

定向干扰跟踪平台的激光扩束系统设计

何秉高, 孙向阳, 史丽娟

(长春大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:为了解决常规定向干扰系统结构复杂、尺寸过大、难以变倍等问题,本文设计了一种采用反射式离轴光机结构的激光扩束系统,并进一步对激光变倍扩束主、副反射镜组的光机结构进行了设计与分析。分析结果表明,主副镜组最大变形量均小于0.01 mm,扩束机构的基本振型频率为105.2 Hz,最大结构应力小于材料的屈服强度。通过测试,系统能够实现系统扩束比为1:15.01、1:19.96、1:25.03,空间偏移量误差小于1 mrad,满足技术指标要求。

关键词:离轴反射;光机结构;扩束;定向干扰;分析测试

中图分类号:TN976 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.07.019

Design of laser beam expanding system in tracking platform of directional interference

HE Bing-gao, SUN Xiang-yang, SHI Li-juan

(School of Electronic and Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China)

Abstract: In view of the problems existed in the traditional directional interference system, such as complicated structure, oversize dimension, difficult to zoom and color difference, a laser beam expanding system with the reflective off-axis opto-mechanical structure was designed. The optical-mechanical structure of off-axis double reflectors were designed and analyzed. Analysis results show that the maximum deformation is below 0.01 mm, the frequency of basic vibration was 105.2 Hz, and the maximum stress of the structure is less than yield strength of the material. After testing, the beam expanding ratio obtained is 1:15.01 (19.96, 25.03) and the spatial offset errors is below 1 mrad, which meets the requirement of technical index.

Key words: off-axis reflection; opto-mechanical structure; beam expansion; directional interference; analysis and test

1 引言

随着传感器技术的不断提高,使得制导导弹的抗干扰能力得到大幅度提升,明显降低了常规红外诱饵弹的干扰效果。若采用红外干扰机进行工作时,由于发射角过大,导致能量过于分散,使得其作用距离变短,对于高空飞行的目标难以进行有效干扰。

基于上述原因,在20世纪末,各国开始进行定

向干扰技术的研究。该技术的最大优势是集中在一个立体角内单向发射干扰能量,从而使干扰信号能量的集中性得到明显提升,而且它只在干扰工作时才发射能量,这样有效地解决了干扰源易暴露的问题^[1]。典型的产品有美国的AN/AAQ24系统、俄罗斯的101KS-O系统、以色列的MUSIC系统、美英联合研制的CIRSM系统^[2-3]。在设计时,上述产品

基金项目:吉林省科技厅优秀青年人才基金项目(No. 20180520225JH);长春大学青年教师培育项目(No. ZK201804)资助。

作者简介:何秉高(1983-),男,讲师,博士研究生,研究方向为光电检测仪器。E-mail: asdf12383@163.com

收稿日期:2017-12-12

为了调整红外激光束发散角,进一步增加干扰距离、减少探测器的检测误差,多采用折反式准直扩束系统^[4-7];此类系统的光机结构设计复杂,难以实现小型化且在传递过程中损失了较大的能量。为了解决这一问题,本文提出了一种反射式离轴扩束系统,以达到高能量反射率、无色差、大口径的设计目标;并采用了专门设计的变倍切换结构,以实现根据作用距离进行扩束比变倍调整的目的。

2 系统组成及主要设计参量

本设计的光机系统主要由 DF 激光器、反射式主扩束镜、反射式离轴副扩束镜、两组转向平面反射镜及安装结构组件构成。进行工作时,激光束先经转向平面镜组进行干扰跟踪平台的扩束系统中,再通过反射式主扩束镜的上下运动(安装在往复直线运动机构上)来改变主副镜组间的径向距离,最后经反射式离轴副镜将主镜所产生的光束分别扩束为 15 倍、20 倍、25 倍的宽光束输出。系统组成如图 1 所示,主要设计参量如表 1 所示。

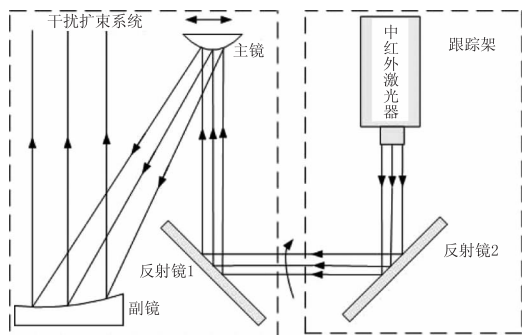


图 1 扩束系统组成

Fig. 1 Compositions of beam expander

表 1 系统技术指标

Tab. 1 Technical indexes of system

序号	设计项目	参数
1	扩束比	1 : 15 (20, 25)
2	光束发散角	≤ 0.5 mrad
3	干扰距离	≥ 5 km
4	最大变形量 $D_{\max}$	≤ 0.1 mm
5	空间偏移量	≤ 1 mrad

3 光学系统设计

为了解决激光能量过度集中的状况及系统结构尺寸过大问题,同时满足 DF 激光器的传输、扩束比及视场光谱范围内波差的要求,扩束光学系统采用 Ritchey-Chretien (R - C) 式离轴反射系统。

主镜的曲率半径为 25.052 mm,非球面系数(conic 系数)为 -0.974 ;副镜曲率半径为 625.052 mm,非球面系数(conic 系数)为 -0.996 ;主副扩束镜间距为 300 mm。通过主镜上下直线运动改变主副镜的径向轴间距,以实现扩束比变倍,(即 15 倍时,两者者轴间距为 117.315 mm;20 倍时为 80 mm;25 倍为 49.827 mm),ZEMAX 设计的光学系统结构如图 2 所示。由图 3 可知,三种扩束系统的 MTF 函数都已达到衍射极限。

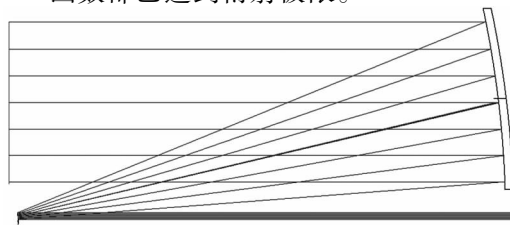


图 2 扩束光学系统

Fig. 2 Optical System of beam expander

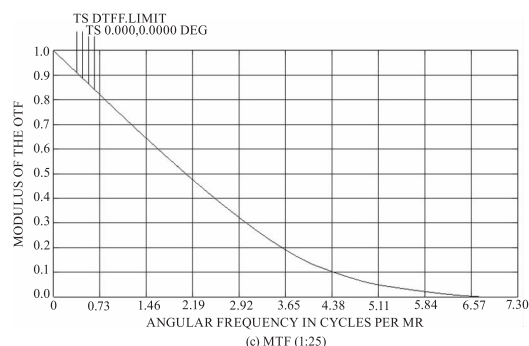
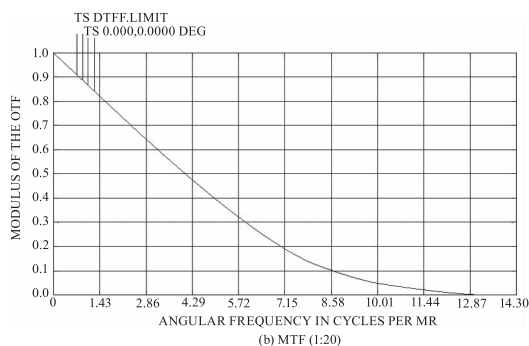
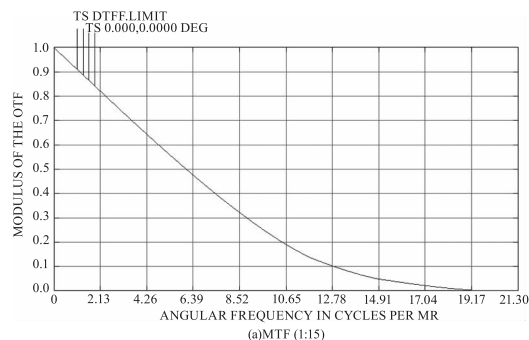


图 3 光学系统传递函数

Fig. 3 MTF of optical System

4 机械结构设计

为了满足扩束系统的光学性能要求,同时本着结构简单、小型轻量、易于装配的设计原则,采用分体设计的思想,将DF激光器安装在干扰跟踪平台的固定基座上,反射式主副扩束镜组则安装在系统的两轴转台上,中间通过两组平面反射镜引导激光束进入扩束系统中,各部分对接均可拆卸模式。这样的设计既可以达到缩短整体机械尺寸的目的,又易于安装调试,同时保证了系统工作的稳定性。系统主要机械结构如图4所示,图中1为主扩束反射镜组件,2、5为平面反射镜,3为离轴副扩束镜组件,4为俯仰安装轴。

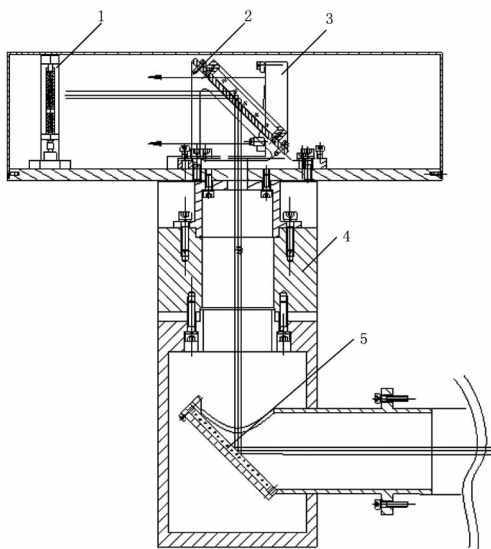


图4 系统机械结构图

Fig. 4 Structure of the system

5 反射式扩束主副镜组设计与分析

本设计所采用的DF激光器的中心波长为 $3.8\mu\text{m}$,对于进行能量传输的镜片均要求具有较高的损伤阈值及极低的吸收系数,所以需要选择对该波段激光有较高透射率的镜片材料。因此在扩束及平面反射光学系统的镜片选择方面,均采用了 CaF_2 镜片,同时为了提高扩束系统的总体反射率,故在 CaF_2 表面镀Au膜并加镀介质膜,从而使总反射率达到97%以上。

5.1 主反射镜组结构设计及分析

由于主扩束反射镜片的尺寸较小,因此在安装设计时直接采用了胶接法,以减少反射镜随工作环境温度变化所引起的镜面变形量,同时降低结构应力变化对镜片的损伤,提高镜片与镜座材料热膨胀系数匹配性。

为了实现扩束变倍功能,将副镜组件安装在由

垂直导轨,螺旋丝杠及步进电机等组成的工作台上。通过步进电机驱动工作台上运动的丝杠螺母以引导导组件上下移动,从而精确定位,以改变主扩束反射镜组件的径向高度,实现扩束比的变倍目的,其安装结构如图5所示。

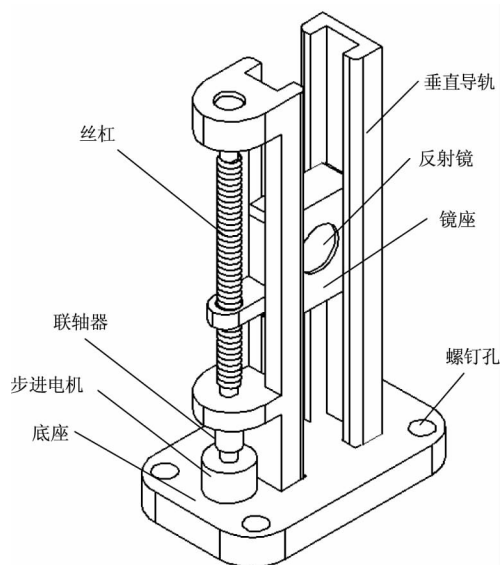


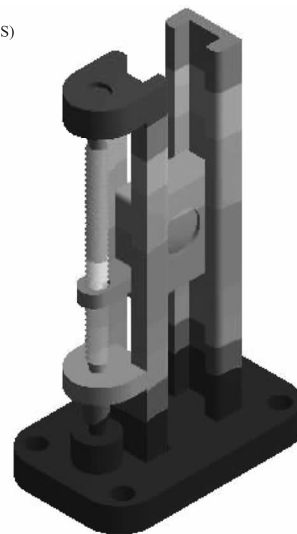
图5 主反射镜结构

Fig. 5 Structure of the main mirror

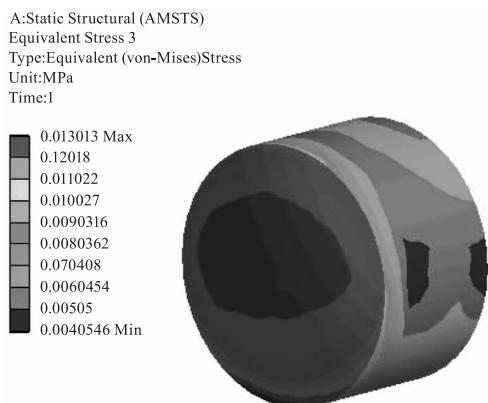
为了验证镜组结构的设计结果,需要对其进行有限元分析。首先是对结构模型进行网格划分,由于分析结果取决于精确的网格划分过程,因此采用Hypermesh软件的8节点六面体单元进行工作,共划分了513522个单元,共计1986026个节点;之后将网格模型导入ANSYS软件中,输入材料属性,将固定螺钉孔添加为固定约束,按整体安装方向添加自身重量约束及转台工作时的传递的力矩,对组件及镜片进行分析,结果如图6所示。

A:Static Structural (AMSTS)
Total Deformation
Type:Total Deformation
Unit:mm
Time:1

0.00016454 Max
0.00014626
0.00012797
0.00010969
9.141e-5
7.3128e-5
5.4846e-5
3.6564e-5
1.8282e-5
0
Min



(a)总体变形量分布



(b) 接触面压力分布

图 6 有限元分析

Fig. 6 Finite element analysis

由分析结果可知,最大轴向变形量为 1.65×10^{-4} mm,小于最大变形量 0.01 mm 的技术指标要求;最大应力为 0.142 MPa,远小于材料的屈服极限 48 MPa 及 260 MPa;接触面压力最大值为 0.013 MPa,也小于材料使用强度;设计符合基本要求。

5.2 反射式离轴副镜组结构设计

对于较大口径的离轴副扩束反射镜片安装而言,常规方法难以满足安装要求:离轴镜大口径尺寸导致胶接法的稳固性较差;离轴镜的非球面形状导致其难以使用压圈法,离轴镜不均匀的质量分布导致挠性安装结构过于复杂^[8],设计装调成本过高。反射式离轴副镜如图 7 所示。

因此在安装设计时,采用挡块及胶接两种方法来固定镜片。安装时,先将反射镜安放在镜座内,之后在镜座的圆环面安装挡块以固定镜片(通过螺钉预紧),最后将橡胶剂注入位于镜框外侧的预留孔中来固紧反射镜。通过长条孔来进行安装位置的微调。固定挡块及镜座材料选用 2A12 铝合金,螺钉材料选用 45# 钢。

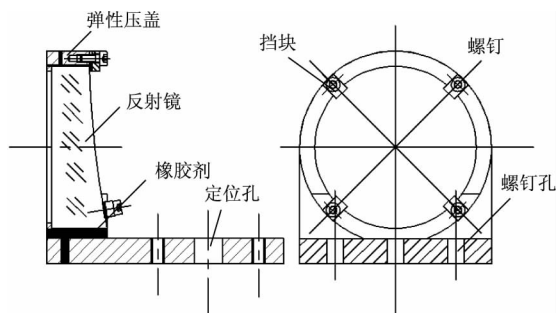
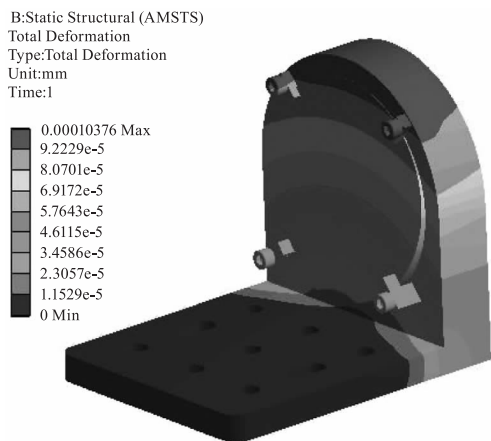


图 7 反射式离轴副镜

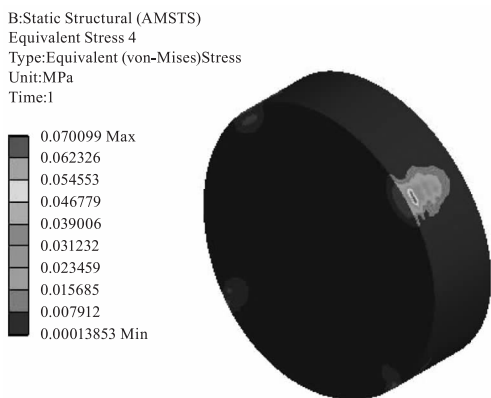
Fig. 7 Structure of off-axis mirror

同理,亦需将其导入 ANSYS 中进行有限元分

析。由分析结果可知,最大轴向变形量为 1.037×10^{-4} mm,小于的技术指标要求;接触面压力最大值为 0.701 MPa,远小于材料的屈服极限 260 MPa,设计符合要求,如图 8 所示。



(a) 总体变形量分布



(b) 接触面压力分布

图 8 有限元分析

Fig. 8 Finite element analysis

6 系统模态分析

为了进一步验证扩束及干扰跟踪系统的设计合理,需要对它们进行相应的模态分析。由于扩束机构、固定机构及整机的材料属性不尽相同,且均采用可拆卸连接方式,所以可以先独立分析扩束的系统主要构件,然后再分析干扰跟踪平台。表 2 为分析结果。

表 2 系统主要机构的模态分析

Tab. 2 Modal analysis for main mechanisms

分析对象	基频/Hz	振型
离轴主反射镜	1004.1	沿光轴垂直方向移动
离轴副反射镜	1278.2	沿光轴垂直方向移动
扩束系统	105.2	沿光轴垂直方向移动
平台系统	111.7	沿光轴垂直方向扭转

由基频结果可知,系统无共振现象发生,但是由于扩束系统的组件安装质量分布不均匀,导致在固定底板边缘产生较大的变形量,可能降低扩束系统的光学性能;为了达到静力平衡状态,提高系统的抗振性能,故采用了添加配重的方法。

7 扩束比及空间偏移量测试

7.1 扩束比测试

在进行测试工作时,首先打开中心波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,同时打开计算机上的图像采集软件,再使用 CCD 依次采集主、副扩束反射镜面的光斑图像;之后先利用 He-Ne 激光束的光强高斯分布性^[9-10],利用高斯函数公式(1)计算出光斑的中心坐标。

$$I(x_z, y_z) = A \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{x_z - x_0}{s_1^2} + \frac{y_z - y_0}{s_2^2} \right] \right\} \quad (1)$$

式中, A 为光斑光强幅值; $I(x_z, y_z)$ 为与光束垂直截面处 (x_z, y_z) 的光; (x_0, y_0) 为光斑中心位置; s_1, s_2 为二维坐标方向上的标准差。由此得出,光强幅值位置即为扩束光斑中心位置,再利用最小二乘圆拟合法,通过公式(2)计算出测量光斑的直径,之后利用公式(3)计算出扩束比:

$$D = 2 \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{D_2}{D_1} \quad (3)$$

式中, (x_i, y_i) 为光斑图像边缘的坐标值; D_1, D_2 分别为主、副扩束反射镜的光斑直径; δ 为系统扩束比。测量结果如图 9 所示。

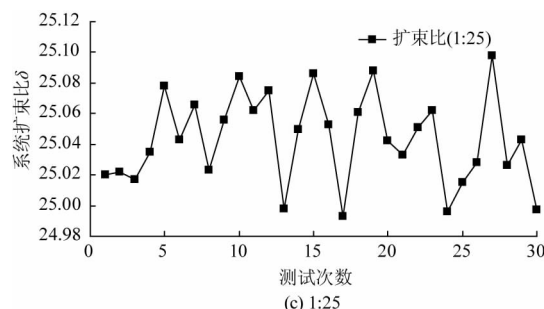
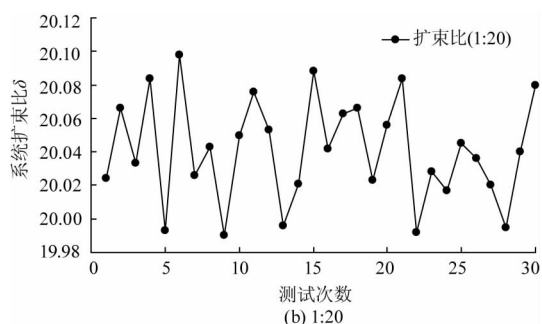
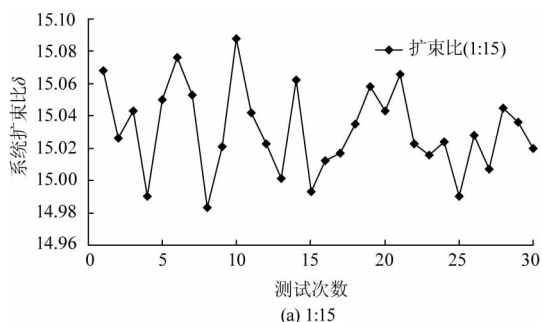


图9 扩束比测试数据分布

Fig. 9 Test data of beam expanding ratio

整合测试数据,取其算数平均值,得出计算结果,扩束比分别为 1 : 15.01、1 : 19.96、1 : 25.03,满足技术指标要求。

7.2 空间偏移量测试

干扰跟踪平台采用 U 型框架结构,通过在框架顶部增加加强筋,提高了运动框架的整体稳定性及抗振性,如图 10 所示。在进行工作时,要求扩束系统的发射轴与跟踪系统的视准轴保持平行关系且实时同步运动,并且与干扰跟踪平台的水平轴始终保持垂直关系,因此主要测试参数的跟踪系统的空间偏移量。

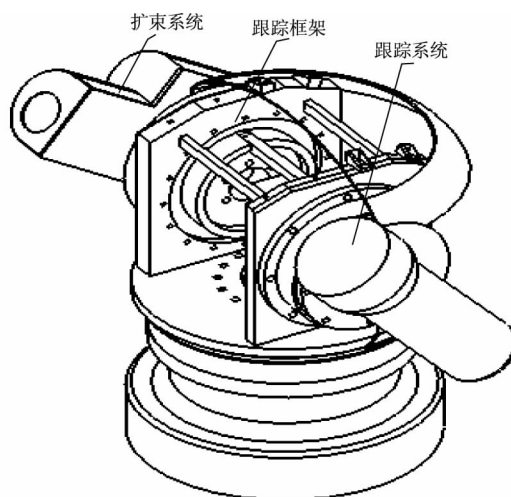


图10 跟踪平台总体结构

Fig. 10 General structure of tracking platformT

通过手持式激光测距仪分别测量整机跟踪目标方位及俯仰的偏轴量,通过其偏轴量与两个测量目标间距的正切函数值,分别求出方位角变化量 θ_1 及俯仰角变化量 θ_2 ,之后通过公式(4),即可求空间偏移量。测量偏差如图 11 所示。

$$\varepsilon = \sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2} \quad (4)$$

并且通过测试点均值 $\bar{x}$, 残差 s 由公式(5)求得

其标准偏差 σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

由计算结果可知, σ 等于 0.263 mrad, 满足技术指标 $3\sigma \leq 1$ mrad 的要求。

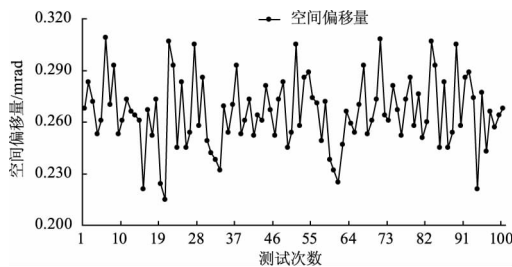


图 11 测试点偏差分布

Fig. 11 Test points of Deviation distribution

8 总 结

本文设计了由反射式离轴主副镜组、平面反射镜组和支撑固定机构组成的中远红外激光扩束系统,并对反射式离轴主、副镜组进行了光机结构设计,并进一步对主要构件进行了有限元分析,以验证设计结果的合理性。经实际测试,系统可扩束比为 1:15.01、1:19.96、1:25.03,空间偏移误差 $3\sigma \leq 1$ mrad,满足设计指标及要求。

参考文献:

- [1] FAN Jinxiang, LI Liang, LI Wenjun. Development of direct infrared countermeasure system and technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 789-794. (in Chinese)
范晋祥, 李亮, 李文军. 定向红外对抗系统与技术的发展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 789-794.
- [2] TANG Cong, YIN Songfeng, LING Yongshun, et al. Study on jamming performance of DIRCM[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(1): 73-78. (in Chinese)
唐聪, 殷松峰, 凌永顺, 等. 定向红外对抗系统干扰性能研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(1): 73-78.
- [3] CHAI Dong, TONG Zhongxiang, LU Yanlong, et al. Simulation and technique of airborne directional laser IR countermeasure system[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(9): 981-984. (in Chinese)
柴栋, 童中翔, 芦艳龙, 等. 机载定向激光红外对抗技术及仿真研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(9): 981-984.
- [4] WANG Weiqiang, JIA Xiaohong, HAN Yumeng, et al. Infrared imaging modeling and simulation of DIRCM laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 789-794. (in Chinese)
王伟强, 贾晓洪, 韩宇萌, 等. 定向干扰激光的红外成像建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 789-794.
- [5] LIU Lei, LI Xiao, XU Xiaojun, et al. Direction infrared jamming based on continuous-wave optical parametric oscillator[J]. High Power Laser and Partial Beam, 2012, 24(9): 2027-2030. (in Chinese)
刘磊, 李霄, 许晓军, 等. 连续波光参量振荡器定向红外干扰[J]. 强激光与离子束, 2012, 24(9): 2027-2030.
- [6] YANG Zhao, YAN Gong. New design of beam expanding unit for excimer laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(9): 1202-1208.
- [7] Benjamin Frey, Udo SGaibl. Radio-immunotherapy: the focused beam expands[J]. The Lancet Oncology, 2015, 16(7): 742-743.
- [8] HE Binggao, AN Zhiyong, CAO Miao, et al. Opto-mechanical design of beam expander on laser jamming system[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(6): 168-174. (in Chinese)
何秉高, 安志勇, 曹秒, 等. 激光干扰扩束系统光机结构设计[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 168-174.
- [9] WANG Bing, ZHAO Wei, JI Xiang, et al. Influence of target temperature on mid-infrared direction jamming[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(4): 498-501. (in Chinese)
王冰, 赵威, 冀翔, 等. 目标温度对中波红外定向干扰效果影响研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(4): 498-501.
- [10] WANG Lili, HU Zhongwen, JI Hangxin. Laser spot center location algorithm based on Gaussian fitting[J]. Applied Optics, 2012, 33(5): 985-989. (in Chinese)
王丽丽, 胡中文, 季杭馨. 基于高斯拟合的激光光斑中心定位算法[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 985-989.