

doi:10.3788/gzxb20174611.1112005

小范围回转轴系测角误差测试方法

田留德^{1,2}, 赵建科¹, 周艳¹, 王涛¹, 赵怀学¹, 潘亮¹, 刘朝晖¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了提高小范围回转轴系测角误差的测量精度, 用自准直经纬仪测量测角误差的原理和方法, 对影响测量结果的误差源进行了分析, 仿真结果表明被测轴系轴线倾斜角度是最主要的误差源。基于误差模型提出了利用最小二乘估计辨识失调参数进而分离引入误差的方法, 以实现测角误差的高精度测量。以精度为 2" 的单轴位置转台为受检对象进行实验验证, 相比常规方法的测试结果 $-309.1'' \sim 428.6''$, 本文方法的测试结果为 $-0.89'' \sim 1.01''$ 和 $-1.01'' \sim 0.93''$, 测试误差为 0.70" 和 0.78", 消除了设备失调引入的测试误差。该方法具有设备简单、操作便捷, 可实现小范围回转轴系测角误差的高精度测试, 解决小范围回转轴系工程测试难题。

关键词: 测量; 角度测量; 最小平方逼近; 小范围回转轴系; 测试方法; 坐标变换; 误差模型

中图分类号: TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)11-1112005-7

Test Method of Angle Error of Limited Rotation Axis System

TIAN Liu-de^{1,2}, ZHAO Jian-ke¹, ZHOU Yan¹, WANG Tao¹, ZHAO Huai-xue¹,
PAN Liang¹, 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)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of the angular error in the limited rotation axis system, the principle and method of measuring the angular error by autocollimation theodolite was used to analysis the error sources which affect the measurement result, the simulation results show that the tilt angle of the axis of the measured shaft is the main error source. Based on the accurate error model, the method to identify the misadjustment parameters and separate the introduced error by using the least squares estimation was proposed to realize the high precision measurement of angle error. The experiment was carried out with the accuracy of 2" single-axis position turntable as tested object. The test results of conventional methods are $-309.1'' \sim 428.6''$, the test error is large, however, the test results of the proposed method are $-0.89'' \sim 1.01''$ and $-1.01'' \sim 0.93''$, the test error is 0.70" and 0.78", eliminating the test error introduced by equipment misadjustment. The method has the advantages of simple equipment and simple operation, and can realize the high precision measurement the angle error of the limited rotation axis system, can solve the problem of limited rotation axis system engineering testing problem.

Key words: Measurement; Angle measurement; Least squares approximations; Limited rotation axis system; Testing method; Coordinate transformation; Error model

OCIS Codes: 120.3940; 120.3930; 120.4640

基金项目: 神光 III 大科学工程资助项目 (No.091Z512BOA) 和中国科学院创新基金 (No.Y154451ZZ0) 资助

第一作者: 田留德 (1984-), 男, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为光电测量设备研制、精密检测。Email: tianliude@126.com

导师 (通讯作者): 刘朝晖 (1965-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为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。Email: lzh@opt.ac.cn

收稿日期: 2017-03-27; 录用日期: 2017-05-24

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

小范围回转轴系是指无法实现 360° 转动的轴系,被广泛应用于光电经纬仪、测试及仿真转台、光电吊舱、光电稳定平台、光电观瞄仪、遥感仪器的扫描机构、捕获跟踪瞄准(Acquisition Tracking Pointing, ATP)系统等精密设备和系统中,能够根据指令驱动负载转动并指示当前位置^[1-3].测角误差是小范围回转轴系最为关键的一项性能参数,直接影响整个设备或系统的性能,需要精确测试和控制^[4-6].目前,对测角误差的研究主要针对整周回转轴系,且集中在测角元件测角误差的产生机理^[7-8]、自动测试设备^[9-12]、动态测试方法^[13-15]、测角误差分量分离方法及补偿模型^[15-17]等方面,文献[18]研究了小范围回转轴系的误差分离及补偿技术,提高了其测角精度.文献[19]应用模型线性化方法和分步最小二乘估计的方法标定了导引头指向误差.而对测角误差测量方法的研究较少.

整周回转轴系测角误差的测试方法主要有转台法、分度台法、多面棱体—自准直仪法等^[20],这些方法实现高精度测试的前提条件为被测轴系与测试设备轴系平行,这对于小范围回转轴系十分困难,容易引入设备位姿失调引起的测试误差.解决措施是在轴系的装配过程等能够实现整周回转阶段进行测角误差测试,并作为最终的测试结果,但存在三个问题:1)测试状态与产品最终的状态有差异,测试结果不能反映产品的最终性能;2)产品长期工作后性能的监测核查无法进行,除非把产品拆卸成可整周回转状态;3)目前最常用的多面棱体—自准直仪法测量小转角范围回转轴系测角误差时测量点数太少^[21-22].研究小范围回转轴系测角误差的精确测试方法具有较高工程应用价值,自准直经纬仪具有精度高、视场大、测量点可任意选取等优点,适用于小范围回转轴系高密度测量.

本文根据自准直经纬仪测量测角误差的原理,利用坐标变换建立了设备位姿失调引入误差的精确数学模型,并利用最小二乘估计对位姿失调参数进行辨识,完成设备位姿失调引入误差的分离,实现小角度回转轴系测角误差的精确测量,并以单轴位置转台为受检对象进行实验验证.

1 影响测角误差测量精度的因素分析

1.1 测量原理

用自准直经纬仪测量测角误差的方法如图 1.被测轴系旋转轴线铅垂,平面反射镜位于被测轴系转子上并与转子同步转动,反射镜法线垂直于被测轴系轴线,反射镜法线转过的角度等于被测轴系转过的角度.自准直经纬仪竖轴铅垂并通过对反射镜自准实现被测轴系转动角度的测量.

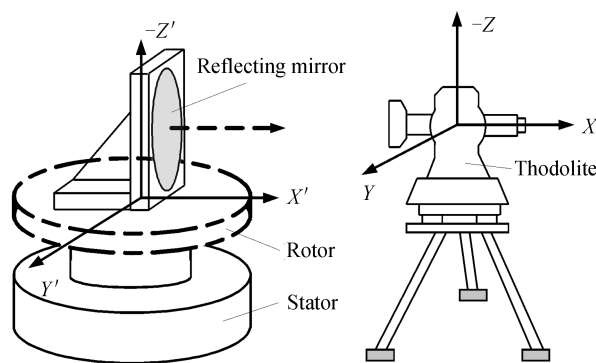


图 1 自准直经纬仪测量测角误差示意图

Fig.1 Schematic diagram of angle error measurement by using autocollimation theodolite

影响测角误差测量精度的因素主要有自准直经纬仪的示值误差、平面反射镜的面型、环境及设备变动性、设备位姿失调等.其中,自准直经纬仪的示值误差可通过查阅设备的检定报告得到,Ⅰ级经纬仪的示值误差不大于 $0.5''$,平面反射镜面型对测试的影响极小通常可以忽略,环境及设备变动性的影响可以通过实验室恒温湿控制及隔振平台实现.设备位姿失调包括:被测轴旋转轴线倾斜误差、平面反射镜法线与被测轴不垂直度误差、自准直经纬仪的调平误差.本文仅分析设备位姿失调的影响,由于自准直经纬仪具有电子自动补偿功能,可消除自准直经纬仪调平误差引入的测试误差.

1.2 设备位姿失调引入测量误差建模

为便于表述,建立如图2所示的坐标系,直角坐标系 $O-XYZ$ 为自准直经纬仪的测量坐标系,是一个定坐标系, OZ 轴沿铅垂线向下, OXY 在水平面内, OX 沿自准直经纬仪的方位零位方向. PO 沿被测轴系旋转轴线,与 OZ 轴的夹角为 ψ (倾斜角),在 OXY 面内的投影与 OX 的夹角为 α (倾斜方向角). On 沿平面反射镜法线,初始时刻(测量起点)在 OXZ 面,与 OX 的夹角为 β .则 $PO = [-\sin \psi \cos \alpha \quad -\sin \psi \sin \alpha \quad \cos \psi]^T$, $On = [\cos \beta \quad 0 \quad -\sin \beta]^T$.

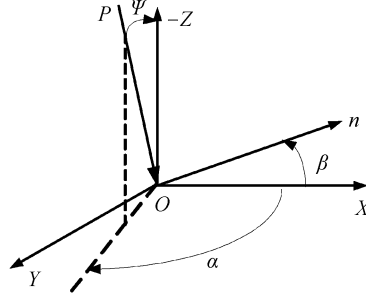


图2 位姿失调误差示意图

Fig.2 Schematic diagram of position and attitude misadjustment

测试步骤为:起始位置,自准直经纬仪对平面反射镜自准,设置自准直经纬仪方位角为零,然后受检轴系旋转角度 θ_i ,即反射镜法线 On 绕 PO 旋转角度 θ_i ,自准直经纬仪再次对平面反射镜自准,记录自准直经纬仪方位俯仰角示值为 (A_i, E_i) ,则 $(A_i - \theta_i)$ 即为设备位姿失调引入的测试误差。

将矢量 On 绕矢量 PO 旋转 θ_i 后的矢量记为 $P'_i = [x'_i \quad y'_i \quad z'_i]^T$,由坐标变换公式得

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

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 On 、 PO 、 θ_i 带入式(1)可得 P'_i ,其各元素的表达式分别为

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

$$y'_i = [\sin^2 \psi \cos \alpha \sin \alpha (1 - \cos \theta_i) + \cos \psi \sin \theta_i] \cos \beta + [\sin \psi \sin \alpha \cos \psi (1 - \cos \theta_i) - \sin \psi \cos \alpha \sin \theta_i] \sin \beta \quad (3)$$

$$z'_i = [-\sin \psi \cos \alpha \cos \psi (1 - \cos \theta_i) + \sin \psi \sin \alpha \sin \theta_i] \cos \beta - [\cos \theta_i + \cos^2 \psi (1 - \cos \theta_i)] \sin \beta \quad (4)$$

由自准直经纬仪的工作原理可得其方位俯仰角示值为

$$A_i = \arctan (y'_i / x'_i) \quad (5)$$

$$E_i = \arcsin (z'_i) \quad (6)$$

则设备位姿失调引入的测试误差为

$$\zeta = A_i - \theta_i \quad (7)$$

式(6)为自准直经纬仪测试小范围回转轴系测角误差时俯仰角示值表达式,式(7)为设备位姿失调引入的测试误差.可以看出俯仰角和测试误差均为 ψ 、 α 、 β 和 θ_i 的非线性函数.实际测试中得到的是各测量点 θ_i 含有设备位姿失调误差测角误差 ζ'_i 和自准直经纬仪俯仰角 E_i .

由 E_i 结合式(6)可通过寻优算法实现设备位姿失调参数的辨识,进一步根据式(7)计算出设备位姿失调引入的测试误差并补偿,实现小范围回转轴系测角误差的高精度测量.通常被测产品的测角误差远小于设备位姿失调引入的测试误差,即直接测得的测角误差呈现设备位姿失调引入的测试误差的趋势,因此可由 ζ'_i 结合式(7)直接辨识失调参数并完成测试误差的分离.

1.3 设备位姿失调引入测量误差仿真分析

根据建立的误差模型,分别分析平面反射镜法线失调、被测轴系轴线倾斜角度、被测轴系轴线倾斜方向角对测试误差的影响.

从式(2)、(3)和(5)可以看出,当被测轴轴线无失调时,平面反射镜法线与被测轴旋转轴线不垂直不影响

测角误差测量结果.从式(4)和(6)可以看出,当被测轴轴线无失调时,反射镜法线失调会使自准直经纬仪的俯仰角示值引入一个与反射镜法线失调量相等的常值偏差.

图3和图4分别给出了受检仪器轴线倾斜角 $\psi=3^\circ$,倾斜方向角 $\alpha=45^\circ$,平面反射镜法线与被测轴旋转轴线不垂直度 β 取不同值时,对测角误差 ζ 及自准直经纬仪俯仰角 E 的影响.从图3可以看出,当受检仪器轴线存在失调误差时,平面反射镜法线无失调($\beta=0^\circ$)及存在失调误差($\beta\neq 0^\circ$)均会引入较大的测试误差,当受检仪器轴线倾斜角为 3° ,引入的测试误差达到 $187.8''$,如此大的测试误差通常是不允许的,必须采取解决措施.由图4可知,受检仪器轴线倾斜误差会使自准直经纬仪的俯仰角示值引入一个偏差,该偏差随受检轴系转动角度、平面反射镜失调角度变化.

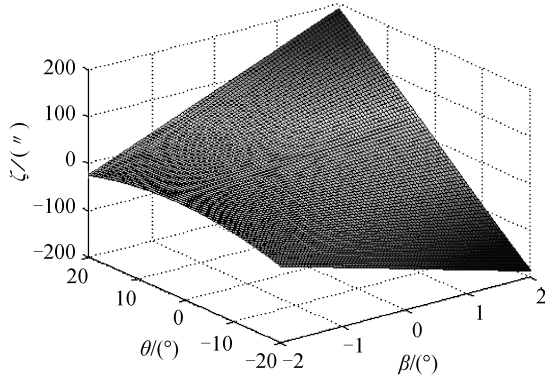


图3 $\psi=3^\circ, \alpha=45^\circ$ 时, β 对 ζ 的影响

Fig.3 Influence of β on ζ in the case of $\psi=3^\circ, \alpha=45^\circ$

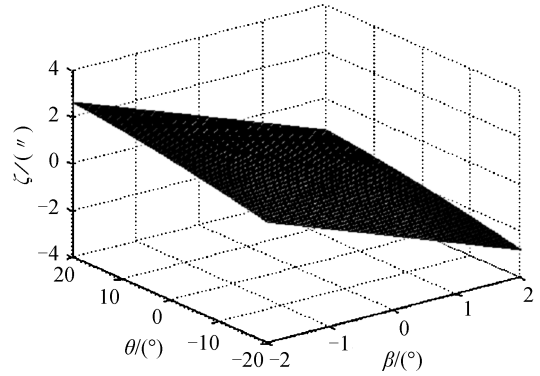


图4 $\psi=3^\circ, \alpha=45^\circ$ 时, β 对 E 的影响

Fig.4 Influence of β on E in the case of $\psi=3^\circ, \alpha=45^\circ$

图5给出了平面反射镜法线与被测轴轴线不垂直度 $\beta=2^\circ$,被测轴轴线倾斜角 $\psi=3^\circ$,被测轴轴线倾斜方向角 α 对测角误差的影响,可以看出对同一测量角度,被测轴轴线倾斜方向角取不同值时,引入的测角误差差异较大,最大值为 $269.5''$.图6给出了平面反射镜法线与被测轴轴线不垂直度 $\beta=2^\circ$,被测轴轴线倾斜方向角 $\alpha=45^\circ$,被测轴轴线倾斜角 ψ 对测角误差的影响,可以看出对同一测量角度,测角误差随被测轴轴线倾斜角的增大而增大且为非线性关系.

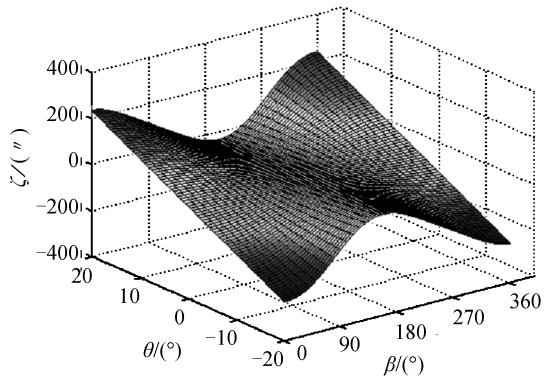


图5 $\beta=2^\circ, \psi=3^\circ$ 时, α 对 ζ 的影响

Fig.5 Influence of α on ζ in the case of $\beta=2^\circ, \psi=3^\circ$

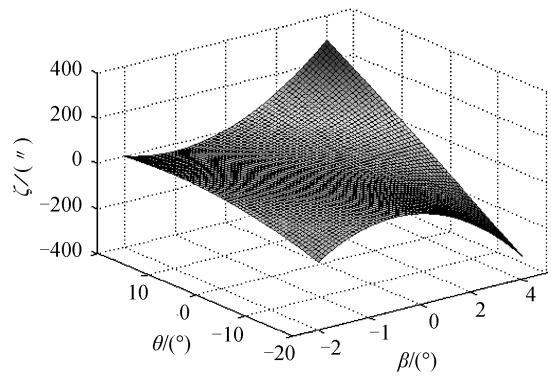


图6 $\beta=2^\circ, \alpha=45^\circ$ 时, ψ 对 ζ 的影响

Fig.6 Influence of ψ on ζ in the case of $\beta=2^\circ, \alpha=45^\circ$

2 验证实验与结果分析

在实验室内以型号为920E的单轴位置转台为测试对象,设计实验对建立的误差模型及失调参数辨识方法进行验证,测试布局如图7.受检转台的测角误差为 $\pm 2''$,测量重复性为 $1''$.实验所用仪器为瑞士Laica公司的自准直经纬仪TM5100A,其测角误差为 $0.5''(1\sigma)$; $\phi 300$ 平面反射镜,其波像差均方根为 $0.047\lambda @ \lambda = 632.8 \text{ nm}$.为了使实验具有一般性和代表性,实验时设备具有被测轴系旋转轴倾斜误差和反射镜法线失调两种误差,失调量的大小随机调整且是未知的.完备条件下的测试结果为受检转台的真实精度,通过比较本文方法对转台失调状态下的误差测试结果与完备条件下转台误差测试结果的一致性评价该方法的有效性及其精度.

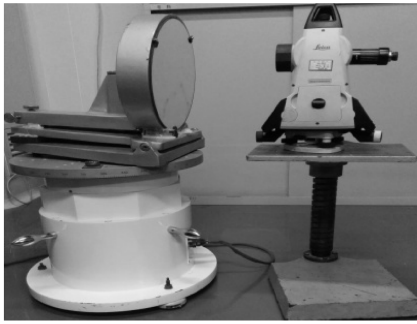


图7 单轴转台测角误差测试验证实验

Fig.7 Test verification experiment of single-axis turntable angle error

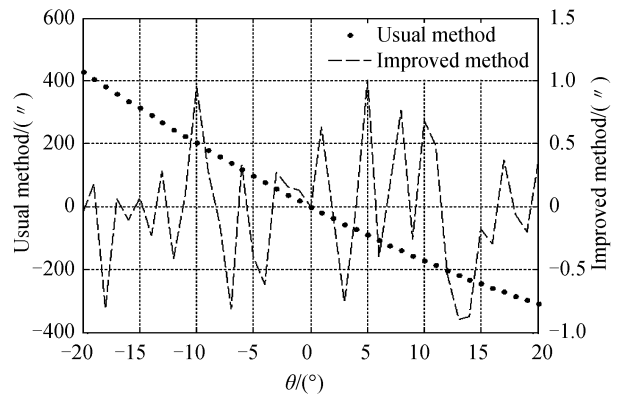


图8 常规方法及改进方法的测试结果

Fig.8 Test results of usual methods and improved methods

首先,在调整完备的条件下对被测转台的测角误差进行测试.用精度为 $0.2''$ 的电子水平仪对被测单轴转台进行精确调平,使被测转台旋转轴铅垂度误差小于 $1''$,平面反射镜法线与转台旋转轴线垂直度偏差小于 $2''$.测试转角范围取 $-20^\circ \sim 20^\circ$,测试点角度间隔取 1° ,以被测转台 0° 位置为测试基准点,然后,人为对单轴转台及平面反射镜进行调整,使其具有一定的位姿失调误差,采用建立自准直经纬仪俯仰角模型,以 $J = \sum [\arcsin(z_i) - E_i]^2$ 为目标函数,以 R-squared(确定系数)为辨识精度参数,用 Matlab 的 fit() 函数对失调参数进行最小二乘辨识进而分离引入的误差.由式(5)和(6)知,需要辨识的失调参数分别为被测轴线倾斜角 ψ 、被测轴线倾斜方向角 α 、平面反射镜法线与被测轴线不垂直度 β ,根据被测转台的失调状态,粗略估计 $\psi \in [-10^\circ \ 10^\circ]$, $\alpha \in [0^\circ \ 360^\circ]$, $\beta \in [-10^\circ \ 10^\circ]$,随机取 1 000 组数据分别作为初始值,参数估计结果一致,被测轴旋转轴线倾斜误差的估计结果为 5.8249° ,被测轴轴线倾斜方向角的估计结果为 43.4965° ,平面反射镜法线与被测轴不垂直度误差估计结果为 -0.0395° ,说明辨识模型及方法对初始值具有鲁棒性.位姿失调引入误差分离前后的测角误差曲线如图 8,可以看出,用自准直经纬仪对小范围回转轴系的测角误差进行测试,常规调节精度下,若不分离设备失调引入的测试误差,则会引入一个 $-309.1'' \sim 428.6''$ 变化的系统误差,根据测试设备的误差不应大于被测设备误差 $1/3$ 的原则,只能实现测角误差劣于 $1285.8''$ 产品的测量,显然无法满足当前的工程应用要求.然而,通过建立设备位姿失调引入测试误差的精确模型,根据实测数据应用最小二乘估计实现失调参数的辨识,实现引入测试误差的分离后,被测转台的测角误差分布在 $-0.89'' \sim 1.01''$ 范围内.

为了说明本文测试方法的普适性,随机调整失调量大小,在 $\psi \in [-10^\circ \ 10^\circ]$, $\alpha \in [0^\circ \ 360^\circ]$, $\beta \in [-10^\circ \ 10^\circ]$,随机取 1000 组数据分别作为初始值,参数的估计结果均为 $\psi = -3.6297^\circ$, $\alpha = 54.2216^\circ$, $\beta = 1.0305^\circ$.应用本文测试方法对两种失调状态下的测试结果与完备状态下的测试结果进行比较见图 9,可以看出,在完备的条件下,测得被测转台的测角误差分布在 $-1.24'' \sim 0.77''$ 范围内,而本文提出方法的测试结果分别为 $-0.89'' \sim 1.01''$ 和 $-1.01'' \sim 0.93''$,完备状态下被测转台的测角误差记为 e_i ,本文方法测得的失调状态下被测转台的测角误差记为

$$e'_i, \text{按 } \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e'_i - e_i)^2} \text{ 计算本文测试方法的}$$

误差,分别为 $0.70''$ 和 $0.78''$,满足绝大多数的工程测试要求.可能是由于模型严重非线性的原因,在利用建立的设备失调量引入误差模型进行辨识时出现非收敛的现象,对初始值要求较高.

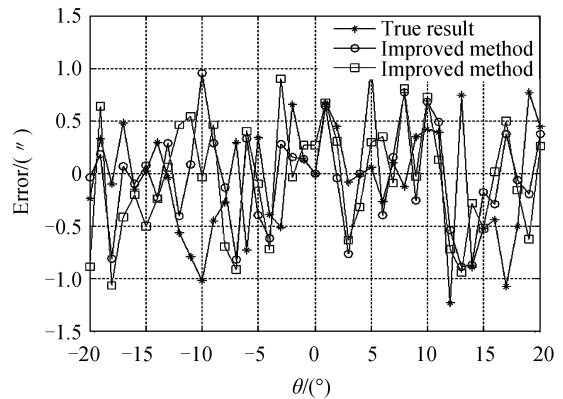


图9 改进方法的测试结果与真值

Fig.9 Test results of the improved method and true value

3 结论

利用坐标变换方法建立了自准直经纬仪测试小范围回转轴系测角误差时设备位姿失调引入误差的精确模型,仿真分析了失调误差的大小,在常规控制条件下,设备位姿失调会引入很大的测试误差,难以满足当前工程的应用需求.基于本文建立的模型,提出了应用最小二乘参数估计实现设备位姿失调参数的辨识,成功分离出了设备位姿失调引入的测试误差,实验表明,本文方法的测试精度较高,达 $0.8''$,基本达到了自准直经纬仪的测量精度($0.5''$),能够实现测角误差大于 $2''$ 的小范围回转轴系的测角误差,该方法可以解决光电经纬仪、测试及仿真转台、光电吊舱等精密设备和系统中的小范围回转轴系的装调、出厂性能测试、使用一段时间后的定期性能监测和评估、长途运输及搬运后状态复查难题,具有工程应用价值.今后需要进一步研究参数优化算法,以解决用含有失调误差的测角误差进行模型辨识时不收敛(对初始值要求较高)的问题以及研究多轴系统设备失调误差的模型及辨识方法.

参考文献

- [1] MICHAEL W, VICTOR K, GERMAN S. 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 Ying-qiao, WAN Qiu-hua, 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] QI Li-li, WAN Qiu-hua. 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 Hai, WAN Qiu-hua, WANG Shu-jie, *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 Ying-qiao, WAN Qiu-hua, 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.
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 Xin-jun. 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 & Methods in Physics Research*, 2008, **586**(2): 345-355.
- [10] WATANABE T, FUJIMOTO H. Automatic high precision calibration system for angle encoder[C]. SPIE, 2001, **4401**: 267-274.
- [11] SUN Shu-hong, LIANG Li-hui, WAN Qiu-hua. 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.
- [12] SUN Shu-hong, ZHAO Chang-hai, WAN Qiu-hua, *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.
- [13] FILATOR Y V, AGAPOV M Y, BOURNACHEV M N. Laser goniometer systems for dynamic calibration of optical encoders[C]. SPIE, 2003, **5144**: 381-390.
- [14] YU Hai, WAN Qiu-hua, LU Xin-ran, *et al.* Calibration of dynamic precision for measurement platform of photoelectric encode[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(11): 2769-2704.
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): 2769-2704.
- [15] ZHANG Gui-lin, JIANG Tao, LI Min. 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 Rong-sheng, LI Wan-hong, LAO Da-bao, *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 Jing-bin, CAO Hong-yan, WANG Ke-xin, *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] REN Shun-qing, YI Guo-xing, ZENG Qing-shuang, *et al.* Error separating technology of inductosyn angle-measuring system in limiting rotation axis system[J]. *Electric Machines and Control*, 2005, **9**(3): 183-186.
任顺清,伊国兴,曾庆双,等. 小范围回转轴系感应同步器测角系统的误差分离技术[J]. 电机与控制学报, 2005, **9**(3): 183-186.
- [19] SUN Hui, LIU Hui, LUO An- Zi, *et al.* Calibration of seeker's pointing error based on model linearization and least square estimation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 2060-2068.
孙辉,刘慧,罗安治,等. 应用模型线性化和最小二乘估计的导引头指向精度标定[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(7): 2060-2068.
- [20] JJF 1115-2004. 光电轴角编码器校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
JJF 1115-2004. Calibration specification for photoelectric shaft encoders[S]. Beijing: Beijing Metrology Press, 2004.
- [21] WANG Xin-jun. 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.
- [22] DONG Deng-feng, ZHOU Wei-hu, JI Rong-yi, *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,纪荣祎,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.