

文章编号:1001-5078(2023)12-1840-06

· 激光应用技术 ·

激光振镜直写光栅误差分析及校正方法

任东旭,周梦园,牛 奚,李 彬

(中原工学院机电学院,机械工业光学传感与测试技术重点实验室,河南 郑州 451191)

摘 要:针对振镜式激光直写光栅系统中存在的扫描畸变的问题,提出了一种内部转角优化和外部扫描误差补偿相结合的校正方法。以光栅栅距 $10\text{ }\mu\text{m}$ 为目标,建立了振镜系统的几何光学模型,对扫描误差进行了分析,然后对振镜转角进行了优化,进一步对振镜进行了曲线拟合补偿,坐标点(100,10)处误差从 0.936 mm , 1.912 mm 降低到 $0.148\text{ }\mu\text{m}$, $0.0296\text{ }\mu\text{m}$ 。结果表明,这种方法能够满足振镜式激光直写光栅在短距离刻划的精度要求。

关键词:激光直写;二维振镜;误差校正;曲线拟合

中图分类号:TN249;TN247 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.12.006

Laser oscillator scanning grating error analysis and correction method

REN Dong-xu, ZHOU Meng-yuan, NIU Xi, LI Bin

(School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan university of Technology, Key Laboratory of Optical Sensing and Testing Technology in the Mechanical Industry, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: A correction method combining internal corner optimization and external scanning error compensation is proposed to address the scanning distortion problem in the oscillator-type laser direct-writing grating system. The geometrical optical model of the oscillating mirror system is established with the grating grid distance of $10\text{ }\mu\text{m}$ as the target. The scanning error is analyzed, then the oscillating mirror turning angle is optimized, and further curve fitting compensation is performed for the oscillating mirror, with the error at the coordinate point(100,10) reduced from 0.936 mm , 1.912 mm to $0.148\text{ }\mu\text{m}$, $0.0296\text{ }\mu\text{m}$. The results show that this method can meet the accuracy requirements of vibrating mirror type laser direct writing grating in short distance.

Keywords: laser direct writing; 2D galvanometer; error compensation; curve fitting

1 引 言

激光直写(SBIL)光栅技术是利用能量密度高、高集束性的激光对基底面的光刻胶进行曝光刻蚀,经过后期显影后形成明暗相间的光栅条纹。相对于其他光栅制造技术,激光直写具有成本低、效率高和加工尺寸大等优点^[1]。激光振镜是利用两个相互垂直的振镜电机的快速偏转带动反射镜从而改变激光光路,振镜惯量小,重复定位精度高^[2]。能够使激

光直写光栅的加工效率得到明显的提升。但振镜系统存在着几何畸变^[3]、离焦^[4]、非线性^[5]等多种因素引起的误差。

在现有振镜误差补偿方法中。朱铁爽^[2]等人提出了一种视觉辅助的畸变校正方法,以机器视觉代替人工获取振镜系统误差并对误差进行拟合补偿。这种方法效率低下,无法快速连贯的刻划光栅条纹。赵中民^[6]等人将振镜误差分为了测距误

基金项目:国家自然科学基金(No. 51905558; No. 51975599)资助。

作者简介:任东旭,男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为光栅位移传感器设计及制造技术、测控技术。E-mail: z18738504170@163.com

通讯作者:周梦园,男,硕士研究生,主要研究方向为光栅位移传感器设计与制造技术。E-mail: 2833835633@qq.com

收稿日期:2023-03-03; **修订日期:**2023-04-10

差、角度误差以及枕形误差,并分别对其进行了优化补偿,但方法效率低,不适合工业使用。彭留永^[7]等人对振镜误差的角度误差进行了分析,使用多项式的方式对优化。但优化效果在大尺寸范围内,误差降低效果并不明显。贾和平^[8]等人建立了基于平面坐标变换几何矫正算法的模型,从而降低了系统误差,但这种方法系统计算量太大,降低了扫描效率。韩万鹏^[9]等人的方法不适用于激光直写光栅。

针对激光直写光栅的特点,本文对振镜镜片的转角计算公式作了优化,针对光栅条纹的特性,进一步对扫描误差进行了曲拟合补偿。降低了直写光栅条纹的误差量,提高了激光直写系统单次扫描的范围。

2 振镜扫描误差分析与补偿

2.1 振镜扫描误差分析

激光振镜系统可分为前扫描方式和后扫描方式,本文采用前扫描方式,如图1所示。

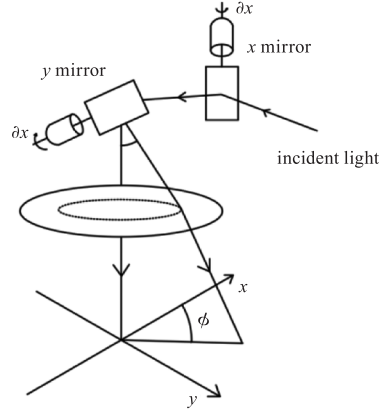


图1 激光振镜前扫描方式

Fig. 1 Laser oscillator front scan method

入射激光在经过振镜的两个反射镜后到达 F-theta 场镜,后经过场镜的聚焦在工作面上进行光栅条纹的扫描刻蚀。前扫描方式存在着枕形和桶形的复合畸变^[10]。

在理想状态下,振镜扫描的坐标与振镜电机转角的映射关系为:

$$\begin{cases} \hat{x} = R \cos \phi = \frac{R}{\sqrt{1 - \tan^2(2\phi)}} = \frac{f \sin(2\theta_x) \cos(\cos(2\theta_x) \cos(2\theta_y))}{\sqrt{1 - \cos^2(2\theta_x) \cos^2(2\theta_y)}} \\ \hat{y} = R \sin \phi = \frac{R \tan \phi}{\sqrt{1 - \tan^2(2\phi)}} = \frac{f \sin(2\theta_y) \cos(2\theta_x) \cos(\cos(2\theta_x) \cos(2\theta_y))}{\sqrt{1 - \cos^2(2\theta_x) \cos^2(2\theta_y)}} \end{cases} \quad (1)^{[11]}$$

式中, $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$ 分别为振镜理论扫描坐标, ϕ 是扫描点夹角, θ_x 、 θ_y 是振镜电机相应转角, R 是扫描点距离中心点距离。

为了减小逻辑运算量并提高实时性,一般采用简化的控制策略代替复杂的坐标-转角映射关系^[2]。振镜的 x 、 y 电机转角 θ_x 、 θ_y 并非是按式(1)进行计算。工业使用中常用如下式进行计算镜片电机转角。

$$\begin{cases} \theta_x = \frac{x}{2f} \\ \theta_y = \frac{y}{2f} \end{cases} \quad (2)^{[12]}$$

式中, f 为振镜焦距。

以单侧光栅长度 10 mm 为例,将 θ_x 、 θ_y 代入下式进行误差计算:

$$\begin{cases} \Delta x = \hat{x} - x = \frac{f \sin(2\theta_x) \cos(\cos(2\theta_x) \cos(2\theta_y))}{\sqrt{1 - \cos^2(2\theta_x) \cos^2(2\theta_y)}} - x \\ \Delta y = \hat{y} - y = \frac{f \sin(2\theta_y) \cos(2\theta_x) \cos(\cos(2\theta_x) \cos(2\theta_y))}{\sqrt{1 - \cos^2(2\theta_x) \cos^2(2\theta_y)}} - y \end{cases} \quad (3)$$

本文采用 FOTIA 工业纳秒激光器,激光光束直径 0.45 mm,波长 355 nm。卡门哈斯振镜,焦距 $f = 420$ mm。结合公式(2)与公式(3),通过 matlab 进行误差模拟仿真结果如图2所示。

如图2所示,振镜系统产生的误差随着 x 、 y 的不断增大而增大。本文中预期光刻扫描光栅栅距为 10 μm ,表一所列,在(100,10)点 x 向误差已经达到了 9 μm 。无法直接应用于激光直写光栅中。

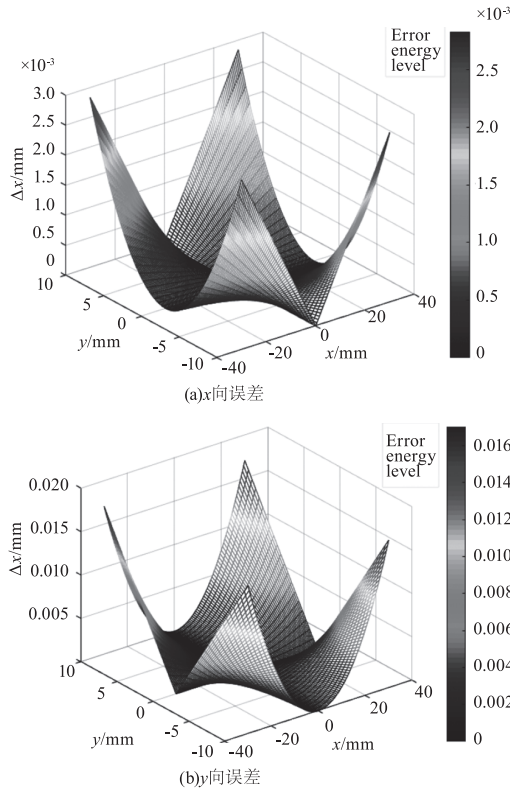


图2 激光振镜扫描误差三维分布图

Fig.2 laser oscillator scanning error three-dimensional distributiona

表1 振镜刻线误差

Tab.1 Vibrator inscription error

x/mm	y/mm	$\Delta x/mm$	$\Delta y/mm$
20	10	0.00188	0.07560
40	10	0.00377	0.03025
60	10	0.00564	0.06812
80	10	0.00840	0.15354
100	10	0.00931	0.18970

2.2 激光振镜转角优化补偿

经过上述分析,可见振镜系统产生的系统误差主要由振镜的转角简化引起的,所以需对振镜转动角度进行优化,从公式(1)可以推导出正确的转动角度为:

$$\begin{cases} \tilde{\partial}_x = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{x \sin \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} \right)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \\ \tilde{\partial}_y = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{x \tan \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} \right)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $(\tilde{\partial}_x)$ 是 x 振镜的理论转角; $\tilde{\partial}_y$ 是 y 振镜的理论转角。

联合公式(2)、公式(4)推导出振镜的转角误差计算式为:

$$\begin{cases} \Delta \partial_x = \tilde{\partial}_x - \partial_x = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{x \sin \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} \right)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \frac{x}{2f} \\ \Delta \partial_y = \tilde{\partial}_y - \partial_y = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{x \tan \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} \right)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \frac{y}{2f} \end{cases} \quad (5)$$

从公式(5)中,当 $\Delta \partial_x$ 中的 y 为 0 时差值为 0, 所以角度误差来源于 y 值的省略,因此本文引入 $f(y)$ 对 ∂_x 进行优化校正,同理对 ∂_y 引入 $f(x)$ 进行优化,其振镜扫描误差校正后如下:

$$\begin{cases} \Delta \partial_x = \tilde{\partial}_x - \partial_x \\ = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{x \sin \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} \right)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \frac{x}{2f} \\ = \frac{x}{2f} \cdot f(y) \\ \Delta \partial_y = \tilde{\partial}_y - \partial_y \\ = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{x \tan \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} \right)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \frac{y}{2f} \\ = \frac{y}{2f} \cdot f(x) \end{cases} \quad (6)$$

根据公式(6),采集一系列特征点,计算相应的振镜转角优化系数。如表 2 所示。

表2 振镜转角优化系数

Tab.2 Vibrator angle optimization factor

x/mm	y/mm	$f(x)/mm$	$f(y)/mm$
10	10	0.18899	-0.00009450
20	20	0.75620	-0.00037823
30	30	1.70241	-0.00085186
40	40	0.00302889	-0.00151653
50	50	0.00473743	-0.00237382
60	60	0.00683029	-0.00342574
70	70	0.00931020	-0.00467485
80	80	0.01218037	-0.00612411
90	90	0.01544442	-0.00776982
100	100	0.01910634	-0.00963742

通过 matlab 对表中数据 $f(x)$ $f(y)$ 进行数据曲线拟合,得到振镜转角优化系数计算式:

$$\begin{cases} f(x) = 0.000001886 \times y^{2.02} \\ f(y) = -0.000000882 \times y^{2.002} \end{cases} \quad (7)$$

优化后振镜转角为:

$$\begin{cases} \partial_x = (-0.000000882y^{2.02} + 1) \frac{x}{2f} \\ \partial_y = (0.000001886x^{2.002} + 1) \frac{y}{2f} \end{cases} \quad (8)$$

式中, (∂_x, ∂_y) 为优化后振镜转角。

将优化后的角度公式式(8)代入式(3)联合,通过 matlab 仿真作图,如图 3 所示。

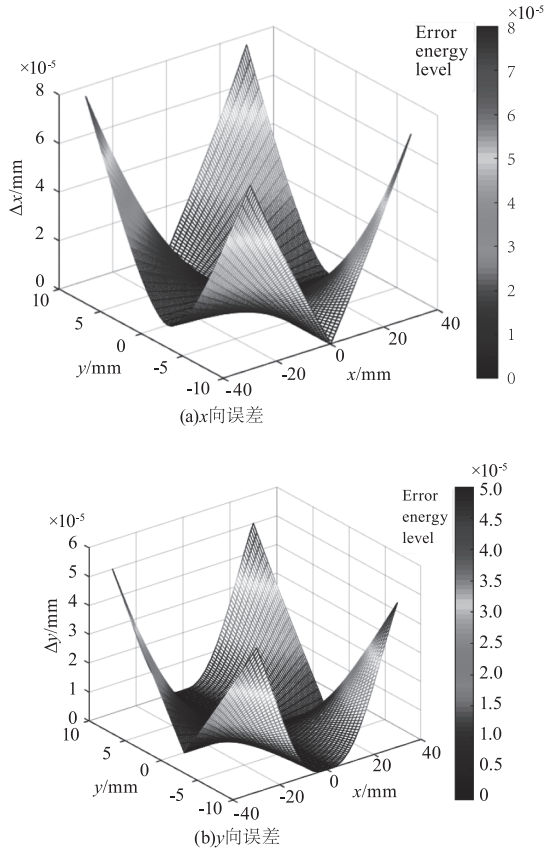


图3 角度优化后振镜系统误差

Fig.3 The error of the oscillator system after angle optimization

将图3与图2对比可以很明显的看出,其误差得到了明显的缩减。但误差的增长速率并未得到很好的改善,累计误差增长速率过快仍然对激光直写光栅条纹有着很大的影响。

2.3 振镜坐标误差补偿

为了改善振镜扫描误差的增长趋势过快的缺陷,降低光栅条纹的累计误差程度。本文在振镜转角优化的基础上又对其扫描坐标误差进行了拟合补偿。

根据光栅条纹的特点,在 y 向长度取 20 mm,由于 y 向的取值最大为 20 mm,其引起的误差对于光栅条纹的精度影响可以忽略,同时为了较小系统计

算量,增加激光直写的效率,所以采集数据时不对 y 值进行变化取值。

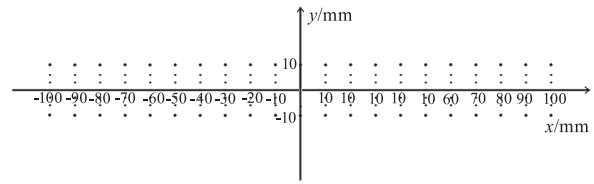


图4 振镜扫描误差采集点

Fig.4 Vibrating mirror scanning error collection point

将 x 轴每间隔 10 mm 上下两端各 10 mm 处作为误差采集点。

对曲线拟合经验公式进行适配修改:

$$\begin{cases} \Delta x = k_x x^2 y^2 \\ \Delta y = k_y x^2 y^2 \end{cases} \quad (9)$$

根据式(8),计算出图4中的采集点相应的误差,如表3所示。

表3 采集点误差表

Tab.3 Collection point error table

x/mm	y/mm	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$
10	20	0.023569765	0.004836604
20	20	0.048433933	0.024698141
30	20	0.075888454	0.050043847
40	20	0.107223984	0.058167536
50	20	0.143721009	0.014985201
60	20	0.186645308	-0.124564237
70	20	0.237243378	-0.416389148
80	20	0.296737669	-0.927218925
90	20	0.366321526	-1.734631354
100	20	0.447153780	-2.927114367

根据表3中的数据,结合式(9),得到相应的 k 值,并通过数据拟合得到 k 值的拟合公式:

$$\begin{cases} k_x = -\frac{3.014 \times 10^{-8}}{x + 0.6324} \\ k_y = -5.384 \times 10^{-13} x^2 + 2.039 \times 10^{-11} x + 3.883 \times 10^{-10} \end{cases} \quad (10)$$

将上述所有研究联合起来得到最终误差补偿的振镜坐标与转角映射公式:

$$\begin{cases} \hat{x} = \frac{f \sin(2 \partial_x) \cos(\cos(2 \partial_x) \cos(2 \partial_y))}{\sqrt{1 - \cos(2 \partial_x)^2 \cos(2 \partial_y)^2}} + k_x x^2 y^2 \\ \hat{y} = \frac{f \sin(2 \partial_y) \cos(\cos(2 \partial_x) \cos(2 \partial_y))}{\sqrt{1 - \cos(2 \partial_x)^2 \cos(2 \partial_y)^2}} + k_y x^2 y^2 \end{cases} \quad (11)$$

2.4 误差优化补偿结果

取一组理想的扫描点,用式 8 计算出优化过的角度,并将其代入式(11)计算出优化补偿后的坐标,如表 4 所示。

表 4 优化补偿后振镜误差

Tab.4 The error of the oscillator after optimization compensation

X/mm	y/mm	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$
20	10	0.00998	0.00147
40	10	0.0115	0.00337
60	10	0.00769	0.00700
80	10	0.0575	0.0144
100	10	0.148	0.0296

对比表 1 与表 4,可以明显看到误差得到了非常明显的降低。对于目标栅距 $10\ \mu\text{m}$ 的光栅条纹刻线,单次扫描中的最大栅距误差降低了 98.5 %。

通过 matlab 对式 11 进行仿真作图,如图 5 所示。相较于图 1,振镜的误差增加速率得到了较大的降低。

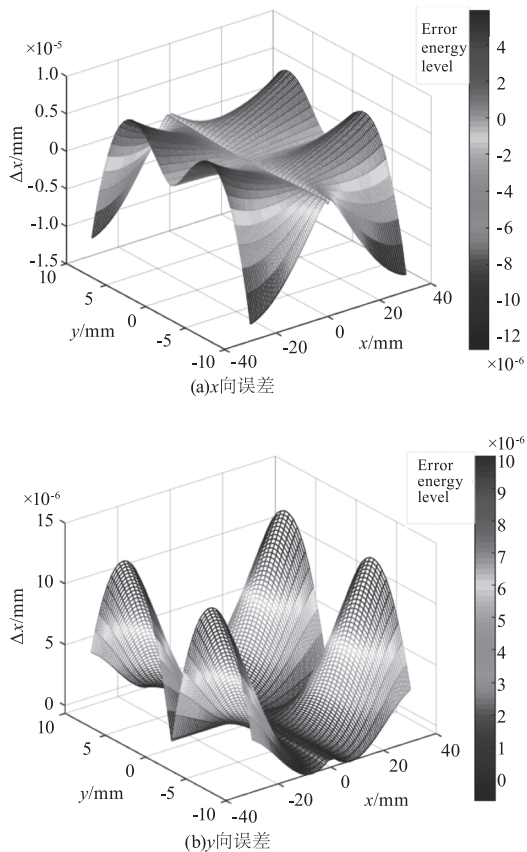


图 5 优化补偿后振镜扫描误差

Fig.5 Scanning error of the oscillator after optimization compensation

3 结 论

本文对基于振镜系统的激光直写光栅系统中的振镜系统误差进行了误差分析,并建立了振镜扫描坐标的数学模型,对转角计算式优化的公式做出变革优化,并针对激光直写光栅的特点,对振镜坐标误差进行了误差补偿,将 200 mm 范围内最大栅距误差降低了 98.5 %。降低了栅距误差的增长速率。对于基于振镜的激光直写光栅系统提供了一定的理论支持。

由于振镜转动电机的限制,振镜的扫描范围并无法实现大尺寸的光栅刻划,在后续的研究中,可以增加精密运动台,实现运动台与振镜的结合,从而实现大尺寸的扫描刻线。本文得研究方法能够对于不同的刻划需求进行快速便捷的数据变更,其在集成电路、生物医疗、激光雷达和激光加工等诸多领域的应用前景非常广阔。

参考文献:

[1] Wang Leijie,Zhang Ming,Zhu Yu. Summarization of monolithic large size and high precision holographic grating manufacturing technology[J]. Optical Precision Engineering,2021,29(8):1759-1768. (in Chinese)
王磊杰,张鸣,朱煜. 单体大尺寸高精度全息光栅制造技术综述[J]. 光学精密工程,2021,29(8):1759-1768.

[2] Zhu Tieshuang,Zhang Chengrui. Vision-assisted laser galvanometer machining distortion correction and accuracy analysis[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing System,2023,29(10):3402-3412. (in Chinese)
朱铁爽,张承瑞. 视觉辅助的激光振镜加工畸变校正及精度分析[J/OL]. 计算机集成制造系统,2023,29(10):3402-3412.

[3] Han Wanpeng,Mongolian,Li Yunxia,et al. Mixed calibration model of least squares and grid method for double galvanometer scanning[J]. Laser Technology,2012,36(2):179-182,187. (in Chinese)
韩万鹏,蒙文,李云霞,等. 双振镜扫描的最小二乘与网格法混合校正模型[J]. 激光技术,2012,36(2):179-182,187.

[4] Zhu Linquan. Error analysis and correction techniques for a two-dimensional scanning system with two galvanometers[J]. Applied Lasers,2001,(5):325-327. (in Chinese)
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,(5):325-327.

- [5] Wan Zhi, Du Wenxi. Image distortion correction and exposure compensation for two-dimensional scanning of galvanometer[J]. Optical Precision Engineering, 2000, (2): 115 – 119. (in Chinese)
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, (2): 115 – 119.
- [6] Zhao Zhongmin, Xi Youbao. Intrinsic error correction algorithm for 3D laser scanning systems[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(1): 34 – 38. (in Chinese)
赵中民, 习友宝. 三维激光扫描系统的固有误差校正算法[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 34 – 38.
- [7] Peng Liuyong, Wang Xuanya, Zhou Jiantao, et al. Polynomial fitting correction of geometric distortion error of galvanometer in laser marking[J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 601 – 604. (in Chinese)
彭留永, 王宣雅, 周建涛, 等. 激光打标中振镜几何畸变误差多项式拟合校正[J]. 激光技术, 2013, 37(5): 601 – 604.
- [8] Jia Heping, Shi Yusheng, Xie Jun. Error analysis and geometric correction algorithm for galvanometer laser scanning[J]. Optoelectronic Engineering, 2007, 213(8): 37 – 40. (in Chinese)
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, 213(8): 37 – 40.
- [9] Han Wanpeng, Meng Wen, Li Yunxia, et al. Error analysis and correction method of dual galvanometer laser scanning[J]. Application of Optoelectronic Technology, 2011, 26(4): 14 – 18. (in Chinese)
韩万鹏, 蒙文, 李云霞, 等. 双振镜激光扫描的误差分析及校正方法[J]. 光电技术应用, 2011, 26(4): 14 – 18.
- [10] Meng Xianyu, Cao Guohua, Li Xue, et al. 2-D scanning galvanometer error analysis and its correction[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1345(2). (in Chinese)
孟贤宇, 曹国华, 薛莉, 等. 二维扫描振镜误差分析及其校正[J]. 物理学报: 会议系列, 2019, 1345(2).
- [11] Luo Liangtao. Research on laser scanning galvanometer distortion correction algorithm and system software[D]. Wuhang: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
罗良涛. 激光扫描振镜畸变校正算法及系统软件的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [12] Gong Yuanjiu, Xia Fei, Sun Jiaying. Laser marking system geometric distortion correction method[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(11): 25 – 28. (in Chinese)
宫元九, 夏斐, 孙嘉兴. 激光标刻系统几何失真的校正方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(11): 25 – 28.