

YAG 激光打标机变焦 f-theta 镜扫描系统

高润梅¹, 高 贵², 常胜江³, 史新刚³, 傅儒廉³

(1. 桂林工学院数理系, 广西 桂林 541004; 2. 天津工业大学理学院, 天津 300160; 3. 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要:为 Nd:YAG 激光打标机设计了变焦距 f-theta 镜扫描系统, 以使它适用于不同的打标面积而不必更换镜头, 系统由四片透镜组成, 材料分别为 BK7、SF18 和 SF11, 系统总长度为 122.96mm, 工作波长 1064nm。利用 f-theta 镜的负畸变效应和机械变焦原理, 将四片镜设计合成两个可变档系统, 系统的有效焦距分别为 f-theta 镜的两个常用焦距: 350mm 和 400mm, 相应的扫描范围分别为 220mm × 220mm, 250mm × 250mm, 扫描角都为 ±18°。系统像面在 0 视场、0.7 视场和全视场的光斑都落在相应的爱里斑以内, 系统的 MTF 曲线接近相应的衍射极限曲线, 最大波像差小于四分之一波长, 系统的最大场曲和最大 f-theta 相对畸变都很好地满足了国内激光打标机的精度要求。

关键词:激光技术; f-theta 镜; 变焦; 畸变

中图分类号: TN249; TH741.1⁺2 **文献标识码:** A

YAG Laser Marking Machines Zoom f-theta-scanning System

GAO Run-mei¹, GAO Gui², CHANG Sheng-jiang³, SHI Xin-gang³, FU Ru-lian³

(1. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Science, Tianjin Polytechnical University, Tianjin 300160, China; 3. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: A varifocal f-theta lens was designed for Nd:YAG laser making scan focusing system, so that it apply to differ making area but change a lens necessarily. The system consists of four lens, made by glass BK7, SF18 and SF11. The total length of the system is 122.96mm, working at 1064m. Using the minus aberration of f-theta lens and machine zoom principle, the three alterable focus system was designed. The two effective focal lengths of the system are 350mm and 400mm, which are usually used in f-theta lens. The scanning field is 220mm × 220mm, 250mm × 250mm, respectively. All of the scanning angles are ±18°. For these two effective focal lengths, the spots on the image surface at zero view field, 0.7-view field and full view field are all inside the airy disc. The system MTF curve of each effective focal length are accordance with the corresponding diffraction limits curve. The biggest wave aberration is smaller than 1/4 wave lengths. The maximum field curvature and maximum f-theta system distortion respectively satisfies the precision demand of the laser marking machine in China.

Key words: laser technology; f-theta lens; zoom; distortio

1 引言

近年来, 由于激光技术的迅速发展, 激光打标技术得以快速普及, 并逐渐成为激光加工的最大应用领域之一^[1-2]。YAG 激光打标机输出 1064nm 的红外波, 能够被金属材料很好地吸收, 因波长短, 聚焦光斑小, 所以最适合在金属材料上进行高清晰度的标记, 是目前应用最广泛激光打标光源^[3-4], 具有很

大的市场潜力。

f-theta 镜是打标机的重要部件, 它将扫描光束

基金项目:国家自然科学基金(No. 60772105); 桂林工学院科研启动基金项目(No. 20060823)资助。

作者简介:高润梅(1966-), 女, 副教授, 主要从事光学设计和激光器研制工作。E-mail: gaorm2002@yahoo.com.cn

收稿日期:2008-07-01

聚焦在工件的平面上打出均匀而不失真的图像,因此它亦称平场镜。目前国内生产的均为定焦距 f-theta 镜,当对不同面积的工件打标时需要更换相应焦距的镜头,操作麻烦,成本高,因此设计变焦 f-theta 镜^[5]适应于不同工件的扫描将是十分必要的。

根据国内某激光公司的实际要求,本文使用 Zemax 软件设计了 YAG 激光打标机的变焦距 f-theta 透镜系统,该系统工作于 1064nm 波长,由四片镜组成,两个可变档对应最常用的两个焦距,该系统结构简单,出射光斑质量良好,造价低,满足了国内激光打标公司的技术要求。

2 f-theta 镜设计原则

激光打标机的扫描系统一般有两个振镜组成,分别完成 X 方向和 Y 方向的扫描。扫描系统出射的光束经光学系统聚焦在焦平面上,如图 1 所示。两光束的光轴夹角为 θ ,光学系统的焦距为 f ,则像高 h 为:

$$h = f \tan \theta \quad (1)$$

将式(1)对时间 t 求导:

$$\frac{dh}{dt} = f \sec^2 \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

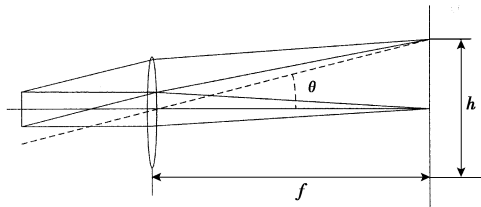


图1 无畸变时光学系统成像

打标机扫描振镜的扫描角速度是均匀的,则 $\frac{d\theta}{dt}$ 为常数,这样在不同的 θ 位置,携带图像信息的光束在加工平面上的扫描线速度 $\frac{dh}{dt}$ 不是匀速的, θ 越大, $\frac{dh}{dt}$ 越大,这也意味着 θ 越大,对于相同的转角 $d\theta$, dh 越大。因此,对于不考虑向差的理想光学聚焦系统,其在工件平面上形成图像的线条将是中间深边缘浅,而且图像失真量越来越大^[6]。

如果我们能够做到 h 与 θ 满足线性关系:

$$h = f \times \theta \quad (3)$$

$$\frac{dh}{dt} = f \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

则上述问题将不存在。满足式(3)的光学系统称为 f-theta 镜,实现的方法是利用光学系统的负畸变现象设计合适的结构使式(3)成立,此时需要产生的畸变量 ΔL 为:

$$\Delta L = f \tan \theta - f \theta = f(\tan \theta - \theta) \quad (5)$$

实际的 f-theta 镜的线性度总存在偏差。设其实际像高为 H ,偏离线性关系的相对畸变量为 η ,则:

$$\eta = \frac{H - f \times \theta}{f \times \theta} \times 100\% \quad (6)$$

在 ZEMAX 软件中用 η 值评价 f-theta 镜的线性度, η 值越小越好。

3 光学系统设计

利用 f-theta 透镜能产生一定负畸变的原理,尽量使 η 小,使光线在像面的成像像高 h 和入射角 θ 成线性关系^[4]。

满足线性关系后,我们就可以由要求扫描的像点排列的长度 L 和扫描角度 θ 求该 f-theta 透镜系统的焦距:

$$f = \frac{L}{2\theta} \times \frac{360^\circ}{2\pi} \quad (7)$$

当扫描长度 L 一定时, f 与 θ 成反比关系。在 F 数一定时,尽可能用小的 f 。这样可减小透镜和反射镜尺寸,从而使棱镜表面角度的不均匀性和扫描轴承不稳定而造成的不利影响减小。但 L 一定时, f 小, θ 就大,这对光学设计带来了困难,使光学系统复杂,加工制造成本增大。如果透镜和反射镜尺寸加大,则棱镜表面角度的不均匀性和扫描轴承不稳定而造成的不利影响加大,影响精度。实际设计中,经常要反复几次,才能最后确定最佳值,从而达到最佳效果^[5]。

根据实际要求,设计指标为:有效焦距分别为 350mm,400mm,扫描范围分别为 220mm × 220mm,250mm × 250mm,扫描角为 $\pm 18^\circ$,我们设计了两个定焦距的用于 Nd:YAG 激光打标机(1064nm)的 f-theta 透镜组。基于这些系统,在不改变扫描角和扫描范围的条件下,我们在系统中加入了另一片透镜,用 Zemax 设计了可变焦的 f-theta 透镜系统,系统的可用有效焦距分别为 350mm 和 400mm。

设计及优化的过程如下:

第一步,设计一个工作于 Nd:YAG 激光器出射波长(1064nm)的有效焦距为 350mm 的单色系统。首先以 HOPKINS laser diode scan lens 系统作为初始结构,在设定系统要求的参数后,在优化函数中加入有效焦距、f-theta 畸变等操作数,对系统进行优化。直到获得一个输出光斑较小且均匀的结果。这样我们就获得了一组三片镜的定焦距 f-theta 透镜系统。

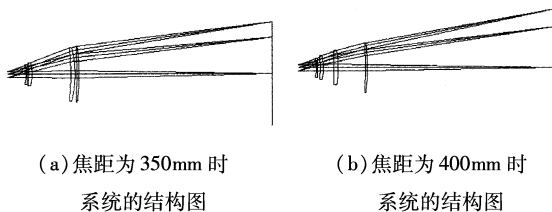
第二步,在上面系统的三片透镜中间加入第四

片透镜。在有效焦距、*f*-*theta* 畸变等操作数不变的情况下,重新对系统进行优化,直到得到一个光斑均匀且满足衍射极限的结果,此时我们得到了一组四片镜的有效焦距为 350mm,工作于 1064nm 的 *f*-*theta* 透镜系统。

第三步,在上面系统的基础上再加入一组透镜。形成两重结构,即构成可以两焦距切换的变焦系统。在结构 2 的优化函数中加入有效焦距(400mm)、*f*-*theta*畸变等操作数,并且在两重结构优化函数中控制四片透镜之间的距离可变但总长不变,重新建立评价函数,对系统进行优化^[6,8],综合考虑系统输出的光斑质量、系统畸变条件以及系统像差,最后选取一个在两种不同有效焦距下光斑质量良好、满足衍射极限^[9]的结果。产生这个结果的系统就是我们所需要的变焦 *f*-*theta* 透镜系统。

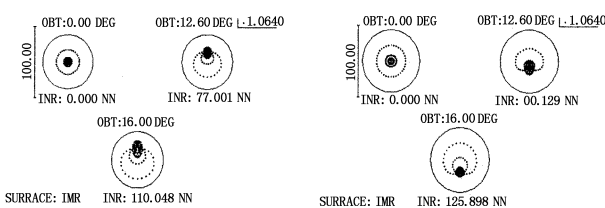
4 设计结果及分析

图 2 为变焦 *f*-*theta* 透镜系统在两个焦距下(350mm,400mm)的结构图,由四片透镜组成,第一片镜的材料为 BK7,第二片镜的材料为 SF18,第三和第四片镜的材料为 SF11。其扫描角为 $\pm 18^\circ$,有效焦距分别为 350mm,400mm,相应的扫描范围分别为 220mm \times 220mm,250mm \times 250mm,系统总长度为 122.96mm。图 3 为系统分别在两个焦距下在三个视场上出射光束在像平面上的光斑,对应于零视场、0.7视场、全视场的光斑大小在两个焦距下分别为 9.848 μ m, 14.992 μ m, 18.461 μ m; 12.554 μ m, 13.027 μ m, 18.305 μ m。爱里斑直径分别为 75.89 μ m,86.87 μ m。图 4 为系统分别在两个焦距下的像差特性曲线。图 5 为系统分别在两个焦距下的 MTF 曲线。



(a) 焦距为 350mm 时系统的结构图 (b) 焦距为 400mm 时系统的结构图

图 2 变焦 *f*-*theta* 透镜系统在两个焦距下的结构图



(a) 350mm 焦距时像面上的光斑 (b) 400mm 焦距时像面上的光斑
图 3 系统在像面上的出射光斑图样(单位: μ m)

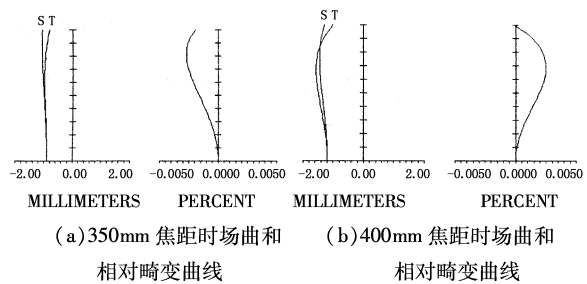
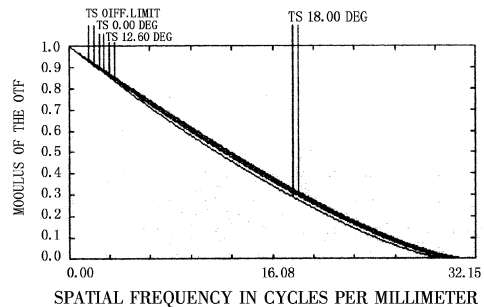
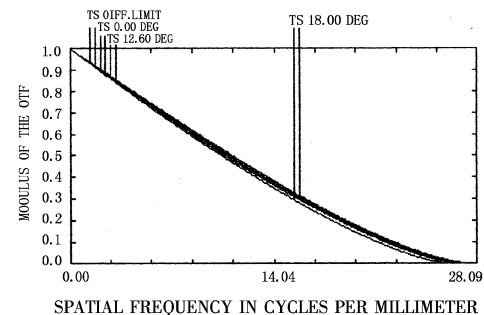


图 4 系统场曲和相对畸变曲线



(a) 350mm 焦距时 MTF 曲线图



(b) 400mm 焦距时 MTF 曲线图

图 5 系统的 MTF 曲线

由以上结果可以看出,本系统在定焦距系统的基础上加入了一片透镜,组成了两倍可切换变焦 *f*-*theta*透镜系统。在三个视场上出射光线均落在爱里斑以内。系统的最大场曲在 350mm,400mm 焦距时分别为 0.0082D,0.0088D(D 为屈光度单位),最大相对 *f*-*theta* 畸变分别为 0.003%,0.0028%。系统在两个焦距时的 MTF 曲线与衍射极限较好地吻合,波像差小于四分之一波长,出射光斑也全部落在衍射极限以内,满足了激光打标的要求。

5 小结

设计了一个变焦 *f*-*theta* 透镜系统,系统比定焦 *f*-*theta* 透镜系统多了一片透镜,使用的材料相同。将激光打标的常用焦距 350mm,400mm 的 *f*-*theta* 透镜系统统一于此。该系统在零视场、0.7 视场和全视场的平均光斑都在相应的爱里斑以内。系统的 MTF 曲线接近衍射极限,波像差小于四分之一波长,满足了实际打标机中对 *f*-*theta* 透镜的要求。但该系统也存在着不足,总长比定焦距系统多出 8cm

左右,体积相对庞大了一点。其光斑在满足衍射极限的情况下的图样不如定焦系统的光斑图样小,这是因为我们要综合考虑两种焦距下的成像效果,从而来确定像面位置、透镜厚度、曲率等参数,最后得到在两种焦距下比较理想的光斑。该系统的场曲和相对畸变与定焦系统的差距不大,有的还比定焦系统达到的效果好,这也说明我们选择的成像位置是符合要求的,这是一个四片镜变焦系统,我们是通过移动中间两片镜来达到变焦的目的,相比移动单个透镜来说,设计自由度^[10]增多了,并且第三片镜也可以补偿由第二片镜的移动带来的像面位移,所以系统的场曲和相对畸变与定焦系统相当。

参考文献:

- [1] Yuan Gen-fu. Application and development of laser processing technology [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture&Industry, 2004, 12 (1): 30 - 33. (in Chinese)
- [2] Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Cheng Yihong. Status and prospect of precision laser machining [J]. Laser Journal, 2000, 21 (5): 1 - 3. (in Chinese)
- [3] Zheng Qiguang. Laser advanced manufacturing technology [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press. ,2002, 1 - 40. (in Chinese)
- [4] Ji Yiqun, Chen Weimin. Optical design of large working area f-theta lens [J]. Acta Optica, 2005, 25 (11): 1539 - 1542. (in Chinese)
- [5] Wang Ziyu. Geometrical optics and optical design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1989: 349 - 351. (in Chinese)
- [6] Benno Hendriks, Stein Kuiper. Through a lens sharply [J]. IEEE Spectrum, 2004, 11: 32 - 36.
- [7] Qing Jieshui. 2-f-theta-design [J]. Applied Optics, 1994, 15 (2): 17 - 20. (in Chinese)
- [8] Tao Zhan. Adjustment and maintenance of the zoom lens [J]. Advanced Television Engineering, 2005, 9: 91 - 93. (in Chinese)
- [9] Wu Huanbao, Wang Zhaoqi, Fu Rulian. Design of a hybrid diffractive/refractive achromatized telecentric f- θ lens system [J]. Acta Photonica Sinica. , 2005, 34 (12): 1818 - 1821. (in Chinese)
- [10] Liu Jianfeng, Long Fumian, Zhang Wei, et. al. Optical design of a flat field unobstructed two-mirror system with wide field of view [J]. Acta Photonica Sinica. , 2005, 34 (9): 1351 - 1354. (in Chinese)

全国第十二届红外加热暨红外医学发展研讨会征文通知

由中国光学学会红外光电器件专业委员会、中国光学光电子行业协会红外分会、中国电子学会量子电子学与光电子学分会、锦州市光学学会、云南省光学学会、中国机械工程学会工业炉分会、中国电工技术学会电热专业委员会、武汉国家红外产品质量监督检验中心联合主办,南京大学光通信工程研究中心、南京丹联科技有限公司承办,《红外技术》编辑部、《工业加热》编辑部协办的全国第十二届红外加热暨红外医学发展研讨会,定于2009年10月在南京市召开。

本届会议主要反映与交流近年来红外加热技术及红外医学领域的新成果和新进展。

一、应征论文范围

1. 红外加热技术在国民经济中地位、作用及发展前景的综述、评论文章;
2. 红外加热元件、红外辐射涂料的新成果、新工艺及相关技术研究;
3. 红外与物质相互作用,红外加热理论与机理的研究;
4. 各种红外加热装置的优化设计与制造及应用实例剖析;
5. 红外加热测试技术、物质的红外光谱及相关技术研究;
6. 红外加热在生物学和医学中的应用等;
7. 红外医学新仪器、新材料、新技术、新成果及国内外发展动向;
8. 红外医学的临床理论研究,临床应用报告及相关的激光、微波、毫米波研究与应用。

二、应征论文作者请在2009年8月30日前将500~800字论文摘要寄到:大连理工大学物理与光电工程学院栾文彦教授收(邮政编码:116023),并请作者注明详细通讯地址、工作单位及职务、职称和邮政编码。

三、经审稿录用的论文摘要集将由《红外技术》编辑部、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社编辑出版。

四、会议筹备组的通信地址:锦州市13号信箱锦州市光学学会(邮政编码:121000),联系人:王永钧,电话:0416-2650160,2135100,传真:0416-2135100, E-mail:lykj88@163.com。

(全国第十二届红外加热暨红外医学发展研讨会筹备组)