

组合逆向反射镜系统中测量镜的晃动引起的附加光程

蒋式弘 陈明仪

(上海科学技术大学 精密机械系)

提 要

组合逆向反射镜系统在二维精密工作台激光干涉仪中起着立方角棱镜的作用。但它在晃动中易于引起附加光程。本文导出了附加光程的计算公式,提出了减小误差的措施。

关键词: 组合逆向反射镜系统; 附加光程。

一、引 言

逆向反射器,如立方角棱镜是条纹计数式干涉测长系统中的重要元件。其特点是当该

类元件在绕它的光心转动时(因运动中导轨不平度引起),出射光束能始终与入射光束保持平行,且几乎不产生任何附加光程^[1,2]。但是,由于结构上的限制,这类逆向反射器无法在二维干涉定位系统中应用。因此广泛地采用了如图1所示的组合逆向反射镜系统^[3]。实践表明,采用这种组合逆向反射镜系统的随机定位误差较之采用立方角棱镜的一维干涉定位系统大。

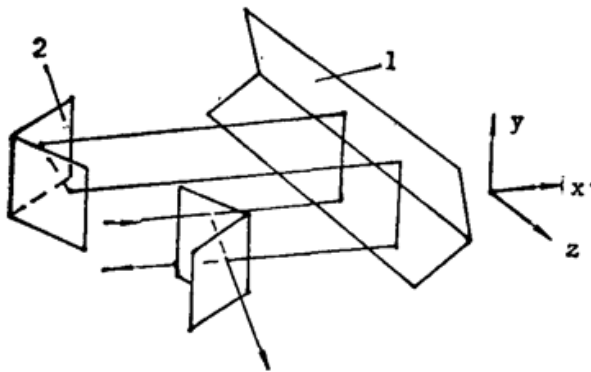


Fig. 1 Composite retro-reflector system

其原因在于这种组合逆向反射镜系统不存在一

固定的光心。因此当测量镜/晃动时,必然会产生附加光程,从而造成定位误差。计算表明,在组合逆向反射镜系统中,当导轨平直度误差仅为数个角秒时,测量镜的晃动所引起的附加光程可达微米量级。

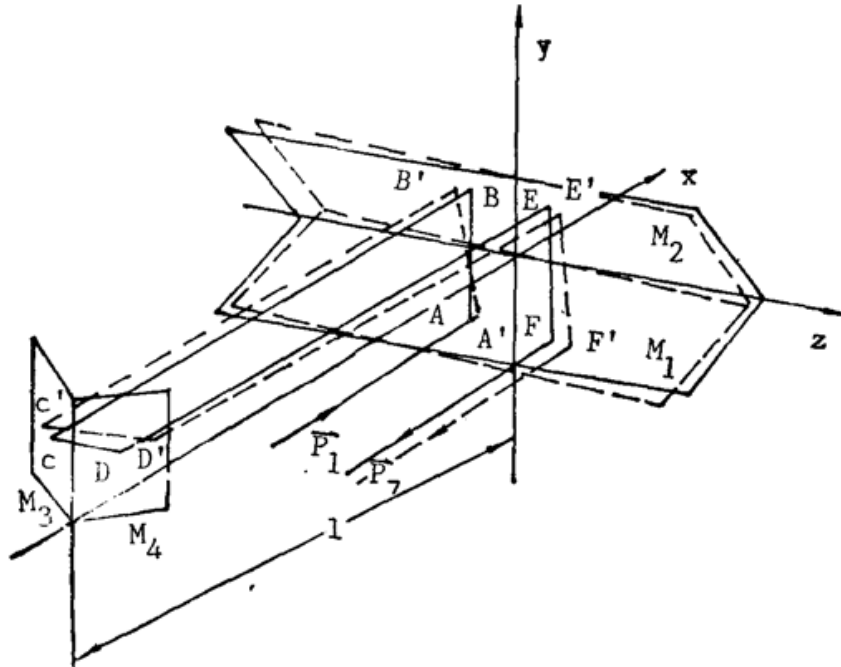
二、附加光程的计算

测量镜的晃动可分解为相对 x, y, z 三个座标的平移和旋转。

当沿 x 轴(见图1)进行测量时,测量镜在 z 方向的平移显然不改变光程,在 y 方向上的平移仅改变上下光束的距离,不产生附加光程。

测量镜绕 x 轴旋转时,光线是在 1 和 2 的主截面内平移,而光程无变化。

绕 y 轴旋转时情况要复杂一些。见图2,测量镜 1 与直角反射镜 2 棱线之间的距离为

Fig. 2 Rotation of moving roof mirror about y axis

1. 测量镜处于正常位置时,入射光线 P_1 与平面镜 M_1 交于 A 。为简单起见,设测量镜棱线通过转动中心,点 A 在三个坐标轴上的投影相等,其绝对值均为 a 。光线依次在点 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 上反射,总光程

$$S = AB + BC + CD + DE + EF. \quad (1)$$

当测量镜绕 y 轴顺时针转过 α 角后,入射光线依次在点 A' 、 B' 、 C' 、 D' 、 E' 、 F' 上反射,总光程

$$S' = AA' + A'B' + B'C' + C'D' + D'E' + E'F' - (F'F)_e, \quad (2)$$

$(F'F)_e$ 为线段 $F'F$ 在 x 轴上的投影。因此,附加光程为

$$\Delta y = S' - S. \quad (3)$$

其中 S 为 $2(l+a)$ 。为求得 S' ,可写出各段光线的直线方程和各投射点的坐标,再用两点间距离公式算出各段光线的长度,相加即为 S' 。

测量镜绕 y 轴旋转 α 角后,原反射面 M_1 、 M_2 变成 M'_1 、 M'_2 ,原平面 M_1 、 M_2 的法线 N_1 、 N_2 变成 N'_1 、 N'_2 。用向量旋转矩阵求出 N'_1 和 N'_2 后,写出 M'_1 和 M'_2 的平面方程。用矢量形式的反射定律可得出各段光线的点向式直线方程。通过解方程组可得到 A' 、 B' 、 C' 、 D' 、 E' 、 F' 的座标:

| incidence point | x coordinate | y coordinate | z coordinate |
|-----------------|----------------------------------|----------------|---------------------------------|
| A' | $a(\alpha-1)$ | $-a$ | $-a$ |
| B' | $a(\alpha-1)$ | a | $-a(2\alpha+1)$ |
| C' | $\frac{a-l}{1+2\alpha}$ | a | $-\frac{2l\alpha+a}{1+2\alpha}$ |
| D' | $\frac{a+4l\alpha-l}{1-2\alpha}$ | a | $\frac{2l\alpha+a}{1-2\alpha}$ |
| E' | $-a(\alpha+1)$ | a | $a(1-2\alpha)+4l\alpha$ |
| F' | $-a(\alpha+1)$ | $-a$ | $a+4l\alpha$ |

因 α 很小,表中计算结果已略去了 α 的二阶小量。由两点间距离公式,得

$$AA' = |a\alpha|, \quad A'B' = 2a,$$

$$B'C' = \sqrt{\left[a(\alpha-1) + \frac{a-l}{1+2\alpha} \right]^2 + \left[\frac{2l\alpha+a}{1+2\alpha} - a(2\alpha+1) \right]^2}, \quad C'D' = 4l\alpha + 2a,$$

$$D'E' = \sqrt{\left[\frac{\alpha + 4l\alpha - l}{1 - 2\alpha} + \alpha(\alpha + 1)\right]^2 + \left[\frac{2l\alpha + a}{1 - 2\alpha} - a(1 - 2\alpha) - 4l\alpha^2\right]}, \quad E'F' = 2a,$$

$$(F'F)_z = |a\alpha|。$$

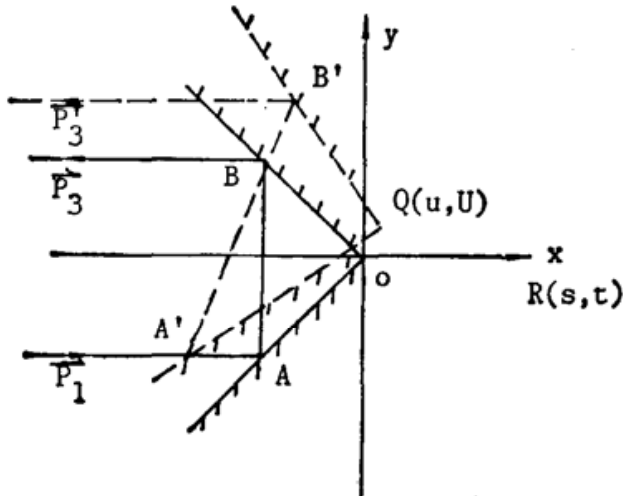
将以上诸式代入(2)和(3)式,得附加光程为

$$\Delta y = B'C' + D'E' + 4l\alpha + 4a - 2l。 \quad (4)$$

其中 $l > 2a$ (当 $l = 2a$ 时, 点 D' 的 x 坐标值将大于点 E' 的 x 坐标值, 这是不可能的)。

计算结果是令人欣慰的。例如, 当 $l = 100 \text{ mm}$, $a = 10 \text{ mm}$, $\alpha = \pm 10''$ 时, 附加光程 Δy 几乎为零。甚至转角 α 达到 $1'$ 时, Δy 也只有 $0.02 \mu\text{m}$ 。因此绕 y 轴旋转所产生的附加光程 Δy 通常可忽略不计。

测量镜绕 z 轴旋转的情况只需在 xy 平面内讨论。如图 3 所示, 当双面反射镜的顶点位于坐标原点时, 入射光线 P_1 在点 A 、 B 反射。



当测量镜绕 R 点 (R 点坐标为 s, t) 在 xy 平面内顺时针转动 α 角后, 测量镜的顶点位于 Q (Q 点坐标为 u, v) 光线 P_1 在 A' 、 B' 点反射。

反射镜绕 R 点的转动可分解为以下三个运动: 沿 x 方向平移距离 u ; 沿 y 方向平移距离 v ; 绕 Q 点转动 α 角。

很显然, 测量镜沿 y 方向的平移和绕顶点 Q 的转动不改变光程, 而沿 x 方向的平移使光程改变了 $4u$ 。由几何关系, 可求得测量镜绕 z 轴旋转所产生的附加光程

Fig. 3 Rotation of moving roof mirror about z axis

$$\Delta z = 4u = 4s + 4\sqrt{s^2 + t^2} \sin(\arctan \frac{s}{t} + \alpha)。 \quad (5)$$

根据(5)式, 绘出了图 4、5 的曲线。可以看出, s 的大小几乎不影响附加光程 Δz 。另外, α 取相反的符号, 即测量镜绕 z 轴逆时针旋转, Δz 的符号也随之改变, 而大小几乎不变。

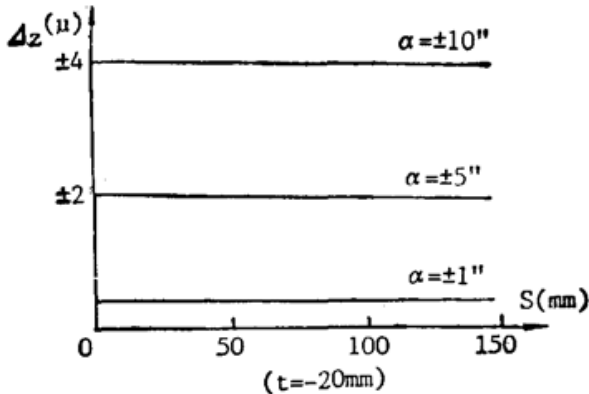


Fig. 4 Correlation between s and Δz

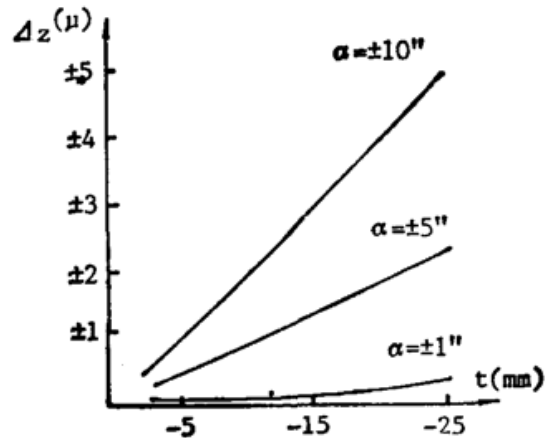


Fig. 5 Correlation between t and Δz

例如, 当 $s = 100 \text{ mm}$, $t = -20 \text{ mm}$, $\alpha = \pm 5''$ 时, 附加光程 Δz 可达 $\pm 1.94 \mu\text{m}$, 长度测量误差为 $\frac{1}{4} \Delta z = 0.49 \mu\text{m}$ 。

三、结 论

综上所述,采用组合逆向反射镜系统进行二维干涉测长时,由于测量镜的晃动所产生的附加光程 Δz 是不容忽视的。若能使测量镜的棱与导轨的水平承导面重合(即 $t=0$),式(5)变为

$$\Delta z = 8s \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (6)$$

绕 z 轴旋转而产生的附加光程可忽略不计。但为了减小阿贝误差, x 和 y 方向的测量镜都必须和测量轴线处于同一水平面,而 x 与 y 方向的导轨是分上下两层安置的,若使 x 方向满足(6)式,则 y 方向必不能满足。因此,至少须对 y 方向导轨的平直度提出很高的要求。对行程为 200 mm 的二维精密工作台来说,下层导轨水平承导面至测量镜棱线的距离若为 25 mm,即 $t = -25$ mm,为了获得优于 $0.3 \mu\text{m}$ 的定位精度,在扣除其它误差因素(如空气折射率变化、计数器量化误差等)后,测量镜晃动造成的定位误差不得超过 $\pm 0.1 \mu\text{m}$,即附加光程 Δz 不得超过 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 。由图 5 可知,导轨的直线度误差必须控制在 $\pm 1''$ 以内。

最后应指出,上述讨论是在假定各直角反射镜的直角误差为零的前提下进行的。

参 考 文 献

- [1] E. R. Peck; *J. O. S. A.*, 1948, **38**, No. 12, 1015~1024.
- [2] 私人通信。
- [3] 私人通信。

Additional optical path caused by yaw of moving roof mirror in composite retro-reflector system

JIANG SHIHONG AND CHEN MINGYI

(Department of Fine Mechanical Engineering, Shanghai University of Science and Technology)

(Received 24 April 1989; revised 14 November 1989)

Abstract

The composite retro-reflector system plays the role of the cubic corner retro-reflector on 2-D interferometric controlled precision workstage. But it is liable to cause considerable additional optical path when it is yawing. The formulans for calculating the additional optical path are derived and the measures to reduce the error are discussed in this paper.

Key words: composite retro-reflector system; additional optical path,