

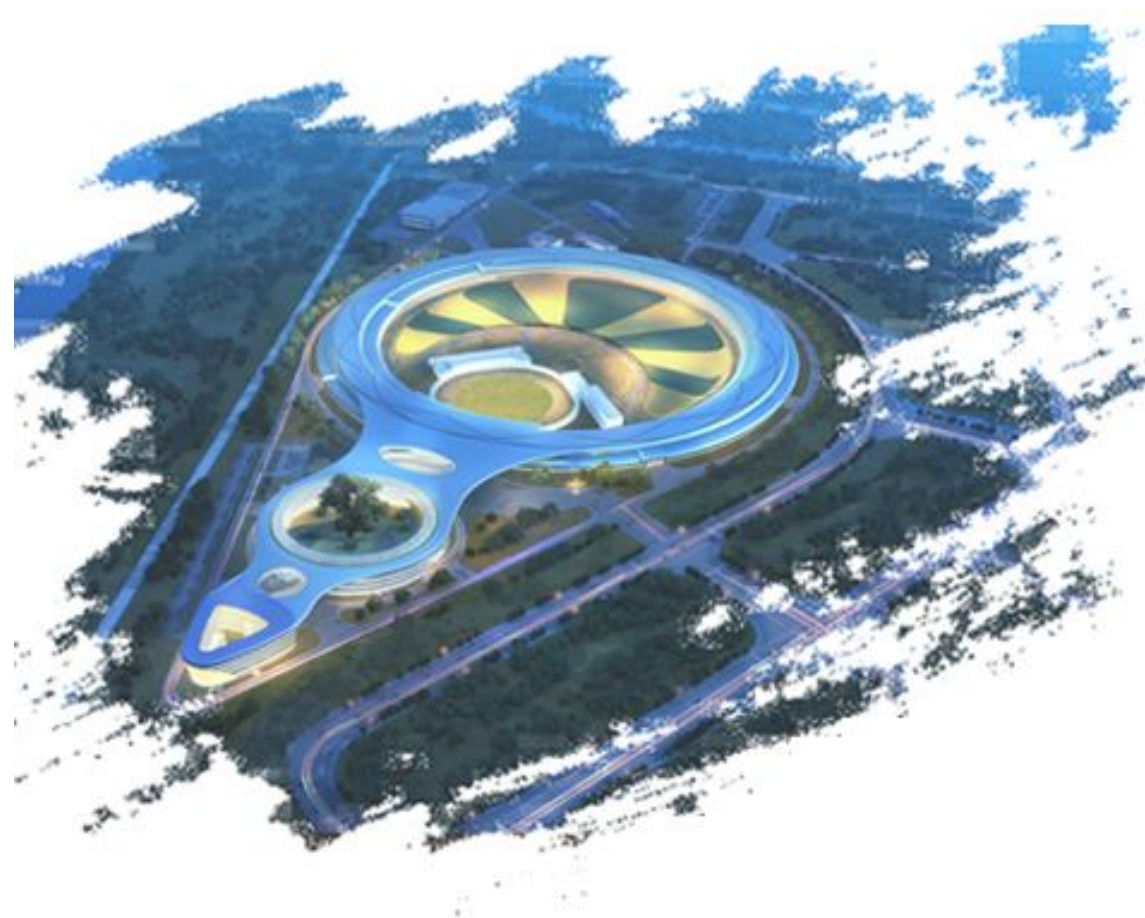
HEPS工程进展

焦 毅

中国科学院高能物理研究所

Jiaoyi@ihep.ac.cn

2026年超级陶粲装置国内研讨会 西安



汇报内容

- 01 概 述
- 02 加速器物理与技术
- 03 光源束流调试
- 04 光源试运行
- 05 总 结



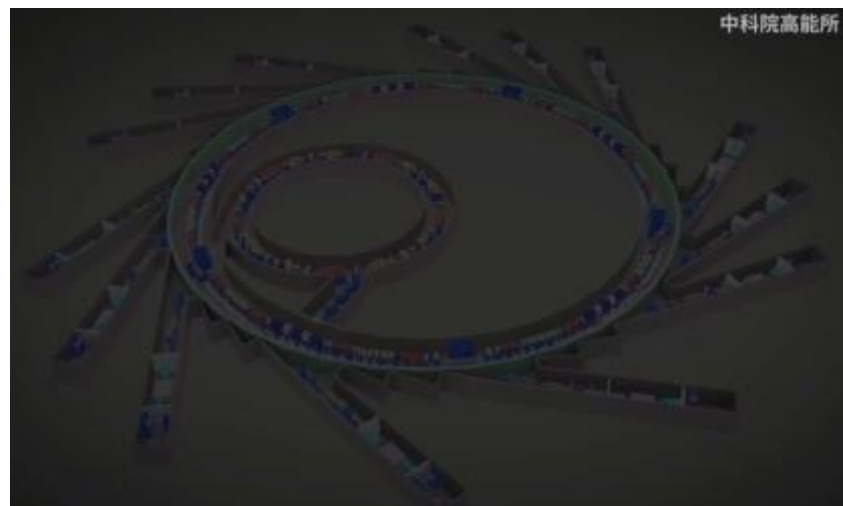
概述



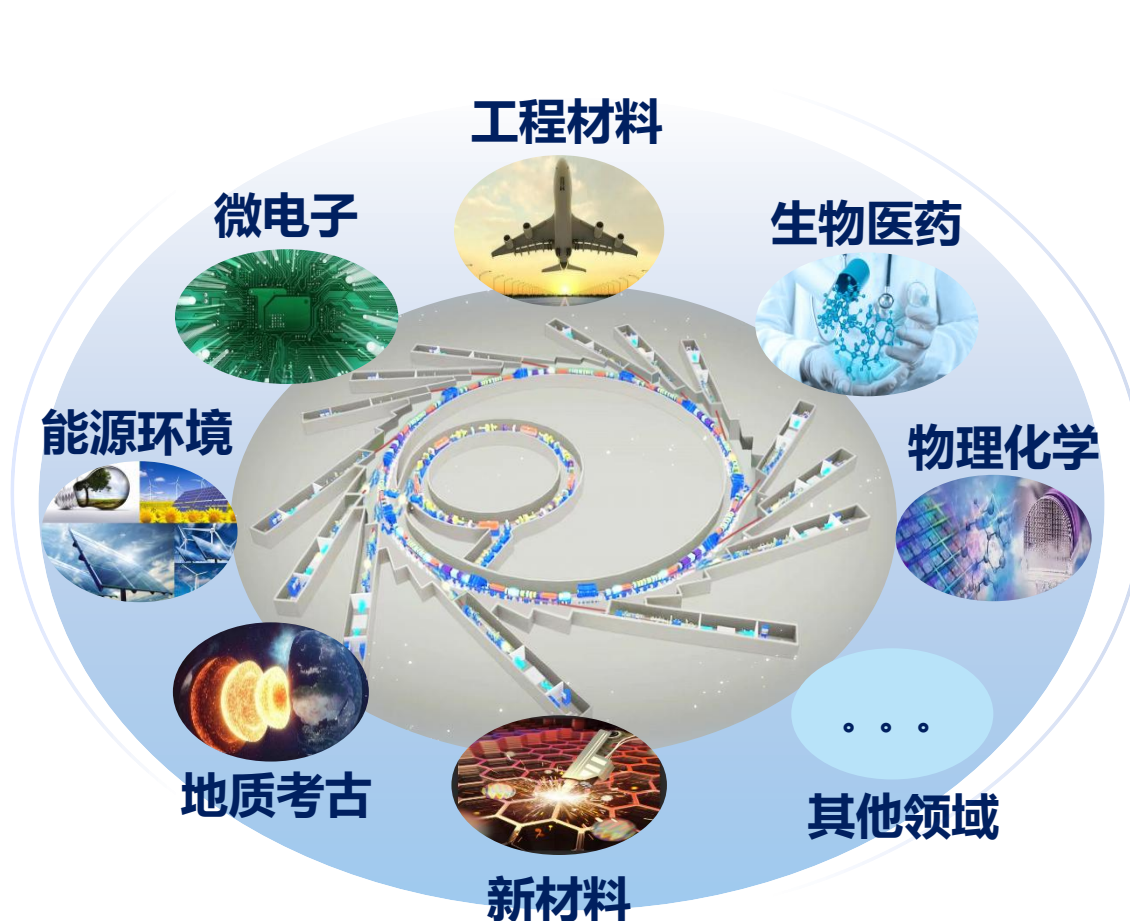
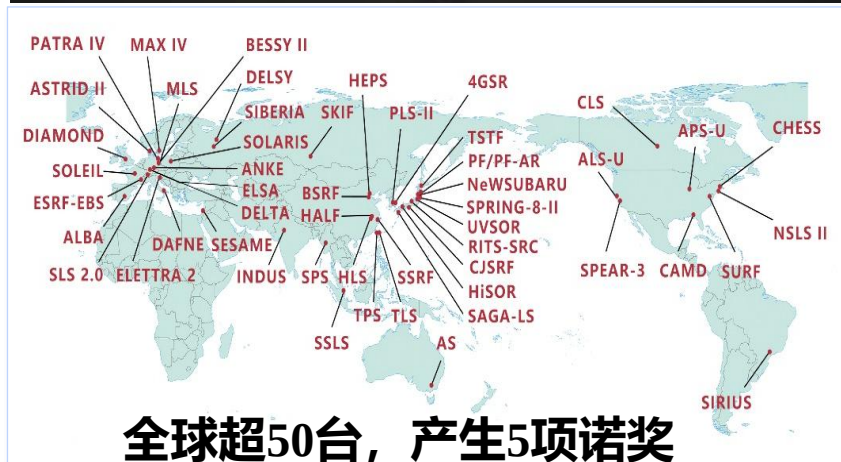


基础研究领域应用最广、性能优异的X射线源

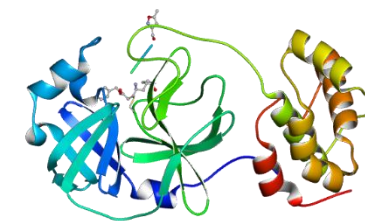
集中体现国家综合科技实力的标志性大科学装置



中科院高能所



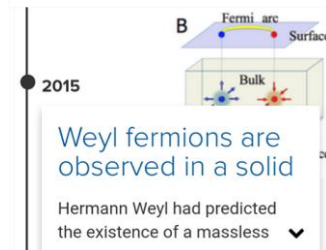
基础前沿探索，国家重大需求，产业核心问题



新冠病毒蛋白酶
结构解析

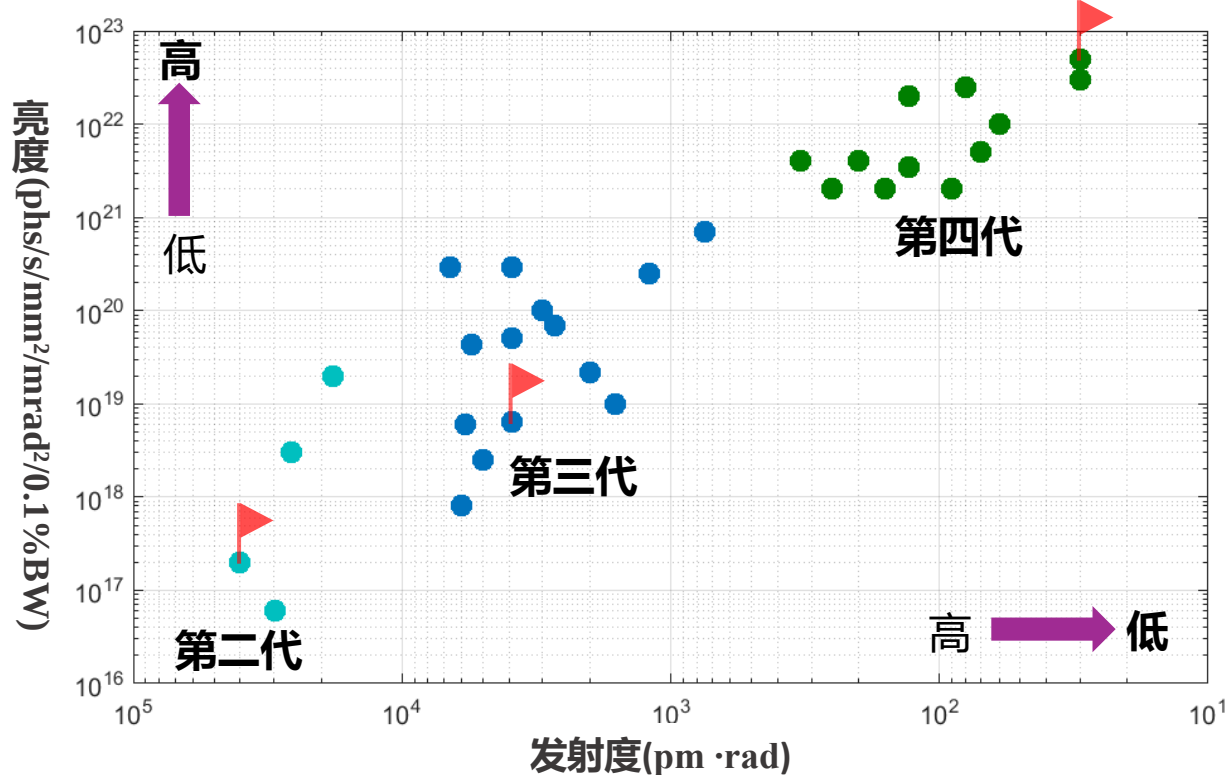
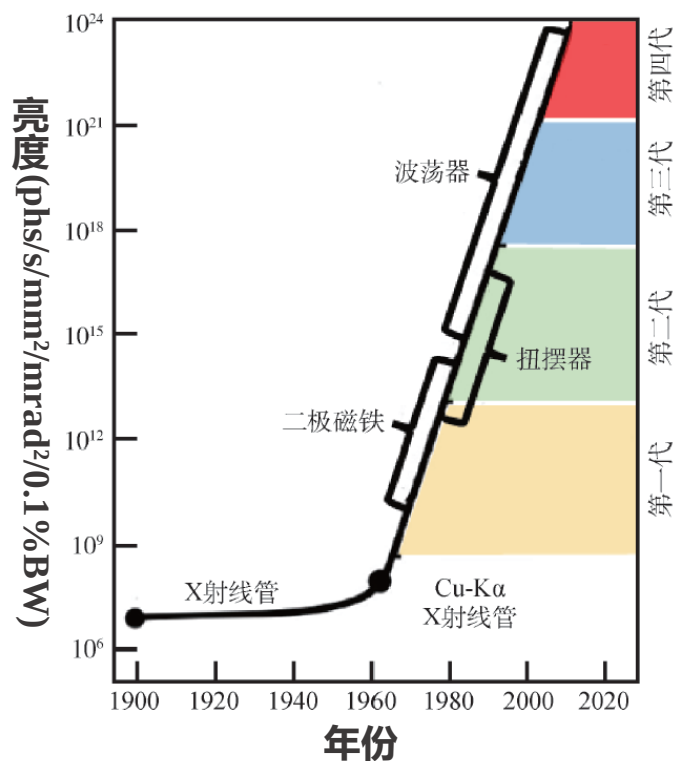
PHYSICAL
REVIEW
JOURNALS 125
YEARS

Celebrating 125 years of the
Physical Review



发现外尔费米子
2015年国际物理学
八大标志性成果

- 光源核心性能：电子束**发射度**、同步辐射**亮度**
- 我国成功建成首台第四代同步辐射光源HEPS，跻身国际领先行列





高能同步辐射光源HEPS

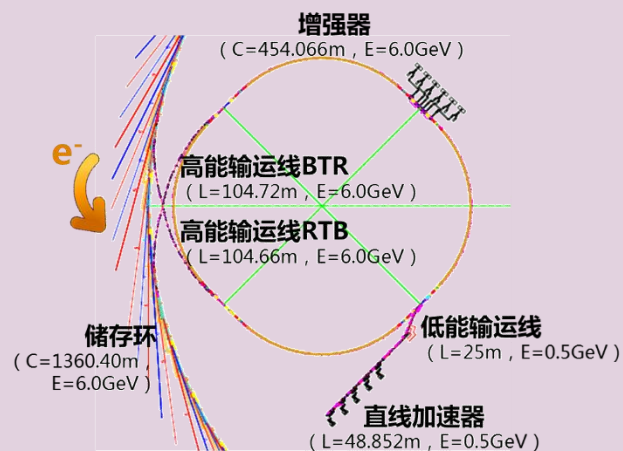
- 国家“十三五”重大科技基础设施
- 中国科学院高能物理研究所承建
- 总投资47.6亿，占地976亩

- 中国首台高能区同步辐射光源
- 亚洲首台第四代同步辐射光源
- 世界最亮的同步辐射光源之一



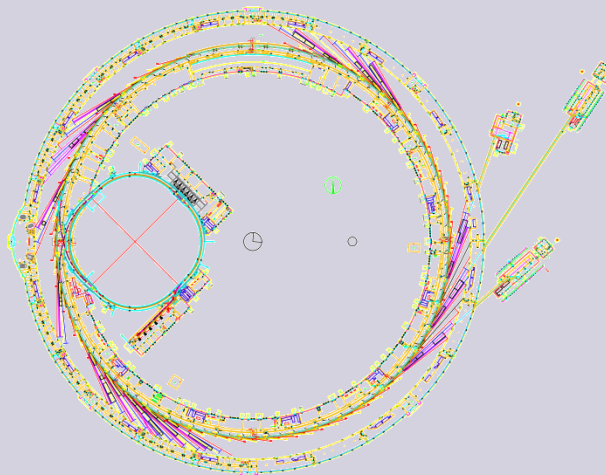
加速器

- 电子能量**6GeV**的储存环
- 为储存环提供束流的直线加速器、输运线和增强器等



光束线站

- 光束线站首批建设**14条**用户光束线和相应的实验站等



配套设施

- 主体环形同步辐射光源实验建筑、配套附属建筑物，以及供水、供电、空调、辐射防护等通用设施。





HEPS主要指标

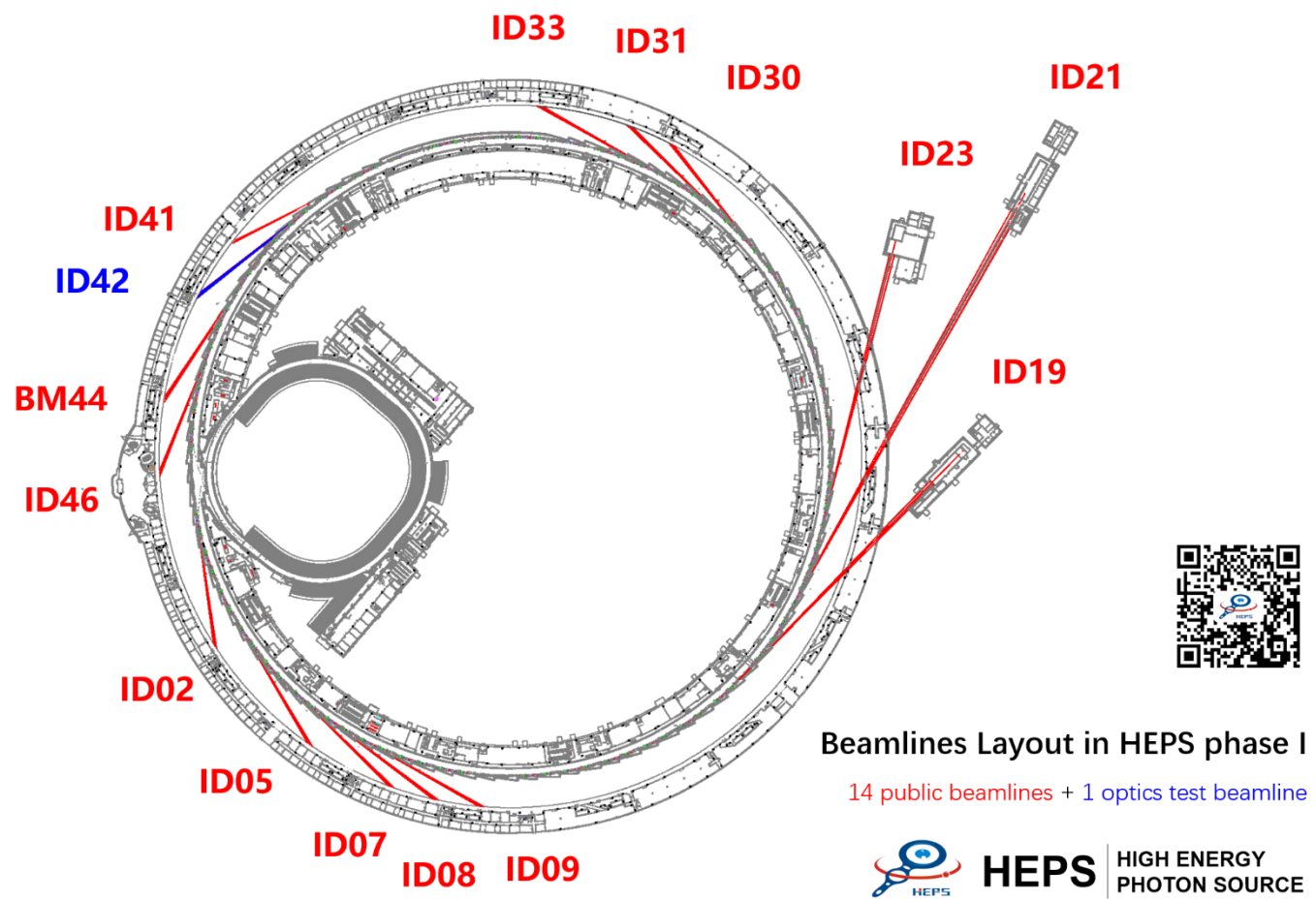
储存环周长	1360.4	m
能 量	6	GeV
发 射 度	≤ 0.06	nm·rad
亮 度	$> 1 \times 10^{22}$	phs/s/mm ² /mrad ² /0.1%BW
最多可容纳线站数	≥ 90	首期14条
供光能量范围	0.1-300	keV



- 1) 高亮度模式: 680束团, 相邻束团间隔6ns
- 2) 高电荷量模式, 63束团均匀填充, 束团间隔72ns

12实验大厅内

3超长线

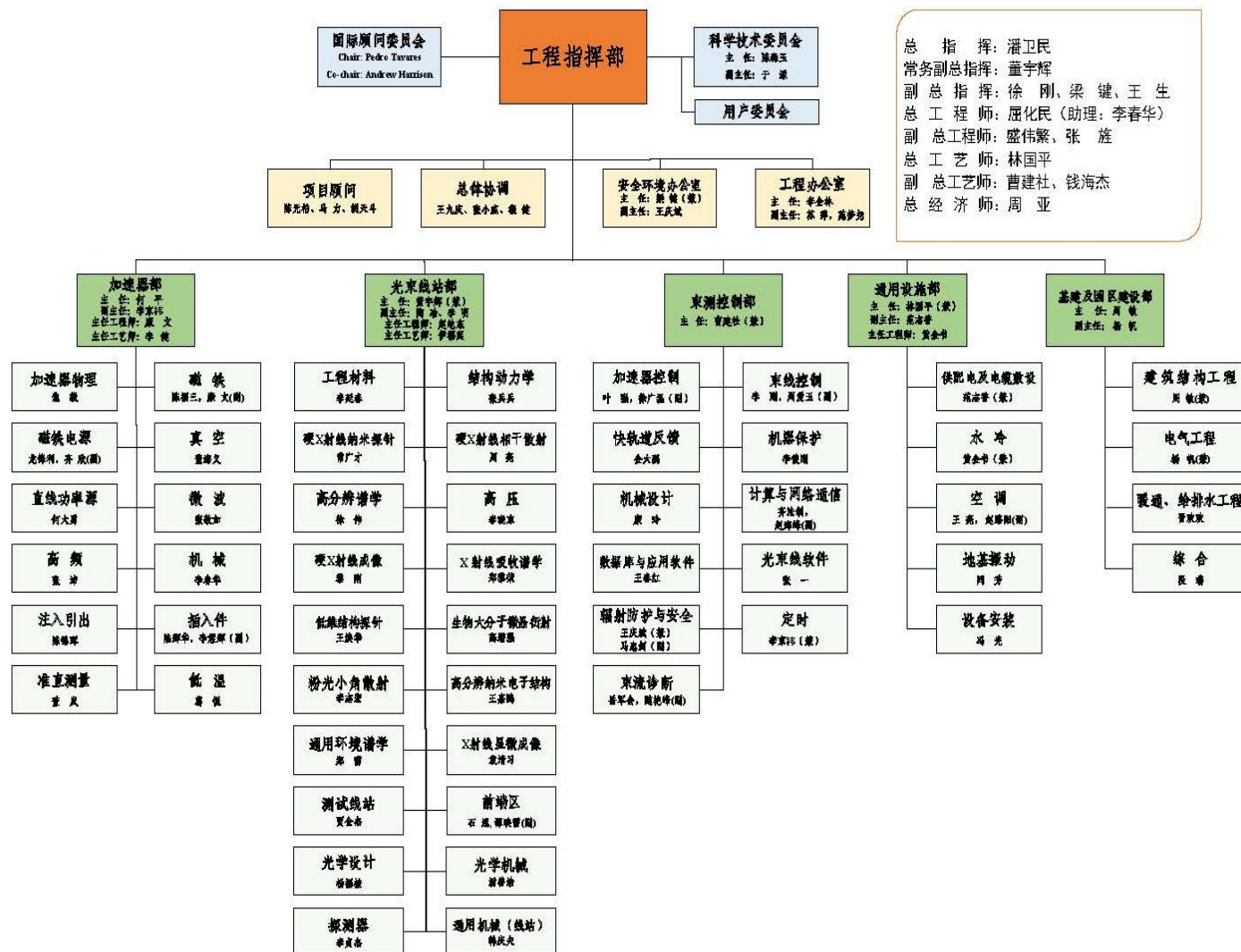


序号	线站名称	国家需求	工业应用	可持续发展	科学前沿	高能	低发射度	用户广泛
1	工程材料线站	√	√	√		√	√	√
2	硬X射线纳米探针线站			√	√	√	√	
3	结构动力学线站	√	√		√	√	√	√
4	硬X射线相干散射线站				√	√	√	
5	高分辨谱学线站	√			√	√	√	
6	高压线站	√			√	√	√	√
7	硬X射线成像线站	√	√		√	√	√	√
8	X射线吸收谱学线站			√	√			√
9	低维结构探针线站	√		√	√			√
10	生物大分子微晶衍射线站	√		√	√			√
11	粉光小角散射线站	√	√		√			√
12	高分辨纳米电子结构线站		√		√		√	√
13	通用环境谱学线站			√	√			√
14	X射线显微成像线站		√	√	√			√



5个分总体 52个系统

- **加速器部 (12)**：物理、磁铁、电源、真空、直线功率源、微波、机械、高频、注入引出、插入件、低温、准直等
- **光束线站部 (20)**：15个线站系统+5个横向系统（光学设计、探测器、通用机械等）
- **束测控制部 (11)**：束流诊断系统、加速器控制、光束线控制、计算与网络通信、定时、光束线软件等
- **通用设施部 (5)**：供配电及电缆敷设、水冷、空调、设备安装、防微振
- **基建及园区建设部 (4)**：建筑结构工程、电气、暖通给排水、综合





HEPS项目建设总体进展

大事记



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



2022年5月12日
直线加速器全线真空封接



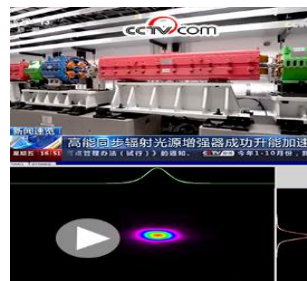
2023年1月13日
增强器全线贯通



2023年2月1日
储存环隧道设备安装启动



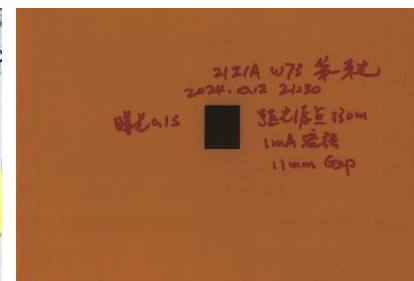
2023年3月14日
直线加速器成功出束
2023年6月5日通过验收



2023年11月17日
增强器成功升能加速，
通过工艺测试和验收



2024年7月1日储存环真空封接，
全环贯通；7月23日，储存环正式
开机调束

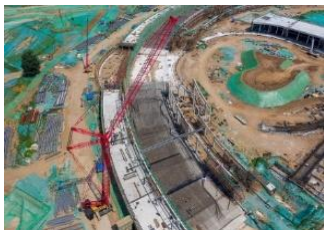


2024年10月12日HEPS发出
第一束光。
2025-10，储存环束流强度达
到了100毫安，发射度小于
100pm·rad，线站全面出光

2019年6月29日
启动建设



2020年7月1日
第一根屋面钢梁



2021年4月13日
通用设施集成安装启动



2021年6月27日
主环建筑单体封顶



2021年6月28日
首台科研设备开始安装



2023年11月3日
配套楼建筑通过五方验收



2024年11月11日
基建通过专项验收



基建 2019.6-2024.1



通用设施 运行中

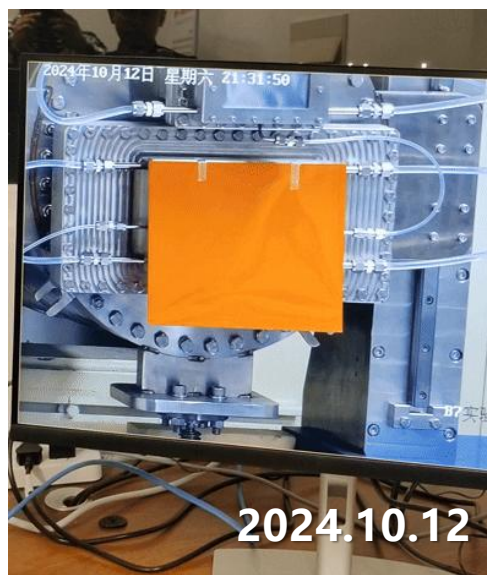


直线加速器 运行中



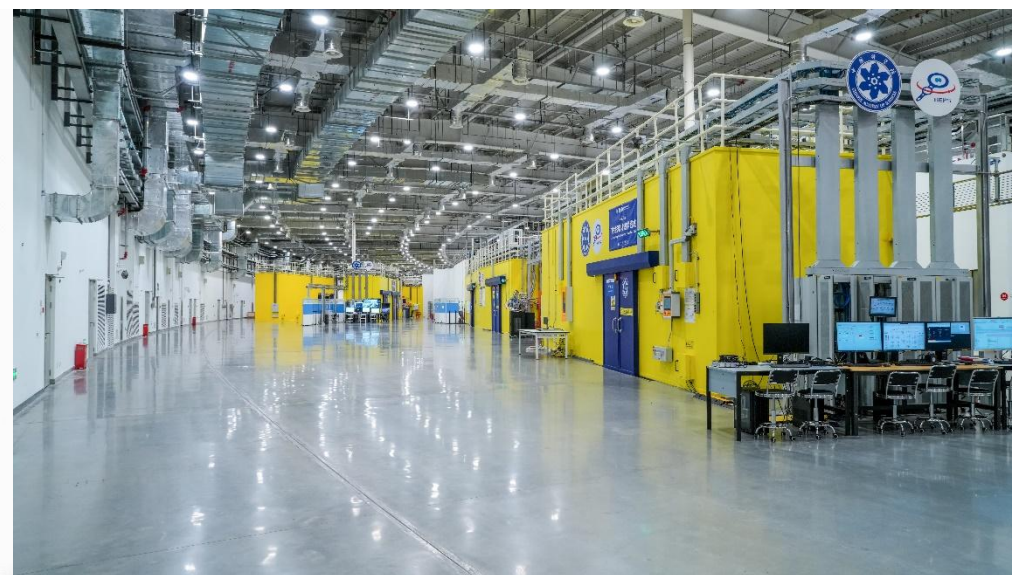
增强器 运行中

储存环 运行中



2024.10.12

光束线站 运行中





加速器物理 与技术



第四代光源：发射度接近X射线衍射极限

紧凑型多弯铁消色散结构, Multi Bend Achromat, MBA

M = 消色散结构中的二极磁铁数目

→ 发射度降低1~2个量级, 接近甚至达到X射线衍射极限

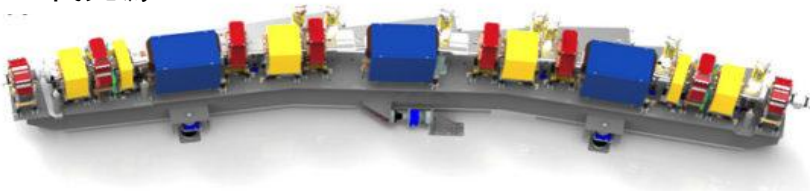
→ 在第三代光源基础上, 亮度提升2~3个量级

三代光源的发射度:

1000~5000 pm·rad

四代光源: $\lesssim 100$ pm·rad

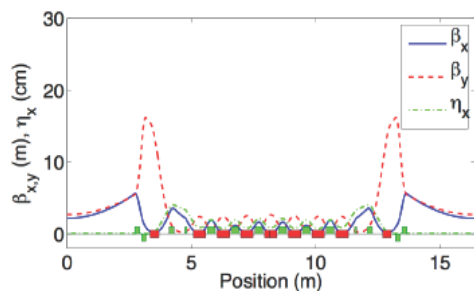
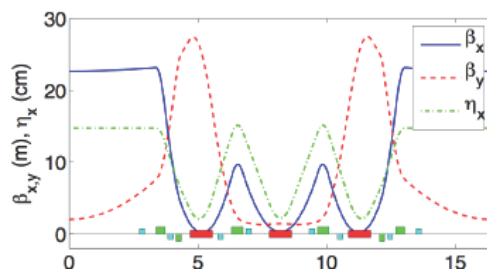
三代光源



四代光源

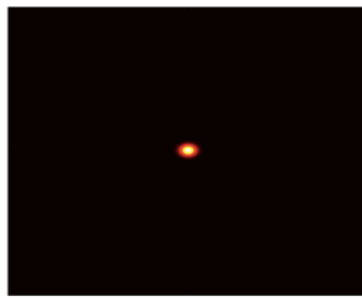
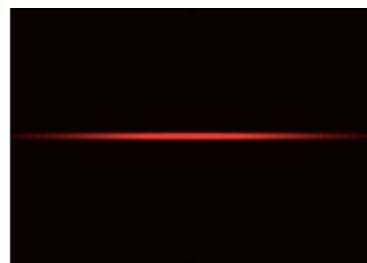


元件布局

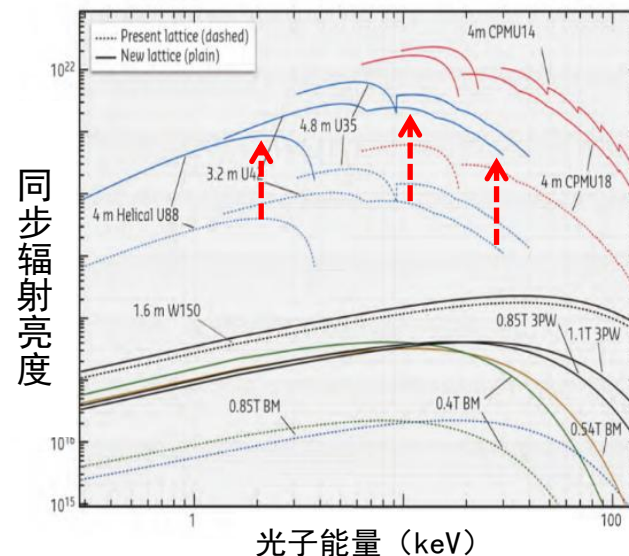


磁聚焦结构束流光学

HEPS RING



1 mm
束斑截面



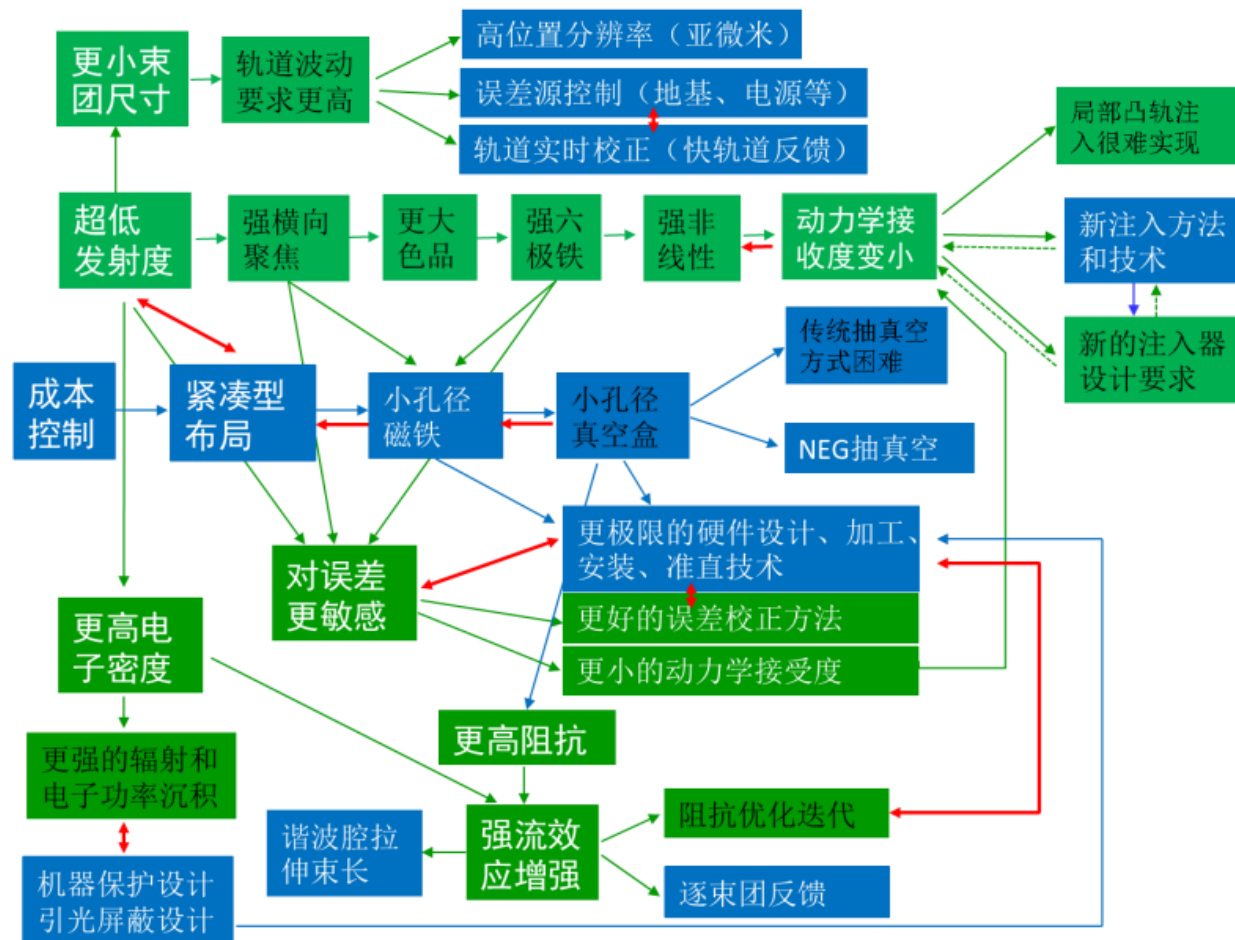
欧洲ESRF光源亮度曲线
虚线: 三代水平; 实线: 升级之后



HEPS

HIGH ENERGY
PHOTON SOURCE

超低发射度设计：系列连锁式物理与技术挑战



超低发射度设计带来的物理（绿色）与技术（蓝色）挑战

加速器物理：

- 非线性极强，动力学接受度受限，力学孔径仅有毫米量级
- 磁场干涉效应显著
- 误差效应及强流效应显著

加速器技术：

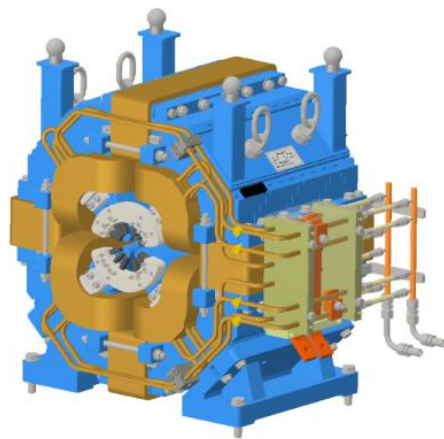
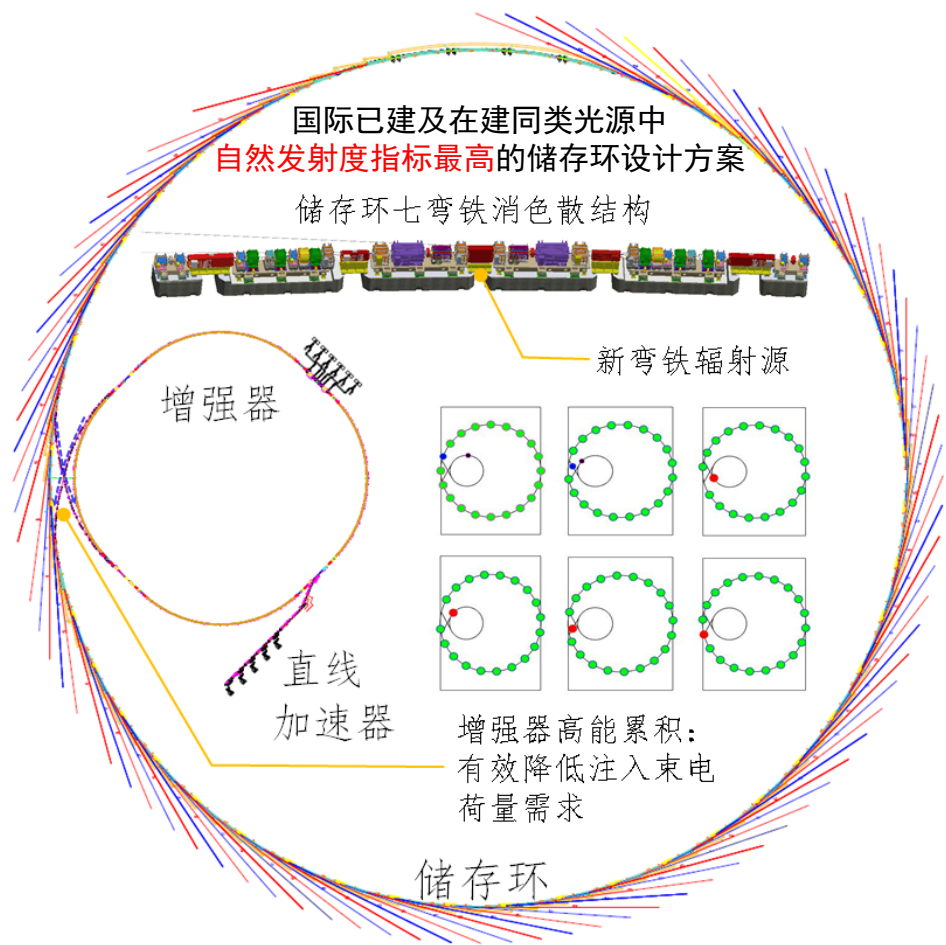
- 将相关技术要求推进至当前所能达到的最好水平
- 发展新技术，例如小孔径、高梯度磁铁技术和小孔径NEG镀膜真空技术以及在轴注入技术等

加速器整体设计：

- 跨系统反复迭代
- 通盘考虑及全局优化

HEPS成功应对物理与技术挑战

在先进性、可靠性、自主性、经济性等多维度目标之间达到合理平衡



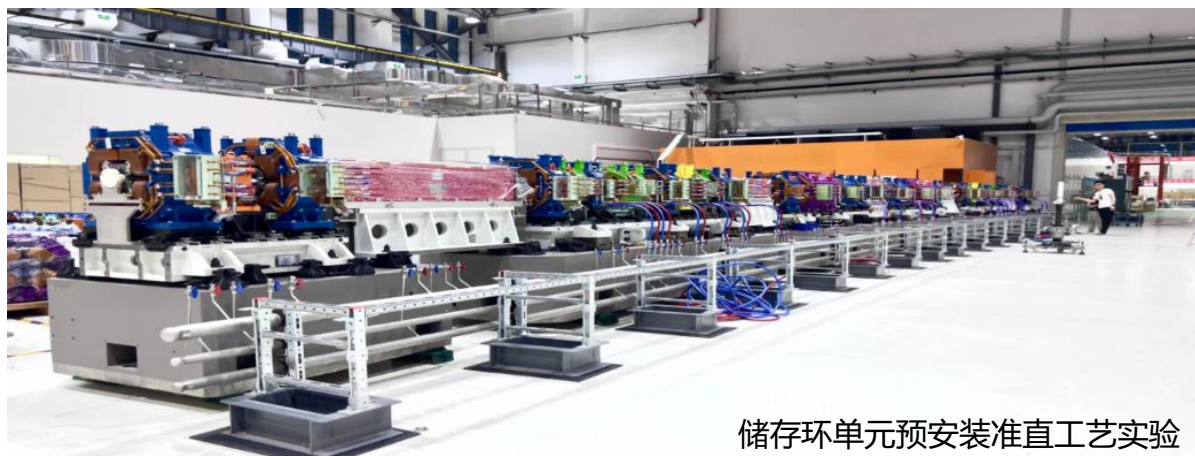
80 T/m的超高梯度四极铁



真空盒内壁吸气剂镀膜系统



166.6 MHz超导高频原型腔



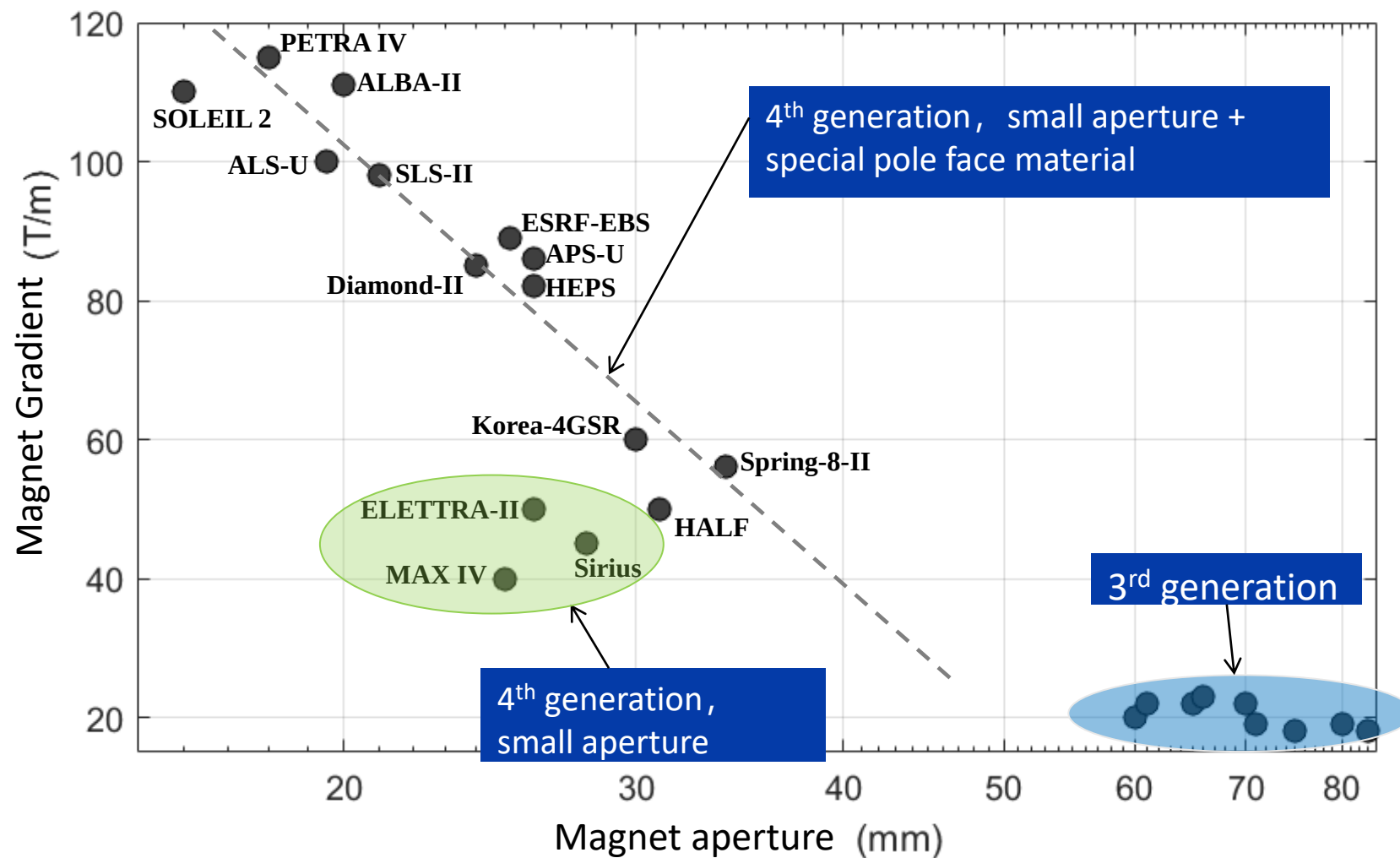
储存环单元预安装准直工艺实验



HEPS

HIGH ENERGY
PHOTON SOURCE

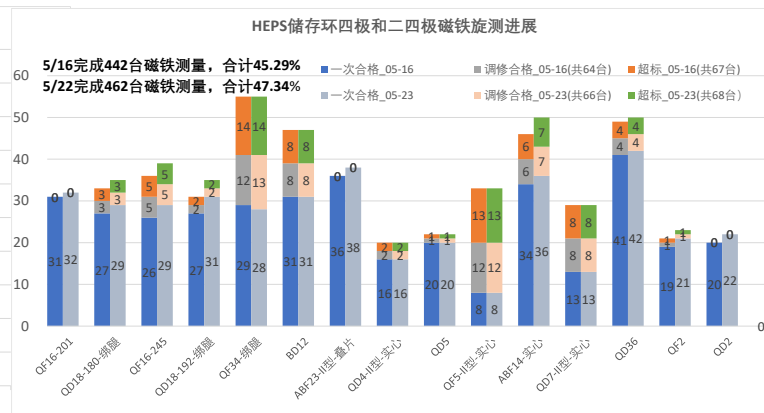
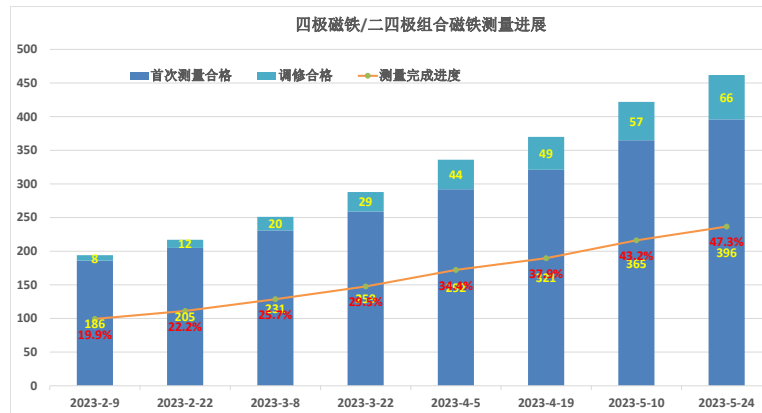
HEPS RING



JIAO Yi, BAI Zheng-He, LI Xiao.
PHYSICS, 2024, 53(2): 71-79. DOI:
10.7693/wl20240201



磁铁类型	磁铁数量
储存环纵向梯度二极磁铁	245
储存环二四极、四极磁铁	980
储存环六极磁铁	294
储存环八极磁铁	98
储存环快校正磁铁	196
增强器二极磁铁	130
增强器四极磁铁	150
增强器六极磁铁	70
增强器校正磁铁	94
直线加速器磁铁	53
低能输运线磁铁	30
高能输运线磁铁	92
合计	2432



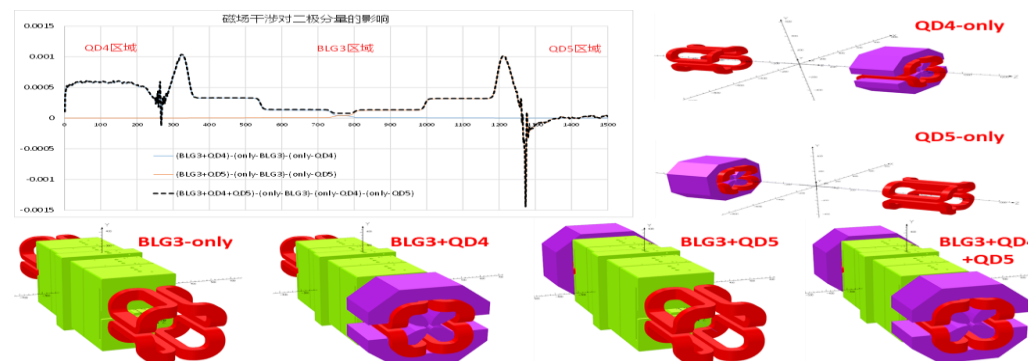
超高梯度四极磁铁

- HEPS: 孔径26mm, 梯度 $>80\text{T/m}$ $\rightarrow$ 极尖磁场 $>1\text{T}$ (饱和) (三代光源: 孔径 $\sim 70\text{mm}$, 极尖磁场 $<0.7\text{T}$ $\rightarrow$ 梯度 $<20\text{T/m}$)
 - 特殊的极面形状: 双曲线 $\rightarrow$ 正负垫补
 - 特殊的极头材料 (ABF2/3)
 - 成本低、周期短的叠片磁铁, 磁场调整专利技术——魔术指, 节省经费, 保证工期
- 预准直安装实验时, 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的数据不符
 - 两种磁铁都是非粘接的叠片结构, 体型较大
 - 磁铁、准直独立采用三种拆装形式, 拆装重复性实验, 确定磁测流程

超高的性能: 高梯度、高精度

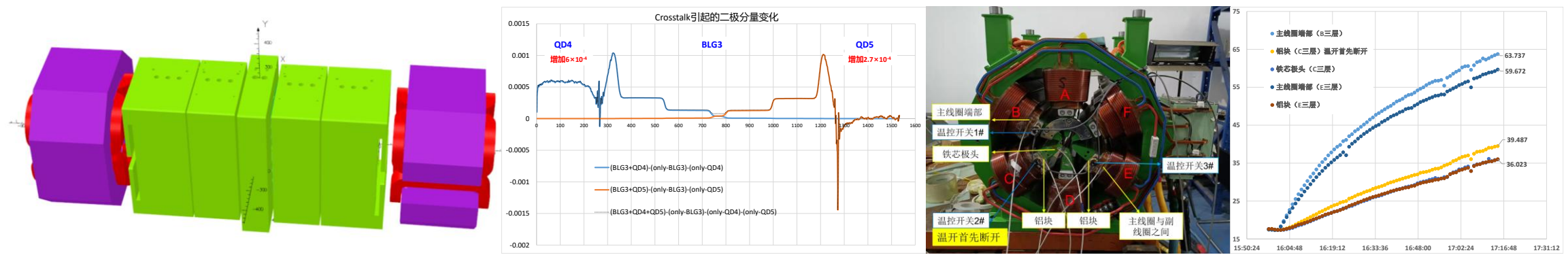
磁场干涉问题研究

- **来源:** 磁铁端部漏场受到相邻磁铁的干扰; 传统判断是4倍孔径外忽略, 实际要考虑饱和情况; HEPS各种类型磁铁的“影响范围”
- **干涉敏感:** 干涉造成二极分量的改变, 从而改变束流轨道; HEPS储存环二极磁铁的磁场不便于在线调节 (纵向梯度二极磁铁BLG采用了永磁方案、二四极组合磁铁BD调整时会同时影响四极分量); BLG3及上下游QD4、QD5的距离约为62mm
- **根据模拟结果, 对BLG积分磁场进行预调整**



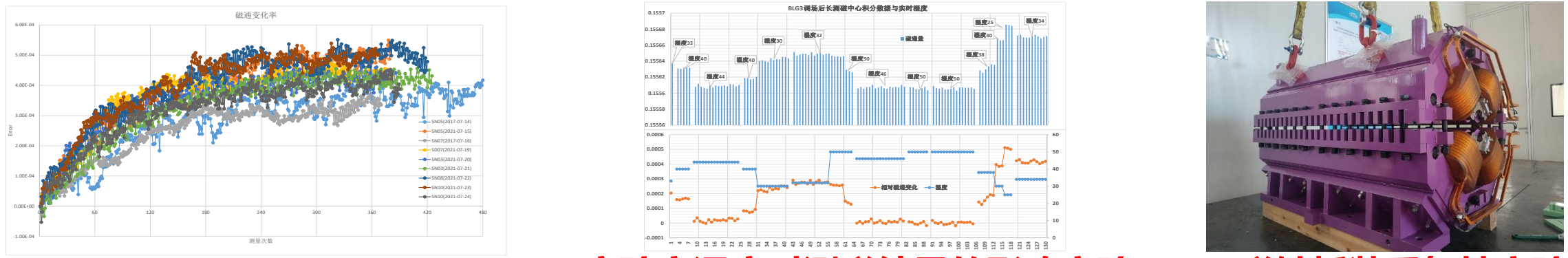
全新的内容: 新结构、新材料、新用法

大量模拟分析和测试实验：



储存环纵向梯度二极磁铁与四极磁铁磁场干涉模拟计算

六极磁铁温控开关改进实验



六极磁铁温升对磁场的影响实验

实验室湿度对测磁结果的影响实验

磁铁拆装重复性实验

- 测量精度 5×10^{-5}
- 测量重复性 2×10^{-5}
- 国际首创三坐标磁中心引出,
精度 $10 \mu\text{m}$ (ESRF $\sim 25 \mu\text{m}$)

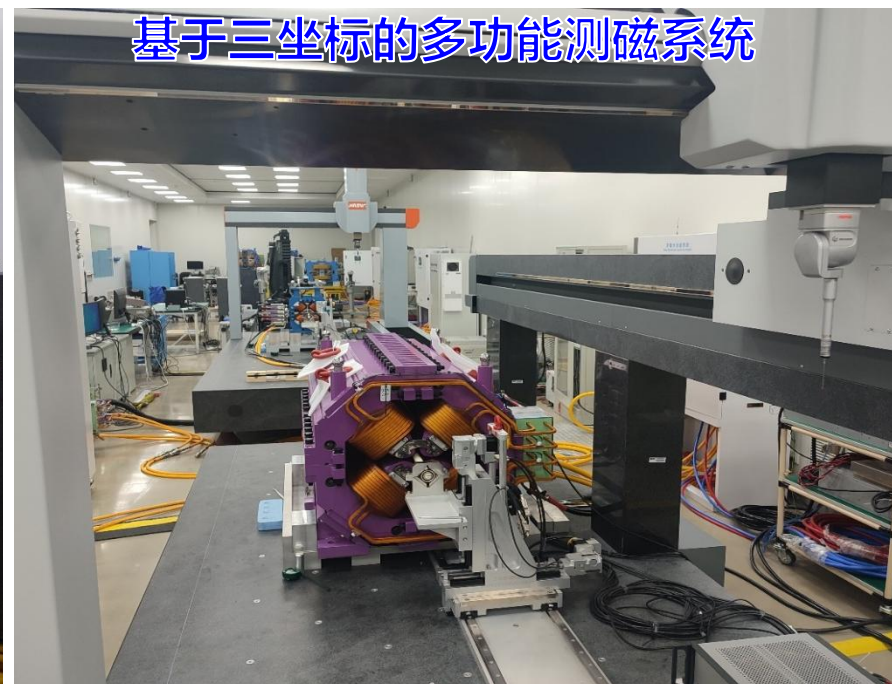
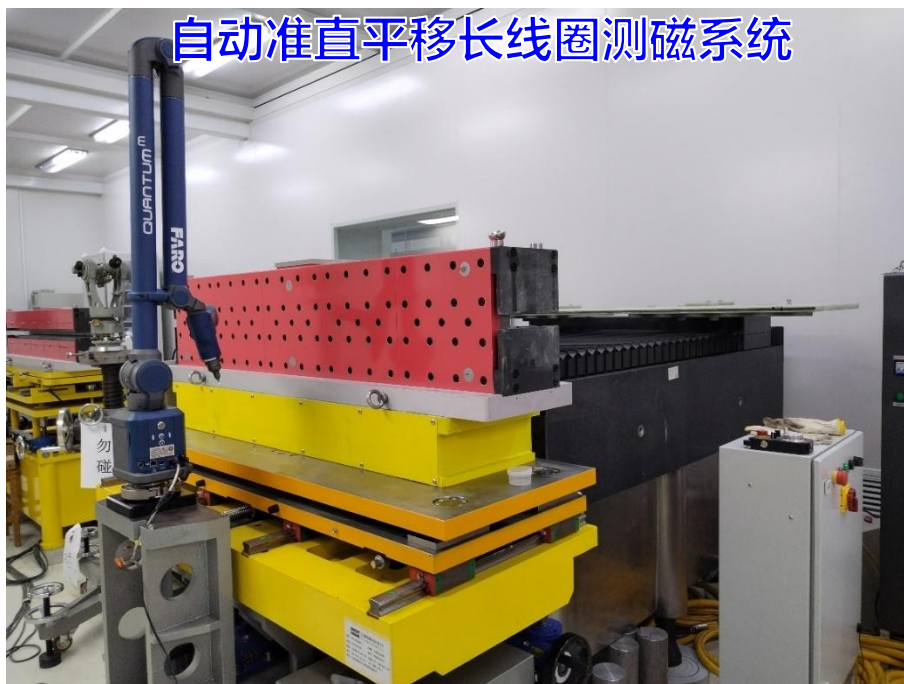
提高了磁测效率和精度

磁铁总数量超过CSNS的8倍

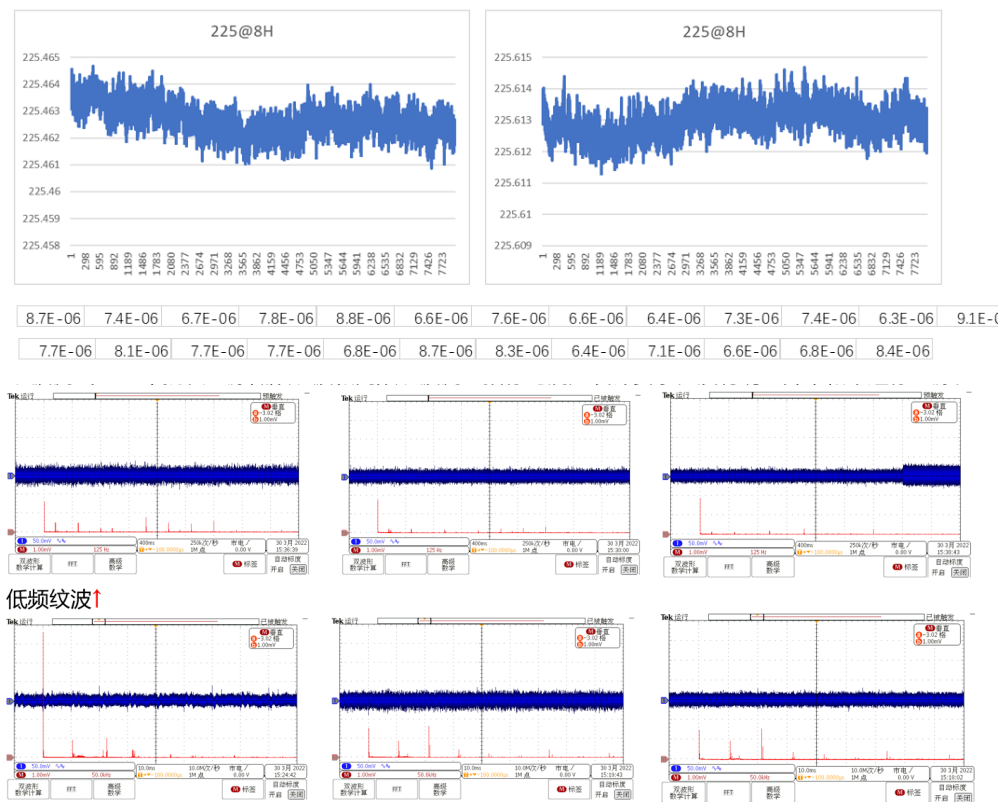
如测前准直时间和精度, 原来2人半天 $40 \sim 50 \mu\text{m}$

提升后, 1人1小时 $10 \mu\text{m}$

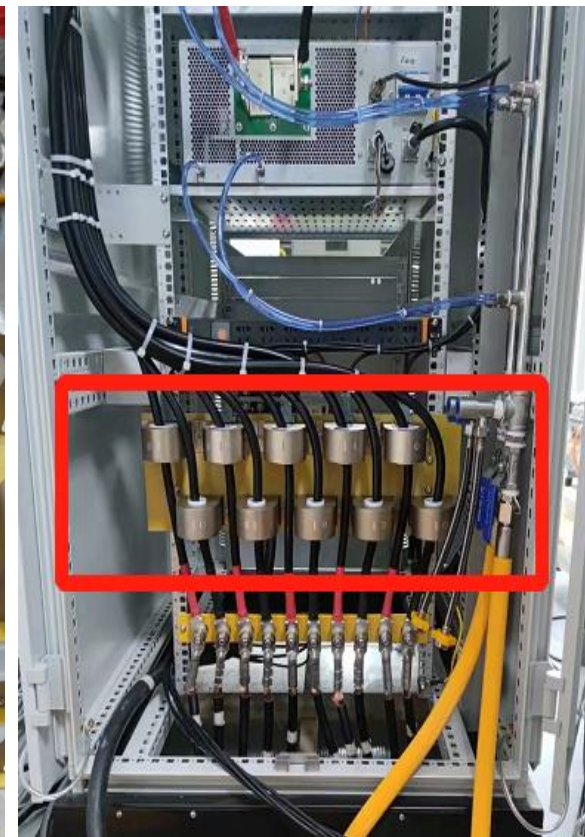
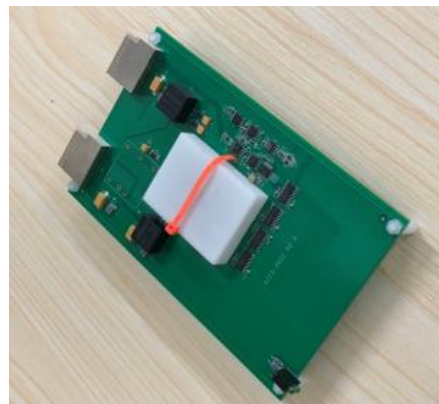
研制了世界先进水平的高性能磁场测量系统



- 实现10ppm高精度稳流电源的批量制作



- 实现核心部件的自主批量研制

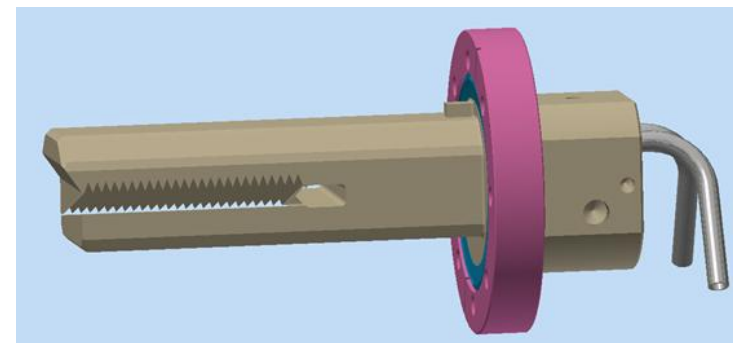
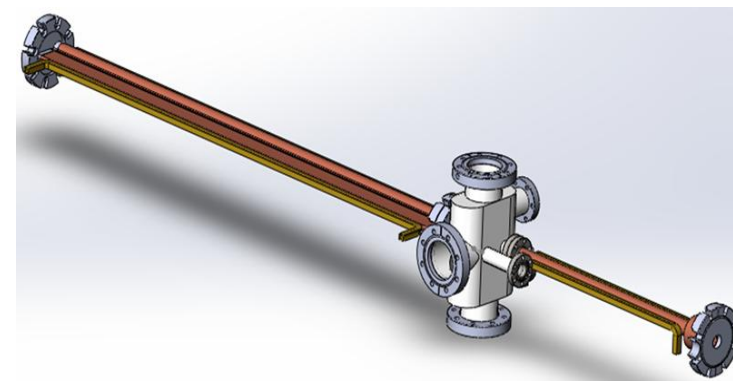
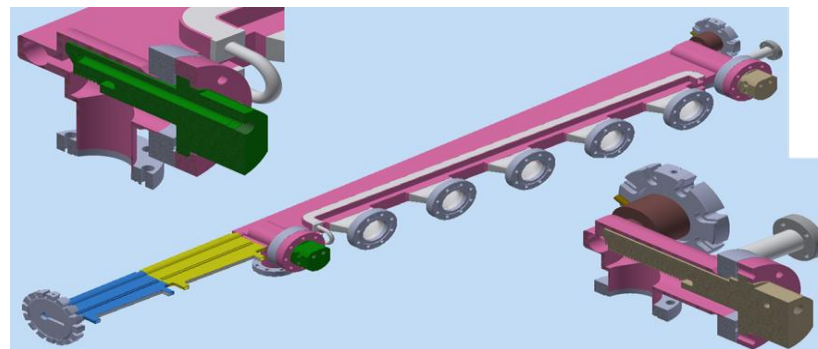
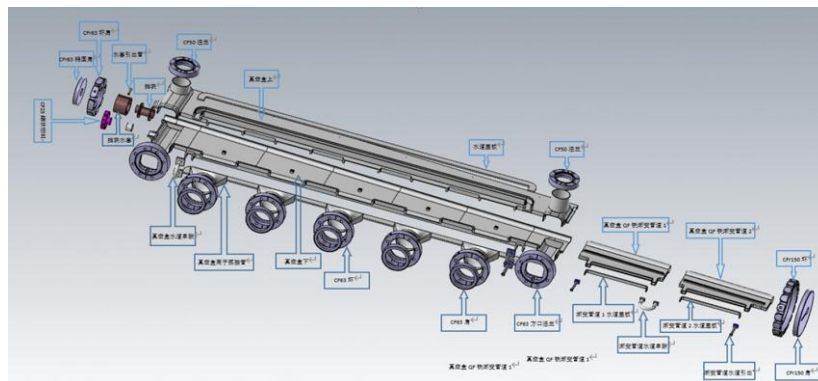


真空盒的设计既要考虑到束流清晰区和全环阻抗预算的要求，又要满足真空度的要求及磁铁孔径的限制，同时还要控制好同步辐射功率的分布。

储存环束流管内径**22mm**

壁厚**1mm**

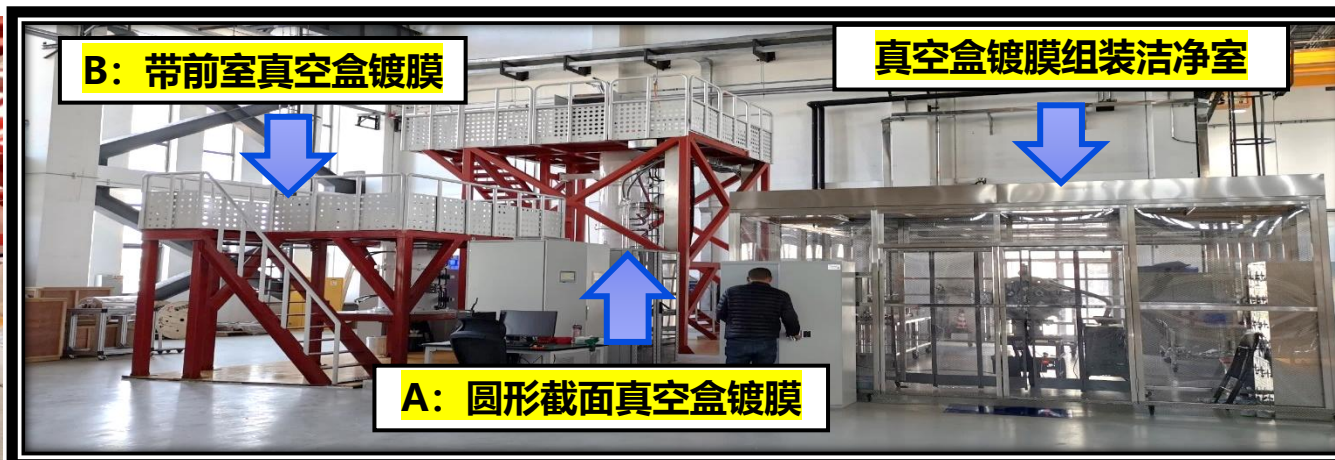
磁极与真空盒间隙仅为**1mm**，其中加热薄膜占**0.4mm**厚度



- 每个标准弧区单元包括**18根真空盒**、**14套**RF屏蔽波纹管、**4个**光子吸收器，还有离子泵、吸气剂泵、真空规和阀门等；
- 首次在国际上采用铬锆铜挤压成型真空盒，因为铬锆铜比无氧铜有更高的强度和硬度，高的热导性和电导性，在 200°C 的 NEG 激活温度下保持高的强度；**

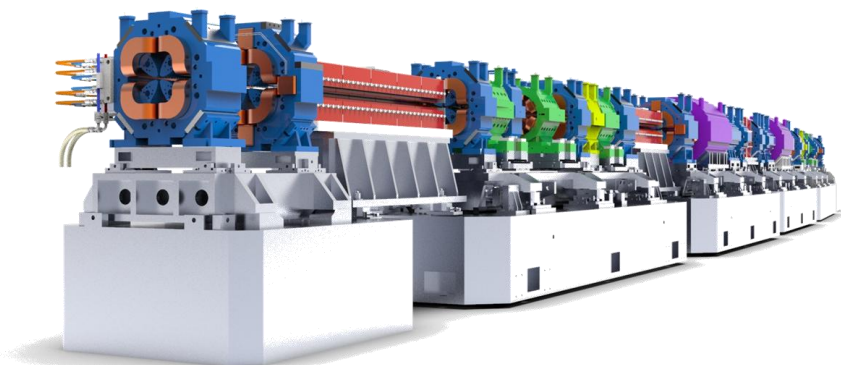


- 圆形真空盒镀膜装置并联6组，每组真空盒长约3.5m，吊装长度约5m；
- 前室形真空盒镀膜装置并联4组，每组真空盒长约1.5m；
- 经过反复实验、结构更改、放电参数调整等解决了在6mm狭缝镀膜的**国际难题**；
- HEPS紧凑型磁聚焦结构设计和小孔径磁铁，导致了真空盒尺寸的减小，严重限制真空盒的流导，使得真空泵的有效抽速得不到发挥。
- 为了提高真空系统的抽气效率，**减小集中式真空泵所占用空间**，需要**在真空盒内表面镀一层Ti-Zr-V吸气剂膜**，由它来取代传统集中式真空泵。
- **主要难点**：Ti-Zr-V磁控溅射阴极制备；阴极在真空盒中安装、固定、绝缘和密封；镀膜工艺参数的确定；吸气剂膜的性能测试和激活试验等。



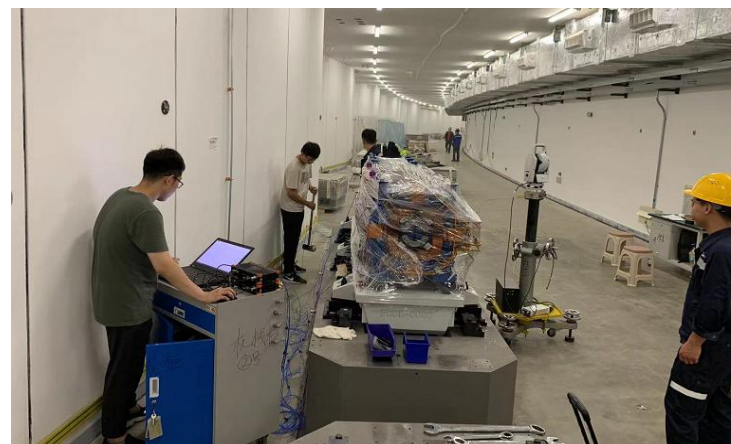
储存环磁铁支撑系统：基座+支架

- ◆ 实验样机的研制与设计方案验证。
- ◆ 工程样机测试验收。
- ◆ 完成了288台基座的批量生产与隧道灌浆安装。



技术难点与突破：

- ◆ 运动分辨率达到1微米，最低阶固有频率71Hz，要有效平衡精密调节与稳定性之间的矛盾。
- ◆ 目前国内外同尺度设备的最高指标



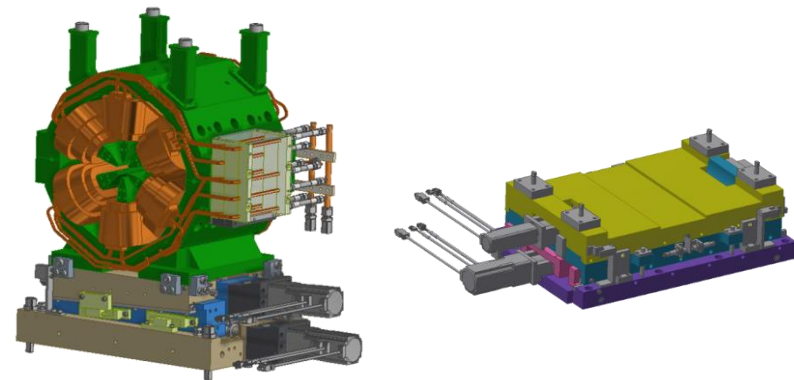
六极铁在线Mover：实现六极铁的在线精密调节，国际上首次大批量应用于工程。

■ 技术难点：运动精度和稳定性指标相互制约，高负载下矛盾更为突出，需寻找平衡点。

- 稳定性：稳固/抗干扰 → 刚性面接触 → 滑动导轨
- 运动精度：灵敏/低摩擦 → 点/线接触 → 滚动导轨

■ 先后开展了三种类型样机预研，完成技术攻关。

- 滑动导轨/四层结构：双向运动耦合量大
- 滚动导轨/三层结构：稳定性不达标
- 滑动导轨/三层结构：满足要求 → 工程实施方案 →
→ 采用精密刮研与修配工艺——提升厂家能力。



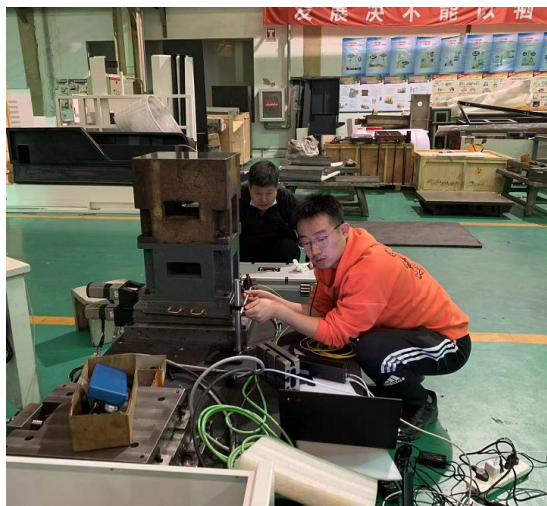
◆ 实现预期指标：

- ✓ 运动精度好于5微米；
- ✓ 磁铁稳定性无降低

六极铁Mover:

- ◆工程样机测试验收。
- ◆批量生产。
- ◆安装和性能调试。

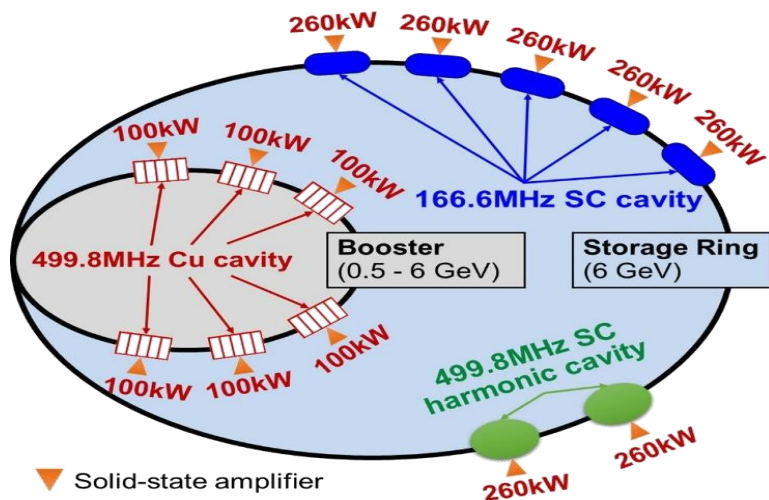
mover控制系统布设与多台联调测试。



工艺安装实验：多系统联合开展

- ◆ 在增强器正式安装前完成了一个**典型安装区段的工艺安装实验**，解决了安装中存在的问题。
- ◆ 完成了**储存环一个标准周期**的工艺安装研究。
 - 磁铁开合重复性实验、运输实验、六极铁及Mover的预准直方案研究、隧道安装稳定性实验，对安装各环节的不确定因素逐一进行了检验。
 - 进行储存环一个标准周期6个单元的预准直，模拟隧道准直以及真空盒、束测元件的安装与准直。





• HEPS高频系统基本组成

- 储存环：5套166.6MHz高频系统 + 2套499.8MHz高频系统
- 增强器：6套499.8MHz高频系统



• 技术难点及挑战

- 首台低频超导腔加速光速粒子（166MHz超导腔）
- 大规模使用大功率全固态功率源（单机260kW）

- **设计：**解决了低频超导腔加速近光速粒子并设计实现了高次模深度抑制
- **制造：**大尺寸波纹管制造挑战，经过多轮矫形、真空焊接
- **后处理**
 - 超导腔结构导致酸液流速不均匀，造成酸洗纹路，通过优化工装设计解决
 - 大尺寸（525mm中径）铝镁合金密封圈首次在超导腔上使用，经过多轮设计和实验验证



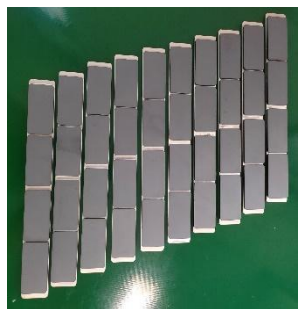
挑战

- 大尺寸零件的精密配合与梯度焊接、批量铁氧体（200片，50个组件）组件的总焊
- 焊接温度高（ $\sim 800^{\circ}\text{C}$ ），铁氧体高温焊接易碎、脱落

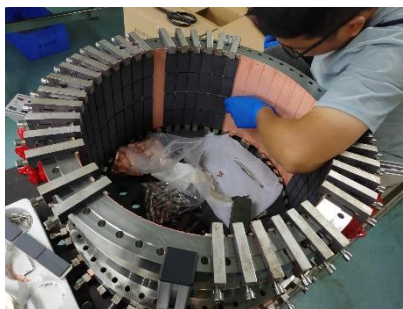
铁氧体金属化



铁氧体组件焊接



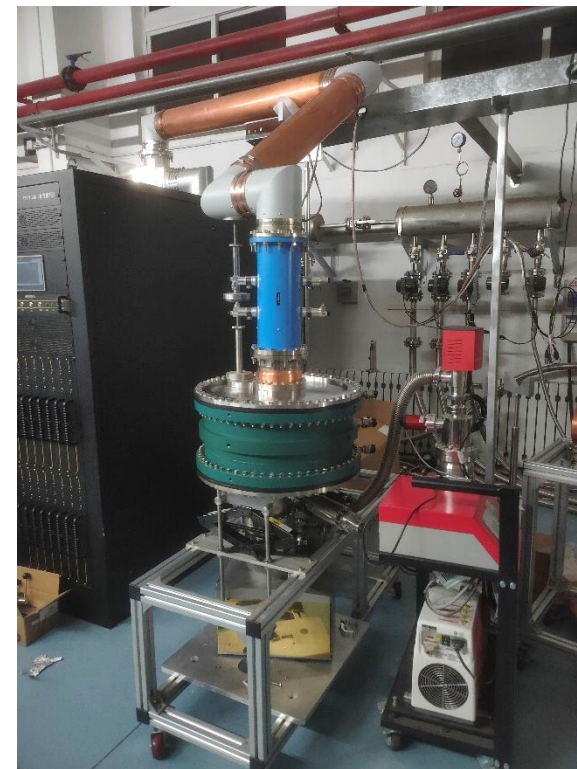
铁氧体组件总装配



吸收器总焊



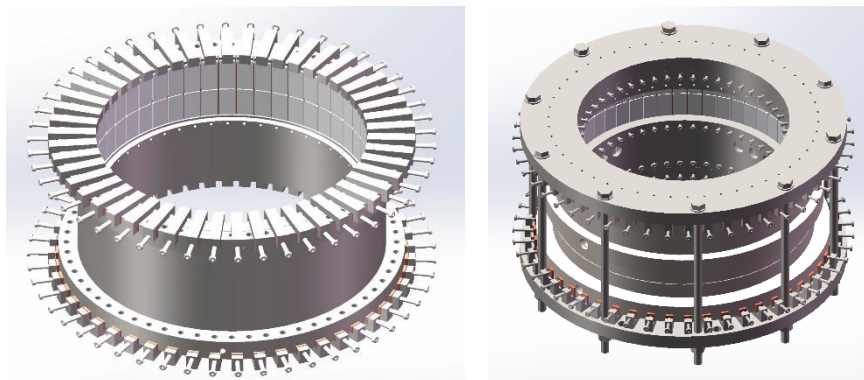
吸收器高功率测试



铁氧体片脱落

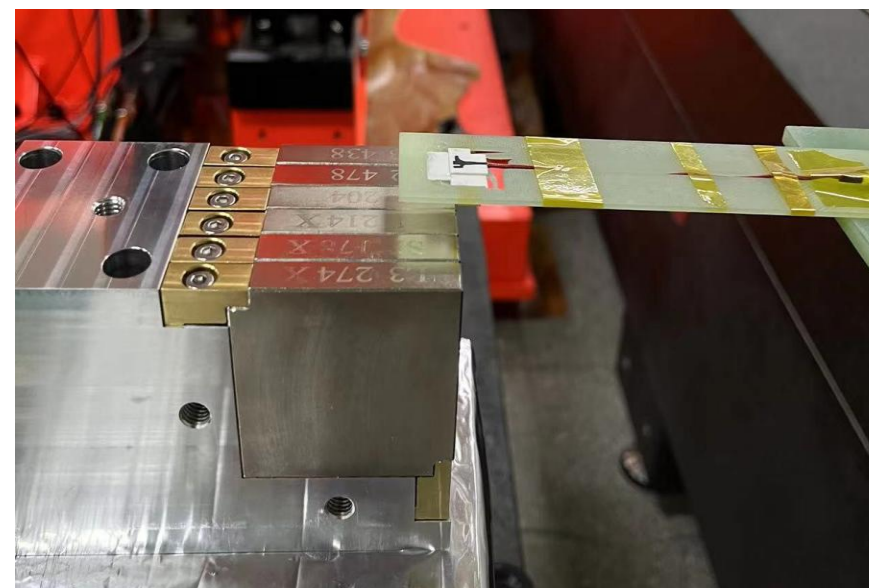


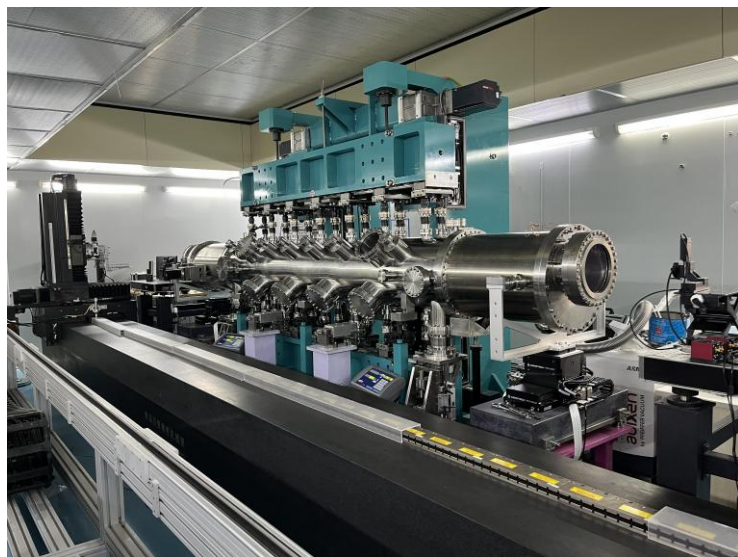
焊接工装设计优化 (左: old, 右: new)



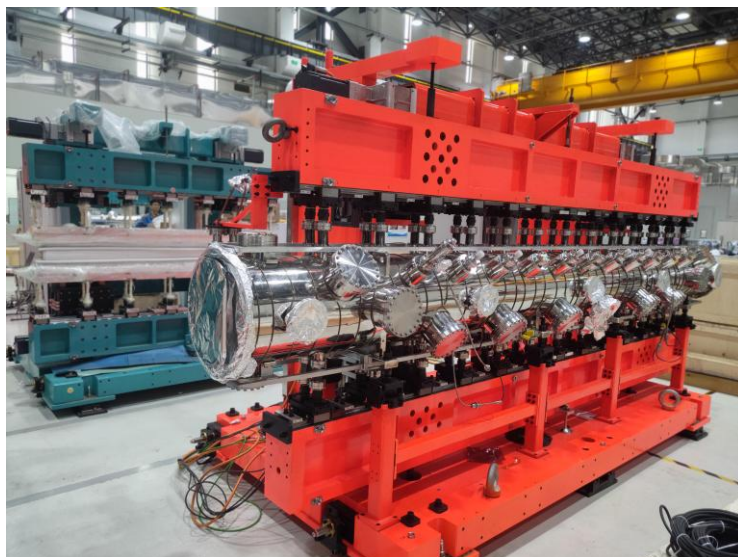
分 类	名 称	数 量
真空内ID	低温波荡器CPMU	6
	真空内波荡器IVU	5
真空外ID	真空外波荡器IAU	4
	真空外扭摆器IAW	2
特殊ID	Mango Wiggler	1
	APPLE-KNOT	1
总 数		19

特殊插入件方案Apple-Knot、
Mango Wiggler为国际首创





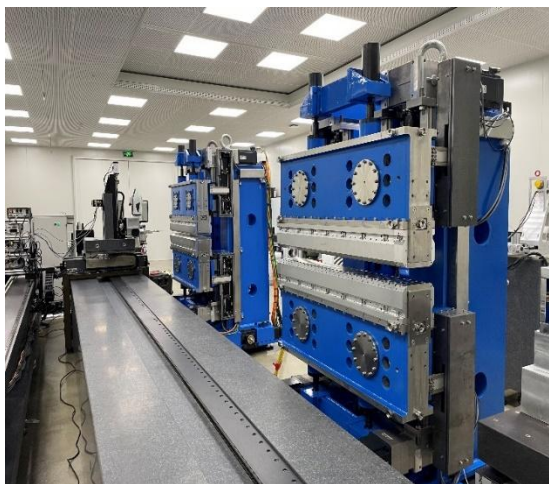
低温波荡器CPMU



真空内波荡器IVU



IVU真空内霍尔测量线



真空外扭摆器IAW



真空外波荡器IAU

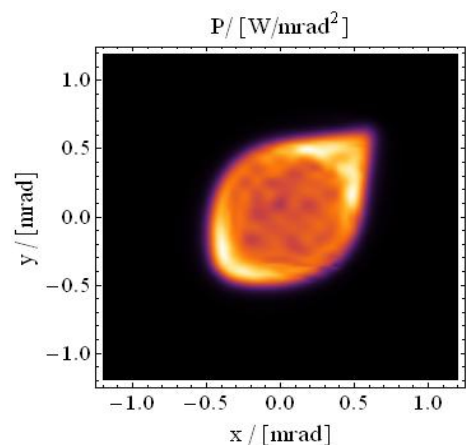


AK波荡器

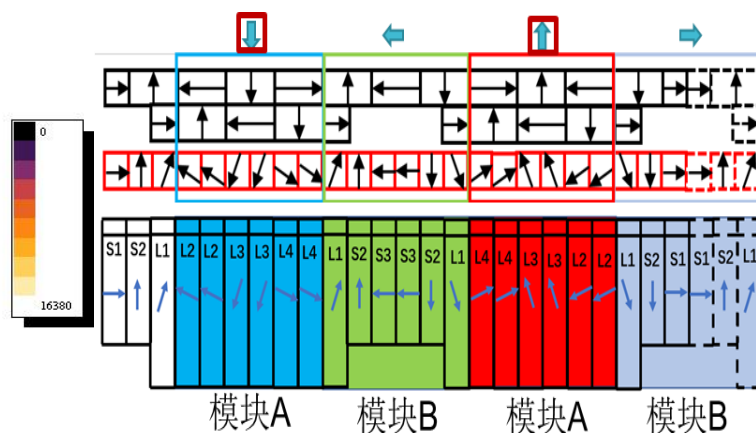


芒果扭摆器

- 国际上率先提出并研制**芒果型扭摆磁铁**，满足大视场X射线诊断和探伤的用户需求
- 国际上首次设计和制造四阵列**Apple Knot型波荡器**，满足低热负载极化可调同步光源用户需求
- 设计并成功研制国际上**周期长度最短的低温波荡器CPMU12**，关键指标包括相位误差和多极场误差等均处于世界领先水平
- 成功研制了超长、高精度真空内磁场测量系统



芒果型扭摆磁铁



AK波荡器结构分段



CPMU12



超长高精度真空内磁测系统

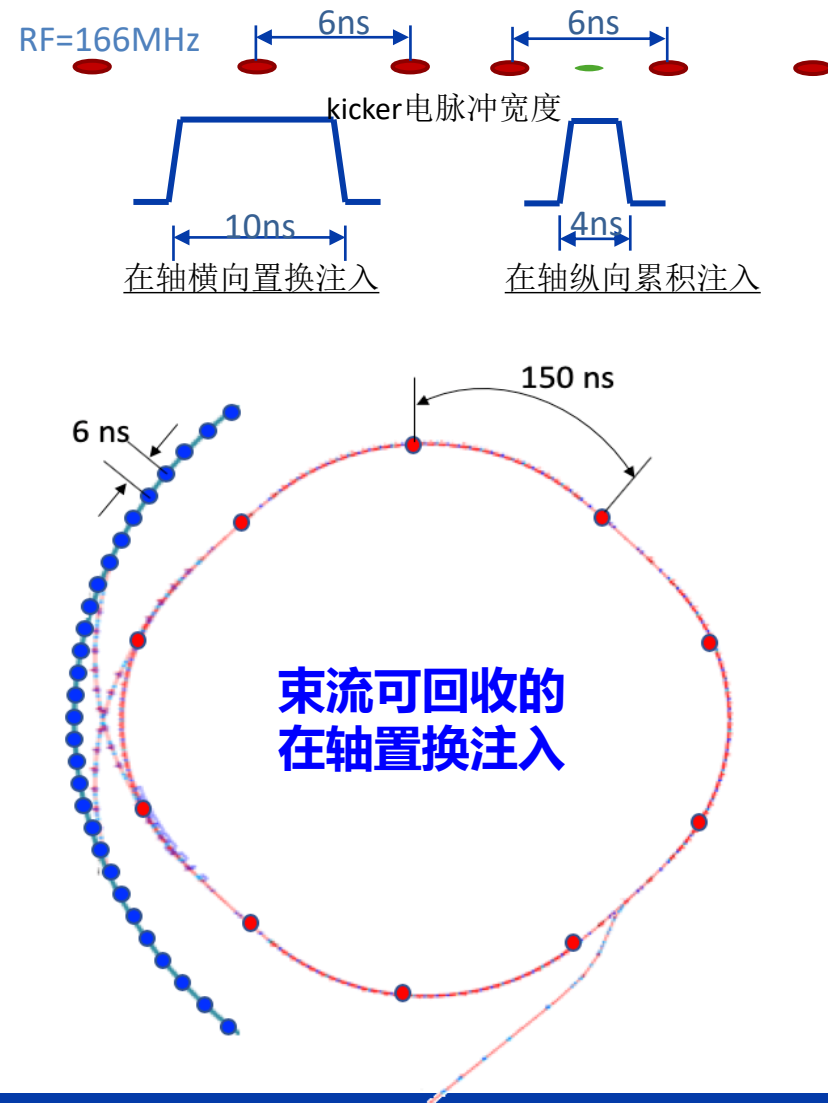


• 储存环注入引出系统:

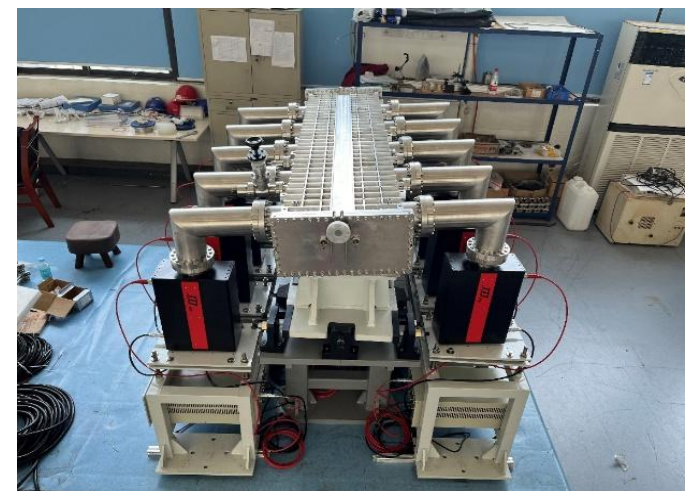
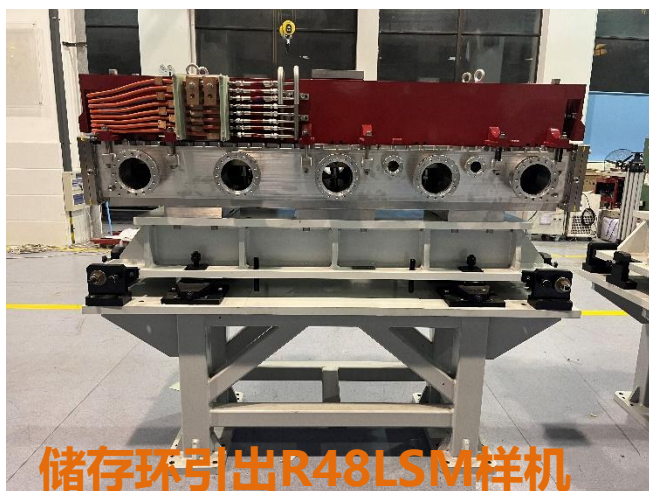
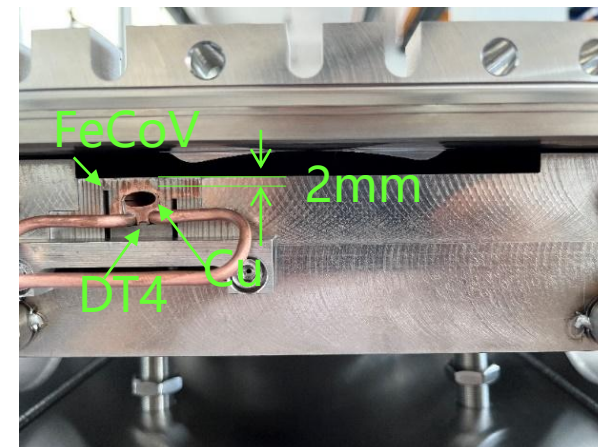
- 有限的直线节空间 (6米), 束流能量高 (6GeV)
- 冲击器系统: 超窄脉冲strip-line kicker 和快脉冲电源 (10ns底宽)
- 切割磁铁: 薄切割板Lambertson型切割磁铁 (2mm厚)

• 增强器注入引出系统:

- 三个子系统
- 冲击磁铁系统: slotted-pipe kicker和快脉冲电源 (最窄300ns底宽)
- 切割磁铁: 薄切割板Lambertson型切割磁铁 (3.5mm厚)



- 储存环切割磁铁共计三台（含样机）
- **特点：**半真空Lambertson型
- **难点：**切割板厚=2mm，世界上切割板最薄的Lambertson磁铁
- 技术突破：**采用原创的半真空磁铁设计**

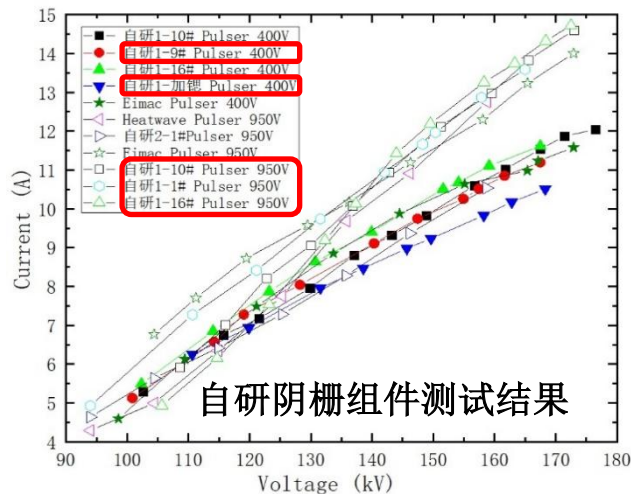
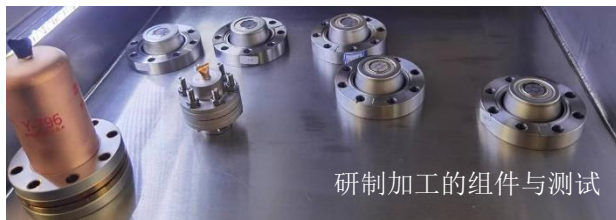
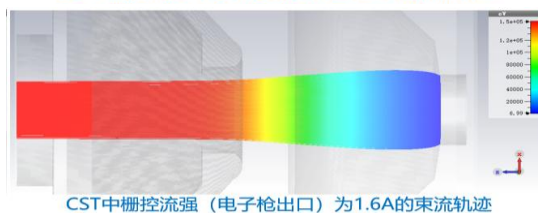
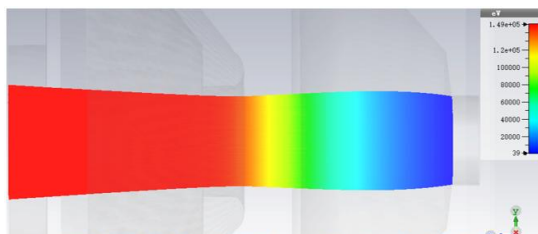
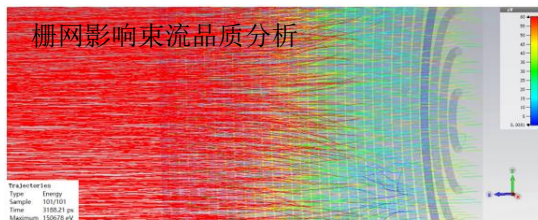


- **进展**：储存环kicker共计两套（5台/套）
- **特点**：strip-line kicker，原创的5cell-module结构，超窄脉冲底宽小于10ns
- **难点**：异形内外导体精密加工，真空腔法兰焊接定位精度高，脉冲宽度窄，频带宽度宽DC-1GHz
- **技术突破**：**kicker采用全数控加工中心加工，精密焊接工艺；自主研发高压射频穿墙件；脉冲电源采用自主研发的DSRD（漂移阶跃恢复二极管）全固态脉冲电源**



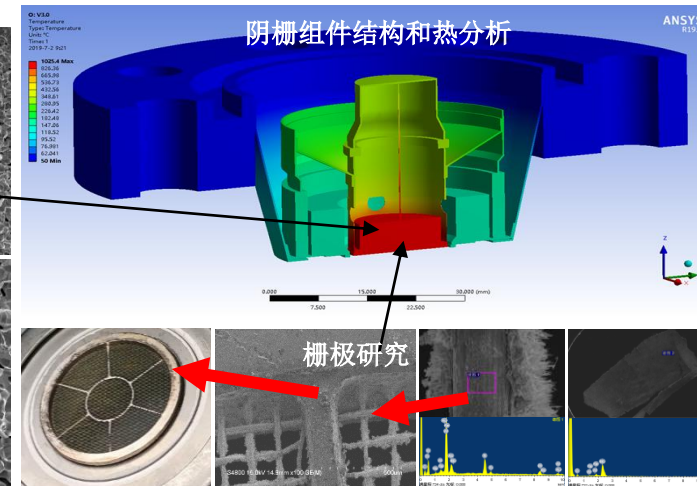
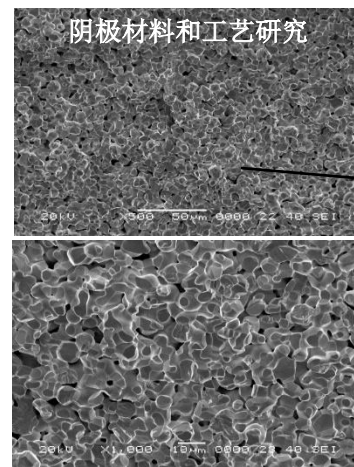
• 电子枪系统

阴栅组件实现国产化突破



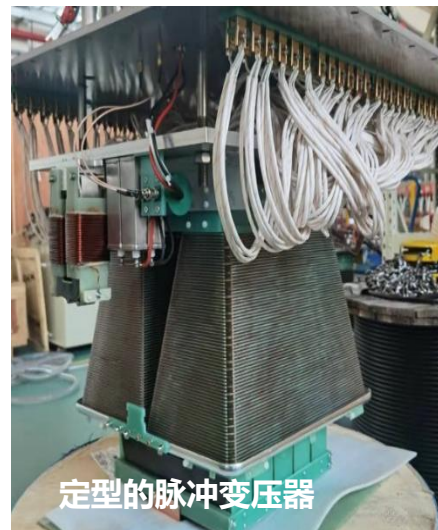
改进了阴极海绵钨基底材料加工工艺，提高了阴极寿命和电流发射密度，解决了阴极高温区附近栅丝和栅极组件的加工工艺难题

研制的电子枪阴栅组件发射电流达到14.7A，阴极脉冲电流发射密度 $\geq 10\text{A}/\text{cm}^2$ (4 $\mu\text{s}/50\text{Hz}$)，阴极寿命大于9000小时，产品合格率和性能一致性满足国内电子加速器装置的可靠运行

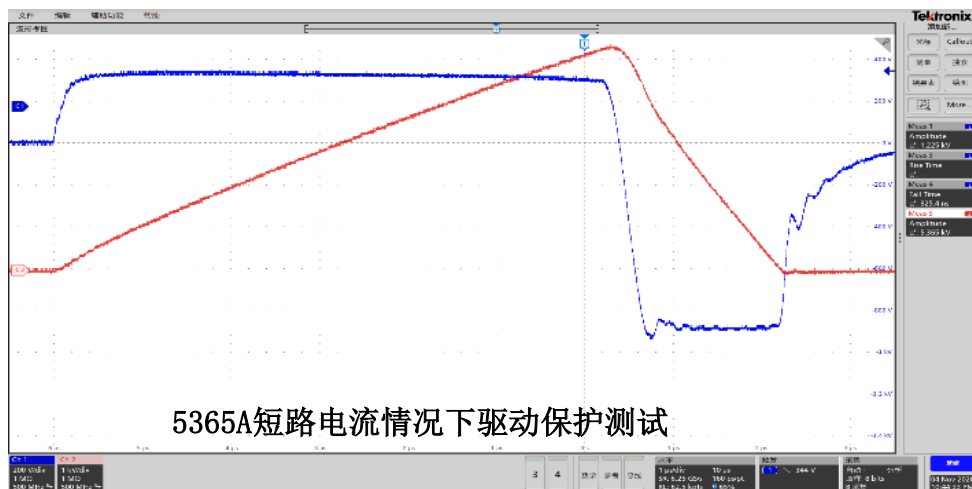


• 固态调制器

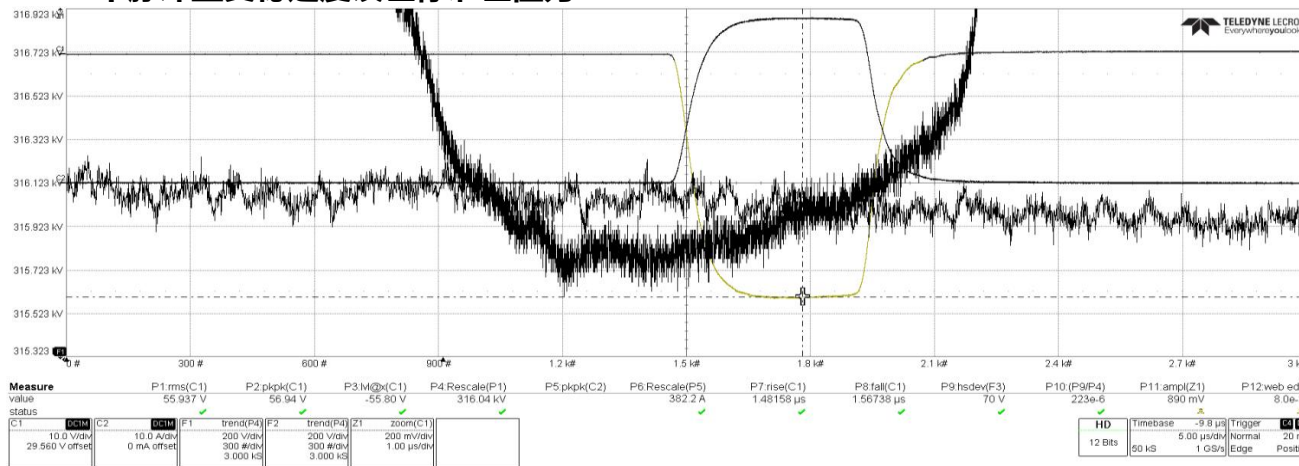
- 难点：IGBT极限开关应用的保护、超低感导线、超低分布电感脉冲变压器设计
- 相比线型调制器，脉冲重复稳定度指标提高近一个量级，加速器束流能量稳定度提高一个量级
- 突破：脉冲重复稳定度指标提高近一个量级，国内首次将大功率固态脉冲调制器应用于加速器装置中



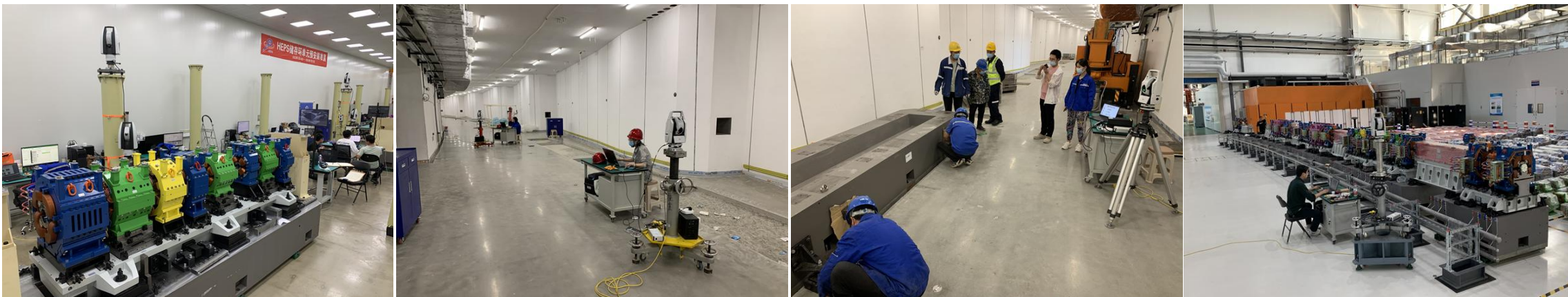
定型的脉冲变压器



3000个脉冲重复稳定度误差标准差值为0.02%



- 储存环控制网测量精度达0.065mm，基座的浇筑准直精度达1.6mm。
- 储存环工艺安装实验六个单元的预准直，精度达0.025mm；一个周期24米束流线准直精度达0.043mm。



- 技术难点：储存环预准直多路激光边长交会测量系统，经过2年研发，取得突破。
- 在国内首次实现6.5米范围内 $5\mu\text{m}$ 的空间坐标测量精度，3米工件范围 $3\mu\text{m}$ 坐标精度。
- 在系统稳定性和自动化方面居于世界前沿

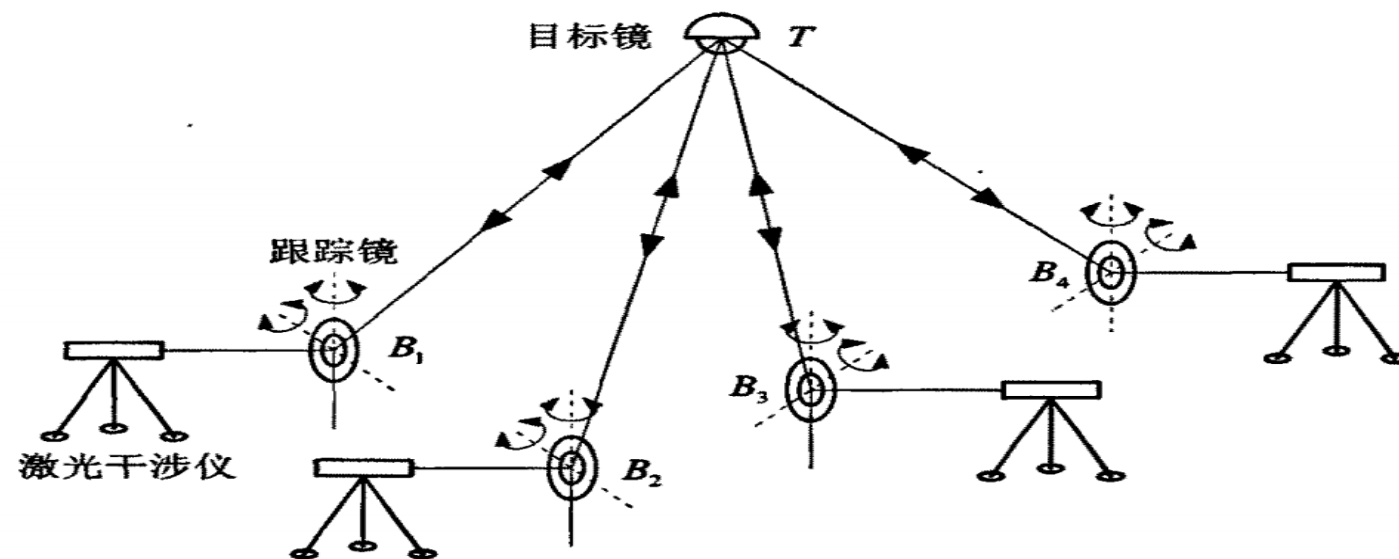


图 2-1 四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统

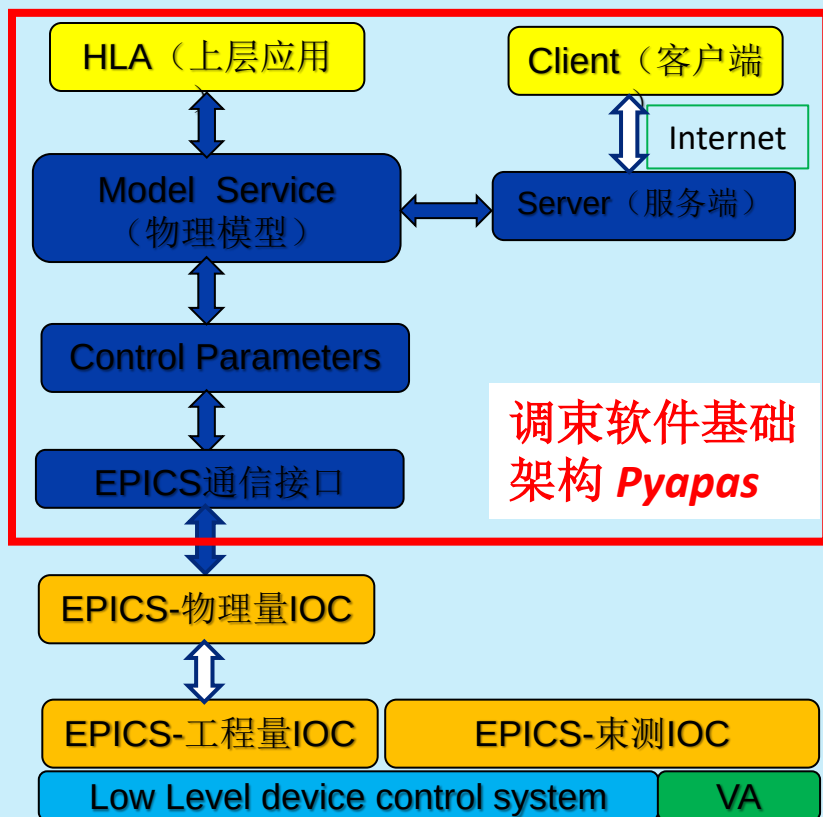


自研BPM电子学已攻克，用于BEPCII上，经历了长时间运行

➤性能与国外商业产品相当，实验室测试闭轨分辨率优于10nm！

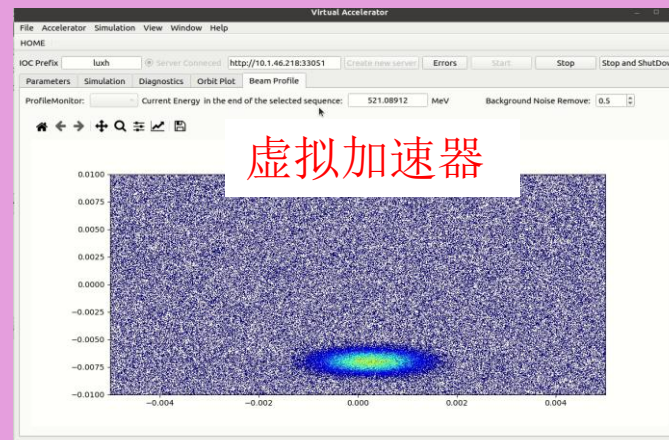


- 自主调束软件架构是高性能四代光源的调束基础
 - APS-U (ASD-AOP) / ESRF-EBS (Tango-AT) / **HEPS (Pyapas)**
- 国内首次**自主开发同步辐射光源调束软件基础架构
 - SAD (**BEPCII**)
 - MML-AT (**HLS / SSRF / TPS /**)
 - Pyapas** (**HEPS**)



- ✓ 模块化设计
- ✓ 基于物理量
- ✓ 高可移植性
- ✓ 高可扩展性
- ✓ Model-Based
- ✓ Client-Server

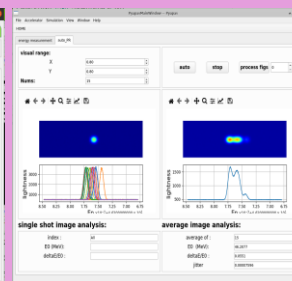
- 基于 *Pyapas* 框架, 完成虚拟加速器开发, “虚拟” 运行至今, 已用于测试调束软件



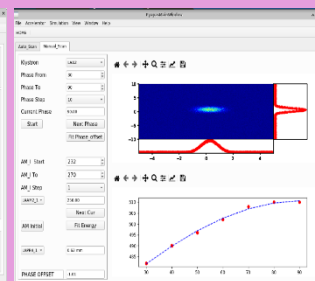
- 完成 HEPS 加速器调束软件开发及测试
- 为加速器调试提供关键软件技术基础



物理量控制程序



能散测量



加速相位扫描

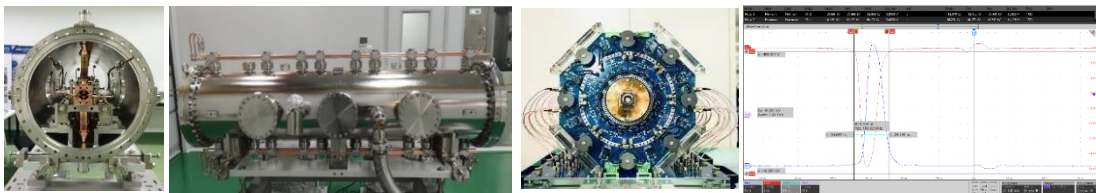
超高梯度四极、永磁纵向梯度
二极磁铁，首创芒果扭摆器



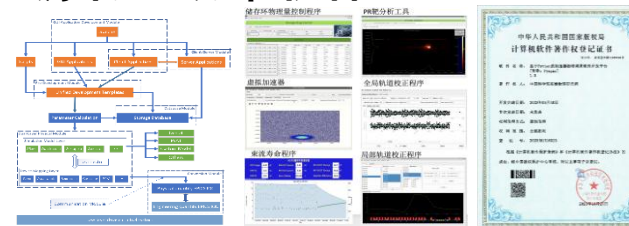
毫米级小孔径真空盒
非蒸散型吸气剂镀膜技术



10纳秒超快脉冲kicker电源技术



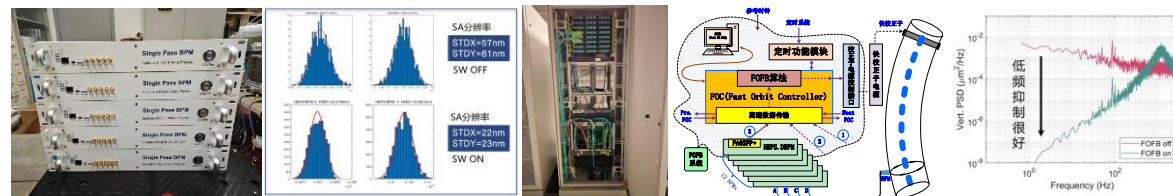
国内首套拥有自主知识产权的
光源物理调束软件



国际首次采用1/4波长型
超导腔加速近光速电子

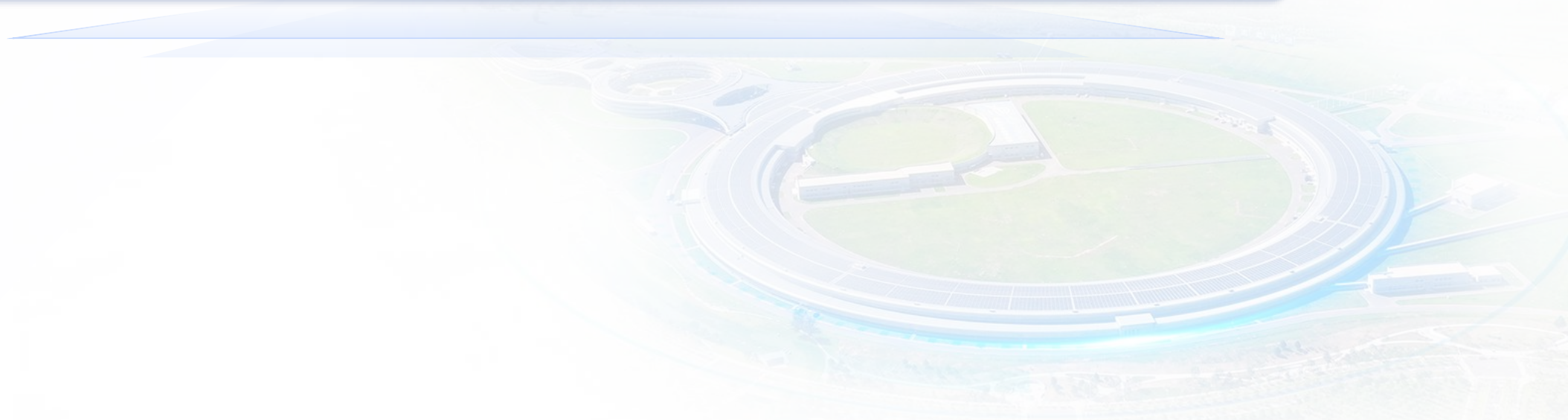


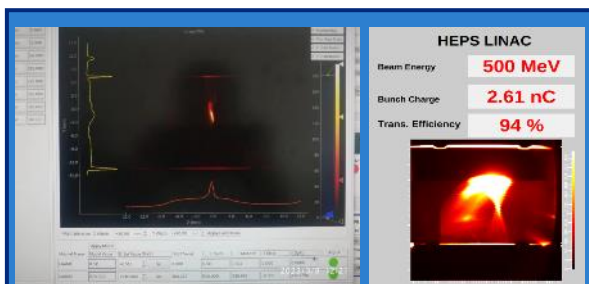
10纳米量级束流位置探测及控制技术(SA)



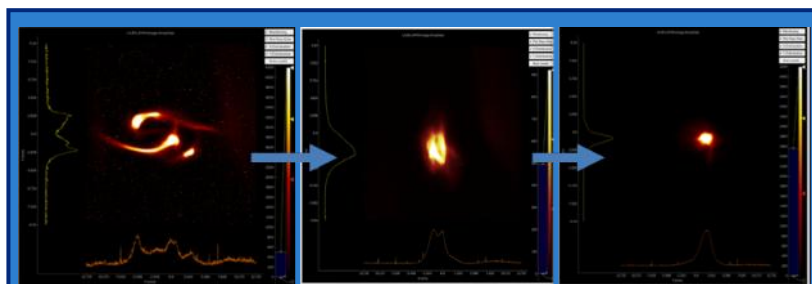


光源束流调试

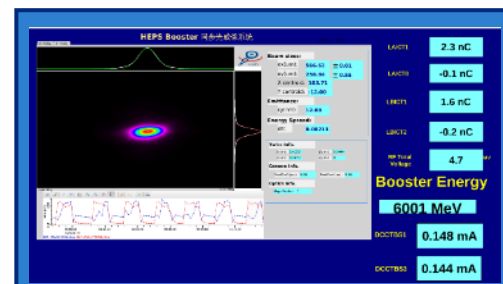




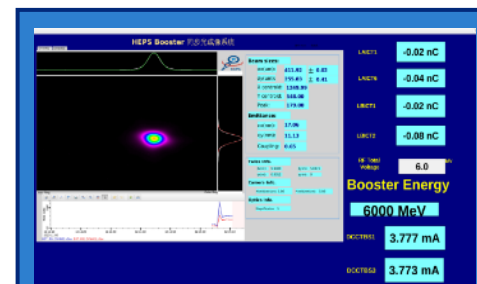
500 MeV, ~2.5 nC
1st electron beam



500 MeV, max bunch charge > 7 nC
LINAC passed SAT



Ramped to 6 GeV
1st electron beam in Booster



>5 nC of single bunch charge
Booster passed SAT

3.9 3.14

LINAC CX started

6.5

7.25 8.9

Booster CX started

11.17

2023

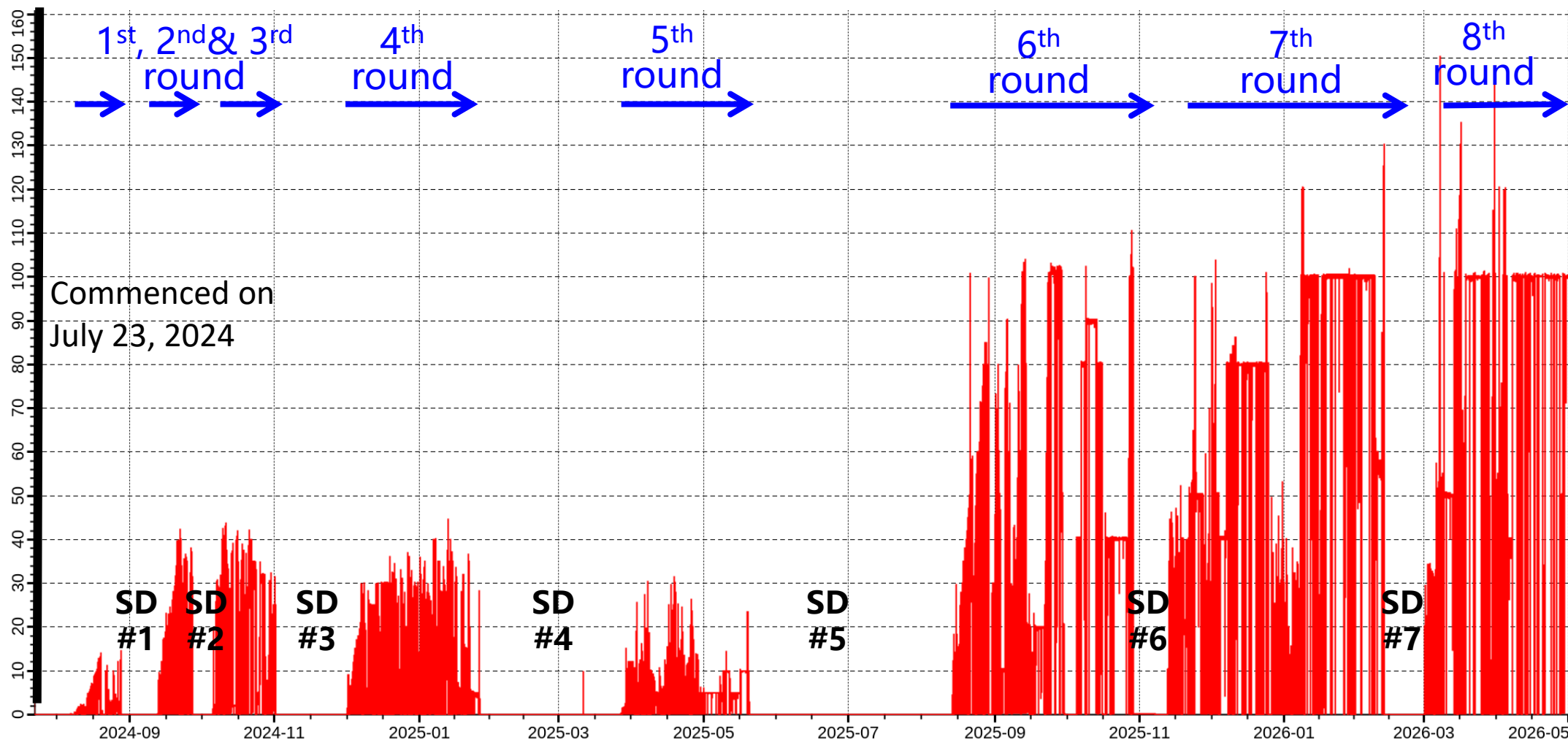
On-site testing of LINAC in May, 2023, the macro-pulse charge reached 7.29 nC, and beam energy stability was 0.014%.

The electron beam achieved more than 5 nC of bunch charge at 6 GeV via the booster on Nov. 17, 2023.



储存环调试

1.5 years from beginning, 8 rounds, Beam current 150 mA, Emittance < 60 pm.rad

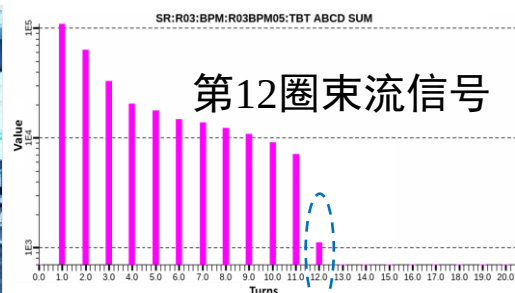


第1轮：实现束流存储，流强超过10毫安



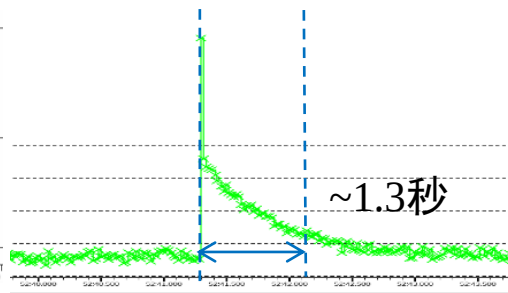
储存环调束启动

07.23



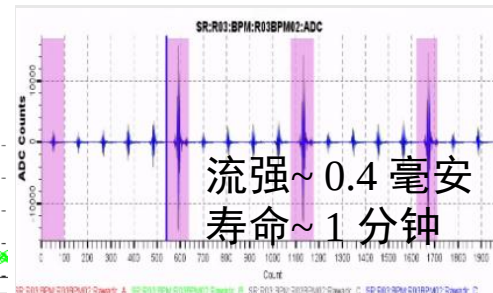
束流循环 10 圈

07.29



束流首次存储

08.06



首次储存多束团

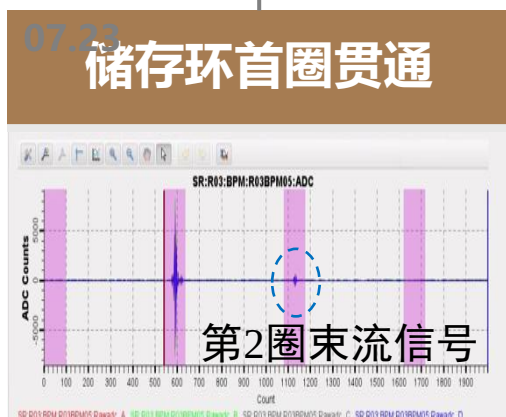
08.08



流强达到12 毫安

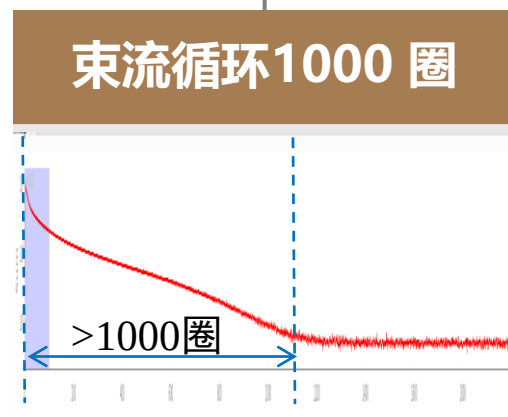
08.15

08.18



储存环首圈贯通

07.23



束流循环1000 圈



束流寿命 1分钟

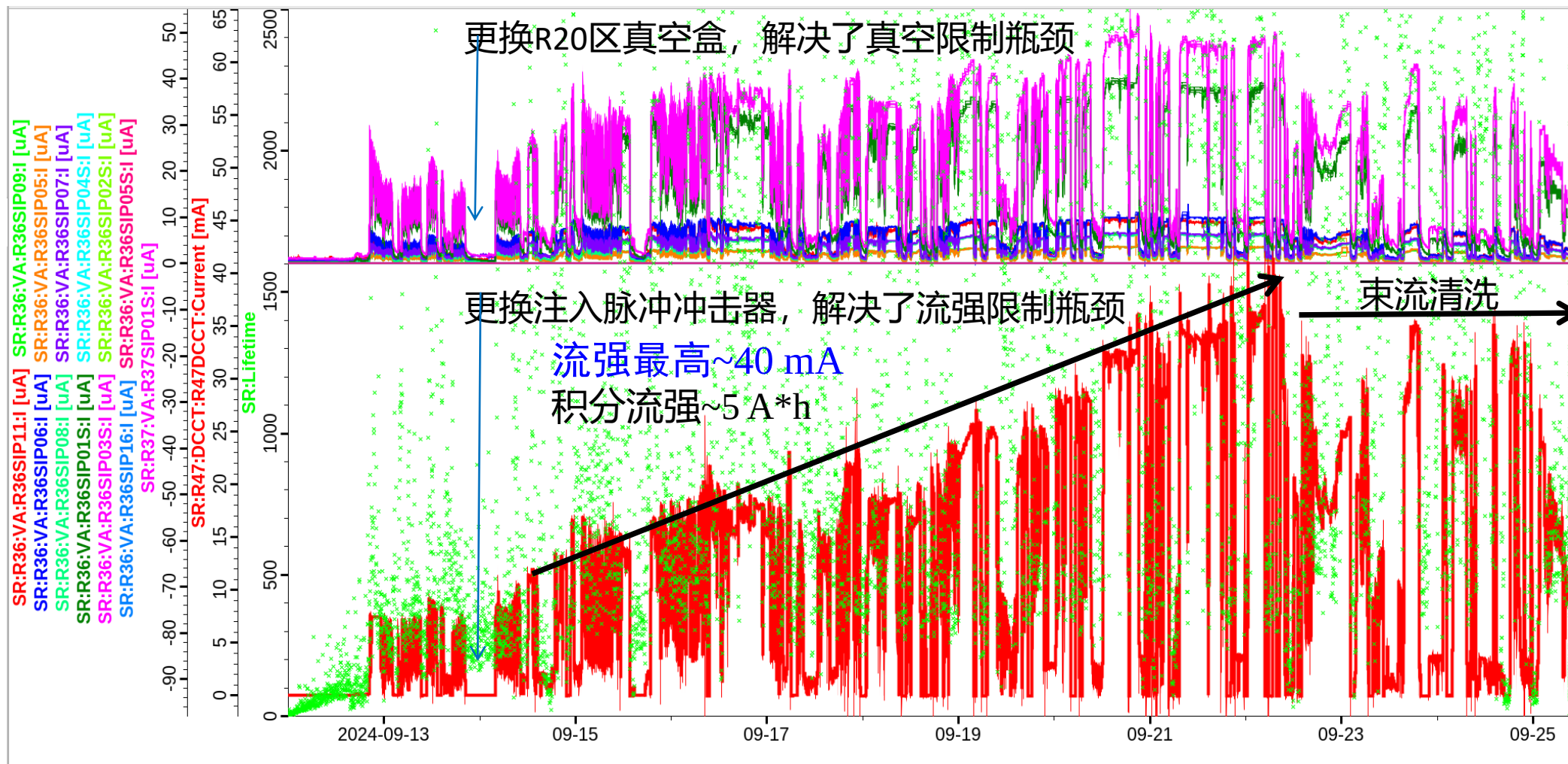
08.06



流强达到 7 毫安

08.15

第2轮：提升流强，超过40毫安





第3轮：发射第一束光，开展束线实验

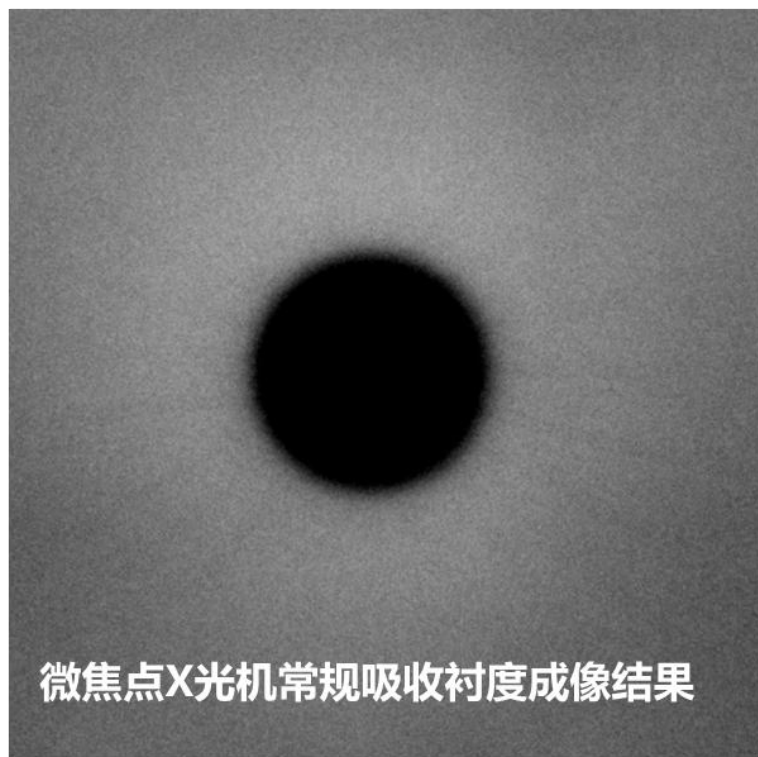


中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

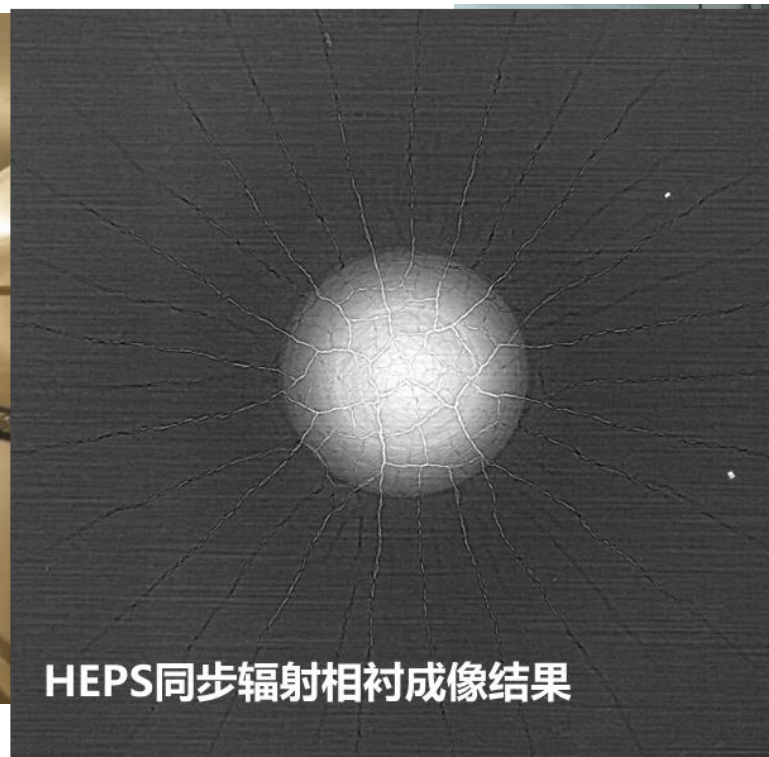
3mm 厚不锈钢板+
几十 μm 深镀铬裂纹



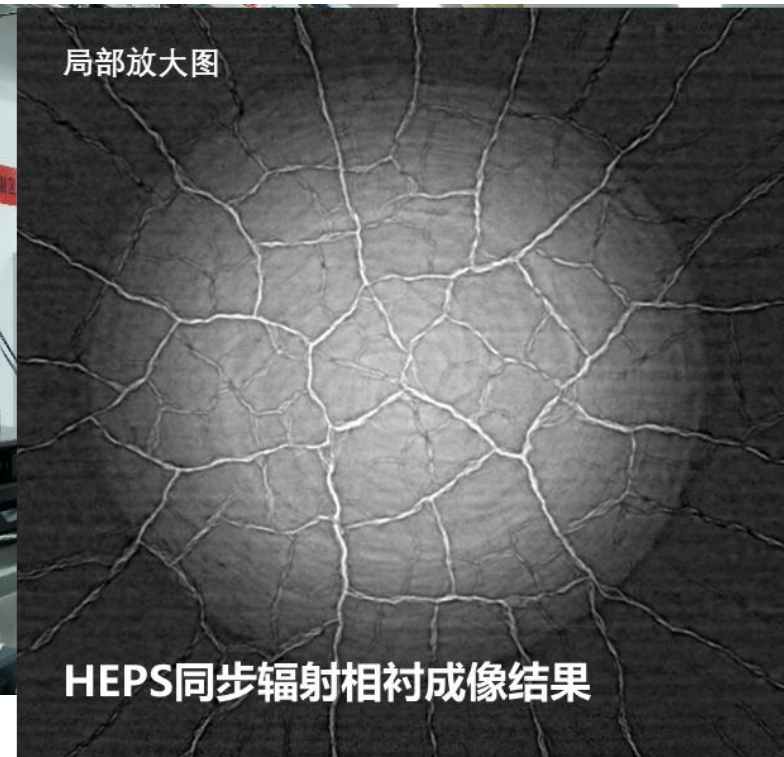
10月12日：“第一束光”及样品实验



微焦点X光机常规吸收衬度成像结果



HEPS同步辐射相衬成像结果

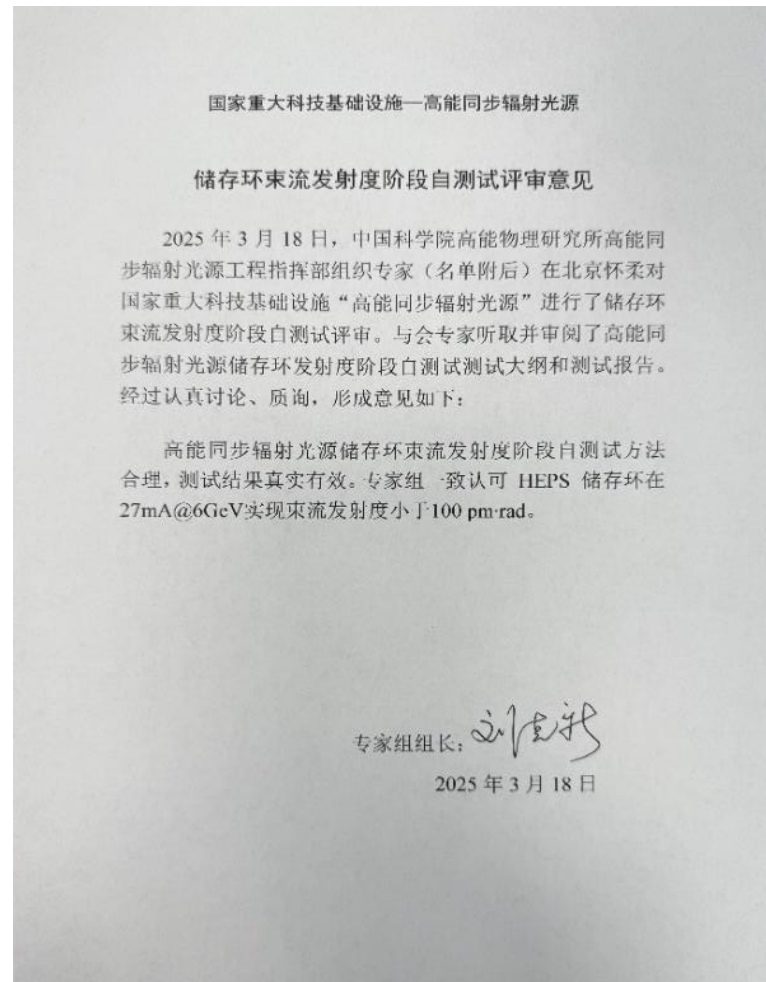
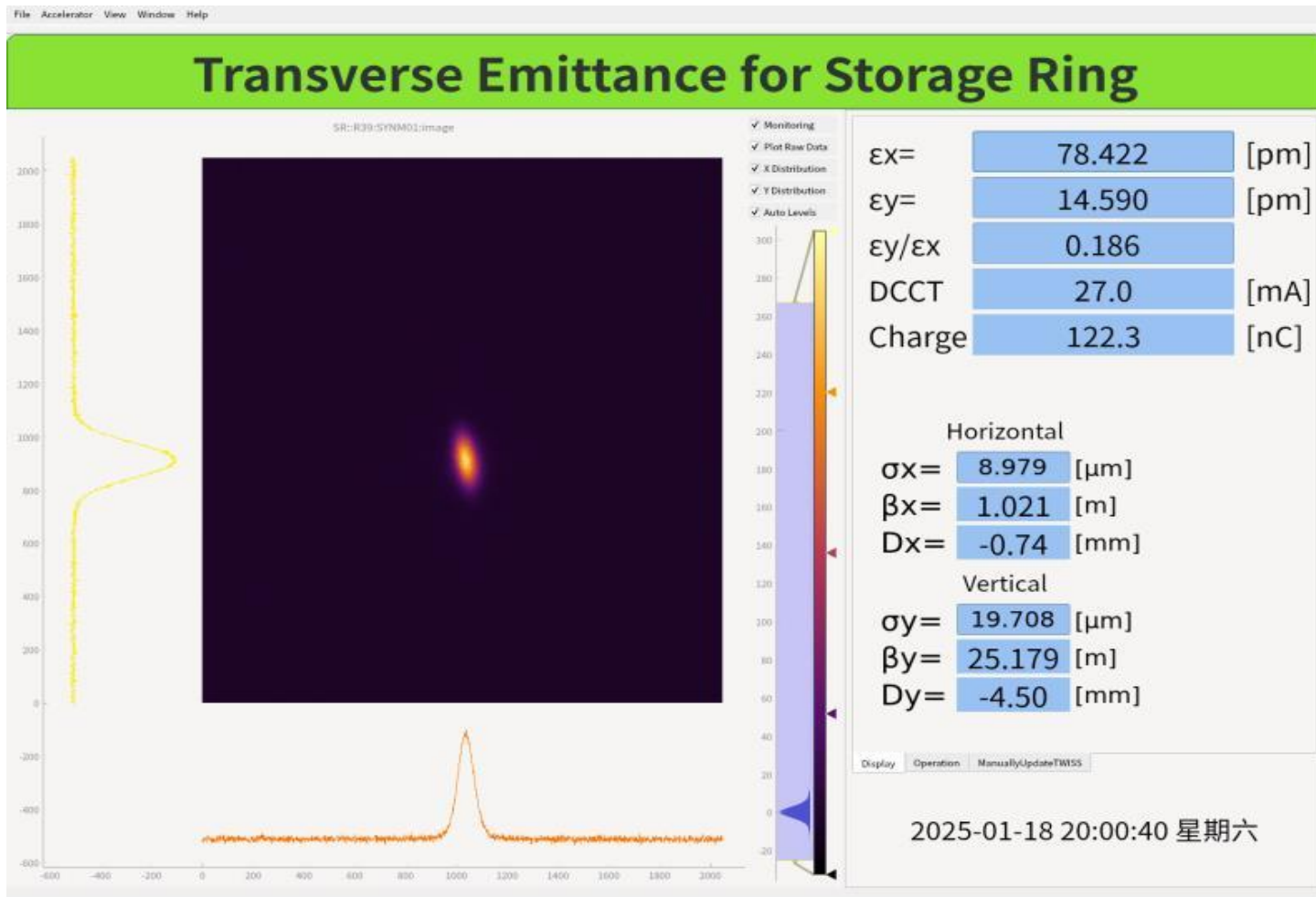


局部放大图

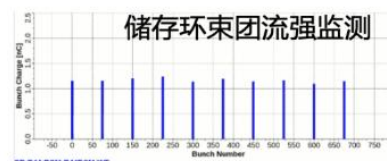
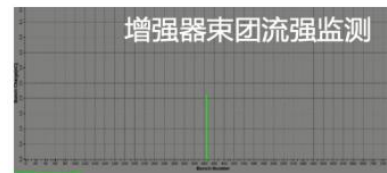
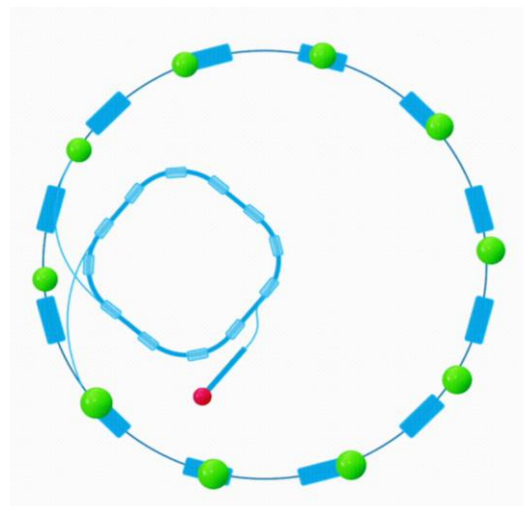
HEPS同步辐射相衬成像结果

B7-硬X射线成像实验站 最长线站 350m

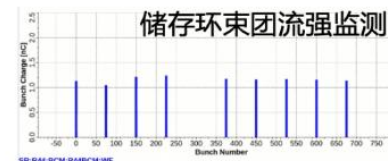
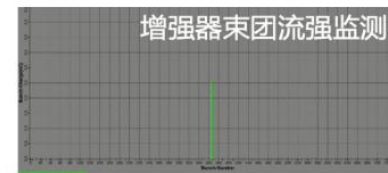
HEPS储存环在27 mA@6 GeV实现束流发射度小于100 pm·rad



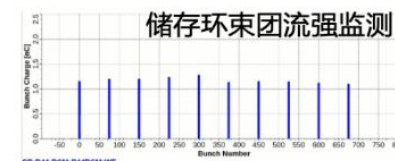
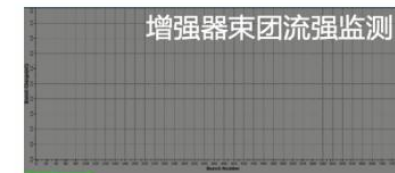
- 2025年1月2日，该方案国际首次调试成功并投入运行
- 2025年9月12日，储存环单束团电荷量超过5nC，满足相关束线测试验收需求。



增强器在500MeV注入单束团，升能到6GeV

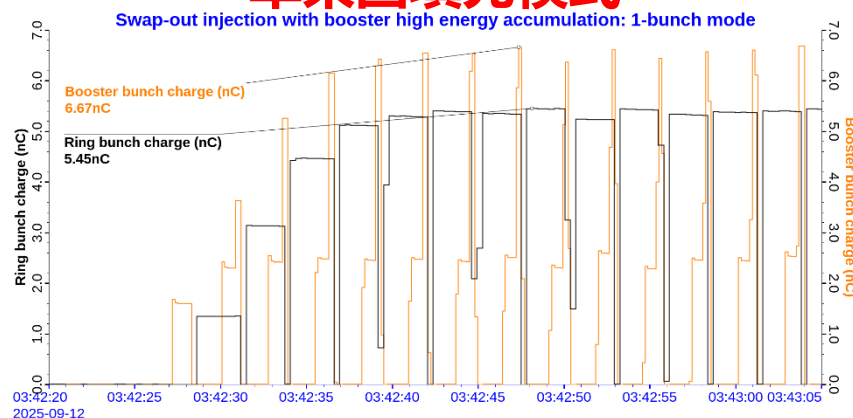


储存环引出束团回注到增强器，同循环束累积

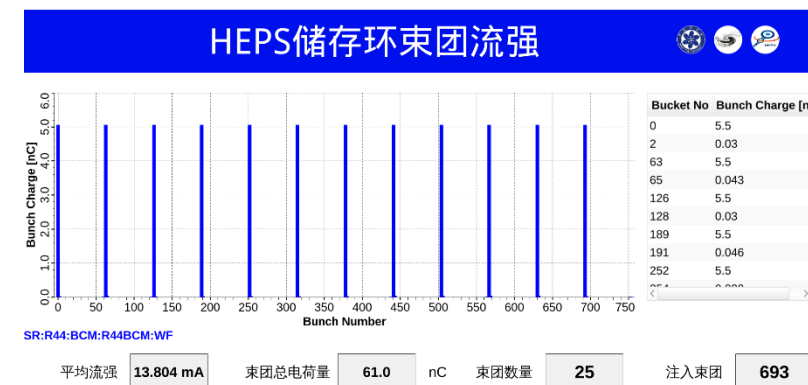


该束团从增强器引出并注入到储存环中，增强器降能

单束团填充模式



12束团均匀填充模式

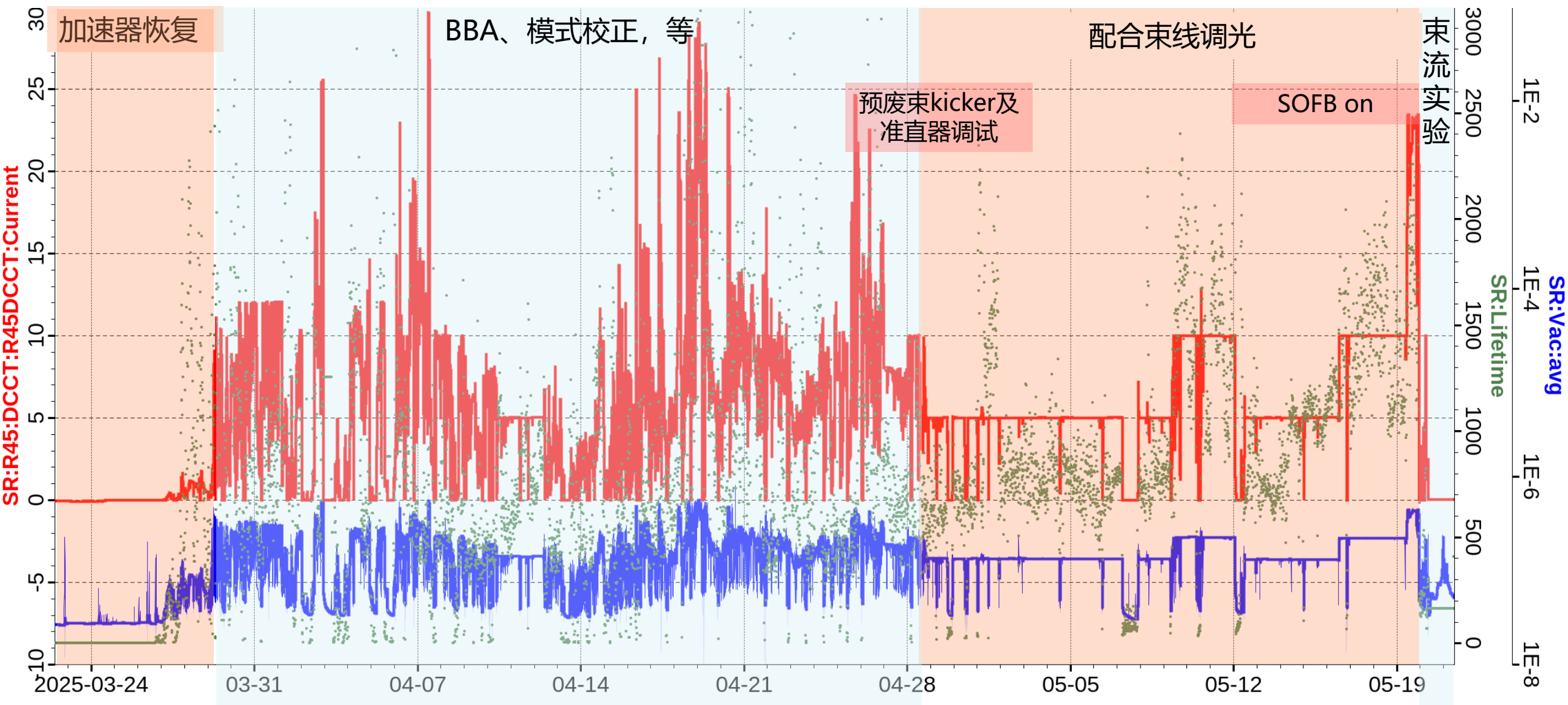




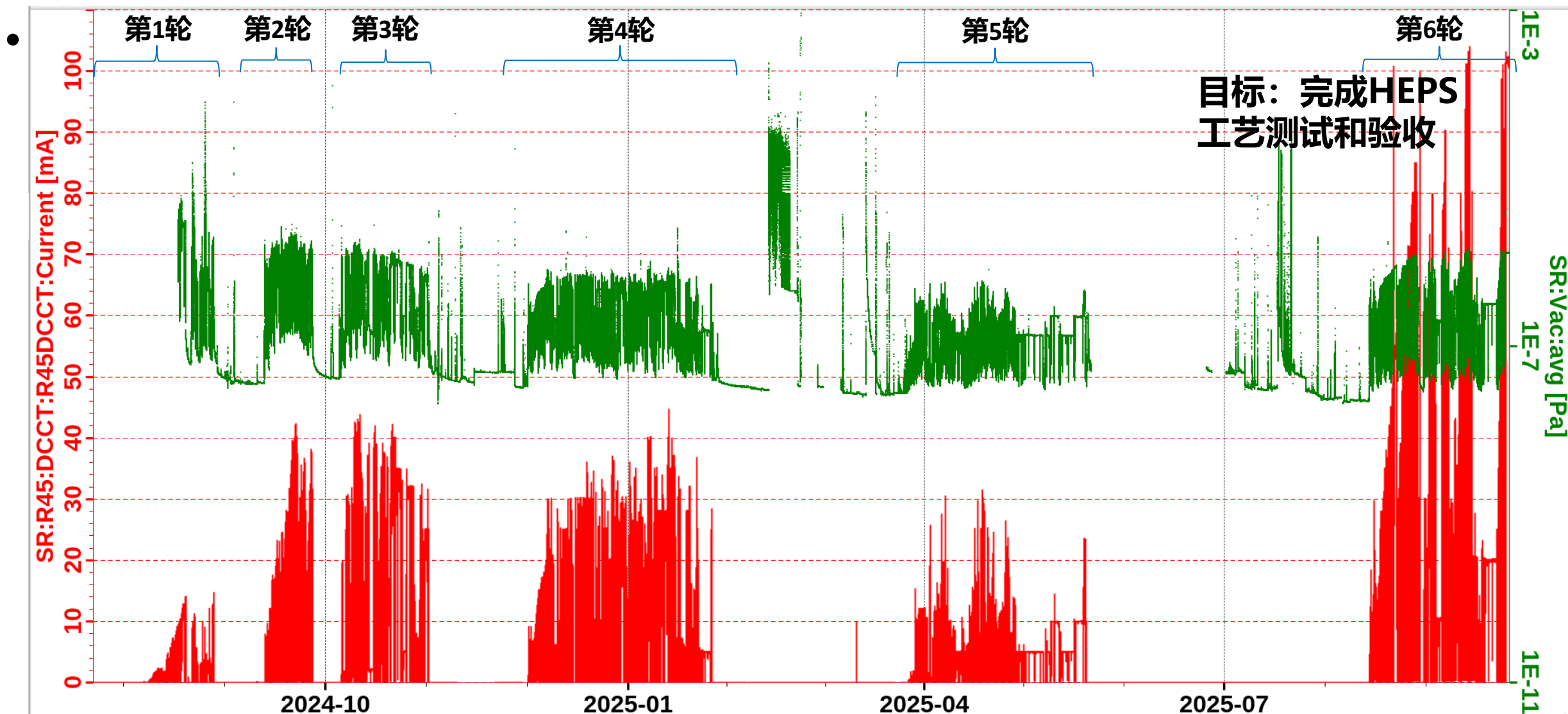
第5轮： 加速器与束线联合调试



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



第6轮：加速器与光束线站工艺测试与验收





2025-9 加速器性能工艺测试，各项指标达到验收指标

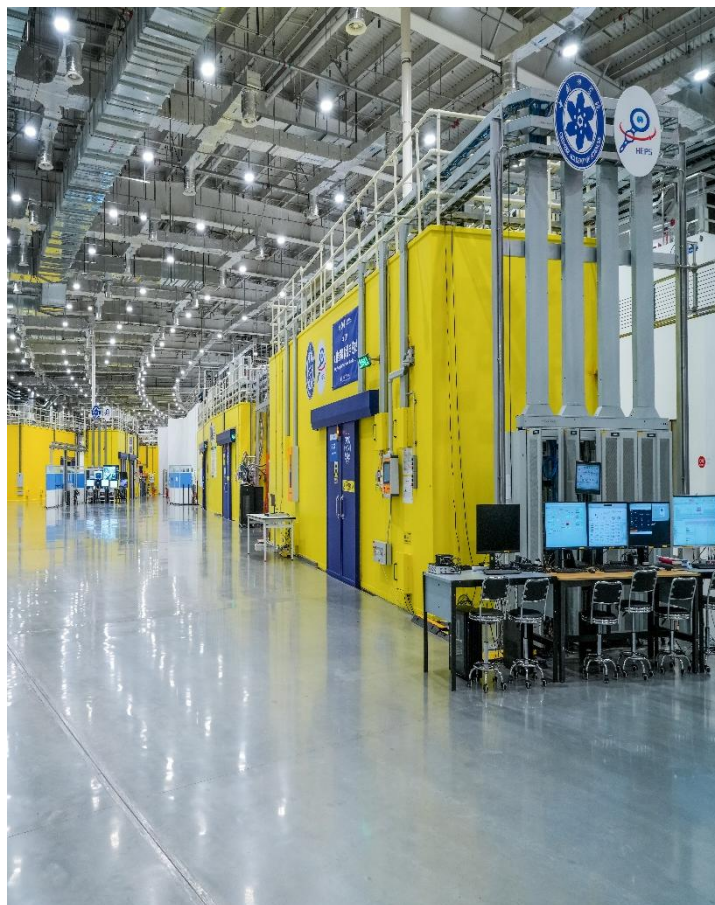
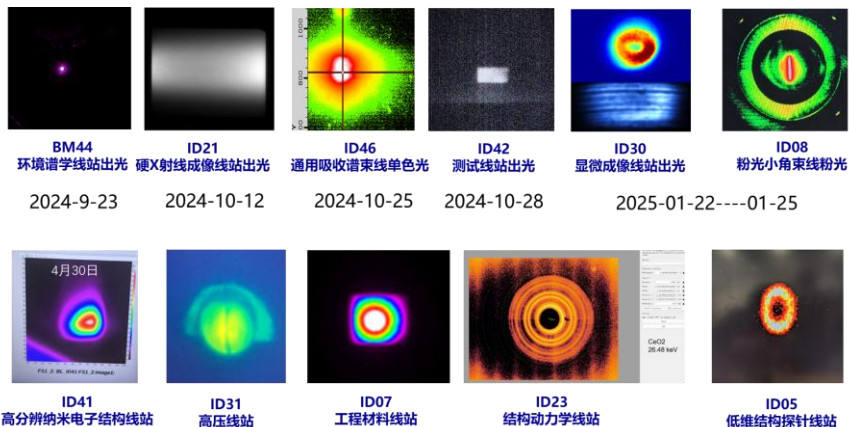
参数 Parameters	设计指标 Design	验收指标 KPP	测试结果
能量Energy (GeV)	6	6	6.01 ± 0.01
流强Beam current (mA)	200	100	100.5±0.4
水平自然发射度 Horizontal natural emittance (pm·rad)	≤60	≤100	56.8±0.9
束流轨道稳定性Beam stability**	10%	20%	全环最大值19.8%
亮度Brightness (phs/s/mm2/mrad2/0.1%BW)	1×10 ²²	2×10 ²¹	(4.0±0.16)×10 ²¹
X射线能量 X-ray energy (keV)	300	≥300	>300 (能量峰值349.57 keV)

*依据《国家发展改革委关于高能同步辐射光源国家重大科技基础设施项目可行性研究报告的批复》（发改高技〔2018〕1928号）。

**垂直方向轨道变化的均方根值与束团垂直均方根尺寸的比值。



总计测试 **15**条线站 **124**个指标； 其中 **27**个达到验收指标 **97**个达到或优于设计指标



HEPS建设了一批国际一流的光束线站：相干衍射成像空间分辨率为9.5nm；聚焦光斑尺寸为12.5nm，最高X射线能量可达302.4keV。。。其中，硬X射线成像线站、结构动力学线站国际领先。



2025年10月29日通过工艺验收



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

高能同步辐射光源工艺验收会

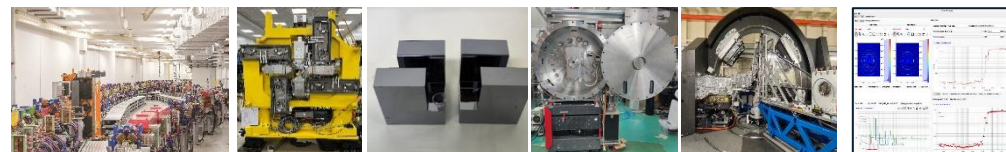
2025年10月29日 北京·怀柔



验收专家组认为

光源综合性能达到国际同类装置领先水平，实现了我国同步辐射光源的代际跨越，培养了一批高水平人才，将为满足国家战略需求、解决重大前沿科学问题和核心关键技术提供有力支撑

中国成为少数几个掌握第四代同步辐射光源全链条技术的国家之一
加速器物理设计、磁铁插入件等硬件技术、光束线、实验站、调光、全生命周期软件等





HEPS将成为旗舰型的同步辐射装置



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

HEPS地位
世界三大旗舰型
高能同步光源

亚洲第一个第四代高
能同步光源

国内唯一高能光源



储存环能量

6 GeV

6 GeV

6 GeV

设计发射度(已达到)

130 pm·rad (130)

42 pm·rad (33)

35 pm·rad (57)

流强 (mA)(已达到)

200 (200)

200 (200)

200 (100)

储存环周长

0.84 km

1.10 km

1.36 km

升级

升级

新建

建设周期/状态

2015-2020
运行

2018-2024
运行

2019-2025
试运行



试运行



HEPS工艺验收以后束流流强

工艺验收后，从11-12开始，流强最高达到150 mA，FOFB投入使用

HEPS
储存环束流强

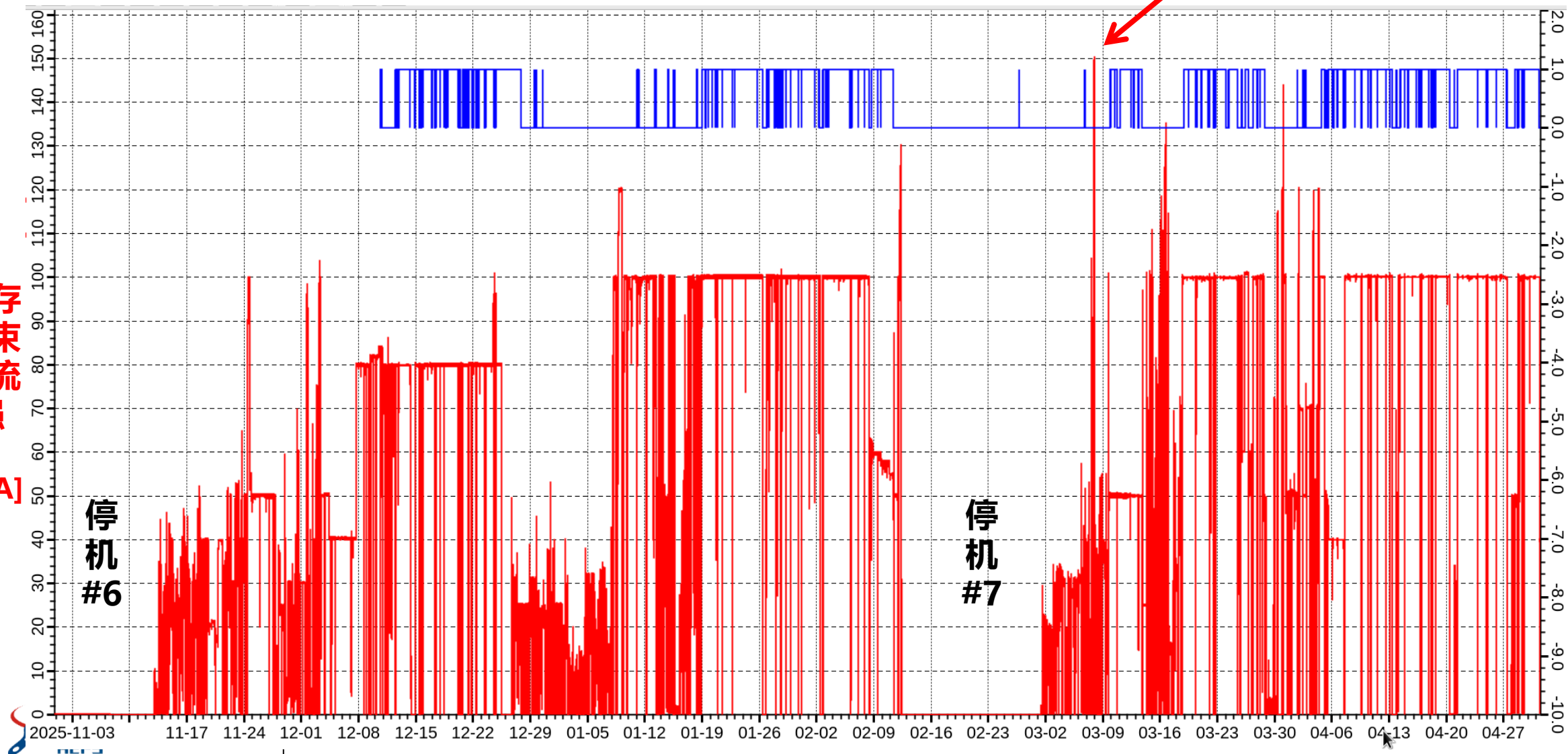
[mA]

停机
#6

停机
#7

FOFB
运行状态

150 mA



HEPS工艺验收以后束流流强

工艺验收后，从11-12开始，流强最高达到150 mA，FOFB投入使用

HEPS
储存环束流强

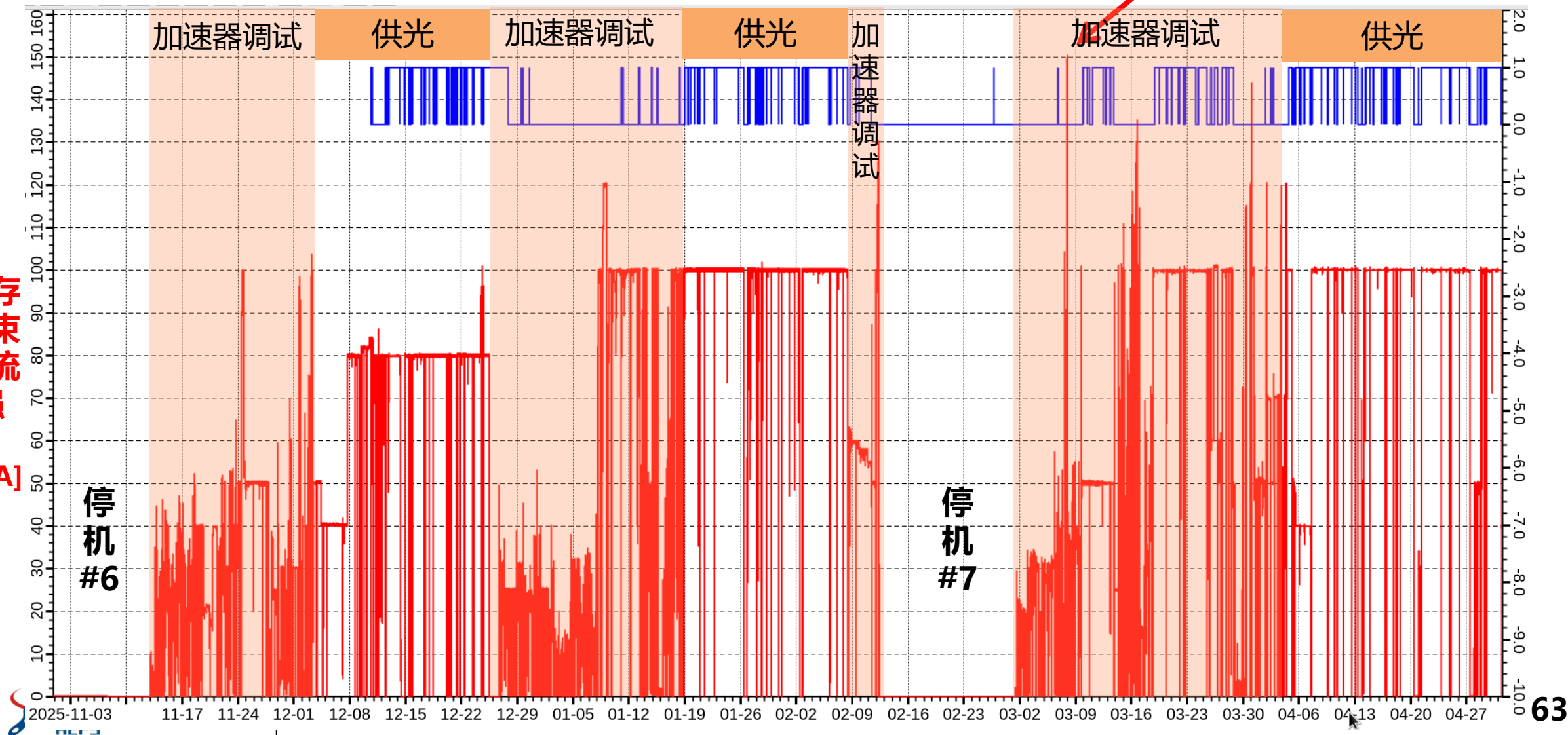
[mA]

停机
#6

停机
#7

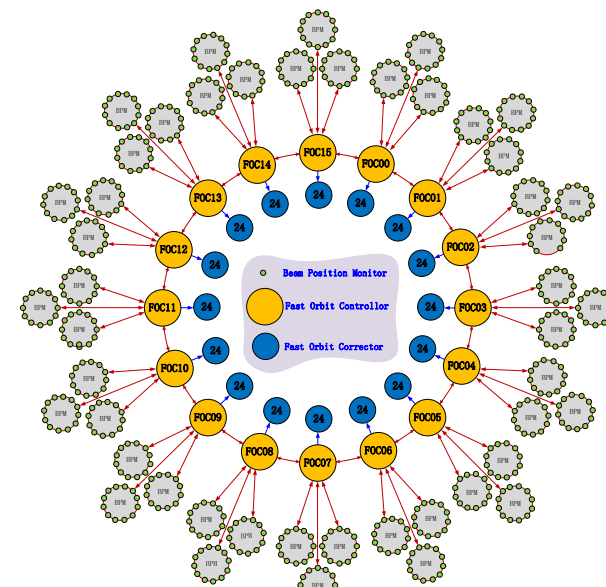
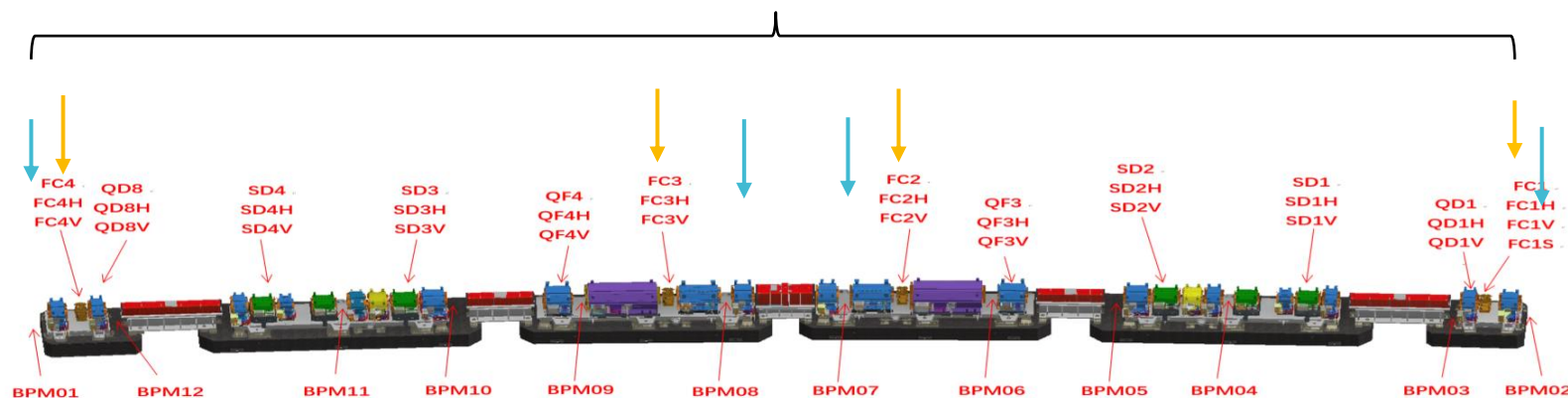
FOFB
运行状态

150 mA

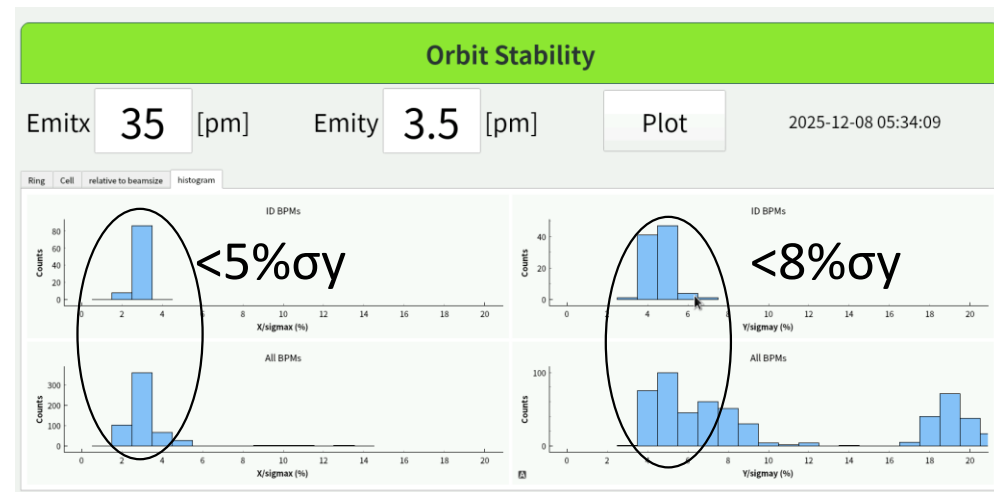
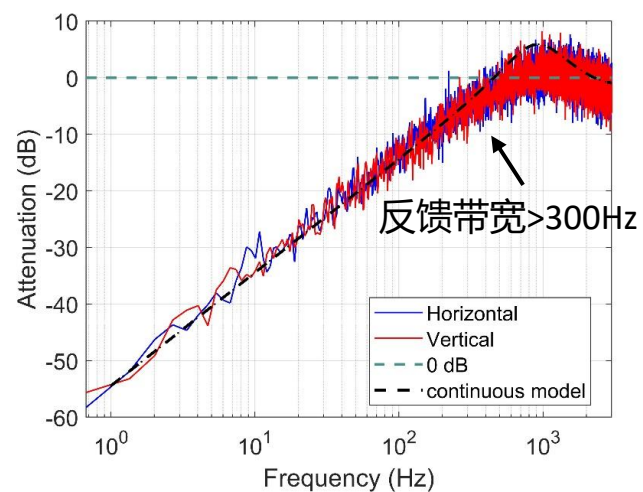
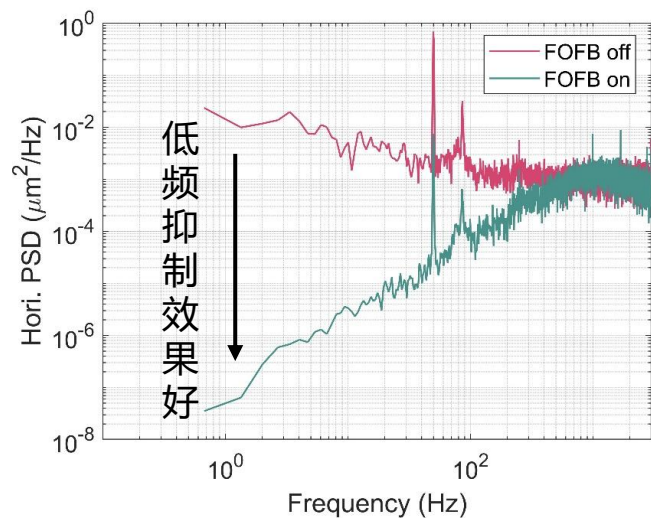


轨道稳定性

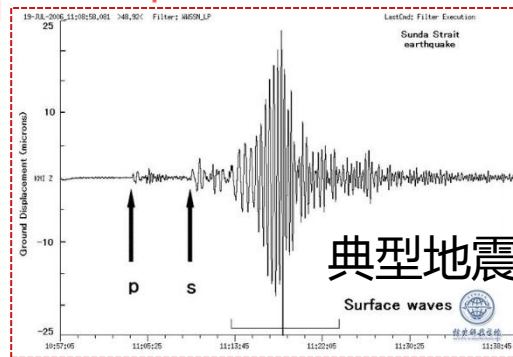
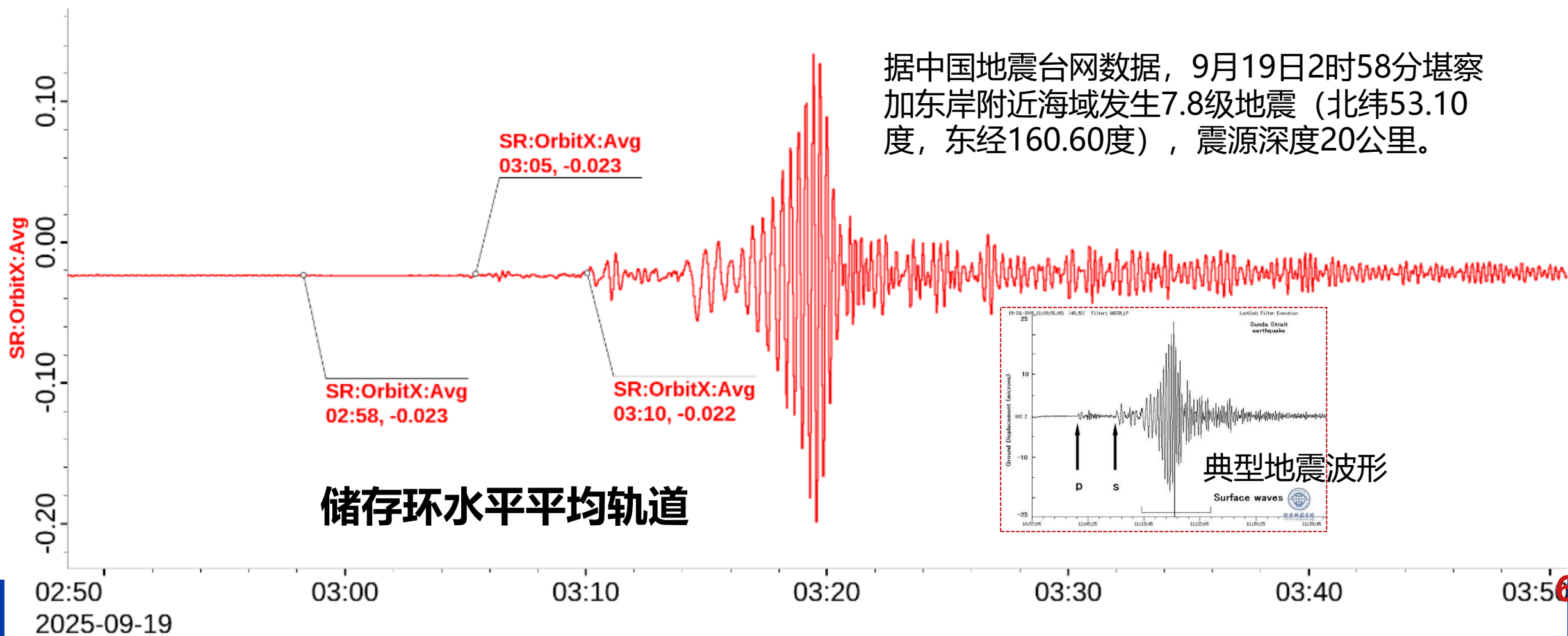
FOFB loop (4*4)



FOFB 全环网络拓扑结构



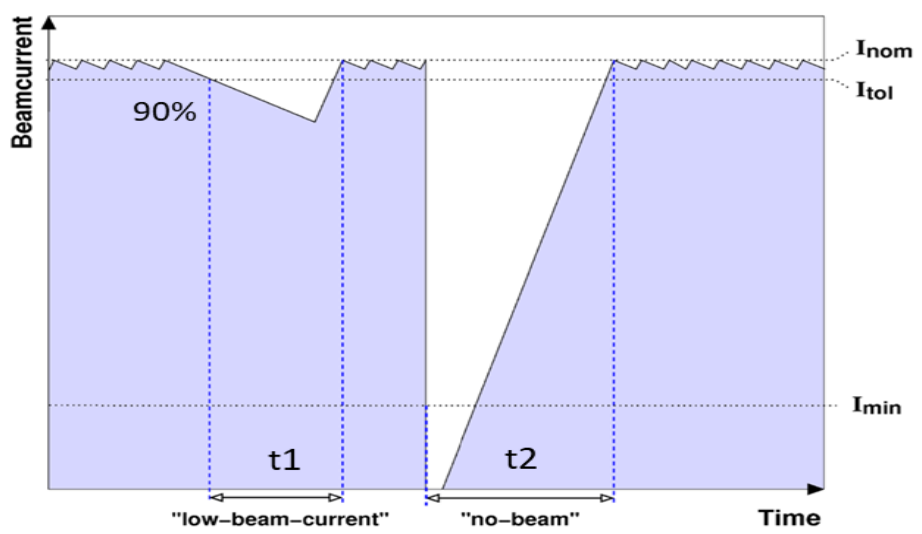
- 得益于良好的轨道稳定性，HEPS完整清晰地记录地震活动



典型地震波形

•判别标准

- 未丢束，但是流强低于topup设定流强的90%到恢复100mA的时间（如100mA topup 供光过程中流强持续低于90mA开始到恢复到100mA），图中表示为t1.
- 丢束后到恢复100mA供光，图中表示为t2.



用户可用性(供光效率)

$$A_{user} = \frac{T_{user_with_beam}}{T_{user}} = 97.35\%$$

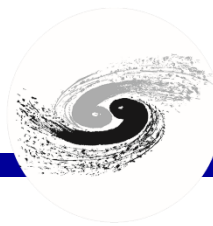
	Statistics (100mA) 26/04/07-26/04/27	Statistics (100mA) 26/1/18-26/2/8
用户时间 (T_user)	426h48min	465h50min
束流中断次数	18	21
总中断时间	11h14min	23h44min
束流运行时间	415h34min	442h6min
可用性(A_user)	97.35%	94.91%
平均无故障时间 (MTBF) *	23.08h	21.05h
平均修复时间 (MTTR) \$	0.63h	1.18h

MTBF*: mean time between failure ----- 束流运行时间（用户可用实验时间）除以束流中断次数

MTTR\$: mean time to repair ----- 指束流中断总时长除以中断次数

高能同步辐射光源

High Energy Photon Source



2026年5月7日，中共中央政治局常委、国务院副总理丁薛祥实地查看高能同步辐射光源，**强调要加强重大科技基础设施建设，提升科研基础保障水平，促进基础研究加速突破。**

35 位委员

主任：姚建年 院士

副主任：丁洪院士、陈春英院士

用户委员会由各领域资深的科学家组建，公正的评估实验的科学价值与可行性，用户课题通过严格遴选后方可获批实验机时。



姓名	单位	职称
姚建年	中国科学院化学研究所	院士
丁洪	上海交通大学	院士
陈春英	中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所	院士
曹军骥	中国科学院大气物理研究所	研究员
程和平	北京大学	院士
封东来	上海科技大学	院士
郭林	北京航空航天大学	教授
郭广平	中国航发北京航空材料研究院	研究员
江涛	中国科学院生物物理研究所	研究员
江怀东	上海科技大学	教授
李亚栋	清华大学	院士
刘洋	浙江大学	教授
刘昌奎	中国航发北京航空材料研究院	研究员
罗胜年	西南交通大学	教授
毛河光	北京高压科学研究中心	院士
门永锋	中国科学院长春应用化学研究所	研究员
南策文	清华大学	院士
欧阳楚英	宁德时代新能源科技股份有限公司	教授
钱天	中国科学院物理研究所	研究员
任洋	香港城市大学	教授
苏东	中国科学院物理研究所	研究员
孙华军	比亚迪锂电池有限公司	教授
孙世刚	厦门大学	院士
部仁忠	中国科学院上海高等研究院	研究员
汪卫华	中国科学院物理研究所	院士
王军	中南大学	教授
王军虎	中国科学院大连化学物理研究所	研究员
王沿东	北京科技大学	教授
韦世强	中国科学技术大学	教授
吴强	中国工程物理研究院	院士
徐义刚	中国科学院广州地球化学研究所	院士
许瑞明	中国科学院生物物理研究所	研究员
杨文革	北京高压科学研究中心	研究员
周忠和	中国科学院古脊椎动物与古人类研究所	院士
孙宝德	上海交通大学	院士



已建立开放透明完善的共享方案



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

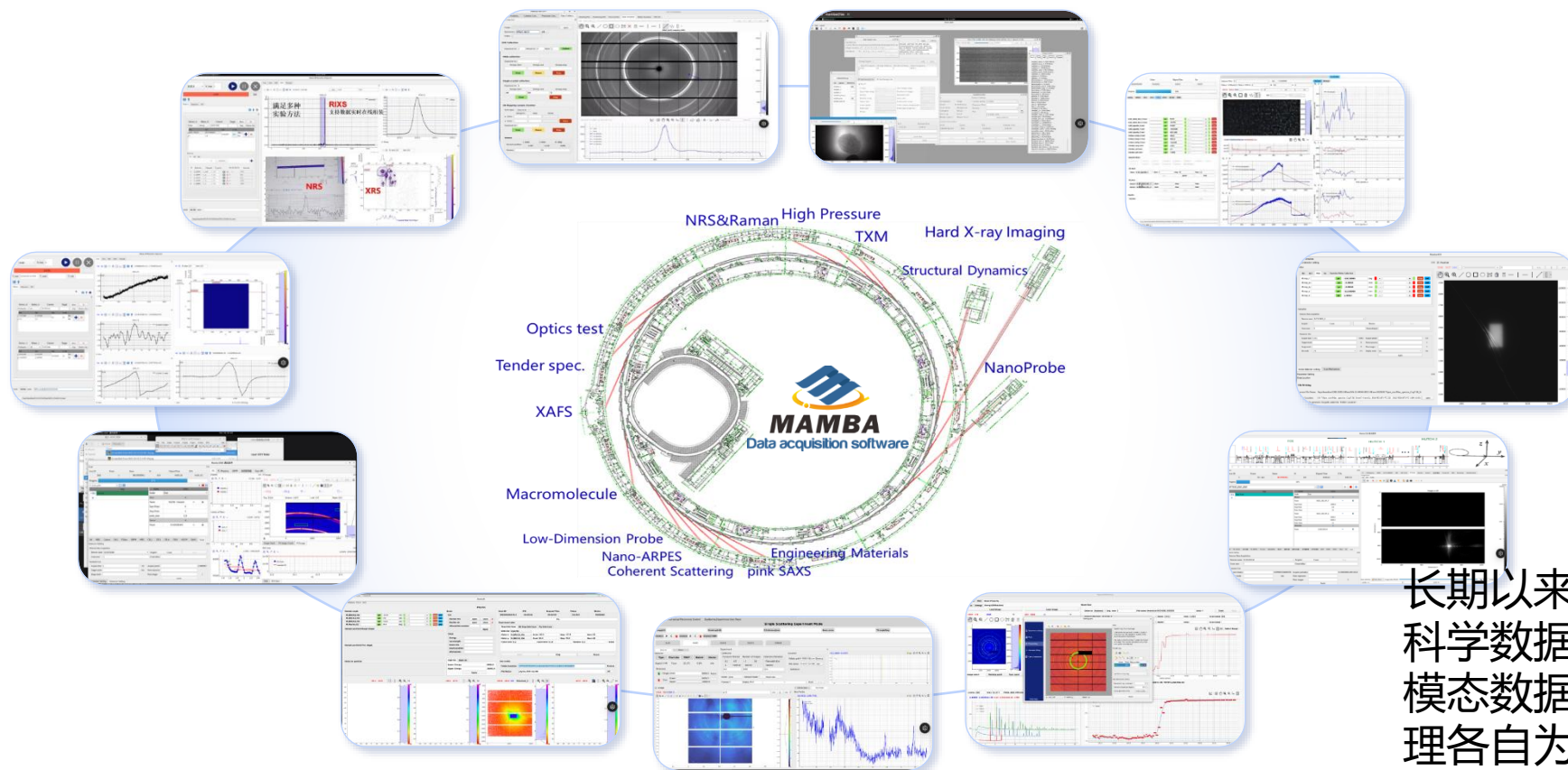
- 已纳入中国科学院重大科技基础设施共享服务平台，面向国内外用户开放申请
- 建设 HEPS-Bot 智能助手、一站式用户服务平台、数据服务系统

- <https://user.heps.ihep.ac.cn/>
- [Domas-DAS 数据服务](#)

- 中、英系统已建设完成
- 实现用户自助服务
- 实现线上安全培训
- 实现线上数据服务功能



- 全球率先实现**控制接口与数据格式统一**的第四代同步辐射装置
- 为对接各学科机器科学家设施提供统一的调度接口，服务AI for Science研究



长期以来，同步辐射实验产生的海量科学数据面临着一系列共性挑战：多模态数据的标准体系不统一、数据管理各自为政、数据分析效率低下、数据价值挖掘不充分。



已完成3轮试运行

数据截至2026年4月30日



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

14

供光光束线站

587

课题申请数

295

用户实验执行数

7632.5

机时 (小时)

107

单位

1026

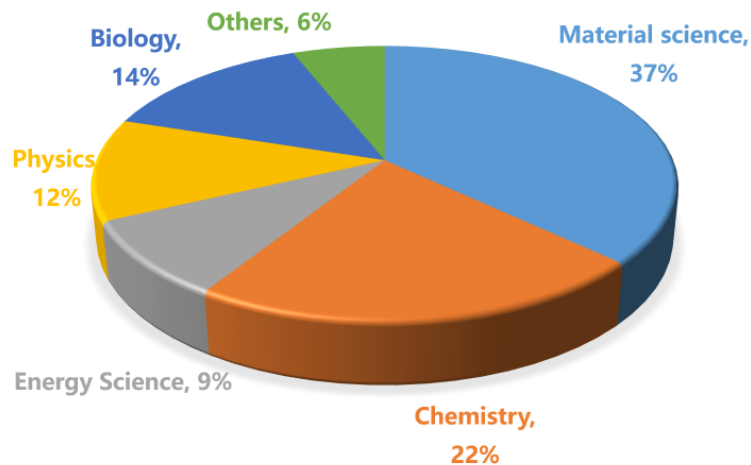
来访用户

6

国外用户实验

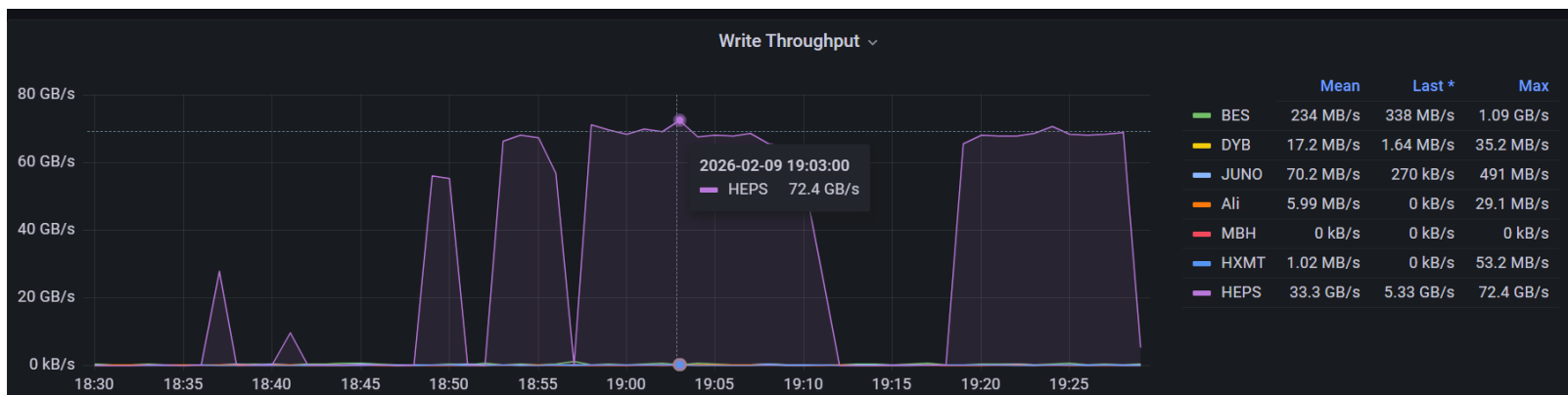
13

商业实验



包括清华、北大、中科院所、比亚迪、宁德时代、中航发、英国UCL等顶尖机构与企业

295个用户实验的领域分布



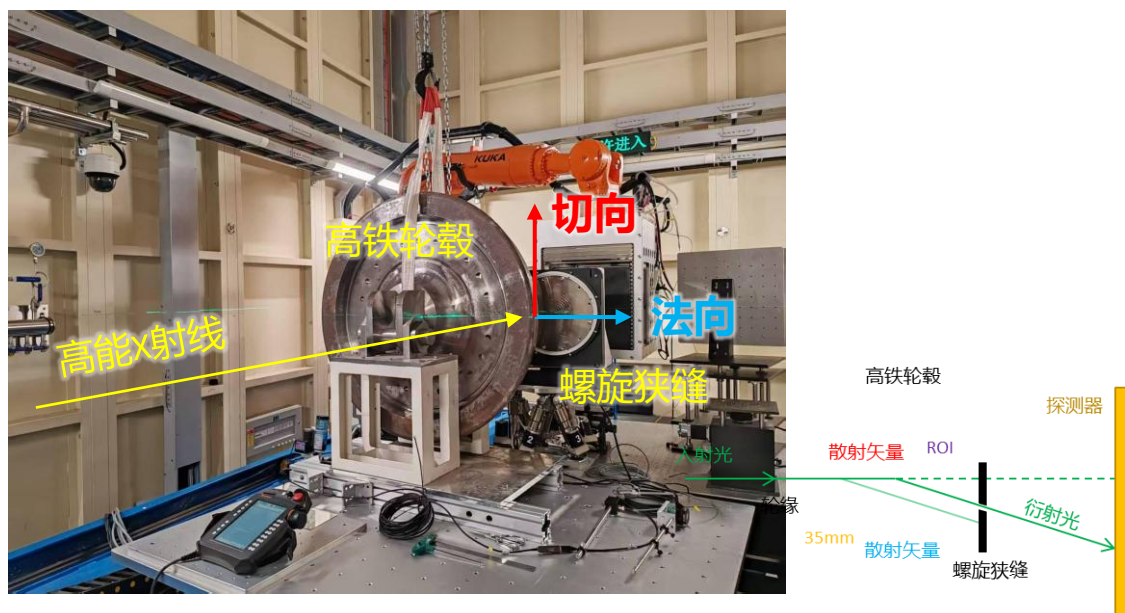
591 TB Raw & processed data

82623 datasets

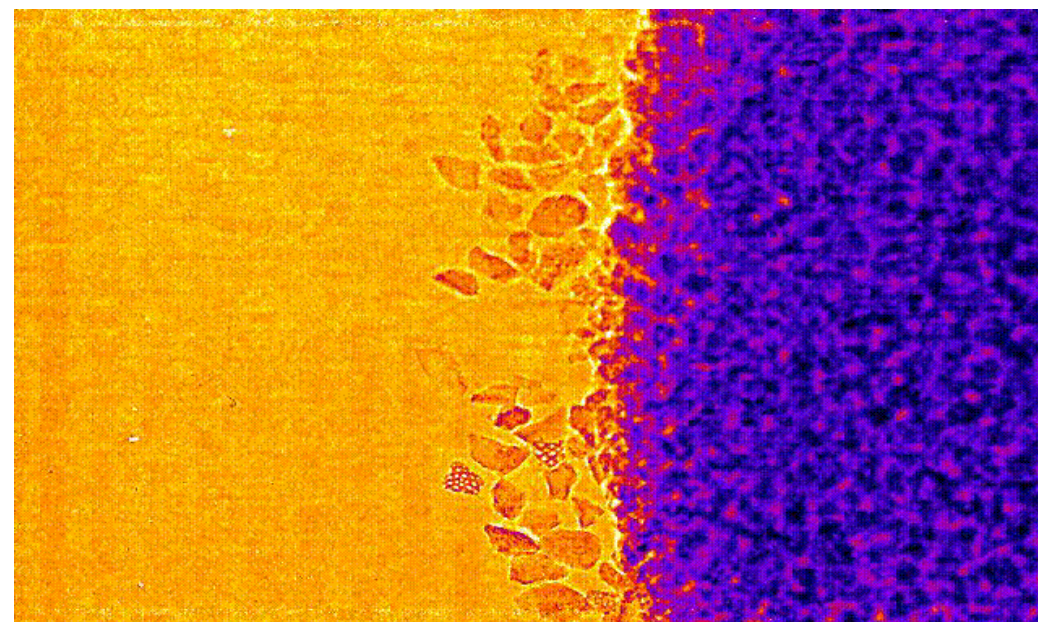
Data collected from Initial
commissioning phase

- 实现高铁轮毂踏面不同位置的三维（切向、轴向和法向）残余应力测量。其中，切向测量系国内首次

- 具备超高时间分辨能力的超快X射线成像方法完成多项快速加载实验，比国外同类线站穿透更深、拍得更快、看得更清



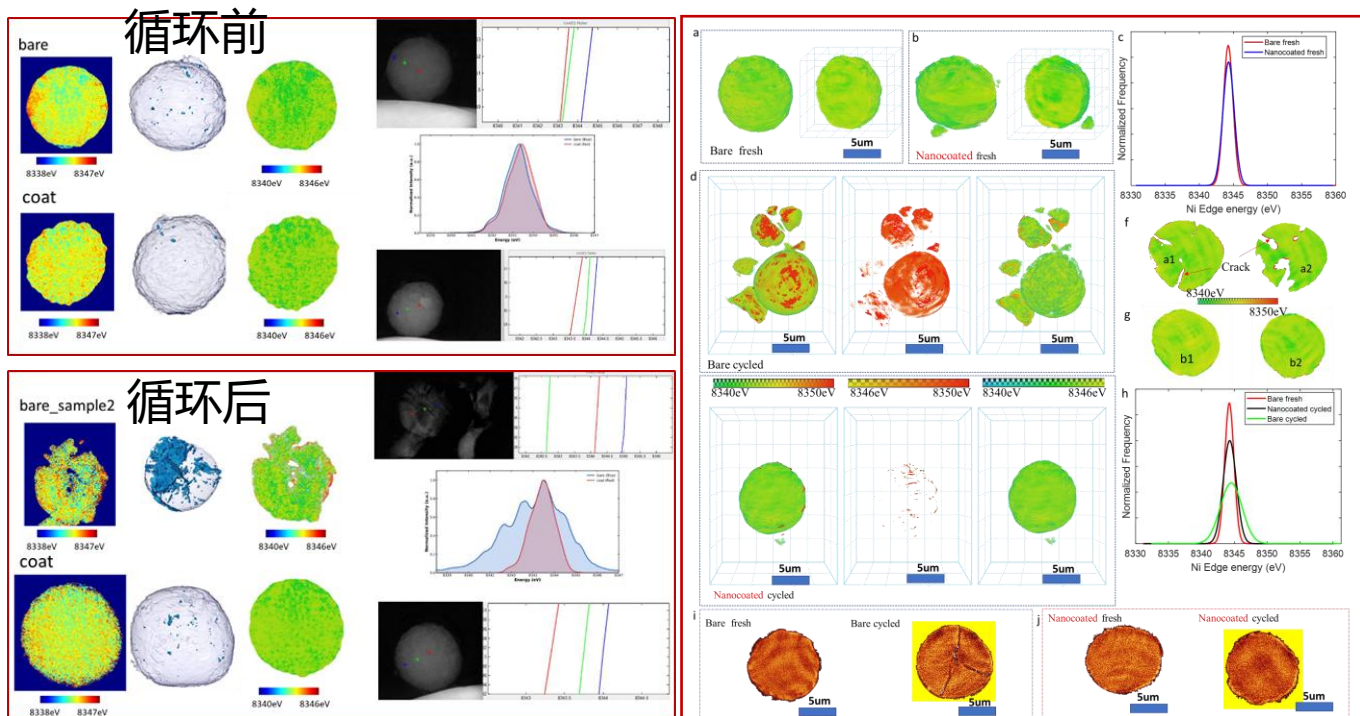
高铁轮毂踏面切向残余应力的测量



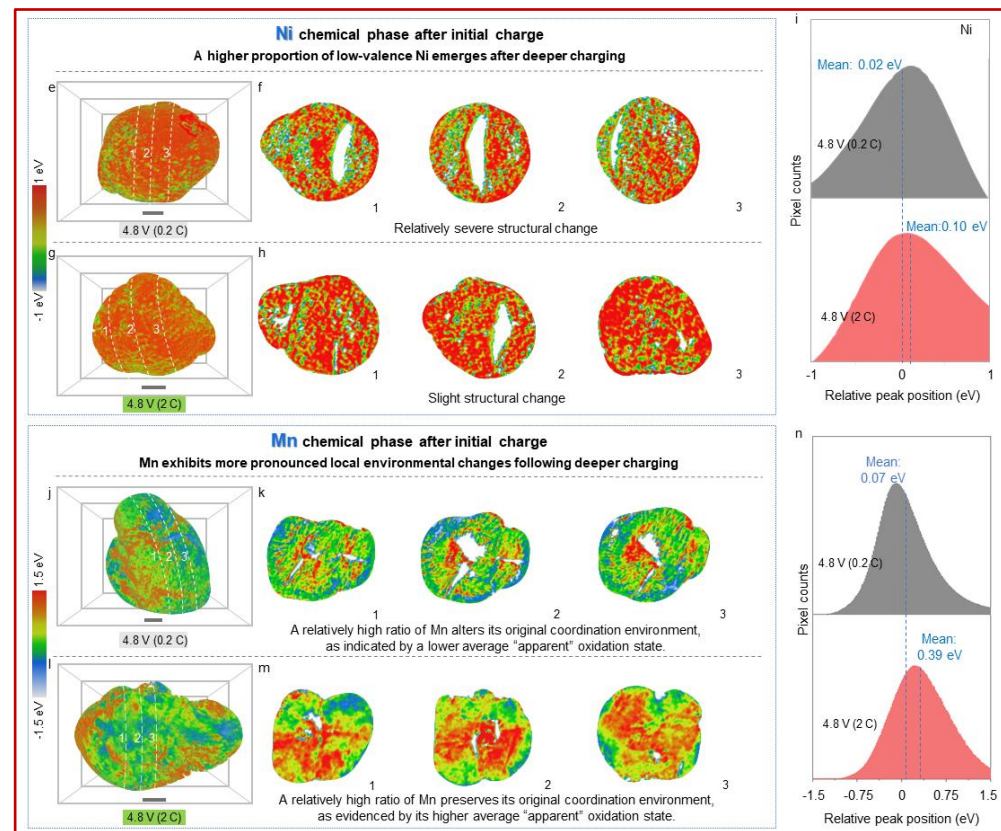
原位追踪高速弹丸的动态侵彻过程

基于ID30近边谱学成像方法解析NMC三元电池材料性能提高机制 电极颗粒纳米涂层工艺改善电池循环及容量性能的解析

锂离子“自钉扎效应”有效降低首次循环的容量损失，缓解电压衰减问题



Nature Nanotechnology, 修改中



Nature, 2026, 7-16发表



总 结





- 作为我国首台第四代同步辐射光源，HEPS建设和调试过程中面临诸多挑战，但总体上按计划推进（2019—2025年）。
- 2025年HEPS顺利通过工艺测试和验收，目前正在试运行。
- **截至2026年4月底，已完成了3轮试运行，支撑100余个用户单位，已展现强穿透、高亮度、高相干等优势，正在开展首批正式用户课题征集与评审，将锚定国家重大需求和产业创新、基础前沿，加强对重大任务的协同攻关。**
- HEPS计划于2026年向全球用户开放。

谢谢！欢迎来HEPS合作交流！

