

· 光学设计 ·

## 基于ZEMAX的 $f-\theta$ 透镜的光学设计

刘 喆<sup>1</sup>, 刘海欧<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学 光电信息学院光电工程分院, 长春 130012; 2. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:**  $f-\theta$  透镜是激光标刻系统中最为重要的组成部分, 它的性能将直接影响标刻机的标刻精度。设计的  $f-\theta$  透镜波长为  $0.65\ \mu\text{m}$  的单色光, 设计时引入负的桶形畸变, 校正系统的场曲, 使匹兹伐尔场曲为零, 轴外和轴上像质一致, 整个像面成平面, 且系统波像差小于  $\lambda/4$ 。把入瞳放置在物方焦点处, 形成像方远心光路, 主光线通过  $f-\theta$  透镜后平行于光轴射出, 主光线在像面上的交点高度不变, 描过程实现线性扫描, 从而保障扫描精度。通过初级像差分析和已有的光学镜头库, 确定  $f-\theta$  透镜的初始结构参量, 然后利用ZEMAX软件进行优化设计, 得到由四片普通球面透镜构成的系统, 该系统结构紧凑、焦距小, 聚焦性能接近衍射极限, 并且像面照度分布均匀、能量集中且相对畸变小, 满足标刻要求。

**关键词:**  $f-\theta$  透镜; 光学设计; ZEMAX; 激光标刻

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-02-0005-06

## Optical Design of $f-\theta$ Lens Based on ZEMAX

LIU Zhe, LIU Hai-ou

(1. College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;

2. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

**Abstract:**  $f-\theta$  lens is the most important parts of laser marking system, its performance will affect the marking precision of laser marking machine directly. The design of  $f-\theta$  lens is monochromatic light with  $0.65\ \mu\text{m}$  wavelength, negative barrel distortion is introduced in the design, field curvature is corrected and the Zifaer field curvature is equal to zero, image quality off axis and on axis is uniform, image plane is plane and the wave front aberrations is less than  $\lambda/4$ . The entrance pupil is placed at the object focus, so the image telecentric beam path is formatted, main light exited through the lens is parallel to the optical axis, the height of intersection points on image plane of main light are invariant, a linear scanning process is achieved in order to ensure scanning precision. The initial structure parameters of the lens are determined through the analysis of the primary aberration and the existing optical lens library, and then optimizes the design through ZEMAX software, the system with four pieces of ordinary spherical lens is obtained. This system is compact, short focal length and its performance is within diffraction limit, and has uniform illumination distribution, concentrated energy and small relative distortion, which meets marking requirements.

**Key words:**  $f-\theta$  lens; optical design; ZEMAX; laser marking

激光扫描系统由光调制器、光束扫描器和  $f-\theta$  透镜构成。首先激光通过光调制器进行调制, 然后通过光束扫描器在空间改变方向, 在经  $f-\theta$  透镜在接收屏上成一维或二维图像, 用来实现扫描作用。

$f-\theta$  透镜是激光扫描系统中常用的并且有特殊要求的光学镜头, 它必须使像高与扫描角呈线性关系, 所以又称它为线性扫描透镜, 常用于激光标刻系统, 这种标刻系统广泛用于制作激光防伪标记、刻

收稿日期: 2016-04-06

作者简介: 刘喆(1984-), 女, 吉林长春人, 硕士, 讲师, 主要研究方向是光电技术应用; 刘海欧(1982-), 女, 辽宁锦州人, 学士, 主要研究方向是光电工程。

字和表面装饰、光学精细加工、大型水晶工艺品的内部雕刻等,具有无污染、分辨率高、非接触、标记永久保持、无非线性误差和塔形误差等优点<sup>[1-3]</sup>。

描述了  $f-\theta$  透镜的光学设计思想,以像差理论和已有的光学镜头出发,选择合适的初始结构,然后利用 ZEMAX 软件进行优化设计,优化后的  $f-\theta$  透镜结构简单紧凑、聚焦性能好、畸变小于 0.02%,像质优良,已经完全满足设计要求。

## 1 设计思想

### 1.1 激光标刻机打标原理

如图 1 所示,用于激光标刻机中的  $f-\theta$  透镜,工作面为平面,等效光阑位于 X 扫描振镜处,光阑口径等于激光束直径。X 扫描振镜和 Y 扫描振镜做等速转动,使光束经  $f-\theta$  扫描透镜后聚焦到待打标表面上,聚焦光点在表面上按规律运动,就可以得到标刻图案<sup>[4-7]</sup>。

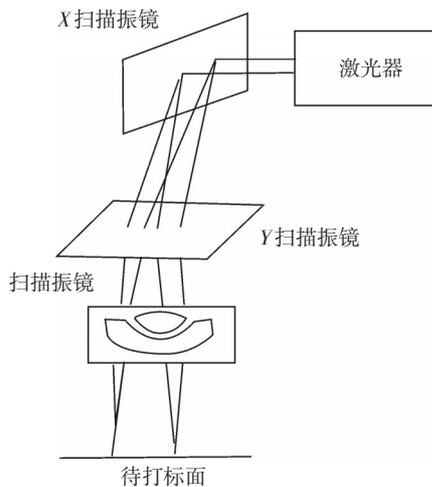


图1 激光标刻机打标原理

### 1.2 $f-\theta$ 透镜对畸变的要求

图 2 是关于  $\theta$  角的三条不同函数曲线。当  $\theta$  角较小时,曲线  $y=\theta$  与  $y=\tan\theta$  很接近,但是随着  $\theta$  角的增大,曲线  $y=\theta$  偏离曲线  $y=\tan\theta$  越明显。激光被扫描振镜反射后,理想像高与扫描角  $\theta$  呈线性关系,即

$$y' = -f' \cdot \theta \quad (1)$$

但对大部分光学系统而言,理想像高为

$$y' = -f' \cdot \tan\theta \quad (2)$$

由式(2)可知,透镜所成理想像高  $y'$  与扫描角  $\theta$  之间不是线性关系,即光束通过扫描振镜反射后所成的角度和像点在像面上的移动速度之比不是常数<sup>[8-9]</sup>。为了保证扫描的稳定性,就要保证通过透镜聚焦后的像点在像面上能够匀速移动。因此,需要使  $f-\theta$  透镜产生一定的桶形畸变(负畸变),即  $f-\theta$  透镜的实际像高要小于理想像高,两者之间的畸变量为

$$\Delta y' = f' \cdot \theta - (-f' \cdot \tan\theta) = f'(\tan\theta - \theta) \quad (3)$$

相对畸变必须满足下式

$$q_{\theta} = \frac{y' - f' \cdot \theta}{f' \cdot \theta} = \frac{f'(\tan\theta - \theta)}{f' \theta} < 0.5\% \quad (4)$$

透镜具有以上性质后,激光经过以固定转速转动的扫描振镜反射后,再由透镜聚焦在像面,可以实现匀速扫描,像高为  $y' = f' \cdot \theta$ ,通常把这种线性成像的透镜称为  $f-\theta$  透镜<sup>[10]</sup>。

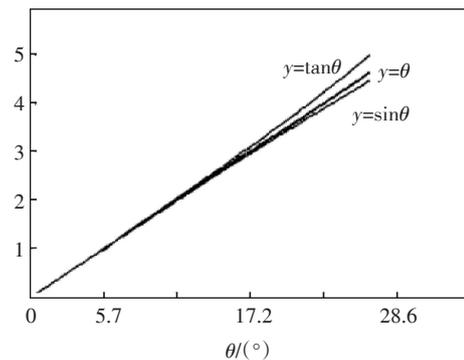


图2 关于  $\theta$  角的三条函数曲线

### 1.3 $f-\theta$ 透镜对场曲的要求

由于  $f-\theta$  透镜一般是在使用激光光源的系统中工作,所以其波长为单色光,为保证扫描的质量要求,整个像面应成平面且像质一致,满足等晕条件。这样在像差校正时,必须使波像差小于  $\lambda/4$ ,并同时校正系统的场曲,只有这样才能实现等晕成像,使得轴外和轴上像质一致。场曲校正需符合如下条件

$$\sum \frac{\Phi_i}{n_i} = 0 \quad (5)$$

式中,  $\Phi_i$  为第  $i$  片透镜的光焦度;  $n_i$  为第  $i$  片透镜材料的折射率。由式(5)可知,若要校正场曲,需要正负透镜彼此分离<sup>[11-14]</sup>。

## 1.4 $f-\theta$ 透镜对其他像差的要求

由于  $f-\theta$  透镜的相对孔径小,所以球差和慧差不大,对像质的影响不是很严重。扫描系统应用单色波长激光做光源,所以不需要校正色差。所以,  $f-\theta$  透镜设计优化时必须引入桶形畸变和校正场曲(匹兹伐尔场曲为零),还要重点考虑像散<sup>[15]</sup>。为了使扫描过程实现线性扫描,需要把入瞳放置在物方焦点处,形成像方远心光路,主光线通过  $f-\theta$  透镜后平行射出,主光线在像面上的交点高度不变,从而保障扫描精度。

## 2 $f-\theta$ 透镜的初始结构

### 2.1 $f-\theta$ 透镜参数的确定

系统参数如下:光源为红光半导体激光器,波长为  $0.65\ \mu\text{m}$ ,扫描光束口径为  $2\ \text{mm}$ ,测量尺寸范围为  $0\sim 35\ \text{mm}$ ,测量精度为  $4\ \mu\text{m}$ ,像质要求为各视场波像差小于  $\lambda/4$ 。由设计要求可知,光源为单色光,不用校正色差,也就是说不需要双胶合结构,用单透镜即可。扫描光束口径为  $2\ \text{mm}$ ,即入射光瞳直径为  $2\ \text{mm}$ ,属于小口径,系统慧差不会很大,设计时不用刻意校正慧差。测量尺寸为  $0\sim 35\ \text{mm}$ ,则其像

面半视场的像高为  $17.5\ \text{mm}$ ,也就是最后一片透镜的半高度为  $17.5\ \text{mm}$ 。综合考虑激光扫描系统的焦距特点,系统焦距为  $50\ \text{mm}$ ,则根据  $f-\theta$  透镜的焦距特性,由  $\theta = \frac{y'}{f} = \frac{17.5\ \text{mm}}{50\ \text{mm}} = 0.35\ \text{rad} = 20^\circ$ ,所以视场角  $2\omega = 40^\circ$ 。为了消除被测件位置引起的误差,出射主光线要平行于光轴,即像方远心光路。测量精度为  $4\ \mu\text{m}$ ,即系统的相对畸变量要降低到  $0.02\%$ 。波像差小于  $\lambda/4$ ,也就是光学系统整个视场的点列图完全落在艾里斑内。

经分析可知,扫描光学系统的参量为:焦距  $f' = 50\ \text{mm}$ ,物距  $l = -\infty$ ,视场角  $2\omega = 40^\circ$ ,入瞳直径  $D = 2\ \text{mm}$ ,波长  $\lambda = 0.65\ \mu\text{m}$ ,畸变小于  $0.02\%$ 。

### 2.2 $f-\theta$ 透镜初始结构的选取

从理论上讲,一个透镜能校正两个单色像差,两个透镜组合可以校正四个单色像差,由于单色像差一共有五个,两片透镜达不到要求,所以至少需要三片透镜<sup>[16-18]</sup>。正负透镜分离能够校正场曲,合适的透镜结构能够校正像散,不选取特殊的玻璃,使用常见的冕牌玻璃和火石玻璃。根据初级像差理论,在镜头手册中选取初始结构参数如图3所示。扫描透镜初始结构如图4所示<sup>[19-21]</sup>。

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard		Infinity	7.500000		1.000000
2	Standard		-13.460000	1.000000	ZF13	3.555743
3	Standard		-12.830000	7.780000		3.843712
4	Standard		-9.470000	0.500000	K9	5.928488
5	Standard		-50.070000	0.880000		6.929334
6	Standard		-27.720000	2.750000	ZF13	7.214264
7	Standard		-15.450000	0.200000		7.951678
8	Standard		-44.110000	4.500000	ZF13	8.593351
9	Standard		-17.280000	39.370000		9.400920
10	Standard		Infinity	5.750000	K9	12.834850
11	Standard		-56.100000	6.212962	M	13.103639
IMA	Standard		Infinity	-		13.186493

图3 扫描透镜初始结构参数

## 3 $f-\theta$ 透镜的优化设计结果与分析

### 3.1 初始结构的像差分析

图5、图6和图7分别为系统的波像差、点列图和畸变。由图5可知,扫描物镜边缘视场的波像差

为  $5\lambda$ ,远远不能达到小于  $1/4\lambda$  的要求。由图6可知,扫描物镜的各视场的点列图较大,分别为  $2\ \mu\text{m}$ 、 $34\ \mu\text{m}$ 、 $64\ \mu\text{m}$ 、 $83\ \mu\text{m}$ 、 $131\ \mu\text{m}$ ,像在  $0.7$  视场和边缘视场均有较大的慧差和像散,不满足等晕条件。由图7可知,扫描物镜的畸变接近  $10\%$ ,远远没有达到设计要求,需要对系统进行优化设计。

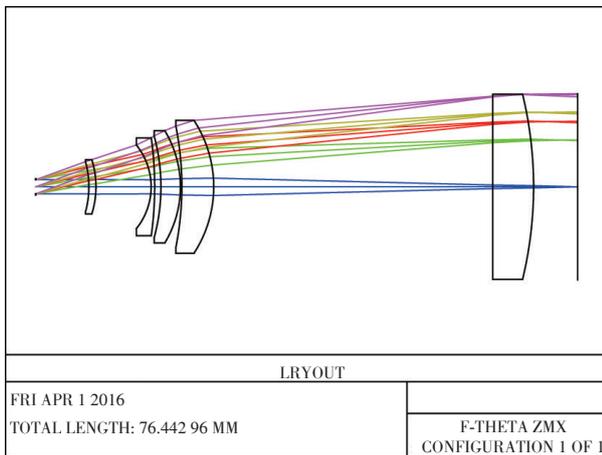


图4 扫描透镜初始结构图

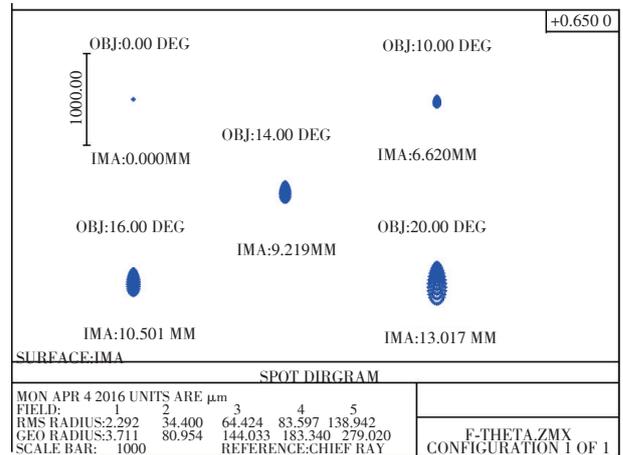


图6 扫描透镜点列图

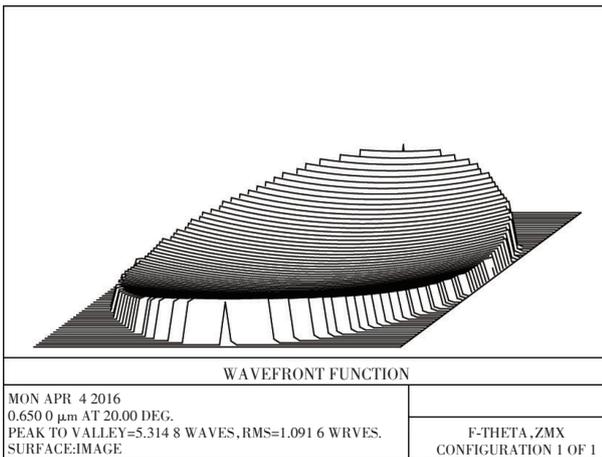


图5 扫描透镜边缘视场波像差

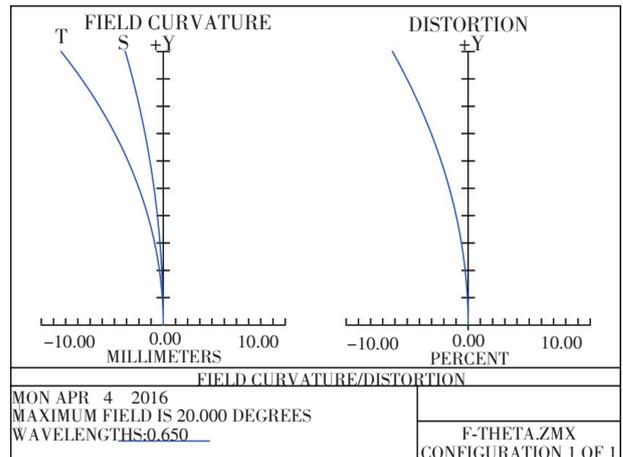


图7 扫描透镜畸变

### 3.2 初始结构的优化

添加焦距 EFFL、慧差 COMA、像散 ASTI 和畸变 DISC 作为优化控制函数,然后逐步增加变量,优化系统并且改善像质。由图4可知,该系统由5片透镜构成,结构有些复杂,出射主光线不平行于光轴,

未达到像方远心光路的要求,且第1片和第2片透镜厚度较薄,特别是第2片透镜,因此尝试将第2片透镜删除,对四片式结构依次设定焦距 EFFL、慧差 COMA、像散 ASTI 和畸变 DISC 作为优化控制函数,然后再次逐步增加变量,优化系统。经过优化后的系统结构参数如图8所示,结构图如图9所示。

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard		Infinity	7.475000		1.000000
2	Standard		18.755950 V	2.000000	ZF13	3.867374
3	Standard		14.249837 V	8.000000		4.074725
4	Standard		-6.955297 V	1.744000	ZF13	5.965220
5	Standard		-9.014725 V	0.449000		7.239930
6	Standard		-34.210999 V	4.585000	ZF13	8.948375
7	Standard		-14.584700 V	51.429000		9.817122
8	Standard		459.562173 V	4.983000	K9	17.438758
9	Standard		-74.209251 V	19.467596 M		17.633245
IMA	Standard		Infinity	-		17.452891

图8 扫描透镜优化后的结构参数

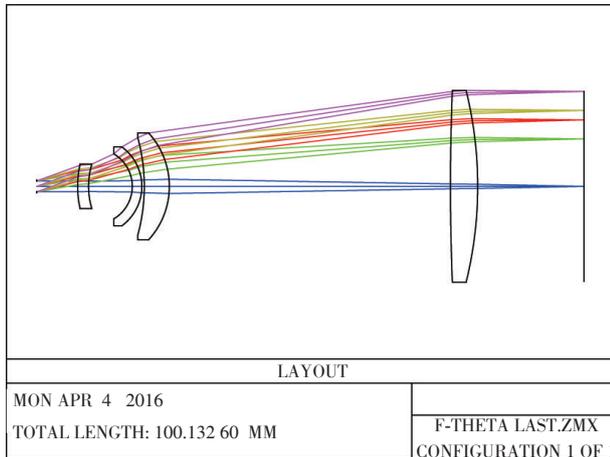


图9 扫描透镜优化后的结构图

### 3.3 优化后系统的像差分析

图10和图11分别给出该扫描镜头在零视场和全视场的波像差,其峰谷比分别为  $0.0033\lambda$  和  $0.0322\lambda$ ,远远小于瑞利准则的  $1/4\lambda$  的要求。

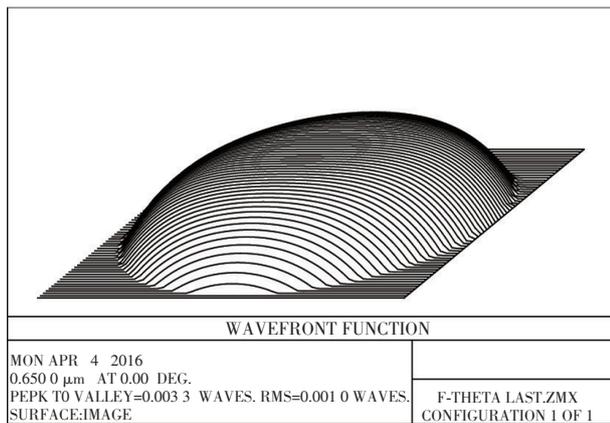


图10 扫描透镜零视场的波像差

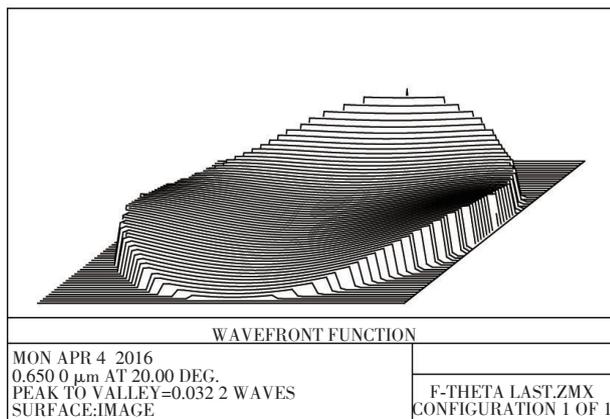


图11 扫描透镜全视场的波像差

如图12所示,各视场点列图大致相等,均方根半径分别为  $0.273\ \mu\text{m}$ 、 $0.532\ \mu\text{m}$ 、 $0.622\ \mu\text{m}$ 、 $0.527\ \mu\text{m}$ 、 $0.887\ \mu\text{m}$ ,满足等晕条件,并且都小于艾里斑直径  $39.65\ \mu\text{m}$ 。扫描镜头的相对畸变和  $f-\theta$  相对畸变分别如图13和如图14所示。

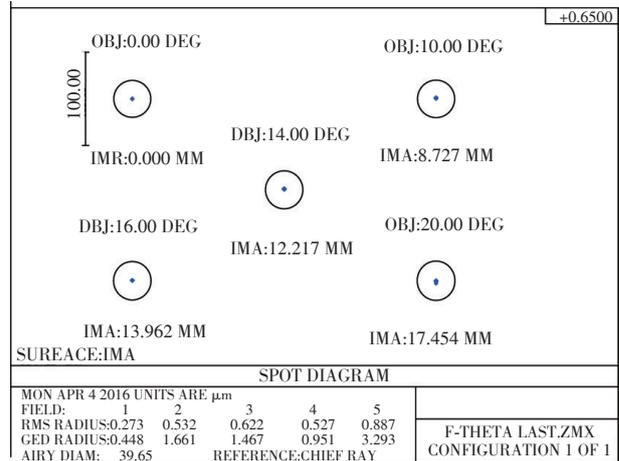


图12 扫描透镜的点列图

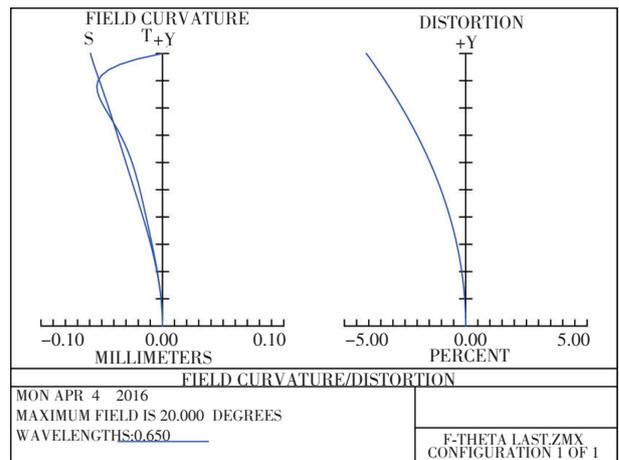


图13 扫描透镜的相对畸变

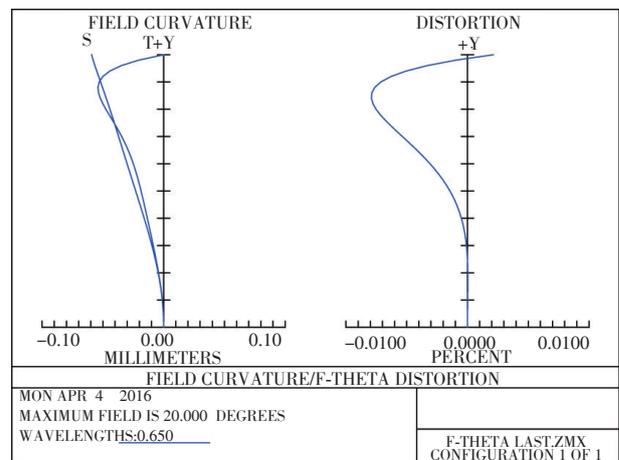


图14 扫描透镜的  $f-\theta$  相对畸变

可见,在最大视场的  $f-\theta$  相对畸变校正为零,最大相对畸变在 0.84 带,为 0.007 9% 远小于 0.02%,出射主光线平行于光轴。由于子午像面和弧矢像面不重合,因此存在场曲和像散。由图 13 可知,像散的最大值为 0.1 mm,根据焦深公式  $l = \lambda/n' \sin^2 u'$  计算,得所设计的焦距为 50 mm 的  $f-\theta$  透镜的焦深为 4.6 mm,最大像散值小于焦深,是在允许的范围内。图 15 和图 16 为扫描透镜的相对照度曲线和能量集中度曲线,由于衍射和像差的存在,会使原本照度均匀的物面经过光学系统后像面变得不均匀,从而影响像质。

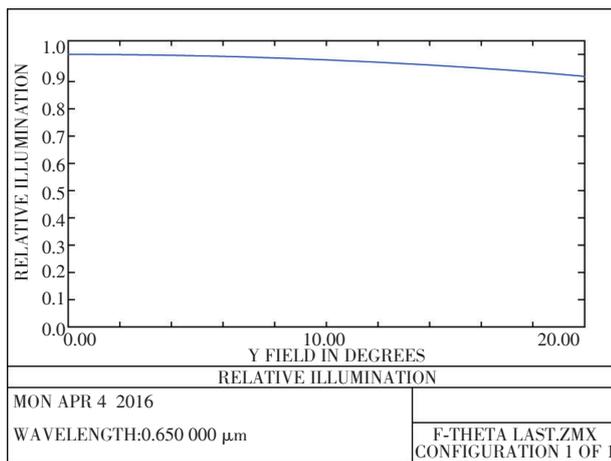


图 15 扫描透镜像面相对照度曲线

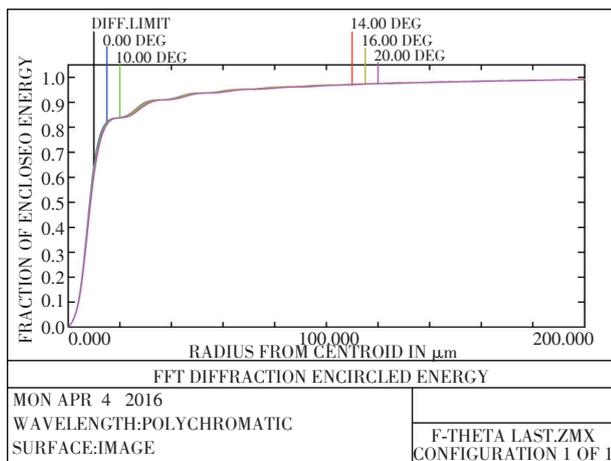


图 16 扫描透镜能量集中度曲线

由图 15 可知,系统的相对照度在 90% 以上,保证了工件表面上刻线深度和粗细的均匀性,是符合实际使用要求的。图 16 是光束经扫描透镜后在成像面的能量集中度分布曲线。

从图中可见,入射光束的近 80% 的能量都集中在 40 μm 的艾里斑内,各视场角能量集中度曲线与衍射极限的能量集中度曲线基本重合,系统达到了衍射极限。

综上所述,设计的  $f-\theta$  透镜是符合设计要求的,其特点是焦距比较短,结构简单紧凑,成本较低,聚焦性能达到衍射极限,系统相对照度分布均匀,有很高的能量集中度。

## 4 结论

给出了  $f-\theta$  透镜的光学设计思想、优化过程及设计结果。首先结合像差理论分析  $f-\theta$  透镜的设计要求,选择合适的参数及初始结构,通过合理添加控制函数,应用 ZEMAX 软件进行自动优化,得到设计结果。整个  $f-\theta$  透镜光学系统共由四片球面透镜组成,其聚焦性能接近衍射极限,具有结构简单紧凑、光能利用率高、畸变小、扫描精度高,聚焦性能达到衍射极限和像面照度分布均匀的优点,能够满足实际激光打标的要求。

## 参考文献

- [1] 季轶群,沈为民.大工作面 F-Theta 镜头的光学设计[J]. 光学学报,2005,25(11):1539-1542.
- [2] 赵曰峰,陈兴海,孙元峰,等.振镜式在线激光打标机精确定位方案的实现[J]. 激光杂志,2004,25(1):65-66.
- [3] 刘本喜,裴先登,卢祖弼,等.振镜扫描系统的特性研究[J]. 电子计算机外部设备,1994,18(6):27-28.
- [4] 付敏敏,陈培锋,王英,等.超广角大工作面 f-theta 镜头的光学设计[J]. 应用光学,2011,32(6):1083-1087.
- [5] 张以谟. 应用光学[M]. 北京:机械工业出版社,1982:120-295.
- [6] 王文生.现代光学系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,2016:196-215.
- [7] 张双翼,徐熙平.激光扫描系统中  $f-\theta$  透镜的光学设计[J]. 光学仪器,2012,34(5):40-44.
- [8] 季轶群,刘红军,沈为民.  $F-\theta$  镜头的光学设计[J]. 光子学报,2007,36(1):73-76.
- [9] 陈海清.现代实用光学系统[M]. 武汉:华中理工大学出版社,2003:62-69.
- [10] 王之江,庄松林,顾培森,等.现代光学应用技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [11] 王相京,吴金才,陈结祥,等.多波长、大工作面折-衍混

(下转第 38 页)

- High efficiency and junction property[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(6):063901-063901-4.
- [11] Kamat P V. Organometal halide perovskites for transformative photovoltaics[J]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136(10):3713-4.
- [12] Gao P, Grätzel M, Nazeeruddin M K. Organohalide lead perovskites for photovoltaic applications[J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(8):2448-2463.
- [13] Kawamura Y, Mashiyama H, Hasebe K. Structural study on cubic-tetragonal transition of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ [J]. Phys Soc Jpn, 2002, 71:1694-1697.
- [14] Poglitsch A, Weber D, Poglitsch A. Dynamic disorder in methyl-ammonium trihalogen plumbates (II) observed by millimeter-wave spectroscopy[J]. Journal of Chemical Physics, 1987, 87(11):6373-6378.
- [15] Stoumpos C C, Malliakas C D, Kanatzidis M G. Semiconducting tin and lead iodide perovskites with organic cations: phase transitions, high mobilities and near-infrared photoluminescent properties[J]. Inorganic Chemistry, 2013, 52(15):9019-9038.
- [16] Amat A, Mosconi E, Ronca E, et al. Cation-induced band-gap tuning in organohalide perovskites: interplay of spin-orbit coupling and octahedra tilting[J]. Nano Letters, 2014, 14(6):3608-3616.
- [17] Lee M M, Jo L T, Tsutomu M, et al. Efficient hybrid solar cells based on meso-super structured organo-metal halide perovskites[J]. Science, 2012, 338(6107):643.
- [18] Carnie M J, Cecile C, Davies M L, et al. A one-step low temperature processing route for organolead halide perovskite solar cells[J]. Chemical Communications, 2013, 49(72):7893-5.
- [19] Julian B, Norman P, Soo-Jin M, et al. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells[J]. Nature, 2013, 499(7458):316-319.
- [20] Qi C, Huanping Z, Ziruo H, et al. Planar heterojunction perovskite solar cells via vapor-assisted solution process[J]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136(2):622-625.
- [21] Mingzhen L, Johnston M B, Snaith H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition[J]. Nature, 2013, 501(7467):395-398.
- [22] Jiangjian S, Yanhong L, Huiyun W, et al. Modified two-step deposition method for high-efficiency  $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  heterojunction solar cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(12):9711-9718.
- [23] Siliu L, Shuping P, Yuanyuan Z, et al. One-step, solution-processed for maminium lead trihalide ( $\text{FAPbI}(3-x)\text{Cl}(x)$ ) for mesoscopic perovskite-polymer solar cells[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2014, 16(36):19206-11.
- [24] Siliu L, Shuping P, Yuanyuan Z, et al. One-step, solution-processed for maminium lead trihalide ( $\text{FAPbI}(3-x)\text{Cl}(x)$ ) for mesoscopic perovskite-polymer solar cells[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2014, 16(36):19206-11.
- [25] Zhao Y, Zhu K.  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl}$ -assisted one-step solution-growth of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ : structure, charge-carrier dynamics, and photovoltaic properties of perovskite solar cells[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2014, 118(18).
- [26] Chen J, Rong Y, Mei A, et al. Hole-conductor-free fully printable mesoscopic solar cell with mixed anion perovskite  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}(3-x)(\text{BF}_4)_x$ [J]. Advanced Energy Materials, 2015.

(上接第10页)

- 杂  $f-\theta$  镜头设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 79-81.
- [12] THIBAUT S. F-Sin(theta) lens system and application[J]. SPIE, 2001, 4441:98-105.
- [13] FUSE K, OKADA T, EBATA K. Diffractive/refractive hybrid F-theta lens for laser drilling of multilayer printed circuit boards[J]. SPIE, 2003, 4830: 95-100.
- [14] 李田泽. 激光扫描成像系统的设计分析及应用[J]. 红外技术, 2004, 26(4):16-19.
- [15] 郑猛, 邵双运, 冯其波, 等. CR 扫描仪激光扫描光学系统的设计及理论分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2393-2399.
- [16] 刘琦, 刘丽萍, 原浦升. 折-衍混合红外激光扫描检测设备的光学系统设计[J]. 中国激光, 2008, 35(2):263-267.
- [17] 崔桂华. 超广角大口径  $f-\theta$  透镜设计[J]. 应用光学, 1993, 14(3):13-15.
- [18] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
- [19] LAIKIN M. 光学系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [20] WELFORD W T. Aberration of optical system[M]. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1986.
- [21] 张登臣, 郁道银. 使用光学设计方法与现代光学系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.