

# 相位计在线纹计量中的应用

杨进堂

## 一、前言

相位计又称比相器，它是用来测量两列频率相同的正弦电信号之间相位差值的仪器。我们从一九六六年开始使用相位计  $QSL-\Phi I$ ，用于动态检测编码器，一九七〇年将相位计用于一台二进制的码盘和光栅度盘光电检验仪上，之后又购买了两台相位计（ $PX-1$ 型和  $BX-13$ 型），七八年又研制了一台全晶体管的相位计。从七〇年到现在，检测了上千块码盘和光栅盘，积累了一些经验。

光电检验仪是属于比较测量的一种仪器（示意图见图1），它利用一块高精度的“标准”光栅盘安装在一根精密主轴上，在“标准盘”的圆周上按适当的间隔布置了十个莫尔条纹读数头，再将这十路信号平行平均后，输出莫尔条纹光电信号（近似正弦信号）。由于平均作用，这种光电信号的精度是比较高的，可作为“标准信号”。从被测盘上取出一个莫尔条纹光电信号，称“被测信号”。被测信号与标准信号比较，得到被测盘的误差。在检测时，精密轴系匀速运动，使标准信号系统和被测信号系统同时输出两列近似正弦的光电信号，经相位计比相。与相位成正比的直流电压量在电子电位差计上划出的刻划误差曲线，能较全面的反映出光栅盘或码盘的误差。

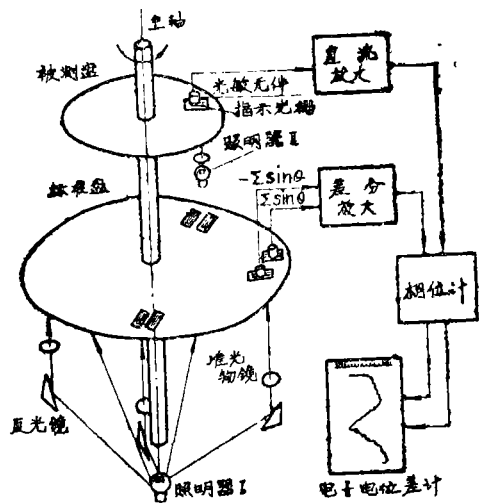


图1

## 二、相位计的原理简述及几种相位计的检测比较

相位计是将连续输入的两列正弦信号之间的相位差较准确的分辨出来。我们接触到的鉴零式相位计的工作原理是：（见图2）两列输入信号分别经放大（或放大、限幅）、整形、微分电路形成具有陡峭前沿的正负交替的尖顶脉冲串。这样两路输入信号的相位差就变成对应负脉冲的时间间隔，微分脉冲去启动双稳态电路，双稳态电路的一种工作状态的持续时间与对应的相邻负脉冲间的相隔时间一致。经鉴相器的相位差有三种显示形式：（1）将鉴相后的方波填充很多的脉冲（填充的数目由相位计的最小分辨率决定），用计数的形式显示；（2）将鉴相后的方波输入平均网络，将相位差转换成与之成正比的直流电压量，再由数字电压表将它显

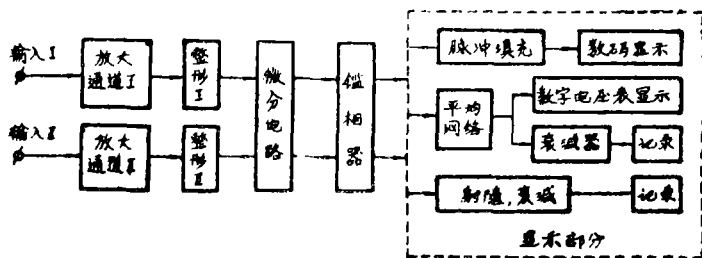
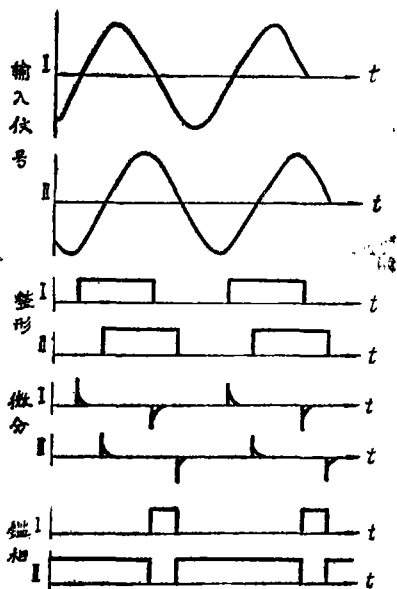


图2 相位计工作原理图(a)方框图



(b) 波形图

示出来(也可划曲线);(3) 将鉴相器两输出端的矩形脉冲(正好反相)同时经滤波,变为与相位成正比的直流电压量,经过射随器耦合,相位差由记录仪记录下来。

对于通用的相位计,由于输入信号频率和幅度大小差异很大,为保证测量精度,对放大通道部分要求极其严格。在光电检测仪的使用中最高频率不超过 500C/S, 输入幅度也较固定,一般是2~6伏(有效值),这样可对相位计放低要求。我们研制的两种相位计电原理方框图如下:

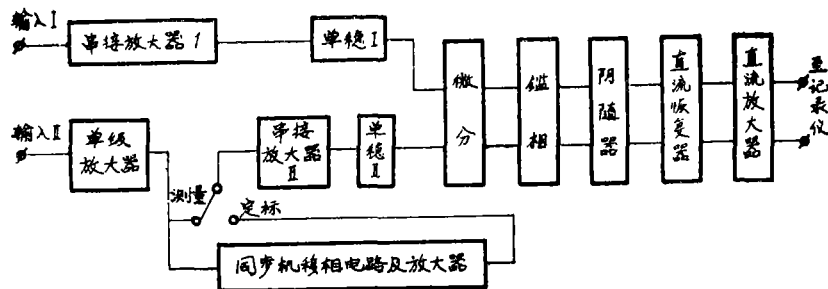


图3 QSL- $\Phi$  I 方框图

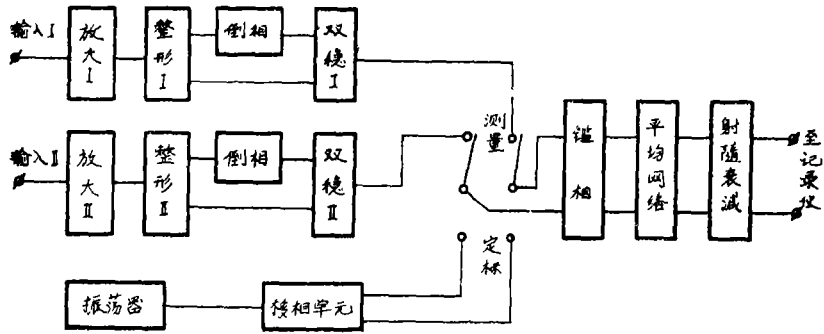


图4 QSL-φ II方框图

现将四种相位计的性能、显示情况等列表如下：

表1:

名称	制造单位	制造时间	使用管类	放大通道	测量误差	显示形式
QSL-φ I	本所	六六年	全电子管	串接放大	±2.0°	曲线记录
QSL-φ II	本所	七八年	全晶体管	放大	±1.5°	曲线记录
BX-13	天津红光厂	六九年	全晶体管	放大、限幅	±0.3°(厂标)	计数数码显示
PX-1C	上海第二电表厂	七六年	电子管、晶体管	放大、限幅	±0.3°(厂标)	模拟数字显示

在测试的过程中,我们反复多次用这四种相位计对同一块光栅盘或码盘进行了比较测量。测量结果表明,这些相位计在精度上都能满足测量要求。下面是三组测试比较曲线:

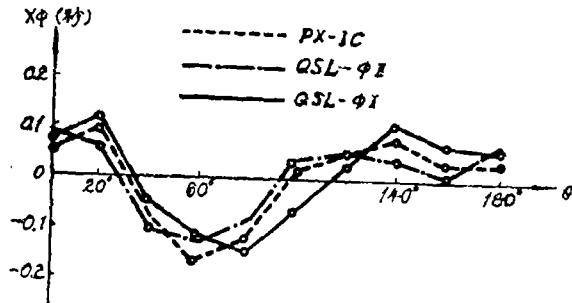


图5 PX-1C、QSL-φ I、QSL-φ II 分别对某一光栅盘两次组合测试的直径全中误差比对曲线(被测盘相对主轴转90°)

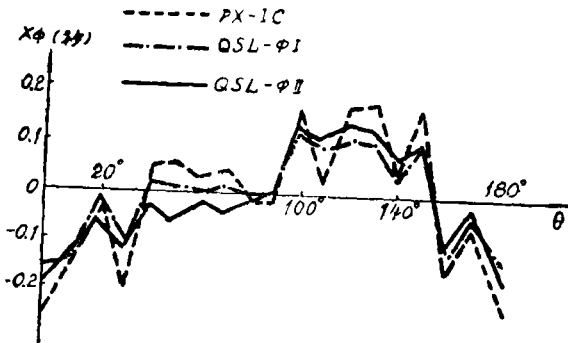


图6 PX-1C、QSL-φ I、QSL-φ II 分别对另一光栅盘两次组合的直径全中误差比对曲线(被测盘相对主轴转90°)

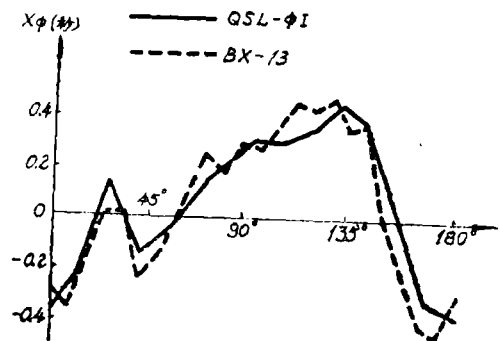


图7 BX-13、QSL-φ I 分别对某18位码盘的直径全中误差比对曲线

### 三、相位计在线纹计量中获得的成果

在光电检验仪没有研制成功之前，我们用光学度盘检验仪检测光栅度盘和码盘。一般用单常角法，要求高时用叶里谢也夫法、郝维林克法等。这些方法除检验所需时间长外，还有一个缺点就是不能全面反映被测盘上的刻划误差。但是利用相位计进行连续比相，使被测的光栅盘和码盘的刻划误差能充分反映出来。

#### 1. 中周期误差的发现

我们曾用光学法检测一块精度合格的十九位码盘，但是在调试编码器时出现有规律的大误差点，使高精度编码器达不到要求。之后用光电检验仪检测发现，这块码盘带有较大的周期误差（见图8a），一周内有112个（图中 $157.5^\circ$ 出现49个），平均 $3.2^\circ$ 出现一个，误差约 $1''\sim 2''$ 。因这种误差在长周期误差和短周期误差之间，我们把它称为“中周期误差”。这种 $3.2^\circ$ 出现的有规律的误差，直接影响编码器的精度。但是这种误差用光学法检测是很难发现的。在分析产生这种误差的原因之后，在纯机械的刻划中采取措施减小中周期误差或用光电刻划消除中周期误差。图8中表示了两台圆刻机刻制的码盘具有中周期误差的曲线形状。前面说的那种高精度的十九位码盘当改用中周期误差约为 $0.5$ 角秒的码盘和光电控制刻划的码盘时（见图8c），编码器的精度满足了设计要求。

#### 2. 封闭差的发现

在刻制光栅和码盘的过程中，由于各种因素的影响，使刻划的第一根

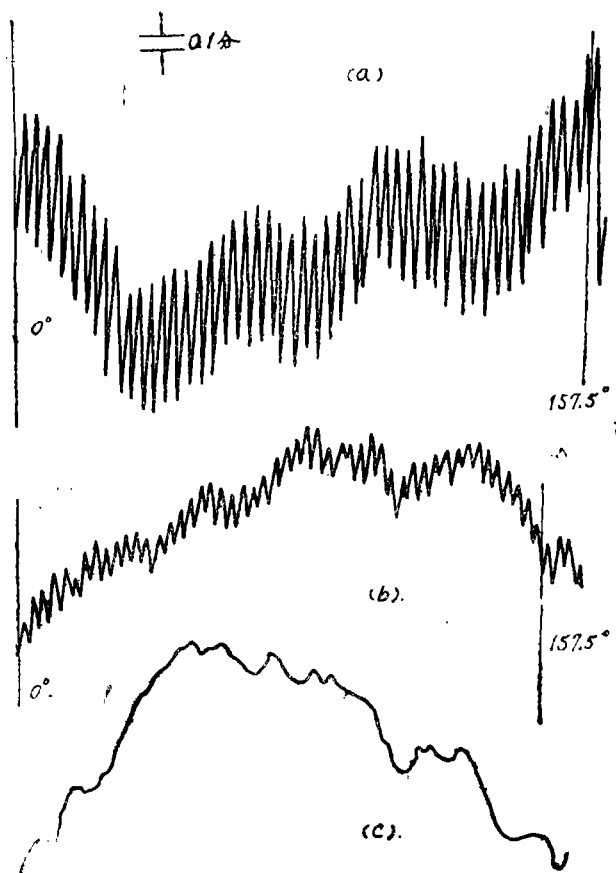


图8 三台机器刻制的局部误差曲线

线和最后一根线之间具有较大的间隔误差。即首尾两条刻线的间隔与其它刻线间隔明显不一致。在采用光学方法的检验中，很难发现这种误差。在相位计的比相测试中，很明显地反映出来，并可量出其差值。如图九的曲线中有明显的封闭差，其值为 $1.5$ 角秒。

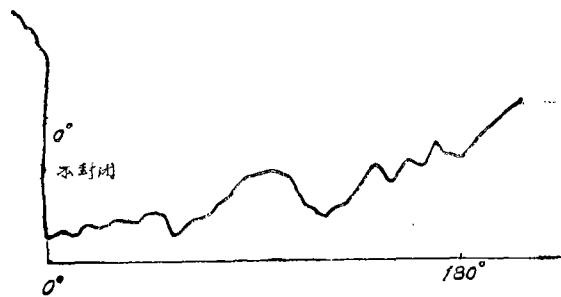


图9 明显反映封闭误差的误差曲线

#### 3. 偏心的快速、精确调整

在高精度的光栅盘和码盘的测量中，对被测盘必须精调偏心，与旋转主轴尽量同心。一般将偏心量调整到1微米之内。要达到这个要求，过去用两台光学显微镜对径放置，反复精调才能达到，但利用相位计动态精调偏心就可轻而易举的达到。

被测盘与主轴不同心时的变化是：

$$e = e_0 \sin \theta$$

其中  $e_0$  是偏心量的最大值； $\theta$  是被测盘随主轴旋转一周的位置角。

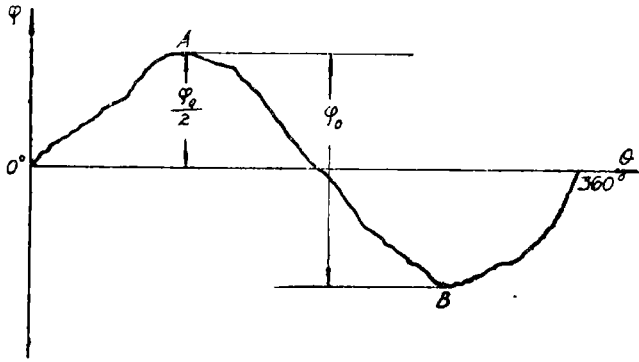


图10 精调偏心的示意图

这样的调整一般只需要几分钟，并且可将偏心量精确调整到0.1微米~0.3微米。

下面是用一般调偏心法（用光学显微镜调整）（见图11a）和动态精调偏心法（图11b）调整的两组曲线。

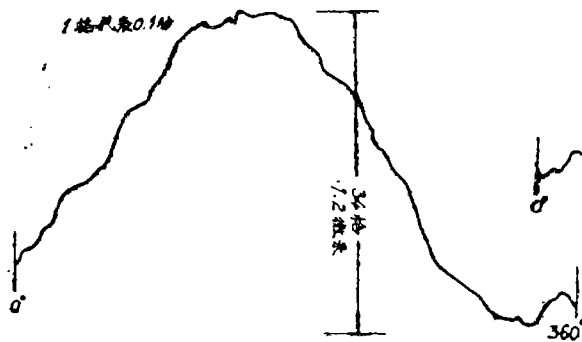


图11a 一般调法使调心到1.2微米

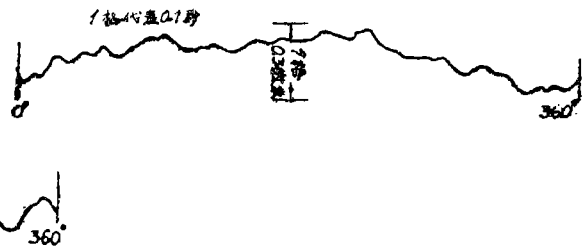


图11b 动态精调使偏心到0.3微米之内

#### 四、相位计误差对检测结果的影响

我们知道，相位计是由好几个环节组成的，这些环节都影响相位计的精度。相位计的精度好坏，直接影响着线纹测量的精度。相位计的精度关键决定于放大通道部分。为了保证精度，两路要严格对称，通道放大倍数达一千倍以上，采用正弦波的过零点触发，满足线性好、精度高的要求。当然我们使用的相位计，达到这一点固然是好的。但从使用条件来看，由于我们工作在低频段，且是相对测量，只要两路信号的相对相位差准确就行了。一般的通用相位计的精度，是指 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的精度，而我们使用的相位计，只要在局部范围内（如

相位范围是 60° 左右) 精度高就可以了。这是线纹计量用的相位计和通用的相位计的不同。

我们的光电检验仪的标准光栅的刻线是 65536, 每条刻线的周期接近 20" (角度秒), 我们研制的相位计的最大误差是 4°, 似乎单是这项误差就会造成 0.2" 的测量误差。但是在实际上, 光电检验仪的单个测量的误差只有 ±0.08"。仅相位计的误差就接近光电检验仪的本身误差。显然这样估算和实际有较大出入。其原因何在呢?

一般鉴零式的相位计, 在 0° 和 360° 附近的小区域内误差较大 (我们研制的相位计最大误差为 4° 左右)。在 180° 附近较大的区域内误差很小, 从图 12 可以看出: 相位计在 180° ± 90° 的区域内, 测量误差为 1°, 但在 180° ± 30° 或 210° ± 30° 或 150° ± 30° 区域

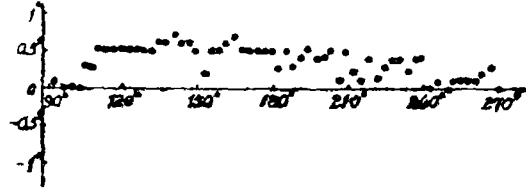


图 12 相位误差实测分布曲线 (在 180° ± 90° 内)

内, 测量误差均小于 0.5°。因此在进行线纹测量时, 就可获得较好的测量结果。对高精度的光栅盘或码盘, 动态精调偏心, 使相位计工作于 60° 之内的很小区域内, 其测量误差充其量为 0.5°, 对于一个周期接近 20" 的莫尔条纹光电信号而言, 由相位计带进误差仅仅是 0.025" 左右。

在比相测量中, 需要正弦形的波形, 波形的畸变对相位比较的影响不容忽视。那么, 谐波畸变对相位比较的影响是怎样的呢? 可用下面公式表示<sup>[4]</sup>:

$$\delta = - (a_n/a_1 + b_n/b_1) \frac{180^\circ}{\pi}$$

其中  $a_1$  为信号 1 的基波幅值,  $a_n$  为信号 1 的谐波成分幅值;  $b_1$  为信号 2 的基波幅值,  $b_n$  为信号 2 的谐波成分幅值。

用谐波分析仪测得的标准信号的谐波与基波的幅值比接近 2%, 如果另一路信号也是这个水平, 那么就会产生近似 2.5° 的相位误差。这个误差也是不小的, 但因我们是相对测量, 相对相位是准确的就可以了。因此我们关心的是光栅盘旋转时进入相位计的信号谐波成分变化的大小。从一些谐波分析中, 莫尔条纹光电信号的谐波成分的变化量一般不大于 0.5% (何况经平均的“标准信号”, 其变化量更小), 这样带进的相位误差也在 0.5° 之内。(对一周为 20" 的信号来说, 带进相位误差 0.025")。这就是说, 由相位计本身和谐波畸变带进的误差充其量也不过是 0.05" 左右, 这是满足仪器的精度要求的。

从上分析不难看出, 相位计最大的测量误差  $\Delta\phi_{max} = 4^\circ$  而在检测中带进的误差仅是:

$$\delta = K T \frac{\Delta\phi_{max}}{360^\circ}$$

其中  $T$  为标准主光栅一周期的秒值 (检验仪主光栅的  $T = 20''$ ),  $K$  为比例常数, 其值约为 0.2~0.3 (这个公式仅对误差较大的相位计而言)。

所以用相位计动态连续作线纹计量时, 必须精调偏心, 使相位计工作在很小区域内, 如对我们保存的一块精度高的“校准盘”, 73年和74年进行了多次全组合测量。其中73年12月10日测得是十六次组合, 74年7月8日是四次组合, 测试数据见图13。这些全组合测量, 偏心调的很小, 使相位计都工作在 30° 左右的区域内。从两条曲线对比来看, 对应点差值的最大值为 0.05", 两次测量的中误差 =  $\pm\sqrt{\frac{\sum U^2}{2m(n-1)}} = \pm 0.027/\sqrt{2} = \pm 0.019''$  (其中  $U$  为一

次测量的误差确定值与平均误差值的差值， $n$  为测量次数， $m$  为每次测量选取的点数）。

通过多年检测上千块光栅，码盘的实践证明：用相位计动态连续测量的办法，误差曲线直观，检测数据可靠，操作简单，操作人员少，测量的时间短，使用维修方便。但是也存在一些问题：（1）用相位计检测线纹稀且精度高的光栅盘或码盘是有困难的，需另找出路；（2）光电信号幅度变化对检测有一定影响。这些有待今后解决。

在我们的工作中，相位计只用来测量光栅和码盘等密线纹圆分度元件上，同样也可以把相位计用在测量计量长光栅上。在我们的工作中，测量过程完全是自动的，但是误差处理还是人工进行计算，将来可以用来用数码输出的相位计，把测得的结果给专用计算机计算后直接把误差值打印出来。

（说明：图 8 的三条局部曲线，图 9 具有明显封闭误差曲线，图 11(a)(b) 两条曲线都是从记录曲线上真实地描绘下来的。）

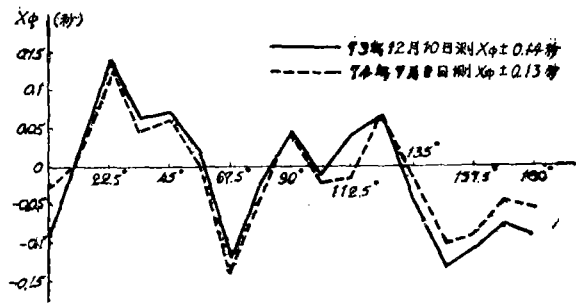


图 13 校准盘两次全组合测试曲线

#### 参 考 文 献

- [1] 十六室光电检验组；光学机械，1974，第 5 期，7 页。
- [2] 光学机械，1972，第 3 期，27 页。