

# “角度基准”中系统误差的修正

杨进堂

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** “圆光栅用于角度基准的研究”(角度基准)为国家提供了一台光、机、电、计算机相结合的仪器,它加工装调精细,又采用了许多高新技术,为高精度测角奠定了坚实基础。使用计算机误差修正技术,又进一步提高了仪器的测角精度。本文在分析了分度基准和细分器产生系统误差的根源之后,分别介绍了两种系统误差的测量与修正。

**关键词:** 角度基准; 圆光栅; 系统误差修正

## 1 前 言

“圆光栅用于角基准的研究”<sup>[1]</sup>为国家提供了一台光、机、电、计算机相结合的仪器,1993年被国家技术监督局批准为国家的“线角度计量基准”。

“角度基准”采用了高精度低速动压轴系(径向回转精度为 $0.023 \mu\text{m}$ )、64800线高精度圆光栅(最大直径间隔误差为 $0.1$ )、大视场莫尔条纹多头平均、两万倍相位细分技术等高新技术,并具有自检、测量自动转位、数据处理自动化和动静态测量等功能。所有这些,为仪器的高精度测角奠定了坚实的基础。但是硬件处理并不是万能的。尽管仪器基准分度系统采取了许多有效平差措施,还存在一定小量的系统误差。仪器一旦装调完毕,轻易改动又不可能。计算机的使用不仅使仪器测量自动化,数据处理自动化,也为仪器系统误差的修正提供了可能,为提高仪器测量精度作出了贡献。

## 2 分度基准系统误差的修正

仪器分度基准的分度误差是衡量仪器整周范围测角的主要指标。这种误差分为系统误差和随机误差。其中系统误差是由基准圆光栅中未平差掉的残留量等因素造成的。

“角度基准”的分度系统<sup>[2]</sup>是这样设置的(见图1):

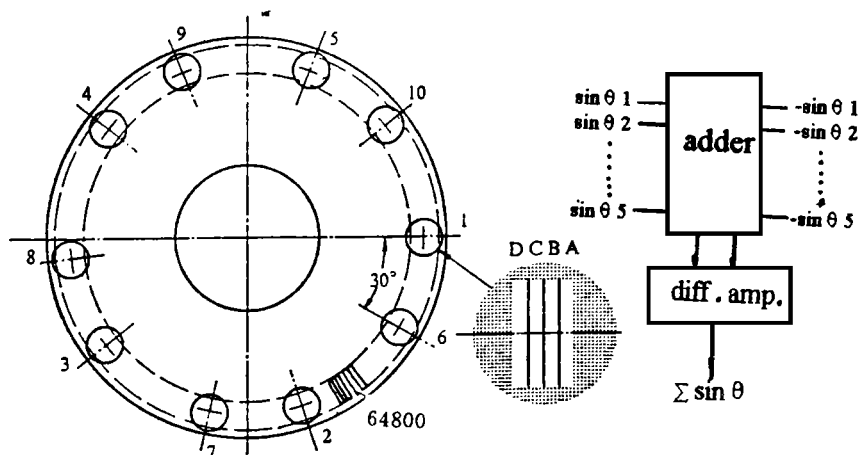


Fig. 1 Diagram of standard subdividing system

该系统采用10个读数头。分两组，每组5个72°均布。为消除30次谐波量误差，两组读数头间相错30°。假如一个读数头获得的莫尔条纹信号的分度误差曲线  $F(\theta)$  表达式为：

$$F(\theta) = \sum_{k=1}^n I_k \sin(k\theta + \varphi_k) \quad (1)$$

式中  $\theta$  为圆光栅的角度位置； $I_k$  为分度误差在  $k = 1, 2, \dots, n$  时的幅值； $\varphi_k$  为初相角。

按图1方式分布，根据向量合成<sup>[3]</sup>得到的标准莫尔条纹信号，其合成分度误差  $F(\theta)_k$  的表达式为：

$$F(\theta)_k = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^n \{ [4 \cos k(180^\circ - 72^\circ) \cos k(180^\circ - 144^\circ) + 1] \times \cos k 15^\circ \sin k(\theta + 159^\circ) \} \quad (2)$$

分析式(2)，除剩余5, 10, 15, 20, 25次误差谐波量外，其它误差谐波量均被消除。因检测高精度线纹圆分度件采用直径误差表示。 $k$  为5, 15, 25的误差谐波量对径消除。唯10, 20的误差谐波量存在， $k$  为20的还减小一半。根据实测基准圆光栅的误差分析， $k > 10$ 的谐波幅值小于0.005， $k$  为10次的误差谐波幅值约为0.02。这一项是分度基准系统误差的主要来源。

由于圆分度的自封闭原理，一般采用全组合法。形成一个矩阵数据库，最终求出仪器的系统误差和随机误差来。全组合的检测间隔决定分度误差的检定精度。过去受各种条件的限制，检测间隔选取10或10以上。“角度基准”测量转位自动，数据处理自动化，大大节省了运转时间，全组合检测间隔选定为5°。具体测量过程是：

用一块刻划中径为280 mm，光栅刻线为32400的陪测光栅盘，与基准盘同轴安放在仪器工作台上。从基准盘0°起始，以每5°间隔将两光栅的莫尔条纹信号，在整周范围内逐次互比两次。分别取各对应点两次测量平均值作第一系列。然后逐次以5°增量，将陪测盘与基准盘错位，直至355°均按第一系列的方法互比得72个系列，共取得5184(72<sup>2</sup>)个平均测量值，按最小二乘法分别等权求得前半周的、完全消除了陪测盘直径误差的基准盘直径误差和测量不确定度(0.003)。最后将前半周的基准盘直径误差的平均值作为仪器的系统误差(见图2)

基准盘最大直径间隔误差(峰-峰值)  $E_1$  为0.052。

同时从基准盘与陪测盘排列互比中求出直径间隔误差单次测量标准差(即随机误差)  $\sigma$  为0.01。

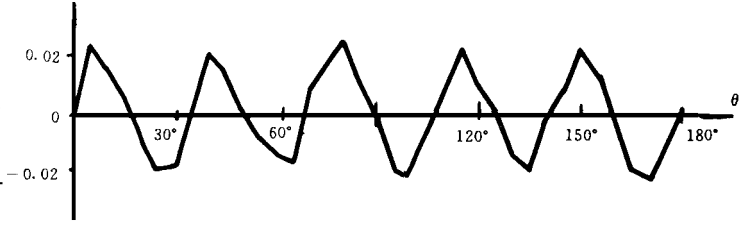


Fig. 2 Systematic error curve of subdividing standard

从图2明显看出, 角度基准的系统误差在半周范围内呈5个起伏变化, 且幅值约为0.025。我们用函数  $f(\theta)$  来模拟图2的曲线。

$$f(\theta) = 0.025\sin(10\theta + \varphi) \quad (3)$$

计算机用此数学模型进行误差修正, 仪器的系统误差基本上被消除掉。

### 3 信号细分误差修正

信号细分误差是衡量仪器光栅栅距内的插补均等程度, 它也是仪器的一项主要指标。

从单个读数头得到的莫尔条纹质量较差, 不能满足高精度细分的要求。为了满足高精度细分的要求, 我们采用大视场接收、多头平均交错裂相、裂相差分等手段, 差分放大器又选用仪用差分放大形式, 使得改变放大倍数不改变共模抑制比, 并抵消光电信号的直流电平, 保证莫尔系统信号稳定可靠。最终获得的莫尔条纹信号的四项指标为:

直流分量变化  $e < 0.5\%$ , 不正交性  $< 0.4^\circ$ ; 正弦信号幅值比  $< 0.7\%$ , 不正弦性  $< 1.2\%$ 。

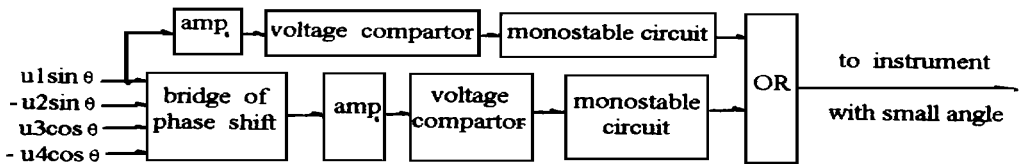


Fig. 3 Diagram for measuring subdivision error

根据 Mcilraith<sup>[4]</sup>的分析, 莫尔条纹相位调制细分1000等分, 要求莫尔条纹信号为: 直流分量变化  $e < 0.6\%$ , 不正交性  $< 0.7^\circ$ ; 正弦信号幅值比  $< 1.2\%$ , 不正弦性  $< 0.6\%$ 。显然不正弦性这项指标超差。根据实测, 主要是二次谐波偏大。从里沙尔图形看, 差分输出的正弦信号和余弦信号形成的圆有明显的畸变, 但稳定不变。

测量信号细分误差用的是动静态激光小角度测量仪,其分辨率为0.0136。测量范围为 $\pm 1$ 时,仪器总不确定度优于0.02。用动态测量方式,其外接输入接线图见图3。

用 $u_1 \sin \theta$ 信号作开门信号,依次用 $0 \sim 2\pi$ 的移相信号作关门信号,测量出二者之间的角值。如在20的栅距内测20个点,按1递增测量。把小角仪测出的值当标准值,与仪器细分器读出值进行比较,得出细分误差。

我们也用移相比相法进行过测量,二者的结果非常接近(见图4)

这样仪器信号的最大细分间隔误差 $E_2$ 为0.10(峰—峰值)。由图4看出,信号细分误差明显存在系统误差。这种系统误差在主轴转动的不同位置上也十分重复。为此采用误差修正正是可能的。我们按照查表法,经计算机修正,细分器的系统误差被消除掉。修正后测出的仪器信号的最大细分间隔误差为0.024(见图5)。

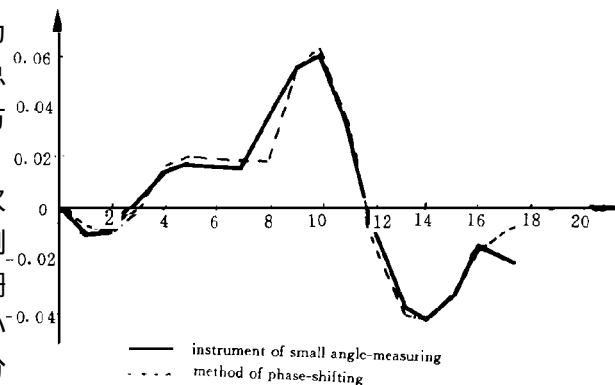


Fig. 4 Error curve of subdivided signal without error revision

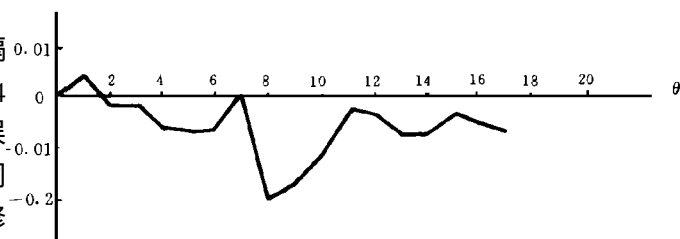


Fig. 5 Subdivided error curve with error revision

## 4 计算机修正的效果

误差修正技术的使用明显地提高了仪器的测角精度。现将角度基准误差修正前后的情况作一比较,见下表。

Tab. 1

	$E_1$	$E_2$	$U_j$	$U_c$
U nrevision	0.052	0.101	0.117	0.124
revised	0	0.024	0.028	0.055

表中 $U_j$ 为仪器的总不确定度,其主要由 $E_1$ 、 $E_2$ 及其相应的测量不确定度 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 决定; $V_c$ 为仪器测量光栅盘的总不确定度, $V_c$ 由下式得到:

$$V_c = \sqrt{V_j^2 + (3 \sqrt{2} \sigma)^2} \quad (4)$$

国内的几台高精度测角仪器,经鉴定确定其 $V_c$ 分别为0.06、0.08、0.14、0.16。角度基准误差修正后,检测一般圆光栅的总不确定度为0.055,检测高精度圆光栅时为0.050。它

还具备动静态测角功能。参与此项工作的有胡国 、魏风岑、胡卫兵、张建华、张 宁等。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 朱应时等. 圆光栅用于角度基准的研究. 计量技术, 1995, 8( 专刊): 5 ~ 8
- [ 2 ] 朱应时, 杨进堂. 圆光栅的高精度高质量莫尔条纹信号的研究. 计量学报, 1995, 16( 4): 280 ~ 285
- [ 3 ] Graham R M Y. The Calibration of a Radial Grating System for Precision Angle Measurement. Microtechnic, 1970, 24( 7): 413 ~ 416
- [ 4 ] McIlraith A M. A Dynamic Moire Fringe Interpolator. J Sci Instrum, 1966, 43(2): 585 ~ 589

## Revision of Systematic Error of Angle Standard

Yang Jintang

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

### Abstract

Study of radial gratings used in Angle Standard(Angle Standard) , which is a measure instrument with optics, mechanics, electronics and computer technique, lays a solid foundation for measure angle with high accuracy. Applying computer error revision technique, the instrument can obtain higher measure accuracy. On the basic of analysis of systematic error from dividing standard and subdivision unit, the methods of measure and revision of the systematic errors are described in this paper.

**Key words:** Angle standard, Radial gratings, Systematic error revision.

**杨进堂** 男,生于1941年,1966年毕业于太原工业大学,付研究员。工作后一直从事线纹计量工作。两项课题获中科院科技进步一等奖,其中角度基准又获国家科技进步二等奖(是两课题的负责人之一),“圆光栅高质量莫尔条纹光电信号系统的研究”获中科院自然科学三等奖。