



CSNS-II RCS高频系统关键技术研究进展

伍 坚

高能物理研究所

2025年7月31日



提纲

- ① CSNS-II RCS高频系统简介
- ② 关键技术研究进展
 - 高功率高梯度磁合金加载腔研制
 - 低电平控制系统研究
 - 高频系统状态分析与优化
- ③ 总结与展望

CSNS-II RCS面临严重空间电荷效应



- CSNS-II RCS束流功率从100 kW提升至500 kW面临严重的空间电荷效应
 - 注入能量从80 MeV提升至300 MeV；采用双谐波加速系统改善束流纵向分布

Linac 80 MeV to **300 MeV**

Beam power
100 kW to **500 kW**

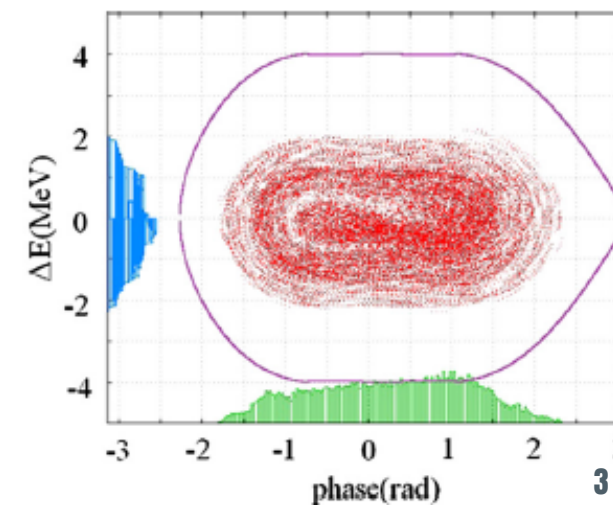
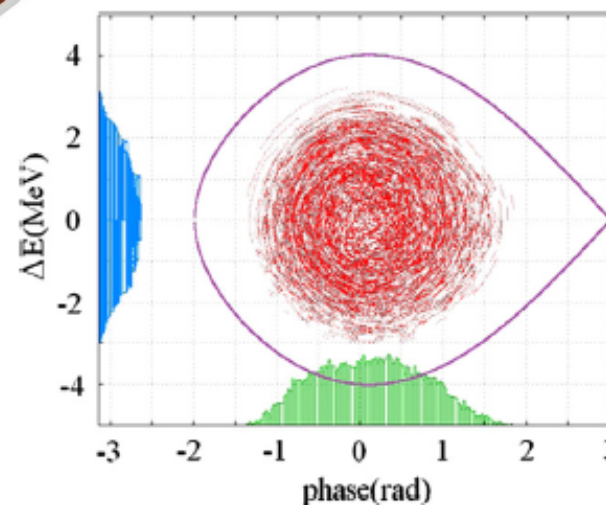
RCS
1.6 GeV, 25 Hz

11 new spectrometers
experimental terminals

Proton & muon
Experimental station

装置	束流循环流强	空间电荷频移
CSNS-II (China)	10.73-15.25 A	0.19
J-PARC (Japan)	8.18-11.14 A	0.12
SNS (USA)	12.69 A	0.08

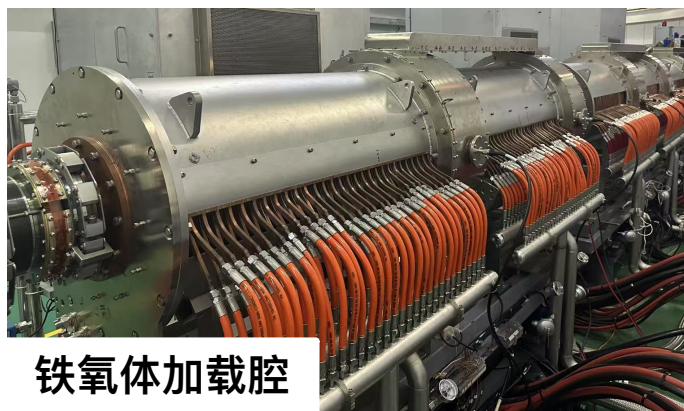
双谐波加速能增大聚束因子，降低峰值流强



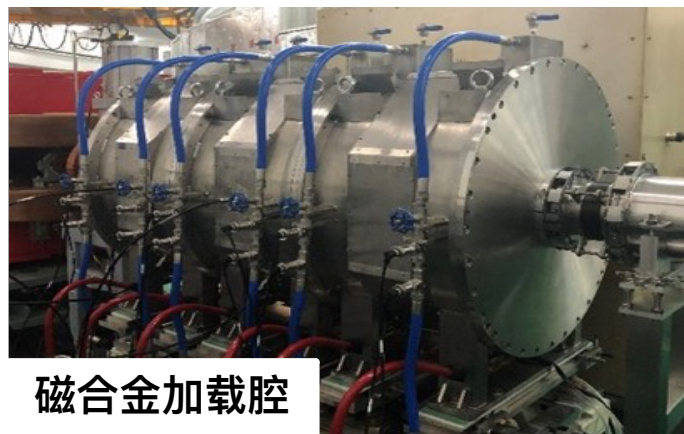
CSNS-II RCS高频系统提供双谐波加速电压



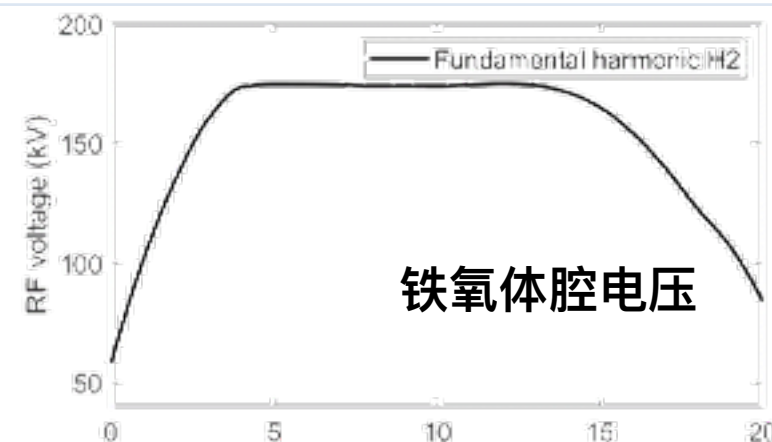
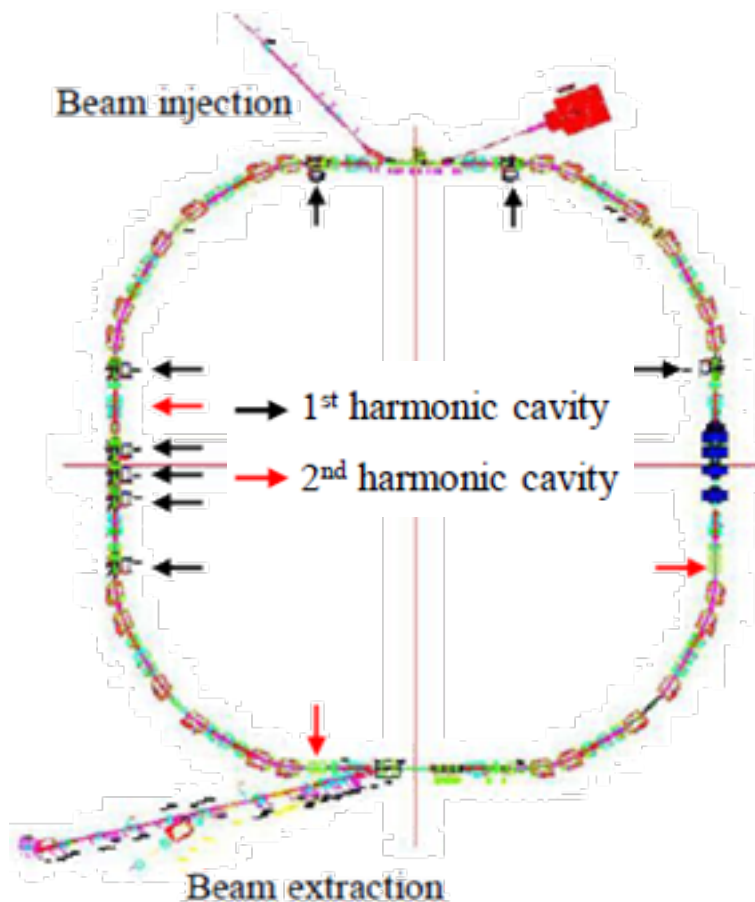
- ▶ 新增二次谐波腔；考虑隧道空间限制，采用高加速梯度磁合金加载腔
 - 8台铁氧体加载腔，提供**175kV**的H2电压
 - 3台磁合金加载腔，提供**54kV**的H2电压 + **110kV**的H4电压



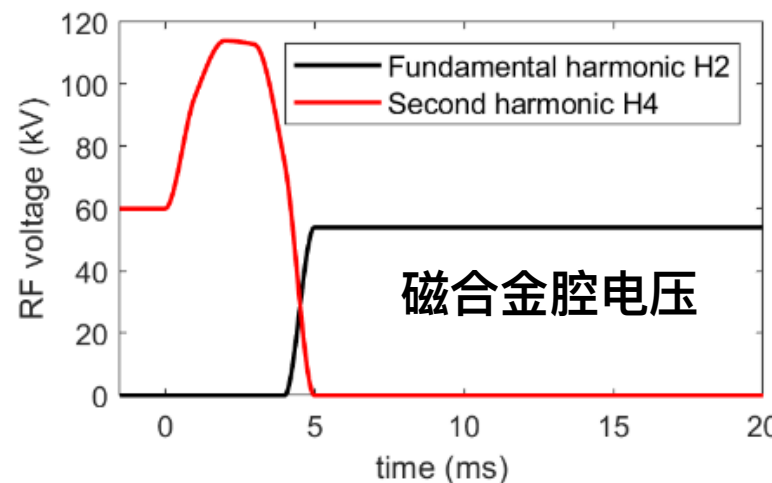
铁氧体加载腔



磁合金加载腔



铁氧体腔电压



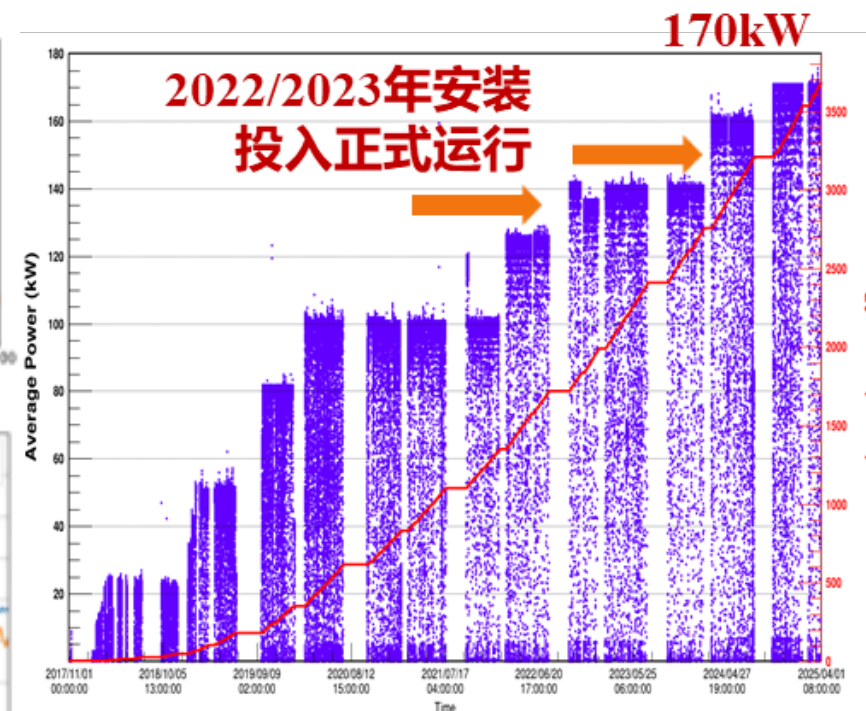
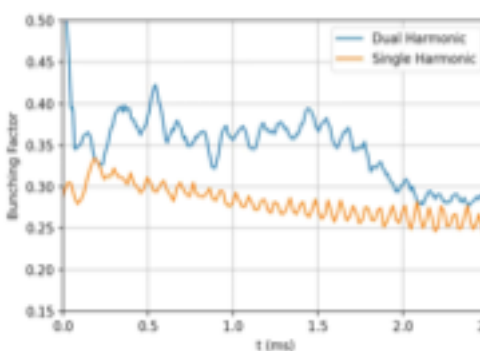
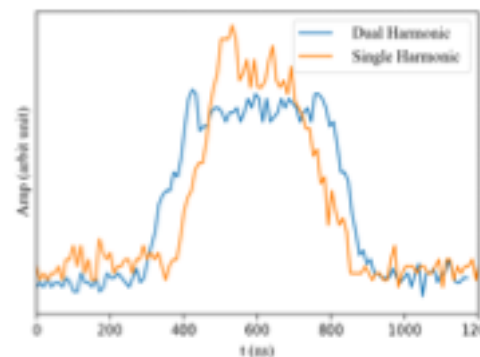
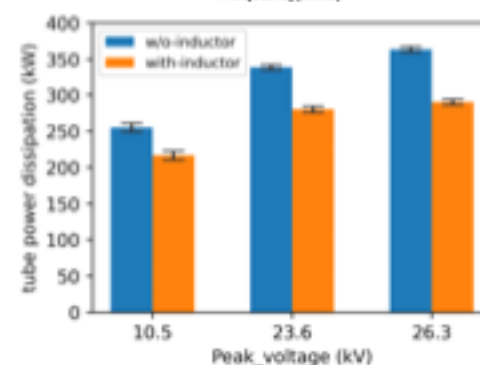
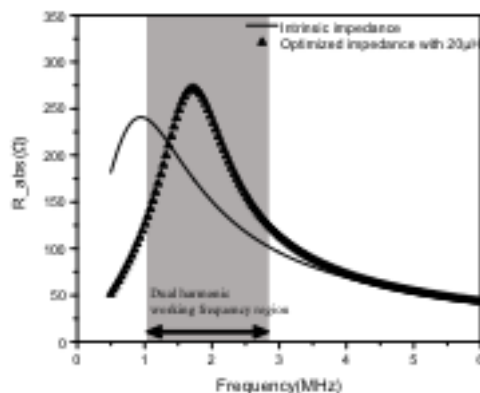
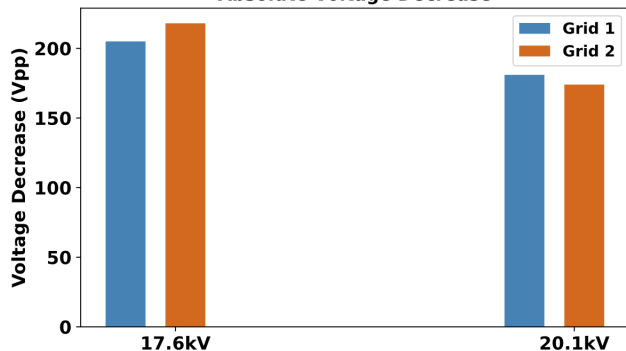
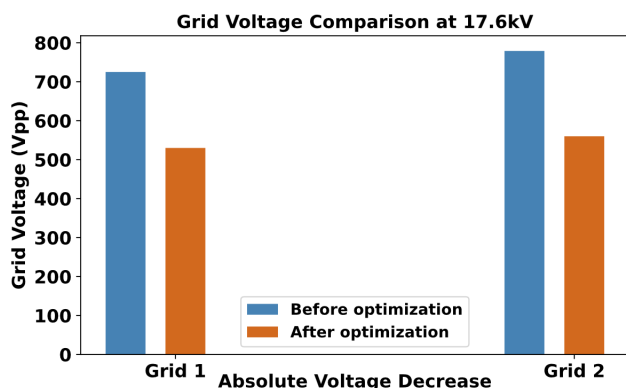
磁合金腔电压

双谐波系统发挥关键作用



- 完成二次谐波系统研制和系统参数优化，保证高梯度下稳定运行
- 对CSNS束流功率提升起到决定性作用
 - 束流分布更加均匀；聚束因子增大
 - 束流功率提升至**170kW**，超过设计指标**70%**，为CSNS-II升级奠定了坚实基础

J. Wu, et al. Nuclear Science and Techniques, 35 (1), 5



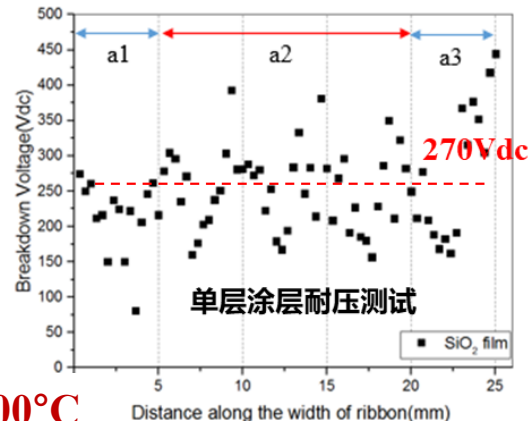
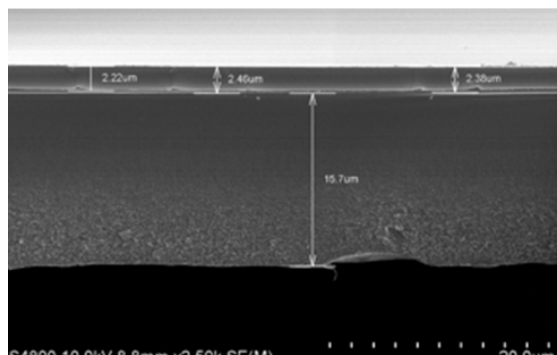
1. 磁合金加载腔取得多项关键技术突破



- ▶ 突破技术封锁，全面解决了高功率高梯度磁合金加载腔研发中的关键技术问题
 - 形成 理论设计 材料组分 制备工艺 性能评价 调试运行 完整技术链条

B. Wu, et al. Nuclear Science and Techniques, 33 (8), 99; B. Wu, et al. Review of Scientific Instruments, 94 (4), 043301

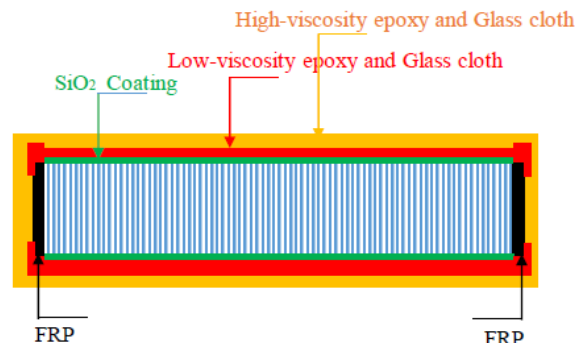
1. 耐高压高绝缘微米级低应力涂层 [发明专利3项]



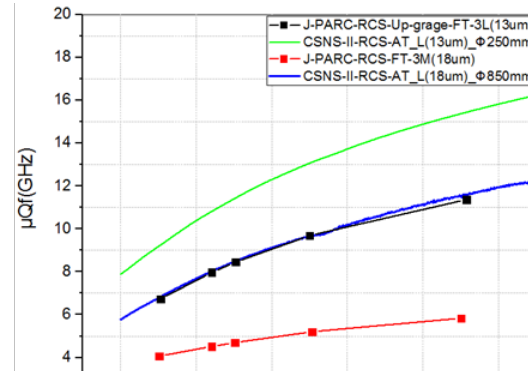
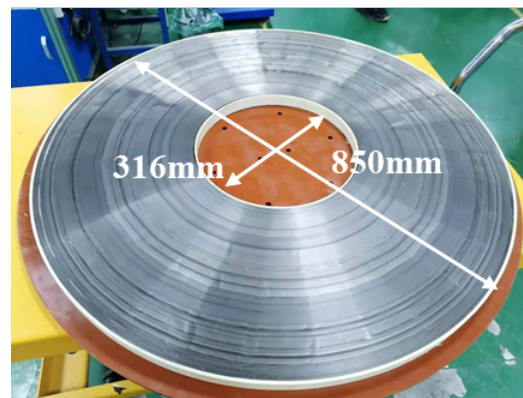
厚度 $2\mu\text{m}$ 耐压达 270Vdc ，耐温 $>600^\circ\text{C}$

3. 磁环低应力防水抗辐射封装技术 [发明专利1项]

工艺前后性能变化小于5%



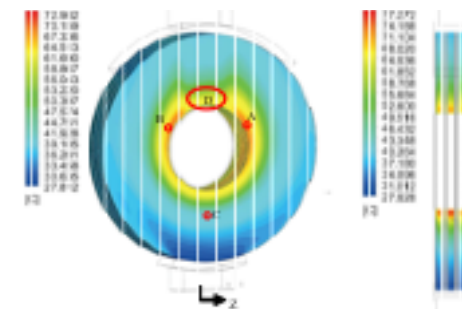
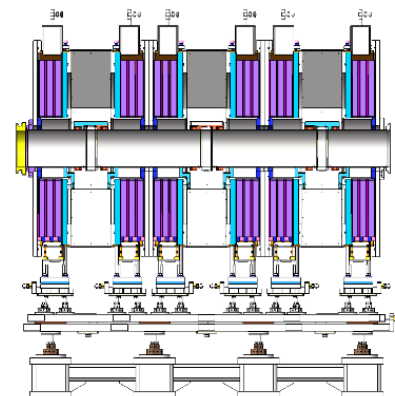
2. 大尺寸恒张力卷绕与高温横向磁场调控 [发明专利2项]



μQf 值高出国外指标约30%

4. 高冷却效率腔体结构的设计 [发明专利2项]

平均功率密度可达 0.34W/c

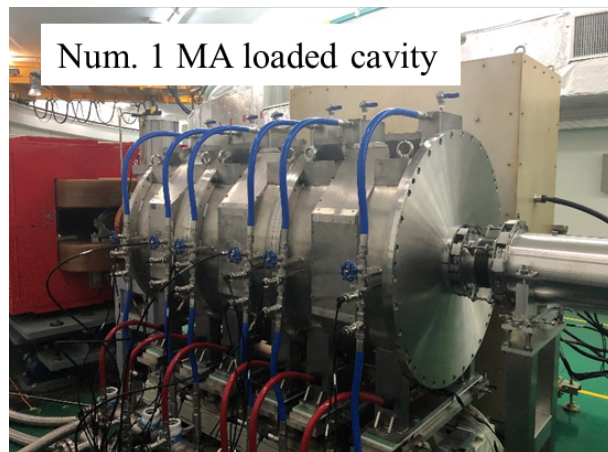


实现稳定运行，性能指标国际领先

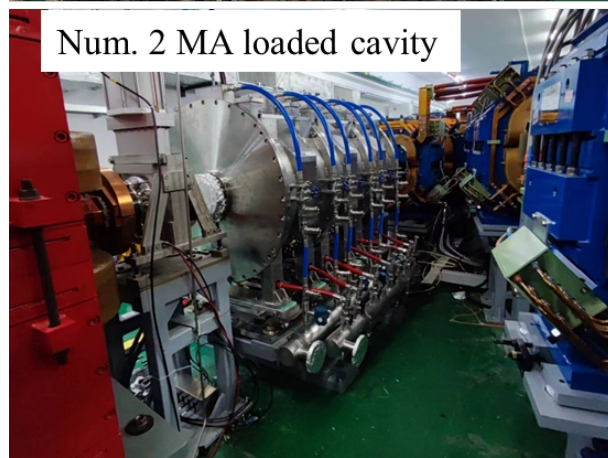


- ▶ 高功率高梯度稳定运行累积时长超**1万小时**，磁环批量化生产
- ▶ 加速梯度达到**50 kV/m**，高出国外指标约**60%**

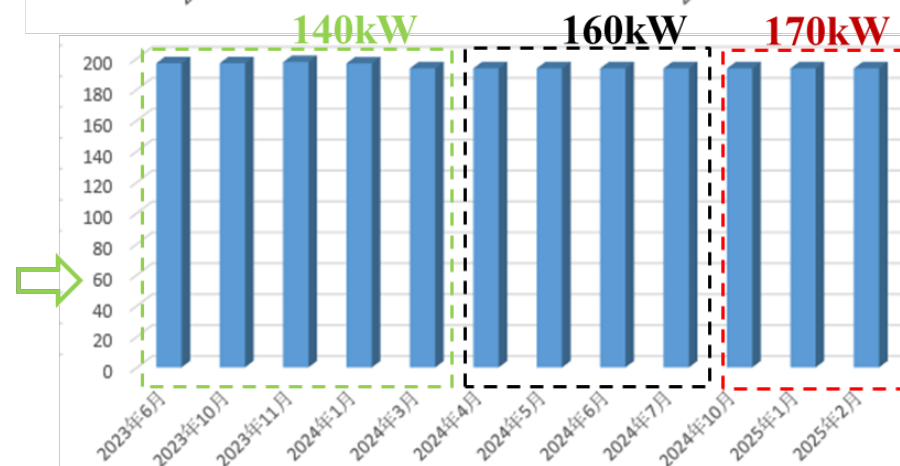
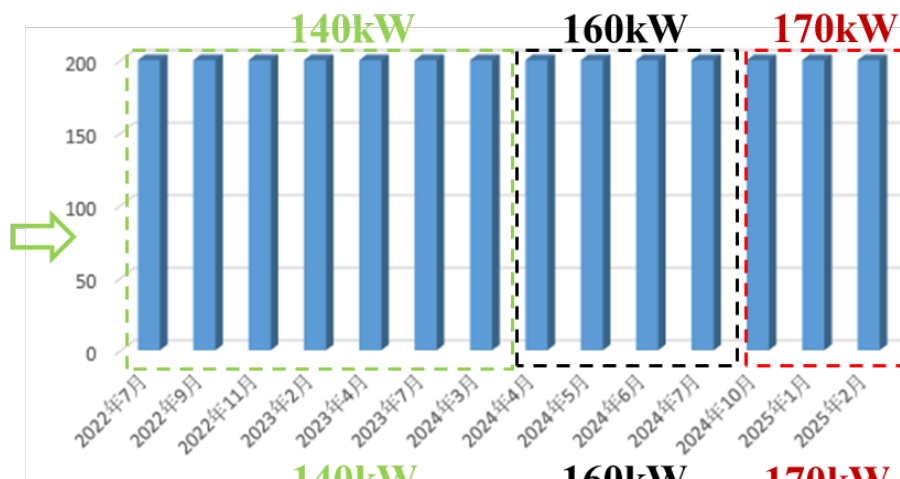
稳定运行时长>**10000小时**；阻抗变化率<**5%**



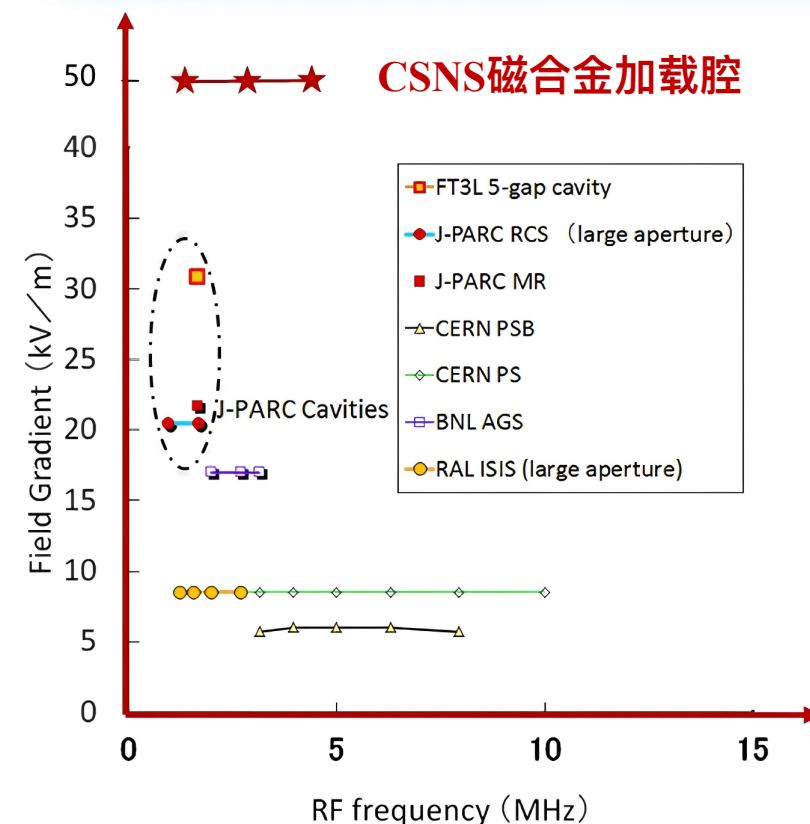
Num. 1 MA loaded cavity



Num. 2 MA loaded cavity



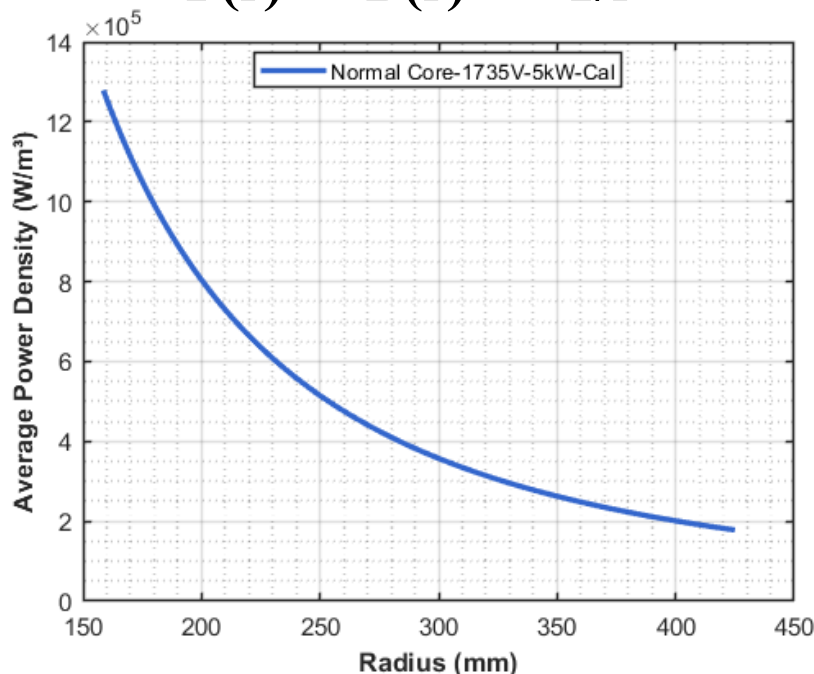
通过广东省科技厅技术经济发展研究中心组织的成果鉴定，**处于国际领先水平**



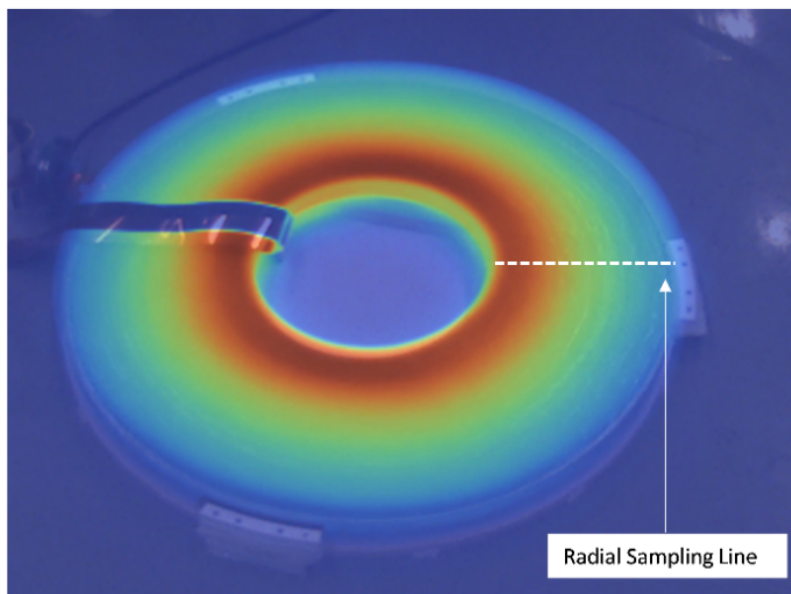
磁环的热稳定性仍需进一步提高

- 当前磁环(采用16μm带材)功率分布不均, 存在严重的内径区域热集中现象
 - 高功率高梯度运行面临的关键瓶颈问题
- 超薄带材(如13μm)能提升材料磁导率并降低涡流损耗
 - 价格昂贵, 是16μm带材的2倍以上
 - 应力敏感, 工艺应力引起的磁环性能退化现象十分明显

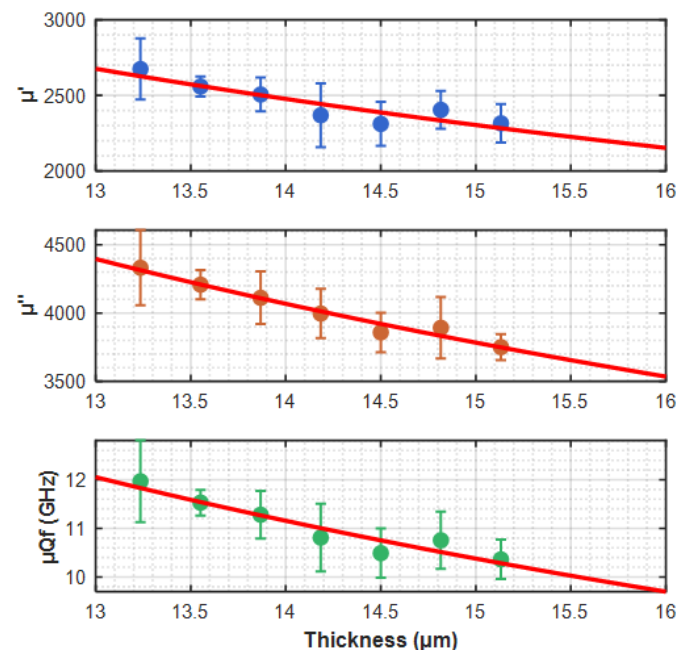
$$P(r) \propto B(r)^2 \propto 1/r^2$$



磁环内径区域热梯度高



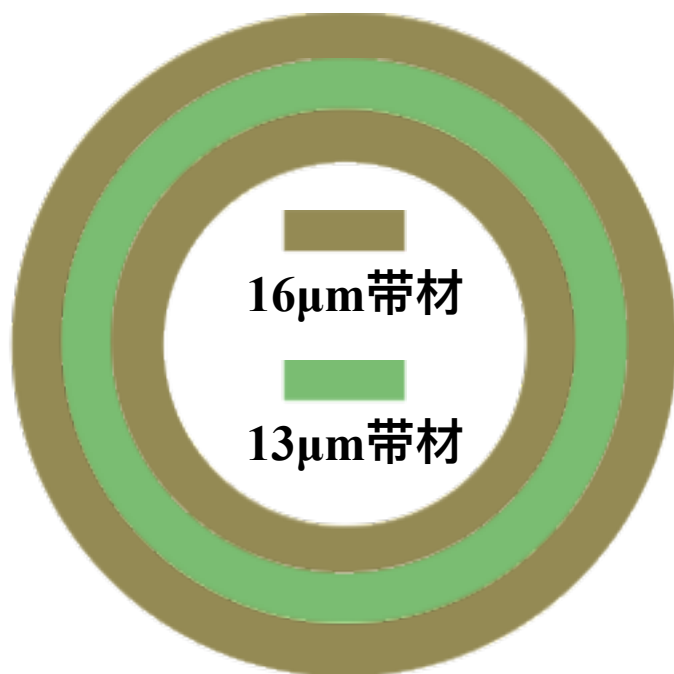
材料磁导率与厚度成反比



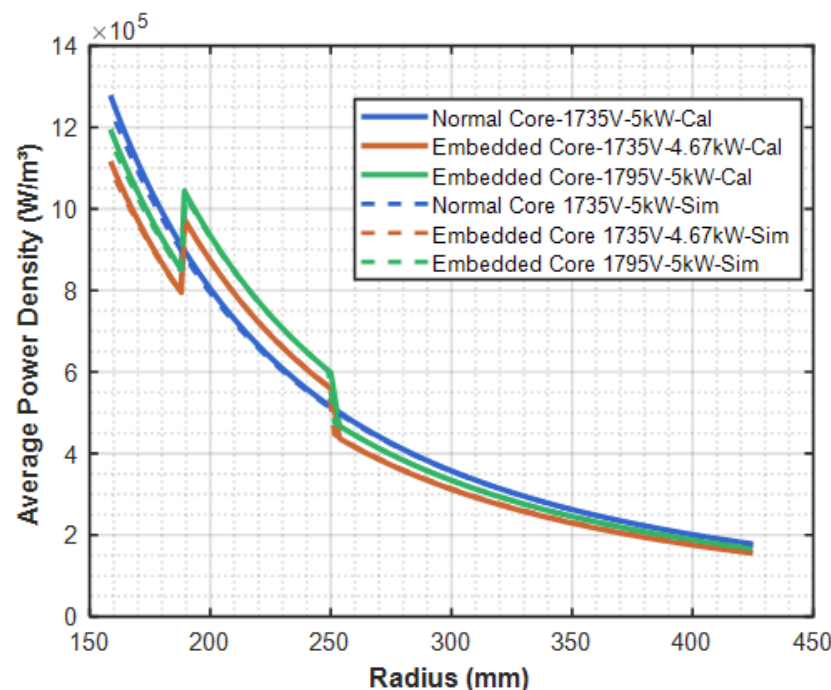
提出新型嵌套结构磁环

- 在磁环径向**中部区域**采用少量**13 μm 带材**，而其他区域采用**16 μm 带材**
- 功率从内径高温区域向中径区域重新分配，改善温度分布均匀性
 - 超薄带材的高磁导率特性使其**阻抗更高**，在串联电路中获得**更高的电压分配**
 - 中径区域相比内径区域具备**更大的散热表面积和更高效的散热路径**，进一步优化热管理

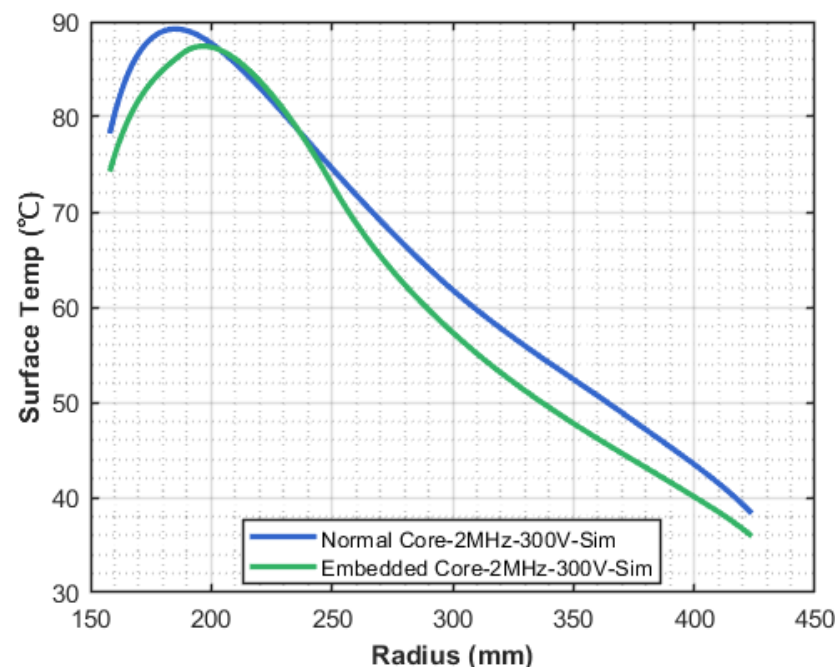
嵌套结构磁环示意图



功率密度重分配



温度峰值从内径向中径区域转移



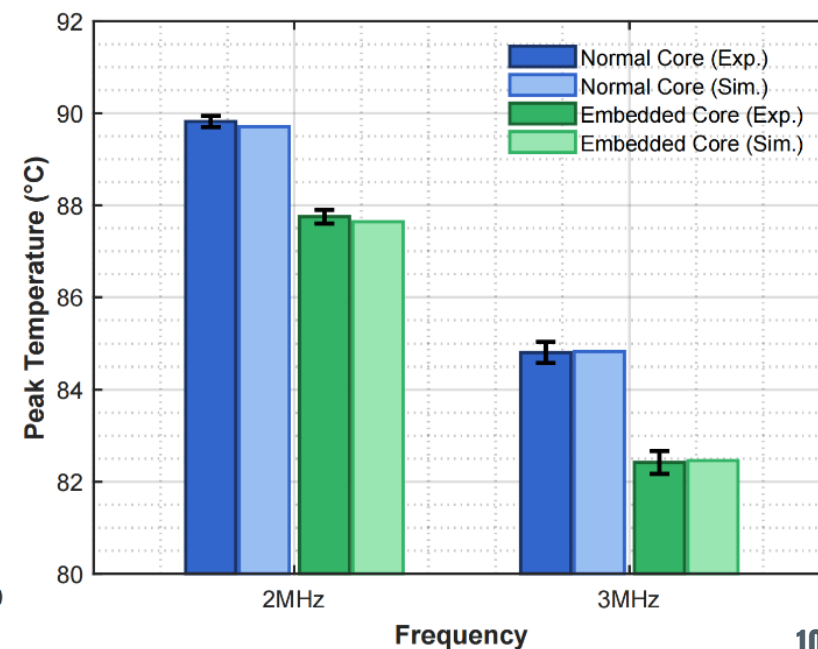
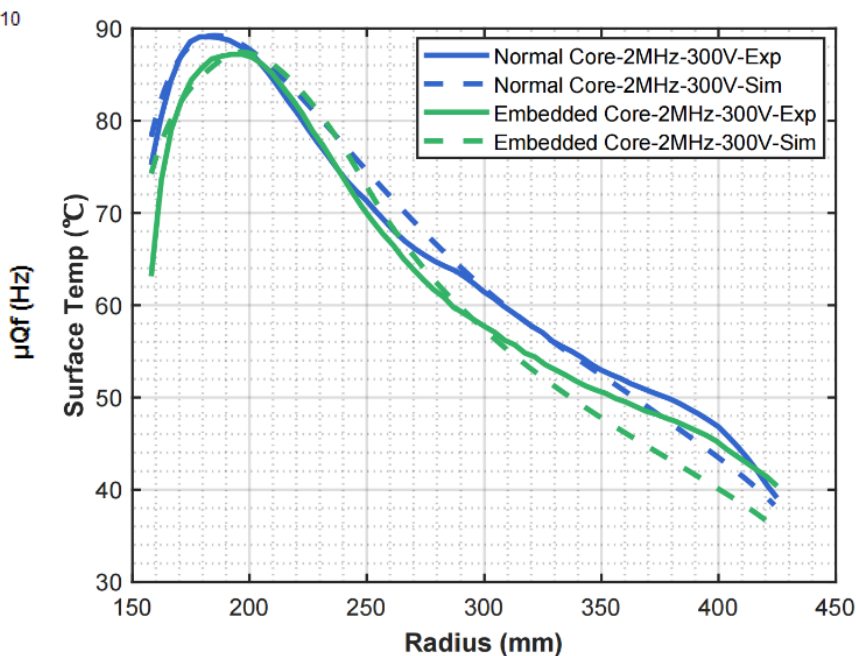
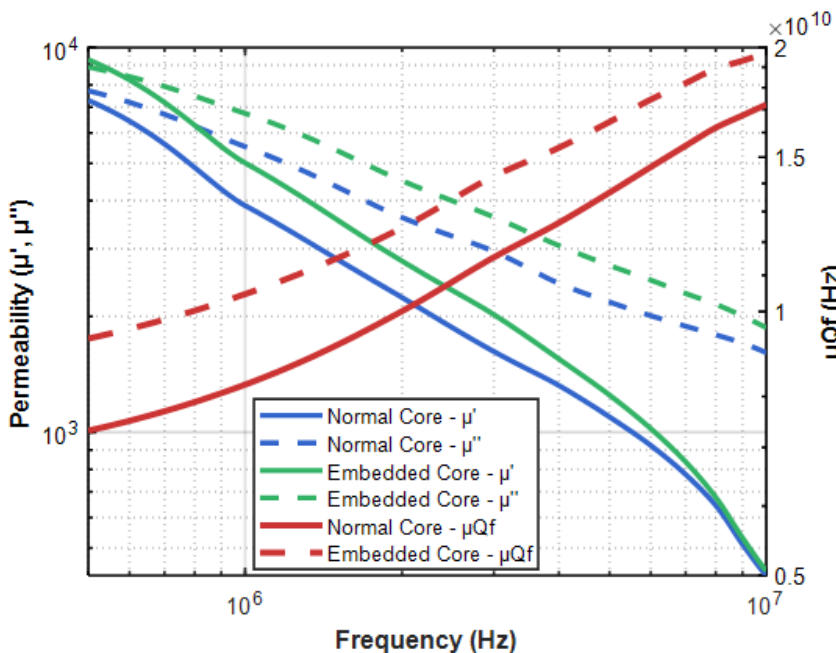
嵌套结构有效提高磁环热稳定性

- ▶ 完成嵌套结构磁环的研制，高功率实验证明提高了磁环热稳定性
 - μ' 、 μ'' 、 $\mu Qf@2\text{ MHz}$ 分别提高了5%、5%、7%
 - 最优配置下可获得3-6°C的温度降低和6-12%的阻抗提升
- ▶ 后续将重点关注电磁-热-力多物理场耦合对长期运行可靠性的影响

B. Wu, et al. Physical Review Accelerators and Beams, under review

嵌套结构相比常规磁环磁性能提升

实验结果与仿真结果吻合，嵌套结构磁环峰值温度得到明显降低

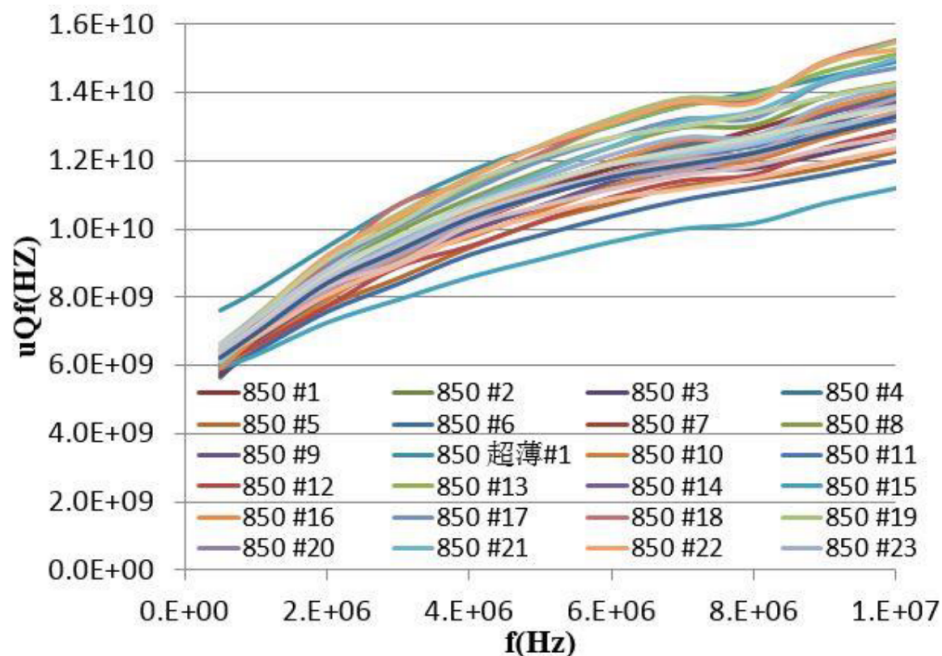


开发高效的磁环排布算法

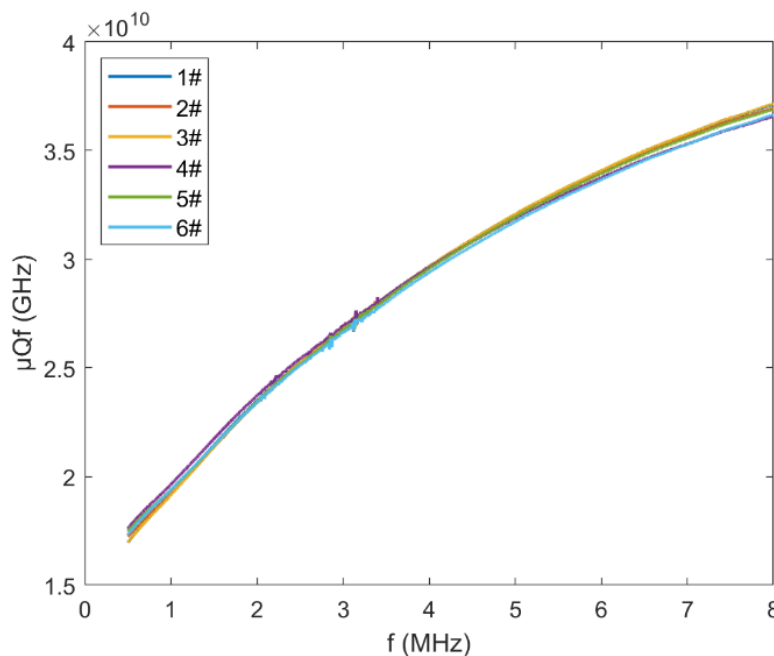


- ▶ 磁合金加载腔包含6个water tank，需确保各腔体功率损耗均衡
 - 每个tank装载3片磁环；18片磁环因生产误差导致 μQf 不一致
 - 优化磁环排布，使6个tank的 μQf 接近
 - 枚举法总组合数为619,028,335，计算复杂度高，难以获得最优解
- ▶ 开发优化算法，实现磁环最优排布， μQf 差异 $\leq 5\%$ ，最大功率差 $\leq 8\%$

18片磁环的 μQf



磁化排布优化后的6个tank的 μQf



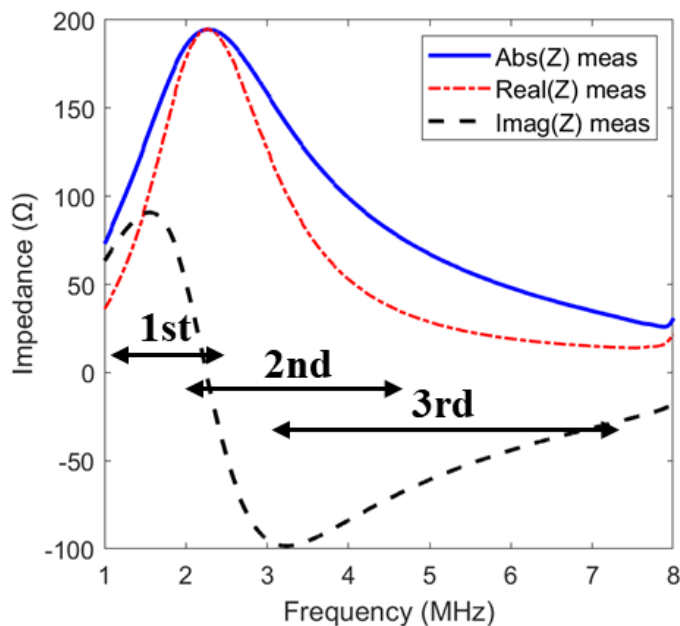
带束运行下的功率损耗

Tank1功率	6.46 kW
Tank2功率	6.60 kW
Tank3功率	6.68 kW
Tank4功率	6.13 kW
Tank5功率	6.62 kW
Tank6功率	6.41 kW
总功率	38.88 kW

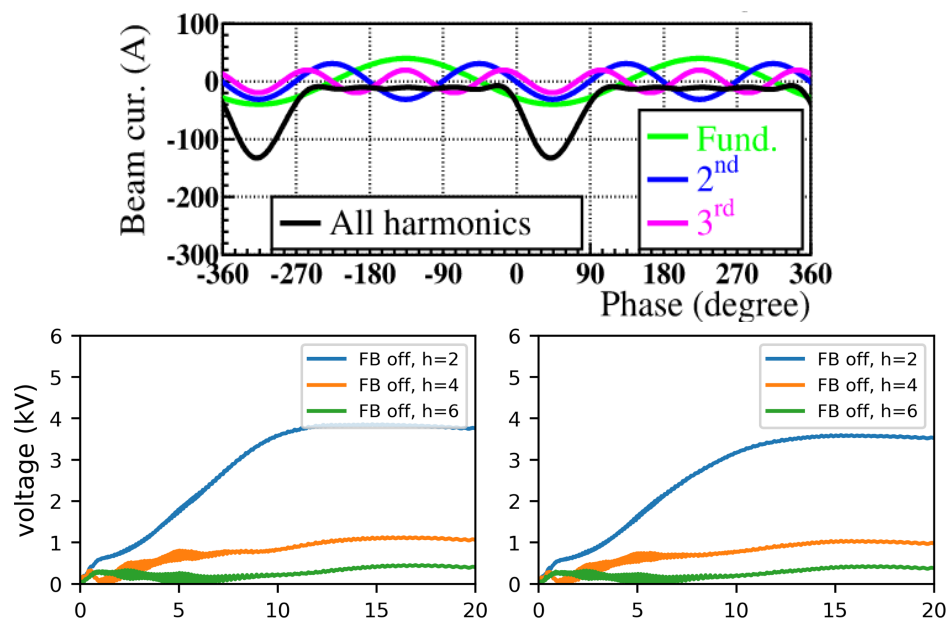
2. 宽带系统面临多谐波束流负载效应

- ▶ 束流负载效应是强流质子加速器公认的难点，是必须解决的核心问题
 - 循环流强 $>4\text{A}$ ，束流负载效应严重
- ▶ 磁合金加载腔宽带阻抗特性覆盖多谐波频段；束流包含丰富谐波
 - 多谐波束流负载导致束流相空间畸变，引发束流不稳定性
 - 束流负载需补偿至三次谐波 $h=6$

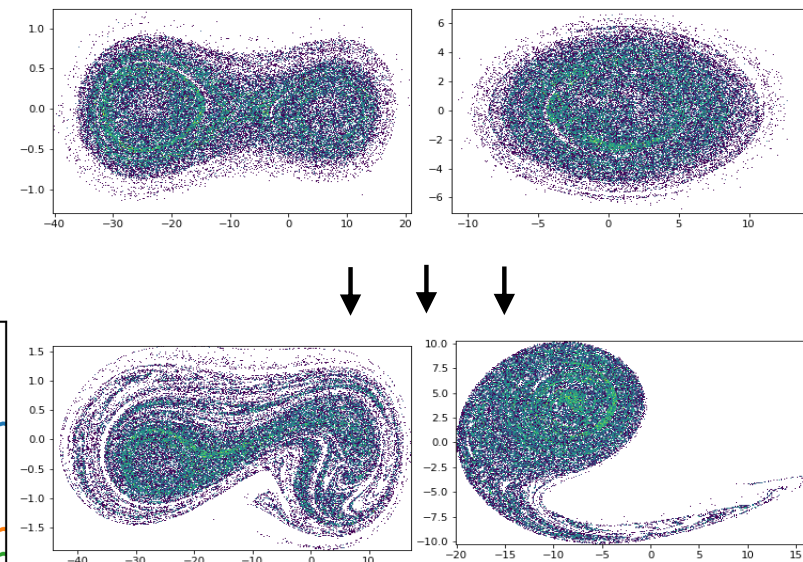
宽带阻抗特性



多谐波束流负载

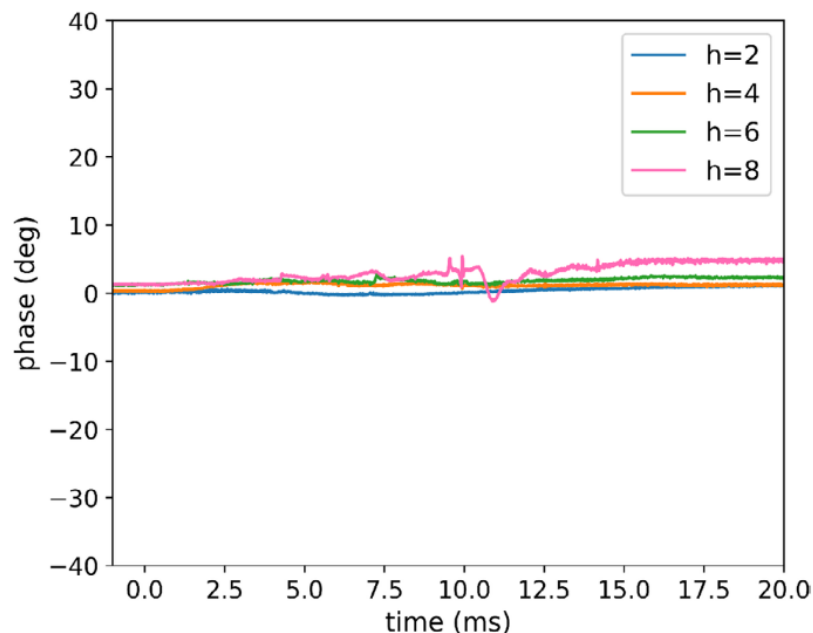


相空间畸变，丝化



- J. Wu, et al. Nuclear Science and Techniques, 36 (4), 62**

环路相移校正

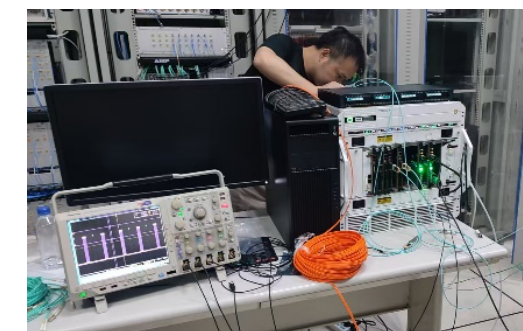
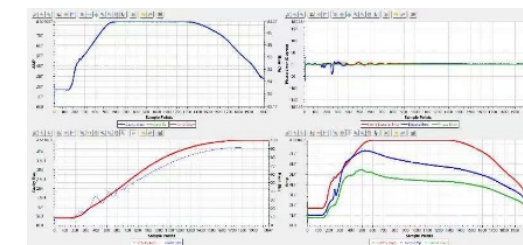
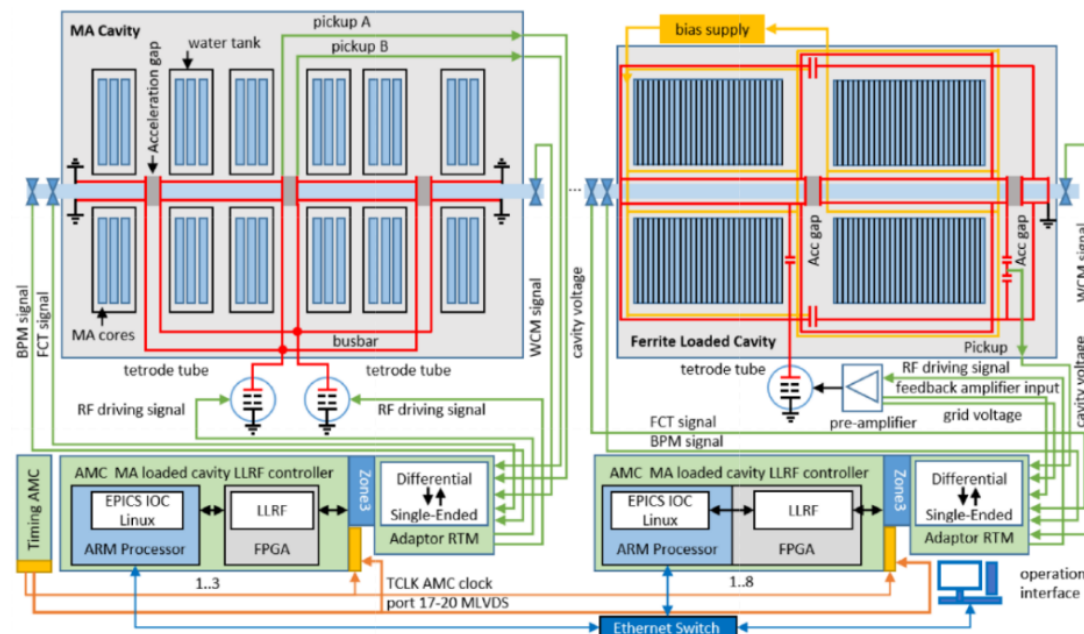
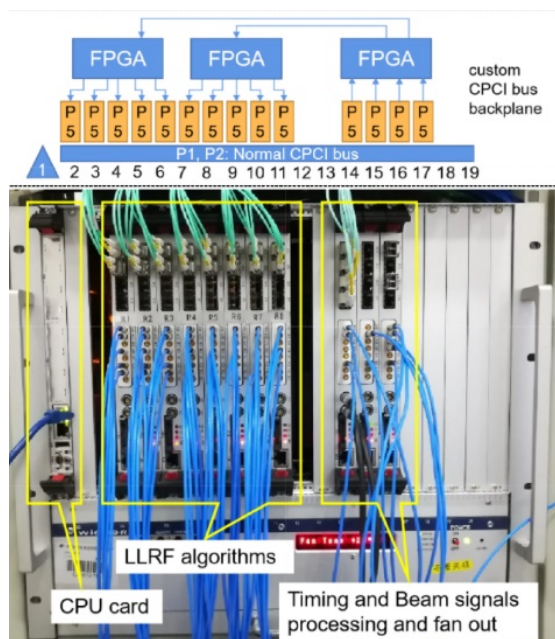
束流负载 $<0.5 \text{ kV/gap}$ 

基于MicroTCA.4平台的LLRF系统升级



- MTCA.4是国际高能物理领域主推的下一代嵌入式数字硬件平台架构
 - 高稳定性、开放标准、模块化设计、高性能、低成本，等
- CSNS-I 基于CPCI总线的硬件平台亟需升级改造
 - CPCI背板桥芯片停产无法备件，CPCI总线带宽的限制

X. Li, et al. Journal of Instrumentation, 19 (10), T10006; W. Long , et al. Journal of Instrumentation, 18 (12), T12004



基于MicroTCA.4平台的LLRF系统升级



▶ 联合国内厂家和研究院开发了国产MTCA.4硬件平台

- 多功能信号处理AMC板卡、定时AMC板卡、适配RTM板卡、上下变频和直接采样RTM板卡、Piezo和步进电机调谐FMC子板，国产MMC子板，MTCA.4机箱电源、MCH...

▶ 满足加速器多个系统的需求：高频、控制、束测

▶ 2024年6月通过专家组的测试和鉴定

▶ 已完成CSNS-II 环高频低电平硬件平台所有模块的批产，正在进行调试和安装

CSNS-II 国产 MTCA.4 平台鉴定意见

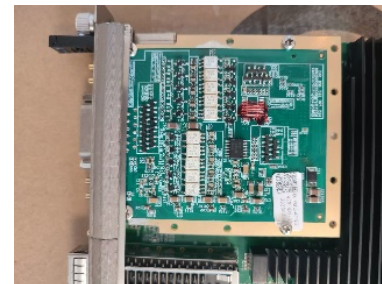
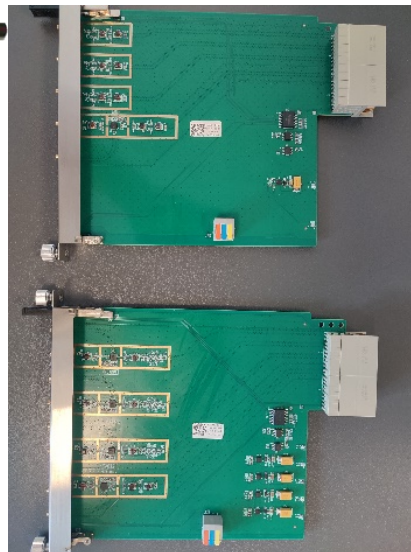
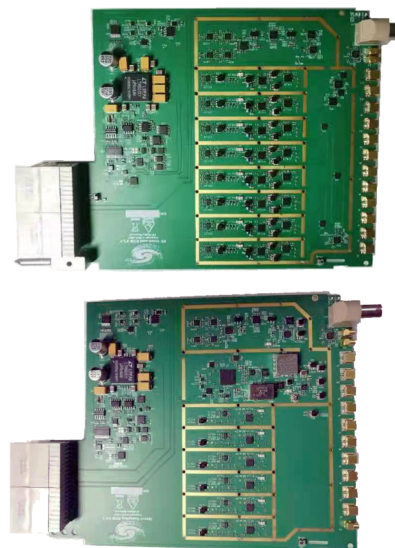
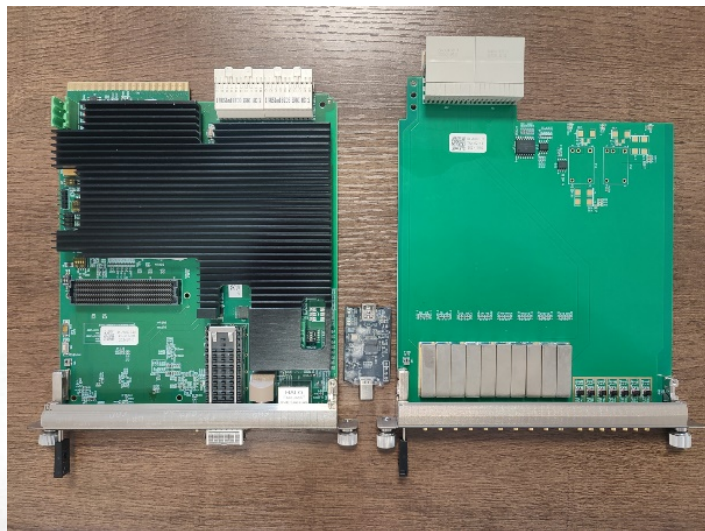
2024年6月12日，中国科学院高能物理研究所组织专家（名单附后）在广东省东莞市对 CSNS-II 国产 MTCA.4 平台进行了成果鉴定。与会专家听取了项目介绍和测试方案报告，讨论并通过了项目测试大纲，专家组进行了现场测试，测试结果见附件。

经过讨论形成如下意见：

1. 项目组在国内首次开展了 MTCA.4 平台的国产化工作，完成了 AMC 主控板卡、AMC 定时板卡、RTM 采样板卡、标准化机箱和电源的研制，可以满足 CSNS-II 工程建设需求。
2. 在符合 MTCA.4 规范的基础上，项目组自主研发了核心的 MMC 控制器，能够实现单板卡独立运行模式，增强了平台的通用性和扩展性，可以满足未来大科学工程对 MTCA.4 系统的定制化需求。
3. MTCA.4 平台国产化实现了关键技术的自主可控，显著降低了设备成本，整体性能达到了国际先进水平。

CSNS-II 国产 MTCA.4 平台鉴定专家组

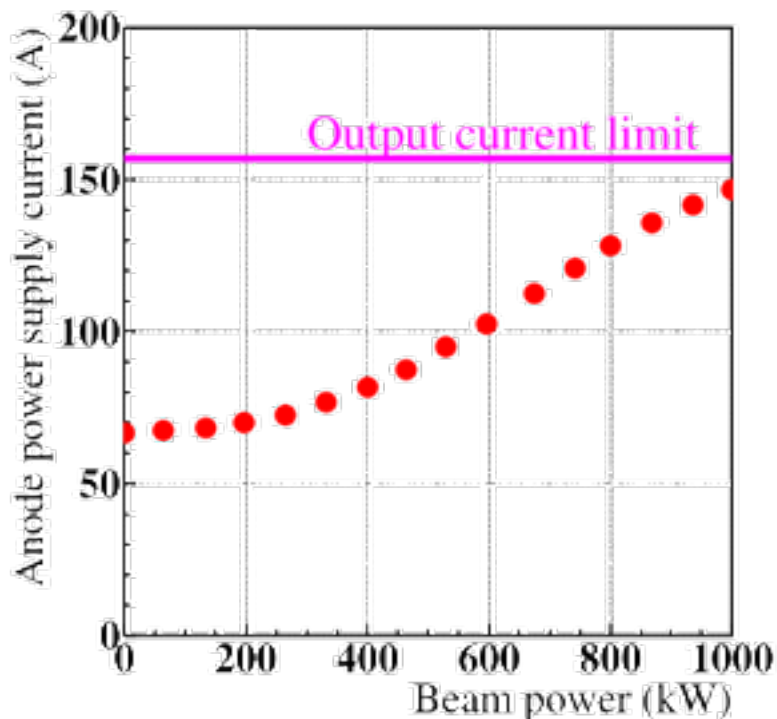
组长：[Signature]
2024年6月12日



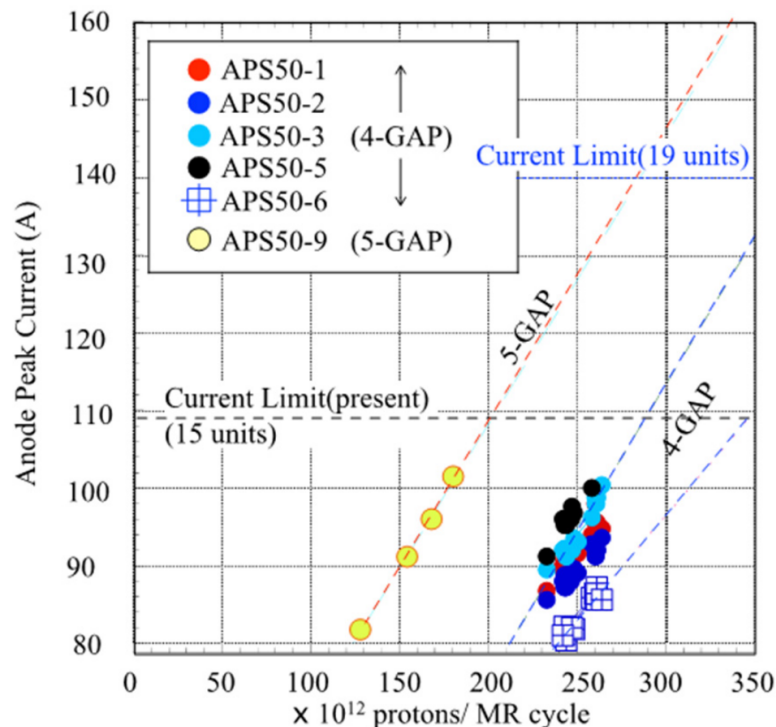
3. 高频系统在强流下失配严重

- 束流功率进一步提升给高频系统带来严峻挑战，亟需展开系统状态分析与优化
 - 高频系统在强流下失配严重、输出能力不足是限制束流功率提升的关键瓶颈
 - J-PARC RCS/MR面临共性问题，进行了10余年的升级改造
 - CSNS 160kW下已失配严重，500kW循环流强比J-PARC高出30%，失配问题更为严峻

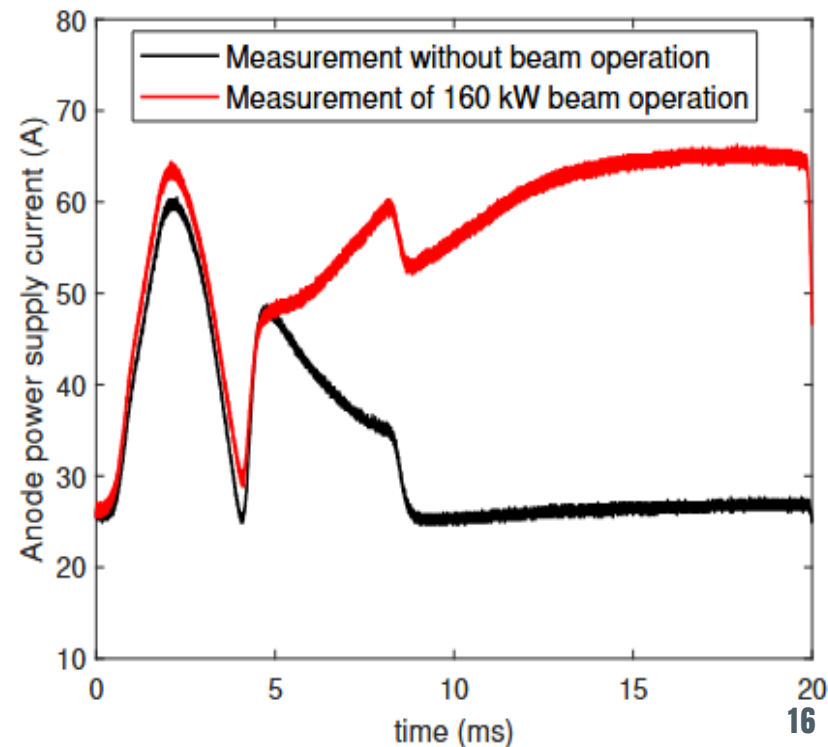
J-PARC RCS电流接近极限



J-PARC MR电流接近极限



CSNS 160kW失配严重

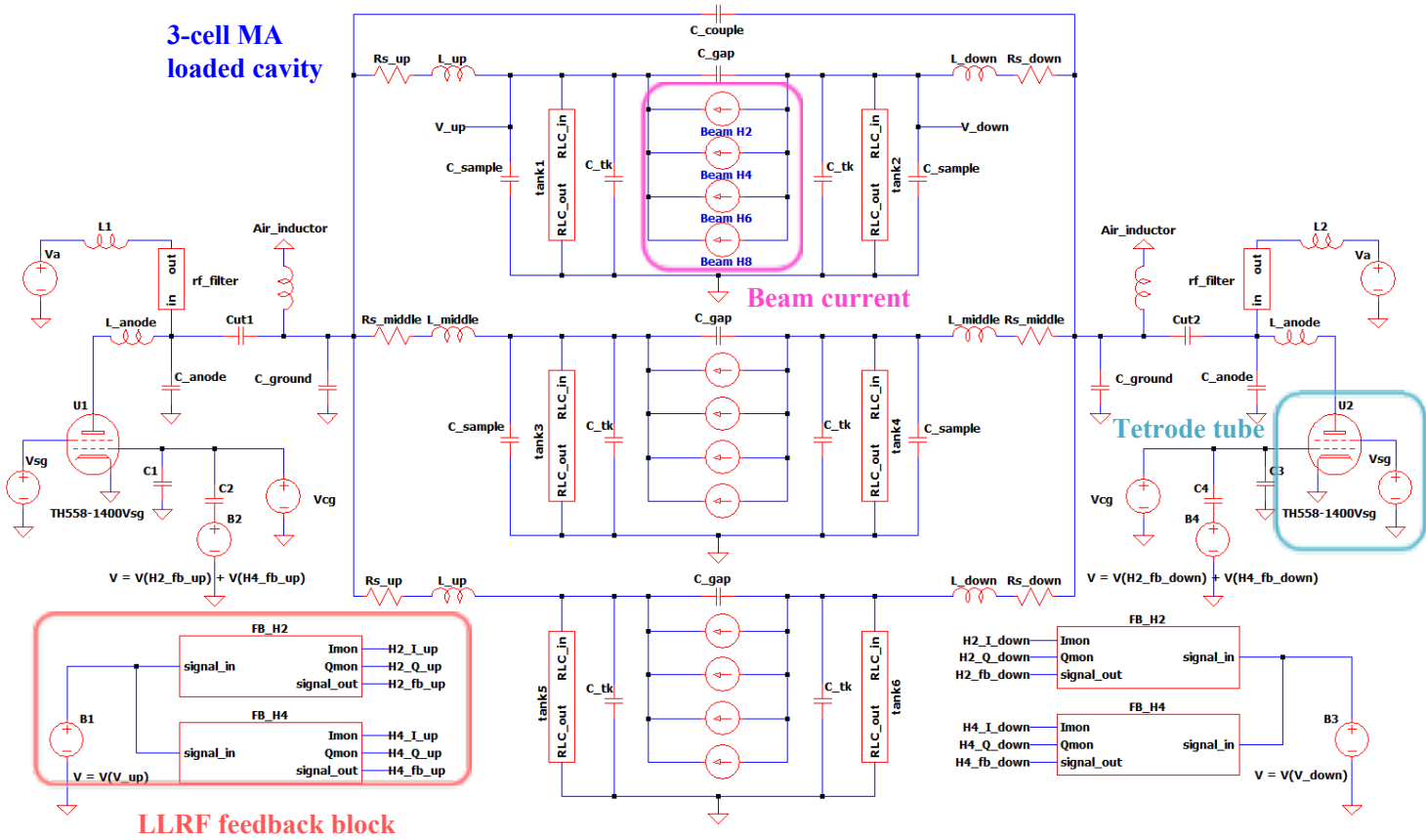


开发束流-磁合金高频系统相互作用分析模型



- ▶ 创新地开发一个完善的系统级仿真模型，准确量化分析束流-系统相互作用
 - 磁合金加载腔+功率源放大器+低电平控制系统+束流
 - 宽带高频系统分布参数较多，考虑支持高效大规模电路仿真的LTspice平台

LTspice磁合金加载腔高频系统模型



符号	描述
Air_inductor	并联电感
Beam H2-H8	束流H2-H8谐波
C_gap	间隙电容
C_sample	采样电容
FB_H2/H4	H2/H4谐波反馈模块
rf_filter	低通滤波器
tank1-6	六个谐振腔
TH558	TH558四极管

解决了复杂非线性系统建模难题

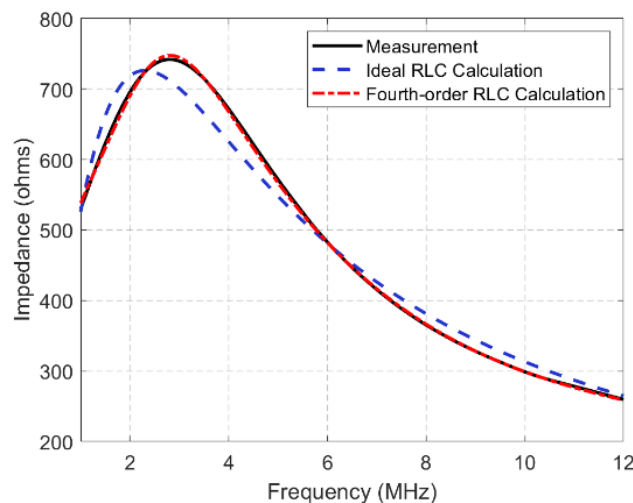
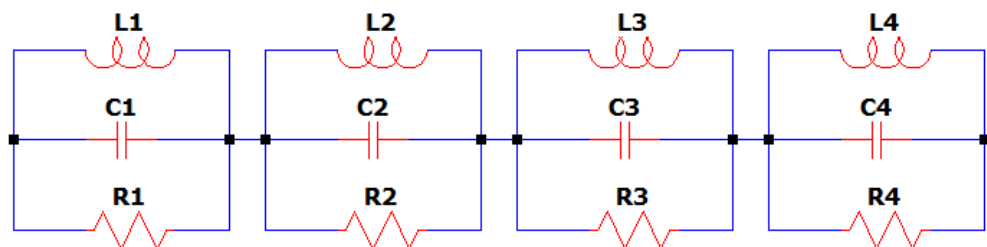


仿真模型准确表征实际高频系统物理特性

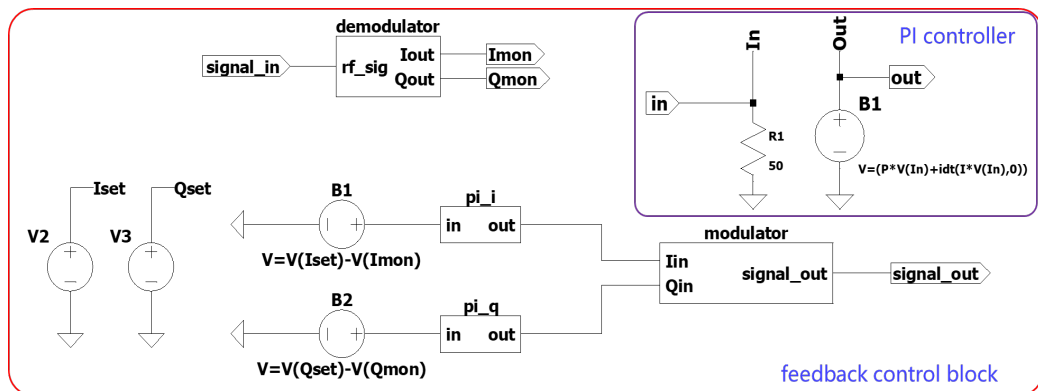
- 高度可移植性，可广泛应用于具有类似架构的高频系统中

创新提出高阶RLC模型，精确拟和磁合金加载腔

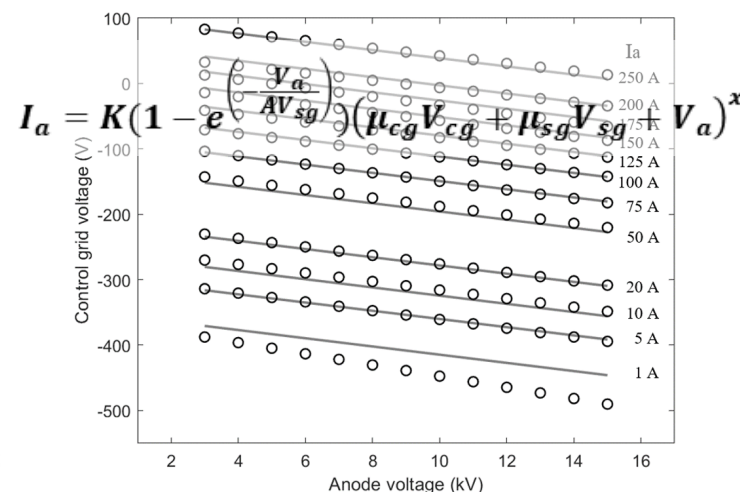
$$Y_i(f) = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{j2\pi f L_i} + j2\pi f C_i \quad z(\omega) = \sum_{i=1}^N (1/Y_i(\omega))$$



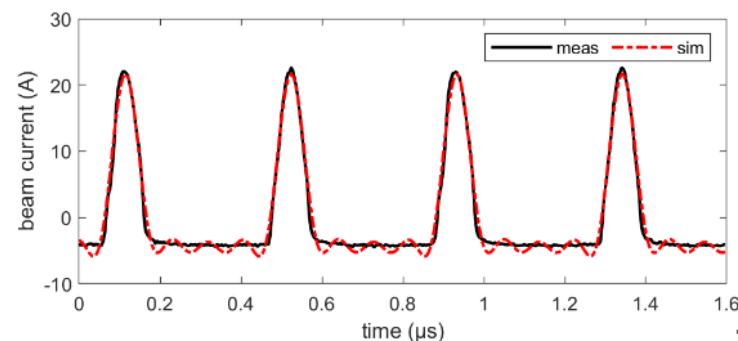
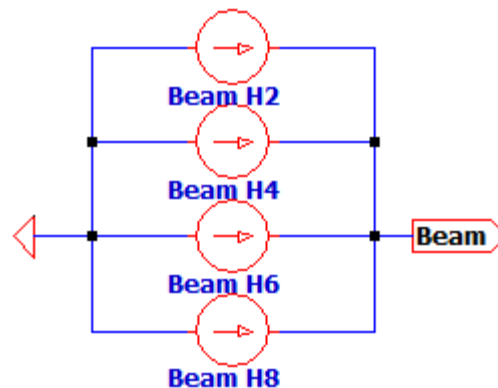
数字信号处理、反馈控制环路搭建



四极管特征曲线重构



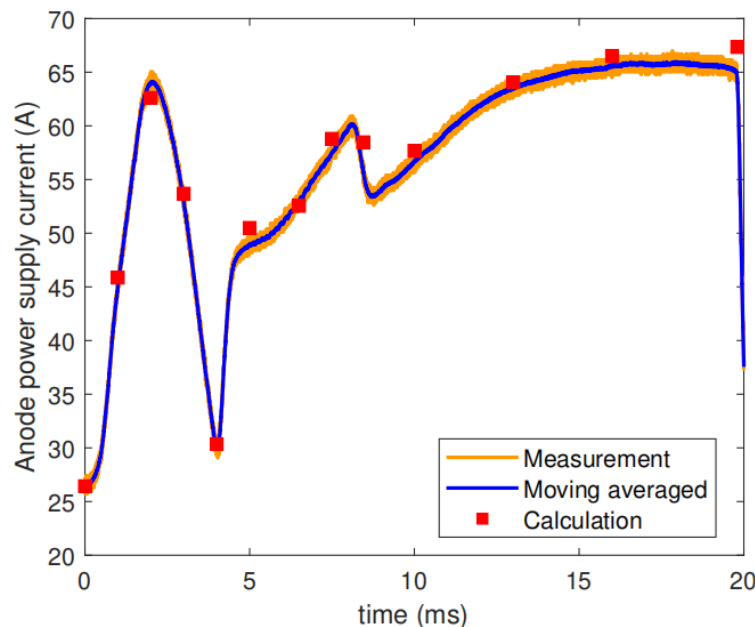
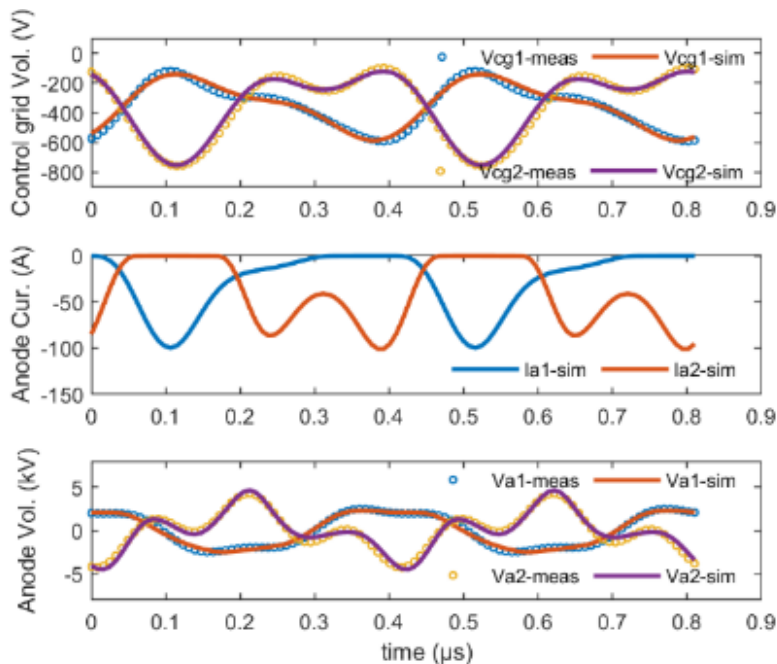
多谐波电流源有效模拟束流波形



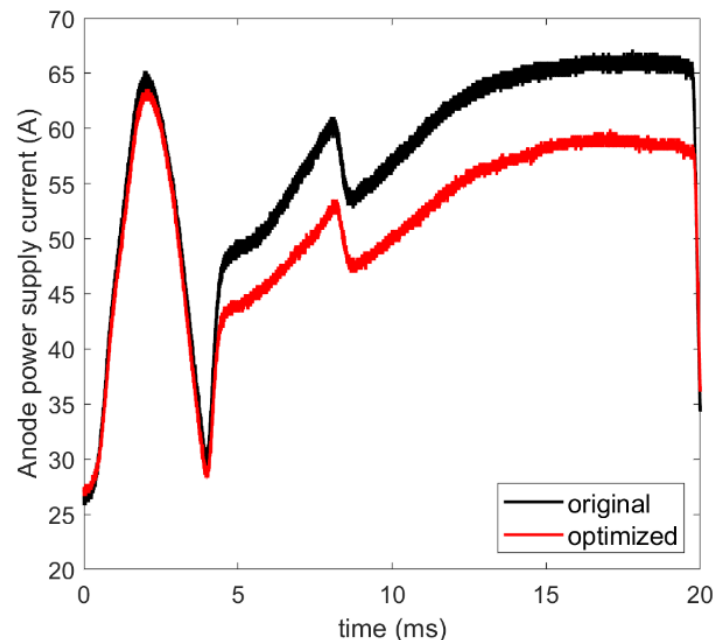
- ▶ 160 kW束流下系统状态分析与测量结果吻合
- ▶ 通过研究不同系统参数对性能提升的作用机制，为高频系统优化提供理论依据
 - 针对500kW束流功率运行，提出可靠的优化方案
 - 160 kW束流运行下的优化方案已得到验证

J. Wu, et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 71 (11), 2339-2349

高频系统状态分析与测量结果对比



优化后高频系统状态改善

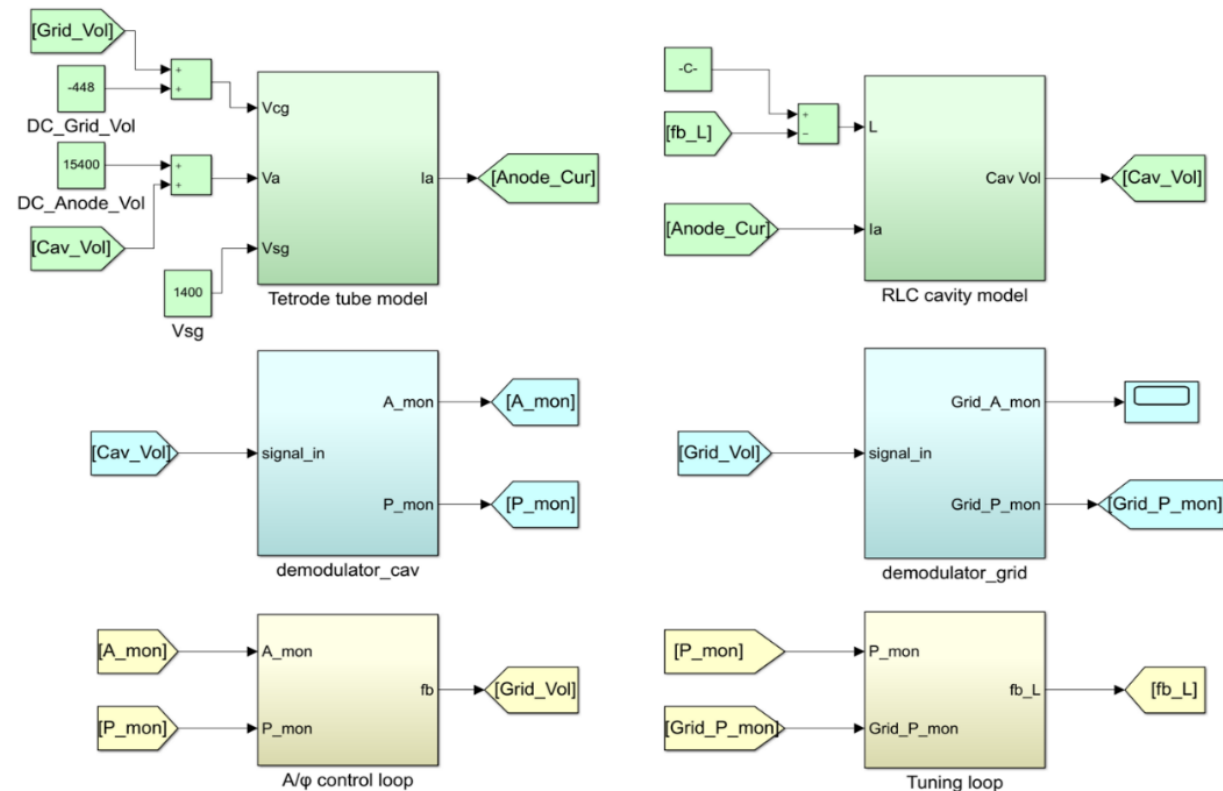


开发束流-铁氧体高频系统相互作用分析模型

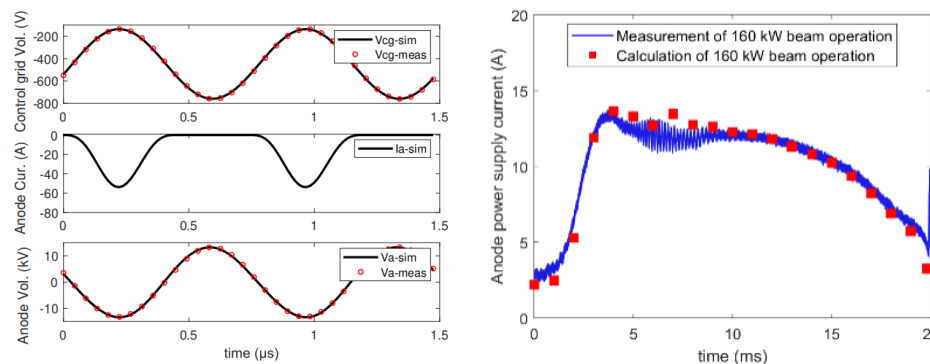


- 首次研究了该高频系统的状态分析方法，能准确量化分析束流-系统相互作用
- 该高频系统参数时变，动态特性复杂，分析困难，尚无相关报道
- 解决系统建模难题，开发铁氧体加载腔+功率源放大器+低电平控制系统+束流模型
- 高度可移植性，可广泛应用于具有类似架构的高频系统中

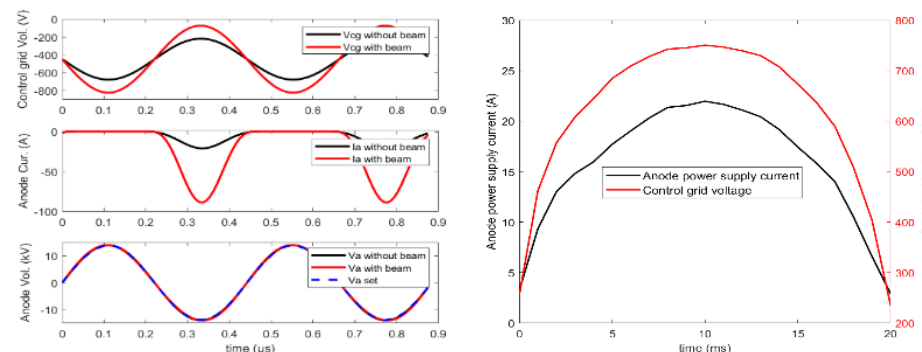
J. Wu, et al. Physical Review Accelerators and Beams , 27 (11), 112001



高频系统状态分析与测量结果吻合

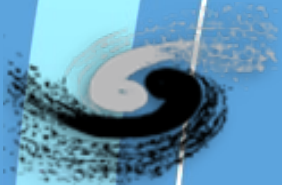


能满足500kW束流功率运行



- ▶ 高功率高梯度磁合金加载腔
 - 加速梯度达50 kV/m，国际领先，稳定运行近三年
 - 新型嵌套结构磁环，进一步提升热稳定性，具有重要应用前景
- ▶ 低电平控制系统
 - 解决相空间丝化，保证双谐波加速稳定，束流功率提升至170 kW
 - 基于MicroTCA.4平台的新型系统将于今年投入运行
- ▶ 束流-高频系统相互作用分析模型
 - 准确模拟了高频系统在束流负载下的工作状态
 - 为强流下系统优化提供了重要研究手段，优化方案已在 CSNS RCS 中得到验证
- ▶ 继续展开磁环性能和腔体结构的优化，满足高重频、高加速梯度需求
- ▶ 系统故障诊断和预测，提高系统运行稳定性

感谢各位专家的聆听！



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

CSNS-II RCS高频系统关键技术研究进展

伍 坚 工程师
微波高频会议报告
2025 年 7 月