

大口径激光发射窗口拼接方法研究

刘旭堂^{1,2} 高云国¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对宽波段高能激光发射窗口口径大, 单片 ZnSe 镜片无法满足使用要求等情况, 提出了一种发射窗口的拼接方案。依据设备实际受力情况, 对窗口的强度进行分析和计算, 使窗口的设计更加合理可行。通过分析设备的工作环境确定窗口边界条件, 并进一步利用有限元软件详细分析了激光发射窗口在力-热耦合作用下的镜面变形, 用 Zernike 多项式对窗口内外表面的变形进行拟合, 求出窗口在力-热耦合作用下面形变化的 Zernike 表达式。利用 Matlab 软件, 从光束发散角变化量、衍射极限倍率 β 值和环围能量比 R_{BQ} 值三个角度, 来分析激光发射窗口在复杂工作环境下工作时对激光束的影响。结果表明, 拼接窗口可以大大降低窗口的质量和成本, 而且对激光束的影响较小, 符合设备使用要求。

关键词 激光光学; 激光发射窗口; 热固耦合; Zernike 多项式; 面型拟合; 大口径; 拼接窗口

中图分类号 V416.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1022003

Study of Large-Diameter Laser Emission Window Stitching Program

Liu Xutang^{1,2} Gao Yunguo¹

(¹ *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*
² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract Since multi-band high-energy laser emission window's diameter is large, single ZnSe lens can't satisfy the working requirements. A window splicing method is proposed. According to the equipment's actual stress, the window's strength is calculated to make the window's design more reasonable and reliable. The window's boundary conditions is acquired through analysis of the equipment's work environment and further detailed analysis by using finite element software is done to study laser emission window's mirror deformation under the effect of thermal coupling force. Then, fitting of inner and outer surface of the window by Zernike polynomials is carried out to obtain the Zernike expressions of the window's surface shape. The window's influence on the beam while working in complex environment is analyzed from the view of beam divergence, times of diffraction limitation β and fractional encircled energy R_{BQ} by Matlab. The results show that stitching can greatly reduce the cost and quality of the window and the impact of laser beam is fare, it can meet the equipment requirement.

Key words laser optics; laser launch window; thermoset coupling; Zernike polynomial; surface-type fitting; large diameter; stitching window

OCIS codes 220.4830; 110.6820; 350.6090

1 引 言

窗口是保证光学系统能够正常工作的关键部件^[1]。它的主要作用是保护内部光学元件免受外界

环境的影响, 增强系统的环境适应性, 提高设备使用寿命和可靠性^[2-3]。目前激光发射系统使用的窗口大致分为晶体窗口和气动窗口两种^[4]。气动窗口的

收稿日期: 2014-06-17; 收到修改稿日期: 2014-07-16

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程(057X22C050)

作者简介: 刘旭堂(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光学精密机械的设计方面的研究。

E-mail: liuxutang220@163.com

导师简介: 高云国(1955—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电仪器总体技术方面的研究。E-mail: gaoyunguo@163.com

可靠性较低,设计复杂,价格昂贵,氮气消耗量大,而且高速气流产生的冲击和震荡还会影响光学设备的工作和光束质量,因此应用受到了限制^[5-6]。相比之下晶体窗口的优越性明显。但是随着激光发射口径不断增大,晶体窗口也遇到了许多难题^[7]。其中晶体尺寸的限制最为突出,很多激光发射系统的窗口都无法使用单片晶体加工完成。

本文针对大口径车载高能激光发射系统的使用要求,设计了一种拼接式的激光发射窗口,该激光发射窗口是由中心的一片圆形镜片和4个扇形镜片组成。为分析拼接窗口的可行性,依据设备受力对窗口的厚度进行了系统的分析,通过有限元软件详细分析了激光发射窗口在力-热耦合作用下的镜面变形量,并进一步利用 Zernike 多项式对面型进行拟合。将分析结果与普通窗口相对比发现,拼接窗口不仅可以大幅降低窗口的质量,其镜面变形量也明显小于普通窗口。通过分析光束发散角、衍射极限倍率 β 值和缓围能量比(BQ)值的变化量值发现窗口对激光束的影响较小,满足设计要求。

2 窗口的设计计算

2.1 窗口的结构设计

经过扩束、合束以后,进入激光发射镜筒的激光束如图1所示。B区域的激光束进入镜筒,经反射式扩束以后,再由窗口射出;在以前的光路设计过程中,通常采取一系列措施将A区域的激光滤掉。为提高激光的利用率,次镜后方增加了一个透射式扩束系统,A区域的激光经过此扩束系统后,也经由窗口射出。

依据图1中激光分布规律所设计的拼接窗口的

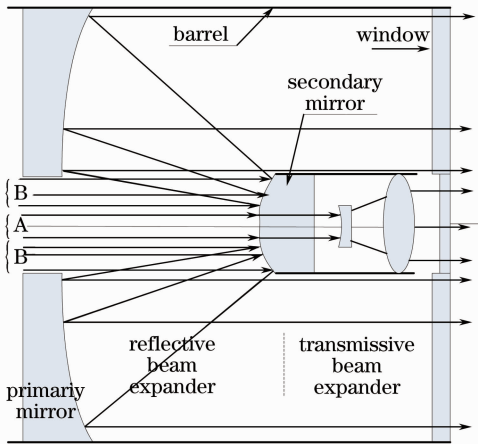


图1 激光发射筒光路图

Fig. 1 Optical path of laser launcher

结构如图2所示。窗口主要是由5块 SnSe 镜片组成,中央是一个直径为 160 mm 的圆形镜片,外层是4个内径 80 mm,外径 320 mm 的扇形镜片。4个扇形镜片间的拼缝与4个次镜支架对齐,以减小出射激光的遮拦。

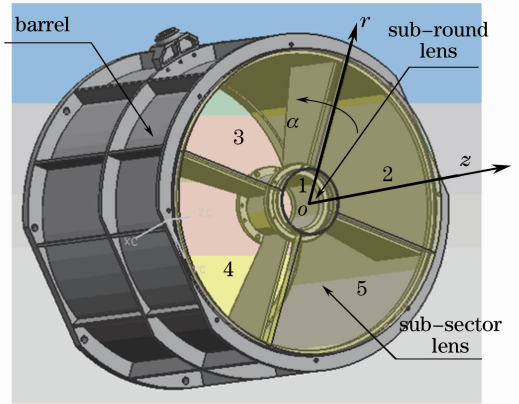


图2 激光发射窗口拼接方案

Fig. 2 Laser launch window stitching program

出于强度、成本等多方因素考虑,要对窗口的厚度进行系统的设计。

2.2 窗口的受力分析与强度计算

窗口在设计过程中必须要考虑所承受的各种外界载荷的作用^[8]。发射窗口在系统中所处的位置如图3所示。其中 i 为激光发射方向, E 为发射镜筒的俯仰角。激光发射窗口主要承受4种外界载荷,首先是风压载荷:

$$q = 0.5 C_D \rho_1 V_m^2, \quad (1)$$

式中 C_D 为风阻系数, V_m 为平均风速, ρ_1 为空气密度。其次是自身重力:

$$q_g = h \rho_2 g \sin E, \quad (2)$$

式中 h 为拼接镜片的厚度, ρ_2 为窗口材料的密度,窗口选取 ZnSe 晶体作为拼接材质,密度为 5.27 g/cm^3 。

设备旋转过程中产生的惯性力:

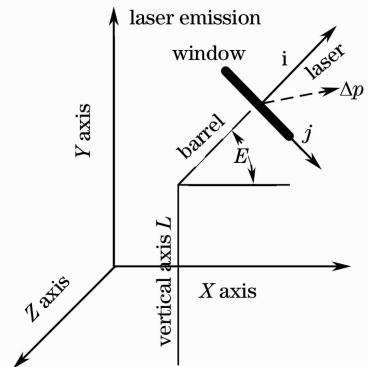


图3 窗口受力分析

Fig. 3 Analysis of the pressure of windows

$$q_1 = h\rho_2\omega^2 r\cos^2 E, \quad (3)$$

式中 r 为镜筒的长度, ω 为设备的旋转角速度。运输过程中的冲击载荷^[9]:

$$q_2 = h\rho_2 a \sin E, \quad (4)$$

式中 a 为车载设备的冲击加速度, 根据设计要求取 5 倍的重力加速度。以断裂应力为设计指标, 圆形镜片的最小厚度^[10]:

$$h = 0.5d(K_w f_s \Delta p / \sigma_F)^{1/2}, \quad (5)$$

式中 d 为窗口镜片的直径, K_w 由支撑条件决定, 当窗口受到夹持作用时取 0.75, f_s 为安全系数, σ_F 为材料的断裂应力。扇形镜片的最小厚度^[10]:

$$h = b[3\Delta p / 4\sigma_F(1 + 2b^3/l^3)], \quad (6)$$

式中 h 为窗口厚度, b 为窗口扇形子镜片内外弧弦长的平均值 275 mm, l 为扇形镜片的内外径之差 170 mm。依据(5)式和(6)式求出, 扇形镜片的最小厚度为 23 mm; 圆形子镜片的最小厚度为 12 mm; 普通窗口所使用镜片的最小厚度为 51 mm。由此可见与常规窗口相比, 拼接窗口所使用晶体材料的质量降低了 60%, 由于尺寸和质量的降低, 不仅解决了晶体尺寸受限的难题, 还可以大幅降低窗口的各项费用。

3 激光发射窗口对光束的影响

假设发射激光是与镜筒中心线平行的平行光。激光发射系统对远场光强和光束的指向精度要求较高^[11], 因此远场光强分布和发散角是评价激光光束质量的主要参数。激光发射窗口的加工制造误差、安装误差, 机械载荷和温度变化造成的镜面变形以及折射率的变化都可能会影响到激光光束的质量^[12], 因此需要分别对这三个因素进行分析。

当窗口前后表面不存在加工误差时, 窗口的安装误差不会对光束造成影响^[13]。加工误差主要包括镜面平行度、镜面粗糙度、子镜片间的厚度差异三个方面。拼接窗口是由 5 个子镜片拼接而成的, 当窗口前后面存在平行度偏差时, 光束经过窗口以后就会因各子镜片的棱镜效应而产生偏折, 当偏折比较严重时出射光就会分散为 5 束彼此分离的光束, 这是设备所不允许的。但是由于加工工艺的限制, 窗口前后表面也不可能达到绝对平行, 而且窗口面形精度达到一定等级以后加工精度每提高一个等级, 加工成本要提高数倍甚至数十倍^[12]。出于成本考虑在满足设计要求的前提下, 要尽可能降低对窗口面形加工精度的要求。假设环境温度为 20 °C, 忽略设备工作过程窗口温度的变化。光束发散角 θ 与

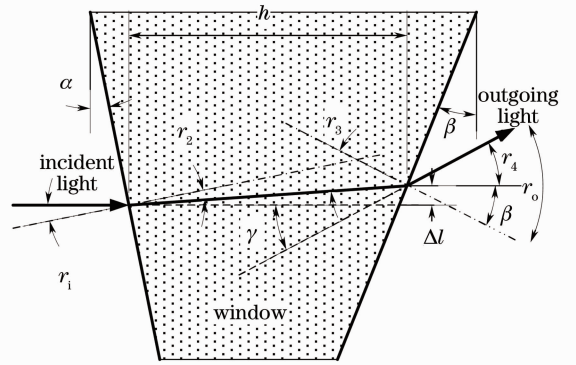


图 4 窗口面形对光束的影响

Fig. 4 Affect of window surface shape to the beam
窗口厚度以及前后表面平行度的关系如图 4 所示, 图中 α 是窗口由于安装误差产生的倾斜角, $\alpha + \beta$ 是窗口后表面平行度的偏差, r_1 和 r_3 为入射角, r_2 和 r_0 为出射角, r_4 为发散角变化量, h 为窗口在入射点的厚度。

依据正弦定理可知:

$$\frac{\sin r_2}{\sin r_1} = \frac{\sin r_3}{\sin r_0} = \frac{n_0}{n_1}, \quad (7)$$

由于图 4 中各角度的实际取值较小 $\sin r \sim r$, 由三角形外角与内角间的关系可知:

$$r_3 = \alpha + \beta - r_2 = \alpha + \beta - \frac{n_0}{n_1} r_1, \quad (8)$$

$$r_0 = \frac{n_1}{n_0} \beta + \left(\frac{n_1}{n_0} - 1\right) \alpha, \quad (9)$$

$$r_4 = \frac{(n_1 - n_0)(\beta + \alpha)}{n_0}, \quad (10)$$

式中 n_1 为 20 °C 时激光束在窗口材质中的折射率, 窗口所选用的 ZnSe 对本设备输出激光束的折射率约为 2.328, n_0 为激光束在空气中的折射率, 近似为 1。对于镜片间厚度差的要求, 可设各子镜片间厚度差得最大值为 A 倍波长, 子镜片数目为 N 。依据夫琅禾费衍射积分定理, 激光束远场光强分布 $I(r, \theta)$ 随 N 和 A 的变化规律为^[12]

$$I(r, \theta) = \left| \frac{1}{\lambda z} \sum_{m=0}^{N-1} \int_0^{a_{m+1}} \int_{\theta_m}^{\theta_{m+1}} \exp(i\Delta\phi_m) \cdot \exp\left[-i \frac{k}{z}(r \cos \theta \cdot x + r \sin \theta \cdot y)\right] \cdot r dr d\theta \right|^2, \quad (11)$$

式中 $\Delta\phi_m = m \cdot A\lambda / (N - 1)$, $\theta_m = m \cdot 2\pi / N$ 。由(11)式可知: 光束发散角约为窗口前后面平行度误差的 1.328 倍, 与窗口的厚度以及安装误差无关。根据设备使用要求, 激光发散角的变化量和指向误差均不得超过 5", 因此窗口镜面平行度至少要达到

4"。对于窗口表面粗糙度的要求,拼接窗口与普通窗口的计算方式是一致的,粗糙度最大值小于 0.3 倍波长^[12],均方根(RMS)值小于 0.035 倍波长^[12]。根据设备使用要求,激光束的斯特列尔比要大于 85%,依据(11)式求解可得,此时 A 小于 0.3 倍波长,即窗口各子镜片间的厚度差最大值为 $3.16 \mu\text{m}$ 。

4 热固耦合分析及面形拟合

4.1 窗口边界条件及热源

为了简化计算,忽略热分析过程中加工和安装误差对窗口面形的影响。边界条件:1)窗口的外表面与大气环境接触,由于外部环境中的空气流动快,因此假设窗口外表面的环境温度在设备工作过程中保持不变;窗口外表面的散热率取决于窗口外表面的温度。2)窗口内表面接触的是激光发射系统内部环境,内部有风机提供冷却气流,散热效率高,可以认为窗口内表面的环境温度保持恒定。3)窗口径向边界主要是与窗口壳体和外框架进行热传递,热传递的热流密度要根据环境温度而定。假设出射激光的强度分布为高斯分布,功率为 10 kW;窗口不存在内部条纹、汽泡、晶体断层或晶向错位等材质问题。由于设备使用的环境温度范围是 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$,因此在 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间建立多种不同的环境温度场。由于次镜支架与次镜支座的遮拦,窗口在各子镜片的拼缝附近的光源为零。拼接窗口边界条件比较复杂,窗口的温度场分布和面形变化都无法通过求解热传导方程获得,需要借助有限元软件求解。

4.2 热固耦合分析及面形拟合

利用有限元软件 Patran 建立窗口的有限元模型,依据前文分析结果设立边界条件。设备使用的环境温度范围是 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$ 。窗口材料为 ZnSe,对光源的吸收系数为 $5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$,表面镀膜的吸收系数为 $2.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 。施加热载荷送交 Nastran 软件求解获得窗口各镜片的温度场分布;采用顺序耦合法,把热单元转换成结构单元。将热分析获得的温度场施加在结构单元上,将机械载荷以及对应的边界条件施加在有限元模型上,导入 Nastran 解出拼接窗口的面型变化规律。其中环境温度为 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 时窗口面形变化的分布如图 5 所示。

由图 5 可知窗口面形变化量沿半径方向的变化比较剧烈,主要是外部机械应力作用和热量分布不均造成的。由于次镜支架对激光束的遮挡,窗口面形沿转角方向也并非均匀分布;但变化幅度较小,可以忽略。利用相同方法求出常规整体窗口的面形分

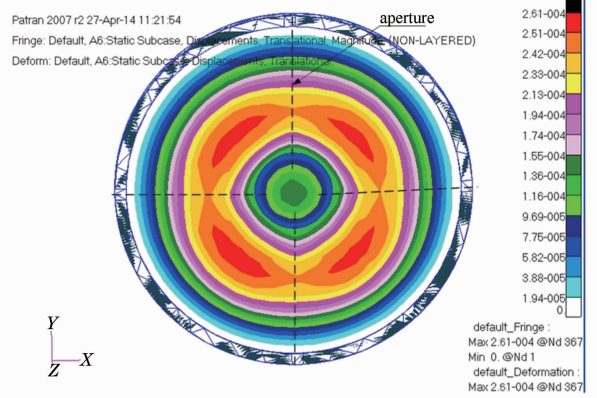


图 5 拼接窗口整体的面形分布云图

布如图 6 所示。由图 6 可知常规整体窗口面形变化量约是拼接窗口的两倍。

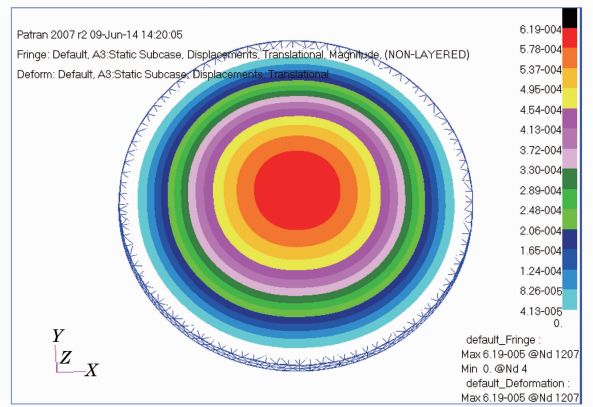


图 6 普通窗口面形分布云图

Fig. 6 Overall distortion cloud of common window

与常规整体窗口相比,拼接窗口在面形稳定性方面也有很大的优势。

5 窗口面形对光束质量的影响

5.1 窗口面形的二维分布规律

由于面形沿转角变化较小,因此沿半径方向的分布规律是研究的重点。利用 Matlab 软件拟合出不同环境温度时窗口面形沿半径 r 的分布规律如图 7 所示。由图 7 可知当周围环境温度降低时,窗口面形变化量也随之降低。因为设备对窗口有一定的保温效果,窗口与环境温度并不相同,当环境温度降低时,窗口边界的散热率随之提高,间接导致面形变化量的减小。

不同环境温度下,窗口面形沿径向分布规律相同。窗口面形沿半径方的分布规律可以分为三个区域:当半径 r 小于 80 mm,窗口面形变化量随 r 的增大而减小;当 r 大于 80 mm 小于 130 mm 时,面形

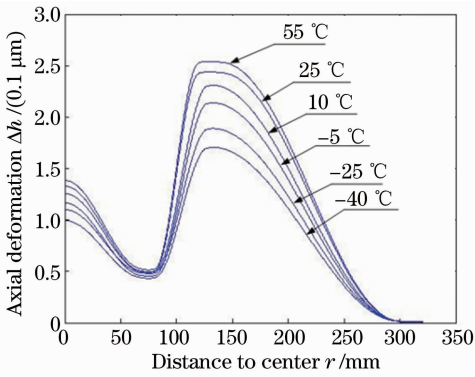


图7 不同环境温度下窗口面形沿半径方向的分布规律

Fig. 7 Distribution of window surface shape along the radial in different ambient temperatures

变化量随 r 的增大而增大;当 r 大于 130 mm 小于 320 mm 时,面形变化量随 r 的增大而减小,分别将以上三个区域命名为:A、B、C。以窗口中心为原点,A、C 区域相当于凸透镜,会使激光束汇聚,B 区域相当于凹透镜,会使激光束发散。光束发散角变化量的绝对值沿半径 r 的分布规律如图 8 所示。

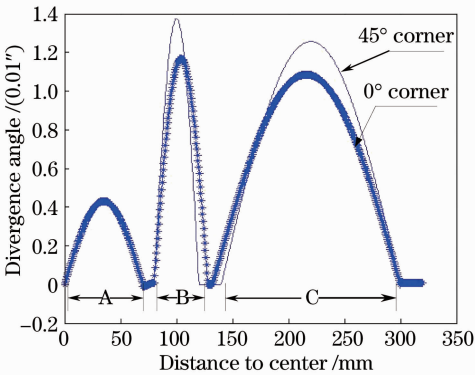


图8 发散角变化量沿转角方向分布规律

Fig. 8 Distribution of divergence angle variation along the corner

由图 8 可知由于窗口边缘夹持机构的作用和窗口受到的不均匀热冲击,使得激光束发散角在 B 区变化最剧烈,C 区次之,A 区最小;变化量的最大值小于 $0.015''$,低于设备 $5''$ 的设计要求。

5.2 窗口对光束质量的影响

通过接口程序将窗口内外表面的面型导出,利用 Zernike 多项式对窗口面形进行拟合。利用最小二乘法求出 Zernike 多项式各项的系数^[14-15]如表 1 所示。

由于拼接窗口的厚度较小,忽略其厚度方向的温差,窗口热透镜效应引起的光程差为^[16]

$$L_{\text{OPD}} = (n + KT)(h + \Delta z_1 + \Delta z_2) - nh, \quad (12)$$

式中 n 为窗口材料的折射率, K 为热光系数, T 为窗

口中心到边远的温度场, h 是窗口的设计厚度, Δz_1 和 Δz_2 分别是窗口内外表面的面形变化量。根据夫琅禾费衍射理论,窗口单模激光束的远场光强分布为^[17-18]

$$U(r) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(i \frac{kr^2}{2z}\right) \times \mathcal{F}_{\text{FT}}(L_{\text{ODP}}). \quad (13)$$

编写相应的 Matlab 程序,求出远场光强的分布规律。结合实际工程应用,在不同环境温度下,使用环境能量为 86.5% 的能量光斑,求出波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 激光衍射极限倍率 β 和环围能量比 R_{BQ} ,如表 2 所示。

表 1 窗口内外表面面形的前 10 项 Zernike 系数

Table 1 First ten Zernike coefficients of windows inside and outside the surfaces shape

Items	Coefficient of inner	Coefficient of outer
1	3.94836×10^{-4}	2.7126×10^{-4}
2	2.42669×10^{-8}	1.6672×10^{-8}
3	-1.2151×10^{-8}	-0.8348×10^{-8}
4	1.52283×10^{-8}	1.0462×10^{-8}
5	5.7137×10^{-12}	3.9254×10^{-12}
6	1.9759×10^{-10}	1.3575×10^{-10}
7	4.9825×10^{-14}	3.4231×10^{-14}
8	-8.742×10^{-14}	-6.011×10^{-14}
9	-6.0412×10^{-14}	-4.1511×10^{-14}
10	2.1073×10^{-14}	1.4478×10^{-14}

表 2 不同温度下的 β, R_{BQ} 参数Table 2 β, R_{BQ} parameters under different temperatures

Temperature / °C	-40	-25	0	20	40
β	1.036	1.039	1.041	1.043	1.047
R_{BQ}	1.014	1.013	1.017	1.021	1.027

由表 2 可知,在经过拼接窗口以后,激光衍射倍率和环围能量比的变化量都小于 5%,窗口热畸变对激光束远场光强的影响较小。根据以上分析可知,由于拼接窗口口径厚比大,散热条件好,所以窗口的热畸变较小,对光束质量的影响可以忽略。

6 结 论

车载激光发射系统的发射窗口除了要承受高能激光束的作用外,还受到外界许多复杂载荷的作用。结合相应的强度计算公式对车载激光发射窗口的尺寸进行了系统的设计,并进一步分析了窗口面形的加工精度对光束质量的影响;通过有限元软件对窗口各子镜片进行热-力耦合分析,求出了窗口在各种载荷影响下的面形变化。利用 Zernike 多项式对有限元分析结果进行拟合,并利用拟合结果详细分析了激光远场光强和发散角的分布规律;分析结果表

明大尺寸激光发射窗口的拼接方案对激光束的影响较小,可行性高。由于窗口所使用的晶体材料的尺寸和质量能够大幅度降低,因此窗口的制作成本和难度也会明显降低。

参 考 文 献

- 1 Paul R, Yoder, Jr. Opto-Mechanical Systems Design [M]. Boca Raton: CRC Press, 2003. 300—305.
- 2 Shi Jinfeng, Wu Qingwen, Zhang Jianping, *et al.*. Thermal-optical analysis for optical window of high-altitude and high-speed aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422004.
石进峰, 吴清文, 张建萍, 等. 高空高速航空相机光学窗口的热光学分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0422004.
- 3 Fang Yu, Xiangli Bin, Lü Qunbo. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422007.
方 煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及变形对相机性能影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0422007.
- 4 Xie Qiming, Li Yiwei, Pan Shunchen. The development and application of the materials for infrared windows and domes [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(10): 559—567.
谢启明, 李奕威, 潘顺臣. 红外窗口和整流罩材料的发展和应用[J]. *红外技术*, 2012, 34(10): 559—567.
- 5 Guo Jianzeng, Li Tiegeng, Wang Zhenhua, *et al.*. Application of rotating window to high-energy laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2309—2313.
郭建增, 刘铁根, 王振华, 等. 转动窗口在高能激光器中的应用[J]. *强激光与离子束*, 2011, 23(9): 2309—2313.
- 6 Zhang Peng, Zhao Chunzhu, Cui Qingfeng. Design of an aerial conformal optical window [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0622006.
张 鹏, 赵春竹, 崔庆丰. 航空共形光学窗口的设计方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0622006.
- 7 Zhou Lu, Bo Baoxue, Wang Yunhua, *et al.*. Study of 940 nm semiconductor lasers with non-absorb window structure fabricated by impurity-free vacancy disordering [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0802001.
周 路, 薄报学, 王云华, 等. 基于无杂质空位混合法制备带有无吸收窗口的 940 nm GaInP/GaAsP/GaInAs 半导体激光器研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802001.
- 8 Zhang Junwei, Chen Wei, Zhou Yi, *et al.*. Design and demonstration of high stability array tiled grating frame [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0216001.
张军伟, 陈 伟, 周 忆, 等. 高稳定性阵列光栅拼接架设计与验证 [J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0216001.
- 9 Xu Xinhang, Gao Yunguo, Yang Hongbo, *et al.*. Large-diameter fast steering mirror on rigid support technology for dynamic platform [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(1): 117—123.
徐新行, 高云国, 杨洪波, 等. 车载大口径刚性支撑式快速反射镜[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 117—123.
- 10 Li Yanwei, Yang Hongbo, Cheng Zhifeng, *et al.*. Thermal/structural/optical integrated design for optical window in aerial remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2102—2106.
李延伟, 杨洪波, 程志峰, 等. 航空遥感器光学窗口光机热一体化设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2102—2106.
- 11 Sun Xiangyang, Zhang Guoyu, Duan Jie. Investigation of controllable axial conformity for opto-mechanical structure [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0116001.
孙向阳, 张国玉, 段 洁. 光机结构的轴向一致性可控方法研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0116001.
- 12 Du Shaojun. Study on Thermal Deformation in High Energy Laser and Transmission System [D]. Hunan: National University of Defense Technology, 2001. 103—105.
杜少军. 高能激光器及其发射系统的热变形研究[D]. 湖南: 国防科技大学, 2001. 301—305.
- 13 Jia Yong, Gao Yunguo, Shao Shuai. Opt-mechanical optimization for laser expander system under thermal loads [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0116003.
贾 勇, 高云国, 邵 帅. 热载荷下扩束系统的光机优化设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0116003.
- 14 Yang Jiawen, Huang Qiaolin, Han Youmin. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(5): 49—55.
杨佳文, 黄巧林, 韩友民. Zernike 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. *航天返回与遥感*, 2010, 31(5): 49—55.
- 15 Tian Xiuyun, Wu Shibin, Wu Fan, *et al.*. Analysis for circle Zernike polynomials fitting precision of annular large flat [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(suppl): 21—23.
田秀云, 吴时彬, 伍 凡, 等. 环形大口径平面镜圆 Zernike 多项式拟合精度分析[J]. *光学技术*, 2008, 34(增): 21—23.
- 16 Pei Zhengping, Tang Chun, Tu Bo, *et al.*. Simulation of thermal effect on beam distortion in ND:YAG thin disk laser [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2006, 18(10): 1615—1618.
裴正平, 唐 淳, 涂 波, 等. Nd:YAG 薄片激光器热致波前畸变[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(10): 1615—1618.
- 17 Jiang Maohua, Su Yi. Beam quality evaluation of coherently combined laser beams [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(2): 367—370.
蒋茂华, 苏 毅. 激光相干合成光束质量评价[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(2): 367—370.
- 18 Lü Naiguang. Fourier Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 93—94.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 93—94.

栏目编辑: 韩 峰