

四读头法消除码盘偏心 and 振动对叠栅条纹相位测量的影响

朱 帆¹ 吴易明¹ 刘长春²

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所光学定向与瞄准技术研究室, 陕西 西安 710119)

² 中国人民解放军 61541 部队, 北京 100094

摘要 光栅编码器装调的偏心误差和使用中安装转轴的振动严重影响光栅编码器的测量精度, 限制了光栅码盘的应用范围。为了消除光栅编码器偏心与振动对测量的影响, 在双读头法的基础上, 提出了四读头法消除光栅编码器偏心和振动影响的方法, 并进行了理论推导和仿真。结果表明, 采用沿光栅编码器圆周均匀分布的四读头读取叠栅条纹信号, 并将检测相位相加除以 4 的方法比当前普遍采用的对径读头读数相加除以 2 的方法更能有效地提高光栅编码器的测量精度, 从而降低了光栅编码器的装调要求。利用四读头各自采集的测量信号可以解算出偏心方向和偏心量, 从而可以消除安装转轴振动的影响。对光栅编码器的进一步应用研究具有指导意义。

关键词 测量; 光栅编码器; 叠栅条纹; 偏心误差; 相位; 转轴振动

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0412008

Eliminating Influence of Grating Encoder's Eccentricity and Vibration to Moiré Fringes Signal by Four Reading Heads

Zhu Fan¹ Wu Yiming¹ Liu Changchun²

¹ *Laboratory of Optical Orientation and Collimation, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

² *The 61541st Troop of the People's Liberation Army, Beijing 100094, China*

Abstract Presently, grating encoder is an important way to accurately measure angle, however, the eccentric inaccuracy of assembling adjusting and the vibration of rotating shaft influence grating encoder's measuring accuracy and then confine the application range of grating encoder. A new method to eliminate the influence of eccentricity and vibration with four reading heads is proposed and the theoretical derivation and simulation results are given out. The conclusion hints that the method which gets moiré fringes signal by four reading heads well-distributed along the circumference of grating is more effective in improving the measuring accuracy than the one that uses double reading heads. Consequently, the new method decreases the requirements of assembling adjusting. The direction and magnitude also can be solved by four reading heads, so the influence of rotating shaft can be eliminated. All the results are useful to deeper research.

Key words measurement; grating encoder; moiré fringes; eccentric inaccuracy; phase; vibration of rotating shaft

OCIS codes 120.3930; 120.4640; 050.1950; 120.7280; 230.1950

1 引 言

光学编码器(简称码盘)是将圆光栅叠栅条纹和光电转换技术相结合,将机械转动的角度值转换为数字信息量输出的一种现代传感器^[1]。由于码盘具有高分辨率、高精度、结构简单、体积小和响应速度

快的特性,使其在高精度数码车床、高精度经纬仪、微型角度及线位移、高精度的扭矩传感器和高精度地震波探测等精密测量领域中得到了广泛的应用^[2~5]。

码盘主要由光源、标尺圆光栅、指示圆光栅和光

收稿日期: 2010-09-16; 收到修改稿日期: 2010-12-08

作者简介: 朱 帆(1983—),男,硕士,工程师,主要从事光学精密测量和光学瞄准等方面的研究。

E-mail: zhufan2080@163.com

电转换读头组成,当标尺圆光栅相对于指示圆光栅转动时,由于干涉而产生的叠栅条纹也会随之移动,光电转换读头通过检测固定点处叠栅条纹光强的变化,经过信号处理得到标尺圆光栅转动角度。光电读头读取的叠栅条纹信号质量是影响码盘测量精度的重要因素,信号质量主要由信号的等幅性、正交性和正弦性等性质决定。随着光栅码盘各种优化设计方法的出现和制作工艺的提高^[6,7],叠栅条纹信号的质量在码盘设计中得到了有力的保证,但在实际测量系统中,由于配件的加工工艺和系统的装调工艺等影响^[8,9],两圆光栅中心轴之间及与其系统转动中心总会存在偏心,而且由于标尺圆光栅固连在转轴上,转轴转动时会带来标尺圆光栅的随机振动。码盘偏心和振动都会给叠栅条纹信号测量带来误差,该误差极大地限制了码盘应用范围的进一步拓展,使得码盘不能在振动较大的场合下得到应用。

目前已经有双读头消除码盘偏心的报道,并已在实际工程中得到运用,然而码盘振动带来的影响未见有分析报道。本文深化了文献[4]中的建模方法,在其分析双读头码盘偏心误差的基础上,分析了四读头码盘在消除偏心误差上的优越性,并提出了四读头消除码盘振动影响的理论。进一步放宽了对码盘偏心装调的要求,提高了码盘对转轴振动的适应性。

2 理论模型建立

如图1所示建立直角坐标系,坐标原点 O 为转轴转动中心, O_1 为指示圆光栅中心, O_2 为标尺圆光栅中心,且指示光栅和标尺光栅具有相同的光栅常数 δ 。

每一栅线都有自己的相位,称之为叠栅相位^[10],标尺圆光栅每转动一个 δ 角度,此相位变化 2π 。设指示光栅和标尺光栅的偏心量分别为 e_1 和

e_2 ,偏心方向与 x 轴的夹角分别为 α_0 和 θ_0 ,并设指示圆光栅的参考栅线与 x 轴的夹角为 α' ,标尺圆光栅的参考栅线沿标尺圆光栅偏心方向,即标尺光栅的参考栅线与 x 轴的夹角为 θ_0 。

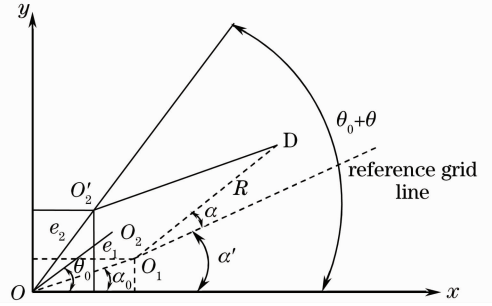


图1 光栅码盘偏心与振动分析模型

Fig. 1 Analysis model about eccentricity and vibration of grating encoder

光学编码器读头 D 检测到的叠栅条纹信号的相位与在读头位置处参与形成叠栅条纹的指示光栅和标尺光栅的叠栅相位有关,设指示光栅的叠栅相位为 φ_1 ,标尺光栅的叠栅相位为 φ_2 ,则叠栅条纹信号的相位为

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (1)$$

设指示光栅不动,标尺光栅转动 θ 角度,则由几何关系,干涉场中任意一坐标点 (x, y) 处,有

$$\tan\left(\frac{\varphi_1}{2\pi}\delta + \alpha'\right) = \frac{y - e_1 \sin \alpha_0}{x - e_1 \cos \alpha_0}, \quad (2)$$

$$\tan\left(\frac{\varphi_2}{2\pi}\delta + \theta + \theta_0\right) = \frac{y - e_2 \sin(\theta + \theta_0)}{x - e_2 \cos(\theta + \theta_0)}. \quad (3)$$

设指示圆光栅半径为 R ,读头位置与指示圆光栅中心的连线与指示光栅参考栅线的夹角为 α ,则读头坐标为

$$X = R \cos(\alpha + \alpha') + e_1 \cos \alpha_0, \quad (4)$$

$$Y = R \sin(\alpha + \alpha') + e_1 \sin \alpha_0, \quad (5)$$

将读头坐标 (X, Y) 代入(2)式和(3)式,解出 φ_1 和 φ_2 ,再将 φ_1 和 φ_2 代入(1)式,得读头检测的叠栅条纹相位为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \alpha + \theta + \theta_0 - \arctan \left[\frac{R \sin(\alpha + \alpha') + e_1 \sin \alpha_0 - e_2 \sin(\theta + \theta_0)}{R \cos(\alpha + \alpha') + e_1 \cos \alpha_0 - e_2 \cos(\theta + \theta_0)} \right] \right\}. \quad (6)$$

显然,若指示光栅和标尺光栅的偏心量 e_1 和 e_2 均为 0,则叠栅条纹相位应为

$$\varphi' = \frac{2\pi}{\delta} (\theta + \theta_0 - \alpha'). \quad (7)$$

(7)式为理想情况下叠栅条纹相位表达式,也是光栅码盘在相位信号处理时实际采用的相位表达式,光栅读头读出的实际相位与信号处理时采用的相位(即理想相位)之差即是相位误差。(6)式与(7)式之差即为单读头读取相位信息时带来的误差

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi' = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \alpha + \alpha' - \arctan \left[\frac{R \sin(\alpha + \alpha') + e_1 \sin \alpha_0 - e_2 \sin(\theta + \theta_0)}{R \cos(\alpha + \alpha') + e_1 \cos \alpha_0 - e_2 \cos(\theta + \theta_0)} \right] \right\}. \quad (8)$$

由(8)式可以看出,偏心带来的相位误差除了与两圆光栅的偏心量 e_1 和 e_2 有关外,还与偏心方向 α_0 和 θ_0 ,标尺圆光栅转动角度 θ 有关^[2]。

3 消除码盘振动的理论分析

3.1 四读头消除码盘偏心影响

当前在码盘数据采样处理中,常采用对径读头信号相位信息相加除以2的方法来消除码盘偏心的影响。设两读头与指示参考栅线的夹角分别为 $\alpha = \beta$ 和 $\alpha = \beta + \pi$,代入(6)式,各自相位相加再除以2,则

$$\varphi_{2D} = \frac{\varphi_{\beta} + \varphi_{\beta+\pi}}{2} = \frac{2\pi}{\delta} \times \left\{ \beta + \theta + \theta_0 - \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{R^2 \sin[2(\beta + \alpha')]}{R^2 \cos[2(\beta + \alpha')]} - \frac{e_1^2 \sin(2\alpha_0)}{e_1^2 \cos(2\alpha_0)} - \frac{e_2^2 \sin[2(\theta + \theta_0)]}{e_2^2 \cos[2(\theta + \theta_0)]} + \frac{2e_1 e_2 \sin(\theta + \theta_0 + \alpha_0)}{2e_1 e_2 \cos(\theta + \theta_0 + \alpha_0)} \right\} \right\}. \quad (9)$$

双读头读取相位信息时的误差为

$$\Delta\varphi_{2D} = \varphi_{2D} - \varphi' = \frac{2\pi}{\delta} \times \left\{ \beta + \alpha' - \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{R^2 \sin[2(\beta + \alpha')]}{R^2 \cos[2(\beta + \alpha')]} - \frac{e_1^2 \sin(2\alpha_0)}{e_1^2 \cos(2\alpha_0)} - \frac{e_2^2 \sin[2(\theta + \theta_0)]}{e_2^2 \cos[2(\theta + \theta_0)]} + \frac{2e_1 e_2 \sin(\theta + \theta_0 + \alpha_0)}{2e_1 e_2 \cos(\theta + \theta_0 + \alpha_0)} \right\} \right\}. \quad (10)$$

由(10)式看出,若 e_1 和 e_2 均远远小于 R ,则可略去 e_1 和 e_2 的二阶无穷小量,有 $\Delta\varphi_{2D} = 0$ 。比较(8)式和(10)式,在(8)式中,单读头读取的相位误差公式里,反正切函数中为 e_1 和 e_2 的一次项表达式,而(10)式中为 e_1 和 e_2 的二次项表达式,说明当码盘偏心量不大时,双读头比单读头更能有效地消除码盘偏心带来的测量误差,从理论上验证了当前普遍采用的双读头消除码盘偏心影响的正确性。

若用4个读头对叠栅条纹进行检测,且4个读头沿指示圆光栅圆周间隔 90° 分布,即与指示光栅参考栅线的夹角分别为 $\alpha = \beta, \alpha = \beta + \pi/2, \alpha = \beta + \pi$ 和 $\alpha = \beta + (3\pi)/2$,相位信息处理时采用各读头读数相加再除以4的方法,则有

$$\varphi_{4D} = \frac{\varphi_{\beta} + \varphi_{\beta+\pi/2} + \varphi_{\beta+\pi} + \varphi_{\beta+3\pi/2}}{4} = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \beta + \theta + \theta_0 - \frac{1}{4} \arctan \left\{ \frac{R^4 \sin[4(\beta + \alpha')]}{R^4 \cos[4(\beta + \alpha')]} - \frac{e_1^4 \sin(4\alpha_0)}{e_1^4 \cos(4\alpha_0)} - \frac{e_2^4 \sin[4(\theta + \theta_0)]}{e_2^4 \cos[4(\theta + \theta_0)]} + \frac{4e_1^3 e_2 \sin(\theta + 3\alpha_0) + 4e_1 e_2^3 \sin(3\theta + \alpha_0) - 6e_1^2 e_2^2 \sin[2(\alpha_0 + \theta + \theta_0)]}{4e_1^3 e_2 \cos(\theta + 3\alpha_0) + 4e_1 e_2^3 \cos(3\theta + \alpha_0) - 6e_1^2 e_2^2 \cos[2(\alpha_0 + \theta + \theta_0)]} \right\} \right\}, \quad (11)$$

略去 e_1 和 e_2 的四阶无穷小量,有 $\varphi_{4D} = \varphi'$ 。四读头读取相位信息的误差为

$$\Delta\varphi_{4D} = \varphi_{4D} - \varphi' = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \beta + \alpha' - \frac{1}{4} \arctan \left\{ \frac{R^4 \sin[4(\beta + \alpha')]}{R^4 \cos[4(\beta + \alpha')]} - \frac{e_1^4 \sin(4\alpha_0)}{e_1^4 \cos(4\alpha_0)} - \frac{e_2^4 \sin[4(\theta + \theta_0)]}{e_2^4 \cos[4(\theta + \theta_0)]} + \frac{4e_1^3 e_2 \sin(\theta + 3\alpha_0) + 4e_1 e_2^3 \sin(3\theta + \alpha_0) - 6e_1^2 e_2^2 \sin[2(\alpha_0 + \theta + \theta_0)]}{4e_1^3 e_2 \cos(\theta + 3\alpha_0) + 4e_1 e_2^3 \cos(3\theta + \alpha_0) - 6e_1^2 e_2^2 \cos[2(\alpha_0 + \theta + \theta_0)]} \right\} \right\}, \quad (12)$$

由(12)式可见,在四读头读取相位信息的误差中,反正切函数中为 e_1 和 e_2 的四次项表达式,由于 e_1 和 e_2 小于码盘半径 R ,故相对于(8)式和(10)式来说,(12)式更接近于零,说明采用沿指示圆光栅圆周均匀分布的四读头读数相加的方法能消除码盘偏心带来的误差,而且其效果相对于当前普遍采用的对径读头读数相加的方法更好,能够极大地降低码盘偏心的影响。

3.2 四读头消除码盘振动的影响

在实际应用中,由于码盘支撑轴承间隙和某些

特殊环境的影响,转轴通常会有不同程度的振动,该振动幅度较大时严重影响码盘的测量精度^[11]。

转轴的振动带动码盘标尺圆光栅随之振动而指示光栅不动,但图1的坐标系是以转轴转动中心为原点的,且坐标轴系不随转轴转动,在考虑转轴振动时,需变换观察角度,以转轴中心为静止参照物。由于标尺光栅盘固联在转轴上,指示光栅盘与读头固定在支撑轴承上,故相对于坐标系来说,标尺光栅盘圆心绕坐标轴原点转动,且转动半径固定不变,指示光栅盘与读头不做转动,但其光栅盘圆心位置随机

振动,需注意其与以常规静止物体为参照物的坐标系的区别。

在码盘偏心分析的基础上,可以将指示光栅盘振动理解为指示圆光栅圆心偏心量和偏心方向随机变化,故在图 1 中, O'_2 和 O 的相对位置不变, D 和 O_1 的相对位置不变,且一旦码盘、转轴和读头装配完毕

后, e_1 和 α_0 会随着转轴的晃动而变化, α, e_2, α' 和 θ_0 则固定不变。可认为 α, e_2, α' 和 θ_0 为常量, e_1 和 α_0 为变量,且 e_2 为标尺光栅盘的装调误差,其大小不随转轴转动而变化,只要保证装调质量,可以将 e_2 修正得很小,为方便分析,将其相关项略去,则(6)式和(12)式可写为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \alpha - \arctan \left[\frac{R \sin(\alpha + \alpha') + e_1 \sin \alpha_0}{R \cos(\alpha + \alpha') + e_1 \cos \alpha_0} \right] + \theta + \theta_0 \right\}, \quad (13)$$

$$\varphi_{4D} = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \beta + \theta + \theta_0 - \frac{1}{4} \arctan \left\{ \frac{R^4 \sin[4(\beta + \alpha')] - e_1^4 \sin(4\alpha_0)}{R^4 \cos[4(\beta + \alpha')] - e_1^4 \cos(4\alpha_0)} \right\} \right\}. \quad (14)$$

将 $\alpha = \beta, \alpha = \beta + \pi/2, \alpha = \beta + \pi$ 和 $\alpha = \beta + 3\pi/2$ 代入(13)式,且设各位置读头读出的相位分别为 p_1, p_2, p_3 和 p_4 , 则有

$$\theta + \theta_0 + \beta = \frac{\delta}{2\pi} p_1 + \arctan \left[\frac{R \sin(\beta + \alpha') + e_1 \sin \alpha_0}{R \cos(\beta + \alpha') + e_1 \cos \alpha_0} \right], \quad (15)$$

$$\theta + \theta_0 + \beta = \frac{\delta}{2\pi} p_2 - \frac{\pi}{2} + \arctan \left[\frac{R \cos(\beta + \alpha') + e_1 \sin \alpha_0}{-R \sin(\beta + \alpha') + e_1 \cos \alpha_0} \right], \quad (16)$$

$$\theta + \theta_0 + \beta = \frac{\delta}{2\pi} p_3 - \pi + \arctan \left[\frac{-R \sin(\beta + \alpha') + e_1 \sin \alpha_0}{-R \cos(\beta + \alpha') + e_1 \cos \alpha_0} \right], \quad (17)$$

$$\theta + \theta_0 + \beta = \frac{\delta}{2\pi} p_4 - \frac{3\pi}{2} + \arctan \left[\frac{-R \cos(\beta + \alpha') + e_1 \sin \alpha_0}{R \sin(\beta + \alpha') + e_1 \cos \alpha_0} \right]. \quad (18)$$

联立(15)式和(17)式,可得

$$\frac{2Re_1 \sin(\beta + \alpha' - \alpha_0)}{R^2 - e_1^2} = \tan \left[\frac{\delta}{2\pi} (p_1 - p_3) \right], \quad (19)$$

联立(16)式和(18)式,可得

$$\frac{2Re_1 \cos(\beta + \alpha' - \alpha_0)}{R^2 - e_1^2} = \tan \left[\frac{\delta}{2\pi} (p_2 - p_4) \right], \quad (20)$$

联立(19)式和(20)式,可解得

$$\alpha_0 = \beta + \alpha' - \arctan \frac{\tan \left[\frac{\delta}{2\pi} (p_1 - p_3) \right]}{\tan \left[\frac{\delta}{2\pi} (p_2 - p_4) \right]}, \quad (21)$$

$$e_1 = \frac{R \sqrt{1 + \tan^2 \left[\frac{\delta}{2\pi} (p_1 - p_3) \right] + \tan^2 \left[\frac{\delta}{2\pi} (p_2 - p_4) \right]} - R}{\sqrt{\tan^2 \left[\frac{\delta}{2\pi} (p_1 - p_3) \right] + \tan^2 \left[\frac{\delta}{2\pi} (p_2 - p_4) \right]}}. \quad (22)$$

用解算出来的 α_0 和 e_1 修正(14)式,从而消除码盘振动的影响,修正项为

$$\Delta\varphi = \varphi_{4D} - \varphi' = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \beta + \alpha' - \frac{1}{4} \arctan \left\{ \frac{R^4 \sin[4(\beta + \alpha')] - e_1^4 \sin(4\alpha_0)}{R^4 \cos[4(\beta + \alpha')] - e_1^4 \cos(4\alpha_0)} \right\} \right\}. \quad (23)$$

结合图 1 可以看出,在(21)~(23)式中, $\beta + \alpha'$ 实际上是第一个读头,即位于 $\alpha = \beta$ 的读头与坐标系 x 轴之间的夹角,当建立坐标系时使 x 轴平行于指示光栅中心与读头的连线,即使 x 轴平行于 O_1D ,则 $\beta + \alpha' = 0$,此时 α_0 和 $\Delta\varphi$ 为

$$\alpha_0 = \arctan \left\{ \frac{\tan \left[\frac{\delta}{2\pi} (p_1 - p_3) \right]}{\tan \left[\frac{\delta}{2\pi} (p_2 - p_4) \right]} \right\}, \quad (24)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \frac{1}{4} \arctan \left[\frac{e_1^4 \sin(4\alpha_0)}{R^4 - e_1^4 \cos(4\alpha_0)} \right] \right\}. \quad (25)$$

在实际应用中,码盘叠栅条纹信号相位信息应由下式得到

$$\varphi = \varphi_{4D} - \Delta\varphi, \quad (26)$$

该式即可消除码盘转轴振动和码盘偏心的影响。

以上分析证明了通过4个沿指示圆光栅圆周均匀分布的读头读取的叠栅条纹相位信息,可以解算出码盘振动带来的相位误差 $\Delta\varphi$,再以 $\Delta\varphi$ 为误差项修正四读头读取的相位信息平均值,可较精确地得到叠栅条纹相位信息,使光栅码盘可用于有微小机械振动的场合中,大大地拓展光栅码盘的使用范围。

4 仿真及应用实例

4.1 仿真计算

为验证理论分析的正确性,检验四读头消除码盘偏心和振动影响的效果,本文根据实际应用中光电码盘的型号和规格,设计了一套实验模型,并进行了仿真计算。

设码盘直径为50 mm,光栅常数为0.2 mrad,指示圆光栅偏心量 e_1 为20 μm ,标尺圆光栅偏心量 e_2 为2 μm , θ 和 φ 为标尺光栅转动角度,转动范围为 $0 \sim 2\pi$,当指示圆光栅偏心角度 α_0 在 $0 \sim 2\pi$ 之间变化时,单读头读出的相位误差为 φ_1 ,如图2所示。

对径读头读数相加再除以2后,合成相位的误差为 φ_2 ,如图3所示。

四读头读数相加再除以4后,合成相位的误差为 φ_3 ,如图4所示。

采用(26)式对四读头合成相位进行误差修正,修正后的相位误差为 φ_4 ,如图5所示。

从图2~4可以看出,单读头读出的相位误差较大,达到了10 rad量级,在实际工程中基本不可使用。同样条件下,对径读头读数相加再除以2后,合成相位的误差在 10^{-2} rad量级,在精度要求不是很

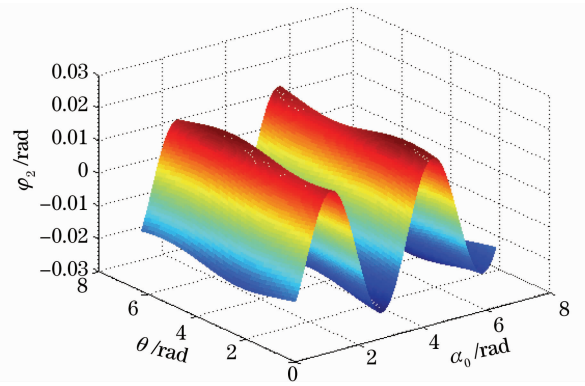


图3 双读头相位误差

Fig. 3 Phase error of double reading heads

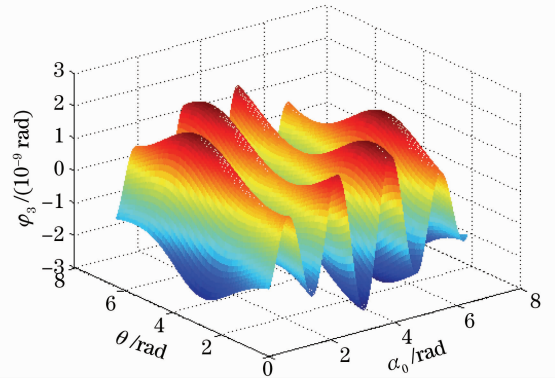


图4 四读头相位误差

Fig. 4 Phase error of four reading heads

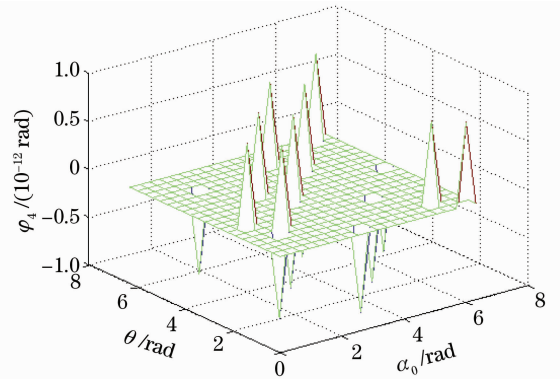


图5 四读头相位修正后的误差

Fig. 5 Modified phase error of four reading heads

高的情况下,双读头即能满足要求。采用四读头读数后,相位误差在 10^{-9} rad量级,相对于双读头,精度提高了 10^7 倍,即在同样精度要求下,采用四读头法可降低对码盘偏心量的调试要求。

采用(26)式对四读头读数相位进行修正后,可将本次仿真条件下的振动影响误差量级减小到 10^{-12} rad,同时,由于码盘安装轴的振动可视为 e_1 的随机变化,四读头法消除了 e_1 的影响,故消除了码盘安装转轴对测量的影响。该方法在实际工程运

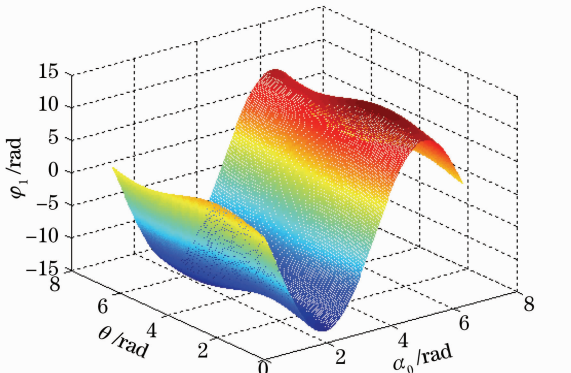


图2 单读头相位误差

Fig. 2 Phase error of single reading head

用中具有重大的意义。

4.2 实例分析

在一转轴扭转角测量系统中,在转轴两端分别装配一套码盘,码盘标尺光栅盘固连在转轴上随转轴一起转动,指示光栅安装在转轴支撑架上,对转轴加载不同的扭矩,通过两套码盘旋转角度之差来计算转轴的扭转角。由于工作环境限制,转轴与支撑架之间不能采用密珠轴承,轴承钢珠间隙较大,导致转轴在转动时存在振动,采用双读头和四读头码盘时,其部分测试数据如表 1 所示,测量重复精度如图 6 所示。

表 1 四读头和双读头码盘的扭矩角测量值

Table 1 Value of torsion angle measured by grating encoder with four and double reading heads

Serial number	Data of four reading heads /(")	Data of double reading heads /(")	Theoretic data /(")	Loading torque/(N·m)
1	0	0	0	0
2	1	1	1	2×10^{-3}
3	2	3	2.4	4.4×10^{-3}
4	2	10	3.3	5.9×10^{-3}
5	6	13	5.4	9.8×10^{-3}
6	27	27	27.2	0.0490
7	53	66	54.4	0.0980
8	271	282	272.2	0.4900
9	822	834	818.7	1.4700
10	1360	1399	1361.1	2.4500
11	1638	1667	1633.3	2.9400
12	2178	2222	2177.7	3.9200
13	2723	2747	2722.2	4.9000

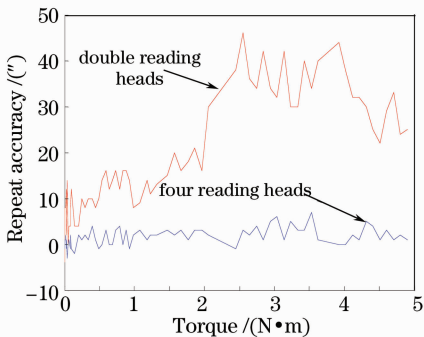


图 6 四读头和双读头码盘的重复测量精度

Fig. 6 Repeat accuracy of grating encoder with four and double reading heads

在该扭转角测量系统中,影响扭转角测量精度的因素除了码盘自身测量精度外,还有扭转角的长度误差、直径误差、加载扭矩误差等。从表 1 和图 6 中可以看出,采用双读头码盘读取转轴扭转角时,其最大测量误差接近 $50''$,而四读头码盘能将测量误

差控制在 $10''$ 以内,可见四读头法在消除码盘偏心和振动上有明显的功效。

5 结 论

就码盘偏心量的影响对双读头和四读头读取叠栅条纹信号做了理论推导和分析,提出了消除码盘偏心影响的方法,对四读头各自读取的信号联立求解,求出了标尺光栅偏心量和偏心方向的表达式,再对四读头合成相位进行了误差修正。分析、仿真和实例结果表明,采用沿指示圆光栅均匀分布的四读头读取叠栅条纹信号比当前普遍采用的对径读头读数法能更有效地消除码盘偏心的影响,从而放宽了对码盘偏心调试的要求,降低了调试难度。对四读头合成相位进行误差修正后,使码盘测量结果不受指示光栅偏心量和偏心方向的影响,即不受码盘安装轴振动的影响,从而扩展了码盘的使用范围。

参 考 文 献

- Fang Yanhui, Long Kehui, Liu Huanyu *et al.*. Studies on digital addition technology in incremental encoder[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2004, **27**(2): 101~103
方艳辉, 龙科慧, 刘焕雨等. 增量式编码器数字量相加技术的研究[J]. 长春理工大学学报, 2004, **27**(2): 101~103
- Wang Duqiao, Liu Yong, Zhou Gang *et al.*. The analysis and research of four fold-frequency method based on incremental photoelectrical encoder pulse[J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2009, **29**(8): 14~17
王度桥, 刘勇, 周岗等. 光电码盘脉冲信号四倍频检测方法的分析与研究[J]. 船电技术, 2009, **29**(8): 14~17
- Zhao Yong, Su Xianyu, Li Wen. Phase subdivision of absolute coding grating[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(1): 91~95
赵勇, 苏显渝, 李雯. 绝对编码光栅的相位细分[J]. 光子·激光, 2010, **21**(1): 91~95
- Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Wangfu *et al.*. Dual-grating-based nanometer measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 702~706
周绍林, 杨勇, 陈旺富等. 基于双光栅的纳米测量方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 702~706
- Zong Ze, Xing Hongyan. A novel double-grating-based horizontal geophone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2493~2503
宗泽, 行鸿彦. 新型双光栅水平向地震检波器的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2493~2503
- Fan Shuwei, Zhou Qinghua, Li Hong. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3133~3139
樊叔维, 周庆华, 李红. 槽型衍射光栅结构参数优化设计研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3133~3139
- Huang Yuanming, Zhou Fufang, Zhai Baogai. Fabrication of organic groove-free gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1160~1162
黄远明, 周甫方, 翟保改. 有机无刻痕光栅的研制[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1160~1162
- Luo Changzhou, Sun Yan, Gao Limin *et al.*. Theoretical analysis on phase of moiré fringes' signal affected by shaft eccentricity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 1013~1016

- 罗长洲, 孙 岩, 高立民 等. 码盘偏心对叠栅条纹信号相位影响的理论分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(8): 1013~1016
- 9 Yang Chuping, Weng Jiawen, Zhao Jing *et al.*. Extract original grating information from deformed grating pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3078~3081
- 杨初平, 翁嘉文, 赵 静 等. 从变形光栅条纹提取基准光栅信息 [J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3078~3081
- 10 Luo Changzhou, Sun Yan, Hu Xiaodong *et al.*. The affect on phase of moire fringes' signal caused by shaft eccentricity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1271~1273
- 罗长洲, 孙 岩, 胡晓东 等. 码盘偏心对叠栅条纹信号相位的影响 [J]. 光子学报, 2003, **32**(10): 1271~1273
- 11 Yang Guoguang. Modern Optical Testing Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005. 272~277
- 杨国光. 近代光学检测系统 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005. 272~277