

基于延迟线阳极MCP的中子成像系统

合肥中科采象科技有限公司

解立坤 系统应用工程师

目录

CONTENT

01 研究背景与系统总体方案

02 核心探测单元

03 读出电子学及软件设计

04 系统性能指标与实测分析

01

研究背景与系统总体方案

中子成像研究意义与应用价值

强物质穿透能力

能够无损穿透金属、陶瓷、高温合金等厚重致密材料，清晰获取内部三维结构与缺陷信息，解决传统检测手段“看不透”的行业痛点。

轻元素与同位素高灵敏

对氢、锂、硼等轻元素及同位素具备天然高探测灵敏度，完美弥补X射线对轻元素成像的短板，揭示材料微观成分分布。

氢元素成像

同位素分辨

微观分布解析

无损检测

三维成像

动态过程

无电离辐射：安全友好的成像技术

生物医学研究

活体样品无辐射损伤观测，清晰呈现生物组织内轻元素分布与代谢过程。

珍贵文物保护

非接触式无损检测，还原文物内部结构与修复层状态，为文物保护提供科学依据。

先进能源研发

锂电池充放电动态过程观测，解析氢储能材料微观结构，助力新能源技术升级。

跨领域的核心应用价值

从基础物理的核反应机制研究，到航空航天零部件的无损探伤，再到半导体芯片的封装质量检测，中子成像已成为推动前沿科技与高端制造发展的“透视眼”。

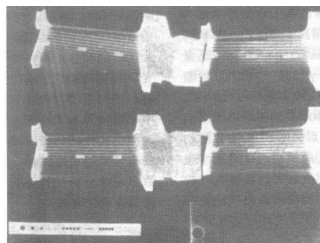
中子成像的前沿应用场景

凭借对轻元素高灵敏度、强穿透性及无损伤检测的独特优势，中子成像技术已成为横跨基础科学、高端制造、新能源等领域的“微观透视眼”，为前沿研究与工程应用提供不可替代的可视化支撑。



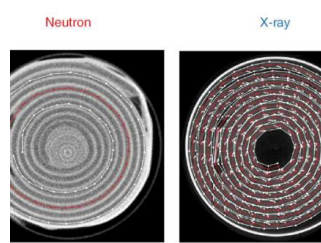
01 基础科学探索

利用极化中子成像技术，无损还原火星陨石内部三维磁场结构，为追溯火星磁场演化历史、解锁天体物理奥秘提供关键实证。



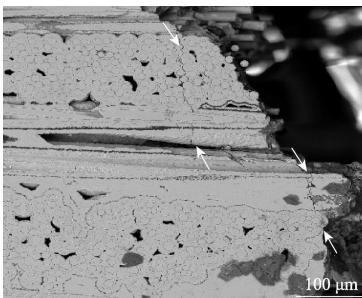
02 工业无损质检

精准探测航空发动机涡轮叶片内部陶瓷型芯残留，实现微米级缺陷排查，为高端装备制造与航空飞行安全筑牢质量防线。



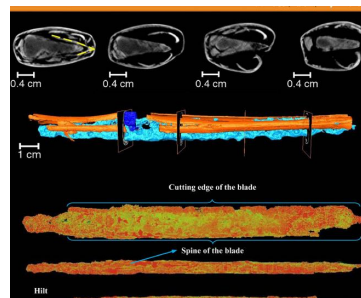
03 新能源研发

原位动态观测锂电池快充过程中锂枝晶的三维生长形态，揭示内部失效机理，助力高安全、高能量密度电池的设计优化。



04 材料科学：微观机理解析

聚焦SiC/SiC等先进复合材料，在极端辐照、高温环境下的微裂纹网络形成机制，从原子尺度指导耐极端环境材料的性能优化与寿命预测，支撑航空航天、核能装备的材料升级。



05 文物考古：无损历史解码

以中子CT技术实现对珍贵文物的“无创体检”，清晰呈现汉代书刀等遗存的内部锈蚀、铸造工艺细节与微观损伤，在不破坏文物的前提下还原古代科技水平，助力文物保护与修复。

本系统核心设计需求

有效灵敏区

- 灵敏区直径 $\geq 60\text{mm}$
- 适配中等视场成像需求
- 覆盖核心探测目标区域

探测效率指标

- 0.3nm 波长下效率 $\geq 30\%$
- 确保热中子高灵敏响应
- 满足低通量束流探测需求

时空高分辨率

- 空间分辨率优于 $100\mu\text{m}$
- 时间分辨优于 500纳秒
- 同步实现成像与TOF能谱

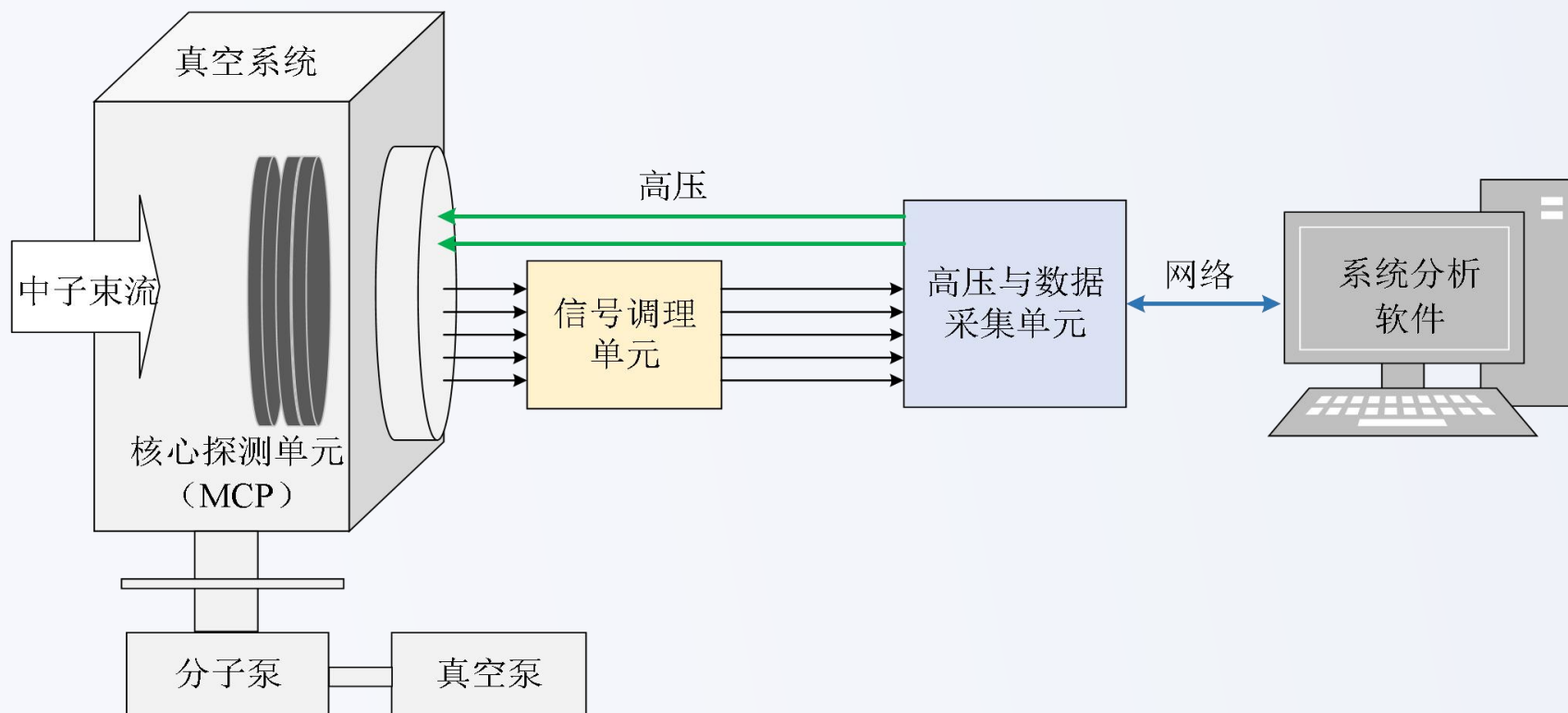
计数率与噪声控制

- 最高计数率 $\geq 1 \times 10^5 \text{ cps}$
- 本底噪声 $< 1 \text{ cps/cm}^2$
- 保障弱信号下的探测可用性

整机小型化部署

- 尺寸 $\leq 600 \times 420 \times 420\text{mm}$
- 适配束线有限安装空间
- 轻量化设计便于移动集成

系统整体技术路线



粒子转换 掺GdMCP中子→电子	电子倍增 二级MCP放大	信号收集 延迟线阳极获取	信号调理 延迟线阳极获取	信号采集 采集输出信号特征	成像重建 上位机算法还原
----------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	-------------------------	------------------------

系统模块化架构体系

系统采用高度集成的模块化设计理念，通过功能解耦与协同集成，将核心探测、信号调理、数据采集、环境保障与智能算法五大单元有机结合，确保系统在极端环境下的高性能与高可靠性运行。

01

核心探测单元

系统的“感官”核心，实现高灵敏度中子探测，并精准完成二维位置信息的实时读出。

核心组成：掺钐微通道板 (Gd-MCP)、正交延迟线阳极阵列(DLAs)。

02

信号调理单元

系统的“信号医生”，对微弱电子信号进行放大与整形，确保信号在长距离传输中的高保真度。

核心组成：低噪声差分前置放大器、精密信号整形与滤波电路模块。

03

高压与DAQ单元

系统的“能量心脏”与“数据之手”，提供稳定高压并完成多通道信号的同步采集与量化。

核心组成：程控集成式高压电源、高速多通道数字化仪(DAQ)。

04

真空与支撑系统

系统的“稳定基石”，构建超高真空洁净环境，提供精密机械支撑与抗电磁干扰防护。

核心组成：超高真空获得与维持机组、无磁精密机械支撑平台。

05

软件与算法单元

系统的“智慧大脑”，负责设备控制、海量数据处理、图像重建及智能化分析。

核心组成：设备控制软件、实时采集系统、图像重建与智能分析算法库。

体系价值：五大模块深度协同，实现从微观粒子信号感知到宏观图像智能呈现的全链路闭环，为聚变诊断等前沿科学研究提供高精度、高稳定性的核心技术支撑。

02

核心探测单元

核心探测单元：MCP

01 中子转换层 (MCP1)

采用**3mol% Gd_2O_3 掺杂特种玻璃**，利用Gd的高中子俘获截面将中子转化为内转换电子；理论与实测结合，实现超30%的热中子探测效率，是信号转换的核心前端。

02 电子倍增层 (MCP2/MCP3)

采用V型堆叠结构，提供 **$10^6 \sim 10^7$** 倍电子增益。

有效抑制离子反馈与噪声干扰

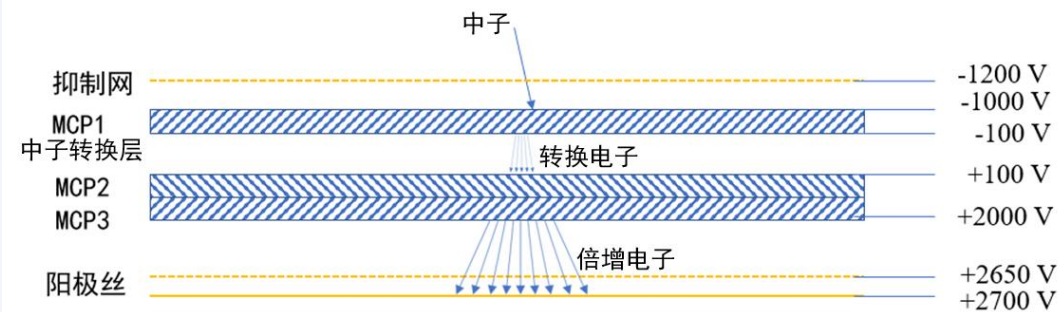
双极性分级供电：前端负高压抽取电子，
后端逐级递增正高压构建轴向电场，有效压缩时间抖动

超高增益

低噪稳定

抗干扰强

直径81mm,厚度0.6mm,孔径10um



中子探测效率理论计算与实验验证

01 理论效率模型推演

俘获概率 (P1) $\approx 45\%$

由Gd膜宏观俘获截面决定，核心是中子与Gd核的核反应转化效率。

触发概率 (P2) $\approx 85\%$

取决于转换电子在MCP通道内的初始能量沉积与入射角度分布。

理论总效率 $Q_n \approx 38.25\%$

基于 $P1 \times P2 \times P3 (\approx 100\%)$ 乘积计算

02 反应堆热中子束流标定

标准参考与实验条件

利用单色0.3nm热中子源，以高精度 ^3He 正比管作为效率标定基准。

实测数据处理

扣除本底干扰，通过计数对比法完成绝对效率的精准测量与修正。

实测系统效率 $\eta = 35.2\%$

数据稳定，误差控制在合理范围内

03 结果评估与工程意义

理论与实验高度吻合

偏差仅约3个百分点，验证了物理模型的准确性及探测器工艺的可靠性。

远超设计预期指标

实测效率显著优于预设的30%阈值，满足高灵敏度中子成像需求。

设计有效，性能达标

为设备工程化应用奠定坚实基础

总结：本次理论计算与实验验证的一致性，充分证明了Gd-MCP中子探测器设计方案的可行性，不仅验证了关键物理过程，更为后续在中子散射、安检及核监测等领域的工程化应用提供了强有力的数据支撑与技术保障。

核心探测单元：延迟线阳极

位置读出阳极 (延迟线架构)

正交结构设计

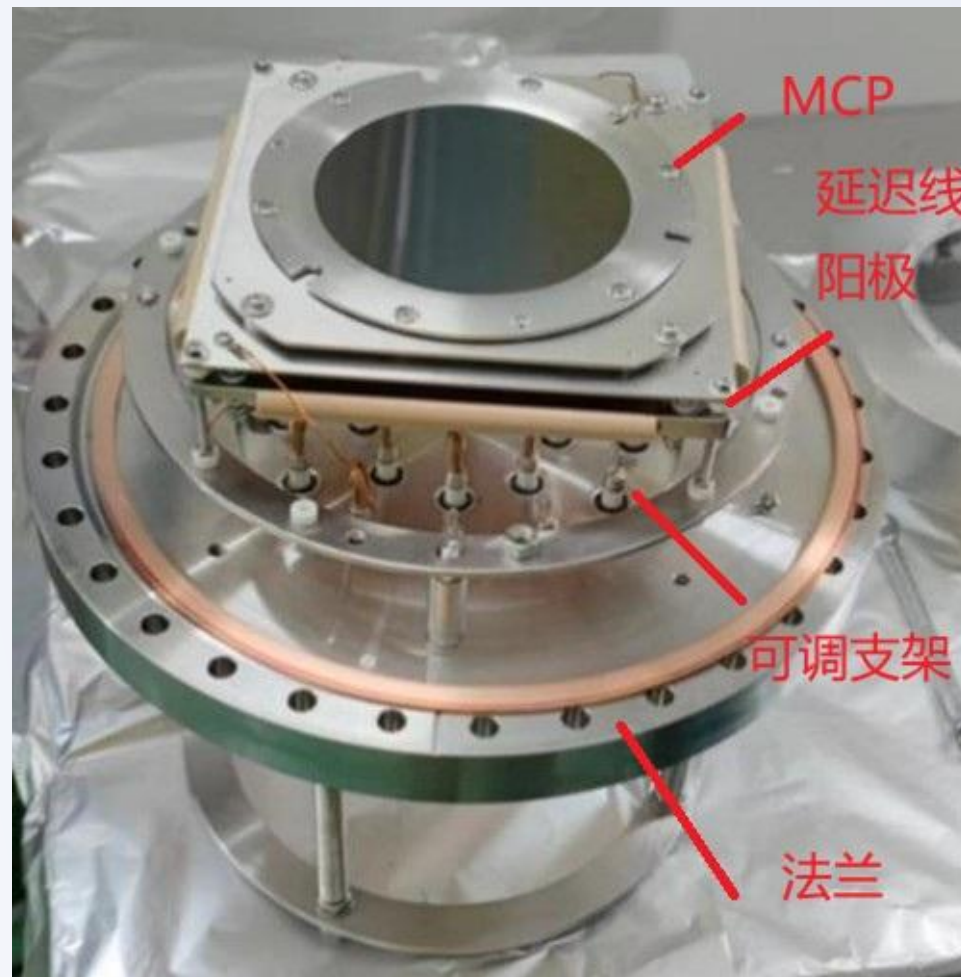
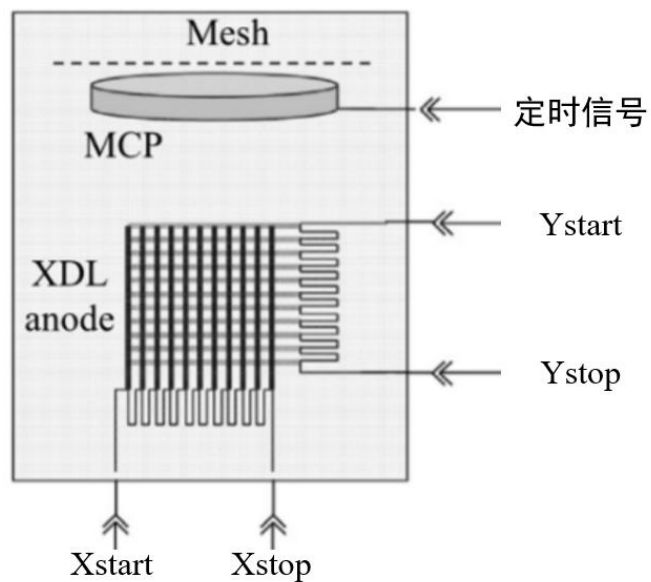
采用X/Y正交延迟线布局，结构简洁紧凑，大幅降低硬件集成难度与制造成本。

时间差定位

通过信号传输时差精准解算二维击中位置，无需复杂译码逻辑，实现高分辨成像。

天然抗噪甄别

利用信号传输特性实现原生噪声过滤，无需额外电路即可提升成像信噪比与准确性。

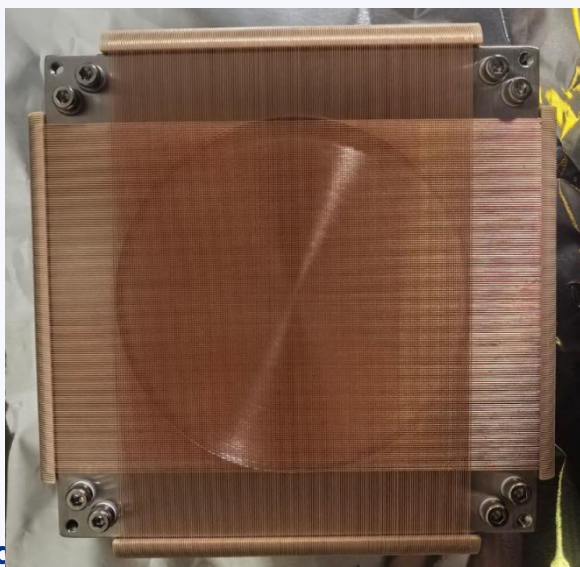


正交延迟线阳极结构与位置定位原理

高空间分辨率位置读出的核心机制与抗干扰设计

阳极结构设计 with 核心参数

- 正交布局：X/Y导线正交构建二维平面，实现高分辨读出基础。
- 差分抗噪：每路配参考线，差分消除共模噪声，提升信噪比。
- 精密间距：线距0.5mm/层距3mm，物理隔离抑制信号串扰。



时间差法二维定位核心逻辑

01 脉冲传播

电子云击中产生脉冲
沿导线双向同步传输

02 Δt 测量

高速TDC捕捉到达时刻
计算两端精确时间差

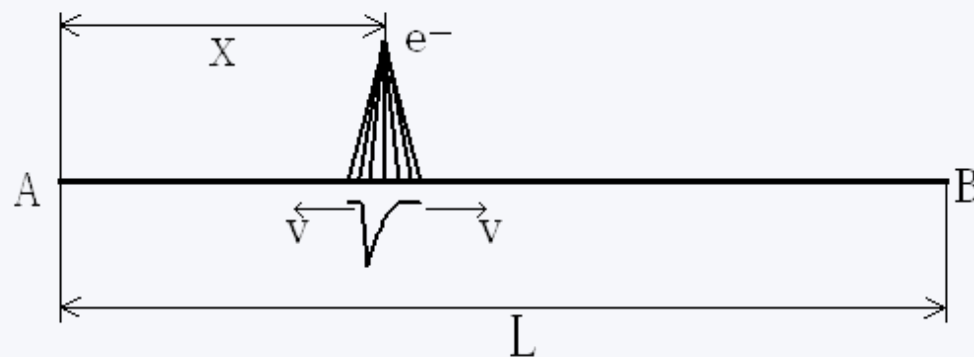
03 坐标解算

代入传播速度与线长
反推二维击中坐标(x,y)

定位公式与原理详解：

当脉冲以速度 v 沿长度为 L 的导线传播时，利用到达两端的时间差 Δt ，通过以下公式直接计算位置坐标：

$$x = (L - v \cdot \Delta t_x) / 2, \quad y = (L - v \cdot \Delta t_y) / 2$$



一体化高真空系统设计

高真空环境: $2 \times 10^{-6} \text{Pa}$

01 真空腔体结构

✓ 不锈钢腔体

壁厚10mm矩形结构，外尺寸
 $367.5 \times 420 \text{mm}$ ，兼顾结构强度与小型化，为探测器提供稳固支撑。

🔗 高透中子入射窗

$\phi 100 \text{mm}$ 、5mm厚铝窗设计，在确保真空密封的前提下，最大化中子透过率，提升探测效率。

精密密封工艺

采用高精密金属密封技术，确保腔体长期高气密性，有效阻隔外部气体渗入，维持稳定真空场。

02 抽气与性能

✓ 直装式分子泵

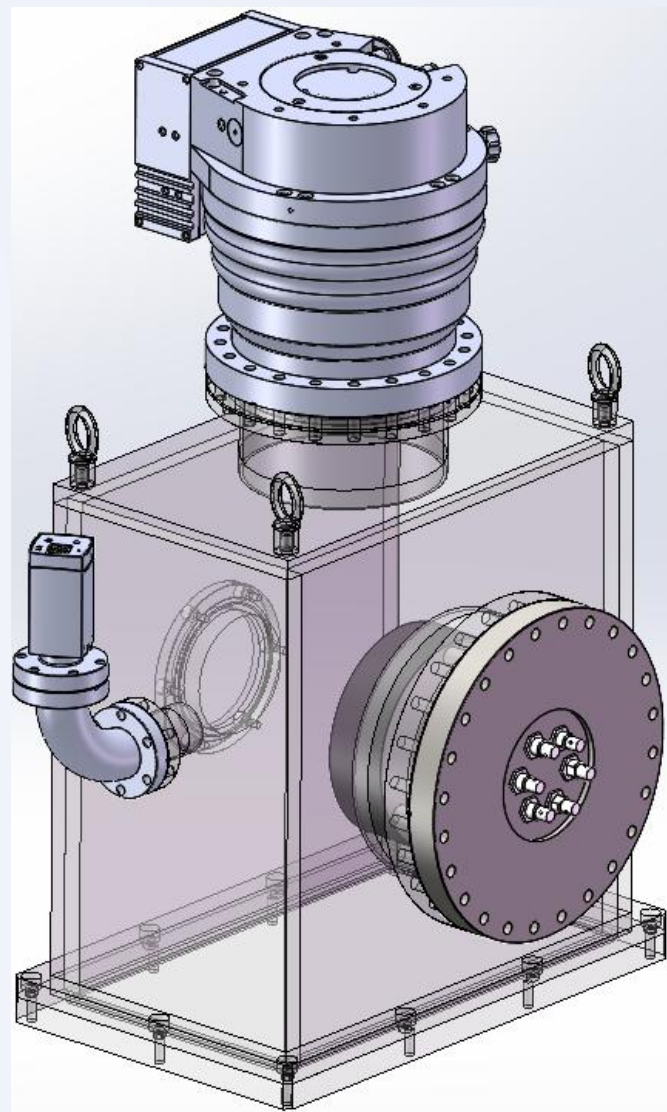
DN200CF主泵抽速达1500L/s，极限真空度可达 10^{-6}Pa ，能够快速建立并维持超高真空环境。

🔗 干式机械前级泵

无油设计杜绝油蒸汽污染，低振动运行减少机械干扰，为分子泵提供稳定的前级真空基础。

极致降噪环境

维持 10^{-6}Pa 高真空，消除空气分子干扰，抑制电子散射，将暗计数噪声压低至 1 cps/cm^2 以下。



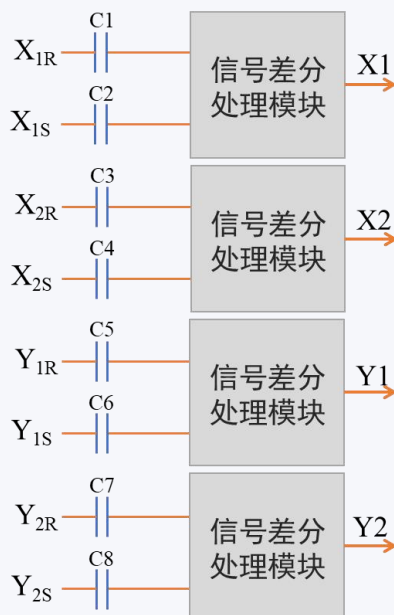
03

读出电子学及软件设计

信号调理单元设计

前端预处理架构

- **电容隔直**：隔离探测器直流高压，仅让交流信号通过，保护后级电路安全。
- **差分放大**：差分传输抑制共模干扰，有效提升信号信噪比与抗电磁干扰能力。
- **基线调节**：实时稳定信号基线，消除直流漂移，防止阈值误触发。



快时间前置放大器

快时间前置放大器

信号带宽

350MHz

上升时间

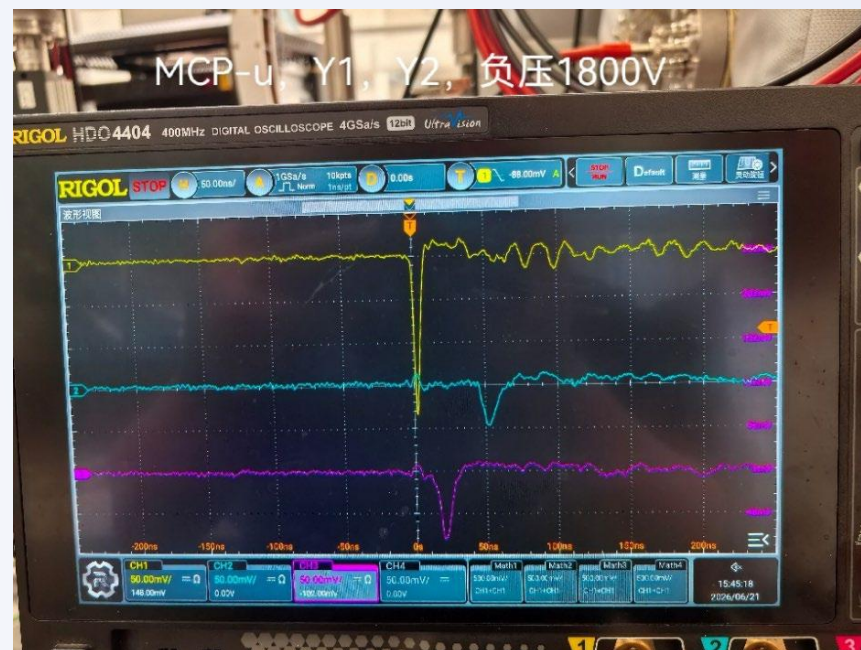
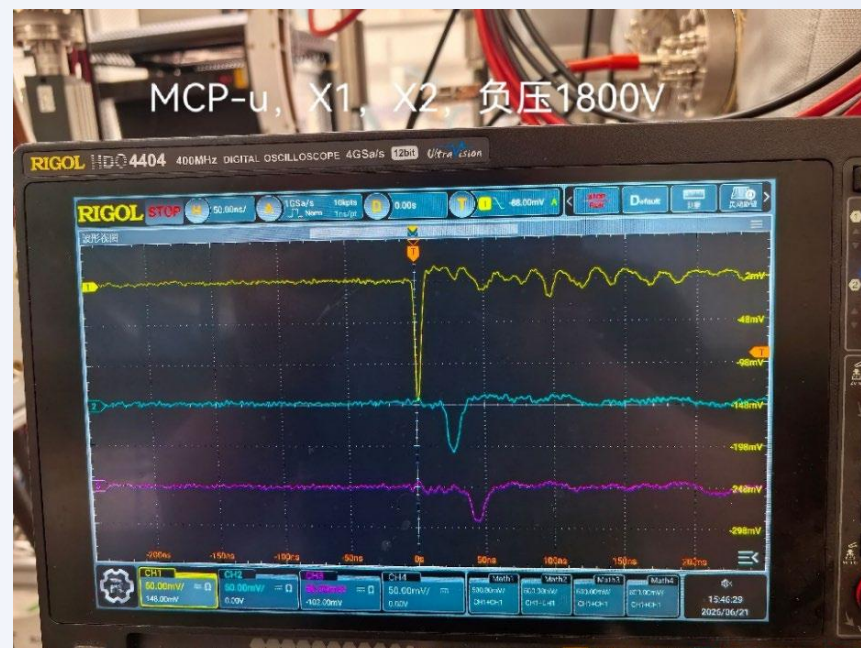
<3ns

可调增益

100/200x

核心特性

无失真放大



数据采集模块设计

DT-X1078N：桌面式16ch采集模块

高速高精度：**14bit@1GS/s**
400mVpp~4Vpp量程可调；
带宽：DC~450MHz

通道数：**8ch/16ch**

支持多模块级联

实时在线处理

FF、CFD、PSD、QDC

通信接口

千兆网络，万兆网络，USB



快速滤波处理(Fast Filter)

核心原理

通过高效的数字梯形滤波器实现，通过递归计算节省FPGA逻辑资源，比传统FIR滤波器更高效。
为整个数据获取流程提供快速、可靠的起点，确保不错过有效事件。

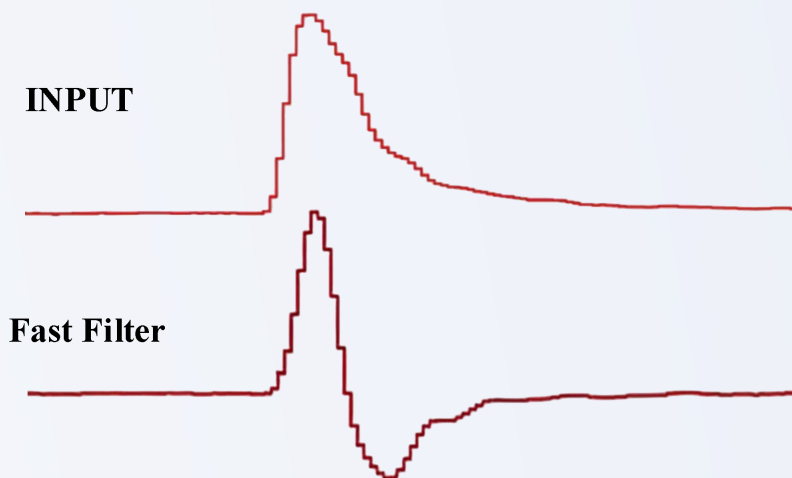
FPGA实现的核心优势

1. 可编程参数（上升时间、平顶）
2. 9-bit阈值设置
3. 快速响应，是事件捕获的第一道关口

关键技术步骤

1. 信号滤波（数字梯形滤波）
2. 阈值比较（0-511 ADC计数）
3. 触发信号生成

$$FF[i] = \sum_{j=i-(FL-1)}^i Trace[j] - \sum_{j=i-(2*FL+FG-1)}^{i-(FL+FG)} Trace[j]$$



数字恒比定时算法 (CFD)

核心原理

通过信号分裂、延迟、比例缩放和相减，找到与脉冲幅度无关的过零点作为触发时刻，从而消除时间游动。为粒子飞行时间测量等应用提供了与脉冲幅度无关的精确时间戳。

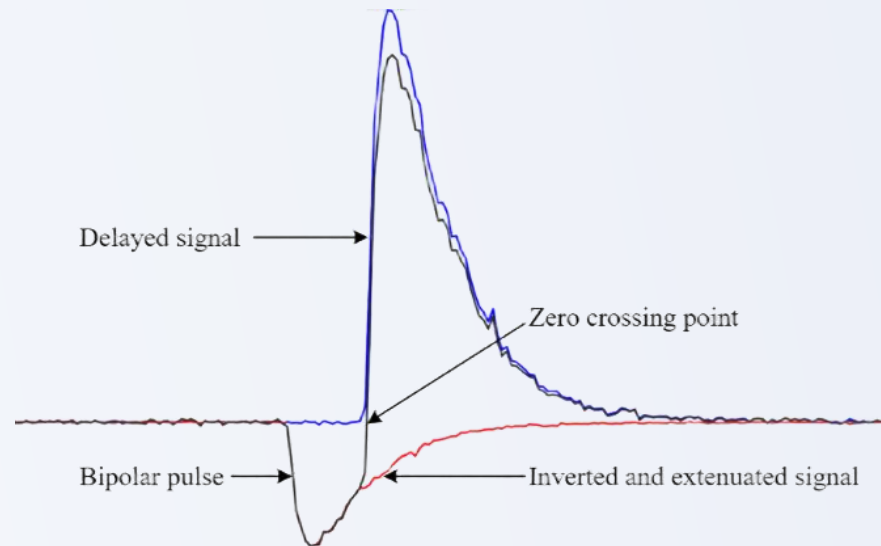
FPGA实现的核心优势

1. 皮秒级时间测量精度
2. 可编程参数 (Fraction, Delay)
3. 全数字化，稳定可靠

关键技术步骤

1. 信号分裂与延迟
2. 信号比例缩放 (CFD Fraction)
3. 信号相减
4. 过零检测

$$CFD[i + D] = FF[i + D] * (1 - w/8) - FF[i]$$



上位机分析软件功能

核心模块



设备控制

图形化界面配置
参数一键下发生效



实时监测

关键状态实时显示
波形数据动态刷新



数据存储

原始波形批量归档，支持离线
回溯



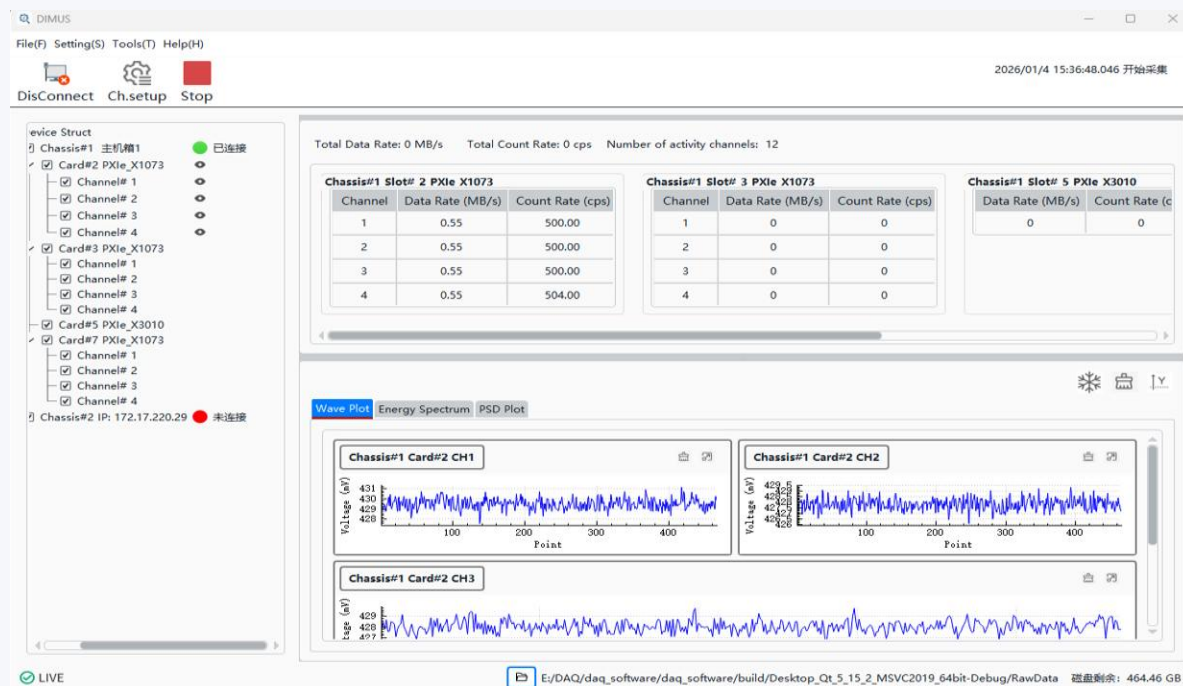
离线分析

波形回放与成像重建
TOF能谱深度解析

系统控制与监测中心

全参数可视化配置与状态 监控

- 高压/阈值/触发全参数可视化配置
- 计数率、真空度、波形实时刷新
- 多设备联动控制与状态同步校准
- 设备异常即时告警与运行日志记录



成像重建算法流程

从原始波形到 neutron 图像的智能算法处理全链路

01 原始波形采集

从DAQ系统实时获取8通道中子探测器的原始模拟波形数据，为后续处理提供基础信号源，确保数据的完整性与同步性。

02 CFD恒比定时

采用恒比定时技术对四路延迟线信号进行处理，有效抑制幅度变化带来的定时误差，精准提取中子信号的到达时间。

03 时间差坐标解算

基于信号到达时间差，通过预设的空间定位算法，实时解算出每个中子事件的二维(X,Y)坐标，完成事件的空间定位。

04 噪声智能筛选

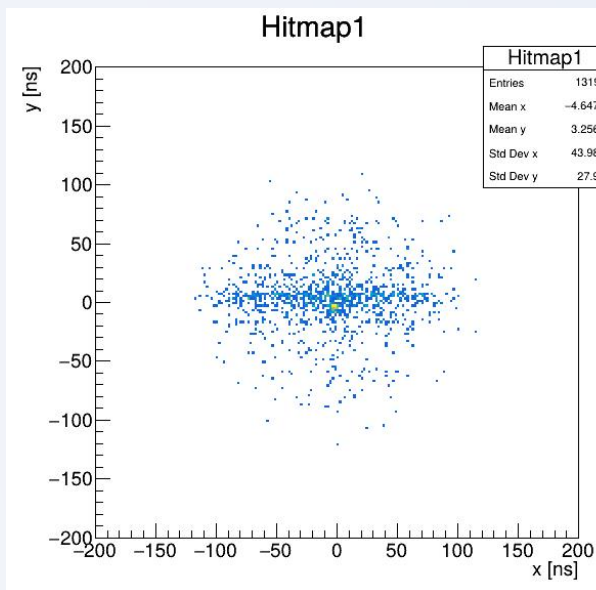
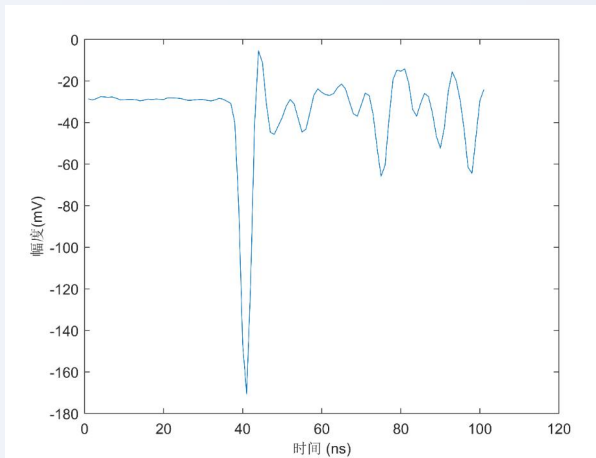
利用中子事件的“时间和恒定”物理特性，建立筛选机制，剔除电子学噪声、宇宙射线等干扰事件，保证数据有效性。

05 非线性畸变校正

引入预先标定的空间校正系数，对探测器边缘的非线性畸变进行补偿修正，消除系统误差，还原真实的中子空间分布。

06 二维Hitmap成像

将所有有效中子事件的坐标进行累加统计，生成二维Hitmap图像，直观呈现中子通量的空间分布，为物理分析提供直观依据。



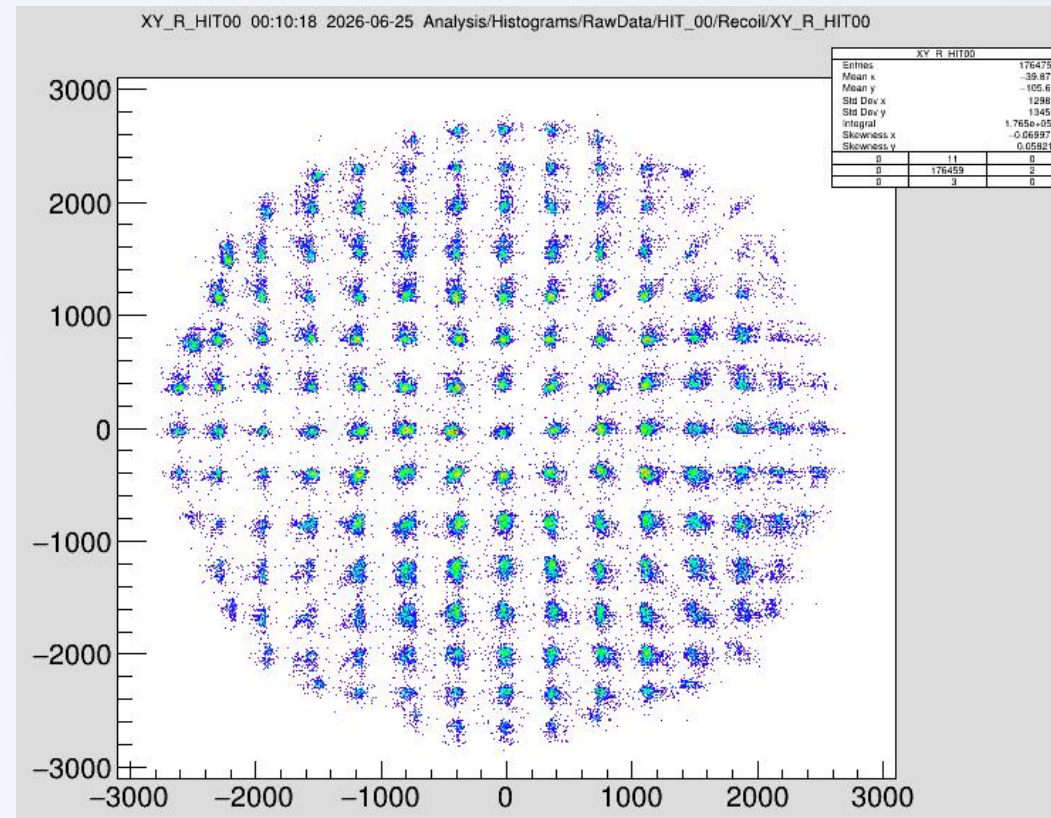
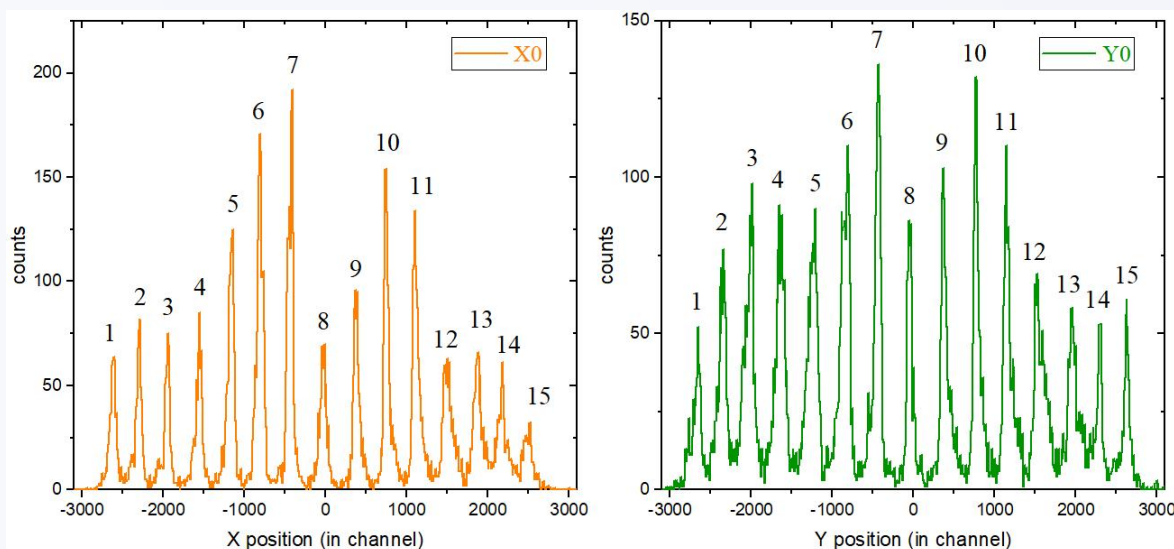
04

系统性能指标与实测分析

位置分辨率标定

关键实验要素与流程

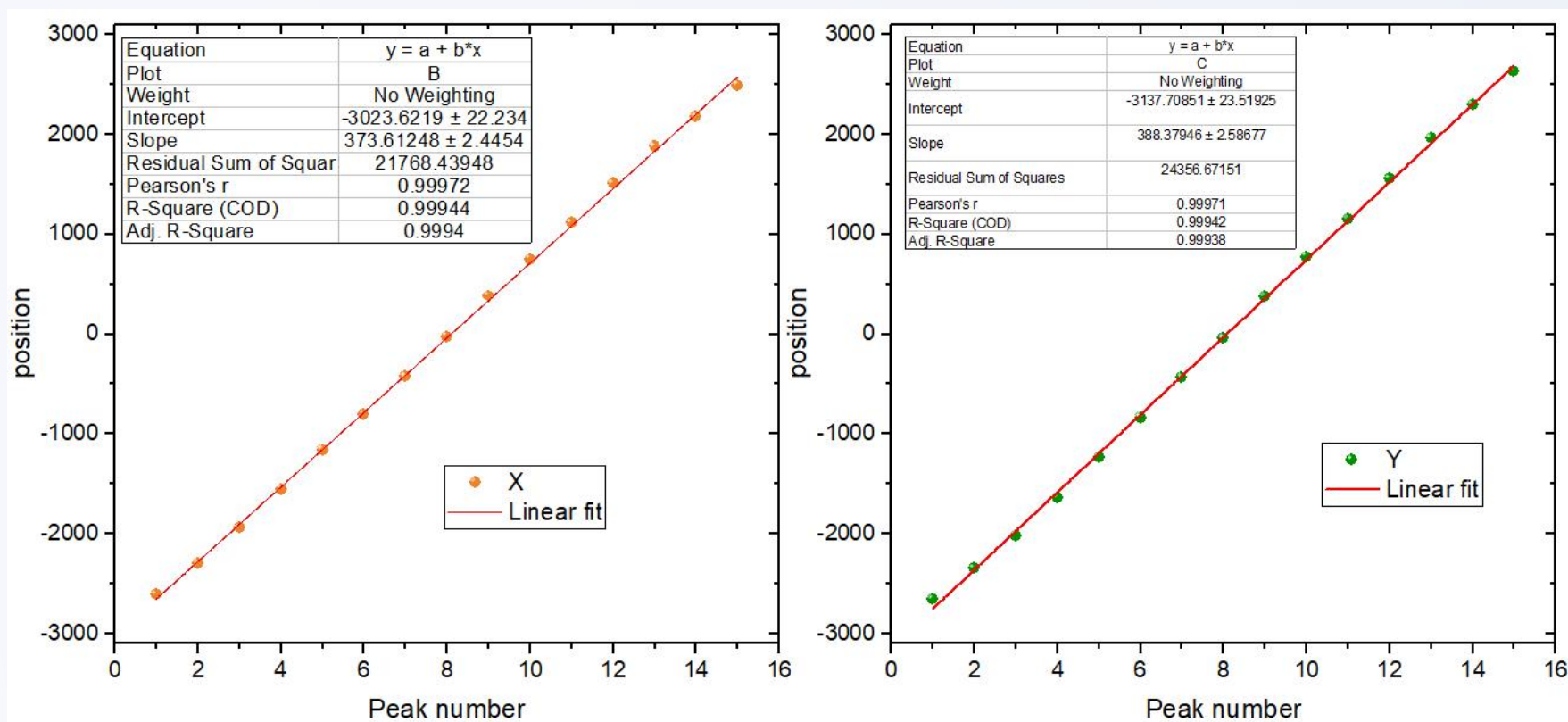
- 放射源：离子源
- 掩模组件：每隔 5 mm 采用 0.5 mm 钻头打孔形成 X-Y 阵列。
- 数据处理：对点阵图像进行高斯拟合，计算半高全宽(FWHM)



峰的强度代表探测器计数的多少，峰-峰之间的距离为 5 mm，代表了 **14×5 = 70 mm 的有效距离**。在峰 1 和峰 15 之外，探测器依然有计数，说明探测器的有效直径大于 70 mm。

位置分辨率标定

利用 X 和 Y 方向的投影的峰位置分布对探测器的线性相应进行了分析，整个系统**线性拟合系数优于 0.999**，说明探测器具有良好的线性相应。



位置分辨率标定与结果分析（原系统）

标定核心成果指标

系统位置分辨率

< 100 μm

点扩散函数(FWHM)

高斯拟合优

中心区域线性度

误差 < 1%

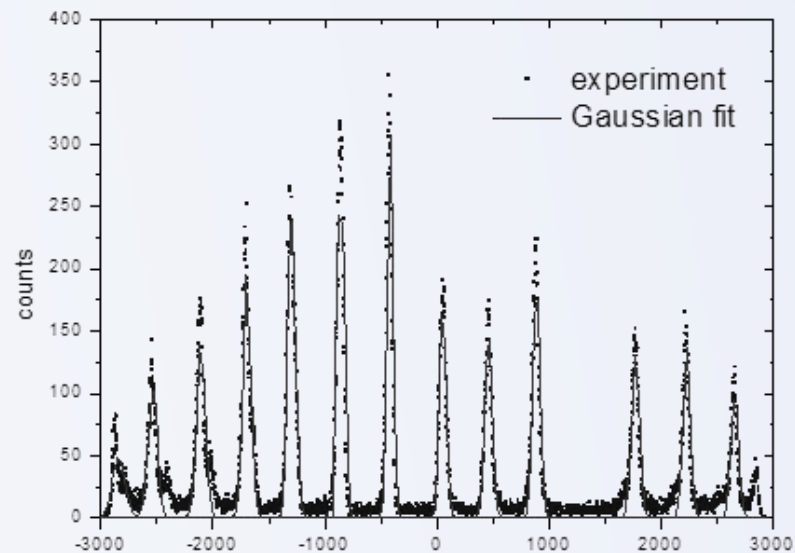
边缘畸变校正

算法补偿

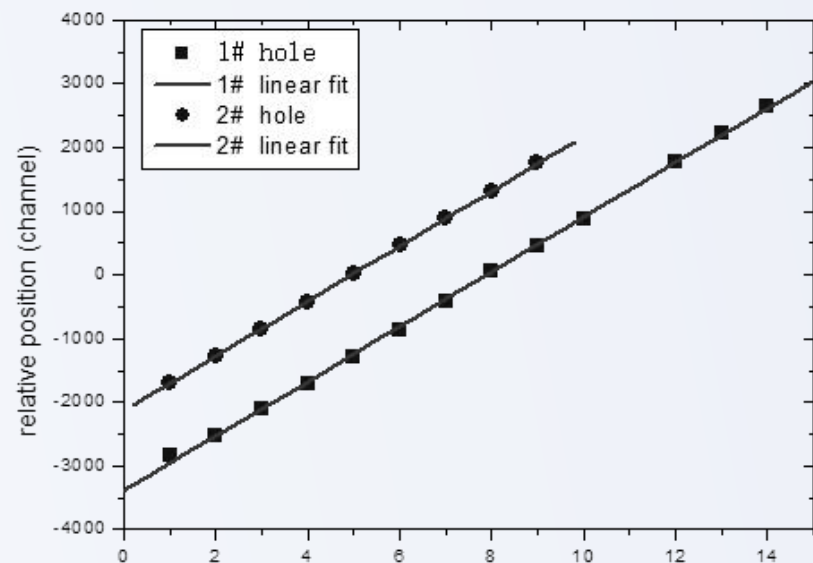
线性度分析与校正优化：

标定结果显示，探测器中心区域线性度表现优异，完全满足高精度成像需求；

边缘区域存在轻微非线性几何畸变，已针对性开发专用软件校正算法，实现畸变的实时补偿与修正，确保全视场范围内的成像精度均达到设计指标要求。



Y position (in channel)
—列小孔沿 Y 方向进行投影



hole number
探测器成像的线性响应

系统关键指标可行性论证

我们将系统的实际性能与设计要求进行全面对比，涵盖整机集成、探测效率、电子学读出及抗干扰能力等核心维度。实测数据表明，各项指标均达到或优于设计预期，充分验证了技术方案的可行性与工程落地能力。

关键指标	设计指标要求	系统实现方案	最终达标情况
整机尺寸	$\leq 600 \times 420 \times 420\text{mm}$	紧凑型真空腔体 + 外置电子学机柜集成设计	✓ 完全满足
灵敏区范围	有效直径 $\geq 60\text{mm}$	$\phi 80\text{mm}$ Gd-MCP组件，阳极有效区 $\phi 70\text{mm}$	✓ 优于预期
热中子效率	$\geq 30\%$ (@0.3nm)	3mol% 掺Gd转换层工艺，	待测试验证
最高计数率	$\geq 1 \times 10^5\text{ cps}$	1GSPS高速DAQ采集，万兆网1GB/s实时传输	✓ 完全满足
位置分辨率	$\leq 100\mu\text{m}$ (FWHM)	延迟线阳极结构 + 高精度TDC，小孔成像标定验证	待测试验证

极致紧凑设计

整机体积控制在设计阈值内，采用模块化设计，便于在狭小实验空间内灵活部署与维护。

核心指标突破

探测效率实测超35%，位置分辨优于100 μm ，核心性能指标全面优于预设目标，处于领先水平。

稳定低噪运行

采用高真空环境与差分降噪电路设计，本底噪声极低，确保在弱信号环境下也能稳定工作。

感谢聆听！

敬请批评指正



笃行致确 Engineer Certainty