

文章编号 1004-924X(2024)18-2803-11

基于误差函数相位偏移的电场式时栅角位移 传感器自标定

于治成¹, 黎自豪¹, 蒲红吉^{1*}, 吴昶亮², 展丙男²

(1. 重庆理工大学 机械检测技术与装备教育部工程研究中心, 重庆 400054;

2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 比对标定对于传感器测量精度的保持和提升具有重要意义, 但其易受现场环境限制, 且成本昂贵。电场式时栅精度不断刷新, 寻找外部参考基准也变得日益困难。针对这一难题, 提出了以圆周封闭原则为基准, 利用傅里叶级数的平移定律, 将电场式时栅的误差序列值以 $2\pi/n$ 角位移值进行移相, 利用具有不同移相次数的误差序列值进行频谱分析, 互相补偿缺失的谐波分量, 最终利用各次谐波分量重构传感器误差函数的自标定方法。并据此设计、搭建了相应的自标定实验平台。实验结果表明, 该自标定方法对于电场式时栅角位移传感器中所包含的周期性误差补偿效果显著。对极内, 使用该自标定方法与用光栅作为参考基准所获得的标定精度基本相当, 两者误差为 $0.05''$, 对极内误差下降 67% ; 整周范围内, 两者误差为 $0.15''$, 整周误差下降 80% 。该自标定方法相比于传统的比对标定法在效率、应用范围及标定成本方面均拥有显著优势。

关键词: 电场式; 角位移传感器; 自标定; 误差移相; 谐波分量

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243218.2803

Research on self-calibration method of electric field time-grating angular displacement sensor based on error function phase shift

YU Zhicheng¹, LI Zihao¹, PU Hongji^{1*}, WU Changliang², ZHAN Bingnan²

(1. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: phongji@126.com

Abstract: Comparison calibration is of great significance for the maintenance and improvement of sensor measurement accuracy, but it is easy to be limited by the field environment, and the cost is expensive. The accuracy of electric grid is constantly updated, and it is increasingly difficult to find an external reference. In order to solve this problem, a self-calibration method of sensor error function was proposed based on the principle of circular closure and the translation law of Fourier series. The error sequence values of electric field time-grating were shifted by $2\pi/n$ angular displacement, error sequence values with different

收稿日期: 2024-01-16; 修订日期: 2024-02-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62103069); 重庆市教委科学技术研究项目资助 (No. KJQN202101121); 国家自然科学基金重点项目资助 (No. 51935004)

phase shift times were used for spectrum analysis to compensate each other for missing harmonic components, finally, the sensor error function was reconstructed using each harmonic component. Accordingly, a self-calibration application platform was designed and built. The experimental results show that the self-calibration method is effective in compensating the periodic errors contained in the electric field time-grating angular displacement sensor. measurement period, the calibration accuracy obtained by using the self-calibration method is similar to that obtained by using the grating as the reference, the measurement error of two different self-calibration methods is 0.05", and the measurement period error is reduced by 67%. Over the full measurement range, the measurement error of two different self-calibration methods is 0.15", and the full measurement error dropped by 80%. Compared with the conventional comparison and self-calibration method, the self-calibration method has significant advantages in efficiency, application range and calibration cost.

Key words: electric field type; angular displacement sensor; self-calibration; error phase shift; harmonic component

1 引言

电场式时栅角位移传感器通过波动的电场构建行波运动场作为匀速运动参考系,将对空间位移量的测量溯源到了对时间量的测量^[1-2]。独特的原理使其在同等测量精度下,对传感器的加工要求大大降低^[3]。但实际应用中,电场式时栅却面临一个精度损失的问题。安装过程中的偏心、倾斜^[4-7]及使用环境的变化都会使得传感器的实际参数与理论参数存在一定偏差,导致传感器测量精度下降。传统解决方法一般是使用更高精度的传感器作为基准来对传感器进行校正^[8-9]。此种校准方法原理简单,可也存在两个较为突出的问题:(1)由于现场环境的限制,不能或者不便安装更高精度的基准,且校准效率低下,对生产效率有较大影响;(2)随着电场式时栅角位移传感器精度的不断提升^[10-11],寻找更高精度的基准也变得愈发困难。而自标定可以通过自身的运动数据辨识误差,摆脱参考基准的限制,解决传感器精度损失问题。因此,进行电场式时栅的自标定研究对于扩大电场式时栅应用范围,完善其相关理论均具有重要意义。

针对角位移传感器的自标定,国内外的学者展开了深入的研究。其中多读数头法是国际完成角度测量自标定的主要方法,如:德国联邦国家物理研究院的 PFD(Prime Factor Division)方

法^[12];美国的 TDR(Time-measurement Dynamic Reversal)方法^[13]和日本国家计量研究院的 EDA(Equal Division Averaged)方法^[14]。以上这些自标定方法都真正意义上实现了传感器的自标定,但这些方法也只在一些特定假设条件下才会生效,当实际条件与假设条件相差过大时,上述这些标定方法就会失效。

国内学者基于上述自标定方法,针对时栅的自标定也进行了深入研究。如苟李等^[15]基于定距平移的原理提出了单个测头的自标定,但是该方法需要依托匀速转台,使得其应用范围受限。鲁进等^[16]针对磁场式时栅提出了一种误差频率扫描型的自标定方法,具有普适性,但该方法是由连续域推广离散域所得到的,因此其适用标准难以界定。Gou 等^[17]通过同轴布置多测头,利用不同测头进行相互标定,降低了旋转误差对标定精度的影响,但是该方法对读数头的布置精度、一致性提出了较高要求。

为解决电场式时栅应用过程中出现的精度丢失^[18-20]问题,本文提出了一种电场式时栅角位移传感器误差函数相位偏移的自标定方法,以圆周封闭原则为基准,通过误差序列值的相位偏移,获得多组误差序列值,再利用误差序列值与系统误差函数间的映射关系,解算出传感器的系统误差。实验结果表明,该方法能有效降低电场式时栅传感器的系统误差。

2 电场式时栅角位移传感器的自标定方法研究

2.1 电场式时栅角位移传感器原理

电场式时栅角位移传感器的结构原理如图 1 所示。

电场式时栅测量的核心思想是时空转换,将空间位移量的测量转换到时间量的测量。要完成这一步,需要在空间位移和时间基准之间构建一个稳定的匀速运动参考系。

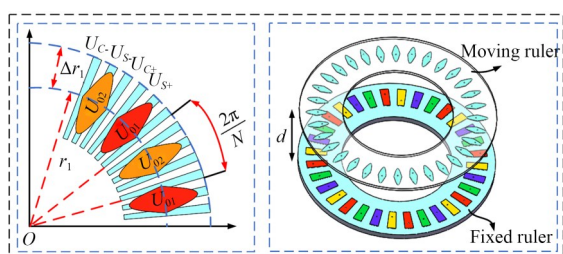


图 1 电场式时栅角位移传感器结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of electric field time-grating angular displacement sensor

图 1 中的四个矩形极片可组成一个对极,整周内均匀分布 N 个对极,每个对极对应角度为 $360^\circ/N$,每个对极内的极片皆施加幅值相等,相位相差 $\pi/2$ 的正弦交流激励信号,将其依次命名为 $U_{S+}, U_{C+}, U_{S-}, U_{C-}$,如式(1)所示:

$$\begin{cases} U_{S+} = +A_m \sin(\omega t) \\ U_{C+} = +A_m \cos(\omega t) \\ U_{S-} = -A_m \sin(\omega t) \\ U_{C-} = -A_m \cos(\omega t) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: A_m, ω, t 分别为激励信号的幅值、频率和时间。动尺所拾取到的感应信号 U_{01} 与电极的正对面积成正比,因此,电场式时栅角位移传感器可以视作变面积型的传感器。

四组激励信号在同一块感应极片上耦合出来的信号依次命名为 $U_{S0+}, U_{C0+}, U_{S0-}, U_{C0-}$ 。为了方便分析其原理,下面将以一个对极内的激励信号 U_{S+} 对感应极片的影响为例进行表述, U_{S0+} 可以表示为:

$$U_{S0+} = K \Delta S_{S+} U_{S+}, \quad (2)$$

其中: K 为电场的耦合系数, ΔS_{S+} 为施加 U_{S+} 激

励信号的定尺极片与动尺极片正对面积变化值。将动尺与定尺发生相对转动时的正对面积变化 ΔS_{S+} 用式(3)表示:

$$\Delta S_{S+} = 2\Delta r_1 r_1 \left[1 - \cos(N\pi\theta/180^\circ) \right] \\ \theta \in \left[0^\circ, \frac{360^\circ}{N} \right], \quad (3)$$

其中: Δr_1 为正弦电极的幅值形式表达, r_1 为正弦电极所在圆周的圆周半径。

电场式时栅角位移传感器的动尺相对定尺在每个对极内的正对面积变化都可用上式表达,每个对极内的变化规律进行组合,即可得到电场式时栅角位移传感器在整周范围内的正对面积变化表达式。将式(1)和式(3)代入式(2)即可得到 U_{S0+} 激励信号在感应电极上的耦合信号表达式。

$$U_{S0+} = 2\Delta r_1 r_1 A_m K \left[1 - \cos\left(\frac{N\pi\theta}{180^\circ}\right) \right]. \quad (4)$$

同理,求出 U_{C+}, U_{S-}, U_{C-} 激励信号单独作用于动尺极片上时的耦合信号 $U_{C0+}, U_{S0-}, U_{C0-}$ 。设电场式时栅工作时四路激励信号在一块极片上耦合出来的信号的叠加值为 U_{01} ,则 U_{01} 可以表示为:

$$U_{01} = U_{S0+} + U_{C0+} + U_{S0-} + U_{C0-} = \\ -4KA_m \Delta r_1 r_1 \sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ) = \\ K_1 \sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ), \quad (5)$$

其中: $K_1 = -4KA_m \Delta r_1 r_1$,表示 U_{01} 的幅值。相位与对极数成正比变化,当动尺相对定尺旋转时,感应信号的相位也会发生变化,此时通过信号处理电路中的高速脉冲模块对感应信号与参考信号的相位差进行插补即可解算出转动的角位移。电场式时栅角位移传感器的信号处理过程如图 2 所示。

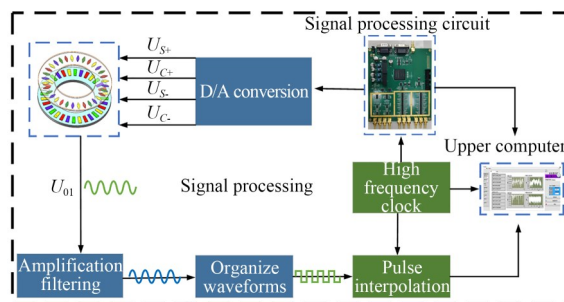


图 2 时栅信号处理过程

Fig. 2 Time-gating signal processing process

2.2 自标定原理

电场式时栅角位移传感器的误差由随机误差和系统误差两部分组成,而传感器示值与传感器误差之间存在以下函数关系:

$$f(\theta) = e_\theta + \theta, \quad (6)$$

其中: e_θ 表示传感器的误差, $f(\theta)$ 表示传感器的示值, θ 表示传感器走过的角位移值。

若传感器走过的角位移值为 $\theta + \varphi$, 则通过式(6)可以得到式(7):

$$f(\theta + \varphi) = e_{\theta+\varphi} + \theta + \varphi. \quad (7)$$

用式(7)减去式(6)可得式(8):

$$f(\theta + \varphi) - f(\theta) = e_{\theta+\varphi} - e_\theta + \varphi. \quad (8)$$

通过式(8), 传感器示值与传感器误差之间建立了联系。利用传感器在不同起始位置处的测量序列值(误差序列值)与误差函数之间的映射关系, 即可重构传感器误差函数。

具体原理为: 在初始位置时, 对被测对象在整周范围内进行采样, 并记录其测量序列值, 将该测量序列值作为测量基准序列值并命名为 $f_1(\theta)$, 将该测量序列值对应的误差序列值作为误差基准序列值, 并命名为 $e_1(\theta)$ 。然后对被测对象以角位移 $2\pi/n$ 变换测量起始点, 继续进行整周范围内的采样, 变换初始测量位置后的测量序列值依次命名为 $f_2\left(\theta + \frac{2\pi}{n} \times 1\right), f_3\left(\theta + \frac{2\pi}{n} \times 2\right), \dots, f_n\left[\theta + \frac{2\pi}{n} \times (n-1)\right]$, 将其余测量序列值对应的误差序列值分别命名为 $e_2\left(\theta + \frac{2\pi}{n} \times 1\right), e_3\left(\theta + \frac{2\pi}{n} \times 2\right), \dots, e_n\left[\theta + \frac{2\pi}{n} \times (n-1)\right]$ 。测量序列值及其所对应的误差序列值相比测量基准序列值、误差基准序列值分别具有相移 $2\pi j/n$ ($j=1, 2, 3, \dots$)。

设相移数 $n=5$, 则对应的误差序列值分别为 $e_1(\theta), e_2\left(\theta + \frac{2\pi}{5}\right), \dots, e_5\left(\theta + \frac{2\pi}{5} \times 4\right)$ 。设第 j 个误差序列值与误差基准序列值的差值为 $\epsilon_{i,j}$, $\epsilon_{i,j}$ 的数学含义即为误差之差, 其可用式(9)表示:

$$\epsilon_{i,j} = f_j\left(\theta_i + \frac{2\pi}{N}(j-1)\right) - f_1(\theta_i) - \frac{2\pi}{N}(j-1) = e_j\left[\theta_i + \frac{2\pi}{N}(j-1)\right] - e_1(\theta_i). \quad (9)$$

通过式(9)可知, 传感器的误差之差等于传感器的示值之差减去两次转位间传感器走过的角位移值。

若传感器走过的角位移值已知, 那么通过传感器误差之差与传感器误差之间的函数关系, 便可求解出传感器的误差实现传感器的误差自标定。每个误差序列值与误差基准序列值的差值可如式(10)所示:

$$\begin{cases} \epsilon_{i,1} = e_1(\theta_i) - e_1(\theta_i) \\ \epsilon_{i,2} = e_2\left(\theta_i + \frac{2\pi}{5}\right) - e_1(\theta_i) \\ \epsilon_{i,3} = e_3\left(\theta_i + \frac{2\pi}{5} \times 2\right) - e_1(\theta_i) \\ \epsilon_{i,4} = e_4\left(\theta_i + \frac{2\pi}{5} \times 3\right) - e_1(\theta_i) \\ \epsilon_{i,5} = e_5\left(\theta_i + \frac{2\pi}{5} \times 4\right) - e_1(\theta_i) \end{cases}. \quad (10)$$

设传感器首次采样所在位置为测量起始点, 传感器在其对应的起始点处完成整周采样后, 便移相 $2\pi/n$, 到达下一个测量起始点, 然后继续在整周范围内进行采样, 整个实验过程传感器共移相 n 次, 共采集 n 组数据。

传感器测量序列值及误差序列值移相原理如图3所示。

取对应五个式子中误差之差的和的平均值, 令其为 $\mu_{i,n}$, 如式(11)所示:

$$\mu_{i,n} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \epsilon_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} e_j\left(\theta_i + \frac{2\pi}{5} \times j\right) - e_1(\theta_i). \quad (11)$$

用式(10)中第一个误差之差 $\epsilon_{i,1}$ 减去 $\mu_{i,n}$, 如式(12)所示:

$$\epsilon_{i,1} - \mu_{i,n} = e_1(\theta_i) - \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} e_j\left(\theta_i + \frac{2\pi}{5} \times j\right). \quad (12)$$

将传感器的误差函数 $e_1(\theta_i)$ 进行傅里叶展开可得到式(13):

$$e_1(\theta_i) = \sum_{m=1}^M E_m \sin(m\theta_i + \varphi_m). \quad (13)$$

虽然传感器的误差函数 $e_1(\theta_i)$ 并未求得, 但是式(12)的左项可通过传感器的测量值求得。

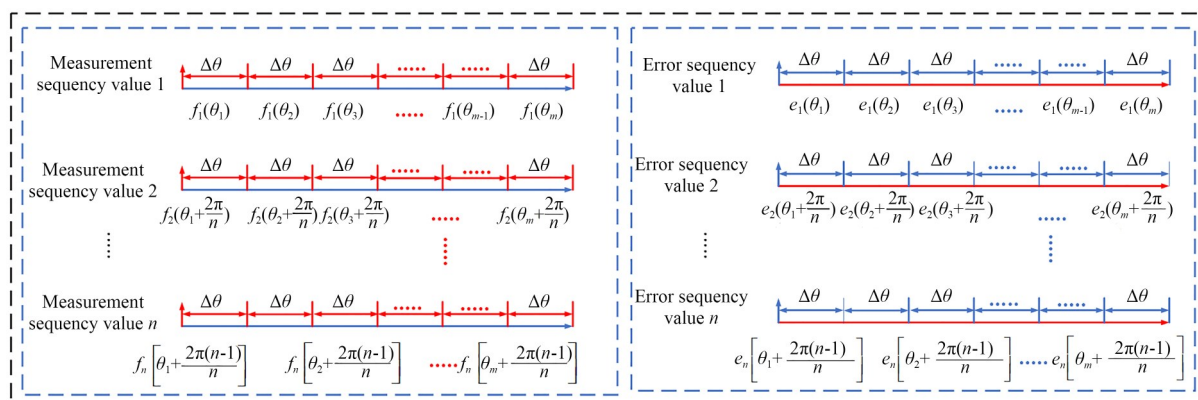


图 3 测量序列值及误差序列值移相原理图

Fig. 3 Phase-shifting diagram of measurement sequence values and error sequence values

如图 4 所示,设曲线 b_0 为传感器的误差曲线,曲线 b_0 移相 $72^\circ, 144^\circ, 216^\circ, 288^\circ$ 可得曲线 b_1, b_2, b_3, b_4 , 取 b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 五条曲线的平均值可得其平均曲线,平均曲线的数学含义即为式(12)方程右侧的第二项。将 b_0 和平均曲线进行傅里叶变换,其结果如图 5 所示。由图 5 可知,平均曲线只含有 b_0 曲线傅里叶分量的五倍分量。

从数学上,也可以利用傅里叶级数的平移定律来对这个现象进行解释进行。“任意的以 2π 为周期的曲线都可以用傅里叶级数表示,当对 n 条每次相移为 $2\pi/n$ 的曲线求平均时,平均曲线表示原始曲线的 n 阶傅里叶分量的整数倍之和”。

因此,通过该方法校准传感器误差时,除 kn 次谐波分量以外的误差都将被显著抑制,且该自标定方法的精度可通过移相次数互质的方法提高。

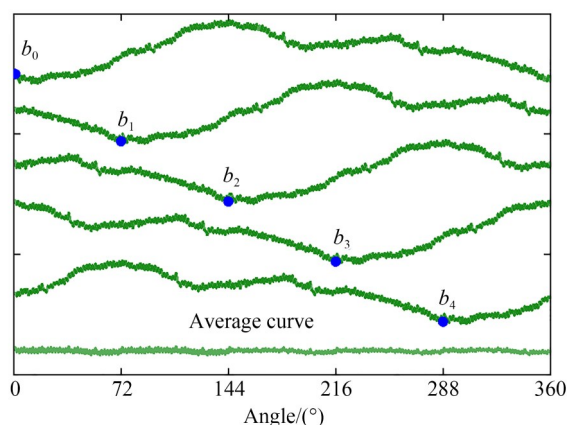
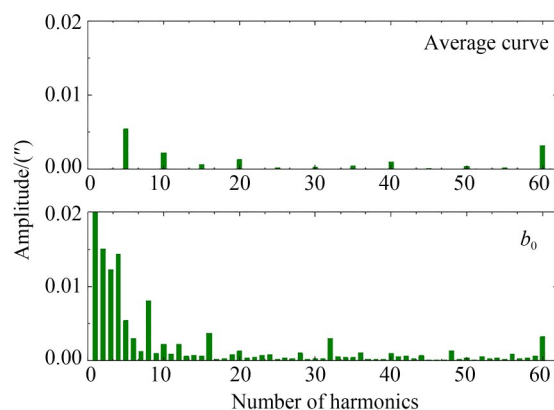


图 4 移相曲线及平均曲线

Fig. 4 Phase shift curve and average curve

图 5 平均曲线及 b_0 频谱分析值Fig. 5 Average curve and b_0 spectrum analysis value

综上,式(12)可改写成式(14):

$$\varepsilon_{i,1} - \mu_{i,n} = \sum_{m=1}^M E_m \sin(m\theta_i + \varphi_m) - \sum_{k=1}^K E_{kn} \sin(kn\theta_i + \varphi_{kn}). \quad (14)$$

2.3 建立自标定模型

为保证不同测量序列值对应点位采样间隔保持一致,增设了一个定位传感器。在初始测量位置处,定位传感器与待标定传感器保持连锁状态,两者同时在整周范围内进行采样,并分别记录定位传感器亟待标定传感器的采样值。然后使定位传感器与待标定传感器解除连锁状态,将待标定传感器的初始测量位置变换 $2\pi/n$,再次让定位传感器与待标定传感器保持连锁状态,以初始测量位置处定位传感器的采样值为参考,继续在整周范围内进行待标定传感器的采样。以此类推,共可得到 n 组不同初始位置处的测量序列值。

将所采集到的数据按照式(10)~式(14)进行处理,并通过频谱分析计算出对应的幅值和相位。设其幅值和相位分别为 β_i, φ_i ,将其代入式(15)即可重构出不含误差函数 kn 次谐波分量的自标定误差函数 $\delta(\theta)$:

$$\delta(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^{\frac{M}{2}-1} [\beta_i \times \sin(i\theta + \varphi_i)], \quad (15)$$

其中: M 为采集的测量点个数, a_0 为 $\delta(\theta)$ 的直流分量,其可通过和式最值求出。设:

$$E = \sum_{i=1}^{\frac{M}{2}-1} [\beta_i \times \sin(i\theta + \varphi_i)], \quad (16)$$

则 $a_0 = \frac{\text{Max}(E) + \text{Min}(E)}{2}$,至此完成了自标定数学模型的构建。

3 实验验证及数据分析

3.1 自标定实验

根据前文所述自标定方法实现原理及过程,在RT400高精度双轴复合测角转台上使用了拥有420对极的待标定传感器及定位传感器进行实验验证。

RT400高精度双轴转台具有很高的回转精

度。转台采用内、外双轴式精密支承、超精密微位移驱动与控制技术方案,可保证转台双轴定位误差优于 $1''$,重复定位误差优于 $0.5''$,转台最小分辨力达到 $0.01''$,能够满足本次自标定实验的要求。

为验证自标定方法的有效性和准确性,在实验系统中加入海德汉RON905光栅随转台同步转动,并作为角度测量的基准,海德汉RON905光栅测量误差为 $\pm 0.4''$,将通过光栅标定获得的误差与自标定获得的误差进行对比。搭建的自标定实验平台如图6所示。

验证过程中首先让定位传感器、待标定传感器保持联锁状态,两者在整周范围内同时等间隔采集5000个数据。然后定位传感器、待标定传感器解除联锁状态,待标定传感器在初始测量位置的基础上移相 72° ,再将定位传感器、待标定传感器间的状态切换为联锁状态,待标定传感器以定位传感器采样值为参考继续进行整周范围内的均匀采样。重复上述步骤。可在 $0^\circ, 72^\circ, 144^\circ, 216^\circ, 288^\circ$ 位置处得到五组不同初始测量位置的测量序列值。

按照前文实验步骤,使定位传感器、待标定传感器保持联锁状态,从初始测量位置处继续进行整周范围内的等间隔采样,同样采集5000个数据。后定位传感器、待标定传感器解除联锁状态,待标

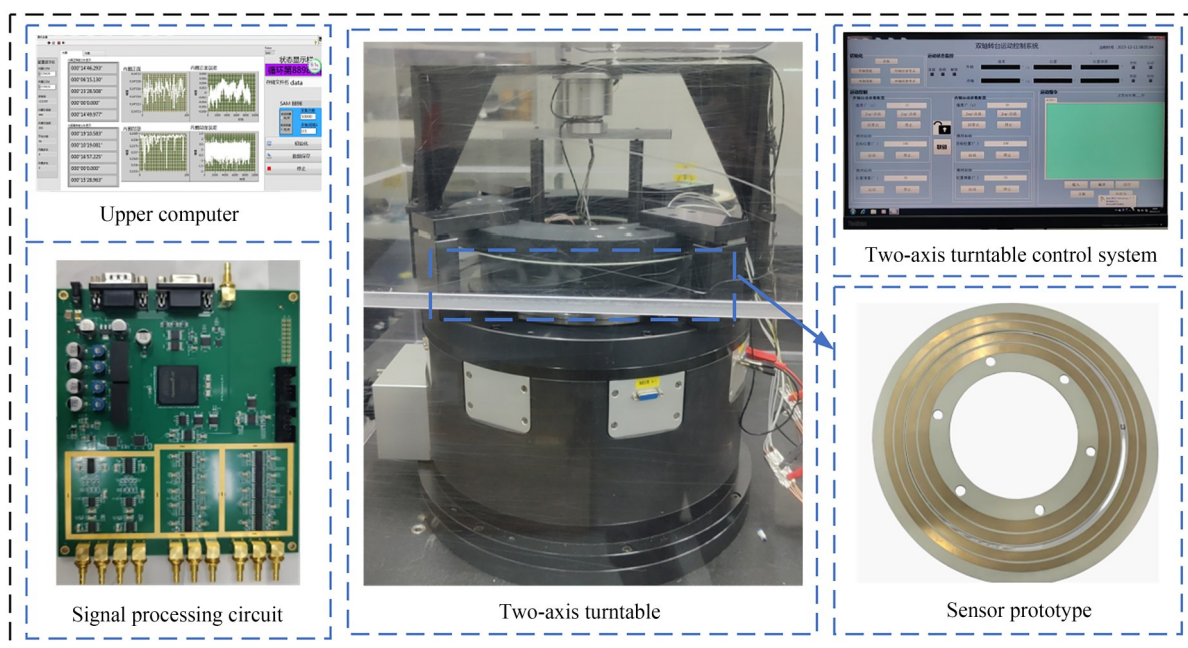


图6 自标定实验平台

Fig. 6 Self-calibration experiment platform

定传感器移相 90° , 并将两传感器间的状态切换为联锁状态, 待标定传感器以定位传感器在初始测量位置处的采样值为参考, 继续进行整周范围内的等间隔采样, 同样采集 5 000 个数据。以此类推, 最终可在 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 位置处采集到 4 组不同初始测量位置的测量序列值。然后根据式 (9)、式 (10) 进行数据处理。利用两次实验所获得数据进行频谱分析, 取前 60 次谐波分量值展现于图 7 中。

由图 7 可知, 用整周 4 次移相及整周 5 次移相所获得的数据做频谱分析, 分别不含 4 的整数倍及 5 的整数倍谐波分量, 但是两者的谐波分量可以互相补偿。因此可以通过多次组合测量, 求取更高频次的谐波误差分量, 提升自标定方法的精度。

3.2 对极内误差验证

电场式时栅角位移传感器的系统误差在各个对极及整周范围内均具有周期性, 整周范围内的误差特性在数学上可以视作各个对极内的误

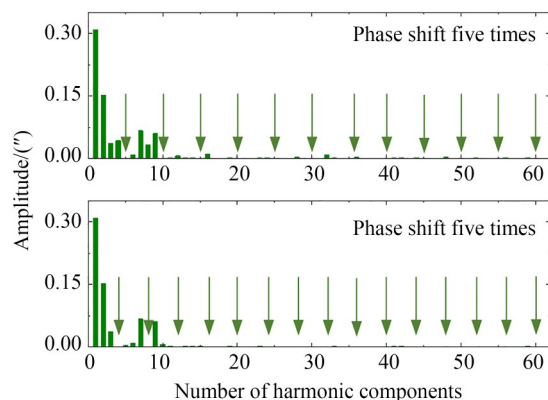


图 7 四次及五次移相频谱分析

Fig. 7 Fourth and fifth phase shift spectrum analysis

差特性的组合。为验证自标定方法的有效性 & 准确性, 选取了四个对极进行验证。设以光栅为基准获得的误差曲线为对比标定误差曲线 (下同), 将以自标定方法获得的误差曲线与对比标定误差曲线进行对比, 如图 8 所示。

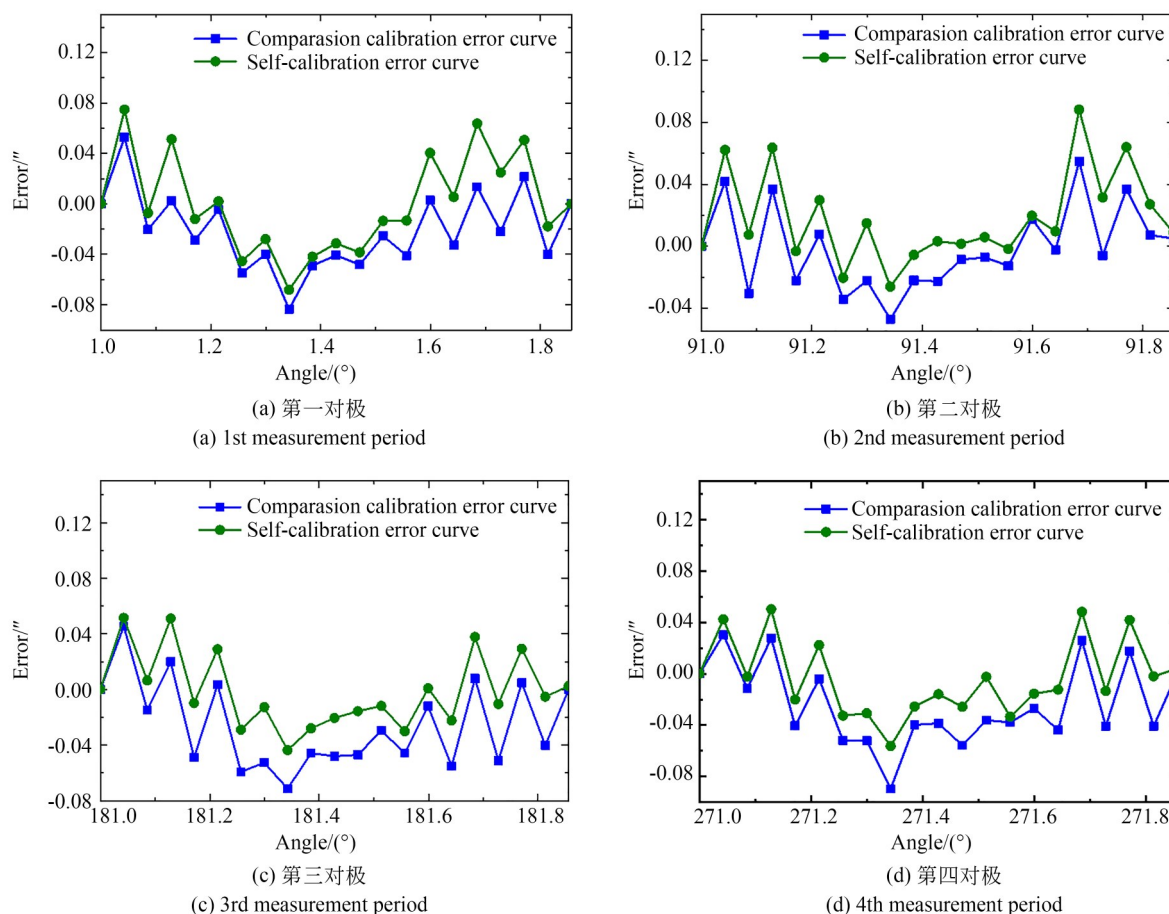


图 8 对极内误差验证

Fig. 8 Error of measurement period accuracy

由图 8 可知,利用该自标定方法获得的误差曲线特性与对比标定误差曲线特性能够保持一致,并且能够较好地拟合对比标定误差曲线。对图 8 所选四个对极的误差进行修正,将修正前、修正后的数据结果展现在表 1 中。

由表 1 数据可知,对极内的误差经过修正之

后,其误差峰峰值较修正之前降低 67%,对极内残余误差峰峰值最大为 0.05",最小为 0.037"。而经由实验验证,传感器的稳定性为 0.01",也即由稳定性本身所带来的随机误差为 0.02",由于电场式时栅本身精度已经极高,此时,随机误差成为影响自标定精度的主要因素。

表 1 对极内误差数据

Tab. 1 Error data in the measurement period

Number of the measurement period	Self calibration error/(")	comparison calibration error/(")	Corrected error/(")	Error reduction ratio column /%
1	0.15	0.14	0.05	64.2
2	0.1	0.12	0.037	69.1
3	0.11	0.12	0.039	67.5
4	0.11	0.11	0.038	66.9

将四组对极内的残余误差分别展现在图 9 中,由图 9 可知各个对极内的数据的差异性为

0.02"。对极内的残余误差呈现出一定的随机性,主要原因有:(1)电场式时栅经过标定后,本

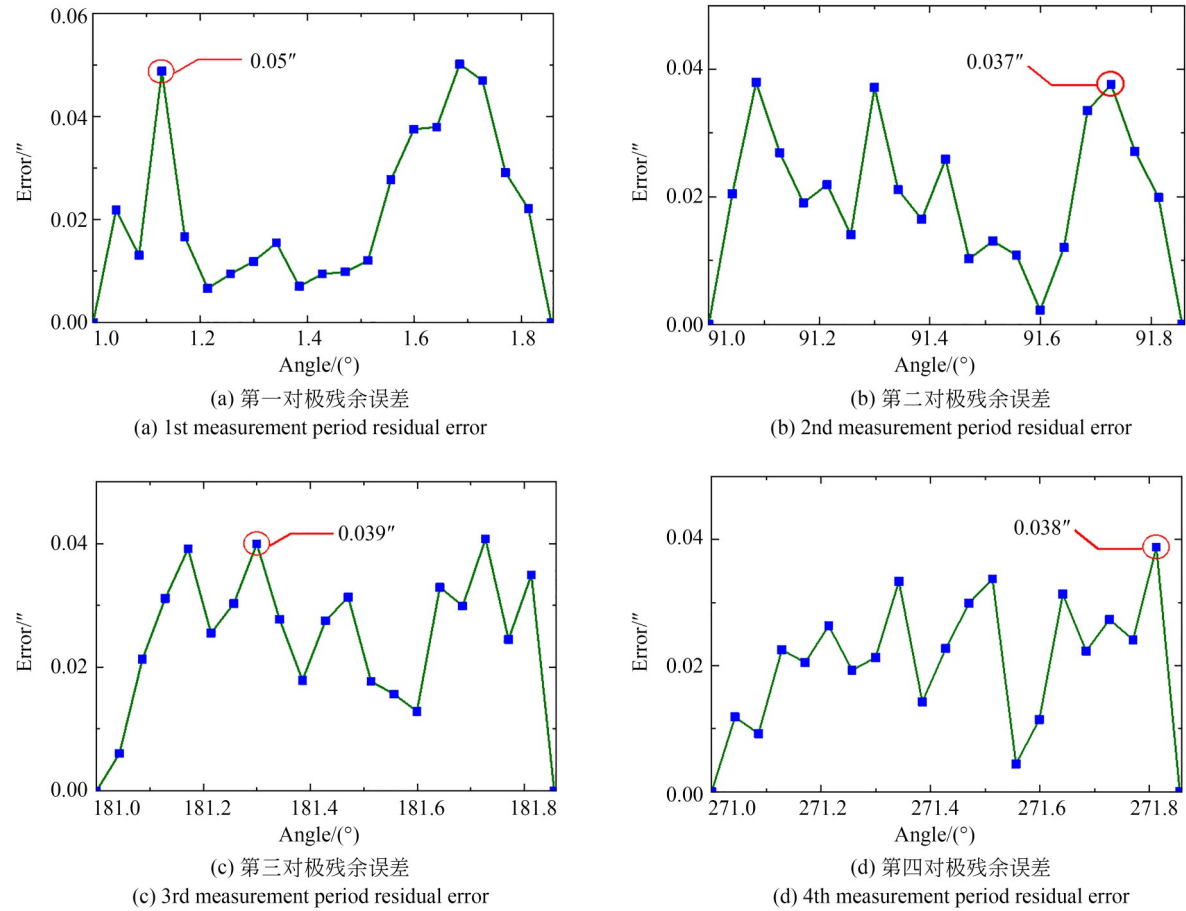


图 9 对极内残余误差

Fig. 9 Residual error in the measurement period

身精度已经极高,此时,随机误差在残余误差中占比较大,因此体现出一定的随机性;(2)由于加工工艺的不一致,导致了不同对极内误差特性不同。

3.3 整周误差及稳定性验证

根据前文实验结果,通过频谱分析可以求得各次谐波分量的幅值和相位,将其代入式(16)可求得 E ,通过 E 的两个最值的平均值可以求得整周误差函数的直流分量 a_0 ,再将求得的各次谐波分量的幅值、相位、直流分量代入式(15)即可重

构出整周范围内的自标定误差曲线。利用 RON905 光栅测得的数据可得到整周范围内的比对标定误差曲线。

将两者绘制在图 10(a)中,将自标定误差曲线与比对标定误差曲线作差即可得到自标定方法残余误差,如图 10(b)所示。实验结果显示,自标定误差曲线与比对标定误差曲线特性基本一致。其误差为 $0.15''$,整周误差峰峰值较修正之前降低 80%。因此,该自标定方法能有效降低电场式时栅角位移传感器的系统误差。

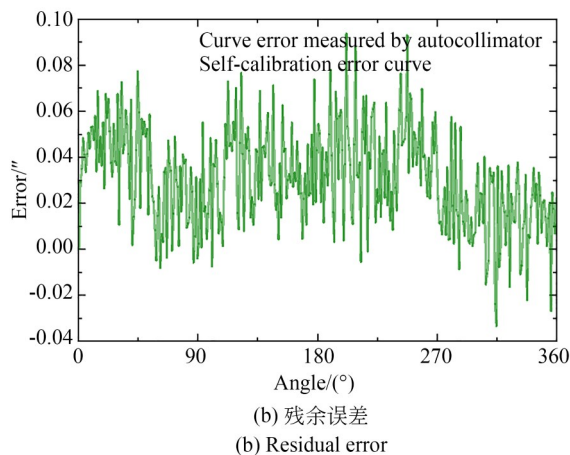
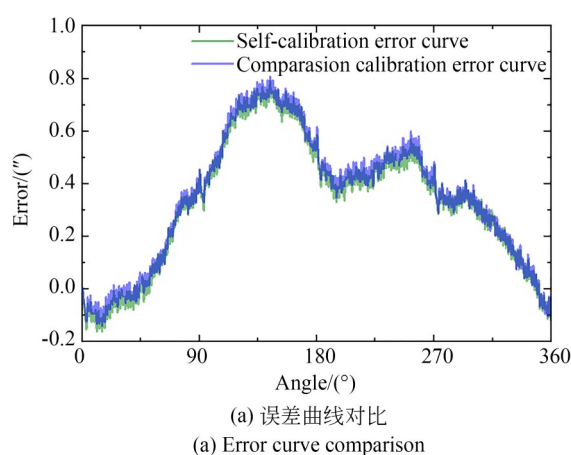


图 10 误差曲线对比及残余误差

Fig. 10 Error curve comparison and residual error

为进一步验证自标定方法的准确性,选用了光电自准直仪作为测角基准,在整周范围内测量 36 个点,并与自标定方法所求误差进行对比,将结果展现在图 11 中。

由图 11 可知,自标定误差曲线特性与用光电自准直仪所测误差曲线特性能够很好拟合,两者误差最大为 $0.07''$ 。通过选用两种高精度的基准进行自标定误差曲线的误差验证,再次证明了该自标定方法的准确有效。

为验证使用该自标定方法后传感器的重复性,使用经过误差校正的电场式时栅传感器在整周范围内进行三次测量,并将对应点位的测量误差展现在图 12 中。

由图 12 可知,经过该自标定方法校准后的传感器在整周范围内,其测量误差最大为 $0.12''$,且

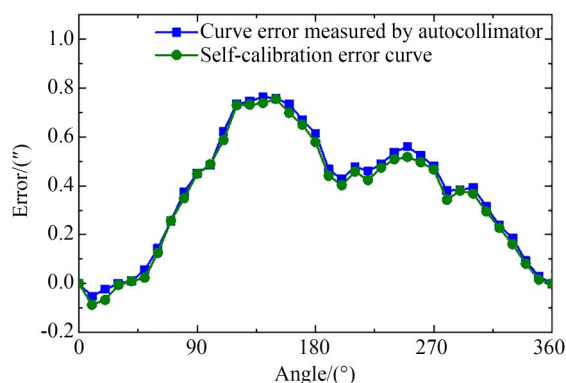


图 11 自准直仪、自标定误差曲线对比

Fig. 11 Comparison of error curves between autocollimator and self-calibration

测量误差的最值均出现在同一点位,表明传感器测量重复性良好。

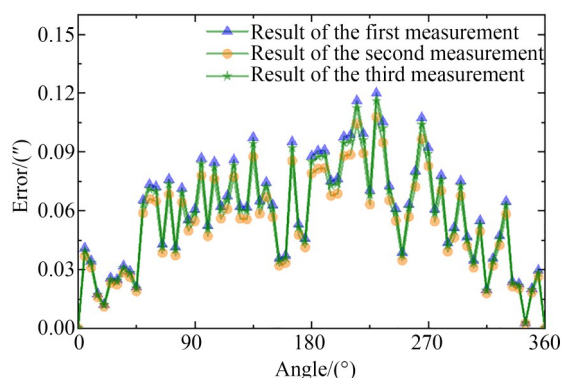


图 12 重复性实验结果

Fig. 12 Results of repeated experiments

4 结 论

通过对电场式时栅角位移传感器的原理及国内外研究现状分析,进行了电场式时栅角位移传感器误差相位偏移的自标定方法研究。以圆

周封闭原则为基准,通过傅里叶级数的平移定律,对测量序列值(误差序列值)的相位偏移进行了理论推导,建立了相应的自标定模型,并搭建了实验平台进行实验验证。由实验数据可知:对于单个对极,标定后的对极内残余误差峰峰值为 $0.05''$,对极内误差峰峰值较标定之前下降 67%,此时随机误差成为影响自标定效果的主要因素;整周范围内,传感器的误差由标定前的 $0.8''$ 降至标定后的 $0.15''$,整周误差峰峰值较标定之前下降 80%。经过标定后的传感器,能够保持稳定采样。

该自标定方法相比传统的比对标定而言,在标定效率和使用成本等方面具有显著的优势,同时,对于完善电场式时栅相关理论也具有重要意义。

该方法对于相位偏移的准确度、传感器的稳定性有一定要求,后续将继续研究这两者对自标定效果的影响,改善其不足,以期进一步提高其精度。

参考文献:

- [1] FAN X C, YU Z C, PENG K, *et al.* A compact and high-precision capacitive absolute angular displacement sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(19): 11173-11182.
- [2] 丁琛沅,陈海军. 高性能被动型 CPT 原子钟发展趋势[J]. 宇航计测技术, 2023, 43(5): 23-30.
DING C F, CHEN H J. Development trend of high performance passive CPT atomic clock[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2023, 43(5): 23-30. (in Chinese)
- [3] 蔡子墨,匡翠方,杨华勇,等. 激光融合制造及在柔性微纳传感器的应用(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(4): 3788/CJL231372.
CAI Z M, KUANG C F, YANG H Y, *et al.* Hybrid laser manufacturing and applications in flexible micro-nano sensors(invited)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(4): 3788/CJL231372. (in Chinese)
- [4] 姜志峰,郝秀朋,刘力,等. 圆光栅配合自准直仪测量主轴径向运动误差[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 2053-2061.
LOU Z F, HAO X P, LIU L, *et al.* Spindle radial motion error measurement using a circular grating and a autocollimator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(9): 2053-2061. (in Chinese)
- [5] 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 Z, YU H, YI J, *et al.* Grating eccentricity monitoring system for image-based angular displacement measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(5): 1038-1045. (in Chinese)
- [6] PENG K, YU Z C, LIU X K, *et al.* Features of capacitive displacement sensing that provide high-accuracy measurements with reduced manufacturing precision [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(9): 7377-7386.
- [7] 鲁进,陈锡侯,汤其富,等. 变耦型时栅传感器及测头姿态对测量误差的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2271-2282.
LU J, CHEN X H, TANG Q F, *et al.* Variable coupling time grating sensor and effects of sensor-head attitudes on measuring errors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2271-2282. (in Chinese)
- [8] 钱建强,王东生. 一种闭环控制圆光栅角度分度测量装置[J]. 仪器仪表学报, 2006, (S2): 1515-1516, 1529.
QIAN J Q, WANG D S. A closed-loop control device for measuring angle division of circular grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, (S2): 1515-1516, 1529.

- [9] 孟琳达,孙丰欣. 用匠心丈量“中国精度”[J]. 国资报告, 2022, (10): 126-129.
MENG L D, SUN F X. Measuring "Chinese precision" with ingenuity [J]. *State Assets Report*, 2022, (10): 126-129.
- [10] 彭东林. 时栅传感器的技术现状、发展趋势和思想延伸[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(03): 128-134.
PENG D L. Technology status, development trend and thought extension of time-grating sensors [J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2023, 60(03): 128-134.
- [11] 许现波,朱革,付敏,等. 基于游标细分方法的高精度时栅测量系统设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(1): 81-82, 86.
XU X B, ZHU G, FU M, *et al.* Design of time grating measurement system based on vernier caliper subdivision method [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(1): 81-82, 86. (in Chinese)
- [12] PROBST R. Self-calibration of divided circles on the basis of a prime factor algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19 (1): 015101.
- [13] LU X D, TRUMPER D L. Self-calibration of on-axis rotary encoders [J]. *CIRP Annals*, 2007, 56 (1): 499-504.
- [14] WATANABE T, FUJIMOTO H, MASUDA T. Self-calibratable rotary encoder [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2005, 13: 240-245.
- [15] 苟李,陈锡侯,彭东林,等. 基于单个时栅读数头冗余采样的自标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 124-131.
GOU L, CHEN X H, PENG D L, *et al.* Redundant sampling self-calibration method based on single reading head of time grating sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39 (3): 124-131. (in Chinese)
- method based on redundant sampling of single time-grating reading head [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(03): 124-131.
- [16] 鲁进,陈锡侯,汤其富,等. 时栅传感器定距变换与误差频率扫描自标定法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 32-39.
LU J, CHEN X H, TANG Q F, *et al.* Fixed distance transform and error frequency scanning self-calibration method for time grating sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37 (1): 32-39. (in Chinese)
- [17] GOU L, PENG D L, CHEN X H, *et al.* A self-calibration method for angular displacement sensor working in harsh environments [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(8): 3033-3040.
- [18] 郑勇,余洁,易兴,等. 大量程高精度的新型弱光栅位移传感器研究[J]. 压电与声光, 2023, 45 (4): 650-656.
ZHENG Y, YU J, YI X, *et al.* Research on a novel weak fiber Bragg grating displacement sensor with large range and high accuracy [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2023, 45 (4): 650-656. (in Chinese)
- [19] 陈自然,张衍潇,何智颖,等. 基于离散绕组的磁场式时栅位移传感器及误差特性[J]. 光学精密工程, 2023, 31(19): 2836-2849.
CHEN Z R, ZHANG H X, HE Z Y, *et al.* Magnetic field time-gate displacement sensor based on discrete winding and its error characteristics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(19): 2836-2849. (in Chinese)
- [20] 张天恒,童鹏,杨继森. 伺服电机转子位置检测的误差分析与补偿[J]. 计量学报, 2022, 43 (10): 1319-1325.
ZHANG T H, TONG P, YANG J S. Error analysis and compensation of servo motor rotor position detection [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43 (10): 1319-1325. (in Chinese)

作者简介:



于治成(1989—),男,重庆人,博士,助理研究员,硕士生导师。2012年于重庆工商大学获得学士学位,2015年于重庆理工大学获得硕士学位,2019年于合肥工业大学获得博士学位。主要从事智能仪器与传感器研究。E-mail: yzc@cqut.edu.cn

通讯作者:



蒲红吉(1988—),男,重庆人,博士,副研究员,硕士生导师。2011年、2014年于重庆理工大学分别获得学士、硕士学位。2020年于西安交通大学获得博士学位。主要从事智能仪器与传感器研究。E-mail: phongji@126.com