

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514522

基于转台自身信号的精度在线监测方法^{*}

谢家波¹, 朱维斌¹, 黄垚², 朱进³, 麻莉²

(1. 中国计量大学计量测试与仪器学院 杭州 310018; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029;
3. 浙江省质量科学研究院 杭州 310019)

摘要:针对转台在长期运行中精度保持与监测的实际需求,提出了一种基于转台自身信号的精度在线监测方法。以 ISO230-2 标准中定义的定位精度 A 和重复定位精度 R 为监测指标,建立了由转台圆周定位偏差 $\varepsilon(\theta)$ 到监测指标的映射模型;通过分析双读数头输出信号的相位关系,结合傅里叶变换实现圆周定位偏差的自分离与精度指标的在线计算。在此基础上,设计并实现了基于 ZYNQ 的在线监测系统,针对信号同步采集与最优谐波阶次选择两个关键问题进行理论分析并提出解决方案。搭建实验平台,以自准直仪和多面棱体作为参考系统,首先对在线监测系统分离的谐波残差进行分析,确定当前最优谐波阶次,进而通过傅里叶变换分离得到定位偏差,实验表明,该方法分离得到的定位偏差与参考装置所得高度一致,其分离精度优于 $2.10''$,验证了定位偏差分离方法的准确性;进一步通过施加载荷的方法改变转台精度状态,当负载自空载逐步增至 5 kg 时,系统能有效监测到转台定位精度由 $289.40''$ 变至 $292.70''$,重复定位精度由 $0.23''$ 变至 $0.38''$,表明自研系统能够实现 $0.01''$ 等级的精度变化监测,验证了所提方法在转台运行过程中对精度实时、有效监测的可行性与准确性。

关键词:精度监测;定位精度;重复定位精度;傅里叶变换

中图分类号: TH712 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Online monitoring method for the accuracy of the rotary table based on its own signals

Xie Jiabo¹, Zhu Weibin¹, Huang Yao², Zhu Jin³, Ma Li²

(1. College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 3. Zhejiang Institute of Quality Sciences, Hangzhou 310019, China)

Abstract: To address the practical need for maintaining and monitoring the accuracy of rotary tables during long-term operation, this paper proposes an online accuracy monitoring method based on the rotary table's own signals. Using the positioning accuracy A and repeatability R defined by ISO230-2 as the core monitoring indicators, a mapping model from the circumferential positioning deviation $\varepsilon(\theta)$ of the rotary table to the monitoring indicators is established. By analyzing the phase relationship of signals output by the dual reading heads and combining it with the Fourier Transform, the circumferential positioning deviation is separated automatically and accuracy indicators are calculated online. On this basis, an online monitoring system based on ZYNQ is designed and implemented, and theoretical analyses were conducted and solutions were proposed for two key issues: signal synchronous acquisition and optimal harmonic order selection. An experimental platform is built, using an autocollimator and a multi-face prism as the reference system. First, the harmonic residuals separated by the online monitoring system are analyzed to determine the current optimal harmonic order. Then, the positioning deviation is separated through Fourier Transform. Experiments show that the positioning deviation obtained by this method is highly consistent with those obtained by the reference device, with a separation accuracy better than $2.10''$, validating the accuracy of the positioning deviation separation method. Furthermore, by applying loads to change the accuracy state of the rotary table, when the load

gradually increases from no load to 5 kg, the system can effectively monitor the change in positioning accuracy from 289.40" to 292.70" and repeatability from 0.23" to 0.38", indicating that the self-developed system can monitor accuracy changes at the 0.01" level. This confirms the feasibility and accuracy of the proposed method for real-time and effective monitoring of accuracy during rotary table operation.

Keywords: accuracy monitoring; positioning accuracy; positioning repeatability; Fourier Transform

0 引言

转台作为一种高精度的角度定位装置,能够实现全圆周范围内的精确定位,广泛应用于航空航天^[1]、机器人及工业制造^[2]等领域。随着尖端装备不断向高效率和高可靠性方向发展,系统在长期运行中对转台精度稳定性的要求日益严格。在工业现场应用中,受部件磨损,机械老化及负载变化等因素影响,转台精度会随之改变。因此,开展转台的长期在线精度监测,对于保障其持续处于良好工作状态具有重要意义。

现有转台精度监测方法主要分为两类。第 1 类方法依赖外部高精度仪器(如自准直仪、多面棱体等)对转台进行标定,或采用自校准方法分离误差曲线,通过监测误差变化以判断转台精度是否发生改变。文献[3]提出一种用于旋转编码器校准的“移角法”,通过改变多边形起始角度,利用自准直仪和多边形实现对小于多边形面间角的任意角度进行校准,实验验证其与自校准方法结果差异<±0.1";文献[4]提出了一种基于激光跟踪仪多站位测量系统的高精度转台角度定位偏差标定方法,通过将激光跟踪仪固定于转台并利用 Levenberg-Marquardt 算法与奇异值分解对站位坐标进行自标定与优化,建立了站位坐标与转台转角之间的几何关系模型,从而校准角度偏差,该方法可实现±0.9"的角度定位偏差;文献[5]提出了一种采用光纤导光的新型旋转激光扫描发射站结构及其高精度测量模型,三维坐标测量精度优于 0.7 mm,实现了亚毫米级三维坐标测量。文献[6]提出基于光纤陀螺和自准直仪的转台动态标定方法,在 360°范围内校准误差<±3";文献[7]提出了一种针对船载双轴旋转惯性导航系统在动基座条件下的动态自校准方法,该方法结合卡尔曼滤波与基于粒子群优化的扩展小波变换,有效消除扰动速度干扰,将陀螺校准精度提升 92%、定位精度提升 24%;文献[8]提出了一种基于双自准直仪的角度校准方法,能够同时校准旋转编码器的角度误差和多面棱体的面间角偏差,实验结果表明其校准结果与现有方法一致,扩展不确定度为 0.46";文献[9]利用两个可调位置的读数头模拟多个读数头,实现编码器的自校准,残余误差峰峰值<18.82",重复性精度优于 0.75";文献[10-11]通过优化读数头排布并结合传递函数的方法,有效分离分度误差和主轴运动误差,分度误差精度达到±0.17",主轴径向误差峰峰值为±0.2 μm;文献[12-13]

开发基于 3~4 读数头排布方式的自校准角度编码器系统,定位精度在±1.5"内,重复性优于 1.1",并采用全组合和等分平均(equal division average, EDA)法混合测角校准的误差分离方法提高精度,最终测角精度优于±0.1"。文献[14]提出了一种环形激光陀螺与光学轴角编码器的互校准方法。该方法利用编码器的零位信号校准陀螺,使其平均测量误差从 1.939"降至 0.536",降低 72.38%;文献[15]开发了嵌入式传感器系统监测转台的五自由度几何误差,±100"测量范围内的倾斜角检测精度优于±5"。上述方法虽能够准确获取转台的核心精度指标,但通常需要依赖外部设备^[16]或多个传感器^[17],对安装精度要求极高,成本较大,难以满足工业现场的长期在线应用需求。

第 2 类方法通过构建相关参数与转台精度之间的数学模型,并利用参数变化实现精度的间接监测。文献[18]建立误差参数与待测工件环形特征位置偏差之间的数学关系模型,通过快速测量 8 个误差参数,实现对五轴机床精度的高效、高精度测量,工件预测偏差控制在 10 μm 以内;文献[19]提出了一种误差建模与补偿方法,通过建立误差模型揭示误差与转台 IAS (instantaneous angular speed) 信号波动的关系,实现了对刻划位置误差、脉冲宽度误差和非正交误差的有效估计与补偿;文献[20]通过多体系统理论和齐次坐标变换建立平动轴与旋转轴的空间误差模型,利用球杆仪在不同平面和多种安装模式下进行圆轨迹测量,实现了对 4 项平动轴关键线性误差以及转台和摆动轴共 12 项几何误差的高效分离与辨识;文献[21]利用编码器反馈的实际运动坐标,构建了进给速度、轨迹半径与误差之间的定量关系模型,在无切削条件下实现了±0.1 μm 级的误差监测;文献[22]提出精简的三花键法,仅使用 12 个球构建机床测量系统、转台以及球盘的综合误差模型,结合约束条件和最小二乘法拟合,实现了 0.1 μrad 的旋转误差和 0.1 μm 的线性误差测量精度;文献[23]通过触发式探头和未标定圆柱测试件实现机床几何误差监测,能够捕捉 20 μm 级线性轴漂移、30 μm 级旋转轴中心偏移。上述方法虽然可以同时获取转台多自由度误差信息,但在面对复杂工况时,实际误差耦合与理论模型仍存在差异,导致其监测精度难以满足应用要求。

本文针对基于转台自身信号的在线监测方法展开研究。首先明确了定位精度和重复定位精度两个核心指标,建立了从定位偏差到精度指标的映射关系;结合双读

数头信号的相位关系与傅里叶变换, 实现转台定位偏差的自分离, 进一步计算相关精度指标; 设计并实现了基于 Zynq-7020 All Programmable SoC(ZYNQ) 的在线监测系统, 针对同步采集与谐波阶次选取等关键问题进行深入分析并提出解决方案。最后, 搭建实验平台, 分别开展定位偏差分离准确性验证实验与变载荷条件下的精度监测实验, 实验结果表明, 所提方法能准确分离定位偏差, 并有效监测转台精度变化。

1 精度监测方法

定位精度与重复定位精度是表征转台精度的核心指标, 定位精度量化了转台系统误差所引起的最大偏差, 重复定位精度则反映转台随机误差的波动范围。

1.1 定位精度和重复定位精度

对转台在匀速转动过程中产生的读数头信号进行采样, 每转动一圈(360°)等间隔采样 N 个位置的角度值, 并重复采集 M 圈。设第 y 圈第 x 个位置的测量值为 $m_y(\theta_x)$, 其中 θ_x 表示转台在第 x 个位置的真实角度值, 显然有 $0 \leq \theta_x \leq 360^\circ, 1 \leq y \leq M, 1 \leq x \leq N$ 。

受噪声、安装偏差及运动误差等多种误差源的综合影响, 转台的测量角位置与真实角位置存在偏离, 如图 1 所示。

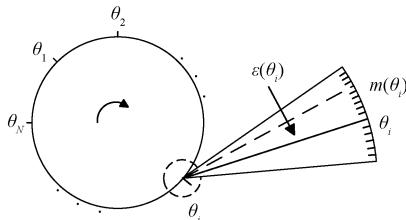


图 1 定位偏差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of positioning deviation

由图 1 可知, 虚线表明读数头在第 x 个测量值对应的转台角位置, 实线表示第 x 个真实角位置, 它们之间的角度即为定位偏差。

故读数头测量值可表示为:

$$m_y(\theta_x) = \theta_x + \varepsilon_y(\theta_x) \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_y(\theta_x)$ 表示读数头在第 y 圈第 x 个位置的定位偏差。

依据 ISO230-2 标准^[24], 为评估转台的定位精度和重复定位精度, 需获取各采样位置的标准差。计算第 x 个位置的平均偏差, 即:

$$\bar{\varepsilon}(\theta_x) = \frac{1}{M} \sum_{y=1}^M \varepsilon_y(\theta_x) \quad (2)$$

则该位置的标准差 s_x 为:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{y=1}^M [\varepsilon_y(\theta_x) - \bar{\varepsilon}(\theta_x)]^2} \quad (3)$$

在 ISO230-2 标准中, 转台重复定位精度 R 与定位精度 A 分别被定义为:

$$R = \max[4s_x] \quad (4)$$

$$A = \max[\bar{\varepsilon}(\theta_x) + 2s_x] - \min[\bar{\varepsilon}(\theta_x) - 2s_x] \quad (5)$$

依据式(4)和(5)即可完成对定位精度 A 和重复定位精度 R 的求取; 同时根据式(2)和(3)可知, 获取转台在各位置的定位偏差 $\varepsilon(\theta)$ 是计算精度指标的前提。

1.2 基于自身信号的精度监测原理

实现无需外部仪器的转台在线精度监测的关键是基于转台自身信号获取定位偏差。

在光栅盘上安装两个读数头 R_a, R_b , 以读数头 R_a 为参考零点, 两个读数头之间的安装夹角为 φ , 安装示意图如图 2 所示。

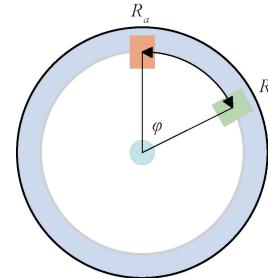


图 2 双读数头安装示意图

Fig. 2 Diagram of double reading head installation

在转台旋转过程中, 读数头 R_a 的测量值为:

$$m^a(\theta) = \theta + \varepsilon(\theta) \quad (6)$$

式中: θ 是转台转动的真实角度; $\varepsilon(\theta)$ 是转台定位偏差。由于读数头 R_b 相对于 R_a 存在夹角 φ , 则 R_b 的测量值可表示为:

$$m^b(\theta) = \theta + \varepsilon(\theta + \varphi) \quad (7)$$

将两个读数头测量值相减, 消去未知真值 θ , 得到差值函数 $\delta(\theta)$ 的表达式, 即:

$$\delta(\theta) = \varepsilon(\theta + \varphi) - \varepsilon(\theta) \quad (8)$$

根据圆周封闭原则, 定位偏差 $\varepsilon(\theta)$ 具有周期性, 可展开为傅里叶级数。对式(8)进行傅里叶变换可得:

$$\Delta(n) = (e^{in\varphi} - 1)F(n) \quad (9)$$

式中: $\Delta(n)$ 是差值函数 $\delta(\theta)$ 的傅里叶系数; $F(n)$ 是定位偏差 $\varepsilon(\theta)$ 的傅里叶系数。 $\Delta(n)$ 通过测量数据的频谱分析获得, $e^{in\varphi}$ 由读数头安装夹角 φ 决定, 故可得 $F(n)$ 为:

$$F(n) = \frac{\Delta(n)}{e^{in\varphi} - 1} \quad (10)$$

对式(10)进行傅里叶逆变换即可分离出转台的定位偏差 $\varepsilon(\theta)$ 。

可见基于转台自身信号能够实现定位偏差的分离, 并进一步求取定位精度与重复定位精度, 实现对转台精度的在线监测。

2 精度在线监测系统

2.1 基于 ZYNQ 的精度在线监测

为了满足在线监测的实时性要求, 以 ZYNQ 芯片(xc7z020CLG400)为核心构建精度在线监测系统, 该芯片集成了处理器系统(processing system, PS)和可编程逻辑(programmable logic, PL), 系统监测流程如图 3 所示。

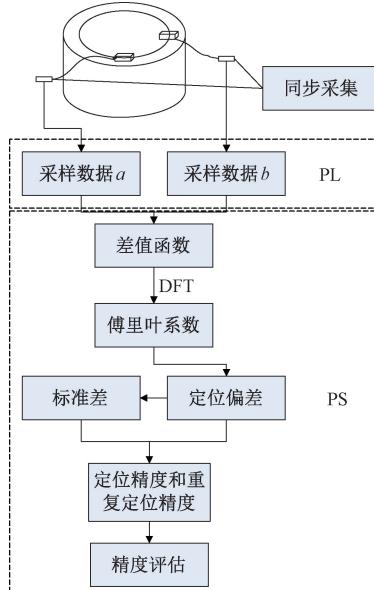


图 3 转台精度监测流程

Fig. 3 Turntable accuracy monitoring process

由图 3 可知, 在检测系统中, PL 端负责对双读数头信号采集, 以确保测量信号的同步性; PS 端则完成转台精度指标的在线计算。通过 PS 与 PL 的协同设计, 能够实现转台精度的在线监测。

2.2 双读数头信号同步采集

转台定位偏差的分离依赖于双读数头信号, 精度监测过程中信号采集同步性直接决定了分离结果的准确性。当两路信号采集存在时间差 τ 时, 若读数头 R_b 信号滞后于 R_a , 根据式(7)可知, 其测量值表示为:

$$m^b(\theta) = \theta + (\tau v) + \varepsilon(\theta + \varphi + \tau v) \quad (11)$$

式中: v 表示转速。

此时, 式(8)转化为:

$$\delta(\theta) = (\tau v) - \varepsilon(\theta + \varphi + \tau v) - \varepsilon(\theta) \quad (12)$$

可见差值函数不仅引入了直流偏置 τv , 同时还导致定位偏差发生相移。

基于三段式有限状态机设计同步采集模块, 在完成同步采集任务的同时, 能够有效抑制信号竞争冒险以及毛刺干扰。同步采集状态机如图 4 所示。

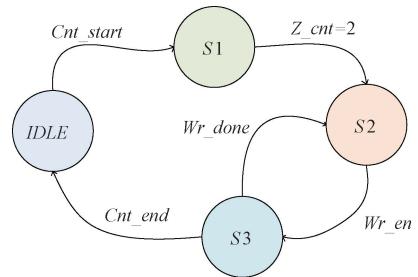


图 4 同步采集状态机

Fig. 4 Synchronous acquisition state machine

系统初始处于 $IDLE$ 状态, 当接收到 PS 端产生的 Cnt_start 信号后, 进入下一状态。 $S1$ 状态为准备计数阶段, 通过对 Z 信号计数, 判断转台转动圈数。为避免转台启动时非匀速状态的影响, 当系统接收到第 2 个 Z 信号后, 再进入定时采样($S2$)状态。在 $S2$ 状态下, 系统完成转台信号的四细分计数, 并启动时钟计数器, 当时钟计数值到设定值后, 产生 Wr_en 信号, 并进入数据写入($S3$)状态。在 $S3$ 状态中, 系统实现读数头数据储存, 随后返回 $S2$ 状态, 重复操作, 直到接收 Cnt_end 信号后, 完成同步采集任务, 跳转回 $IDLE$ 状态。

通过状态机设计, 同步采集任务被划分为若干独立状态, 其中数据写入操作能够在两个时钟周期内完成。当 PL 端时钟频率为 100 MHz 时, 两路信号最大时间差 τ 不超过 20 ns。

所选转台配套圆光栅刻线数为 16 384, 细分倍率为 1 024, 可得光栅分辨率为 0.077”。当转台在 30°/s 的转速下工作时, 由 20 ns 时间差引起的测量误差为 0.002”, 远远小于系统光栅分辨率, 可见同步采集模块能够有效抑制时间差 τ 带来的影响。

2.3 谐波阶次选取原则

在基于傅里叶变换的定位偏差分离过程中, 谐波阶次的选取直接影响系统的计算效率与分离精度。

理论上, 需对 $N/2$ 次谐波(N 为采样点数)进行逆变换, 才能分离出时域误差信号, 即:

$$\varepsilon^{N/2}(\theta) = \sum_{n=0}^{N/2} F(n) \cdot e^{in\theta} \quad (13)$$

但在实际应用中, 由于采样点数 N 非常大, 若对全部 $N/2$ 阶次进行处理会极大的影响系统工作效率, 因此需要对谐波阶次进行截断处理。利用前 K 阶谐波分离得到的定位偏差 $\varepsilon^K(\theta)$ 为:

$$\varepsilon^K(\theta) = \sum_{n=0}^K F(n) \cdot e^{in\theta} \quad (14)$$

此时分离的定位偏差不包含高阶次的谐波分量, 存在截断误差 $D_i(\theta)$ 为:

$$D_i(\theta) = \varepsilon^{N/2}(\theta) - \varepsilon^K(\theta) = \sum_{n=K+1}^{N/2} F(n) e^{in\theta} \quad (15)$$

为了实现精度与效率之间的平衡, 通过残差分析确定最优 K 值, 寻优流程如图 5 所示。

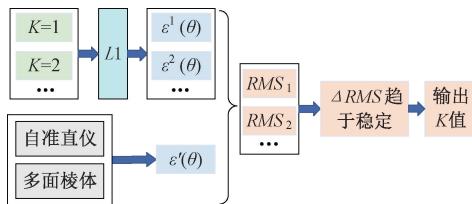


图 5 最大谐波阶次 K 寻优流程

Fig. 5 Optimization process of maximum harmonic order K

如图 5 所示, 在相同实验条件下, 首先采用在线监测系统采集转台整圆周数据 L_1 , 并利用自准直仪和多面棱体获取转台实际定位偏差曲线 $\varepsilon'(\theta)$ 。随后, 从 $K=1$ 开始, 基于 L_1 逐阶分离定位偏差曲线 $\varepsilon^k(\theta)$, 并将其与 $\varepsilon'(\theta)$ 比较以计算残差, 进一步获取残差的均方根值 (root mean square, RMS)。最后计算相邻 RMS 的变化率, 即:

$$\Delta RMS(K) = \left| \frac{RMS_{K-1} - RMS_K}{RMS_{K-1}} \right| \times 100\% \quad (16)$$

式中: $K \geq 2$ 。

当 $\Delta RMS(K)$ 连续 5 次 $< 1\%$ 时, 认为 RMS 值趋于稳定, 此时进一步增加阶次仅会加大计算量, 而对精度改善作用有限, 因此选取当前阶次 K 作为最大谐波阶次。

3 实验验证与数据分析

为验证所提出转台精度在线监测方法的有效性, 搭建实验平台并开展两组验证实验。通过对比自主研制的监测系统与参考装置各自所得定位偏差, 验证定位偏差分离方法的准确性; 通过在转台上施加不同重量的砝码改变其精度状态, 再利用自研监测系统在线计算精度指标, 从而验证该方法监测转台精度变化的可行性。

3.1 实验平台搭建

实验以气浮转台作为角位置发生装置, 配套两个光电读数头; 使用自准直仪和多面棱体作为参考装置; 使用自研监测系统同步采集双读数头信号, 并在线完成定位偏差分离及精度指标计算。实验平台搭建如图 6 所示, 主要仪器如表 1 所示。

实验过程中, 避免气流扰动及外界强磁场干扰, 环境温度保持在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 实验平台置于隔振台上, 保证数据的可靠性。

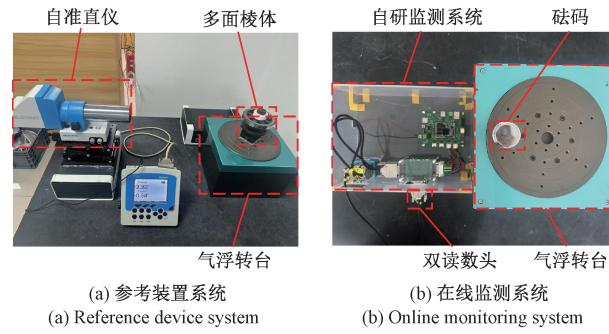


图 6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

表 1 主要仪器规格

Table 1 Main instrument specifications

仪器名称	型号(制造商)	技术参数
气浮转台	BJSM-QF-200	重复性: $\pm 0.3''$ 最高转速: $200^\circ/\text{s}$
圆光栅盘	R10851 (Micro E)	刻线数: 16 384 栅距: $20 \mu\text{m}$
读数头	Mercury 3000 (Micro E)	细分倍率: 1 024 分辨率: $0.077''$
自准直仪	ELCOMAT3000	范围: $\pm 1 000''$ 不确定度: $\pm 0.1'', k=2$
多面棱体	24-sided polygon	范围: $0^\circ \sim 360^\circ$ 不确定度: $\pm 0.2'', k=2$
转台精度在线监测系统	自研	最大采样率: 1 kHz 最大通道数: 4

3.2 定位偏差分离有效性验证实验

为确保定位精度和重复定位精度计算的准确性, 需要验证自研系统分离的定位偏差是否可靠。

计算定位偏差首先要确定最优谐波阶次, 分别对不同谐波阶次下残差 RMS 的变化率进行实验和分析, 结果如图 7 所示。

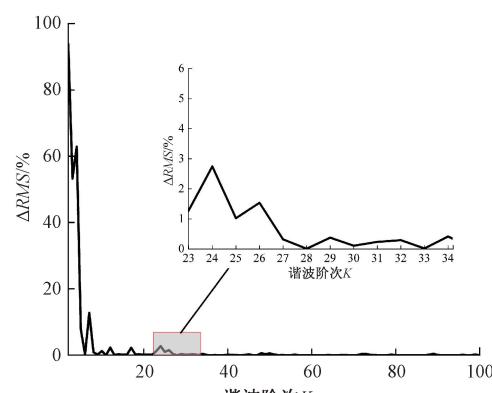


图 7 相邻 RMS 的变化率

Fig. 7 The rate of change of the adjacent RMS

图 7 展示了前 100 阶谐波对应的 ΔRMS 。在低阶阶段,新增谐波多对应误差曲线的主要频率成分,因此能够显著降低残差,导致 RMS 快速下降, ΔRMS 变化较大;随着阶次的进一步增加,高阶谐波能量逐渐减小,RMS 趋于稳定, ΔRMS 几乎不再变化。由图 7 可知,当 $K>26$ 时, ΔRMS 连续多次 $<1\%$,故本次实验选择 $K=27$ 作为傅里叶逆变换的最大谐波阶次。

确定谐波阶次后,分别利用参考系统与自研系统分离转台的平均定位偏差曲线。如图 6(a)所示,将 24 面棱体和转台同轴安装,并通过电感测微仪将同轴度调整到 $2 \mu\text{m}$ 以内。利用自准直仪和 24 面棱体获取转台整圆周 24 个位置的定位偏差,重复测量 5 圈,并根据式(2)计算各位置的平均定位偏差。如图 6(b)所示,在去掉砝码,转台空载情况下,采用自研在线监测系统同步采集安装夹角为 33° 的双读数头信号,在恒定转速 $6^\circ/\text{s}$ 下以 200 Hz 采样频率获取每圈 12 000 个位置数据,共采集 5 圈。分离结果如图 8 所示。

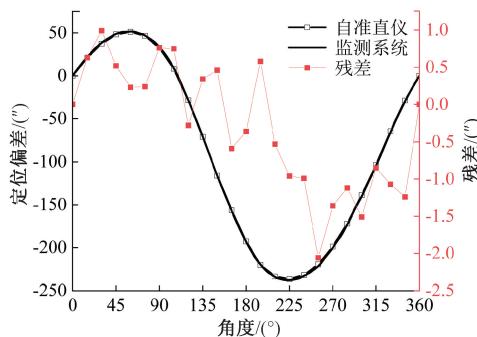


图 8 不同系统获取的定位偏差

Fig. 8 Positioning deviation obtained by different systems

由图 8 可见,在整圆周范围内,利用转台自身信号分离的定位偏差曲线与采用自准直仪和棱体校准得到的定位偏差参考值曲线吻合,残差曲线波动范围为 $-2.06''$ ~ $0.99''$ 。为了进一步明确两种方法对误差分离函数各个阶次的差异,对两条曲线作频谱分析。由于采用了 24 面棱体开展实验,对应的误差函数最高阶次为 12 阶,因此仅对两条偏差曲线的前 12 阶进行谐波分析,结果如图 9 所示。

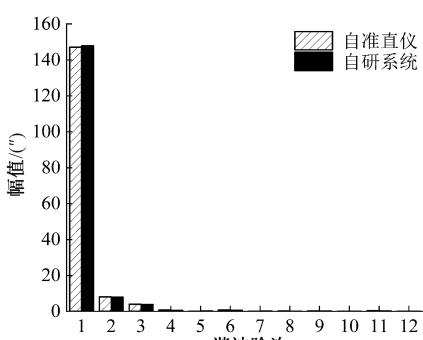


图 9 定位偏差谐波分析

Fig. 9 Analysis of positioning deviation harmonics

由图 9 可知,自准直仪与自研系统所得定位偏差以前三阶谐波为主导,占总谐波幅值的 98.8%,其中一阶谐波幅值最大,校准参考值和自身信号分离得到的谐波幅值分别为 $147.12''$ 和 $147.86''$,残差为 $0.74''$,相对误差为 0.50%;对于二阶、三阶偏差的谐波幅值,两种方法的分离结果残差分别为 $0.19''$ 、 $0.08''$,对应相对误差分别为 2.15% 和 2.43%。

以上实验结果表明,自研监测系统与参考装置分别分离的定位偏差曲线残差峰值为 $2.06''$,可见其分离精度优于 $2.10''$,并且在主要谐波成分上高度一致,证明所提方法和监测系统对定位偏差分离的准确性。

3.3 转台精度在线监测实验

为进一步验证自研系统对转台精度变化的监测能力,通过在转台单侧施加砝码以改变转台精度状态。对图 6(b)所示系统分别施加 1、2、3、4、5 kg 砝码,在各个工况下由自研监测系统采集 5 圈转台读数头数据并分离定位偏差,比较不同负载与空载条件下的平均定位偏差曲线残差,结果如图 10 所示。

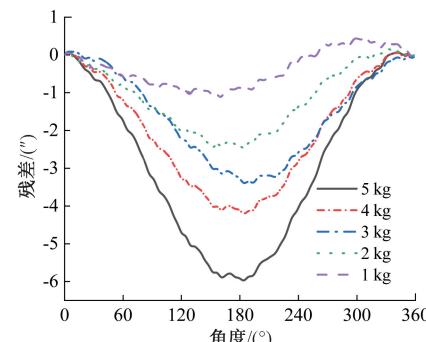


图 10 不同负载与空载定位偏差的残差

Fig. 10 Residuals of positioning deviations under different loads and no-load conditions

由图 10 可见,随着负载增加,残差曲线波动明显加大,最大残差值由 1 kg 负载时的 $-1.11''$ 逐渐增大至 5 kg 负载下的 $-5.97''$,表明载荷增加能够改变转台的精度状态。

对各个载荷状态下的转台精度进行量化评价,利用每一圈的定位偏差与平均定位偏差,获取所有采样位置对应的标准差,并在线计算不同负载下转台的定位精度和重复定位精度,结果如图 11 所示。

由图 11 可见,当施加砝码改变转台状态条件时,随着载荷增加,转台定位精度与重复定位精度对应数值增加。当负载由 0 增至 5 kg,转台定位精度由 $289.40''$ 上升至 $292.70''$,重复定位精度由 $0.23''$ 上升至 $0.38''$,实验过程中,系统所记录的定位精度与重复定位精度最小变化

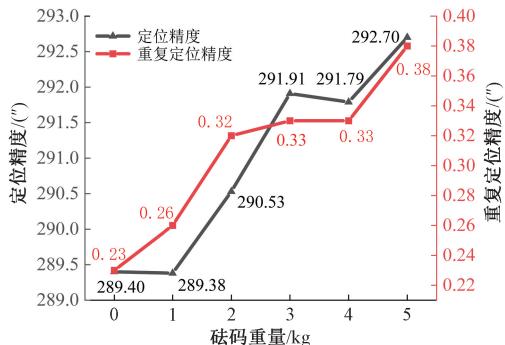


图 11 不同负载下转台精度数据

Fig. 11 Rotary table accuracy data under different loads

步长达到 $0.01''$ 量级。结果表明,自研系统能够精确监测转台定位精度与重复定位精度变化,其监测灵敏度可达 $0.01''$ 。

4 结 论

本文提出一种基于转台自身信号的在线精度监测方法,明确定位精度和重复定位精度作为核心监测指标,并构建了从定位偏差到精度指标的映射模型;基于傅里叶变换,利用转台内置的双读数头信号相位关系,实现了转台定位偏差的分离,并在线计算相关精度指标。设计并搭建了基于ZYNQ的在线监测系统,确保信号采集与数据处理的实时性,针对信号同步采集与谐波阶次选择两个关键问题进行分析并提出解决方案。实验结果表明,所提方法能有效分离定位偏差,分离精度优于 $2.10''$;在转台未补偿且施加载荷的条件下,转台定位精度和重复定位精度能够随负载变化而被精确监测,当负载由0增至5 kg时,定位精度由 $289.40''$ 变至 $292.70''$,重复定位精度由 $0.23''$ 变至 $0.38''$,系统对两者变化量的监测灵敏度可达 $0.01''$,证明研究具备实际应用价值。

参考文献

- [1] WANG Y ZH, SUI X D, ZHANG T Q, et al. Design and experimental study on the torque balancing mechanism of a satellite-borne two-axis rotary table [J]. Machines, 2023, 11(8): 830.
- [2] LOU ZH F, LIU L, ZHANG J Y, et al. A self-calibration method for rotary tables' five degrees-of-freedom error motions [J]. Measurement, 2021, 174: 109067.
- [3] HSIEH T H, WATANABE T, HSU P E. Calibration of rotary encoders using a shift-angle method [J]. Applied Sciences, 2022, 12(10): 5008.
- [4] CHEN H F, 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.

- [5] 滕明鑫, 林嘉睿, 吴腾飞, 等. 新型旋转激光扫描系统发射站结构设计与测量模型构建[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(7): 60-72.
- [6] TENG M X, LIN J R, WU T F, et al. Structural design of the transmitter and measurement model construction for a novel rotating laser-scanning system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(7): 60-72.
- [7] MOU J P, SU J J, MIAO L J, et al. Research on field application technology of dynamic angle measurement based on fiber optic gyroscope and autocollimator [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(13): 15308-15317.
- [8] HAN S L, NI CH L, ZHAO M C, et al. A dynamic self-calibration approach with anti-disturbance capability for dual-axis rotary inertial navigation system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-10.
- [9] HSIEH T H, LIN M X, YEH K T, et al. Calibration of a rotary encoder and a polygon using a two-autocollimator method [J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1865.
- [10] WANG X Y, ZHAO CH X, XIAO L Y, et al. Self-calibration method for circular encoder based on two reading heads with adjustable positions [J]. Machines, 2024, 12(4): 246.
- [11] JIAO Y, DONG Z G, DING Y, et al. Optimal arrangements of scanning heads for self-calibration of angle encoders [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(10): 105013.
- [12] JIAO Y, DING Y, DONG Z G, et al. Optimal-arrangement-based four-scanning-heads error separation technique for self-calibration of angle encoders [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(8): 085005.
- [13] HUANG Y, XUE Z, QIAO D, et al. Study on the metrological performance of self-calibration angle encoder [C]. 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test, Measurement Technology, and Equipment. SPIE, 2016, 9684: 167-174.
- 李尕丽, 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.
- [14] YU N, CAI X Z, YAN J X, et al. Mutual calibration method of ring laser gyro and optical shaft encoder[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(20): 24696-24710.
- [15] LOU ZH F, HAO X P, CAI Y D, et al. An embedded sensor system for real-time detecting 5-DOF error motions of rotary stages[J]. Sensors, 2019, 19(13): 2855.
- [16] HSIEH T H, WATANABE T, HSU P E. Calibration of rotary encoders using a shift-angle method[J]. Applied Sciences, 2022, 12(10): 5008.
- [17] LU X D, GRAETZ R, AMIN-SHAHIDI D, et al. On-axis self-calibration of angle encoders[J]. CIRP Annals, 2010, 59(1): 529-534.
- [18] FLORUSSEN G H J, SPAAN H A M, SPAAN-BURKE T M. Assessing the accuracy of five axis machines by comparing machine measurement data with test work piece deviations[J]. Procedia Manufacturing, 2016, 6: 25-32.
- [19] YIN X CH, GUO Y, NA J, et al. Incremental optical encoder error modeling and compensation for accurate speed acquisition in non-stationary conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 72(1): 1033-1042.
- [20] 焦安铃, 陈光胜. 基于球杆仪的五轴数控机床误差快速检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 138-148.
- JIAO AN L, CHEN G SH. Fast error identification method for five-axis machine tools based on double ball-bar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 138-148.
- [21] DOS SANTOS B C, DE ANDRADE G, DEL CONTE E G. A method for monitoring and diagnosing the circular trajectory error in micromilling[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(12): 4639-4645.
- [22] KELLER F, STEIN M. A reduced self-calibrating method for rotary table error motions[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(6): 065015.
- [23] ONISHI S, IBARAKI S, KATO T, et al. A self-calibration scheme to monitor long-term changes in linear and rotary axis geometric errors[J]. Measurement, 2022, 196: 111183.
- [24] Test code for machine tools — Part 2; Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes: ISO 230-2: 2014[S]. Geneva,

Switzerland: International Organization for Standardization, 2014.

作者简介



谢家波, 2023 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定位偏差实时分离与补偿。

E-mail: s23020804063@cjlu.edu.cn

Xie Jiabo received his B. Sc degree from China Jiliang University in 2023. He is currently pursuing his master degree at China Jiliang University. His main research interest includes real-time separation and compensation of rotary table positioning deviation.



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 a professor at China Jiliang University. His main interests include the grating signal processing and precision angle measurement.



黄垚, 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, 目前在浙江大学攻读博士学位, 主要研究方向为角度计量。

E-mail: huangyao@nim.ac.cn



Huang Yao received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Beijing University of Technology in 2004 and 2007, respectively. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Zhejiang University. His main research interest is angle measurement.



朱进, 2022 年获得中国计量大学计量测试工程学院硕士学位, 现为浙江省质量科学研究院工程师, 主要研究方向为几何量计量。

E-mail: 1067940964@qq.com



Zhu Jin received his M. Sc. degree from the School of Metrology and Testing Engineering from China Jiliang University in 2022. He is currently an engineer at the Zhejiang Institute of Quality Science. His main research interest is geometric metrology.