

基于搜索算法的大口径反射镜支撑结构应力研究

李正达^{1,2,3}, 刘贺宇^{1,2}, 卫金鸿^{1,2}, 李夜金^{1,2}, 孙胜利^{1,2,3*}

¹中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 大口径反射镜的光学面型在系统装调过程中会受到支撑点所产生的机械应力的影响;同时,在进行测试过程中,环境温度的变化也会导致光学面型发生变化。准确定位应力的发生位置、方向和大小将对解决大口径光学系统因应力变化而导致的波前变形起到决定性作用。结合模拟退火算法与集成分析技术,建立了反射镜面型与其各安装点应力之间的线性关系;通过模型仿真实现了对受力位置、方向及大小的精确识别,模型仿真对作用力大小的识别准确度可达 75% 以上。

关键词 测量; 空间光学; 压力测试; 图像分析; 表面测试; 图像

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1412003

Research on Stress of Large Aperture Mirror Supporting Structures by Search Algorithm

Li Zhengda^{1,2,3}, Liu Heyu^{1,2}, Wei Jinhong^{1,2}, Li Yejin^{1,2}, Sun Shengli^{1,2,3*}

¹Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Surface deformation of a large-aperture mirror is affected by the mechanical stress produced on its support points in the process of system adjustment. Moreover, in the process of testing, a change in temperature will also lead to a change in surface deformation. Correct determination of the direction and magnitude of the stress plays a decisive role in solving the wavefront change caused by the stress change in a large-aperture optical system. A new approach for correctly determining the direction and magnitude of the stress, which combines a simulated annealing algorithm and integrated analysis technology to establish the linear relationship between the surface deformation of the mirror and the stress on its support points, is proposed in this paper. Through the simulation, accurate recognition of stress location, direction, and magnitude can be realized, with a stress magnitude recognition accuracy of more than 75%.

Key words measurement; space optics; pressure measurement; image analysis; surface measurements; image

OCIS codes 120.5475; 350.6090; 120.6650; 110.2960

1 引 言

随着遥感卫星及天文望远镜的发展,大口径光学系统已成为遥感相机以及望远镜获取高分辨率的直接手段。大口径光学系统一般会采用反射式结构,其主光学系统由大口径反射镜构成^[1]。同时,为了满足轻量化要求,大型反射镜会采用特殊的支撑方式,主要是背部支撑方式,包括三点支撑、六点支

撑等。通常,较大尺寸的反射镜采用六点支撑结构,而较小的反射镜采用三点支撑结构^[2-3]。

无论采用何种支撑方式,支撑位置与主框架的连接均会受到安装点平面度、主框架变形、温度变化或其他外部环境的影响,而反射镜会受到来自支撑位置的应力作用,从而影响了反射镜的面型和整个光学系统的成像质量。支撑点应力的影响极大地限制了反射镜的最佳面型。多数系统的装调都需要反

收稿日期: 2020-04-01; 修回日期: 2020-04-13; 录用日期: 2020-04-20

基金项目: 中国科学院创新基金(CXJJ-19S030)、中国科学院上海技术物理研究所创新专项(CX-260)

* E-mail: lizhengda@mail.sitp.ac.cn

复多次调整安装点的连接,以获得最佳的应力环境,从而实现最佳的反射镜面型^[4-6]。

目前,在大型反射镜的安装过程中,尚无法有效定位应力的产生位置、大小与方向,因此,人们通常采用反复试错的方式进行调试安装。但这种方式不仅严重影响安装的效率,而且不具有可重复性。此外,对于因温度导致的支撑变形而产生的反射镜面型变化,目前并没有简单可行的识别与纠错手段。

为了实现更好的反射镜装调,以及对后期结构件的设计改进进行指导,可以使用电子散斑干涉仪(ESPI)对支撑结构的形变进行测试^[7];但该方法无法在反射镜安装于支撑结构的情况下进行测试,因为使用该方法进行测试时,无法剥离反射镜所受重力的影响。此外,ESPI相对于一般干涉仪的代价更高。

支撑方式的多样性以及应力产生情况的复杂性,使得目前无法准确地建立反射镜面型与支撑点应力之间的简单的数学关系。为了解决此问题,本文将模拟退火算法与集成分析技术相结合,建立了一种有效描述大型反射镜面型变化与支撑点应力之间关系的数学模型,同时根据反射镜的面型变化反向定位支撑点的应力变化情况,为之后解决支撑点应力的影响提供了精确的定量化指导。

2 基本原理

2.1 原理介绍

反射镜的支撑点是直接连接反射镜与主框架的结构组件,外部环境变化导致的应力变化会通过支撑结构直接作用在反射镜上,导致反射镜的面型发生变化,进而影响光学系统的整体成像能力。若要建立反射镜面型变化与支撑点应力变化的数学关系,需要先假设反射镜面型变化所产生的波前变化为 ΔW ,其与支撑点因应力变化而产生的形变量 $\Delta P^{(n)}$ 之间的数学表达式为

$$\Delta W = \begin{bmatrix} \frac{\partial W}{\partial P^{(1)}} & \frac{\partial W}{\partial P^{(2)}} & \cdots & \frac{\partial W}{\partial P^{(n)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P^{(1)} \\ \Delta P^{(2)} \\ \cdots \\ \Delta P^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: W 为反射镜的面型; $P^{(n)}$ 为第 n 个支撑点的变形; n 表示反射镜的第 n 个支撑点。由于材料在一定应力范围内所发生的形变量与所受应力之间成相对的线性变化关系,且在作用面积不变时,可将此线性关系等效为形变量与作用力的线性关系,因此,反射镜的面型变化量 ΔW 可以分解为每个独立支

撑位置所产生的变化量的线性叠加。每个支撑点的形变量是由该支撑位置所受来自 X 、 Y 、 Z 三个方向的作用力变化 $\Delta F_x^{(n)}\mathbf{x}$ 、 $\Delta F_y^{(n)}\mathbf{y}$ 、 $\Delta F_z^{(n)}\mathbf{z}$ 所产生的形变量的叠加,即矢量的模,其表达式为

$$\Delta P^{(n)} = \left| \begin{bmatrix} \frac{\partial P^{(n)}}{\partial F_x^{(n)}} & \frac{\partial P^{(n)}}{\partial F_y^{(n)}} & \frac{\partial P^{(n)}}{\partial F_z^{(n)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_x^{(n)}\mathbf{x} \\ \Delta F_y^{(n)}\mathbf{y} \\ \Delta F_z^{(n)}\mathbf{z} \end{bmatrix} \right|. \quad (2)$$

因此,反射镜的面型变化量可以分解为每个支撑点所受各个方向作用力的复杂线性叠加。可以将作用力与反射镜面型变化之间的数学关系表示为

$$\Delta W_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 (\omega_j^{(i)} \times \Delta w_j^{(i)}) + O(n), \quad (3)$$

式中: ΔW_{sum} 为反射镜的面型变化; i 表示第 i 个支撑点; j 表示三个坐标系方向(X, Y, Z)中的一个($X: 1, Y: 2, Z: 3$); $\Delta w_j^{(i)}$ 表示在第 i 个支撑点上, X, Y, Z 方向上单位作用力导致的反射镜的面型变化; $\omega_j^{(i)}$ 为单位应力的权重; $O(n)$ 为由应力导致反射镜面型变化的非线性残余量。根据(2)式, X, Y, Z 方向上单位作用力导致的反射镜面型变化可以表示为

$$\Delta w_j^{(i)} = f(\Delta F_j^{(i)} \times \eta), \quad (4)$$

式中: $\Delta F_j^{(i)}$ 为第 i 个支撑点在第 j 个方向上的单位作用力的变化; η 为反射镜材料的应变系数; $f(\cdot)$ 表示支撑点的形变量与其导致的最终面型变化之间的映射关系,该映射关系可由集成分析软件计算得到。

因此,通过反射镜的最终面型变化解算出不同支撑点在不同方向上的作用力的大小,就等价于计算出 $\omega_j^{(i)}$ 的权重。为此,本文使用模拟退火算法通过所测量反射镜的面型变化反向解算出各个支撑点上作用力的变化情况,如此便能够根据反射镜的面型变化得到所需调整的支撑点位置以及后续的结构改造方案。

2.2 反射镜应力分析模型的建立

根据反射镜面型的变化情况,利用模拟退火算法(SA)^[8]预测受力点的位置、受力的方向及大小,就需要建立一套以有限元分析结果为基础的模拟退火模型。模型的构建方法如图1所示。

模型构建的具体步骤如下。

Step 1:首先建立大口径反射镜的结构模型。例如,设计一个 $\varphi 230$ mm口径的平面反射镜,该反射镜的轻量化率为50%,选用常规材料 Zerodur 作为反射镜材料,设计背部六点支撑结构,对于每个支撑点建立如图2所示的坐标系。

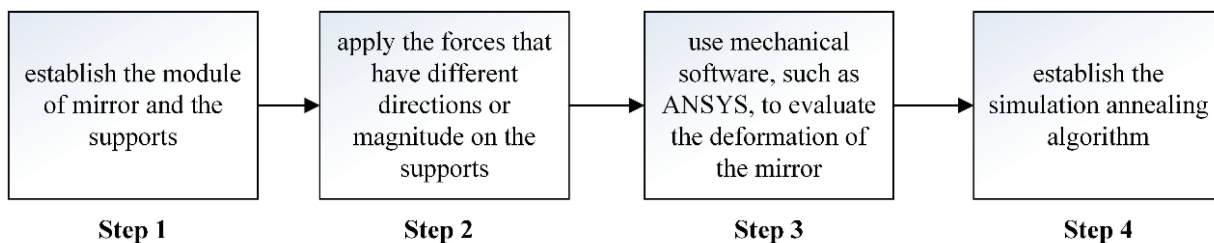


图 1 分析模型构建方法的流程图

Fig. 1 Flow chart of the construction of analysis model

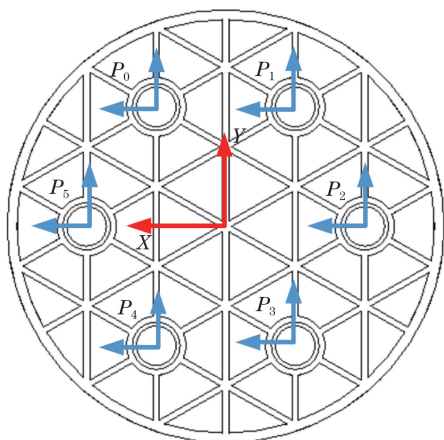


图 2 $\varphi 230$ mm 口径 Zerodur 反射镜轻量化结构图

Fig. 2 Lightweight structure of $\varphi 230$ mm Zerodur aperture mirror

Step 2: 将模型导入有限元分析软件(如 ANSYS)中,对每个支撑位置施加 X、Y、Z 三个方向大小为 1 N 的作用力,如在每个方向上对图 2 所示平面镜的 6 个支撑点位置(P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5)

都施加 1 N 的力,保存反射镜相应的形变量,并将其作为各个方向在单位作用力作用下对应的反射镜面型的变化。

Step 3: 采用有限元分析后,反射镜镜面的形变量是以 X、Y、Z 三个坐标的变化量体现的,而通常测试反射镜面型的变化需要通过干涉仪实现。为了将该方法切实运用到大口径反射镜的应力分析上,需要将有限元模型分析后的变化量与干涉仪的测试变化量进行转换。对于不同特性的大口径反射镜,其面型形变量与干涉仪所测的波前变化情况的转换关系是不同的。图 3 展示了对三种大口径反射镜进行波前测试的示意图。

通常情况下,采用大口径干涉仪产生的平面波对平面反射镜的面型进行测试,如图 3(a)所示;对于球面反射镜的面型,则通过 F 数匹配的干涉仪出射的球面波进行检测,如图 3(b)所示;非球面镜面型的检测方式与球面反射镜类似,但需要使用补偿器对干涉仪出射的球面波进行整形。

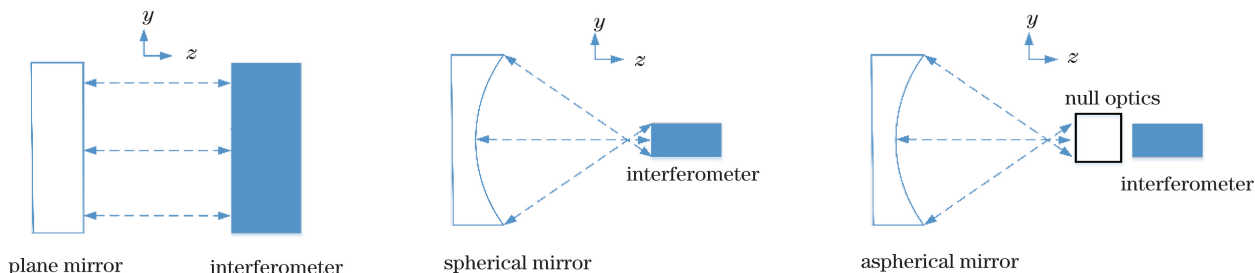


图 3 三种大口径反射镜面型的波前测试方法。(a)平面反射镜;(b)球面反射镜;(c)非球面反射镜

Fig. 3 Wavefront testing methods for surface deformation of three large aperture mirrors.

(a) Plane mirror; (b) spherical mirror; (c) aspherical mirror

对于不同的反射镜类型,将有限元分析结果转换成波前变换的方法如下。

将波前测试点作为坐标原点,如图 4 中的 S 点是反射镜中的任意一个独立位置。

将坐标原点设置在干涉仪出射光波的会聚点处,建立如图 4 所示的坐标系。在反射镜表面有一个点 S,该点的坐标为(X_s 、 Y_s 、 Z_s),该点的矢量表

示为 $\mathbf{S} = X_s \mathbf{i} + Y_s \mathbf{j} + Z_s \mathbf{k}$ 。由应力导致的 S 点的变形量为(ΔX_s 、 ΔY_s 、 ΔZ_s), $\Delta \mathbf{S} = \Delta X_s \mathbf{i} + \Delta Y_s \mathbf{j} + \Delta Z_s \mathbf{k}$ 为该点变形量的矢量表示。则该 S 点的面型变化量可以表示为

$$\Delta W_i = \Delta \mathbf{S} \cdot \frac{\mathbf{s}}{|\mathbf{s}|} = \frac{\Delta X_s \cdot X_s + \Delta Y_s \cdot Y_s + \Delta Z_s \cdot Z_s}{\sqrt{X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2}} \quad (5)$$

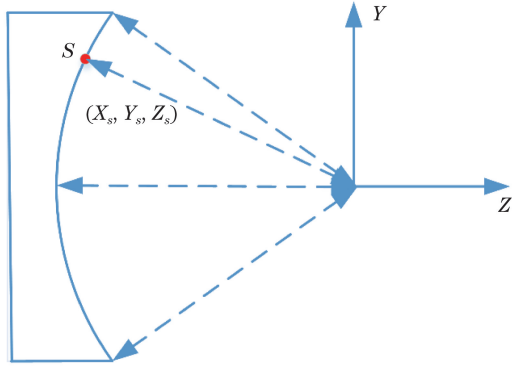


图 4 反射镜上每个位置点的变形量与干涉仪测试的波前变化量的转换示意图

Fig. 4 Relationship between the surface deformation of each point in mirror and wavefront variation tested by interferometer

不同类型反射镜的面型变化量与对应的干涉仪测试波前之间的转换关系为

$$\Delta W_i = \begin{cases} \Delta Z_i, & \text{plane mirror} \\ \frac{\Delta X_s \cdot X_s + \Delta Y_s \cdot Y_s + \Delta Z_s \cdot Z_s}{\sqrt{X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2}}, & \text{spherical or aspherical mirror} \end{cases} \quad (6)$$

将每个单位作用力所产生的波前图分别进行保存。对每个支撑点施加大小为 1 N 且不同方向的作用力会对反射镜面型产生不同的效果。例如,图 5 为 P_0 支撑点在 6 个方向($\pm X$ 、 $\pm Y$ 、 $\pm Z$)上受到大小为 1 N 的作用力时,反射镜表面的面型变化。将这些 1 N 作用力导致的反射镜面型的变化作为(3)式中的 $\Delta w_j^{(i)}$,将单位作用力产生的面型变化应用于(3)式,就可以计算出权重 $\omega_j^{(i)}$ 。

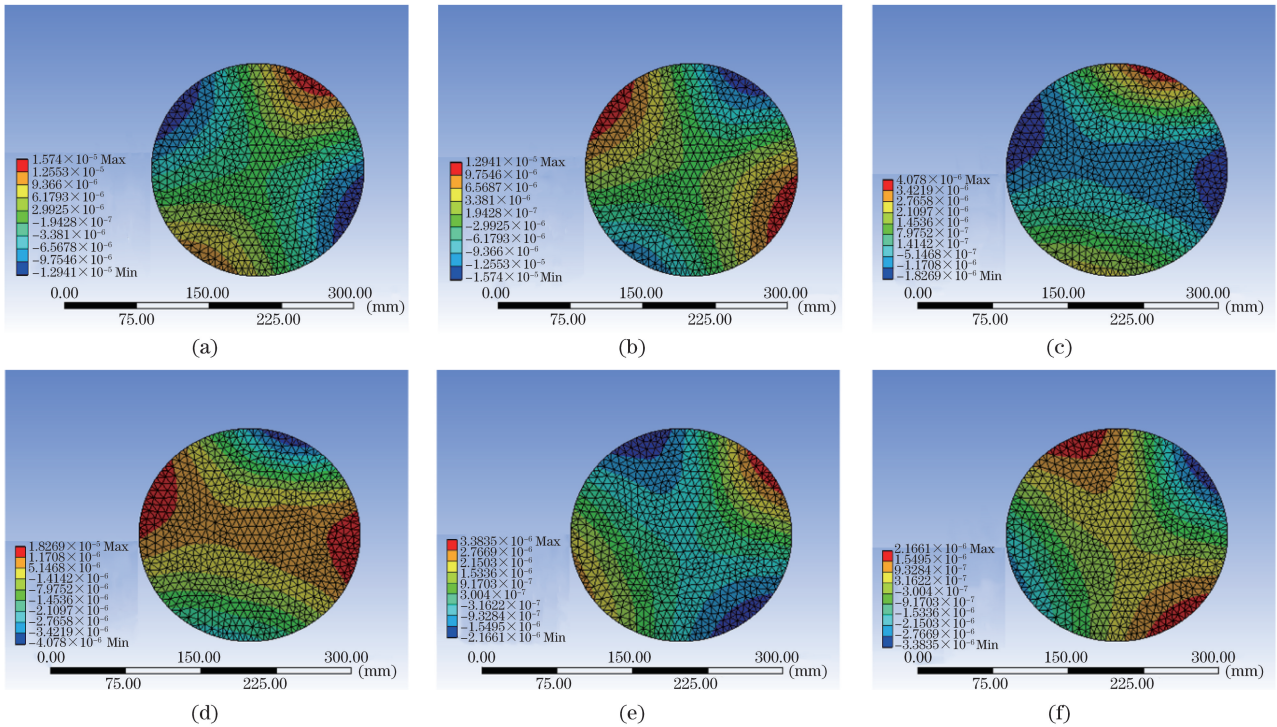


图 5 有限元分析的反射镜面型变化图(取 $\varphi 230$ mm 的平面反射镜支撑点 P_0 作为参考,分别在 $\pm X$ 、 $\pm Y$ 、 $\pm Z$ 方向上施加大小为 1 N 的作用力时,反射镜面型所发生的形变情况)。(a) P_0 支撑点在 $+X$ 方向上受到 1 N 作用力时反射镜的面型;(b) P_0 支撑点在 $-X$ 方向上受到 1 N 作用力时反射镜的面型;(c) P_0 支撑点在 $+Y$ 方向上受到 1 N 作用力时反射镜的面型;(d) P_0 支撑点在 $-Y$ 方向上受到 1 N 作用力时反射镜的面型;(e) P_0 支撑点在 $+Z$ 方向上受到 1 N 作用力时反射镜的面型;(f) P_0 支撑点在 $-Z$ 方向上受到 1 N 作用力时反射镜的面型

Fig. 5 Surface deformation of mirror via FEM simulation(the sample is a $\varphi 230$ mm aperture size plane mirror, and the support point P_0 is imposed 1 N stress in six directions, including $\pm X$, $\pm Y$ and $\pm Z$). (a) Surface deformation of mirror after 1 N stress is imposed on P_0 in the direction $+X$; (b) surface deformation of mirror after 1 N stress is imposed on P_0 in the direction of $-X$; (c) surface deformation of mirror after 1 N stress is imposed on P_0 in the direction of $+Y$; (d) surface deformation of mirror after 1 N stress is imposed on P_0 in the direction of $-Y$; (e) surface deformation of mirror after 1 N stress is imposed on P_0 in the direction of $+Z$; (f) surface deformation of mirror after 1 N stress is imposed on P_0 in the direction of $-Z$

由图 5 可以看出,单一方向的作用力特征明显,可以较好地辨别,但在实际应用中通常会出现多个不同作用点、不同作用方向、不同大小的力共同作用于反射镜的情况,因此想要区别不同方向、位置以及大小的作用力比较困难。图 6 为一组随机作用力作用于反射镜的 6 个支撑点上时,反射镜的面型变化。施加的随机作用力如表 1 所示。

表 1 在 $\varphi 230$ mm 口径平面反射镜的 6 个支撑点上施加的随机作用力

Table 1 A set of random stresses is imposed on the six support points of $\varphi 230$ mm aperture plane mirror

Support No.	Random stresses /N		
	Direction X	Direction Y	Direction Z
Support P_0	10	-8	43
Support P_1	47	18	42
Support P_2	-37	22	-47
Support P_3	12	39	0
Support P_4	2	16	-7
Support P_5	33	16	-34

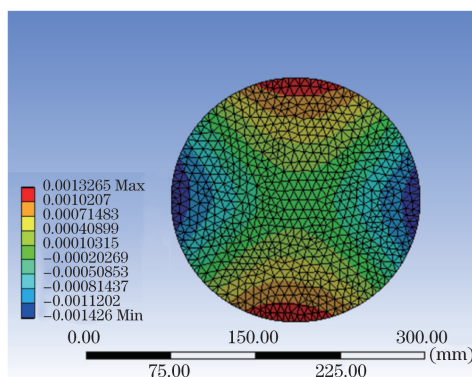


图 6 在 6 个支撑点上施加随机作用力的情况下,反射镜面型的变化情况

Fig. 6 Surface deformation of mirror after a set of random stresses are imposed on six support points

由图 6 可见,在一组随机作用力下的反射镜面型变化与图 5 中所示的单位力产生的面型变化是完全不同的,无法识别力的作用位置、方向与大小。为了解决这一问题,需要特定的搜索算法,如模拟退火算法。

Step 4: 建立模拟退火算法的流程图,见图 7。

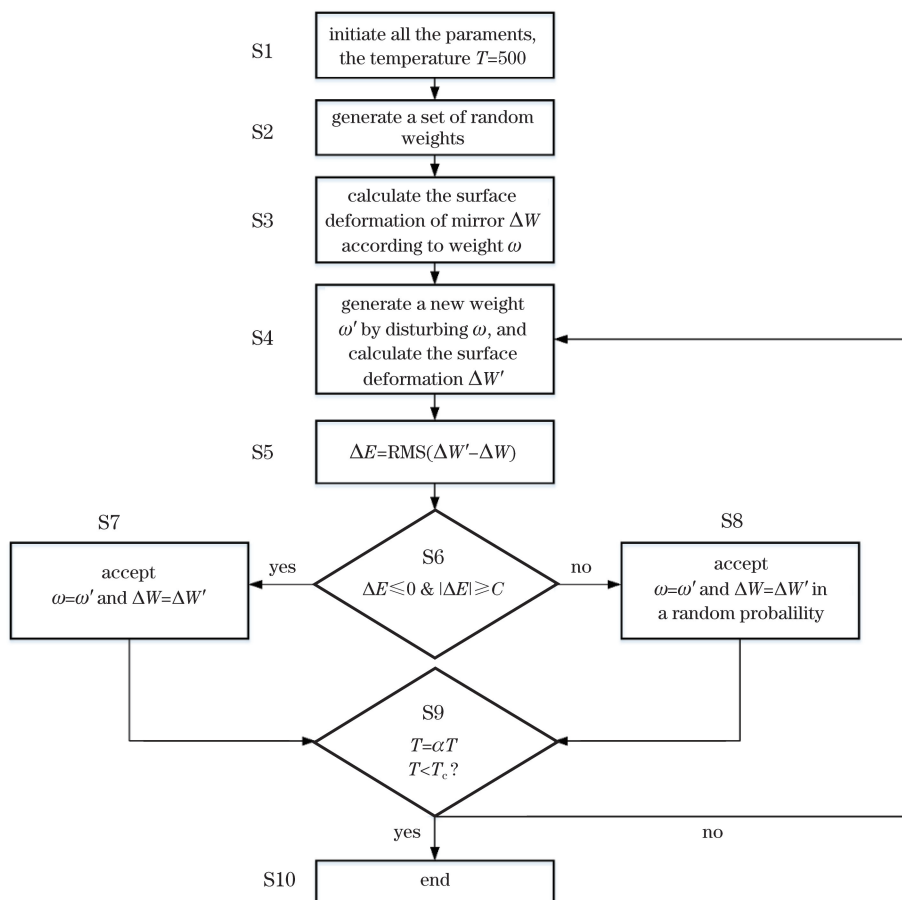


图 7 模拟退火算法流程图

Fig. 7 Flow chart of simulated annealing algorithm

第一步(S1),初始化各个参数,如设置初始温度 $T=500$ 。

第二步(S2),首先产生一组随机权重 ω ,随机权重值的个数为支撑点的数量 $3n(x,y,z$ 共 3 个力方向), n 表示反射镜的支撑位置数。

第三步(S3),根据随机产生的权重 ω ,以及集成分析软件得到的计算结果,利用(3)式计算反射镜的面型变化 ΔW 。如此,只计算了总面型变化相对单位面型变化的线性部分。同时,通过计算可知非线性变化部分相对于线性变化部分可以忽略不计。如图 8 所示,施加 $-50\sim 50$ N 的作用力于 P_0 位置的

X,Y,Z 三个方向,然后使用 1 N 的单位力进行拟合,拟合公式为

$$\Delta = \text{RMS}(\Delta W_i - i \times \Delta W_1), \quad (7)$$

式中: Δ 为面型残差; i 表示力的大小,单位为 N; ΔW_i 表示 i N 的作用力使反射镜面型产生的变化; ΔW_1 表示 1 N 的作用力使反射镜面型产生的变化;RMS 表示均方根函数。如图 8 所示, i N 大小的作用力产生的反射镜面型变化减去 i 倍 1 N 作用力产生的面型变化得到的结果小于 0.0035 nm(RMS),因此可以认为 i N 大小的作用力产生的反射镜面型可以由 i 倍 1 N 作用力所产生的面型变化叠加表示。

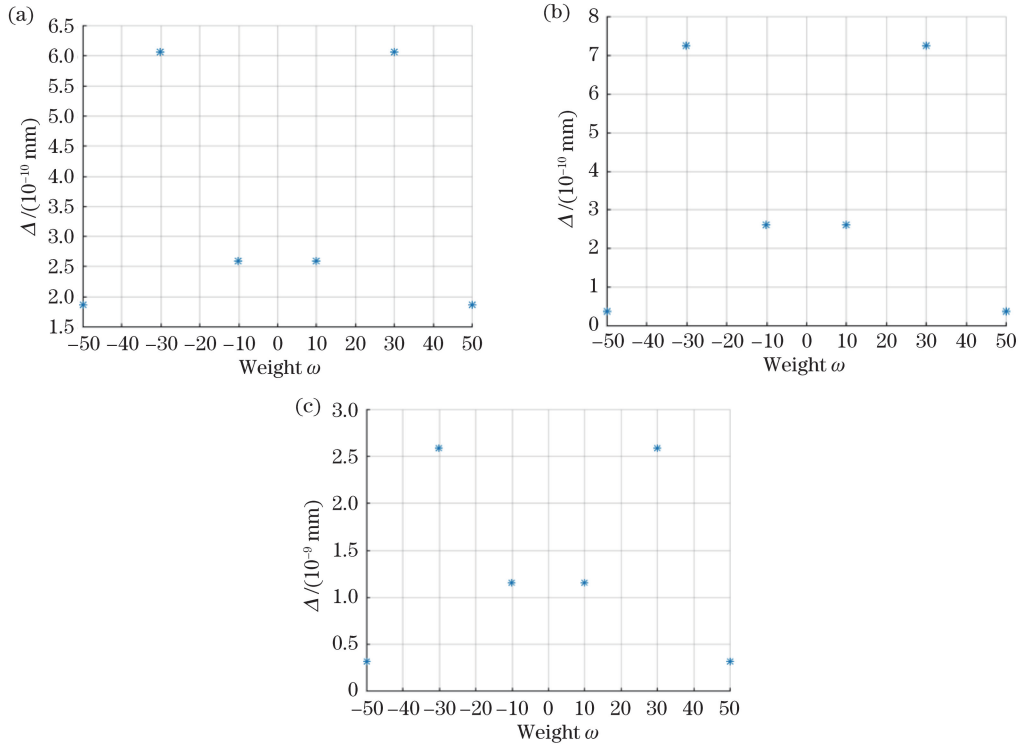


图 8 P_0 支撑点位置在 X,Y,Z 三个方向上由 n N 作用力所产生的面型变化减去 n 倍由单位力产生的面型变化后所得的 RMS 值。(a) X 方向;(b) Y 方向;(c) Z 方向

Fig. 8 RMS of surface deformation variation which is the differences between the deformation variation caused by n N stress and n times deformation caused by 1 N stress. (a) In the direction of X ; (b) in the direction of Y ; (c) in the direction of Z

第四步(S4),扰动初始权重产生一组新权重 ω' ,并计算其 $\Delta W'$ 。扰动方法为

$$\omega' = \omega + r \times (1 - T/T_{\max})^K \times \text{sgn}(r - 0.5), \quad (8)$$

式中: r 为 $0\sim 1$ 范围内的随机数; T 为当前温度; T_{\max} 为初始温度的最大值; K 为调整系数, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; ω 为扰动前的权重; ω' 为扰动后的权重。

第五步(S5),计算两组权重下反射镜面型变化的差值,并计算差值的 RMS 值。

第六步(S6),判断该差值是否小于 0,并且判断

它的绝对值是否大于等于标准值 C 。 C 定义了面型的最小变化量,如可以定义为 $C=0.01\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm)。

第七步(S7),当第六步的判断为正确时,接受 $\omega = \omega', \Delta W = \Delta W'$ 。

第八步(S8),当第六步的判断为错误时,Metropolis 准则接受 $\omega = \omega', \Delta W = \Delta W'$ 。

第九步(S9),降低温度, $T = \alpha T$ (α 为温度衰退系数,可以取小于 1 的正数,如 0.99),判断 T 是否小于 T_c , T_c 为最低温度。

第十步(S10),满足第九步的条件时,结束循环,否则回到第四步,重新产生一个扰动后的权重,

继续循环,直至满足结束条件为止。

3 反射镜应力分析模型的有效性验证

为了测试本文方法的有效性,建立一个如图 2 所示的 $\varphi 230$ mm 平面反射镜,反射镜背部用 6 个支撑孔进行支撑,随机产生 5 组作用力作用于 6 个支撑点位置,如表 2 所示(F_{stress} 表示所施加的作用力

的大小, F_{result} 表示通过反射镜面型变化反向计算出的作用力的大小)。采用模拟退火算法,根据反射镜的面型变化反向计算出的作用力的方向及大小,与实际施加的作用力的方向及大小十分接近,且能够保证每个反射镜面型拟合后的残余误差小于 5 nm (RMS),约为 0.01λ ($\lambda = 632.8$ nm),满足大口径光学系统对反射镜的面型要求。

表 2 施加 5 组随机力后,通过反射镜面型反向计算得到的力的方向与大小

Table 2 Directions and magnitude of stresses calculated via surface deformation under the five sets of random stresses

No.		Stress /N								
		Support P_0			Support P_1			Support P_2		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	F_{stress}	10	-8	43	47	18	42	-37	22	-47
	F_{result}	20.3	-5.2	39.9	25.1	11.1	28.8	-32.5	2.5	-60.2
2	F_{stress}	21	1	23	5	-11	30	22	41	25
	F_{result}	46.2	13.9	23.5	-6.3	-15.2	22.3	16.9	37.8	13.0
3	F_{stress}	-28	-42	-1	2	-13	-41	-40	39	0
	F_{result}	-18.3	-42.9	-9.6	10.9	-24.6	-42.1	-37.8	21.5	17.3
4	F_{stress}	-39	-24	8	-27	49	-24	16	-17	-2
	F_{result}	-31.6	-18.5	0.8	-27.4	61.7	-36.3	14.1	-3.2	4.4
5	F_{stress}	-21	30	-27	-10	-47	-17	-1	20	41
	F_{result}	-31.2	28.2	-39.9	-14.1	-55.8	-25.0	-4.0	8.1	44.2

No.		Stress /N								
		Support P_3			Support P_4			Support P_5		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	F_{stress}	12	39	0	2	16	-7	33	16	-34
	F_{result}	12.3	13.8	-15.1	1.1	9.3	-11.7	12.0	21.4	-29.8
2	F_{stress}	36	-48	-3	-41	2	33	31	13	-40
	F_{result}	43.0	-47.5	-10.3	-33.8	9.7	32.3	27.7	26.6	-35.2
3	F_{stress}	31	-1	-44	32	48	-42	-44	-21	-13
	F_{result}	29.5	-15.7	-13.9	29.5	46.0	-8.7	-41.0	-11.3	-2.1
4	F_{stress}	8	-34	18	32	15	-37	-10	-7	-30
	F_{result}	0.4	-30.1	43.8	24.6	16.2	-7.6	-22.8	-7.6	-14.5
5	F_{stress}	-32	48	-46	22	30	3	3	-49	-1
	F_{result}	-22.2	31.7	-39.9	34.7	39.6	-33.1	2.9	-36.8	-12.7

对 5 组随机产生的力进行分解后可知,所识别作用力方向的准确性为 98%,即通过面型反向识别的作用力方向与输入的作用力方向基本相同。此外,作用力幅度的计算准确率 A 达到 75%,如表 3 所示。计算准确率的公式为

$$A = \text{RMS} \left[\frac{F_{\text{stress}} - F_{\text{result}}}{\max(F_{\text{stress}})} \times 100\% \right]。 \quad (9)$$

根据图 9 所示的仿真计算结果可知该模型能够正确区分出每个受力支撑点的位置,并能够判断出

每个支撑点所受应力的具体方向以及可能的作用力的大小,作用力大小的识别准确率高于 75%。

表 3 计算结果的准确性分析

Table 3 Accuracy analysis of calculation results

No.	Residual errors /nm	Accuracy rate of orientation /%	Accuracy rate of magnitude /%
1	4.68		
2	2.16		
3	4.82	98	75
4	3.72		
5	2.69		

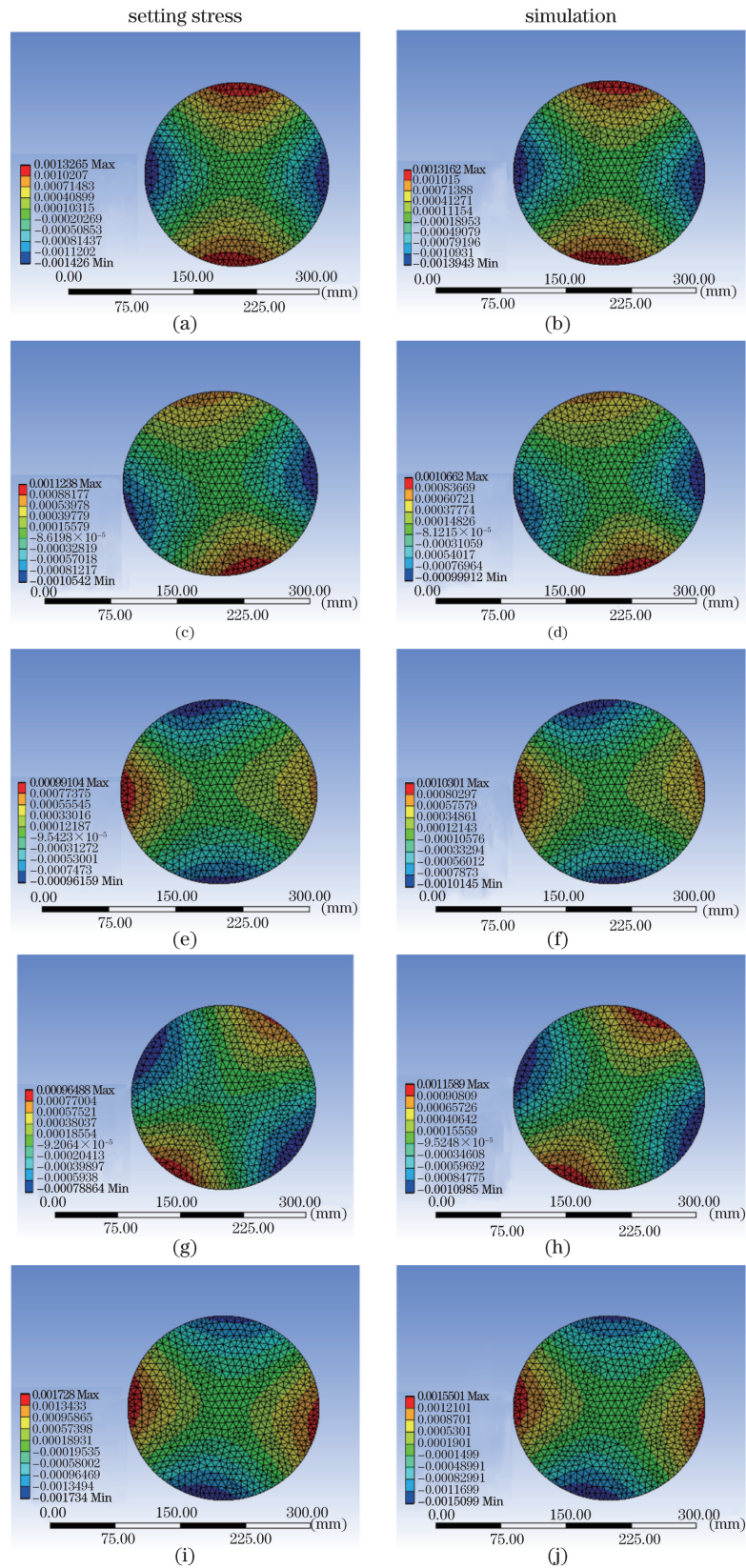


图 9 随机作用力所产生的反射镜面型的变化以及通过搜索算法计算得到的各位置与方向上的作用力所产生的面型变化。

(a)(b) P_0 处; (c)(d) P_1 处; (e)(f) P_2 处; (g)(h) P_3 处; (i)(j) P_4 处

Fig. 9 Surface deformation variation of mirror imposed by the 5 sets of random stresses shown in the table 2 and surface deformation variation calculated via search algorithm. (a)(b) P_0 ; (c)(d) P_1 ; (e)(f) P_2 ; (g)(h) P_3 ; (i)(j) P_4

4 结 论

反射镜支撑应力的变化是反射镜面型变化的关键因素,有效地定位应力的特性对反射镜装调、结构支撑设计与热设计能力的提升具有重要的推动作用。为了实现对大型反射镜应力位置、方向及大小的识别,本文提出了将集成分析与退火算法相结合的方法,针对反射镜的面型变化反向求解各个支撑点的作用力的变化,作用力方向的识别准确性可达98%,作用力大小的识别准确性达到了75%。该方法可为大型反射镜的安装与大口径相机的研制提供关键的应力解决方案。

参 考 文 献

- [1] Sabelhaus P A, Decker J. James Webb space telescope (JWST) project overview[C] // 2006 IEEE Aerospace Conference. 4-11 March 2006, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2006: 9109863.
- [2] Warden R M. Cryogenic nano-actuator for JWST[C] // Proceedings of the 38th Aerospace Mechanisms Symposium, May 17-19, 2006, Virginia, United States. Washington: AMS, 2006: 239-252.
- [3] Xu H, Yang L W, Yang H S. Recent progress of active support system for large optical telescope primary mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 100002.
徐宏, 杨利伟, 杨会生. 大型光学望远镜主镜主动支撑系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 100002.
- [4] Hu H F, Luo X, Xin H W, et al. Layout optimization of equal-force supports for ultra-large optical fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0422003.
胡海飞, 罗霄, 辛宏伟, 等. 超大口径光学制造均力支撑布局优化[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0422003.
- [5] Wu Q B, Chen S J, Dong S. Optimization of parameters structural design of lightweight reflector [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(5): 466-471.
吴清彬, 陈时锦, 董申. 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 466-471.
- [6] Fu Y, Xu C J, Ding Y L. Scanning mirror supporting structure of aerial remote sensing camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(6): 550-554.
付芸, 徐长吉, 丁亚林. 航空遥感相机扫描反射镜支撑技术[J]. 光学精密工程, 2003, 11(6): 550-554.
- [7] Morris M N, Millerd J, Brock N, et al. Dynamic phase-shifting electronic speckle pattern interferometer [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5869: 58691B.
- [8] Xin W X, Xie J X. Modern optimization calculation (second edition) [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 30-72.
邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2006: 30-72.