

文章编号 1004-924X(2015)09-2562-08

空间长条形反射镜背部三支撑点的设置

朱俊青^{1,2}, 沙 巍¹, 陈长征¹, 张星祥¹, 任建岳^{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 100039)

摘要:采用背部三点支撑方式的空间光学遥感器长条形反射镜目前尚无普遍适用的支撑点设置方法,只能对某一确定尺寸和长宽比的反射镜进行专门设计。本文提出了基于规则模型的、以参数化模型为核心的集成参数化设计方法,并建立了长条形实体反射镜背部三点支撑集成参数化模型。在集成环境中通过试验设计、响应面分析等方法对设计参数进行了分析和优化,结果表明在轴向重力工况,镜面面形峰谷(PV)值优于 $\lambda/10$ ($\lambda=632.5\text{ nm}$)的设计要求下,长条形碳化硅反射镜背部三点支撑的最大适用尺寸为 1 m。文中给出了最优支撑点布置,并确定了厚径比最优为 1/10。最后,对集成参数化分析方法进行了精度分析,结果显示该方法整体误差为 6.13%。提出的方法确定了空间长条镜背部三点支撑的适用范围,提供了支撑点最佳布置,为空间相机不同尺寸要求的长条镜设计打下了基础。

关键词:空间光学遥感器;空间反射镜;长条形反射镜;参数化设计;集成优化;背部支撑

中图分类号:TH743;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152309.2562

Position layout of rear three point mounting for space rectangular mirror

ZHU Jun-qing^{1,2}, SHA Wei¹, CHEN Chang-zheng¹, ZHANG Xing-xiang¹, REN Jian-yue^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: reny@sohu.com

Abstract: It is difficult to conclude a general method in opto-mechanical design for rectangular mirrors mounted via rear three-point method in a space remote sensor. So, the individual opto-mechanical design for a given size rectangular mirror is usually used. In this paper, an integrated parametric design method based on a regular model was proposed and a parametric model for 3-point mounting space rectangular mirror was established. Integrated analysis and response surface method were used in analysis and optimization of the designed parameters. The results show that the size limit of mirror for rear three mounting method is 1 m for the requirement of the axial self-weight deflection of wavefront error less than $1/10\lambda$ ($\lambda=632.5\text{ nm}$). The best mounting position was proposed, and the proper thick aspect ratio was given by 1/10. The accuracy of the proposed integrated parametric design method was analyzed, and the results show that the total analysis error is 6.13%. The method defines the proper size of rectangular mirror with rear three point mounting, gives the best mounting

收稿日期:2014-12-11;修订日期:2015-01-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

position and provides a standard for design of space remote sensors.

Key words: space optical remote sensor; space mirror; rectangular mirror; parametric design; integrated optimization; rear mounting

1 引言

离轴三反(Three Mirror Anastigmat, TMA)光学系统具有无色差、无中心遮拦、大视场等特点,已在国内外多种型号的空间光学遥感器中得到应用,如美国 EO-1 相机等。

TMA 光学系统的反射镜多为长条形,长条形反射镜的3点静定支撑有侧边支撑、双脚架支撑^[1]和背部3点支撑^[2-3]等方式。其中背部3点支撑方式光机结构紧凑,反射镜组件可以实现较高的谐振频率^[5]。

空间光学遥感器工作时需克服地面环境 1G 重力场到空间环境微重力场的变化,在轨温度场变化,发射环境的振动和冲击等影响。空间光学遥感器的光机系统设计需满足遥感器在预期工况下的变化在可接受范围内,以保证正常成像和稳定工作^[4-5]。在可见光波段工作的空间光学遥感器要求反射镜组件在光轴向 1 G 重力工况下,反射镜的面形变化峰谷(PV)值为 $\lambda/10$,均方根(rms)值为 $\lambda/50$ ($\lambda=632.5$ nm)。

空间相机反射镜的轻量化设计是在实体反射镜的基础上进行等刚度设计,因此应首先确定同尺寸实体反射镜支撑需要的支撑点的数目和最佳布置方式。圆形实体反射镜背部3点支撑的最优支撑点布置方式可由经验公式得到^[6],但由于长条形反射镜设计参数较多,目前尚未有文献就长条形实体反射镜背部3点最优支撑问题考察其全部设计空间。

集成优化设计方法在空间光学遥感器设计中得到较多应用^[7]。通过集成光学、机械、热控等学科,集成优化设计方法可以全面考量系统设计,尽快收敛到较优设计。Lucy E. Cohan 等人对轻量化拼接反射镜进行了集成建模优化设计,采用参数化建模的方法实现了闭环、多学科集成优化^[8]。

参数化建模^[9]能够通过设计变量参数化,根据所给参数来实现快速建模,将其嵌入至集成设

计环境中能够进行多目标优化,较快地迭代到较优设计点,从而显著提高设计效率;参数化设计可以实现连续变化结构变量,能够全面考察参数设计空间,进行灵敏度分析、不确定度分析;进而可建立专家系统,能够将测试数据和设计经验固化来指导新设计。参数化集成建模对如光学遥感器方案设计等复杂、高耦合但模型规则的系统有重要的意义^[10],目前在模型规则的初步设计中应用广泛,但对于复杂结构,参数化方法的实现还较为困难。

本文介绍了一种以基于规则模型的参数化建模为核心的多学科集成设计系统,并利用该系统对长条形实体反射镜背部3点支撑特性进行了研究。

2 集成参数化设计系统的构成

由于规则模型可知,故可通过数学建模实现参数化建模。针对初步设计阶段的较简单模型,集成多学科分析,提出以自动参数化建模为核心的集成参数化设计方法,建立长条形实体反射镜背部3点支撑集成参数化模型。

2.1 参数化建模的实现方法

空间长条形实体反射镜为平面反射镜,工作在可见光波段,采用背部3点支撑,支撑位置和反射镜尺寸如图1所示。反射镜有限元模型的参数及其变化范围见表1。反射镜尺寸变化范围是依据经验确定的:反射镜长度在 200 mm 以内时单点支撑可以满足要求;长度大于 1 600 mm 时,背部3点支撑亦不能满足重力变形要求,因此研究的长条形反射镜长度为 200~1 600 mm。长宽比在 0.4 以下时,背部3点支撑的支撑点趋于一线,会引起热变形大和谐振频率低等现象,因此研究的长条形反射镜长宽比在 0.4~1。反射镜采用 SiC 材料^[11],材料属性如表2所示。计算工况为光轴方向 1 G 重力下变形。

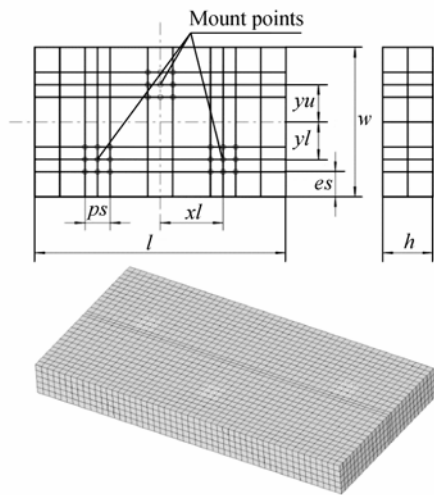


图 1 长条形实体反射镜背部 3 点支撑模型示意图

Fig. 1 Rectangular mirror mounted by using rear three points

表 1 长条形实体反射镜初始参数

Tab. 1 Baseline mirror properties

Parameter	Unit	Range
长度 l	mm	200~1 600
长宽比 $a_r = w/l$	—	0~1
厚径比 $h_r = h/l$	—	0~1
单元尺寸 e_s	mm	1~20
支撑点大小 p_s	mm	5~20
支撑点 X 方向比 $x_p = 2 \times xl/l$	—	0~1
上方支撑点 Y 方向比 $y_{up} = 2 \times yu/w$	—	0~1
下方支撑点 Y 方向比 $y_{ip} = 2 \times yl/w$	—	0~1

表 2 SiC 材料属性

Tab. 2 Properties of SiC

Density	Youngs Modulus	Poisson's ratio	CTE
Unite g/cm^3	GPa	—	$1 \times 10^{-6} / K$
SiC 3. 20	400. 00	0. 3	2. 40

长条形实体反射镜参数化建模流程如图 2 所示,根据输入参数,根据规则模型的数学描述,建立相应有限元模型节点、单元、材料属性和工况等信息,网格单元划分大小由单元尺寸参数 e_s 确

定。按照有限元计算软件的输入文件的格式要求形成解算文件,至此参数化建模完成。

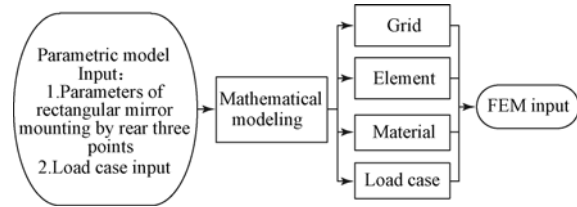


图 2 长条形实体反射镜背部 3 点支撑参数化建模流程图

Fig. 2 Block diagram of parameterization for rectangular mirror mounted by using rear three points

2.2 集成参数化设计系统的构成

空间光学传感器设计涉及光学、机械、电子、控制和热控等学科,通过集成多学科仿真,最终以系统可行性、成像质量和经济性等指标进行评价。长条形实体反射镜背部 3 点支撑采用反射镜轴向重力变形的面形,即波像差进行评价,也就是说采用反射镜面形 PV 值评价轴向重力变形的大小。

在像质评价中,长条形反射镜相当于整个圆形反射镜中的局部视场,其波面形式不能满足 Zernike 多项式的特性要求,反射镜的静力学变形的波像差不能直接用 Zernike 多项式来描述,必须进行转换处理,采用球面拟合方法得到反射镜面型方法。

集成参数化设计系统如图 3 所示。根据设计任务,采取一定的设计流程,通过参数化自动建模得到分析结果。评价分析结果后转入下一步分析流程,经过多次迭代,最终得到设计结果。

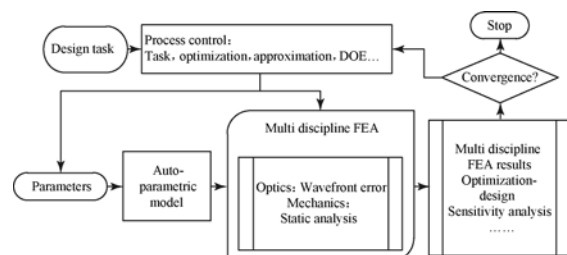


图 3 集成参数化分析系统流程图

Fig. 3 Block diagram of integrated parametric system

3 反射镜背部 3 点支撑特性分析

3.1 支撑位置响应面分析

对于确定的设计任务,反射镜尺寸为已知,即 l, a_r 为常量。采用反射镜背部 3 点支撑方案,首先应确定实体反射镜的最优支撑位置。支撑位置的优化问题描述如下:

目标函数为反射镜镜面面形,即面形 PV 值。由于研究对象为平面,则面形 PV 值为变形后反射镜表面节点平面拟合残差(residual error)的最大值和最小值之差,即:

$$PV = \max(\text{residual error}) - \min(\text{residual error}). \quad (1)$$

由于设计空间较大,首先采用实验设计方法(DOE)对整个设计空间进行采样计算,然后进行响应面分析^[12-13]。如设置 $l = 500 \text{ mm}, a_r = 0.5, h_r = 0.1, e_s = 10 \text{ mm}, p_s = 20 \text{ mm}$ 。采用优化拉丁超立方法,采集 1 000 个设计点,得到分析结果如下:通过响应面模型(RSM),利用多项式函数拟合设计空间,得到轴向重力工况参数 x_p 和 y_p 对镜面面形 PV 值的响应面如图 4 所示,并得到四阶响应面近似模型的各项系数,PV 值的响应面模型多项式系数如表 3 所示,拟合误差为 6.1%,满足精度要求,显示模型具有可信度。

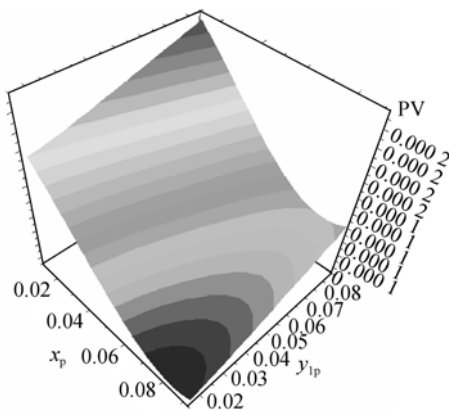


图 4 3 点支撑设计空间响应面图

Fig. 4 Response surface of design space for three point mount

表 3 轴向重力下 PV 响应面模型多项式系数

Tab. 3 Polynomial coefficients of PV in axial gravity case

Term	Coefficient	Term	Coefficient
Constant	0.000 215 042	$x_p \times y_{up}$	-1.88×10^{-5}
x_p	-0.000 192 471	$y_{ip} \times y_{up}$	-2.49×10^{-5}
y_{ip}	-1.84×10^{-5}	x_p^3	3.35×10^{-5}
y_{up}	-0.000 179 962	y_{ip}^3	-0.000 372 164
x_p^2	-0.000 157 708	y_{up}^3	-0.000 580 702
y_{ip}^2	0.000 316 802	x_p^4	0.000 175 032
y_{up}^2	0.000 530 588	y_{ip}^4	0.000 161 31
$x_p \times y_{ip}$	1.94×10^{-5}	y_{up}^4	0.000 237 116

变量 x_p, y_{ip}, y_{up} 对结果 PV 的帕累托贡献度百分比如图 5 所示,正值表示正效应,负值表示反效应。可以看出影响 PV 值最大的是 x_p 和 y_{ip} 变量,变量 y_{up} 对 PV 结果影响较小。

基于灵敏度分析实施优化过程,即优先对灵敏度高的参数进行优化迭代,可缩小优化过程的设计空间,能够尽快得到优化结果,节约时间和成本。得到在全部设计空间中,最优支撑结果: $x_p = 0.71, y_{ip} = 0.22, y_{up} = 0.46$,最优面形 PV 值为 21.3 nm。

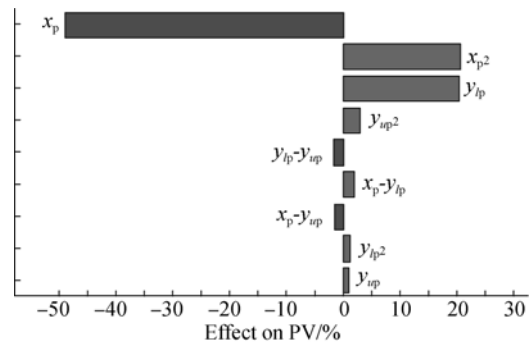


图 5 3 点支撑设计变量对 PV 的帕累托贡献

Fig. 5 Pareto plot for response PV

3.2 支撑位置优化策略

长条形反射镜支撑位置优化的变量有 3 个,用试验设计(DOE)方法优化的计算量较大。且优化问题不能简单地用函数来描述,单纯用梯度优化算法会得到局部最优解而非全局最优。应首先采用全局优化算法在全部设计空间进行粗略定位,避免出现局部最优解,然后以全局优化算法得

到的最优解作为梯度优化算法的初值,进行精确寻优,最终得到最优解。

本文采用的优化策略为首先用遗传算法(Genetic Algorithm,GA)对整个设计空间进行寻优,然后采用单纯形梯度优化算法(Downhill Simplex Method,DSM)以遗传算法的最优解为初值继续寻优,得到最优解。优化过程如图 6 所示:

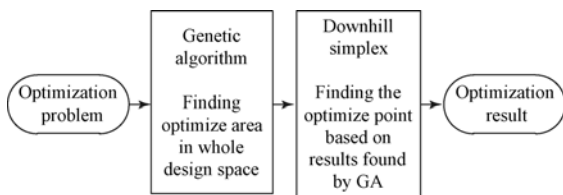


Fig. 6 Block diagram of optimization process

经过验算,采用遗传算法,选定种群规模为 70,初始种群在变量约束范围内随机产生,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.01,总进化代数数为 7 代,得到遗传算法优化结果。将遗传算法得到的最优结果传递给单纯形梯度优化模块作为初始值,设置初始单纯形尺寸(initial simplex size)为 0.1,继续迭代 100 次得到优化结果。迭代过程如图 7 所示,左图为遗传算法迭代过程,右图为单纯形梯度优化算法迭代过程。试验表明该方法可以得到的全局最优解,方法稳定可靠。

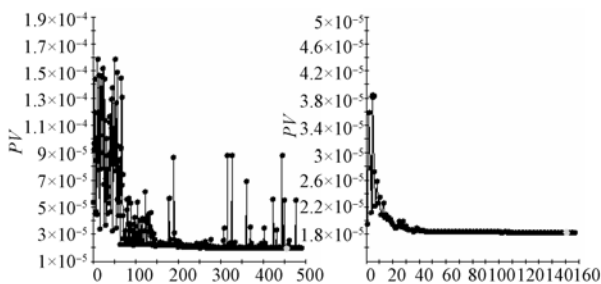


图 7 优化迭代过程

Fig. 7 Iteration process of optimization

3.3 背部 3 点支撑适用尺寸范围确定

基于长条形实体反射镜 3 点支撑集成参数化设计系统,研究了不同尺寸反射镜支撑最优位置和支撑结果。依据设计经验,反射镜厚径比为 0.1 左右,设定反射镜厚径比为 0.1,在长宽比

0.4~1,长度 200~1 600 mm 内采样,得到不同尺寸反射镜最优支撑 PV 值如图 8 所示。

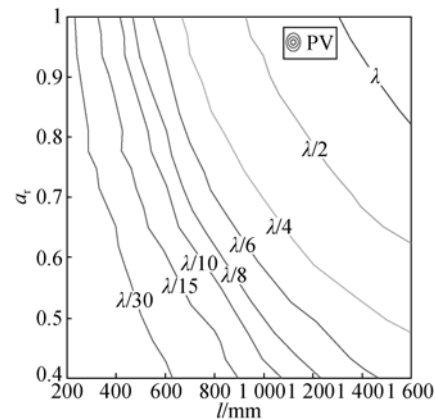


图 8 不同尺寸最优支撑 PV 值等高线图

Fig. 8 Contour plot of best mount results PV for variable sizes of rectangular solid mirror

在 $PV = \lambda/10$ 等高线内(即 3 点支撑最优 $PV \leq \lambda/10$)为适用支撑区域,处于该区域的不同尺寸的反射镜采用背部 3 点支撑可以满足轴向重力变形要求。

依据设计经验,介于 $PV = \lambda/10$ 等高线和 $PV = \lambda/8$ 等高线之间为支撑临界区域,处于该区域的不同尺寸的反射镜经过轻量化后也可满足轴向重力变形要求。

当 $PV > \lambda/8$,反射镜尺寸太大,背部 3 点支撑方法的重力变形太大,不能满足轴向重力变形要求,背部 3 点支撑方法不再适用。

可知在长条形反射镜长宽比 0.4~1.0 内,厚径比为 0.1 时,对于所述材料 SiC,在轴向重力变形镜面面形值要求为 $PV: \lambda/10$ 条件下,背部 3 点支撑结构最大适应尺寸约为 1 m,长宽比为 0.4,最优支撑位置结果如表 4 所示,反射镜尺寸和轴向重力面形如图 9 所示。

研究背部 3 点支撑的适用范围可为反射镜支撑设计提供依据,从而减少不必要的工作,同时可以在不同尺寸反射镜最优支撑位置结果固化为经验数据,为设计提供方便。如果反射镜尺寸在图示背部 3 点支撑适用范围内,则反射镜背部 3 点支撑是可行的。如果反射镜尺寸在适用范围以外,则背部 3 点支撑无法满足轴向重力变形要求。

表 4 最大尺寸反射镜最优支撑位置结果

Tab.4 The best mounting position for the largest size of mirror

Mirror parameters		Optimized result	
l	1 000 mm	x_p	0.807 734
a_r	0.4	y_p	0.300 001
h_r	0.1	y_{up}	0.301 917
e_s	40 mm	PV	5.55×10^{-5} mm
p_s	40 mm	rms	1.24×10^{-5} mm

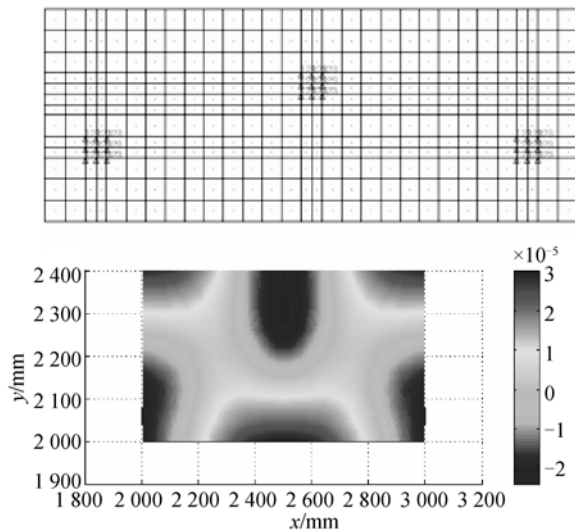


图 9 最大适用尺寸 1 m 的最优支撑结果和面形云图

Fig.9 The best mount results for 1 m rectangular solid mirror

3.4 反射镜最佳厚径比分析及确定

由弹性力学可知,增大反射镜厚径比可以提高反射镜刚度,但增大厚径比的同时增大了反射镜自重,提高了成本,因此需要研究厚径比对支撑结果的影响。

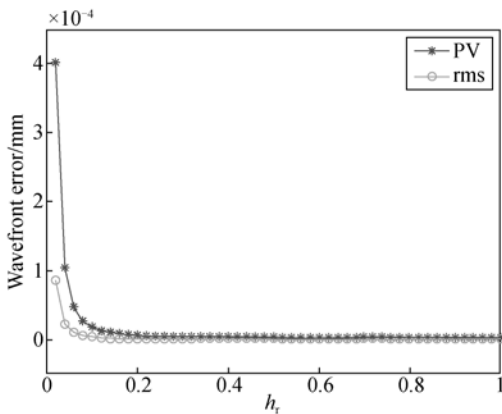


图 10 不同厚径比支撑结果

Fig.10 Figure errors for different h_r

对 $l=500, a_r=0.5$ 的 SiC 反射镜,改变其厚径比(0.01~1)得到轴向重力变形结果如图 10 所示。可见,增大厚径比可以提高反射镜轴向变形的面形值,但当 h_r 增大,反射镜重量增大,其对轴向变形的贡献量减少。因此不能单纯采用增大厚度的方式来提高反射镜面形精度,合适的厚径比在 0.1 左右。

3.5 集成参数化设计系统精度分析

集成参数化设计系统的误差的来源如表 5 所示。其中有限元计算结果采用科学计数法表示,有效数字为 7 位,因此有限元分析截断误差 δ_t 可忽略不计。镜面面形计算采用双精度数据计算,面形计算误差 δ_f 可忽略不计。

表 5 集成参数化设计系统误差来源

Tab.5 Error source of integrated parametric design system

Error source	Description
δ_t	finite element analysis truncation error
δ_m	finite element modeling error
δ_f	figure-error calculation error

建立的有限元模型的质量以及单元尺寸对分析结果引起误差 δ_m 。参数化集成系统可以实现不同单元尺寸的建模,这里研究了不同单元尺寸对分析结果的影响。对 $l=500, a_r=0.5, h_r=0.1$ 的 SiC 反射镜,采用不同单元尺寸建模,得到分析结果如图 11 所示。

可知不同单元尺寸得到的分析结果不同,误差 PV 为 6.13%,rms 为 4.68%,误差在允许范围内。

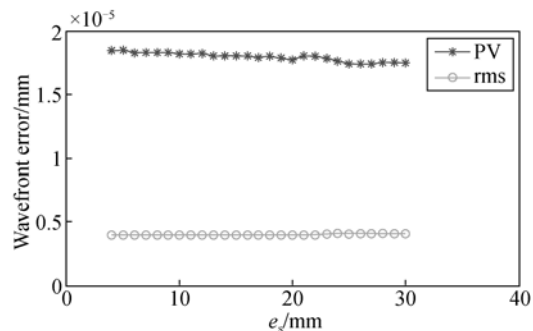


图 11 不同单元尺寸与分析结果的关系

Fig.11 Different element sizes and PV and rms

4 设计验证



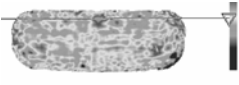

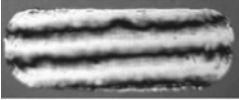
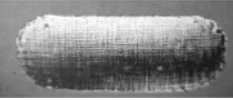
实体反射镜最优支撑是空间反射镜设计的基础。实体反射镜最优支撑确定后,进行轻量化设计,经多次迭代优化满足设计要求的最佳设计结果。

通过多次空间反射镜设计任务,验证该方法的有效性。长条形反射镜工程实例如表 6 所示。

空间反射镜 1 尺寸为 750 mm×300 mm,尺寸在适用支撑区域内,经分析计算,其在轴向重力工况下,厚径比为 0.1 的实体反射镜最优支撑镜面面形 PV 值为 25.61 nm,rms 值为 5.72 nm;轻量化后镜面面形 PV 值为 24.52 nm,rms 值为 5.31 nm,满足镜面面形优于 PV 值 $\lambda/10$ ($\lambda=632.5$ nm) 的要求。加工后干涉检验面形如表 6 中所示,rms 值为 0.025λ 。

表 6 空间长条形反射镜设计实例

Tab. 6 Designs of space rectangular mirrors

	Mirror 1	Mirror 2												
Photo of mirror														
Interferenc pattern														
	<table border="1"> <tr> <td>PV</td> <td>0.424</td> <td>wave</td> </tr> <tr> <td>rms</td> <td>0.025</td> <td>wave</td> </tr> </table>	PV	0.424	wave	rms	0.025	wave	<table border="1"> <tr> <td>PV</td> <td>0.537</td> <td>wave</td> </tr> <tr> <td>rms</td> <td>0.026</td> <td>wave</td> </tr> </table>	PV	0.537	wave	rms	0.026	wave
PV	0.424	wave												
rms	0.025	wave												
PV	0.537	wave												
rms	0.026	wave												
														

参考文献:

- [1] 严从林,吴钦章,刘卫林. 大型矩形反射镜支撑结构设计[J]. 光电工程, 2013,40(3):135-141.
YAN C L, WU Q ZH, LIU W L. Design and analysis for the support of large aperture rectangular mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40 (3):135-141. (in Chinese)
- [2] 刘巨,董得义,辛宏伟,等. 大口径反射镜组件的温

空间反射镜 2 尺寸为 1 000 mm×490 mm,尺寸在临界支撑区域内。轴向重力工况下,厚径比为 0.1 的实体反射镜最优支撑镜面面形 PV 值为 66.52 nm,rms 值为 14.53 nm;轻量化后镜面面形 PV 值为 52.61 nm,rms 值为 12.54 nm,满足镜面面形优于 PV 值 $\lambda/10$ ($\lambda=632.5$ nm) 的要求。加工后干涉检验面形如表 6 中所示,rms 值为 0.026λ 。

以上工程实例验证了该方法的对轻量化反射镜设计的有效性。

5 结 论

基于可数学描述的规则模型,通过参数化建模实现了连续变化结构参数,提出了以自动参数化建模为核心的集成参数化设计方法。建立了长条形实体反射镜背部 3 点支撑集成参数化模型。

基于该模型,连续变化结构参数,通过试验设计进行了响应面分析。确定各参数灵敏度,实现了基于灵敏度的优化过程,得到了长条形实体反射镜最优支撑位置。

设计了联合遗传算法和单纯形梯度优化算法的长条形反射镜最优支撑优化方案。确定了在轴向重力工况下,镜面面形优于 PV 值 $\lambda/10$ ($\lambda=632.5$ nm) 时,厚径比为 0.1 的长条形碳化硅反射镜采用背部 3 点支撑结构的最大适应尺寸为 1 m,长宽比为 0.4。确定了不同尺寸长条形反射镜最佳支撑位置和面形值。分析和确定了反射镜最佳厚径比在 0.1 左右。对集成参数化设计系统进行了精度分析,结果显示误差在允许范围内。在具体工程实践中实际应用了该方法,证明了该集成参数化设计方法的有效性,满足了工程实际需要。

度适应性[J]. 光学精密工程, 2013(12): 3169-3175.

LIU J, DONG D Y, XIN H W, *et al.*. Temperature adaptation of large aperture mirror assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013(12): 3169-3175. (in Chinese)

[3] 徐宏,关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. 光学精密工程,2013(6):1488-1495.

XU H, GUAN Y J. Structural design of 1 m diameter

- space mirror component of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013(6):1488-1495. (in Chinese)
- [4] 沙巍,陈长征,张星祥,等. 空间反射镜轻量化结构的拓扑优化设计[J]. *光电工程*, 2009, 36(4): 35-39.
- SHA W, CHEN CH ZH, ZHANG X X, *et al.*. Topological lightweight design of space mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(4):35-39. (in Chinese)
- [5] 刘书田,胡瑞,周平,等. 基于筋板式基结构的大口径空间反射镜构型设计的拓扑优化方法[J]. *光学精密工程*, 2013,21(7):1803-1810.
- LIU SH T, HU R, ZHOU P, *et al.*. Topologic optimization for configuration design of web-skin-type ground structure based large aperture space mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1803-1810. (in Chinese)
- [6] PAUL R Y J. *Opto-mechanical Systems Design (third edition)* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2008:503-506.
- [7] MICHELS G J, GENBERG V L, DOYLE K B, *et al.*. Design optimization of actuator layouts of adaptive optics using a genetic algorithm [C]. *Optics & Photonics 2005. International Society for Optics and Photonics*, 2005:58770L-58770L-9.
- [8] COHAN L E, MILLER D W. Integrated modeling for determining launch survival and limitations of actuated, lightweight mirrors [C]. *Proc. SPIE.*, 2008, 7010:70102I.
- [9] 伞晓刚,孙宁,卓仁善,等. 大口径光电经纬仪主反射镜支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2013,21(12):3111-3117.
- SAN X G, SUN N, ZHUO R SH, *et al.*. Design of supporting structure for primary mirror of large aperture theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(12):3111-3117. (in Chinese)
- [10] GERSH-RANGE J A, ARNOLD W R, PECK M A, *et al.*. A parametric finite-element model for evaluating segmented mirrors with discrete edgewise connectivity [C]. *SPIE Optical Engineering Applications. International Society for Optics and Photonics*, 2011:81250H-81250H-9.
- [11] 张舸. 1.5 m 量级 SiC 陶瓷素坯凝胶注模成型工艺[J]. *光学精密工程*, 2013,21(12):2989-2993.
- ZHANG G. Gelcasting process of 1.5 m SiC ceramic green body [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):2989-2993. (in Chinese)
- [12] ANDERSON-COOK C M. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* [M]. US: John Wiley & Sons, 2009:34:102.
- [13] 王书新. 2 m 量级空间反射镜组件设计与优化 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2013.
- WANG SH X. *Design and Optimization of 2 m-Class Space Reflector Assemblies* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

作者简介:



朱俊青(1990—),男,河南周口人,博士研究生,2011年于上海交通大学获得学士学位,主要研究方向为光机结构设计及 CAE。E-mail: zhujunqing2012@gmail.com

导师简介:



任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价。E-mail: reny@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)