

文章编号 1004-924X(2015)03-0794-09

圆感应同步器系统误差的动态提取与补偿

袁 辉*, 刘朝晖, 李治国, 崔 凯, 谢友金
(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 由于采用圆感应同步器的光电转台系统的精度取决于圆感应同步器的角位置测量精度, 故对圆感应同步器的系统误差进行了研究。分析了圆感应同步器系统误差的产生机理; 使用相关的实验装置对圆感应同步器的系统误差进行了动态的定量测量; 最后, 结合数据处理和误差机理, 确立了圆感应同步器的动态误差模型, 并结合误差模型对圆感应同步器的输出信号进行补偿。对补偿方法进行了实验验证, 结果显示: 实验中使用的 720 极 12 位圆感应同步器的动态角度测量精度由补偿前的 11.25" 提高到了 1.17", 角速度估计精度由修正前的 0.72(°)/s 提高到了 0.09(°)/s。这些结果表明提出的动态误差补偿方法能够显著提高圆感应同步器的动态测量精度, 满足光电转台指向控制系统的精度要求。

关键词: 圆感应同步器; 角位置误差; 角速度; 系统误差

中图分类号: TH741.2; TH824.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0794

Dynamic extracting and compensation of system error for rotary inductosyn

YUAN Hui*, LIU Zhao-hui, LI Zhi-guo, CUI Kai, XIE You-jin

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: yuanhui@opt.cn

Abstract: As the precision of a photo-turntable control system using rotary inductosyn depends on the dynamic angular position measuring precision of a rotary inductosyn, this paper explores the system error of the rotary inductosyn. The error mechanism of rotary inductosyn was analyzed, and the system error of the rotary inductosyn was quantitatively and dynamically measured by using an experimental platform. Finally, the system error model of the rotary inductosyn was put forward based on the data processing and error mechanism, and the output signals from the rotary inductosyn were compensated by the error model. The software compensation method was verified and the experimental results for the rotary inductosyn with 720 poles, 12 bits show that the dynamic angle measurement accuracy is improved from 11.25" to 1.17", while the angular velocity estimation accuracy is improved from 0.72(°)/s to 0.09(°)/s. The test results show that the proposed method improves the dynamic measuring accuracy of the rotary inductosyn significantly and satisfies the accuracy demands of photoelectric platform pointing control systems.

Key words: rotary inductosyn; angle error; angular velocity; systematic error

收稿日期: 2014-05-29; 修订日期: 2014-08-13.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA7087034)

1 引言

在光电经纬仪、数控转台等装置的控制测量系统中,角位置和角速度传感器的测量精度对系统的指向精度和指向稳定性起着至关重要的作用^[1-2]。圆感应同步器以其测量精度高、耐恶劣环境、寿命长、稳定可靠等一系列优点被广泛用于此类应用中。另外,感应同步器的角度信息也经常被微分以获得角速度和角加速度信息。虽然高精度圆感应同步器所提供的角度信号误差理论上可能很小,但是在实际应用中,由于设计的缺陷、安装精度和机械传动机构等的影响,圆感应同步器的角位置输出信号中包含了各种周期性和非周期性的系统误差,从而使其使用精度大打折扣。尤其是当感应同步器同时被用来提供角度和角速度信号时,由于数值微分对噪声具有放大效应,故需要复杂的滤波或估计算法来减小角速度估计噪声^[3-4],否则放大的噪声甚至可能导致系统无法工作。可见,不管是提供角位置信息还是角速度信息,圆感应同步器都需要具有良好的角位置测量精度。

对于圆感应同步器的误差机理,已有若干学术论文进行了研究。文献[5]从原理上分析了感应同步器一次谐波和二次谐波的产生原因,并设计了一次谐波硬件补偿电路。文献[6]使用23面体对圆感应同步器进行了静态标定。文献[7-8]通过静态测量分离了圆感应同步器的一次谐波和二次谐波误差,并采用相应的软硬件方法对感应同步器的位置误差进行了补偿。文献[9]使用精密光栅式光学分度头为基准,对一个180极,16 bit分辨率的圆感应同步器误差进行了数值分析法补偿。此外,文献[10-12]也对圆感应同步器的误差分离与补偿方法进行了研究,并取得了一定的效果。

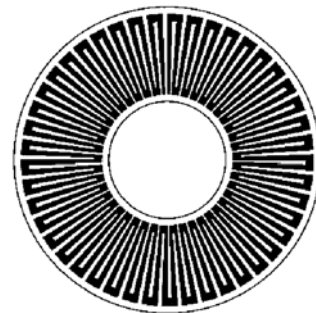
虽然文献[5]和文献[7]对圆感应同步器的误差进行了分析和补偿,但它们的标定都是在静态下进行的,受采样点数的限制,无法对感应同步器的高次谐波误差进行分析和补偿,也没有对圆感应同步器的动态误差特性进行分析。因此,为提高圆感应同步器的使用精度,本文采用相关实验装置对圆感应同步器的动态误差特性进行了定量测量,结合数据处理和误差机理,确立了圆感应同

步器的动态误差模型,并结合误差模型对感应同步器的输出信号进行补偿。

2 圆感应同步器系统误差来源

2.1 圆感应同步器的结构

圆感应同步器基于电磁感应原理把旋转角度转换成相应的电信号。它由转子和定子组成,其中转子上印制有连续的单相绕组,定子上印制有交替排列的分段绕组,各自串联形成正弦和余弦两相绕组。其转子和定子的结构如图1所示^[13]。



(a) 转子/连续绕组

(a) Rotor/continuous winding



(b) 定子/分段绕组

(b) Stator/sectional winding

图1 圆感应同步器结构

Fig.1 Inner structure of inductosyn transducer

2.2 圆感应同步器的工作方式

圆感应同步器有4种工作方式:分段绕组激磁鉴相、分段绕组激磁鉴幅、连续绕组激磁鉴相和连续绕组激磁鉴幅。这里以目前最为常见的连续绕组激磁鉴幅方式为例,设激磁电压为:

$$u_R = U_m \sin \omega t. \quad (1)$$

则分段绕组两相输出可分别表示为:

$$\begin{cases} u_{\cos} = \frac{U_m}{k_u} \cos \theta \cos \omega t \\ u_{\sin} = \frac{U_m}{k_u} \sin \theta \cos \omega t \end{cases} \quad (2)$$

若要确定旋转的电角度,分段绕组的两路输出还需进行放大、滤波、采样、AD 转换,以及求两路信号比值的反正切。对于 720 极(360 对极)的圆感应同步器,每个节距对应的机械角度为 1° 。实际中使用轴角数字转换芯片如 AD2S80A 完成信号的 AD 转换,AD 转换的细分位数可选为 10 位、12 位、14 位、16 位等,对应的角分辨率为 $\frac{\text{电角度周期}}{2^{\text{位数}}}$,如 720 极 12 位的圆感应同步器的角分辨率约为: $\frac{1^\circ}{2^{12}} = 2.4 \times 10^{-4} = 0.88''$ 。

2.3 圆感应同步器的误差机理

实际应用中,受绕组刻划精度,电路设计缺陷、安装偏心和倾斜以及使用环境等的影响,圆感应同步器很难达到理论的测角精度。理论上分段绕组的两相输出的幅值应当相同、相位相差 90° ,但实际上由于各种内外部因素的影响,它们不可能完全满足要求,这就会导致感应同步器的输出信号中包含输入信号的各次谐波误差。

下面就主要的谐波误差进行简要说明。根据文献[14]获知圆感应同步器的系统误差主要包括:零位误差、细分误差和信号处理误差。具体表现为一系列以整周为基波的低次谐波与一系列以极距为基波的高次谐波之和。其中,安装误差和随机刻线偏差引起低次谐波;信号处理电路引起的相位、幅值失配主要表现为高次谐波。例如,安装偏心引起的零位误差按照机械角度周期的一次正弦规律变化,安装倾斜引起的误差按电角度周期变化^[14];两相输出电势幅值不相等引起细分误差按照电角度二次正弦规律变化;分段绕组输出电势包含三、五次等谐波电势引起的细分误差按照电角度四次正弦规律变化。

对于 720 极的圆感应同步器,机械角度的一次谐波误差可表示为:

$$\Delta \alpha_{360} = \Delta A_{360} \sin \left[\frac{2\pi}{360} x + \Delta \varphi_{360} \right]. \quad (3)$$

电角度的一次谐波误差可表示为:

$$\Delta \alpha_1 = \Delta A_1 \sin(2\pi x + \Delta \varphi_1). \quad (4)$$

电角度的二次谐波误差可表示为:

$$\Delta \alpha_2 = \Delta A_2 \sin(4\pi x + \Delta \varphi_2). \quad (5)$$

电角度的 0.5 次谐波误差可表示为:

$$\Delta \alpha_{0.5} = \Delta A_{0.5} \sin(\pi x + \Delta \varphi_{0.5}). \quad (6)$$

在考虑以上各次谐波误差时,感应同步器的误差可表示为各次谐波误差之和:

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_{360} + \Delta \alpha_{0.5} + \Delta \alpha_1 + \Delta \alpha_2. \quad (7)$$

在实际转台的测角系统中,感应同步器的硬件设计安装一经完成就很难改变,因而通过软件方法对测角系统的误差进行补偿成为提高系统测量精度的一种非常有效的方法。本文旨在提出一种提取和分离圆感应同步器系统误差的可行方法,使用所确立的误差模型对系统误差进行动态补偿,提高圆感应同步器的使用精度。

3 系统误差建模补偿方法

3.1 实验装置

为提取圆感应同步器的系统误差模型,我们搭建了如图 2 所示的单轴旋转实验平台。在实验平台的旋转轴上,同时安装了高精度海德汉编码器,某型号圆感应同步器和一个光纤陀螺用于角度和角速度测量。

实验中所使用的各传感器的标称参数如下:海德汉角编码器的分辨率为 29 位,约合 $0.02''$,精度为 $0.4''(1\sigma)$;圆感应同步器为 720 极,12 位,分辨率为 $0.88''$,静态精度约为 $1.2''(1\sigma)$;光纤陀螺(FOG-98)零偏稳定性为 $0.05^\circ/\text{h}$,随机游走系数为 $0.005^\circ/\sqrt{\text{h}}$,标度因数非线性度为 $50 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。

实验中以海德汉角编码器的测量值为角度基准,以光纤陀螺的测量值为角速度基准,以验证感应同步器的测角测速性能。

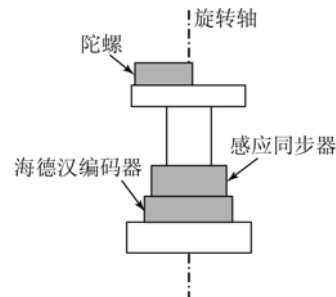


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental facilities

3.2 模型参数的确定

实验中在不同的运动状态下,对 3 个传感器进行同步采样。对采集的数据进行处理分析,确定感应同步器的误差模型。此处的采样频率为 500 Hz。

3.2.1 角位置误差与旋转速度的关系

为研究角位置误差与旋转速度的关系,使实验装置做近似正弦运动,并同步采样记录数据。分别以光纤陀螺的角速度信号和海德汉的角位置信号为基准,对所得到的实验数据进行处理。得到位置误差与角速度的关系曲线如图 3 所示。

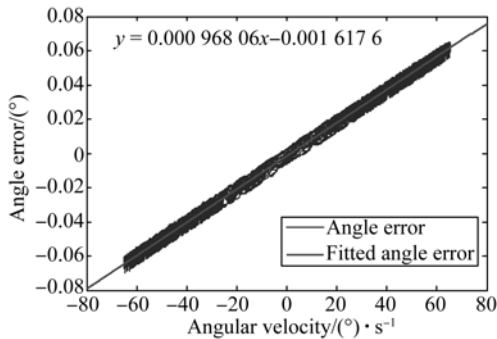


图 3 角位置误差与角速度的关系

Fig. 3 Angle position error varies with angular velocity

从图 3 中可以很明显发现,角位置误差与旋转角速度之间存在明显的线性关系,旋转速度越高,角位置误差越大。通过分析,这种误差主要来自于两方面,分别为圆感应同步器的电磁滞后效应和信号处理延迟。一方面,由于感应同步器是基于电磁感应原理工作的,因此它必然受到磁滞现象的影响,且角频率越大,这种影响越明显,表现为角位置误差会随角速度的增加而增大,使得感应同步器动态误差相对于静态误差明显增加^[14]。另一方面,实验中以 500 Hz 对海德汉编码器和圆感应同步器进行同步采样。但是各个传感器内部的信号处理电路的延迟不一致,故所采集到的编码器信号和感应同步器信号存在时差。因此,图中的关系是这两种误差共同影响的结果。在进行进一步处理之前,需要对其进行补偿。假设由于磁滞和信号处理造成的感应同步器的信号延迟为 Δt_i , 编码器的信号延迟为 Δt_h , 则所采集的两个传感器的信号时差为 $\Delta t = \Delta t_i - \Delta t_h$ 。假设转台以角速度 ω 运动,则由信号时差引起的角度测量误差为 $e_t = \omega \Delta t$, 其与旋转角速度成正比。对

所得到的误差曲线进行拟合,其曲线斜率约为 0.000 968 s,即为信号时差 Δt 。可见,只要令感应同步器的信号减去当前采样点的角速度与信号时差的乘积即可消除这种误差,这等效于对感应同步器的信号进行了线性外推,从而消除了信号不同步的影响。

3.2.2 角位置误差与绝对位置的关系

为了分析感应同步器的位置误差特性,分别对上述实验装置进行静态和速度约为 $6(^{\circ})/s$ 的匀速动态采样。采样得到的角位置误差如图 4 所示。

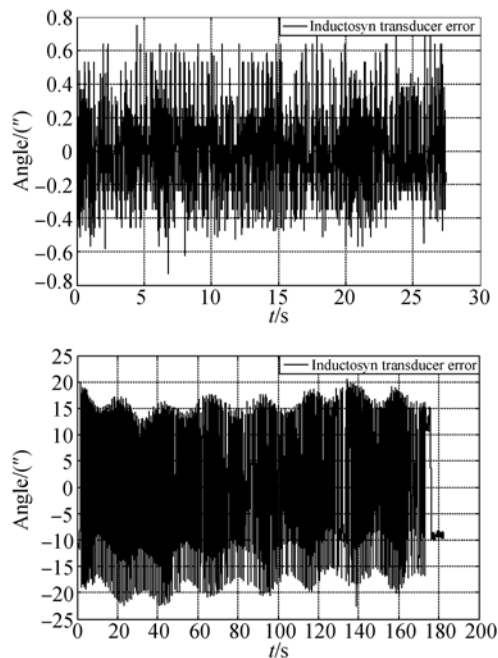


图 4 感应同步器静态和动态误差

Fig. 4 Static and dynamic errors of inductosyn transducer

从图 4 可以看出,相对于静止情况,动态情况的误差幅值显著增大,峰峰值由原来的约为 $1.2''$ 增加到了约为 $40''$ 。图 5 为对动态位置误差局部放大结果,由图 5 可以看出,位置误差呈现明显的周期性。为了确定这种位置误差与绝对位置的关系,把角位置进行均匀细分(每度 1 000 份),并用插值方法得到对应的角位置误差(如图 6 所示),再对其做傅里叶变换,可得到角位置误差的空间频率幅度谱,如图 7 所示。

从图 6 中可以直观地看出,位置误差在空间频率上存在明显的周期性,周期分量的周期主要分布在 0.25, 0.5, 1 和 2° 。考虑到感应同步器的

工作原理,这种周期性误差正是由于感应同步器输出的两路正弦信号幅值不相等、相位不正交造成的,周期分量的周期正好为磁激信号的各次谐波。

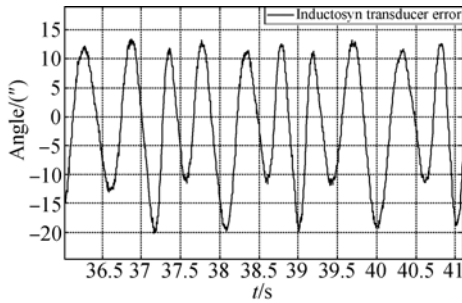


图 5 动态位置误差局部放大

Fig. 5 Local amplified of dynamic angle error

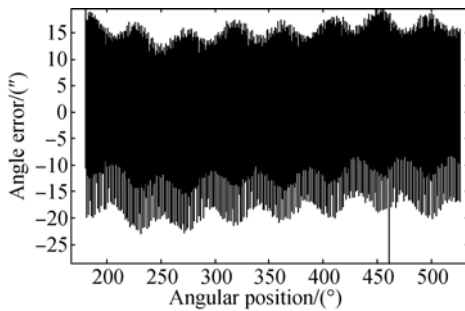


图 6 角位置误差与绝对位置的关系

Fig. 6 Relationship between angle position error and absolute position

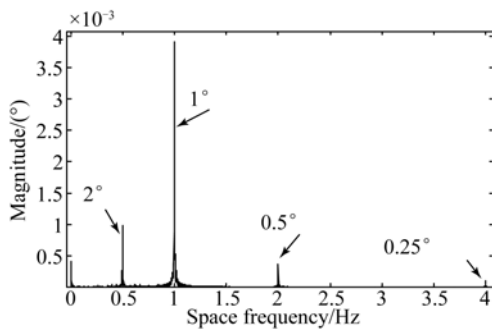


图 7 角位置误差空间频率-幅度谱

Fig. 7 Space frequency-magnitude spectra of angle error

根据 2.3 节圆感应同步器的误差机理,并针对图中最明显的 2,1 和 0.5° 3 种周期分量,建立了如下的位置误差模型:

$$f_m(x) = c_{0.5} \sin(4\pi x + \varphi_{0.5} + 4\varphi_0) + c_1 \sin(2\pi x + \varphi_1 + 2\varphi_0) + c_2 \sin(\pi x + \varphi_2 + \varphi_0) + c_0. \quad (8)$$

模型系数向量为:

$$C = [c_0, \varphi_0, c_{0.5}, \varphi_{0.5}, c_1, \varphi_1, c_2, \varphi_2]^T.$$

在 matlab 中使用非线性最小二乘对角位置误差按上述模型进行拟合,得到的模型系数向量为:

$$C = [0.002\ 96, -0.542\ 58, 0.000\ 42, 6.253\ 05, 0.004\ 15, 0, 0.000\ 10, 2.277\ 65]^T.$$

至此误差模型确定完毕。使用该模型对感应同步器的角度信号进行补偿后的误差曲线如图 8 所示。补偿前后角位置误差标准差分别为 $\sigma_{\text{before}} = 11.07''$ 和 $\sigma_{\text{after}} = 1.61''$,可见补偿后角位置误差降低为原来的 1/7。

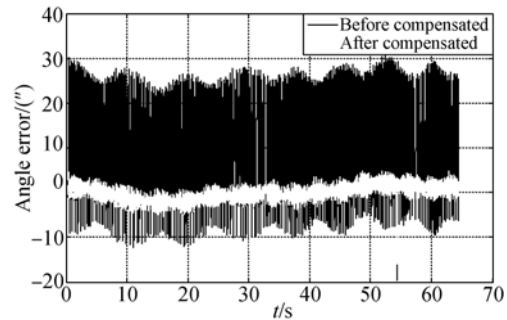


图 8 补偿前后的角位置误差

Fig. 8 Angle error before and after compensations

更进一步,可以注意到图 6 中的位置误差在幅度上还存在一个周期约为 45° 的误差分量,这恰好与感应同步器分段绕组的组数一致,因此对误差模型做进一步改进,可得到改进的误差模型:

$$f_m(x) = c_{0.5} \sin(4\pi x + \varphi_{0.5} + 4\varphi_0) + \left[c_1 + c_{45} \sin\left(\frac{2\pi}{45}x + \varphi_{45}\right) \right] \sin(2\pi x + \varphi_1 + 2\varphi_0) + c_2 \sin(\pi x + \varphi_2 + \varphi_0) + c_0. \quad (9)$$

模型系数向量为:

$$C = [c_0, \varphi_0, c_{0.5}, \varphi_{0.5}, c_1, \varphi_1, c_2, \varphi_2, c_{45}, \varphi_{45}]^T.$$

使用同样方法进行拟合,可得模型系数向量为:

$$C = [0.002\ 96, -0.542\ 55, 0.000\ 42, 6.253\ 51, 0.004\ 15, 0, 0.000\ 10, 2.277\ 65, 0.000\ 45, 1.142\ 14]^T.$$

使用上述模型对感应同步器的角度信号进行补偿后的误差曲线如图 9 所示。补偿前后角位置误差标准差分别为 $\sigma_{\text{before}} = 11.07''$ 和 $\sigma_{\text{after}} = 1.38''$,可见补偿后角位置误差约为原来的 1/8。

对补偿后的角位置误差进行空间频率变化,结果如图 10 所示。从图中可以看出,补偿前较为突出的 2,1 和 0.5° 3 种频率分量的误差已经消失。而 0.25° 周期的误差突显了出来,但其幅值

约为 $0.000\ 105^\circ$, 约合 $0.38''$, 已经低于感应同步器的角分辨率 $0.88''$, 与感应同步器的随机误差幅度相当, 因而再对其补偿已无意义。

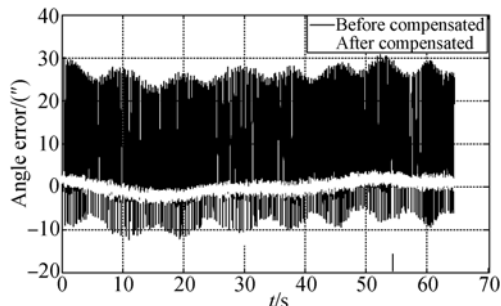


图 9 基于修正后误差模型的角位置误差

Fig. 9 Angle errors based on modified error model

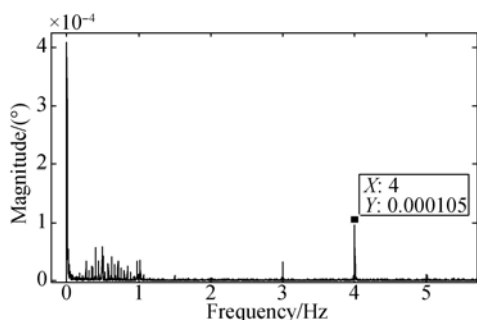


图 10 补偿后角度误差空间频率-幅度谱

Fig. 10 Frequency-magnitude spectra of angle error after compensation

综上, 根据该方法确立的感应同步器位置误差模型能够有效地补偿因电路设计和安装缺陷引起的角位置系统误差, 极大地提高了感应同步器的使用精度。

3.2.3 角误差模型参数与角速度的关系

3.2.2 只是在一定旋转速度下确定了误差模型的表达式, 为了使误差模型更好地适用于实际情况, 还需确定模型系数对旋转速度的敏感性。为此, 在不同旋转速度下对实验装置进行采样, 并对所得数据按式(4)的模型进行拟合, 得到误差模型系数与旋转速度的关系如表 1, 其中 c_0 为模型的常值部分, 它的取值不影响其他系数的取值, 为简化计算, 暂且取为 0。

由表 1 可以看出, 模型系数中除整体相位 φ_0 有明显的变化趋势外, 其他系数均受随机误差影响, 呈现为上下波动, 可认为模型系数与旋转速度无关, 这里以不同旋转速度的系数均值作为模型系数的估计值。对于整体相位 φ_0 , 其与安装速度的关系如图 11 所示。

对 φ_0 随角速度的变化进行拟合, 可得 φ_0 与角速度 v_a 的关系为:

$$\varphi_0 = 0.002\ 98 v_a - 0.543\ 12. \quad (10)$$

表 1 误差模型系数与旋转角速度的关系

Tab. 1 Relationship between error model coefficients and rotation rates

(°)/s	φ_0	$c_{0.5}$	$\varphi_{0.5}$	c_1	φ_1	c_2	φ_2	c_{45}	φ_{45}
-40	-0.658 08	0.000 47	6.430 12	0.004 18	0.000 07	0.001 08	2.277 78	0.000 45	1.142 10
-35	-0.652 53	0.000 48	6.426 09	0.004 08	0.000 07	0.001 08	2.277 70	0.000 45	1.142 09
-30	-0.634 45	0.000 47	6.447 95	0.004 10	0.000 07	0.001 07	2.277 62	0.000 45	1.142 02
-20	-0.602 24	0.000 41	6.444 22	0.004 28	0.000 19	0.001 03	2.277 63	0.000 45	1.142 16
-18	-0.597 68	0.000 45	6.411 88	0.004 15	0.000 03	0.001 13	2.277 66	0.000 45	1.142 23
-12	-0.578 47	0.000 42	6.380 99	0.004 32	-0.000 01	0.001 01	2.277 79	0.000 45	1.141 95
-6	-0.561 89	0.000 42	6.368 70	0.004 25	0.000 02	0.001 00	2.277 51	0.000 45	1.142 04
-2	-0.552 86	0.000 43	6.383 81	0.004 08	0.000 17	0.001 00	2.277 71	0.000 45	1.141 97
2	-0.533 21	0.000 46	6.382 75	0.003 97	0.000 11	0.000 99	2.277 67	0.000 45	1.141 92
6	-0.523 38	0.000 43	6.366 15	0.004 16	0.000 09	0.001 00	2.277 92	0.000 46	1.142 17
12	-0.504 32	0.000 41	6.355 70	0.004 28	-0.000 16	0.001 00	2.277 55	0.000 46	1.142 16
15	-0.500 18	0.000 39	6.353 84	0.004 14	0	0.001 12	2.277 74	0.000 45	1.142 05
20	-0.474 25	0.000 41	6.358 09	0.004 27	-0.000 18	0.001 05	2.277 78	0.000 46	1.142 08
30	-0.455 86	0.000 39	6.356 39	0.004 21	-0.000 04	0.001 12	2.277 54	0.000 45	1.142 19
35	-0.440 19	0.000 38	6.355 62	0.004 27	0.000 04	0.001 12	2.277 73	0.000 45	1.142 05
40	-0.428 33	0.000 39	6.359 24	0.004 25	0.000 09	0.001 12	2.277 66	0.000 46	1.142 16

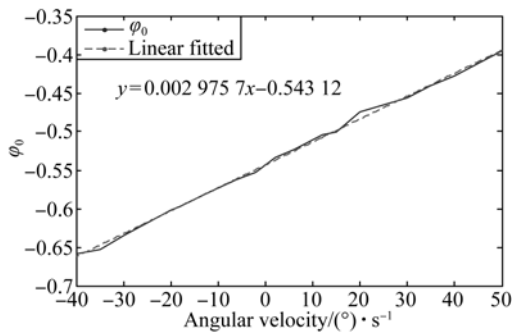


图 11 整体相位与角速度的关系

Fig. 11 Overall model phase ν s angular velocity

通过以上过程,已经确定了圆感应同步器的误差模型及系数值。根据表 1,误差模型系数可表示为:

$$C = [0, 0.002\ 98\ v_a - 0.543\ 12, 0.000\ 42, 6.384\ 67, 0.004\ 19, 0.000\ 04, 0.001\ 06, 2.277\ 69, 0.000\ 45, 1.142\ 08, 21.941\ 18, 2.764\ 71]^T \quad (11)$$

3.2.4 方法验证

为验证式(9)和式(11)所确立的误差模型的适用性,对实验装置进行了近似正弦运动采样,结果如图 12 所示。

使用由式(9)和式(11)所确立的误差模型对正弦运动的感应同步器信号进行补偿,误差模型的拟合结果如图 13。可以看出,模型的拟合结果与实际误差的一致性非常好。使用该拟合结果对系统的角度输出进行补偿,补偿前后的误差曲线分别如图 14 和图 15 所示。补偿前后的角度误差标准差分别为 $\sigma_{a\text{-before}} = 11.25''$ 和 $\sigma_{a\text{-after}} = 1.17''$ 。补偿前后的角速度误差标准差分别为 $\sigma_{v\text{-before}} = 0.72(^{\circ})/s$ 和 $\sigma_{v\text{-after}} = 0.09(^{\circ})/s$ 。

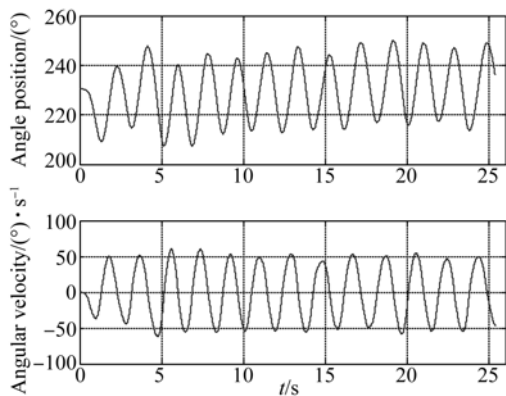


图 12 正弦运动的角位置和角速度

Fig. 12 Angular position and angular velocity of sine motion

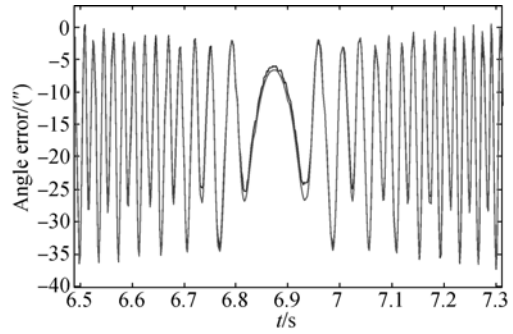


图 13 角位置误差和误差模型拟合结果

Fig.13 Fitted results of angle error and error model

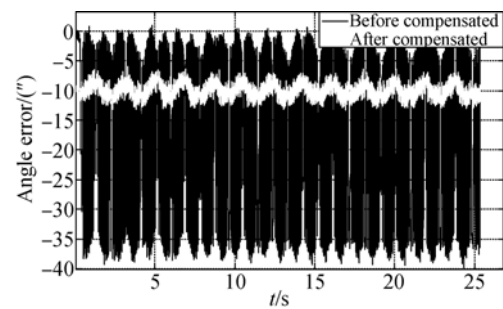


图 14 补偿前后的角位置误差

Fig.14 Angle errors before and after compensations

可以看出,通过采用文中的方法对感应同步器的系统误差进行建模补偿后,极大地提高了感应同步器的角位置测量精度和角速度估计精度。角速度为 $-50 \sim 50(^{\circ})/s$ 时,在不进行随机误差处理的情况下,感应同步器的角位置测量精度已经从约 $11.25''(1\sigma)$ 下降到了 $1.17''(1\sigma)$,与所采用的感应同步器的理论分辨相当。而同样在未对系统的随机误差进行处理的情况下,该感应同步器的角位置估计精度已经由原来的 $0.72(^{\circ})/s(1\sigma)$ 下降到了 $0.09(^{\circ})/s(1\sigma)$ 。感应同步器的角位置和角速度测量误差得到了极大地提高。

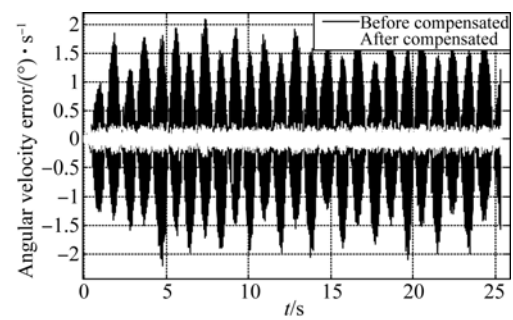


图 15 补偿前后的角速度误差

Fig. 15 Angular velocity errors before and after compensations

4 结 论

本文首先从原理上分析了圆感应同步器的角位置误差机理;其次,使用文中试验装置对圆感应同步器的角位置误差进行了动态测量;再次,通过对测量数据的分析,建立了圆感应同步器的角位置误差模型;最后,使用所确立的误差模型对圆感

应同步器的系统误差进行了软件补偿,并对补偿方法进行了实验验证。

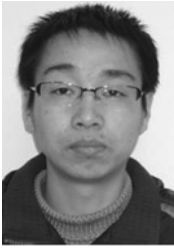
理论和实践均证明,文中所提方法能够显著减小圆感应同步器角位置测量输出的系统误差,有效提高光电转台的动态测角精度。同时,由于文中所建立的误差模型具有普遍意义,该方法具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 曾鸣,王忠山,苏宝库. 精密测试转台测角系统研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(2):167-169.
- ZENG M, WANG ZH SH, SU B K. Study on angular measuring system for the precision testing turntable [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(2): 167-169. (in Chinese)
- [2] 张宇翔,郜宇鹏,王海兵. 圆感应同步器发展综述[J]. 企业技术开发,2010,29(18):101-102.
- ZHANG Y X, GAO Y P, WANG H B. The development review of inductosyn [J]. *Technological Development of Enterprise*, 2010, 29(18): 101-102. (in Chinese)
- [3] MERRY R J E, VAN M J G de MOLENGRAFT, STEINBUCH M. Velocity and acceleration estimation for optical incremental encoders [J]. *Mechatronics*, 2009,20(2010):19-26.
- [4] VERSCHUREN T A C. *Extracting more accurate position and velocity estimations using time stamping* [D]. Eindhoven University of Technology, 2006.
- [5] 姜莉娜,朱革,王先全,等. 感应同步器测角系统短周期误差的研究及软件补偿[J]. 计算机测量与控制,2010,18(8):1730-1732.
- LOU L N, ZHU G, WANG X Q, *et al.*. Error research and software compensation of inductosyn angle measuring system [J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(8): 1730-1732. (in Chinese)
- [6] 陈希军,任顺清. 感应同步器测角误差的自动化检测与补偿[J]. 电机与控制学报,2010,14(4):41-45.
- CHEN X J, REN SH Q. Automatic measurement and compensation of inductosyn angular displacement error [J]. *Electric Machines and Control*, 2010, 14(4): 41-45. (in Chinese)
- [7] 任顺清. 圆感应同步器测角误差的分离技术[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):92-94.
- REN SH Q. The angle-measuring error separation technology of round inductosyn [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(4): 92-94. (in Chinese)
- [8] WANG X Q, WU M, ZHU G, *et al.*. The error analysis and harmonic wave correction of inductosyn [C]. *2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 2010: 358-361.
- [9] 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):52-55.
- LIU CH J, QI M, ZOU J B. Error modeling of inductosyn angle measuring system [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(9): 52-55. (in Chinese)
- [10] 倪国芬. 一种高精度动态测角系统研究及实现[J]. 航空精密制造技术,2013,49(2):18-20.
- NI G F. Research and application in high precision dynamic angle measurement system [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2013, 49(2): 18-20. (in Chinese)
- [11] 潘文贵,付晶,朱钰,等. 感应同步器测角系统的电路设计与软件补偿[J]. 科学技术与工程,2012,12(22):5484-5488.
- PAN W G, FU J, ZHU Y, *et al.*. Circuit design and software compensation of inductosyn angle measuring system [J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(22): 5484-5488. (in Chinese)
- [12] 朱梦龙. 背靠背感应同步器测角系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013,43-55.
- ZHU M L. *Research on Back to Back Inductosyn Angle Measuring System* [D]. Harbin: Harbin In-

- stitute of Technology, 2013, 43-55. (in Chinese)
- [13] 鲍茂然. 感应同步器精密测角技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013, 8-28.
- BAO M R. *Research on technologies of precise angle measurement based on inductosyn transducer* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013, 8-28. (in Chinese)

作者简介:



袁 辉(1987—),男,陕西富平人,博士研究生,主要从光电转台精密测角系统,光纤陀螺精密测角,惯性仪器技术及应用方面的研究。E-mail: yuanhui@opt. cn

- [14] 石治国,衣同胜,齐凤梅. 圆感应同步器数显表检测方法研究 [J]. 光学技术, 2006, 32(增刊): 383-385.
- SHI ZH G, YI T SH, QI F M. Research of the digital readout instrument testing ways based on the round inductosyn [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(Suppl): 383-385. (in Chinese)

导师简介:



刘朝晖(1965—),男,陕西西安人,研究员,博士生导师,1987年毕业于浙江大学光学仪器与工程学系摄影仪器与工程专业,主要从事光学工程学科的研究。E-mail: lzh@opt. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)