

文章编号 1004-924X(2014)10-2757-08

嵌入式时栅传感器的动态自标定

孙世政^{1,2}, 陈锡侯^{2*}, 彭东林^{1,2}, 武 亮²

- (1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 重庆理工大学 机械检测技术与装备教育部工程中心, 重庆 400054)

摘要:提出了一种新的嵌入式时栅角位移传感器的自标定方法,以提高这类传感器在没有高精度母仪标定以及参数和工作环境发生变化时的测量精度。介绍了嵌入式时栅的特点,提出了利用两个间隔一定角度离散测头之间的误差规律变换来实现自标定的方法。设计了动态自标定系统,采用卡尔曼动态滤波算法来降低动态标定过程中传感器自身稳定性波动和环境干扰的影响。为了寻求最优参数以保证标定精度,提出了残差的控制算法。最后,运用设计的自标定系统对传感器进行了标定实验,并与以往母仪标定方法进行了对比。实验结果表明,传感器的误差从标定前 $\pm 20''$ 降低到 $\pm 2.4''$,标定参数与实际传感器误差成分相吻合,标定精度与以往母仪标定的精度基本相同,满足时栅传感器的标定要求。

关键词:嵌入式时栅传感器;离散测头;动态自标定;母仪标定;标定精度;

中图分类号:TP212.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2757

Dynamic self-calibration for embedded time grating sensors

SUN Shi-zheng^{1,2}, CHEN Xi-hou^{2*}, PENG Dong-lin^{1,2}, WU Liang²

- (1. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
 2. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment of the Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)
- * Corresponding author, E-mail: cxh0458@cqut.edu.cn

Abstract: A dynamic self-calibration method was proposed for an embedded time grating sensor to improve its measuring accuracy when it worked at changed electric parameters and measuring environments and could not be calibrated by a standard instrument. The features of the embedded time grating sensor were introduced, and a self-calibration method was presented by using error regular transformation of two discrete probes in a certain angle. Then, a dynamic self-calibration system was designed. To reduce the influence of sensor stability and environmental disturbance on the dynamaic calibrating processing, a Kalman filter was used. Moreover, an algorithm for residual control was proposed to ensure calibration precision. Finally, the self-calibration system was applied to calibration of the embedded time grating sensor. This calibration method was compared with the traditional standard method. Experiment results show that the original errors of sensor have been reduced from $\pm 20''$ to

收稿日期:2014-02-20;修订日期:2014-04-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51127001, No. 51005263);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA041200);“两江学者”专项资金资助项目

$\pm 2.4''$, which is nearly the same as the accuracy of standard instrument calibration and has been satisfied the calibration requirements of time grating sensors.

Key words: embedded time grating sensor; discrete probe; dynamic self-calibration; standard implementation calibration; calibration precision

1 引言

位移(直线位移或角位移)是最基本、最普遍的测量指标,因此,生产和科学实践中需要大量的高精度位移传感器。目前,提高传感器测量精度的方法主要有两种:一是通过提高栅尺的刻划精度来提高传感器的测量精度;二是通过标定、校准以及误差补偿和修正等方法在栅尺刻划精度不足的情况下提高测量精度。其中,精密刻划能力已趋于极限,精密度提高的空间相对较小。标定、校准以及误差修正、补偿等“后天”方法,由于能够有效地提高测量精度并可以大幅度地降低测量装置成本已得到广泛的认可和应用。时栅传感器由于工作原理的特殊性,完全避开了精密刻划的问题,其精度的保证主要通过标定、误差修正来实现^[1-2]。

嵌入式时栅是一种新型时栅传感器,前期研发阶段称这种传感器为“寄生式时栅”^[3],本文将其定义为“嵌入式时栅”。该传感器沿袭前期时栅传感器的基础,将被测对象与传感器融合为一体,主要用于解决高速、重载、超大等极端条件和中空、狭窄、限重等一些不能安装普通传感器的特殊条件下的全封精密测量与精密控制问题。

目前嵌入式时栅已成功应用于对大型齿轮和铸铁涡轮的位置检测,精度可达到 $\pm 3''$ 。该类传感器正在逐步产业化,但面临着两个重要问题。第一,虽然在加工过程中该类传感器摒弃了对高精度加工母机的要求,但是测试和标定环节仍需要高精度的母仪作为基准。第二,由于受到工作环境变化的影响,传感器的电气参数容易发生变化,这也是传感器出现测量精度损失的重要原因之一。在这种情况下,迫切需要一种能够在现场动态自我标定的技术^[4]。

对于传感器的自标定技术,国内外学者进行了一定的研究。Masuda 和 Kajitani^[5]通过在主刻度标尺同一圆周不同空间间距设置多个读数头

的方法,实现了对角度编码器的自检。之后,Watanabe^[6-7]等人又开发出一种测角系统,利用 2 个同轴安装的码盘在不同位置进行分度误差互检,基于相同的原理,他们还提出了一种在单个码盘圆周均布 5 个读数头进行自标定的方案。上述几种方法对各个读数头安装状态的一致性提出了极高的要求,因为安装状态的不一致会影响标定的精度。X. D. Lu 和 D. L. Trumper^[8-9]利用光栅脉冲的测量值和精密轴系的动态特性,实现了在单读数头条件下对光栅的分度误差进行自标定的方法,该方法虽然不存在多读数头安装一致性的问题,但标定对精密轴系的动态响应特性有极高的要求。本文结合嵌入式时栅的特点,提出了一种利用 2 个测头求解误差规律的自标定方法,结合机械、电子系统研发了动态自标定系统,并将该系统应用在嵌入式时栅的研发和生产过程中。实验对比动态自标定方法与以往母仪标定方法表明,本文构建的自标定系统能够更好地实现对嵌入式时栅高精度、高效率标定。

2 嵌入式时栅自标定技术

2.1 嵌入式时栅特点

嵌入式时栅是在前期变耦合系数式时栅传感器基础上发展起来的^[10],该传感器将一整周封闭的定子线圈“离散化”,分解成为若干个独立并用导线连接的测头,以被检测的齿轮类传动件作为转子,获取传动件的运动信息(直线位移或回转角度),其结构如图 1 所示。实际应用过程中,为了消除谐波误差,提高测量精度,至少保证安装 2 个离散测头实现对径读数,对于大尺寸的传动件,则需要安装多个测头来保证精度。

与传统的同轴加传感器的测量方法相比,该测量方法不但省掉了精密传感器和联轴节,而且用于测量的测头处于非接触、不运动状态,具有体积小、重量轻、不怕油污等特点,在高冲击和振动、多油污等恶劣的工作环境下,不容易受到空间狭

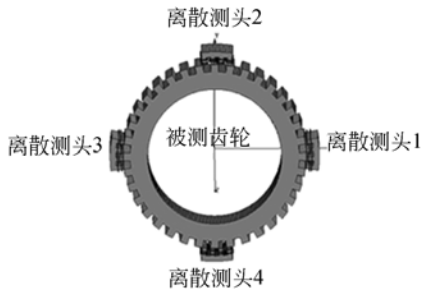


图 1 嵌入式时栅结构图

Fig. 1 Block diagram of embedded time grating sensor

小和限重等特殊条件的限制。

2.2 自标定原理

嵌入式时栅传感器的自标定是通过 2 个间隔一定角度的离散测头来完成的。这两个离散测头同时对同一个回转对象进行角位移的测量,以其中任意一个测头作为参考单元,另一个测头作为被标定的单元,从而获取 2 个测头测量值之间的关系,依据嵌入式时栅的误差特点对测量结果进行数据处理,按照一定的模型求解出 2 个测头的误差函数,利用误差函数实现对传感器系统的自标定。

根据误差的定义即误差是测量值和真值之差,可将嵌入式时栅的误差函数描述为:

$$\delta(\theta) = f(\theta) - \theta, \quad (1)$$

式中: $\delta(\theta)$ 为嵌入式时栅测头的误差函数; $f(\theta)$ 为测头对回转对象的测量值; θ 为回转对象角位移的真值。由于真值无法获知,尽管这个误差函数客观存在,但也无法通过式(1)直接求出。文中利用两个间隔固定角度的测头 A 和测头 B 来实现多个方程的构造,两测头的误差函数可描述为:

$$\delta_A(\theta) = f_A(\theta) - \theta, \quad (2)$$

$$\delta_B(\theta) = f_B(\theta) - \theta, \quad (3)$$

求解出任意一个误差函数($\delta_A(\theta)$ 或 $\delta_B(\theta)$)就可以实现对相应测头的标定,式(2)和式(3)相减可得:

$$\delta_{A-B}(\theta) = f_A(\theta) - f_B(\theta), \quad (4)$$

其中: $\delta_{A-B}(\theta)$ 为新的误差序列; $f_A(\theta)$ 和 $f_B(\theta)$ 分别为测头 A 和测头 B 对于同一回转对象的角位移测量值。按照傅里叶变换的思想可以将相减后新的误差序列看作是 n 次谐波的叠加,故:

$$\delta_{A-B}(\theta) = \sum_{i=0}^n AB_i \sin(i\theta + \varphi_{ABi}) + \Delta\delta_{A-B}(\theta), \quad (5)$$

式中: i 取整数为谐波次数; AB_i 为第 i 次谐波的幅值, φ_{ABi} 为第 i 次谐波的相位, $\Delta\delta_{A-B}(\theta)$ 为残余误差,通过一定的算法将残余值控制在标定精度允许的范围,它的值远小于 $\delta(\theta)$,因此可以将 $\Delta\delta_{A-B}(\theta)$ 忽略,故式(5)可以改写为:

$$\delta_{A-B}(\theta) = \sum_{i=1}^n AB_i \sin(i\theta + \varphi_{ABi}). \quad (6)$$

同理可将式(2)和式(3)中测头 A 和测头 B 的误差函数分别变换成傅里叶函数的形式,而后相减可得:

$$\delta_{A-B}(\theta) = \sum_{i=0}^n (A_i \sin(i\theta + \varphi_{Ai}) - B_i \sin(i\theta + \varphi_{Bi})). \quad (7)$$

在不考虑外界干扰和传感器系统稳定的情况下,同一传感器系统在整周 360° 内误差规律是一定的,测头位置的不同只会引起误差中各次谐波相位的偏移,偏移量为两个测头间隔的固定角度,整周范围内谐波的次数和幅值大小不会发生变化。故式(7)在 i 相同的情况下,两个测头误差中各次谐波的幅值大小相同,即 $A_i = B_i$,设两测头间隔的固定角度为 φ_0 ,式(7)可简化为:

$$\delta_{A-B}(\theta) = \sum_{i=0}^n (A_i \sin(i\theta + \varphi_{Ai}) - A_i \sin(i\theta + \varphi_{Ai} + \varphi_0)), \quad (8)$$

结合式(6)和式(8),可以求出测头 A 的误差函数中的相关参数:

$$\begin{cases} A_i = AB_i / (2 \sin(\varphi_0 / 2)) \\ \varphi_{Ai} = \varphi_{ABi} - (\pi + \varphi_0) / 2 \end{cases}. \quad (9)$$

从式(9)中容易看出,测头 A 的误差函数只与两测头测量值之差的函数和间隔的固定角度有关。

3 动态标定系统组成及原理

3.1 系统硬件组成及原理

嵌入式时栅动态自标定系统硬件组成如图 2 所示。

图 2 中嵌入式时栅 2 个测头感应信号经过放大、滤波等信号处理和 A/D 转换后,转变为含有位置信息的数字信号被送至动态采集模块。现场可编程门阵列(FPGA)作为位置信息采集的逻辑核心单元,对角位移信息进行动态采样和存储。

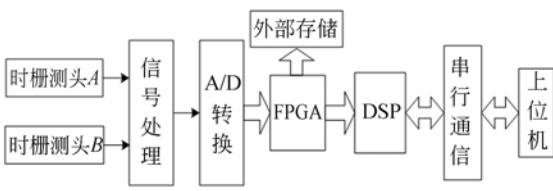


图 2 动态标定系统硬件原理框图

Fig. 2 Block diagram of hardware model of dynamic calibration system

数据处理采用 TI 公司的 TMS320C6713 为核心处理器,通过中断的方式将测量的数据送至数字信号处理器(DSP),通过动态滤波算法来降低动态采样过程中粗大误差和读数稳定性的影响,利用串行通信将数据送至上位机。在上位机实现自标定相关参数的计算,根据残差控制算法寻找最优的参数值,再通过串行通信将参数值送至 DSP,实现误差的拟合和修正。

3.2 软件算法

动态自标定系统总的软件流程如图 3 所示。

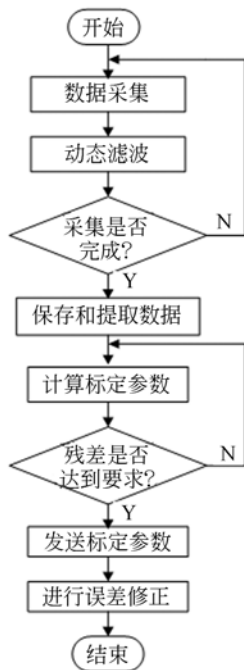


图 3 动态自标定系统软件流程图

Fig. 3 Block diagram of software model of dynamic calibration system

3.2.1 卡尔曼动态滤波算法

在动态采样过程中,由于传感器受到自身稳定性和外界环境干扰的影响,测量数据存在波动

的现象。为了降低数据波动的影响,采用卡尔曼滤波的方法动态预测空间位置的最优估算。卡尔曼滤波算法是一个最优化自回归数据处理算法^[11-12],自标定系统是线性随机微分系统,过程和测量中的数据波动为高斯白噪声,符合卡尔曼滤波的应用条件。

根据动态自标定系统单模型单测量的特征卡尔曼滤波算法主要包括以下几个步骤:

(1)获取当前状态的预测值及与其对应的协方差:

$$X(k|k-1) = X(k-1|k-1), \quad (10)$$

$$P(k|k-1) = P(k-1|k-1) + Q, \quad (11)$$

式中: $X(k|k-1)$ 为当前状态预测结果; $X(k-1|k-1)$ 为前一状态最优结果; $P(k|k-1)$ 为当前状态的协方差; $P(k-1|k-1)$ 为前一状态的协方差; Q 为系统过程协方差。

(2)获取当前状态的最优估算值:

$$K_g(k) = P(k|k-1) / [P(k|k-1) + R], \quad (12)$$

$$X(k|k) = X(k-1|k-1) + K_g(k)[Z(k) - X(k|k-1)], \quad (13)$$

式中: $K_g(k)$ 为卡尔曼增益; $X(k|k)$ 为当前状态最优估算值; $Z(k)$ 为当前状态下的测量值; R 为系统测量协方差。

(3)更新当前状态的协方差:

$$P(k|k) = [I - K_g(k)]P(k|k-1), \quad (14)$$

式中:其中 I 为矩阵,对于单模型单测量, $I=1$ 。当系统进入 $k+1$ 状态时, $P(k|k)$ 就是式 (11) 的 $P(k-1|k-1)$,算法可以自回归地运算下去。

3.2.2 残差控制算法

为了保证标定精度,式(5)中的残余误差 $\Delta\delta_{A-B}(\theta)$ 应非常小,动态自标定系统按照一定的时间间隔进行离散化采样, θ 为整周范围内测量 $k+1$ 个数据点,实际处理的数据也为离散数据,故式(5)可以表示为矩阵形式:

$$\delta_{A-B}(\theta) = \begin{pmatrix} \delta_{A-B}(\theta_0) \\ \delta_{A-B}(\theta_1) \\ \vdots \\ \delta_{A-B}(\theta_i) \\ \vdots \\ \delta_{A-B}(\theta_k) \end{pmatrix} \quad L = \begin{pmatrix} AB_0 \\ AB_1 \\ \vdots \\ AB_i \\ \vdots \\ AB_n \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & \sin(\theta_0 + \varphi_{AB_1}) & \cdots & \sin(i\theta_0 + \varphi_{AB_i}) & \cdots & \sin(n\theta_0 + \varphi_{AB_n}) \\ 1 & \sin(\theta_1 + \varphi_{AB_1}) & \cdots & \sin(i\theta_1 + \varphi_{AB_i}) & \cdots & \sin(n\theta_1 + \varphi_{AB_n}) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & \sin(\theta_i + \varphi_{AB_1}) & \cdots & \sin(i\theta_i + \varphi_{AB_i}) & \cdots & \sin(n\theta_i + \varphi_{AB_n}) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & \sin(\theta_k + \varphi_{AB_1}) & \cdots & \sin(i\theta_k + \varphi_{AB_i}) & \cdots & \sin(n\theta_k + \varphi_{AB_n}) \end{pmatrix}$$

$$\delta_{A-B}(\theta) = \mathbf{A} * \mathbf{L} + \Delta\delta_{A-B}(\theta), \quad (15)$$

式中: n 值为谐波次数,其值小于采样点数 k ,由于测量数据中不可避免地包含有测量误差,待求的参数也必然包含一定的误差,为了提高所得结果的精度,采样点数 k 应尽可能大,从而能够抵偿性地减少随机误差的影响。根据式(15)运用最小二乘原理,从低次开始,逐渐增加谐波的次数,直到残差平方和的减少不显著,解算出 n 值,同时选取矩阵 \mathbf{L} 和 \mathbf{A} 中对残差影响较大的参数,用于求解式(9)中误差函数的相关参数。

4 标定实验及结果

4.1 自标定测头和实验系统

为了验证自标定原理的可行性,系统以精密分度转台为测量对象,多次对嵌入式时栅进行了动态自标定。为了保证测头绕线的一致性,采用印制电路板的来代替绕线,测头实物如图 4 所示。

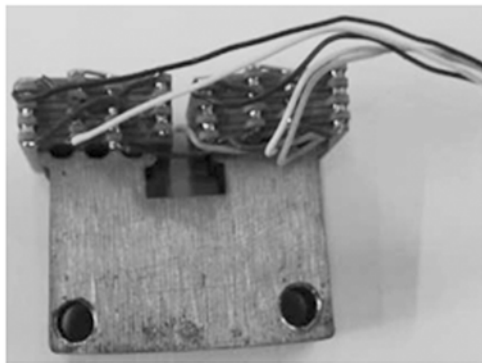


图 4 嵌入式时栅测头实物图

Fig. 4 Discrete probes of embedded time grating sensor

采用德国海德汉高精度光栅作为母仪标定的基准器具,时栅和高精度的光栅分别通过弹性联轴结安装在精密分度转台的主轴上,控制系统通

过驱动电机带动转台做匀速转动的同时,光栅和时栅的 2 个测头对分度转台转过的角度进行同步测量。数据的采集是动态的过程,其对速度的变化比较敏感。为了得到相对恒定的转速,本系统利用光栅将位置信息反馈给运动控制卡形成闭环的控制方式,达到了较高的控制精度。图 5 所示为动态自标定实验系统。

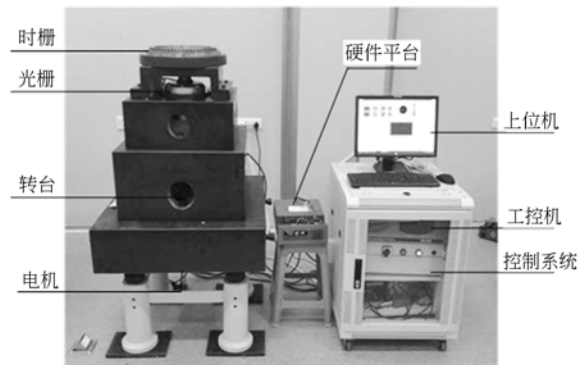


图 5 动态自标定系统实物图

Fig. 5 Experimental system of dynamic self-calibration

4.2 稳定性实验

采用卡尔曼动态滤波来降低传感器自身波动

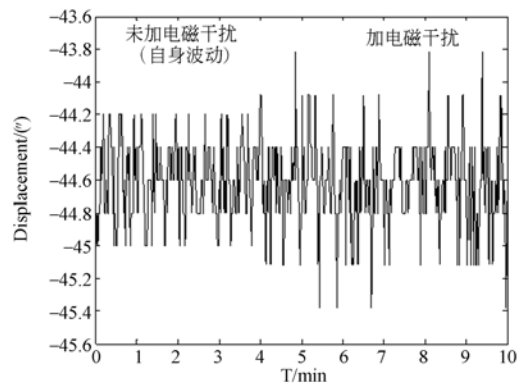


图 6 滤波前传感器稳定性

Fig. 6 Stability of sensor before filtering

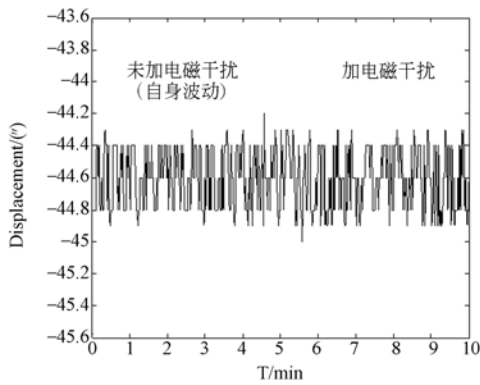


图 7 滤波后传感器稳定性

Fig. 7 Stability of sensor after filtering

和外界干扰的影响,为了验证该滤波算法的可靠性,在传感器稳定一段时间后,在外界环境中增加电磁干扰用以对比滤波前后传感器稳定性的变化。图 6 和图 7 分别为滤波前后的传感器稳定性。滤波前,未加电磁干扰传感器自身稳定性波动量为 $0.8''$,加电磁干扰后波动量增加至 $1.6''$,滤波后传感器稳定性波动量为 $0.6''$ 。可以明显地看出该算法有效地增强了传感器的稳定性。

4.3 传感器自标定

为了保证标定精度,利用残差控制算法对标定参数进行寻优,经解算的 n 值与残差平方和的关系如图 8 所示。

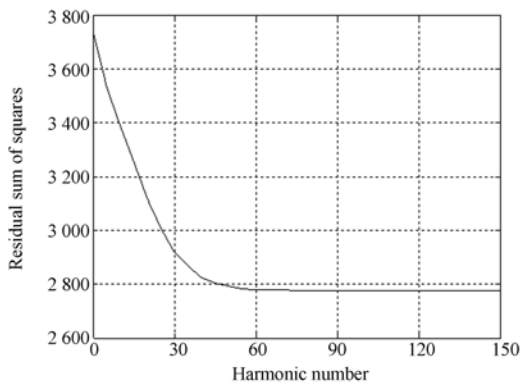


图 8 残差控制效果图

Fig. 8 Result of residual control

当谐波次数 n 为 70 时残差平方和的减少不再显著。各次谐波成分的幅值越大表明其在误差中的比重越大,根据 n 值和谐波的幅值选取的自标定参数如表 1 所示。利用得到的标定参数对嵌入式时栅进行标定,最终精度如图 9 所示。

表 1 动态自标定参数表

Tab. 1 Parameters of dynamic self-calibration

谐波次数 i	谐波幅值 A_i	谐波相位 φ_{Ai}
30	9.119	0.414
60	6.369	1.453
0	2.812	1.571
31	2.117	4.099
61	1.908	-1.413
2	1.584	3.803
1	0.809	3.365
7	0.603	3.195
4	0.510	3.439
59	0.505	3.290
62	0.505	1.540
29	0.505	1.358

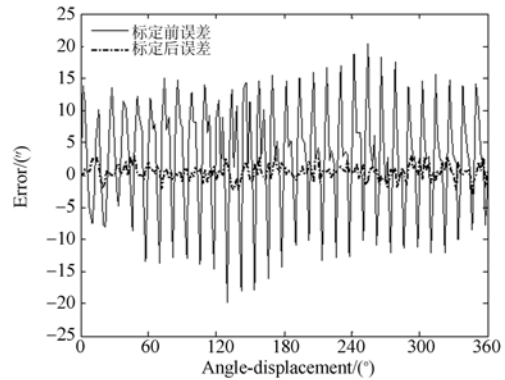


图 9 动态自标定效果图

Fig. 9 Result of dynamic self-calibration

从图 9 可以看出,传感器标定前的原始误差为 $\pm 20''$,标定后误差为 $\pm 2.4''$ 。实验所用的嵌入式时栅为 30 对极,传感器误差主要受到激励正交性和转子加工的影响,激励正交性不好表现为短周期误差,转子加工的误差主要表现为长周期误差,它也同时影响短周期误差。参数表中 30 和 60 次谐波为短周期误差,在总误差中比重最大,由于转子加工所导致的 31、61 和 59 次谐波等短周期附带误差以及 2 次和 1 次等长周期误差比重也较大,与实际传感器误差成分相符合。参数中各次谐波的幅值 A_i 最终变化不大,残差平方和变化不显著,说明残差控制算法对于参数的寻优起到了很好的作用。

4.4 对比实验

为了验证方法的有效性和准确性,用自标定方法与传统母仪标定的方法进行了对比实验。两

种标定方法最终精度对比结果如图 10 所示。

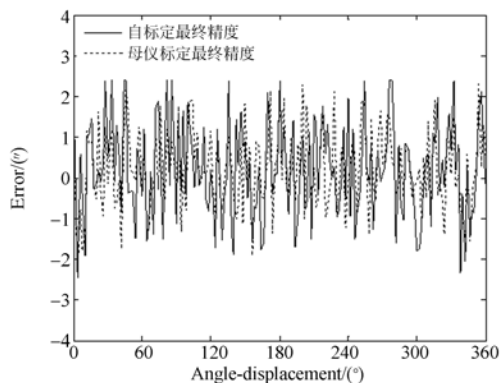


图 10 自标定和母仪标定最终精度对比

Fig. 10 Comparison of self-calibration and standard implement calibration

从图 10 可以看出,母仪动态标定最终精度为 $\pm 2.3''$,与自标定的最终精度范围基本相同,表明该自标定方法正确有效。

与以往传感器多个测头自标定的方法相比,该方法能够在使用较少测头数的条件下实现对传

传感器的较高精度标定,减少了由测头之间不一致所引入的误差。另外,该标定方法对测头安装的一致性和精密轴系的动态响应要求不高,从而使得传感器的现场标定成为可能。

5 结 论

本文针对嵌入式时栅传感器提出了利用 2 个间隔一定角度的离散测头来完成自我标定的新标定方法,并设计了动态自标定系统。利用卡尔曼动态滤波算法来克服动态标定过程中传感器稳定性波动和环境干扰的影响,提出了残差控制算法进行参数寻优保证标定精度。运用自标定系统对传感器进行了标定实验和对比实验,结果表明:传感器误差从标定前 $\pm 20''$ 降低到 $\pm 2.4''$,标定参数与实际的传感器误差成分相吻合,标定精度与以往母仪标定的精度基本相同,满足时栅传感器的标定要求,对嵌入式时栅的现场标定具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 彭东林,刘小康,张兴红,等. 高精度时栅位移传感器研究[J]. 机械工程学报,2005,41(12):126-129. PENG D L, LIU X K, ZHANG X H, et al.. Research on high-precision time-grating displacement sensor[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005,41(12):126-129. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] 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, LIU 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. (in Chinese)
- [4] 高策,乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. 光学精密工程,2007,15(6):846-851. GAO C, QIAO Y F. Real-time error-correction method for photoelectrical theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):846-851. (in Chinese)
- [5] MASUD A, KAJITANI P. An automatic calibration system for angular encoders[J]. *Precision Engineering*, 1989, 11(2):95-100.
- [6] WATANABE T, FUJIMOTO H, NAKAYAMA K, et al.. Automatic high precision calibration system for angular encoder[J]. *SPIE*, 2003, 51(4):400-409.
- [7] WATANABE T, FUJIMOTO H. Self-calibration rotary encoder [C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, Shenyang, P. R. China; ICEMS*, 2005: 240-245.
- [8] X. D L, TRUMPER D L. Self-calibration of on-axis rotary encoders[J]. *Annals of the CIRP*, 2007, 56(1):499-504.
- [9] AMIN S D. On-axis self-calibration of angle encoders [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2010,59(1):529-534.
- [10] 杨伟,彭东林,朱革. 基于变耦合系数变压器原理的时栅位移传感器设计[J]. 仪器仪表学报,2006,27(11):1403-1405.

- YANG W, PENG D L, ZHU G. Design of time grating sensor based on variable coupling coefficient transformer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(11):1403-1405. (in Chinese)
- [11] 郭立红, 朱玮, 李岩, 等. 基于卡尔曼滤波技术解算惯导的水平偏差[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(4): 379-384.
- GUO L H, ZHU W, LI Y, *et al.*. Using Kalman filter technology establishment of attitude and course errors for measurement ship inertial navigation system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(4):379-384. (in Chinese)
- [12] 王晓初, 尤政, 赵开春. 基于改进的无迹卡尔曼滤波确定视线感知相对状态[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4):1032-1039.
- WANG X CH, YOU ZH, ZHAO K CH, *et al.*. Determination of vision-based relative state by modified unscented Kalman filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1032-1039. (in Chinese)

作者简介:



孙世政(1986—),男,山东烟台人,博士研究生,2012年于重庆理工大学获得硕士学位,主要研究方向为计算机辅助测试技术与仪器与智能传感器。E-mail: ssz091011@163.com

导师简介:



彭东林(1952—),男,重庆人,教授,博士生导师,1988年、1992年于重庆大学分别获得硕士、博士学位。重庆市首批学术学科带头人、重庆市“两江学者”。主要研究方向为计算机辅助测试技术与仪器、智能传感器。E-mail: pdl@cqut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)