

doi: 10.3788/gzxb20144306.0622002

激光干扰扩束系统光机结构设计

何秉高^{1,2}, 安志勇¹, 曹秒¹, 曹维国¹

(1 长春理工大学, 长春 130022)

(2 长春大学, 长春 130022)

摘 要:针对常规红外干扰技术存在的能量无法集中、隐蔽性差且无法进行变倍切换等实际问题,提出一种离轴双反射式激光干扰扩束系统的设计方案,并对离轴双反射镜组,转向平面反射镜及支撑固定机构等主要组成部分进行了光机结构设计.为实现扩束比的变倍切换功能,采用新型离轴副镜组件设计;为减小镜面变形,离轴主副镜组均采用微应力设计.分析结果表明,在 $-20\sim+60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,主副镜组轴向最大位移小于等于 0.01 mm ,主副镜组的反射镜面形误差小于等于 71.9 nm ;系统一阶固有频率 108.3 Hz ,其支撑结构应力响应远小于材料的屈服极限.实际测试发现,系统可实现 $1:10.02(19.92, 25.02)$ 扩束比,满足设计技术指标要求.分析及试验结果表明,系统光机结构设计合理,完全满足实际应用要求.

关键词:光学设计;变倍扩束;离轴反射;光机结构;激光干扰;分析;测试

中图分类号:TH703;TN976

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)06-0622002-7

Opto-mechanical Design of Beam Expander on Laser Jamming System

HE Bing-gao^{1,2}, AN Zhi-yong¹, CAO Miao¹, CAO Wei-guo¹

(1 Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Changchun University, Changchun 130022, China)

Abstract: In view of the actual problems existed in the routine infrared jamming technology, such as failure to meet required energy concentration, poor concealment and unable to be realized zoom, a design scheme regarding a new off-axis double mirror type of laser jamming applied at beam expander was put forward. The optical-mechanical structures of such key components as the battery of off-axis double mirrors, the steering mirror and supporting and fixing mechanisms, etc. were designed and analyzed. A new-style structural design of off-axis was adopted, realizing zoom function of the expansion ratio; the design of micro-stress was adopted for components of both the main and secondary mirrors and the components of steering mirror. Analysis results show that the first order natural frequency is 108.3 Hz , and stress responses of the structure is also smaller than yield limit of the material; in the temperature range of -20°C to $+60^{\circ}\text{C}$, the maximum displacement of the main and secondary mirrors is below or equal to 0.01 mm and the surface accuracy is below to 71.9 nm . After the actual detection, the beam expanding ratio obtained is $1:10.02(19.92, 25.02)$, meeting the requirement of designed technical index. Analysis and experimental results demonstrate that designs of the optical and mechanical structure are effective that can meet the requirements of actual applications.

Key words: Optical design; Zoom expansion; Off-axis reflection; Optomechanics; Laser jamming; Analysis; Testing

OCIS Codes: 220.4880; 220.4840; 140.3070; 140.6810; 220.4298

0 引言

随着光电传感技术的发展,红外制导武器的作用

距离不断提高,使用波段也越来越宽,使得国内外部队大多采用的红外诱饵、烟幕干扰、红外伪装等措施的干扰效果大幅度降低^[1].面对此种情况,各国加强了对新

基金项目:吉林省科技厅重大项目(No. 20106010)资助

第一作者:何秉高(1983-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为光电测控技术与仪器. Email:asdf12383@163.com

导师(通讯作者):安志勇(1943-),男,教授,博导,主要研究方向为光电测控技术与仪器. Email:an_zhiyong@126.com

收稿日期:2013-11-14;录用日期:2013-12-20

<http://www.photon.ac.cn>

型红外干扰技术及设备的研究. 比较有代表性的是美国诺斯洛普公司和桑德公司所研制的 MIRTS 型红外干扰机、AN/ALQ 系列红外干扰系统, 澳大利亚 MODIR 调制红外干扰机系统及法国军方研制的 EIREL 红外干扰机系统等^[2-3]. 但是由于红外干扰机发射广角干扰信号, 导致输出能量分散, 不利于增强信号; 尤其对大型目标而言, 红外干扰机就难以满足干扰要求.

美国在 20 世纪 90 年代率先进行了定向红外干扰技术的研究. 该技术能发射较高能量的窄波信号, 且只在工作时辐射能量, 其优势在于提高了信号能量和反应速度, 增加了干扰系统的隐蔽性^[4]. 英国 BAE 公司研制了先进威胁红外定向干扰系统, 美国诺斯洛普公司的 AAQ-24 系统, 法德两国 Diebl、EADS 及 Thale 三家公司联合研制了 FLASH 定向干扰验证机等^[5-6]. 国内的研制起步较晚, 主要集中在中科院长春光机所, 长春理工大学等单位. 但由于研制系统需采用折射式扩束装置^[7-12], 结构较为复杂, 难以达到大口径、无色差、高能量输出的目标; 且难以解决红外激光投射到远距离目标上, 由于光束发散的影响, 仅有部分能量发挥作用的问题.

本文设计了一种切换变倍离轴双反射式扩束系统, 达到了大口径、无色差、99% 以上能量反射输出的目的, 并解决了投射到远距离目标时能量使用率低的问题; 具有干扰效果好、体积小、光路短、结构紧凑等优点.

1 系统设计及技术指标

1.1 系统组成及设计指标

设计的激光干扰扩束系统由中红外激光器、双反扩束镜、三面反射镜(转折光路并使结构紧凑)组成, 如图 1. 其中中红外激光器产生波长为 $3.2 \sim 4.1 \mu\text{m}$ 的激光, 三面反射镜引导的激光束通过机载光电对抗稳定平台进入干扰扩束系统中, 反射式扩束副镜顺时针旋转切换镜片, 再通过主镜可将激光器发射的束腰为 4 mm 的光束扩成直径为 40 mm、80 mm、100 mm 的宽光束并输出.

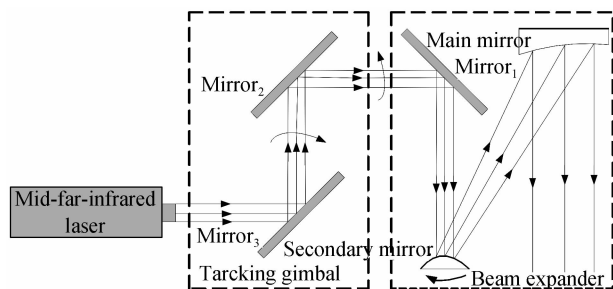


图 1 光电跟踪平台系统构成

Fig. 1 Compositions of Opto-electronic tracking platform
光机系统关键技术参量如表 1.

表 1 系统技术指标

Table 1 Technical index

Serial number	Design project	Parameter
1	Beam expanding ratio	1 : 10(20,25)
2	Beam divergence	$\leq 0.5 \text{ mrad}$
3	Jamming distance	$\geq 20 \text{ km}$
4	Maximum deformation(D_{max})	$\leq 0.01 \text{ mm}$

1.2 系统设计

由于所设计的干扰扩束系统要求具有紧凑性、小型化、轻量化的结构要求, 为减小整体机构对光学系统的影响, 系统的干扰系统与中红外激光器采用分体结构, 分别安装固定在总体系统的二维转台及支撑座上, 通过软连接各机构进行对接; 同时为减小干扰系统的整体结构尺寸, 在目标光源与干扰系统的光路上安装有转向平面反射镜组, 保证了使用状态的稳定性, 既控制其整体准确度, 又便于运输与装调.

2 系统设计方案

2.1 光学系统设计

为了满足视场光谱范围内波差、扩束比以及大功率激光器的传输要求, 避免共焦引起的能量过度集中的问题, 同时也避免系统机械结构尺寸过大, 光学系统采用 Ritchey-Chretien(R-C)式离轴反射系统. 切换变倍的三个副镜为球面, 曲率半径分别为 25.052 mm、31.251 mm、62.473 mm, 离轴量分别为 3.5 mm、5 mm、6.5 mm; 主镜为椭球面, 曲率半径为 625.052 mm, 非球面系数(conic 系数)为 -0.902 ; 二者间距分别为 299.562、285.145 和 275.347 mm. 光学系统设计参量见表 2, 系统光路图见图 2, 设计结果为系统无焦像空间点列图, 系统传递函数均达到衍射极限, 如图 3.

表 2 光学系统参量

Table 2 Optical system parameter

Name	Radius/ mm	Distance/ mm	Conic	Off-axis/ mm
Primary mirror	625.052		-0.902	
Secondary mirror ₁	25.052	299.562		3.5
Secondary mirror ₂	31.251	285.145		5
Secondary mirror ₃	62.473	275.347		6.5

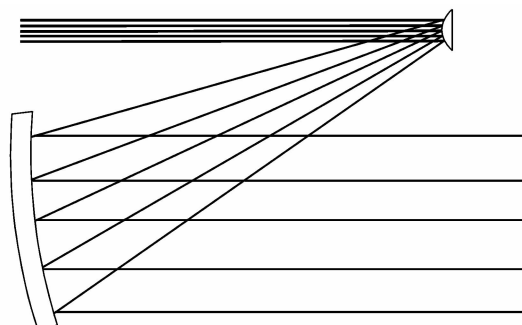


图 2 扩束光学系统

Fig. 2 Optical system of beam expander

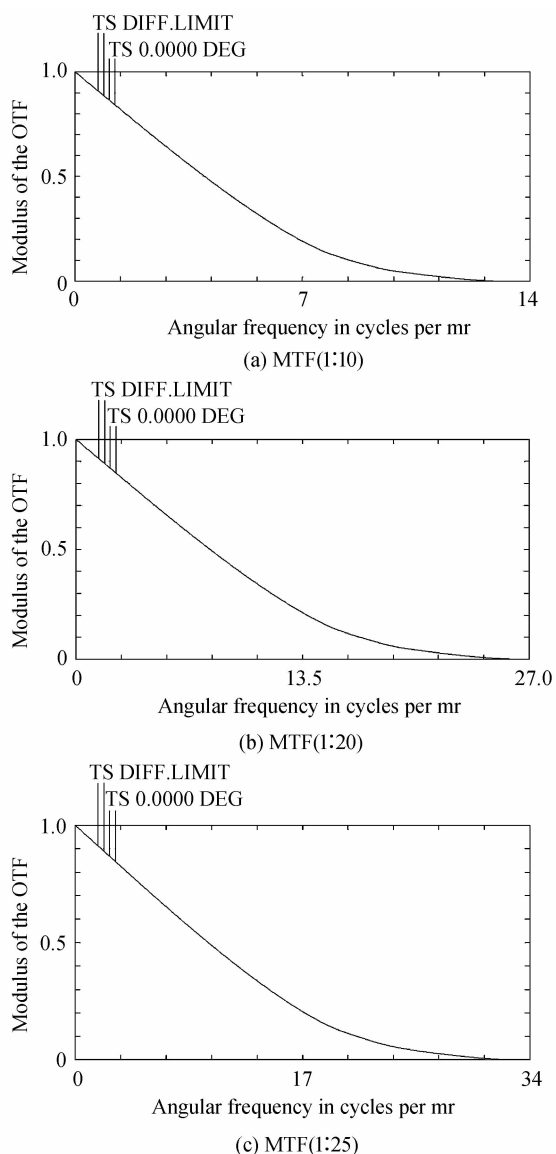


图3 光学系统传递函数
Fig. 3 MTF of optical system

2.2 整体机械结构

系统整体机械结构如图4, 1为步进电机, 2为离轴副镜组件, 4为离轴主镜组件, 3、5、7为平面反射镜组件, 6为下端转接机构, 8为扩束装置安装轴。

2.2.1 离轴主反射镜结构设计及分析

由于主反射镜形状为离轴椭球型且尺寸较大, 若使用压圈法不能实现螺纹压圈与镜片的紧密接触; 使用滚边法易产生塑性变形; 使用胶接法, 由于反射镜尺寸原因, 其牢固程度难以达到要求; 使用挠性安装法, 由于镜片形状导致其质量分布不均匀, 易产生镜面倾斜且在运动时受到的偏心冲击较大; 因此在设计离轴主反射镜支撑固定结构时采用挡块法代替上述方法, 以减小反射镜变形。反射镜及固定支撑结构如图5。镜片通过配有预紧螺钉的固定挡块压靠在反射镜通光孔径外的圆环平面上约束该反射镜, 再在镜框侧面注入橡胶剂以固紧反射镜, 方位、俯仰角度由长条孔实现微

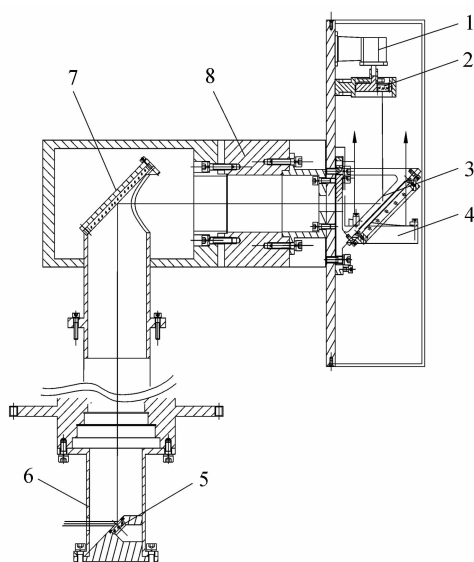


图4 系统整体结构图
Fig. 4 Integral structure of the system

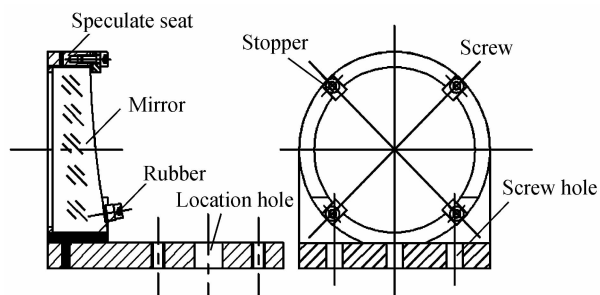
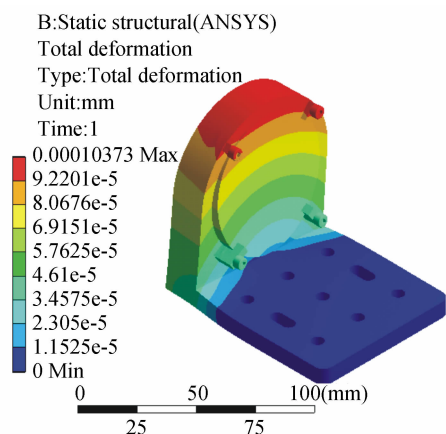


图5 离轴主反射镜
Fig. 5 Structure of the main off-axis mirror

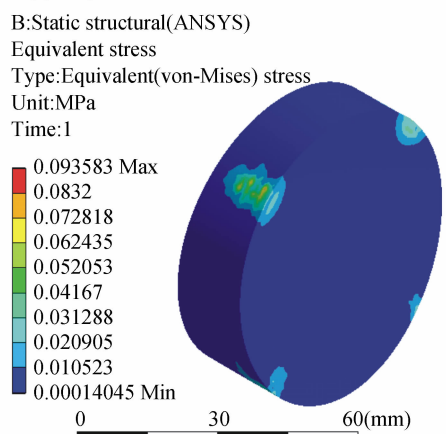
调节。镜座和固定挡块材料选用2A12铝合金, 弹性垫选用优质橡胶; 由于激光器的工作波长为中红外波段(3.2~4.1 μm), 因此在镜面镀金膜以提高对该波段的反射率。同时, 为避免透射部分的光能积聚在镜体中而导致镜体局部温度过高损伤镜体, 应选择对该波段具有较高透过率的材料, 故本组件的镜片采用 CaF_2 表面镀金膜并加镀介质膜的结构, 以减小镜片吸收的热量, 并提高镜面反射率, 可使主镜反射率达到98.8%; 固定及调整螺钉材料选用45#钢。

为了保证主反射镜结构设计的合理性及光轴的一致性, 将其导入有限元分析软件中进行静力学分析。为了保证分析结果的准确性, 先采用Hypermesh软件的高准确度HEX8单元进行网格划分, 共划分254 838个节点, 71 067个单元; 之后按条件输入材料, 并添加约束, 最后再进行组件及镜片的有限元分析, 结果如图6。

分析图6可知, 最大位移为 1.04×10^{-4} mm, 小于最大轴向变形量0.01 mm; 最大应力为19.966 MPa, 分别小于镜片及镜座材料的抗拉强度极限60 MPa和425 MPa; 接触面的最大应力为0.0935 MPa, 也小于材料设计强度; 符合设计要求。



(a) Displacement distribution of structure



(b) Pressure distribution of interfaces

图6 离轴主反射镜有限元分析结果

Fig. 6 Finite element analysis results of the main off-axis mirror

2.2.2 离轴副反射镜结构设计及分析

为了改善镜片的应力分布情况和解决镜片与镜座材料热膨胀系数不匹配的问题,在设计离轴副反射镜组件时采用胶接法,以减小反射镜变形.组件的镜片采用 CaF_2 表面镀金膜并加镀介质膜的结构,以使副镜反射率达到 98.8%.在设计固定支撑结构时,将三个镜片分别固定安装在法兰盘镜筒中,并使其安装位置与法兰盘中心的径向与轴向距离不同,以满足主镜与副镜组间离轴量及间距变化的光学系统设计的要求;联轴器采用支撑架形式,既可以保证法兰盘旋转轴系与步进电机驱动轴系的连接安装准确度,又起到了支撑镜座以减小结构变形的作用,从而保证了副镜组件旋转切换的定位准确度,结构设计如图 7.在设计本组件运动控制机构时,采用基于 FPGA 与角度传感器相结合的闭环控制系统进行角度精确定位,使步进电机驱动法兰盘旋转,每旋转 120° ,切换一次镜片,从而实现扩展变倍功能.

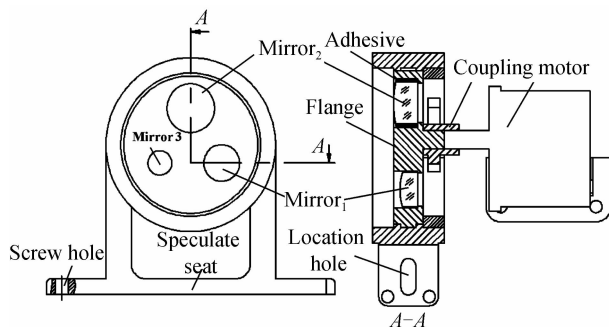
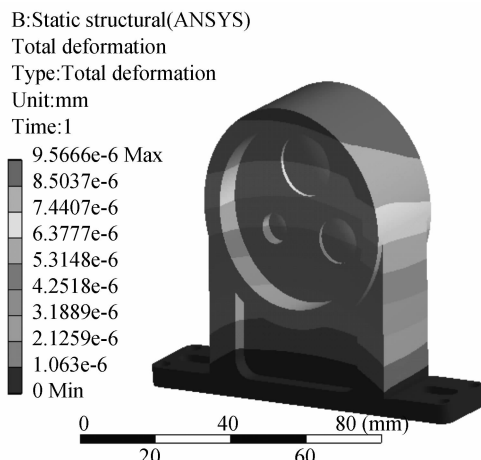


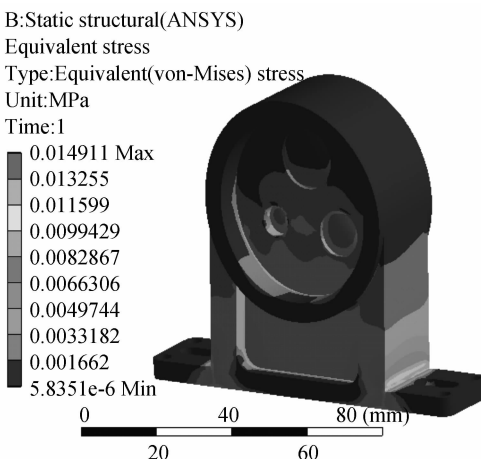
图7 离轴副反射镜

Fig. 7 Structure of the secondary off-axis mirror

为保证结构设计的对称性及光轴一致性,该组件先采用 Hypermesh 软件的高准确度 HEX8 单元进行网格划分,再将其导入有限元软件中进行静力学分析(如图 8).由分析结果可知,最大位移为 9.57×10^{-6} mm,小于最大轴向变形量 0.01 mm;最大应力为 0.015 MPa,远小于材料的抗拉强度极限 425 MPa,符合设计要求.



(a) Displacement distribution of structure



(b) Pressure distribution of interfaces

图8 离轴副反射镜有限元分析结果

Fig. 8 Finite element analysis results of the secondary off-axis mirror

2.2.3 转向平面反射镜结构设计及分析

考虑到系统具有光路长、光学口径大的特点,故采用转向平面反射镜来缩短光路,使整体结构紧凑.由于所设计的平面反射镜安装在扩束装置固定底板的几何中心位置处,并随装置一起进行跟踪运动,且需满足副镜组件径向高度的变化要求,其转向平面镜组件结构设计如图9.镜片通过配有橡胶槽的镜架固定于镜座上,镜框侧面填充有橡胶垫,方位、俯仰角度由各自的调整螺钉实现微调节.镜座选用2A12铝合金,以减轻重量,弹性垫选用优质橡胶,固定与调整螺钉等材料选用45#钢.

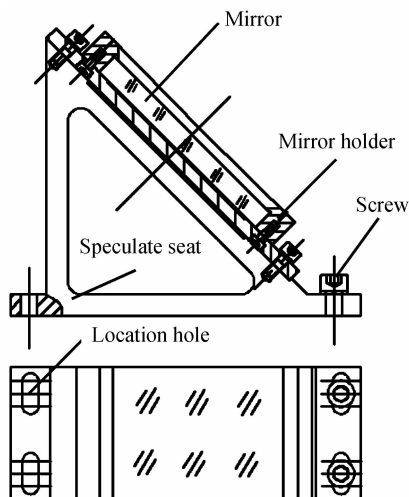


图9 转向平面反射镜

Fig.9 Structure of steering mirror

由有限元分析结果可知,组件最大位移为 2.46×10^{-4} mm,小于最大轴向变形量0.01 mm;最大应力为3.02 MPa,远小于材料的抗拉强度极限425 MPa,符合设计要求.

3 光机性能分析

3.1 主副镜组结构-热学耦合分析

主副镜组在进行结构-热学耦合分析时需满足:1)结构受热发生变形,导致热流入射角变化使得温度场改变;2)结构发生小变形和小转动,不考虑几何非线性影响;3)在所考虑的温度变化范围内,结构材料性质不发生变化^[13-15].

主副镜组的镜片处在力场和温度场的共同作用下,按照弹性力学结构分析方法,建立镜片在力载荷和因温度场变化引起的载荷共同作用下应力与变形的有限元方程.根据叠加原理求解该方程,通过式(1)可求出外力与温度共同作用下的位移矢量 a ,结果见表3.

$$M\ddot{a} + D\dot{a} + Ka = P + P_T \quad (1)$$

式中, M 为结构质量矩阵, D 为结构阻尼矩阵, K 为结构刚度矩阵, P 为机械载荷, P_T 为温度变化引起的载荷.

表3 镜组轴向变形量分析

Table 3 Analysis of surface deformation

Temperature/ (°C)/ $T_s=22$ C	Maximum deformation $D_{max}/\mu\text{m}$	
	Components of main mirror	Components of secondary mirror
-20	-9.95	-3.18
-10	-7.71	-2.42
0	-5.28	-1.66
10	-2.85	-0.91
20	-0.43	-0.12
30	4.42	0.64
40	6.85	1.44
50	9.27	2.24
60	9.75	3.04

在受到重力、夹持力及均匀升温 $\Delta T=40$ °C的情况下,计算表面变形量的均方根值(Root Mean Square, RMS)及PV值作为其面形准确度评价标准,其计算结果见表4.

表4 镜片表面变形量数据分析

Table 4 Analysis of surface deformation

$\Delta T=40$ °C	RMS/nm	PV/nm
Main mirror	41.9	130.2
Secondary mirror	17.9	55.5

由表3、4中的数据可知,在 $-20 \sim +60$ °C温度范围内,镜组的轴向变形量均小于0.01 mm;温度升高40°C,RMS小于71.9 nm;符合设计指标要求.

3.2 系统模态分析

由于仪器的主要组成即离轴主、副镜,转向平面镜、支撑机构及转接机构由硬连接连接.其整体属于单一刚性结构,故可对扩束系统进行整体模态分析.其前三阶模态分析结果如表5.

表5 模态分析结果

Table 5 Modal analysis results

Order	Natural frequency/Hz	Vibration mode
1	108.3	Move vertical to the direction of optical axis
2	144.5	Move horizontal to the direction of optical axis
3	167.8	Rotate vertical to the direction of optical axis

由于扩束系统在转动力矩的作用下,结构最大位移分布在未安装镜座的对称支撑底板边缘部分,将对系统的光机特性产生影响,可通过施加配重的方式使其达到静力平衡状态,以减小振动对系统的影响.

4 扩束比测试

测试时,将氦氖激光器打开,发射激光;同时打开工控机上的图像采集程序,通过CCD摄像机分别采集到主副镜上的光斑图像并记录下来(如图10).然后,

利用 Zernike 算子进行边缘提取,再用拟合法进行中心定位^[18-19],以 Zernike 矩模值的相关度作为配准的相似性度量.在每点求取图像的 N 个 Zernike 矩模值与模板图像的 N 个 Zernike 矩模值的相关度,之后遍历整幅图像,得到相关度曲面.再搜索相关度曲面峰值,得到配准点,最后使用最小二乘法在峰值处拟合出相关度曲面,求得拟合曲面的最大值,通过式(2)得到亚像素配准位置,由此计算出激光光束投射到副镜上的光斑直径 d_1 和主镜上的光斑直径 d_2 ,由式(3)即可得到整形扩束系统的扩束比 δ ,其测量结果见表 6~8.

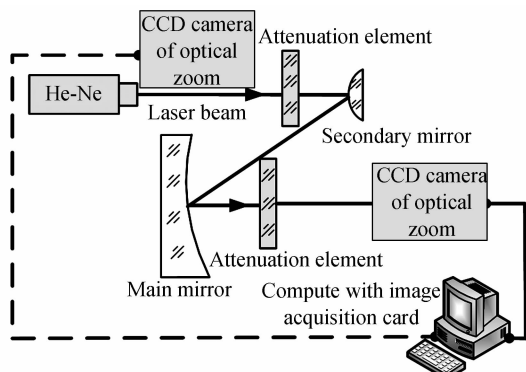


图 10 分析测试示意图

Fig. 10 Schematic diagram of analysis and testing

表 6 扩束比测试数据 (1 : 10)

Table 6 Test data of beam expanding ratio (1 : 10)

Testing times	d_1 /mm	d_2 /mm	δ
1	6.07	60.42	9.954
2	6.05	60.82	10.053
3	6.06	60.25	9.942
4	6.03	60.7	10.066
5	6.02	60.6	10.066

表 7 扩束比测试数据 (1 : 20)

Table 7 Test data of beam expanding ratio (1 : 20)

Testing times	d_1 /mm	d_2 /mm	δ
1	6.09	120.93	19.857
2	6.04	120.51	19.952
3	6.09	121.35	19.926
4	6.03	120.8	20.033
5	6.07	120.42	19.839

表 8 扩束比测试数据 (1 : 25)

Table 8 Test data of beam expanding ratio (1 : 25)

Testing times	d_1 /mm	d_2 /mm	δ
1	6.04	150.82	24.970
2	6.08	152.7	25.115
3	6.01	150.8	25.092
4	6.02	150.7	25.033
5	6.05	150.6	24.893

$$A(x, y) =$$

$$\sum_N \frac{(|Z_p(i)| - |\bar{Z}_p|)(|Z_q(i)| - |\bar{Z}_q|)}{\sqrt{\sum_N (|Z_p(i)| - |\bar{Z}_p|)^2 (|Z_q(i)| - |\bar{Z}_q|)^2}} \quad (2)$$

式中 $A(x, y)$ 表示点 (x, y) 子图像与模板图像的 Zernike 矩互相关度, $|Z_p(i)|$ 为子图的第 i 个 Zernike 矩模值, $|Z_q(i)|$ 为模板的第 i 个 Zernike 矩模值, $|\bar{Z}_p|$ 、 $|\bar{Z}_q|$ 分别表示 N 个矩模值的均值.

$$\delta = \frac{d_2}{d_1} \quad (3)$$

由测试结果的平均值可知,整形扩束系统的扩束比分别为为 1 : 10.02(19.92, 25.02), 满足技术指标要求.

5 结论

本文设计出由离轴主副镜组、平面反射镜组和支撑固定机构组成的切换变倍中红外激光干扰扩束系统.该光机系统具有紧凑性、小型化、轻量化的特点.根据设计指标要求,分别对其主要组成即离轴主、副镜组,平面反射镜等光机结构进行了设计及分析.经实际测试所设计的系统扩束比为 1 : 10.02、1 : 19.92、1 : 25.02, 满足设计指标要求.

参考文献

- [1] YI Ming, WANG Xiao, WANG Long. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 601-607.
易明, 王晓, 王龙. 美军光电对抗技术装备现状与发展趋势初探[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 601-607.
- [2] TITERTON D H. A review of the development of optical countermeasures[J]. *Processing SPIE, Technologies for Optical Countermeasures*, 2004, **5615**(1): 117-122.
- [3] LIU Zhi-chun, SUN Yu-ming, SU Zhen, et al. Development of the foreign laser interference Technology [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, **29**(7): 21-24.
刘志春, 孙玉铭, 苏震, 等. 国外激光干扰技术的发展[J]. *舰船电子工程*, 2009, **29**(7): 21-24.
- [4] LI Hui, LI Yan, LIU Bing-feng, et al. Status, Development and key technique analysis of laser jamming technology[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 51-55.
李慧, 李岩, 刘冰, 等. 激光干扰技术现状与发展及关键技术分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(8): 51-55.
- [5] ZHANG Hong-yan, LI Yan-jun, ZHANG Ke, et al. Current situation and development trend of the laser anti-jamming technology[J]. *Laser and Infrared*, 2007, **37**(7): 14-17.
张鸿雁, 李言俊, 张科, 等. 激光干扰技术的现状与发展趋势[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(7): 14-17.
- [6] GERHARDS M. High energy and narrow bandwidth mid IR nanosecond laser system[J]. *Optics Communications*, 2004, **241**(4): 493-497.
- [7] JIA Yong, GAO Yun-guo. A switch zoom design for reflective laser beam expander[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 2001-2008.

- 贾勇,高云国. 反射式激光扩束器的切换变倍技术[J]. 光学学报, 2012, **32**(10): 2001-2008.
- [8] WANG Fu-guo, WANG Zhi, MING Ming, *et al.* Opto-mechanical structure design, alignment and test of prime focus optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 21-25.
王富国,王志,明名,等. 主焦点式光学系统的光机结构与装调检测[J]. 光子学报, 2012, **41**(1): 21-25.
- [9] XU Hong, GUAN Ying-jun. Structural design of 1m diameter space mirror component of space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(6): 1488-1495.
徐宏,关英俊. 空间相机 1m 孔径反射镜组件结构设计[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(6): 1488-1495.
- [10] SMITH V K, MANSFIELD C. Laurel clayton valuing a homeland security policy: Countermeasures for the threats from shoulder mounted missiles [J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 2009, **38**(3): 215-243.
- [11] HAO Pei-ming, YUAN Li-yin, LI Wei-wei, *et al.* Design of optical system for ϕ_0 300 laser beam expander [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 850-853.
郝沛明,袁立银,李玮玮,等. Φ_0 300 激光扩束器光学系统设计[J]. 光子学报, 2006, **35**(6): 850-853.
- [12] SUN Xiang-yang, ZHANG Guo-yu, WANG Da-yi, *et al.* Opto-mechanical design of large-scale and high precision star simulator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(9): 2121-2126.
孙向阳,张国玉,王大轶,等. 大尺寸高精度星模拟器光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2011, **32**(9): 2121-2126.
- [13] XU Jie, ZHAO Shang-hong, HOU Rui, *et al.* Laser jamming technique research based on combined fiber [J]. *Laser Optics and Laser Technology*, 2008, **41**(4): 486-494.
- [14] LI Zhi-lai, XU Dong-lin, ZHANG Xue-jun. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2548-2490.
李志来,薛栋林,张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(12): 2485-2490.
- [15] WANG Fu-guo. Study on the influence of temperature and support style to the 1. 2m SiC primary mirror surface figure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 932-934.
王富国. 温度和支撑方式对 1. 2m SiC 主镜面形的影响分析[J]. 光子学报, 2011, **40**(6): 932-934.
- [16] GUO Yong-xiang, LI Ying-cai, LIANG Tian-mei, *et al.* Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide held of view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680-2683.
郭永祥,李英才,梁天梅,等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2680-2683.
- [17] ZOU Gang-yi, FAN Xue-wu. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 605-609.
邹刚毅,樊学武. 离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂光分析[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 605-609.
- [18] ZHANG Pei-lu, WANG Jian-jun. Research on laser simulator for an optoelectronic confrontation HWIL test system [J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, **6**(6): 429-431.
- [19] YIN Cheng-long, ZHANG Xu-ming, XU Kan. A fast imageregistration method based on Zernike moments [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(11): 82-87.
尹程龙,张旭明,徐侃. 基于 Zernike 矩的快速图像配准算法[J]. 光电工程, 2012, **39**(11): 82-87.