

文章编号 1004-924X(2017)09-2267-10

测试设备位姿失调对自准直仪法 测量圆分度误差的影响

田留德^{1,2*}, 赵建科¹, 王 涛¹, 赵怀学¹, 段亚轩^{1,2}, 刘朝晖¹

(1. 中国科学院 安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高圆分度仪器分度误差的测量精度, 介绍了用多面棱体自准直仪测量分度误差的原理和方法, 对影响测量结果的误差源进行了分析。根据测量原理建立了多面棱体和自准直仪坐标系, 利用坐标变换分别建立了多面棱体工作面与受检仪器轴线的平行差、自准直仪光轴与多面棱体工作面不垂直度误差、自准直仪电十字竖线与受检仪器轴线的平行差对分度误差影响的精确模型。在实验室内, 以单轴位置转台的定位精度为测试对象, 设计了以上三种位姿失调误差模型的验证实验, 实验结果与理论模型仿真结果具有很好的一致性, 三种位姿失调引入的误差实测值与理论值的最大偏差小于 $0.9''$, 验证了位姿失调量引入测量误差模型的正确性, 该模型及仿真结果可以准确指导圆分度误差测试。

关键词: 角度测量; 误差分析; 坐标变换; 分度误差; 多面棱体; 自准直仪

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2267

Influence of test equipment pose error on dividing error measurement based on autocollimator

TIAN Liu-de^{1,2*}, ZHAO Jian-ke¹, WANG Tao¹, ZHAO Huai-xue¹, DUAN Ya-xuan^{1,2}, LIU Zhao-hui¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: tianliude@126.com

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of dividing error of encoders, the principle and method to measure dividing error by using angular polygon and autocollimator were introduced, and the error sources were analyzed. According to the measurement principle, coordinate systems of angular polygon and autocollimator were established. Utilizing the method of coordinate transformation, precise mathematical models were deduced for indicating the relationships between dividing error and misalignment errors, such as parallelism error between the angular polygon working surface and the axis of the tested unit, perpendicularity error between autocollimator optical axis and the working surface of angular polygon, parallelism error between vertical wire of the

收稿日期: 2017-03-28; 修订日期: 2017-05-16.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA708703A); 中国科学院创新基金资助项目 (No. Y154451ZZ0)

autocollimator and the axis of the tested unit. In order to verify the error models of misadjustment, three experiments were performed in the laboratory, taking the positioning error of a single-axis position turntable as test object. The experimental and theoretical results have good consistency and the maximum deviation was less than $0.9''$, which indicate that the error models of misadjustment are applicable to guide dividing error measurement.

Key words: angular surveying; error analysis; coordinate transformation; dividing error; angular polygon; autocollimator

1 引言

正多面棱体是一种高准确度的角度计量标准器具,各相邻工作面法线间的夹角为等值测量角,并具有准确角度量值^[1]。多面棱体与自准直仪配合,广泛应用于测量、校准与检定转台、光电轴角编码器、圆感应同步器、多齿分度台等圆分度仪器的分度误差^[2-3]。目前,分度误差的研究主要集中在分度误差的产生机理、误差分量分离方法及补偿模型等方面^[4-14],而对分度误差测量方法的研究较少。分度误差的测量方法主要有转台法、分度台法、测角仪法、多面棱体—自准直仪法,文献[15-17]研究了光电编码器分度误差的自动检测系统,并验证了系统的测试精度。文献[18]用多齿分度台检定转台的分度误差,并分析了测量不确定度,但没有给出误差源的具体影响模型。文献[19]给出了利用多面棱体自准直仪对金属圆光栅测角误差进行标定及补偿的方法,并分析了标定结果的不确定度,但未系统分析测试装置位姿失调对测试结果的影响。文献[20]分析了多面棱体和编码器的偏心对编码器转角精度检测结果的影响。文献[21]研究了塔差对编码器转角精度测试结果的影响。

为了提高分度误差的测量精度和测试效率,本文基于多面棱体自准直仪测量圆分度误差的原理,分析了影响测试结果的误差源,建立了受检仪器坐标系、多面棱体坐标系、自准直仪坐标系,利用坐标变换法建立了多面棱体工作面与受检仪器轴线平行差、自准直仪光轴与多面棱体工作面不垂直度误差、自准直仪电十字竖线与受检仪器轴线平行差对测试结果影响的精确模型。以单轴位置转台定位精度为测试对象,在恒温实验室对上述 3 项测试设备位姿失调引入的测量误差数学模型进行了实验验证,并与理论仿真模型进行比较,

验证了误差模型的正确性。

2 测量原理

多面棱体自准直仪测量分度误差的布局如图 1 所示。多面棱体与受检仪器同轴,自准直仪光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,自准直仪电十字竖线与受检仪器轴线平行。记录受检仪器示值 a_1 及自准直仪初始读数 c_1 ,旋转受检仪器依次完成所有受检点。

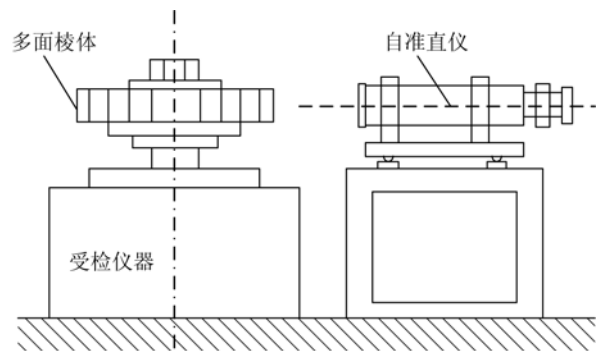


图 1 多面棱体自准直仪测量分度误差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dividing error measurement using angular polygon and autocollimator

依据式(1)计算受检仪器在各受检点的分度误差:

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

式中: a_i 为受检仪器第 i 测量点示值, $i=1, 2, \dots, n$, n 为棱体的面数, b_i 为棱体第 i 面与第 1 面的夹角, 那么 $b_1=0$, c_i 为自准直仪第 i 测量点示值, e_i 为受检仪器第 i 测量点的分度误差。

3 分度误差测试精度的影响因素分析

影响分度误差测量精度的因素主要有多面棱体工作面角偏差或多面棱体工作面角偏差的检定误

差、自准直仪的测量误差、设备及环境变动性、测试设备位姿失调等。多面棱体工作角偏差与其精度等级有关,二等棱体的极限角度偏差为 $\pm 2''$;多面棱体工作角偏差的检定误差与检定结果不确定度有关,一般小于 $0.5''$,可见这两项误差对测试结果均有较大影响,是主要误差源。测试设备位姿失调包括:多面棱体工作面与受检仪器轴线的平行差、自准直仪光轴与多面棱体工作面的不垂直度误差、自准直仪电十字竖线与受检仪器轴线的平行差、多面棱体与受检仪器轴线的偏心误差。由测量原理可知,多面棱体与受检仪器轴线的偏心误差不会引入测量误差,因此本文仅分析前 3 种测试设备位姿失调的影响。

3.1 多面棱体工作面与受检仪器轴线的平行差对测试的影响

为了建立多面棱体工作面与受检仪器轴线的平行差对分度误差测试结果影响的数学模型,建立如图 2 所示的坐标系。多面棱体坐标系 O-XYZ 中,OZ 轴沿多面棱体轴线,OXY 平面平行于多面棱体主截面,则多面棱体各工作面的法线均在该平面内,OX 轴沿多面棱体第 1 被测量面法线方向。OZ' 轴为受检仪器的旋转轴线,与 OZ 轴的夹角为 ψ (平行差),在 OXY 平面内的投影与 OX 轴的夹角为 ω (倾斜方向角)。自准直仪坐标系 σ -xyz 中,oz 轴沿自准直仪光轴,oxy 平面平行于自准直仪的探测器平面,且 ox 轴沿探测器的水平方向,oy 轴沿探测器的垂直方向。不考虑其他位姿失调误差,坐标系 σ -xyz 的 ox 轴、oy 轴、oz 轴分别与坐标系 O-XYZ 的 OY 轴、OZ 轴、OX 轴方向相同。

在坐标系 O-XYZ 中,多面棱体第 i 个工作面法线方向的单位矢量为: $\mathbf{P}_i = [\cos \theta_i \quad \sin \theta_i \quad 0]^T$, 其中, $\theta_i = (i-1) \times \frac{360^\circ}{n}, i=1, 2, 3, \dots, n$ 。OZ' 方向的单

位矢量为: $\mathbf{P}_{Z'} = [\sin \psi \cos \omega \quad \sin \psi \sin \omega \quad \cos \psi]^T$ 。分度误差测试时,受检仪器每次转动棱体标准角,多面棱体第 i 个工作面绕 OZ' 轴旋转 $(i-1)$ 次成为当前测量面。为了简化测量误差的建模过程,假设受检仪器的分度误差为零,此时自准直仪水平方向的读数 c_i 与 c_1 之差即为多面棱体工作面与受检仪器轴线平行差引起的测量误差。

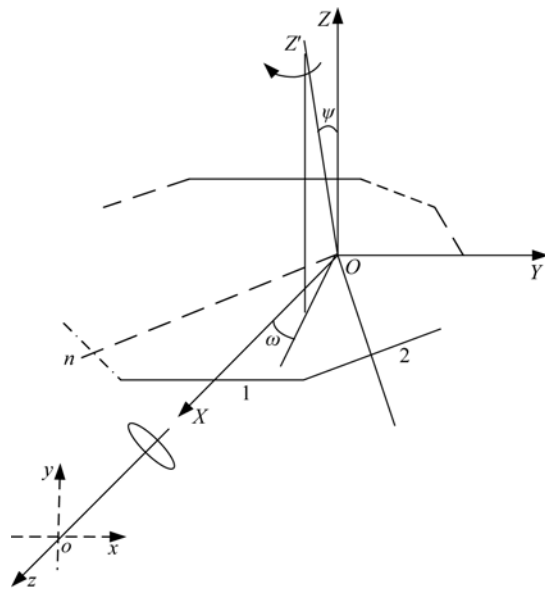


图 2 多面棱体工作面与受检仪器轴线的平行差示意图
Fig. 2 Schematic diagram of parallel error between working surface of angular polygon and axis of tested unit

然后推导该误差的精确数学模型,将矢量 \mathbf{P}_i 绕矢量 $\mathbf{P}_{Z'}$ 旋转 $-\theta_i = -(i-1) \times \frac{360^\circ}{n}$ 后得到的矢量记为 $\mathbf{P} = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T$ 。坐标变换公式为:

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

式中: $[x \quad y \quad z]^T$ 为旋转前矢量, $[\Lambda_x \quad \Lambda_y \quad \Lambda_z]^T$ 为转轴方向的单位矢量, φ 为旋转角度, $[x' \quad y' \quad z']^T$

为旋转后的矢量。将 $\mathbf{P}_i, \mathbf{P}_{Z'}, -\theta_i$ 带入式(2)可得 $\mathbf{P}'_i = [x'_i \quad y'_i \quad z'_i]^T$, 其中:

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

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

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

由坐标系 $O-XYZ$ 与坐标系 $o-xyz$ 的关系可得, 矢量 \mathbf{P}'_i 在坐标系 $o-xyz$ 下记为: $\mathbf{P}'_i = [y'_i \quad z'_i \quad x'_i]^T$ 。由自准直仪的工作原理得, 被测面法线方向矢量为 \mathbf{P} 时自准直仪示值为:

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

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

式中: ζ_x 为自准直仪水平方向的示值, 反映测量误差; ζ_y 为自准直仪垂直方向的示值, 反映多面棱体工作面与受检仪器轴线的平行差。式(6)~式(7)是精确模型, 但该模型复杂不便应用, 这里给出其近似模型。因为圆分度误差一般在几角秒到几十角秒量级, 则 ζ_x 是一个 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 量级的数, 调整误差一般在几角分量级, 则 ψ 是一个 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级的数, 那么式(6)~(7)可简化为:

$$\zeta_x \approx \psi^2 \left[\sin \omega (1 - \cos \theta_i) \cos(\omega - \theta_i) + \frac{1}{2} \sin \theta_i \cos \theta_i \right], \quad (8)$$

$$\zeta_y \approx \psi [\cos \omega - \cos(\omega + \theta_i)]. \quad (9)$$

受篇幅限制, 这里略去简化过程。

图 3 给出了受检仪器轴线倾斜方向角为 0° 时, 不同倾斜角度对自准直仪示值 X 的影响。由图 3 可知, 轴线倾斜引入的测量误差随倾斜角度的增大而增大, 与倾斜角之间并非线性关系, 近似为平方关系。当倾斜角为 0.5° 时, 所引入的测量误差为 $3.93''$, 这对于高精度的测试和校准是不允许的。当倾斜角为 $1'$ 时, 所引入的测量误差仅为 $0.004''$, 可以满足一般精度受检仪器的测试需求。

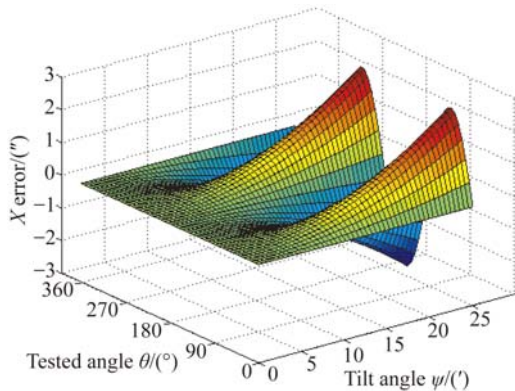


图 3 倾斜角度对自准直仪示值 X 的影响

Fig. 3 Influence of tilt angle on X values of autocollimator

3.2 自准直仪光轴与棱体工作面的不垂直度对测试的影响

建立的坐标系如图 4 所示, 多面棱体坐标系 $O-XYZ$ 和自准直仪坐标系 $o-xyz$ 的定义同 3.1 节。 α, β 分别为自准直仪光轴与多面棱体工作面的不垂直度误差在自准直仪 Y 向和 X 向的投影。则坐标系 $o-xyz$ 可以由坐标系 $O-XYZ$ 通过旋转得到, 坐标系 $O-XYZ$ 依次绕 OX 轴旋转 90° , 绕 OY 轴旋转 90° , 再绕 OX 轴旋转 α , 绕 OY 轴旋转 β , 得到坐标系 $o-xyz$ 。分度误差测试时, 取多面棱体某工作面法线与 OX 轴的夹角为 ϵ , 则该方向的单位矢量在坐标系 $O-XYZ$ 下为 $\mathbf{P} = [\cos \epsilon \quad \sin \epsilon \quad 0]^T$, 矢量 \mathbf{P} 在坐标系 $o-xyz$ 下的坐标记为 $\mathbf{p} = [x_1 \quad y_1 \quad z_1]^T$, 则有:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \epsilon \cos \beta - \cos \epsilon \cos \alpha \sin \beta \\ \cos \epsilon \sin \alpha \\ \sin \epsilon \sin \beta + \cos \epsilon \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (10)$$

则自准直仪示值为:

$$\zeta_x = \arctan \left[\frac{\sin \epsilon \cos \beta - \cos \epsilon \cos \alpha \sin \beta}{\sin \epsilon \sin \beta + \cos \epsilon \cos \alpha \cos \beta} \right], \quad (11)$$

$$\zeta_y = \arctan \left[\frac{\cos \epsilon \sin \alpha}{\sin \epsilon \sin \beta + \cos \epsilon \cos \alpha \cos \beta} \right], \quad (12)$$

其中: ζ_x 为自准直仪水平方向的示值, 反映测量误差; ζ_y 为自准直仪垂直方向上的读数。

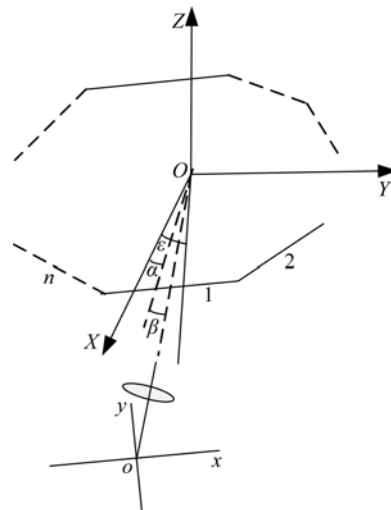


图 4 自准直仪光轴与多面棱体工作面不垂直度误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of perpendicularity error between optical axis of autocollimator and working surface of angular polygon

由于 ϵ, α, β 的值均在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级, 则式(11)和式(12)可简化为(受篇幅限制, 略去简化过程):

$$\zeta_x \approx \frac{\epsilon}{\cos \alpha} - \beta, \quad (13)$$

$$\zeta_y \approx \frac{\alpha}{\cos \beta}, \quad (14)$$

式中: α, β 分别为自准直仪光轴与多面棱体法线在垂直方向和水平方向的不垂直度分量, ϵ 为被测仪器的分度误差真实值, ζ_x 为自准直仪的 X 向测量值, ζ_y 为引入的自准直仪 Y 向示值。因为多面棱体第一工作面对应被测仪器的零位, 为测试基准点, 该点的分度误差为零, 此时自准直仪的 X 向测量值为 $-\beta$, 则自准直仪光轴与多面棱体工作面的不垂直度引入的测量误差为 $\zeta_x + \beta - \epsilon$, 记为 γ_x , 则有:

$$\gamma_x = \frac{\epsilon}{\cos \alpha} - \epsilon. \quad (15)$$

图 5 给出了自准直仪光轴与多面棱体工作面水平方向的不垂直度取 $600''$ 时, 垂直方向不垂直度对自准直仪示值 X 的影响。由图 5 可知, 垂直方向的不垂直度 (ω) 引入的 X 向误差与 α 近似成平方关系, 误差为 $0.001''$ 量级, 可以忽略不计。图 6 给出了自准直仪光轴与多面棱体工作面垂直方向的不垂直度取 $600''$ 时, 水平方向不垂直度对自准直仪示值 X 的影响。由图 6 可知, X 向误差随 β 变化, 误差为 $0.001''$ 量级, 同样可以忽略不计。

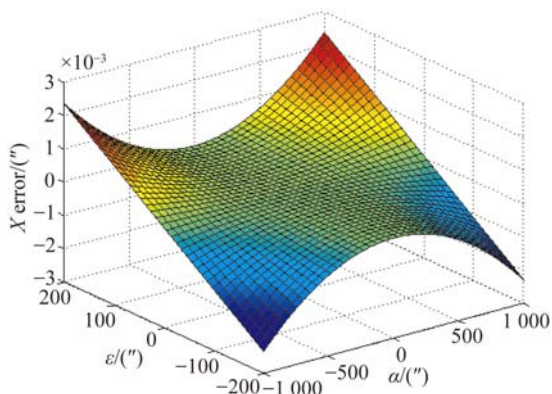


图 5 垂直方向不垂直度分量 α 对自准直仪示值 X 的影响

Fig. 5 Influence of nonperpendicularity component along perpendicular direction (ω) on values of autocollimator (X)

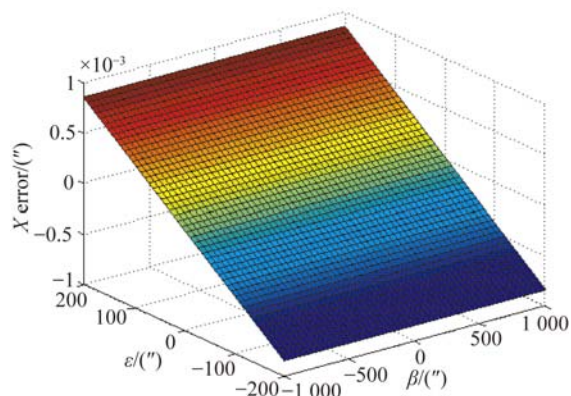


图 6 水平方向不垂直度分量 β 对自准直仪示值 X 的影响

Fig. 6 Influence of nonperpendicularity component along horizontal direction (β) on values of autocollimator (X)

3.3 自准直仪电十字竖线与受检仪器轴线的平行差对测试的影响

不考虑多面棱体与受检仪器轴线的平行差, 建立了如图 7 所示坐标系。多面棱体(或受检仪器)坐标系 O-XYZ 和自准直仪坐标系 σ -xyz 的定义同 3.1 节。坐标系 σ -x'y'z' 是电十字竖线无倾斜时的自准直仪坐标系, 坐标系 σ -xyz 可由 σ -x'y'z' 绕 oz' 轴旋转 η 得到, η 是自准直仪电十字竖线, 与受检仪器轴线平行差。Or 为多面棱体工作面法线方向的单位矢量, 与 OZ 的夹角记为 δ 。Or 方向的平行光在自准直仪焦平面上的成像点记为 s。自准直仪示值由点 s 在坐标系 σ -xyz 下的坐标决定, 记为 (x, y), 自准直仪电十字竖线无倾斜时, 点 s 在坐标系 σ -x'y'z' 下的坐标记为 (x', y'), $x-x'$ 即为自准直仪电十字竖线倾斜引入的测量误差。

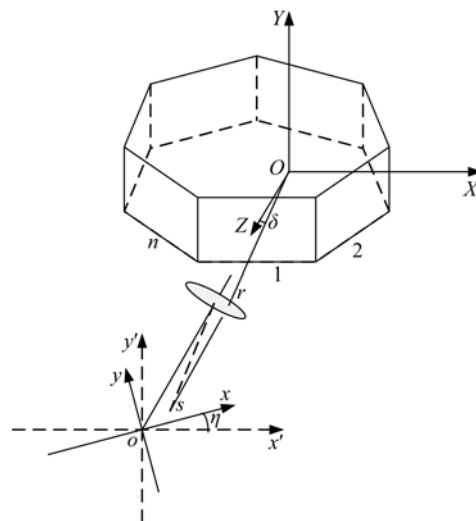


图 7 自准直仪电十字竖线与受检仪器轴线的平行差示意图
Fig. 7 Schematic diagram of parallel error between vertical wire of autocollimator and axis of tested unit

由坐标系 $o-xyz$ 与坐标系 $O-XYZ$ 的关系可得, 矢量 or 在坐标系 $o-xyz$ 下记为 $[\cos \eta \sin \delta \quad -\sin \eta \sin \delta \quad \cos \delta]^T$, 多面棱体工作面法线方向的单位矢量为 or 时, 自准直仪示值为:

$$\zeta_x = \arctan \left(\frac{\cos \eta \cdot \sin \delta}{\cos \delta} \right), \quad (16)$$

$$\zeta_y = \arctan \left(\frac{-\sin \eta \cdot \sin \delta}{\cos \delta} \right). \quad (17)$$

矢量 or 在坐标系 $o-x'y'z'$ 下记为 $[\sin \delta \quad 0 \quad \cos \delta]^T$, 相应的自准直仪示值为:

$$\zeta_x = \delta, \quad (18)$$

$$\zeta_y = 0. \quad (19)$$

自准直仪电十字竖线倾斜引入的测量误差为:

$$\gamma_x = \arctan \left(\frac{\cos \eta \cdot \sin \delta}{\cos \delta} \right) - \delta, \quad (20)$$

$$\gamma_y = \arctan \left(\frac{-\sin \eta \cdot \sin \delta}{\cos \delta} \right). \quad (21)$$

因为 δ 是一个 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 量级的数, 式(20)和式(21)可简化为:

$$\gamma_x \approx \cos \eta \cdot \delta - \delta, \quad (22)$$

$$\gamma_y \approx -\sin \eta \cdot \delta. \quad (23)$$

图 8 给出了多面棱体工作面与自准直仪竖丝的平行差对自准直仪示值 X 的影响。从图 8 可知, 当自准直的竖丝调整误差为 10° , 受检圆分度仪器的分度误差为 $10''$, 自准直仪竖丝调整误差引入的最大测量误差为 $0.0027''$, 该误差可以忽略不计。

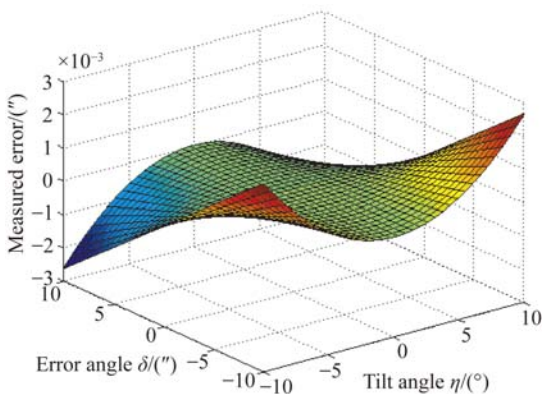


图 8 倾斜角 η 对分度误差的影响

Fig. 8 Influence of tilt angle η on dividing error

4 实验与结果分析

为了验证各失调量引入测量误差模型的正确

性, 在实验室内以型号为 920E 的单轴位置转台定位精度为测试对象, 设计了相应的验证实验, 测试布局如图 9 所示。受检转台的定位精度为 $\pm 2''$, 定位重复性为 $1''$ 。实验所用仪器为三等 23 面棱体, 德国 MOLLER 的 ELCOMAT3000 双轴电子自准直仪, 符合 I 级要求。实验针对各单项位姿失调误差专门设计, 验证某一失调误差的影响时, 严格控制其他的失调误差项。



图 9 单轴转台定位精度测试验证实验

Fig. 9 Verification experiment equipment for single-axis turntable positioning accuracy test

4.1 多面棱体工作面与受检仪器轴线平行差对测试的影响

实验测试了受检仪器轴线倾斜方向角为 0° , 倾斜量分别为 $0'', 200'', 600'', 1\ 000''$ 时, 受检仪器的定位误差, 并将精确模型的理论仿真结果与实测结果进行比较, 自准直仪的 X 向、 Y 向示值分别如图 10 和图 11 所示。由图 10 可以看出, X 向示值仿真结果的变化趋势与实验结果一致, 最大偏差小于 $0.5''$ 。由图 11 可以看出, Y 向示值的仿真结果与实验结果的最大偏差小于 $30''$ 。

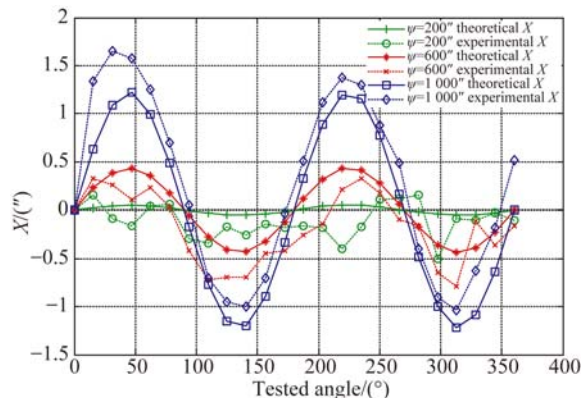


图 10 ϕ 分别取 $200'', 600'', 1\ 000''$ 时 X 的理论值与实测值

Fig. 10 Experimental and theoretical values of X with ϕ of $200'', 600''$ and $1\ 000''$ respectively

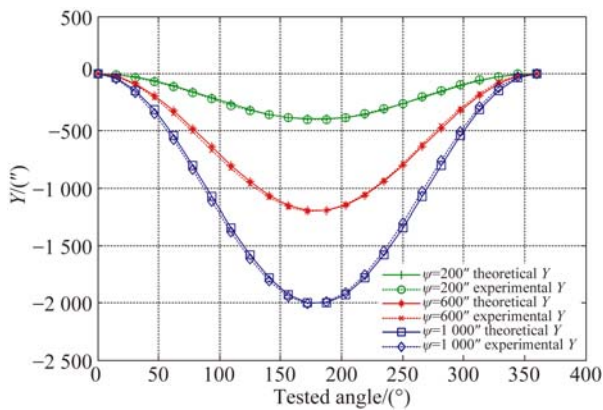


图 11 ϕ 分别取 $200''$, $600''$, $1\ 000''$ 时 Y 的理论值与实测值
 Fig. 11 Experimental and theoretical values of Y with ϕ of $200''$, $600''$ and $1\ 000''$ respectively

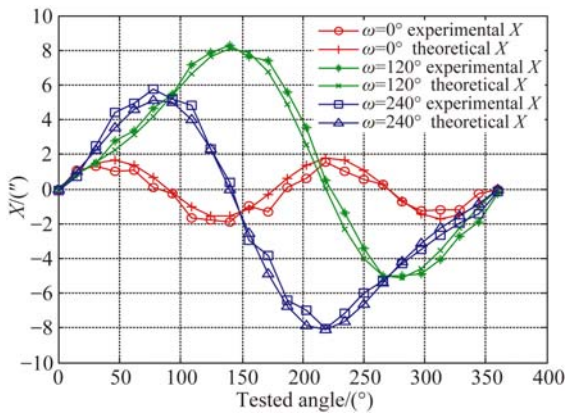


图 12 ω 分别取 0° , 120° , 240° 时 X 的理论值与实测值
 Fig. 12 Experimental and theoretical values of X with ω of 0° , 120° and 240° respectively

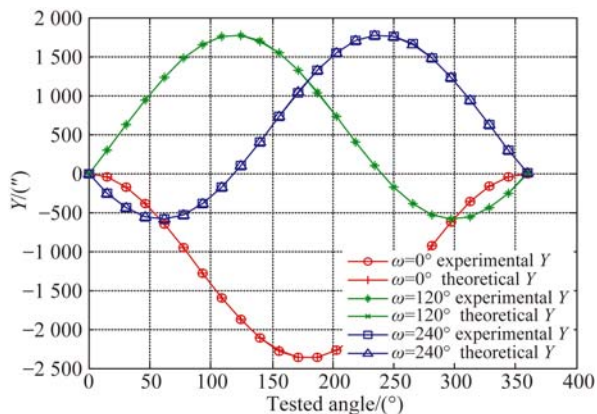


图 13 ω 分别取 0° , 120° , 240° 时 Y 的理论值与实测值
 Fig. 13 Experimental and theoretical values of Y with ω of 0° , 120° and 240° respectively

在受检仪器轴线倾斜量为 $1\ 184''$, 倾斜方向角分别为 0° , 120° , 240° 时测试了受检仪器的定位误

差,并将理论仿真结果与实测结果进行比较,自准直仪的 X 向、Y 向示值分别如图 12 和图 13 所示。由图 12 可以看出, X 向示值仿真结果的变化趋势与实验结果一致,最大偏差小于 $0.9''$ 。由图 13 可以看出, Y 向示值的仿真结果与试验结果的最大偏差小于 $4''$ 。

4.2 自准直仪光轴与棱体工作面不垂直度对测试的影响

在自准直仪光轴与多面棱体工作面不垂直度误差为 $(600'', -600'')$ 的情况下测试了受检仪器的定位误差,并比较精确模型的理论仿真结果与实测结果,自准直仪的 X 向、Y 向示值如图 14 所示, X 向、Y 向的理论值与实测值偏差如图 15 所示。

图 14 可以看出,理论值与实测值的变化趋势

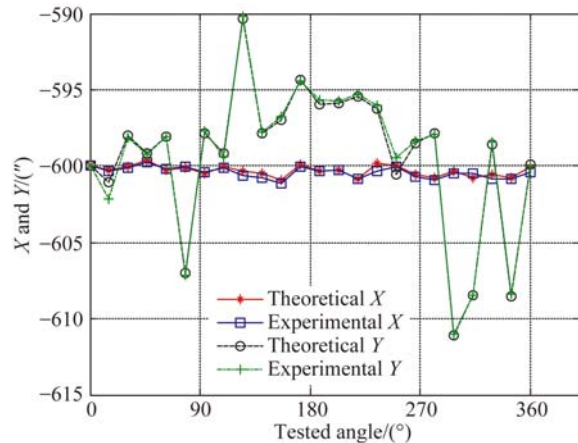


图 14 X、Y 的理论值与实测值

Fig. 14 Experimental and theoretical values of X and Y

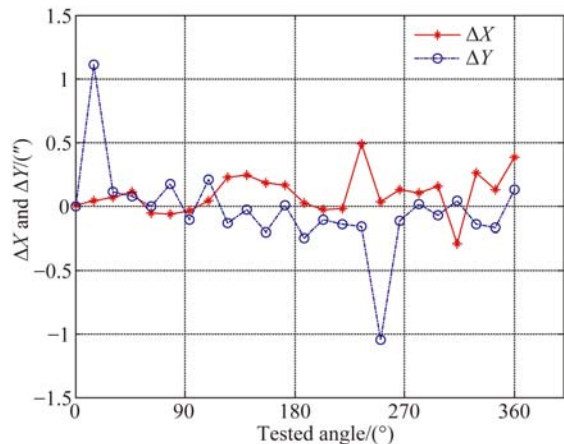


图 15 X、Y 的理论值与实测值偏差

Fig. 15 Differences of X and Y between experimental and theoretical values

一致。自准直仪 X 向、Y 向示值的理论值与实测值之差分别记为 ΔX 、 ΔY ，由图 15 可知， ΔX 最大为 $0.49''$ ， ΔY 最大为 $1.11''$ 。

4.3 自准直仪电十字竖线与受检仪器轴线的平行差对测试的影响

在自准直仪电十字竖线倾斜角分别为 0° 、 10° 、

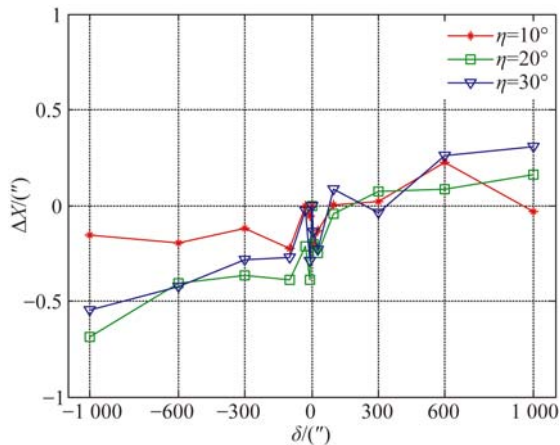


图 16 X 的理论值与实测值偏差

Fig. 16 Difference of X between experimental and theoretical values

20° 、 30° 时测试了受检仪器的定位误差，并将精确模型的理论仿真结果与实测结果进行比较，自准直仪 X 向、Y 向的理论值与实测值偏差分别如图 16 和图 17 所示。由图 16 可知，X 向示值的理论值与实测值的最大偏差为 $0.69''$ 。由图 17 可知，Y 向示值的理论值与实测值的最大偏差为 $0.75''$ 。

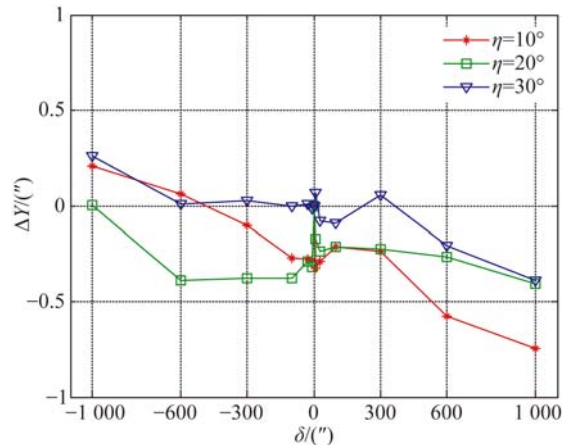


图 17 Y 的理论值与实测值偏差

Fig. 17 Difference of Y between experimental and theoretical values

5 结 论

本文利用坐标变换方法分别建立了多面棱体工作面与受检仪器轴线平行差、自准直仪光轴与棱体工作面不垂直度、自准直仪电十字竖线与受检仪器轴线平行差对分度误差影响的精确模型，并通过化简模型得到了便于应用的近似模型。以单轴位置转台定位精度为测试对象，设计了针对各单项失调误差的验证实验。实验结果显示，理论仿真值与实测值的变化趋势一致，且偏差较小，

参考文献：

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJG 283-2007 正多面棱体检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJG 283-2007 verification regulation of angular polygon [S]. Beijing: China Metrology Press, 2008. (in Chinese)

验证了建立的测试设备位姿失调误差引入测量误差数学模型的正确性。由仿真及实验结果可知，对于一般精度的受检仪器圆分度误差测试，多面棱体工作面与受检仪器轴线的平行差控制在 $1'$ 以内，自准直仪光轴与多面棱体工作面的不垂直度误差控制在 $10'$ 以内、自准直仪电十字竖线与受检仪器轴线的平行差控制在 10° 以内即可。本文建立的误差模型及分析结果为圆分度仪器的精度鉴定、误差补偿、设计改进提供了可靠数据，对促进圆分度仪器的发展具有重要意义。

- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 202-2007 自准直仪检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJG 202-2007 verification regulation of autocollimators [S]. Beijing: China Metrology Press, 2007. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJF 1115-2004 光电轴角编码器校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJF 1115-2004 calibration specification for photoelectric shaft encoders [S]. Beijing:China Metrology Press, 2005. (in Chinese)
- [4] WARNER M, KRABBENDAM V, SCHUMACHER G. Adaptive periodic error correction for Heidenhain tape encoders [J]. SPIE, 2008, 7012:70123N.
- [5] DHAR V K, TICKOO A K, KAUL S K, *et al.*. Artificial neural network-based error compensation procedure for low-cost encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(1):015112.
- [6] 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.
- FENG Y Q, WAN Q H, SONG CH, *et al.*. Interpolation of small photoelectric encoder based on coordinate rotation digital computer algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2):0205001. (in Chinese)
- [7] 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.
- QI L L, WAN Q H. Angle-measurement technology of an optical pattern rotary encoder and its hardware implementation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4):0412001. (in Chinese)
- [8] LOPEZ J, ARTES M. A new methodology for vibration error compensation of optical encoders [J]. *Sensors*, 2012, 12(4):4918-4933.
- [9] 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.
- YU H, WAN Q H, WANG SH J, *et al.*. Dynamic errors analysis of small absolute photoelectric encoder [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8):0808004. (in Chinese)
- [10] 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.
- FENG Y Q, WAN Q H, SUN Y, *et al.*. Interpolation error correction of moiré fringe photoelectric signals in the approximate form of triangle wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8):0812001. (in Chinese)
- [11] 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.
- WANG X J. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):379-386. (in Chinese)
- [12] KAUL S K, TICKOO A K, KOUL R, *et al.*. Improving the accuracy of low-cost resolver-based encoders using harmonic analysis [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2008, 586(2):345-355.
- [13] WATANABE T, FUJIMOTO H, NAKAYAMA K, *et al.*. Automatic high-precision calibration system for angle encoder [J]. SPIE, 2001, 4401:267-274.
- [14] FILATOV Y V, AGAPOV M Y, BOURNACHEV M N. Laser goniometer systems for dynamic calibration of optical encoders [J]. SPIE, 2003, 5144:381-390.
- [15] 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.
- SUN SH H, LIANG L H, WAN Q H. Automatic detection system for photoelectrical encoder based on DSP [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9):2536-2539. (in Chinese)
- [16] 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.
- SUN SH H, ZHAO CH H, WAN Q H, *et al.*. Automatic detection system for miniature photoelectrical encoder [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4):600-606. (in Chinese)
- [17] 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.
- ZHANG G L, JIANG T, LI M. Error analysis on measurement of photoelectrical encoder corner precision [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8):0808001. (in Chinese)
- [18] 郭敬滨, 曹红艳, 王克新, 等. 转台分度误差的检定及补偿模型的建立[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2014, 47(6):524-529.
- GUO J B, CAO H Y, WANG K X, *et al.*. Check of indexing error for turntable and establishment of its compensation model [J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2014, 47(6):524-529. (in Chinese)
- [19] 卢荣胜, 李万红, 劳达宝, 等. 激光跟踪仪测角误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9):2299-2305.
- LU R SH, LI W H, LAO D B, *et al.*. Angular error compensation for laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2299-2305. (in Chinese)

- [20] 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(S1):249-252.
ZHAO J K, ZHANG ZH F. Error analysis for measurement of encoder with shaft eccentricity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(S1):249-252. (in Chinese)
- [21] 田留德, 刘朝晖, 赵建科, 等. 利用坐标变换分析

塔差对编码器测角精度测试的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5):0512003.

TIAN L D, LIU CH H, ZHAO J K, *et al.*. Analysis the influence of pyramidal error on the encoder accuracy test by using coordinate transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5):0512003. (in Chinese)

作者简介:



田留德(1984—),男,河南周口人,博士研究生,工程师,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光电测量设备研制、精密检测的研究。E-mail: tianliude@126.com

导师简介:



刘朝晖(1965—),男,陕西西安人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获得学士学位,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方面的研究。E-mail: lzh@opt.ac.cn