

长工作距变焦显微系统物镜设计

张润泽, 陈宇, 张家铭, 李阳, 张健

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 激光内雕机在进行激光内雕时, 经常会存在激光“炸点”不均匀的情况, 需要对其进行放大分析, 从而更好地控制激光束的能量。根据企业激光内雕“炸点”观察需求, 设计了一款长工作距变焦显微物镜。玻璃内部的“炸点”观察范围为 9~32 mm, 系统采用光学变焦方式, 变焦范围为 6~24 mm, 放大倍率为 4[×]~16[×], 变倍比为 4 倍。探测器采用了一款型号为 VA-1MG2 的 1/2 in(1 in=2.54 cm) CCD, 其像元大小为 5.5 μm。利用 Zemax 进行光学系统设计优化, 在截止频率 91 lp/mm 处, 各组态下各视场的 MTF 值均大于 0.4, 在中心视场和 0.7 视场处均接近衍射极限。点列图 RMS 半径也均小于艾里斑半径, 满足长工作距变焦显微系统的各项指标需求。

关键词: 长工作距离; 变焦显微物镜; 光学设计; 激光“炸点”

中图分类号: TB851 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0618003

Design of zoom microscope objective with long working distance

Zhang Runze, Chen Yu, Zhang Jiaming, Li Yang, Zhang Jian

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: When a laser engraving machine carries out laser engraving, sometimes the laser "bursting points" are uneven. It is necessary to amplify and analyze the laser "explosion points" to better control the energy of the laser beam. A zoom microscope objective with long working distance was designed according to the observation requirements of "explosion points". The "explosion points" inside the glass have the viewing range of 9–32 mm. The zoom range of focal length is from 6 mm to 24 mm with optical zoom mechanism. The magnification is 4[×]–16[×], and the zoom ratio is 4. A 1/2-inch CCD model VA-1MG2 was adopted as the detector with pixel size 5.5 μm. The optical system optimization was carried out by using Zemax. The MTF values of all fields are larger than 0.4 at cut-off frequency 91 lp/mm for each configuration. The MTF values for central field and 0.707 field approach to the diffraction limit. The RMS radius of the spot diagram is smaller than the radius of Airy disk. The image quality of the designed system meets the requirements of all technical indicators.

Key words: long working distance; zoom microscope objective; optical design; laser "explosion points"

收稿日期: 2019-02-13; 修订日期: 2019-03-16

基金项目: 吉林省发改委产业创新专项资金(2017C037-1)

作者简介: 张润泽(1995-), 女, 硕士生, 主要从事光学设计和制造技术方面的研究。Email: 893205262@qq.com

通讯作者: 陈宇(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事先进光学系统设计与制造技术方面的研究。Email: 323111501@qq.com

0 引言

激光内雕是用激光内雕机将一定波长的激光打入玻璃内部,令玻璃内部的特定部位发生细微的爆裂形成气泡,从而勾勒出预置形状的一种玻璃加工工艺。这些气泡俗称“炸点”。在激光“炸点”不均匀的情况下,需要对其进行放大观察分析,从而更好地控制激光束的能量。

何湘艳等^[1]研究了基于 Zemax 的简单连续变倍显微物镜,该显微物镜可以在 0.7×~4.5×连续变倍,工作距离 50~100 mm,但其放大倍率较小且物方处于空气中。李晓奇等^[2]研究了长工作距视频显微物镜,其工作距离 150 mm,放大倍率 5×,分辨力 6 μm,但不是变焦系统。马迎军等^[3]研究了连续变焦光学系统的自动像差,其优化系统可以实现 20~300 mm 的连续变焦,但其不是显微系统结构设计。

激光内雕产品的“炸点”位于玻璃内部,并且企业需求观察不同深度的“炸点”,所以现有的显微观察系统并不适用。基于该系统对观察距离和不同纵向深度的探查需求,设计了一款长工作距变焦显微物镜。激光“炸点”经该显微镜物镜放大后由 CCD 接收,并在监视器上显示出来,实现对“炸点”像的进一步放大。

1 设计原理

连续变焦光学系统在设计、加工、装调方面相对于定焦光学系统更加复杂^[4],但其在视场转换过程中具有不丢失目标的优点^[5]。连续变焦镜头是焦距在一定范围内连续变化,其一般都会利用“物像交换原则”,从而保证变焦组在移动的过程中,像面的位置保持稳定且像质良好^[6-9]。按照补偿方法的不同,可将变焦镜头分为光学补偿和机械补偿两种^[10]。光学补偿不需要凸轮机构,但其变倍比一般较小。文中设计的激光内雕“炸点”观测系统的变倍比仅为 4×,因此选择光学补偿方式。

图 1 为光学变焦镜头的工作原理图,光学变焦系统通常由前固定组 A、后固定组 E 以及变焦组 B、C、D 组成。在光学变焦的过程中,变焦组 B、C、D 一起移动^[11]。通过光学系统自动优化设计,既可以利用变焦组之间线性移动的规律达到变倍的目的,又

能在保证像质的基础上使其像面稳定^[12]。因此在变焦的过程中应始终关注 MTF 曲线变化情况,在满足光学系统其他性能指标的前提下,使 MTF 曲线逐步改善至满足成像质量要求。

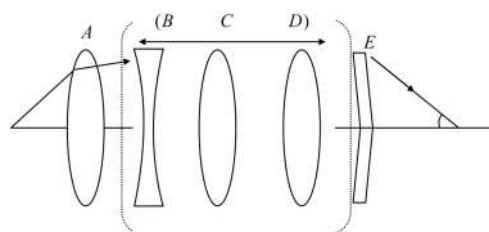


图 1 光学变焦镜头的工作原理

Fig.1 Working principle of optical zoom lens

2 设计过程

根据企业提出的设计指标要求,将长工作距变焦显微系统的设计参数规定如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

Tab.1 Optical design parameters

Design parameters	Indicator requirements
Working distance/mm	10~30
Magnification	4×~16×
Zoom ratio	4×
Waveband/mm	486~656(visible light)
Resolution/μm	<5
Total length/mm	<200
Distortion	<1%

2.1 初始结构选取

初始结构的合理选取有利于光学系统的后续优化设计。根据长工作距变焦显微物镜的光学设计参数需求,在 ZEBASE 镜头库中确定了一款编号为 S_015 的变焦镜头作为该系统的初始结构,其由 12 片透镜组成,变倍比约为 1.11 倍,放大倍率为 53.6×~60.2×,焦距为 2.63~2.647 mm,工作波段为可见光波段。其结构参数如表 2 所示。

表 2 初始结构参数

Tab.2 Initial structural parameters

	Radius	Thickness	Glass
0	Infinity	0.7-1.2-1.7	(1.52; 59.5)
1	Infinity	3.944-3.664-3.322	
2	-7.485	2.505	(1.71; 54.0)
3	-5.286	0.2	
4	65.442	2.254	(1.50; 82.3)
5	-11.916	0.1	0.1
6	14.814	1.503	(1.76; 31.7)
7	9.656	5.411	(1.43; 95.6)
8	-17.133	3.202-4.909-7	
9	17.335	0.751	(1.70; 55.6)
10	7.592	4.809	(1.43; 95.6)
11	-7.592	0.902	(1.62; 60.3)
12	-42.086	4.702-3.006-0.9	
13	6.614	2.555	(1.50; 82.3)
14	-376.781	0.601	(1.72; 29.5)
15	4.149	2.505	(1.71; 54.0)
16	8.117	7.866	
17	-3.716	2.861	(1.71; 54.0)
18	4.582	2.004	(1.73; 28.3)
19	-10.224	0	
20	Infinity	138.632	
21	Infinity		



图 2 初始结构

Fig.2 Initial structure

该系统初始结构的放大倍率较大，而变倍比较小。由于系统的像差平衡能力有限，在逐步增大变倍比的同时需减小放大倍率，使光学系统的像质连续平滑变化。图 3 为第一组态下放大率为 53.6×时的 MTF 曲线图。由于篇幅所限，另外两个组态的 MTF 曲线图在文中并未给出，但各组态下的 MTF 曲线形态与图 3 大致相同。

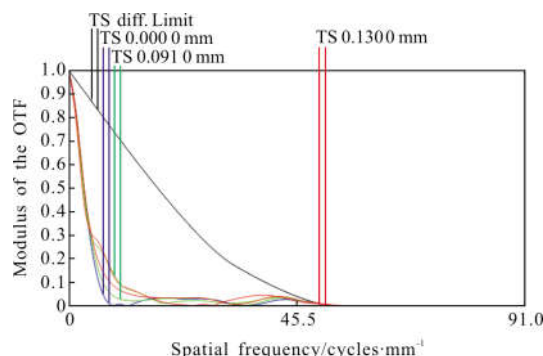


图 3 初始结构第一组态 MTF 曲线

Fig.3 MTF curve of initial structure first configuration

2.2 优化设计

显微系统的像面由型号为 VA-1MG2 的 1/2 in (1 in=2.54 cm) 寸 CCD 接收，像元数为 1 024×1 024，像元大小为 5.5 μm×5.5 μm。根据公式 $N = \frac{1\ 000}{2 \times a}$ (a 为像元尺寸，单位为 μm) 计算可得截止频率约为 91 lp/mm。系统最大视场由采用的 1/2 in CCD 的像面尺寸决定，经计算其值为 4 mm。系统中数值孔径的大小要求直接影响系统放大倍率及 CCD 上图像光照度大小，而这两项参数是相互矛盾的。通过优化设计确定倒置后的物方数值孔径大小为 0.025，可以满足光学系统的各项指标要求。

前固定组最后一个面及变倍组最后一个面设置

图 2 为该结构三个组态的初始结构图，该系统由 12 片透镜组成，其中前两片透镜和其后的双胶合透镜共同组成系统的前固定组。系统的第一个三胶合透镜作为系统的变焦组，第二个三胶合和最后一个双胶合透镜共同组成系统的后固定组。从图 2 可以看出，该初始结构存在两个主要问题：首先，该初始结构是物像常规设计，不利于物像共轭距的控制，所以应将该系统进行物像倒置；其次，该结构在三组态下的筒长未统一，应通过操作数控制使系统筒长满足参数要求。

为多重结构中的距离变量,进行光学变焦。设置 EFFL、PMAG 等操作数,以保证系统焦距、放大倍率等镜头参数满足要求。最后一面位于玻璃内部,即玻璃内“炸点”的观测面。由于“炸点”在玻璃内部的观察范围仅为 0.7~1.7 mm,与 10~30 mm 的指标要求相差较大。优化时,像距需要逐步增大,直至满足参数要求,否则像质将快速劣化。

经初步优化后得到如图 4 所示的系统结构图。从图 4 可以看出,该系统结构中依然存在两组三胶合结构,在后续设计时,将其拆分成一单透镜和一双胶合物镜的组合形式,不但降低了定心难度,而且增加了一个半径和一个空气间隔作为变量,有利于改善系统像质。

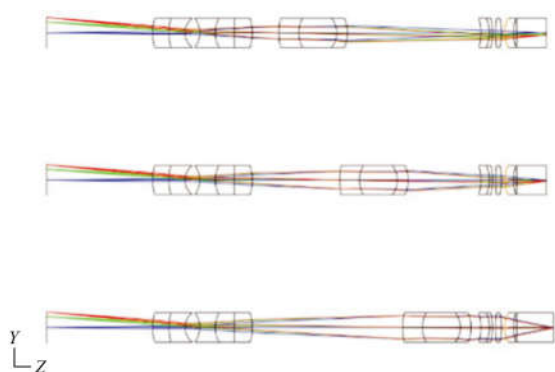


图 4 初步优化后结构示意图

Fig.4 Structural schematic diagram after initial optimization

初步优化后的系统像质已有较大程度提高,但尚未达到设计要求,可以选择以均方根半径作为像质优化标准,使系统各视场点列图尽可能快速收敛,待后期像质得到进一步改善后再更改为波像差的像质优化标准,可对成像光学系统像质优化起到事半功倍的效果。

2.3 设计结果及像质评价

优化后的系统结构如图 5 所示,在进行三组态下的系统筒长约束时,两组三胶合透镜拆分后,系统最后一个双胶合透镜不承担系统光焦度,因此在逐步优化的过程中选择将其去除,简化了系统结构,其结果对像质未造成影响。优化后的系统由 10 片透镜组成,总长为 180 mm(即物面到系统后固定组最后一个面之间的总长度)。图 5 中第一组态的放大倍率为 16 \times ,焦距为 6 mm,实际工作距为 32 mm;第二组态的放大倍率为 8 \times ,焦距为 12 mm,实际工作距为

18 mm;第三组态的放大倍率为 4 \times ,焦距为 24 mm,实际工作距为 9 mm。故该结构中“炸点”在玻璃内部的观测区间为 9~32 mm (即像点在平行平板内部的移动范围),充分满足 10~30 mm 的设计参数要求。

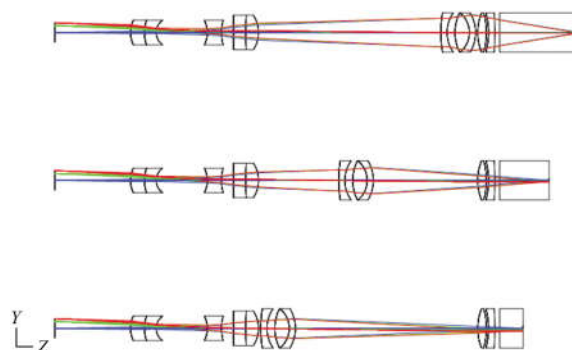


图 5 最终优化后结构示意图

Fig.5 Structural schematic diagram after final optimization

变焦显微镜在各焦距下的 MTF 曲线如图 6~图 8 所示,在镜头截止频率为 91 lp/mm 处,系统短焦、中焦和长焦结构所对应各视场的 MTF 平均值分别约为 0.8、0.7 和 0.4。由于各组态下的焦距是变化

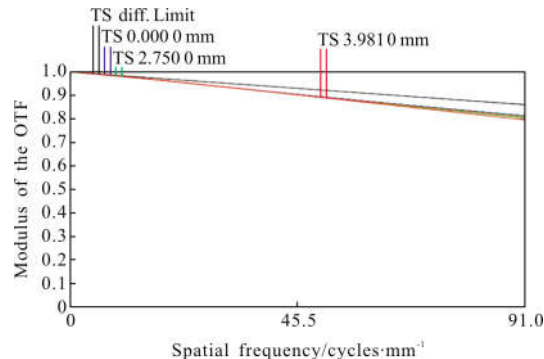


图 6 焦距为 6 mm 的系统 MTF 曲线

Fig.6 MTF curve of system with focal length 6 mm

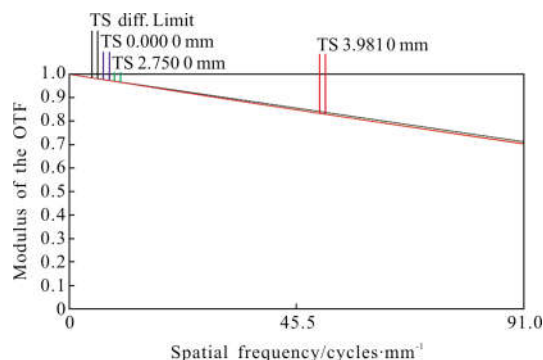


图 7 焦距为 12 mm 的系统 MTF 曲线

Fig.7 MTF curve of system with focal length 12 mm

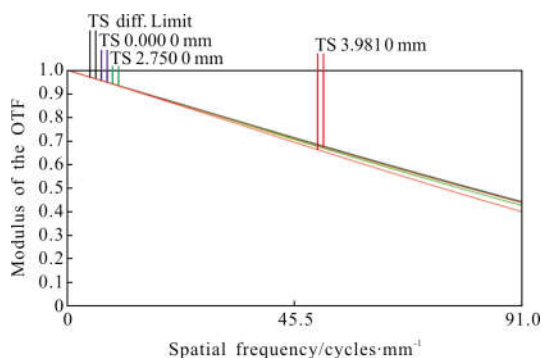


图 8 焦距为 24 mm 的系统 MTF 曲线

Fig.8 MTF curve of system with focal length 24 mm

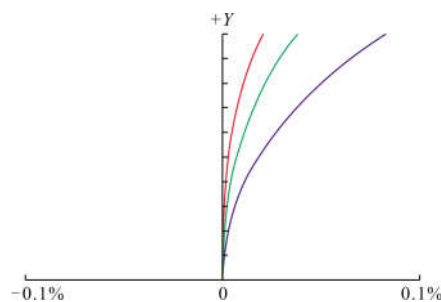


图 11 焦距为 24 mm 的系统畸变曲线

Fig.11 Distortion curve of system with focal length 24 mm

的,所以倒置后的像方数值孔径不同,第一组态、第二组态和第三组态的数值孔径分别为 0.245、0.12 和 0.061。由分辨率公式 $\sigma = \frac{0.5\lambda}{NA}$ 计算可得,第一组态下的分辨率为 1.2 μm ,第二组态下的分辨率为 2.45 μm ,第三组态下的分辨率为 4.9 μm ,均满足分辨率的设计参数要求。在系统第三组态向第一组态变焦的过程中,系统的放大倍率逐渐增大,各焦距对应的各视场下的 MTF 值接近衍射极限。

系统各组态下畸变曲线如图 9~11 所示,其

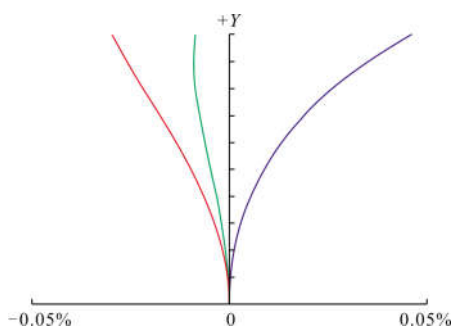


图 9 焦距为 6 mm 的系统畸变曲线

Fig.9 Distortion curve of system with focal length 6 mm

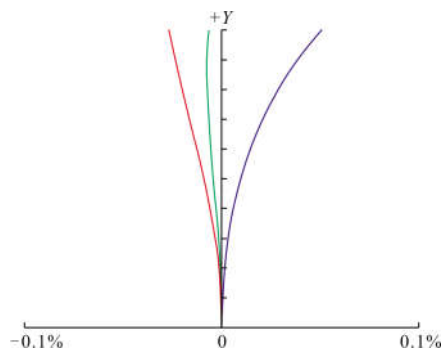


图 10 焦距为 12 mm 的系统畸变曲线

Fig.10 Distortion curve of system with focal length 12 mm

中第一组态下最大畸变为 0.05%,第二组态下最大畸变为 0.1%,第三组态下最大畸变为 0.1%,三组态下最大畸变值均远小于 1%,符合企业要求。

3 公差分析

因为光学系统的设计需要满足实际的加工技术要求,所以应对其进行公差分析。经过 MTF 值公差敏感度分析,得到镜头各表面的曲率半径公差为 $\pm 0.07 \text{ mm}$;各表面的厚度公差为 $\pm 0.03 \text{ mm}$;各表面的偏心公差为 $\pm 0.05 \text{ mm}$;各表面的倾斜公差为 $\pm 0.1^\circ$;元件的偏心公差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$;元件的倾斜公差为 $\pm 0.1^\circ$ 。对 200 组镜头数据进行了蒙特卡洛分析,得到了合理的设计结果,满足现有的实际加工水平。

4 结论

文中针对企业激光内雕产品“炸点”的观测需求,设计了一款长工作距变焦显微系统,其工作距离为 9~32 mm,变焦范围为 6~24 mm,放大倍率为 $4\times\sim 16\times$,变倍比为 4 倍,系统总长为 180 mm。该系统的工作距离较长,设计简单,并且所有透镜均为球面设计,在降低成本的同时更便于加工及装调。该变焦显微系统在各组态下截止频率 (91 lp/mm) 处的 MTF 值均大于 0.4,成像质量较好,系统要求的各项指标均已实现。不同激光内雕产品具有不同的“炸点”观测深度,需要光学系统具有长工作距以及变焦的特点。其设计难点在于:如何在保证像质的前提下逐步扩大工作距离,以满足系统的设计参数要求。文中也可以对其他长工作距变焦显微系统设计提供一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Mang Yingjun, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Aberrations automatic design of continuous zoom optical systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0822003. (in Chinese)
马迎军, 张葆, 洪永丰. 连续变焦光学系统的像差自动设计[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0822003.
- [2] Li Xiaoqi, Xiang Yang, Zhang Haixin, et al. The design of video microscope objectives with long working distance [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41 (12): 24–27. (in Chinese)
李晓奇, 向阳, 张海馨, 等. 长工作距视频显微镜物镜设计[J]. 光电工程, 2014, 41(12): 24–27.
- [3] He Xiangyan, Chen Yinghua, Liao Wenzhe, et al. of monocular zoom microscope objective in succinct structure based on Zemax [J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(5): 41–45. (in Chinese)
何湘艳, 陈莹花, 廖文哲, 等. 基于 Zemax 的简单连续变倍显微物镜设计[J]. 光学仪器, 2013, 35(5): 41–45.
- [4] Miao Jianyu, Zhang Liping, Zhai Yan, et al. Structural realization of small zoom camera [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 169–174. (in Chinese)
苗健宇, 张立平, 翟岩, 等. 小型连续变焦相机的结构实现[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 169–174.
- [5] Jiang Lun, Huang Wei. Design of long focal length large zoom ratio MWIR zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1867–1871. (in Chinese)
江伦, 黄玮. 长焦距大变倍比中波红外变焦距系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1867–1871.
- [6] Chang Qun. Optical Design Anthology [M]. Beijing: Science Press, 1976: 16–17, 27–29, 155–165. (in Chinese)
常群. 光学设计文案 [M]. 北京: 科学出版社, 1976: 16–17, 27–29, 155–165.
- [7] Tian Tiejun, Wang Hong. Optical zoom system with long focal length and large aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2369–2374. (in Chinese)
田铁印, 王红. 长焦距大口径连续变焦光学系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2369–2374.
- [8] Hong Yongfeng, Zhang Xueming, Cheng Xin, et al. Miniaturization design of aerial zoom lenses [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(3): 61–65. (in Chinese)
洪永丰, 张学明, 程欣. 航空变焦镜头的小型化设计[J]. 光电工程, 2010, 37(3): 61–65.
- [9] Wang Hong, Tian Tiejun. Miniature design of 5 × zoom optical system [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 315–319. (in Chinese)
王红, 田铁印. 5 倍变焦距光学系统小型化设计 [J]. 中国光学, 2014, 7(2): 315–319.
- [10] Chen Weining, Yang Hongtao, Liu Wei, et al. Optimization design method of cam curve for zoom lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1535–1539. (in Chinese)
陈卫宁, 杨洪涛, 刘伟, 等. 变焦凸轮曲线的优化设计方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1535–1539.
- [11] Wang Wensheng. Contemporary Optical System Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 217–218, 222–223. (in Chinese)
王文生. 现代光学系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 217–218, 222–223.
- [12] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: Chinese Machine Press, 2006: 152–153. (in Chinese)
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 152–153.