

角度受限的编码器误差测试研究

王涛, 田留德, 赵建科, 周艳, 陈琛, 赵怀学, 刘镨, 潘亮, 万伟, 刘艺宁, 张婷

中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

摘要 为解决转角受限编码器角度误差的精确测试问题,采用平面反射镜-自准直经纬仪法测试编码器角度误差。建立了角度误差和位姿失调参数、编码器角度以及经纬仪示值之间关系的数学模型,通过对失调参数的解算可对编码器角度系统误差进行修正。实验结果表明,在角度范围为 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 时,由位姿失调所引入的角度误差随编码器角度的增大单调递增,误差最大值为 $742.9''$;经过修正后的角度误差和编码器位姿无失调时的角度误差基本相当,误差最大值分别为 $4.4''$ 和 $3.5''$ 。此方法可有效测试无法精确调整或不具备调平条件的转角受限的编码器角度误差。

关键词 测量; 角度误差; 位姿失调; 数学模型

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0512001

Research on Encoder Error Test with Limited Angle

Wang Tao, Tian Liude, Zhao Jianke, Zhou Yan, Chen Chen, Zhao Huaixue,
Liu Kai, Pan Liang, Wan Wei, Liu Yining, Zhang Ting

Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract In order to solve the accurate test problem of encoder angle error with limited angle, the angle error of encoder is tested by plane mirror-autocollimation theodolite. The mathematical model of the relationship between the angle error, the pose dislocation parameters, the angle of encoder and the value of the theodolite is established, the system error of the encoder angle can be corrected by calculating the pose dislocation parameters. The experimental results show that the angle error introduced by the pose dislocation increases monotonically with the increase of encoder angle when the angle range is $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$, the maximum angle error is $742.9''$. The corrected angle error is basically the same as the angle error without encoder pose dislocation, the maximum angle errors are $4.4''$ and $3.5''$, respectively. Encoder angle error with limited angle that cannot be accurately adjusted or does not have a leveling condition can be effectively evaluated by this method.

Key words measurement; angle error; pose dislocation; mathematical model

OCIS codes 120.3940; 120.4640; 120.4800

1 引 言

转角范围受限的编码器是由于使用需求或物理空间受限而无法实现 360° 转动的器件,其被广泛应用于光电经纬仪、转台、光电侦查吊舱、光电稳定平台、光电观瞄仪、遥感仪器中的扫描机构等精密设备和系统中,能够根据控制指令驱动负载转动并反馈当前角度值。角度误差是转角受限编码器的一项关键参数,直接影响整个设备或系统的性能,需要精确测试和控制。目前,对角度误差的研究主要集中在角度误差的产生机理^[1-8]、自动测试设备^[9-15]、角度

误差分量分离方法及补偿模型^[16-19]等方面,而对转角受限的编码器角度误差测量方法的研究极少。适用于整周回转的编码器角度误差测试方法主要有:转台法^[14, 20-21]、多面棱体-自准直仪法^[22]、分度台法。转台法可以用于测试角度受限编码器的误差,但该方法难以控制编码器轴线和转台轴线的同轴度以及两轴线的平行度,当同轴度不好时,编码器转子会拖动固定在空间的定子而损伤编码器,此外还会给编码器的角度误差测试引入随机误差,当两轴线的夹角不平行时,会给角度误差测试引入系统误差。多面棱体-自准直仪法可以根据误差模型调节编码

收稿日期: 2017-11-01; 收到修改稿日期: 2017-11-29

基金项目: 中国科学院创新基金(Y154451ZZ0)、神光 III 大科学工程资助项目(091Z512BOA)

作者简介: 王涛(1987—),男,硕士,工程师,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: 442888896@qq.com

器轴线和棱体轴线的平行度以控制由于轴线不平行引入的测试误差,但该方法中棱体工作面数量有限,在非整周回转时,角度误差的采样点数量会更少,因此难以满足角度受限的编码器角度误差评价。分度台法存在和转台法同样的缺点,另外由于无法精确控制编码器轴线和分度台轴线的夹角、多齿分度台轴线和平面镜法线的垂直度以及编码器轴线和平面镜法线的垂直度,所以会给角度误差测试带来影响。

本文采用平面反射镜-自准直经纬仪法对转角受限的编码器角度误差进行测试,根据自准直经纬仪测角原理,利用坐标变换方式建立了角度误差与编码器轴线和平面反射镜法线位姿失调参数之间的测量模型,并利用最小二乘法^[23]对位姿失调参数进行辨识,对设备位姿失调引入的误差进行了分离,实现了转角受限编码器角度误差的精确测量,具有很大的工程应用价值。

2 测试原理、模型建立与仿真

2.1 测试原理

平面反射镜-自准直经纬仪法测试转角误差示意图如图 1 所示,将平面反射镜固定在编码器台面上,在平面反射镜前方架设自准直经纬仪,转台转过一定角度后转动自准直经纬仪方位和俯仰角使经纬仪出射的光束经平面反射镜反射后自准,记录此时经纬仪转动的方位角,转台转动的角度和经纬仪转动的方位角之差即为角度误差。

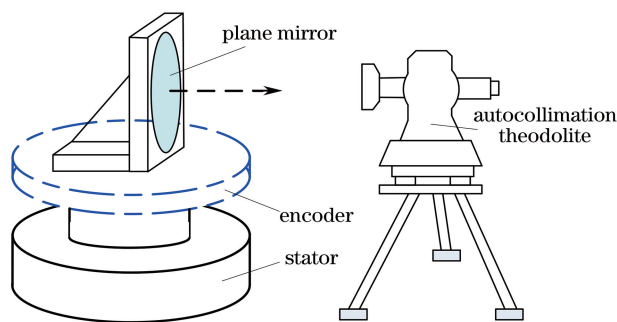


图 1 平面反射镜-自准直经纬仪测量角度误差示意图
Fig. 1 Schematic of using plane mirror-autocollimation theodolite to measure angle error

2.2 模型建立

平面反射镜法线和编码器轴线不垂直以及编码器轴线和水平面不垂直时都会给角度误差测试引入系统误差,为了精确测试转角受限编码器角度误差,根据自准直经纬仪测角原理,利用坐标变换方式建立角度误差与编码器轴线和平面反射镜法线位姿失调参数之间的测量模型。

控制编码器转至零位,在转台台面放置平面反射镜并固定,在平面反射镜的正前方架设自准直经纬仪,开启自准直经纬仪,使经平面反射镜反射回的自准直像处于经纬仪视场中心,以此为初始状态,建立坐标系。

设平面反射镜的坐标系为 $O-XYZ$,平面反射镜法线 ON 和 OY 轴重合, OY 轴正向与自准直经纬仪出射光束方向相反, OX 轴和 OZ 轴与 OY 轴构成右手坐标系,则 XOZ 平面与反射镜反射面平行, OY 轴和 OZ 轴在水平面内的投影共线。编码器的转轴为 OO' , OO' 轴和 OZ 轴的夹角为 α ,定义 α 为编码器转轴在平面反射镜坐标系下的倾斜量。 OO' 在 XOY 坐标平面的投影为 OM , OM 和 OY 轴的夹角为 δ ,俯视编码器, δ 以 OY 轴为始边,顺时针取值,定义 δ 为编码器转轴在平面反射镜坐标系下的倾斜方向,编码器转轴和平面反射镜坐标系之间的相对位置关系如图 2(a) 所示。

经纬仪的坐标系为 $o-xyz$, oz 轴垂直于水平面, ox 轴和 oy 轴与 oz 轴构成右手坐标系, oy 轴正向与 OY 轴正向在水平面内的投影共线且方向相同。将平面反射镜坐标系平移到经纬仪坐标系, oz 轴和 OZ 轴之间的夹角为 ω ,此夹角即为编码器角度为零、经平面反射镜反射回的像处于自准直仪视场中心时经纬仪的俯仰角, ω 正负号选取原则为:经纬仪低头时取正,经纬仪抬头时取负。定义 ω 为平面反射镜法线在经纬仪坐标系下的倾斜量。平面反射镜坐标系和经纬仪坐标系之间的相对位置关系如图 2(b) 所示。

编码器转轴 OO' 在坐标系 $O-XYZ$ 中的方向余弦为 $OO' = [A_x, A_y, A_z]^T = [\sin \alpha \sin \delta, \sin \alpha \cos \delta,$

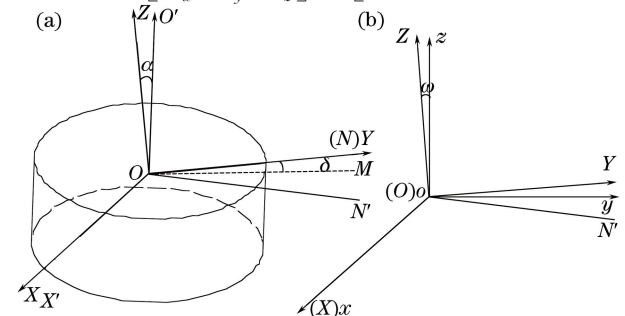


图 2 (a) 编码器和平面反射镜坐标系之间的相对位置关系;
(b) 平面反射镜坐标系和经纬仪坐标系之间的相对位置关系
Fig. 2 (a) Relative position relationship between encoder and plane mirror coordinate system; (b) relative position relationship between plane mirror coordinate system and theodolite coordinate system

$\cos \alpha]^T$, 平面反射镜法线的方向余弦为 $\mathbf{ON} = [0, 1, 0]^T$ 。进行角度测试时顺时针转动编码器 θ 角度, 平

面镜的法线跟随同步器一起转动, 转动后的法线为 \mathbf{ON}' , 法线 \mathbf{ON}' 的方向余弦按下式计算:

$$\mathbf{ON}' = \begin{bmatrix} C + A_x^2(1-C) & A_z S - A_x A_y(1-C) & A_y S + A_x A_z(1-C) \\ A_z S + A_x A_y(1-C) & C + A_y^2(1-C) & A_x S - A_y A_z(1-C) \\ A_y S - A_x A_z(1-C) & A_x S + A_y A_z(1-C) & C + A_z^2(1-C) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_z S - A_x A_y(1-C) \\ C + A_y^2(1-C) \\ A_x S + A_y A_z(1-C) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \sin \theta - \sin^2 \alpha \sin \delta \cos \delta(1 - \cos \theta) \\ \cos \theta + \sin^2 \alpha \cos^2 \delta(1 - \cos \theta) \\ \sin \alpha \sin \delta \sin \theta + \sin \alpha \cos \delta \cos \alpha(1 - \cos \theta) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $C = \cos \theta, S = \sin \theta$ 。

坐标系 $O-XYZ$ 到坐标系 $o-xyz$ 的变换矩阵为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}. \quad (2)$$

\mathbf{ON}' 在坐标系 $o-xyz$ 中的方向余弦为 $\mathbf{on}' = [x, y, z]^T$:

$$\mathbf{on}' = \mathbf{F} \times \mathbf{ON}' = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \alpha \sin \theta - \sin^2 \alpha \sin \delta \cos \delta(1 - \cos \theta) \\ \cos \theta + \sin^2 \alpha \cos^2 \delta(1 - \cos \theta) \\ \sin \alpha \sin \delta \sin \theta + \sin \alpha \cos \delta \cos \alpha(1 - \cos \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \sin \theta - \sin^2 \alpha \sin \delta \cos \delta(1 - \cos \theta) \\ \cos \omega [\cos \theta + \sin^2 \alpha \cos^2 \delta(1 - \cos \theta)] - \sin \omega [\sin \alpha \sin \delta \sin \theta + \sin \alpha \cos \delta \cos \alpha(1 - \cos \theta)] \\ \sin \omega [\cos \theta + \sin^2 \alpha \cos^2 \delta(1 - \cos \theta)] + \cos \omega [\sin \alpha \sin \delta \sin \theta + \sin \alpha \cos \delta \cos \alpha(1 - \cos \theta)] \end{bmatrix}. \quad (3)$$

转动编码器后, 需再次转动经纬仪才能使经平面反射镜反射回的自准直像处于视场中心, 设经纬仪方位和俯仰需要转动的角度分别为 A 和 E , 其中 A 为:

$$A = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) = \arctan\left\{\frac{\cos \alpha \sin \theta - \sin^2 \alpha \sin \delta \cos \delta(1 - \cos \theta)}{\cos \omega [\cos \theta + \sin^2 \alpha \cos^2 \delta(1 - \cos \theta)] - \sin \omega [\sin \alpha \sin \delta \sin \theta + \sin \alpha \cos \delta \cos \alpha(1 - \cos \theta)]}\right\}. \quad (4)$$

因为 \mathbf{on}' 为单位向量, 所以其模值为 1, 则 E 按下式计算:

$$E = \arctan\left[\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right] = \arctan\left\{\frac{\sin \omega [\cos \theta + \sin^2 \alpha \cos^2 \delta(1 - \cos \theta)] + \cos \omega [\sin \alpha \sin \delta \sin \theta + \sin \alpha \cos \delta \cos \alpha(1 - \cos \theta)]}{\sqrt{[\cos \alpha \sin \theta - \sin^2 \alpha \sin \delta \cos \delta(1 - \cos \theta)]^2 + \{\cos \omega [\cos \theta + \sin^2 \alpha \cos^2 \delta(1 - \cos \theta)] - \sin \omega [\sin \alpha \sin \delta \sin \theta + \sin \alpha \cos \delta \cos \alpha(1 - \cos \theta)]\}^2}}\right\}. \quad (5)$$

假设编码器转动的角度为 θ , 则由编码器转轴和大地的不垂直度以及平面反射镜法线和编码器转轴的不垂直度引入的角度系统误差为:

$$\Delta \sigma = |\theta - A|. \quad (6)$$

由于(6)式中的角度误差含有因编码器位姿失调所引入的系统误差, 因此为了准确评价编码器的角度误差, 需对系统误差进行修正, 修正方法为: 先将经纬仪测得的俯仰角代入(5)式中运用最小二乘法求解 α, ω 和 δ , 再将三者代入(4)式中通过数值

求解的方法反解编码器角度真值, 编码器示值和反解的角度真值之差的绝对值即为修正后的编码器角度误差。

2.3 仿真

根据 2.2 节中 A 和 E 的表达式, 在 δ, α, ω 为不同值时, 对角度系统误差 $\Delta \sigma$ 和编码器转角 θ 之间的关系进行仿真。

设编码器转角 θ 的范围为 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 。当 δ 和 α 为 $0, \omega$ 的范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 、取样间隔为 2° 时, 角

度系统误差如图 3 所示,对应的经纬仪俯仰角如图 4 所示。

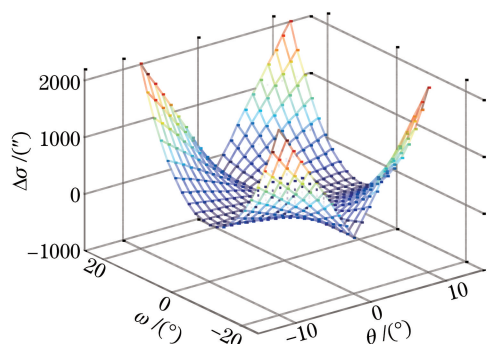


图 3 δ, α 为 0, ω 不同时角度系统误差

Fig. 3 Angle system error with different ω when δ, α are 0

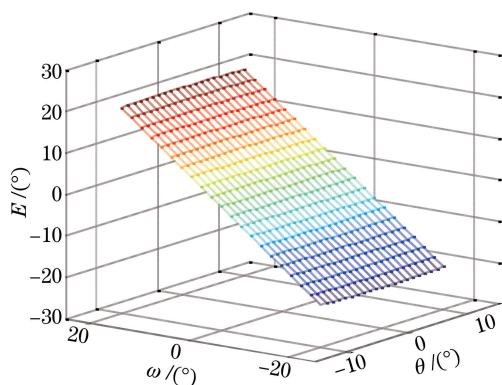


图 4 δ, α 为 0, ω 不同时经纬仪的俯仰角

Fig. 4 Elevation angle of theodolite with different ω when δ, α are 0

当 ω 为 2° 、 α 为 1° 、 δ 的范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 、取样间隔为 10° 时,角度系统误差如图 5 所示,对应的经纬仪俯仰角如图 6 所示。

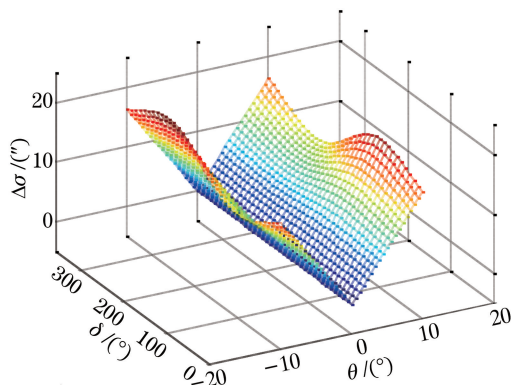


图 5 ω 为 2° 、 α 为 1° 、 δ 不同时角度系统误差

Fig. 5 Angle system error with different δ when ω is 2° and α is 1°

当 ω 为 2° 、 δ 为 10° 、 α 的范围为 $0^\circ \sim 4^\circ$ 、取样间隔为 0.2° 时,角度系统误差如图 7 所示,对应的经纬仪俯仰角如图 8 所示。

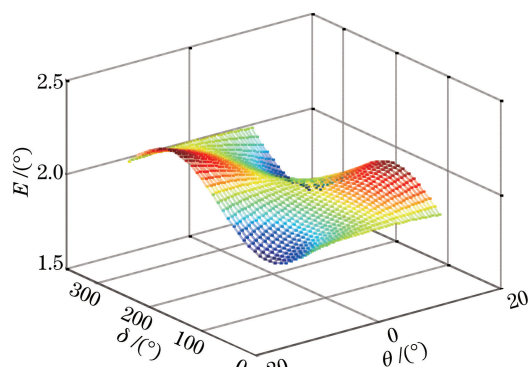


图 6 ω 为 2° 、 α 为 1° 、 δ 不同时经纬仪的俯仰角

Fig. 6 Elevation angle of theodolite with different δ when ω is 2° and α is 1°

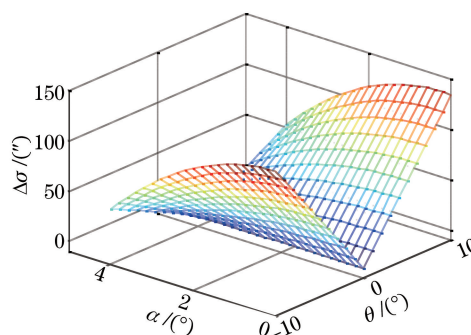


图 7 ω 为 2° 、 δ 为 10° 、 α 不同时角度系统误差

Fig. 7 Angle system error with different α when ω is 2° and δ is 10°

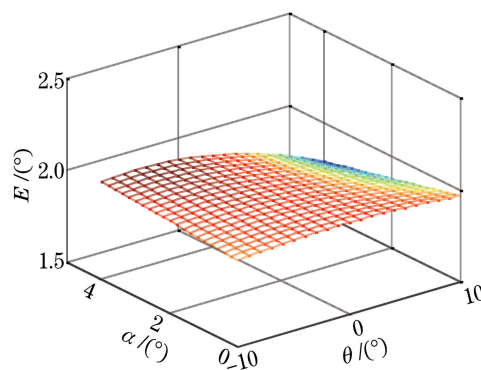


图 8 ω 为 2° 、 δ 为 10° 、 α 不同时经纬仪的俯仰角

Fig. 8 Elevation angle of theodolite with different α when ω is 2° and δ is 10°

由上述仿真结果可知,当 δ 和 α 为 0、 θ 为固定值时,随着 ω 绝对值的增大,角度系统误差不断增大;当 ω 为固定值时,随着 θ 绝对值的增大,角度系统误差不断增大。当 ω 为 2° 、 α 为 1° 、 θ 为固定值时,随着 δ 的增大,角度系统误差呈类正弦变化;当 δ 为固定值,随着 θ 绝对值的增大,角度系统误差不断增大。当 ω 为 2° 、 δ 为 10° 、 θ 为固定值时,随着 α 的增大,角度系统误差不断减小;当 α 为固定值时,

随着 θ 绝对值的增大, 角度系统误差不断增大。编码器在不存在位姿失调的情况下, 经纬仪俯仰角示值为 90° , 存在失调情况时, 经纬仪俯仰角示值会发生变化, 但俯仰角示值与角度系统误差没有直接关系, 在利用数学模型辨识失调参数时会用到俯仰角示值。

3 实验结果

为了准确评价转角受限编码器的角度误差, 以反映编码器的真实精度, 利用以下实验对模型进行验证。

调整编码器轴线, 使之与水平面垂直, 垂直度误差控制在 $1''$ 以内, 将平面反射镜放置在编码器台面上加以固定, 在反射镜前端架设自准直经纬仪并将经纬仪俯仰角调节至 90° , 微调平面反射镜的方位角和俯仰角, 使自准直经纬仪出射的光束经平面反射镜反射后处于经纬仪视场中心, 实验装置如图 9 所示。

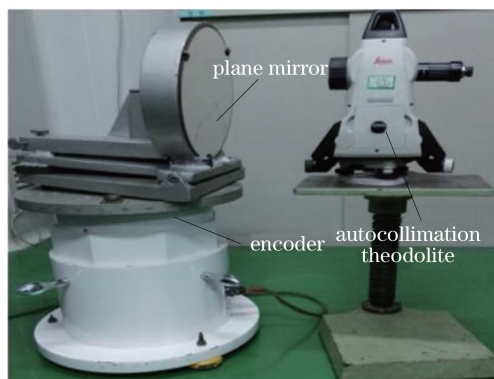


图 9 编码器角度误差测试实验装置
Fig. 9 Experimental device for testing the angle error of the encoder

将编码器角度清零, 自准直经纬仪方位角清零, 控制编码器以 1° 间隔顺时针步进运行至 40° , 每运行一步, 转动经纬仪使出射光束经反射镜自准, 记录经纬仪方位角 A_i 和编码器示值 θ_i , $|\theta_i - A_i|$ 即为系统差为零的编码器角度误差, 以编码器示值为横坐标、角度误差为纵坐标绘制曲线, 如图 10 所示。

控制编码器重新回到零位并将编码器轴线随机倾斜某一角度, 随机调节平面反射镜俯仰至某一位置, 转动经纬仪使出射光束经反射镜重新自准, 控制编码器以 1° 间隔顺时针步进运行至 40° , 每运行一步, 转动经纬仪使出射光束经反射镜自准, 记录经纬仪方位角 A_i' 、俯仰角 E_i' 以及编码器的示值 θ_i' , $|\theta_i' - A_i'|$ 即为含有系统差的编码器角度误差, 以

编码器示值为横坐标、角度误差为纵坐标绘制曲线, 如图 11 所示。

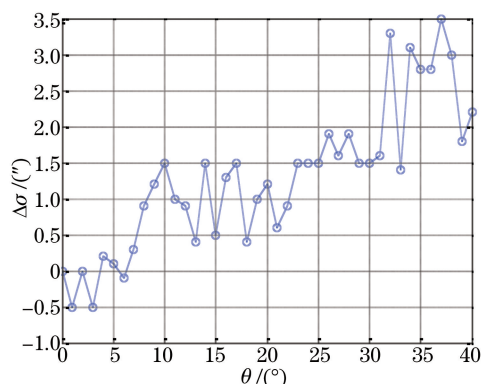


图 10 系统差为零的编码器角度误差

Fig. 10 Angle error of encoder with zero system error

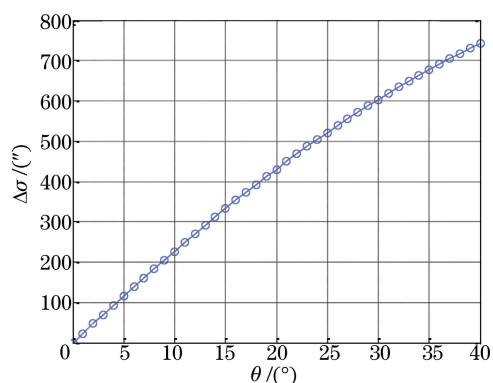


图 11 含有系统差的编码器角度误差

Fig. 11 Angle error of encoder with system error

4 分析与讨论

当编码器轴线和水平面垂直且平面反射镜法线和编码器轴线垂直时, 从图 10 可以看出, 在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内随着编码器角度的增大, 角度误差呈上升趋势, 最大角度误差为 $3.5''$, 此结论与编码器出厂测试结果基本一致。当编码器轴线和水平面及平面镜法线不垂直时, 从图 11 可以看出, 在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内随着编码器角度的增大, 角度误差呈上升趋势, 最大角度误差为 $742.9''$, 这与编码器真实角度误差相差甚远, 需修正平面反射镜法线和编码器轴线不垂直以及编码器轴线和水平面不垂直给误差测试引入的系统误差。将位姿失调情况下测得的经纬仪俯仰角 E_i' 和编码器示值 θ_i' 代入(5)式中, 并以 E_i' 代换 E , 以 θ_i' 代换 θ , 以非线性最小二乘法对(5)式中的参数进行辨识, 求解参数 δ 、 α 、 ω , 其值分别为 129.3174° 、 6.7348° 、 -1.6617° 。将解得的 δ 、 α 、 ω 以及 A_i' 代入(4)式中并以 A_i' 代换 A , 运用数值求解方法反求解 θ_i'' , $|\theta_i' - \theta_i''|$ 即为修正由位姿失调参数所引入的

系统误差后的角度误差,以编码器示值为横坐标、角度误差为纵坐标绘制曲线,并与图 10 中的曲线进行对比,如图 12 所示。

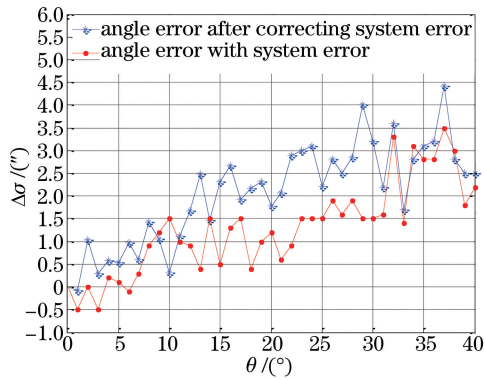


图 12 修正系统误差后的角度误差

Fig. 12 Angle error after correcting system error

由图 12 可知,当编码器轴线和水平面及平面镜法线不垂直时,对采集的数据利用 2.2 节建立的数学模型进行解算和处理,修正系统误差后编码器角度误差和系统差为零时的编码器角度误差趋势基本一致,误差最大值分别为 $4.4''$ 和 $3.5''$,曲线没有完全重合的主要原因是空气存在湍流扰动,导致自准直经纬仪出射光束和反射回的光束方向发生了变化,对图 12 中两条曲线的角度误差之差计算标准差,得到标准差为 $0.76''$,即空气湍流扰动给测试带来的误差为 $0.76''$ 。

5 结 论

仿真和实验均可证明,当 δ 、 α 、 ω 都为零时,采用平面反射镜-自准直经纬仪法测试的编码器角度误差为不含系统差的角度误差。实际测试时,由于转角受限编码器轴线和水平面垂直度无法精确调整或是不具备调整条件,在此前提下,编码器轴线和平面反射镜法线无论垂直与否,均会给测试引入系统误差,因此需对不垂直度引入的系统误差进行修正,修正方法为将测试数据代入数学模型并进行参数辨识,将求解的参数 δ 、 α 、 ω 回代入模型中并运用数值求解方法反求解编码器角度,编码器显示值与求解的编码器角度之差即为修正后的角度误差。实验证明该方法可以正确反演姿态失调引入的编码器角度误差。

参 考 文 献

- [1] Warner M, Krabbendam V, Schumacher G. Adaptive periodic error correction for Heidenhain tape encoder [C]. SPIE, 2008, 7012: 70123N.
- [2] 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.
- [3] Feng Y Q, Wan Q H, Song C, *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] 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.
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.
- [5] Lopez J, Artes M. A new methodology for vibration error compensation of optical encoders [J]. Sensors, 2012, 12(4): 4918-4933.
- [6] Yu H, Wan Q H, Wang S J, *et al.* Dynamic errors analysis of small absolute photoelectric encoder [J]. Chinese Journal of 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.
- [7] 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.
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.
- [8] Wang X J. 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.
- [9] Kaul S K, Tickoo A K, Koul R, *et al.* Improving the accuracy of low-cost resolver-based encoder using harmonic analysis [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2008, 586(2): 345-355.
- [10] Watanabe T, Fujimoto H, Nakayama K, *et al.* Automatic high precision calibration system for angle encoder [C]. SPIE, 2001, 4401: 267-274.
- [11] Filatov Y V, Agapov M Y, Bournachev M N, *et al.* Laser goniometer systems for dynamic calibration of optical encoders [C]. SPIE, 2003, 5144: 381-390.
- [12] Sun S 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.
- 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] Yu H, Wan Q H, Lu X R, *et al.* Calibration of dynamic precision for measurement platform of photoelectric encode[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(11): 2699-2704.
- 于海, 万秋华, 卢新然, 等. 光电编码器误差检测转台的动态精度标定[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2699-2704.
- [14] Sun S H, Zhao C H, Wan Q H, *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.
- [15] 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.
- 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.
- [16] Lu R S, Li W H, Lao D B, *et al.* Angular error compensation for laser tracker[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2299-2305.
- 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.
- [17] 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.
- 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.
- [18] Wang X J. Correction of angle measuring errors for large telescopes[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2446-2451.
- 王显军. 大型望远镜测角系统的修正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2446-2451.
- [19] Dong D F, Zhou W H, Ji R Y, *et al.* Design of precise tracking system of laser tracker[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 309-318.
- 董登峰, 周维虎, 纪荣祚, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 309-318.
- [20] Watanabe T, Fujimoto H, Nakayama K, *et al.* Automatic high precision calibration system for angle encoder(II)[C]. *SPIE*, 2003, 5190: 400-409.
- [21] Yu H, Wan Q H, Zhao C H, *et al.* A high-resolution subdivision algorithm for photographic encoders and its error analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0312001.
- 于海, 万秋华, 赵长海, 等. 图像式光电编码器高分辨力细分算法及误差分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0312001.
- [22] Wang S, He J Y. Research on testing device for rotary precision of photoelectric shaft angle encoder [J]. *Journal of Changchun University*, 2014, 24(12): 1652-1655.
- 王爽, 何景宜. 光电轴角编码器转角精度检测装置研究[J]. *长春大学学报*, 2014, 24(12): 1652-1655.
- [23] Chen W J. The principle of least square method and its application to fitting with experimental curve[J]. *Journal of Liaoning Institute of Science and Technology*, 2014, 16(4): 33-34.
- 陈伟杰. 最小二乘法原理及其在实验曲线拟合中的应用分析[J]. *辽宁科技学院学报*, 2014, 16(4): 33-34.