

文章编号: 0253-2239(2008)07-1301-06

# 叠栅条纹信号细分误差的一种动态补偿方法

朴伟英 袁怡宝

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 缺乏有效的误差补偿方法是制约长光栅测量精度提高的关键原因之一。提出一种动态的误差补偿方法, 可以消除由直流漂移、两路信号不等幅和非正交导致的细分误差。其原理是跟踪光栅信号在一个周期上的 8 个特征值点(正余弦信号的过零点及绝对值交点), 从特征值点的幅度值中首先分解出正弦信号的直流漂移误差, 对其进行补偿; 然后继续跟踪补偿后的信号, 从中又能分解出余弦信号的直流漂移误差。再补偿, 再跟踪, 又能依次分解出不等幅误差和非正交误差。最多只需要 3 个光栅信号周期, 就能对三种误差依次实现补偿。分析了谐波对该方法的影响并提出了改进措施。实验证实了该方法的有效性。

**关键词** 光学测量; 动态误差补偿; 参量连续性; 细分误差; 光栅纳米测量

**中图分类号** TH741.6 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082807.1301

## Dynamic Compensation for Interpolation Error of Moiré Fringe Signals

Piao Weiying Yuan Yibao

(Auto Test & Control Department, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Lacking effective error compensation method is one of the important reasons that limit the advance of measurement precision of the grating ruler. A dynamic compensation method for eliminating the interpolation error of moiré fringe signals is put forward. The interpolation error is caused by zero offset, quadrature phase shift and unequal amplitude of two signals. Eight characteristic points (zero points and absolute amplitude joints of two channels signals) on a grating signal period is traced, and the zero offset of sinusoidal signal is separated from amplitude of characteristic points, and compensated. Then the compensated signal is traced, and the zero offset of cosinusoidal signal can also be separated and compensated. The compensative signal is traced continually, the unequal amplitude error and the error of quadrature phase shift can be separated and compensated respectively. The above three errors can be totally compensated in no more than three grating signal periods. The influence of harmonics was analyzed and the improvement method was presented. Experiments verify this method's validity.

**Key words** optical measurement; dynamic error compensation; continuity of parameters; interpolation error; grating-based nanometrology

## 1 引言

光栅测量是以实物作为基准, 虽然采取了很多措施, 仍然有很多误差因素不可避免。例如光栅基体和刻线材料本身光学性质的不均匀性、导轨直线性误差引起的光栅副间隙的变化等。这些误差因素使得光栅信号偏离理想信号并且在全量程上是变化的, 且具有一定的随机性, 导致细分误差很大, 难以满足纳米精度测量的需要。单纯依靠制造、装配和调试来提高光栅测量的精度不仅代价昂贵, 而且难度也很大。另外长期使用环境条件的变化也会导致

叠栅条纹信号发生变化, 从而产生细分误差。这些都对光栅测量的精度和可靠性提出了严峻的挑战。要解决这些问题, 必须采用误差补偿的方法。李江国等<sup>[1]</sup>提出了一种相位误差的软件补偿方法, 但相位误差的补偿范围较小。刘文文等<sup>[2]</sup>提出了一种高精度的光栅信号细分算法, 但由于谐波的影响实际光栅信号的利萨如图形并非理想的椭圆, 因此拟合会导致误差, 另外该方法计算复杂, 难以满足实时处理的需要。楚光春等<sup>[3]</sup>提出了一种任意相位差条纹信号细分方法, 但对其他误差因素则无能为力。

收稿日期: 2007-10-09; 收到修改稿日期: 2008-01-21

作者简介: 朴伟英(1976—), 男, 朝鲜族, 博士研究生, 主要从事数字信号处理及光栅传感技术等方面的研究。

E-mail: pwyingpwy@yahoo.com.cn

导师简介: 袁怡宝(1964—), 男, 博士生导师, 主要从事表面计量学与微形状计量学等方面的研究。

E-mail: yibaoyuan2008@yahoo.com.cn

余文新等<sup>[4,5]</sup>提出了叠栅条纹信号的参量连续性概念。由于叠栅条纹信号相当于经过一个线性低通滤波器,其幅值、直流电平、频谱分布和相位关系在全量程上都是连续和平滑变化的,并且其变化频率远小于叠栅条纹信号的空间频率,因此叠栅条纹信号具有参量连续性。相邻的一个或几个周期的叠栅条纹信号具有几乎一致的幅值、直流电平、相位差等特征参量。基于此本文提出一种分步补偿的动态补偿方法。

## 2 细分误差的动态补偿原理

首先对利萨如图形一个周期的特征值点进行编号,编号顺序如图1。用S表示正弦幅度值,用C表示余弦幅度值。0、4为正弦信号过零点,因此有 $S_0 = S_4 = 0$ ;序号2、6为余弦信号过零点, $C_2 = C_6 = 0$ ;序号1、3、5、7为正余弦信号绝对值交点,因此有 $|S_1| = |C_1|$ , $|S_3| = |C_3|$ , $|S_5| = |C_5|$ , $|S_7| = |C_7|$ 。

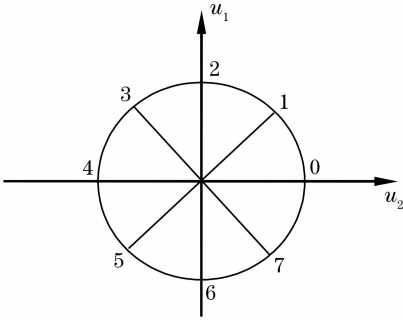


图1 特征值点的序号定义

Fig. 1 Serial number definition of characteristic points

### 2.1 直流漂移误差、不等幅误差和非正交误差的分步补偿方法

当光栅信号误差以直流漂移误差、非正交误差、不等幅误差为主时,可以用(1)式表示光栅信号<sup>[2,6]</sup>:

$$\begin{cases} u_1 = \Delta a_1 + A \sin \theta, \\ u_2 = \Delta a_2 + A(1 + \xi) \cos(\theta + \varphi), \end{cases} \quad (1)$$

式中 $u_1, u_2$ 分别为两路叠栅条纹信号, $A$ 为信号幅值, $\Delta a_1, \Delta a_2$ 分别为正余弦信号的直流漂移误差, $\xi$ 为不等幅误差, $\varphi$ 为非正交误差, $\theta$ 为叠栅信号的相位值。不妨称(1)式的光栅信号为正弦补偿周期信号。跟踪特征值点2和6,计算其相位值:

$$\begin{cases} \theta_2 = -\varphi + \arccos \frac{-\Delta a_2}{A(1 + \xi)}, \\ \theta_6 = \pi - \varphi + \arccos \frac{-\Delta a_2}{A(1 + \xi)}, \end{cases} \quad (2)$$

设 $\alpha = -\varphi + \arccos \frac{-\Delta a_2}{A(1 + \xi)}$ ,则有

$$\begin{cases} S_2 = \Delta a_1 + A \sin \alpha, \\ S_6 = \Delta a_1 + A \sin(\pi + \alpha), \end{cases} \quad (3)$$

因此有

$$\begin{cases} \Delta a_1 = \frac{S_2 + S_6}{2}, \\ u'_1 = u_1 - \Delta a_1, \end{cases} \quad (4)$$

式中 $u'_1$ 为补偿了直流漂移误差的正弦路信号。经过(4)式补偿后,理论上余弦补偿周期的正弦路信号不再含有直流漂移误差。因此余弦补偿周期的光栅信号可写为

$$\begin{cases} u_1 = A \sin \theta, \\ u_2 = \Delta a_2 + A(1 + \xi) \cos(\theta + \varphi). \end{cases} \quad (5)$$

跟踪特征值点0和4,此时 $\theta_0 = 0, \theta_4 = \pi$ ,计算其幅度值,有

$$\begin{cases} C_0 = \Delta a_2 + A(1 + \xi) \cos \varphi, \\ C_4 = \Delta a_2 + A(1 + \xi) \cos(\pi + \varphi), \end{cases} \quad (6)$$

因此

$$\begin{cases} \Delta a_2 = (C_0 + C_4)/2, \\ u'_2 = u_2 - \Delta a_2, \end{cases} \quad (7)$$

式中 $u'_2$ 为补偿了直流漂移误差后的余弦路信号。经过(7)式补偿后,理论上正弦路和余弦路信号均不含有直流漂移误差。不等幅补偿周期的光栅信号为

$$\begin{cases} u_1 = A \sin \theta, \\ u_2 = A(1 + \xi) \cos(\theta + \varphi), \end{cases} \quad (8)$$

跟踪特征值点0、2、4、6,计算其相位值,有 $\theta_0 = 0, \theta_2 = \pi/2 - \varphi, \theta_4 = \pi, \theta_6 = 3\pi/2 - \varphi$ ,因此

$$\begin{cases} C_0 = -C_4 = A(1 + \xi) \cos \varphi, \\ S_2 = -S_6 = A \sin \theta_2 = A \cos \varphi, \end{cases} \quad (9)$$

则不等幅误差的补偿算法为

$$\begin{cases} 1 + \xi = \frac{C_0}{S_2} = \frac{C_0}{-S_6} = \frac{C_4}{S_6} = \frac{-C_4}{S_2}, \\ u'_2 = u_2 \frac{1}{1 + \xi}, \end{cases} \quad (10)$$

经过(10)式补偿后,理论上光栅不再含有直流漂移误差和不等幅误差。非正交补偿周期的光栅信号可为

$$\begin{cases} u_1 = A \sin \theta, \\ u_2 = A \cos(\theta + \varphi), \end{cases} \quad (11)$$

跟踪特征值点1、3、5、7,计算其相位值,可知

$$\theta_1 = \arctan \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi},$$

$$\theta_3 = \pi - \arctan \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi},$$

$$\theta_5 = \pi + \arctan \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi},$$

$$\theta_7 = 2\pi - \arctan \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

因为  $\theta_5 - \theta_1 = \pi, \theta_7 - \theta_3 = \pi$ , 因此有  $S_1 = -S_5, S_3 = -S_7$ 。另外可以证明  $\theta_3 - \theta_1 = \pi/2, \theta_7 - \theta_5 = \pi/2$ 。由(11)式得

$$u'_2 = A \cos \theta = \frac{u_2 + u_1 \sin \varphi}{\cos \varphi}, \quad (12)$$

$\sin \varphi$  和  $\cos \varphi$  值可以通过以下求得

$$\begin{cases} A \cos(\theta_1 + \varphi) = A \sin \theta_1 = S_1, \\ -A \cos(\theta_3 + \varphi) = A \sin \theta_3 = S_3, \end{cases} \quad (13)$$

由于  $\theta_3 - \theta_1 = \pi/2$ , 因此有  $A \cos \theta_1 = S_3, A \cos \theta_3 = -S_1$ , 代入(13)式得到

$$\begin{cases} \cos \varphi = \frac{2S_1 S_3}{S_1^2 + S_3^2}, \\ \sin \varphi = \frac{S_3^2 - S_1^2}{S_1^2 + S_3^2}. \end{cases} \quad (14)$$

由(12)式和(14)式即可补偿非正交误差。至此, 分步补偿完成了一个完整的补偿周期, 光栅信号被调整到一个比较理想的状态。此时输出的信号已经可以供细分使用。之后继续跟踪补偿后的信号, 使用(2)式~(14)式可以获得补偿增量, 用补偿增量对原补偿量进行更新可以获得新的补偿量。用脚标 L 代表原补偿量, P 代表补偿增量, N 代表新的补偿量, 则补偿量的更新方法如下:

$$\begin{cases} \Delta a_{1N} = \Delta a_{1L} + \Delta a_{1P}, \\ \Delta a_{2N} = \Delta a_{2L} + \Delta a_{2P}, \\ \xi_N = \xi_L \cdot \xi_P, \\ \varphi_N = \varphi_L + \varphi_P, \end{cases} \quad (15)$$

对于非正交误差来说, 有

$$\begin{cases} \sin \varphi_N = \sin \varphi_L \cos \varphi_P + \cos \varphi_L \sin \varphi_P, \\ \cos \varphi_N = \cos \varphi_L \cos \varphi_P - \sin \varphi_L \sin \varphi_P, \end{cases} \quad (16)$$

而  $\sin \varphi_L, \cos \varphi_L, \sin \varphi_P, \cos \varphi_P$  均已经得到, 因此由(16)式即可以求出  $\sin \varphi_N, \cos \varphi_N$ 。

当光栅正向移动时, 特征值点的跟踪顺序为  $S_2, S_6 \rightarrow C_0, C_4 \rightarrow S_6, C_0 \rightarrow S_1, S_3$  或者  $S_6, S_2 \rightarrow C_4, C_0 \rightarrow S_2, C_4 \rightarrow S_5, S_7$ ; 当光栅反向移动时, 特征值点的跟踪顺序为  $S_2, S_6 \rightarrow C_4, C_0 \rightarrow S_6, C_4 \rightarrow S_3, S_1$  或者  $S_6, S_2 \rightarrow C_0, C_4 \rightarrow S_2, C_0 \rightarrow S_7, S_5$ 。这两种跟踪顺序可以交替使用。当某种误差产生增量时, 跟踪算法可以在 2 个半光栅信号周期内对其进行补偿。如果只使用一种跟踪顺序也可以在 3 个信号周期内实现补偿。由叠栅条纹的参量连续性可知, 在这样短的周期内, 误差的增量很小, 避免了误差之间的相互影响, 保证了补偿算法的精度和稳定性。

除了上述三种误差之外, 光栅信号还存在谐波, 这不但会产生细分误差, 而且对本文的动态补偿方

法也会产生不利的影晌。本文只定量分析其对动态补偿方法的影响。

## 2.2 谐波对分步补偿方法的影响

谐波可以分为奇次谐波和偶次谐波。当只考虑三次谐波时, 两路叠栅条纹信号可表示为

$$\begin{cases} u_1 = A \sin \theta + e_3 A \sin(3\theta + \varphi_{s3}), \\ u_2 = A \sin(\theta + \pi/2) + \\ \quad e_3 A \sin(3\theta + 3\pi/2 + \varphi_{c3}) = \\ \quad A \cos \theta - e_3 A \cos(3\theta + \varphi_{c3}), \end{cases} \quad (17)$$

式中  $e_3$  为三次谐波幅值与基波幅值的比值,  $\varphi_{s3}, \varphi_{c3}$  分别为三次谐波与基波的相位差。(17)式的绝对值交点是一个超越方程, 不能求得其解析解。当  $A = 1, e_3 = 0.05, \varphi_{s3} = \varphi_{c3} = 0$  时, 光栅信号及其利萨如图形如图 2 所示, 利用 Matlab 软件计算其 8 个特征值点的相位值为:  $\theta_0 = 0, \theta_1 = \pi/4, \theta_2 = \pi/2, \theta_3 = 3\pi/4, \theta_4 = \pi, \theta_5 = 5\pi/4, \theta_6 = 3\pi/2, \theta_7 = 7\pi/4$ 。特征值点幅值为  $|S_1| = |S_3| = |S_5| = |S_7| = 0.7424, |C_0| = |S_2| = |C_4| = |S_6| = 0.95$ 。因此三次谐波不改变特征值点的相位, 对正余弦信号过零点幅值影响是相同的, 对正余弦信号绝对值交点幅值影响也是相同的。可以证明, 五次和七次谐波对特征值点的影响与三次谐波相同。实际信号的谐波相对基波可能存在相移, 这种相移一般比较小, 因此可以基本认为奇次谐波对本文补偿方法没有影响或影响很小。

当只考虑二次谐波时, 两路叠栅条纹信号可表示为

$$\begin{cases} u_1 = A \sin \theta + e_2 A \sin(2\theta + \varphi_{s2}), \\ u_2 = A \sin(\theta + \pi/2) + \\ \quad e_2 A \sin(2\theta + 2\pi/2 + \varphi_{c2}) = \\ \quad A \cos \theta - e_2 A \sin(2\theta + \varphi_{c2}), \end{cases} \quad (18)$$

式中  $e_2$  为二次谐波幅值与基波幅值的比值,  $\varphi_{s2}, \varphi_{c2}$  分别为二次谐波与基波的相位差。(18)式也不能得到解析解。当  $A = 1, e_2 = 0.05, \varphi_{s2} = \varphi_{c2} = 0$  时, 光栅信号及其利萨如图形如图 3 所示。利用 Matlab 软件计算其 8 个特征值点的相位值为:  $\theta_0 = 0, \theta_1 = 0.2277\pi, \theta_2 = \pi/2, \theta_3 = 3\pi/4, \theta_4 = \pi, \theta_5 = 1.2723\pi, \theta_6 = 3\pi/2, \theta_7 = 7\pi/4$ 。特征值点幅值为  $|S_1| = 0.7054, |S_3| = 0.6571, |S_5| = 0.7054, |S_7| = 0.7571, |C_0| = |S_2| = |C_4| = |S_6| = 1$ 。因此二次谐波误差改变特征值点 1、5 的相位, 改变特征值点 3、7 的幅值。因此偶次谐波对非正交误差补偿方法有影响。实际应用中可以对特征值点 3、7 的幅值取平均来抑制偶次谐波的影响, 有  $(|S_3| + |S_7|)/2 = 0.7071$ , 与  $|S_1|$  十分接近。

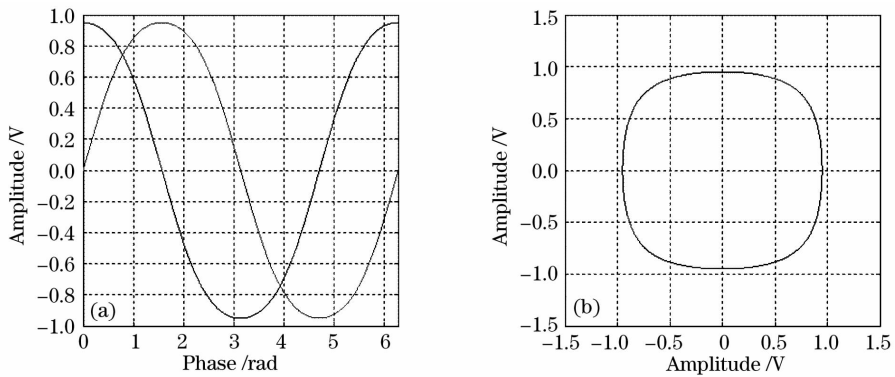


图 2 含有三次谐波光栅信号(a)及其利萨如图形(b)

Fig. 2 Grating signals (a) with third harmonic and Lissajou figure (b)

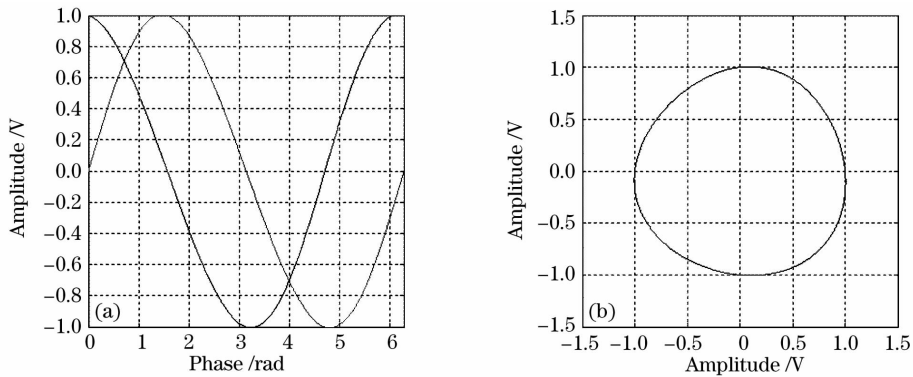


图 3 含有二次谐波光栅信号(a)及其利萨如图形(b)

Fig. 3 Grating signals (a) with second harmonic and Lissajou figure (b)

谐波还会导致细分误差。目前对于谐波一般采用光学滤波的方法。例如德国 Opton 公司的余弦光栅,可以把谐波幅值从基波幅值的 10% 降到 2%,能够满足 300 细分的需要。文献[7]介绍的正弦微窗光栅也有同样的效果。从实际情况看,国外光栅厂例如 Heidenhain、Fagor 等生产的光栅尺均能提供低谐波的高质量叠栅条纹信号。由叠栅条纹信号的细分误差分析可知<sup>[8]</sup>,每种误差对细分精度都有影响,因此只修正或补偿某一种误差对提高细分精度的帮助不大。本文方法能补偿除谐波以外的所有误差因素,因此将本文方法与光学滤波方法结合使用可显著提高细分精度。

### 3 实验验证

实验中使用的光栅为西班牙 Fagor 公司生产的 MP-12-5 型封闭式光栅尺,具有 50 lp/mm 的刻线密度。光栅安装在日本 THK 公司生产的精密导轨上由丝杠带动,通过北京双诺公司生产的 AC6111 型 12 位精密数据采集卡采集光栅信号。采集后的数据使用 Matlab 软件进行处理。只采用一种特征值点的跟踪顺序,并且对特征值点 3、7 的幅值取平

均来抑制偶次谐波的影响。补偿周期为 3 个光栅信号周期。对于特征值点的跟踪,可以采用文献[3]介绍的方法。

补偿前和补偿后的光栅信号如图 4 所示,利萨如图形如图 6(a)所示。可见,原始信号存在明显的非正交误差,还有一定的直流漂移误差和不等幅误差。经过补偿,三个周期后的光栅信号质量大为改善(对于补偿后信号的利萨如图,前三个周期的信号被剔除)。

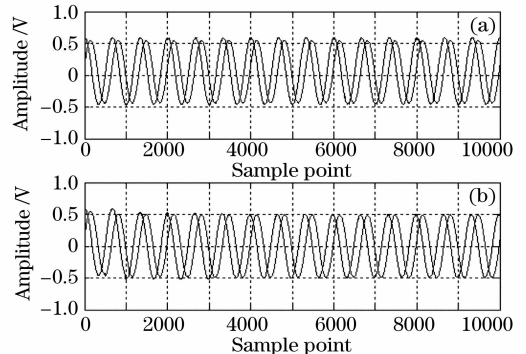


图 4 原始光栅信号。(a)补偿前,(b)补偿后

Fig. 4 Original grating signals (a) before, (b) after compensation

以 3 个光栅信号周期为单位,每经过 3 个周期各补偿量值的变化情况如表 1 所示。

表 1 补偿量变化情况

Table 1 Change of compensation value of original grating signals

	1	2	3	4	5
$\Delta a_1/V$	0.0427	0.0564	0.0557	0.0564	0.0558
$\Delta a_2/V$	0.0625	0.0653	0.0659	0.0651	0.0659
$\xi$	0.9936	0.9615	0.9389	0.9370	0.9393
$\sin \varphi$	-0.1973	-0.2413	-0.2408	-0.2372	-0.2262
$\cos \varphi$	0.9804	0.9704	0.9706	0.9715	0.9741

由表 1 可见,经过 3 个周期后补偿量基本趋于稳定,但有小幅波动。这种波动来源于光栅信号的微小畸变和采样误差导致的特征值点幅值计算误差。这会导致输出的补偿后信号也产生小幅波动。理论分析和实验均表明,当光栅信号变化很小时补偿量的变化也很小,补偿后信号的波动也很小,因此算法是稳定的。

在原光栅信号上增加一个随空间位置增加的直流分量,其表达式为

$$\Delta a = 3 \times 10^{-6} \pi x$$

式中  $x$  为采样点数。对此时的光栅信号进行补偿,补偿前后的光栅信号如图 5 所示,利萨如图形如图 6(b)所示。各补偿量值的变化情况如表 2 所示。可见,正弦和余弦信号的直流漂移误差补偿量不断增大,而另外三个补偿量则基本不变。但与表 1 相比,另外三个补偿量的大小则存在一定偏差,这是由于直流分量不断增加,因此补偿后还存在一定的直流漂移误差,导致其他补偿量的计算产生偏差。因此即使补偿量存在偏差,但与补偿前光栅信号相比,补偿后光栅信号的质量仍然得到了明显提高。特别是当原光栅信号利萨如图形存在较大波动时,补偿后信号的利萨如图形仍较稳定。对于不等幅误差和非

正交误差也有同样的结果。因此本文方法不但能够补偿系统误差,而且能够补偿随机误差。

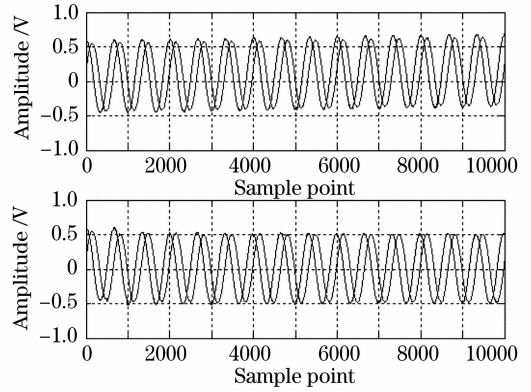


图 5 叠加时变直流分量的光栅信号。(a)补偿前, (b)补偿后

Fig. 5 Grating signals with time-varying zero offset (a) before and (b) after compensation

表 2 叠加时变直流分量的补偿量变化情况

Table 2 Change of compensation value of grating signals with time-varying zero offset

	1	2	3	4	5
$\Delta a_1/V$	0.0466	0.0776	0.0965	0.1150	0.1346
$\Delta a_2/V$	0.0698	0.0910	0.1094	0.1293	0.1485
$\xi$	0.9948	0.9813	0.9671	0.9669	0.9700
$\sin \varphi$	-0.1633	-0.1998	-0.1998	-0.1975	-0.2004
$\cos \varphi$	0.9866	0.9798	0.9798	0.9803	0.9797

由图 6 可见,由于各种误差因素导致补偿前的光栅信号的利萨如图形变成一个不规则的形状,在补偿后利萨如图形的形状大为改善,更接近一个理想的圆。可用利萨如图形的圆度误差评价细分误差<sup>[6]</sup>,因此本文的方法可以显著降低细分误差。

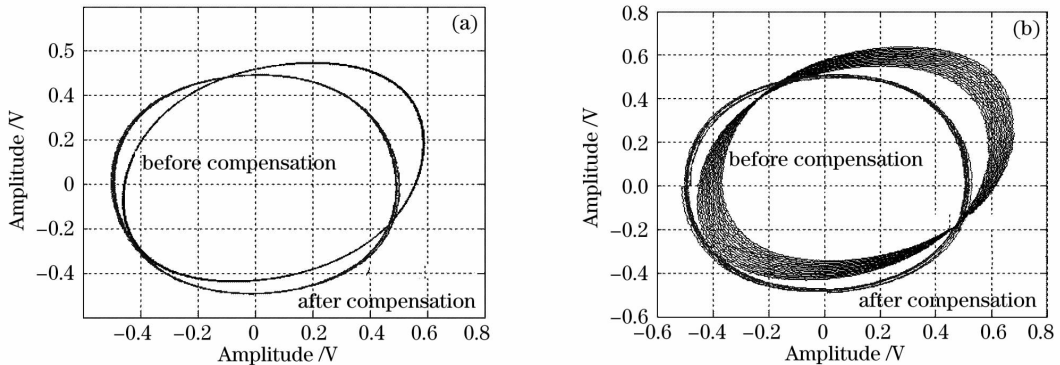


图 6 原始光栅信号(a)与叠加时变直流分量光栅信号(b)补偿前后光栅信号的利萨如图

Fig. 6 Lissajou figures of original grating signal (a) and grating signal with time-varying zero offset (b)

## 4 结 论

提出一种动态补偿叠栅条纹信号的细分误差方法。它不但能补偿系统误差,更关键的是能补偿一部分随机误差。只需要跟踪 8 个特征值点的幅度值,因此所需的存储空间很小;通过简单的加减乘除运算,就可以补偿光栅信号的直流漂移误差、非正交误差和不等幅误差,算法高效,能够满足实时处理的需要。该方法不但能够降低系统安装和调试的难度,而且能够显著地提高光栅信号的质量,降低细分误差;对提高光栅测量系统的精度和可靠性具有重要意义,是保证光栅实现纳米测量的一项关键技术。

## 参 考 文 献

- 1 Li Jianguo, Xuan Ming, Wang Yifan. Software compensation method of phase error in moire strip division[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, **3**(1): 69~73  
李江国,宣明,王一凡. 莫尔条纹细分中位置误差的软件修正方法[J]. *光学精密工程*, 1995, **3**(1): 69~73
- 2 Liu Wenwen, Fei Yetai. A high-accuracy algorithm for the interpolated displacement of grating signal[J]. *J. Applied Sciences*, 1999, **17**(1): 70~74  
刘文文,费业泰. 高精度的光栅信号细分算法[J]. *应用科学*, 1999, **17**(1): 70~74
- 3 Chu Xingchun, Lü Haibao, Du Leibo *et al.*. Research on subdividing method for random phase difference fringe signals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 497~500  
楚兴春,吕海宝,杜列波等. 任意位置差条纹信号细分方法的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 497~500
- 4 Yu Wenxin, Zhou Ziqiang, Hu Xiaotang. Research on dynamic realtime error correction method in grating-based nanometrology[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2001, **22**(suppl.): 63~64  
余文新,邹自强,胡小唐. 光栅纳米测量中实时动态误差修正方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2001, **22**(增刊): 63~64
- 5 Yu Wenxin, Hu Xiaotang, Zhou Ziqiang. Research on dynamic realtime error correction method in grating-based nanometrology[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, **23**(2): 101~105  
余文新,胡小唐,邹自强. 光栅纳米测量中的系统误差修正技术研究[J]. *计量学报*, 2002, **23**(2): 101~105
- 6 Wang Chunhai, Zhang Guoxiong, Jing Fangsheng. A method of determining the interpolation error without length reference[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, **16**(1): 6~10  
王春海,张国雄,景芳盛. 不依赖长度基准的光栅细分精度的评定方法[J]. *计量学报*, 1995, **16**(1): 6~10
- 7 Wang Chunhai, Zhang Guoxiong, Guo Shangqi *et al.*. A displacement encoder using sine micro-window grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1153~1157  
王春海,张国雄,郭尚旗等. 采用正弦微窗光栅的位移传感器[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1153~1157
- 8 Luo Hua, Gao Shan, Li Xianglong. Realization of high division number of coarse grating signals by fully digital processing method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(2): 283~288  
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
- 9 Hans-Jürgen von Martens. Generalization and analysis of the fringe-counting method for interferometric measurement of motion quantities[J]. *Measurement*, 1999, **25**: 71~87
- 10 Zhang Nanyangsheng, Yang Kuntao. Three-dimensional measurement technology based on virtual grating of double frequency[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1407~1411  
张南洋生,杨坤涛. 双频虚拟光栅投影三维测量技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1407~1411
- 11 Zhang Lijuan, Lu Xiangdong, Ou weiyang. Improvement of measuring grating parameters with diffraction orders of  $m = 1$  efficiencies ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1605~1608  
张丽娟,卢向东,欧伟英. 对正负一级能量之比测量光栅参量方法的改进[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1605~1608
- 12 Hua Shiqun, Luo Ying. High precision measurement of alignment error based on theory of interference[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 76~80  
花世群,洛英. 基于干涉原理的高精度直线度误差测量[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 76~80