

用干涉法测角

张 二 星

一、引 言

把光波干涉法用于角度测量，可得到很高的精度。但是，干涉测角仪的调整和使用并不方便，测量范围也不大。随着电子计算机的应用，这种情况也在改变。而且有时因为用其他测角仪精度不够，就非用干涉测角仪不可。

干涉测角仪，按功能可分为：1) 能测微小角度的和 2) 能测较大角度的。按采用的方法可分为：1) 测量光程差的干涉测角仪；2) 在零光程差附近工作（测量干涉条纹的倾斜角和疏密度）的干涉测角仪。

二、测量光程差的干涉测角仪

在这类仪器中，测量的光程差是角度函数的一个自变量。角度函数有简单的正弦函数、正切函数和较复杂的函数。

1. 用正弦（正切）原理的干涉测角仪。由图1(a)，正弦尺的转角 α 可由下式求得：



(a)

(b)

图 1

$$\sin \alpha = \frac{H}{B}, \quad \alpha = \arcsin \frac{H}{B}. \quad (1)$$

由图 1 (b) 得正切尺的转角

$$\alpha = \arctan \frac{H}{B}. \quad (2)$$

在上面的公式中， B 是正弦（切）尺的基线长， H 是当旋转 α 角时正弦（切）尺端的变化量，即所测光程差。正弦尺的测角误差可按下面的方法求得：微分（1）式得

$$\cos \alpha d\alpha = \frac{1}{B^2} (BdH - HdB),$$

$$\Delta \alpha = \pm \frac{1}{B^2 \cos \alpha} [(B \Delta H)^2 + (H \Delta B)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

同理可得正切尺的测角误差

$$\Delta \alpha = \pm \frac{\cos^2 \alpha}{B^2} [(B \Delta H)^2 + (H \Delta B)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

式中 ΔB 是测基线长 B 的误差， ΔH 是测光程差 H 的误差。

在角 α 较小时， H 也较小， ΔB 对误差 $\Delta \alpha$ 的影响不大， ΔH 对误差 $\Delta \alpha$ 的影响较大。当

角 α 较大或 B 较短时, ΔB 对误差 $\Delta\alpha$ 也有显著的影响。

这类测角仪 H 值的测量有用目视的, 但多数都采用脉冲计数技术^{[1]~[4]}。图2给出了这类测角仪的几种光路。

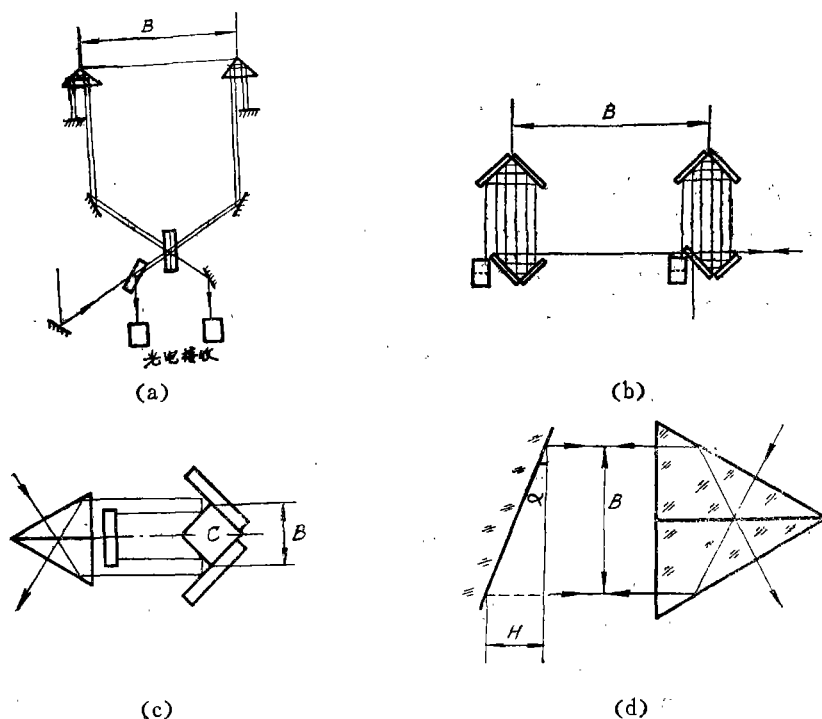


图2

图2 (a) 的测角仪, 测量范围为 $\pm 3.5^\circ$, 精度在 $\pm 0.1''$ 左右。图2 (b) 的测角仪, 测量范围为 $\pm 3^\circ$, 灵敏度较高, 精度达 $\pm 0.057''$ 。图2 (c) 的测角仪, 结构紧凑。反射面可以研磨得很好。立方体 c 的边长可测得很准。因此尺长 B 也能准确地确定。测量范围为 $\pm 35^\circ$, 精度达 $\pm 0.1''$ 。图2 (d) 的测角仪测量范围不大, 精度可达 $\pm 0.02''$ 。

限制正弦(切)尺精度提高的因素, 在小角度时, 主要是对程差测量得不够精确, 在较大的角度时, 还有对基线长测量得不够精确。

2. 用较复杂函数关系的干涉测角仪^{[5]、[6]}。参看图3, 当平行平板玻璃(也可以是光楔)转动的时候, 它的两个表面反射的光线之间的光程差发生变化, 对平行平板玻璃

$$\frac{m}{t} = -\frac{2}{\lambda} [(N^2 - \sin^2\theta_1)^{\frac{1}{2}} - (N^2 - \sin^2\theta_2)^{\frac{1}{2}}] \quad (5)$$

对楔形平板玻璃

$$\frac{m}{t} = \frac{2}{\lambda} \{ [(N^2 - \sin^2\theta_1)^{\frac{1}{2}} - (N^2 - \sin^2\theta_2)^{\frac{1}{2}}] \cos\alpha + \sin\alpha (\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \} \quad (6)$$

式中, m 为干涉级, t 为板厚, λ 为光波波长, N 为玻璃的折射率, α 为楔角, θ_1 、 θ_2 为两不同入射角。测出对应于角 θ_1 、 θ_2 的光程差的变化, 就可求出被测角 $\theta_2 - \theta_1$ 。这实际

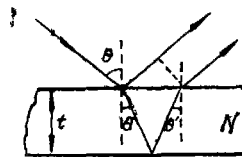


图3

上是剪切干涉仪。限制精度提高的重要因素是平板的折射率误差。用楔板时精度高于用平板的精度，可达 $0.2''$ 左右。

三、在零光程差附近工作的干涉测角仪

这种干涉仪的原理是我所高研顾去吾同志提出的。这里只简单地介绍其原理。

参看图4，设位于铅垂面内的二相干光束以角 $2\theta_{\perp}$ 相交，形成的干涉条纹与角度向量 $2\overline{\theta}_{\perp}$ 的方向相同。今若使二光束再沿水平方向分离 $4\overline{\theta}_{\perp}$ 角，则此二角度向量之和 $4\overline{\theta}_{\perp} + 2\overline{\theta}_{\perp}$ 与水平方向成 ϕ 角，亦即干涉条纹与水平方向成 ϕ 角

$$\tan \phi = \frac{2\theta_{\perp}}{Q_{\perp}} \quad (7)$$

测得角 ϕ ，便知角 θ_{\perp} 。实现此原理用下述光路，见图5。来自光源的白光会聚于分束棱镜 S 的折光面上的 f 点，分为1、2两束光经反射折射后射出，透镜 L 的焦点也位于 f 点。这样，1、2两束光经透镜之后将变为平行光。由被测平面反射镜 M 反射返回，经透镜、棱镜

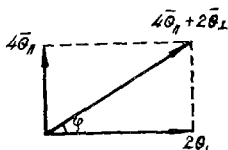


图4

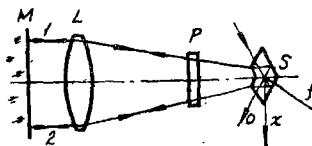


图5

后从 0 方向射出。若棱镜 S 在胶合时，二半分别绕 x 轴（位于纸面内）有一相对转角 θ_{\perp} ，则从 0 方向射出的光束将上、下偏离纸面，以 $2\theta_{\perp}$ 角相交，形成与 $2\overline{\theta}_{\perp}$ 同向的水平干涉条纹。它叫予置条纹。如反射镜 M 绕垂直于纸面的轴转 θ_{\parallel} 角，则从 0 方向射出的光束又向左右分离成 $4\theta_{\parallel}$ 角。两种效果合成，使水平的予置条纹变为倾斜。倾角为 ϕ 。实际上，我们并不直接测量 ϕ 角，而是在光路中加一可绕垂直于纸面的轴转动的平板玻璃 P 。当平板 P 转至某一角度时，刚好补偿了转角 θ_{\parallel} ，使倾斜了的干涉条纹恢复水平状态。测知平板 P 的转角，便知 θ_{\parallel} 角。

四、提高干涉测角仪灵敏度的办法

增加反射面的个数，可提高干涉测角仪的灵敏度。设用二块平行平板玻璃成一小角 θ 放置，构成一简单的干涉仪，^[7]如图6所示，在玻璃板表面上将看到等厚干涉条纹。设条纹间距为 D ，则

$$\theta = \rho \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{D}$$

式中 ρ 是弧度换算成秒的常数。

$$d\theta = -\rho \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{dD}{D^2}$$

因此，干涉仪的灵敏度为：

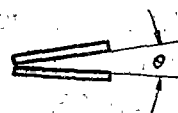


图6

$$S_1 = \left| \frac{dD}{d\theta} \right| = \frac{2}{\rho\lambda} D^2. \quad (8)$$

若反射面的个数增加1倍,其光路如图7所示,则当被测反射面转 θ 角时,返回光波成 4θ 角相交。因此有

$$\theta = \rho \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{1}{D}.$$

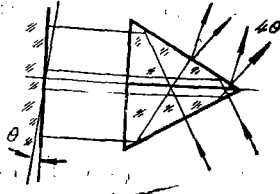


图7

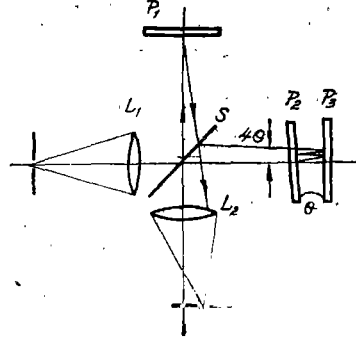


图8

灵敏度为:

$$S_2 = \left| \frac{dD}{d\theta} \right| = \frac{4}{\rho\lambda} D^2. \quad (9)$$

可见,当反射面的个数增加时,灵敏度也增加了,相应的测量范围也缩小了。

采用多通道技术,也可提高干涉测角仪的灵敏度。如图8所示的光路, L_1 、 L_2 是准直物镜, S 是分束器, P_1 、 P_2 、 P_3 分别是镀部分反射、部分透过、全反射膜的平板玻璃。当光线在 P_3 上反射2次时,返回光束与入射光束成 4θ 角。 θ 是 P_2 与 P_3 之间的夹角。当反射 n 次时,为 $2n\theta$ 角。因此,灵敏度为

$$S_n = \frac{2n}{\rho\lambda} D^2. \quad (10)$$

与(8)式比较,看出灵敏度增大为原来的 n 倍。再看图2(b)所示的光路,使诸光线在纸面内折叠,也可在垂直于纸面的方向叠置。此时的基本计算公式,当初始角为0时是

$$\sin\theta = \frac{\lambda n}{2tD}.$$

式中 θ 为待测角, λ 为光波波长, n 为探测到的条纹数, t 为光线的反射次数, D 为反射器屋脊间的距离。微分上式得

$$\cos\theta d\theta = \frac{\lambda}{2tD} dn,$$

$$S = \left| \frac{dn}{d\theta} \right| = \frac{2tD}{\lambda} \cos\theta. \quad (11)$$

可见,当光线的反射次数 t 增加时,灵敏度 S 也成正比地增大。但是,光线的反射次数不能无限地增加。一则程差的测量精度高到一定程度时,测量正弦尺长的精度也应相应地提高才有意义。二则当反射次数增加时,程差增大,激光器频率不稳定性引起的误差也增大。

上述方法为在测量程差的干涉测角仪中提高灵敏度的方法。当采用在零光程差附近工作的干涉测角仪时,也可获得高灵敏度。在(7)式中,当取 $\theta_1 = 2''$, $\phi = 1^\circ$ 时 $\theta_n = 0.017''$ 。

即被测角为 $0.017''$ 时,干涉条纹已倾斜了 1° 。实际上,用肉眼可以觉察到比 1° 还小的干涉条纹的倾斜。可见,用简单的观察干涉条纹的倾斜的方法,获得了高灵敏度。

参 考 文 献

1. В. Г. Вьскуб и Т. Д. ,Измер. Тех. ,1974,2,11~13.
2. G. D. Chapman,Appl. Opt.,1974, 7, 1646~1651.
3. K. Dorenwendt et al.,Feinwerktechnik und Messtechnik,1976,84, 7, 344~346.
4. The Review of Scientific Instruments, 1978, 49, 2, 280.
5. D. Malacara, O. Harris,Appl. Opt.,1970, 9, 7, 1630~1633.
6. M. Singh et al.,Optik, 1971, 33, 5, 457~462.
7. M. J. Saunders,The Review of Scientific Instruments, 1968, 39 11,1744~1747.