

# 利用坐标变换分析塔差对编码器测角精度测试的影响

田留德<sup>1,2</sup> 刘朝晖<sup>1</sup> 赵建科<sup>1</sup> 段亚轩<sup>1,2</sup> 潘亮<sup>1</sup> 赵怀学<sup>1</sup> 龙江波<sup>1</sup> 周艳<sup>1</sup> 李坤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了实现编码器测角精度的高精度测量,介绍了应用多面棱体和自准直仪组合测量编码器测角精度的原理和方法,建立了多面棱体坐标系和自准直仪测量坐标系,利用坐标变换的方法推导了塔差对测角精度测试结果影响的精确模型。结果表明,编码器转轴的倾斜角度和倾斜方向会影响编码器测角精度的测量结果。测量误差随编码器的倾斜角度的增大而增大,且近似成平方关系。测量误差随随编码器的倾斜方向改变,倾斜方向角为 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 时,测量误差最小;倾斜方向角为 $90^\circ$ 或 $270^\circ$ 时,测量误差最大。当倾斜角度为 $5'$ 时,引入的测量误差为 $0.11''\sim 0.48''$ ,这对于 I~III 级编码器的测试是不能忽略的。根据被测编码器的精度等级将塔差控制在恰当的范围内,给出了不同精度等级编码器测试时塔差的控制要求。

**关键词** 测量; 误差分析; 坐标变换; 光电编码器; 测角精度; 塔差

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0512003

## Analysis the Influence of Pyramidal Error on the Encoder Accuracy Test by Using Coordinate Transformation

Tian Liude<sup>1,2</sup> Liu Chaohui<sup>1</sup> Zhao Jianke<sup>1</sup> Duan Yaxuan<sup>1,2</sup> Pan Liang<sup>1</sup> Zhao Huaixue<sup>1</sup>  
Long Jiangbo<sup>1</sup> Zhou Yan<sup>1</sup> Li Kun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** In order to realize the high precision measurement of encoder accuracy, the principle and method to measure encoder accuracy by using polyhedron and autocollimator are introduced. The polyhedron coordinate system and autocollimator measurement coordinate system are established, and the precise mathematical model is established, which is relation with the measurement error of the encoder accuracy and pyramidal error. The simulation results show that the encoder shaft tilt angle and tilt direction will affect the measurement results of the encoder accuracy. Measurement error of encoder accuracy increases with encoder shaft tilt angle, and approximately proportional to the square. Measurement error of encoder accuracy changes with encoder shaft tilt direction. When encoder shaft tilt direction is  $0^\circ$  or  $180^\circ$ , measurement error is the smallest; When encoder shaft tilt direction is  $90^\circ$  or  $270^\circ$ , measurement error is the maximum. As encoder shaft tilt angle is  $5'$ , the measurement errors can reach  $0.11''\sim 0.48''$ , which cannot be ignored for encoder with 1~3 levels of precision grade. Pyramidal error should be controlled in the appropriate range based on the precision grade of measured encoder. Specific requirements on pyramidal error are given for encoders with different precision grades.

**Key words** measurement; error analysis; coordinate transformation; photoelectrical encoder; angle measuring accuracy; pyramidal error

**OCIS codes** 120.3930; 120.4640; 120.4800; 130.6010

收稿日期: 2014-11-10; 收到修改稿日期: 2014-12-17

基金项目: 中国科学院创新基金(Y154451ZZ0)

作者简介: 田留德(1984—),男,博士研究生,主要从事光电测量设备研制、精密检测研究。E-mail: tianliude@126.com

导师简介: 刘朝晖(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学跟踪测量仪器总体技术、空间 ATP 技术、红外弱目标与红外深空探测技术等方面的研究。E-mail: lzh@opt.ac.cn

## 1 引 言

光电轴角编码器是一种具有代表性的角位移传感器,集光、机、电于一体的数字测角装置<sup>[1-2]</sup>。因其具有高分辨力、高精度、智能化和非接触测量等优点,被广泛应用于工业、国防和科技领域的动态测量和实时控制系统中<sup>[3-6]</sup>。对光电编码器的研究大都集中在提高编码器的分辨力和测量精度上<sup>[7-11]</sup>,而对编码器精度检测方法的研究较少。编码器转角精度的测试方法主要有:转台法、分度台法、测角仪法、多面棱体——自准直仪法。目前仍以手动检测方法为主,但近几年,也有学者研究了光电轴角编码器的自动检测装置和方法。文献[12]给出了一套光电编码器自动检测系统,并验证了该系统的测试精度。文献[13]给出了一种小型光电编码器的自动检测系统,并比较了该系统的测试结果与传统测试方法的一致性。文献[14]提出了一种基于双频激光干涉仪的光电编码器转角精度检测方法,并研制了相应的检测装置,实验结果表明该装置和传统手动检测装置具有相同的检测精度,并具有更高的检测效率。文献[15]分析了多面棱体中心和编码器中心不重合对编码器转角精度检测结果的影响。多面棱体轴线与编码器旋转轴线的平行度(塔差)是影响编码器转角精度测试结果的另一机械安装误差,研究塔差对转角精度测试结果的影响可以提高编码器检测精度和检测效率,为编码器的精度鉴定、误差补偿、设计改进提供可靠数据依据,对促进编码器的发展具有重要意义。本文基于多面棱体和自准直仪组合测量编码器测角精度的原理,建立了多面棱体坐标系和自准直仪测量坐标系,给出了塔差对测角精度测试结果影响的精确模型和便于记忆和应用的简化模型。通过仿真给出了塔差的大小及方向对编码器测角精度测试结果影响和各精度等级编码器对塔差的控制要求。

## 2 测量原理

多面棱体——自准直仪法测量编码器如图1所示。将多面棱体安装在编码器转轴上,并使多面棱体轴线与编码器旋转轴线重合;安放自准直仪,使自准直仪视轴垂直于多面棱体工作面并对准多面棱体第一工作面中心,自准直仪分划板竖线应与编码器轴线平行;记下编码器示值  $a_1$  及自准直仪初始读数  $c_1$ , 旋转编码器主轴使多面棱体第二工作面对准自准直仪,记下编码器示值  $a_2$  及自准直仪读数  $c_2$ , 旋转编码器主轴直至校准完所有校准点。再次旋转编码器主轴使编码器示值为  $a_1$ , 同时记下自准直仪示值  $c'_1$ , 并计算一测回首尾重合差  $H = |c'_1 - c_1|$ , 各级编码器一测回首尾重合差应符合标准要求, 否则该组数据无效, 需重新测试。

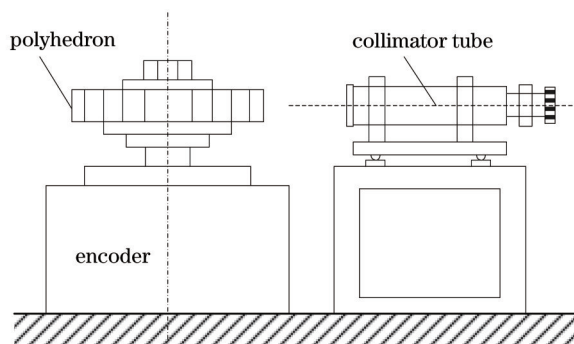


图1 多面棱体——自准直仪测试编码器示意图

Fig.1 Schematic diagram using polyhedron and autocollimator to measure encoder

编码器各测点的误差值计算公式为

$$e_i = (a_i - a_1) - (b_i - b_1) - (c_i - c_1), \quad (1)$$

式中  $a_i$  为编码器第  $i$  测点示值,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $b_i$  为棱体第  $i$  面与第 1 面夹角,  $c_i$  为自准直仪第  $i$  测点读数,  $e_i$  为被校准编码器第  $i$  测点的误差值。

## 3 塔差引入的转角精度测试误差

### 3.1 坐标系建立

为了推导塔差对转角精度测试结果影响的数学模型,建立了应用多面棱体——自准直仪测试编码器转角精度的坐标系。如图2所示,直角坐标系  $O-XYZ$  为多面棱体所在坐标系,  $OZ$  轴沿多面棱体的中心轴线,

与多面棱体各被测面平行,  $OXY$  平面平行于多面棱体主截面。因此, 多面棱体各被测面法线均在该平面内。定义  $OX$  轴沿多面棱体第 1 被测面法线方向。 $OZ'$  轴沿被测编码器的旋转轴, 其与  $OZ$  轴的夹角为  $\psi$  (倾斜角度), 其在  $OXY$  平面内的投影与  $OX$  轴的夹角为  $\omega$  (倾斜方向)。则  $\psi$  即为编码器精度测试时调整不到位引起的棱体各工作面与被检编码器的轴线的平行度误差(以下简称塔差)。直角坐标系  $o-xyz$  为自准直仪测量坐标系,  $oz$  轴平行于自准直仪的光轴,  $oxy$  平面为自准直仪的焦平面,  $ox$  轴沿自准直仪探测器的水平方向,  $oy$  轴沿自准直仪探测器的垂直方向。为了简洁模型, 定义直角坐标系  $o-xyz$  的  $oz$  轴与直角坐标系  $O-XYZ$  的  $OZ$  轴的方向相同, 则  $oy$  轴与  $OZ$  轴方向相同,  $ox$  轴与  $OY$  轴方向相同。

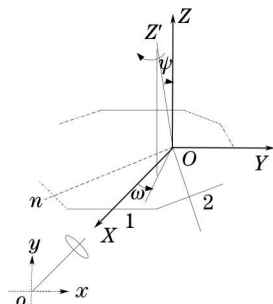


图 2 多面棱体——自准直仪法测量编码器转角精度的坐标关系

Fig.2 Coordinate relationship measuring encoder accuracy using polyhedron and autocollimator

### 3.2 塔差引入的测量误差模型

在直角坐标系  $O-XYZ$  中, 多面棱体第  $i$  个被测面的法线与  $OX$  轴的夹角为  $\theta_i = (i-1) \times \frac{360^\circ}{n}$ , 式中  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。则多面棱体第  $i$  个被测面的法线方向上的单位矢量在直角坐标系  $O-XYZ$  下的方向余弦为  $P_i = [\cos \theta_i \quad \sin \theta_i \quad 0]^T$ 。被测编码器的转轴  $OZ'$  方向的单位矢量在直角坐标系  $O-XYZ$  的方向余弦为  $P_z = [\sin \psi \cos \omega \quad \sin \psi \sin \omega \quad \cos \psi]^T$ 。在编码器转角精度测试时, 编码器每次转动相同角度, 均为多面棱体两相邻面之间的夹角  $\frac{360^\circ}{n}$ , 当塔差为零时(即  $OZ'$  与  $OZ$  重合),  $OZ$  为多面棱体的旋转轴, 多面棱体第  $i$  个被测面经过  $i-1$  次旋转后成为当前测量面, 该被测面的法线平行于  $OX$  轴, 自准直仪水平方向的读数  $c_i$  与测量第 1 面时的读数  $c_1$  相等。若塔差不为零(即  $OZ'$  与  $OZ$  不重合), 多面棱体第  $i$  个被测面绕  $OZ'$  轴经过  $i-1$  次旋转后成为当前测量面, 显然, 此时该被测面的法线与  $OX$  轴不平行, 自准直仪水平方向的读数  $c_i$  与测量第 1 面时的读数  $c_1$  之差即为塔差引起的编码器转角精度测试误差。下面具体推导该误差的精确数学模型。

第一步: 求取矢量  $P_i = [\cos \theta_i \quad \sin \theta_i \quad 0]^T$  绕矢量  $P_z = [\sin \psi \cos \omega \quad \sin \psi \sin \omega \quad \cos \psi]^T$  旋转  $-\theta_i = -(i-1) \times \frac{360^\circ}{n}$  后的矢量  $P'_i = [x'_i \quad y'_i \quad z'_i]^T$ 。

坐标变换为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi + \Lambda_x^2(1 - \cos \phi) & \Lambda_x \Lambda_y(1 - \cos \phi) - \Lambda_z \sin \phi & \Lambda_x \Lambda_z(1 - \cos \phi) - \Lambda_y \sin \phi \\ \Lambda_x \Lambda_y(1 - \cos \phi) + \Lambda_z \sin \phi & \cos \phi + \Lambda_y^2(1 - \cos \phi) & \Lambda_y \Lambda_z(1 - \cos \phi) - \Lambda_x \sin \phi \\ \Lambda_x \Lambda_z(1 - \cos \phi) - \Lambda_y \sin \phi & \Lambda_y \Lambda_z(1 - \cos \phi) + \Lambda_x \sin \phi & \cos \phi + \Lambda_z^2(1 - \cos \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $Q = [x \quad y \quad z]^T$  为旋转前矢量,  $R = [\Lambda_x \quad \Lambda_y \quad \Lambda_z]^T$  为转轴方向的单位矢量,  $\phi$  为旋转角度,  $Q' = [x' \quad y' \quad z']^T$  为旋转后的矢量。将  $P_i$ 、 $P_z$ 、 $-\theta_i$  代入(2)式可得  $P'_i = [x'_i \quad y'_i \quad z'_i]^T$ , 其各元素的具体表达式为

$$x'_i = [\cos \theta_i + \sin^2 \psi \cos^2 \omega(1 - \cos \theta_i)] \cos \theta_i + [\sin^2 \psi \cos \omega \sin \omega(1 - \cos \theta_i) + \cos \psi \sin \theta_i] \sin \theta_i, \quad (3)$$

$$y'_i = [\sin^2 \psi \cos \omega \sin \omega(1 - \cos \theta_i) - \cos \psi \sin \theta_i] \cos \theta_i + [\cos \theta_i + \sin^2 \psi \sin^2 \omega(1 - \cos \theta_i)] \sin \theta_i, \quad (4)$$

$$z'_i = [\sin \psi \cos \psi \cos \omega(1 - \cos \theta_i) + \sin \psi \sin \omega \sin \theta_i] \cos \theta_i + [\sin \psi \cos \psi \sin \omega(1 - \cos \theta_i) - \sin \psi \cos \omega \sin \theta_i] \sin \theta_i. \quad (5)$$

第二步: 计算法线矢量为  $P'_i = [x'_i \quad y'_i \quad z'_i]^T$  的被测面对应的自准直仪读数。

由多面棱体坐标系  $O-XYZ$  与自准直仪测量坐标系  $o-xyz$  之间关系可得, 矢量  $P'_i = [x'_i \quad y'_i \quad z'_i]^T$  在  $o-xyz$

坐标系下的方向矢量为  $P'_i = [y'_i \ z'_i \ x'_i]^T$ 。由光电自准直仪的工作原理可知,法线矢量的方向余弦为  $P'_i = [y'_i \ z'_i \ x'_i]^T$  的被测面对应的自准直仪读数为

$$\varepsilon_x = \arctan\left(\frac{y'_i}{x'_i}\right), \quad (6)$$

$$\varepsilon_y = \arctan\left(\frac{z'_i}{x'_i}\right), \quad (7)$$

式中  $\varepsilon_x$  为自准直仪的水平方向上读数,表征塔差引起的测量误差,  $\varepsilon_y$  自准直仪垂直方向上的读数,表征塔差的大小。

(6)~(7)式是塔差与自准直仪示值关系的精确模型。但该模型不够简洁不便于记忆和应用,下面推导其简化模型。

因为  $\varepsilon_x$  是一个  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  量级的数,  $\arctan\left(\frac{y'_i}{x'_i}\right)$  可用其一阶泰勒级数近似,则有

$$\varepsilon_x \approx \frac{y'_i}{x'_i}. \quad (8)$$

将(3)式和(4)式代入(8)式并进行整理可得

$$\varepsilon_x \approx \frac{\sin^2 \psi \sin \omega (1 - \cos \theta_i) \cos(\omega - \theta_i) - \cos \psi \sin \theta_i \cos \theta_i + \sin \theta_i \cos \theta_i}{\sin^2 \psi \cos \omega (1 - \cos \theta_i) \cos(\omega - \theta_i) + \cos \psi \sin^2 \theta_i + \cos^2 \theta_i}. \quad (9)$$

由于  $\psi$  是一个  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  量级的数,(9)式分母中  $\sin^2 \psi \approx 0$ ,  $\cos \psi \approx 1$ ,则(9)式分母近似等于1,简化为

$$\varepsilon_x \approx \sin^2 \psi \sin \omega (1 - \cos \theta_i) \cos(\omega - \theta_i) - \cos \psi \sin \theta_i \cos \theta_i + \sin \theta_i \cos \theta_i. \quad (10)$$

由于  $\psi$  是小量,则  $\sin^2 \psi \approx \psi^2$ ,  $\cos \psi \approx 1 - \frac{\psi^2}{2}$ ,代入(10)式整理可得

$$\varepsilon_x \approx \psi^2 [\sin \omega (1 - \cos \theta_i) \cos(\omega - \theta_i) + \frac{1}{2} \sin \theta_i \cos \theta_i], \quad (11)$$

式中  $\varepsilon_x$  和  $\psi$  的单位是弧度,转换成角秒为

$$\varepsilon_x \approx 0.4848 \times 10^{-5} \psi^2 [\sin \omega (1 - \cos \theta_i) \cos(\omega - \theta_i) + \frac{1}{2} \sin \theta_i \cos \theta_i]. \quad (12)$$

(12)式是塔差对编码器精度测试结果影响的简化模型,其中  $\varepsilon_x$  和  $\psi$  的单位是角秒。由(12)式可得,塔差引入的编码器精度测试误差与转轴倾斜角之间并非简单的线性关系,近似为平方关系。

同理,(7)式可简化为

$$\varepsilon_y \approx \psi [\cos(\omega - \theta_i) - \cos \omega], \quad (13)$$

(13)式是自准直仪垂直方向读数与塔差关系的简化模型。从该模型可以看出自准直仪垂直方向读数与塔差近似成线性关系。

### 3.3 仿真实验与结果分析

由建立的误差模型可知:被测编码器转轴的倾斜角度和倾斜方向均会影响编码器转角精度的测量结果。因此仿真分为两部分:第一部分,编码器转轴的倾斜角度为  $5'$ ,计算不同倾斜方向时引入的编码器转角精度的测量误差,分析编码器转轴倾斜方向对转角精度测量的影响,仿真结果见图3;第二部分,取编码器转轴倾斜方向角为  $90^\circ$ ,计算不同倾斜角度时引入的编码器转角精度测量误差,分析编码器转轴倾斜角度对转角精度测量的影响,仿真结果见图4。

由图3可知,编码器转轴倾斜引入的测量误差随转轴的倾斜方向而改变。倾斜方向角为  $0^\circ$  或  $180^\circ$  时,引入的测量误差最小;倾斜方向角为  $90^\circ$  或  $270^\circ$  时,引入的测量误差最大。当编码器转轴的倾斜角度取  $5'$  时,引入的转角精度测量误差在  $0.11'' \sim 0.48''$  范围内,这对于高精度编码器的测试和校准是不被允许的。

由图4可知,编码器转轴倾斜引入的测量误差随转轴的倾斜角度的增大而增大。当转轴倾斜角为  $10'$  时,所引入的测量误差为  $1.92''$ 。引入的测量误差与转轴倾斜角之间并非简单的线性关系,近似为平方关系。当编码器角度为  $179^\circ$  时,测量误差与倾斜角度的关系为  $\varepsilon_x \approx 0.1269 \times 10^{-6} \psi^2$ ;当编码器角度为  $111^\circ$  时,测量误差与倾斜角度关系为  $\varepsilon_x \approx 0.5337 \times 10^{-5} \psi^2$ 。

由图5可知,自准直仪垂直方向的读数最大所对应的编码器角度值等于编码器转轴的倾斜方向角。由此结论可以根据自准直仪垂直方向的读数确定编码器转轴的倾斜方向,为塔差的调整提供数据依据。由图6可知,自准直仪垂直方向的读数的变化量为编码器转轴倾斜角度的2倍。由此结论可以根据自准直仪垂直方向的读数变化量确定编码器转轴的倾斜量,为塔差的调整提供数据依据。

根据各精度等级编码器的最大允许测试误差,并取最大允许测试误差的1/3作为最大允许塔差引入测试误差,再根据测量误差与倾斜角度关系  $\varepsilon_x \approx 0.5337 \times 10^{-5} \psi^2$  可以确定各级编码器精度测试时塔差具体控制要求,如表1所示。

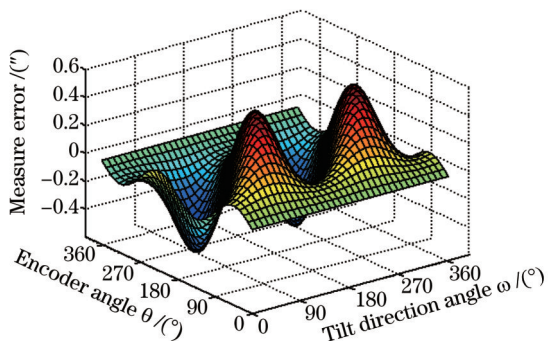


图3 倾斜方向对转角精度测量的影响

Fig.3 Influence of tilt direction for encoder accuracy measurement result

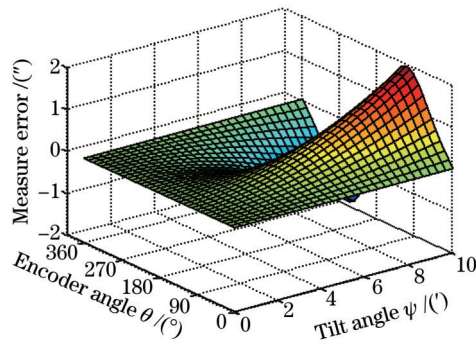


图4 倾斜角度对转角精度测量的影响

Fig.4 Influence of tilt angle for encoder accuracy measurement result

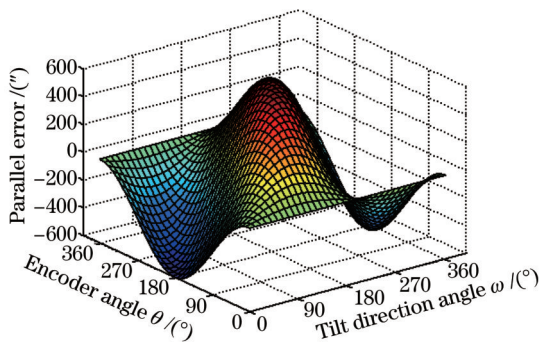


图5  $\varepsilon_y$  与转轴倾斜方向角的关系

Fig.5 Relationship between  $\varepsilon_y$  and encoder shaft tilt direction angle

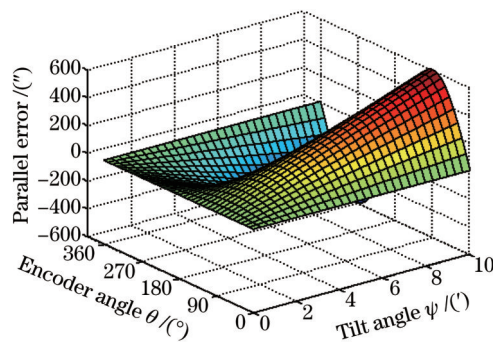


图6  $\varepsilon_y$  与转轴倾斜角度的关系

Fig.6 Relationship between  $\varepsilon_y$  and encoder shaft tilt angle

表1 各级编码器的转角精度及塔差控制要求

Table 1 Accuracy and pyramidal error requirements for encoders with different precision grades

Precision grade	Required accuracy / (\"	Required pyramidal error / (\"
1	$\pm 0.25$	140
2	$\pm 0.5$	178
3	$\pm 1$	250
4	$\pm 2$	354
5	$\pm 5$	559
6	$\pm 10$	791
7	$\pm 30$	1369

## 4 结 论

根据多面棱体——自准直仪法测量编码器转角精度的原理,建立了多面棱体坐标系和自准直仪测量坐标系,利用坐标变换的方法建立了编码器转轴倾斜对转角精度测试结果影响的精确模型。通过对精确模型

进行化简,得到了便于记忆和应用的简化模型。结果表明,编码器转轴倾斜引入的测量误差随编码器转轴倾斜角度的增大而增大,且近似为平方关系;引入的测量误差随编码器转轴倾斜方向改变,倾斜方向角为 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 时,测量误差最小;倾斜方向角为 $90^\circ$ 或 $270^\circ$ 时,测量误差最大。自准直仪垂直方向的读数最大所对应的编码器角度值等于编码器转轴的倾斜方向角;自准直仪垂直方向的读数变化量为编码器转轴的倾斜角度的2倍。这些仿真结论与本文理论模型具有很好的自洽性。当倾斜角度为 $5'$ 时,所引入的测量误差在 $0.11''\sim 0.48''$ 范围内,这对于I~III级编码器的测试和校准是不能忽略的。因此,应根据被测编码器的精度等级将塔差控制在相应的范围内。

## 参 考 文 献

- 1 Qi Lili, Wan Qiuhua. Angle-measurement technology of an optical pattern rotary encoder and its hardware implementation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412001.  
齐荔荔, 万秋华. 图像式光电编码器的测角技术及其硬件实现[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412001.
- 2 Yu Hai, Wan Qiuhua, Wang Shujie, *et al.*. Dynamic errors analysis of small absolute photoelectric encoder[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0808004.  
于海, 万秋华, 王树洁, 等. 小型绝对式光电轴角编码器动态误差分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0808004.
- 3 Feng Yingqiao, Wan Qiuhua, Song Chao, *et al.*. Interpolation of small photoelectric encoder based on coordinate rotation digital computer algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0205001.  
冯英翘, 万秋华, 宋超, 等. 基于坐标旋转数字计算算法的小型光电编码器细分[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0205001.
- 4 W Michael, K Victor, S German. Adaptive periodic error correction for heidenhain tape encoder[C]. SPIE, 2008, 7012: 70123N.
- 5 V K Dhar, A K Tickoo, S K Kaul, *et al.*. Artificial neural network based error compensation procedure for low cost encoders[J]. Meas Sci & Technol, 2010, 21(1): 015112.
- 6 Feng Yingqiao, Wan Qiuhua, Sun Ying, *et al.*. Interpolation error correction of moire fringe photoelectric signals in the approximate form of triangle wave[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0812001.  
冯英翘, 万秋华, 孙莹, 等. 近似三角波莫尔条纹光电信号的细分误差修正[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0812001.
- 7 Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 379-386.  
王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 379-386.
- 8 Jesus Lopez, Mariano Artes. A new methodology for vibration error compensation of optical encoders[J]. Sensors, 2012, 12(4): 4918-4933.
- 9 S K Kaul, A K Tickoo, R Koul, *et al.*. Improving the accuracy of low cost resolver based encoder using harmonic analysis[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2008, 586(2): 345-355.
- 10 T Watanabe, H Fujimoto. Automatic high precision calibration system for angle encoder[C]. SPIE, 2001, 4401: 267-274.
- 11 Y V Filator, M Y Agapov, M N Bournachev. Laser goniometer systems for dynamic calibration of optical encoders[C]. SPIE, 2003, 5144: 381-390.
- 12 Sun Shuhong, Liang Lihui, Wan Qiuhua. Automatic detection system for photoelectrical encoder based on DSP [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(9): 2536-2539.  
孙树红, 梁立辉, 万秋华. 基于DSP的光电编码器自动检测系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2536-2539.
- 13 Sun Shuhong, Zhao Changhai, Wan Qiuhua, *et al.*. Automatic detection system for miniature photoelectrical encoder [J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 600-606.  
孙树红, 赵长海, 万秋华, 等. 小型光电编码器自动检测系统[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 600-606.
- 14 Zhang Guilin, Jiang Tao, Li Min. Error analysis on measurement of photoelectrical encoder corner precision[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0808001.  
张桂林, 姜涛, 李敏. 一种光电编码器转角精度检测方法的误差分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0808001.
- 15 Zhao Jianke, Zhang Zhoufeng. Error analysis for measurement of encoder with shaft eccentricity[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(S): 249-252.  
赵建科, 张周峰. 轴角编码器测量中偏心带来的误差分析[J]. 光子学报, 2007, 36(S): 249-252.

栏目编辑: 何卓铭