



高能同步辐射光源 (HEPS)

磁铁研制

王辉 2023-10-23

『十三五』国家重大科技基础设施

高能同步辐射光源

(HEPS | High Energy Photon Source)

建设内容：加速器、光束线站、配套土建工程及辅助设施等；

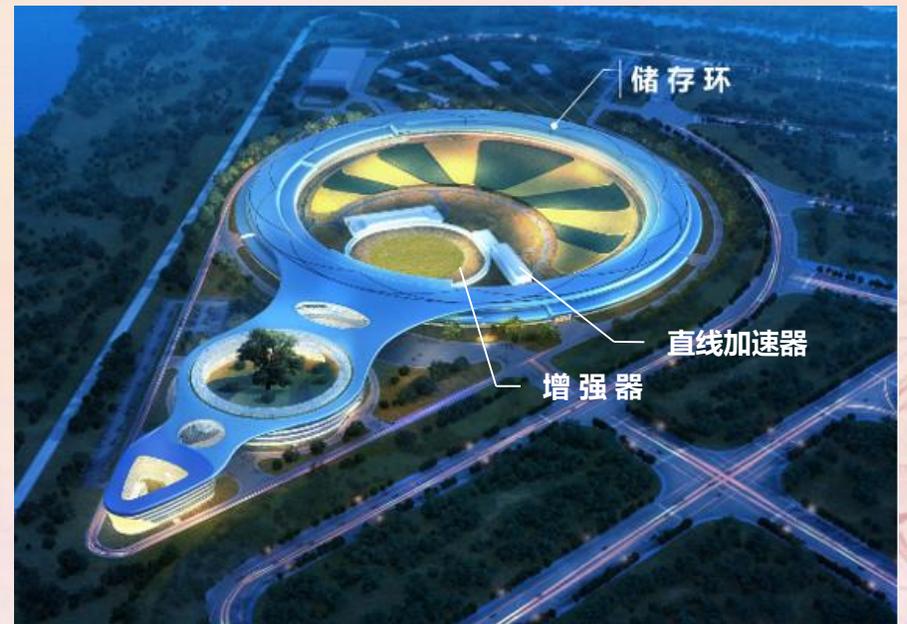
工 期：6.5年，2019年7月-2025年12月；

法人单位：中科院高能物理研究所；

建设地点：北京怀柔科学城北部核心区；

占地面积：976亩；

建筑面积：12.5万平米+2.8万平米。



报告提纲

01

HEPS磁铁与锐新承制情况

02

磁铁研制与批量完成情况

03

批量生产中的质量控制

04

遇到的问题与挑战

05

总结与展望

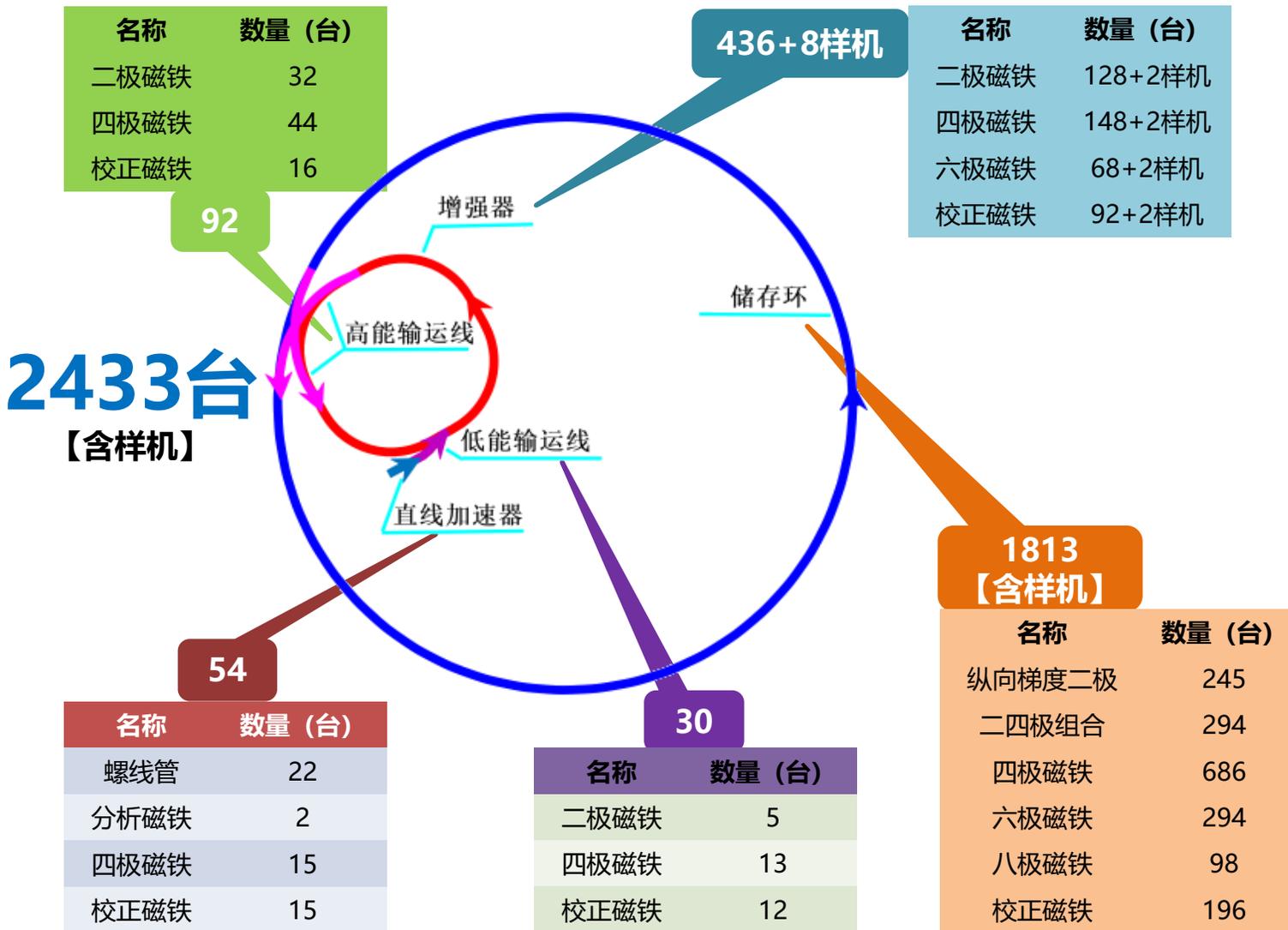


01

HEPS磁铁与锐新承制情况

一、HEPS磁铁概况

■ 数量与分布



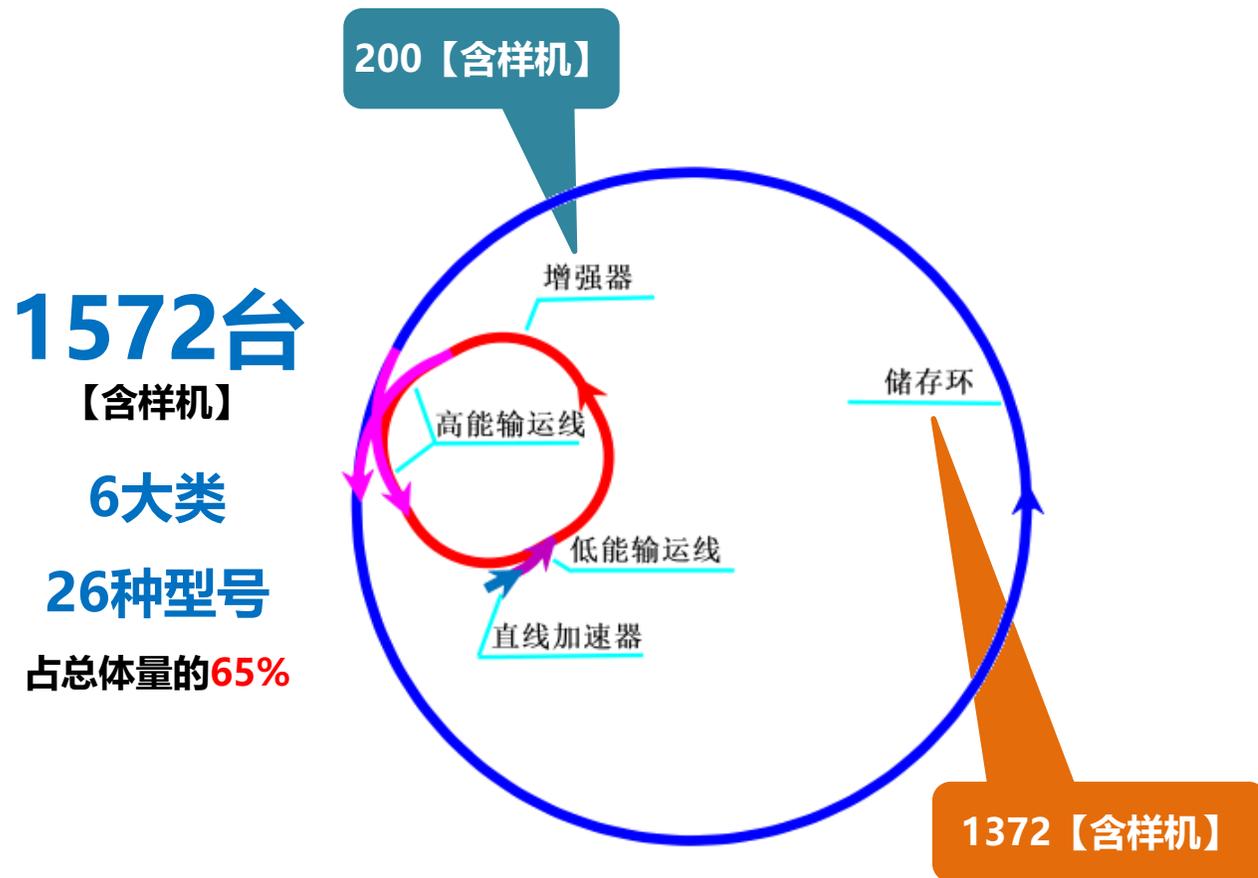
■ 磁铁特点

超高梯度	四极磁铁 80T/m
超高精度	磁场质量0.01%
特殊功能	组合磁铁、纵向梯度二极铁
磁场测量精度高	5×10^{-5}
准直精度高	15 ~ 20 μ m

- 磁铁的**性能指标和技术难度**都达到了国际先进水平，**在国内加速器上也是首次应用。**
- **纵向梯度二极磁铁和超高梯度四极磁铁**（结构复杂、磁场质量高）是实现HEPS超低发射度的**关键。**
- **超高梯度二四极组合磁铁**节省了宝贵的纵向空间
- 对磁铁的**加工、装配**都提出了极高的要求，尤其是**批量磁铁的制造**，需要有成熟稳定的工艺和严格的质量控制措施。

二、HEPS磁铁——锐新公司承接情况

■ 增强器与储存环磁铁



1572台
【含样机】

6大类

26种型号

占总体量的**65%**

■ 型号与数量

增强器磁铁			
名称	型号	数量 (台)	研制周期
二极磁铁	BS-34B	130	2019.12~2021.12
六极磁铁	BS-40S	70	2019.12~2021.12

储存环磁铁【按时间顺序】			
名称	种类	数量 (台)	研制周期
六极磁铁	3	294	2020.05~2022.05
纵向梯度二极	2	98	2020.12~2023.06
四极磁铁	16	686	2020.12~2023.12
二四极组合	3	294	2020.12~2023.12

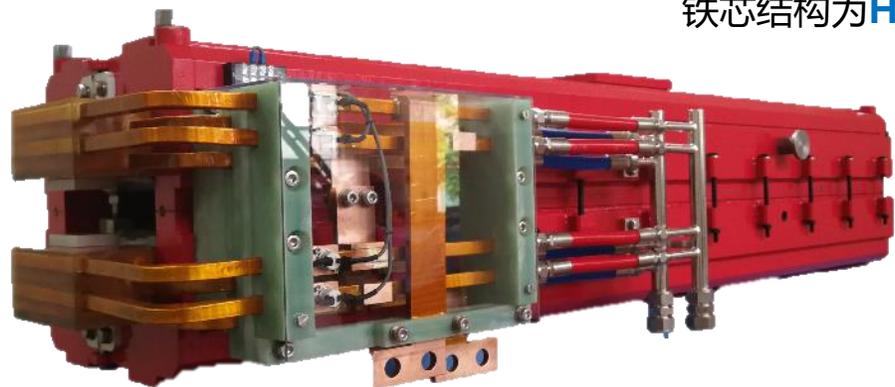


02

磁铁研制与批量完成情况

一、增强器磁铁

■ 1、二极磁铁——130台

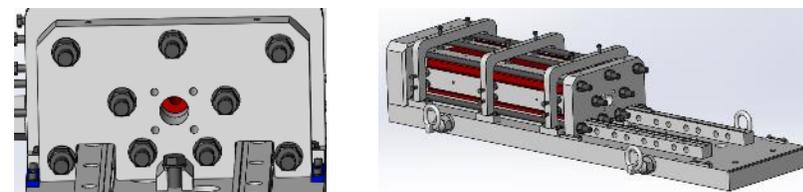


铁芯结构为H型结构

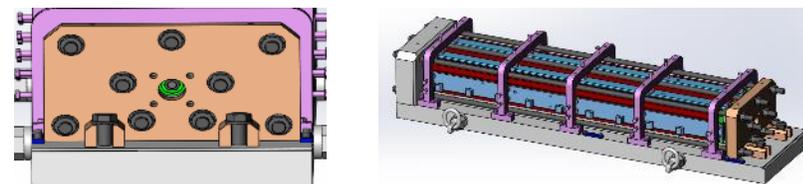
参数名称	数值	单位
数量	130	-
磁有效长度	1.450	m
弦弧差	8.90	mm
最高工作磁场(@6GeV)	0.68	T
最低工作磁场(@500MeV)	0.05	T
弯转半径	29.540	m
磁极间隙	34.00	mm
好场区(H×V)	30×20	mm
好场区范围内场均匀度(@0.5GeV, 6GeV)	$1 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-4}$	-
磁铁间积分磁场离散性	0.1%	-

■ 关键工艺

- 铁芯外形L×W×H=1465×370×337 胶粘叠片铁芯
- 解决瘦长型铁芯胶粘叠压与固化工艺，成熟应用在批量生产中



(1) 半铁芯叠装进行紧固与尺寸检查



(2) 整铁芯叠装后进行紧固与尺寸检查

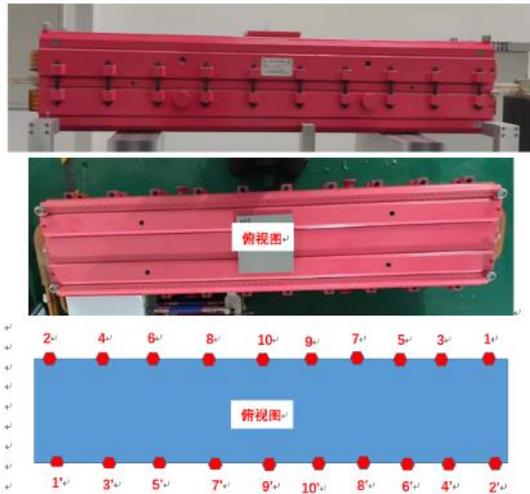


(3) 整铁芯固化时二次预紧，控制铁芯长度根据多次固化实验确定工艺参数

一、增强器磁铁

■ 1、二极磁铁——130台

增强器二极磁铁拆装流程



一、拆卸流程

按照两侧到中间顺序对角拆卸: 1-1'-2-2'-3-3'-4-4'-5-5'-6-6'-7-7'-8-8'-9-9'-10-10'

二、装配流程

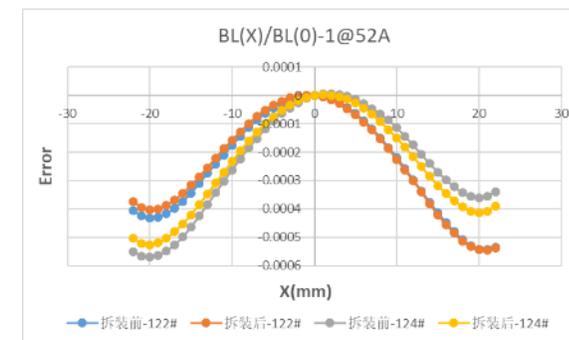
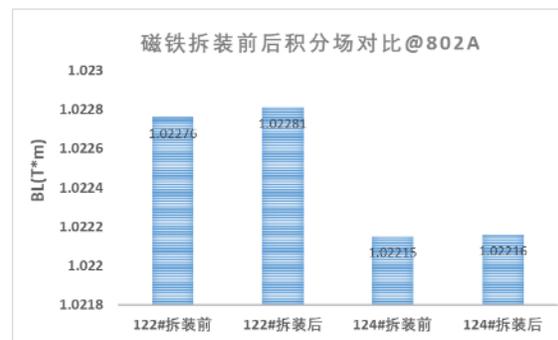
1. 螺丝按照从中间到两边的顺序预紧拧到 30N.m, 顺序为: 10-10'-9-9'-8-8'-7-7'-6-6'-5-5'-4-4'-3-3'-2-2'-1-1'
2. 最后按照与 1 步骤同样顺序 10-10'-9-9'-8-8'-7-7'-6-6'-5-5'-4-4'-3-3'-2-2'-1-1'将螺丝扭矩拧到 60N.m



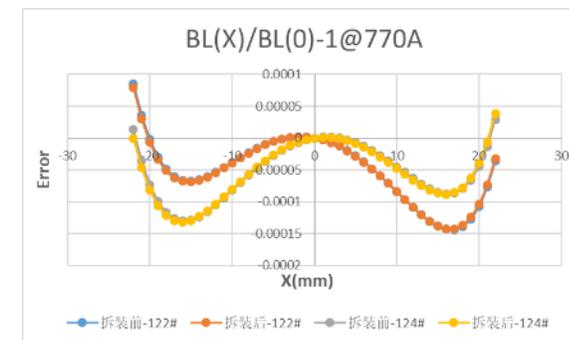
■ 关键工艺

■ 批量磁铁拆装与重复性测试

- 按照拆装流程、控制螺钉的拧紧顺序和扭矩以及定位销的以一一对应
- 进行拆装前后的磁场测试并对比



电流 (A)	BL(T*m)—122#			BL(T*m)—124#		
	拆装前	拆装后	误差	拆装前	拆装后	误差
20	0.02518	0.02518	3.97E-07	0.02518	0.02518	2.23E-04
32	0.04039	0.04039	3.66E-05	0.04038	0.04039	1.15E-04
38.5	0.04864	0.04865	9.27E-05	0.04863	0.04864	8.68E-05
52	0.06582	0.06582	8.40E-05	0.06580	0.06580	6.09E-05
705	0.90187	0.90194	7.52E-05	0.90134	0.90132	-2.14E-05
740	0.94584	0.94591	6.97E-05	0.94528	0.94526	-1.54E-05
770	0.98324	0.98330	6.26E-05	0.98266	0.98265	-8.17E-06
782	0.99804	0.99810	5.95E-05	0.99745	0.99745	-4.22E-06
802	1.02276	1.02281	5.26E-05	1.02215	1.02216	4.67E-06



一、增强器磁铁

■ 2、六极磁铁——70台



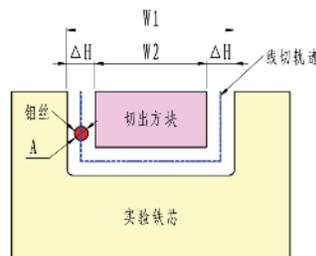
铁芯结构为**上-下二合一**结构

参数名称	数值	单位
数量	70	-
磁有效长度	200	mm
最高工作六极场 ¹	1000	T/m ²
最低工作六极场 ¹	30	T/m ²
好场区 (半径)	16	mm
磁铁孔径 (内接圆直径)	40.00	mm
好场区范围内高阶场误差 (@0.5GeV, 6 GeV)	$5 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-3}$	-
磁铁间积分磁场离散性	0.2%	-

■ 关键工艺

■ 半铁芯中部极头的切割与复位装配

- 选定线切机床, 定制铁芯冲片
- 铁芯叠装后, 进行极头的切割与复位装配, 至三处极头同处对顶圆范围



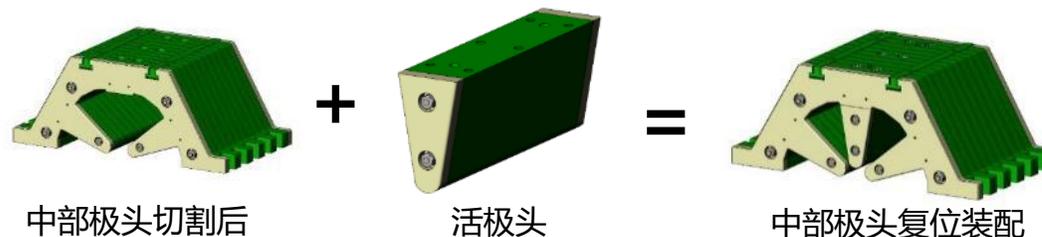
编号	位置	W1	W2	ΔH	W2	ΔH
1	5	29.948	29.328	0.310	29.326	0.311
2	15	29.948	29.331	0.309	29.328	0.310
3	25	29.945	29.331	0.307	29.330	0.308
4	35	29.940	29.330	0.305	29.329	0.306
5	45	29.940	29.331	0.305	29.329	0.306
6	55	29.940	29.328	0.306	29.328	0.306
7	65	29.943	29.332	0.306	29.330	0.307
8	75	29.940	29.332	0.304	29.330	0.305
9	85	29.944	29.333	0.306	29.328	0.308
10	95	29.937	29.331	0.303	29.327	0.305
11	105	29.947	29.329	0.309	29.326	0.310
12	115	29.941	29.329	0.306	29.327	0.307
13	125	29.937	29.327	0.305	29.323	0.307
14	135	29.944	29.329	0.307	29.324	0.310
15	145	29.942	29.327	0.307	29.328	0.307
16	155	29.943	29.329	0.307	29.325	0.309
17	165	29.958	29.326	0.316	29.328	0.315
18	175	29.968	29.330	0.319	29.327	0.320
19	185	29.953	29.329	0.312	29.327	0.313
20	195	29.959	29.330	0.315	29.328	0.316
21	205	29.955	29.331	0.312	29.326	0.314
22	215	29.962	29.329	0.317	29.327	0.317
23	225	29.966	29.331	0.318	29.328	0.319
AVG		29.948	29.329	0.309	29.327	0.310
MIN		29.937	29.326	0.303	29.323	0.305
MAX		29.968	29.333	0.319	29.330	0.320



六极冲片平面图

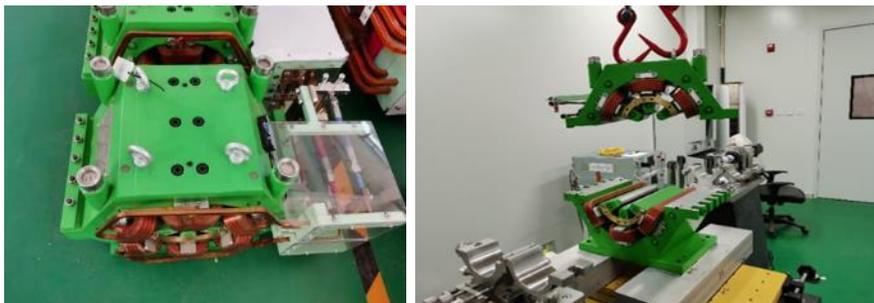


冲片三坐标检测



■ 2、六极磁铁——70台

1	6
2	7
3	8
4	9
5	10



二、上铁芯拆卸流程

- 1、拆开上下铁芯之间的水、电和温控线等的连接；
- 2、按照 1-10-5-6-2-9-4-7-3-8 的顺序将两边的螺母从两侧到中间逐个松开；
- 3、将螺杆和压条全部取掉；
- 4、吊起上半铁芯。

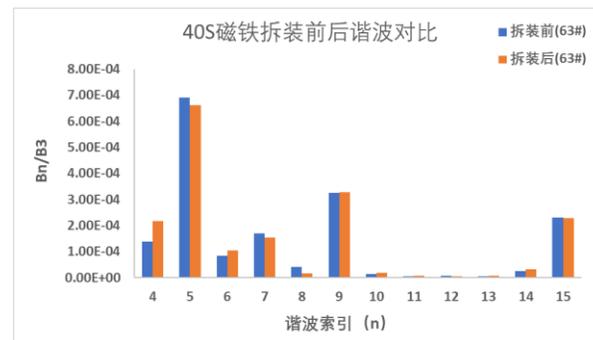
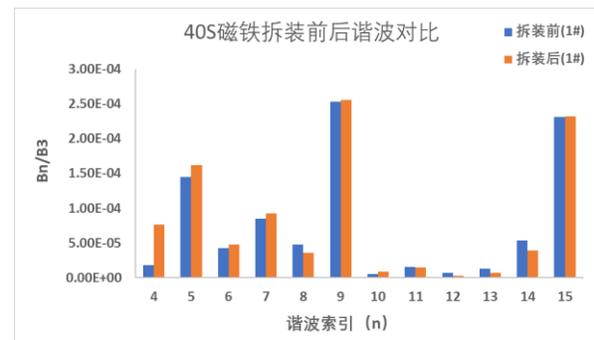
三、上铁芯装配顺序

- 1、检查销钉位置，将吊起的上铁芯放回，装上螺杆和压条；
- 2、按照 3-8-2-9-4-7-1-10-5-6 的顺序预紧螺丝 (扭矩 15N.m)；
- 3、按照第 2 步顺序使用 25N.m 的扭矩拧紧螺丝；
- 4、按照第 2 步顺序复检每个螺丝；
- 5、装配上下铁芯之间的水、电和温控线等的连接。

■ 关键工艺

■ 批量磁铁拆装与重复性测试

- 按照拆装流程、控制螺钉的拧紧顺序和扭矩以及定位销的以一一一对应
- 进行拆装前后的磁场测试并对比



在磁铁拆装前后均进行了磁场测试，上图为两种类型磁铁的拆装结果，其中梯度积分场差异 < 2E-4，空间谐波误差 < 1E-4。

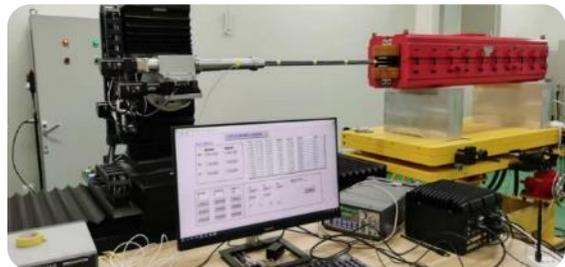


一、增强器磁铁

■ 批量完成情况

二、六极样机研制成功 完成出厂验收

2020.8.30



五、验收意见
经过磁场测试，HEPS 增强器所有二极磁铁的各项磁场技术指标均优于设计要求。资料档案规范、齐全。
同意通过验收。
验收组组长（签字）：*Peu* 验收时间：2021年12月10日

五、验收意见
经过磁场测试，增强器所有六极磁铁的各项磁场技术指标均优于设计要求。资料档案规范、齐全。
同意通过验收。
验收组组长（签字）：*Peu* 验收时间：2021年12月10日

2021.12.10

二、六极批量测试完成 通过最终验收

全部设备运抵怀柔PAPS平台

2022.3.1



2022.10.18

增强器设备完成安装

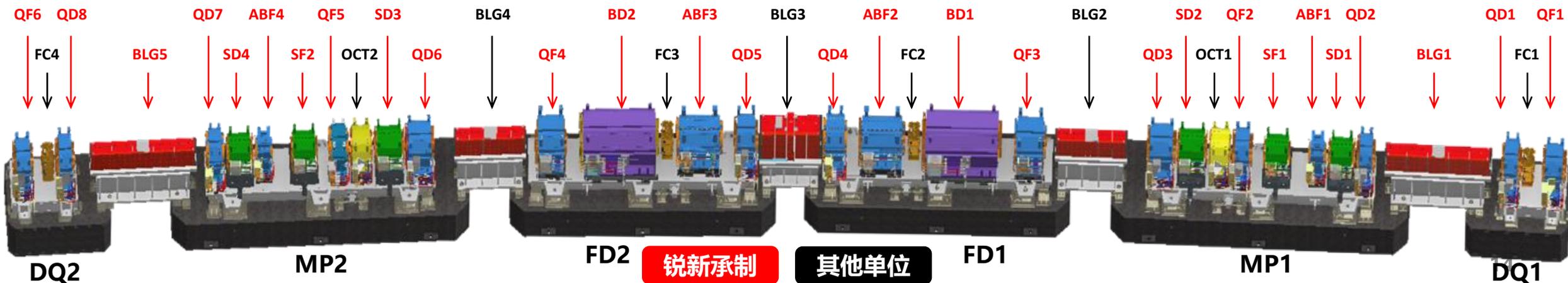
二、储存环磁铁

■ 纵向梯度二极磁铁——2种 (49+49台)



■ 主要技术要求

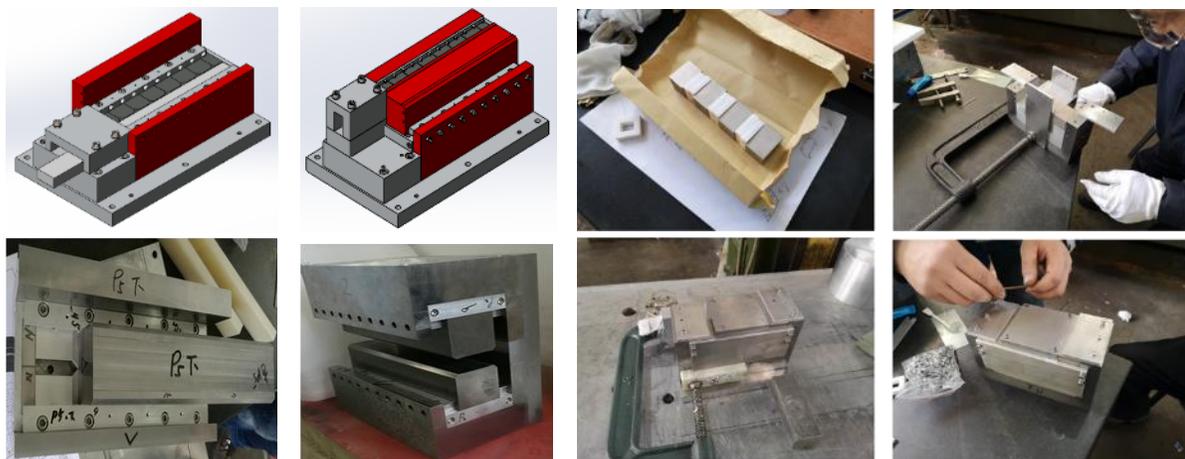
磁铁类型	BLG1 (I型)	BLG5 (II型)
磁铁数量 (台)	48+1 样机	48+1 样机
磁铁总的等效磁长度 (m)	1.499	1.499
磁场平台数目	5	5
各平台的磁场 (Gauss)	4838.4/3357.3/2863.6/ 2073.6/1283.7	1283.7/2073.6/2863.6/ 3357.3/4838.4
磁铁总的积分磁场 (Gauss·m)	4322.0	4322.0
积分磁场的离散 (最大偏离)	1×10^{-4}	1×10^{-4}
好场区范围(H×V) (mm)	$[-11, 11] \times [-8, 8]$	$[-11, 11] \times [-8, 8]$
好场区内积分磁场均匀度 (最大值)	4×10^{-4}	4×10^{-4}



二、储存环磁铁

■ 纵向梯度二极磁铁——2种 (49+49台)

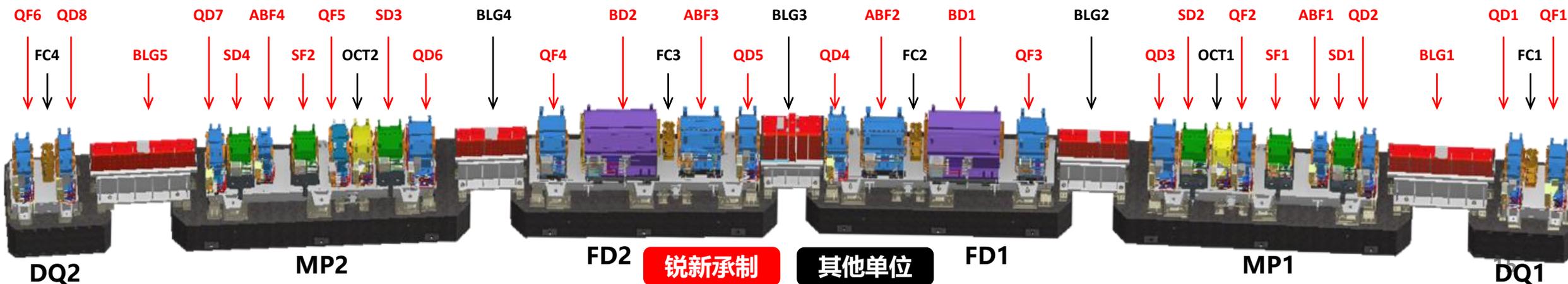
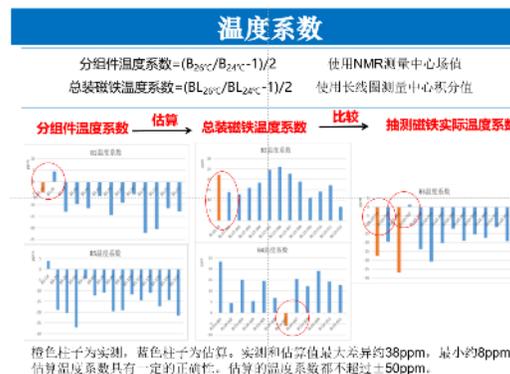
- 磁块的筛选与性能排序，减少磁极组件之间的性能差异
- 全装配过程中的无磁控制，装配工装、工具与测量仪器的选择等



■ 关键工艺

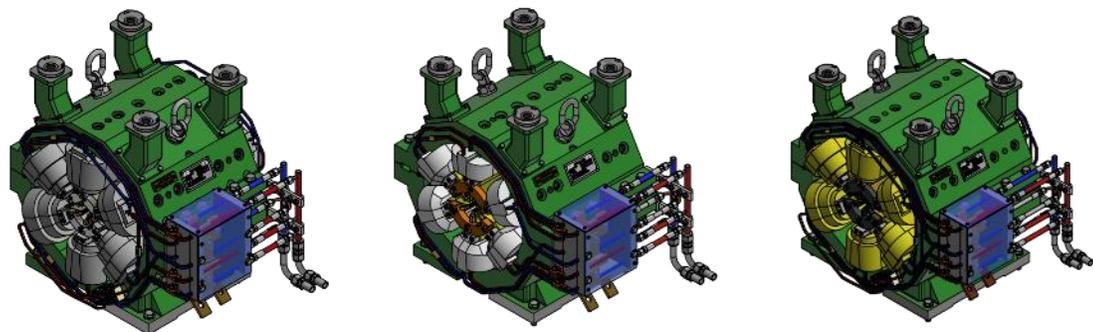
■ 温度补偿

- 恒温间 (24 ~ 26 °C ± 0.5 °C) 通过安装1J30温度补偿片，将磁铁在不同温度下的磁场差异控制在一定范围内



二、储存环磁铁

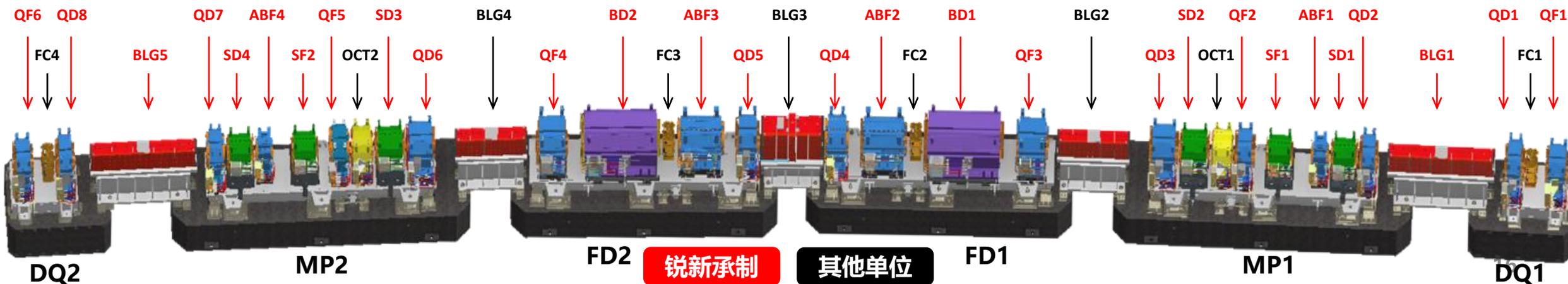
■ 六极磁铁——3种 (98+98+98台)



型号	孔径 (mm)	铁芯尺寸 长×宽×高 (mm)	数量 (台)	铁芯结构	线圈结构
SD1/4	32.0	304×460×540	98	八合一	主+ 双向校正
SF1/2	26.6	318×480×539	98	八合一	主
SD2/3	26.6	350×504×539	98	八合一	主+ 双向校正

■ 主要技术要求

磁铁名称	SD1&4	SD2&3	SF1&2
磁铁数量 (台)	96+2样机	96+2样机	96+2样机
等效磁长度 (m)	0.314	0.358	0.326
最高磁场梯度 (T/m ² 或 T/m ³)	4588	7360	7494
积分磁场离散 (最大偏离)	6 × 10 ⁻³		
积分磁场离散sorting (最大偏离)	3 × 10 ⁻³		
束流清晰区(H×V) (mm)	[-6.4, 6.4] × [-4.9, 4.9]		
好场区范围 (r) (mm)	5	5	5
好场区内积分高阶场分量 ¹	$B_4/B_3 \leq 5 \times 10^{-3}$, $B_5/B_3 \leq 2.5 \times 10^{-3}$, $B_n/B_3 \leq 1.25 \times 10^{-3}$ for n>5		
是否带绑腿线圈	是, 用于轨道校正	是, 用于轨道校正	否
绑腿校正子电源数目	192	192	0



二、储存环磁铁

■ 六极磁铁——3种 (98+98+98台)

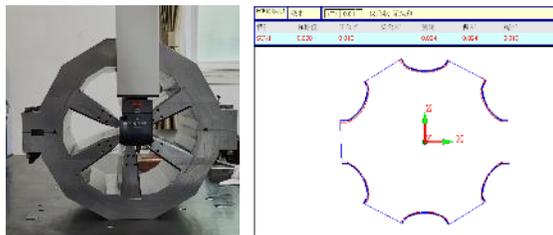
■ 铁芯二合一+6活极头的配作

- 一次装卡完成半铁芯内轮廓加工，保证铁芯内轮廓与极头定位槽精度



■ 极面轮廓度的控制

- 精密线切进行多次极头轮廓切割
- 三坐标配合轮廓度的检测



■ 关键工艺

■ 批量磁铁拆装后的重复性测量

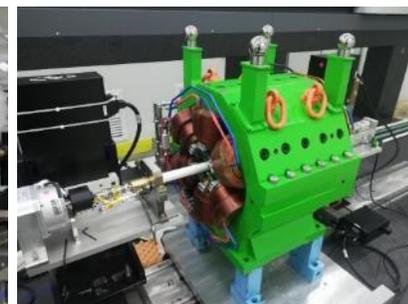
- 机械尺寸的重复性检测
- 磁场测量的重复性



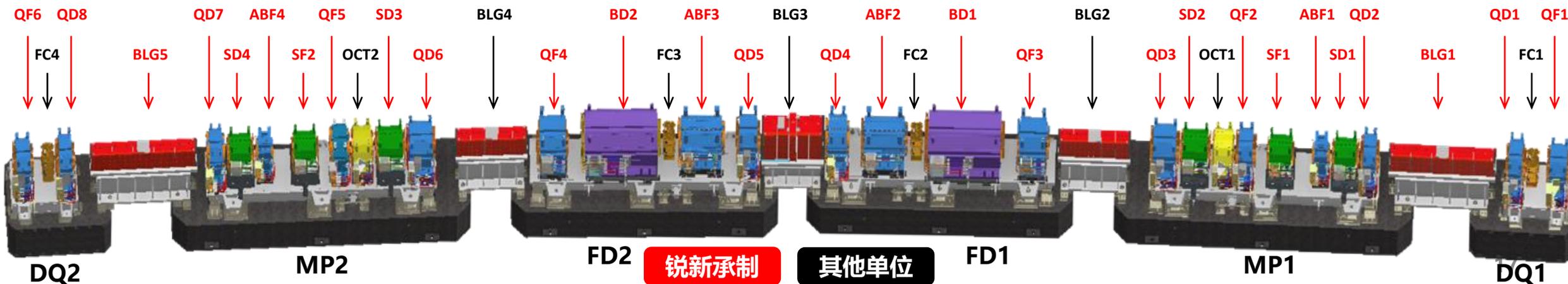
机械尺寸检测



霍尔点测

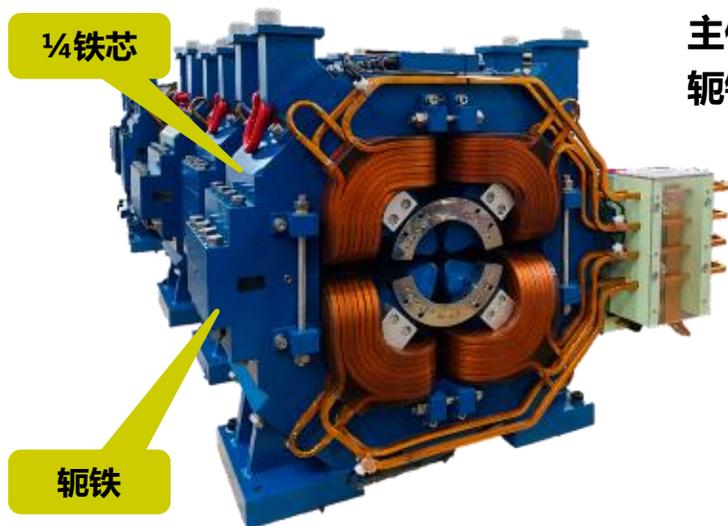


旋测



二、储存环磁铁

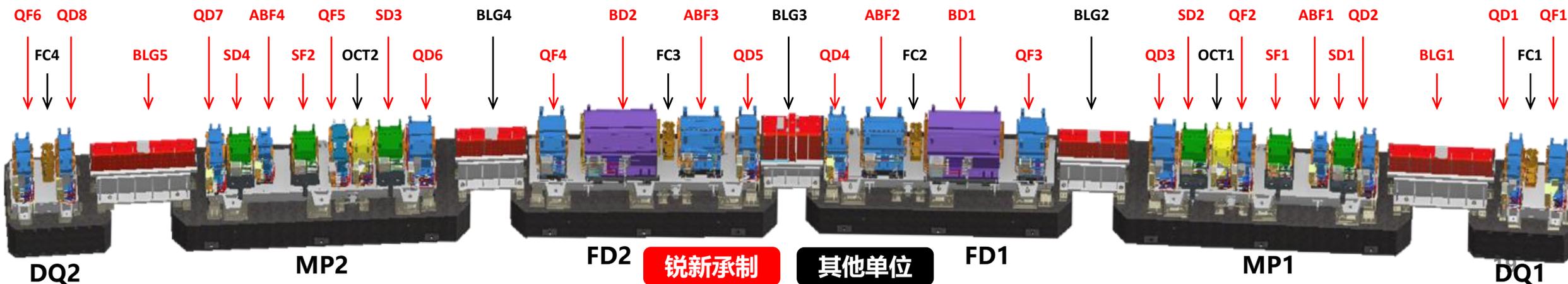
■ 四极磁铁——II型3种 (148台)



铁芯结构：八合一
 主体：DT4纯铁
 轭铁：316L不锈钢

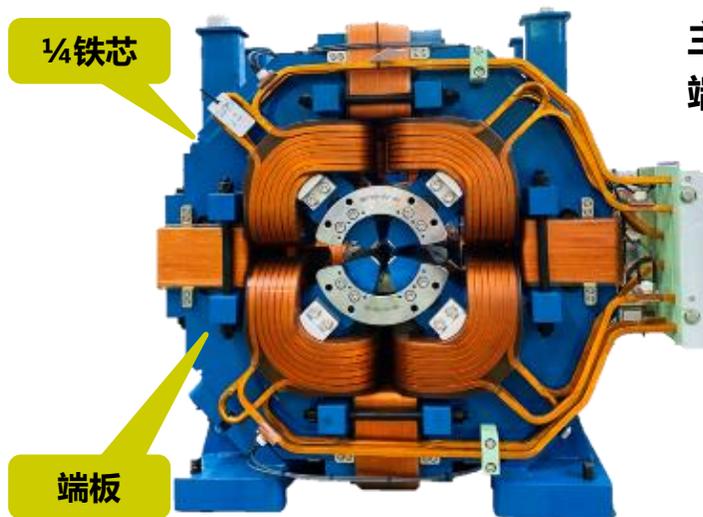
■ 主要技术要求

磁铁名称	QD4	QF5	QD7
数量 (台)	48+1样机	48+1样机	49+1样机
铁芯类型	实心DT4	实心DT4	实心DT4
铁芯长度 (mm)	260	201	180
磁有效长度 (mm)	270	211	190
磁场梯度 (T/m)	74.2	77.2	73.7
好场区半径 (mm)	5	5	5
磁铁孔径 (内接圆直径/mm)	26	26	26
积分磁场高阶分量	$B_3/B_2 \leq 4 \times 10^{-4}$, $B_4/B_2 \leq 4 \times 10^{-4}$, $B_5/B_2 \leq 2 \times 10^{-4}$, $B_n/B_2 \leq 1 \times 10^{-4}$ for $n > 5$		
磁铁间积分磁场离散性 (最大偏离)	0.2%	0.2%	0.2%
是否带绑腿线圈	否	否	否



二、储存环磁铁

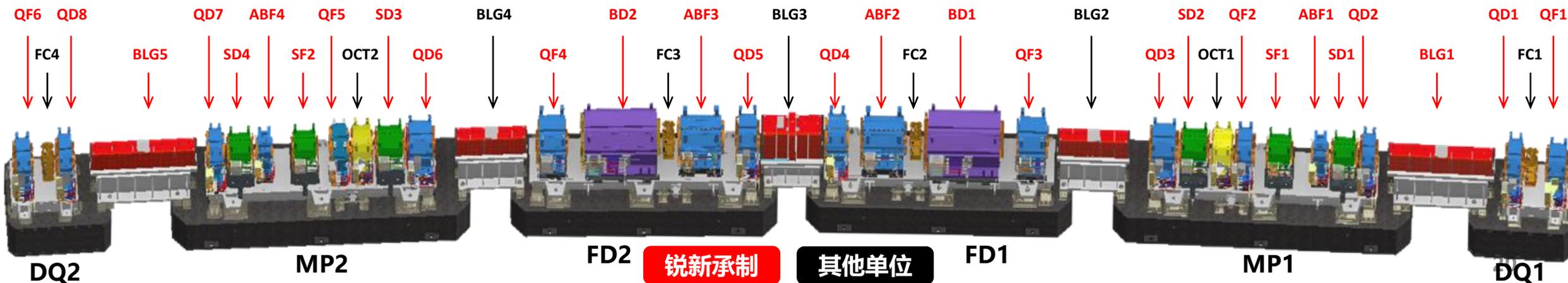
■ 四极磁铁——带校正 (194台)



铁芯结构：四合一
 主体：J23G-50硅钢片
 端板：DT4纯铁

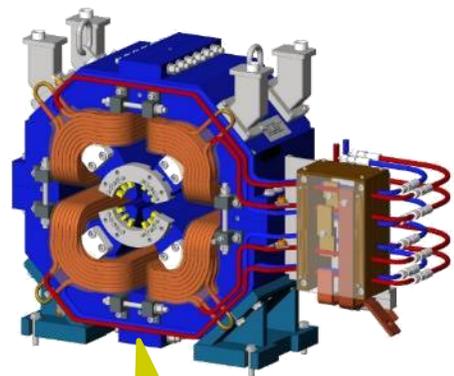
■ 主要技术要求

磁铁名称	QD1/8-192	QD1/8-180	QF3/4
数量 (台)	47+1样机	47+1样机	96+2样机
铁芯类型	叠片铁芯	叠片铁芯	叠片铁芯
铁芯长度 (mm)	192	180	374
磁有效长度 (mm)	202	190	384
磁场梯度 (T/m)	77.4	68.7	79.6
好场区半径 (mm)	5	5	5
磁铁孔径 (内接圆直径/mm)	26	26	26
积分磁场高阶分量	$B_3/B_2 \leq 4 \times 10^{-4}$, $B_4/B_2 \leq 4 \times 10^{-4}$, $B_5/B_2 \leq 2 \times 10^{-4}$, $B_n/B_2 \leq 1 \times 10^{-4}$ for $n > 5$		
磁铁间积分磁场离散性 (最大偏离)	0.2%	0.2%	0.2%
是否带绑腿线圈	是	是	是

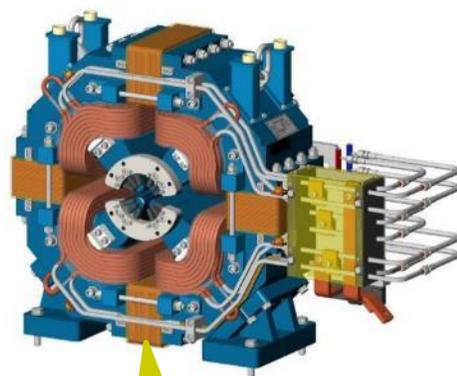


二、储存环磁铁

■ 特殊四极磁铁——4种 (1+1+1+1台)



R02QF6
R48QF1

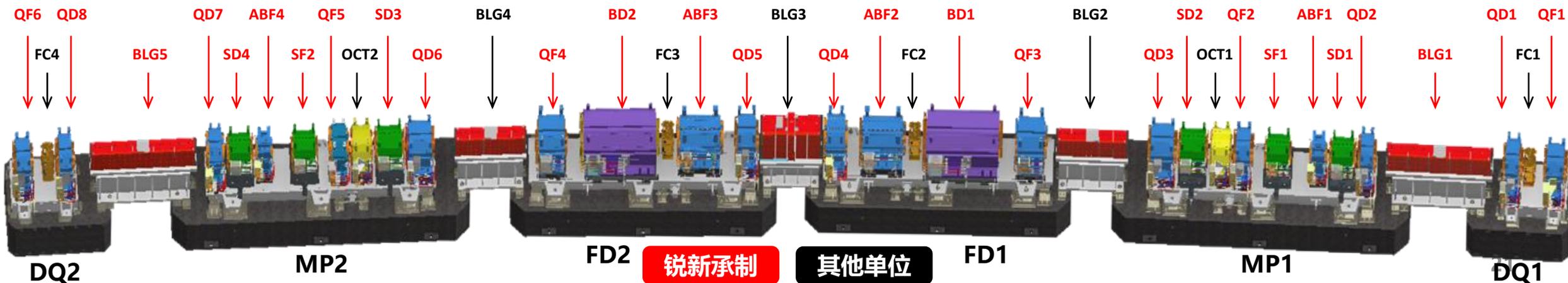


R02QD8
R48QD1

铁芯结构：四合一
主体：DT4纯铁

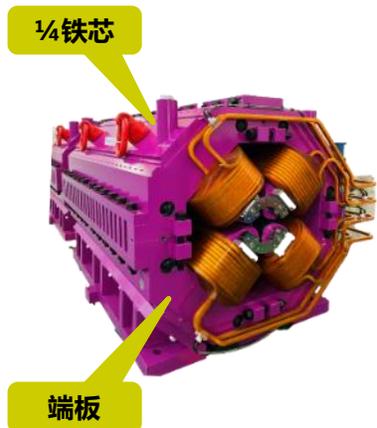
■ 主要技术要求

磁铁名称	R02QF6	R48QF1	R02QD8	R48QD1
数量 (台)	1	1	1	1
铁芯类型	实芯DT4	实芯DT4	实芯DT4	实芯DT4
铁芯长度 (mm)	245	201	192	180
磁有效长度 (mm)	255	211	202	190
磁场梯度 (T/m)	78.2	77.5	77.4	68.7
好场区半径 (mm)	5	5	5	5
磁铁孔径 (内接圆直径/mm)	26	26	26	26
积分磁场高阶分量	$B_3/B_2 \leq 4 \times 10^{-4}$, $B_4/B_2 \leq 4 \times 10^{-4}$, $B_5/B_2 \leq 2 \times 10^{-4}$, $B_n/B_2 \leq 1 \times 10^{-4}$ for $n > 5$			
磁铁间积分磁场离散性 (最大偏离)	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
是否带绑腿线圈	否	否	是	是



二、储存环磁铁

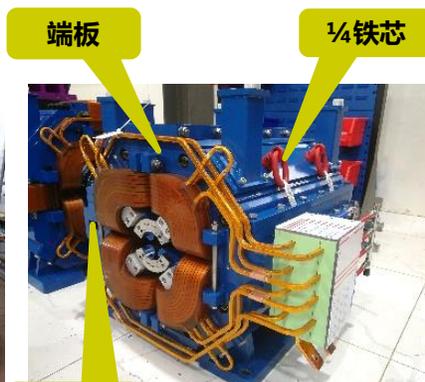
■ 二四极组合磁铁——3种 (98+98+98台)



铁芯结构：四合一
主体：J23G-50硅钢片
端板：DT4纯铁



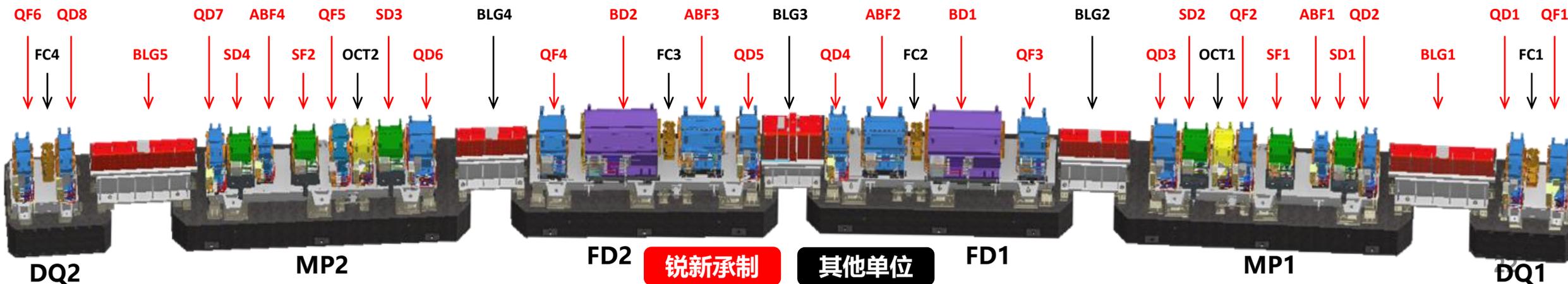
铁芯结构：四合一
主体：DT4纯铁



铁芯结构：八合一
主体：J23G-50硅钢片
轭铁：316L不锈钢
端板：DT4纯铁

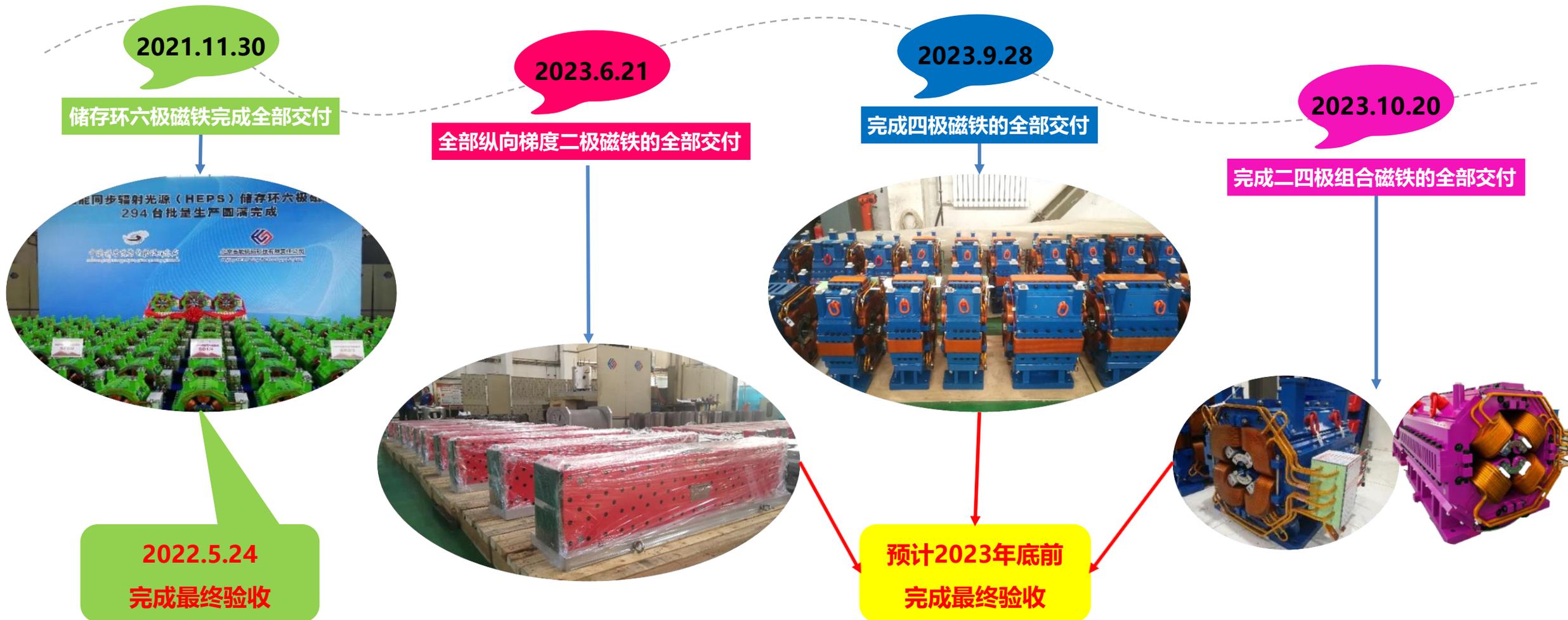
■ 主要技术要求

磁铁名称	BD1/2	ABF1/4	ABF2/3
数量 (台)	96+2样机	96+2样机	96+2样机
铁芯类型	叠片铁芯	叠片铁芯	实芯DT4
铁芯长度 (mm)	1040	590	180
磁有效长度 (mm)	1097.2	179.9	609.9
磁场梯度 (T/m)	34.54	53.43	66.43
好场区半径 (mm)	5	5	5
磁铁孔径 (内接圆直径/mm)	45	30	30
积分磁场高阶分量	$B_3/B_2 \leq 6 \times 10^{-4}$, $B_4/B_2 \leq 6 \times 10^{-4}$, $B_5/B_2 \leq 3 \times 10^{-4}$, $B_n/B_2 \leq 1.5 \times 10^{-4}$ for $n > 5$		
磁铁间积分磁场离散性 (最大偏离)	0.2%	0.2%	0.2%
是否带绑腿线圈	否	否	否



二、储存环磁铁

■ 批量完成情况





03

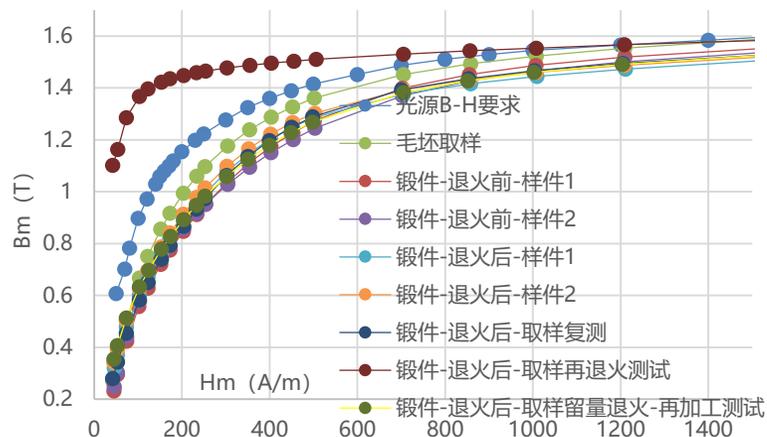
批量生产中的质量控制

一、原材料控制

材料自身性能、不同批次材料之间的性能差异等对磁铁品质有着显著的影响

■ 对于实芯磁铁

■ 铁芯为采购的DT4连铸坯料锻造而成，原材料在不同状态下分别进行取样测试其BH性能



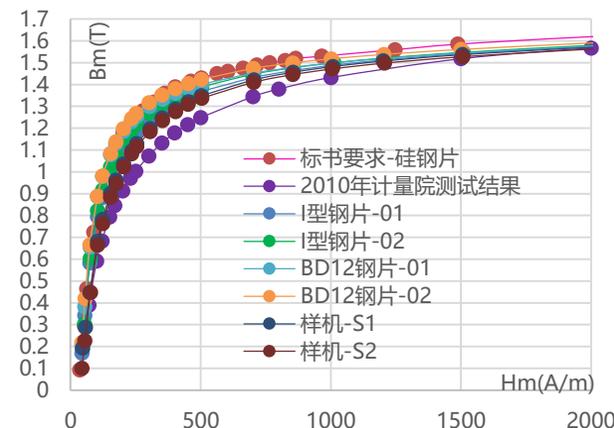
■ 同一型号的磁铁，使用同一批次/炉次的原材料，减小材料之间的性能差异

■ 原材料锻制后统一进行磁化退火处理，确保BH性能要求



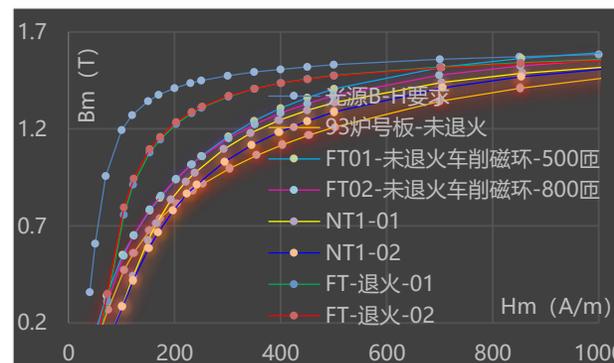
■ 对于叠片磁铁

■ 硅钢片原材料：取样进行BH的测试，并进行充分的掺和



■ DT4端板：同一型号磁铁，使用同一批次/炉次的DT4板，减小材料之间的性能差异

■ 所有原材料，均进行BH取样测试以及下料后的磁化退火处理

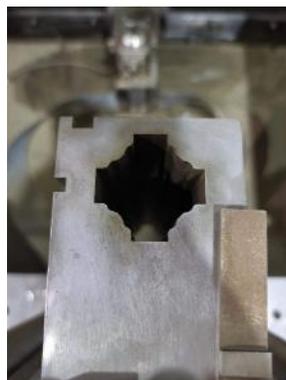


二、加工精度的控制

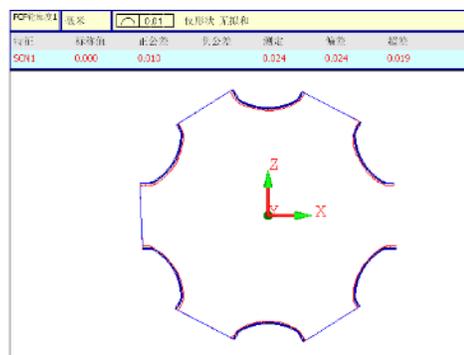
■ 实芯磁铁极面精度的控制—— ± 0.02

■ 采用精密慢走丝线切工艺保证极面精度。

- 正式切割前，多次进行工艺探索，并对试件全面多点测量，保证精切极面轮廓度、直线度优于0.02 mm。



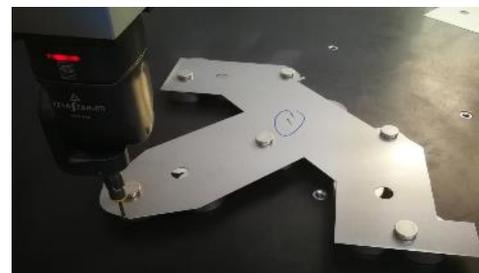
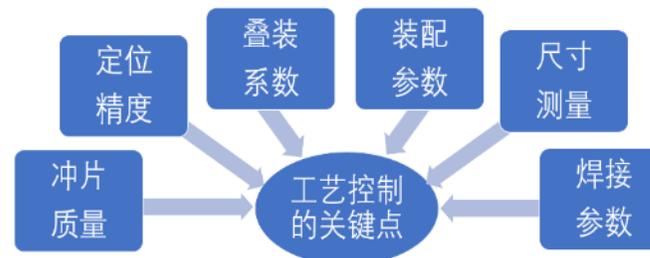
线切实验件



线切后三坐标测试

■ 叠片磁铁极面精度的控制—— ± 0.03

■ 冲片、叠装模具、叠装工艺流程，是保障叠片磁铁极面精度的三个关键



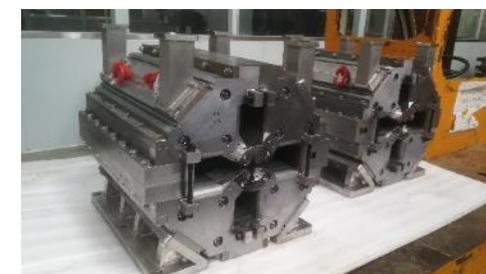
冲片三坐标检测



1/4铁芯叠装



半铁芯



整铁芯

三、外观与质检的控制

■ 部件外观的控制

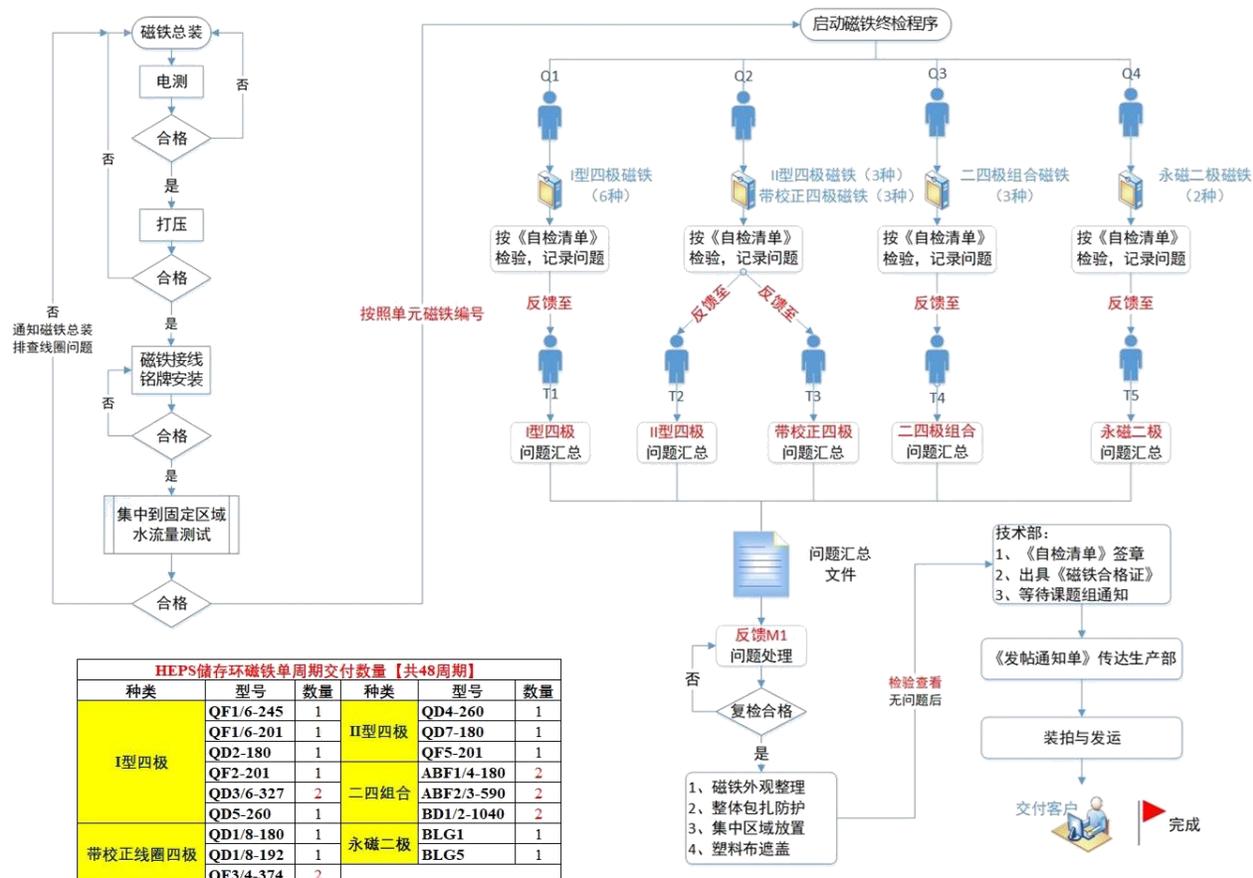
- 铁芯喷漆的质量
- 线圈环氧浇注后的表面质量
- 磁铁配件的表面处理：铝件、G10件、不锈钢件、铜电排件等



■ 质检控制

- 落实人员的责任制，制定严格的质检流程

HEPS储存环磁铁·终检流程图





04

遇到的问题与挑战

一、遇到的问题与实验研究

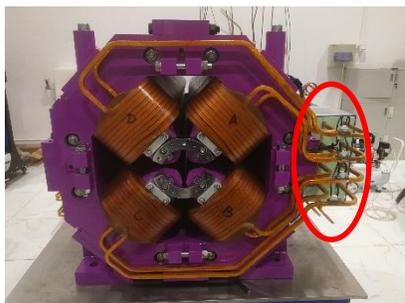
■ 线圈温控开关问题

■ 温控开关的初始设计

- 二四极、四极磁铁，六极磁铁的温控开关距离线圈很远，对线圈温升不敏感
- 水路流量减小时可以起到保护作用，水路完全堵塞或者未供水时，存在线圈过温风险

■ 问题的发现

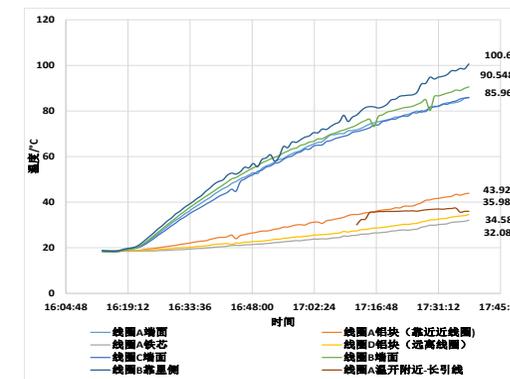
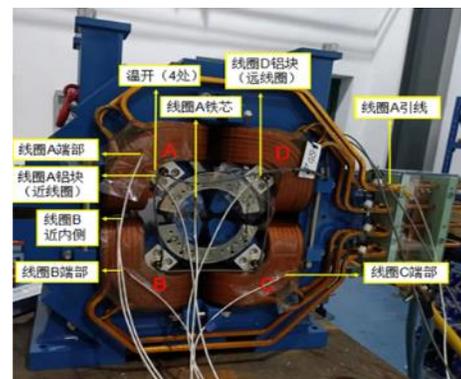
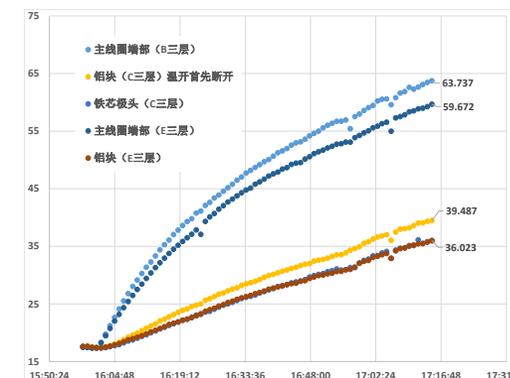
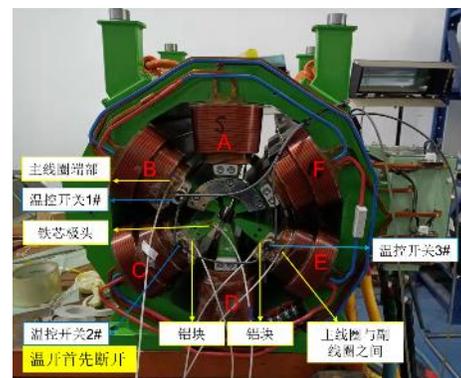
- 储存环六极磁铁在进行某一台磁测时，未开水直接加电测试，线圈过热导致铁芯温度上升，磁场指标出现异常



■ 磁铁断水通电实验

■ 在磁铁不同位置粘贴温度传感器，分别测试在线圈无水干烧、有水堵塞、有水正常流动情况下加电后的线圈温升情况

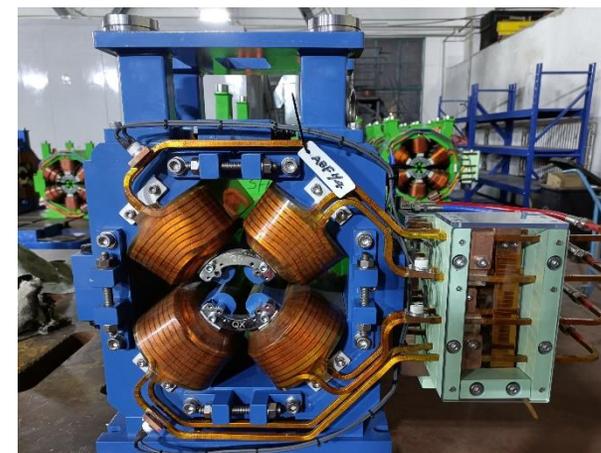
- 以控制线圈温度小于100°C为条件
- 寻找合适的温控安装点位



一、遇到的问题与实验研究

■ 线圈温控安装位置的改进

- 根据实验结果，调整温开位置与动作温度



■ 二四极组合磁铁拆装重复性研究

■ 问题的发现

- 常磁铁预准直安装实验时，发现BD1/2和ABF2/3激光跟踪仪测得的靶标球坐标与测磁三坐标测得的数据不符
- 两种磁铁都是非粘接的叠片结构，且体型较大

磁铁类型	BD1/2	ABF2/3
磁铁孔径 (mm)	45	30
铁芯长度 (mm)	1040	590
铁芯截面 (mm)	640*640	480*480
铁芯结构	1/4铁芯	1/4铁芯 + 不锈钢垫块
铁芯材料	硅钢片/非粘接	

■ 磁铁拆装形式

■ 三种拆装形式

- 松紧拆装
- 原位拆装
- 分离拆装

■ 多靶标姿态监控



BD1/2姿态定位
110靶标



ABF2/3姿态定位
64靶标



BD1/2原位拆装



ABF2/3原位拆装



BD1/2分离拆装

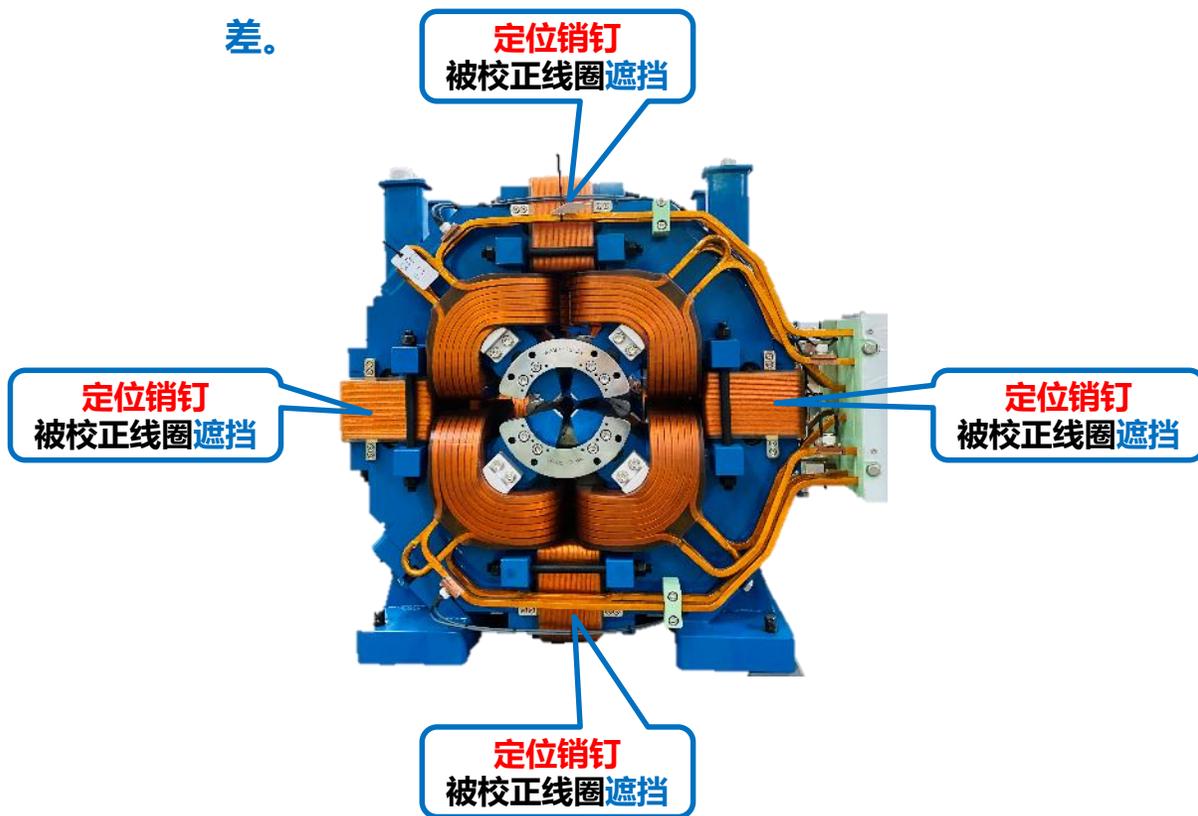
- 根据实验结果，制定了两种磁铁总装后**静置-拆装-测试**的工艺规范

一、遇到的问题与实验研究

■ 带校正线圈四极QF3/4重复拆装问题

■ 问题:

- QF3/4磁铁铁芯较厚，线圈较大， $\frac{1}{4}$ 铁芯结合处的定位销钉因校正线圈的遮挡，相比同类型的两款薄铁在重复性拆装上，容易出现**机械数据的不重复，从而引起磁场谐波的超差。**

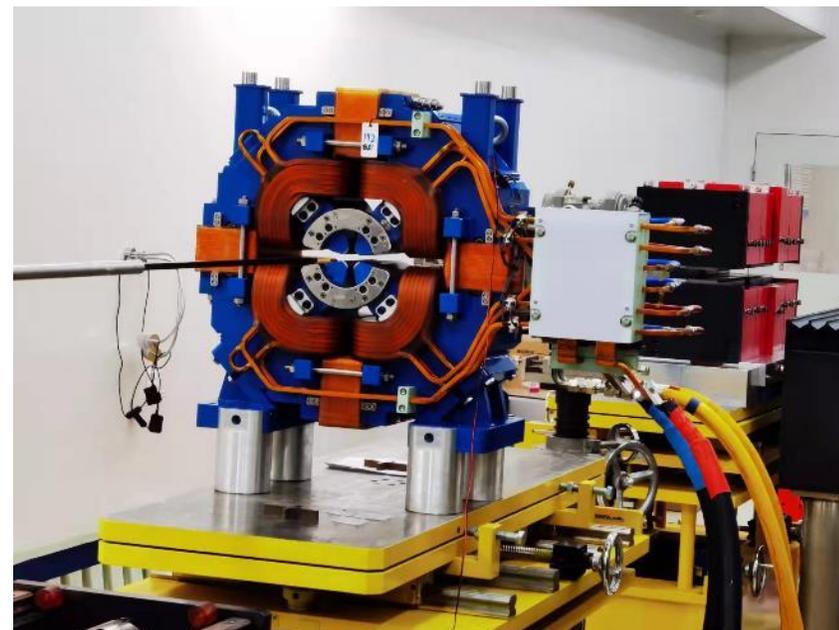


■ 总装工艺的改进

■ 增加QF34磁铁的装配次数:

- 先不装校正线圈，测试机械数据;
- 再以套装校正线圈后的机械数据重复后确定总装的合格性。

■ 工艺改进后的QF3/4磁铁，磁测全部合格



一、遇到的问题与实验研究

部分实芯四极磁铁磁测谐波超差的问题

问题:

- II型实芯四极磁铁, 磁测时在QD7与QF5型号上出现多次的谐波超差的问题

从原材料方面分析:

- 按照GB测试, 原材料的BH性能满足要求

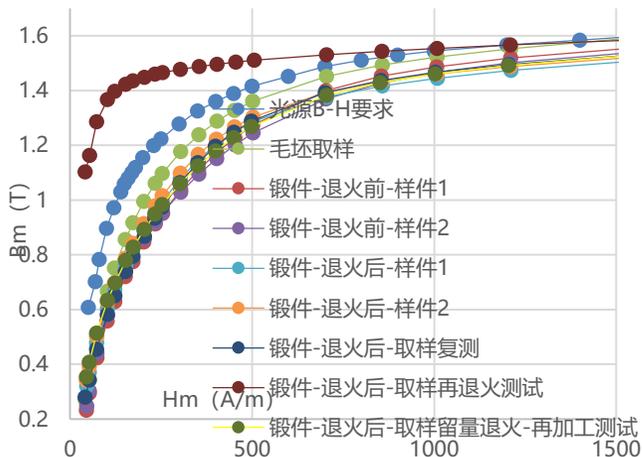
从磁铁机械数据精度分析:

- 实芯磁铁的谐波超差与机械数据的相关性不明显

进行了各种磁测实验:

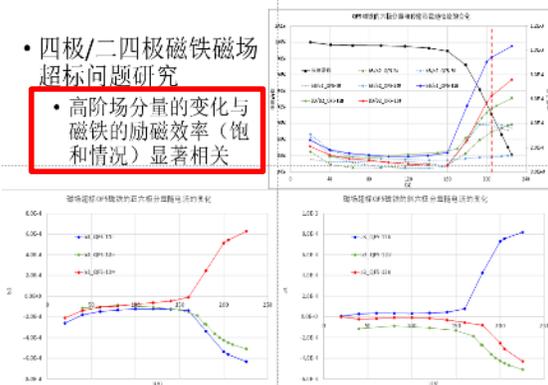
- 排除了磁铁结构、不锈钢轭铁、标准件材质等各种因素

气隙	08#	10#	11#	13#	21#	16#	19#	23#	26#	28#	29#	42#	45#
Gap41Z-	-0.009	-0.008	-0.001	-0.011	0.002	-0.018	0	-0.004	0.006	-0.012	0.006	0.016	0
Gap12Z-	0.025	0.018	0.012	0.014	0.003	0.018	0.009	0.016	0.016	0.014	0.037	0.014	0.016
Gap23Z-	-0.01	-0.005	-0.003	-0.006	-0.005	-0.018	-0.002	-0.014	0.003	-0.004	0.007	0.009	0.002
Gap34Z-	0.01	0.012	0.018	0.023	0.019	0.019	0.007	0.019	0.001	0.012	0.009	0.024	0.02
Gap41Z+	-0.013	-0.003	-0.012	-0.008	0.016	-0.019	-0.001	-0.003	-0.001	-0.001	0.003	0.012	0
Gap12Z+	0.017	0.011	0.011	0.016	0.001	0.01	0.008	0.014	0.009	0.013	0.042	0.006	0.015
Gap23Z+	-0.016	-0.003	-0.004	-0.005	-0.011	-0.014	-0.007	-0.005	-0.008	-0.01	0.005	0.006	0
Gap34Z+	0.011	-0.004	0.011	0.026	0.018	0.015	0.01	0.015	-0.003	0.009	0	0.014	0.017

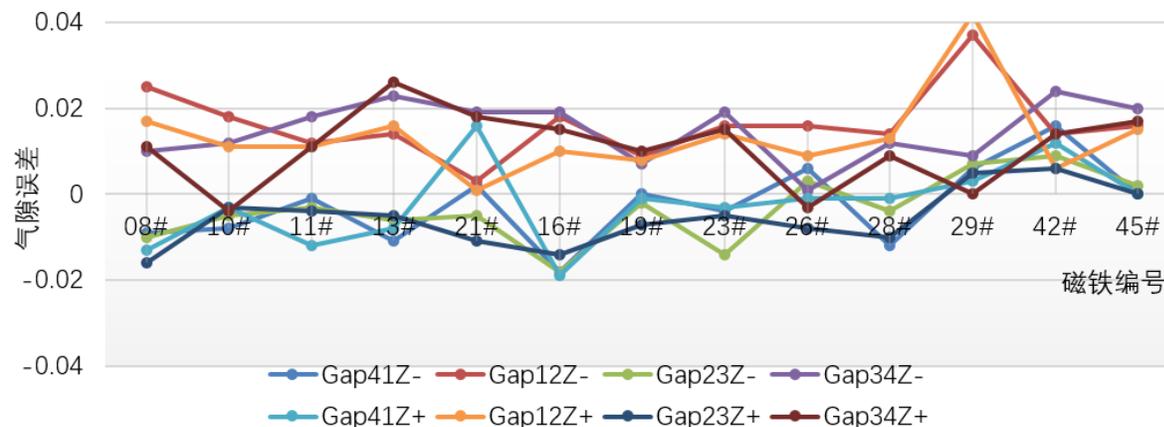


储存环磁铁进展

- 四极/二四极磁铁磁场超标问题研究
- 高阶场分量的变化与磁铁的励磁效率(饱和情况)显著相关



13台磁测不合格QD7磁铁三坐标数据图



高电流下的材料磁饱和(励磁效率)、同磁铁不同铁芯原材料的性能差异与高阶场分量的变化显著相关!
该问题在后续的磁铁研制中我们将会持续关注。

二、产能的优化

■ 核心工作公司内部完成

- 叠片磁铁冲片的检测、铁芯叠装与加工
- 实芯磁铁极面精切
- 线圈加工制作与检测
- 磁铁总装与重复性拆装等



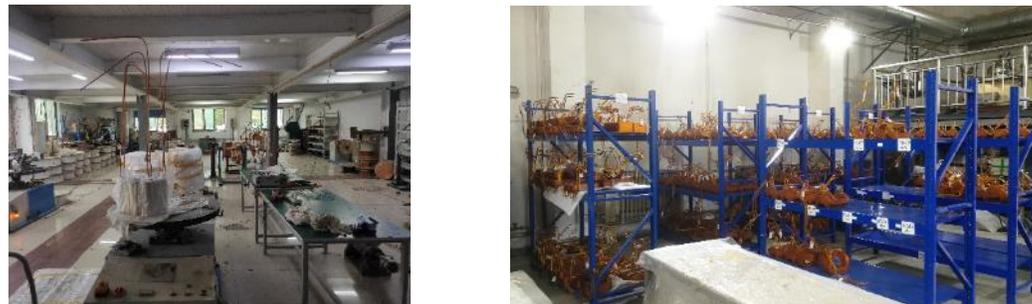
■ 合理有效性的开展外协协作

- 如磁铁配件、附件的加工
- 铁芯喷漆
- 冲片的批量冲制



■ 开辟线圈生产基地

- 磁铁线圈技术的转化，扩大生产产能



■ 引进机器人进行铁芯焊接

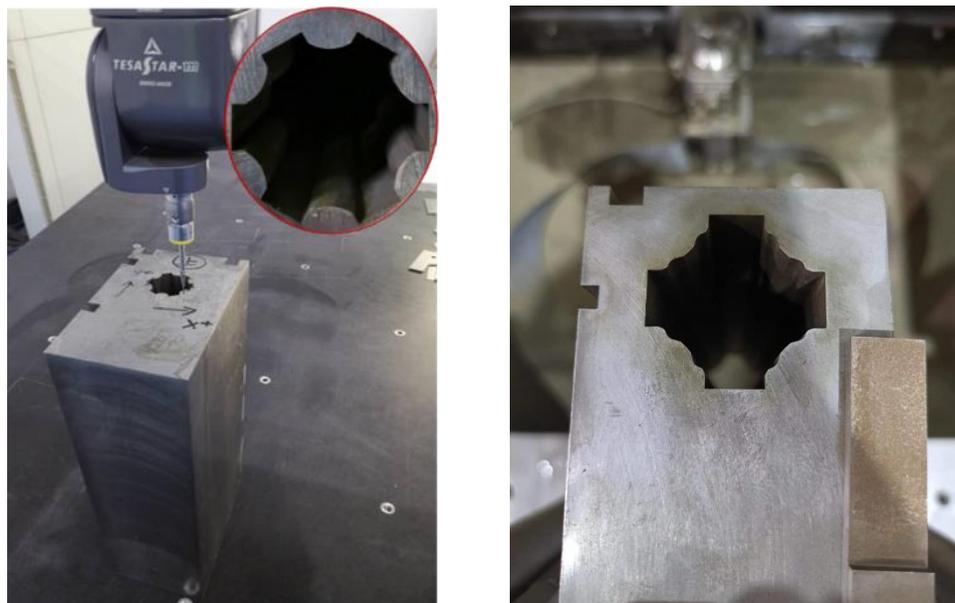
- 引入工业机器人进行长铁芯焊接时，表现出其优越性
 - 速度远超手工焊接，效率提升明显；
 - 热量小，热应力、应变远小于手工焊接，焊接质量稳定；
 - 可实现连续焊接，强度优于断续焊焊接。



三、技术工艺的创新

■ 实芯磁铁的扫边切割工艺

- 研究实芯磁铁极头轮廓不同留量情况下的线切效率问题

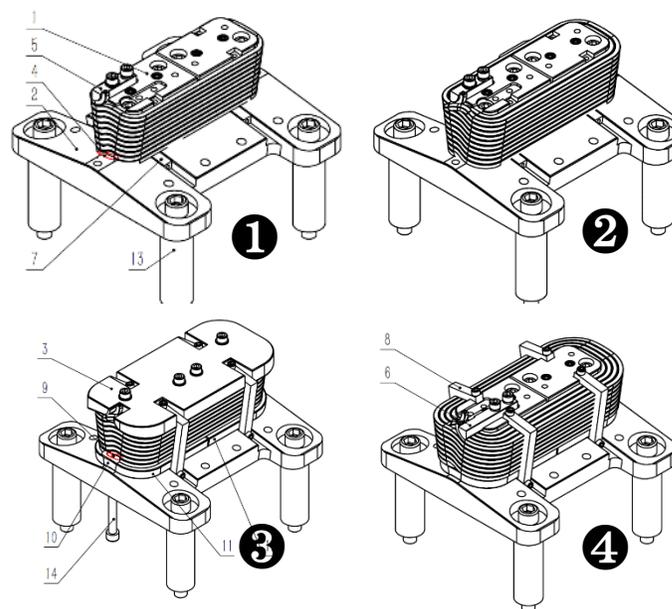


储存环六极/四极磁铁线切效率提升工艺实验

- 采用扫边的切割工艺技术：
- 储存环六极磁铁——实现了1.5台/天的切割效率提升
- 储存环四极磁铁——实现了1台/天的切割效率提升

■ 一种立式线圈的卷绕装置

- 实现单根多层 (> 2) 线圈的一次性绕制，相对于卧式线圈卷绕更好的保证线圈的外形

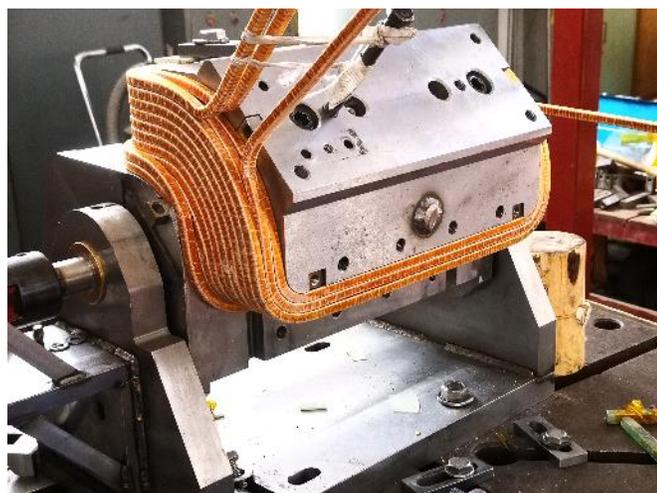
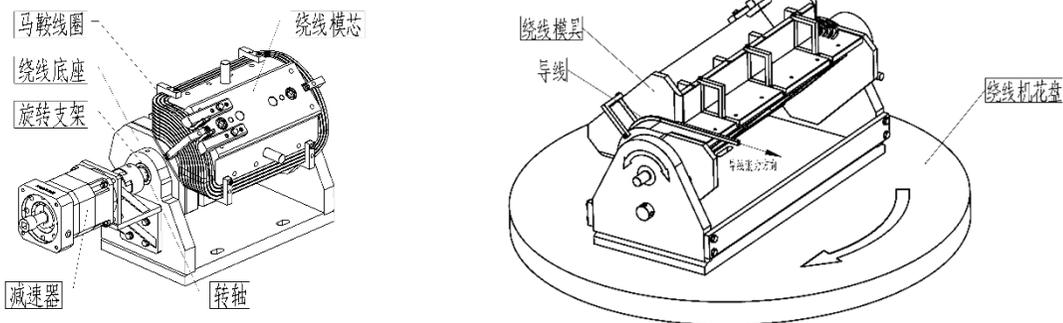


三、技术创新

■ 马鞍形线圈的绕制成型

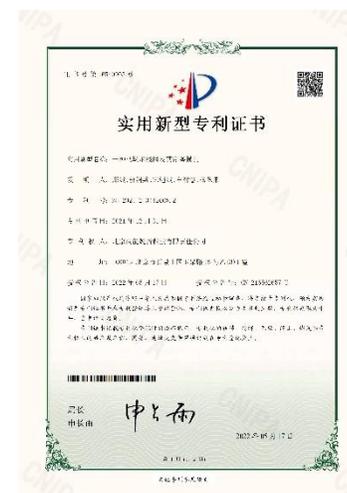
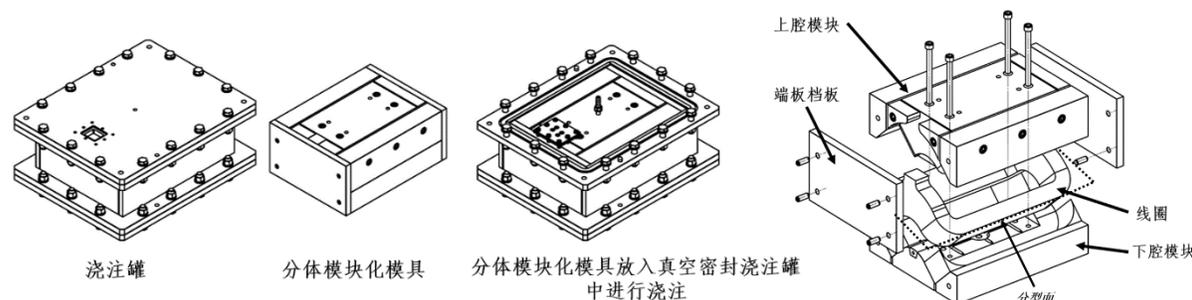
■ 研究一种马鞍形线圈绕制的新型模具

- 提高马鞍形线圈绕制效率。
- 增强马鞍形线圈绕制质量



■ 马鞍形线圈分体模块化型腔的浇注模具

- 分体模块化模具用于形成符合线圈外形特征的型腔，浇注罐则用于提供密封的真空空间，将模块化模具放入其中进行抽真空处理，进而环氧灌入模具，完成线圈的浇注。

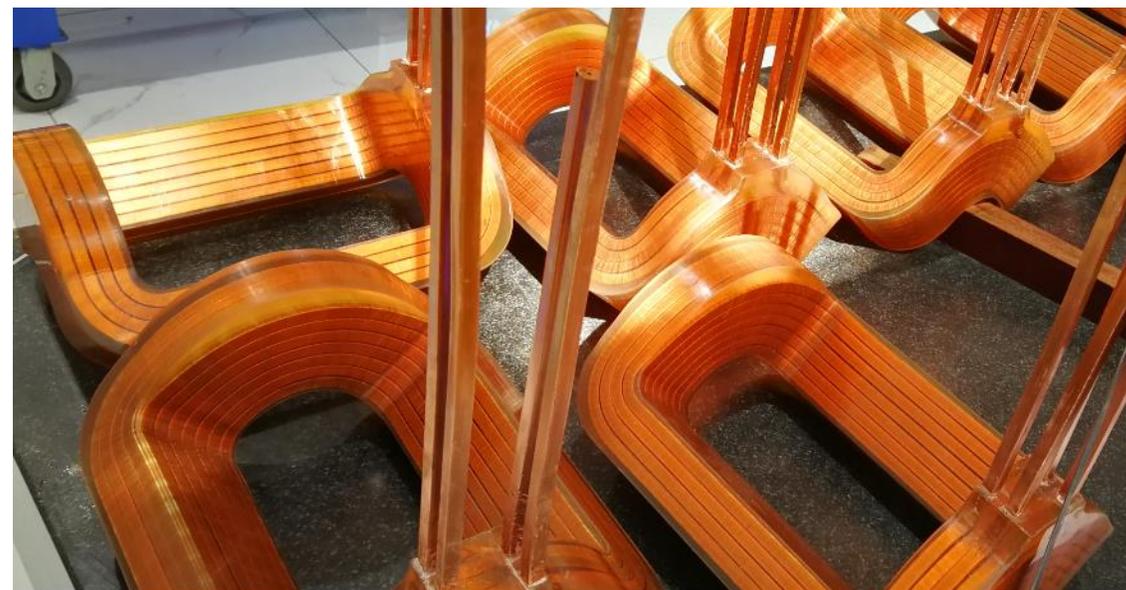


三、技术创新

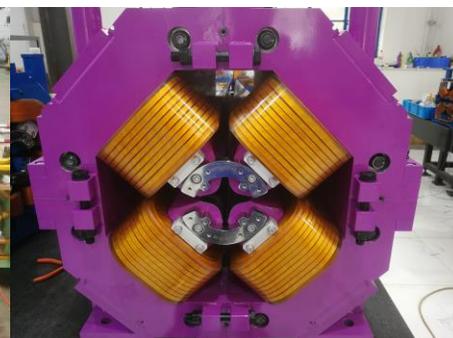
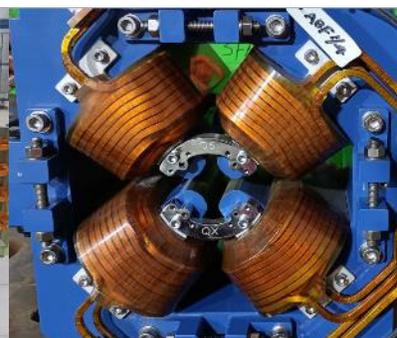
■ 线圈环氧浇注配方的摸索

- 研究线圈环氧浇注材料的配比对提高线圈浇注质量的影响
- 提高线圈浇注后的表面质量
- 探索环氧材料的国产替代
 - 目前已实现3种材料在磁铁线圈环氧浇注上的国产替代

线圈浇注后的表面质量



配料	厂商
#DER331双酚A环氧树脂	陶氏化学
#DER736聚二醇塑性树脂	陶氏化学
固化剂NMA	CEBA Co. 瑞士
增韧剂F100	陶氏化学
催化剂DMP-30	Fluka Co. 德国





05

总结与展望

■ 小结

- 自2019年12月以来，历时3年，公司圆满完成了所承制HEPS各型号共计**1572台**磁铁的研制和生产任务
- 在磁铁研制与生产中，通过**发现问题-分析问题-解决问题**，对于**高梯度高精度小孔径磁铁**的加工制造积累了丰厚的技术实力和宝贵经验，尤其是具备了**大批量制造高梯度高精度小孔径磁铁**的能力。
- 在加速器磁铁领域，公司多年来一直致力于将磁铁产品无论从**性能质量**，还是**外观**方面做到最好，这点在先前的BEPC/BEPCII/CSNS工程上我们做到了，如今在HEPS工程上我们将**磁铁的整体质量**又一次**提前迈上了新台阶**。

我们的目标绝不仅仅是研制出光源所需要的各种高性能磁铁，而是要借着光源建设的机遇，发展加速器磁铁的新理念和新技术。

IHEP加速器中心磁铁组组长 研究员

HEPS储存环磁铁系统负责人

陈福三

2、未来展望

■ 高梯度高精度小孔径磁铁未来面向的大科学装置





谢谢，敬请批评指正！



北京高能锐新科技有限责任公司

Beijing HE-Racing Technology Co.,Ltd.

北京高能锐新科技有限责任公司（前身为中国科学院高能物理研究所实验工厂）是国内外知名的大科学装置关键设备生产企业，也是大科学装置产品与技术涉及面最广的制造商之一。依托国内外大科学装置建设以及长期的高能物理合作积累的技术和经验，创建了一支强大的技术队伍和生产队伍，拥有完备的生产和测试条件。产品涵盖磁铁、加速结构、电真空器件与超导腔等，可提供加速器设备设计、加工、测试、安装、运维等全链条服务体系。

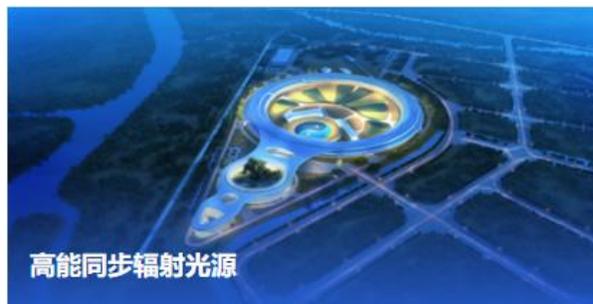
■ 面向国家大科学工程装置



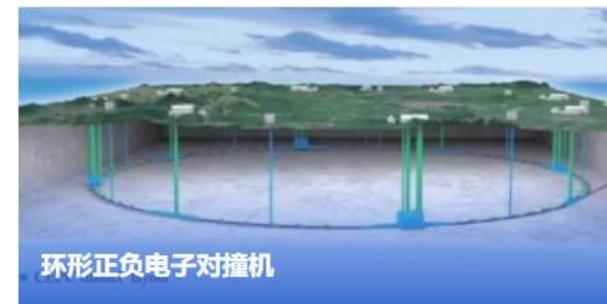
北京正负电子对撞机



中国散裂中子源



高能同步辐射光源



环形正负电子对撞机

■ 涉及产品——磁铁、加速管、耦合器、电真空、超导腔与模组集成等领域



BEPC II



CSNS



CSNS DTL



HEPS 加速管 (2998.8 MHz)



RFQ (180 MHz)



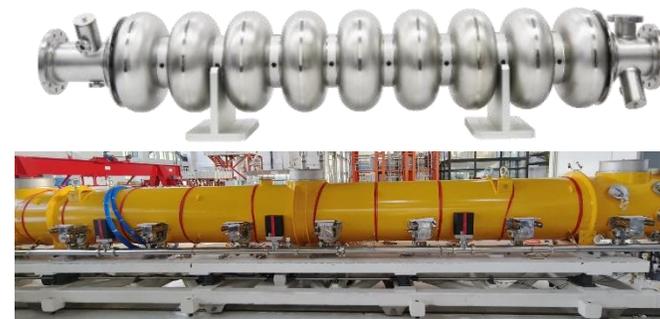
DTL (80 MHz)



高能同步辐射光源 (HEPS) -增强器与储存环磁铁



耦合器



1.3GHz 9 Cell 超导腔与模组集成

■ 国内外知名院校、重点实验室

