

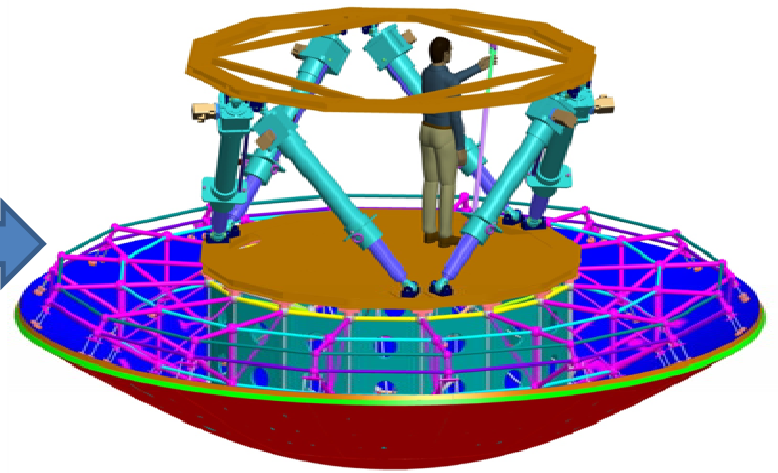
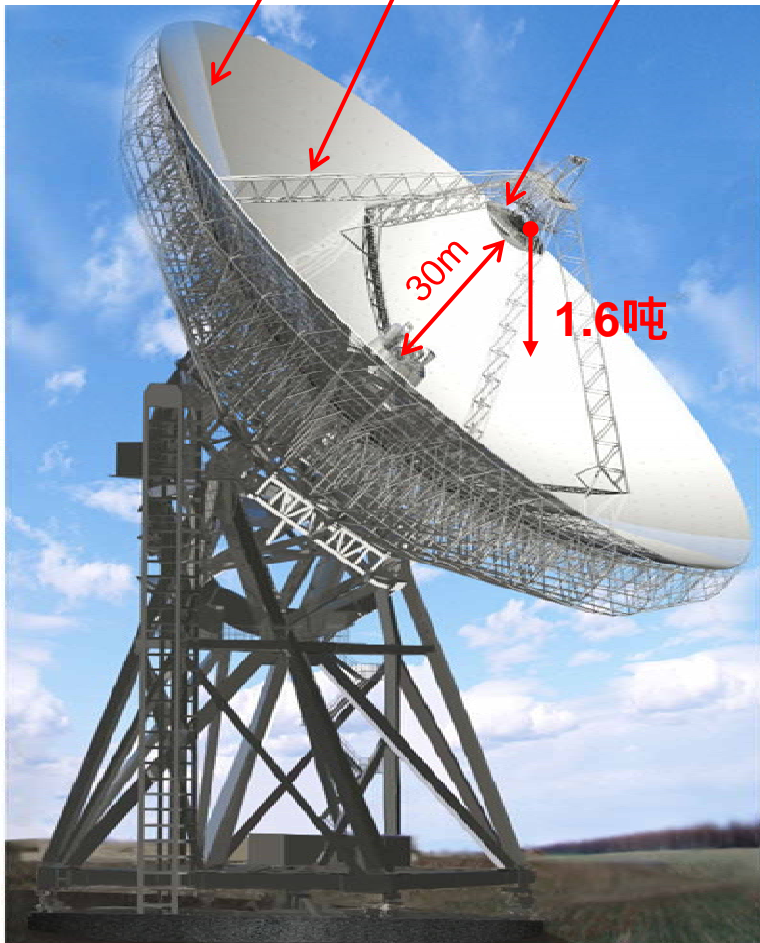


# 第四章 机械系统设计



# 4.7机械系统设计案例—副面精调机构

主反射面 桁架 副反射面



修正副面的指向误差

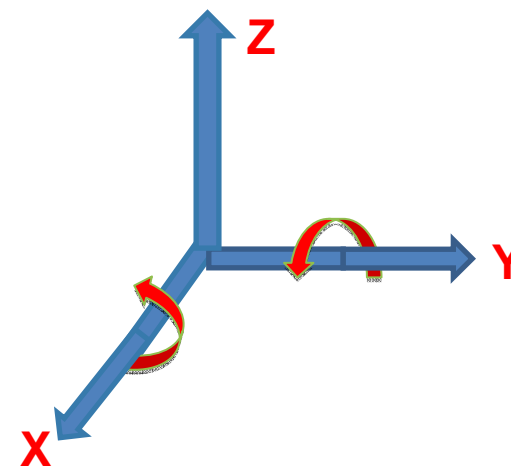
在频段L、S、C、X、Ku、Ka之间  
进行转换



65米射电望远镜

# 一、副面调整机构技术指标

X、Y、Z 最大调整范围	$\pm 100\text{mm}$
X方向旋转	+8度至-2度
Y方向旋转	$\pm 2\text{度}$
最大承载力	大于1600Kg
X、Y、Z 方向平移 定位精度	
X、Y方向旋转定位精度	



# 副面精调系统设计指标

## 设计指标:

### 1、调整范围

位移： $-100\text{mm}<X<100\text{mm}$ ;  $-100\text{mm}<Y<100\text{mm}$ ;  $-100\text{mm}<Z<100\text{mm}$ 。

姿态： $-2^\circ<X<6^\circ$ ;  $-2^\circ<Y<2^\circ$ ;  $Z=0^\circ$

### 2、位置精度：

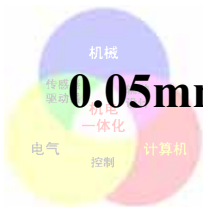
优于 $0.05\text{mm}$ 。姿态精度：优于10角秒



0.05mm=硬币厚度的1/32



10角秒=秒针跳动一下转过角度的1/2160



# 副面精调系统设计指标

## 设计指标：

### ➤ 抗风能力：

20 m/s保精度工作；

28 m/s可以驱动；

45 m/s在收藏位置不破坏。

➤ 工作温度：-10 ~ +50

➤ 工作湿度：5% ~ 95%

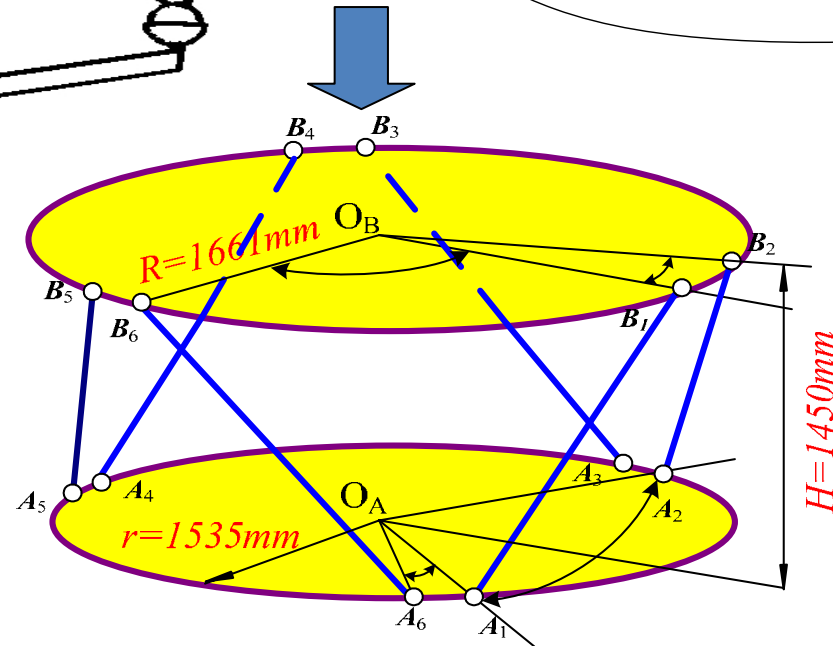
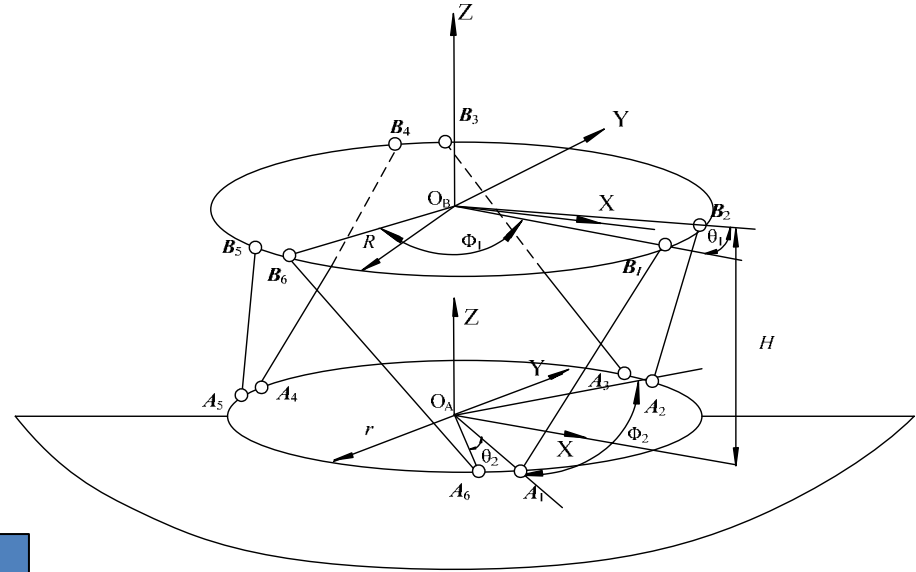
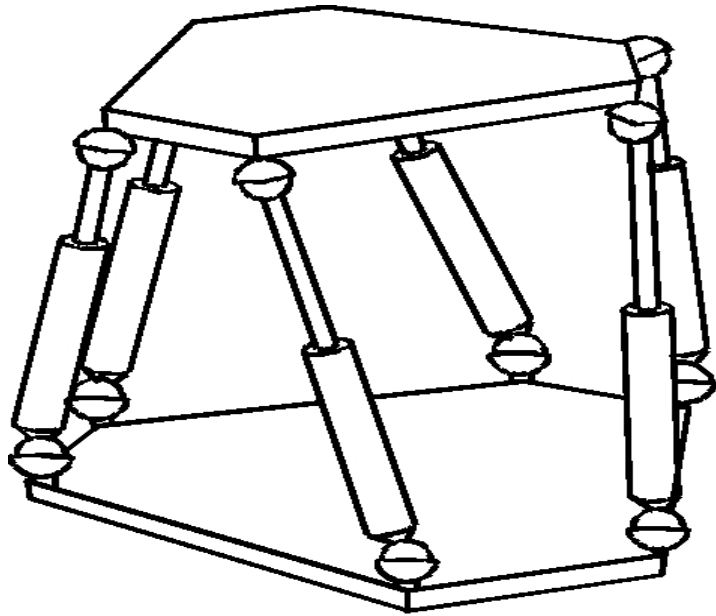
➤ 下雨：雨量100 mm/h时不积水

➤ 积雪：积雪20 cm不产生永久变形

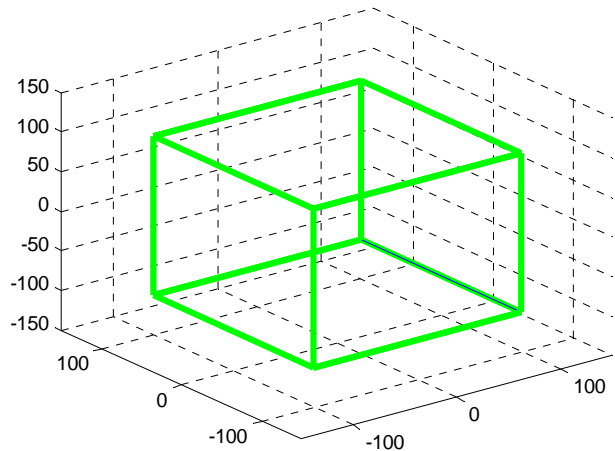
➤ 抗震：地面加速度：水平分量0.20 g，垂直分量0.10 g



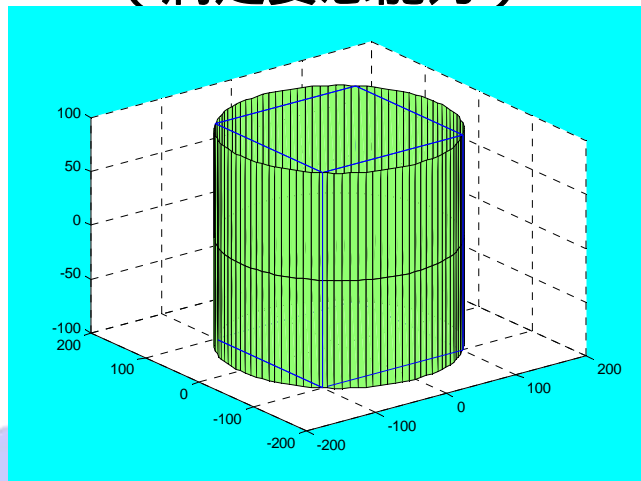
## 二、机构方案的选型与设计



# 副面精调系统结构尺寸参数优化



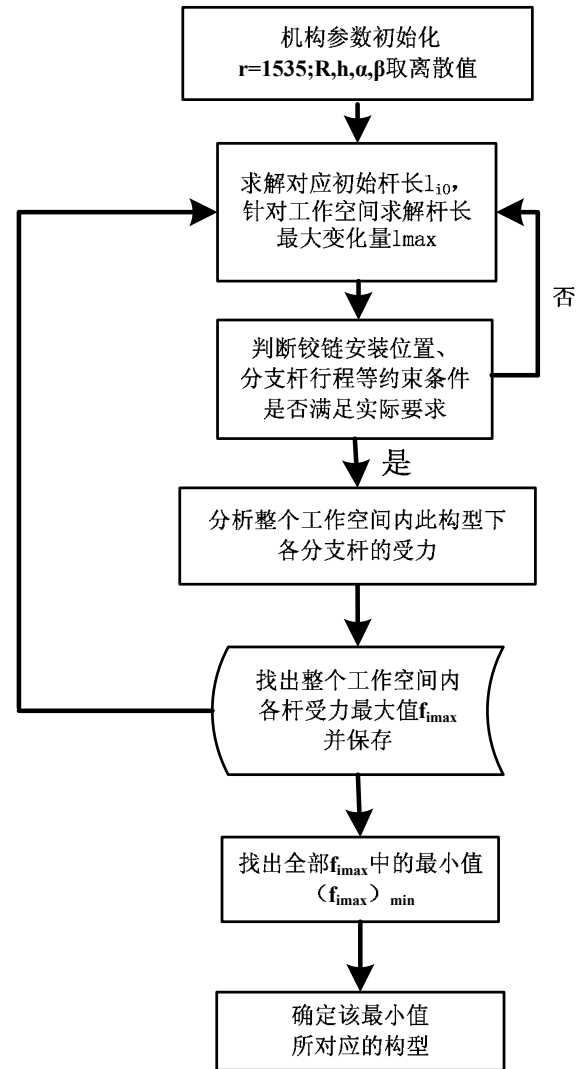
期望工作空间范围  
(满足姿态能力)



设计的最小工作空间  
(满足姿态能力)

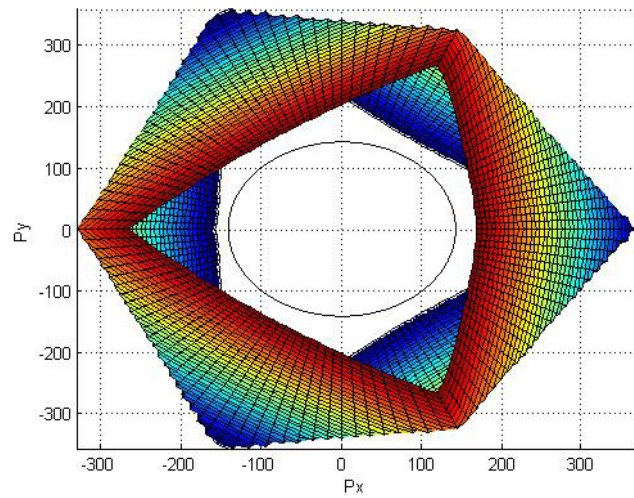


机构参数  
 $R+\Delta R$   
 $h+\Delta h$   
 $\alpha+\Delta\alpha$   
 $\beta+\Delta\beta$

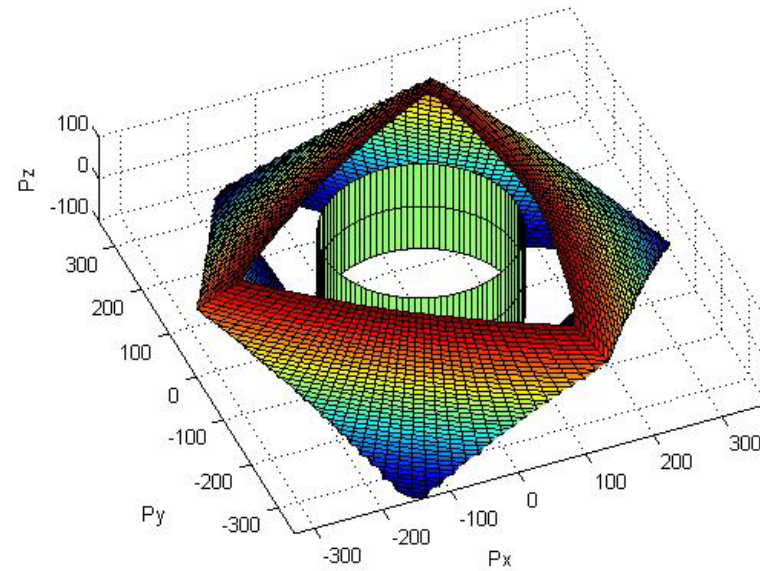


基本机构参数优化流程

# 实际工作空间与要求工作空间对比分析



优化后实际工作空间XY视图



优化后实际工作空间45°视图





# 副面精调系统静力学分析

4.3 机构静力学计算

应用螺旋理论建立机构的静力平衡方程如下:

$$F = [O_j^r] f$$

其中,  $F$  为作用在动平台上的六维外力,  $f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6]^T$ , 为各分支杆上

---

所受的力,  $[O_j^r]$  为力雅可比矩阵, 其表达式为:

$$[O_j^r] = \begin{bmatrix} \beta_1 - \alpha_1 & \beta_2 - \alpha_2 & \beta_3 - \alpha_3 & \beta_4 - \alpha_4 & \beta_5 - \alpha_5 & \beta_6 - \alpha_6 \\ \beta_1 - \alpha_1 & \beta_2 - \alpha_2 & \beta_3 - \alpha_3 & \beta_4 - \alpha_4 & \beta_5 - \alpha_5 & \beta_6 - \alpha_6 \\ \alpha_1 \times \beta_1 & \alpha_2 \times \beta_2 & \alpha_3 \times \beta_3 & \alpha_4 \times \beta_4 & \alpha_5 \times \beta_5 & \alpha_6 \times \beta_6 \\ \beta_1 - \alpha_1 & \beta_2 - \alpha_2 & \beta_3 - \alpha_3 & \beta_4 - \alpha_4 & \beta_5 - \alpha_5 & \beta_6 - \alpha_6 \end{bmatrix}$$

当  $[O_j^r]$  非奇异时, 有:

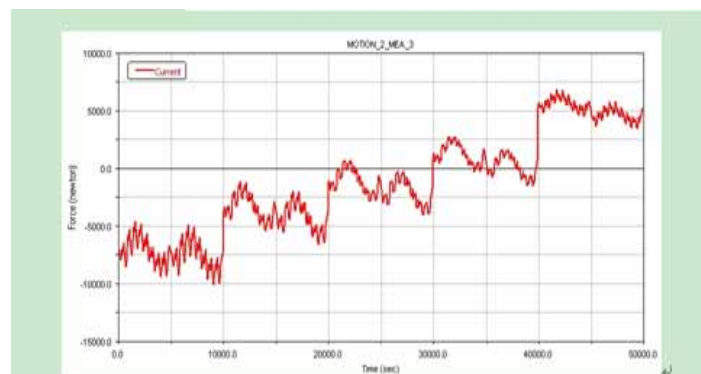
$$f = [O_j^r]^{-1} F$$


图 6-27 分支杆 2 受力曲线

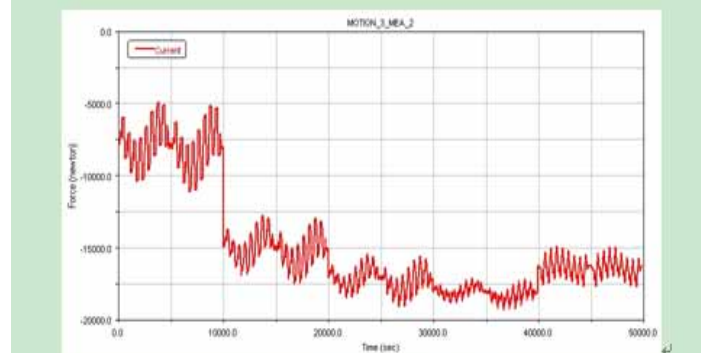
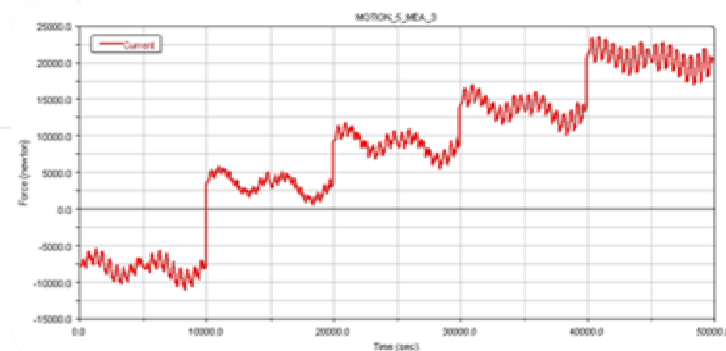
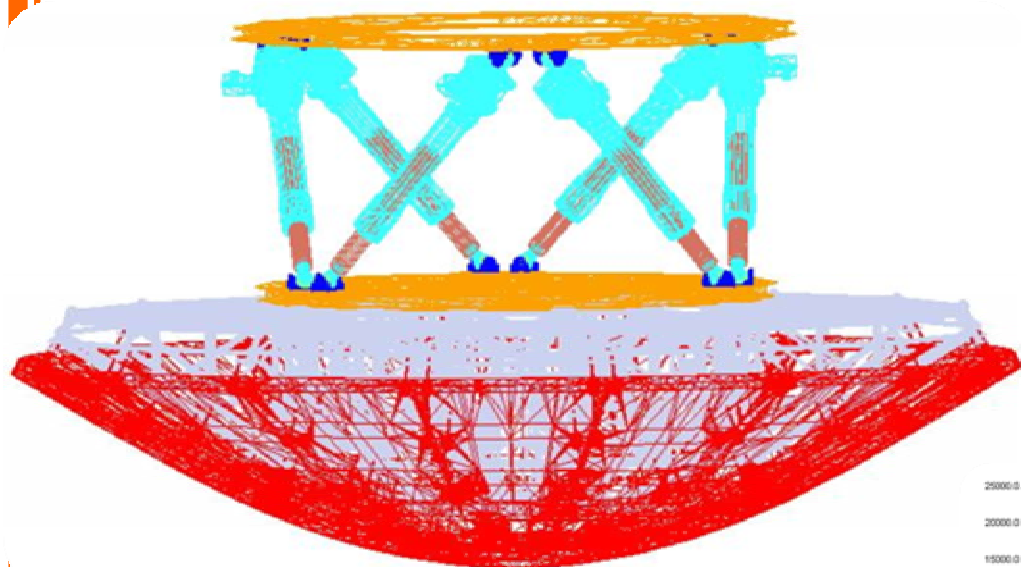


图 6-28 分支杆 3 受力曲线

通过静力学计算分析, 对调整机构的静态承载能力进行了验证



## 副面精调系统动力学分析

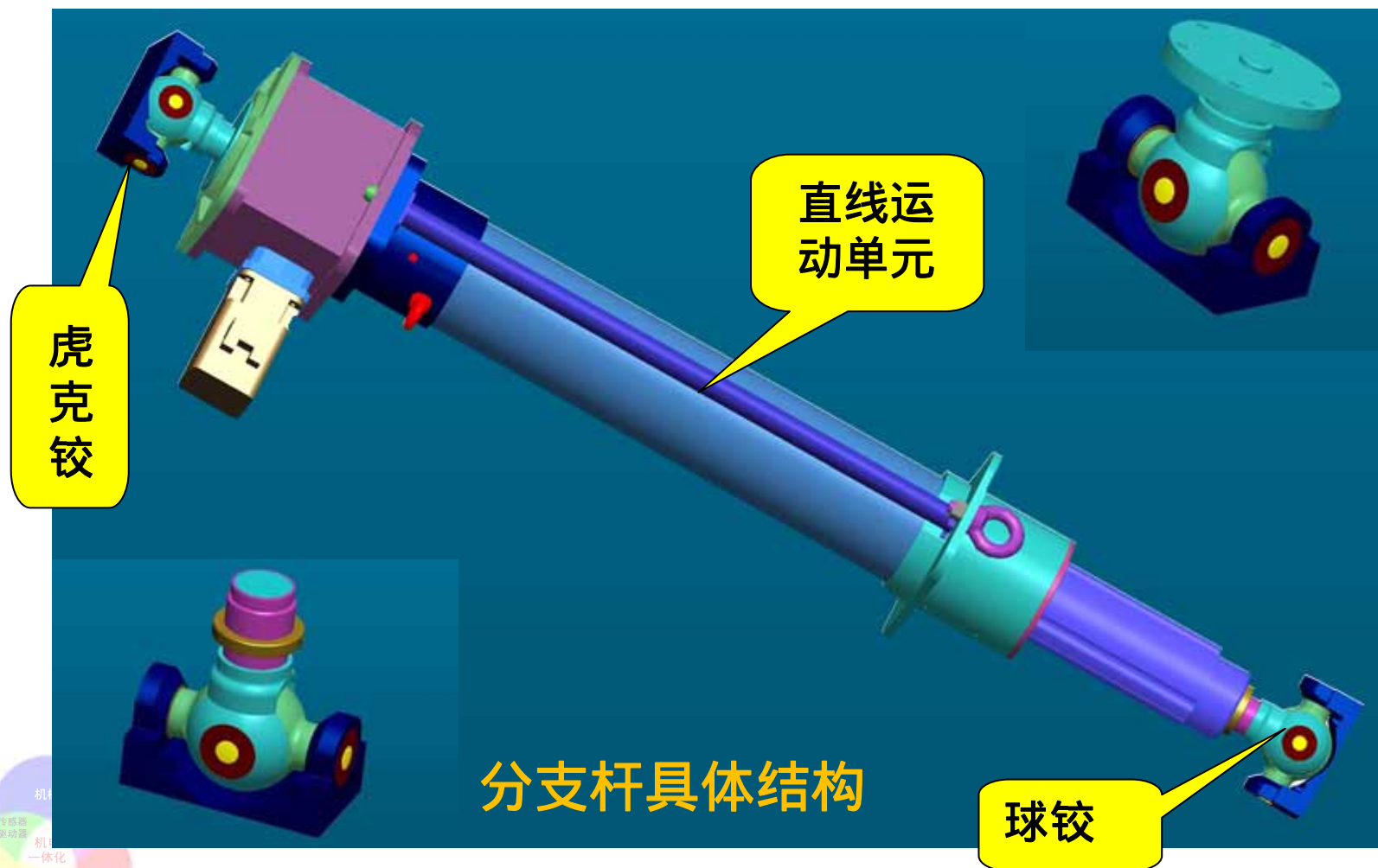


通过动力学仿真，对运动过程中调整机构各部件的受力进行了分析

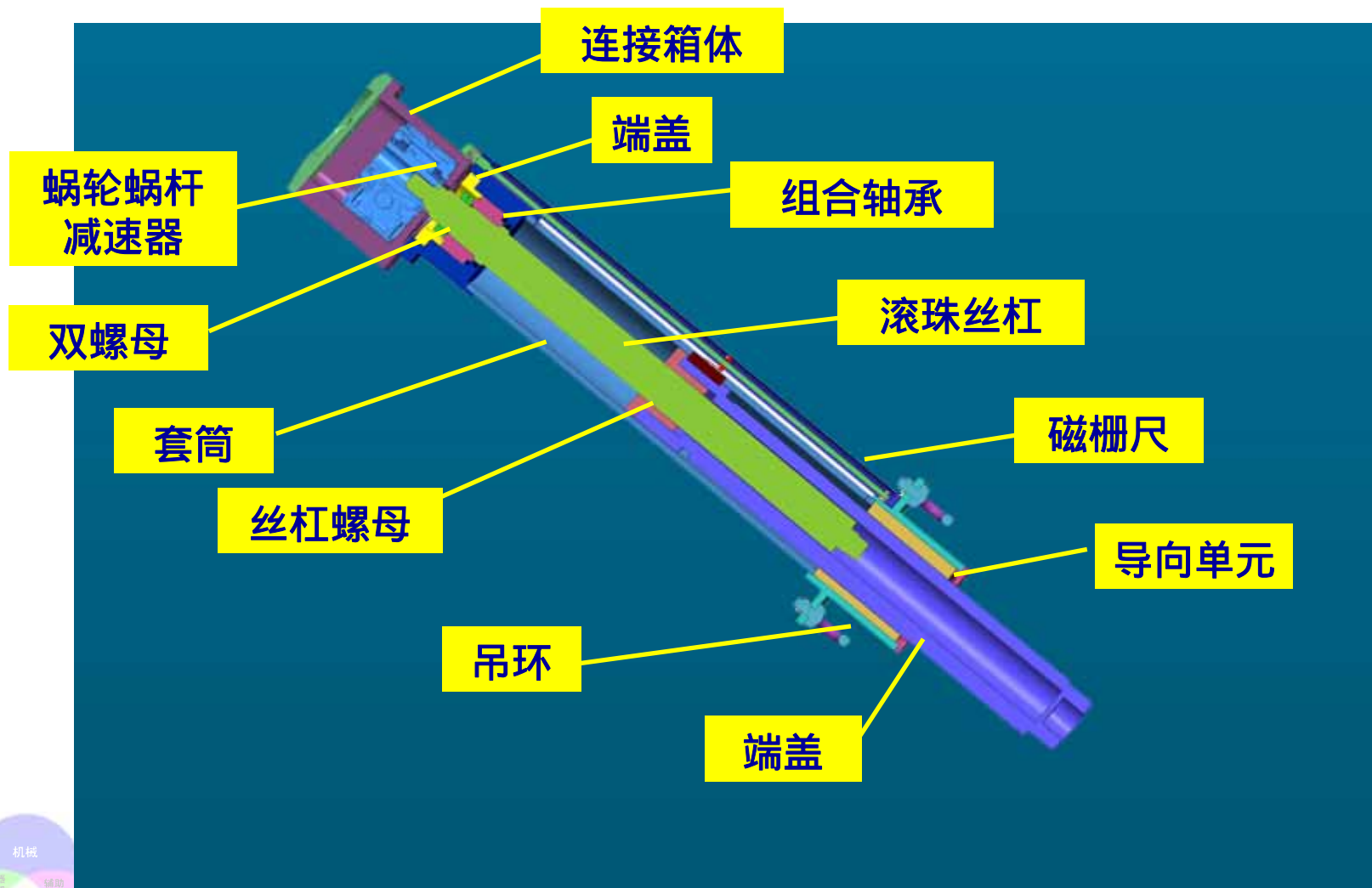


### 三、副面精调系统结构设计

#### 分支杆结构设计



### 三、副面精调系统结构设计



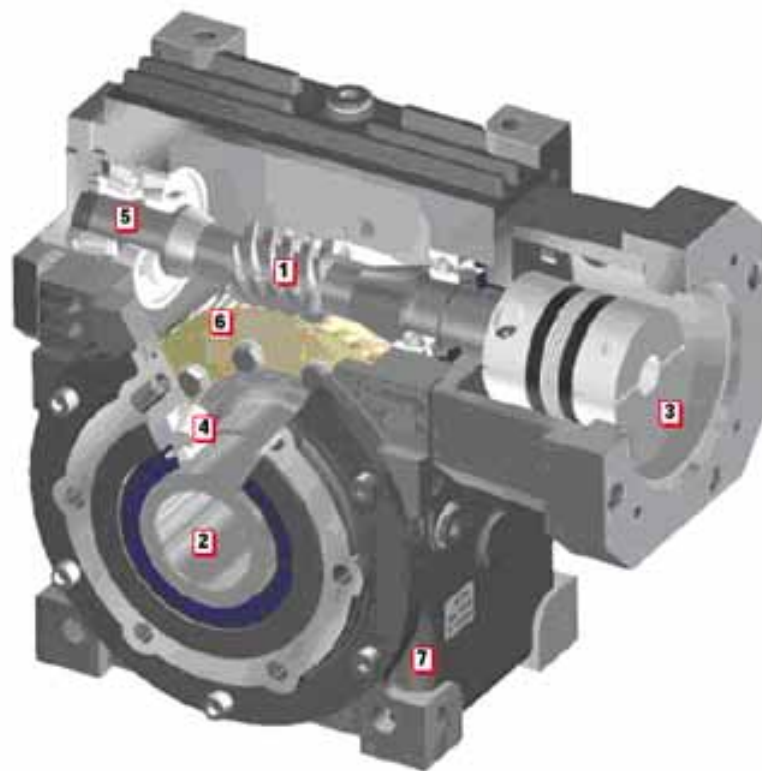
直线运动单元内部结构



# 伺服电机的选型——瑞诺FP0711



# 减速器的选型—Danabox蜗轮蜗杆减速器



具有自锁性能  
齿隙空回小  
( $< 1$  arcminutes)

结构紧凑，采用高性能的聚乙二稀润滑剂，  
确保长寿命润滑，免维护。



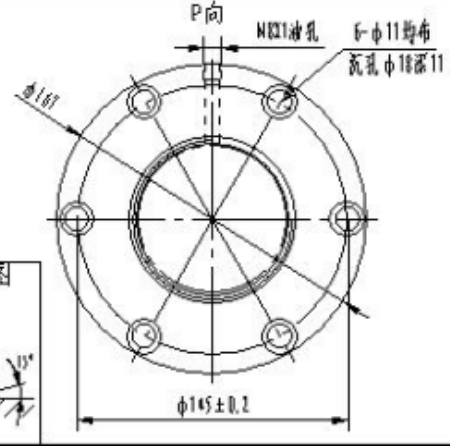
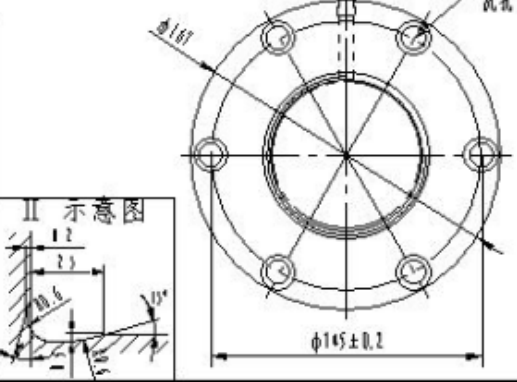
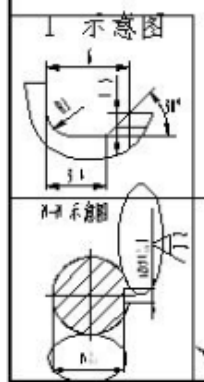
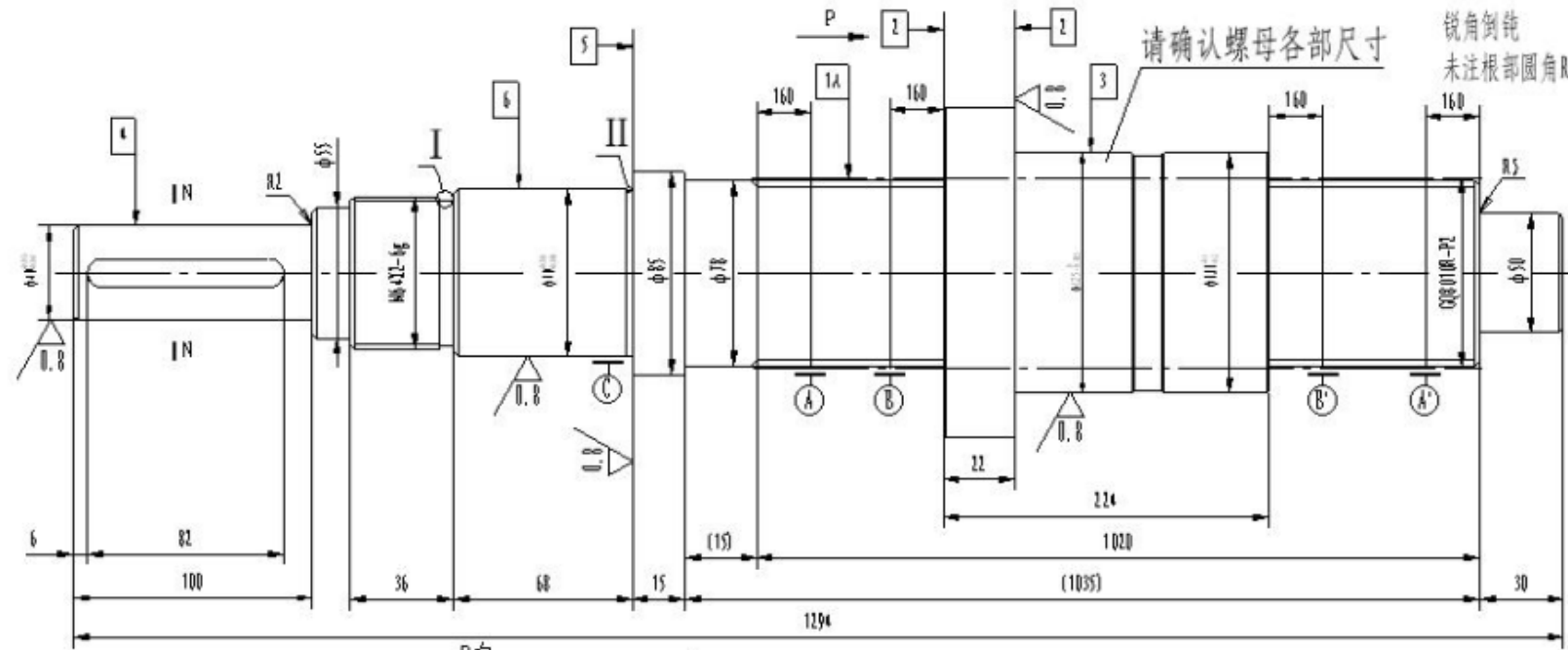
# 滚轴丝杠副的初选—THK BNFN8010-5

轴向间隙（预压）的选择	预压载荷为： $F_{a0} = 5500 \text{ N}$
导程：	$P_h = 10 \text{ mm}$
滚珠丝杠底径：	$d_1 = 75 \text{ mm}$
容许轴向负荷：	<p>挫曲载荷 <math>P_1 &gt; 2500\text{N}</math></p> <p>拉伸压缩载荷 <math>P_2 &gt; 2500\text{N}</math></p>
容许转速	$N_2 > 132\text{rpm}$
螺母的选择	拟采用双螺母
初选型号	<b>BNFN 8010-5</b>
静态安全系数	$f_s = 11.3$



# FFZD8010TR-6-P2/1294 × 1020

其余  $\sqrt{6.3}$   
 倒角  $2 \times 45^\circ$   
 锐角倒钝  
 未注根部圆角  $R0.3 \sim R0.5$



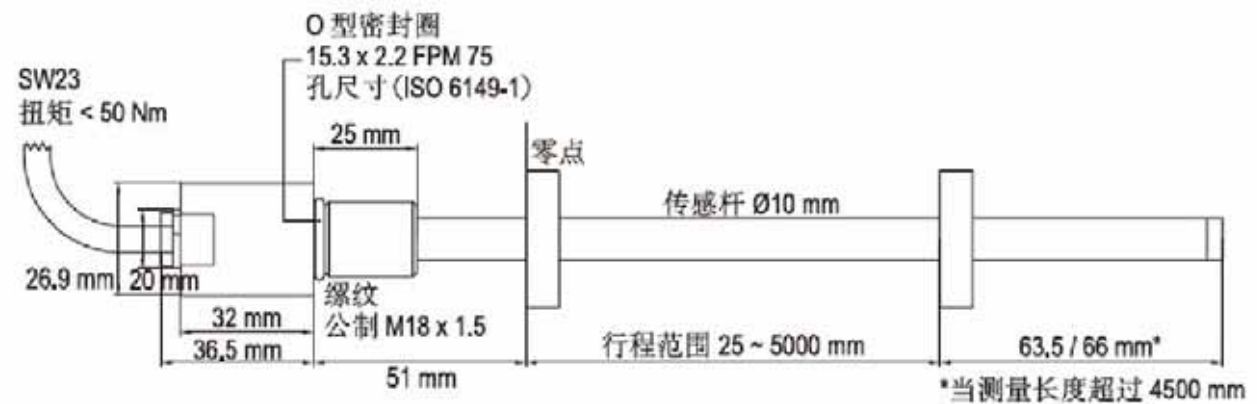
- ### 技术要求
- 1、其余应符合GB/T17587.3-1998 P2级精度的要求。
  - 2、预紧力: 5300N。
  - 3、额定动载荷: 70.3KN。
  - 4、额定静载荷: 264.3KN。
  - 5、请确认丝杠规格为8010, 螺母循环圈数为6圈。

6	0.018/200 AA'	3	0.023 BB'
5	0.005 AA'	2	0.022 BB'
4	0.009/200 C	1A	0.022 AA'
序号	项目	序号	项目

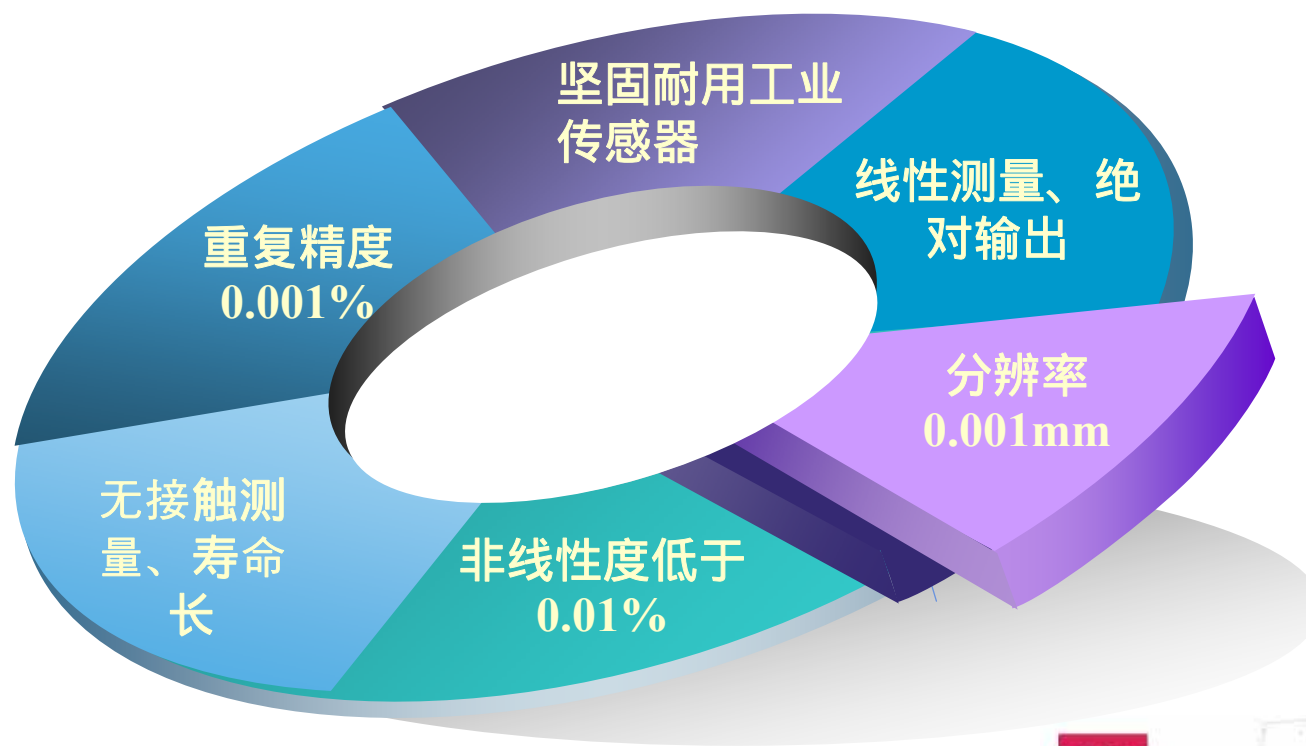
设计			
审核			PPZD8010TR-6-P2/1294X1020
共 1 张	第 1 张	需方确认签字:	
南京工艺装备制造有限公司		需方图号:	
		需方:	



# 磁栅尺的选型—MTS RD4



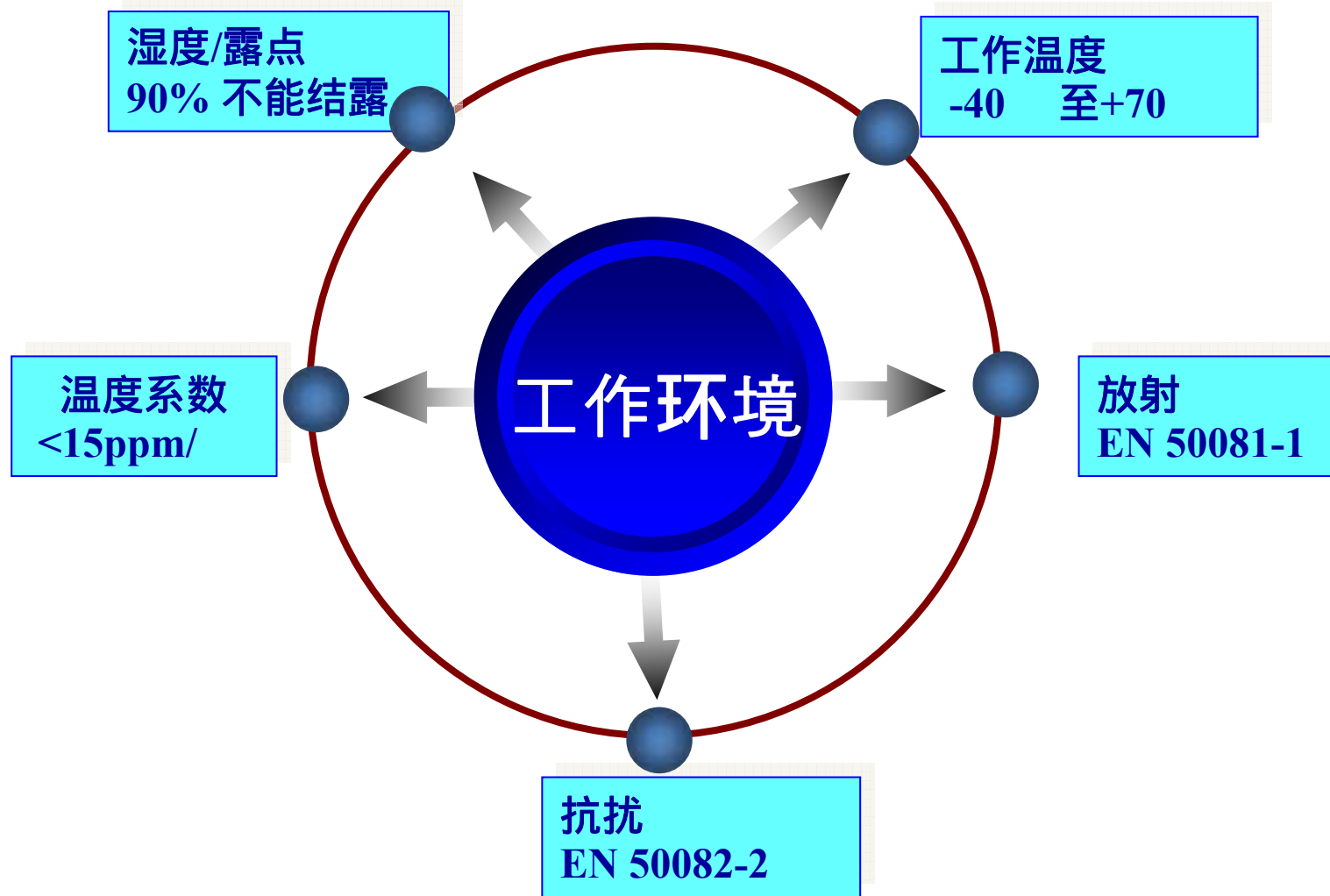
# 磁栅尺的选型—MTS RD4



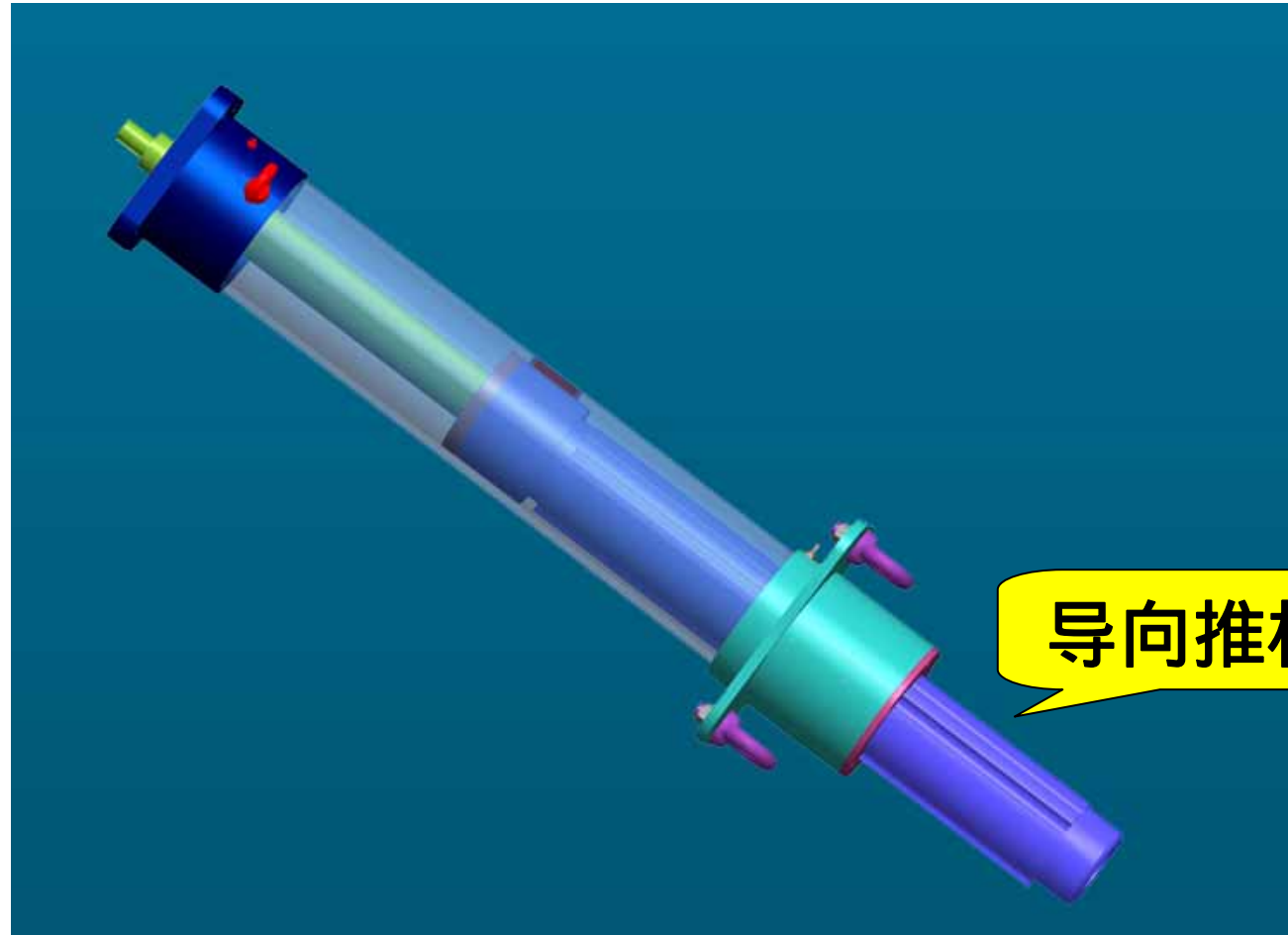
MTS  
SENSORS



# 磁栅尺的选型—MTS RD4



# 天线副面调整机构结构设计



导向推杆

直线导向单元结构图

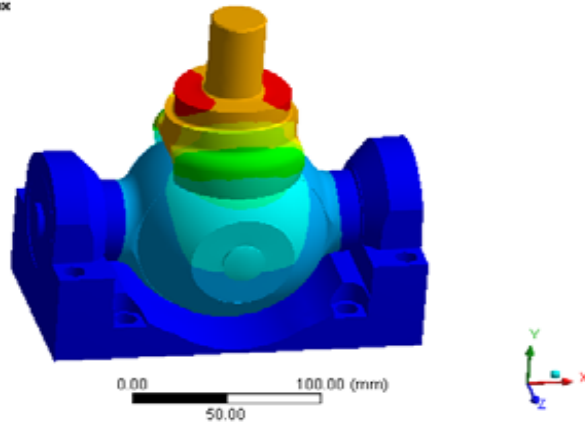


# 副面精调系统关键零件强度校核

Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
2010-01-08 17:28

ANSYS

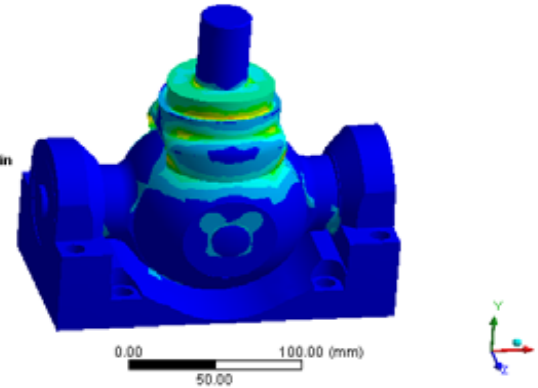
0.0073878 Max  
0.0065669  
0.0057461  
0.0049252  
0.0041043  
0.0032035  
0.0024626  
0.0016417  
0.00082087  
0 Min



Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
2010-01-08 18:22

ANSYS

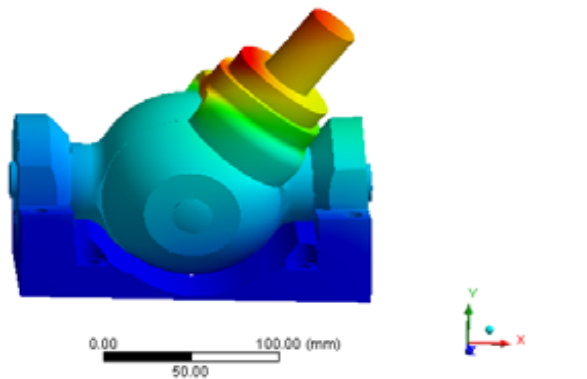
32.001 Max  
29.156  
25.512  
21.067  
18.223  
14.578  
10.934  
7.2894  
3.6449  
0.0004571 Min



Total Deformation 3  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
2010-01-08 19:10

ANSYS

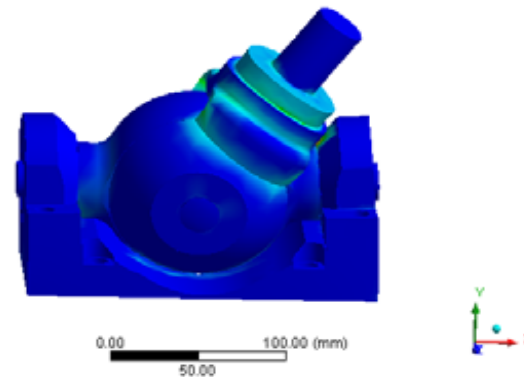
0.010020 Max  
0.0089137  
0.0077994  
0.0066852  
0.005571  
0.0044568  
0.0033426  
0.0022284  
0.0011142  
0 Min



Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
2010-01-08 19:14

ANSYS

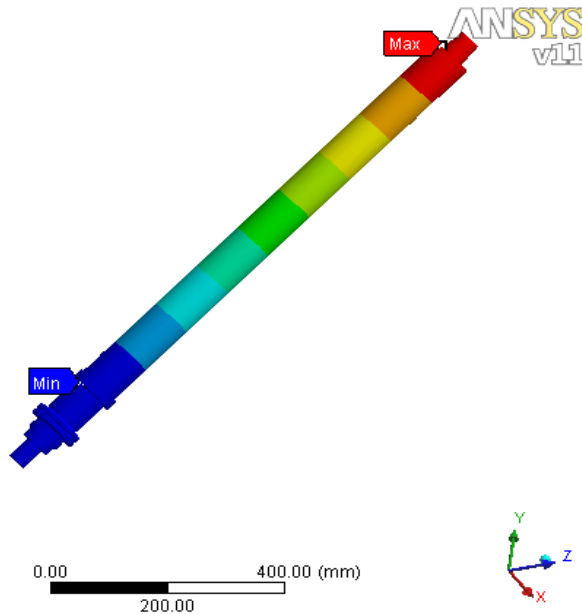
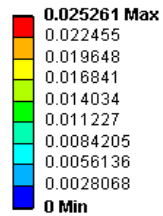
57.201 Max  
50.916  
44.552  
30.100  
31.824  
25.46  
19.095  
12.731  
6.3671  
0.0029452 Min



对不同转角情况下虎克铰的受力变形进行了分析

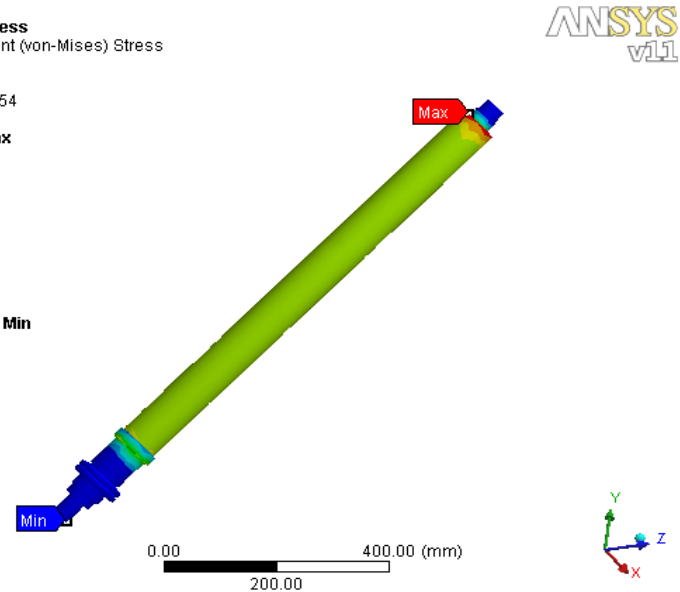
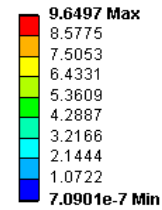
# 副面精调系统关键零件强度校核

**Total Deformation**  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
2010-1-31 21:52



轴向力25000N作用下丝杠变形

**Equivalent Stress**  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
2010-1-31 21:54



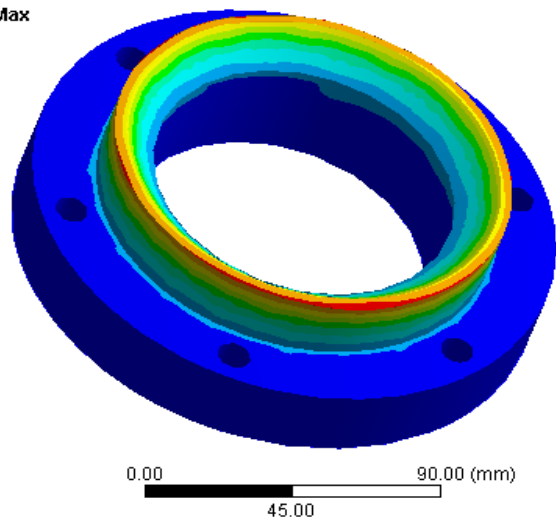
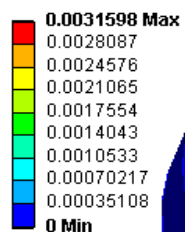
轴向力25000N作用下丝杠应力



# 副面精调系统关键零件强度校核

**Total Deformation**  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
2010-01-11 14:57

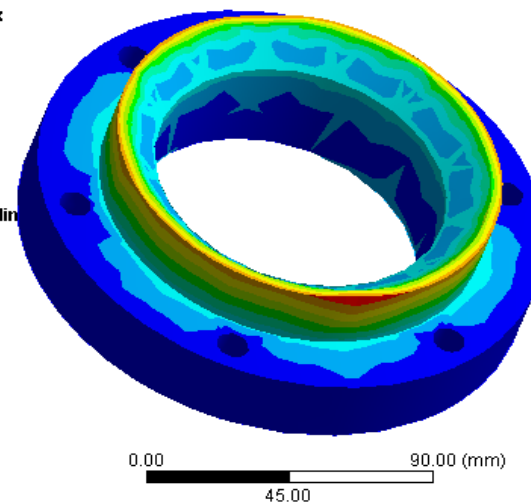
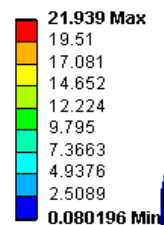
ANSYS



轴向力25000N作用下轴承端盖变形

**Equivalent Stress**  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
2010-01-11 14:57

ANSYS



轴向力25000N作用下轴承端盖应力

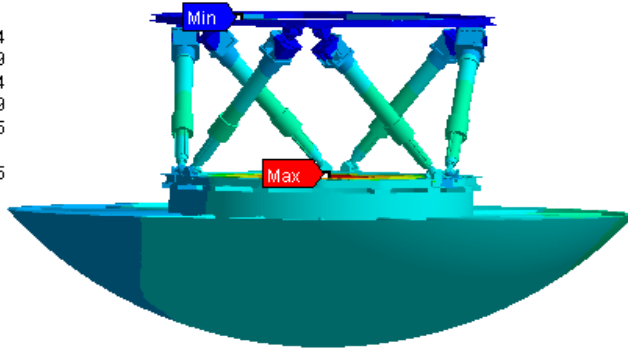


# 副面精调系统整体刚度校核

Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
2010-2-3 21:38

ANSYS  
v11

0.1264 Max  
0.11236  
0.098314  
0.084269  
0.070224  
0.056179  
0.042135  
0.02809  
0.014045  
0 Min



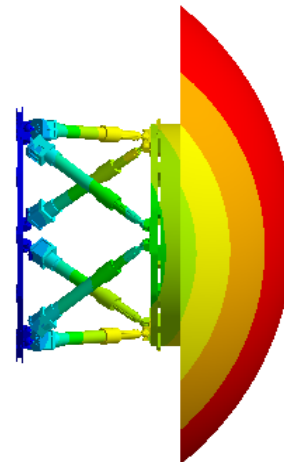
0 1.5e+003 3e+003 (mm)

天线处于90°时机构整体形变

Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
2010-2-3 21:33

ANSYS  
v11

0.18121 Max  
0.16107  
0.14094  
0.12081  
0.10067  
0.080537  
0.060403  
0.040269  
0.020134  
0 Min



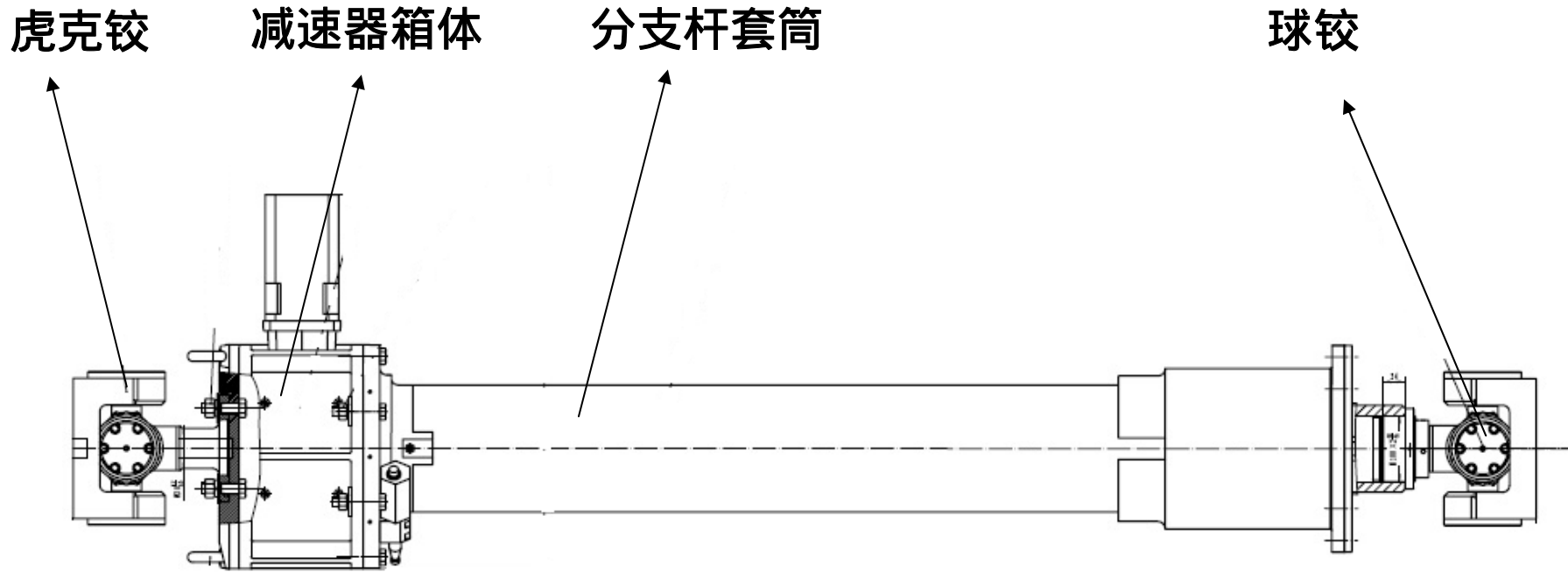
0 1.5e+003 3e+003 (mm)

天线处于0°时机构整体形变





# 系统精度的保证



分支杆装配图

关键精度保证：通过设计精密的定位措施，保证球铰和虎克铰中心位于各分支丝杠轴线。



## 四、关键性能指标的实现

### 1、定位精度

- 所选滚珠丝杠等级为C1，其运行距离误差为  $\pm 10 \mu\text{m}$

每变动300mm误差为  $7 \mu\text{m}$

定位精度可达0.02mm。

具体型号为：**BNFN7010-7.5RRGT+1075C1**

**实际型号**：**FFZD8010TR-6-P2/1294 × 1020**

- 磁致伸缩位移传感器具体型号：

**RD4MD3B1025MD70S2G821**

分辨率为0.001mm，保证了各分支定位精度的测量实现。



## 四、关键性能指标的实现

### 2、调整时间

在满足给定工作空间要求前提下，各分支最大行程为690mm，丝杠导程为10mm，减速器速比为45，为实现副面调整机构最大调整时间小于30秒，所需电机最大转速为6210rpm，而所选电机最高转速为6300rpm，故调整时间满足要求。



## 四、关键性能指标的实现

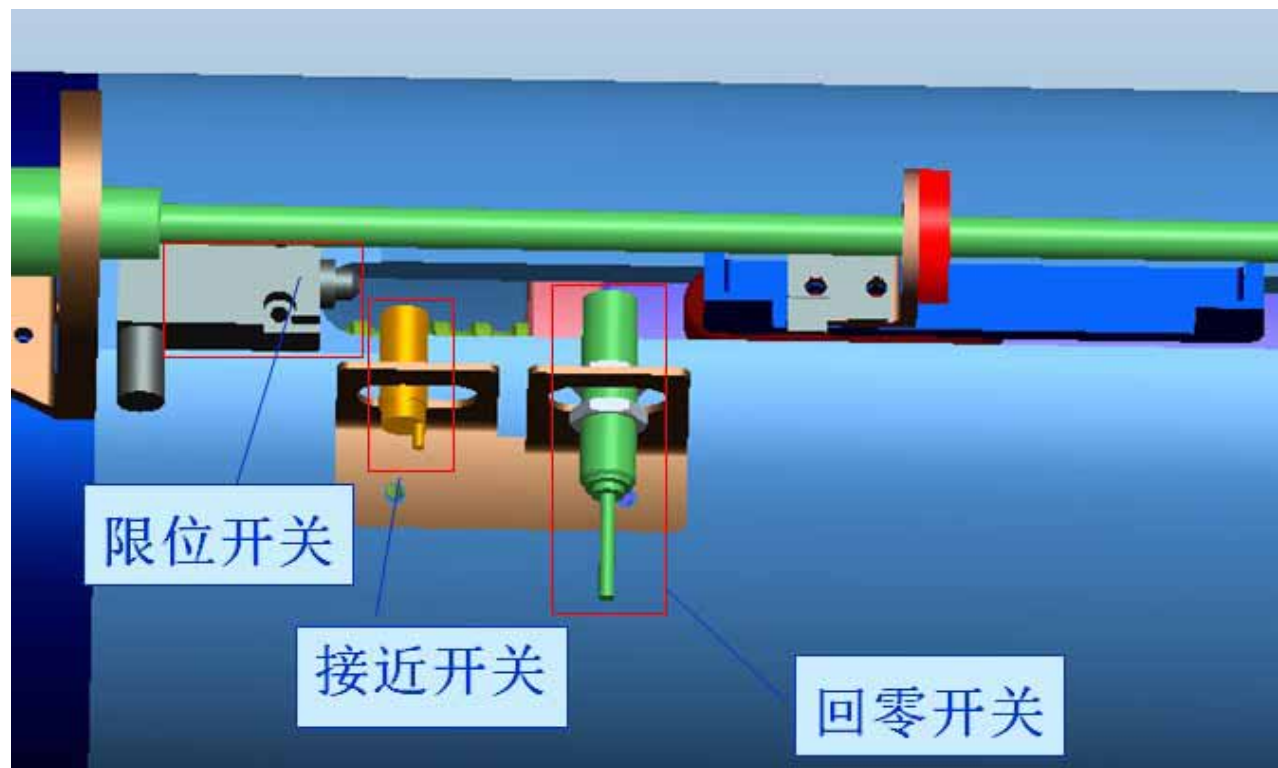
### 3、防护

调整机构各元器件在设计或选型时均认真考虑防护要求，注意维护的方便性，合理进行密封和防水结构设计。

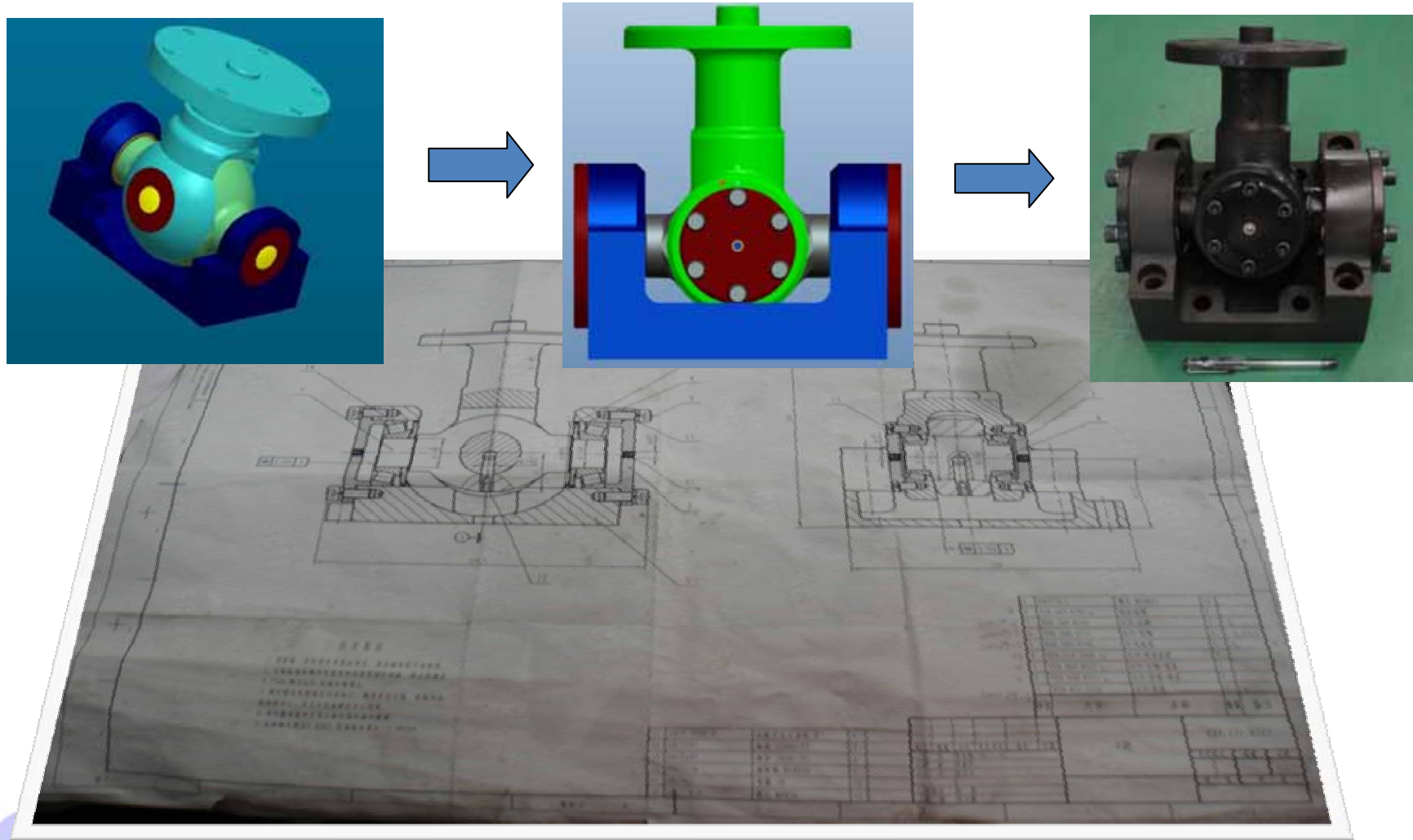


## 四、关键性能指标的实现

### 4、安全性



## 五、副面精调系统关键零件



考虑加工性能，进行虎克铰结构的再优化，设计工程图，生产出虎克铰

## 五、副面精调系统关键零件



根据设计图生产出来的套筒和滚珠丝杠

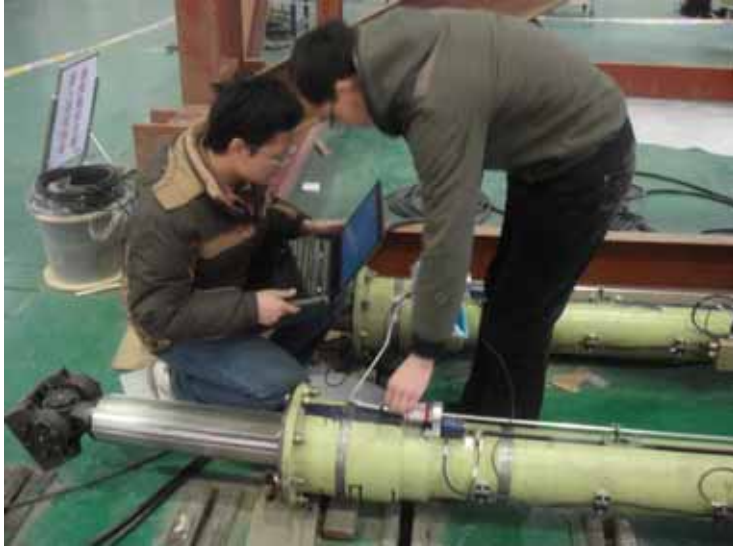
## 五、副面精调系统关键零件



装配完成的直线运动单元



## 五、副面精调系统整装准备



整体装配前对各  
驱动分支电气系统进  
行进一步调试，确保  
运行的稳定性。



## 六、副面精调系统整体装配



整体装配中.....

## 六、副面精调系统整体装配



整体装配中.....

## 六、副面精调系统整体装配



整体装配完成

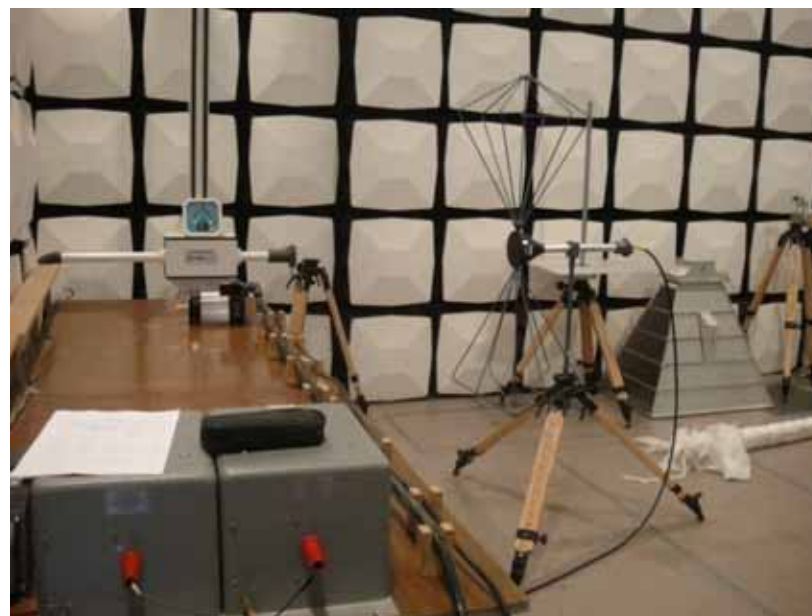
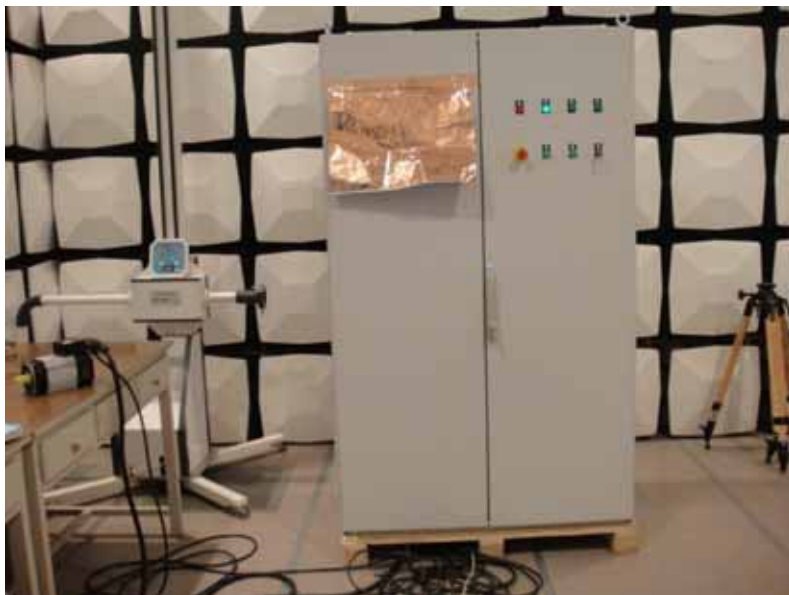
## 副面精调系统电气施工



电装完成的副面调整机构电气控制系统



## 副面精调系统EMC测试



对电气系统EMC性能  
进行测试，以避免对天线  
系统信号造成干扰



## 副面精调系统调试



对电气系统进行调试，以确保各项性能指标达到设计要求



# 副面精调系统调试



副面精调人机界面





## 副面精调系统标定



上海天文台松江佘山基地现场天线副面倾斜 $45^\circ$ 标定现场

## 副面精调系统标定



为降低温度、振动对测量精度的影响，在晚上对副面调整机构进行了标定。

## 副面精调系统安装



上海佘山基地现场副面调整设备吊装

## 副面精调系统安装



地面调试完毕后，  
进行设备的最终安装。

此图为工人师傅正  
在使用600T吊车将电控  
柜安装在距离地面40米  
的馈源仓中。

## 副面精调系统



安装在近70米高空的副面并联调整机构

## 65米射电望远镜落成典礼



上海65米射电望远镜天线系统已于2012年10月28日正式落成，研发的基于Stewart并联机构的副反射面调整系统运行状况良好，完全满足高运动精度、恶劣环境适应性及工作可靠性要求。

