

文章编号 1004-924X(2015)01-0093-09

时栅角位移传感器在线自标定系统

高忠华^{1,2}, 陈锡侯^{2*}, 彭东林^{1,2}

- (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 时栅传感器及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054)

摘要:为解决时栅角位移传感器在实际应用中的在线标定问题,提出了一种定角平移自标定方法并设计了相应的自标定系统。该方法首先把圆周封闭的自然基准转换成定角基准,在时栅内部建立了自标定基准。然后,根据傅里叶级数的性质,将定角基准平移到傅里叶变换的幅值和相位中,建立了测量值之差与误差之差的函数关系。通过对测量值之差进行傅里叶分析,重构了时栅角位移传感器的误差函数。最后,讨论了影响自标定精度的误差来源,并设计了传感器的零点纠错算法。为了检验自标定效果,利用激光干涉仪实验装置与自标定系统进行了对比试验。结果表明:定角平移自标定精度为 $1.9''$,与理论计算的自标定误差 $(1.5 \pm 0.5)''$ 的结论相符。提出的自标定方法在解决时栅自身标定基准的同时,满足了精密测量领域对时栅精度和可靠性的要求。

关键词:时栅角位移传感器;自标定;定角平移;零点纠错

中图分类号: TB922; TP212.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152301.0093

Online self-calibration system for time grating angular displacement sensor

GAO Zhong-hua^{1,2}, CHEN Xi-hou^{2*}, PENG Dong-lin^{1,2}

- (1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Time Grating Sensing & Advanced Testing Technology,
Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)
* Corresponding author, E-mail: cxh0458@cqut.edu.cn

Abstract: To implement the in-line self-calibration of a time grating angular displacement sensor in practical applications, a self-calibration method called Fixed Angle Shift (FAS) was presented and a self-calibration system was designed. Firstly, circle-closed natural base was shifted to a fixed angle base to be as the self-calibration base of time grating. According to properties of Fourier series, the relations between differences of measured values and errors were established by shifting the fixed angle base to amplitudes and phases in the Fourier transfer. Then, the error function was reconstructed based on the Fourier analysis for differences of measured values. Finally, the error

收稿日期: 2014-08-05; 修订日期: 2014-10-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51205434); 科技部国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2013YQ220893); 重庆市基础与前沿研究计划资助项目 (No. cstc2013jcyjA70007); 重庆市教育委员会科学技术研究专项资助项目 (No. KJ130816)

sources effect on the calibration accuracy were discussed and a zero point correction algorithm was designed. To verify the results of self-calibration, self-calibration experiments were performed and compared with the proposed FAS system and a laser interferometer. Experimental results indicate that the accuracy of self-calibration with FAS method is $1.9''$, which is well consistent with that of the theoretic calculation $(1.5 \pm 0.5)''$. The method solves the self-calibration base of the time grating angular displacement sensor and satisfies, the requirements of precise measurement systems for high precise and high reliability.

Key words: time grating angular displacement sensor; self-calibration; fixed angle shift; zero point correction

1 引言

时栅角位移传感器是基于“用时间量来测量空间位移”的原创思想^[1-2],依据时空坐标转换理论而发明的一种新型位移传感器^[3-4]。随着时栅角位移传感器^[5]向产业化推进的过程中,迫切需要解决的一个关键问题是传感器标定。目前,比对标定法大量应用于工业现场,如坐标测量机的标定^[6-7],多传感器联合标定^[8],武器装备系统的光电跟踪转台标定^[9]等。时栅也以光栅等高精度的仪器作为基准^[10-11],采用比对测量法进行标定^[12-13]。但在时栅产业化过程中应用此测量标定法存在以下问题:第一,由于时栅没有自己的精度基准,因此随着时栅角位移传感器精度的逐步提高,需要不断地寻找更高精度的基准仪器,这在一定程度上限制了时栅的发展;第二,在极端和恶劣的条件下使用时,机械和电气参数的变化致使时栅传感器精度也发生变化,需专业人员现场进行重新标定,费时费力,不便于操作;另外,有些设备在运行期间,其外部工作空间有限,比对标定时没有足够的位置来安装基准仪器,在一定程度上限制了时栅的应用范围。由此可见,时栅传感器必须依靠自身来解决现场标定的基准问题,即在线自标定问题。

近年来,角位移传感器自标定技术在国内外有所研究。哈尔滨工业大学和天津大学早年提出了排列常角法、排列互比法^[14-15],它们利用两个相同精度等级的多面棱体或多齿分度台多次转位实现相互标定,但多次转位测量的可操作性较差。德国联邦物理技术研究院(PTB)提出了恩斯特法^[16]和质因数分解法^[17]。恩斯特法在度盘上按指数规律刻线,非等分分布 16 个读数头;质因数分解法设置两组读数头成互质数关系且它们的乘积刚好等于刻线数,这两种方法对刻线精度的要

求非常高。日本国家计量研究院(NMIJ)提出的等分平均法^[18],在度盘整周均匀放置多个读数头来分离度盘刻线误差,但这种方法要求读数头读取刻线误差的一致性极高。哥伦比亚大学和麻省理工学院提出了基于时间测量的动态转位自标定方法^[19-20],该方法基于传感器安装在旋转轴这一事实,在空气静压轴承上建立了自由减速方程从而实现误差分离,但这种方法对轴系精度的要求非常高。上述方法的自标定精度在 $0.5 \sim 2''$ 的精度水平。

本文结合时栅角位移传感器的多对极、多读数头的特点,提出了定角平移自标定法。设计了主辅读数头的自标定结构,结合电子系统和计算机快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法,在不需要外部基准仪器的情况下,依靠自身对时栅角位移传感器的误差进行了在线标定。最后利用激光干涉仪进行了精度对比实验,实验结果表明,定角平移自标定法的自标定精度为 $1.9''$ 。该方法实现了时栅角位移传感器的高精度在线标定。

2 时栅传感器自标定原理

定角平移(Fixed Angle Shift, FAS)自标定法的原理如图 1 所示。

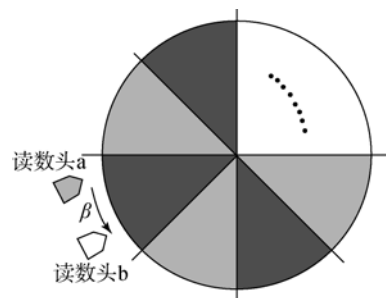


图 1 时栅定角平移自标定原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Fixed Angle Shift (FAS) self-calibration method for time grating

该方法需要构造一个固定不变的角度值,称之为定角 β ,相隔 β 放置两组读数头 a 和 b ,则转子旋转一周就可获取 n 个与 β 相比较的值。该比较值呈圆周封闭,从而形成了自标定的自然基准。

设读数头 a 的测量值为 $f(\alpha)$,则读数头 b 的测量值为 $f(\alpha+\beta)$,将两组测量值做差,根据误差定义有:

$$f(\alpha+\beta) - f(\alpha) = \delta(\alpha+\beta) - \delta(\alpha) + \beta, \quad (1)$$

式中: $\delta(\alpha+\beta)$ 为读数头 b 的误差, $\delta(\alpha)$ 为读数头 a 的误差, α 为角度真值。从式(1)可以看出,若不考虑定角 β ,则两个读数头的测量值之差转化成了误差之差,从而建立了测量值与误差之间的函数关系。根据傅里叶级数的线性和位移性质,误差函数为:

$$\begin{aligned} \delta(\alpha+\beta) - \delta(\alpha) &= \left[\sum_{i=1}^m A_i \sin(i\alpha + \varphi_i) \right] e^{j\beta} - \\ &\quad \left[\sum_{i=1}^m A_i \sin(i\alpha + \varphi_i) \right] = \\ &= 2 \sum_{i=1}^m \left[A_i \sin \frac{i\beta}{2} \sin \left(i\alpha + \frac{i\beta}{2} + \varphi_i + \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (2) \end{aligned}$$

式中: A_i 和 φ_i 为函数 $\delta(\alpha)$ 的幅值和相位。由式(2)可知,误差之差 $\delta(\alpha+\beta) - \delta(\alpha)$ 与原误差函数 $\delta(\alpha)$ 的幅值和相位呈函数关系。若已知 β 和 $\delta(\alpha+\beta) - \delta(\alpha)$ 的幅值和相位,就可以解出 $\delta(\alpha)$ 的幅值和相位,从而重构出误差函数 $\delta(\alpha)$ 。

设读数头 a 的离散采样值序列为 $a[n]$,读数头 b 的离散采样值序列为 $b[n]$,将两个采样值序列做差,并对序列值 $b[n]$ 做清零处理,即 $b[n]$ 的每个值均减 β ,则得到差值序列 $c[n]$,即:

$$c[n] = b[n] - a[n]. \quad (3)$$

若 $c[n]$ 点数满足香农定理,可对它做傅里叶变换,得到误差之差的幅值 F_i 和初相 Φ_i :

$$\begin{cases} F_i = 2A_i \sin \frac{i\beta}{2} \\ \Phi_i = \frac{i\beta}{2} + \varphi_i + \frac{\pi}{2} \end{cases}, \quad (4)$$

且有 $\beta = F_0$,从而可解出 A_i 和 φ_i 为:

$$\begin{cases} A_i = \frac{F_i}{2 \sin \frac{i\beta}{2}} = \frac{F_i}{2 \sin \frac{iF_0}{2}} \\ \varphi_i = \Phi_i - \frac{i\beta}{2} - \frac{\pi}{2} = \Phi_i - \frac{iF_0}{2} - \frac{\pi}{2} \end{cases}. \quad (5)$$

据此重构误差曲线 $\delta(\alpha)$,得到:

$$\delta(\alpha) = A_0 + \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}-1} \left[\frac{F_i}{2 \sin \frac{iF_0}{2}} \times \sin \left(i\alpha + \Phi_i - \frac{iF_0}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (6)$$

式中: A_0 根据峰峰值的一半来求取。由于在数据处理过程中将定角 β 平移到了傅里叶级数的幅值和初相中,因此称这种方法为定角平移法。

3 时栅传感器自标定系统

3.1 定角平移自标定系统结构

在自标定原理中使用两个读数头 a 和 b ,但在实际应用中,两个读数头的机械和电气参数不可能完全一致,导致测量误差 $\delta(\alpha+\beta)$ 和 $\delta(\alpha)$ 不一致,而且定角 β 在测量过程中是实时变化的,这些因素会导致定角平移自标定方法失效。

实际应用中定角平移自标定时栅角位移传感器结构如图 2 所示。

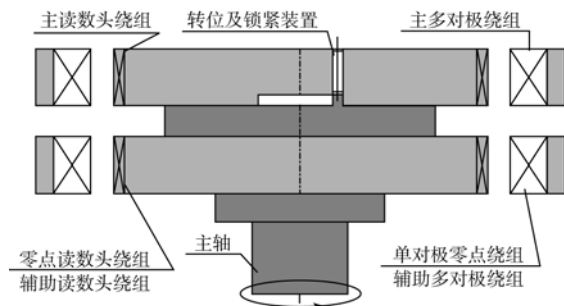


图 2 时栅定角平移自标定结构

Fig. 2 Structure of time grating with FAS self-calibration function

图 2 中,上层的主传感器的一个主读数头代替图 1 中的两个读数头 a 和 b ,通过转位及锁紧装置使主读数头可以转过一个定角 β 。通过主读数头转位前后测得的两组测量值来代替图 1 中的读数头 a 和 b 的两组测量值,同样可以构造一个定角基准。这种结构避免了由两个读数头的参数不一致而带来的影响,但采用一个主读数头没有办法知道转位前后测得的值是否为同一个机械位置的角度值,所以增加了下层的辅助读数头。主读数头转位前后的数据由辅助读数头示值采集,确保主读数头转位前后数据的正确性。

为了确定绝对零点,在下层的辅助传感器的定子和转子绕组中嵌入了单对极零点绕组。转子每转过一周,零点读数头输出一个周期信号与机械位置相对应,通过零点读数头读数可以唯一确定主读数头处于主传感器的当前对极,再通过软件算法可将时栅传感器的零点确定下来。但是由于零点读数的稳定性为 $40''$,在对极点附近很容易将主读数头的位置判断错误,此时必须对其进行零点纠错。

3.2 自标定硬件系统组成

定角平移自标定系统硬件组成如图 3 所示。

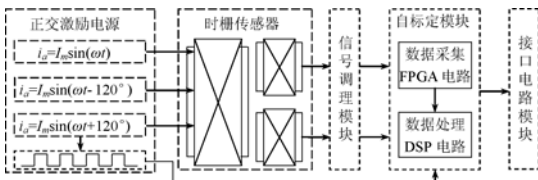


图 3 定角平移自标定系统的硬件组成原理图

Fig. 3 Block diagram of hardware structure for FAS self-calibration system

主辅多对极绕组以及单对极绕组需要的激励信号采用 DDS 技术,由图 3 中的正交激励电源电路提供,时栅传感器的输出信号经整形后变成方波信号提供给自标定模块。自标定模块由现场可编程门阵列(FPGA)和数字信号处理器(DSP)共同完成,FPGA 采用 Altera 公司的 EP2C5T144 芯片,主要完成与角度值相关的数字信号的采集及时间量对空间位移的测量,DSP 采用 TI 公司的 TMS320VC33 芯片,主要完成角度转换及与计算机通讯、自标定参数传递以及零点纠错等数据的处理。时栅数据通过接口电路送到计算机中,在计算机中通过测试软件进行较为复杂的 FFT 运算,得到的自标定参数通过 DSP 存储在 Flash 中,供误差修正使用。

3.3 自标定系统软件设计

3.3.1 系统标定软件流程

系统标定软件需要上下位机的协调运行,上位机测试软件主要进行如 FFT 等复杂数据的运算以及标定的自动化工作,下位机主要完成传感

器智能化的数据处理工作。根据定角平移自标定的实际应用,软件总流程如图 4 所示。

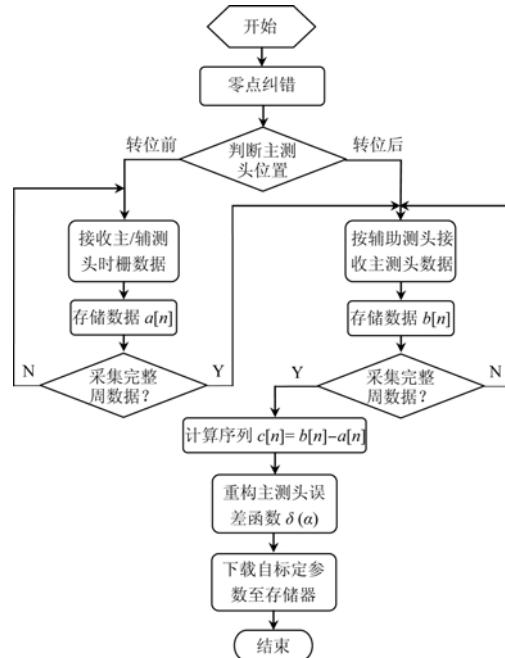


图 4 系统自标定软件总流程图

Fig. 4 Flow chart of software system for self-calibration

3.3.2 零点纠错算法

绝对零点的确定是保证自标定正确进行的关键。根据主读数头和零点读数头的读数用软件算法进行纠错处理,纠错步骤如下:

(1) 设主读数头的前一个读数值为 θ_1 ,当前读数值为 θ_2 ,对极数设为 p ,那么在对极点附近二者的差值有可能出现两种情况:

$$|\theta_2 - \theta_1| < \frac{360}{2p}, \quad (7)$$

$$|\theta_2 - \theta_1| > \frac{360}{2p}. \quad (8)$$

前一种情况是主读数头在对极点附近没有跨到下一个对极内,后一种情况是主读数头已经进入下一个对极内。

(2) 设零点读数头的读数为 γ ,符号 $\text{int}[\quad]$ 是对中括号数据取整,做运算:

$$n = \text{int}\left[\frac{\gamma}{360/p}\right], \quad (9)$$

$$\gamma_p = n \times \frac{360}{p}. \quad (10)$$

再将二者做差值,有可能出现两种情况:

$$|\gamma - \gamma_p| > \frac{360}{2p}, \quad (11)$$

$$|\gamma - \gamma_p| < \frac{360}{2p}. \quad (12)$$

前一种情况说明零点读数头在对极点附近没有跨进下一个对极,后一种情况是零点读数头已经进入下一个对极内。

(3)综合(1)和(2)中出现的 4 种情况进行判断,就可完成纠错。过程如下:

①当式(7)和(11)同时成立或式(8)和(12)同时成立时,主读数头读数没有错误,不用纠错。

②当式(7)和(12)同时成立时,零点读数头读数错误地跨入下一个对极,将 n 减 1 纠错。

③当式(8)和(11)同时成立时,零点读数头的读数错误地停留在当前对极内,将 n 加 1 纠错。

上述的纠错方法要求零点读数头的读数误差 $\Delta < \frac{360}{2p}$,即小于栅距的一半,即可正确纠错。从长期的实验测试可知,单读数头的读数误差不会超过 $1'$,远远小于时栅 72 对极的栅距 $W = 5^\circ$,满足上述要求。

4 自标定实验与结果

4.1 自标定实验系统

时栅自标定实验系统如图 5 所示。

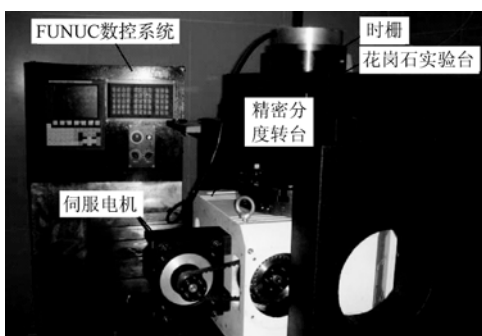


图 5 时栅自标定实验系统

Fig. 5 Experimental system of self-calibration for time grating

实验台以变形量较小的花岗岩为基体,以精

密度分度转台为回转机构,把时栅辅助读数头的数据送入 FUNUC 数控系统作为反馈量,由该数控系统控制电机按照辅助读数头读数进行精密定位控制,实现时栅自标定的整周定点数据采集。

4.2 读数稳定性实验

主辅读数头的稳定性是影响自标定精度的主要因素。主读数头采用 72 个读数头串联,辅助读数头采用 104 个读数头串联,分别如图 6 和图 7 所示。

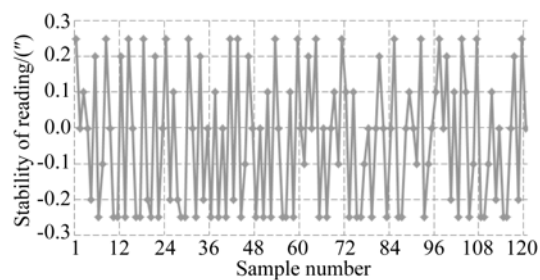


图 6 时栅主读数头读数稳定性

Fig. 6 Stability of main reading head of time grating

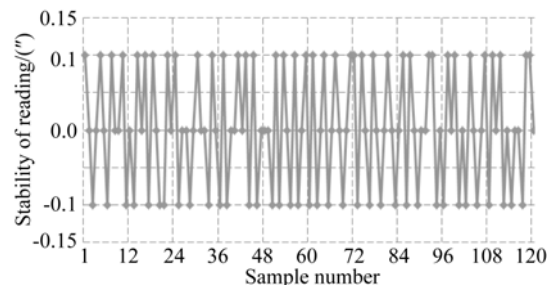


图 7 时栅辅助读数头读数稳定性

Fig. 7 Stability of auxiliary reading head of time grating

由于多读数头平均效应,主辅读数头的读数稳定性不同。时栅传感器静止不动,对主辅读数头连续采集 120 个数据,则主读数头的稳定性为 $0.5''$,辅助读数头的稳定性为 $0.2''$ 。

4.3 自标定实验

利用实验装置,按照辅助读数头的示值分别采集主读数头转位前后的数据。主读数头转位的角度是 $360^\circ/104 = 3.46154^\circ$,整周等间隔采集 12 960 个数据,即采样间隔值为 $100''$,由于数据量较大,这里只给出前 10° 间隔 0.5° 的原始数据,如表 1 和表 2 所示。

表 1 主读数头转位前主辅读数头 $0 \sim 10^\circ$ 的测量数据Tab. 1 Data of main and auxiliary reading heads from 0° to 10° before turning of main reading heads

序号	主读数头/ $^\circ$	辅助读数头/ $^\circ$	序号	主读数头/ $^\circ$	辅助读数头/ $^\circ$
1	0.001 31	0.000 00	12	5.499 22	5.500 00
2	0.498 92	0.500 00	13	5.999 33	6.000 00
3	0.998 86	1.000 00	14	6.500 08	6.500 00
4	1.499 14	1.500 00	15	6.998 89	7.000 00
5	1.999 36	2.000 00	16	7.499 31	7.500 00
6	2.499 25	2.500 00	17	7.999 47	8.000 00
7	2.998 78	3.000 00	18	8.498 64	8.500 00
8	3.499 78	3.500 00	19	8.999 92	9.000 00
9	3.999 42	4.000 00	20	9.498 94	9.500 00
10	4.500 03	4.500 00	21	9.998 81	10.000 00
11	4.999 58	5.000 00	22	—	—

表 2 主读数头转位后主辅读数头 $0 \sim 10^\circ$ 的测量数据Tab. 2 Data of main and auxiliary reading heads from 0° to 10° after turning of main reading heads

序号	主读数头/ $^\circ$	辅助读数头/ $^\circ$	序号	主读数头/ $^\circ$	辅助读数头/ $^\circ$
1	3.479 43	3.461 54	12	8.952 84	8.961 54
2	3.952 47	3.961 54	13	9.461 88	9.461 54
3	4.461 38	4.461 54	14	9.957 10	9.961 54
4	4.956 01	4.961 54	15	10.452 22	10.461 54
5	5.452 62	5.461 54	16	10.977 55	10.961 54
6	5.977 42	5.961 54	17	11.454 92	11.461 54
7	6.454 16	6.461 54	18	11.960 91	11.961 54
8	6.961 89	6.961 54	19	12.457 03	12.461 54
9	7.456 42	7.461 54	20	12.953 48	12.961 54
10	7.954 45	7.961 54	21	13.477 03	13.461 54
11	8.477 74	8.461 54	22	—	—

按照定角平移自标定算法,对表 1 和表 2 中的 $\delta(\alpha)$ 主要误差分量的幅值和相位,如表 3 所示。
的数据做差值,根据式(4)和式(5)可得误差函数

表 3 FAS 方法的误差函数 $\delta(\theta)$ 的主要误差分量的幅值和相位Tab. 3 Amplitudes and phases of main component of error function $\delta(\theta)$ using FAS method

谐波次数 N	幅值 $A_i/(\prime)$	相位 φ_i/rad	谐波次数 N	幅值 $A_i/(\prime)$	相位 φ_i/rad
0	0.001 39	0.000 00	288	17.681 40	0.149 63
1	0.519 81	4.144 19	360	0.444 44	2.158 47
2	1.343 84	-0.905 24	432	39.977 22	1.361 16
3	0.177 97	0.023 28	433	0.281 49	0.053 10
4	0.177 67	3.886 91	576	9.230 11	2.556 25
5	0.131 81	-0.048 19	720	0.120 27	1.727 65
72	1.153 30	3.466 58	792	0.072 10	1.013 19
144	21.685 93	1.346 40	864	5.337 10	2.384 33
216	2.164 15	3.21345	—	—	—

根据式(6)可重构 $\delta(\alpha)$ 的误差曲线,标定出来的整周误差峰峰值为 $102''$,如图 8 所示。

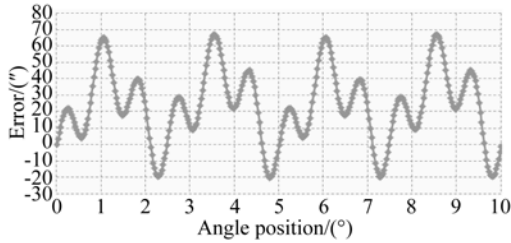


图 8 FAS 方法自标定重构出来的 $0\sim 10^\circ$ 误差曲线
Fig. 8 Error curve from 0° to 10° reconstructed by self-calibration using FAS method

4.4 比对实验

为了检验自标定效果,进行了激光干涉仪比对实验,实验装置如图 9 所示。

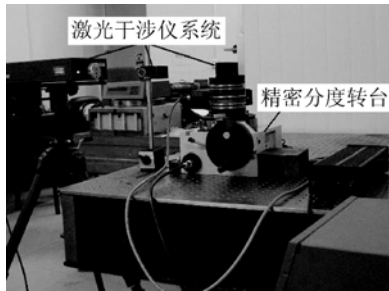


图 9 激光干涉仪比对实验系统

Fig. 9 Laser interferometer experimental system for comparison

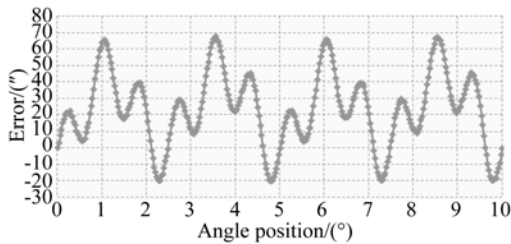


图 10 时栅与激光干涉仪比对后 $0\sim 10^\circ$ 的误差曲线
Fig. 10 Error curve of time grating from 0° to 10° in comparison with laser interferometer

把时栅角位移传感器同轴安装在精密分度转台内部,以 RENISHAW 的 XL10 和 RX10 组成的角度测量系统作为基准测量时栅的原始误差,整周误差为 $100''$,测得的误差曲线如图 10 所示。

把图 8 和图 10 的数据做差值,整周差值最大

为 $1.9''$,此值为自标定误差,自标定曲线与比对误差的差异曲线如图 11 所示。

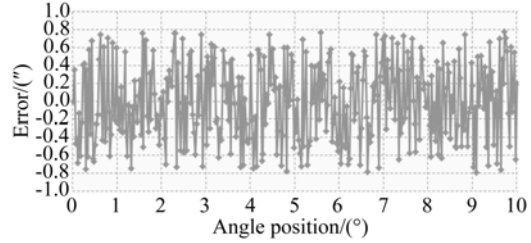


图 11 FAS 自标定曲线与比对误差 $0\sim 10^\circ$ 的差异曲线
Fig. 11 Differences curves of between self-calibration errors using FAS method and comparison errors with laser interferometer from 0° to 10° for time grating

4.5 误差分析

时栅角位移传感器自标定误差主要来源于曲线重构误差和主辅读数头的读数稳定性误差。其中曲线重构误差是重构误差曲线时对傅里叶谐波次数的取舍造成的,表 3 中只列出了主要的误差分量,其余的高次谐波分量所占的比例较小,且远远小于读数头的稳定性,这部分数据已经不可靠,故将其舍弃。

$$\text{曲线重构误差为 } e_s(\alpha) = \sum_{i=18}^{6480} e_i(\alpha) = 1.5'' ,$$

主读数头的稳定性误差为 $\delta_z(\alpha) = 0.5''$,辅助读数头的稳定性误差为 $\delta_f(\alpha) = 0.2''$,则自标定总误差 $e(\alpha)$ 为:

$$e(\alpha) = e_s(\alpha) \pm \sqrt{\delta_z^2(\alpha) + \delta_f^2(\alpha)} = 1.5 \pm \sqrt{0.5^2 + 0.2^2} = 1.5'' \pm 0.5'' . \quad (13)$$

与图 11 比较,自标定误差 $1.9''$ 在总误差范围内,实测误差数据与理论分析数据相吻合。

5 结 论

根据时栅角位移传感器产业化所面临的标定问题,本文提出了定角平移自标定方法。首先进行了理论推导,然后设计了自标定系统的机械结构以及电路硬件和软件算法,并进行了自标定实验和比对实验。最后给出了影响自标定精度的误差来源,并计算了自标定总误差。实验结果表明:定角平移自标定的精度为 $1.9''$,与误差分析结果

(1.5 ± 0.5) $''$ 相吻合,该结果满足了时栅角位移传感器标定的基本要求。定角平移自标定法为后续

的误差自修正准备了条件,同时为时栅在精密测量领域的应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 刘小康,费业泰,彭东林,等. 时栅位移传感器智能化实现方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(6): 1139-1142.
LIU X K, FEI Y T, PENG D L, *et al.*. Research on intelligentization method for time grating displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(6): 1139-1142. (in Chinese)
- [2] GAO ZH H. Error calibration system for time grating angular displacement sensor [C]. *Proceedings of 2012 International Conference on Nanotechnology and Precision Engineering*, Guilin, P. R. China: AMR, 2013:705-708.
- [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): 359-365.
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): 359-365. (in Chinese)
- [4] 高忠华,彭东林. 直线时栅测量系统的误差研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1): 15-20.
GAO ZH H, PENG D L. Study on error of linear time grating measurement system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(1): 15-20. (in Chinese)
- [5] 彭东林,刘小康,张兴红,等. 时栅位移传感器原理与发展历程[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2010, 24(10): 40-45.
PENG D L, LIU X K, ZHANG X H, *et al.*. The principle and development process of time grating sensor [J]. *Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science*, 2010, 24(10): 40-45. (in Chinese)
- [6] 夏桂锁,廖城,优燕军. 平行双关节坐标测量机的标定及不确定度评价[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1227-1234.
XIA G S, LIAO CH, YOU Y J. Calibration and uncertainty evaluation of double parallel-joint coordinate measuring machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1227-1234. (in Chinese)
- [7] 解则晓,韩振华,高翔. 光笔式单目视觉测量系统的关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 780-787.
XIE Z X, HAN ZH H, GAO X. Key technologies of monocular vision measurement system with light pen [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 780-787. (in Chinese)
- [8] 李醒飞,姚旺,赵新华,等. 多传感器测量系统的联合标定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2877-2883.
LI X F, YAO W, ZHAO X H, *et al.*. Joint calibration of multi-sensor measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2877-2883. (in Chinese)
- [9] 徐涛,李博,刘廷霞,等. 车载光电跟踪系统跟踪转台的初始标定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 782-789.
XU T, LI B, LIU T X, *et al.*. Initial calibration of tracking turntable for vehicle-borne opto-electronic tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 782-789. (in Chinese)
- [10] GAO ZH H. Research and implimentation of control method for time grating rotary table with high precision [C]. *Proceedings of 2012 International Conference on Future Optical Materials and Circuit Design*, Xiamen, P. R. China: AMR, 2013: 135-138.
- [11] 高忠华,彭东林,陈锡侯. 时栅角位移传感器误差分离与建模方法研究[J]. 测控技术, 2014, 33(2): 1-3, 7.
GAO ZH H, PENG D L, CHEN X H. Study on the method of error separation and modeling for time grating angular displacement sensor [J]. *Measurement & Control Technology*, 2014, 33(2): 1-3, 7. (in Chinese)
- [12] GAO ZH H, ZHENG F Y, CHEN X H. Error analysis and method of calibration for linear time grating displacement sensor [J]. *SPIE*, 2013, 8759: 87594A-1-7.
- [13] 杨继森,何健,彭东林,等. 基于 STM32 的时栅转台高精度自动标定系统设计[J]. 传感器与微系

- 统,2014,33(3):107-109.
- YANG J S, HE J, PENG D L, *et al.*. Design of high precision automatic calibration system for time-grating turntable based on STM32 [J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2014, 33(3):107-109. (in Chinese)
- [14] 谢长文,范天泉,曹学东,等. 排列互比法用于测角时测量结果及测量误差的计算[J]. 计量学报, 1998,19(3):189-193.
- XIE CH W, FAN T Q, CAO X D, *et al.*. Computing method of measuring results and errors of arrange mutual analogy method for angle measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1998,19(3): 189-193. (in Chinese)
- [15] 袁祖荣,陈清清,李敬杰. 正多面棱体和多齿分度台角分度误差的互检[J]. 光电工程,2009,36(10): 90-93.
- QIU Z R, CHEN Q Q, LI J J. Mutual check of angular deviation for regular polygonal prism and precise angle dividing table [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009,36(10):90-93. (in Chinese)
- [16] ERNST A, JOHANNES H G. Angle measuring device;European, 0440833B1[P]. 1994-06-08.
- [17] PROBST R, WITTEKOPF R, KRAUSE M. The new PTB angle comparator [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(7):1059-1066.
- [18] WATANABE T., FUJIMOTO H, MASUDA T. Self-calibratable rotary encoder [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2005, 54(1): 240-245.
- [19] LU X D, GRAETZ R, AMIN-SHAHIDI D, *et al.*. On-axis self-calibration of angle encoders [J]. *CIRP: Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59:529-534.
- [20] LU X D. Self-calibration method and apparatus for on-axis rotary encoders: USA, 7840372B2 [P]. 2010-11-23.

作者简介:



高忠华(1972—),男,黑龙江富裕人,博士研究生,副教授,2008年于重庆理工大学获得硕士学位,主要从事测试技术与仪器、智能传感器的研究。E-mail: gzh@cqut.edu.cn

通讯作者:



陈锡侯(1976—),男,福建漳州人,教授,1999年、2004年、2007年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事几何量精密测量技术与传感器的研究。E-mail: cxh0458@cqut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)