

F-θ 镜头的光学设计*

季轶群 刘红军 沈为民

(苏州大学现代光学研究所, 苏州 215006)

摘 要 介绍一种适合于激光打标聚焦镜头—F-θ 镜头的光学设计. 通过引入桶形畸变, 得到的 F-θ 镜头的像高与入射角成正比, 可实现打标速度的线性控制. 优化设计得到的工作面积达 500×500 mm² 的 F-θ 镜头, 结构简单紧凑、聚焦性能达到衍射极限.

关键词 光学设计; 激光打标; F-θ 镜头

中图分类号 O439

文献标识码 A

文章编号 1004-4213(2007)01-0073-4

0 引言

F-θ 镜头的像高与视场角成正比, 常用作线性扫描系统的光学聚焦镜头^[1-2]. 激光标刻机属于激光扫描系统, 其工作时, 激光器发出的高能量激光束, 依次经过扫描振镜 X 和 Y 反射后, 入射到 F-θ 镜头, 聚焦到待标刻工件表面, 进行相应的标刻. 这种标刻系统可以用于制作激光防伪标记、刻字、光学精细加工等, 具有无污染、分辨率高、非接触、标记永久保持等优点^[3].

以像差理论^[4-5]和已有光学镜头的设计为理论基础^[6-9], 结合 F-θ 镜头的特点, 本文描述了 F-θ 镜头的光学设计思想, 并论述报导了 F-θ 镜头的设计结果.

1 设计思想

图 1 为关于 θ 角的三条不同函数曲线. 当 θ 角较小时, 曲线 y=θ 与 y=tan θ 很接近, 随着 θ 角的增大, 曲线 y=θ 偏离曲线 y=tan θ 越明显. 因此, F-θ 镜头光学设计的本质是要引入桶形畸变, 使实际像高 Y 偏离理想高斯像高 f×tanθ, 而接近 f×θ,

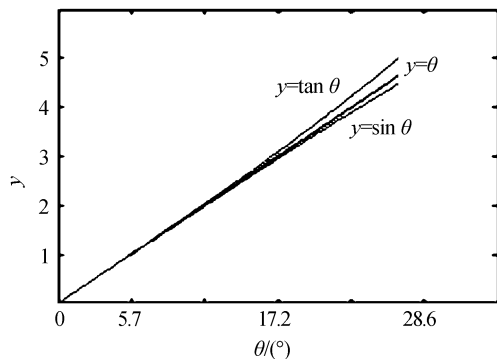


图 1 关于 θ 角的三条曲线
Fig. 1 Three curves about θ

偏离程度须满足^[10]

$$q_{f\theta} = \frac{Y - f \cdot \theta}{f \cdot \theta} < 0.5\% \quad (1)$$

所以, 与普通照相物镜不同, 为了有利于引入桶形畸变, 需将光阑设置在光学系统外部, 并将靠近光阑的透镜弯向光阑.

F-θ 镜头属于大视场小相对孔径光学系统, 球差和彗差不严重. 为获得良好的标刻效果, 一般要求镜头具有衍射受限的聚焦性能. 用于激光打标机的 F-θ 镜头, 工作于单波长, 不需要校正色差, 这是它与普通照相物镜的另一不同点.

工作面通常为平面, 即希望镜头的像面满足如式(2)所示的平场条件

$$\sum_k \frac{\phi_k}{n_k} = 0 \quad (2)$$

式中 n_k 是指第 K 块透镜的折射率, ϕ_k 指第 K 块透镜的光焦度.

这就要求光学系统正负光焦度分离. 正负光焦度分离, 一方面可保证平场要求, 另一方面, 采用负透镜在前、正透镜在后的结构形式, 可使主光线在后面正透镜上有较高的位置, 获得一定的负畸变.

系统中存在相邻透镜的两个邻近的面背向而置的结构, 有利于像散的校正.

2 设计结果

根据实际使用需求, 通过优化设计, 得到像面大小分别为 100×100 mm², 200×200 mm² 和 500×500 mm² 的三种用于振镜式激光打标机的 F-θ 光学聚焦镜头, 光学系统结构如图 2.

如图 2(b), 优化设计得到的工作面积为 200×200 mm² 的 F-θ200 镜头由三片球面透镜构成, 视场角 ±27°, 有效焦距 300 mm. 三块透镜的光焦度分别为负、正、正. 透镜的最大口径 86 mm; 工件表面的工作面大小为 φ288 mm, 距透镜 3 后表面 375 mm; 透镜 1 的前表面与透镜 3 的后表面的间距(即筒长)

*江苏省现代光学技术重点实验室开放课题(KJS01004)资助
Tel: 0512-65113796 Email: 210323005@suda.edu.cn
收稿日期: 2005-11-22

为 40 mm,系统结构简单紧凑. 透镜 1 和 2 都弯向光栏,有利于畸变的引入. 透镜 3 前表面背向光栏, 1 和 2 都弯向之,有利于校正像散和彗差.

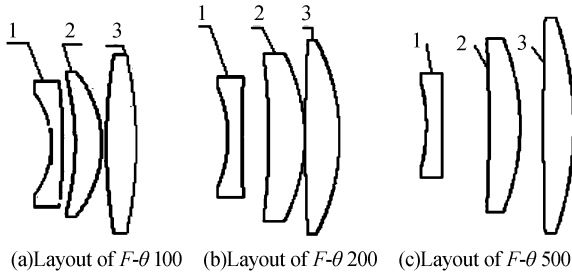


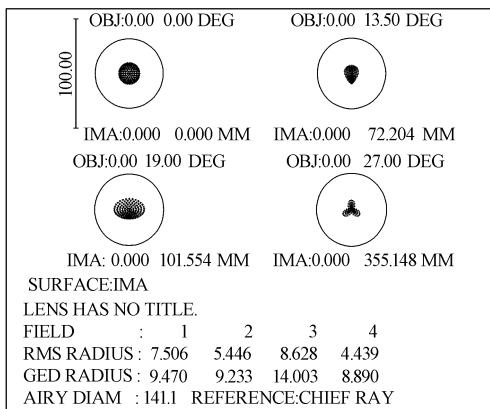
图 2 三种工作面积不同 $F-\theta$ 的光学系统结构
Fig. 2 Layout of three kinds of $F-\theta$ lenses with different working area

优化设计得到的工作面积达 $500 \times 500 \text{ mm}^2$ 的 $F-\theta 500$ 聚焦镜头如图 2(c),光学系统的结构与 $200 \times 200 \text{ mm}^2$ 镜头相似,符合上述光学设计思想. 视场角 $\pm 30^\circ$,有效焦距 680 mm. 透镜的最大口径 117 mm;工作面积为 $\phi 710 \text{ mm}$,距透镜 3 后表面 800 mm;透镜 1 前表面至透镜 3 后表面的间距(即筒长)为 62 mm,镜头结构简单紧凑,工作面积大.

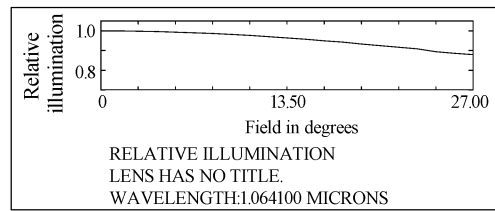
比较图 2(b)和图 2(c)可得,在三片式的 $F-\theta$ 镜头中,随着镜头工作面尺寸的增大,光学系统中透镜口径也越来越大,且第二块透镜与最后一块透镜的间距也随之增大,主光线在最后一块透镜上的入射高度变大,出射时与光轴间的夹角变小,夹角余弦的四次方变大,可保证像面辐照度分布的均匀性,实现更大的工作面要求.

图 3 和图 4 分别为 $F-\theta 200$ 镜头和 $F-\theta 500$ 镜头的聚焦性能评价曲线,如图 3(a)和图 4(a),两镜头经光线追迹后的点列图都落在爱里斑以内. 整个工作面上的辐照度分布如图 3(b)和图 4(b),比较均匀.

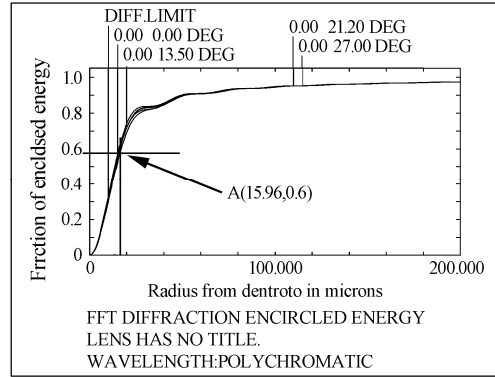
由图 3(c)可知,激光束经 $F-\theta 200$ 镜头聚焦在像平面上后,在直径等于爱里斑半径 $32 \mu\text{m}$ 的弥散圆内,包含的能量占总能量的 60%. 而对于 $F-\theta 500$ 镜



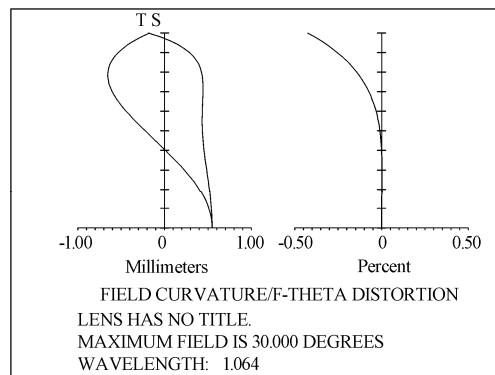
(a)Spot diagram



(b)Relative illumination

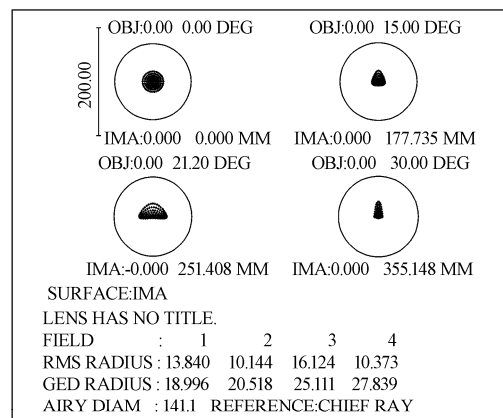


(c)Relative illumination

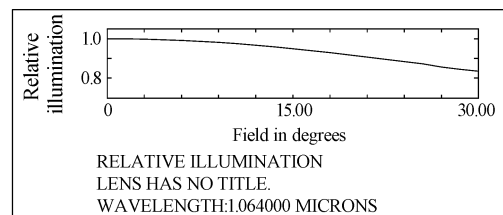


(d)Field curvature and distortion relative to $F-\theta$ linearity

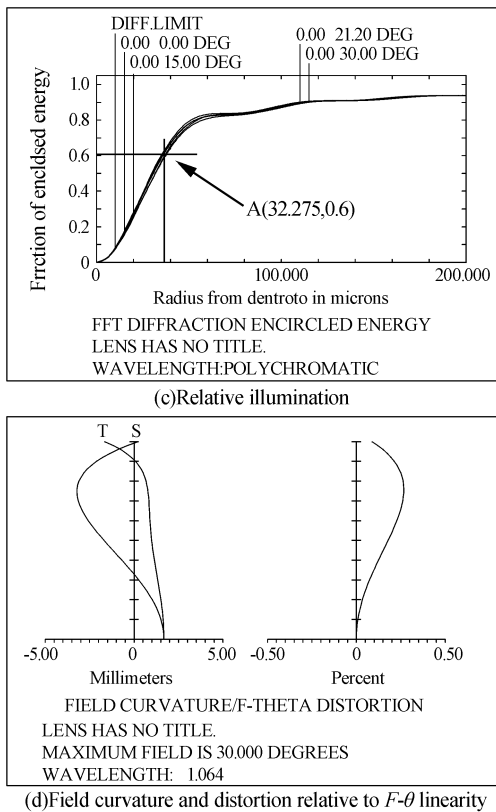
图 3 $F-\theta 200$ 镜头的聚焦性能评价曲线
Fig. 3 Performance evaluation of $F-\theta 200$



(a)Spot diagram



(b)Relative illumination

图 4 $F-\theta 500$ 镜头的聚焦性能评价曲线Fig. 4 Performance evaluation of $F-\theta 500$

头,由于工作面积增大,焦距 f 增大, $F/\text{No.}$ 增大,爱里斑半径 $D/2 = 1.22\lambda \cdot F/\#$ 也增大,总能量的 60%集中在直径为 $70 \mu\text{m}$ 的弥散圆内。

图 3(d)和图 4(d)中右方的畸变曲线所反应的实际像高相对于 $F-\theta$ 线性关系的偏离量,满足式(1)的要求。由图 3(d)和 4(d)中左方的场曲—像散曲线可明显看出,它的场曲像散比 $F-\theta 200$ 的大,最大值达 4 mm。事实上,根据焦深的计算公式 $\frac{\lambda}{n' \sin^2 u}$ $= \frac{4\lambda(F/\#)^2}{n'}$ $= 12.56 \text{ mm}$ 可知,此像散值远小于焦深,在像差容限范围内^[4-5]。

3 结论

介绍了 $F-\theta$ 光学聚焦镜头的原理和设计思想。给出了用作激光打标时, $F-\theta 200$ 和 $F-\theta 500$ 的设计结果,通过像质评价和实际使用情况,设计和研制的 $F-\theta$ 镜头结构简单紧凑,聚焦性能达到衍射极限,像面照度分布比较均匀,能满足实际激光打标要求。

致谢 本文所做的工作得到了薛鸣球院士的精心指导,在此表示最诚挚的谢意!

参考文献

- [1] SIMON T. F-Sin (θ) lens system and application[C]. *Proc SPIE*, 2001, **4441**:98-105.
- [2] ZHAO Yue-feng, CHEN Xin-hai, SUN Yuan-feng, *et al.*. Realization of accurate orientation project to the mirror laser online-marking system[J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(1):65-66. 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] LIU Ben-xi, PEI Xian-deng, LU Zu-bi, *et al.* Study of oscillating mirror scanner system [J]. *Peripheral Equipment of Computer*, 1994, **18**(6):27-28. 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] WELFORD W T. Aberration of optical system[M]. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1986.
- [5] ZHANG Yi-mo. Applied optics [M]. Tianjin: Mechanical Industry Press, 1982. 120-295. 张以谟. 应用光学[M]. 天津:机械工业出版社, 1982. 120~295.
- [6] SHEN Wei-min, WU Quan-ying, XUE Ming-qiu, *et al.* Optical design of far field beam diagnosis system in shen-guang III intense laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):964-969. 沈为民,吴泉英,薛鸣球,等. 神光III强激光光束远场诊断系统光学设计[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8):964-969.
- [7] WU Feng, SHEN Wei-min. Design of a light and compact optical system for star sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11):1336-1338. 吴峰,沈为民. 轻小型星敏感器光学系统的设计[J]. *光子学报*, 2004, **33**(11):1336-1338.
- [8] CHEN Li-wu, YANG Jian-feng, HONG Xin-hua, *et al.* Wide bands long focal refracting lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1123-1126. 陈立武,杨建峰,洪新华,等. 宽波段折射式长焦光学镜头[J]. *光子学报*, 2004, **33**(9):1123-1126.
- [9] SHEN Wei-min. High-speed infrared optical system with wide field of view[D]. Xi'an: Academic Sinica, 2004. 沈为民. 大相对口径大视场红外光学系统[D]. 西安:中国科学院研究生院, 2004.
- [10] CHEN Hai-qing. Modern practical optical system [M]. Wuchang: Huazhong University of Science and Technology, 2003. 62-96. 陈海清. 现代实用光学系统[M]. 武昌:华中理工大学出版社, 2003. 62-96.

Optical Design of $F-\theta$ Lens

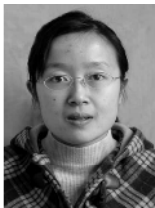
JI Yi-qun, LIU Hong-jun, SHEN Wei-min

(Modern Institute of Soochow University, Soochow 215006)

Received date: 2005-11-21

Abstract The optical design of $F-\theta$ lens, which is fit for laser marking as the focusing lens was introduced. Introducing barrel distortion, the image height of $F-\theta$ lens is in proportion to its incident angle, and it made marking linearly. $F-\theta$ lens with its working area $500 \times 500 \text{ mm}^2$ was obtained after optimal design. It was compact and its performance was within diffraction limit.

Key words Optical design; Laser marking; $F-\theta$ lens



JI Yi-qun was born in 1980. She graduated from Xuzhou Normal University with a Bachelor's degree in 2003, and now she is a postgraduate student of Institute of Modern Optical Technology of Suzhou University. Her major interests include optical design and optical apparatus.

重要通知

1. 因编辑部搬迁, 寄信时请使用新通信地址, 如下:

邮 编: 710119

地 址: 西安市高新区新型工业园信息大道 17 号 47 分箱

单 位: 中国科学院西安光学精密机械研究所《光子学报》编辑部

Tel/Fax: 029-88887564 网 址: <http://www.photon.ac.cn>

电子邮箱: photon@opt.cn

2. 为了加强国际学术交流, 扩大《光子学报》在国际学术界的影响, 编委会决定增加英文稿件的刊出数据。对于已经通过全部审稿程序且学术质量较高的论文, 编辑部将要求其作者提供英文全文, 并将适当缩短出版周期。