

激光与光电子学进展

抑制反射镜热变形影响的支撑方式优化设计

罗超^{1,3*}, 王毕艺², 杨海波², 袁磊³, 柳建^{1,3}¹核工业西南物理研究院, 四川 成都 610200;²光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300450;³成都理工大学工程技术学院, 四川 乐山 614000

摘要 在高功率激光应用系统中,常通过反射镜对光束进行扩聚束、重定向、波前校正等控制。但控制系统中的各类反射镜会吸收部分光能从而形成非均匀温度场,使反射镜产生形变,进而影响反射光束质量。由于支撑方式与温度场共同决定反射镜的变形结果,因此在光束控制系统设计中,需要研究最佳的反射镜支撑约束方式。基于热弹性力学,提出了不同镜面支撑方式减小镜面热变形的的方法;对几种常见支撑约束方式下的反射镜的温度场、变形量进行了量化仿真分析;对比了镜面的总变形量、光斑区域相对变形量、光斑区域相对变形量引入的波前像差。结果显示:对反射镜背面采用小块区域约束的支撑方式镜面相对变形量最小;对反射镜背面采用刚性约束的支撑方式镜面相对变形量最大;后者可以有效减小小镜面相对变形量约 98.4%。实验和仿真分析的镜面光斑区域的相对变形量十分接近,波前图像基本一致。这些研究结果为光束控制系统镜体支撑的选型和设计提供了理论支持。

关键词 激光传输; 镜面热变形; 热弹性力学模型; 像差分析

中图分类号 O436;O241

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231089

Optimization Design of the Constraint Method to Repress the Thermal Deformation of Reflecting Mirror

Luo Chao^{1,3*}, Wang Biyi², Yang Haibo², Yuan Lei³, Liu Jian^{1,3}¹Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610200, Sichuan, China;²Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300450, China;³The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, Sichuan, China

Abstract In high-power laser applications, it is common to use reflecting mirrors for controlling the beam, such as beam expansion, redirection and wavefront correction. However, various types of reflecting mirrors in the control system will absorb some of the light energy, forming a non-uniform temperature field, which cause deformation of the reflecting mirrors and ultimately affect the quality of the reflected beams. Since the support method and temperature field jointly determine the deformation of the reflecting mirrors, it is necessary to study the optimal support method for reflecting mirrors in the design of beam control systems. Based on thermoelastic mechanics, the methods to reduce the thermal deformation of reflecting mirrors using different mirror support methods are proposed, the temperature field and deformation of the reflecting mirrors under several common support constraints are quantified and simulated. The total deformation of the mirror, the relative deformation of the spot area, and the wavefront aberration introduced by the relative deformation of the spot area are compared. The results show that the support method with a small area constraint on the back of the reflecting mirror has the smallest relative deformation, and the support method with a rigid constraint on the back of the reflecting mirror has the largest relative deformation. The relative deformation of the mirror with a rigid constraint can be effectively reduced by about 98.4%. The experimental and simulation results are very close in terms of the relative deformation of the mirror in the beam spot area, and the wavefront images are essentially identical. These results provide theoretical support for the selection and design of mirror support in beam control systems.

Key words laser transmission; thermal deformation of mirror; thermoelasticity model; wavefront analysis

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-05-06; 录用日期: 2023-06-01; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 光电信息控制和安全技术重点实验室开放基金(6142107190310)

通信作者: *luochao03257@163.com

1 引言

高能激光应用系统通常包含实现扩束、聚焦、重定向等功能的光束控制系统^[1-4]。在光束控制系统中,反射镜是重要的光学元件之一。尽管这些反射镜具有极高的反射率,但仍会吸收小部分激光能量,产生热膨胀。且由于反射镜温度场分布不均匀,反射镜会产生热应力,造成镜面发生形变。

已有研究对高功率激光系统下的镜面热变形进行了大量有益探究,如:Yang等^[5]针对镜面热变形问题,提出了一种采用碳纤维增强塑料桁架杆的被动热补偿设计,并通过仿真计算和实验验证了该设计的可行性;Hu等^[6]提出了一种水冷镜面层的新结构,分析了镜面的温升、温度均匀性、热变形和变形均匀性,结果表明,新型镜面层对热变形的幅度和均匀性均有改善;Bae等^[7]开展了大功率激光辐射环境下自适应光学系统化学气相沉积 SiC 变形镜冷却性能的实验和数值研究,研究表明,与可变形镜相比,该变形镜的热变形量降低了 85%,并实现了亚 μm 级的热位移;Cutler等^[8]提出了一种新颖的悬臂式液氮冷却硅反射镜设计,对镜子热弹性变形进行了有限元计算,认为可以通过将焦点向上移动 7.5 mm 实现镜面校正,其最小斯特列尔比为 0.99;还有大量的研究者对 m 级大口径的反射镜作了结构和支撑的优化设计^[9-11]。由此可以看出,对于反射镜的热变形,研究者提出了较

多抑制方法,并对其作了大量的研究。但少有人对 m 级以下口径的反射镜作支撑方式优化设计抑制反射镜热变形的研究。镜面热变形主要由材料受热产生的沿轴向的线膨胀、温度变化产生的热应力引起的形变和因镜体周边受限不能自由膨胀而产生的挠曲变形等三部分组成。因此,当腔镜尺寸和结构确定以后,镜体的支撑方式就成为了关键问题。不同的反射镜支撑方式会使位移或压力约束条件不同,约束条件和热应力共同决定反射镜的热应变,进而使镜面变形。同时镜面变形会对激光波前产生附加相位,改变反射激光的波前质量^[12-15],导致激光质量变差,远场光斑偏移、变形以及能量发散。

由于反射镜的热变形是由温度场和支撑(约束)方式共同决定的(忽略重力影响),因此有必要对反射镜的支撑方式进行定量分析和优化设计,以减小反射镜变形对波前质量的不利影响。本文提出了不同支撑方式下的反射镜的优化设计方法。利用热弹性力学,结合有限元分析方法、泽尼克像差分析方法,对 4 种不同的镜面支撑方式(图 1),即反射镜背面支撑、背面与侧面同时支撑、侧面支撑、背面小块表面支撑(柔性支撑)进行了分析对比,得出:柔性支撑相对于背面支撑可减小镜面相对变形量约 98.4%,是反射镜的最优支撑方式。同时与实验结果进行了比较,验证了所建立的优化设计方法和设计结论可以直接用于光束控制器的设计中。

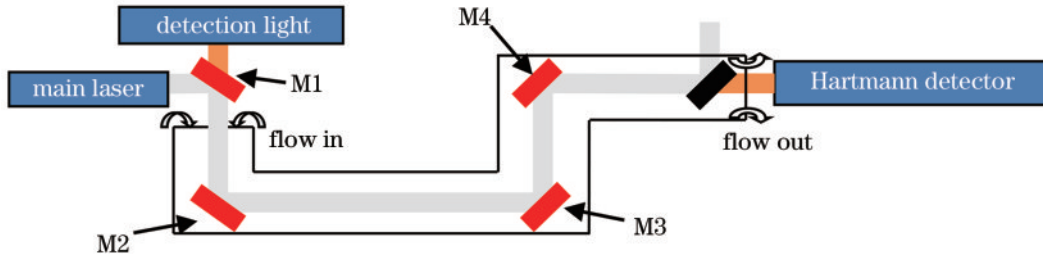


图 1 反射镜布局示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the layout of the reflecting mirrors

2 物理模型

2.1 反射镜的热弹性变形分析方法

在高能激光系统中,反射镜吸收小部分激光能量,镜体产生非均匀温度场,引起非均匀热膨胀,在一定的约束条件下,产生相应的应力应变,发生热变形^[12-19]。在小变形前提下,忽略光学膜层对镜体变形的影响,可以认为反射镜的热传导系数、热应变张量是各向同性的。此时,镜体变形可以利用热弹性力学模型求解。该模型方程组在直角坐标系下的张量形式^[20-21]为

$$\begin{cases} k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i \partial x_i} = C_\epsilon \frac{\partial \theta}{\partial t} + T_0 \beta \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial u_i}{\partial t^2} \\ \sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} - \beta \theta \delta_{ij} \\ \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ x \in \Omega, \quad t \in [0, \infty) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: k 为热传导系数; T_0 为参考温度; x 为坐标向量; θ 为温度变化场; C_ϵ 为热容; t 为时间; β 为热模量; ϵ 为

应变张量; σ 为应力张量; ρ 为材料密度; \mathbf{u} 为位移向量; λ 和 μ 为拉梅系数; δ 为 Kronecker 积; Ω 指空间区域。

通过有限元方法,对式(1)进行离散、数值求解,可以获得不同约束条件下的反射镜形变状态,进而得到镜面的变形量。

2.2 镜面变形对激光波前相位影响的像差分析方法

反射镜面变形引入激光波前的附加相位,往往会导致光束产生聚散焦、偏移、旋转,造成局部性能变差^[12,17-18]。利用泽尼克多项式像差分析方法,可以定量地对附加相位引起的像差进行分析。

取激光光斑圆域内的镜面相对变形量,折算出激光波前的附加相位作为待分析的波前相位。首先进行径向和角向采样,然后作归一化和正交化预处理,得到可用于泽尼克多项式波前重构^[22-24]的相位序列 $\phi(x, y)$,此时,可写为各项泽尼克多项式的线性组合:

$$\phi(x, y) = \sum_{k=1}^{N_z} a_k z_k(x, y), \quad (2)$$

式中: $z_k(x, y)$ 、 a_k 分别是第 k 项泽尼克多项式和第 k 项多项式的待定常数。式(2)的矩阵形式可写为

$$\boldsymbol{\phi} = \mathbf{a}^T \mathbf{z}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{a} 是 $\{a_k\}$ 的列向量; \mathbf{z} 是 $\{z_k\}$ 的列向量。由于相位采样点一般多于泽尼克多项式项数,因此式(3)一般是超定方程组。

可以利用最小二乘法、Gram-Schmidt 法或协方差

矩阵法等方法对式(3)求解,从而得出 a_k 的值,这些值就代表了各项 z_k 所表示的像差的大小。

3 数值仿真结果及分析

在反射镜不发生物理损坏且产生的应变较小的前提下,使用弹性小变形假设。此时,利用有限元法求解式(1)可以获得镜面的热变形量^[13]。对于图 1 光学系统中的反射镜,主激光入射的方向为入口。整套光学系统有 4 面反射镜,用 M1、M2、M3、M4 表示。在 M1 后布置探测光,用于探测激光能量;M4 为出口方向,出口方向布置哈特曼探测器。对采用不同的支撑方式,即不同约束条件下的镜面变形进行仿真分析。由于系统中的反射镜的形状、材料、大小都一样,变形结果也基本一致,因此仅对 M1 的情况进行阐述。

反射镜的直径为 50.8 mm,厚度为 12 mm,反射率为 99.95%,与激光方向成 45° 夹角,面型精度为入射激光波长 λ 的 0.1 倍,初始温度为 300 K,采用硅材料的物理参数。入射激光采用基模高斯光束,参数为:功率 $P=2$ kW;波长 $\lambda=1.08$ μm ;准直后的直径 $r=5$ mm;激光照射时间为 5 s。利用 FLUENT 和 Mechanical APDL 软件进行数值计算。

为了达到优化设计支撑方式的目的,选取具有代表性的 4 种支撑方式(图 2)进行对比仿真计算。在计算中,将支撑方式所代表的物理条件转化为位移约束和旋转约束条件。在镜体局部坐标系(x' , y' , z')下,镜体局部坐标及反射镜的三个面的示意图如图 3 所示。

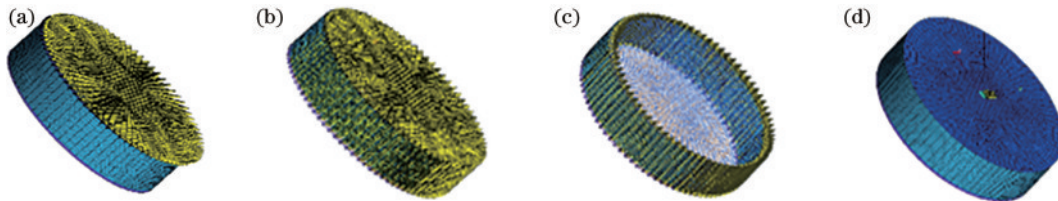


图 2 4 种支撑方式(约束条件)示意图。(a) 1# 支撑方式;(b) 2# 支撑方式;(c) 3# 支撑方式;(d) 4# 支撑方式

Fig. 2 Schematic diagram of the four types of support methods (constraints). (a) 1# support method; (b) 2# support method; (c) 3# support method (d) 4# support method

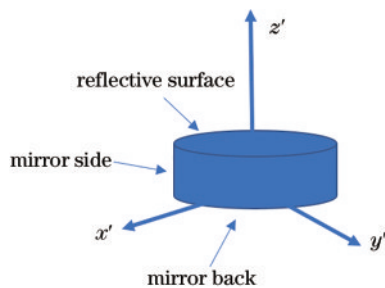


图 3 镜体局部坐标及反射镜的三个面的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the local coordinates and three surfaces of the reflecting mirror

几种支撑方式对应的约束条件分别为:

1) 1# 支撑方式,通过刚性束缚对反射镜背面进行

约束,限制反射镜背面的 x' 、 y' 、 z' 三个方向的位移,即镜体可以朝反射面轴向(z' 轴的正方向)和镜体周围产生形变;

2) 2# 支撑方式,通过刚性束缚对反射镜侧面和背面全部约束,使反射镜侧面在 x' 、 y' 、 z' 三个方向上不能发生位移,且反射镜背面(z' 轴负方向)也不能发生位移,即镜体只能朝反射面轴向(z' 轴正向)产生形变;

3) 3# 支撑方式,通过刚性束缚对反射镜侧面进行约束,使侧面在 x' 、 y' 、 z' 三个方向无法产生位移,即镜体可以朝反射面、镜体背面两个方向(z' 轴的正方向和负方向)产生形变;

4) 4# 支撑方式,通过粘连的方式对反射镜背面中

心处的小块表面进行约束,使小块表面的 x' 、 y' 、 z' 三个方向不发生位移,此外,限制 x' 、 y' 、 z' 三个方向的旋转自由度,其他区域处于自由产生形变的状态,但是整体位移只能朝反射面(z' 轴的正方向)发生。

首先,对反射镜通过反射面吸收入射激光引起的镜体温度分布进行计算。尽管激光照射时长所形成的温度结果不一样,但温度场结构基本类似,如图 4 所示,此时支撑约束方式没有影响。

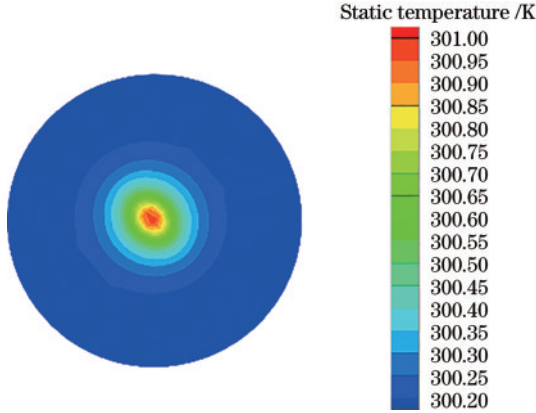


图 4 反射面温度分布($P=1500\text{ W}$, $t=5\text{ s}$)
Fig. 4 Temperature distribution of the reflecting surface ($P=1500\text{ W}$, $t=5\text{ s}$)

然后将镜体的温度分布作为热载荷加载到镜体有限元模型上,同时在局部坐标系中对反射镜施加前述的几种支撑约束条件,求解热弹性方程组,就可以得到镜体的热变形量。结果显示,在 1#~4# 支撑约束条件下,反射镜镜体、反射面的非均匀变形在分布形态上基本相同,如图 5(a) 所示,只是在数值大小、局部差异上区别较大。

几种支撑方式下,反射镜的镜面变形都表现为向外膨胀,导致变形面所在光路上的光程减小,形成有规

律的光程差面,如图 5(b) 所示。几种支撑方式下,反射面光束区域整体变形(即反射镜整体变形)的最大值 $d_{i_{\max}}$ 、相对变形量 $\Delta d_{i_{\max}}$ (变形最大值减去变形最小值的差值)如表 1 所示。

表 1 几种支撑方式的反射面光束区域的最大变形和相对变形值(激光: $P=1500\text{ W}$, $t=5\text{ s}$)

Support method	$d_{i_{\max}}/\mu\text{m}$	$\Delta d_{i_{\max}}/\mu\text{m}$
1#	19.750	2.250
2#	19.000	2.000
3#	10.680	0.140
4#	12.525	0.035

从表 1 中的数据可以看出:

1) 1# 支撑方式下,反射镜的整体变形量最大,达到近 $20\ \mu\text{m}$;反射面光斑区域的相对变形量也达到 $2.250\ \mu\text{m}$ 。

2) 2# 支撑方式下,与 1# 支撑方式下的反射镜相比,整体变形量略小,反射面光斑区域的相对变形量也略小。

3) 3# 支撑方式下,反射镜的整体变形量明显减小,相比 1# 支撑方式,减小约 45.9% ;反射面光斑区域的相对变形量减小 93.8% 。

4) 4# 支撑方式下,反射镜的整体变形量和 3# 支撑方式下反射镜的整体变形量接近,相比 1# 支撑方式减小约 37% ;反射面光斑区域的相对变形量相比 1# 支撑方式减小约 98.4% (将近两个量级);同时,相比 3# 支撑方式,反射面光斑区域的相对变形量再次减小了约 75% ,仅有 $0.035\ \mu\text{m}$ 。

反射镜整体变形和反射面光斑区域的变形形成的光程差(Δ_{OPL} ,绘图时用 d_{ψ} 表示,文中 d_{ψ} 为光程差,而

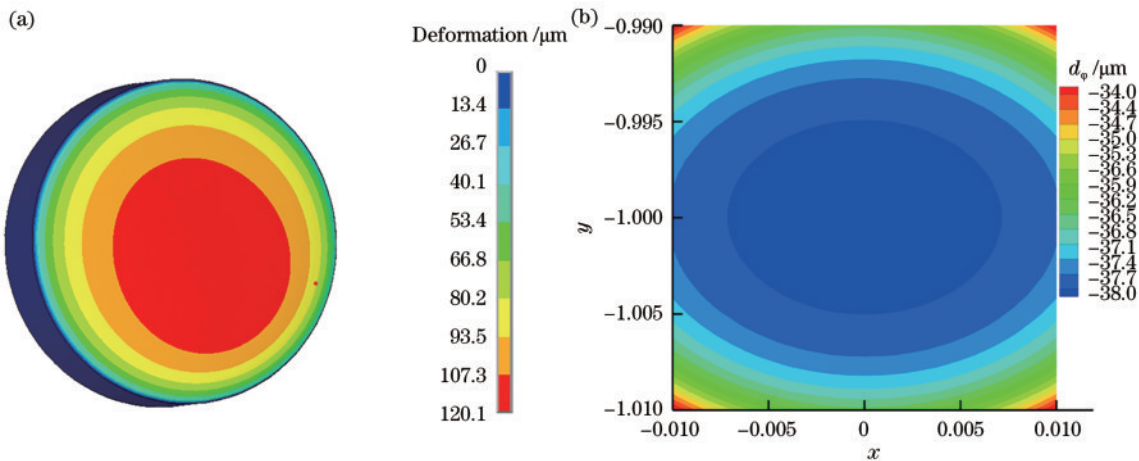


图 5 镜面变形及镜面变形引入的光程差。(a) 反射镜面变形;(b) 镜面变形引入的光程差

Fig. 5 Mirror deformation and introduction of optical path difference. (a) Deformation of the reflecting mirror; (b) optical path difference introduced by the deformation

非相位差)会在激光波前引入附加相位($\Delta_{\text{OPL}} \cdot 2\pi/\lambda$)。对比表 1 的结果可见,不同的支撑方式引入的 Δ_{OPL} 差异较大。反射镜的整体变形的平均部分,会使激光光斑靶点发生平移;而反射面光斑区域的相对变形量,会

导致激光产生倾斜、离焦、球差、慧差等像散,是需要关注的重点部分。并且由于反射,1 μm 的镜面形变量会使光程差变化 2 μm 。图 6 显示了在 1.5 kW 激光照射 5 s 后,反射面光斑区域的 Δ_{OPL} 的情况。

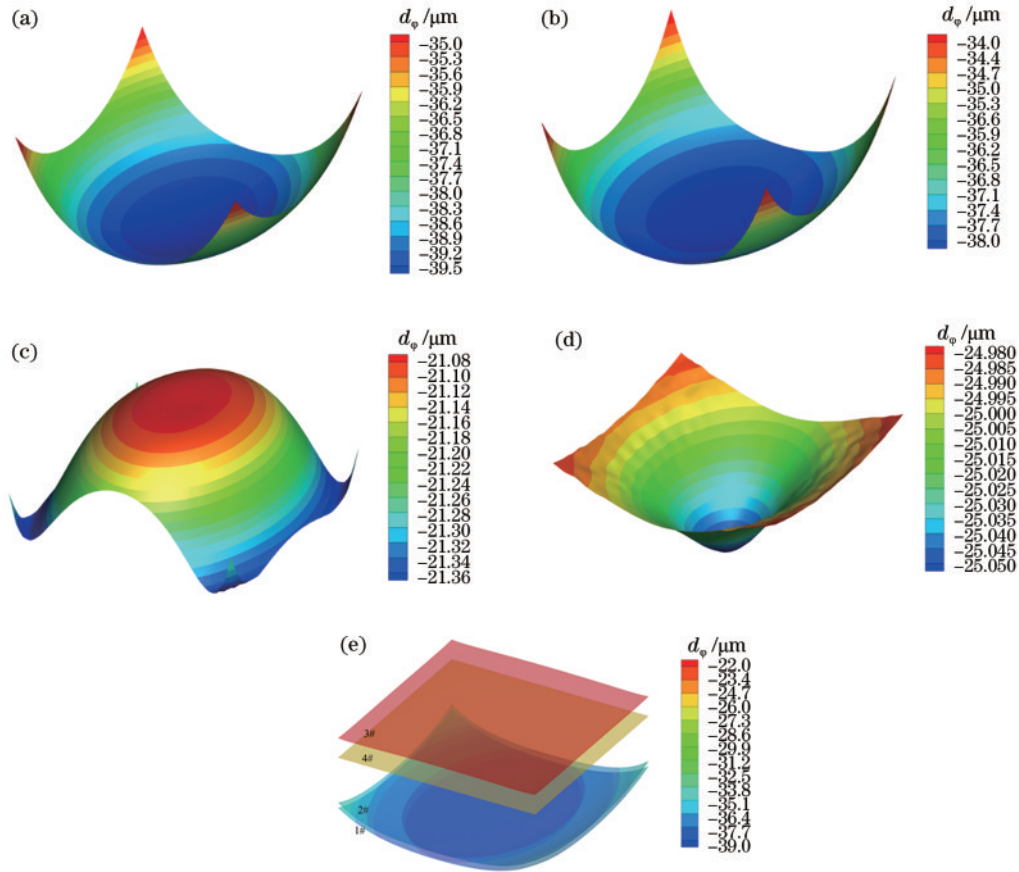


图 6 1#~4#支撑方式下反射面光斑区域的相对变形量引入的光程差 Δ_{OPL} 及对比。(a) 1#支撑方式;(b) 2#支撑方式;(c) 3#支撑方式;(d) 4#支撑方式;(e) 1#~4#支撑方式下的光斑区域 Δ_{OPL} 分布对比

Fig. 6 Distribution of introduced optical path difference (Δ_{OPL}) caused by the relative deformation of the reflecting surface in the beam spot area under 1#–4# support methods and their comparison. (a) 1# support method; (b) 2# support method; (c) 3# support method; (d) 4# support method; (e) comparison of Δ_{OPL} distribution in the spot area under 1#–4# support methods

为了更好地分析反射面光斑区域的相对变形量给激光引入的波前像差,需要选择引入像差最小的反射镜支撑方式。将几种支撑方式下的光斑区域的 Δ_{OPL} 乘 ($2\pi/\lambda$),变成相位差,再进行采样、归一化和正交化;然后,利用泽尼克多项式进行拟合、重构。由于热变形在空间上是连续的,主要表现为低频分量,因此结果仅列出了前 16 项泽尼克多项式的拟合系数值大于 10^{-3} 的项,如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,泽尼克多项式拟合系数值较大的有第 1、2、4、5、9、10、12 等项。其中:第 1 项就是激光波前的整体位移,所以第 1 项的系数被移除掉;第 2 项是倾斜;第 4 项是离焦;第 5 项、第 6 项是一阶像散;第 7 项是一阶彗差;第 9 项是一阶球差;第 10 项是一阶三叶像差;第 12 项是二阶像散;第 14 项是二阶彗差。这些低阶的像差在光束控制系统中可以通过哈特曼等系统进行实时检测,并通过快反镜等自适应系统进行

较好地校正。

从拟合系数值也可以看出,4#支撑方式下的热变形量对激光波前的影响最小,引入的像差最小。因此这种支撑方式在几种支撑方式中是最佳的选择。同时,对于 4#支撑方式,其 4、5、9 等项系数较大,主要体现出的是离焦,离焦效应达到了像散和球差的 3 倍以上。因此,在光束控制器的设计中,可以主要关注平移、离焦像的校正。

为考察激光波前的泽尼克多项式系数拟合的准确性,利用拟合系数值进行了波前相位面重构,并与原始相位进行了比较,结果如图 7 所示,其中,RMS 均为方根。

从重构的相位面形状、重构误差来看,拟合结果比较准确,可以将各项的拟合系数应用到预校正的设计中去。

表 2 几种支撑方式下,波前像差的泽尼克多项式拟合系数
Table 2 Fitting coefficients of Zernike polynomials with different constraints

Zernike term coefficient	1#	2#	3#	4#
1	-115.6610	-107.3550	-62.4910	-73.9150
2	0.0422	0.0312	0.0061	-0.0072
3	0.0001	0.0001	0	0
4	4.8254	2.6940	-0.5773	0.1500
5	3.9922	2.7375	-0.4893	0.0594
6	-0.0054	-0.0061	0.0003	0.0002
7	0.0028	0.0064	-0.0073	0.0035
8	0.0001	0	0	-0.0000
9	0.8978	1.0847	-0.1348	-0.0545
10	0.0033	0.0047	-0.0013	0.0011
11	-0.0002	0.0001	-0.0001	-0.0002
12	0.9152	1.1316	-0.0853	-0.0270
13	0.0009	-0.0006	-0.0008	0.0001
14	0.0048	-0.0055	0.0052	0.0001
15	0.0002	0	0.0010	0

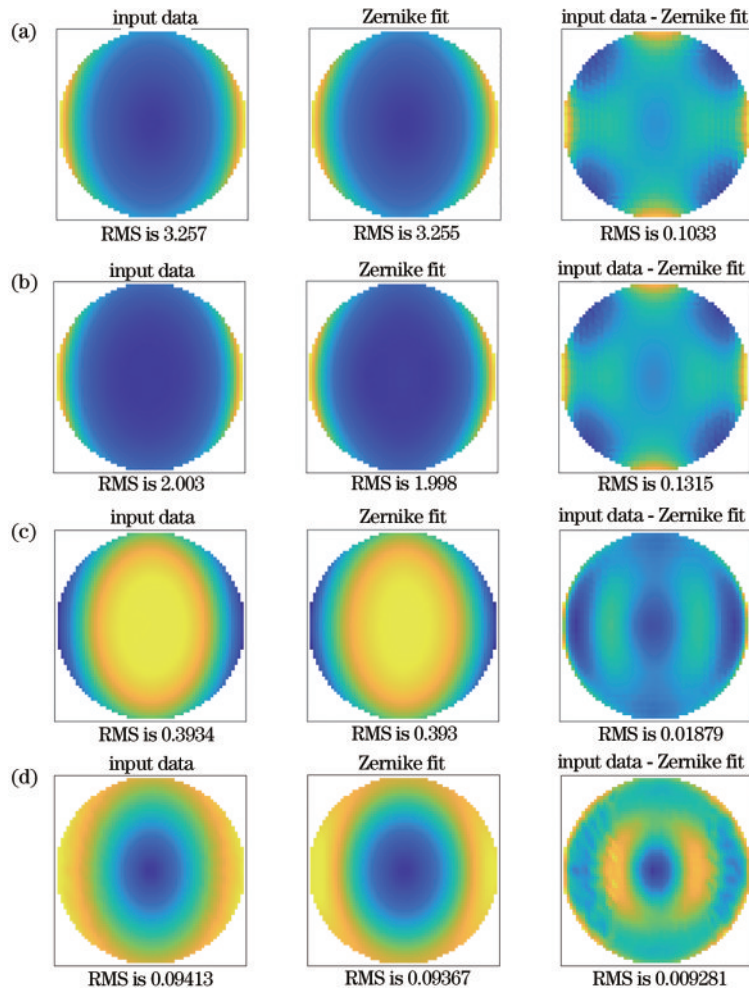


图 7 几种支撑方式下,原始波前相位面、重构相位面、原始相位面与重构相位面的误差。(a) 1#支撑方式;(b) 2#支撑方式;(c) 3#支撑方式;(d) 4#支撑方式

Fig. 7 Errors between the original wavefront phase plane and the reconstructed phase plane, original phase plane and reconstructed phase plane for different support methods. (a) 1# support method; (b) 2# support method; (c) 3# support method; (d) 4# support method

4 实验结果及比较

在实验室条件下,搭建了实验系统,利用功率为 1500 W、光斑直径为 5 mm、波长为 $1.08\ \mu\text{m}$ 的连续激光对与激光方向成 45° 角,边缘底部刚性支撑、边缘其余部分柔性支撑的直径为 50.8 mm、厚度为 12 mm、反射率为 99.95% 的硅材料单反射镜进行了 10~60 s 照射实验,并采用哈特曼系统对镜面变形量进行了测量。从支撑方式上来看,实验中的支撑方式接近自由约束,和仿真分析中限制变形位移最少的 4# 支撑方式接近,又带有局部位移约束的特点,因此约束条件上可认为介于 3# 和 4# 支撑方式之间。

激光照射时长为 20 s 时的实验典型测量结果如图 8~9 所示。图 8 为哈特曼测量的光斑范围内的镜面变形情况,图 9 为实验采集的去掉反射镜整体变形平移量后的反射面光斑区域变形量最大值随激光照射时间的情况。

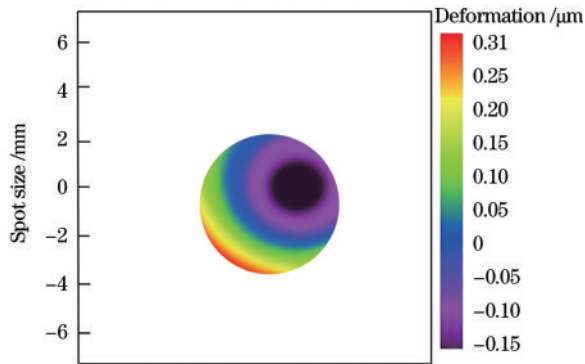


图 8 哈特曼测量的光斑区域镜面变形分布情况

Fig. 8 Deformation distribution of the mirror surface in spot area measured by Hartmann

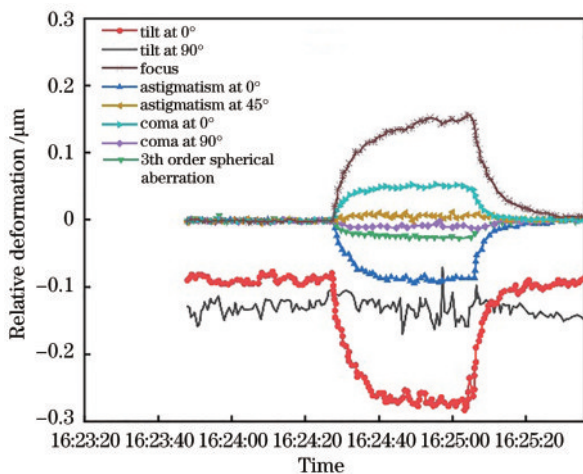


图 9 光斑区域相对变形量最大值随激光照射时间的分布情况
Fig. 9 Maximum value of mirror surface's relative deformation with the laser raying time

从图 8、图 9 可见,在 16:24:40~16:25:00 这 20 s 的照射时间中,镜面的相对变形量最大为 $0.35\ \mu\text{m}$ 左

右,而变形量的面分布与仿真分析结果(图 4)中的光程差面分布具有基本一致的规律。由于镜面变形的仿真分析和实验测量结果基本一致,因而镜面变形对激光波前的影响基本一致。实际获得的波前像差分析结果也类似,都体现为对激光波前主要产生倾斜、离焦的附加影响。

测量的镜面变形量为 $0.08\ \mu\text{m}$ 左右。表 1 中仿真得到的 4# 约束相对变形量为 $0.035\ \mu\text{m}$, 3# 约束相对变形量为 $0.140\ \mu\text{m}$, 仿真分析与实验结果十分接近。

通过仿真分析与实验测量结果的比较,证明了所建立的仿真分析方法可以较好地应用到对光束控制系统的支撑优化设计中去。

5 结 论

基于传热学和热弹性力学的有限元方法,利用 FLUENT 和 Mechanical APDL 软件单向耦合进行数值计算,结合光学分析的泽尼克多项式波前拟合重构方法,对高功率激光应用系统中不同支撑方式反射镜对镜体热变形、反射面光斑区域相对变形量的影响进行了仿真分析。分析结果显示,不同的反射镜支撑方式代表了不同的约束条件,约束条件和温度场共同决定了反射镜热变形的大小和位形,进而对反射激光波前产生了不同的影响。比较了多种典型的反射镜支撑方式对激光波前的影响,结果显示:4# 镜面支撑方式下的镜面相对形变量最小;1# 支撑方式下的镜面相对变形量最大;#3 支撑方式下的镜面相对变形量仅次于 4#。4# 镜面支撑方式相对于 1# 可以有效减小镜面相对变形量约 98.4%,并且在 3# 的基础上仍能减小 75%,因此 4# 反射镜支撑方式即在设计中采用仅约束反射镜背面中心小块区域、其他地方采用柔性支撑的支撑约束方式是最佳的选择。同时,在镜面光斑区域的相对变形量方面,实验的测量结果和仿真分析结果非常相近,波前图像基本一致,验证了所建立的优化设计方法和所得出的优化设计结论,为光束控制系统镜体支撑的选型和设计提供了理论支持。

参 考 文 献

- [1] 何秉高,孙向阳,史丽娟.定向干扰跟踪平台的激光扩束系统设计[J].激光与红外,2018,48(7):903-908.
He B G, Sun X Y, Shi L J. Design of laser beam expanding system in tracking platform of directional interference[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(7): 903-908.
- [2] Qu Y, Jiang Y J, Jia X, et al. Bidirectional beam expanding field mirror for monostatic laser scanning imaging system[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 119: 103973.
- [3] Giliarov M R, Nagulin K Y, Gilmutdinov A K. The laser beam positioning and focusing system for surface treatment of products[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105624.
- [4] 邓万涛,赵刚,夏惠军,等.应用于高能激光系统的发

- 射聚焦装置研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(6): 751-760.
- Deng W T, Zhao G, Xia H J, et al. Research on the transmitting-focusing device applied to high energy laser system[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(6): 751-760.
- [5] Yang L, Wei L, Zhang L. Thermal compensation design of truss structure for large-scale off-axis three-mirror space telescope[J]. Optical Engineering, 2019, 58(2): 023109.
- [6] Hu P P, Zhu H H, He C W. Optimization design of water-cooled mirror for low thermal deformation[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 598-607.
- [7] Bae J Y, Hur H, Kim I J, et al. Experimental and numerical investigations on cooling performance of chemical-vapor-deposited SiC deformable mirror for adaptive optics system in high-power laser radiation environments[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 203: 117950.
- [8] Cutler G, Cocco D, DiMasi E, et al. A cantilevered liquid-nitrogen-cooled silicon mirror for the Advanced Light Source Upgrade[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2020, 27(5): 1131-1140.
- [9] Sun L J, Wu W C, Chen W C, et al. Microstress bonding design of low-distortion mirror assembly[J]. Optical Engineering, 2022, 61(10): 105109.
- [10] Wang K J, Dong J H, Zhao Y, et al. Research on high performance support technology of space-based large aperture mirror[J]. Optik, 2021, 226: 165929.
- [11] 崔永鹏, 何欣, 张凯. 采用三点定位原理的反射镜支撑结构设计[J]. 光学仪器, 2012, 34(6): 56-61.
- Cui Y P, He X, Zhang K. The support design of reflected mirror from the principle of three points supported[J]. Optical Instruments, 2012, 34(6): 56-61.
- [12] 柳建, 李树民, 赵杰, 等. 镜面热变形及吹气流场对光束的联合影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2032-2038.
- Liu J, Li S M, Zhao J, et al. Combined influence of mirror thermal deformation and blowing on beam propagation[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2032-2038.
- [13] Wang Z, Xiao L S, Wang W, et al. Influence of thermal deformation in cavity mirrors on beam propagation characteristics of high-power slab lasers[J]. Optics Communications, 2018, 407: 97-106.
- [14] Zhang L, Liu M, Li D N, et al. Thermal optics property study and athermal design on optical window of IR aiming device reliability testing system[J]. Optik, 2017, 136: 586-594.
- [15] Schmid E, Mahnke P. Thermally deformable mirror to compensate for phase aberrations in high-power laser systems[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(11): 2661-2666.
- [16] Liu L, Lou S L, He Y J, et al. Thermal distortion analysis for silicon reflectors irradiated by high-power laser[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9671: 96710J.
- [17] 柳建, 李树民, 金钢, 等. 沿 Z 型光传输管道轴向吹气对激光传输的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(2): 164-168.
- Liu J, Li S M, Jin G, et al. Influence on beam propagation through Z-shape tube of blowing non-absorbing gas in[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(2): 164-168.
- [18] 柳建, 刘顺发, 金钢. 封闭充气管道中气体热效应对激光传输的影响[J]. 光电子·激光, 2004, 15(1): 100-103.
- Liu J, Liu S F, Jin G. Thermal effects on laser propagating in a closed tube with air[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2004, 15(1): 100-103.
- [19] 胡鹏, 张建柱. 激光系统中元件热效应时空特性分析[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2014001.
- Hu P, Zhang J Z. Analysis of spatio-temporal characters of thermal effects of optical components in laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2014001.
- [20] 王洪刚. 热弹性力学概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- Wang H G. Introduction to thermoelastic mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989.
- [21] 高钢. 热冲击下分区均质材料耦合热弹性问题的变分原理[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 1999, 45(5): 610-612.
- Shang G. Variational principles on coupled thermal-elasticity of zoned homogeneous materials under thermal shock[J]. Wuhan University Journal (Natural Science Edition), 1999, 45(5): 610-612.
- [22] Wang G Y, Hou Z H, Qin L A, et al. Simulation analysis of a wavefront reconstruction of a large aperture laser beam[J]. Sensors, 2023, 23(2): 623.
- [23] 张杏云, 罗芳琳, 李楠, 等. 相位差波前探测与图像重建[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(8): 120-127.
- Zhang X Y, Luo F L, Li N, et al. Phase diversity wavefront sensing and image reconstruction[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(8): 120-127.
- [24] 羊国光, 宋菲君. 高等物理光学[M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- Yang G G, Song F J. Advanced physical optics[M]. 2nd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008.