文章编号:1001-5078(2013)05-0536-04 ·光电技术与系统·

双光路全光纤电流互感器的研究

熊显名,方浚丞,王 璐
(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院,广西 桂林 541004)

摘 要:为了使光纤电流互感器具有快速、准确地测量出电流值的能力,本文在分析法拉第电磁感应效应的偏振调制型全光纤电流互感器的基础上引入双光路检测法,将光纤中输出的线偏振光分成振动方向相互垂直、传播方向成一定夹角的两束光。经光信号转换器转换成电信号后系统对其进行放大、滤波处理后得到无噪正弦波信号,结合TMS320F28335测试平台对输出的两路信号进行同步采集、解调,通过运算求出法拉第旋转角,并拟合法拉第旋角与参考电流值得出两者关系式,最终使测量系统能够在高压环境下快速、准确地测量电流值。由此可见,本系统适用于高压环境下对大电流进行检测。

关键词:全光纤电流互感器;法拉第电磁感应效应;双光路;法拉第旋转角
中图分类号:TN249 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.05.014

Research on dual optical path all-fiber current transformer

XIONG Xian-ming, FANG Jun-cheng, WANG Lu
(Guilin University of Electronic Science and Technology of Electronic Engineering and Automation, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to make fiber current transformer to have the ability to measure the current quickly and accurately, we analyzed the polarization-modulated all-fiber current transformer based on Faraday electromagnetic induction effect. And a dual optical path detection method is introduced. Polarized light from the optical fiber is divided into two beams. One is perpendicular to the direction of vibration, the other is at a certain angle towards the spread direction of the wave. After converting optic signal into electric signal, the sine wave signal obtained via amplification and filtering process is noiseless. Combining with TMS320F28335 test platform two output signals are synchronously acquired and demodulated, then the Faraday rotation angle is determined by calculation. And the relationship between fitting Faraday rotary and the reference current value is obtained. Finally the measurement system can measure current value in the high-pressure environment quickly and accurately. It proves that the system is applicable to large current detection in the high-pressure environment.

Key words: all-fiber current transformer; the Faraday effect of electromagnetic induction; dual optical path; Faraday rotation angle

1 引 言

近年来电力工业发展迅猛,电力传输系统的电压等级越来越高,传统的电流互感器存在着诸多缺点已经难以满足测量要求,其中最突出的问题是绝缘问题,电压的提高给电流互感器的绝缘技术带来极大的挑战;另外,传统的电流互感器体积庞大、质量重,给生产、运输和维护带来诸多困难;此外,电磁式电流互感器的成本随电压等级的提高成指数增加[1]。与此同时,以光纤为介质的新型传感技术具有质量轻、体积小、抗电磁辐射性能好等一系列其他介质难以相比的优点,特别适合于高电压、空间小及强电磁干扰环境下使用[2]。光纤传感器自从问世

作者简介:熊显名(1964-),男,工学学士,高级工程师,主要研究方向为光电测试,计算机辅助测试及光学遥感测试。E-mail: 380338015@qq.com

收稿日期:2012-09-27;**修订日期**:2012-10-16

以来，经过几十年的发展，已经应用于测量电压、电流、振动、位移、温度、压力等七十多个物理量，广泛应用于商业、民用、医学、军事、工业控制等领域。作为一种新型的传感技术，光纤传感器将深入应用到各个领域。

2　基本原理

全光纤电流互感器结构如图 1 所示，主要由激光光源、起偏器、检偏器、渥拉斯顿棱镜、光电转换器等构成，系统中运用了法拉第磁光效应：一束线偏振光沿外加磁场方向或磁化强度矢量方向通过置于磁场中的磁光介质时透射光的偏振方向相对于入射光的偏振方向转过一定的角度，这个角度称为法拉第旋转角[3]。在一般材料中，法拉第旋角与材料的长度、磁场强度成正比[4]。如公式所示：

$$\theta = \nu\int_l \vec{H}\,\mathrm{d}\vec{l} = \nu\int_l \frac{I}{2\pi R}\,\mathrm{d}\vec{l} = \nu NI \tag{1}$$

式中，ν 为材料的费尔德（Verdet）常数；H 为磁场强度；L 为线偏振光在磁场 H 作用下的传输距离；R 为光纤线圈的半径；N 为光纤绕的总圈数。由于费尔德数 ν 在相同的测量环境下相等，而且光纤绕的圈数 N 也是确定的，因此法拉第旋角与电流值成线性关系。但是直接测量法拉第旋角并不容易，一般情况下法拉第旋角通过光强度的形式表现出来。由马吕斯定律可知，光强信号与线偏振面旋转角之间的转化关系为：

$$J = E_0\cos^2(\Phi - \theta) \tag{2}$$

式中，E_0 为起偏器入射光强；Φ 为起偏器与检偏器开始时的夹角。对式（2）求导，当 $\frac{\partial}{\partial\Phi}\left(\frac{\partial}{\partial\theta}\bigg|_{\theta=0}\right)=0$ 时，探测器为了获得对 θ 变化有最大灵敏度。解得：$2\Phi - 2\theta = \pi/2$，由于 2θ 非常小，所以可以认为当 $\Phi = \pi/4$ 时，即起偏器和检偏器光轴成 45°夹角时，偏振面检测获得最大灵敏度[4]。式（2）可化简为：

$$J = \frac{1}{2}E_0^2(1 + \sin 2\theta) \tag{3}$$

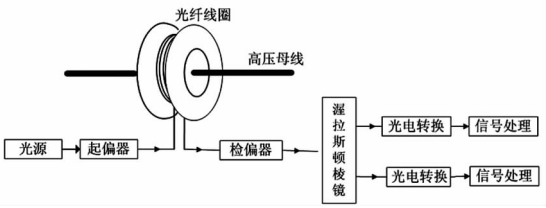


图 1　全光纤电流互感器结构图

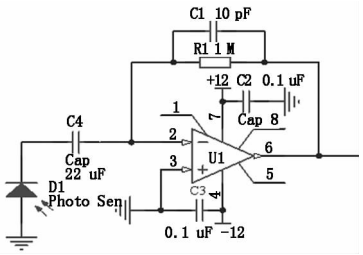
图 1 中渥拉斯顿棱镜将检偏器输出的光信号分成振动方向相互垂直，传播方向成一定夹角的两束光。由于两路信号相位相差 90°，对两路信号进行差和运算之后将所得的结果相除得式（4）：

$$\frac{J_1 - J_2}{J_1 + J_2} = \frac{E_0^2\sin 2\theta}{E_0^2} = \sin 2\theta \tag{4}$$

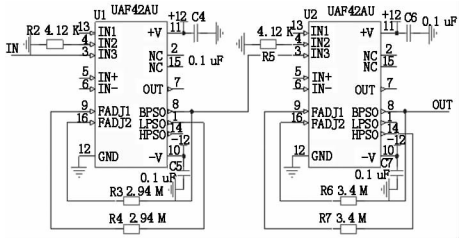
通过这种方法能够对交、直流信号进行测量，而且输出信噪比是直接经过检偏器输出的两倍。由式（4）可知双光路检测法能有效地提高了光路灵敏度，而且由于法拉第旋转角很小，有 $\sin 2\theta \approx 2\theta$，故此时线性度也较好，更能满足测量电流的需要。

3　信号检测电路

光纤电流互感器输出的是两路光强信号，直接对光强信号处理比较困难，通常是将光电检测到的模拟电信号经模拟预处理电路后送至 A/D 进行模数转换成数字信号[5]。本文在光信号输出端接入光电二极管将光信号转换为电信号后输出为微弱信号。检测系统的微弱信号检测部分主要有前置低噪声放大、带通滤波器、乘法器、A/D 转换器等环节组成[6]。在前置放大电路运用低噪声、高精度的运算放大器对信号进行放大如图 2（a）所示。



（a）前置放大电路



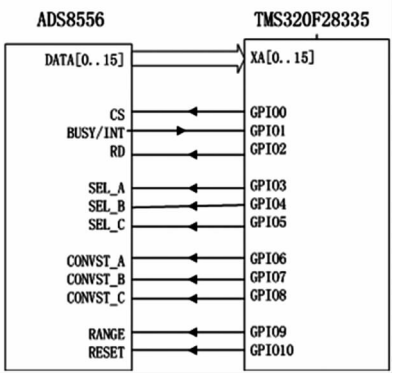
（b）带通滤波器

图 2　前置放大电路与带通滤波器

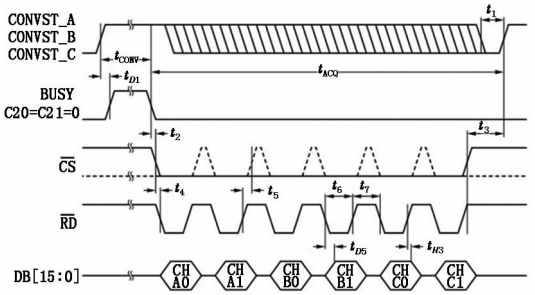
由于光纤电流互感器的测量对象是工频交流电其频率为 50 Hz，因此为了在光电转换器输出端不引入额外噪声，检测电路中还应包含 50 Hz 带通滤波器以滤除干扰，如图 2（b）所示为本文设计的带通滤波器。在设计滤波器时选用了美国 BB（Burr-Brown）公司生产的集成滤波器 UAF42，是一款通用的有源集成滤波器，可广泛应用于低通、高通、带通、带阻滤波器设计，其内部包含两个积分器、一个反相放大器和一个独立的运放，积分器包含两个 1000 pF 精度高达 0.5% 的电容，这种结构解决了设计有源滤波器时难以获得高精度，低损耗的电容的问题。

该滤波器属于连续时间滤波器,可避免开关噪声和一些开关电容滤波器一些其他问题的影响[7]。经过 50 Hz 带通滤波器之后,通过再低通滤波器隔离交流与电容隔离直流的作用把信号分成直流部分与交流部分,信号中的直流部分会随测量环境的温度变化而变化,而信号中的交流信号反应出测量环境中磁场的强弱,因此分别提取直流部分与交流部分能有效地检测在不同温度下的电流值。

经过电路处理后的两路交流信号以频率为 50 Hz 的正弦波信号输出,峰 - 峰值约为 2 V。为了能同时采集两路直流信号与两路交流信号本文采用了 TI 公司生产的 ADS8556,它是一款 6 路 16 位 SAR ADC,采集信号的电压范围可选 ±5 V。而且每路还包含了取样保持电路,6 个模拟输入组成 3 个通道组,这些通道组可以同时采集,而且在并行口模式下 ADS8556 数据采样速率高达 730 ksps,信噪比达到了 91.5 dB,能满足对信号采集的要求。在控制器上本文采用了 TI 公司推出的一款浮点型 DSP 控制器 TMS320F28335。与以往的定点 DSP 相比,该器件的精度高成本低,性能高,外设集成度高,数据以及程序存储量大,A/D 转换更精确快速,而且在数据采集和数据输出方面具有独特的优越性,满足系统运算速率与精度的要求。通过 TMS320F28335 与 ADS8556 搭建而成的同步采集系统能快速实时地反应电流的大小,其连接示意图如图 3(a)所示。



(a)



(b)

图 3 TMS320F28335 与 ADS8556

TMS320F28335 控制器需要对检测电路输出的两路信号同时运算,通过控制 ADS8556 的时序能实现对两路信号的同时采集,保证运算数据的准确性,如图 3(b)所示为 ADS8556 控制时序图。当模数转换完毕,转换得到的数字量存储到 AD 对应的寄存器,通过 TMS320F28335 的 16 位数据总线依次读取两路信号的 16 位数据[8]。

4 数据处理

在图 1 中,经过渥拉斯顿棱镜处理后将光路分成 J_1,J_2 两路垂直的光。如图 4 部分所示 X 轴上方为 J_1 信号,J_1 实线部分为当系统中没有电流值时偏转角,X 轴下方为 J_2 信号,J_2 实线部分为系统中没有电流值时偏转角。当系统中检测电流不为 0 时,电流以频率为 50 Hz 的正弦波传输,J_1,J_2 偏转角也随着电流以 50 Hz 频率变化,当电流值越大 J_1,J_2 偏转的幅度越大,如图 4 虚线部分所示。

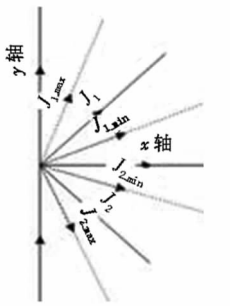
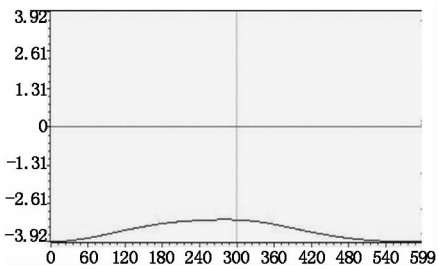


图 4 J_1,J_2 偏转角

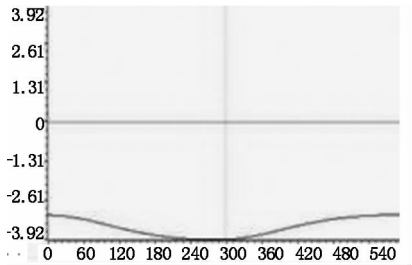
经过 ADS8556 对 J_1,J_2 两路交流信号采集之后的波形显示如图 5 所示,J_1,J_2 均为 50 Hz 正弦波的信号,两个波形相位相差 90°。当 J_1 处于波峰时,偏转角为 J_{1_max},同时 J_2 也偏转角为 J_{2_min},波形处于波谷。由式(4)可知,两路光信号交流分量之和为 2θ。通过反三角函数求出法拉第旋角,如式(5)所示:

$$2\theta = \arctan\left(\frac{J_{1_min}}{J_{2_max}}\right) - \arctan\left(\frac{J_{1_max}}{J_{2_min}}\right) \tag{5}$$

式中,J_{1_min} 为 J_1 通道波谷电压值;J_{1_max} 为 J_1 通道波峰电压值;J_{2_min} 为 J_2 通道波谷电压值;J_{2_max} 为 J_2 通道波峰电压值。



(a)



(b)

图 5　J_1,J_2 波形

通过 ADS8556 采集数据分别求出 J_1,J_2 波形一个周期内的波峰与波谷,代入式(5)运算出法拉第旋转角 θ。由式(1)可知 θ 与电流值有着线性关系。如图 6 所示为通过实验求出的法拉第旋转角 θ 与电流值之间的线性关系。

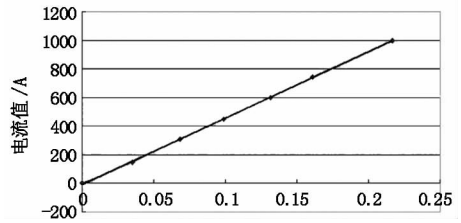


图 6　法拉第旋角与电流值关系

在不同的电流值下运算出法拉第旋角,经过多点拟合,得出法拉第旋角与参考电流值之间的关系式。再把运算式植入 TMS320F28335 系统之后,系统便可以直接显示出待测电流值的大小。如表 1 所示为测得电流值与实际流值之间的比较。由表 1 的数据可知系统能快速准确地测量出电流值,满足系统设计的需求。

表 1　测得电流值与参考电流值比较

温度/℃	实际电流/A	测得电流/A	误差/%	温度/℃	实际电流/A	测得电流/A	误差/%
15	985	986.6	0.16	35	210	209.2	0.38
15	522	520.8	0.23	35	150	149.5	0.33
15	298	298.3	0.1	35	80	80.8	1
15	170	170.2	0.11	55	990	988.7	0.13
15	100	99.8	0.2	55	650	650.8	0.12
15	50	50.3	0.6	55	310	309.3	0.23
35	1000	998.6	0.14	55	200	200.5	0.25
35	550	550.5	0.09	55	105	105.3	0.28
35	300	300.6	0.2	55	40	39.5	1.25

5　总　结

本文在分析法拉第磁光效应的基础上研制了全光纤电流互感器,并设计了 TMS320F28335 同步采集系统,对光纤输出的两路光信号进行同步采集。通过对采集的信号进行一系列的运算之后求出法拉第旋角,便能实时地反应出电流值的大小。通过实验表明,该系统能够在高压环境下快速准确地测量大电流。

参考文献:

[1] Sum Dunyan. Optical fiber current sensor research[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
孙敦艳. 光纤电流传感器研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.

[2] Zhao Yong. Principles and applications of fiber optic sensors technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
赵勇. 光纤传感器原理与应用技术[M]. 北京:清华大学出版社,2007.

[3] Li Hongzhe, Gu Guohua. The verdet constant testing of the magneto-optical material based on the finite element[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 55 - 58. (in Chinese)
李宏哲,顾国华. 基于有限元的磁光材料费尔德常数测试研究[J]. 激光与红外,2012,42(1):55 - 58.

[4] Zhang Hai. Polarization all-fiber current sensor system based on the Faraday effect practical[D]. Xiamen: Xiamen University a Master Degree Thesis, 2007. (in Chinese)
张海. 基于法拉第效应的偏振型全光纤电流传感系统的实用化研究[D]. 厦门:厦门大学,2007.

[5] Fu Mingfei, Geng Xiangming, Yuan Yan. DSP all-optical current transformer system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(9): 44 - 48. (in Chinese)
傅鸣非,耿相铭,袁炎. 基于 DSP 全光纤电流互感器系统研究[J]. 电测与仪表,2007,44(9):44 - 48.

[6] Shi Yang, Liu Huijun, Lü Jin. Dual-channel infrared spectra of weak signal detection system design[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(11): 1192 - 1194. (in Chinese)
施秧,刘辉军,吕进. 双通道红外光谱微弱信号检测系统设计[J]. 激光与红外,2007,37(11):1192 - 1194.

[7] TI company. UAF42 Data Sheet[E]. 10/2010.

[8] Liu Lingshun, Gao Yanli, Zhang Shutuan. The TMS320F28335 DSP principles of and development programming[M]. Beijing: Beihang University Press, 2011. (in Chinese)
刘陵顺,高艳丽,张树团. TMS320F28335 DSP 原理及开发编程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.