

文章编号: 1001-3806(2014)06-0742-05

激光转镜扫描系统中自由曲面 $f-\theta$ 物镜的设计

谢洪波, 李 勇, 姚丽娟, 祝世民

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息工程系, 天津 300072)

摘要: 为了满足扫描系统高分辨率、大工作面、小型化的需要,设计了一款具有衍射受限聚焦能力的超广角 $f-\theta$ 物镜。在此基础上,针对五面转镜引起 $f-\theta$ 物镜入瞳偏移从而导致系统分辨率降低、线性畸变增大的问题进行了分析,计算得到光瞳偏移量与扫描转角存在非对称分布的非线性关系。采用在系统中引入含有奇次高阶项自由曲面校正光瞳漂移的方法,在 ZEMAX 软件中利用多重结构对 $f-\theta$ 转镜扫描系统建模优化设计,并给出了设计实例。该物镜采用远摄型结构,有效减小了扫描系统总体长度及透镜尺寸。结果表明,经优化校正后, $f-\theta$ 物镜性能得到显著改善,在其扫描角度 115° 范围内,线性畸变小于 0.5% , 60% 以上能量集中在半径 $30\mu\text{m}$ 圆内。该 $f-\theta$ 扫描系统具有结构紧凑、分辨率高、线性畸变小等优点,有良好的适用性。

关键词: 光学设计; $f-\theta$ 物镜; 自由曲面; 光瞳漂移; 激光扫描; 畸变

中图分类号: TN202 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.06.005

Design of free-form $f-\theta$ lens in polygonal mirror laser scanning system

XIE Hongbo, LI Yong, YAO Lijuan, ZHU Shimin

(Department of Opto-electronics Information Engineering, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to satisfy the need of high resolution, large operation area and miniaturization of the scanning system, one $f-\theta$ lens with super wide angle and diffraction-limited focusing performance was designed. On this basis, the resolution reduction and the linear distortion increasing caused by the pupil deviation due to the polygonal mirror were analyzed. After calculation, it was found that the pupil deviation had an aspheric nonlinear relationship with the scanning angle. Using the higher order terms of free surfaces to correct the deviation of pupil, the models of polygonal mirror $f-\theta$ scanning system was optimized with ZEMAX and the multiple structures and the practical example was given. Due to the telephoto type of lens, the overall length of the scanning system and the aperture of the lens were effectively reduced. The simulation result shows that the $f-\theta$ performance is significantly improved through optimization and correction. Within the scanning angle of 115° , linear distortion is less than 0.5% and 60% of incident light energy is gathered in a circle in $30\mu\text{m}$ radius. The practical $f-\theta$ scanning system has the advantages of compact structure, high resolution and low linear distortion.

Key words: optical design; $f-\theta$ lens; free-form surface; pupil deviation; laser scanning; distortion

引 言

激光扫描光学系统因其具有非接触、高分辨率、速度快、无污染等优点而广泛应用于信息处理、激光显示、激光存储、激光打印、高速摄影等领域^[1]。 $f-\theta$ 物镜作为扫描系统的核心部分,其理想像高与扫描角成线性关系,当扫描器件以等角速度旋转时,一定

时间间隔的扫描信息,经过 $f-\theta$ 物镜后按一定的位置间隔记录在像平面上。

随着激光技术以及微机电系统的高速发展,激光扫描系统对于 $f-\theta$ 物镜的性能提出了更高的要求,其向着小型化、高分辨率、大工作面的方向发展。依据像高公式分析,扩大系统工作面可以通过以下两种方式:(1)增加系统焦距;(2)增大系统视场角 2θ 。但是增加系统焦距会降低系统极限分辨率、增大系统尺寸,只能采取增加系统视场角 2θ 的方式。目前国内外专利和文献报道的 $f-\theta$ 物镜视场角一般均在 $30^\circ \sim 60^\circ$,例如苏州大学 JI 等人设计的大工作

作者简介:谢洪波(1969-),男,博士,副教授,主要从事光学成像与显示技术方面的研究。

E-mail:hbxie@tju.edu.cn

收稿日期:2013-11-22;收到修改稿日期:2013-11-29

面 $f-\theta$ 物镜其扫描角度也仅能达到 64° ,并且系统结构较为复杂由4片分离透镜组成^[2]。华中科技大学FU等人设计的超广角 $f-\theta$ 物镜虽然通过引入望远镜结构将扫描角度增大到 90° ^[3],但大幅增加系统总体长度和复杂程度。国外虽有一些更大角度 $f-\theta$ 物镜,但一直未见详实报道。另外,对于转镜旋转引起的反射点位置不断变化对于 $f-\theta$ 物镜性能的影响及其光学校正方法也鲜见有关报道。

本文中从初级像差理论出发,利用自由曲面多自由度的特点,引入负畸变,扩大系统视场角,校正转镜扫描过程引起的入射光瞳漂移,在ZEMAX软件中完成以五面转镜作为扫描器件的两片式 $f-\theta$ 激光扫描物镜设计。

1 系统设计思路

系统依据其工作方式,可分为物镜前扫描和物镜后扫描两种形式。物镜后扫描系统中的物镜口径相对较小,只需要校正物镜轴上点像差,大幅降低系统设计难度和物镜尺寸,但像面为一曲面,不符合平面工作面的需要^[3]。因此本文中采用图1所示的物镜前扫描方式,系统将同步电机带动高速旋转的五面镜作为扫描器件。综合考虑LD光源准直出射光斑大小及能量分布、同步电机负载以及 $f-\theta$ 物镜设计难度,确定五面镜厚度 $d=2\text{mm}$,外接圆半径 $R=25\text{mm}$ 。

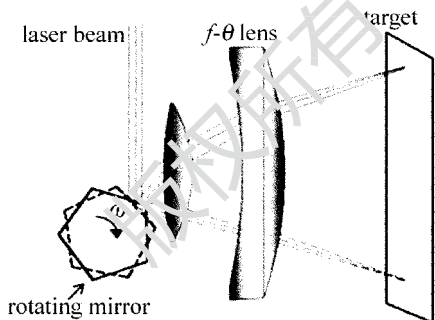


Fig. 1 Principle sketch of pentamirror scanning system

$f-\theta$ 物镜是一种特殊的光学透镜,通过人为引入定量负畸变,使入射角度和像高由下式所示的 \tan 关系:

$$y' = f' \times \tan\theta \quad (1)$$

转化为下式所示线性关系^[4]:

$$y' = f' \times \theta \quad (2)$$

此时 $f-\theta$ 物镜的线性畸变 q' 定义为^[5]:

$$q' = \frac{y' - f'\theta}{f'\theta} \quad (3)$$

为满足系统210mm大工作面的需要,设计了超广角 $\pm 57.5^\circ$ 的 $f-\theta$ 物镜,由(2)式可以计算得到系统焦距 $f'=104.9\text{mm}$ 。入射光束的口径受到五面镜厚度的限制,因此系统的入瞳直径 D 等于五面镜厚度 $d=2\text{mm}$,计算此时系统的光圈数 F :

$$F = f'/D = 104.9/2 = 52.45 \quad (4)$$

为了提高系统分辨率,物镜需要具有衍射受限的聚焦性能,根据瑞利判断理论,圆形口径扫描系统的衍射受限爱里斑半径 δ 为^[6]:

$$\delta = 1.22\lambda \times F \quad (5)$$

对于工作波长780nm的激光扫描系统,根据(5)式计算其爱里斑半径约为 $50\mu\text{m}$ 。

线性畸变和能量集中度是评价 $f-\theta$ 物镜的两个重要指标,为保持时间和信号和像高的线性关系,通常要求系统线性畸变应小于0.5%。为获得高分辨率,系统应具备接近衍射极限的聚焦能力^[7],分析能量集中度时不仅应保证几何光学点列图小于爱里斑半径,还应充分考虑衍射影响,要求衍射包围圆能量图在半径 $40\mu\text{m}$ 圆内能量集中度大于60%。

2 光学系统设计

2.1 $f-\theta$ 物镜设计

系统的工作面为一个平面,根据平场条件和光焦度分配公式,两片式 $f-\theta$ 物镜的透镜1和透镜2的光焦度 φ_1, φ_2 ,折射率 n_1, n_2 ,以及透镜间隔 d 应满足下式所示关系^[8]:

$$\begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2 = 0 \\ n_1 + n_2 \\ \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

这就要光学系统正负光焦度分离。而非球面矢高的表达式如下式所示:

$$r = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}} + A_1h^2 + A_2h^4 + A_3h^6 + A_4h^8 + A_5h^{10} \quad (7)$$

式中, k 为2次项系数, c 为表面曲率半径。通过合理选择诸如 A_2, A_3, \dots 高次项系数,控制各视场主光线在系统第 i 面投射高度 h_i 处的曲率半径 r_i ^[9],从而改变其在像面投射高度 y_i' ,引入系统所需负畸变。因此,本文中所设计系统无需通过国内 $f-\theta$ 物镜通常采用的负透镜在前,正透镜在后的结构形式,即可引入 $f-\theta$ 线性关系所需负畸变。系统采用正在前、负在后的远摄型形式^[10],有效减小系统总体长度,降低主光线在第2片透镜投射高度,减小透镜尺

寸。同时,非球面的多自由度,有利于校正系统像差,提高系统聚焦性能。

系统中所用 780nm LD 光源波长漂移在 $\pm 10\text{nm}$ 以内,对色差校正无特殊要求,两片透镜材料均设定为 H-BaK3,其折射率 n 和色散系数 ν 分别为 1.54678 和 62.78,均与环烯烃共聚物材料相近,便于设计结果向大规模注塑产品转化。在 ZEMAX 软件中对系统进行优化设计,将两片透镜的 4 个表面均设为非球面,并将其 4 阶到 10 阶项系数 A_2, A_3, A_4, A_5 和透镜厚度及光学间隔设为变量,通过归一化畸变操作数约束 $f-\theta$ 物镜线性畸变小于 0.5%。在此基础上约束系统的有效焦距 $f' = 104.9\text{mm}$,从而保证扫描系统的工作面范围;在优化过程中,观察像散场曲线图,对偏离位置较大处进行约束;观察点列图,对引起像点明显拖尾现象的彗差进行约束,提高系统聚焦性能。完成如图 2 所示两片式 $f-\theta$ 物镜设计,光阑距离透镜前表面距离为 13mm,便于扫描器件转动, $f-\theta$ 物镜长度约为 40mm。透镜 1 两表面在其最大口径 45mm 处,矢高分别为 -1.94mm 和 -7.28mm ;透镜 2 两表面在其最大口径 100mm 处,矢高分别为 -14.46mm 和 -13.30mm ;均符合单点金刚石车床加工要求。

图 3 为系统点列图,各视场像点均小于爱里斑

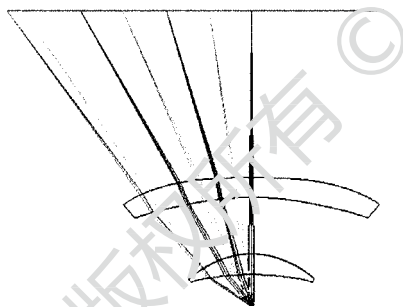


Fig. 2 Structure of $f-\theta$ lens

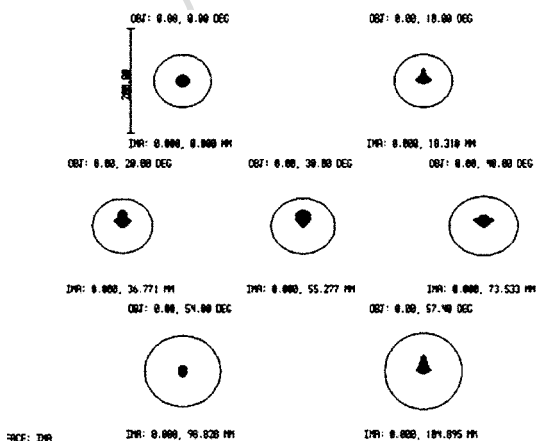


Fig. 3 Spot diagram of $f-\theta$ lens

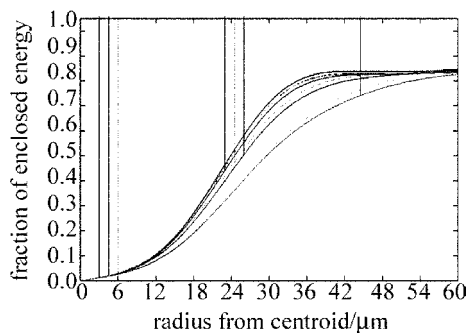


Fig. 4 Energy of diffraction encircle of $f-\theta$ lens

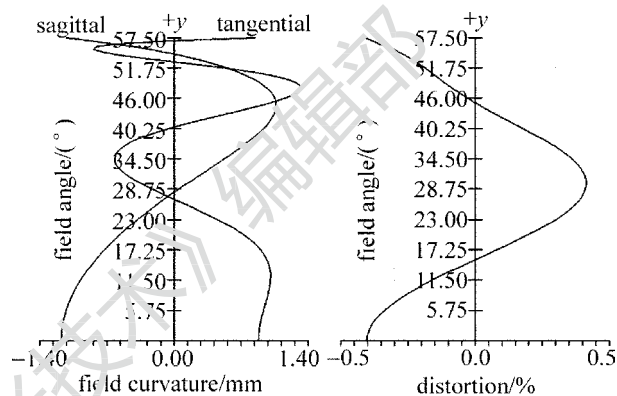


Fig. 5 Curvature of distortion field of $f-\theta$ lens

半径,达到衍射极限;图 4 为衍射包围圆能量图,入射光束 60% 以上能量均汇聚在半径小于 $35\mu\text{m}$ 光斑内;图 5 为系统的像散畸变图,从图中可以看出系统线性畸变小于 0.5%,最大像散为 2.8mm,小于焦深公式(见下式)计算得到的 8.58mm,在系统允许范围内,式中 n' 为像空间折射率, $\sin u'$ 为像方数值孔径。

$$\frac{\lambda}{n' \sin^2 u'} = 4\lambda \times \frac{F^2}{n'} = 8.58\text{mm} \quad (8)$$

2.2 光瞳偏离校正

图 6 为五面转镜扫描工作原理图,图中 A 点为入射光线与多边形外接圆的交点; a 为轴心 O 到入射光线距离,其值保证入射光线与反射光线垂直时,

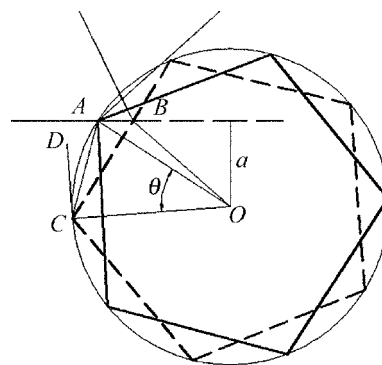


Fig. 6 Process sketch of pentamirror scanning

反射点在五面镜棱的中点,此时 $a = \cos 72^\circ \cdot R/\sqrt{2}$ 。五面镜沿逆时针转过 θ 角度后,入射光与五面镜相交于 B 点,随着五面镜的转角变化, B 点在镜面上不断移动,其在入射光方向移动量为 $AB^{[11]}$ 。

在三角形 ABC 中,根据几何关系有:

$$\begin{cases} AC = 2R \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \angle ACB = 36^\circ - \frac{\theta}{2} \\ \angle CAB = 90^\circ - \frac{\theta}{2} + \arcsin\left(\frac{a}{R}\right) \end{cases} \quad (9)$$

可以求得:

$$AB = 2R \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(36^\circ - \frac{\theta}{2}\right) / \sin\left[90^\circ - \frac{\theta}{2} + \arcsin\left(\frac{a}{R}\right)\right] \quad (10)$$

从(10)式可知,扫描过程中随着五面镜转动,反射光点即 $f-\theta$ 物镜的入瞳中心并不固定,而是在入射光方向不断移动。入射光瞳位置的漂移,势必会导致各视场主光线在 $f-\theta$ 物镜表面上实际投射高度与原设计发生偏离,影响 $f-\theta$ 物镜性能指标。在上节设计 $f-\theta$ 物镜中加入五面转镜进行模拟,发现

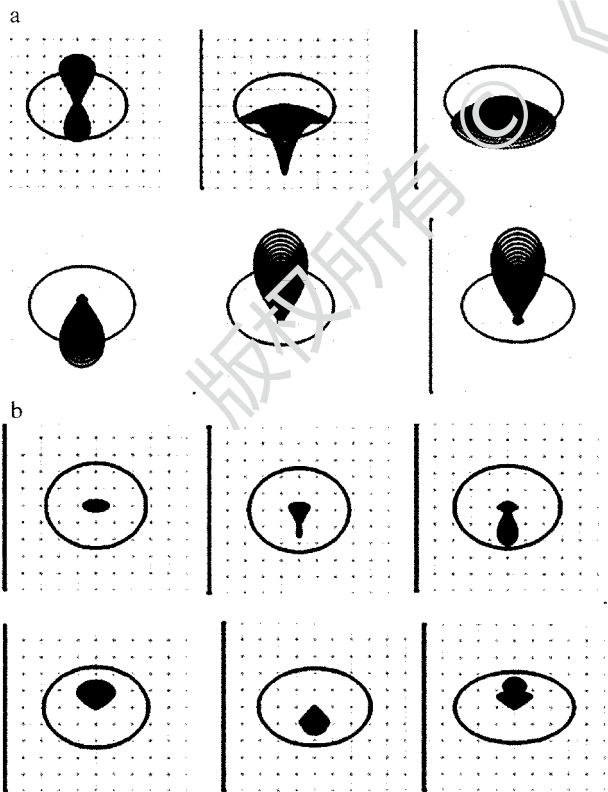


Fig. 7 Spot diagrams of scanning system

a—before correction of pupil deviation b—after correction of pupil deviation

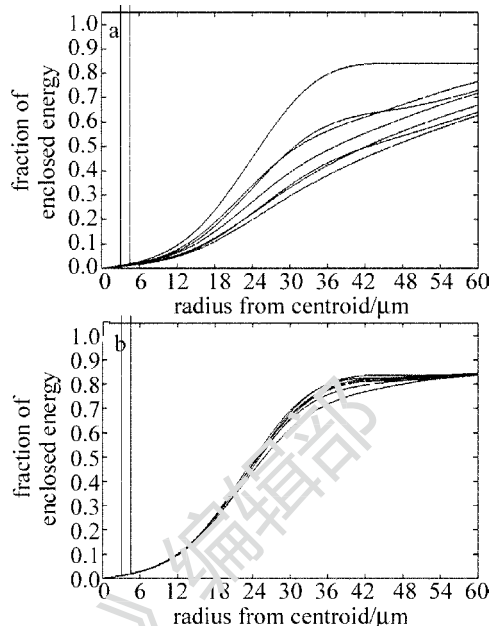


Fig. 8 Diffraction encircle energy of scanning system
a—before correction of pupil deviation b—after correction of pupil deviation

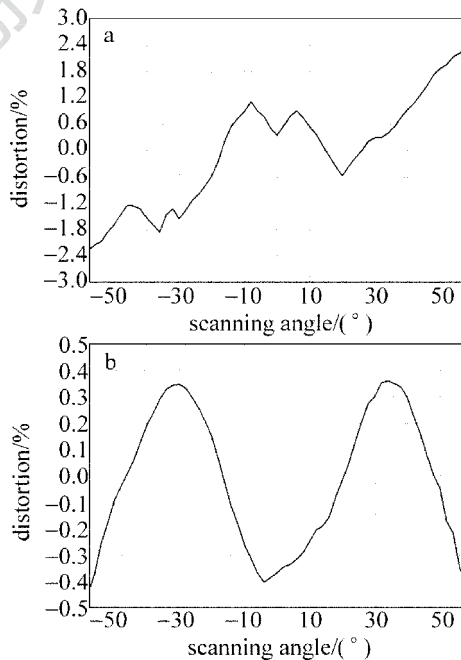


Fig. 9 $f-\theta$ distortion of scanning system

a—before correction of pupil deviation b—after correction of pupil deviation

其聚焦性能较之前明显下降(如图7a点列图、图8a包围圆能量所示),线性畸变明显增大(如图9a线性畸变图所示)。因此需要对转镜扫描系统进行优化,校正由于五面镜转动造成的入瞳漂移^[12],提高扫描系统分辨率、减小系统线性畸变。在 ZEMAX 软件中,建立转镜扫描光路模型如图10所示,利用

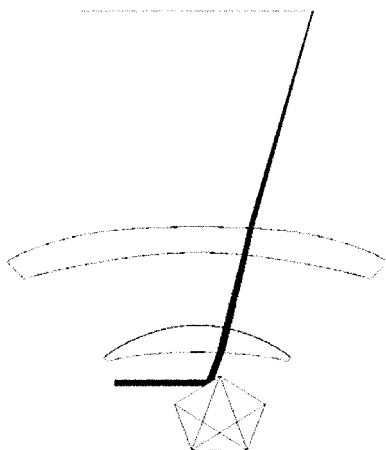


Fig. 10 Structure of pentamirror $f-\theta$ scanning system

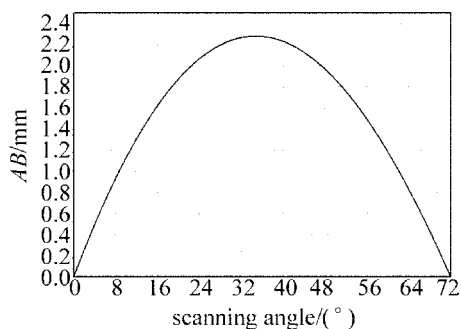


Fig. 11 Pupil movement in incident direction vs. angle

多重结构模式对系统进行优化。由图 11 中可以看出,光瞳位移量并不随扫描角度而线性变化,且不关于中心扫描角度 32° 对称。由于(7)式所示非球面仅包含偶次项,无法对光瞳的非对称位移进行校正。因此,将第 1 片 $f-\theta$ 透镜的前表面和第 2 片的后表面转化为如下式所示的扩展多项式面型,引入含有 y 奇次项的高阶项,校正光轴两端不对称分布的非线性光瞳漂移。

$$z = \frac{cr}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum A_{ij}X^iY^j \quad (11)$$

图 7b 为光瞳漂移校正后系统点列图,从图中可以看出,经过优化校正后各扫描角度像面汇聚效果得到显著改善,聚焦效果接近衍射极限。从图 8a 衍射包围圆能量图中可以看出,由于光瞳漂移,像面能量集中度显著下降,而且各视场差异较大,通过引入扩展多项式面型,不仅校正了由于五面镜转动引起的漂移,同时增加表面自由度,提高系统聚焦能力,校正后结果如图 8b 中所示,光斑 60% 以上能量均被汇聚在半径小于 $30\mu\text{m}$ 的圆内。利用 ORIGIN 软件将系统各扫描角度在工作面的汇聚位置拟合为图 9 所示线性畸变曲线,从图中可以看出线性畸变得

到良好校正,最大线性畸变比例从图 9a 中的 2.4% 校正到图 9b 中的 0.5%。

3 小 结

设计了一款用于转镜扫描系统的两片式超广角 $f-\theta$ 物镜,其扫描角度达到 115° 。与以往设计结构不同,系统利用非球面各矢高位置具有不同曲率的特性,引入 $f-\theta$ 线性关系所需负畸变,采用前正后负的远摄型结构,使系统具有结构紧凑、体积小特点。分析转镜扫描过程,计算得到入瞳漂移量与五面镜转镜存在非对称分布的非线性关系。在 ZEMAX 软件中对系统进行优化,引入含有 y 奇次高阶项的自由曲面,校正五面转镜引入的光瞳漂移,从而显著减小系统线性畸变、提高系统能量集中度。

参 考 文 献

- [1] NGOI B K A, VENKATAKRISHNAN K. Two-axis-scanning laser doppler vibrometer for microstructure[J]. Optics Communication, 2000, 18(1/3):175-185.
- [2] 任 宇 飞, SHEN W M. Optical design of large working area f -theta lens[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(11):1539-1542 (in Chinese).
- [3] FU M M, CHEN P F, WANG Y, et al. Optical design of super wide angle f -theta lens with large operation area[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(6):1083-1087 (in Chinese).
- [4] PENG L Y, WANG X Y, ZHOU J T, et al. Polynomial fitting correction of galvanometer geometric distortion error in laser marking[J]. Laser Technology, 2013, 37(5):602-604 (in Chinese).
- [5] LAIKIN M. Lens design[M]. 4rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 143-155 (in Chinese).
- [6] WANG X J, WU J C, CHEN X X, et al. Design of hybrid refractive-diffractive $f-\theta$ lens with multi-wavelength, large working area[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1):79-81 (in Chinese).
- [7] FUSE K, OKADA T, EBATA K. Diffractive/refractive hybrid f -theta lens for laser drilling of multilayer printed circuit boards[J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 4830:95-100.
- [8] ZHANG S Y. Optical design of the $f-\theta$ lens in laser scanning system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 8-34 (in Chinese).
- [9] LI D J, LIANG S Y, CAO J J, et al. Spatial laser beam shaping using aspheric Galilean beam expansion system[J]. Laser Technology, 2008, 32(4):427-429 (in Chinese).
- [10] SMITH W J. Modern optical engineering[M]. 4rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 98-102 (in Chinese).
- [11] HU J G, LI X J, ZHANG B G, et al. Study on nonlinearity and asymmetry of polygonal mirror scanning[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(3):26-28 (in Chinese).
- [12] 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):179-182 (in Chinese).