸缩材料。在电流磁场作用下磁致伸缩材料的伸缩使光纤产生应变使两个臂中传输光的相位差发生变化，干涉光谱发生移动，通过计量第一个干涉峰值的移动而获得磁致伸缩材料的长度的变化量，实现对磁场的传感，由 Biot-Savart 定理，进而得到了电流的信息，达到了测量电流的目的。

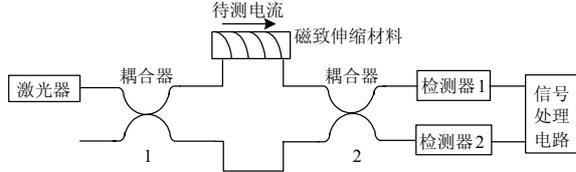


图1 基于马赫-曾德干涉仪的光纤电流传感器原理图

Fig.1 Principle diagram of fiber-optic current sensor based on M-Z interferometer

本文采用稀土超磁致伸缩材料铽镱铁代替传统的磁致伸缩材料。铽镱铁这种超磁致伸缩材料不仅磁致伸缩应变大，在室温下可达 0.15%，比镍的高 40~50 倍，比压电陶瓷高 5~25 倍^[4]，可以提高测量的灵敏度；而且，这种材料只在平行磁场的轴向磁致伸缩，而温度膨胀是各向同性^[5]，根据这一特性，为了克服温度问题带来的测量困难，采取了以下措施设计了传感头结构。用两根同种等长单模光纤作为 M-Z 干涉仪的两个臂，作为粘贴光纤的应变载体磁致伸缩材料，将其取成正方形薄片（磁致伸缩方向与一边平行）。将两根光纤分别沿磁致伸缩方向和垂直于磁致伸缩方向多匝回环粘贴在磁致伸缩材料的两个表面，光纤均匀布满磁致伸缩材料表面，单面上的光纤左右对称分布，上下面的光纤正交叠置，粘贴方式、匝数均相同，如图 2 所示。

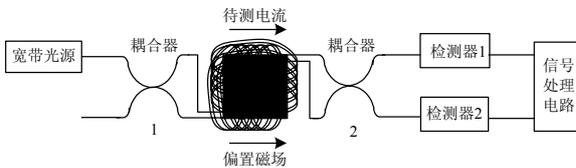


图2 光纤电流传感器测量系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of measurement system of fiber-optic current sensor

因为传感头双臂的对称性，在一定程度上减小了因磁致伸缩材料热胀冷缩引起的光程差，达到了一定的温度补偿效果。另外，由于传感头双臂所处环境的一致，其受迫振动也一致，从而也可以减小双臂振动差异带来的干扰。

1.2 材料的磁致伸缩与待测电流的关系

材料的伸长量 Δl 与磁感应强度的变化量 ΔB 的关系为

$$\Delta l = C \Delta B l \quad (1)$$

式中： C 为比例系数； l 为磁致伸缩材料伸缩方向上的长度。

由毕-萨定理，载流直导线周围的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (2)$$

式中： μ_0 为真空中磁导率； R 为场点到导线的垂直距离。

由于长直导线的磁场是环形磁场，而磁致伸缩材料有几何尺寸，所以，当磁致伸缩材料沿伸缩方向垂直于导线放置时，材料所处的磁场是非均匀磁场，如图 3 所示。

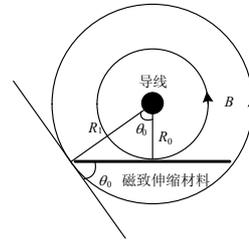


图3 磁致伸缩材料在载流直导线的磁场中

Fig.3 Magnetostrictive materials in long straight wire DC magnetic field

在载流直导线的磁场中，磁致伸缩材料上的任意点沿其伸缩方向上所在的磁感应强度应为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \cos \theta \quad (3)$$

由式（1）、式（3）整个磁致伸缩材料在电流的磁场中的伸长量 Δl 与电流 I 的关系可表示为

$$\Delta l = Cl \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \cos \theta \quad (4)$$

即伸长量 Δl 与电流 I 成正比例关系。但是，式（4）中有变量 θ ，无法得到 Δl 与 I 的比例系数，所以，作如下等价替换，在不改变 Δl 与 I 的关系的前提下用平均磁场代替非均匀磁场，即

$$\bar{B} = \frac{1}{\theta_0} \int_0^{\theta_0} \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \cos \theta d\theta \quad (5)$$

$$\Delta l = \frac{Cl}{\theta_0} \int_0^{\theta_0} \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \cos \theta d\theta \quad (6)$$

把 $R = R_0 / \cos \theta$ 代入式（6）化简得

$$\Delta l = \frac{Cl\mu_0 I}{2\pi\theta_0 R_0} \int_0^{\theta_0} \cos^2 \theta d\theta = \frac{Cl\mu_0 I}{8\pi\theta_0 R_0} (\sin 2\theta_0 + 2\theta_0) \quad (7)$$

由式(7)知材料的磁致伸缩与待测电流成正比。根据光干涉理论可知,双光束干涉光强满足如下关系:

$$I = I_0 (1 + \cos(2\pi n\Delta l / \lambda))$$

当满足条件 $n\Delta l = K\lambda$ 时,光输出为极大值, K 为正整数, λ 为波长;两束干涉光相位差为 π 。

2 实验数据分析与讨论

实验采用绝缘漆包线缠绕结构,从而获得较大电流,匝数 400 匝,由直流稳定电源提供 0~5 A 的直流电,则被测电流为 0~2 000 A。偏置磁场由 4 A 的直流电源提供,同样采用绝缘漆包线缠绕结构,匝数 500 匝。

图 4 是由软件观察到的波长在 1 550 nm 波段的 M-Z 干涉仪输出波形。

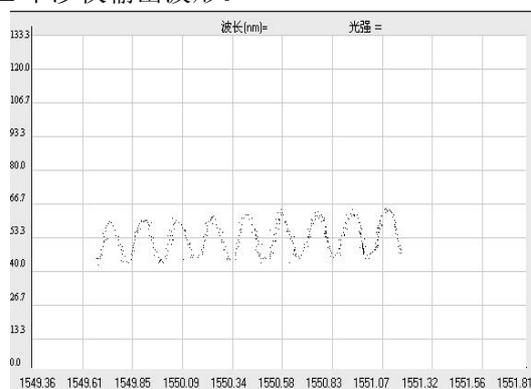


图 4 M-Z 干涉仪输出光谱波形

Fig.4 Output spectral waveform of Mach-Zehnder interferometer

被测电流逐步增大时记下第一个干涉峰值对应的波长值。以 0 A 时第一个干涉峰值为基准,得到表 1。图 5 是电流与波形移动的关系图。

表 1 被测电流和波形移动的关系

Tab.1 Relationship between current and waveform shift

被测电流 / A	波形移动 / nm	被测电流 / A	波形移动 / nm
0	0	1 000	0.871
125	0.103	1 125	0.979
250	0.215	1 250	1.086
375	0.322	1 375	1.198
500	0.434	1 500	1.305
625	0.541	1 625	1.417
750	0.649	1 750	1.520
875	0.760	1 875	1.632

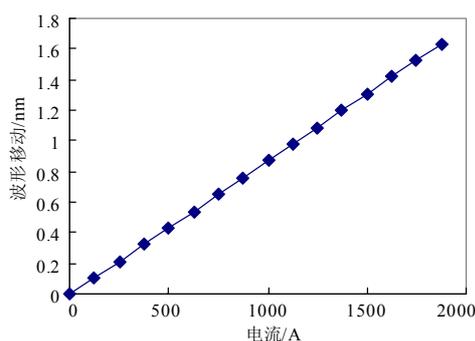


图 5 电流与波形移动关系图

Fig.5 Diagram of current and waveform shift

对图 5 进行线性拟合,斜率为 8.723×10^{-4} ,拟合度为 0.999 99。所以在 0~1 875 A 区间电流与第一个干涉峰值处波长的移动有较好的线性关系,基本不受温度影响。

表 2 中 I 是待测电流实际值, I_1 是测量值,由表 2 得,本文所设计的电流互感器误差为:

$$A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_1 - I}{I} \right)^2} \times 100\% \approx 0.65\%$$

表 2 电流和波形移动量的线性拟合

Tab.2 Linear fitting of current and waveform shift

被测电流值 I / A	测量值 I_1 / A	被测电流值 I / A	测量值 I_1 / A
125	121.82	1 125	1 126.06
250	250.22	1 250	1 248.73
375	372.88	1 375	1 377.12
500	501.28	1 500	1 499.79
625	627.38	1 625	1 628.18
750	747.75	1 750	1 746.26
875	875.00	1 875	1 874.66
1 000	1 002.25		

有很好的温度补偿效果,经分析误差主要来源有:波长测量引起的误差,波长测量仪的精度直接影响测量结果;安培表读数引起的误差;物理结构引起的误差, GMM 固定机构加工精度不高,容易受到震动,造成传感材料发生形变从而产生误差。

由于磁致伸缩材料的磁致伸缩曲线不是在各个磁场区域都是线性度,所以为了保证工作在线性区内,有时需加一定的偏置磁场,相应的线性测量范围会增大,但增大的线性范围是有限的,这也是磁致伸缩材料应用的局限所在。

3 结论

本文设计了一种基于马赫—曾德干涉仪的高压
(下转第 78 页 continued on page 78)

TANG Jie-ming, LIU Jun-yong, YANG Ke, et al. Short-term load combination forecasting by grey model and least square support vector machine[J]. Power System Technology, 2009, 33 (3): 46-52.

[5] 曹志彤, 陈宏平, 何国光. 电机故障诊断支持向量机[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (6): 738-741.
CAO Zhi-tong, CHEN Hong-ping, HE Guo-guang. Support vector machine for fault diagnosis of the rotor broken bare of IM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25 (6): 738-741.

[6] 费胜巍, 苗玉彬, 刘成良, 等. 基于粒子群优化支持向量机的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2009, 35 (3): 509-513.
FEI Sheng-wei, MIAO Yu-bin, LIU Cheng-liang, et al. Fault diagnosis of transformer based on particle swarm optimization-based support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35 (3): 509-513.

[7] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰, 等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 51-56.
ZHAN Yong, CHENG Hao-zhong, DING Yi-feng, et al. S-transform-based classification of power quality disturbance signals by support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4): 51-56.

[8] 吕干云, 程浩忠, 郑金菊, 等. 基于 S 变换和多级 SVM 的电能质量扰动检测识别[J]. 电工技术学报, 2006, 21 (1): 121-126.
Lü Gan-yun, CHENG Hao-zhong, ZHENG Jin-ju, et al.

Power quality disturbances detection and recognition based on S transform and multi-layer SVMs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21 (1): 121-126.

[9] 宋晓芳, 陈劲操. 基于支持向量机的动态电能质量扰动分类方法[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (4): 39-42.
SONG Xiao-fang, CHEN Jin-cai. Classification method of dynamic power quality disturbances based on SVM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (4): 39-42.

[10] 吴晓朝, 方立新, 郭红霞. 一种基于小波变换的电能质量特征量提取及分类的方法[J]. 控制理论与应用, 2008, 25 (2): 325-328.
WU Xiao-chao, FANG Li-xin, GUO Hong-xia. An approach to the extraction and classification of feature vector for power quality based on wavelet[J]. Control Theory&Applications, 2008, 25 (2): 325-328.

收稿日期: 2009-08-12; 修回日期: 2009-10-04

作者简介:

陈春玲 (1971-), 女, 副教授, 博士, 主要从事电能质量检测与分析研究; E-mail: sncc1@163.com

许童羽 (1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事电能质量监测、电力信息化研究;

郑伟 (1981-), 男, 助教, 硕士, 主要从事电力信息化研究。

(上接第 73 页 continued from page 73)
电流传感器, 设计了完全对称的双臂结构, 对温度进行了一定的补偿, 在一定程度上降低了温度的影响。成功地实现了对高压电流的传感测量。由于被测电流线路和测量装置没有电气连接, 采用光纤进行信号传送, 因此传感器具有很强的绝缘能力和抗干扰能力。本实验对于探索电力系统测量技术的新途径, 具有重要意义。

参考文献

[1] 张健, 及洪泉, 远振海, 等. 光学电流互感器及其应用评述[J]. 高电压技术, 2007, 33 (5): 37-41.
ZHANG Jian, JI Hong-quan, YUAN Zhen-hai, et al. Optical current transducer and its application[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (5): 37-41.

[2] 孙圣和, 王廷云, 徐影. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 111-112.

[3] 安亚青, 薛剑, 李文田. 对基于马赫-曾德干涉仪的高压电流传感器的实验研究[J]. 电力系统通信, 2005, 26 (1): 31-32.
AN Ya-qing, XUE Jian, LI Wen-tian. Study on high-voltage current sensor based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Telecommunications for Electric Power

System, 2005, 26 (1): 31-32.

[4] 侯淑萍, 杨庆新, 陈海燕, 等. 超磁致伸缩材料的特性及其应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31 (5): 99-102.
HOU Shu-ping, YANG Qing-xin, CHEN Hai-yan, et al. Characteristic and application of giant magnetostrictive material[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31 (5): 99-102.

[5] 魏光虎, 周王民, 刘德峰, 等. 基于 M-Z 干涉仪的光纤电流互感器应用研究[J]. 传感器与微系统, 2008, 27 (9): 34-36.
WEI Guang-hu, ZHOU Wang-min, LIU De-feng, et al. Application investigation of fiber-optic current sensors based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27 (9): 34-36.

收稿日期: 2009-07-30; 修回日期: 2009-11-03

作者简介:

徐元哲 (1962-), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统自动化;

孙瑞丽 (1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: mysunmyhome@163.com

潘文明 (1981-), 男, 助理工程师, 从事电网规划工作。