

第十届海峡两岸天文望远镜与观测前沿技术研讨会

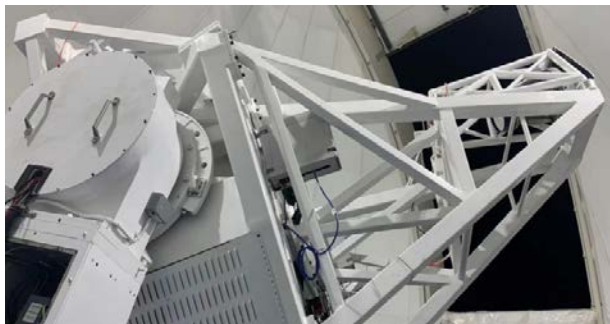
AIMS太阳望远镜装调关键技术

雷昱，付兴，李华，赵建科

中国科学院西安精密机械光学研究所

2023年11月20日

一、背景介绍-AIMS太阳望远镜

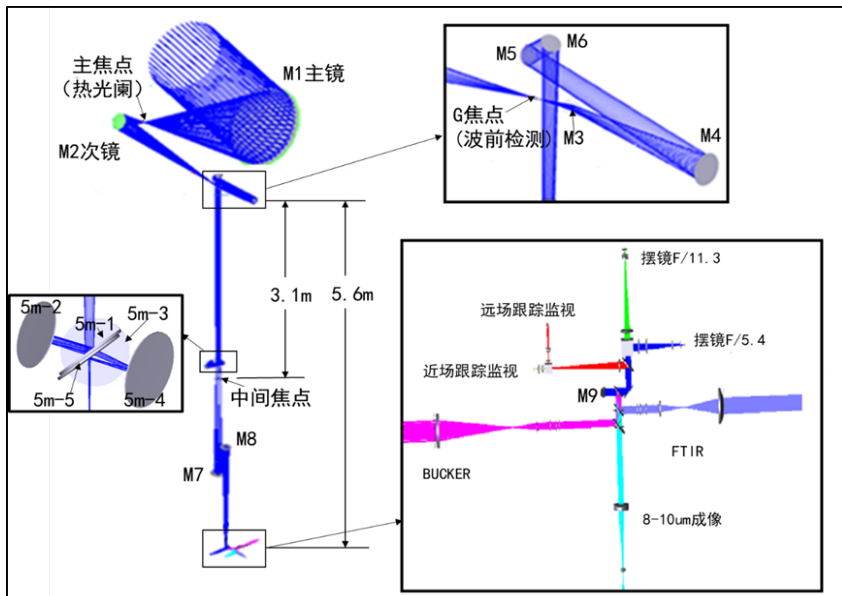


太阳望远镜

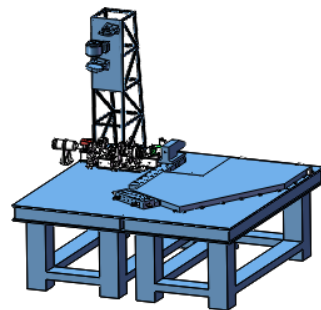
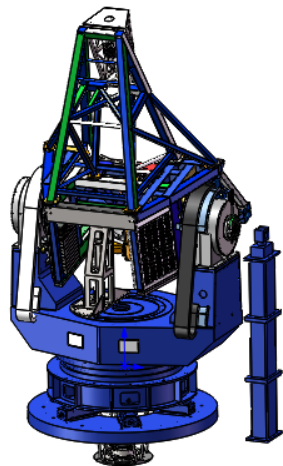


青海冷湖-塞什腾山 (4000m)

国际首个用于太阳中红外磁场观测系统



- (1) 格里高利主次镜系统 → 1.1m口径, 次镜六杆调姿
- (2) 折轴系统 → 复杂空间姿态, 折转光路
- (3) 消旋镜系统 → 国内首个五镜消旋系统
- (4) 后光学系统 → 多波段分光, 用于跟踪/观测



望远镜总体结构

针对AIMS光学系统精密装调，形成三项关键技术

技术1



离轴系统长光路穿心



- 模块化装配，并建立光轴基准
- 自准直成像方法，完成各模块光路对接

技术2



五镜消旋系统装配



- 分析消旋系统特性
- 理论计算和仿真，确定调整自由度
- 完成系统装配，验证方法

技术3



六杆机构像质校正技术

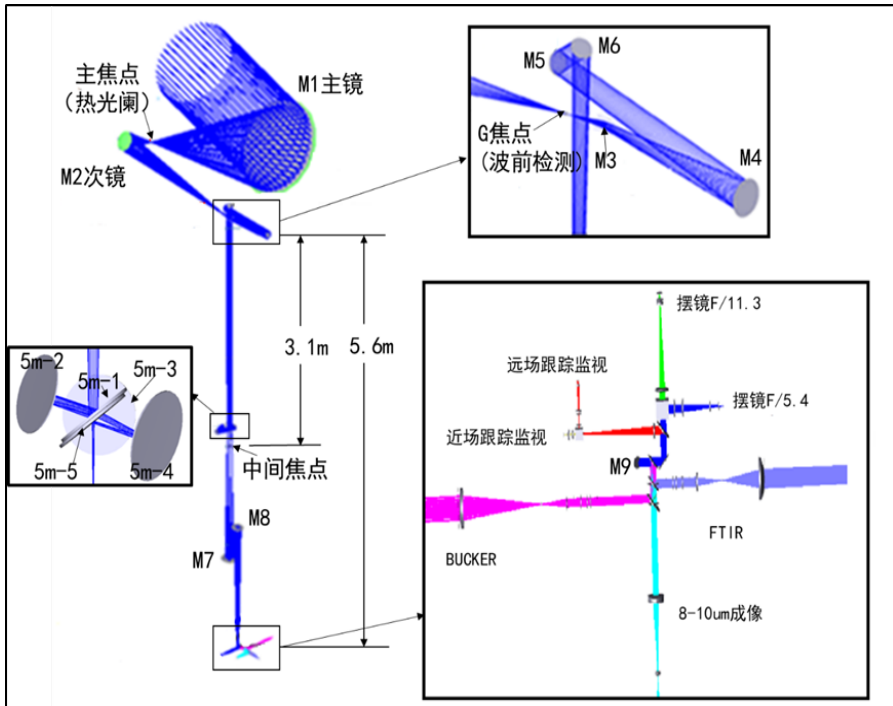


- 计算机辅助装调技术
- 仿真计算+实际测量，得到像差与自由度数学关系
- 完成像质校正调整

二、装调关键技术

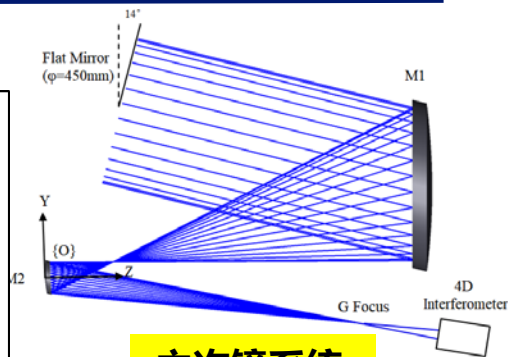
技术1

离轴系统长光路穿心

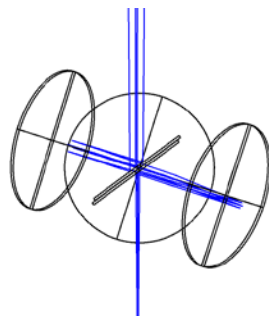


(1) 各模块单独装配，并预留基准接口

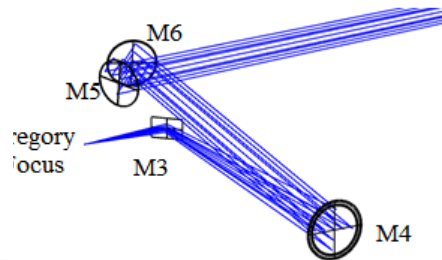
(2) 按照光路方向，将各模块依次对准



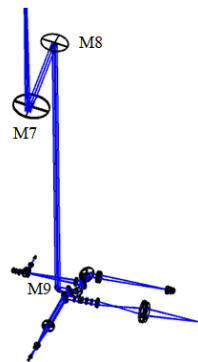
主次镜系统
(M1-M2)



消旋镜系统



折轴镜系统
(M3-M6)



准直系统+后光学
(M7-M9)

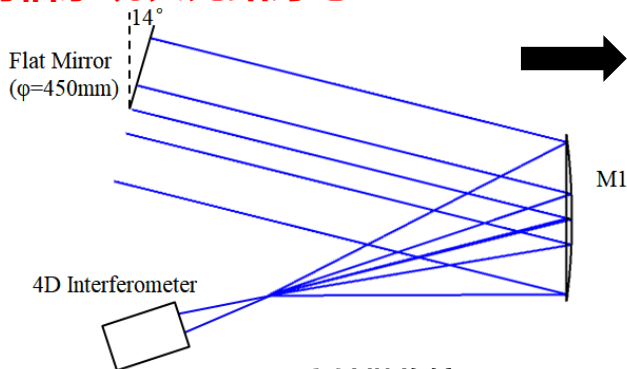
二、装调关键技术

技术1

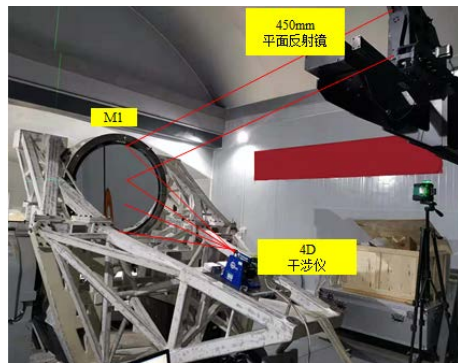
主次镜系统 (M1-M2)



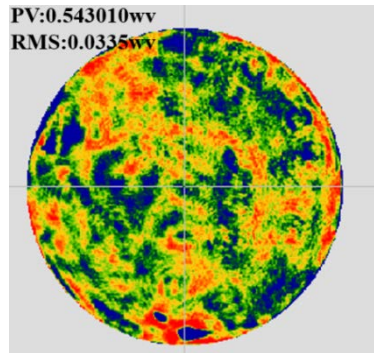
离轴系统长光路穿心



- (1) M1：离轴抛物镜
- (2) 无像差点确定光轴



- (1) 搭建面形检测光路
- (2) 调整检测反射镜角度



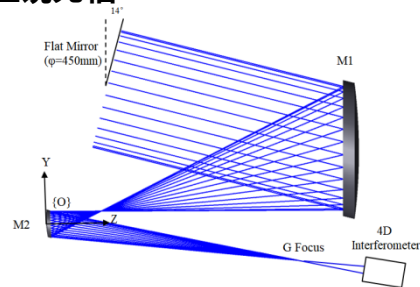
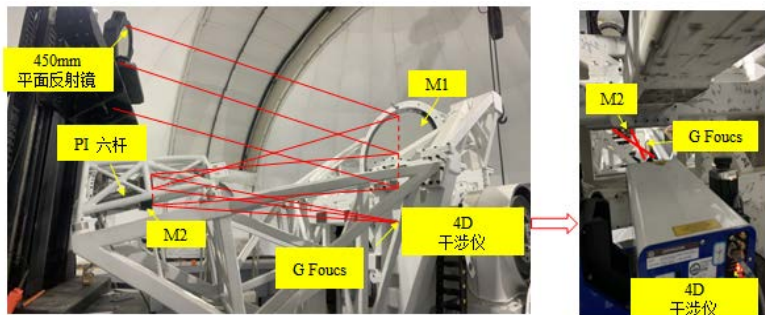
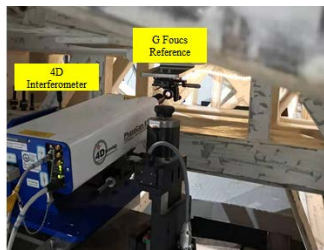
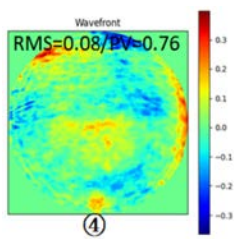
- (3) 主镜面形最小，检测反射镜即为主镜光轴



- (1) 完成主次镜系统调整

- (2) 像质满足要求 (RMS < 0.08)

- (3) 标定焦点位置和方向，建立基准



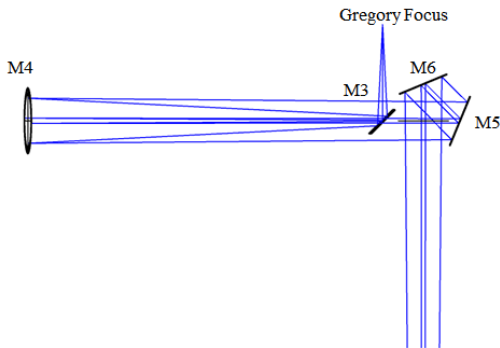
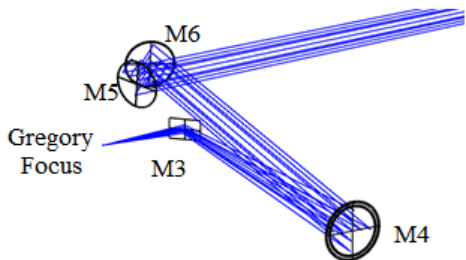
- (1) 搭建M1-M2干涉检测
- (2) 离轴Gregory系统

二、装调关键技术

技术1

离轴系统长光路穿心

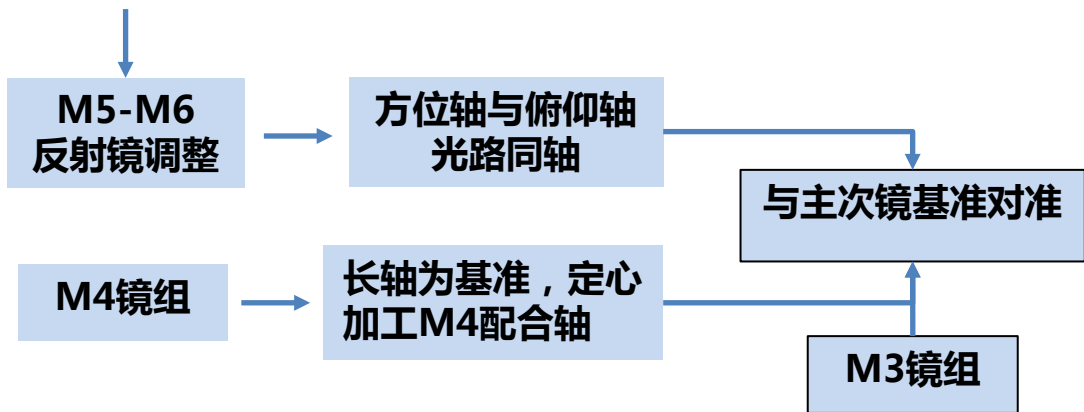
折轴镜系统 (M3-M6)



光路特点(左图所示)：

- (1) M3：平面反射镜，反射主次系统光线至M4
- (2) M4：离轴椭球镜，短轴接M3出射光线，长轴与俯仰轴同轴
- (3) M5：平面反射镜，反射M4长轴光线至M6
- (4) M6：平面反射镜，反射M5光线，出射光线与方位轴同轴

转轴基准标定

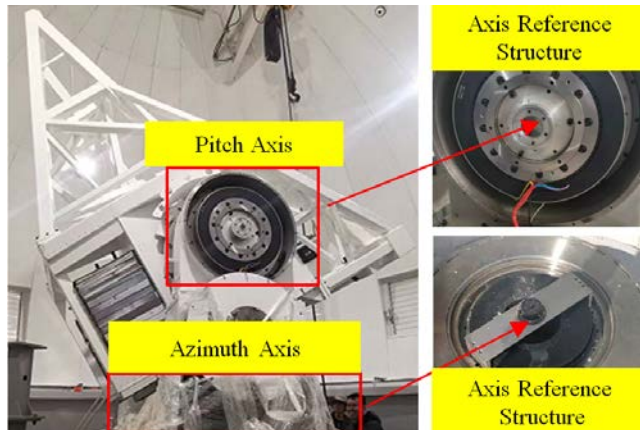
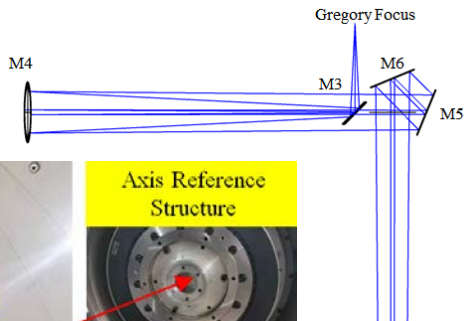


二、装调关键技术

技术1

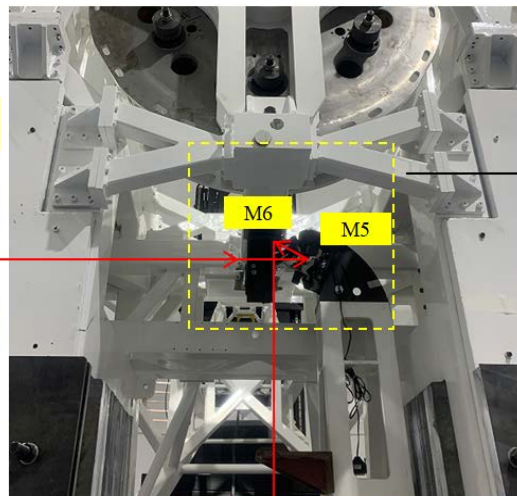
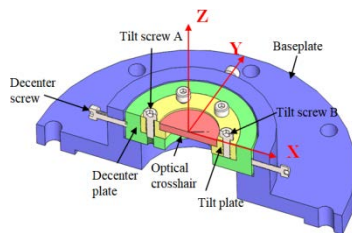
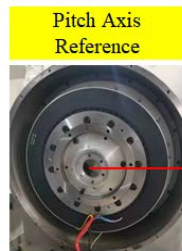
离轴系统长光路穿心

折轴镜系统 (M5-M6)



转轴基准标定

- (1) 轴系安装十字丝基准
- (2) 调整基准偏心和倾斜
- (3) 标定俯仰轴、垂直轴

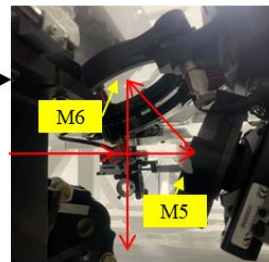


Azimuth Axis Reference

Flat Mirror

M5-M6姿态调整

- (1) 自准直经纬仪与方位轴对准
- (2) 调整M5/M6角度
- (3) 完成方位轴、俯仰轴基准同轴调整



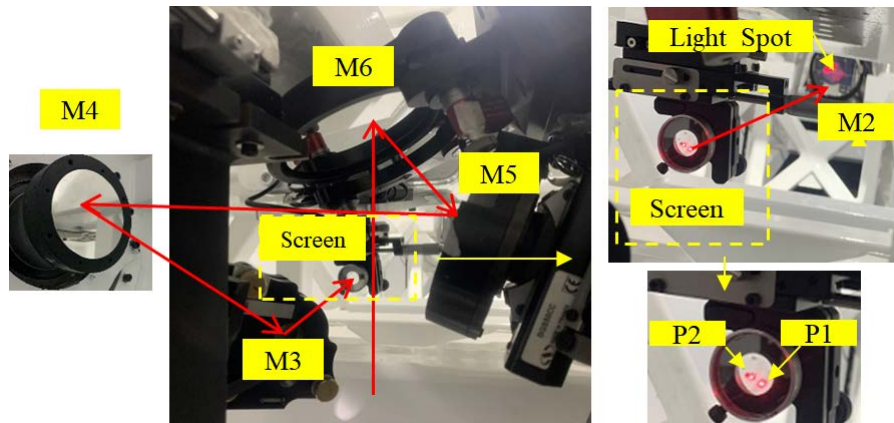
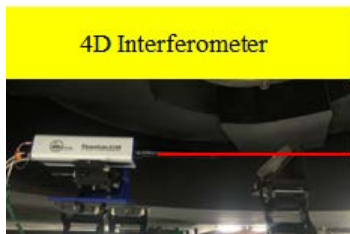
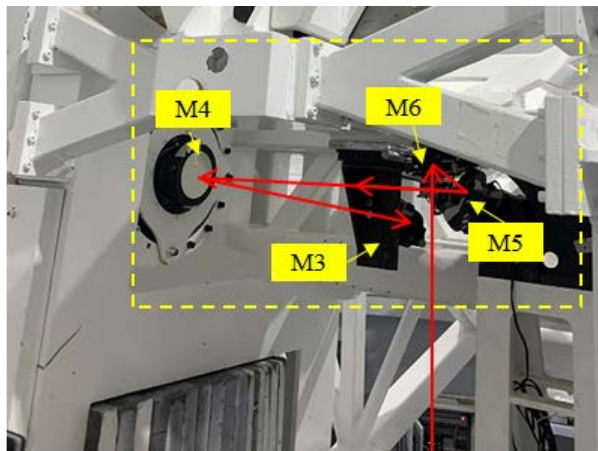
Auto-collimation Theodolite



二、装调关键技术

技术1 离轴系统长光路穿心

折轴镜系统 (M3-M4)



M3-M4姿态调整

- (1) 俯仰轴基准对准 (4D干涉仪-自准-穿心)
- (2) 光线通过M6~M4, 在**主次基准**上汇聚焦点
- (3) 调整M3角度、M4自旋, 保证形成自准直光 (干涉仪条纹)
- (4) 调整M3平移, 保证焦点与**主次基准**中心重合
- (5) 调整M4前后, 保证焦点最小

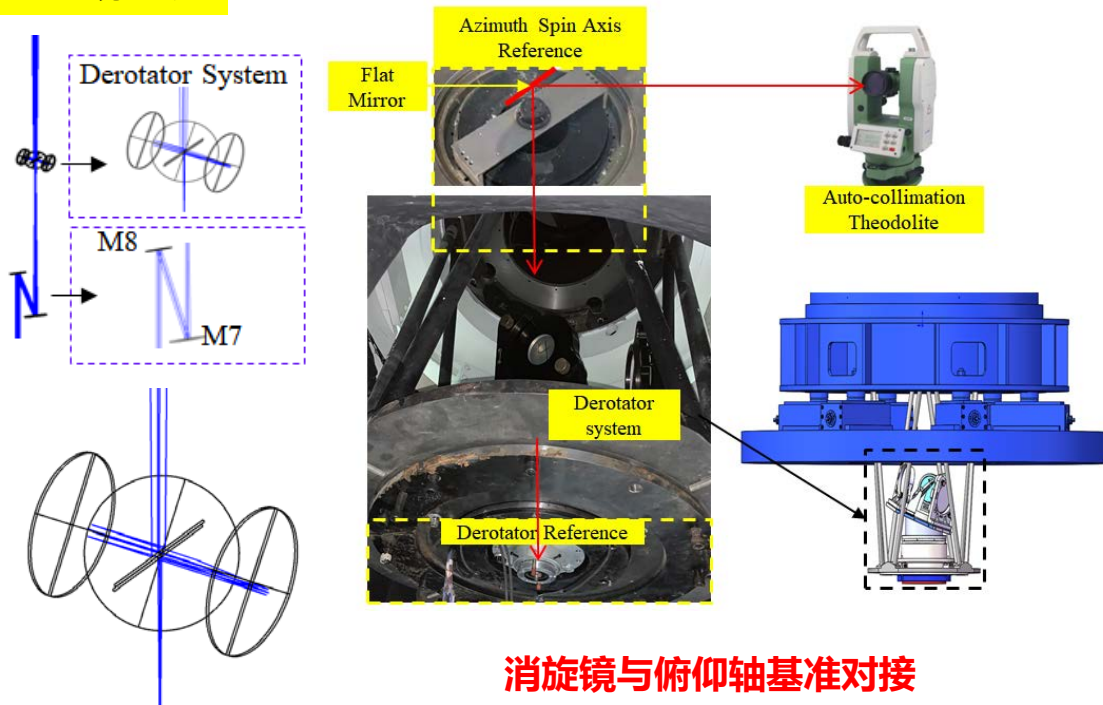
完成折轴镜系统 (M3-M5) 与主次镜系统对准

二、装调关键技术

技术1

离轴系统长光路穿心

消旋镜系统



消旋镜与俯仰轴基准对接

光路特点：

- (1) 五块平面反射镜，自带旋转轴
- (2) 观测太阳过程中可消除像旋转
- (3) 出射光线与入射光线同轴性

装调方法：

- (1) 模块化装配，预留基准（技术2详述）
- (2) 整体调整消旋镜，与俯仰轴基准对准

二、装调关键技术

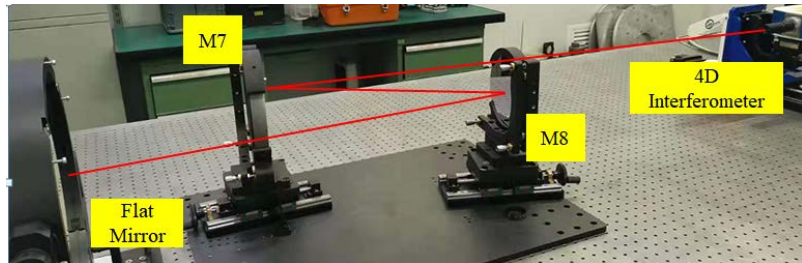
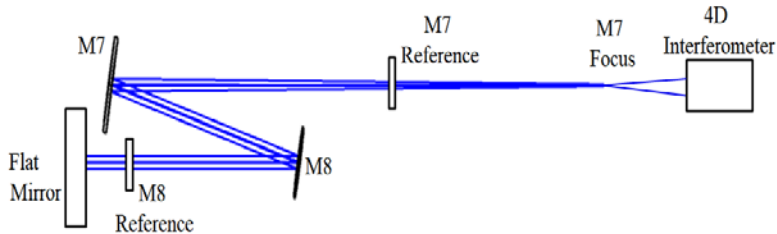
技术1

离轴系统长光路穿心

准直系统 (M7-M8)

光路特点：

- (1) M7为平面镜，M8离轴抛物镜
- (2) 将前端光线准直为平行光

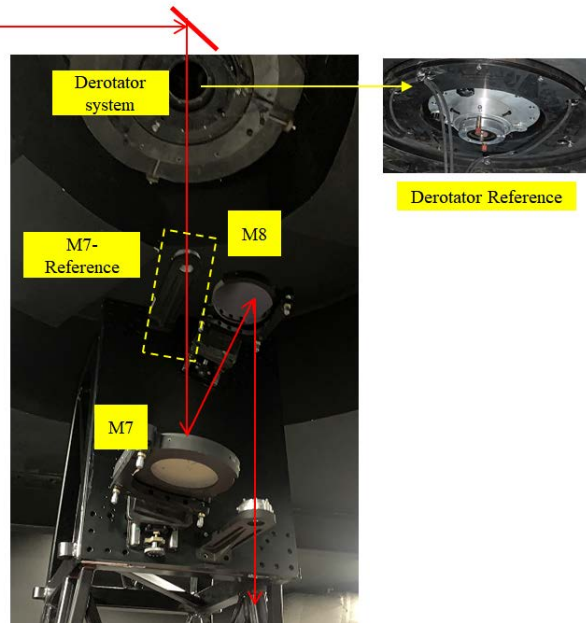


M7-M8模块装配与基准标定

- (1) 搭建干涉仪检测光路，确定M7-M8光轴
- (2) 十字丝标定光轴基准



Auto-collimation
Theodolite



M7-M8模块对接

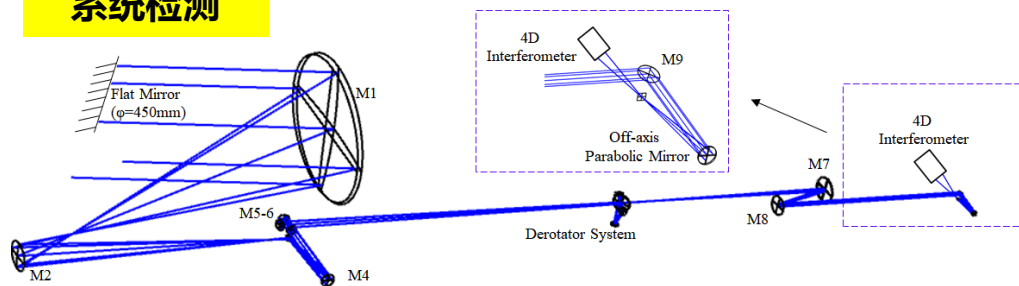
- (1) M7-M8模块已预留基准十字丝
- (2) 调整M7-M8模块，通过与俯仰轴基准对准

二、装调关键技术

技术1

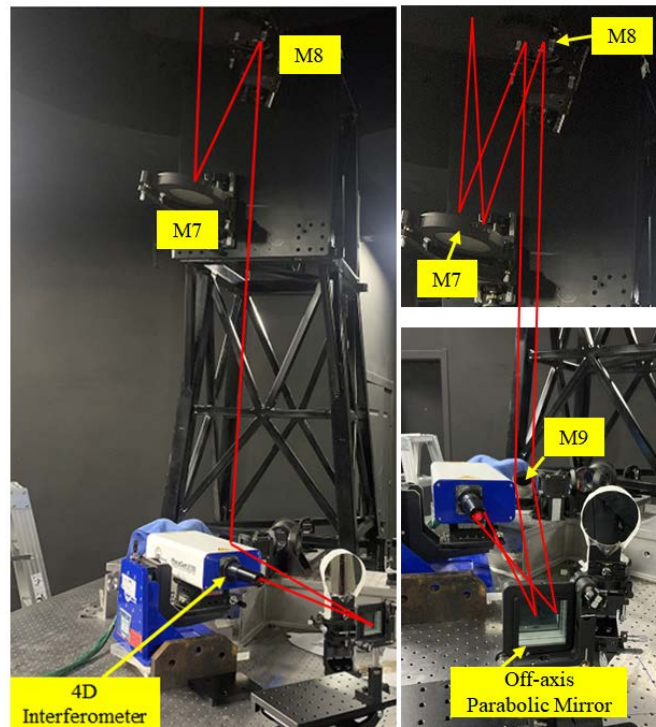
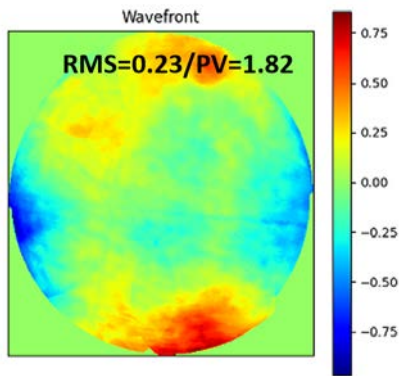
离轴系统长光路穿心

系统检测



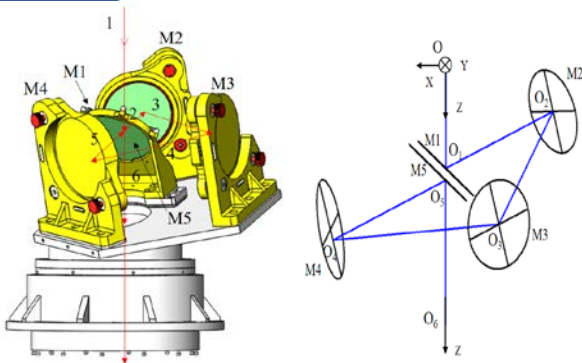
M1-M8光路像质测量

- (1) M1-M8光路完成对接
- (2) 搭建干涉检测光路，已出条纹
- (3) 测量系统波前数据
- (4) 初次完成装后， $RMS=0.23\lambda$
- (5) 光路精调（敏感组件）-技术3详述



二、装调关键技术

技术2 五镜消旋系统装配



旋转过程：光线平行性10" 同轴0.02mm

- ① 国内首个五镜消旋系统
- ② 五个反射镜，法线不共面，姿态复杂
- ③ 多组件多自由度耦合，难度大
- ④ 特性：360°旋转，出射光线与入射光线保持同轴

位姿仿真技术

探索规律

工艺路线设计

实际工程应用

1、理论推导

Zemax+空间矩阵变换+反射定理矩阵形式：证明旋转过程中，出射光线与入射光线同轴性

$$A' = TA = \begin{bmatrix} 1-2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1-2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1-2N_z^2 \end{bmatrix} A \quad R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} R_1 = R_y(36.2^\circ) \\ R_2 = R_1 R_x(30^\circ) \\ R_3 = R_2 R_x(59.972^\circ) R_y(1.1177^\circ) \\ R_4 = R_3 R_y(-1.1177^\circ) R_x(60.028^\circ) R_y(1.1181^\circ) \end{cases}$$

$$\begin{cases} N_1 = N_5 = R_1 \times A = [0.5906 & 0 & 0.8070]^T \\ N_2 = R_2 \times A = [0.8255 & -0.5 & 0.2619]^T \\ N_3 = R_3 \times A = [0.0064 & -0.9998 & -0.0184]^T \\ N_4 = R_4 \times A = [-0.8194 & -0.5 & -0.2804]^T \end{cases}$$

$$A' = TA = T_5(N_5)T_4(N_4)T_3(N_3)T_2(N_2)T_1(N_1)A=A$$

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4 = 0 \\ \Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3 + \Delta y_4 = 0 \\ \Delta z = \Delta z_1 + \Delta z_2 + \Delta z_3 + \Delta z_4 = 7.8 \end{cases}$$

二、装调关键技术

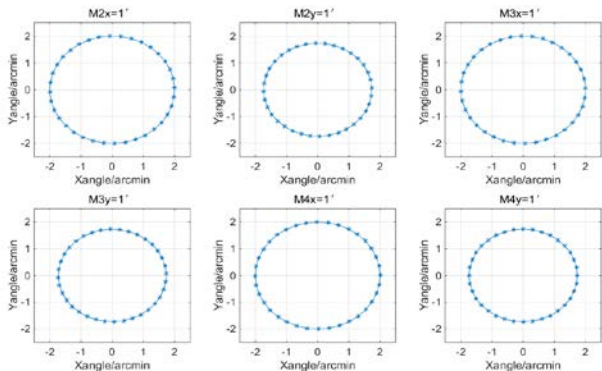
技术2 五镜消旋系统装配

2、多变量扰动分析

单变量、多变量添加至矩阵方程中，计算每个镜子自由度对平行性和偏心性影响

$$\begin{cases} R_2 = R_z(\alpha)R_1R_y(36.2^\circ)R_x(30^\circ)R_x(M2x)R_y(M2y) \\ R_3 = R_z(\alpha)R_2R_x(59.972^\circ)R_y(1.1177^\circ)R_x(M3x)R_y(M3y) \\ R_4 = R_z(\alpha)R_3R_y(-1.1177^\circ)R_x(60.028^\circ)R_y(1.1181^\circ)R_x(M4x)R_y(M4y) \end{cases}$$

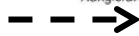
← 添加扰动



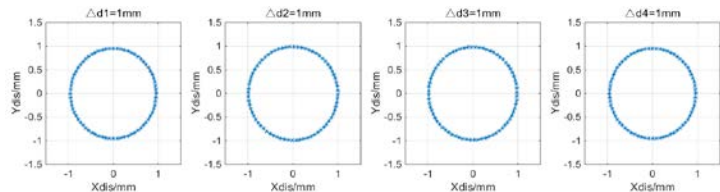
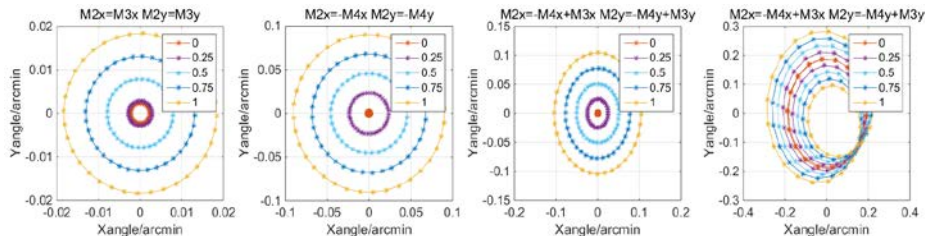
单变量-平行性仿真



根据结果，叠加影响

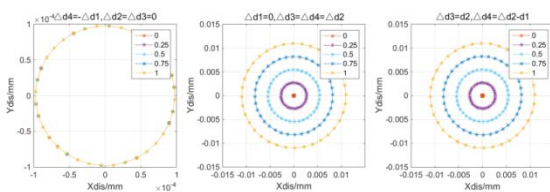


多变量-平行性仿真



单变量-偏心性仿真

→ 根据结果，叠加影响



多变量-偏心性仿真

M2反射镜的M2x、M2y角度、光学间隔偏差 $\Delta d3$ 、 $\Delta d4$ 可显著改善出射光线同轴性，简化调整自由度12→4

二、装调关键技术

技术2 五镜消旋系统装配

3、装调方案设计

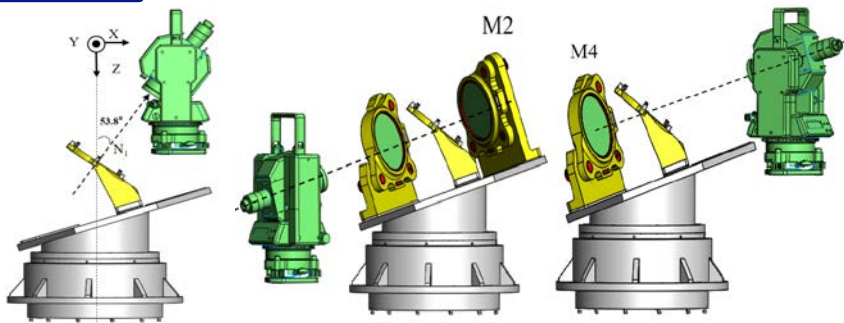
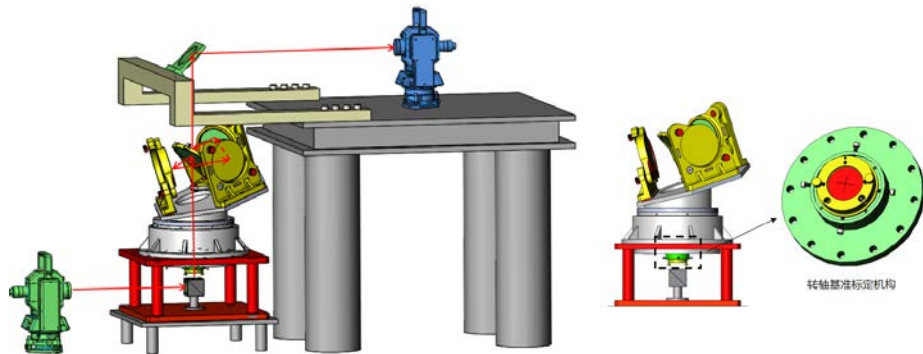


表 2 消旋镜各反射镜法向量空间角度

Mirror	α (degree)	β (degree)
M1	-53.8°	0
M2	15.1799°	-31.2028°
M3	1.0628°	-89.6381°
M4	-16.2809°	31.3775°
M5	-53.8°	0

- Zemax+坐标变换，计算反射镜姿态
- 经纬仪建立空间基准，完成角度定位

角度调整，保证偏差小于1'，满足仿真分析的精度



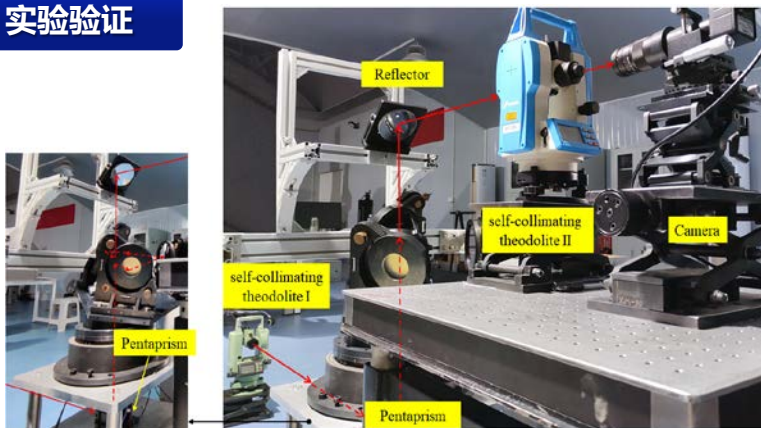
- 五棱镜+双经纬仪建立装调平台
- 4维调整十字丝标定转轴基准
- 经纬仪动态调焦，检测平行偏心性

通过 M2角度、 $\Delta d3$ 、 $\Delta d4$ 保证光线的同轴性

二、装调关键技术

技术2 五镜消旋系统装配

4、实验验证

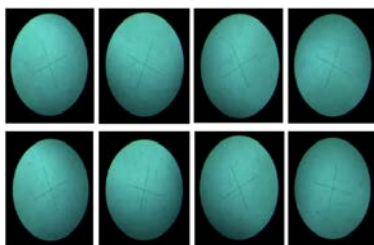


基于Zemax+空间矩阵变换的位姿仿真技术

技术延伸
应用

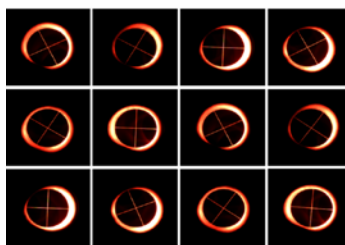
光机系统空间复杂位姿仿真技术

探索多变量对成像质量影响



偏心量为 $\pm 0.019\text{mm}$

序号	X	Y	dx	dy	d	距离
1	68	69	0	0	0	0
2	68	70	0	1	1	0.027
3	68	70	0	1	1	0.027
4	67	70	1	1	1.414	0.038
5	68	70	0	1	1	0.027
6	68	70	0	1	1	0.027
7	68	69	0	0	0	0
8	68	69	0	0	0	0



角度量为 $\pm 10''$

序号	X	Y	tx	ty	total	角度
1	70	71	0	0	0	0
2	69	71	1	0	1	6.66°
3	68	70	2	1	2.23	14.8°
4	69	69	1	2	2.23	14.8°
5	70	68	0	3	3	30°
6	70	69	0	2	2	13.2°
7	70	70	0	1	1	6.66°
8	69	70	1	1	1.414	9.41°
9	69	70	1	1	1.414	9.41°
10	69	71	1	0	1	6.66°
11	69	70	1	1	1.414	9.41°
12	69	70	1	1	1.414	9.41°

完成系统冷湖台址装配

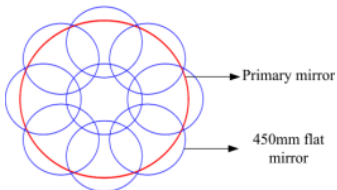


二、装调关键技术

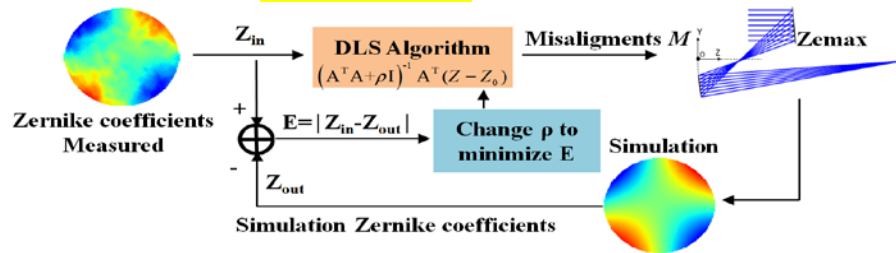
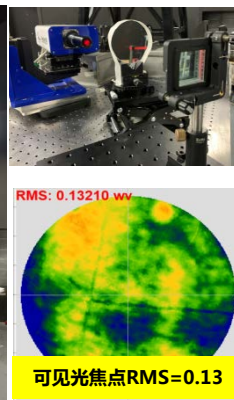
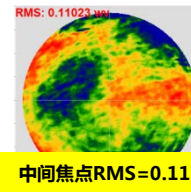
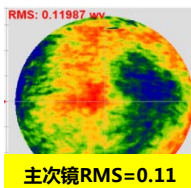
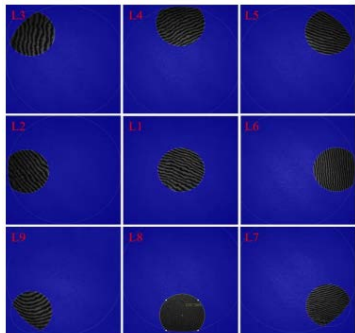
技术3 六杆机构像质校正技术



M2镜组六杆调姿-主动校正像质



大口径系统拼接检测原理

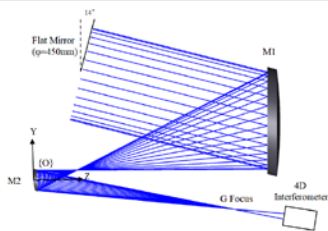


- (1) 次镜采用六杆机构，可对像质进行校正
- (2) 主次镜系统：理论计算灵敏度矩阵，采用计算机辅助装调技，计算六杆调整量
- (3) 可见光焦点：使用六杆对次镜位姿扰动，计算系统实际灵敏度矩阵，反算六杆调整量

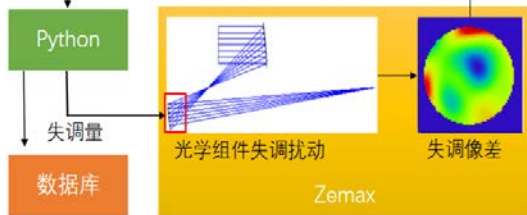
二、装调关键技术

技术3 六杆机构像质校正技术

主次镜系统-六杆调整



像差系数获取Zernike Coefficients

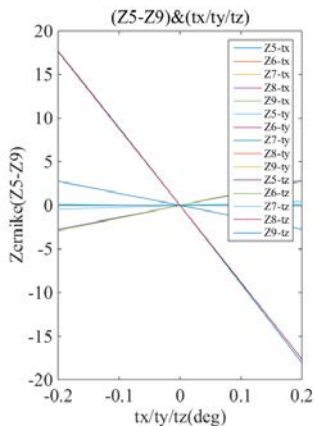
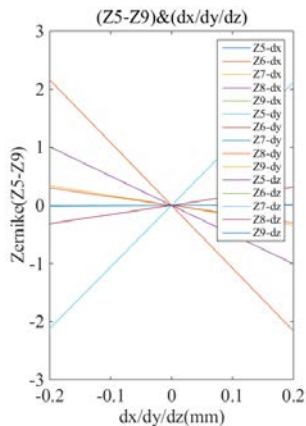


基于分析数据，使用雅克比矩阵，表征次镜自由度与像差关系

$$\begin{cases} \Delta Z5 = \frac{\partial Z5}{\partial dx} \Delta dx + \frac{\partial Z5}{\partial dy} \Delta dy + \frac{\partial Z5}{\partial dz} \Delta dz + \frac{\partial Z5}{\partial Tx} \Delta Tx + \frac{\partial Z5}{\partial Ty} \Delta Ty + \frac{\partial Z5}{\partial Tz} \Delta Tz \\ \Delta Z6 = \frac{\partial Z6}{\partial dx} \Delta dx + \frac{\partial Z6}{\partial dy} \Delta dy + \frac{\partial Z6}{\partial dz} \Delta dz + \frac{\partial Z6}{\partial Tx} \Delta Tx + \frac{\partial Z6}{\partial Ty} \Delta Ty + \frac{\partial Z6}{\partial Tz} \Delta Tz \\ \Delta Z7 = \frac{\partial Z7}{\partial dx} \Delta dx + \frac{\partial Z7}{\partial dy} \Delta dy + \frac{\partial Z7}{\partial dz} \Delta dz + \frac{\partial Z7}{\partial Tx} \Delta Tx + \frac{\partial Z7}{\partial Ty} \Delta Ty + \frac{\partial Z7}{\partial Tz} \Delta Tz \\ \Delta Z8 = \frac{\partial Z8}{\partial dx} \Delta dx + \frac{\partial Z8}{\partial dy} \Delta dy + \frac{\partial Z8}{\partial dz} \Delta dz + \frac{\partial Z8}{\partial Tx} \Delta Tx + \frac{\partial Z8}{\partial Ty} \Delta Ty + \frac{\partial Z8}{\partial Tz} \Delta Tz \\ \Delta Z9 = \frac{\partial Z9}{\partial dx} \Delta dx + \frac{\partial Z9}{\partial dy} \Delta dy + \frac{\partial Z9}{\partial dz} \Delta dz + \frac{\partial Z9}{\partial Tx} \Delta Tx + \frac{\partial Z9}{\partial Ty} \Delta Ty + \frac{\partial Z9}{\partial Tz} \Delta Tz \end{cases}$$

主次镜系统 (离轴Gregory)

Zemax+Python联合仿真



$$\begin{bmatrix} \Delta Z5 \\ \Delta Z6 \\ \Delta Z7 \\ \Delta Z8 \\ \Delta Z9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -9.57 & 71.0 & 0 & 5.04 \\ 10.8 & 0 & 0 & 80.2 & 0 \\ 1.7 & 0 & 0 & 12.6 & 0 \\ 0 & 1.11 & -8.22 & 0 & -1.54 \\ 0 & -0.066 & 0.493 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta dx \\ \Delta dy \\ \Delta tx \\ \Delta ty \\ \Delta dz \end{bmatrix}$$

已知像差，求解自由度： $\Delta Z = A \cdot M \rightarrow M = (A^T A)^{-1} A^T \Delta Z = B \cdot \Delta Z$

矩阵条件大，计算不稳定： $cond(B) = \|B^{-1}\| \cdot \|B\| = 1.44 \times 10^4$

阻尼最小二乘法： $M = (A^T A + \rho I)^{-1} A^T \Delta Z$

次镜自由度对Zernike像差系数的影响

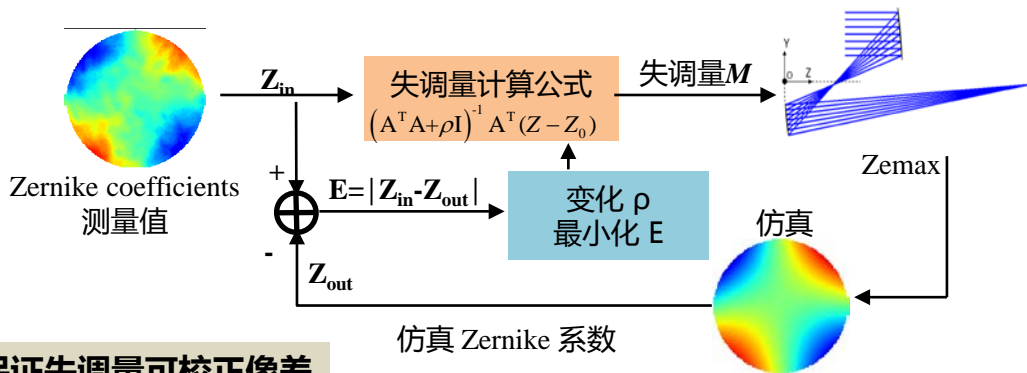
二、装调关键技术

技术3 六杆机构像质校正技术

主次镜系统-六杆调整

自适应阻尼最小二次法

$$M = (A^T A + \rho I)^{-1} A^T (Z - Z_0)$$



逆向优化方法确定合适阻尼系数，保证失调量可校正像差

逆向优化方法原理

- ① 以实测像差系数为输入
- ② 给定初始阻尼系数 ρ ，计算失调量 M
- ③ M 带入 Zemax，元件逆向运动 M
- ④ 得到仿真像差系数，与输入求偏差
- ⑤ 调整阻尼系数 ρ ，保证偏差最小
- ⑥ 得到合适阻尼系数，对应失调量可校正像差

$$\begin{cases} E = \sum_{i=5}^9 |Z_{in}^i - Z_{out}^i| \\ \Delta RMS = |RMS_{input} - RMS_{output}| \end{cases}$$

Z ：失调 Zernike 系数（4D 干涉仪测量）

A ：灵敏度矩阵

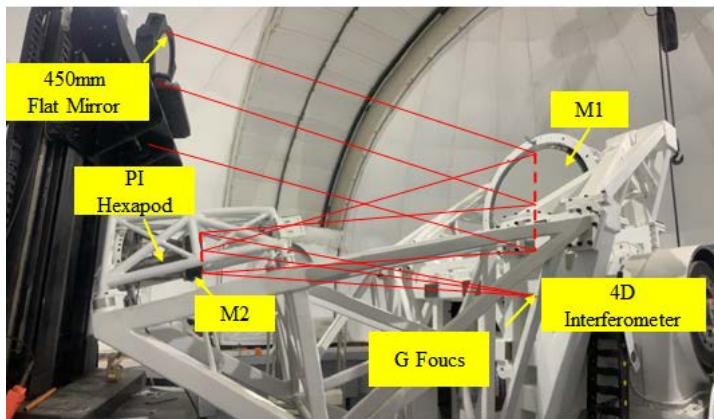
M ：次镜、三镜失调量

ρ ：阻尼系数，根据输入变化，保证偏差最小，偏差 E 和 ΔRMS 如右公式所示：

二、装调关键技术

技术3 六杆机构像质校正技术

主次镜系统-六杆调整



完成六杆像质校正实验验证

- A. 干涉仪测量像差Zernike系数作为输入
- B. 自适应最小二乘法计算失调量
- C. 六杆机构主动调整，校正像质
- D. 2~3次主动调整后，RMS收敛至 0.08λ

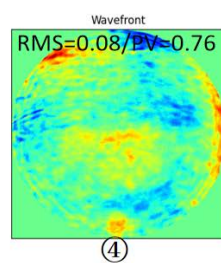
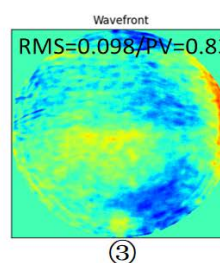
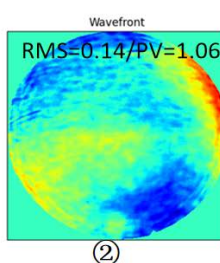
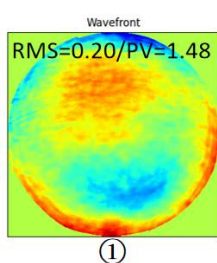


表 2-六杆调整量

Iteration	Hexapod control data						RMS
	x	y	z	tx	ty	tz	
-	-	-	-	-	-	-	0.20λ
①	0.0000	0.0000	0.967	-0.0014	-0.0228	0.000	0.14λ
②	0.0000	0.0000	0.000	0.0023	0.0014	0.000	0.098λ
③	0.0000	0.0000	0.000	0.0005	0.0007	0.000	0.08λ

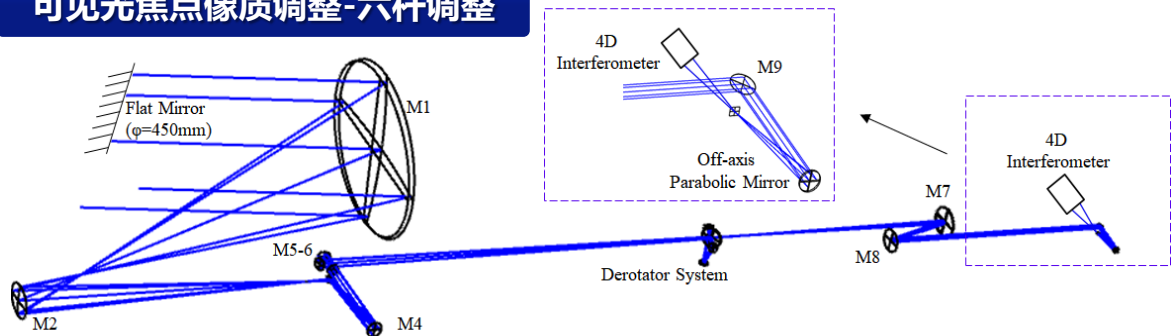
表 3-主次镜波前数据

Iteration	Fringe Zernike					RMS
	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	
①	0.055	0.029	0.123	-0.508	0.06	0.20λ
②	0.159	0.237	0.123	0.012	0.06	0.14λ
③	0.09	0.07	0.105	0.03	0.06	0.098λ
④	0.017	-0.03	0.05	0.019	0.05	0.08λ

二、装调关键技术

技术3 六杆机构像质校正技术

可见光焦点像质调整-六杆调整



- 可见光系统包括：M1-M8
- 光路长，光学元件多
- 光路与理论有偏差
- 理论计算灵敏度矩阵有偏差

$$\begin{bmatrix} \Delta Z_5^1 & L & \Delta Z_5^n \\ \Delta Z_6^1 & L & \Delta Z_6^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T x^1 & L & \Delta T x^n \\ \Delta T y^1 & L & \Delta T y^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T x^1 & L & \Delta T x^n \\ \Delta T y^1 & L & \Delta T y^n \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 72.30 & -69.19 \\ -52.70 & -22.54 \end{bmatrix}$$

①构建六杆调整与像差数学模型（像散）

②六杆实施扰动，计算实际灵敏度

$$\Delta Z = M \Delta T \longrightarrow M = \Delta Z (\Delta T^T \Delta T)^{-1} \Delta T^T \longrightarrow \Delta T_{new} = M \Delta Z_{new} = (M^T M)^{-1} M^T (0 - Z_{new})$$

③得到六杆自由度与像差关系

④以实测矩阵关系，计算次镜调整量

二、装调关键技术

技术3 六杆机构像质校正技术

可见光焦点像质调整-六杆调整

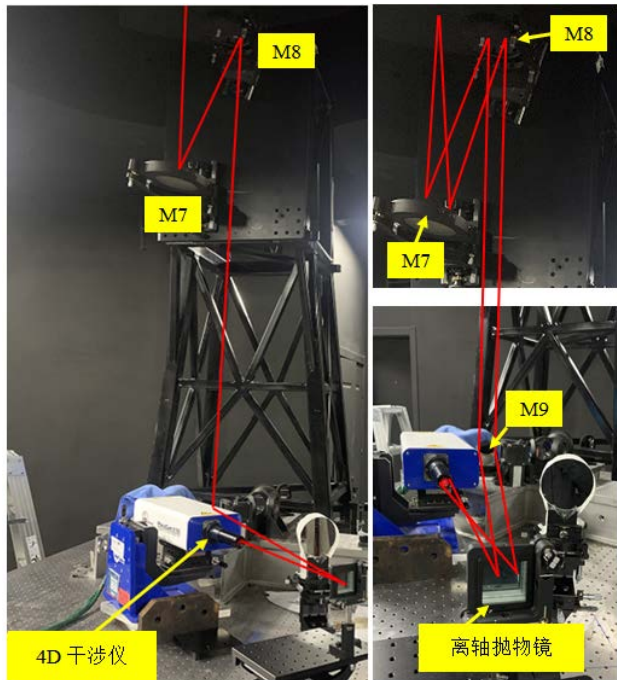


表 6- M1-M9 System 像差系数

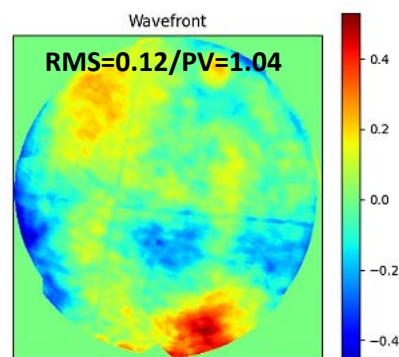
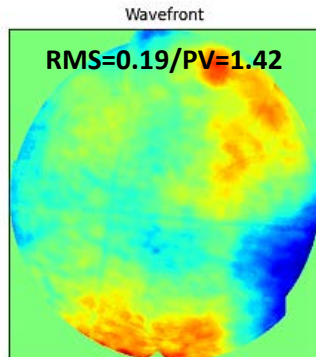
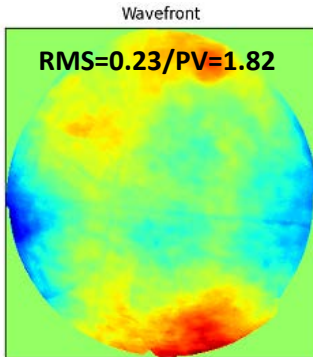
Iteration	Fringe Zernike					RMS
	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	
①	-0.47	-0.06	0.14	-0.109	-0.102	0.233 λ
②	-0.20	0.25	-0.07	-0.109	-0.07	0.1926
③	-0.10	0.08	0.07	-0.08	-0.05	0.12 λ

表 7- 六杆控制量

Iteration	Hexapod control data						RMS	PV
	x	y	z	tx	ty	tz		
①	0.0000	0.0000	0.000	-0.0012	-0.0056	0	0.233 λ	1.83 λ
②	0.0000	0.0000	0.000	-0.0042	0.0014	0	0.0192 λ	1.42 λ
③	0.0000	0.0000	0.000	-0.0007	-0.0022	0	0.12 λ	1.04 λ

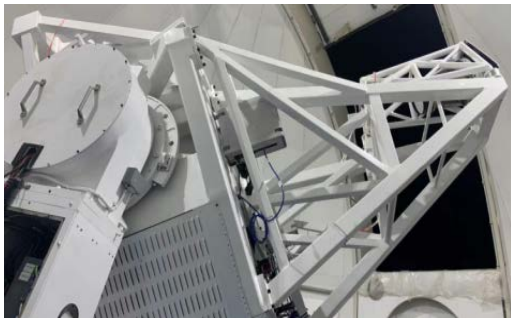
完成六杆像质校正实验验证

- ① 测量像差Zernike系数作为输入
- ② 以实测灵敏度矩阵计算M2
- ③ 六杆机构主动调整，校正像质
- ④ 多次调整后，RMS收敛0.12 λ

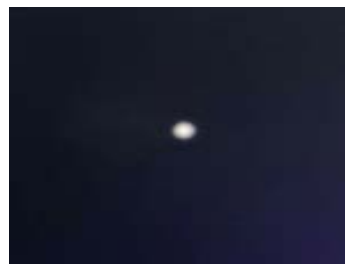


三、实验观测

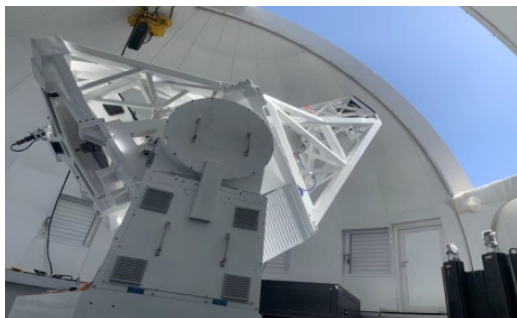
星点和太阳观测



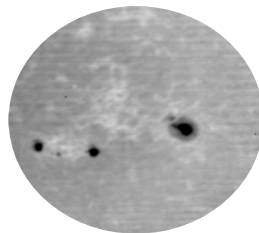
望远镜观星



星点像圆整



完成太阳观测



太阳黑子像边缘清晰

感谢您的聆听！

雷昱

中国科学院西安精密机械光学研究所

邮箱：leiyu@opt.ac.cn