

DOI: 10.13382/j.jemi.B2105020

偏心偏斜对转台圆光栅莫尔信号的影响研究^{*}

白 冰¹ 朱维斌¹ 黄 焱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:转台测角系统偏心偏斜会改变莫尔信号特征,并进一步影响转台定位精度。针对偏心偏斜对转台圆光栅莫尔信号的影响开展研究。首先分析转台测角系统工作原理,阐述转台圆光栅莫尔信号特征分离方法原理;针对圆光栅莫尔信号特征误差源进行分析,分别建立偏心 and 偏斜对莫尔信号特征的影响模型,明确莫尔信号特征谐波阶次与偏心、偏斜关系;基于FPGA开发莫尔信号特征分离电路,并以自制电路板为实验平台,验证了莫尔信号特征分离方法可行性和分离电路功能有效性;搭建偏心、偏斜测试平台验证偏心偏斜对转台圆光栅莫尔信号影响模型的准确性,实验结果表明,偏心、偏斜分别与莫尔信号特征一次、二次谐波呈线性关系,非线性误差为3.88%和2.08%。

关键词:转台测角系统;偏心;偏斜;圆光栅;莫尔信号

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 effect of eccentricity and inclination on
the Moiré signal of turntable

Bai Bing¹ Zhu Weibin¹ Huangyao² Xue Zi²

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

Abstract: The characteristics of Moiré signal and the positioning accuracy of turntable is sensitive to eccentricity and inclination. A research on the effect of eccentricity and inclination on the Moiré signal of grating of turntable in this paper. The working principle of turntable angular measurement system is described and the principle of separation method of Moiré signal characteristic is elaborated in detail. The error sources of Moiré signal are analyzed, the effect model of eccentricity and inclination are established respectively, and the relationship among the harmonic order of Moiré signal characteristic, eccentricity and inclination is deduced. The separation method of Moiré signal characteristic is implemented using a laboratory-made field-programmable gate array circuit. The result of experiment performed on the eccentricity and inclination test platform confirmed that eccentricity and inclination have linear relationship with first and second harmonic of Moiré signal characteristic, and nonlinear error is 3.88% and 2.08%.

Keywords: turntable angular measurement system; eccentricity; inclination; circular grating; Moiré signal

0 引 言

转台测角系统可实现全圆范围内角度的连续测量。由于具有高分辨力、大行程的优势,转台测角系统在精密制造、航空航天、国防军工等领域被广泛应用^[1-2]。由于转台测角系统轴系的加工精度有限以及角度传感器存在

装配误差,使得偏心偏斜成为影响测角精度的主要误差因素,同时反映为莫尔信号特征随之变化^[3-4]。随着各行各业对转台测角系统测角精度要求越来越高,如何实现对偏心偏斜快速准确的监测、减小偏心偏斜对转台测角系统测角精度的影响,成为转台测角系统使用过程中被重点关注的问题。

针对提升转台测角系统测角精度这一问题,很多研

究机构通过建立偏心偏斜与测角误差关系模型,结合误差补偿思想达到提升测角精度的目的^[5-6]。中国科学院大学的任曦等^[7]分析了圆光栅安装偏心与测角误差的关系,且认为转台轴系晃动带来的测角误差也是偏心误差的一种情况,最终得出偏心会引入测角误差谐波阶次的一阶成分,并通过多读数头排列的方法消除测角误差谐波分量,最终将测角精度从 15" 提高至 0.8";Chen^[8]在分析圆光栅安装偏心和安装偏斜对测角误差影响的基础上,提出了一种基于压缩感知和稀疏分解提高测角精度的方法,实验证明该方法可将转台测角系统测角误差降低 97%;Chen 等^[9-10]基于齐次变换结合莫尔条纹方程,推导出了圆光栅安装偏心导致的测角误差模型,得到圆光栅中心与转轴中心偏心导致测角的一次谐波误差,基于倾斜条件下的莫尔条纹方程,推导出测角误差的数学模型,最终得到圆光栅安装偏斜导致测角的二次谐波误差;王笑一等^[11]建立双读数头读数与偏心率之间的关系,利用最小二乘法拟合出偏心率,再建立非对径安装双读数头偏心测角误差补偿模型,经实验证明,该方法比传统对径双读数头均值法具有更高的误差抑制效果;Li 等^[12]基于阿贝原理,提出了一种分析转台定位误差的方法,对转台转轴固有的倾斜误差和径向运动进行了分析和实验验证,得到转台和主轴的角度定位误差与转轴瞬时倾斜和径向运动有关,使用多读数头消除径向和倾斜误差的影响,达到提升测角精度的目的;Hou 等^[13]分析了导致圆光栅安装倾斜的误差源,推导了圆光栅安装偏心、偏斜与测角误差之间的理论模型,证明偏心会引入角位置测量误差 1 阶成分,偏斜会引入角位置测量误差 2 阶谐波成分,通过自校准法补偿测角误差,最终将测角误差从 0.5" 降低到 0.2"。

以上研究是通过误差补偿方式提升测角精度,并没有涉及到对转台测角系统偏心偏斜的监测。对于该部分内容,国内外研究机构主要聚焦于转台测角系统中角度传感器圆光栅安装偏心和安装偏斜的监测。王文等^[14]推导出圆光栅安装偏心造成的测角误差公式,提出了一种基于模拟退火算法的圆光栅安装偏心参数识别方法,可实现包括偏心率和偏心相位角在内的偏心参数识别;王亚洲等^[15]基于线阵图像传感器,建立了圆光栅安装偏心调试监测信号的模型,并提出一种适用于图像式角位移测角技术的安装调试系统,经实验验证,该系统对偏心量的监测以及调节方法优于传统的显微镜调节法;王臣文^[16]利用 CCD 相机采集当前圆光栅刻线位置,提出一种经过优化的最小二乘圆曲线拟合算法实现对圆光栅偏心的监测;艾晨光等^[17]依据圆光栅旋转过程中莫尔信号之间的相位差变化,通过观察李萨如图中的相位差信息配合数学公式,实现圆光栅偏心参数的监测。

综上所述,偏心偏斜会直接影响转台测角系统

的测角精度,同时也会影响转台测角系统输出的莫尔信号。对于偏心偏斜对转台测角系统测角误差的影响模型以及测角误差补偿方法已被很多科研机构研究证明,对于偏心偏斜的监测手段也很丰富,但是从转台测角系统本身输出莫尔信号入手,建立偏心偏斜对莫尔信号特征的影响模型,实现对偏心偏斜的监测的相关研究较少。

本文针对转台测角系统莫尔信号特征和偏心偏斜对应关系开展研究,提出一种基于信号解调思想的转台测角系统莫尔信号特征分离方法;根据转台测角系统工作原理,建立偏心偏斜对莫尔信号特征的影响模型;在 FPGA 平台设计完成莫尔信号特征分离电路开发,在保证分离功能有效的前提下,最大限度降低资源占用量;搭建转台测角系统偏心偏斜测试平台,通过实验定性分析偏心偏斜与莫尔信号特征关系,证明偏心偏斜对莫尔信号特征影响模型的正确性。本文的研究成果能够对监测转台测角系统偏心偏斜提供参考,同时有利于推动转台测角系统测角精度提升。

1 转台莫尔信号特征分离原理

1.1 转台测角系统工作原理

转台测角系统主要由转台、圆光栅和光栅读数头组成。转台是角位移发生装置,圆光栅与转台回转轴同轴安装,并与光栅读数头共同组成测角系统。转台测角系统示意图如图 1 所示。

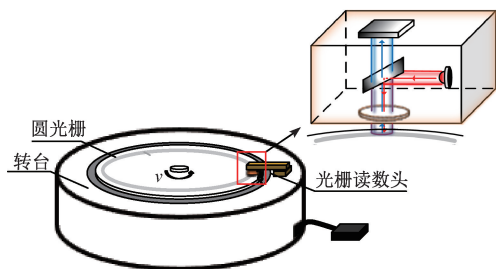


图 1 转台测角系统示意图

Fig. 1 Schematic of turntable angular measurement system

转台每转动一个光栅刻线对应的分度角,转台测角系统相应输出一个周期的莫尔信号,莫尔信号强度与光栅读数头接收到的光强呈正比关系。转台每转动 360°,转台测角系统输出 k 个周期的莫尔信号, k 为圆光栅刻线数。

在理想情况下,转台匀速转动时,转台测角系统输出等幅、恒频莫尔信号,表示为:

$$u_c(t) = A \cos \theta(t) \quad (1)$$

式中: A 为莫尔信号的幅值; t 为转台测角系统旋转时间; $\theta(t)$ 为莫尔信号相位。 $\theta(t)$ 满足关系:

$$\theta(t) = \omega_c \cdot t \quad (2)$$

式中: ω_c 为莫尔信号角频率。

根据圆周角度封闭性和圆光栅刻线数, 可知:

$$\omega_c = k \cdot \omega \quad (3)$$

式中: ω 为转台转动角速度。

将式(3)代入式(2)可得:

$$\theta(t) = k \cdot \omega \cdot t = k \cdot \varphi(t) \quad (4)$$

式中: $\varphi(t)$ 为转台测角系统转角。

由式(1)和(4)可知, 转台测角系统转角与转台测角系统输出的理想莫尔信号 $u_c(t)$ 具备对应关系, 表现为莫尔信号随着转角发生呈现正余弦变化规律, 通过采集、分析莫尔信号, 可实现转台测角系统的转动角度测量。

在理想匀速情况下转动时, 转台测角系统输出莫尔信号为恒频、等幅正余弦信号。但是由于偏心偏斜等因素, 在实际转动过程中, 莫尔信号的幅值会发生改变。根据转台圆周封闭特性, 偏心偏斜等因素对转台莫尔信号的影响随转台圆周运动发生周期性变化, 变化周期为圆周转角 2π , 这种转台莫尔信号幅值包络以转台圆周为周期发生变化的特征即为莫尔信号特征。

由于误差来源的复杂性, 莫尔信号特征包含各个阶次的谐波成分, 采用级数表示莫尔信号特征, 匀速转动的

转台测角系统莫尔信号特征 $u_m(t)$ 表示为:

$$u_m(t) = \sum_{i=1}^j B_i \cos(i\omega t) \quad (5)$$

式中: i 为阶次, B_i 为各阶谐波的幅值。

由于圆光栅圆周刻线 k 通常很大, 每个刻线对应一个莫尔信号周期, 而莫尔信号特征则是以圆周转角为周期, 即对应 k 个莫尔信号周期, 因此转台测角系统实际输出的莫尔信号 $u_s(t)$, 可看做是 $u_m(t)$ 对理想莫尔信号 $u_c(t)$ 进行信号幅值调制的结果, 表示为:

$$u_s(t) = A[1 + u_m(t)] \cos\theta(t) \quad (6)$$

对比式(1)和(6)可知, 偏心偏斜等误差的存在会影响转台测角系统输出的莫尔信号与转台转角的对应关系, 进而会影响着转台测角系统的测角精度。

1.2 莫尔信号特征分离

由于偏心偏斜等因素改变了莫尔信号与转台转角的对应关系, 进而降低了转台测角系统的测角精度, 因此分离莫尔信号特征有利于研究转台测角系统测角精度。根据莫尔信号特征的表现形式, 基于信号调制解调思想, 使用全波整流结合滤波的手段实现莫尔信号特征的分离。莫尔信号特征分离示意图如图2所示。

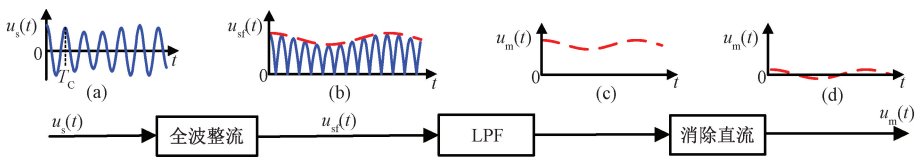


图2 莫尔信号特征分离示意图

Fig. 2 Schematic of the separation of characteristics of Moiré signal

将转台测角系统实际输出的莫尔信号 $u_s(t)$ 进行全波整流得到 $u_{sf}(t)$, $u_{sf}(t)$ 用傅里叶级数表示为^[18]:

$$u_{sf}(t) = A[1 + u_m(t)](a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_c t) + b_n \sin(n\omega_c t)]) \quad (7)$$

式中: n 是一个正整数; a_0 、 a_n 和 b_n 为傅里叶系数通过式(8)确定。

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{T_C} \int_{t_0}^{t_0+T_C} (|\cos\omega_c t|) dt = \frac{2}{\pi} \\ a_n = \frac{2}{T_C} \int_{t_0}^{t_0+T_C} [|\cos\omega_c t| \cos(n\omega_c t)] dt \\ \quad = -\frac{4}{\pi} \times \frac{1}{n^2 - 1} \times \cos \frac{n\pi}{2} \\ b_n = \frac{2}{T_C} \int_{t_0}^{t_0+T_C} [|\cos\omega_c t| \sin(n\omega_c t)] dt = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: T_C 为莫尔信号的周期。

$$T_C = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad (9)$$

联立式(7)和(8), $u_{sf}(t)$ 的傅里叶级数展开式如下:

$$u_{sf}(t) = A[1 + u_m(t)] \left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \cos \frac{n\pi}{2} \cos(n\omega_c t) \right) \quad (10)$$

由式(10)可知, 当 n 为奇数时, $\cos(n\pi/2) = 0$, 只取 n 的偶数项简化式(10)得:

$$u_{sf}(t) = A[1 + u_m(t)] \left(\frac{2}{\pi} + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{4n^2 - 1} (-1)^{n+1} \cos(2n\omega_c t) \right) \quad (11)$$

展开式(11)可知, $u_{sf}(t)$ 的频谱中包含直流分量 $2A/\pi$ 、莫尔信号特征的频谱成分 $2Au_m(t)/\pi$ 、 ω_c 的偶次谐波分量以及 ω_c 与莫尔信号特征 $u_m(t)$ 频谱搬移后的成分。由于各频谱分量在频域上相互独立, 而且莫尔信号特征 $u_m(t)$ 的频谱成分在数值是 ω_c 的 i/k 倍, 且 $i/k < 1$, 故将 $u_{sf}(t)$ 通过低通滤波后消除高于 $u_m(t)$ 的频谱成分, 再消除直流分量即可分离得到莫尔信号特征 $u_m(t)$ 。

2 偏心偏斜对莫尔信号特征影响

由于转台莫尔信号特征来源复杂,难以对所有误差源一一追溯。考虑轴系径向偏移、圆光栅安装偏心、轴系偏摆、圆光栅安装偏斜的误差特征明显,且为莫尔信号特征误差的最主要来源,重点开展这些主要误差源的莫尔信号特征作用的量化分析。

2.1 偏心对莫尔信号特征影响模型

轴系径向偏移、圆光栅安装偏心均会造成圆光栅几何中心与转台回转中心不重合,表现为偏心引入转台测角系统莫尔信号特征。偏心示意图如图3所示。

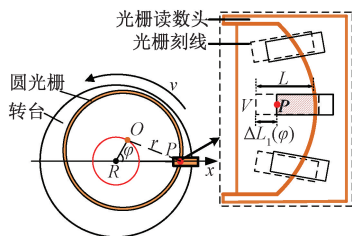


图3 偏心示意图

Fig. 3 Schematic of eccentricity

图3中, O 为圆光栅中心, R 为转台回转中心, RO 为偏心距。以 R 到光栅读数头方向为正方向建立 x 轴,圆光栅刻线外侧与 x 正半轴的交点为 P , $OP=r$ 为圆光栅光学半径, φ 是转台转角, V 是光栅刻线宽度, L 是无偏心时光栅刻线进入接收视场的长度, $\Delta L_1(\varphi)$ 为偏心导致的感光面积长度变化量。

在光栅读数头中光源光强恒定时,光栅读数头接收到的光强大小由光栅读数头接收视场的感光面积决定,由于圆光栅的刻线宽度为恒值,感光面积与光栅刻线进入接收视场的长度呈正比关系。

转台测角系统旋转时 RP 长度变化即为 $\Delta L_1(\varphi)$,且随转台转角变化而变化,根据图3的几何关系可知:

$$\Delta L_1(\varphi) = RO \cdot \cos\varphi \quad (12)$$

则感光面积 $S_1(\varphi)$ 表示为:

$$S_1(\varphi) = V \cdot [L - \Delta L_1(\varphi)] \quad (13)$$

若光电转换系数为 K ,光电接收器接收到的反射光强恒为 I ,由偏心引入的莫尔信号特征 $u_{me}(\varphi)$ 与感光面积 $S(\varphi)$ 的关系为^[19]:

$$u_{me}(\varphi) = K \cdot I \cdot S_1(\varphi) \quad (14)$$

由式(12)~(14)可知,则由偏心引入的莫尔信号特征 $u_{me}(\varphi)$ 与转台转角 φ 的关系为:

$$u_{me}(\varphi) = K \cdot I \cdot V \cdot [L - RO \cdot \cos\varphi] \quad (15)$$

由式(15)可知,偏心影响转台测角系统输出的莫尔信号的幅值,对莫尔信号特征引入一次谐波成分,莫尔信

号的幅值呈现一次谐波变化规律。对于确定的转台测角系统,参量 K, I, V, L 均为常数,因此莫尔信号特征一次谐波强度与偏心呈正比关系。

2.2 偏斜对莫尔信号特征影响模型

轴系偏摆、圆光栅安装偏斜均会造成圆光栅安装平面与水平面存在倾斜角度,表现为偏斜引入转台测角系统莫尔信号特征。偏斜示意图如图4所示。

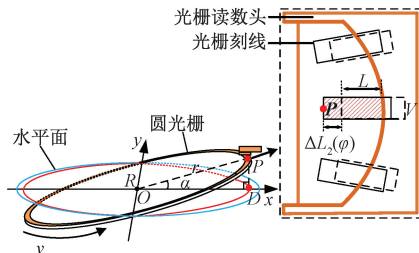


图4 偏斜示意图

Fig. 4 Schematic of inclination

图4中, α 为圆光栅与水平面倾角,圆光栅中心 O 与转台回转中心 R 重合,点 P 在水平面上垂直投影为点 D ,以 OD 为正方向建立直角坐标系,不存在偏斜时 $OD = OP = r$ 。 $\Delta L_2(\varphi)$ 为偏斜导致感光面积长度变化量。

在光栅读数头中光源光强恒定时,光栅读数头接收到的光强大小由光栅读数头接收视场的感光面积决定,由于圆光栅刻线宽度为恒值,感光面积与光栅刻线进入接收视场的长度呈正比关系。

偏斜时,圆光栅在水平面上的投影为椭圆,且椭圆的半长轴长为 r ,半短轴长为 $r \cos\alpha$,所以椭圆方程为:

$$\frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{(r \cos\alpha)^2} = 1 \quad (16)$$

在转台测角系统旋转时, $\rho(\varphi)$ 为点 D 到点 O 距离,随转台转角位置变化而变化,点 D 极坐标表示为:

$$\begin{cases} x = \rho(\varphi) \cos\varphi \\ y = \rho(\varphi) \sin\varphi \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)得到 $\rho(\varphi)$ 与转台转角 φ 的关系为:

$$\rho(\varphi) = \sqrt{\frac{r^2 \cos^2\alpha}{\cos^2\alpha \cos^2\varphi + \sin^2\varphi}} \quad (18)$$

化简式(18)可得:

$$\rho(\varphi) = \frac{\sqrt{2} r \cos\alpha}{\sqrt{(\cos^2\alpha + 1) + (\cos^2\alpha - 1) \cos 2\varphi}} \quad (19)$$

OD 的长度变化为 $\Delta L_2(\varphi)$,且:

$$\Delta L_2(\varphi) = r - \rho(\varphi) \quad (20)$$

感光面积 $S_2(\varphi)$ 表示为:

$$S_2(\varphi) = V \cdot [L + \Delta L_2(\varphi)] \quad (21)$$

由偏斜引入的莫尔信号特征 $u_{mi}(\varphi)$ 与感光面积

$S_2(\varphi)$ 的关系为:

$$u_{mi}(\varphi) = K \cdot I \cdot S_2(\varphi) \tag{22}$$

由式(20)~(22)可知,则由偏斜引入的莫尔信号特征 $u_{mi}(\varphi)$ 与转台转角 φ 的关系为:

$$u_{mi}(\varphi) = K \cdot I \cdot V \cdot \left[L + r - \frac{\sqrt{2}rcos\alpha}{\sqrt{(\cos^2\alpha + 1) + (\cos^2\alpha - 1)\cos2\varphi}} \right] \tag{23}$$

式中: r 与 $\cos\alpha$ 均为常数, $u_{mi}(\varphi)$ 与 φ 表现为二次谐波变化关系,故偏斜影响转台测角系统输出的莫尔信号的幅值,对莫尔信号特征引入二次谐波成分,莫尔信号的幅值呈现二次谐波变化规律。对于确定的转台测角系统,参量 K, I, V, L, r 均为常数,因此莫尔信号特征二次谐波强度与偏斜呈正比关系。

3 莫尔信号特征分离电路设计

分离转台测角系统莫尔信号特征的关键是获取转台测角系统输出的整圆周莫尔信号。鉴于整圆周莫尔信号大数据量的特点,同时考虑 FPGA 具有可多线程工作、IO 资源丰富、设计灵活等优点,故基于 FPGA 设计特征分离电路,实现转台整圆周莫尔信号的采集和莫尔信号特征分离。电路系统结构如图 5 所示。

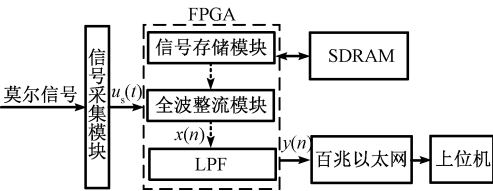


图 5 莫尔信号特征分离电路结构

Fig. 5 Schematic representation of separation circuit

转台测角系统工作时产生莫尔信号,被信号采集模块采集后经信号存储模块写入 SDRAM,信号采集结束后,FPGA 读出 SDRAM 中的数据,经过低通滤波器分离莫尔信号特征,通过以太网发送至上位机接收,完成分离任务。

SDRAM 和千兆以太网均是成熟的存储模块和通信方式,本文不予详细讨论。ADC 参数和低通滤波器 LPF 的设计将决定能否完成莫尔信号特征分离任务,因此对以上两方面进行说明和分析。

3.1 ADC 位宽和采样率

转台测角系统采用传感器的不同,会引起输出莫尔信号电气特征差异。本文实验使用到的转台测角系统所采用的圆光栅和读数头型号如表 1 所示。

表 1 转台传感器参数

Table 1 Specifications of Sensors

名称	型号(制造商)	技术参数
圆光栅	R10851 (MicroE system)	16384 刻线
光栅读数头	Mercury 1000 (MicroE)	信号幅值为 2 V _{pp}

以转速为 150°/s 工况为例,对应的输出的莫尔信号频率为 6.827 kHz。为了防止采集到的信号发生频率混叠现象,参考奈奎斯特采样定律和工程要求,ADC 采样率按照 100 倍莫尔信号频率设计,即 ADC 采样率 f_s 应满足式(24)。

$$f_s \geq 0.6827 \text{ MHz} \tag{24}$$

同时为降低数字化过程中量化误差,确保采集到的信号 $u_s(n)$ 更加逼近莫尔信号 $u_s(t)$,并考虑电路噪声水平,设计 ADC 的分辨率为 0.5 mV,则 ADC 的位宽 N 应满足式(25)。

$$\frac{1}{2^N} \leq \frac{0.5 \text{ mV}}{2 \text{ V}} \tag{25}$$

可得 ADC 的位宽 $N \geq 12$ 。

由式(23)、(24)可知,信号采集模块最低需要选用 12 bits 位宽,1 MHz 的采样率的 ADC。

3.2 数字低通滤波器设计

全波整流后的莫尔信号需要低通滤波器才能够分离得到莫尔信号特征。在 FPGA 中实现时,滤波器阶次增加有利于提升滤波器的滤波效果,但同时会增加硬件资源消耗。

传统的 FIR 滤波器的输出 $y(n)$ 可表示为输入序列 $x(n)$ 与单位取样响应 $h(n)$ 的线性卷积,其系统函数为:

$$H(n) = \sum_{N=0}^{N-1} h(n)z^{-n} \tag{26}$$

FIR 滤波器由抽头延时线加法器和乘法器构成,每一个乘法器的操作系数就是 FIR 滤波器各级延时单元加权系数。通过比对不同 FIR 滤波器设计方法的效果差异确定 FIR 滤波器各级延时单元加权系数,在 FPGA 电路中建立系数查找表(LUT)实现乘法运算。传统的 FIR 滤波器电路结构如图 6 所示。

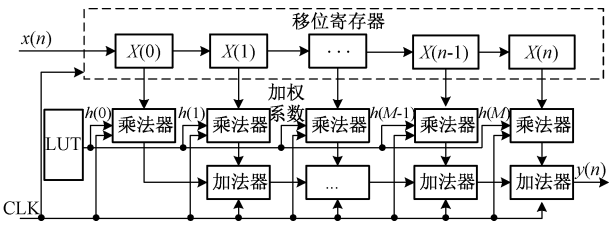


图 6 传统 FIR 滤波器电路结构

Fig. 6 Schematic of structure of traditional FIR filter

由图 6 可知,对于 $M+1$ 阶的滤波器,至少需要 $M+1$ 个乘法单元、 M 个延时单元以及 M 个加法单元,在 FPGA 中实现时不仅会占用大量运算单元,而且会产生较长的系统延时,不利于莫尔信号特征的分离。

为减少滤波器资源占用量,设计偶对称结构的全串行 FIR 滤波器,输入输出关系式为:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{(M-1)/2} h(k) [x(n-k) + x(n-M+k)] \tag{27}$$

偶对称结构可以将对称的输入序列相加后乘以相同的权值系数,相较于传统的滤波器至少节省一半的乘法单元和延时单元,并减少运算的复杂程度,偶对称全串行 FIR 滤波器电路结构如图 7 所示。

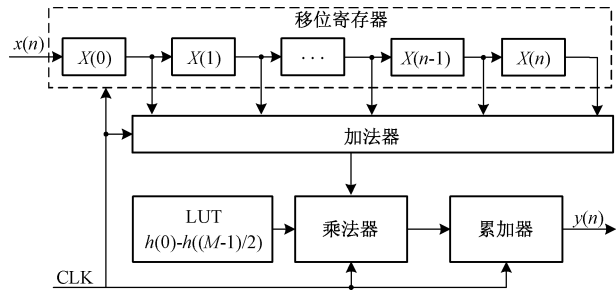


图 7 偶对称全串行 FIR 滤波器电路结构

Fig. 7 Schematic of structure of the symmetrical FIR filter

在实现转台测角系统莫尔信号特征分离的设计中,通过设计通带为 0~50 Hz,过渡带为 50 Hz~8 kHz 的凯瑟窗设计方法建立系数查找表,FIR 低通滤波器阶数选取 281 阶,两种结构的 FIR 滤波器在 FPGA 中资源占用情况如表 2 所示。

表 2 滤波器参数及 FPGA 资源占用

Table 2 Parameters of filter and FPGA resource occupancy

参数	传统 FIR 滤波器	偶对称全串行 FIR 滤波器
滤波器阶数	281	281
LE 资源	7 326	1 858
嵌入式乘法器	282	2
延时单元 (系统时钟)	280	140

由表 2 可知,在相同阶数的条件下,偶对称全串行 FIR 滤波器占用更少的 LE 资源,使用的嵌入式乘法器数量远小于传统 FIR 滤波器,而且延时量也减小至传统 FIR 滤波器的 1/2。

4 实验与数据分析

为证明偏心偏斜对莫尔信号特征影响模型的正确

性,一方面验证自制特征分离电路功能的有效性和莫尔信号特征分离方法的可行性;另一方面搭建偏心、偏斜实验平台,定性分析莫尔信号特征与偏心偏斜的变化关系。

4.1 莫尔信号特征分离电路有效性

为证明莫尔信号特征分离的可实现性,使用实验室自制莫尔信号特征分离电路 GSA_B 完成分离任务。选用 EP4CE115F29C7 作为电路主控芯片,AD9635 作为 ADC 芯片,IS42S16320B 作为 SDRAM 存储芯片,RTL8211 作为以太网芯片。GSA_B 实物如图 8 所示。

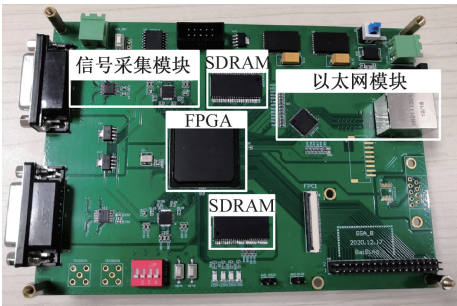


图 8 GSA_B 电路板

Fig. 8 Laboratory-made electronic board for the separation of the rotation characteristics

选用 RIGOL DG4162 信号发生器模拟转台测角系统输出的实际莫尔信号,由式 (6) 可知,实际莫尔信号可看做调幅信号,参照文中使用的转台测角系统在最大转速 150°/s 下输出的莫尔信号特征,设置载波信号频率为 6.827 kHz,幅值为 400~1 600 mV,调制信号设置为单一频率的正弦信号,频率为 100 Hz,调制深度为载波信号峰值的 10%,即调制信号峰峰值为 60 mV。

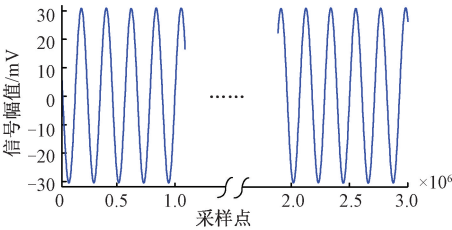
将信号发生器产生信号作为 GSA_B 电路板输入,数据通过以太网上传至上位机接收并进行莫尔信号特征分离,分离结果的时域和频域特性如图 9 所示。

理论上,GSA_B 电路板输出的莫尔信号特征的幅值和频率应与调制信号保持一致。由图 9(a) 可知,GSA_B 电路板输出的莫尔信号特征峰峰值为 60 mV,与信号发生器调制信号设定幅值一致;由图 9(b) 可知,GSA_B 电路板输出的莫尔信号特征频谱图中,100 Hz 的单频谱线特征明显,与调制信号的设定频率吻合;可见本文验证的莫尔信号特征分离方法和电路有效。

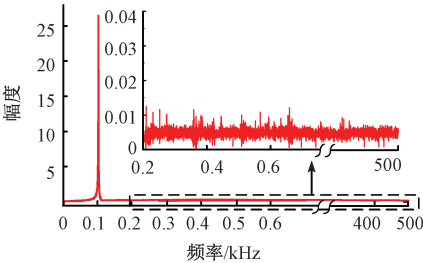
同时,根据图 9(b) 可见,频谱图中包含幅度约为 0.01 的白噪声,均匀分布在整個频谱范围内,这种白噪声频谱是由 GSA_B 电路板的板级噪声影响所引入,该噪声不会改变莫尔信号特征。

4.2 转台验证实验

偏心和偏斜会影响转台测角系统莫尔信号特征,为定性分析偏心 and 偏斜与莫尔信号特征的关系,搭建的实



(a) 仿真莫尔信号特征时频图
(a) The time domain diagram of rotation characteristics of simulated moiré signal



(b) 仿真莫尔信号特征时频图
(b) The frequency domain diagram of rotation characteristics of simulated moiré signal

图 9 仿真莫尔信号特征时频图

Fig. 9 The time-frequency diagram of rotation characteristics of simulated Moiré signal

验平台如图 10 所示,实验温度控制在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度 $30\%\sim 75\%$,无显著气流扰动和振动的实验室环境下完成。

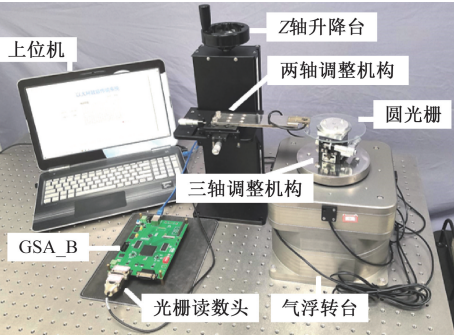


图 10 实验平台实物图

Fig. 10 Photograph of experimental setup

图 10 中,XY 轴微位移台和倾角台组成三轴调整机构,且与转台测角系统同轴安装,光栅盘通过安装卡具与三轴调整机构同轴安装,Z 轴升降台的载物面上装配两轴调整机构,光电传感器 M20 通过安装卡具装配到两轴调整机构上,通过调整 Z 轴升降台和两轴调整机构进行 M20 与光栅盘的安装调试。转台采用表 1 所示圆光栅和读数头,其他实验所使用的主要仪器规格如表 3 所示。

表 3 主要仪器及技术参数

Table 3 Specifications of Main Instrument

仪器名称	型号(制造商)	技术参数
XY 轴微位移台	LY40-LM	最小步进:10 μm
		行程: $\pm 6.5\text{ mm}$
倾角调整台	GFG40-40	最小步进:15"
		行程: $\pm 20^{\circ}$
Z 轴升降台	LZ-300	最小步进:1 mm
		行程:261 mm

为更加直观分析偏心 and 偏斜对莫尔信号特征的定性关系,实验前首先使用电感测微仪对圆光栅安装位置进行调试,同轴度调整至 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 内,水平调整至 $\pm 20''$ 内,转台转速为 $150^{\circ}/\text{s}$ 时,对转台莫尔信号进行采集并分离出莫尔信号特征,其频谱图如图 11 所示。

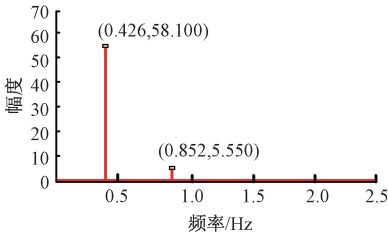


图 11 莫尔信号特征频谱图

Fig. 11 The frequency diagram of characteristics of Moiré signal

由式(3)可知,莫尔信号特征中一阶成分的频率理论值为 0.417 Hz ,二阶成分的频率理论值为 0.834 Hz ,图 11 中一阶和二阶成分的频率与理论值相差均小于 0.02 Hz ,差异是由于转台速率与设定理论值之间存在一定的误差引起。

图 11 中,由于偏心偏斜已经调整至很低,认为莫尔信号特征频谱的偏心偏斜作用很小,一阶和二阶及其他频谱成分来自转台系统其他误差源,且对于确定的转台测角系统,这些误差源影响恒定不变。

开展偏心误差对莫尔信号特征的单变量影响实验。设置转台转速为 $150^{\circ}/\text{s}$,偏心量调整步距为 $10\text{ }\mu\text{m}$,调整范围 $0\sim 290\text{ }\mu\text{m}$,ADC 采样率为 1 MHz 。每种工况进行 3 次重复性实验,分离每次实验的莫尔信号特征,并剔除图 11 中误差源影响后,记录每次实验分离莫尔信号特征的一次谐波幅值,结果如图 12 所示。

由图 12 可知,随着偏心调整量的增大,莫尔信号特征的一次谐波幅度随之增大,说明圆光栅安装偏心会影响莫尔信号特征的一次谐波,且偏心量越大,莫尔信号特征一次谐波越明显。图 12 中 3 次重复性实验数据,偏差均不超过 3 LSB,该重复性偏差由实验环境扰动造成,属于随机误差。为减小随机误差影响,对图 12 中各个位置

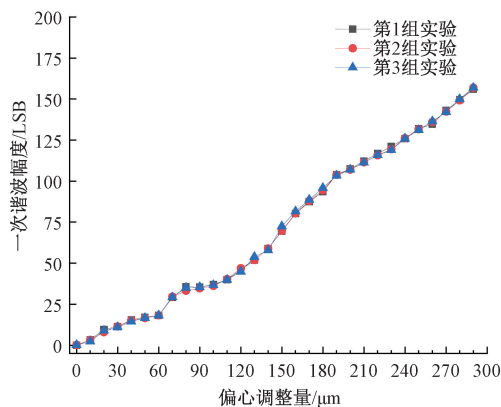


图12 偏心对莫尔信号特征的影响

Fig. 12 Effects of eccentricity on characteristics of Moiré signal

3次实验数据取平均值并进行直线拟合。最小二乘法拟合直线方程为 $y=0.566x-11.111$,拟合直线的非线性误差为3.88%。可见莫尔信号特征的一次谐波幅度与转台偏心具有良好的线性对应关系,与式(15)模型结论相吻合。

开展偏斜误差对莫尔信号特征的单变量影响实验。设置转台转速为 $150^\circ/\text{s}$,偏斜量调整步距为 $15''$,偏斜量调整范围 $0''\sim 150''$,AD采样率为1 MHz。每种工况进行3次重复性实验,分离每次实验的莫尔信号特征,并剔除图11中误差源影响后,记录每次实验分离莫尔信号特征的二次谐波幅值,实验结果如图13所示。

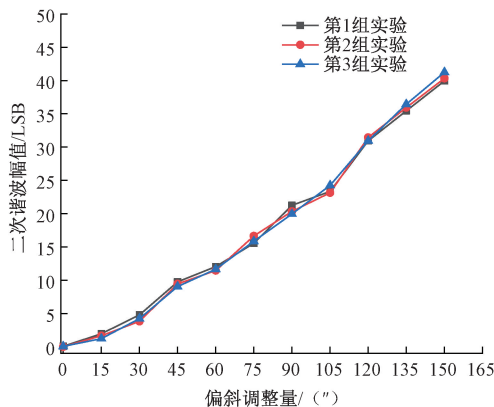


图13 偏斜对莫尔信号特征的影响

Fig. 13 Effects of inclination on rotation characteristics of Moiré signal

由图13可知,随着偏斜调整量的增大,莫尔信号特征的二次谐波幅度随之增大,说明圆光栅安装偏斜会影响莫尔信号特征的二次谐波,且偏斜量越大,莫尔信号特征二次谐波越明显。同样对图13中重复性实验偏差进行分析,重复性偏差小于1 LSB,3次实验数据取平均值

的最小二乘法拟合直线方程为 $y=0.277x-3.085$,拟合直线的非线性误差为2.08%。可见莫尔信号特征的二次谐波幅度与转台偏斜具有良好的线性对应关系,与式(23)模型结论相吻合。

以上实验结果证明偏心量和偏斜量与转台测角系统输出莫尔信号特征有直接的对应关系,参考本文研究成果,从转台测角系统本身输出信号入手,通过分离分析转台测角系统莫尔信号特征,可实现对转台测角系统偏心和偏斜的监测,同时本文的研究成果也为提升转台测角系统定位精度提供新的研究思路。

5 结论

本文针对偏心偏斜对转台圆光栅莫尔信号的影响模型开展研究。在介绍转台测角系统工作原理基础上,阐述了实现莫尔信号特征分离的原理可行性;分别建立了偏心、偏斜与莫尔信号特征频谱成分的对应关系模型;根据圆光栅莫尔信号特点开发了基于FPGA平台的转台圆光栅莫尔信号特征分离电路。实验证明了莫尔信号特征分离方法的可行性以及特征分离电路的功能有效性,通过量化偏心、偏斜方法证明其对莫尔信号特征影响关系。实验结果证明偏心、偏斜分别与莫尔信号特征的一次谐波和二次谐波呈现线性关系,与理论模型结论一致,拟合直线的非线性误差分别为3.88%和2.08%。本文的研究成果为转台测角系统偏心偏斜研究提供新思路,有利于推进转台定位精度方法研究。

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] 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 J, XIE ZH J, et al. Compensation of angular indexing error for precision turntable [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(8): 2165-2172.
- [4] 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, 37(3): 9-12.
- MI X T, GAO SH Y. Effect of eccentric of circular

- gratings on angular position accuracy of simulator [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 37(3): 9-12.
- [5] 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.
- [6] HUANG Y, XUE Z, HUANG M, et al. The NIM continuous full circle angle standard [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(7): 074013.
- [7] 任曦, 杜升平, 陈科, 等. 圆光栅编码器测角误差源及频谱分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 171-178.
- REN X, DU SH P, CHEN K, et al. Error source and spectrum analysis for angle measurement of circular grating encoder [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171-178.
- [8] CHEN G. Improving the angle measurement accuracy of circular grating [J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, 91(6): 065108.
- [9] CHEN X J, WANG Z H, ZENG Q S. Angle measurement error and compensation for decentration rotation of circular gratings [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 17(4): 536-539.
- [10] CHEN X J, WANG Z H, ZENG Q S. Angle measurement error and compensation for pitched rotation of circular grating [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 18(3): 11-15.
- [11] 王笑一, 王永军, 雷贤卿, 等. 非对径安装双读数头圆光栅偏心测角误差修正 [J]. 光学精密工程, 2021, 29(5): 1103-1114.
- WANG X Y, WANG Y J, LEI X Q, et al. Correction method for angle measurement error of eccentric encoder with double read-heads installed non-diametrically opposite [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(5): 1103-1114.
- [12] LI Y T, FAN K C. A novel method of angular positioning error analysis of rotary stages based on the Abbe principle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2018, 232(11): 1885-1892.
- [13] HOU J, XUE Z, HUANG Y, et al. Effect of varying load on angle measurement deviation of rotary table [C]. Proc. SPIE 11053, 10th International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, Kunming, China, 2018: 1105333.
- [14] 王文, 林铿, 高贯斌, 等. 关节臂式坐标测量机角度传感器偏心参数辨识 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 135-141.
- WANG W, LING K, GAO G B, et al. Eccentricity parameter identification of angle sensors for articulated arm CMMs [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 135-141.
- [15] 王亚洲, 于海, 易进, 等. 图像式角位移测量的光栅偏心度监测系统 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(5): 1038-1045.
- WANG Y ZH, YU H, YI J, et al. Grating eccentricity monitoring system for image-based angular displacement measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(5): 1038-1045.
- [16] 王臣文. 编码器偏心调整自动生产线关键技术及优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- WANG CH W. Key technology and optimization of encoder eccentric adjustment automatic production line [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.
- [17] 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, CHU M, SUN 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.
- [18] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- ZHENG J L, YING Q H, YANG W L. Signal and system [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [19] 卢璐卿. 光栅读数头微动效应研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019.
- HU L Q. Research on micro-motion effect of grating readhead [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019.

作者简介



白冰, 2019 年于哈尔滨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精密测量。

E-mail: 563295241@qq.com

Bai Bing received his B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2019. Now he is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. His research interest includes the error separation of turntable angular measurement system.



朱维斌(通信作者),2014年获得浙江大学控制理论与控制工程博士学位,现为中国计量大学副教授,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. Now he is 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年于北京工业大学分别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,2013年至今在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,现为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 from Beijing University of Technology in 2004 and 2007, respectively. He has worked in the Geometric Lab of Beijing

Metrology Institute in 2007-2013 and joined the Division of Metrology in Length and Precision Engineering of National Institute of Metrology in 2013. Now he is a Ph. D. candidate at Zhejiang University. His main research interest includes angle measurement.



薛梓,2006年于哈尔滨工业大学获得博士学位,1991年起开始在中国计量科学研究院工作,目前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 Technical University in 2006. She joined the Division of Metrology in Length and Precision Engineering of National Institute of Metrology in 1991. Now she is 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 includes geometric measurement.