

文章编号 1004-924X(2019)01-0110-11

## 自研角度计量转台在圆分度器件校准中的应用

黄 明<sup>1,2</sup>, 刘品宽<sup>1</sup>, 夏仰球<sup>2,3\*</sup>, 李梦阳<sup>2</sup>, 唐 强<sup>2,3</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;
3. 国家机床产品质量监督检验中心(四川), 四川 成都 610200)

**摘要:** 为了实现亚角秒级圆分度器件的高精度校准, 建立了基于角度计量转台和自准直仪的角度测量系统, 研究了基于无实物基准的圆分度误差检测方法和控制测量系统引入误差的策略。简要介绍了基于真空预载气浮支承和超声马达驱动的自研转台的结构, 搭建了整个测量系统。利用圆封闭原理和最小二乘原理分析了圆分度误差的测量算法, 讨论了测量过程的误差来源, 并分析了抑制各误差源的方法。最后, 在构建的测量系统上测量了多齿分度台的圆分度误差, 并对测量不确定度进行了分析。实验结果表明: 自研计量转台和被校多齿分度台的最大圆分度误差分别为  $0.12''$  和  $0.15''$ , 测量不确定度为  $0.05'' (k=2)$ 。通过对比, 表明测量系统能够实现亚角秒级圆分度误差的高精度校准。

**关键词:** 测角转台; 角度校准; 分度误差; 误差分析; 不确定度评定

**中图分类号:** TB922; TH712 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192701.0110

## Calibration of circular division artifacts using a self-developed angle comparator

HUANG Ming<sup>1,2</sup>, LIU Pin-kuan<sup>1</sup>, XIA Yang-qiu<sup>2,3\*</sup>, LI Meng-yang<sup>2</sup>, TANG Qiang<sup>2,3</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;
3. National Machine Tool Production Quality Supervision Testing Center(Sichuan), Chengdu 610200, China)

\* Corresponding author, E-mail: xiayqiu@caep.cn

**Abstract:** In order to achieve high-precision calibration of circular division artifacts with sub-arcsecond level, an angular measuring system based on a high-precision angle comparator and an autocollimator was established. A nonphysical circular indexing error detection method was studied, and the scheme to control measurement error was investigated. Firstly, the structure of self-developed angle comparator based on vacuum preloaded air bearings and ultrasonic motors, and the construction of the whole measurement system were introduced. Secondly, the measurement algorithm for circular indexing error detection was analyzed by the circular closed principle and the least squares principle. Thirdly, the

收稿日期: 2018-06-08; 修订日期: 2018-08-13.

基金项目: 中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室基金资助项目(No. K1065)

sources of error in the measurement process were discussed and the methods for eliminating error sources are analyzed. Finally, based on the measurement system, the circular indexing error of the multitooth indexing table was measured, and the measurement uncertainty was analyzed. The experimental results show that the maximum circular indexing error of the self-developed angle comparator and the indexing table is  $0.12''$  and  $0.15''$ , respectively; the measurement uncertainty is  $0.05''$  ( $k=2$ ). Thus, it shows that the measurement system satisfies the high-accuracy calibration of circular indexing error with sub-arcsecond level.

**Key words:** angle comparator; angle calibration; dividing error; error analysis; uncertainty evaluation

## 1 引言

在制造、机器人、测量、军事等精密工程领域,都需要精确的角度测量技术<sup>[1-2]</sup>。在高端装备制造和生产过程中,角度的测量精度面临着越来越高的要求,有从秒级向亚秒级延伸的趋势,这对装、调、检提出了更高的要求。超精密转台、精密分度头、精密分度台、工业机器人关节等角分度装置对角度精度检测有着严格的要求,其中超精密机床用分度转台、高精度检测仪器角度基准转台已达到秒级、亚秒级的角定位精度检测要求<sup>[3-6]</sup>。超精密机床、检测仪器等高端工艺装备的正交轴垂直度以及高精度圆光栅的检验与校正也都达到了亚秒级。

随着科技的发展,传统机械式的量块、量尺、分度盘等角度测量和校准工具早已不能满足现代科学和技术工业发展的需求,取而代之的是集光学、机械、电子、计算机等多学科尖端技术复合而成的新型角度计量转台<sup>[7-8]</sup>。近年来,土耳其 TUBITAK<sup>[9]</sup>、美国 NIST<sup>[10]</sup>、德国 PTB<sup>[11]</sup>、意大利 INRIM<sup>[12]</sup>、日本 AIST<sup>[13]</sup>、韩国 KRISS<sup>[14]</sup>等发达国家的国家计量院均已经对亚秒级精度的角度计量转台进行了深入的研究,并将它作为角度计量的国家标准。欧洲发达国家,特别是德国 PTB 的角度计量水平已经走在了世界最前列,最先进的面向亚秒级角度计量的超精密转台结合剪切校准方法,获得了在一定角度范围内  $0.001''$  的超高角度测量不确定度<sup>[15]</sup>,虽然此不确定度仍属于实验室研究范畴,并未真正实用,且仅在很小的范围内能实现,但仍然代表了目前世界测角能力的最高水平。另外,其圆分度误差也能达到  $0.1''$ 。亚洲发达国家,如日本、韩国也紧随欧洲各国的脚步,进行亚秒级角度计量的超精密转台研发,并取

得了一定的进展,开发了诸如 Self-A 等角度计量光栅和多种校准方法。目前的角度测量水平大致在不确定度  $0.03''$  ( $k=2$ ),圆分度误差  $0.1''$  的水平。我国亚秒级角度计量转台领域与国际先进水平差距较大,目前高分辨率高精度角度计量精密转台仍是依赖进口,价格十分昂贵。

圆分度误差检测方法众多,其严密度、精确度、测量难易程度及计算工作量等均不相同。国际上常用的圆分度误差检测方法主要可以分为两大类:常角法和比较法<sup>[16-17]</sup>。国际上公认的基于圆周闭合原理的全组合法是最为严密和精确的方法<sup>[18]</sup>,但是其检测、计算工作量巨大,并且要想达到非常高的检测精度,对环境要求也极其苛刻,获得超高精度圆分度误差检测精度的难点也在于此<sup>[19-20]</sup>。近年来,国内、外学者和相关研究机构在分度误差的产生机理、误差分量分离及补偿模型等方面开展了大量的研究工作。中国科学院田留德等<sup>[21]</sup>发展了基于坐标变换法的分度误差影响模型,提高了自准直仪法直接测量圆分度误差的测量精度。北京邮电大学艾晨光等<sup>[22]</sup>建立了圆光栅偏心测角误差补偿模型,修正了关节测试平台中由圆光栅安装偏心所产生的测量误差。在仪器设备综合误差分析补偿方面,合肥工业大学卢荣胜等<sup>[23]</sup>针对激光跟踪仪提出了基于非线性最小二乘法的误差谐波补偿方法,避免了最小二乘法的不收敛问题。重庆大学王福全等<sup>[24]</sup>等针对精密转台提出一种基于稀疏分解的角分度误差补偿方法,修正精密转台中由圆光栅安装偏心、倾斜等引起的角分度误差。

本文介绍了一种基于真空预载气浮轴承和超声马达驱动的自研角度计量转台,基于该转台搭建了圆分度误差测量系统;利用圆封闭原理和最小二乘原理分析了基于无实物基准的圆分度误差的测量算法;讨论了测试过程中环境、仪器及仪器

安装误差对测量结果的影响及抑制方法;最后,在构建的测量系统上对多齿分度台的圆分度误差进行了校准,其校准结果与中国计量科学研究院(NIM)、制造厂家的结果相当。

## 2 角度计量转台及测量系统的搭建

### 2.1 角度计量转台

图 1 为角度计量转台的结构简图。它主要由空气轴承套、空气轴承转子、工作台、陶瓷环、超声马达、光栅盘、读数头以及底座等组成。

支承系统由空气轴承套、空气轴承转子、工作台以及底座组成,构成了径向气浮轴承和轴向气浮轴承。其中,轴向气浮轴承采用真空预载气浮支承,真空预载气浮支承是指在开式气浮支承基础上,在气浮支承面局部产生负压,吸力与支承力及负载构成新的平衡,如图 2 所示。该结构的突出优点是减少了支承系统机械装配件的误差传递与误差累积,同时支承系统无漂移,减少了零件数量,提高了系统的动态特性,保证了轴系的精密回转。经实验测试,该转台的轴向刚度为  $400 \text{ N}/\mu\text{m}$ 、最大负载为  $80 \text{ kg}$ 、回转精度优于  $50 \text{ nm}$ 。

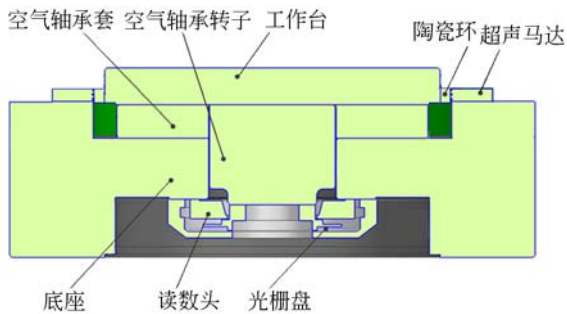


图 1 角度计量转台结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of angle comparator

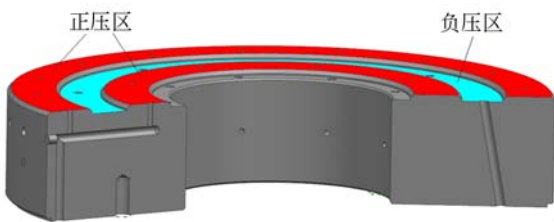


图 2 止推轴承结构

Fig. 2 Configuration of thrust bearing

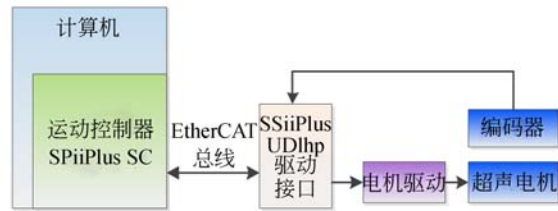


图 3 角度计量转台控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of controller system of angle comparator

驱动控制系统由陶瓷环、超声马达、光栅盘和读数头组成。4 个超声马达均布在陶瓷环四周,利用摩擦驱动转台实现纳米级运动。图 3 为角度计量转台控制系统框图,它是由 SPiiPlus 万能驱动接口(UDlhp4422N01N, ACS™)、安装了实时运动控制软件(SPiiPlusSC HP0800004BAY5A, ACS™)的电脑、电机驱动器(AB2, Nanomotion™)、4 个超声波马达(HR2, Nanomotion™)和双读数头编码器(ERP880, 海德汉™)组成。4 个超声波马达并联在一起,所有马达同步运动。利用虚拟龙门控制方式,对两个读数头的位置数据进行平均,获得角度计量转台的位置读数,伺服回路的采样率和更新率均为  $20 \text{ kHz}$ 。转台使用的海德汉 ERP880 圆光栅在  $360^\circ$  内包括 180 000 刻线,同时再通过  $2^{12}$  的数字细分,可以获得约  $0.0018''$  的控制分辨率。

### 2.2 测量系统的搭建

该系统的基本工作原理为:角度测量就是将被测角与基准角进行比较,准确测出两者之间的角度偏差数据,然后对数据进行处理,再通过一定的算法去除测量误差。

构成测量系统硬件平台的仪器设备除了自研的角度计量转台外,还包括多齿分度台、自准直仪和多面棱体等,测量装置的主要技术参数如表 1 所示,安装图如图 4 所示,将多齿分度台、棱体和自准直仪安装在隔震台上并加装防护罩,防止振动、气流、光等对检测结果的影响。棱体回转中心轴线应与分度台的回转中心轴线平行,调整定位夹具的轴心(棱体回转中心)与多齿分度台回转中心重合,控制其偏差范围。调整自准直仪,使出射平行光的光束中心与棱体工作面中心重合,视轴垂直于棱体工作面并与中心重合,视场内十字分划线竖线应与分度台的回转中心轴线平行。

本文搭建的这套角度测量系统可以实现角度计量转台、多面棱体和多齿分度台三者之间的互校准,利用角度计量转台的高分辨率、高精度以及稳定性还可以实现自准直仪的校准。

表 1 角度测量装置的主要技术参数

Tab.1 Technical parameters of angle measurement devices

序号	名称	型号	主要技术指标
1	多齿分度台	1 440	圆分度误差:±0.1" 分辨率:15'
2	自准直仪	TA US 300-57	分辨率:0.005" 示值误差:±0.05"(±10"); 测量重复性:0.05";漂移:0.1"
3	多面棱体	36 面	工作角偏差:±0.7"
4	隔振平台	DST-H18-12	精度等级:一级; 自然频率:2 Hz
5	定位夹具	自研	同轴度:0.005 μm

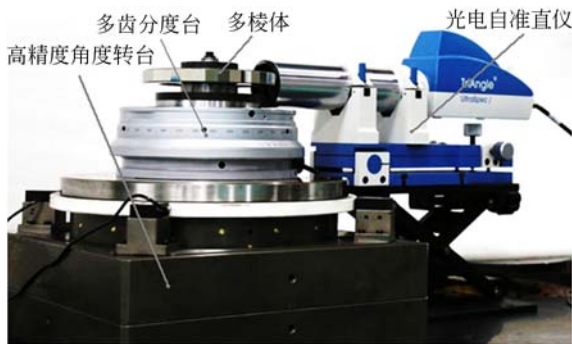


图 4 角度测量装置的安装图

Fig. 4 Assembly of angle measurement devices

### 3 圆分度误差的测量算法

#### 3.1 基本原理

利用 360°圆封闭原理,两两比较工作角偏差,较精确地分离校准仪器和被校准仪器的圆分度误差。圆分度误差检测原理如图 5 所示,在校准过程中,用一组适当的、不要求准确但要求稳定的参考角  $\beta_i$ ,通过旋转转台,分别与被测分度器件的角度  $\alpha_i$ 在整周范围内顺序进行闭合的、独立的比较测量,以消除参考角误差的影响,并按最小二乘原理等权确定各工作角偏差。

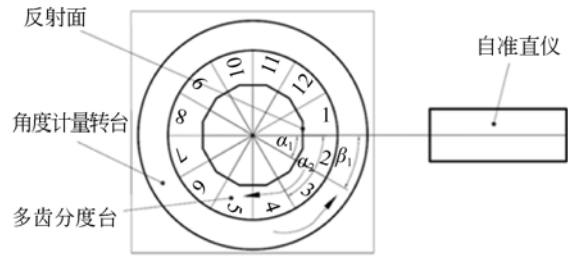


图 5 圆分度误差检测原理图

Fig. 5 Schematic diagram of circular dividing error detection

#### 3.2 参考角误差消除算法

设测试基本分度角为  $2\pi/n$ ,则测回数为  $n$ ,常角序列为:

$$\varphi_i = i \frac{2\pi}{n}, i = 1, 2, 3, \dots, n-1. \quad (1)$$

易得角度偏差为:

$$\theta_i = \alpha_i - \beta_i = (\varphi_i + \delta\alpha_i) - (\varphi_i + \delta\beta_i) = \delta\alpha_i - \delta\beta_i, \quad (2)$$

式中: $\alpha_i$ 为转台的旋转角度; $\beta_i$ 为参考角度; $\delta\alpha_i$ 为  $\alpha_i$ 相对于常角的偏差; $\delta\beta_i$ 为  $\beta_i$ 相对于常角的偏差。

第  $i$ 组测回方程为:

$$\begin{cases} (\delta\alpha_{i \bmod n} - \delta\alpha_{i-1}) - \delta\beta_1 = \theta_{i-1, i \bmod n} \\ (\delta\alpha_{(i+1) \bmod n} - \delta\alpha_{i-1}) - \delta\beta_2 = \theta_{i-1, (i+1) \bmod n} \\ \vdots \\ (\delta\alpha_{(i+n-2) \bmod n} - \delta\alpha_{i-1}) - \delta\beta_{n-1} = \theta_{i-1, (i+n-2) \bmod n} \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

将上述  $n$ 组方程合并,按相同位置合并得到:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (\delta\alpha_{i \bmod n} - \delta\alpha_{i-1}) - n\delta\beta_1 = \sum_{i=1}^n \theta_{i-1, i \bmod n} \\ \sum_{i=1}^n (\delta\alpha_{(i+1) \bmod n} - \delta\alpha_{i-1}) - n\delta\beta_2 = \sum_{i=1}^n \theta_{i-1, (i+1) \bmod n} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n (\delta\alpha_{(i+n-2) \bmod n} - \delta\alpha_{i-1}) - n\delta\beta_{n-1} = \sum_{i=1}^n \theta_{i-1, (i+n-2) \bmod n} \end{cases}. \quad (4)$$

式(4)等号两边相加,得:

$$\delta\beta_j = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{i-1, (i+j-1) \bmod n}, \quad j = 1, 2, \dots, n-1. \quad (5)$$

通过式(5)可以获得参考角偏差,但是从

$n(n-1)$ 个方程中求得 $(n-1)$ 个 $\delta\alpha_i$ ,显然是不定解。为了求出未知数的最佳值,建立符合最小二

乘原理的方程式,即残差的平方和最小时的方程式。残差可表示为:

$$\begin{cases} (\delta\alpha_{i \bmod n} - \delta\alpha_{i-1}) - \delta\beta_1 - \theta_{i-1, i \bmod n} = V_{i-1, i \bmod n} \\ (\delta\alpha_{(i+1) \bmod n} - \delta\alpha_{i-1}) - \delta\beta_2 - \theta_{i-1, (i+1) \bmod n} = V_{i-1, (i+1) \bmod n} \\ \vdots \\ (\delta\alpha_{(i+n-2) \bmod n} - \delta\alpha_{i-1}) - \delta\beta_{n-1} - \theta_{i-1, (i+n-2) \bmod n} = V_{i-1, (i+n-2) \bmod n} \end{cases} \quad (6)$$

需满足:

$$Q = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} V_{i,j}^2 = \min, i \neq j. \quad (7)$$

则有:

$$\frac{\partial Q}{\partial \delta\alpha_i} = 0, i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (8)$$

易得:

$$\delta\alpha_i = \frac{t_i - t_0}{2 \times 12}, \quad (9)$$

$$\text{式中 } t_i = \sum_{j=0}^{n-1} \theta_{j,i} - \sum_{j=0}^{n-1} \theta_{i,j}, i \neq j.$$

由误差理论,测量标准差<sup>[25]</sup>为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \sum v_{i,j}^2}{n(n-1)(n-2)}}, \quad (10)$$

式中 $v_{i,j}$ 为相应位置测量值的残差。

$$v_{i,j} = \begin{cases} a_{i,j} - (A_j - B_{i+j-1}) - C_i & (i+j-1 \leq n) \\ a_{i,j} - (A_j - B_{i+j-n-1}) - C_i & (i+j-1 > n) \end{cases}, \quad (11)$$

$$\text{式中: } A_j = \frac{1}{n} (S_j - \sum_{i=1}^n C_i);$$

$$B_j = -\frac{1}{n} (Y_j - \sum_{i=1}^n C_i); C_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{i,j};$$

$$Y_j = \begin{cases} \sum_{i=1}^n a_{i,(j-i+1)} & (j-i \geq 0) \\ \sum_{i=1}^n a_{i,(j-i+n+1)} & (j-i < 0) \end{cases}.$$

从上述分析可以看出,该算法可以消除参考角误差的影响,大大提高了测试的准确度,还可以实现一次测量同时获得校准仪器和被校准仪器的圆分度误差。此外,若想获得较高的精度,从理论上就是要增大 $n$ 值,即“小常角多测回”,此时测量成本也呈二次幂增加,测量次数、时间以及数据处理都会大幅增加。

## 4 影响因素的分析及抑制

### 4.1 环境因素

在校准过程中,光电自准直仪带来的误差主要有两个方面,即示值误差和量化误差(分辨率),其大小主要受环境因素的影响,在一般精度测量的情况下使用校准证书给定的校准值是可以的,但是为了获得更高的不确定度测量结果,需对测量环境进行筛选。

为筛选和验证环境对光电自准直仪的影响,选取了两种试验环境,两环境的试验参数见表 2。采用连续监控采集的试验方法,对自准直仪进行跳动及漂移监控试验,采样时间间隔为 10 s,获得的监控试验曲线如图 6 和图 7 所示。试验结果表明:在环境 1 下,自准直仪示值可在 15 min 内维持在 $\pm 0.01''$ 以内跳动,一个小时内维持在 $\pm 0.02'$ 以内跳动,两个小时漂移不超过 $0.06''$ ,一个测回在 15 min 左右,环境稳定性引起的误差在 $0.02''$ 以内;环境 2 相对环境 1 较差,自准直仪的抖动明显增大,但是仍可以在 20 min 内维持在 $\pm 0.02'$ 以内。因此,在现有条件下选择环境 1 为测试环境。

表 2 环境试验参数

Tab. 2 Parameters of environmental test

参数	环境 1	环境 2
温度	$(20.0 \pm 0.2) ^\circ\text{C}$	$(20.0 \pm 1) ^\circ\text{C}$
湿度	$(50.0 \pm 0.5) \%$	$(50.0 \pm 1) \%$
气流	0.25 m/s	0.5 m/s
洁净度	百级	万级

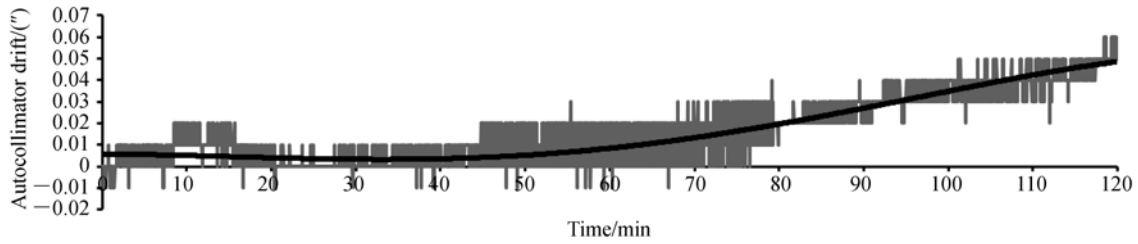


图 6 自准直仪在环境 1 下的读数漂移

Fig. 6 Drifts of autocollimator in environment 1

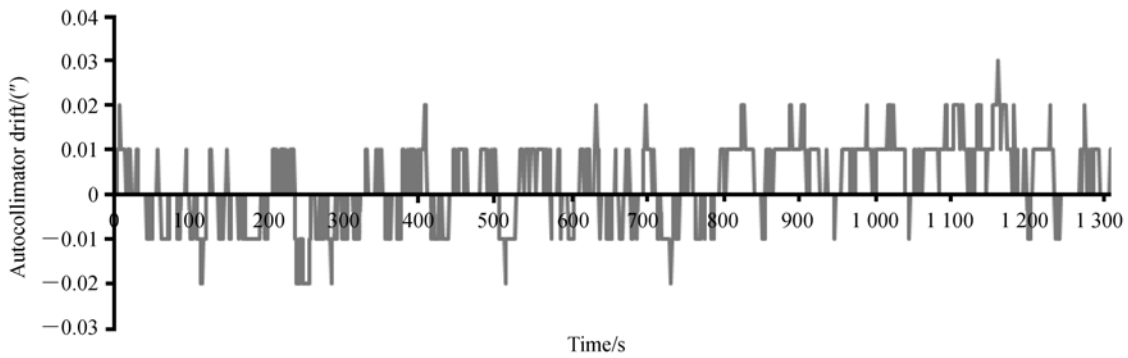


图 7 自准直仪在环境 2 下的读数漂移

Fig. 7 Drifts of autocollimator in environment 2

## 4.2 安装因素

### 4.2.1 多面棱体安装偏心对测量结果的影响

安装时多面棱体不可能与被测轴完全同心,假设存在偏心距  $e$ ,步距角  $\theta$ ,则反射面的偏距为:

$$d = e \sin \theta. \quad (12)$$

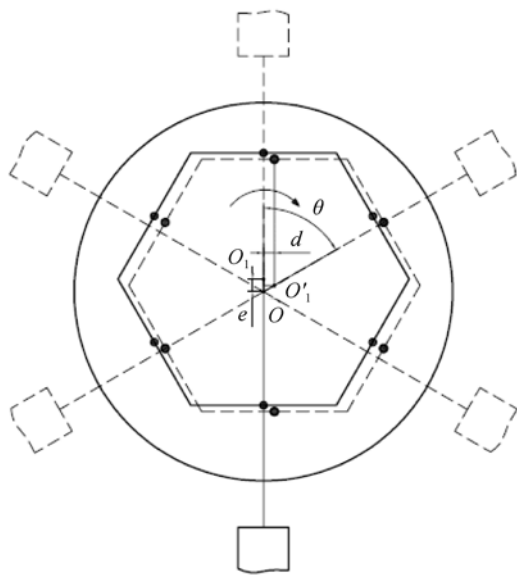


图 8 多面棱体安装偏心影响原理图

Fig. 8 Eccentricity effect of optical polygon

如图 8 所示,多面棱体安装偏心不会直接引起反射光线的偏转,但会导致多次测量的多面体的反射面不一致,而反射面的一致会间接地增大反射面平面对测量结果的影响。从式(12)可以看出,在某一固定的步距角下,减小偏心距  $e$  可以有效减小反射面偏距  $d$ ,从而减小反射面误差对检测结果的影响。

### 4.2.2 多面棱体工作面平面度对测量结果的影响

多面棱体与自准直仪一起使用,工作面相当于一个反射面,当自准直仪对准不同的反射位置时,平面度会对角度测量有影响,其原理如图 9 所示。

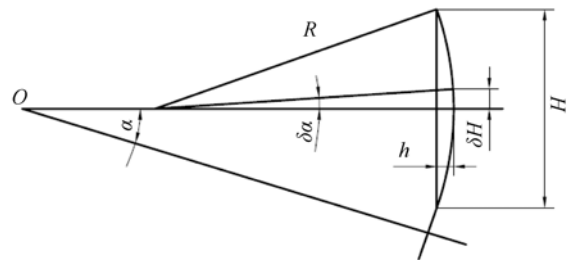


图 9 多面棱体工作面平面度影响原理

Fig. 9 Flatness effect of optical polygon

假设将多面棱体工作面中间区域的平面度理想化为圆弧,则有:

$$R^2 = (R-h)^2 + \left(\frac{H}{2}\right)^2, \quad (13)$$

式中:  $R$  为工作面的曲率半径;  $H$  为工作面的宽度;  $h$  为工作面的平面度误差。

则由式(13)得:

$$R = \frac{4h^2 + H^2}{8h} \approx \frac{H^2}{8h}. \quad (14)$$

设两工作面位置的法线间夹角为  $\alpha$ , 若自准直仪光轴偏离工作面中心为  $\delta H$  处, 则对  $\alpha$  将产生角度误差  $\delta\alpha$ , 即:

$$\delta\alpha = \frac{\delta H}{R} \rho = \frac{8h\delta H}{H^2} \rho, \quad (15)$$

式中  $\rho=206\,265''$ 。

从上述分析可以看出, 通过减小自准直仪光轴偏离工作面中心的距离  $\delta H$  和工作面平面度误差  $h$ , 均可以减小对测量结果的影响, 不过减小  $\delta H$  比减小  $h$  更方便。

#### 4.2.3 反射面与基准面的不垂直(塔差)对测量结果的影响

反射面与基准面的不垂直带来的不确定度原理如图 10 所示。在  $abML$  平面内两反射面的夹角为  $\varphi$ , 当安装倾斜或存在位置度误差时, 棱体反射面对安装支承而产生垂直度误差  $\alpha$ , 平行于支承面的照准光轴相当于在与  $abML$  面成  $\alpha$  角的平面  $a'b'ML$  照准多面棱体的  $\varphi$  角, 此时所测得的角度是  $\varphi'$ 。

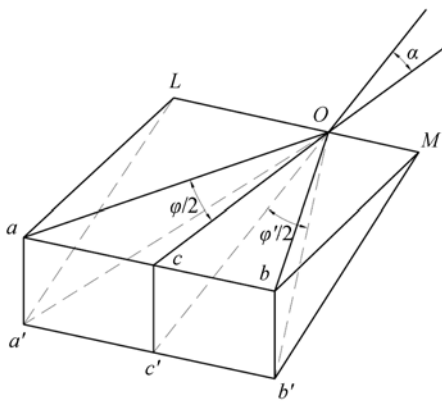


图 10 反射面与基准面的不垂直影响原理图

Fig. 10 Effect of squareness error between optical polygon reflector and reference plane

经过分析计算得到棱体工作面对支承面的垂直度误差所产生的工作角误差为:

$$\delta\varphi = \sin \varphi \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \rho, \quad (16)$$

式中:  $\varphi$  为测量间隔;  $\alpha$  为棱体工作面与定位面的垂直度误差(塔差);  $\rho=206\,265''/\text{rad}$ 。

由仿真计算可知, 控制综合塔差和减小测量步距均可以减小测量误差。在  $30^\circ$  的测量步距下, 塔差控制在  $30''$  以内, 测量误差在  $0.003''$  以下。

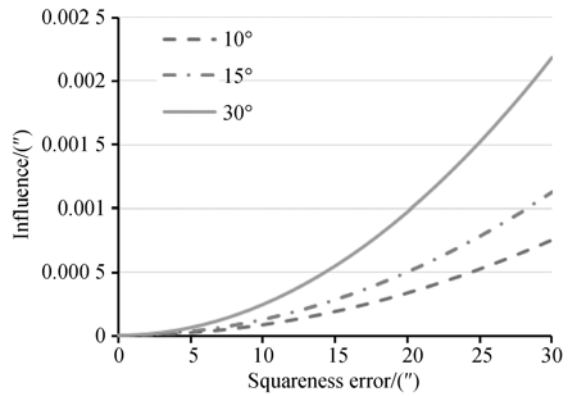


图 11 垂直度影响的计算结果

Fig. 11 Calculation results of effect of squareness error

#### 4.3 仪器因素

被测仪器的重复性是影响测量准确度的重要因素, 标准角度测量仪器的重复性通常采用双观测量法检定, 测量在整圆周均布  $n$  个位置进行。

重复性为:

$$u_2 = s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha'_i)^2}{2n}}, \quad (17)$$

式中:  $\alpha_i$  为第一周第  $i$  个相邻工作角的测量值;  $\alpha'_i$  为第二周第  $i$  个相邻工作角的测量值。

某次试验的测量重复性取决于测量程序、人员、仪器、环境等因素, 在程序、人员、环境一致的情况下, 则大部分取决于仪器本身的特性, 所以在同一测量过程中应尽量保持以上因素的一致性。

## 5 试 验

### 5.1 分度台校准试验

利用搭建的测试系统对某型 1440 齿精密分度台(标称精度为  $\pm 0.1''$ )进行校准,试验过程中对可能的影响因素进行了严格控制,包括温度波动( $<0.2^\circ\text{C}$ )、湿度波动( $<0.5\%$ )、安装偏心( $<0.001\ \mu\text{m}$ )、多面棱体工作面平面度(优于  $50\ \text{nm}$ )及塔差( $<30''$ )等。试验采用的基本分度角为  $30^\circ$ ,测回数为 12,利用第 3 节的算法进行数据处理。

### 5.2 不确定度评定

#### 5.2.1 数学模型

最大分度间隔误差为:

$$\Delta = \max\left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_{i,j} - \sum_{i=1}^n \alpha_{i,1}\right)/n\right] - \min\left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_{i,j} - \sum_{i=1}^n \alpha_{i,1}\right)/n\right], \quad (18)$$

式中: $n$ 为测量系列数; $i$ 为棱体位置; $j$ 为分度台位置。

不确定度为:

$$u_c = \sqrt{c^2(A)u^2(A)} = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 u_i^2}, \quad (19)$$

式中灵敏系数  $c_i = c(A) = \sqrt{n-1}/n$ 。

#### 5.2.2 不确定度来源

根据前述的分析及不确定度评定的一般思路,不确定来源主要有以下 6 个方面:

- (1)光电自准直仪的示值误差;
- (2)光电自准直仪的量化误差;
- (3)转台的重复性;
- (4)正多面棱体平面度误差;
- (5)反射面与基准面的不垂直;
- (6)回零误差。

#### 5.2.3 不确定度计算

不确定度分量的计算可以依据不确定评定准则,结合第 4 节分析的影响因素进行计算,结果如表 3 所示。

表 3 不确定度汇总表

Tab. 3 Uncertainty budget

不确定度分量	参数名称	参数值	分量值/ ( $''$ )	$\nu_i$
$u_1$	自准直仪示值误差	$\pm 0.05''$	0.029	50
	自准直仪量化误差	$0.05''$	0.02	50
$u_2$	转台重复性	$0.02''$	0.02	23
$u_3$	多面体工作面平面度	50 nm	0.035	50
$u_4$	反射面与基准面不垂直	$35''$	0.002	50
$u_5$	回零误差	$0.1''$	0.058	50
$c_i$		0.276		
合成标准测量不确定度: $u_c=0.022''$				
扩展不确定度: $U=0.05''$ ( $k=2$ )				

### 5.3 试验结果与对比分析

试验一共获得 12 组共 144 个数据,经数据处理和不确定度评定,获得了分度台的校准结果以及角度计量转台自身的校准结果。图 12 给出了分度台圆分度误差的校准结果,将结果与制造商和中国计量科学研究院(NIM)提供的校准结果进行比较。制造商和 NIM 在他们提供的校准证书中报告的校准结果中最大圆分度误差分别为  $0.12''$ 和  $0.15''$ 、扩展不确定度均为  $0.05''(k=2)$ 。从图中可以看出,实验室对分度台最大圆分度误差的校准结果为  $0.15''$ ,考虑到不确定度因素,3 个校准结果显示良好的一致性。图 13 给出了计量转台的圆分度误差,其最大值为  $0.12''$ 。

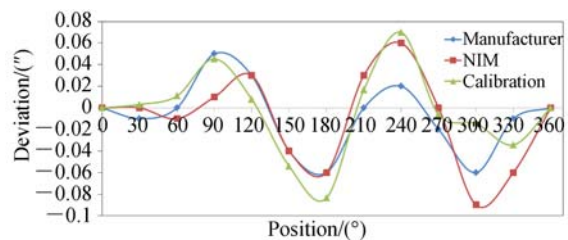


图 12 分度台的圆分度误差

Fig. 12 Calibration results of indexing table

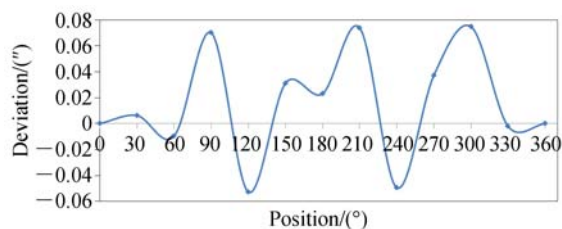
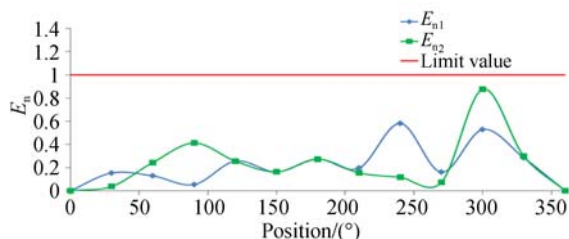


图 13 角度计量转台的圆分度误差

Fig. 13 Position error of angle comparator

图 14  $E_n$  值曲线Fig. 14 Curve of  $E_n$  value

为验证该方法的正确性,采用实验室(测量审核)最常用的  $E_n$  值比较法(当  $E_n \leq 1$  时,比对为满意结果;当  $E_n > 1$  时,比对为不满意结果),将多齿分度台的圆分度误差分别与制造商和中国计量科学研究所的校准结果进行比较,得到:

$$E_n = \frac{|y_{\text{lab}} - y_{\text{ref}}|}{\sqrt{U_{\text{lab}}^2 + U_{\text{ref}}^2}}, \quad (20)$$

式中:  $y_{\text{lab}}$  为实验室校准结果;  $U_{\text{lab}}$  为实验室扩展测量不确定度;  $y_{\text{ref}}$  为参考实验室校准结果;  $U_{\text{ref}}$  为参考实验室扩展测量不确定度。

图 14 为计算得到的  $E_n$  值曲线,图中  $E_{n1}$  为以制造商校准结果为参考的  $E_n$  值,  $E_{n2}$  为中国计量科学研究所提供的参考值,二者均未超过极限

值。但是从图中可以看出,  $E_{n2}$  曲线在  $300^\circ$  的时候明显偏大(达到了 0.83),其原因可能有以下几个方面:

(1) 由于采用全组合法测量多齿分度台圆分度误差时,采用的是定点的静态测量,被测对象的定点重复性对测量不确定度的影响较大;

(2) 由于不同的测量环境、人员和测量仪器的波动,某些点位存在测量误差偏大的情况,从而导致某些点位的  $E_n$  值偏离;

(3) 仅通过归一化偏差  $E_n$  值计算方法,并未对全部对比过程进行控制,导致  $E_n$  值存在偏离。

## 6 结 论

本文介绍了一种高精度角度计量转台,它使用真空预载气浮支承、超声马达摩擦驱动、双读数头编码器反馈控制,具有分辨率高、精度高、结构简单等优点。基于该转台搭建了角度测量系统,系统分析了基于无实物基准的圆分度误差测量算法的消差原理,获得了高精度圆分度误差计算模型。针对构建的测量系统及精度指标讨论了测试过程中可能对测量结果产生影响的因素,并制定了相应的抑制方法。最后,在构建的测量系统上对多齿分度台的圆分度误差进行了校准,并将校准结果分别与中国计量科学研究所(NIM)、制造厂家的结果进行比对分析。实验结果表明:自研计量转台和被校多齿分度台的最大圆分度误差分别为  $0.12''$  和  $0.15''$ ,测量不确定度为  $0.05''$  ( $k=2$ )。比对结果表明,测量系统满足亚角秒级圆分度误差的高精度校准要求。

## 参考文献:

- [1] 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 & Manufacturing*, 2013, 14(3):367-371.
- [2] 刘万里, 曲兴华, 欧阳健飞, 等. 激光跟踪测量系统角度自动校正装置设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1695-1700.
- [3] LIU W L, QU X H, OUYANG J F, et al. Design of angular automatic calibration mechanism for laser tracker system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1695-1700. (in Chinese)
- [4] KESABA P, CHOUDHURY B B, MUNI M K. An effective prediction of position analysis of industrial robot using fuzzy logic approach[C]. *Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Computing, Networking and Informatics*. Springer India, 2016:45-54.
- [5] FENG X. A new watermarking algorithm for point model using angle quantization index modulation [C]. *4th National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*, Xi'an, 2016:

- 963-968.
- [5] ZOU H B, CHEN X D, XIA H J. Modeling of the positioning error in ultra-precision machine tools [J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 679:33-36.
- [6] OIWA T, KOBAYASHI K, TERABAYASHI K, *et al.*. *Ultra-precision Machine System Feedback-controlled with Hexapod-type Measurement Device for Six-degree-of-freedom Relative Motions Between Tool and Workpiece*[M]. Springer International Publishing, 2016:330-334.
- [7] JUST A, KRAUSE M, PROBST R, *et al.*. Comparison of angle standards with the aid of a high-resolution angle encoder [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(4):530-533.
- [8] GECKELER R D, FRICKE A, ELSTER C. Calibration of angle encoders using transfer functions [J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17(10):2811-2818.
- [9] 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 & Technology*, 2013, 25(25):303-309.
- [10] ESTLER W T, QUEEN Y H, BRYAN J. An advanced angle metrology system [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1993, 42(1):573-576.
- [11] PROBST R, WITTEKOPF R, KRAUSE M, *et al.*. The new PTB angle comparator [J]. *Measurement Science & Technology*, 1998, 9(7):1059-1066.
- [12] PISANI M, ASTRUA M. Towards the realization of the new INRIM angle comparator [C]. *13th EU-SPEN International Conference. Berlin, Germany*, 2013:179-183.
- [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 & Technology*, 2014, 25(25):065002.
- [14] KIM J A, KIM J W, KANG C S, *et al.*. Note: high precision angle generator using multiple ultrasonic motors and a self-calibratable encoder [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(11):116108.
- [15] ANDREASSEN C N, ALSNER J, OVERGAARD M, *et al.*. A shearing-based method for the simultaneous calibration of angle measuring devices [J]. *Measurement Science & Technology*, 2014, 25(10):174-186.
- [16] SU A, LIU H. Multiple reflectors based autocollimator for three-dimensional angle measurement [C]. *International Conference on Experimental Mechanics 2014*, 9302:9302301-9302307.
- [17] JING X, CHENG H, XU C, *et al.*. Method to measure the position offset of multiple light spots in a distributed aperture laser angle measurement system. [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(6):1740-1747.
- [18] 范天泉, 谢长文, 陆德基, 等. 排列互比法用于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 intercomparison method using in superprecision angle measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(2):98-103. (in Chinese)
- [19] AKAGAWA O, FUKAZU K, NAGAOKA R, *et al.*. Two-dimensional blood flow vector and wall shear stress of carotid artery obtained with dual-angle Doppler method [C]. *Ultrasonics Symposium. IEEE, Tours, France*, 2016:1-4.
- [20] BUONO E W, VRIJENS B, BOSWORTH H B, *et al.*. Coming full circle in the measurement of medication adherence: opportunities and implications for health care [J]. *Patient Preference & Adherence*, 2017, 11:1009-1017.
- [21] 田留德, 赵建科, 王涛, 等. 测试设备位姿失调对自准直仪法测量圆分度误差的影响 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9):2267-2276.
- TIAN L D, ZHAO J K, WANG T, *et al.*. Influence of test equipment pose error on dividing error measurement based on autocollimator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9):2267-2276. (in Chinese)
- [22] 艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11):2479-2484.
- AI CH G, CHU M, SUN H X, *et al.*. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2479-2484. (in Chinese)
- [23] 卢荣胜, 李万红, 劳达宝, 等. 激光跟踪仪测角误差补偿 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9):2299-2305.
- LU R SH, LI W H, LAO D B, *et al.*. Angular error

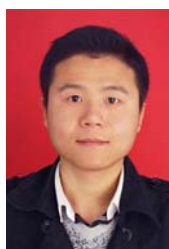
- compensation for laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2299-2305. (in Chinese)
- [24] 王福全, 王珏, 谢志江, 等. 精密转台角分度误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8):2165-2172.
- WANG F Q, WANG J, XIE ZH J, *et al.*. Compensation of angular indexing error for precision turntable[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2165-2172. (in Chinese)
- [25] 全国几何量角度计量技术委员会. JJG 472-2007 多齿分度台检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2007: 8.
- National Geometric Metrology Technology Committee of China. JJG 472-2007 verification regulation of precise angle dividing table [S]. Beijing: *China Metrology Press*, 2007: 8. (in Chinese)

#### 作者简介:



**黄明** (1972—), 男, 四川汉源人, 硕士, 研究员, 1998 年于重庆大学获得硕士学位, 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所副所长, 主要从事精密计量装备和超精密加工关键技术的研究。E-mail: hmhy1972@163.com

#### 通信作者:



**夏仰球** (1987—), 男, 江苏宿迁人, 硕士, 工程师, 2010 年、2013 年于南京理工大学分别获得学士和硕士学位, 主要从事高端工艺装备研制及检测技术的研究。E-mail: xiayqiu@caep.cn

#### 导师简介:



**刘品宽** (1969—), 男, 湖北天门人, 博士, 研究员, 1991 年、1995 年、2003 年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位, 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。Emai: pkliu@sjtu.edu.cn