文章编号　2097-1842(2022)05-1066-13

基于力矩促动器的镜面半主动光学支撑系统集成优化设计

张奔雷[1,2], 杨　飞[1*], 王富国[1], 卢保伟[1,2]
（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 100049）

摘要: 基于半主动光学技术的半主动支撑, 通过力矩促动器 (Warping Harness, WH) 弹簧叶片将校正力转换为校正力矩, 对由重力、温度等误差源引入的镜面低阶像差进行校正。针对利用传统经验设计反射镜时存在的设计缺陷, 提出一种反射镜支撑系统优化设计新方法, 即结合结构尺寸优化和经验设计的镜面支撑系统综合设计优化方法, 并建立一套基于 WH 的半主动镜面支撑系统。首先, 按照经验公式设计了支撑系统初始结构; 设计了一款 L 形镂空式 WH 弹簧叶片, 并对其开展了非线性分析及疲劳分析, 确定叶片厚度为 2 mm、寿命为 1.2×10^6 次。然后, 通过优化镜面支撑点位置、三角板柔节位置、支撑系统柔性件关键尺寸参数, 将光轴竖直及水平状态下镜面 RMS 值由 119 nm 和 106 nm 分别降至 13.3 nm 和 4.8 nm; 1 °C 温差状态下镜面面形差由 2.8 nm 降至 1.9 nm; 一阶谐振频率由 80 Hz 提升至 130 Hz。最后, 采用提出的方法对半主动支撑系统的校正能力进行验证。结果表明: 本套半主动支撑系统对镜面离焦、初级像散、初级慧差、初级球差的校正率最高可达 99%, 且校正后各像差幅值均小于 1 nm; 室温自重状态下对镜面面形 RMS 值校正率最高可达 46.5%; 温升 10°C 情况下的校正率为 31.28%。

关　键　词: 支撑系统; 集成优化; 半主动光学; 力矩促动器; 低阶像差
中图分类号: TH751　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2022-0121

Integrated optimization design of mirror semi-active support system based on Warping Harness

ZHANG Ben-lei[1,2], YANG Fei[1*], WANG Fu-guo[1], LU Bao-wei[1,2]
（1. *Changchun Institute of Optics*, *Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *yangflying@163.com*

Abstract: The semi-active support is based on the semi-active optical technology, and the correction force is

收稿日期: 2022-06-11; **修订日期:** 2022-06-28
基金项目: 吉林省科技发展计划（No. 20210402065GH）; 中国科学院青年创新促进会优秀会员（No. Y202053）; 中国科学院国际伙伴计划（No. 181722KYSB20200001）; 国家自然科学基金（No. 11973040）
Supported by Science and Technology Development Program of Jilin Province (No. 20210402065GH); Excellent Member of Youth Innovation Promotion Association, CAS (No. Y202053); International Partnership Program of the Chinese Academy of Sciences (No. 181722KYSB20200001); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 11973040)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

converted into a correction torque through a Warping Harness(WH) spring blade to correct the mirror low-order aberration introduced by error sources such as gravity and temperature. Aiming at the defects of traditional empirical design of mirrors, a new optimal design method for a mirror support system is proposed, that is, a comprehensive design optimization method of mirror support system based on structural size optimization combined with empirical design, and a set of semi-active mirror support systems based on WH is established. Firstly, the initial structure of the support system is designed according to the empirical formula; an L-shaped hollow WH spring blade is designed, and the nonlinear analysis and fatigue analysis are carried out to determine that the blade thickness is 2 mm and the service life is 1.2×10^6 times. Then, the RMS value of the mirror surface in the vertical and horizontal states of the optical axis was reduced from 119 nm and 106 nm to 13.3 nm and 4.8 nm by optimizing the position of the mirror support point, the position of the triangular plate flexure joint, and the key dimension parameters of the support system's flexible parts; under the state of 1 °C temperature difference, the specular aberration is reduced from 2.8 nm to 1.9 nm; the first-order resonance frequency is increased from 80 Hz to 130 Hz. Finally, this method is used to verify the correction ability of the semi-active support system. The results show that the correction rate of the semi-active support system for mirror defocus, primary astigmatism, primary coma and primary spherical aberration can reach up to 99%. The amplitude of each aberration is less than 1 nm; the correction rate of the RMS value of the mirror's surface shape can reach up to 46.5% under it′s own weight state at room temperature, and the correction rate is 31.28%.

Key words: support system; integration optimization; semi-active optics; Warping Harness; low-order aberrations

1　引　言

望远镜主镜作为望远镜系统中最关键、口径最大的光学元件,其支撑技术一直是望远镜技术发展要解决的核心问题之一[1]。对于 4 m 口径以下的小口径主镜一般采用柔性的被动支撑形式,对于 4 m 及更大口径主镜则采用主动支撑形式[2]。大口径望远镜如果采用主动支撑,从而将增加支撑系统的复杂程度,从而大大提高望远镜制造成本,而被动支撑是完全被定义的支撑结构,对于镜面低频误差并不能起到较好的校正能力。为解决这一矛盾,基于力矩促动器(Warping Harness, WH)的半主动光学技术应运而生,该技术主要用于校正空间频率接近于零的镜面波前误差[3]。从自由度的角度分析,WH 机构在底支撑硬点位置的 3 个局部自由度的基础上,通过自身柔性为支撑系统释放微弱的局部自由度,其微弱的自由度介于主被动支撑之间,所以被称为"半主动支撑"。WH 都是基于 Whiffletree 设计的,它的应用前提是可以通过树形扩展方式来传递校正力矩,进而改变支撑力分布,以达到调整面形的目的[4-5]。

传统的反射镜支撑系统设计主要靠设计人员根据经验,采用传统理论和经验公式设计支撑系统结构,并用有限元方法检验计算,再根据计算结果反复修改迭代使其最终满足设计要求。这种方法效率较低,需耗费大量人力物力且经迭代后获得的可能是局部最优解。针对传统设计方法的缺陷,本文提出一种反射镜支撑系统优化设计新方法,即结构尺寸优化结合经验设计的反射镜支撑系统综合设计优化方法,并建立一套基于 WH 的半主动光学支撑系统,并用所提出方法检验了该半主动支撑系统对于镜面低阶像差的校正能力。

2　半主动支撑系统经验设计

2.1　背部定位方案确定

镜面背部支撑点位置是支撑系统中一个重要的组成部分,支撑点的分布直接影响面形精度。对于大型薄镜面,支撑点的数目与平均支撑面积成反比,如果有 N 个支撑点,则有:

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\delta_{\mathrm{rms}} = 0.001\,19\frac{mg}{ND}\left(\frac{A}{N}\right)^2 \quad , \qquad (1)$$

式中：A 为镜面的面积；m 为镜子重量；g 为重力加速度；$D=Et^3/12(1-v^2)$，其中，E 为弹性模量，t 为镜面厚度，v 为泊松比[6]。

本课题采用实验镜径厚比达到了 20，具体参数如表 1 所示，将表 1 中参数代入式(1)，最终选定镜面背部采用 9 点支撑方式。

表 1 镜面参数

Tab. 1 Primary mirror parameters

参数	指标
口径d/mm	500.00
焦距f/mm	6000.00
密度(g/cm^{-3})	2.53
弹性模量GPa	91.00
泊松比	0.24
热膨胀系数(10^{-6}/K)	0.05

Hindle 总结的 9 点支撑布局，如图 1 所示。图 1 中平衡半径 R_E 把一个等厚度反射镜分成两部分：一个是圆环盘，其占总重量的 2/3，一个是中心盘，其占总重量的 1/3。3 个支撑点等角间距分布在非常接近且略大于平衡半径 R_E 的一个圆上。其中 3 个支撑点位于半径为 R_1 的内圆上，6 个支撑点位于半径为 R_0 的外圆上[7]。各圆半径计算公式如下：

$$R_E = (\sqrt{3}/6)D = 0.289D \quad ; \qquad (2)$$

$$R_1 = (\sqrt{3}/12)D_G = 0.144D \quad ; \qquad (3)$$

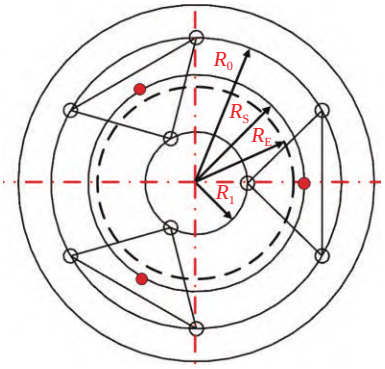


图 1 9 个支撑点的 Whiffletree 支撑结构

Fig. 1 Whiffletree support structure of the mirror with 9 support points

$$R_0 = (\sqrt{6}/6)D = 0.408D \quad ; \qquad (4)$$

$$R_s = 0.304D \quad . \qquad (5)$$

其中 D 为反射镜直径，将其代入式(2)~式(5)得支撑点半径 R_0=204 mm，R_1=72 mm。经有限元分析计算得镜面面形 RMS=19.8 nm。

2.2 侧向定位方案确定

基于运动学约束原理的 3 个切向杆的镜面侧向定位方式是最基本和最经典的方式，满足镜面在侧向定位的要求，且不引入额外的定位应力，能够减小对镜面面形精度的影响[8]。如图 2 所示，根据镜面的受力特点，以镜面质心平面 X 轴正半轴端点为起点，沿圆周 120°均布选取 3 个定位点 A、B、C，侧向柔性杆的方向以 A、B、C 为起点沿圆周切线方向。这种中心对称设计结构简单，侧向柔性杆之间相互约束，可以最大程度上减小镜面在 XY 平面上的位移。

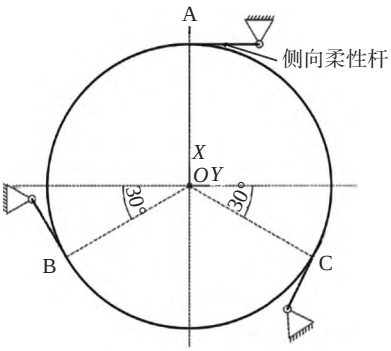


图 2 镜面侧向定位方案

Fig. 2 Lateral positioning scheme of the primary mirror

侧支撑由单柔性杆连接镜体，3 组柔性杆呈中心对称安装，在光轴水平状态下，A 点几乎不受力，B、C 点受力大小相等，夹角为 60°，因此在光轴水平状态下侧向柔性杆受力分析可只对 B、C 点柔性杆进行分析，镜体自重 G 计算公式如下：

$$G = 2\times F\times\cos\frac{\pi}{6} \quad . \qquad (6)$$

镜体重约 100 N，得 F=58 N，则望远镜在工作情况下侧支撑柔性杆所受最大轴向力 G 为 58 N。

2.3 柔性件设计

反射镜支撑机构包括侧支撑和底支撑。底支撑共有 3 组 Whiffletree 机构，包括 9 根轴向柔性杆和 3 根三角板柔节；侧支撑则包含 3 根侧向柔性杆。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

根据柔性件的设计指标、功能需求和反射镜支撑系统中柔性件位置的空间来设计柔节[9-10]。初始设计柔性件结构形式如图 3 所示。

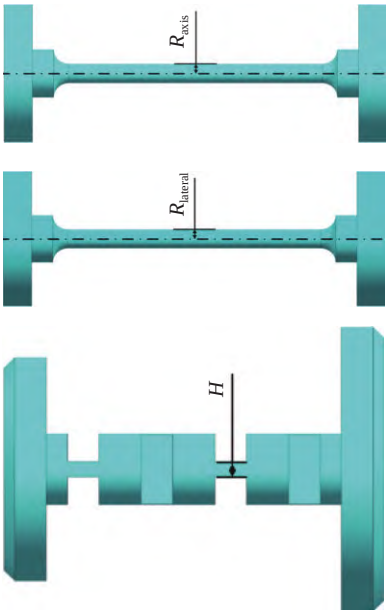


图 3　支撑系统柔性件结构

Fig. 3　Diagram structure of the flexible parts of the support system

根据柔节最大变形量要求, 需满足以下公式:

$$\Delta l = \frac{FL}{EA} \leqslant \Delta l_{\max} \quad , \qquad (7)$$

其中, F 为柔性件所受轴向载荷; L 为柔节的有效长度; E 为柔性件材料的弹性模量, 值为 2.1×10^{11} Pa; A 为柔节轴向有效截面积。将轴向、侧向柔性杆、三角板柔节参数代入公式(7), 求得柔性件的最小截面积, 如表 2 所示。

表 2　各柔性件截面积计算结果

Tab. 2　Calculation results of the cross-sectional area of each flexible part

类别	F/N	L/mm	$A_{\min}$/mm^2
轴向柔性杆	12	48	0.0014
三角板柔节	50	28	0.0011
侧向柔性杆	58	42	0.0020

3 个柔性件最小截面积同时考虑可加工性初定各柔性件关键尺寸, 其中轴向柔性杆 R 取为 1.2 mm, 三角板柔节 H=1.4 mm, 侧支撑柔性杆 $R_{lateral}$=1.0 mm。

2.4　三角板及开放式镜室设计

考虑到镜体质量较轻, 对三角板承重能力要求较小, 所以三角板采用 T 形截面设计。镜面口径较小, 侧支撑之间跨度不大, 为降低支撑系统质量, 设计了一款三角形开放式镜室。相较于传统圆形封闭式镜室, 其大大降低了支撑系统自重, 且大大提高了支撑系统各零件安装及检测维修的可操纵性。具体结构如图 4~图 5 所示。

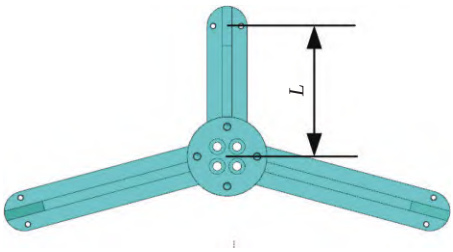


图 4　三角板结构设计

Fig. 4　Triangle plate structure design

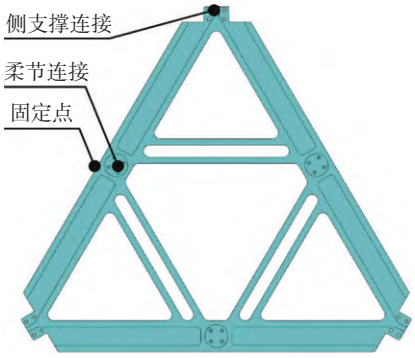


图 5　镜室结构设计

Fig. 5　Mirror chamber structure design

三角板三端连接轴向柔性杆, 对三角板单独做有限元分析验证其极限工作条件下变形大小。约束三角板底端圆面, 对连接轴向柔性杆的 3 个端面分别施加 20 N 的垂直力, 结果表示三角板最大变形在两长边处, 变形量为 0.001 mm, 满足要求。

镜室大三角三端连接侧支撑座, 中间倒三角三端连接三角板柔节, 固定端位于三角板柔节连接处外侧, 以减小更多的变形传递。镜室承载了整个望远镜系统的重量, 约束镜室 3 个固定点处全自由度, 对侧支撑连接点和三角板柔节连接点分别施加平行于镜室上表面 50 N 和 10 N 的力, 分析得到镜室最大变形量为 0.0002 mm, 满足要求。

2.5　WH 弹簧叶片结构优化设计

WH 弹簧叶片在整套半主动光学支撑系统中

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

负责将促动器产生的校正力转化为校正力矩，并传递到最上一级柔性杆以改变各柔性杆支撑力，进而达到校正镜面面形的作用[11]。

2.5.1 WH 弹簧叶片结构设计

WH 弹簧叶片应用的前提是可以通过树形扩展方式来传递校正力矩，其结构形式采用 L 形夹角为 90°镂空式设计，如图 6 所示。

图 6 WH 弹簧叶片结构设计

Fig. 6 Structure design of WH spring blade

镂空式设计是为了在增加促动器输出位移行程的同时减小弹性叶片的尺寸。由杠杆原理知促动器行程越大，输出精度越高；同时促动器驱动弹簧叶片变形弯曲时，将弹簧叶片驱动点与固定点的水平距离改变量减小，使得整个系统卡死的风险降低。夹角设为 90°则是为了保证两个叶片受促动器垂直向上或向下作用力时在其坐标中心处产生的力矩耦合具有一致性。无论叶片作用方向如何，由于其正交性在三角板枢轴上产生的力矩作用效果可以保持一致。

弹簧叶片的厚度决定了其在受力状态下变形量的大小，由于镜面变形符合线性定律，所以要求叶片在受线性力的时候变形量满足线性关系，针对叶片厚度进行优化分析。设叶片厚度为变量，以叶片最大变形量为目标函数搭建弹簧叶片厚度优化平台。经优化分析弹簧叶片厚度为 2 mm 时变形量呈线性分布，如图 7(彩图见期刊电子版)所示，所以选取弹簧叶片厚度为 2 mm。

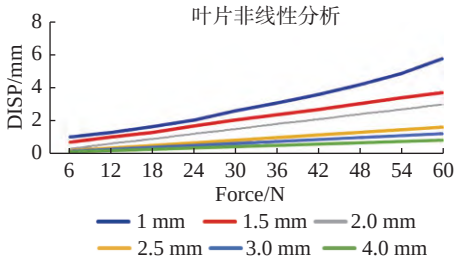


图 7 WH 弹簧片位移线性分析

Fig. 7 Linear analysis of the displacement of the WH spring blade

2.5.2 WH 弹簧叶片疲劳分析

疲劳表达了零件受循环载荷作用产生的损伤和破坏，弹性叶片中截面积最小的地方是其最薄弱的地方，受力时引入应力集中，薄弱环节的应力集中用K_T表示，则有应力集中系数K_f。

$$K_f = 1 + \frac{K_T - 1}{1 + a/\rho} \quad , \tag{8}$$

其中，ρ为薄弱根部半径，a 为结构材料常数，用截面积最小区域应力场强来反映疲劳强度，则有：

$$\sigma_{\mathrm{F}} = \frac{1}{V}\int_{\Omega}(\sigma_{ij})\varphi(r)\mathrm{d}v \quad , \tag{9}$$

其中Ω为缺口破坏区域，V 为缺口破坏区域的体积，$f(\sigma_{ij})$为破坏应力函数，$\varphi(r)$为权函数。

根据有限元分析，WH 弹簧叶片最薄弱处应力为 14.4 MPa，如图 8(彩图见期刊电子版)所示。代入上述公式，权函数取 1，计算得到 σ_{F}=9.2 MPa，通过 S-N 曲线查找得到 WH 弹簧叶片疲劳寿命为 1.2×10^6 次，满足使用要求。

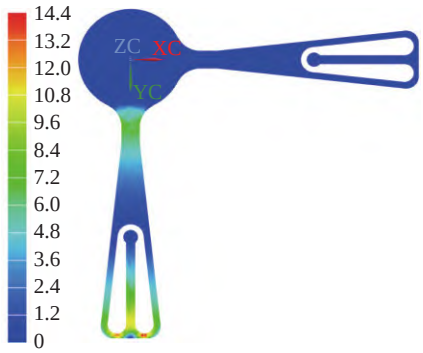


图 8 WH 弹簧叶片应力分析

Fig. 8 Stress analysis of the WH spring blade

2.6 传统经验设计静力学分析

由上述经验设计得到的各零件尺寸建立有限元模型并分析，其中光轴竖直和水平状态下镜面面形 RMS 值为 119 nm 和 106 nm；1 °C 温升状态下镜面面形变化量为 2.8 nm；一阶模态频率为 80 Hz。

3 支撑系统结构尺寸及位置优化

由 2.6 节知在传统经验设计的支撑系统支撑下，望远镜各工况下镜面面形误差较大，接下来将对该支撑系统各零件尺寸和分布位置进行优化设计，以降低由支撑系统引入的镜面面形误差[12-13]。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.1　轴向支撑点位置优化

在镜体支撑点位置完成传统经验设计之后，首先对支撑点位置进行优化。采用 Isight 集成优化平台集成有限元分析软件和数据处理软件[14-15]，采用序列二次规划算法以内外圈支撑点半径 R_0、R_1 为变量，以反射镜面形 RMS 值为优化目标。数学模型如下：

$$\begin{array}{l}\min RMS_z=\varphi(R_0,R_1)\\ 60<R_0<80\\ 190<R_1<210\end{array},\qquad(10)$$

式中：RMS_z 为光轴竖直状态镜面面形。优化结果如表 3 所示。

表 3　支撑点位置优化结果

Tab. 3　Optimization results of the support point position

项目	参数
R_1/mm	68.3
R_0/mm	206.5
PV/nm	52.7
RMS/nm	12.0

由上表知，相较于传统经验公式计算得到的支撑点位置，优化后 RMS 值由 19.8 nm 降至 12.0 nm。优化前后镜面变形云图如图 9(彩图见期刊电子版)所示。

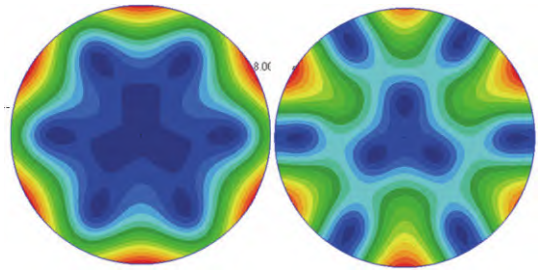


图 9　支撑点位置优化前后镜面变形对比

Fig. 9　Comparison of mirror deformation before and after optimization of the support point position

3.2　三角板连接点位置优化

轴向支撑点在镜面底部分为内外两圈，由于该实验反射镜为内凹球面镜，镜体边缘厚度大于中心厚度，如果三角板柔节连接点仍设计为三角板质心点，将使轴向柔性杆在望远镜工作状态下受力不等，从而引入镜面变形。

由 2.3 节知各柔性件尺寸，并由 2.1 节知经验公式计算得到的三角板柔节连接点位置参数。使用 Isight 集成优化平台集成有限元分析软件、数据处理软件搭建三角板柔节连接点位置参数优化平台。根据传统经验进行设计，最终得 $L=R_S-R_0=83.7$ mm，设置图 4 中 L 为变量，约束三角板柔节连接点全自由度，以镜面面形为优化目标，其数学模型为：

$$\begin{array}{l}\min RMS_z=\varphi(L)\\ 60<L<85\\ 70<L<72\end{array},\qquad(11)$$

式中：RMS_z 为光轴竖直状态下的镜面面形值，单位为 mm；L 的两次优化范围分别为 60~85 mm 和 70~72 mm，为保证 L 以第一位小数结尾，设间隔为 0.1 mm。

经全因子遍历 L 值后，最终搜索到 L=70.6 mm 时镜面面形 RMS_z 值为 13.5 nm，相较于传统经验设计下的镜面面形 RMS 值由 119 nm 降至 13.5 nm，其中 L 与 RMS_z 呈二次函数关系，且在 L=70.6 mm 时取最小值。

3.3　支撑系统柔性件尺寸参数优化

由上述优化知根据传统经验设计得到的结果并不能完全满足设计指标要求，因此，还需要在支撑系统各组件位置关系确定后对轴、侧支撑柔性件进行关键部位尺寸参数优化，以达到更好的支撑效果。

在 3.2 节优化获得的 L 值的基础上重新建立有限元模型，对光轴竖直方向和光轴水平方向分别施加重力载荷，设置为 Z 工况和 X 工况，并对有限元模型施加温升载荷，设置为 TEMP 工况。使用 Isight 搭建支撑系统柔性件关键尺寸参数优化平台。约束尺寸包括轴向柔性杆半径 R_z、侧向柔性杆 R_c、三角板柔节宽 H。

经过两次多尺寸参数优化，得到使反射镜组件光轴竖直和水平状态下镜面面形、1 °C 温差下镜面面形差最小状态下的柔性件尺寸，见表 4。其中 RMS_z 和 RMS_x 为光轴竖直、水平工况下的镜面面型精度、RMS_t 为 1 °C 温差时镜面 RMS 值的差值。类似三角板柔节连接点尺寸参数优化，考虑到柔性件结构的尺寸合理性和加工合理性，在试验设计的优化过程中，对参数变量的取值进行了规定，取优化值为以 1 位小数结尾的数值，将以多于 1 位小数结尾的数值过滤掉。

通过分析每个参数对每个响应的影响趋势和

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 4 支撑柔性件结构尺寸最优解

Tab. 4 The optimal solution for the structural size of the supporting flexible parts

项目	参数
H/mm	2.9
R_z/mm	1.4
R_c/mm	0.5
RMS_x/nm	4.8
RMS_z/nm	13.3
RMS_t/nm	1.9

影响程度。可以得到：

（1）光轴竖直状态下对镜面面形影响最大的柔性件参数为轴向柔性杆半径 R_z 和侧向柔性杆半径 R_c，其中前者和镜面面形 RMS_z 成反比，后者与 RMS_z 成正比。

（2）光轴水平状态下镜面面形影响最大参数为侧向柔性杆和三角板柔节宽综合作用 H-R_c、R_c^2，前者与镜面面形 RMS_x 成反比，后者与 RMS_x 成正比。

（3）1 °C 温差下镜面面形影响最大参数为轴向柔性杆半径 R_z，与 RMS_t 成正比。

至此优化结束。经对比知传统经验设计光轴竖直状态下镜面面形由 119 nm 降至 13.3 nm，优化率达到 88.9%；光轴水平状态下镜面面形由 106 nm 降至 4.8 nm，优化率达到 95.5%；1 °C 温差状态下镜面面形最大差值由 2.8 nm 降至 1.9 nm，优化率为 32.1%。优化前后镜面变形对比如图 10（彩图见期刊电子版）所示，可见支撑系统经优化后各方面性能均得到了不同程度的提升。

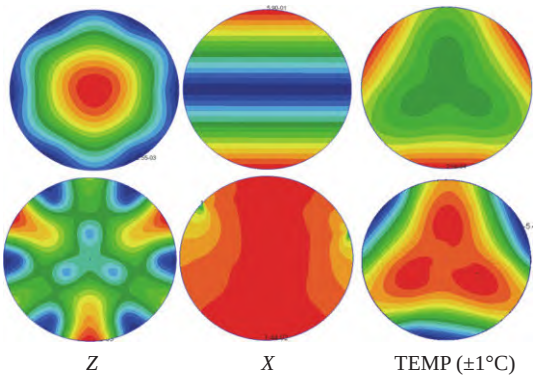


图 10 3 种工况下优化前（上）后（下）镜面变形图

Fig. 10 Specular deformation diagrams before (top) and after (bottom) optimization under three working conditions

3.4 轴、侧柔性件解耦验证

由上节可得到使镜面面形 RMS 最小的柔性件尺寸，根据支撑系统功能和指标分配，轴向柔性杆应满足：

（1）在光轴竖直状态下，沿轴向产生的刚体位移要小于 0.002 mm，才能实现对反射镜的轴向约束。

（2）在光轴水平状态下，轴向柔性杆承受载荷为光轴竖直状态时承受载荷的 1/10，即 1.2 N，轴向柔性杆径向产生的挠度大于侧支撑引起的刚体位移时，底支撑对反射镜面面形产生的影响可以忽略不计，此时轴、侧向支撑满足解耦要求。

现对 3.3 节求得的柔性件尺寸进行分析，结果如表 5 所示。其中 $S_{轴轴}$为轴向柔性杆轴向最大受力变形，$S_{轴侧}$为轴向柔性杆耦合状态下最大变形，$S_{侧}$为侧向柔性杆变形。由表 5 可知，柔性杆在光轴水平工况下满足耦合，望远镜系统三维设计图如图 11所示，支撑系统组件总质量为 12 kg，远小于两倍镜重。

表 5 柔性杆轴及侧向解耦结果

Tab. 5 Flexible rod axis and lateral decoupling results

项目	参数
$R_{轴}$/mm	1.4
$R_{侧}$/mm	0.50
$S_{轴轴}$/mm	0.00030
$S_{轴侧}$/mm	0.067
$S_{侧}$/mm	0.014
满足耦合	满足

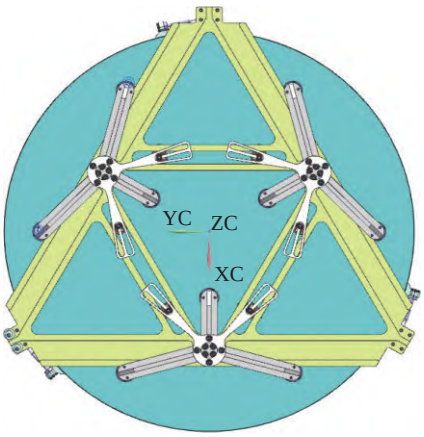


图 11 镜面支撑系统三维图

Fig. 11 3D view of the mirror support system

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　有限元分析与半主动支撑系统校正能力验证

利用有限元软件重新建立镜面支撑系统的有限元模型, 为使计算结果更加准确, 全部采用手动画网格, 其中镜体和各柔性件采用 solidHEX8 单元划分, 三角板和镜室采用 Beam 梁单元划分, 有限元模型如图 12(彩图见期刊电子版)所示, 图中 Act_01~Act_06 为作用在 WH 弹簧叶片上的 6 个中心对称分布的促动器编号。

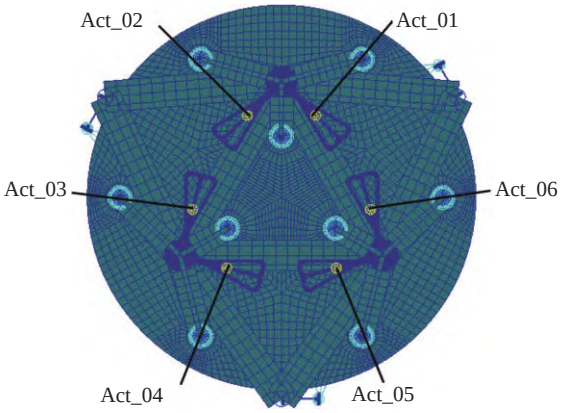


图 12　镜面系统有限元模型

Fig. 12　Finite element model of the mirror system

4.1　WH 叶片驱动影响分析

半主动支撑系统校正过程中主要靠促动器推拉 WH 弹簧叶片产生形变从而使轴向柔性杆受力大小发生变化, 进而校正镜面面形[16]。为探究该支撑系统对镜面面形的校正能力, 采用 Zernike 各项像差系数大小来表征面形质量的好坏, 镜面半主动校正主要针对镜面低阶像差, 由于前三阶像差可通过调整次镜来消除, 所以本次分析主要针对前 4~11 阶 Zernike 像差, 包括初级离焦、像散、慧差、球差、三叶草像差等。

建立有限元模型, 使用 Isight 集成 Patran、Nastran、Sigfit 建立校正力与镜面像差影响分析平台, 如图 13 所示。6 个促动器分别呈中心对称分布的 WH 弹簧叶片, 6 个受力点施加 1 N 力并分析各校正力对上述 8 种低阶像差的影响, 其中各促动器单位校正力与各低阶像差 Pareto 图如图 14(彩图见期刊电子版)所示。

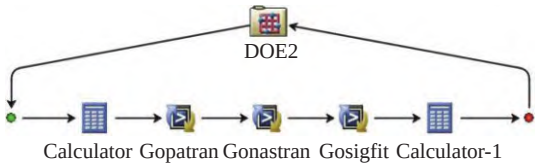
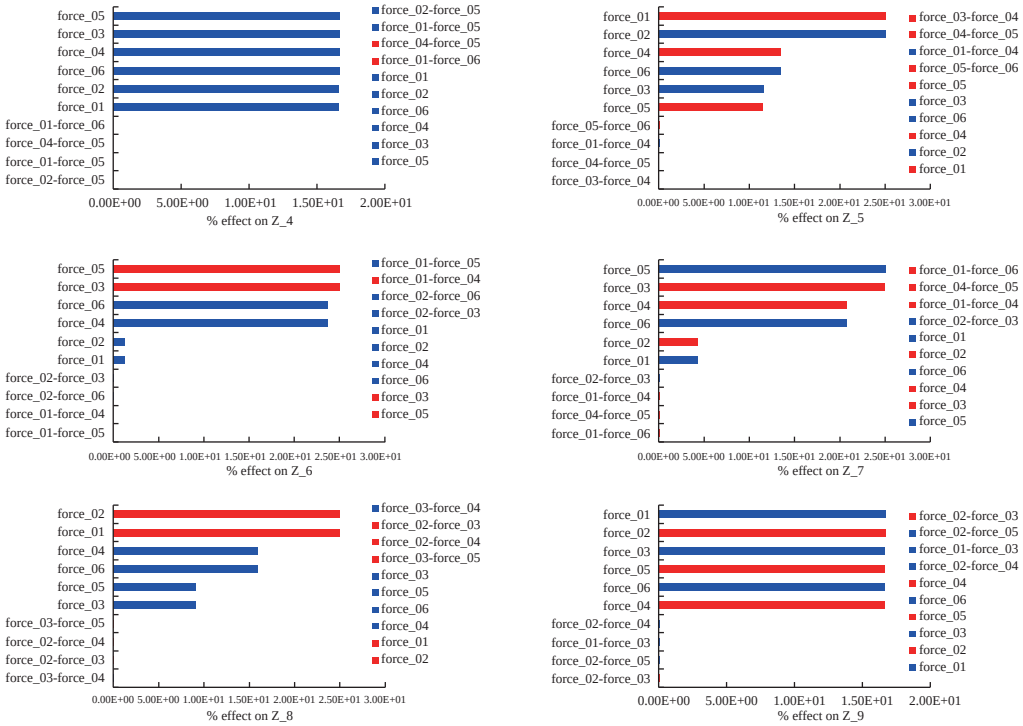


图 13　校正力与镜面像差影响分析平台

Fig. 13　Correction force and mirror aberration impact analysis platform



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

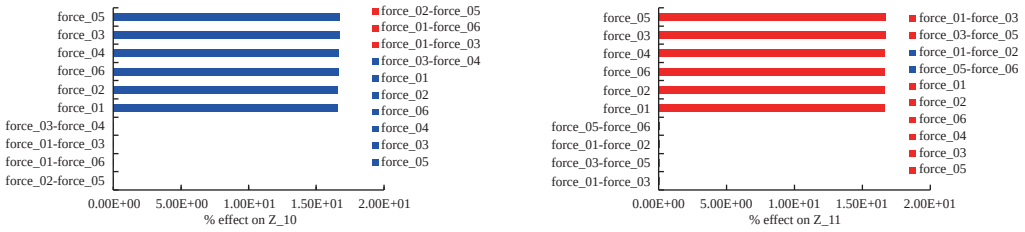


图 14　各校正力相对 Zernike 4~11 阶像差 Pareto 图

Fig. 14　Pareto diagrams of the 4th to 11th order Zernike aberrations for each correction force

上图 14 给出了各促动器相对镜面 Zernike4~11 阶像差的 Pareto 图，可以看出各校正力对镜面像差均有影响，但由于 6 个校正力施加位置不同，所以对于特定像差，各校正力的影响程度也不同。其中各单位校正力对离焦、0°和 90°三叶草像差校正效果相同。由于镜面产生大小相同且呈中心对称变形时 0°和 90°像散、0°和 90°慧差方向不同，所以各单位校正力对上述像差影响程度不同。

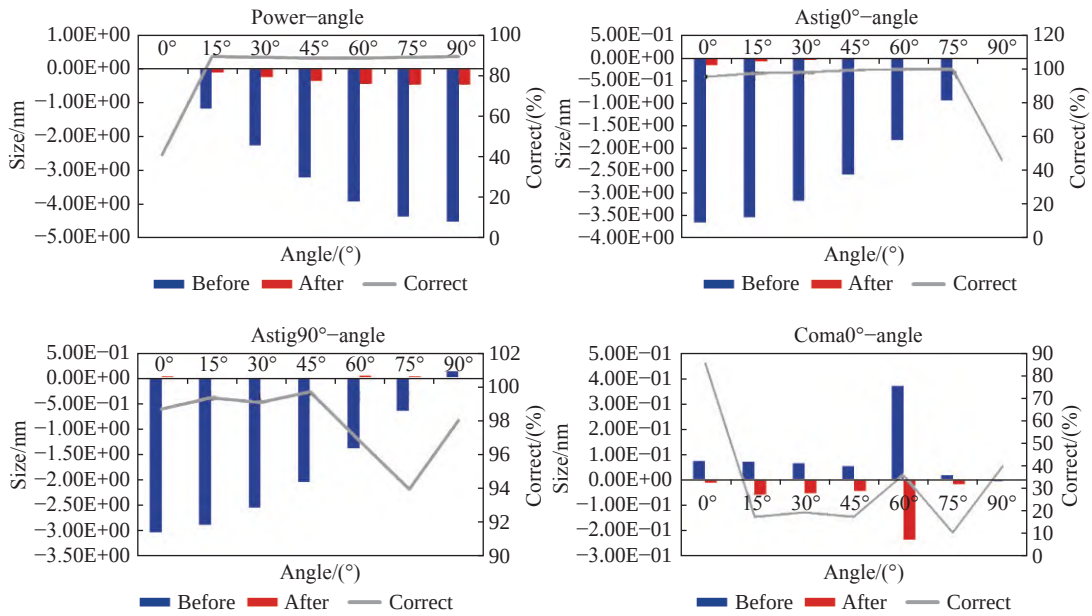
4.2　系统静力学校正能力分析

上节给出了各促动器单位力与镜面低阶像差之间的影响程度分析，可以看出虽然 6 个促动器位置分布不同，但它们对镜面像差的影响是交互的，不同促动器对同一种像差均有不同程度的影响，为了深入探究半主动光学技术对镜面像差的校正能力，采用 Isight 集成 Patran、Nastran、sigfit 建立镜面低阶像差多目标优化平台。其数学模型如式 12 所示，其中Z_{4-11}表示 Zernike 第 4~11 阶系数，单位为 nm; act_{01} ~ act_{06}表示 6 个促动器输出的校正力大小，单位为 N。

$$\begin{aligned}&\min Z_{4-11} = \varphi(act_{01} \sim act_{06})\\&-1 < (act_{01} \sim act_{06}) < 1\quad .\end{aligned} \tag{12}$$

上文支撑系统优化均是在镜面处于两个极限位置，即光轴水平状态和竖直状态下的镜面面形情况，而望远镜实际工作时这两个极限位置几乎不会出现，大部分时间望远镜指向在 30°至 75°之间，因此需要分析半主动光学技术在镜面系统工作状态下的校正能力。为清晰表达望远镜工作状态，首先定义一个直角坐标系，明确镜面在坐标系中的位置。坐标系原点设置在主镜面中心，光轴正方向为 Z 轴正向，X 方向沿镜面半径方向并垂直其中一根侧支撑柔性杆，按照右手定则确定 Y 轴的方向，实际上 Y 轴沿另一条半径并垂直于 X 轴。

将镜面俯仰过程以 15°为间隔细分，采用多岛遗传算法分别对各角度状态下的镜面像差进行优化校正，校正结果如图 15(彩图见期刊电子版)所示。其中 0°和 90°分别代表光轴水平和光轴竖直状态。



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

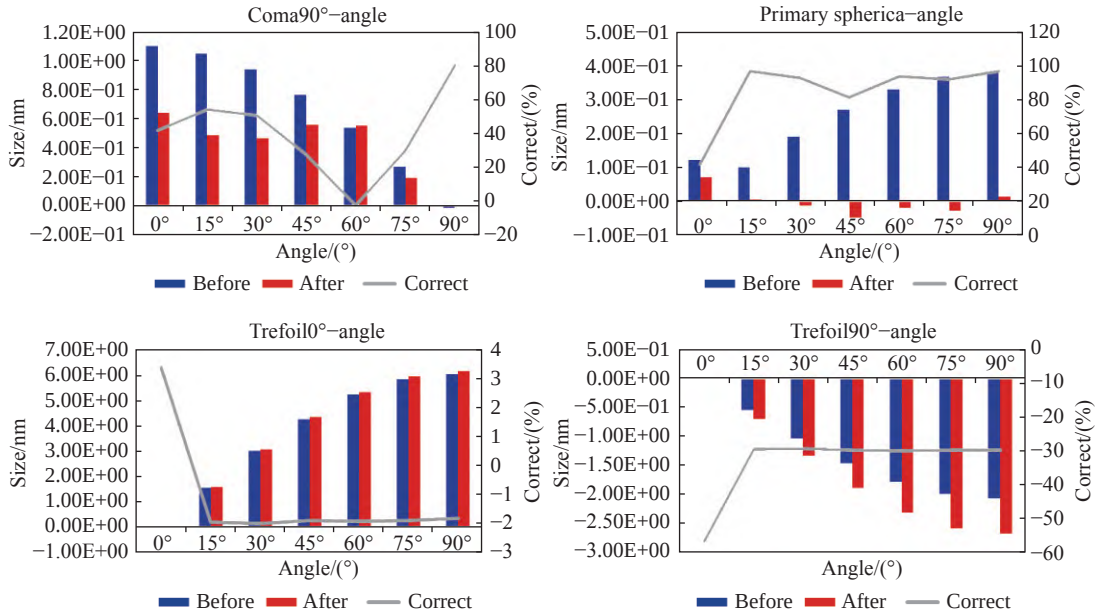


图 15　半主动支撑系统俯仰过程中镜面各像差校正前后对比及校正率图

Fig. 15　Comparison before and after correction and their correction rate of each aberration of the mirror surface during the pitching process of the semi-active support system

图 15 给出了半主动支撑系统在镜面支撑系统俯仰过程中各角度对 Zernike 第 4~11 阶像差的校正效果, 可以看出:

(1)对于由支撑系统引入的镜面初级离焦、像散、慧差、球差等像差, 半主动支撑系统可以进行有效校正, 校正率最高可达 99%, 校正后各像差幅值均低于 1 nm。

(2)对于 0°和 90°三叶草像差, 半主动支撑系统对其校正能力一般, 大多数情况下其幅值有所增大。

校正前后, 镜面面形 RMS 值相对于俯仰角度变化如图 16(彩图见期刊电子版)所示, 其中俯仰过程中镜面变形云图校正前后对比如图 17(彩图见期刊电子版)所示。

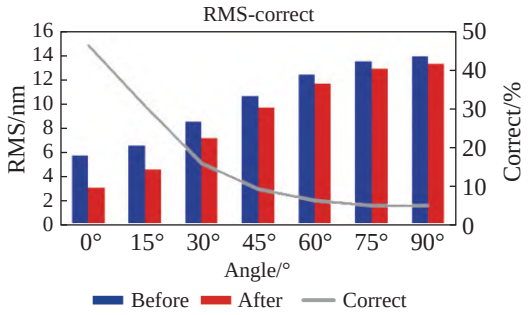


图 16　镜面面形与俯仰角度关系图

Fig. 16　The relationship between mirror surface shape and pitch angle

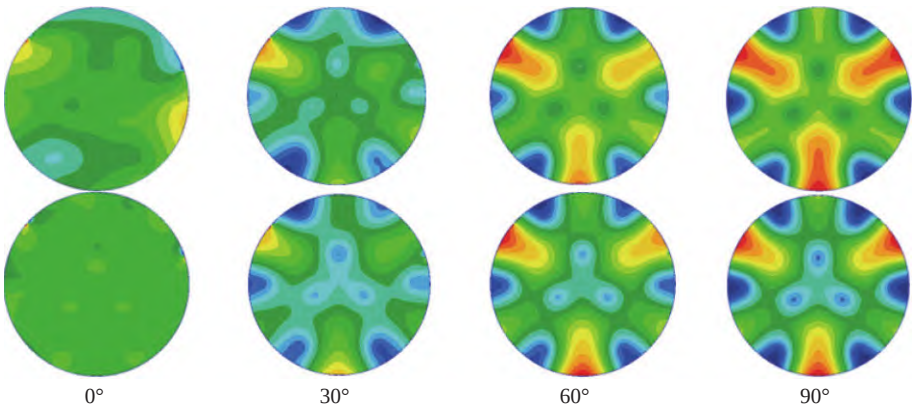


图 17　俯仰过程中镜面校正前(上)后(下)云图

Fig. 17　Cloud maps before (top) and after (bottom) mirror correction during pitching

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图 16 知：镜面系统在 0°~90°俯仰过程中校正前镜面面形 RMS 值呈三角函数曲线变化，经校正后镜面面形 RMS 值范围由 5.6 nm~14.0 nm 降至 3.3 nm~13.3 nm；对镜面面形的校正率随镜面系统从光轴水平俯仰至光轴竖直状态的过程中逐渐减小，其范围在 4.7%~46.5% 之间，校正能力优秀。

4.3 半主动支撑系统热力学校正能力分析

镜面支撑系统静力学分析满足线性定律，但是实际分析过程中受温度和重力的双重影响，所以在分析温度载荷影响时，镜面总变形等于重力引起的变形和温度变化引起的变形的线性叠加。望远镜工作时圆顶内设有温度保持装备，工作温度范围不会太大。假设镜面在室温 20 °C 时的面形误差是理想值，分析半主动支撑系统在室温 30 °C 时对镜面面形 RMS 值及 $Z_{4\sim11}$ 阶像差校正前后情况。结果如表 6 所示，校正前后镜面变形云图如图 18（彩图见期刊电子版）所示，从位移云图校正前后的对比可以看出镜面离焦像差被有效校正。

表 6 30 °C 时镜面面形校正前后对比

Tab. 6 Comparison of mirror surface shapes before and after correction at 30°C

Temp_30°C	Before/nm	After/nm	correct
RMS	19.2	13.2	31.28%
Power	−13.8	−0.382	97.23%
Astig0°	−0.588	−0.0783	86.68%
Astig90°	0.0998	0.0680	31.86%
Coma0°	−0.0211	−0.0268	−27.01%
Coma90°	−0.00346	−0.0466	−1246.82%
Primary spherical	−2.43	−0.981	59.63%
Trefoil0°	−12.8	−12.4	3.13%
Trefoil90°	−1.43	−3.45	−141.26%

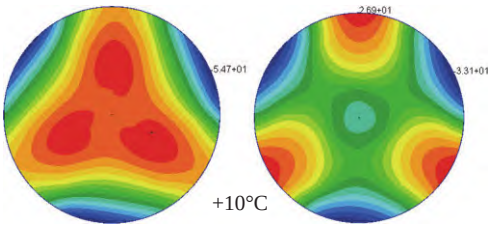


图 18 10 °C 温升状态下镜面面形校正前(左)后(右)变形云图

Fig. 18 Deformation cloud diagrams of the mirror's surface shapes before (left) and after (right) correction under a 10°C temperature rise

由图 18 可知温升 10 °C 状态下镜面经多目标集成优化校正前后：

(1)校正前后镜面面形 RMS 值由 19.2 nm 降至 13.2 nm，校正率为 31.28%

(2)半主动支撑系统对由温升引起的镜面离焦、初级像散、初级球差均有较好的校正能力，校正率最高可达 97.23%，且校正后各像差幅值均小于 1 nm。

(3)对于温升引入的 0°和 90°初级慧差，由于其校正前幅值最大为 0.02 nm，校正后其幅值仍小于 0.05 nm，可以忽略不记。

(4)对于温升引入的 0°和 90°三叶草像差，校正前像差幅值分别为 12.8 nm 和 1.43 nm，校正后为 12.4 nm 和 3.45 nm，可以看出半主动支撑系统对该像差校正能力有所欠缺。

4.4 模态分析

镜面支撑系统另一个重要特征是谐振频率，谐振频率影响其稳定性和半主动控制系统精度。建立有限元模型分析望远镜支撑系统前 4 阶谐振频率，约束镜室固定位置的 3 个节点对其进行模态分析，计算结果如表 7 所示。

表 7 镜室组件前四阶谐振频率

Tab. 7 The first four-order resonance frequencies of the mirror chamber assembly

阶数	1	2	3	4
频率/Hz	130.5	132.7	199.7	203.3

由表 7 可知，经集成优化后半主动支撑系统一阶谐振频率由 80 Hz 提升至130 Hz，动态刚度有了明显的提升。

5 结 论

针对反射镜传统设计方法的缺陷，本文采用一种传统经验设计与尺寸参数优化设计相结合的集成优化设计方法。该方法收敛速度快，容易找到全局最优解，在轴、侧向支撑柔性件和 WH 弹簧叶片结构设计以及三角板柔节连接点位置选定中采用了该优化方法，效果显著。设计了一种三角形开放式镜室，相较于传统圆形封闭式镜室，支

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

撑系统总质量大大降低, 提高了镜室内零件安装和检测维修的可操纵性。同时采用该方法对半主动支撑系统校正能力进行验证, 包括各促动器校正力相对镜面 Zernike 4~11 阶像差影响分析、常温状态和温升 10 °C 状态下镜面半主动系统俯仰过程中对各低阶像差校正能力分析。

利用本文提出的集成优化设计方法完成了:

(1)500 mm 口径反射镜半主动支撑系统的镜面支撑点位置、轴向和侧向支撑结构以及 WH 弹簧叶片厚度的优化设计。经优化后轴、侧柔性件仍满足解耦要求。

(2)镜面支撑系统经优化后反射镜光轴竖直及光轴水平状态下面形精度 RMS 值分别达到了 13.3 nm 和 4.8 nm, 说明本支撑系统对镜面面形精度影响较小。

(3)1 °C 温差状态下镜面面形最大差值由 2.8 nm 降至 1.9 nm, 说明本支撑系统温度适应性较好。

(4)一阶谐振频率由 80 Hz 提升至 130 Hz, 镜面半主动支撑系统动态刚度有明显的提升。

(5)由本套半主动支撑系统对镜面低阶像差的校正能力验证结果可知: 对镜面系统俯仰过程中由支撑系统、镜面自身重力、温度变化等引入的镜面离焦、低阶像散、低阶慧差、初级球差等镜面低阶像差, 半主动光学技术的校正率最高可达到 99%。经校正后各像差幅值均小于 1 nm, 校正能力十分优秀。

(6)这套半主动支撑系统在室温状态下对镜面俯仰过程中由重力引起的镜面面形 RMS 值的变化校正率在 4.7%~46.5 之间, 其中光轴水平状态下校正效果最好; 同时对由温升引起的镜面面形 RMS 值变化校正率达到 31.28%。校正能力优秀。

可以看出本套半主动支撑系统经本文采用的集成优化设计后各方面性能均得到大幅度提升, 说明该集成优化方法在支撑系统设计中具有很好的应用价值, 同时为同类镜面支撑系统结构设计提供一定的参考。

参考文献:

[1] 范文强, 王志臣, 陈宝刚, 等. 地基大口径拼接镜面主动控制技术综述[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1194-1208.
FAN W Q, WANG ZH CH, CHEN B G, *et al*.. Review of the active control technology of large aperture ground telescopes with segmented mirrors[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1194-1208. (in Chinese)

[2] 王富国, 吴小霞, 邵亮, 等. 国外大型地基望远镜主镜支撑综述[J]. 激光与红外, 2012, 42(3): 237-243.
WANG F G, WU X X, SHAO L, *et al*.. Review of foreign ground-based telescope primary mirror support[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(3): 237-243. (in Chinese)

[3] KAMPHUES F, CHEN L, ZHANG D, *et al*.. Warping harness actuator for the thirty meter telescope primary mirror segments[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11451: 1145150.

[4] 王克军. 天基大口径反射镜轻量化设计及复合支撑技术研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
WANG K J. Research on the lightweight design and compound support of the large-aperture mirror for space-based telescope[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

[5] 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.
GONG X F, CHEN X, CHEN ZH. Layout optimization of warping harness for segmented-mirror telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(2): 363-371. (in Chinese)

[6] 徐加慧, 夏立新, 陈诚. 基于有限元法的主镜底支撑的优化分析[J]. 机械设计与制造, 2004(3): 67-69.
XU J H, XIA L X, CHEN CH. Optimization analysis for the underside support of the primary mirror by the finite element method[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2004(3): 67-69. (in Chinese)

[7] 王从敬. 1 m 口径光电经纬仪主镜及其支撑结构研究[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), 2021, doi: 10.27522/d.cnki.gkcgs.2021.000044.
WANG C J. Research on the primary mirror and supporting structure of photoelectric theodolite with 1m aperture[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021, doi: 10.27522/d.cnki.gkcgs.2021.000044. (in Chinese)

[8] 原帅. 2 米碳化硅主镜在光机系统中精确定位方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

与物理研究所), 2018.
YUAN SH. Research of precise positioning method of 2-m SiC primary mirror in opto-mechanical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)

[9] 约德. 光机系统设计[M]. 3版. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008: 480-481.
YODER JR P R. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. 3rd ed. ZHOU H X, CHENG Y F, trans. Beijing: China Machine Press, 2008: 480-481. (in Chinese)

[10] 吴松航, 董吉洪, 徐抒岩, 等. 快速反射镜椭圆弧柔性铰链多目标优化设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(4): 20200286.
WU S H, DONG J H, XU SH Y, *et al*.. Multi-objective optimal design of elliptic flexible hinge in fast steering mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20200286. (in Chinese)

[11] 韩琳楚. 基于 TMT 三镜的半主动光学面形校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
HAN L CH. Study on correction of semi-active optics technology for large optical flat mirror based on TMT tertiary mirror[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, China, 2017. (in Chinese)

[12] 曲慧东, 魏加立, 董得义, 等. 长条形空间反射镜组件轻量化结构设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(6): 20200404.
QU H D, WEI J L, DONG D Y, *et al*.. Lightweight structural design of rectangular space mirror assembly[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20200404. (in Chinese)

[13] 刘奉昌, 李威, 赵伟国, 等. 临近空间望远镜次镜优化设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(2): 20200178.
LIU F CH, LI W, ZHAO W G, *et al*.. Optimization design of secondary mirror for near space telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200178. (in Chinese)

[14] 胡海飞, 关英俊, 赵思宏, 等. 大口径反射镜分析驱动设计与优化[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(5): 990-994.
HU H F, GUAN Y J, ZHAO S H *et al*.. Analysis led design and optimization for large aperture mirror[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(5): 990-994. (in Chinese)

[15] 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.
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. (in Chinese)

[16] 吴松航, 董吉洪, 徐抒岩, 等. 拼接式望远镜主镜主动支撑技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0300006.
WU S H, DONG J H, XU SH Y, *et al*.. Overview of active support technology for main mirror of segmented telescopes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0300006. (in Chinese)

作者简介：

张奔雷(1997—), 男, 山东曹县人, 硕士研究生, 2019 年于中原工学院获得学士学位, 主要从事大口径地基望远镜光机结构优化设计方面的研究。E-mail: zhangbenleiii@163.com

杨　飞(1982—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 2009 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 2017 年于长春理工大学获得博士学位, 现主要从事大口径光学工程技术的光机系统研究。E-mail: yangflying@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net