

锥镜光学扫描系统中的棱镜调整分析

任 建 岳

摘要: 本文对激光记录、激光照排等装置中广泛应用的锥镜扫描轴系的安装误差、回转误差对扫描象点位置的影响,应用棱镜调整理论进行了定量分析,对不同误差源所引起扫描误差的性质进行了分析,提出了相应的解决办法。

一、前 言

在激光记录、激光照排等装置的光学扫描系统中,广泛应用棱锥体反射镜进行行扫描。棱锥体反射镜(简称锥镜)及其扫描轴系的安装误差、回转误差对扫描光点的位置即对扫描线的形状及畸变产生影响。弄清它们之间的关系,对锥镜光学扫描系统的设计、装调有一定的指导意义。

在一般锥镜光学扫描系统中,锥镜装在扫描轴上,其中心线平行于扫描轴线,入射的平行光束经锥镜 90° 转折和 2θ 角扫描后,通过 $f \cdot \theta$ 物镜成像在焦平面上,在垂直纸面方向形成一条扫描线。工作原理示于图1。

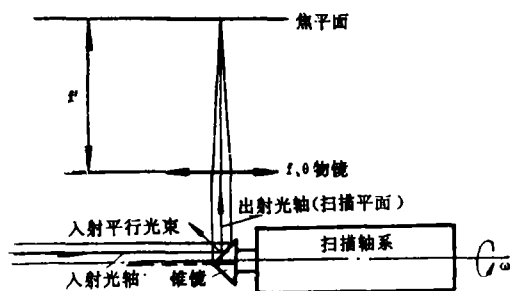


图 1

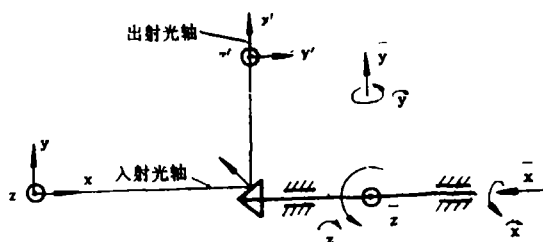


图 2

为分析方便,对扫描锥镜出、入射光线及扫描轴系建立的坐标系示于图2。 x 、 y 、 z 为物坐标系, x 为入射光轴方向。在工作中,物座标方向固定不变,为固定坐标系,可作为扫描轴系参考坐标系。入射光轴被锥镜 90° 转折成出射光轴 x' ,并随锥镜旋转在出射的扫描平面内,改变出射方向。当然 y' 、 z' 座标轴的方向也随之确定。此时 x' 、 y' 、 z' 座标轴构成像坐标系,显然它是动坐标系。

由于锥镜在平行光路中工作,因此只有出射光线绕 x' 、 y' 、 z' 座标轴的转动,才可能对扫描点产生影响。由图2可见,出射光线绕 x' 轴的转动对扫描象点的位置不产生影响。所以在以下分析中,只考虑出射光线绕 y' 、 z' 座标轴的转动。在棱镜调整理论中,定义出射光轴绕 y' 轴的转角为光轴偏转 μ'_y ,绕 z' 轴转角为光轴偏转 μ'_z 。当单次平面反射镜绕空间某个轴 \bar{P} 转动微量转角 $\Delta\alpha$,偏离其理想位置时,可推导出由此所产生绕 y' 轴和 z' 轴的光轴偏

转^[1]分别为

$$\mu'_{y'} = 2\Delta\alpha \sin \frac{\beta}{2} \cos \varphi \quad (1)$$

$$\mu'_{z'} = 2\Delta\alpha \cos \omega \quad (2)$$

其中: $\Delta\alpha$ 为单次反射镜绕 \overline{P} 轴微量转角。

β 是出入射光轴夹角。

φ 是 \overline{P} 轴与光轴偏转极值 $\mu'_{y',max}$ 的矢量方向 \overline{v} 的夹角。

ω 是 \overline{P} 轴与光轴偏转极值 $\mu'_{z',max}$ 的矢量方向 \overline{w} 的夹角。

在棱镜调整理论中已定义了单次反射镜光轴偏转极值方向,^[1]其中 \overline{v} 的方向为入射光轴与出射光轴夹角平分线, \overline{w} 垂直光轴平面, 与 z 轴同向。参见图 3。对 ψ 和 ω 要按具体条件分析, 在此不能给出。由下面分析可以看到, 应用公式 (1) (2) 解决锥镜光学扫描系统中棱镜调整问题, 实质上是把锥镜每一反射面都作为单次平面反射面, 确定 \overline{P} 轴和 \overline{v} 、 \overline{w} 之间夹角 ψ 和 ω , 从而求出 $\mu'_{y'}$ 和 $\mu'_{z'}$ 。

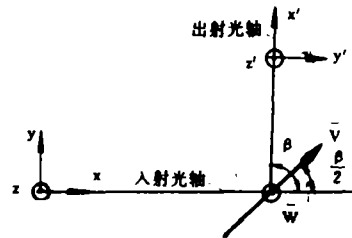


图 3

二、扫描轴系安装误差对扫描的影响

设扫描轴系的安装误差, 在参考坐标系中分解为三个线位移 \overline{x} 、 \overline{y} 、 \overline{z} , 和三个角位移为 \widehat{x} 、 \widehat{y} 、 \widehat{z} , 见图 2。

1. \overline{x} 、 \overline{y} 、 \overline{z} 的影响。

扫描轴系的线位移 \overline{x} 、 \overline{y} 、 \overline{z} , 不会产生锥镜的转角, 也就不会使出射光轴偏转, 对扫描光点成像位置不产生影响。但改变出射光轴到 $f \cdot \theta$ 物镜的入射高度, 会产生像差, 影响光点成像质量。因此, 也要控制在一定范围内。

2. \widehat{x} 、 \widehat{y} 、 \widehat{z} 的影响。

\widehat{x} 是扫描轴系正常工作的自由度对扫描不产生有害影响。

\widehat{y} 、 \widehat{z} 是扫描轴系绕固定坐标轴 y 、 z 的角位移, 其转角一般为角分级, 分别设为 $\Delta\alpha_y$ 、 $\Delta\alpha_z$ 。

\widehat{y} 、 \widehat{z} 引起出射光轴绕 y' 轴偏转角由 (1) 式确定, 分别为:

$$\mu'_{y'} = 2\Delta\alpha_y \sin \frac{\beta}{2} \cos \varphi,$$

$$\mu'_{z'} = 2\Delta\alpha_z \sin \frac{\beta}{2} \cos \varphi.$$

把图 3 中的 x 、 y 、 z 及 x' 、 y' 、 z' 坐标系原点移至单反射面的反射点得图 4。

一般 $\beta = 90^\circ$, 扫描角为 θ 。由图 4 可见, 当 \overline{P} 轴平行 y 轴时, 设为 \overline{P}_y ,

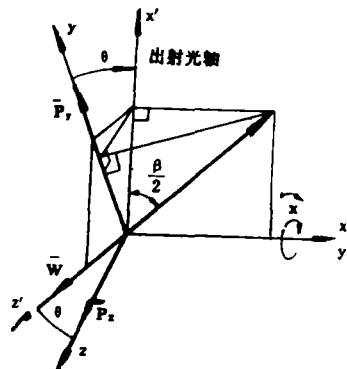


图 4

$$\cos\varphi_1 = \cos(\overline{p}_1, \overline{v}) = \cos\frac{\beta}{2}\cos\theta$$

当 \overline{p} 轴平行 z 轴时, 设为 \overline{p}_1 ,

$$\begin{aligned}\cos\varphi_1 &= \cos(\overline{p}_1, \overline{v}) = \cos\frac{\beta}{2}\cos(90^\circ + \theta) \\ &= -\cos\frac{\beta}{2}\sin\theta\end{aligned}$$

由 \widehat{y} , \widehat{z} 对出射光轴产生绕 y' 轴的光轴偏转为

$$\begin{aligned}\mu'_{1y} &= \mu'_{1y1} + \mu'_{1y2} = 2\Delta\alpha_1 \sin\frac{\beta}{2}\cos\frac{\beta}{2}\cos\theta - 2\Delta\alpha_2 \sin\frac{\beta}{2}\cos\frac{\beta}{2}\sin\theta \\ &= 2\Delta\alpha_1 \sin 45^\circ \cos 45^\circ \cos\theta - 2\Delta\alpha_2 \sin 45^\circ \cos 45^\circ \sin\theta \\ &= \Delta\alpha_1 \cos\theta - \Delta\alpha_2 \sin\theta = \Delta\alpha \sin(\gamma_1 - \theta)\end{aligned}$$

$$\Delta\alpha = \sqrt{\Delta\alpha_1^2 + \Delta\alpha_2^2}, \quad \gamma_1 = \text{tg}^{-1} \frac{\Delta\alpha_1}{\Delta\alpha_2}$$

同理, 可得

$$\begin{aligned}\cos\omega_1 &= \cos(\overline{p}_1, \overline{w}) = \cos(90^\circ - \theta) = \sin\theta \\ \cos\omega_2 &= \cos(\overline{p}_2, \overline{w}) = \cos\theta \\ \mu'_{1z} &= \mu'_{1z1} + \mu'_{1z2} = 2\Delta\alpha_1 \cos\omega_1 + 2\Delta\alpha_2 \cos\omega_2 \\ &= 2\Delta\alpha_1 \sin\theta + 2\Delta\alpha_2 \cos\theta = 2\Delta\alpha \sin(\gamma_2 + \theta) \\ \Delta\alpha &= \sqrt{\Delta\alpha_1^2 + \Delta\alpha_2^2}, \quad \gamma_2 = \text{tg}^{-1} \frac{\Delta\alpha_1}{\Delta\alpha_2}\end{aligned}$$

y 轴、 z 轴是固定坐标轴, 在加工装调后, $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_2$ 为固定值, γ_1 、 γ_2 也就确定了。锥镜每个面的扫描角相同, 每个面对同一个 θ 角产生的光轴偏转 μ'_{1y} 、 μ'_{1z} 也相等, 所以每条扫描线上, 同名点在扫描线方向及其垂直方向有相同的位移量, 并且按正弦规律分布。当行扫描与纵向扫描运动结合起来时, 形成一条条等长、等距, 比理论长度稍有增减的弯曲变形扫描线。

对于不要求扫描光点位置绝对精度的激光照排, 激光打印等系统, 只要人眼不能直接观察到扫描线畸变和弯曲变形就可以使用。如在实际设计装调中, 控制 $\Delta\alpha_1 = 40''$, $\Delta\alpha_2 = 1'$, 当扫描角 $2\theta = 60^\circ$, $f' = 156\text{mm}$, 在扫描线视场 163mm 的长度上, 扫描线弯曲变形量为 0.06mm , 扫描线增长 0.045mm (相对畸变 0.03%), 使用效果良好。

三、扫描轴系回转误差对扫描的影响

1. 轴向窜动及纯径向跳动

这些是轴系在转动中产生的 x , y , z 三个方向微量线位移运动, 由上面分析可知, 不影响光点扫描位置。

2. 轴系的角运动误差

如图5所示, 轴系的角运动误差 $\Delta\alpha$ 是扫描轴系转动时, 实际轴线对理想轴线的微量摆角。设 \overline{p} 轴对 z' 轴有一个固定相位差 φ , 如图6所示。在绕实际轴线的扫描轴转动中, 锥镜与实际轴线固连在一起, 同时绕 \overline{p} 轴对理想轴线做 $\Delta\alpha$ 摆角, 从而引起出射光轴, 在两个方向光轴偏转。这时有:

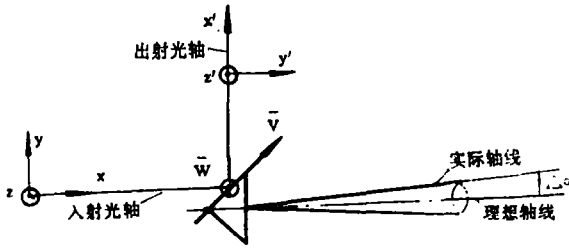


图 5

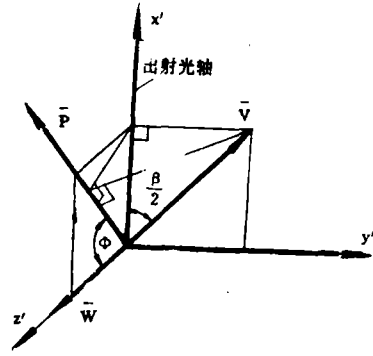


图 6

$$\cos\varphi = \cos(\bar{p}, \bar{v}) = \cos\frac{\beta}{2} \cos(90^\circ - \varphi) = \cos\frac{\beta}{2} \sin\varphi$$

$$\cos\omega = \cos(\bar{p}, \bar{w}) = \cos\varphi$$

$$\mu'_{z'} = 2\Delta a \sin\frac{\beta}{2} \cos\varphi = -2\Delta a \sin 45^\circ \cos 45^\circ \sin\varphi = \Delta a \sin\varphi$$

$$\mu'_{y'} = 2\Delta a \cos\omega = 2\Delta a \cos\varphi$$

显然光轴偏转 $\mu'_{z'}$ 、 $\mu'_{y'}$ 仅取决于相位差 φ 。在实际系统中，一旦装调完毕，微量摆角 $\Delta\alpha$ 的 \bar{p} 轴与锥镜上单反射面上的动坐标轴 z' 夹角固定，即相位差 φ 固定，而锥镜各面之间的 z' 轴与 \bar{p} 轴夹角不等， $\mu'_{z'}$ 、 $\mu'_{y'}$ 以锥镜的面数为周期变化。实际的 $\Delta\alpha$ 都含有常量和变化量，其中常量部份引起的光轴偏轴偏转也是常量，各面对应的 $\mu'_{z'}$ 可用光楔较方便地校正， $\mu'_{y'}$ 可通过行起始信号及相应计数电路校正。而变化量部份引起的光轴偏转不易通过校正得到补偿，必须在设计，加工，装调中给予充分重视，采取有效措施保证足够的轴系精度，以控制 $\Delta\alpha$ 中变化量部分带来的扫描误差在允许范围内。

四、锥棱镜安装误差对扫描的影响

锥镜在扫描轴系上正确安装的位置应该是锥镜对称轴线与扫描轴系的轴线平行。如果有线位移和绕 y' 轴转动 y' ，如前所述，对扫描点的位置没有影响。

设锥镜绕 \bar{p} 轴转动 $\Delta\alpha$ ， \bar{p} 轴对 z' 轴有 φ 角的固定相位差，如图6所示得到

$$\cos\varphi = \cos(\bar{p}, \bar{v}) = \cos\frac{\beta}{2} \cos(90^\circ - \varphi) = \cos\frac{\beta}{2} \sin\varphi$$

$$\cos\omega = \cos(\bar{p}, \bar{w}) = \cos\varphi$$

$$\mu'_{z'} = 2\Delta a \sin\frac{\beta}{2} \cos\varphi = 2\Delta a \sin 45^\circ \cos 45^\circ (-\sin\varphi)$$

$$= \Delta a \sin\varphi$$

$$\mu'_{y'} = 2\Delta a \cos\omega = 2\Delta a \cos\varphi$$

锥镜调整完毕， $\Delta\alpha$ 、 φ 随之确定且为常量， $\mu'_{z'}$ 及 $\mu'_{y'}$ 也必为常量， $\mu'_{z'}$ 用光楔校正， $\mu'_{y'}$ 用行起始信号和相应计数电路消除。

五、结 论

作者在激光照排机样机的研制过程中,曾用棱镜调整理论分析了轴系安装误差,轴系回转误差和锥镜安装误差对锥镜扫描象点位置的影响,结果与追光线计算的结果相吻合,实验也证明了这一点。通过合理的分配精度,可以控制扫描线的弯曲,畸变和均匀性在允许的范围之内。有针对性地采用行对齐和光楔校正技术,可以适当放宽某些单项精度指标而保证总的精度指标不变。

与通常的追光线计算的方法相比,用棱镜调整理论进行分析,除了都具有定量分析的优点外,它还具有形象直观,使用方便的优点,尤其在进行总体论证和设计时,这些优点将更加突出。

这种分析方法对一般的反射光学扫描系统都是适用的。

参 考 文 献

- [1] 毛英泰主编,《误差理论与精度分析》,国防工业出版社,1982
- [2] 连铜淑,《棱镜调整》,国防工业出版社,1978

Prism Adjustment Analysis of Optical Scanning System with Pyramid Mirror

Ren Jianyue

Abstract

The pyramid mirror is widely used in laser recording and typesetting. This paper analyzes, according to the prism adjustment theory, the assembling errors and the influences of the rotary errors on scanning the image position, discusses the properties of scanning error caused by different error sources and gives some methods to solve these problems.