

文章编号 1004-924X(2017)08-2165-08

精密转台角分度误差补偿

王福全^{1,2,3}, 王 珏^{2,3}, 谢志江^{1,3,*}, 刘丰林^{1,2,3}

- (1. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400030;
2. 重庆大学 光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400030;
3. 重庆大学 工业 CT 无损检测教育部工程研究中心, 重庆 400030)

摘要:为了修正精密转台中由圆光栅安装偏心、倾斜等引起的角分度误差,提出一种基于稀疏分解的角分度误差补偿方法。首先,分析了圆光栅安装偏心、倾斜等对精密转台角分度误差的影响。然后,根据圆光栅测角误差中不同阶次误差项的特性,结合稀疏分解思想与谐波分析建立了角分度误差补偿模型,对转台的角分度误差进行补偿。最后,搭建试验平台,采用提出的角分度误差补偿模型对精密转台角分度误差进行修正,验证该方法的有效性。试验结果表明:该方法能够将角分度精度提高 2 个数量级,对角分度误差最大值为 90.85" 的转台进行误差补偿后,能够使角定位误差的最大值减小到 0.64"。采用该方法进行误差补偿后,能够显著提高角度定位精度,结果满足精密转台角位移的高精度测试要求。

关键词:精密转台;角分度误差;稀疏分解;误差补偿

中图分类号: TB922 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172508.2165

Compensation of angular indexing error for precision turntable

WANG Fu-quan^{1,2,3}, WANG Jue^{2,3}, XIE Zhi-jiang^{1,3,*}, LIU Feng-lin^{1,2,3}

- (1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
 2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education Chongqing University, Chongqing 400030, China;
 3. Engineering Research Center of Industrial Computed Tomography Nondestructive Testing, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)
- * Corresponding author, E-mail: xie@cqu.edu.cn

Abstract: A compensation method for angular indexing error was introduced based on sparse decomposition to correct the angular indexing error caused by the eccentric and tilt of circular gratings installation in a precision turntable. First, the effect of circular grating installed eccentric and tilt on the angular indexing error was analyzed. Next, according to the characteristics of different orders of error in measuring error of circular grating angle, a compensation model of angular indexing error was built based on the sparse decomposition theory and the harmonic analysis to compensate the angular indexing error of the turntable. Finally, a test platform was established, and the effectiveness of the pro-

收稿日期: 2017-03-01; 修订日期: 2017-04-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61471070); 国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ030629)

posed method was verified to compensate the angular indexing error of a precision turntable. The experimental results show that the proposed method can increase 2 orders of magnitude of the angular indexing accuracy. The maximum value of angular indexing error can be reduced to 0.64" from 90.85" through proposed error compensation method. After error compensation with the method, the accuracy of angle positioning can be remarkably improved, meeting the high-accuracy testing requirements of angular displacement of a precision turntable.

Key words: precision turntable; angular indexing error; sparse decomposition; error compensation

1 引言

精密转台作为微纳 CT 成像分析仪的关键部件之一,其旋转定位精度直接影响成像分析仪的成像质量。随着成像分析仪重建图像分辨率的提高,需要达到微米、亚微米级,甚至纳米级,对转台的旋转定位精度也提出了更高的要求。

精密转台的角度定位精度主要受其回转精度的影响。轴系回转精度又受制造精度、安装精度等^[1]的影响。因此,提高轴系的制造和安装精度有助于提高转台的旋转定位精度。转台角位移测量主要依靠同轴安装的高精度圆光栅完成。在精密转台主要零部件制造、安装精度满足要求的情况下,圆光栅的测角精度将直接影响转台的角定位精度。在使用圆光栅测量转台角位移的过程中,系统、随机误差将影响其测量精度。圆光栅测量误差的来源有:圆光栅的制造误差,圆光栅安装的偏心、倾斜误差,圆光栅安装后的变形等。其中安装偏心、倾斜引起的测量误差随转台转轴的旋转呈现出周期变化。

文献[2]研究了多齿分度台安装偏心、倾斜以及光电自准直仪未调平对角分度误差的影响,采用多次谐波分析法对误差进行补偿。文献[3]通过研究得知金属圆光栅测量误差主要源于光栅环的机械安装误差、光栅环划线误差以及读数头的细分误差,并通过 4 个读数头对测量误差进行补偿。文献[4]研究了圆光栅安装偏心引起的误差,采用双读数头对误差进行补偿修正。文献[5]研究了圆光栅安装偏心对测角精度的影响,并利用最小二乘拟合法对测量误差进行修正。文献[6]研究了角分度误差的来源,利用最小二乘法、三次样条插值法和傅里叶级数拟合 3 种方法对角分度误差进行补偿。文献[7]研究了圆光栅的码盘制造误差、电子细分误差、轴系晃动误差、码盘安装

偏心误差等对转台角分度误差的影响,利用谐波分析进行误差补偿,较双读数头补偿的补偿效果好。多读数头安装方法简单易行、精度高,不需要对偏心参数进行求解。但以多读数头方式来提高角定位精度,成本会成倍的增加。

通过对单读数头转台系统中的圆光栅安装偏心、倾斜所引起的角分度误差进行综合分析,利用激光干涉仪和校准回转装置对转台角定位进行检测标定,提出了基于稀疏分解和谐波分析相结合的误差补偿模型。通过试验平台对所提出的方法进行验证。

2 精密转台角分度误差分析

引起精密转台角分度误差的因素有:转台关键零部件的制造、装配误差,圆光栅测角系统本身的制造误差、安装误差。精密转台角位移测量主要通过同轴安装的圆光栅完成。由于圆光栅本身也存在制造、安装误差,采用圆光栅测量角位移将不可避免地出现测角误差。精密转台的角分度精度主要取决于轴系精度和测角系统的精度,在轴系和圆光栅确定的情况下,圆光栅的安装误差将成为影响转台角定位精度的主要因素。圆光栅安装误差引起的测角误差将随着转台的旋转呈周期性的变化。转台角分度误差可以展开成多次谐波叠加的形式。圆光栅安装偏心会引起一阶谐波误差,圆光栅安装倾斜会引起二阶谐波误差^[6],另外,光栅的划线误差、读数头的电子细分误差、轴系的回转误差和晃动等也会引起转台的角定位误差,并体现在圆光栅的安装上。下面主要分析圆光栅安装偏心和倾斜引起的误差。

2.1 圆光栅安装偏心的影响

对于柱面的圆光栅,其安装偏心引起的误差是由于安装过程中圆光栅的几何中心和转台的旋转中心不重合所导致的。圆光栅安装偏心对光栅

编码器的角度测量精度有较大影响,对安装偏心引起的测角误差进行补偿可以有效提高圆光栅的测量精度^[8]。圆光栅安装偏心引起的测角误差是一种有规律的系统误差,其大小随着转台的旋转呈周期性变化。

由于圆光栅的制造以及装配过程中不可避免地存在误差,圆光栅安装后其几何中心与转台的旋转中心不能够完全重合。如图 1 所示。

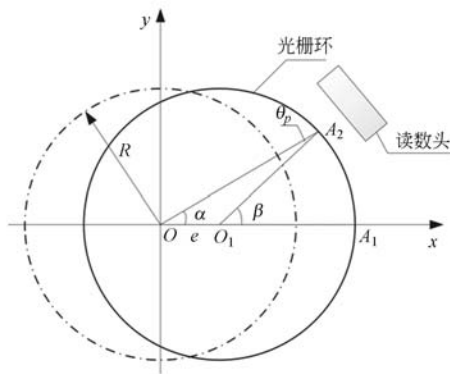


图 1 圆光栅安装偏心示意图

Fig. 1 Schematic diagram of circular gratings installed eccentric

转台的旋转中心为 O,圆光栅几何中心为 O₁,设偏心距为 e,圆光栅的半径为 R,转台实际转过的角度为 α,光电读数头测得的角度值为 β,则测角误差 Δθ_p 为:

$$\Delta\theta_p = \beta - \alpha, \quad (1)$$

根据几何关系可得如下关系式:

$$\frac{e}{\sin \Delta\theta_p} = \frac{R}{\sin \alpha}, \quad (2)$$

由上式可得:

$$\Delta\theta_p = \arcsin\left(\frac{e \sin \alpha}{R}\right). \quad (3)$$

通常圆光栅安装偏心 e 远小于圆光栅半径 R,则式(3)可简化为:

$$\Delta\theta_p = \frac{e}{R} \sin \alpha, \quad (4)$$

由式(4)可知,圆光栅安装偏心 e 引起的测角误差 Δθ_p 随着转台旋转角度 α 呈正弦变化。由圆光栅安装偏心引起的测角误差为一阶误差。可通过采用多个读数头的方式来减小此误差,以提高测角精度。但是采用多读数头的圆光栅测角系统,对读数头的安装位置精度要求非常严格,且多读数头不能消除高阶误差,另外成本也会成倍增

加。因此,采用多读数头方式进行消偏并不是很好的选择。

2.2 圆光栅安装倾斜的影响

圆光栅测角系统一般由标尺光栅、指示光栅和读数头组成,工作原理如图 2 所示。指示光栅与标尺光栅做相对运动产生莫尔干涉条纹,通过读数头接收干涉产生的莫尔条纹信号。光栅环安装倾斜会导致莫尔条纹的数量和宽度同时变化,安装倾斜是圆光栅测角误差的一个重要来源。

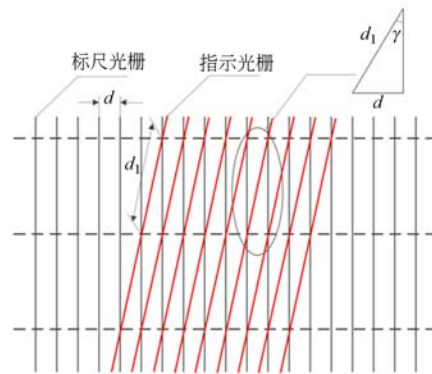


图 2 圆光栅工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of circular gratings working principle

从圆光栅测试原理上看,如图 2 所示,d₁ 表示莫尔条纹的间距,d 表示标尺光栅的栅距,γ 表示指示光栅条纹与标尺光栅条纹夹角,则有如下关系:

$$\sin \gamma = \frac{d}{d_1}, \quad (5)$$

通常情况下 γ 非常小,上式可简化为:

$$\gamma = \frac{d}{d_1}. \quad (6)$$

圆光栅安装过程中不可避免地存在一些安装误差,当安装好后的圆光栅存在倾斜时,随着标尺光栅运动,夹角 γ 会发生变化。在理想情况下,当标尺光栅与指示光栅相对移动一个栅距 d 时,莫尔条纹移动距离为 d₁,夹角相对位置变化为 γ。当光栅环安装存在倾斜时,标尺光栅与指示光栅相对移动一个栅距 d,莫尔条纹移动距离为 d₂,夹角相对位置变化 γ+Δγ,由式(6)可得:

$$\gamma + \Delta\gamma = \frac{d}{d_2}, \quad (7)$$

结合式(6)与式(7)有:

$$d_2 = \frac{\gamma}{\gamma + \Delta\gamma} d_1. \quad (8)$$

式中, $E'(\theta)$ 表示角分度误差成分, δ' 为噪声成分, $D' = [d_1', d_2', \dots, d_k'] \in R^{n \times k}$ 为原子库, x' 为分解系数, ϵ' 表示信号的分解残差。

$$\begin{cases} E'(\theta_1) - c_0 = \sum_{k=1}^m \left[a_k \cos \left(k \frac{2\pi}{n} \cdot 1 \right) + b_k \sin \left(k \frac{2\pi}{n} \cdot 1 \right) \right] \\ E'(\theta_2) - c_0 = \sum_{k=1}^m \left[a_k \cos \left(k \frac{2\pi}{n} \cdot 2 \right) + b_k \sin \left(k \frac{2\pi}{n} \cdot 2 \right) \right], \\ E'(\theta_n) - c_0 = \sum_{k=1}^m \left[a_k \cos \left(k \frac{2\pi}{n} \cdot n \right) + b_k \sin \left(k \frac{2\pi}{n} \cdot n \right) \right] \end{cases} \quad (12)$$

将上式转换成如下矩阵形式:

$$E(\theta) = D\mathbf{x} + \epsilon, \quad (13)$$

$$D = \begin{bmatrix} \cos \left(1 \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot 1 \right) \cdots \cos \left(m \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot 1 \right) & \sin \left(1 \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot 1 \right) \cdots \sin \left(m \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot 1 \right) \\ \vdots & \vdots \\ \cos \left(1 \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot n \right) \cdots \cos \left(m \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot n \right) & \sin \left(1 \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot n \right) \cdots \sin \left(m \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot n \right) \end{bmatrix}$$

$\mathbf{x} = [a_1, a_2, \dots, a_m, b_1, b_2, \dots, b_m]^T$, 为信号的分解残差。

原子库 D 与角分度误差的特征成分具有高度的相关性, 而与噪声成分相关性较弱。 $E(\theta)$ 可由少数几个原子 d_i 线性表示。根据稀疏分解理论, 特征系数 \mathbf{x} 可以通过下式求得:

$$\min \|\mathbf{x}\|_0 \text{ s. t. } \|E(\theta) - D\mathbf{x}\|_2 < \epsilon, \quad (14)$$

求解上式通常是一个 NP 难题, 往往采用 l_1 范数代替 l_0 范数, 则上式可改写为:

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \text{ s. t. } \|E(\theta) - D\mathbf{x}\|_2 < \epsilon, \quad (15)$$

选取前 l 阶谐波分量组成谐波补偿函数, 则误差补偿模型的表达式为:

$$B(\theta) = c_0 + \sum_{s=1}^l [a_s \cos(s\theta) + b_s \sin(s\theta)], \quad (16)$$

其中 s 为误差补偿模型的阶次。

4 实验验证与分析

4.1 搭建实验平台及采集数据

为验证上述误差补偿方法对转台角分度误差补偿的有效性, 利用研制的精密气浮转台, 搭建如图 4 所示的试验平台进行验证。为了降低转台的制造成本, 研制的精密气浮转台采用单读数头柱面圆光栅测角系统做位置反馈。转台角分度检定通常采用正多面棱体作为角分度标准器, 利用光电自准直仪进行角度测量。此方法受多面棱体面数的限制, 测量间隔大, 采集到的数据少。为避免

表征角分度误差的谐波分量具有类似正弦信号的周期性特征。根据式(10), 代表角分度误差的成分 $E'(\theta)$ 可表示成如下关系式:

$$\text{其中 } E(\theta) = [E'(\theta_1) - c_0, E'(\theta_2) - c_0, \dots, E'(\theta_m) - c_0]^T,$$

上述问题, 本文利用雷尼绍激光干涉仪加校准回转装置对所研制的转台进行检测标定。这种检测方法正多面棱体检测方法的原理相同, 但可以采集到更多的数据。

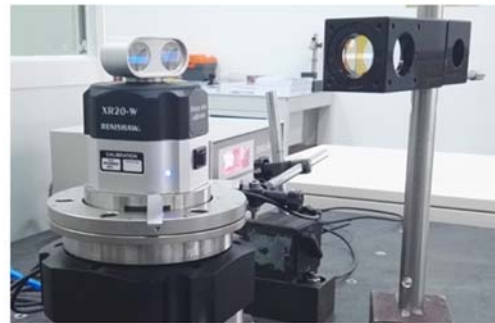


图 4 实验平台

Fig. 4 Experiment platform

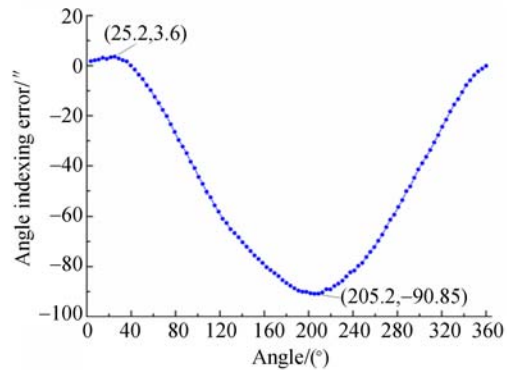


图 5 补偿前角分度误差分布图

Fig. 5 Angular indexing error distribution diagram before compensation

利用搭建的试验平台,对转台正反两个旋转方向的角分度误差进行采集,每隔 3.6° 采集一个数据,共采集到 202 个数据。取正反方向的角分度误差的平均值作为原始误差数据,未进行误差补偿的转台角分度误差分布图如图 5 所示。由图 5 可知,转台的角分度误差最大值为 $90.85''$,需要对其进行误差补偿。

4.2 误差补偿验证

如 3.1 节所述,将角分度误差表示为多个谐波分量的组合,建立误差补偿模型对转台的测角误差进行补偿。由式(15)计算得到不同阶次的谐波分量的幅值,其分布如图 6 所示。由图 6 可知,圆光栅安装偏心引起的一阶误差是角分度误差最主要的误差来源。

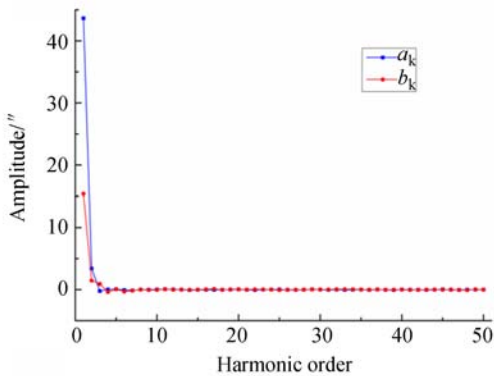


图 6 各阶谐波幅值

Fig. 6 Amplitude of different order harmonic

通过谐波分量拟合的数据与采集的原始数据之间的残差如图 7 所示。

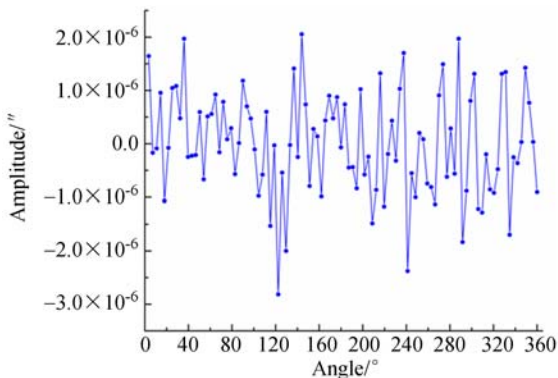


图 7 拟合残差

Fig. 7 Fitting residuals

由图 7 可知,不同阶谐波分量拟合后的数据

与原始角分度误差数据高度吻合。取前 10 阶谐波分量组成谐波补偿函数:

$$B(\theta) = c_0 + \sum_{s=1}^{10} [a_s \cos(s\theta) + b_s \sin(s\theta)].$$

利用所选谐波分量组成的误差补偿函数对转台角分度误差进行补偿。误差补偿前后转台的角分度误差对比结果如图 8 所示。

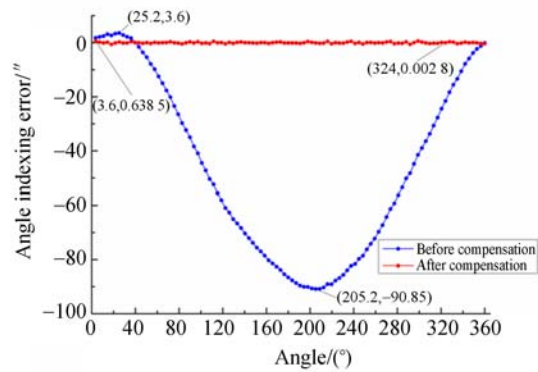


图 8 角分度误差对比图

Fig. 8 Comparison diagram of angle indexing error

由图 8 可知,补偿前的转台角分度误差最大值为 $90.85''$,补偿后的角分度误差最大值为 $0.64''$ 。经过误差补偿后,角分度误差的最大值减小了两个数量级。说明本文提出的误差补偿方法能够显著提高转台角度定位精度。经过补偿后的圆光栅测试系统满足精密转台高精度角定位需求。

5 结 论

精密转台的角分度定位精度由多种因素决定,其中圆光栅安装偏心、倾斜误差是主要因素。本文研究了圆光栅安装偏心、倾斜等对精密转台角分度误差的影响,利用激光干涉仪与校准回转装置对转台进行检测标定。提出一种基于稀疏分解与谐波分析相结合的角分度误差补偿模型。在处理角分度误差数据的过程中,该方法能够过滤掉信号中的噪声,获得较为准确的谐波分量。通过分解得到的谐波分量拟合误差补偿函数,并对角分度误差进行补偿。试验结果表明:该方法对角分度误差数据有较好的拟合精度,能够将角分度测量精度提高 2 个数量级;对于角分度误差

最大值为 $90.85''$ 的精密转台进行误差补偿后,其值能够减小到 $0.64''$ 。采用误差补偿后,转台的

角度定位精度得到显著提高,满足高精度角位移测试要求。

参考文献:

- [1] 姜登明,魏亮,姚腾蛟,等. 高精度转台装配误差分析和补偿[J]. 导航与控制, 2015, 14(3):108-111+107.
JIANG D M, WEI L, YAO T J, *et al.*. Error analysis and compensation for high accuracy turntable [J]. *Navigation and Control*, 2015, 14(3):108-111+107. (in Chinese)
- [2] 郭敬滨,曹红艳,王克新,等. 转台分度误差检测及补偿技术的研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(7):894-899.
GUO J B, CAO H Y, WANG K X, *et al.*. Study on verification and compensation of indexing errors for turntable [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(7):894-899. (in Chinese)
- [3] 赵人杰,马文礼. 利用误差谐波补偿法提高金属圆光栅测角精度[J]. 仪器仪表用户, 2009, 16(3):69-71.
ZHAO R J, MA W L. Improving the accuracy of new-type encoders using error harmonic compensation [J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2009, 16(3):69-71. (in Chinese)
- [4] 艾晨光,褚明,孙汉旭. 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 C H G, CHU M, SUN H X. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2479-2484. (in Chinese)
- [5] 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 S H 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. (in Chinese)
- [6] 郭敬滨,曹红艳,王克新,等. 转台分度误差的检定及补偿模型的建立[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(6):524-529.
GUO J B, CAO H Y, WANG K X, *et al.*. Check of indexing error for turntable and establishment of its compensation model [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2014, 47(6):524-529. (in Chinese)
- [7] 折文集,高立民,杨永清,等. 激光跟踪仪测角误差标定及补偿[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(SI):52-56.
SHE W J, GAO L M, YANG Y Q, *et al.*. Calibration and compensation of angular error in laser tracker [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(SI):52-56. (in Chinese)
- [8] 冯超鹏,祝连庆,潘志康,等. 一种新的圆光栅偏心参数自标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11):2459-2464.
FENG C H P, ZHU L Q, PAN Z H K, *et al.*. New self-calibration method of circular grating eccentric parameters [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(11):2459-2464. (in Chinese)
- [9] 劳达宝,周维虎,李万红,等. 基于遗传算法的柱面光栅测角技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7):2182-2188.
LAO D B, ZHOU W H, LI W H, *et al.*. Cylindrical grating angle measurement technology based on genetic algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7):2182-2188. (in Chinese)
- [10] KAUL S K, TICKOO A K, KOUL R, *et al.*. Improving the accuracy of low-cost resolver-based encoders using harmonic analysis[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2008, 586(2):345-355.
- [11] 高旭,万秋华,王树洁,等. 光电轴角编码器信号补偿技术的研究进展[J]. 光电子技术, 2013, 33(2):131-136.
GAO X, WAN Q H, WANG S H J, *et al.*. Development of signal compensation technology for photoelectric rotary encoder [J]. *Optoelectronic Technology*, 2013, 33(2):131-136. (in Chinese)
- [12] 苏燕芹,张景旭,陈宝刚,等. 谐波分析方法在提高精密转台回转精度中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1):274-278.

- SU Y Q, ZHANG J X, CHEN B G, *et al.*. Harmonic analysis application in accuracy improvement of precise turntable [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1):274-278. (in Chinese)
- [13] 张功, 张晓飞, 王昱峰, 等. 角位置测量误差补偿方法研究 [J]. *测试技术学报*, 2016, 30(4):353-357.
- ZHANG G, ZHANG X F, WANG Y F, *et al.*. Study on error compensation of angular position measurement [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2016, 30(4):353-357. (in Chinese)
- [14] DONOHO D L, ELAD M, TEMLYAKOV V N. Stable recovery of sparse overcomplete representations in the presence of noise [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(1):6-18.

作者简介:



王福全(1979—),男,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,2005年于重庆交通大学获得学士学位,2008年于重庆大学获得硕士学位,主要从事机电一体化、精密机械及仪器、工业CT技术及系统、计算流体力学以及超精密主轴加工技术等方面的研究。E-mail: wang_fuquan@126.com

导师简介:



谢志江(1963—),湖南双峰人,博士,教授、博士生导师,1983年于河南理工大学获得学士学位,1992年于重庆大学获得博士学位,主要从事智能制造与装备、机电一体化、复杂机电系统和设备状态监测与故障诊断技术方面的研究。E-mail: xie@cqu.edu.cn

(本栏目编辑:李自乐)