

文章编号: 0253-2239(2003)08-1013-4

码盘偏心对叠栅条纹信号相位影响的理论分析

罗长洲¹ 孙 岩² 高立民¹ 陈良益¹ 胡晓东¹ 徐 洲¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所动目标光电测控室, 西安 710068)
(² 青岛海西电子有限公司, 青岛 266000)

摘要: 增量式光学编码器根据径向辐射光栅产生的叠栅条纹进行角度测量, 两光栅码盘轴之间及其与系统转动轴之间的偏心和晃动, 影响着编码器读头输出的叠栅条纹信号的相位, 这给角度测量带来了一定的系统误差。根据光栅码盘产生叠栅条纹的基本理论, 在改进计量光栅码盘理论模型的基础上, 推导出码盘偏心情况下码盘读头输出的叠栅条纹信号相位的理论公式, 对码盘偏心给叠栅条纹信号相位带来的偏差、增量式光学编码器光学设计原理及消除此由此带来的系统误差的技术原理进行了分析与讨论。

关键词: 光学计量; 光学编码器; 增量式编码器; 叠栅条纹; 偏心; 相位

中图分类号: TH741.6 文献标识码: A

1 引 言

光学编码器是测量长度、角度等相关力学量的传感器。增量式光学编码器成对使用计量光栅, 分别称为标尺光栅和指示光栅, 两光栅的叠合形成叠栅条纹, 条纹的宽度与光栅节距有着确定的关系。当标尺光栅和指示光栅发生相对移动时, 叠栅条纹就发生相应的移动, 其移动方向代表着光栅对之间的相对移动方向, 这样利用叠栅条纹就可以测量位移、角位移等相关的力学量^[1,2]。实际上, 常采用光闸叠栅条纹, 便于光电信号的采集和处理。

光栅角度测量系统利用光学编码器读头检测到的叠栅条纹信号实现角度测量, 信号的质量主要由信号的等幅性、正交性和正弦性等性质决定。叠栅条纹信号的质量虽然在光学编码器的设计中得到有力的保证, 但由于配件的加工工艺和系统的装调工艺等因素, 在实际测量系统中, 两光栅码盘中心轴之间及其与系统转中心之间总会产生偏心现象; 进行测量操作时, 由于转轴间隙, 两光栅码盘中心轴之间也会产生晃动现象, 这影响了光学编码器读头检测到的叠栅条纹信号的相位, 因而影响了信号的正交性, 给角度测量带来了一定的系统误差。

计量光栅叠合产生叠栅条纹的几何光学原理指出: 叠栅条纹是不同计量光栅栅线交点的轨迹^[1~3],

根据这种几何学的计量光栅模型, 已经得到了描述径向辐射计量光栅形成的叠栅条纹的数学方程, 但是这个方程不能有效说明编码器读头检测到的叠栅条纹信号的相位特性, 因此, 为了说明码盘偏心对叠栅条纹信号相位的影响, 有必要在计量光栅码盘的理论模型中引入描述相位的特征量。

2 理论分析

根据计量光栅叠栅条纹信号产生的基本原理^[1,2], 计量光栅码盘可以抽象成这样一个数学模型: 光栅栅线沿圆周连续分布, 确定参考光栅栅线后, 每一栅线都有自己的相位, 称之为叠栅相位 φ , 此相位描述各光栅栅线参与形成叠栅条纹时对叠栅条纹信号相位的贡献, 沿圆周每经过一个光栅常量 δ , 此相位就变化一个 2π 周期; 参考栅线的叠栅相位 $\varphi=0$, 其他光栅栅线的叠栅相位依其与参考栅线的位置关系沿圆周连续增大, 当 φ 为 2π 的整数倍时, 对应光栅栅线即为实际的透光栅线。对于一个光栅常数为 δ 、有 N 条光栅栅线的光栅码盘, 叠栅相位 φ 的定义域为 $[0, 2N\pi]$, 与参考栅线成 α 角的光栅栅线的叠栅相位为

$$\varphi = 2\pi \frac{\alpha}{\delta}, \quad (1)$$

如图 1 所示, 增量式光学编码器读头 D 检测到的叠栅条纹信号的相位 ϕ 与在读头位置处参与形成叠栅条纹的两计量光栅栅线的叠栅相位有关, 设指示光栅栅线(图中实线)的叠栅相位为 φ_1 , 标尺光栅

E-mail: luochry@sohu.com

收稿日期: 2002-09-16; 收到修改稿日期: 2003-01-10

栅线(图中点划线)的叠栅相位为 φ_2 , 则叠栅条纹信号的相位 ϕ 可表示成如下公式:

$$\phi = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (2)$$

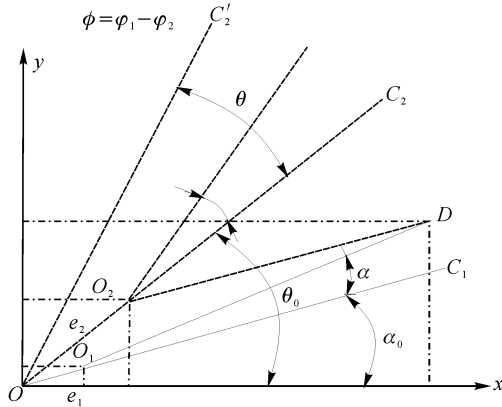


Fig. 1 The theoretical model of incremental encoder

由于增量式光学编码器的装调工艺, 形成叠栅条纹的两计量光栅中心轴之间及其与系统转动中心之间会产生偏心现象(图 1)。考虑一般的情况, 设转动中心为 O , 以此为坐标原点建立直角坐标系, 指示光栅的圆心为 O_1 , 装配形成的偏心量为 e_1 ; 标尺光栅的圆心为 O_2 , 也是由于装配所形成的偏心量为 e_2 。不失一般性, 起始时刻, 指示光栅 O_1 的参考栅线

在与 x 轴成 α_0 的直线上, 标尺光栅 O_2 的参考栅线在与 x 轴成 θ_0 的直线上, 两参考栅线都经过各自圆心并且过转动中心 O ; 在实际应用中, 一般指示光栅不动, 标尺光栅随物体转动, 当标尺光栅绕转动中心再转动 θ 角时, 在给定坐标系下, 指示光栅盘 O_1 上叠栅相位为 φ_1 的栅线方程为

$$y - e_1 \sin \alpha_0 = \tan\left(\frac{\varphi_1}{2\pi} \delta + \alpha_0\right) (x - e_1 \cos \alpha_0), \quad (3)$$

标尺光栅盘 O_2 上叠栅相位为 φ_2 的栅线方程为

$$y - e_2 \sin(\theta + \theta_0) = \tan\left(\frac{\varphi_2}{2\pi} \delta + \theta + \theta_0\right) [x - e_2 \cos(\theta + \theta_0)]. \quad (4)$$

设读头位于指示光栅半径为 R 、与参考栅线成 α 角的位置处, 即在给定坐标系下, 该读头的位置坐标为

$$\begin{aligned} X &= R \cos(\alpha + \alpha_0) + e_1 \cos \alpha_0, \\ Y &= R \sin(\alpha + \alpha_0) + e_1 \sin \alpha_0, \end{aligned}$$

将读头的位置坐标代入两光栅的栅线方程, 可解出读头位置处指示光栅栅线的叠栅相位 φ_1 及标尺光栅栅线的叠栅相位 φ_2 与标尺光栅转动角 θ 的关系为

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\delta} \alpha, \quad (5)$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \arctan \left[\frac{R \sin(\alpha + \alpha_0) + e_1 \sin \alpha_0 - e_2 \sin(\theta + \theta_0)}{R \cos(\alpha + \alpha_0) + e_1 \cos \alpha_0 - e_2 \cos(\theta + \theta_0)} \right] - \theta - \theta_0 \right\}, \quad (6)$$

(5) 式和(6)式中, 由于叠栅相位与读头位置角 α 及标尺光栅转动角 θ 在各自定义域内是一一对应的, 因此, (5) 式用读头位置角 α 表示反正切值, 而(6)式只保留了反正切主值域的值。这样读头检测到的叠栅条纹信号的相位为

$$\phi = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \alpha - \arctan \left[\frac{R \sin(\alpha + \alpha_0) + e_1 \sin \alpha_0 - e_2 \sin(\theta + \theta_0)}{R \cos(\alpha + \alpha_0) + e_1 \cos \alpha_0 - e_2 \cos(\theta + \theta_0)} \right] + \theta + \theta_0 \right\}, \quad (7)$$

由(7)式可见, 光栅盘中心轴之间的偏心及它们与系统转动轴之间的偏心, 都会影响光学编码器读头检测到的叠栅条纹信号的相位, 而且在有偏心的情况下, 读头的位置也会影响其检测到的叠栅条纹信号的相位。

2 结果讨论

1) 一般情况下, 增量式光学编码器读头检测到的叠栅条纹信号相位的理论公式(7)中含有三项, 分别反映码盘偏心时不同因素对叠栅条纹信号相位的贡献:

第一项因素: α , 表示读头的位置;

第二项因素:

$$\arctan \left[\frac{R \sin(\alpha + \alpha_0) + e_1 \sin \alpha_0 - e_2 \sin(\theta + \theta_0)}{R \cos(\alpha + \alpha_0) + e_1 \cos \alpha_0 - e_2 \cos(\theta + \theta_0)} \right],$$

表示码盘轴之间及其与系统转动中心之间的偏心, 角度测量的系统误差主要由这一项产生;

第三项因素: $\theta + \theta_0$, 表示标尺光栅的转动。

单独保证指示光栅或标尺光栅与系统转动轴重合, 都不能消除第二项产生的影响, 因此, 在增量式光学编码器的装调过程中, 光栅码盘都必须调整得与系统转动中心同轴。

2) 当指示光栅和标尺光栅的中心轴都与系统的转动中心重合, 即 $e_1 = e_2 = 0$ 时, 光学编码器处于理想工作状态, 将条件代入(7)式, 可以得理想工作

条件下叠栅条纹信号相位与标尺光栅转过角之间的关系如下:

$$\phi = \frac{2\pi}{\delta}(\theta + \theta_0 - \alpha_0), \quad (8)$$

这便是增量式光学编码器实现角度测量的基本原理^[4]。由此可见,理想情况下,增量式光学编码器读头检测到的叠栅条纹信号的相位与指示光栅和标尺光栅参考栅线之间的夹角 $(\theta_0 - \alpha_0)$ 有关。

3) 增量式光学编码器一般输出正弦(A)和余弦(B)两路叠栅条纹信号,即要求在标尺光栅转过

任意角度时,这两路叠栅条纹信号的相位都相差 $\pi/2$,根据(8)式,经计算,可以得到位于同一圆周上输出这两路信号的读头,其指示光栅参考栅线位置之间的关系为

$$\alpha_{0A} - \alpha_{0B} = n\delta + \delta/4, \quad (9)$$

在计量光栅码盘光学图案的设计中,这个结论已经得到广泛应用^[5]。

4) 将(7)式与(8)进行比较,可以得到由于码盘偏心而给叠栅条纹信号相位带来的偏差为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \alpha + \alpha_0 - \arctan \left[\frac{R\sin(\alpha + \alpha_0) + e_1 \sin \alpha_0 - e_2 \sin(\theta + \theta_0)}{R\cos(\alpha + \alpha_0) + e_1 \cos \alpha_0 - e_2 \cos(\theta + \theta_0)} \right] \right\}, \quad (10)$$

因此,由码盘偏心带来的相位偏差不仅与码盘偏心情况有关,而且与标尺光栅转过的角度及读头的位置都有关。考虑两种特殊位置的读头: $\alpha = 0$ 和 $\alpha = \pi$,码盘偏心时给两个读头检测到的叠栅条纹信号相位带来的偏差分别为

$$\Delta\phi_{\alpha=\pi} = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \pi + \alpha_0 - \arctan \left[\frac{-R\sin(\alpha + \alpha_0) + e_1 \sin \alpha_0 - e_2 \sin(\theta + \theta_0)}{-R\cos(\alpha + \alpha_0) + e_1 \cos \alpha_0 - e_2 \cos(\theta + \theta_0)} \right] \right\}, \quad (11)$$

$$\Delta\phi_{\alpha=0} = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \alpha_0 - \arctan \left[\frac{R\sin(\alpha + \alpha_0) + e_1 \sin \alpha_0 - e_2 \sin(\theta + \theta_0)}{R\cos(\alpha + \alpha_0) + e_1 \cos \alpha_0 - e_2 \cos(\theta + \theta_0)} \right] \right\}, \quad (12)$$

根据(11)式和(12)式,相对于系统转动轴中心,当标尺光栅偏心而指示光栅同轴,即 $e_1 = 0$ 而 $e_2 \neq 0$ 时,码盘偏心给叠栅条纹信号相位带来的偏差随标尺光栅转过角度而变化,转过角度一定时,不同读头因此而引入的相位偏差也不同;当标尺光栅同轴而指示光栅偏心,即 $e_1 \neq 0$ 而 $e_2 = 0$ 时,码盘偏心给叠栅条纹信号相位带来的偏差不随标尺光栅转过角度而变化,但与读头的位置有关,读头位置确

定,由此引入的相位偏差就一定;这些特点已经在增量式光栅码盘的装调过程中已得到充分证明。

5) 考虑位于直径两端的两个读头,它们位于半径为 R 的圆周上,与参考栅线的夹角分别为 $\alpha = \beta$ 和 $\alpha = \beta + \pi$;根据(7)式,利用数学三角函数运算公式,经计算可得到一般情况下,这两个读头检测到的叠栅条纹信号的相位和为

$$\frac{\phi_{\alpha=\beta} + \phi_{\alpha=\beta+\pi}}{2} = \frac{2\pi}{\delta} \left\{ \beta + \theta + \theta_0 - \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{R\sin 2(\beta + \alpha_0) - e_1^2 \sin 2\alpha_0 - e_2^2 \sin 2(\theta + \theta_0) + 2e_1 e_2 \sin(\theta + \theta_0 + \alpha_0)}{R\cos 2(\beta + \alpha_0) - e_1^2 \cos 2\alpha_0 - e_2^2 \cos 2(\theta + \theta_0) + 2e_1 e_2 \cos(\theta + \theta_0 + \alpha_0)} \right] \right\}, \quad (13)$$

一般情况下, e_1, e_2 都远小于 R ,因此,可以略去(13)式中所有的二阶无穷小量,再考虑在各自定义域内,叠栅相位与转动角之间的一一对应关系,经简单计算就可得到下式:

$$\frac{\phi_{\alpha=\beta} + \phi_{\alpha=\beta+\pi}}{2} \approx \frac{2\pi}{\delta}(\theta + \theta_0 - \alpha_0), \quad (14)$$

将(14)式与(8)式进行比较可知将码盘中心轴与转动中心的偏心量看作无穷小量,在略去其二阶无穷小量的基础上,采用对径向信号相加再除2的方法,可以适当消除因此而给测量带来的系统误差,

因此,增量式光学编码器对径信号处理技术的实质是对码盘中心轴偏心量的一种二阶无穷小近似,这种采用多读头方法来消除码盘轴系偏心给测量带来的系统误差的方法已经在光学编码器的实际应用中得到了广泛的应用。

结论 根据增量式光学编码器光栅码盘产生叠栅条纹的基本理论,在改进计量光栅码盘理论模型的基础上,推导出指示光栅和标尺光栅码盘轴之间偏心及其与系统转动轴之间偏心时读头检测到的叠栅条

纹信号相位的理论公式,从理论上分析了码盘偏心对读头检测到的叠栅条纹信号的影响,及由此而给叠栅条纹信号相位带来的偏差,理论得出的结论与实践结果相一致,不仅说明本文建立的光栅码盘理论模型的正确性,而且也有助于对光栅码盘技术中一些现象的理解,因此对计量光栅技术的应用具有一定的指导意义。

参 考 文 献

1 Zhu Baishen, Zhang Ju. *Digital Sensor* (数字传感器). Beijing: Beijing University of Science and Technology

Press, 1996. 27~42 (in Chinese)

2 Zhang Shanzhang. *Measurement Grating Technique* (计量光栅技术). Beijing: Mechanical Industry Press, 1985. 1~33 (in Chinese)

3 Jiang Zaomin, Wu Jinjie, Zhuang Zhitao. *Angle Measurement* (角度测量). Beijing: Mechanical Industry Press, 1995. 186~194 (in Chinese)

4 Zhu Baishen, Zhang Ju. *Digital Sensor* (数字传感器). Beijing: Beijing University of Science and Technique Press, 1996. 117~125 (in Chinese)

5 Zhang Shanzhong. *Measurement Grating Technique* (计量光栅技术). Beijing: Mechanical Industry Press, 1985. 143~144 (in Chinese)

Theoretical Analysis on Phase of Moiré Fringes' Signal Affected by Shaft Eccentricity

Luo Changzhou¹ Sun Yan² Gao Liming¹ Chen Liangyi¹ Hu Xiaodong¹ Xu Zhou¹

{¹ *Laboratory of Measuring and Controlling Moving Target, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*
² *Qingdao Haixi Electronics Co. Ltd., Qingdao 266000*}

(Received 10 September 2002; revised 10 January 2003)

Abstract: Incremental optical encoder measures length and angle based on the principle of moiré fringes. The eccentricity and shaking of two disks' axis may affect the phase of moiré fringes signal detected by encoder readout. This phase error may cause systematic error on angle measuring. According to the elementary theory of two grating disks forming moiré fringes, an improved model of optical encoder was proposed, and theoretical formula on phase of moiré fringes taking account of shaft eccentricity was deduced. This phase error caused by shaft eccentricity, the principle of designing incremental optical encoder and dispelling the systematic error were analyzed and discussed.

Key words: optical measurement; optical encoder; incremental encoder; moiré fringe; shaft eccentricity; phase