

文章编号: 0253-2239(2010)04-0949-05

基于光纤光栅的光学电流互感器研究

熊燕玲¹ 赵洪^{1*} 张剑² 赵海军³ 汪淑容⁴

¹ 哈尔滨理工大学工程电介质及应用技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

² 哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; ³ 维世佳电力器材有限公司, 辽宁 沈阳 110115

⁴ 泰科电子有限公司, 上海 200233

摘要 将超磁致伸缩材料(GMM)棒粘贴光纤布拉格光栅(FBG)的体系置于电流感应磁场中,构成光学电流互感器,用导磁材料构建磁路系统以约束并引导磁力线进入GMM。用永磁体材料建立偏置磁场以确定系统静态工作点,应用有限元分析磁路的磁场分布并设计了磁路的结构尺寸。利用粗波分复用器(CWDM)线性边带对光纤光栅交变应变解调,实现对交流电流信号的检测。实验测得偏置磁场为30 kA/m时,该系统在线性区最大可测电流为186 A,可获得4.3%的满量程精度。利用快速傅里叶变换(FFT),分析工频电流互感器不同输出信号的谐波分量,对输出信号进行质量评价。表明在线性区,互感器的输出信号基本不受GMM回滞特性和非线性特性的影响。

关键词 光纤光学;光学电流互感器;频谱分析;光纤布拉格光栅;超磁致伸缩材料

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103004.0949

Research on Optical Current Transformer Based on the Fiber Bragg Grating

Xiong Yanling¹ Zhao Hong¹ Zhang Jian² Zhao Haijun³ Wang Shurong⁴

¹ Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

² Physics and Electronics Engineering College, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150080, China

³ VISCAS Wire & Cable Accessories Corporation, Shenyang, Liaoning 110115, China

⁴ Tyco Electronics Co., Ltd., Shanghai 200233, China

Abstract An optical current transformer is constructed by exposing giant magnetostrictive material (GMM)-FBG system to current-induced magnetic field. Ferro-magnetic materials are used to design a loop to constraint and conduct the flux into GMM. The permanent magnetic material is used in loop to establish a bias flux to form a working bias for the system. Finite element method is used to analyze and design the loop structure and the size. Coarse wavelength division multiplexing (CWDM) device is used to demodulate the alternating strain on FBG caused wavelength drift to realize sensing of the current. In the experiment, the maximum current is 186 A and the full scale accuracy is 4.3% when the system works in linear region by setting the bias in 30 kA/m. Fast Fourier transform algorithm (FFT) is used to analyze the harmonic component of the output signal to evaluate the quality. It is demonstrated that the output signal is not influenced by hysteresis and nonlinear effect of GMM in linear region.

Key words fiber optics; optical current transformer; frequency spectrum analysis; fiber Bragg grating (FBG); giant magnetostrictive material (GMM)

1 引言

电流互感器是电力系统中进行电能计量和继电保护的关键设备,其精度及可靠性与电力系统的安

全可靠运行密切相关。随着电力工业的发展,光学电流传感器因其独特的优点,越来越显现潜在的应用价值,已成为该领域的研究热点。但至目前,法拉

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-13

基金项目: 黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD200815)资助课题。

作者简介: 熊燕玲(1964—),女,博士,教授,主要从事光纤传感及高压绝缘测试等方面的研究。

E-mail: xyling1964@163.com

* 通信联系人。E-mail: hongzhao@hrbust.edu.cn

第磁光效应电流传感方案仍然受光纤线性双折射问题和环境温度因素的影响,光电混合式解决方案的高电位电子电路供电问题一直没有得到很好解决,因而难以实现工程应用^[1]。

近年来,光纤布拉格光栅(FBG)传感技术成为可靠性最高、实用性最强的光纤传感技术。FBG窄带反射谱的中心波长由FBG的有效折射率和周期决定,仅在栅区对应应变和温度敏感,能有效地防止物理量交叉敏感带来的问题^[2,3]。超磁致伸缩材料(GMM)具有伸缩系数大、响应速度快等优点,广泛地应用于换能和驱动^[4,5]。基于GMM磁致伸缩系数大、FBG传感可靠等优点,将GMM与FBG组合(GMM-FBG体系)作为传感器进行电流传感,是目前电流传感领域的研究热点。

国际上报道应用GMM-FBG体系实现工频交流传感的研究始于2004年,多集中于温度影响的研究^[6,7],由于FBG动态信号解调技术的限制,国内相关的研究多限于将GMM-FBG体系暴露于螺线管内的直流磁场内,观察GMM磁致应变导致FBG反射中心波长变化的现象及规律^[8]。熊燕玲等^[9]在国内报道了应用ASE光源解调GMM-FBG体系的应变信号,测得螺线管中的工频电流。国内也有人用其他解调方法进行过相应研究^[10]。对GMM的研究大多集中在致动领域,作为传感器件的性能研究甚少^[11~13]。本文将GMM-FBG体系暴露于由铁磁物质设计而成的近似于工程电流互感器的磁回路中,使其产生交流应变,应用粗波分复用器件(CWDM)中心波长1550 nm通带的边带与FBG相关的强度解调原理,对交变应变形成的FBG动态中心波长位移实现解调,从而获得被测交变信号,以实现测量。同时运用快速傅里叶变换(FFT)算法分析了系统工作在线性区、准线性区和非线性区时互感信号的畸变程度,进一步理解GMM非线性特性对互感过程的影响。

2 原理与系统设计

2.1 FBG 波长信息解调技术

温度不变时,中心波长为 λ_B 的FBG沿轴向应变 ϵ 与波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 关系为

$$\Delta\lambda_B = (1 - p_e)\lambda_B\epsilon, \quad (1)$$

式中 p_e 为光纤有效光弹系数。该式表明FBG的中心波长会随轴向应变而变。设无电流输入时轴向应变 ϵ 为零。

中心波长为1550 nm透射式CWDM透射波长

区的一个边带在4 nm波长范围内有40 dB的透射率变化,若将CWDM边带曲线在变化最大区域内透射率与波长关系近似为线性关系,FBG的反射谱密度函数近似为高斯曲线函数,入射光通过FBG的反射和CWDM的透射,光强与波长之间关系可表述为线性滤波函数与FBG反射谱密度函数的相关,如图1所示。当FBG受到扰动时,FBG反射谱中心波长变化 $\Delta\lambda_B$ 与通过光电转换系统输出电平变化 $U(\Delta\lambda_B)$ 间线性关系为

$$U(\Delta\lambda_B) = GkR_0\Delta\lambda_B, \quad (2)$$

式中 R_0 为FBG峰值反射率, G 为光电转换系统增益, k 为常数。

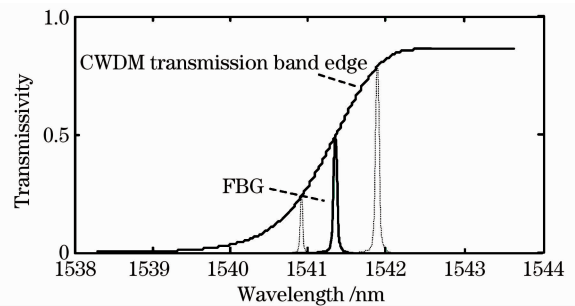


图1 CWDM透射谱与FBG反射谱

Fig. 1 Transmission spectra of CWDM and reflection spectra of FBG

将GMM-FBG体系暴露于交变磁场中,交变磁场致GMM的脉动应变被转换成FBG的波长动态变化,由解调器变成电平信号,电平信号中包含了电流信息。

设在待测电流 $i(t)$ 产生的激励磁场作用下,GMM上产生的应变为 $\epsilon(i)$,则待测电流、FBG中心波长及系统输出电平 $U(i)$ 的对应关系为

$$U(i) = GkR_0(1 - p_e)\epsilon(i)\lambda_B. \quad (3)$$

根据(1)式和(2)式可知,当无输入电流时,FBG反射谱中心波长 $\lambda = \lambda_B$,波长变化 $\Delta\lambda_B = 0$, $\epsilon(i) = 0$,输出电平 $U(i) = 0$ 。

2.2 磁路系统的设计与优化

设计了近似于工程电流互感器的磁路系统,由硅钢叠片、铁氧体材料、钕铁硼材料和GMM棒组成磁回路。根据磁场仿真分析,母排中电流感应的磁场大部分被限制在磁回路中,如图2所示。用铁氧体块状材料改善磁力线由硅钢叠片向GMM棒中耦合,硅钢片和铁氧体的相对磁导率大于1000,而GMM的相对磁导率在5~10范围内。仿真分析表明,被硅钢叠片约束的磁力线的40%会通过GMM棒,相比螺线管结构或赫姆霍兹线圈结构,该

磁路系统对引导磁力线进入 GMM 棒更有效^[14]。该结构的另一优点是 GMM-FBG 体系远离电流母排或线圈,不受电流发热的影响。设置偏置直流磁场,可以使 GMM 工作在线性区,消除 GMM 倍频效应和非线性效应的影响,应用钕铁硼高强永磁体置于磁路之中,永磁恒定磁场经磁路被施于 GMM 上,调整永磁材料的结构尺寸可改变恒定偏置磁场强度。经有限元分析,优化的结构尺寸如下:硅钢片

叠成截面 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 、边长为 30 cm 的正方形框架;GMM 材料采用 Terfenol-D, 尺寸设计成 $15\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,设计时长度要尽可能短,以使 Terfenol-D 棒的一阶谐振频率远离工作频率,截面也尽可能小,有利于降低总的损耗,该尺寸棒的一阶谐振频率为 15 kHz ,远离与 50 Hz 的工作频率和电力系统的 3, 5 次谐波频率。

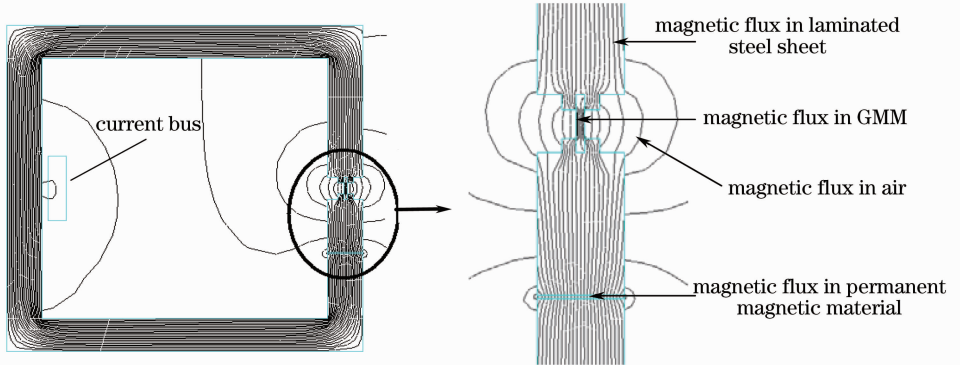


图 2 GMM-FBG 传感系统磁路框图

Fig. 2 Magnetic-path diagram of GMM-FBG sensor system

3 实验与分析

3.1 GMM-FBG 传感器定标

电流互感器实验装置由电磁系统、光源、传感系统、解调系统和数据采集系统组成,如图 3 所示。ASE 宽带光源发出的光经过耦合器到达 GMM-

FBG 传感器,被 FBG 反射后通过 CWDM 转变成光强信号进入光电转换器转换成电平信号,由数据采集系统进行数据处理。磁路中磁场由缠绕到硅钢叠片上的载流导线产生,缠绕导线 850 匝,电流读数采用安匝电流。

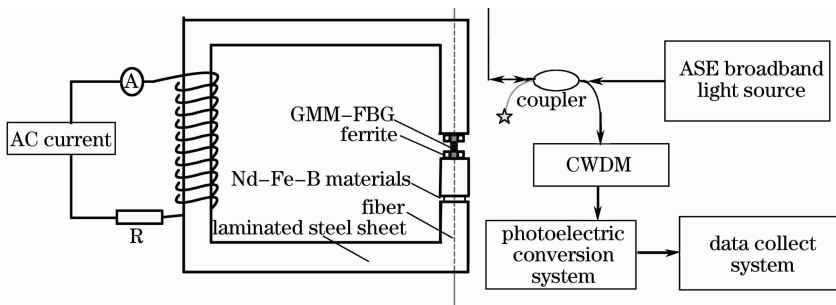


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

GMM-FBG 传感器定标时,除去永磁体(无偏置磁场)。将电流源通过直流电流,通过数据采集系统采集对应的系统输出电平,建立 GMM-FBG 传感器的磁滞迴线,如图 4 所示。其中横坐标为通过导线的安匝电流及转换的磁场,纵坐标为输出电平及由 FBG 中心波长转换的应变。由图 4 可以看出,在 GMM 无预应力条件下,激励安匝电流在 1200 A 范围内 GMM 应变与激励电流为准线性关系,可以利

用该准线性段进行电流传感。

3.2 工频电流互感实验

本文研究有偏置磁场下工频电流互感实验,因此,传感系统的输出电平与待测电流、FBG 中心波长关系式(3)式则变为

$$U(i) = U_0 + GkR_0(1 - p_c)\epsilon(i)\lambda_B, \quad (4)$$

式中 U_0 为传感系统中由于偏置磁场的引入系统的输出电平(静态工作点)。根据图 4 选择偏置磁场为

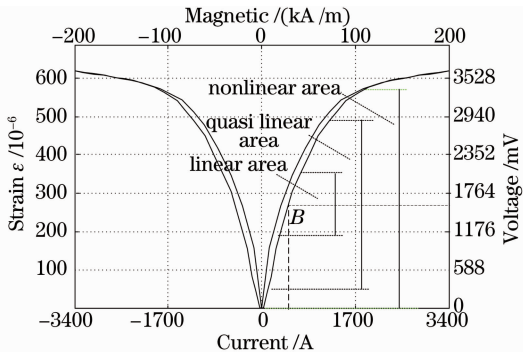


图 4 GMM-FBG 磁滞迴线族

Fig. 4 GMM-FBG hysteresis loop groups

30 kA/m 即图 4 中 B 点,其对应永磁体充磁方向特征尺寸为 $\phi = 15 \text{ mm}$, $h = 1.8 \text{ mm}$ 的圆片结构),此

时系统输出电平 U_0 为 1600 mV,根据(1)式的规定传感器中无电流时应变为零,且将该状态 FBG 中心波长值定义为无电流输入时中心波长。激励源为工频信号。将双踪示波器的两个通道 ch1,ch2 分别接到图 3 中标准电阻 R 和光电转换系统的输出端,用来监测传感系统的输入、输出信号。图 5(a),5(b)分别为在激励工频电流产生的磁场小于和大于偏置磁场两种情况下采集到的互感系统的输入和输出信号。图 5(a)反应由于偏置磁场的引入,且 186 A 输入电流产生的磁场小于偏置磁场,输出电平与输入电流变化同频率、同相位,并且波形无明显畸变。图 5(b)表示在图 4 中工作点为 B 点、幅值为 700 A 电流的激励使系统输出在负峰值饱和,说明激励电流形成的交变磁场峰值大于偏置磁场超出测量范围。

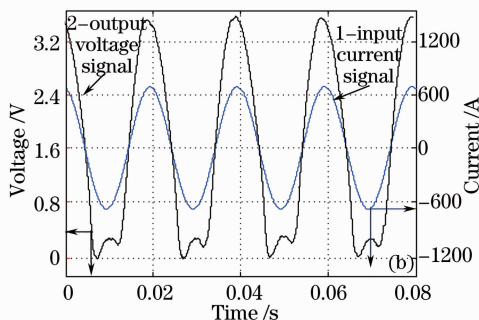
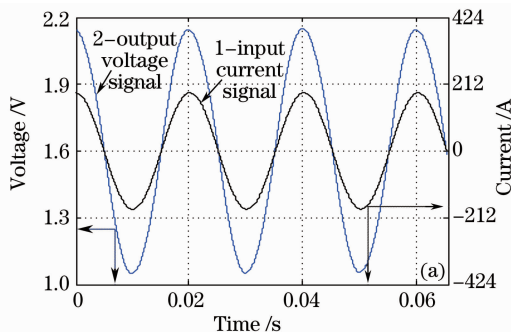


图 5 偏置磁场相同激励电流为(a)186 A,(b)700 A 时传感系统的输入-输出信号

Fig. 5 Input-output signals of the sensor system with (a) 186 A, (b) 700 A exciting current and the same bias magnetic field

改变工频电流幅值建立输入信号与传感器输出信号的迴线规律,即传感器 GMM-FBG 的传递特性,如图 6 所示。重复上述实验,建立输入工频电流信号“正向”幅值与传感器输出电平幅值的关系,如图 7 所示,输入信号与输出信号幅值呈较好的线性关系。当偏置磁场在 30 kA/m 时,激励安匝电流小于 570 A 范围内互感系统电流检测灵敏度为 2.52 mV/A。若

系统噪声控制在 20 mV,最小探测的安匝电流为 8 A。

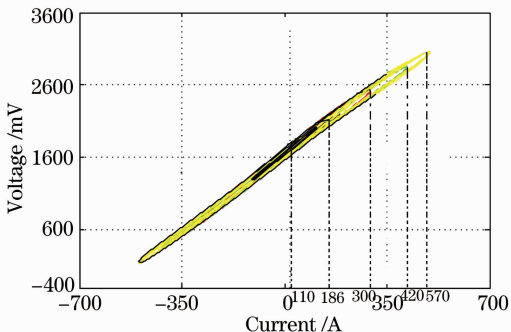


图 6 传感器的输入-输出关系族

Fig. 6 Input-output groups of the sensor

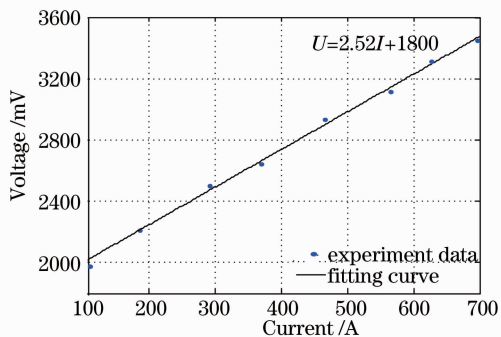


图 7 输出电平幅值与激励电流幅值关系

Fig. 7 Relation between output electrical level amplitude and exciting current amplitude

3.3 输出信号质量分析

为了考察 GMM 的迴滞特性和非线性对系统传递特性的影响,用 FFT 对工作激励电流在传感器线性区、准线性区和非线性区时互感系统输出时域信号进行频谱特性分析,如图 8 所示。图中横坐标为频率,纵坐标为归一化的功率谱密度。

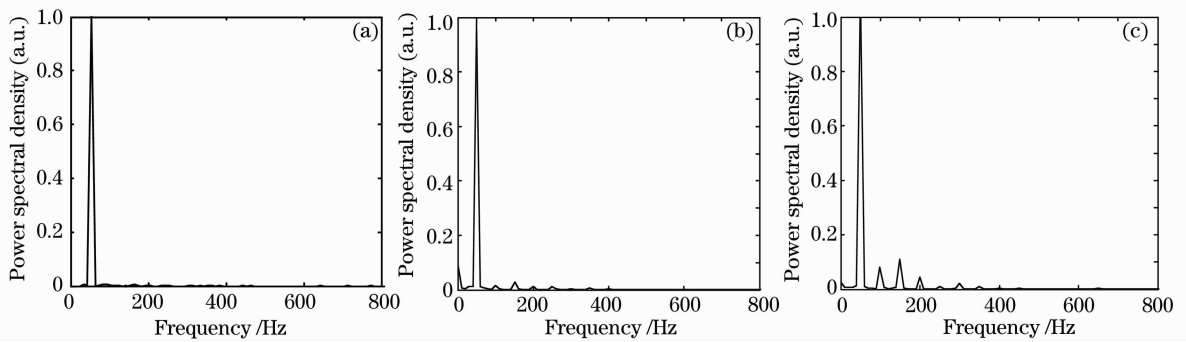


图 8 激励电流分别为(a)186 A, (b) 300 A, (c) 700 A 时互感系统输出信号的频谱

Fig. 8 Output signal spectra of transformer system with (a) 186 A, (b) 300 A, (c) 700 A exciting current

在偏置磁场为 30 kA/m, 工频电流幅值为 186 A (工作在线性区)时,互感系统输出信号基本上没有谐波分量;当工频电流幅值为 300 A(工作在准线性区),互感系统输出信号中的二次、三次和四次谐波分别占 2.3%, 3.3% 和 1.2%;当工频电流幅值为 700 A(激励磁场大于偏置磁场),互感系统输出信号中的二次、三次和四次谐波分别占 8.2%, 11.2% 和 5.0%。用于实际电流互感器设计时,应根据需要设计偏置磁场和额定电流。本例中,当电流幅值为 186 A,系统工作在线性区,基本上不产生非线性误差,与 8 A 的最小测量电流相比,系统有 4.3% 的满量程精度。

4 结 论

设计了新的电磁结构,运用硅钢叠片和铁氧体构建的磁路系统能有效地将磁场引入 GMM 棒,构成了近似于工程应用的电流互感器结构,将钕铁硼高强永磁材料置于回路中可有效设置偏置磁场。应用 CWDM 与 FBG 相关实现了交变磁场致动态应变的解调。实验和傅里叶分析表明,实验系统线性区最大输入电流为 186 A 时,输出信号几乎无谐波分量,说明在线性区 GMM 的磁滞特性与非线性特性几乎不影响测量,在这个量程范围系统有 4.3% 的满量程精度。

参 考 文 献

- 1 Wang Tingyun. The study of high voltage photoelectric current transformer[D]. Beijing: Tsinghua University, 2000. 3~14
王廷云. 高压光电式电流互感器的研究[D]. 北京:清华大学, 2000. 3~14
- 2 Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiquan. Theoretical analysis of fiber Bragg grating characterization by applying transverse force [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 472~476
吴飞, 李立新, 李志全. 均匀光纤布拉格光栅横向受力特性的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 472~476
- 3 Liu Changjun, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Study on self-induced chirping for fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1671~1674

- 刘长军, 张伟刚, 姜萌等. 光纤布拉格光栅自致啁啾效应的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1671~1674
- 4 Cao Shuying, Wang Bowen, Yan Rongge *et al.*. The hysteretic non-linearity dynamic model of giant magnetostrictive braker[J]. *Chin. Soc. Electrical Engng.*, 2003, **23**(11): 149~153
曹淑英, 王博文, 闫荣格等. 超磁致伸缩制动器的磁滞非线性动态模型[J]. *中国电机工程学报*, 2003, **23**(11): 149~153
- 5 F. T. Calkins, R. C. Smith, A. B. Flatau. Energy-based hysteresis model for magnetostrictive transducers [J]. *IEEE Trans. Magnetics*, 2000, **36**(2): 429~439
- 6 J. Mora, A. Diez, J. L. Cruz. A magnetostrictive sensor interrogated by fiber gratings for DC-current and temperature discrimination [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12): 1680~1682
- 7 D. Reilly, A. J. Willshire, G. Fusiek *et al.*. A fiber Bragg grating based sensor for simultaneous AC current and temperature measurement [J]. *IEEE Sens. J.*, 2006, **6**(6): 1539~1542
- 8 Liao Bangquan, Feng Dejun, Zhao Qida *et al.*. FBG current sensor theoretical and experimental research [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1092~1095
廖帮全, 冯德军, 赵启大等. 光纤布拉格光栅电流传感器的理论和实验研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1092~1095
- 9 Xiong Yanling, Zhao Hong, Zhang Jian *et al.*. A GMM and FBG based on AC current sensor [J]. *Trans. China Electrotechnol. Soc.*, 2006, **21**(4): 16~19
熊燕玲, 赵洪, 张剑等. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅交流电流传感系统[J]. *电工技术学报*, 2006, **21**(4): 16~19
- 10 Yao Yuan, Yi Benshun, Xiao Jinsheng. Current measurement based on giant magnetostriction material and fiber Bragg grating [J]. *J. Wuhan University Technol.*, 2008, **30**(8): 124~127
姚远, 易本顺, 肖进胜. 基于超磁致伸缩材料和光纤光栅的交流电流测量[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, **30**(8): 124~127
- 11 P. Niewczas, G. Fusiek, J. R. McDonald. Dynamic capabilities of the hybrid fiber-optic voltage and current sensor [C]. *IEEE Sensors Conference*, 2006. 295~298
- 12 G. Fusiek, P. Niewczas, J. R. McDonald. Concept level evaluation of the optical voltage and current sensors and an arrayed waveguide grating for aero-electrical systems' applications [C]. *IEEE IMTC*, 2007. 1~5
- 13 D. Satpathi, J. A. Moore, M. G. Ennis. Design of a Terfenol-D based fiber-optic current transducer [J]. *IEEE Sens. J.*, 2005, **5**(5): 1057~1059
- 14 Zhang Yongshun, Liu Guangjun, Jia Zhenyuan. Analysis on dynamic characteristics of giant magnetostrictive thin films [J]. *J. Mechanical Engng.*, 2005, **41**(6): 168~173
张永顺, 刘广军, 贾振元. 超磁致伸缩薄膜动态驱动特性的研究[J]. *机械工程学报*, 2005, **41**(6): 168~173