

文章编号: 0253-2239(2005)11-1539-4

大工作面 F-Theta 镜头的光学设计*

季轶群^{1,2} 沈为民^{1,2}

(¹ 苏州大学现代光学技术研究所, 苏州 215006)
(² 江苏省现代光学技术重点实验室, 苏州 215006)

摘要: 目前国内用于激光标刻机的 F-Theta 镜头的工作面积一般不超过 $\phi 420$ mm。国外虽有面积较大的 F-Theta 镜头,但结构复杂。通过初级像差分析,确定了镜头的初始结构参量,利用光学设计软件优化得到了工作面积为 $\phi 680$ mm 的 F-Theta 镜头,它由四片两种普通玻璃球面透镜构成,光学筒长不到 100 mm,具有结构简单紧凑,聚焦性能接近衍射极限、线性畸变小的优点,满足大工作面打标的使用要求。

关键词: 光学设计; F-Theta 镜头; 初级像差理论; 激光打标

中图分类号: O439 文献标识码: A

Optical Design of Large Working Area F-Theta Lens

Ji Yiqun^{1,2} Shen Weimin^{1,2}

(¹ Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006)
(² Jiangsu Key Laboratory of Modern Optical Technology, Suzhou 215006)

Abstract: The working area of F-Theta lens is generally not larger than 420 mm in diameter interiorly when used in laser marking system. F-Theta lenses with larger working areas overseas are of complicated structures. F-Theta lens with its working area as large as 680 mm in diameter is obtained by determining the parameters of initial structure through analysis of the primary aberration and optimizing the initial structure with optical design software. The designed system is compact and composed of only four spherical lenses made up of two kinds of common optical glasses. Its tube length is less than 100 mm. But its focusing performance is diffraction-limited and its distortion relative to the F-Theta linear relation is small. The system satisfies the requirements of marking on a large area.

Key words: optical design; F-theta lens; primary aberration theory; laser marking

1 引言

望远物镜的像高与视场角的正切成正比,而 F-Theta 镜头的像高与视场角成正比,常用于线性扫描系统,如激光标刻机,激光束经 F-Theta 镜头聚焦,像高 y 与光束的入射角 θ 成正比^[1,2]。这种标刻系统广泛用于制作激光防伪标记、刻字和表面装饰、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、非线性误差和塔形误差等优点^[3]。

随着激光打标应用范围的进一步扩展,大工作面要求越来越迫切。目前国内激光打标机的工作面

积一般不超过 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ^[2,4],国外虽有工作面较大的 F-Theta 镜头,但结构复杂,价格昂贵,且未见详细报导。

本文描述了大工作面 F-Theta 镜头的光学设计思想,从初级像差理论出发,确定初始结构,然后利用 ZEMAX 软件优化设计,得到了标刻直径为 $\phi 680$ mm 的 F-Theta 镜头,它结构简单紧凑、聚焦性能好、线性畸变小,满足了目前大工作面打标的使用要求。

2 设计思想

用于激光打标机的 F-Theta 镜头,工作于单波

* 江苏省现代光学技术重点实验室开放课题基金(KJS01004)资助课题。

作者简介: 季轶群(1980~),女,江苏宜兴人,苏州大学现代光学技术研究所硕士研究生,主要从事光学设计和仪器光学研究。E-mail: jiyiqun1980@163.com

收稿日期: 2005-01-31; 收到修改稿日期: 2005-04-01

长,工作面通常为平面,等效光阑位于 X 扫描振镜处(如图 1 所示),光阑口径等于激光束直径。它属于大视场、小相对孔径光学系统。为获得良好的标刻效果,一般要求镜头具有衍射受限的性能。

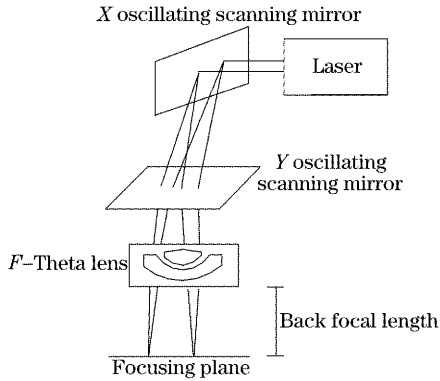


图 1 激光标刻机打标原理

Fig. 1 Principle of online-laser marking system

标刻大面积(如面积 $450\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 计算机标准键盘)工件时,用现有的激光标刻机标刻,因工作面积太小,需要用高精度的平移平台,经多次平移才能完成整个工件的标刻。为了降低设备成本,消除平台平移而引起的误差,在键盘上标刻清晰的字体、符号及某些特殊标记,要求 F-Theta 镜的工作面尺寸为 $\phi 634\text{ mm}$ 。

受打标系统光机结构的限制,扫描振镜的偏转角度一般不超过 $\pm 15^\circ$,即激光束的入射角 θ 不超过 $\pm 30^\circ$ 。可由像高 $Y = f \times \theta$,计算得到 F-Theta 镜头的焦距 f 约为 600 mm 。

由图 1 的工作原理可知,孔径光阑位于 X 扫描振镜处,口径等于入射激光束直径,约为 10 mm 。根据实际标刻机的结构,此等效光阑离 F-Theta 镜头的距离为 32 mm 。此镜头的 F 数接近于 60,是一个大视场小相对孔径光学系统。对于波长为 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 的 YAG 激光束,艾里斑的半宽度 a 为

$$a = 1.22\lambda \times F, \quad (1)$$

计算得 a 为约 $75\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,为获得尽可能高的标刻分辨率,光学系统应具有达到或接近理论极限的聚焦特性^[3]。

为使像高与视场角满足线性关系,需引入桶形畸变^[4]。对于理想的 F-Theta 镜头,理想高斯像高 y 为 $f \tan \theta$,根据相对理想高斯像高的畸变定义

$$q = \frac{Y - y}{y} \times 100\%, \quad (2)$$

计算得到需要引入的相对畸变量为 -9.3% 。相对于理想 F-Theta 线性关系的畸变为

$$q' = (Y' - f \times \theta) / (f \times \theta), \quad (3)$$

式中 Y' 为实际像高。通常要求该畸变值低于 1% 。

像面辐照度和能量集中度分布是衡量 F-Theta 镜头质量的重要指标,要求激光束在工件表面辐照度分布均匀、能量集中,相对照度分布应好于 90% 。F-Theta 镜头工作于单个激光波长,影响弥散斑尺寸的像差有球差、彗差、像散和场曲。由于其相对孔径很小,球差影响较小;像散、场曲、彗差的影响相对突出。因为标刻工作面是平面,所以 F-Theta 镜头必须满足平场条件

$$\sum_k \frac{\phi_k}{n_k} = 0, \quad (4)$$

式中 ϕ_k, n_k 分别是第 k 块透镜的光焦度和折射率。

F-Theta 镜头的孔径光阑位于透镜前方,将透镜弯向光阑,有利于引入畸变;为校正像散,系统中应具有相邻的、弯曲方向相反的透镜表面;彗差可通过改变透镜的形状因子校正。

为简单起见,在计算初始结构时,假设系统由正、负两个薄透镜构成。整个系统有四个曲率半径,一个间隔和两个玻璃折射率等七个一阶光学参量。对于色差问题,因为光学系统工作在单色光下,故不需要校正色差。为满足平场条件式(4),考虑选用两种不同的光学玻璃,根据经验选用无色光学玻璃 K9 和 ZF6^[6]。为满足结构紧凑的要求,两透镜的间隔初步确定为 100 mm 。考虑到总光焦度的要求,可用于校正像差的自由参量仅剩两个,难以同时校正所有像差。在优化设计过程中可通过复杂化初始结构,引入更多的优化参量。

3 初始结构

利用归一化间距 $d = 1/6$ 及两块透镜的折射率 $n_1 = 1.50619, n_2 = 1.72754$,可得到满足平场条件式(4)和归一化光焦度 $\phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2 = 1$ 要求的两组解:

$$A: \begin{cases} \phi_1 = -1.93487, \\ \phi_2 = 2.21992 \end{cases} \quad B: \begin{cases} \phi_1 = 2.70365, \\ \phi_2 = -3.10098 \end{cases}$$

根据薄透镜系统的初级像差理论和 PW 求解方法^[7],可将初级球差 S_1 、彗差 S_2 、像散 S_3 和畸变 S_5 等像差系数表示为

$$\begin{cases} \sum S_1 = S_1(\phi_1, \phi_2, Q_1, Q_2), \\ \sum S_2 = S_2(\phi_1, \phi_2, Q_1, Q_2), \\ \sum S_3 = S_3(\phi_1, \phi_2, Q_1, Q_2), \\ \sum S_5 = S_5(\phi_1, \phi_2, Q_1, Q_2), \end{cases} \quad (5)$$

它们的推导过程和显式过于冗长,在此不再给出。上式中 Q_1 和 Q_2 是两透镜的形状因子,是用于校正初级像差的两个独立变量。联立(5)式中的任意两个方程便可解出不同的 Q 值。

由透镜公式和形状因子与透镜表面曲率、光焦度间的关系,可计算得到透镜表面的曲率半径。当取光焦度解 A 时,得到靠近光阑的透镜前表面的曲

率半径为正值,表面弯曲背向光阑,与上文所述的校正畸变的设计思想相背,不宜作为初始结构解。取光焦度解 B 时,得到了八组初始结构解,经 ZEMAX 光学设计软件评价,能够得到相应的初级球差、彗差以及像差系数,这八组解和对应的像差系数均列于表 1。比较可见,第 1 组的像差系数值最小,选择该组作为进一步优化设计的初始结构。

表 1 取光焦度解 B 时的初始结构解

Table 1 Initial structure solutions and their corresponding aberration coefficients when focal powers are listed in group B

Initial solutions	Q_1	Q_2	r_{11}	r_{12}	r_{21}	r_{22}	SPHE / 10^{-4}	COMA / 10^{-5}	ASTI 10^{-5}
1	-1.190080	-0.678907	-110.8760	-8534.480	144.275	-5794.560	0.58	0.7	0.1
2	0.018575	1.169820	-120.8560	1593.420	168.419	-857.487	2.95	2.1	0.1
3	-2.521600	1.073760	-101.6270	-1066.110	166.967	-897.207	2.87	2.2	0.1
4	0.397255	2.069550	-124.3690	1160.980	183.352	-606.145	2.60	1.8	0.1
5	-6.996980	0.448593	-79.3730	-270.502	158.098	-1284.410	2.64	2.6	0.1
6	-5.937570	-2.592130	-83.7123	-328.541	125.636	1168.620	4.60	3.7	0.2
7	-1.195350	-3.674760	-110.8360	-8303.930	117.078	695.610	5.84	3.4	0.2
8	0.866743	2.243860	-129.0130	868.996	186.556	-573.573	2.54	1.8	0.1

4 优化设计

计算初始结构时略去了透镜的厚度,是一个近似解,须经过优化,才能得到符合实际使用要求的光学系统。借助 ZEMAX 软件,对所选初始结构中的薄透镜进行增厚,优化得到如图 2 所示的光学系统,最大视场角 20° ,像高约 215 mm,小于要求的工作面大小,且第二片透镜中心厚度偏厚,对材料和加工的要求较高。

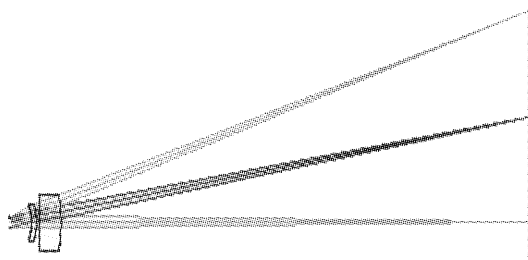


图 2 初步优化得到的镜头

Fig. 2 Lens obtained from initial optimization

图 2 所示两片式结构,是同时校正两种初级像差时计算得到的,若要同时校正更多种像差,须增加光学系统的可变参量,方法一是通过适当地复杂化系统,使前、后组均由两块透镜组成,借助 ZEMAX 软件的功能,建立合理的品质函数,设置合理的约束条件进行优化。

优化设计得到的 F-Theta 镜头如图 3 所示,它

由四块球面透镜组成,Stop 为等效光阑,也是激光束首先入射到达的振镜,其直径为 10 mm;前组透镜 1、2 和后组透镜 3、4 分别选用 K9 和 ZF6 玻璃,最大口径 70 mm;工件表面 Image surface 的工作面大小为 $\phi 680$ mm,距透镜 4 后表面 600 mm;最大视场角 32° ,有效焦距 633.9 mm;透镜 1 的前表面与透镜 4 的后表面的间距(即筒长)为 100 mm,系统结构简单紧凑。透镜 3 的光焦度为正,另外三块透镜的光焦度为负,保证了球差和场曲的校正。透镜 4 背向光阑,其他透镜都弯向光阑,利于校正像散和彗差。

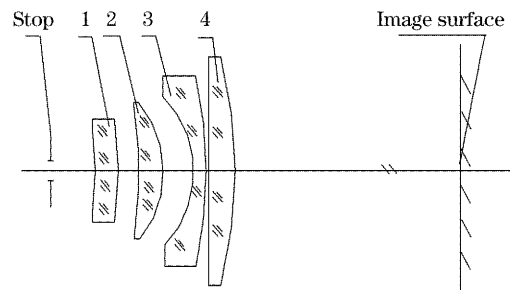


图 3 优化设计得到的镜头

Fig. 3 Lens obtained from final optimization

图 4 给出了此 F-Theta 镜头聚焦性能评价曲线,工作波长 $1.064 \mu\text{m}$ 。激光束在工件表面的光线追迹点列图如图 4(a)所示,图中各视场处的圆表示艾里斑大小,像面上所有视场的点列图基本都落在

艾里斑内,表明具有接近于衍射理论极限的聚焦特性;图 4(b)是激光束在工件表面的衍射能量集中度,入射光束的 90% 的能量集中在半径为 $125\ \mu\text{m}$ 的圆斑内;图 4(c)是激光束在工件表面的相对辐照度分布,整个工作面内的均匀性接近 90%;畸变曲线如图 4(d)所示,可见相对于线性关系的畸变值小于 0.5%;图 4(e)是子午和弧矢场曲曲线 T 和 S 随视场的变化情况,两者之差为像散值,可见存在场

曲,且像散的绝对值较大。实际上平场条件是在初级像差理论下计算初始结构时考虑的,最后的像面是通过自动优化平衡像差以后得到的,确实不一定平场,会有残余的场曲像差,用来平衡像散等高级像差。像散的绝对值虽然较大,但与艾里斑相比较,最后结果的点列图基本都落在艾里斑内[见图 4(a)],从图 4(b)的衍射能量集中图来看,各视场都接近于衍射极限,所以这样大小的像散是允许的。

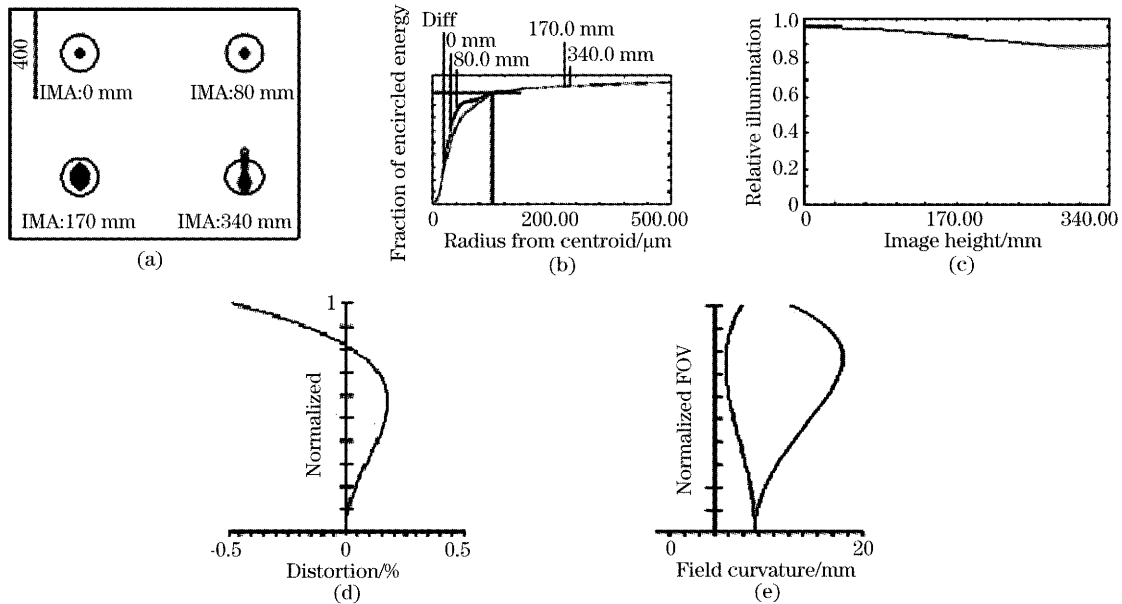


图 4 聚焦性能评价。(a)点列图,(b)能量集中度曲线,(c)像面辐照度分布曲线,(d)相对畸变图,(e)场曲曲线
Fig. 4 Evaluation of focusing performances. (a) Spot diagram, (b) encircled energy, (c) relative illumination, (d) distortion relative to $F-\theta$ linearity, (e) field curvature

5 结 论

给出了工作面尺寸为 $\phi 680\ \text{mm}$ ($480\ \text{mm} \times 480\ \text{mm}$) 的 F-Theta 镜头的光学设计思想、优化过程和设计结果。得到了仅由四片球面透镜组成、光学筒长 100 mm 毫米的光学系统。其聚焦性能接近于衍射极限,具有结构简单紧凑、光能利用率高、畸变小、像面照度分布均匀的优点,可适用于大面积的激光打标机。随着工作面尺寸的加大,对像差的校正要求越来越严格,希望通过引入光学非球面,可设计得到工作面更大且性能指标更为理想的 F-Theta 镜头,有关这方面的工作将另撰文报道。

致谢 感谢薛鸣球院士的指导。

参 考 文 献

- Zhang Dengchen, Xu Daoyin. *Practical Optical Design Method and Modern Optical System* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995 (in Chinese)
张登臣, 郁道银. 实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
- Chen Haiqing. *Modern Practical Optical System* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003. 62~96 (in Chinese)
陈海清. 现代实用光学系统[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2003. 62~96
- Liu Benxi, Pei Xiandeng, Lu Zubi. Study of oscillating mirror scanner system[J]. *Peripheral Equipment of Computer*, 1994, 18(6): 27~28 (in Chinese)
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
- Qin Shuijie. Design of two-piece $f \cdot \theta$ lens[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 15(2): 17~20 (in Chinese)
秦水介. 两片型 $f \cdot \theta$ 透镜设计[J]. 应用光学, 1994, 15(2): 17~20
- Zhao Yuefeng, Chen Xinghai, Sun Yuanfeng *et al.*. Realization of accurate orientation project to the mirror laser online-marking system[J]. *Laser J.*, 2004, 25(1): 65~66 (in Chinese)
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
- Li Shixian, Zhen Lenian. *Optical Design Manual* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990, 1~3, 118 (in Chinese)
李士贤, 郑乐年. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 1~3, 118
- Zhang Yimo. *Applied Optics* (2nd Volume) [M]. Tianjin: Mechanical Industry Press, 1982. 85~93 (in Chinese)
张以谟. 应用光学[M]. 天津: 机械工业出版社, 1982. 85~93