

文章编号: 1001-3806(2013)05-0601-04

激光打标中振镜几何畸变误差多项式拟合校正

彭留永¹, 王宣雅², 周建涛¹, 裴红星^{1*}

(1. 郑州大学 物理工程学院, 郑州 450001; 2. 河南煤业化工集团 洛阳永龙能化有限公司, 洛阳 471100)

摘要: 为了消除激光打标系统中由2维振镜物镜前扫描引起的打标点几何畸变误差, 分析误差产生的原因, 在振镜扫描角度 (α, β) 理想计算公式的基础上, 采用最小二乘曲线拟合的方法, 得到用打标点坐标 (x, y) 表示的补偿 (α, β) 误差的拟合多项式, 从而对激光打标点的畸变误差进行了校正。通过校正, 可以将激光打标点的最大几何畸变误差由3.2mm降至20 μm 以内, 且计算量小、速度快。结果表明, 该误差校正算法可以满足高速、高精度激光打标的需要; 同时可通过改变物镜焦距计算出新的补偿公式, 以应用于不同参量的激光打标系统。

关键词: 激光技术; 激光打标; 多项式拟合; 2维振镜; 误差校正

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.009

Polynomial fitting correction of galvanometer geometric distortion error in laser marking

PENG Liu-yong¹, WANG Xuan-ya², ZHOU Jian-tao¹, PEI Hong-xing¹

(1. School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Luoyang Yonglong Energy Limited Company, Henan Coal Chemical Industry Group, Luoyang 471100, China)

Abstract: In order to eliminate geometric distortion error of marking point caused by 2-D galvanometer scan before the objective in laser marking system, the causes of the distortion was analyzed in detail. On the basis of the ideal formula of galvanometer deflection angle (α, β) , using the least squares curve fitting method, a fitting polynomial for compensating the errors of (α, β) with the marking point coordinates (x, y) was obtained and the distortion error of the galvanometer laser marking point was corrected. After correction, the maximum geometric distortion error of the laser marking point can be reduced from 3.2mm down to less than 20 μm with smaller amount of calculation and faster speed. The results show that this error correction algorithm can meet the requirements of high-speed, high-precision laser marking. At the same time, new compensation formula can be calculated by changing the objective lens focal length to be applied to the different parameters laser marking system.

Key words: laser technique; laser marker; polynomial fitting; 2-D galvanometer; error correction

引言

激光打标是激光技术的一个重要应用方向。目前, 振镜式激光打标以其速度快、精度高的特点得到了广泛的应用^[1]。但振镜式打标系统存在着打标点的几何畸变^[2]、离焦^[3]、非线性^[4]、机械安装、系统控制^[5]、环境电磁干扰、随机噪声等多种因素引起的误差, 必须通过误差的校正才能实现高精度的

打标。其中, 打标点的几何畸变是引起2维振镜式激光打标误差的主要因素, 对其进行精确校正, 可以大幅减小打标系统误差^[2]。本文中分析了2维振镜式激光打标点几何畸变误差产生的原因, 并从振镜扫描角度与打标点坐标的理想关系式出发, 用多项式拟合的方法, 校正几何畸变误差。理论计算结果表明, 该方法可以使最大的畸变误差由3.2mm降至20 μm 以内, 较好地校正了几何畸变误差, 且不会显著增加运算量, 满足高速、高精度打标的需要。

1 几何畸变误差产生原因的分析

2维振镜扫描系统分为物镜后扫描和物镜前扫描两种。激光打标中, 应用最广泛的是物镜前扫描系统, 但是会使打标点产生几何畸变误差^[6]。图1

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10974183)

作者简介: 彭留永(1985-), 男, 硕士研究生, 现主要从事误差分析、嵌入式系统、数据库的研究。

* 通讯联系人。E-mail: phxlee@zsu.edu.cn

收稿日期: 2012-11-28; 收到修改稿日期: 2013-01-05

所示为 $f-\theta$ 物镜前扫描系统的结构示意图,在图 1 中建立直角坐标系, $x-O-y$ 为打标平面; x 轴、 z 轴分别与振镜 Y、振镜 X 的转轴平行; θ 为出射角, R 为打标点与坐标原点的距离, δ 为打标点在打标幅面上的角坐标。

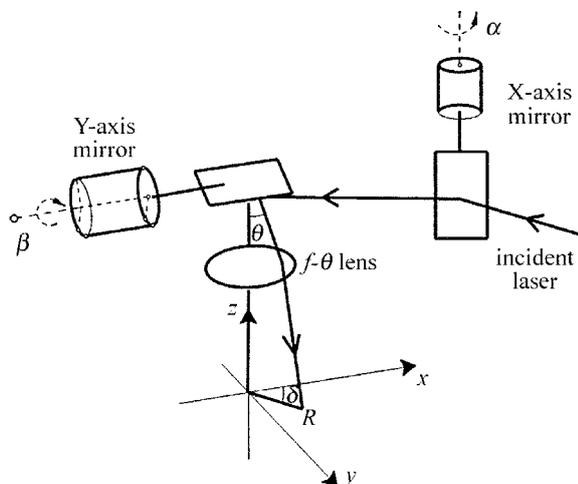


Fig. 1 Diagram of scanning system before $f-\theta$ objective lens

对于 $f-\theta$ 物镜, 焦距为 f , 则 $R = f\theta$ 。X 振镜和 Y 振镜的扫描角度 (α, β) 与打标点坐标 (x, y) 的实际计算关系为^[2]:

$$\begin{cases} x = R \cos \delta = \frac{R}{\sqrt{1 - \tan^2(2\delta)}} = \\ \frac{f \sin(2\alpha) \arccos[\cos(2\alpha) \cos(2\beta)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\alpha) \cos^2(2\beta)}} \\ y = R \sin \delta = \frac{R \tan \delta}{\sqrt{1 - \tan^2(2\delta)}} = \\ \frac{f \sin(2\beta) \cos(2\alpha) \arccos[\cos(2\alpha) \cos(2\beta)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\alpha) \cos^2(2\beta)}} \end{cases} \quad (1)$$

而当控制器控制振镜扫描时, 是按照下式所示的理想计算关系来处理的^[7]:

$$x' = +2f\alpha, y' = +2f\beta \quad (2)$$

$$\text{由(2)式得: } \alpha = x'/(2f), \beta = y'/(2f) \quad (3)$$

当扫描角为 (α, β) 时, 实际打标点与理想打标点的误差为:

$$\begin{cases} \Delta x = x - x' = -2f\alpha + \\ \frac{f \sin(2\alpha) \arccos[\cos(2\alpha) \cos(2\beta)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\alpha) \cos^2(2\beta)}} \\ \Delta y = y - y' = -2f\beta + \\ \frac{f \sin(2\beta) \cos(2\alpha) \arccos[\cos(2\alpha) \cos(2\beta)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\alpha) \cos^2(2\beta)}} \end{cases} \quad (4)$$

在本文中的激光打标系统中, 采用光纤激光器, 激光光点直径^[8]为 $d = 34 \mu\text{m}$, 焦距 $f = 254 \text{mm}$, 打标

幅面为 $170 \text{mm} \times 170 \text{mm}$ 。取一组理想打标点坐标 (x', y') , 根据(1)式和(4)式计算其实际打标点坐标及误差, 如表 1 所示。

Table 1 Marking distortion errors between the ideal coordinates and the actual coordinates/mm

x'	x	y'	y	Δx	Δy
0	0	0	0	0	0
10	10.0026	10	9.99483	0.00258274	-0.00516828
25	25.0403	25	24.9191	0.0403056	-0.0808857
45	45.2343	45	44.5262	0.234273	-0.473769
65	65.7021	65	63.5625	0.702147	-1.43748
85	86.5576	85	81.756	1.55765	-3.24399

从表 1 中可以看出, $\Delta x > 0, \Delta y < 0$, 即在 x 和 y 方向产生了几何畸变误差, 这种几何畸变也可称为 x 方向的枕形失真和 y 方向的桶形失真^[9]。图 2 即为几何畸变误差的示意图。当 $x' = y' = 85 \text{mm}$ 时, $\Delta x = 1.56 \text{mm}, \Delta y = -3.23 \text{mm}$, 是激光光点直径的上百倍, 误差非常明显, 肉眼即可辨识, 不能满足高精度打标的需要。

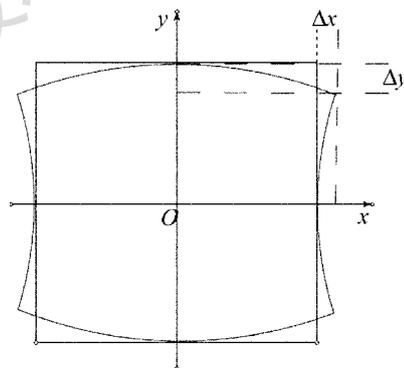


Fig. 2 Diagram of geometric distortion error

2 几何畸变误差的校正

2.1 校正方法分析

对于物镜前扫描系统引起的几何畸变误差, 有硬件校正^[7]和软件校正两类方法。软件校正不增加硬件成本、简单灵活、可适应于不同参量的系统, 因而得到广泛的应用。常用的软件校正方法有多种, 从原理上讲, 都归结为解决振镜扫描角度 (α, β) 与打标点坐标 (x, y) 的准确映射关系, 而最终评判标准为打标精度和打标速度两个指标^[10]。

软件校正几何畸变误差, 可采用以下 3 种方法。

(1) 直接根据打标点坐标 (x, y) 计算振镜扫描角度 (α, β) 。

(α, β) 与 (x, y) 的精确计算关系如下式所示^[11]:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\arcsin\left(\frac{x\sin\theta}{R}\right)}{2} = \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{x\sin\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{f}}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \\ \beta = \frac{\arctan\left(\frac{x\tan\theta}{R}\right)}{2} = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{x\tan\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{f}}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \end{cases} \quad (5)$$

此方法不会产生几何畸变误差,但计算量大,振镜扫描速度慢,使打标速度降低将近95%,不能满足高速打标的要求。

(2)将 (x,y) 与 (α,β) 之间一一对应关系存储起来,通过查表的方法调用。在打标幅面上, x,y 轴方向均分为 2^{16} 份^[6],在每个坐标点上, x,y 均是存储空间为4byte的双精度数,则所需查表文件的大小为: $(4+4)\times 2^{16}\times 2^{16}\text{byte}=32\times 2^{30}\text{byte}=32\text{Gbyte}$ 。这么大的文件的存储和读取复杂,对系统的成本和稳定性都是极大的挑战,所以查表的方法也不可取。

(3)多项式拟合校正的方法。此方法在下面进行详述。

2.2 多项式拟合法校正几何畸变误差

多项式拟合方法是为了拟合出 (x,y) 与 (α,β) 的准确映射关系。拟合原理是:在由(3)式得到理想的 (α',β') 的基础上,补偿一定的误差量 $(\Delta\alpha,$

$\Delta\beta)$,如下式所示,从而得到与(5)式相近的结果,简化计算过程,满足高速、高精度打标的要求。

$$\begin{cases} \alpha = \alpha' + \Delta\alpha = (x/2f) + g(x,y) \\ \beta = \beta' + \Delta\beta = (y/2f) + f(x,y) \end{cases} \quad (6)$$

由(6)式可知,拟合问题的关键就是求 $\Delta\alpha = g(x,y)$ 和 $\Delta\beta = f(x,y)$ 的表达式。由于曲线拟合的方法可以较好地反映客观实际,具有较好的实用价值^[12],这里采用最小二乘曲线拟合来计算 $g(x,y)$ 和 $f(x,y)$ 。 $g(x,y)$ 和 $f(x,y)$ 的精确表达式如下式所示:

$$\begin{cases} g(x,y) = \Delta\alpha = \alpha - \alpha' = \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{x\sin\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{f}}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{2f} \\ f(x,y) = \Delta\beta = \beta - \beta' = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{x\tan\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{f}}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{y}{2f} \end{cases} \quad (7)$$

由于是在 $x/(2f)$ 和 $y/(2f)$ 的基础上进行误差的补偿,为了简化计算,取:

$$g(x,y) = [x/(2f)]g'(y), f(x,y) = [y/(2f)]f'(x) \quad (8)$$

对于任一点 (x,y) ,可由(7)式和(8)式得出 $g'(y)$ 和 $f'(x)$ 的值。取 $y = 85\text{mm}, x = 0\text{mm} \sim 85\text{mm}$ 时的 $g'(y)$ 和 $x = 85\text{mm}, y = 0\text{mm} \sim 85\text{mm}$ 时 $f'(x)$ 的部分值如表2所示,其中 $g'(y)$ 和 $f'(x)$ 为由误差角度与理想角度相除得到的无量纲系数。

Table 2 Values of $g'(y)$ and $f'(x)$ corresponding to coordinate points (x,y)

$y = 85\text{mm}$	$x = 0\text{mm}$	$x = 5\text{mm}$	$x = 25\text{mm}$	$x = 45\text{mm}$	$x = 65\text{mm}$	$x = 85\text{mm}$
$g'(y)$	0	-0.00006761	-0.001689	-0.005466	-0.011382	-0.019409
$x = 85\text{mm}$	$y = 5\text{mm}$	$y = 15\text{mm}$	$y = 25\text{mm}$	$y = 35\text{mm}$	$y = 45\text{mm}$	$y = 55\text{mm}$
$f'(x)$	0	0.0001263	0.003169	0.010355	0.021892	0.03813

利用表2中的数据进行二次多项式拟合,可得 $g'(y)$ 和 $f'(x)$ 的拟合曲线如图3所示。

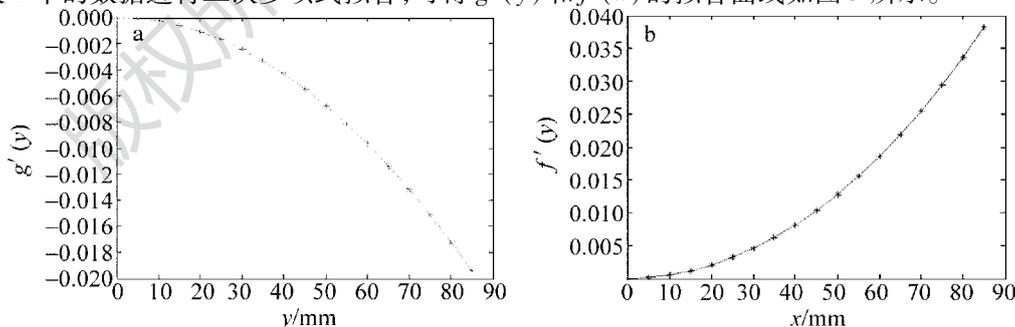


Fig. 3 Fitting curve of $g'(y)$ and $f'(x)$

$g(x,y)$ 和 $f(x,y)$ 的拟合多项式为:

$$\begin{cases} g(x,y) = [x/(2f)](-0.000002673y^2 - 0.000001395y + 0.000009754) \\ f(x,y) = [y/(2f)](0.000005448x^2 - 0.000017774x + 0.00012597) \end{cases} \quad (9)$$

进而可得振镜扫描角度 (α,β) 的多项式拟合校

正公式为:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha' + g(x,y) = (-0.000002673y^2 - 0.000001395y + 1.000009754)[x/(2f)] \\ \beta = \beta' + f(x,y) = (0.000005448x^2 - 0.000017774x + 1.00012597)[y/(2f)] \end{cases} \quad (10)$$

2.3 误差校正结果的验证

取一组理想打标点,用(10)式得到校正后的振镜扫描角度,再将所得的角度值代入(1)式得出校

正后的打标点坐标,并计算校正后坐标(x_c, y_c)与理想坐标的误差,如表3所示。

Table 3 Marking points errors between the ideal coordinates and the corrected coordinates after correcting scan points/mm

x'	y'	x_c	y_c	Δx	Δy
0	0	0	0	0	0
10	10	10.0001	9.99976	0.000149	-0.00024
25	25	24.9998	24.9963	-0.00016	-0.00370
45	45	44.9976	44.9925	-0.0024	-0.00747
65	65	64.9981	64.9925	-0.00185	-0.00753
85	86	85.019	84.986	0.01899	-0.01399

3 多项式拟合校正的优点

从表3与表1的对比可以看出,通过多项式拟合校正后,打标点的几何畸变误差降至微米量级,在最大理想坐标点 $x' = y' = 85\text{mm}$ 处, x 轴和 y 轴方向的误差为 $19\mu\text{m}$ 和 $-14\mu\text{m}$, 分别降至校正前的 1.22% 和 0.43%, 与激光聚集光点的半径 $17\mu\text{m}$ 相当, 肉眼无法分辨, 可以认为, 误差基本消除, 满足了高精度打标的需要。同时, $19\mu\text{m}$ 的误差能大幅减小激光打标系统误差的积累。

从(10)式可以看出,校正后的 (α, β) 只需计算 x, y 的 3 次方,而在(5)式中,为了达到一定的精度,需要计算 x, y 的 25 次方,因而多项式拟合校正的方法可以极大地减少运算量,运算速度快,满足高速打标的需要。

由于是用软件的方法校正几何畸变误差,不会增加硬件成本,且对于不同的系统,可以使用相同的方法,在改变参量 f 后拟合出新的校正多项式加以应用,通用性强。

4 结 论

分析了 2 维振镜物镜前扫描系统几何畸变误差产生的原因,在振镜扫描角 (α, β) 理想计算公式的基础上,运用多项式拟合校正的方法,对 (α, β) 进行一定的误差补偿,从而使激光打标系统中打标点的几何畸变误差由肉眼可分辨的毫米量级降至与激光聚集光点半径相当的 $20\mu\text{m}$ 以内,满足高精度打标的需要;同时拟合出的多项式只涉及 x, y 的 3 次方运算,不会显著增加运算量,运算速度快,能满足高速打标的需要;该校正方法为软件校

正,不增加硬件成本,且可通过改变物镜焦距 f 的数值,拟合出新的多项式,应用于不同参量的激光打标系统中。

参 考 文 献

- [1] TANG Y J. Design of laser marking controller based on DSP[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010;2-3 (in Chinese).
- [2] HAN W P, MENG W, LI Y X, et al. Correction model mixed with least-square and grid method for dual galvanometric scanning[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 179-187 (in Chinese).
- [3] ZHU L Q. Error analysis and correcting method of the two vibrational mirrors scanning system[J]. Applied Laser, 2001, 21(5): 325-327 (in Chinese).
- [4] WAN Z, DU W X. Calibration of graphic distortion and compensation of exposure for dual galvanometer scanning[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(2): 115-118 (in Chinese).
- [5] WEN S F, SHI Y S, XIE J, et al. Study on key technology for 3-D galvanometric scanners[J]. Laser Technology, 2009, 33(4): 377-380 (in Chinese).
- [6] SCANLAB A G. Installation and operation of the RTC4 PC interface board[EB/OL]. (2006-07-14). <http://www.scanlab.de/zh/-/service/downloads>.
- [7] GUO F, HU B, YING H S, et al. Hardware correction for distortion of dual galvanometer scanning[J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 337-341 (in Chinese).
- [8] SHI W Q. Research on laser micro-welding based on scanning galvanometers[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009;56-57 (in Chinese).
- [9] JI Y Q. Study on optical design of large working area F-theta lens[D]. Suzhou: Suzhou University, 2006;7-8 (in Chinese).
- [10] HAN W P, MENG W, LI Y X, et al. Error analysis and correction methods of dual galvanometer scanning[J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(4): 14-18 (in Chinese).
- [11] WEN S F. Study of galvanometric scan and control system in selective laser sintering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010;20-31 (in Chinese).
- [12] XU S L. Numerical analysis and algorithms[M]. Beijing: China Machine Press, 2008;266-276 (in Chinese).