

高正交关系的莫尔条纹信号

朱 应 时

摘要：莫尔条纹的电子学细分需要有一对光电正交的莫尔条纹信号。本文叙述了在圆光栅系统中产生裂相误差的四种原因和消除它们的办法。最后，在一台圆分度检验仪上已经得出了优于 0.5° 裂相误差的结果。

一、前 言

在利用计量光栅测量位移时，为了提高测量的分辨率，对莫尔条纹光电信号进行插补（或称细分）。在插补莫尔条纹信号时，要求给出一对正交关系的莫尔条纹信号，即相位差为 $\pi/2$ 的两路莫尔条纹信号。在理想的插补中，这对信号应具备四项条件：即等幅度，相位差 $\pi/2$ ，无谐波分量和无直流成份。在实际系统中，如果插补精度愈高，这四项条件偏离理想的程度应愈小。四项指标中，满足相位差 $\pi/2$ 即高正交关系是比较困难的。本文重点介绍在圆光栅多头读数系统中获得高正交关系莫尔条纹光电信号的原理及测试的结果。

我们在一台高精度圆分度检验仪上采用多头平均原理得到正交关系优于 0.5° 的一对莫尔条纹的光电信号，它具备细分1000等分的能力。

二、引起裂相误差的因素及消除方法

衡量莫尔条纹正交关系好坏的指标为裂相误差，一对正交的莫尔条纹信号相位差应为 90° （即 $\pi/2$ ），如果令一信号为 $a_1 \sin \theta$ ，另一信号为 $a_2 \sin(\theta + \frac{\pi}{2} + \Delta\alpha)$ ，其中 $\Delta\alpha$ 为裂相误差（其符号可正可负）。在圆光栅系统中，引起裂相误差主要因素为裂相光栅的裂相误差、指示光栅的调整误差、光栅盘的偏心和主轴的晃动等。

（一）刻划误差和调整误差的影响及其消除

如果采用裂相指示光栅，四段指示光栅从外向中心依次相邻两段之相位差为 $\pi/2$ 排列，从这样的单个读数头中可得下列四个莫尔条纹光电信号：

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= A_1 + a_1 \sin \theta \\ U_2 &= A_2 + a_2 \sin \left(\theta + \frac{\pi}{2} + \Delta_1 + \delta \right) \\ U_3 &= A_3 + a_3 \sin \left(\theta + \pi + \Delta_2 + 2\delta \right) \\ U_4 &= A_4 + a_4 \sin \left(\theta + \frac{3\pi}{2} + \Delta_3 + 3\delta \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $\theta = 2\pi nx/w$, x —光栅位移, w —光栅栅距, $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

$A_1 \sim A_4$ —直流分量。

$a_1 \sim a_4$ —莫尔条纹信号幅值。

Δ_1, Δ_2 和 Δ_3 —第二段、第三段和第四段裂相光栅分别相对第一段的裂相误差。

δ —指示光栅调整不佳形成的裂相误差。

(1) 式中 $A_1 \sim A_4$ 和 $a_1 \sim a_4$ 可通过各种调整, 使之分别接近相等。在实际使用中, 为了消除各种共同变化因素的影响采用两两差分放大, 差分后的信号为 (其中 G 和 G' 为信号的幅值):

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= U_3 - U_1 = G \sin \left(\theta + \frac{1}{2} \Delta_2 + \delta \right) \\ U_{00} &= U_4 - U_2 = G' \cos \left[\theta + \frac{1}{2} (\Delta_1 + \Delta_3) + 2\delta \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

从 (2) 式中可知, 经差分后 U_0 和 U_{00} 这对信号中, 由于存在刻划误差和调整误差, 使正交关系变坏, 但这种裂相误差是固定的。

根据 (2) 式可知, 要使 U_0 和 U_{00} 为正交信号, 下列等式成立:

$$\theta + \frac{1}{2} \Delta_2 + \delta = \theta + \frac{1}{2} (\Delta_1 + \Delta_3) + 2\delta$$

经整理得

$$\delta = \frac{1}{2} (\Delta_2 - \Delta_1 - \Delta_3) \quad (3)$$

式 (3) 中的含意是如果控制 δ 使之等于 $(\Delta_2 - \Delta_1 - \Delta_3)/2$ 时, 就可消除刻划裂相误差引起的莫尔条纹信号的裂相误差。在实际上, 如果刻划裂相误差控制在一定范围内, 通过调整指示光栅相对主光栅的交角即可消除或减小指示光栅的裂相误差的影响。由此可知, 采用按相位差依次为 $\pi/2$ 排列的裂相光栅, 不必要求刻划裂相误差过严, 要得到高正交关系是靠设计合理的调整机构与精确的相位指示。

尽管靠调整可减少裂相指示光栅的影响, 但调整后, 每个读数头的信号中还存在不同程度残余的裂相误差 Δ_{pi} , 如果沿圆光栅圆周分布 n 个莫尔条纹读数头, Δ_{pi} 是随机性的, 它具有

$$\sum_{i=1}^n \Delta_{pi} = 0$$

的特性。

如果 n 个读数头各自的余弦信号相对于本身的正弦信号的裂相误差为 $\Delta_{p1}, \Delta_{p2}, \dots, \Delta_{pn}$, 当各读数头间正弦信号相位接近同相时, n 路余弦信号分别为:

$$G'_1 \cos(\theta + \Delta_{p1}), G'_2 \cos(\theta + \Delta_{p2}), \dots, G'_n \cos(\theta + \Delta_{pn})$$

当 G'_i 值接近同一值 G' , 并 Δ_{pi} 很小时, 合成信号结果为

$$nG' \cos\theta + G' \left(\sum_{i=1}^n \Delta_{pi} \right) \sin\theta \approx nG' \cos\theta \quad (3')$$

由 (3') 式可知, 如果满足一定条件时, 单个读数头信号中的残余的裂相误差, 经合成后, 在合成的莫尔条纹信号中的裂相误差可平均到忽略不计的程度。

(二) 圆光栅的偏心影响及其消除

圆光栅的安装偏心是不可避免的, 由于偏心的存在, 即使单个莫尔条读数头中信号的正交关系在某一位置上调得很准确, 转动圆光栅至另一位置, 一对信号的正交关系就变坏, 这显然是偏心引起的。图 1 所示, O 为转轴的中心, O' 为圆光栅的中心, e 为偏心距, l 为圆光栅刻线长度, R 为光栅外径。根据图 1 的几何关系可以得出偏心 e 产生的相移量 Δ_s 为

$$\Delta_s = \frac{2\pi X_s}{w} = \frac{2\pi e l}{w R} \sin\varphi \quad (4)$$

式中 φ —刻线位置。很显然, 圆光栅存在偏心时, 单个读数头中一对具有正交关系的莫尔条纹信号为

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= G \sin\theta \\ U_{90} &= G' \cos\left(\theta + \frac{2\pi e l}{w R} \sin\varphi\right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

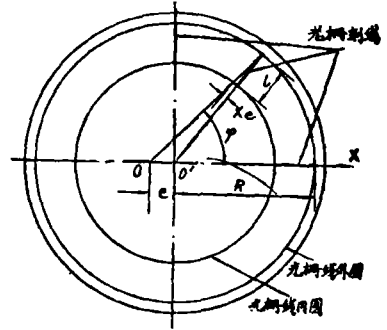


图 1

从 (5) 式可知由于 e 产生的附加相移引起的裂相误差与偏心的位置有关。当圆光栅的中心 O' 处于 OX 轴, 即 φ 为零或 π 时, 附加相移为零。当圆光栅的中心 O' 绕 O 点转动时, 附加相移是圆光栅转角位置 φ 的正弦函数。

单头的读数系统是无法消除偏心引起的裂相误差。而对径分布两个读数头就可消除这种裂相误差, 为了得到高品质的莫尔条纹信号, 采用多头读数更为有益, 多读数头系统对平均偏心引起的裂相误差效果怎样呢? 下面加以说明。

由圆光栅安装偏心引起的附加相移 Δ_s 是光栅位置转角的正弦函数。在正弦函数的周期内的 n 个均匀位置上, 附加相移之和具有下列特点:

$$\sum_1^n \Delta_{s_i} = 0$$

若 n 个读数头各自的余弦信号相对本身的正弦信号的偏心引起的裂相误差为 $\Delta_{s1}, \Delta_{s2}, \dots, \Delta_{sn}$, 如果各读数头间正弦信号相位接近同相时, n 路余弦信号的幅值同值并 Δ_{s_i} 又不大时, 合成信号的结果为

$$\sum_1^n G' \cos(\theta + \Delta_{s_i}) = nG' \cos\theta + G' \left(\sum_1^n \Delta_{s_i} \right) \sin\theta = nG' \cos\theta \quad (6)$$

$nG' \cos\theta$ 就是多路合成的余弦信号。其中平均了偏心引起的裂相误差。

(三) 主轴晃动引起的裂相误差及其消除

主轴晃动就是主轴在转动时轴心偏离了理想的转动中心, 如果偏离量为 S , 则附加相移为

$$\Delta_s = \frac{2\pi S l}{w R} \sin\varphi' \quad (7)$$

式中 φ' 为读数所在位置与轴心晃动方向之间的夹角, 其他符号的含意与 (4) 式相同。当

φ' 为 $\pi/2$ 时, 附加相移为最大。由 (7) 式可知, 这种影响与偏心对裂相误差的影响相同。

如果采用多头莫尔条纹系统, 并且均称分布, 合成信号中平均掉裂相误差的原理同偏心的一样, 不再作说明了。

三、实际效果

为了获得高正交关系的一对莫尔条纹信号, 我们按上述平均原理设计了一台圆分度检验仪, 读数头按图 2 的情况分布 (即两组五等分, 两组相隔 30°), 每个读数头中取得信号按 $\sin\theta, \sin(\theta + \frac{\pi}{2}), \sin(\theta + \pi), \sin(\theta + \frac{3\pi}{2})$ 次序排列。图 3 中的多头读数系统共取得 40 个信号, 平均系统是先将每个

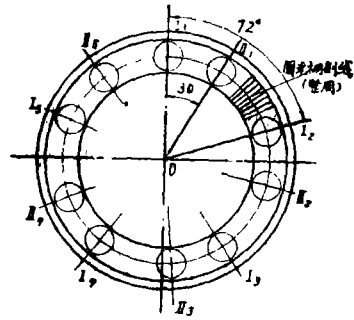


图 2 读数头分布。I₁—I₅ 第一组读数头, II₁—II₅ 第二组读数头。

$$\sum_1^{10} (A_i + a_i \sin\theta),$$

$$\sum_1^{10} [A_i + a_i \sin(\theta + \frac{\pi}{2})], \sum_1^{10} [A_i + a_i \sin(\theta + \pi)]$$

和 $\sum_1^{10} [A_i + a_i \sin(\theta + \frac{3\pi}{2})]$ 四个带有直流分量的莫尔条纹信号。在调试中, 40 个直流分量 A 尽量一致。40 个信号幅值 a 也尽量一致。相加得到的四个

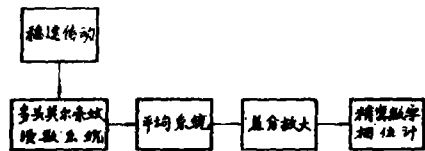


图 3 高正交关系莫尔条纹信号方框图
为了使相位测量准确和信号稳定, 必须采用稳速传动和各种稳定的供电电源。相位测量用高精度高分辨率的数字相位计。测量结果如图 4 所示。

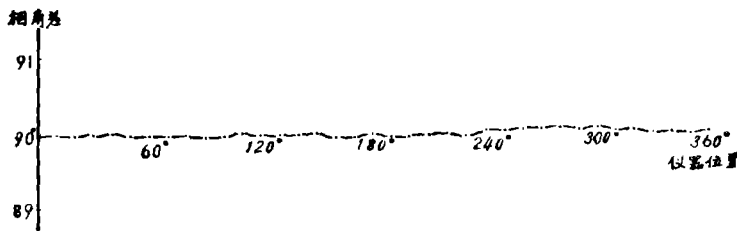


图 4

此系统使用多年比较稳定, 经多次测定, 两路信号的正交关系优于 0.5° 。这样高正交关系的莫尔条纹信号, 对于相位调制型插补系统来说具有插补 1000 等分的能力^[1]。

在本项工作中, 杨进堂承担了电路设计, 赵秀文和孙承浦参加了装调和测试。

参 考 文 献

- [1] Л. Н. Преснукин, Фотоэлектрические преобразователи информации, Москва, «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1974, 230—253.

Photo-Electric Moiré Fringe Signals with High Orthogonality Relation

Zhu Yingshi

Abstract

A pair of photo-electric orthogonal Moiré fringes is necessary for the electronic interpolation of Moiré fringe signals. This paper describes four kinds of reasons leading to separated-phase error and the methods of eliminating these separated-phase error. A result with separated-phase error less than 0.5° has been obtained in a circular dividing calibrating instrument.