



**合肥科焯**  
专业电物理设备制造商

Hefei Keye Electrical Physical Equipment Manufacturing Co., Ltd.



# CEPC Collider 环磁铁支架

合肥科焯电物理设备制造有限公司

2021年11月09日



## COMPANY PROFILE

- ◆ **成立时间：**合肥科焯电物理设备制造有限公司成立于**2007年1月**；
- ◆ **经营范围：**电物理设备、超导磁体、低温工程、真空机械设备、加速器部件、磁铁/线圈、微波和高频设备、各类通用机械设备的设计、制造以及自动化控制产品研发。
- ◆ **61项国家专利和1项软件著作权。**
- ◆ **2011年、2014年、2017年、2020年，连续四届被认定为“高新技术企业”。**



公司现有人员包括管理人员、技术人员、质量人员、生产技工等300余人。

- ✓ 60人的研发团队，平均年龄32岁；
- ✓ 博士4人，硕士研究生8人，本科及以上学历98%；
- ✓ 研发团队包括：**机械工程师、材料工程师、机电工程师、电力工程师等。**

焊接

- ✓ 国际焊接技师；
- ✓ 国际焊工；
- ✓ 特种设备焊接；
- ✓ **TIG焊、MIG焊、电弧焊、真空钎焊、银铜钎焊、感应钎焊、电子束焊、激光焊等焊接技术。**

技术人员

车间技工

- ✓ 车、铣、刨、钳、数控加工中心、五轴加工、装配工等近200人

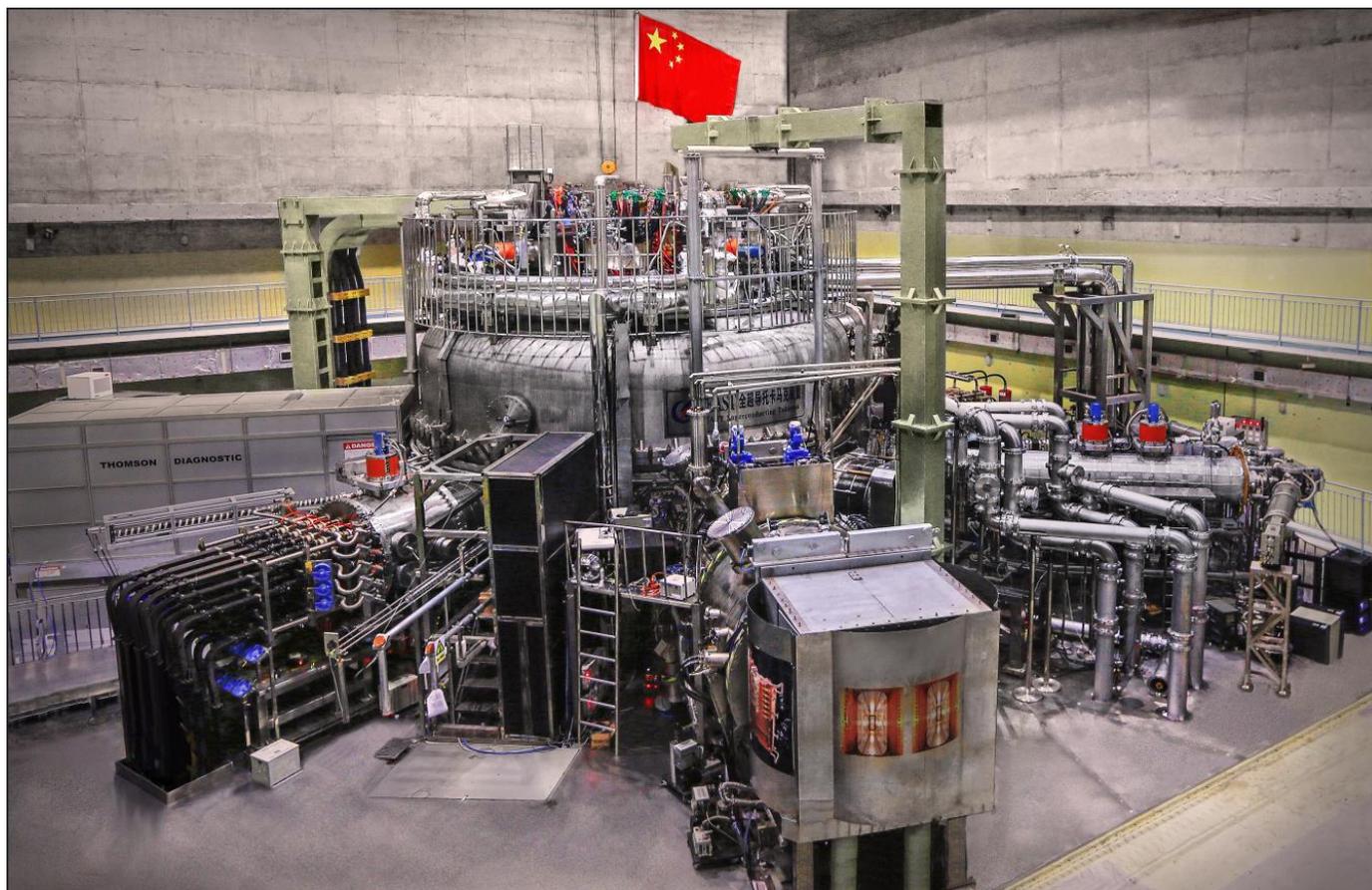
检测人员

- ✓ **特种设备无损检测：焊缝的超声探伤、射线探伤，着色渗透探伤等无损探伤；**
- ✓ 真空检漏
- ✓ 三坐标/激光跟踪仪尺寸检测



我公司现有各类通用制造（车，铣，刨，磨，钳）设备、高精密制造、焊接、钎焊、尺寸检测、无损检测、检漏设备375台/套，其中大型及精密设备88台。

- **先进切割设备**：大型数控等离子切割机、德国HWE-P4020水刀切割设备、线切割设备、激光切割设备；
- **精密加工中心**：数控立式加工中心、数控卧式加工中心、**卧式数控镗铣床、慢走丝数控线切割**、数控车铣加工中心；
- **大型加工中心**：落地镗铣加工中心、数控龙门镗铣床、6.3米数控立车；
- **多轴精密加工设备**：意大利JOBS五轴五联动龙门移动铣床、**六轴六联动卧式数控车铣中心**；
- **焊接设备**：氩弧焊设备、气保焊设备、自动焊设备；大型真空钎焊炉、氢气保护钎焊设备、感应钎焊；
- **环氧树脂真空浇注设备**：静态混料真空压力(VPI)浇注设备；
- **钣金设备**：数控四辊卷板机、数控弯管机；折边机；500T压机，100T压机；
- **热处理设备**：RT2-700-9电阻式热处理炉；真空热处理炉；
- **高精密尺寸检测设备**：激光跟踪测量仪、三坐标测量仪；
- **检漏及无损检测设备**：氦质谱检漏仪、超声波探伤仪、相控阵成像超声波探伤仪、X射线探伤检测设备等。



合肥科焯电物理设备制造有限公司：

感谢你们对国家大科学工程 EAST 全超导托卡马克建设做出的重要贡献！



EAST 非圆截面全超导托卡马克核聚变实验装置胜利建成

中国科学院等离子体物理研究所  
国家大科学工程 EAST 工程指挥部

EAST装置的主机部分高11米，直径8米，重400吨，由**超高真空室、纵场线圈、极向场线圈、内外冷屏、外真空杜瓦、支撑系统**等六大部件组成，我公司自成立至今，全程深度参与了EAST装置的建造工作以及后续升级改造工作，为**EAST全超导托卡马克建设做出了重要贡献。**



中国散裂中子源是国家“十一五”期间重点建设的十二大科学装置之首，将为我国材料科学技术、物理、化学化工、生命科学、资源环境和新能源等提供一个先进、功能强大的科研平台，成为继英国散裂中子源、美国散裂中子源和日本散裂中子源之后，全世界第四台脉冲型散裂中子源。

我公司为该装置提供了真空系统、探测器、中子屏蔽系统、靶站准直、支撑系统等关键设备。

我公司为工程建设做出了**重大贡献**。





## 真空类

我公司具有丰富的一般真空、高真空 ( $10^{-3}\sim 10^{-6}\text{Pa}$ )、超高真空 ( $\leq 10^{-8}\text{Pa}$ ) 产品研制经验。其中研制的真空镀膜机填补了国内的技术空白，CSNS/RTBT真空盒、斜切式位置探头等产品真空度均达到了 $10^{-7}\text{Pa}$ 。



◆真空镀膜机 —(填补了国内技术空白)



◆CSNS RTBT真空盒



◆CSNS斜切式探头



◆真空腔体



◆铝真空腔体



◆铜球真空室

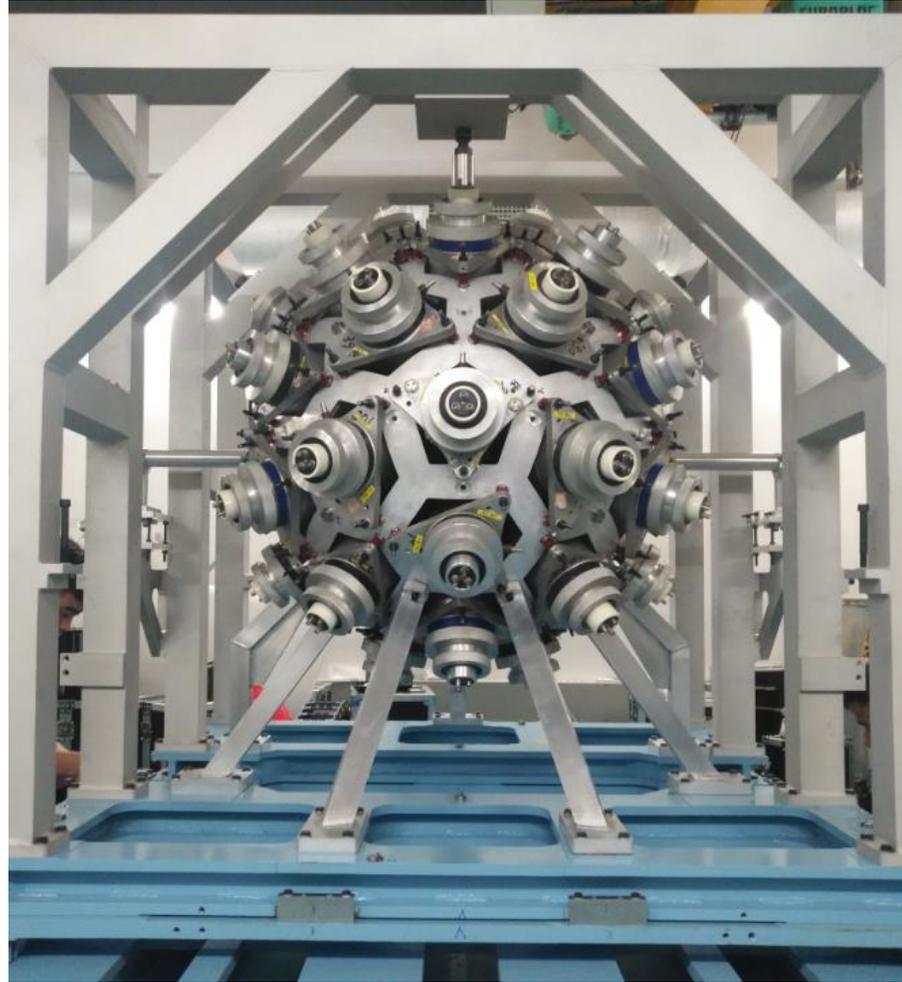
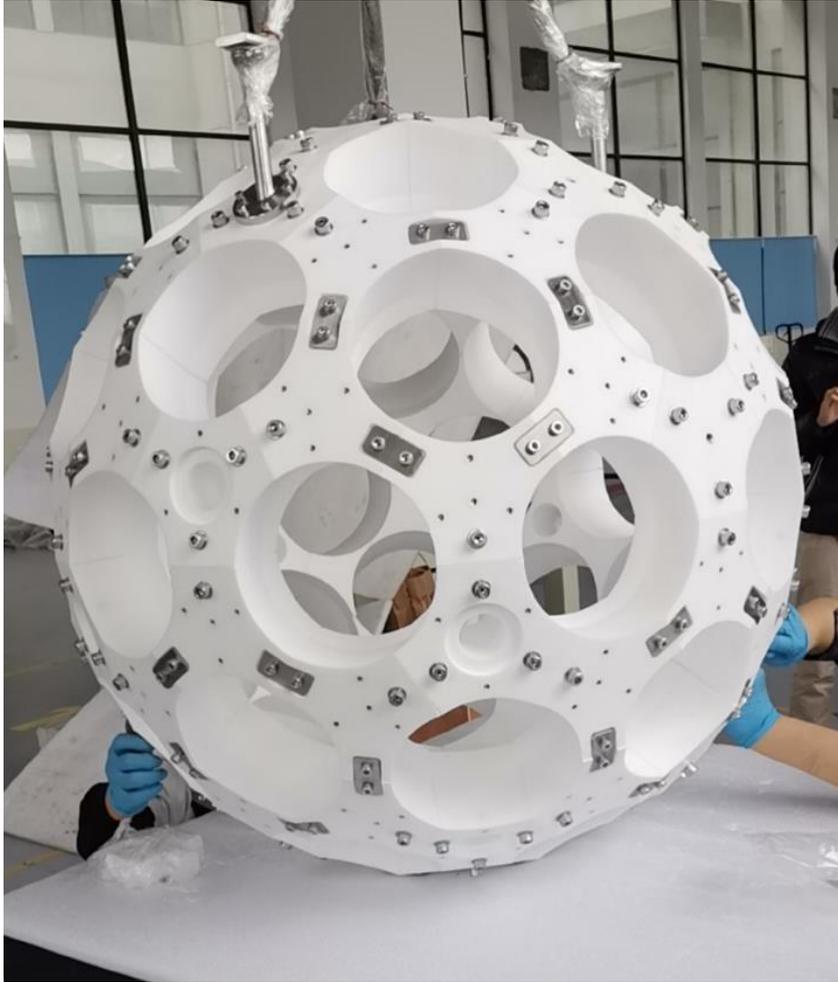


◆球形真空腔体





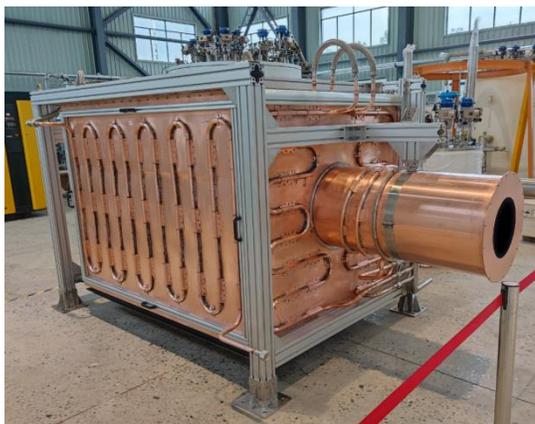
## □ 探测器类





## 低温类设备

低温类项目涵盖80K-4K超低温各类设备，例如低温测试平台的、超导磁体及元件类测试杜瓦等。



20K氮仓低温系统



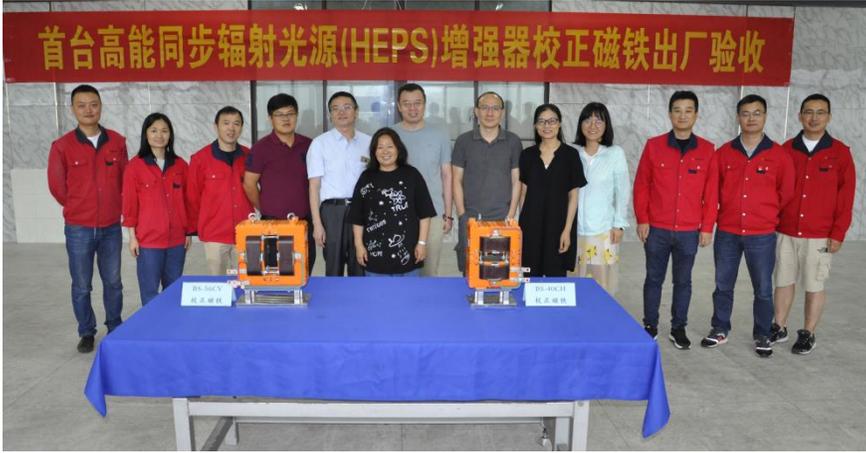
超导磁铁测试杜瓦



CSMC低温测试平台冷屏



## □ 磁体类



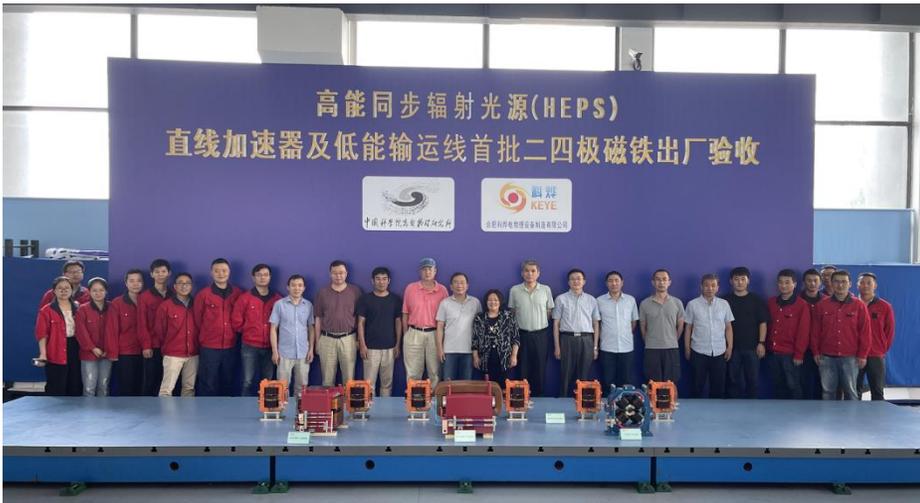
高能同步辐射光源校正磁铁



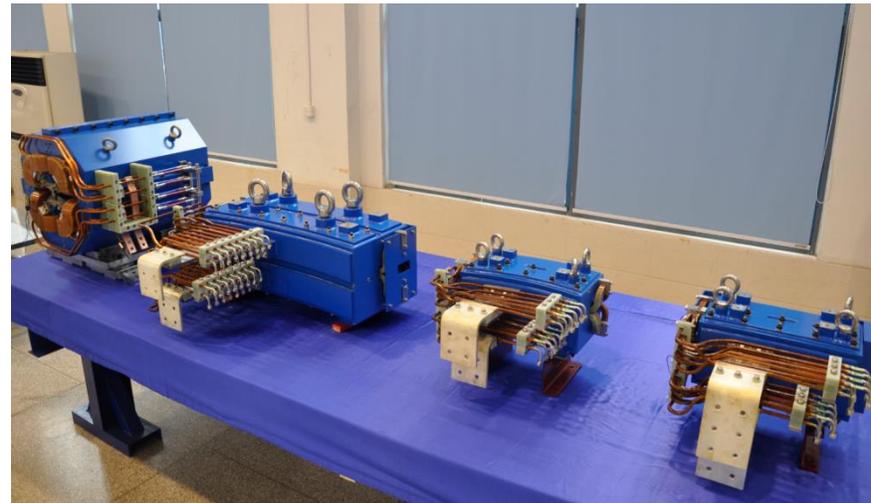
□ HEPS直线加速器和运输线的二极、四极和校正磁铁主要用于束流的偏转和能量分析、束流的聚焦以及轨道校正；

□ 由于HEPS属于第四代光源，对加速器磁铁性能要求很严格，因此对磁铁材料的性能指标、零部件的加工精度都提出了很高的要求。

□ 我公司为上海光源、北方光源提供了静磁切割磁铁、校正磁铁、快校正磁铁及超导磁铁研制。



高能同步辐射光源二四极磁铁



质子治疗装置注入引出切割磁铁



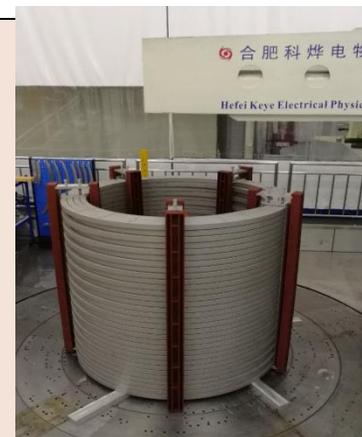
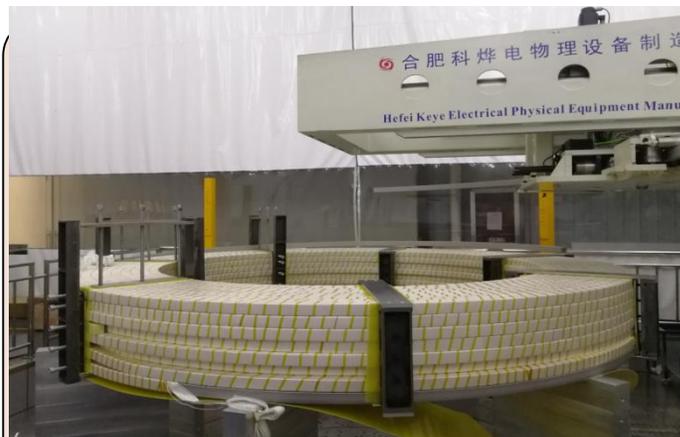
## □ 线圈类

### ITER PF6线圈、CFETR CS模型线圈、CEPC探测器 超导磁铁DUMMY线圈等

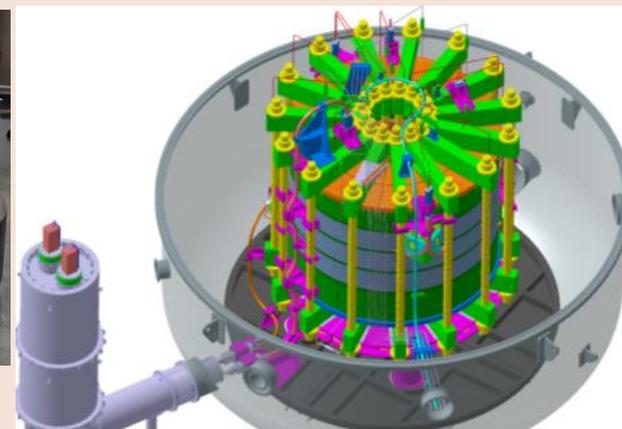


国际热核聚变实验堆（ITER）极向场6号线圈

外径	Φ10.2m	CICC型导体	316L
内径	Φ7.1m	超导材料	NbTi
高度	1.13m	工作电流	48/52kA
重量	265t	磁场强度	7.8T



◆ CSMC NbTi/Nb<sub>3</sub>Sn超导线圈绕制



◆ CFETR CS模型线圈子部件制造及装配集成

CFETR CS模型线圈包括2个Nb<sub>3</sub>Sn线圈、3个NbTi线圈



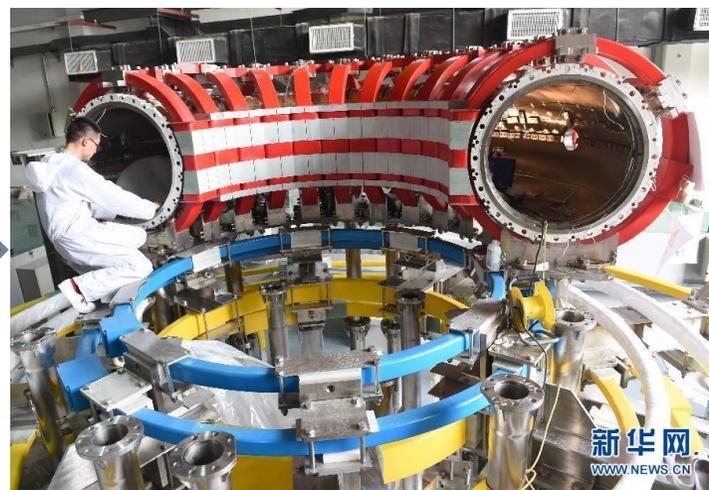
## □ 装置类



科大一环是环形磁约束等离子体装置，是**先进磁约束聚变位形探索研究**的重要装置。大半径1.4m，小半径0.4m，中心场强0.7 T，最大等离子体电流1MA，电子温度约600eV，放电时间30~100ms。

2015年11月3日，我国首台反场箍缩磁约束聚变装置——“科大一环”每两分钟即可获得一次放电，**最大等离子体电流可达180千安，达到设计值的1.8倍。**

我公司承担了装置主机的加工制造和整体集成。





## □ 装置类

**KRX等离子体装置主要用于磁场重联试验，该装置由KRX真空室、磁场线圈系统、电源系统、等离子体流发射装置、磁场电流板、诊断系统组成。**



磁重联装置

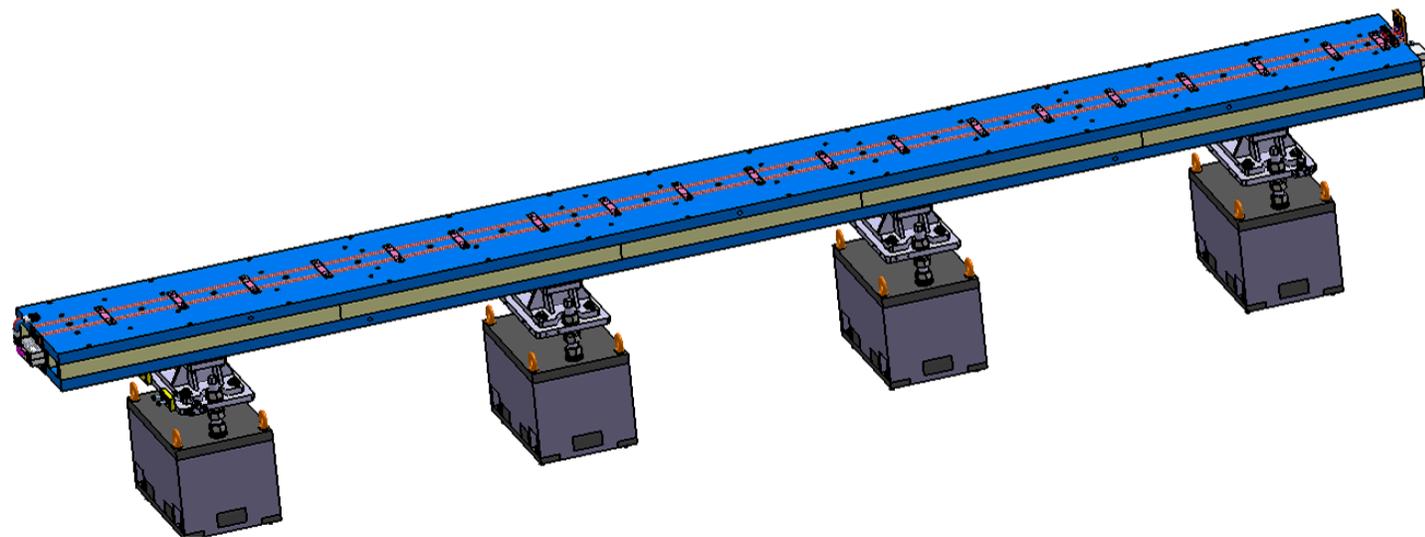


在CEPC设计中，环线的很长拥有大量的磁铁，而对应磁铁的支架也需要相应的数量，磁铁的最终安装精度不仅在于其本身还需要通过支架来进行支撑与调节，最终才能实现磁铁的功能，故在前期设计时需要进行仔细的考量。本次报告以二极铁支架设计分析进行介绍。

目前针对磁铁支架的设计方向主要考

虑以下三个因素：

- 支架整体制造安装的成本
- 整体现场安装时的操作方便、快捷
- 对磁体形变的影响



二极铁支架设计模型示意图

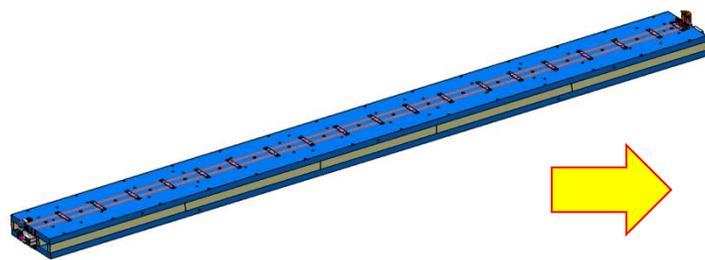
## 二. 支架计算



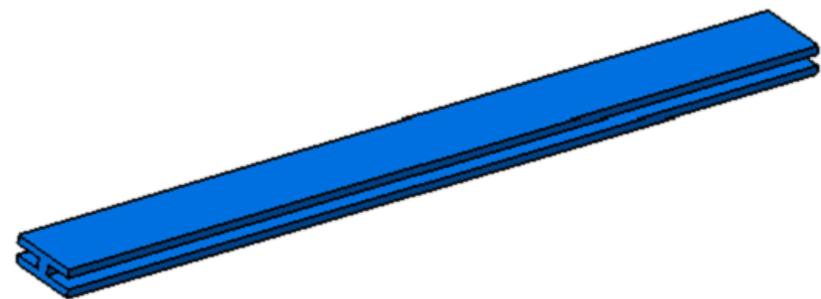
为了便于整体的分析计算，根据二极铁的结构，将二极铁模型进行简化；

考虑到整体磁铁的长度较长，依次分析三个支撑、四个支撑、五个支撑磁铁形变的结果，通过制造成本及形变的结合选择最优数量的支撑；

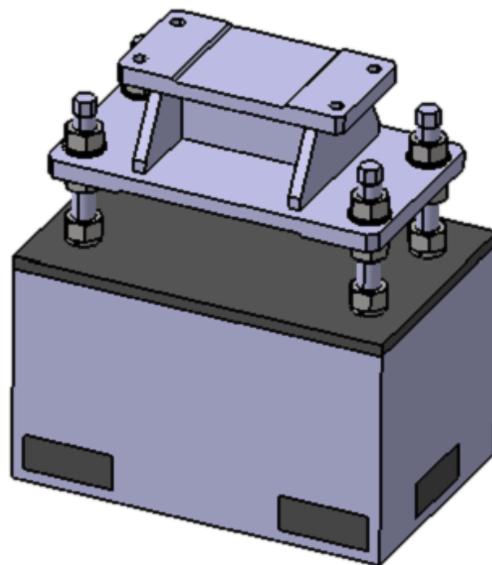
支撑本身可以设计为四个调节支撑结构和两个支撑结构的形式，从后期的安装调试便捷性，结合磁体的形变，通过分析计算选择最优的结构；



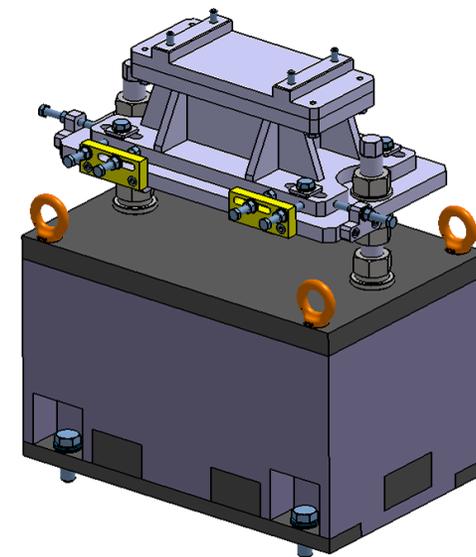
原始模型



简化模型



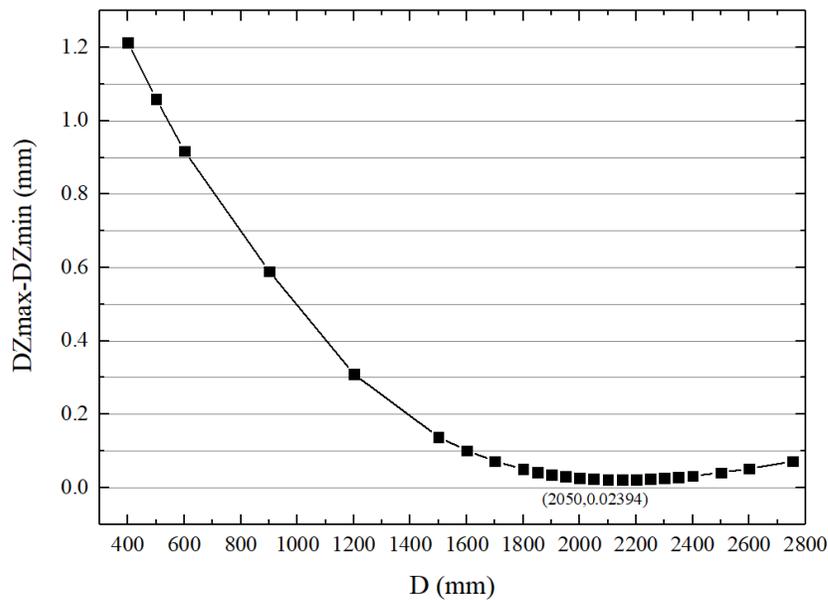
四支撑结构



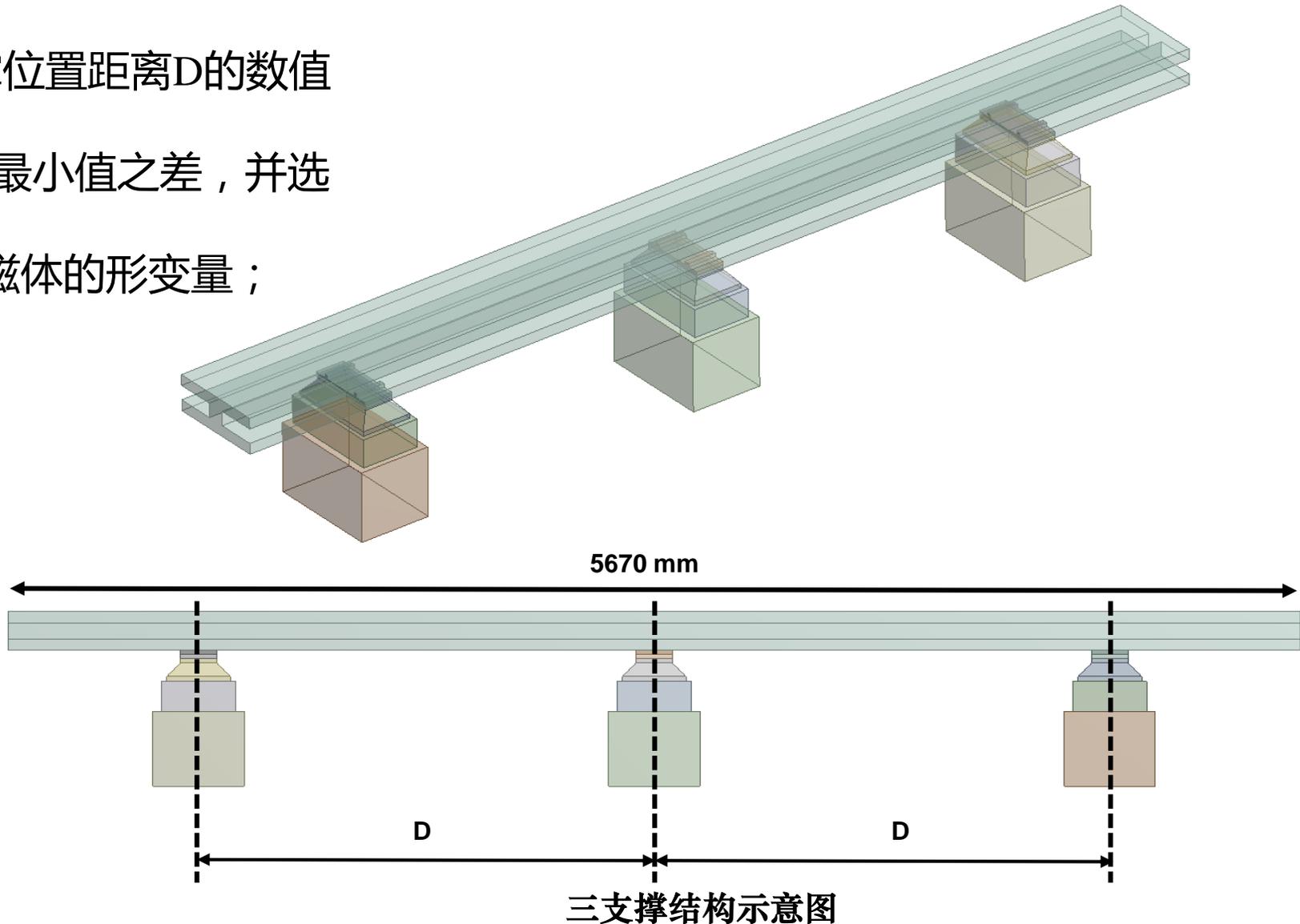
两支撑结构



通过Ansys计算分析，获得支撑位置距离D的数值  
在相应位置磁体的形变量最大值和最小值之差，并选  
取最小值时D的数据进行分析计算磁体的形变量；



**D = 2150 mm**时，**DZmax-Dzmin** 最小

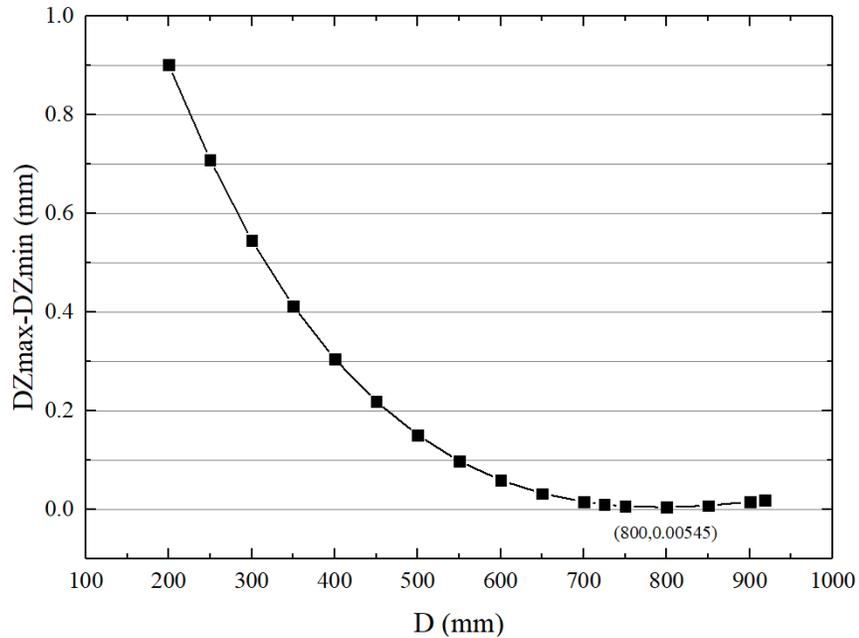
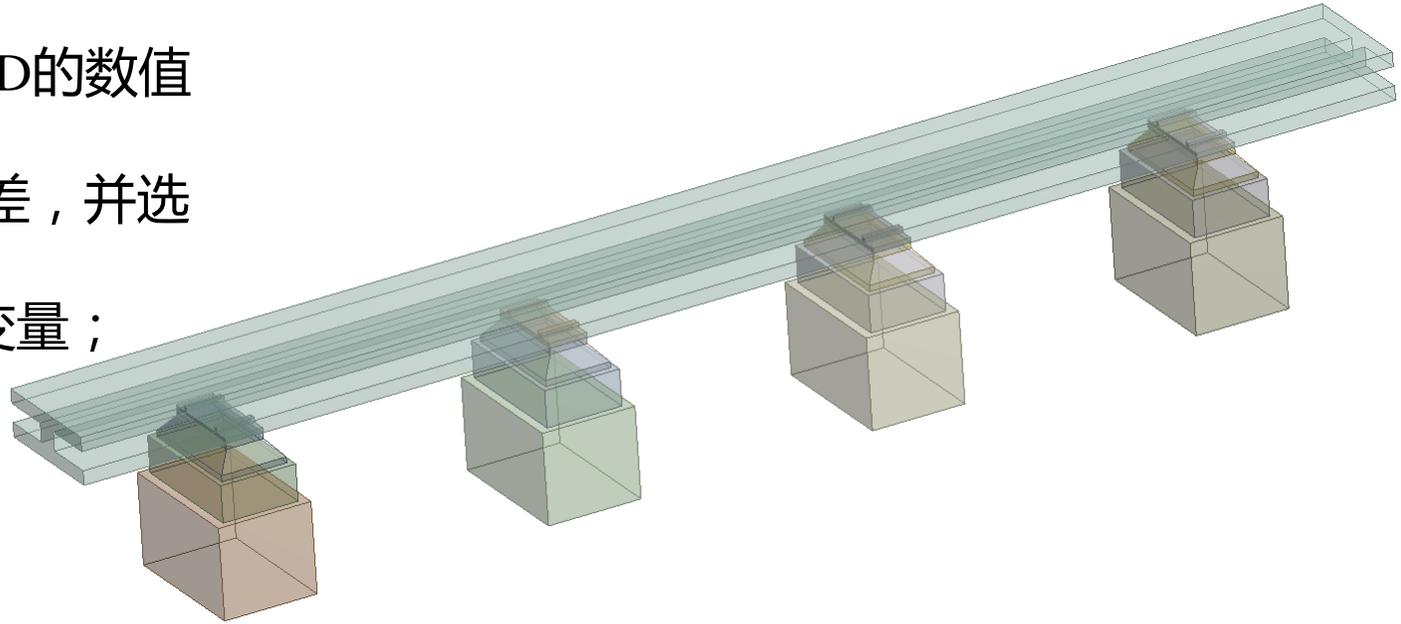




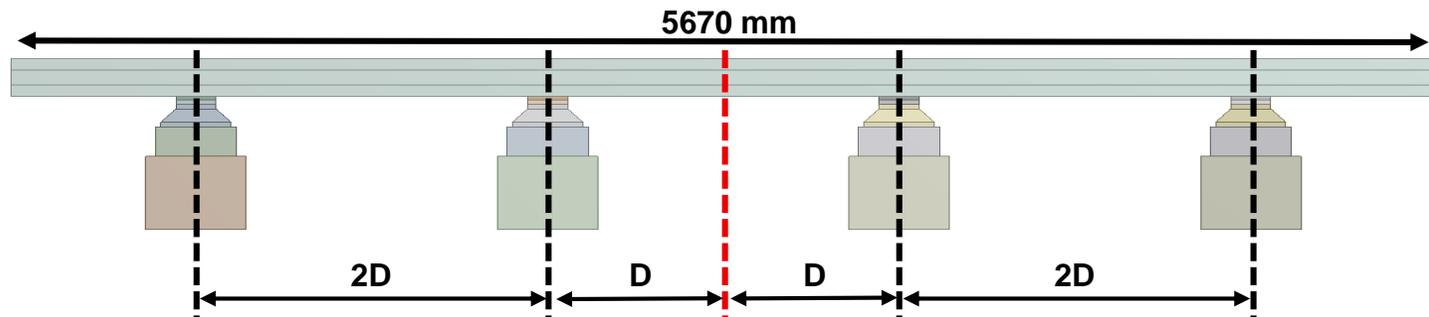
通过Ansys计算分析，获得支撑位置距离D的数值

在相应位置磁体的形变量最大值和最小值之差，并选

取最小值时D的数据进行分析计算磁体的形变量；



**D = 800 mm**时，**DZmax-Dzmin** 最小



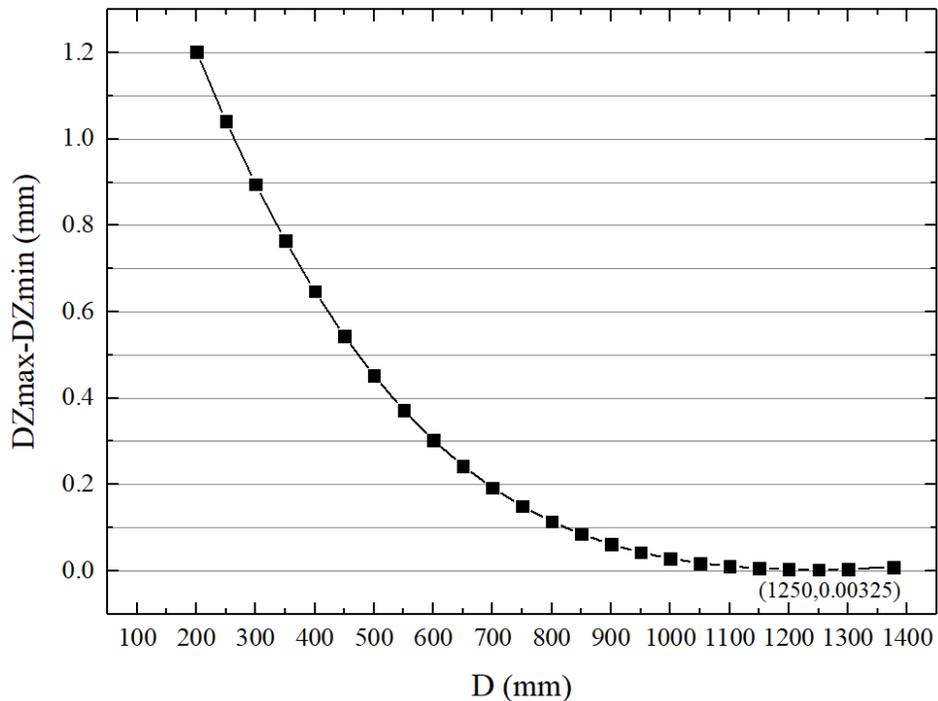
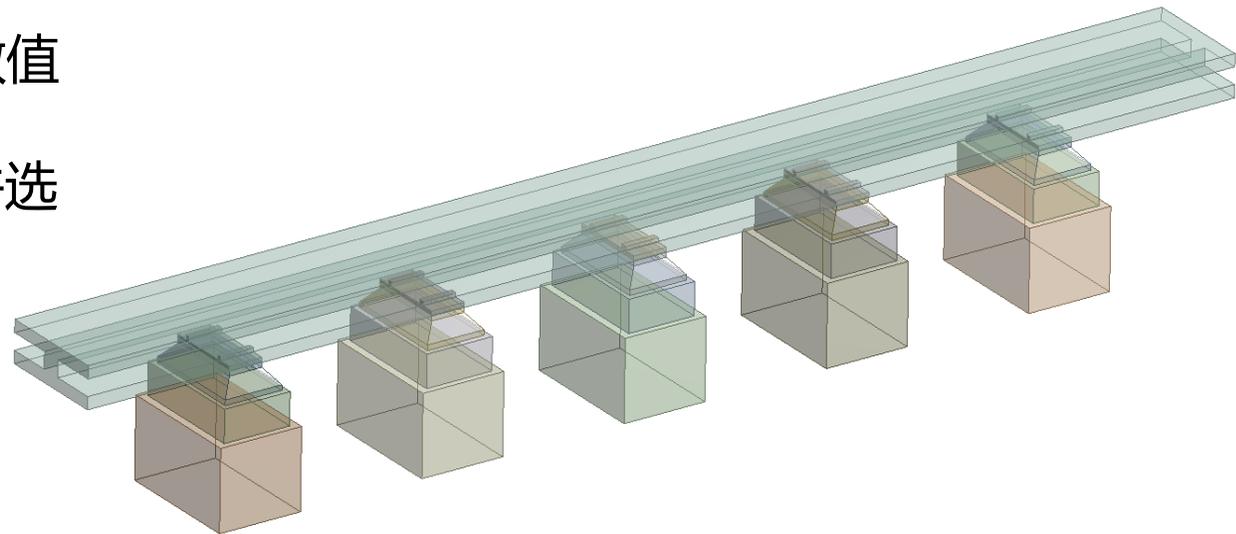
四支撑结构示意图



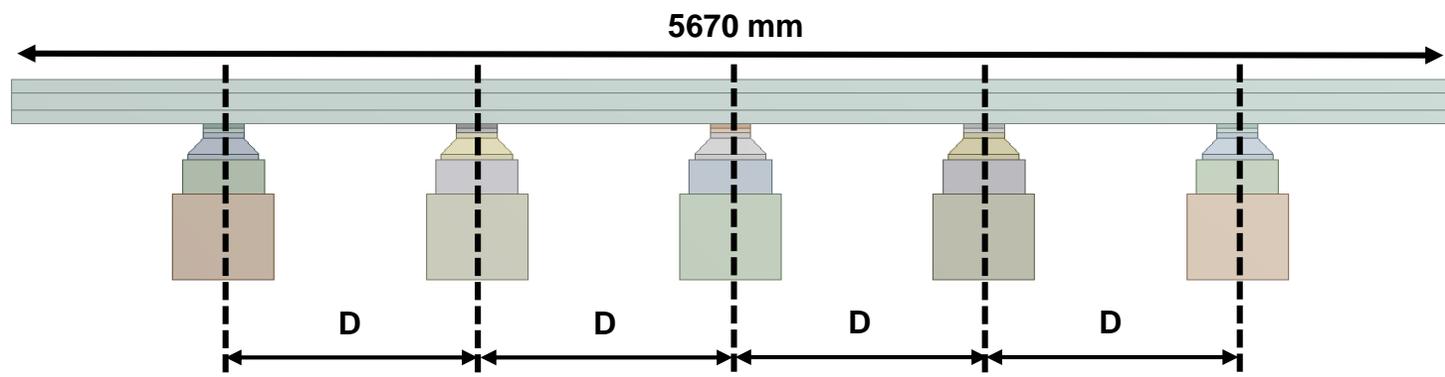
通过Ansys计算分析，获得支撑位置距离D的数值

在相应位置磁体的形变量最大值和最小值之差，并选

取最小值时D的数据进行分析计算磁体的形变量；



**D = 1250 mm**时，**DZmax-Dzmin** 最小

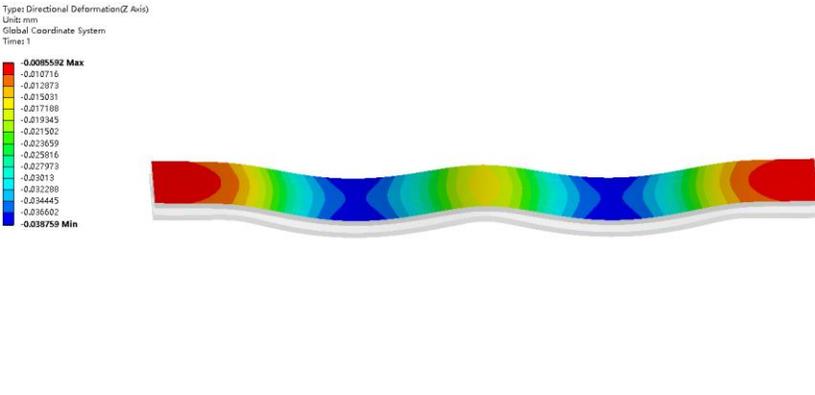


五支撑结构示意图



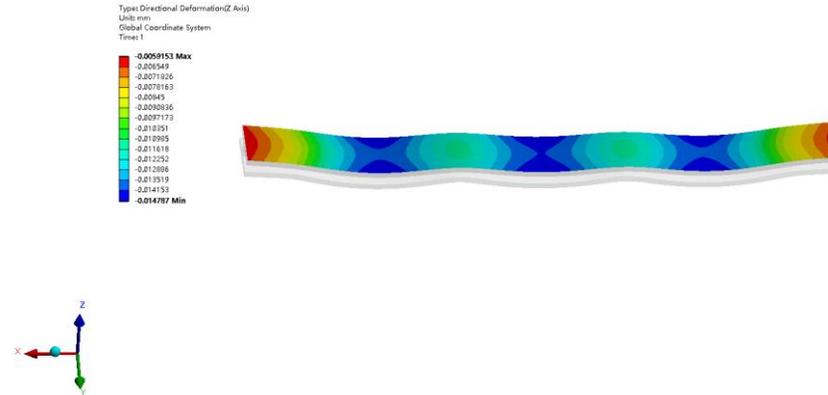
根据上述所获得的数据进行支撑位置调整，然后通过ANSYS进行磁体形变分析，如下所示：

### 三个支撑



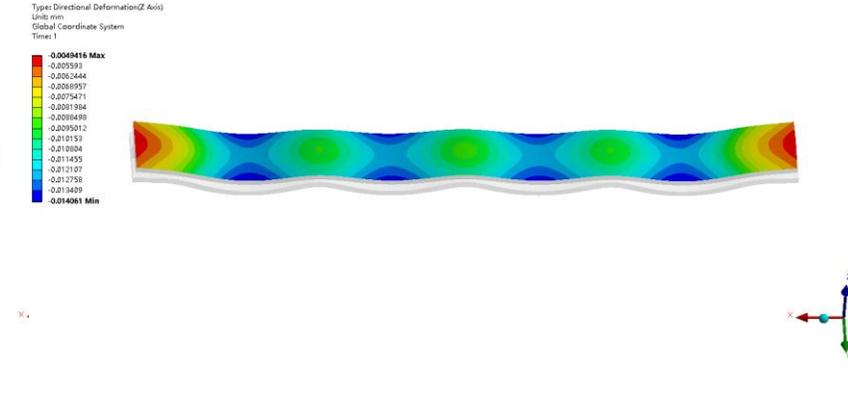
磁体上表面Z方向最大变形： -  
0.039mm  
DZmax-DZmin = 0.030 mm

### 四个支撑



磁体上表面Z方向最大变形： -  
0.015mm  
DZmax-DZmin = 0.009 mm

### 五个支撑

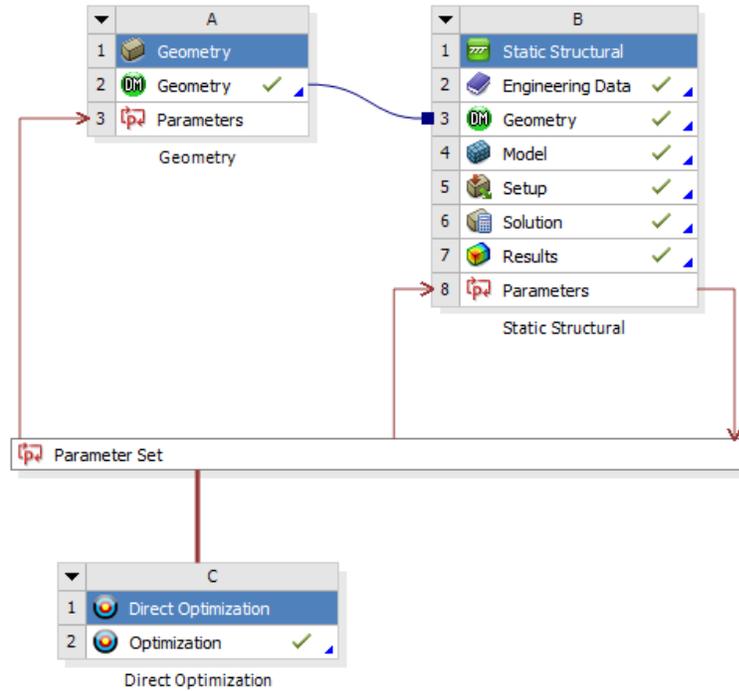


磁体上表面Z方向最大变形：  
-0.014mm  
Dzmax-DZmin = 0.009 mm



# 二. 支架计算

根据上述所获得的数  
 据以DZmax-Dzmin最小值  
 为优化目标，通过ANSYS  
 分析进行优化点的优化值  
 计算，确定最佳支撑距离；



	A	B
1	Property	Value
2	Design Points	
3	Preserve Design Points After DX Run	<input type="checkbox"/>
4	Failed Design Points Management	
5	Number of Retries	0
6	Optimization	
7	Method Selection	Manual
8	Method Name	MOGA
9	Estimated Number of Design Points	1050
10	Number of Initial Samples	100
11	Number of Samples Per Iteration	50
12	Maximum Allowable Pareto Percentage	70
13	Convergence Stability Percentage	2
14	Maximum Number of Iterations	20
15	Maximum Number of Candidates	3

	A	B	C	D	E	F	G
1	Reference	Name	P1 - D (mm)	P2 - Directional Deformation Maximum (mm)		P3 - Directional Deformation Minimum (mm)	
2				Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	<input checked="" type="radio"/>	Candidate Point 1	2004.3	-0.010428	0.00%	-0.029639	0.00%
4	<input type="radio"/>	Candidate Point 2	2002.3	-0.010447	-0.18%	-0.030044	-1.37%
5	<input type="radio"/>	Candidate Point 3	2005.7	-0.010424	0.03%	-0.029832	-0.65%

选取 (D=2004.3 mm)



## 二. 支架计算

根据上述所获得的数  
 据以DZmax-Dzmin最小值  
 为优化目标，通过ANSYS  
 分析进行优化点的优化值  
 计算，确定最佳支撑距离；

	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Units	mm
4	Classification	Continuous
5	Values	
6	Lower Bound	725
7	Upper Bound	729
8	Allowed Values	Any

	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Units	mm
4	Classification	Continuous
5	Values	
6	Lower Bound	2206
7	Upper Bound	2210
8	Allowed Values	Any

根据最佳优化点的附近细化点：

D1优化取值范围：725 mm-729 mm； D2优化取值范围：2206 mm-2210 mm

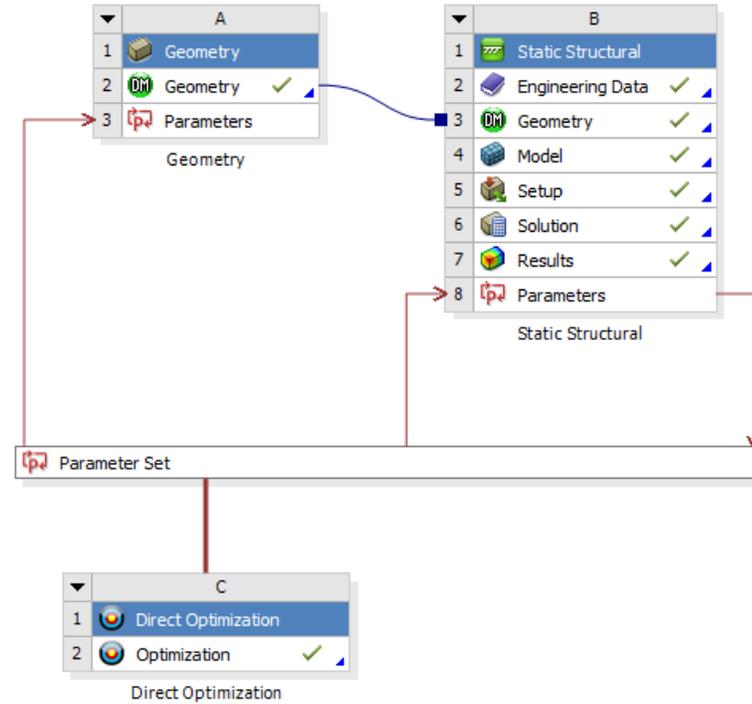
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	Reference	Name	P1 - Plane5.FD1 (mm)	P2 - Plane6.FD2 (mm)	P3 - Directional Deformation 2 Minimum (mm)	P4 - Directional Deformation 2 Maximum (mm)	P5 - Directional Deformation Min			
2					Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation f
3	●	Candidate Point 1	728.18	2208.9	★★★ -0.015558	0.00%	★ -0.0098476	0.00%	★★ -0.017128	0.00%
4	○	Candidate Point 2	726.54	2207.6	×× -0.01579	-1.50%	★★★ -0.0099504	-1.04%	× -0.017184	-0.33%
5	○	Candidate Point 3	725.35	2208.1	★★ -0.015631	-0.47%	★ -0.0098651	-0.18%	— -0.017168	-0.23%

选取 (D1=728.18 mm, D2=2208.9 mm)



# 二. 支架计算

根据上述所获得的数  
 据以DZmax-Dzmin最小值  
 为优化目标，通过ANSYS  
 分析进行优化点的优化值  
 计算，确定最佳支撑距离；



	A	B
1	Property	Value
2	[-] Design Points	
3	Preserve Design Points After DX Run	<input type="checkbox"/>
4	[-] Failed Design Points Management	
5	Number of Retries	0
6	[-] Optimization	
7	Method Selection	Manual
8	Method Name	MOGA
9	Estimated Number of Design Points	1050
10	Number of Initial Samples	100
11	Number of Samples Per Iteration	50
12	Maximum Allowable Pareto Percentage	70
13	Convergence Stability Percentage	2
14	Maximum Number of Iterations	20
15	Maximum Number of Candidates	3

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Reference	Name	P1 - D1 (mm)	P2 - D2 (mm)	P3 - Directional Deformation Minimum (mm)		P4 - Directional Deformation Maximum (mm)	
2					Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	<input checked="" type="radio"/>	Candidate Point 1	1132.2	2316.7	★★ -0.012798	0.00%	★★ -0.0083354	0.00%
4	<input type="radio"/>	Candidate Point 2	1120.8	2316.7	★★ -0.012739	0.46%	★ -0.0082734	0.74%
5	<input type="radio"/>	Candidate Point 3	1150.4	2319	★★ -0.012795	0.02%	★ -0.0082687	0.80%

选取 (D1=1132.2 mm; D2=2316.7 mm)

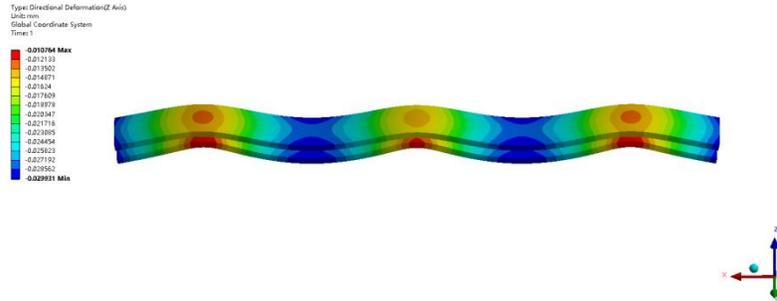


## 二. 支架计算

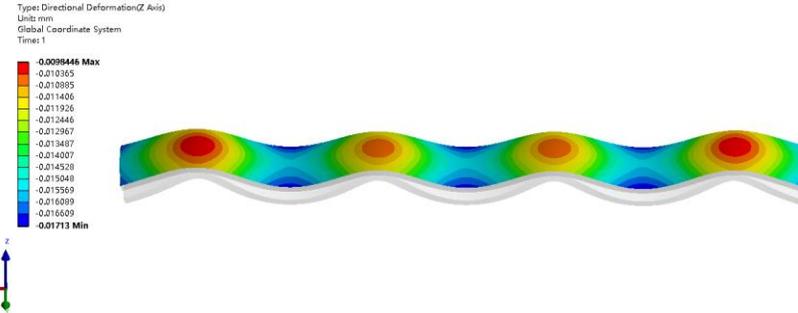
根据上述所获得的数据以DZmax-Dzmin最小值为优化目标，然后通过ANSYS再次进行磁体形变分析，

如下所示：

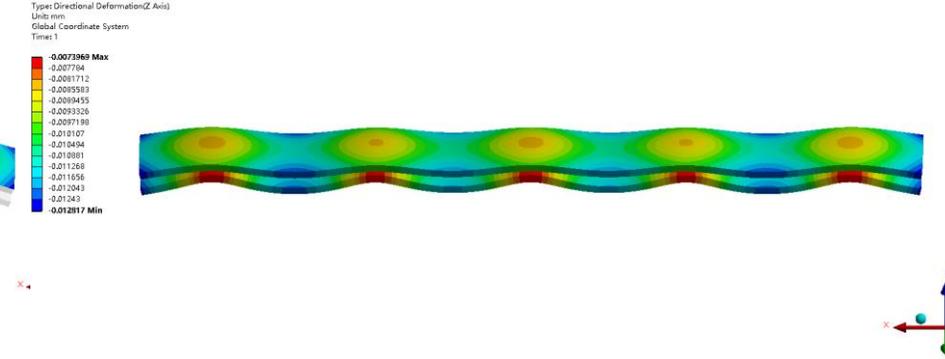
### 三个支撑



### 四个支撑



### 五个支撑



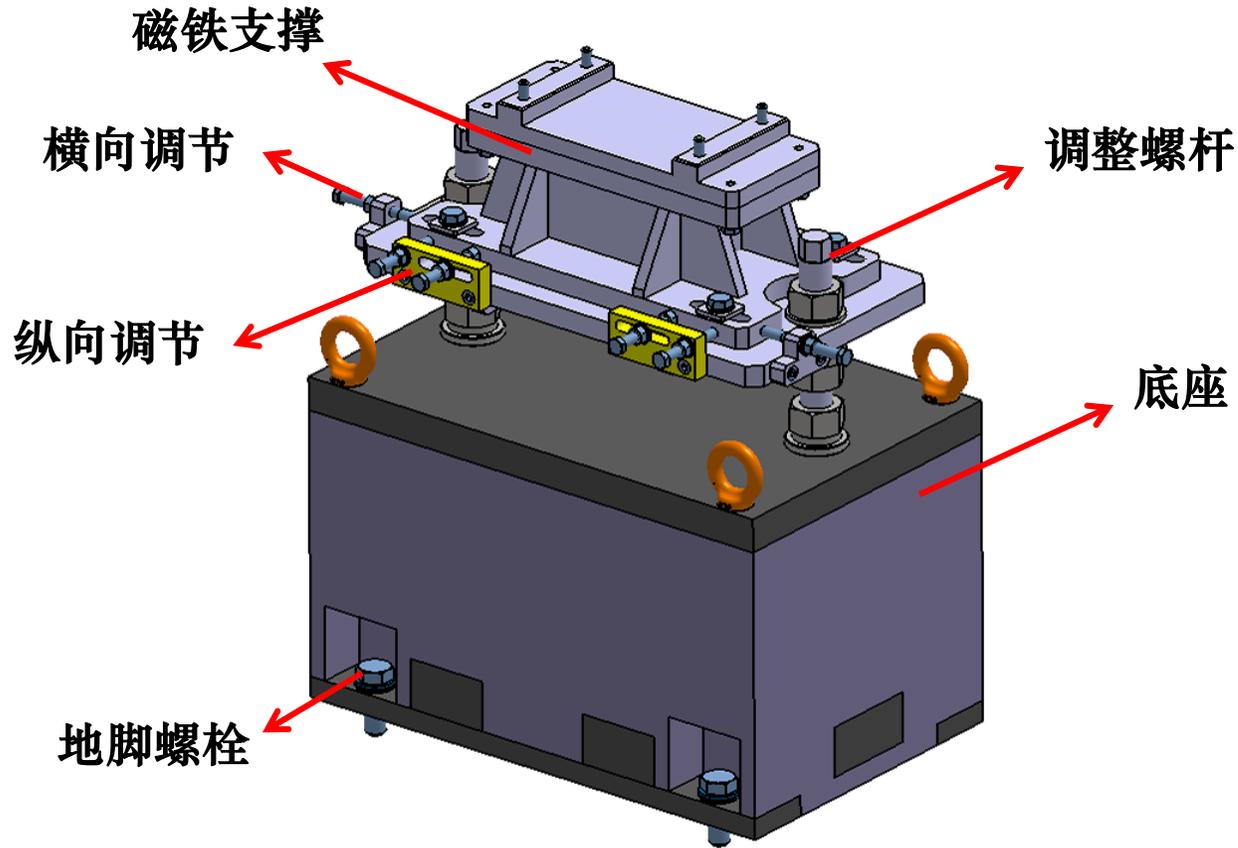
磁铁整体变形峰峰值  $ABS(Dz_{max} - Dz_{min}) = -0.010764 - (-0.029931) = 0.019167 \text{ mm}$

磁铁整体变形峰峰值  $ABS(Dz_{max} - Dz_{min}) = -0.0098446 - (-0.01713) = 0.0072854 \text{ mm}$

磁铁整体变形峰峰值  $ABS(Dz_{max} - Dz_{min}) = -0.0073969 - (-0.012817) = 0.0054201 \text{ mm}$



根据上述ANSYS分析所获得的结果，分析对比暂选择四个支撑作为二极铁的支撑结构，然后根据支架调节量的要求对支架进行详细的优化设计，如下图所示：



形变量与支撑数量关系表

支撑数量	整体最大形变量 (um)
3	19
4	7
5	5

支架调节参数表

磁铁调整范围			
X	$\geq \pm 20$ mm	$\Delta\theta_x$	$\geq \pm 10$ mrad
Y	$\geq \pm 30$ mm	$\Delta\theta_y$	$\geq \pm 10$ mrad
Z	$\geq \pm 20$ mm	$\Delta\theta_z$	$\geq \pm 10$ mrad



谢谢!