

文章编号 1004-924X(2014)09-2299-07

## 激光跟踪仪测角误差补偿

卢荣胜<sup>1</sup>, 李万红<sup>1,2\*</sup>, 劳达宝<sup>2</sup>, 周维虎<sup>2</sup>, 丁功明<sup>1,2</sup>

- (1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094)

**摘要:** 由于激光跟踪仪的角度测量精度直接影响仪器的测量精度, 本文提出了用自准直仪结合多面棱体对跟踪仪金属圆光栅测角误差进行离散标定的方法。研究了基于谐波分析的误差补偿方法, 取金属柱面圆光栅测角误差中幅值较大且相位基本不变的谐波分量建立了补偿模型, 避免了最小二乘法不收敛的问题。分析了标定测角误差的不确定度, 结果显示: 水平测角精度补偿前后分别为 1.60" 和 0.90", 俯仰测角精度补偿前后分别为 4.89" 和 0.91", 精度分别提高了 44% 和 81%, 从角秒级提高到了亚角秒级。结果表明, 提出的方法可为激光跟踪仪水平和俯仰轴系提供测角误差补偿, 对类似测角系统的误差补偿也有参考价值。

**关键词:** 激光跟踪仪; 角度测量; 误差补偿; 谐波分析

**中图分类号:** TP212.1; TH712 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2299

## Angular error compensation for laser tracker

LU Rong-sheng<sup>1</sup>, LI Wan-hong<sup>1,2\*</sup>, LAO Da-bao<sup>2</sup>, ZHOU Wei-hu<sup>2</sup>, DING Gong-ming<sup>1,2</sup>

- (1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

\* Corresponding author, E-mail: wanhongli28@163.com

**Abstract:** As the angle measurement accuracy for a laser tracker affects the instrument measurement accuracy directly, a discrete calibration method for the angle measurement errors of a metal circular grating in the laser tracker was proposed based on an autocollimator combined with a multi-mirror polyhedron. The error compensation method based on harmonic analysis was studied. Then, a compensation model was built up on the basis of the harmonic wave components whose amplitudes are large and phases remain essentially constant, by which the no convergence from least square method was overcome. Furthermore, the calibration uncertainty of angle measurement errors was analyzed. The analysis results show that the horizontal angle measurement accuracy is reduced from 1.60" to 0.90", and the vertical angle from 4.89" to 0.91" after compensation. The accuracy is improved by 44% and 81% respectively, and has been from an arc second scale to a sub-arc second scale. The results indicate that the proposed method effectively compensates angle measurement errors for

收稿日期: 2013-11-22; 修订日期: 2014-01-13.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2011YQ120022); 中国科学院科研装备研制项目 (No. 090206A01Y); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 61307095)

harmonic and vertical axis systems of the laser tracker, and also provides a reference for other error compensation of angle measuring systems.

**Key words:** laser tracker; angle measurement; error compensation; harmonic analysis

## 1 引言

激光跟踪仪是大尺寸空间三维坐标测量仪器,它利用激光测距和二维测角组成的极坐标测量系统,通过极坐标与直角坐标转换获得目标的空间坐标。在激光测距系统中,激光干涉测距(IFM)和激光绝对测距(ADM)提供测距数据,二维精密跟踪转台的水平轴系和俯仰轴系提供测角数据<sup>[1-2]</sup>。目前,测角传感器的种类有很多,激光测距系统的测角精度与传感器的类型、结构、安装等关系密切。如果传感器安装不当,测角精度会受到很大影响。因此,为了提高激光跟踪仪的测量精度,需要采用适当的方法对测角系统进行误差补偿。

圆光栅是常用的高精度测角传感器,其测角误差用各阶谐波来表示。其中,零起角位置偏差引起零阶误差,偏心引起一阶正弦误差,安装倾斜引起二阶谐波误差<sup>[3-5]</sup>。除了采用多头读数的方法消除偏心、轴系晃动等引起的误差外,人们广泛采用误差标定后软件补偿、自校准等方法提高圆光栅的测角精度<sup>[3,6-7]</sup>。文献[8]采用基于径向基函数神经网络模型的误差补偿方法,该方法无需预知误差的成因及分布规律,避免了某些复杂的分析与测试工作,但需要足够多且分布均匀的误差标定点数据。文献[9]运用傅里叶级数对圆光栅测角误差进行展开,修正了前三阶谐波误差。文献[10]提出了基于粒子群算法的正弦函数误差补偿方法,克服了最小二乘法无法收敛的问题。以上文献所补偿的测角误差在几十到几百角秒内,补偿后误差在 $10''$ 以内。文献[3]采用误差谐波补偿法对误差幅值和相位基本不变的谐波分量进行补偿,但是当采用36面等偶数面棱体时,基于矩阵运算的线性最小二乘算法会因为矩阵出现全零列,而无法求解模型中的待定参数。

本文针对自行研制的激光跟踪仪,提出了基于非线性最小二乘法的误差谐波补偿方法,取金属柱面圆光栅测角误差中幅值较大且相位基本不变的谐波分量建立补偿模型,避免了最小二乘法的不收敛问题,并详细分析了标定误差的不确定

度。该方法可将测角精度提高到亚角秒级。

## 2 激光跟踪仪测角误差标定

激光跟踪仪采用反射镜跟踪模式,通过二维精密跟踪转台中水平轴和俯仰轴的转动,调节跟踪头内反射镜的方位以实现激光束的空间指向跟踪,并通过安装在水平轴和俯仰轴上的圆光栅测角系统获得角度数据。

正多面棱体是以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的正多边形角度计量标准器具。金属多面棱体结合自准直仪测角可以达到亚角秒级精度,因此可以用于标定激光跟踪仪的测角误差。如图1所示,转接件固定在跟踪仪顶端,通过水平轴与圆光栅实现同轴转动。理论分析可知,测量角度的精确度不受棱体安装偏心的影响,但实验中应尽量保证多面棱体的中心轴线与旋转轴线重合(同轴度误差不大于 $0.02\text{ mm}$ ),且棱体各工作面与旋转轴线的平行度不大于 $15''$ 。

棱体某工作面的工作角偏差是指该工作面法线对起始工作面法线的夹角与该夹角标称值之差。计量部门出具的检定证书中工作角偏差是以第1面为起始工作面,按工作面序号增加的方向进行计算的<sup>[11]</sup>。

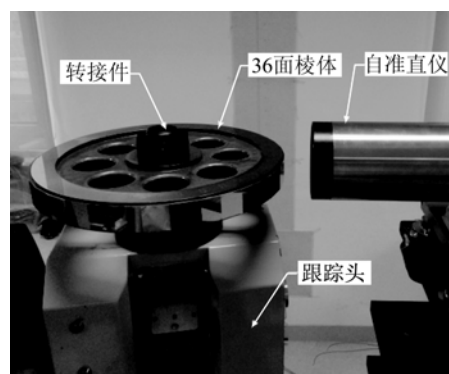


图1 标定跟踪仪水平轴测角误差实验

Fig. 1 Experiment of angular error calibration for horizontal shaft of laser tracker

以跟踪仪水平轴测角误差的标定为例,首先

以棱体第 1 面对准自准直仪且水平轴显示为  $0^\circ$  的位置,此时自准直仪读数记为  $m_1$ 。然后沿一个方向(即工作面序号增加或减小的方向)转动水平轴依次使棱体第  $i$  个工作面(该工作面序号记为  $j$ )对准自准直仪,自准直仪读数记为  $m_i$ ,水平轴显示角度记为  $\theta_i$ ,正  $n$  面棱体工作面序号为  $j$  的工作角偏差记为  $\Delta\alpha_{j,1}$ 。那么第  $i$  个工作面与第 1 个工作面的实际工作角  $\alpha_{i,1}$  为:

$$\alpha_{i,1} = 360^\circ(i-1)/n \pm \Delta\alpha_{j,1}. \quad (1)$$

水平轴实际转过的角度  $\beta_i$  为:

$$\beta_i = \alpha_{i,1} \pm (m_i - m_1). \quad (2)$$

那么水平轴在该位置显示的角度误差  $\Delta\theta_i$  为:

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \beta_i. \quad (3)$$

根据实验中棱体随水平轴转动时工作面序号  $j$  增加的方向与水平轴显示角度  $\theta_i$  增加的方向之间的关系和自准直仪读数  $m_i$  增加的方向与水平轴显示角度  $\theta_i$  增加的方向之间的关系,式(1)、式(2)、式(3)正负号的取定参见表 1。

表 1 正负号取定详细说明表  
Tab. 1 Details for sign calculation

| 工作角标称值  | $\theta_i$ 增加的方向           |                     |
|---|----------------------------|---------------------|
|   | $j$ 增加的方向                  | $m_i$ 增加的方向         |
| $360^\circ(i-1)/n$  | $+\Delta\alpha_{j,1}$ (同向) | $+(m_i - m_1)$ (同向) |
|   | $-\Delta\alpha_{j,1}$ (反向) | $-(m_i - m_1)$ (反向) |
| $\alpha_{i,1} = 360^\circ(i-1)/n \pm \Delta\alpha_{j,1}$            |                            |                     |
| $\beta_i = 360^\circ(i-1)/n \pm \Delta\alpha_{j,1} \pm (m_i - m_1)$ |                            |                     |

本激光跟踪仪测角系统的两种方向关系均为同向,所以实际的水平轴测角误差为:

$$\Delta\theta_i = \theta_i - [360^\circ(i-1)/n + \Delta\alpha_{j,1} + (m_i - m_1)]. \quad (4)$$

### 3 误差谐波补偿模型

由于圆光栅的安装偏心、倾斜等引起的测角系统误差一般不随时间变化,对应的误差谐波表达式的幅值和初相位也不会随时间变化。因此,可以用一系列谐波表示测角误差,找出其中幅值和初相位基本不变的谐波分量作为补偿值,建立谐波补偿模型。

由上节可知,结合多面棱体和自准直仪可标定出跟踪仪测角  $\theta_i$  和该处的转角误差  $\Delta\theta_i$ 。谐波函数拟合公式为:

$$\epsilon(\theta_i) = \sum_{k=0}^m C_k \sin(k\theta_i + \varphi_k). \quad (5)$$

采用非线性最小二乘法求解式(6),得到  $k$  阶谐波的幅值  $C_k$  和相位  $\varphi_k$ 。

$$e = \min \left\{ \sum_{i=1}^n [\epsilon(\theta_i) - \Delta\theta_i]^2 \right\} =$$

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{k=0}^m C_k \sin(k\theta_i + \varphi_k) - \Delta\theta_i \right]^2 \right\}, \quad (6)$$

式中: $n$  为多面棱体的面数,  $m = [n/2]$ 。选取幅值较大且相位基本不变的谐波分量,设这些谐波阶次为  $t_0, t_1, \dots, t_l$ ,则建立的误差模型表达式为:

$$\epsilon(\theta) = \sum_{s=0}^l C_{t_s} \sin(t_s \theta + \varphi_{t_s}). \quad (7)$$

## 4 实 验

本文以激光跟踪仪水平轴的测角实验数据为例进行实验。水平测角系统采用雷尼绍 SiGNUM<sup>TM</sup> RESM 20  $\mu\text{m}$  圆光栅和对径 SR 双头读数,光栅环外径为 150 mm,光栅刻线数为 23 600,细分数为 400,分辨率为 0.14"。采用 6354 所 CSZ-1A 型 CCD 双轴自准直仪和二等 23 面、36 面棱体进行比对。其中,36 面棱体能够整数倍等分圆周角,23 面棱体不能整数倍等分圆周角;采用 36 面棱体和自准直仪标定水平测角误差,23 面棱体的测量数据进行误差补偿效果验证。在不同时刻和实验装置重新调整的情况下,采集到 5 组误差数据,根据式(5)拟合谐波函数,由式(6)求出幅值和相位,发现 0, 1, 2, 12 阶幅值较大且相位基本不变,所以建立的误差谐波补偿模型的表达式为:

$$\epsilon(\theta) = C_0 + C_1 \sin(\theta + \varphi_1) + C_2 \sin(2\theta + \varphi_2) + C_{12} \sin(12\theta + \varphi_{12}). \quad (8)$$

幅值较大说明该阶次在总误差中的影响比较大,相位基本不变说明该阶次误差较稳定,取幅值较大且相位基本不变的谐波分量保证了该阶次误差补偿的有效性和稳定性。取 5 组数据的平均值作为最终的显示角度及其对应的误差,误差及补

偿模型曲线如图 2 所示。

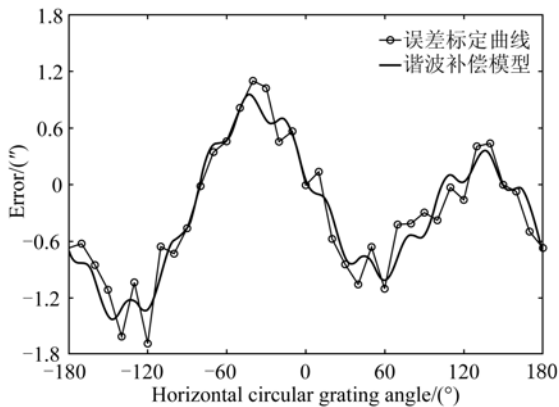


图 2 水平轴显示角度误差曲线及谐波补偿模型曲线图

Fig. 2 Error curves of horizontal shaft angle and harmonic compensation model

然后验证误差补偿效果。采用 23 面棱体结合自准直仪测量水平轴显示角度,得到显示角度  $\theta'$  和测角误差  $\Delta\theta'_{\text{orig}}$  (即补偿前误差)。将  $\theta'$  带入误差模型中,得到补偿后误差  $\Delta\theta'_{\text{comp}}$ 。补偿前后水平测角误差数据如表 2 所示,对比曲线如图 3 所示。

由实验数据可知,补偿前水平角测角误差集中在  $(-1.21'', +1.12'')$ , 补偿后误差集中在  $(-0.43'', +0.51'')$ ; 补偿前后的峰峰值分别为  $2.33''$  和  $0.94''$ , 标准差分别为  $0.75''$  和  $0.26''$ 。

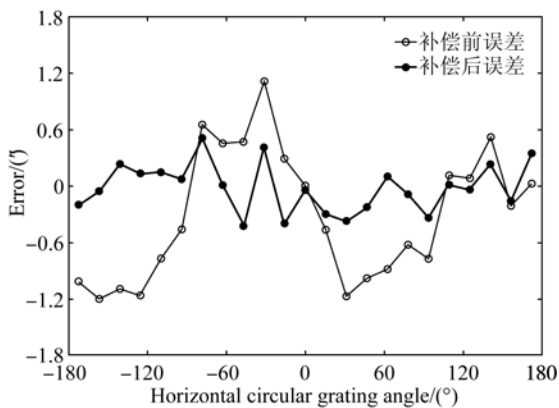


图 3 水平轴显示角度误差补偿前后对比图

Fig. 3 Comparison of horizontal shaft angular errors before and after compensations

表 2 水平轴显示角度误差及补偿后误差数据

Tab. 2 Errors of horizontal shaft angles before and after compensations

| 序号 | 显示角度/(°)    | 补偿前误差/(") | 补偿后误差/(") |
|----|-------------|-----------|-----------|
| 1  | -172.173 91 | -1.03     | -0.20     |
| 2  | -156.521 74 | -1.21     | -0.06     |
| 3  | -140.869 57 | -1.10     | +0.23     |
| 4  | -125.217 39 | -1.17     | +0.13     |
| 5  | -109.565 22 | -0.78     | +0.14     |
| 6  | -93.913 04  | -0.47     | +0.07     |
| 7  | -78.260 87  | +0.65     | +0.51     |
| 8  | -62.608 70  | +0.45     | +0.00     |
| 9  | -46.956 52  | +0.47     | -0.43     |
| 10 | -31.304 35  | +1.12     | +0.41     |
| 11 | -15.652 17  | +0.29     | -0.41     |
| 12 | 0.000 00    | +0.00     | -0.05     |
| 13 | 15.652 17   | -0.47     | -0.30     |
| 14 | 31.304 35   | -1.18     | -0.38     |
| 15 | 46.956 52   | -0.99     | -0.23     |
| 16 | 62.608 70   | -0.89     | +0.10     |
| 17 | 78.260 87   | -0.63     | -0.09     |
| 18 | 93.913 04   | -0.78     | -0.35     |
| 19 | 109.565 22  | +0.11     | +0.01     |
| 20 | 125.217 39  | +0.08     | -0.04     |
| 21 | 140.869 57  | +0.52     | +0.23     |
| 22 | 156.521 74  | -0.21     | -0.17     |
| 23 | 172.173 91  | +0.02     | +0.35     |

同理采用 23 面棱体标定俯仰轴的测角误差,得到 0,1,2,3,6 阶补偿的谐波补偿模型,补偿前的测角误差集中在  $(-1.17'', +4.50'')$ , 补偿后的误差集中在  $(-0.45'', +0.52'')$ ; 补偿前后的峰峰值分别为  $5.67''$  和  $0.97''$ , 标准差分别为  $2.28''$  和  $0.28''$ 。补偿前后俯仰测角误差的对比曲线如图 4 所示。

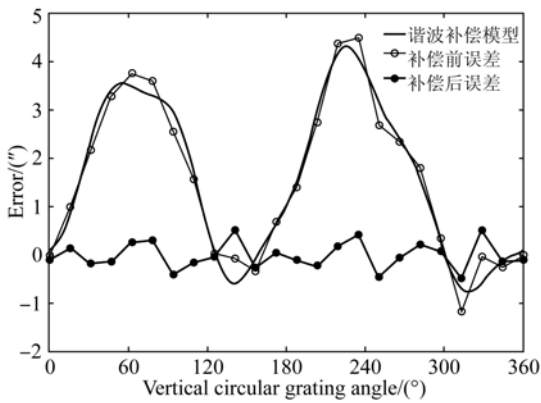


图4 俯仰轴显示角度误差补偿前后对比图

Fig. 4 Comparison of vertical shaft angular errors before and after compensations

### 5 不确定度分析

以上实验标定的测角误差与标定引入的误差都处于亚角秒量级,因此必须进行不确定度分析。不确定度的影响因素包括标准器、标定装置等。

#### 5.1 棱体检定误差引入的不确定度 $u(a)$

实验所用的多面棱体为二等,其检定证书中注明其测量不确定度为  $0.2''$ ,  $k=2$ ,则有:

$$u(a) = 0.2''/2 = 0.1''$$

#### 5.2 自准直仪示值误差引入的不确定度 $u(b)$

自准直仪是高精度测角仪器,易受到空气扰动、温湿度变化等影响。根据检定证书,漂移、测量重复性、示值误差等因素造成的测量不确定度为  $0.15''$ ,  $k=2$ ,则有:

$$u(b) = 0.15''/2 = 0.075''$$

#### 5.3 误差标定装置引入的不确定度 $u(c)$

在调节测量装置的过程中,由于达不到理想状态,自准直光管会相对水平轴有微小角度的倾斜,从而引入了附加测量误差<sup>[12]</sup>。如图5所示,自准直光管内发出的十字光线经棱体工作面反射并成像在自准直仪的CCD上,  $x, y$  是水平轴坐标系,  $x', y'$  是自准直仪坐标系,两者相对旋转,夹角为  $\epsilon$ 。水平旋转轴线  $y$  与棱体中心轴线  $y''$  存在夹角  $\gamma$ 。当对准某工作面时,十字光线水平方向偏转的实际值为  $\Delta H$ ,自准直仪测得的(X轴)示值为  $\Delta H'$ ,垂直方向(Y轴)示值为  $\Delta V'$ ,则有:

$$\Delta H' = \Delta H / \cos \epsilon + \Delta V' \tan \epsilon, \quad (9)$$

$$\Delta H = \Delta H' \cos \epsilon - \Delta V' \sin \epsilon. \quad (10)$$

误差  $\delta$  为:

$$\delta = \Delta H' - \Delta H = \Delta H' (1 - \cos \epsilon) + \Delta V' \sin \epsilon. \quad (11)$$

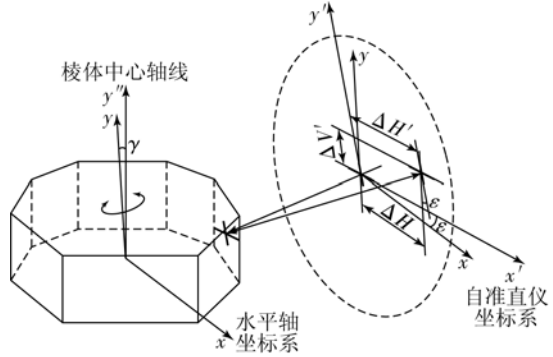


图5 自准直仪相对水平轴倾斜示意图

Fig. 5 Configuration of autocollimator tilting relative to horizontal shaft

水平旋转轴线  $y$  与棱体中心轴线  $y''$  不重合、棱体工作面与基准面的垂直度误差、自准直光管相对水平旋转轴线  $y$  倾斜等3种因素的综合影响形成了附加测量误差  $\delta$ 。在实验过程,沿一个方向旋转水平轴,自准直仪 X 轴示数从  $-500''$  转到  $+500''$  的过程中, Y 轴示数变化了  $10''$ ,那么  $\epsilon$  为  $0.01$  rad。在多次测量中,  $\Delta H', \Delta V'$  的值都在  $15''$  以内,由式(11)得  $\delta = 0.15''$ ,  $k=3$ ,则有:

$$u(c) = 0.15''/3 = 0.05''$$

总结上述各项不确定度,如表3所示。

表3 标准不确定度明细表

Tab. 3 List of standard uncertainties

| 来源   | 值                |
|------|------------------|
| 多面棱体 | $u(a) = 0.1''$   |
| 自准直仪 | $u(b) = 0.075''$ |
| 标定装置 | $u(c) = 0.05''$  |

所以,合成的标准不确定度为:

$$u = \sqrt{u(a)^2 + u(b)^2 + u(c)^2} = 0.13''$$

### 6 结论

本文采用多面棱体和自准直仪结合的方法标定了激光跟踪仪水平和俯仰的测角误差,并进行

了基于非线性最小二乘法的误差谐波补偿,最后详细分析了标定误差的不确定度。在比较误差补偿效果及选取测角精度的评定标准方面,不再采用误差峰峰值或标准差<sup>[6,13]</sup>,而是采用包含扩展不确定度的测量结果,以便更好地反映补偿前后测角精度值的真实变化量。标定测角误差的合成标准不确定度为 0.13",取包含因子 $k=3$ ,置信概

率 $P=99.73\%$ ,则补偿前后的水平测角精度分别为 1.60"和 0.90",俯仰测角精度分别为 4.89"和 0.91",精度分别提高了约 44%和 81%。该方法将测角精度从角秒级提高到亚角秒级,大大提高了激光跟踪仪的测量精度,不仅可补偿自行研制的激光跟踪仪水平和俯仰轴系的测角误差,对类似测角系统的误差补偿也有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 林嘉睿, 郝继贵, 张皓琳, 等. 激光跟踪仪测角误差的现场评价[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 463-468.  
LIN J R, ZHU J G, ZHANG H L, et al.. Field evaluation of laser tracker angle measurement error[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(2): 463-468. (in Chinese)
- [2] 丁蕾, 周维虎, 王亚伟. 样条函数在激光跟踪仪测距补偿中的应用[J]. 光电工程, 2012, 39(3): 78-82.  
DING L, ZHOU W H, WANG Y W. S-spline function for distance error compensation of laser tracker[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(3): 78-82. (in Chinese)
- [3] 赵人杰, 马文礼. 利用误差谐波补偿法提高金属圆光栅测角精度[J]. 仪器仪表用户, 2009, 116(3): 69-71.  
ZHAO R J, MA W L. Improving the accuracy of new-type encoders using error harmonic compensation[J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2009, 116(3): 69-71. (in Chinese)
- [4] CHEN X J, WANG ZH H, ZENG Q SH. Angle measurement error and compensation for decentration rotation of circular gratings[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 2010, 17(4): 536-539.
- [5] CHEN X J, WANG ZH H, WANG ZH B, et al.. Angle measurement error and compensation for pitched rotation of circular grating[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 2011, 18(3): 11-15.
- [6] ORTONP A, POLIAKOFF J F, HATIRIS E, et al.. Automatic self-calibration of an incremental motion encoder[J]. *IEEE IMTC*, 2001, 18(3): 1614-1618.
- [7] WATANABE T, FUJIMOTO H, MASUDA T. Self-calibratable rotary encoder [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2005(13): 204-245.
- [8] 洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 598-604.  
HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encode based on RBF network[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 598-604. (in Chinese)
- [9] 于连栋, 丁洋, 程文涛. 平行双关节坐标测量机圆光栅测角误差补偿技术[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2009, 33(5): 659-662.  
YU L D, DING Y, CHENG W T. Compensation of angle measurement error of circular gratings for parallel dual-joint coordinate measuring machine[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science*, 2009, 33(5): 659-662. (in Chinese)
- [10] 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1766-1762.  
GAO G B, WANG W, LIN K, et al.. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1766-1762. (in Chinese)
- [11] 任顺清, 马广程, 伊国兴, 等. 测量角位置误差时自准直仪读数与正多面棱体偏差的符号取定[J]. 计量技术, 2003, 15(12): 42-45.  
REN SH Q, MA G CH, YI G X, et al.. Calculation the sign of autocollimator readings and the deviation of regular polyhedron measuring angular position error[J]. *Measurement Technique*, 2003, 15(12): 42-45. (in Chinese)
- [12] 孙方金. 自准直仪与反光面准直时的注意事项[J]. 计量技术, 1999(10): 33-36.

SUN F J. Points for attention in collimating of autocollimator and reflector [J]. *Measurement Technique*, 1999(10): 33-36. (in Chinese)

- [13] 艾晨光,褚明,孙汉旭,等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11):

2479-2484.

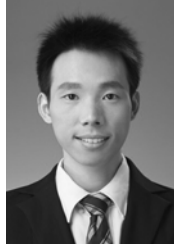
AI CH G, CHU M, SUN H X, *et al.*. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2479-2484. (in Chinese)

#### 作者简介:



卢荣胜(1963—),男,安徽庐江人,教授,博士生导师,1985年于安徽机电学院(现安徽工程大学)获得学士学位,1998年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事机器视觉、自动光学检测、光学微纳测量等方向的研究。E-mail: rslu@hfut.edu.cn

#### 通讯作者:



李万红(1988—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事精密测量系统方向的研究。E-mail: wanhongli28@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)