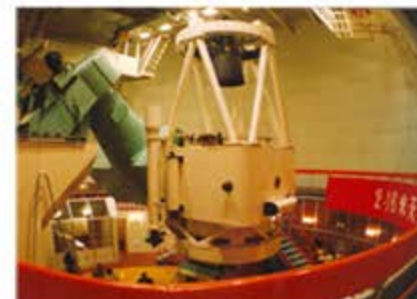


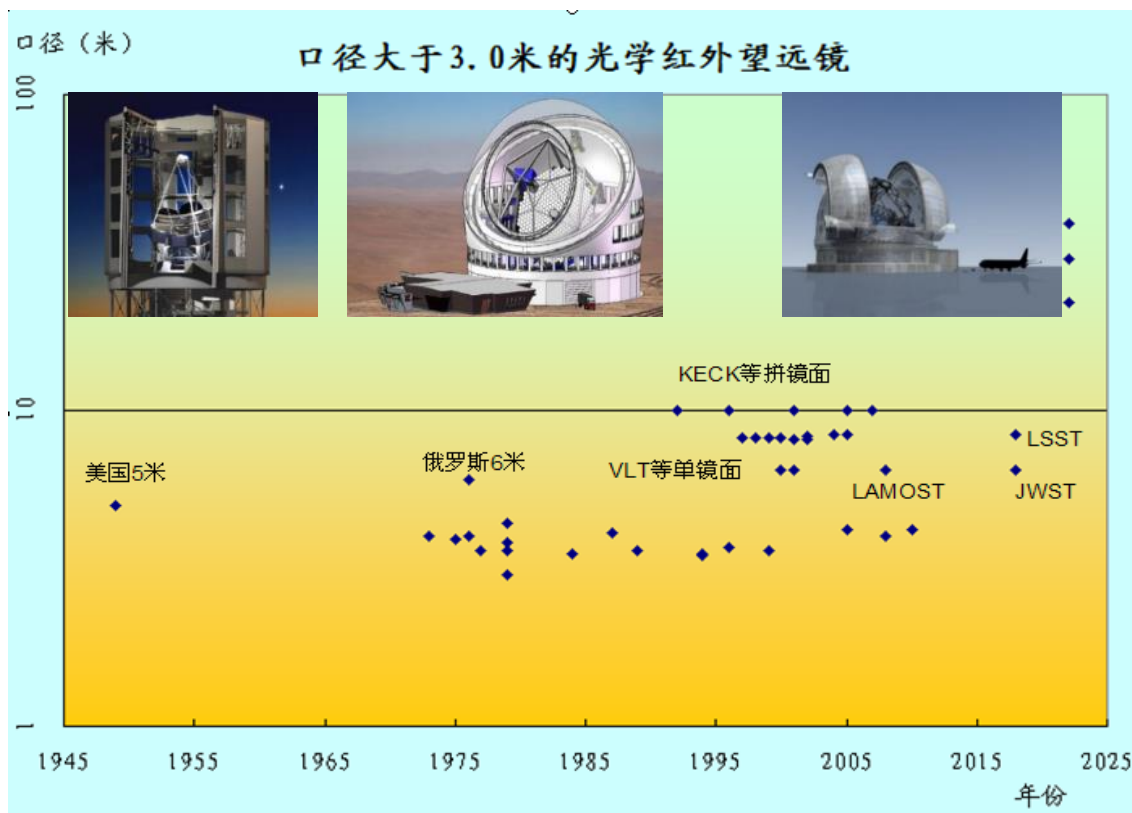
基于计算全息的大口径天文镜面检测技术

黄亚

中国科学院南京天文光学技术研究所

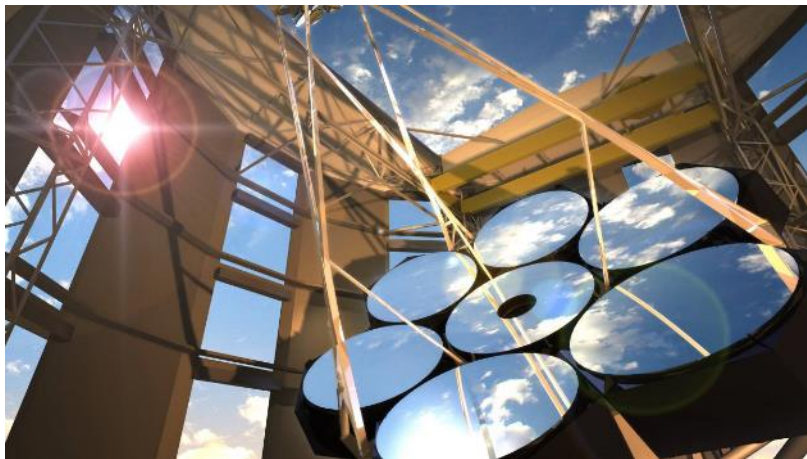


研究背景



序号	名称	口径(m)	焦比	子镜数量	子镜尺寸(m)	国别
1	GMT	25	f/0.7	7	8.4	美国
2	TMT	30	f/1	492	1.44	美国
3	ELT	39.2	f/0.88	798	1.44	欧南台
4	LOT	12	f/1.5	84	1.44	中国

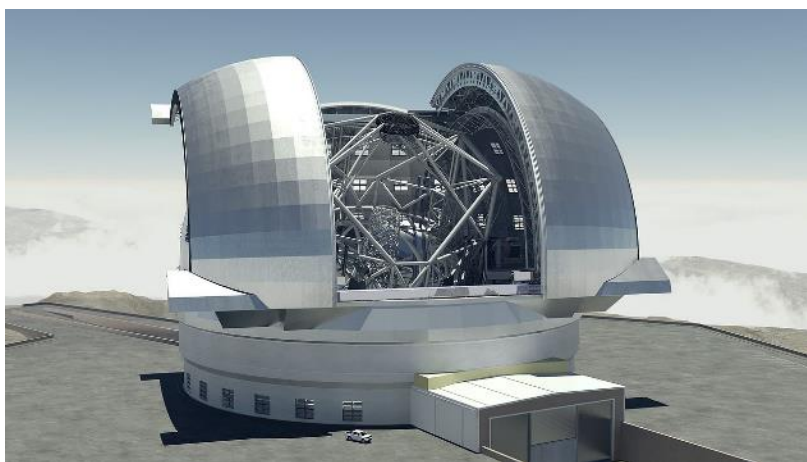
研究背景



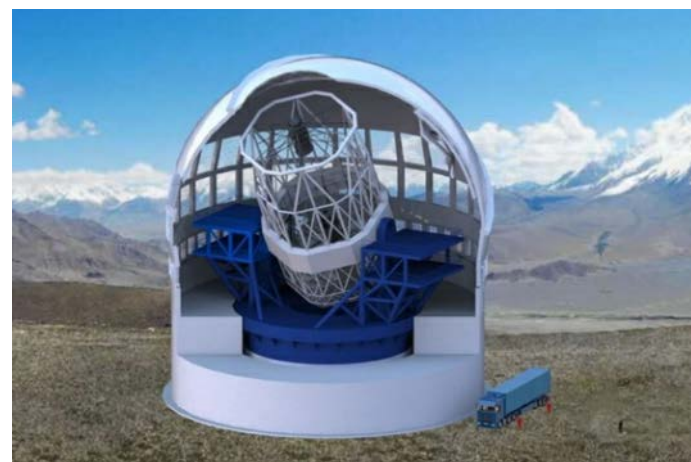
大麦哲伦望远镜，GMT



三十米望远镜，TMT



欧洲极大天文望远镜，ELT

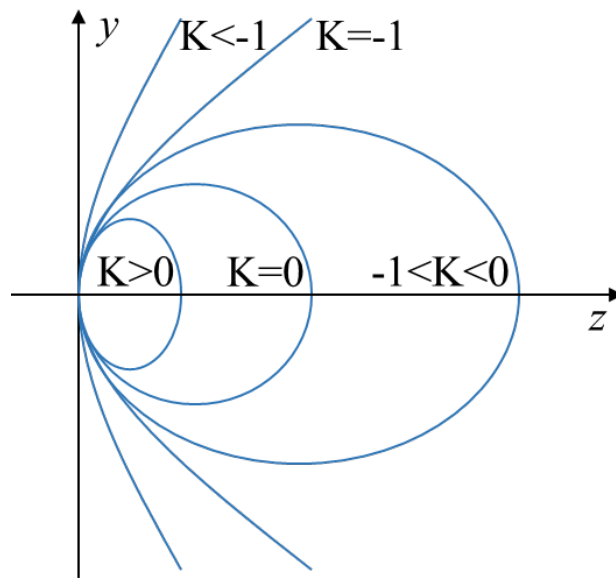
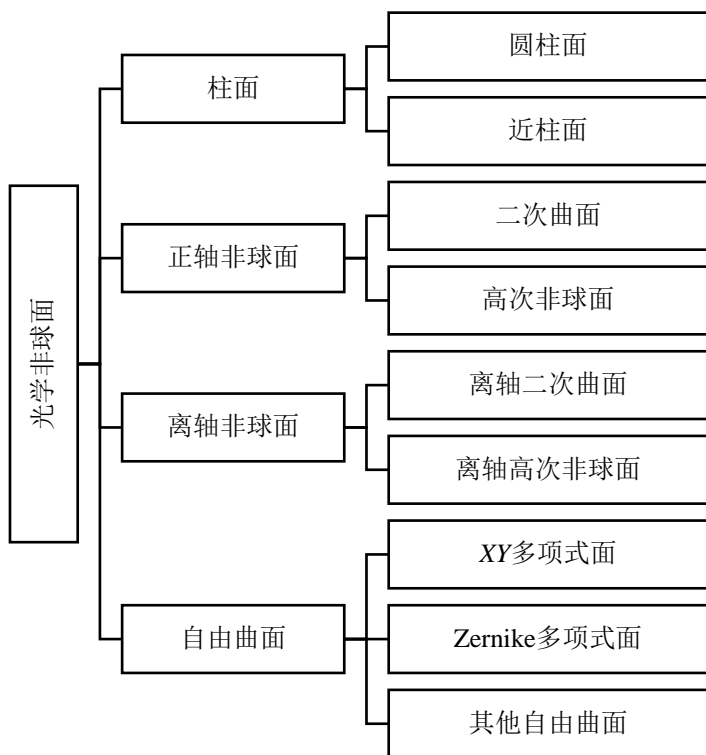


中国，12米光学/红外望远镜，LOT

研究背景

□ 非球面定义

相比于传统的平面、球面元件，非球面具有更大的自由度和灵活性，形状多样，可以更有效的校正像差，改善成像质量，减少光学系统所需元器件的数量，从而精简系统结构，减轻系统重量。

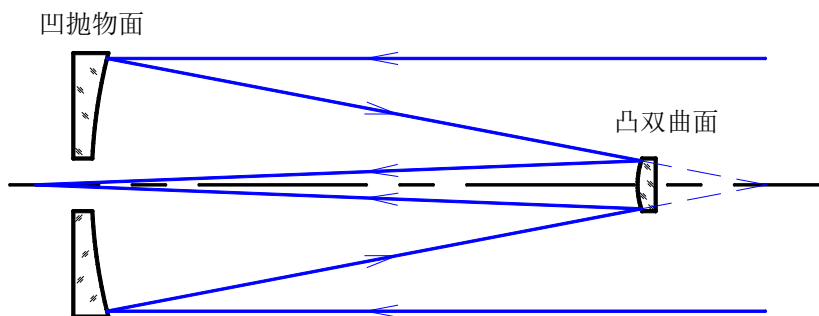


$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N a_i r^{2(i+1)}$$

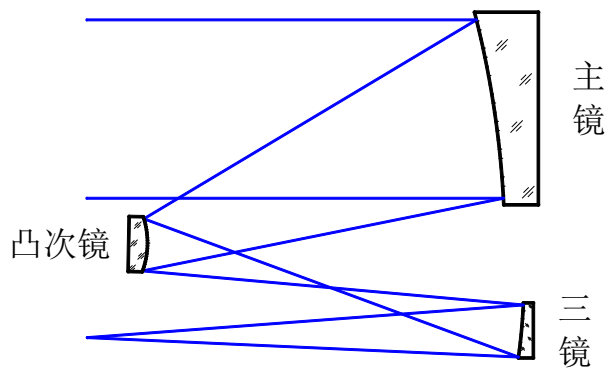
研究背景

□ 非球面在天文领域应用

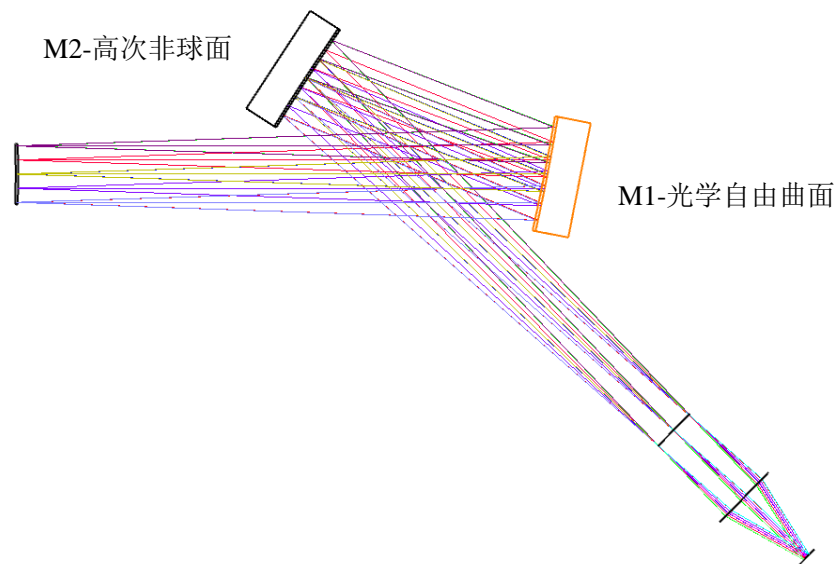
望远系统



离轴三反系统



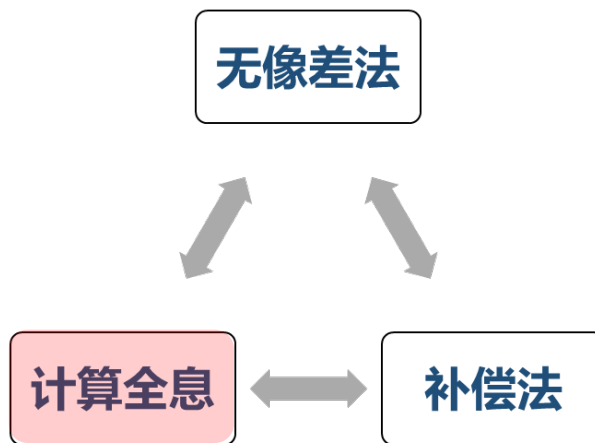
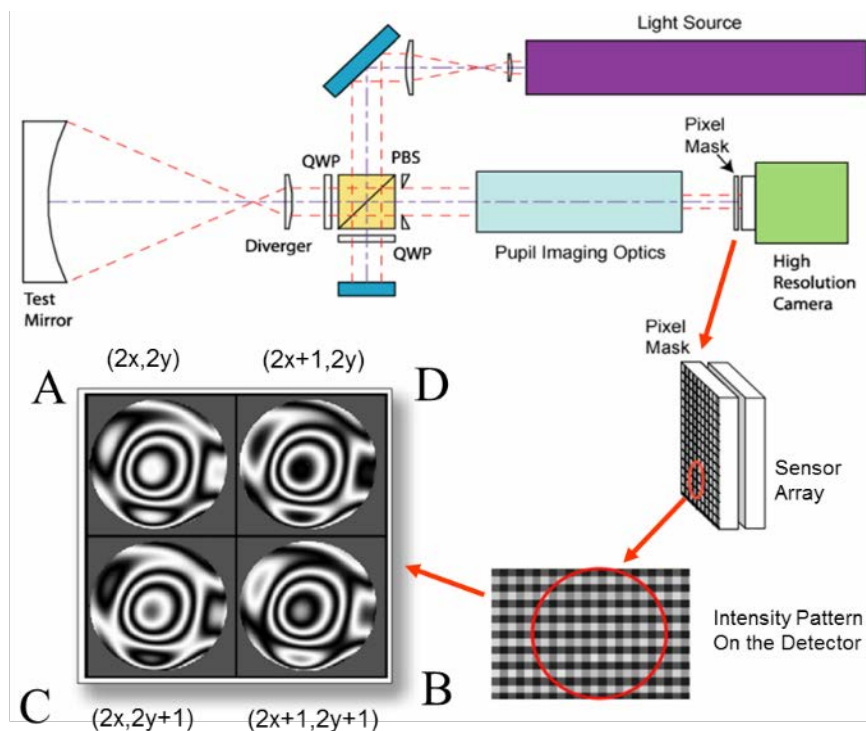
大视场光谱仪准直系统



天文非球面镜面干涉检验

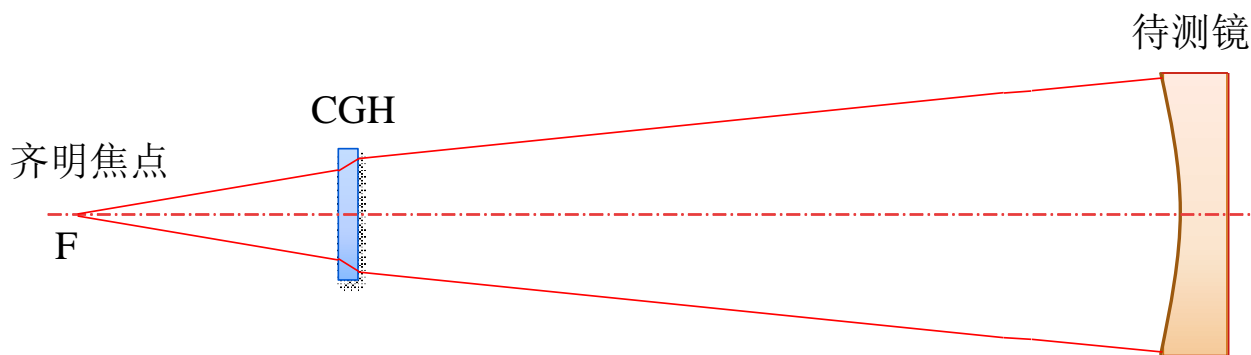
□ 非球面干涉检验方法

对高精度的非球面镜面精磨抛光阶段的检测，主要采用非接触的干涉测量方式，借助商用干涉仪完成。

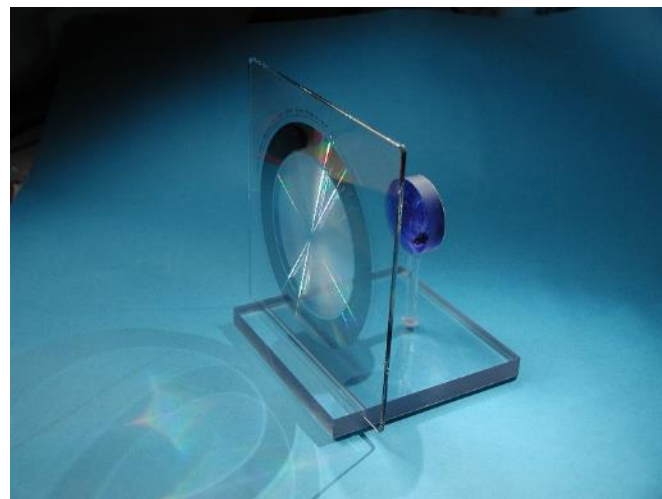
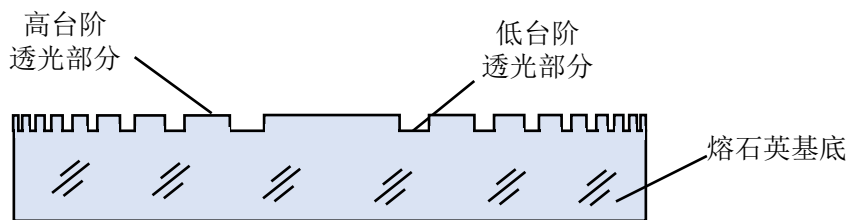


天文非球面镜面干涉检验

□ 计算全息零位检测原理



- ◆ CGH可产生任意形状的波前，可用于复杂面形的零位检测
- ◆ 测量精度高，可达 $\lambda/100$ (RMS)



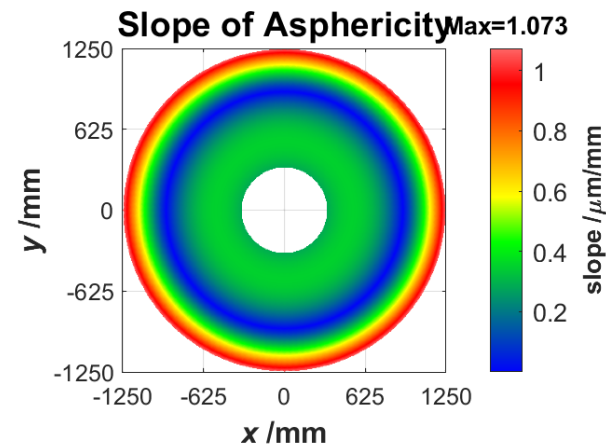
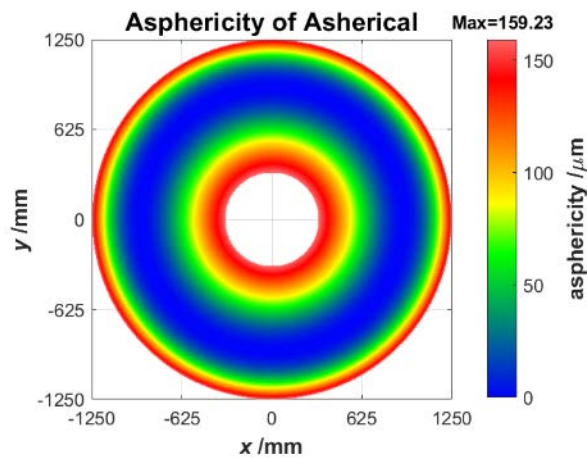
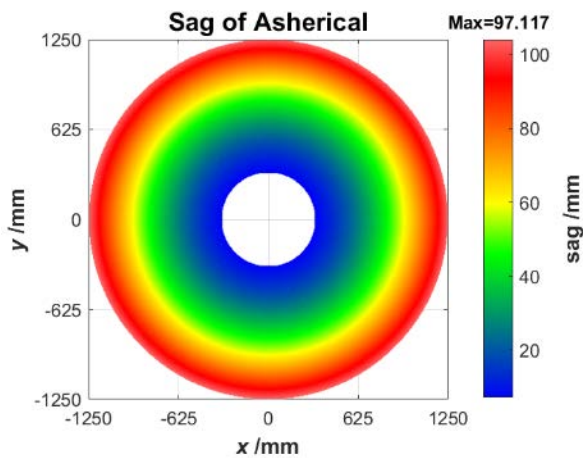
CGH为具有独特光栅结构的衍射光学元件，基于**标量衍射理论**分析，根据特定的微纳结构，生成不同的波前。

天文非球面镜面干涉检验

□ 环形正轴天文望远镜主镜检测

Φ2.5m主镜

天文望远镜主镜通常为二次曲面，口径比较大，而且通常为**环形孔径**，中央需要开孔以保证副镜折转的光路可进入探测组件。

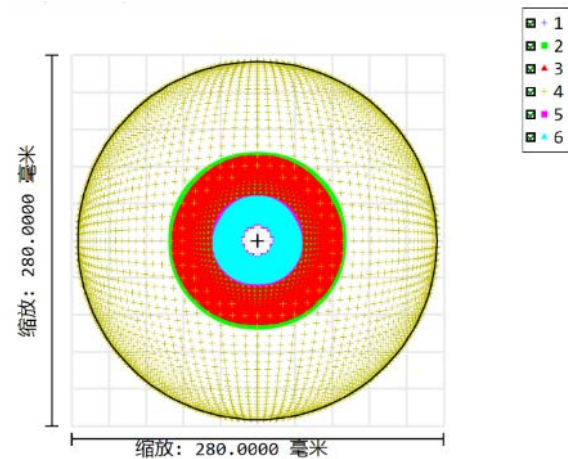
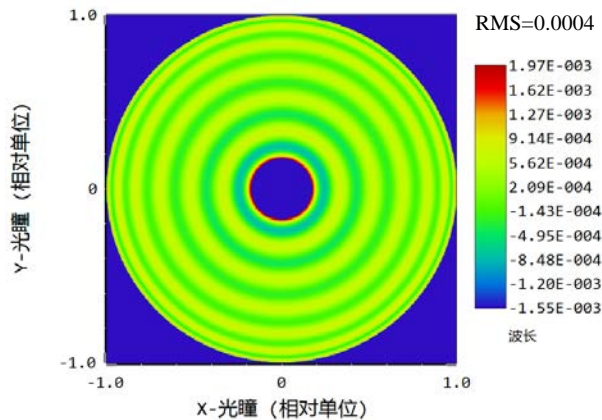
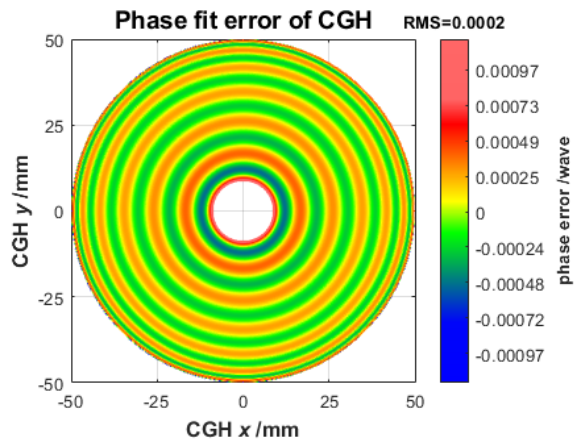
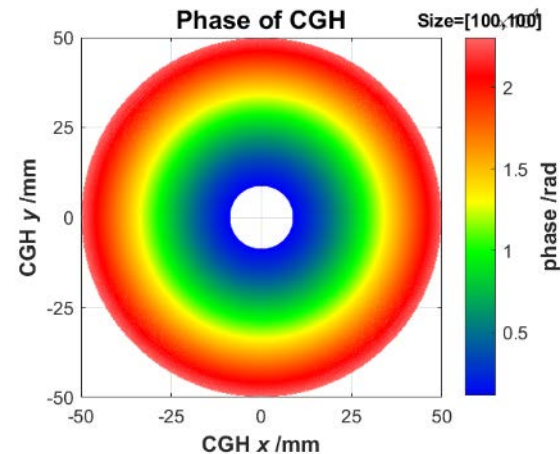
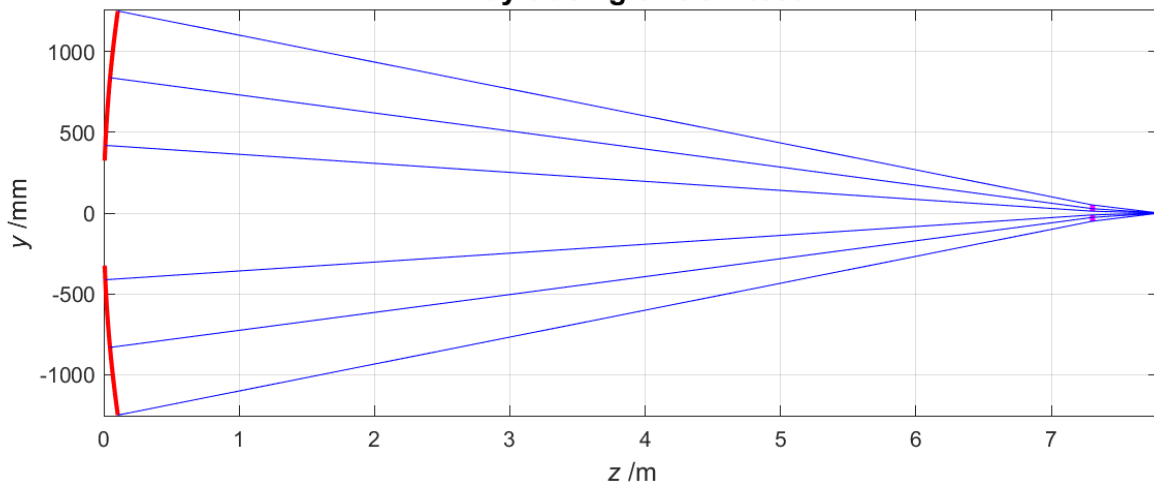


天文非球面镜面干涉检验



□ 环形正轴天文望远镜主镜检测

Ray tracing of CGH test



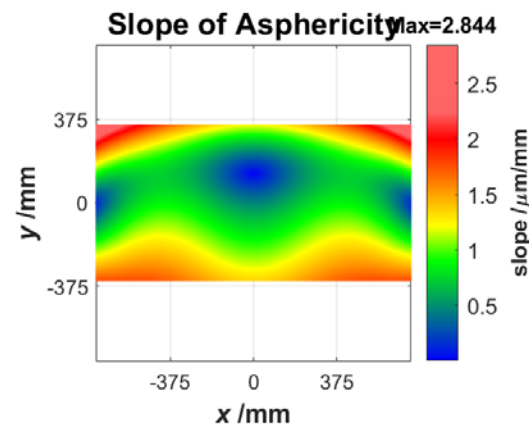
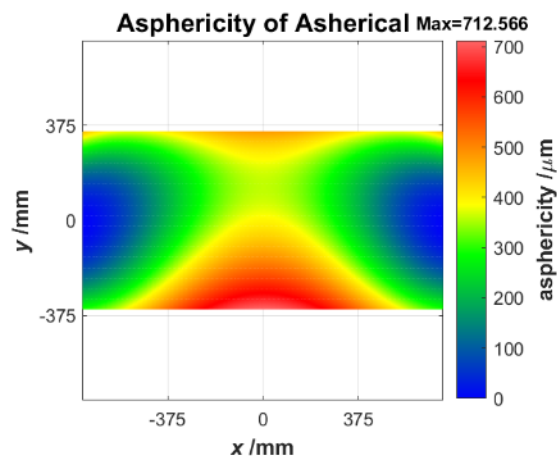
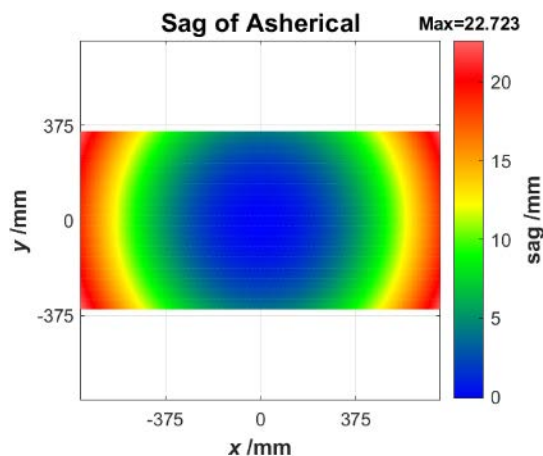
天文非球面镜面干涉检验

□ 矩形光学自由曲面检测

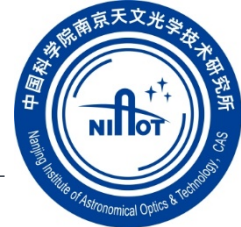
光学自由曲面主要通过通过在平面或者二次曲面基础上叠加高阶多项式的形式。其高阶多项式通常会包含 x 、 y 的交叉项，如**Zernike多项式**、**XY多项式**等，并不具有旋转对称性。光学自由曲面具有更高的设计自由度，在现代天文光学系统中得到了越来越广泛的应用

TMT WFOS COL M1光学自由曲面参数

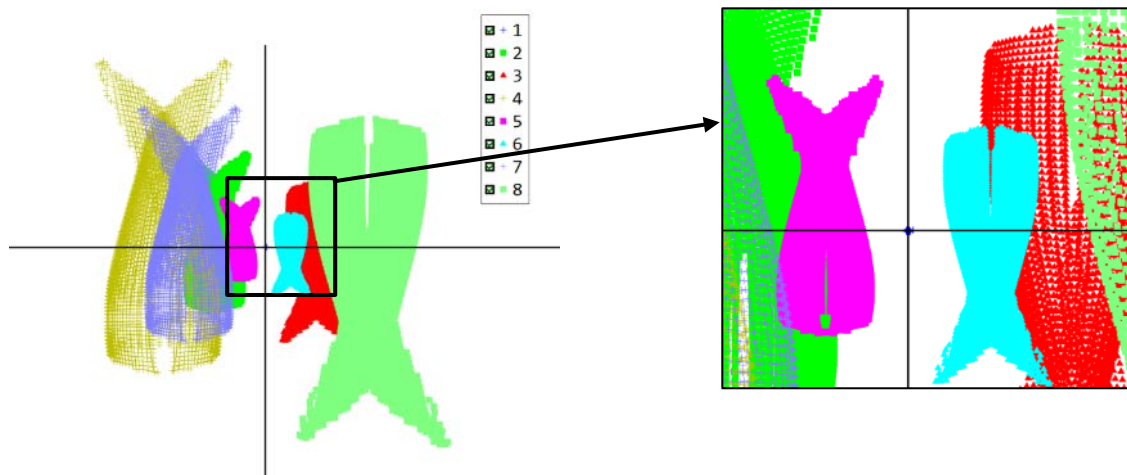
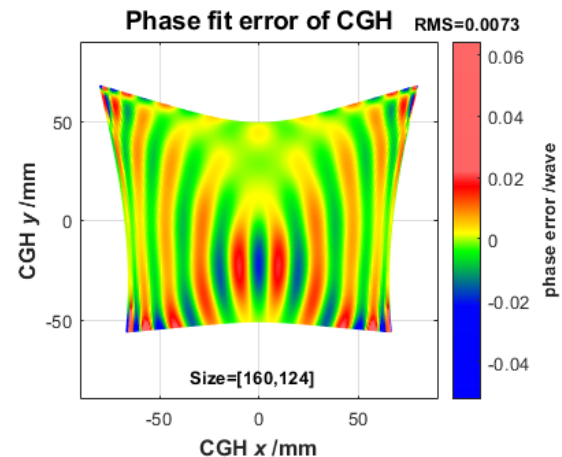
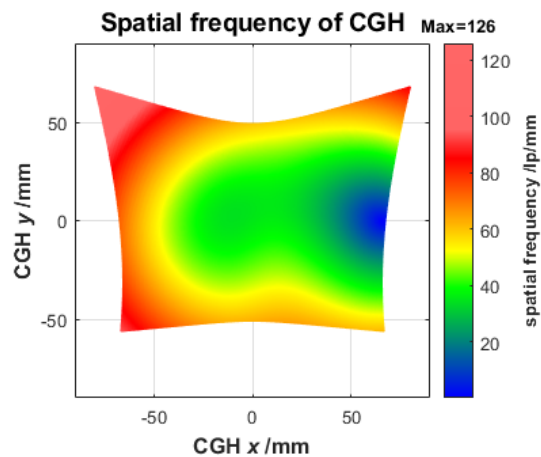
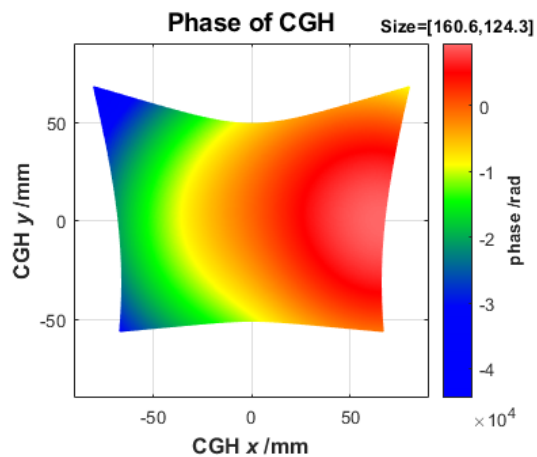
非球面参数	理论值
顶点曲率半径 /mm	-14209
Zernike正交化半径/mm	805 mm
水平像散(Z5)	-0.9577
垂直彗差(Z8)	+0.1867
高级球差(Z9)	+0.0947
通光孔径 /mm ²	1420×700
最大矢高 /mm	22.7
最大非球面度 / μm	712.6



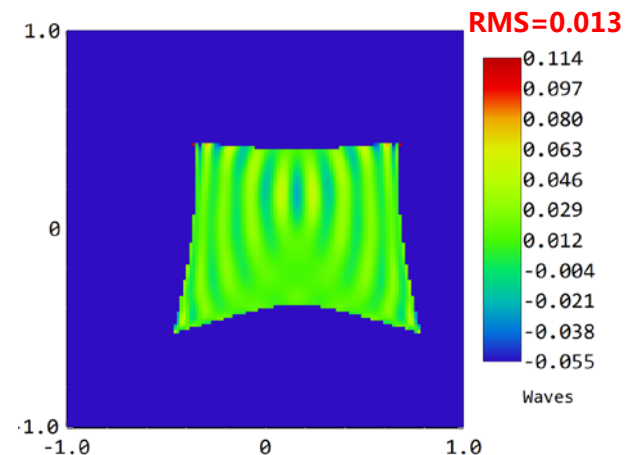
天文非球面镜面干涉检验



□ 矩形光学自由曲面检测

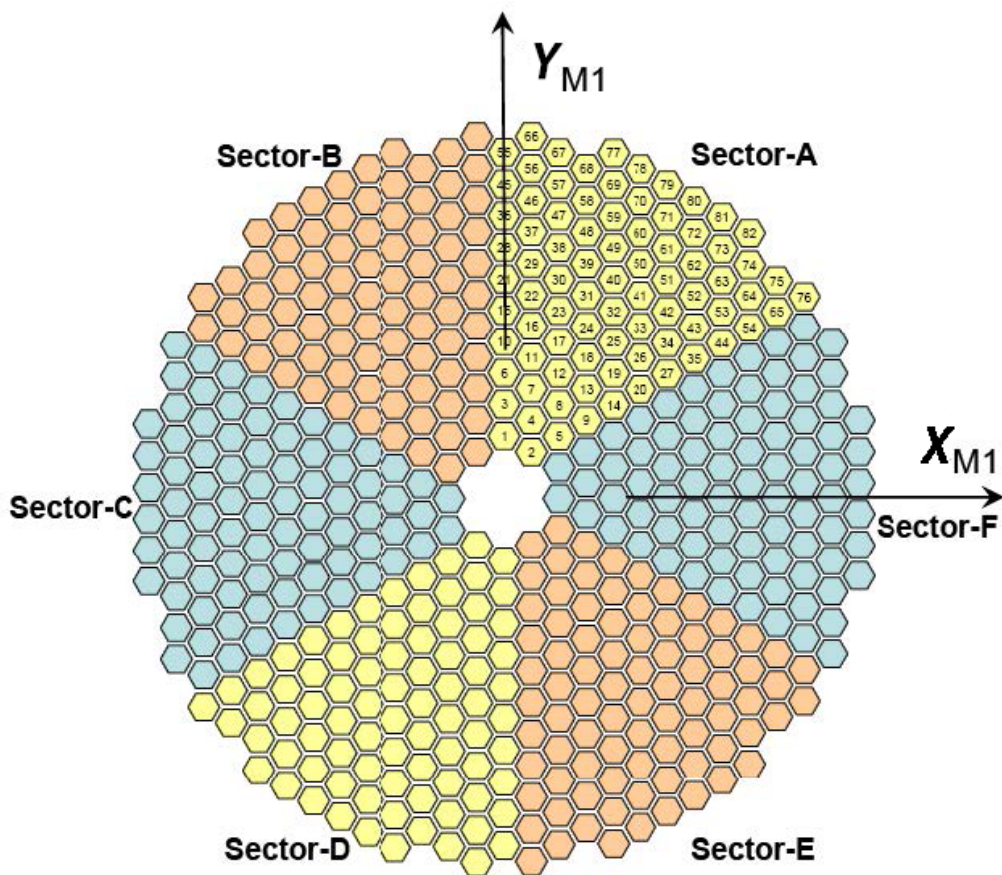


x方向离轴载频



天文非球面镜面折衍混合补偿干涉检验

大口径长焦距主镜离轴子镜检验



TMT主镜

TMT主镜参数

非球面参数	理论值
顶点曲率半径 /mm	-60,000
圆锥系数	-1.000953
有效外径 /mm	30,000
子镜数量 /块	492
子镜种类 /类	82
子镜形状	正六边形

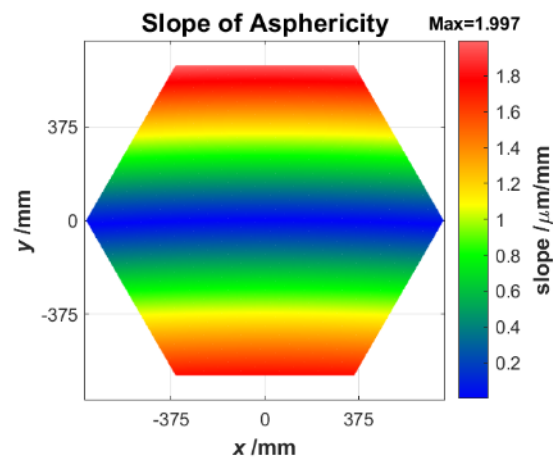
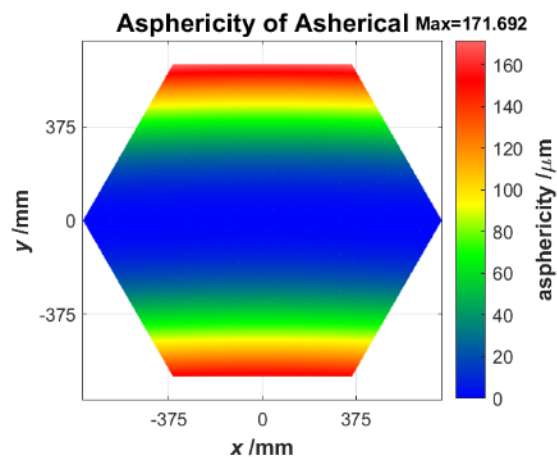
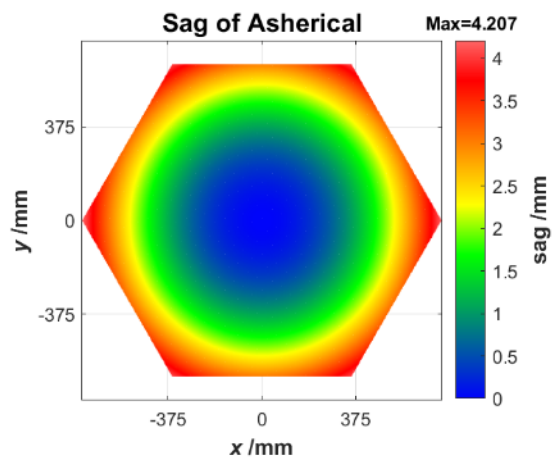
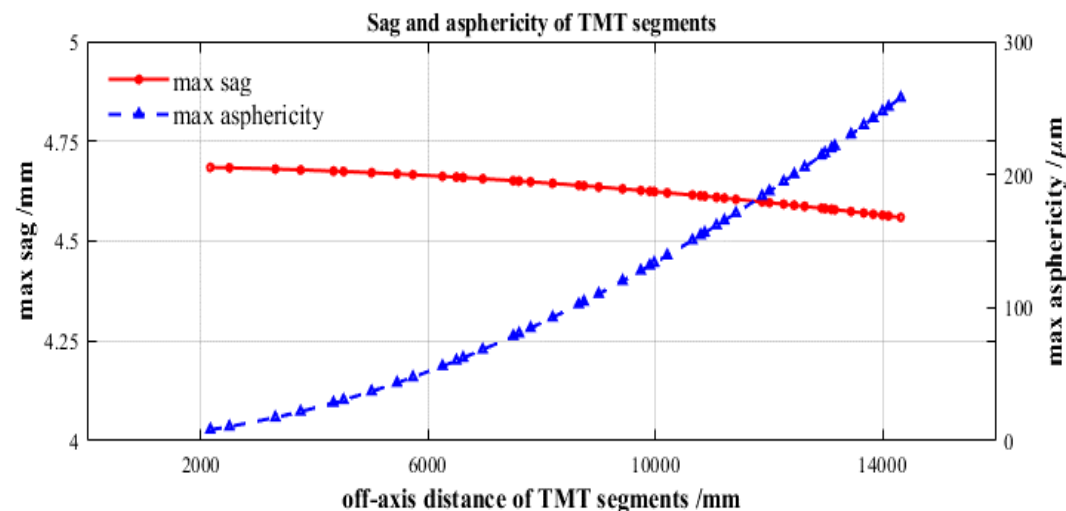
TMT主镜为拼接镜面结构，可按对称性质分为6个扇区，每个扇区包含**82种**类型的离轴子镜，离轴量从2.5 m至14.3 m。其中天光所计划承接其中最外围的**12种**类型的离轴子镜的加工任务，离轴量为**13.4 m至14.3 m**。

天文非球面镜面折衍混合补偿干涉检验

大口径长焦距主镜离轴子镜检验

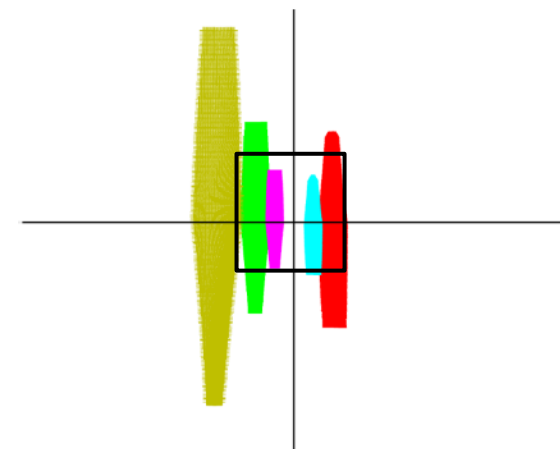
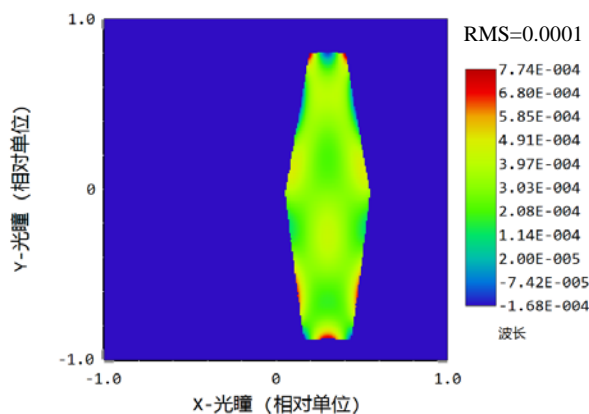
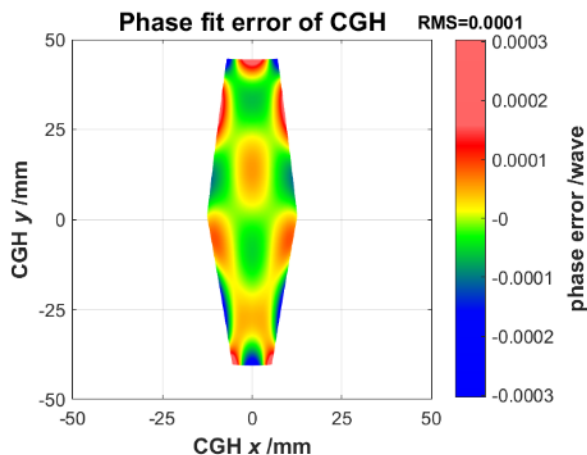
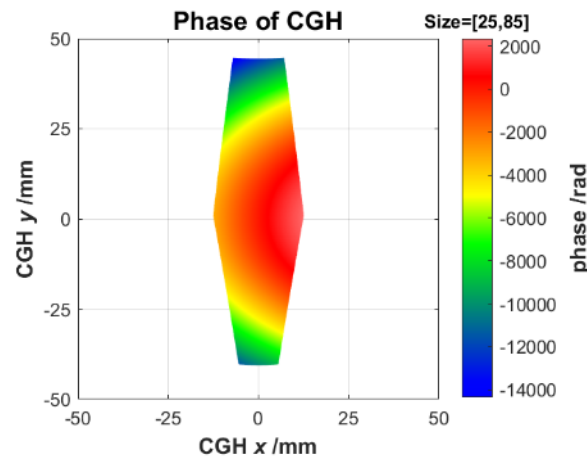
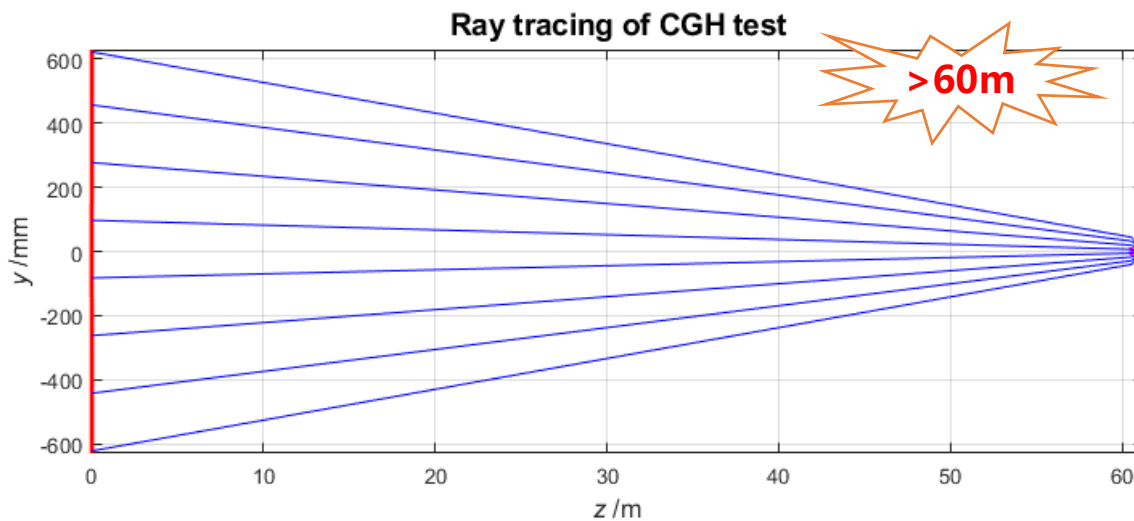
TMT第79号离轴子镜参数

非球面参数	理论值
顶点曲率半径 /mm	-60,000
圆锥系数	-1.000953
离轴量 /mm	13,994
外径 /mm	1440
最大矢高 /mm	4.21
最大非球面度 / μm	171.7



天文非球面镜面折衍混合补偿干涉检验

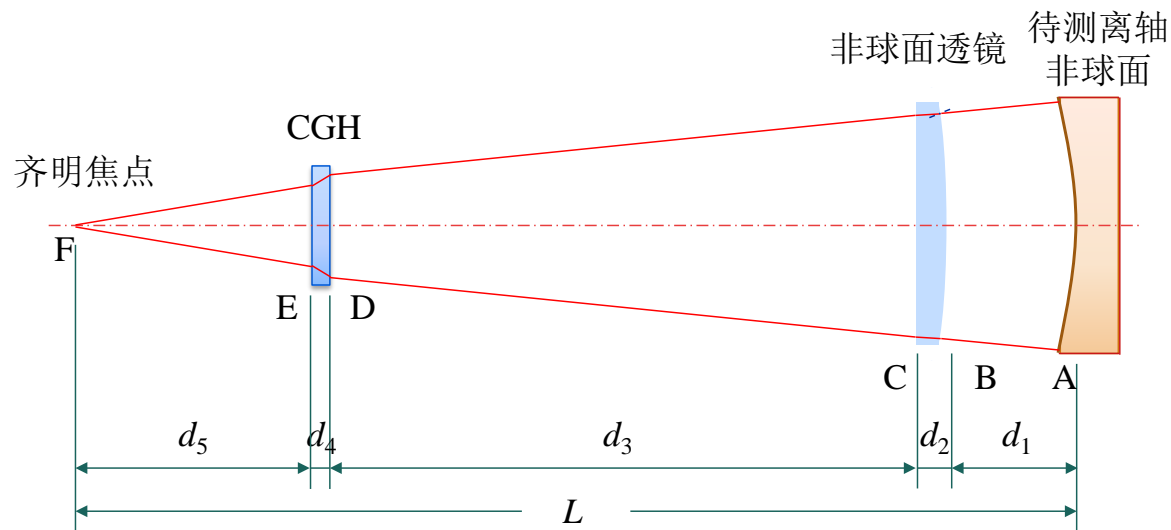
大口径长焦距主镜离轴子镜检验



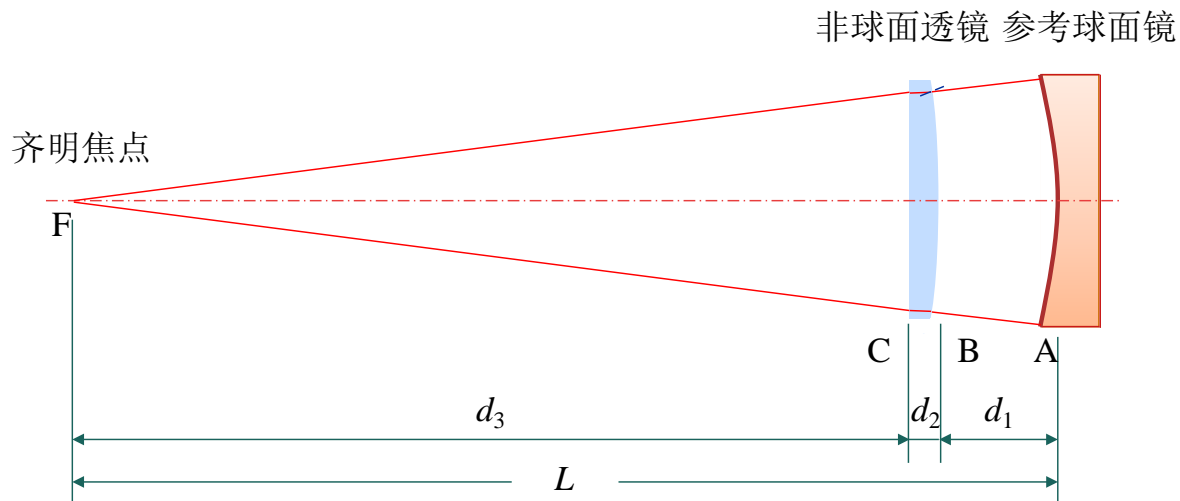
CGH直接检验长焦距离轴子镜，检测光路长，场地环境要求高，检测畸变大

天文非球面镜面折衍混合补偿干涉检验

大口径长焦距主镜离轴子镜检验

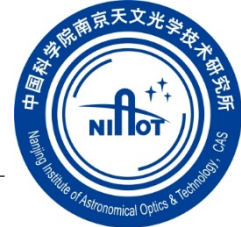


离轴非球面镜经平移旋转后作为在轴自由曲面进行检测

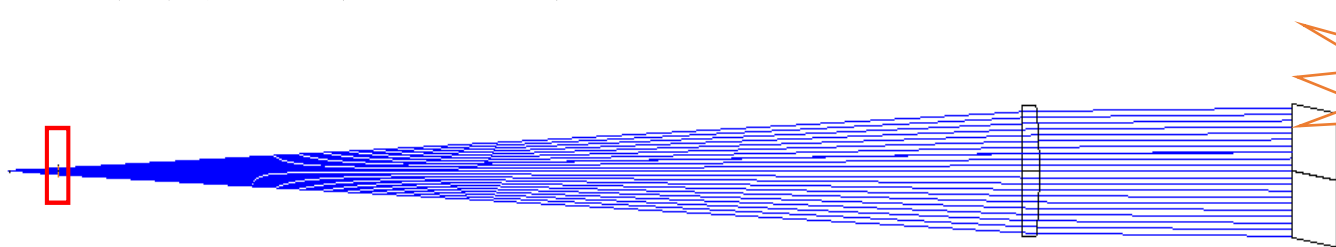


参考球面镜曲率半径与待测离轴非球面中心曲率半径相近

天文非球面镜面折衍混合补偿干涉检验



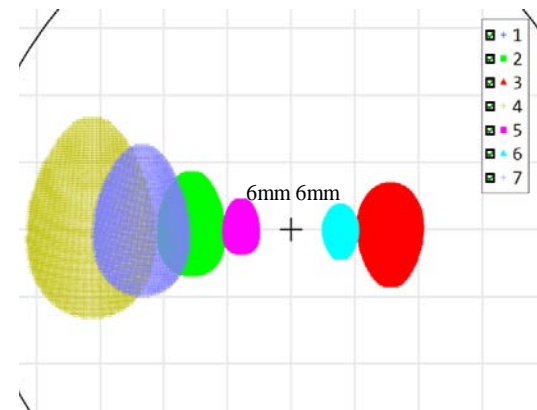
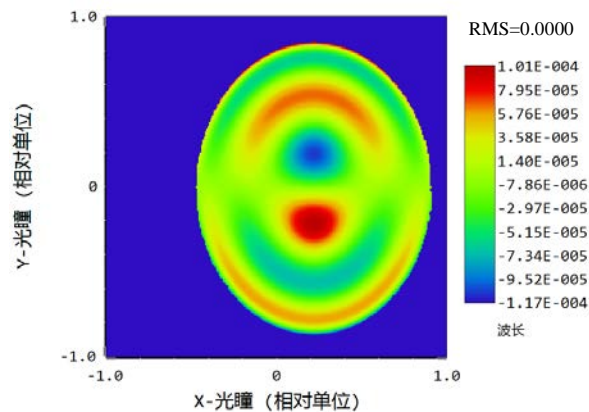
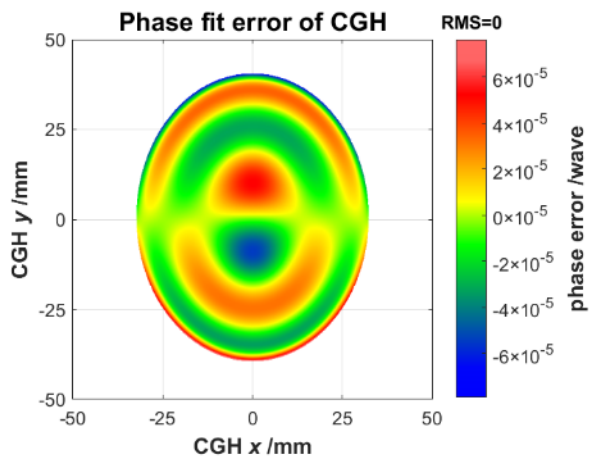
大口径长焦距主镜离轴子镜检验



computer generated
hologram

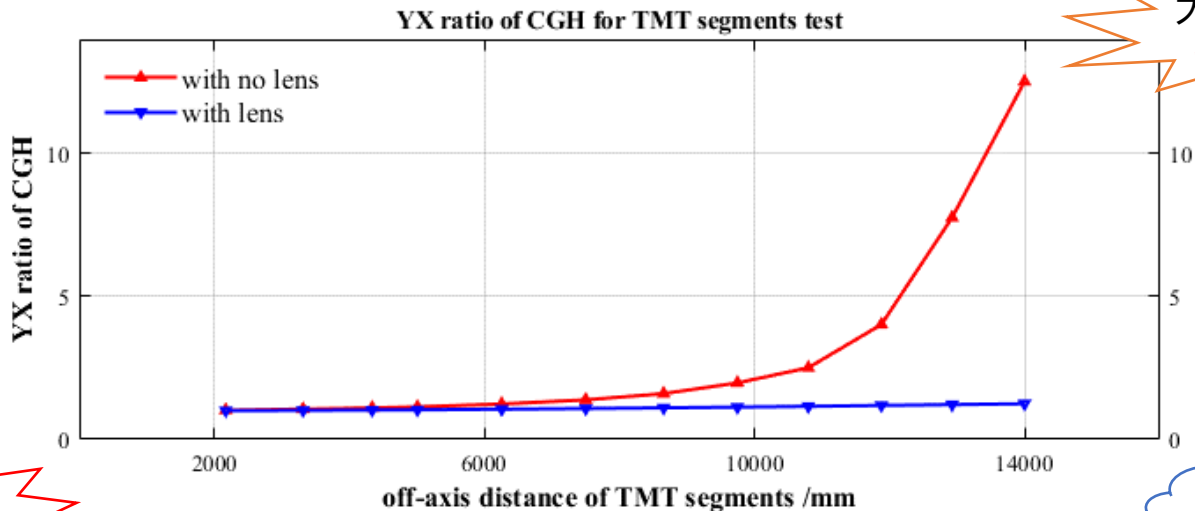
aplanatic lens TMT segment

1e+04 mm



天文非球面镜面折衍混合补偿干涉检验

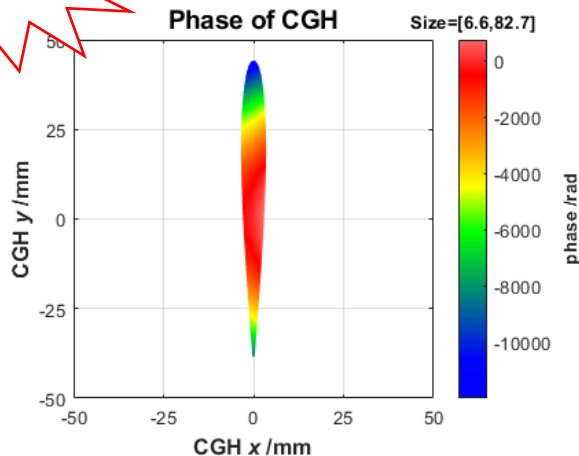
大口径长焦距主镜离轴子镜检验



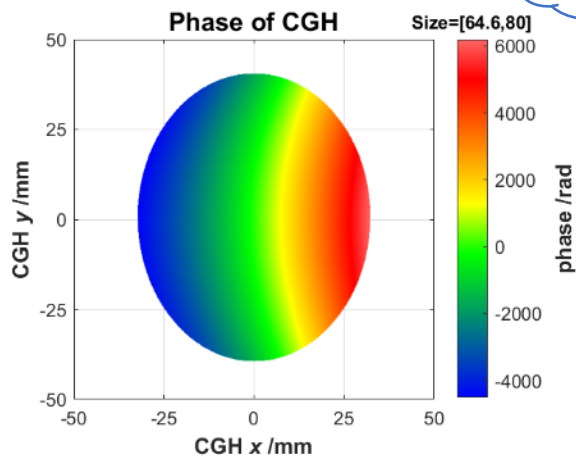
大幅度降低
投影畸变

1 : 12

1 : 1.2



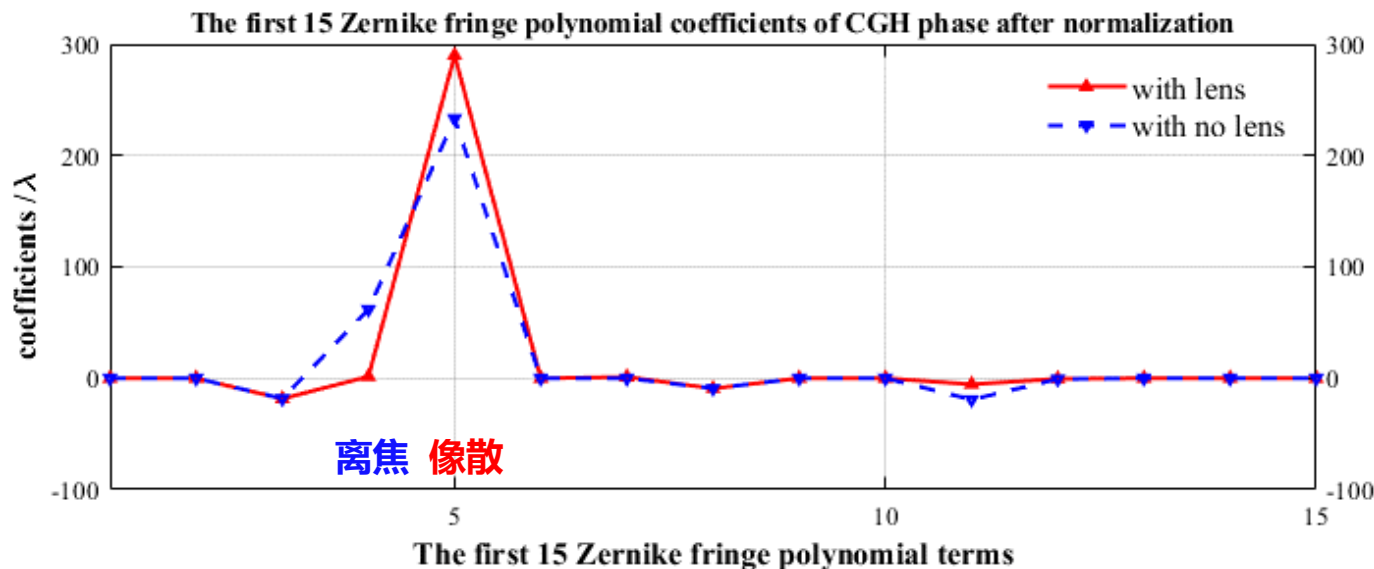
CGH直接检测



折衍混合补偿检测

天文非球面镜面折衍混合补偿干涉检验

□ 大口径长焦距主镜离轴子镜检验



优点：

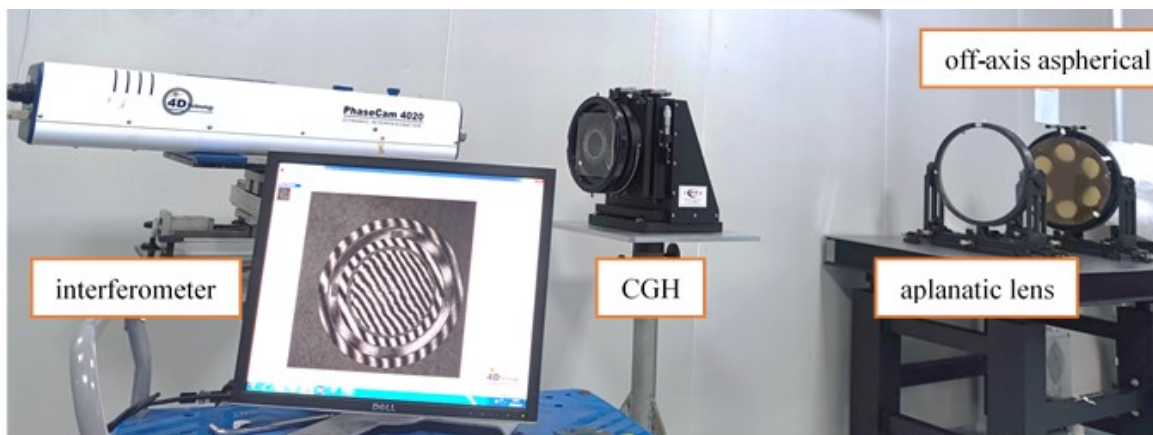
- 1、缩减检测光路**长度**；
- 2、大幅度降低**投影畸变**；
- 3、适合批量检测，不同离轴镜面，检测光路结构**相同**，光路空间参数相同。

缺点：

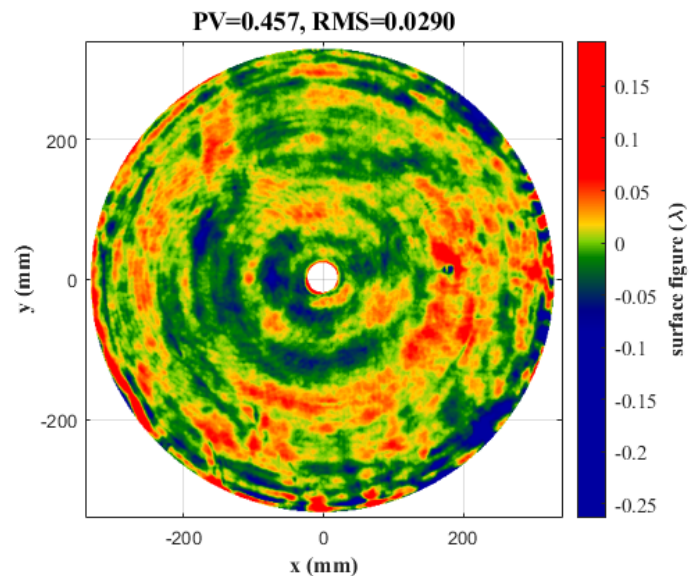
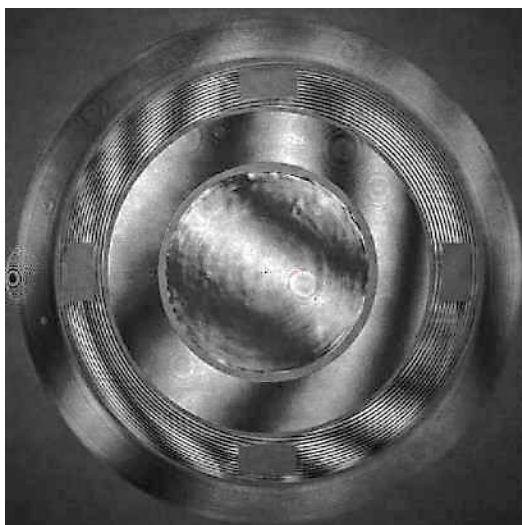
- 1、消球差透镜与待测镜等口径，加工**成本高**；
- 2、消球差透镜实现缩焦，精度要求严苛，加工误差对检测结果影响大。

天文非球面镜面折衍混合补偿干涉检验

□ $\Phi 330\text{mm}$ 试验镜折衍混合补偿检测

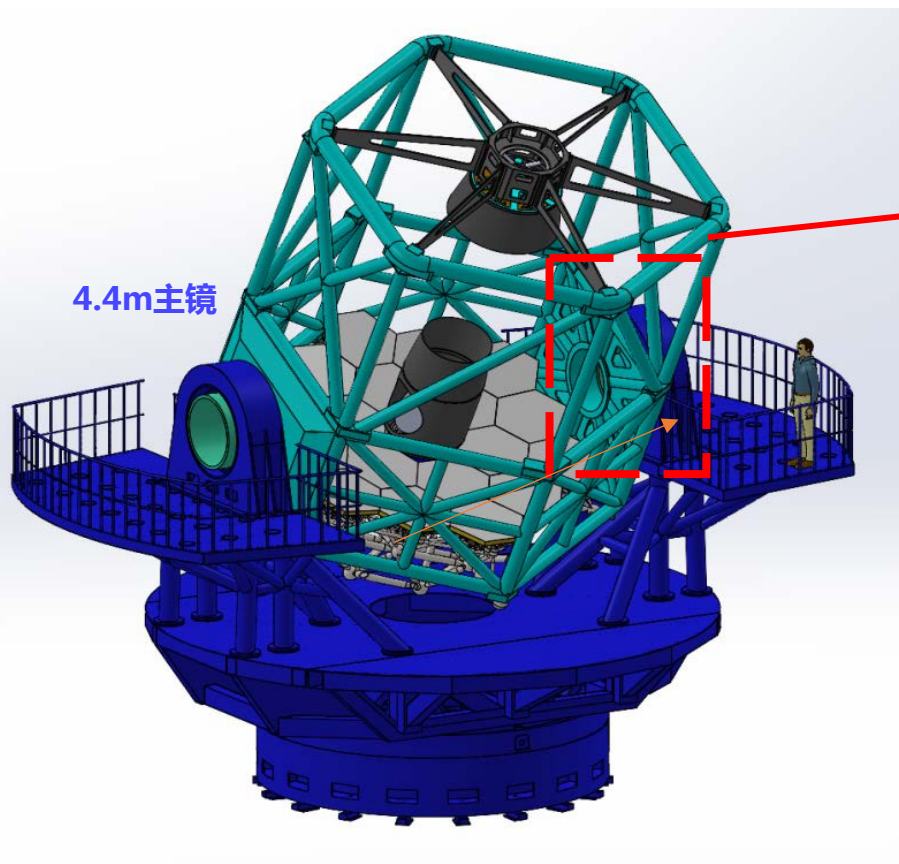


非球面参数	理论值
顶点曲率半径 /mm	-21,000
圆锥系数	-1
离轴量 /mm	3600
外径 /mm	330
最大矢高 /mm	0.64
最大非球面度 / μm	19



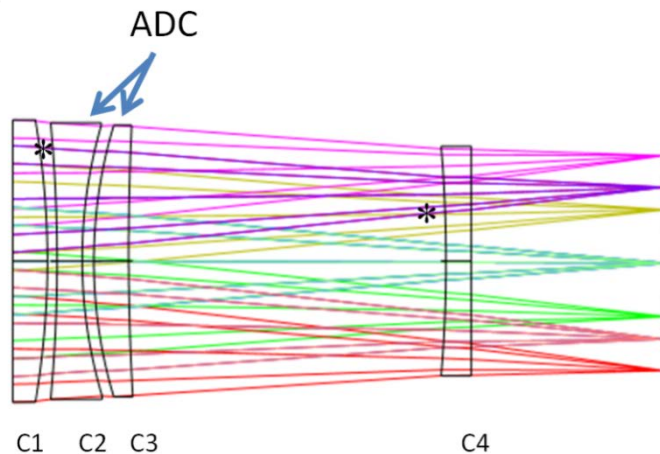
天文非球面镜面混合补偿干涉检验

大口徑高次非球面混合补偿检验



上海交通大学光谱望远镜
(JUST)

高次非球面改正透镜组



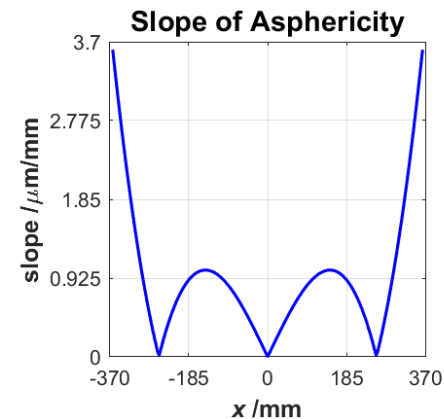
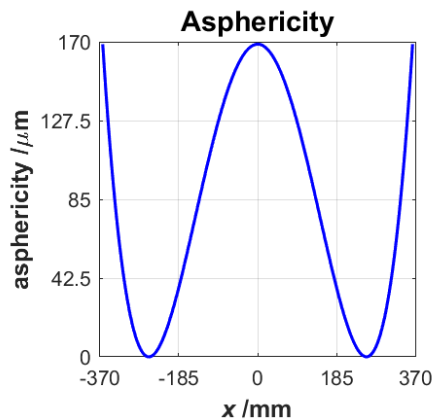
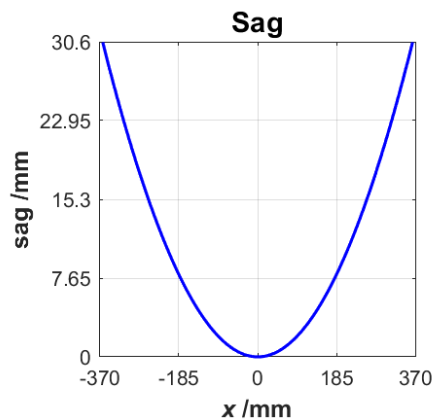
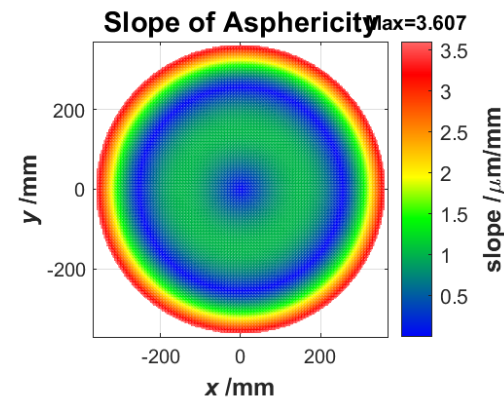
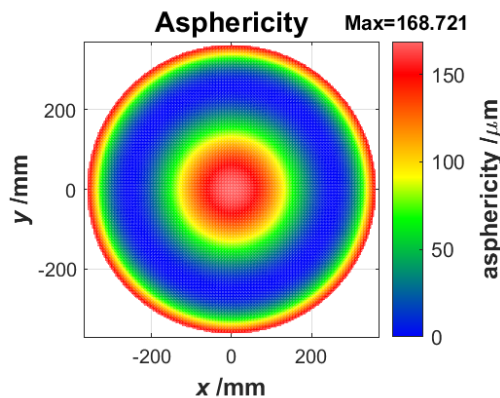
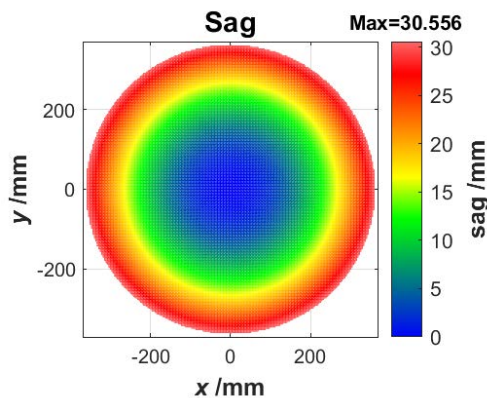
透镜	口径	表面类型
Lens 1	Φ750	平面/凸高次非球面
Lens 2	Φ740	凹球面/倾斜凹球面
Lens 3	Φ730	倾斜凸球面/凹球面
Lens 4	Φ620	凹高次球面/平面

天文非球面镜面折衍混合补偿干涉检验

大口徑高次非球面混合补偿检验

Φ750八阶高次凸非球面

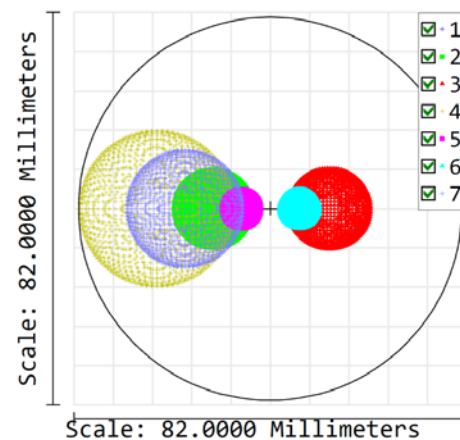
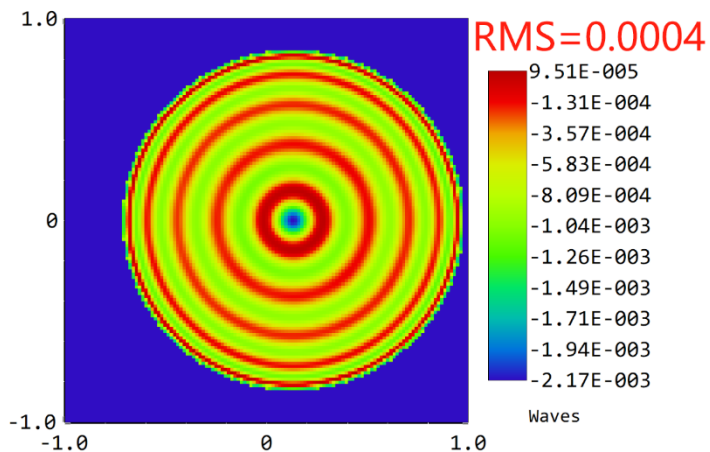
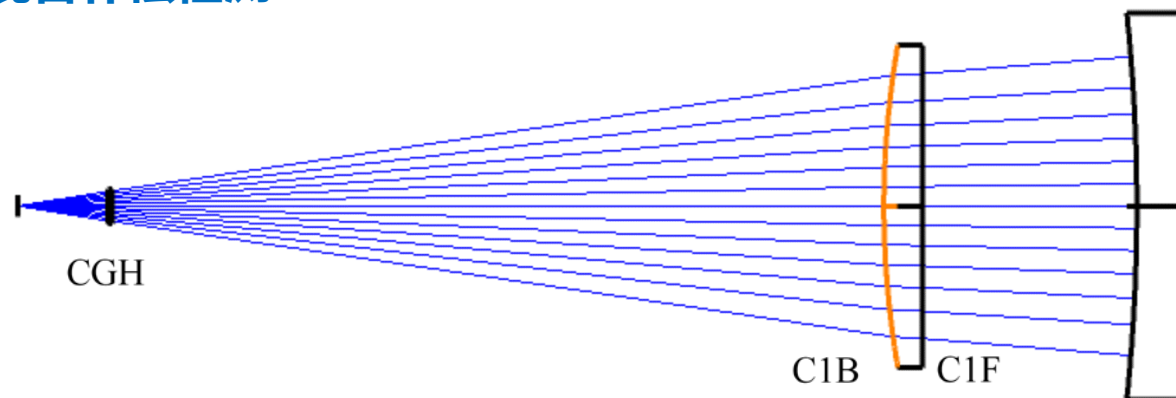
非球面特性



天文非球面镜面折衍混合补偿干涉检验

大口径高次非球面折衍混合补偿检验

CGH混合补偿检测





谢谢各位老师！

