



中科院南京天文仪器有限公司

CAS Nanjing Astronomical Instruments Co., LTD

# 基于瑞奇-康芒检测的大口径平面镜抛光

——第十届海峡天文望远镜与观测前沿技术两岸研讨会

武兆平

2023年11月23日

# 报告内容

---

1. 瑞奇-康芒检测技术
2. 平面镜检测-加工系统
3. 大口径平面镜加工工艺
4. 多机器人协同加工模式
5. 应用成果

# 瑞奇-康芒检测技术

---



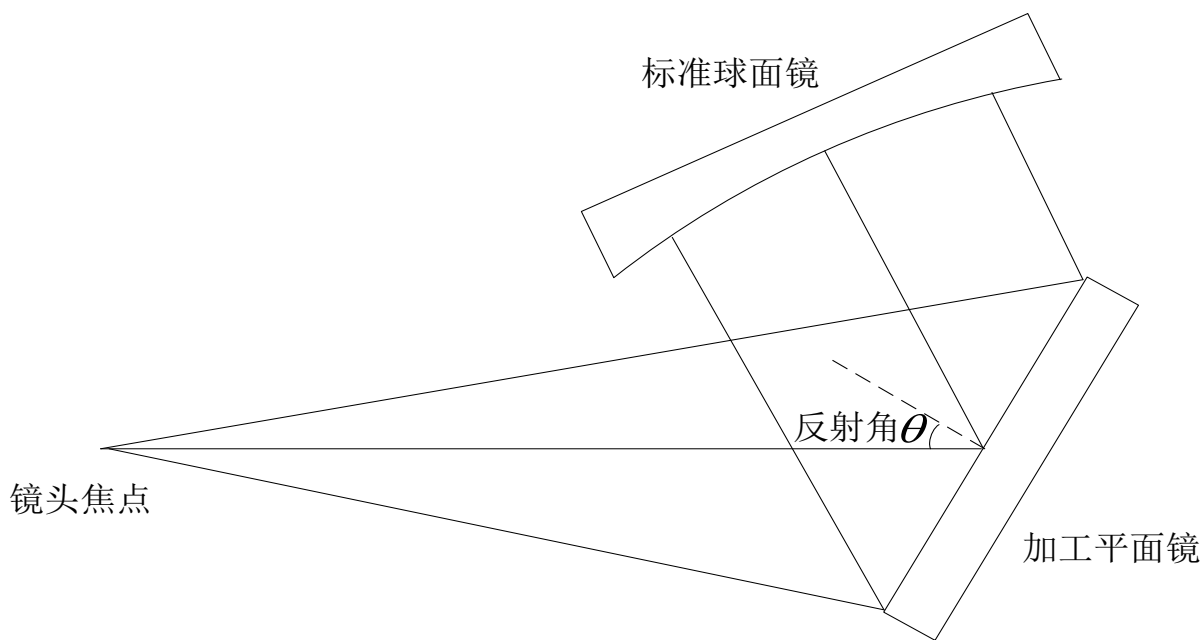
大口径平面镜是光学系统自准检测不可缺少的标准器具，其本身需要获得较为准确的面形信息

目前的平面干涉仪口径都在1m一下，且价格高昂

拼接法操作复杂，且移动干涉仪或者平面镜的时候，会引入多种误差

# 瑞奇-康芒检测技术

瑞奇-康芒检测原理图



干涉仪发出的准直光束经过镜头变成发散光束，平面镜以一定的角度斜插入到发散光路中，检测光束经平面镜反射到标准球面镜，再由标准球面镜反射后沿原光路返回与干涉仪内部的参考光束发生干涉，最后利用干涉仪测得数据进行分析、计算得到平面镜的面形误差。

# 瑞奇-康芒检测技术

## 坐标及幅值转换法

$x_s$ 、 $y_s$ 表示被检平面镜镜面坐标系  
 $x_p$ 、 $y_p$ 表示检测系统光瞳面坐标系

$$x_s = \frac{d \cdot x_p}{d \cdot \cos \theta - x_p \cdot \sin \theta}$$

$$y_s = \frac{d \cdot \cos \theta \cdot y_p}{d \cdot \cos \theta - x_p \cdot \sin \theta}$$

$$\cos \alpha = \frac{d \cdot \cos \theta}{\sqrt{(d \cdot \sin \theta + x_s)^2 + y_s^2 + (d \cdot \cos \theta)^2}}$$

$$x_p = \frac{d \cdot \cos \theta \cdot x_s}{d + x_s \cdot \sin \theta}$$

$$y_p = \frac{d \cdot y_s}{d + x_s \cdot \sin \theta}$$

$$\cos \alpha = \frac{d \cdot \cos \theta - x_p \cdot \sin \theta}{\sqrt{d^2 + x_p^2 + y_p^2}}$$

平面镜真实误差表达式

$$Z_1(x_p, y_p) = Z_{11} + Z_{12} \cdot x_p + Z_{13} \cdot y_p + Z_{14} \cdot (x_p^2 + y_p^2) + Z_{m1}(x_p, y_p)$$

$$Z_2(x_p, y_p) = Z_{21} + Z_{22} \cdot x_p + Z_{23} \cdot y_p + Z_{24} \cdot (x_p^2 + y_p^2) + Z_{m2}(x_p, y_p)$$

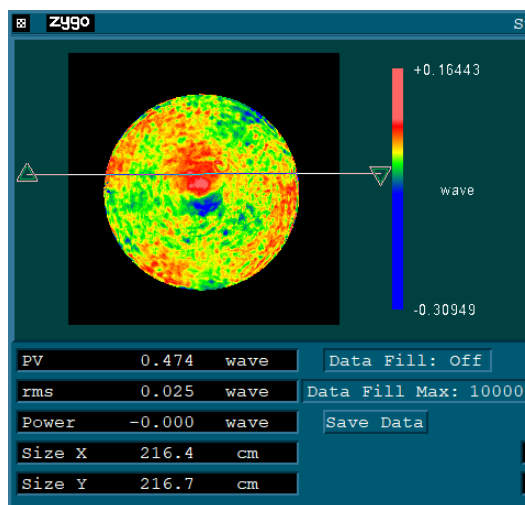
与真实面形无关的系统误差多项式

$$S_1(x_s, y_s) - S_2(x_s, y_s) = \frac{Z_1}{4 \cos \alpha_1} - \frac{Z_2}{4 \cos \alpha_2}$$

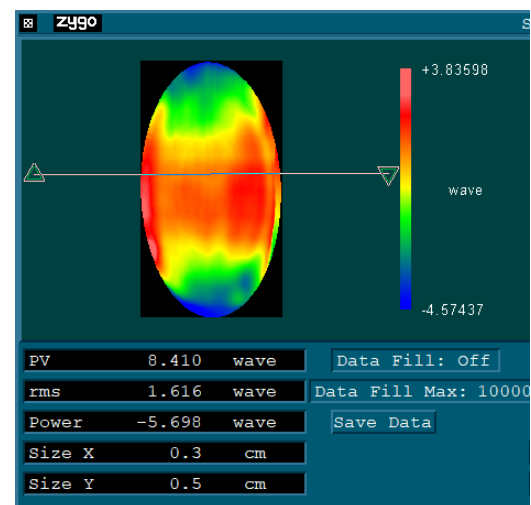
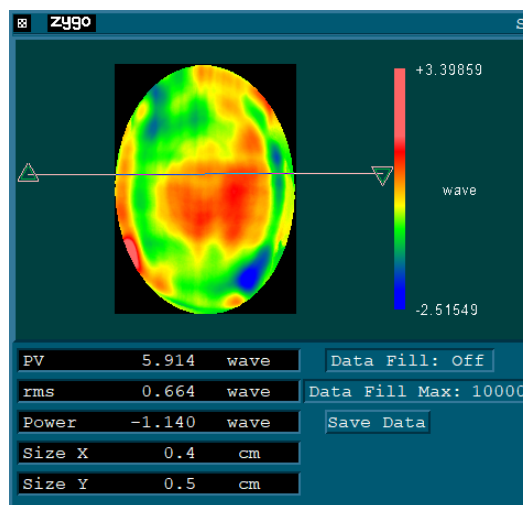
实际检测中，当检测系统参数确定之后，对于不同的被测平面镜，系统引入的离焦是可以计算的，可以预先确定并予以剔除

# 瑞奇-康芒检测技术

标准球面镜面形检测



两个方向面形检测

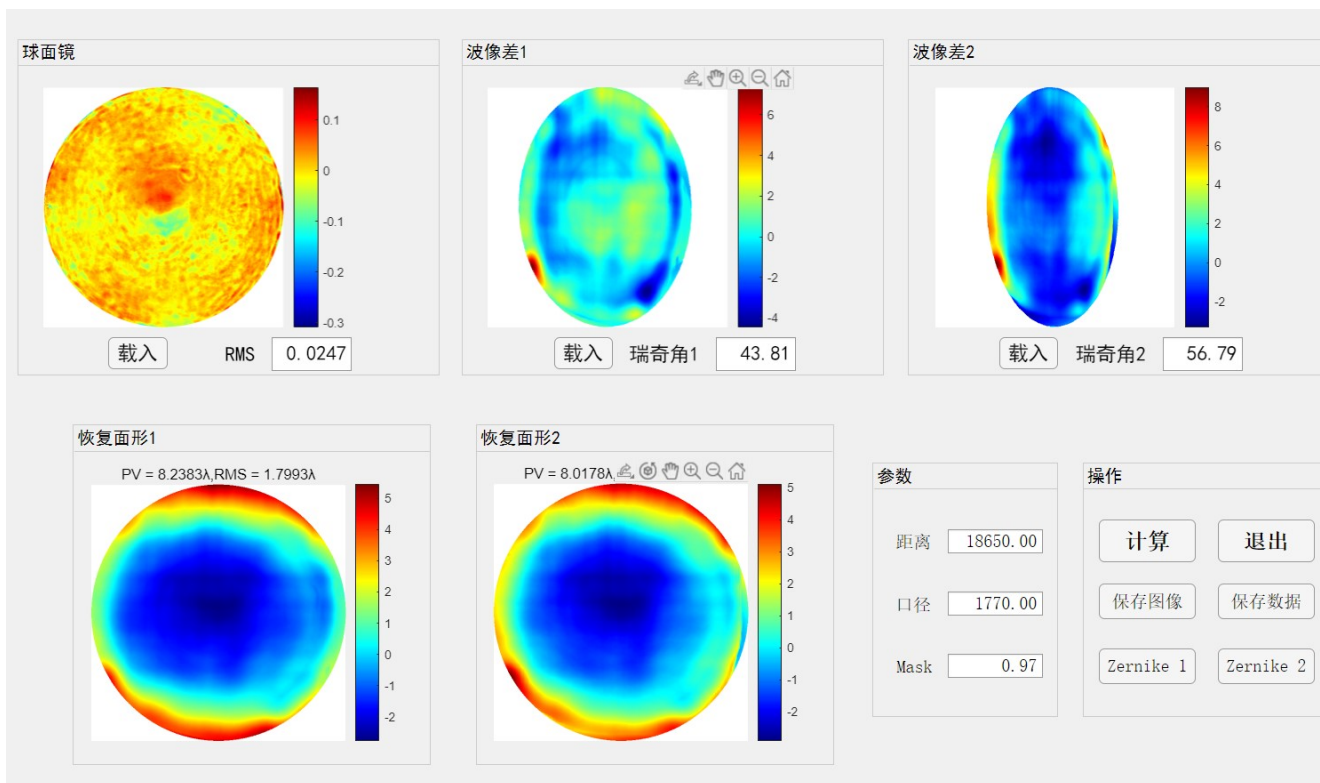


第一检测方向

第二检测方向

# 瑞奇-康芒检测原理

## 瑞奇-康芒面形拟合



# 瑞奇-康芒检测技术

---

可以较好的实现大口径平面镜的全口径面形检测

制作成本与难度相对来讲较低

测试原理较为简单，易于实现

测试光路易于调整，检测精度较高，而且检测稳定性较好

# 平面镜检测-加工系统

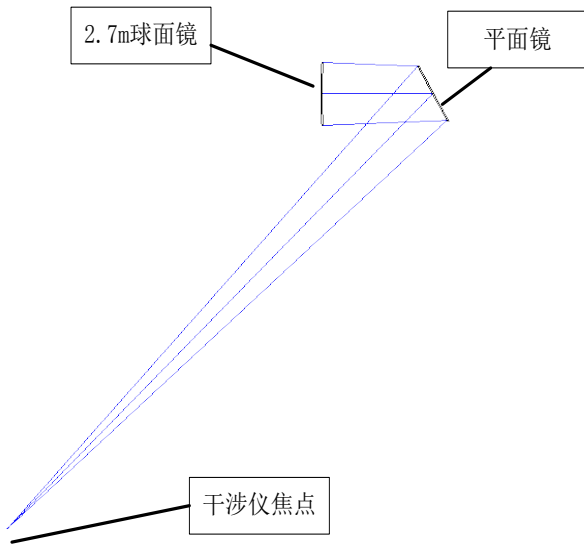
---

## 检测系统注意事项

- 1.需要对不同角度测试时的实际使用区域进行标定；
- 2.在不同角度进行瑞奇-康芒检测时需要尽量保证平面镜在子午方向上的状态不变；
- 3.要保证主光线始终入射到被检平面镜的中心位置；
- 4.瑞奇角选在20至60度之间，且角度差至少在10度以上。

# 平面镜检测-加工系统

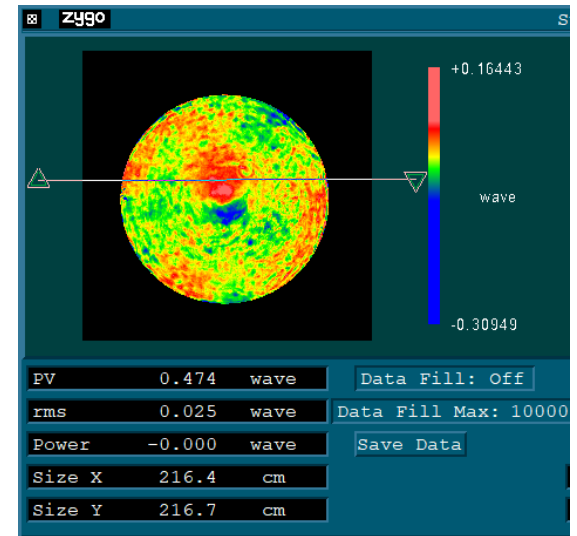
## 瑞奇-康芒检测系统



瑞奇-康芒检测光路图



2.7m标准球面镜



标准球面镜面形(1/40λ)

# 平面镜检测-加工系统

## 加工系统参数与设备

检验镜	2.7m标准球面镜，曲率半径30m
测试焦点到平面镜中心距离	18.65m
第一检测位置反射角大小	44°左右
第二检测位置反射角大小	56°左右
检测设备	4D干涉仪
检测设备	刀口仪
检测设备	zeiss三坐标
加工支撑	中前期吊带支撑，后期镜室结构支撑
加工设备	单轴机
加工设备	工业机器人
抛光工具	双转子抛光磨头
安装设备	加工转台

# 平面镜检测-加工系统

## 部分检测与加工设备



单轴机



Zeiss三坐标



4D干涉仪



机器人

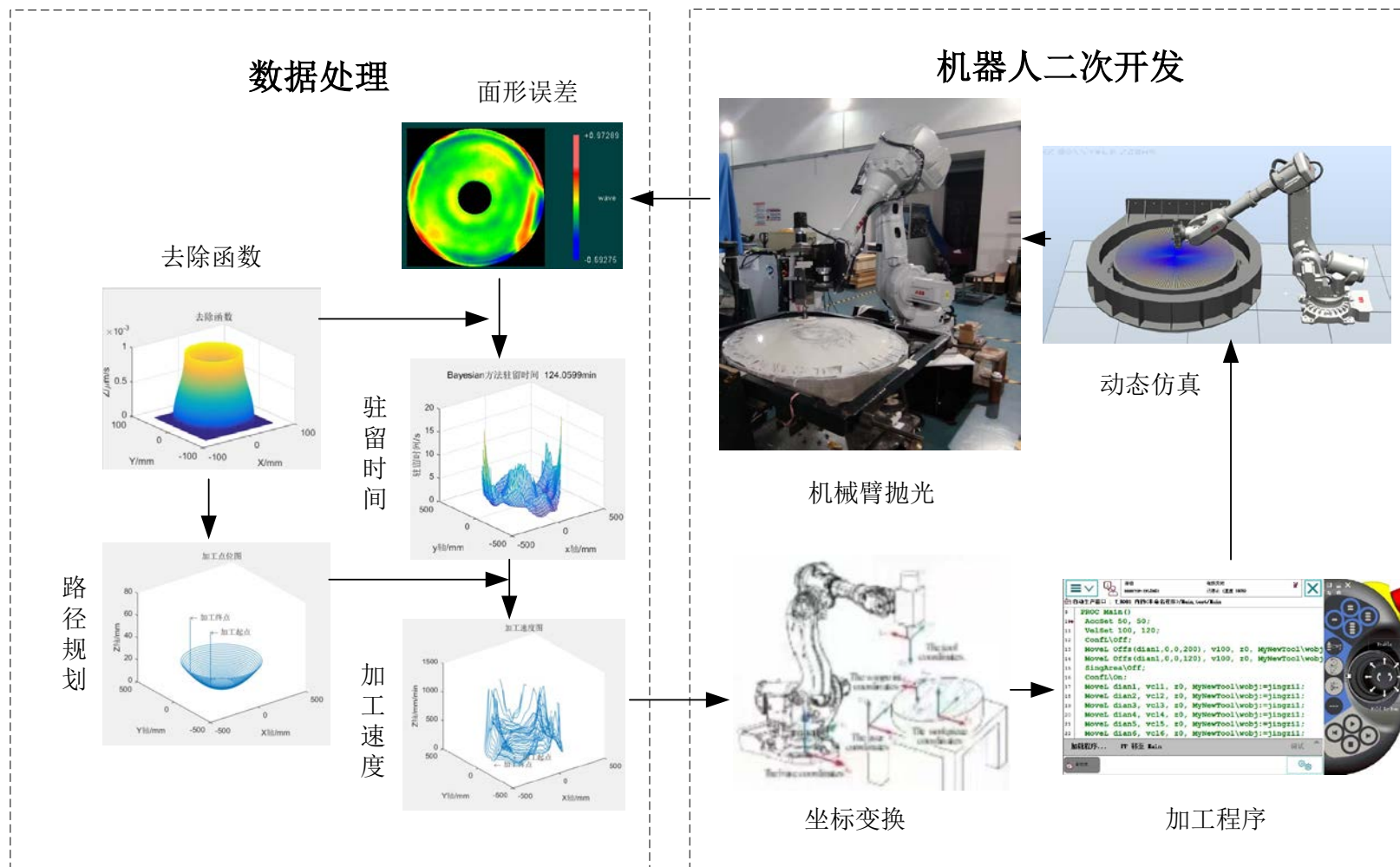
加工转台



待加工平面镜

# 平面镜检测-加工系统

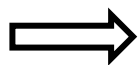
## 机械臂CCOS抛光



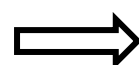
# 大口径平面镜加工工艺

## 分阶段抛光

粗抛阶段



刀口阶段



干涉测量阶段



根据三坐标测量数据，单轴机抛光

标定加工区域，由机械臂分区域分阶段抛光，去除大误差量

根据测量数据图，采用CCOS抛光工艺加工

# 大口径平面镜加工工艺

## 单轴机粗抛



单轴机

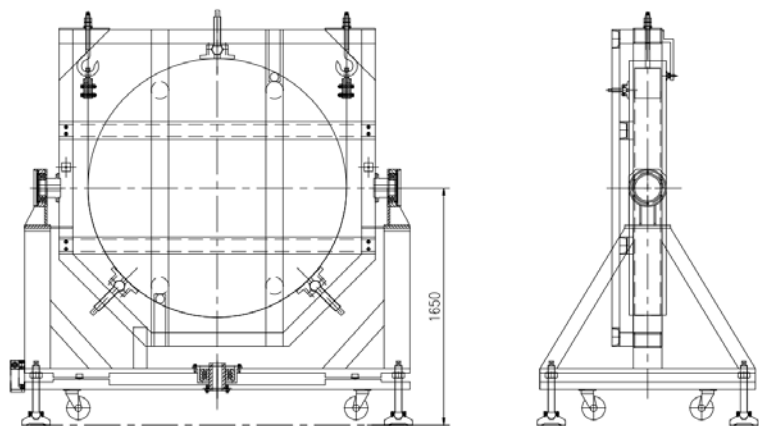


单轴机+机械臂

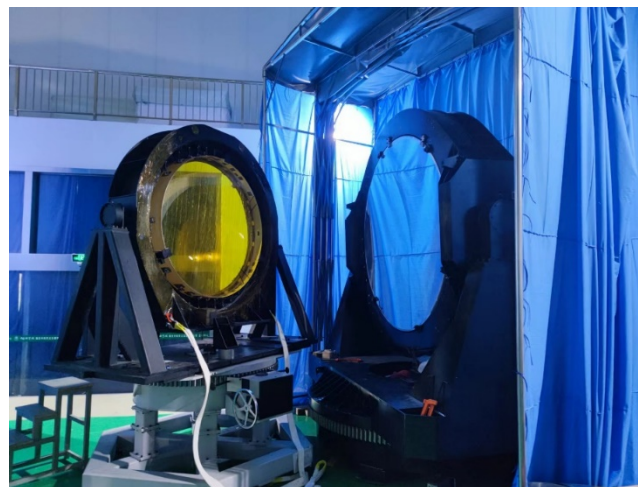
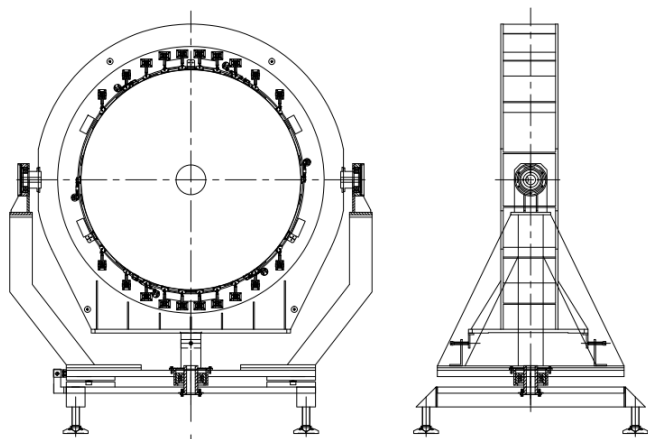
去除体积率高  
去除大环带低频误差  
加工平滑光顺，中高频误差少  
操作简单，装夹方便  
配合机械臂，去除局部大误差量。提升效率

# 大口径平面镜加工工艺

吊带支撑

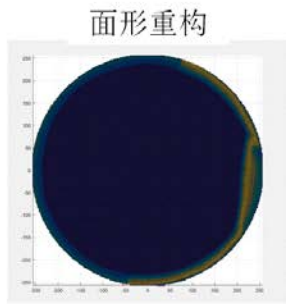
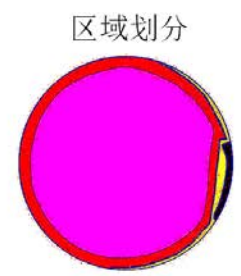
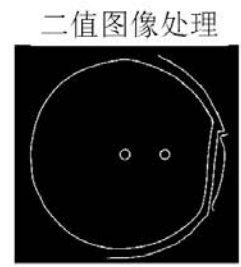
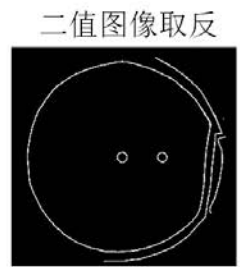
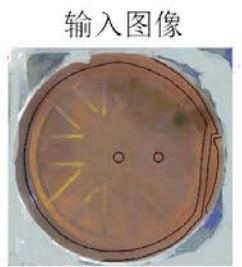
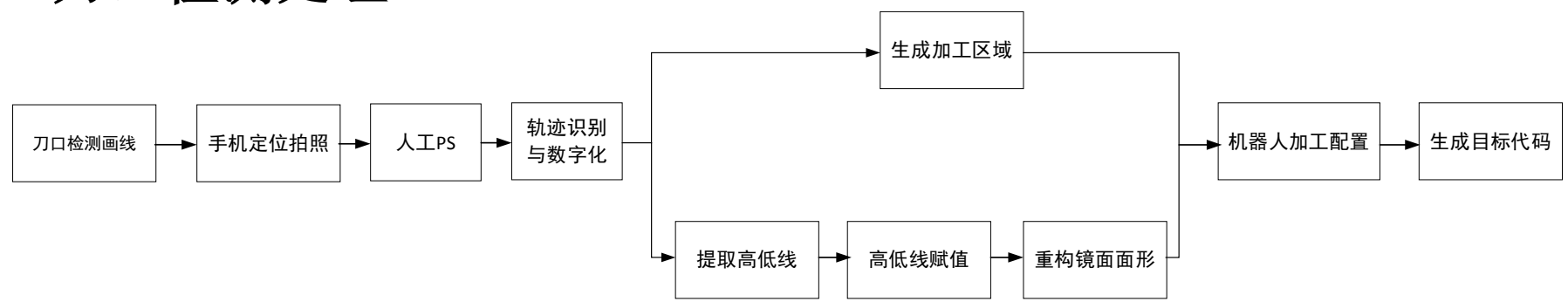


结构支撑



# 大口径平面镜加工工艺

## 刀口检测处理



# 大口径平面镜加工工艺

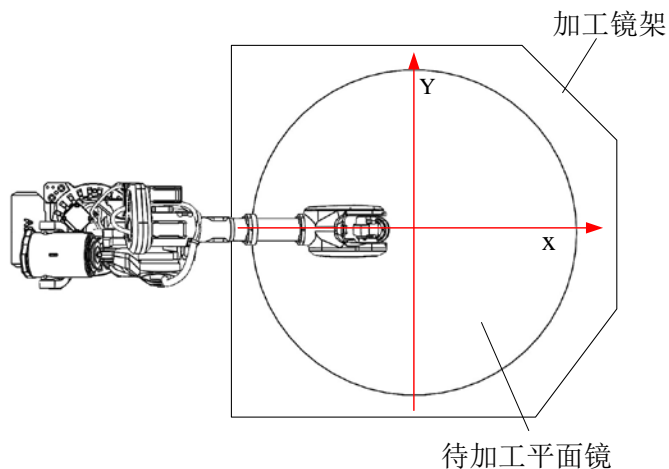
## 分项分频加工工艺



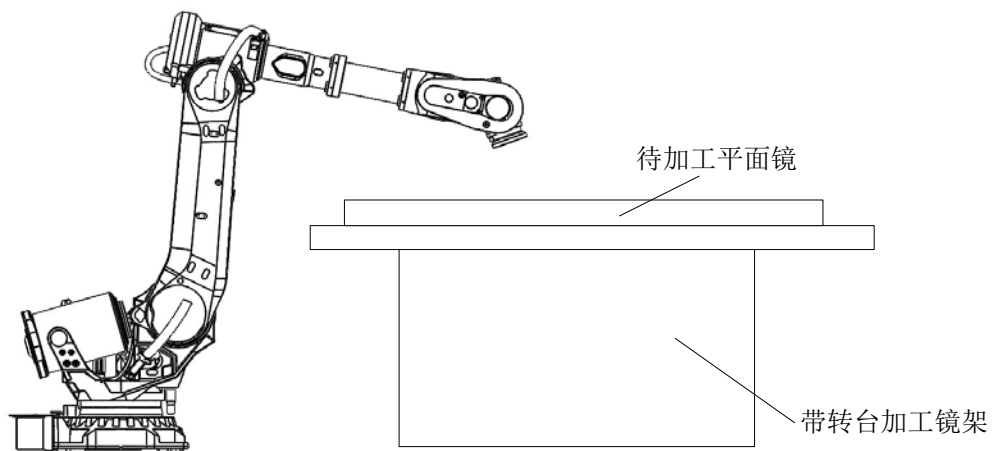
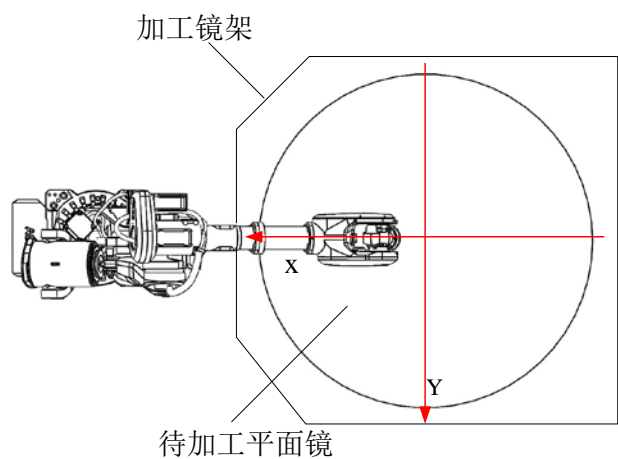
1. 存在大像散的情况下，首先加工像散误差，获得完整清晰的干涉条纹
2. 当较大反射角方向的面形像散大于较小反射角方向的面形像散时，离焦项power起主要影响，由拟合面形加工power项
3. 像散与离焦项都较小时，将小角度方向压缩面形恢复，加工误差

# 大口径平面镜加工工艺

## 单机械臂+转台模式

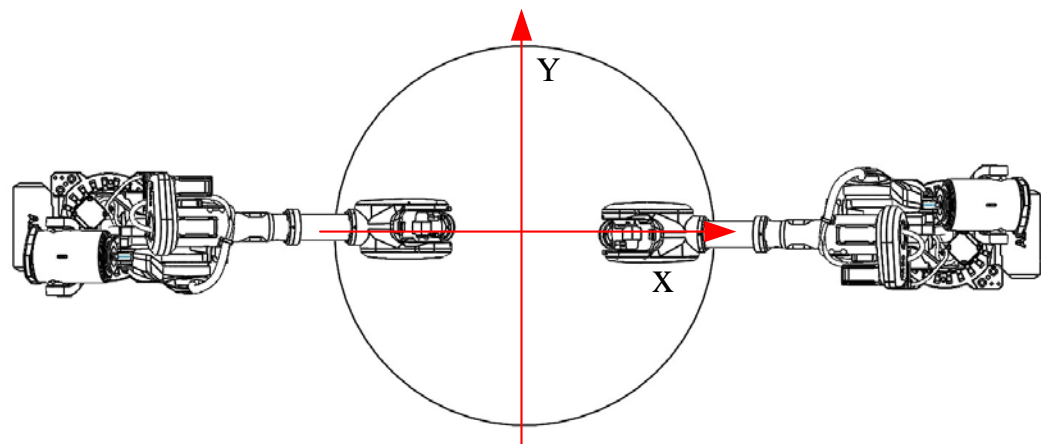


加工系统简单  
安全性高  
加工一致性较好

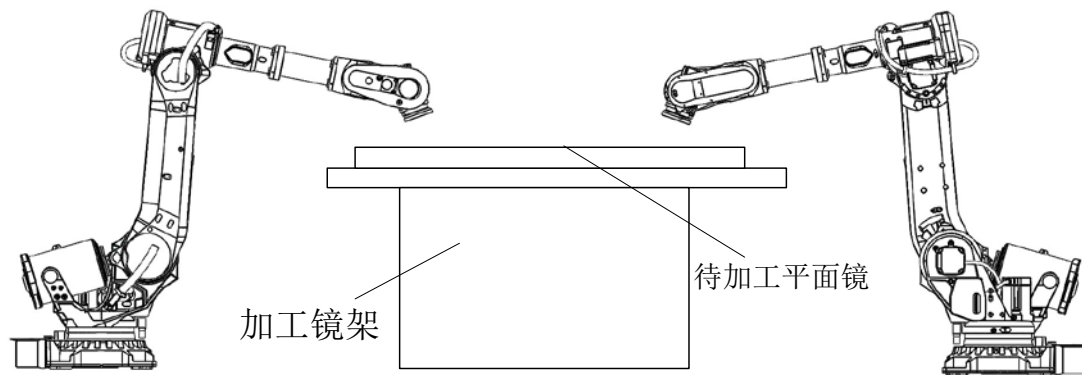


# 大口径平面镜加工工艺

## 多机械臂协同加工模式

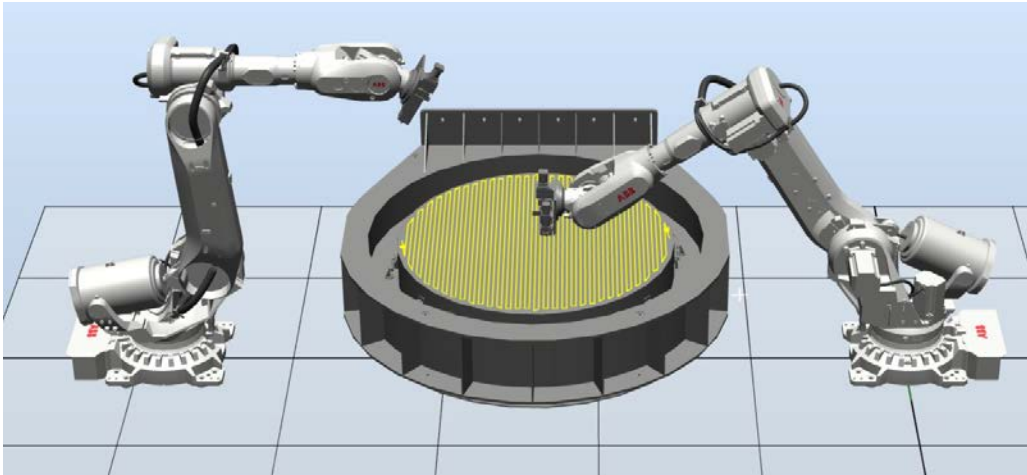


设备利用率高  
加工效率高  
可加工口径大



# 多机械臂协同加工模式

## 双机械臂协同操作仿真



提高加工效率

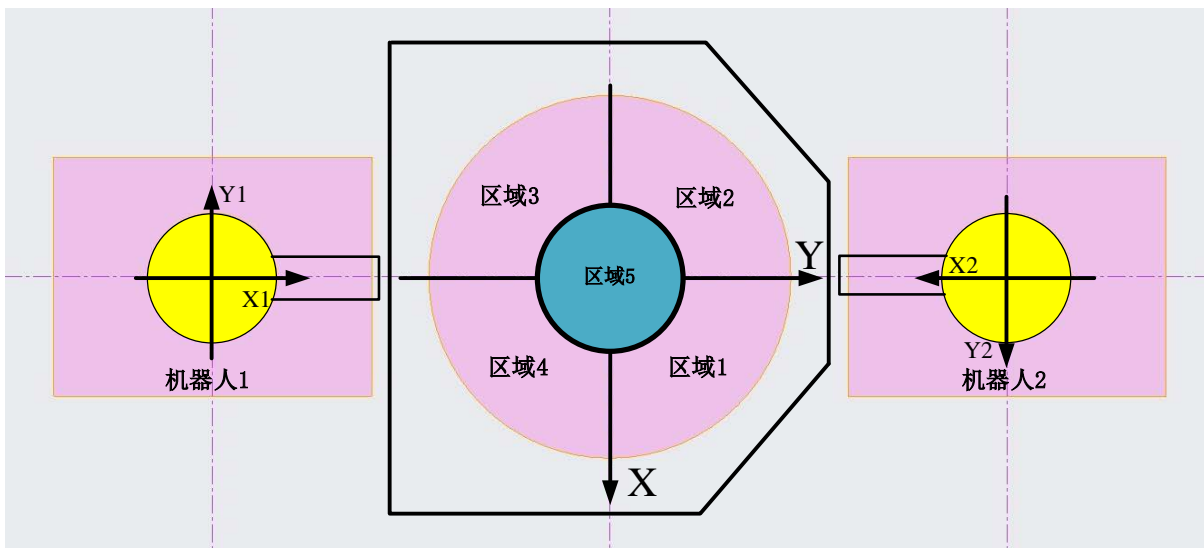
提高设备利用率

提高可加工镜面口径

通过路径规划和优化加工算法，可实现无碰撞、  
无接缝、编程简单的多机械臂协同加工

# 多机械臂协同加工模式

## 5区域加工物理隔离模式（3个加工阶段）



区域1：镜面坐标系第一象限  
区域2：镜面坐标系第二象限  
区域3：镜面坐标系第三象限  
区域4：镜面坐标系第四象限  
区域5：镜面中心区域

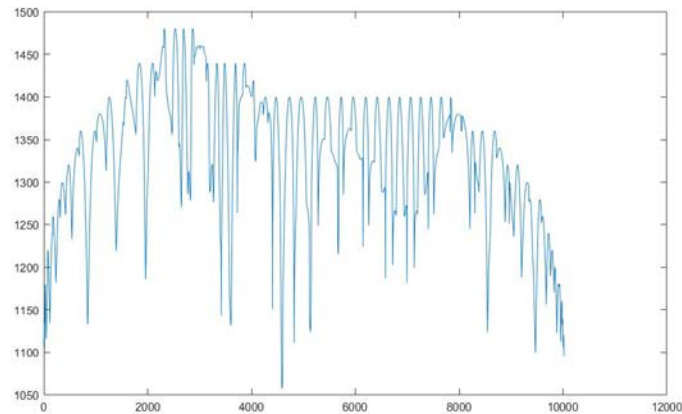
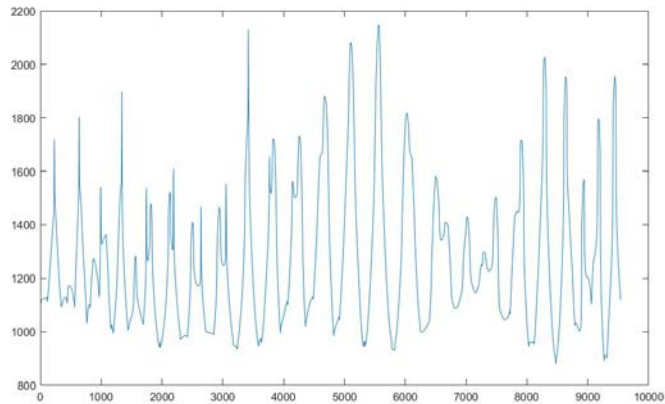
第一加工阶段：  
机器人1区域3，机器人2区域1  
第二加工阶段：  
机器人1区域4，机器人2区域2  
第三加工阶段：  
任一机器人区域5

物理隔离，安全系数高，机械臂不会相撞

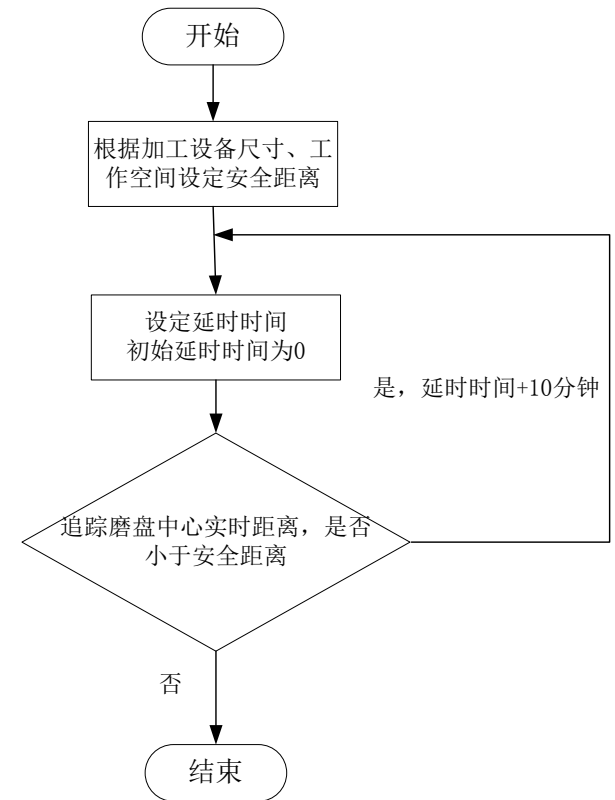
# 多机械臂协同加工模式

## 距离追踪模式（1个加工阶段）

磨盘中心距离追踪



延时计算流程

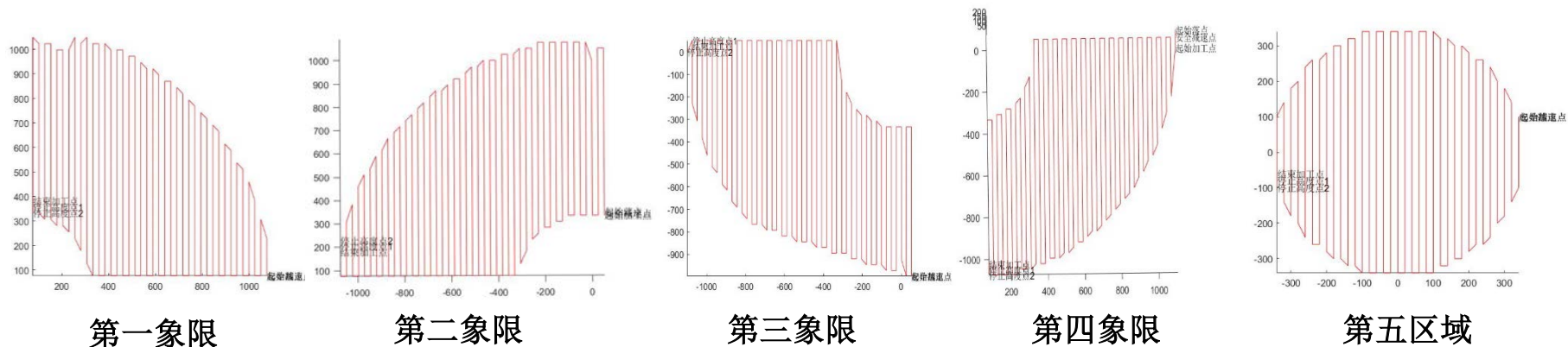


多次迭代，获得最小延时时间，  
有效提高加工效率

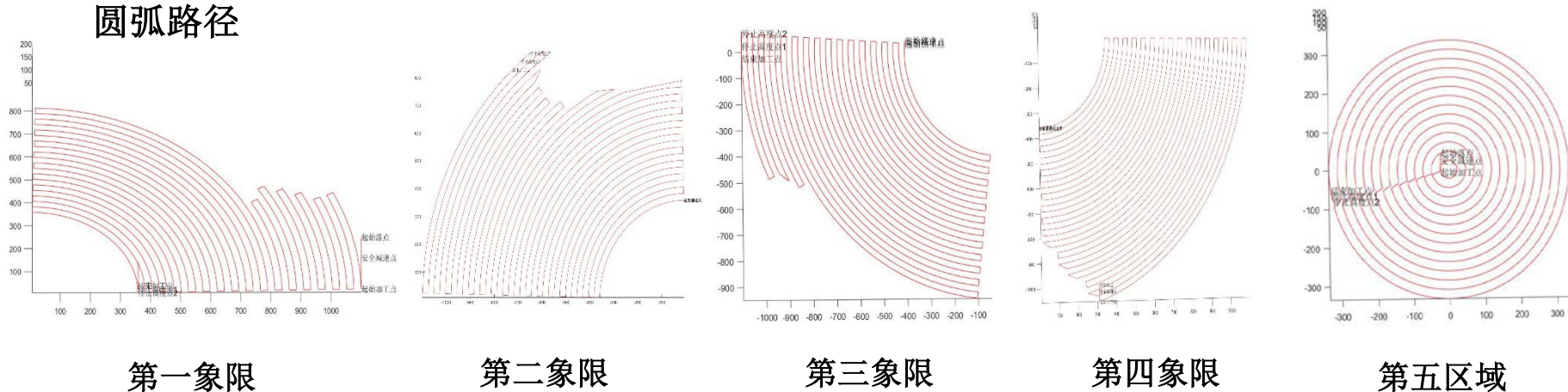
# 多机械臂协同加工模式

## 路径规划

### 栅格路径

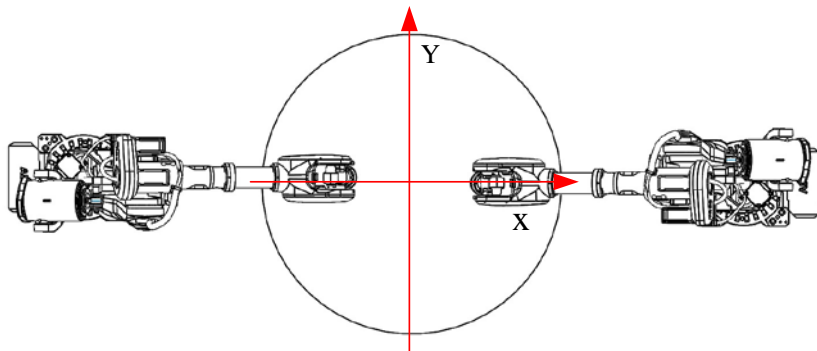


### 圆弧路径

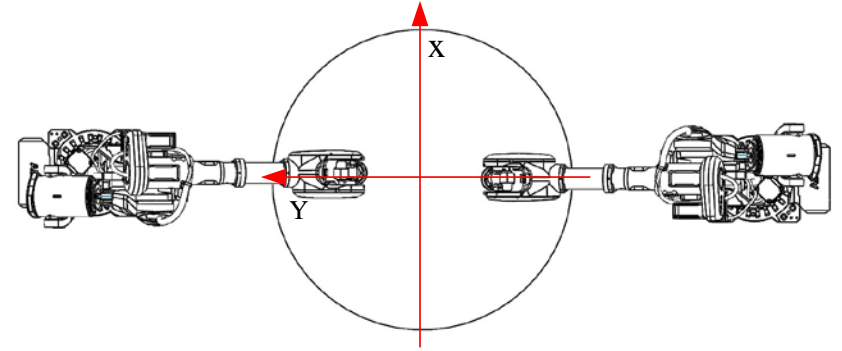


# 多机械臂协同加工模式

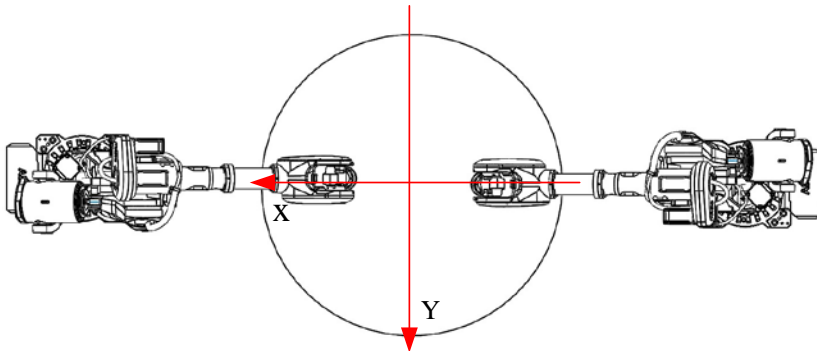
## 接缝区域处理



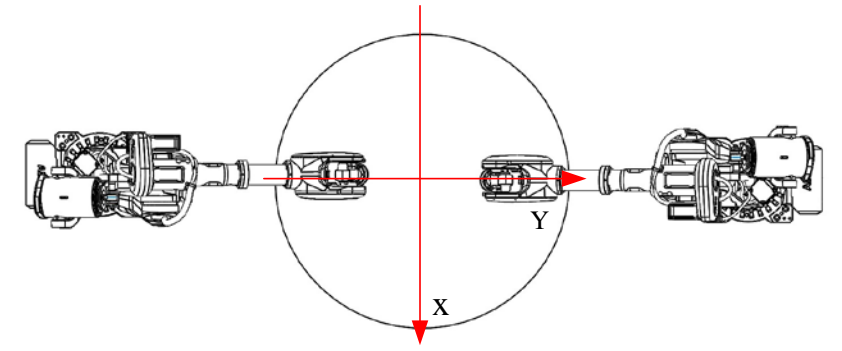
0°位置



90°位置



180°位置

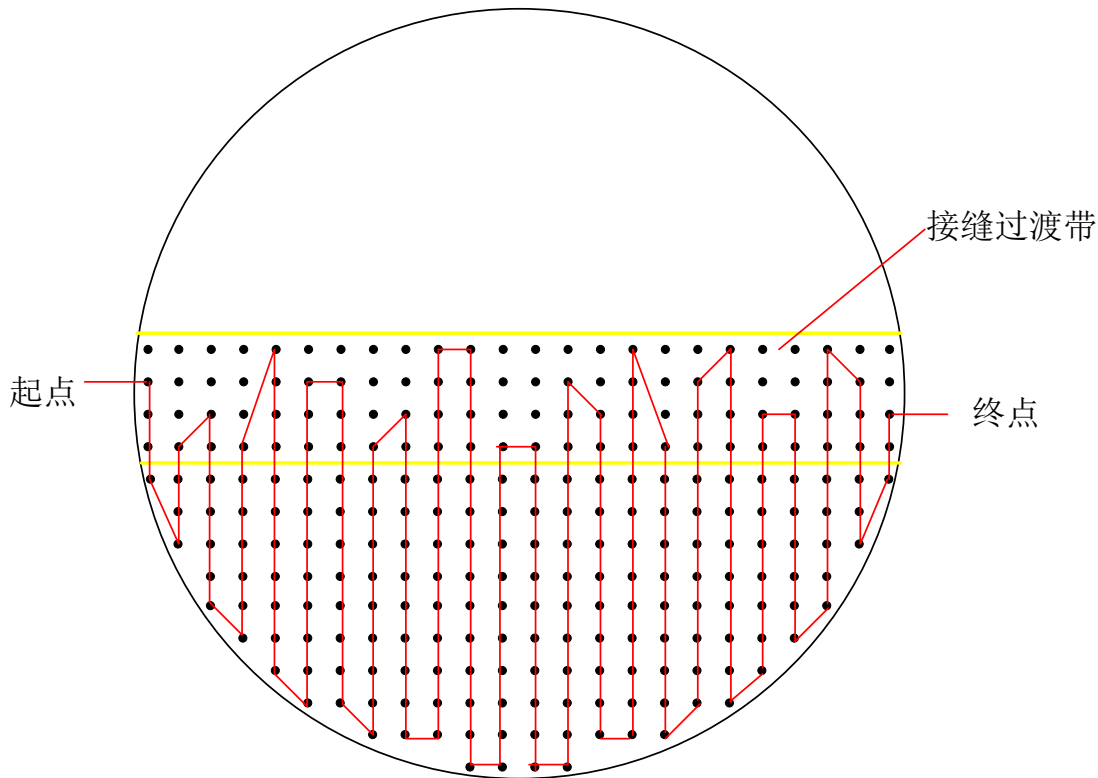


270°位置

每隔一个加工周期，随机调整平面镜在机器人加工系统中的位姿

# 多机械臂协同加工模式

## 接缝区域处理



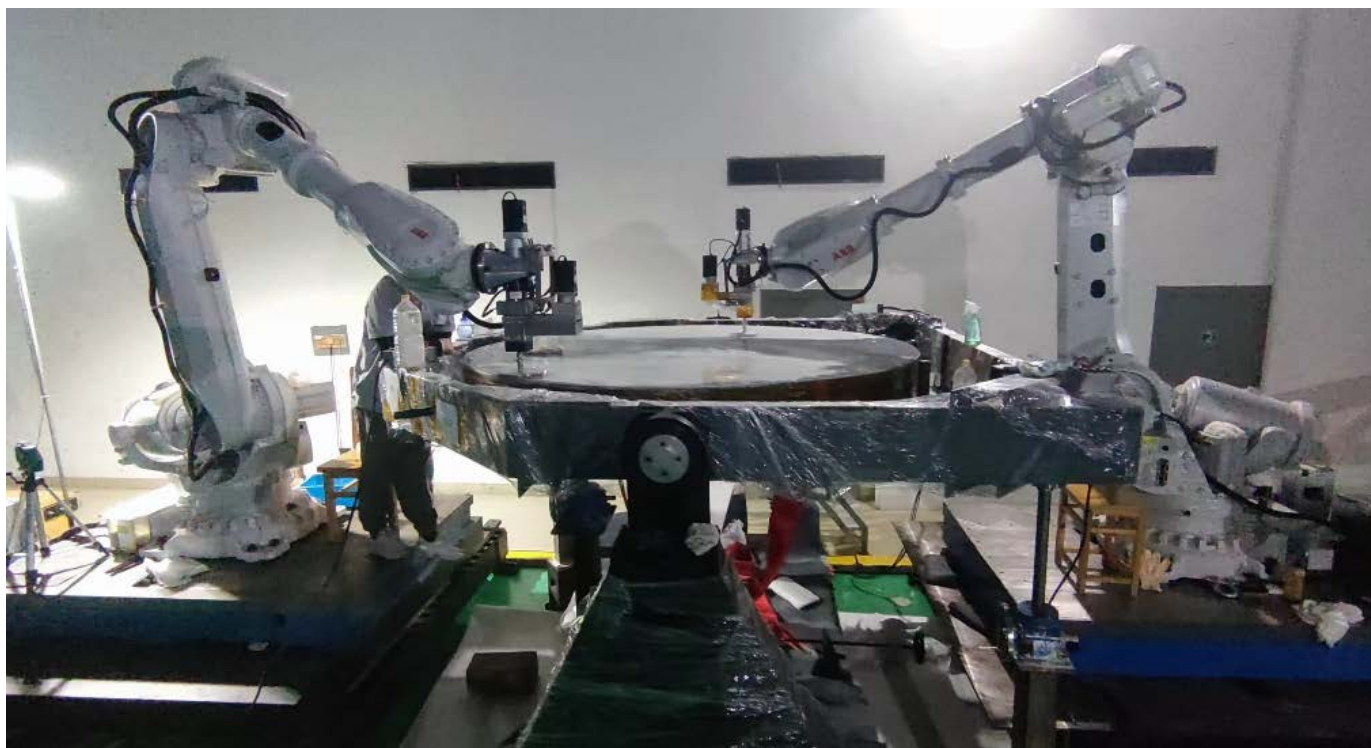
接缝处设置过渡区域，在过渡带根据路径形式随机生成加工位置，减小累积误差

接缝处重卷积运算

# 多机械臂协同加工模式

---

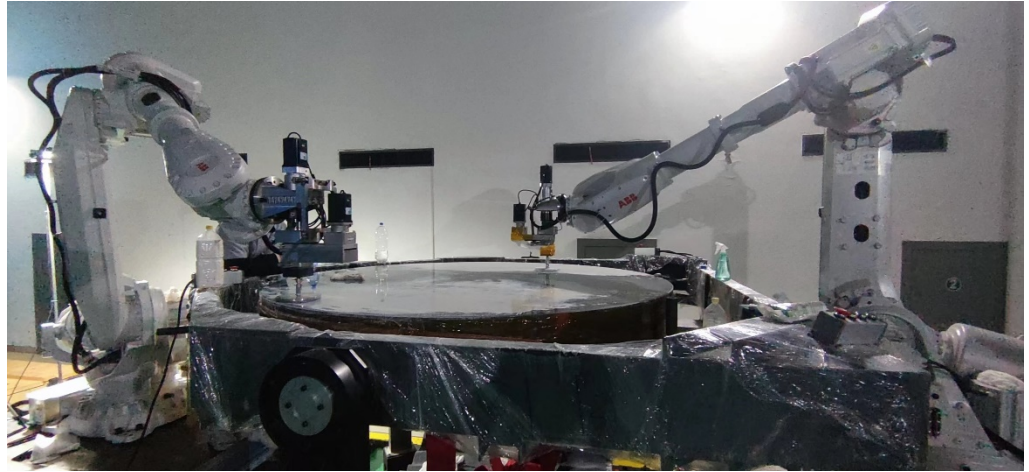
## 双机械臂协同加工现场



# 应用成果



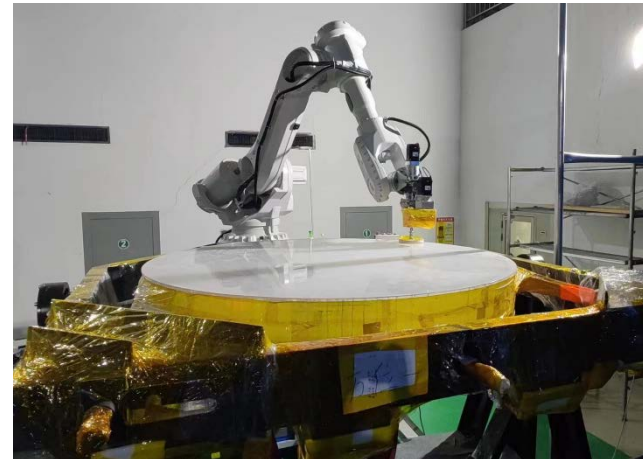
1770mm平面



2300mm平面



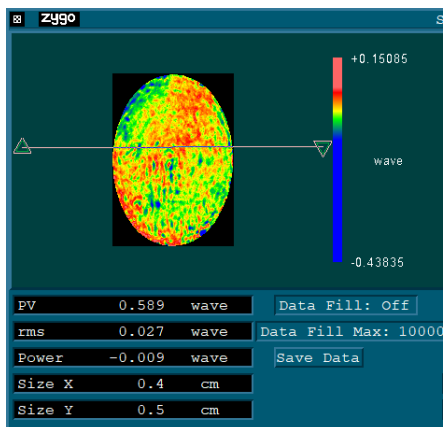
1560mm平面



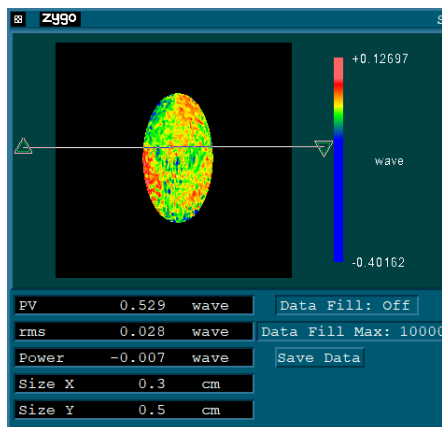
2000mm平面

# 应用成果

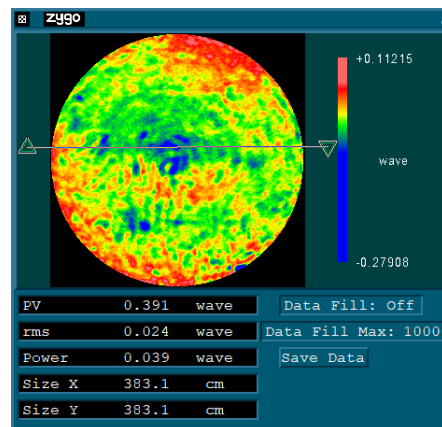
## 1770mm平面最终加工面形



44°反射角

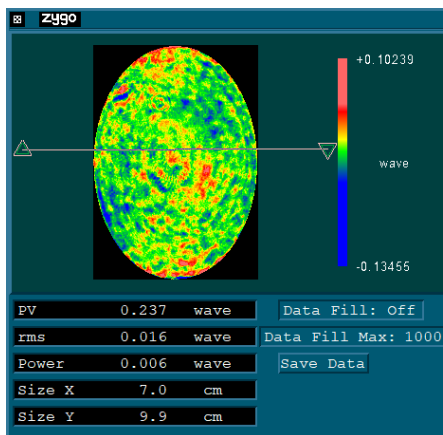


56°反射角

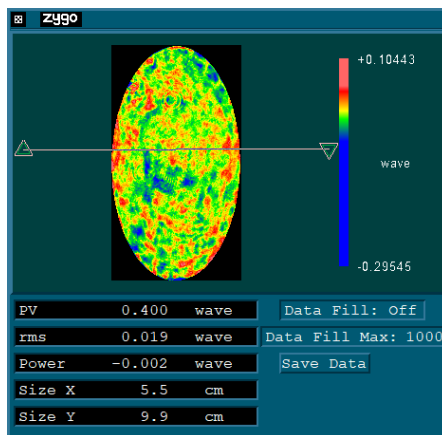


拟合面形

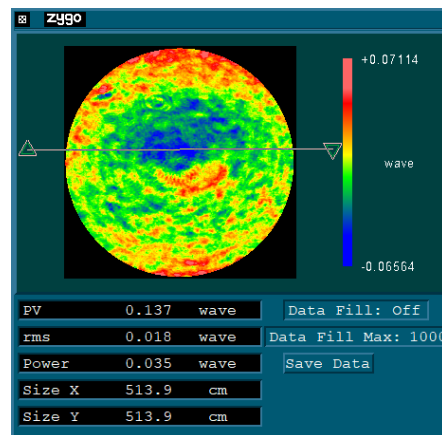
## 1560mm平面最终加工面形



44°反射角



56°反射角



拟合面形

# 应用成果

---

## 大口径平面镜综合加工能力

1. 最大可加工2.5米口径平面镜
2. 加工精度可以达到 $1/50 \lambda$
3. 抛光周期在3个月以内

---

**谢谢！**