

# 光电定角比相法检测圆光栅测量精度的提高

张红胜, 冯长有

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 用公式推导说明了影响光电定角比相法检测圆光栅刻划误差测量精度的因素, 并用两台测量精度不同的仪器做了实验验证。文中提出, 在仪器稳定, 主轴回转精度高的前提下, 再采用分光裂相法读数, 异或门鉴相、“内插法”、“对称联系法”等措施, 就能获得较高的测量精度。

**关键词:** 圆光栅; 刻划误差; 常角法

**中图分类号:** TN 253      **文献标识码:** A

## 1 引言

光电定角比相法是检测圆光栅或码盘刻划误差的一种动态测试方法。这种方法是在常规的光学定角检验法<sup>[1]</sup>启示下试验成功的。它把光学读数显微镜换成莫尔条纹读数头, 按照常角法的组合规则检测出圆光栅或码盘的刻划误差。光电定角比相法的装置主要由精密主轴、传动系统、读数系统、前置放大、比相器和记录仪组成。如配上计算机数据处理, 可在  $\varphi$ - $V$  转换后, 经采样保持器, 数据采集系统, 由计算机给出误差数据(见图1)。光电定角比相法原于光学检验法, 但又和光学检验法不同, 主要特点为:

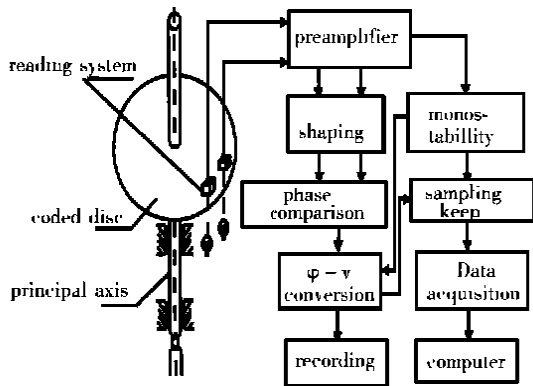


Fig. 1 Diagram of photoelectric phase-comparing method

(a) 提高刻线读数的精度。光电定角比相法的读数系统与圆光栅的使用条件基本一致, 具有莫尔条纹的平均效应, 而用光学显微镜只能瞄准一根刻线。而且人眼读数和光学显微镜的自身误差也比较大。

b) 测量时间大大缩短。用光电定角比相法检测圆光栅, 一个人操作用五分钟左右的时间就可以把圆光栅的刻划误差信息全部采集下来, 而光学检验法, 当测量间隔为 3 时, 三个人至少用两天的时间。这样人员疲乏和记录失误造成的误差也在所难免。

c) 光电定角比相法可以反映被测盘的长周期误差, 中周期误差和局部跳动等误差, 而光学检验法不易反映出中周期误差和局部跳动误差。

用光电定角比相法检测圆光栅的刻划误差比用光学检验法要优越得多。但是用光电定角比相法和比较法的光电检验仪(如我所研制的六十进制光电圆分度检验仪等)相比是怎样的呢? 从原理可知, 光电定角比相法的测量精度不能做得较高, 其主要原因是: 光电定角比相法受常角的限制, 检测精度具有不等权性等。但光电定角比相法也有其可取之处, 如装置简单、建置费用较少(与比较法光电检验仪相比少一倍之多)。维护方便, 能检测各种进制的圆光栅和码盘, 在我国发展市场经济的今天, 探索其测量精度的提高是十分重要的。

### 2 推导分析

检测圆光栅的光电定角比相法,是将被测盘与一个接近等大的固定角相比较。那么这种方法影响测量精度的因素是什么呢?

光电定角比相法所测曲线包括被测盘刻划误差、主轴晃动、偏心差等。按测量间隔将一周曲线分点,再对径处理。这样既去掉了偏心,又找出对径处理后的观测值。

常角法求解圆分度件直径间隔误差的一般表示式为<sup>[2]</sup>:

$$V_i = f_{(i,i+1)} + A_i - \delta\beta \quad (1)$$

式中  $A_i$  为对径处理的观测值;  $V_i$  表示观测值  $A_i$  的误差;  $f_{(i,i+1)}$  是直径间隔误差;  $\delta\beta$  是个常量,它是实摆常角与理论名义角相关的值。

由(1)式写出下列方程式组:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= f_{(1,2)} + A_1 - \delta\beta \\ V_2 &= f_{(2,3)} + A_2 - \delta\beta \\ &\vdots \\ V_s &= f_{(s,1)} + A_s - \delta\beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由圆分度件直径间隔误差的闭合条件(即

$\sum_{i=1}^s f_{(i,i+1)} = 0$ ,  $S$  是被测直径间隔数),取(2)式等号两边和,求出  $\delta\beta$ ,并令  $C = \delta\beta$ ,那么:

$$C = \delta\beta = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^s A_i \quad (3)$$

这样(2)式可以改写成一般式为:

$$V_i = f_{(i,i+1)} + A_i - C \quad (4)$$

当不计  $V_i$  时,求解直径间隔误差一般方程式为:

$$f_{(i,i+1)} = C - A_i \quad (5)$$

由(3)式知,  $C$  值是一个系列观测值的平均值,是可知数。当将  $C$  值代入方程(5)式,并设  $L_i = C - A_i$ ,又知  $f_{(i,i+1)} = (\varphi_{i+1}) - (\varphi_i)$ , ( $\varphi_i, \varphi_{i+1}$  是相邻的直径误差),可求出直径误差的方程式:

$$\left. \begin{aligned} (\varphi) - (\varphi) &= L_1 \\ (\varphi) - (\varphi) &= L_2 \\ &\vdots \\ (\varphi) - (\varphi) &= L_s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

假定被测盘零直径的直径误差  $(0) = (\varphi) = 0$ ,那么直径误差  $(\varphi), (\varphi), \dots, (\varphi)$  就相继求了出来。

从这些公式推导中可以看出,影响光电定角比相法检测圆光栅刻划误差测量精度主要有两个因素:

a) 从(5)式看出,圆光栅刻划误差曲线对径处理后的观测值  $A_i$  的准确程度是重要因素。换句话说,能够获得高质量的  $A_i$ ,是提高光电定角比相法测量精度的前提。

b) 从(6)式看出,光电定角比相法在单常角测量时存在累积误差。如  $(\varphi)$  有测量误差  $\delta$ ,那

么它就会影响后边所有的数据,即累计迭加。根据误差理论,其累积误差可以近似为:

$$\left. \begin{aligned} (\varphi) &\pm \delta \\ (\varphi) &\pm \sqrt{2} \delta \\ &\vdots \\ (\varphi) &\pm \sqrt{s-1} \delta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当然这也与观察值的准确性有关。如果观察值越准确,那么带进测量误差  $\delta$  就越小,不管怎样,测量误差总是存在的,由于方法带进的累积误差不能忽视。

### 3 实验启示

六十进制光电圆分度检验仪标准盘上的读数系统见图 2,它是双五头系统,两组都是在圆周上每隔 72 均布,读数头两组之间的夹角为 30°:这台仪器的主轴回转精度为 0.05μm,标准盘和读数头安装稳定,在这上面做的实验较为理想。

a) 用比较法测量。用标准盘上的其中一路信号与“标准信号”( $\sin\theta$ )进行比相测量,在记录仪上划出误差曲线(图 3),求出直径误差值,见表 1 中的 列数据。

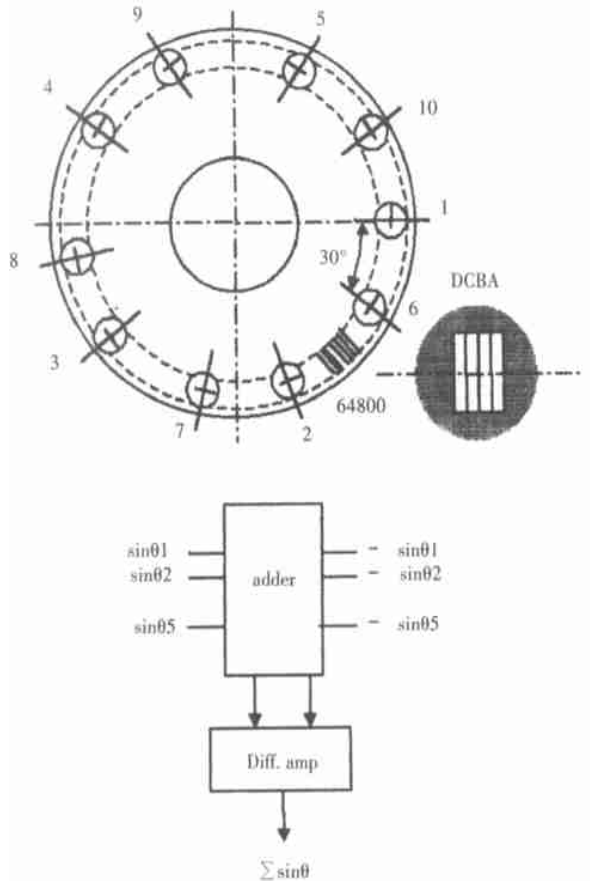


Fig. 2 Diagram of standard sub-dividing system



Fig. 3 Test graph of phase-comparing method

b) 分别用单常角  $\theta_1$  为 30 和  $\theta_2$  为 72 进行比相测量, 记录仪划出误差曲线(图 4, 图中的纵坐标是记录纸的格数), 再用“内插法”算出 6 间隔的直径误差值。两次测量的直径误差值也列入表 1 中。其中  $\theta_1$  是单常角为 30 的数据;  $\theta_2$  是单常角为 72 时的数据。

用公式  $\delta = \pm \frac{[dd]}{2s}$  (公式中的  $d$  为两列对应位置的直径误差的差值,  $S$  为被检直径数) 分别求出  $\theta_1$  列,  $\theta_2$  列数据与  $\theta_1$  列数据重复性为  $\pm 0.015''$  和  $\pm 0.013''$ , 与此同时又把单路信号  $\sin\theta_1$ 、 $\sin\theta_2$ 、 $\sin\theta_3$ 、 $\sin\theta_4$ 、 $\sin\theta_5$  分别与标准信

号  $\sin\theta$  进行比较测量, 它们相互之间的重复性  $\delta$  在  $\pm 0.011'' \sim \pm 0.016''$  范围内。在标准盘上做实验表明, 不管用光电定角比相法, 还是用比较法, 其测量准确度是很接近的。

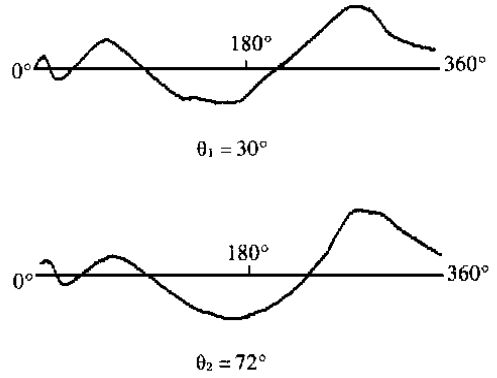


Fig. 4 Test graph of constant angle method

Table 1 Contrast of diameter error for two methods

$\theta^\circ$	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84
$\theta_1$	0.12	0.10	0.08	0.07	0.08	0.06	0.05	0.01	0	-0.04	-0.06	-0.06	-0.07	-0.10	-0.12
	0.13	0.11	0.08	0.09	0.10	0.09	0.07	0.02	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.06	-0.10	-0.15
	0.10	0.08	0.11	0.08	0.07	0.07	0.05	0.02	0.03	-0.02	-0.05	-0.07	-0.08	-0.08	-0.14
$\theta_2$	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174
	-0.12	-0.12	-0.10	-0.08	-0.07	-0.06	-0.03	0	0.02	0.04	0.05	0.06	0.06	0.09	0.10
	-0.15	-0.11	-0.11	-0.11	-0.09	-0.09	-0.05	-0.01	0.04	0.05	0.05	0.04	0.08	0.12	0.13
	-0.13	-0.13	-0.12	-0.11	-0.09	-0.03	-0.03	-0.01	0.02	0.04	0.07	0.03	0.09	0.11	0.11

在一台改造的光电定角检验仪上做实验, 其主轴回转精度约  $0.2\mu\text{m}$ , 读数系统的机械刚性也差一些。用一块  $300\text{mm}$ , 刻线为 32400 的圆光栅进行试验。图 5 是被测盘相对主轴错位  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  的误差曲线, 其相互之间的测量重复性在  $\pm 0.05'' \sim \pm 0.06''$  的范围内。

察值  $A_i$  的质量不同, 如何用光电定角比相法获取高质量的观察值  $A_i$  呢?

a) 首先要保证主轴晃动要小, 仪器要稳定可靠。能检测直径全中误差为  $\pm 0.5''$  的仪器, 主轴回转精度至少控制在  $0.1\mu\text{m}$  之内, 仪器主体的防振措施要加强。

此外, 作者认为在读数系统, 比相器和偏心调整等环节上做些文章, 也会有好的效果。

b) 读数系统采用分光的办法。由光学系统分光, 使其变成两路互为反相的, 幅度基本相等的光电信号, 然后进入差分放大器, 其输出信号为相位计的一端输入(见图 6)。“角度基准”的圆光栅读数头采用这种方法, 对提高测量重复性很有效。因为同幅反相的光电信号进入差分放大器, 反相成分放大, 而同相成分相抵。这样一来可增强抗干扰能力, 二来可抵消圆光栅直流电平变化带进的影响(主要是均匀性误差的影响)。评价圆光栅质量的主要指标是直径误差和均匀性误差, 采取一定措施防止或减少均匀性误差带入刻划误差曲线是必要的。

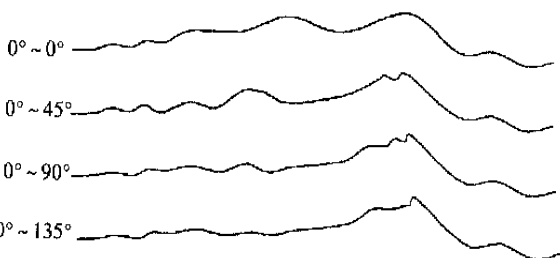


Fig. 5 Test graph of wrong position

光电定角比相法在两台仪器的测量重复性之所以有较大差距, 重要原因是两台仪器获取的观

分光的办法不是所有圆光栅都能采用,刻划直径小于 150mm 的圆光栅,由于读数头的体积问题摆不开。目前圆光栅向小型化、密线纹、高精

度方向发展。如某经纬仪的圆光栅,刻划中径为 75mm,刻线 16200,要求直径全中误差 1"。检测这种圆光栅,用分光的办法就有困难。

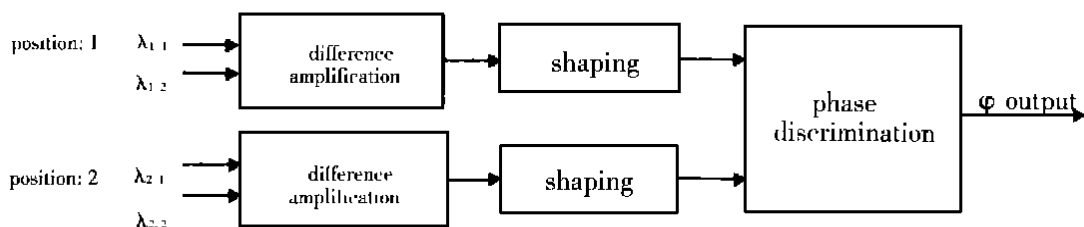


Fig. 6 Diagram of spectroscopic phase-splitting method

c) 比相器中的鉴相单元用异或门实现,这种鉴相,是光电信号的前后沿都参与工作,而传统的双稳态鉴相是单沿工作。异或门鉴相特别适合于光电定角比相法中。因其两路信号的工作频率总是一致的。异或门鉴相可消除光栅均匀性误差等因素带进的影响,抗干扰能力也能增强<sup>[4]</sup>。这种办法的读数头对于小直径的光栅(如 20mm 左右)也可测量。

d) 被测圆光栅的安装偏心要尽量小,这样分点读差的影响就小。我们做过实验,当安装偏心较大时,对刻划误差曲线的分点要求高,否则易造成较大误差;当安装偏心较小时,分点要求可放低一些。

减小或避免常角法中的累积误差,主要措施有:

a) 观察系列不要过长,对二进制的圆光栅,一个系列一般选八条直径;对于六十进制的圆光栅,一般选九条直径。如果要求测更多的直径,就采用“内插法”解决。如一块六十进制的圆光栅,要求 5° 间隔给出数据,采用“内插法”,等间隔选四个系列,每个系列求出九条直径,然后按顺序将 36 条

直径误差排列出来即可。

b) 按检测精度的不同要求选择下列方法: 威特法、全组合常角法、对称联系法,用计算机编程处理,这样工作量适当,又可避免带进累积误差的缺陷,可获得测量等权的效果。

## 4 结 束 语

a) 在被测圆光栅上,按摆置的常角,用莫尔条纹读数头拾取出两路光电信号进行比相,画出刻划误差曲线。刻划误差曲线较全面反映了被测盘的长周期误差,中周期误差和封闭差。在仪器稳定、可靠,主轴回转精度高,读数头采用分光裂相法和异或门鉴相,再用“内插法”、“对称联系法”等能减小或避免累积误差的方法,就能获得较高的测量精度<sup>[4]</sup>。

b) 按照国际计量局建议,测量不确定度用标准差表示。为此圆光栅的刻划误差用直径全中误差表示为宜。根据我们的工作经验,用光电定角比相法给出直径全中误差较为适宜<sup>[5]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 耶列谢也夫 C B. 测量仪器学[M]. 科学出版社, 1956.
- [2] 角度计量编写组. 角度计量[M]. 北京: 中国标准出版社, 1984.
- [3] 杨进堂. 异或门鉴相在计量光栅检测中的应用[J]. 计量技术, 1996(9): 11- 13
- [4] 杨进堂. 用直径全中误差表征圆分度件的刻划误差[J]. 计量技术, 1997(5): 10- 12
- [5] 杨进堂. “角度基准”中系统误差的修正[J]. 光学精密工程, 1997, 5(1): 142- 146.

## Improvement of measurement precision of circular raster by photoelectric phase-comparing method for angle positioning

ZHANG Hong-sheng, FENG Chang-you

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China*)

**Abstract:** Formula is used to explain the factors affecting the measurement precision of score errors of the circular raster by photoelectric phase-comparing method for angle positioning. It is proved that, under the conditions of high stability of the instrument and high turning precision of principal axis, the higher measurement precision can be achieved by using spectroscopic phase-splitting method for reading system, inverted OR gate for phase-discrimination, interpolation method and symmetry relation method.

**Key words:** circular raster; scoring errors; constant angle

作者简介: 张红胜(1961-),男,吉林长春市人,工程师,从事线纹计量工作。