

文章编号 1004-924X(2009)07-1694-07

莫尔条纹信号相位误差补偿

吕孟军¹, 郭琪^{1,2}, 吕印晓¹

(1. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464000;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为减小莫尔条纹信号不正交时的正切法细分误差,提出了一种可对任意相位滞后误差进行实时补偿的新算法。在分析了相位不正交对细分精度的影响后,通过对信号过零点的准确采样,计算出余弦信号相位滞后的角度值,进而确定了实际的相位计算公式。根据存在相位滞后信号的极性和幅值信息,对完整的短周期信号进行相位分段补偿,并分析了影响算法实现的各个因素。仿真实验表明,本算法可实现对相位滞后误差的实时补偿,有效降低信号相位不正交对细分精度的影响,使细分误差仅为未补偿误差的10%,极大地提高了莫尔条纹信号细分精度和位移检测精度。

关键词:莫尔条纹;细分;相位;补偿

中图分类号:O436.1;TP274.5 **文献标识码:**A

Signal phase error compensation of Moiré fringe

LÜ Meng-jun¹, Guo Qi^{1,2}, LÜ Yin-xiao¹

(1. *The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang 464000, China;*

2. *College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)*

Abstract: In order to eliminate the tangent subdivision error caused by nonorthogonal Moiré fringe signals, a new algorithm is presented to compensate the real-time phase laggard error. After analyzing the effect of the phase nonorthogonality on subdivision precision, the cosine signal phase error is worked out based on sampling the signal with zero value well and the actual phase formula is determined clearly. According to the polarity and amplitude of the signal with laggard phases, the shorter periodic signals are compensated in a certain section phase respectively and the factors influencing the compensation precision are analyzed. Experimental data indicate that this algorithm can compensate the phase error perfectly and can depress the effect of the nonorthogonal signals on the subdivision precision. Obtained results show that the subdivision error by using the proposed method reduces to 10 percent of the original error and the subdivision and location precisions are improved greatly.

Key words: Moiré fringe; subdivision; phase; compensation

收稿日期:2008-08-10;修订日期:2008-09-28.

基金项目:江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金资助项目(No. 20060306);国家自然科学基金资助项目(No. 50605031)

1 引言

正切细分法是目前应用最广泛的一种莫尔条纹信号幅值分割的细分方法^[1-3]。由于正余切函数在 $\pi/4$ 弧度范围内具有良好的线性度^[4],用正切细分法分割莫尔条纹信号的幅值便有一个突出特点,即各相位具有近似的角分辨率,可有效地避免由于信号幅值在短周期内突变或变化不灵敏而造成的细分脉冲不均匀等现象;且该细分法受信号幅值衰减的影响较小,能够满足较高的细分倍数和精度等要求。

在实际应用中,光栅刻线的间距和尺寸等往往存在量化误差,再加上器件安装和调试水平的限制^[5],莫尔条纹信号经常存在直流电平、正余弦信号幅值不等、谐波分量、相位不正交及噪声干扰等现象,限制了正切细分法的细分精度和倍数。文献[6-8]分别介绍了消除直流分量、谐波分量、幅值不等及干扰成分的方法,而对于不正交相位的补偿,国内外虽陆续提出了一些算法,但有的受信号幅值变化影响较大^[9],有的校正范围非常有限^[10-11],据目前可查资料,能够对任意相位滞后误差实现实时补偿的方法未见报道。在广泛查阅资料和实验的基础上,本文提出了一种全新的相位滞后误差补偿算法,可使莫尔条纹信号的正交性大大提高。

2 正交性对正切细分法细分精度的影响

莫尔条纹正切细分法原理是利用两路相位正交信号 $u_1 = A \sin \theta, u_2 = A \cos \theta$ (A 为信号幅值) 构造新函数:

$$w = \begin{cases} \tan \theta = \frac{|A \sin \theta|}{|A \cos \theta|}, & |A \sin \theta| \leq |A \cos \theta| \\ \cot \theta = \frac{|A \cos \theta|}{|A \sin \theta|}, & |A \sin \theta| > |A \cos \theta| \end{cases} \quad (1)$$

w 函数将一个完整的莫尔条纹信号(短周期)分割为 8 个区间,理想情况下每个区间宽度为 $\pi/4$,从而实现了八倍细分,更高倍数的细分只需

再对各个单区间曲线进行幅度分割。通过判断 u_1, u_2 以及它们绝对值差值的符号可判断当前莫尔条纹所处区间,如表 1 所示。

表 1 莫尔条纹信号区间划分依据

Tab. 1 Rule of Moiré fringe signal sections

$\text{sign}(u_1)$	$\text{sign}(u_2)$	$ u_1 - u_2 $	section
+	+	< 0	1
+	+	> 0	2
+	-	> 0	3
+	-	< 0	4
-	-	< 0	5
-	-	> 0	6
-	+	> 0	7
-	+	< 0	8

为定量分析信号相位不正交对细分精度的影响,这里假设正余弦信号具有相同的幅值 A ,余弦相位滞后角度为 δ (最大为 45°),那么莫尔条纹信号可表示为 $u_1' = A \sin \theta, u_2' = A \cos(\theta + \delta)$,正切细分法构造函数改写为:

$$\begin{cases} \tan \theta' = \frac{|\sin \theta|}{|\cos(\theta + \delta)|}, & |\sin \theta| \leq |\cos(\theta + \delta)| \\ \cot \theta' = \frac{|\cos(\theta + \delta)|}{|\sin \theta|}, & |\sin \theta| > |\cos(\theta + \delta)| \end{cases} \quad (2)$$

函数曲线如图 1 所示(设 $A=1.0$)。图中实线表示正交的莫尔条纹信号及正切函数曲线,虚线表示实际采样得到的存在相位滞后的余弦信号及正切函数曲线。

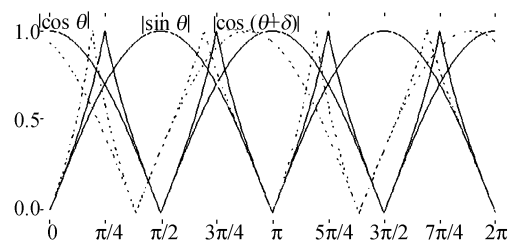


图 1 构造函数曲线

Fig. 1 Tangent curves calculated through Moiré fringe signals

显然通过式(2)计算得到的角度 θ' 和实际角度 θ 是不相等的,几个关键点的角度误差值为:

$\sin \theta = 0$ 时, $\theta' = 0$;

$\cos (\theta + \delta) = 0$ 时, $\theta' = -\delta$;

$\sin \theta = \cos (\theta + \delta)$ 时, $\theta' = \arctan \frac{\cos \delta}{1 + \sin \delta}$.

从图 1 中虚线可以看出,短周期内最大角度累积误差发生在 2、6 区间的终点亦即 3、7 区间的起点(图 1 中 0 至 2π 区间内 $\frac{\pi}{4}$ 为一个单位划分为 8 个单区间),大小为 δ ,因此单区间最大累积误差大小为 $\delta/2$,且当正弦信号趋向于 0 时,误差逐渐缩小为 0。显然,分析正交性对细分精度的影响就是看滞后角度 δ 的大小。为保证细分精度, $\delta/2$ 应不超过 1 个细分当量,但由于区间总宽度仍为一个信号周期,因此短周期误差不会累积。

假设细分倍数为 N ,那么由于 $\delta/2$ 角度误差引起的误差细分脉冲数 N_e 为:

$$N_e = N \times \delta / 2 / 360 = N \times \delta / 720. \quad (3)$$

要使误差脉冲数 $N_e \leq 1$, 应使 $\delta \leq 720 / N (^{\circ})$ 。假定莫尔条纹信号细分倍数为 1024,那么正余弦信号的不正交性需满足 $\delta \leq 0.7^{\circ}$ 的条件。

对于系统产生的固定的正交性误差,可以通过移相处理尽可能消除对细分精度的影响,而对于偶然产生的正交性误差,必须通过有效的相位补偿算法来提高信号的正交性。

3 相位补偿算法

3.1 基本原理

正切细分法能够直接利用的信息是采样得到的相位不交错的莫尔条纹信号 u_1', u_2' , 要补偿滞后的相位角,首先需找出实际角度 θ 和滞后角度 δ 之间的函数关系。

条纹信号采样值 $A \sin \theta$ 和 $A \cos (\theta + \delta)$ 的大小是已知的,因此有:

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{\sin \theta}{\frac{\cos (\theta + \delta) + \sin \theta \sin \delta}{\cos \delta}}, \quad (4)$$

通过上式计算得到实际角度 θ 为:

$$\theta = \arctan \left(\frac{\cos \delta}{\frac{\cos (\theta + \delta)}{\sin \theta} + \sin \delta} \right), \quad (5)$$

可进一步得到正切法细分应发脉冲数:

$$n = \frac{N\theta}{2\pi}. \quad (6)$$

显然要想获得式(4)、式(5)结果,需设法先得到相位滞后角度 δ 。文献[8]介绍了确定 δ 大小的方法,即当正弦信号 $A \sin \theta \approx 0$ 时,通过采样得到的 $A \cos (\theta + \delta)$ 可计算出 δ 的大小,但这种方法有两个较明显的缺点。

第一,必须事先明确信号幅值 A 的大小,否则无法通过反余弦运算得到 δ ,而如果假定 A 的大小已知,就失去了正切细分法的意义;

第二,当正交误差不明显,正弦值约等于 0 时,余弦值恰好处于信号顶点位置附近,即短周期信号灵敏度最低点。假设对莫尔条纹进行 2^n 倍细分,那么采样分辨率至少为 $\log_2 \frac{2^n}{8} = (n-3)$ 位。为提高精度,假设采样位数也为 n ,那么当信号处于峰值位置时, $\frac{A}{2^n}$ 幅值跨度对应的角度变化范围为

$$\Delta\theta = 2 \arccos \left(1 - \frac{1}{2^n} \right). \quad (7)$$

举例 $n=12$ 时, $\Delta\theta = 2.5315^{\circ}$, 远远超过了一个细分当量 0.3516° , 可见由于算法就可能产生如此大的误差,得到的 δ 显然是不准确的。当然,提高采样分辨率可以在一定程度上减小误差 $\Delta\theta$, 但噪声干扰将随之加强。

不难得出结论,判断滞后角度 δ 的参考点最好处于正余弦信号的过零点,这样上面分析的两条限制就可以基本消除,这也就是本文方法的出发点。

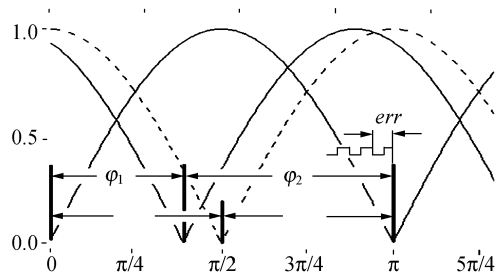


图 2 滞后角度测量原理

Fig. 2 Measurement principle of laggard angle δ

如图 2 所示,当相位不存在滞后时,正、余弦信号 0 点间的相位差 ϕ_1 与余、正弦信号 0 点间的

相位差 ϕ_2 是相等的,如图虚线的过零点;而当正余弦信号不垂直时, $\phi_1 \neq \phi_2$, 需找出 ϕ_1, ϕ_2 与相位滞后角度 δ 间的关系,从而确定 δ 的大小。

不难理解 $\frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{90-\delta}{90+\delta}$, 可得到:

$$\delta = \frac{90(\phi_2 - \phi_1)}{\phi_1 + \phi_2}. \quad (8)$$

可通过周期测量法得到相位差 ϕ_1, ϕ_2 , 具体作法是当 u_1' 的数值介于 $\pm LSB$ 时启动计数, 当 u_2' 的数值介于 $\pm LSB$ 时读出计数值作为 ϕ_1 , 当 u_1' 数值再次介于 $\pm LSB$ 时读出计数值作为 $\phi_1 + \phi_2$, 如此反复, 再通过公式(8)即可实现相位滞后角度 δ 的实时计算。

3.2 分段处理

本文的相位补偿算法, 理论上只要滞后角度已知, 就可以实现相位的准确补偿, 但实际情况并非如此, 如图 3。

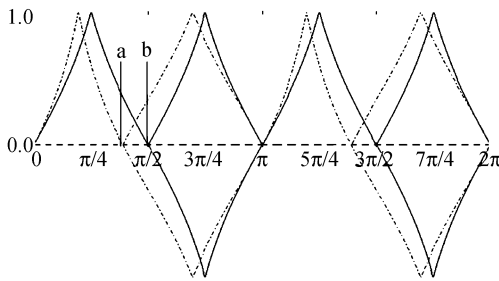


图3 分段补偿原理

Fig. 3 Subsection compensation principle

虚线是采样得到的正切曲线, 也就是相位补偿可以利用的数据, 实线是补偿后的理想正切曲线, 是需要获得的数据。在虚线所表示的第一象限内, 补偿范围是从 0 点到 a 点; 在虚线所表示的第二象限内, 补偿范围是 a 点到 π ; 第三、四象限与第一、二象限类似。似乎采样点和补偿点是一一对应的, 但是, ab 段和实线的第二象限曲线发生了明显的突变, 若同样运用式(5)补偿第二象限的正交误差则会产生错误, 第三、四象限也存在着同样的问题。

为解决此问题, 本文将第二象限曲线以横坐标对称镜像, 这样 ab 段和第二象限的实线部分实现了无突变衔接, 得到的新曲线作为余切曲线。经过了上述变换, 第二象限的正余切概念正好颠

倒, 也就是正余弦正好颠倒, 变换后所谓的余弦相位是超前的, 因此将式(5)变换为:

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{-\sin \delta + \frac{|\cos(\theta + \delta)|}{|\sin \theta|}}{\cos \delta} \right), \quad (9)$$

依据同样方法处理第三、四象限, 公式如表 2。

表 2 不同象限相位计算公式

Tab. 2 Phase formulas for different quadrants

象限	相位计算公式
1	$\theta = \arctan \left(\frac{\cos \delta}{\sin \delta + \frac{ \cos(\theta + \delta) }{ \sin \theta }} \right)$
2	$\theta = \frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{-\sin \delta + \frac{ \cos(\theta + \delta) }{ \sin \theta }}{\cos \delta} \right)$
3	$\theta = \pi + \arctan \left(\frac{\cos \delta}{\sin \delta + \frac{ \cos(\theta + \delta) }{ \sin \theta }} \right)$
4	$\theta = \frac{3\pi}{2} + \arctan \left(\frac{-\sin \delta + \frac{ \cos(\theta + \delta) }{ \sin \theta }}{\cos \delta} \right)$

3.3 补偿精度主要影响因素分析

3.3.1 采样位数

采用本文的相位补偿算法后, 信号在过零点处 $\frac{\Delta}{2^n}$ 幅值跨度对应的角度变化范围由式(7)变为:

$$\Delta\theta = 2\arcsin \frac{1}{2^n}, \quad (10)$$

$n=12$ 时计算得到 $\Delta\theta=0.028^\circ$, 远小于细分当量 0.3516° , 最大误差为 7.96% , 这完全得益于参考点处于信号灵敏度极高的过零点, 显然采样位数越高误差越小。

3.3.2 计数频率

由图 2 可以看出, 由于计数终点与计数脉冲触发沿不同步, 量化误差 err 最大可以达到一个脉冲角度, 显然莫尔条纹信号周期内脉冲数越多, 误差角度越小。将 $\frac{\phi_2}{\phi_1}$ 作为自变量, 对式(8)求导得:

$$\delta' = \frac{180}{\left(1 + \frac{\phi_2}{\phi_1}\right)^2}. \quad (11)$$

由于 $\frac{\phi_2}{\phi_1} \geq 0$, 因此当 $\phi_2 \approx 0$ 时, 滞后角度 δ 变化最快, 即在此处由于量化误差 err 的存在, 滞后角度计算误差 $\Delta\delta$ 最大。将一个脉冲角度表示为 φ , 计算得到:

$$\Delta\delta_{\max} \approx 180 \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{\varphi}{180}} \right), \quad (12)$$

因此最大滞后角度计算误差 $\Delta\delta_{\max}$ 小于一个细分当量的要求是脉冲角度 φ 也应小于一个细分当量, 即计数脉冲频率至少为莫尔条纹信号最大频率的 2^n 倍。

4 实验和仿真

莫尔条纹信号由具有 1024 个刻线的普通圆光栅产生, 不失一般性, 采样得到的两路原始信号经过了自适应滤波、电平校正等预处理。

由于信号本身存在失真, 利用正切细分法计算得到的角度与实际角度存在着一定的误差, 如图 4 所示。在验证本文的相位补偿算法有效性实验中, 比较相位补偿前后角度的不同时, 计算得到的角度误差中包含了波形失真对细分精度的影响。

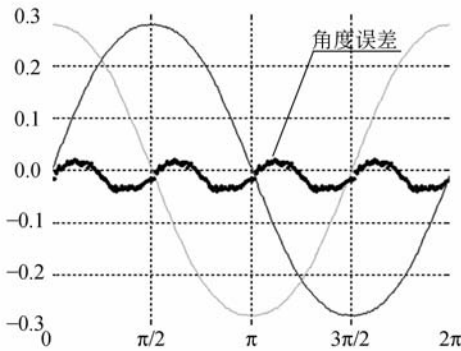


图 4 原始正交莫尔条纹信号

Fig. 4 Original orthogonal Moiré fringe signals

图 5 为余弦滞后 10° 时的莫尔条纹信号曲线及相位补偿前后计算得到的角度误差曲线, 表 3 为补偿前后几个关键点的计算角度及其误差大小。可以看出, 相位补偿后最大角度误差仅为补偿前的 9.05%。

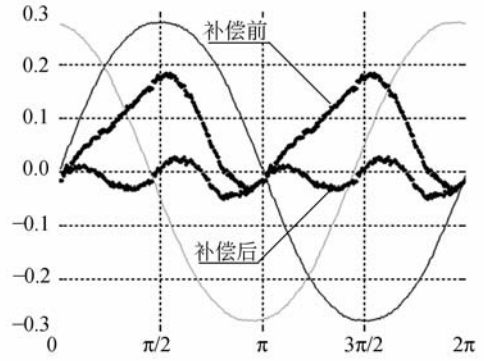


图 5 补偿前后角度误差曲线 1

Fig. 5 Angle error curves 1

表 3 角度误差对比 1

Tab. 3 Angles and angle error data 1 (rad)

实际角度值	相位未补偿		相位补偿后	
	计算角度值	角度误差值	计算角度值	角度误差值
0.772 4	0.860 5	0.088 1	0.761 2	-0.011 2
1.553 2	1.742 2	0.189 0	1.570 3	0.017 1
2.343 2	2.405 6	0.062 4	2.327 8	0.015 4
3.124 0	3.123 9	-0.000 1	3.124 1	0.000 1
3.914 0	4.002 1	0.088 1	3.902 7	-0.011 3
4.694 8	4.883 8	0.189 0	4.711 9	0.017 1
5.484 8	5.547 2	0.062 4	5.469 4	-0.015 4
6.265 6	6.265 5	-0.000 1	6.265 7	0.000 1

图 6 为余弦滞后 45° 时的莫尔条纹信号曲线及相位补偿前后计算得到的角度误差曲线, 表 4 为补偿前后几个关键点的计算角度及其误差大小。可以看出, 相位补偿后最大角度误差仅为补偿前的 10%。

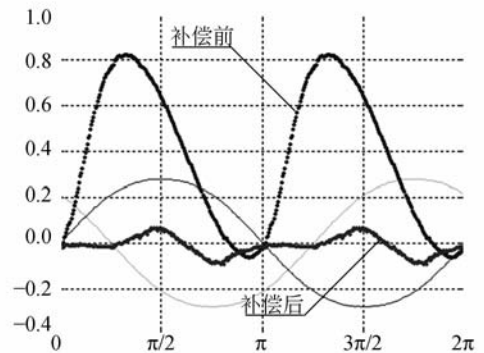


图 6 补偿前后角度误差曲线 2

Fig. 6 Angle error curves 2

表4 角度误差对比2

Tab.4 Angles and angle error data 2 (rad)

实际角度值	相位未补偿		相位补偿后	
	计算角度值	角度误差值	计算角度值	角度误差值
0.772 4	1.547 3	0.774 9	0.769 1	-0.003 3
1.553 2	2.214 1	0.660 9	1.630 9	0.077 7
2.343 2	2.485 8	0.142 6	2.268 3	-0.074 9
3.124 0	3.118 7	-0.005 3	3.125 2	0.001 2
3.914 0	4.688 9	0.774 9	3.910 7	-0.003 3
4.694 8	5.355 7	0.660 9	4.772 5	0.077 7
5.484 8	5.627 4	0.142 6	5.409 9	-0.074 9
6.265 6	6.260 3	-0.005 3	6.266 7	0.001 1

当余弦相位滞后不同角度时,同样可得出相似的结果,限于篇幅不再详细阐述。结合正切细分法脉冲公式(6),不难得出结论:应用本文介绍的相位误差补偿算法,可极大地提高莫尔条纹信

参考文献:

- [1] 吕孟军. 光栅莫尔条纹电子学细分技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2008.
LV M J. *Study of Electronic Subdivision for Grating MoiréFringe* [D]. Master Degree Thesis, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [2] 王君立, 李大一, 刘琳. 莫尔条纹快速细分在光电轴角编码器中的应用[J]. 微细加工技术, 2005, 12(4): 16-20.
WANG J L, LI D Y, LIU L. Rapid subdivision Method of MoiréFringe and Its Applications on the Photoelectric Rotary Encoders [J]. *Microfabrication Technology*, 2005, 12(4): 16-20. (in Chinese)
- [3] 简小军, 史耀耀, 汪文虎, 等. 光栅信号软件细分技术及其误差分析[J]. 工具技术, 2006, 40(10): 72-74.
WANG X J, SHI Y Y, WANG W H, et al.. Digital subdividing technique for grating signal and Its error analysis [J]. *Instrument Technology*, 2006, 40(10): 72-74. (in Chinese)
- [4] 徐洲, 胡晓东, 罗长洲, 等. 增量式轴角编码器的电子细分及零位处理[J]. 光子学报, 2002, 31(12): 1497-1500.
XU ZH, HU X D, LUO CH ZH, et al.. The electronic multiplication and interpolation of incremental optical encoder with reference mark [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(12): 1497-1500. (in Chi-

号的细分精度,且可有效地补偿任意角度的相位滞后,这对精密位移测量意义重大。

5 结 论

针对莫尔条纹信号的正交性误差校正,本文首次提出了一种全新的相位误差补偿算法。该算法可实现对任意大小相位滞后误差的实时补偿,具有细分脉冲均匀、信号峰值处灵敏度高、不需要准确清楚的信号幅值等优点。实验结果表明,本算法应用于圆光栅角度测量时,补偿后的计算角度误差大大减小,可控制在未补偿误差大小的10%以内。本算法的应用能最大限度地消除相位不正交对细分精度的影响,极大地提高莫尔条纹信号细分精度和位移检测精度。

nese)

- [5] 朱应时, 杨进堂. 圆光栅的高精度高质量莫尔条纹信号的研究[J]. 计量学报, 1995, 10(4): 280-285.
ZHU Y SH, YANG J T. Study of Moiré Fringe Signals with High Accuracy and Superior Quality in Radial Gratings [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, 10(4): 280-285. (in Chinese)
- [6] 唐小琦, 刘世峰, 王平江, 等. 正切法莫尔条纹信号幅值分割细分的误差分析[J]. 计量学报, 2007, 07(3): 220-223.
TANG X Q, LIU SH F, WANG P J, TANG Y Z, LUO C H. Error Analysis for Amplitude Segmenting Subdivision of MoiréFringe [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, 07(3): 220-223. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 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, 9(9): 61-65.
YU H L, HUANG L M, WANG Y G. Study on DSP filter and subdivision of Moiréfringes signal [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2004, 9(9): 61-65. (in Chinese)
- [9] 楚兴春, 吕海宝, 杜列波, 等. 任意相位差条纹信号细分方法的研究[J]. 光学学报, 2005, 257(4): 498-

500.

CHU X CH, LV H B, DU L B, *et al.*. Research on subdividing method for random phase difference fringe signals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 257 (4):498-500. (in Chinese)

- [10] 李江国, 宣明, 王一凡. 莫尔条纹细分中相位误差的软件补偿方法[J]. *光学 精密工程*, 1995, 3(1): 69-73.

LI J G, XUAN M, WANG Y F. Software compensation method of phase error in moiré fringe di-

vision [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, 3(1):69-73. (in Chinese)

- [11] 熊文卓, 孔智勇, 张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(11):1745-1748.

XIONG W ZH, KONG ZH Y, ZHANG W. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11):1745-1748. (in Chinese)

作者简介:



吕孟军(1978—),男,山东烟台人,硕士,讲师,2001年于空军第一航空学院获得学士学位,2008年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事机电控制及自动化方面的教学和研究。E-mail: strlmj@163.com



吕印晓(1974—),男,河南获嘉人,硕士,讲师,1997年于郑州大学获得学士学位,2005年于华中科技大学获得硕士学位,主要从事航空电子方面的教学和研究。E-mail: lyxlf2733@sina.com



郭琪(1978—),女,陕西汉中人,学士,讲师,硕士研究生,2000年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事航空发动机故障检测与诊断方面的教学和研究。E-mail: qi_guo_cn@yahoo.com.cn

●下期预告

基于相位相关技术的 MEMS 旋转角度的高分辨力测量方法

陈 治,朱洪程,胡晓东,胡小唐

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

实现 MEMS 微结构周期运动过程中各个时刻的旋转角度及其动态特性参数的高分辨力测量,为提高 MEMS 器件的性能和可靠性分析提供重要参考。方法:针对频闪成像技术获得的微结构运动图像序列,提出了一种基于相位相关技术与 Radon 变换技术相结合的旋转角度测量方法。该方法通过 Radon 变换将图像的空间坐标转换为极坐标的参数空间,使得空间坐标的旋转投影为参数坐标得平移运动,再通过相位相关技术的亚像素运动估计算法,可得到物体旋转角度的高分辨力测量结果。结果:实验结果表明,该方法旋转角度测分辨力优于 0.01° 。结论:该方法可以有效的减少由于旋转产生形变对测量结果的影响,提高测量结果的稳定性和减少测量误差。