

文章编号 1004-924X(2019)10-2180-12

## 双角度编码器超精密转台测角误差校准

焦 扬<sup>1</sup>, 黄 明<sup>1,2</sup>, 刘品宽<sup>1\*</sup>, 李梦阳<sup>1,2</sup>, 秦代成<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;  
2. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 为了提高超精密角度计量转台的测量精度, 对转台所用编码器分度误差与细分误差的校准展开研究。首先, 介绍了转台的结构, 设计了方便进行相互比对的双角度编码器测角系统并描述了其多读数头布置方式。然后, 基于直接比较法与自校准法进行了双编码器分度误差的快速、高精度校准。最后, 借助精密电容式位移传感器测量系统, 利用比较法检测了两套编码器各读数头的单信号周期测量误差。校准结果显示: 采用双读数头均布的第一套编码器的分度误差为  $\pm 0.27''$ , 细分误差在  $\pm 0.1''$  以内; 基于四读数头均布方式进行测量的第二套编码器分度误差为  $\pm 0.17''$ , 细分误差在  $\pm 0.2''$  以内; 两套编码器的测量精度皆为亚角秒级。双编码器相互比对的校准方式有助于对转台的测角误差进行全面、准确地评估。

**关键词:** 精密转台; 角度编码器; 分度误差; 细分误差; 角度校准

**中图分类号:** TB922; TH712 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192710.2180

## Calibration of angular errors of high-precision rotary table with two-angle encoders

JIAO Yang<sup>1</sup>, HUANG Ming<sup>1,2</sup>, LIU Pin-kuan<sup>1\*</sup>, LI Meng-yang<sup>1,2</sup>, QIN Dai-cheng<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
2. Institute of Machinery Manufacturing Technology, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)  
\* Corresponding author, E-mail: pkliu@sjtu.edu.cn

**Abstract:** To improve the accuracy of a high precision angle measuring table, calibrations of angle encoders of the rotary table to determine both graduation and interpolation errors were performed. First, the structure of the rotary table was introduced, including the angular measuring system with two angle encoders and the arrangements of the scanning heads. Then, graduation errors of the two encoders were calibrated using the direct comparison and self-calibration methods. Finally, with the aid of capacitive displacement sensors, the position error within one signal period (i. e., the interpolation error) for each scanning head of the encoders was investigated using the direct comparison method. Calibration results indicate that for the first angle encoder with two scanning heads arranged at intervals of  $180^\circ$ , the graduation and interpolation errors are within  $\pm 0.27$  and

**收稿日期:** 2019-04-28; **修订日期:** 2019-05-21.

**基金项目:** 国家科学挑战计划资助项目 (No. JCKY2016212A506-0105); 中国工程物理研究院超精密加工技术实验室重点基金项目 (No. K1065); 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项 (No. 2016ZX04002007-002)

approximately  $\pm 0.1$  arcsec, respectively. For the second encoder, which uses an average value of four heads arrange at intervals of  $90^\circ$  as the measurement value, the graduation and interpolation errors are within  $\pm 0.17$  and approximately  $\pm 0.2$  arcsec, respectively. Both angle encoders have a measuring accuracy at a sub-arcsec level. The manner in which the two angle encoders calibrate each other is helpful for complete and accurate determination of the rotary table's angular errors.

**Key words:** rotary table; angle encoder; graduation error; interpolation error; angle calibration

## 1 引 言

精密转台是精密工程领域中用于角度测量的关键装置,被广泛应用于超精密机床、精密定位系统等高端装备中。近年来,微纳米技术和精密工程的发展对测角转台的性能指标提出更高要求,集成多种关键技术的高精度新型转台已成为研究热点<sup>[1]</sup>。精密转台的角度测量精度受编码器刻线误差、安装精度、主轴误差运动以及环境条件等多种因素的影响。对转台测角误差进行校准是评估并提升转台精度的重要措施。

以角度编码器为核心部件的转台可以同时具备测量范围大、高分辨率、高精度等特点。多国计量院研发了代表该国最先进测角水平的超精密转台,并将其用作国家角度计量基准装置。德国联邦物理技术研究院(PTB)的角度基准 WMT 220,是目前世界上精度最高的计量转台。该转台以气浮轴承为支承,以布置有 16 个读数头(8 个测量读数头、8 个校准读数头)的高精度增量式编码器为位置反馈,可以实现  $0.01''(k=2)$  以内的测量不确定度<sup>[2]</sup>。此外,日本、韩国、土耳其、意大利等国的角度计量转台在轴系设计、测量方案(单光栅多读数头或多光栅系统)、驱动装置等方面也各具创新之处<sup>[3-6]</sup>。我国精密测角转台的研究近几年也取得了一定的成果<sup>[7-8]</sup>,但与国际先进水平相比仍然存在较大差距。

精密转台的测角误差主要包含分度误差和细分误差<sup>[9]</sup>。分度误差的主要成分是周期为  $360^\circ/n$  ( $n$  为正整数)的低频误差。分度误差的校准方法有很多。当参考标准的精度明显高于被测转台时,可采用直接比较法进行校准。当被测转台与陪检设备的精度相当时,可采用排列互比法同时分离出二者的分度误差<sup>[10]</sup>。此外,角度编码器的

自校准法由于具备不需要借助外部参考标准、可实现快速实时校准等优点,近年来也得到广泛的应用。常用的两种自校准法为等分平均法(Equal Division Averaged method)和傅里叶法(Fourier method)。等分平均法通过将  $N$  个读数头均匀布置在圆光栅周围,可以校准得到除了  $N$  的整数倍次谐波成分以外的分度误差曲线<sup>[3]</sup>;为了提高校准精度,也可以将 2 组或 3 组数量互质的读数头组合均布<sup>[4, 11-12]</sup>;但该法所需读数头个数过多。傅里叶法使用离散傅里叶变换及反变换,通过对读数头间的相对测角差值,结合传递函数,计算出编码器的分度误差<sup>[13]</sup>。相比等分平均法,傅里叶法对读数头任意布置情况都适用,因而存在优化布置方案<sup>[14]</sup>。另外,主轴误差运动也会影响读数头角度测量值,在高精度应用场合中,这一影响不可忽视<sup>[15]</sup>。基于傅里叶法,采用四读数头优化布置方案可以实现编码器分度误差与主轴径向误差运动的有效分离<sup>[16]</sup>。

编码器细分误差又称为单信号周期位置误差,是在对圆光栅基本信号周期进行细分以获得更高分辨率的过程中产生的,是转台测角误差的另一重要部分<sup>[17]</sup>。在精密转台进行自准直仪校准等小角度测量任务时,细分误差的影响尤其不可忽视。目前,一些学者已经开展了细分误差的分析、校准及补偿等研究工作,并得出了一些有价值的结论<sup>[18-20]</sup>。细分误差的校准可以使用比较法,即通过与更高精度的角度编码器或自准直仪直接比较测得(忽略参考标准的误差)。另外,对于细分误差较小的测角装置,国外 PTB 等计量机构基于误差分离思想,采用剪切技术(Shearing technique)实现了两台测角装置细分误差的准确分离<sup>[21]</sup>。国内针对高精度角度编码器细分误差校准的研究文献相对较少。

基于自研超精密角度计量转台<sup>[1]</sup>,并在其上

再加装一套多读数头角度编码器,构成双编码器转台测角系统,本文针对该系统进行测角误差校准。文中工作为研制下一代更高精度的测角转台提供了理论与实验基础。

## 2 超精密转台系统设计

图 1 为自研超精密角度计量转台系统结构。转台选用静压气浮轴承作为支承元件,以保证转台径向误差运动小于  $0.1 \mu\text{m}$ ;选用 4 个压电陶瓷电机(Nanomotion HR2)作为驱动元件<sup>[22]</sup>、采用 ACS 运动控制器进行运动控制<sup>[23]</sup>,通过多模式切换的控制策略既可以实现电机驱动回转轴以最高  $14 \text{ r/m}$  的速度旋转,又可以实现重复性优于  $0.01''$  的超精密定位。测量系统选用的是含两个读数头( $P_1, P_2$ )的高精度角度编码器海德汉 ERP 880(以下简称编码器 I)<sup>[17]</sup>。两读数头对径安装平均读数可以消除主轴径向运动对测角值的影响以及光栅分度误差中的奇次谐波成分(特别是由光栅安装偏心造成的一次谐波)。该编码器光栅中心线平均直径为  $126 \text{ mm}$ ;信号周期数为  $180\,000/\text{圈}$ ,即基本分辨率为  $7.2''$ ;输出信号再经过  $4\,096$  倍数字细分,最终得到细分后的分辨率约为  $0.0018''$ ;标称光栅精度为  $\pm 0.9''$ ,标称单信号周期位置误差(即细分误差)为  $\pm 0.1''$ 。此外,为深入研究含多个读数头角度编码器的测量性能,同时为克服多面棱体、多齿分度台等器件在进行转台校准时测量点数有限的问题,本研究又在该单轴转台上加装了一套含 7 个读数头的高精度编码器海德汉 ERA 4282 C(简称编码器 II)。该编码器光栅鼓外径为  $331.31 \text{ mm}$ ;信号周期数为  $52\,000/\text{圈}$ ,即基本分辨率约为  $24.92''$ ;经过  $4\,096$  倍细分后,细分后分辨率约为  $0.006''$ ;标称光栅精度为  $\pm 1.7''$ ,标称单信号周期位置误差为  $\pm 0.3''$ 。

为减小环境因素对测量精度的影响,整套系统置于洁净间中,同时将转台安装在大理石底座上并整体置于隔振地基上以减少外界振动的影响,并将环境温度波动范围控制在  $\pm 0.2 \text{ K}$  以内。

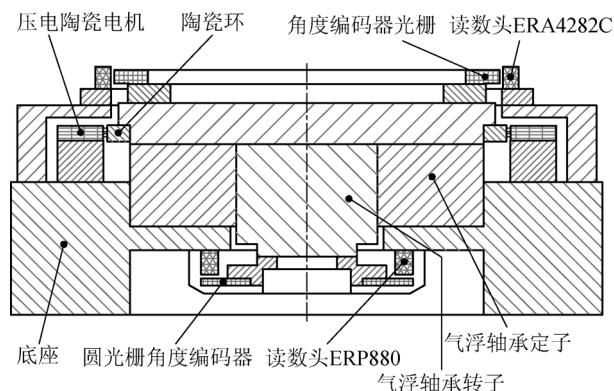


图 1 超精密转台结构示意图

Fig. 1 Schematic view of precision rotary table

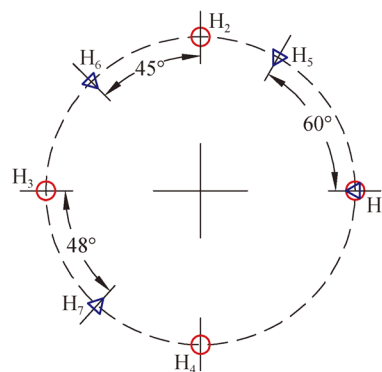


图 2 角度编码器 ERA 4282 C 读数头布置方案

Fig. 2 Arrangement of scanning heads of ERA 4282 C

图 2 为编码器 II 的读数头布置方案。该方案综合考虑了转台角度测量任务与光栅分度误差自校准功能。其中,读数头  $H_1$  为参考读数头,校准用读数头  $H_5, H_6$  和  $H_7$  相对  $H_1$  的角度间隔分别为  $60^\circ, 135^\circ$  和  $228^\circ$ ,在这种布置方式下,可以使用四读数头误差分离算法精确校准得到包含前 100 次谐波的分度误差<sup>[16]</sup>。而当进行角度测量时,使用以  $90^\circ$  为角度间隔沿圆周方向均匀分布的 4 个读数头  $H_1, H_2, H_3$  和  $H_4$ ;四读数头读数平均值既可以消除回转轴径向运动的影响,又可以消除分度误差中除 4 及 4 的倍数次以外剩余所有的谐波成分,能够显著提升测角精度。当然,使用误差补偿技术将校准得到的分度误差补偿到系统中可以进一步提高测量精度。

## 3 分度误差校准

### 3.1 校准原理

精密转台进行角度测量时,除实际旋转角度

外,读数头的读数值还受光栅分度误差、主轴误差运动以及编码器细分误差等因素的影响。以图 2 中编码器 II 读数头  $H_k$  为例,其读数值可以概括为如下式所示的测量模型<sup>[16,24]</sup>:

$$H_k(\theta) = \theta + \varepsilon_H(\theta + \alpha_k) + \frac{1}{R_H} [x_H(\theta) \sin \alpha_k - y_H(\theta) \cos \alpha_k] + \psi_{Hk}(\theta), \quad (1)$$

其中: $\theta$ 为实际旋转角度, $H_k(\theta)$ 为读数头  $H_k$  的读数值, $\alpha_k$ 为读数头的角度位置,即读数头  $H_k$  与  $H_1$  的夹角( $\alpha_1 = 0$ ); $\varepsilon_H(\theta)$ 为编码器 II 光栅分度误差,不同角度位置处的读数头测得的分度误差存在一个相位偏移; $R_H$ 为光栅的半径, $x_H(\theta)$ , $y_H(\theta)$ 分别表示回转轴沿 X, Y 方向的径向误差运动, $[x(\theta) \sin \alpha - y(\theta) \cos \alpha]/R$ 即径向误差运动对读数头测角值的影响; $\Psi_{Hk}(\theta)$ 反映了读数头的不一致性对测量结果的影响,这种不一致性由多种误差因素引起,包括读数头制造公差、装调误差以及细分误差等。

类似地,编码器 I 读数头  $P_k$  ( $k=1, 2$ ) 的读数值为:

$$P_k(\theta) = \theta + \varepsilon_P(\theta + \beta_k) + \frac{1}{R_P} [x_P(\theta) \sin \beta_k - y_P(\theta) \cos \beta_k] + \psi_{Pk}(\theta), \quad (2)$$

其中: $\beta_1 = 0, \beta_2 = \pi$ 。需要注意的是在主轴倾斜误差运动的影响下,不同轴向位置处的径向误差运动值亦有所不同,因此  $x_H(\theta) \neq x_P(\theta), y_H(\theta) \neq y_P(\theta)$ 。

分度误差是光栅精度的表征,实际应用时也与光栅安装状态有关(光栅安装偏心、倾斜等因素造成的测角误差也符合分度误差模型,因此一般也视为分度误差的一部分)。通常情况下,分度误差是导致测角误差的主要因素;在精密应用场合中主轴误差运动的影响也需仔细评估;读数头不一致性  $\Psi(\theta)$ 属于高频误差,在进行整周大范围角度测量或者测角间隔为信号周期整数倍时通常可以忽略。

本研究将 4 个读数头  $H_1$  至  $H_4$  的读数平均值作为编码器 II 的测角值,通过式(1)可得:

$$H(\theta) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 H_k(\theta) = \theta + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \varepsilon_H(\theta + \alpha_k) + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \psi_{Hk}(\theta) = \theta + \varepsilon'_H(\theta) + \psi'_H(\theta), \quad (3)$$

其中: $\alpha_k = (k-1)\pi/2$ ;由于 4 个读数头均布安装,读数平均值消除了径向误差运动的影响。光栅分

度误差  $\varepsilon_H(\theta)$  具有周期性,可以用傅里叶级数来表示:

$$\varepsilon_H(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F_H(n) e^{in\theta}, \quad (4)$$

其中: $N$ 为分度圆等分角的数目, $F_H(n)$ 为  $\varepsilon_H(\theta)$  的傅里叶系数。则式(3)中合成分度误差  $\varepsilon'_H(\theta)$  的傅里叶系数  $F'_H(n)$  可以表示为:

$$F'_H(n) = \frac{1}{4} F_H(n) \left( \sum_{k=1}^4 e^{in\pi(k-1)/2} \right) = \begin{cases} F_H(n) (n = 4, 8, 12, \dots) \\ 0, \text{otherwise} \end{cases}. \quad (5)$$

因此,四读数头平均读数既消除了主轴径向运动的影响,又消除了分度误差中除 4 及 4 的倍数次谐波以外的剩余所有谐波成分,大大提升了测角精度。编码器 II 测角值  $H(\theta)$  可作为参考值来检测其它测角器具。

同理,编码器 I 的测角值为两读数头  $P_1$  和  $P_2$  的读数平均值:

$$P(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 P_k(\theta) = \theta + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \varepsilon_P(\theta + \beta_k) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \psi_{Pk}(\theta) = \theta + \varepsilon'_P(\theta) + \psi'_P(\theta), \quad (6)$$

式中  $\varepsilon'_P(\theta)$  只包含编码器 I 光栅分度误差中的偶数次谐波成分。

本文拟采用直接比较法与自校准法进行分度误差的校准。

### 3.1.1 直接比较法

当被检设备的精度明显低于外部参考标准时,可采用直接比较法进行快速校准。

本文首先以编码器 I 测角值  $P(\theta)$  为参考来校准编码器 II 各读数头测角误差,然后以编码器 II 测角值  $H(\theta)$  为标准检测编码器 I 两读数头的测角误差:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Hk}(\theta) &= H_k(\theta) - P(\theta) = \\ \varepsilon_H(\theta + \alpha_k) &+ \frac{1}{R_H} [x_H(\theta) \sin \alpha_k - y_H(\theta) \cos \alpha_k] + \\ \psi_{Hk}(\theta) &- \varepsilon'_P(\theta) - \psi'_P(\theta), \quad (7) \\ \varepsilon_{Pk}(\theta) &= P_k(\theta) - H(\theta) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_P(\theta + \beta_k) &+ \frac{1}{R_P} [x_P(\theta) \sin \beta_k - y_P(\theta) \cos \beta_k] + \\ \psi_{Pk}(\theta) &- \varepsilon'_H(\theta) - \psi'_H(\theta). \quad (8) \end{aligned}$$

由式(7)、式(8)可知,校准得到的读数头测角误差中包含参考标准的相关误差。但是,通常情况下式(7)、式(8)各分项中光栅分度误差占比最

大,即读数头测角误差主要成分为所对光栅的分度误差,有:

$$\begin{aligned}\epsilon_{Hk}(\theta) &\approx \epsilon_H(\theta + \alpha_k), \\ \epsilon_{Pk}(\theta) &\approx \epsilon_P(\theta + \beta_k).\end{aligned}\quad (9)$$

当然,如果将参考标准的分度误差  $\epsilon'(\theta)$  事先校准出来并进行误差补偿,可以进一步提升校准精度。

此外,直接比较两套编码器的测角值能够更直观地观测两者的性能差异:

$$d(\theta) = H(\theta) - P(\theta) = \epsilon'_H(\theta) - \epsilon'_P(\theta) + [\psi'_H(\theta) - \psi'_P(\theta)]. \quad (10)$$

读数头不一致性带来的误差项属于高频误差,可以通过滤除高次谐波的方式予以消除。因此,对式(10)进行滤波可以进一步得到两编码器合成分度误差的相对差值。

### 3.1.2 自校准法

本文基于傅里叶法进行分度误差的自校准。不考虑主轴误差运动影响的基础自校准法的原理见文献[13-14]。在超精密测试场合中考虑主轴误差运动的影响时,采用基于优化布置的四读数头误差分离技术可以实现分度误差与误差运动的有效分离<sup>[16]</sup>,其基本原理简要概述如下。

通过式(1)可以求得图 2 中读数头  $H_k$  相对于  $H_1$  的测角差值:

$$\delta_{k1}(\theta) = H_k(\theta) - H_1(\theta) = \epsilon_H(\theta + \alpha_k) - \epsilon_H(\theta) + \frac{1}{R_H} [x_H(\theta) \sin \alpha_k - y_H(\theta) (\cos \alpha_k - 1)], \quad (11)$$

式中已滤除了读数头不一致性的影响。在消除实际旋转角度  $\theta$  后,上式仍包含 3 个未知参数 ( $\epsilon_H, x_H, y_H$ ),因此需要 3 组测角差值:  $\delta_{51}, \delta_{61}, \delta_{71}$ 。这 3 组差值加权求和可以消除径向误差运动的影响:

$$\delta(\theta) = a_1 \delta_{51}(\theta) + a_2 \delta_{61}(\theta) + a_3 \delta_{71}(\theta), \quad (12)$$

式中,加权系数  $a_1, a_2$  以及  $a_3$  应当满足:

$$\begin{aligned}a_1 \sin \alpha_5 + a_2 \sin \alpha_6 + a_3 \sin \alpha_7 &= 0, \\ a_1 (\cos \alpha_5 - 1) + a_2 (\cos \alpha_6 - 1) + a_3 (\cos \alpha_7 - 1) &= 0.\end{aligned}\quad (13)$$

求解式(13)可以得到如下表达式:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} \sin(\alpha_6 - \alpha_7) - \sin \alpha_6 + \sin \alpha_7 \\ \sin(\alpha_7 - \alpha_5) - \sin \alpha_7 + \sin \alpha_5 \\ \sin(\alpha_5 - \alpha_6) - \sin \alpha_5 + \sin \alpha_6 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中  $C$  为任意常数。为方便起见,本文取  $C=1$ 。

当移除径向误差运动的影响后,使用离散傅里叶变换,式(12)可以表示为:

$$E(n) = [a_1 (e^{i n \alpha_5} - 1) + a_2 (e^{i n \alpha_6} - 1) + a_3 (e^{i n \alpha_7} - 1)] F_H(n) = W(n) F_H(n), \quad (15)$$

其中:  $E(n), F_H(n)$  分别为  $\delta(\theta)$  和  $\epsilon_H(\theta)$  的傅里叶系数,  $W(n)$  为由  $F_H(n)$  到  $E(n)$  的传递函数。给定  $E(n)$  和  $W(n)$  后,分度误差的傅里叶系数  $F_H(n)$  便唯一确定,进而可通过离散傅里叶逆变换求得分度误差:

$$\epsilon_H(\theta) = IDFT(F_H(n)) = IDFT(E(n)/W(n)). \quad (16)$$

将求得的  $\epsilon_H(\theta)$  代入式(11)中可以进一步得到径向误差运动值  $x_H(\theta)$  和  $y_H(\theta)$ :

$$\begin{aligned}x_H(\theta) &= [A(\theta) (\cos \alpha_6 - 1) - B(\theta) (\cos \alpha_5 - 1)] / a_3, \\ y_H(\theta) &= [A(\theta) \sin \alpha_6 - B(\theta) \sin \alpha_5] / a_3,\end{aligned}\quad (17)$$

其中:

$$\begin{aligned}A(\theta) &= R_H (\delta_{51}(\theta) - \epsilon_H(\theta + \alpha_5) + \epsilon_H(\theta)), \\ B(\theta) &= R_H (\delta_{61}(\theta) - \epsilon_H(\theta + \alpha_6) + \epsilon_H(\theta)).\end{aligned}\quad (18)$$

需要特别注意的是,当  $W(n)=0$  时,出现谐波抑制现象,  $F_H(n)$  不能被有效求得;当  $W(n)$  接近于 0 时,测角差值的傅里叶系数  $E(n)$  出现很小的误差,就会导致  $F_H(n)$  出现较大的误差。因此需要优选四读数头的角度位置,以避免传递函数  $W(n)$  在待求谐波范围内出现接近于 0 的情况。在图 2 中读数头  $H_1, H_5, H_6$  和  $H_7$  的布置方式下,传递函数  $W(n)$  性能优良,能够实现常规低次谐波范围内分度误差与径向误差运动的完整、准确分离。

另外,由于  $W(1)$  恒为 0,误差分离技术不能有效分离一次谐波分量。但是,一次谐波主要是由光栅安装偏心引起,符合基础自校准模型<sup>[13-14]</sup>,可采用基本的傅里叶法校准获得。

## 3.2 校准结果

采取连续测量模式,主轴以 1 r/m 的转速匀速旋转,测量点采样时间间隔设为 3 ms,同步采集所有读数头的测试数据。采用直接比较法与自校准法对两套编码器的分度误差进行校准,校准结果讨论如下(为方便比较,测角误差中的直流分量皆已移除)。

### 3.2.1 直接校准

首先以编码器 I 的测角值  $P(\theta)$  作为参考值,检测编码器 II 各读数头的测角误差,见式(7)。图 3 为某单圈测量数据下读数头  $H_1$  至  $H_4$  测角误差的校准结果,误差峰峰值分别为 3.94",

4.06",4.01",4.22"。误差曲线中明显的一次谐波是由光栅安装偏心引起。结合式(9),由于分度误差是测角误差的主要成分,四读数头测角误差的整体轮廓一致,只是基于各读数头的角度位置,相位依次相差 90°。当然,由于读数头不一致性以及主轴误差运动等因素的影响,各误差曲线的具体形状稍有区别。

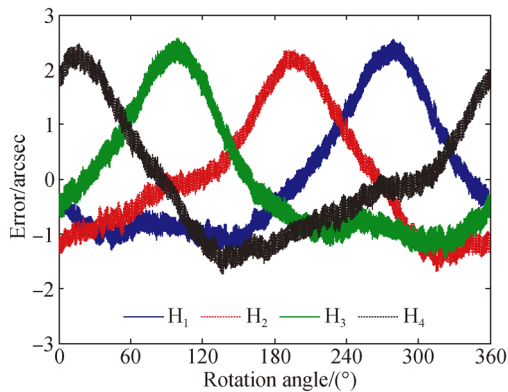


图 3 码器 II 4 个读数头的测角误差

Fig. 3 Measurement deviations of the four scanning heads of angle encoder II

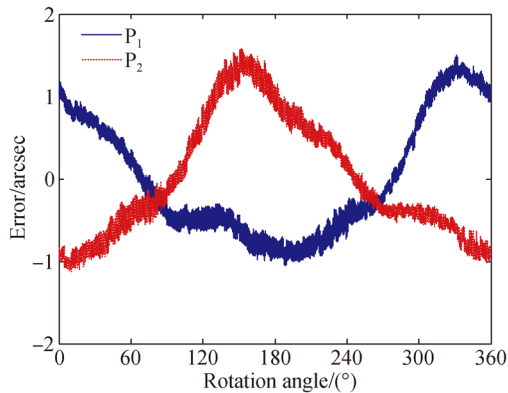


图 4 编码器 I 2 个读数头的测角误差

Fig. 4 Measurement deviations of two heads of encoder I

图 4 为根据式(8)以编码器 II 测角值为参考,校准得到的编码器 I 两读数头 P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub> 的测角误差,误差峰峰值分别为 2.56"和 2.71"。同理,误差曲线相位相隔 180°。对比图 3 和图 4 可以看出,编码器 I 单个读数头的测角误差范围(峰峰值)小于编码器 II 各读数头的误差范围。两套编码器基于单个读数头的测角精度皆为角秒级。

在实际使用中,编码器 I 以其两读数头的平均值作为角度输出值,编码器 II 以四读数头均值作为系统测角值。因此,有必要比较两编码器的整体测角性能。基于式(10),图 5 为某单圈测量

数据下两编码器的整体测角差值  $d(\theta)$ 。该差值曲线既包含各编码器的合成分度误差,又包含读数头不一致性的影响。总体来看,采用多头均布技术后,两套编码器在误差补偿前已皆具有亚角秒级精度。

由于分度误差主要为低频误差,性质相对稳定,在相同的测试状态下其值保持不变。因此对图 5 的差值数据进行滤波,只保留前 100 阶谐波成分,便可得到单圈测量数据下两编码器合成分度误差的相对差值。再通过多次测试求平均,可以进一步减小随机误差的影响。最终得到基于 20 圈测量数据的两编码器合成分度误差的相对差值如图 6 所示。

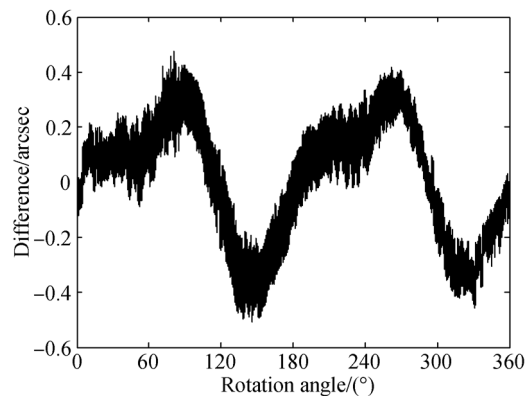


图 5 编码器 II 与编码器 I 的测角差值

Fig. 5 Angle differences between encoder II and encoder I

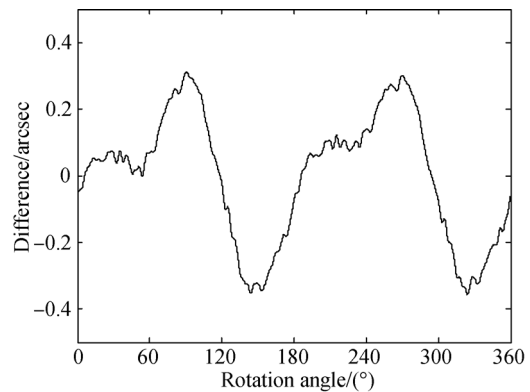


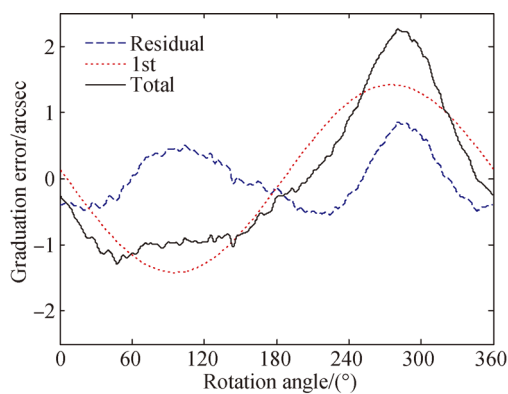
图 6 两编码器合成分度误差的相对差值

Fig. 6 Differences of graduation errors between the two angle encoders

### 3.2.2 自校准

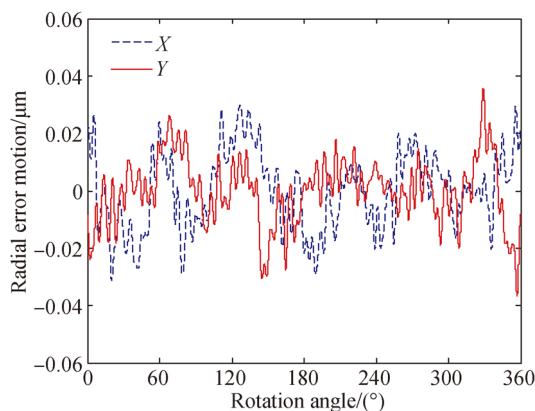
编码器 II 中光栅的分度误差可以使用读数头 H<sub>1</sub>,H<sub>5</sub>,H<sub>6</sub> 和 H<sub>7</sub> 依据自校准法精确测得。首先采用傅里叶法通过基础自校准模型校准得到分度误差的一次谐波;接着使用四读数头误差分离算

法求得分度误差的剩余谐波成分以及回转轴径向误差运动;最后再将一次谐波与剩余谐波成分加总求和,便可重构出光栅的分度误差。为减少主轴异步误差运动以及其他随机误差的影响,本文以 20 圈测试数据的平均值计算校准结果。图 7 为基于自校准法的校准结果(彩图见期刊电子版),其中图 7(a)中 3 条曲线分别为编码器 II 光栅分度误差的一次谐波成分(红色点线)、剩余谐波成分(蓝色虚线)以及加总后分度误差(黑色实线,峰峰值  $3.55''$ ),图 7(b)为回转轴径向误差运动  $x_H(\theta)$  和  $y_H(\theta)$ 。由图可知,去除安装偏心造成的一次谐波后编码器 II 光栅的分度误差在  $\pm 0.9''$  以内,回转轴 X/Y 同步误差运动峰峰值小于  $80\text{ nm}$ ,皆满足指标要求。另外,对比图 3 与图 7(a)可以看出,读数头  $H_1$  的测角误差与光栅分度误差的轮廓基本一致,从而验证了式(9),说明了直接比较法的可行性。



(a) 光栅分度误差

(a) Graduation error of the circular scale of encoder II



(b) X, Y 径向误差运动

(b) X and Y radial error motion

图 7 编码器 II 自校准结果

Fig. 7 Self-calibration results

通过对比两种方法的校准结果可以确认,直接校准结果中除光栅的分度误差外,还包含主轴径向误差运动对测角值的影响以及参考标准的分度误差。而自校准法不需要借助外部标准,能够完整地分离出分度误差与误差运动,因此校准结果更为精确。在实际应用中,当参考标准的精度明显高于被校编码器时,可以选用直接比较法进行校准;当编码器自身分度误差很小,或很难找到精度等级更高的标准器具时,宜采用自校准法。

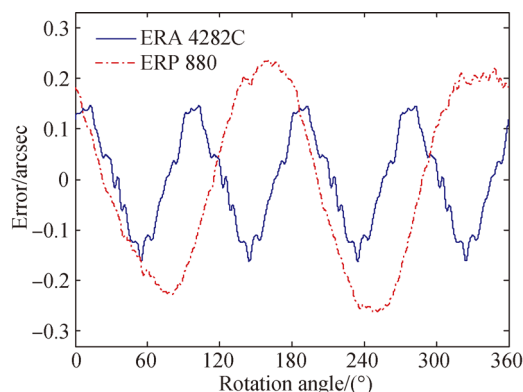


图 8 编码器 II 与编码器 I 的合成分度误差

Fig. 8 Graduation errors of encoder I and encoder II

此外,由于编码器 II 是以四读数头平均值作为其测角值,其合成分度误差只保留了光栅分度误差中 4 及 4 的倍数次谐波成分。因此可以基于图 7 中光栅的分度误差,合成出编码器 II 测角系统整体的分度误差,如图 8 中蓝色实线所示(彩图见期刊电子版),其误差范围为  $\pm 0.17''$ 。另外,再结合图 6,最终也可求得编码器 I 两读数头合成后的分度误差,见图 8 中红色点划线,其误差范围为  $\pm 0.27''$ 。进一步证实了两套编码器皆具有亚角秒级精度。当然,由于分度误差的稳定性,进行测量任务时将图 8 中的分度误差分别补偿到两套系统中能够进一步提升测量精度。通过 ACS 控制器的补偿功能模块,利用这些误差数据构建校正表(correction map)即可进行误差补偿<sup>[23]</sup>,补偿流程参见文献[7]。后续工作将对此开展深入研究,并进行补偿后分度误差的校准以评估系统最终精度。

#### 4 细分误差校准

细分误差是编码器误差的另一重要成分,在

编码器的每一个基本分辨率步距中重复出现。细分误差的大小取决于编码器的信号周期长度和信号扫描质量。在进行小角度测量任务时,其影响特别明显。因此有必要对超精密转台角度编码器的细分误差进行校准。

#### 4.1 原理、方案与装置

本文使用比较法测试细分误差,即通过与更高精度的参考标准直接比较来进行校准,计算公式为:

$$\zeta = \psi_E - \psi_R, \quad (19)$$

其中:  $\psi_E$  为编码器的角度测量值,  $\psi_R$  为参考标准的角度测量值,  $\zeta$  为编码器相对于参考标准的测角偏差,当忽略参考标准的误差时,  $\zeta$  便为编码器的细分误差。

在进行小角度校准时,常用的参考标准包括:装配有高精度角度编码器的精密计量转台、激光干涉小角度测量仪、电子自准直仪等。本研究采用电容式位移传感器测量系统进行细分误差的精密检测,实验装置见图 9。当转台旋转角度范围很小时 ( $< 0.05^\circ$ ), 其实际旋转角度  $\psi$  可通过位移传感器实测位移值  $h$  依据弧长公式求得:

$$\psi = h/L, \quad (20)$$

其中  $L$  为位移传感器回转轴线与转台主轴回转轴线的距离,本实验中  $L = 200 \text{ mm}$ 。

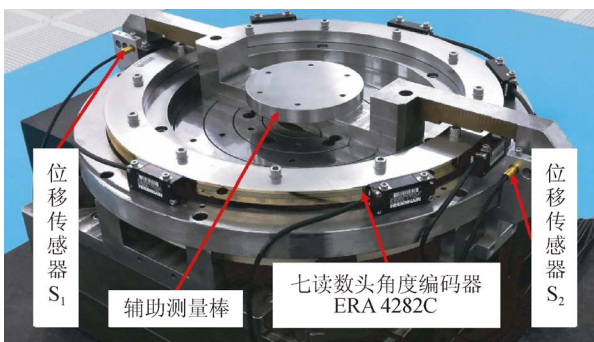


图 9 细分误差校准装置图

Fig. 9 Experimental setup for calibration of interpolation errors

位移传感器选用的是两支德国米纳的圆柱形电容式探头(型号为 CS05),一方面两支探头同步使用时被测物体允许不接地,另一方面两支探头

测量结果求平均能够进一步提升测试精度。采用一个辅助测量棒,通过精密加工保证测量棒上用于探头检测的两个被测表面与测量棒几何中心轴线位于同一平面内,同时在安装时精密调节测量棒使其中心轴线与主轴回转轴线同轴。另外,在转台进行小角度旋转过程中,探头感应面与辅助测量棒上的被测表面会偏离其初始的平行状态,但是经过计算得知,这一微小的不平行对测量结果的影响很小,可以忽略不计。

对于多读数头角度编码器,考虑到读数头的安装和调整误差,经由各读数头产生的细分误差有所不同。为了综合比较两套编码器不同读数头的单信号周期测量误差,基于两编码器光栅的基本分辨率,本实验进行了 3 次测试,见表 1。

表 1 细分误差实验测试参数

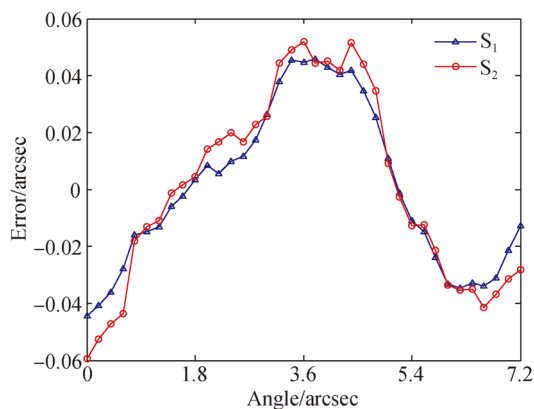
Tab. 1 Three tests for measuring the interpolation error

测次编号	测量范围/(°)	测点间隔/(°)	测量点数
1	7.2	0.2	37
2	25	0.5	51
3	25	0.5	51

此外,由于编码器 I 的精度更高,其标称细分误差与编码器 II 的细分误差相比整体较小。因此,本文也尝试以编码器 I 作为参考标准来测定编码器 II 的细分误差。

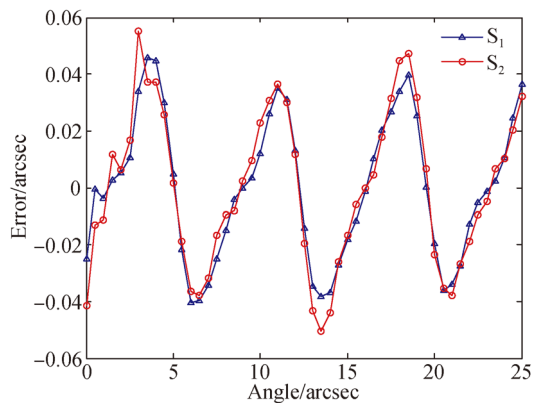
#### 4.2 校准结果

图 10 为使用位移传感器系统测得的编码器 I 读数头  $P_1$  的细分误差。其中,图 10(a)、图 10(b)分别为在第 1,2 次测试中由探头  $S_1, S_2$  各自测得的细分误差。由图可知,两探头测量结果基本一致。编码器 I 信号周期为  $7.2''$ ,第 2 次测试的测量范围约为 3.5 个信号周期,图 10(b)中误差曲线所示周期与理论分析一致。本文以两探头校准结果的平均值作为最终的误差校准值,三次测试最终校准结果见图 10(c),误差峰峰值分别为  $0.100''$ ,  $0.089''$  和  $0.086''$ 。从图中可以看出,测试系统的重复性很好。读数头  $P_1$  的单信号周期测量误差以一次谐波为主,误差值在  $\pm 0.06''$  以内。



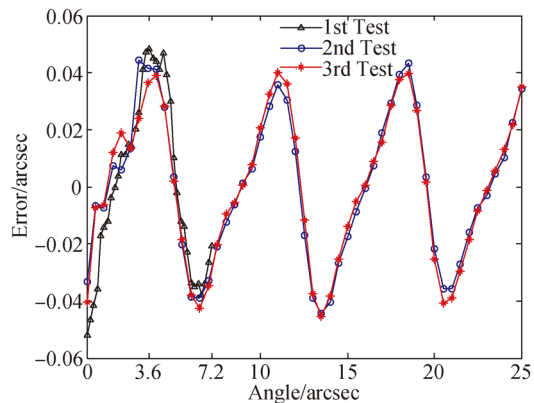
(a)第 1 次测试结果

(a) Measurement results for 1st test



(b)第 2 次测试结果

(b) Measurement results for 2nd test



(c)两探头测量平均值三次结果对比

(c) Comparison of the calibration results for three tests

图 10 编码器 I 基于读数头 P<sub>1</sub> 的细分误差

Fig. 10 Interpolation errors for head P<sub>1</sub> of encoder I, measured by capacitive sensors

图 11 为 3 次测试下编码器 I 读数头 P<sub>2</sub> 的细分误差校准结果, 误差峰峰值分别为 0.124", 0.140"和 0.139"。由图可知, 尽管 P<sub>2</sub> 单信号周期内测量误差也满足标称精度, 但其误差幅值更大,

除一次谐波外, 还包含明显的二次谐波。对比图 10 和图 11 可以看出, 读数头及其安装状态对角度编码器的细分误差有重要影响。

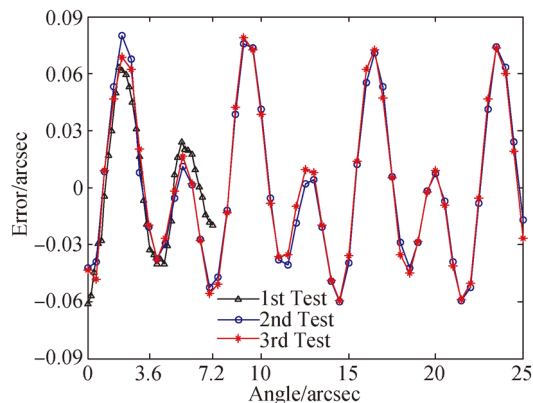


图 11 编码器 I 基于读数头 P<sub>2</sub> 的细分误差

Fig. 11 Interpolation errors for head P<sub>2</sub> of encoder I, measured by capacitive sensors

本实验分别以位移传感器系统以及编码器 I 为参考标准检测编码器 II 的细分误差。图 12 为第 2 次测试中编码器 II 读数头 H<sub>1</sub> 的细分误差校准结果, 包括以两电容式探头平均值为参考的校准值 (Meas. by CS)、以编码器 I 读数头 P<sub>1</sub> 为参考的校准值 (Meas. by P1) 以及二者的差值 (Meas. by CS - Meas. by P1, 即读数头 P<sub>1</sub> 的细分误差)。由图可知, 由于编码器 I 本身存在细分误差, 当其误差值相比被检器具 (编码器 II) 的细分误差不是很小时, 只能用其来进行近似估计。

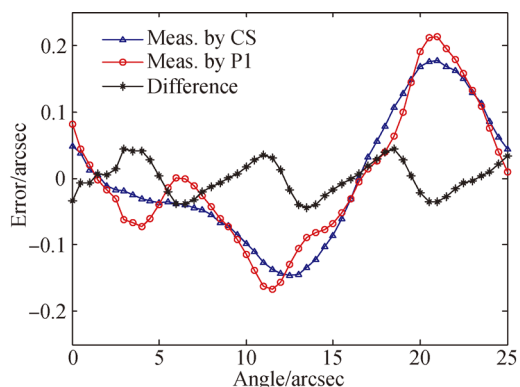


图 12 编码器 II 读数头 H<sub>1</sub> 的细分误差 (第 2 次测试)

Fig. 12 Error curves for head H<sub>1</sub> of encoder II in 2nd test, measured by capacitive sensors (CS) and head P<sub>1</sub> of encoder I (P1) respectively, and their differences

然而,在实际检测中,可以利用编码器 I 和 II 信号周期不同这一因素来提升校准精度。图 13 为第 2 次测试中以两电容式探头为参考标准测得的读数头  $H_1$  与  $P_1$  的细分误差的各阶谐波幅值。由于在绝大多数情况下编码器细分误差的主要成分为一、二次谐波,三次及以上的谐波成分占比很小。而第 2 次测试的测量范围约等于编码器 II 的信号周期长度,同时约为编码器 I 信号周期的 3.5 倍。因此图 13 中读数头  $H_1$  测量误差的主要谐波为第一、二次,  $P_1$  测量误差的主要谐波为第三、四次(3.5 次谐波向左右迁移)。基于此,本文尝试对图 12 中以  $P_1$  为参考测得的  $H_1$  的误差曲线(Meas. by  $P_1$ )进行滤波,只取其第一、二次谐波作为  $H_1$  细分误差的最终校准值,并再次与以电容式探头为标准测得的误差相比较,结果如图 14 所示。相比图 12,两条曲线的吻合程度更高。这既验证了以不同信号周期的更高精度编码器为参考标准进行细分误差校准时滤波方法的有效性,又间接证实了以高精度电容式位移传感器测量系统为参考标准进行编码器细分误差校准的有效性。

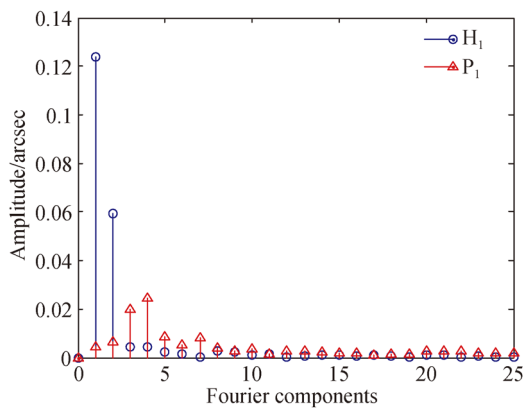


图 13  $H_1$  与  $P_1$  细分误差各阶谐波幅值(第 2 次测试)

Fig. 13 Fourier components of measurement errors of  $H_1$  and  $P_1$  in the 2nd test, with the capacitive sensors as reference standard

类似于图 14,图 15 为第 2 次测试中读数头  $H_2$  的测量误差,图中基于读数头  $P_1$  的只取前两次谐波的校准结果与基于两电容式探头的校准值也十分吻合。此外,本实验也检测了编码器 II 读数头  $H_3$  至  $H_7$  的单信号周期测量误差,所得结果与图 14、图 15 类似,只是不同读数头细分误差曲线的大小、形状不同。

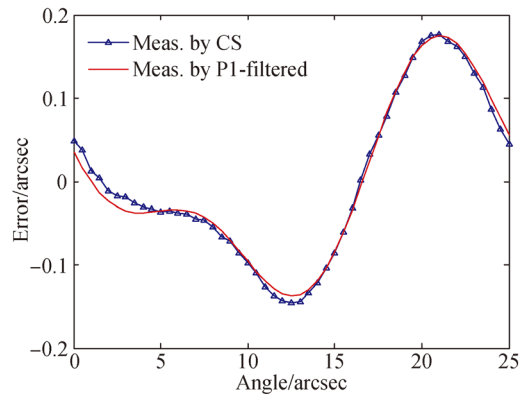


图 14 读数头  $H_1$  细分误差再次比较

Fig. 14 Comparison of errors of head  $H_1$  measured by capacitive sensors (CS) and filtered errors of  $H_1$  measured by head  $P_1$  ( $P_1$ ), in 2nd test

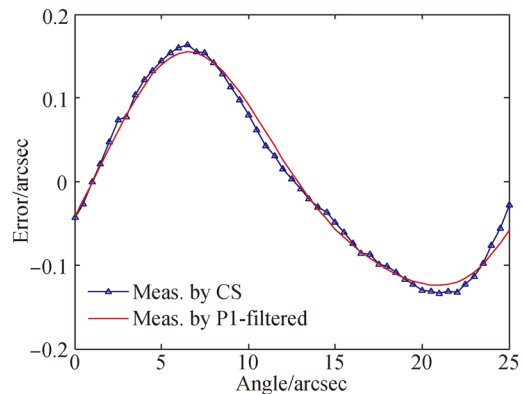


图 15 读数头  $H_2$  细分误差

Fig. 15 Comparison of the measurement errors of head  $H_2$  measured by  $P_1$  (filtered) and by capacitive sensors, in 2nd test

需要补充说明的是,由于电容式探头测量范围有限,并且考虑到测试装置的实际安装,上述结果是以编码器 I 光栅转角  $60^\circ$  为起点进行的(即实测范围为  $60^\circ \sim 60^\circ 25''$ )。通过改变探头支承夹具的安装位置,本研究另外分别以  $150^\circ$ ,  $240^\circ$  和  $330^\circ$  为起点进行了测试,校准结果所得结论与上文一致,只是由于主轴角度位置的变化,各读数头细分误差的大小和形状也会改变。总体而言,编码器 I 两读数头的细分误差皆在  $\pm 0.1''$  以内,编码器 II 各读数头细分误差皆在  $\pm 0.2''$  以内。

最后,由于两套编码器都是以多读数头的读数均值作为最终测角值,整体的细分误差也应为各读数头细分误差的平均。然而,由于不同读数头的单信号周期测量误差各不相同,它们的平均

值尽管也满足标称精度,但不能像对分度误差的多头平均那样可以有规律地消除一部分谐波分量。因而细分误差补偿便具有重要意义。后续工作将针对多读数头编码器细分误差的补偿以及补偿后残留细分误差的校准等问题进一步开展研究。

## 5 结 论

本文进行了双角度编码器超精密转台测角误差的校准。首先介绍了转台的结构以及编码器读数头布置方案,然后进行了编码器分度误差的校准,最后借助位移传感器测量系统检测了编码器的细分误差。结果表明:只使用单个读数头时,两

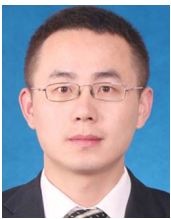
套编码器皆具有角秒级精度;使用多读数头时,两套测角系统皆为亚角秒级精度,其中基于两读数头均布的编码器 ERP 880 测角系统的分度误差为 $\pm 0.27''$ ,基于四读数头均布的编码器 ERA 4282 C 测角系统的分度误差为 $\pm 0.17''$ ;使用精密电容式位移传感器能够进行编码器细分误差的准确检测;当使用更高精度编码器作为参考标准进行细分误差校准时,如果两套编码器信号周期不同,可以利用这一因素采用谐波滤除法提高校准精度;ERP 880 测角系统的细分误差在 $\pm 0.1''$ 以内,ERA 4282 C 测角系统的细分误差在 $\pm 0.2''$ 以内。本文工作有助于准确评估进而提升精密转台的测角精度。

### 参考文献:

- [1] 黄明,刘品宽,夏仰球,等. 自研角度计量转台在分度器件校准中的应用 [J]. 光学 精密工程, 2019, 27(1): 110-120.  
HUANG M, LIU P K, XIA Y Q, *et al.*. Calibration of circular division artifacts using a self-developed angle comparator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 110-120. (in Chinese)
- [2] PROBST R, WITTEKOPF R, KRAUSE M, *et al.*. The new PTB angle comparator [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(7): 1059-1066.
- [3] WATANABE T, FUJIMOTO H, NAKAYAMA K, *et al.*. Automatic high precision calibration system for angle encoder [C]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4401: 267-274.
- [4] KIM J A, KIM J W, KANG C S, *et al.*. Calibration of angle artifacts and instruments using a high precision angle generator [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(3): 367-371.
- [5] YANDAYAN T, AKGOZ S A, ASAR M. Calibration of high-resolution electronic autocollimators with demanded low uncertainties using single reading head angle encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(1): 015010.
- [6] PISANI M, ASTRUA M. The new INRIM rotating encoder angle comparator (REAC) [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(4): 045008.
- [7] 姚雪峰,孙慈,杨晋,等. 高精度角位移平台的研制及误差补偿 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 961-967.
- [8] YAO X F, SUN C, YANG J, *et al.*. Development and error compensation of the high precision turntable [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(5): 961-967. (in Chinese)
- [9] HUANG Y, XUE Z, HUANG M, *et al.*. The NIM continuous full circle angle standard [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(7): 074013.
- [10] 冯英翘,万秋华,王树洁. 小型光电编码器长周期误差的修正 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9): 2491-2497.  
FENG Y Q, WAN Q H, WANG SH J. Correction of long-period error for small photoelectric encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2491-2497. (in Chinese)
- [11] 范天泉,谢长文,陆德基,等. 排列互比法用于超精测角时产生系统误差的研究 [J]. 光学 精密工程, 1997, 5(2): 98-103.  
FAN T Q, XIE CH W, LU D J, *et al.*. Research on the systematical error of permutation inter-comparison method using in super-precision angle measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(2): 98-103. (in Chinese)
- [12] 张文颖,劳达宝,周维虎,等. 多读数头混合布局测角误差抑制方法 [J]. 光学 精密工程, 2017, 25(9): 2339-2346.  
ZHANG W Y, LAO D B, ZHOU W H, *et al.*. Suppression method for angle measurement error of mixing-layout multiple reading head [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2339-2346. (in Chinese)
- [13] WATANABE T, KON M, NABESHIMA N, *et al.*. An angle encoder for super-high resolution

- and super-high accuracy using SelfA [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(6): 065002.
- [13] GECKELER R D, FRICKE A, ELSTER C. Calibration of angle encoders using transfer functions [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(10): 2811-2818.
- [14] JIAO Y, DONG Z, DING Y, *et al.*. Optimal arrangements of scanning heads for self-calibration of angle encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(10): 105013.
- [15] LU X D, GRAETZ R, AMIN-SHAHIDI D, *et al.*. On-axis self-calibration of angle encoders [J]. *CIRP annals*, 2010, 59(1): 529-534.
- [16] JIAO Y, DING Y, DONG Z, *et al.*. Optimal-arrangement-based four-scanning-heads error separation technique for self-calibration of angle encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(8): 085005.
- [17] Dr Johannes Heidenhain GmbH. Angle Encoders [EB/OL]. [2019-04-26]. [www.heidenhain.com](http://www.heidenhain.com).
- [18] 王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 379-386.  
WANG X J. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 379-386. (in Chinese)
- [19] 冯英翘, 万秋华. 小型光电编码器细分误差校正方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(6): 1374-1379.  
FENG Y Q, WAN Q H. Interpolation error calibration method of small photoelectric encoders [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(6): 1374-1379. (in Chinese)
- [20] 乔栋, 续志军, 吴宏圣, 等. 绝对式光栅尺细分误差补偿方法 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112008.  
QIAO D, XU ZH J, WU H SH, *et al.*. A method for compensating interpolation error of absolute linear encoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112008. (in Chinese)
- [21] GECKELER R D, JUST A. A shearing-based method for the simultaneous calibration of angle measuring devices [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(10): 105009.
- [22] Nanomotion Ltd. HR2 Nanomotion Motor [EB/OL]. [2019-04-26]. [www.nanomotion.com](http://www.nanomotion.com).
- [23] ACS Motion Control Ltd. UDIhp/lt [EB/OL]. [2019-04-26]. [www.acsmotioncontrol.com](http://www.acsmotioncontrol.com).
- [24] GECKELER R D, LINK A, KRAUSE M, *et al.*. Capabilities and limitations of the self-calibration of angle encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(5): 055003.

#### 作者简介:



焦 扬(1991—),男,山西大同人,博士研究生,主要从事精密计量装备及检测技术的研究。E-mail: yangjsj@sjtu.edu.cn

#### 导师简介:



刘品宽(1969—),男,湖北天门人,研究员,博士生导师,主要从事纳米级微定位技术、微操作机器人,电子制造中的高速高精度定位与操纵,以及纳米制造中的精密驱动与控制等方面的研究。E-mail: pkliu@sjtu.edu.cn