



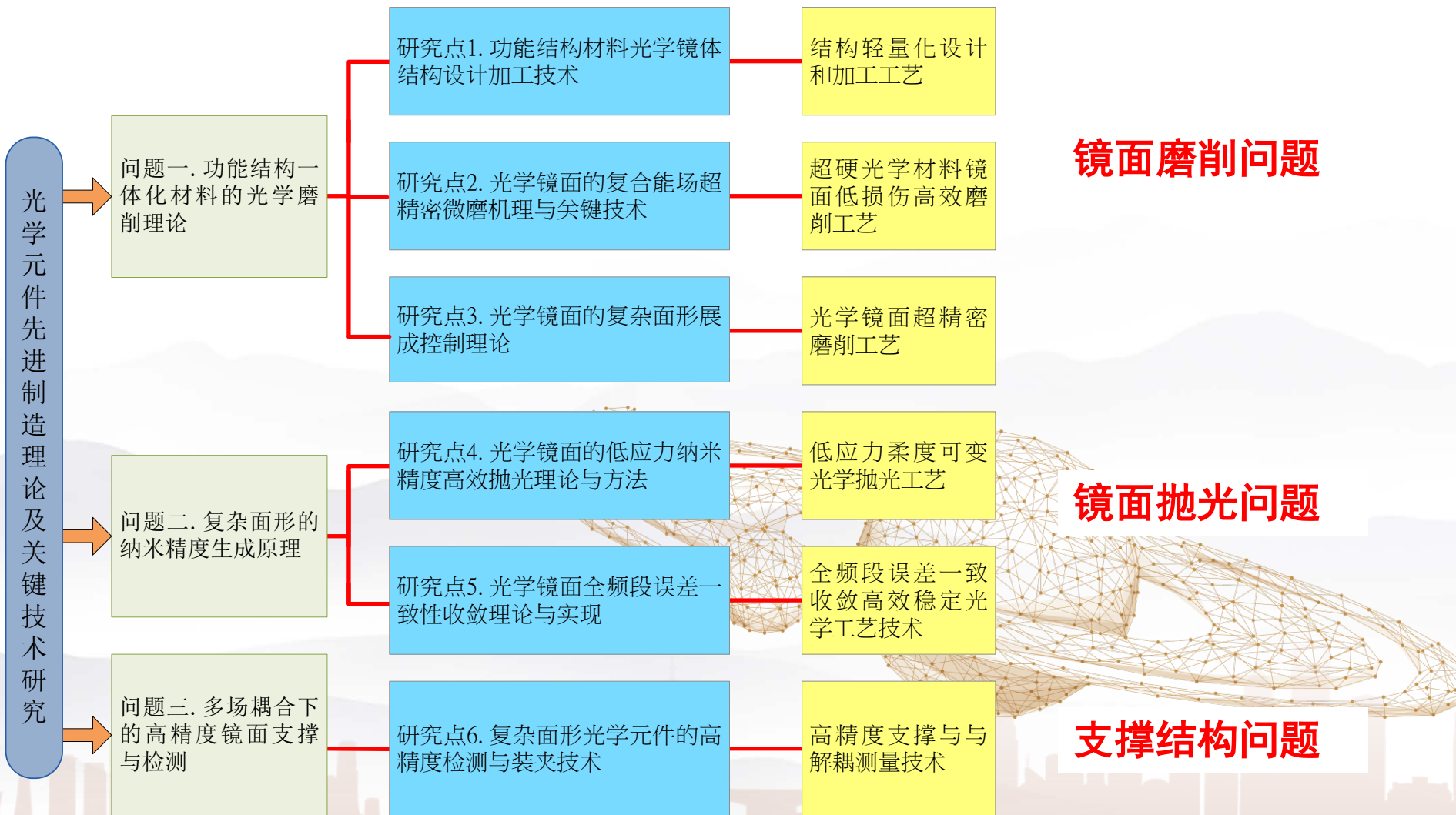
中科院南京天文仪器有限公司

CAS Nanjing Astronomical Instruments Co., LTD

# 大口径光学系统数字化制造技术

焦长君

中科院南京天文仪器有限公司



■ 磨削通过**轨迹复印法**加工工件。光学磨削在精密多轴铣床上控制砂轮以适当路径的路径遍历待加工面，通过复合多工序，在控制亚表面损伤层厚度的同时加工出精密镜面和复杂结构。

- 基础：精密多轴机床
- 核心：刀具位置规划与解算
- 要点：多工序复合
- 目的：控制损伤、提高精度

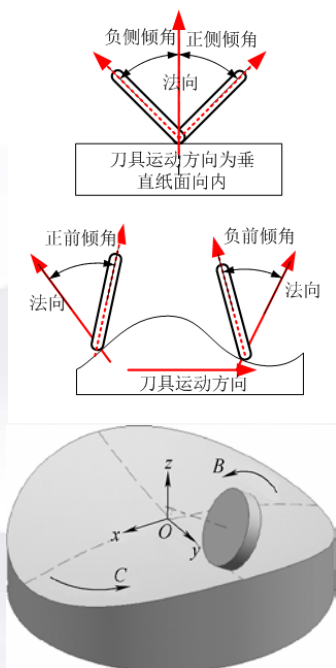


## ■ 基于机床运动学模型和镜面几何模型，建立磨削成型算法，形成了如下的磨削技术：

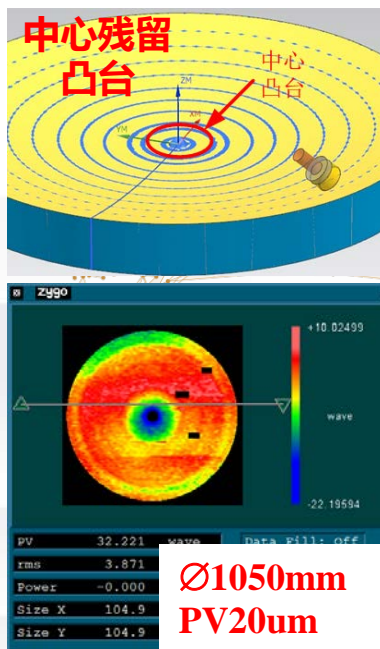
- 五轴磨削技术：利用五轴加工中心进行复杂曲面精密磨削，提高精度和效率；
- 四轴磨削技术：降低机床要求，仅XYZ+C轴，达到五轴的效果；
- 三轴磨削技术：倾斜轴磨削，XYZ三轴；
- 自由曲面SiC磨削技术：



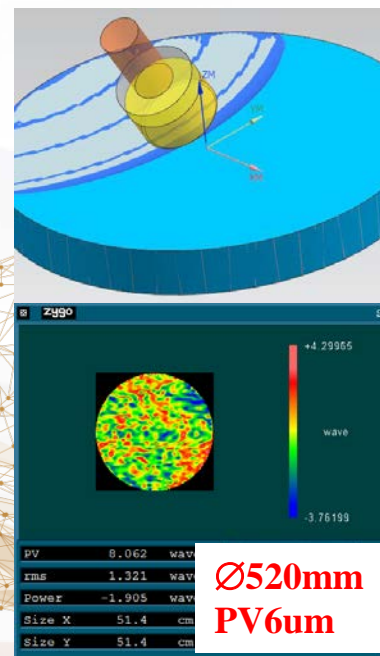
- 基于通用CAM软件，控制前倾角和侧倾角以保持砂轮相对于镜面磨削点处姿态不变，抑制刀具磨损影响，提高精度和效率，多工序复合控制亚表面损伤层厚度。轨迹为阿基米德螺线。



磨削原理示意图

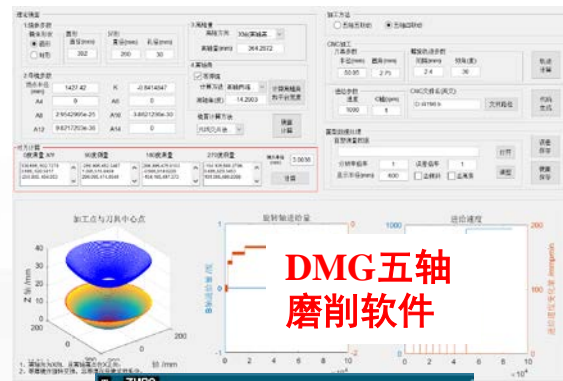
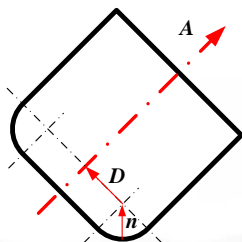
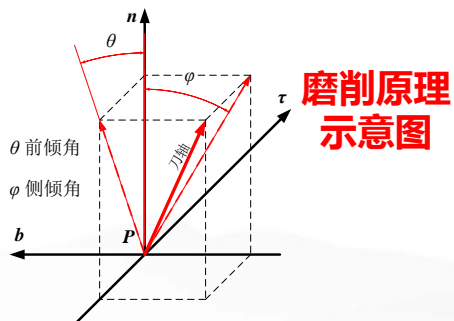


正轴磨削

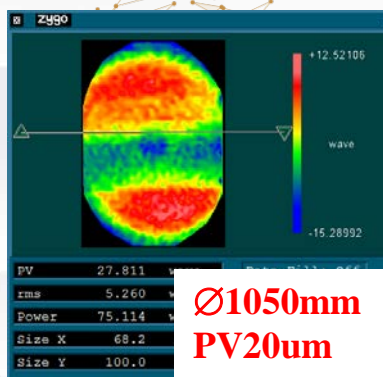


离轴磨削

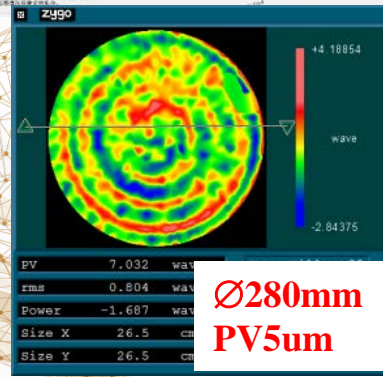
- 以五轴机床运动学模型为基础，基于微分几何理论，建立以刀具前倾角和侧倾角为参数磨削模型，计算刀具运动参数，形成高精度镜面**全口径**五轴磨削技术。



磨削现场图

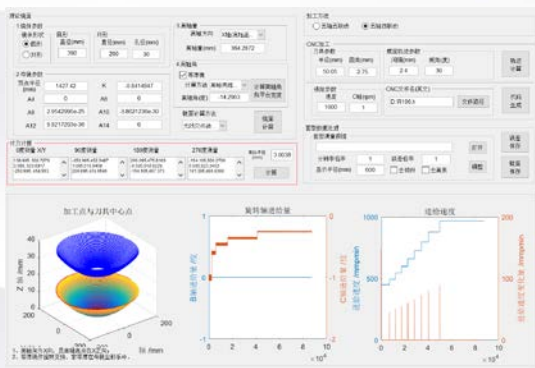
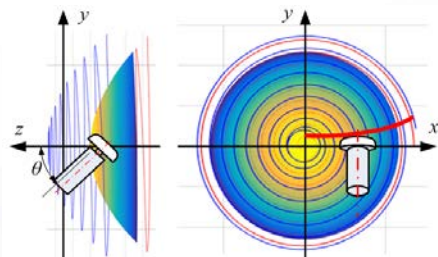
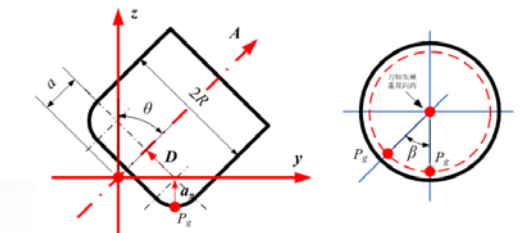


高次非球面

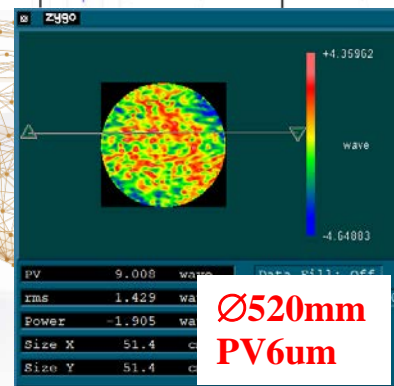


高精度非球面（边缘倾角大于30°）

- 基于XYZC四轴**定倾角**铣床，约束砂轮磨削点处法向与镜面加工点处法向平行，构建磨削模型，形成恒**刀具磨削环带**的四轴磨削技术，可在DMG或XYZC四轴铣床实现，降低设备要求。

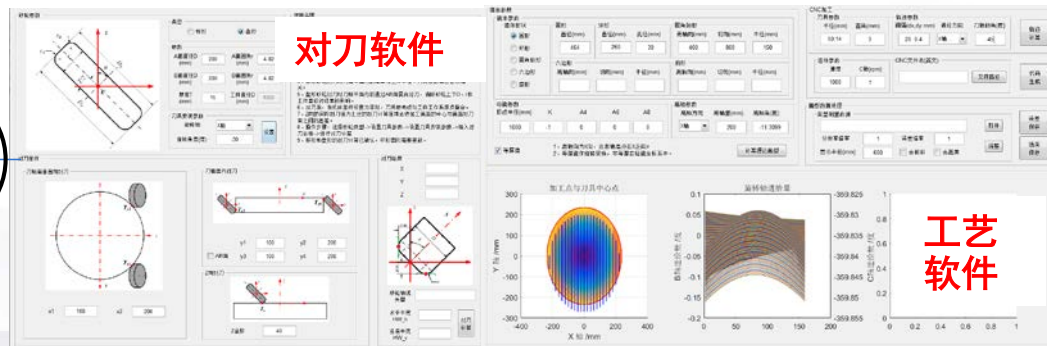
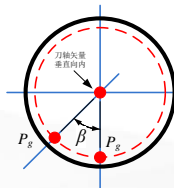
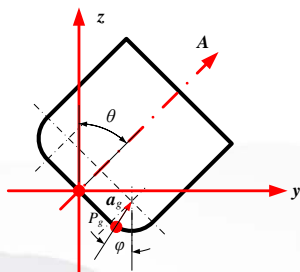


磨削原理与工艺软件



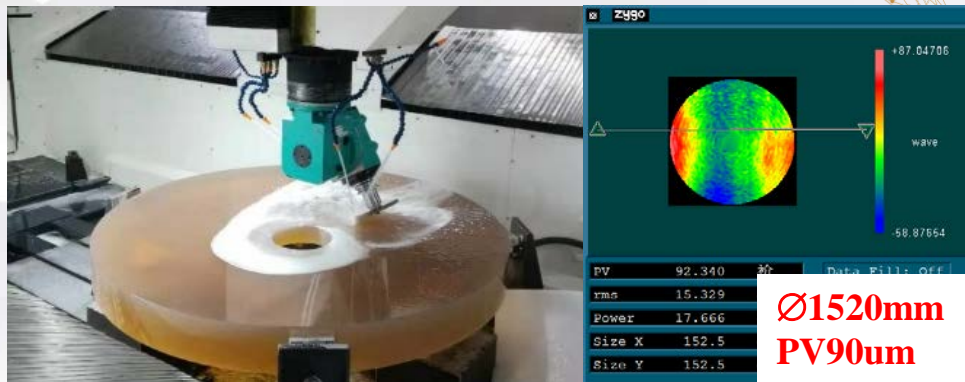
DMG四轴磨削结果

- 基于XYZ三轴铣床定倾角铣床，约束砂轮磨削点处法向与镜面加工点处法向平行，构建磨削模型，形成**变刀具磨削环带**三轴镜面磨削技术，可实现大口径镜面精密磨削，刀具磨损影响磨削精度。设备要求低。



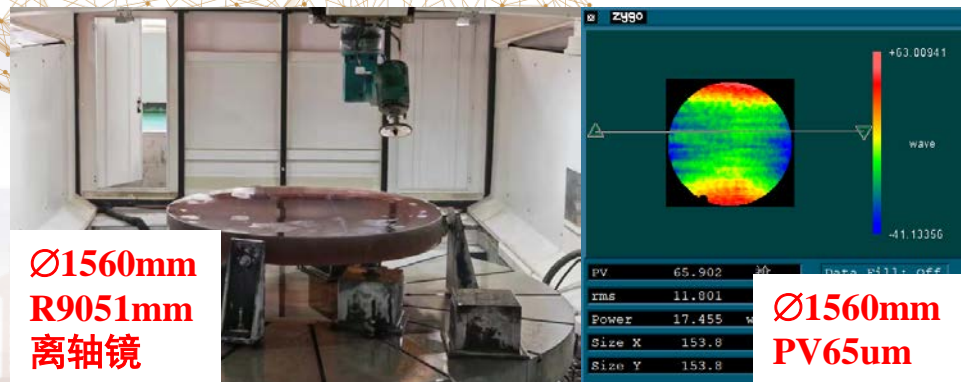
对刀软件

工艺软件



Ø1520mm  
PV90um

正轴非球面磨削案例

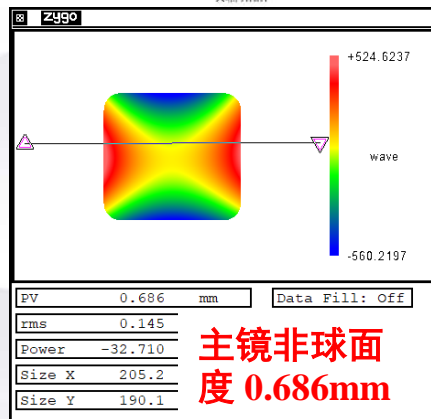
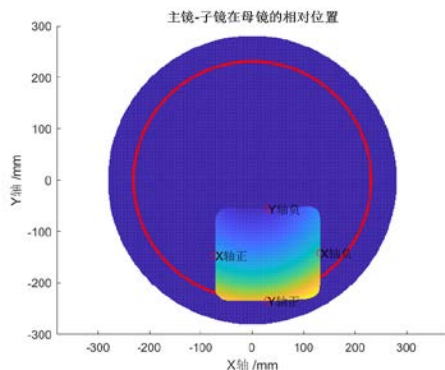


Ø1560mm  
R9051mm  
离轴镜

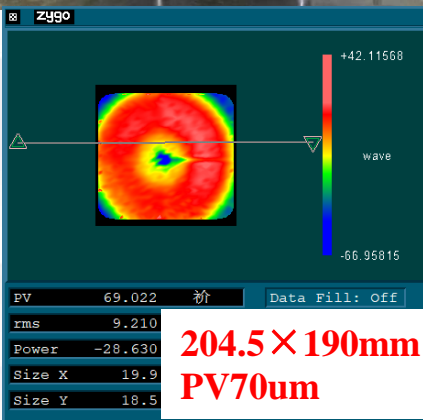
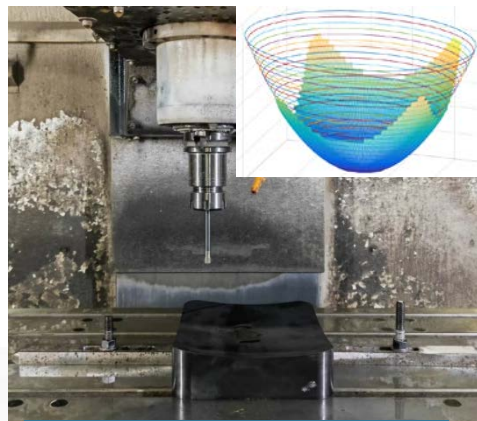
Ø1560mm  
PV65um

离轴非球面磨削案例

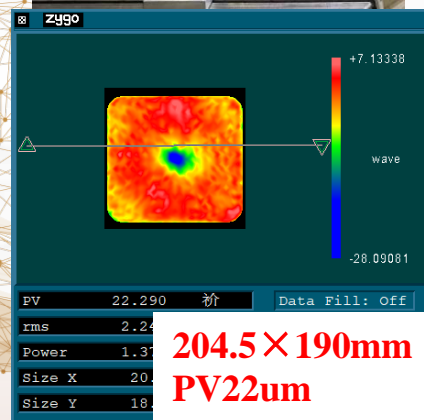
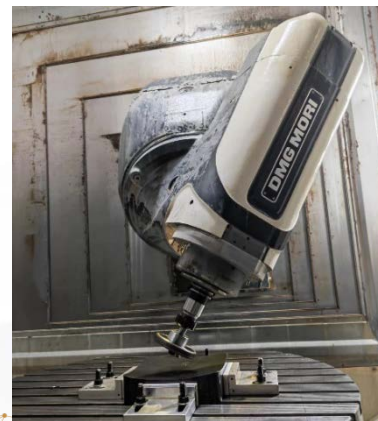
## ■ 三轴轮廓铣粗加工+五轴精密铣磨，减小总加工时间。



离轴Zernike多项式面



三轴轮廓磨削



五轴精密磨削

- 抛光以**去除量累计法**加工工件，通过CCOS原理控制镜面精度。数字化光学抛光是**在龙门式、机械臂式等抛光设备上控制抛光磨盘以适当路径和给定速度分布**遍历待抛光面，通过多次测量加工达到要求精度。速度分布由面型误差和去除函数通过**解卷积方法**求解。

- 基础：抛光机床、磨盘系统
- 核心：CCOS成型解卷积、路径规划与实现
- 要点：多工序复合
- 目的：控制表面质量、提高镜面精度

### ■ 主要工作包括

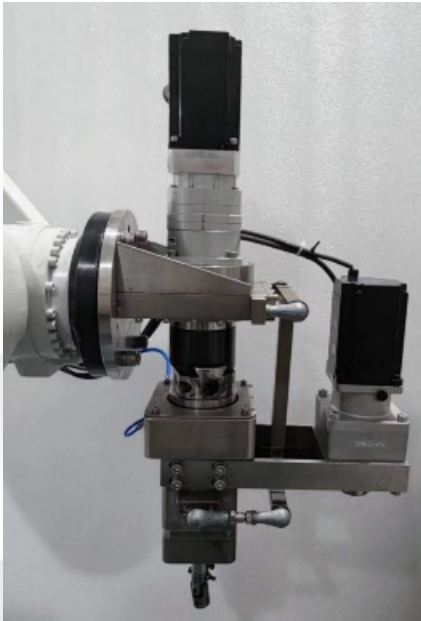
- 设备研发
- 工艺控制软件



龙门式抛光机床

机械臂抛光机床

- 设计压力可调双转子磨头，二次开发机械臂控制器，整合机械臂和磨头控制功能，实现速度、压力动态可调，提高工艺柔性。



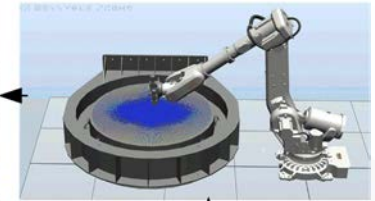
双转子磨头



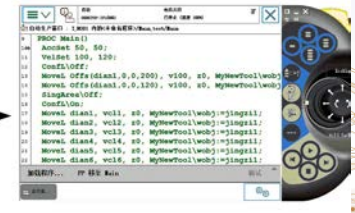
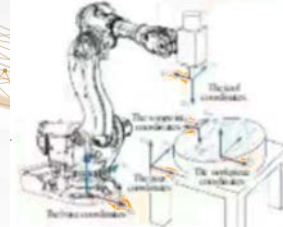
机械臂抛光控制系统



机械臂抛光

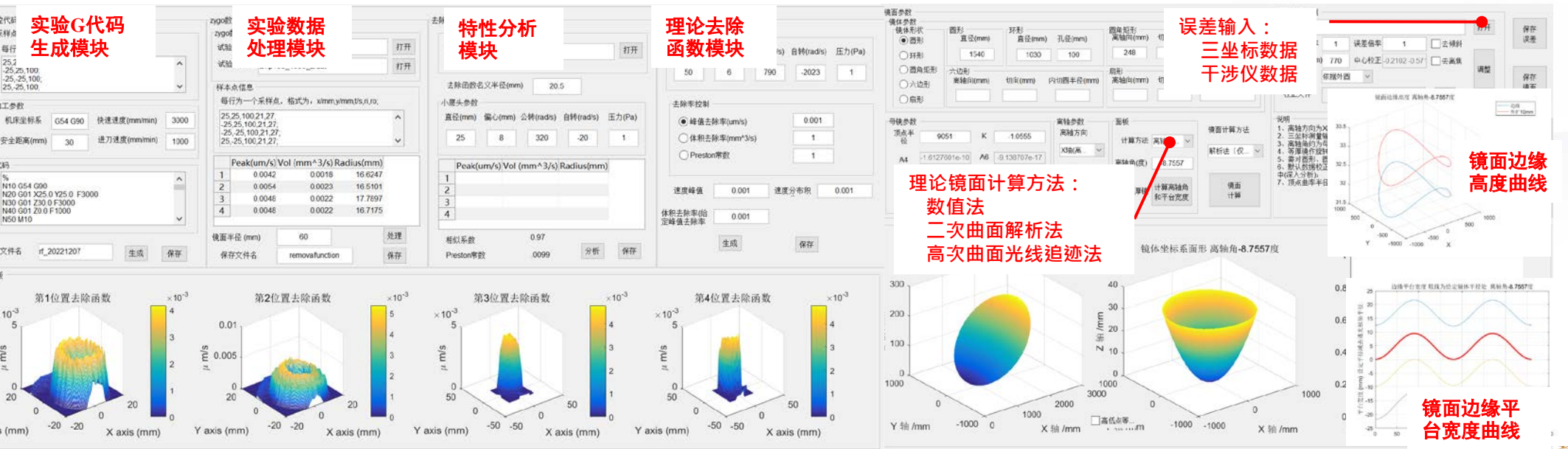


动态仿真



机械臂工艺流程

## ■ 开发包含从去除函数、镜面处理、轨迹规划、驻留时间解算、机械臂控制等工艺软件，实现机械臂抛光的全流程控制。



**实验G代码生成模块**

**实验数据处理模块**

**特性分析模块**

**理论去除函数模块**

**误差输入：三坐标数据干涉仪数据**

**理论镜面计算方法：数值法、二次曲面解析法、高次曲面光线追迹法**

**镜面边缘高度曲线**

**镜面边缘平台宽度曲线**

**去除函数处理软件**

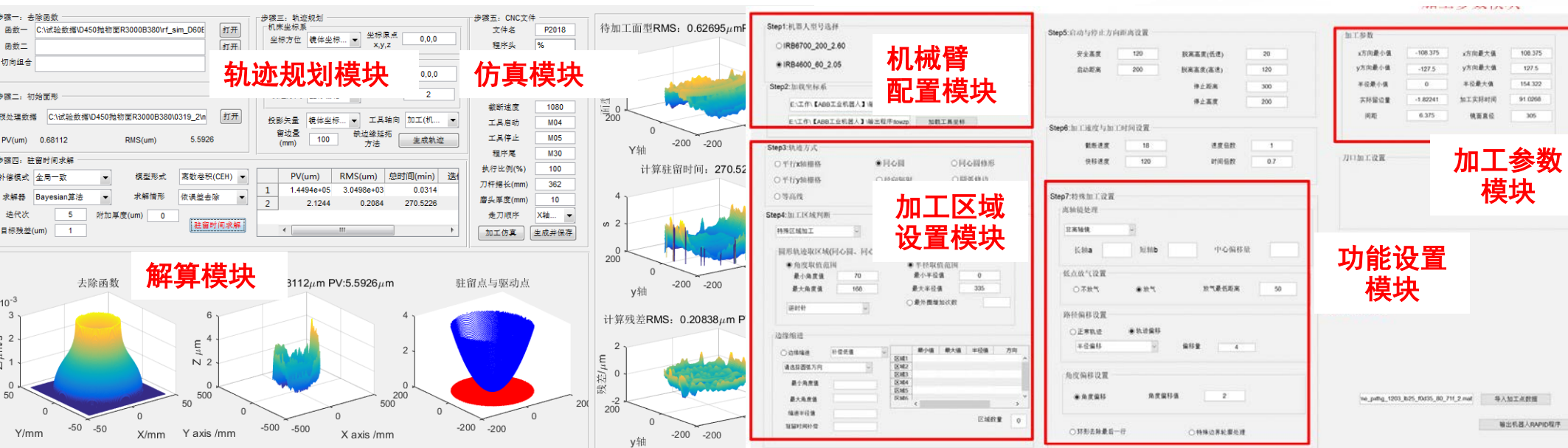
**镜面处理软件**

The screenshot displays a complex software interface with multiple panels. On the left, there are sections for '实验G代码生成模块' (Experimental G-code generation) and '实验数据处理模块' (Experimental data processing), including a table of peak data. The top center features '特性分析模块' (Characteristic analysis) and '理论去除函数模块' (Theoretical removal function) with various input fields and buttons. On the right, there are sections for '误差输入' (Error input) and '理论镜面计算方法' (Theoretical mirror calculation method), which includes a list of calculation methods and a 3D plot of a mirror surface. The bottom row contains four 3D surface plots labeled '第1位置去除函数' through '第4位置去除函数', each with a color scale. To the right of these are two more 3D plots and a 2D line graph showing '镜面边缘高度曲线' and '镜面边缘平台宽度曲线'.

去除函数处理软件

镜面处理软件

## 开发包含从去除函数、镜面处理、轨迹规划、驻留时间解算、机械臂控制等工艺软件，实现机械臂抛光的全流程控制。



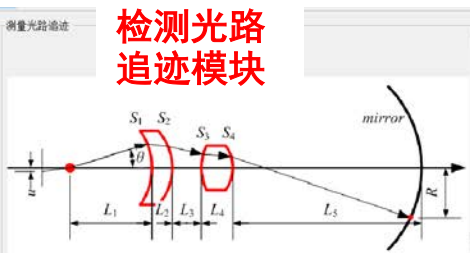
The screenshot displays a comprehensive software interface for robotic arm polishing control, divided into several functional modules:

- 轨迹规划模块 (Trajectory Planning Module):** Located at the top left, it includes steps for removing functions, trajectory planning, and CNC file generation.
- 仿真模块 (Simulation Module):** Features 3D surface plots showing the workpiece geometry and simulation results, such as "待加工面型RMS: 0.62695μm".
- 机械臂配置模块 (Mechanical Arm Configuration Module):** A central configuration panel for selecting the robot model (e.g., IRB4600\_80\_2.05) and setting parameters like tool length and speed.
- 加工区域设置模块 (Processing Area Setting Module):** Allows for defining the specific processing area on the workpiece, including circular and concentric shapes.
- 加工参数设置模块 (Processing Parameter Setting Module):** Configures various parameters such as safety height, start/stop distance, and tool speed.
- 功能设置模块 (Function Setting Module):** Manages special processing settings like high-axis treatment, low-point gas blowing, and path offset.
- 驻留时间解算软件 (Residence Time Calculation Software):** A dedicated module for calculating the required residence time, showing a table of results for different points on the workpiece.

高数卷积(CEH)	PV(um)	RMS(um)	总时间(min)
1	1.4494e+05	3.0490e+03	0.0314
2	2.1244	0.2084	270.5226

- 测量光路中镜面上的点与干涉仪相机上的点不是线性映射关系，需要根据检测光路和干涉仪成像关系，建立镜面上点与检测数据像素点之间的映射关系，校正测量畸变，保证工艺过程正确进行。

**检测光路**  
**追踪模块**



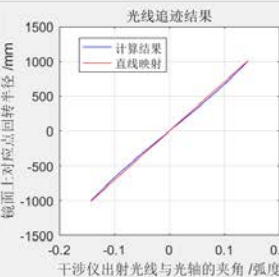
**允光参数**

补偿器类型	补偿器参数
两个透镜	参数文 C:\Users\thn\ 读取
	保存文 保存

S1	S2	S3	S
L	257.6300	22.4350	170.9220 12 ^
N	1.5157	1.5153	1.5149 1
D	74	74	74
LZ	0	0	0

理论光迹文件  打开 追踪计算

**光线追踪结果**



使用说明

1. L为镜面与镜面i-1的距离。
2. N为当前镜面前介质的折射系数。
3. D为镜体的直径。
4. LZ为镜面的高轴量，主要针对待测镜面。
5. K为镜面的形状参数。
6. R、A4-A14为镜面的参数，符号与Zemax中一致，与镜面加工程序的相应。
7. 干涉仪光轴与待测镜母镜光轴一致。
8. theta的单位为弧度。
9. 干涉仪的光线追踪的基本坐标是，母镜的中心对应的像素坐标。
10. 标记点像素坐标可以从4D、matlab显示以及xyqc的干涉条纹中提取，但前两者数据了正负的位置，辨识后的4D可以作为镜体的中心，第三个不能。

**校正参数辨识**

标记点文件 C:\Users\thn\Desktop 打开

干涉仪映射模型  $\sin(\theta) = \sin(\theta_0) + k \cdot \theta^2$

参数辨识 比例k 0.0000  理论光 平移u0 -3.883 辨识

镜体中  打开 保存

**畸变校正曲线2.0061**



**坐标校正参数辨识模块**

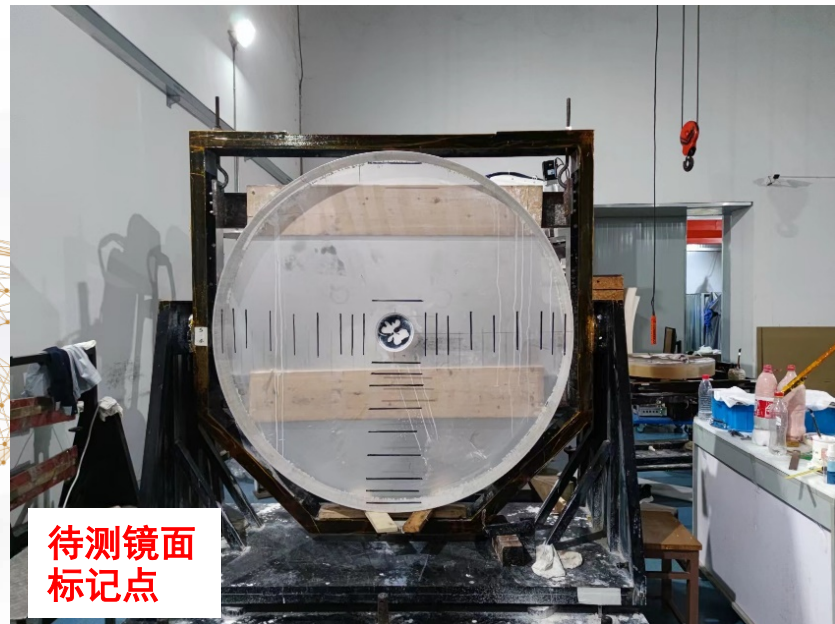
**测量数据校正**

面型测量数据  打开

畸变校正 分辨率倍率 1 误差倍率 1 显示半 760 中心校正 -0.022,0.012  去高 结果保存



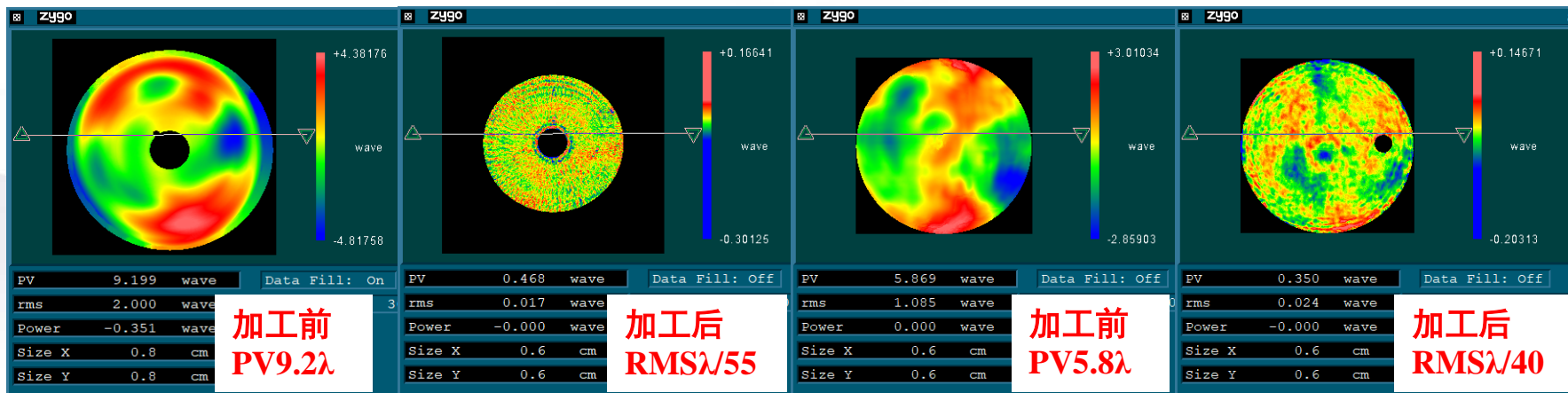
**检测镜面畸变校正模块**



- 正轴非球面： $\text{Ø}1520\text{mm}$ ，初始误差 $\text{PV}9.2\lambda$ （含边缘 $\text{PV}20\sim 30\mu\text{m}$ ），加工后 $\text{PV}0.46\lambda$ 、 $\text{RMS}\lambda/55$ 。
- 离轴非球面： $\text{Ø}1520\text{mm}$ ，初始误差 $\text{PV}5.8\lambda$ ，加工后 $\text{PV}0.35\lambda$ ， $\text{RMS}\lambda/40$ 。



加工现场图



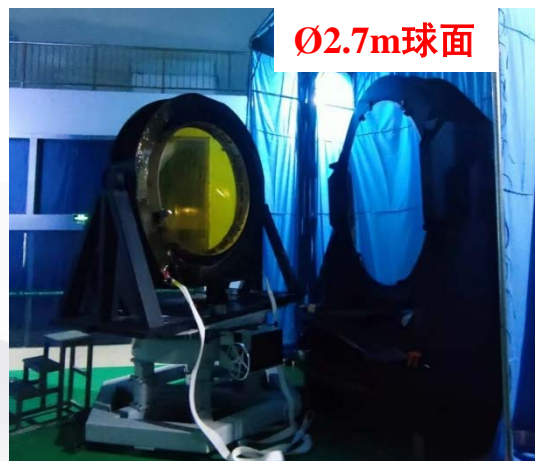
正轴非球面

离轴非球面

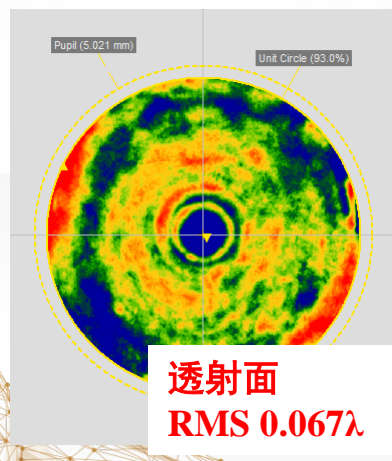
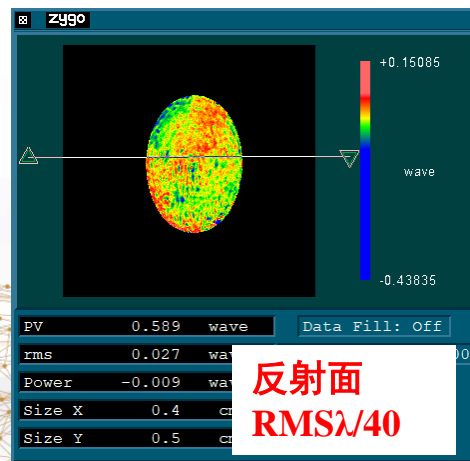
- $\text{Ø}1770\text{mm}$ 透镜，两面都为平面，反射面精度 $\lambda/40$ ，透射面精度 $\lambda/10$ 。



加工现场图



检测现场图

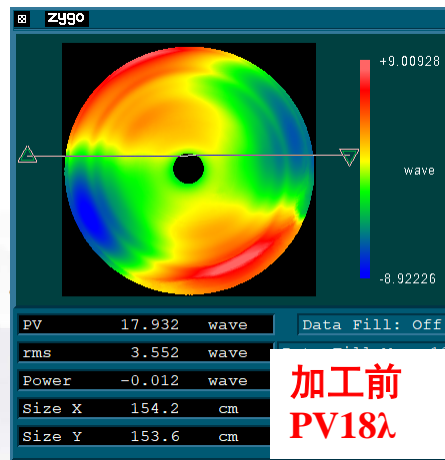


加工结果图

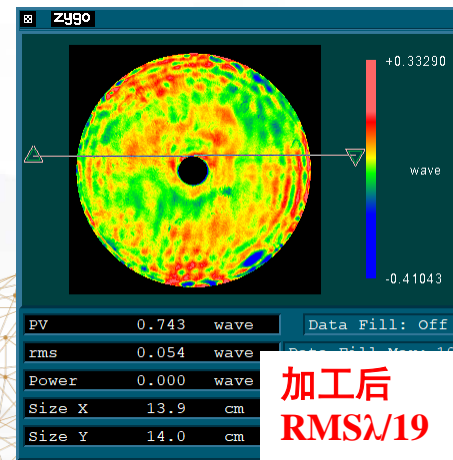
- $\text{Ø}1540\text{mm}$ 抛物面，国产石英，初始误差 $\text{PV}18\lambda$ （含边缘 $\text{PV}\sim 20\mu\text{m}$ ）；加工时间15天；加工后 $\text{PV}0.74\lambda$ 、 $\text{RMS}\lambda/20$ 。



加工现场图

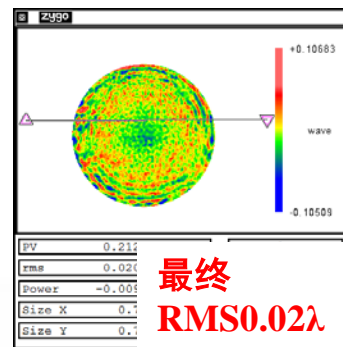
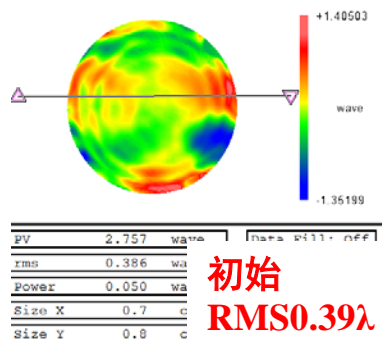
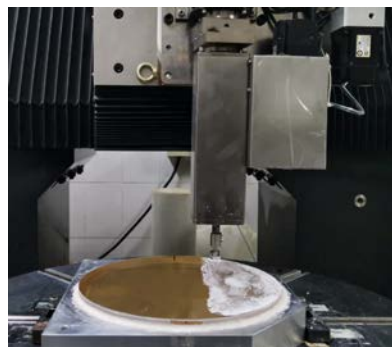


加工前

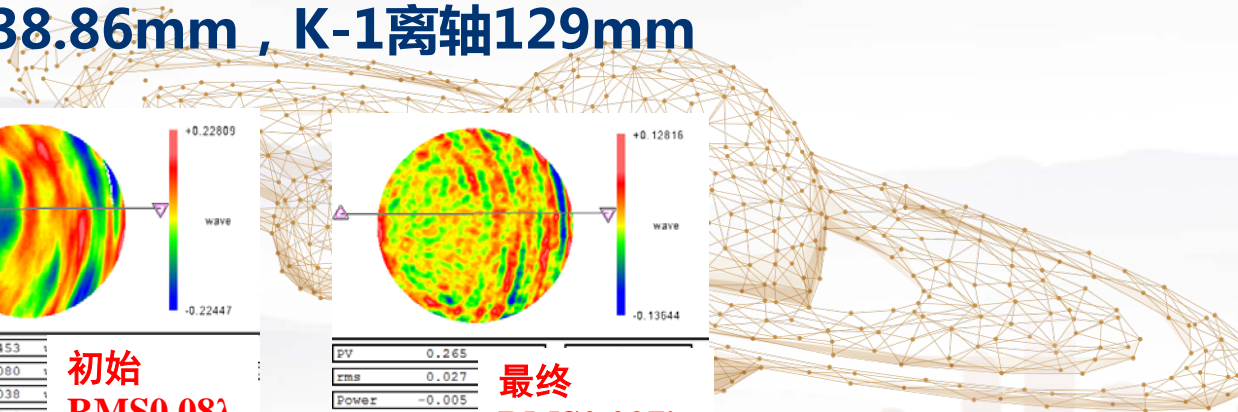
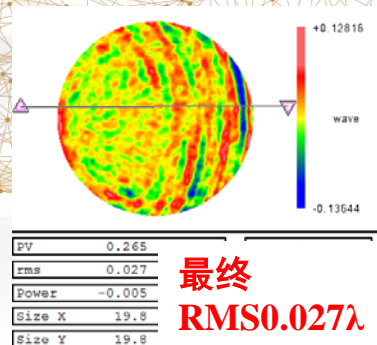
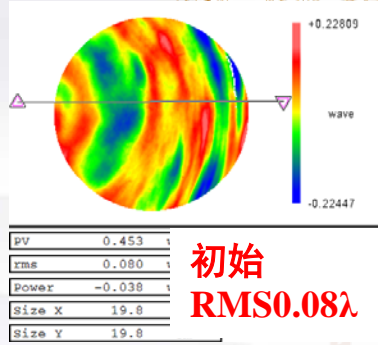
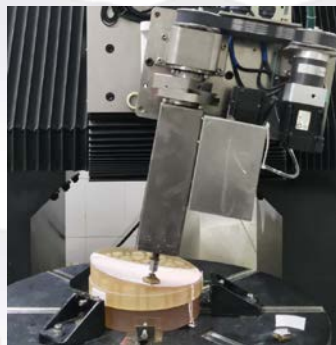


加工后

## ■ 等厚凸次镜：Ø266mm，R-2458.6，K-2.877

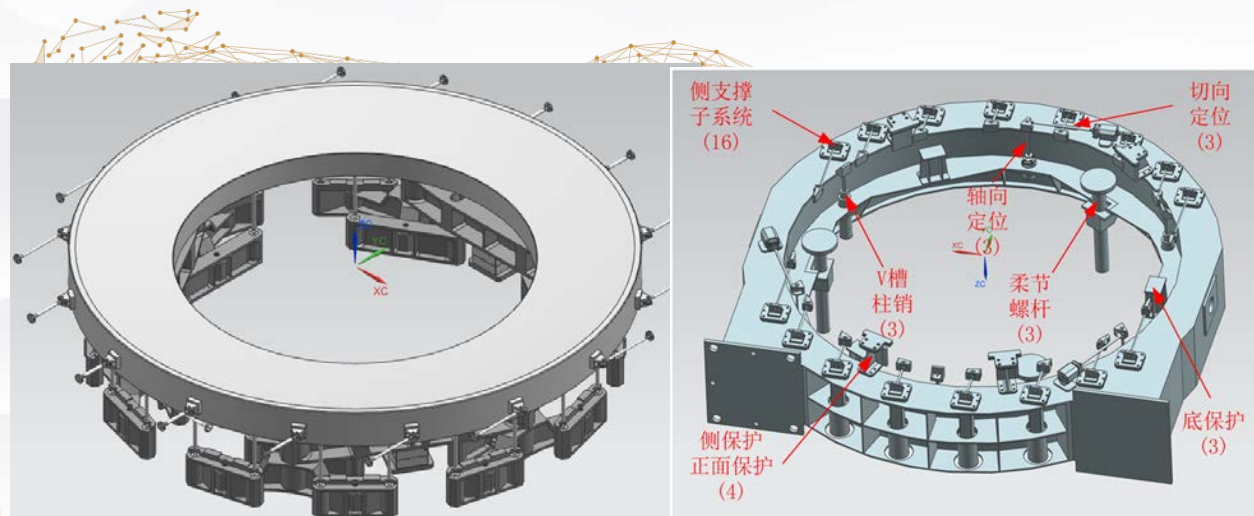


## ■ 离轴非等厚镜：Ø210mm，R738.86mm，K-1离轴129mm



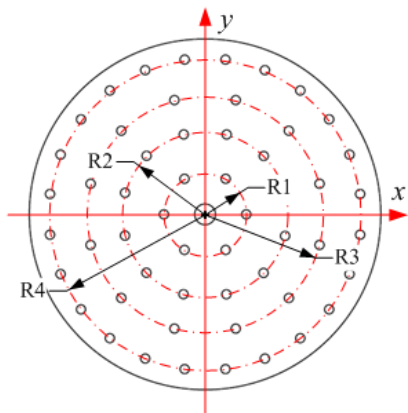
## ■ 光机结构方面，基于机械、弹性力学、优化等理论，研究支撑参数优化、系统仿真、柔性结构设计等，形成如下技术：

- 镜体支撑参数优化软件
- 望远镜主镜柔性支撑结构优化设计与仿真技术
- 光管主镜/检验镜柔性支撑结构优化设计与仿真技术

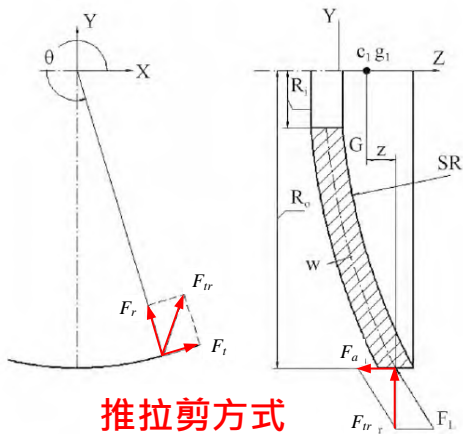


## ■ 建立以支撑环带半径、轴向支撑位置等为参数，支撑精度为目标函数的优化模型，开发Ansys和Matlab联合优化软件。

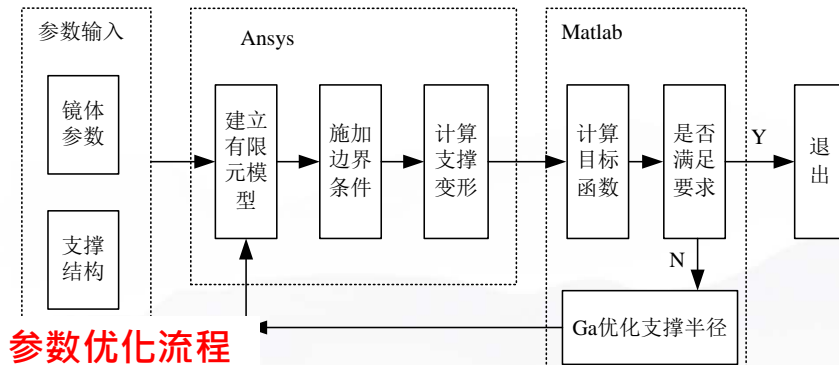
底支撑模型



弯月镜侧支撑模型

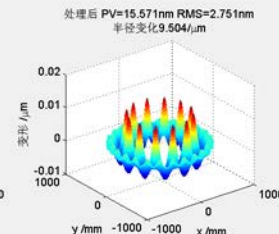
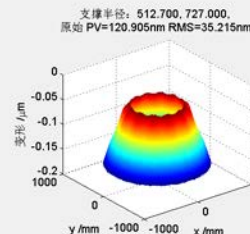
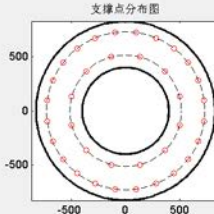
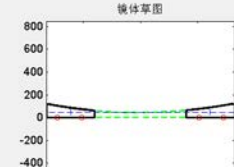


推拉剪方式



参数优化流程

说明：  
1. 对凸凹镜体分析时，上表面通光直径与压边两径之和等于下表面通光直径与压边两径之和；压边两径可以等于0。  
2. 图形和重心输出时，以下表面中心为原点计算。  
3. 上下表面的凸凹曲率绝对值于上表面相同，凸形：上表面曲率半径为正的凸值，下表面曲率半径为正的凹值，曲率半径为负为凹值。  
4. 镜体支撑精度计算是确定支撑点分布的，配镜精度是支撑点计算结果和优化，配镜精度支撑点不用支撑两种情况。  
5. 注意Cov参数的设置，需与成支撑和侧支撑点匹配。  
需解决的问题：1. 优化之前计算一下初始值的结果，以写好中间文件；2. 设置优化变量的范围；3. 镜体半径为优化初值。

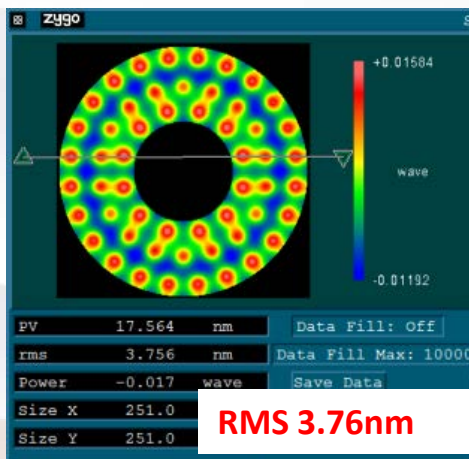


参数优化软件

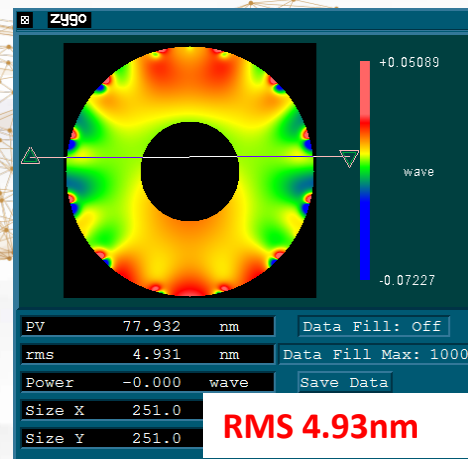
- 弯月薄镜： $\text{Ø}2.5\text{m}$ ，中孔 $\text{Ø}1\text{m}$ ，后后面 $R10.6\text{m}$ ，镜厚 $120\text{mm}$ （径厚比20.8）。



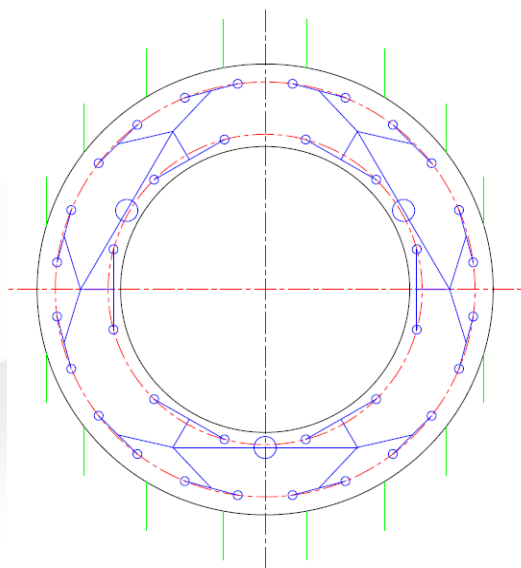
底支撑参数优化



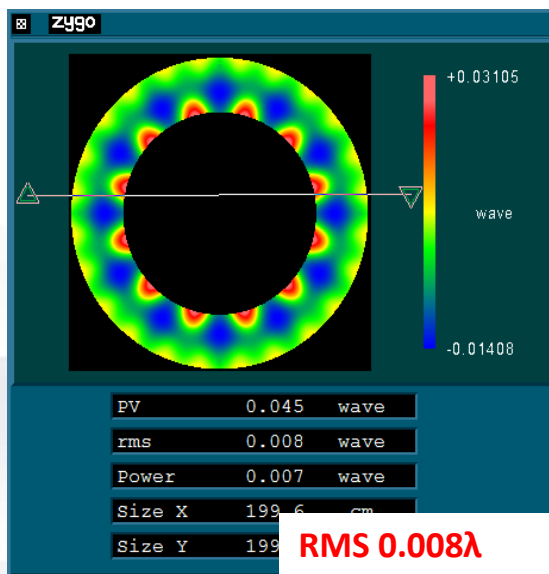
侧底支撑参数优化



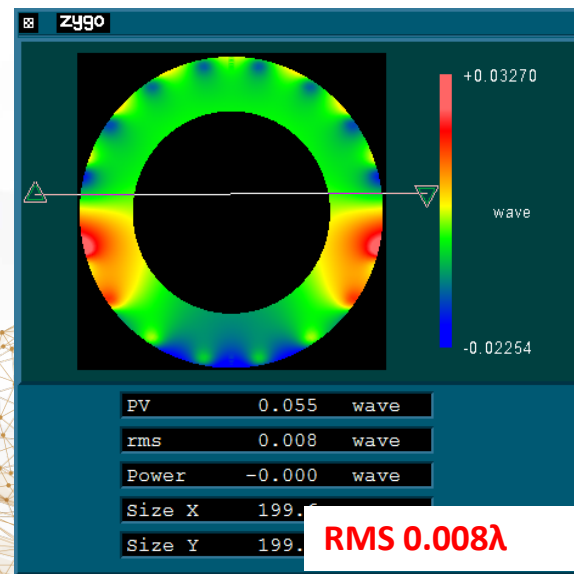
- $\text{Ø}2.05\text{m}$ , 中孔 $\text{Ø}1.3\text{m}$ , 厚 $148\text{mm}$ (径厚比 $13.85$ ),  $K-0.977$ ,  $R6\text{m}$
- 支撑方案: 轴向36点支撑, 侧向16点竖直推拉



支撑方案示意图

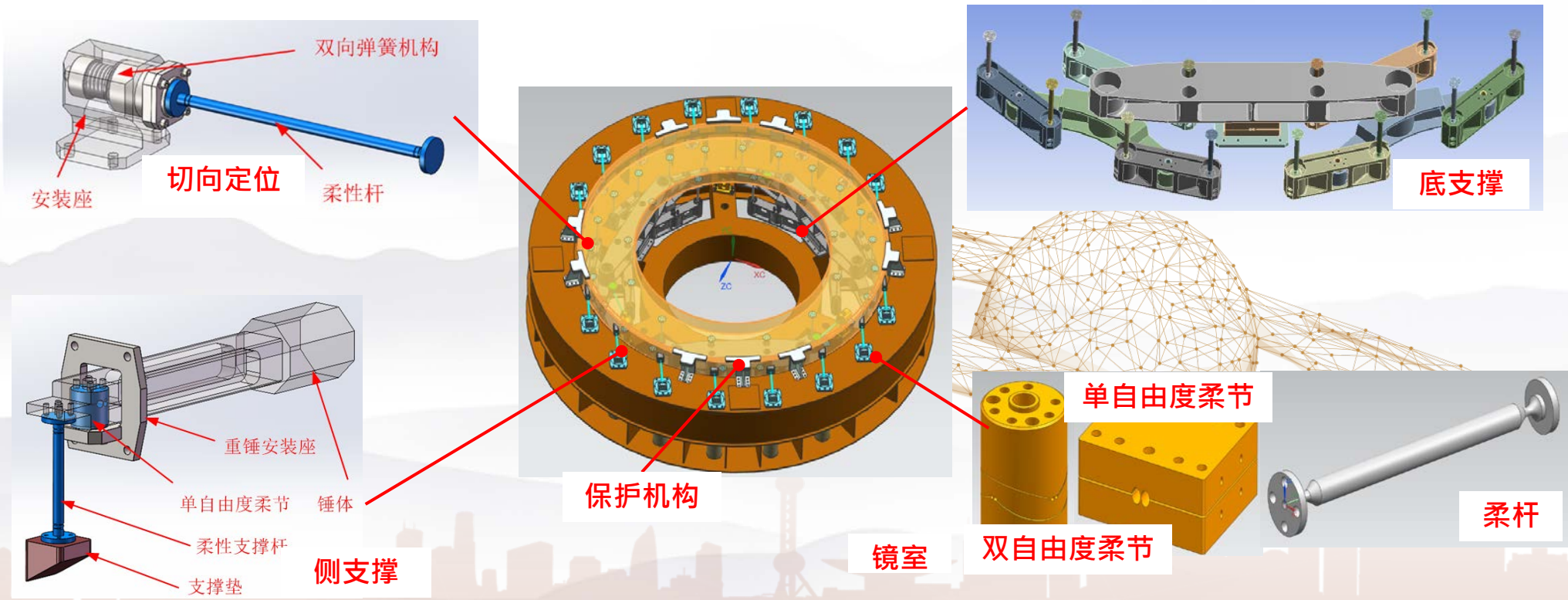


底支撑参数优化结果

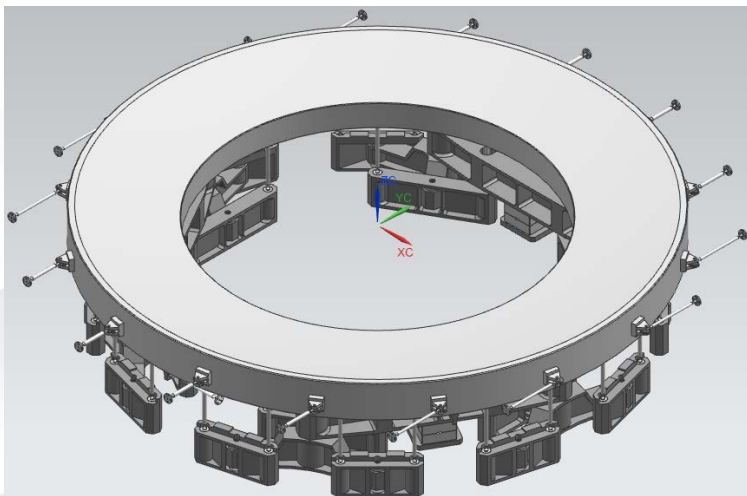


侧支撑参数优化结果

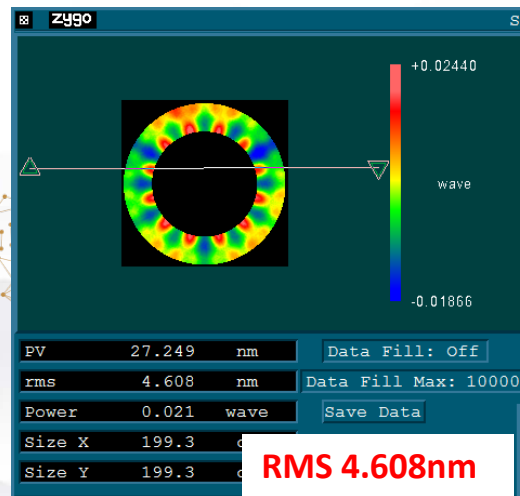
- **结构设计优化条件：**考虑支撑系统质量分布对支撑参数优化的影响；柔性/柔节质量划分对底/侧支撑系统平衡的影响。
- **结构材质：**利用钛合金柔性部件，消除装配和热应力的影响。



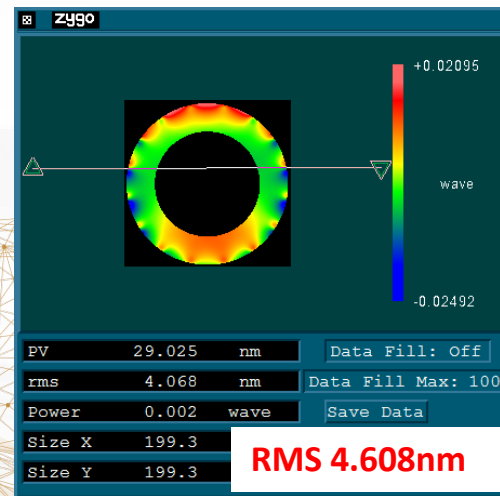
- 利用Workbench对有支撑、定位等结构和镜体构成主镜进行分析，系统分析支撑精度，结果表明：镜体各向支撑精度与理论值相当。从而任意俯仰角下支撑精度满足要求。



主镜系统结构图

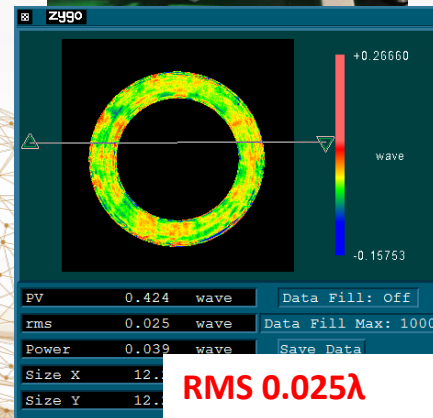
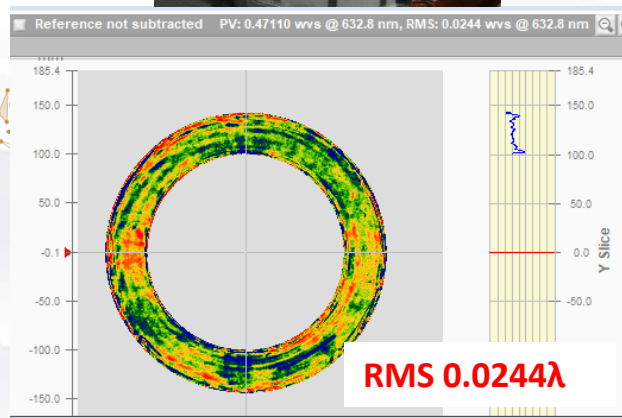
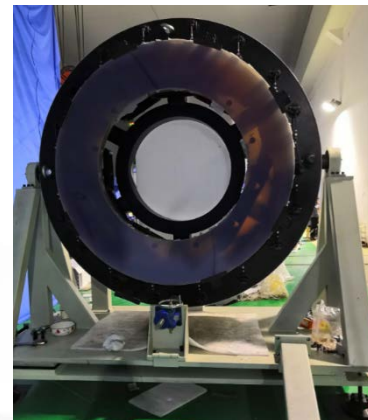


底支撑分析结果



侧支撑分析结果

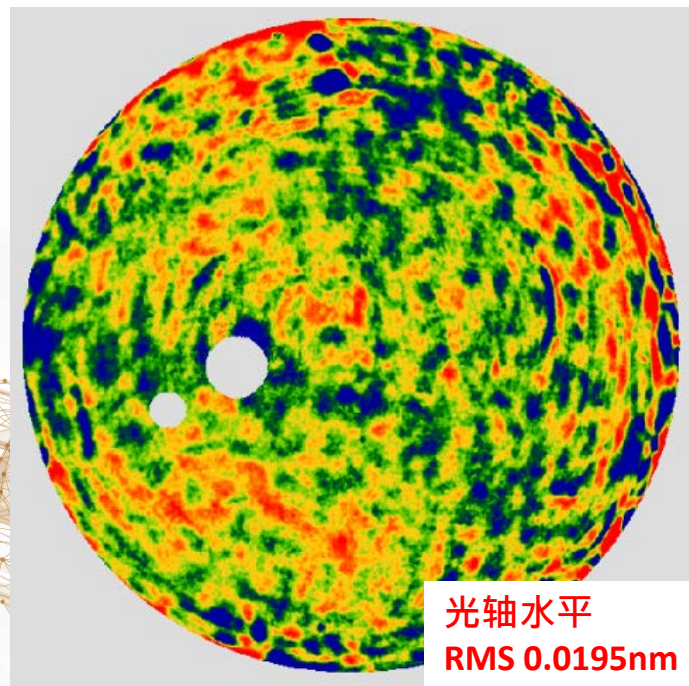
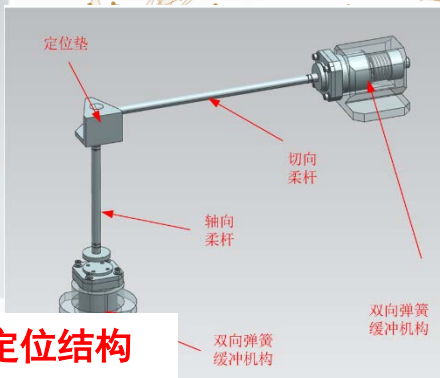
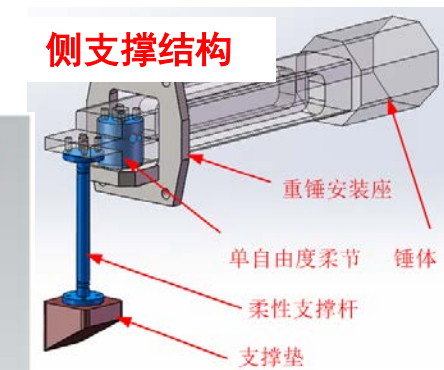
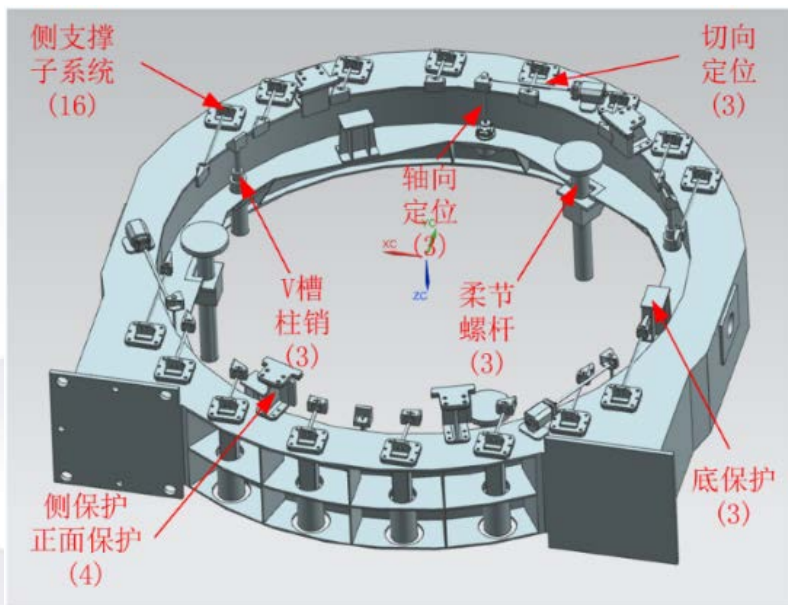
- **加工时为光轴竖直态垂直检验**，此时底支撑起作用；**复测时为光轴水平态检验**，此时侧支撑起作用。
- **检验结果表明两者精度一致**，从而保证任意俯仰角度下精度为 $0.025\lambda$ ，满足望远镜使用要求。



光轴竖直检测结果

光轴水平检测结果

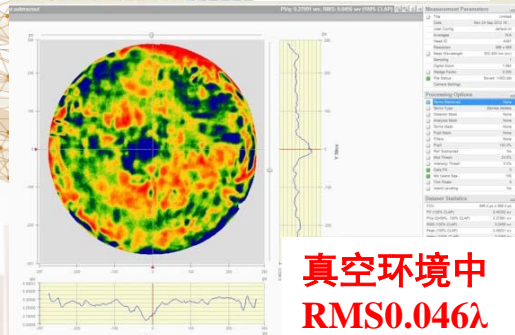
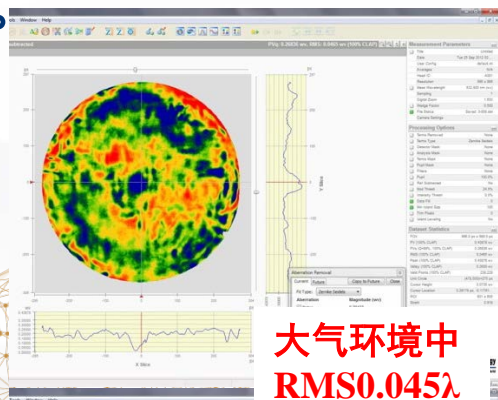
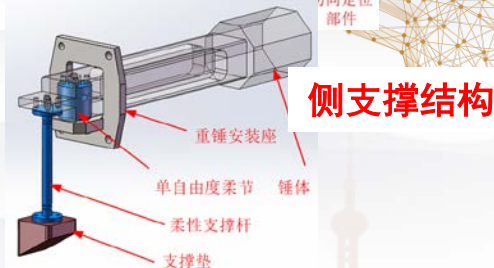
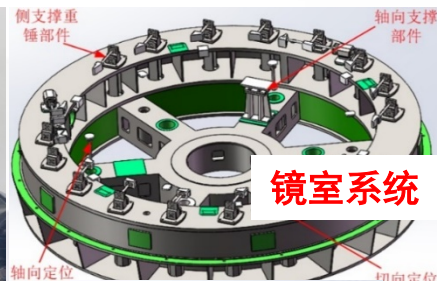
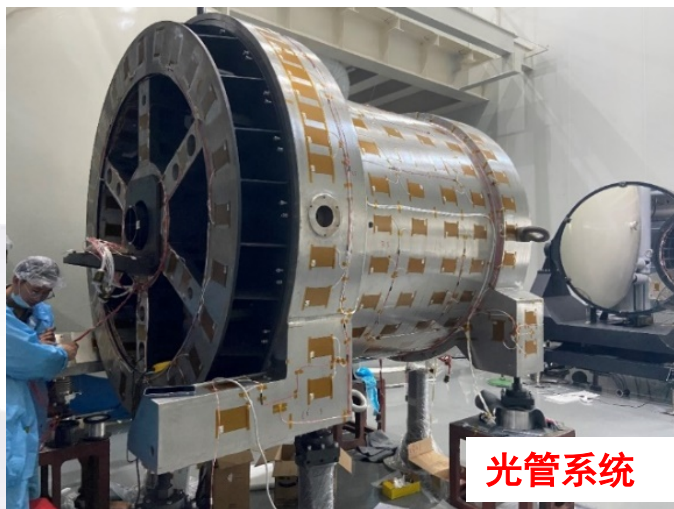
- $\text{Ø}1560\text{mm}$  , 厚 $142\text{mm}$  , 曲率半径 $9051\text{mm}$  ,  $K=-1.0555$  , 离轴量 $1400\text{mm}$
- 支撑结构 : 16点柔性竖直推拉 ; 定位结构 : 3切向杆+3轴向杆



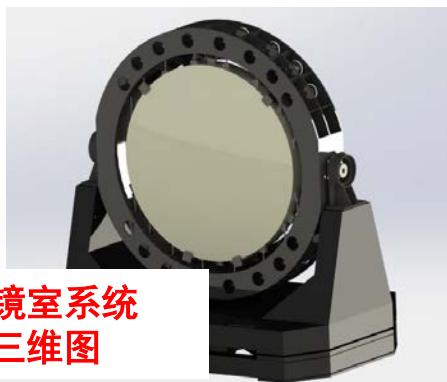
主镜室系统

加工结果

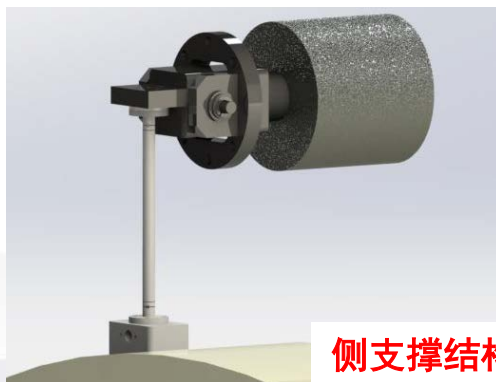
- 真空光管主镜 $\varnothing 1.5\text{m}$ ，边缘厚度 $140\text{mm}$ ， $R4094\text{mm}$ ， $k=-1.0056$
- 支撑结构：16点柔性竖直推拉；定位结构：3切向杆+3轴向杆
- 系统装调后，光管精度：PV： $0.28\lambda$ ，RMS： $0.045\lambda$ 。
- 抽真空后，光管精度：PV： $0.27\lambda$ ，RMS： $0.046\lambda$ 。



- 透镜参数：外径 $\varnothing 1560\text{mm}$ ，平凸式。
- 支撑方案：侧向16点竖直推拉、六杆定位机构。
- 利用柔节消除摩擦、热和装配应力对镜体支撑影响。



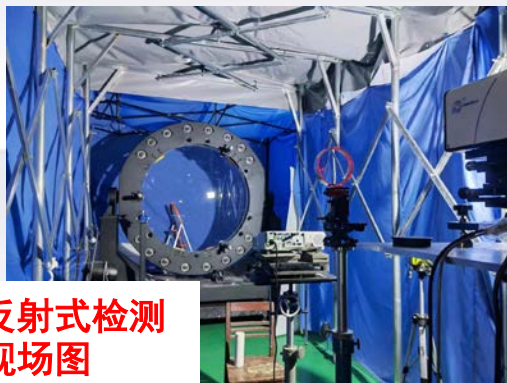
镜室系统  
三维图



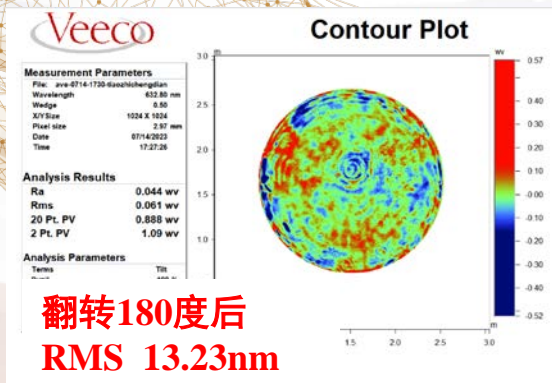
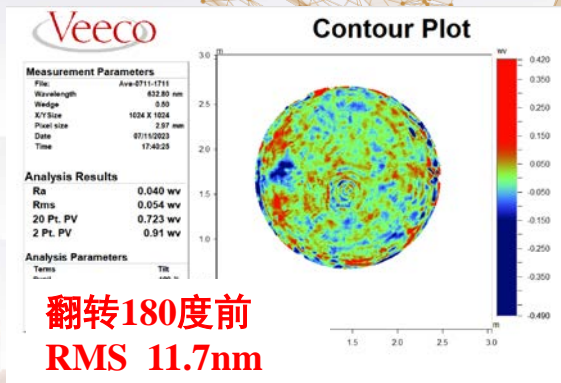
侧支撑结构



定位结构



反射式检测  
现场图



谢谢观看  
Thanks

