

文章编号 1004-924X(2015)04-1114-08

时栅传感器动态测量误差补偿

孙世政^{1,2}, 彭东林^{2*}, 郑方燕^{2,3}, 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;
3. 重庆理工大学 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室 重庆 400054)

摘要:针对动态测量误差特点,提出了对系统误差和随机误差分别进行建模和组合补偿的思想来提高时栅传感器的动态测量精度。对具有周期性变化特征的系统误差采用傅里叶级数逼近的方法进行建模,运用最小二乘求解超定方程组的方法计算出系统误差的补偿参数。对于系统误差补偿后残留的随机误差采用灰色预测 GM(1, 1)模型进行预测,通过模型残差检验和修正提高预测的准确度。实验结果表明,利用傅里叶级数逼近模型有效地补偿了系统误差,误差由 $\pm 35''$ 降至 $\pm 7.8''$,通过最小二乘参数寻优得到的补偿参数与传感器实际的误差成分相吻合;灰色预测模型则很好地预测补偿了残留的随机误差,误差由 $\pm 7.8''$ 降至 $\pm 3''$ 。得到的结果表明,利用这种对误差分别建模和补偿的方法大幅度地降低了动态测量误差,有效地提高了传感器的测量精度。

关键词:时栅传感器;位移测量;动态测量误差;系统误差;随机误差;傅里叶级数逼近;GM(1, 1)模型

中图分类号:TP212.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152304.1114

Compensation for dynamic measurement errors of time grating sensor

SUN Shi-zheng^{1,2}, PENG Dong-lin^{2*}, ZHENG Fang-yan^{2,3}, 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;
3. Chongqing Key Laboratory of Time-grating Sensing and Advanced Testing Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

* Corresponding author, E-mail: pdl@cqut.edu.cn

Abstract: According to the error characteristics in dynamic measurement, a targeted respective modeling and a combined compensation idea for systematic errors and random errors were proposed to improve the dynamic measuring accuracy of a time grating sensor. The Fourier series approach was presented to establish the model for the systematic errors with periodical changes, in which the compensation parameters for the systemic errors were calculated by using least square to solve overdetermined equation. Moreover, the grey model GM(1,1) was used for modeling random errors

收稿日期:2014-08-26; **修订日期:**2014-10-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51127001); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA041202);“两江学者”专项资助项目

after compensation systemic errors and the forecast accuracy was improved by a residual error test and modification. The actual experiments show that systematic errors have been effectively compensated by Fourier series approach model, the original errors are reduced from $\pm 35''$ to $\pm 7.8''$, and the compensation parameters are consistent with that of actual sensor. The random errors have been forecasted and compensated by GM(1,1) model, and the random errors are reduced from $\pm 7.8''$ to $\pm 3''$. These results demonstrate that proposed method compensates the dynamic errors greatly and the dynamic measurement accuracy of the embedded time grating sensor is effectively improved by using this modeling and compensation method.

Key words: time grating sensor; displacement measurement; dynamic measurement error; systematic error; random error; Fourier series approach; GM(1,1) model

1 引言

时栅传感器是一种新型的位移传感器^[1-2]。它将空间位移量转换为时间量,利用高频时钟脉冲插补的方式实现位移测量,目前该类传感器正在逐步实现产业化。由于在传感器的加工制造和安装过程中会产生具有一定规律的确定性误差;在传感器系统动态测量过程中也会受到环境温度、湿度、振动以及各种电参数变化的影响而产生不确定性误差,因此对传感器的上述误差进行建模和补偿以保证其测量精度很受关注。

动态测量误差的建模和补偿主要是通过通过对误差数据进行建模,运用模型将预估的误差数据加入到过程计算中,进而达到修正的目的^[3-5]。对于动态测量误差的建模方法有很多,杨洪涛^[6]等人利用偏最小二乘回归法和支持向量机建立了三坐标测量机的空间动态误差模型。高贯斌^[7]等人提出了一种基于正弦函数结合粒子群算法的圆光栅角度传感器误差补偿模型,该方法对光栅误差中的周期性成分起到了较好的补偿作用。Guan^[8]等人利用时间序列模型结合现代功率谱分析对动态误差进行了分离。李鸣鸣^[9]等人采用灰色模型实现了对纳米工作台的动态定位误差的预测补偿。陈自然^[10]等人提出了利用向量机回归和时间序列相结合的预测方法,在时栅动态采样过程中建立了过去测量值与未来测量值的映射关系,用以预测下一采样时刻的角位移。这些方法的针对性较强,在特定应用上对动态误差起到了较好的修正作用。

前期实验研究表明,时栅传感器的动态测量

误差主要包括具有周期性的系统误差和具有不确定性的随机误差,上述的误差建模方法并不能完全适合该类传感器的误差特点。本文根据时栅误差的特点,提出了针对动态测量的系统误差和随机误差分别建模和组合补偿的思想。采用傅里叶逼近模型对周期性的系统误差进行了分离,通过利用最小二乘法求解超定方程组的方法求得系统误差补偿参数;对于随机性成分则通过建立灰色预测模型进行预测和补偿。实验证明这种建模和补偿方法能够有效地提高时栅的动态测量精度。

2 时栅误差的来源及特点

测量系统的误差根据性质可以分为系统误差、随机误差和粗大误差三类^[11]。时栅动态测量系统同样存在这三类误差,其系统误差主要由加工、安装和电气三个方面引起。时栅传感器虽然对空间的刻划要求低,但是在定转子的加工过程中分度误差和椭圆误差不可避免,由此会带来系统误差,此类误差表现为短周期一次和三次误差,加工中的短周期附带误差也比较明显;在传感器安装过程中会产生偏心误差,偏心误差包括两个方面:一个是被测对象与测头之间的安装偏心,另一个是被测对象与回转中心之间的偏心,偏心误差表现为长周期的一次误差;电气系统中激励信号之间的正交性同样会产生系统误差,此类误差表现为短周期的二次误差。动态测量过程中的随机误差主要由环境温度、湿度、振动以及各种电气参数的变化引起。粗大误差主要是由突发性的强干扰、振动等因素引起,该类误差在建模之前可予以剔除。

3 误差建模

通过将传感器与其同轴安装的高精度母仪(高精度光栅)的数据进行比较来获取误差数据。根据时栅动态测量过程中的误差特点,可将误差表示为:

$$\Delta\delta(\theta) = \Delta\delta_s(\theta) + \Delta\delta_r(\theta), \quad (1)$$

式中: θ 为测量角度; $\Delta\delta(\theta)$ 为总误差; $\Delta\delta_s(\theta)$ 系统误差; $\Delta\delta_r(\theta)$ 随机误差。

根据式(1)可将动态测量误差分为系统误差和随机误差两部分,下面针对这两部分分别建立模型。

3.1 傅里叶逼近模型

时栅的测量符合圆周内误差封闭的原则,故可以将系统误差看作以 2π 为周期的周期函数。根据傅里叶的思想,可以将式(1)中的系统误差 $\delta_s(\theta)$ 视为 n 次误差谐波的叠加,即可表示为^[12-13]:

$$\begin{aligned} \delta_s(\theta) &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) = \\ & a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\theta + \varphi_n), \end{aligned} \quad (2)$$

其中: A_n 为各次谐波的振幅, $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$; φ_n 为相应的各次谐波的初相角, $\varphi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$ 。因此,只要得到各次谐波的幅值和初相角,就可以实现对系统误差的重构。

在实际的动态测量过程中,通过在 $[0, 2\pi]$ 内测量 $k+1$ 个数据点,系统按照一定的时间间隔进行离散化采样获得误差序列 $\Delta\delta(\theta)$, 其测量值可表示为 $\theta_i = \frac{2\pi i}{k+1}$, ($i=0, 1, 2, \dots, n+1$)。实际处理的数据为离散数据,结合式(2)又可将式(1)表示为矩阵形式:

$$\delta(\theta) = \begin{pmatrix} \delta(\theta_0) \\ \delta(\theta_1) \\ \vdots \\ \delta(\theta_i) \\ \vdots \\ \delta(\theta_k) \end{pmatrix} \quad \mathbf{L} = \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_k \end{pmatrix}$$

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

$$\delta(\theta) = \mathbf{A} \times \mathbf{L} + \Delta\delta_r(\theta). \quad (3)$$

公式(3)中的谐波次数 n 不可能无限大,根据时栅传感器系统误差的特点,单个对极内的短周期误差谐波次数都比较低,通常不会超过 10 次。为了减少运算量且提高计算的准确性,谐波次数 n 的最大值取 10 倍的对极数,这样可以同时包含长周期和短周期的谐波成分。在整周范围内的采样点数 $k+1$ 远大于谐波次数 n 的最大值,故公式(3)可以看作是包含补偿参数(各次谐波的振幅和初相角)的超定方程组,利用最小二乘原理,以残差平方和为目标即可解算出补偿参数。

3.2 灰色预测模型

通过上述的傅里叶逼近模型可将时栅动态测量误差中具有周期性变化的系统误差分离出来,而不确定性的随机误差则采用灰色模型进行预测。灰色系统理论是一种研究少数据、贫信息不确定问题的新方法。在灰色理论的研究内容中,用于建模、预测的灰色模型(Grey Mode, GM)是一种应用广泛的重要方法,其通过对原始数据的处理和灰色模型的建立,发现和掌握系统发展规律,以对系统的未来状态做出科学的定量预测^[9,14]。

3.2.1 GM(1,1)模型原理

将分离后的随机误差作为原始数据序列:

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)), \quad (4)$$

对该数据进行一次累加可得:

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)), \quad (5)$$

式(5)中, $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n,$

$X^{(1)}$ 的紧邻均值生成的序列 $Z^{(1)}$ 为:

$$Z^{(1)} = (z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)), \quad (6)$$

式(6)中背景值

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2} (x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)), \quad (7)$$

其中: $k=1, 2, \dots, n,$ 若记 $\hat{\alpha} = [a, b]^T$ 为参数列,且

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & 1 \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

则 GM(1,1)模型 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 的最小二乘法估计参数列满足:

$$\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y, \quad (9)$$

由此得到 GM(1,1)模型的时间响应序列为:

$$\hat{x}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a}, \quad (10)$$

其中 $k=1, 2, \dots, n$, 经一次累减可得原始数据的拟合值:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) = (1 - e^a)(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak}, \quad (11)$$

其中 $k=1, 2, \dots, n$, 根据式(11)得到的原始数据的预测序列为:

$$\hat{X}^{(0)} = (\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)). \quad (12)$$

3.2.2 误差检验与修正

预测模型是否合理有效, 必须通过残差评定模型进行检验。残差检验, 即对模型值和实际值的残差进行逐点检验。计算原始序列 $x^{(0)}(k)$ 与 $\hat{x}^{(0)}(k)$ 的绝对残差序列:

$$\begin{aligned} \epsilon^{(0)} &= \{\epsilon^{(0)}(k), k=1, 2, \dots, n\} \\ \epsilon^{(0)}(k) &= |x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)|, \end{aligned} \quad (13)$$

及相对残差序列:

$$\phi = \{\phi_k, k=1, 2, \dots, n\}, \phi_k = \left[\frac{\Delta^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \right] \%, \quad (14)$$

并计算平均相对残差:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \phi_k, \quad (15)$$

给定 α , 当 $\bar{\phi} < \alpha$, 且 $\phi_n < \alpha$ 成立时, 称模型为残差合格模型。

当模型残差不合格时, 可以用 GM(1,1) 建立残差模型来修正, 按照灰色预测算法可以得到残差的预测值:

$$\hat{\epsilon}^{(0)}(k+1) = (1 - e^a)(\epsilon^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak}. \quad (16)$$

3.2.3 预测输出

通过 GM(1, 1)模型预测和残差修正最终的预测输出为:

$$\hat{x}_e^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(0)}(k+1) + \hat{\epsilon}^{(0)}(k+1). \quad (17)$$

4 实验方法及结果

4.1 实验装置及补偿方法

实验系统以精密分度转台为测量对象, 以德国海德汉光栅(精度为 $\pm 1''$)为基准器具。图 1 为实验系统实物图。时栅和光栅分别通过弹性联轴结安装在精密的分度转台的主轴上, 控制系统通过驱动电机带动转台做匀速转动的同时, 光栅和时栅对分度转台转过的角度进行同步测量。采集误差数据的过程是动态的, 其对速度的变化较为敏感。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控制, 以达到较高的控制精度。

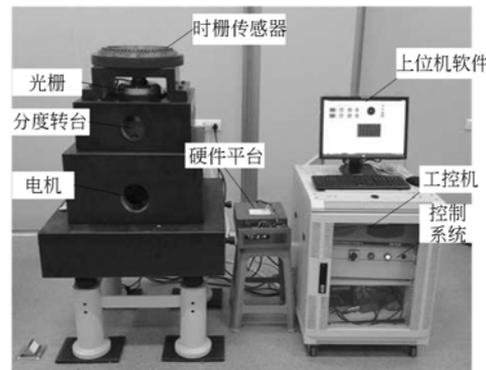


图 1 实验系统实物图

Fig. 1 Experimental system

为了实现误差补偿, 研发了时栅误差补偿系统, 该系统由硬件平台、上位机软件、建模和分析软件组成。硬件平台主要包括信号处理模块, 数据采集模块, 误差修正模块和通信模块, 上位机采用 Visual Basic 编写, 运用 Matlab 软件对误差进行建模和参数寻优计算。针对上位机软件和建模软件的接口问题, 采用动态链接库技术实现了两者的混合编程。图 2 为时栅误差补偿系统原理框图。

硬件平台将采集到的光栅和时栅数据通过串口发送至上位机软件, 在上位机中做差得到原始误差值, 先对原始误差中的粗大误差进行剔除, 然后对系统误差和随机误差分别建模, 计算模型中的相关参数, 将补偿参数通过串口发送至误差补偿模块, 实现对动态测量误差的补偿。图 3 为误差补偿流程图。

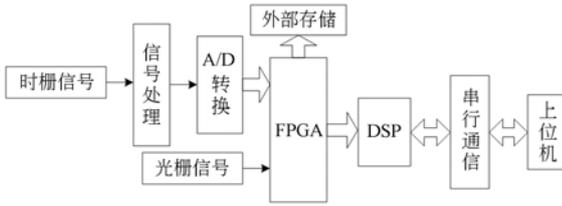


图 2 时栅误差补偿系统原理框图

Fig. 2 Block diagram of error compensation system for time grating

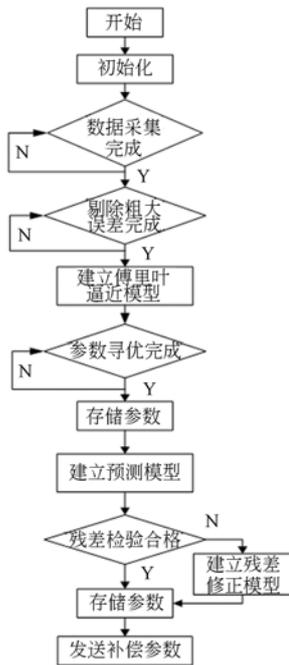


图 3 误差补偿流程图

Fig. 3 Flow chart of error compensation

4.2 补偿实验

实验选用了 10 对极的时栅传感器, 傅里叶函数逼近模型参数可根据公式(3)运用最小二乘求解超定方程组的原理, 解出各次谐波的幅值和初相位, 图 4 为进行傅里叶分解后各次谐波的频谱图。

从图 4 中可以看出, 该传感器系统误差中短周期(对极内)1 次、2 次和 3 次误差成分的幅值较大, 表现为整周范围的 10 次、20 次和 60 次误差; 受到安装偏心影响, 长周期(整周)1 次误差也比较明显; 另外受到转子加工的影响, 短周期一次误差的附带误差非常明显, 如图 4 中的 11 次、12 次、8 次和 9 次误差。最终的分析结果与实际的

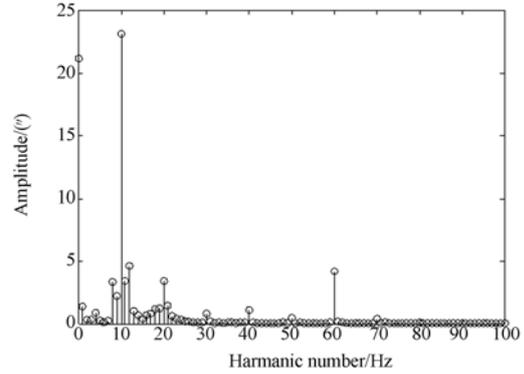


图 4 各次谐波的频谱图

Fig. 4 Spectral image of each harmonic

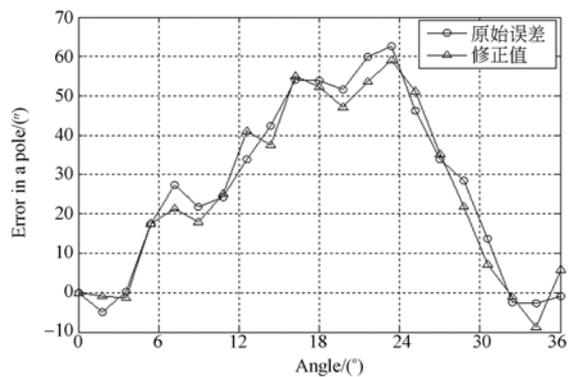
传感器误差成分相吻合。通过解方程组计算出的系统误差补偿参数如表 1 所示。

表 1 系统误差补偿参数表

Tab. 1 Compensation parameters of systematic error

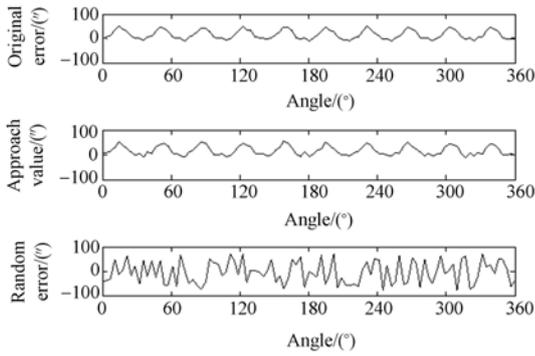
谐波次数 n	谐波幅值 A_n	谐波相位 φ_n
10	23.156 06	4.388 901
0	21.192 09	1.570 796
60	4.629 296	-1.141 26
12	4.221 976	1.857 255
20	3.418 596	-0.635 33
11	3.387 022	2.402 379
8	3.317 666	1.648 626
9	2.215 638	4.667 302
1	1.409 014	4.034 967

根据表 1 的参数, 采用傅里叶逼近模型对系统误差进行补偿, 补偿结果如图 5 所示, 图 5(a) 和图 5(b) 分别为对极内和整周范围内的系统误差补偿效果。



(a) 对极内补偿效果

(a) Compensation effect in a pole

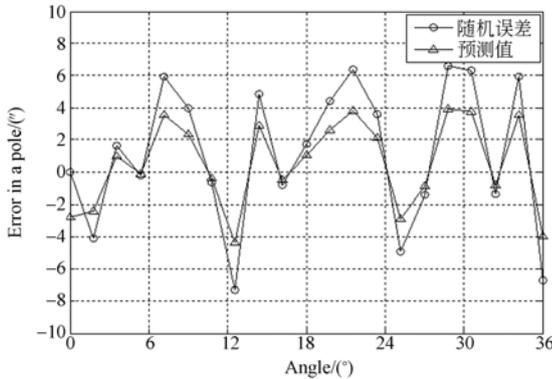


(b) 整周补偿效果

(b) Compensation effect in a circle

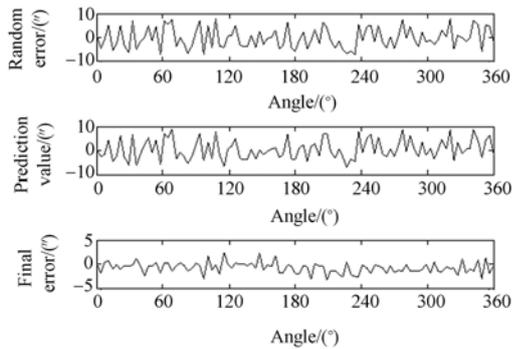
图 5 系统误差补偿效果图

Fig. 5 Compensation results of systematic errors



(a) 对极内补偿效果

(a) Compensation effect in a pole



(b) 整周补偿效果

(b) Compensation effect in a circle

图 6 随机误差补偿效果图

Fig. 6 Compensation results of random errors

从图 5 中可以明显地看出,误差从补偿前的 $\pm 35''$ 降至 $\pm 7.8''$,这说明傅里叶逼近模型有效地降低了误差中具有周期性变化的系统误差。然后用补偿后残留的随机误差建立预测模型,图 6(a)和 6

(b)分别为对极内和整周范围内的运用 GM(1,1)模型对随机误差进行补偿的效果图。

从图 6 中可以看出,通过预测随机误差,残留误差由 $\pm 7.8''$ 降至 $\pm 3''$,传感器的精度得到了大幅度提高。

4.3 对比实验

为了更好地验证本文方法的准确性,在相同的实验条件下,对 3 台不同型号的传感器进行了误差补偿,其最终的精度如图 7 所示。

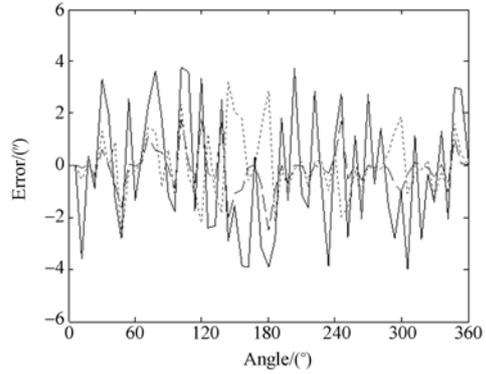


图 7 3 台传感器补偿后的最终精度对比

Fig. 7 Comparison of final precision of three sensors after compensation

由图 7 可以看出,补偿后 3 台不同型号的传感器的误差都较小,精度都达到了一定的水平,说明补偿方法与不同型号的传感器都有较好的补偿效果。

4.4 速度实验

实验用传感器的标定速度为 1 r/min,为了更清楚地了解速度对补偿模型的影响,进行了速度实验。分别在 1、3 和 10 r/min 的速度下对传感器进行误差补偿,补偿结果如图 8 所示。

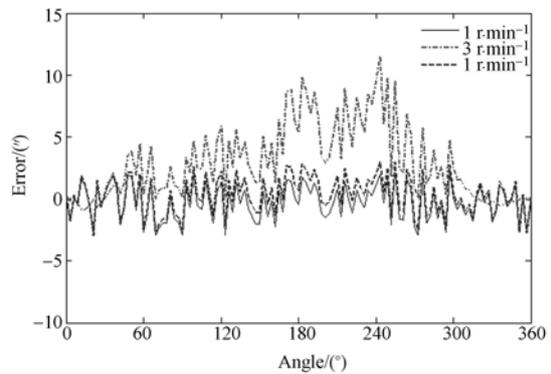


图 8 不同速度下补偿效果图

Fig. 8 Results of compensation in different speeds

由图 8 可以看出,在速度较低的情况下,补偿结果基本相同,当速度较高时,精度明显变差,随着速度的提高,整周的低次误差变得比较明显。这主要是由两方面因素引起的:一是速度提高后传感器自身原始误差发生变化,低速情况下求解出的参数已不能满足高速的要求;二是高速情况下采样点相对较少,这直接导致了方程组数量较少,运用最小二乘法求解出的参数存在一定的误差。

5 结 论

为了提高时栅传感器的动态测量精度,本文

针对该类传感器的误差特点,提出了对系统误差和随机误差进行分别建模和补偿的思想。对于具有周期性变化特征的系统误差采用傅里叶级数逼近的方法进行建模,通过最小二乘解超定方程组的方法计算出系统误差的补偿参数。对于具有不确定性变化特征的随机误差采用灰色预测 GM(1, 1)模型进行预测,通过模型残差检验和修正提高预测的准确度。实验结果表明,这种利用误差分别建模和补偿的方法使传感器的误差由 $\pm 35''$ 降至 $\pm 3''$,大幅度地降低了测量误差,有效地提高了传感器的动态测量精度。

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. (in Chinese)
- [2] 付敏,彭东林,鲁进,等.基于时间参考点的差动式线阵 CCD 位移传感器[J].光学精密工程,2014,4(22):956-962.
FU M, PENG D L, LU J, *et al.*. Differential and linear CCD displacement sensors based on time reference points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 4(22):956-962. (in Chinese)
- [3] PENG T, YE W H, LIANG R J, *et al.*. Temperature variable optimization for precision machine tool thermal error compensation on optimal threshold [J]. *Journal of Mechnacial Engineering*, 2013, 1(26):158-165.
- [4] WU D H, HUANG S L, WEI Z, *et al.*. Infrared thermometer sensor dynamic error compensation using Hammerstein neural network[J]. *Sensors and Actuators A*, 2009, 149:152-158.
- [5] 姜湖海,魏群,贾宏光,等.共形导引头角增量误差分析及其前馈补偿[J].光学精密工程,2014,22(4):829-836.
JIANG H H, WEI Q, JIA H G, *et al.*. Analysis of angle increment error in conformal seeker and its feedforward compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):829-836. (in Chinese)
- [6] 杨洪涛,刘勇,费业泰,等.三坐标测量机动态误差混合建模方法[J].仪器仪表学报,2010,31(8):1861-1865.
YANG H T, LIU Y, FEI Y T, *et al.*. Hybrid modeling method for CMM dynamic error [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(8):1861-1865. (in Chinese)
- [7] 高贯斌,王文,林铿,等.圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J].光学精密工程,2010,18(8):1766-1772.
GAO G B, WANG W, LIN K, *et al.*. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1766-1772. (in Chinese)
- [8] GUAN Q J, GAO F R, LIU G X, *et al.*. Dynamic error modeling based on time series and modern spectrum analysis [C]. *Fourth International Symposium on Precision Mechanical Measurements, Anhui, P. R. China: SPIE*, 2008: 7130-7133.
- [9] 李鸣鸣,龚振邦,程维明,等.纳米定位系统动态误差灰色模型补偿方法研究[J].光学精密工程,2006,14(1):89-94.
LI M M, GONG ZH B, CHENG W M, *et al.*. Research of dynamic error compensation for nanopositioning system based on grey model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):89-94. (in Chinese)
- [10] 陈自然,彭东林,刘小康,等.基于支持向量机时栅数控转台时序预测研究[J].仪器仪表学报,

- 2012, 33(8):1793-1799.
- CHEN Z R, PENG D L, LIU X K, *et al.*. Research on forecast method for time grating CNC rotary table based on SVR and time series [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(8):1793-1799. (in Chinese)
- [11] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: Chinese Mechine Press, 2007.
- [12] 吴宏圣, 曾琪峰, 乔栋, 等. 提高光栅莫尔条纹信号质量的滤波方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8):1944-1949.
- WU H SH, ZHENG Q F, QIAO D, *et al.*. Filtering method of improving quality of grating Moir fringe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1944-1949. (in Chinese)
- [13] 张宁, 沈湘衡, 杨亮, 等. 利用动态靶标谐波特性评价光电经纬仪的跟踪性能[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6):1286-1293.
- ZHANG N, SHEN X H, YANG L, *et al.*. Evaluation of tracking performance of photoelectric theodolite by using harmonic property of dynamic target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1286-1293. (in Chinese)
- [14] 彭小强, 戴一帆, 唐宇, 等. 基于灰色预测控制的磁流变抛光液循环控制系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1):100-105.
- PENG X Q, DAI Y F, TANG Y, *et al.*. Circulatory system for MR fluid based on gray forecast control algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1):100-105. (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,及智能传感器。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。E-mail: pdl@cqut.edu.cn

(本栏目编辑:马健)

(版权所有 未经许可 不得转载)