



无监督机器学习算法 在束流测量与诊断中的应用

中国科学院高能物理研究所 东莞研究部 黄蔚玲

On behalf of CSNS BI Group



- CSNS加速器束流测量系统最近进展
- 无监督机器学习算法在束流测量与诊断中的应用

- ◆ 基于机器学习算法的束流剖面测量畸变矫正研究
- ◆ 聚类算法在DCCT软磁合金环精准匹配中的应用

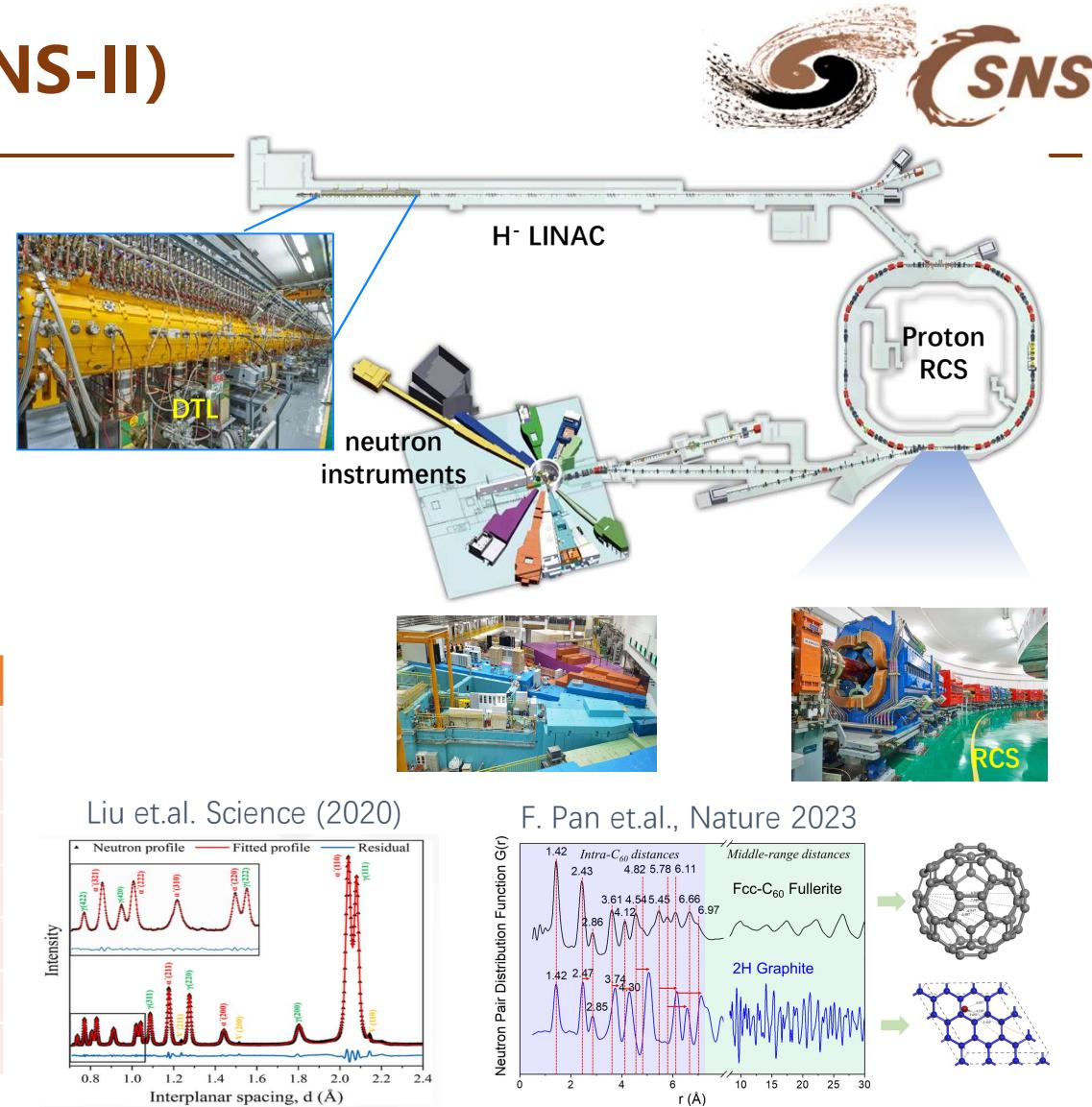
- 总结与展望

中国散裂中子源 (CSNS → CSNS-II)

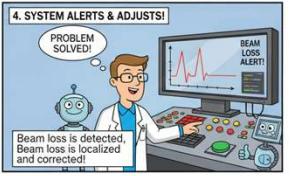
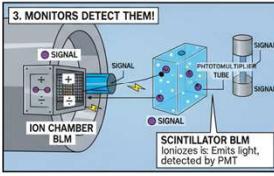
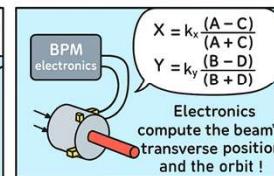
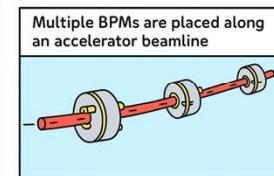
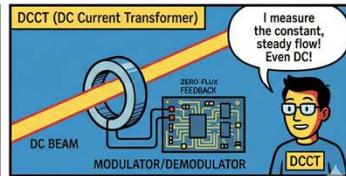
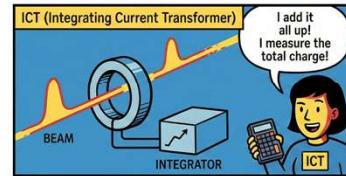
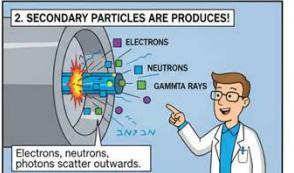
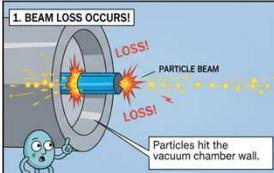
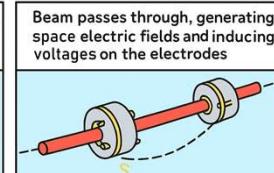
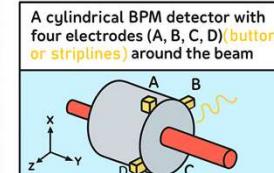
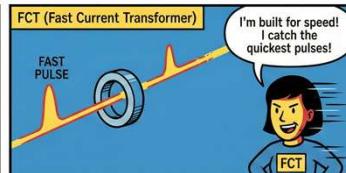
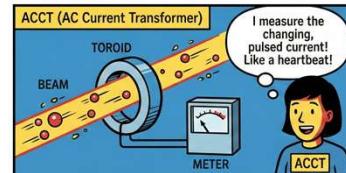
- 世界上第4台脉冲型散裂中子源
用户实验于2018年10月开放
- 一期建成3台谱仪(GPPD, MR & SANS)
8台合作谱仪
- CSNS-II: 功率提升至 500 kW 、新增9台中子谱仪
+ 缪子源 + 高能质子束线

Major machine parameters

	CSNS(now)	CSNS-II
Beam Power on target [kW]	160	500
Proton energy [GeV]	1.6	1.6
Average beam current [μ A]	100	312.5
Pulse repetition rate [Hz]	25	25
Linac energy [MeV]	80	300
Macropulse. ave current [mA]	15	50
Macropulse duty factor	1.05	1.5

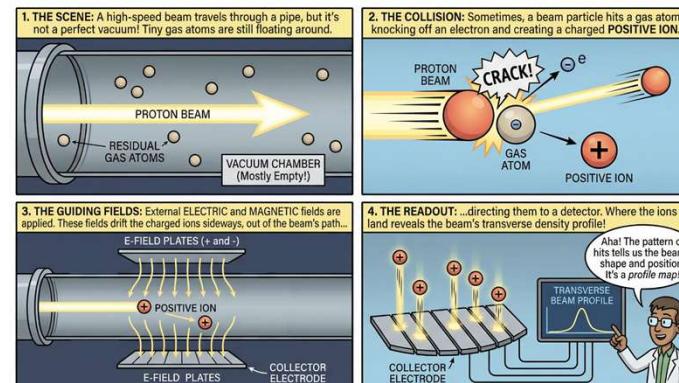
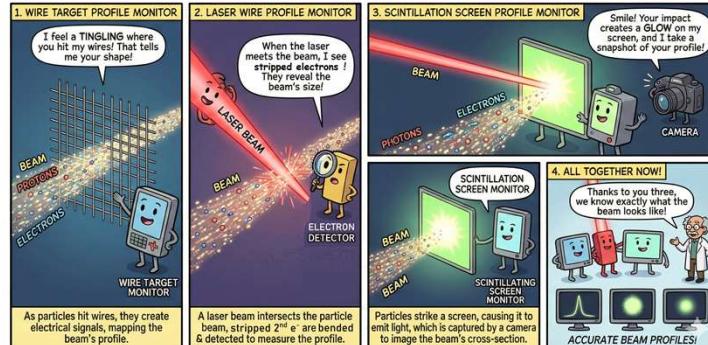


欢迎截屏



Different BCTs for different beams: ACCT for pulses, FCT for fast pulses, ICT for total charge, and DCCT for continuous current.

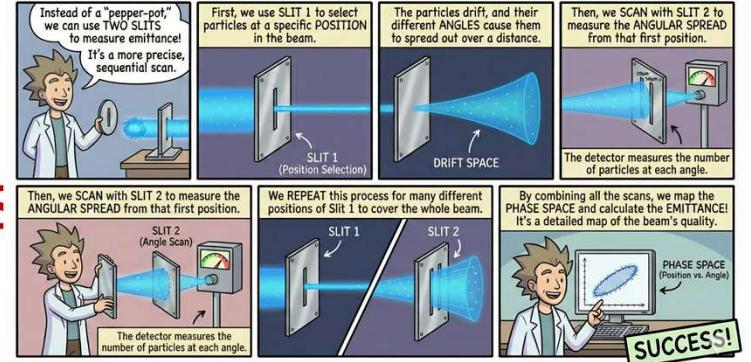
BEAM PROFILE MONITORS: SEEING THE INVISIBLE!



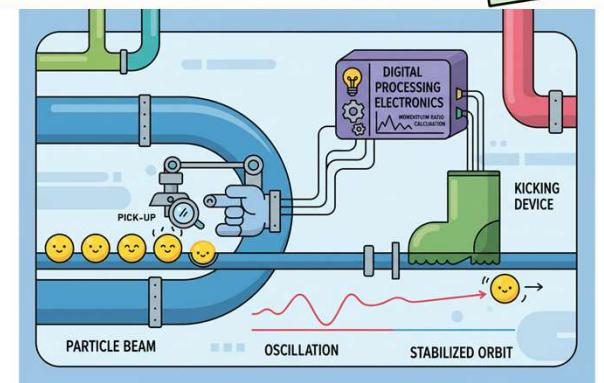
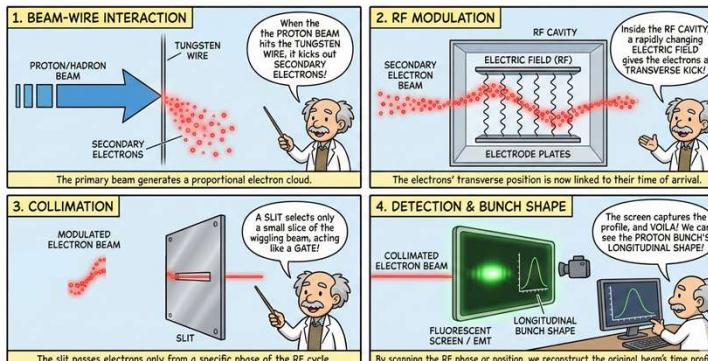
Nano Banana



BEAM EMITTANCE: THE DOUBLE-SLIT METHOD!



THE FESCHENKO MONITOR: SEEING THE BEAM'S TIME STRUCTURE!



CSNS-II 加速器束测元件



CSNS-II 加速器配备束测元件总共约470台套，新增超过200台套

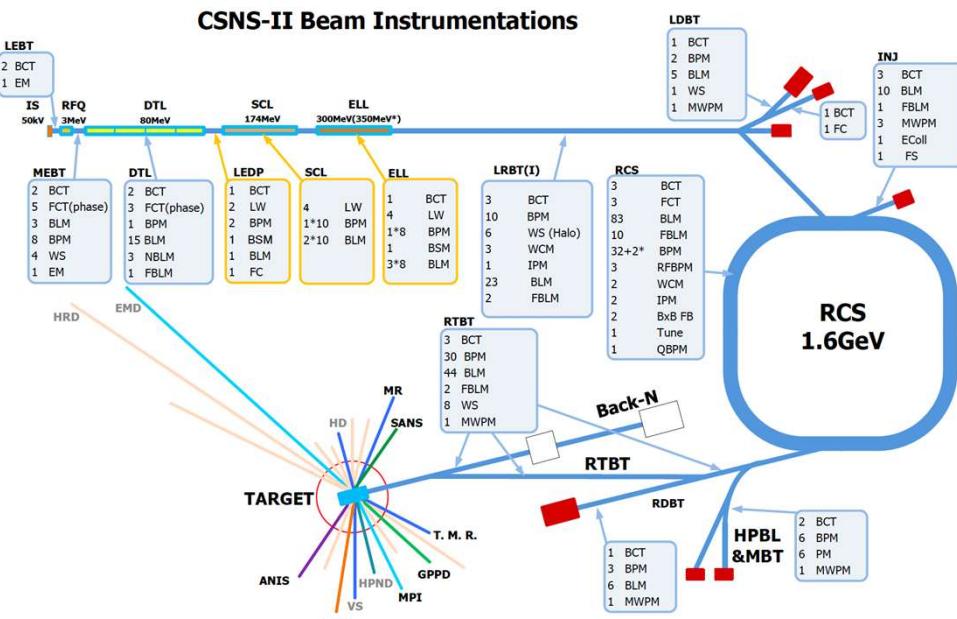
	BCT	FCT	BPM	BLM	WS	LW	MWS	IPM	VS	EMIT	BSM	WCM	FC	Feed back	Tune
Front-end	3		8	3	2					2	1			1	
DTL	3	3	1	18											
SC-LINAC	3		20	63	4	4					2			1	
LRBT	2	2	19	25	4	1					1				
LDBT	2		2	5	1		1							1	
I-Dump	2			4				1		1					
RCS	3	3	35	98				2	2			2		2	2
RTBT		3	30	44	4			1							
RDBT	1	3	6	4			1								
RABT	2	6	8	0			1		1						
Total	8	14	124	274	19	5	7	2	2	3	3	2	3	2	2

CSNS-II 加速器束流测量与诊断系统升级概况



□ 升级规划

- 前端、注入区的整体改造升级(2025-2026)
- 直线加速器超导节相关的束测系统升级(2027-)
- RCS环束流可视化功能提升(电离型剖面探测器IPM) 及不稳定性抑制(2024-)
- 两条高能输运线上的束测设备(RABT, 2027-)



陆续研制、安装、调试 200多台套新束测元件

由“常规”向“创新”迈进

- 微拦截式剖面仪 (IPMs, LW)
- RCS环束流横向不稳定性抑制
- 新材料(碳纳米管丝靶, 荧光丝靶)

注入区设备升级改造项目



INDVS

INDCT

INDMWS01

H0CT ($H^- \rightarrow H^0 \rightarrow p$)

R1BPM01

INECOL

INMWS02

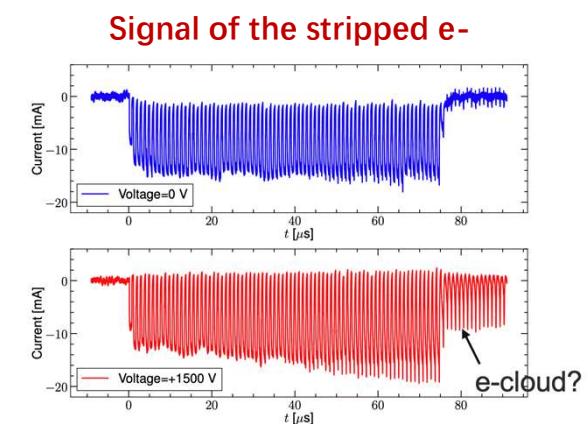
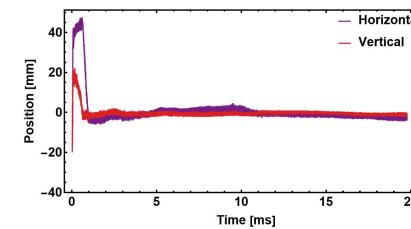
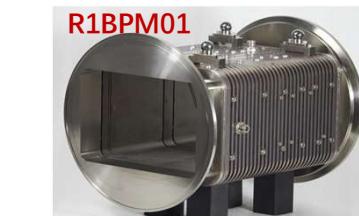
INMWS01

LRBPM18

今年暑期完成了9台套束测设备的安装

- RBPM18: 短条带型BPM (内径=50 mm)
- INMWS01-02、INMWS03: 多丝靶 (136通道)
- INECOL: 剥离电子收集器
- R1BPM01: 矩形斜切式BPM (260 mmx180 mm)
- H0CT, INDCT: 交流流强变压器 (10 μ A-80 mA)
- INDVS: 荧光屏剖面仪(Chromox6)

调束第一天所有束测设备工作完美 (Day 1)



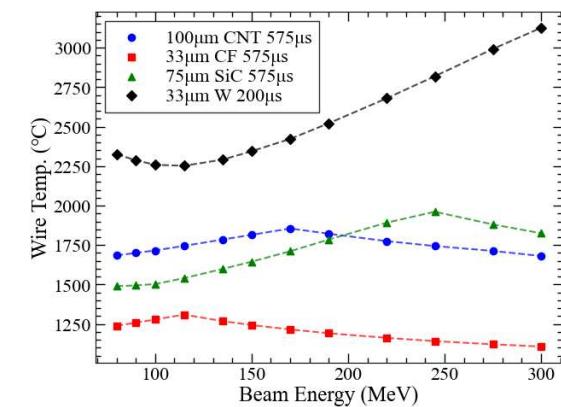
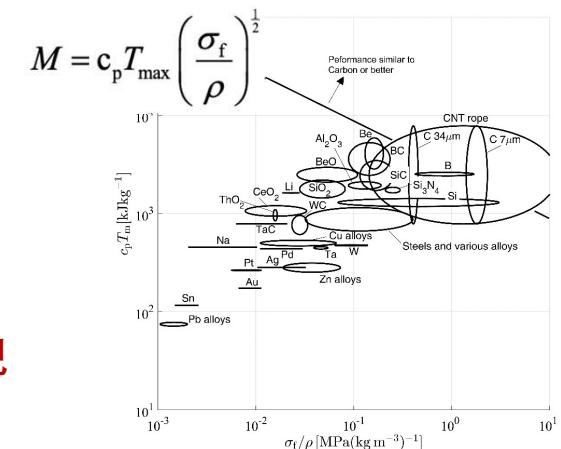
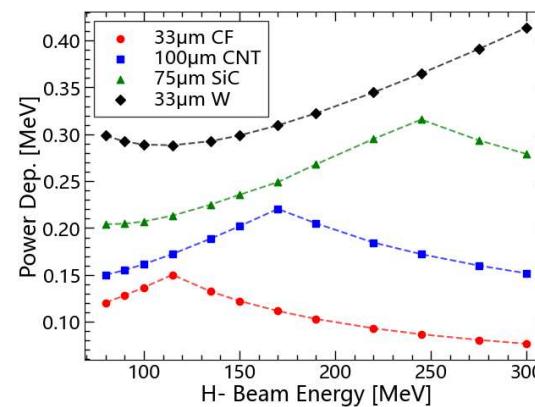
RCS注入区多丝靶剖面仪的研制



□RCS注入区调束亟需3台多丝靶剖面仪：极高的技术挑战

- 束流条件苛刻：H- beam, 80/300 MeV, 30 mA, 575 μs, $\sigma_{x/y} \sim 2.0$ mm, 单发或 1 Hz
- 利用Geant4与ANSYS联合进行丝靶材料的热分析
 - 常规钨丝及SiC在束流轰击下会融化/升华
 - 碳纤维(33 μm) 峰值温度仅1310 °C
- 碳纤维丝短板：SEY<5%* I_{H^-} @>115 MeV；机械应力与挠度问题制约大规模部署

Material	CNT	CF	W	SiC
Diameter(um)	100	33	33	75
Density(g/cm ³)	1.08	1.8	19.35	2.89
Thermal conductivity (W/mK)	350	24	173	340
Tensile Strength(GPa)	1.79	3	1	5.9
Work Temperature (°C)	<2000	<2000	<2000	≥1250
Expected max. temperature (°C)	1855	1310	>3000	1962



[1] H. Bigland et al., Advanced Engineering Materials (2020)

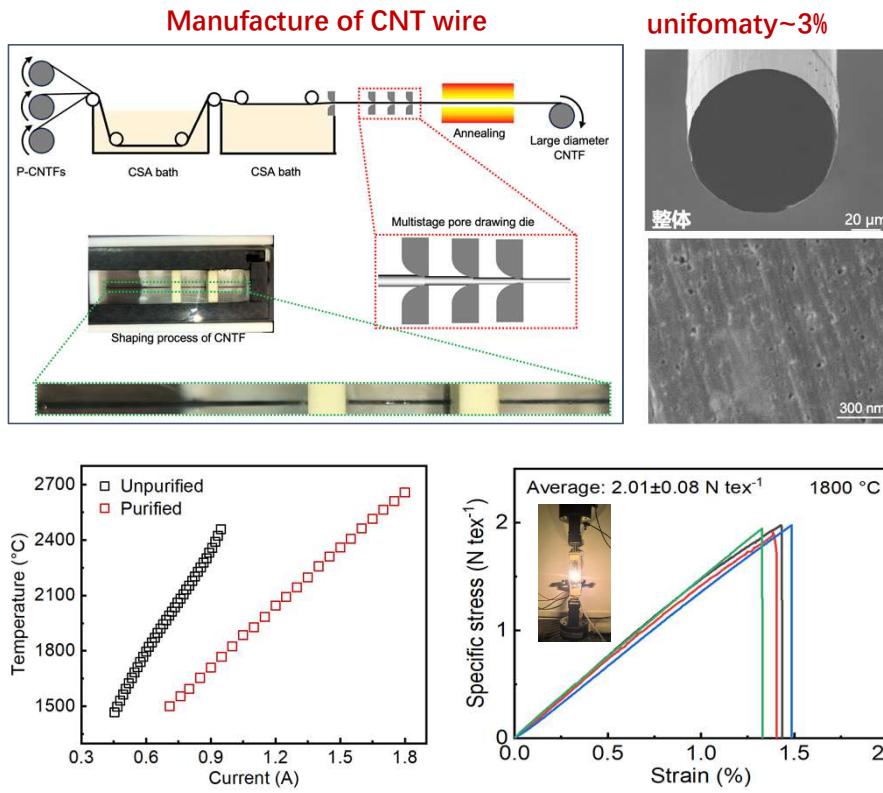
[2] <https://www.specmaterials.com/>

RCS注入区多丝靶剖面仪的研制



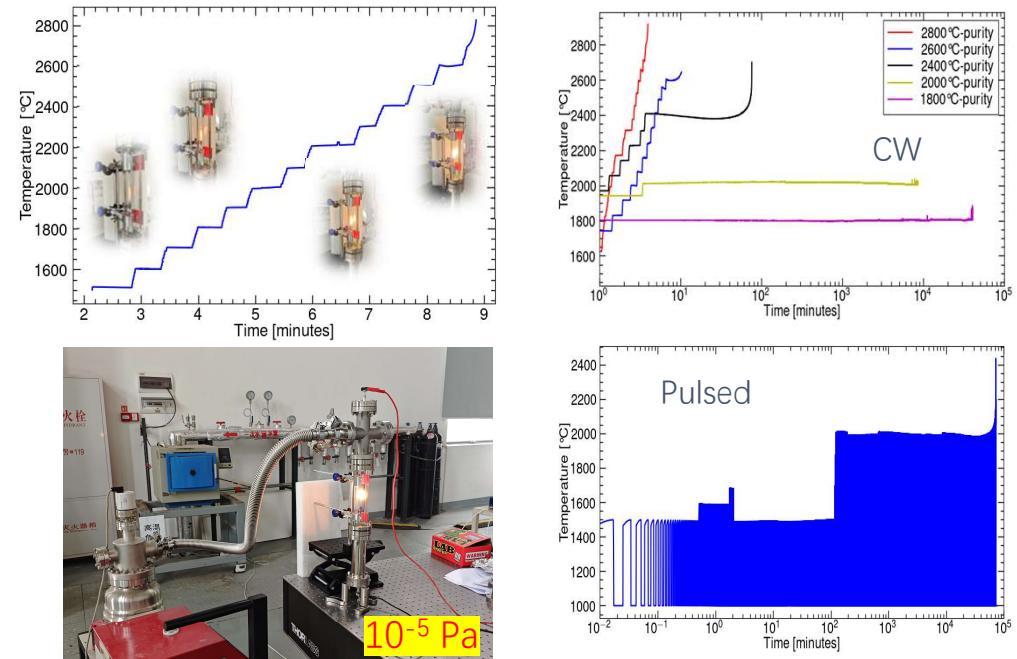
IHEP-SINANO-PKU collaboration

- 大直径碳纳米管 (CNT) : 利用约30根 CNT纤维经化学气相沉积 (CVD) 方法制备成功
- 优化二茂铁 ($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$) 提纯工艺 (10^{-5} Pa真空环境下加热至1570 K), 提升丝材稳定性



□ 在实验室开展长期热稳定性测试

- 最高温度可达2800 °C
- 2000 K下可持续~700 h (CW) & >1000 h (1 Hz, duty~0.5)



RCS注入区多丝靶剖面仪的研制

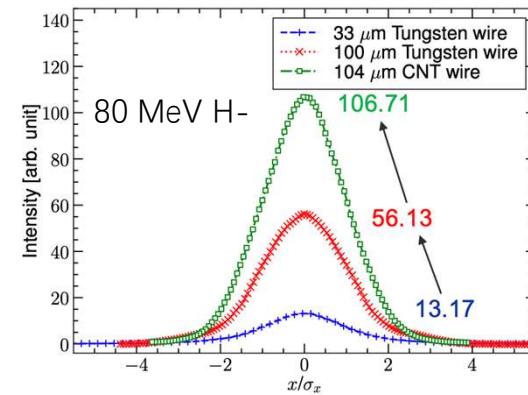
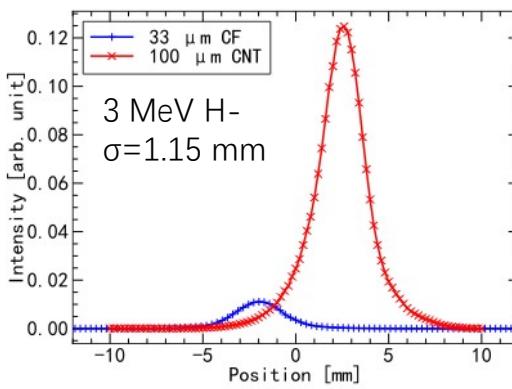


□ 不同能量下SEY对比

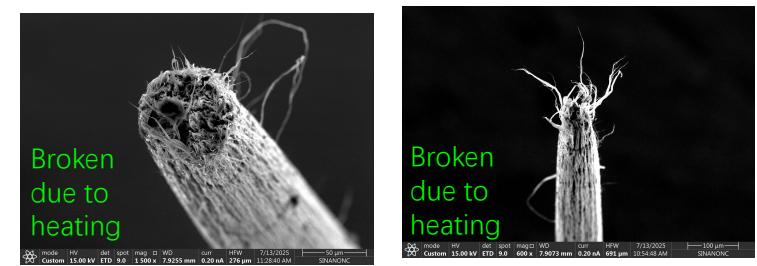
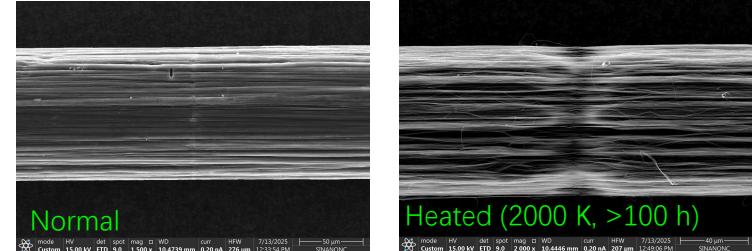
- $S_{\text{cnt},100\mu\text{m}}:S_{\text{cf},33\mu\text{m}} \sim 11:1 @ 3 \text{ MeV}$
- $S_{\text{cnt},100\mu\text{m}}:S_{\text{w},100\mu\text{m}}: S_{\text{w},33\mu\text{m}} \sim 8:4:1 @ 80 \text{ MeV}$

□ 加热后的丝材在SEM下的微观结构显示

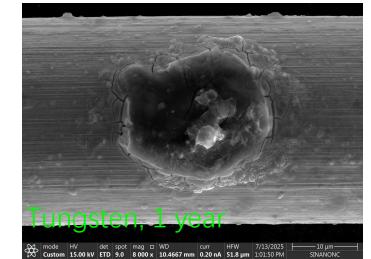
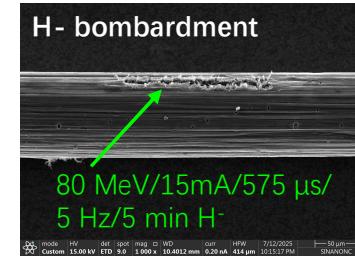
- 高温后呈丝状结构
- 加热（额外PS和光束）升华->更细的直径->断裂成纤维结构
- 高功率束流测试(80 MeV/15mA/575 μs/5 Hz/5 min H-, $\sigma \sim 2\text{mm}$) =>局部轻微表面损伤



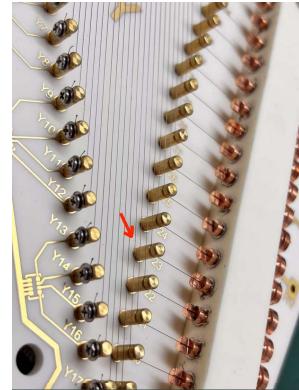
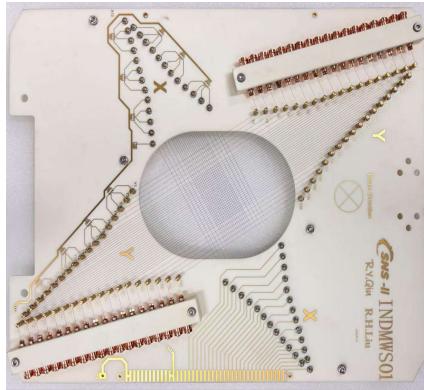
φ100 μm CNT wire (pure) test in lab.



Beam test (CNT vs. W) w/ 80 MeV H-

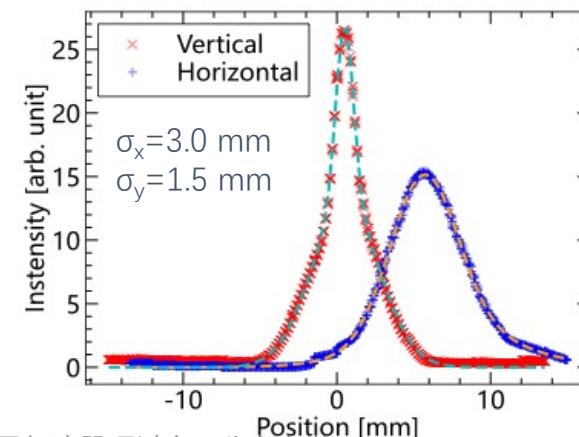
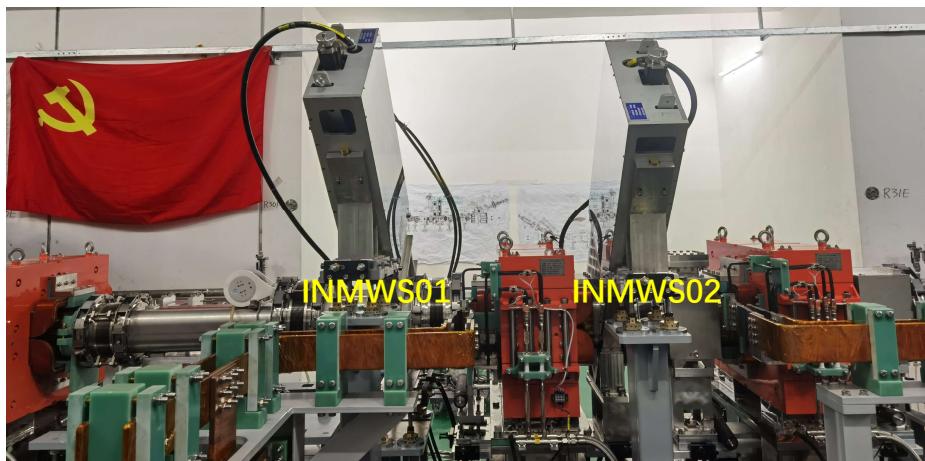


RCS注入区多丝靶剖面仪的研制



- 3套多丝靶剖面仪，每套含136根信号碳纳米管（CNT）丝
- 陶瓷框架上丝材最小间距为1.5 mm；采用直径2 mm螺旋弹簧，提供0.5 N稳定张力
- 另一框架上布置独立偏压丝 (+100 V)
- 数据采集（DAQ）系统：Linux系统 + NI PXIe设备 + EPICS IOC（复用NI控制器及数字化仪）

- ✓ 调束第一天即成功测量H-的剖面
- ✓ 通过扫描程序控制将分辨率进一步提升至0.15 mm



□ 数据维度高、标签缺失

- IPM、多丝靶剖面探测器对束流的测量含轨道、剖面等多参数
- 单台探测器每秒产生MB级数据，却无人工标注的“标准束流样本”，传统监督学习难以落地

□ 动态畸变难实时校正

- 匀场栅网遮挡
- 空间电荷效应
- 空间电磁干扰

□ 异常检测依赖经验

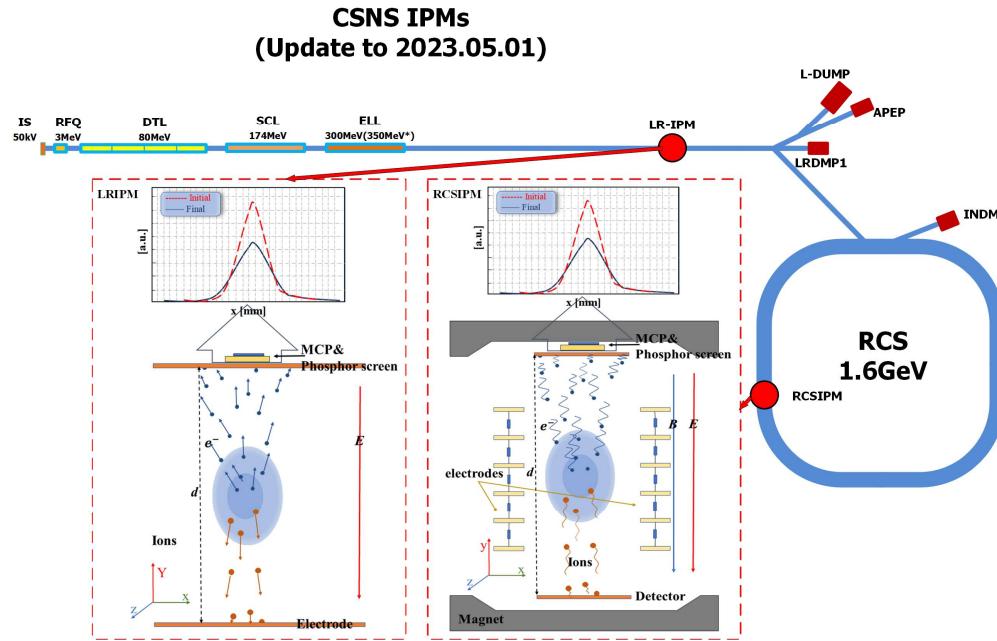
- 束流失配、探测器故障等异常，多靠工程师经验判断
- 误报、漏报率高，亟需自动化检测方案

无监督机器学习算法在束流诊断中的应用

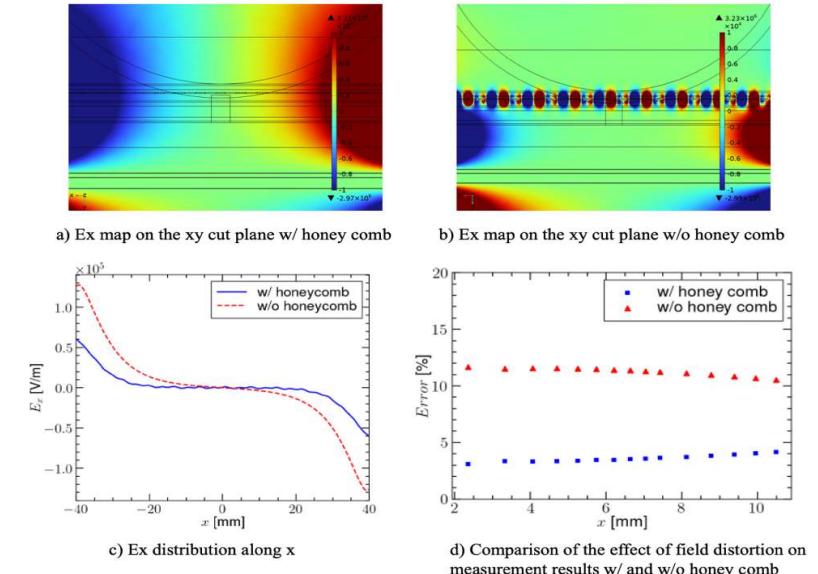
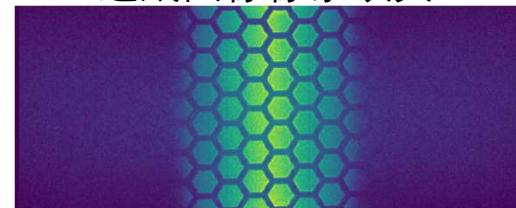


类 别	核心目标	核心特征	典型算法	核心评价指标	适用场景
聚 类	数据分簇 (相似归组)	簇内紧、簇间松	K-Means、 DBSCAN、GMM	轮廓系数、CH 指数	束团聚类分析、异常束流识别、实验数据分类归档、用户分群等
降 维	降维 + 保留核心信息	高维→低维 信息损失最小	PCA、t-SNE、 UMAP	信息保留率、还原误差	束流诊断高维数据 (如 IPM/FCT 多通道采集数据) 降维、仿真数据特征压缩、 高维监测数据可视化、模型轻量化
密度估计	估计数据概率分布	刻画特征空间密度	GMM、KDE	似然值、拟合优度	束流参数分布建模、束流稳定性概率评估、异常束流概率识别、实验数据分布验证
关联规则	挖掘特征间关联	共现关系 因果 / 相关推断	Apriori、FP-Growth	支持度、置信度、提升度	加速器运行参数关联分析 (如某磁场参数与束流发射度的关联)、实验工况关联挖掘、故障诱因关联分析
*异常检测	识别偏离正常的样本	正常数据建模 偏离即异常	孤立森林、LOF	精确率、召回率	束流突发异常检测、设备故障预警
*自编码器	无监督特征提取	编码降维 解码还原	AE、VAE、DAE	还原误差、特征区分度	束流高维数据特征提取、 仿真数据降噪、异常检测

基于无监督机器学习的CSNS-LRIPM图像修复



LRIPM低压板匀场栅网
造成图像像素缺失



□ 图像修复方法选择

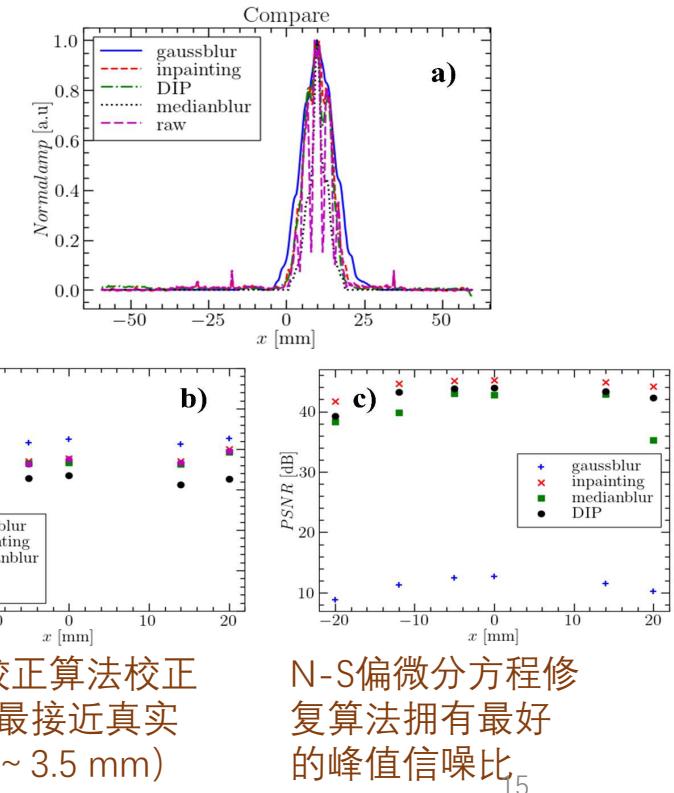
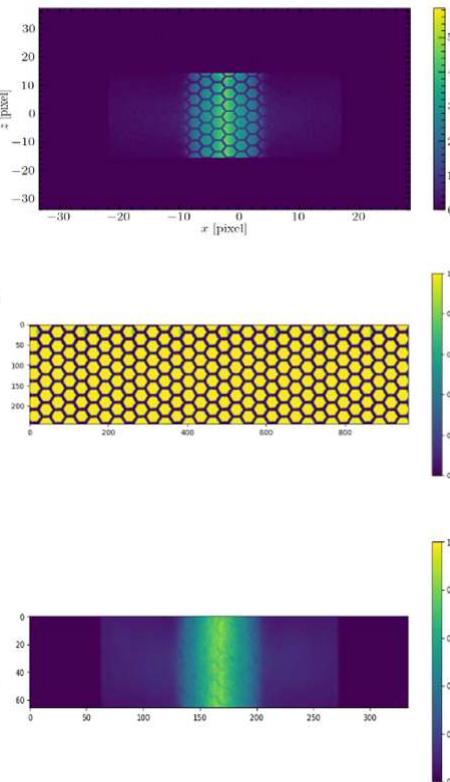
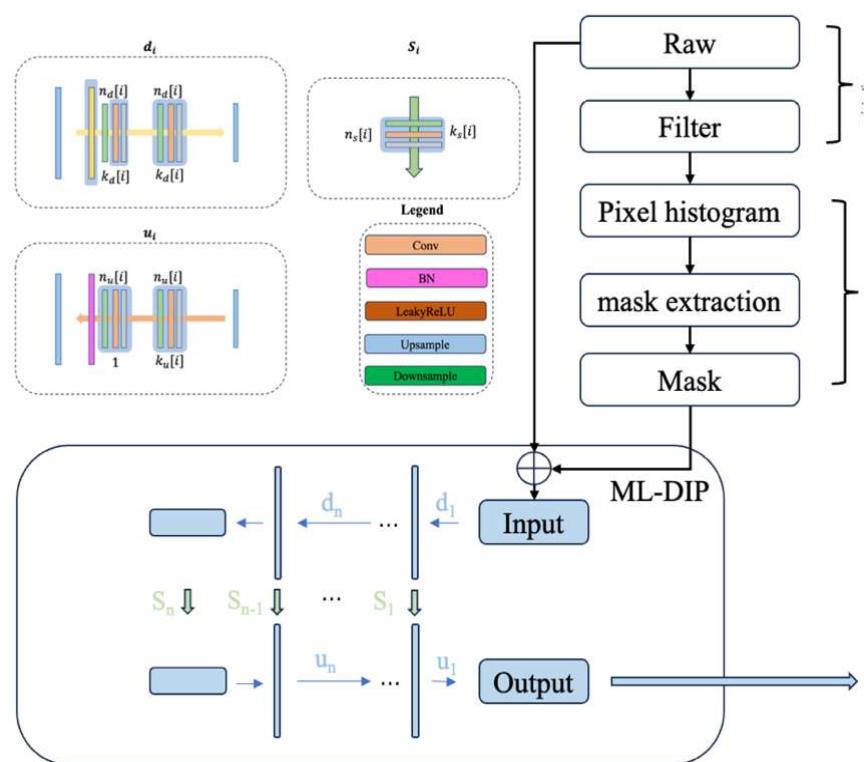
- 模糊滤波
 - 高斯模糊
 - 中值模糊
- N-S偏微分方程修复算法
- 无监督学习

14

基于无监督机器学习的CSNS-LRIPM图像修复



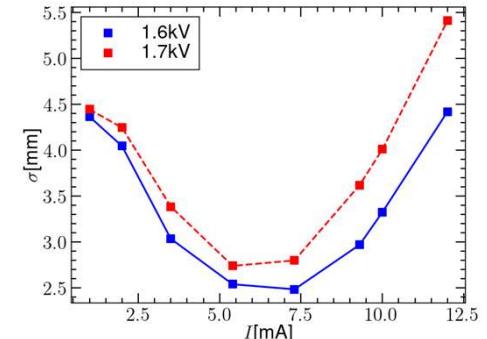
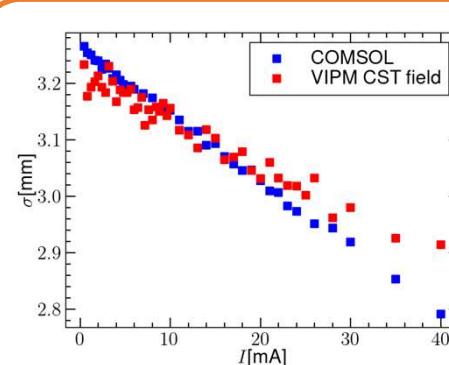
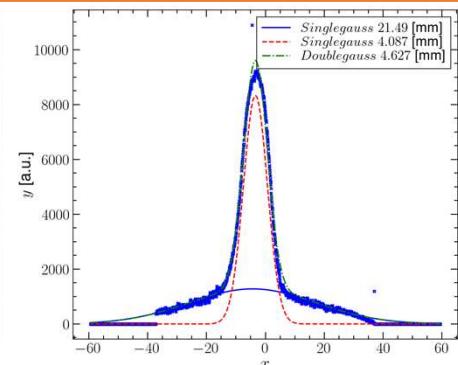
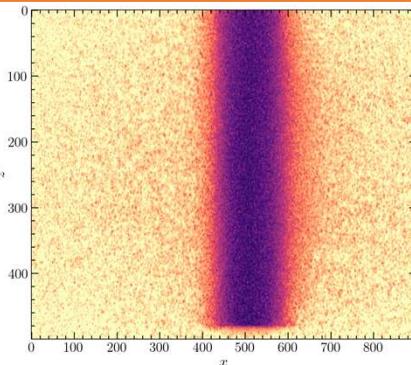
- 用实验束流模式 (80 MeV, 400 us, 12 mA, 1 Hz) 在不同束流轨道下取得的IPM测量数据作为对比样本
- 采用高斯模糊、中值模糊、N-S偏微分方程修复以及无监督DIP方法对获取的图像进行修复



DIP校正算法校正
结果最接近真实
值 (~ 3.5 mm)

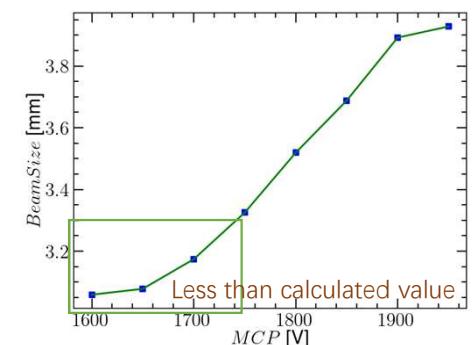
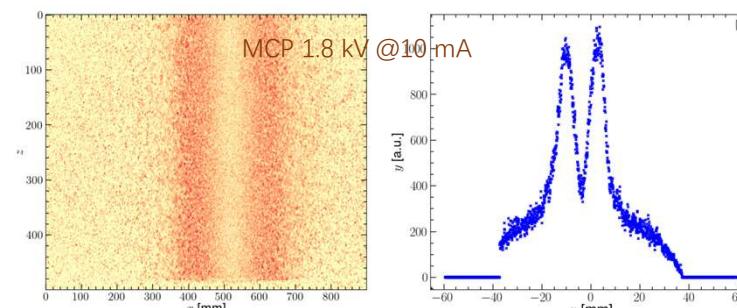
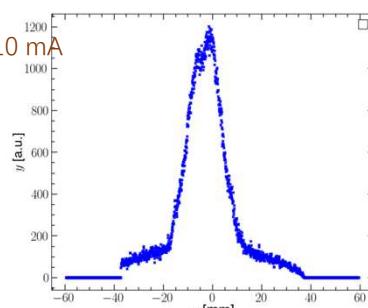
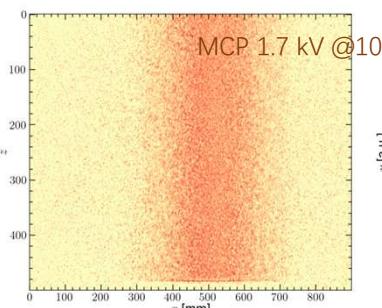
N-S偏微分方程修
复算法拥有最好
的峰值信噪比

LR-IPM探测器优化设计与性能研究



移除匀场栅网后，束流剖面变为双高斯叠加分布

束流流强变化，剖面尺寸测量结果与仿真结果部分偏差



MCP电压变化对束流剖面测量结果的影响（初步判断为MCP出口处空间电荷效应）

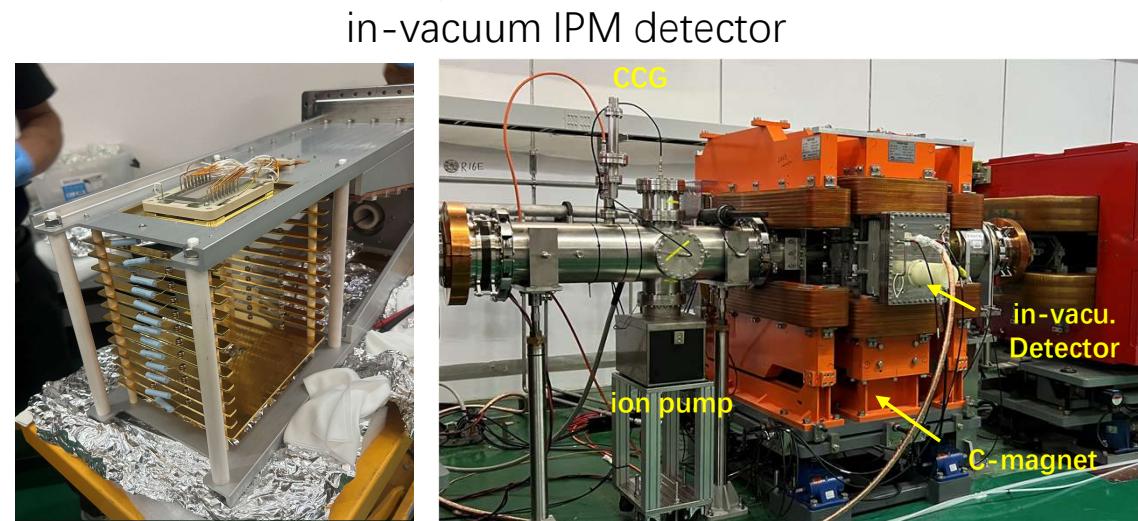
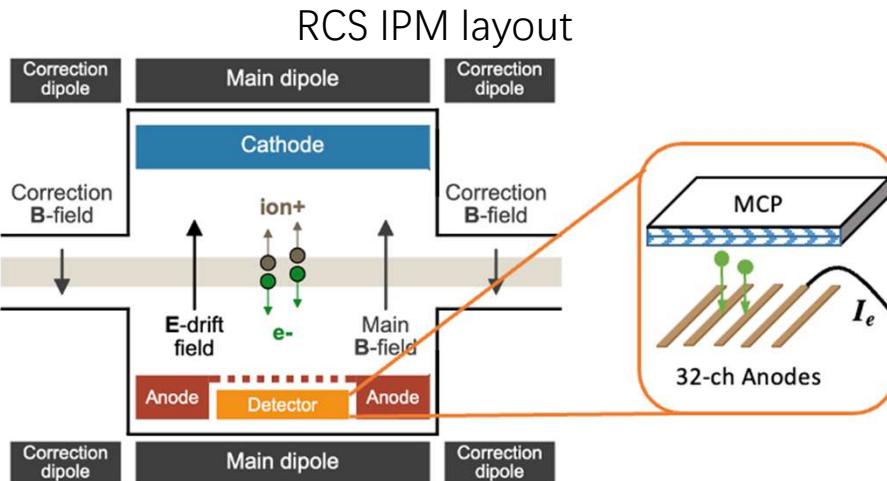
RCS电离型剖面探测器

□ RCS上共安装了2台残余气体电离型剖面探测器 (IPMs)

- 水平及垂直方向上剖面测量IPMs (H+V)
- 逐束团束流发射度测量

□ IPM工作原理

- 质子电离残余气体分子产生 $10^3\sim 10^4$ 离子-电子对
- 游离离子、电子能量 ~ 10 eV, 在收集电场 (~ 100 kV/m) 的加速作用下分别由阴极和阳极收集
- 离子/电子可由多种探测器收集 (MCP+样机条带、MCP+荧光屏, 硅条带/像素)

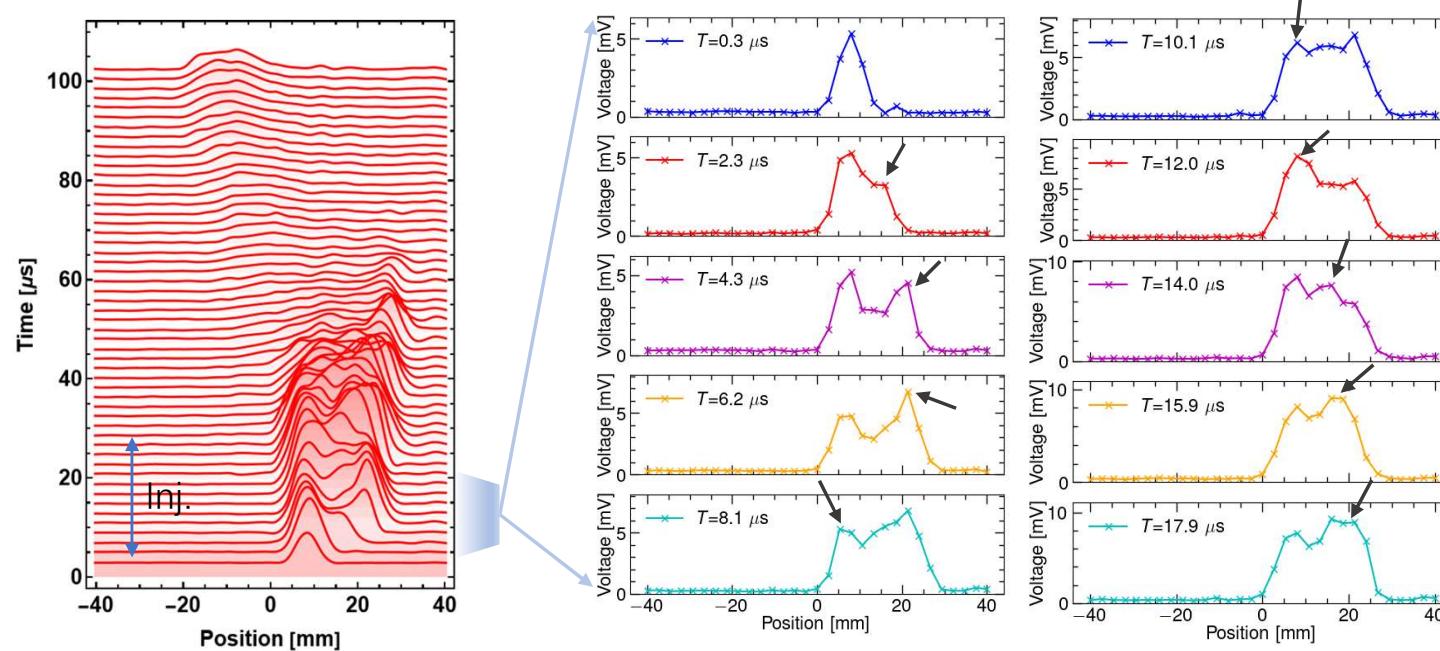


RCS注入束的首次观测



- IPM最初的带束调试聚焦于离子收集模式（无需外加磁场约束）
- 束流强度 $<10^{12}$ ppb => 最初注入束的成像

水平注入涂抹机制：直接观测



* S. Wang et al., CSNS-II design report; H. Hotchi et al., PRAB 15, 040402 (2012);

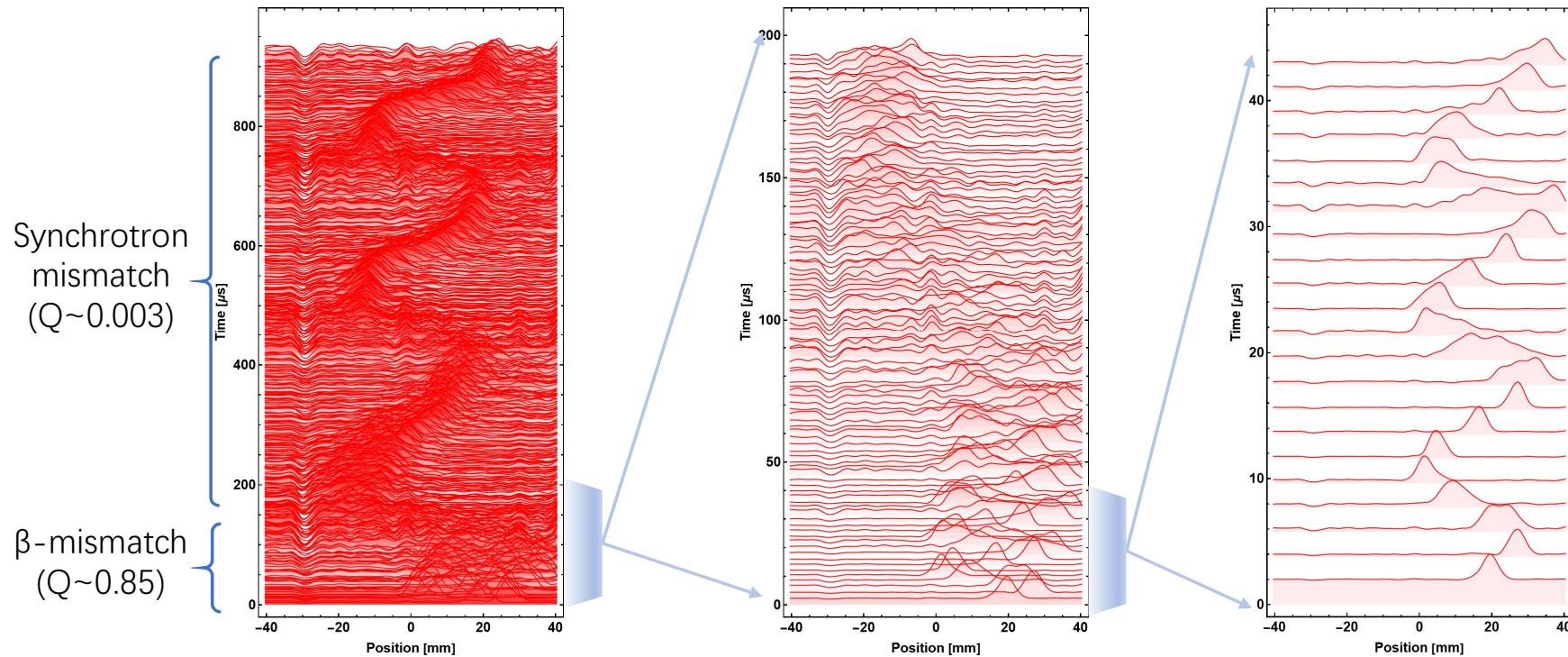
W.L. Huang on behalf of CSNS BI group, 第二届人工智能与粒子加速器研讨会, 北京大学, 2025

RCS注入束的首次观测



- IPM最初的带束调试聚焦于离子收集模式（无需外加磁场约束）
- 束流强度 $<10^{12}$ ppb => 最初注入束的成像

发现注入失配（单圈, 270 ns, 2.5×10^{10} ppb, 19/11/2025）



注入失配聚类特征识别



□ 模式1：水平注入涂抹正常（聚类标签0）

- 聚类特征：X/Y位置波动小 ($\sigma_{xy} < 1.5\text{mm}$)，强度稳定增长（波动幅度>30%），时序上集中在注入初期 (time=0.3~17.9 μs)
- 实测对应：“Horizontal injection painting scheme”
- 占比：约10%~20%（视注入强度波动略有差异）

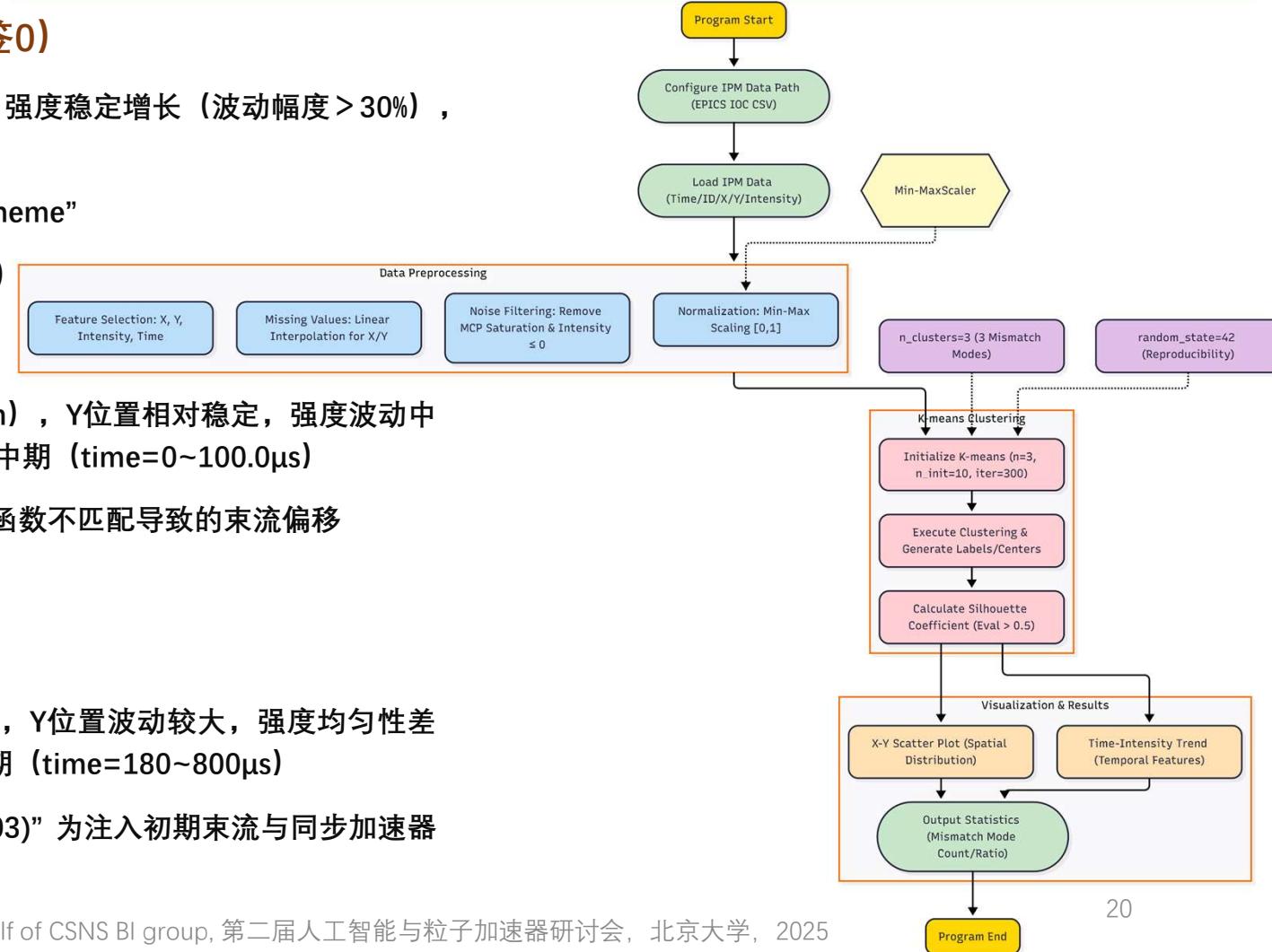
□ 模式2： β 失配（聚类标签1）

- 聚类特征：X方向位置偏移显著 (-20~-10mm)，Y位置相对稳定，强度波动中等 (15%~25%)，时序分布集中在注入初期和中期 (time=0~100.0 μs)
- 实测对应：“ β -mismatch ($Q \approx 0.85$)”为横向 β 函数不匹配导致的束流偏移
- 占比：约40%~80%（最主要的失配模式）

□ 模式3：同步失配（聚类标签2）

- 聚类特征：X位置大范围扩散 (-40~40mm)，Y位置波动较大，强度均匀性差（波动幅度>40%），时序上集中在注入中后期 (time=180~800 μs)
- 实测对应：“Synchrotron mismatch ($Q \approx 0.003$)”为注入初期束流与同步加速器谐振条件不匹配导致
- 占比：约20%~60%

W.L. Huang on behalf of CSNS BI group, 第二届人工智能与粒子加速器研讨会, 北京大学, 2025

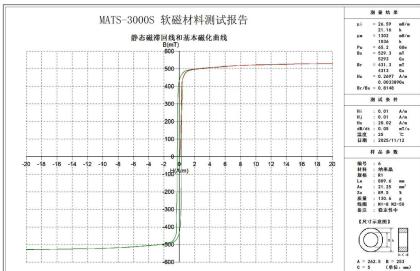


无监督机器学习算法——聚类分析在DCCT磁环精确匹配中的应用

零磁通磁环精确匹配程度将决定束流测量精度、谐波干扰抑制效果及长期运行稳定性

对于核心部件磁环的性能 (Br , Bs , Hc 等) 分析，分别考察了 K 均值聚类、DBSCAN 聚类和层次聚类算法的磁环匹配效果。

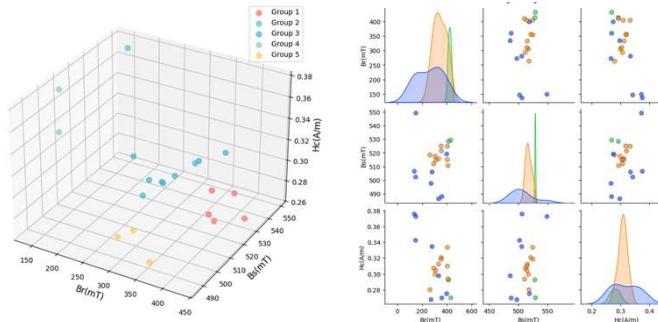
直流磁滞回线测量结果



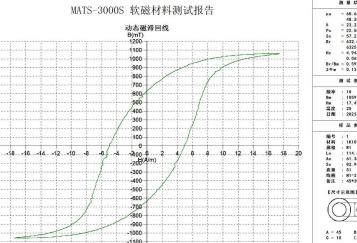
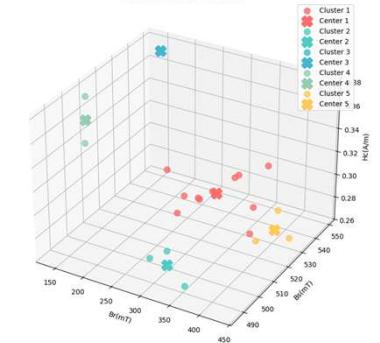
同批次20只非晶纳米晶磁环性能参数筛选

1	原始图片名称	A	B	C	D	E	F	G
2	259-2505-5-410-60-15.1.jpg	398.5	519.1	0.2749	0	0.463042298	1	
3	259-2505-5-410-60-3.1.jpg	413	528.4	0.2924	0	0.575441765	2	
4	259-2505-5-410-60-7.1.jpg	409.1	510.6	0.2934	0	0.717049549	3	
5	259-2505-5-410-60-9.1.jpg	403.8	515	0.3098	0	0.813490566	4	
6	259-2505-5-410-60-10.1.jpg	413.3	529.2	0.2957	0	0.892915110	5	
7	259-2505-5-410-60-22.1.jpg	149.4	549.2	0.2626	1	0	1	
8	259-2505-5-410-60-14.1.jpg	332.4	515.6	0.3123	2	0.167046729	1	
9	259-2505-5-410-60-23.1.jpg	309.9	514.7	0.3044	2	0.340440571	2	
10	259-2505-5-410-60-13.1.jpg	304.9	517.5	0.2992	2	0.467679997	3	
11	259-2505-5-410-60-6.1.jpg	293.2	511.9	0.3071	2	0.525311774	4	
12	259-2505-5-410-60-25.1.jpg	355.7	521.4	0.3207	2	0.55798105	5	
13	259-2505-5-410-60-2.1.jpg	353.4	525	0.3184	2	0.684053538	6	
14	259-2505-5-410-60-24.1.jpg	286.9	509.3	0.3345	2	1.177049598	7	
15	259-2505-5-410-60-1.1.jpg	263.2	519.4	0.309	2	1.277049562	8	
16	259-2505-5-410-60-20.1.jpg	403.5	524.8	0.3325	2	1.277049537	9	
17	259-2505-5-410-60-21.1.jpg	137	506.4	0.3758	3	0.568390052	1	
18	259-2505-5-410-60-18.1.jpg	147.2	502.2	0.3424	3	0.568390052	2	
19	259-2505-5-410-60-4.1.jpg	359.1	487.8	0.2695	4	0.545785613	1	
20	259-2505-5-410-60-10.1.jpg	333.7	486.2	0.2975	4	0.714772068	2	
21	259-2505-5-410-60-19.1.jpg	272.2	497.5	0.2674	4	0.82683797	3	

Core Cluster 3D Plot



3D Visualization of 5 Clusters



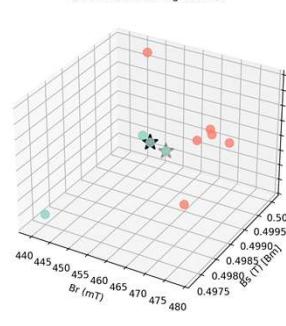
小样本：基于DCCT零磁通部分对磁环交流磁性能超高匹配度的要求，推荐使用**层次聚类**来挑选匹配度最佳的磁环对

- 层级聚类能更好地捕捉磁环性能的层次关系

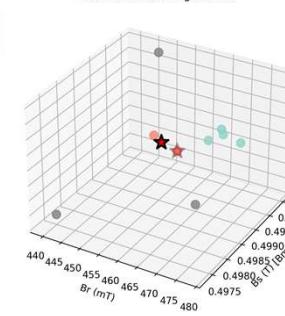
- 匹配距离最小，表明性能参数最接近

- 特别适合需要精确匹配的零磁通应用场景

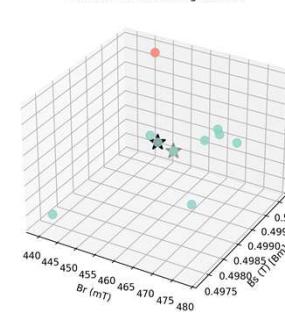
K-Means Clustering Results



DBSCAN Clustering Results



Hierarchical Clustering Results

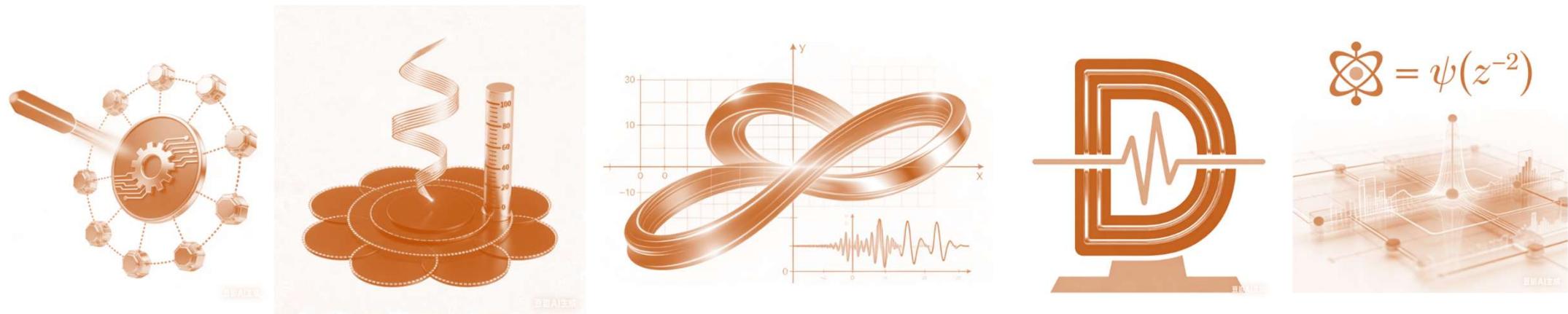


后续实验规划：搭建匹配磁环的交流调制测试平台，进行零磁通电路优化和算法验证

无监督机器学习算法在束流诊断中的应用优势



- 无需人工标注样本，完美适配某些数据标签稀缺的核心痛点
- 精准量化挖掘隐藏模式，突破经验判断的主观性局限
- 适配动态束流数据，多维度捕捉时序演化特征
- 鲁棒性强，适配加速器现场数据的噪声特性
- 结果可解释性强，贴合束流物理规律



- CSNS-II 升级改造为束流测量系统带来极大的技术挑战，多项攻关已取得初步结果
- 无监督机器学习算法可在多种束流测量与诊断中应用
 - 在微拦截束流剖面测量中的图像修复和模式识别
 - 在直流束流变压器材料筛选中的磁性能快速匹配
- 未来有望将人工智能进一步融合入束流诊断技术中



感谢各位聆听！