

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210697

基于 Kalman 的动态角度测量方法研究*

马新宇¹, 朱维斌¹, 黄 焱², 邹 伟², 薛 梓²

(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:为了保证转台测角系统动态角度测量的准确性,研究了一种基于 Kalman 滤波的动态角度测量方法。阐述了动态角度测量方法原理,详细解释了基于 Kalman 滤波的参数优化模型和动态预测模型;根据测量精度要求设计动态角度测量电路,基于现场可编程门阵列(FPGA)平台实现转台发生角度值实时预测;开展加速度为 $10^\circ/\text{s}^2$ 的匀加速运动工况仿真实验,以转台发生角度理论值为参实验证方法有效性;搭建转台实验平台,以环形激光陀螺仪为测量参考值验证动态角度测量方法应用效果。实验结果证明提出的动态角度测量方法可有效减小转台测角系统测量延时引入的系统误差,在转速为 $30^\circ/\text{s}$ 时延时误差由 $-82.62''$ 减小至 $-0.01''$,在各种转速下能够保持测量结果一致性,有效提升转台测角系统动态测量精度。

关键词: 动态角度测量; 延时误差; Kalman 滤波; 预测补偿

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

Research on the dynamic angle measurement method based on Kalman

Ma Xinyu¹, Zhu Weibin¹, Huang Yao², Zou Wei², Xue Zi²

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

Abstract: To ensure the accuracy of the dynamic angle measurement results for the turntable angle measurement system, a dynamic angle measurement method based on Kalman filtering is studied in this article. The principle of dynamic angle measurement method is described, and the parameter optimization model and dynamic prediction model based on Kalman filtering are explained in detail. The dynamic angle measurement circuit is designed according to the requirements of measurement accuracy, and the real-time prediction of the turntable angle is realized based on the field programmable gate array platform. The simulation experiment of constant acceleration motion is implemented with acceleration of $10^\circ/\text{s}^2$, and the validity of the method is verified by taking the theoretical value of turntable angle as a reference. A turntable experimental platform is established to evaluate the application effect of the dynamic angle measurement method with the ring laser gyro as the reference value. Experimental results show that the proposed dynamic angle measurement method can effectively reduce the system error introduced by the measurement delay of the turntable angle measurement system. The error is reduced from $-82.62''$ to $-0.01''$ at the speed of $30^\circ/\text{s}$, the consistency of measurement results can be maintained at various speeds, and effectively improve the dynamic measurement accuracy of the turntable angle measurement system.

Keywords: dynamic angle measurement; delay error; Kalman filtering; predictive compensation

0 引 言

角度作为国际计量标准量,在工业测量、标准量计量、航天航空等各方面均广泛涉及和应用。随着制造业水平的发展,静态角度测量技术逐渐成熟,可达到 $0.1''$ 的

先进水平^[1],但动态角度测量方面,由于其原理复杂和实现难度大,针对动态角度测量的研究还缺乏系统性认知,更没有成熟的计量体系和应用场合。因动态测量具有时变性、随机性、相关性和动态性等特点^[2],使得动态条件下的角度变化规律难以掌握,故如何提高动态角度测量精度成为国内外各学者共同研究的课题。

收稿日期:2022-11-12 Received Date: 2022-11-12

* 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

针对动态角度测量的方法展开调研,目前常规的角度测量方法包括机械式^[3-5]、电磁式^[6]和光学式^[7-10],在静态角度测量领域这些方法都拥有成熟的应用效果,但动态角度测量的核心要点在于保证必需的动态测量速度。机械式测角由于接触测量下的机械惰性,不可避免会对测量速度产生限制作用^[11];电磁式基于电磁感应原理得到动态旋转的转角量^[12],但测量精度受环境干扰严重;光学式测角方法中,图像法、莫尔条纹法和光电编码法因系统延时、高频信号携带的噪声、轴系晃动和转速不稳定等因素会引入动态角度测量误差。唐声权等^[13]认为在光电编码器匀速运动过程中,电路的延时会引入测量误差,将其量化补偿后可实现1"的动态测角精度。黄晓敏^[14]在2015年提出使用动态性能较差的传感器获得的测量结果并不能准确描述被测量的瞬态变化。针对图像法而言,图像传感器一般使用电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)构成,但由积分过程、处理过程和传输过程组成的CCD时间延迟,很大程度上限制了系统的响应速度,从而影响系统的动态性能^[15]。

在上述针对动态角度测量的研究中,主要问题集中在信号获取、转换、处理、传输所需时间以及所使用测量传感器及电路系统的延时对测量结果的影响,在动态测量时无法满足采样时刻与输出测量时刻被测量的一致性。为解决该误差源的影响,大量的误差抑制补偿手段被提出并应用于提高动态角度测量精度。

1992年,中国科学院光电技术研究所首创重复定位精度为0.022"的动态光电自准直仪^[16],之后航空航天303研究所研制出差动式动态激光小角度测量仪^[17],基于Sagnac效应研制的环形激光陀螺仪^[18]也逐渐发展完善,此类动态性能良好的测角装置逐渐应用于动态角度测量领域。2017年,清华大学针对多通道激光干涉仪在动态测量时光电信号处理过程中的延时误差给予补偿方案,从而实现多通道数据的同步获取功能^[19]。王辛^[20]基于圆光栅开发动态角度测量系统,该系统对圆光栅角度数据进行实时解算,同时基于泰勒模型对动态角误差进行实时补偿,最终输出高精度的动态测角结果。何秋农^[15]针对光电跟踪系统中由于信号处理传输时间带来的延时误差问题进行分析,将测量延迟问题引入到鲁棒状态估计问题中,该方法的复杂度随着延迟时间的增大而急剧上升,不适用于处理过长的时间延迟问题。

综上所述,基于高精度光学器件的测量方法存在操作复杂、动态测量范围小以及测量结果漂移等问题,对使用场所的环境要求较高,而基于算法的补偿方法存在实现难度高,无法实时应用的问题,故在实际应用中测量精度和实时性无法满足动态测量需求。

本文针对转台测角系统在动态角度测量过程中,因信号处理和传输等原因引入的延时误差问题,提出一种基于Kalman滤波的动态角度测量方法;并在现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)电路平台上实现,达到实时预测转台实际发生角位置的目的;搭建测试系统开展验证实验,结果证明了该动态角度测量方法可有效消除转台测角系统的延时误差。

1 基于Kalman滤波的动态角度测量原理

动态角度测量过程中,因为信号处理和传输等原因,转台测角系统角位置发生时刻和角位置测量值输出时刻不一致,该时间偏差导致的角度偏差定义为延时误差。在动态角度测量中,延时误差会对动态角位置测量结果引入系统误差。针对该误差源,本文采用Kalman预测滤波方法进行动态角度测量,利用转台测角系统动态测角过程中的角位置测量值和运动状态信息,消除转台测角系统输出角位置测量值与角位置发生值之间的延时误差。方法原理如图1所示。

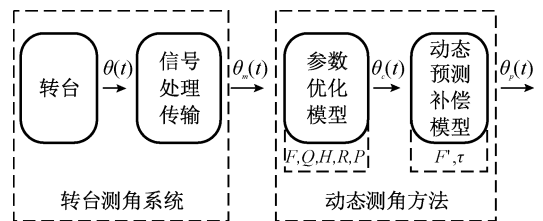


图1 基于Kalman滤波的动态测角原理示意图

Fig. 1 Schematic representation of dynamic angle measurement based on Kalman filtering

由图1可见,由于转台信号处理过程以及信号传输等环节会不可避免地引入测量延时 Δt ,转台测角系统直接角度测量值 $\theta_m(t)$ 与转台发生角度值 $\theta(t)$ 关系为:

$$\theta_m(t) = \theta(t + \Delta t) \quad (1)$$

参数优化模型根据补偿前角度测量值 $\theta_m(t)$ 获取转台运动状态,减小转台测角系统输出的角度测量值中包含的系统测量噪声,输出当前时刻的角位置最优估计值 $\theta_c(t)$ 。动态预测补偿模型根据转台运动状态信息与转台测角系统测量延时,调整预测参数对当前时刻的最优估计值进行补偿,使最终输出的动态角度预测值 $\theta_p(t)$ 与转台实际发生角度值 $\theta(t)$ 之间不存在延时误差,即:

$$\theta_p(t) = \theta(t) \quad (2)$$

1.1 参数优化模型

参数优化模型利用转台运动状态信息对转台测角系统输出的角度测量值进行优化,结合运动状态减小测量系统中存在的系统测量噪声,为动态预测模型提供当前时刻的角位置最优估计值 $\theta_c(t)$ 。

以转台匀速运动工况进行分析,转台测角系统发生角度值 $\theta(t)$ 与时间 t 的关系如下:

$$\theta(t) = \omega \times t \quad (3)$$

式中: ω 为转台转速。

构建 Kalman 滤波状态方程和观测方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_i = \mathbf{F}\mathbf{X}_{i-1} + \boldsymbol{\alpha}_i \\ \mathbf{Z}_i = \mathbf{H}\mathbf{X}_i + \mathbf{u}_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{X}_i 表示系统状态向量; \mathbf{F} 表示状态转移矩阵; $\boldsymbol{\alpha}_i$ 为运动模型中的系统状态噪声,通常为零均值的白噪声,方差为 \mathbf{Q} ; \mathbf{Z} 为实测离散角度值组成的观测向量; \mathbf{H} 为观测矩阵; \mathbf{u}_i 为转台测角系统引入的观测噪声,通常为零均值的白噪声,方差为 \mathbf{R} 。

在转台匀速转动工况下,系统状态向量 $\mathbf{X}_i = [\theta_i, \omega_i]$;

状态转移矩阵 $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, T 为角度测量时间间隔; 观测矩阵 $\mathbf{H} = [1 \ 0]$; 观测向量 $\mathbf{Z} = [\theta_m]$ 。

通过 Kalman 进行参数优化的实质是对状态方程和观测方程以及各矩阵参数进行递归更新。转台状态方程根据前一时刻最优估计值 $\hat{\mathbf{X}}_{i-1}$ 得到当前时刻的状态估计 $\hat{\mathbf{X}}_i^-$, 同时更新当前状态的协方差 \mathbf{P}_i^- , 状态更新过程表示为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_i^- = \mathbf{F}\hat{\mathbf{X}}_{i-1} \\ \mathbf{P}_i^- = \mathbf{F}\mathbf{P}_{i-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \end{cases} \quad (5)$$

根据当前时刻的状态估计 $\hat{\mathbf{X}}_i^-$, 可对转台测角系统进行观测更新,减小测量噪声影响,得到当前时刻最优估计值 $\hat{\mathbf{X}}_i$, 同时更新最优估计协方差 \mathbf{P}_i 。观测更新过程表示为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_i = \hat{\mathbf{X}}_i^- + \mathbf{K}_i(\mathbf{Z}_i - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}_i^-) \\ \mathbf{P}_i = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i\mathbf{H})\mathbf{P}_i^- \end{cases} \quad (6)$$

在状态更新过程和观测更新过程中,仅滤波增益矩阵 \mathbf{K} 未知。Kalman 滤波增益矩阵 \mathbf{K} 是基于状态协方差 \mathbf{P}_i^- 和观测噪声协方差 \mathbf{R} 得出,表示为:

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{P}_i^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_i^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (7)$$

参数优化模型的递归过程以实现最优估计值与观测值之间的均方误差最小为判别条件,通过递归方程迭代计算后得到最优估计 $\hat{\mathbf{X}}_i = [\theta_{ci}, \omega_{ci}]$, 提供给动态预测模型。

1.2 动态预测补偿模型

根据转台运动状态与转台测角系统测量延时,构建动态预测补偿模型,利用参数优化模型的角位置最优估计值 $\theta_c(t)$ 对转台测角系统延时误差进行实时补偿。仍以转台匀速运动工况进行分析,动态预测补偿模型原理如图2所示。

图2中, $\theta(t)$ 为转台发生角度值, $\theta_c(t)$ 为角位置最优估计值, τ 为依据转台测角系统运动状态的预测参数。

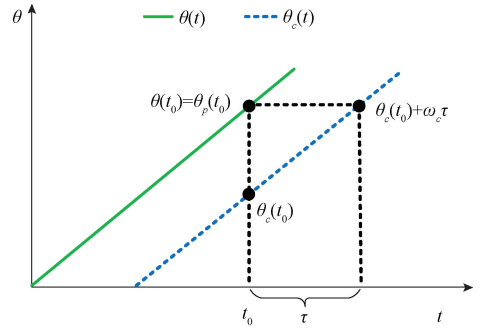


图2 动态预测补偿模型原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of the dynamic prediction compensate model

依据 Kalman 一步预测原理,动态预测补偿模型可表示为:

$$\mathbf{X}_{pi} = \begin{bmatrix} \theta_{pi} \\ \omega_{pi} \end{bmatrix} = \mathbf{F}' \hat{\mathbf{X}}_i \quad (8)$$

式中: \mathbf{F}' 为状态预测矩阵, $\mathbf{F}' = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

将 $\hat{\mathbf{X}}_i = [\theta_{ci}, \omega_{ci}]$ 代入式(8)可得:

$$\begin{bmatrix} \theta_{pi} \\ \omega_{pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{ci} \\ \omega_{ci} \end{bmatrix} \quad (9)$$

在 t_0 时刻,预测模型输出角度值 $\theta_p(t_0)$ 为:

$$\theta_p(t_0) = \theta_c(t_0) + \omega_c \tau \quad (10)$$

在匀速转动过程中, ω_c 为常数, $\omega_c \tau$ 即为延时误差,因此图2中, $\theta_p(t_0)$ 与 $\theta(t_0)$ 相等,预测补偿模型输出角位置等于转台发生角位置,实现转台测角系统延时误差补偿,完成无延时误差的转台角度动态测量。

对于变速等更复杂工况,参数优化模型和动态预测补偿模型过程相同,在每一个角度测量时间间隔 T 都可以根据运动状态进行迭代更新并调整预测参数 τ 取值,保证任意时刻对发生角度的预测跟踪。

2 动态角度测量电路设计

由于动态角度测量方法对电路有实时性和准确性要求,考虑 FPGA 运行速度快、可多线程工作等优点,选择基于 FPGA 平台设计动态角度测量电路,选用 ALTERA 公司的 FPGA 芯片作为主芯片,芯片型号为 EP4CE115F29C7,动态角度测量电路原理如图3所示。

基于 FPGA 平台的动态测角功能电路实现,关键在于对参数优化模型和动态预测模型的迭代运算,其核心问题是数据的存储和转移,以及矩阵运算问题。

构建有限状态机 (finite state machine, FSM) 实现数据的存储和转移功能,通过在每个状态中设定数据存储器寄存器,并通过控制状态跳转的方式实现不同状态间数

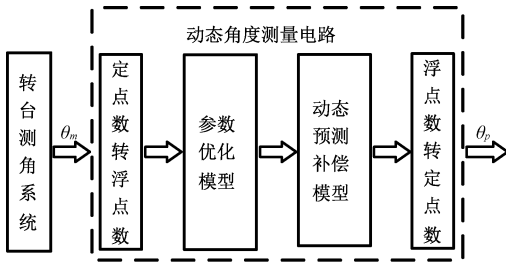


图3 动态角度测量电路原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the dynamic angle measurement circuit

据转移;通过采用流水线方式将矩阵运算拆解为数据加减乘除四则运算。由于转台测角系统输出出定点数角度测量值无法避免数据位宽累加问题,为解决位宽累加问题,采用浮点数形式完成数据运算功能。

2.1 定点-浮点转换

转台测角系统输出的角度测量值 $\theta_m(t)$ 为一个定点整数。在 Kalman 迭代运算过程中,定点数四则运算存在数据位宽累加问题,定点数格式限制了多次迭代的计算精度。将转台测角系统输出的定点数形式的角度测量值 θ_m 转化为浮点数形式,小数点位置可以随着数据大小的变化而左右浮动,从而解决迭代过程数据位宽累加问题。

在 FPGA 中实现浮点数转换的精度和转换效率对动态角度测量方法实现效果有明显影响。为保证数据精度在转换及计算过程中不受影响,防止转换引入截位误差,浮点数位宽需按照计算精度要求选择。同时,扩大浮点数数据位宽会造成动态角度测量电路实现的资源占用量增大问题。

对浮点数运算中转换截位误差、电路资源占用量与数据位宽的关系进行测试分析,结果如表 1 所示。

表 1 浮点数位宽对转换截位误差和资源占用影响
Table 1 Resource occupation and calculation error related to bit width

浮点数位宽/bit	转换截位误差/%	LUT 资源	reg 资源
16	0.05	103	226
24	0.000 4	137	302
32	0.000 012	170	378
43	0	219	480
52	0	254	569

由表 1 可见,当浮点数位宽不够大时,因为位宽原因会对定点-浮点转换引入截位误差,误差大小随位数增加快速减小,所以浮点数数据位宽应不小于原定点数数据位宽。但随着浮点数位宽的增加,硬件 LUT 资源和 reg

资源占用情况会随之增加。综合转换精度与资源占用两方面因素,并结合模块数据运算范围,依据 IEEE754 标准将 32 bit 定点数扩展为 43 bit 浮点数,其浮点数格式如图 4 所示。

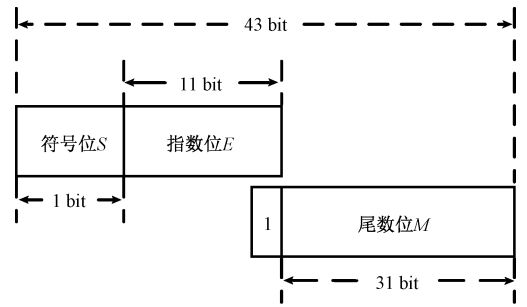


图4 43 bit 浮点数示意图

Fig. 4 Diagram of 43 bit floating point number

其中,符号位 S 为 1 bit,指数位 E 为 11 bit,尾数位 M 为 31 bit,其代数形式为:

$$f = (-1)^S \times 1.M \times 2^{E-1024} \quad (11)$$

2.2 有限状态机

Kalman 迭代运算过程可以分为多个步骤,故将动态角度测量方法采用有限状态机实现,将各状态中使用到相同资源复用到其他状态中,在不降低效率的情况下,减少 FPGA 资源使用量。

使用有限状态机实现各状态之间的跳转关系,将同一时间内的矩阵运算控制在一个状态中完成。动态角度测量过程中存在 5 种状态,使用三段式状态机控制状态跳转,有限状态机原理如图 5 所示。

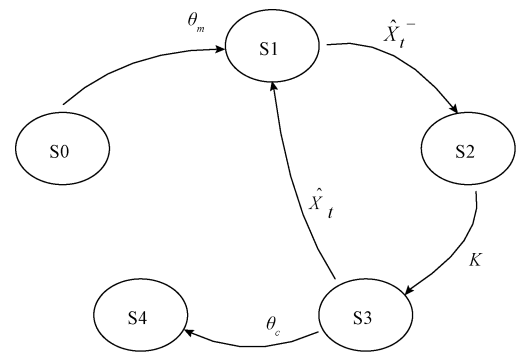


图5 有限状态机原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the process for finite state machine

状态机在 S0 状态时,对 Kalman 迭代运算各矩阵参数进行初始化,接收到角度测量值 θ_m 后状态依次跳转到 S1 状态计算当前估计,S2 状态计算 Kalman 滤波增益 K 、S3 状态计算最优估计,完成 Kalman 迭代运算过程,得到最优估计值 θ_c 并跳转回 S1 状态计算下一次接收到的角度测量值,同时跳转到 S4 状态完成 Kalman 预测。

2.3 矩阵运算

在同一个状态内存在多个矩阵方程同时运算的现象,结合 FPGA 并行、多线程工作优势,采用流水线结构将矩阵运算拆解为四则运算,进一步提高矩阵运算效率,简化动态角度测量方法在 FPGA 中的结构。

为保证动态角度测量方法本身的实时性,在每个状态机内使用流水线结构,将矩阵运算分解成小规模加减法和乘法并行操作,其流水线结构如图 6 所示。

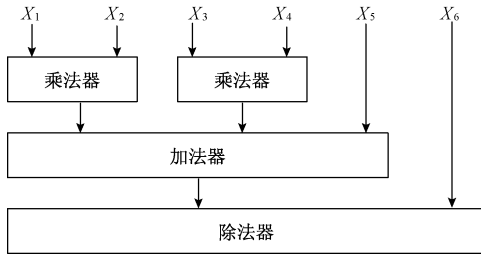


图 6 矩阵运算流水线结构示意图

Fig. 6 Pipelined architecture diagram of the matrix operation

针对每个状态内 Kalman 迭代过程中的矩阵运算,调整流水线结构中乘法器 MUL、加法器 ADD 以及除法器 DIV 的数量和串并联结构,在同一时钟内,并行运算多个流水线,可同时得到多个矩阵的运算结果。

使用 Quartus 软件评估动态角度测量方法的性能,选择 FPGA 工作时钟为 100 MHz,利用有限状态机 FSM 和流水线结构在 FPGA 电路中实现动态角度测量方法,通过代码优化和时序约束,保证系统不存在时序违例,共占用 LE 资源 12 236,延时 93 个系统时钟,完成延时误差实时预测补偿功能,同时保证了动态角度测量方法的实现精度和效率。

3 实验与数据分析

为了验证基于 Kalman 滤波的动态角度测量方法效果,搭建实验系统开展方法有效性和测量精度验证实验。基于 MATLAB 产生的转台测试数据,测试在不同工况下动态角度测量方法的有效性;将动态角度测量方法应用于实际转台测角系统,验证测量精度以及在不同转速下的普遍适用性。

3.1 动态角度测量方法有效性验证

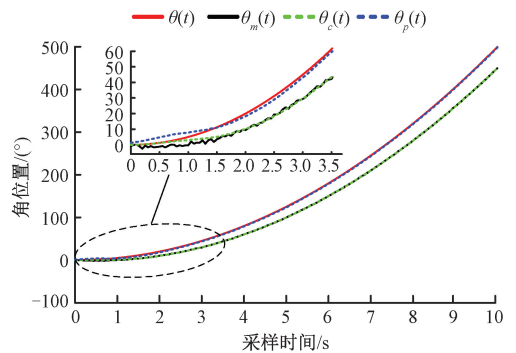
为了证明本文提出的动态角度测量方法的可实现性和有效性,基于自制电路板 (DASA_B) 开展实验,采用 ALTERA 公司 EP4CE115F29C7 作为算法承载芯片,设计编码器脉冲接收模块作为信号输入端口,电路实物如图 7 所示。



图 7 电路板实物

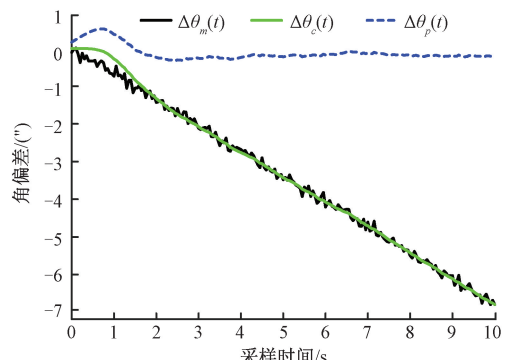
Fig. 7 Photograph of laboratory-made circuit board

采用 MATLAB 仿真转台加速度为 $10^\circ/s^2$ 时的匀变速转动的角位置值 $\theta(t)$,对其进行 $20 \mu s$ 延时仿真转台测角系统信号传输与处理时间,并增加均值为 $0''$ 、方差为 $0.1''$ 的高斯白噪声生成输出角度测量值 $\theta_m(t)$,将 $\theta_m(t)$ 输入电路板 DASA_B,通过 Kalman 迭代实现动态角度测量,获取最优估计值 $\theta_c(t)$ 和动态角度预测值 $\theta_p(t)$ 。实验结果如图 8 所示。



(a) 角度值曲线

(a) Curves of angular value



(b) 角偏差值曲线

(b) Curves of angular deviation value

图 8 动态角度测量仿真结果

Fig. 8 Simulation results of dynamic angle measurement

由图 8(a) 可见,最优估计值 $\theta_c(t)$ 与转台测角系统仿真输出测量值 $\theta_m(t)$ 近似重合,说明了 Kalman 滤波参数优化模型的有效性;动态角度预测值 $\theta_p(t)$ 与仿真发生角度值 $\theta(t)$ 近似重合,说明了动态预测模型和动态角度测量方法的有效性。

由图 8(b) 可见,由于延时原因,匀加速过程中随着转速增加, $\Delta\theta_m(t) = \theta_m(t) - \theta(t)$ 近似线性增加,且 $\theta_m(t)$ 中的噪声作用会直接传递到 $\Delta\theta_m(t)$;对于 $\Delta\theta_c(t) = \theta_c(t) - \theta(t)$, Kalman 滤波展示出了良好的优化效果,能够与 $\Delta\theta_m(t)$ 近似重合且消除了噪声影响;对于动态角度测量误差 $\Delta\theta_p(t) = \theta_p(t) - \theta(t)$,其始终为近似常数,没有被转速变化所影响,即消除了延时误差对动态角度测量的精度影响,证明了本文所提动态角度测量方法的正确性和可行性。

转动开始阶段, $\Delta\theta_c(t)$ 和 $\Delta\theta_p(t)$ 都出现了相对较大的偏差,这是因为在 Kalman 滤波迭代过程中的初值影响,应用过程中应该予以避免。

3.2 动态角度测量实验

为验证动态角度测量方法在实际应用中的有效性,搭建动态角度测量实验平台,实验装置如图 9 所示。转台通过上位机控制运动,环形激光陀螺仪安装在转台上,为实验提供比对参考值 θ_g ,标定转台测角系统动态测角的延时误差。实验在中国计量科学研究院开展,动态角度测量系统主要仪器及其参数如表 2 所示。

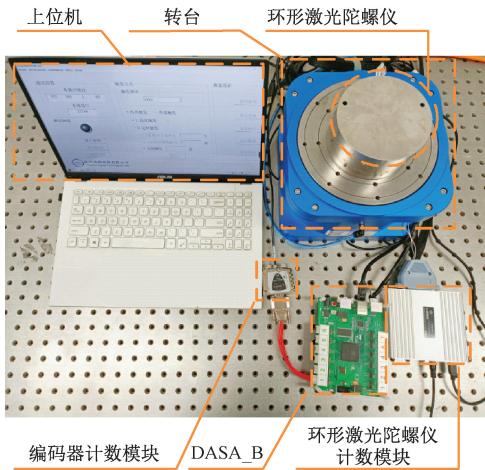


图 9 实验装置

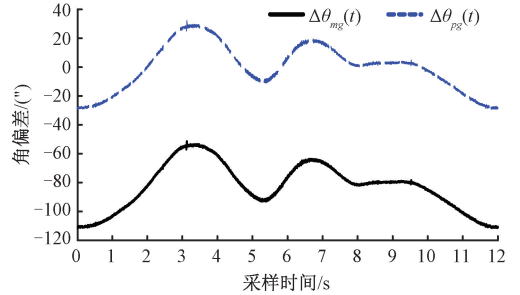
Fig. 9 Photograph of experiment setup

表 2 主要仪器规格

Table 2 Specifications of main instruments

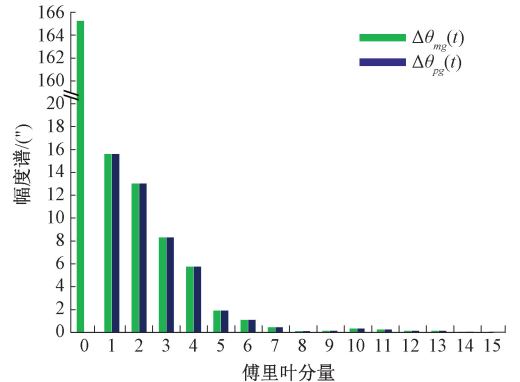
仪器名称	型号(制造商)	技术参数
环形激光陀螺仪	(西安 618 所)	零漂: $\pm 0.4''$; 精度: $0.05''$
圆光栅盘	R10851 (MicroE)	16384 刻线; 栅距: $20 \mu\text{m}$
读数头	Mercury 3000 (MicroE)	细分倍率: 1 024 分辨率: $0.077''$

在转台为 $30^\circ/\text{s}$ 转速工况下开展实验,以环形激光陀螺仪输出为参考值,采用自制电路 DASA_B 获取转台测角系统输出角度测量值 $\theta_m(t)$,并实现基于 Kalman 滤波的动态角度测量,输出动态角度预测值 $\theta_p(t)$ 。分别将 $\theta_m(t)$ 和 $\theta_p(t)$ 与环形激光陀螺仪参考值 $\theta_g(t)$ 进行差值处理,结果如图 10 所示。



(a) 误差曲线时域图

(a) Timedomain curves of the error



(b) 误差曲线频域图

(b) Frequency domain curves of the error

图 10 动态角度测量误差曲线

Fig. 10 Comparison of the angular deviation curves

由图 10(a) 可见,转台测角系统输出角度误差 $\Delta\theta_{mg}(t) = \theta_m(t) - \theta_g(t)$ 与动态角度测量误差 $\Delta\theta_{pg}(t) = \theta_p(t) - \theta_g(t)$ 的误差波形近似相同;由图 10(b) 可见, $\Delta\theta_{mg}(t)$ 和 $\Delta\theta_{pg}(t)$ 的各阶频谱强度近似相等,仅代表直流分量的零阶分量存在非常大的差异,对应时域内波形直流分量差异。

图 10(a) 中,误差函数波形与转台自身定位误差函数相关,受转台读数头安装数量及运动过程中其他误差源影响。 $\Delta\theta_{mg}(t)$ 和 $\Delta\theta_{pg}(t)$ 的误差曲线波动峰峰值均为 $61''$, $\Delta\theta_{mg}(t)$ 的波动范围为 $-111.63'' \sim -51.18''$,均值为 $-82.62''$, $\Delta\theta_{pg}(t)$ 的波动范围为 $-29.42'' \sim 32.23''$,均值约为 $-0.01''$ 。可见本文所提出的动态角度测量方法有效消除了延时误差的影响,提高动态角度测量精度。

进一步验证本文提出的动态角度测量方法在实际转台测角系统中应用的普遍适用性。分别设置转台转速为 $10^\circ/\text{s}$ 、 $30^\circ/\text{s}$ 、 $60^\circ/\text{s}$ 、 $120^\circ/\text{s}$ 开展动态角度测量实验,实验结果如表 3 所示。

表3 不同转速下的动态角度测量精度
Table 3 Dynamic angle measurement accuracy
at different speeds

$\omega/$ ($^{\circ}/s$)	$\Delta\theta_{mg}/$ ($"$)	$\Delta\theta_{pg}/$ ($"$)	$\overline{\Delta\theta}_{mg}/$ ($"$)	$\overline{\Delta\theta}_{pg}/$ ($"$)
10	-75.78~-15.13	-29.72~32.93	-46.63	-0.03
30	-111.63~-51.18	-29.43~32.23	-82.62	-0.01
60	-166.13~-106.07	-29.27~32.14	-137.09	0.01
120	-274.06~-214.43	-29.02~31.20	-245.25	-0.02

由表3可见,随着角速率增大,预测补偿前延时误差曲线的均值 $\overline{\Delta\theta}_{mg}$ ($"$)近似线性增大,但趋势和波动范围均未改变,进一步说明转台测角系统延时误差可由误差曲线均值表示,且延时误差与转速和延时量之间存在关系,与原理分析吻合。预测补偿后,各个转速工况下 $\overline{\Delta\theta}_{pg}$ ($"$)曲线均值均趋于0 $"$ 附近,在各转速工况下均值差异小于0.05 $"$,证明本文所提动态角度测量方法在不同工况下对系统延时误差都有良好的预测补偿效果。

4 结 论

本文针对转台测角系统在动态角度测量过程中的延时误差问题,提出一种基于 Kalman 滤波的动态角度测量方法。通过分析 Kalman 滤波原理,构建参数优化模型和动态预测模型;根据动态测角方法的计算过程和实现需求,设计基于 FPGA 的硬件电路;将方法应用于实际转台测角系统,借助环形激光陀螺仪搭建实验平台。实验结果表明,该动态角度测量方法可有效消除转台测角系统的延时误差,对提高转台测角系统动态角度测量精度具有良好的实际应用价值。

参考文献

- [1] WATANABE T, SAMIT W, VATCHARANUKUL K, et al. High resolution selfa rotary table by the interpolation signal calibration [J]. Key Engineering Materials, 2014, 3392(625): 53-59.
- [2] 程真英. 动态测量误差的贝叶斯建模预报及不确定度研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2004.
- CHENG ZH Y. Study on bayes modeling and predicting

for dynamic measurement errors and measurement uncertainty[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.

- [3] HUANG M, LIU P K, XIA Y Q, et al. Calibration of an indexing table using a high precision angle comparator[C]. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017, 95: 07022.
- [4] 黄明, 刘品宽, 夏仰球, 等. 自研角度计量转台在圆分度器件校准中的应用[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 110-120.
- HUANG M, LIU P K, XIA Y Q, et al. Calibration of circular division artifacts using a self-developed angle comparator [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1): 110-120.
- [5] XIA Y Q, 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.
- [6] 武丹, 李剑, 韩焱. 一种基于电磁感应原理的角位移参数测量方法[J]. 传感技术学报, 2017, 30(2): 211-217.
- WU D, LI J, HAN Y. A measurement method for angular displacement parameter based on the electromagnetic induction principle [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(2): 211-217.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李尔丽, 薛梓, 黄焱, 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] CHEN L, ZHOU Y L, ZHANG D W, et al. A dynamic

- angle metrology system based on fibre-optic gyroscope and rotary table [J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2019, 26(3): 497-504.
- [11] 孙方金. 角度的动态测量[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S1): 6-10.
SUN F J. Dynamic measurement of angles[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S1): 6-10.
- [12] JIN N, CHENG Y Z, SUN S Y. Design of angle measurement system based on magnetic grid displacement sensor [J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(8): 191-193.
- [13] 唐声权, 刘均松, 张新磊. 高准确度转台中动态测角方法的研究[J]. *宇航计测技术*, 2011, 31(2): 8-12.
TANG SH Q, LIU J S, ZHANG X L. Research on dynamic goniometry of high accuracy motion simulator[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2011, 31(2): 8-12.
- [14] 黄晓敏. 传感器动态特性补偿方法研究及其 FPGA 实现[D]. 太原:中北大学,2015.
HUANG X M, Research on compensation method of sensor's dynamic characteristics and its FPGA implementation[D]. Taiyuan:North University of China, 2015.
- [15] 何秋农. 基于预测滤波的光电系统跟踪控制技术研究[D]. 成都:中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021.
HE Q N. Research on tracking control technology of photoelectric system based on predictive filtering [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [16] 刘西钊, 阮丽江. 动态光电自准直仪[J]. *光电工程*, 1992(1): 27-32.
LIU X ZH, RUAN L J. Dynamic photoelectric self collimator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1992(1): 27-32.
- [17] 王成秀, 陆振伦, 梁世伟. 动态激光小角度测量仪[J]. *仪器仪表与分析监测*, 1989(2): 13-15.
WANG CH X, LU ZH L, LIANG SH W. Dynamic laser small angle measuring instrument [J]. *Instrumentation Analysis Monitoring*, 1989(2): 13-15.
- [18] 王帆, 黄焱, 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.
- [19] DU S W, HU J C, ZHU Y, et al. Analysis and compensation of synchronous measurement error for multichannel laser interferometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(5):055201.
- [20] 王辛. 圆光栅动态测角时效误差补偿技术研究[D]. 杭州:中国计量大学, 2020.
WANG X. The research of compensation technique for data age error in dynamic angle measurement by rotary grating[D]. Hangzhou:China Jiliang University, 2020.

作者简介



马新宇,2020年于中国计量大学获得学士学位,现为中国计量大学硕士研究生,主要研究方向为转台动态角度测量方法。

E-mail: p20020854056@cjl.u.edu.cn

Ma Xinyu received his B.Sc. degree from China Jiliang University in 2020. He is currently a M.Sc. candidate at China Jiliang University. His main research interests include turntable dynamic angle measuring method.



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@cjl.u.edu.cn

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

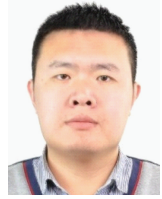


黄焱,2004年和2007年于北京工业大学分别获得学士学位和硕士学位,现为中国计量科学研究院长度与精密工程计量分部高级工程师,浙江大学博士研究生,主要研究方向为角度计量。

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 is currently a senior engineer at Division of Metrology in Length and Precision Engineering of National Institute of Metrology, and a Ph.D. candidate at Zhejiang University. His main research interests include angle measurement.



邹伟,2020 年于北京航空航天大学获得博士学位,现为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.



薛梓,2006 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为亚太计量规划组织长度技术委员会主席、国际计量技术委员会长度咨询委员会委员,主要研究方向为几何量计量。

E-mail: xuez@nim.ac.cn

Xue Zi received her Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2006. She is currently the Chairman of the Technical Committee of Length (TCL) of the Asia Pacific Metrology Programme (APMP), the member of Consultative Committee for Length (CCL) of the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Her main research interest is geometric measure.