

光电编码器与棱体轴线平行度对转角误差的影响

王涛¹, 赵建科¹, 田留德¹, 周艳¹, 杨利红², 陈琛¹, 段亚轩¹, 潘亮¹, 赵怀学¹,
刘锴¹, 王伟¹, 刘艺宁¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 光电轴角编码器轴线与棱体轴线不平行会降低转角误差测试结果的置信度, 为了减小光电轴角编码器转角测试误差, 将由光电轴角编码器轴线与棱体轴线不平行引入的转角测试误差控制在光电轴角编码器转角误差的 1/3~1/5 以内, 建立了由光电轴角编码器轴线和棱体轴线平行度引入的转角测试误差数学模型及 Y 向偏置数学模型。由仿真结果可知, 光电轴角编码器转角测试误差和 Y 向偏置随转角的增大呈现周期性变化, 周期分别为 π 和 2π , 棱体轴线倾斜方向相同时, 两轴线夹角越大, 转角测试误差峰值和 Y 向偏置峰值越大, 两轴线夹角相同时, 棱体轴线倾斜方向大小只会改变转角测试误差曲线和 Y 向偏置曲线相位, 不会改变曲线形状。根据多面棱体-自准直仪法对建立的数学模型进行了实验验证。实验结果表明: 测试结果与数学模型具有很好的自洽性。在实际测试中, 对转角误差进行预先测试, 绘制偏置曲线并对曲线进行最小二乘法拟合, 求取平行度与倾斜方向, 根据倾斜方向调整两轴线平行度大小, 直到误差峰值满足测试要求。

关键词: 平行度; 倾斜方向; 测试误差; 误差

中图分类号: TH712 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0217001

Influence of parallelism between photoelectric shaft encoder axis and polyhedron one on the rotation angle error

Wang Tao¹, Zhao Jianke¹, Tian Liude¹, Zhou Yan¹, Yang Lihong², Chen Chen¹, Duan Yaxuan¹,
Pan Liang¹, Zhao Huaixue¹, Liu Kai¹, Wan Wei¹, Liu Yining¹

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The confidence level of rotation angle error test result was reduced by nonparallelism between photoelectric shaft encoder axis and polyhedron one. In order to decrease rotation angle test error, the rotation angle test error caused by nonparallelism between photoelectric shaft encoder axis and polyhedron one was controlled within 1/3–1/5 of photoelectric shaft encoder angle error. The mathematical models of rotation angle test error and Y bias introduced by nonparallelism between photoelectric shaft encoder axis and polyhedron one were established. The simulation results showed that rotation angle test error and Y bias had periodic change with the angle increase, the cycle were π and 2π respectively. When the tilt direction of polyhedron axis was fixed, the bigger angle between encoder axis and polyhedron one, the

收稿日期: 2017-08-05; 修订日期: 2017-10-11

基金项目: 中国科学院创新基金(Y154451ZZ0)

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

bigger peak values of angle test error and Y bias, when the angle between photoelectric shaft encoder axis and polyhedron one was fixed, the tilt direction of polyhedron axis only changed the phases of rotation angle test error curve and Y bias one and not changed the shapes of the curves. According to the polyhedron-autocollimator method, the established mathematical models were verified by experiments. Experimental results indicate that the test results and the mathematical models are in good conformity. In the actual test, the rotation angle test error is pretested, the curve is drawn and fitted by the least squares method, the parallelism and tilt direction are obtained, the parallelism is adjusted according to tilt direction until error peak satisfies test requirement.

Key words: parallelism; tilt direction; test error; error

0 引言

光电轴角编码器又称光电位置传感器,可以实现角位移、角速度、角加速度等物理量的精确测量,已普遍应用于雷达、光电经纬仪、机器人等领域,是自动化设备的理想传感器^[1-5]。随着科学技术的进步,精密仪器与测量技术对光电轴角编码器分辨率和精度提出了更高的要求,国内外已采用机械细分、光学细分、电子学细分以及多头读数等多种措施来提高光电轴角编码器的分辨率和精度^[6-14]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在 20 世纪 80 年代末研制的 23 位绝对式光电轴角编码器,分辨率为 0.15",精度为 0.51"。成都光电所研制的 25 位绝对式光电轴角编码器,分辨率为 0.04",精度为 0.71"。德国 Heidenhain 公司为意大利伽利略望远镜控制系统设计并制作的 27 位增量式光电轴角编码器,经细分后,它的测角精度为 0.036",分辨率为 0.01"。

在提高光电轴角编码器分辨率和精度的同时,需要考虑测试设备的测量精度以及测试方法的测试误差,对光电轴角编码器转角误差的准确测试是研制和开发新一代高分辨率与高精度光电轴角编码器的前提与基石。目前高精度光电编码器转角误差的测试方法主要有:转台法^[15-16]、分度台法、多面棱体—自准直仪法^[17]。转台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夹角,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转角误差测试引入系统误差而不能真实地反映编码器的性能,当两轴线的夹角不为 0 时,同样会给转角误差测试引入系统误差。多齿分度台法无法精确控制编码器轴线和多齿分度台轴线的夹角、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,因此会给转角误差测试带来影响。多面棱体—自准直仪法的基本原理是以被测编码器所转动的名义角度值与棱体相应两工作面的夹角值作差来求取编码器的转角误差。多面棱体—自准直仪法具有三个优点:一是不存在由于同轴度不好编码器转子拖动定子的现象;二是对棱体轴线和编码器轴线的同轴度要求不高,只需满足棱体的每个工作面对准自准直仪时,有输出即可;三是虽然棱体轴线和编码器轴线都是虚轴,但是可以通过转动编码器并结合自准直仪控制两轴线的夹角在一定范围内。但棱体与光电轴角编码器轴线夹角大小会影响转角误差测试,在测试过程中应针对不同精度的编码器进行不同程度的夹角调整以满足测试要求,根据鉴定校准惯例,将由两轴线夹角引入的转角测试误差控制在待检编码器误差的 1/3~1/5 即可。两轴线夹角大小与测试误差之间的关系到目前为止很少有文献对此进行分析^[18-19],因此为了研究棱体与编码器轴线夹角对转角误差测试的影响,建立了棱体与光电轴角编码器夹角和转角测试误差的数学模型和 Y 向偏置数学模型并进行了实验验证,实验结果表明建立的数学模型可以为两轴线夹角调整、编码器精度鉴定、误差补偿以及设计改进提供精准的数据支撑,对促进编码器的发展具有重要意义。

1 转角误差测试原理

如图 1 所示,光电编码器放置在良好的隔振基础上,多面棱体安装于具有三点调整功能的支架上,并将支架放置于光电编码器台面中心区域,在棱体工作面的正前方架设自准直仪,调整支架相对于台面的位置使得棱体每个工作面对准自准直仪时都有

输出,最终将支架固连于光电编码器台面。使自准直仪对准多面棱体的第 1 工作面,记下编码器示值 a_1 及自准直仪初始读数 c_1 ,启动光电编码器测控系统,旋转光电编码器主轴,使自准直仪对准多面棱体第 2 工作面,记下编码器示值 a_2 及自准直仪相应的读数 c_2 ,旋转光电编码器主轴直至测试完多面的棱体的所有工作面,使用多面棱体—自准直仪法测试光电编码器转角误差的示意图如图 1 所示。光电编码器各测点的转角误差按公式(1)计算:

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

式中: a_i 为光电编码器第 i 测点示值, $i=1,2,3, \dots, n$; b_i 为棱体第 i 工作面与第 1 工作面夹角; c_i 为自准直仪第 i 测点读数; e_i 为被测光电编码器第 i 测点的转角误差。

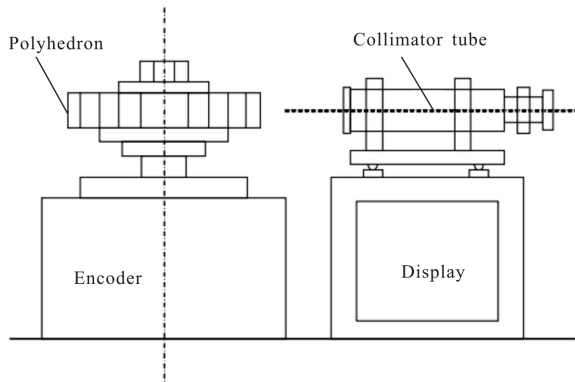


图 1 多面棱体—自准直仪法测试编码器转角误差示意图

Fig.1 Schematic diagram using polyhedron-autocollimator to test rotation angle error of encoder

再次旋转光电轴角编码器主轴使编码器主轴示值为 a_1 ,同时记下自准直仪示值 c_1' ,并计算一测回首尾重合误差 $H=|c_1'-c_1|$,各级编码器一测回首尾重合误差应符合表 1 要求。

表 1 一测回首尾重合误差要求

Tab.1 Overlap difference requirement of beginning and ending in one round

Accuracy levels	Overlap difference requirement of beginning and end/(")
1	≤ 0.2
2	≤ 0.3
3	≤ 0.5
4	≤ 1
5	≤ 3
6	≤ 5
7	≤ 15

2 轴线平行度与转角误差关系数学建模

两轴线夹角与测试误差之间的函数关系决定了测试不同精度编码器时编码器轴线和棱体轴线的允差。因此需建立两轴线夹角与转角测试误差之间的函数关系,以便于科学地指导编码器转角误差的实际测试工作。两轴线夹角与测试误差数学模型建立过程如下:

面向自准直仪探测器靶面,探测器靶面中心 O 点定义为坐标原点,以探测器靶面横向为 X 轴,以探测器靶面竖向为 Y 轴,以自准直仪光轴为 Z 轴,建立 $O-XYZ$ 三维坐标系,如图 2 所示。 H 点为自准直仪物镜的主点, S 点为自准直仪出射光束经棱体工作面反射后在探测器靶面所成像点的质心。在实际测试转角误差时,棱体轴线不会过物镜主点,但在不影响物理模型正确性的前提下,为了简化分析使编码器轴线经过自准直仪物镜主点,即 HK 为编码器轴线。棱体轴线和光电轴角编码器轴线的夹角定义为平行度,以 α 表示,自准直仪对准棱体第 1 工作面时,棱体轴线在 XOZ 面的投影与 OZ 轴的夹角定义为倾斜方向,以 ρ 表示。

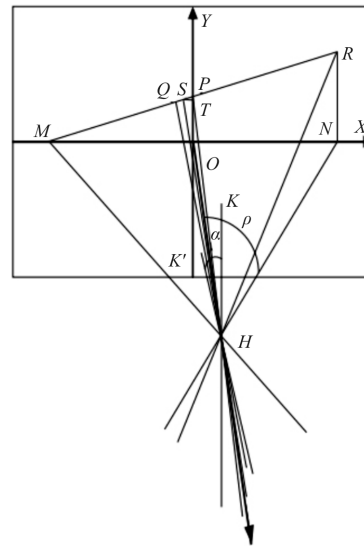


图 2 编码器与棱体轴线平行度和转角测试误差关系空间模型

Fig.2 Space model of the relationship between axis parallelism between encoder and polyhedron and rotation angle test error

假定编码器轴线和棱体轴线平行,并令棱体第 1 工作面对准自准直仪, N 点为过自准直仪物镜主点

且垂直于棱体轴线的直线 HN 与自准直仪探测器靶面 X 轴的交点, 过物镜主点 H 作垂直于 HN 的直线 HM 并与 X 轴相交于 M 点。令 $M、O、N$ 以及 H 点四点所构成的平面以 HM 作为转动轴线转动一定角度, HN 经转动后与探测器靶面相交于 R 点, HO 经转动后与探测器靶面相交于 S 点, 编码器轴线 HK 经转动后变为 HK' , 转动后的 $M、S、R$ 以及 H 点四点共面, 且有 $\angle OHN = \angle SHR$ 。根据编码器轴线与棱体轴线平行度定义以及棱体轴线倾斜方向定义并结合空间模型可知, 两轴线平行度 $\alpha = \angle K'HK = \angle RHN$, 编码器轴线倾斜方向 $\rho = \angle OHN$ 。作直线 RN 垂直于 X 轴相交于 N 点, 直线 ST 垂直于 Y 轴相交于 T 点, 则有 $\angle RMN = \angle PST$ 。作直线 HQ 垂直于直线 MR 相交于 Q 点, 直线 MR 和 Y 轴相交于 P 点, 连接 H 点和 P 点。

根据上述建立的空间模型可知, 在两轴平行度为 $\alpha = \angle K'HK$, 棱体轴线倾斜方向为 $\rho = \angle OHN$ 的条件下, 自准直仪出射光束经棱体第 1 工作面反射后成像在探测器靶面的像点为 S , ST 的距离由棱体和自准直仪的空间位置关系可求得, 推导过程如下所示:

$$NH = f / \cos \rho \quad (2)$$

$$OM = f / \tan \rho \quad (3)$$

$$HM = NH / \tan \rho = f / \sin \rho \quad (4)$$

$$HR = NH / \cos \alpha = f / (\cos \rho \times \cos \alpha) \quad (5)$$

$$NR = NH \times \tan \alpha = f \times \tan \alpha / \cos \rho \quad (6)$$

$$MN = NH / \sin \rho = f / (\cos \rho \times \sin \rho) \quad (7)$$

$$MR = \sqrt{NR^2 + MN^2} = f \times \sqrt{1 + \tan^2 \alpha \times \sin^2 \rho} / (\sin \rho \times \cos \rho) \quad (8)$$

由相似三角形定理可知, $NR、MN、OM$ 以及 OP 满足以下关系式:

$$NR / MN = OP / OM \quad (9)$$

将公式(4)、(6)、(7)代入公式(9)可解得 OP :

$$OP = NR \times OM / MN = f \times \tan \alpha \times \cos \rho \quad (10)$$

$$HP = \sqrt{f^2 + OP^2} = f \times \sqrt{1 + \tan^2 \alpha \times \cos^2 \rho} \quad (11)$$

由于 HQ 垂直于直角三角形 $\triangle MHR$ 的斜边 MR , 因此可得如下关系式:

$$HM^2 - (MR - QR)^2 = HR^2 - QR^2 \quad (12)$$

将公式(4)、(5)、(8)代入公式(12)可解得 QR :

$$QR = (HR^2 + MR^2 - HM^2) / (2 \times MR) = f \times \tan \rho / (\cos^2 \alpha \times \sqrt{1 + \tan^2 \alpha \times \sin^2 \rho}) \quad (13)$$

$$QH = \sqrt{HR^2 - QR^2} = f / \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \times \cos^2 \rho} \quad (14)$$

$$\angle QHR = \arcsin(QR / HR) = \arcsin(\sin \rho / (\cos \alpha \times \sqrt{1 + \tan^2 \alpha \times \sin^2 \rho})) \quad (15)$$

$$\angle QHP = \arccos(QH / HP) = \arccos(1 / \sqrt{1 + \tan^2 \alpha \times \sin^2 \alpha \times \cos^2 \rho \times \sin^2 \rho}) \quad (16)$$

$$ST = SP \times \cos \angle PST = (QP - QS) \times \cos \angle RMN = QH \times (\tan \angle QHP - \tan(\angle QHR - \rho)) \times MN / MR \quad (17)$$

将公式(7)、(8)、(14)、(15)、(16)代入公式(17)即可解得 ST , 式中 f 为自准直仪焦距。

根据自准直仪解算原理, 自准直仪 X 示值为像点到 Y 轴的距离与自准直仪焦距之比的反正切, 因此自准直仪 X 示值可按公式(18)计算。

$$\Delta A = \arctan(ST / f) = \arctan\{1 / \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \times \cos^2 \rho} \times [\tan \angle QHP - \tan(\angle QHR - \rho)] \times 1 / \sqrt{1 + \tan^2 \alpha \times \sin^2 \rho}\} \quad (18)$$

由于 α 和 $\angle QHP$ 均为小量, 有 $\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx 0$, $\tan \angle QHP \approx \angle QHP$, 因此上式可化简为:

$$\Delta A = \angle QHP - (\angle QHR - \rho) \quad (19)$$

式中: ΔA 为在平行度为 α 、倾斜方向为 ρ 的条件下, 自准直仪出射光束经棱体第 1 工作面反射后, 自准直仪 X 示值。

编码器转角不存在误差的条件下, 使编码器以棱体相邻工作面夹角 γ 为基准值进行转动, 棱体工作面序号 n 与棱体轴线在 XOZ 面的投影与 OZ 轴的夹角 θ 之间的关系如下式所示:

$$\theta = 2\pi / N \times (n - 1) + \rho \quad (20)$$

式中: N 为棱体工作面总数。

若公式(19)中所含的 ρ 均以 θ 代替, 则可以求解出编码器转动后, 自准直仪出射光束经相应棱体工作面反射后自准直仪的 X 示值 $\Delta A_n, \Delta A_n$ 即为由棱体轴线和编码器轴线不平行所引入的转角测试误差。

OT 的距离由棱体和自准直仪的空间位置关系可求得, 推导过程如下所示:

$$OT = OP - TP = OP - SP \times \sin \angle PST = OP - (QP - QS) \times \sin \angle RMN = OP - QH \times (\tan \angle QHP - \tan(\angle QHR - \rho)) \times NR / MR \quad (21)$$

将公式(6)、(8)、(10)、(14)、(15)、(16)代入公式(21)即可解得 OT 。

根据自准直仪解算原理, 自准直仪 Y 示值为像点到 X 轴的距离与自准直仪焦距之比的反正切, 因此自准直仪 Y 示值可按公式(22)计算。

$$\Delta E = \arctan(OT / f) \quad (22)$$

$$\arctan\{\tan\alpha\times\cos\rho-1/\sqrt{1-\sin^2\alpha\times\cos^2\rho}\times[\tan\angle QHP-\tan(\angle QHR-\rho)]\times\tan\alpha\times\sin\rho/\sqrt{1+\tan^2\alpha\times\sin^2\rho}\} \quad (23)$$

由于 α 为小量,有 $\tan\alpha\approx 0$,因此上式可化简为:

$$\Delta E=\tan\alpha\times\cos\rho \quad (24)$$

式中: ΔE 为在平行度为 α 、倾斜方向为 ρ 的条件下,自准直仪出射光束经棱体第 1 工作面反射后,自准直仪 Y 示值。

若公式(24)中所含的 ρ 均以 θ 代替,则可以求解出编码器转动后,自准直仪出射光束经相应棱体工作面反射后自准直仪的 Y 示值 $\Delta E_n, \Delta E_n$ 即为由棱体轴线和编码器轴线不平行所引入的 Y 向偏置。

实际测试中,通过预先测试,绘制偏置曲线并对曲线进行最小二乘法拟合,求取平行度大小与倾斜方向,若由轴线平行度所决定的转角测试误差峰值不满足测量要求,则根据倾斜方向调整两轴线平行度大小,直到误差峰值满足测试要求为止。

3 实验验证

验证实验的被试品为北京航空精密机械研究所研制的 920E 型单轴转台,转台内置 ROD880 型海德汉编码器,直径为 160 mm,刻画线数为 36 000,360° 度范围内最大位置误差 $\pm 1''$,文章旨在验证棱体轴线和编码器轴线不平行度对转角误差测试的影响,因此在验证前对 920E 型单轴转台进行了 3 次重复性测量,并将 3 次测量结果的平均值作为系统误差而扣除了。根据多面棱体—自准直仪法,将此转台放置在隔振地基上,在转台台面上放置青岛前哨公司分辨率为 0.2''WL11 型电子水平,以 30° 间隔转动编码器一周,根据电子水平仪示值调整编码器轴线空间位姿,调整的最终结果为转台转动一周,电子水平仪的最大示值为 1.8'',调整现场如图 3 所示。在转台台面中心区域放置中国船舶重工集团公司某所生产的 DLT-23 型 23 面棱体,在棱体第 1 工作面正前方架设德国 Moller 公司生产的 ELCOMAT3000 自准直仪,调整支架相对于台面的位置使得棱体每个工作面对准自准仪时都有输出,并将支架固连于转台台面,在 23 面棱体的第 1 工作面和第 6 工作面正前方架设瑞士徕卡公司生产的 TM5100A 型自准直经纬仪,并将经纬仪水平轴线调整到和多面棱体基本等高,通过脚螺调平经纬仪并将经纬仪的俯仰度盘调节到 90° 后,调整 23 面棱体,使双经纬仪视场内的自准像处于各自视场中心,调整现场如图 4 所示。调整自准直仪使其探测器靶面竖线与编码器轴线平行,调

整结果为转台正向和反向转动过程中自准直仪 Y 向示值保持不变,均为 0''。

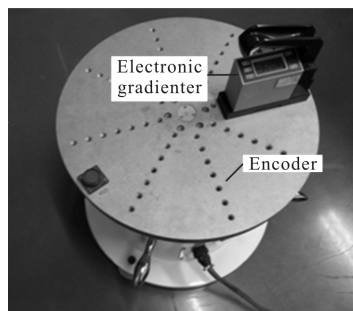


图 3 编码器轴线调整示意图

Fig.3 Schematic diagram of encoder axis adjustment

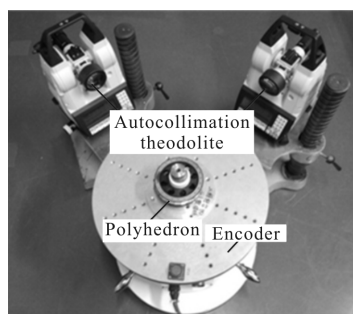


图 4 棱体轴线调整示意图

Fig.4 Schematic diagram of polyhedron axis adjustment

为了验证上述数学模型及理论的正确性,取倾斜方向和两轴线平行度组合分别为 $\rho=0^\circ, \alpha=1\ 000''$; $\rho=0^\circ, \alpha=1\ 500''$; $\rho=31.304\ 3^\circ, \alpha=1\ 000''$; $\rho=31.304\ 3^\circ, \alpha=1\ 500''$ 。

按照多面棱体—自准直仪法对倾斜方向和两轴线平行度的四种组合进行转角误差仿真和实际测试,测试现场如图 5 所示。

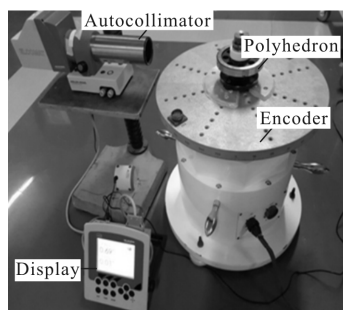


图 5 转角误差测试现场

Fig.5 Rotation angle error test site

转角误差中扣除两轴线平行度 $\alpha=0''$ 时的转角误差后所得结果即为两轴线不平行时所引入的转角测试误差。仿真结果和测试结果如图 6~9 所示。

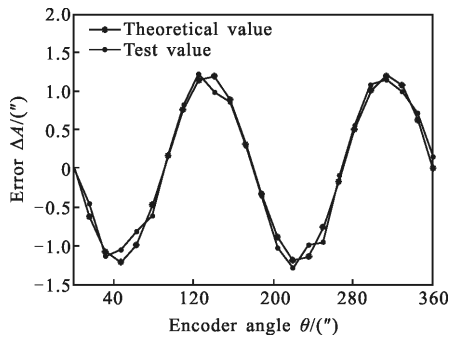


图 6 $\rho=0^\circ, \alpha=1000''$ 转角测试误差曲线

Fig.6 $\rho=0^\circ, \alpha=1000''$ rotation angle test error curve

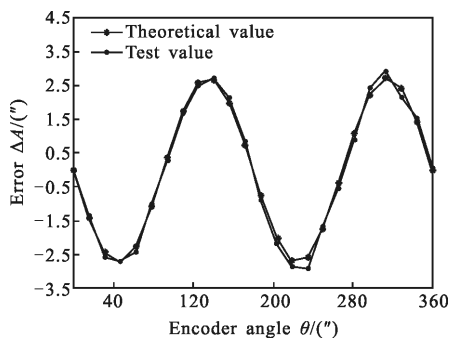


图 7 $\rho=0^\circ, \alpha=1500''$ 转角测试误差曲线

Fig.7 $\rho=0^\circ, \alpha=1500''$ rotation angle test error curve

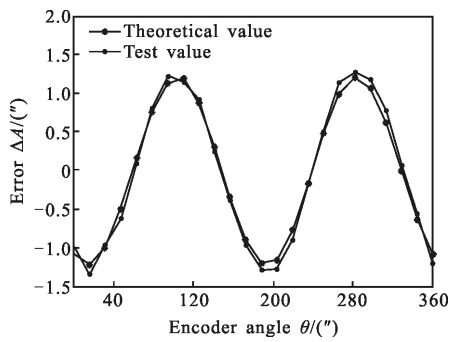


图 8 $\rho=31.3043^\circ, \alpha=1000''$ 转角测试误差曲线

Fig.8 $\rho=31.3043^\circ, \alpha=1000''$ rotation angle test error curve

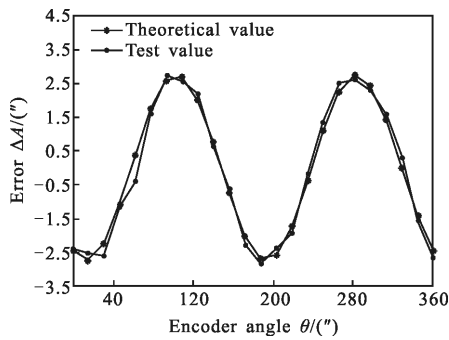


图 9 $\rho=31.3043^\circ, \alpha=1500''$ 转角测试误差曲线

Fig.9 $\rho=31.3043^\circ, \alpha=1500''$ rotation angle test error curve

两轴线不平行时所引入 Y 向偏置测试结果如图 10~13 所示。

由图 6~13 可知, 试验测得的转角测试误差和 Y 向偏置与仿真值吻合的很好。转角测试误差实验标准差分别为 $0.11''$ 、 $0.13''$ 、 $0.09''$ 、 $0.13''$, Y 向偏置实验标准差分别为 $1.26''$ 、 $1.50''$ 、 $1.13''$ 、 $1.62''$ 。转角测试误差实验标准差和 Y 向偏置实验标准差均不为 0, 这种现象主要是由于空气湍流导致空气折射率不均匀, 进而影响到自准直仪出射光束和入射光束发生

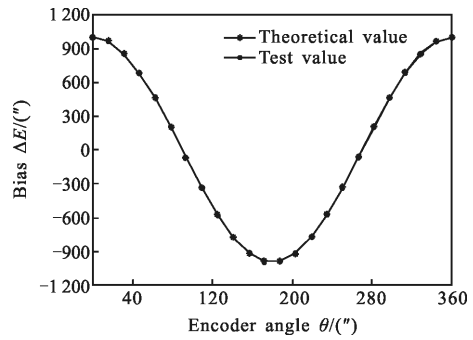


图 10 $\rho=0^\circ, \alpha=1000''$ 偏置曲线

Fig.10 $\rho=0^\circ, \alpha=1000''$ bias curve

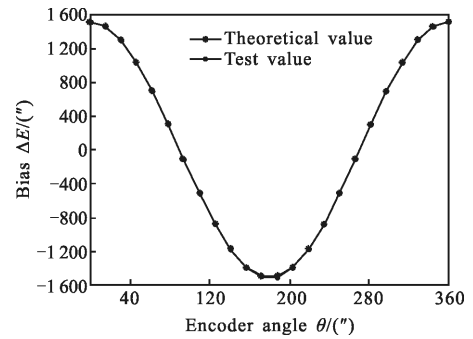


图 11 $\rho=0^\circ, \alpha=1500''$ 偏置曲线

Fig.11 $\rho=0^\circ, \alpha=1500''$ bias curve

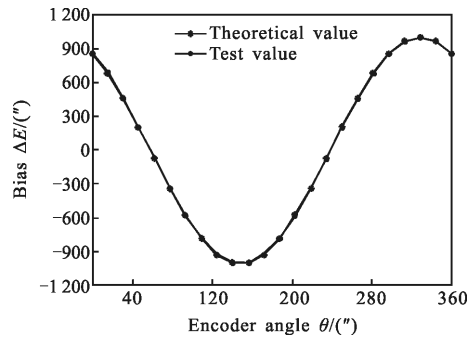


图 12 $\rho=31.3043^\circ, \alpha=1000''$ 偏置曲线

Fig.12 $\rho=31.3043^\circ, \alpha=1000''$ bias curve

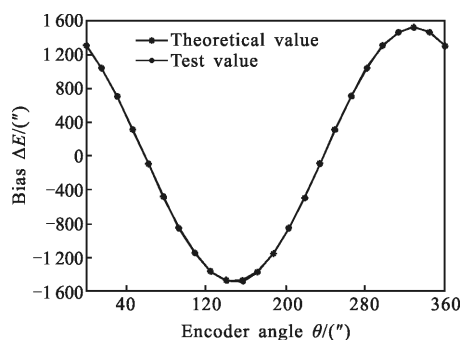


图 13 $\rho=31.3043^\circ, \alpha=1500''$ 偏置曲线

Fig.13 $\rho=31.3043^\circ, \alpha=1500''$ bias curve

随机偏转所引起的。由转角测试误差实验标准差和 Y 向偏置实验标准差可知，后者的实验标准差大于前者，这种现象主要是由于编码器在转动一周过程中，Y 向偏置峰值及其附近的数据会处于自准仪视场边缘，自准直仪对处于视场边缘的目标点坐标提取精度不高所引起的。

4 结 论

建立了轴线平行度引入的测试误差及 Y 向偏置数学模型，由仿真可知编码器转角测试误差和 Y 向偏置随转角的增大呈现周期性变化，周期分别为 π 和 2π ，倾斜方向相同时，两轴线夹角越大，转角测试误差峰值和 Y 向偏置峰值越大，两轴线夹角相同时，倾斜方向大小只会改变转角测试误差曲线和偏置曲线相位，不会改变曲线形状。根据多面棱体—自准直仪法对建立的数学模型进行了实验验证，实验结果表明，测试结果与数学模型具很好的自洽性。在实际测试中，对转角误差进行预先测试，绘制偏置曲线并对曲线进行最小二乘法拟合，求取平行度与倾斜方向，根据倾斜方向调整两轴线平行度大小，直到误差峰值满足测试要求。

参 考 文 献：

[1] 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. (in Chinese)

[2] Gao Xu, Wan Qiuhua, Li Jinhuan, et al. Photoelectric shaft encoder error of moire fringe signal compensation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 647-653. (in

Chinese)

[3] 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. (in Chinese)

[4] 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. (in Chinese)

[5] Feng Yingqiao, Wan Qiuhua, Sun Ying, 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)

[6] Zhao Changhai, Wan Qiuhua, Liang Lihui, et al. The small high-precision spaceborne photoelectric encoder [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(8): 1224-1230. (in Chinese)

[7] Feng Yingqiao, Wan Qiuhua, Sun Ying, et al. High resolution interpolation techniques of small photoelectric encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1825-1829. (in Chinese)

[8] Feng Yingqiao, Wan Qiuhua. Interpolation error calibration method of small photoelectric encoders [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(6): 1374-1379. (in Chinese)

[9] Yu Hai, Wan Qiuhua, Wang Shujie, et al. Dynamic errors analysis of small photoelectric encoder [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0808004. (in Chinese)

[10] Zhang Guilin, Jiang Tao, Li Min. Error analysis on measurement of photoelectrical encoder corner precision [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0808001.

[11] Feng Yingqiao, Wan Qiuhua, Wang Shujie. Correction of long-period error for small photoelectric encoders [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2491-2497. (in Chinese)

[12] Du Yingcai, Wang Xijun, Wang Shujie, et al. Auto-detection system of incremental encoder [J]. *Journal of Electronic of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26 (11): 993-998. (in Chinese)

[13] Deng Fang, Chen Jie, Chen Wenjie, et al. A high precision test method and apparatus for photoelectric encoder [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27 (11): 977-980. (in Chinese)

[14] Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 379-386. (in Chinese)

-
- [15] Sun Shuhong, Zhao Changhai, Wan Qihua, et al. Automatic detection system for miniature photoelectrical encoder [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 600–606. (in Chinese)
- [16] Tsukasa Watanabe, Hiroyuki Fujimoto, Kan Nakayama, et al. Automatic high precision calibration system for angle encoder [C]//SPIE, 2003, 5190: 400–409.
- [17] Wang Shuang, He Jingyi. Research on testing device for rotary precision of photoelectric shaft angle encoder [J]. *Journal of Changchun University*, 2014, 24(12): 1652–1655. (in Chinese)
- [18] Yao Huang, Zi Xue, Dan Qiao, et al. Study on the metrological performance of self-calibration angle encoder [C]//SPIE, 2016, 9684: 968400.
- [19] Yan Wang, Zi Xue, Yao Huang, et al. Study on self-calibration angle encoder using simulation method [C]//SPIE, 2016, 9903: 990320.