

# 基于混合优化方法的大口径主镜设计

孙奇<sup>1,2,3\*</sup>, 宫雪非<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

<sup>2</sup>中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 混合使用响应面近似模型和直接优化方法对主镜进行轻量化和支撑点布局集成设计,并以 2.5 m 地基光学望远镜的超低膨胀主镜为例,对该方法的参数敏感性分析、基于 Kriging 响应面多目标遗传算法的全局优化、基于混合整数序列二次规划梯度算法的局部优化过程进行研究,并采用折衷规划理论制定评价函数。集成优化结果表明,与相同尺寸的实心镜相比,主镜采用背部局部开放式六边形孔夹芯三明治结构时,轻量化率为 72.13%。主镜轴向采用 54 点 whiffletree 被动支撑,在光轴竖直及重力载荷下镜面变形的均方根值为 6.08 nm,各项指标均满足设计要求。

**关键词** 地基光学望远镜; 轻量化设计; 主镜支撑; 集成优化设计; 混合优化方法

中图分类号 TH751

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2212001

## Design of Large-Aperture Primary Mirror Based on Hybrid Optimization Method

Sun Qi<sup>1,2,3\*</sup>, Gong Xuefei<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

<sup>2</sup>CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In this paper, a hybrid use of response surface approximation methodology and direct optimization method is utilized to design the lightweight and support point layout of the primary mirror. Taking the ultra-low expansion primary mirror of a 2.5 m ground-based optical telescope as an example, the parameter sensitivity analysis of this method, the global optimization of multi-objective genetic algorithm based on Kriging response surface, the local optimization process based on the gradient algorithm of the mixed-integer sequential quadratic programming are studied, and the evaluation function is formulated using the compromise programming theory. The results of integrated optimization show that, compared with the solid mirror of the same size, the lightweight rate is 72.13% when the primary mirror adopts a partially open hexagonal hole sandwich structure on the back. The primary mirror adopts 54-point whiffletree passive support in the axial direction. The root mean square of the mirror surface deformation under the vertical optical axis and gravity load is 6.08 nm, and all indexes meet the design requirements.

**Key words** optical design; ground-based optical telescope; lightweight design; mirror support; integrated optimization design; hybrid optimization method

**OCIS codes** 220.0220; 110.6770; 120.4640; 120.4880

## 1 引 言

目前我国正在建设和预研数架 2.5 m 地基光学

望远镜,如南极天文台规划中的昆仑暗宇宙巡天望远镜,拟建设在中国西部的大视场巡天望远镜、太阳望远镜及测光望远镜。由于这些望远镜的台址大多

收稿日期: 2020-06-12; 修回日期: 2020-07-13; 录用日期: 2020-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(11873014)

\* E-mail: sunqi181@mails.ucas.ac.cn; \*\* E-mail: xfgong@niaot.ac.cn

处于高海拔、低温度和不易到达的环境下,存在望远镜组件不易输送、科学家难以长期驻留等问题,对望远镜的主镜设计提出了更高的挑战。系统总质量和面形精度是极端环境下主镜设计的两个关键因素,一方面要尽可能地提高面形精度,进而提升光学系统的成像质量;另一方面需要对主镜进行轻量化设计,以保证运输过程中不超过特殊环境下的最大运载能力。以南极内陆望远镜为例,该望远镜受直升机运载能力的限制,要求单件物体的质量不得高于4 t。

国内对大口径反射镜的结构优化进行了深入研究,如中科院南京天光所许明明等<sup>[1]</sup>基于多目标遗传算法(MOGA)对长为1600 mm、宽为800 mm的矩形反射镜形状及支撑位置进行优化,结果表明,轻量化后的反射镜质量和面形精度均满足设计要求。中科院长春光机所叶伟楠等<sup>[2]</sup>在口径为2 m的SiC主镜轻量化结构参数优化设计中采用拉丁超立方采样(LHS)方法建立了Kriging响应面近似模型,并基于该模型进行MOGA优化,获得了满足设计要求的参数最优解。中国工程物理研究院沈展鹏等<sup>[3]</sup>针对长为610 mm、宽为440 mm的矩形反射镜轻量化和支撑问题,分别采用基于有限元直接优化和基于响应面近似模型优化方法进行轻量化设计,结果表明,两种方法的优化效果均比较显著。

上述研究均采用单一优化方法设计反射镜的结构,对于多参数、宽取值范围的情况,仅依靠直接优化容易陷入局部最优解、优化效率低;对于输入输出呈高度非线性关系的情况,建立高精度响应面需要庞大的实验样本,优化效率较低,样本数量不足又不能反应输出随输入变化的真实情况。因此,本文针对2.5 m地基光学望远镜的超低膨胀(ULE)主镜,结合响应面近似模型优化和直接优化两种方法的优点,提出了一种包含参数敏感性分析、基于Kriging响应面MOGA全局优化、混合整数序列二次规划(MISQP)局部直接优化的新方案。

## 2 主镜结构优化方案

针对地基光学望远镜主镜结构的优化,主要有基于有限元计算的直接优化和基于响应面的近似模型优化两种方法。

### 2.1 基于有限元计算的直接优化

直接优化法基于大量重复性的有限元计算,通过多次迭代,使设计空间逐渐缩小并朝着最优解方向靠近,最终依靠算法的收敛性获得问题的最优解,

具有过程直观、操作简单、易于实现自动化求解等优点。但该方法在每次优化过程中都需要进行参数化模型建立、网格划分、有限元求解、后处理结果输出等一套完整的有限元分析过程,当模型复杂、参数多、取值范围宽时,优化效率较低,难以应用到实际工程中<sup>[3]</sup>。虽然可通过梯度算法提高优化效率,但不可避免地会陷入局部最优解。此外,直接优化法不具有重复使用性,当目标函数或约束条件改变时,需重新进行优化设计。

### 2.2 基于响应面的近似模型优化

基于响应面的近似模型优化通过实验数据的有限元计算结果近似构造输入输出之间的多项式函数,从而在设计空间内快速定位最优解并获取其近似值,不需要执行完整的有限元计算流程<sup>[4]</sup>。相比直接优化法,该方法避免了大量重复性的有限元计算,可在短时间内探索多个设计方案以获取全局最优解的近似值;且响应面模型具有复用性,当目标函数或约束条件改变时,该模型仍然满足使用者的个性化需求。但对于输入输出呈高度非线性问题,建立全局设计空间内的高精度响应面模型需要庞大的实验样本,若样本数量不足,会导致响应面模型不可靠,难以进行后期优化。

### 2.3 本文方案

将上述两种方法混合使用,分别将其放置在优化设计的不同环节中,使优化效率最大化。由于主镜的优化参数包含结构参数和支撑位置参数,总输入参数大于10,而设计点的数量会随输入参数的增加而增加,严重影响优化效率。因此,先对输入参数进行敏感性分析,通过设定阈值识别出对输出参数重要/次要的输入参数,在后期优化中仅考虑这些重要的输入参数,对于次要参数可以通过经验公式或工程经验确定。

基于响应面近似模型进行全局优化的关键是构建响应面,其目的是用最少的采样点获得足够多的信息,有效位置的采样点不仅可以减少总体采样点的数量,还可以提高响应面的精度。LHS是常用的实验设计算法,可在整个设计空间中随机采样,且能保证任一点没有与其他点共享设计空间的行或列,对设计空间的填充性较好<sup>[5]</sup>。实验设计采用的最优空间填充(OSF)算法本质是经过多次迭代优化的LHS,可最大限度地扩大点与点之间的距离,从而在整个设计空间中实现更均匀的分布,如图1所示。基于实验设计结果建立Kriging响应面,Kriging是一种基于随机过程和统计理论的多维插值建模方

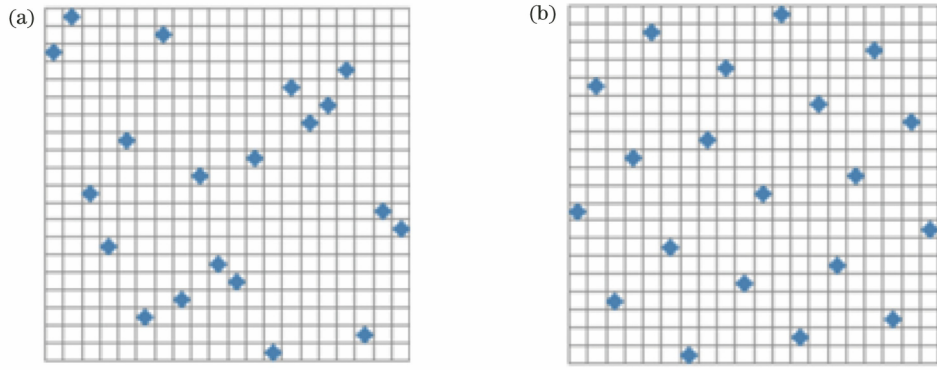


图 1 2 个输入参数 20 个设计点的分布情况。(a) LHS;(b) OSF

Fig. 1 Distribution of 20 design points with 2 input parameters. (a) LHS; (b) OSF

法,表现为基于全局设计空间的标准多项式模型和正态分布过程中的局部偏差。Kriging 提供的细化功能可不断提升响应面质量,从而适应输出参数的高阶非线性变化。与回归分析法相比,Kriging 能提供更好的全局预测<sup>[6]</sup>。建立 Kriging 响应面后,还需插入验证点检查响应面精度,在精度满足要求后,采用 MOGA 进行基于响应面模型的全局优化,MOGA 是一种多目标全局优化算法,可通过模拟生物自然选择和遗传机理的进化过程搜索最优解,不受函数求导和连续性的限定,具有自动优化搜索空

间的优点,能避免陷入局部最优解<sup>[7]</sup>。

尽管 Kriging 响应面在全局设计空间中满足所需的精度,但在局部范围内仍存在一定误差,因此,需在响应面最优解取值附近进行直接优化以验证其是否为最优解。可基于 MISQP 算法进行局部优化,MISQP 是一种高效的梯度优化算法,利用函数的导数、梯度等数学特征确定迭代方向和步长,当目标函数在设计空间内满足连续、单峰特征时,该算法能沿最快的下降方向求取问题的最优解<sup>[8]</sup>,主镜结构的优化流程如图 2 所示。

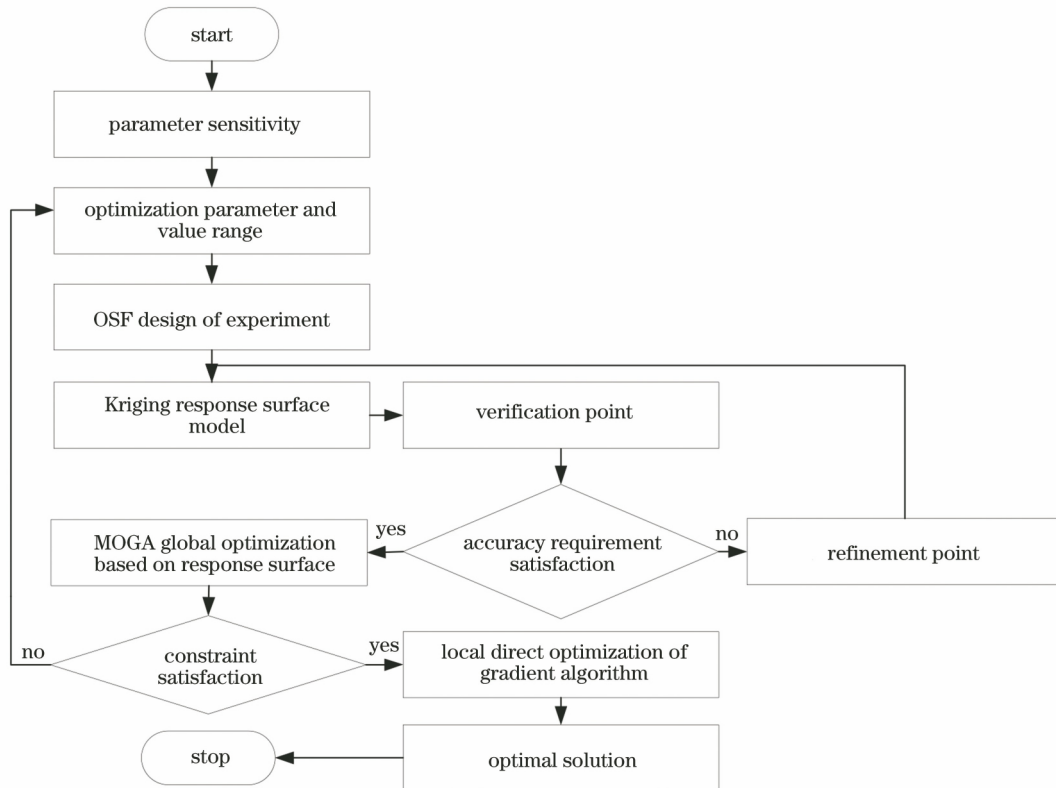


图 2 主镜结构的优化

Fig. 2 Optimization of the primary mirror structure

### 3 主镜轻量化及轴向支撑设计

为验证上述流程在主镜结构优化中的可行性,以 2.5 m 地基光学望远镜的 ULE 主镜为例,对其轻量化结构和轴向支撑点布局进行集成设计。

#### 3.1 主镜技术指标

参考南极 2.5 m 望远镜的光学参数及设计要求,以平背式主镜为研究对象,其中孔直径为 400 mm,曲率半径为 5172 mm;考虑到传统 2.5 m 级望远镜被动支撑主镜的直径和厚度比,初定镜面的中心厚度为 250 mm;受直升机调运阶段限制,主镜系统及运输包装总质量不得超过 4 t;综合考虑镜室、支撑结构和包装各部分,分配给主镜的最大质量为 1.5 t。

主镜重力载荷可按轴向力和径向力分解,相应配备轴向支撑和径向支撑结构,轴向支撑与径向支撑的设计会直接影响主镜的面形精度,进而影响望

远镜的成像质量。相比径向支撑,轴向支撑设计更复杂,原因是其支撑点数量更多、面形敏感性更强。因此,采取主镜轻量化和轴向支撑点布局集成优化设计,再基于最优参数取值进行径向支撑设计,根据瑞利准则和 Marechal 准则确定主镜面形误差<sup>[9]</sup>。由于光学系统精度的要求较高,设定主镜镜面变形的均方根值(RMS)低于  $\lambda/50$ ,取激光波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,即镜面变形 RMS 低于 12 nm。

#### 3.2 主镜轻量化设计

ULE 主镜的性能参数如表 1 所示,其中,  $E$  为弹性模量,  $\rho$  为质量密度,  $\nu$  为泊松比, CTE 为热膨胀系数,  $K$  为热导率,  $C_p$  为比热容。ULE 在迅速加热和冷却过程中不会产生导致破裂的应力,能够将超薄的部件通过火焰熔接在一起形成刚性的夹芯结构,再通过熔接物封接技术将夹芯层和上下面板熔接成一个封闭式整体<sup>[10]</sup>。

表 1 ULE 的性能参数

Table 1 Performance parameters of ULE

$E / \text{GPa}$	$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\nu$	CTE / ( $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	$K / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	$C_p / \text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
67	2205	0.18	0.03	1.3	766

主镜轻量化结构主要有背部完全开放式、背部局部开放式和背部封闭式结构,在相同尺寸下,封闭式结构的刚度大于开放式。考虑到主镜的通风散热性能,采用背部局部开放式的夹芯三明治结构。为了保证主镜的结构刚度和轻量化率,轻量化后的主镜孔形状为近似蜂窝的六边形<sup>[11]</sup>。为了便于实施轻量化和轴向支撑点布局集成设计,先以实心背板进行优化,确定最优参数后,在不影响镜面面形的前提下对背板进行局部开孔,以形成背部局部开放式结构。

#### 3.3 主镜轴向支撑方案

主镜轴向支撑方式选用 whiffletree 结构,whiffletree 结构的刚度高、可靠性强,且后期可在枢轴处布置力矩促动器以改变支撑力的分布,从而主动校正热、力等未知环境因素造成的低阶光学像差,实现更高的面形精度<sup>[12]</sup>,以满足高寒偏远台址下望远镜主镜系统的特殊要求。根据 Hall 经验公式<sup>[13]</sup>得到初始的轴向支撑点数目

$$N = \left( \frac{0.375 D_G^2}{t_A} \right) \times \left( \frac{\rho_G}{E_G \delta} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中,  $N$  为支撑点的数量,  $D_G$  为主镜的口径,  $t_A$  为主镜的厚度,  $\rho_G$  为主镜材料的密度,  $E_G$  为主镜材料的弹性模量,  $\delta$  为支撑系统要求的主镜面形精度。

考虑(1)式基于等厚实心圆板理论,而实际中的主镜与理论模型偏差较大(主镜非等厚、中间薄两边厚且带有中孔),因此将数值较低的中心厚度代入(1)式得到的支撑点数会略多,进而提高面形精度,通过 ULE 的力学参数得到  $N \approx 48.60$ 。由于 whiffletree 结构一般为旋转对称形式,且基于 3 个点进行扩展,取  $N=54$  可满足上述所有条件。图 3 为甚大望远镜干涉仪辅助望远镜(VLTI AT)主镜轴向支撑点的布局,在三级 whiffletree 扩展结构、54 个支撑点的作用下,光轴竖直时的镜面变形 RMS 小于 6 nm<sup>[14]</sup>。为了降低轴向支撑点的布局难度,将 54 个支撑点分布在 4 个圆周上,由内而外

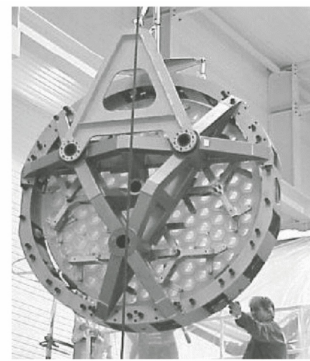


图 3 VLTI AT 的主镜支撑结构

Fig. 3 Support structure of VLTI AT primary mirror

的数目依次为 6, 12, 12, 24, 如图 4 所示。

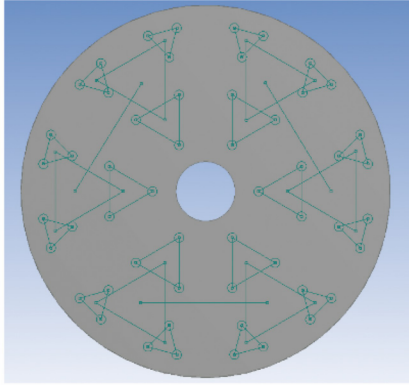


图 4 54 个支撑点的布局示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the layout of 54 supporting points

## 4 集成优化设计

### 4.1 参数化模型

模型参数分为轻量化结构参数和支撑位置参数,假设夹芯层中的每个单元尺寸相同、各单元之间的距离相等,且在内外圈均设有压边,因此,将压边宽度也作为优化参数。主镜轻量化结构参数如图 5 所示,其中,  $H$  为夹芯层的中心厚度,  $D$  为六边形的内切圆直径,  $L_1$  为加强筋的宽度,  $L_2$  为内圈压边的宽度,  $L_3$  为外圈压边的宽度,  $T_1$  为反射面的厚度,

$T_2$  为背板的厚度。此外,分别用  $R_1, R_2, R_3, R_4$  表示 4 个圆的支撑半径,以确定支撑点的位置。

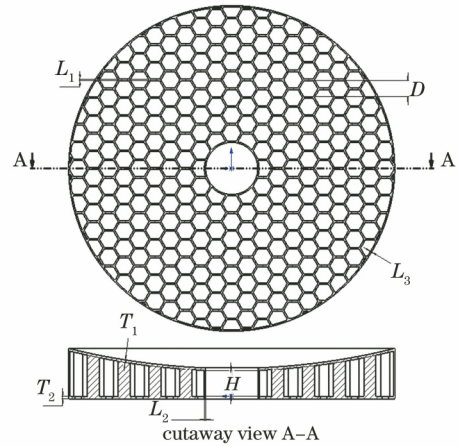


图 5 主镜轻量化设计的结构参数

Fig. 5 Structural parameters of the lightweight design of the primary mirror

### 4.2 折衷规划理论

主镜结构设计为多目标优化问题,且镜面变形 RMS 和主镜质量是相互冲突的,很难同时达到最优。考虑到各目标的度量方式不同,需设置合理的评价函数将绝对量转化为相对量,即将多目标的优化问题转换为单目标优化问题。采用折衷规划理论<sup>[15]</sup>设置评价函数,将多目标优化问题表示为

$$\begin{cases} \text{find } x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ \min_{x=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)} F(x) = \left\{ \sum_{i=1}^m \lambda_i^p \left[ \frac{f_i(x) - f_i(x)_{\min}}{f_i(x)_{\max} - f_i(x)_{\min}} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, i = 1, 2, 3, \dots, m, \\ \text{s.t. } x \in X \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $x$  为优化参数,  $n$  为优化参数的个数,  $F(x)$  为评价函数,  $m$  为子目标函数的个数,且  $m \geq 2, m \in N, \lambda_i$  为第  $i$  个子目标函数的权重,  $f_i(x), f_i(x)_{\min}, f_i(x)_{\max}$  分别为第  $i$  个子目标函数在约束条件下的当前值、最小值和最大值, s.t. 表示约束条件,  $p$  为距离指数<sup>[16]</sup>。

1) 当  $p=1$  时,评价函数为各子目标与理想解距离的和。

2) 当  $1 < p < \infty$  时,评价函数为各子目标与理想

解的加权几何距离;特别地,当  $p=2$  时,评价函数的实际意义为欧几里得距离。

3) 当  $p=\infty$  时,评价函数的实际意义为切比雪夫距离,又称为最大加权距离。

### 4.3 参数敏感性分析

各输入参数对镜面变形 RMS 和主镜质量的敏感性如表 2 所示,可以发现,在取值范围内,背板厚度、加强筋宽度分别对镜面变形 RMS、主镜质量的敏感性最强,而内外压边尺寸对两者的综合敏感性

表 2 参数敏感性

Table 2 Parameter sensitivity

	$H$	$D$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$T_1$	$T_2$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
RMS	-0.03	0.21	-0.03	0.15	0.04	-0.05	-0.41	-0.06	-0.03	-0.12	-0.38
Mass	0.26	-0.22	0.75	0.14	0.01	0.38	0.31	-0.01	0.01	-0.04	-0.03

较低,可不作为优化参数。内外压边尺寸与镜面变形 RMS、主镜质量均呈正相关,因此,内外压边尺寸应越小越好,根据工程经验将压边尺寸设置为 10 mm。此外,虽然第 1、2 圈支撑点的位置对镜面变形 RMS 和主镜质量的敏感性不高,但由于没有合适的经验公式参考,仍将其作为优化参数。

#### 4.4 基于 Kriging 响应面 MOGA 全局优化

除了输入参数的个数,输入参数的取值范围也会影响后续响应面的精度及优化效率。因此在实验设计阶段生成 1000 个采样点,并根据有限元计算结果取出质量低于 1500 kg、镜面变形 RMS 小于 12 nm 的采样点,通过这些点缩小取值范围,缩小后不同参数的取值范围如表 3 所示。

表 3 缩小后的参数取值范围  
Table 3 Parameter value range obtained after reduction unit: mm

Symbol	$H$	$D$	$L_1$	$T_1$	$T_2$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
Range	150-200	120-150	5-20	10-30	10-30	320-370	650-700	870-920	1100-1150

基于表 3 中的参数范围用 OSF 算法进行实验设计,建立 Kriging 响应面并插入验证点检查响应面精度,验证结果显示确定性系数  $R^2$  为 1,这表明实验设计阶段所有的采样点都位于响应面上,且主镜质量的响应面精度较高,相对验证点的误差仅为

0.24%。但镜面变形 RMS 的响应面精度较低,相对验证点的误差为 10.92%。经过 Kriging 自动细化之后,镜面变形 RMS 和主镜质量的相对误差均低于 5%,达到设计要求。根据折衷规划理论,可将主镜结构的优化问题表示为

$$\begin{cases} \text{find } x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ \min_{x=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)} F(x) = \left\{ \lambda_1^2 \left[ \frac{M(x) - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}} \right]^2 + \lambda_2^2 \left[ \frac{R(x) - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \text{s.t. } x \in X \\ X_{\text{RMS}} \leq 12 \text{ nm} \\ X_{\text{Mass}} \leq 1500 \text{ kg} \end{cases}, \quad (3)$$

式中,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为主镜质量和镜面变形 RMS 的权重系数,  $M(x)$  为轻量化过程中的主镜质量,  $M_{\min}$ 、 $M_{\max}$  分别为约束条件下主镜质量的最小值和最大值,  $R(x)$  为重力作用引起的镜面变形 RMS,  $R_{\min}$ 、 $R_{\max}$  分别为约束条件下镜面变形 RMS 的最小值和最大值。

为了满足主镜的设计要求,将主镜质量和镜面变形 RMS 的权重系数分别设置为 0.4 和 0.6。采用 MOGA 进行基于 Kriging 响应面的全局优化,在短时间内遍历 49171 个设计点,迭代 16 次,得到的响应面最优解:主镜质量为 927.53 kg,镜面变形 RMS 为 6.62 nm。

#### 4.5 MISQP 局部直接优化

尽管 4.4 节中得到的全局最优解已满足设计要求,但响应面与验证点之间依然存有误差,因此,还需检验该全局最优解是否在局部设计空间上也为最优解。将响应面最优解各参数的取值上下浮动 5%,进行 MISQP 局部直接优化。经过迭代,得到的局部最优解:镜面变形 RMS 为 5.99 nm,主镜质量为 941.2 kg。表 4 为 MISQP 最优解的参数值,与响应面近似模型的最优解相比,镜面变形的 RMS 降低了 9.52%,质量增加了 1.47%。根据(3)式可知,该参数下主镜的综合指标得到了提升,这也反应了在响应面最优解附近进行局部梯度优化的必要性。

表 4 不同参数的最优值

Table 4 Optimal values of different parameters unit: mm

Symbol	$H$	$D$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$T_1$	$T_2$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
Optimal value	196	124	12	10	10	19	19	355	679	871	1115

## 5 背部局部开放式主镜

实际工程中,为了通风散热,一般对主镜背板进

行局部开孔。在不影响镜面变形 RMS 的前提下对六边形对应的背板处开圆孔,得到的镜面变形 RMS 随开孔直径的变化曲线如图 6 所示。可以发现,开



孔直径和镜面变形 RMS 呈高度非线性关系,在给定取值范围内,RMS 变化不大,甚至在部分子区间内面形 RMS 有所降低,但当开孔直径超过 53 mm 后,RMS 呈现上升趋势。原因是开孔直径较小时,刚度和质量的下降速度相差较小,两者相互制衡,但随着开孔直径的不断增大,刚度的下降速度远高于质量。

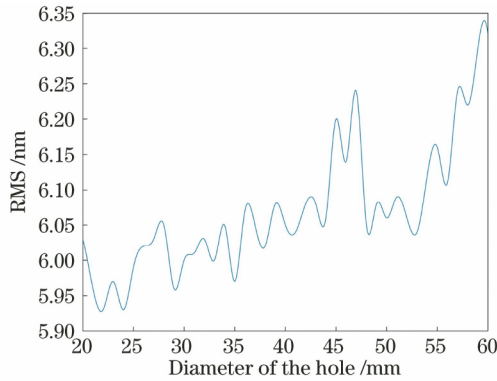


图 6 镜面变形 RMS 随开孔直径的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of mirror surface deformation RMS with opening diameter

根据(3)式可知,开孔直径在 50 mm 附近时,评价函数最优。因此,取开孔直径为 50 mm,得到的镜面变形 RMS 为 6.08 nm,主镜质量为 917.7 kg,轻量化主镜的最终优化结构如图 7 所示。利用 Zernike 多项式对镜面变形进行拟合,并去除前三项刚体位移,得到的实际镜面畸变如图 8 所示。

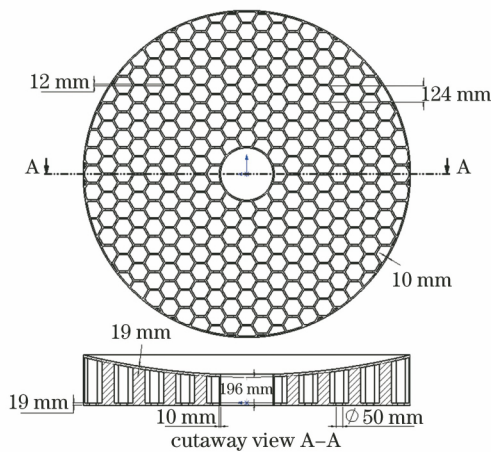


图 7 轻量化主镜的最终结构

Fig. 7 Final structure of the lightweight primary mirror

## 6 结 论

针对大口径主镜轻量化及轴向支撑点布局集成设计中优化参数多、取值范围宽、输入输出呈高度非线性的问题,提出了混合直接优化和响应面近似模

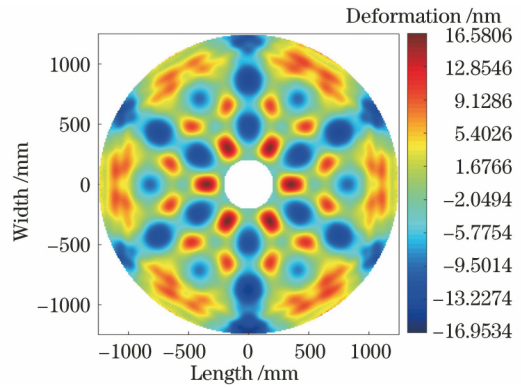


图 8 去除刚体位移后的镜面变形图

Fig. 8 Mirror deformation after removing rigid body displacement

型的优化方法。以 2.5 m 地基光学望远镜的 ULE 主镜为例,经集成优化分析表明,与相同尺寸的实心镜相比,主镜采用背部局部开放式六边形孔夹芯三明治结构的轻量化率为 72.13%。主镜轴向采用 54 点 whiffletree 被动支撑,在光轴竖直及重力载荷下的镜面变形 RMS 为 6.08 nm,各项指标均满足设计要求。仿真分析表明,本方法具有概念新颖、效率高、结果可靠等优点,可适应现代工程设计自动化、集成化的发展趋势。

## 参 考 文 献

- [1] Xu M M, Hu Z W, Ji H X, et al. Multidisciplinary design optimization of large rectangle collimating mirror lightweight structure[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(1): 45-50.  
许明明, 胡中文, 季杭馨, 等. 大尺寸矩形准直镜轻量化结构多学科优化设计[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 45-50.
- [2] Ye W N, Dong J H. Optimized design of lightweight structural parameters for large-aperture primary mirror [J]. Chinese Optics and Applied Optics Abstracts, 2012, 5(3): 222-228.  
叶伟楠, 董吉洪. 大口径主镜轻量化结构参数的优化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 222-228.
- [3] Shen Z P, Chen X J, Chen X Q, et al. Two parameter optimization methods for large aperture mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(6): 062001.  
沈展鹏, 陈晓娟, 陈学前, 等. 大口径反射镜结构的两种参数优化方法[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(6): 062001.
- [4] Zhu X S, Gong X F. Optimization on supporting method of large-aperture aspheric lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 012203.  
朱星申, 宫雪非. 大口径非球面透镜支撑方法的优化

- [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 012203.
- [5] Dey A, Sarkar D. A note on the construction of orthogonal Latin hypercube designs [J]. Journal of Combinatorial Designs, 2016, 24(3): 105-111.
- [6] van Beers W C M, Kleijnen J P C. Kriging interpolation in simulation: a survey [C]// Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004, December 5-8, 2004, Washington, DC, USA. New York: IEEE, 2004: 113-121.
- [7] Michels G J, Genberg V L, Doyle K B, et al. Design optimization of actuator layouts of adaptive optics using a genetic algorithm [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5877: 58770L.
- [8] Wang S X. Design and optimization of 2 m-class space reflector assemblies [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 28-31.  
王书新. 2 m 量级空间反射镜组件设计与优化 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 28-31.
- [9] Hu Q Q, Yao Z Q. Design of astronomical telescope [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2013: 338-339.  
胡企千, 姚正秋. 天文望远镜设计 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2013: 338-339.
- [10] Fox A, Hobbs T, Edwards M, et al. ULE design considerations for a 3 m class light weighted mirror blank for E-ELT M5 [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9912: 99123F.
- [11] Wang F G, Yang H B, Zhao W X, et al. Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(1): 85-91.  
王富国, 杨洪波, 赵文兴, 等. 1.2 m SiC 主镜轻量化设计与分析 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 85-91.
- [12] Gong X F, Chen X, Chen Z. Layout optimization of warping harness for segmented-mirror telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 363-371.  
宫雪非, 陈迅, 陈哲. 拼接子镜力矩促动器布局的优化设计 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 363-371.
- [13] Yoder P R. Opto-mechanical systems design [M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006: 503-506.
- [14] Flebus C, Quertemont E, Cola M. Manufacturing and testing of the primary mirror unit for the ESO VLT auxiliary telescopes [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4837: 600-608.
- [15] Hu J N, Dong J H, Zhou P W. Parametric design of flexure supporting for optical space remote sensor primary mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1128001.  
胡佳宁, 董吉洪, 周平伟. 空间光学遥感器主镜柔性支撑的参数化设计 [J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1128001.
- [16] Liu L H, Xin Y, Wang W. Multi-objective topology optimization for an off-road vehicle frame based on compromise programming [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(3): 382-385.  
刘林华, 辛勇, 汪伟. 基于折衷规划的车架结构多目标拓扑优化设计 [J]. 机械科学与技术, 2011, 30(3): 382-385.