

热载荷下激光扩束系统的光机优化设计

贾 勇^{1,2} 高云国¹ 邵 帅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 为提高激光扩束系统的温度适应性水平,提出了一种直接面向光学系统波像差的光机结构优化方法。对扩束系统进行了敏感度分析,并结合齐次坐标变换,将波像差的失调模型与有限元中的节点应变进行有机结合。以最小化失调波像差为优化目标,得到了支撑结构的最优材料拓扑,然后按照拓扑图对镜架进行分块划分和尺寸优化。最终得到的镜架结构合理,加工工艺性良好,且具有优良的温度适应性。-50 °C时,扩束系统波像差均方根(RMS)值从 0.728 λ 降为 0.196 λ , $\lambda=632.8$ nm;而且在 ± 50 °C的范围内,同等载荷条件下,优化后的系统波像差RMS值约为优化前的1/4。

关键词 光学制造; 光机结构; 结构优化; 热稳定性

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0116003

Opto-Mechanical Optimization for Laser Expander System Under Thermal Loads

Jia Yong^{1,2} Gao Yunguo¹ Shao Shuai¹

(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 In order to improve the temperature adaptability of vehicle-borne beam expander system, a structural optimization method is proposed to directly deal with optical wavefront aberrations. After sensitivity analysis, root mean square (RMS) value of the optical wavefront aberration can be calculated from the strain of the finite element nodes through homogeneous coordinate transformation. Taking the minimum wavefront aberration as the optimization objective, an optimized topology is obtained. According to the topology of material, the frame is divided into blocks, and optimized secondly in the form of size optimization. Finally, a manufacturable structure with good temperature flexibility is obtained. When the thermal load is -50 °C, the wavefront aberration RMS value is reduced from 0.728 λ to 0.196 λ , $\lambda=632.8$ nm. And in the range of ± 50 °C, the optimized wavefront aberration RMS value is about 1/4 times as large as that before optimization at the same thermal load conditions.

Key words optical fabrication; opto-mechanical structure; structural optimization; thermal stability

OCIS codes 140.6810; 220.1000; 220.1010; 220.4880

1 引 言

实际应用中,一个经过了精密装调环节的光电设备也难以达到光学设计的残留波像差水平^[1]。一方面,镜子和支撑结构的设计和加工制约着装调精度^[2],会造成光学系统的装调残留失调;另一方面,

装调过程通常在常温状态进行,若无有效的温控措施,当受到温度冲击时,镜子和支撑结构将产生热应变,在装调残余波像差的基础上再次引起波像差变化,即热失调。受温度冲击的光学系统失调便可看成是装调残留失调和热失调的叠加虽然两种失调的

收稿日期: 2013-07-26; 收到修改稿日期: 2013-09-04

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: 贾 勇(1987—),男,博士研究生,主要从事光机一体化方面的研究。E-mail: qinfengjie201@163.com

导师简介: 高云国(1955—),男,博士生导师,研究员,主要从事光电仪器总体设计方面的研究。

E-mail: gaoyunguo@163.com

方向可能一致也可能相反,但在同时考虑高温和低温冲击时,只有将热应力失调尽可能地降至最小,才能保证激光扩束系统在高于或低于装调温度的环境中光机性能最优。为此,必须对光电设备进行温度适应性设计^[3]。

近几年,光学系统的计算机辅助装调技术在国民经济的很多领域得到了广泛应用^[4],理论体系也趋于完善。该技术首先建立光学系统的波像差失调模型,然后再利用精密的光学检测手段得到实际失调系统的波像差,进而反求系统的失调量用以指导系统装调。模仿该技术的实现过程,本文先对某项目中的激光扩束系统进行敏感度分析,建立了系统的波像差失调模型,加载温度载荷后,根据波像差的失调反求扩束镜支撑结构的材料拓扑分布。得到的支撑结构仅采用了常用的 HT200 且无柔性环节,在 ±50 °C 的范围内,同等温度条件下优化后失调波像差均方根(RMS)值约为优化前的 1/4,具备优良的温度适应性。

2 失调扩束系统的波像差描述

采用的扩束系统为典型的卡式反射系统^[5],由两片离轴工作的共焦抛物反射镜构成。主、次镜曲率半径分别为 1800 mm、1000 mm,光阑离轴为 125 mm,对口径为 60 mm 激光束实现 1.8 倍扩束,光路如图 1 所示。为方便分析波像差,在扩束器的

输出面后方添加了一个理想的近轴平面(Zemax 中为 Paraxial 面,焦距 $f=100$ mm)。扩束系统在 $(0^\circ, 0^\circ)$ 和 $(0^\circ, \pm 0.15^\circ)$ 视场的波像差 RMS 值分别为 0 和 0.3955 nm。

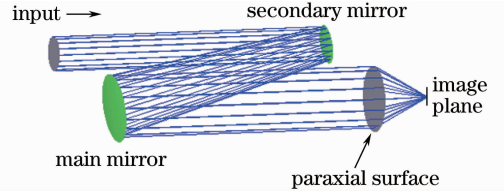


图 1 扩束系统光路图

Fig. 1 Layout of the expander system

2.1 波像差的失调模型

光学元件在加工和装调的过程中常与设计结果有所差别,这种微小的偏差又称为光学元件的失调^[6]。为避免大量的光线追迹计算,利用了计算机辅助装调技术中的敏感度分析法;对失调波像差模型进行线性近似^[6],在失调量比较微小时,可在保证计算精度的同时极大简化计算量。

按照计算机辅助装调中的假设,认为光学元件只存在刚性的位移和旋转。为避开遮拦,扩束系统主次镜都是偏轴使用,不再轴对称,故应将这 12 个自由度(主镜和次镜镜面分别相对各自顶点的 3 个平移和 3 个旋转)全部考虑在内;另外主、次镜顶点 z 坐标之差即主次镜间距,是一个独立变量,故将扩束系统的自由度确定为 11 个,将其写作列向量的形式。

$$\mathbf{X} = \{D_{\text{sec}_x}, D_{\text{sec}_y}, R_{\text{sec}_x}, R_{\text{sec}_y}, R_{\text{sec}_z}, D_{\text{mai}_x}, D_{\text{mai}_y}, R_{\text{mai}_x}, R_{\text{mai}_y}, R_{\text{mai}_z}, D_d\}^T, \quad (1)$$

式中 $D_{\text{sec}_x}, D_{\text{sec}_y}$ 分别为次镜在 x, y 方向上的平移自由度, $R_{\text{sec}_x}, R_{\text{sec}_y}, R_{\text{sec}_z}$ 分别为次镜在 x, y, z 方向上的旋转自由度, $D_{\text{mai}_x}, D_{\text{mai}_y}$ 分别为主镜在 x, y 方向上的平移自由度, $R_{\text{mai}_x}, R_{\text{mai}_y}, R_{\text{mai}_z}$ 分别为主镜在 x, y, z 方向上的转动自由度, D_d 为主次镜机点 z 坐标之差。其在热应力作用下的变化量:

$$\Delta \mathbf{X} = \{\delta_{\text{sec}_x}, \delta_{\text{sec}_y}, \theta_{\text{sec}_x}, \theta_{\text{sec}_y}, \theta_{\text{sec}_z}, \delta_{\text{mai}_x}, \delta_{\text{mai}_y}, \theta_{\text{mai}_x}, \theta_{\text{mai}_y}, \theta_{\text{mai}_z}, \delta_d\}^T, \quad (2)$$

式中 $\delta_{\text{sec}_x}, \delta_{\text{sec}_y}$ 分别为次镜沿 x, y 轴的平移失调量(正负服从右手规则), $\theta_{\text{sec}_x}, \theta_{\text{sec}_y}, \theta_{\text{sec}_z}$ 分别为次镜绕 x, y, z 轴的旋转失调量, $\delta_{\text{mai}_x}, \delta_{\text{mai}_y}$ 分别为主镜沿 x, y 轴的平移失调量, $\theta_{\text{mai}_x}, \theta_{\text{mai}_y}, \theta_{\text{mai}_z}$ 分别为主镜绕 x, y, z 轴的旋转失调量, δ_d 为主次镜间距的失调量(取间距变大的方向为正), $\Delta \mathbf{X}$ 称为失调向量, 简记为

$$\Delta \mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{11}\}^T. \quad (3)$$

失调系统的波像差 \mathbf{W} 可以表示为失调向量的函数,

$$\mathbf{W} = F(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}), \quad (4)$$

式中, $F(\cdot)$ 是一个复杂的非线性函数, 解析表达式难以获得; \mathbf{W} 为失调系统的波像差, 通常用 Zernike 多项式描述。在失调量比较微小时, 取

$$\mathbf{W} \approx \mathbf{W}_0 + \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{X}} \Delta \mathbf{X} = \begin{Bmatrix} Z_0^1 \\ Z_0^2 \\ \vdots \\ Z_0^{17} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \cdots & S_{1,11} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \cdots & S_{2,11} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{17,1} & S_{17,2} & \cdots & S_{17,11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{11} \end{Bmatrix} = \mathbf{Z}_0 + \mathbf{S} \Delta \mathbf{X}, \quad (5)$$

式中 $Z_0^i (i=1,2,3,\dots,17)$ 为用前 17 项标准 Zernike 多项式表示的理想状态的波像差分量。 W_0 表示理想状态的波像差,由此计算得到的 W 也是一个列向量,各元素分别对应失调状态的各项标准 Zernike 多项式系数。 S 为敏感度矩阵,在失调量比较小时,可将其写成差分的形式:

$$S_{i,j} = \frac{\partial Z^i}{\partial x_j} \approx \frac{\Delta Z^i}{\Delta x_j}, \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, 11; j = 1, 2, \dots, 17.$

可见 $S_{i,j}$ 的物理意义为第 j 个自由度在理想位置基础上增加一个单位的量,且其余自由度增量为零时,第 i 项 Zernike 多项式系数的增量。据此可以在 Zemax 软件中利用自定义宏函数求得所需的敏感度矩阵 S 。

由于所求得到的敏感度矩阵在 Zemax 中通过光线追迹获得,失调向量只有具备 Zemax 中的失调形式时,(5)式才能获得正确的结果。为此,还需要推导失调向量 ΔX 在有限元中的表达式。

2.2 失调向量的有限元描述

有限元算法能得到结构任意一点的应变变量,但为了映射 Zemax 软件中光学表面的偏心和倾斜,有限元模型中额外添加 4 个节点 $ABCD$,不失一般性可将主镜和次镜中对应位置处的节点用相同符号表示,组成一个局部坐标系,用以表征 Zemax 中光学表面的位置和姿态(可称其为坐标节点),如图 2 所示。将这 4 个节点定义为一个刚性单元,并固接到镜架的安装位置,利用其坐标变化(即应变变量)计算光学表面的位姿失调。

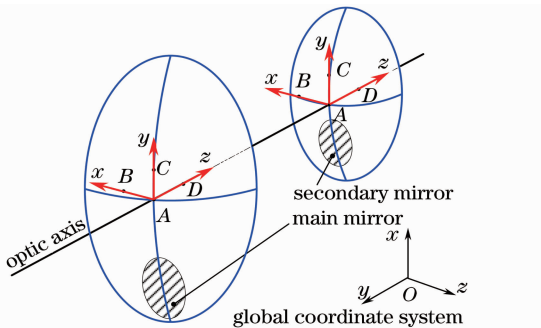


图 2 镜面局部坐标系

Fig. 2 Local coordinate systems of mirrors

按照 Zemax 中的变换规则,可将坐标系失调的过程描述为齐次坐标的形式:首先按照局部坐标系 xy_z 三坐标轴平移,然后按 x, y, z 的顺序绕坐标轴依次旋转,旋转轴参照新生成的坐标轴。则光学表面上任意一点 P 失调后在理想坐标系中的坐标为,

$$P' = T(dx, dy, dz)R(\alpha, \beta, \gamma)P^0, \quad (7)$$

式中 P' 为失调后的 P 点坐标向量, P^0 为 P 点的理想坐标向量, $T(dx, dy, dz)$ 为平移变换, $R(\alpha, \beta, \gamma)$ 表示旋转变换^[7], 它们的形式分别为

$$P' = \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

$$P^0 = \begin{Bmatrix} x^0 \\ y^0 \\ z^0 \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

$$T(dx, dy, dz) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

取微小角度的余弦为 1, 正弦为倾斜角的弧度值,并忽略微小量的高次项^[8], 得变换公式:

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{Bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & \beta & dx \\ \gamma & 1 & -\alpha & dy \\ -\beta & \alpha & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{Bmatrix}. \quad (12)$$

取局部坐标系中 A, B, C, D 四节点的齐次坐标分别为 $(0, 0, 0, 1), (t, 0, 0, 1), (0, t, 0, 1), (0, 0, t, 1)$, t 表示 B, C, D 三点距 A 的长度。用待定系数法即可求得该镜面的 6 个失调量,

$$\begin{Bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{x_{loc}}^A \\ \epsilon_{y_{loc}}^A \\ \epsilon_{z_{loc}}^A \\ (\epsilon_{z_{loc}}^C - \epsilon_{z_{loc}}^A)/t \\ (\epsilon_{x_{loc}}^D - \epsilon_{x_{loc}}^A)/t \\ (\epsilon_{y_{loc}}^B - \epsilon_{y_{loc}}^A)/t \end{Bmatrix}, \quad (13)$$

式中等号左边的列向量为光学表面的失调向量,将主、次镜分别用相同的方式处理即可分别得到用应变变量表示的失调向量前 10 项的值,失调量 x_{11} 用主

次镜的 d_z 之差表示之。(13)式中等号右边表示的是应变分量,变量上标表示节点,以 $\epsilon_{x_loc}^A$ 为例,它表示坐标节点 A 在局部坐标系 $ABCD$ 中 X 轴向的应变。由于(13)式中的应变分量均在坐标节点构成的局部坐标系中获取,而有限元计算输出的结果是全局坐标系中的量,所以还需要进行一步变换。根据图2所示的坐标系形式,最终得到失调向量,

$$\Delta \mathbf{X} = \begin{Bmatrix} \delta_{sec_x} \\ \delta_{sec_y} \\ \theta_{sec_x} \\ \theta_{sec_y} \\ \theta_{sec_z} \\ \delta_{mai_x} \\ \delta_{mai_y} \\ \theta_{mai_x} \\ \theta_{mai_y} \\ \theta_{mai_z} \\ \delta_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\epsilon_{z_glo}^{A_sec} \\ \epsilon_{x_glo}^{A_sec} \\ (-\epsilon_{y_glo}^{C_sec} + \epsilon_{y_glo}^{A_sec})/t \\ (-\epsilon_{z_glo}^{D_sec} + \epsilon_{z_glo}^{A_sec})/t \\ (\epsilon_{x_glo}^{B_sec} - \epsilon_{x_glo}^{A_sec})/t \\ -\epsilon_{z_glo}^{A_mai} \\ \epsilon_{x_glo}^{A_mai} \\ (-\epsilon_{y_glo}^{C_mai} + \epsilon_{y_glo}^{A_mai})/t \\ (-\epsilon_{z_glo}^{D_mai} + \epsilon_{z_glo}^{A_mai})/t \\ (\epsilon_{x_glo}^{B_mai} - \epsilon_{x_glo}^{A_mai})/t \\ -\epsilon_{y_glo}^{A_sec} + \epsilon_{y_glo}^{A_mai} \end{Bmatrix}, \quad (14)$$

式中等号右边各量均参考全局坐标系,(以 $\epsilon_{z_glo}^{A_sec}$ 为例,表示次镜的节点 A 在全局坐标系中 z 轴方向的应变)可以直接代入有限元求解的应变分量。

3 光机热分析

光机热一体化分析通常需要建模软件、有限元

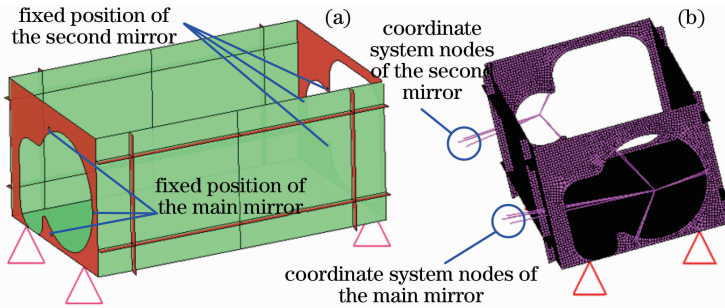


图3 主次镜支撑结构。(a) 中面模型; (b) 有限元模型

Fig. 3 Layout of the bracing structure. (a) Mid-surface model; (b) FEA model

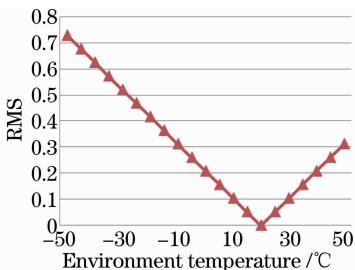


图4 波像差 RMS 曲线

Fig. 4 Curve of the wavefront RMS

软件、光机接口程序和光学软件相互协作才能计算得到结构应变失调引起的光学指标^[9-11],操作复杂且不宜优化迭代。如果将前文已推导的波像差失调模型集成到有限元算法中来,就能在有限元分析过程中直接得到系统波像差,而且有利于实现结构优化。为此,将波像差数学模型用 Fortran 语言的形式编译成动态链接库 (DLL) 文件,然后借助 optistruc 中的响应(response)链接到有限元求解器中。具体而言,首先根据光学系统的设计结果获得初始状态的波相差 Z_0 ,然后利用自定义宏函数在 Zemax 软件中计算输出敏感度矩阵 \mathbf{S} ;根据(14)式的定义,将有限元模型表述的失调向量连同 Z_0 和 \mathbf{S} ,以(5)式的格式实现为 Fortran 代码;最后按照 Hypermesh 软件预留的接口格式,编译连接成 DLL 文件,在有限元计算时调用。

扩束系统采用顶面开口的半箱形的支撑结构,图3(a)所示为箱体抽取中面后的简化模型。箱体厚度统一为 6 mm,左右两侧面为镜片的安装位置,并预留了通光孔径。用 PSHELL 单元建立镜架的有限元模型,如图3(b)所示,并按照图2的形式,分别为主次镜添加4个坐标节点,并用刚体单元连接到箱体上各自的安装位置。将初始环境温度设置为 20 °C,模型在 ±50 °C 范围内的波像差失调情况,如图4所示,其中 $x=632.8$ nm。

由图4可知,失调波像差均方根(RMS)值水平与环境温度近似呈正比例关系; -50 °C 时,波像差最大,为 0.728。扩束系统为小像差系统,项目要求装调波像差低于 0.5 λ; 在 -50 °C 环境中,热应变引起的失调已经超过了这个精度,所以有必要对其进行温度适应性,尽可能降低热失调。

4 光机优化设计

对支撑结构进行优化设计前,将结构的左右两

个侧面定义为固定域,前后侧面以及底面定义为设计域,为保证结构刚度,将前后侧面上的筋板也定义为固定域。优化目标就是寻求设计域的某种材料分布,使一定环境温度载荷下的波像差 RMS 值达到最小。

4.1 光机优化模型

光机优化模型可以用数学语言描述如下:

$$\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, \quad (15)$$

$$W_{\text{RMS}}(\Delta \mathbf{X}), \quad (16)$$

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}^{\text{thermal}}, \quad (17)$$

$$V(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^n p_i v_i \leq v_f \sum_{i=1}^n v_i, \quad (18)$$

式中向量 \mathbf{P} 为设计域内的设计变量组成的向量,表示壳单元的厚度,其维数 n 等于设计域内的有限元

单元总数。 \mathbf{K} 为刚度矩阵, \mathbf{U} 为节点位移向量, $\mathbf{F}^{\text{thermal}}$ 为温度场影响下的热应力, v_i 是单元 i 的初始体积, v_f 为优化模型中定义的体积分约束,目标函数 $W_{\text{RMS}}(\Delta \mathbf{X})$ 表示失调向量 $\Delta \mathbf{X}$ 引起的波像差均方根值。拓扑优化通常采用热力耦合下的结构柔顺度作为目标函数^[12],但本文的目标函数值无法在有限元中自然获得,需要借助 DLL 文件进行链接。

4.2 光机拓扑优化

由图 4 可见,失调波像差会随着温差的增大而近似线性增加,所以优化的环境载荷选择为温差最大的一 50 °C。将前后侧面和底面的单元厚度作为拓扑优化变量,迭代 46 次得到镜架的拓扑优化结果如图 5 所示。

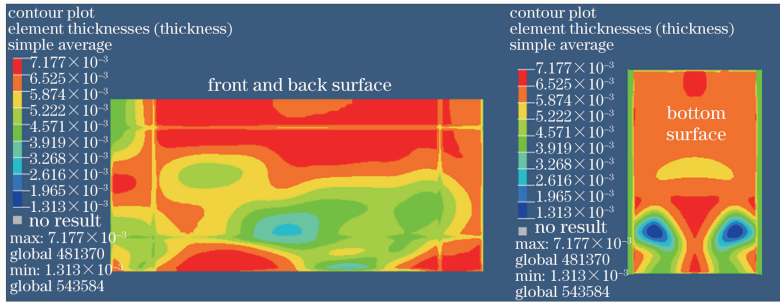


图 5 镜架的拓扑优化结果

Fig. 5 Result of the topology optimization

图 6 所示为优化过程中扩束系统失调向量和波像差 RMS 值的变化过程。各个失调分量在优化过程中互有增减;热应变在总体上并没有显著减小,但却得以重新分配,使失调波像差 RMS 值从 0.728 λ 降为 0.172 λ (本文中的 λ 统一取值为 632.8 nm)。

然而拓扑优化产生了许多中间密度单元,相同密度的单元分布也不规则,设计和加工成本过大;但得到的材料分布云图,却能为箱体的设计提供指导。下面就在云图的基础上对箱体进行尺寸优化。

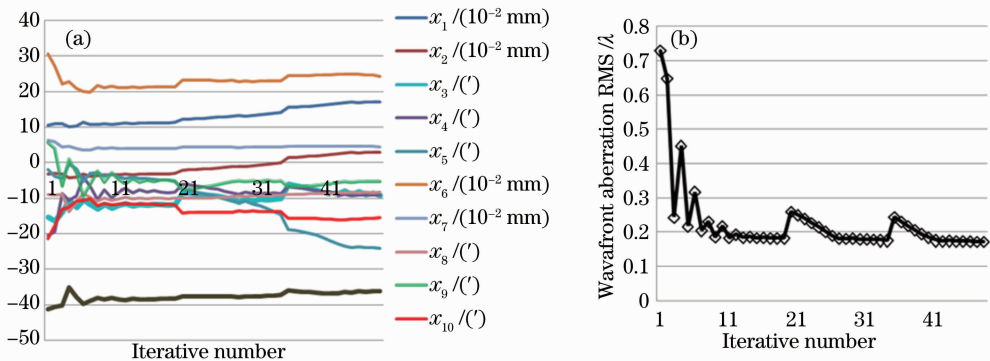


图 6 迭代过程曲线。(a) 失调向量; (b) 波像差 RMS 值

Fig. 6 Iterative history curves. (a) Misadjusted vector; (b) wavefront RMS

4.3 光机尺寸优化

根据已得材料分布云图,对箱壁进行规则的矩形块划分,划分过程应尽可能使同一个矩形中包围相同厚度的单元,箱体的分割布局如图 7 所示。分

块之后,将矩形块的单元厚度近似取为其内所有单元厚度的平均值,然后按照所得圆整厚度值和矩形所处箱壁的位置,将其划分为 7 类,图 7 用大写字母 A、B、C、D、E、F、G 表示。令相同类型的矩形块具有

相同的材料厚度,尺寸优化最终归结为寻找这 7 个材料厚度序列。

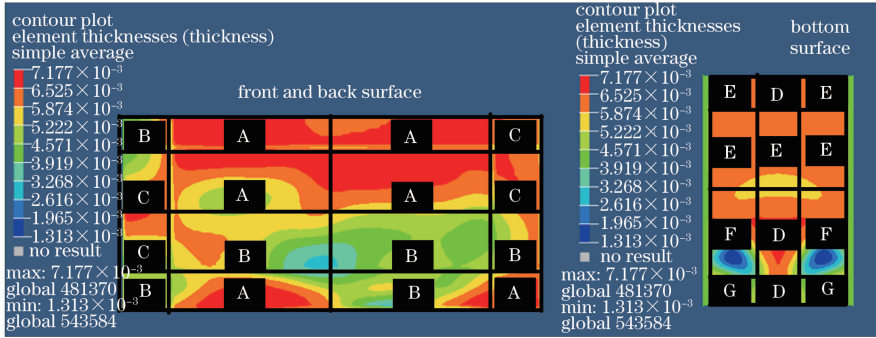


图 7 结构的分块布局

Fig. 7 Layout of the structure's division

用 7 个独立的设计变量控制 7 种类型的矩形块材料厚度,设置优化目标为失调波像差 RMS 值最小,在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度载荷下,迭代 12 步,即得 7 种块单元厚度的最优值。优化所得的波像差 RMS 值为 0.192λ ,对材料厚度圆整后波像差 RMS 值为 0.196λ ,7 个设计变量在优化前后以及圆整取值如表 1 所示。优化后,前后侧面的单元厚度趋于一致,统一为 8 mm;底面的单元厚度则呈现不同的分布形式,如图 8 所示。

表 1 7 个材料厚度变量的取值

Table 1 Values of 7 kinds of material thicknesses

Variables	Initial	Optimized	Rounded
	value /mm	value /mm	value /mm
A	7	8.00	8
B	5	7.75	8
C	6	8.00	8
D	7	5.52	6
E	6	4.08	4
F	3	3.08	3
G	5	1.43	1.5

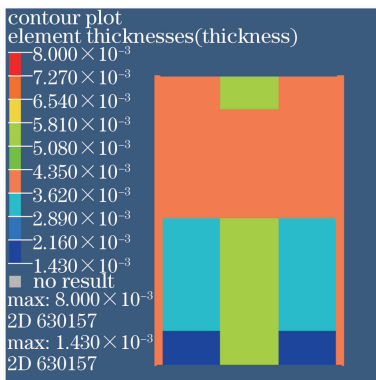


图 8 大镜架底面的材料厚度分布

Fig. 8 Layout of material thickness on the bottom surface

根据得到的尺寸优化结果,重新建立主次镜支撑结构的实体模型如图 9 所示,结构底面呈现规则

的阶梯形厚度分布,其余四面均是统一厚度,结构合理,加工工艺性良好,优化前后的结构刚度基本保持不变(如果刚度水平不能达到目标需求,优化模型中应施加必要的约束,如最大柔度约束等)。图 10 所示为失调波像差在不同温度载荷下的变化曲线,虚线表示优化前的镜架模型,实线表示重新建模后的模型;可知,热应力引起的波像差 RMS 值与环境温度始终保持为近似线性关系,而且优化设计得到的大镜架结构能够有效抑制 $\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的热应力失调。

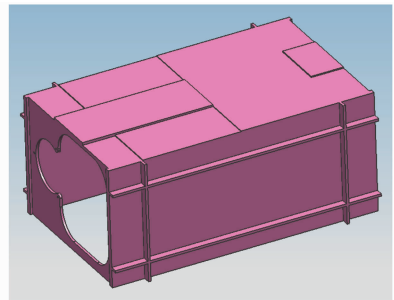


图 9 优化后的支撑结构

Fig. 9 Bracing structure after optimization

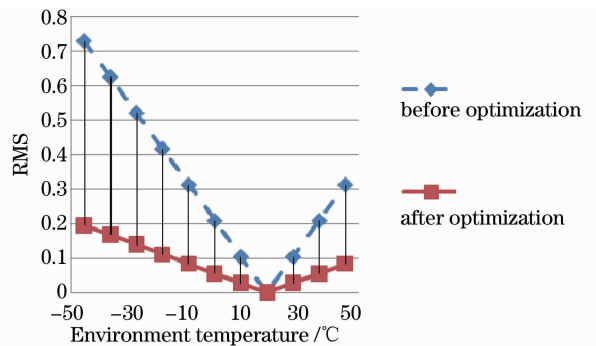


图 10 优化前后的失调波像差曲线

Fig. 10 Curves of wavefront RMS before and after optimization

5 结 论

为提升激光扩束系统在温度冲击下的适应性能,提出了一种简单有效的温度适应性设计方法,通过寻求合理的材料分布,将扩束系统热应变引起的波像差进行了有效的抑制。对扩束光学系统进行敏感度分析,并建立起系统的波像差模型;然后将模型转换为 DLL 文件,再将其整合到成熟的拓扑优化算法中;最后以一典型车载激光扩束器为例,得到了满足最小波像差目标的材料拓扑分布云图,进一步采用分块尺寸优化完成了结构的优化设计。所得模型仅使用了一种材料(HT200)就将热应力下的波像差降为原来的 1/4,不存在柔性环节,加工工艺性良好,是一种经济实用的设计。

参 考 文 献

- Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *et al.*. Influence of surface-profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422002. 庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0422002.
- Zhang Lei, Zheng Jianping, Fu Yuegang, *et al.*. The supporting structure design for large aperture optical reflecting system[J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2005, 26(8): 461-463. 张磊, 郑建平, 付跃刚, 等. 大口径反射光学系统的支撑结构设计[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(8): 461-463.
- Sun Xiangyang, Zhang Guoyu, Duan Jie. Investigation of controllable axial conformity for opti-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.
- Kong Xiaohui, Fan Xuewu. Alignment of two mirror aspherical optical system based on vector aberration theory[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(8): 082202. 孔小辉, 樊学武. 基于矢量波像差理论的两镜系统装调技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(8): 082202.
- Jia Yong, Gao Yunguo. A switch zoom design for reflective laser beam expander[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022003. 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): 1022003.
- Shi Guangwei. Study of Reflective Telescopes Alignment Based on Vector Wavefront Aberration [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2011. 11-12. 史广维. 基于矢量波像差理论的反射望远系统装调研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011. 11-12.
- Xiong Youlun, Ding Han, Liu Encang. Robotics[M] Beijing: China Machine Press, 1993. 24-25. 熊有伦, 丁汉, 刘恩沧. 机器人学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 24-45.
- Zhang Ying, Ding Zhenmin, Zhao Huijie, *et al.*. Rigid-body displacement separation of optics in optical-structural-thermal integrated analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2763-2767. 张颖, 丁振敏, 赵慧杰, 等. 光机热集成分析中镜面刚体位移分离[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2763-2767.
- Wen Jingyang. Research on Methods and Techniques of Optomechanical Integrated Analysis [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 2-3. 温敬阳. 光机热集成分析方法与技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 2-3.
- Dong Bing, Yu Xin, Zhang Xiaofang, *et al.*. Thermal-structural-optical integrated analysis of segmented space telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 326-329. 董冰, 俞信, 张晓芳, 等. 分块式空间望远镜的光机热集成分析[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 326-329.
- Zhu Bin, Yang Yi, Pang Jinxiang, *et al.*. The development of integrated optomechanical simulation platform [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(7): 75-79. 朱彬, 羊毅, 庞金祥, 等. 光机一体化仿真系统开发[J]. *电光与控制*, 2012, 19(7): 75-79.
- Yang Jungang, Zhang Weihong, Wang Dan, *et al.*. Analysis and topology optimization of elastic supports for structures under thermo-mechanical loads[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(3): 537-545. 杨军刚, 张卫红, 王丹, 等. 热力耦合结构的弹性支撑分析与拓扑优化设计[J]. *力学学报*, 2012, 44(3): 537-545.

栏目编辑:张 腾