

Q1

(a)

设带电粒子横向动量为 P_T ，设带电粒子横向动量为 q ，轴向均匀磁场磁感应强度为 B 。由洛伦兹力提供向心力，回旋半径 R 满足：

$$R = \frac{P_T}{qB} = \frac{P_T}{0.3B}$$

取有效轨迹弦长为 L ，对应的弧垂为 s 。在弱弯曲近似 $R \gg L$ 下：

$$s \approx \frac{L^2}{8R} = \frac{0.3BL^2}{8P_T}$$

若单点位置测量误差为 σ_s ，则弧垂测量误差 $\sigma_s \approx \sigma_x$

于是相对动量误差： $\frac{\sigma_{P_T}}{P_T} \approx \frac{\sigma_s}{s} \approx \frac{8P_T\sigma_s}{0.3BL^2}$

在二值读出、电荷分享可忽略的近似下，粒子打在哪根条上就记录哪个位置，位置精度基本由微条的间距（pitch）决定。

硅微条位置分辨率 $\sigma_x \approx \frac{\text{pitch}}{\sqrt{12}}$ ，即 $\sigma_x \propto \text{pitch}$

代入后得到高动量极限下的简化比例关系：

$$\frac{\sigma_{P_T}}{P_T} \propto \frac{P_T * \text{pitch}}{BL^2}$$

(b) 根据公式，为将相对误差缩小一半，可独立改变以下单一参数

改变参数	操作	理由
传感器几何	pitch 减半	误差正比于 pitch，直接减半
外部磁场	B 增至 2 倍	误差反比于 B，磁场加倍使误差减半
探测几何尺寸	L 增至 $\sqrt{2}$ 倍	误差反比于 L^2 ， L^2 翻倍使误差减半

(c)

方案一：pitch 减半

1. 通道密度与功耗剧增：pitch 减半意味着单位面积通道数变为 4 倍，前端 ASIC 引脚数、逻辑单元与功耗呈线性甚至超线性上升，数据读出带宽急剧增加，在 HL-LHC 高事例率下数据链路与触发系统可能饱和。

2. 噪声与电容增大：更小 pitch 使条间电容增加，前端电子学噪声随之增大；辐照后漏电流增大，信噪比进一步恶化，实际位置分辨率不一定按比例提高。

3. 互连工艺与可靠性失配：传感器与 ASIC 的 bump bonding 间距需缩至 25 μm 以下，接近当前光刻与回流焊工艺良率临界点，导致模块制造成本指数级增长；小尺寸结构更易受辐照损伤，探测器寿命和良率降低。

方案二：B 增至 2 倍

1. 磁体储能与机械应力：磁能正比于 B^2 ，磁场加倍则储能变为 4 倍，巨大的电磁应力要求线圈骨架采用更厚的高强度合金，磁铁系统的重量与造价急剧增加。

2. 冷却负荷剧增：超导线材在更高磁场下的临界电流下降，交流损耗或稳态焦耳热增加，低温系统需提供更大制冷量，液氮消耗与低温管线复杂度上升。

3.系统间电磁干扰与低动量接收度：增大的漏磁场会对磁铁内部的电子学前端产生显著影响，可能触发 ADC 参考电压偏移或 ASIC 内部串扰噪声；更强的磁场使低动量粒子回旋半径变小，可能无法有效穿过探测器，影响径迹重建效率。

4.整机级影响：磁场不是只改径迹探测器就能解决的参数，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，接近重做整台实验装置。

方案三：L 增至 $\sqrt{2}$ 倍

1.传感器总面积与成本激增：L 增大会迫使内层半径不变而外扩外层，或整体尺度放大。无论哪种，硅传感器覆盖面积均按平方关系增加，直接导致裸片采购与加工成本激增。

2.机械与系统误差敏感：更长的径迹对磁场非均匀性、对准误差、热膨胀和重力形变更敏感；更长的悬臂或支撑筒壁导致整体结构刚度下降，固有频率降低，在加速器束流本底振动下，微米级弹性形变难以通过静态对准常数矫正。

3.多次散射与本底增加：粒子穿过更多探测材料，多重散射贡献增大；同时可能产生更多簇射和本底击中，部分抵消动量分辨收益。

(d) 最不推荐：方案三

方案三为了换取高动量极限下误差减半，要求 $L \rightarrow \sqrt{2}L$ 。但这意味着粒子在探测器中穿过的物质总量显著增加。

增大 L 的初衷是提高动量分辨率 $\frac{\sigma_{PT}}{P_T} \propto \frac{1}{L^2}$

但 L 增大的实际后果是：粒子穿过更多硅层 \rightarrow 多重散射角增大 \rightarrow 位置测量本身变差 (σ_x 有效增大)

于是出现悖论

公式预测的增益 $\propto \frac{1}{L^2}$

实际散射劣化 $\propto L$ 或更差

当 L 大到一定程度，散射劣化会追上甚至超过 $\frac{1}{L^2}$ 的增益，此时继续增大 L 反而使动量分辨率更差。

因此，方案三是一种自我抵消的设计：它试图通过增大 L 来提高分辨率，却同时通过增大物质量来降低分辨率。在 HL-LHC 类实验中，这种抵消意味着巨大的面积、功耗、数据量投入无法换来预期的物理收益。

Q2

(a)

1.受控阻抗设计 (50 Ω 全程匹配)

从传感器电极到射频连接器，整个信号路径必须被建模为特性阻抗确定的传输线，严格控制在 50 Ω (微带线或带状线)。选用低损耗高频介质 (如 Rogers RO4350B)，通过精确计算线宽、介质厚度实现阻抗连续；禁止出现阻抗突变、残桩过孔或不匹配过渡。

影响：阻抗失配会产生信号反射，导致脉冲前沿过冲、振铃或阶梯状畸变。时间测量依赖信号前沿过固定阈值的时刻，任何波形畸变都会使甄别时刻偏移，统计上体现为 σ_T 显著上升。

2.完整地平面对回流路径控制

敏感模拟信号层上下必须提供连续、完整的实心地平面，形成微带/带状线屏蔽结构；焊盘周边布置接地保护环；高频信号线远离板边缘与开槽。模拟地与数字地采用单点共地。

影响：地平面断裂会截断高频返回电流的最短路径，增大回路电感，导致辐射噪声与串扰大幅提升。对于 AC-LGAD 这类信号幅度有限的探测器，地弹噪声会直接耦合进信号通路，降低信噪比，增加时间抖动。

3.模拟/数字分区与隔离

LGAD 模拟灵敏区、射频走线应独立分区；数字供电、控制、以太网走线放置于 PCB 另一侧或不同层，通过完整地平面对隔离。

影响：数字开关噪声（如 ASIC 时钟、以太网数据）若耦合到快脉冲模拟信号，会叠加随机抖动，直接压低时间测量精度。

4.最短键合与最小寄生参数

打线焊盘必须紧邻传感器电极，信号走线直线最短，禁止长距离平行走线或蛇形绕线；电极焊盘尺寸最小化以减小对地寄生电容；过孔数量尽可能少，必要时选用背钻消除残桩。

影响：键合线本身是小电感，焊盘引入寄生电容，二者与传感器本征电容构成 LC 谐振电路，会改变信号频率响应、减缓前沿。平行走线产生互感串扰，引入固定时延偏差。

5.精密电源去耦与机械定位

传感器偏置供电端口必须紧邻 0402/0201 高频去耦电容，滤波电容紧贴焊盘、走线极短；偏置电阻选用低寄生薄膜电阻，远离射频通路。PCB 需预留精密定位孔或安装槽，以固定放射源支架与传感器间距。

影响：供电纹波与交流噪声会直接调制 LGAD 漏电流，带来定时偏移与随机抖动；机械结构不稳定会导致放射源与传感器相对距离/角度变化，引起信号幅度波动和时间游走。

(b)

选择：MMCX 侧卧型。

四个选项特点

(1) Flat Ribbon Cable & Connector

核心特点：多根平行铜导线紧密排列，通过 IDC（绝缘位移连接器）压接实现电气连接。

核心问题：

- 1.阻抗不可控：缺乏连续参考地平面，各信号线特性阻抗离散在 70-120 Ω 之间，与标准 50 Ω 严重失配
- 2.串扰严重：相邻线间寄生电容与互感耦合显著，信号完整性极差
- 3.无屏蔽：对外界工频电磁干扰极其敏感
- 4.带宽不足：可用带宽不足 100 MHz，远低于 LGAD 快脉冲所需频谱
- 5.时延不一致：不同通道物理长度差异大，可引入数百皮秒级传播时延偏差

总结：排线是为低速数字信号设计的，用于 GHz 级模拟快脉冲属于“物理原理上的误用”。

(2) RJ45 Ethernet Connector

核心特点：为 OSI 模型物理层数字通信定义的标准接口，典型应用为 1000BASE-T 千兆以太网。

核心问题：

- 1.变压器隔离：内部集成隔离变压器，严重衰减模拟脉冲中的直流与低频分量
- 2.非线性相位响应：对高频分量引入非线性相位失真，破坏脉冲波形
- 3.协议绑定：强制遵循 MAC 帧结构，无法透传原始模拟电流脉冲

4. 变压器饱和：强行传输未编码模拟信号会导致变压器饱和，脉冲上升沿被积分平滑
 5. 有限带宽：频率响应特性仅在 < 100 MHz 低频段平坦
- 总结：RJ45 是"数字通信专用接口"，其内部变压器和协议层从根本上阻止了模拟基带信号的透传。

SMA

核心特点：符合 MIL-STD-348 标准的螺纹锁定微波射频同轴连接器，半刚性同轴电缆配套使用。

核心优点：

1. 50Ω 标准阻抗，DC 至 18 GHz 带宽，VSWR < 1.15
2. 全频带极低插入损耗与平坦群时延，可传输 < 100 ps 阶跃脉冲
3. 螺纹锁定提供 50 磅轴向拉力，接触电阻重复精度达千分之一
4. 机械稳定性极佳，高低温循环或振动下无微动磨损

核心问题：

1. 体积过大：外径约 6.35 mm，4 路排布超出 4 cm 器件宽度限制
2. 高度过高：竖立型约 7.5 mm，侧卧型约 4 mm，与 0.7 mm 薄板极不协调
3. 多通道拥挤：4 路 SMA 在有限空间内排布困难，走线被迫绕行增加长度
4. 性能过剩：18 GHz 带宽远超 LGAD 脉冲频谱需求，代价无对应收益

总结：SMA 是电气性能优秀，但物理尺寸与本次测试的多通道高密度布局存在根本冲突。

MMCX

核心特点：SMA 的进一步小型化版本， 50Ω 特征阻抗，卡扣式推入锁定结构。

核心优点：

1. 50Ω 标准阻抗，DC 至 6 GHz 带宽，完全覆盖 LGAD ps 级快脉冲频谱
2. 外轮廓尺寸比 SMA 小约 40%，适合板卡密度极高的空间限制场景
3. 侧卧型高度仅约 1.5 mm，与 0.7 mm 薄板高度适配
4. 卡扣式连接拆卸便捷，适合实验室多批次重复测试
5. 寄生参数（引脚电容、电感）低于 SMA，对快脉冲边沿退化更小

核心问题：

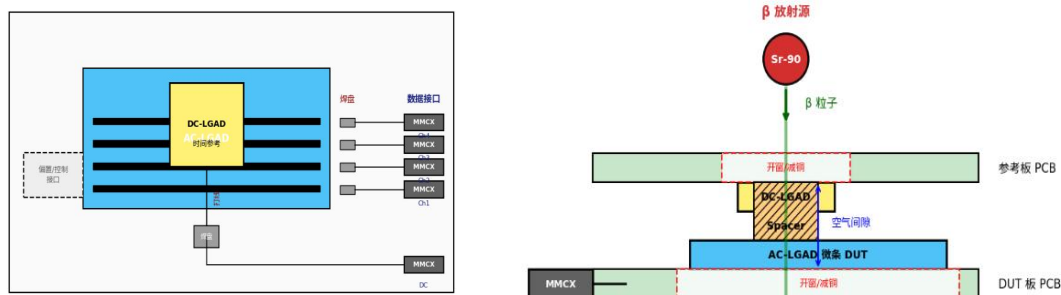
1. 机械保持力较弱：卡扣结构相比螺纹锁定，抗振动和抗拉扯能力稍逊
2. 插拔寿命有限：通常标称约 500 次循环，频繁插拔可能导致接触阻抗漂移
3. 薄板应力风险：在 0.7 mm 厚 PCB 上，反复插拔可能使接地焊盘承受应力，导致开裂或接触阻抗不可逆漂移

总结：MMCX 在电气性能、空间适配和便捷性之间取得了最佳平衡，其机械弱点在本实验室测试场景下可控。

本测试的核心目标是评估 AC-LGAD 器件的本征时间分辨率，其输出为前沿上升时间极短的快脉冲模拟电流信号。接口选型的核心准则为：不劣化信号上升沿、不引入额外的确定性时延偏差、不产生反射噪声。

在此准则下，Flat Ribbon 和 RJ45 因物理原理缺陷被首先排除。SMA 与 MMCX 同属 50Ω 同轴体系且电气属性均满足要求，但 SMA 的大体积与四通道高密度布局存在根本冲突，且其 18 GHz 带宽对本测试属性过剩。MMCX 以更小的寄生参数、更适配薄板的高度、足够的带宽覆盖、以及适合实验室环境的插拔便捷性，成为本测试板的最优选择。

(c)



Q3

反对 "多层球面洋葱皮"结构

物理维度

- 1.多重散射与入射角问题：球面导致所有方向的粒子均以斜入射（非垂直）击中硅传感器，有效硅厚度增加，多重散射（MS）效应恶化，尤其损害低动量径迹重建精度——而这正是内层径迹探测器的核心任务。
- 2.电荷收集与位置分辨非均匀：入射角在球面上连续变化，导致电荷在电极间的 sharing 模式复杂且各向异性，簇团重建和位置分辨难以统一校准。
- 3.径迹重建算法复杂度：球面坐标下径迹参数化（如球面螺旋线）远比圆柱坐标系复杂，增加 Kalman 滤波等重建算法的计算量和系统误差。

磁场维度

- 1.与螺线管磁场严重失配：现有探测器采用沿束流轴的螺线管磁场（如 CMS 4T），在圆柱坐标系中磁场均匀且与桶部硅条近似平行。球面与轴向磁场不匹配，球面各处的法向与磁场夹角连续变化，导致洛伦兹漂移方向和幅度各向异性，电荷收集和信号形状难以统一处理。
- 2.球面磁体技术不存在：若为了配合球面探测器而设计球面磁体，该技术极其复杂且从未实现，磁场均匀性无法保证，工程上完全不可行。

系统集成维度

- 1.传感器形状无法标准化：球面每层曲率不同，硅传感器需要大量不同形状（梯形、扇形、三角形等），无法批量生产和模块化更换，成本剧增且质量控制困难。
- 2.支撑结构与服务线路灾难：球面分层无法使用简单的圆柱/圆盘支撑结构，机械设计复杂；电缆、光纤、冷却管从球面引出困难，无法像桶部那样沿径向或轴向整齐排列，必然产生大量服务盲区和额外物质质量。
- 3.安装与维护不可行：球面探测器无法像现有桶部那样模块化滑入安装，维护更换单个模块需要拆解整个球壳，对撞机停机时间和维护成本不可承受。