

文章编号 1004-924X(2011)08-1944-06

提高光栅莫尔条纹信号质量的滤波方法

吴宏圣*, 曾琪峰, 乔 栋, 郭帮辉

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对莫尔条纹信号的质量问题提出一种相位差滤波法。将指示光栅上四场裂相方式中每场细分为多个不同相位的行组合,利用行组合间的不同相位排列关系来消弱高次谐波的分量,从而提高莫尔条纹信号的质量。首先,介绍了莫尔条纹的傅里叶级数表达式,对莫尔条纹的各次谐波特性进行了分析。然后,以指示光栅的图案设计为例,阐明该滤波方法消除二次、三次和四次谐波的过程。最后,通过仿真和实验,验证了该滤波方法对削弱高次谐波的有效性。实验结果表明,该滤波方法可将莫尔条纹信号的三次谐波削弱4.9%,在20 μm 内测量精度提高了0.5 μm 。另外,该方法仅改变指示光栅的刻划图案,不增加制造成本和体积,实用性强,易于工业生产。

关键词:莫尔条纹; 相位差滤波; 指示光栅; 高次谐波

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1944

Filtering method of improving quality of grating Moiré fringe

WU Hong-sheng*, ZENG Qi-feng, QIAO Dong, GUO Bang-hui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wu9321@163.com

Abstract: A filtering method, phase-difference filtering, was presented to improve the quality of grating Moiré fringe. Each field of the 4 field scanning reticle was divided into multi-lines with different phases to suppress the high harmonic generations and to improve the signal quality of the Moiré fringe. Firstly, the Fourier series expression of Moiré fringe was introduced and various harmonic generations of the Moiré fringe were analyzed. Then, the filtering method to eliminate the second, third and fourth harmonic generations was illustrated with the designed grating patterns. Finally, the validity of the method to inhibit the high harmonic generations was verified through simulations and experiments. Experimental results indicate that the third harmonic generation of the Moiré fringe signal can be reduced by 4.9% and the accuracy can be improved by 0.5 μm with the period of 20 μm . The method is effective, low cost, without increasing the system size and easy to be used in industrial productions.

Key words: Moiré fringe; phase-difference filtering; scanning reticle; high harmonic generation

1 引言

光栅位移测量系统的莫尔条纹信号的质量是决定测量误差的重要因素。莫尔条纹信号的正弦性是评价莫尔条纹信号质量的指标之一,而信号的谐波含量将影响信号的正弦性,谐波含量大,正弦性差^[1]。通常,光电元件的输出波形会由于各种噪声的干扰变为近似正弦曲线的波形,其中包含在莫尔信号噪声中的低频成份是由基体材料光学性质的不均匀性、光电转换元件性能的波动、光栅副间隙变化、直流电平基准漂移引起的;次高频部分是由高次谐波失真引起的;噪声中的高频成份是由随机干扰信号、光栅刻线的毛刺、弯曲、缺损等缺陷和弱衍射作用等因素引起的^[2]。抑制莫尔条纹信号高次谐波的常用方法有两种:光学滤波法和电子学滤波法。光学滤波法通常采用增加滤波光阑来抑制高次谐波含量^[3-4]。这种光阑滤波方法的缺点是增加了系统的体积和制造成本。电子学滤波法也包括多种,叠加法^[2]、神经网络自适应滤波算法^[5]、有限长冲激响应(FIR)数字滤波法^[6]等。电子学滤波法的缺陷是软件计算带来的时间滞后和实时性差。本文提出的相位差滤波法,将指示光栅上四场裂相方式中每场细分为多个不同相位的行组合,利用行组合间的不同相位排列关系来消弱高次谐波的分量,从而提高莫尔条纹信号的质量。该方法具有不需增加系统体积和制造成本,也不需增加后续处理电路的优点。

2 莫尔条纹的傅里叶级数

任何周期函数都可以展开为如下的傅里叶级数^[7]:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(nx + \phi_n), \quad (1)$$

其中, $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, $\phi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$ 。

式(1)表明,一个周期函数可以由常数项 a_0 及各次谐波之和所组成,其中 A_n 为各次谐波的振幅; ϕ_n 为相应的各次谐波的初相角。

a_0 可以用来表征直流电平的漂移;

$A_1 \cdots A_n$ 为信号中各次谐波的幅值,可用来表征多相信号的等幅性;

$\phi_1 \cdots \phi_n$ 为信号中各次谐波的相角,可用来表征多相信号的正交性。

莫尔条纹信号也可以看成是一种周期信号,给定一组莫尔条纹信号,首先进行傅里叶变换,了解数据中的谐波含量,计算出高次谐波的幅值和相角。测得的数据可以用如下的公式表示^[8]:

$$f(x) = a_0 + A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{T}x + \phi_1\right) + A_2 \sin\left(\frac{2\pi}{T}2x + \phi_2\right) + \cdots + A_n \sin\left(\frac{2\pi}{T}nx + \phi_n\right), \quad (2)$$

其中, T 为光栅节距; x 为测量位置。

在实际的应用中,二次谐波和三次谐波对信号的误差影响较大。

3 各次谐波特性分析

通过公式推导来说明相位差滤波法是如何消除各次谐波的。

将表达式(2)移相 θ 角后的新表达式为:

$$f_2(x) = a_0 + A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{T}x + \phi_1 + \theta\right) + \cdots + A_n \sin\left[\frac{2\pi}{T}nx + \phi_n + n\theta\right]. \quad (3)$$

考虑到先消除 2 次谐波,取 $n=2$,将式(2)、(3)相加后,得

$$f(x) + f_2(x) = 2a_0 + 2A_1 \sin\left(t_1 + \frac{\theta}{2}\right) \cos \frac{\theta}{2} + A_2 [\sin t_2 + \sin(t_2 + 2\theta)], \quad (4)$$

其中, $t_1 = \frac{2\pi}{T}x + \phi_1$; $t_2 = \frac{2\pi}{T}2x + \phi_2$ 。

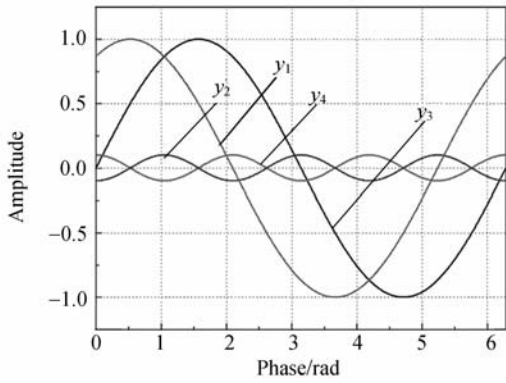
式(4)中,令 $A_2 [\sin t_2 + \sin(t_2 + 2\theta)] = 0$, 则 $\theta = n \times 360^\circ + 90^\circ$, 取 $\theta = 90^\circ$ 。

所以,将莫尔函数 $f(x)$ 平移 90° 后所得的新函数 $f_2(x)$ 与原函数 $f(x)$ 相加可消除二次谐波。

同理,要抵消三次谐波,可将莫尔函数 $f(x)$ 平移 60° 所得的新函数与原函数 $f(x)$ 相加,三次谐波可消除。

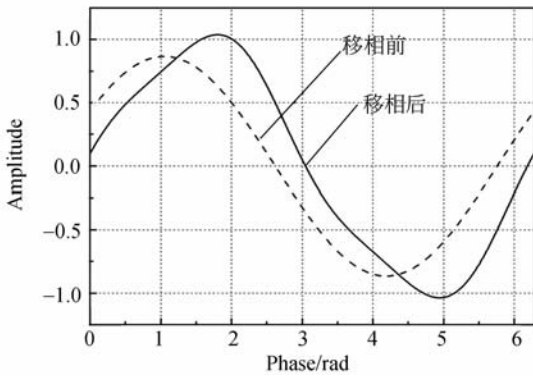
图 1 是基波与三次谐波在移相前后的波形关系图。图 1(a)中, y_1 与 y_2 是移相前的基波和三次谐波, y_3 与 y_4 是移相 60° 后的基波和三次谐波。图 1(b)是基波与三次谐波合成后移相前后

的波形关系图。从图 1(b)中可以看出,将 y_1, y_2, y_3 与 y_4 相加后,三次谐波被抵消了。



(a) 合成前的波形

(a) Waveforms before combination



(b) 合成后的波形

(b) Waveforms after combination

图 1 基波与三次谐波在移相前后的波形关系图

Fig. 1 Waveforms of fundamental and third harmonic generation before and after phase shift

4 指示光栅的图案设计

基于双光栅的位移测量通常采用横向莫尔条纹,用四场裂相接收的方式来实现^[9]。本方法仍然以四场方式设计,仅改变指示光栅的设计图案,其它部分不改变。相位差滤波法的原理是:将指示光栅上四场裂相方式中每场细分为多个不同相位的行组合,利用行组合间的不同相位排列关系来削弱高次谐波的分量,从而提高莫尔条纹信号的质量。

通常消除偶次谐波的方法是引入差分电路,在实际当中,只需要消除三,五,七的奇次谐波。但是这里作为一种新的方法,消除偶次谐波的情况也一并讨论。

以消除二次、三次和四次谐波为例,每场分为 8 行: $L_1, L_2 \dots L_8$,见图 2。根据第 3 节得出的结论, L_1 与 L_2 的相位差为 90° , L_1 与 L_2 在光电接收时能量是累加的,所以可抵消二次谐波。同理, L_3 与 L_4, L_5 与 L_6, L_7 与 L_8 相位差同样为 90° ,所以该场二次谐波消除。作为附加的结果,对于谐波次数符合: $2+4k(k \geq 0, k$ 为整数)的谐波都可以消除。

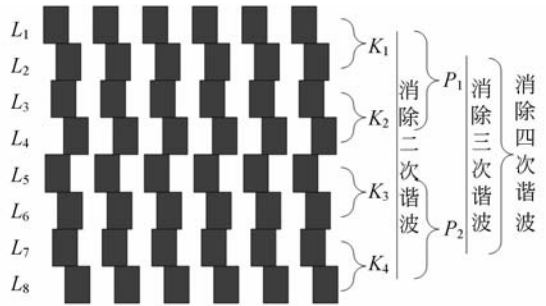


图 2 采用相位差滤波时每场的指示光栅排列图

Fig. 2 Scanning reticle arrangement of each field for filtering

接着分析三次谐波的消除,将 L_1 与 L_2 设为一组 K_1, L_3 与 L_4 设为一组 K_2 ,设 K_1 与 K_2 相位差为 ξ ,则 K_1 的三次谐波分量为:

$$f_3(x) = A_3[\sin t_3 + \sin(t_3 + 3 \times 90^\circ)] \quad (5)$$

其中, $t_3 = \frac{2\pi}{T}3x + \phi_3$ 。

K_2 的三次谐波分量为:

$$f_3'(x) = A_3[\sin(t_3 + 3\xi) + \sin(t_3 + 3 \times 90^\circ + 3\xi)] \quad (6)$$

将式(5)、(6)相加,并令其结果为 0,求得 $\xi = 60^\circ$ 。于是 K_1, K_2 间的三次谐波得以消除。这个相位差同时也可以消除。对于谐波次数符合: $3+6k(k \geq 0, k$ 为整数)的高次谐波都可以消除。同理,将 L_5 与 L_6 设为一组 K_3, L_7 与 L_8 设为一组 K_4 ,设 K_3 与 K_4 相位差也为 60° ,于是 K_3, K_4 间的三次谐波也消除。

再考虑消除四次谐波,将 K_1 与 K_2 设为一组 P_1, K_3 与 K_4 设为一组 P_2 ,利用算式(3)可求出 P_1 与 P_2 相位差为 45° 时,可消除四次谐波。

稍加整理, $L_1, L_2 \dots L_8$ 行依次相位差为: $90^\circ, 60^\circ, 150^\circ, 36^\circ, 126^\circ, 96^\circ, 186^\circ$ 。

其它三场的内部相位关系与第一场相同,而四场间的 L_1 行相位关系仍然保持相角差为: $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$,如图 3 所示。

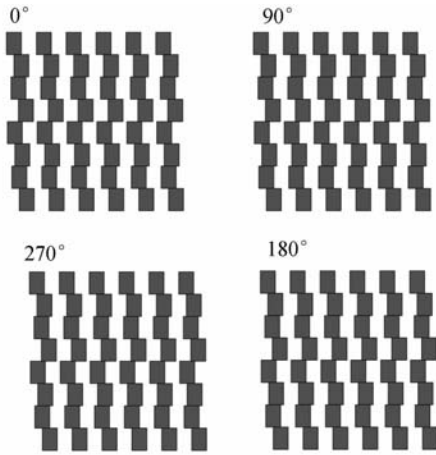


图 3 采用相位差滤波时各场相位关系图

Fig. 3 Phase relationship between the fields for filtering

5 信号中含有三次谐波的仿真

通常的四场裂相接收方式,利用差分电路,消除偶次谐波,但不能消除奇次谐波。利用相位差滤波法可消除二次、三次、四次等主要谐波。通常,三次谐波分量幅值占基波的 6%~12%^[10]。设两路信号分别为:

$$\begin{cases} f_1(\theta) = y = U \cos \theta + a_3 \sin(3\theta) \\ f_2(\theta) = x = U \sin \theta + b_3 \sin(3\theta) \end{cases}, \quad (7)$$

当 $a_3 = b_3 = 10\%$ (谐波含量), $U = 1$ 时,李沙育图形(Lissajou)如图 4 所示。图中小圆是基波中不含三次谐波时的图形,大圆是基波中含有三次谐波时的图形。二者的角度偏差为:

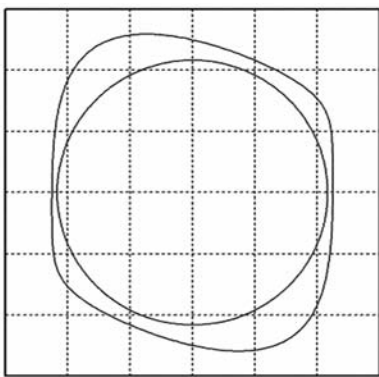


图 4 三次谐波引起的李沙育图形变化及其修正后的图形

Fig. 4 Lissajou figure with and without third harmonic generation

$$\Delta\varphi_a = \arctan \frac{x}{y} - \arctan \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{(b_3 \cos \theta - a_3 \sin \theta) \sin 3\theta}{U + \sin 3\theta(a_3 \cos \theta + b_3 \sin \theta)}. \quad (8)$$

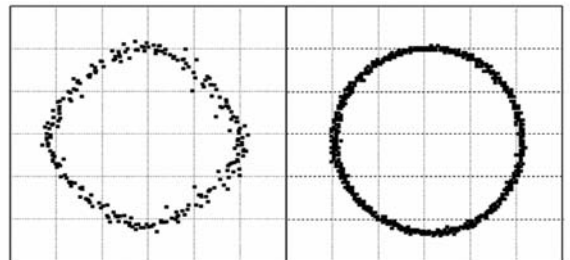
求得, $\Delta\varphi_{a\max} = 11^\circ$, 用栅距宽度为 0.02 mm 计算,可算出三次谐波引起的最大误差为: 0.61 μm 。

6 实 验

为验证理论分析的可行性,以 SGC2 型光栅尺做了两种对比实验。

6.1 李沙育图形对比实验

SGC2 型光栅尺的栅距为 0.02 mm, 输出信号是差分放大后的两路正余弦电压信号。偶次谐波已被差分电路基本抵消掉。这两路正余弦电压信号可以直接用示波器测量。将 SGC2 型光栅尺在相位差滤波前后的李沙育图形做了对比,如图 5 所示。图 5(a)是 SGC2 型原型尺输出的李沙育图形,图 5(b)是经过滤波改进后输出的李沙育图形。利用傅里叶级数分离出高次谐波,计算出各次谐波的含量,如表 1 所示。从表 1 知,两种实验结果中,偶次谐波含量比较接近,三次谐波含量降低了 4.9%,与仿真结果基本相同。从表 1 中可知,偶次谐波含量比较接近,这是因为差分放大电路已经把偶次谐波基本抵消了。



(a)改正前

(b)改进后

(a)Before improving

(b)After improving

图 5 SGC2 型光栅尺的滤波改进前后的莫尔条纹李沙育图形

Fig. 5 Lissajou figures of SGC2 linear encoder before and after filtering

表 1 滤波改进前后的各次谐波含量

Tab. 1 Harmonic generation percentages

	before and after filtering (%)		
	二次谐波含量	三次谐波含量	四次谐波含量
改进前	1.4	6.1	0.6
改进后	1.1	1.2	0.5

6.2 位移测量实验

本文用长光数显公司自制的双光栅位移检测设备作测量基准,对 SGC2 型光栅尺在相位差滤波前后分别做了位移测量实验。该双光栅位移检测设备主要由两只海德汉公司生产的高精度光栅尺组成,从原理上消除了阿贝误差,并用双频激光干涉仪标校,标校后的测量精度优于 $0.1 \mu\text{m}/10 \text{ mm}$ 。SGC2 型光栅尺的输出用高精度信号细分采集卡来采集,并送电脑显示。采集卡的细分精度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。以 SGC2 型光栅尺绝对零位为参考点,测量范围为 10 mm ,测量步距为 1 mm ,共 10 个测量点。每个测量点选在 1 mm 间隔附近,且该测量点以 $1 \mu\text{m}$ 为间隔,以 $20 \mu\text{m}$ 周期内 20 个数据中的最大值为测量结果,以便比较真实地反映测量误差。表 2 给出 SGC2 型光栅尺误差测量数据。然后,单独检测 $20 \mu\text{m}$ 周期内的位置误差,测量间隔为 $1 \mu\text{m}$,共 20 个测量点。图 6 是 $20 \mu\text{m}$ 周期内的测量误差曲线,实线部分表示 SGC2 型光栅尺改进前的测量结果;虚线部分表示 SGC2 型光栅尺改进后的测量结果。

表 2 SGC2 型光栅尺误差测量数据

Tab. 2 Measured data for encoder errors

序号	改进前			改进后		
	双光栅 测量/mm	SGC2 型尺 测量 mm	误差 Δ_1 / μm	双光栅 测量/mm	SGC2 型尺 测量/mm	误差 Δ_2 / μm
1	1.083 5	1.083 2	0.3	1.013 3	1.013 5	-0.2
2	2.034 8	2.034 1	0.7	1.985 7	1.985 5	0.2
3	2.978 6	2.978 1	0.5	3.028 9	3.028 4	0.5
4	4.012 9	4.013 2	-0.3	4.052 3	4.051 9	0.4
5	5.068 4	5.068 3	0.1	5.016 4	5.015 6	0.8
6	5.962 1	5.961 2	0.9	6.053 8	6.053 8	0
7	7.039 5	7.038 2	1.3	7.022 0	7.021 6	0.4
8	8.045 5	8.044 9	0.6	8.076 7	8.076 8	-0.1
9	9.021 7	9.020 8	0.9	9.012 8	9.012 3	0.5
10	10.035 8	10.035 4	0.4	10.045 3	10.045 1	0.2

参考文献:

- [1] 魏晓蓉,刘丰文.两种莫尔条纹信号对光栅系统测量精度的影响[J].光电工程,2002,29(6):43-45.
WEI X R, LIU F W. Influence of two Moire fringe signals on measuring accuracy of a grating system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(6): 43-

从表 2 知,SGC2 型光栅尺改进前后,在 10 mm 内数据测量误差分别为:

$$\Delta_1 = 1.6 \mu\text{m}, \Delta_2 = 1 \mu\text{m}.$$

从图 6 中知,SGC2 型光栅尺改进前后,在 $20 \mu\text{m}$ 内数据测量误差分别为:

$$\Delta_1' = 1.3 \mu\text{m}, \Delta_2' = 0.8 \mu\text{m}.$$

可见,SGC2 型光栅尺在增加光学滤波后,在 10 mm 内测量精度提高了 $0.6 \mu\text{m}$,在 $20 \mu\text{m}$ 内测量精度提高了 $0.5 \mu\text{m}$ 。

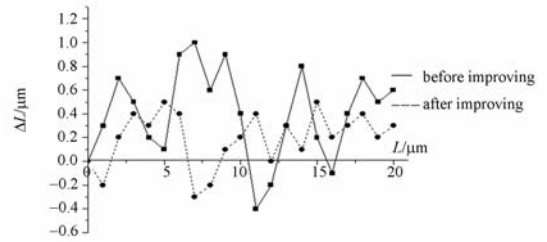


图 6 $20 \mu\text{m}$ 周期内的测量误差曲线

Fig. 6 Curves of error with period of $20 \mu\text{m}$

7 结 论

本文针对莫尔条纹信号质量提出了相位差滤波法,该方法突破了传统光学滤波法和软件滤波法的不足,通过消弱高次谐波分量,提高了测量精度,并通过实验,验证了方法的可行性。它不仅适用于四场裂相测量方式,也适用于单场扫描测量方式。由于仅改进了指示光栅的设计图案,制造成本低,不增加体统体积,不增加后续处理电路,因此实用性强,易于工业生产。

45. (in Chinese)

- [2] 罗华,高山,李翔龙.粗光栅信号全数字化处理法实现高倍数细分[J].光学精密工程,2007,15(2): 283-288.
LUO H, GAO SH, LI X L. Realization of high division number of coarse grating signals by fully digital processing method [J]. *Opt. Precision Eng.*,

- 2007,15(2):283-288. (in Chinese)
- [3] 曹向群,黄维实,金彤. 光栅计量技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992.
CHAO X Q, HUANG W SH, JIN T. *Measuring Grating Technique* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992. (in Chinese)
- [4] 许明耀. 莫尔条纹余弦信息的提取方法[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2003,22(1):26-28.
XU M Y. Picking-up method in moiré cosine information[J]. *Journal of South-Central University for Nationalities (Nat. Sci. Edition)*, 2003, 22(1):26-28. (in Chinese)
- [5] 吕孟军. 光栅莫尔条纹电子学细分技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
LV M J. *Study on electronic subdivision of grating Moiré fringe* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [6] 喻洪麟,黄良明,王远干. 莫尔条纹信号的DSP滤波及细分技术研究[J]. 光电工程,2004,31(9):61-65.
YU H L, HUANG L M, WANG Y G. Study on DSP filter and subdivision of Moiré fringes signal [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(9):61-65. (in Chinese)
- [7] 张善锺. 计量光栅技术[M]. 北京:机械工业出版社,1985.
ZHANG SH ZH. *Measuring Grating Technique* [M]. Beijing: China Machine Press, 1985. (in Chinese)
- [8] 余琳. 编码器光电信号参数测量及细分误差评估[D]. 北京:中国科学院研究生院,2004.
SHE L. *Measurement of encoder photoelectric signal parameters and evaluation of Interpolation errors* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [9] 陈勇,陈慧宝,孙桂清,等. 光栅莫尔条纹信号质量的提高及其采集方法[J]. 上海大学学报(自然科学版),2004,10(2):129-132.
CHEN Y, CHEN H B, SUN G Q, et al.. Improving quality of grating Moiré fringe and a collection method [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2004, 10(2):129-132. (in Chinese)
- [10] 刘春霞,张成元,杨卫卫,等. 编码器光电信号参数变化对莫尔条纹质量的影响[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2009,26(4):547-550.
LIU CH X, ZHANG CH Y, YANG W W, et al.. The influence on the moiré fringe quality with the change from the optic-electro signals of the encoder [J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2009, 26(4):547-550. (in Chinese)

作者简介:



吴宏圣(1974—),男,山西天镇人,副研究员,1997年于吉林工业大学获得学士学位,2003年于中国科学院研究生院获得硕士学位,现从事光电位移检测技术的研究工作。E-mail: wu9321@163.com



乔栋(1985—),男,河南武陟人,硕士,研究实习员,2006年、2009年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,现从事光电位移检测技术研究工作。E-mail: qiaodonglwz@163.com.



曾琪峰(1983—),四川自贡人,硕士,研究实习员。2006年于吉林大学获得学士学位,2009年于吉林大学获得硕士学位,现从事信号处理和算法的研究工作。E-mail: qifengzeng@sina.com.



郭帮辉(1983—),男,湖北鄂州人,硕士,研究实习员。2006年、2008年于华中科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事红外光学系统的研究。E-mail: gbhyxl@163.com