

Q1 位置分辨与动量误差的资源博弈

a) 相对动量误差简化推导

带电粒子在均匀磁场中做圆周运动，满足关系 $p_T = 0.3 B \rho$ ，其中 p_T 为粒子横动量， B 为磁场强度， ρ 为轨迹曲率半径。

多层硅探测器对粒子位置的测量误差为 σ_x ，由题设该误差与硅条间距（pitch）成正比。通过径迹几何关系推导，曲率的测量误差满足：

$$\sigma_{\frac{1}{\rho}} \propto \frac{\sigma_x}{L^2}$$

其中 L 为探测器层间距离。

对 $p_T = 0.3 B \rho$ 做误差传递，可得相对动量误差满足：

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \cdot \sigma_x}{BL^2}$$

相对动量误差与粒子横动量、位置测量误差正相关，与磁场强度、层间距的平方负相关。

b) 三个使动量误差减半的独立方案

1. 缩小硅条间距：修改参数为将硅微条间距（pitch）缩减为原值的 $1/2$ ，原理是位置测量误差与 pitch 成正比，pitch 减半后位置误差同步减半，动量误差随之减半。
2. 提升磁场强度：修改参数为将探测器超导磁场强度提升至原值的 2 倍，原理是动量误差与磁场强度成反比，磁场翻倍后，相对动量误差变为原值的 $1/2$ 。
3. 增大探测器层间距：修改参数为将探测器层间距离 L 放大为原值的 $\sqrt{2}$ 倍，原理是动量误差与层间距平方成反比， L 变为 $\sqrt{2}$ 倍后， L^2 翻倍，动量误差减半。

c) 各方案的工程代价

方案 1：硅条间距减半

1. 读出通道数量翻倍，前端 ASIC 芯片、数据读出链路的规模与功耗同步提升，硬件成本显著增加。
2. 微条间距缩小后，通道间电容耦合增强，串扰噪声上升，会部分抵消位置分辨的提升收益。
3. 硅条加工与模块组装的对准精度要求翻倍，生产工艺难度提升，良品率下降。

方案 2：磁场强度翻倍

1. 超导磁体的超导材料用量、低温制冷系统规模大幅提升，基建与运行成本呈指数级增长。
2. 强磁场会对前端模拟电路产生干扰，引入额外噪声，劣化探测器的测量性能。
3. 磁体自

重与机械应力显著提升，探测器整体支撑结构、土建基础均需重新设计，工程量剧增。

方案 3：探测器层间距放大

1. 探测器整体径向尺寸膨胀，配套的冷却管路、读出线缆、机械支撑的规模同步扩大。2. 粒子穿越的探测器物质质量增加，多重库仑散射效应增强，低动量区间的径迹测量精度下降。3. 探测器有效覆盖的伪快度范围收缩，向前区粒子的探测能力下降。

d) 最不推荐方案：磁场强度翻倍

该方案为最不推荐选项。磁体系统是探测器中成本最高、改造难度最大的子系统，磁场翻倍带来的成本增长远高于另外两种方案，且强磁场引发的电子学干扰、束流扰动属于全局性问题，难以通过局部优化完全消除。其余两种方案仅针对探测器本体进行修改，成本与风险均可控。若强制采用该方案，可通过前端 ASIC 与模拟电路增加磁屏蔽结构、模拟与数字电路分区分布线、采用低磁导率材料制作探测器支撑结构等方式补偿副作用。该方案在系统层面难以完全落地。超导磁体制成后几乎无法迭代升级，且强磁场下磁体失超风险显著提升，安全隐患难以根除；同时磁场变化会干扰加速器束流运行，该问题无法通过探测器端的优化解决。

Q2 β 放射源时间分辨测试 PCB 设计

a) PCB 设计核心原则（保障时间分辨）

1. 信号线全程 50 Ω 阻抗匹配：快脉冲信号遇到阻抗不连续点会产生反射，导致信号上升沿展宽，降低时间测量精度。所有信号走线需严格控制特征阻抗为 50 Ω 。
2. 同组信号线等长约束：走线长度差异会引入固有传输时延差，无法区分是布线引入的时差还是粒子本身的时间差。同通道信号线长度误差需控制在微米级。
3. 完整连续地平面设计：底层铺设完整接地平面，可降低信号回路阻抗，抑制地弹噪声，减小时间测量的随机抖动。
4. 传感器与接口就近布局：缩短高频信号走线长度，减少信号衰减与上升沿退化，保障信号时域特征不失真。
5. 电源与信号物理隔离：电源走线与模拟信号线分区布置，避免电源开关噪声耦合至模拟信号，劣化时间分辨。

b) 数据接口选型：侧卧式 SMA 连接器

选型依据如下：1. 本测试传输 ns 级快脉冲信号，需要 GHz 级带宽。SMA 连接器工作带宽可达 DC~18GHz，完全满足测试需求；MMCX 带宽上限较低，高频段信号畸变严重。2. SMA

采用螺纹锁紧结构，接触稳定性高，反复插拔不会引入接触阻抗波动，保障时间测量的重复性。3. 侧卧式 SMA 安装高度低，适配双板堆叠的测试布局，不会产生空间干涉。扁平排线、RJ45 等接口为低速数字接口，带宽不足以传输快脉冲信号，不适用本场景。

c) PCB 结构示意图

俯视图

板上布置两类 LGAD 传感器，长条型四通道器件横向排布，方形器件相邻放置；传感器电极焊盘引出 50Ω 微带线，等长布线至板边；板边焊接侧卧式 SMA 连接器，单通道对应单连接器；其余区域铺接地铜箔，电源走线沿板边布置，与信号区物理分隔。

剖面图

顶层为信号走线、传感器焊盘、SMA 焊盘；中间层为 0.7mm 厚 FR4 基材；底层为完整接地铜平面；双板测试时，两块 PCB 上下平行放置，中间预留约 5mm 间距放置 β 放射源，避免板间信号串扰。

Q3 拓扑结构选择：为何不采用球形“洋葱”结构

结论：不推荐纯球形分层拓扑，传统圆柱桶部+端盖结构更具合理性

以下从三个维度展开论证：1. 物理测量维度：带电粒子在螺线管磁场中沿束流轴偏转，圆柱形结构与磁场分布匹配度高，粒子多以接近垂直的角度入射探测器，测量响应均匀，径迹重建算法成熟。球形结构下粒子入射角度连续变化，探测器响应畸变严重，位置与动量重建复杂度大幅提升，误差显著增大。同时对撞机向前区辐射剂量最高，球形结构无法分区更换老化模块，运维灵活性差。2. 磁场系统维度：HL-LHC 类实验采用圆柱形超导螺线管，仅在圆柱体积内磁场均匀度满足测量要求。球形结构会大量占用磁场非均匀区域，直接导致动量测量误差上升。且球形超导线圈绕制、低温支撑、应力控制均无成熟工程方案，研发与制造成本极高；圆柱形螺线管已有数十年工程验证，技术成熟度高。3. 工程与运维维度：硅传感器为平面器件，球形曲面组装会引入巨大的对准误差，加工与装配难度呈指数级上升。圆柱形结构由平面模块拼接而成，工艺成熟，精度可控。同时球形内部空间局促，冷却管路、读出线缆无规整布线空间，热管理与电磁屏蔽难度大；圆柱形结构径向分层布局清晰，运维时可单独抽出模块检修，全生命周期成本更低。

更合理的拓扑结构：分段圆柱桶部+锥形端盖

该结构以同轴圆柱桶部覆盖中心快度区，以锥形端盖覆盖向前高伪快度区，两者之间设置过渡层消除探测盲区。相比纯球形结构，该方案优势如下：完全适配圆柱形螺线管的均匀磁场，动量测量精度最优；全部采用平面硅模块拼接，无曲面加工难度，制造成本与对准误差可控；桶部、端盖、过渡层物理分区，可单独更换辐射老化模块，运维成本低；径向分层结构清晰，冷却、布线、屏蔽设计难度低，系统可靠性更高。结构简图可按如下逻辑绘制：以水平束流管为中心轴，中部绘制多层同心圆代表桶部探测器，两侧绘制锥形台结构代表端盖探测器，外围标注超导螺线管范围。