

·激光技术·

## 双振镜激光扫描的误差分析及校正方法

韩万鹏<sup>1</sup>, 蒙文<sup>1</sup>, 李云霞<sup>1</sup>, 李大为<sup>1</sup>, 周嘉<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学, 陕西 西安 710077; 2. 西安通信学院, 陕西 西安 710106)

**摘要:**近年来,二维振镜激光扫描技术因其速度快、精度高、易于控制等特点,得到了越来越广泛的应用。但振镜扫描系统在扫描过程中,存在着固有扫描场的几何畸变,系统本身也存在着线性、非线性误差以及其他误差等,严重影响了振镜扫描系统在不同应用领域的扫描质量。从理论推导出发,较为详细地分析了物镜前扫描和物镜后扫描两种方式存在的几何畸变以及各种误差,并提出了针对性的补偿方法。在对各种误差理论分析的基础上,对校正思路进行了展望,提出了一些看法和建议。

**关键词:**双振镜;几何畸变;误差分析;展望

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)04-0014-05

## Error Analysis and Correction Methods of Dual Galvanometer Scanning

HAN Wan-peng<sup>1</sup>, MENG Wen<sup>1</sup>, LI Yun-xia<sup>1</sup>, LI Da-wei<sup>1</sup>, ZHOU Jia<sup>2</sup>

(1. Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China)

**Abstract:** The two-dimensional laser galvanometer technology is widely used for the characters of high speed, high precision and good controllability. Due to the intrinsic geometric distortion on the scanning field, and linear, nonlinear and other errors of the system, the scanning quality of the laser galvanometer system is seriously affected in different application fields. The geometric distortion and various errors are profoundly analyzed about the pre-object and post-object scanning models, and the pertinence compensation methods are advanced too. Some views and suggestions are put forward, the correction methods are also conceived on the basis of the theoretical analysis about various errors.

**Key words:** dual galvanometer; geometric distortion; error analysis; prospect

如今,激光振镜扫描技术已广泛应用于激光打标、激光快速成型、物体轮廓提取、激光舞台等诸多领域,并以其优良的矢量扫描特性<sup>[1]</sup>在机场泊位引导系统、车辆防撞体系、车场停泊系统中发挥着重要作用。激光扫描方式主要分为2种:物镜后扫描和物镜前扫描<sup>[2]</sup>。扫描方式主要由聚焦物镜与反射镜之间的位置关系来确定。由像差理论可知,物镜后扫描仅需要校正轴上点像差,校正方法相对简单;物镜前扫描一般是由反射镜的出射光束经过 $f \cdot \theta$ 物镜到达目标平面完成较大视场内清晰成像

的,因此必须要很好地校正轴外像差,这类方式是由物镜的 $f \cdot \theta$ 特性代替一般物镜的 $f \tan \theta$ 特性从而实现光点匀速扫描的目的。

这2种扫描方式都存在着固有扫描场的几何畸变<sup>[3,4]</sup>,物镜后扫描主要表现为 $x$ 方向上的枕形失真;物镜前扫描表现为 $x$ 方向上枕形与 $y$ 方向上桶形的复合失真。另外还都存在聚焦、非线性<sup>[5]</sup>、镜面偏置等其他误差,当扫描场较大时,极大地影响了激光扫描的质量。

收稿日期:2011-06-28

作者简介:韩万鹏(1983-),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事激光测距和振镜扫描技术研究;导师简介:蒙文(1966-),男,广西桂林人,副教授,硕士生导师,主要从事光通信和激光技术应用与研究。

## 1 双振镜平面扫描误差分析

### 1.1 枕形误差

二维振镜扫描是利用安装在2个互相垂直伺服转机上的平面反射镜绕互成角度,围绕转轴转动,使扫描光束按照一定角度和速度向 $x$ 、 $y$ 轴2个方向扫描,实现目标空间平面扫描的扫描方式。

由图1可知, $x$ 、 $y$ 轴分别转动 $\alpha$ 、 $\beta$ 角后,扫描光束在 $XOY$ 平面内的扫描线端点坐标为

$$\begin{cases} y = d \tan 2\beta \\ x = (e + d \sec 2\beta) \tan 2\alpha \end{cases} \quad (1)$$

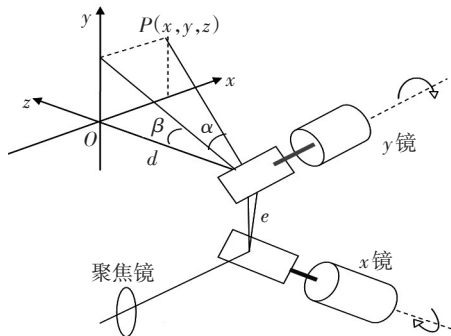


图1 物镜后扫描系统

对应的 $Y$ 、 $X$ 反射镜的摆角分别为

$$\begin{cases} \beta = \frac{1}{2} \arctan \frac{y}{d} \\ \alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{x}{d \sec 2\beta + e} \end{cases} \quad (2)$$

当摆角 $\alpha$ 不变时,坐标 $x$ 、 $y$ 的值会随着摆角 $\beta$ 作相应的变化,令 $\tan 2\alpha = c$ , $c$ 为常数,对式(1)变形整理后得

$$\frac{(x - ce)^2}{(cd)^2} - \frac{y^2}{d^2} = 1 \quad (3)$$

显然,扫描轨迹为双曲线,即所谓的枕形畸变,如图2所示,这是光学元件无法消除的非线性几何畸变。

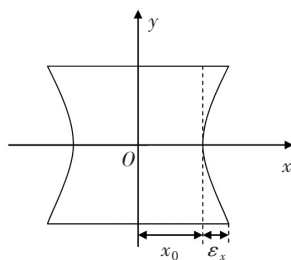


图2 枕形失真

$x$ 、 $y$ 方向的畸变量分别为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = x - x_0 = \left(\frac{1}{\cos 2\beta} - 1\right)d \tan 2\alpha \\ \varepsilon_y = y - y_0 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

扫描线的枕形失真度为

$$\eta_x = \frac{\varepsilon_x}{2x_0} = \frac{x - x_0}{2x_0} = \frac{1 - \cos 2\beta}{2(e/d + 1)\cos 2\beta} = \frac{\sin^2 \beta}{(e/d + 1)\cos 2\beta} \quad (5)$$

当 $\alpha$ 、 $\beta$ 较小时,式(4)、式(5)可以近似为

$$\begin{cases} \varepsilon_x \approx 2d\alpha\beta^2 \\ \eta_x \approx \frac{\beta^2}{e/d + 1} \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,枕形畸变量与 $d$ 、 $\alpha$ 以及 $\beta$ 的平方成正比,因此要完成一定面积的扫描,可以增大 $d$ 的值,这样可以同时减小 $\alpha$ 、 $\beta$ 的最大值,从而大大减少振镜扫描的畸变程度。

### 1.2 聚焦误差

振镜扫描系统的焦平面为一球面,光束通过反射镜到达视场平面不同坐标点的光程不同,从而造成聚焦误差,也叫离焦误差。

$y$ 轴反镜的中心到达平面坐标中心的距离为

$$L_0 = e + d \quad (7)$$

以 $y$ 轴反镜的中心为光程计算起点,则这点到视场平面上任意点 $P(x, y)$ 的光程为

$$L_p = \sqrt{(\sqrt{d^2 + y^2} + e)^2 + x^2} = (d \sec 2\beta + e) \sec 2\alpha \quad (8)$$

光程差为

$$\begin{aligned} \Delta L = L_p - L_0 &= (d \sec 2\beta + e) \sec 2\alpha - (e + d) \approx \\ & 2(\alpha^2 + \beta^2 + 2\alpha^2\beta^2)d + 2\alpha^2e \end{aligned} \quad (9)$$

聚焦误差会影响光斑直径的变化,从而影响扫描的质量。从式(9)可以看出,目标范围一定时,要减小 $\alpha$ 、 $\beta$ 的值就需要增大 $d$ 的值,从而减小聚焦误差。对于物镜后扫描方式来说,利用动态聚焦模块可以有效校正二维扫描系统的聚焦误差,但这种方式只能在小范围内获得满意的结果。对于物镜前扫描方式,一般采用 $f \cdot \theta$ 物镜利用自身的特性来进行像差校正<sup>[6]</sup>。但 $f \cdot \theta$ 物镜的使用又在原来枕形畸变的基础上叠加了桶形畸变,产生了复合畸变。

### 1.3 复合畸变误差

如图3所示,物镜前扫描系统增加一个 $f \cdot \theta$ 物镜,可以对离焦误差进行校正,使得激光束能够聚焦在同一焦平面上,并对扫描系统进行一定的失真校正,但其无法实现对 $x$ 轴枕形失真的校正,并产生 $y$ 轴方向的桶形失真。

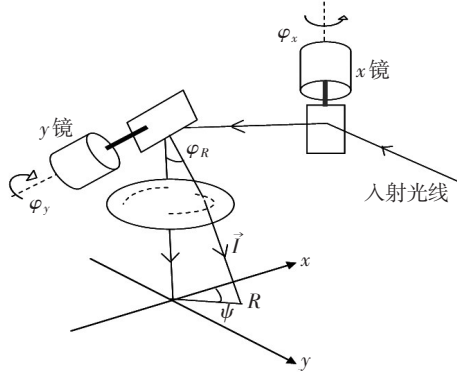


图3 物镜前扫描系统

系统扫描光线的单位矢量为

$$\vec{i} = (\sin 2\varphi_x)\vec{i} + (\cos 2\varphi_x \sin 2\varphi_y)\vec{j} + (\cos 2\varphi_x \cos 2\varphi_y)\vec{k} \quad (10)$$

令 $\phi_R$ 为出射光线与 $z$ 轴的夹角; $R$ 为以角 $\phi_R$ 出射的光线与扫描场平面的交点至坐标原点的距离; $\psi$ 为光线交点在扫描场平面上的角坐标。则从式(10)中得到如下结果

$$\tan \psi = \frac{\sin 2\varphi_x}{\tan 2\varphi_y} = \frac{\sin 2\varphi_x \cos 2\varphi_y}{\sin 2\varphi_y} \quad (11)$$

$$\cos \phi_R = \cos 2\varphi_x \cos 2\varphi_y \quad (12)$$

对于 $f \cdot \theta$ 物镜,焦距为 $f$ ,根据几何关系可得

$$R = f\phi_R = f \arccos(\cos 2\varphi_x \cos 2\varphi_y) \quad (13)$$

利用以上关系可求出扫描场上任一点的坐标

$$X = R \cos \psi = \frac{R}{\sqrt{1 - \tan^2 2\psi}} = \frac{f \sin 2\varphi_x \arccos(\cos 2\varphi_x \cos 2\varphi_y)}{\sqrt{1 - \cos^2 2\varphi_x \cos^2 2\varphi_y}}$$

$$Y = R \sin \psi = \frac{R \tan \psi}{\sqrt{1 - \tan^2 2\psi}} = \frac{f \sin 2\varphi_y \cos 2\varphi_x \arccos(\cos 2\varphi_x \cos 2\varphi_y)}{\sqrt{1 - \cos^2 2\varphi_x \cos^2 2\varphi_y}} \quad (14)$$

$x$ 、 $y$ 方向的畸变量分别为

$$\varepsilon_x = x - x_0 =$$

$$\frac{f \sin 2\varphi_x \arccos(\cos 2\varphi_x \cos 2\varphi_y)}{\sqrt{1 - \cos^2 2\varphi_x \cos^2 2\varphi_y}} - 2f\varphi_x$$

$$\varepsilon_y = y - y_0 =$$

$$\frac{f \sin 2\varphi_y \cos 2\varphi_x \arccos(\cos 2\varphi_x \cos 2\varphi_y)}{\sqrt{1 - \cos^2 2\varphi_x \cos^2 2\varphi_y}} - 2f\varphi_y \quad (15)$$

其中, $x_0$ 、 $y_0$ 分别是 $\varphi_y = 0$ 、 $\varphi_x = 0$ 时 $x$ 、 $y$ 的坐标值。扫描线的失真度为

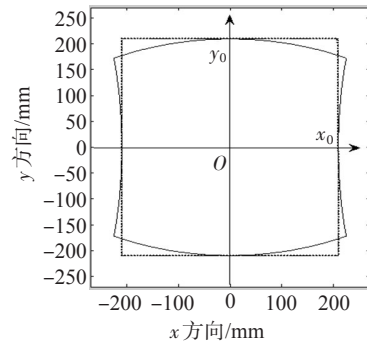
$$\eta_x = \frac{\varepsilon_x}{2x_0} = \frac{x - x_0}{2x_0} =$$

$$\frac{\sin 2\varphi_x \arccos(\cos 2\varphi_x \cos 2\varphi_y)}{4\varphi_x \sqrt{1 - \cos^2 2\varphi_x \cos^2 2\varphi_y}} - \frac{1}{2}$$

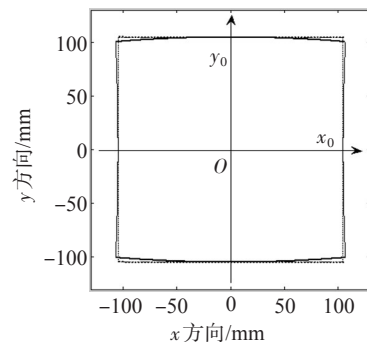
$$\eta_y = \frac{\varepsilon_y}{2y_0} = \frac{y - y_0}{2y_0} =$$

$$\frac{\sin 2\varphi_y \cos 2\varphi_x \arccos(\cos 2\varphi_x \cos 2\varphi_y)}{4\varphi_y \sqrt{1 - \cos^2 2\varphi_x \cos^2 2\varphi_y}} - \frac{1}{2} \quad (16)$$

根据式(16)用Matlab软件进行计算绘图,取 $f=300$  mm,两振镜的角度偏转范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$ ,分别作转角为 $10^\circ$ 和 $20^\circ$ 时的正方形扫描图案,如图4所示,弯曲的实线图形代表实际作出的正方形图案,虚线的正方形表示理想的没有畸变的扫描图形。



(a) 偏转 $20^\circ$



(b) 偏转 $10^\circ$

图4 枕形、桶形复合畸变的仿真图形

由图4可以看出明显的几何畸变,也就是在 $x$ 方向产生了枕形失真, $y$ 方向产生了桶形失真。当 $\varphi_x = \varphi_y = 10^\circ$ 时, $\eta_x \approx 1.1\%$ , $\eta_y \approx 2\%$ ;当 $\varphi_x = \varphi_y = 20^\circ$ 时, $\eta_x \approx 3.7\%$ , $\eta_y \approx 9\%$ 。畸变程度随着扫描角度的增大而增大,当扫描角度小于 $10^\circ$ 时,畸变程度不明显,而当扫描角度大于 $15^\circ$ 时,畸变就特别明显了,因此在不采用任何校正方法的情况下,选择 $f$ 值较大的聚焦透镜可以有效降低扫描的畸变程度。

#### 1.4 非线性误差

在振镜扫描过程中,由于振镜是角度偏转,而扫描线则按线度 $x, y$ 计算,其中 $x$ 正比于 $\tan 2\alpha$  ( $\beta$ 固定), $y$ 正比于 $\tan 2\beta$  ( $\alpha$ 固定),即 $x = f \tan 2\alpha$ , $y = \tan 2\beta$ ,而实际中计算机通过D/A转换成模拟信号来控制振镜偏转是按线性关系来处理的,即 $x = 2f\alpha$ , $y = 2f\beta$ 。因为 $\tan \theta > \theta$ ,所以其扫描不是线性的,且偏转角度越大,误差就越大。非线性失真度可表示为: $(\tan 2\theta - 2\theta) / \tan 2\theta$ ,当 $\theta = 10^\circ$ 时,其非线性失真度为4.1%。

#### 1.5 系统误差

系统误差可以分为结构误差、安装误差和控制误差<sup>[7]</sup>。结构误差包括结构参数误差( $d, e$ 参数的测量误差, $d$ 是 $x$ 镜轴线到视场平面的距离, $e$ 为两镜之间的距离)、振镜转轴的平衡度、检流计定位精度、机械装置的形变度、光学系统工艺误差<sup>[8]</sup>等。安装误差主要有:(1) $x, y$ 两转轴的垂直误差;(2)扫描光束与振镜转轴相交度和垂直度误差;(3) $y$ 镜射出光与扫描平面中心 $O$ 的位置偏移误差;(4)振镜扫描前的初始角度即零位置调整误差;(5)镜面偏置误差。控制误差主要是控制系统响应失真<sup>[9]</sup>、电路的稳定度、控制信号与扫描角度存在的非线性关系等。另外还要考虑到入瞳漂移、随机噪声干扰、环境温度等因素的影响。

由于以上这些误差的存在,单一的通过理论计算进行扫描控制必然导致较大的扫描误差,因此校正时要获得实际扫描数据,通过实际数据与理论数据的对比可以建立补偿校正表或补偿曲面,这种校正思路可以克服纯畸变理论校正方法的不足。

## 2 快速校正表模型

针对畸变和误差进行校正的方式可分为硬件校正<sup>[10]</sup>和软件校正2种,软件校正因其经济实用、简单灵活而被大多数人采用。通常采用的软件校正方法有增量补偿<sup>[11]</sup>、校正表<sup>[12]</sup>、最小二乘拟合<sup>[13]</sup>、神经网络标定<sup>[14]</sup>、坐标变换<sup>[15]</sup>、图像校正<sup>[16]</sup>等几种方法。这些方法各有优劣,从原理上讲,可归结为解决角度偏转和坐标的准确映射关系上,而最终评判标准可归结为扫描精度和扫描速度2个指标上。

在保持一定扫描精度的同时,为了提高扫描速度,提出了一种基于角度近似比例关系的简单校正表模型。对物镜后扫描来说,当 $\beta$ 固定时,转动 $x$ 轴,扫描线是平行于 $y$ 轴的直线,几何畸变只在 $x$ 方向发生,对应不同的俯仰角 $\beta$ ,都有一个最大的畸变量 $\varepsilon_{x \max}$ ,如图5所示。

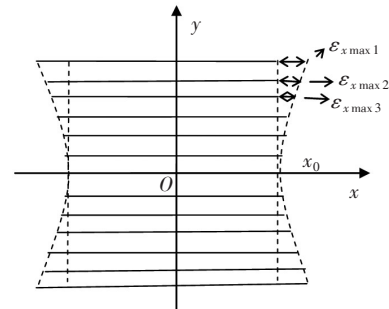


图5 简单校正表模型原理图

其中

$$\varepsilon_{x \max} = \left( \frac{1}{\cos 2\beta} - 1 \right) d \tan 2\alpha_{\max} \quad (17)$$

每一行对应任意一点 $x$ ,其畸变误差为

$$\varepsilon_x = \left( \frac{1}{\cos 2\beta} - 1 \right) d \tan 2\alpha \quad (18)$$

二者之间的关系为

$$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{x \max}} = \frac{\tan 2\alpha}{\tan 2\alpha_{\max}} \approx \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \quad (19)$$

$$\varepsilon_x \approx \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \varepsilon_{x \max} \quad (20)$$

系统扫描误差可以通过系统的统计特性进行校正,安装偏置误差和畸变误差相差几个数量级,可忽略不计,因此,在一般的扫描精度情况下,对于不同步进的俯仰角 $\beta$ (比如以 $1^\circ$ 为步进,分别计算 $\cos 1^\circ$ 、 $\cos 2^\circ$ 、 $\cos 3^\circ$ 、……对应的 $\varepsilon_{x \max}$ )、不同距离



$d$ 的扫描方式都可以通过以上各式建立简单的误差校正表给予校正。该校正表模型可应用于实时性要求较高的物镜后扫描模式,对于物镜前扫描,增加 $y$ 方向上的畸变补偿表,同样适用。

### 3 校正方法展望

这些校正方法从着手点上大致可以分为两类:一类是通过理论计算对畸变及误差进行校正的方法,增量补偿和校正表等校正方法属于此类;一类是通过扫描实验得到的实际数据与理论数据对比进行补偿或校正的方法,这类主要有最小二乘拟合、神经网络标定、坐标变换等校正法。从精度上讲后者优于前者,主要是因为这类方法能够兼顾理论畸变和光学器件、扫描系统等各种误差;从复杂程度上讲前者优于后者,前者只考虑理论畸变上的补偿量就能到达校正的目的,应用起来相对比较简单,扫描速度较快。

由于双振镜扫描存在固有的几何畸变和其他各种误差,单一的校正模式一般很难满足具体的应用需求。随着计算机处理速度的不断提高,大量的公式推导和数字计算已不是难题,对这种综合误差进行修正时,必须获得振镜系统的实际扫描数据,根据实际扫描数据与理论数据的偏差,建立补偿曲面或校正表。具体可以通过最小二乘拟合或者神经网络等需要大量计算的方法不断向真实情况逼近,这样可以有效校正扫描的综合误差,不断提高扫描精度。为了同时提高扫描速度,可以综合2种或多种校正模式,比如拟合后的补偿曲面建立对应的校正网格表,通过校正表进行校正,即先复杂后简单的校正模式。因此,在实际应用中,要结合具体情况对校正模型进行合理地改进和综合。

### 4 结束语

对物镜前扫描方式和物镜后扫描方式存在的扫描图形畸变以及各种扫描误差都进行了较为详细的理论分析和公式推导,并提出了改善补偿办法。单一的校正一种误差相对都比较简单,前人也做过大量行之有效的,但对于校正综合误差要想达到理想的效果还是要权衡各种误差的影响以

及相互之间的关系,文中在综合分析各种扫描误差和前人各种校正方法的基础上,提出了一种简单的校正表模型,并对振镜扫描的校正思路进行了总结和展望。振镜扫描技术目前已相对成熟,但每种校正方法都并非完美,究竟采用何种校正方法还要根据具体的应用领域和使用要求。

### 参考文献

- [1] D P Jablonowski, J Raamot. Beam deflection at high accuracy and precision [J]. SPIE, 1976, 84: 69-76.
- [2] 叶乔. 高速振镜理论研究及实践[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [3] J R Weisz. Software calibration of scan system distortions [J]. SPIE, 1991, 1454: 265-271.
- [4] 朱林泉. 双振镜二维扫描系统的误差分析和校正技术 [J]. 应用激光, 2001, 21(5): 325-327.
- [5] 唐武. 加畸变透镜的双振镜系统特性 [J]. 光学学报, 1987, 7(3): 261-268.
- [6] Ven katakrishnan K, Tan B, Ngoi B K A. Two-axis-scanning laser Doppler vibrometer for precision engineering [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 38: 153-171.
- [7] 孙会来, 林树忠. 双振镜激光扫描加工误差原因分析 [J]. 激光与红外, 2005, 35(3): 161-163.
- [8] 许亚平, 陶霞红. 振镜结构对精度和速度的影响 [J]. 应用激光, 1998, 18(4): 169-170.
- [9] 刘才明. 激光大屏幕显示系统中振镜扫描的工作原理及图像失真研究 [J]. 中国激光, 2003, 30(3): 263-266.
- [10] 郭飞, 胡兵, 应花山, 等. 双振镜扫描几何失真的硬件校正 [J]. 激光技术, 2003, 27(4): 337-338.
- [11] 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.
- [12] 赵毅, 卢秉恒. 振镜扫描系统的枕形畸变校正算法 [J]. 中国激光, 2003, 30(3): 216-218.
- [13] 万志, 杜温锡. 振镜二维扫描的图形畸变校正和曝光量补偿 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 115-118.
- [14] 陈小明, 洪军, 阎海红, 等. 基于Elman神经网络的振镜扫描系统误差校正技术研究 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(5): 587-590.
- [15] 贾和平, 史玉升, 谢军. 振镜式激光扫描误差分析及几何校正算法 [J]. 光电工程, 2007, 34(8): 37-40.
- [16] 郝俊明, 邢刚, 李江明. 双振镜激光扫描加工误差精密校正 [J]. 激光与红外, 2009, 39(12): 1271-1274.