

# 基于多目标优化与相关性分析的大口径反射镜展开系统优化设计

谢碧晶<sup>1,2</sup>, 傅雨田<sup>1</sup>, 陈永和<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:**大口径反射镜展开系统主要用于解决口径超出整流罩包络的望远镜发射问题,需要保证折叠后的望远镜包络满足整流罩包络的约束,并尽可能减轻展开系统的质量,降低执行机构设计复杂度。由于存在设计参数与评价指标较多的问题,故提出采用多目标优化算法与参数相关性分析相结合的优化设计方法,以提高展开系统性能。首先,提出了一种引入罚函数的多目标粒子群优化算法;根据评价指标间的耦合关系,降低优化目标数量;建立多目标粒子群优化算法,并使用罚函数作为各参数方案是否满足展开系统功能的判据,从而实现展开系统多目标优化并保证算法结果的可靠性。其次,通过改变参数搜索区间、折叠后反射镜的径向包络等初始条件进行仿真,分析算法结果的初始条件、设计参数与评价指标的相关性。最后,通过将评价指标分组,并采取分步打分与筛选的策略,选出了一组最优参数方案。相比于原始设计,其总质量降低了 20.90%,最大等效转动惯量降低了 28.75%,2 根摇杆的伸缩行程分别缩小了 64.04% 与 67.04%。采用最优参数方案重新构建大口径反射镜展开系统,并对其进行折叠状态下的随机振动分析。结果表明,在不改变材料的前提下,优化后的大口径反射镜系统仍可满足相应的力学条件。

**关键词:**大口径反射镜;展开系统;多目标粒子群优化算法;罚函数;参数相关性分析

中图分类号: TH743 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 46020

## Optimization design of large-aperture mirror deployment system based on multi-objective optimization and correlation analysis

Xie Bijing<sup>1,2</sup>, Fu Yutian<sup>1</sup>, Chen Yonghe<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The large-aperture mirror deployment system is primarily designed to address the launch challenges posed by telescopes whose apertures exceed the constraints of the fairing envelope. It is imperative to ascertain that the stowed telescope adheres to the constraints imposed by the fairing envelope. The system must ensure that the stowed telescope conforms to the fairing envelope while minimizing the overall mass of the deployment mechanism and reducing actuator design complexity. To cope with the large number of design parameters and evaluation metrics, an optimization approach combining a multi-objective optimization algorithm with parameter correlation analysis is proposed to improve system performance. First, a multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm incorporating penalty functions is introduced. By exploiting the coupling relationships among evaluation metrics, the number of optimization objectives is reduced. The penalty functions are then used as criteria to evaluate whether parameter schemes satisfy functional requirements of the deployment system, thereby enabling multi-objective optimization while ensuring the reliability of the algorithm outcomes. Subsequently, simulations are conducted by varying initial conditions (including parameter search bounds and the radial envelope of the stowed primary mirror) to analyze the correlations among initial conditions design parameters, and evaluation metrics. Finally, an optimal parameter scheme is selected by grouping evaluation metrics and applying a stepwise scoring and screening strategy. Compared with the original design, the optimal scheme achieves a 20.90% reduction in total mass, a 28.75% reduction in maximum equivalent moment of inertia, and reductions of 64.04% and 67.04% in the stroke lengths of the two rockers, respectively. The large-aperture mirror deployment system is then reconstructed based on the optimal parameters, and a random

vibration analysis is performed under the stowed condition. The results demonstrate that, without changing the material, the optimized system continues to meet the required mechanical conditions.

**Keywords:** large-aperture mirrors; deployment system; multi-objective particle swarm optimization (MOPSO); penalty functions; correlation analysis

## 0 引言

空间望远镜的主反射镜作为整个望远镜系统的“眼睛”,承担着接收来自宇宙各类天体与物质所发射的电磁波的职责。为了识别更微弱的光源,并探测出更多细节,增大主镜口径以提高望远镜光学系统分辨率成为了目前空间望远镜的研究重点<sup>[1]</sup>。然而主镜口径的增大将会带来主镜制造难度增大与火箭整流罩尺寸难以匹配的双重挑战<sup>[2-4]</sup>。为解决此问题,在2021年底成功发射并投入使用的詹姆斯韦布空间望远镜,采用由多块子镜拼接成主镜与主镜发射时折叠、在轨时展开的策略,将6.5 m的主反射镜送入预定轨道<sup>[5-6]</sup>。由NASA正在研发的大型红外/可见/紫外空间望远镜也采用相同的策略设计主反射镜,计划使用8.4 m直径的火箭整流罩运送15 m口径的主反射镜<sup>[7-8]</sup>。因此,采用多子镜拼接与主镜在轨展开技术设计更大主镜口径具有较大的可行性,设计与制造大口径反射镜展开系统以降低折叠后主镜的径向包络与高度具有重要的现实意义。

大口径反射镜展开系统由反射镜背板、展开机构、展开系统支撑结构等组件组成,结构复杂,设计参数较多。而且受成本与运输能力等限制,展开系统的质量、不同工况下的径向包络与高度等均需要受到控制。这将导致在设计展开系统时难以确定各项参数值以使设计指标达到理想状态,因此需要进行参数优化设计。

由于机械系统的参数优化问题通常属于多目标优化问题,目前一般应用元启发式算法来解决此类问题,包括进化算法和群体智能算法等<sup>[9-10]</sup>。进化算法中较为典型的算法是第2代遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II),该算法运行效率高,在低维问题中解集分布良好,但不适用于解决高维优化问题<sup>[11-12]</sup>。第3代遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III)则弥补了NSGA-II的不足,适用于超多目标问题的优化,然而计算复杂度较高<sup>[13-14]</sup>。群体智能算法包括多目标粒子群优化算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)、多目标蚁群优化算法(multi-objective ant colony optimization, MOACO)、多目标郊狼优化算法(multi-objective coyote optimization algorithm, MOCOA)等。其中,MOPSO具有需要设置的参数较少、收敛速度快的特点,主要用于连续优化问题的求解<sup>[15-17]</sup>;MOACO需要设置较多参数,主要用于离散优

化问题<sup>[18-19]</sup>;MOCOA具有收敛速度快、分类精度高的特点,适用于高维度优化<sup>[20-21]</sup>。

本研究根据大口径反射镜展开系统的设计参数值与展开系统性能,确定了评价指标与优化目标。由于需要解决连续优化问题,并降低计算复杂度,首先,本研究采用了多目标粒子群算法作为展开系统的优化方法:建立优化目标的数学模型,使用多目标粒子群优化算法获得Pareto最优解集,并引入罚函数提高最优解集的可靠性。其次,通过使用前述算法,获取在不同初始搜索条件下的优化参数方案,并分析各设计参数与评价指标之间的相关性。最后,对评价指标进行分组,通过打分的方式对Pareto最优解集进行多轮次筛选,得到各评价指标均提升明显的一组设计参数。

## 1 大口径反射镜展开系统

### 1.1 大口径反射镜展开系统及其评价指标

大口径反射镜展开系统如图1(a)所示,它由1个中心基座、3个上翻子镜组件以及3个下翻子镜组件组成。中心基座包含1个次镜筒以及1个桁架基座,上翻子镜组件采用伸缩杆式双摇杆展开机构(telescopic-rod-type twin-rocker mechanism, TRTTRM),下翻子镜组件的展开机构为电机直驱式铰链展开机构(direct-drive hinge deployment mechanism, DDHDM),其还包括3个伸缩式连杆作为下翻子镜组件的辅助支撑结构。目前已完成了展开机构的初步系统构型设计,确定了系统设计参数,且为各部件选用了合适的材料。大口径反射镜展开系统各部件的参数值如表1所示,各部件在展开系统位置如图2所示。根据表1的关键参数尺寸值,并依照8:1的比例设计并制造了大口径反射镜展开系统缩比试验平台,该平台如图1(b)所示。目前已通过缩比试验平台验证了大口径反射镜展开系统可实现所要求的展开-折叠功能,且折叠后的反射镜系统包络大幅降低,这说明了所提的展开系统构型的有效性与可实现性。

依据初步设计,该大口径反射镜口径为 $D = 15\ 913\text{ mm}$ ,且在折叠工况下,其径向外包络直径为 $D_{\text{stowed}} = 7\ 935\text{ mm}$ ,轴向高度为 $H = 11\ 650\text{ mm}$ 。该大口径反射镜展开系统总质量为 $M = 23\ 296\text{ kg}$ 。将子镜组件背板简化为正六边形体,并将所有杆件简化为长方体进行分析时,单个上翻子镜组件的最大等效转动惯量为 $I_{\text{TRTTRM}} = 31\ 402\text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,单个下翻子镜组件的等效转动

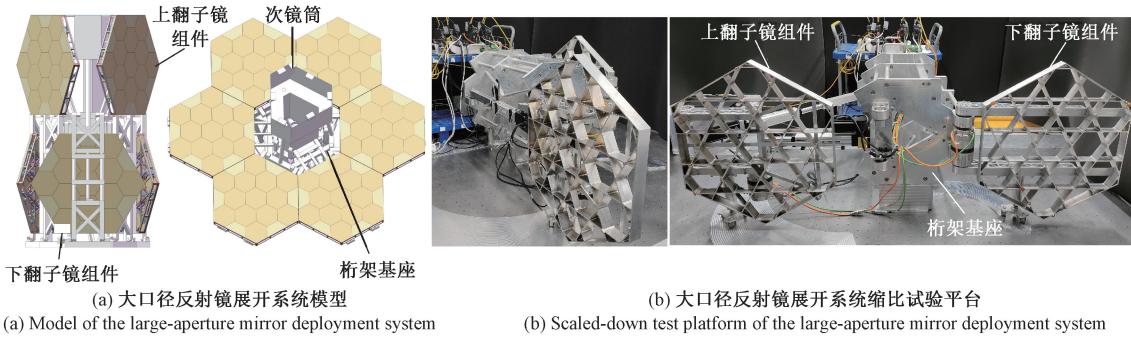


图1 大口径反射镜展开系统

Fig. 1 Large-aperture mirror deployment system

表1 大口径反射镜展开系统各部件尺寸与质量

Table 1 Dimension specifications and mass properties of components for the large-aperture mirror deployment system

关键参数	尺寸/mm	质量/kg	材料
摇杆 $AB$	$L_{AB}$	4 515.00	M65J
	$\delta_{AB}$	1 550.00	
连杆 $BC$	$L_{BC}$	2 299.00	206
摇杆 $GC$	$L_{GC}$	8 285.52	M65J
	$\delta_{GC}$	1 831.12	
连杆 $PR$	$L_{PR}$	5 714.00	428
连杆 $NR$	$L_{NR}$	7 656.73	733
次镜筒	$H_S$	5 800.00	2 123
$H_T$ 6300.00			
$ x_A $ 1 000.23			
桁架基座	$ x_P $	2 100.23	6 881
$\Delta x_{AG}$ 1 100.00			
$\Delta y_{AG}$ 6 000.00			
子镜组件	$L_{bp}$	6 000	子镜采用金属铍,
背板	$T_{bp}$	382	1 164 背板桁架为 M65J
相邻背板间距	$s$	20	轴与轴承座
杆件厚度	$T_{lk}$	230	采用 2Cr13

惯量为  $I_{DDHDM} = 18 175 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。该设计可以实现折叠后展开系统体积大幅降低的功能,但现在展开系统的总质量、电机的等效转动惯量以及摇杆  $AB$ 、摇杆  $GC$  的伸缩行程  $\delta_{AB}$ 、 $\delta_{GC}$  仍较大,影响系统的最终性能。因此本文选择  $M$ 、 $I_{TRTTRM}$ 、 $I_{DDHDM}$ 、 $\delta_{AB}$  以及  $\delta_{GC}$  作为大口径反射镜展开系统的评价指标,需要优化系统参数以在保证不影响折叠后展开系统包络的前提下,提高系统性能。

## 1.2 展开系统优化设计的整体架构

由于大口径反射镜展开系统存在设计参数较多,参数间关系复杂等特性,因此本文采用罚函数与多目标粒

子群优化算法结合的方式,通过选取  $M$  与  $I_{TRTTRM}$  作为多目标粒子群优化算法的优化目标,使用罚函数处理系统参数间的复杂关系,并采用多目标粒子群算法优化设计参数,从而获得一系列可以实现降低系统质量与电机转动惯量的有效参数方案。

然而在使用多目标优化算法前,需要先设置算法搜索的初始条件,即设置算法的优化参数搜索区间与折叠后展开系统包络的允许范围。不同的初始条件将会导致优化结果中设计参数与优化目标的值分布在不同的区间。通过多目标优化算法寻找不同初始条件的有效参数方案,并分析有效方案的初始条件、设计参数对评价指标的影响,得到评价指标与其它参数间的相关性。由于评价指标较多,因此根据相关性将评价指标分组,并采取分步打分与筛选的策略,在所有有效参数方案中选取一组最优参数方案。该参数优化方法的流程图如图 3 所示。

## 2 引入罚函数的多目标粒子群优化算法

### 2.1 优化目标

#### 1) 大口径反射镜展开系统质量

大口径反射镜展开系统质量与折叠后系统包络、各部件尺寸等具有强相关的关系。降低系统质量可以将系统包络与各部件尺寸同时优化至合适的范围,因此选择系统质量作为优化目标。

各关键部件的原始尺寸与原始质量如表 1 所示。在参数优化过程中,假设各连杆与摇杆仅有长度被改变,其厚度与宽度保持不变,则杆件的质量如式(1)所示。

$$m_{\text{linkage}} = m_{\text{linkage}_0} (L_{\text{linkage}} / L_{\text{linkage}_0}) \quad (1)$$

式中:  $m_{\text{linkage}_0}$  与  $L_{\text{linkage}_0}$  代表各杆件的原始质量与长度;  $m_{\text{linkage}}$  与  $L_{\text{linkage}}$  代表杆件长度更改后的质量与长度。

当铰链座  $A$ 、 $G$ 、 $P$  的位置、杆件尺寸与摇杆的伸缩量确定之后,次镜筒与桁架基座的高度与横截面积即可

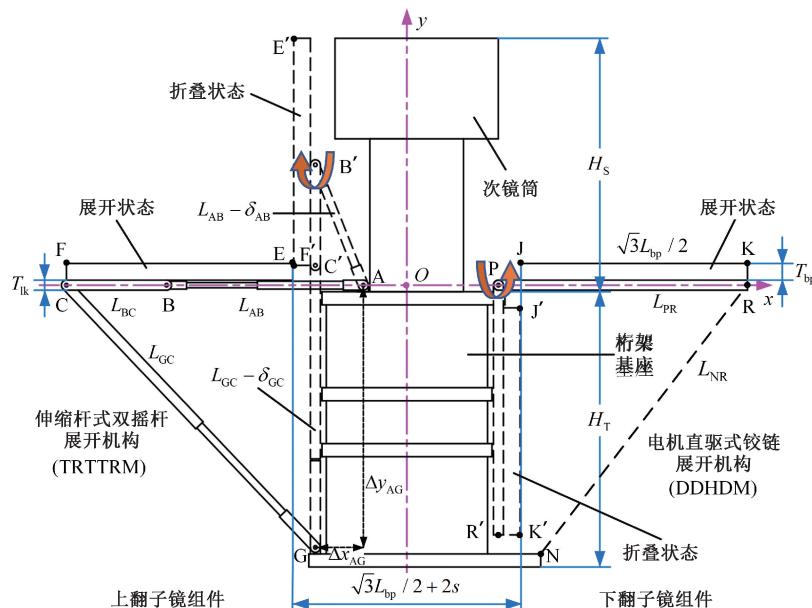


图2 展开系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the deployment system

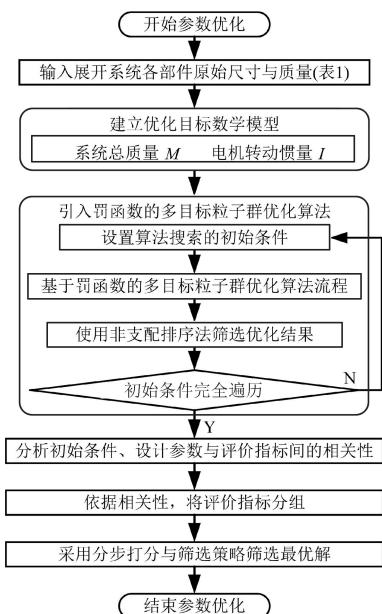


图3 大口径反射镜展开系统优化设计流程

Fig. 3 Optimization design flowchart of the large-aperture mirror deployment system

确定。此时,次镜筒与桁架基座的质量变化如式(2)与式(3)所示。

$$m_s = m_{s,0} (V_s / V_{s,0}) \quad (2)$$

$$m_T = m_{T,0} (V_T / V_{T,0}) \quad (3)$$

式中:  $m_{s,0}$  与  $V_{s,0}$  代表次镜筒的原始质量与体积;  $m_s$  与  $V_s$  代表次镜筒尺寸更改后的质量与体积。同理,  $m_{T,0}$  与  $V_{T,0}$

代表桁架基座的原始质量与体积;  $m_T$  与  $V_T$  代表桁架基座尺寸更改后的质量与体积。

## 2) 子镜组件的转动惯量

从图2可以看出,下翻子镜组件(图2右侧)的电机安装在铰链座P处,该电机轴所受的外部载荷转动惯量如式(4)所示。

$$I_{DDHDM} = I_{DDHDM,0} + (m_{PR} + m_{bp})d_{DDHDM}^2 \quad (4)$$

式中:  $I_{DDHDM,0}$  代表下翻子镜组件绕自身质心的转动惯量;  $m_{PR}$  与  $m_{bp}$  代表连杆PR与子镜组件背板的质量;  $d_{DDHDM}$  代表质心与电机转轴间的距离。

由于铰链座P在x轴方向上的位置受折叠后展开系统径向包络的影响,而且该径向包络存在极限,其最小值为  $D_{stowed-min} = 7340$  mm。因此在优化过程中,  $I_{DDHDM}$  的变化量有限,不作为优化过程的优化目标。本文选择上翻子镜组件(图2左侧)的转动惯量作为优化目标。

上翻子镜组件的电机安装在图2所示的关节B上。假设摇杆AB与连杆BC的夹角为 $\alpha$ ,上翻子镜组件从折叠状态运动至展开状态时,最少需要经历4个阶段:(1)先将TRTTRM从折叠状态运动至 $\alpha = \alpha_0$ 的状态( $\alpha_0$ 为1个指定角度);(2)然后将摇杆AB展开;(3)接着将摇杆GC展开;(4)最后将TRTTRM从 $\alpha = \alpha_0$ 的状态旋转至最终的展开状态。在展开过程中,该类子镜组件的转动惯量是不断变化的,需要计算各个阶段中转动惯量的最大值。

在计算转动惯量时,由于结构复杂,因此简化各个零部件的形状,将子镜组件背板简化为正六棱柱、所有杆件

均简化为长方体。此时,子镜组件背板与杆件绕各自质心的转动惯量如式(5)和(6)所示。

$$I_{bp} = m_{bp} (5(L_{bp}/2)^2 + 2T_{bp}^2)/24 \quad (5)$$

$$I_{lk} = m_{lk} (L_{lk}^2 + T_{lk}^2)/12 \quad (6)$$

式中:  $I_{bp}$  表示子镜组件背板绕其质心的转动惯量;  $m_{bp}$  表示背板质量;  $I_{lk}$ 、 $m_{lk}$ 、 $L_{lk}$  分别代表某一杆件绕其质心的转动惯量、自身质量与杆件长度。

由于子镜组件背板安装在连杆  $BC$  上,需要计算该组合绕自身质心的转动惯量,如式(7)~(9)所示。

$$x_{com1} = (m_{bp}x_{bp} + m_{BC}x_{BC})/(m_{bp} + m_{BC}) \quad (7)$$

$$y_{com1} = (m_{bp}y_{bp} + m_{BC}y_{BC})/(m_{bp} + m_{BC}) \quad (8)$$

$$I_{bp-BC} = I_{bp} + m_{bp}d_{bp-com1}^2 + I_{BC} + m_{BC}d_{BC-com1}^2 \quad (9)$$

式中: 该组合的质心坐标为  $(x_{com1}, y_{com1})$ ;  $I_{bp-BC}$  表示该组合绕其质心的转动惯量; 背板的质心坐标为  $(x_{bp}, y_{bp})$ ; 连杆  $BC$  的质心坐标为  $(x_{BC}, y_{BC})$ 。

由此可得, 上翻子镜组件的质心  $(x_{com2}, y_{com2})$  与转动惯量  $I_{TRTRM}$  的表达式如式(10)和(11)所示。

$$\begin{cases} x_{com2} = (m_{AB}x_{AB} + (m_{bp} + m_{BC})x'_{com1} + m_{GC}x_{GC}) / \\ \quad (m_{AB} + m_{bp} + m_{BC} + m_{GC}) \\ y_{com2} = (m_{AB}y_{AB} + (m_{bp} + m_{BC})y'_{com1} + m_{GC}y_{GC}) / \\ \quad (m_{AB} + m_{bp} + m_{BC} + m_{GC}) \end{cases} \quad (10)$$

$$I_{TRTRM} = I_{AB} + m_{AB}d_{AB-com2}^2 + I_{bp-BC} + \\ (m_{bp} + m_{BC})d_{com1-com2}^2 + I_{GC} + m_{GC}d_{GC-com2}^2 \quad (11)$$

式中:  $(x'_{com1}, y'_{com1})$  表示背板与连杆  $BC$  组合的质心在图 2 所示的坐标系中的位置;  $(x_{AB}, y_{AB})$  与  $(x_{GC}, y_{GC})$  分别表示在该坐标系下摇杆  $AB$  与摇杆  $GC$  质心的位置;  $d_{AB-com2}$ 、 $d_{com1-com2}$ 、 $d_{GC-com2}$  分别表示摇杆  $AB$  的质心、背板和连杆  $BC$  组合的质心以及摇杆  $GC$  的质心与上翻子镜组件的质心之间的距离。

## 2.2 罚函数

由图 2 所示,大口径反射镜展开系统的参数众多,且各参数间存在一定几何关系。在使用多目标优化算法时,优化算法会对优化参数以某种优化方式改变它们的取值,此时通常会遇到优化后的优化参数取值无法满足各参数取值的边界条件或无法满足各参数间必须存在的几何关系等问题。这些问题将导致优化算法产生无效解,从而降低算法结果的有效性。为了快速识别优化参数值的有效性,并剔除无效的优化参数方案,本文建立了罚函数,如式(12)和(13)所示。

$$Pf = \sum_{i=1}^q Pf_i \quad (12)$$

$$\begin{cases} Pf_i = 0, & \text{保留} \\ Pf_i = \mu, & \text{剔除} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $Pf$  表示所有罚函数值的总和;  $Pf_i$  表示各项罚函数;

罚函数的总数为  $q$ 。如果优化参数值满足各自的边界条件或满足参数间的几何关系,那么对应的罚函数  $Pf_i$  赋值为 0。如果参数值不能满足某条件,则对应的罚函数赋值为足够大的正数,假设  $\mu = 1\,000\,000$ 。

## 2.3 引入罚函数的多目标粒子群(MOPSO)优化算法

根据上述分析,首先确定了  $L_{bp}$ 、 $T_{bp}$ 、 $m_{bp}$ 、 $s$ 、 $T_{lk}$  的取值为定值,具体值如表 1 所示。其次,依据优化目标的求解过程式(1)~(11)以及参数间的几何关系,确定了算法的优化参数为  $|x_A|$ 、 $L_{AB}$ 、 $L_{BC}$ 、 $\Delta y_{AG}$  与  $\Delta x_{AG}$ ,其余参数均可通过边界条件或几何关系推出。此时,优化问题的数学模型如式(14)所示。

$$\begin{cases} \text{Find} & \text{Solution} = \{|x_A|, L_{AB}, L_{BC}, \Delta y_{AG}, \Delta x_{AG}\} \\ \text{min} & \text{Objective} = \{M, I_{TRTRM}\} \end{cases} \quad (14)$$

本研究采用引入罚函数的多目标粒子群优化算法进行优化设计,即:

1)首先给定各优化参数的初始值(表 1),并给出取值介于 0~1 的搜索系数  $\xi$ ,将  $\xi$  与各参数的初始值相乘以确定优化参数的搜寻范围。设置粒子群优化算法参数的取值,如最大迭代次数  $MNI$ 、种群规模  $n$  等。

2)初始化种群:首先将优化参数在步骤 1)得到的搜寻范围内随机取值,并均服从均匀分布。然后计算其余几何参数,并代入罚函数中进行判断。若罚函数的值为 0,则将优化参数值标记为粒子位置,并计算优化目标值,且将优化目标值标记为粒子适应度。若罚函数不为 0,则重新对优化参数进行随机取值。种群初始化过程需要搜寻到  $n$  个有效粒子。

3)粒子群算法主流程:首先寻找到全局最佳个体,其次假设最开始所有粒子在所有优化参数搜寻方向上的速度为 0,并根据原速度、全局最佳个体位置、该粒子曾经到过的最佳位置与目前位置以更新该粒子的速度。得到的粒子位置与推导出的其余几何参数均代入罚函数,通过罚函数的粒子位置将直接计算适应度,未通过的粒子的所有位置的值均变为罚因子  $\mu$ 。每个粒子在每次迭代中都以概率  $Pm$  决定是否发生变异。发生变异的粒子则重新获得粒子位置,并通过优胜劣汰的方式选择保留变异前或变异后的粒子位置与适应度。经过  $MNI$  次迭代后,输出最终的优化结果,算法流程如图 4 所示。

## 3 相关性分析与参数方案筛选

### 3.1 参数相关性分析

将多目标粒子群优化算法的最大迭代次数  $MNI$  设为 200,种群规模  $n$  设为 800。通过固定折叠后展开系统的径向包络尺寸允许范围,并更改  $\xi$  的值以改变各优化

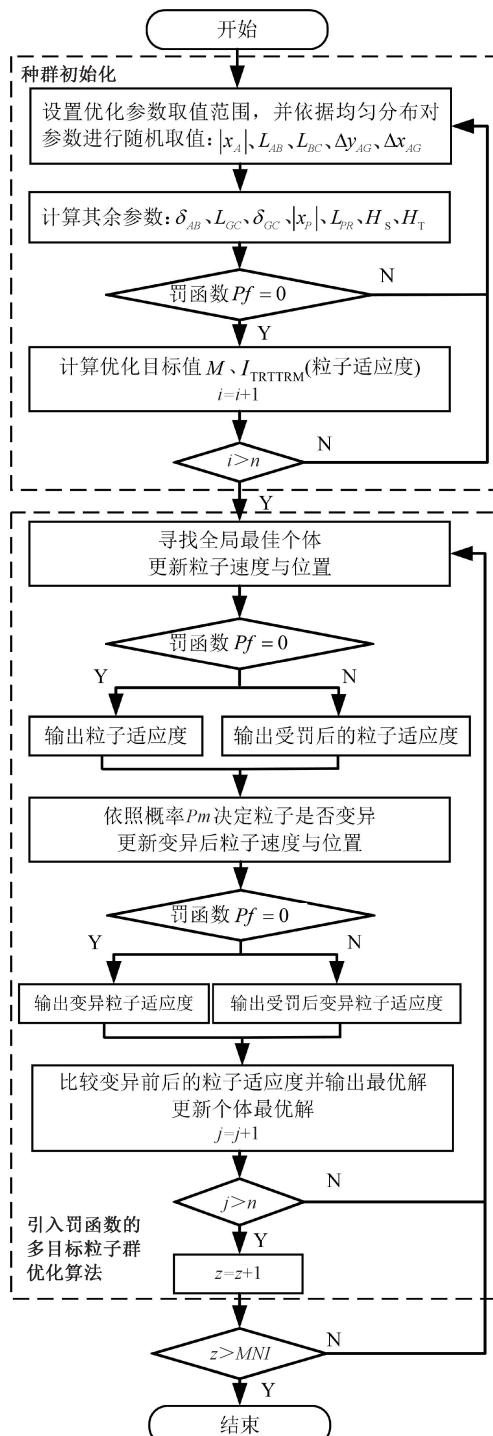


图4 引入罚函数的多目标粒子群优化算法流程

Fig. 4 Flowchart of the MOPSO incorporating penalty functions

参数的搜索区间,得到的结果如表2所示。通过固定优化参数的搜索区间,并更改折叠后展开系统的径向包络尺寸允许范围,得到的结果如表3所示。

由于 $\xi$ 的增大会导致优化参数的搜索区间增大,而且搜索区间的极值过大或过小均可能导致优化后的参数

值无法被采纳,因此将 $\xi$ 限制在0.30以内。 $D_{stowed}$ 的理论最小值为7340 mm,允许最大值为7956 mm,依照折叠率对其进行区间划分。

从表2可以看出,在扩大优化参数的搜索区间时,上翻子镜组件在电机转轴处的转动惯量大幅降低,最高可降低50.2%。展开系统总质量也有所下降,最高可降低23.4%(除去6块背板质量)。其余指标的变化幅度较小。根据优化结果,发现不同优化方案(粒子)的 $L_{BC}$ 与 $\Delta y_{AC}$ 的值均是其搜索区间的最小值。这2项参数值的大幅减小是使优化目标值减小的主要原因。

从表3可以看出,在固定优化参数搜索区间,仅改变 $D_{stowed}$ 的允许区间(用作罚函数)时, $D_{stowed}$ 的允许区间越大,展开系统的高度与质量的结果范围也越大,但 $I_{TRTRM}$ 的结果对此不敏感。 $I_{DDHDM}$ 主要受连杆PR的长度的影响,因此在 $D_{stowed}$ 的允许最小值缩小的情况下,连杆PR的长度增加, $I_{DDHDM}$ 的最大值增大。

为了进一步分析优化参数对优化目标结果的影响,需要在表2和3中选取一组数据来分析。选取 $\xi=0.20$ 、 $D_{stowed}=[7479 \text{ mm}, 7956 \text{ mm}]$ 时的仿真结果,此时经过本文所提优化算法的Pareto前沿如图5所示,优化参数的搜索区间与实际仿真结果如表4所示,优化参数对各优化目标的影响如图6所示。从图5中可以看出,本文算法得到的Pareto前沿平滑、连续。

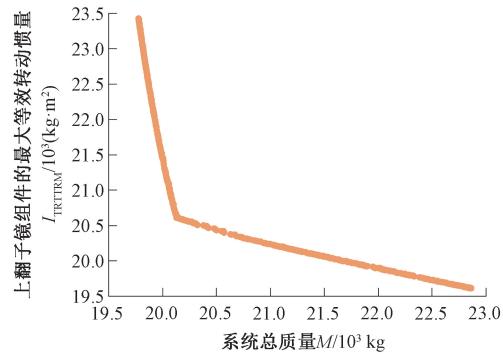


图5 引入罚函数的多目标粒子群优化算法的Pareto前沿

Fig. 5 Pareto front of the MOPSO optimization algorithm with penalty functions

从表4中可以看出,在确定了 $\xi$ 的取值之后,优化后 $\Delta y_{AC}$ 与 $L_{BC}$ 的值也随即确定在其搜索区间的最小值附近。 $|x_A|$ 的仿真结果范围与搜索区间范围一致,而由于 $\Delta x_{AC}$ 需要满足式(15),因此 $\Delta x_{AC}$ 的仿真结果范围主要受 $|x_A|$ 结果的影响。

$$D_{stowed} = 2\sqrt{(|x_A| + \Delta x_{AC} + T_{lk}/2 + T_{bp})^2 + (L_{bp}/2)^2} \quad (15)$$

从图6(a)中可以看出,展开系统的高度 $H$ 、质量 $M$ 与下翻子镜组件的电机轴所受的转动惯量 $I_{DDHDM}$

表 2 更改  $\xi$  时的优化结果Table 2 Pareto-optimal solutions as a function of  $\xi$ 

搜索系数 $\xi$	折叠状态的 径向外包络直径 $D_{stowed}/\text{mm}$	折叠状态的轴向高度 $H/\text{mm}$	总质量 $M/\text{kg}$	上翻子镜组件的 最大等效转动惯量 $I_{TRTRM}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	下翻子镜组件的 等效转动惯量 $I_{DDHDM}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
0.05		[11 096, 11 474]	[20 585, 22 931]	[27 025, 28 555]	[18 023, 21 910]
0.10		[11 094, 11 474]	[20 304, 22 940]	[24 345, 26 674]	[18 025, 21 910]
0.15		[11 094, 11 474]	[20 028, 22 901]	[21 877, 25 043]	[18 023, 21 910]
0.20	[7 479, 7 956]	[11 095, 11 474]	[19 777, 22 862]	[19 612, 23 430]	[18 027, 21 910]
0.25		[11 094, 11 474]	[19 609, 22 833]	[17 540, 21 167]	[18 023, 21 910]
0.30		[11 095, 11 474]	[19 472, 22 804]	[15 653, 18 855]	[18 028, 21 910]

表 3 更改  $D_{stowed}$  时的优化结果Table 3 Pareto-optimal solutions as a function of  $D_{stowed}$ 

搜索系数 $\xi$	折叠状态的 径向外包络直径 $D_{stowed}/\text{mm}$	折叠状态的 轴向高度 $H/\text{mm}$	总质量 $M/\text{kg}$	上翻子镜组件的 最大等效转动惯量 $I_{TRTRM}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	下翻子镜组件的 等效转动惯量 $I_{DDHDM}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
0.20	[7 940, 7 956]	[11 094, 11 106]	[21 906, 22 852]	[19 615, 22 468]	[18 023, 18 139]
	[7 797, 7 956]	[11 094, 11 217]	[21 233, 22 865]	[19 609, 22 809]	[18 023, 19 228]
	[7 638, 7 956]	[11 095, 11 344]	[20 501, 22 858]	[19 613, 23 112]	[18 033, 20 519]
	[7 479, 7 956]	[11 095, 11 474]	[19 777, 22 862]	[19 612, 23 430]	[18 027, 21 910]
	[7 340, 7 956]	[11 095, 11 593]	[19 153, 22 860]	[19 611, 23 714]	[18 031, 23 220]

表 4 优化参数的搜索区间与仿真结果范围

Table 4 Search ranges of optimization parameters and corresponding simulation results

(mm)

范围	铰链座 $A$ 在 $x$ 轴 方向的位置 $ x_A $	铰链座 $A$ 与 $G$ 在 $x$ 轴方向的距离 $\Delta x_{AG}$	铰链座 $A$ 与 $G$ 在 $y$ 轴方向的距离 $\Delta y_{AG}$	摇杆 $AB$ 展开 状态的长度 $L_{AB}$	摇杆 $AB$ 的 伸缩行程 $\delta_{AB}$	连杆 $BC$ 的 长度 $L_{BC}$	摇杆 $GC$ 的 伸缩行程 $\delta_{GC}$
搜索区间范围	[800.18, 1 200.27]	随 $ x_A $ 变化上限 下限为 0	[4 800.00, 7 200.00]	[3 612.00, 5 418.00]		[1 839.20, 2 758.80]	
仿真结果范围	[800.18, 1 200.27]	[538.07, 984.59]	[4 800.00, 4 801.39]	[3 668.10, 4 584.22]	[0.74, 1 792.55]	[1 839.20, 1 840.02]	[121.87, 1 829.56]

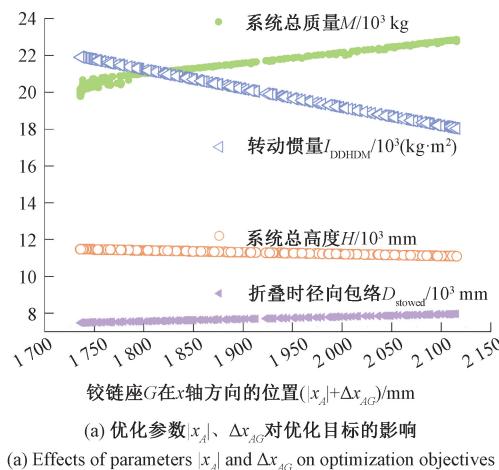
与  $|x_A|$ 、 $\Delta x_{AG}$  的和呈较好的线性关系, 其中展开系统质量  $M$  与其成正比关系, 其余优化目标与其成反比关系。而且根据图 6 (a) 与式 (15) 可知,  $D_{stowed} \propto (|x_A| + \Delta x_{AG})$ 。

从图 6(b) 中可以看出, 上翻子镜组件的转动惯量  $I_{TRTRM}$  与  $|x_A|$ 、 $L_{AB}$  的和成一定的反比关系。如图 2 所示,  $|x_A|$ 、 $L_{AB}$  的和代表的是关节  $B$  (安装电机的关节) 在  $x$  轴方向的位置。在 2.1 节第 2 条所述的展开过程的第(1)阶段时,  $|x_A|$ 、 $L_{AB}$  的和越小, 背板的质心相对于关节  $B$  逐渐往  $y$  轴负方向移动, 使得关节  $B$  与 TRTTRM 的质心距

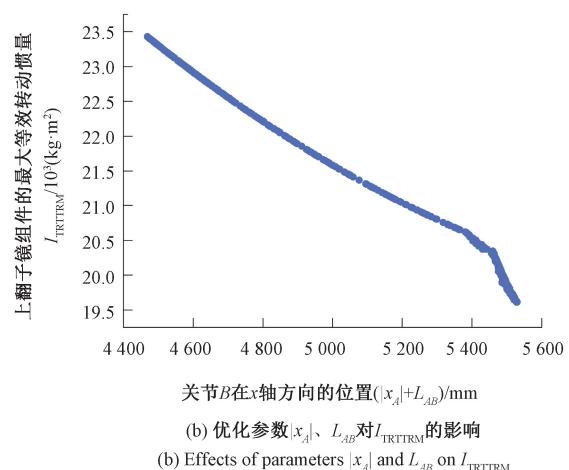
离增大, 导致  $I_{TRTRM}$  增大。在展开过程的第(4)阶段时, 背板的质心与关节  $B$  距离越近, 则  $I_{TRTRM}$  越小。

### 3.2 参数方案筛选

从图 2 可以看出,  $|x_A|$  的尺寸决定了次镜筒的大小,  $\Delta x_{AG}$  的尺寸决定了摇杆  $AB$  与连杆  $BC$  在折叠状态下的位置关系, 从而影响连杆  $BC$  的设计。因此  $|x_A|$  与  $\Delta x_{AG}$  的尺寸不宜过小。其次, 连杆  $PR$  的尺寸变化较小, 由于桁架基座搭载的连杆  $NR$  的铰接点  $N$  需要位于折叠后向下翻折的子镜组件背板下方外侧, 因此桁架基座的高度  $H_T$  变化也较小。 $\Delta y_{AG}$  的尺寸将会影响摇杆  $GC$  的伸缩长



(a) 优化参数  $|x_A|$ 、 $\Delta x_{AG}$  对优化目标的影响  
(a) Effects of parameters  $|x_A|$  and  $\Delta x_{AG}$  on optimization objectives



(b) 优化参数  $|x_A|$ 、 $L_{AB}$  对  $I_{TRTRM}$  的影响  
(b) Effects of parameters  $|x_A|$  and  $L_{AB}$  on  $I_{TRTRM}$

图6 优化参数对优化目标的影响

Fig. 6 Effects of optimization parameters on optimization objectives

度  $\delta_{GC}$ ，因此  $\Delta y_{AG}$  的尺寸也不宜过小。综合考虑，选择  $D_{stowed} = [7479 \text{ mm}, 7956 \text{ mm}]$ 、 $\xi = 0.20$  的仿真结果，并需要从中选取一组最优解。其中仿真结果如表4与图6所示。

实际评价指标一共有7个： $H$ 、 $M$ 、 $I_{DDHD}$ 、 $D_{stowed}$ 、 $I_{TRTRM}$ 、 $\delta_{AB}$ 、 $\delta_{GC}$ 。由于评价指标较多，因此采取分步打分与筛选的策略。

首先依据图6(a)，通过对每个参数方案的  $H$ 、 $M$ 、 $I_{DDHD}$  和  $D_{stowed}$  的值进行打分，获得合适的  $|x_A|$  与  $\Delta x_{AG}$  的和的范围，即：

1) 对所有参数方案的评价指标进行归一化处理，使用评价指标  $H$  进行举例说明，如式(16)所示。

$$H' = (H_{\max} - H) / (H_{\max} - H_{\min}) \quad (16)$$

式中： $H'$  为将  $H$  归一化后的值； $H_{\max}$  与  $H_{\min}$  分别为所有解中  $H$  的最大值与最小值。同理可得  $M'$ 、 $I'_{DDHD}$  和  $D'_{stowed}$ 。

2) 采用100分制对评价指标进行打分，根据各指标的重要性及实现难度进行分数分配。

打分结果如图7所示，选取分数高于55分的解进入第2轮筛选。此时  $(|x_A| + \Delta x_{AG})$  的值在  $1735 \sim 1738 \text{ mm}$ 。

第2轮筛选的评价指标选取  $I_{TRTRM}$ 、 $\delta_{AB}$  与  $\delta_{GC}$ ，并根据式(16)对3项评价指标进行归一化处理。同样采用100分制对评价指标进行打分，打分结果如图8所示。图中三角形符号代表的是首轮排除的解集(参数方案)，方形符号代表的是第2轮排除的解集，星形符号代表的是最终保留的解集，且图中还展示出所有解在3个方向上的投影。可以看出，保留的解集合中， $|x_A|$  的值在  $800 \text{ mm}$  附近， $\Delta x_{AG}$  的值在  $935 \text{ mm}$  附近， $L_{AB}$  的值在  $3900 \sim 4200 \text{ mm}$ 。

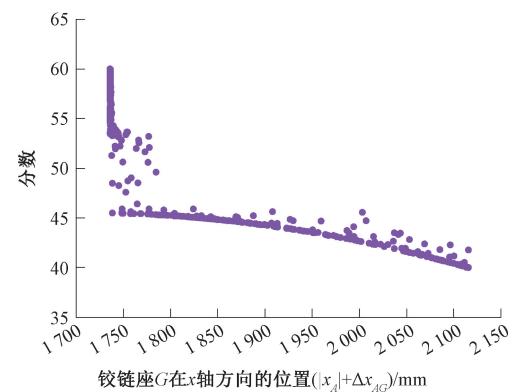


图7 第1轮打分结果

Fig. 7 Evaluation results of the first round

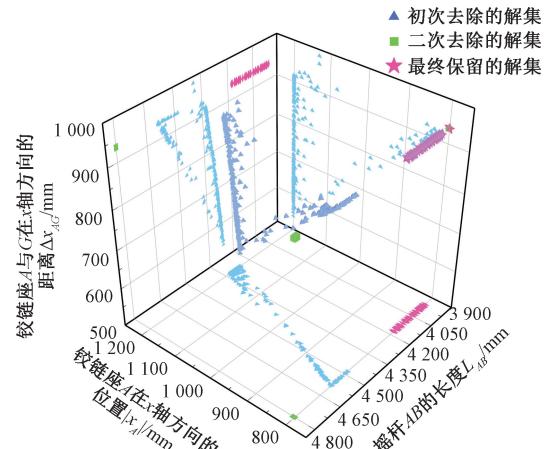


图8 解集(参数方案)的筛选结果

Fig. 8 Down-selection results of the pareto-optimal solutions

通过选取  $\delta_{AB}$  与  $\delta_{GC}$  拥有较小的值的解作为余下的解集中的最优参数方案，得到的结果如表5所示。

表 5 最优参数方案的优化参数与评价指标结果

Table 5 Optimization parameters and evaluation indicators of the optimal parameter solution

关键参数	表达方法	参数值	对比已有设计
摇杆 AB	$L_{AB}$	3 951.52 mm	↓ 64.04%
	$\delta_{AB}$	557.30 mm	
连杆 BC	$L_{BC}$	1 839.20 mm	
摇杆 GC	$L_{GC}$	6 826.79 mm	↓ 67.04%
	$\delta_{GC}$	603.47 mm	
连杆 PR	$L_{PR}$	6 077.71 mm	
桁架基座	$ x_A $	800.18 mm	
	$ x_P $	1 736.52 mm	
	$\Delta x_{AG}$	936.33 mm	
	$\Delta y_{AG}$	4 800.00 mm	
折叠后的径向包络	$D_{stowed}$	7 479.90 mm	↓ 5.74%
总高度	$H$	11 474 mm	↓ 1.51%
总质量	$M$	19 887 kg	↓ 20.90% (无背板)
TRTTRM 转动惯量	$I_{TRTTRM}$	22 374 kg·m <sup>2</sup>	↓ 28.75%
DDHDM 转动惯量	$I_{DDHDM}$	21 902 kg·m <sup>2</sup>	

由表 5 可得, 经过本文提出的算法、参数相关性分析以及参数方案筛选策略, 得到的参数方案可以使展开系统在保证不增大折叠后的径向包络与总高度的前提下, 总质量  $M$  减少 20.90% (比较时不计背板质量), 上翻子镜组件在运动过程中的最大转动惯量  $I_{TRTTRM}$  降低了 28.75%, 且摇杆 AB 与 GC 的伸缩量  $\delta_{AB}$ 、 $\delta_{GC}$  相比原有距离也缩短了 64% 以上, 这将大幅降低展开系统结构研制、执行机构研制与控制等的难度。

### 3.3 大口径反射镜展开系统优化后的力学性能

根据表 5 所示的尺寸数据对大口径反射镜展开系统进行了重新建模, 三维模型如图 9 所示。

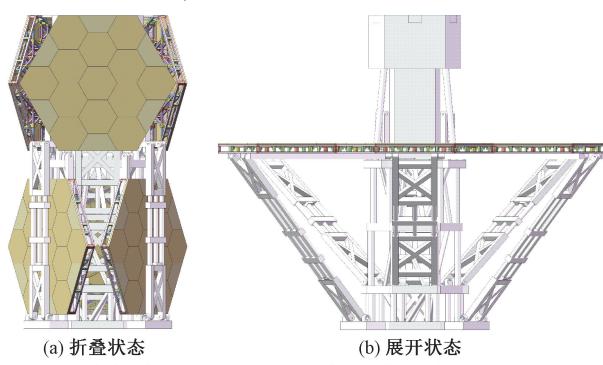


图 9 优化后的大口径反射镜展开系统

Fig. 9 Optimized large-aperture mirror deployment system

对图 9 所示的大口径反射镜展开系统模型进行折叠状态下的随机振动分析, 力学条件如表 6 所示, 仿真结果如表 7 所示。

表 6 随机振动力学条件

Table 6 Random vibration loading conditions

振动方向	频率范围/Hz	功率谱密度
Y 轴方向 (竖直方向)	10 ~ 50	3 dB/oct
	50 ~ 300	0.067 9 g <sup>2</sup> /Hz
	300 ~ 2 000	-12 dB/oct
X、Z 轴方向	10 ~ 50	3 dB/oct
	50 ~ 300	0.038 g <sup>2</sup> /Hz
	300 ~ 2 000	-12 dB/oct

表 7 随机振动仿真结果

Table 7 Random vibration simulation results

振动方向	材料	最大应力值/MPa	最大应力所在位置
Y 轴方向	M65J	105	上翻子镜组件背板与次镜筒的锁紧位置处
	2Cr13	15	摇杆 AB 与桁架基座连接处的轴
X 轴方向	M65J	581	桁架基座底部
	2Cr13	140	连杆 PR 与桁架基座连接处的轴
Z 轴方向	M65J	526	桁架基座底部
	2Cr13	144	摇杆 GC 与桁架基座连接处的轴

2Cr13 的屈服强度为 440 MPa, M65J 的拉伸强度为 3 500 MPa。取安全系数为 3 时, 2Cr13 的许用应力为 147 MPa, M65J 的许用应力为 1 167 MPa。由表 7 可得, 优化后的大口径反射镜展开系统可满足如表 6 所示的力学条件, 具有一定的工程可实现性。

## 4 结 论

大口径反射镜展开系统用于将大口径反射镜收纳至可装载入火箭整流罩的包络尺寸内, 以突破火箭整流罩对空间望远镜主镜口径的限制。本研究针对大口径反射镜展开系统存在的质量较大、电机轴处所受外部等效转动惯量较大、摇杆的运动部件行程较长以及系统参数较多且相互耦合等问题, 首先提出了引入罚函数的多目标

粒子群优化算法。该算法将展开系统的总质量  $M$  与上翻子镜组件的电机轴处所受的最大等效转动惯量  $I_{\text{TRTRM}}$  作为优化目标,通过将参数的边界条件与参数间的耦合关系使用罚函数表达,最后使用多目标粒子群优化算法对展开系统参数进行优化。该算法可以将优化目标数量降至最低,同时经由罚函数得到的参数方案均符合大口径反射镜展开系统的设计要求。

其次,本文分析了改变优化参数的搜索区间与改变折叠后展开系统的径向包络  $D_{\text{stowed}}$  的允许范围对优化结果的影响,将优化结果与已有设计相比较,结果表明:当优化参数的搜索区间增大时,  $M$  与  $I_{\text{TRTRM}}$  的值将会减小,其中  $M$  最高可降低 23.4% (不计背板质量),  $I_{\text{TRTRM}}$  最高可降低 50.2%;当  $D_{\text{stowed}}$  的允许范围增大时,  $M$  的最小值降低,展开系统总高  $H$  的最大值升高,而  $I_{\text{TRTRM}}$  的结果变化较小。在确定搜索系数  $\xi = 0.20$ 、 $D_{\text{stowed}} = [7479 \text{ mm}, 7956 \text{ mm}]$  时,通过对优化结果进行分析发现:  $M$ 、 $D_{\text{stowed}}$  与铰链座  $A$  距离中心轴线的距离  $|x_A|$ 、铰链座  $A$  与铰链座  $G$  在  $x$  轴方向上的距离  $\Delta x_{AG}$  的和成正比关系,  $H$  与其成反比关系,  $I_{\text{TRTRM}}$  与  $|x_A|$ 、摇杆  $AB$  的长度  $L_{AB}$  的和具有一定反比关系。通过将评价指标分组并采取分步打分与筛选的策略,最终选择了一组最优参数方案。将该组解对比已有设计,  $D_{\text{stowed}}$  降低了 5.74%,  $H$  降低了 1.51%,  $M$  降低了 20.90% (不计背板质量),  $I_{\text{TRTRM}}$  降低了 28.75%, 摆杆  $AB$  与  $GC$  的伸缩行程  $\delta_{AB}$  与  $\delta_{GC}$  分别缩小了 64.04% 与 67.04%。

结果表明,所提的使用  $M$  与  $I_{\text{TRTRM}}$  为优化目标的引入罚函数的多目标粒子群优化算法能够有效地优化大口径反射镜展开系统参数。根据算法的仿真数据,通过分析初始条件、设计参数与评价指标间的相关性,并采用分步打分与筛选的策略,可以快速筛选展开系统各项指标提升最优的一组参数方案。使用最优参数方案对大口径反射镜展开系统进行尺寸优化后,对展开系统模型进行了随机振动分析。结果表明,展开系统的材料所受的最大应力均在其许用应力范围之内,证明了优化后的大口径反射镜展开系统具有一定的工程可实现性,具备一定的工程参考价值。

## 参考文献

- [1] 田富湘. 空间大口径反射镜支撑及重力卸载技术研究 [D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2024.
- TIAN F X. Support and gravity unloading technology of the large aperture space mirror [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2024.
- [2] KENDRICK S E. Monolithic versus segmented primary mirror concepts for space telescopes [C]. Optical Manufacturing and Testing VIII, 2009, 7426: 195-206.
- [3] LUO X G. High-precision fabrication of 4m SiC aspheric mirror [J]. Light: Science & Applications, 2023, 12(1): 4.
- [4] 殷龙海, 李延伟, 李骏驰, 等. 大口径超轻量化碳化硅反射镜超精密铣磨技术(特邀) [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(9): 31-38.
- YIN L H, LI Y W, LI J CH, et al. Ultra-precision milling technology of large-aperture ultra-lightweight SiC mirror (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(9): 31-38.
- [5] ABEEL A C, WOOLDRIDGE E M, CALCABRINI M, et al. Overview of contamination control for the James Webb Space Telescope launch campaign [C]. Space Systems Contamination: Prediction, Control, and Performance 2022. SPIE, 2022, 12224: 185-209.
- [6] MENZEL M, PARRISH K, FEINBERG L, et al. Lessons learned from systems engineering on the James Webb Space Telescope [J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2024, 10(1): 011208.
- [7] HYLAN J E, BOLCAR M R, CROOKE J, et al. The large UV/optical/infrared surveyor (LUVOIR): Decadal mission concept study update [C]. 2019 IEEE Aerospace Conference, 2019: 1-15.
- [8] PARK S, EISENHOWER M J, BOLCAR M R, et al. LUVOIR thermal architecture overview and enabling technologies for picometer-scale WFE stability [C]. 2019 IEEE Aerospace Conference, 2019: 1-13.
- [9] 肖晓伟, 肖迪, 林锦国, 等. 多目标优化问题的研究概述 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 805-808, 827.
- XIAO X W, XIAO D, LIN J G, et al. Overview on multi-objective optimization problem research [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(3): 805-808, 827.
- [10] 刘智睿, 杨志刚, 赵志伟, 等. 决策空间自组织多模态多目标鲸鱼优化算法研究 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(4): 48-55.
- LIU ZH R, YANG ZH G, ZHAO ZH W, et al. Research on self-organizing multi-modal multi-objective

- whale optimization algorithm in decision space [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(4): 48-55.
- [11] 张旭飞, 张锋阳, 刘欣超, 等. 三轴标准振动台簧片解耦结构遗传算法多参数优化设计[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(5): 167-176.
- ZHANG X F, ZHANG F Y, LIU X CH, et al. Multi-Parameter optimization design for leaf-spring decoupling structure of tri-axial standard vibrator based on the genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(5): 167-176.
- [12] MA H P, ZHANG Y J, SUN SH Y, et al. A comprehensive survey on NSGA-II for multi-objective optimization and applications[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(12): 15217-15270.
- [13] MKAOUER W, KESSENTINI M, SHAOUT A, et al. Many-objective software remodularization using NSGA-III[J]. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2015, 24(3): 1-45.
- [14] 何嘉辉, 李文辉, 王进, 等. 基于改进 NSGA-III 算法的航发多分支电缆布局规划[J/OL]. *计算机集成制造系统*, 1-14[2025-06-09].
- HE J H, LI W H, WANG J, et al. Multi-branch cable layout planning for aero-engines based on improved NSGA-III algorithm[J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1-14[2025-06-09].
- [15] CUI Y Y, MENG X, QIAO J F. A multi-objective particle swarm optimization algorithm based on two-archive mechanism[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 119: 108532.
- [16] 乔贵方, 蒋欣怡, 高春晖, 等. 基于多目标优化的工业机器人位置与姿态精度提升方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(12): 217-224.
- QIAO G F, JIANG X Y, GAO CH H, et al. Method for improving position and attitude accuracy of industrial robots based on multi-objective optimization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(12): 217-224.
- [17] 徐萌, 周玉祥, 徐海, 等. 基于改进粒子群算法的开关磁阻电机本体优化[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(4): 131-141.
- XU M, ZHOU Y X, XU H, et al. Ontology optimization of switched reluctance motor based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(4): 131-141.
- [18] FALCÓN-CARDONA J G, LEGUIZAMÓN G, COELLO COELLO C A, et al. Multi-objective ant colony optimization: An updated review of approaches and applications[J]. *Advances in Machine Learning for Big Data Analysis, Intelligent Systems Reference Library*, Springer, 2022, 218: 1-32.
- [19] 冉宁, 杨宏飞, 张家明, 等. 基于改进蚁群算法的无人机三维航迹规划[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(20): 41-49.
- RAN N, YANG H F, ZHANG J M, et al. 3D path planning of UAV based on improved ant colony algorithm[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(20): 41-49.
- [20] THOM DE SOUZA R C, DE MACEDO C A, DOS SANTOS COELHO L, et al. Binary coyote optimization algorithm for feature selection[J]. *Pattern Recognition*, 2020, 107: 107470.
- [21] ZHU J H, WANG J SH, ZHANG X Y, et al. Multi-objective coyote optimization algorithm based on hybrid elite framework and Meta-Lamarckian learning strategy for optimal power flow problem [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2024, 57: 117.

## 作者简介



谢碧晶,2019年于吉林大学获得学士学位,现为中国科学院上海技术物理研究所博士研究生,主要研究方向为大口径反射镜展开拼接技术。

E-mail: xiebijing@mail.sitp.ac.cn

**Xie Bijing** received her B. Sc. degree from Jilin University in 2019. She is currently pursuing the Ph. D. degree at Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences. Her research interests include the deployment and splicing technology for large-aperture mirrors.

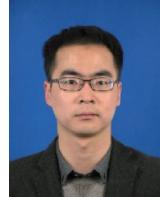


傅雨田,1990年于浙江大学获得学士学位,1996年于中国科学院上海技术物理研究所获得硕士学位,1999年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位,现为中国科学院上海技术物理研究所研究员,主要研究方向为空间遥感和天文光学仪器。

E-mail: yutianfu@mail.sitp.ac.cn

**Fu Yutian** received his B. Sc. degree from Zhejiang University in 1990, and his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Shanghai

Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, in 1996 and 1999, respectively. He is currently a researcher at Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences. His research interests include space remote sensing and astronomical optical instruments.



陈永和(通信作者),2003年于中国科学技术大学获得学士学位,2006年于中国科学院研究生院获得硕士学位,2017年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院上海技术物理研究所高级工程师,主要研究

方向为空间高灵敏度光电系统。

E-mail: chenyonghe@mail.sitp.ac.cn

**Chen Yonghe** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from the University of Science and Technology of China in 2003, his M. Sc. degree from the Graduate School of Chinese Academy of Sciences in 2006, and his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2017. He is currently a senior engineer at Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences. His research interest includes space high-sensitivity photoelectric systems.