

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210598

一种转台测角系统动态比对的信号同步方法*

徐兴晨¹, 朱维斌¹, 黄 焱², 邹 伟², 孔 明¹

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

摘 要:针对转台测角系统和环形激光测角仪进行动态比对时的数据同步问题开展研究。首先分析了转台测角系统与环形激光测角仪之间的同步问题,阐述了转台测角系统和环形激光测角仪之间因各自系统延时不同引入的同步角偏差;针对同步角偏差进行分析,提出延迟补偿方案以实现转台测角系统和环形激光测角仪相同时刻测量输出值对应同一转台角位置;开发基于现场可编程门阵列(FPGA)的同步角偏差实时补偿电路,重点说明了角速率解算和延时触发关键环节。搭建动态角度测量实验平台验证同步角偏差补偿效果,实验结果表明,在不同转速下补偿方法均能够实现良好的补偿效果,且各个转速下的补偿效果差异小于0.5"。

关键词:转台测角系统;动态比对;信号同步;延时补偿

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Signal synchronization method for dynamic comparison of turntable angle measurement system

Xu Xingchen¹, Zhu Weibin¹, Huang Yao², Zou Wei², Kong Ming¹

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

Abstract: In this article, the data synchronization problem of dynamic comparison between turntable angular measurement and ring laser gyroscope is studied. The synchronization problem between the turntable angular measurement and the ring laser gyroscope is analyzed and the synchronous angle deviation introduced by their different system delay is elaborated. Based on the analysis of synchronous angle deviation, a delay compensation scheme is proposed to make the output value of turntable angular measurement and ring laser gyroscope to the same turntable angle position at the same time. A real-time compensation circuit for synchronous angular deviation based on field programmable gate array is developed, and the key links of the circuit in the process of compensation are analyzed in detail. The experimental platform of dynamic angle measurement is established to evaluate the compensation effect of synchronous angle deviation and the results show that the proposed method can achieve outstanding compensation effect at different speeds. The difference of compensation effect at each speed is less than 0.5".

Keywords: turntable angular measurement; dynamic comparison; signal synchronization; delay compensation

0 引 言

转台测角系统可实现全圆范围内角度的连续测量,具有高分辨力、大行程的优势,在精密制造、航空航天、国防军工等领域被广泛应用^[1-3]。由于转台测角系统中存在角度传感器自身误差、圆光栅安装偏心偏斜误差、电机转矩波动以及环境扰动等^[4-5]不确定因素,会造成转台旋

转轴转动速度波动而使转动角度实际值与理想值不一致,存在转台角位置误差。为保障转台测角系统的测量精度,需要对转台角位置误差进行校准工作。

在角度计量领域中,转台角位置误差校准的技术,如光电自准直仪与多面棱体法^[6-9]、激光干涉转角测量法^[10-11]、激光跟踪仪标定法^[12-13]和经纬仪标定车载转台法^[14]等都是在静态角度测量的基础上发展起来的,现在已经比较成熟。基于光电自准直仪和多面棱体的校准原

收稿日期:2022-10-20 Received Date: 2022-10-20

* 基金项目:国家自然科学基金(52175526)、国家质量监督检验检疫总局科技计划(2016QK189)项目资助

理简单,标定精度可达 $0.1''$ 。但是在实际测试过程中,仍面对着装调工作复杂以及测试流程繁琐等情况。激光干涉仪的校准精度优于 $0.2''$,但为了实现全圆周上的校准,需要不断调整激光干涉仪的安装。基于激光跟踪仪的校准方法操作相对简单,效率高。但是,要实现高精度转台的全圆周校准,至少需要两台高精度激光跟踪仪,成本较高。经纬仪标定精度在 $30''$ 左右,虽然克服了偏心转台回转中线难以确定及光电自准直仪视场小等缺点,但这种方法的观测点难以选择。这些校准方法各有优缺点,均基于静态角度测量技术。

目前,工业发展对动态角度测量的应用需求和精度要求都在不断提高,因此,采用转台作为动态基准对惯性仪器的动态特性进行校准时,基于上述方法得到的静态校准结果不够可靠和全面。计量领域的转台动态校准需要高精度的动态角度基准。

环形激光测角仪作为一种基于 Sagnac 效应的高精度角速率传感器^[15-17],具有高精度、高角分辨率、实时性高和低成本等优点,在计量领域的动态角度测量和校准方面具有广泛的应用价值^[18]。但是,要实现高精度的动态校准,就需要保证其比对时的数据要严格同步。目前,针对动态比对中的数据同步问题,多利用同一基准时钟同步触发多个传感器进行数据同步采集。冯仁剑等^[19]在圆光栅数据采集系统启动时刻,向外输出 2 kHz 的同步触发信号,以实现角速率比对过程中测试数据的时间同步。王帆等^[20]利用信号发生器提供光栅编码器数据采集系统所需的采样时钟,使其和环形激光测角仪数据采集速率保持相同以实现角速率校准过程中的数据同步。以上这种方法由于忽略了不同传感器之间的延迟差异,只能保证采集系统输入端的时间“同步”并不能保证各个传感器输入端的同步特性。

本文通过分析因转台测角系统和环形激光测角仪之间系统延时不同引入的同步角偏差,研究同步角偏差补偿方法,并在现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)平台上完成同步角偏差在线补偿;通过实验证明在不同转速工况下,该方法能够有效保证动态比对结果的准确性。

1 信号同步原理

1.1 同步角偏差产生机理

转台测角系统主要由角度发生装置(转台)和角度测量单元(传感器和信号处理器)组成,与环形激光测角仪进行角度动态比对的示意图如图 1 所示。其中 O 是转台旋转轴轴心, ω 是转台旋转角速率,旋转过程中转台角位置记为 $\theta_R(t)$ 。

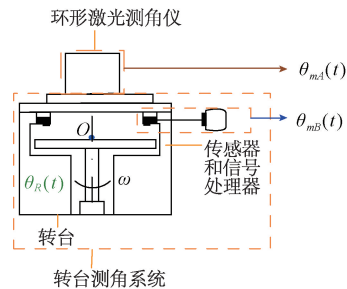


图 1 动态比对示意图

Fig. 1 Schematic representation of dynamic comparison

当环形激光测角仪测量转台在 t_R 时刻的角位置 $\theta_R(t_R)$ 时,由于存在信号处理延时 τ_A ,其测量值在 $t_A(t_A = t_R + \tau_A)$ 时刻输出,记为 $\theta_{mA}(t_A)$,即环形激光测角仪在 t_A 时刻输出的测量值对应转台在 t_R 时刻的角位置,记为:

$$\theta_{mA}(t_A) = \theta_R(t_R) \quad (1)$$

同理,转台测角系统也因自身的系统延时 τ_B ,在 $t_B(t_B = t_R + \tau_B)$ 时刻输出测量值 $\theta_{mB}(t_B)$ 也对应转台在 t_R 时刻的角位置,即:

$$\theta_{mB}(t_B) = \theta_R(t_R) \quad (2)$$

可见,当环形激光测角仪和转台测角系统的延时不相等,即存在同步延时误差 $\Delta\tau(\Delta\tau = \tau_B - \tau_A)$ 时,转台同一角位置对应不同时刻的测量输出。同理,在同一时刻 t_S 的输出值 $\theta_{mA}(t_S)$ 和 $\theta_{mB}(t_S)$,分别对应转台不同的角位置,根据式(1)和(2)可知:

$$\begin{cases} \theta_{mA}(t_S) = \theta_R(t_S - \tau_A) \\ \theta_{mB}(t_S) = \theta_R(t_S - \tau_B) \end{cases} \quad (3)$$

这种因延时不同导致动态比对过程中引入的角度误差称为同步角偏差,记为:

$$\theta_{\text{er}}(t_S) = \theta_{mA}(t_S) - \theta_{mB}(t_S) = \theta_R(t_S - \tau_A) - \theta_R(t_S - \tau_B) \quad (4)$$

1.2 同步角偏差补偿原理

针对同步延时误差 $\Delta\tau$,在转台角度匀速转动时,转台角位置、环形激光测角仪和转台测角系统的测量输出理论值均应该线性增长。由于转台测角系统和环形激光测角仪的输出为增量计数值,小于角度分辨率的位移变化不会引起输出改变,因此输出值为阶梯式变化。又由于环形激光测角仪的角度分辨率远高于转台测角系统的角度分辨率,为方便分析,将环形激光测角仪的输出近似为直线。动态测量信号随时间变化情况示意图如图 2 所示。

图 2 中,转台从 t_0 时刻开始匀速转动,转台角位置值线性增加,环形激光测角仪和转台测角系统分别延时 τ_A 和 τ_B 时间后在 t_1 和 t_2 时刻输出对应的测量值。 θ_{re} 为转台测角系统的角度分辨率, T_R 为其测量输出值变化 θ_{re} 对应的时间长度。

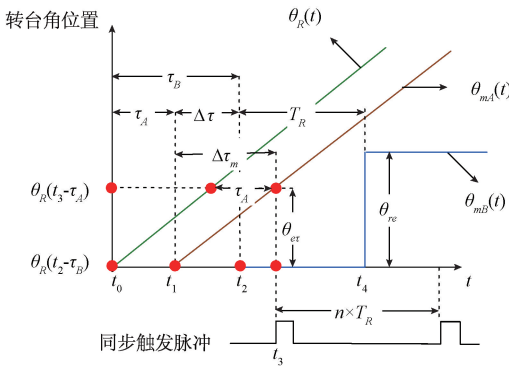


图 2 动态测量信号延时示意图

Fig. 2 Schematic of signal delay in dynamic comparison

同步触发脉冲信号以 $n \times T_R$ (n 为编码器输出 θ_{re} 的次數, 为正整数) 为时间间隔触发环形激光测角仪和转台测角系统进行角度测量。当同步脉冲在 t_3 时刻进行测量触发时, 得到的测量值分别为 $\theta_{mA}(t_3)$ 和 $\theta_{mB}(t_3)$, 根据式(3)可知:

$$\begin{cases} \theta_{mA}(t_3) = \theta_R(t_3 - \tau_A) \\ \theta_{mB}(t_3) = \theta_R(t_3 - \tau_B) \end{cases} \quad (5)$$

由于角度分辨率原因, 在 $[t_2, t_4]$ 时间内, 转台测角系统的测量值不发生改变, 所以有:

$$\theta_{mB}(t_3) = \theta_{mB}(t_2) = \theta_R(t_2 - \tau_B) \quad (6)$$

由式(5)、(6)可见, t_3 时刻测得同步角偏差为:

$$\begin{aligned} \theta_{er}(t_3) &= \theta_{mA}(t_3) - \theta_{mB}(t_3) = \\ \theta_{mA}(t_3) - \theta_{mB}(t_2) &= \theta_R(t_3 - \tau_A) - \theta_R(t_2 - \tau_B) \end{aligned} \quad (7)$$

可见因为角度分辨率原因, 在实际测量过程中的同步延时误差 $\Delta\tau_m$ 为:

$$\Delta\tau_m = (t_3 - \tau_A) - (t_2 - \tau_B) = t_3 - t_2 + \Delta\tau \quad (8)$$

因为同步角偏差来源于延时时间的差异, 并受测量传感器角度分辨率影响, 为了实现转台测角系统和环形激光测角仪相同时刻测量输出值对应同一转台角位置, 转台测角系统仍采用图 2 的同步触发脉冲进行角度测量, 环形激光测角仪则基于图 2 的同步触发脉冲采用延迟触发的方式进行角度测量。原理如图 3 所示。

对环形激光测角仪的触发脉冲延时 T_D 时间, 延时量 T_D 为:

$$\begin{aligned} T_D &= (t_6 - \tau_B) - (t_3 - \tau_A) = (t_2 + n \times T_R - \tau_B) - \\ (t_3 - \tau_A) &= n \times T_R - (t_2 - \tau_B) + (t_3 - \tau_A) = n \times T_R - \Delta\tau_m \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(3)和图 3 可知:

$$\theta_{mA}(t_5) = \theta_R(t_5 - \tau_A) = \theta_R(t_3 + T_D - \tau_A) \quad (10)$$

将式(9)代入, 得到:

$$\theta_{mA}(t_5) = \theta_R(t_6 - \tau_B) \quad (11)$$

对于转台测角系统, 由于在 $[t_6, t_8]$ 时间内测量值不发生改变, 因此:

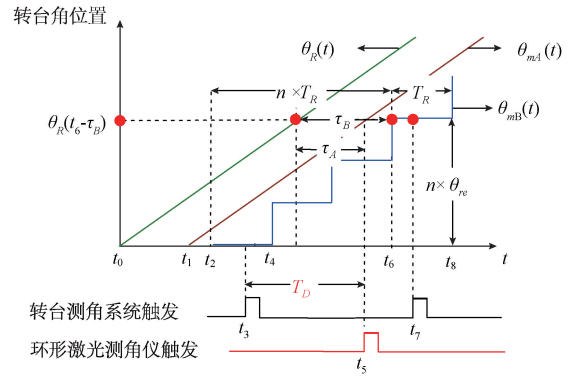


图 3 同步角偏差补偿原理

Fig. 3 Schematic of compensation for synchronous angle deviation

$$\theta_{mB}(t_7) = \theta_{mB}(t_6) = \theta_R(t_6 - \tau_B) \quad (12)$$

根据式(11)、(12)可见, $\theta_{mA}(t_5)$ 和 $\theta_{mB}(t_7)$ 对应转台同一角位置, 完成转台测角系统和环形激光测角仪的动态信号同步。

1.3 延时测量原理

基于同步角偏差补偿原理可知, 只需确定 $\Delta\tau_m$, 即可完成同步角偏差延时补偿。对于角速率 ω 匀速圆周运动情况, 则转台测角系统输出角位置值和环形激光测角仪输出角位置值可表示为:

$$\begin{cases} \theta_{mB}(t) = \theta_R(t - \tau_B) = \omega \times (t - \tau_B) \\ \theta_{mA}(t) = \theta_R(t - \tau_A) = \omega \times (t - \tau_A) \end{cases} \quad (13)$$

由式(4)、(13)可知, 此时的同步角偏差为:

$$\begin{aligned} \theta_{er}(t) &= \theta_{mA}(t) - \theta_{mB}(t) = \\ \omega \times (t - \tau_A) - \omega \times (t - \tau_B) &= \omega \times \Delta\tau \end{aligned} \quad (14)$$

由式(8)可知, 实际测量过程中的同步延时误差为 $\Delta\tau_m$, 故实际测量过程中的同步角偏差为:

$$\theta_{er}(t) = \omega \times \Delta\tau_m \quad (15)$$

$\Delta\tau_m$ 与同步角偏差和转台角速率有关, 即:

$$\Delta\tau_m = \theta_{er}(t) / \omega \quad (16)$$

由于转台测角系统输出 θ_{re} 的时间长度 T_R 可以表示为:

$$T_R = \theta_{re} / \omega \quad (17)$$

故环形激光测角仪触发信号延迟的时间量 T_D 可以简化为:

$$\begin{aligned} T_D &= n \times T_R - \Delta\tau_m = (n \times \theta_{re} - \theta_{er}(t)) / \omega = \\ (n \times \theta_{re} + \theta_{mB}(t) - \theta_{mA}(t)) / \omega & \end{aligned} \quad (18)$$

2 同步角偏差实时补偿电路设计

2.1 电路方案设计

为了满足同步角偏差补偿电路的实时性和快速性, 在 FPGA 平台上实现同步角偏差实时补偿电路的设计, 其整体电路框图如图 4 所示。

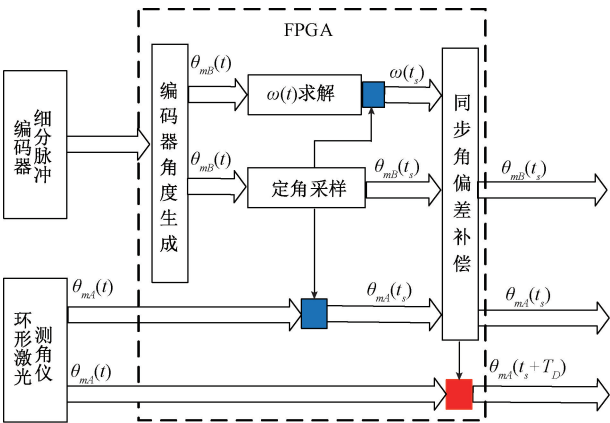


图 4 同步角偏差补偿电路框图

Fig. 4 Schematic of synchronous compensation circuit for angle deviation

由图 4 可见,同步角偏差补偿电路主要由编码器角度生成、实时角速率 $\omega(t)$ 求解、定角采样和同步角偏差补偿 4 个模块组成。编码器角度生成是利用四细分电路对正交方法进行角度解算;定角采样电路是以增量式光栅盘为角位置传感器的转台系统中较为常用的采集方式,本文不予详细讨论,仅对实时角速率求解和同步角偏差补偿模块功能的实现进行分析。

2.2 实时角速率解算

在同步角偏差补偿过程中,延迟触发环形激光测角仪的时间量与转台角速率密切相关,因此角速率解算对于整体实现效果至关重要。综合考虑角速率实时解算效率和硬件资源占用情况,本文采用有限差分法进行实时角速率解算,其电路结构框图如图 5 所示。

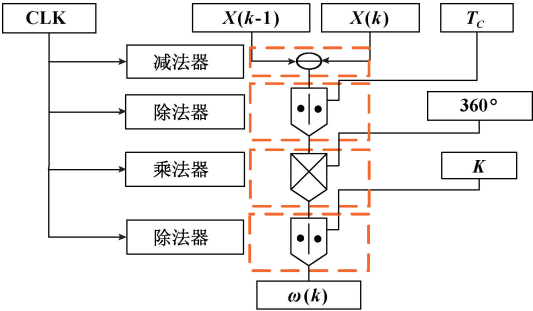


图 5 角速率解算结构示意图

Fig. 5 Schematic of calculation structure of angular velocity

由图 5 可见,角速率实时解算电路实现主要由减法器,除法器,乘法器组成,其中 K 为光栅盘刻线数, T_c 为设定的采样时间。

FPGA 在每个采样时间段内,对每个标志角度信息的脉冲信号 $X(k)$ 进行捕获,在高速时钟下依次进行减法运算得到间隔时间内角度差值,然后通过差分法获得当

前的实时角速率。使用 Quartus 软件评估有限差分法的电路结构,具体参数如表 1 所示。

表 1 有限差分法使用的 FPGA 资源
Table 1 Resource utilization of FPGA for the finite difference method

参数	有限差分法
LE 资源	3 091
乘法器	6
延时单元(系统时钟)	18

由表 1 可见,采用有限差分法实时解算角速率占用 FPGA 芯片资源少,延时量时间仅为 18 个时钟,通过提高时钟频率可以进一步提升系统实时性。

2.3 同步角偏差补偿中的延迟触发

延时触发是同步角偏差补偿模块实现的关键一步。根据信号同步原理可知,以转台测角系统的定角脉冲为基准,通过计数器进行延时产生新的脉冲信号触发环形激光测角仪,即可实现两套设备间角度同步。延时触发原理框图如图 6 所示。

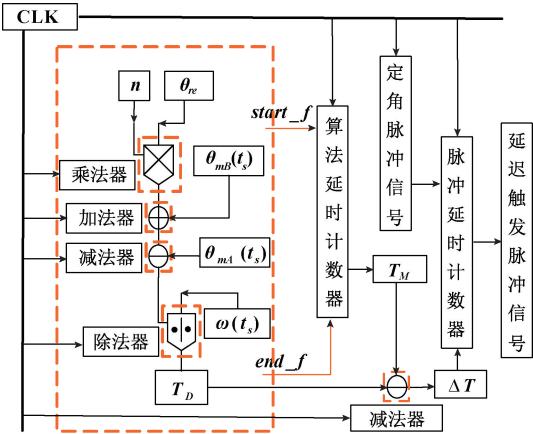


图 6 延迟触发电路原理

Fig. 6 Schematic of delay trigger circuitry

脉冲延时计数器的输入延时量的准确性直接影响了同步角偏差补偿结果的精度。根据式(18)能够得到延时量 T_d ,但是在电路实现过程中,会由于算法本身的延时导致补偿结果的不准确,需要进一步考虑补偿电路自身的延时问题。

由图 4 可知,同步角偏差补偿电路所包含的编码器角度生成、实时角速率求解、定角采样和同步角偏差补偿 4 个模块均在 FPGA 电路上以数字电路方式实现,因此各个环节的处理时间都可以量化为若干时钟数,当电路系统时钟确定,同步角偏差电路环节引入的延时时间就是一个固定值,表示为 T_m 。

由图 6 可知,在延时触发电路中,实际延时时间是根据 T_d 和 T_M 之差。在解算开始时刻给出标志信号 start_f, 同时在延时量 T_d 输出时刻给出标志信号 end_f, 通过电路延时计数器得到算法延时时间 T_M , 然后通过减法器确认脉冲延时计数器的输入延时量 ΔT , 最终输出延迟触发脉冲信号实现同步角偏差的补偿。

3 实验与数据分析

为了证明同步角偏差影响,搭建实验平台开展静态测量和动态测量的比对实验;为了验证同步角偏差补偿方法的有效性,一方面进行同步角偏差补偿实验以分析补偿效果,另一方面开展不同转速下的实验以验证方法的普遍适用性。

3.1 同步角偏差验证实验

搭建角度测量实验平台,分别在静态、动态条件下完成角度测量结果比对。实验装置如图 7 所示。环形激光测角仪安装在转台上,转台可以通过上位机控制运动;信号采集和处理电路采用实验室自制电路板,命名为 DASA_B,实现转台测角系统和环形激光测角仪测量输出值的同步采集和补偿。实验主要仪器及其参数如表 2 所示。

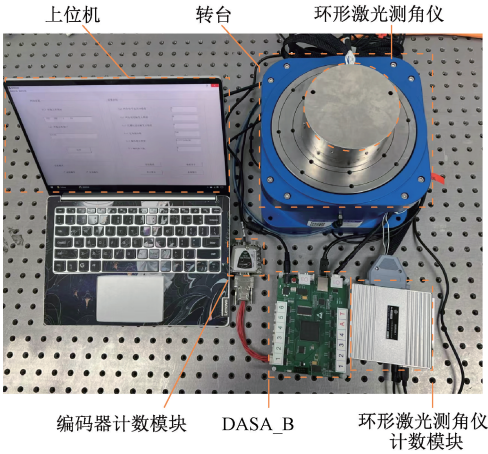


图 7 实验装置

Fig. 7 Photograph of experimental setup

表 2 实验主要仪器规格

Table 2 Specifications of main instruments

仪器名称	型号(制造商)	技术参数
环形激光测角仪	(西安 618 所)	分辨力: 0.001"
光栅码盘	R10851 (MicroE)	刻线: 16 384 栅距: 20 μm
编码器计数模块	Mercury 3000 (MicroE)	细分倍率: 1 024 分辨力: 0.077"

以 10° 为间隔,在圆周内静态测量获取转台测角系统和环形激光测角仪各 36 个角位置测量值,对二者进行差值处理并进行函数拟合,得到静态条件下的角位置误差曲线 $\varphi_{static}(\theta_R)$;设置转台转速为 $30^\circ/\text{s}$,以 10° 为步距,在定角触发工作模式下动态获取转台测角系统与环形激光测角仪整圆周角度测量值,采用同样的数据处理方法,得到动态条件下的角位置误差曲线 $\varphi_{dynamic}(\theta_R)$ 。两条曲线如图 8 所示。

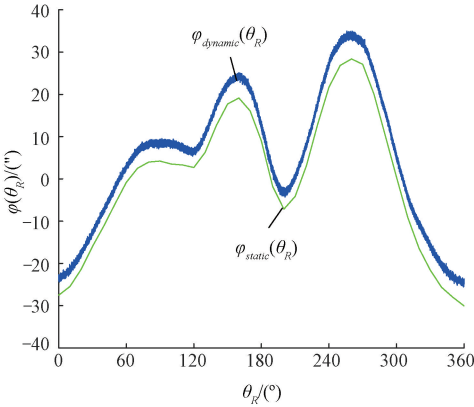


图 8 静态-动态圆周角位置误差曲线

Fig. 8 Comparison of the angular deviation curves of static and dynamic

因为静态测量条件下角位置不变,认为测量误差曲线不存在延时误差因素,可以作为无同步角偏差参考值。由图 8 可见,静态和动态的角偏差曲线趋势一致,曲线波动峰值均为 $58''$,波形差异即为同步延时引入的同步角偏差。可知设备间的同步延时差异会对动态校准引入系统误差。

3.2 同步角偏差补偿实验

为验证本文提出的同步角偏差补偿方法在实际应用场景下的有效性,开展同步延时补偿效果验证实验。仍采用图 7、表 2 的实验装置,以 DASA_B 电路板作为同步角偏差实时补偿方法的承载平台开展实验。

转台转速仍设置为 $30^\circ/\text{s}$,以定角触发模式动态获取转台测角系统与环形激光测角仪整圆周的角位置测量值,对所获取的角位置测量值进行同步角偏差实时补偿后,仍通过两者差值处理得到同步角偏差补偿后的角位置误差曲线 $\varphi_{dyn_sync}(\theta_R)$,如图 9 所示。

图 9 中,在动态测量条件下,同步角偏差补偿前的角偏差 $\varphi_{dynamic}(\theta_R)$ 波动范围为 $-25.535'' \sim 34.968''$,补偿后的角偏差 $\varphi_{dyn_sync}(\theta_R)$ 波动范围为 $-30.980'' \sim 29.535''$,与静态测量下的角偏差曲线 $\varphi_{static}(\theta_R)$ 的波动范围 $-30.030'' \sim 28.382''$ 几乎重合。

将同步角偏差补偿前后的角位置测量误差 $\varphi_{dynamic}(\theta_R)$ 和 $\varphi_{dyn_sync}(\theta_R)$ 分别与静态条件下的角位置测

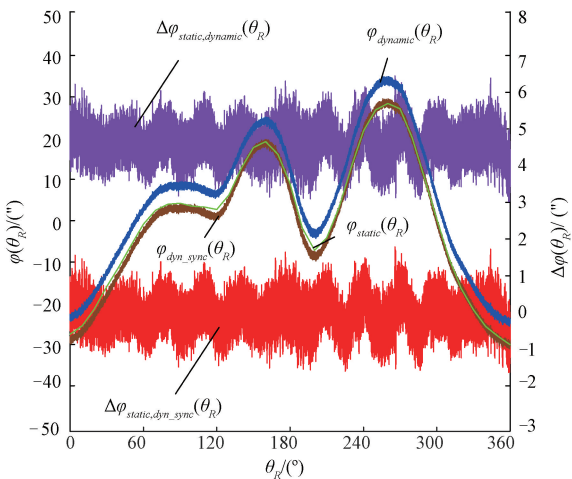


图 9 同步角偏差补偿效果

Fig. 9 Comparison of angle deviation curves before and after synchronous compensation

量误差 $\varphi_{static}(\theta_R)$ 进行差值处理,得到图 9 中的补偿前后动态与静态之间的偏差曲线 $\Delta\varphi_{static,dynamic}(\theta_R)$ 和 $\Delta\varphi_{static,dyn_sync}(\theta_R)$ 。可见在进行同步角偏差补偿前,360° 圆周范围内 $\Delta\varphi_{static,dynamic}(\theta_R)$ 的波动范围为 3.023″~6.384″,平均值为 4.661″,均方差为 0.263″;补偿后角位置误差与静态之间的偏差 $\Delta\varphi_{static,dyn_sync}(\theta_R)$ 的波动范围为 -1.759″~1.723″,平均值为 0.105″,均方差为 0.303″。可见本文提出的同步角偏差补偿方法能够有效消除同步角偏差这一系统误差,提高测量结果准确度;补偿前后 $\Delta\varphi_{static,dynamic}(\theta_R)$ 和 $\Delta\varphi_{static,dyn_sync}(\theta_R)$ 的均方差无明显差别,波形都具有周期性特征,分析为转台安装和旋转过程其他误差源作用,且该误差作用与时间延时无关。

进一步验证本文提出同步角偏差补偿方法的普遍适用性。分别设置转台角速率为 30°/s、60°/s、90°/s、120°/s、150°/s 和 180°/s,在 0°~360° 进行动态同步角偏差补偿实验,实验结果如表 3 所示。

表 3 不同转速下的同步角偏差补偿效果

Table 3 Angular deviation before and after synchronous compensation at different speeds

$\omega/({}^{\circ}/\text{s})$	$\varphi_{dynamic}(\theta_R)/(^{\circ})$	$\varphi_{dyn_sync}(\theta_R)/(^{\circ})$	$\Delta\varphi_{static,dynamic}(\theta_R)/(^{\circ})$	$\Delta\varphi_{static,dyn_sync}(\theta_R)/(^{\circ})$	$\Delta\varphi_{static,dyn_sync}(\theta_R)$ 平均值/ $(^{\circ})$
30	-25.535~34.968	-30.980~29.535	3.023~6.384	-1.759~1.723	0.105
60	-19.208~41.361	-31.094~28.476	9.257~13.110	-1.745~1.636	0.077
90	-15.086~43.774	-30.236~30.327	13.752~16.379	-1.464~1.551	0.560
120	-9.960~50.223	-30.793~30.315	18.325~21.848	-1.791~1.621	0.501
150	-4.680~57.677	-30.659~29.501	23.085~27.287	-1.742~1.689	0.309
180	-0.3248~60.315	-30.923~29.597	27.893~30.906	-1.558~1.545	0.282

由表 3 可知,随着角速率的增加,同步前的 $\varphi_{dynamic}(\theta_R)$ 和 $\Delta\varphi_{static,dynamic}(\theta_R)$ 均随之增大,且变化量与速率呈现近似线性关系,说明同步角偏差与转速和延时之间存在关联性。补偿后, $\varphi_{dyn_sync}(\theta_R)$ 和 $\Delta\varphi_{static,dyn_sync}(\theta_R)$ 均近似为恒值,同步后的效果相似, $\Delta\varphi_{static,dyn_sync}(\theta_R)$ 在各转速下的均值差异小于 0.5″,证明了该方法在不同转速下对同步角偏差都有良好的补偿效果。

4 结 论

本文针对转台测角系统和环形激光测角仪进行动态比对时存在同步角偏差这一问题开展研究。在介绍同步角偏差产生机理的基础上,通过延时分析阐述了同步角偏差补偿方法的原理可行性;开发了基于 FPGA 平台的同步角偏差实时补偿电路,通过有限差分法对转台角速率进行实时解算,优化延迟触发电路设计。实验结果显示在不同转速动态测量工况下,补偿方法均能够实现良好的补偿效果,各个转速下的补偿效果差异小于 0.5″,能有效保证动态比对结果的准确性。

参考文献

[1] GAO W, KIM S W, BOSSE H, et al. Measurement technologies for precision positioning[J]. CIRP Annals, 2015, 64(2): 773-796.

[2] 逯轩, 杨晓青, 石然, 等. 微型欠阻尼转台的高精度高响应控制方法[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(11): 58-63.

LU X, YANG X Q, SHI R, et al. Research on high precision and high response control method of micro underdamped platform[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(11): 58-63.

[3] YANG Q X, WU Z L, HUANG M, et al. An improved angle calibration method of a high-precision angle comparator[J]. Metrology and Measurement Systems, 2021, 28(1): 181-190.

[4] 白冰, 朱维斌, 黄垚, 等. 偏心偏斜对转台圆光栅莫尔信号的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022,

- 36(1): 1-10.
- BAI B, ZHU W B, HUANG Y, et al. Research on the effect of eccentricity and inclination on the Moiré signal of turntable [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 1-10.
- [5] 张志, 夏仰球, 米良, 等. 角位置误差对回转误差测量的影响规律研究[J]. 中国测试, 2022, 48(7): 23-29.
- ZHANG ZH, XIA Y Q, MI L, et al. Study on the influence law of angular position error on rotation error measurement[J]. China Measurement and Test, 2022, 48(7): 23-29.
- [6] WANG H, XUE Z, SHEN N, et al. Calibration of a high precision rotary table[C]. 9th International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, 2015: 749-757.
- [7] WATANALE T, SAMIT W, VATCHARANUKUL K, et al. High resolution self-A rotary table by the interpolation signal calibration [J]. Key Engineering Materials, 2015, 625: 53-59.
- [8] NOVYANTO O, ALFIYAYTI N. An approach method to calibrate the autocollimator with small angle measurement range[J]. Mapan, 2016, 31(1): 9-15.
- [9] 李尔丽, 薛梓, 黄垚, 等. 全圆连续角度标准装置的系统误差分离与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 1-9.
- LI G L, XUE Z, HUANG Y, et al. System error separation and compensation of the continuous full circle angle standard device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 1-9.
- [10] JÓZWIK J, CZWARNOWSKI M. Angular positioning accuracy of rotary table and repeatability of five-axis machining centre dmu 65 monoblock[J]. Advances in Science and Technology Research Journal, 2015, 9(28): 89-95.
- [11] 皮世威, 刘强, 孙鹏鹏. 基于激光干涉仪的旋转轴误差快速检定方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2484-2491.
- PI SH W, LIU Q, SU P P. Geometric error detection for rotary feed drive based on laser interferometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2484-2491.
- [12] CHEN H, JIANG B, LIN H, et al. Calibration method for angular positioning deviation of a high-precision rotary table based on the laser tracer multi-station measurement system[J]. Applied Sciences, 2019, 9(16): 3417.
- [13] ZHA J, LI L, HAN L, et al. Four-station laser tracer-based geometric error measurement of rotary table[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(6): 065008.
- [14] 王冕, 包金平. 大型转台精度标定方法研究与实现[J]. 工业计量, 2014, 24(1): 31-35.
- WANG M, BAO J P. Large turntable accuracy calibration method research and implementation [J]. Industrial Metrology, 2014, 24(1): 31-35.
- [15] 邹伟, 黄垚, 梁可, 等. 激光陀螺测角仪的角度计量误差分析[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(5): 41-48, 68.
- ZOU W, HUANG Y, LIANG K, et al. Error analysis of angle measurement by laser gyro goniometer [J]. Metrology Science and Technology, 2022, 66(5): 41-48, 68.
- [16] FILATOV Y V, PAVLOV P A, VELIKOSELTSEV A A, et al. Precision angle measurement systems on the basis of ring laser gyro[J]. Sensors, 2020, 20(23): 6930.
- [17] 邹伟, 黄垚, 梁可, 等. 激光陀螺测角仪的校准与计量方法[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(4): 40-47.
- ZOU W, HUANG Y, LIANG K, et al. Calibration and measurement method of laser gyro goniometer [J]. Metrology Science and Technology, 2022, 66(4): 40-47.
- [18] 周彩红, 云鹏, 梁雅军, 等. 环形激光在测角方面的应用[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(6): 1-3, 8.
- ZHOU C H, YUN P, LIANG Y J, et al. Application of ring laser in angle measurement [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2012, 32(6): 1-3, 8.
- [19] 冯仁剑, 王良俊童, 董雪明. 高动态转台角速率测量及解算方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 30-35.
- FENG R J, WANG L J T, DONG X M. Angular velocity measurement and solving method of high-dynamic turntable[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(8): 30-35.
- [20] 王帆, 黄垚, 杨禹, 等. 单周范围内角速率误差校准[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(8): 24-28.

WANG F, HUANG Y, YANG Y, et al. Angular velocity deviation calibration in single circumference range[J]. Metrology Science and Technology, 2021, 65 (8): 24-28.

作者简介



徐兴晨, 2020 年于南京理工大学紫金学院获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为转台测角系统动态比对。

E-mail: p20020854093@cjlu.edu.cn

Xu Xingchen received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology ZiJin College in 2017. He is currently a M. Sc. candidate at China Jiliang University. His main research interest is dynamic comparison of turntable angle measurement system.



朱维斌 (通信作者), 2014 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为光栅信号处理和角度精密测量。

E-mail: zhuweibin@cjlu.edu.cn

Zhu Weibin (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2014. He is currently an associate professor at China Jiliang University. His main research interests include the grating signal processing and precision angle measurement.



黄焱, 分别在 2004 年和 2007 年于北京工业大学获得学士学位和硕士学位, 2007 年~2013 年在北京计量学院几何实验室工作, 现为中国计量科学研究院长度与精密工程计量分部担任高级工程师, 浙江大学博士研究生, 主要研究方向为角度计量。

E-mail: huangyao@nim.ac.cn

Huang Yao received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Beijing University of Technology in 2004 and 2007,

respectively. He worked at the Geometric Lab of Beijing Metrology Institute from 2007 to 2013. Now he is a senior engineer at Division of Metrology in Length and Precision Engineering of National Institute of Metrology, Ph. D. candidate at Zhejiang University. His main research interest is angle measurement.



邹伟, 2020 年于北京航空航天大学获得博士学位, 目前在中国国家计量研究院担任助理研究员, 主要研究方向包括高精度摄像机校准、多摄像机三维重建相关的几何计量和计算机视觉问题, 以及角度计量等工作。

E-mail: zouwei@nim.ac.cn

Zou Wei received his Ph. D. degree from Beihang University in 2020. He is currently an assistant research fellow at China National Institute of Metrology. His main research interests include geometric metrology and computer vision problems related to high accuracy camera calibration, three-dimensional reconstruction with multi-cameras, and angle measurement.



孔明, 分别在 2000 年和 2005 于东南大学获得学士学位和博士学位, 现为中国计量大学计量测试工程学院教授, 博导, 全国量具量仪标准化技术委员会委员, 全国产品几何技术规范标准化技术委员会委员, 主要研究方向为光电检测技术、计量检测设备开发。

E-mail: mkong@cjlu.edu.cn

Kong Ming received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Southeast University in 2000 and 2005, respectively. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at China Jiliang University. He is the member of National Technical Committee for Standardization of Measuring Tools and Meters, the member of National Technical Committee for Standardization of Geometrical Product Specification. His main research interest are photoelectric detection technology and development of measurement equipment.