

文章编号 1004-924X(2019)10-2207-08

小型精密谐波转台角度定位精度标定与补偿

吴 斌,王 航,康杰虎*

(天津大学 精密测试技术与仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘要:为了解决应用于关节型三维激光传感器的小型谐波转台角度定位精度标定的问题,提出了一种基于 Renishaw 双频激光干涉仪的单自由度小型谐波转台旋转角度测量和补偿方法。首先依据干涉仪角度测量原理和光路调节方法,建立了测量光路系统,分析了回转台装配误差对角度测量精度的影响并进行了有效调整,而后提出了小型谐波转台 360°范围角度标定的实验方案,最后通过曲线拟合的方法分析了转台转角误差的测量数据,总结转台转角误差随位置改变的变化规律,并将误差补偿函数嵌入控制器中,对转台的每次运动进行实时有效补偿。实验结果表明:使用该标定补偿方法能够将小型谐波转台的定位精度提高 85%以上,补偿后的定位误差小于 10"。采用该方法能够对小型谐波转台进行小间隔 360°标定,标定后转台满足激光传感器空间精确定位的要求。

关键词:双频激光干涉仪;360°标定;小型谐波转台

中图分类号: TB922 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192710.2207

Calibration and compensation of small precision harmonic turntable

WU Bin, WANG Hang, KANG Jie-hu*

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: zhongdian313@163.com

Abstract: To solve the problem of angel positioning accuracy calibration of a small harmonic turntable used in a joint-type laser sensor, a method for measuring and compensating the rotation angle of a single-degree-of-freedom small harmonic turntable using a Renishaw dual-frequency laser interferometer was proposed. First, based on the interferometer angle measurement principle and optical path adjustment method, a measurement optical path system was established. Next, the influence of the assembly error of the rotary table on angle measurement accuracy was analyzed, and the rotary table was adjusted effectively. Then, a 360° range angle calibration experimental scheme for a small harmonic turntable was proposed. Finally, the curve fitting method was used to analyze the measurement data of the turning angle error, and the variation law of the turning angle error with the position of the turntable was summarized. The error compensation function was embedded in the controller to compensate the real motion of the turntable in real time. Experimental results show that the positioning error improved the positioning accuracy of the small harmonic turntable by more than 85%, and the positioning error after compensation is less than 10". This method can be used to calibrate a small harmonic turntable with a small interval of 360°. The rear turntable meets the

收稿日期:2019-04-03;修订日期:2019-04-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61771336);天津市自然科学基金资助项目(No. 18JCZD38600)

requirements of the laser sensor for accurately locating targets in space.

Key words: dual frequency laser interferometer; 360° calibration; small harmonic turntable

1 引言

应用于三维激光传感器的精密转台需要具有体积小、重量轻、空间精确定位等特点。本文研究的小型谐波转台台面转动直径为 30 mm, 转台全重 500 g, 且具备一定的负载能力, 需实现负载激光发射器的激光束在一定的空间范围内精确定位, 所以对该转台的定位精度的标定及补偿显得尤为重要。

转台转角的测量方式需要根据应用的场合、转台结构、特征来设计具体的测量实验方案。第一种方法是机械式测角, 以多齿分度盘为代表, 采用差动的技术可获得很高分辨率^[1], 但受限于齿数不能无限增加。第二种方法是电磁式测角^[2], 主要有磁栅测角法^[3]和感应同步器法^[4]。其中磁栅测角可以获得对转台进行整周测量, 但环境要求严格、电路复杂, 精度受到限制; 感应同步器测角结构简单, 但应用于转台整周测量时分辨率不高。第三种方法是利用光学方法测角^[5-10], 采用激光跟踪仪对转台转角进行间接测量是近年来常用的转台标定方法, 该方法需要建立空间坐标与转角之间关系的数学模型, 角度测量精度随转台半径的减小而降低, 适用于转动半径较大的大型转台, 对于小型谐波转台, 标定精度会大大降低。

针对上述问题, 本文提出一种基于激光干涉仪配合干涉仪回转台, 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内小间隔旋转角度的测量方法。首先, 依据双频激光干涉仪角度测量原理及测量光路搭建原则, 建立测量光路系统, 并由此分析安装误差对测量精度的影响及调整方法; 然后依据谐波转台传动误差规律建立误差预测模型并选取测量角度间隔; 而后在验证了误差的周期性后, 得到基于预测模型的补偿函数^[11]; 最后将补偿函数写入补偿软件, 通过嵌入控制器补偿系统实现对谐波转台的实时补偿, 最终使得转台的定位精度满足三维激光传感器空间精确定位的要求。

2 标定系统组成及调整

2.1 标定系统组成

如图 1 所示, 整个测量系统由三脚架、双频激

光干涉仪、分光棱镜、单自由度谐波转台、连接装置、回转台、主机 等部件组成。光路系统依次为平放在三脚架上的激光干涉仪、分光棱镜、干涉仪回转台。激光干涉仪发出的激光经过分光棱镜后, 两束激光经过回转轴上的角度反射棱镜反射后返回到干涉仪的回光孔, 所以三者的中心需对齐, 使得回光孔能接收到一定强度的反射光。干涉仪回转台配合连接件搭载在谐波转台的主轴上。连接件的设计、加工需要考虑到谐波转台的最大扭矩和最大负载, 平面度需要满足干涉仪回转台与转台旋转面平行的要求。整个系统搭建在具有较高平面度的光学平台上, 由此可保证激光光束与分光棱镜、反射镜垂直。干涉仪回转台与谐波转台装配时要保证一定的同轴度。

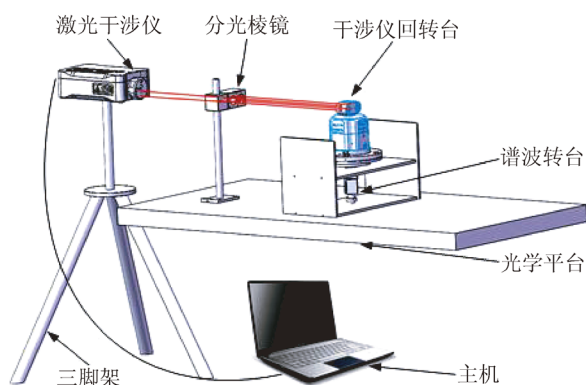


图 1 测量系统模型

Fig. 1 Model of measuring system

2.2 标定系统调整

光路中一些光学器件在安装过程中会因位置关系不精确带来测量误差^[12], 主要是干涉仪回转台主轴(下文简称回转轴)与待测转台主轴的同轴度。需要把同轴度误差通过精确装配降低到传感器系统误差允许范围内。

2.2.1 标定系统的偏心量调整

如图 2 所示, 当两轴平行时, 存在偏差量 E 使得转台旋转时回转轴相对于主轴有相对位移, 该部分误差对角度测量误差无影响, 只需避免测量时干涉仪回光丢失造成测量数据丢失, 匀速转动转台记录千分表最大读数, 重复多次, 最终确保 $E < 1 \text{ mm}$ 即可满足测量要求^[13]。

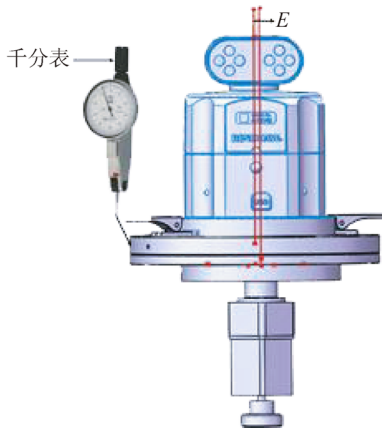


图 2 回转轴与转台主轴存在偏差 E

Fig. 2 Deviation E between axis of rotary and turntable

2.2.2 标定系统的安装角度调整

如图 3 所示,在安装过程中若回转轴与转台主轴之间存在一偏斜角 e ,则在转台转动 360° 过程中采集的数据将会产生正弦分量的测量误差。设转台转角为 θ ,误差大小取决于 e 的大小,并与 $\sin 2\theta$ 成正比,若要使得产生的误差小于 $1''$,即对最终定位误差补偿的影响可忽略不计,需要 $e < 0.025^\circ$ 。考虑到 e 的实际测量与校准较为困难,所以通过使用外部固定的杠杆千分表与固定干涉仪回转台的连接盘上表面接触并预留适当压缩量,测量连接盘上表面的总指示偏差 TIR,间接校准两轴平行度,干涉仪回转台的连接盘半径 $R=50\text{ mm}$,则 $TIR = 2R \tan e$,所以要求 $TIR < 0.04\text{ mm}$,匀速转动转台记录千分表最大读数,更换位置重复多次,记录最大偏差量为 TIR,最终通过反复调整连接盘的上下拧丝松紧使得 TIR 满足要求。

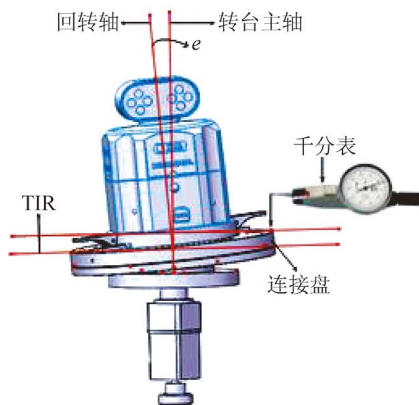


图 3 回转轴与转台主轴存在偏差 e

Fig. 3 Deviation e between axis of rotary and turntable

3 补偿方案设计

3.1 误差预测模型

谐波转台传动是运用具有柔性变形和弹性变形的齿轮套发生变形来实现机械运动传递的。其通常由三大基本构件组成,如图 4 所示。工作时,通过波发生器周期性转动与柔轮接触使得柔轮周期性变形,产生弹性机械波。在传动过程中,波发生器转一周,柔轮上某点变形的循环次数称为波数,以 n 表示。刚轮与波发生器角速度之比称为传动比。

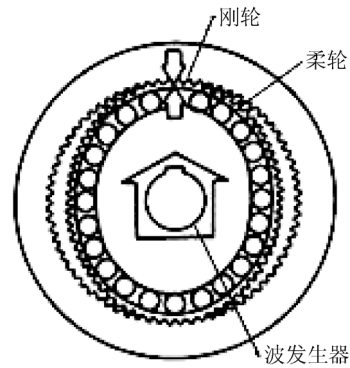


图 4 谐波转台传动原理

Fig. 4 Principle of harmonic turntable transmission

本文小型谐波转台的 $n=2$,给定重复定位精度指标为 $5''$,传动比为 $1:50$,即波发生器旋转一周转台转动 7.2° 。根据谐波齿轮传动理论,波发生器每转一圈误差的周期就重复一次,故理论上转台定位误差的重复周期为 $T=7.2^\circ$ 。

谐波转台的定位误差存在周期性规律,但是在一个周期内的误差曲线难以预测,考虑到其可能是一个表达式复杂的复合函数,而正弦函数和余弦函数作为一对正交的基函数,可用他们构成的无穷级数来表示任何周期函数。含有三角函数的傅里叶函数模型为:

$$f(x) = C + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \sin \left\{ \frac{2\pi k}{T} x \right\} + b_k \cos \left\{ \frac{2\pi k}{T} x \right\} \right], \quad (1)$$

式中: C 是常数项, k 为谐波次数, a_k, b_k 为 k 次谐波系数。

本文以式(1)作为离散点拟合曲线的基础模型, x 代表转台理想转动位置, $f(x)$ 代表各离散点测得误差的拟合值, $T=7.2^\circ$ 代表定位误差函数的周期, 各项中的 a_k, b_k 作为待拟合 k 次谐波系数, 是影响拟合程度的重要指标, 需要利用非线性最小二乘原理确定。

确定 k 的最高次数需要综合考虑谐波传动原理、拟合的准确性及拟合的计算量。谐波减速器齿轮传动误差的高频误差主要由 $Z_B \omega_i$ 及 $i_A \omega_i$ 二种频率成分构成, 其中 $\omega_i = \frac{2\pi}{T}$, Z_B 为刚轮齿数, $i_A=50$ 代表谐波齿轮的传动比, 因此选用 $k=50$ 作为预测模型频率最高项的次数。

最终转台角度定位误差的预测模型表达式为:

$$f(x) = C + \sum_{k=1}^{50} \left[a_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T}x\right) + b_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T}x\right) \right]. \quad (2)$$

3.2 标定角度间隔选取

在谐波转台转动一周的过程中, 为了验证角度定位误差的周期性规律, 选取 0.1° 作为角度标定的间隔, 这样可测得 50 个不同的误差周期, 考虑到连续转动 3 600 个位置需要的时间较长, 谐波转台内部由于机械发热等原因将影响谐波转台实际定位精度, 因此将测量范围缩短至 72° , 即 10 个周期。

验证谐波转台角度定位误差具备周期性后, 需要判断其不同周期是否具有重复性。为此, 需要把谐波转台在不同周期的重复精度与转台的重复定位精度进行对比, 验证不同周期内的重复性是否在允许的标定误差内。设不同周期内相差 $7.2N$ ($N=1, 2, 3, \dots, 49$) 的角度测量点分别为 P_i ($i=0, 1, 2, \dots, 49$), 该点角度测量值为 α_i ($i=0, 1, 2, \dots, 49$), 设第一个测量角的真值为 α_0 , 则 P_i 上的角度测量误差分别为 $\epsilon_i = \alpha_i - (\alpha_0 + 7.2i)$, $i=0, 1, 2, \dots, 49$, 谐波转台任一位置的单向重复定位精度可表示为:

$$R_i \uparrow = kS_i, \quad (3)$$

式中: $R_i \uparrow$ 表示从正向趋近该位置的重复定位精度, k 为扩展因子, S_i 表示 n 次趋近该位置所获得的位置偏差标准不确定度, 表达式为:

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\epsilon_{ij} \uparrow - \bar{\epsilon}_i \uparrow)^2}, \quad (4)$$

式中: $\epsilon_{ij} \uparrow$ 表示第 j 次趋近 P_i 的角度测量误差, $\bar{\epsilon}_i \uparrow$ 表示 P_i 点 n 次角度测量误差的算术平均值。式(3)可用于评价 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围任一测量点的重复定位精度, 同样可用于评价不同周期误差的重复性能否达到要求。在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 选取 3 个测量区间, 每个区间 10 个不同周期相差 $7.2N$ 的测量点, 每个区间测量点测量 3 次, 得到 90 个测量误差数据 ϵ_i , 用于评价不同周期误差的重复性水平。

4 定位误差补偿

若谐波转台在不同周期内具有高度重复性, 谐波转台 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的标定可转化为一个周期上定位误差的标定, 文中对 $0.1^\circ \sim 7.2^\circ$ 位置上的 72 个实际转角位置进行误差测量, 共测量 3 组数据, 取平均值后利用 3.1 节的误差预测模型进行拟合, 得到谐波转台一个周期上的误差函数, 进而求得谐波转台 $0^\circ \sim 360^\circ$ 上的角度定位误差函数。

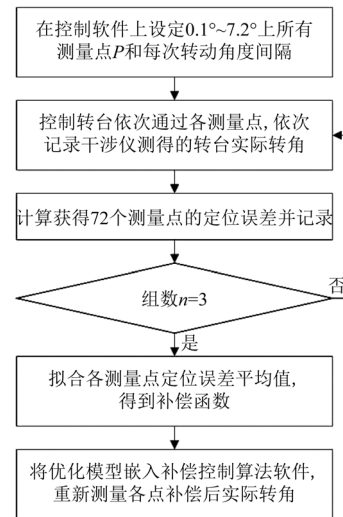


图 5 角度定位误差补偿流程图

Fig. 5 Flowchart of angle positioning error compensation

补偿的过程如图 5 所示, 主要分为 7 个步骤: (1) 将谐波转台复位至绝对零点位置, 在控制软件中设定测量范围中的各测量点角度位置 P 、角度间隔 φ ; (2) 根据设定好的转角测量点和角度间隔, 控制谐波转台依次转动角度 φ , 记录干涉仪软

件计算得到的转台实际转角;(3)计算每个位置转角实际误差并记录数据,共 3 组;(4)应用误差预测模型以及非线性最小二乘原理拟合所有位置定位误差(3 组数据平均值);(5)通过忽略与误差曲线相关性较小的方法优化拟合后的误差函数;(6)将优化模型嵌入转台补偿控制算法软件中,进而通过向电机发送补偿脉冲指令来控制谐波转台转动补偿后的理想角度值;(7)应用补偿控制算法控制谐波转台重复(1)~(3)步骤,得到补偿后谐波的转台定位误差,判断是否需要二次补偿。

由于干涉仪测得的参数为转台转动至每个角度间隔的实际转角 α_i ,转动理想值为 θ_i ,定位误差 $\epsilon_i = \alpha_i - \theta_i$,结合上文提到的误差模型可知,补偿后控制转台转动的角度为:

$$\alpha' = \alpha + f(x), \quad (5)$$

式中 α' 为补偿后的转台理论转角。

5 实 验

依据 2.1 节所述光路系统,搭建基于双频激光干涉仪角度测量装置的转台标定实验系统,如图 6 所示,其中干涉仪回转台装置与主机通过蓝牙连接。

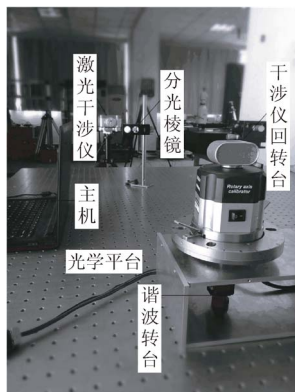


图 6 实验平台实物图

Fig. 6 Schematic diagram of experiment platform

首先依据 3.2 节所述在 $0^\circ \sim 72^\circ$ 范围内确定谐波转台转角误差的周期规律,得到的角度测量误差如图 7 所示,由图 7 可以看出,在 $0^\circ \sim 72^\circ$ 的测量范围内,误差的变化呈现一定规律且在每个周期内误差大致为正弦变化,不同周期内的波峰

和波谷大致在同一高度上,验证了谐波转台的定位误差周期为 7.2° 。

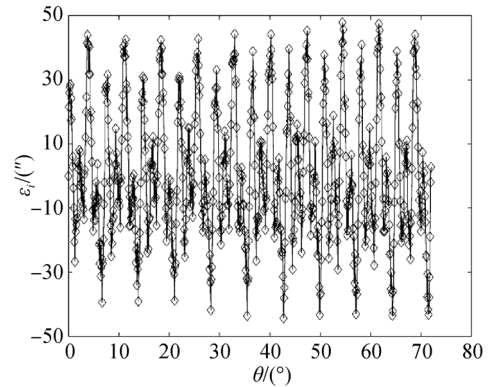


图 7 角度测量误差($0^\circ \sim 72^\circ$)

Fig. 7 Angle measurement error ($0^\circ \sim 72^\circ$)

确定其周期 $T = 7.2^\circ$ 后,需要得到谐波转台在不同周期的转角误差重复程度,在转台的 $0^\circ \sim 7.2^\circ$ 的范围内连续测量 3 次,获得的转台角度误差如图 8 所示,72 个点中最大的位置偏差标准不确定度及重复定位精度数据见表 1。而后在转台一周的前后分别选取 $7.2N, 144 + 7.2N, 250 + 7.2N (N = 1, 2, \dots, 10)$ 3 个区间,得到的角度误差如图 9 所示,每个区间 3 组测量数据中最大的标准偏差不确定度及重复性同见表 1。将图 8 中得到的标准偏差作为验证图 9 中转台不同周期重复程度的依据,相比于厂家给定的转台重复定位精度指标,以此方法可以减小测量误差对结果的影响。

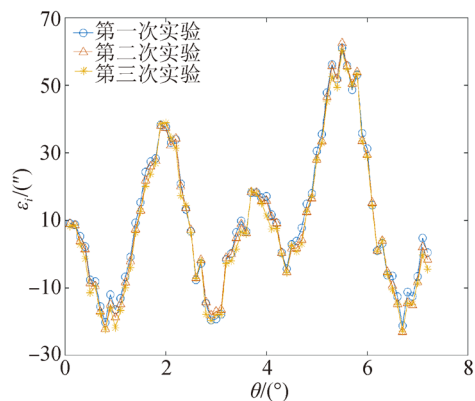


图 8 角度测量误差($0^\circ \sim 7.2^\circ$)

Fig. 8 Angle measurement error ($0^\circ \sim 7.2^\circ$)

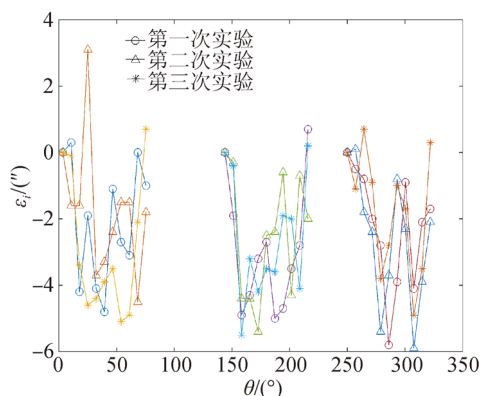


图 9 角度测量误差(不同周期)

Fig. 9 Angle measurement error (different cycles)

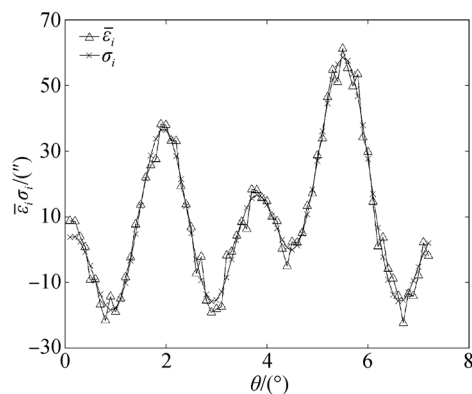


图 10 角度误差离散傅里叶拟合曲线

Fig. 10 Discrete Fourier fitting curve of angle error

表 1 同一周期与不同周期标准偏差比较

Tab. 1 Standard deviation comparison of the same cycle and different cycles

测量范围(间隔)	$S_{i,\max}/(″)$	$\overline{S}_i/(″)$	$R_i(k=3)/(″)$
$0^\circ \sim 7.2^\circ (0.1^\circ)$	1.98	—	5.94
$0^\circ \sim 72^\circ (7.2^\circ)$	1.80	1.36	5.40
$144^\circ \sim 216^\circ (7.2^\circ)$	1.61	1.26	4.83
$250^\circ \sim 322^\circ (7.2^\circ)$	1.81	1.47	5.43

从图 8,图 9 和表 1 可以看出:谐波转台的角度误差具有较高的重复定位精度;不同周期内相差 $7.2N$ 的 10 个点的最大位置偏差标准不确定度均小于前者,同样具有较高的重复性,说明相差 $7.2N$ 各位置的转角误差可以用其中任一点的角度误差表示,即此谐波转台的角度误差只需要在一个周期(7.2°)内拟合即可用于整周的补偿。

针对图 8 所示的 3 组实验测得的散点误差,使用式(2)的预测模型对 3 组数据平均值 $\bar{\epsilon}_i$ 进行非线性最小二乘拟合,得到谐波转台在 $0^\circ \sim 7.2^\circ$ 区间误差随角度变化的连续函数,进而间接得到整周的误差函数曲线,每个位置的角度补偿值 $\sigma_i = f(x_i)$,拟合的误差曲线如图 10 所示,而后将图 9 得到的拟合函数带入到式(5),补偿后的转台理论转角为:

$$\alpha'_i = \alpha_i + \sigma_i. \quad (6)$$

利用式(6)的补偿函数嵌入到转台的控制算法后,重新测量谐波转台在该范围内各位置的角度误差,设补偿后各散点角度测量误差为 ϵ'_i ,经过补偿后的角度测量误差如图 11 所示,谐波转台角度误差补偿前后的结果如表 2 所示。

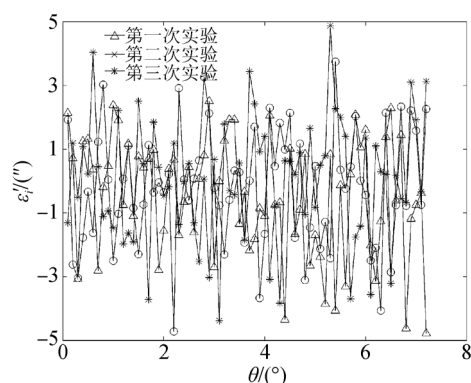
图 11 补偿后转角测量误差($0^\circ \sim 7.2^\circ$)Fig. 11 Angle measurement error after compensation ($0^\circ \sim 7.2^\circ$)

表 2 补偿前后误差比较

Tab. 2 Errors comparison before and after compensation

补偿前后	补偿前	实际补偿后
最大偏差正值/(″)	61.3	4.9
最大偏差负值/(″)	-22.8	-4.7
定位误差/(″)	84.1	9.6

由图 11 和表 2 可以看出:补偿后的 3 组角度误差测量数据中,最大正负偏差值均相对于图 7

(补偿前)有大幅度减小,经过对谐波转台各位置转角的补偿后,实际转角的定位误差被控制在 $10''$ 以内,无需二次补偿,充分验证文中所述针对小型谐波转台标定方法的有效性。

6 结 论

本文提出的基于双频激光干涉仪对小型谐波转台转角定位误差测量与补偿的方法可快速、方便、准确的对转台进行连续 360° 标定,具有安装简便,实施灵活等优点。标定主要为角度误差测量和补偿两部分,通过对测量系统误差的分析优化了测量光路系统,针对需要验证的不同周期是否具有重复性提出了误差预测模型及测量角度间隔的选取方法,利用该模型及非线性最小二乘原

理拟合了转台一个周期内的角度测量误差,将模型嵌入谐波转台控制程序,通过实验验证了转角误差补偿的有效性,实现了对高精度谐波转台整周的标定,并得出以下结论:

使用杠杆千分表可以测量并有效降低因回转轴与转台不平行带来的测量误差,使得指示偏差 $TIR < 0.04 \text{ mm}$,对转角实际值测量的影响忽略不计。把定位精度细分到 0.1° 时,该种小型谐波转台在 $\theta + 7.2N (0 < \theta \leq 7.2, N = 1, 2, \dots, 50)$ 上的重复性与测量计算得到的转台任一点重复性非常接近,因此可以由一个周期内的误差曲线得到整周的误差拟合函数。补偿后转台定位误差由 $84''$ 降低到 $10''$,较为接近转台的重复定位精度,精度提高了85%以上,验证了该标定补偿方法对于这类小型谐波转台的标定是有效的。

参考文献:

- [1] 刘兵,马勇,凌四营,等. 基于多齿分度改善高精度齿轮齿距精度[J]. 机械传动仪器仪表学报, 2010, 34(4):6-9.
LIU B, MA Y, LING S Y, et al.. Improving the precision of high-precision gear pitch based on multi-tooth indexing [J]. *Mechanical Transmission*, 2010, 34(4): 6-9. (in Chinese)
- [2] GRAETZ R J. *On-axis Self-calibration of Angle Measurement Errors in Precision Rotary Encoders* [D]. New York: University of British Columbia, 2011.
- [3] 金南,程远增,孙书鹰. 基于磁栅位移传感器的角度测量系统设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(8):191-193.
JIN N, CHENG Y Z, SUN SH Y. Design of angle measurement system based on magnetic grid displacement sensor [J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(8): 191-193. (in Chinese)
- [4] 殷侠,徐健. 应用圆感应同步器进行高精度角度测量的方法研究[J]. 南通航运职业技术学院学报, 2005, 4(4):49-50.
YIN X, XU J. Research on the method of high precision angle measurement using circular induction synchronizer [J]. *Journal of Nantong Shipping Vocational and Technical College*, 2005, 4(4): 49-50. (in Chinese)
- [5] 崔勇,徐岩. 精密转台角位移精度的测量方法研究[J]. 计量与测试技术, 2012, 39(2):1-2.
CUI Y, XU Y. Research on measurement method of angle displacement accuracy of precision turntable [J]. *Metrology & Testing Technology*, 2012, 39(2): 1-2. (in Chinese)
- [6] 彭思,杨向东,吴聊,等. 高精度转台标定方法研究[J]. 机械设计与制造, 2012(4):1-3.
PENG S, YANG X D, WU L, et al.. Research on calibration method of high precision turntable [J]. *Mechanical Design & Manufacture*, 2012(4):1-3. (in Chinese)
- [7] 白普俊,薛娜,刘松涛,等. 基于激光追踪仪的精密转台角度标定方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(1):100-107.
BAI P J, XUE N, LIU S T, et al.. Angle calibration method of precision turntable based on laser tracker [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(1): 100-107. (in Chinese)
- [8] 李春艳,陆卫国,乔琳. 快速空间测角系统中偏振棱镜消光比的影响[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4):749-756.
LI CH Y, LU W G, QIAO L. Influence of extinction ratio of polarizing prism in fast space angle measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 749-756. (in Chinese)
- [9] DONG H, FU Q, ZHAO X, et al.. Practical rotation angle measurement method by monocular vision [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(3):425.
- [10] 吴易明,高立民,陈良益. 基于偏振光的精密角度

测量及传递技术 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3):525-529.

WU Y M, GAO L M, CHEN L Y Precision angle measurement and transmission technology based on polarized light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 525-529. (in Chinese)

[11] 王福全, 王珏, 谢志江, 等. 精密转台角分度误差补偿 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(8):2165-2172.

WANG F Q, WANG Y, XIE ZH J, *et al.*. Compensation of angular indexing error of precision turntable [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2165-2172. (in Chinese)

[12] 糜小涛, 高胜英. 圆光栅偏心对仿真转台角位置

精度的影响 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014(3):9-12.

MI X T, GAO SH Y. Influence of circular grating eccentricity on position accuracy of simulation turntable [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science)*, 2014(3): 9-12. (in Chinese)

[13] 雷尼绍. 全新 XR20-W 系统显著提高回转轴校准的灵活性和便利性 [J]. 航天制造技术, 2011(6):45-45.

RENISHAW. The new XR20-W system significant improves the flexibility and convenience of rotary axis calibration [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2011(6): 45-45. (in Chinese)

作者简介:



吴斌(1975—),男,河南通许人,博士,教授,1993年于天津大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光及光电测试技术、视觉测量技术及应用、精密测量技术及仪器等方面的研究。
E-mail: wubin@tju.edu.cn



王航(1994—),男,辽宁阜新人,硕士研究生,2017年于天津大学获得学士学位,主要从事激光及光电测试技术、视觉引导跟踪及应用等方面研究。
E-mail: 1065410650@qq.com