

Q1: 位置分辨与动量误差的资源博弈

a) 推导相对动量误差简化表达式

(Q1. (a). 均匀磁场 B 沿 z 轴方向
带电粒子在横向平面内运动为圆弧, 曲率半径为 R

$p_T = 0.3BR$ (1)

简化模型为: 三层等间距的探测器平面分别位于 $z = -d, 0, d$
在粒子偏转方向 (设为 x 方向) 探测坐标 x_1, x_2, x_3

弧矢高 $S = x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2} = \frac{d^2}{2R}$ (2)

将(1)代入(2): $S = \frac{0.3Bd^2}{2p_T}$

$p_T = \frac{0.3Bd^2}{2S}$ (3)

测量点误差 $\sigma_x = \frac{P}{\sqrt{12}}$ (4)

由(2)得: $\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial x_3}\right)^2} \sigma_x = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma_x$ (5)

$\therefore \frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{\sigma_x}{S}$ (6)

将(3)(4)(5)代入(6): $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{6\sigma_x p_T}{Bd^2}$

综上, $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{P p_T}{0.3BL^2} \sqrt{\frac{60}{N+4}}$

b) 使动量误差缩小一半的三个独立方案

根据 $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{P}{BL^2} p_T$, 可在高动量极限下通过改变分母参数将误差减半:

1. 将硅微条 pitch P 减半
2. 直接使 σ_x 减半, 动量误差随之减半。要求读出通道密度加倍, 但原理上最直接。
3. 将磁场强度 B 加倍
4. 磁场增强使得相同动量的径迹曲率半径减小, 弧矢高增大, 从而 σ_{p_T}/p_T 减半。
5. 将径迹测量臂长 L 增大 $\sqrt{2}$ 倍
6. L^2 加倍, 动量误差减半。可通过整体放大桶部半径和长度 (或增加测量层覆盖的径向跨度) 实现。

c) 各方案的致命系统级代价

方案 1: pitch 减半

- 通道数与功耗爆炸: pitch 减半导致单位面积通道数翻倍。前端 ASIC 数量、功

耗、数据量急剧上升，需要更庞杂的供电与冷却系统，增加探测器总物质量，恶化多重散射，反而限制动量分辨的极限。

- *噪声与信噪比恶化*: 细条使传感器电容增大 (尤其 strip 长度不变时), 噪声增加。为维持信噪比可能需要更厚传感器或更高偏压, 导致漏电流增加, 进一步需要更强冷却。
- *组装与对准挑战*: pitch 减小到约 20–40 μm 级别时, 倒装焊或打线互连的精度要求极高, 模块良率和机械对准难度大大增加, 生产成本与工期呈非线性增长。
- *二值读出假设失效*: 当 pitch 缩小到与电荷扩散尺度可比时, 电荷分享不可忽略, 单纯二值读出无法给出 $\text{pitch}/\sqrt{12}$ 的分辨率, 反而需要模拟或集群读出, 进一步加剧功耗和数据量问题。

方案 2: 磁场加倍

- *超导磁体技术极限与造价*: 现有 HL-LHC 型探测器 (CMS4T) 已逼近 NbTi 超导螺线管的工程极限。将磁场翻倍至 8T 需要使用 Nb₃Sn 甚至高温超导, 磁体造价与研发风险呈指数上升, 储能和失超保护难题难以承受。
- *机械应力与支撑*: 磁场加倍时, 磁体线圈承受的洛伦兹力增大到原来的 4 倍, 需要更好的机械支撑结构, 质量和体积大幅增加。
- *低动量粒子接受度损失*: 强磁场使低 p_T 粒子螺旋半径过小, 无法穿越内层径迹探测器即被弯曲回束流管道, 导致径迹重建效率下降, 物理性能受损。
- *前端电子学兼容性*: 更高磁场可能对 ASIC、电源模块产生非 negligible 的霍尔效应和干扰, 需要专门抗磁加固, 增加研发周期和成本。

方案 3: 臂长 L 增大 $\sqrt{2}$ 倍

- *探测器总体积与质量激增*: 桶部半径和长度各增大 1.4 倍, 导致探测器总容积和质量至少增加 2.8 倍, 对实验大厅、支撑结构、安装过程提出极高要求, 成本成倍上升。
- *磁体容积跟随增大*: 若磁体需包裹整个径迹系统, 其内径、长度均需扩大, 超导线材用量和储能以更高幂次增长, 使磁体成本变得天文数字。
- *物质量与服务路径加长*: 更大的尺寸意味着服务 (电缆、光纤、冷却管) 长度增加, 物质量累积效应加重, 多重散射在高动量下虽非主导, 但会显著恶化动量分辨率的低动量区转折点, 并影响下游量能器性能。
- *径迹重建复杂度*: 增大间距若保持层数不变, 则层间距离变大, 径迹模式识别和虚假组合概率上升; 若加层则物质量更高, 与初衷矛盾。

d) 最不推荐的方案与补救分析

我选择方案 2（磁场加倍）为最不推荐方案。

在典型 HL-LHC/CEPC 条件下，超导磁体早已处在工程极限附近。HL-LHC 的 CMS 磁体场强 4T，CEPC 基线设计通常采用 2-3T 的螺线管磁体。将磁场提升到 8T（HL-LHC）或 4-6T（CEPC）将面临前所未有的技术挑战和资源消耗，而其对所有子探测器都会带来难以兼容的副作用，风险与收益严重失衡。

- **如果坚持该方案，需要从系统层面进行大规模补偿：**
 - *ASIC 与电子学*：所有前端 ASIC 必须采用特殊抗磁设计，且可能需嵌入局部屏蔽微结构，功耗会进一步增加。
 - *冷却与材料*：引入更激进的低温电子学或双相 CO₂ 冷却，将电子学与传感器一同冷却，但极大增加系统复杂度和物质量。
 - *机械与磁体*：采用“无铁”内探测器结构和主动屏蔽线圈减小对束线的影响；磁体本身必须转向高温超导内插线圈，代价巨大。
- **为什么在系统上不可行**：即使不计成本，8T 大口径螺线管在储能和应力上已超出当前材料科学的允许范围，需要数十年的专项研发。对撞机运行环境中，如此高场还将严重干扰束流光学的校正、导致同步辐射背景急剧增加（对 CEPC 尤为致命），且失超保护系统几乎不可能安全实现。因此，该方案在物理、工程、经济上均不成立，不应作为严肃的技术路径。

Q2: β 放射源时间分辨测试的 PCB 设计

a) PCB 设计的关键原则

1. **最小化寄生电感和电容**
2. 传感器到第一级放大器（或连接器）的引线必须尽可能短，打线焊盘紧邻传感器边缘，PCB 走线宽且短。这样可保留信号快速的上升沿（<几百皮秒），减小 RC 展宽导致的定时抖动。
3. **阻抗控制与信号完整性**
4. 将关键走线设计为 50 Ω 单端传输线，精确计算线宽与介质厚度。阻抗失配造成的反射会引起基线振荡和时间游走，直接恶化时间分辨率。
5. **低噪声接地与屏蔽**
6. 采用完整的地平面和共面波导结构，使返回路径短且电感低。相邻通道之间用地线隔离，抑制串扰，避免串扰引起的定时偏移和假触发。
7. **信号路径等长与对称布局**

8. 参考 DC-LGAD 和待测 AC-LGAD 各通道的信号走线长度应严格匹配，以消除系统相对时延。同时也便于离线或在线的时间对齐校准，保证物理极限分辨率不被系统歪斜掩盖。

9. 最小化材料预算与粒子路径扰动

10. β 粒子在到达传感器前应尽量少穿过 PCB 基材。可在传感器下方开槽、减薄或使用薄柔性板；传感器上方避免不必要的铜皮和阻焊层，以降低能损歧离和散射角涨落，这些涨落会直接转化为时间游走和符合时间展宽。

b)数据接口选择：MMCX 连接器

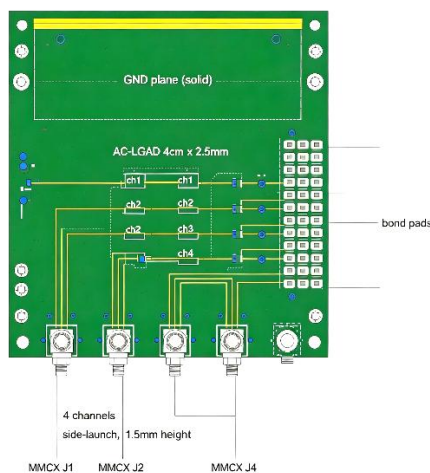
选择 MMCX 连接器（侧卧型，高度约 1.5mm）。

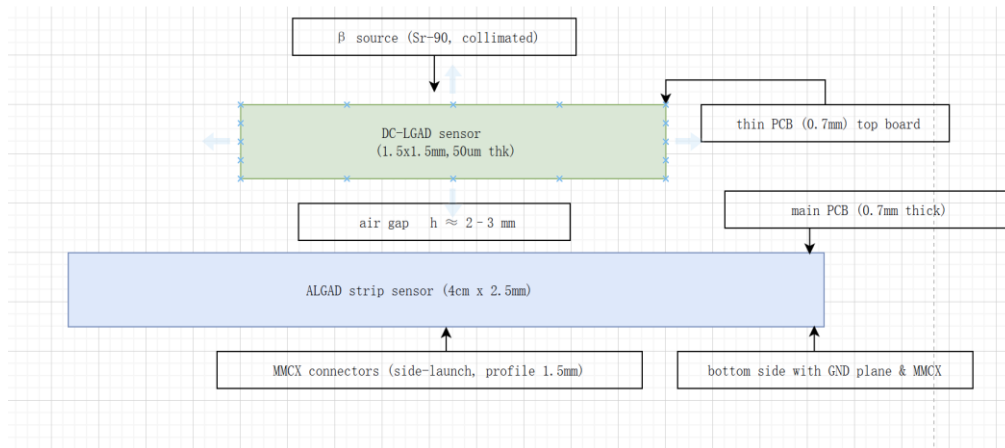
原因：

- 它具有 DC-6GHz 的优良射频带宽，能无失真传输 AC-LGAD 产生的亚纳秒脉冲，保持快速上升沿。
- 体积小、高度低（侧卧型 1.5mm），利于薄型 PCB 堆叠，若采用双板设计也不额外增加过多间距。
- 卡扣式连接稳固，适合实验室测试频繁插拔且占用空间少，可轻松实现 4 通道 + 参考通道的密集排布。
- 相比之下，RJ45、扁平排线带宽不足，会抹平快信号；SMA 射频性能好但高度较大（侧卧 4mm），不利于紧凑布局和缩短打线距离。

c)俯视图与剖面示意图

采用双板设计：上层小板承载参考 DC-LGAD，下层大板承载待测 AC-LGAD 微条。 β 源（Sr-90）从上向下照射，粒子依次穿过参考传感器、空气隙、待测传感器。





- 传感器之间的距离（空气隙）**粗略估计为 2-3mm**，综合考虑打线高度、机械公差以及尽量减少 β 粒子多次散射，同时又避免上下传感器电接触短路。
- β 源底部开窗，使粒子几乎垂直穿透两片传感器，产生符合时间戳信号。
- 上层参考板的 MMCX 通过柔性半刚性电缆导出，与下层板的四个 MMCX 一同接入时间测量电子学。

Q3: 拓扑结构的选择——为何不建一个“球”？

我明确反对“多层球面洋葱皮”提案，坚持发展优化的“圆柱形桶部+垂直端盖”拓扑，并在此基础上引入小角度圆锥形端盖以进一步优化物质质量分布。

1)物理维度

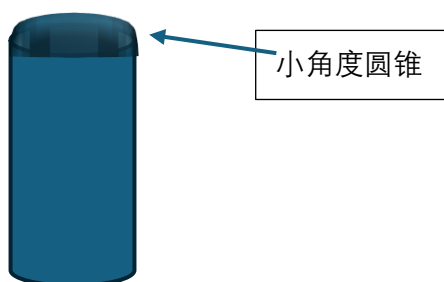
- **质快度覆盖的天然匹配**：强子对撞机中末态粒子流密度主要在中心快度区集中，且分布近似沿束流轴柱对称。圆柱形桶部按径向分层、恒定 z 长度，恰好提供了均匀的快度覆盖；垂直端盖则在 $|\eta|$ 较大区域自然延伸。球面结构会导致各“纬度”处探测器层数不一致，产生不规则的快度间隙和叠层，物理性能不均匀。
- **径迹重建和模式识别**：在轴向均匀磁场中，径迹弯曲发生在 $r-\phi$ 平面。圆柱桶部的测量层按径向 r 分层，每条径迹的击中点呈简单几何排列，便于快速模式识别和卡尔曼滤波。球面各层的半径随极角变化，使径迹在不同方向上的测量臂长和击中间距不恒定，极大增加重建算法复杂度和计算成本。

2)磁场维度

- **与螺线管磁场的固有匹配：**几乎所有现代对撞机探测器都采用沿束流方向的螺线管磁场，其场线平行于圆柱桶部的轴线。径迹在 $r-\phi$ 面的弯曲仅依赖于 B_z 。圆柱型径迹系统完全适应这种场结构，端盖区域虽弯曲线与探测器平面斜交，但物理分析已成熟。球面结构无法改变这一事实——我们不可能为球面提供径向磁场（那将需要完全不同的磁铁构型，如螺绕环，技术上不可行）。若仍用轴向磁场，球面各层只是“削足适履”，没有任何好处，反而使某些区域径迹近垂直于球面，失去弧矢高放大效应，动量分辨变差。
- **磁体与探测器的集成：**超导螺线管与低温恒温器本身就是圆柱形；球面径迹系统要求磁体线圈容纳一个外部球面体积，这将浪费大量无用空间，增加磁体储能而不带来相应的物理收益。

3)系统集成维度

- **模块化与可制造性：**圆柱桶部可用相同矩形或梯形模块（stave）拼成多边形，端盖用扇形模块（petal）拼成圆盘，制造、测试、安装高度标准化。球面每一纬度环都需要不同曲率半径的局部球面模块，模具、工装、测量基准极其繁杂，成本不计其数。
- **服务布线与冷却：**桶部和端盖的服务（电缆、光纤、冷却管道）可沿径向或沿盘片周向规则铺设，经由圆柱端部集中引出。球面拓扑中，服务线路必须在三维曲面上辐射状分布，汇集点无法规整，导致大块死区和不均匀物质量，严重劣化探测器性能。
- **对准与稳定性：**圆柱加端盖可通过端面法兰和内筒建立清晰的机械基准，易于激光跟踪对准。球面结构缺乏平坦基准面，热形变和重力变形在各处不一致，实现微米级对准的可行性极低。



- 桶部仍为圆柱分层，端盖改为略带锥角的盘片（倾斜几度），可使得端盖模块上的粒子入射角更接近垂直，减少传感器集群宽度、优化电荷收集和时间性能。
- 这种结构保留了圆柱对称的所有工程和物理优势，只需在端盖模块设计上稍作角度适配，代价极小，收益明显。
- 它比球面结构更优，因为球面牺牲了所有标准化与磁场匹配的便利，只换来一个在物理上并无实质好处的几何强迫。

