

# 复合结构磁扭转微镜光纤电流传感器的研究

黄梅红<sup>1</sup> 王巨锋<sup>2</sup> 庄其仁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>泉州师范学院应用科技学院, 福建 泉州 362000

<sup>2</sup>华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

**摘要** 提出一种复合结构微机电系统(MEMS)磁扭转微镜光纤电流传感器,传感部分由磁扭转微镜和双光纤准直器组成。介绍了MEMS扭转微镜的结构及电流传感原理。对电流传感器模型进行分析,结果表明,选择合适的准直器端面与微镜的距离,可以避免信号失真。利用归一化光强峰峰值作为交变电流来测量输出信号时,电流测量灵敏度随电流测量值的变化而变化,且被测电流的电流强度接近0时,测量灵敏度也接近0。因此采用归一化光强线性修正信号处理方法,得到了很好的输出线性响应曲线,使电流测量灵敏度不受电流变化的影响。最后实验验证了理论分析和模拟仿真结果的正确性,实验测得的归一化光强线性修正响应灵敏度约为0.034/A。

**关键词** 信号处理; 光纤电流传感器; 微机电系统; 磁扭转微镜

**中图分类号** TN253      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.070603

## Study of Magnetic Torsion Micro-Mirror Fiber Current Sensors with Composite Structure

Huang Meihong<sup>1</sup> Wang Jufeng<sup>2</sup> Zhuang Qiren<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Applied Science and Technology College, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China

<sup>2</sup>College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

**Abstract** A MEMS (micro-electro-mechanical system) magnetic torsion micro-mirror fiber current sensor with composite structure is proposed. The sensor part is composed of a magnetic torsion mirror and a dual-fiber collimator. The structure of MEMS magnetic torsion micro-mirror and the principle of current sensor are introduced. Analysis based on the current sensor model shows that by choosing suitable distance between the collimator and the micro-mirror, signal distortion can be avoided. When the peak-to-peak value of normalized intensity is taken as the output signal of alternating current measurement, the measurement sensitivity changes with the measured value of electric current. When the measured current approaches 0, the sensitivity also approaches 0. Thus, one linear correction processing method for normalized intensity signal is proposed. With this method, a good linear response curve is obtained, and the current measurement sensitivity is not distorted by the current change. Finally, the correctness of theoretical analysis and simulation results are testified by experiments, from which the linear response sensitivity of normalized intensity reaches around 0.034/A.

**Key words** signal processing; fiber current sensor; micro-electro-mechanical system; magnetic torsion micro-mirror

**OCIS codes** 060.2330; 060.2370; 060.4510; 070.0070;

## 1 引言

微机电系统(MEMS)与光学的结合,已广泛应用于复合结构光器件的研究<sup>[1-2]</sup>,如光滤波器、光调制器、

收稿日期: 2016-03-04; 收到修改稿日期: 2016-03-09; 网络出版日期: 2016-06-21

基金项目: 福建省自然科学基金(11151054)、福建省教育厅课题(JA15396)、福建省光传输与变换重点实验室开放课题(2014101)

作者简介: 黄梅红(1980—),女,硕士,讲师,主要从事光电检测和光纤传感技术方面的研究。

E-mail: plum\_huang@126.com

光开关等。近年来, MEMS 技术在传感领域的应用, 减小了传感器尺寸且提高了相应精度, 很大程度上拓展了传感器的应用领域<sup>[3-4]</sup>, MEMS 光学传感器在磁场和电流测量方面的应用成为研究热点。Eyre 等<sup>[5]</sup>提出一种采用 CMOS 工艺制作的共振扭摆机构, 通过测量扭摆幅度确定磁场强度。Heredero 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于电磁感应的 MEMS 光学电流传感器, 当交流电经过输电导线时, 在空间产生交变磁场, 将一块磁铁固定在硅薄膜上, 该磁铁与空间交变磁场相互作用引起硅薄膜的上下振动, 磁铁上端面与一个光纤的端面形成法布里-珀罗干涉, 通过光学信号的变化来感知硅薄膜的振动, 从而测量交变电流的大小。该结构受温度的影响大, 热胀冷缩导致法布里-珀罗腔静态长度随温度变化, 进而影响测量精度和稳定性; 此后, 赵本刚等<sup>[7]</sup>研究了一种复合结构 MEMS 光学电流传感器, 通过罗氏(Rogowski)线圈将高压交变电流信号转化为 MEMS 扭转微镜的振动信号, 同时采用对角度敏感的双光纤准直器对转动特性进行检测, 从而获知电流的信息。Rogowski 线圈需要与长直输电导线形成穿心结构, 因此存在安装不方便的问题。Du 等<sup>[8-9]</sup>研究了基于硅桥结构的 MEMS 铁磁磁敏传感器, 通过铁磁体在磁场中产生的扭矩与硅桥的耦合作用来检测磁场。龙亮等<sup>[10]</sup>设计制作了一种微型 MEMS 光纤磁传感器, 利用对角度变化敏感的双光纤准直器对扭镜的扭转角度进行了检测, 检测灵敏度可达 0.65 dB/mT, 最小可分辨磁场达 167 nT。

在智能电网中, 高压线路的电流传感器必须具有结构简单、体积小、重量轻、成本低、安装方便、测量动态范围宽、测量精度和灵敏度高和稳定性好等特点, 上述强度调制型光纤电流传感器易受传输距离<sup>[11]</sup>、光源波动<sup>[12]</sup>和连接器损耗等的影响。因此, 本文研究了一种可用于测量高压线路交变电流的复合结构 MEMS 磁扭转微镜光纤电流传感器, 重点分析了接收光强和反射面与目标距离的关系, 提出了一种简单易于实现的线性矫正方法, 该方法可获得高灵敏度和较好稳定性, 并在光源和连接器损耗变化的实验条件下进行实验验证。

## 2 MEMS 磁扭转微镜电流传感器原理

### 2.1 基本原理

MEMS 磁扭转微镜电流传感器原理图如图 1 所示, 主要由带有扭转梁和反射镜的 MEMS 扭转微镜、永磁体和双光纤准直器构成。扭转微镜固定在导线附近, 并与通电导线之间保持固定距离, 工作原理为: 永磁体在通电导线产生的交变磁场中产生磁扭矩, 该磁扭矩使 MEMS 扭转微镜产生扭转运动。当被测电流为交流电流时, 永磁体的最大扭转角度与外磁场(电流)成比例, 扭转微镜始终以扭转梁为轴按交电流的频率周期性振荡。通过双光纤准直器与微镜反射面的位置关系, 探测微镜扭转产生的光强变化即可获得待测电流大小。

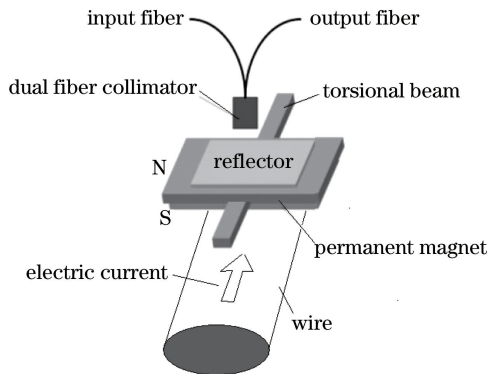


图 1 磁扭转微镜电流传感器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetic torsion micro-mirror current sensor

### 2.2 扭转角度与电流的关系

研究表明, 扭转角度很小(小于  $0.5^\circ$ )时, 磁扭转微镜的力矩与通电导线的电流成正比<sup>[13]</sup>。设输入交流电  $i(t) = i_0 \cos(\omega t)$ , 则磁扭转微镜力矩

$$T(t) = A \cdot i_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

式中  $A$  为一个常数,  $i_0$  为交流电电流强度幅值,  $\omega$  为交流电角频率。

在磁场力矩  $T(t)$  的作用下, 扭转微镜的转动角度满足微分方程:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C_\theta \frac{d\theta}{dt} + K\theta = T(t), \quad \theta(0) = 0, \quad \frac{d\theta(0)}{dt} = 0, \quad (2)$$

式中  $\theta$  为微镜稳态扭转振动时的扭转角度;  $J$  为系统的转动惯量, 可根据扭转微镜的几何尺寸与材料物理性质得到;  $C_\theta$  为阻尼系数, 可根据实验过程中暂态扭转振动的衰减时间常数来确定;  $K$  为扭转梁的扭转刚度<sup>[14]</sup>, 该值由基底材料的剪切模量和圆形扭转梁的半径决定。

由(1)式和(2)式可求得  $\theta$  与导线电流强度  $i_0$  的关系为<sup>[13]</sup>

$$\theta(t) = Qi_0 \cos(\omega t - \delta), \quad (3)$$

式中  $\delta$  为微镜扭转初相位, 微镜稳态振动的振幅  $Q$  可表示为

$$Q = A / \left[ J \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{C_\theta^2}{J^2} \omega^2} \right], \quad (4)$$

式中  $\omega_0$  为扭转微镜的谐振角频率<sup>[15]</sup>且  $\omega_0 = \sqrt{K/J}$ 。

### 2.3 光纤接收光强度与扭转角度的关系

双光纤准直器的入射与出射光场的耦合效率随扭转角度的增大而减小, 根据模场耦合理论, 光纤准直器输出光场和接收的反射光场的耦合效率取决于两光场的叠加比率, 耦合效率可表示为<sup>[16]</sup>

$$F = \frac{\iint \varphi_1 \varphi_2^* ds}{\iint \varphi_1^2 ds \iint \varphi_2^2 ds}, \quad (5)$$

式中  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为入射光和反射光的光强分布,  $s$  为双光纤准直器端面面积。对于单模光纤准直器, 光强分布可近似为高斯分布, 设准直器到微镜反射面的距离为准直器输出高斯光束的束腰距离  $d$ , 则准直器输出光场和接收光场具有完全相同的分布特性, 如图 2 所示, 光纤准直器的出射光和接收光分别为反射镜的入射光和反射光, 因此光纤准直器归一化出射光场  $\varphi_1$  可表示为<sup>[5]</sup>

$$\varphi_1(x, y) = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp[-(x^2 + y^2)/w^2], \quad (6)$$

光纤准直器归一化接收光场  $\varphi_2$  可表示为

$$\varphi_2(x, y) = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\{-[(x - \Delta x)^2 + y^2]/w^2\}, \quad (7)$$

式中  $w$  为准直器出射模场半径, 可近似为准直器的半径。由(5)~(7)式可得

$$F = \exp(-\Delta x^2/w^2), \quad (8)$$

由于扭转微镜旋转角度  $\theta$  很小, 由图 2 可知,  $\Delta x \approx 2\theta d$ , 所以(8)式可写为

$$F(\theta) = \exp(-4\theta^2 d^2/w^2). \quad (9)$$

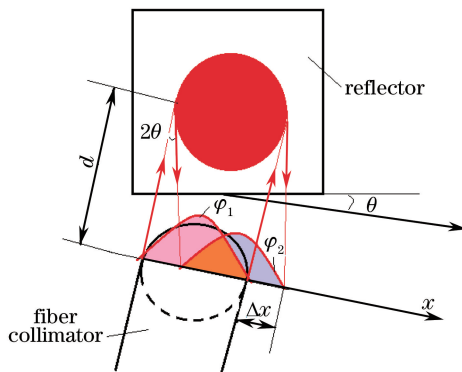


图 2 光纤准直器测量扭转角度原理图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring torsion angle with fiber collimator

### 3 灵敏度与动态范围分析

将(3)式代入(9)式,可得到接收光纤接收到的归一化光强度  $I_n$  与被测交变电流的关系式为

$$I_n(i_0, t) = \exp\left[-\frac{4Q^2 d^2}{\omega^2} i_0^2 \cos^2(\omega t - \delta)\right]. \quad (10)$$

当扭转微镜电流传感器的结构参数和材料确定后,(10)式中  $Q$ 、 $d$  和  $\omega$  均为常数,则归一化光强度的峰峰值可写为

$$I_{\text{pp}}(i_0) = 1 - \exp(-4Q^2 d^2 i_0^2 / \omega^2), \quad (11)$$

(11)式为输出交变电流幅值公式,电流测量灵敏度为

$$\frac{\Delta I_{\text{pp}}(i_0)}{\Delta i_0} = \frac{8Q^2 d^2 i_0}{\omega^2} \exp\left(-\frac{4Q^2 d^2}{\omega^2} i_0^2\right). \quad (12)$$

#### 3.1 光纤准直器与微镜距离 $d$ 的影响

准直器直径为 1 mm 时,准直器端面与微镜反射面的距离  $d$  对归一化光强度  $I_n \sim \theta$  响应曲线的影响如图 3 所示,可见增大准直器端面与微镜的距离  $d$  可增大响应曲线斜率且提高微镜扭转角度检测灵敏度,这对小角度测量有利,但可测量角度范围(动态范围)变小。通常扭转梁的最大扭转角度  $\theta_0$  决定于扭转梁的材料和结构参数,选择  $d$  的同时需要考虑扭转梁的最大扭转角度  $\theta_0$ ,采用与之相匹配的距离  $d_0$ 。图 4 所示为不同微镜距离  $d$  对测量信号的影响:图 4(a)所示为  $d \ll d_0$  即扭转梁的最大扭转角度  $\theta_0$  远小于光纤准直器可测量角度(动态范围)  $\theta_{\text{max}}$  时的输出波形,输出信号顶部平坦,幅度很小,影响了测量准确性和灵敏度,不可取;图 4(b)所示为  $d < d_0$  即扭转梁的最大扭转角度  $\theta_0$  等于动态范围  $\theta_{\text{max}}$  时的输出波形,输出波形是比较理想的兼顾灵敏度和动态范围的输出波形;图 4(c)所示为  $d = d_0$  即  $\theta_0$  等于  $\theta_{\text{max}}$  时的输出波形,波形底部有部分非线性失真,影响了测量精度;图 4(d)所示为  $d > d_0$  即  $\theta_0$  大于  $\theta_{\text{max}}$  时的输出波形,输出波形严重失真,无法得到正确的归一化光强度的峰峰值。

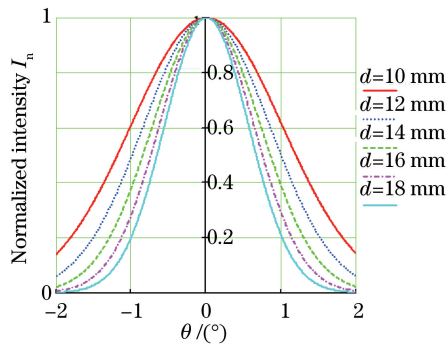


图 3 归一化光强度  $I_n \sim \theta$  响应曲线与微镜距离  $d$  的关系

Fig. 3 Relationship between response curves of normalized intensity  $I_n \sim \theta$  and micro-mirror distance  $d$

#### 3.2 测量灵敏度问题

利用光纤准直器扭转微镜测量电流的灵敏度,结果如图 5 所示,曲线所用参数为  $Q = 0.001/\text{A}$ ,  $\omega = 0.5 \text{ mm}$ 。图中曲线表明上述电流测量的灵敏度随电流测量值的变化而变化,当被测电流接近 0 时,电流测量灵敏度也接近 0,因此需要作进一步的数据处理——线性矫正。对(10)式两边取对数并开根号取正根,可得归一化光强度线性矫正信号为

$$L(i_0, t) = \sqrt{-\ln[I_n(i_0, t)]} = \left| \frac{2Qd}{\omega} i_0 \cos(\omega t - \delta) \right|, \quad (13)$$

峰值表达式为

$$L_p(i_0) = 2Qd i_0 / \omega, \quad (14)$$

电流测量灵敏度为

$$\frac{\Delta L_p(i_0)}{\Delta i_0} = \frac{2Qd}{\omega}, \quad (15)$$

比较(12)式和(15)式,可以看出将接收光纤的光信号经过取对数和开根号处理后,电流测量灵敏度变为恒定

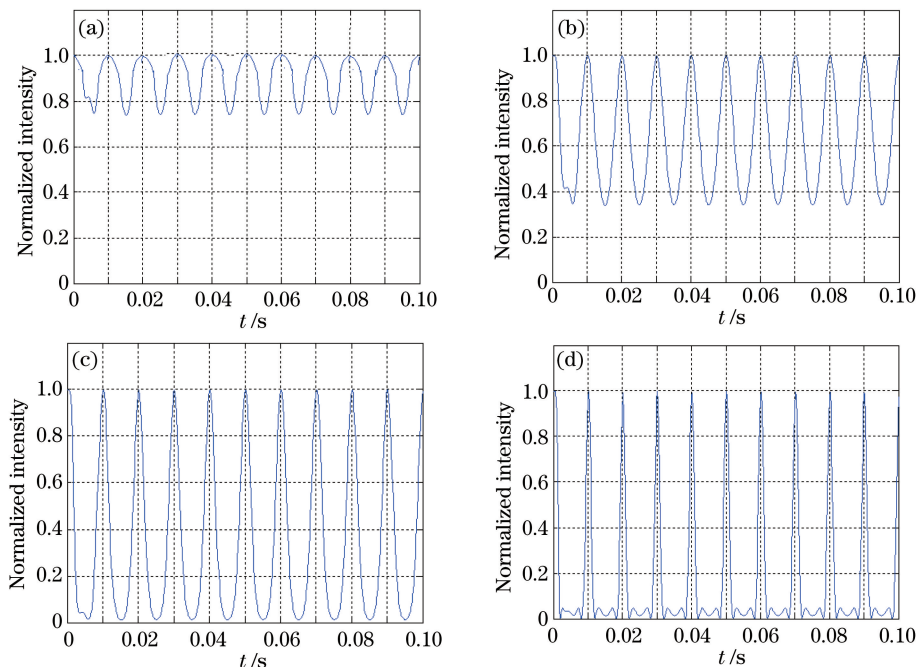


图4 微镜距离  $d$  对测量信号的影响。(a)  $\theta_0 \ll \theta_{\max}$  ( $d \ll d_0$ ); (b)  $\theta_0 < \theta_{\max}$  ( $d < d_0$ ); (c)  $\theta_0 = \theta_{\max}$  ( $d = d_0$ ); (d)  $\theta_0 > \theta_{\max}$  ( $d > d_0$ )

Fig. 4 Influence of micro-mirror distance  $d$  on measurement signals. (a)  $\theta_0 \ll \theta_{\max}$  ( $d \ll d_0$ ); (b)  $\theta_0 < \theta_{\max}$  ( $d < d_0$ ); (c)  $\theta_0 = \theta_{\max}$  ( $d = d_0$ ); (d)  $\theta_0 > \theta_{\max}$  ( $d > d_0$ )

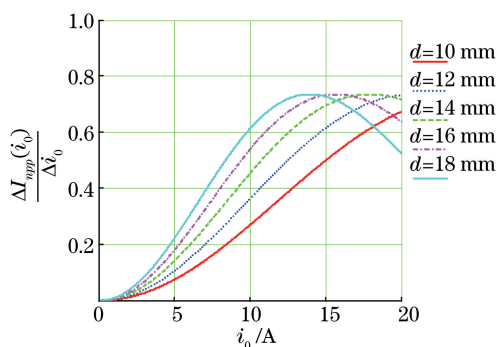


图5 扭转微镜测量电流的灵敏度曲线

Fig. 5 Sensitivity curves of measuring current with torsion micro-mirror

值,与被测电流的大小无关。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 磁扭转微镜实验室制作

图6所示为实验室制作的MEMS磁扭转微镜结构图,采用聚合物-金属复合结构。扭转微镜基底为聚碳酸酯PC材料,内嵌铍青铜扭转梁和钕铁硼(NdFeB)永磁体,扭转微镜通过扭转梁固定在聚合物PC框架上,扭转微镜正面为铝膜反射镜。扭转微镜的尺寸为 $2.2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$ ,铍青铜扭转梁直径为 $0.1\text{ mm}$ ,单边长度为 $2\text{ mm}$ ,扭转微镜的主体部分采用光纤激光打标机(YLP-X2,浙江嘉泰激光科技有限公司,浙江)制作完成。

### 4.2 实验方法与测量结果

实验采用He-Ne激光作为光源(可见光,易操作),通过双光纤准直器垂直入射磁扭转微镜,准直器直径为 $1\text{ mm}$ ,光纤准直器端面与扭转微镜反射面垂直距离为 $10\text{ mm}$ 。通电导线直径为 $5\text{ mm}$ ,导线中心与扭转微镜背

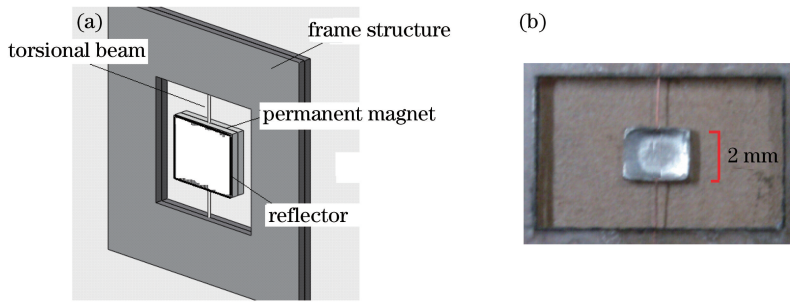


图 6 MEMS 磁扭转微镜结构图。(a) 结构图；(b) 实物照片

Fig. 6 Structure diagram of MEMS magnetic torsion micro-mirror. (a) Structure diagram; (b) real structure photo

面垂直距离为 10 mm, 采用示波器测量 PIN 光电二极管的输出信号波形, 通过调压器改变导线电流, 测量结果如图 7 所示。小电流时, 微镜扭转角度  $\theta_0$  远小于光纤准直器可测量角度(动态范围)  $\theta_{\max}$ , 信号顶部平坦, 如图 7 (a)、(b) 所示; 电流过大时, 微镜扭转角度  $\theta_0$  等于或大于光纤准直器动态范围  $\theta_{\max}$ , 信号底部平坦, 如图 7 (e)、(f) 所示。实验结果与图 4 理论仿真结果一致。

通过改变光源的光功率, 使光源光功率下降 3 dB, 在不同电流下得到的归一化光强度信号波形与由图 7 所示信号得到的归一化光强度信号波形一致, 说明光源光强度变化不影响归一化光强度信号波形。同样, 通过 3 dB 光纤衰减器使探测器接收到的信号衰减, 得到的不同电流下的归一化光强度信号波形也保持不变, 由此可见采用归一化光强度信号处理方法可以消除强度型光纤传感器受传输距离、光源波动和连接器损耗变化等的影响。实验得到的归一化光强度信号峰值与导线电流的关系曲线如图 8 所示。

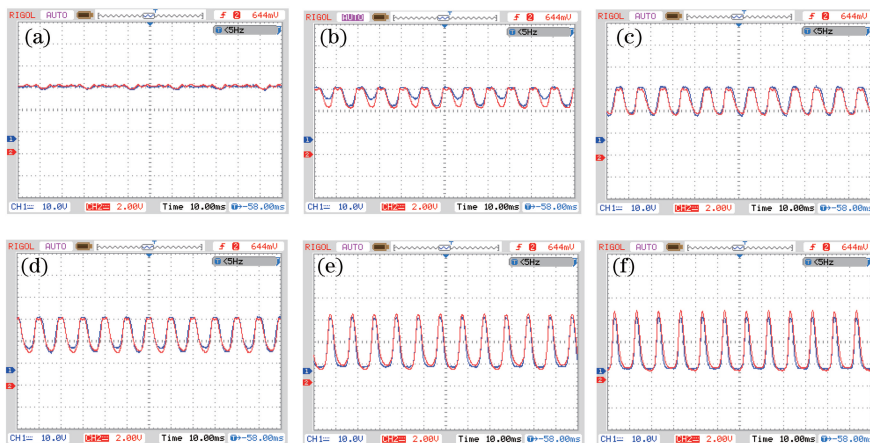


图 7 不同电流下的输出信号波形。(a)  $I = 3.2$  A; (b)  $I = 18.5$  A; (c)  $I = 21.2$  A; (d)  $I = 34.9$  A; (e)  $I = 42.6$  A; (f)  $I = 51.2$  A

Fig. 7 Output signal waveforms under different currents. (a)  $I = 3.2$  A; (b)  $I = 18.5$  A; (c)  $I = 21.2$  A; (d)  $I = 34.9$  A; (e)  $I = 42.6$  A; (f)  $I = 51.2$  A

由图 8 可得, 电流幅值在 0~17 A 范围的归一化光强峰峰值变化率(灵敏度)约为 0.016 /A; 电流幅值在 17~48 A 范围内时, 灵敏度约为 0.03 /A; 电流幅值在 48~55 A 范围内时, 灵敏度约为 0.02 /A, 这表明直接(未经处理)光测量的传感器灵敏度是随电流大小不断变化的, 不利于测量系统的标定。

#### 4.3 数据处理与分析

将图 8 所示的实验数据按照(13)式对光强度进行线性矫正数据处理, 即取  $L(i_0) = \sqrt{-\ln[I_{npp}(i_0)]}$ , 得到  $L(i_0) \sim i_0$  关系曲线, 如图 9 所示, 该响应曲线线性度很好, 归一化光强的线性矫正响应电流测量灵敏度约为 0.034 /A, 基本不受电流变化影响。

由于实验测量得到的光强度进行了归一化处理, 所以光强度信号的输出波形最大值为 1。调光型光纤传感器的强度调制不同于其他强度调制型光纤传感器, 其输出信号不受光路光信号衰减和光源功率波动的影响, 因此基于复合结构 MEMS 磁扭转微镜的调光型光纤电流传感器结合归一化光强度线性矫正信号处理

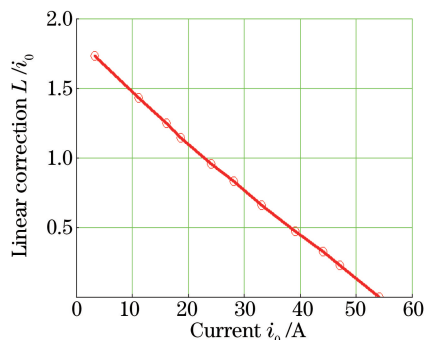
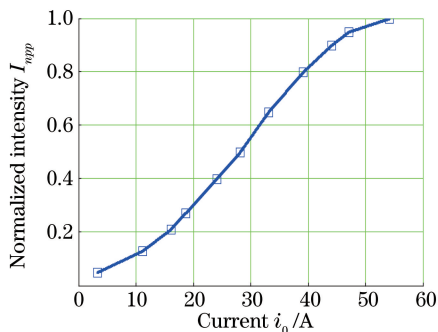


图 8 归一化光强峰峰值与导线电流的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of peak-to-peak value of normalized intensity and wire current

图 9 归一化光强线性矫正值与导线电流的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve of linear correction value of normalized intensity and wire current

方法,光强信号输出波形最大值均为 1,这一测量结果说明了该数据处理方法的稳定性。

## 5 结 论

对复合结构 MEMS 磁扭转微镜光纤电流传感器的结构模型进行了分析,结果表明,当  $\theta_0 \ll \theta_{\max}$  时,输出信号顶部平坦,幅度很小,影响了测量准确性和灵敏度;当  $\theta_0 > \theta_{\max}$  时,输出波形底部严重失真,无法得到正确的归一化光强度的峰峰值。通过减小准直器端面与微镜的距离  $d$ ,可使  $\theta_0 < \theta_{\max}$ ,避免信号失真。另外由于归一化光强变化动态范围随  $d$  的减小而变小,因此  $d$  值不能太小。以归一化光强度峰峰值作为交变电流测量的输出信号,电流测量灵敏度随电流测量值的变化而变化,且当被测电流接近 0 时,电流测量灵敏度也接近 0。通过采用归一化光强度线性矫正信号处理的方法,可以得到很好的线性响应曲线,电流测量灵敏度不受电流变化的影响。实验结果与理论分析、模拟仿真结果一致,实验得到的归一化光强线性矫正响应电流测量灵敏度约为 0.034 /A,说明基于复合结构 MEMS 磁扭转微镜的调光型光纤电流传感器和归一化光强度线性矫正信号处理方法具有实际应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Lenz J E. A review of magnetic sensors[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(6): 973-989.
- 2 Goel M. Recent developments in electroceramics: MEMS applications for energy and environment [J]. Ceramics International, 2004, 30(7): 1147-1154.
- 3 Panas R M, Cullinan M A, Culpepper M L. Design of piezoresistive-based MEMS sensor systems for precision microsystems[J]. Precision Engineering, 2012, 36 (1): 44-54.
- 4 Khoshnoud F, de Silva C W. Recent advances in MEMS sensor technology-mechanical applications[J]. Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE, 2012, 15(2): 14-24.
- 5 Eyre B, Pister K S J, Kaiser W. Resonant mechanical magnetic sensor in standard CMOS[J]. IEEE Electron Device Letters, 1998, 19(12): 496-498.
- 6 Heredero R L, Santos J L, de Caleyra R F, et al.. Micromachined low-finesse Fabry-Perot interferometer for the measurement of DC and AC electrical currents[J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(1): 13-18.
- 7 Zhao Bengang, Liu Yufei, Xu Jing, et al.. Design of novel optical current sensor based on MEMS[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(5): 534-538.  
赵本刚, 刘玉菲, 徐 静, 等, 新型 MEMS 光学电流传感器的设计[J]. 半导体光电, 2006, 27(5): 534-538.
- 8 Du G T, Chen X D, Lin Q B. Micromechanical magnetic sensor based on cylindrical ferromagnets[J]. IEEE Sensor Journal, 2011, 11(11): 2973-2979.
- 9 Du G T, Chen X D. MEMS magnetometer based on magnetorheological elastomer[J]. Measurement, 2012, 45(1): 54-58.
- 10 Long Liang, Zhong Shaolong, Xu Jing, et al.. Design and fabrication of mirco fiber-optic magnetic sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(9): 2294-2302.

- 龙 亮, 钟少龙, 徐 静, 等. 微型光纤磁传感器的设计与制作[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(9): 2294-2302.
- 11 Wang Jufeng, Huang Meihong, Zhuang Linling, *et al.*. Characteristics of MEMS torsion micro-mirror current sensor based on polymer material[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(3): 450-456.  
王巨锋, 黄梅红, 庄琳玲, 等. 聚合物 MEMS 磁扭转微镜电流传感特性研究[J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(3): 450-456.
- 12 Li Jianshu, Zhong Xianxin. Analysis on four-terminal optical fiber compensation network[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(10): 923-928.  
李建蜀, 钟先信. 四端光纤补偿网络的理论分析[J]. 光子学报, 1998, 27(10): 923-928.
- 13 Peng Huan. Research on reflected fiber distance sensor with single mode illumination[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012: 4-6.  
彭 欢. 单模光纤照射反射式光纤位移传感技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 4-6.
- 14 Zhang X M, Chau F S, Quan C, *et al.*. A study of the static characteristics of a torsional micromirror[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 90(1-2): 73-81.
- 15 Asada N, Takeuchi M, Vaganov V, *et al.*. Silicon micro-optical scanner[J]. Sensor and Actuators A: Physical, 2000, 83(1): 284-290.
- 16 Gilsdorf R W, Palais J C. Single-mode fiber coupling efficiency with graded-index rod lenses[J]. Applied Optics, 1994, 33(16): 3440-3445.