

# TMT 三镜缩比系统支撑点位置优化

郭鹏<sup>1,2</sup> 张景旭<sup>2</sup> 杨飞<sup>2</sup> 赵宏超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 三十米望远镜(TMT)的三镜(M3M)及其缩比反射镜(M3MP)为椭圆形反射镜,采用18点 whiffletree 支撑结构。总结了望远镜支撑点优化方法的发展,并采用多学科集成优化软件 ISight 对 M3MP 进行了支撑点优化。优化的目标函数选取 M3MP 在光轴竖直状态下的镜面面形误差 SlopeRMS 值,优化算法采用全局优化算法模拟退火算法。最终面形误差 SlopeRMS 相较初始点下降了 14.3%,结果表明优化方法有效。

**关键词** 光学设计;三十米望远镜;缩比系统;支撑点;优化;模拟退火

**中图分类号** TH751 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.112205

## Optimization of TMT M3 Prototype's Support Points

Guo Peng<sup>1,2</sup> Zhang Jingxu<sup>2</sup> Yang Fei<sup>2</sup> Zhao Hongchao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Tertiary mirror (M3M) of thirty meter telescope (TMT) and its prototype reflector (M3MP) are elliptical reflector. Their support structure takes 18 points whiffletree. Telescope support optimization methods are reviewed in this paper. By using the multidisciplinary integrated optimization software ISight, the support points of M3MP are optimized. The SlopeRMS of M3MP's mirror surface error when the optical axis is vertical is selected as objective function. And the global optimization algorithm simulated annealing algorithm was used to optimize. Final surface error SlopeRMS is decreased 14.3% compared to the initial support points. The results show the effectiveness of optimization method.

**Key words** optical design; thirty meter telescope; prototype; support points; optimization; simulated annealing

**OCIS codes** 220.4830; 110.4850; 260.1960

## 1 引言

三十米望远镜(TMT)是一台 30 m 口径的光学望远镜,由美国加州理工学院、加州大学系统和加拿大大学天文研究联盟联合发起。长春精密机械与物理研究所承担了三镜系统(M3S)的研制工作。三镜(M3M)为一面椭圆形平面镜,长轴 3594 mm,短轴 2536 mm,厚度 100 mm<sup>[1]</sup>。在三镜的预建设阶段长春光机所计划建造一套缩比系统,尺寸按原系统 1/4 设计。三镜缩比反射镜(M3MP)长轴 898.5 mm,短轴 634 mm,厚度考虑到刚度匹配和镜子加工难度两方面因素取为 12.5 mm,材料为微晶玻璃。

根据前期的概念设计工作,三镜系统轴向支撑结构决定采用 18 点 whiffletree 结构。M3M 的径厚比达到了 30 左右,M3MP 的径厚比更是达到了 60 左右。如此大的径厚比使得镜子非常薄弱,对支撑非常敏感,因此必须对支撑点进行优化。相较一般的圆形反射镜,M3MP 为椭圆形,支撑点分布没有规律,这增大了优化的难度。本文结合有限元法和现代的优化理论对 M3MP 的支撑点位置进行了优化。

## 2 反射镜支撑点优化方法发展

一般的圆形反射镜支撑点优化是将支撑点按照几个支撑圈分布,对支撑圈的半径和支撑点的数量分别进行优化。最早的 Hindle 于 1945 年对等厚度圆镜的 9 点 2 环支撑的进行了计算<sup>[2]</sup>。其方法为将直径为  $D$  的

收稿日期: 2015-03-27; 收到修改稿日期: 2015-06-22; 网络出版日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(11403022)

作者简介: 郭鹏(1989—),男,硕士,研究实习员,主要从事大口径望远镜支撑技术方面的研究。

E-mail: guopengmse@gmail.com

圆形反射镜分为两块,如图1所示。中心圆半径为 $R_E$ ,其质量占原镜质量1/3,外环占2/3。

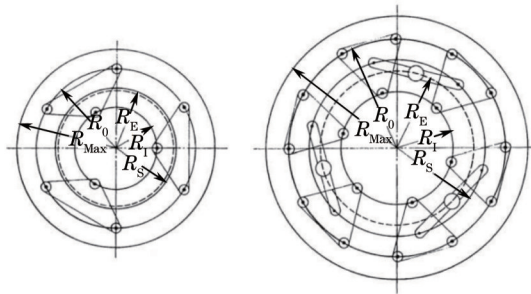


图1 Hindle支撑点布局

Fig.1 Hindle's support points distribution

3个支撑点位于半径 $R_1$ 的内环,6个支撑点位于 $R_0$ 的外环,每个支撑点应承担相同的重量。经过Hindle的计算得出各个圈的半径如下:

$$R_E = (\sqrt{3}/6)D, \quad (1)$$

$$R_1 = (\sqrt{3}/12)D, \quad (2)$$

$$R_0 = (\sqrt{6}/6)D. \quad (3)$$

此外Hindle还对18点也进行了计算,方法是类似的。1983年Mehta对这类支撑的支撑面形进行了理论计算,结果与有限元分析是一致的<sup>[3]</sup>。

1982年,Nelson对圆形薄板的支撑点分布进行了详细分析,支撑点的分布位置在文献<sup>[4]</sup>中有详述。 $N$ 点支撑的最优分布和面形误差的理论计算的结果为

$$\delta_{\text{RMS}} = \gamma_N (q/F)(A/N)^2, \quad (4)$$

其中 $q$ 为单位面积上的作用力, $N$ 为支撑点数目, $A$ 为反射镜面积, $\delta_{\text{RMS}}$ 为面形误差的均方根(RMS)值, $F$ 为反射镜的挠度:

$$F = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}. \quad (5)$$

对于球面和非球面的圆形反射镜,如大口径望远镜的主镜,很难通过理论计算得出支撑点最优分布,多采用有限元法。但优化步骤还是支撑圈和点分布分别进行优化,这样可使得模型简化,减少优化变量。如崔向群院士对VIT主镜支撑点的优化时,分别采用了连续同心环厚壳模型进行支撑圈半径的优化,无限大厚板进行点分布优化,60°扇形三维模型进行精确的面形计算。SOFIA主镜的支撑点优化先采用圆形平板理论的微分方程计算出支撑点数和支撑圈半径,再使用实际弯月镜的有限元分析对半径进行修正。由于优化变量较少,多采用工程分析软件自带的优化算法,一般都是基于目标函数梯度的局部寻优算法。

而对于椭圆形反射镜或其他非圆形的反射镜没有支撑圈的概念,必须以支撑点坐标作为优化变量,使得优化空间和难度加大。但优化方法有了进一步的发展,主要体现在:

- 1) 多光机分析软件的集成,包括几何建模、有限元分析、光学分析、动力学仿真等工程软件的集成;
- 2) 优化算法也更为丰富,对于多变量问题常采用一些全局优化算法,以及多优化算法组合,以避免陷入局部最优点;

- 3) 目标函数更为复杂,不再是简单的面形RMS,多通过光学分析软件或其他软件提取出多种光学指标。

例如TMT的主镜支撑点优化过程。TMT主镜为拼接镜,各子镜为六边形的非球面反射镜。首先,基于一些初步的分析确定了反射镜的支撑点数和支撑点的分布形式。再通过集成Matlab、Nastran、Femap等软件,建立一套优化的流程,如图2所示。优化算法采用的是Matlab的序列二次规划算法。通过多软件平台间迭代运行优化了支撑点的位置<sup>[5-6]</sup>。

### 3 M3MP的支撑点优化

#### 3.1 三镜缩比系统支撑方案

根据TMT三镜概念设计时期的探索,决定轴向支撑采用18点whiffletree的支撑形式,如图2所示。支

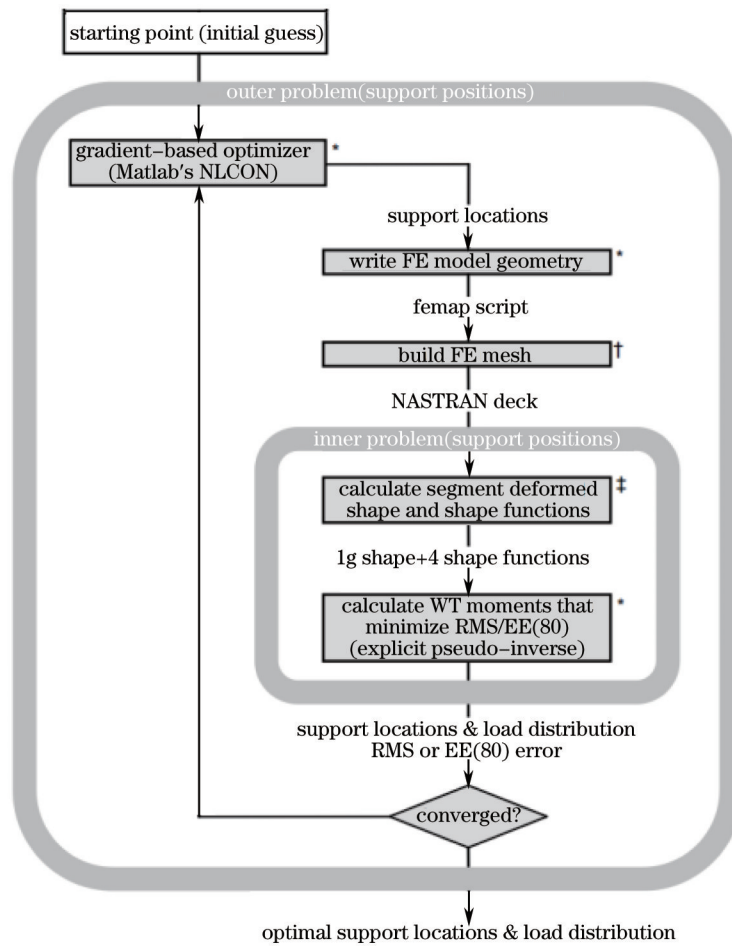


图2 TMT M1 支撑点优化流程

Fig.2 Work flow of TMT M1 support points optimization

撑结构分为两层,第一层使用3个杠杆(rocker)将3个支撑点扩展为6个;第二次使用6个三角板,再将每个支撑点扩展为3个,共18个支撑点。并且对比了各种分布形式后,最终决定采用图3中的分布:支撑点沿 $x$ 轴和 $y$ 轴对称,并且有两个支撑点位于 $x$ 轴上。

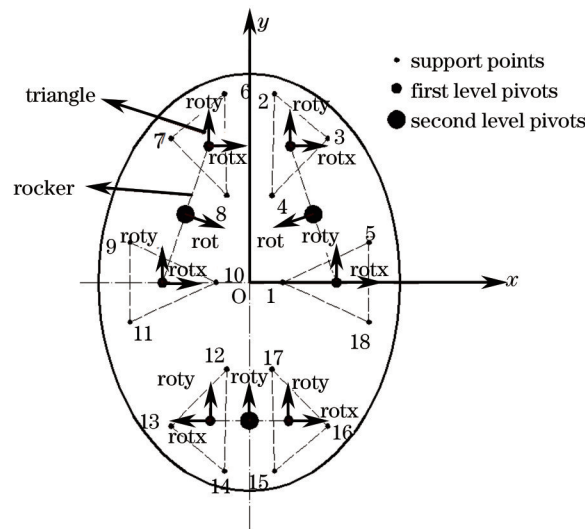


图3 轴向支撑点分布

Fig.3 Axial support points' distribution

缩比系统采用同样的分布,以对三镜系统进行验证。根据对称性,独立优化变量共9个,选取第一象限4个点的 $x, y$ 坐标 $(x_i, y_i)$ 和 $+x$ 轴上点的 $x$ 坐标 $x_i$ 作为优化变量,下标 $i$ 为支撑点编号,取2~5。

### 3.2 优化模型

根据TMT的要求,三镜的面形指标包括反映Plate Scale和SlopeRMS。Plate Scale反映了低阶的离焦和像散相差,在空间频率上为低频误差。根据系统分析,Plate Scale在一定范围内是可以通过TMT系统的标校消除掉的。SlopeRMS反映的反射面高频的面形误差,其与TMT的成像质量具有很高的相关性<sup>[7-9]</sup>。因此,选取SlopeRMS作为M3MP支撑点优化的光学指标。由于支撑点位置对镜面指向天顶时影响最大,故以镜子法向竖直时的面形误差SlopeRMS作为优化目标函数。SlopeRMS的计算式如下:

$$F_{\text{SlopeRMS}} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)(M-1)} \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} \left( \frac{s_{k+1,j} - s_{k,j}}{dx} \right)^2 + \left( \frac{s_{k,j+1} - s_{k,j}}{dy} \right)^2}. \quad (6)$$

如前所述,问题的优化变量共有9个。各点坐标均为于第一象限,且均落于M3MP的镜面上。故优化问题可表示为:

$$\left. \begin{array}{l} \min F_{\text{SlopeRMS}}^{\text{vertical}} \\ \text{s.t. } 0 < x_1 < b \\ \quad 0 < x_i < b \\ \quad 0 < y_i < a \\ \quad \left( \frac{x_i}{b} \right)^2 + \left( \frac{y_i}{a} \right)^2 - 1 < 0 \end{array} \right\}, \quad (7)$$

其中 $a$ 为M3MP的半长轴长, $b$ 为M3MP的半短半轴长, $i$ 取2~4。基于多学科设计优化软件ISight建立了如图4所示的优化模型<sup>[8]</sup>。模型集成了ISight的优化模块和有限元分析软件Ansys,以及用于面形计算的Matlab。使用Ansys建立M3MP的参数化有限元模型,使用Matlab编写SlopeRMS的计算程序。通过ISight可识别和传递各模块的文件和参数,提取出优化变量和目标函数,并设定相应约束条件。

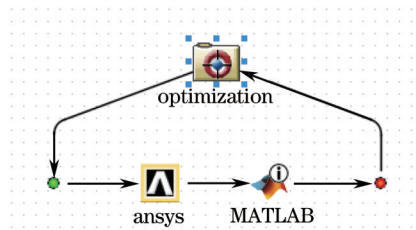


图4 M3MP的支撑点优化模型

Fig.4 Optimization model of M3MP's support points

### 3.3 优化算法简介

由于问题的变量较多,局部优化算法如Ansys的梯度优化算法会陷于局部最优解。因此,采用ISight内部集成的全局寻优的算法模拟退火算法(SAA)。算法思想为通过模拟退火过程,将优化问题与统计力学的热平衡问题类比<sup>[10]</sup>。假如物体缓慢冷却,即为稳态过程,那么物体在绝对温度 $T$ 时具有能量 $E_i$ 的概率为:

$$P(E = E_i) = \frac{1}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right), \quad (8)$$

其中 $Z(T)$ 为标准化因子, $k_B$ 为波尔兹曼常数。显然当温度 $T$ 越低时,物体具有最低能量的概率越大,但也有一定概率不是最低能量。当 $T$ 趋近于0时,物体具有最低能量的概率趋近于1。将这一模型结合到优化方法上,产生了模拟退火算法。算法特点为当迭代一次结果变坏时也有一定概率接受,即有可能从一个局部低点跳出。这种概率突跳的特性有助于跳出局部最优解,遍历整个空间寻优。当优化变量 $X_k$ 在空间中找到新的一点 $X_{k+1}$ 时,能量 $E$ 对应优化目标函数值,如果 $E(X_{k+1}) < E(X_k)$ 则接受,如果 $E(X_{k+1}) \geq E(X_k)$ 则有一定的概率接受,当满足下式时也接受新的设计点:

$$\exp\left(-\frac{E_{k+1} - E_k}{k T_k}\right) > \xi. \quad (9)$$

$\xi$ 为[0,1)间的一随机数, $\{T_k\}$ 为一随 $k$ 衰减为0的序列,其意义即为模拟退火过程的温度。随着 $T_k$ 逐渐降低,搜索突跳的概率越低,当趋于0时突跳的概率也趋于0。算法的流程如图5所示,显然初温 $T_0$ 越高, $T_k$ 的下降速度越慢,计算量越大,而得到高质量解的可能性越大。

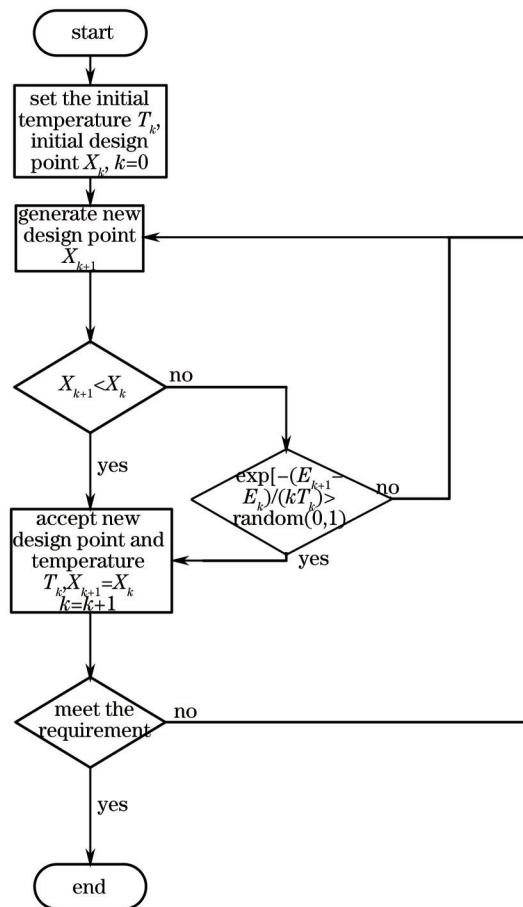


图5 模拟退火算法流程

Fig.5 Work flow of SAA

### 3.4 优化结果

模拟退火算法作为一种全局寻优算法,需要大量的设计点以搜索整个空间,因此在ISight内设置总的设计点数设为10000个。初始的设计点是基于初步分析选定的一个较优的结果,具体方法是手动在有限元模型中移动支撑点位置使得面形中印透的区域大小趋于一样,如图6所示。以此为初始点进行优化,经过搜索后第1072个设计点达到最小值。优化结果列于表1。

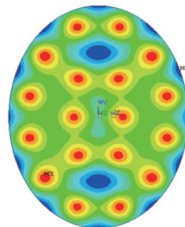


图6 初始点有限元分析的面形

Fig.6 Initial support points' mirror surface in finite element analysis

表1 优化结果

Table 1 Optimization results

|  | Initial points | Optimized points |
|--|----------------|------------------|
| Support points'<br>coordinate values /mm | $(x_1, 0)$     | (86.8, 0)        |
|  | $(x_2, y_2)$   | (75.5, 363.5)    |
|  | $(x_3, y_3)$   | (192, 248)       |
|  | $(x_4, y_4)$   | (70.2, 157)      |
|  | $(x_5, y_5)$   | (244.7, 84.5)    |
| SlopeRMS / $\mu$ rad                     | 0.96           | 0.87             |



最终 SlopeRMS 从初始点的  $0.96 \mu\text{rad}$  优化到了  $0.87 \mu\text{rad}$ , 目标函数下降了 14.3%。M3MP 的支撑面形如图 7 所示。

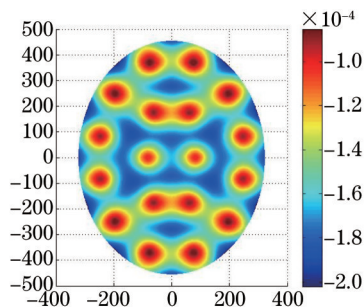


图 7 优化后 M3MP 的面形

Fig.7 M3MP's mirror surface after optimization

## 4 结 论

TMT 三镜的面形误差 SlopeRMS 与成像的锐利程度具有很高的相关性。而重力变形在光轴竖直朝上时达到最大,且对支撑点位置十分敏感。因此必须在结构设计前确定支撑点的理想位置。由于 TMT 的 M3M 及 M3MP 均为椭圆形反射镜,支撑点分布不规则,故优化变量较多,传统有限元分析软件的优化方法不能够很好地在如此大的优化空间中找到一个全局的优化解。最终集成多学科优化软件 ISight、有限元分析软件 Ansys 和数值计算软件 Matlab,并采用全局寻优效果比较好的模拟退火算法进行了 M3MP 的支撑点优化,取得了很好的效果,优化后 SlopeRMS 下降了 14.3%。多平台集成的优化方法对 TMT 的三镜系统的优化设计具有很强的借鉴意义,可沿用与今后三镜系统的优化设计中。

支撑点位置决定了重力作用下镜子由于支撑结构印透效应带来的面形误差,除此之外仍需考虑加工、装配以及热扰动所带来的面形误差。热扰动引起的面形误差与支撑点位置的相关性不大,主要取决结构是否在热膨胀方向具有较好的柔性,以释放热变形;加工、装配误差需要对完整的支撑结构进行详细的敏感性分析,基于敏感性分析结构可确定加工、装配误差引起的面形误差是否满足需求。这两项工作需要下一步结合结构进行详细的分析。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Fuguo, Yang Fei, Zhao Hongchao, *et al.*. Progress in TMT M3 system[J]. Chinese Optics, 2013, 10(6): 643-651.  
王富国, 杨 飞, 赵宏超, 等. TMT 望远镜三镜系统的研究进展[J]. 中国光学, 2013, 10(6): 643-651.
- 2 Hindle J H. Mechanical flotation of mirrors[J]. Amateur Telescope Making, 1945: 229.
- 3 Mehta P K. Flat circular optical elements on a 9-point hindle mount in a 1-g force field[C]. SPIE, 1983, 450: 118.
- 4 Nelson J E, Lubliner J, Mast T S. Telescope mirror supports: plate deflections on point supports[C]. 1982: 212.
- 5 崔向群. 采用主动光学的大口径单块薄镜面的支撑系统[D]. 南京: 中国科学院紫金山天文台, 1995.
- 6 Hans J Meier. Support of thin meniscus primary for SOFIA[C]. Cryogenic Optical Systems and Instruments: SPIE, 1990: 153-164.
- 7 Eric Ponslet, Dan Blanco, Myung Cho, *et al.*. Development of the primary mirror segment support assemblies for the thirty meter telescope[C]. SPIE, 2006: 1-19.
- 8 Hu Haifei, Luo Xiao, Xin Hongwei, *et al.*. Layout optimization of equal-force supports for ultra-large optical fabrication [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0422003.  
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.
- 9 Wang Fuguo, An Qichang. Evaluation of mirror surface figures for TMT based on sloperms[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(5): 1171-1175.  
王富国, 安其昌. 30 m 望远镜三镜镜面面形误差的斜率均方根评价[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(5): 1171-1175.
- 10 Xie Yun. Principle and realization of the simulated annealing algorithm[J]. Numerical Mathematics, 1999, 3: 212-218.  
谢 云. 模拟退火算法的原理及实现[J]. 高等学校计算数学学报, 1999, 3: 212-218.