

Q1 位置分辨与动量误差的资源博弈解答

a) 高动量极限相对动量误差推导

带电粒子在垂直磁场 B 中做圆周运动，曲率半径满足：

$$pT = 0.3BR \quad (pT \text{ 单位 GeV/c, } B \text{ 单位 T, } R \text{ 单位 m})。$$

小角度近似下，径迹弦长 L 、弧矢高 s 满足 $s \approx L^2/8R$ ，代入曲率半径得：

$$s = 0.3BL^2/8pT$$

对 s 做误差传递： $\sigma_s/s = \sigma_{pT}/pT$ ，因此相对动量误差：

$$\sigma_{pT}/pT = \sigma_s/s = 8pT\sigma_s/0.3BL^2$$

题目给出 $\sigma_s \propto$ 微条间距 p ，即 $\sigma_s = kp$ (k 为比例常数)，最终简化式：

$$\sigma_{pt}/pT \propto pT \cdot p / BL^2$$

b) 3 个独立缩小一半动量误差的方案

由上式 $\sigma_{pt}/pT \propto pT \cdot p / BL^2$ ，高动量 $pT=100 \text{ GeV/c}$ 固定，要让误差减半，可从 4 个参数选 3 个独立方案：

1. 方案 1：增大磁场强度 B 至 2 倍

改动物理参数：磁场系统（超导磁体励磁 / 线圈匝数）；原理： B 翻倍，误差直接减半。

2. 方案 2：增大探测跨度 L 至 $2 \approx 1.414$ 倍

改动工程参数：探测器径向 / 轴向安装跨度；原理： L^2 翻倍，误差减半。

3. 方案 3：将微条间距 p 缩小至原来 1/2

改动工艺参数：硅微条光刻工艺、读出 ASIC 通道密度；原理：位置误差 σ_s 随 p 减半，动量误差同步减半。

c) 各方案工程系统级代价

1. 方案 1 (B 翻倍)

- 代价 1：超导磁体励磁电流 / 线圈匝数提升，制冷系统热负载翻倍，液氮 / 低温制冷机功耗、体积大幅增加，制冷失效风险上升；

- 代价 2: 磁场漏磁增大, 干扰周边前端 ASIC、时钟同步电路, 需要更复杂的磁屏蔽结构, 机械结构承重、抗震要求提升。

2. 方案 2 (L 放大 2 倍)

- 代价 1: 探测器整体体积、质量增加, 加速器隧道空间受限, 支撑结构力学负载提升, 形变带来额外位置误差;
- 代价 2: 粒子穿过更多探测材料, 多次散射效应增强, 反而引入额外动量测量不确定度, 径迹重建算法复杂度上升。

3. 方案 3 (p 减半)

- 代价 1: 硅片光刻精度要求翻倍, 良品率下降、制造成本显著提升; 通道数翻倍, ASIC 读出通道数量、功耗、数据带宽翻倍;
- 代价 2: 微条电容、串扰大幅上升, 前端信噪比恶化, 需要更低噪声的前端芯片、更复杂的屏蔽布线, 散热压力陡增。

d) HL-LHC 条件下方案筛选与优化

最不推荐方案: 缩小微条间距 p (方案 3)

理由: HL-LHC 对探测器辐射耐受、通道密度、功耗有极严苛约束, 微条减半会让通道数翻倍, 辐射损伤下漏电流增长更快, 前端电子学功耗和带宽超出现有冷却与数据系统冗余, 材料与 ASIC 迭代周期极长, 系统兼容性最差。

补救优化策略

1. **ASIC 架构:** 采用双通道复用、分时读出架构, 在不显著增加总通道数的前提下优化条带分组; 选用辐射加固的深亚微米工艺 ASIC, 降低单通道功耗与噪声。
2. **冷却方案:** 改用 CO₂ 两相微通道冷却, 提升局部散热能力, 适配更高通道密度的热负载。
3. **材料与布线:** 采用高阻超薄硅基板降低条带电容, 层间增加磁屏蔽层抑制串扰, 采用差分走线优化信号完整性。
若仍无法补偿: 微条间距缩小带来的电容串扰、辐射老化、带宽压力是指数级增长, HL-LHC 的隧道空间、低温系统、数据采集系统的上限已固化, 大规模重构基建成本超预算, 系统层面不可行

Q2 β 放射源时间分辨测试 PCB 设计

a) PCB 版图与机械结构关键原则 (重点 4-5 项)

通用原则

1. **信号路径等长化:** 四通道 AC-LGAD 到前端芯片的走线严格等长, 偏差控制 < 5ps, 避免走线时延差恶化固有时间分辨;

2. **阻抗连续控制**：高频快脉冲信号全程 50Ω 阻抗控制，线宽、层厚、介电常数全程匹配，阻抗突变会造成反射畸变，拉长信号前沿、劣化时间分辨；
3. **分区隔离布局**：传感器灵敏区、模拟前端走线、数字接口强电区域物理分区，用地墙分割，数字开关噪声不会耦合进微弱快信号；
4. **最短化灵敏信号走线**：LGAD 电极到焊盘、再到前端放大芯片的走线尽可能短，走线寄生电容 / 电感会拖慢信号上升沿，直接增大时间分辨误差；
5. **接地参考平面完整**：模拟区域铺设完整地平面，避免地环路带来的地弹噪声，地噪声会叠加在脉冲信号上，触发时刻抖动变大；
6. **机械应力释放设计**：薄 0.7mm PCB 做传感器贴装的应力缓冲槽，防止贴装翘曲拉扯芯片导致电极开裂、接触电阻漂移，带来长期时间抖动。

4-5 项重点对时间分辨的影响

- **等长原则**：通道走线时延差会让同源 β 事件的到达时刻出现固定偏差，直接拉宽多通道符合时间谱，测得的时间分辨虚高；
- **阻抗连续**：阻抗不连续产生信号反射，前沿震荡变形，定时甄别阈值的触发时刻抖动显著增加；
- **分区隔离**：数字接口的高速开关噪声耦合到模拟走线，基线抖动变大，定时触发的随机抖动上升；
- **最短走线**：走线寄生电容增大，信号 RC 上升时间变长，前沿变缓，阈值微小波动就会带来很大的时间误差；
- **完整地平面**：地环路会引入工频、开关频率的周期性噪声，造成触发时刻周期性抖动，展宽时间分辨结果。

b) 数据接口选型：**SMA**（竖立型 / 侧卧式均可，优先竖立 **SMA**）

原因：

1. **LGAD** 输出是亚纳秒级快脉冲，**SMA** 特性阻抗严格 50Ω ，工作带宽可达十几 GHz，适配快时间信号传输，插损和反射极小；
2. **MMCX** 带宽更低、插拔寿命短、接触稳定性弱，高速快脉冲下阻抗一致性差；扁平排线、**RJ45** 是数字低速接口，带宽不足、串扰极大，完全不适合快时间模拟脉冲传输；
3. **SMA** 机械结构牢固，多次插拔后阻抗稳定性好，适合实验室反复测试标定。

c) PCB 俯视 + 剖面示意图说明

俯视图布局

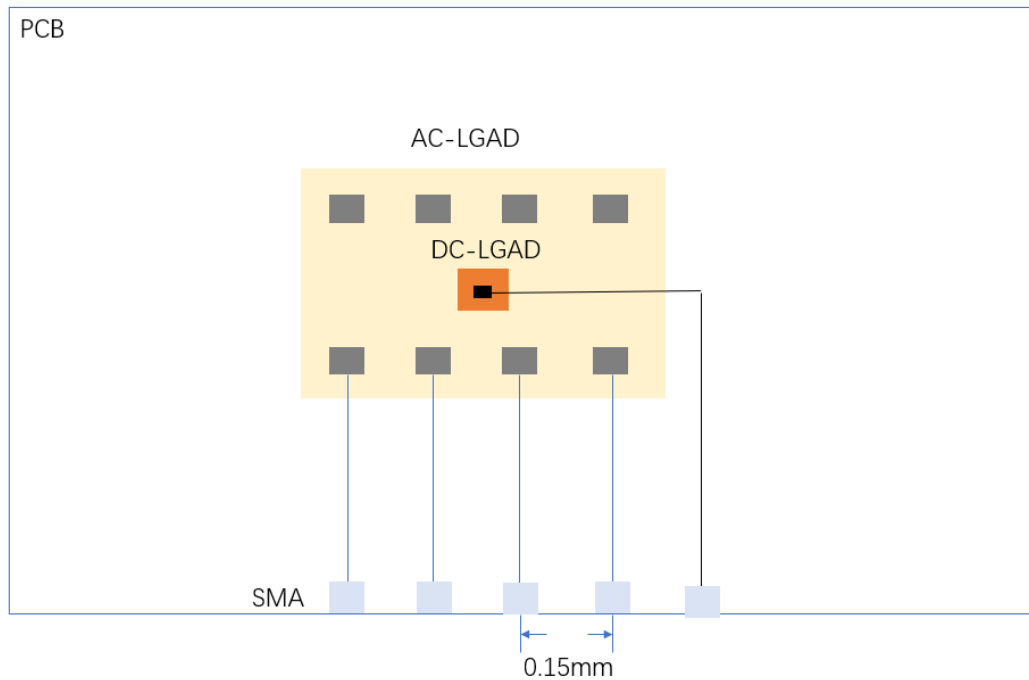
- 左下角放置 $1.5\times 1.5\text{mm}$ DC-LGAD 参考器件，右侧并排摆放 4 条 $1\text{cm}/4\text{cm}$ 长的四通道 AC-LGAD，电极间距 $\text{pitch}=150\mu\text{m}$ 、电极宽 $50\mu\text{m}$ ；

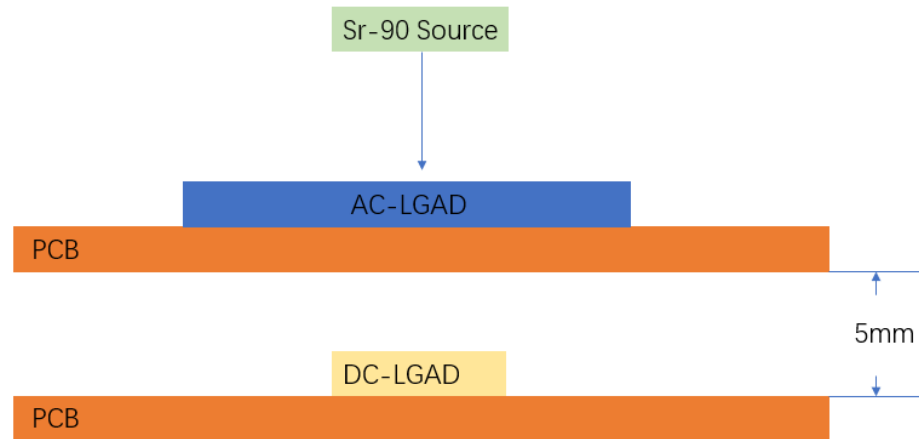
- 器件电极焊盘就近布置在器件长边侧边，短线从焊盘引出到 PCB 内侧的前端放大芯片区域；
- PCB 边缘布置竖立 SMA 接口，每组通道走线等长接到对应 SMA；四角预留机械固定孔。

剖面图（双板叠构）

- 上层：传感器贴装层 + 模拟走线层，铺完整模拟地平面；
- 中介质层：厚 0.35mm 介电稳定的高频板材；
- 下层：数字走线层 + 完整数字地平面，和上层用地过孔分隔；
- 传感器垂直间距：上下两层传感器垂直间距建议 **5~10mm**，既保证 β 射线可以先后穿过两层形成符合事件，又避免距离过近造成电磁串扰、散射过多。

标注项：SMA 接口位置、传感器贴装区域、地过孔阵列、走线阻抗控制宽度、板材厚度。





Q3 拓扑结构：为何不建“球形”硅探测器

结论：反对多层球面洋葱皮结构，保留优化后的 **Barrel+Endcap** 分层拓扑

1. 物理维度论证

- **动量测量精度**：圆柱形桶部磁场沿轴向（束流方向），粒子垂直穿过磁场产生方位角偏转，利用径迹方位角变化测 p_T ；球面结构磁场难以实现均匀轴向分布，极角方向磁场分量会引入非轴对称偏转，曲率半径解算复杂，极区动量分辨率大幅恶化；
- **径迹覆盖**：对对撞机前后向小极角区域，传统 **Endcap** 端盖圆盘可以分层精准覆盖；球面结构靠近束流的极区曲率极大，微条倾角随极角剧烈变化，位置分辨随极角畸变严重，前后向径迹重建精度暴跌。

2. 磁场系统维度论证

- 对撞机主超导磁体天然**螺线管圆柱形磁场**，沿束流轴向均匀分布，和 **Barrel** 桶部完美适配；球面结构需要设计球形超导线圈，球形线圈磁场中心强、边缘畸变严重，极区磁场不均匀度远超螺线管，励磁设计、低温绕制难度指数级上升，漏磁控制几乎无法实现；
- 球形磁场的磁场梯度复杂，不同极角的 B 大小方向差异大，动量重建的系统误差难以校准。

3. 工程系统维度论证

- **硅探测器加工与组装**：硅传感器只能做平面 / 微弧度弯曲的柔性板，球面需要大量不同曲率的定制瓦片，单片瓦片贴合球面时形变应力大，硅片易碎裂、电极间距畸变；圆柱形仅需小幅圆柱弯曲，瓦片标准化程度高，组装公差可控、成本低、辐射加固维护方便；
- **冷却与布线**：圆柱分层结构每层是同轴圆筒，冷却管路、读出电缆可以沿轴向规整布置；球面每层曲率处处变化，布线、冷却管路无法标准化

排布，布线长度差异大带来时延不一致，冷却管路弯折多、流阻不均，热管理难度陡增；

- **辐射老化**：对撞机辐照强度随径向增大、随极角前后向抬升，圆柱 + 端盖可以针对性调整每层厚度、传感器厚度做辐射冗余；球面极区辐照集中，瓦片老化速率差异极大，批量更换维护几乎不可实现。

更合理的优化拓扑：**分段圆柱桶部 + 锥形过渡端盖 + 小角度前向圆盘端盖**
简易示意图：

- 中心束流为 z 轴，中间是多段同轴圆柱 **Barrel**（半径逐层增大）；
- 圆柱两端用平缓锥形结构过渡，衔接多层圆盘 **Endcap**；极靠近束流的极小极角区域增设薄圆盘探测器；

优势：既保留圆柱适配螺线管磁场的核心优势，又用锥形过渡平滑衔接端盖，优化前后向覆盖，相比纯球面标准化程度高、磁场匹配好、工程可实现性强。