

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210386

基于单测头误差相位偏移法的嵌入式角位移传感器自校准研究*

孙世政¹, 张俊明¹, 韩宇², 陶平安³, 何泽银¹

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆 400074; 2. 重庆交通职业学院智能制造与汽车学院 重庆 402247;
3. 重庆建设汽车系统股份有限公司 重庆 400052)

摘要:针对嵌入式角位移传感器长期使用出现精度损失问题,结合传感器结构特点提出一种基于单测头误差相位偏移法的自校准方法。首先,依据圆周空间封闭性原则,基于傅里叶变换分析传感器误差特性;然后,以起始测量值序列作为误差偏移起始基准,根据误差特性等间隔变换误差序列并解算误差与起始基准的函数关系,构建传感器误差模型;最后,搭建在线校准实验平台进行验证实验。实验结果表明,单个对极内误差结果与测量误差特性一致,整周测量误差大幅度降低,误差峰峰值由127.80"降低至5.90";该方法校准效率相比于比较校准法提升了80.69%,校准后误差分布集中,同时具有良好的测量稳定性。本文所述自校准方法在不依赖高精度基准器具前提下,有效解决了传感器精度损失问题,对实现嵌入式角位移传感器自校准具有重要的应用意义。

关键词: 嵌入式角位移传感器;单测头;自校准;相位偏移;测量误差

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

Self-calibration study of the embedded angular displacement sensor based on single probe error phase shift method

Sun Shizheng¹, Zhang Junming¹, Han Yu², Tao Ping'an³, He Zeyin¹

(1. School of Mechatronic and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. School of Intelligent Manufacturing and Automobile, Chongqing Vocational College of Transportation, Chongqing 402247, China; 3. Chongqing Construction Automotive Systems Co., Ltd., Chongqing 400052, China)

Abstract: To address the problem of accuracy loss of embedded angular displacement sensor after long time use, a self-calibration method using single probe error phase shift method is proposed in combination with the structural characteristics of the sensor. Firstly, the sensor error characteristics are analyzed based on the Fourier transform according to the principle of circumferential spatial closure. Secondly, the sensor error model is constructed by transforming the error sequence and solving the function relationship between the error and the starting reference with the sequence of starting measurement values as the starting reference for error offset. Finally, the online calibration experiment platform is established for verification experiments. Experimental results show that the single intra-pole error results are consistent with the measurement error characteristics, and the whole cycle measurement error is reduced significantly, with the error peak value reduced from 127.80" to 5.90". Comparison experiments and repeatability experiments show that the calibration efficiency of the method is improved by 80.69% compared with the comparative calibration method, and the error distribution is concentrated after calibration, while remains good measurement stability. The self-calibration method described in this article effectively solves the problem of sensor accuracy loss without relying on a high-precision reference apparatus, and has important application significance for realizing the self-calibration of embedded angular displacement sensors.

Keywords: embedded angular displacement sensor; single measurement probe; self-calibration; phase shift; measurement error

收稿日期:2022-09-02 Received Date: 2022-09-02

* 基金项目:国家自然科学基金项目(52105542)、“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020032)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJZD-K202200705)资助

0 引 言

嵌入式角位移传感器主要应用于大型中空旋转机械部件角位移检测,具有结构简单、制造成本低、体积小等特点^[1-4]。在实际工程应用中,由于受环境、机械部件磨损、电气元件老化等因素的影响,传感器不可避免地会出现精度损失问题,因此需要进行校准^[5-7]。常用的校准方法主要使用高精度基准器具进行比较校准^[8],但由于传感器的特殊应用工况,安装高精度基准器具难以频繁地对其进行在线校准,进而影响生产效率。因此,需探索出一种高效、精准的自校准方法解决传感器的精度损失问题。

针对角位移传感器的自校准,目前主要有等分平均法(equal division averaged, EDA)^[9-10]、质因数分解法(prime factor division, PFD)^[11]、辅助装置法(auxiliary device method, ADM)^[12]等自校准方法。基于上述方法,诸多学者进行了深入研究,张文颖等^[13]根据多测头布局优化原理,基于圆周封闭原则与傅里叶分析构建误差函数理论模型,该模型有效地降低传感器系统误差,因受测量环境与多测头安装误差影响,其消除误差能力有限;Sun 等^[14]根据傅里叶分析,提出一种对称式双测头结构,该结构降低了传感器谐波频次误差,由于测量对象结构特殊性,对称式双测头安装对同轴度与对称度要求较高,易产生安装一致性问题;杨继森等^[15]基于多测头信号感应原理,构建了基于三次样条插值-傅里叶谐波合成的误差补偿模型,该模型能有效补偿传感器短周期误差;鲁进等^[16]提出一种基于连续定距变换原理的误差频率扫描方法,有效降低了由安装误差与电气偏差引入的随机误差,由于需要参考测头和固定步长,误差补偿的精度受限于测头间的空间位置;Gou 等^[17]采用多测头同轴安装相互校准法,建立基准与旋转角度之间的函数模型,该方法降低了多测头相对旋转误差,但对测头安装精度要求较高,因此更适用于安装由滚动轴承支撑轴体上的传感器。上述自校准方法实现均需加装额外测头等辅助装置,对制造和安装加工精度要求较高,校准过程繁琐且受机械结构限制。

为解决上述问题,本文提出一种基于单测头误差相位偏移法(error phase shift, EPS)的嵌入式角位移传感器自校准的方法。该方法依据圆周空间封闭原则,基于傅里叶变换分析传感器误差特性,以起始测量值序列作为误差偏移基准,等间隔变换误差序列解算误差与基准的函数关系。实验结果表明该方法能大幅度降低测量误差,有效解决传感器的精度损失问题。

1 嵌入式角位移传感器测量原理

嵌入式角位移传感器由定子和转子两部分组成,定子为传感测头,转子为被测部件(大型中空旋转机械部件),定子包括测头齿、激励线圈与感应线圈 3 部分。在两组激励线圈上分别通以正余弦激励信号,使其满足时间正交条件,同时在机械空间位置错开 1/4 个对极(转子一个空间周期为一个对极),使其满足空间正交条件。根据电磁感应原理,当转子发生相对转动时,传感器输出两列含时间信息与空间信息的驻波信号 U_A 和 U_B ,通过叠加合成行波信号。行波信号经放大、滤波、波形转换等处理后转变为可精确测量的数字方波信号。基于连续动态鉴相法,利用高频时钟脉冲对数字方波信号进行插补得到时间相位差,借助数字处理器解算出空间角位移信息 θ ,传感器测量原理如图 1 所示。

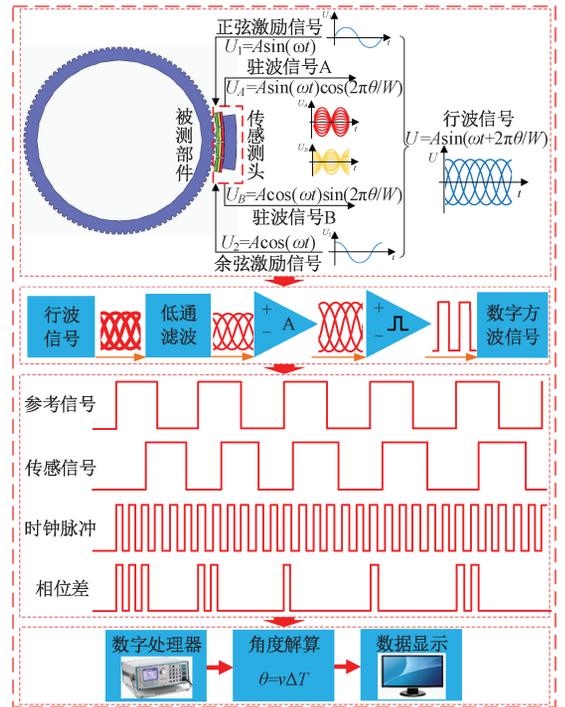


图 1 传感器测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of sensor measurement

2 基于单测头误差相位偏移法自校准原理

2.1 传感器自校准方法

嵌入式角位移传感器的原始误差主要包括系统误差和随机误差两部分^[18],根据误差定义,传感器误差值可

表示为:

$$e(\theta) = f(\theta) - \theta \quad (1)$$

式中: $e(\theta)$ 为传感器误差值, $f(\theta)$ 为传感器测量值, θ 为角位移真实值。

当被测对象作匀速运动时, 以等时间间隔对其整周范围进行数据采样并记录起始测量值序列, 以该序列作为误差偏移起始基准, 整周范围内等间隔变换误差序列的位置, 对变换后不同位置下的误差序列所对应的误差与起始基准构建函数映射关系并解算起始位置下的误差模型, 最终达到传感器自校准的目的, 其中误差序列变换如图2所示。

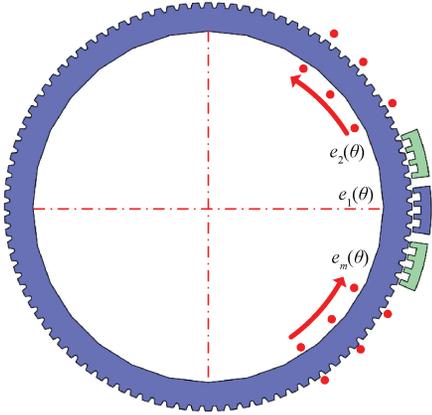


图2 误差序列变换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of error series transformation

由傅里叶变换可知, 当传感器误差序列以等间隔变换 m 次时, 谐波误差幅值不变, 相位随起始位置变化而改变, 原理如图3所示。

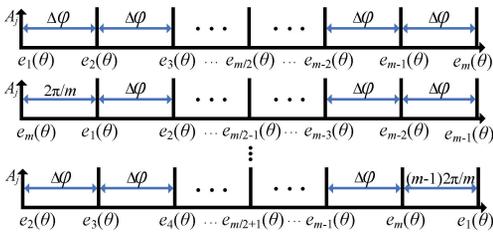


图3 相位偏移法原理图

Fig. 3 Shift schematic of phase shift

若规定传感器起始位置误差 $e_1(\theta)$ 相位为0, 则传感器误差序列可描述为:

$$\begin{cases} e_1(\theta) = A_j \sin(H_j \theta) \\ e_2(\theta) = A_j \sin\left(H_j \left(\theta + \frac{2\pi}{m}\right)\right) \\ e_3(\theta) = A_j \sin\left(H_j \left(\theta + 2 \frac{2\pi}{m}\right)\right) \\ \vdots \\ e_m(\theta) = A_j \sin\left(H_j \left(\theta + (m-1) \frac{2\pi}{m}\right)\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $e_m(\theta)$ 为第 m 次误差值, A_j 为谐波误差幅值, H_j 为谐波误差频次。

将 m 个误差序列中第 i ($i < m$) 次变换的误差值与起始位置的误差值相减可得:

$$\Delta e_{i-1}(\theta) = (\theta_i - \theta_1) + (e_i(\theta) - e_1(\theta)) \quad (3)$$

传感器采用增量测量模式^[19], 测量基准值满足:

$$\theta_i = \theta_1 \quad (4)$$

算数平均法能有效减少测量数据误差, 取变换后新的误差序列下测量值的平均值与传感器起始位置的测量值相减得:

$$\mu(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_i(\theta) - f_1(\theta) \quad (5)$$

结合式(1)、(2)和(5), 传感器起始位置误差可表示为:

$$e_1(\theta) = \frac{A_j}{m} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=0}^{m-1} \sin\left(H_j \left(\theta + \frac{2k\pi}{m}\right)\right) \right] - \mu(\theta) \quad (6)$$

对式(6)进行三角函数变换运算得:

$$e_1(\theta) = \frac{A_j}{m} \sum_{j=1}^n \left[\frac{(-1)^{H_j} \sin(H_j \theta) \sin(H_j \pi) \cos\left(\frac{(m-1)H_j \pi}{m}\right)}{\sin\left(\frac{H_j \pi}{m}\right)} \right] - \mu(\theta) \quad (7)$$

由式(7)可得, 传感器起始位置下误差模型为:

$$e_1(\theta) = \begin{cases} A_j \sin(H_j \theta) - \mu(\theta), & H_j = km \\ -\mu(\theta), & H_j \neq km \end{cases} \quad (8)$$

($k = 1, 2, \dots, n$)

由上述分析可知, 当谐波频次不等于误差序列变换次数整数倍时, EPS 自校准法可用于校准嵌入式角位移传感器。

2.2 传感器自校准实现过程

利用 EPS 自校准法对传感器进行校准, 校准流程如图4所示。

由2.1节可知, 使用传感器测量数据作为误差偏移起始基准, 但序列变换不均匀会产生新的误差。因此, 本文所述方法的关键在于相邻两个误差变换序列之间的间隔应相同并等于 $2\pi/m$, 故相邻序列实际间隔与理论间隔之差 $\delta(\theta)$ 可表示为:

$$\delta(\theta) = \left(f\left(\theta + \frac{2\pi}{m}\right) - f(\theta) \right) - \frac{2\pi}{m} = \sum_{j=1}^M A_j \left(\sin\left(H_j \left(\theta + \frac{2\pi}{m}\right) + \varphi_j\right) - \sin(H_j \theta + \varphi_j) \right) = 2 \sum_{j=1}^M A_j \sin\left(\frac{H_j \pi}{m}\right) \cos\left(H_j \left(\theta + \frac{\pi}{m}\right) + \varphi_j\right) \quad (9)$$

式中: $2A_j \sin(H_j \pi/m)$ 为误差频次为 H_j 时的误差幅值。

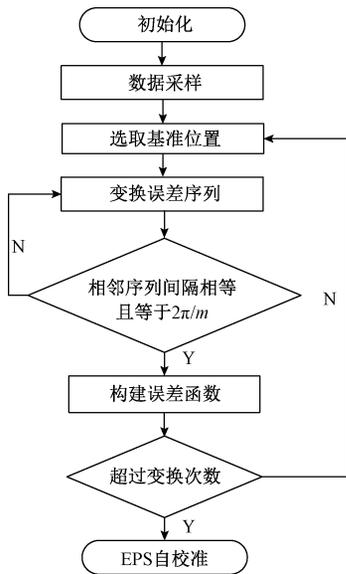


图 4 EPS 自校准法实现流程

Fig. 4 EPS self-calibration model implementation process

由三角函数变量区间映射值域可得:

$$\begin{cases} 0 < 2\sin\left(\frac{H_j\pi}{m}\right) < 1, \frac{H_j\pi}{m} \in \left(0, \frac{\pi}{6}\right) \cup \left(\frac{5\pi}{6}, \pi\right) \\ 1 < 2\sin\left(\frac{H_j\pi}{m}\right) < 2, \frac{H_j\pi}{m} \in \left(\frac{\pi}{6}, \frac{5\pi}{6}\right) \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知误差序列变换次数 m 应至少为谐波误差最大频次 6 倍以上,此时可减少因序列变换间隔不均匀所产生的误差,同时测量值可作为误差序列变换依据。

3 实验与数据分析

3.1 在线校准实验平台

为验证 EPS 自校准法的校准效果,搭建传感器在线校准实验平台,如图 5 所示。以标准直齿轮(模数 0.8, 对极数 400)作为被测对象,以海德汉 ERP880 型高精度圆光栅(测量精度为 $\pm 1''$)作为基准器具。利用伺服电机为转子提供动力,通过减速装置使其与转子相连,将被测对象与光栅同轴安装,通过电控系统实现传感器和光栅同步采样。

在进行自校准验证实验时,将被测对象回归绝对零位,待被测对象匀速转动后,光栅与传感器同步采样,以相同间隔记录角位移数据。首先,以等时间间隔进行测量采样并标序测量值序列 $f_1(\theta)$ 与测量误差序列;然后,基于测量值序列 $f_1(\theta)$,测量值每经过 $2\pi/m$ 变换一次测量误差序列的起始位置,通过数值变换得到在不同起始

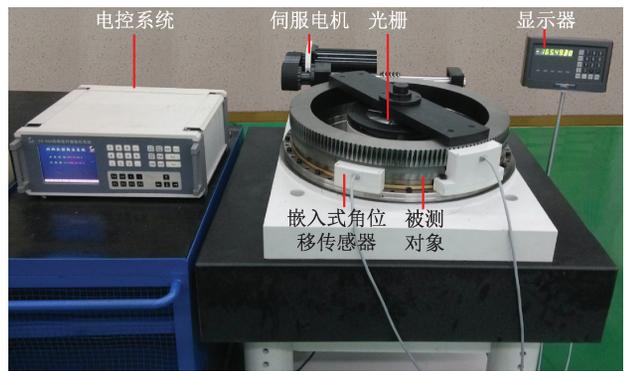


图 5 在线校准实验平台

Fig. 5 Online calibration experiment platform

位置时相应的测量值序列 $f_i(\theta)$;最后,将满足条件的测量值序列进行数据处理得到测头在绝对零位的整周测量误差,至此完成 EPS 自校准。

3.2 自校准实验验证

传感器长期使用由于电气系统元件参数变化、环境参数变化等均会产生误差,将校准前误差序列在整周范围内进行等时间间隔采样,图 6 为传感器校准前整周测量误差,其峰峰值为 $127.80''$ ($-62.02'' \sim 65.78''$)。

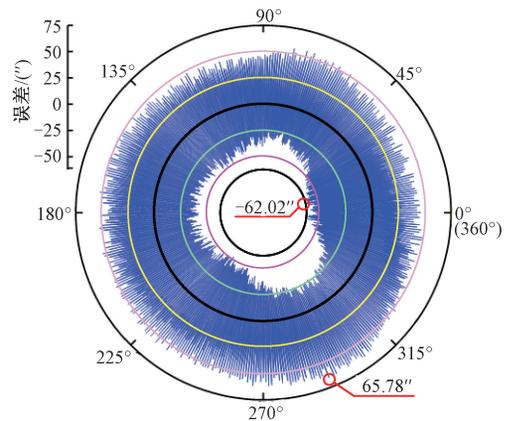


图 6 整周测量误差曲线

Fig. 6 Measurement error curves of entire circle

选取前 10 个对极 ($0^\circ \sim 9^\circ$) 测量误差曲线,由图 7 可知传感器测量误差为周期性误差。

为验证 EPS 自校准法的校准效果,根据传感器测量误差特点,在 400 个对极中选取第 1 对极 ($0^\circ \sim 0.9^\circ$)、第 50 对极 ($44.1^\circ \sim 45.0^\circ$)、第 100 对极 ($89.1^\circ \sim 90.0^\circ$)、第 200 对极 ($179.1^\circ \sim 180.0^\circ$)、第 300 对极 ($269.1^\circ \sim 270.0^\circ$)、第 400 对极 ($359.1^\circ \sim 360.0^\circ$) 共 6 个对极进行验证实验,图 8 为所选 6 个对极的测量误差曲线与 EPS 自校准法重构的误差曲线,图 9 为 EPS 自校准后的误差分布云图。

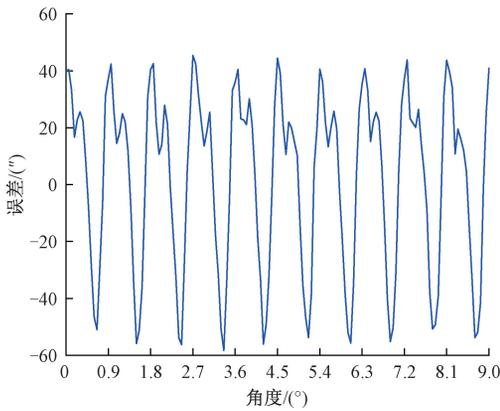


图7 前10个对极测量误差曲线

Fig. 7 Measurement error curves for the first 10 pairs of poles

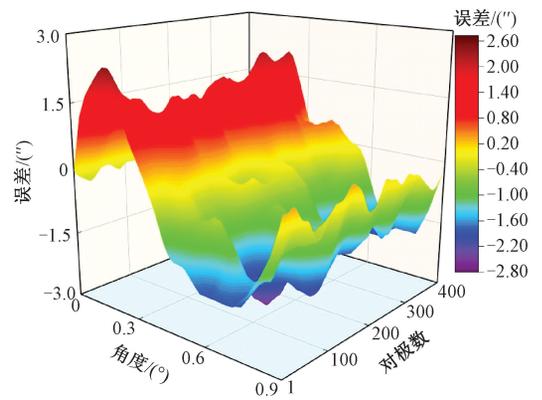


图9 自校准后的误差

Fig. 9 Error after self-calibration

表1 对极内误差峰峰值

Table 1 Error peak to peak within the pole

对极数	测量误差峰峰值/(″)	自校准方法重构误差峰峰值/(″)	校准后误差峰峰值/(″)	降低比例/%
1	91.41	89.95	5.75	93.71
50	85.38	82.92	4.48	94.75
100	77.67	74.43	4.75	93.88
200	85.50	81.13	4.45	94.80
300	95.47	92.96	4.25	95.55
400	99.87	97.70	4.48	95.51

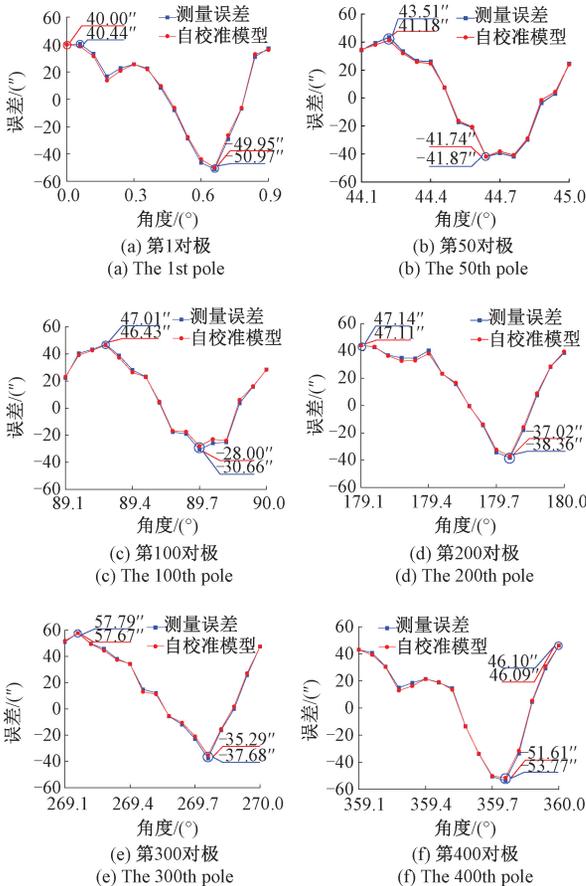


图8 误差重构结果

Fig. 8 Error reconstruction results

由图8可知,单个对极经EPS自校准法重构的误差曲线与测量误差特性保持一致,并且能较好地拟合测量误差曲线;由图9可知,单个对极校准后的误差较小,误差曲线分布均匀且呈相同趋势,误差峰峰值平均减少94.70%,所选6个对极的误差数据如表1所示。

由图10可知,传感器整周测量误差峰峰值由127.80″(-62.02″~65.78″)降低至5.90″(-2.96″~2.94″),降低了95.38%,EPS自校准法能有效降低传感器测量误差,校准后误差分布均匀,与单个对极内校准后的误差分布特点相同。

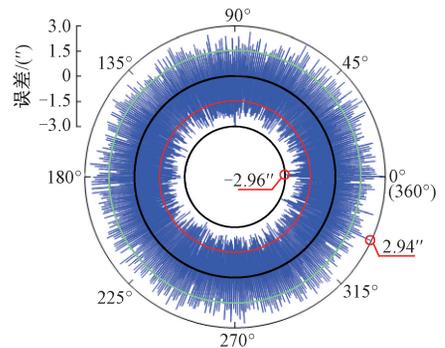


图10 校准后整周误差曲线

Fig. 10 Error curves of entire circle after calibration

3.3 重复性实验

为了验证EPS自校准法的稳定性,对校准后的传感器进行重复性实验,在整周范围内分别进行了正、反行程的3次测量,实验结果如图11所示。

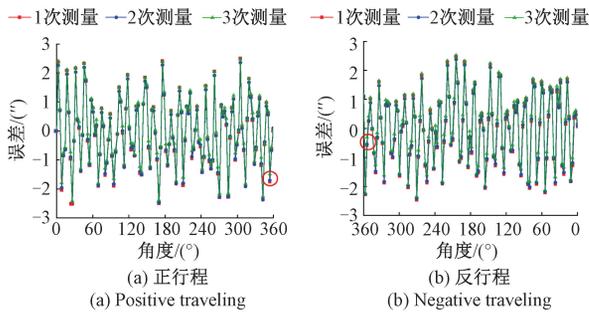


图 11 重复性实验结果

Fig. 11 Repeatability experiment results

由图 11 可知,正行程的 3 次测量重复性最大误差为 0.27",反行程的 3 次测量重复性最大误差为 0.29",正反行程的测量重复性最大误差出现在相同位置。重复性实验表明,正反行程的重复性实验结果基本一致,该自校准法具有较好的测量稳定性。

3.4 对比实验

为了验证本文 EPS 自校准法的有效性性与准确性,选取 6 个典型对极与比较校准法进行了对比实验,实验结果如图 12 所示。

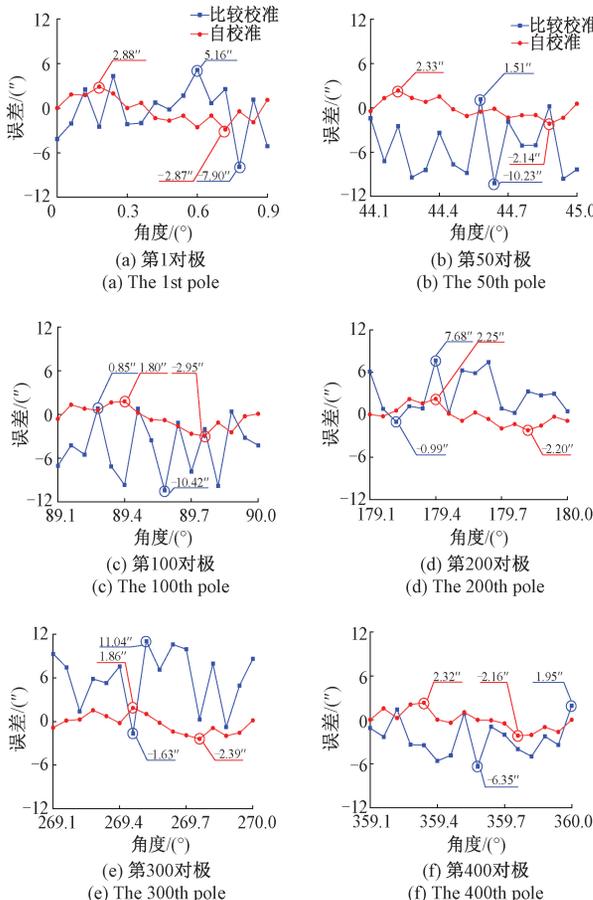


图 12 校准后误差对比

Fig. 12 Comparison of errors after calibration

实验结果表明,与比较校准法相比,单个对极自校准后的误差曲线更加平稳,同时误差峰峰值相比于比较校准法平均减少 6.20",因此 EPS 自校准法能高效地对传感器进行校准,两种方法校准后的误差数据如表 2 所示。

表 2 校准后对极内误差数据

Table 2 Calibration of intra-pole error data

对极数	EPS 自校准法 误差峰峰值/(")	比较校准法 误差峰峰值/(")	差值绝对值 /(")
1	5.75	13.06	7.31
50	4.47	11.38	6.91
100	4.75	11.27	6.52
200	4.45	8.67	4.22
300	4.25	12.67	8.42
400	4.48	8.30	3.82

由图 13 可知,整周范围内自校准后误差峰峰值为 5.90"(-2.96"~2.94"),比较校准后误差峰峰值为 30.55"(-15.72"~14.83"),从校准后误差峰峰值可知,自校准法相比于比较校准法降低误差的效率提升了 80.69%;从校准后误差分布可知,自校准法校准后误差相比于比较校准法分布更集中,更能有效抑制由偏心引入的误差,减少因安装额外辅助装置引入的误差。综上所述,EPS 自校准法在不依赖高精度基准器具的条件下,能更高效地对传感器进行校准。

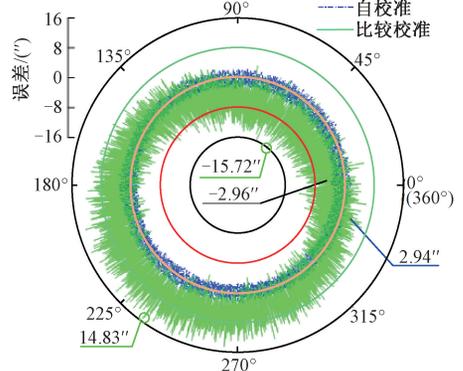


图 13 整周误差对比

Fig. 13 Comparison of entire circle error

4 结 论

本文针对嵌入式角位移传感器长期使用出现的精度损失问题,提出一种基于单测头误差相位偏移法的自校准方法。该方法以传感器起始测量值序列作为误差偏移起始基准,根据误差特性等间隔变换误差序列并解算对

应误差与起始基准的函数关系,构建传感器误差模型。实验结果表明该方法在不依赖高精度基准器具的条件下能高效地校准传感器,其中整周测量误差峰峰值由127.80"降低至5.90",所选对极内测量误差峰峰值平均降低94.70%;校准效率相比于比较校准法提高了80.69%,同时方法具有良好的测量稳定性。本文所提出的自校准方法对实现嵌入式角位移传感器自校准具有重要的应用意义。

该自校准方法对被测对象转速控制具有一定要求,后续将对其在不同转速状态下对传感器的校准效果进行研究,以提高方法的泛化性和普适性。

参考文献

- [1] 孙世政,周清松,韩宇,等. 不同安装模态对嵌入式时栅测量误差的影响[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2290-2300.
- SUN SH ZH, ZHOU Q S, HAN Y, et al. Effect of different mounting modes on embedded time grating measuring errors[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2290-2300.
- [2] SUN S Z, LV Z, HAN Y, et al. A novel inductive angular displacement sensor based on time-grating[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(5): 055105.
- [3] 孙世政,韩宇,党晓圆,等. 嵌入式角位移传感器动态测量误差建模与补偿[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(3): 78-85.
- SUN SH ZH, HAN Y, DANG X Y, et al. Research on modeling and compensation for embedded angular displacement sensor dynamic measurement errors[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(3): 78-85.
- [4] 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.
- [5] 陈小丽,张波,李杰,等. 非接触电感式角位移传感器的设计与校准[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 36-42.
- CHEN X L, ZHANG B, LI J, et al. Design and calibration of the non-contact inductive angular displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 36-42.
- [6] 张泽宇,李杰,胡陈君,等. 一种适用于高量程加速度计的标定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 45-51.
- ZHANG Z Y, LI J, HU CH J, et al. Calibration method for high range accelerometer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12): 45-51.
- [7] WU G, ZHANG M, GUO F. Self-Calibration direct position determination using a single moving array with sensor gain and phase errors[J]. Signal Processing, 2020, 173: 107587.
- [8] 于海,万秋华,卢新然,等. 光电编码器误差检测转台的动态精度标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2699-2704.
- YU H, WAN Q H, LU X R, et al. Calibration of dynamic precision for measurement platform of photoelectric encoder[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(11): 2699-2704.
- [9] KOKUYAMA W, WATANABE T, NOZATO H, et al. Angular velocity calibration system with a self-calibratable rotary encoder[J]. Measurement, 2016, 82(13): 246-253.
- [10] LUO P G, TANG Q F, JING H, et al. Design and development of a self-calibration based inductive absolute angular position sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(14): 5446-5453.
- [11] GUO Y D, ZHANG Y S, TONG N N, et al. Angle estimation and self-calibration method for bistatic MIMO radar with transmit and receive array errors[J]. Circuits Systems and Signal Processing, 2017, 36(4): 1514-1534.
- [12] HUANG B, WANG X M, LI C W, et al. Development and calibration of an air-floating six-axis force

- measurement platform using self-calibration[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(9): ID 095002.
- [13] 张文颖, 劳达宝, 周维虎, 等. 基于多头读数布局的圆光栅自校准方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 352-358.
- ZHANG W Y, LAO D B, ZHOU W H, et al. Self-Calibration method based on multi-head reading layout[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 352-358.
- [14] SUN S Z, HAN Y, ZHANG H, et al. A novel inductive angular displacement sensor with multi-probe symmetrical structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(4): 3087-3096.
- [15] 杨继森, 张迪, 卢渝, 等. 时栅位移传感器误差动态采样与补偿模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 9-18.
- YANG J S, ZHANG D, LU Y, et al. Study on error dynamic sampling and compensation model of the time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 9-18.
- [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.
- [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, 2018, 20(5): 2361-2368.
- [18] 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.
- [19] ZHANG C, LI Z, CHEN J, et al. Design and research of a novel non-contact vertical inductive torque sensor[J]. Measurement, 2021, 177: 109252.

作者简介



孙世政(通信作者), 2015 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为重庆交通大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为精密仪器与机械、智能传感技术。
E-mail: ssz091011@163.com

Sun Shizheng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2015. He is currently a professor and a master advisor at Chongqing Jiaotong University. His main research interests include precision instruments and machinery and smart sensor technology.