



中国科学院云南天文台

YUNNAN OBSERVATORIES, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

环形拼接太阳望远镜子镜结构研究

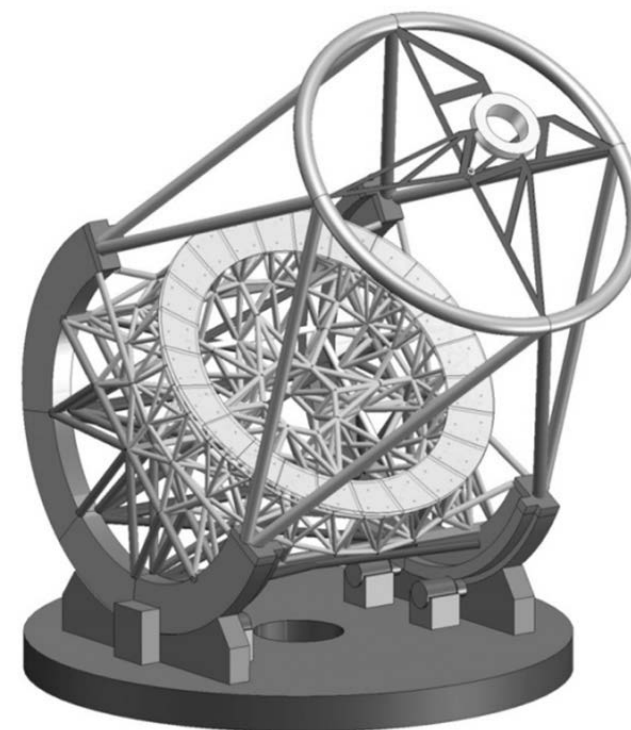
汇报人：谭旭

云南天文台-天文技术实验室

2023.11.23

目录

- CGST环形拼接主镜简介
- 子镜及其支撑方案
- 子镜热变形分析
- 子镜面型误差的传播
- 总结



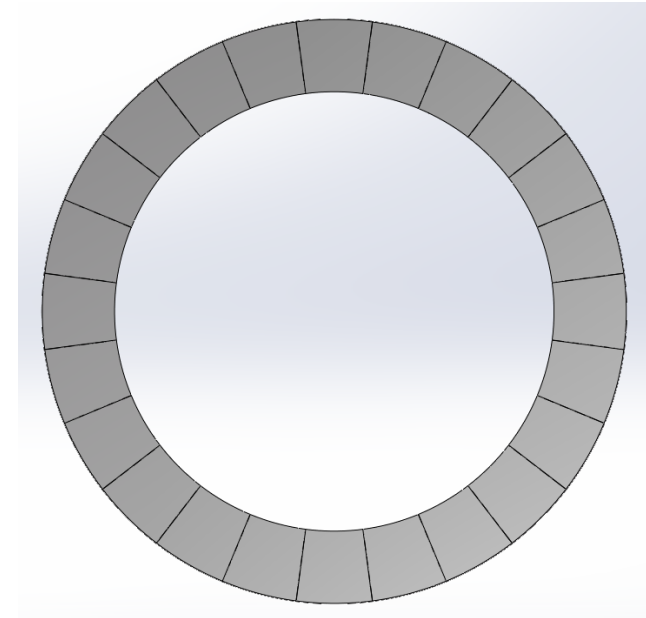
CGST : Chinese Giant Solar Telescope

1、CGST环形拼接主镜简介

主镜口径：**8米**

主镜形式：环形

结构方案之一：环宽**1米**，**24**块扇形子镜拼接



2、CGST子镜及其支撑方案

(1) 子镜材料及几何参数

子镜材料：微晶玻璃Zerodur；

弹性模量 $E=9.1 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ；

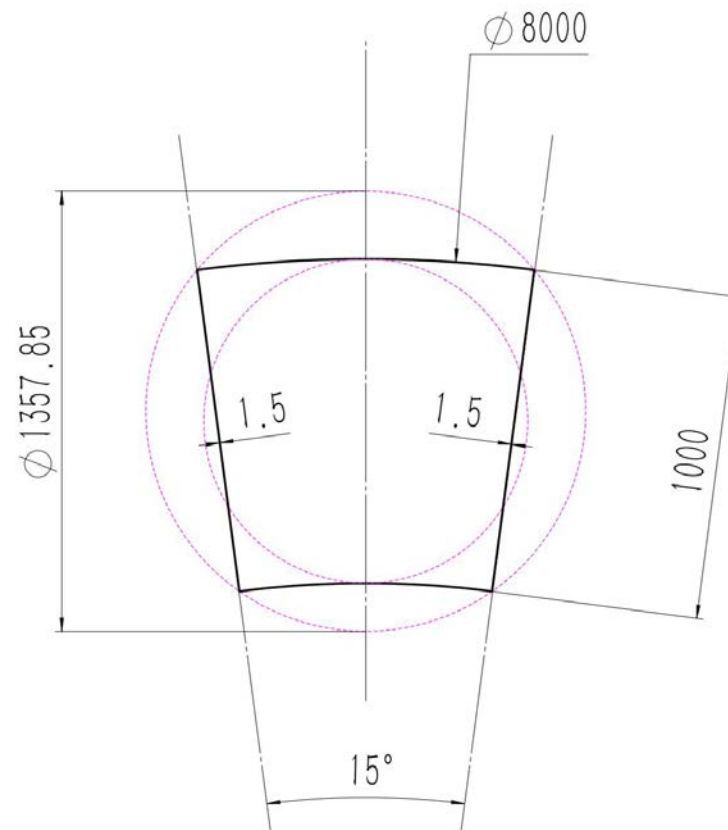
质量密度 $\rho=2530 \text{ kg/m}^3$ ；

热膨胀系数 $\alpha=0.05 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ；

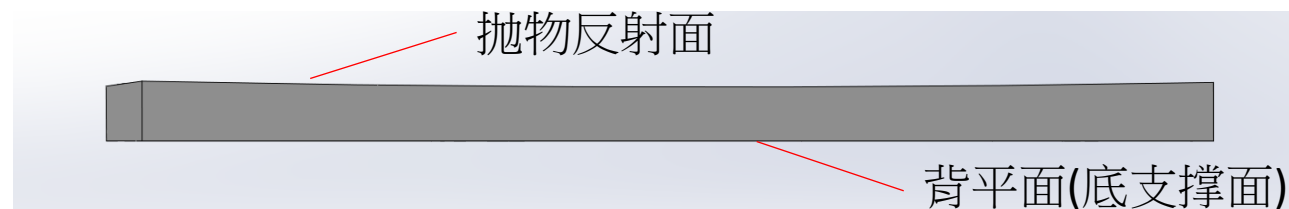
泊松比 $\nu=0.24$ ；

热导率 $K=1.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；

比热容 $C_p = 821 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$



厚度：75mm



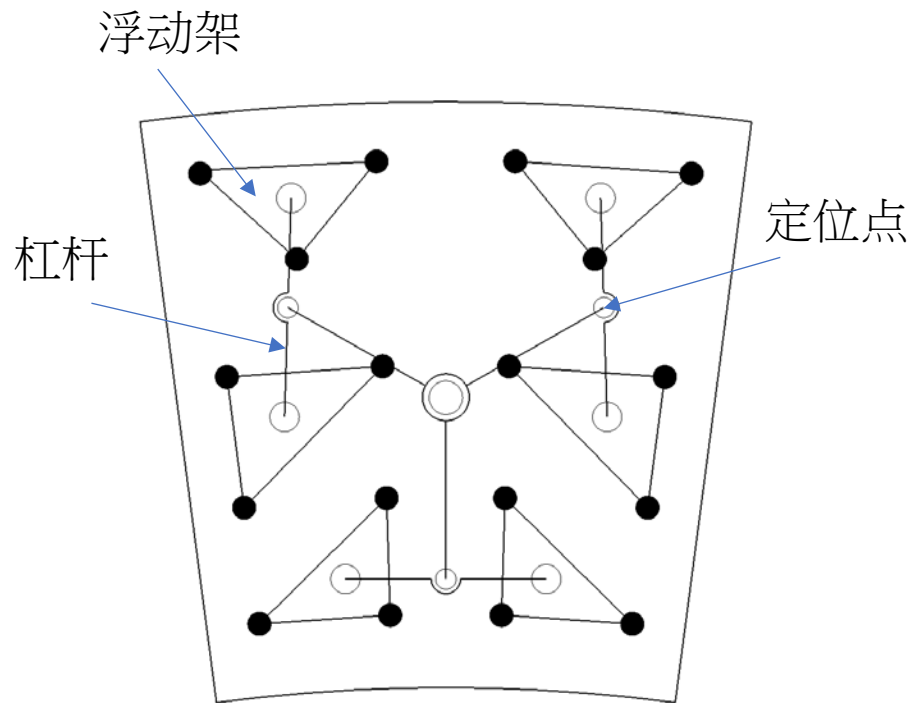
(2) 底、侧支撑初步方案

参考实心等厚圆面反射镜最少支撑点准则公式：

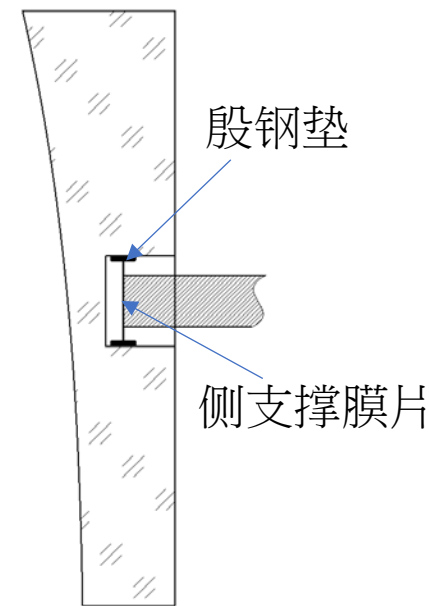
$$N = \left(\frac{1.5r^2}{t} \right) \left(\frac{\rho}{E\delta} \right)^{0.5}$$

以及子镜形状为扇形的特点

➡ 18点底支撑



whiffletree浮动底支撑



中心膜片侧支撑

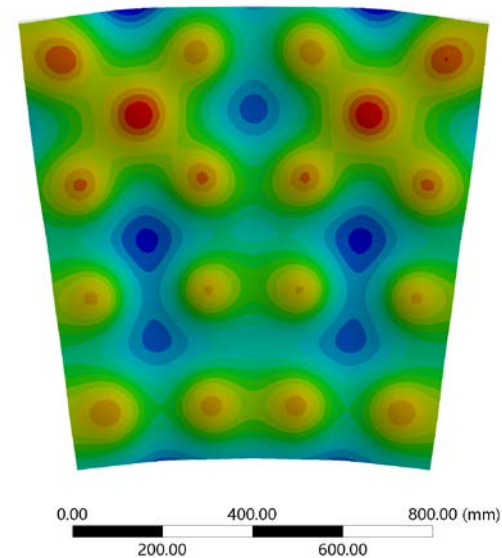
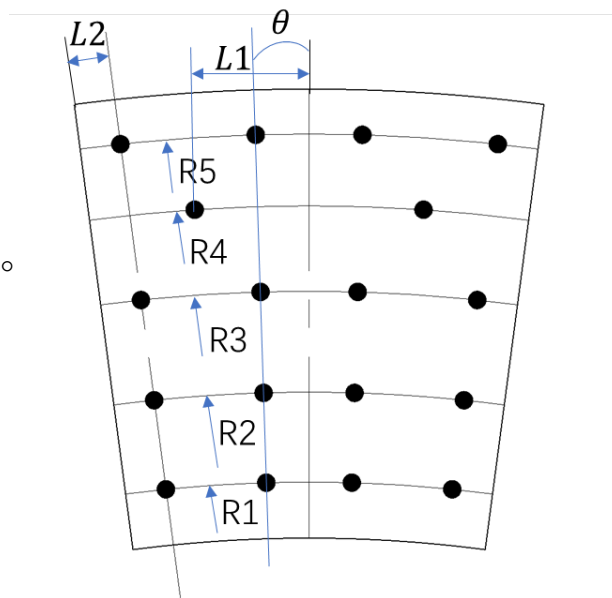
侧支撑：子镜重心平面内

(2) 底支撑优化

优化目标：子镜水平位置反射面轴向面型PV值。

变量：R1, R2, R3, R4, R5, L1, L2, θ

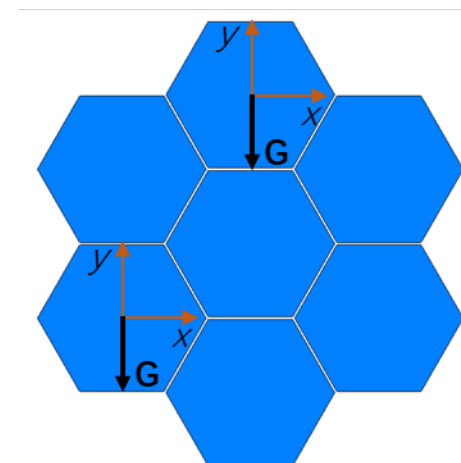
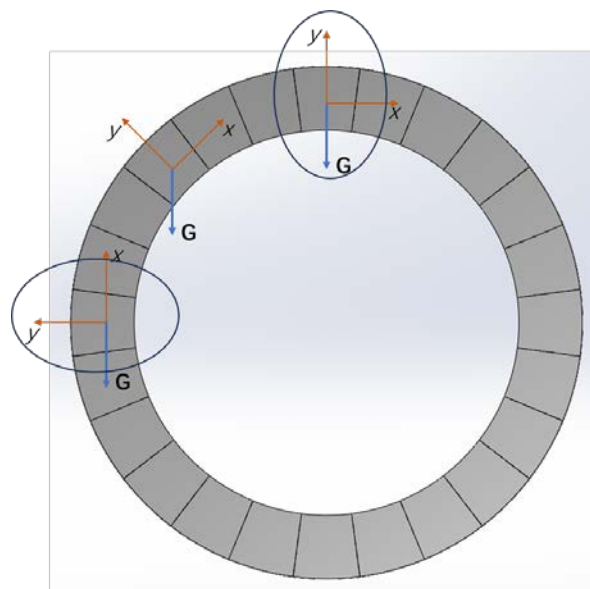
约束： $\sigma_{\max} \leq [\sigma]$

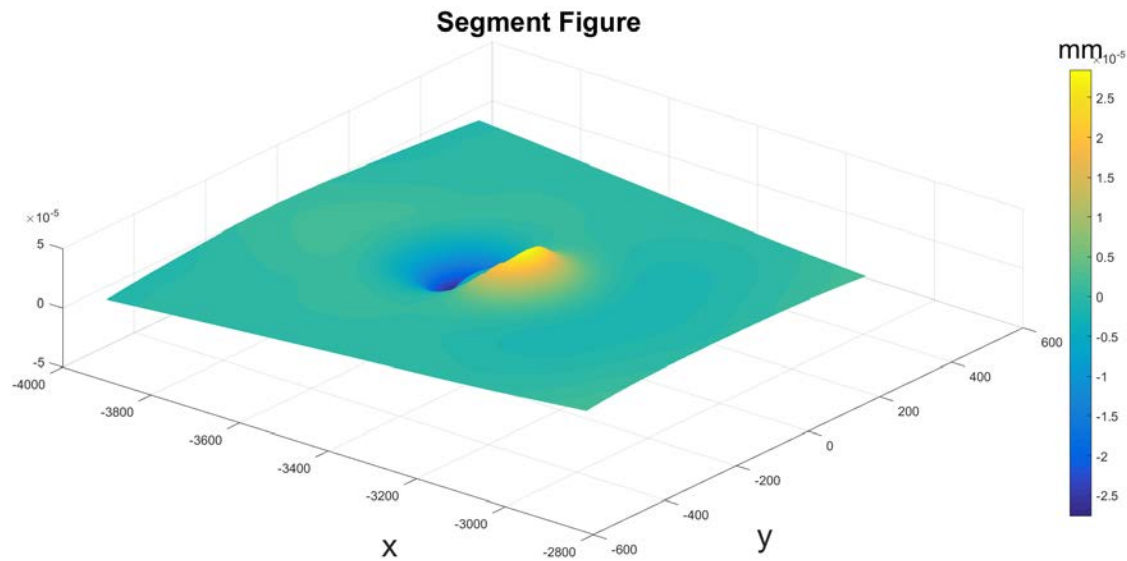
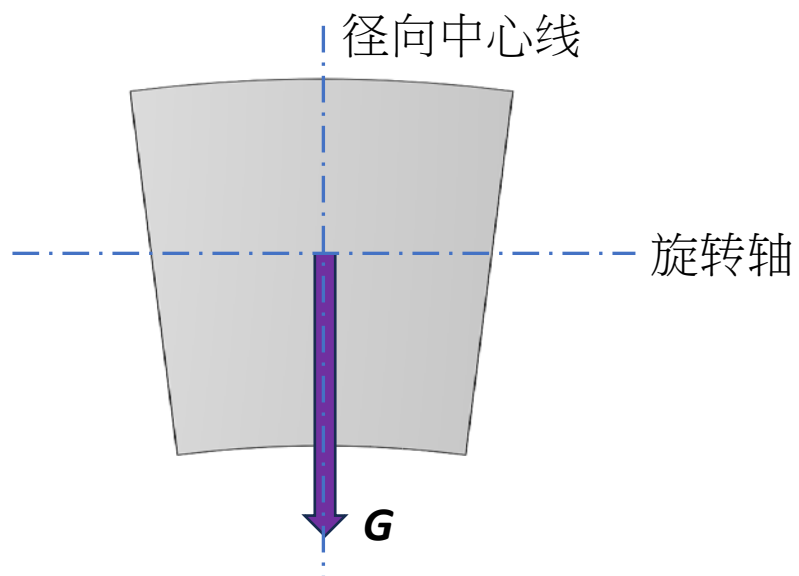


$PV = 31.85nm$
 $RMS = 6.25nm$

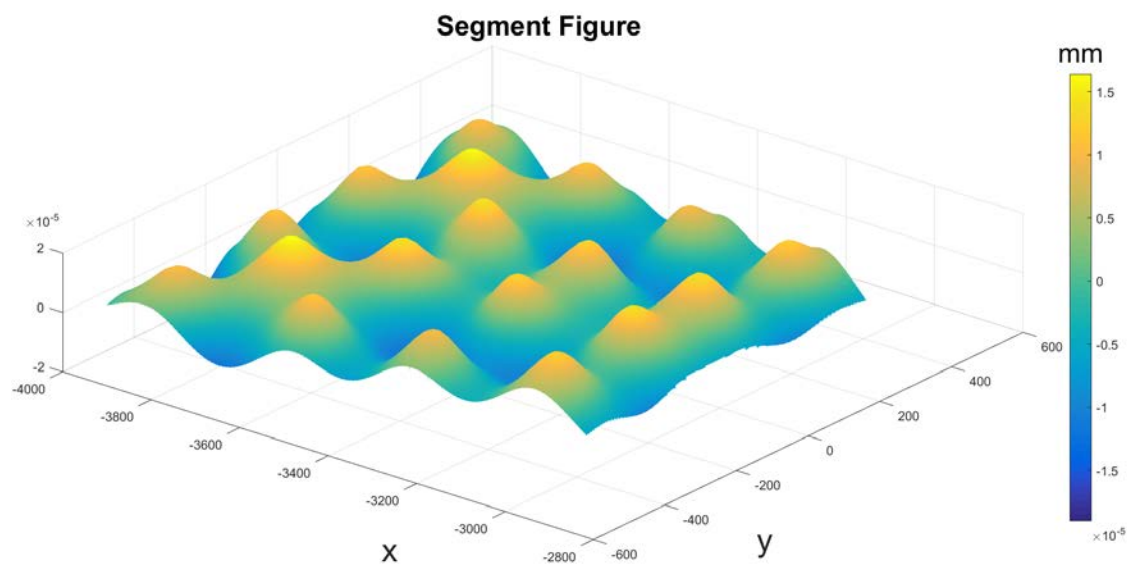
(3) 不同重力方向下子镜面型变化

- 望远镜指向不同高度角时，作用在子镜上的重力分量不同；
- 由于扇形子镜几何形状对称性弱，不同位置处子镜上的重力分量也不同。

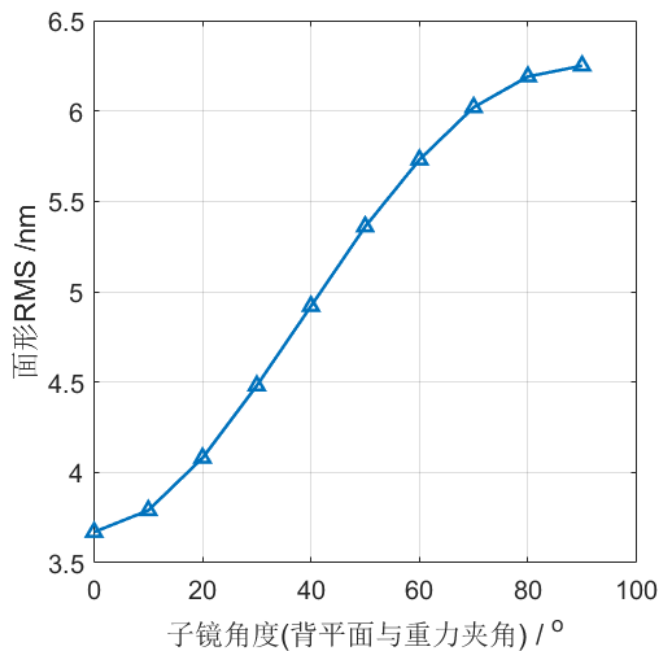
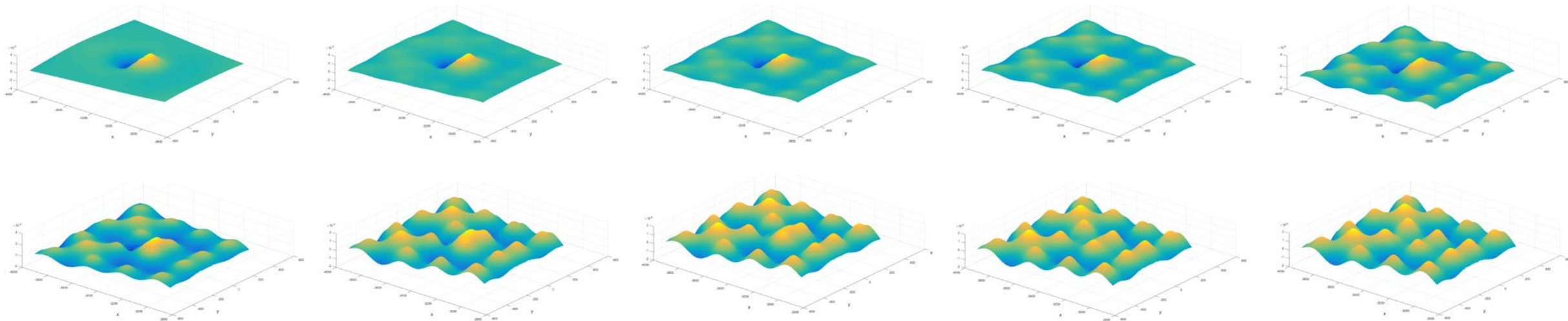




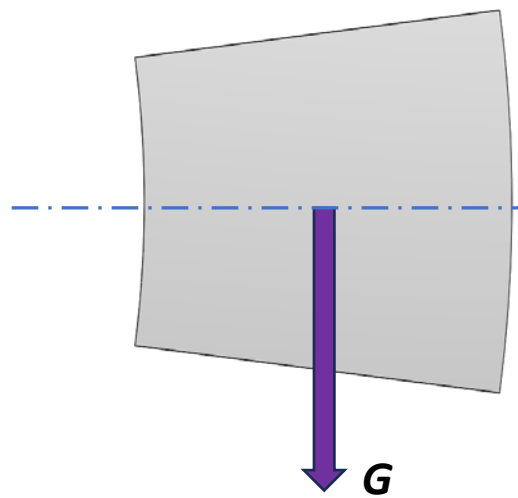
PV: 56.26nm
RMS: 3.67nm



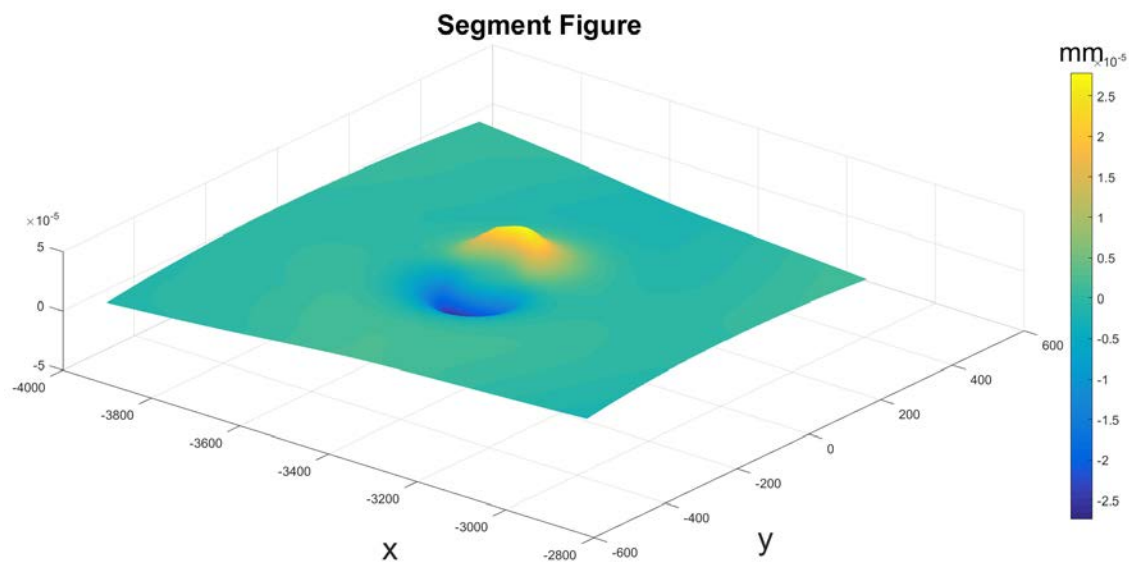
PV: 35.47nm
RMS: 6.25nm



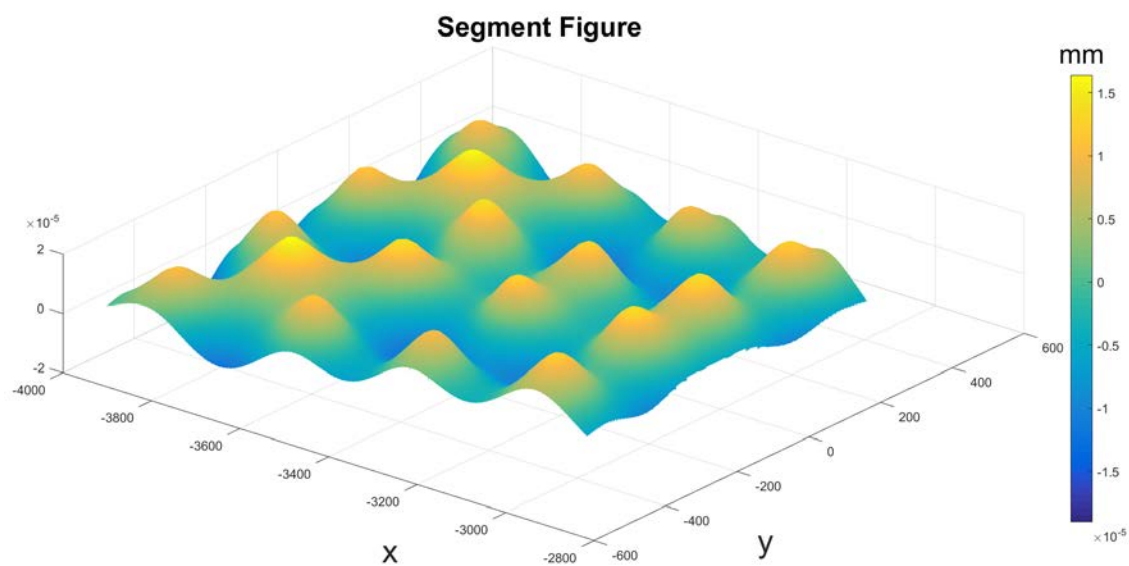
重力与背平面夹角	PV	RMS
0	56.26	3.67
10	55.47	3.79
20	53	4.08
30	48.91	4.48
40	43.34	4.92
50	36.46	5.36
60	33.08	5.73
70	33.71	6.02
80	35.13	6.19
90	35.47	6.25



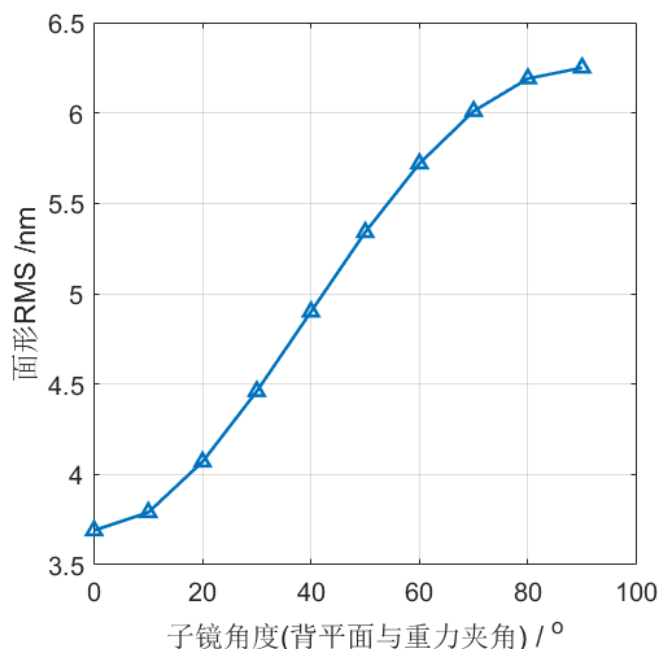
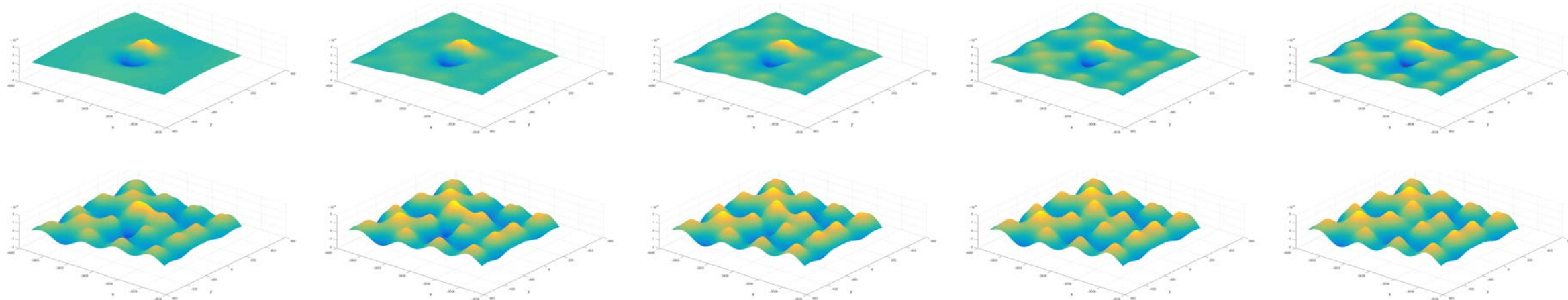
旋转轴
(径向中心线)



PV: 55.24nm
RMS: 3.69nm



PV: 35.47nm
RMS: 6.25nm

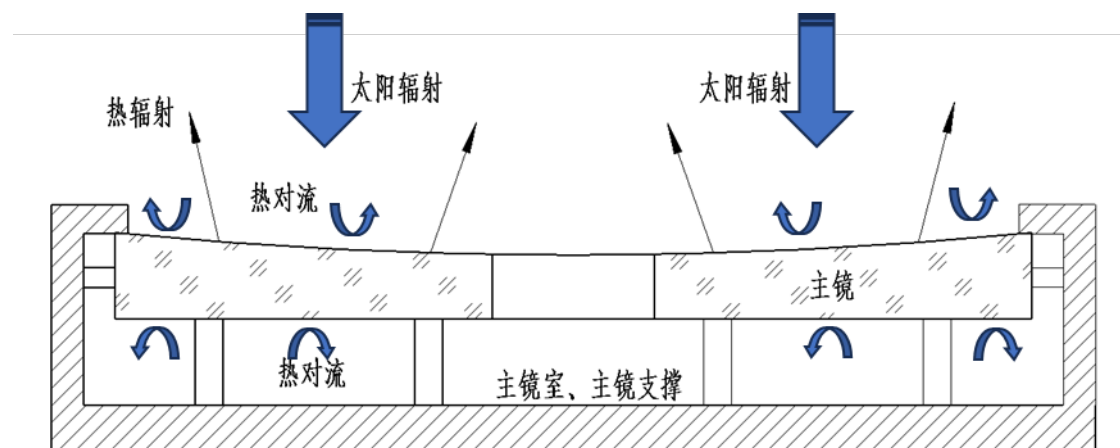


重力与背平面夹角	PV/nm	RMS/nm
0	55.24	3.69
10	54.39	3.79
20	51.9	4.07
30	47.82	4.46
40	42.55	4.9
50	37.02	5.34
60	32.14	5.72
70	33.69	6.01
80	35.11	6.19
90	35.47	6.25

3、子镜热变形分析

环境温度变化及主镜内部温度梯度 → 主镜面型变化 → 影响望远镜光学系统的成像质量。

太阳望远镜独特的热环境



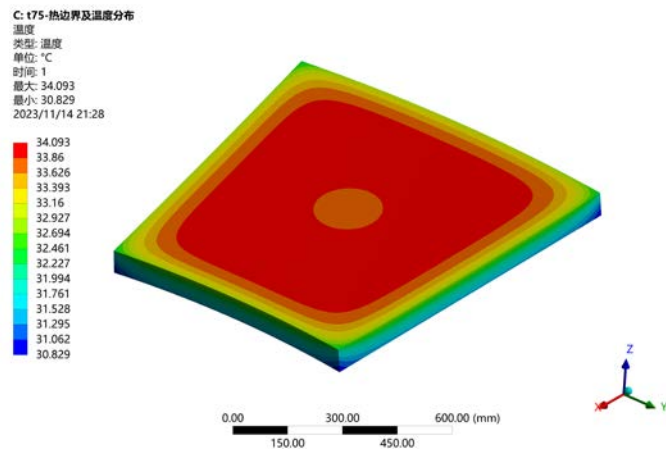
镜面注入的热功率密度: $100W/m^2$

环境温度: 初始 $22\text{ }^\circ\text{C}$, 稳态 $30\text{ }^\circ\text{C}$

对流换热系数: $15W/m^2/K$

忽略辐射换热

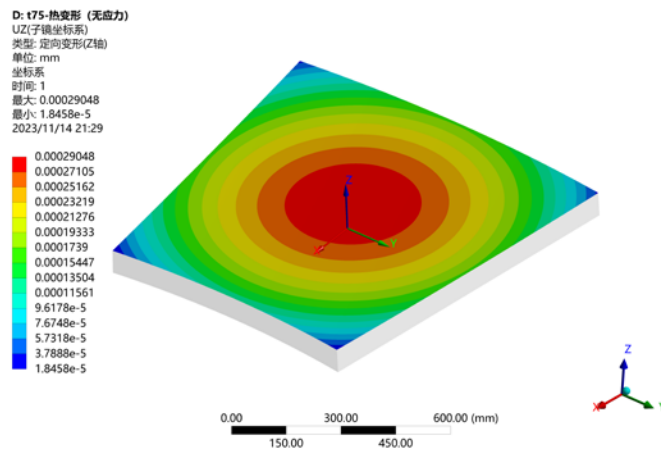
温度分布



$$T_{max} = 34.093^\circ\text{C}$$

$$T_{min} = 30.829^\circ\text{C}$$

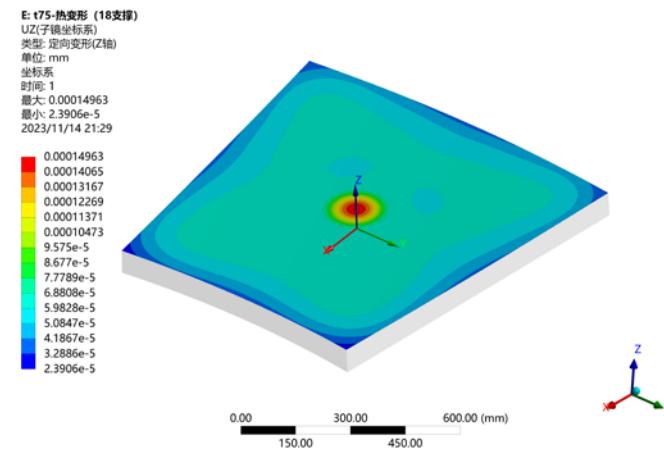
无约束应力自由膨胀热变形



$$\text{失焦 } \Delta f = 367.0211\mu\text{m}$$

$$\text{面形 RMS} = 0.5108\text{nm}$$

支撑约束下热变形



$$\text{失焦 } \Delta f = 66.719\mu\text{m}$$

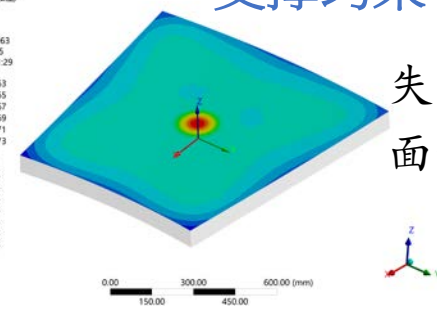
$$\text{面形 RMS} = 8.7363\text{nm}$$

对流换热系数: $50W/m^2/K$
(模拟强制对流换热制冷)

对流换热系数:
 $15W/m^2/K$

支撑约束下热变形

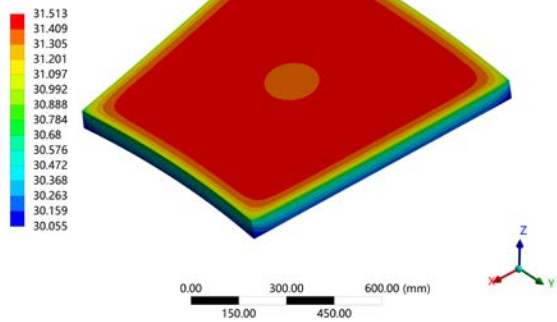
E: 175-热变形 (18支撑)
UZ(子镜坐标系)
类型: 定向变形(Z轴)
单位: mm
坐标系
时间: 1
最大: 0.00014963
最小: 2.3906e-5
2023/11/14 21:29



失焦 $\Delta f = 66.719\mu m$
面形 $RMS = 8.7363nm$

温度分布

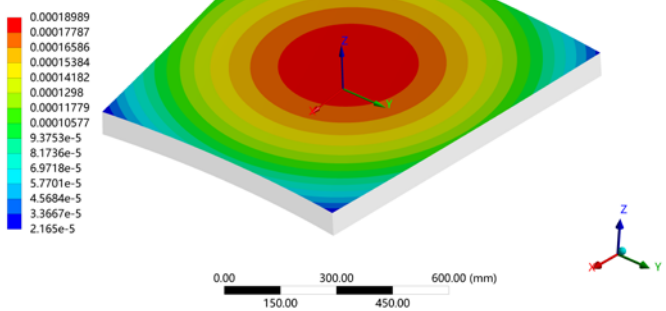
D: 稳态热
温度
类型: 温度
单位: °C
时间: 1
最大: 31.513
最小: 30.055
2023/11/14 16:55



$T_{max} = 31.513^{\circ}C$
 $T_{min} = 30.055^{\circ}C$

无约束应力自由膨胀热变形

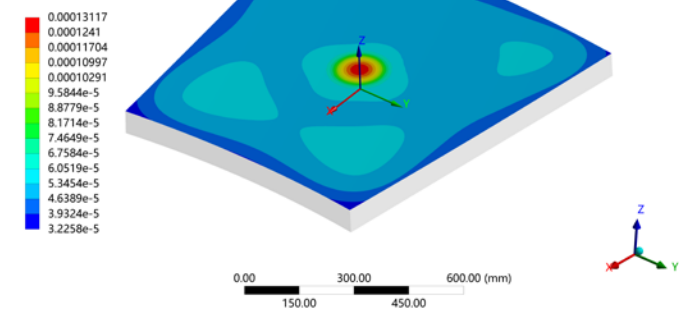
D: 175-热变形 (无应力)
UZ(子镜坐标系)
类型: 定向变形(Z轴)
单位: mm
坐标系
时间: 1
最大: 0.00018989
最小: 2.165e-5
2023/11/14 19:41



失焦 $\Delta f = 235.0450\mu m$
面形 $RMS = 0.3076nm$

支撑约束下热变形

E: 175-热变形 (18支撑)
UZ(子镜坐标系)
类型: 定向变形(Z轴)
单位: mm
坐标系
时间: 1
最大: 0.00013117
最小: 3.2258e-5
2023/11/14 19:44

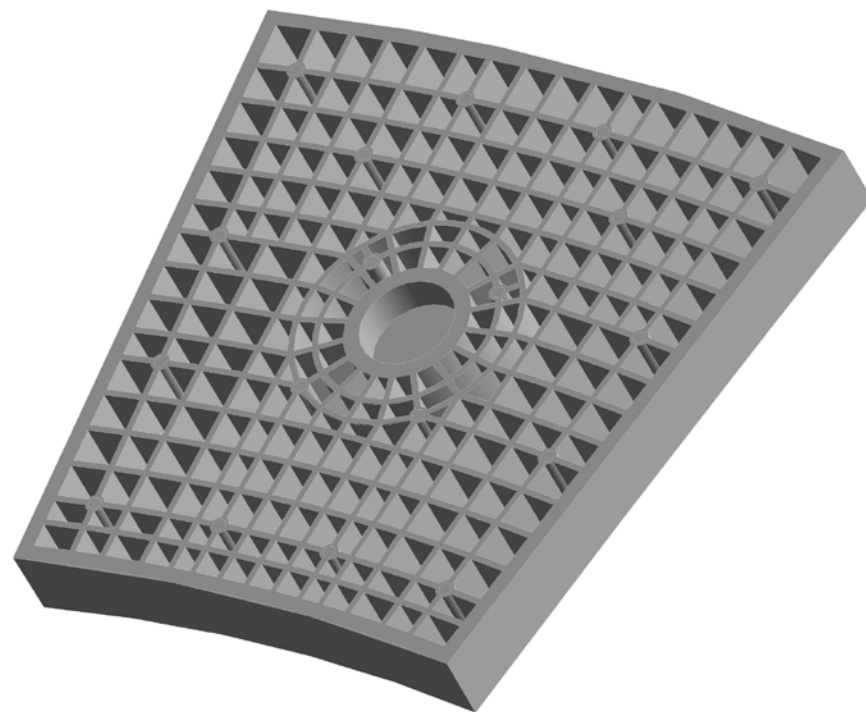


失焦 $\Delta f = 45.9739\mu m$
面形 $RMS = 7.3186nm$

蜂窝轻量化子镜方案热分析

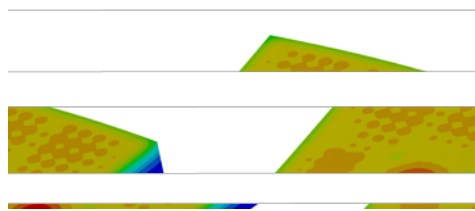
扇形轻量化孔

厚度：**120mm**



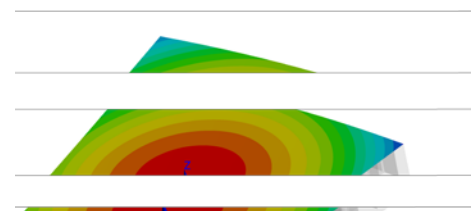
15W/m²/K

温度分布



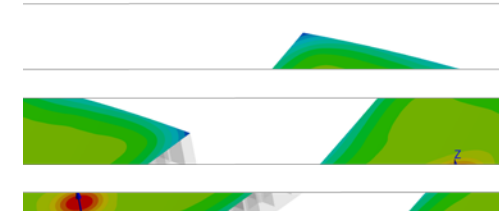
$T_{max} = 35.909^{\circ}\text{C}$
 $T_{min} = 30.094^{\circ}\text{C}$

无约束应力自由膨胀热变形



失焦 $\Delta f = 707.2620 \mu\text{m}$
面形 $RMS = 1.9247 \text{nm}$

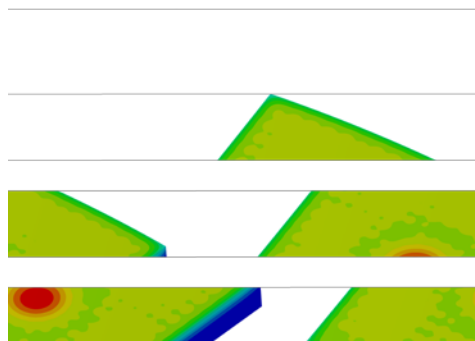
支撑约束下热变形



失焦 $\Delta f = 136.3279 \mu\text{m}$
面形 $RMS = 11.4166 \text{nm}$

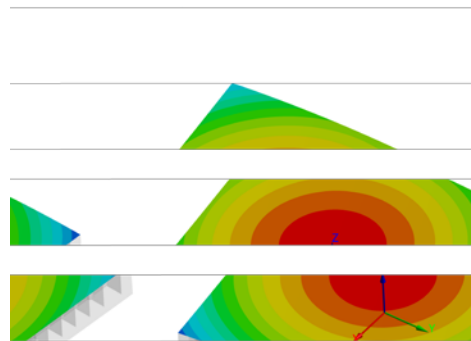
50W/m²/K

温度分布



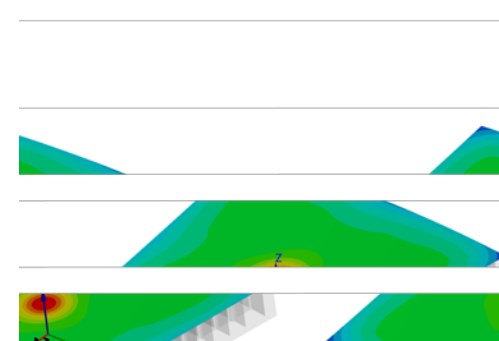
$T_{max} = 34.123^{\circ}\text{C}$
 $T_{min} = 30.001^{\circ}\text{C}$

无约束应力自由膨胀热变形



失焦 $\Delta f = 413.7807 \mu\text{m}$
面形 $RMS = 1.4315 \text{nm}$

支撑约束下热变形



失焦 $\Delta f = 87.3024 \mu\text{m}$
面形 $RMS = 8.2807 \text{nm}$

4、子镜面型误差的传播

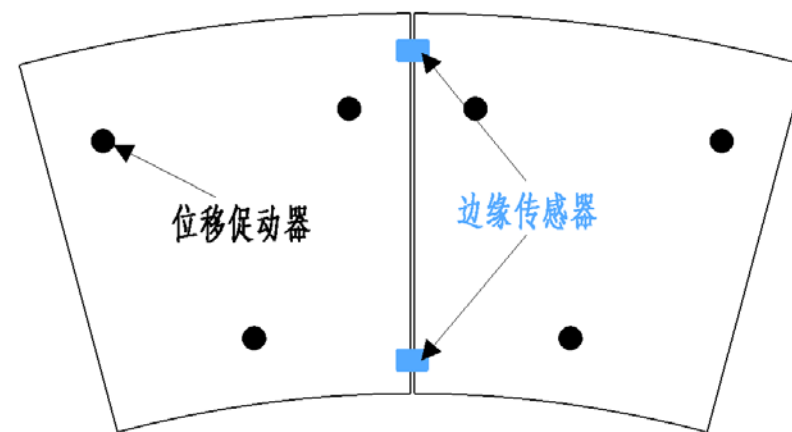
子镜面型误差对拼接镜面主动光学的影响?

$$s = Az$$

s : 边缘高度差(边缘传感器读数值)

z : 促动器位移量

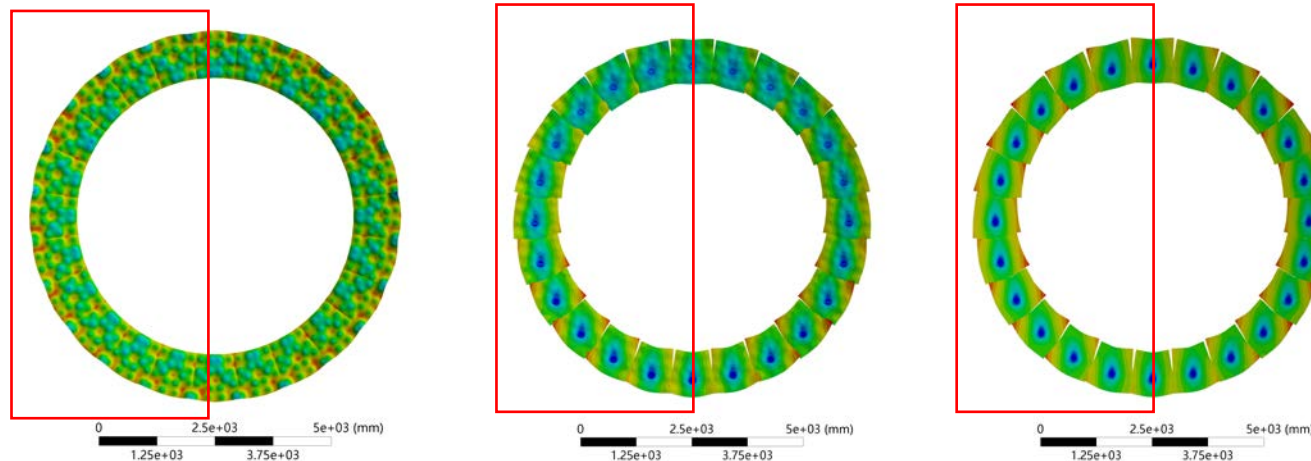
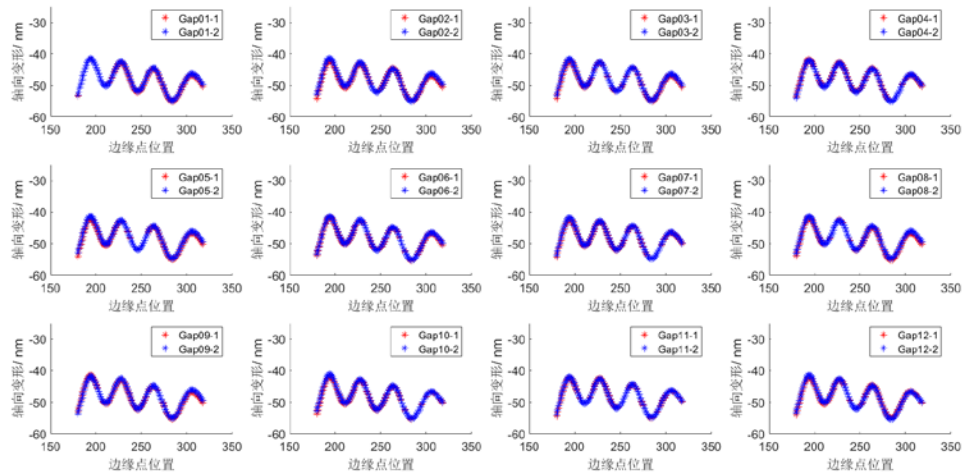
A : 促动器位移量到边缘传感器读数值
的传递矩阵
(主动光学控制矩阵)



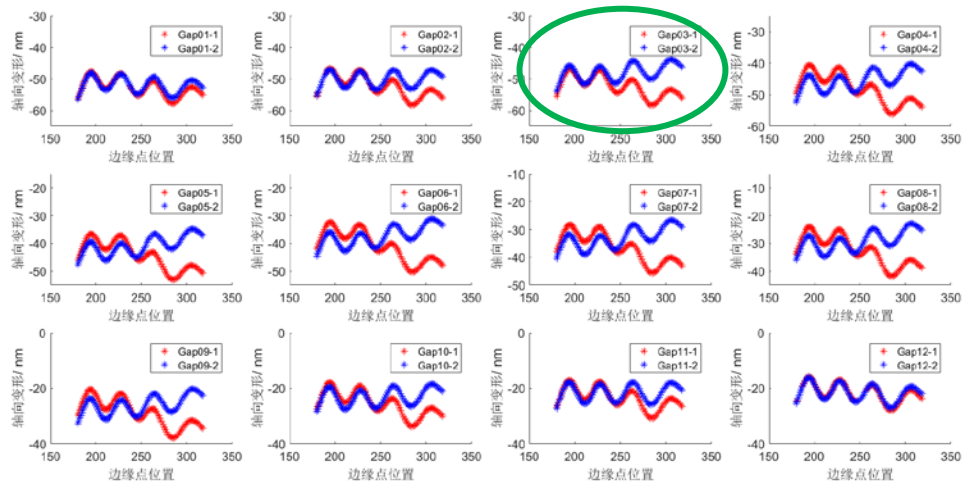
子镜面型误差 \longrightarrow 边缘高度差 $\xrightarrow{\text{误差传播}}$ 镜面型精度

望远镜不同高度角下子镜面型在边缘处的反映 (仅考虑重力变形)

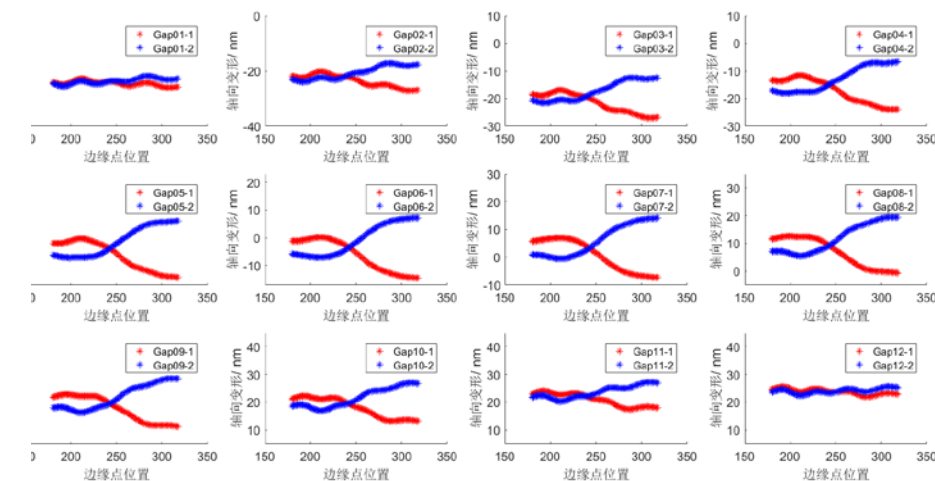
90°高度角



50°高度角



0°高度角

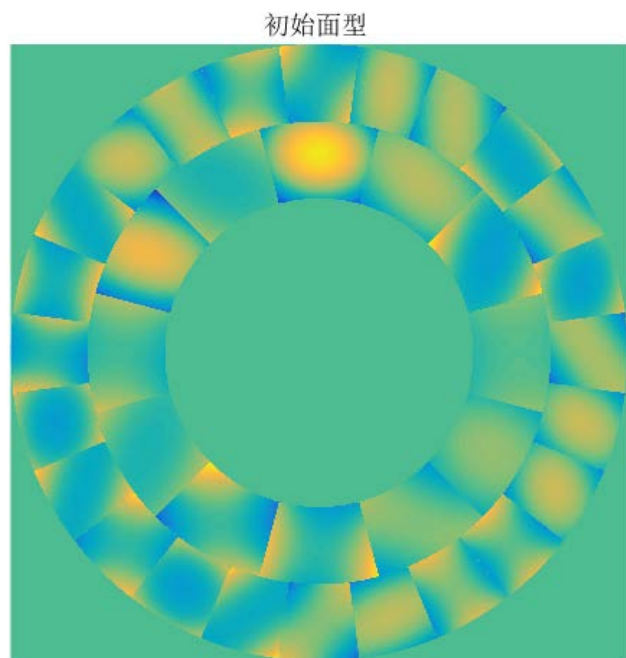


Example:

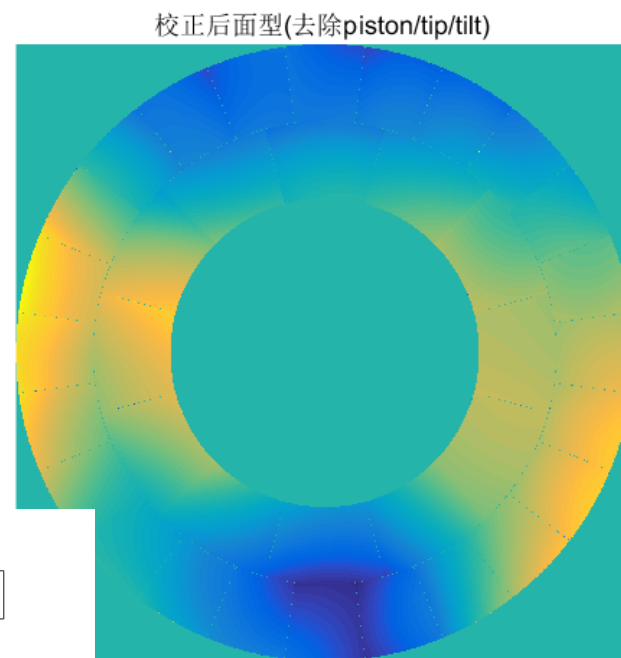
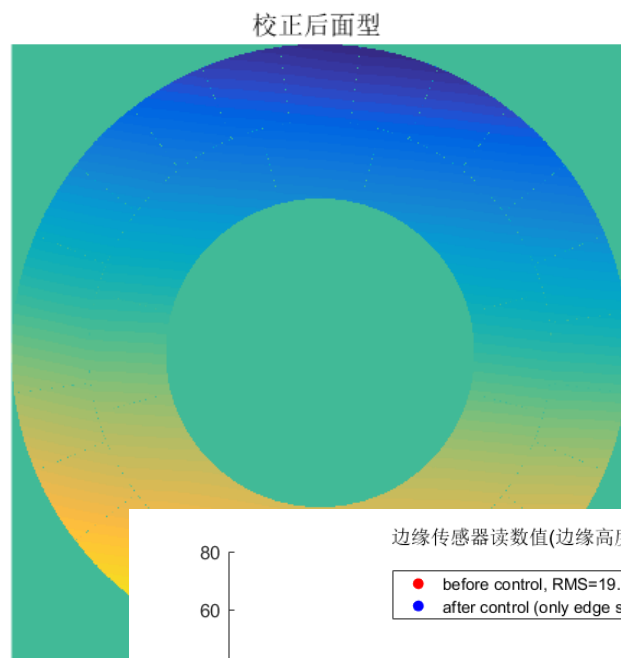
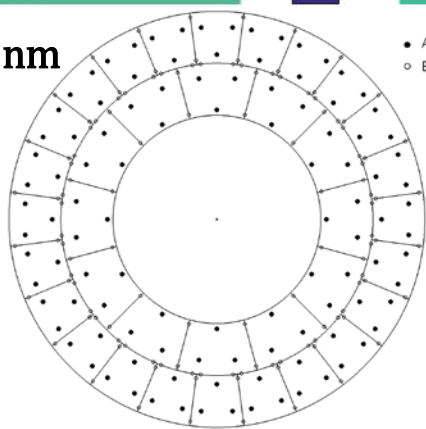
两环拼接

每个子镜添加泽尼克第4到第6项随机像差(一个失焦、两个像散)

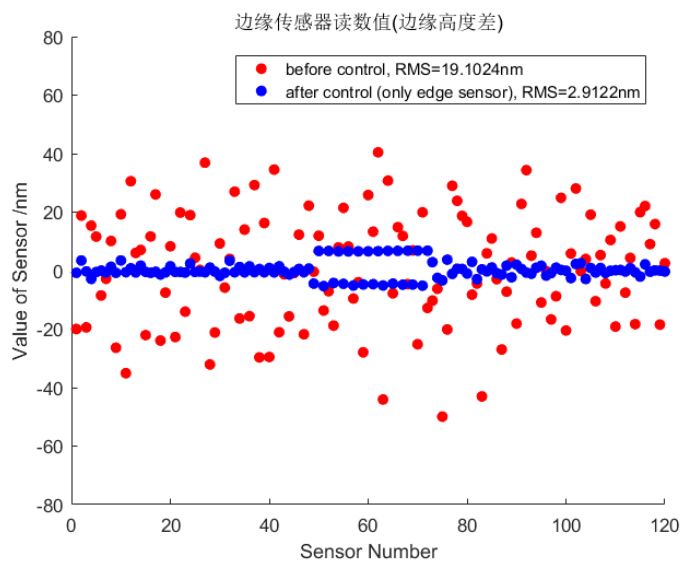
仅边缘探测



RMS—10.0171nm



RMS—210.6645nm



对子镜的面型提出要求，以减少子镜面型误差对主动控制的影响。

这种对子镜面型的要求最终会反映在对子镜自身结构、子镜支撑、热控、以及加工精度的要求上。

4、总结

- 为CGST提出whiffletree浮动底支撑和中心膜片侧支撑的子镜支撑方案，并进行了子镜的重力变形和热变形的仿真分析。
- 初步评估了子镜面型误差的传播对主镜整体面型的影响。
- 下一步工作：基于有限元仿真模拟的子镜面型来分析面型误差的传播。并形成对子镜在接近实际工况下的面型要求。为子镜加工、支撑设计、热控等提供参考或性能指标。



中国科学院云南天文台

YUNNAN OBSERVATORIES, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

谢谢!

Thank you for listening

