

# 超大口径光学制造均力支撑布局优化

胡海飞<sup>1</sup> 罗霄<sup>1,2</sup> 辛宏伟<sup>1</sup> 戚二辉<sup>1,3</sup> 郑立功<sup>1,2</sup> 张学军<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033  
<sup>2</sup> 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033  
<sup>3</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为降低支撑控制难度和节约制造成本, 同时又保证在线光学加工-检测所需的支撑精度, 提出超大口径反射镜的支撑布局优化方法。研究支撑状态下的反射镜面形精度, 解决面形拟合和优化目标提取的问题; 以斜率均方根(SlopeRMS)为目标建立非圆形口径的超薄反射镜加工支点布局优化模型, 使其具备自适应有限元分析的功能; 针对工程中大量使用的轻量化反射镜, 设计出适应其几何变化的支撑转换结构, 并展开以面形均方根(RMS)误差为目标的支点位置的优化设计; 通过 30 m 口径望远镜(TMT)第三镜和某 2 m 口径反射镜的支撑布局优化, 验证了所采用方法的效果。算例结果表明, 所提方法具有较好的几何适应性, 布局优化后支撑系统的精度满足超大口径反射镜的光学制造要求。

**关键词** 光学制造; 均力支撑; 支撑布局优化; 超大口径反射镜; 面形精度; 光机集成

**中图分类号** O439; TH161+.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0422003

## Layout Optimization of Equal-Force Supports for Ultra-Large Optical Fabrication

Hu Haifei<sup>1</sup> Luo Xiao<sup>1,2</sup> Xin Hongwei<sup>1</sup> Qi Erhui<sup>1,3</sup> Zheng Ligong<sup>1,2</sup> Zhang Xuejun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** When fabricating ultra-large aperture mirrors, it's always very crucial to reduce the control difficulty and to lower the cost of the support system while providing the support accuracy required for on-line fabrication and testing. For this purpose, layout optimization method of supporting points for the equal-force support system is proposed. Firstly through surface fitting, surface figure accuracy of supported mirror is analyzed, and the objectives for layout optimization are auto-updated. Afterward support layout optimization, whose model has the capability of adaptive finite element analysis, of arbitrary-shaped thin flat mirrors is carried out. Sequentially load transfer structure for lightweight mirrors, which are widely used, is designed and the support location within each transfer is optimized. Finally the optimization method is applied to 30 m telescope (TMT) tertiary mirror and a 2-m aperture mirror. Results show that the proposed method has the required accuracy for the optical fabrication of ultra-large mirrors.

**Key words** optical fabrication; equal-force support; layout optimization of supports; ultra-large aperture mirror; surface figure accuracy; opto-mechanical integration

**OCIS codes** 120.4610; 120.4880; 220.4610

## 1 引言

光学加工过程中, 镜体在支撑状态下受外部载

荷作用时, 其刚度较大区域的弹性形变比镜面薄弱区的弹性形变更小, 前者对应的材料去除量更大; 当

收稿日期: 2013-09-13; 收到修改稿日期: 2013-11-28

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013205)、国家自然科学基金(61210015)

作者简介: 胡海飞(1984—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事大口径光学制造、光机结构分析及优化设计等方面的研究。

E-mail: huhf@ciomp.ac.cn

载荷卸除后,大刚度区凹陷,薄弱区凸起,当抛光镜面面形达到较高精度时,镜面呈现波浪形,极易导致面形指标超标,进而恶化成像效果——类似于将支撑系统的形貌反向印制到镜面,因此,该现象被称为压印效应<sup>[1]</sup>。压印效应由光学加工过程中镜体的卸载形变引起。

为确保成像质量,一般要求光学系统中的各镜面在卸载前后(重力方向改变或太空失重、温度升降、加工载荷卸除、装卡状态改变、残余应力释放等)的形变均方根值(RMS)优于 $\lambda/50$ (全文使用可见光波长 $\lambda=633\text{ nm}$ )<sup>[2]</sup>。正在研制的30 m口径望远镜(TMT)还要求其第三镜(TMT-M3)在加工状态下镜面的斜率均方根值(SlopeRMS)优于 $1.44\ \mu\text{rad}$ <sup>[3]</sup>,除去加工和检测误差,分配到支撑系统的镜面 SlopeRMS 应优于 $0.3\ \mu\text{rad}$ ——而随着口径和径厚比的增大,镜面的卸载形变量动辄突破微米量级,这些指标越来越难以达到,对镜体的支撑系统要求也越来越高。分离点浮动支撑技术被广泛应用于抑制超大口径反射镜加工过程中的卸载形变,自20世纪90年代开始得到广泛应用以来,在世界上已成功应用于诸多

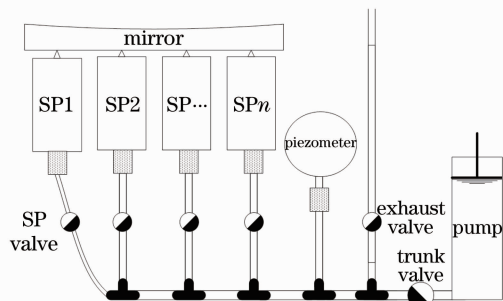
2 m以上反射镜的加工<sup>[4-8]</sup>,在国内也有用于加工1 m量级反射镜的尝试<sup>[9-11]</sup>。

目前,分离点浮动支撑方法存在的一个重要不足是,为精确控制支撑力,需在各点安装高精度力促动器进行反馈控制,以致造价昂贵,且控制变量繁多导致控制系统复杂。

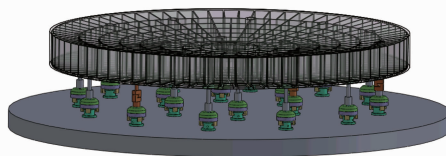
因此,本文研究了一种均力静压支撑系统,取消力反馈环节,每个支撑输出相同的支撑力,通过优化支撑点布局而获得理想的卸载面形精度,改进现有支撑方法的不足,从而降低超大口径反射镜的制造难度和成本。

## 2 新型静压支撑系统

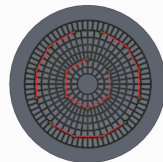
将静压支撑系统分成3~6个支路分别控制管路液体压强,可实现镜体姿态的灵活调整,并将超大口径支撑系统的控制变量从数十个至数百个输出力锐减到3~6个压强控制。为防止加工过程中镜体发生侧移,可在反射镜侧边额外安装三个以上的侧限位支撑。支路结构设计概念如图1所示。



(a) one piping trunk of equal-force support system



(b) applied to fabricate ultra-large optics



(c) four trunks and pipe links

图1 均力静压支撑系统

Fig. 1 Equal-force hydrostatic support system

其中,图1(a)所示支路含 $n$ 个静压支撑;图1(b)为支撑系统的实施方案,侧支撑和液压管路未画出;图1(c)为图1(b)系统的支路管路连接方式,4个支路可用于调整镜体的刚体位移和姿态,其中每条红线表示一个支路系统。

该均力支撑系统的每个支路中的各支撑结构通过管路相连,在同一液体压强下工作,各点提供相同的轴向支撑力。基于静压支撑系统的等力输出特性,相同支路内部各支撑点的输出力大小相同,因此要实现支撑精度的优化,必须对支点的布局进行优化设计。

## 3 支点布局优化设计

光学系统中对于光机结构的刚度一般要求较高,须将镜面形变量控制在亚波长量级或更小<sup>[2]</sup>。光机结构优化设计与常规结构优化设计的不同在于,其评价指标一般为镜面的形变情况,且较为复杂,通常包括如下几个方面:

- 1) 反射镜的刚体位移(含平移和转动),主要取决于支撑系统的刚度;
- 2) 镜面弹性形变所造成的曲率半径变化,受支撑系统与反射镜自身刚度的耦合影响;
- 3) 弹性形变的高阶分量的RMS值,主要取决于反射镜自身的刚度;

4) 镜面 SlopeRMS 值,受支撑系统与反射镜自身刚度的耦合影响。

前两种造成的像差可以通过运动机构进行调整和补偿<sup>[12]</sup>,不会对系统成像造成本质的影响,后两种是在光机结构设计中需要重点考察的指标。传统上使用 RMS 进行面形质量评价,随着光学系统口径变大和像元分辨率的提升,SlopeRMS 也成为一种评价指标。

### 3.1 优化模型描述

反射镜的光学制造是一个加工-检测的循环迭代过程,为抑制镜面卸载形变,保证检测精度,必须将支撑系统造成的镜面面形误差降到最小,因此含  $n$  个支撑点的静压支撑系统的布局优化模型可描述为

$$\begin{aligned} & \text{Find} && P_i(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n; \\ & \text{Minimize} && \text{RMS}(dz_k), k = 1, 2, \dots, N_G; \\ & && \text{or SlopeRMS}(dz_k); \\ & \text{Subject to} && P(x_i, y_i) \in \Omega; \\ & && \text{and } |P_i P_j| > D, i \neq j \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $P_i(x_i, y_i)$  表示支撑点在直角坐标系下 XY 平面上的投影位置,  $dz_k$  表示镜面第  $k$  个节点偏离最佳拟合面的矢高,须借助于面形拟合算法获得,  $N_G$  表示镜

面节点个数,  $\Omega$  表示反射镜的口径范围,  $|P_i P_j| > D$  表示任意两个支撑点的中心距离  $|P_i P_j|$  要大于单个静压支撑的外径  $D$ 。

标准圆域的泽尼克多项式由于诸多优点而被广泛用于面形拟合。若反射镜的口径为非圆,可预先将其口径坐标通过正交变换投影到标准圆域。将镜面节点的矢高变化量  $dz_k$  采用  $m$  项泽尼克多项式拟合后,可得到泽尼克系数  $C_l (l=1, 2, \dots, m)$ ,扣除其中的刚体位移和曲率半径变化后<sup>[12-13]</sup>,参与 RMS 计算的分量  $\Delta z_k$  为

$$\Delta z_k = dz_k - C_1 - 2C_2 x_k - 2C_3 y_k - \sqrt{3}C_4 [2(x_k^2 + y_k^2) - 1], \quad (2)$$

其中  $x_k, y_k$  为归一化的节点坐标。于是面形峰谷 (PV) 值和 RMS 值可定义为

$$\begin{aligned} S_{PV} &= \max(\Delta z_k) - \min(\Delta z_k) \\ S_{RMS} &= \sqrt{\sum_{k=1}^{N_G} (\Delta z_k - \overline{\Delta z})^2 / (N_G - 1)}, \quad (3) \end{aligned}$$

式中  $\overline{\Delta z}$  为  $\Delta z_k$  的平均值。

至于 SlopeRMS 的计算,则参照 TMT 项目组的定义<sup>[3]</sup>,其表达式为

$$V_{\text{SlopeRMS}} = \sqrt{\left( \frac{1}{(N-1)(M-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} \left[ \left( \frac{S_{i+1,j} - S_{i,j}}{dx} \right)^2 + \left( \frac{S_{i,j+1} - S_{i,j}}{dy} \right)^2 \right] \right)}, \quad (4)$$

式中  $N$  为口径的  $x$  方向的采样点数,  $M$  为  $y$  方向的采样点数,  $S_{ij}$  为沿  $x$  方向第  $i$  个、沿  $y$  方向第  $j$  个采样点的矢高误差,  $dx, dy$  分别为相应方向上采样点的空间距离。

### 3.2 光机结构优化

(3)式和(4)式表明,在(1)式所示模型中,优化目标是一个统计量,且与设计变量之间没有显式关系,只能在迭代过程中进行寻优和敏度分析,因此借助于 Isight 软件搭建一个光机集成优化分析流程,如图 2 所示<sup>[14-15]</sup>。

其中, Adaptive\_FEA 模块实现自动化的网格划分、边界条件施加、计算求解和镜面节点位移输出;在 Adaptive\_FEA 模块中,边界条件是加在硬几何编号上,这些编号在建模过程中保持不变,但硬几何本身是运动的,造成每次自动剖分网格会生成新的有限元模型,进而导致边界条件所作用的节点号、单元号均发生改变,这是进行自适应有限元分析的基本思想。PV\_RMS 模块可进行镜面坐标的正交化处理、泽尼克多项式拟合,输出面形 PV、RMS 或

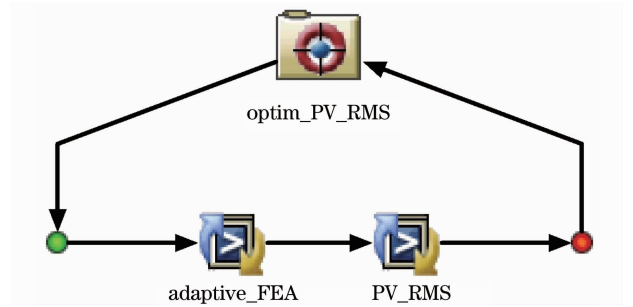


图 2 光机结构优化流程

Fig. 2 Optimization flow for opto-mechanical structures SlopeRMS 值。Optim\_PV\_RMS 模块用来选择优化算法、定义设计变量、设定约束条件和优化目标;由于超大口径反射镜的支撑点数较多导致优化变量众多,同时布局优化的目标不止一个,甚至需要人工经验判断参数解的优劣,因此很难有一种万能的算法。具体操作中,通常采用 Downhill Simplex、Hook Jeeves 等算法全局寻优,然后采用 NLPQL、MOST 等梯度算法进行局部寻优<sup>[15]</sup>。

## 4 几何适应性

为优化各支点的布局,需要在图 2 所示的 Adaptive\_FEA 模块中实现可适应反射镜 CAD 模型变化的有限元分析功能。光学工程中的反射镜结构形式各异,按径厚比可分为薄镜和厚镜两类。薄镜的结构形式一般为板壳结构,径厚比一般超过 10,支撑系统可以直接粘接到反射镜背部;厚镜一般为实体结构或者筋板结构,需要采用三角板、杠杆等连接结构将其安装到支撑系统。

### 4.1 薄板型反射镜支撑系统

对于轻薄反射镜,图 1 所示的各个支撑点可安装到镜背任意位置,因此支撑点坐标的设计空间较大。在建模的前处理阶段,将支撑点设置为镜面的硬点,使用板壳单元对镜面进行离散,然后将边界条件施加到硬点上。当支撑点位置移动时,这种处理方式可保证有限元网格和边界条件的自适应生成。图 3 为 TMT 第三镜自适应支撑布局优化模型。由于 TMT 第三镜为椭圆镜,且需要设置 3 个虚拟硬点的边界条件,只能简化到 1/2 模型。

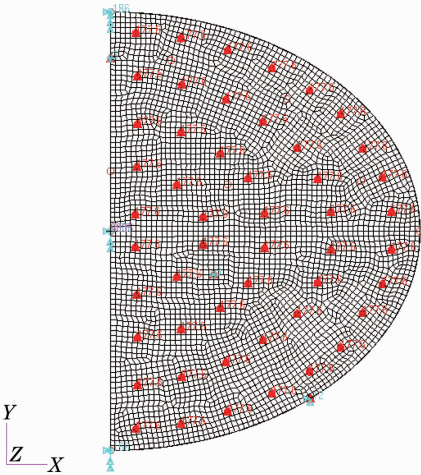


图 3 板壳式自适应建模(TMT-M3, 1/2 模型)  
Fig. 3 Adaptive modeling for plane structures (TMT-M3, half model)

图 3 中,三角点均为硬点,对应一个静压支撑,在有限元模型中体现为一个力边界条件。静压系统支撑状态下的反射镜为浮动件,为了便于进行有限元求解,图 3 中还施加了限制镜体刚体位移的边界条件和对称边界条件。

### 4.2 筋板型反射镜支撑系统

由于厚反射镜一般为实体结构或筋板结构,支撑孔的位置确定不变,加强筋交汇的位置也是确定的,图 1 所示的各个支撑点想要实现布局优化必须借助于转接板来实现。图 4 为某 2 m 主镜自适应支

撑布局优化模型。支撑系统采用 18 点支撑,分别通过 6 个转接板,每个转接板上安装一个静压支撑承受 1/6 的镜体自重。静压支撑点可以在三角板内任意移动,从而实现布局优化。由于设计方提供的镜坯结构的加强筋、支撑孔位置影响,只能简化到 1/4 模型。在 1/4 模型中含 1.5 个转接板,1.5 个静压支撑。

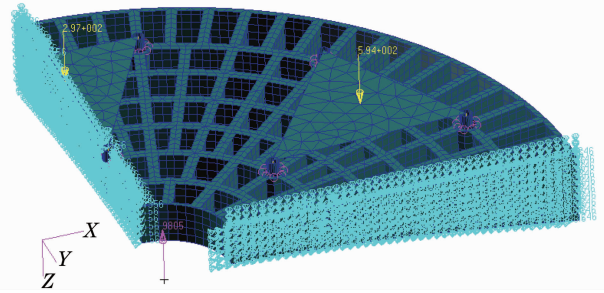


图 4 筋板式反射镜自适应建模(2 m 主镜, 1/4 模型)  
Fig. 4 Adaptive modeling for stiffen structures (2 m mirror, 1/4 model)

在前处理中,由于均力特性,各支撑点均匀承受镜体自重,施加相同的力边界条件。对于处在对称轴上的支撑点则对载荷幅值进行减半处理。

## 5 算例与结果

传统上,反射镜在加工过程中镜面法向朝上,检测时将其翻转 90°,以降低重力对面形的影响。现有条件下,上述过程普遍的做法是将其从加工机床上卸下,搬运至隔振平台上翻转 90°后检测。反射镜口径达到 2 m 以上后,搬运和翻转过程存在风险且不易实现,应尽量采用立式检测。下述算例中,通过支撑布局优化使其获得最佳的重力卸载面形精度,以实现反射镜的立式检测。重力沿 Z 向(镜面法向),长春地区重力加速度  $g=9805 \text{ mm/s}^2$ 。

### 5.1 TMT-M3

TMT-M3 为椭圆形平面镜,长轴  $a=3500 \text{ mm}$ ,短轴  $b=2500 \text{ mm}$ ,均匀厚度  $t=100 \text{ mm}$ ,径厚比  $D/t=35$ 。材料为微晶玻璃(zerodur),密度  $\rho=2.458 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ ,弹性模量  $E=6.9 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\nu=0.23$ ;TMT 项目组要求光学加工及检测的总体面形  $\delta \approx \lambda/10(63 \text{ nm})$ ,  $V_{\text{SlopeRMS}} \leq 1.44 \mu\text{rad}$ ,要求支撑系统造成的镜面  $V_{\text{SlopeRMS}} \leq 0.3 \mu\text{rad}$ 。使用 mm-N-s 量纲体系时,反射镜最少支撑点数  $N$  与反射镜材料属性、口径  $D$ (此处  $D=a$ )和径厚比  $D/t$  有如下经验公式<sup>[15]</sup>

$$N = 0.001175 \times D \times \frac{D}{t} \times \sqrt{\frac{\rho}{E\delta}} \quad (5)$$



由(5)式算出  $N=108$ ,  $1/4$  模型中  $N_{1/4}=27$ 。考虑到面积与尺寸的平方关系,分别分析:5圈( $N_{1/4}=25=1+3+5+7+9$ )共100点、6圈( $N_{1/4}=36=1+3+5+7+9+11$ )共144点两种方案。TMT-M3 支撑点布局优化的自适应模型如图3所

示。

表1列出了依据设计经验布置支撑点的镜面面形指标和优化后的结果对比,其中 Pts 表示支点个数。全模型的 Slope 云图如图5所示。

表1 TMT-M3 支撑点布局优化结果汇总

Table 1 Results summary of support layout optimization for TMT-M3

Pts	Empirical layout			Optimized layout		
	PV /nm	RMS /nm	SlopeRMS / $\mu$ rad	PV /nm	RMS /nm	SlopeRMS / $\mu$ rad
100	957	247	0.56	91	14.4	0.23
144	776	221	0.45	68.9	11.6	0.18

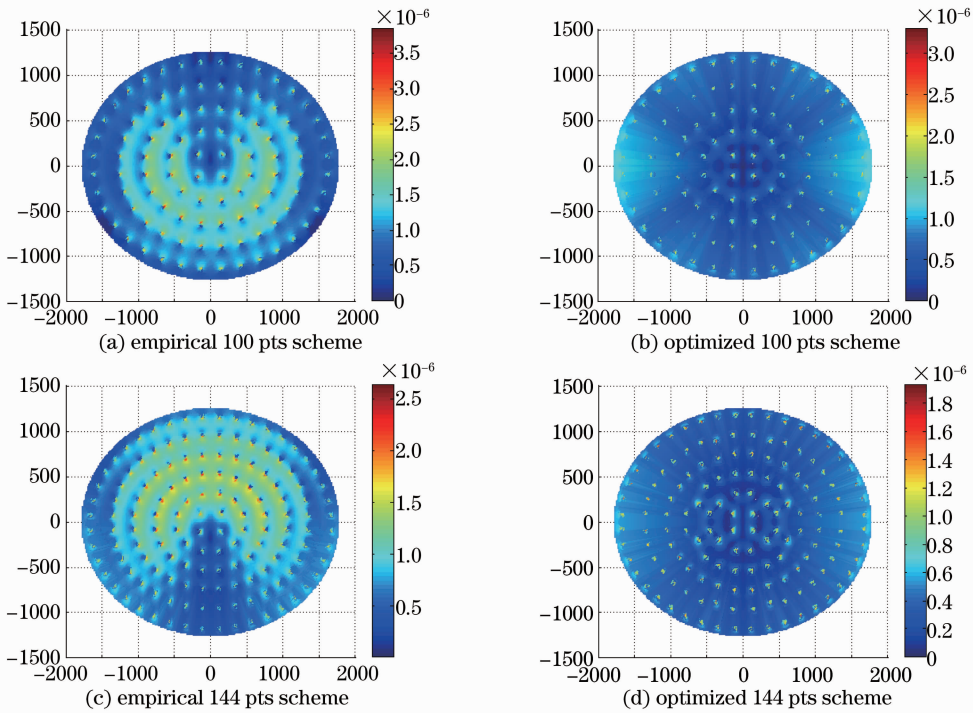


图5 TMT-M3 全模型的 Slope 云图汇总

Fig. 5 Slope contour for TMT-M3 models

观察表1可以发现,100点初始支撑方案经过优化后,PV值仅为原来的9.5%,RMS仅为原来的5.8%,SlopeRMS仅为原来的41%;144点初始支撑方案经过优化后,PV值仅为原来的8.9%,RMS仅为原来的5.2%,SlopeRMS仅为原来的40%,由此可见,布局优化带来的改进效果相当明显。另外表1还表明,增加支撑点数可以提高支撑精度。

从图5也可以看到,经过支撑布局优化后的镜面形变趋于均匀,支撑效果达到理想状态。两种支撑方案的SlopeRMS分别为0.23  $\mu$ rad和0.18  $\mu$ rad,均小于0.3  $\mu$ rad,满足设计要求。

### 5.2 长春2 m主镜

长春2 m主镜为环形反射镜,外圆直径为2040 mm,中心孔直径320 mm,反射面为二次曲面,

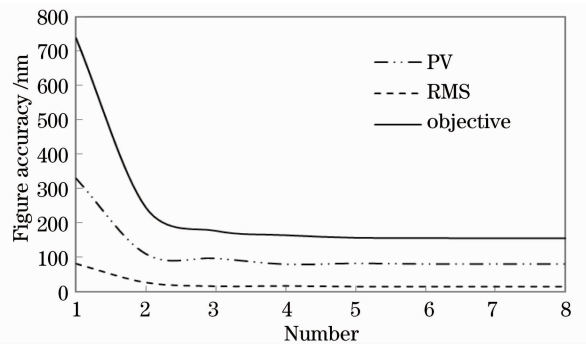


图6 2 m主镜面形指标的改进过程

Fig. 6 Improvement of the figure accuracy of the 2 m primary mirror

背面为平面,镜体中心厚109 mm,边缘厚190 mm,采用18点支撑方案。镜体材料为反应烧结碳化硅(RB-

SiC), 密度  $\rho = 3.06 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ , 弹性模量  $E = 3.4 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.25$ ; 项目总体组要求光学加工及检测的总体面形 RMS 小于  $\lambda/50$  ( $\approx 13 \text{ nm}$ )。2 m 主镜支撑点布局优化的边界条件自适应有限元模型如图 4 所示。以 RMS 值为优化目标时, 则还需兼顾 PV 值, PV 值一般为 RMS 值的 3~8 倍, 因此不妨把目标定义为  $5 \times S_{\text{RMS}} + S_{\text{PV}}$ 。

经过大约 30 次迭代得到最优结果, 取出其中逐步改进的结果如图 6 所示。最终得到 PV 为 80.7 nm, RMS 为 15.0 nm, 略大于公差分配值 13 nm, 基本满足

表 2 TMT-M3 支撑系统造价对比(100 点方案)

Table 2 Cost comparison of support systems for TMT-M3 (100 pts)

Scheme	Component	No.	Unit price / ¥	Cost / ¥	Total cost / ¥
Classical; optimizing support forces	Load cell	100	6,000	600,000	755,000
	Actuator	100	1,000	100,000	
	Support structure	100	500	50,000	
	Fluid pipes	100	50	5,000	
Our scheme; optimizing support locations	Piezometer	6	6,000	36,000	97,000
	Actuator	6	1,000	6,000	
	Support structure	100	500	50,000	
	Fluid pipes	100	50	5,000	

表 3 2 m 主镜支撑系统造价对比(18 点方案)

Table 3 Cost comparison of support systems for 2 m primary mirror (18 pts)

Scheme	Component	No.	Unit price / ¥	Cost / ¥	Total cost / ¥
Classical; optimizing support forces	Load cell	18	6,000	144,000	171,900
	Actuator	18	1,000	18,000	
	Support structure	18	500	9,000	
	Fluid pipes	18	50	900	
Our scheme; optimizing support locations	Piezometer	6	6,000	36,000	51,900
	Actuator	6	1,000	6,000	
	Support structure	18	500	9,000	
	Fluid pipes	18	50	900	

从表 2 可以发现, 对于 TMT-M3, 采用传统方案的造价需 75.5 万元, 而采用改进后的方案仅需 9.7 万元, 仅为前者的 13%; 从表 3 可以发现, 对于 2 m 主镜, 采用传统方案的造价需 17.2 万元, 而采用改进后的方案仅需 5.2 万元, 仅为前者的 30%。由于显著减少了高精度传感器和相关控制器件的使用, 该均力支撑方案可大幅降低超大口径光学制造的成本, 且支撑点数越多时, 效益越显著。

## 6 结 论

提出了一种新型的静压支撑系统, 该支撑系统中的各个支撑结构输出相同的支撑力, 基于这种均力特性, 研究了该型系统中支撑点的布局优化方法。解决了该方法实施过程中的两个难点: 1) 面形拟合

要求。若需获得更高的支撑精度, 可考虑在三角板上增加 1 或 2 个支撑点重新进行布局优化, TMT-M3 的计算结果已经表明, 增加支撑点数可以提高支撑精度。

### 5.3 造价对比

上述两个算例的造价对比汇总于表 2 和表 3。其中采用力反馈方案(即传统方案)时, TMT-M3 按照 100 点支撑方案计算造价, 2 m 主镜按照 18 点支撑方案计算造价; 采用均力支撑方案时, 两块反射镜均采用 6 个压强控制支路。

及优化目标的自动提取; 2) 能够适应 CAD 模型及边界条件变化的光机集成分析与优化设计。

分析了其在超大口径反射镜的光学加工和检测中的应用。该支撑系统降低了控制变量的个数和控制难度, 降低了超大口径光学制造的难度; 避免了大量高精度力传感与控制器件的使用, 降低了超大口径光学制造的成本。

对 TMT-M3 和某 2 m 口径主镜的分析结果表明, 所设计的支撑方法效果较好, 精度满足要求。新型静压支撑系统可有效抑制超大口径反射镜的卸载形变, 具备光学加工和立式检测所需的支撑精度。

需要注意的是, 该设计方法去掉了力反馈系统, 各点支撑力相同, 因此在安装中须实现较高精度的支点定位。在最优布局的基础上, 对 TMT-M3 进

行正交试验分析,发现支撑点定位精度为 0.1 mm 时,镜面 RMS 值变化约为 0.5 nm。使用 Laser Tracker 球座辅助安装,各支点中心可实现约 20  $\mu\text{m}$  的定位精度,满足使用要求。

### 参 考 文 献

- 1 Zhong Xianyun, Xu Qinglan, Fan Bin. Study on elimination of "imprinting effect" of lightweight reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0722002.  
钟显云, 徐清兰, 范斌. 消除轻质反射镜“压印效应”的技术研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0722002.
- 2 Xu Hong, Guan Yingjun. Structural design of 1 m diameter space mirror component of space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1488-1495.  
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, 21(6): 1488-1495.
- 3 TMT Group. Tertiary Mirror Surface Figure Specification[S], 2012, TMT. OPT. SPE. 12. 001. DRF02 19.
- 4 H M Martin, R G Allena, B Cuerden, *et al.*. Primary mirror system for the first Magellan telescope [C]. *SPIE*, 2000, 4003: 1-12.
- 5 H M Martin, R G Allena, B Cuerden, *et al.*. Manufacture of the second 8.4 m primary mirror for the Large Binocular Telescope [C]. *SPIE*, 2006, 6273: 62730C.
- 6 P Schipani, M Capaccioli, S D'Orsi S, *et al.*. The VST active primary mirror support system [C]. *SPIE*, 2010, 7739: 773931.
- 7 H J Kaercher, P Eisentraeger, M Süß. Mechanical principles of large mirror supports [C]. *SPIE*, 2010, 7733: 773320.
- 8 H M Martin, S P Callahan, B Cuerden, *et al.*. Active supports and force optimization for the MMT primary mirror [C]. *SPIE*, 1998, 3352: 412-423.
- 9 Huang Qitai, Guo Peiji, Yu Jingchi. Controlling distortion in the process of ultra-thin mirror manufacture [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(8): 128-133.  
黄启泰, 郭培基, 余景池. 超轻超薄反射镜制造过程中的形变控制研究[J]. *光电工程*, 2008, 35(8): 128-133.
- 10 Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo, Wang Jianli, *et al.*. Active surface-profile correction of 620 mm thin-mirror based on flotation support [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511001.  
李宏壮, 张振铎, 王建立, 等. 基于浮动支撑的 620 mm 薄反射镜面面形主动校正[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0511001.
- 11 Chen Fulin, Zhang Jingxu, Wu Xiaoxia, *et al.*. Supporting structure of 620 mm thin primary mirror and its active surface correction [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 1022-1029.  
陈夫林, 张景旭, 吴小霞, 等. 620 mm 薄镜面的主动支撑结构及面形校正[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1022-1029.
- 12 Wang Quandou, Zheng Weiping, Yu Jingchi. Optimizing optics support structure in testing primary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(6): 98-102.  
王权陡, 郑卫平, 余景池. 非球面主反射镜检测用支撑结构的优化设计[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(6): 98-102.
- 13 Yang Jiawen, Huang Qiaolin, Han Youmin. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(5): 49-55.  
杨佳文, 黄巧林, 韩友民. Zernike 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. *航天返回与遥感*, 2010, 31(5): 49-55.
- 14 Hu Haifei, Guan Yingjun, Zheng Ligong. Analysis led design and optimization for large aperture mirror [C]. *SPIE*, 2012, 8415: 841503.
- 15 Hu Haifei, Guan Yingjun, Zhao Sihong, *et al.*. Analysis led design and optimization for large aperture mirror [J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(5): 990-994.  
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.

栏目编辑：韩峰