

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007069

全圆连续角度标准装置的系统误差分离与补偿*

李昶丽^{1,2}, 薛梓², 黄焱², 朱维斌¹, 邹伟²

(1. 中国计量大学 杭州 310018; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要:中国计量科学研究院自主研发了全圆($0^\circ \sim 360^\circ$)连续角度标准装置,该标准装置采用四读数头等分平均(EDA)的自校准方法进行硬件补偿,补偿后的测角精度优于 $0.1''$ 。为了进一步提高该标准装置的测角精度,本文首先基于误差特征从谐波角度推导自校准误差分离算法数学模型,提出利用全组合和EDA混合测量校准的误差分离方法;其次量化分析全组合分离的原始误差与EDA补偿后的全圆离散角位置偏差傅里叶级数各阶次分布,分析EDA补偿后误差的衰减率获得EDA最优补偿函数,并利用傅里叶逆变换法生成($0^\circ \sim 360^\circ$)全圆连续角度补偿函数;最后利用激光干涉仪对全圆连续角度标准进行小角度范围内的测角精度验证,同时与中国计量科学研究院的激光小角度基准进行比对验证。实验结果表明该方法利用全组合离线的高精度测量能力,使补偿后的EDA测角精度在全圆连续角度范围内逼近全组合方法,改善了自校准的校准能力及局限性,进一步优化了全圆连续角度标准装置。

关键词:全组合;自校准;傅里叶逆变换法;计量学;校准

中图分类号: TB922 TH71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

System error separation and compensation of the continuous full circle angle standard device

Li Gali^{1,2}, Xue Zi², Huang Yao², Zhu Weibin¹, Zou Wei²

(1. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: A continuous angle standard device for the full circle ($0^\circ \sim 360^\circ$) is developed at the National Institute of Metrology, China. The self-calibration method of equal division average (EDA) with four reading heads is utilized for hardware compensation. The angle measurement accuracy of the standard device after compensation is smaller than $0.1''$. To further improve the angle measurement accuracy of the standard device, the mathematical model of the self-calibration error separation algorithm is derived from the harmonic angle based on the error characteristics, and the error separation method based on cross-calibration and the EDA method is proposed. Secondly, the Fourier series distribution of the original error of full combination separation and the full circle discrete angular position deviation after EDA compensation is analyzed quantitatively. And the error attenuation rate after EDA compensation is analyzed to achieve the optimal EDA compensation function. The inverse Fourier transform method is used to generate the continuous full circle ($0^\circ \sim 360^\circ$) angle compensation function. Finally, the laser interferometer is utilized to verify the accuracy of the full circle continuous angle standard in the small angle range, which is compared with the laser small angle benchmark of National Institute of Metrology. Experimental results show that the proposed method takes advantage of the high-precision measurement capability of the cross-calibration off-line. The compensated EDA angle measurement accuracy is close to the cross-calibration method within the continuous angle range of the full circle. This method can improve the calibration capability and limitations of self-calibration. The continuous full circle angle standard device is further improved.

Keywords: cross-calibration; self-calibration; the inverse Fourier transformation method; metrology; calibration

收稿日期: 2020-11-02 Received Date: 2020-11-02

* 基金项目: 国家自然科学基金(51935004)项目资助

0 引言

角度是几何量计量的关键参量,广泛应用于光学工业、机械制造、航天航空及航海、科学研究、交通运输、工程测绘等领域。角度计量可提供统一、精准的角度参考,以确保角度测量结果的可靠性,主导这些领域的活动的质量,效率和安全性^[1-2]。我国现有平面角计量基准:多齿分度台面角度基准装置和激光小角度基准装置。面角度基准基于两组齿数有限的齿轮啮合而成的工作原理,导致多齿分度台无法连续旋转,只能进行整分度角度测量,无法测量细分误差;激光干涉仪小角度基准,也称为小角度发生器,利用激光干涉原理对细分角进行测量,其测量量程($\pm 5^\circ$)有限。这两个现有标准不能提供全圆范围内连续位置的参考角,无法满足角度编码器等高精度连续测角仪的校准要求。

针对上述问题,国内外许多计量机构和学者利用圆光栅高精度性能,以及多读数头均化作用对全圆连续角度的测角精度进行深入研究。德国联邦物理技术研究所(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)率先提出了自校准方法,研制了全组合测量和自校准测量混合式角度标准装置,实现了全范围任意角度精密测量,用于目前角度编码器、自准直仪等仪器校准^[3-4];日本国家计量研究院(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)研制了激光干涉测量和自校准测量混合式角度测量系统,实现了陀螺仪角速率测量误差量值可溯源的检测过程^[5];韩国标准与科学研究院和英国国家物理研究所^[6]也开发了全圆连续角度标准(比角仪)^[7]。

国内的许多学者也展开了多读数头的自校准技术研究。邹自强^[8]推荐使用双五头系统(不等分十头系统),对消差效果进行实践分析;Watanabe^[9]提出在等距分布5个读数头,消除5次及5倍阶次谐波之外的所有误差;黄龙等^[10]分析了多读数头消差原理并采用相位差 90° 的四读数头测角方式,实现亚角秒级测角目的;朱应时等^[11]采用十头平均和裂相差分,通过抑制长周期分度误差提高测角精度。艾晨光等^[12]通过双读数头信号的相位差检测出圆光栅偏心方向和偏心距,以获得由偏心引起的测角误差补偿项并对其修正,修正后的测量精度提高了近5倍;

虽然上述方案可以快速、实时的进行原位校准,但同时因自校准^[13]原理限制及读数头安装^[14-15]影响存在无法消除的系统误差且没有实现全圆连续角度的测角精度验证。全组合法在理想情况下是无误差角度校准方法^[16],是角度测量中精度最高的一种^[17],且可以同时得到被检器具和陪检器具的分度误差^[18]。全组合法需要借助外部辅助设备(如多面棱体和光电自准直仪)^[4,19]且

只能用于静态角度的离线补偿。

中国计量科学研究院自主研发的全圆连续角度标准装置采用相位差为 90° 的四读数头等分布,可以实现全圆连续角度实时误差分离与补偿^[20]。本文基于全组合与自校准的误差分离方法、新型圆光栅与激光干涉的角度测量技术,利用等分平均(equality dividing average, EDA)补偿后的误差衰减率获得EDA最优补偿函数,在全圆连续角度范围内实现整角和细分角、面角度和线角度的混合式角度测量与溯源一体化,填补相关计量溯源的国内空白。

1 角位置误差分离算法

1.1 自校准原理

EDA是基于谐波误差分离技术的经典方法,其原理是在圆光栅盘上等距布置多个读数头,各个读数头的均值可以消除部分谐波误差^[21]。单个读数头测角偏差可由各阶谐波合成的周期误差来表示:

$$\Delta\theta' = \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \omega_k \sin k\theta \right\} \quad (1)$$

式中: k 为各阶谐波阶次; ω_k 为各阶次谐波幅值。

n 个读数头的测角系统中,相邻两个读数头的相位差为 $360^\circ/n$,由等分平均原理及式(1)可知,圆光栅系统的测角偏差表示为:

$$\Delta\theta' = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{\infty} \omega_k \left\{ \sin k\theta + \sin k\left(\theta + \frac{2\pi}{n}\right) + \sin k\left(\theta + 2 \cdot \frac{2\pi}{n}\right) + \dots + \sin k\left[\theta + (n-1) \cdot \frac{2\pi}{n}\right] \right\} \quad (2)$$

由式(2)结合三角函数关系,根据各谐波阶次 k 的取值可将测角偏差分为以下两种情况:

$$\Delta\theta'_k = \begin{cases} \omega_k & (k = mn, m = 1, 2, 3, \dots) \\ 0 & (k \neq mn, m = 1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad (3)$$

由理论分析可知,等分平均法消除了测角系统中 $k \neq mn$ 阶谐波误差成分,但 $k = mn$ 的谐波误差成分未消除。

1.2 全组合法原理

全组合法是目前测量圆分度误差精度最高的一种方法^[22]。全组合法的测量原理可概括为:将陪测和待测的两个圆分度器具同轴安装,在 360° 全圆范围内对两分度器具进行易位互比测量,整个测量分 n 个系列,记录实验产生的 $n \times n$ 数据矩阵,其中 n 是每系列角位移次数,数据处理后可得到两个圆分度器具的分度误差。以 $n=6$ 为例,间隔角为 $360^\circ/n=60^\circ$,测量原理如图1所示(图1中1,2,⋯,6分别表示被测件A和B中的 $0^\circ, 60^\circ, \dots, 300^\circ$ 位置),被测件A和B同轴安装,第一系列,被测件A和B

都以 0°为起始位置,在全圆(0°~360°)范围内等间隔 60°进行 6 点互比测量;第二系列,被测件 B 以 0°为起始位置,被测件 A 相对于 B 转过 60°再进行 6 点互比测量,依次进行其它系列,直到第 6 个系列。

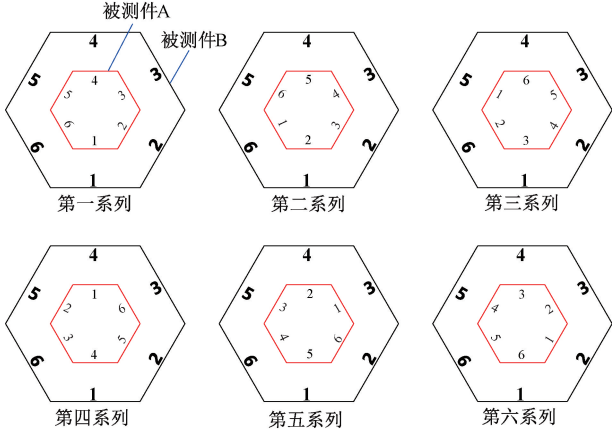
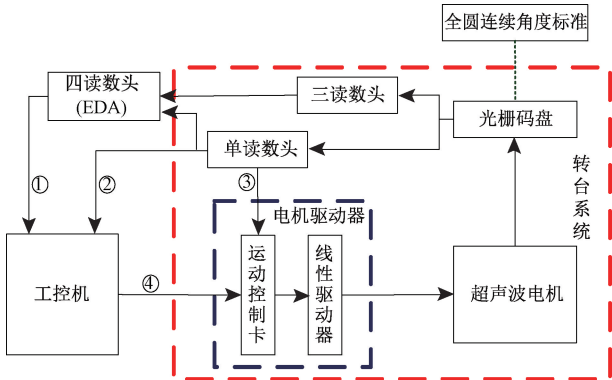


图 1 全组合法测量原理

Fig. 1 Cross-calibration measurement principle

2 校准实验

全圆连续角度标准装置原理如图 2 所示,当前位置反馈信号由单读数头提供,四读数头的均值进行实时校准。



注:①四读数头等分平均输出信号;②单读数头输出信号;
③位置反馈信号;④以太网控制信号。

图 2 全圆连续角度标准装置工作原理图

Fig. 2 Continuous full circle angle standard device schematic diagram

全圆连续角度标准装置采用 4 个等距布置的扫描读数头 ERP880 180000 角度编码器作为圆形刻度盘。这种角度编码器是根据干涉扫描原理而不是成像原理制造的,因此,插值误差(高阶误差)可以被限制在很低的水平,可以忽略高阶傅里叶分量的周期性偏差影响。其输出信号通过 EIB 741 细分盒进行 4 096 倍的电子细分,分辨率可以达到 0.001 7"。

2.1 实验方案设计

以单读数头为媒介,通过全组合法标定 EDA 未补偿的低阶误差成分。全圆连续角度标准装置安装在一个温控室内的隔振平台上,室内温度控制在 20℃±0.2℃,湿度 30%~75%,无显著气流扰动和振动。校准实验的系统框图如图 3 所示。

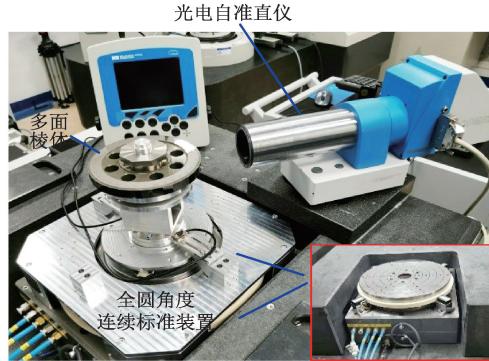


图 3 实验装置

Fig. 3 The experimental device

2.2 全组合法和 EDA 校准

校准所使用的计量标准器具如表 1 所示。

表 1 计量仪器技术指标

Table 1 The specification of metrologic instrument

仪器名称	型号	测量范围	最大允许误差
自准直仪	Elcomat-3000	±1 000"	±0.1"
多面棱体	36 面	0°~360°	2 级

如图 3 所示为实验装置图,右下角是全圆连续角度标准装置图。全组合法测量不确定度为 0.03"(k=2)。

2.3 EDA 补偿后误差结果分析

校准范围为 0°~360°,步距为 10°,全组合法和 EDA 校准结果如图 4 所示。两种方法校准单读数头定位角偏差均为±1.5"。

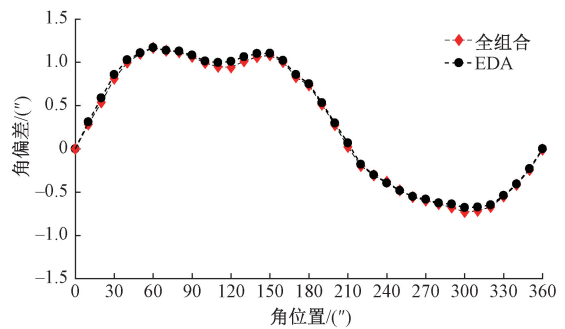


图 4 全组合法和 EDA 误差曲线

Fig. 4 Error curves of cross-calibration and EDA calibration

全组合法在理想情况下是无误差的角度校准方法,以全组合法分离出的误差作为该标准装置单读数头总的系统误差。全组合法和 EDA 法误差分离结果对比如图 5 所示,测角偏差谐波成分主要分布在低阶,其中 1、2、3 阶约占测角系统的总误差的 87%。图中明显看出 1 阶成分是导致测角误差的最主要因素,约占测角系统的总误差的 65%,其主要来源于安装^[23]过程中光栅盘偏心;2 阶成分约占测角系统的总误差的 10%左右,其来源于安装过程中光栅盘的偏斜^[24];3 阶成分约占测角系统的总误差的 12%,其来源于圆光栅测角系统运动过程中光栅盘的变形^[24];这些低阶误差都是以一定周期变化的可重复性误差,其大小主要取决于光栅盘安装精度及光栅盘变形。高次谐波对应的幅值较小,3 阶以上的误差约占测角系统的总误差的 13%,主要来源于光栅盘刻划误差和电子细分误差。其中 3 阶以上的误差每个阶次对应的误差成分比 1 阶误差小两个数量级,比 2、3 阶误差小 1 个数量级。

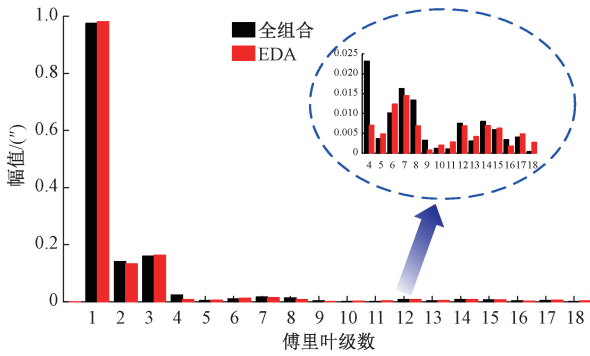


图 5 全组合法和 EDA 校准结果周期性成分对比
Fig. 5 Comparison of periodic components between cross-calibration and EDA calibration results

该标准装置的单读数头总的系统误差和 EDA 补偿后的角偏差曲线如图 6 所示,明显看出经过 EDA 补偿后全圆连续角度标准装置测角精度从 $\pm 1.5''$ 提高到 $\pm 0.1''$ 。

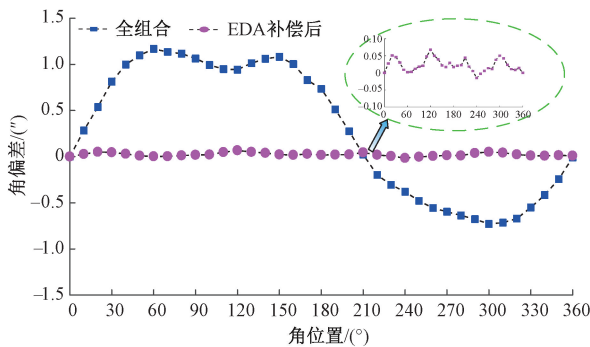


图 6 全组合法和 EDA 补偿后的误差曲线
Fig. 6 Error curves of cross-calibration and after EDA compensation

全组合得到的该标准装置单读数头总的系统误差和 EDA 补偿后的误差的傅里叶级数分布如图 7 所示。EDA 补偿后总误差的 1、2、3 阶成分明显消除,补偿后前 3 阶误差成分较总误差减小了两个数量级,但是还存留一些未补偿的误差成分。

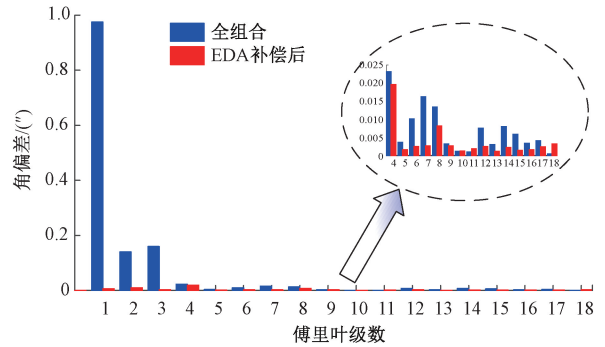


图 7 原始误差和 EDA 补偿后的角偏差周期性误差成分
Fig. 7 Periodic error components of angle deviation original error and after EDA compensation

3 角位置误差补偿

圆光栅测角系统的角位置误差补偿主要有插值、拟合逼近等方法。其中数值补偿算法包括分段线性、三次样条、多项式和傅里叶逆变换等误差补偿模型。傅里叶逆变换法是基于谐波分析,得出各次谐波成分,再对各次谐波的幅值和相位拟合的一种算法。由于圆光栅测角误差具有周期性的特征,所以本文采用谐波补偿法。

全组合法有 36 个采样点,通常情况下,由于频率混叠和时域截断的影响,通常认为 12 阶以上的频谱的精度不高而不予考虑。EDA 补偿后的误差通过傅里叶变换得到各次谐波的幅值和相位,对各次谐波的幅值和相位通过傅里叶逆变换表示为具有一定幅值和相位的单个周期函数。

为量化误差补偿效果,利用误差衰减率 ζ ,即前 i 阶谐波误差幅值相对总的谐波误差幅值的衰减程度,来描述误差拟合曲线对系统误差补偿的情况。如图 8 所示为前 $i(i=3,4,\dots,9)$ 谐波误差幅值对应的误差衰减率 ζ 。

表 2 所示为前 $i(i=3,4,\dots,9)$ 阶谐波误差幅值所占 EDA 补偿后误差的比例、幅值及误差衰减率 ζ 。

由图 8 和表 2 可知,前 1~9 阶谐波误差幅值已经逼近 EDA 补偿后的误差幅值,且前 1~9 阶之后误差衰减率趋于稳定。因此,取前 9 阶谐波误差作为误差补偿项。

前 $i(i=3,4,\dots,9)$ 阶谐波误差与 EDA 补偿后的误差曲线如图 9 所示。随着 i 阶次的增加,补偿曲线越来越接近 EDA 补偿后的误差曲线,当 $i=9$ 时,前 i 阶谐波误差变化趋势和 EDA 补偿后的误差变化趋势一致可以很

好地反映 EDA 的误差特征。

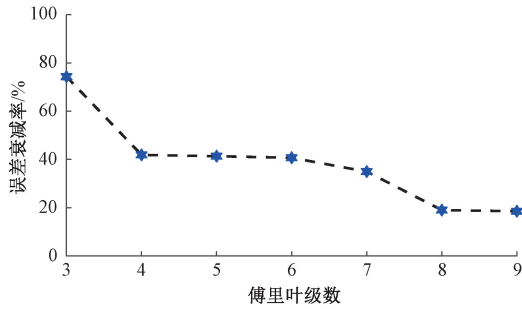


图 8 前 i 阶谐波误差幅值衰减率

Fig. 8 Attenuation rate of the first i -th-order harmonic error amplitude

表 2 前 i 阶谐波误差幅值所占系统误差的比例、幅值及衰减率

Table 2 The proportion, amplitude and decay rate of the sum of the i -th-order deviation function in the system error

傅里叶级数	误差比例/%	误差幅值/($''$)	误差衰减率/%
1~3 阶	25.68	0.017 44	74.32
1~4 阶	58.11	0.039 46	41.89
1~5 阶	58.66	0.039 84	41.34
1~6 阶	59.30	0.040 27	40.70
1~7 阶	65.04	0.044 17	34.96
1~8 阶	80.98	0.055 00	19.02
1~9 阶	81.46	0.055 32	18.54

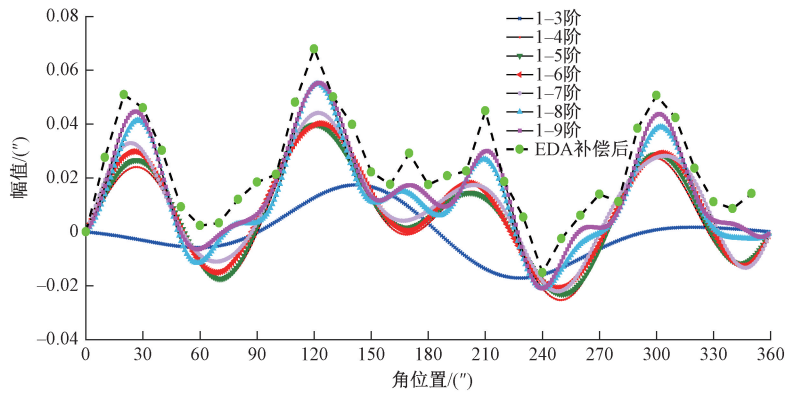


图 9 EDA 补偿后误差曲线及前 i 阶谐波误差曲线

Fig. 9 Error curves after EDA compensation and error curve of the sum of i -th-order

各个阶次的角偏差曲线可以单独绘制,每个傅里叶分量可以通过傅里叶逆变换表示为具有一定幅值和相位

的单个周期函数。图 10 所示为 i 阶 ($i = 1, 2, 3, \dots, 9$) 角偏差曲线。

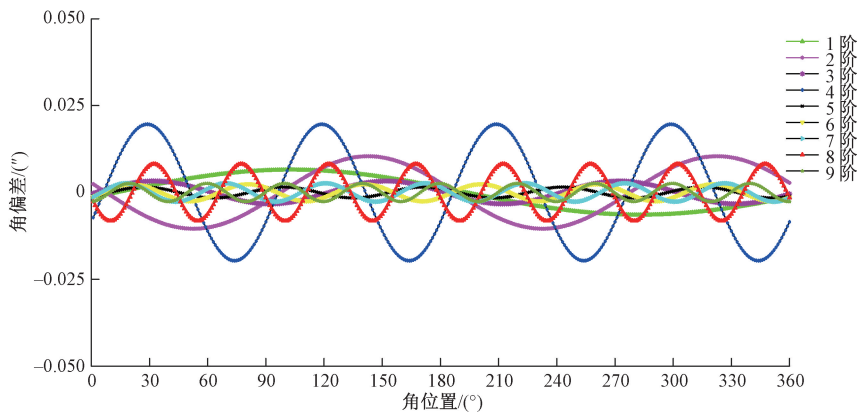


图 10 i 阶傅里叶单周期函数

Fig. 10 The i -th-order Fourier single period function

将单个周期函数组合成一个偏差函数,并建立一个新的偏差曲线为傅里叶逆变换曲线。EDA 补偿后全圆离散角位置误差曲线、前 9 阶拟合的误差曲线对比如图 11 所

示,拟合的误差曲线可以很好的表示全圆连续角度的周期性偏差。将前 9 阶拟合的误差作为误差补偿项,则补偿后的 EDA 法测角精度更加逼近全圆合法测角精度。

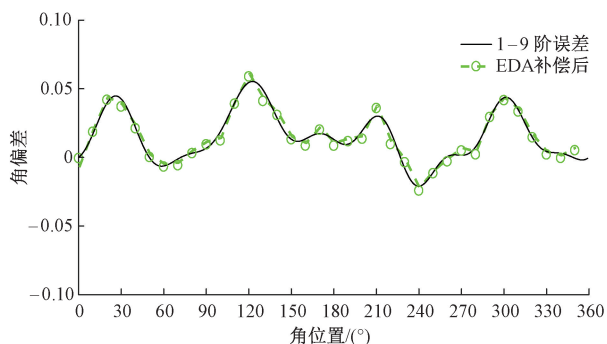


图 11 EDA 补偿后误差曲线、EDA 补偿后误差的 1~9 阶曲线对比图

Fig. 11 Comparison of error curves after EDA compensation and 1~9 order curve of error after EDA compensation

误差补偿函数和误差值是相反数。因此,补偿函数可以表示为:

$$c = -1 \times \sum_{i=1}^9 A_i \times \cos(p \times i + P_i) \quad (4)$$

其中, p 是测量角位置; A_i 是单个周期函数的幅值; P_i 是单个周期函数的初始相位。

4 验证实验

全圆连续角度标准采用 4 个等距布置的读数头,读数头位置不均匀会产生低阶分度误差,这些误差可以通过自校准法和全组合法分离,同时也是该装置系统误差的主要误差来源。除此之外,插值误差(高阶误差)主要是由电子细分时产生的,这些误差只能被抑制,不能完全消除。因此,文中采用激光干涉仪对该标准装置的小角度测角偏差进行实验分析研究。最后通过与国家小角度基准装置进行比对验证。

4.1 细分误差实验研究

实验装置如图 12 所示,采用雷尼绍公司的激光干涉仪(XL-80),其分辨率为 0.01"。

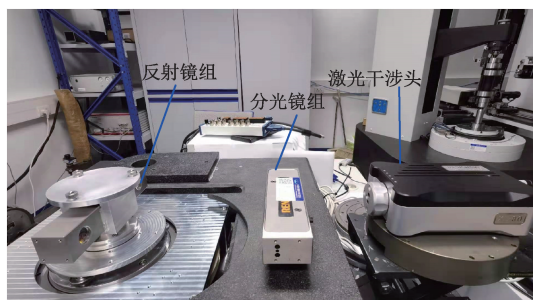


图 12 实验装置

Fig. 12 The experimental device

校准范围为 $\pm 5^\circ$,步距为 0.1°,激光干涉仪的校准结果如图 13 所示。实验结果表明, $\pm 5^\circ$ 范围内,全圆连续角度标准装置的测角偏差在 $\pm 0.05''$ 内。

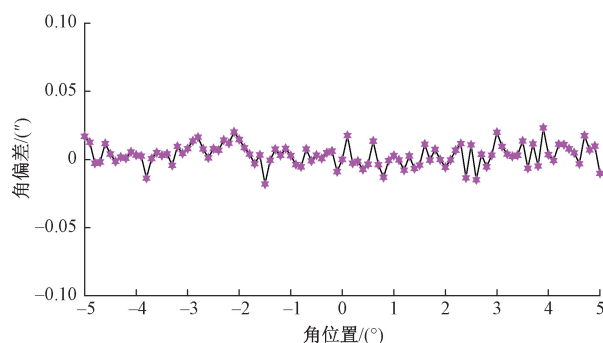


图 13 $\pm 5^\circ$ 范围内 EDA 补偿后与激光干涉测角之间的角偏差

Fig. 13 The angle deviation between EDA compensation and laser interferometry in $\pm 5^\circ$ range

$\pm 5^\circ$ 内的测角偏差傅里叶级数分布如图 14 所示。实验结果表明,EDA 法补偿后中高阶误差成分在总的系统误差中所占比例极小。

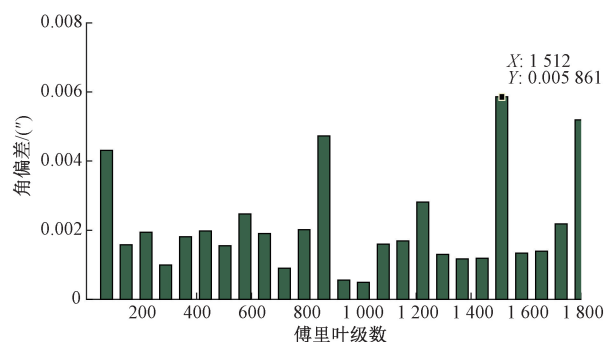


图 14 $\pm 1 000''$ 范围内 EDA 补偿后与激光干涉测角之间的角偏差的周期性误差成分

Fig. 14 The periodic error component of angle deviation between EDA compensation and laser interferometry in $\pm 1 000''$ range

校准范围为 $\pm 1 000''$,步距为 10",校准结果如图 15 所示,标准装置的测角偏差在 $\pm 0.05''$ 内。

$\pm 1 000''$ 内的测角偏差傅里级数分布如图 16 所示。实验结果表明,EDA 法补偿后高阶误差成分对总的系统误差影响很小。

上述实验结果表明,小角度范围内全圆连续角度标准装置测角误差中的中、高阶成分很小,插值误差在总的系统误差中所占比例很小,较低阶的分度误差成分,插值误差对系统误差的影响很小。

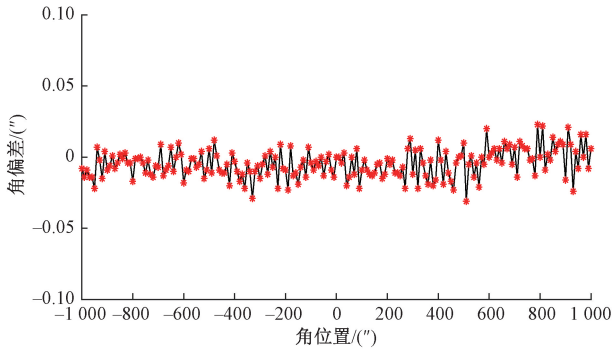


图 15 ±1 000"范围内 EDA 补偿后与激光干涉测角之间的角偏差

Fig. 15 The angle deviation between EDA compensation and laser interferometry in ±5° range

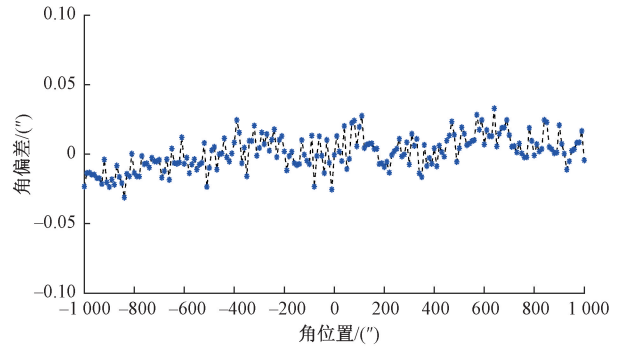


图 17 全圆连续角度标准与激光小角度基准之间的偏差

Fig. 17 The deviation between full circle continuous angle standard and the laser interferometer angle standard

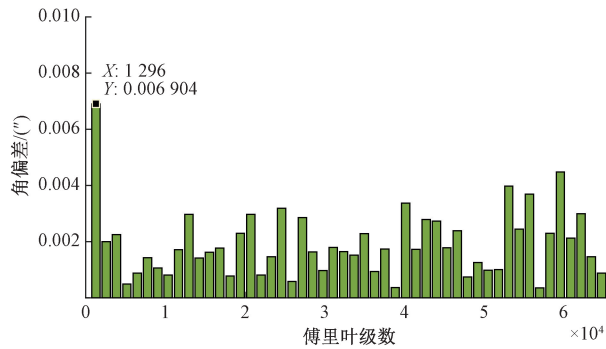


图 16 ±1 000"范围内 EDA 补偿后与激光干涉测角之间的角偏差的周期性误差成分

Fig. 16 The periodic error component of angle deviation between EDA compensation and laser interferometry in ±1 000" range

4.2 激光小角度基准比对

全圆连续角度角度的测量不确定度估计为 $U_1 = 0.05'' (k=2)$, 很难用另一个更高精度的标准对其进行校准。因此, 要证明全圆连续角度标准的可靠性, 必须与现有 NIM 角度基准进行比对实验, 用测角一致性 (E) 来确定比对结果。本文采用光电自准直仪作为媒介与中国计量科学研究所的激光小角度基准 (测量不确定度 $U_2 = 0.05'' (k=2)$) 完成比对验证实验。

在小角度范围内进行高密度采样, 测量范围为 ±1 000", 步距为 10", 全圆连续角度标准装置和激光小角度基准的测量比对结果如图 17 所示。

由图 17 可知, 两个角度标准的测角偏差最大值为 0.033", 比对结果可以表示为:

$$|E| = \left| \frac{D_{\max}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \right| = \frac{0.033''}{0.071''} \approx 0.46 < 1 \quad (5)$$

因此, 可以证明全圆连续角度标准在 ±1 000" 位置测量不确定度估计是合理的。

5 结 论

为进一步提高全圆连续角度标准装置测角精度 (当前该标准装置测角精度为 0.1"), 本文提出利用全组合 (外标) 和 EDA (内标) 混合测量校准的误差分离方法。实验结果表明, 该方法提高了 EDA 法自校准测角精度, 使补偿后的 EDA 测角精度在全圆连续角度范围内逼近全组合法 (不确定度为 0.03" ($k=2$)), 与中国计量科学研究所的激光小角度基准比对实验验证, 结果表明该标准装置的测量不确定度满足 0.05" 的要求。

参考文献

- [1] 张琢, 李鹏生, 强锡富, 等. 测角技术国内外发展概况 [J]. 宇航计测技术, 1994(4): 4-11+30.
ZHANG ZH, LI P SH, QIANG X F, et al. Development of angle measurement technology at home and abroad [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 1994(4): 4-11+30.
- [2] CUI J, TAN J, WEN X, et al. Comparison between angle interferometer and angle encoder during calibration of autocollimator [J]. Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, 2015, 9446: 944624.
- [3] PROBST R, WITTEKOPF R, KRAUSE M, et al. The new PTB angle comparator [J]. Measurement Science and Technology, 1998, 9(7): 1059-1066.
- [4] GECKELER R D, LINK A, KRAUSE M, et al. Capabilities and limitations of the self-calibration of angle

- encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(5):055003.
- [5] WATANABE T, KON M, NABESHIMA N, et al. An angle encoder for super-high resolution and super-high accuracy using SelfA [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(6):065002.
- [6] PALMER E W. Goniometer with continuously rotating gratings for use as an angle standard [J]. *Elsevier*, 1988, 10(3):147-152.
- [7] JONG A K, JAE W K, CHU S K, et al. Precision angle comparator using self-calibration of scale errors based on the equal-division-averaged method [J]. *Macro Scale Proceedings*, 2011, 24(9):389-397.
- [8] 邹自强. 论圆光栅多头读数系统[J]. *光学机械*, 1983(2): 39-48.
ZOU Z Q. On circular grating multi head reading system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1983(2): 39-48.
- [9] WATANABE T. Compact self-calibratable rotary encoder[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2012, 3(9): 2100-2102.
- [10] 黄龙, 潘年, 马文礼, 等. 拼接式编码器测角误差分析及试验[J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 464-470.
HUANG L, PAN N, MA W L, et al. Error analysis and experimentation of scale tape encoder [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 464-470.
- [11] 朱应时, 杨进堂. 圆光栅的高精度高质量莫尔条纹信号的研究[J]. *计量学报*, 1995(4): 280-285+296.
ZHU Y SH, YANG J T. Research on high precision and high quality moire fringe signal of circular grating [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995(4): 280-285+296.
- [12] 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, ZH M, S H X, et al. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. *Optics and Precision Engineering* 2012, 20(11): 2479-2484.
- [13] TSUKASA W, TADASHI M, MAKOTO K, et al. Automatic high-precision calibration system for angle encoder[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2001, 67(7): 1091-1095.
- [14] 艾华, 戴岑. 圆光栅衍射光干涉偏心测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(S1): 128-132.
- AI H, DAI C. Eccentric measuring approach of circular grating by diffracted light interference[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(S1): 128-132.
- [15] 冯超鹏, 祝连庆, 潘志康, 等. 一种新的圆光栅偏心参数自标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(11): 2459-2464.
FENG CH P, ZHU L Q, PAN ZH K, et al. New self-calibration method of circular grating eccentric parameters [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(11): 2459-2464.
- [16] 王蕾, 张忠武, 王震, 等. 圆分度角测量检定中的分段内插测量法[J]. *计量学报*, 2020, 41(1): 6-10.
WANG L, ZHANG ZH W, WANG ZH, et al. Piecewise interpolation measurement in circular indexing angle measurement verification [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(1): 6-10.
- [17] 周进, 刘彤, 吴小丽. 排列互比法的分度误差测量原理与实验研究[J]. *科技视界*, 2018(23): 95-96+26.
ZHOU J, LIU T, WU X L. Principle and experimental study of indexing error measurement of permutation intercomparison method [J]. *Science & Technology Vision*, 2018(23): 95-96+26.
- [18] AI H, CAO Y. Calibration of rotary table by whole combination measuring method [C]. *9th International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation (ISPEMI)*, 2015, 94464E.
- [19] 裘祖荣, 陈清清, 李敬杰. 正多面棱体和多齿分度台角分度误差的互检[J]. *光电工程*, 2009, 36(10): 90-93+99.
XI Z R, CHEN Q Q, LI J J. Mutual check of angular deviation for regular polygonal prism and precise angle dividing table [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(10): 90-93+99.
- [20] HUANG Y, XUE Z, HANG M, et al. The NIM continuous full circle angle standard [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(7), DOI:10.1088/1361-6501/aac6a6.
- [21] 乔丹, 薛梓, 黄垚, 等. 等分多读数头位置偏差对测角误差的影响研究[J]. *计量学报*, 2017, 38(6): 676-680.
QIAO D, XUE Z, HUANG Y, et al. Study on influence of position deviation of multi-reading heads of equal average

on angular measurement [J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(6): 676-680.

- [22] 陆德基, 谢长文, 范天泉, 等. 排列互比法用于超精测角时数据处理方法的研究 [J]. 计量技术, 1997(9): 27-29.

LU D J, XIE CH W, FAN T Q, et al. Research on data processing method of super precision angle measurement by permutation cross ratio method [J]. Measurement Technique, 1997(9): 27-29.

- [23] 张文颖, 朱浩然. 圆光栅测角系统误差分析与修正 [J]. 应用光学, 2019, 40(3): 399-403.

ZHANG W Y, ZHU H R. Error analysis and correction of circular grating angle measurement system [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3): 399-403.

- [24] 周彬彬. 高精度圆光栅测角系统误差补偿技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

ZHOU B B. Research on error compensation technology for high accuracy circle gratings angle-measuring system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

作者简介



李尢丽, 2018 年于兰州理工大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为角度计量。

E-mail: lgl1938475456@163.com

Li Gali received her B. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2018. She is currently pursuing her master degree at China Jiliang University. Her main research interest is angular metrology.



黄焱 (通信作者), 2004 年于北京工业大学获得学士学位, 2007 年于北京工业大学获得硕士学位, 现为中国计量科学研究院高级工程师, 主要研究方向为角度计量。

E-mail: huangyao@nim.ac.cn

Huang Yao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2004, received his M. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2007, now, he is a senior engineer at National Institute of Metrology, China. His main research interest is angular metrology.