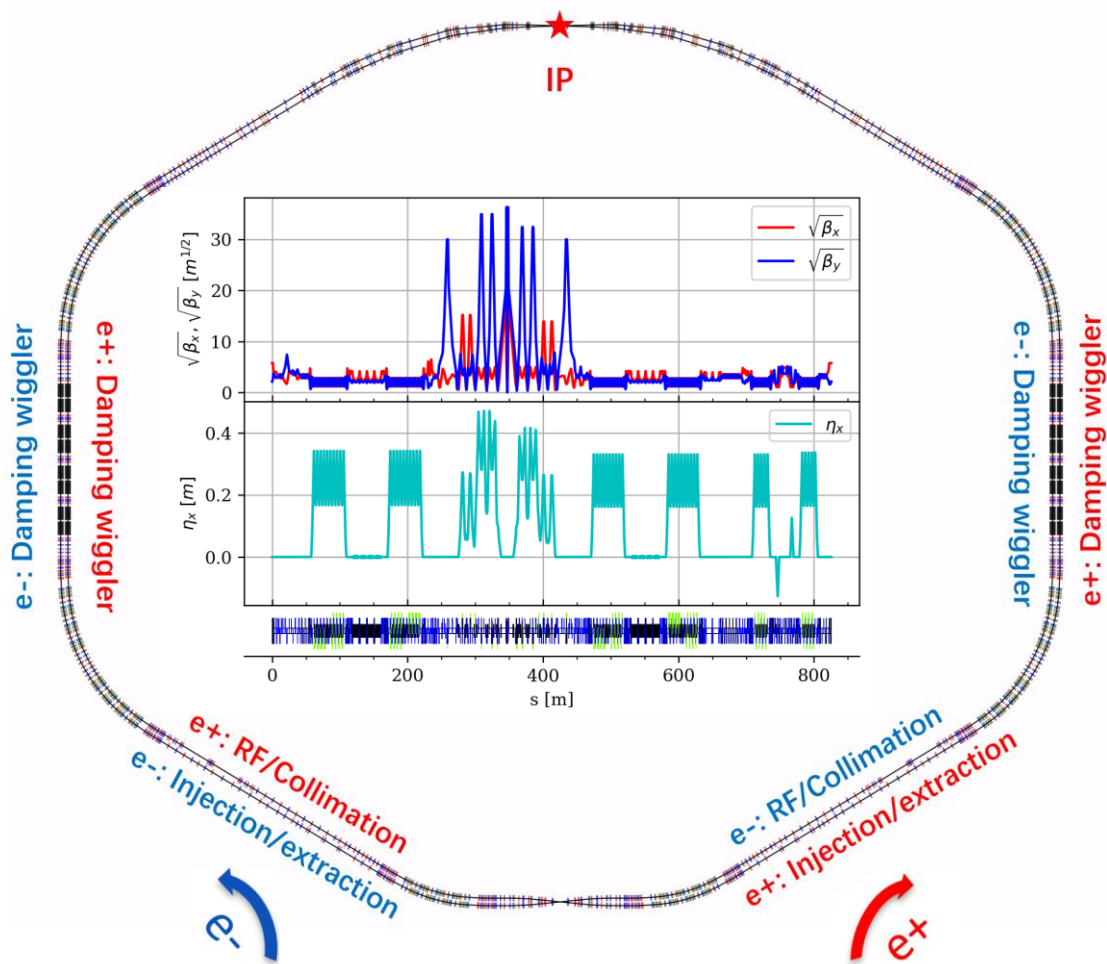


加速器分会总结

邹野、罗箐、张艾霖
2026.07.03, 西安

加速器分会报告

	加速器物理	加速器技术	装置介绍	
STCF	6	7		13
非STCF	5	2	2	9
	11	9	2	22

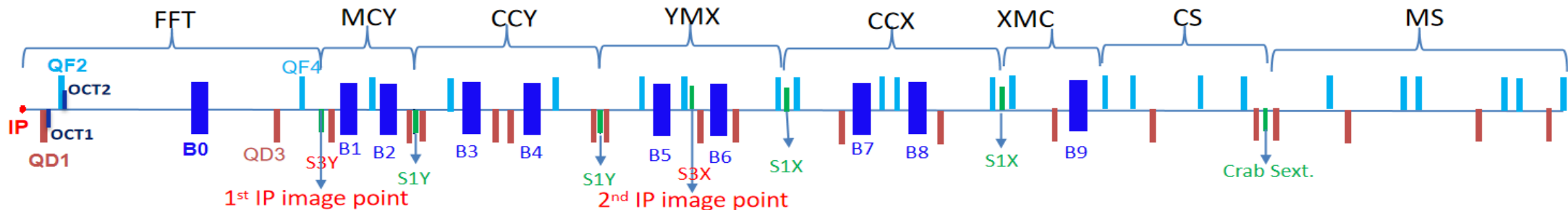


- V5版Lattice与V4版比较：
 - 周长由860m 缩短到 825.5m (利于降低造价)
 - Bucket number: 1376 (32的倍数) (利于注入)
 - 对撞点处 β_x^* 由60 mm 降到 40 mm (利于抑制X-Z不稳定性)
 - 高频段采用长漂移节布局 (利于高频腔整体放置)
 - 阻尼扭摆器峰值场强由1.6 T增加到1.9 T (利于缩短DW长度)
 - 能散和动量压缩因子稍微增加: 约10% (利于增加托歇克寿命)
- Touschek寿命较V4版本综合提升约40%

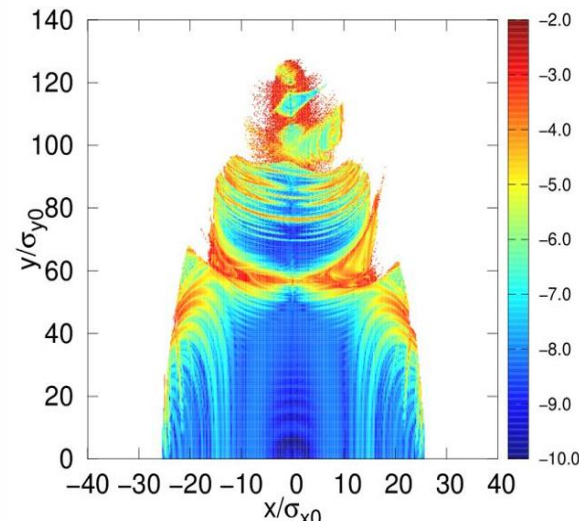
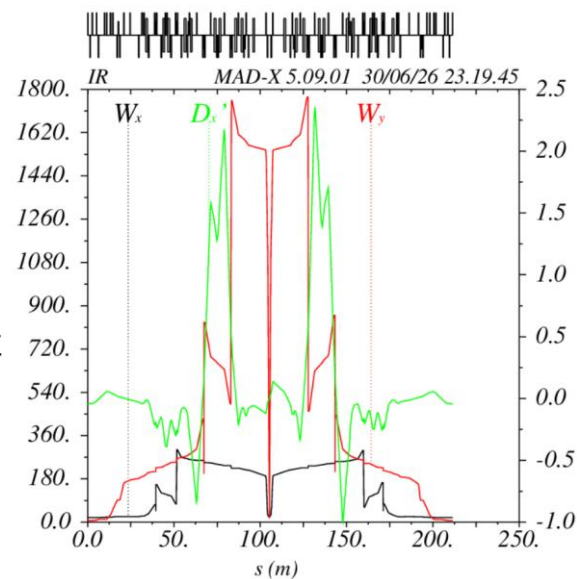
能量(GeV)	2	1	1.5	3.5
亮度(cm ⁻² s ⁻¹)	1.02E+35	7.95E+33	2.64E+34	3.31E+34
Touschek寿命(s)	364	267	371	10972

• Y. Zou*, L. Zhang, T. Liu, et al., Optics design of the Super Tau-Charm Facility collider rings, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1084 (2026) 171191

- 模块化布局: 终聚焦望远镜(FFT), 垂直和水平色品校正段 (CCY/CCX), Crab六极铁(CS)段



- 更新了(V5.0)对撞区光学设计 $\beta_y^* = 0.8\text{mm}$, $\beta_x^* = 40\text{mm}$
 - 调整对撞区双环最大间距到2m
 - 减小 Hx 到0.025m以内, 以增大局部动量孔径LMA
- 优化了对撞区高阶色品, 对撞区动量带宽超过 $\pm 1.5\%$
 - 减小Crab六极铁处的二阶色散及其斜率几乎到0
 - 抑制了垂直二阶色品
- 改善了对撞区超导四极铁边缘场补偿方案, 可大幅恢复动力学孔径
- 对撞区更加深入的非线性优化工作还需进一步展开
 - 进一步优化对撞区lattice, 以更好地优化水平三阶色品
 - 详细地模拟优化实际螺线管补偿



主要内容

介绍

- STCF 简介及集体效应挑战

单束团不稳定性

- 纵向MWI: CSR & CWR + RW (NEG膜)
- 横向TMCI: 几何+ RW (NEG膜)

耦合束团不稳定性

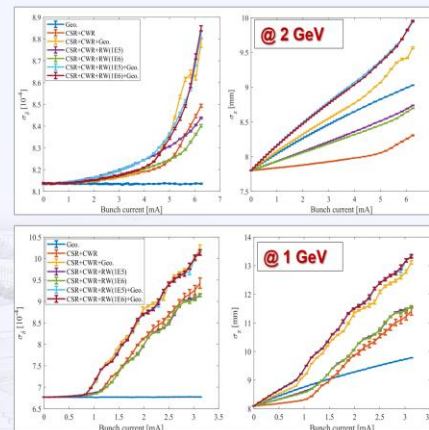
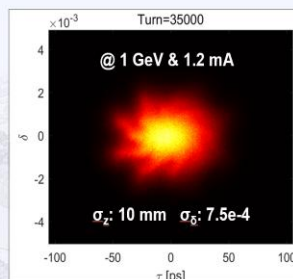
- 由RF腔加速模式驱动
- 由RF腔HOMs驱动
- 由RW驱动

电子云与离子俘获不稳定性

总结

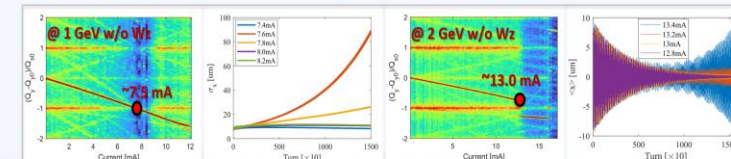
微波不稳定性

- CSR 和 CWR 主导了 MWI
- NEG 的电导率影响可忽略不计
- 危险: @ 1 GeV & 1.2 mA
- 安全: @ 2 GeV & 3.0 mA



横向单束团不稳定性

- 粒子追踪模拟 + 解析计算:
- @ 1 GeV, TMCI 阈值 ~ 7.5 mA; @ 2 GeV, TMCI 阈值 ~ 13 mA



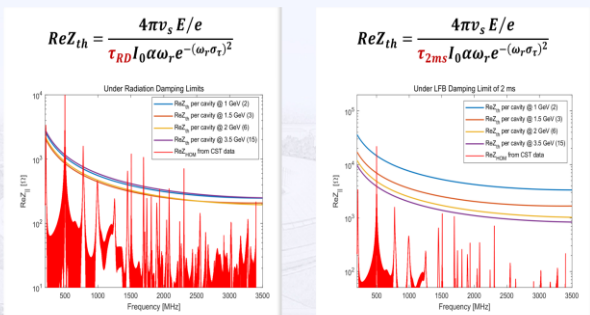
$$\textcircled{1} \quad I_{th} = \frac{4\pi V_s (E_0 / e)}{T_0 \sum \beta_{xy} k_{xy}}$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{\Delta v_y}{v_s} = \frac{e l_0^{\text{th}}}{2 E_0 \omega_0} \sum \beta_{xy} k_{xy} \cong 0.7$$

RW (NEG 1x6 5/m) + Geo. @ bunch length of 8 mm			
Beam energy	E0	2 GeV	1 GeV
Revolution period	T0	2.75e-6 s	2.76e-6 s
Synchrotron tune	vs	0.0193	0.0147
$\sum \beta_{xy} k_{xy}$ (RW)		1974 V/pC	984 V/pC
$\sum \beta_{xy} k_{xy}$ (Geo.)		6600 V/pC	6600 V/pC
Threshold bunch current (1: Tune shift = ν_y)		20.5 mA	8.8 mA
Threshold bunch current (2: Tune shift = $0.7 \nu_y$)		14.4 mA	6.2 mA

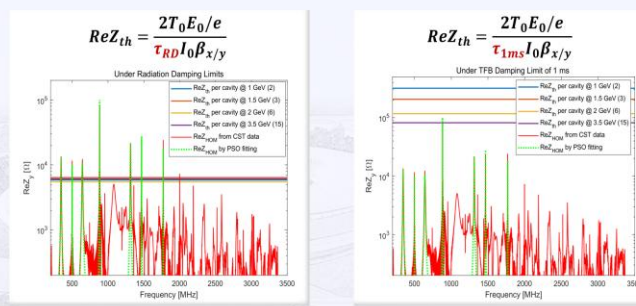
纵向高次模不稳定性评估

- 基于保守估计的解析计算 (假设各腔体HOM频率完全对齐)
- 仅靠辐射阻尼不足以抑制不稳定性
- 需采用能提供至少2 ms 阻尼的反馈系统 (这在工程上切实可行)



横向高次模不稳定性评估

- 基于保守估计的解析计算 (假设各腔体HOM频率完全对齐)
- 仅靠辐射阻尼不足以抑制不稳定性
- 需采用横向逐束团反馈系统(阻尼时间<1 ms)



总结

- 初步阻抗模型 (含 CSR、CWR、RW 和 Geo.) 已建立。
- 1 GeV 下 MWI 以 CSR 和 CWR 为主导, NEG 膜电导率影响甚微; TMCI 阈值高于两倍标称束流强, 处于安全范围。
- 加速模驱动的低阶耦合束团模式可由 PI 控制器完全抑制。
- 对于RF腔 HOMs 驱动的 LCBI, 需逐束团反馈阻尼时间 < 2 ms; 而 TCBI 抑制则需阻尼时间: HOMs < 1 ms, 电阻壁和电子云 < 0.5 ms, 离子效应 < 0.4 ms。

◆ STCF 对撞环的误差水平设置

RMS value, Cut-off @ 2.5σ

Component	Horizontal (μm)	Vertical (μm)	Longitudinal (μm)	Rotation (mrad)	Main Field Error
Dipole	100	100	100	0.1	0.02%
Quadrupole	50	50	100	0.1	0.02%
FFT Doublet	30	30	100	0.1	0.02%
Arc/IR Sextupole	50 / 30	50 / 30	100	0.1	0.02%

◆ 后续模拟中使用的 BPM 误差如下:

BPM offset (before BBA)	BPM offset (after BBA)	BPM noise (TBT)	BPM noise (Closed Orbit)	BPM gain	BPM roll
300 μm	20 μm	1 μm	0.1 μm	5%	0.1 mrad

- 四极磁铁的准直误差, 尤其是 FFT 四极铁, 对闭轨的影响最为显著;
- 对撞区六极磁铁的准直误差对 β 、色散及耦合均有较大影响;
- 给出了 STCF 对撞环的误差水平设置, 并完成了 BPM、校正磁铁和斜四极磁铁的布局;
- 对首圈传输、闭轨、 β 、色散及耦合进行了校正, 尤其是对 IP 点处参数的校正. 校正后, DA 得到良好恢复, Touschek 寿命恢复了 70%~80%.

下一步工作:

- 继续优化 BPM, 校正磁铁和斜四极磁铁的布局, 考虑 girder 的准直误差;
- 考虑 mover, 并采用新的校正流程进行校正;
- 继续研究 IP 处的轨道校正流程和方法.

◆ BPM、校正磁铁和斜四极磁铁的布局

- **BPM:** 几乎每个四极磁铁旁均会放置 BPM;
- **校正磁铁:** 聚焦四极磁铁旁放置 CORx, 散焦四极磁铁旁放置 CORy, 六极磁铁旁放置 CORx 和 CORy (以 2 GeV lattice 为准);
- **斜四极磁铁:** 部分六极磁铁绑斜四极磁铁线圈, 部分四极磁铁旁放置斜四极磁铁;
- 每个环总计有 401 个 BPM, 266 个 CORx, 255 个 CORy 和 94 个斜四极磁铁(V5 lattice).

◆ 校正流程和方法

- 首圈轨迹校正: SVD + 轨迹响应矩阵
- 全环轨道和色散校正: SVD + Dispersion Free Steering (DFS);
- IP点轨道和色散校正: SVD with weight factor;
- 光学耦合校正: Linear optics from closed orbits (LOCO);
- β_y^* 校正: K-modulation;
- 根据需要可迭代上述校正流程.

斜四极磁铁数量较 V4.3 减少69个

$$\mathbf{R}\vec{\theta} + \vec{d} = 0$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} (1-\alpha)\mathbf{A} \\ \alpha\mathbf{B} \end{pmatrix}, \quad \vec{d} = \begin{pmatrix} (1-\alpha)\vec{u} \\ \alpha\vec{D}_u \end{pmatrix}$$

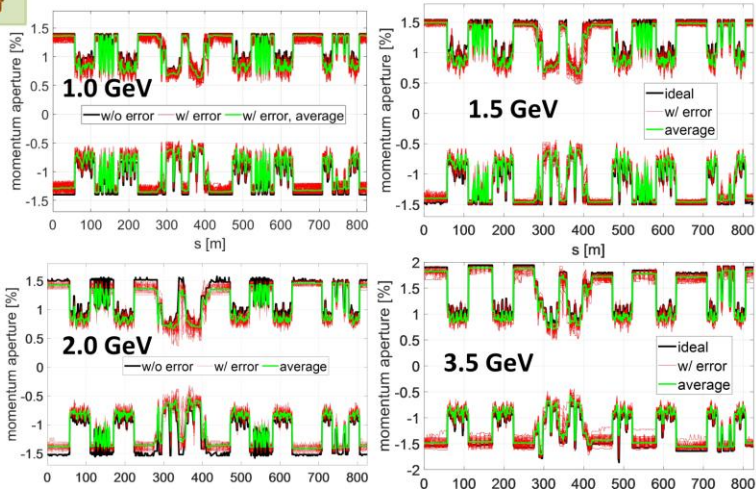
后续展示 1 GeV 的校正模拟

不同能点的校正模拟结果



◆ LMA和 Touschek 寿命

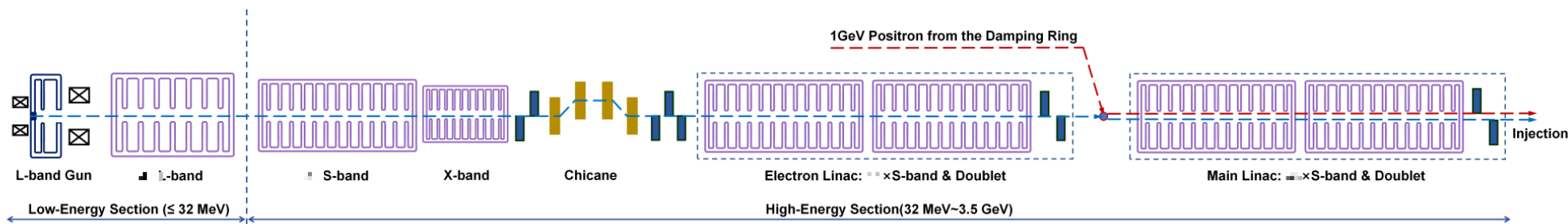
能量	理想 lattice	误差种子平均值
1 GeV	272 s	191 s
1.5 GeV	361 s	279 s
2 GeV	350 s	257 s
3.5 GeV	3.03 h	2.48 h



STCF注入器物理-直线加速器设计

胡桐宁

- 结合多目标优化算法，完成电子枪至低能段束流动力学仿真计算、误差分析与轨道校正设计。
- 完成整体注入器设计，结果均满足STCF设计指标
- 完成1.0\2.0\3.5 GeV 三个能量点、离轴 (1nC) 和置换 (8.5nC) 注入束光学优化。
- 完成包含尾场以及准直误差(0.1mm 1mrad)的误差分析计算。



1 nC chicane出口

Energy	188 MeV	1 GeV	2 GeV	3.5 GeV
Beam length (ps)	1.56	1.57	1.57	1.57
Energy spread (%)	2.36	0.056	0.056	0.054
Sigma_x (mm)	0.11	0.11	0.09	0.07
Sigma_y (mm)	0.22	0.06	0.08	0.06
Nor. emittance_x (mm mrad)	0.97	1.07	1.12	1.15
Nor. emittance_y (mm mrad)	0.92	0.98	0.95	0.94

1 nC ML输出

8.5 nC chicane出口

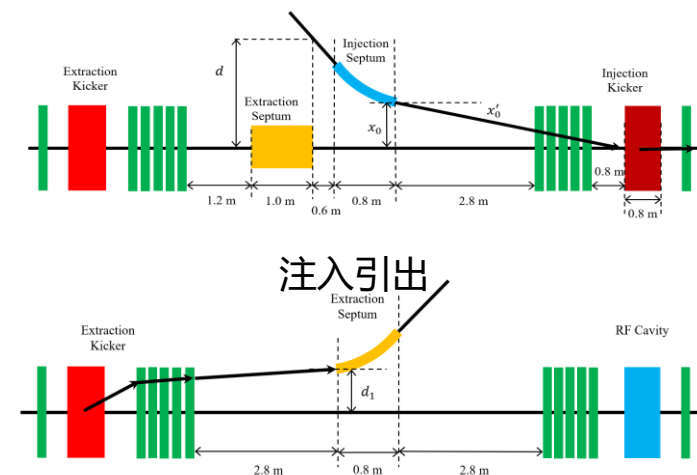
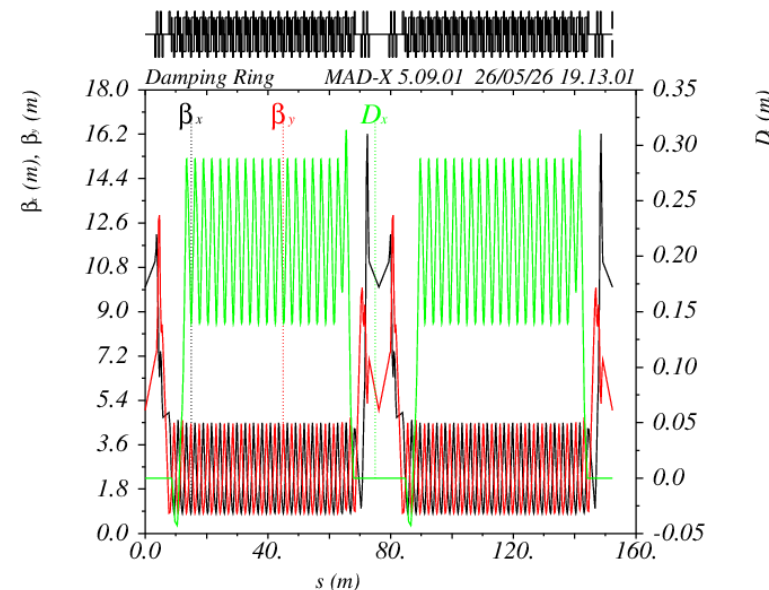
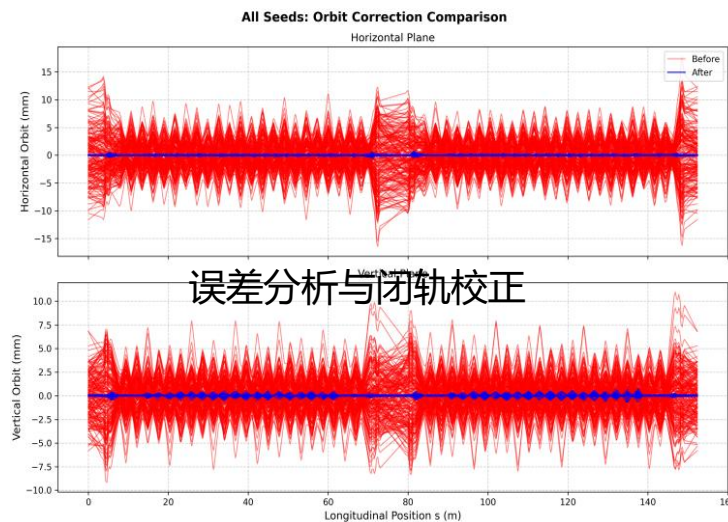
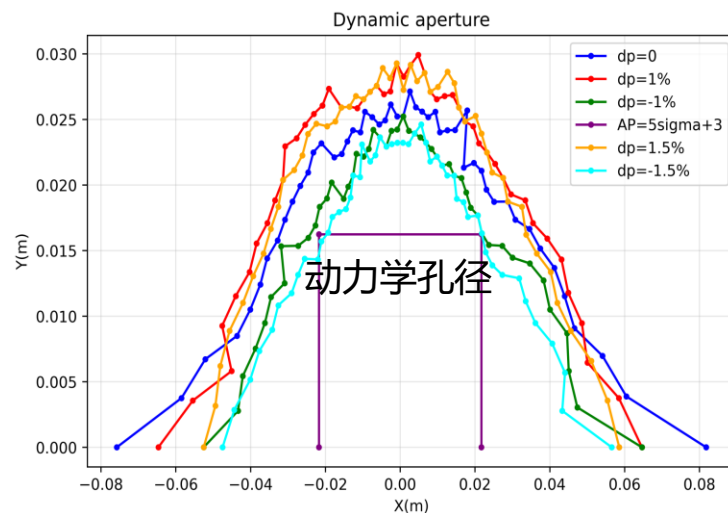
Energy	120 MeV	1 GeV	2 GeV	3.5 GeV
Beam length (ps)	3.21	3.26	3.32	3.11
Energy spread (%)	5.03	0.26	0.31	0.23
Sigma_x (mm)	0.29	0.14	0.16	0.15
Sigma_y (mm)	0.28	0.38	0.39	0.09
Nor. emittance_x (mm mrad)	6.2	6.27	13.56	12.85
Nor. emittance_y (mm mrad)	5.0	5.53	7.90	4.88

8.5 nC ML输出

STCF注入器物理-阻尼环设计

常铭轩

- 2026年3月召开光学方案评审会，经对比（反转二极磁铁/常规FODO/四六极组合），最终采用反转二极磁铁方案
- 完成TDR版光学设计，周长152.4 m，水平自然发射度9.62 nm·rad（优于设计指标11 nm·rad），横向阻尼时间23.2 ms。
- 动力学孔径达5倍rms注入尺寸，确保大发射度正电子束团能被高效阻尼
- 完成误差分析与闭轨校正，针对紧凑型磁铁间距优化布局：独立双向校正磁铁（16块）、四极复合（16块）、六极复合（72块）
- 完成注入与引出设计，元件布局与硬件参数均处在合理范围。结合累积环AR，引出束参数满足离轴/置换注入需求。



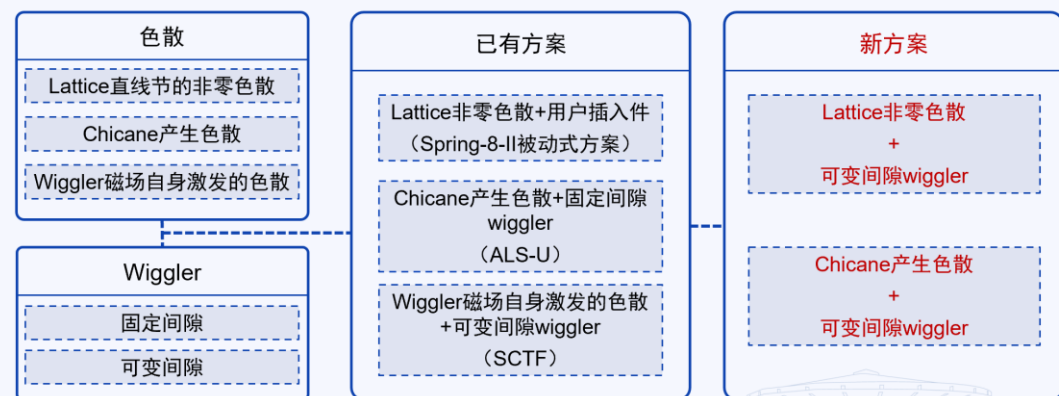
基于量子激发的发射度补偿方案

刘晓宇

基于量子激发的发射度补偿方案

中国科学院大学
国家同步辐射实验室
NNSL, SHANGHAI SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

核心因素：色散+Wiggler



新方案可统一表述为：外部固定色散+可变间隙wiggler

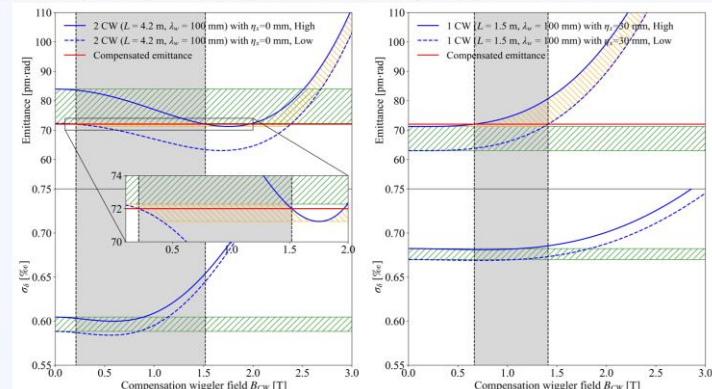
基于量子激发的发射度补偿方案

中国科学院大学
国家同步辐射实验室
NNSL, SHANGHAI SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

零流强情况发射度补偿：

- 辐射阻尼方案：两个位于长直线节的DW可以调整gap补偿发射度扰动。
- 量子激发方案：在目前闲置的20号中直线节安装可变gap的短wiggler，同时两个DW固定最小gap。

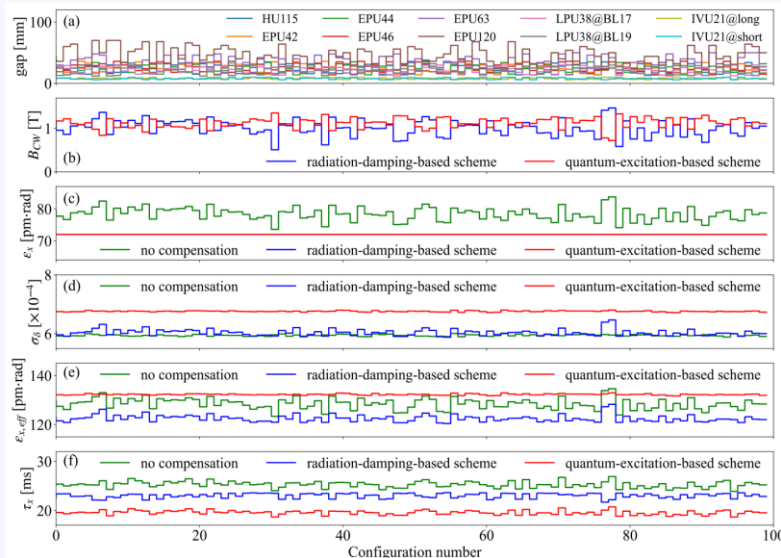
- 量子激发方案可以达到辐射阻尼方案相同的发射度补偿水平。
- 量子激发方案补偿wiggler数目更少 ($1 < 2$)，磁场更弱 ($1.41 \text{ T} < 1.56 \text{ T}$)，磁极间吸力更小。
- 发射度补偿过程中，量子激发方案对能散扰动更小 ($\pm 1.2\% < \pm 5.5\%$)。
- 两台长直线节的DW可以固定gap为用户供光，即增加了两条wiggler站点。



零流强情况发射度补偿：

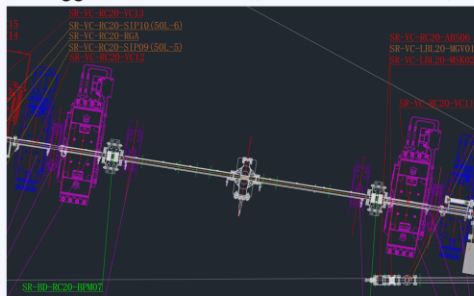
模拟发射度补偿过程

- 量子激发方案可以达到辐射阻尼方案相同的发射度补偿水平。
- 量子激发方案发射度完全补偿，且补偿发射度过程中能散变化很小，使得中直线节有效发射度基本得到补偿 ($\pm 0.5\%$)。
- 量子激发方案中两个DW固定在最小gap，阻尼时间更短，有利于抑制IBS效应和束流不稳定性。

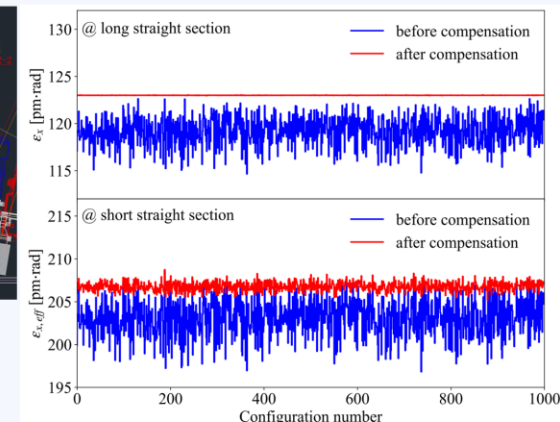


HALF补偿wiggler参数选择

- 中直线节长度2.2 m，考虑BPM、校正铁、真空管道支撑、插入件端部等元件空间，中直线节补偿wiggler有效长度1.2 m，周期长度120 mm，磁场1.8 T



- 在400 mA、20%耦合、4倍束团拉伸条件下，长直线节发射度完全补偿，中直线节有效发射度的变化范围从补偿前的 $\pm 3.0\%$ 降低至 $\pm 0.9\%$ 。

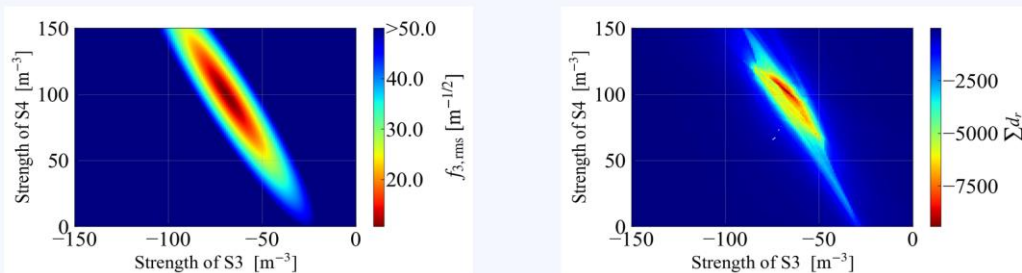


储存环共振驱动项纵向变化的凸性及应用

李万彬

共振驱动项纵向变化的凸性

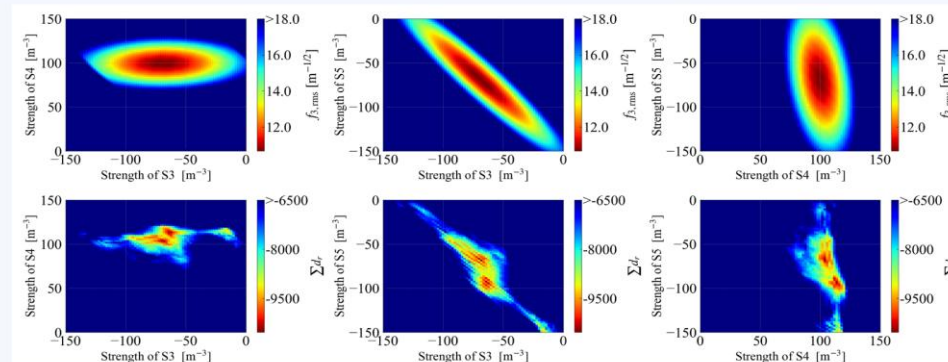
➤ $f_{3,rms}$ 与动力学孔径在HLS-III储存环六极磁铁强度空间中分布的一致性（四组六极磁铁）



二维情况：动力学孔径与 $f_{3,rms}$ 的分布趋势相似，而且具有较大动力学孔径的解基本分布在具有较小 $f_{3,rms}$ 的椭球内部。此处，使用存活粒子的总频率扩散率 (Σd_r) 量化表示动力学孔径， Σd_r 越小存活粒子数越多（动力学孔径越大）且存活粒子的运动越稳定（动力学孔径质量越高）。

共振驱动项纵向变化的凸性

➤ $f_{3,rms}$ 与动力学孔径在HLS-III储存环六极磁铁强度空间中分布的一致性（五组六极磁铁）

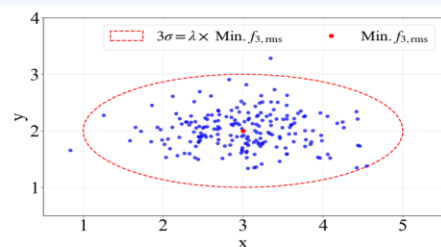


三维情况：尽管动力学孔径存在多个极值区域，但它们是连续地分布在具有较小 $f_{3,rms}$ 值的椭球内部，这与传统的离散分布的认识不同。因此，在六极磁铁强度空间中， $f_{3,rms}$ 与动力学孔径的分布具有较好的一致性，这说明非凸的动力学孔径优化问题可近似视为一个凸优化问题。

应用：快速的动力学孔径优化方法

➤ 基于 $f_{3,rms}$ 凸性的快速动力学孔径数值优化方法

$$f_{3,rms}^2 = \frac{1}{2} K^T D K + G^T K + H,$$
$$N(x; \mu, \Sigma) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^k \det(\Sigma)}} \exp\left(-\frac{1}{2} x^T \Sigma^{-1} x - \mu^T \Sigma^{-1} x - \frac{1}{2} \mu^T \Sigma^{-1} \mu\right)$$



基于 $f_{3,rms}$ 几何结构的高斯采样的示意图

01

使用随机生成的解拟合 $f_{3,rms}$ 二次型的系数

02

构造高斯分布，令其 3σ 等于 λ 倍 $f_{3,rms}$ 最小值

03

使用此高斯分布在六极磁铁强度空间中进行采样

以此高斯分布采样作为智能优化算法的初始种群进行基于粒子跟踪的数值优化

□ 三阶共振驱动项纵向变化的量化表达式 $f_{3,rms}$ 是一个特殊的凸函数，其等值面在六极磁铁强度空间中呈现为一系列同心同轴的椭球面。

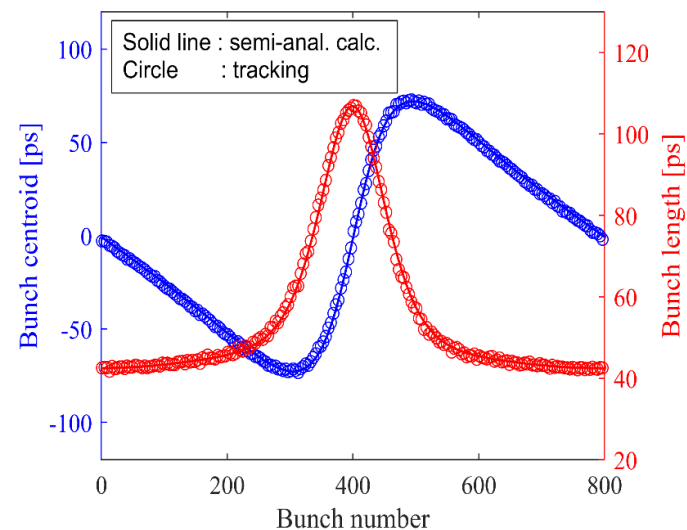
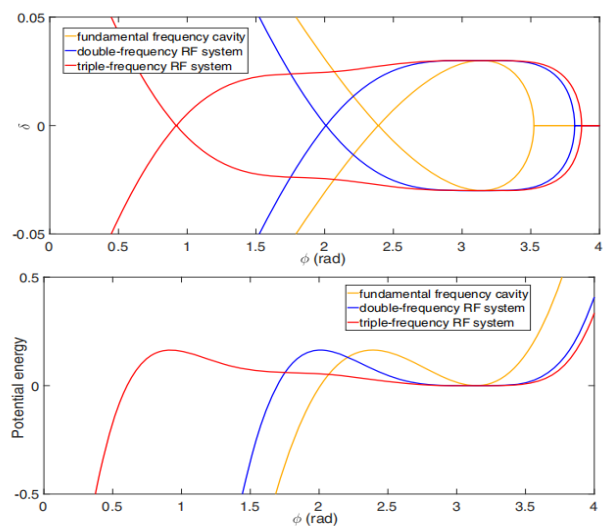
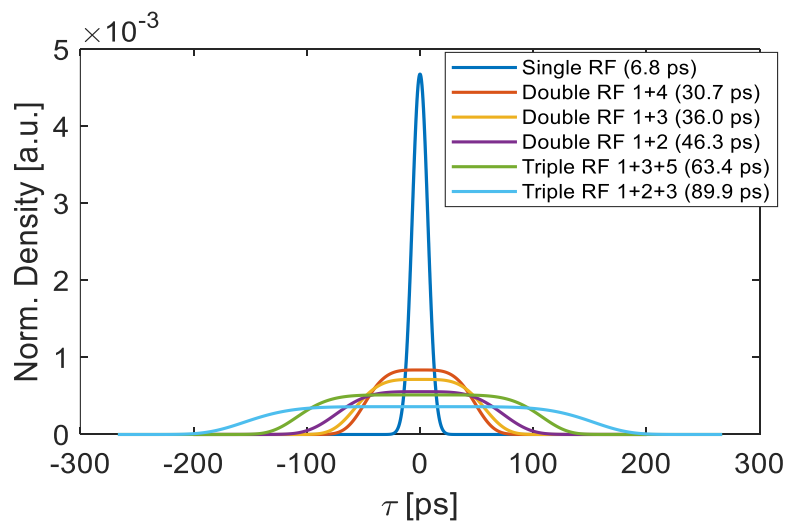
□ 动力学孔径与 $f_{3,rms}$ 在六极磁铁强度空间中的分布呈现很强的一致性，具有较大动力学孔径的区域大致连续地分布在具有较小 $f_{3,rms}$ 的椭球内部，表明非凸的动力学孔径优化问题可以近似视作一个凸优化问题。

□ 将基于 $f_{3,rms}$ 几何结构的高斯采样与基于粒子跟踪的动力学孔径数值优化方法相结合，能够显著提高动力学孔径的优化效率。

三射频系统中的周期性瞬态束流负载效应

肖瑾成

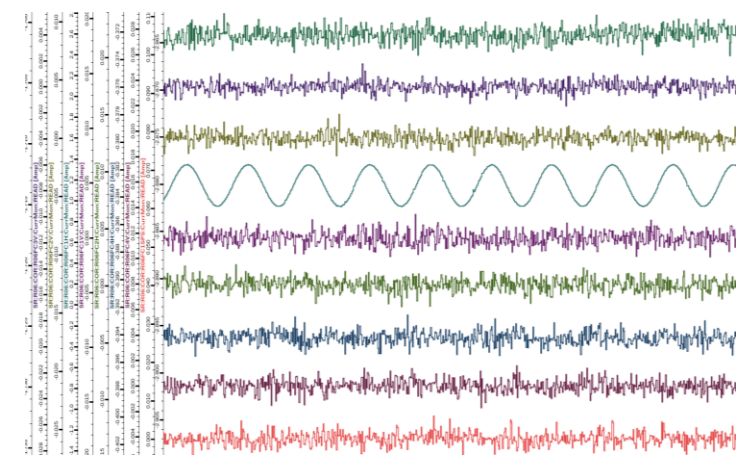
- 对于旨在实现超低发射度的四代光源，双射频（RF）系统拉伸效果仍有不足，因此提出了三RF系统方案来进一步拉伸束长，还可以实现静态的纵向累积式在轴注入
- 三RF系统的周期性瞬态束流负载(PTBL)效应会使得总的束长拉伸效果变差
- 提出了基于稳态腔压响应矩阵(SSRM)，改进了半解析算法，与改进后的追踪模拟互相验证，详细研究了三RF系统中的PTBL效应。
- 拓展了模拟计算程序STABLE，使其可用于三射频系统束流动力学研究。
- 提出了适用于超导三射频系统PTBL阈值快速判断的半解析方法。



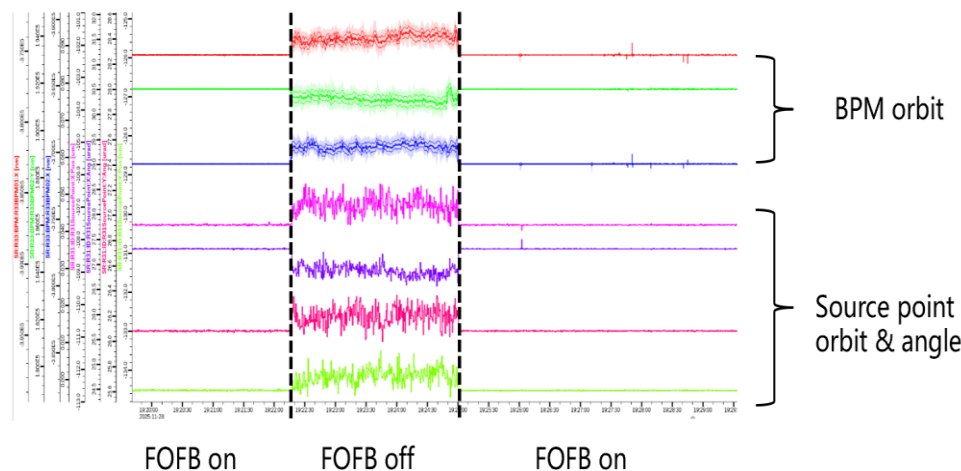
HEPS储存环束流轨道稳定性研究

黄玺洋

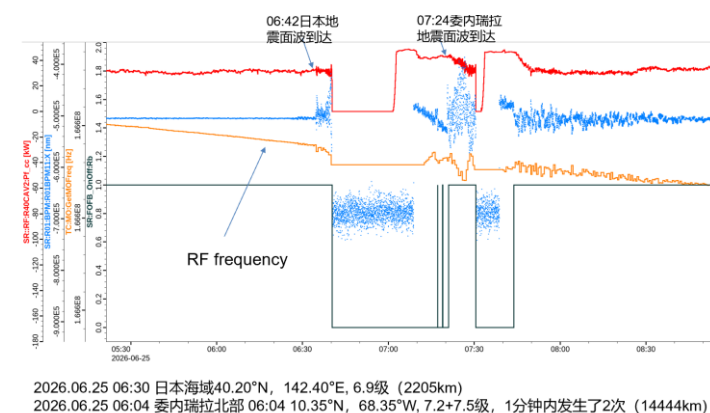
- HEPS加速器与光束线站已于2025年10月通过性能测试，达到全部关键性能参数
- 在束流调试初期，通过对不同校正磁铁的脉宽调制频率进行错相处理后，无反馈条件下束流轨道偏离幅度约为束流尺寸的20%。
- 快轨道反馈系统成功完成调试，实现了高于400 Hz的闭环带宽，束流轨道偏离被抑制至束流尺寸的10%以下。
- 水平平均轨道的变化还为地震相关数据的获取提供了一种潜在的新途径



调节PWM频率
降低低频扰动



快轨道反馈调试



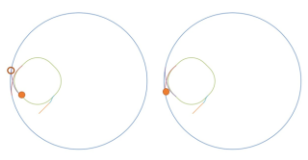
观察到地震波

- 首次成功验证了“回注型”在轴置换注入，实现了储存环单束团高电荷量稳定运行
- 建立并逐步完善置换注入传输效率监测手段和优化方法
- 后续将继续深入开展储存环注入效率的优化和保持研究

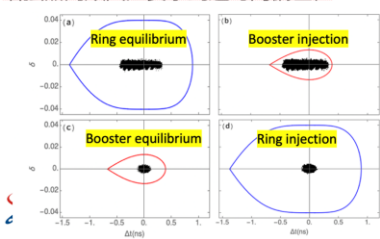
关键物理问题

- 精准同步

储存环引出束要回到相同的bucket

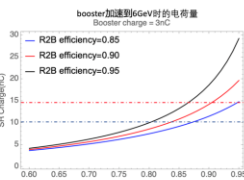


增强器高效回注要求到达时间偏差在 ± 100 ps以内

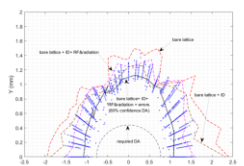


- 高效传输

能够维持的单束团电荷量，同增强器加速到6GeV的电荷量、增强器和储存环之间双向传输的效率有关

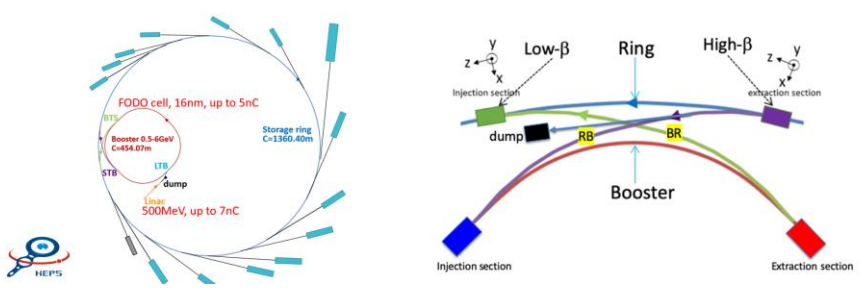


置换注入可放松对DA的要求，但阻抗效应可能导致大电荷量注入束团注入效率降低 -> 抑制注入残余振荡

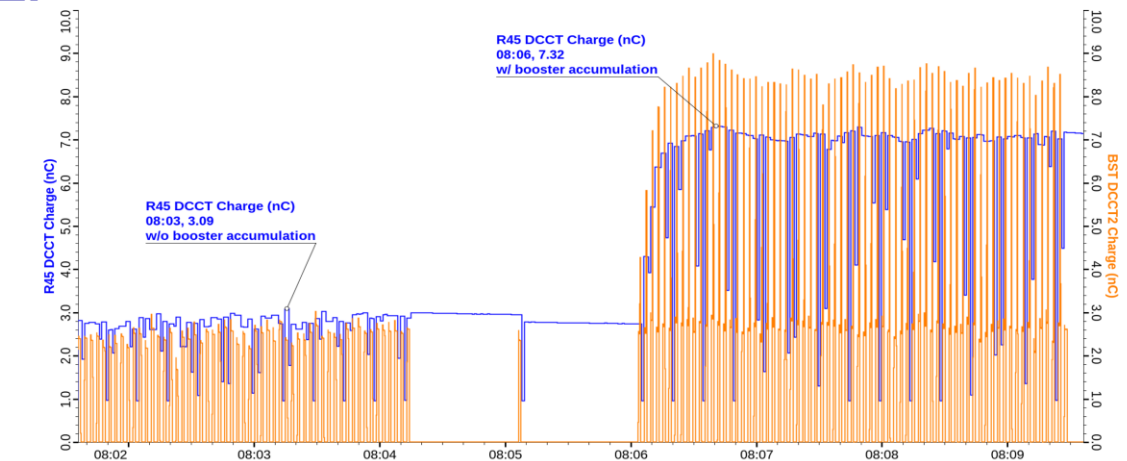


注入引出设计总体考虑

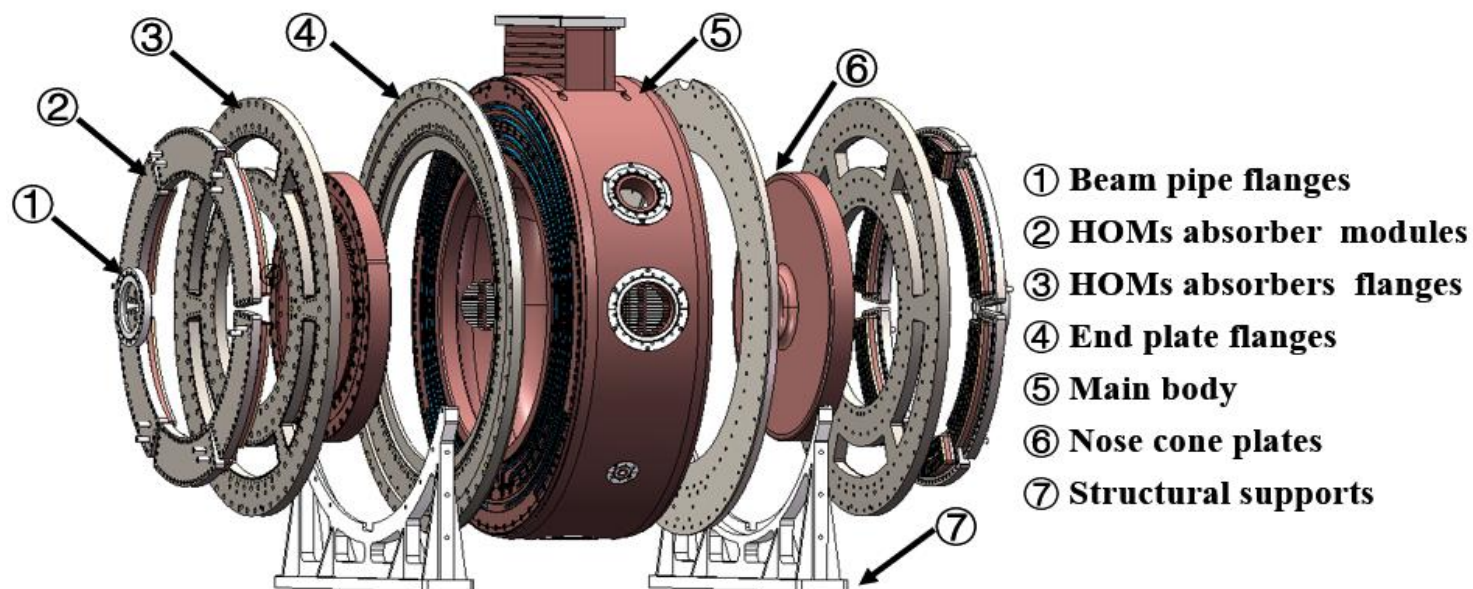
- 储存环引出区和注入区对称设计
- 新增一条储存环到增强器的输运线 (RB)
- 增强器回注：离轴累积注入
- RB输运线上设有一个beam dump，方便初期调束



单束团填充模式

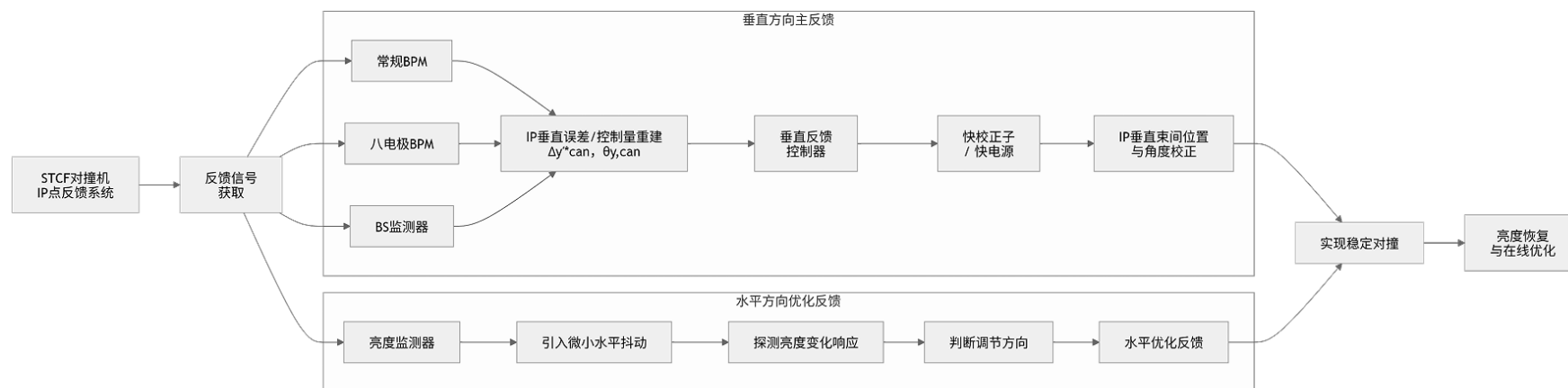


- 常温高频腔的单腔运维成本较低、可靠性较好
 - STCF攻关项目自主研发了常温TM020模腔，具备对高次模的良好阻尼
 - 样机已经完成腔体加工、初步的冷测（包含频率，品质因子）
 - 极限真空测试，基本上满足验收指标 $5\text{E-}9$ mbar
 - 高功率测试计划于2026年8-9月完成

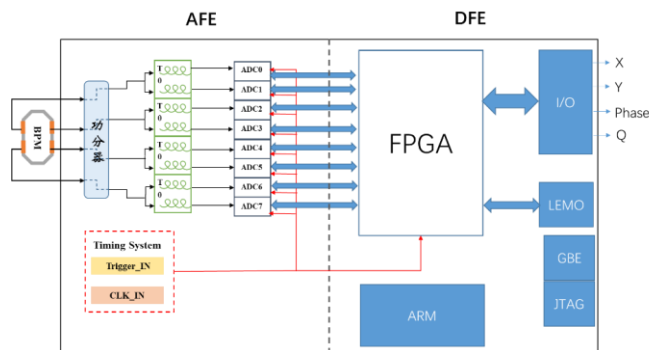


RF parameters	
Working mode	TM020
Frequency [MHz]	499.7
R/Q [Ω]	86
Unloaded quality factor	61288
E_p/E_{acc}	3.01
B_p/E_{acc} [mA/V]	2.96
Leakage(%)	1.2
Beta	1.04

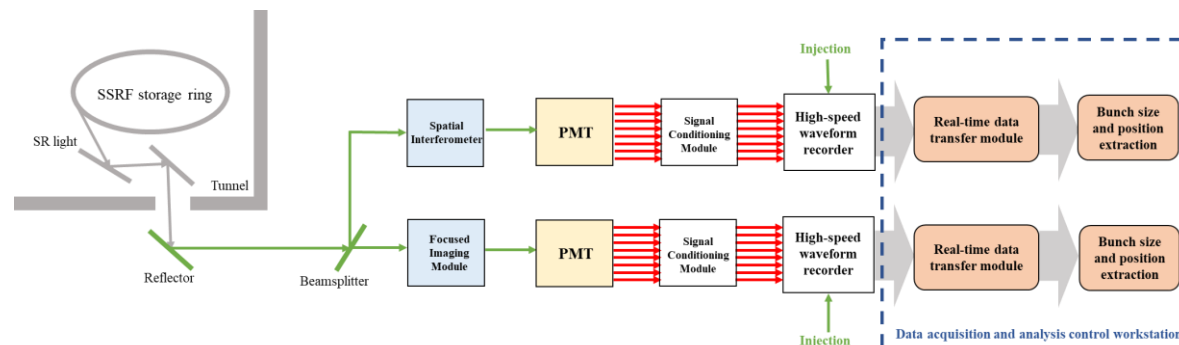
- 高精度、非拦截束测和反馈是加速器稳定运行的核心保障
 - 完成了完整的IP反馈系统概念设计



- 进一步提高逐束团测量的时空分辨能力

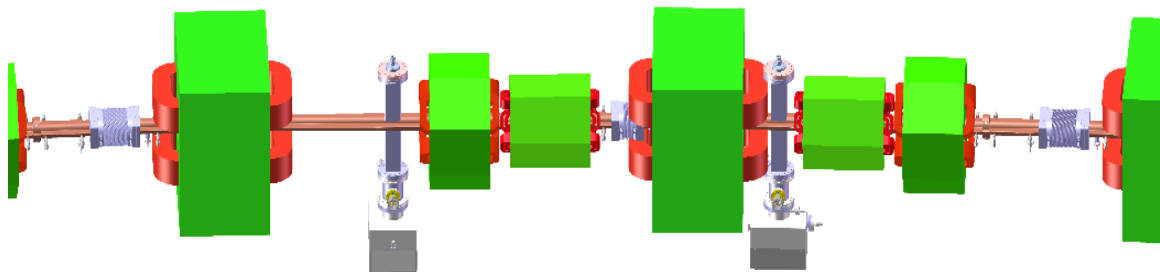


基于高速采集板卡逐束团三维位置测量系统

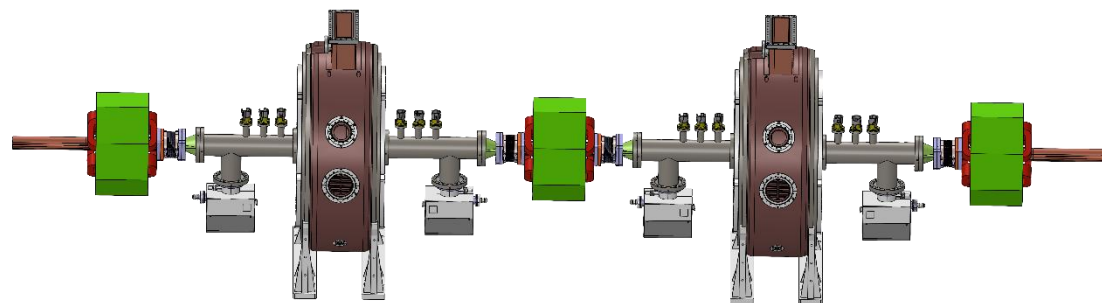


逐束团截面尺寸测量系统

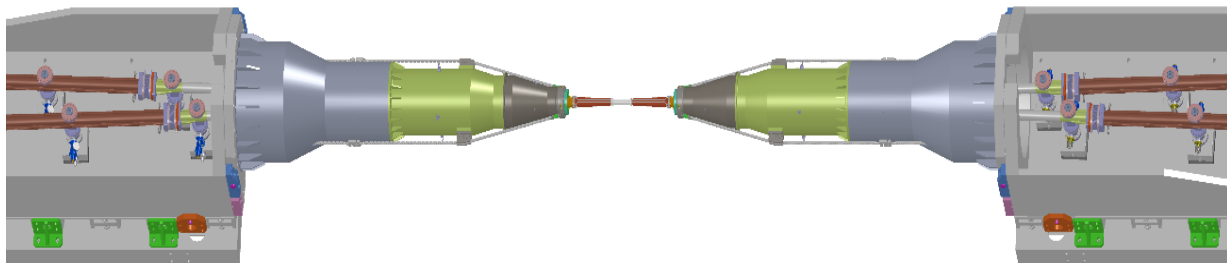
- 完成了STCF对撞环弧区标准单元段、对撞区MDI段、通用直线段等和注入器真空系统设计
 - 完成了弧区标准单元段光子吸收器的技术、工艺设计评审
 - 复杂、综合、系统性的工程工作



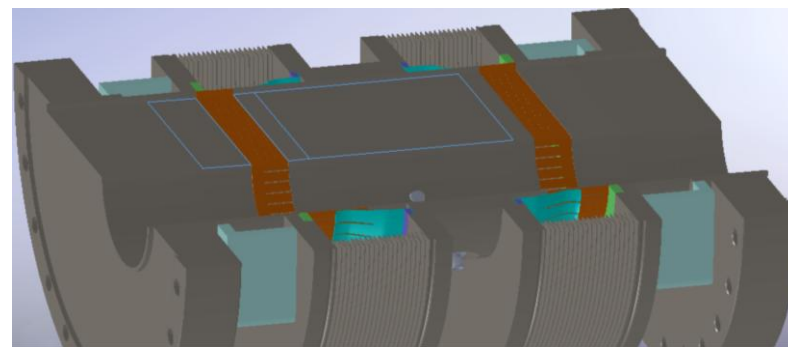
弧区标准单元段



高频段



对撞区MDI段



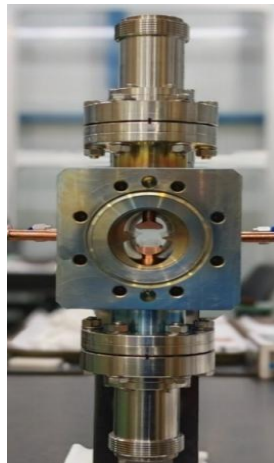
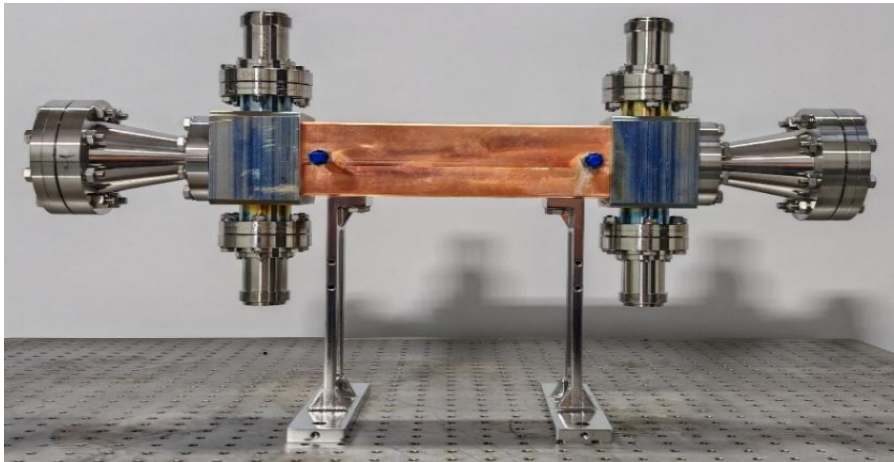
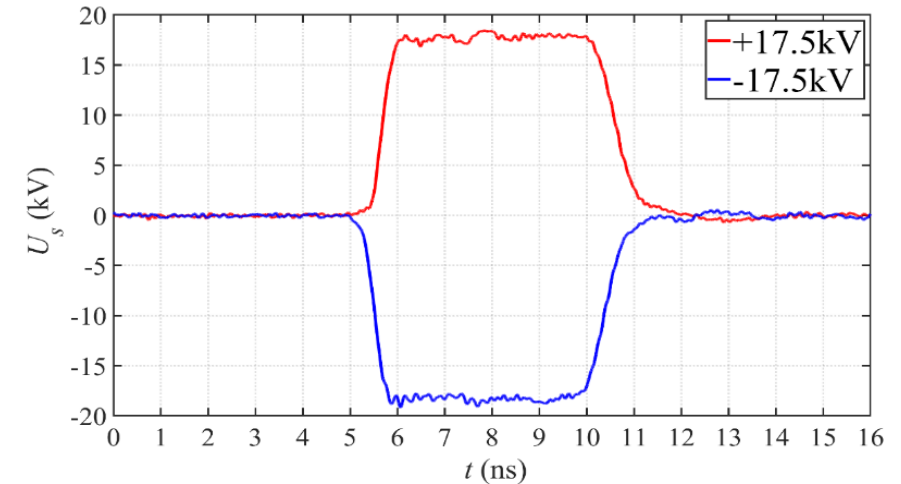
波纹管设计优化

用于置换注入的纳秒级条带冲击器研制

杨军

- 为STCF的置换注入要求做准备，研制了纳秒级条带冲击磁铁

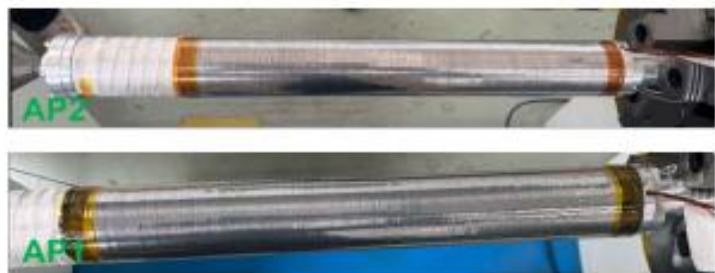
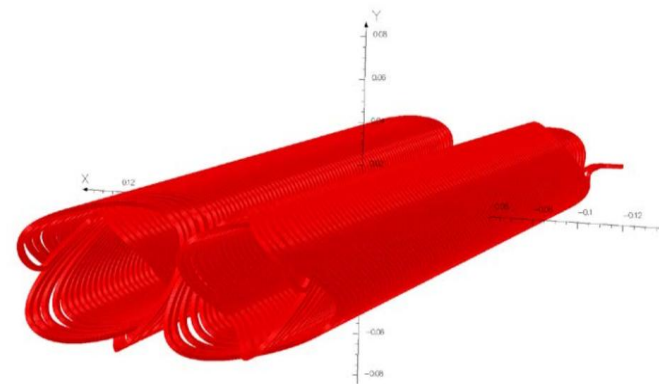
参数	设计值	测试结果
脉冲上升时间 (10%-90%) (ns)	$\leq 2\text{ns}$	0.43ns
脉冲下降时间 (10%-90%) (ns)	$\leq 2\text{ns}$	0.88ns
脉冲平顶时间 (90%-90%) (ns)	$\geq 2\text{ns}$	4.2ns
脉冲宽度 (10%-10%) (ns)	$\leq 6\text{ns}$	5.51ns



STCF超导磁铁研究进展

马文彬

- 超导磁铁是关系到对撞机能否达到亮度指标的核心部件
 - 双孔径CCT QD1和QF2的磁铁设计已达到项目要求
 - 反螺线管设计已基本达到设计指标，只有 B_z 在0.87米处为200高斯（略超指标）
 - 目前已经完成QD1样机研制，正在测试



Finished two coils

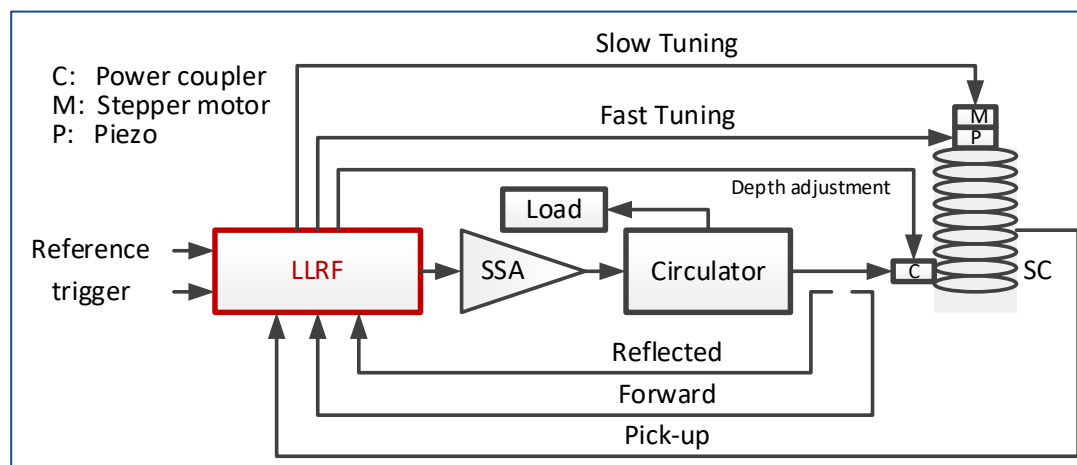


The finished rotating probe and calibrated in PM magnet, by SSRF



磁体+杜瓦+磁测

- 低电平通过反馈控制和调谐，使加速系统的相位、幅度、频率保持稳定
 - 上海光源自主研发了四代数字低电平系统，目前已支持连续波、脉冲、频率扫描和腔压扫描四种工作模式，并实现了关键设备国产可控



1.3 GHz 低电平控制

- 1.3GHz、3.9GHz、S波段、L波段

单腔单源单低电平

- X波段

1低电平 + 1速调管 + “一拖四” X波段加速结构

一套低电平控制器包含3部分

DSP
所有低电平使用相同的中频

射频前端
兼容不同腔体入射信号

**后插板：兼容不同外设——电机、
压电驱动、触发和模拟IQ测量**

高功率密度高可靠性固态功率源

江国栋

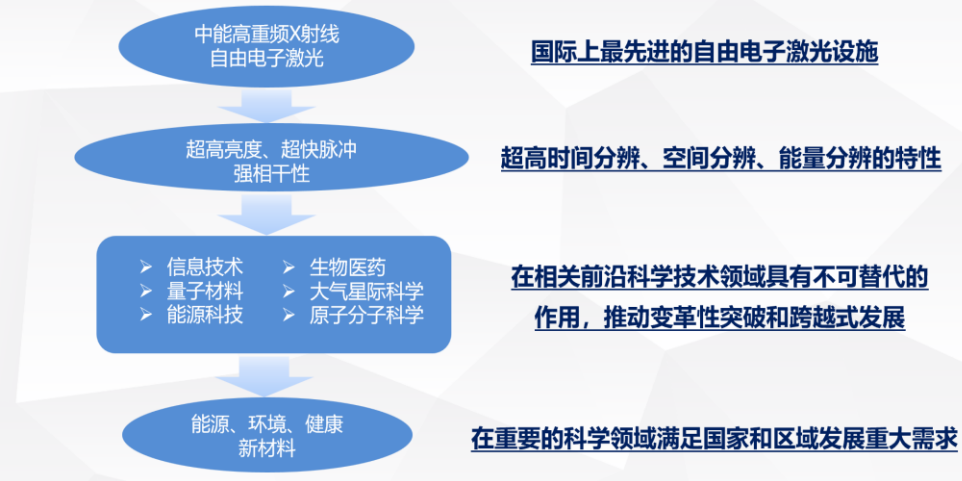
- 高功率密度高可靠性固态功率源是先进高功率加速器的主动脉
 - 近物所推动功率源标准化研发，目前面向近物所 CiADS 和 HIAF 的全系列产品的标准化均已定型，并实现了标准化的基本目标
 - CiADS高功率固态功率源作为国产第三代半导体（GaN）器件版本，通过现场测试，效率和单插件功率都有大幅提升，有非常广阔的应用前景
 - 功放模块热插拔实现，大大提升了固态功率源的可维护性



深圳中能高重复频率X射线自由电子激光装置

张未卿

重大科学意义



对粤港澳大湾区科技发展有重要支撑作用

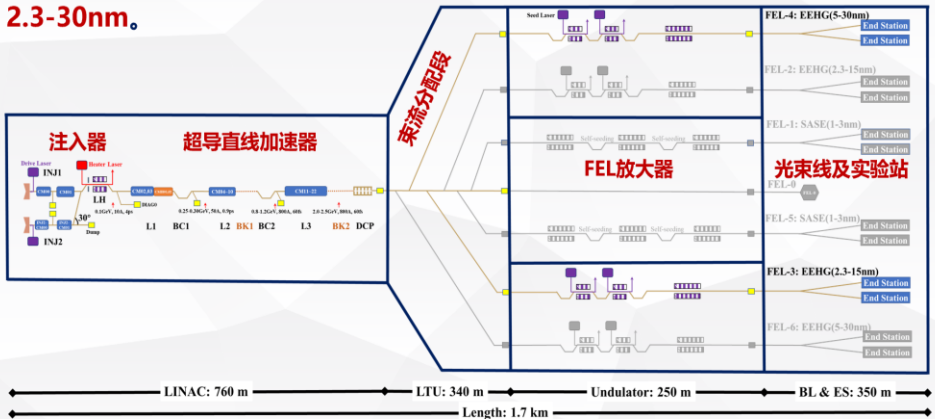
深圳自由电子激光装置有力支撑大湾区高校科研机构原始创新突破，满足高新技术企业的产业升级需求，促进大湾区形成高新技术产业集群。



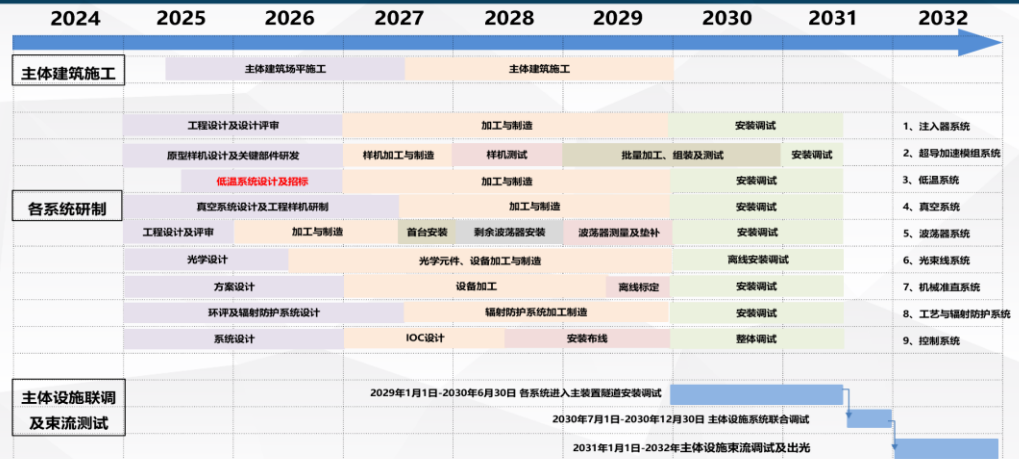
深圳自由电子激光装置建成后将成为粤港澳大湾区第一个正式运行的先进光源

装置布局

束流能量2.5GeV、电荷量100pC、重频1MHz；一期建设两条FEL束线，出光覆盖2.3-30nm。



实施计划 —2032年出光



重离子加速器发展前沿和重大应用

蔡付成

HIAF工程进展和现状

2018年12月开工建设，建设周期7年，总投资16.7+12亿元，2025年12月建成



三年疫情、贸易摩擦、齐心协力、攻坚克难、确保进度



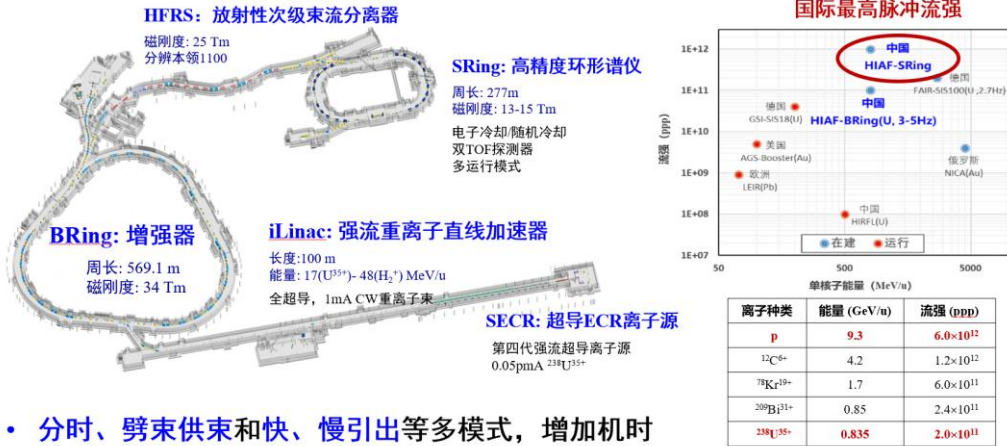
创新突破 - 国际领先

强流重离子加速器-HIAF



总体方案与建设目标

强流超导直线iLinac、快循环同步环BRing与系列实验终端组合



重离子加速器

重离子加速器 - 满足国家重大需求、国计民生的高端装备



从探寻宇宙物质的终极奥秘，到破解人类文明的能源困局，其前沿突破，已成为赢得未来发展主动权的**核心**，也是发展**新质生产力**的关键

谢谢大家！