

高能物理硅径迹探测器系统作业

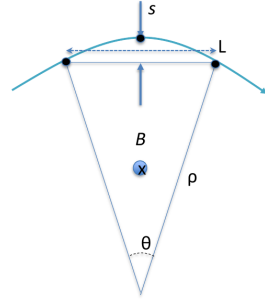
Q1: 位置分辨与动量误差的资源博弈

作业

Q1: 位置分辨与动量误差的资源博弈

假设你正在设计一个硅微条桶部径迹探测器，用于类似 HL-LHC 的实验。物理学家要求在 $p_T=100 \text{ GeV}/c$ 处，相对动量测量误差 σ_{p_T}/p_T 必须缩小一半。

- 在**高动量极限下**，从带电粒子在均匀磁场中的轨迹几何出发，推导相对动量误差 σ_{p_T}/p_T 的简化表达式。假设位置测量误差 σ_x 与硅微条 pitch 近似成正比（在二值读出、电荷分享可忽略的近似下）。
- 基于上述简化公式，提出三个独立的方案，使动量误差在高动量极限下缩小一半。对每个方案，指出你改变了哪个物理/工程参数并简要说明理由。
- 请分别指出这三个方案如果在真实工程中落地，会引发哪些致命的系统级代价？对每个方案，至少列出 2-3 条具体代价，并说明它们会如何影响。
- 在典型 HL-LHC / CEPC 类实验条件下，你最不推荐哪个方案？为什么？必须明确选择一个方案作为“最不推荐”的方案，并说明理由。然后回答：
 - 如果坚持这个方案，你会如何修改系统其他部分（如 ASIC 架构、冷却、材料选择、服务线路）来尽量补偿副作用？
 - 如果无法有效补偿，要说明为什么“这个方案在系统上不可行”。



a) 高动量极限下的简化推导

这里我先用一个比较简化的模型来算。在均匀磁场 B 中，带电粒子的横向运动半径 ρ 与横动量满足

$$p_T = 0.3 B \rho,$$

其中 p_T 的单位为 GeV/c ， B 的单位为 T， ρ 的单位为 m。在高动量的时候，轨迹弯得比较轻，可以近似看成一段浅圆弧，用弦长 L 和弓高 s 来描述：

$$s \simeq \frac{L^2}{8\rho}.$$

将 $\rho = p_T/(0.3B)$ 代入，得到

$$s \simeq \frac{0.3 B L^2}{8 p_T}.$$

因为 $p_T \propto 1/s$ ，所以如果弓高的测量误差是 σ_s ，大致有

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \simeq \frac{\sigma_s}{s} \simeq \frac{8 p_T \sigma_s}{0.3 B L^2}.$$

如果用 N 层测量点来拟合径迹，可以把弓高误差近似写成 $\sigma_s = C(N)\sigma_x$ 。这里 $C(N)$ 跟层数和拟合方式有关。题目说可以把位置误差看成和 pitch 成正比，所以在二值读出、暂时不考虑电荷分享时：

$$\sigma_x \simeq \frac{\text{pitch}}{\sqrt{12}}.$$

因此在固定 p_T 、层数和拟合方式的简化情况下：

$$\boxed{\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \text{pitch}}{B L^2}}.$$

b) 三个独立方案

方案	改什么	为什么有用
方案 1: 微条 pitch 减半	$\sigma_x \simeq \text{pitch}/\sqrt{12}$, 单点误差约减半。	$\sigma_{p_T}/p_T \propto \sigma_s$, 所以误差约减半。
方案 2: 磁场 B 加倍	把螺线管磁场从 B 提高到 $2B$ 。	曲率信号更大, 同样位置误差下动量误差约减半。
方案 3: 杠杆臂 L 增至 $\sqrt{2}L$	增大外层半径或有效测量跨度。	$\sigma_{p_T}/p_T \propto 1/L^2$, $L \rightarrow \sqrt{2}L$ 后约减半。

c) 如果真的这样做, 会遇到的问题

方案	主要问题	我认为会影响到的地方
pitch 减半	通道数会变多, 芯片要读更多信号, 功耗和数据量都会变大, 布线也更密。	会更热、更贵, 测试也更麻烦, 实际提升可能打折扣。
B 加倍	磁场不是只调一个旋钮, 通常要换更大的磁体, 还要重新考虑冷却、安全和空间。	这会影晌整台实验装置, 改动最大, 成本和风险也最大。
L 增至 $\sqrt{2}L$	探测器要做得更大, 外层模块、支撑和冷却管线都会增加。	会占更多空间, 安装和对准更难; 材料多了, 也会更容易干扰粒子。

d) 我最不推荐的方案

我最不推荐“把磁场 B 加倍”。原因是, 磁场不是只改径迹探测器这一部分就能解决的参数。它关系到整台实验的磁体、冷却、安全和空间安排。公式上看很有效, 但实际代价太大。

如果一定要这样做, 就不只是径迹探测器变一下, 而是磁体、冷却、支撑结构和周围探测器的位置都要一起重新设计。这样已经接近重做整台实验装置了, 所以我觉得不现实。

所以我觉得更现实的做法是: 在能接受的范围内减小 pitch、增加测量层数、适当增大外层半径, 并把安装对准和温度控制做好, 而不是只靠加大磁场。

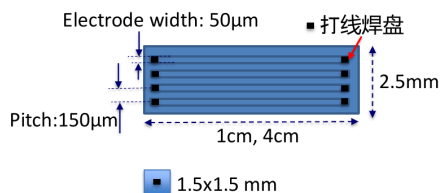
Q2: β 放射源时间分辨测试的 PCB 设计

Q2: β 放射源时间分辨测试的 PCB 设计

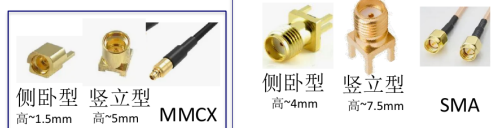
你拿到了一批新型传感器:

- 1.5 mm × 1.5 mm 的一通道方形 DC-LGAD 器件, 用于符合和提供时间参考。
- 1 cm × 2.5 mm 和 4 cm × 2.5 mm (pitch=150 μ m, electrode width=50 μ m) 的微条型四通道 AC-LGAD 待测器件

你需要设计一块通用的 PCB 测试板(厚 0.7 mm), 用于 β 放射源(如 Sr-90) 评估微条型四通道 AC-LGAD 器件的时间分辨率。



- 在不考虑具体放大电路设计的前提下, 为了保证获取到真实的物理极限时间分辨率, 你的 PCB 在版图和机械结构设计上必须遵守哪些关键原则? 重点论述 4-5 项原则, 并简要说明每项原则如何影响时间分辨率。
- 右边在几种常见数据接口和数据线类型中, 你会选择哪一种用于本测试板? 说明原因。
- 画出 PCB 的俯视图和剖面示意图, 并予以适当标注: 传感器位置, 焊盘位置, 打线路径, 数据接口(可用方形轮廓表示)等等。剖面图需包括 β 测试时的 PCB 布局, 双板设计需粗略估计传感器之间的距离。



a) 我认为 PCB 要注意的原则

- 参考器件和待测器件要对准:** DC-LGAD 参考器件和 AC-LGAD 微条最好沿 β 粒子路径上下对齐, 这样同一个粒子才有机会同时打到参考和 DUT。
- 两个传感器距离要小, 而且粒子路径上少材料:** 距离太大会增加空气路径、多重散射和准直误差。我会用 spacer 把间距固定在约 1-3 mm 量级, 并在传感器背后开窗、减铜, 让 β 粒子穿过的材料尽量少。
- 高速信号线要短、直、等长:** 从打线焊盘到连接器尽量短, 做 50 Ω 微带线或共面波导。四个通道尽量等长, 减少时间偏差。
- 打线焊盘尽量靠近传感器:** 打线越长, 引线电感和寄生电容越大, 容易让上升沿变差, 也会影响时间分辨率。
- 接地要完整, 通道之间要隔离:** 高速模拟信号很怕反射和串扰, 所以要有连续参考地、过孔围栏, 并且把偏置和高速输出分开。

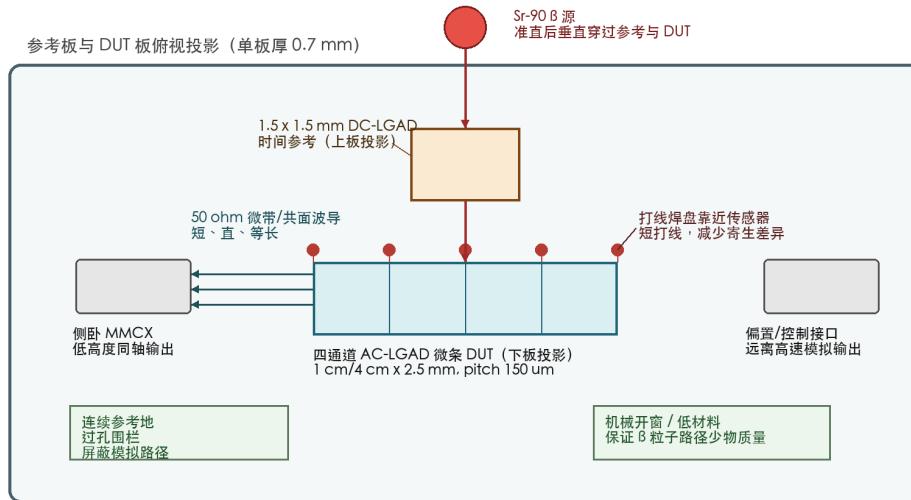
b) 数据接口选择

我会选右图里的侧卧型 MMCX。它高度约 1.5 mm, 比 SMA 和 RJ45 低, 更适合这块 0.7 mm 的薄测试板。

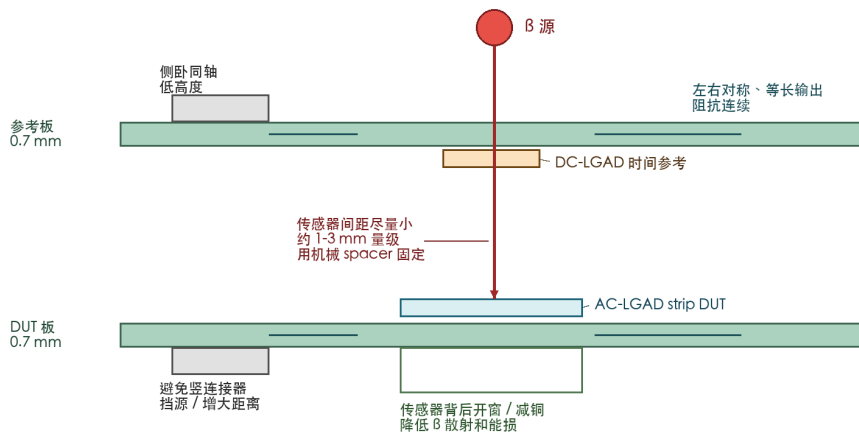
理由是: 这个测试读出的是很快的模拟脉冲, MMCX 可以接 50 Ω 同轴线, 比较有利于保持波形。SMA 也能用但更大; 排线和 RJ45 更适合普通连接或数字通信, 所以我不选。

c) 俯视图和剖面图

Q2 俯视图：参考器件与 DUT 对准、短线输出



Q2 剖面示意：双板符合几何与低寄生设计



Q3: 拓扑结构的选择：为何不建一个“球”？

题目问的是：能不能把类似 HL-LHC 的下一代强子对撞机探测器做成“多层球面洋葱皮”，彻底放弃常见的圆柱桶部加垂直端盖 (Barrel + Endcap) 分层拓扑。我的选择是反对这个提议。

我为什么反对球面提议

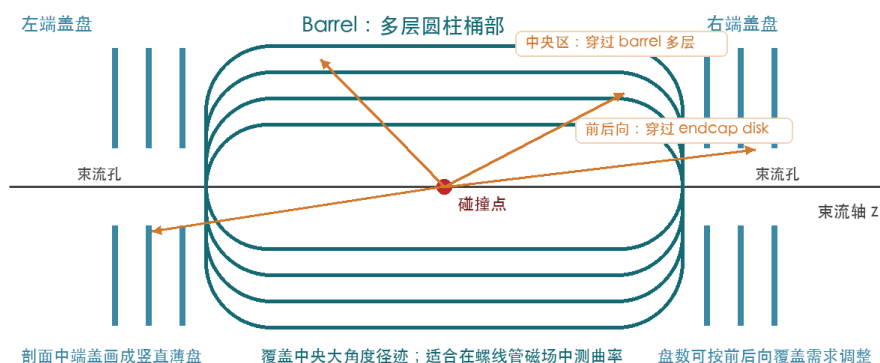
维度	反对球面结构的原因
物理测量	束流碰撞区不是一个完美点，而是沿 z 方向有长度；粒子在中央区和前后向区的分布也不一样。球面看起来对称，但不一定适合这些实际情况，反而会把不同区域强行做成同一种结构。
磁场与径迹几何	强子对撞机常用螺线管磁场，带电粒子主要在 $r-\phi$ 平面弯曲。球面坐标并不会让曲率测量更简单，也不天然匹配沿束流轴布置的磁场和径迹重建坐标。
系统集成	球面模块不容易平面化量产；冷却管、供电、光纤和支撑都要沿曲面布置，安装维护和局部替换会很麻烦。对准和服务线布置也会比现有分层结构复杂。

我认为更合理的拓扑结构

我建议采用下面这种结构：中间是几层同心圆柱形 barrel，靠近束流管的内层用 pixel，外层可按需用 pixel 或 strip；左右两端放多片垂直于束流轴的 endcap disk，用来补前后向区域。

Q3 推荐拓扑示意：多层 Barrel + 多片 Endcap

剖面图思路：中央大角度粒子主要交给桶部，前后向小角度粒子主要交给端盖。



为什么比球面合适：按区域分工，中央区和前后向区可以分别优化；模块更容易做成平面件，冷却、供电和维护也更容易分区安排。

这个方案比球面更优的核心原因是：它不是追求几何上“看起来最对称”，而是按粒子飞出的区域来分工。中央大角度径迹主要交给 barrel，前后向小角度径迹交给 endcap；每个区域的层数、半径、材料、像素/条带选择和服务路径都可以分别优化，工程上也更容易做成可生产、可安装、可维护的模块。