

# 振镜二维扫描的图形畸变校正和曝光量补偿

万志, 杜温锡

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所电子印刷工程技术中心, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 主要讨论了物镜前振镜二维扫描光学系统中图形畸变的产生原因, 分析比较了图形畸变与振镜布放、像面坐标系方位及  $f\theta$  特性误差等的关系, 并结合视场大小为  $75 \times 75$  的实际物镜  $f\theta$  特性误差的最小二乘拟合, 给出了校正图形畸变的准确关系式。另外, 在矢量扫描方式中光斑移动速度的非线性会导致扫描图形各部分曝光不均匀, 文中也给出了对扫描图形曝光量加以补偿的方法和公式。

**关键词:** 振镜扫描; 图形畸变; 曝光量补偿

中图分类号: TH703 文献标识码: A

## 1 引言

文中较详细地讨论了物镜前双振镜二维扫描光学系统在扫描过程中图形畸变的产生和哪些因素有关, 并从畸变的产生根源中找到消除该畸变的方法。另外, 在矢量扫描方式中扫描的非线性将引起曝光量不均匀的问题, 我们也给出了补偿曝光量不均匀性的办法。以上旨在为提高扫描精度提供一些参考依据和思路。

## 2 振镜二维扫描图形畸变

### 2.1 畸变的产生原因及定义

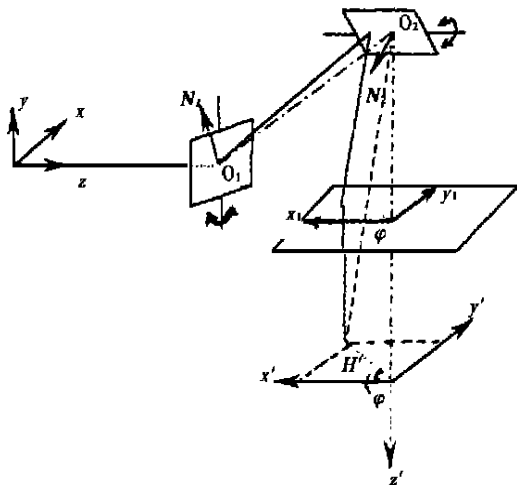


Fig. 1 Pre-objective dual galvanometer scanning system

振镜二维扫描所产生的畸变与一般意义上的畸变像差有所不同。首先, 从产生根源上看平常所说的畸变像差是由于成像系统中的一些光学元件本身存在像差而导致在对具有一定几何形状的物体成像时产生像和物的不相似性。振镜二维扫描的畸变则是一种图形畸变, 其所谓的物不是由真实的物点组成的, 而是存储在主控计算机中的一些扫描点的坐标数据, 是数字化了的图形。在  $f\theta$  物镜前振镜二维扫描系统(参见 Fig. 1)中, 当主控计算机通过 D/A 转换将数字信号转换成模拟信号来控制振镜偏转时是按照如下的像点坐标与振镜摆角的线性关系来处理的, 即:

$$\begin{cases} x = -2f \cdot \theta_1 \\ y = 2f \cdot \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $f$  为物镜焦距, 正负号的选取与坐标系的选择相对应。

但实际上, 由于存在入瞳漂移、 $f\theta$  特性误差等因素的影响, 使得上述线性关系不可能严格成立。另外, 从下文推导像点坐标与振镜摆角的关系中还将看到: 即使忽略入瞳漂移和  $f\theta$  特性误差的影响, 从纯几何投影的角度来说在  $\theta_1$  和  $\theta_2$  均不为零的情况下上述关系也只是近似, 只不过  $\theta_1$  和  $\theta_2$  越小则近似程度越高。所以, 这将造成扫描像点的定位精度误差从而引起图形畸变。其次, 从畸变的对称性来看, 同轴光学系统的畸变像差相对光轴具有轴对称性, 可以通过纯光学的方法校正, 而振

镜二维扫描光学系统属于非同轴的光学系统,其所产生的图形畸变一般不具有轴对称性,即畸变大小和形状在垂直光轴的平面内的各个方向上可能会有所不同,所以不能用纯光学的方法加以校正。

### 2.2 图形畸变与振镜摆放的关系

振镜二维扫描系统中双振镜可以有 Fig. 2 中所示四种摆放形式。当按(1)式简化控制振镜扫描一个正方形时,对应这四种摆放形式将得到 Fig. 3 所示三种畸变图形。其中在 Fig. 2 中的(a)、(b)两种摆放形式下扫描图形畸变的大小和形状完全相同,都对应 Fig. 3(a),而 Fig. 2 的(c)和(d)两种摆放形式分别对应 Fig. 3(b)和(c)。从畸变图形的对称性来看, Fig. 3(a) 关于像面坐标系 X 轴和 Y 轴都对称,而 Fig. 3(b)与(c)则只关于 Y 轴对称;从畸变大小上看, Fig. 3(a) 的畸变量要比 Fig. 3(b)和(c)小,这就是在二维振镜扫描应用中双振

镜一般采用 Fig. 2 (a) 或 (b) 所示摆放形式的原因。

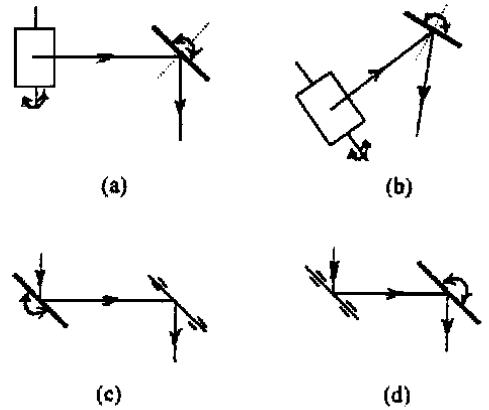


Fig. 2 Four kinds of placement of dual galvanometers

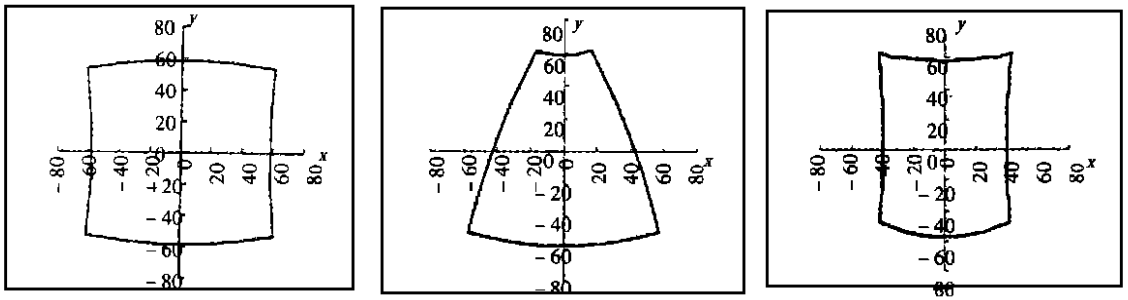


Fig. 3 Comparison of graphic distortion among four kinds of placement of dual galvanometers

### 2.3 图形畸变与像面坐标系方位的关系

多数二维振镜扫描应用中,像面坐标系的一个坐标轴(X 轴)和入射光束平行,而另外一个坐标轴(Y 轴)与二振镜中心连线平行。在研究中,我们发现在视场角大小相同的情况下,坐标轴上点的畸变像差要比轴外点小。所以可以考虑在扫描图形轴外点视场大于轴上点时,能否通过坐标变

换把视场较大的轴外像点变为轴上像点以减少扫描图形的整体畸变量。实际扫描结果证明这样做对于减小扫描畸变作用是明显的。Fig. 4 所示为扫描一个正方形时在扫描图形整体相对像面坐标系旋转 45 后与原扫描图形的对比,显然后者的畸变程度要小一些。

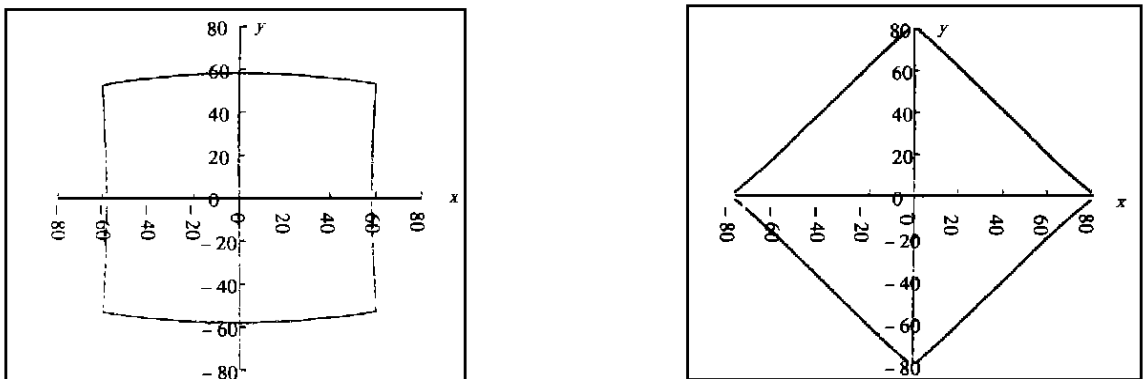


Fig. 4 Contrast of graphic distortion between different placement of coordinates of image plane

## 2.4 图形畸变的校正方法和公式

这里以 Fig. 2 中前两种振镜布放为例, 给出振镜二维扫描图形畸变的校正公式。在小视场  $f\theta$  物镜情形下可忽略入瞳漂移的影响, 从而在光线追迹时只考虑从第二振镜中心出射的光线的方向余弦, 经过推导得到出射光线的三个方向余弦为:

$$\begin{cases} \cos\alpha = -\sin 2\theta_1 \\ \cos\beta = \cos 2\theta_1 \cdot \sin 2\theta_2 \\ \cos\gamma = \cos 2\theta_1 \cdot \cos 2\theta_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\alpha, \beta$  分别为出射光线与像面坐标  $X$  轴和  $Y$  轴的夹角,  $\gamma$  为视场角即出射光线与  $f\theta$  物镜光轴的夹角。

由此导出

$$\begin{cases} \theta_1 = (\alpha - \frac{\pi}{2})/2 \\ \theta_2 = \tan^{-1}(\cos\beta/\cos\gamma)/2 \end{cases} \quad (3)$$

再参照 Fig. 1 由几何上的关系得到:

$$\begin{cases} \alpha = \cos^{-1}(\sin\gamma \cdot \cos\varphi) \\ \beta = \cos^{-1}(\sin\gamma \cdot \sin\varphi) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\varphi = \tan^{-1}(y/x)$  为扫描像点在像面坐标系中的方位角, 即扫描中心到像点的矢径与  $X$  轴正向的夹角。

理想  $f\theta$  物镜像高与视场角(单位为弧度)之间应满足  $f\theta$  特性关系, 但是实际的  $f\theta$  物镜由于在设计、加工等过程中不可避免地会产生一定的误差, 从而导致实际  $f\theta$  物镜像高与理想  $f\theta$  物镜像高相差一个小量  $\Delta$ , 即

$$H = f \cdot \gamma + \Delta \quad (5)$$

而  $H = \frac{x^2 + y^2}{2f}$ , 故有

$$\gamma = \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - \Delta}{f} \quad (6)$$

把 (4) 和 (6) 两式代入 (3) 得到用以校正振镜二维扫描系统图形畸变的实际像高和振镜摆角的关系为:

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{1}{2}(\cos^{-1}(\sin(\frac{\sqrt{x^2 + y^2} - \Delta}{f}) \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}) - \frac{\pi}{2}) \\ \theta_2 = \frac{1}{2}\tan^{-1}(\tan(\frac{\sqrt{x^2 + y^2} - \Delta}{f}) \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}) \end{cases} \quad (7)$$

显然, 从式 (7) 可以看出实际二维振镜扫描的像点坐标和振镜摆角之间是个复杂的非线性关系, 当按 (1) 式简化控制振镜进行扫描时就不可避免地产生光点的定位误差从而导致扫描图形的畸变。所以, 校正扫描畸变的关键在于能否按 (7) 式非线性地控制振镜偏转进行扫描。非线性电路实现起来可能有些困难, 但是可以按照与期望输出的像点坐标成非线性关系确定存储在主控计算机中的振镜摆角数据来达到这一目的。以一个采用  $75 \times 75$  小视场  $f\theta$  物镜作为成像物镜、振镜布放形式如图 Fig. 2(a) 所示的物镜前型二维扫描系统为例, 有了振镜摆角关系式 (7) 我们就可以利用非同轴光线追迹软件仿真实际扫描系统进行光线追迹, 得出扫描点的坐标和定位误差。

Table 1 Contrast of scan error between different control modes

Ideal position of laser spot	(0, 38)	(19, 38)	(38, 38)	(38, 19)	(38, 0)
Control mode	Errors of laser spot position: $ \Delta r $				
According to equation (1)	0.0185	0.1822	0.5670	0.2584	0.0195
According to $\Delta = 0$	0.0185	0.0267	0.0585	0.0274	0.0195
equation (7) $\Delta = 0$	0.0002	0.0027	0.0069	0.0033	0.0007

Table 1 所示为按像点坐标与振镜摆角的不同关系进行光线追迹得到的扫描像点坐标定位误差。下面我们对比分析一下这几种不同的结果: 表中第一种结果是按照通常的控制方式也就是按 (1) 所示线性关系控制扫描得到的, 在这种情形下扫描点误差最大可达 0.5 至 0.6 mm, 人眼能明显看出图形的畸变, 如图 Fig. 3(a) 所示; 第二种结果虽然是按非线性关系控制扫描, 但是忽略了  $f\theta$  特

性误差的影响, 所以它的扫描点误差仍可达到几十微米, 这对于精度要求一般的应用来说已经够用了, 但不能满足某些精度要求更高的场合; 最后一种结果是按 (7) 式非线性控制扫描并考虑到物镜的  $f\theta$  特性误差的情况下得到的, 对于我们所采用的  $75 \times 75$   $f\theta$  物镜用最小二乘法拟合  $\Delta$  得:

$$\Delta = [-0.0051(x^2 + y^2)^{3/2} + 0.0996(x^2 + y^2) - 1.5149(x^2 + y^2)^{1/2} + 6.0688]/10000 \quad (8)$$

基本上在小视场  $f\theta$  物镜的情况下它的定位精度能达到几微米的量级, 已经很精确了。但是这种校正方式只适合于下面将要介绍的步进和矢量两种扫描方式, 并且在矢量扫描方式中还要考虑曝光均匀性补偿问题, 关于这方面的讨论将在下文进行。

### 3 曝光量均匀性补偿

对于矢量扫描方式来说由于扫描光点在像面上的移动速度是非均匀的, 所以会引起扫描图形的各部分曝光不均匀, 下面分固定采样周期和随周期脉冲采样两种情况分别讨论补偿办法。

#### 3.1 固定采样周期系统的曝光量均匀性补偿

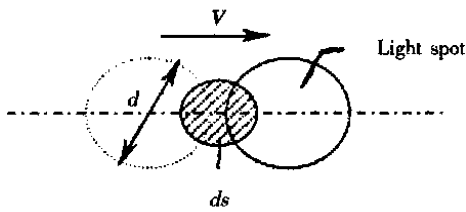


Fig. 5 Scheme of movement of the light spot

首先, 考虑根据光点移动速度的变化实时调整激光功率来保证曝光的均匀性。

矢量扫描方式的输入命令是由一系列步长很小的步进过程(阶跃函数)组成的, 在某次小的步进过程中扫描步距  $\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$  与步进时间(或者说采样周期)  $T$  的比值即为光点在这段扫描范围内的移动速度, 于是参照 Fig. 5 可得该段扫描的曝光量为:

$$Q = E \cdot ds \cdot dt = \varphi \cdot dt = \varphi \cdot \frac{d}{v} = d \cdot \varphi \cdot \frac{T}{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (9)$$

#### 参考文献:

- [1] 王本等. 激光扫描与光盘技术[M]. 北京: 北京邮电学院出版社, 1990. 90~112.
- [2] 虞孝舜. 双振镜扫描几何畸变的校正[J]. 激光与红外, 1998, 28(1): 45-47.
- [3] 杨少辰等. 对构成闭环振镜式光学扫描系统的研究[J]. 激光与红外, 1997, 27(5): 294-300.
- [4] Weisz J R. Software calibration of scan system distortions[C]. Proc. SPIE, 1991, 1454: 265-271.

其中  $d$  为光斑尺寸,  $\varphi$  与激光功率成正比, 分式为光点移动速度的倒数。可见, 只要在扫描过程中保持后两项乘积为定值就可以保证曝光的均匀性。

#### 3.2 随机周期采样脉冲系统的曝光均匀性校正

若激光功率恒定、采样脉冲周期可变, 则扫描场中对应最大扫描步距  $\Delta_{\max}$  的曝光量为

$$Q_0 = d \cdot T_{\max} \cdot \frac{\varphi}{\Delta_{\max}} \quad (10)$$

为保证曝光均匀  $T$  应满足下式

$$T = T_{\max} \cdot \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\Delta_{\max}} \quad (11)$$

这一方法特别适合于折线组成的图形。

### 4 结 论

1) 当扫描视场或者  $f\theta$  物镜口径较大时, 最好采用陀螺转镜作为扫描器, 以减小因入瞳漂移造成的像差和  $f\theta$  特性误差对像质的破坏。

2) 在小视场扫描应用中, 可以选用双振镜作为扫描元件。而双振镜的布放则可以根据具体情况选取 Fig. 2(a) - (d) 四种布放形式之一。但是, 如果没有特殊需要最好选择前两种布放形式, 这其中的原因可参阅 2.2 节。

3) 当扫描图形是除圆形以外的其它几何形状时, 各个方向对应的视场大小不同, 这时应通过坐标变换把对应视场角较大的像点调整到像面坐标系坐标轴上来。因为在视场大小相同的情况下坐标轴外像点受入瞳漂移的影响较大, 并且随视场增大这个影响也越来越大。

4) 通过非线性控制欲输出扫描像点坐标和两振镜摆角的关系可以精确地校正图形畸变。

以上讨论了图形畸变和曝光均匀性校正的一些公式和方法谨供扫描系统设计和应用人员参考, 希望对大家有所帮助。

## Calibration of graphic distortion and compensation of exposure for dual galvanometer scanning

WAN Zhi, DU Wei-xi

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** This paper mainly discussed the reasons for resulting in graphic distortion of pre-objective dual-galvanometer optical scanning system, and compared as well as analyzed the relations between graphic distortion and placement of galvanometers, orientation of image plane, and  $f-\theta$  error etc. With simulating the  $f-\theta$  error of  $75 \times 75$  FOV actual objective lens by least-squares model, the accurate formula for correcting graphic distortion was given. In addition, in vector scanning, the non-linear velocity of spot movement in image plane will lead to uneven exposure. This paper also offered several ways and formulas to compensate uneven exposure.

**Key words:** galvanometer scanning; graphic distortion; compensation of exposure

作者简介: 万志(1973-),男,吉林长春市人。中科院长春光机所硕士研究生,光学专业,研究方向为激光扫描光学系统。