



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

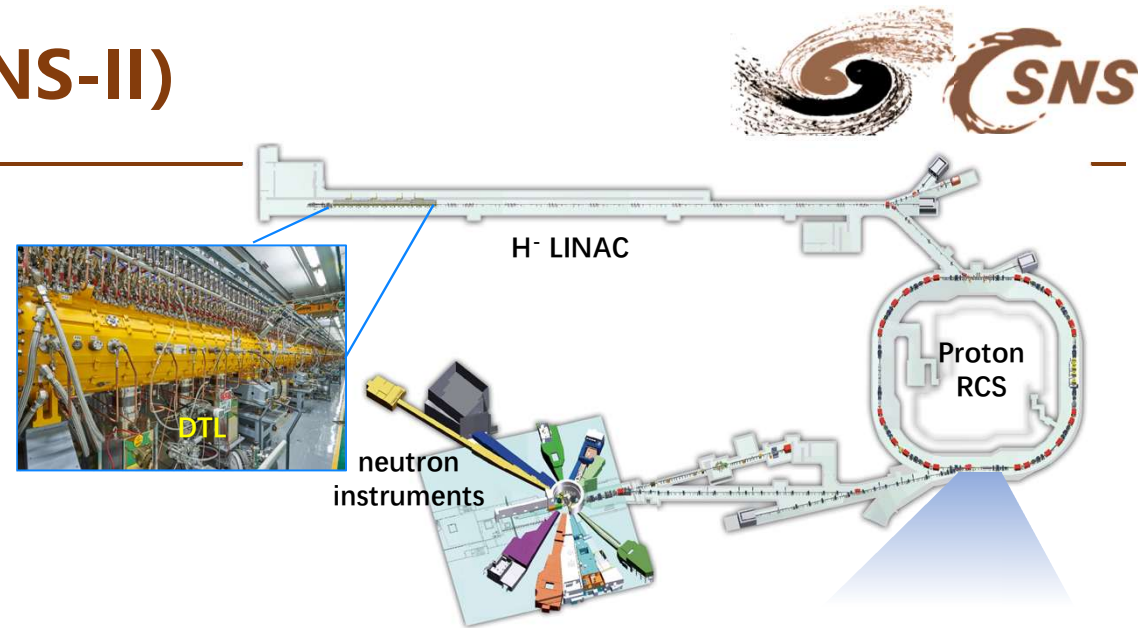
□ 总结与展望

中国散裂中子源 (CSNS → CSNS-II)

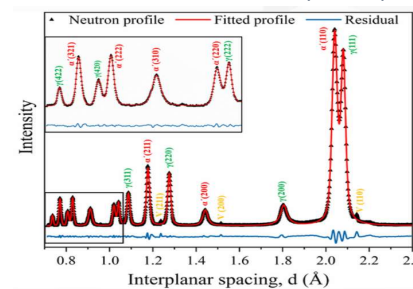
- 世界上第4台脉冲型散裂中子源
用户实验于2018年10月开放
- 一期建成3台谱仪(GPPD, MR & SANS)
8台合作谱仪
- CSNS-II: 功率提升至 500 kW 、新增9台中子谱仪
+ 缪子源 + 高能质子束线

Major machine parameters

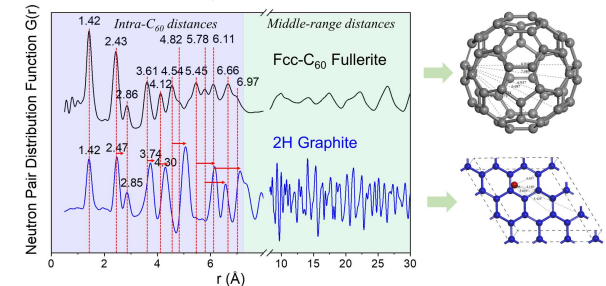
| | CSNS(now) | CSNS-II |
|--|-----------|---------|
| Beam Power on target [kW] | 160 | 500 |
| Proton energy [GeV] | 1.6 | 1.6 |
| Average beam current [μA] | 100 | 312.5 |
| Pulse repetition rate [Hz] | 25 | 25 |
| Linac energy [MeV] | 80 | 300 |
| Macropulse. ave current [mA] | 15 | 50 |
| Macropulse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



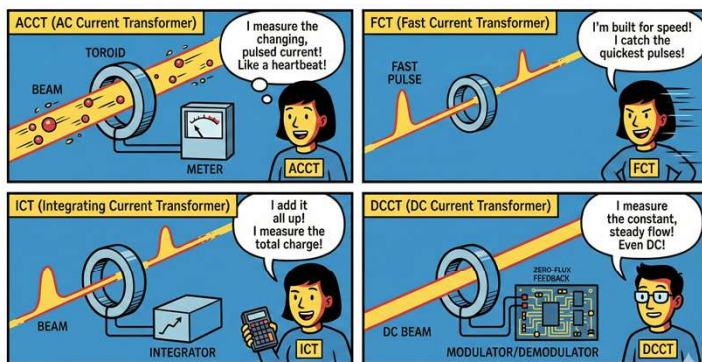
Liu et.al. Science (2020)



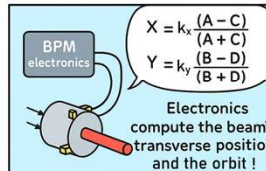
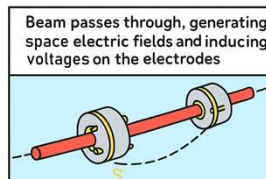
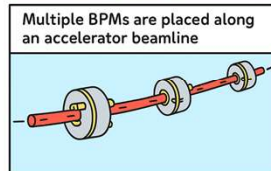
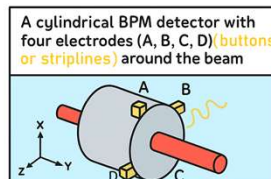
F. Pan et.al., Nature 2023



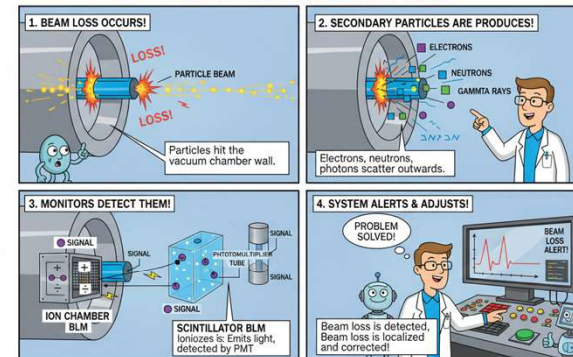
欢迎截屏



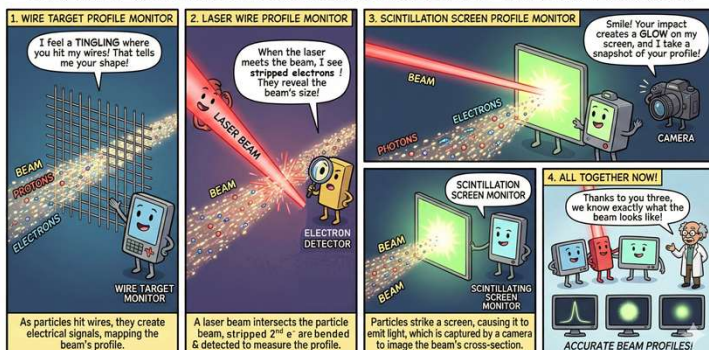
Different BCTs for different beams: ACCT for pulses, FCT for fast pulses, ICT for total charge, and DCCT for continuous current.



BEAM LOSS MONITORS: HOW THEY WORK!



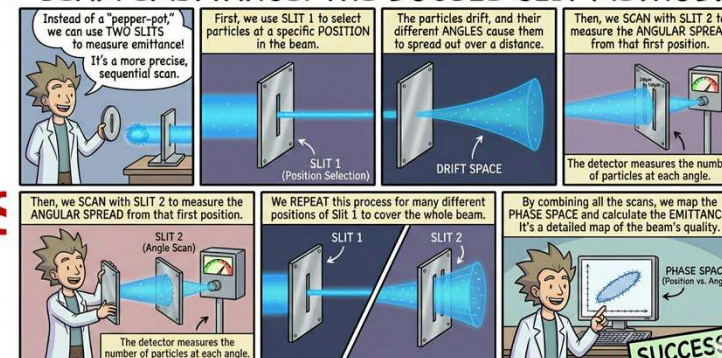
BEAM PROFILE MONITORS: SEEING THE INVISIBLE!



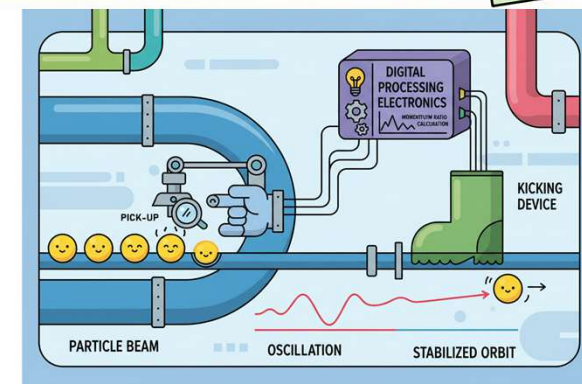
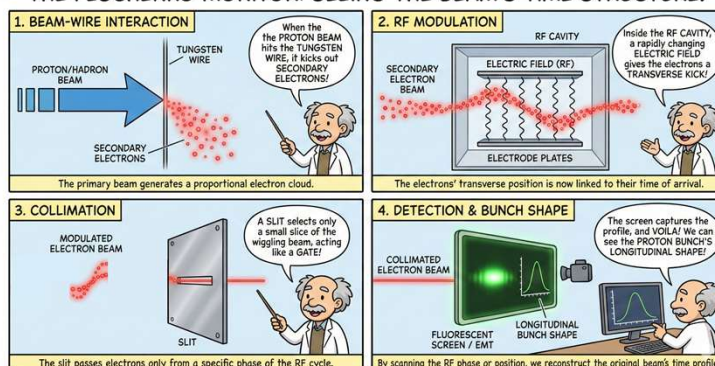
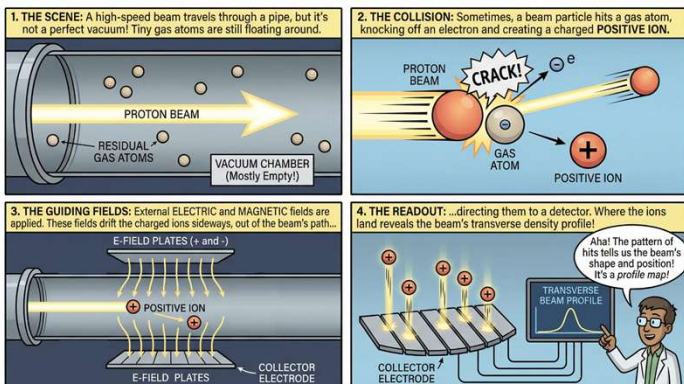
Nano Banana



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

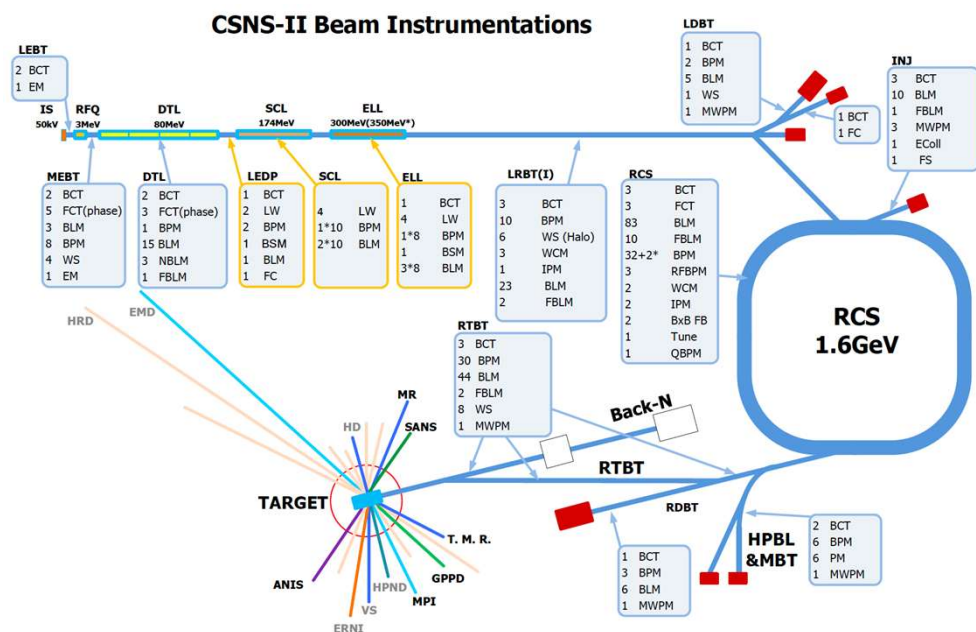
| | BCT | FCT | BPM | BLM | WS | LW | MWS | IPM | VS | EMIT | BSM | WCM | FC | Feed back | Tune |
|-----------|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|------|-----|-----|----|-----------|------|
| Front-end | 3 | | 8 | 3 | 2 | | | | | 2 | 1 | | 1 | | |
| DTL | 3 | 3 | 1 | 18 | | | | | | | | | | | |
| 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

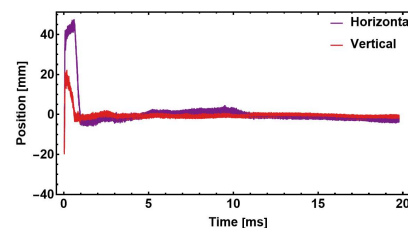
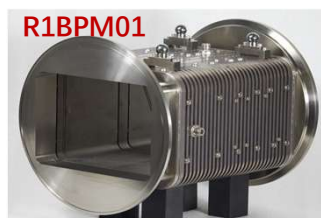


- INDVS
- INDCT
- INDMWS01
- H0CT ($H^- \rightarrow H^0 \rightarrow p$)
- R1BPM01
- INECOL
- INMWS02
- INMWS01
- LRBPM18

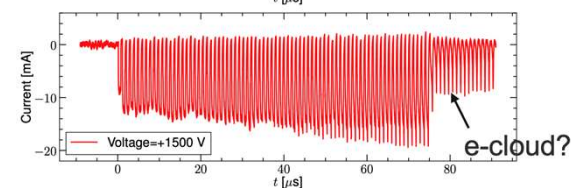
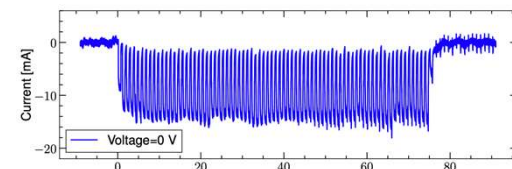
➤ 今年暑期完成了9台束测设备的安装

- 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)



Signal of the stripped e-



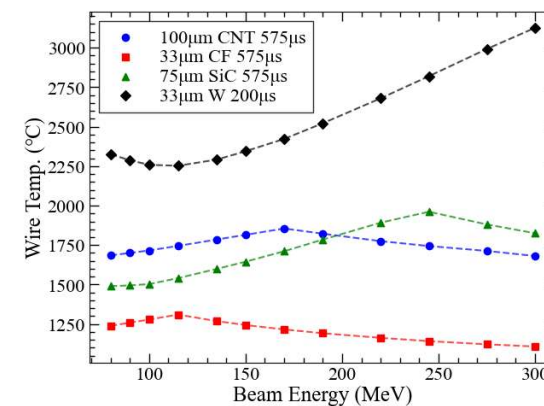
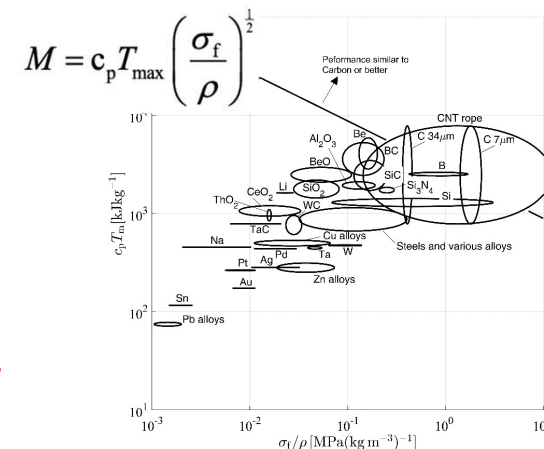
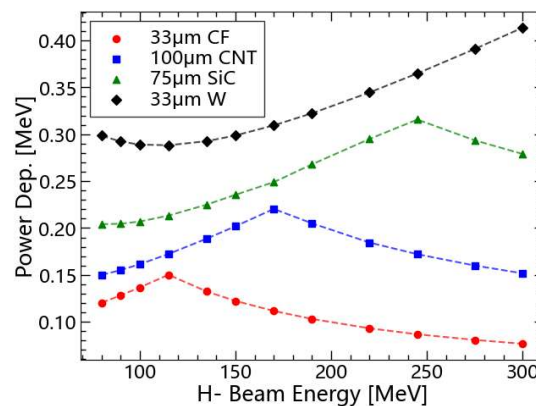
RCS注入区多丝靶剖面仪的研制



□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 μ s, $\sigma_{x/y} \sim 2.0$ 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 μ m) 峰值温度仅1310 $^{\circ}$ 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(μ m) | 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 ($^{\circ}$ C) | <2000 | <2000 | <2000 | ≥ 1250 |
| Expected max. temperature ($^{\circ}$ 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

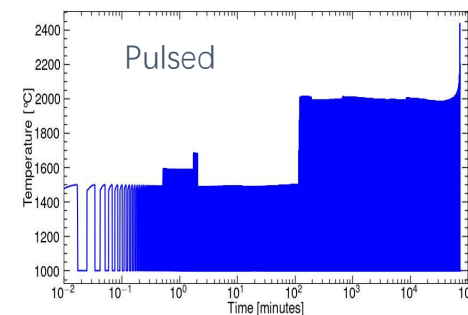
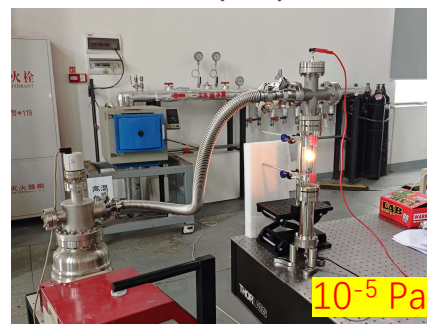
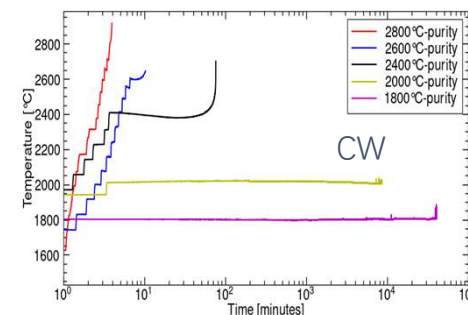
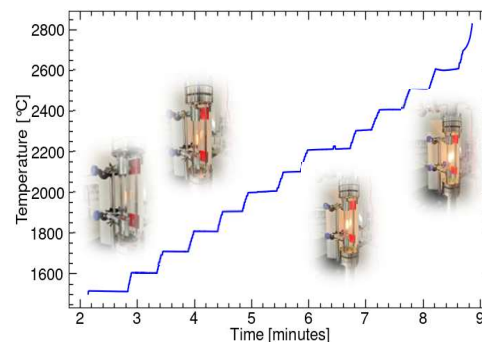
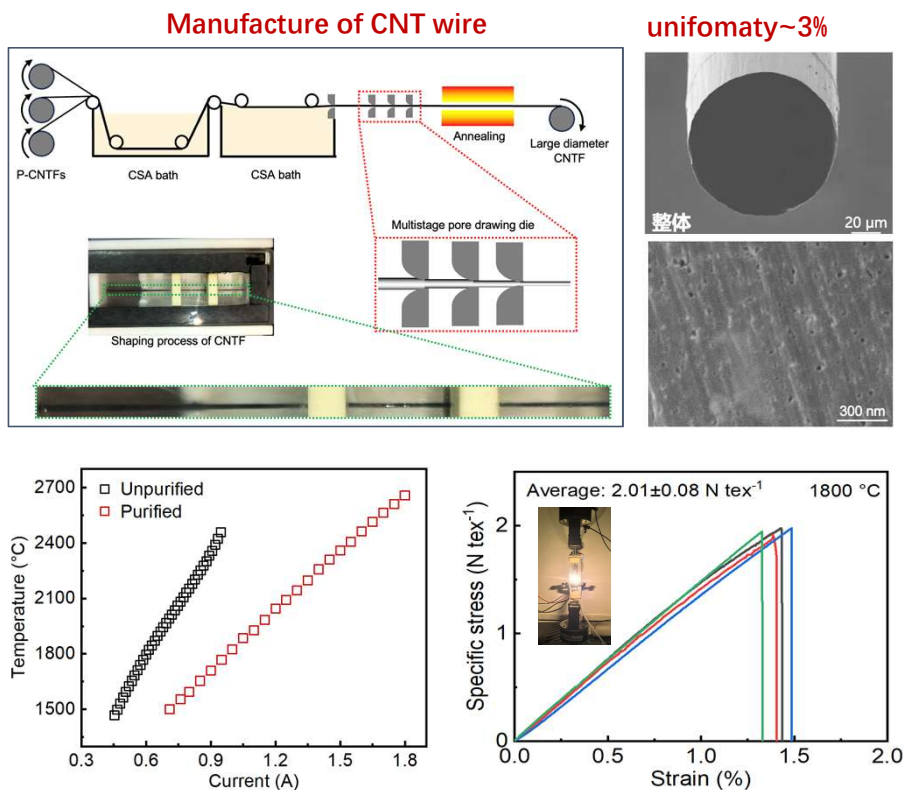


IHEP-SINANO-PKU collaboration

- 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

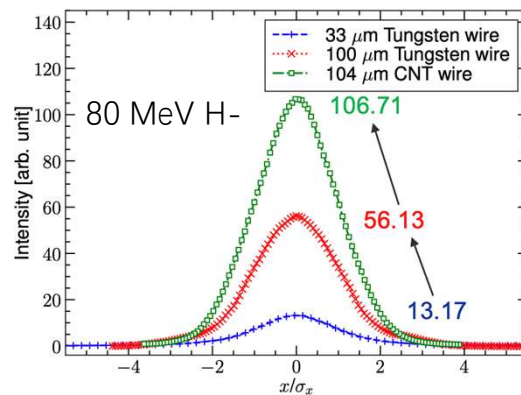
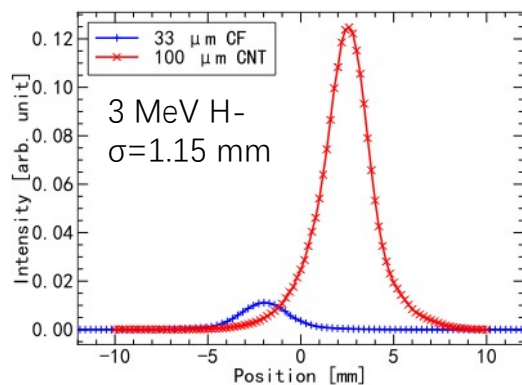


不同能量下SEY对比

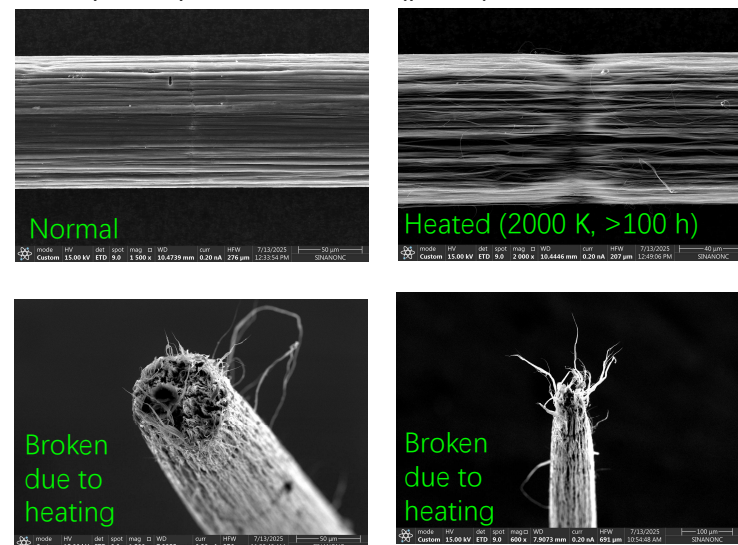
- $S_{\text{cnt},100\mu\text{m}}:S_{\text{cf},33\mu\text{m}} \sim 11:1 @ 3 \text{ MeV}$
- $S_{\text{cnt},100\mu\text{m}}:S_{\text{w},100\mu\text{m}}:S_{\text{w},33\mu\text{m}} \sim 8:4:1 @ 80 \text{ MeV}$

加热后的丝材在SEM下的微观结构显示

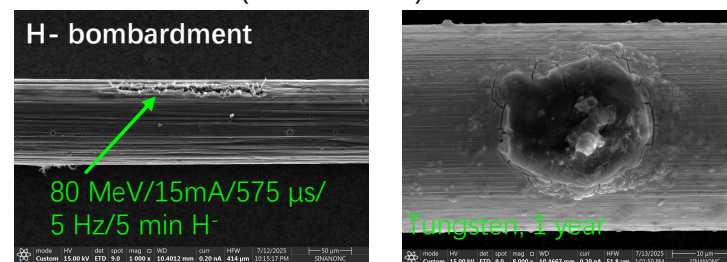
- 高温后呈丝状结构
- 加热（额外PS和光束）升华->更细的直径->断裂成纤维结构
- 高功率束流测试(80 MeV/15mA/575 μs /5 Hz/5 min H-, $\sigma \sim 2\text{mm}$) =>局部轻微表面损伤



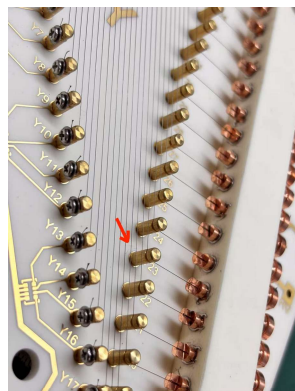
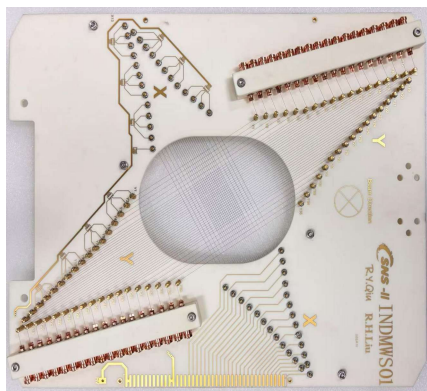
$\phi 100 \mu\text{m}$ CNT wire (pure) test in lab.



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

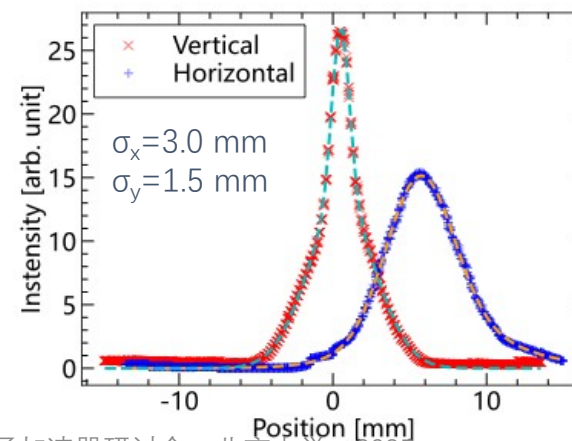


RCS注入区多丝靶剖面仪的研制



- 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

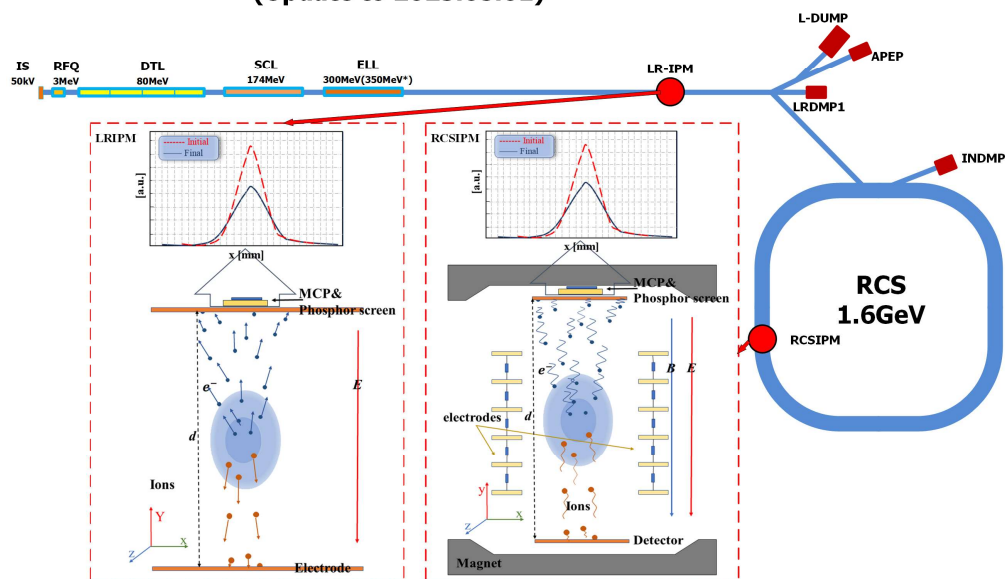


| 类 别 | 核心目标 | 核心特征 | 典型算法 | 核心评价指标 | 适用场景 |
|-------|----------------|-------------------|------------------------|-------------|--|
| 聚 类 | 数据分簇 (相似归组) | 簇内紧、簇间松 | K-Means、 DBSCAN、GMM | 轮廓系数、CH 指数 | 束团聚类分析、异常束流识别、实验数据分类归档、用户分群等 |
| 降 维 | 降维 + 保留核心信息 | 高维→低维 信息损失最小 | PCA、t-SNE、 UMAP | 信息保留率、还原误差 | 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 |

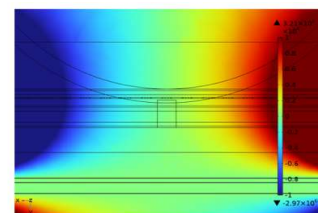
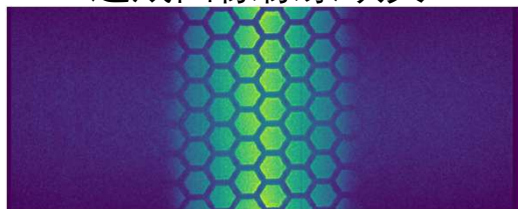
基于无监督机器学习的CSNS-LRIPM图像修复



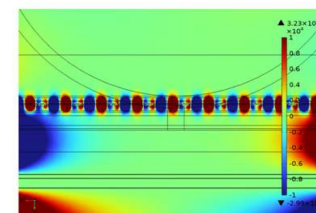
CSNS IPMs
(Update to 2023.05.01)



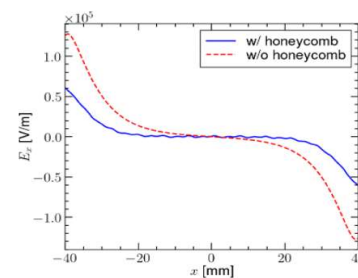
LRIPM低压板匀场栅网
造成图像像素缺失



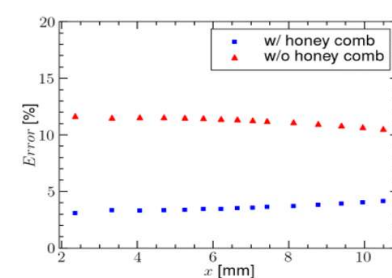
a) Ex map on the xy cut plane w/ honey comb



b) Ex map on the xy cut plane w/o honey comb



c) Ex distribution along x



d) Comparison of the effect of field distortion on measurement results w/ and w/o honey comb

□ 图像修复方法选择

□ 模糊滤波

- 高斯模糊
- 中值模糊

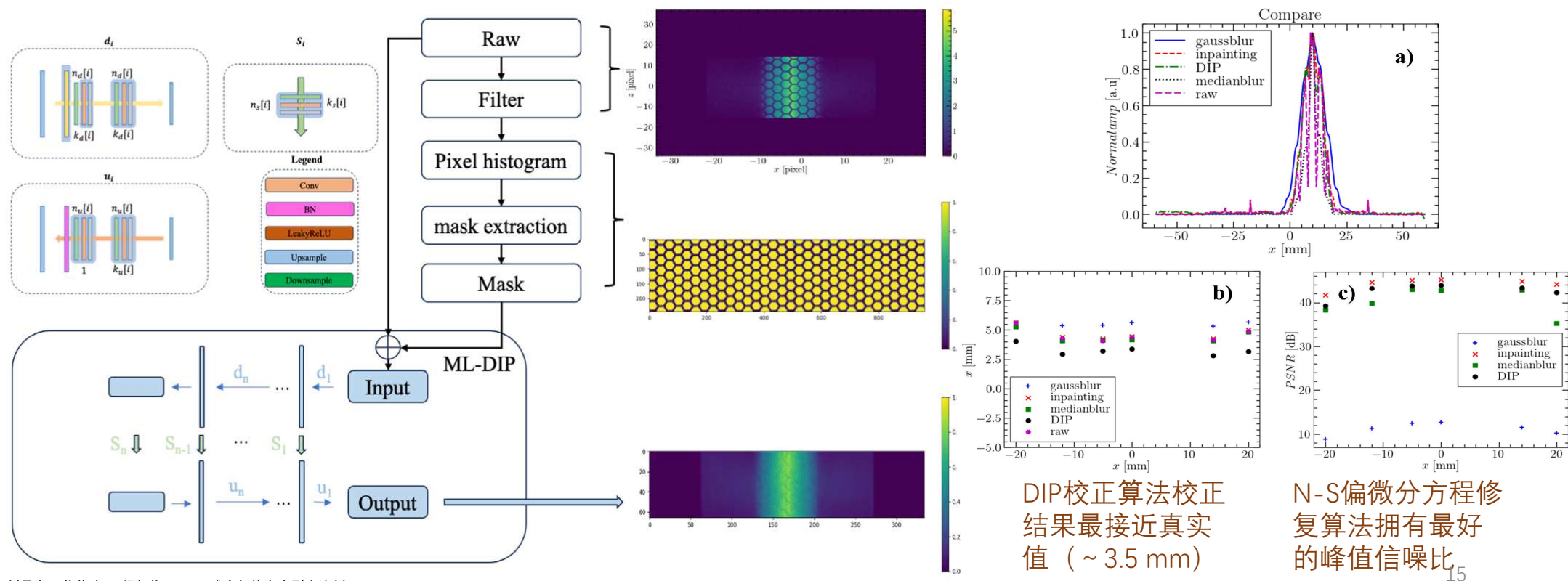
□ N-S偏微分方程修复算法

□ 无监督学习

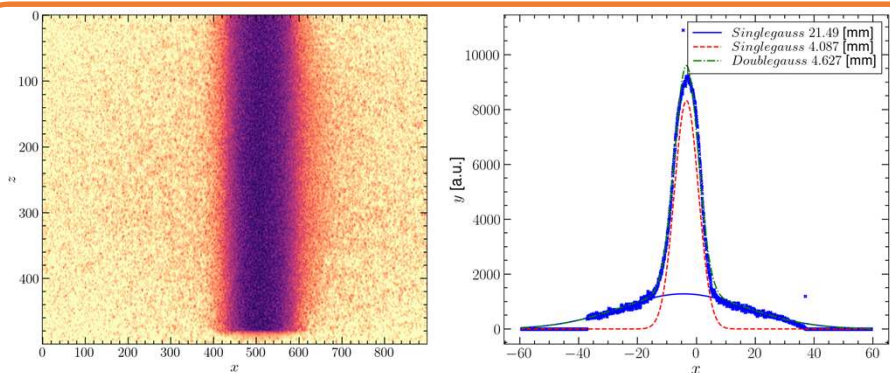
基于无监督机器学习的CSNS-LRIPM图像修复



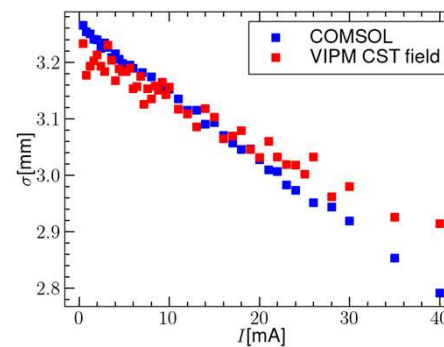
- 用实验束流模式（80 MeV，400 us，12 mA，1 Hz）在不同束流轨道下取得的IPM测量数据作为对比样本
- 采用高斯模糊、中值模糊、N-S偏微分方程修复以及无监督DIP方法对获取的图像进行修复



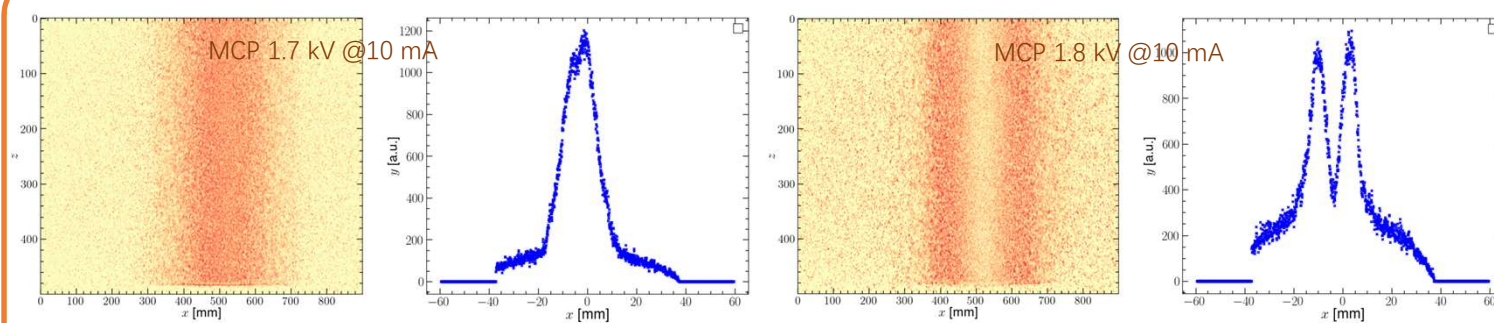
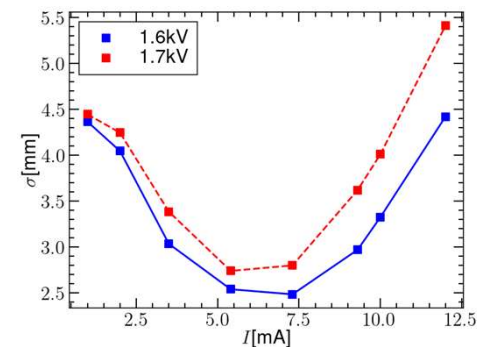
LR-IPM探测器优化设计与性能研究



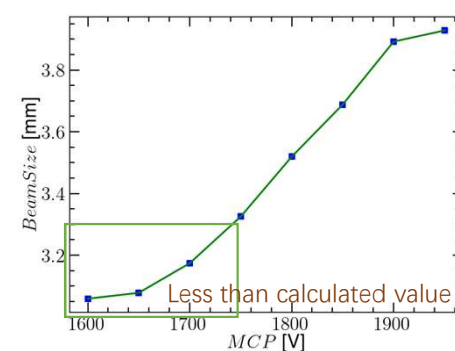
移除匀场栅网后，束流剖面变为双高斯叠加分布



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



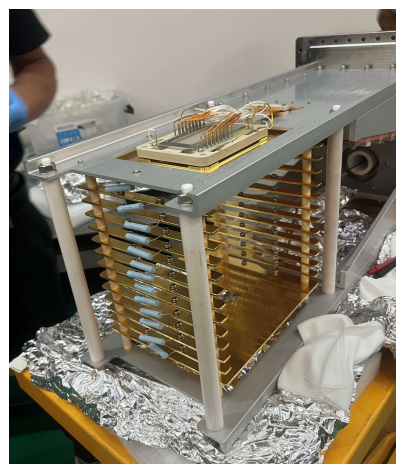
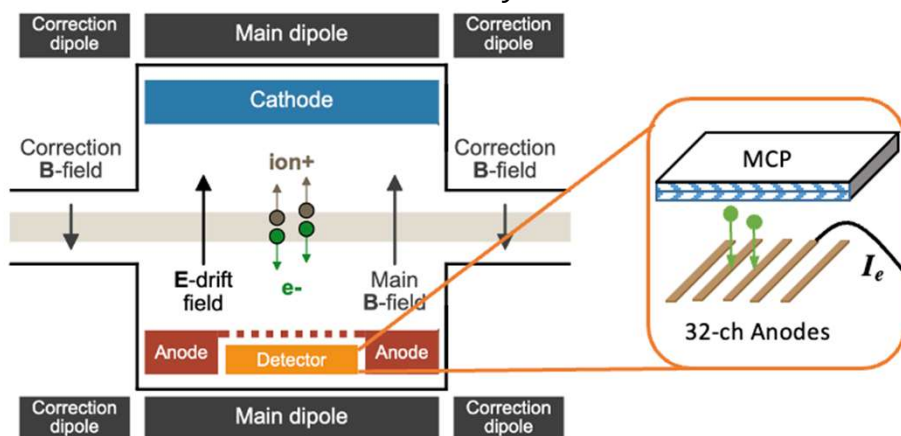
□ RCS上共安装了2台残余气体电离型剖面探测器 (IPMs)

- 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

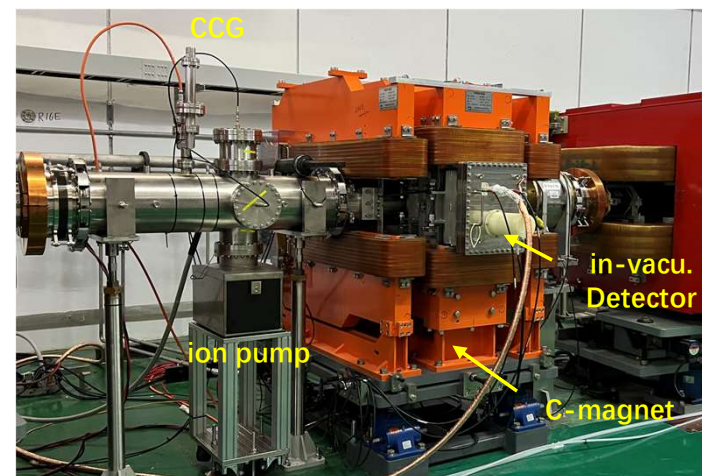
□ IPM工作原理

- 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 IPM layout



in-vacuum IPM detector



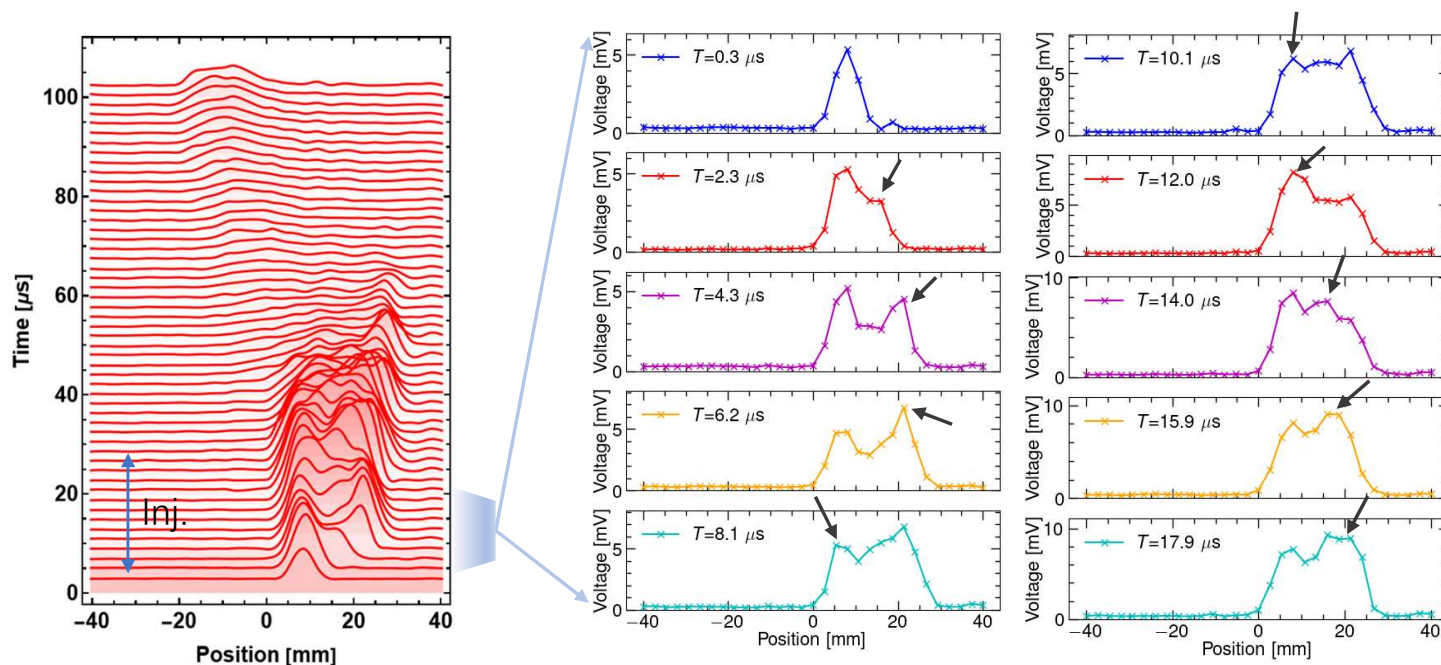
RCS注入束的首次观测



□ 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);

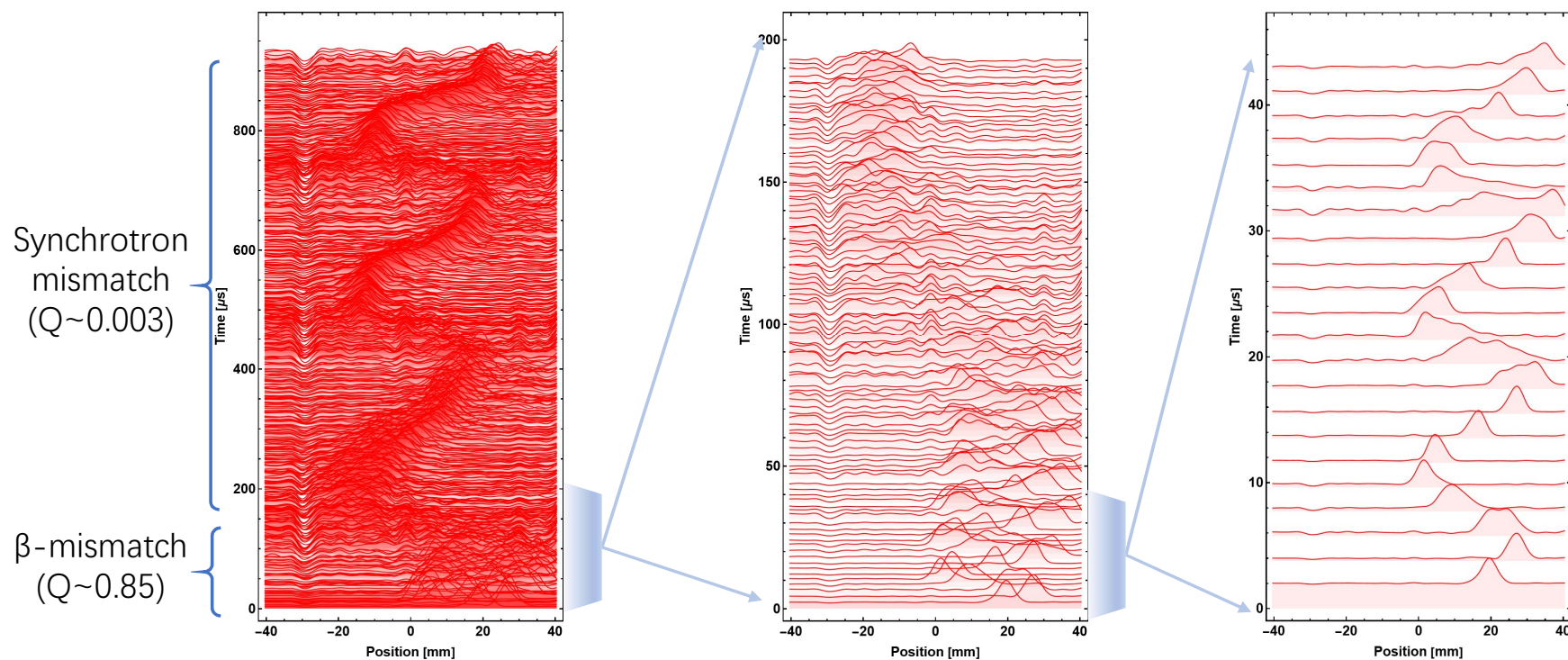
RCS注入束的首次观测



□ 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）

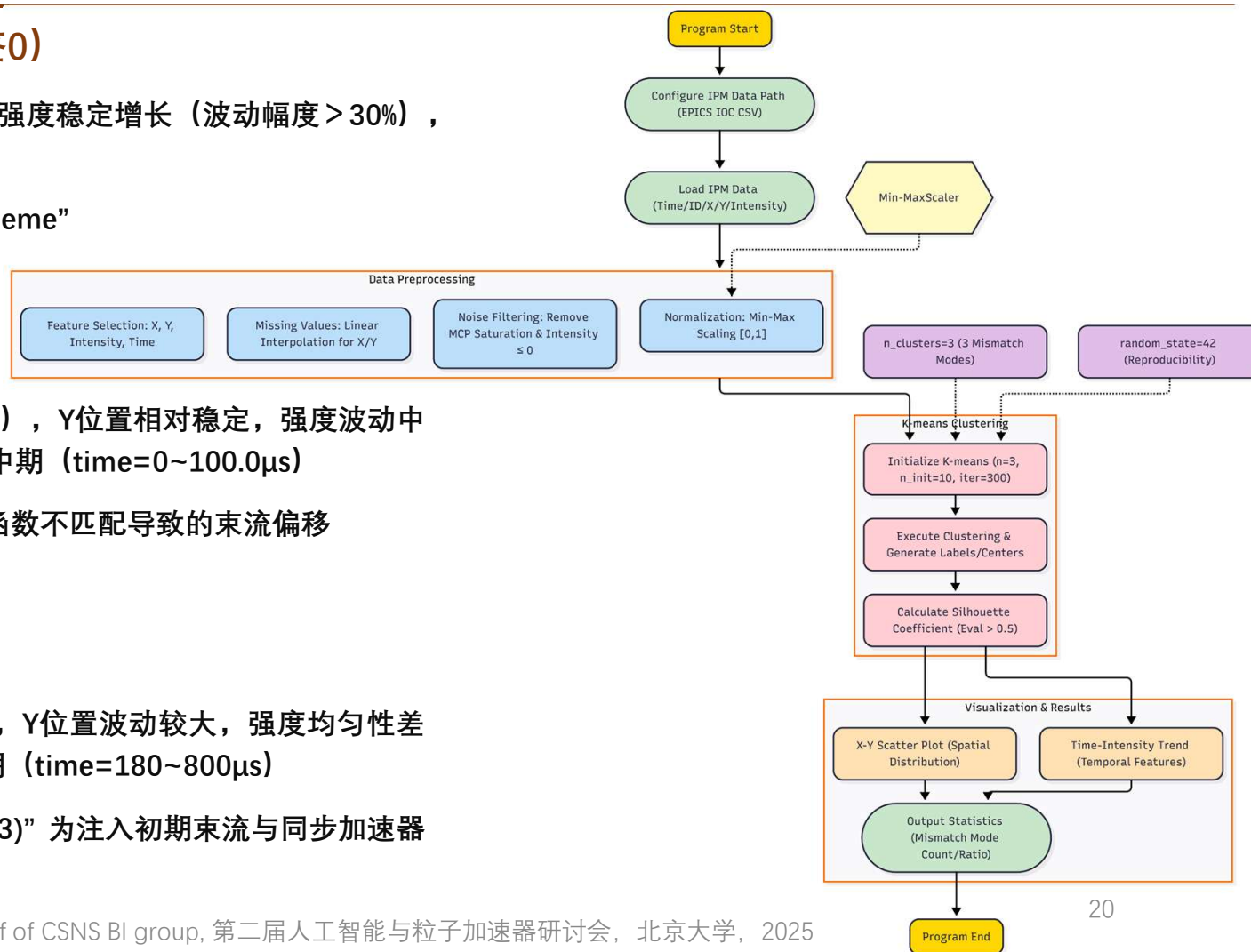
- 聚类特征：X/Y位置波动小 ($\sigma_{xy} < 1.5\text{mm}$)，强度稳定增长（波动幅度 $> 30\%$ ），时序上集中在注入初期（time=0.3~17.9 μs ）
- 实测对应：“Horizontal injection painting scheme”
- 占比：约10%~20%（视注入强度波动略有差异）

□ 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%

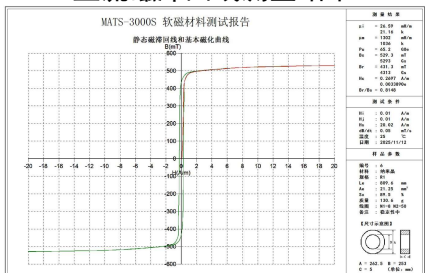


无监督机器学习算法——聚类分析在DCCT磁环精确匹配中的应用

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。

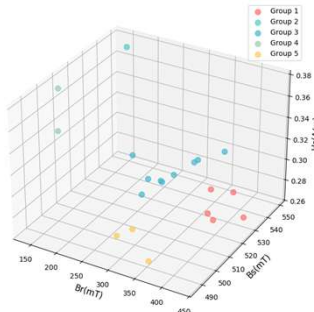
直流磁滞回线测量结果



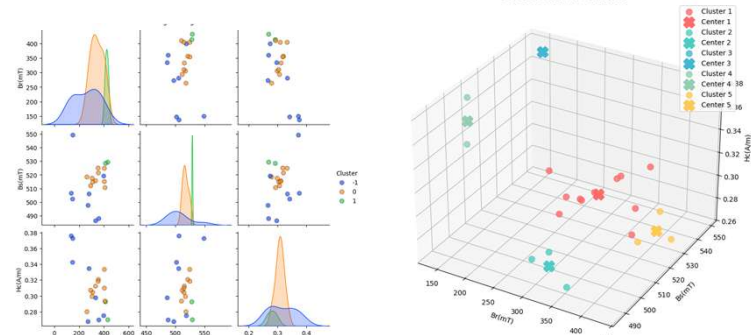
同批次20只非晶纳米晶磁环性能参数筛选

| A | | B | C | D | E | F | G |
|--------|-------------------------------|-------|-------|---------|------|-------------|---------------|
| 原始样品名称 | | B/(M) | B/(m) | H/(A/m) | 聚类系数 | 前中心距离 | (标准差) 组内区配度排名 |
| 1 | 259-250.5-5-410-60-15.1.ppt | 3965 | 5191 | 0.2749 | 0 | 0.64032298 | 4 |
| 2 | 259-250.5-5-410-60-3.1.ppt | 413 | 5284 | 0.2842 | 0 | 0.575441765 | 1 |
| 4 | 259-250.5-5-410-60-7.1.ppt | 4091 | 5106 | 0.2924 | 0 | 0.71349549 | 3 |
| 5 | 259-250.5-5-410-60-9.1.ppt | 4035 | 515 | 0.3098 | 0 | 0.814395168 | 4 |
| 6 | 259-250.5-5-410-60-12-1.1.ppt | 4313 | 5393 | 0.2687 | 0 | 0.892931515 | 5 |
| 7 | 259-250.5-5-410-60-22.1.ppt | 1494 | 5492 | 0.3726 | 1 | | 6 |
| 8 | 259-250.5-5-410-60-14.1.ppt | 3324 | 5156 | 0.3123 | 2 | 0.167046729 | 1 |
| 9 | 259-250.5-5-410-60-23.1.ppt | 3049 | 5147 | 0.3044 | 2 | 0.340440517 | 2 |
| 10 | 259-250.5-5-410-60-18.1.ppt | 3043 | 5175 | 0.2982 | 2 | 0.467679997 | 3 |
| 11 | 259-250.5-5-410-60-11.1.ppt | 2932 | 5219 | 0.3074 | 2 | 0.525331174 | 4 |
| 12 | 259-250.5-5-410-60-25.1.ppt | 3557 | 5214 | 0.3207 | 2 | 0.55781005 | 5 |
| 13 | 259-250.5-5-410-60-2.1.ppt | 3534 | 525 | 0.3184 | 2 | 0.684053538 | 6 |
| 14 | 259-250.5-5-410-60-24.1.ppt | 2803 | 5059 | 0.3349 | 2 | 1.175495988 | 7 |
| 15 | 259-250.5-5-410-60-11.1.ppt | 2632 | 5184 | 0.2785 | 2 | 1.229776162 | 8 |
| 16 | 259-250.5-5-410-60-70.1.ppt | 4035 | 5106 | 0.2924 | 0 | 1.277993325 | 9 |
| 17 | 259-250.5-5-410-60-21.1.ppt | 317 | 5064 | 0.3758 | 3 | 0.588390052 | 10 |
| 18 | 259-250.5-5-410-60-18.1.ppt | 1472 | 5022 | 0.3424 | 3 | 0.588390052 | 2 |
| 19 | 259-250.5-5-410-60-4.1.ppt | 3591 | 4878 | 0.2695 | 4 | 0.545785613 | 3 |
| 20 | 259-250.5-5-410-60-10.1.ppt | 3337 | 4862 | 0.2975 | 4 | 0.714772088 | 4 |

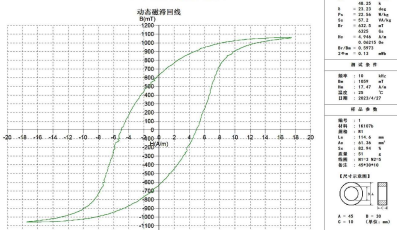
Core Cluster 3D Plot



3D Visualization of 5 Clusters



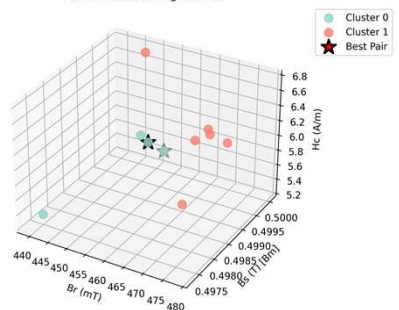
MATS-3000S 软磁材料测试报告



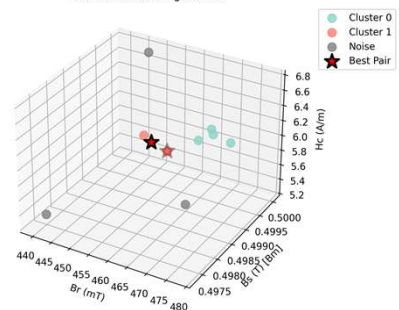
小样本：基于DCCT零磁通部分对磁环交流磁性能超高匹配度的要求，推荐使用**层次聚类**来挑选匹配度最佳的磁环对

- 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

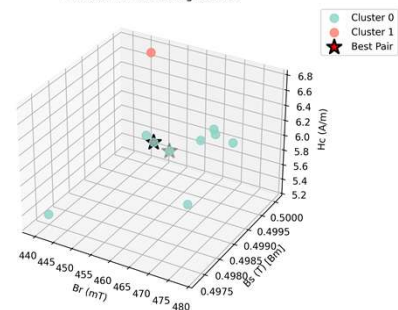
K-Means Clustering Results



DBSCAN Clustering Results



Hierarchical Clustering Results

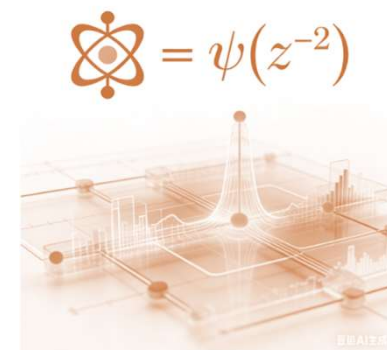
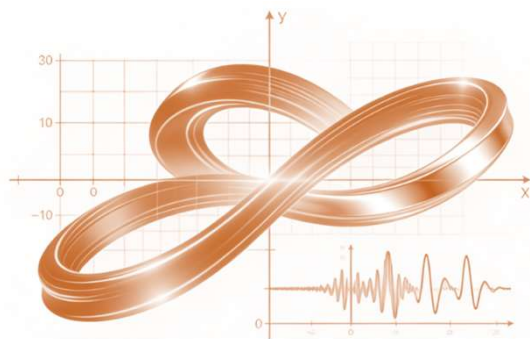
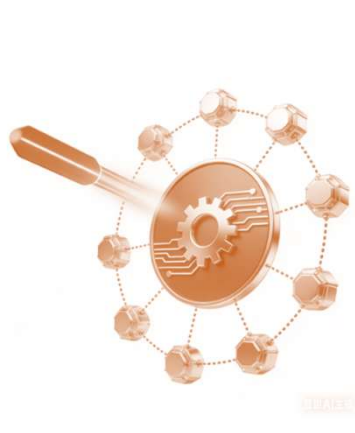


后续实验规划：搭建匹配磁环的交流调制测试平台，进行零磁通电路优化和算法验证

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！