

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209601

时栅位移传感器误差动态采样与补偿模型研究*

杨继森,张迪,卢渝,吴灼,周润

(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)

摘要:针对现有时栅位移传感器误差补偿模型补偿效果受标定实验台速度影响的问题,提出了一种基于三次样条插值-傅里叶谐波合成的误差补偿模型。首先,根据时栅位移传感器多测头信号感应原理与整周误差曲线等间距周期性分布特性,分析短周期误差受标定实验台速度影响,引入传感器等间距采样的“错位”误差,该误差将直接影响构建的短周期误差补偿模型的补偿效果;其次,利用三次样条插值法准确定位误差采样位置,精确重构短周期误差曲线;最后,通过重构的短周期误差曲线与傅里叶谐波补偿法建立了短周期误差补偿模型,提高了时栅位移传感器误差补偿效果。实验结果表明,采用本补偿模型后传感器短周期误差峰峰值降至 $1.7''$;本补偿模型短周期误差补偿效果优于传统基于傅里叶谐波补偿法构建的补偿模型,标定实验台速度为 3 r/min 时补偿效果可提高 56.0% ,既能满足传感器动态标定的工作效率,也能满足传感器的高精度误差标定需求。

关键词:时栅位移传感器;误差补偿模型;三次样条插值;傅里叶谐波补偿

中图分类号: TH712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Study on error dynamic sampling and compensation model of the time grating displacement sensor

Yang Jisen, Zhang Di, Lu Yu, Wu Zhuo, Zhou Run

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

Abstract: The compensation effect of the current dynamic compensation model of the time grating displacement sensor is affected by the speed of calibration platform. To address this issue, an error compensation model based on cubic spline interpolation-Fourier harmonic compensation method is proposed. Firstly, the periodic distribution characteristics of multiple probe and whole cycle error curves of time grating displacement sensor are utilized. The short period error is affected by the speed of calibration platform, and the “dislocation” error is introduced. The dislocation error directly affects the compensation effect of the short period error compensation model. Secondly, the cubic spline interpolation method is used to locate the error sampling position accurately and reconstruct the short period error curve accurately. Finally, according to the reconstruction of short period error curve and the method of Fourier harmonic compensation short period error compensation model is established, the error compensation effect of time grating displacement sensor is improved. Experimental results show that the peak-to-peak value of short period error decreases to $1.7''$ after using the compensation model. The compensation effect of short period error is better than the traditional compensation model based on Fourier harmonic compensation method. When the calibration platform rate is 3 r/min , the compensation effect can be increased by 56.0% . It cannot only meet the working efficiency of sensor dynamic calibration, but also meet the demand of sensor high-precision error calibration.

Keywords: time grating displacement sensor; error compensation model; cubic spline interpolation; Fourier harmonic compensation

收稿日期:2022-04-12 Received Date: 2022-04-12

*基金项目:国家自然科学基金(51205434,52175454)、重庆市高等学校优秀人才支持计划项目、重庆理工大学研究生创新项目(clygyc20203107)资助

0 引言

时栅位移传感器是一种新型的位移传感器,具备精度高、抗干扰能力强等特点,在位移测量仪器中逐步得到广泛应用^[1-4]。随着制造加工及位移检测等领域的快速发展,对位置反馈的要求也逐渐增加。提高时栅位移传感器测量精度、减小测量误差迫在眉睫。误差补偿是提高位移传感器测量精度的重要措施之一^[5-10]。目前,常用误差补偿方法包括谐波修正法、遗传算法、后验误差拟合法等。刘承军等^[11]采用谐波修正法建立感应同步器误差模型,将测角系统误差减小至 $\pm 2''$ 。肖韶荣等^[12]采用径向基函数神经网络处理光纤位移传感器测量数据,增加了传感器的测量范围。于海等^[13]基于后验误差拟合法确定光电编码器误差模型参数并构建误差补偿模型,将编码器测角精度提高至 $5.82''$ 。

针对时栅位移传感器误差补偿,许多学者进行了深入研究,彭东林等^[14]采用谐波修正法对误差进行辨识并构建时栅位移传感器的误差补偿模型,实现传感器的高精度测量。杨继森等^[15]运用多项式拟合算法构建了时栅位移传感器的误差补偿模型,提高了传感器整周测量精度。孙世政等^[16]基于超限学习机训练误差补偿模型参数并构建时栅位移传感器误差补偿模型,大幅度降低传感器短周期误差。

上述方法通过对时栅位移传感器误差数据进行动态采样构建误差补偿模型,实现对时栅位移传感器误差的静态补偿,提高了传感器误差补偿精度。但均未考虑“无法等间距采样”,即时栅位移传感器误差信息与采样位置信息不匹配的问题。该问题将在建立短周期误差补偿模型中引入“错位”误差,影响短周期误差补偿效果,因此忽略该误差而产生的补偿误差应受到重视。

本文以时栅位移传感器多测头信号感应原理与整周误差曲线等间距周期性分布特性为基础,分析了时栅位移传感器误差信息与采样位置信息不匹配问题,明确了误差补偿方案,为优化误差补偿模型提供了理论依据。为重构补偿效果更佳的短周期误差曲线,提出了基于三次样条插值-傅里叶谐波合成的误差补偿模型。通过三次样条插值法获得更为准确的时栅位移传感器误差采样数据,利用傅里叶谐波补偿法构建时栅位移传感器短周期误差补偿模型。实验对比基于三次样条插值-傅里叶谐波误差补偿法与传统基于傅里叶谐波补偿法合成的误差补偿模型,结果表明本文构建的误差补偿模型在保证时栅位移传感器误差补偿效率的同时,增强了短周期误差补偿效果,提高了时栅位移传感器测量精度。

1 时栅位移传感器误差特性

1.1 时栅位移传感器测量原理

时栅位移传感器是一种基于“时空坐标转换”(time-space coordinate transform, TST)测量原理的新型高精度位移传感器。本文仅对场式圆时栅位移传感器进行原理介绍。场式圆时栅位移传感器原理如图1所示。

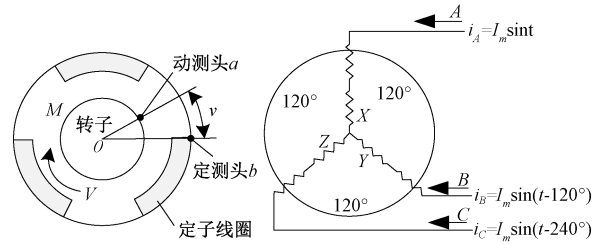


图1 场式圆时栅位移传感器原理

Fig. 1 Principle of field-type circular time grating displacement sensor

场式圆时栅位移传感器由绕制 p 对极激励线圈和 p 个定测头感应线圈的定子基体与安装 p 个动测头感应线圈的转子基体组成。工作时,在定子激励线圈中通入相同频率、相同幅值、相位两两相差 120° 且时间上满足正交要求的三相交流激励信号,分别为:

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin(\omega t) \\ i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_C = I_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_m 为交流电流的振幅; ω 为交流电流的频率。将产生旋转速度恒定的磁场,磁场速度大小为:

$$v = \frac{60f}{p} \quad (2)$$

式中: v 为磁场旋转的速度; f 为电源的频率; p 表示时栅位移传感器的对极数。旋转磁场将在定测头与动测头感应线圈中感应出频率、幅值相同而相位不同的行波信号,通过对两路行波信号进行比相,就可以解算出被测物体角位移:

$$\theta = \frac{\Delta T}{T_0} \alpha \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{360^\circ}{p} \quad (4)$$

式中: θ 表示运动物体转动的角位移; ΔT 表示两路行波信号时间差; T_0 表示参考信号周期; α 为空间当量。

1.2 时栅位移传感器误差特性

根据场式圆时栅位移传感器多测头感应结构与圆周封闭原则可知任一位置读数头的测量误差都是以圆周空间(360°)作为周期的各阶谐波信号构成。

$$\Delta\theta_{p_n} = \sum_{k=1}^m A_k \sin k(\theta + n\alpha) \quad (5)$$

式中: k 为误差谐波阶数; A_k 为 k 阶谐波幅值; θ 为传感器的转动角位移; α 为相邻两个测头线圈的空间位移当量。 p 个感应测头的合成误差为:

$$\Delta\theta = \frac{1}{p} \left[\sum_{k=1}^m A_k \sin k\theta + \sum_{k=1}^m A_k \sin k(\theta + \alpha) + \dots + \sum_{k=1}^m A_k \sin k(\theta + (p-1)\alpha) \right] \quad (6)$$

其中任一 n 阶谐波信号为:

$$\Delta\theta_n = \frac{1}{p} \cdot A_n [\sin k\theta + \sin k(\theta + \alpha) + \dots + \sin k(\theta + (p-1)\alpha)] \quad (7)$$

对式(7)进行三角函数变换运算可得:

$$\Delta\theta_n = \frac{1}{p} \cdot A_n \left[\frac{\cos\left(\frac{p-1}{2} \cdot n\alpha\right) \sin\left(\frac{p}{2} \cdot n\alpha\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} \cdot n\alpha\right)} + \cos n\theta \frac{\sin\left(\frac{p-1}{2} \cdot n\alpha\right) \sin\left(\frac{p}{2} \cdot n\alpha\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} \cdot n\alpha\right)} \right] \quad (8)$$

将式(4)代入式(8)中可得:

$$\Delta\theta_n = \begin{cases} A_n \sin n\theta, & n = cp \\ 0, & n \neq cp \end{cases} \quad (9)$$

由上述分析及式(9)可知,时栅位移传感器的多测头感应结构可有效地消除 $n \neq cp$ 以外的各阶误差谐波,传感器整周($0^\circ \sim 360^\circ$)测量误差曲线如图2所示。

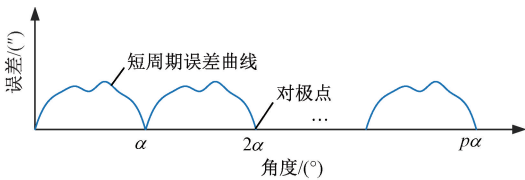


图2 时栅位移传感器误差曲线

Fig. 2 Error curve of the time grating displacement sensor

误差曲线以 α 为周期沿圆周等间距均匀分布,在对极点处由于多测头平均效应,误差将接近为0。基于该误差特性,只需获得短周期误差曲线,即可重构整个圆周的误差曲线,这将为时栅位移传感器误差动态标定与补偿工作提供理论基础与技术支持。

2 误差分析

2.1 “错位”误差分析

时栅位移传感器采用等时间采样输出模式,当时栅位移传感器采样频率为 f 时,每隔 $\Delta t = 1/f$ 才能获取一次

相位信息,即每间隔 $\Delta t = 1/f$ 才能获取一次时栅位移传感器的误差信息。当标定实验台进行速度为 v 的匀速运动时, Δt 内转台转过的角度为 $x_{\Delta t} = v \cdot \Delta t$,认为 $T + \Delta t$ 时刻的位置信息为:

$$x_{T+\Delta t} = v \cdot (T + \Delta t) \quad (10)$$

但受到标定实验台速度的影响,实际上 $T + \Delta t$ 时刻的位置信息:

$$x'_{T+\Delta t} \neq v \cdot (T + \Delta t) \quad (11)$$

即采样位置信息与时栅位移传感器误差信息存在“错位”误差 Δx , 大小为:

$$\Delta x = x'_{T+\Delta t} - x_{T+\Delta t} \quad (12)$$

而传统时栅位移传感器误差补偿过程中往往默认初始采样值对应的位置为对极的起点 $n\alpha$ ($0 \leq n \leq p, p$ 为时栅位移传感器对极数, α 为相邻两个测头线圈的空间位移当量),通过短周期误差曲线构建短周期误差补偿模型。当标定实验台速度引入的“错位”误差 Δx 正好影响对极起点,此时该对极短周期误差曲线与其他对极短周期误差曲线相似度最低,根据该对极短周期误差曲线构建的短周期误差补偿模型补偿效果最弱。“错位”误差分析模型如图3所示。

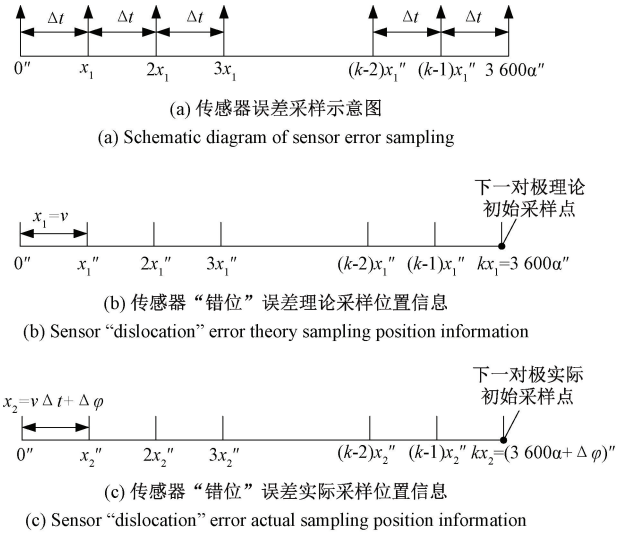


图3 “错位”误差分析模型

Fig. 3 Analysis model of “dislocation” error

图3(a)为传感器误差采样示意图,图3(b)为传感器“错位”误差理论采样位置信息,图3(c)为传感器“错位”误差实际采样位置信息。图中 Δt 、 α 、 x_1 、 x_2 、 k 分别为时栅位移传感器的采样时间、每个对极间距、理论误差采样间距、实际误差采样间距,以及每个对极采样点数, v 为标定实验台速度。

随着标定实验台速度的改变,“错位”误差 Δx 也将随之发生变化。当时栅位移传感器对极数为 p , 采样频率为 f 时,时栅位移传感器每个对极间距为 α , 采样点

n ($0 \leq n \leq k$) 与采样点 $n-1$ 误差采样时间 Δt 、理论上误差采样间距 x_1 分别为:

$$\Delta t = 1/f \quad (13)$$

$$x_1 = v \cdot \Delta t \quad (14)$$

每个对极采样点数 k 为:

$$k = \alpha/x_1 \quad (15)$$

将式(4)与(13)代入式(14)中有:

$$k = \frac{360^\circ \cdot f}{pv} \quad (16)$$

理论上短周期采样点数为 k 时运动距离应为:

$$\theta = kx_1 = 360^\circ/p \quad (17)$$

但实际上采样点数为 k 时运动距离应为:

$$\theta' = kx_2 \neq 360^\circ/p \quad (18)$$

式中: x_2 为时栅位移传感器实际误差采样间距。理论运动距离与实际运动距离存在大小为 Δx 的“错位”误差:

$$\Delta x = |\theta - \theta'| = |kx_1 - kx_2| \quad (19)$$

“错位”误差的存在将直接导致下一对极初始采样点对应的采样位置信息为:

$$|\theta - 360^\circ/p| \neq n\alpha \quad (20)$$

即下一对极初始采样点对应的误差数据与实际误差数据间存在误差。

2.2 标定实验台速度对误差补偿模型的影响

根据第 2.1 节的分析,受标定实验台速度的影响,时栅位移传感器误差信息与采样位置信息存在“错位”误差;同时“错位”误差的大小将因标定实验台速度的改变而变化,即标定实验台速度将影响构建的短周期误差模型补偿效果。

下面将对标定实验台不同速度下“错位”误差对误差曲线及误差补偿模型的影响进行分析。

根据第 1.2 节时栅位移传感器的误差特性可知,短周期内时栅位移传感器的误差曲线由各阶谐波信号构成:

$$\varphi = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^n A_i \cos\left(\frac{2\pi}{n}xi + \varphi_i\right) \quad (21)$$

式中: A_i 为 i 阶谐波幅值(单位:"); n 为采样点数; x 为采样点间隔(单位:"); φ_i 为 i 阶谐波初相位(单位:").

传统构建误差补偿模型的方法:依据短周期测角误差的周期特性,以傅里叶变换与收敛定理为基础,将短周期误差展开为有限谐波,通过傅里叶分析得到各阶谐波的幅值与相位信息,根据幅值大小选取对误差影响较大的阶次,得到谐波补偿的误差函数模型进行补偿。误差补偿模型的傅里叶表达式为:

$$\varphi_c = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^n A_i \cos\left(\frac{2\pi}{n}xi + \varphi_i\right) \quad (22)$$

受到标定实验台速度的影响误差曲线中的引入了“错位”误差,构成时栅位移传感器的误差曲线的各阶谐

波信号将发生改变:

$$\varphi_v = \frac{A_{i0}}{2} + \sum_{i=1}^n A_{vi} \cos\left(\frac{2\pi}{n}xi + \varphi'_{vi}\right) \quad (23)$$

$$\varphi'_{vi} = \varphi_{vi} + \Delta\varphi \quad (24)$$

将式(24)代入式(23)有:

$$\varphi_v = \frac{A_{i0}}{2} + \sum_{i=1}^n A_{vi} \cos\left(\frac{2\pi}{n}xi + (\varphi_{vi} + \Delta\varphi)\right) \quad (25)$$

此时,误差补偿模型的傅里叶表达式为:

$$\varphi_{cv} = \frac{A_{i0}}{2} + \sum_{i=1}^n A_{vi} \cos\left(\frac{2\pi}{n}xi + (\varphi_{vi} + \Delta\varphi)\right) \quad (26)$$

2.3 不同速度下误差曲线与误差补偿模型

根据第 2.1 与 2.2 节的分析,测试并绘制不同速度下标定实验台对时栅位移传感器影响最大时的误差曲线,通过误差曲线构建该速度下的误差补偿模型。

受到外界环境的影响标定实验台的速度会上下波动,间隔 Δt 转台的转过角度也将上下波动,仅考虑标定实验台对初始采样点位置影响最大的情况。表 1 为利用式(19)得到的标定实验台在不同速度下对极初始采样点位置最大偏移量。

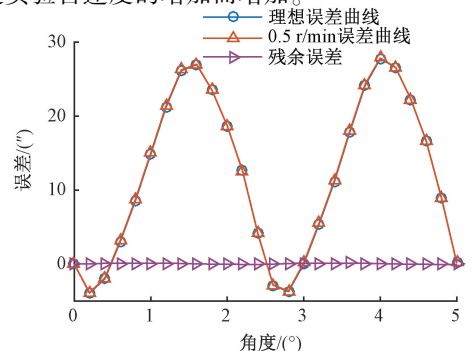
表 1 初始采样点位置偏移量

Table 1 Offset of the initial sampling point position

标定实验台速/(r·min ⁻¹)	极端情况下的初始采样点位置偏移量 Δx /(")
0.5	9
1	36
3	144

无偏差状态下,误差曲线不存在“错位”误差 Δx ,绘制无偏差状态与标定实验台速度为 0.5、1、3 r/min 时栅位移传感器短周期误差曲线对比图,并绘制两者残余误差曲线。

由图 4 可以看出短周期“错位”误差存在,无偏差误差曲线与受标定实验台速度影响误差曲线间的残余误差随标定实验台速度的增加而增加。



(a) 标定实验台速度 0.5 r/min

(a) Calibration platform rate 0.5 r/min

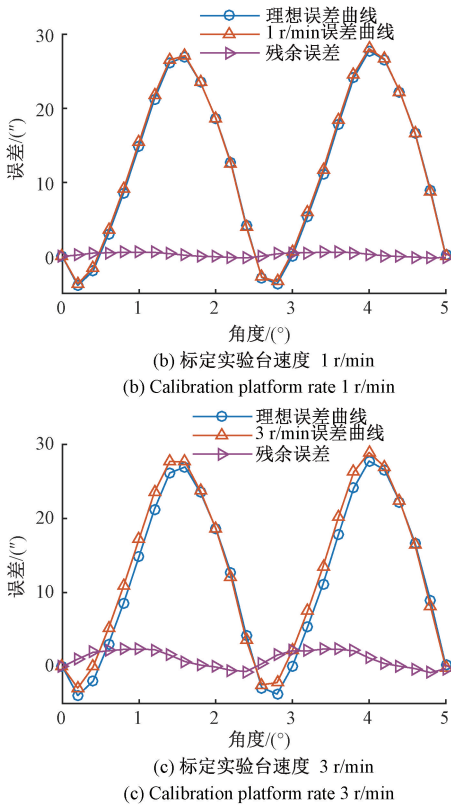


图 4 不同速度下短周期误差曲线

Fig. 4 Short period error curves of different rates

表 2 无偏差状态与不同速度下误差模型参数

Table 2 Error model parameter of unbiased state and different rate

谐波阶数 i	幅值 $A_i/(\text{''})$	初相位 $\varphi_i/(\text{''})$	幅值 $A_{0.5i}/(\text{''})$	初相位 $\varphi_{0.5i}/(\text{''})$	幅值 $A_{1i}/(\text{''})$	初相位 $\varphi_{1i}/(\text{''})$	幅值 $A_{3i}/(\text{''})$	初相位 $\varphi_{3i}/(\text{''})$
0	24.7	0	24.5	0	24.9	0	26.5	0
2	15.1	2.4	15.1	2.5	15.1	2.5	15.1	2.6
4	1.0	2.6	0.8	2.8	0.8	2.8	0.8	3.0
6	0.9	1.9	0.8	2.1	0.8	2.1	0.8	2.4

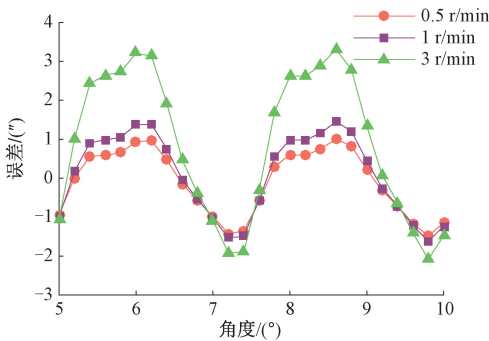


图 5 不同速度与无偏差状态下补偿模型误差

Fig. 5 Compensation model error under different rate and unbiased state

分别对无偏差误差曲线与不同速度下误差曲线进行 FFT,仅考虑对误差影响较大的谐波阶数,即 0 阶、2 阶、4 阶、6 阶谐波,误差补偿模型傅里叶表达式为:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_c &= \frac{A_0}{2} + A_2 \cos\left(\frac{2\pi}{n}x \cdot 2 + \varphi_i\right) + \\ &A_4 \cos\left(\frac{2\pi}{n}x \cdot 4 + \varphi_i\right) + A_6 \cos\left(\frac{2\pi}{n}x \cdot 6 + \varphi_i\right) \\ \varphi_{cv} &= \frac{A_0}{2} + A_2 \cos\left(\frac{2\pi}{n}x \cdot 2 + \varphi_{vi}\right) + \\ &A_4 \cos\left(\frac{2\pi}{n}x \cdot 4 + \varphi_{vi}\right) + A_6 \cos\left(\frac{2\pi}{n}x \cdot 6 + \varphi_{vi}\right) \end{aligned} \right. \quad (27)$$

表 2 为无偏差状态及标定实验台速度分别处于 0.5、1、3 r/min 时误差曲线各阶谐波对应的幅值与初相位值,将表 2 中参数代入式(27),得到无偏差状态与不同速度下误差补偿模型,图 5 为受标定实验台速度影响的误差补偿模型与无偏差误差补偿模型间误差曲线。

由表 2 与图 5 可知,标定实验台速度改变误差补偿模型参数也随之改变,将直接影响误差补偿模型的补偿效果,且标定实验台速度越大对误差补偿效果影响越大,补偿残余误差越大。

3 误差补偿模型建立

根据上述分析,时栅位移传感器短周期误差曲线存在受标定实验台速度影响产生的“错位”误差,且“错位”误差对误差补偿模型补偿效果的影响随着标定实验台速度的增加而增加。必须构建补偿效果更优的短周期误差补偿模型。

3.1 三次样条插值

插值法是一种传统的数学方法,早间用于制定历法与天文计算。现常用于数据处理和编制函数表,是离散函数逼近的重要方法,利用该方法可通过函数在有限点处的取值状况,估算出函数在其他点处的近似值。

插值法中三次样条插值具有计算方便,数值稳定性好以及插值曲线光滑性好等优点。设在区间 $[a, b]$ 上取 $n+1$ 个节点, $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$,给定这些点的函数值 $f(x_i) = f_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 。函数 $S(x)$ 满足如下3个条件:1) $S(x)$ 在每个子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上为三次的多项式;2) $S''(x)$ 在 $[a, b]$ 连续;3) $S(x_i) = y_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$ 则称 $S(x)$ 为函数 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上的三次样条插值函数。因此,在本研究中采用三次样条插值方法对时栅位移传感器误差数据进行插值处理。

通过对时栅位移传感器误差数据进行插值处理得到位置信息所对应的传感器误差信息,解决“无法等间距采样”的问题。得到补偿效果更佳的短周期误差补偿模型,减小补偿后的残余误差。

3.2 傅里叶谐波补偿

由傅里叶原理可知,任何一个信号不论其在时间域连续是否连续,均可以用无限个频率不同的正弦波进行叠加合成。基于傅里叶原理与傅里叶变换算法将原始信号分解为若干个正弦波,同时计算分解后所得正弦波的相位、幅值和频率信息,筛选对测量误差影响较大的正弦波,分别筛选正弦波的相位、幅值和频率信息。

根据相位、幅值与频率关系重新组成正弦波,并利用多个生成的正弦波重新组成一个新的信号,利用组合的信号来实现对测量误差的标定。根据傅里叶展开与收敛定理,将时栅角位移传感器误差进行分解,可分解为:

$$\Delta R_s(\theta) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega) + b_k \sin(k\omega)] = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [c_k \sin(k\omega + \varphi)] \quad (28)$$

式中: k 为谐波阶数; a_0 为常数项系数, a_k, b_k 分别为各阶余弦与正弦波系数; $c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ 为各阶谐波幅值; $\psi = \arctan(a_k/b)$ 为各阶谐波相位。

依据傅里叶变换理论可知一个信号理论上由无限个谐波组成,但在实际运用过程中通常将一个周期函数分解为有限谐波,并从中提取对原始信号影响较大的部分组成一个新的信号。在时栅角位移传感器误差补偿过程中,从一个采样周期内提取 $k+1$ 个数据点,根据采样定理,傅里叶级数拟合中周期项个数最多为 $N(k+1)$ 个,因此由傅里叶级数拟合所得的误差函数可表示为:

$$\Delta R_s(\theta) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega) + b_k \sin(k\omega)] = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [c_k \sin(k\omega + \varphi)] \quad (29)$$

$$\text{式中:} \begin{cases} a_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cos\left(\frac{2\pi ki}{n}\right) \\ b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sin\left(\frac{2\pi ki}{n}\right) \end{cases} \quad (30)$$

根据所得各项谐波的系数,即可完成对传感器系统误差中周期成分的重构,从而实现传感器误差的补偿。

3.3 误差补偿过程

建立基于三次样条插值-傅里叶谐波补偿法的时栅位移传感器误差补偿模型,并利用该误差补偿模型对传感器进行误差补偿的具体步骤如下:

- 1) 对任一极对中的误差数据建立插值函数,根据插值原理建立3对角方程组求解三次样条插值函数的二阶导数,从而获得各插值点的插值函数值;
- 2) 获得时栅位移传感器初始采样点的实际误差数值;
- 3) 重构短周期误差曲线并将曲线展开为有限谐波,通过傅里叶分析得到各阶谐波的幅值与相位信息,选取对误差影响较大的阶次即幅值较大的谐波,构造误差补偿模型;
- 4) 进行误差补偿,提高测量精度。

4 实验研究与分析

4.1 实验系统搭建

搭建如图6所示的时栅位移传感器误差补偿实验系统。系统以精密分度转台为测量对象,采用德国海德汉公司圆光栅(型号为:ROD886)其测量精度为 $\pm 0.6''$ 作为基准器具。实验中的时栅位移传感器对极为72,每个对极对应的空间角度为 $5^\circ (360^\circ/72 = 5^\circ)$ 。

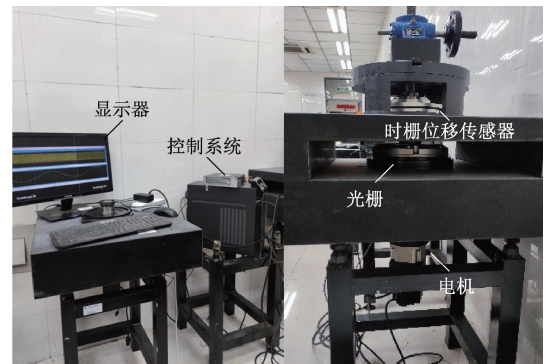


图6 实验装置实物图

Fig. 6 Physical drawing of experimental device

将时栅和光栅同轴安装在大理石台上,控制系统通过驱动电机带动转台做匀速转动的同时,光栅和时栅位移传感器以相同的采样频率对分度转台进行同步测量。在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 进行整周期测量,将光栅测量值作为基准值,时栅位移传感器测量值与基准值之差即为原始测量误差。

4.2 误差验证

为验证受标定实验台速度的影响,时栅位移传感器误差信息与位置信息存在“错位”误差进行如下实验。将电机速度分别设置为0.5、1、3 r/min,光栅与时栅位移

传感器的采样频率为 400 Hz,进行误差采样。

不考虑标定实验台速度影响引入的“错位”误差,分别利用标定实验台速度为 0.5、1、3 r/min 时采集到的误差数据绘制第 2 对极(5°~10°)误差曲线。并利用传统傅里叶谐波补偿法构建误差补偿模型。

图 7 为不同速度下第 2 对极的误差曲线。可见受到标定实验台速度的影响时栅位移传感器误差信息与采样位置信息存在“错位”误差。

根据三次样条插值函数得到误差曲线并重构补偿效果更佳的误差补偿模型,即无偏差误差补偿模型。表 3 为重构后以及不同速度下误差补偿模型参数,将表 3 中误差补偿模型参数代入式(27)中,得到无偏差状态与不同速度下误差补偿模型,图 8 为受标定实验台速度影响的误差补偿模型与无偏差误差补偿模型间误差曲线。

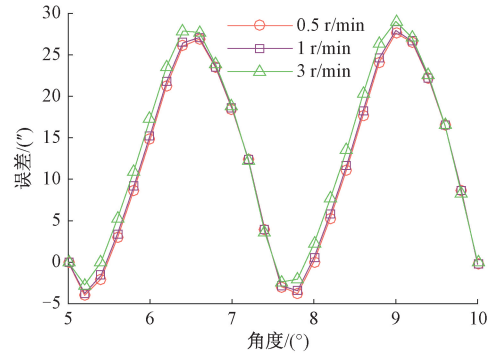


图 7 不同速度下第 2 对极误差曲线
Fig. 7 The second polar error curves of different rate

表 3 无偏差状态与不同速度下误差模型参数

Table 3 Error model parameters of unbiased state and different rate

谐波阶数 i	幅值 A_i /(")	初相位 φ_i /(")	幅值 $A_{0.5i}$ /(")	初相位 $\varphi_{0.5i}$ /(")	幅值 A_{1i} /(")	初相位 φ_{1i} /(")	幅值 A_{3i} /(")	初相位 φ_{3i} /(")
0	24.4	0	24.2	0	24.8	0	26.7	0
2	15.1	2.5	15.1	2.5	15.1	2.5	15.2	2.6
4	0.8	2.8	0.8	2.8	0.8	2.8	0.8	3.0
6	0.8	2.0	0.8	2.1	0.8	2.1	0.8	2.4

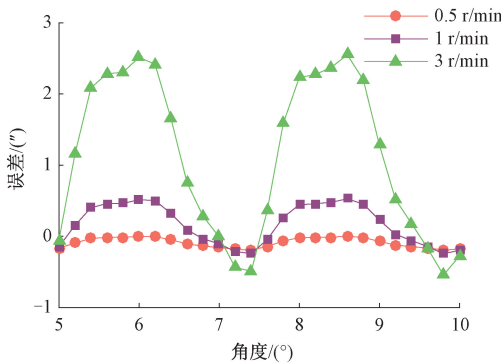


图 8 无偏差状态与不同速度下补偿模型误差
Fig. 8 Compensation model error under unbiased state and different rate

由表 3 与图 8 可知,受到标定实验台速度影响时栅位移传感器“错位”误差的大小也会发生改变,且随标定实验台速度的增加而变大,即标定实验台速度将影响短周期误差补偿模型的补偿效果。

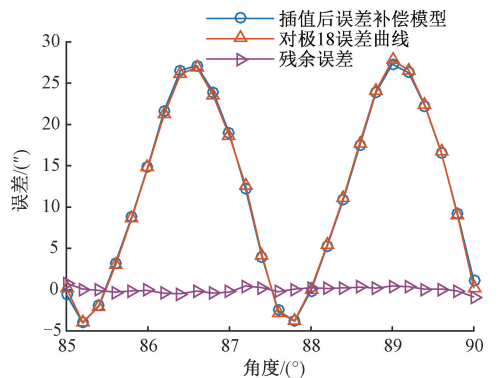
4.3 基于插值法的误差补偿

为验证基于三次样条插值-傅里叶谐波法误差补偿方法的有效性,以标定实验台速度为 3 r/min 误差数据为例。利用 MATLAB 三次样条插值函数对标定实验台速

度为 3 r/min 下第 2 对极(5°~10°)误差数据进行插值还原短周期实际误差曲线,并利用该误差曲线通过傅里叶谐波拟合法构造无偏差误差补偿模型。

以时栅位移传感器多测头与整周误差曲线等间距周期性分布特性为基础,对该速度下第 18 对极(85°~90°)、第 36 对极(175°~180°)、第 54 对极(265°~270°) 3 个对极进行误差补偿实验。

图 9 为第 18、36、54 对极原始误差曲线、基于三次样条插值-傅里叶谐波的误差补偿模型与误差补偿后残余误差曲线。



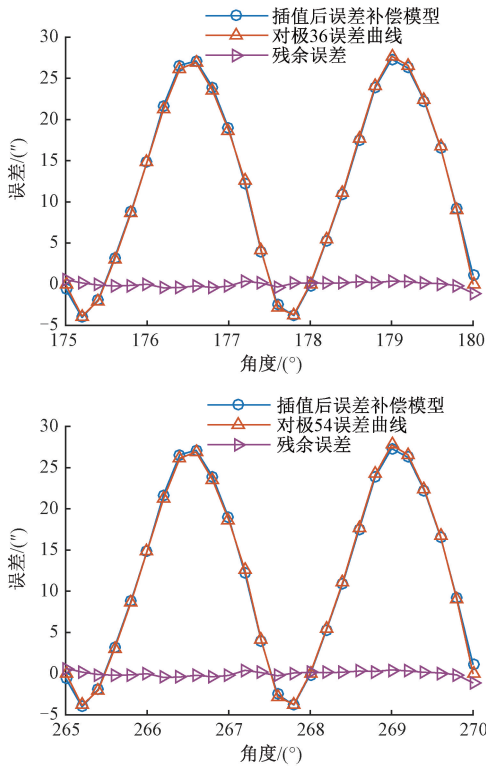


图9 3 r/min 速度原始误差与补偿后残余误差曲线
Fig.9 Original error and compensation residual error curve at calibration platform rate 3 r/min

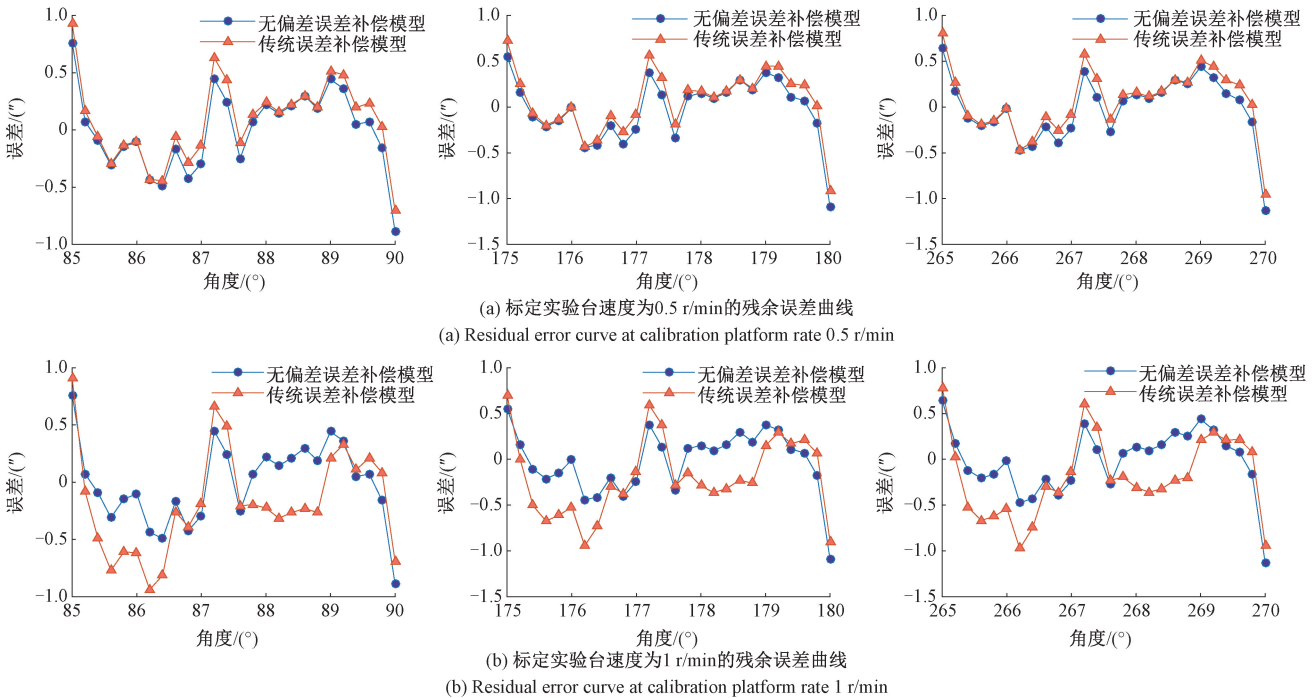
采用基于三次样条插值-傅里叶谐波补偿法的误差补偿模型补偿后误差的峰峰值可达到 1.7"、1.7"、1.8"，时栅位移传感器各对极短周期误差下降，整体补偿效果明显。

4.4 误差补偿对比实验

为对比基于三次样条插值-傅里叶谐波误差补偿方法的误差补偿模型与传统基于傅里叶谐波误差补偿方法的误差补偿模型补偿效果。将标定实验台速度为 0.5、1、3 r/min 下的 3 个典型对极：第 18 对极 (85°~90°)、第 36 对极 (175°~180°)、第 54 对极 (265°~270°) 分别利用两种误差补偿模型进行误差补偿，不同速度下 3 个对极内补偿后残余误差对比结果如图 10(a)、(b)、(c) 所示。计算补偿后残余误差峰峰值之差并绘制柱状图，具体数据如表 4，柱状图如图 11 所示。

从图 10 可知，同时利用基于三次样条插值-傅里叶谐波误差补偿法与传统基于傅里叶谐波补偿法的误差补偿模型对第 18、36、54 对极进行短周期误差补偿，本文研究的误差补偿模型效果更优，当标定实验台速度为 0.5、1、3 r/min 时，误差补偿方法补偿效果分别增强 1.1%、5.2%、56.0%。

根据表 4 与图 11 可知，相同对极内，随着标定实验台速度的增加，分别利用两种模型补偿后残余误差峰峰值之差逐渐增大。



(a) 标定实验台速度为0.5 r/min的残余误差曲线
(a) Residual error curve at calibration platform rate 0.5 r/min
(b) 标定实验台速度为1 r/min的残余误差曲线
(b) Residual error curve at calibration platform rate 1 r/min

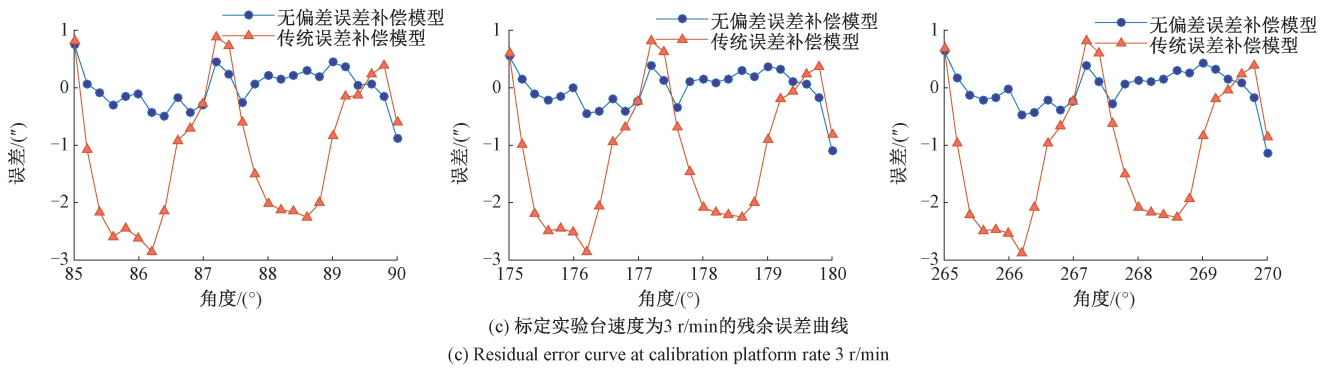


图 10 不同速度下残余误差对比结果

Fig. 10 Comparison results of residual errors at different rate

表 4 不同速度下两种模型补偿后残余误差峰峰值之差

Table 4 The peak-to-peak difference of residual errors after compensation of the two models at different rate (")

对极数	标定实验台速度/(r·min ⁻¹)		
	0.5	1	3
18	0	0.2	2.3
36	0	0.1	2.1
54	0	0	2.1

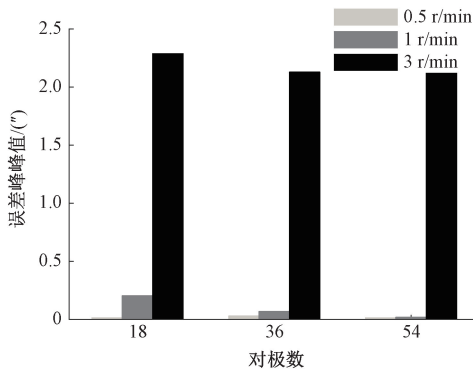


图 11 不同速度下两种模型补偿后残余误差峰峰值之差

Fig. 11 The peak-to-peak difference of residual errors after compensation of the two models at different rate

综上所述,为保证时栅位移传感器误差补偿效率而增加标定实验台速度时,本文研究的误差补偿模型与传统误差补偿模型相比传感器误差补偿效果更明显。

5 结 论

为解决“无法等间距采样”导致误差曲线存在“错位”误差进而影响误差补偿效果的问题。本文对时栅位移传感器受标定实验台速度影响而产生的误差进行分析,明确了“错位”误差的产生原因及影响。在传统基于

傅里叶谐波误差补偿方法的误差补偿模型基础上,提出了一种基于三次样条插值-傅里叶谐波误差补偿法的误差补偿模型。对该误差补偿模型进行误差补偿实验,实验表明,使用该补偿模型后传感器短周期误差峰峰值降至 1.7”。进行误差补偿对比实验,标定实验台速度从 0.5 r/min 增加至 3 r/min 误差补偿效果从 1.1% 增加至 56.0%,表明为保证时栅位移传感器误差补偿效率而增加标定实验台速度时,本误差补偿模型与传统误差补偿模型相比短周期误差补偿效果得到显著提高。对时栅位移传感器误差标定与补偿模型研究提供重要的理论和现实意义。

参考文献

[1] 彭东林, 李彦, 付敏, 等. 用于极端和特殊条件下机械传动误差检测的寄生式时栅研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2):359-364.
PENG D L, LI Y, FU M, et al. Study on parasitic time grating sensors used for mechanical transmission error measurement under harsh and special environment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 359-364.

[2] LIU X, ZHAN B, YU Z, et al. A miniaturized capacitive absolute angular positioning sensor based on a dual two stage secondary re-modulation scheme with time-division multiplexing[J]. Sensors and Actuators a Physical, 2020, 310:112043.

[3] 彭东林, 刘成康, 谭为民. 时空坐标转换理论与时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2000(4):338-342.
PENG D L, LIU CH K, TAN W M. Study on the theory of time space coordinate transformation and the time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000(4):338-342.

[4] 陈自然, 黎锡, 冯馥颖, 等. 基于差极结构的绝对式直线时栅位移传感器研究及测量误差特性分析[J]. 光学精密工程, 2022, 30(6):667-677.

- CHEN Z R, LI X, FENG X J, et al. Research on absolute linear time-grating displacement sensor with one-pole-difference structure and analysis of measurement error characteristics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022,30(6):667-677.
- [5] SHEN H Y, FU J Z, HE Y, et al. On-line asynchronous compensation methods for static/quasistatic error implemented on CNC machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012,60:14-26.
- [6] 李彬,张云,王立平,等. 基于遗传算法优化小波神经网络数控机床热误差建模[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(21):215-220.
- LI B, ZHANG Y, WANG L P, et al. Modeling for CNC machine tool thermal error based on genetic algorithm optimization wavelet neural networks [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019,55(21):215-220.
- [7] MIRANDA DANIEL L, SCHWARTZ JOEL B, LOOMIS ANDREW C, et al. Static and dynamic error of a biplanar video radiography system using marker-based and marker-less tracking techniques [J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2011, 133(12):121002.
- [8] HOTAIT M A, KAHRAMAN A. Experiments on the relationship between the dynamic transmission error and the dynamic stress factor of spur gear pairs [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2013,70:116-128.
- [9] 李海霞,张嵘,韩丰田. 感应同步器测角系统误差测试及补偿[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2016, 56(6):611-616.
- LI H X, ZHANG R, HAN F T. Error testing and compensation of an inductosyn-based angular measurement system[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2016,56(6):611-616.
- [10] FABER J. Self-calibration and noise reduction of resolver sensor in servo drive application[C]. *ELEKTRO IEEE*, 2012:174-178.
- [11] 刘承军,齐明,邹继斌. 感应同步器测角系统误差建模[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009,41(9):51-55.
- LIU CH J, QI M, ZOU J B. Error modeling inductosyn angle measuring system [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009,41(9):51-55.
- [12] 肖韶荣,张周财,黄新. 基于数据融合的多通道光纤位移传感器[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11):2764-2770.
- XIAO SH R, ZHANG ZH C, HUANG X. Multi-channel fiber-optic displacement sensor based on data fusion[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11):2764-2770.
- [13] 于海,万秋华,赵长海,等. 基于后验误差拟合的角位移测量误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2019,27(1):51-57.
- YU H, WAN Q H, ZHAO CH H, et al. Error-compensation of angular displacement measurement based on posteriori error fitting [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019,27(1):51-57.
- [14] 彭东林,刘小康,张兴红,等. 基于谐波修正法的高精度时栅位移传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(1):31-33.
- PENG D L, LIU X K, ZHANG X H, et al. High precision time grating displacement sensor based on harmonic wave correcting method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006,27(1):31-33.
- [15] 杨继森,陈自然,张天恒,等. 时栅传感器直驱式误差自动标定与修正系统[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(5):968-975.
- YANG J S, CHEN Z R, ZHANG T H, et al. Automatic error calibration and correction system for time grating angular displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016,37(5):968-975.
- [16] 孙世政,周清松,何泽银. 嵌入式时栅角位移传感器短周期误差分析与补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(4):27-34.
- SUN SH ZH, ZHOU Q S, HE Z Y. Short period error analysis and compensation of embedded time grating angular displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019,40(4):27-34.

作者简介



杨继森(通信作者),2001年于湖北汽车工业学院获得学士学位,2003年于重庆大学获得硕士学位,2007年于重庆大学获得博士学位,现为重庆理工大学教授,主要研究方向为精密测量与智能传感器。

E-mail: yangjs@cqut.edu.cn

Yang Jisen (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hubei University of Automotive Technology in 2001, M. Sc. degree from Chongqing University in 2003, and Ph. D. degree from Chongqing University in 2007. He is currently a professor at Chongqing University of Technology. His main research interests include precision measurement and intelligence sensor.



张迪,2020年于重庆邮电大学获得学士学位,现为重庆理工大学硕士研究生,主要研究方向为智能仪器与传感器。

E-mail: 872743502@2020.cqut.edu.cn

Zhang Di received her B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2020. She is currently a master student at Chongqing University of Technology. Her main research interests include intelligent instruments and sensors.