



# 中国科学院国家天文台

## FAST运行和发展中心

### MATLAB在中国天眼中的应用

李辉

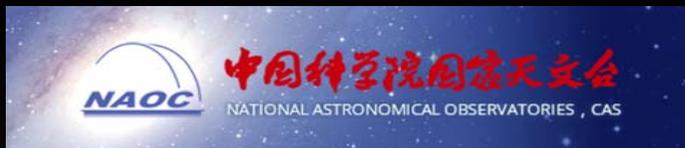


MATLAB EXPO 2021

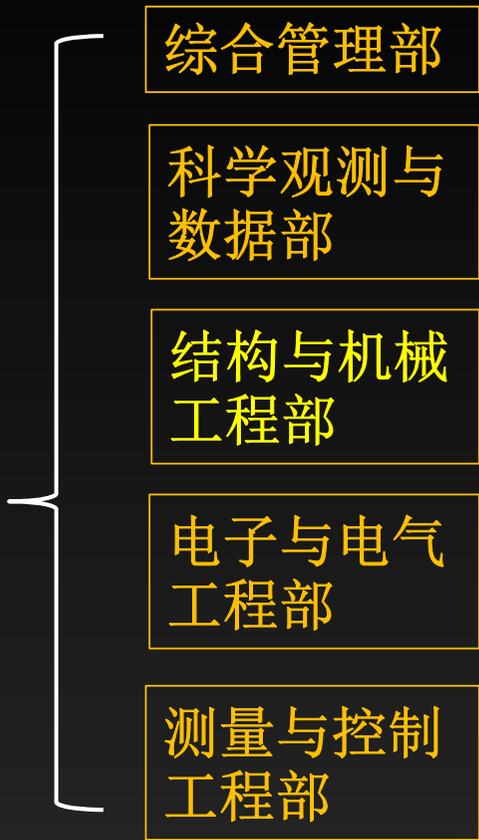
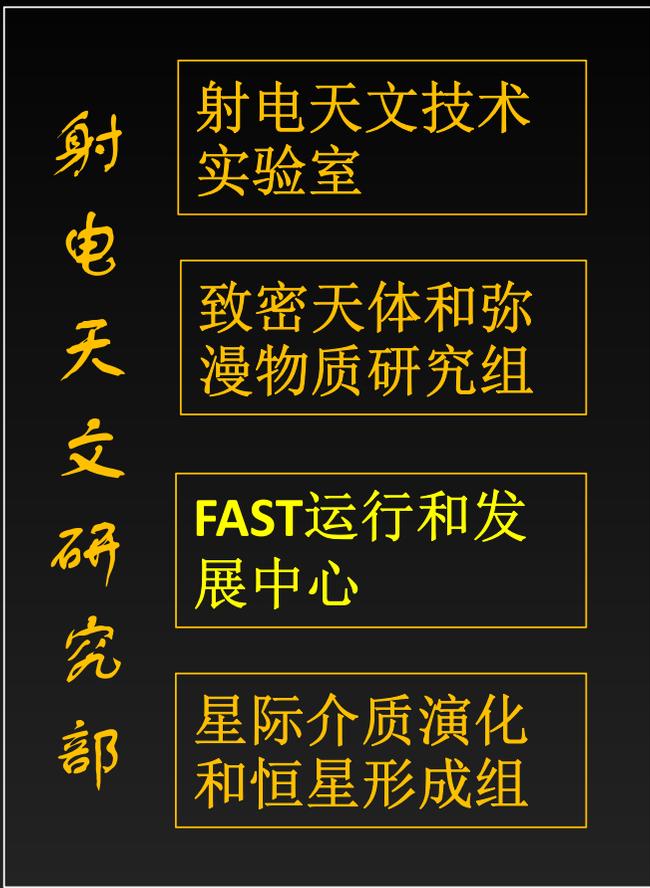


## 纲要

- 一： 国家天文台(FAST运行和发展中心)简介
- 二： FAST望远镜及其面临的工程问题
- 三： 基于MATLAB的解决方案和工程实现
- 四： 展望未来



- 1. 北京总部 (原北京天文台)
- 2. 直属单位:
  - ① 云南天文台
  - ② 南京天文光学技术研究所
  - ③ 新疆天文台
  - ④ 长春人造卫星观测站





中德亚毫米波望远镜



西藏羊八井观测站

郭守敬望远镜



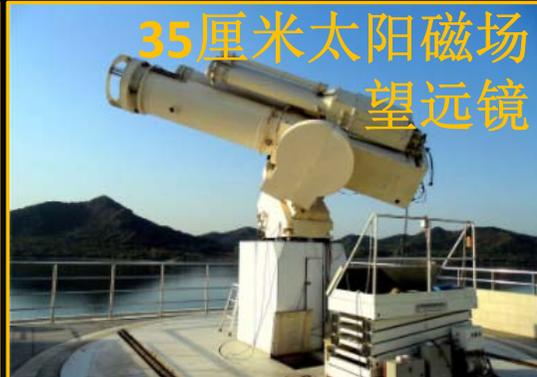
兴隆观测基地

射电频谱日像仪



内蒙明安图观测站

35厘米太阳磁场望远镜



怀柔观测基地

天籁项目



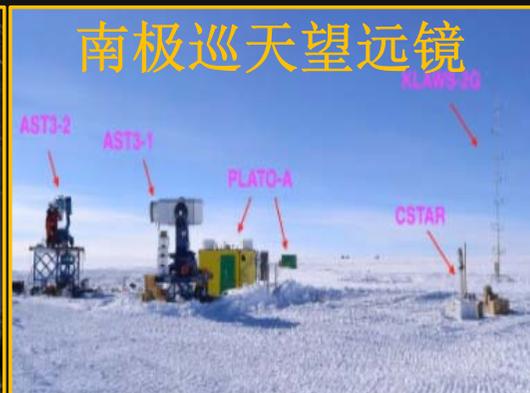
新疆红柳峡观测站

密云50米望远镜



密云观测基地

南极巡天望远镜



南极大陆昆仑站

贵州FAST基地





## 重大科学成果

2017年10月FAST证实发现2颗新脉冲星



2020年11月FAST发现磁星辐射快速射电暴





## 纲要

- 一：国家天文台(FAST运行和发展中心)简介
- 二：FAST望远镜及其面临的工程问题
- 三：基于MATLAB的解决方案和工程实现
- 四：展望未来



世界第一大单口径射电望远镜

FAST介绍

# What is FAST

500米口径球面射电望远镜

(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope)

共建：贵州省人民政府；主管：中国科学院；研发及建设：中国科学院国家天文台



**特点：**利用贵州天然喀斯特洼坑  
作为望远镜台址

**历史：**1994年启动，预研究-建  
设-调试-运行，共27年

**建设投资：**~11.5亿元

**设计寿命：**30年



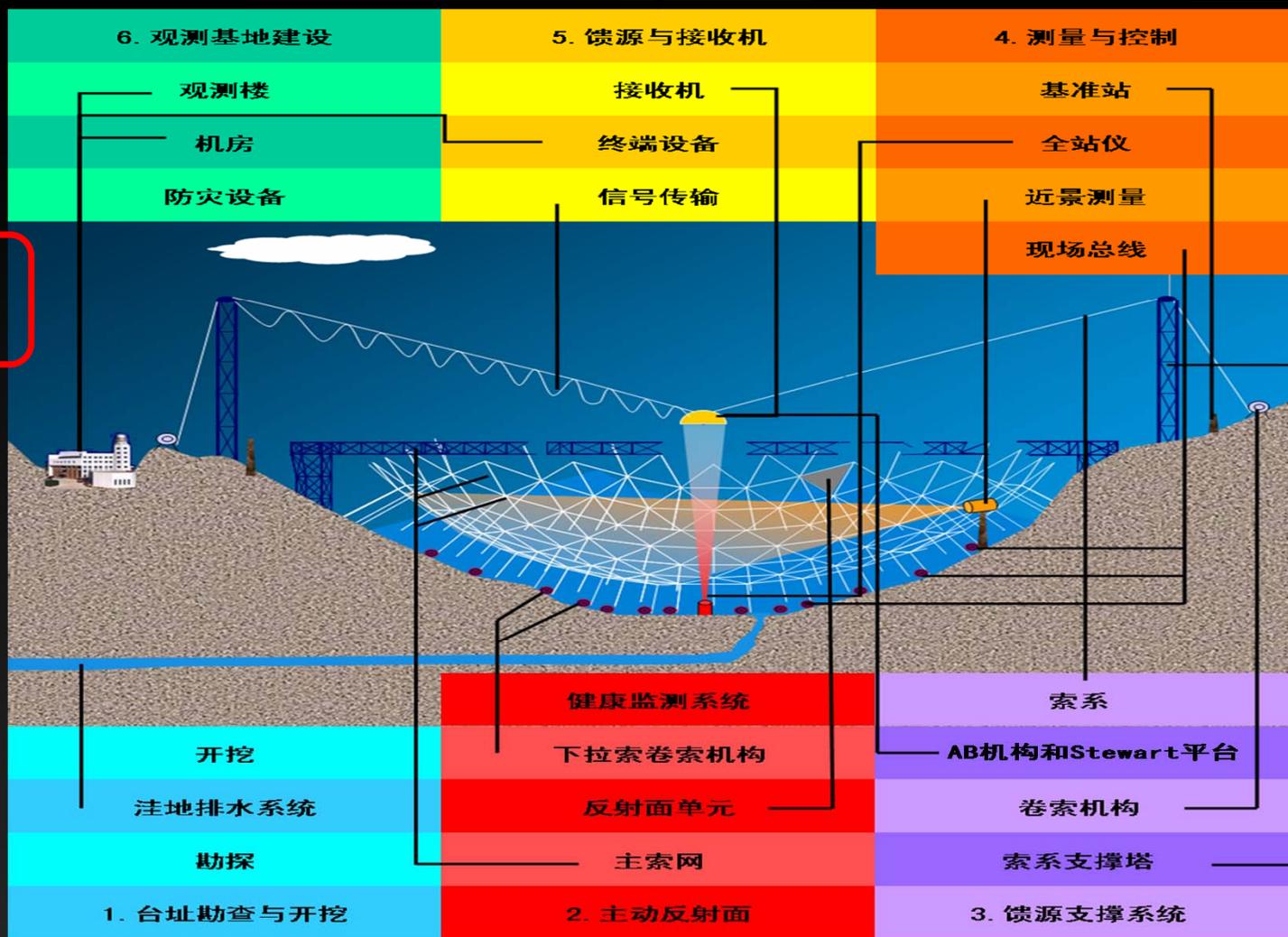
FAST接收面积 ≈  
35个标准足球场



# 系统构成

## 系统构成示意图

岩土工程  
汇聚电磁波  
焦点精确跟踪  
望远镜测控  
电波接收处理  
工作、生活





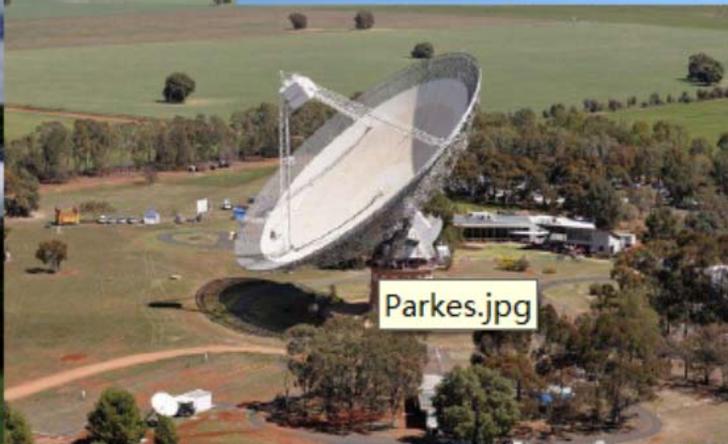
# 单口径射电望远镜

# 射电望远镜

英国Jodrell Bank的Lovell 76米 (1957)



澳大利亚Parkes 64米 (1961)



美国绿岸射电望远镜~100米(2003)



The Green Bank Telescope is the world's largest steerable radio telescope.



美国Arecibo 305米 (1963)



德国Effelsberg 100米 (1971)



# 射电望远镜

## 射电望远镜

Radio Telescope

波长: 1mm—30m

1、主反射面(抛物面)

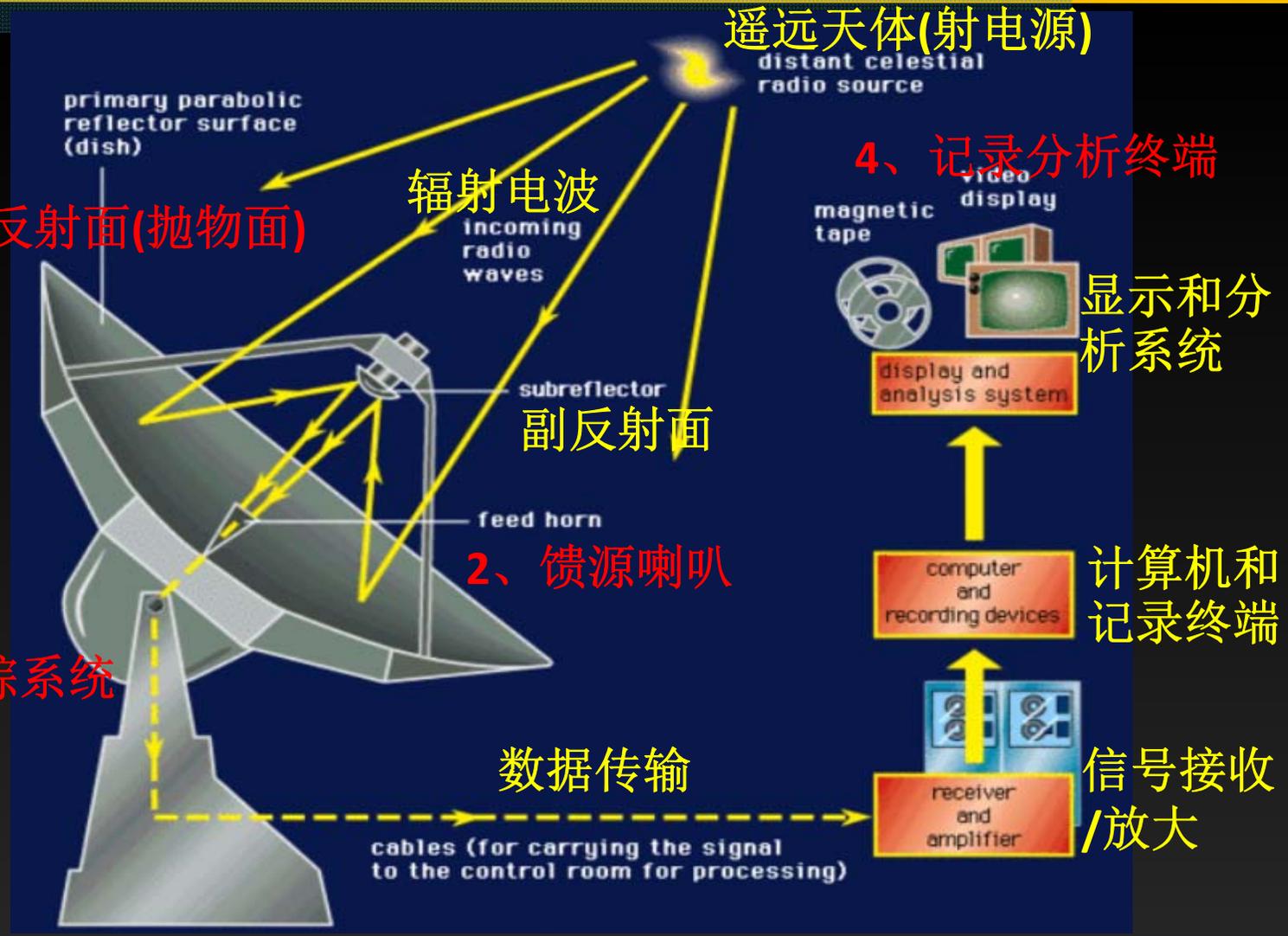
3、跟踪系统

辐射电波

2、馈源喇叭

数据传输

遥远天体(射电源)



4、记录分析终端

显示和分析系统

计算机和记录终端

信号接收/放大



# 射电望远镜

天文望远镜关注点：口径！

口径大些，大些，再大些！

大口径

看得见—非常暗弱天体

看得清—天体局部细节

GBT

100m



Arecibo

305m



FAST

500m





突破射电望远镜口径100m极限

射电望远镜



主反射面重量  $\propto D^2$

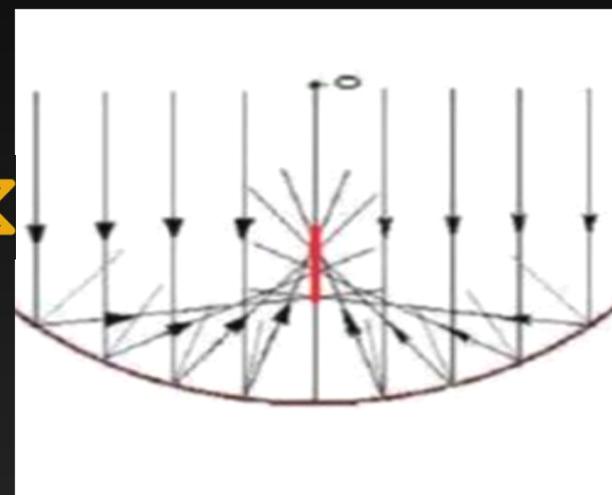
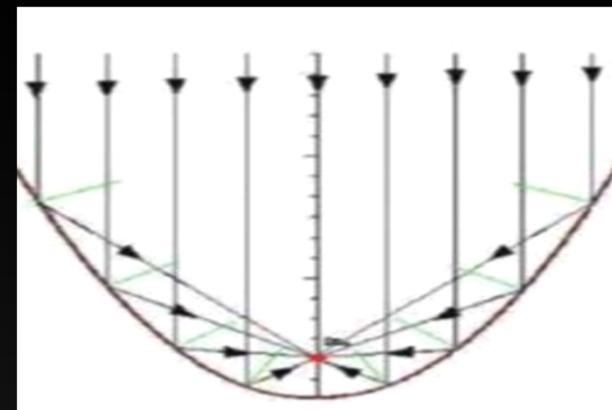
主反射面柔度  $\propto D^3$



突破射电望远镜口径100m极限

天文望远镜

Arecibo Telescope (305m)

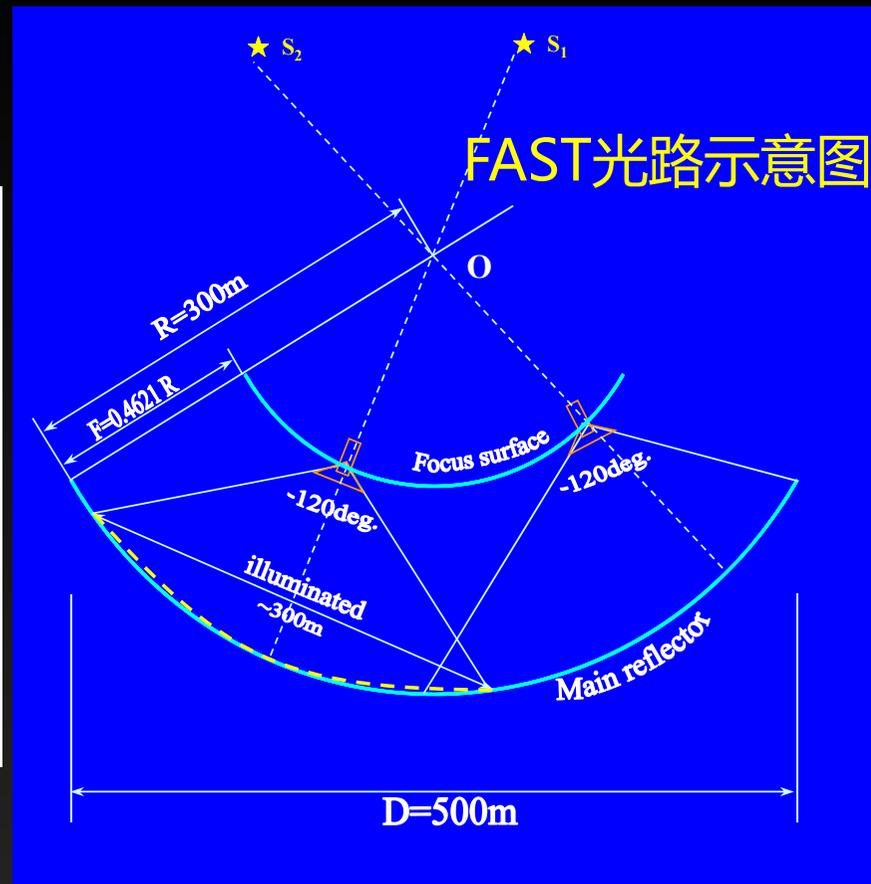
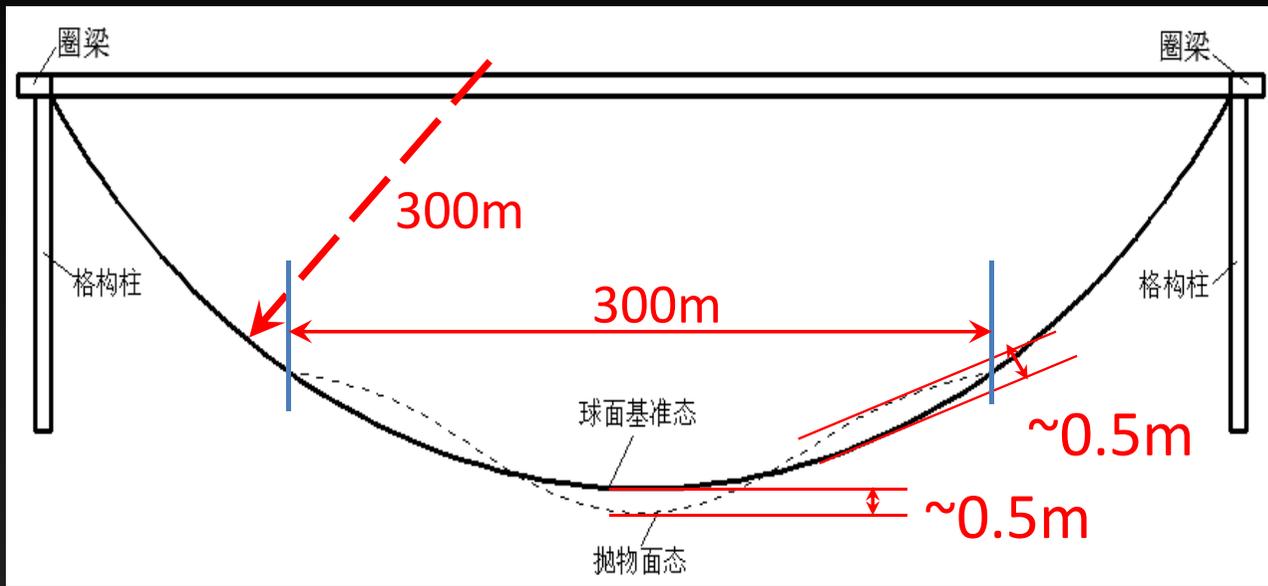




# 突破射电望远镜口径100m极限

# 射电望远镜

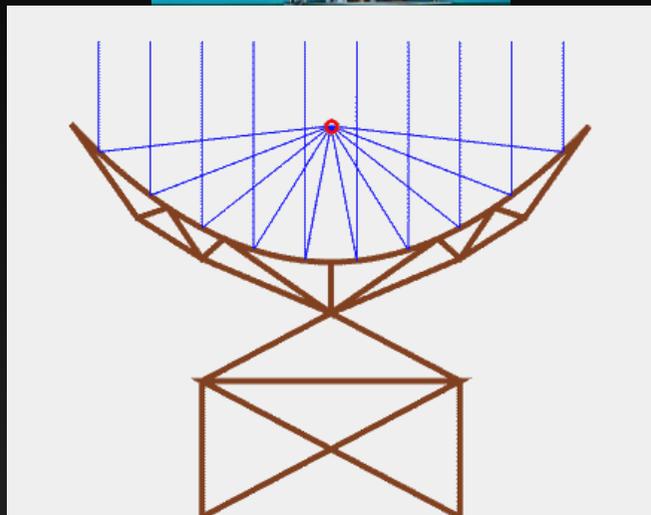
优点：  
刚体转动转化为面形移动



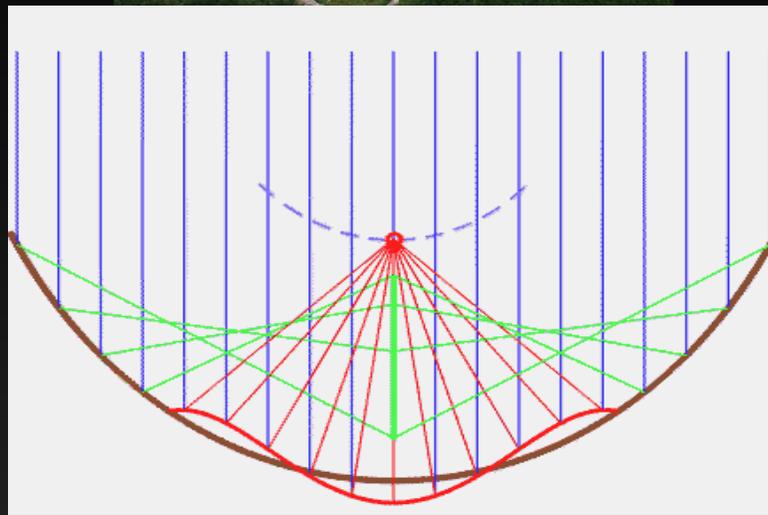


# 射电望远镜三种跟踪方式的动画模拟

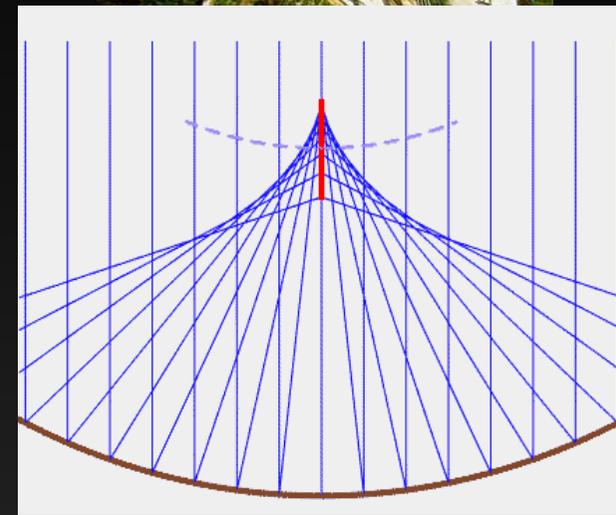
# 射电望远镜



Steerable Telescope



FAST



Arecibo



# Innovation of FAST

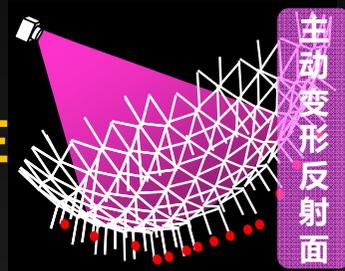
- FAST 将实现中国射电望远镜从“追赶”到“领先”的跨越!
- FAST 将在未来20年保持世界领先地位。



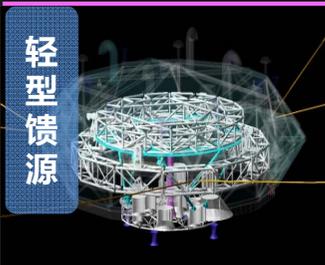
台址

利用地球上独一无二的优良台址—**贵州天然喀斯特巨型洼地**作为望远镜台址

自主发明**主动变形反射面**，在观测方向形成300米口径瞬时抛物面汇聚电磁波，在地面改正球差，实现宽带和全偏振



主动变形反射面



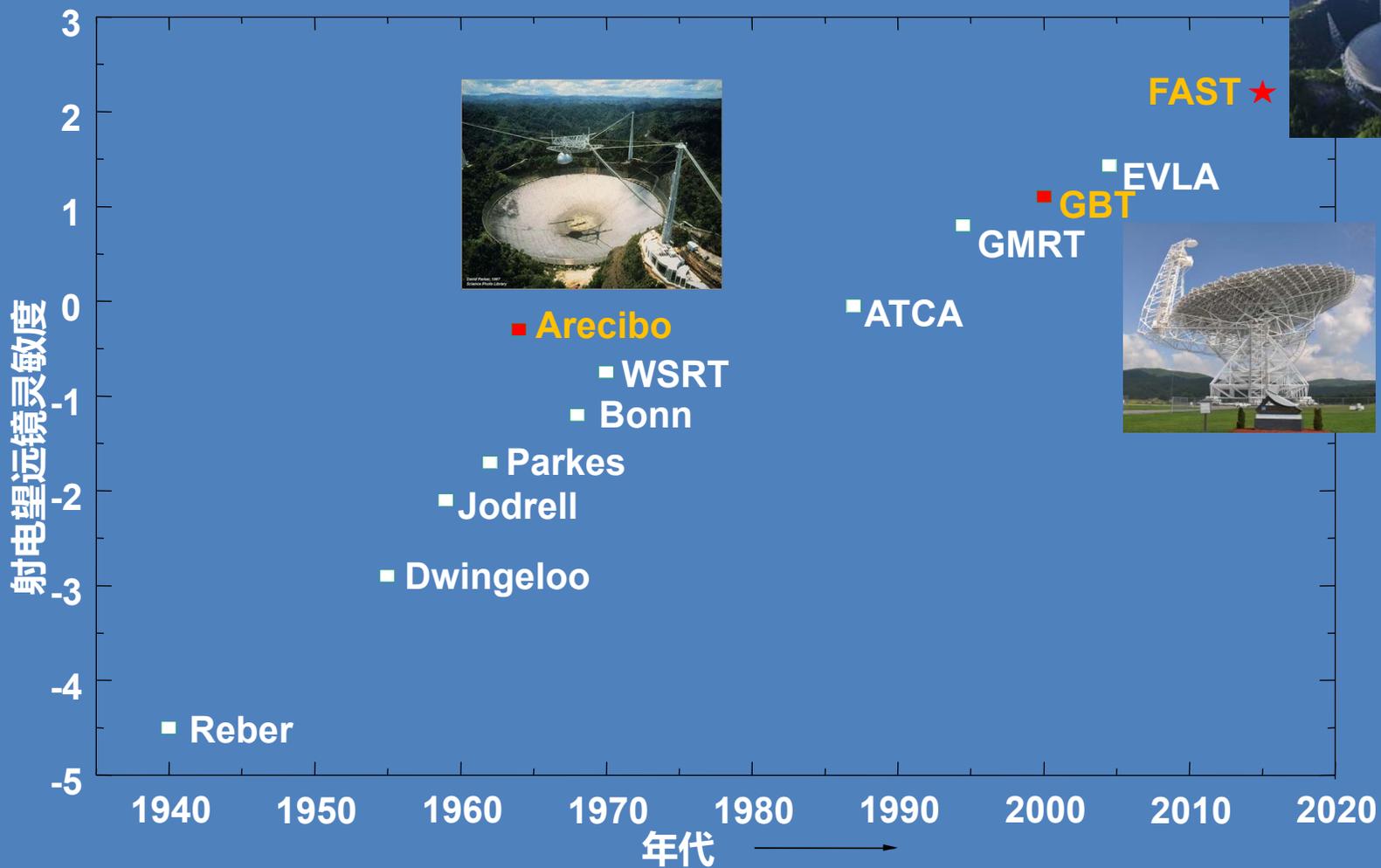
轻型馈源

采用光机电一体化技术，自主提出**轻型索拖动**馈源支撑系统和**并联机器人**，实现望远镜接收机的高精度指向跟踪



# 最灵敏的射电望远镜

创新





需解决如下问题：

- 1、球面 $\longleftrightarrow$ 抛物面的转换如何实现？
- 2、焦点如何精确跟踪？
- 3、安放大锅的理想台址在哪里？



## 纲要

- 一：国家天文台(FAST运行和发展中心)简介
- 二：FAST望远镜及其面临的工程问题
- 三：基于MATLAB的解决方案和工程实现
- 四：展望未来



# 一、MATLAB与主动反射面的安全运行

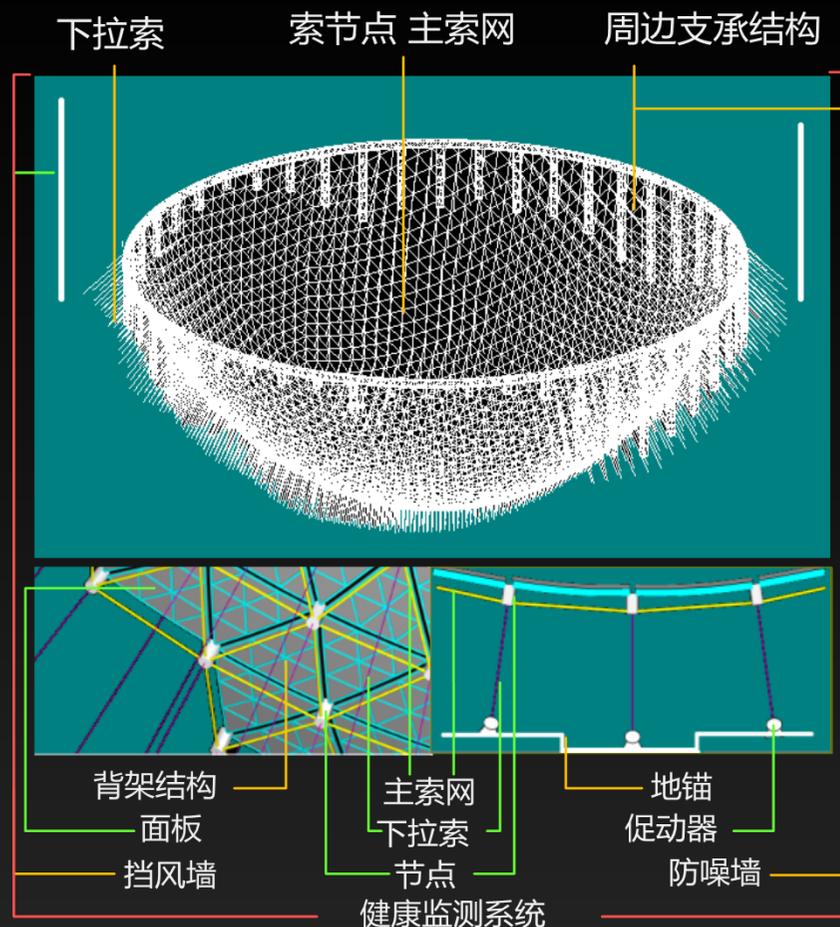
- 主索疲劳应力:  $\geq 500\text{MPa}$  @ 200万次循环加载
- 索长加工精度:  $\pm 1\text{mm}$  @  $\sim 11\text{m}$

**圈梁** 钢结构  
环梁: 周长1600米、宽11米、高5.5米  
支柱: 50个, 6-50米  
重量: 5600吨

**索网** 特制索结构  
主索: 6670根  
下拉索: 2225根  
节点盘: 2225个  
重量: 1600吨

**反射面单元** 铝合金结构  
4450块边长约11米的三角形面板及背架结构组成  
重量: 2000多吨

**促动器** 驱动单元  
2225套液压促动器  
**健康监测** 传感器等  
**挡风墙** 钢结构





## 主动反射面



圈梁



索网结构



促动器



反射面单元



反射面吊装

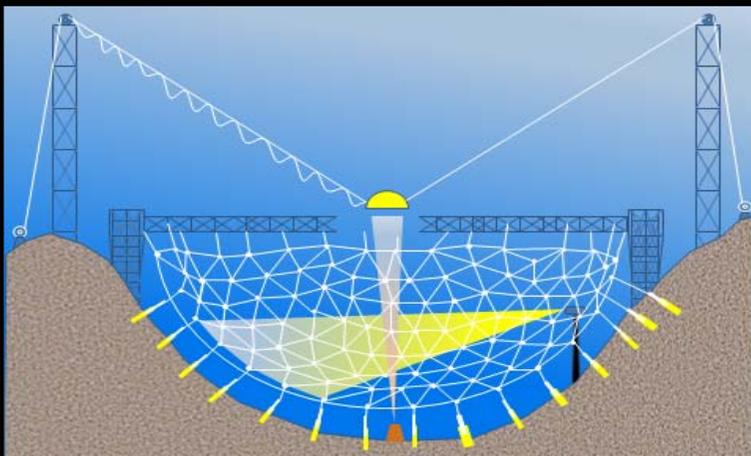


挡风墙

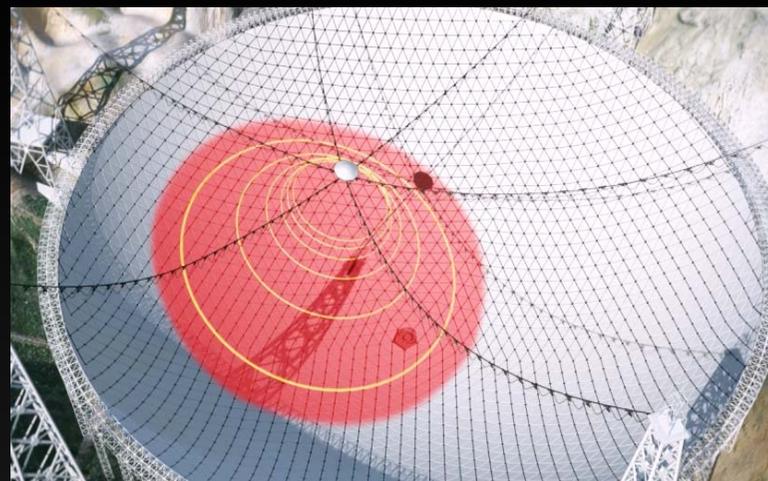


# 一、MATLAB与主动反射面的安全运行

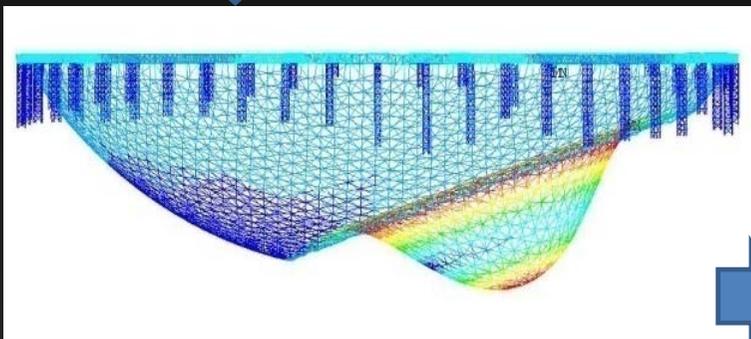
## 超大型射电望远镜的实现方案



突破百米



可变形的索网



集三项世界第一的索网工程

工程特点

跨度最大  
精度最高  
主动变形

三大超标准设计

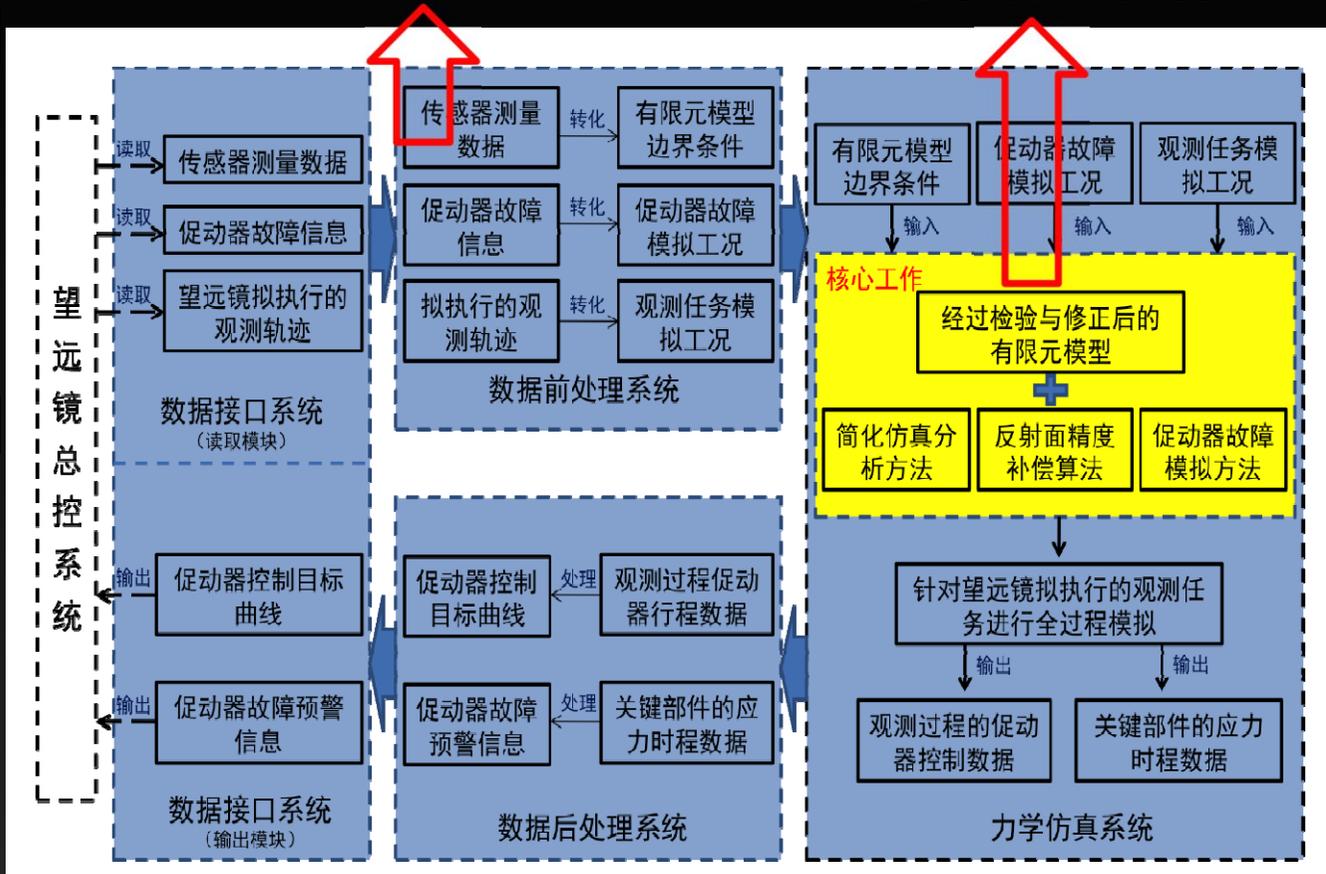
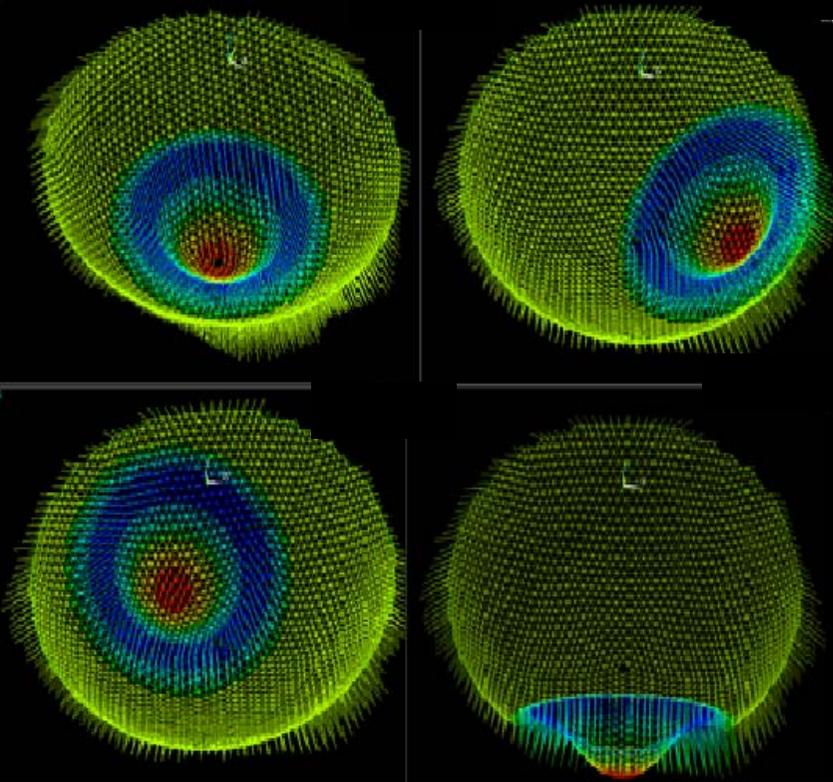
超大跨度索网结构安装问题  
对索构件制造的高精度需求  
索网超高疲劳性能技术要求



# 反射面索网结构安全的实时保障

数据接口+前/后处理+GUI  
MATLAB

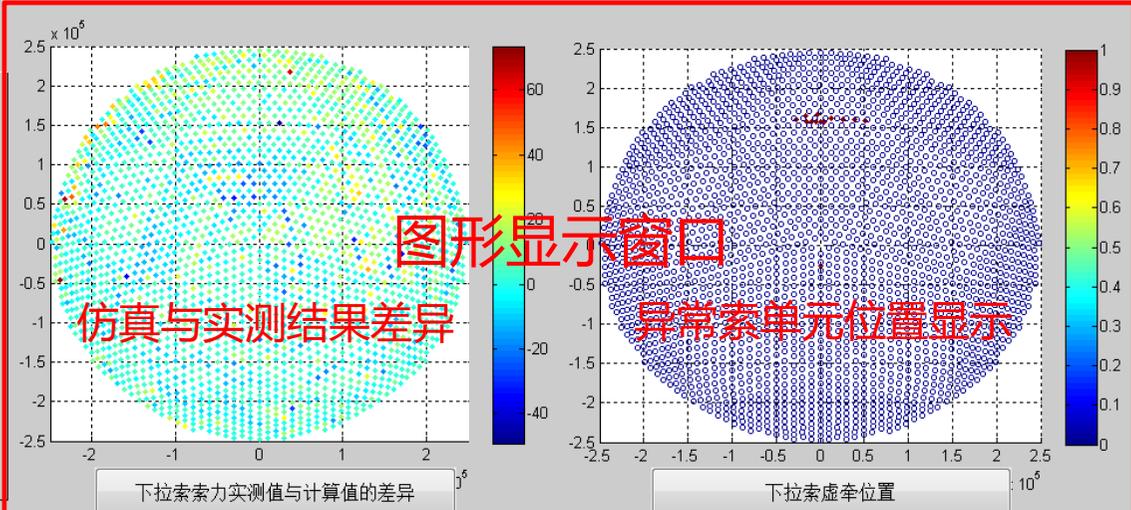
索网圈梁结构FE模型  
力学仿真软件



# FAST索网结构实时评估系统 V2.0

实时评估已开始!

**运行参数输入窗口**



**运行状态显示**

报警信息

- 2017-12-08 08:39:46.0
- 2017-12-08 08:39:33.0
- 2017-12-08 08:39:19.0
- 2017-12-08 08:39:05.0
- 2017-12-08 08:38:52.0
- 2017-12-08 08:38:38.0
- 2017-12-08 08:38:24.0

采集数据时间: 2017-12-08 08:39:46.0

最大延时时间: 11 秒

累计工况数: 11

结果显示 (实测值)

结果显示 (理论值)

**促动器油压**

超限数量	1	最大值	15.01	MPa	端部	166/D030	对应理论值	83.022	KN
虚牵数量	3	最小值	0	MPa	端部	15/E003	对应理论值	3.581	KN

**促动器油压等实测值实时显示窗口**

超限数量	0	最大值	7.097	MPa	端部	2031/A379	对应理论值	71.521	KN
虚牵数量	0	最小值	3.111	MPa	端部	2036/A411	对应理论值	33.768	KN

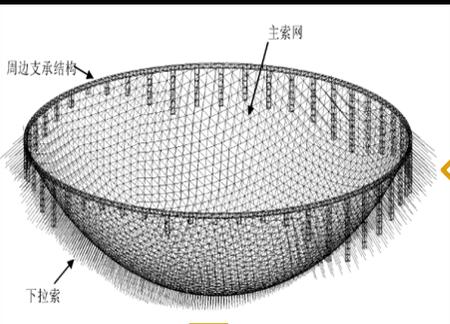
**索网结构仿真应力实时显示窗口**

面索应力	超限数量	0	最大值	738.05	MPa	端部1	D030	端部2	D038	
下拉索索力	超限数量	1	最大值	83.02	kN	端部1	D030	油压	15.01	MPa
边缘索索力	超限数量	3	最大值	99.67	kN	端部1	A407	油压	7.063	MPa
面索应力幅	超限数量	0	最大值	460.12	MPa	端部1	D013	端部2	D014	



# 反射面控制系统安全正常运行的保障

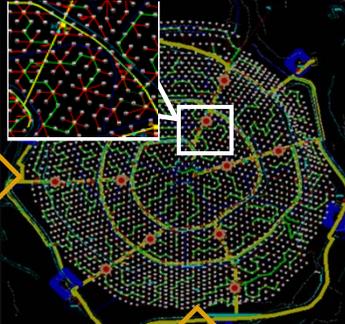
### 索网结构



### 液压促动器



### 供电及通讯网络



仿真 ↓ 数据 反射面控制系统 信号 ↔ 数据

### 索网安全评估系统

OPC  
通讯

促动器油  
压、行程

安全状态报警  
严重故障时触发  
总控停机指令

### 反射面控制系统

观测模  
式和轨  
迹

开 / 停机指令

运行状  
态等

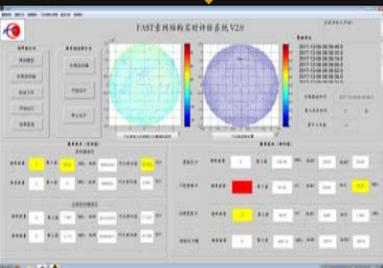
运行  
日志

### FAST总控系统

状态  
预警

信号  
数据

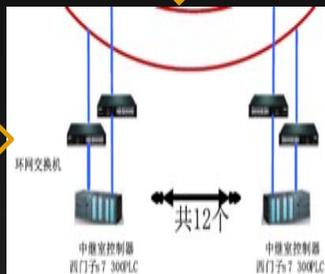
### 索网安全评估



### 总控室



### 中继室PLC





# FAST索网结构实时评估系统

求解已完成，分析结果见txt文件!

7,509,511,576,578,580,582,584,650,652,654,655,656,658,660,662,664,735,737,739,741,743,745,747,821,823,827,829,831,835,914,916,918,921

预评估分析

原始模型

失效促动器

轨迹文件

开始运行

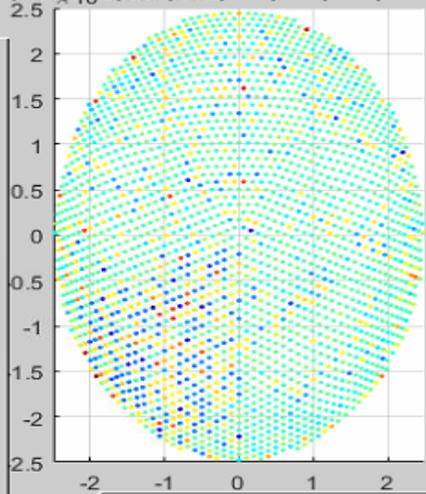
结果查询

准实时追踪分析

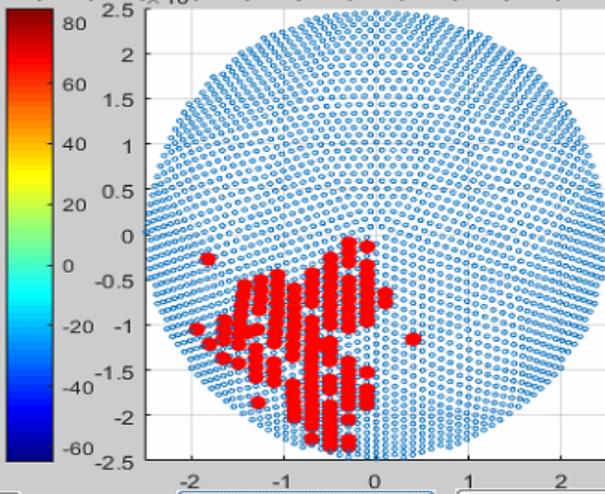
失效促动器

开始运行

停止运行并解...



下拉索索力实测值与计算值...



获取虚牵下拉索位置

获取油压超限下拉...

警报信

- 2019-2-5-11:7:17.719
- 2019-2-5-11:6:58.730
- 2019-2-5-11:6:37.715
- 2019-2-5-11:6:16.731
- 2019-2-5-11:5:55.713
- 2019-2-5-11:5:34.728

采集数据时

最大延时 82871.344 秒

累计工况 2176

## 例子：异常情况发现与处理（安全报警，中断观测）

促动器油压  
超限数量 7 最大值 14.533 MPa 端部 653/D12 对应理论值 83.26 KN

虚牵数量 122 最小值 0 MPa 端部 28/E004 对应理论值 1.628 KN

边缘促动器油压

超限数量 0 最大值 7.375 MPa 端部 2032/A4 对应理论值 105.3 KN

虚牵数量 0 最小值 0.415 MPa 端部 2150/D4 对应理论值 8.321 KN

面索应力 超限数量 0 最大值 706.19 MPa 端部1 D293 端部2 D317

下拉索索力 超限数量 4 最大值 83.83 kN 端部 D112 油压 14.35 MPa

边缘索索力 超限数量 5 最大值 107.11 kN 端部 E430 油压 7.067 MPa

面索应力幅 超限数量 0 最大值 433.7 MPa 端部1 D143 端部2 D144



## MATLAB程序主要模块功能介绍

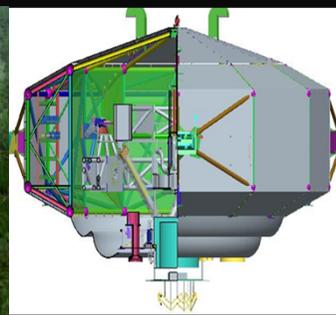
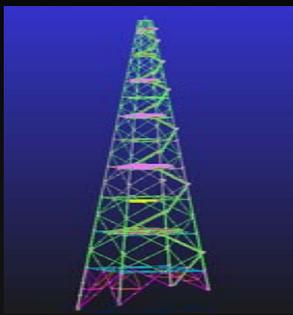
- **GUI界面:**  
将计算结果和通讯数据转化为可见的图像、色彩、声音和数字等;  
提示操作人员当前索网结构的运行状态
- **OPC通讯:**  
与中继室PLC保持实时通讯 (大约20s一次) ;  
读取2225台液压促动器的油压和行程等信息;  
输出程序运行状态 (心跳) , 检验程序运行或通讯是否异常
- **TimerFCN:**  
读入文件入并转化为力学仿真软件的模型计算参数;  
循环调用力学仿真软件, 完成仿真计算, 读入计算结果文件  
对计算结果进行分析判断和安全评估, 输出评估结果和运行日志  
处理各种误操作和报错信息



## 二、MATLAB与馈源支撑系统的仿真设计

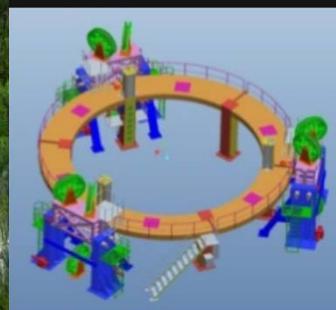
- 六塔自振频率  $\geq 1\text{Hz}$
- 馈源舱重量  $\leq 30\text{t}$
- 柔性索驱动定位  $\leq 48\text{mm}$
- 馈源定位(二次精调)  $\leq 10\text{mm rms}$
- 动光缆信号传输衰减  $\leq 0.05\text{dB}$  @10万次弯折

**馈源支撑塔**  
6座塔，含塔身  
及附属设施



**馈源舱**  
舱体、星型框  
架、精密并联  
机器人、AB轴  
机构等

**索驱动机构**  
驱动机构、导向  
机构、缆索装置、  
六索并联控制等



**舱停靠平台**  
舱支撑装置、  
滑轮支撑装置  
和配电电控等

**动态监测** 各种传感器，数据采集与传输设备、软件开发等



## 馈源支撑



馈源支撑塔



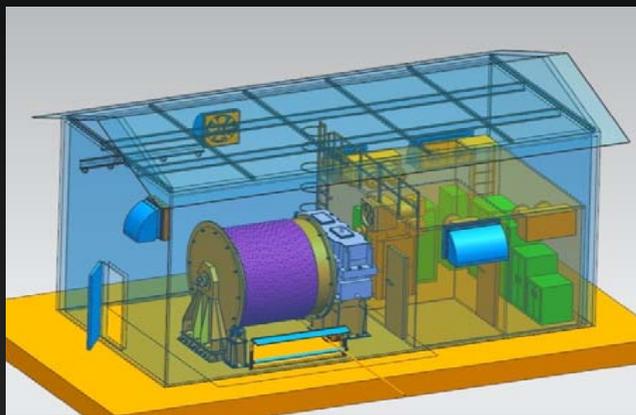
馈源舱



舱停靠平台



塔顶导向滑轮



索驱动卷扬机



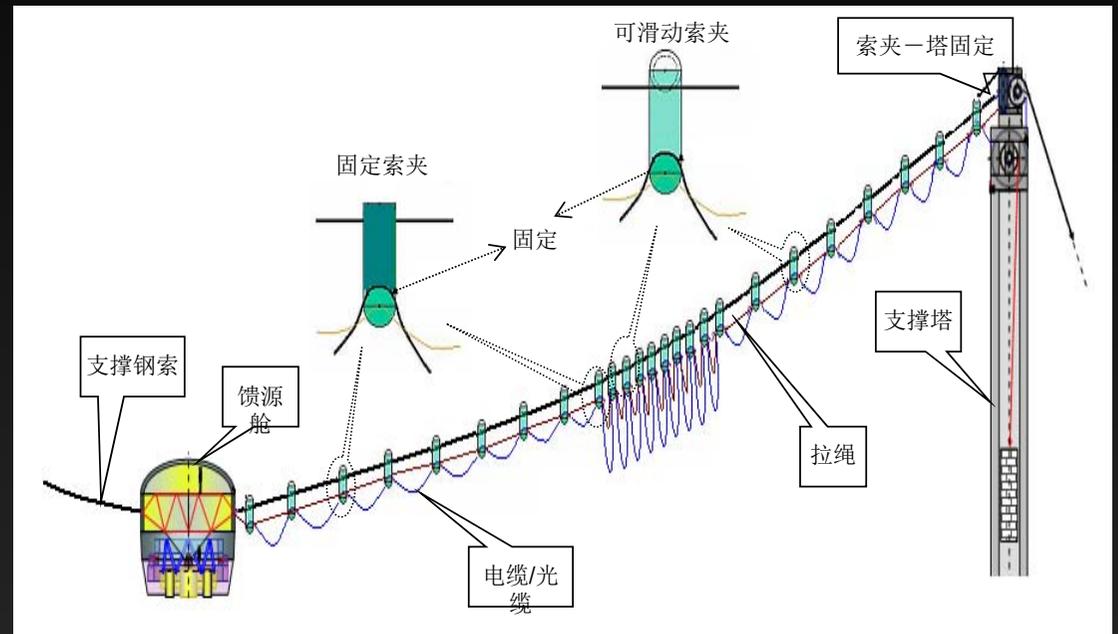
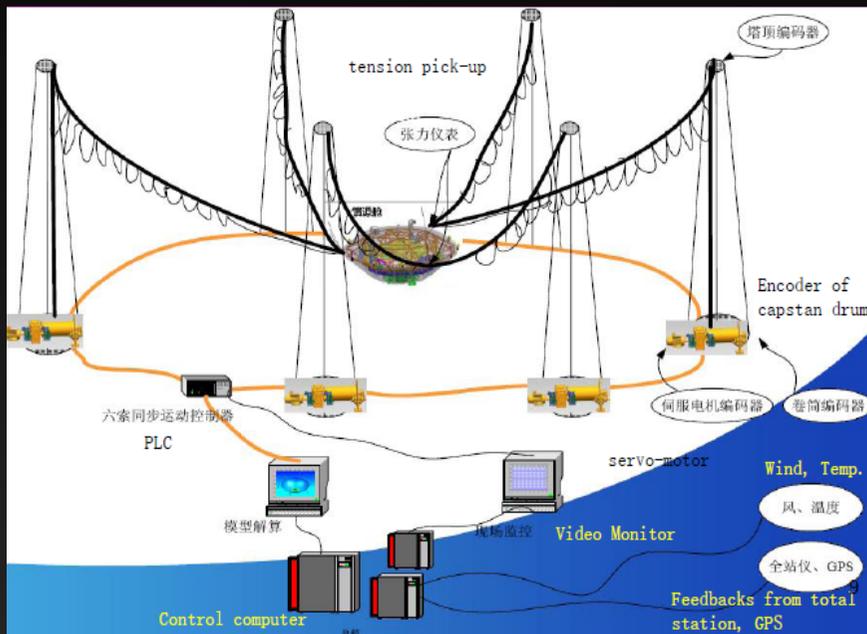
驱动钢索

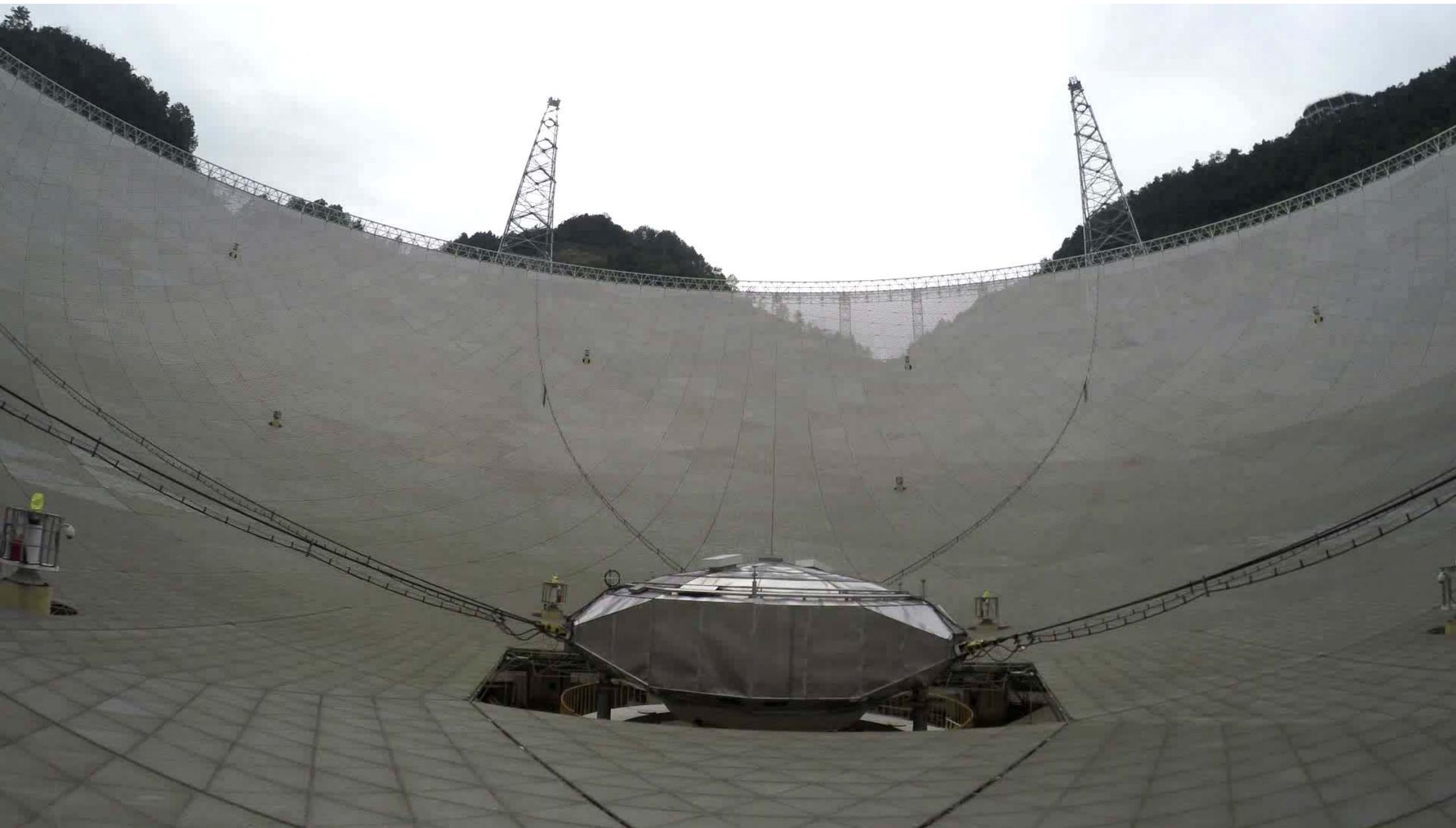


## 二、MATLAB与馈源支撑系统的仿真设计

需要攻克的技术难题：

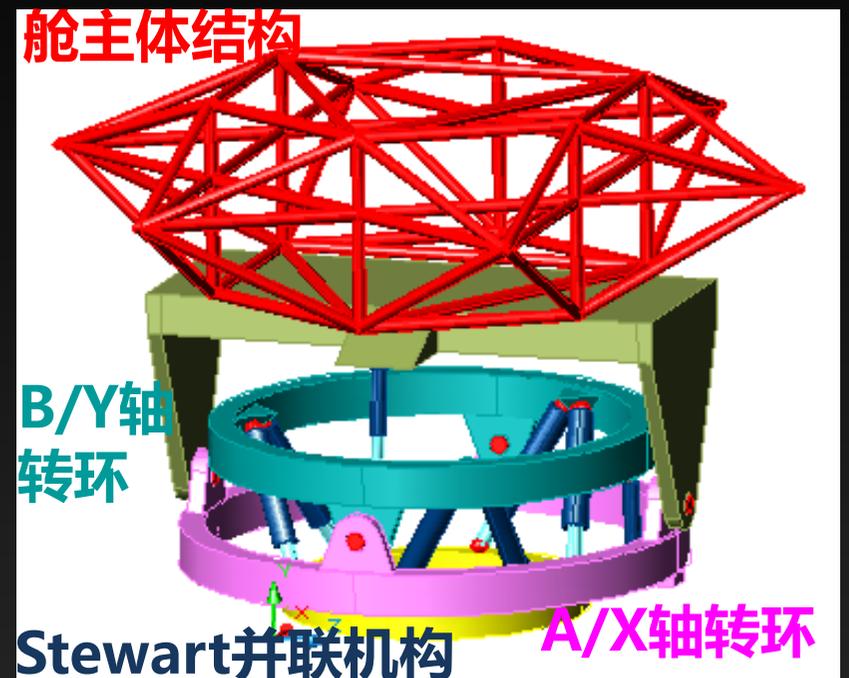
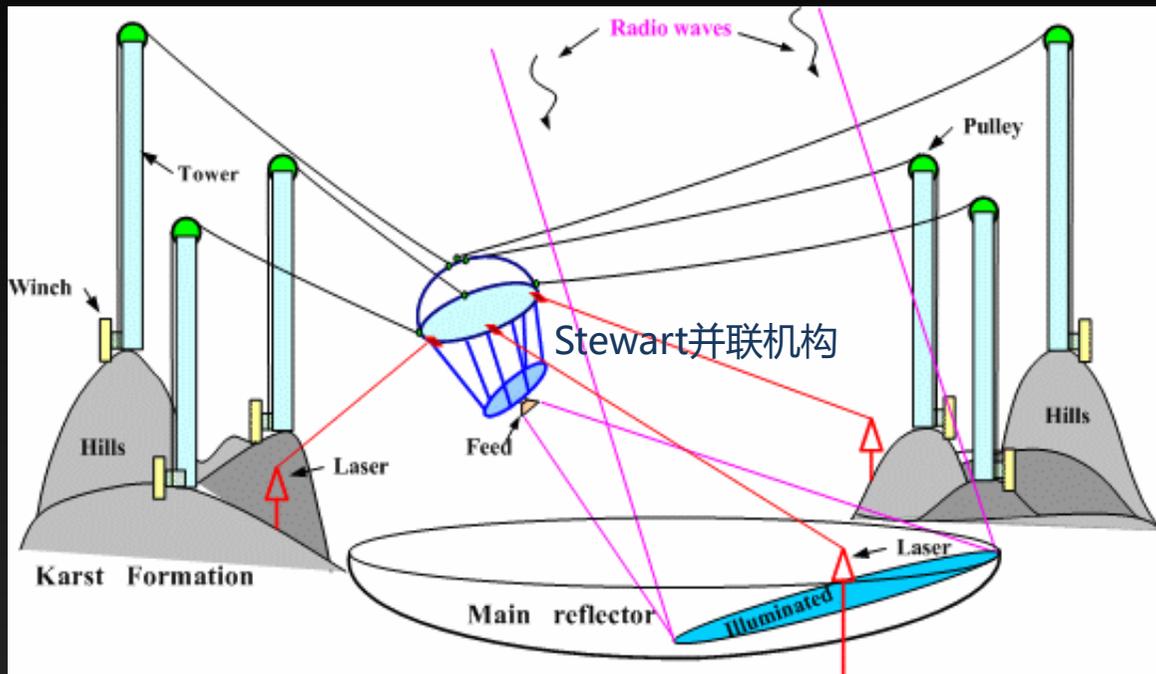
1. 塔振动对大跨度柔性非线性动力学系统的影响
2. 大跨度刚柔耦合非线性系统动力学及跟踪控制
3. 高空变索长电力及信号入舱可靠传输技术





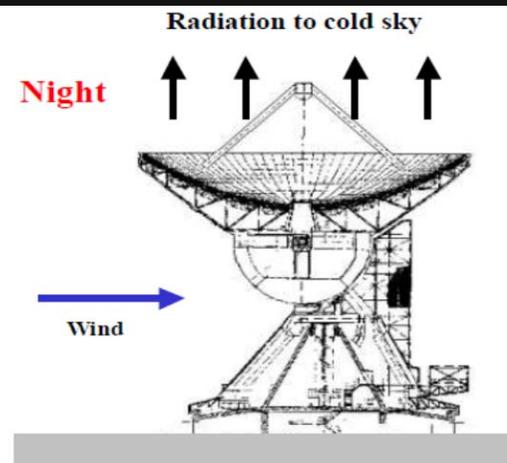
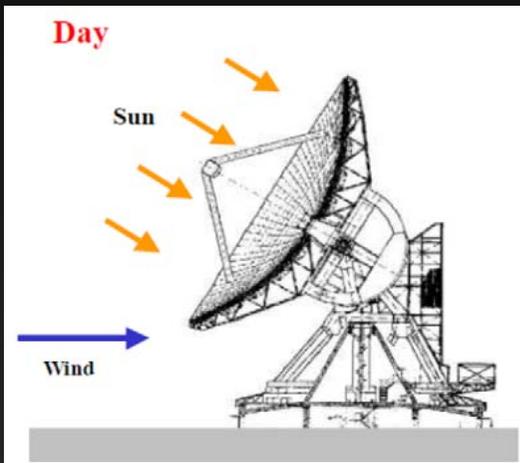
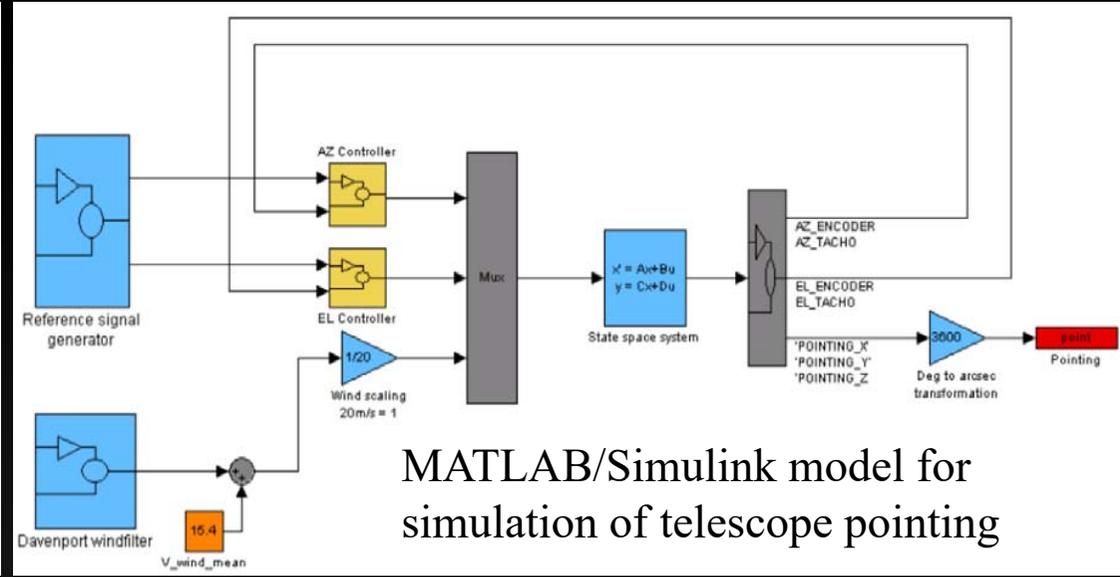
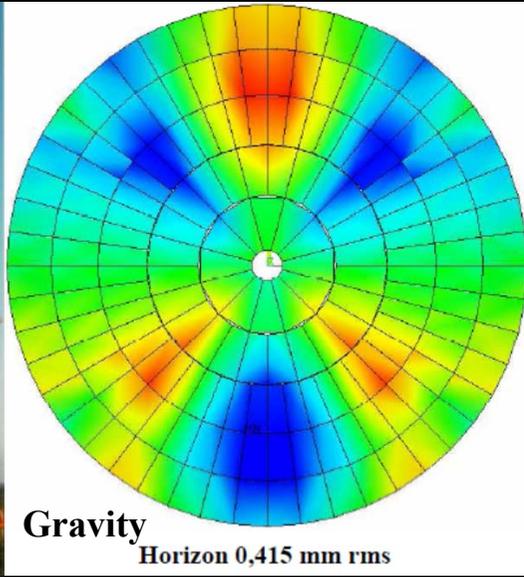


- 馈源舱重量  $\leq 30t$
- 柔性索驱动定位  $\leq 48mm$
- 馈源定位(二次精调)  $\leq 10mm$  rms





# End-to-end Simulation on surface & pointing



**Pointing Errors in arcsec rms**

Source and Type of Error (all values in arcsec rms)	Passive	Active comp.
<b>Environmental Influences (steady-state)</b>		
Gravity Deformations	10,0	0,2
Wind Deformations	3,6	0,3
Thermal Deformations	0,5	0,2
<b>Environmental Influences (dynamic)</b>		
Wind gusts (servo)	0,3	0,3
Wind gusts (structure)	0,3	0,3

Source and Type of Error (all values in arcsec rms)	Passive	Active comp.
<b>Mechanical Alignment</b>		
Overall	5,0	0,5
<b>Servo</b>		
Sensors	0,1	0,1
Non-linearities	5,0	0,3
Controllers	0,03	0,03
Commands	0,03	0,03
<b>Margin</b>		
		0,5
<b>Overall Pointing Error Budget</b>		
	12,8	0,98



# 馈源支撑系统全过程仿真(end-to-end Simulation)



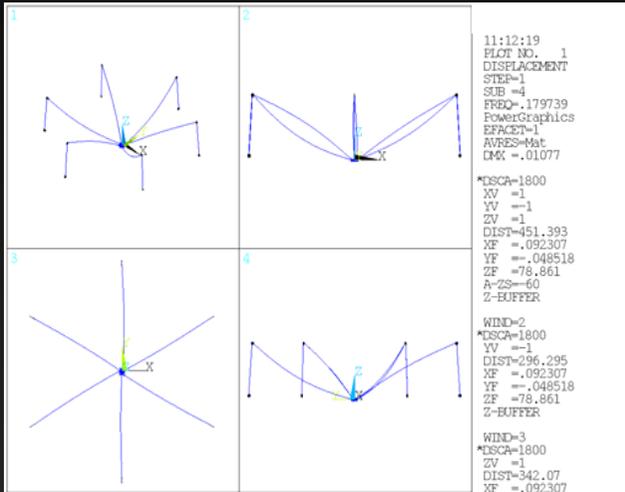
关键部件  
建模分析

塔-舱-索系统  
静力学分析

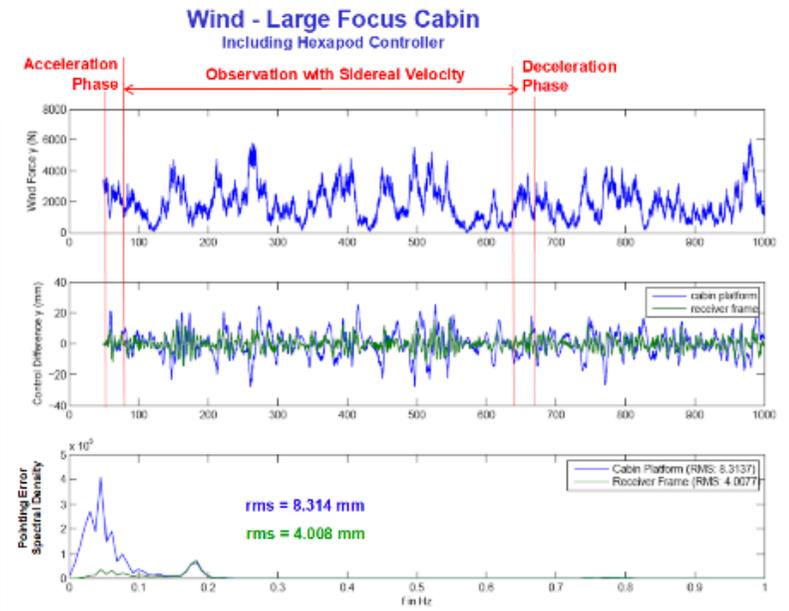
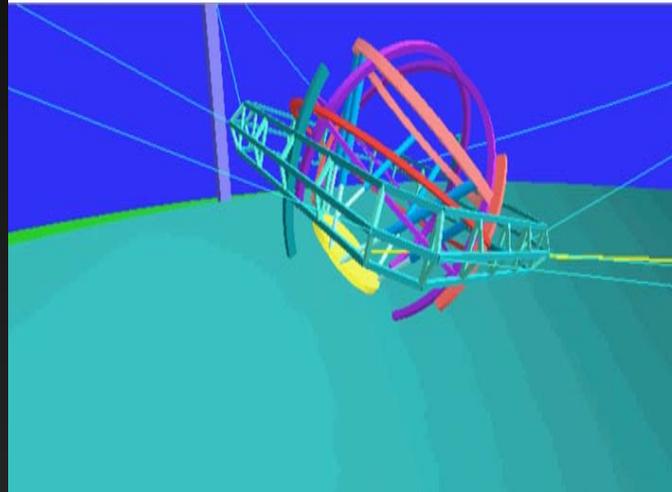
塔-舱-索柔性悬挂  
系统的动力学分析

耦合控制系统总体  
仿真和算法优化

论证：柔性馈源支撑方案是可行的



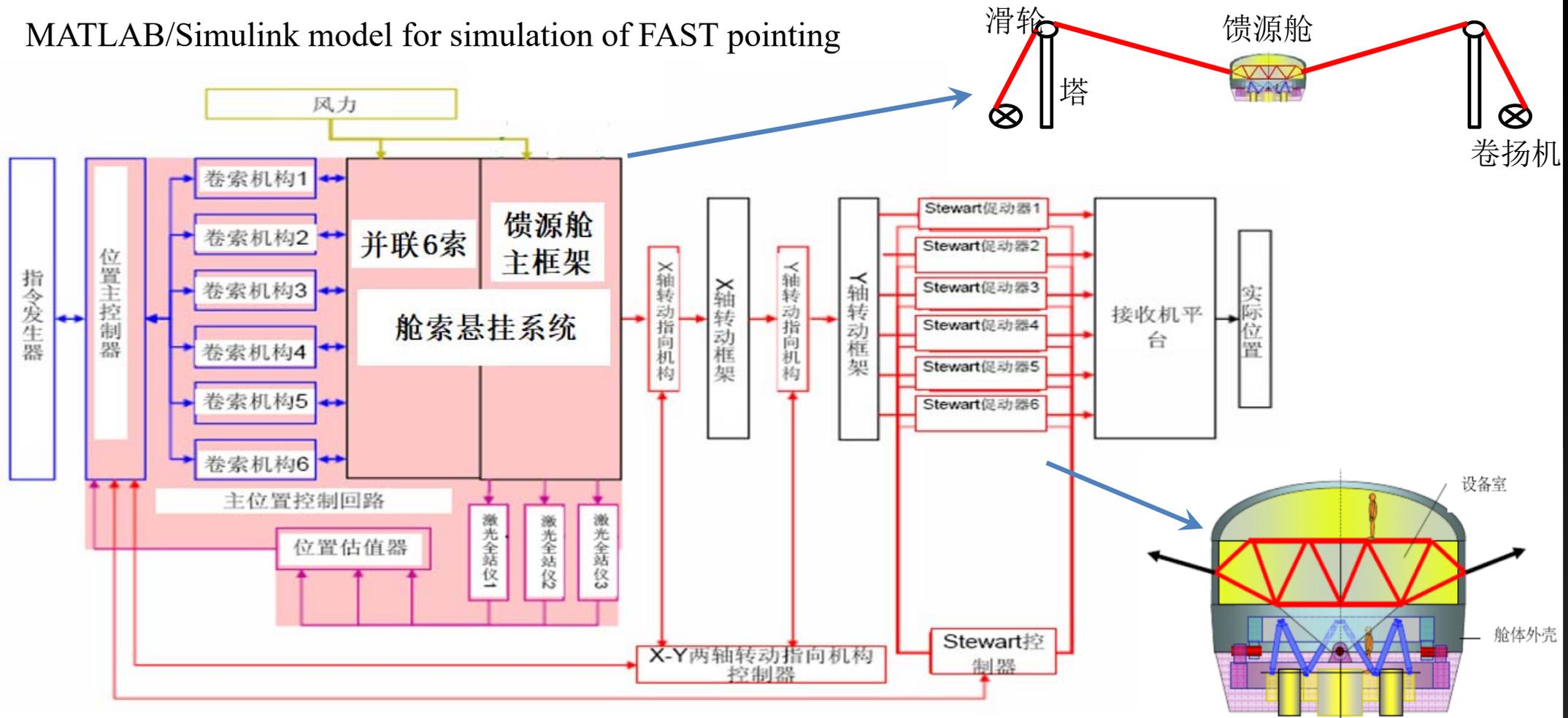
rms=4.008mm < 10mm !





# 全过程仿真模型的构成

MATLAB/Simulink model for simulation of FAST pointing





### ➤ 舱—索悬挂系统力学建模

1. 静力学优化分析(MATLAB)
2. 动力学建模(力学仿真软件)
3. 状态方程模型输出(MATLAB)

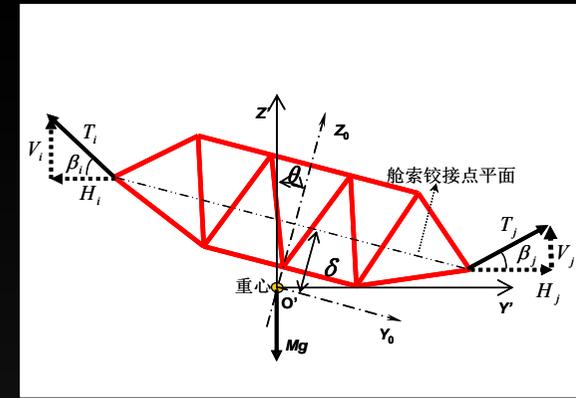
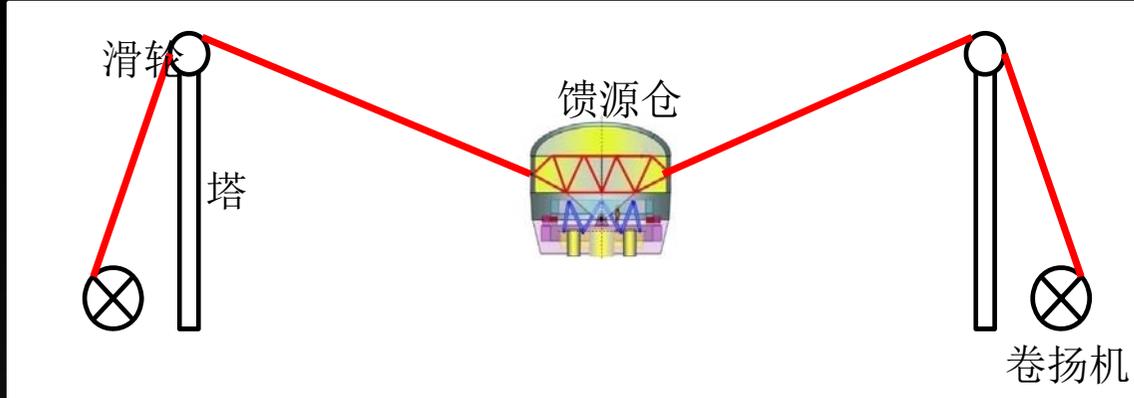
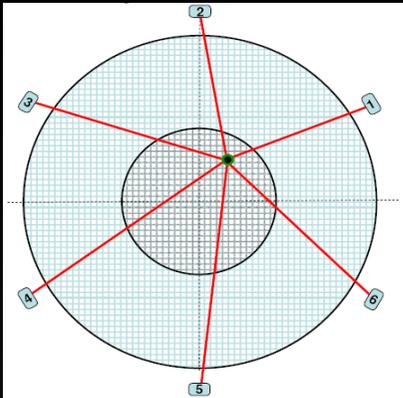
### ➤ 其它关键部件建模(SIMULINK)

卷扬机、控制器、传感器、风荷载、舱内机构等

### ➤ 系统综合仿真(SIMULINK)



# 舱-索悬挂系统静力分析



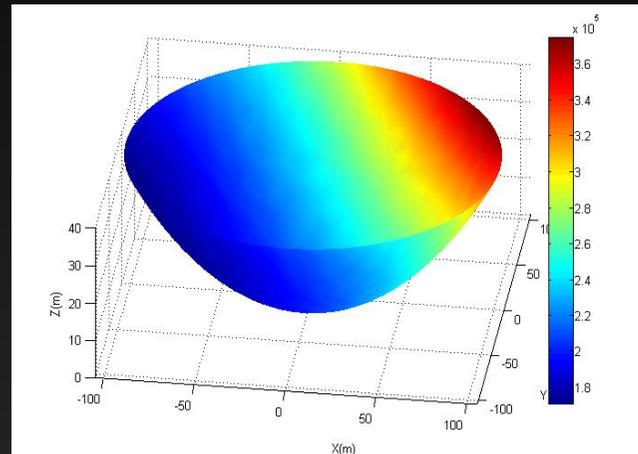
## 寻找最优索力和舱姿态

基于LM优化算法, MATLAB编程实现

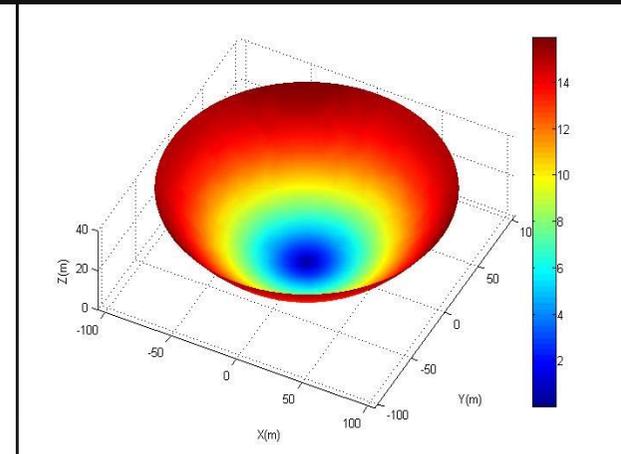
$$\min : \left( \sum_{i=1}^6 \left( T_i - \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 T_j \right)^2 \right)$$

$$s.t. \begin{cases} F_x = 0; F_y = 0; F_z = 0; \\ M_x = 0; M_y = 0; M_z = 0 \end{cases}$$

and  $H_i > 0 (i = 1, 2, \dots, 6)$



最优索力分布

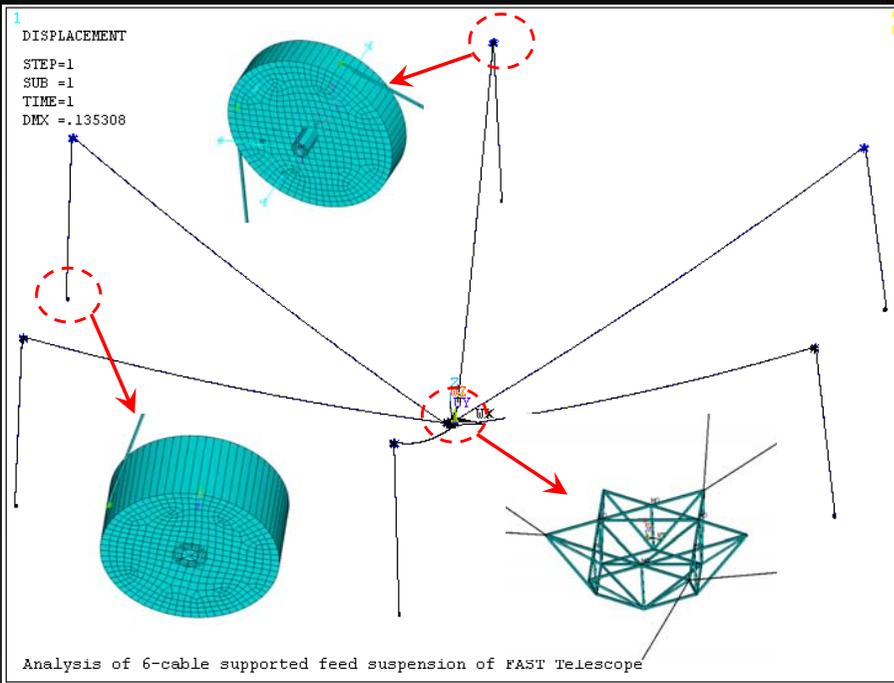


最优舱倾角分布

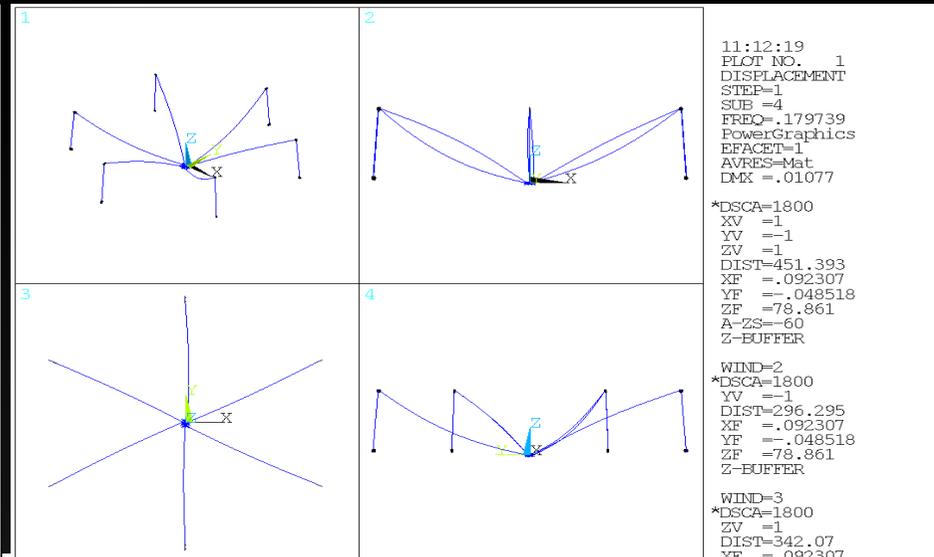


# 舱-索系统有限元建模分析

- 模态分析
  - 模型缩聚
- 150×300

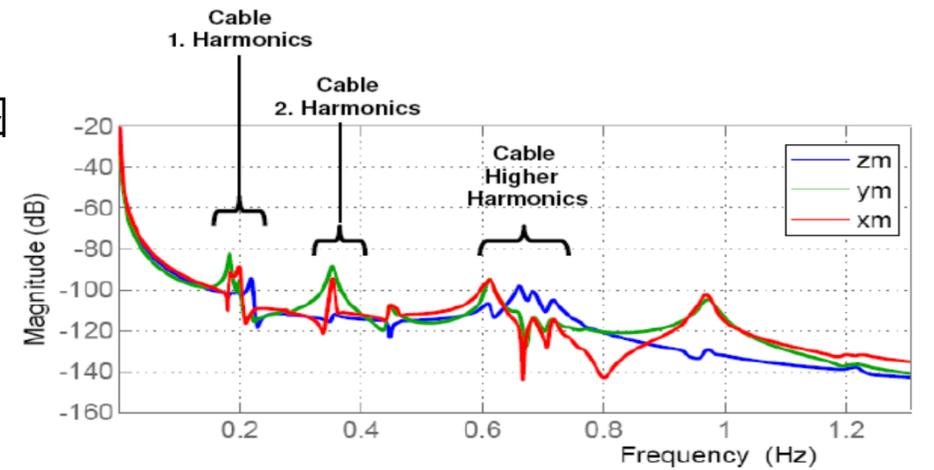


0. Order	1	0.000000000000
	2	0.000000000000
	3	0.000000000000
1. Order	4	0.1797394987397
	5	0.1820134418916
	6	0.1824548461540
	7	0.1968523833325
	8	0.1969882294856
	9	0.2088509824237
	10	0.2127083719683
	11	0.2127218899488
	12	0.2127354445089
	13	0.2151577553195
	14	0.2151772981990
	15	0.2166244246352
2. Order	16	0.2759873288547
	17	0.3489233572895
	18	0.3490209137409
	19	0.4246867222884
	20	0.4247148301912



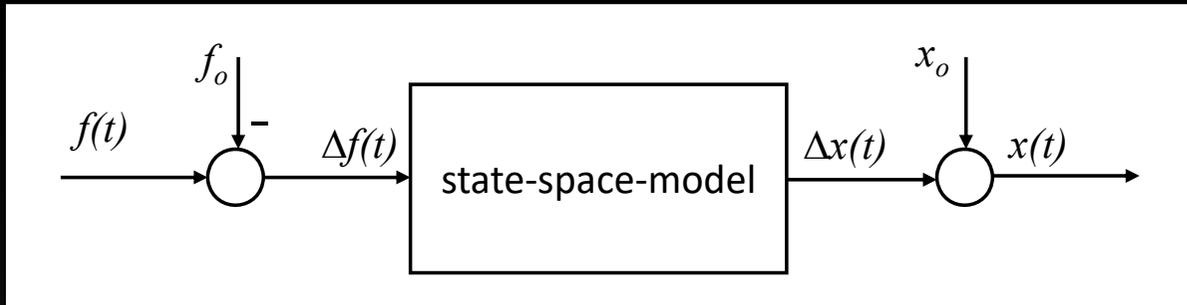
## 系统Bode图

输入：  
卷筒扭矩；  
输出：  
馈源舱中心  
位移





## 重建状态空间模型



### From FEA software

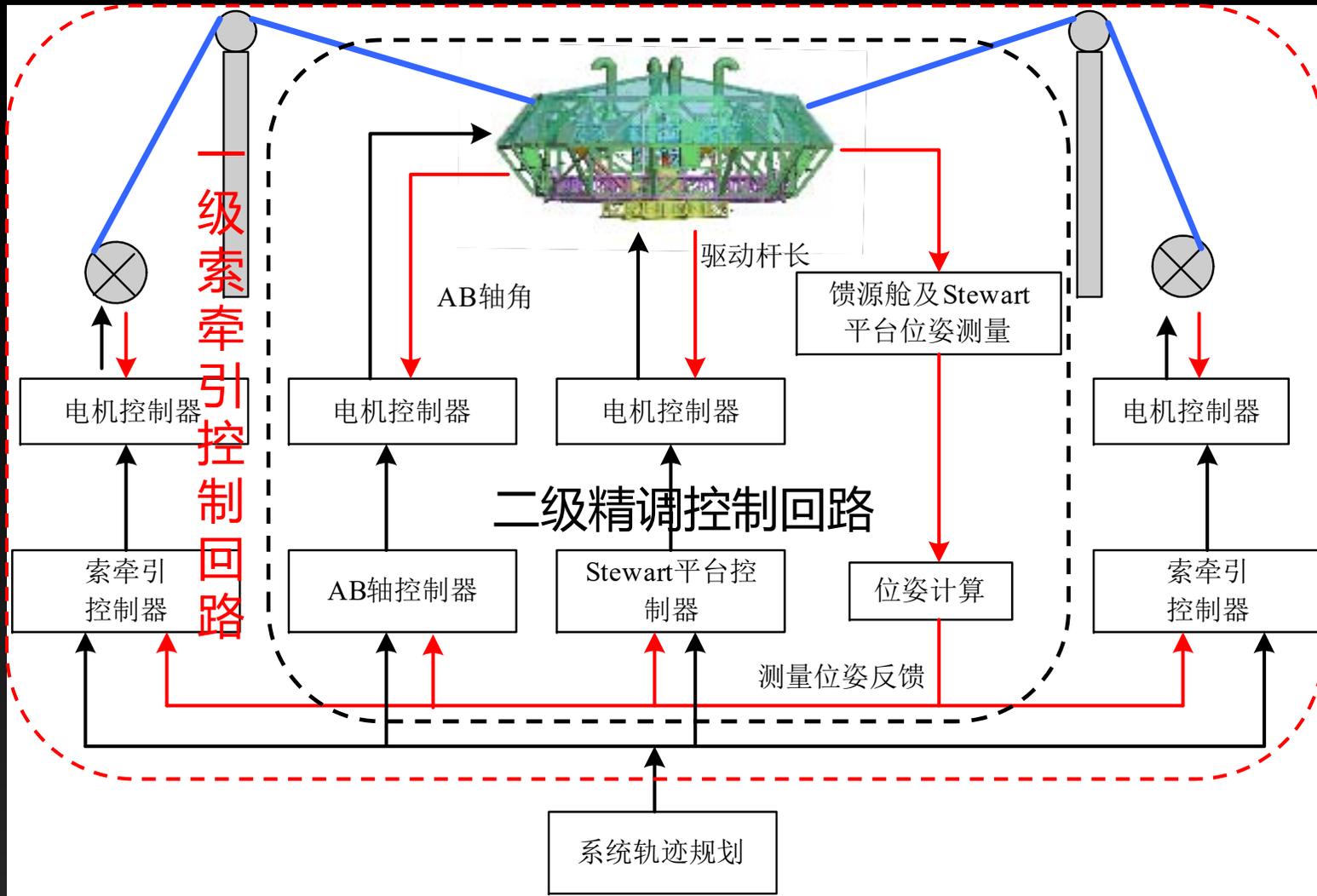
- FE-Model
- 150 natural frequencies + modal matrix (300x150)
- static forces and static positions of io-nodes

### In MATLAB

- 构建 A, B, C, D 矩阵
  - A in modal form, inputs and outputs forces and position acting on nodes
- reduction (balanced truncation)



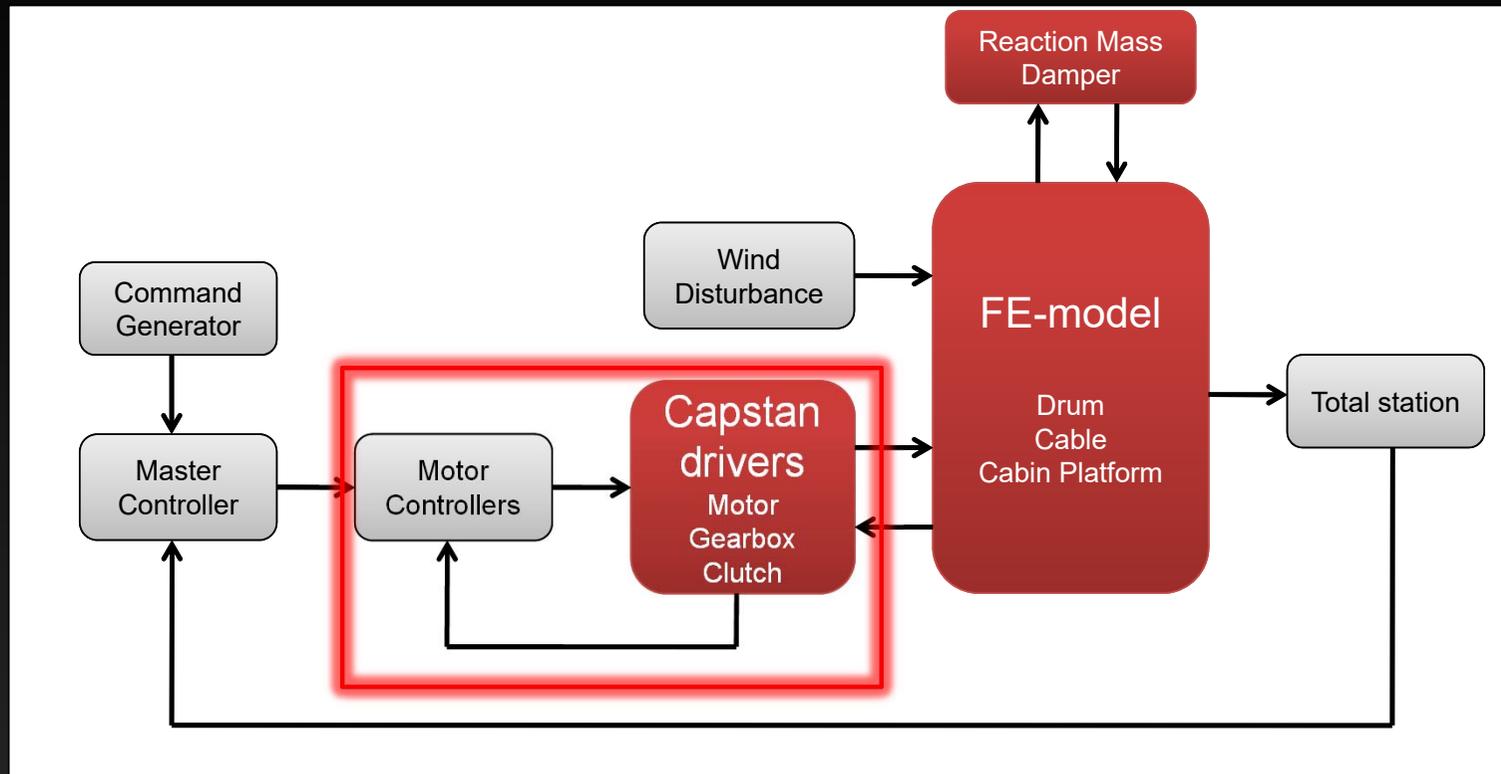
# 馈源支撑控制系统构成





# 一级索牵引控制

- 卷扬机：控制索长和索力的大小

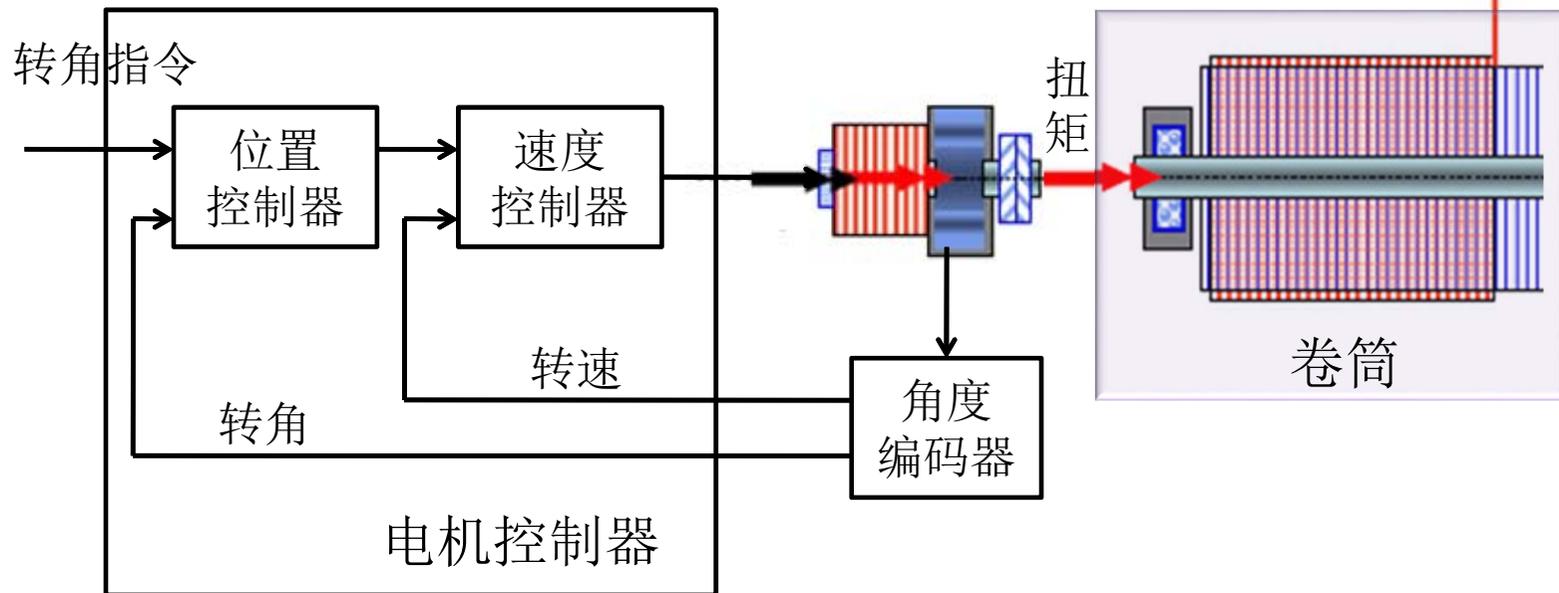




# 一级索牵引控制

电机伺服系统（控制器+驱动器）

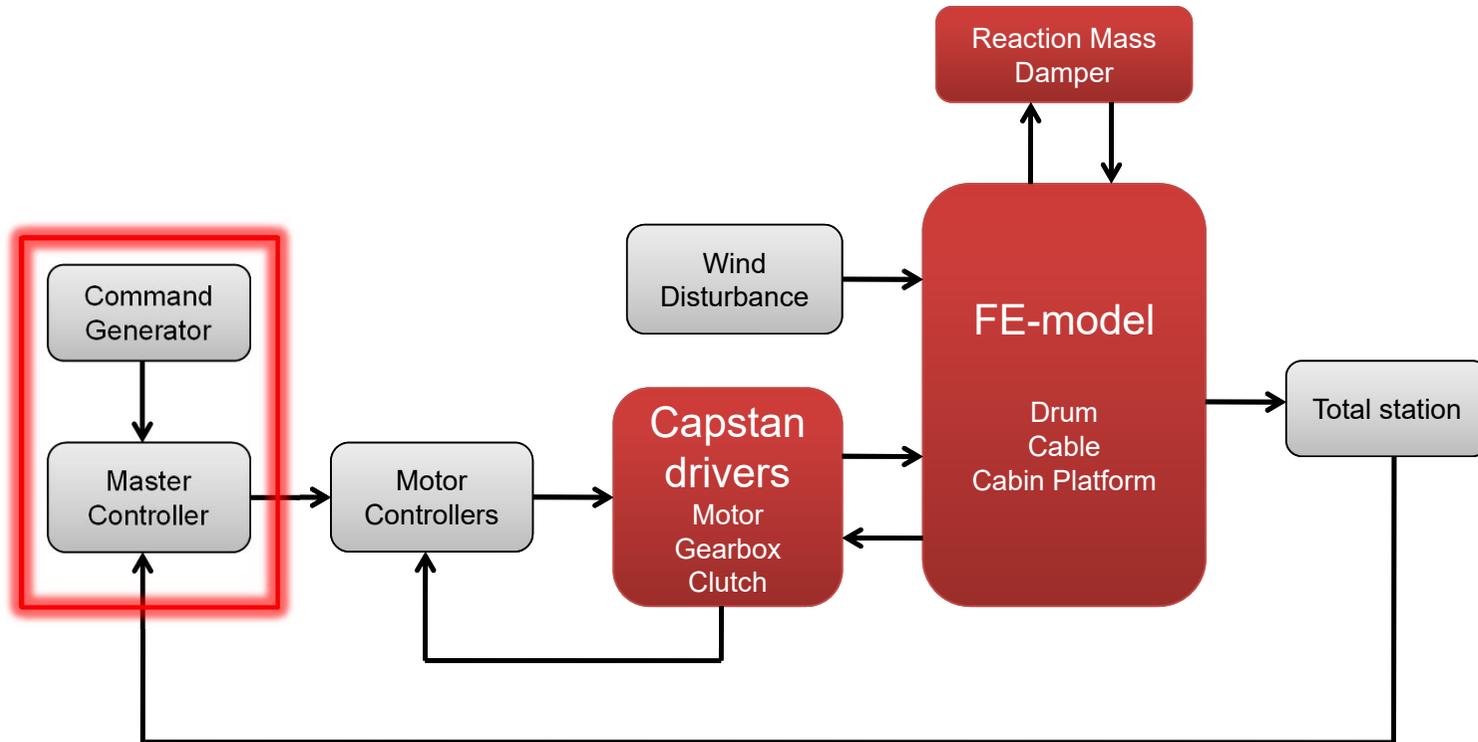
电机、减速器、联轴器





# 一级索牵引控制

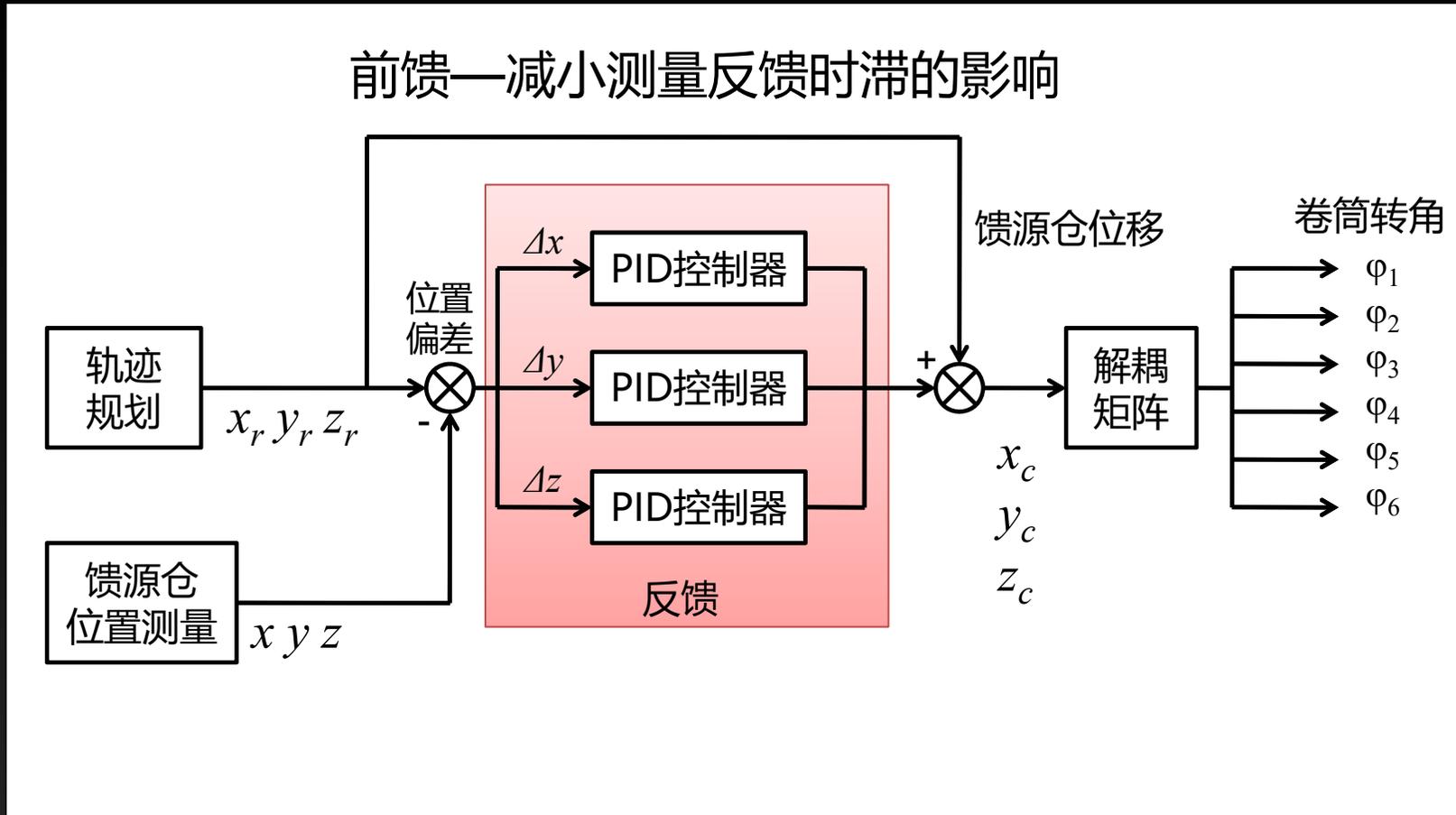
主控制器： 轨迹规划+馈源仓位置控制器





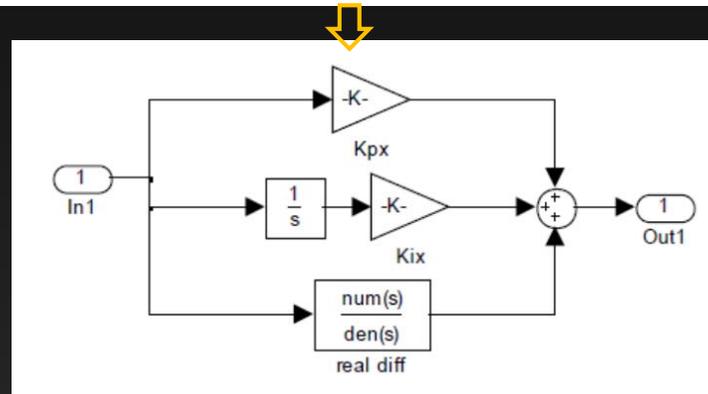
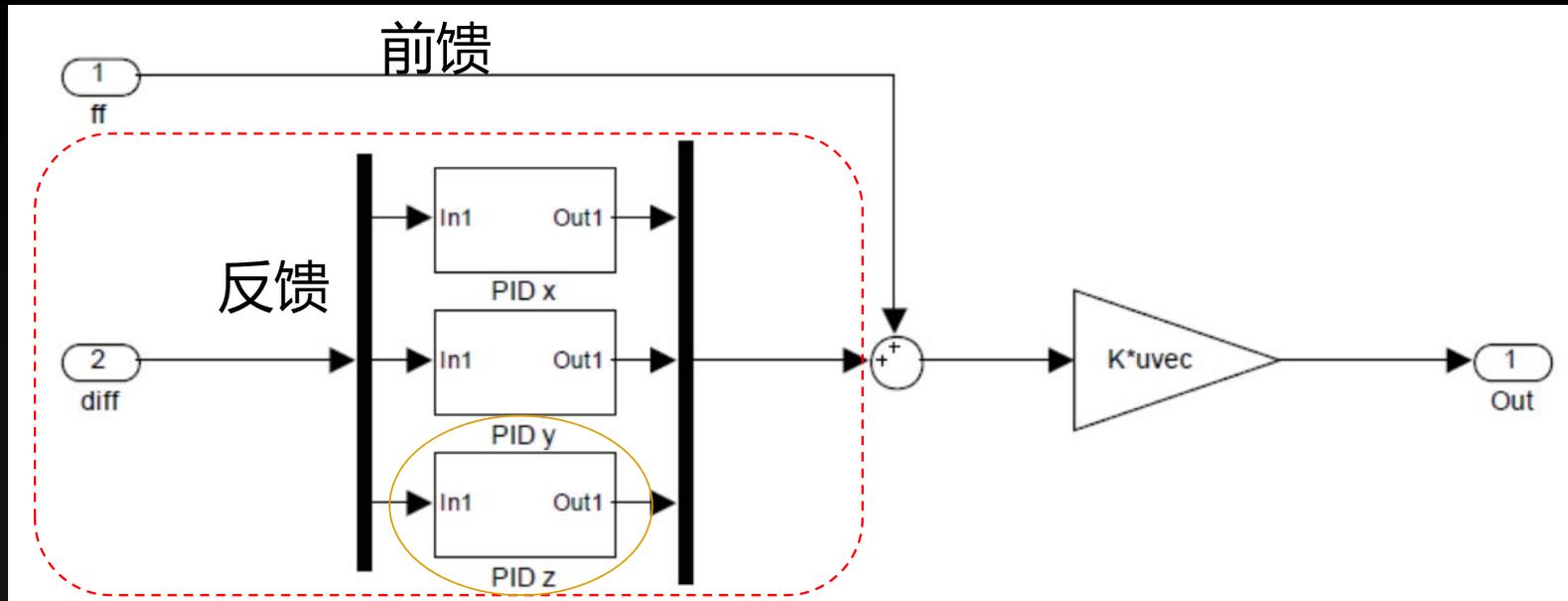
# 一级索牵引控制

前馈+反馈，由馈源舱位移计算卷筒转角





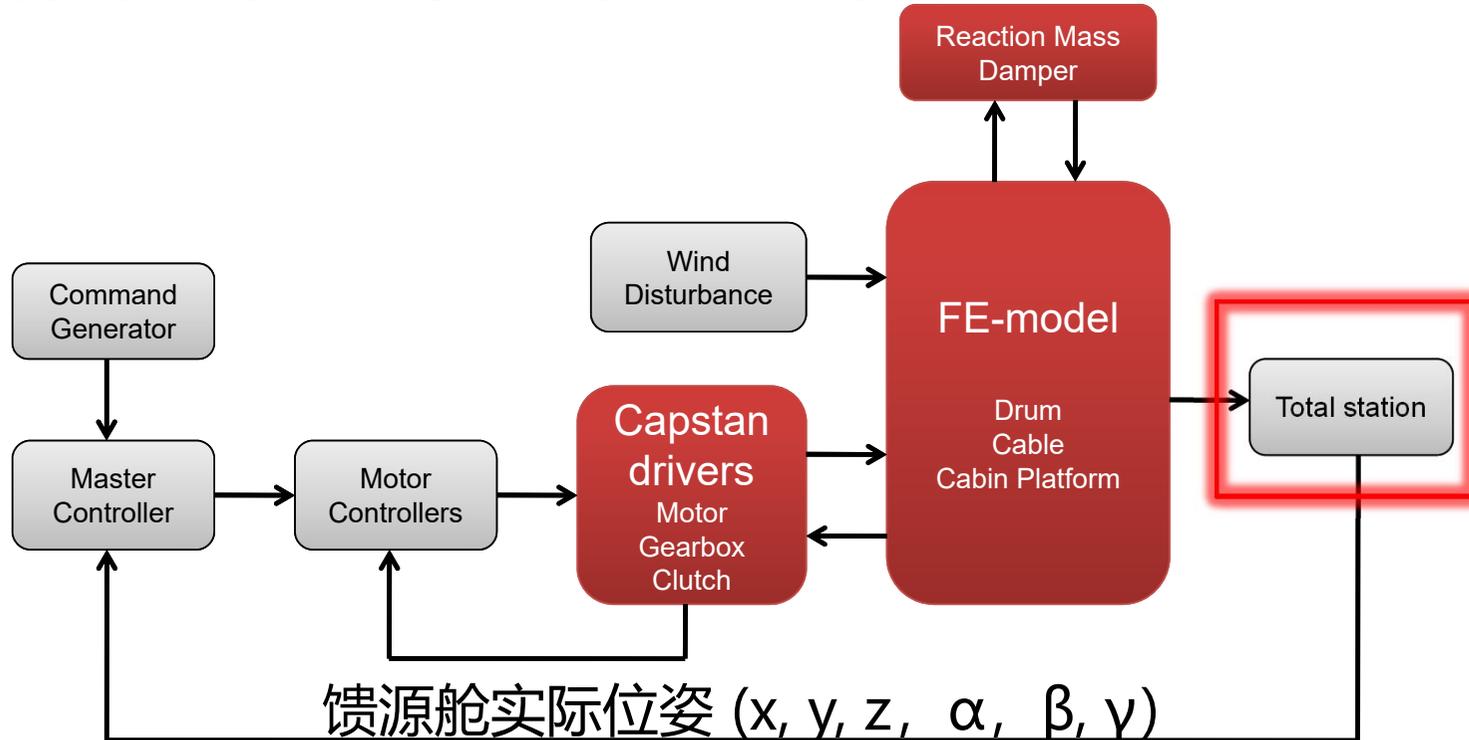
# 一级索牵引控制





# 馈源舱位姿传感器

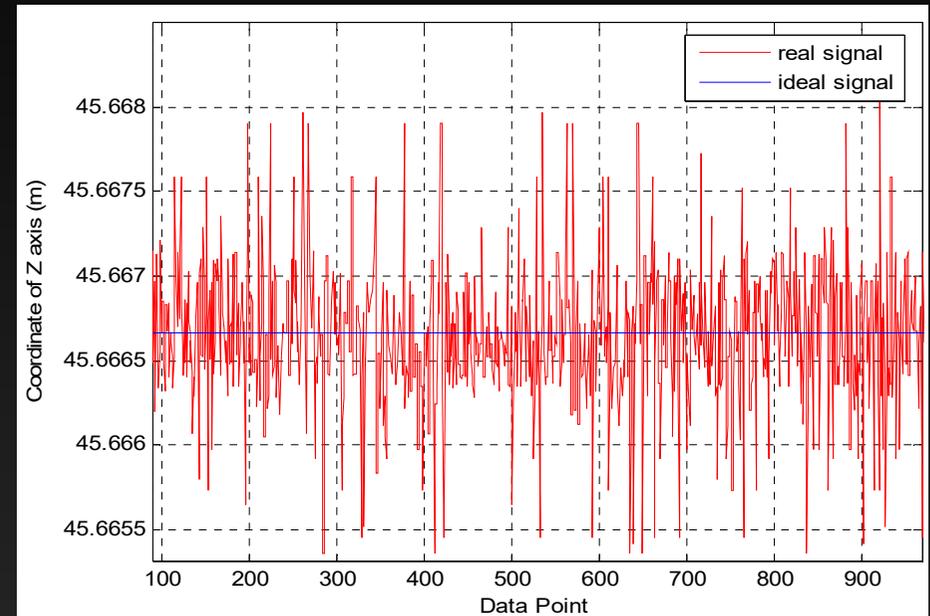
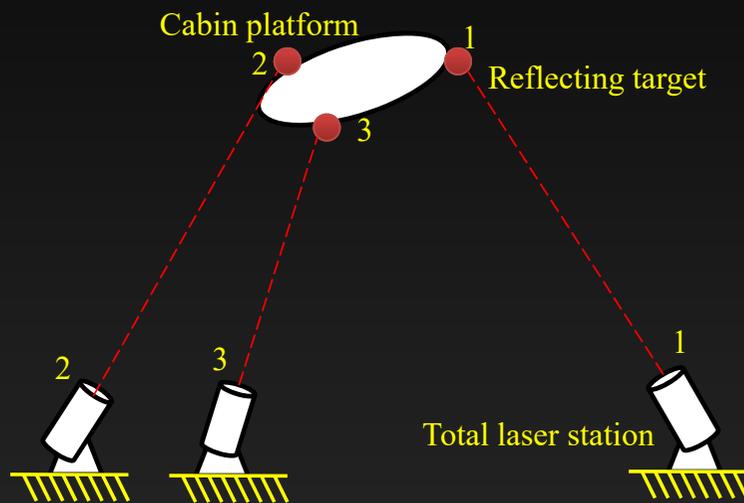
传感器：激光全站仪  
将测量到的馈源舱位姿反馈给控制器





## 馈源舱位姿传感器

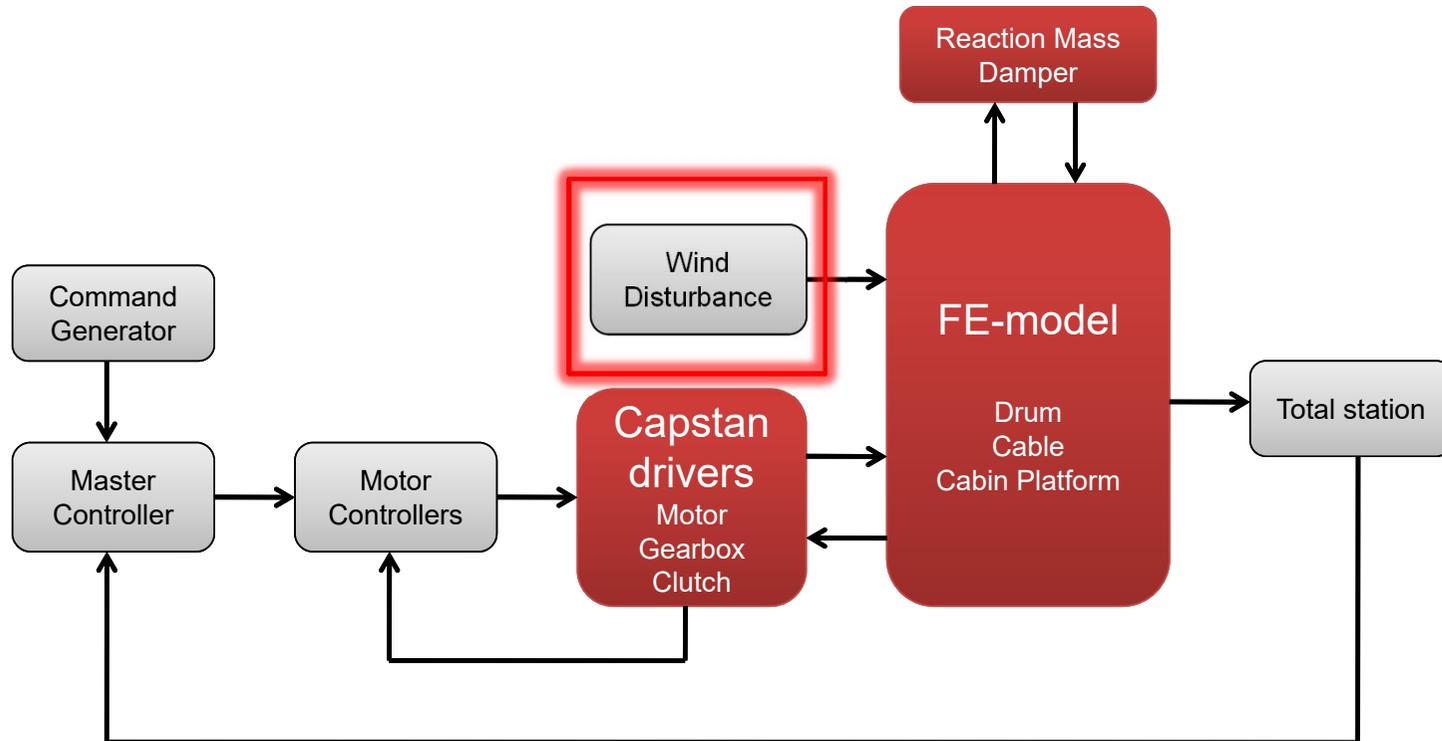
- 水平角、俯仰角测量误差 $3.0E-6\text{rad}$
- 距离测量误差 $1.5E-3$
- 最大位置误差约 $1.5\text{mm}$
- 测量延时 $0.16\text{s}$





# 风载荷模型

## 风载荷直接作用于舱索系统



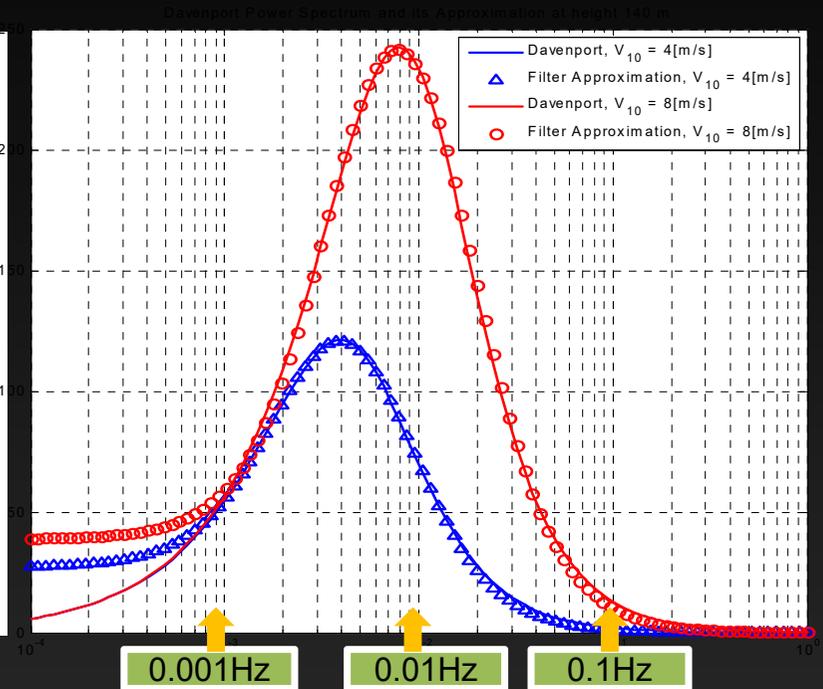
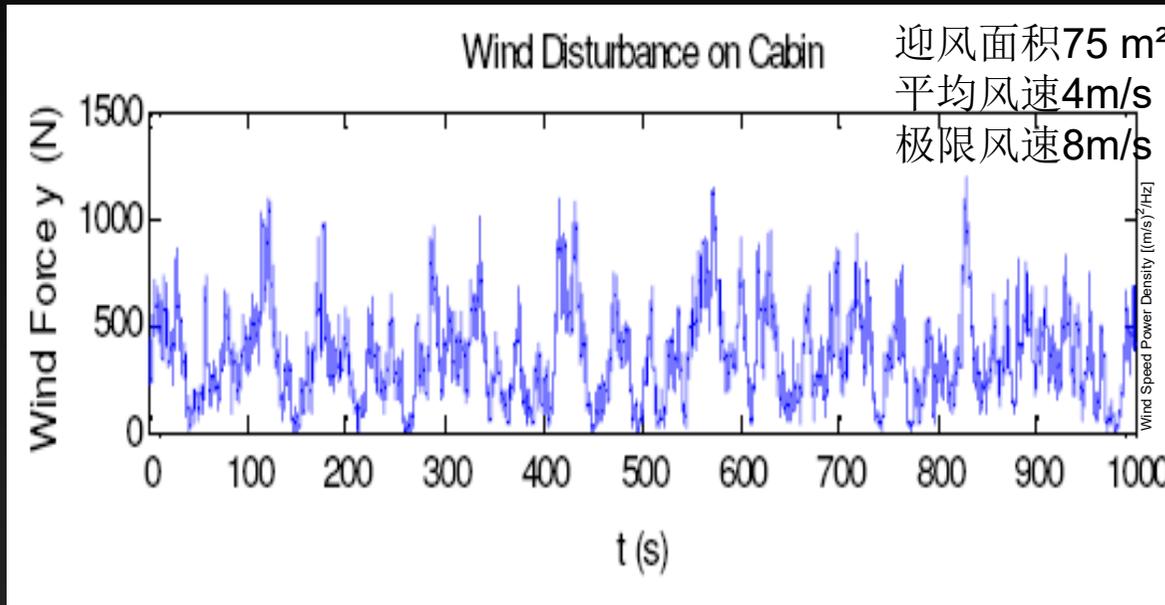


# 风载荷模型

根据风速计算风压进而得到馈源舱所受风力

风速 = 平均风速 + 脉动风速

脉动风速由Davenport风速功率谱描述



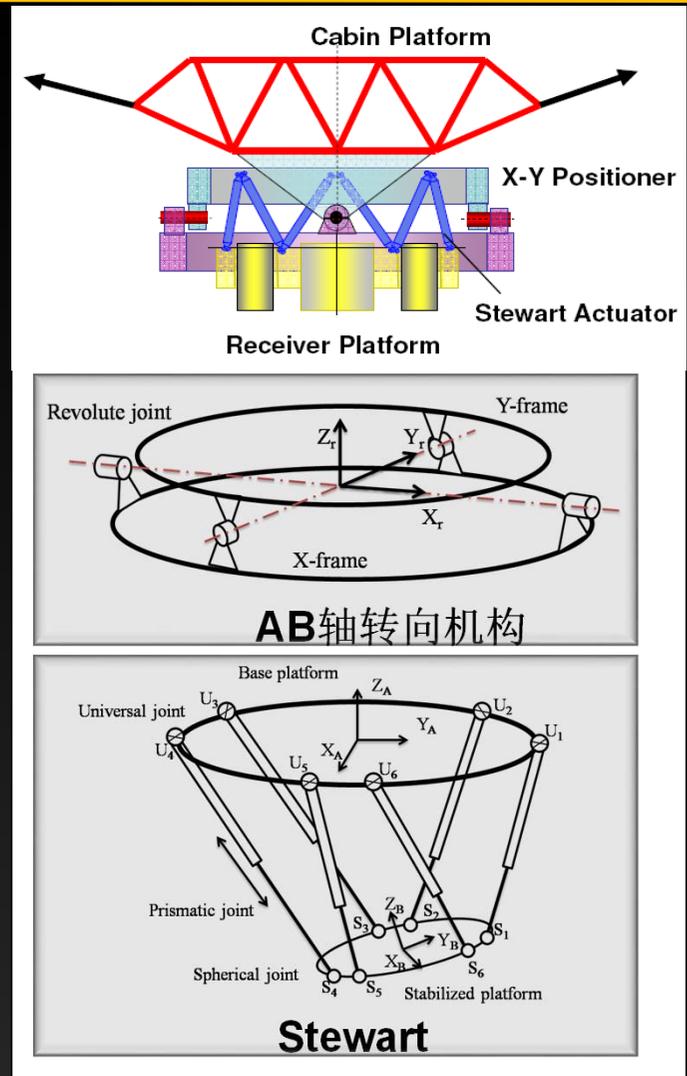


# 舱内二级精调控制机构

## 两轴转向机构+Stewart并联机器人

两轴转向机构在馈源舱自然倾斜的基础上补偿接收机平台所需的指向角 ( $\pm 20^\circ$ )

Stewart平台将接收机平台与振动的馈源仓框架隔离，补偿剩余的定位和指向误差。







## 纲要

- 一：国家天文台(FAST运行和发展中心)简介
- 二：FAST望远镜及其面临的工程问题
- 三：基于MATLAB的解决方案和工程实现
- 四：展望未来



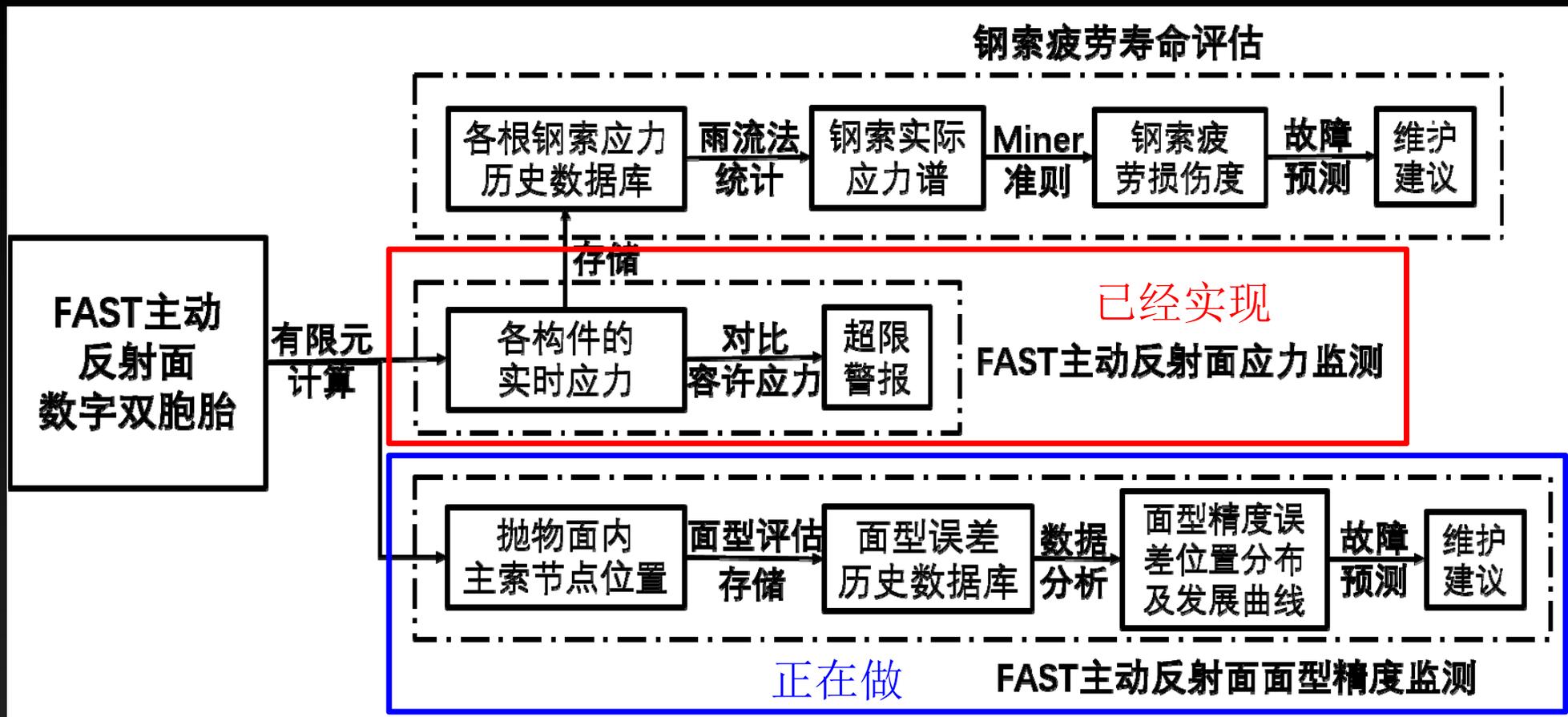
# 运行监测海量数据的整编、统计与分析

初步统计，平均每天有1台促动器故障，每1周出现一次随机的PLC故障！

The image displays a comprehensive monitoring interface for the FAST project. It includes a dashboard with status indicators for various components (索网A-D区, 塔梁, 促动器), a data table, a 3D visualization of the structure, a detailed data table, a complex control panel, and a real-time evaluation system (FAST索网结构实时评估系统 V2.0).



# 运行监测海量数据的深度挖掘和设备维护预测



# MATLAB EXPO 2021

Thank you



© 2021 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See [mathworks.com/trademarks](https://www.mathworks.com/trademarks) for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.