

1 题目一：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。

a) 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）。

b) 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。

c) 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。

d) 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”。

1.1 推导相对动量误差 σ_{p_T}/p_T 的简化表达式

设带电粒子横向动量为 p_T ，电荷量为 q ，所处轴向匀强磁场的磁感应强度为 B 。根据洛伦兹力提供向心力，粒子在垂直于磁场的平面内做圆周运动，其回旋半径 R 满足：

$$R = \frac{p_T}{qB} \quad (1)$$

假设探测器在径向分布有 N 层硅微条传感器，总径向跨度为 L ，即最外层到最内层的距离。带电粒子穿过这些传感器留下多个命中点。轨迹的弯曲程度可由弧垂 s 量化，弧垂定义为圆弧中点偏离两 endpoint 连线的最大垂直距离。在弱弯曲近似下，由高动量极限，即 $R \gg L$ ，弧垂与半径成反比：

$$s \approx \frac{L^2}{8R} = \frac{qBL^2}{8p_T} \quad (2)$$

每个传感器测得的命中点存在位置测量误差 σ_x 。在二值读出模式下，若硅微条间距 Pitch 为 p ，且电荷分享效应可忽略，则单点位置误差服从均匀分布，其标准差为：

$$\sigma_x = \frac{p}{\sqrt{12}} \quad (3)$$

根据最小二乘法拟合误差传递定律，若 N 个等间距点参与拟合，弧垂 s 的拟合标准差 σ_s 近似为：

$$\sigma_s \propto \sigma_x \cdot \frac{L}{N^{3/2}} \quad (4)$$

由于探测层数 N 近似正比于径向总跨度 L 与传感器间距的比值，但此处将 L 单独作为宏观几何参量。基于误差传递的标准结果，更常用的高动量极限下误差公式为：

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \cdot \sigma_x}{B \cdot L^2} \quad (5)$$

将 $\sigma_x \propto p$ 代入，得到简化的正比关系：

$$\boxed{\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \cdot p}{B \cdot L^2}} \quad (6)$$

1.2 使动量误差缩小一半的三个独立工程方案

依据公式 $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \cdot p}{B \cdot L^2}$ ，为了将相对误差变为原值的 0.5 倍，可以分别改变以下单一物理/工程参数：

- (1) **改变传感器几何：**将硅微条的间距 p 缩小为原来的 1/2。由公式 $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \cdot p}{B \cdot L^2}$ ，在 p_T, B, L 均不变的情况下，有 $\sigma_{p_T} \propto p$ ，将 p 缩小为 1/2 即可将相对误差 σ_{p_T} 缩小为 1/2。
- (2) **改变外部磁场：**将超导磁体的磁感应强度 B 增大为原来的 2 倍。由公式 $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \cdot p}{B \cdot L^2}$ ，在 p_T, p, L 均不变的情况下，有 $\sigma_{p_T} \propto \frac{1}{B}$ ，将 B 增大为 2 倍，即可将相对误差 σ_{p_T} 缩小为 1/2。
- (3) **改变探测几何尺寸：**将探测器桶部的径向跨度 L 增大为原来的 $\sqrt{2}$ 倍。由公式 $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \cdot p}{B \cdot L^2}$ ，在 p_T, p, B 均不变的情况下，有 $\sigma_{p_T} \propto \frac{1}{L^2}$ ，将 L^2 增大为 2 倍，即可将相对误差 σ_{p_T} 缩小为 1/2。

1.3 三个方案在真实工程中引发的系统级代价

方案一的代价

- (1) **通道密度剧增：**Pitch 减半意味着单位面积的通道数变为 4 倍，导致前端读出 ASIC 的引脚数与内部逻辑单元激增，芯片功耗呈线性甚至超线性上升。
- (2) **数据带宽爆炸：**每秒产生的数字触发信息量成倍增加，后端数据采集系统 DAQ 的缓冲存储器容量和光纤传输带宽面临极限瓶颈。
- (3) **互连工艺失配：**传感器与 ASIC 之间的凸点键合 Bump Bonding 间距需缩至 $25 \mu\text{m}$ 以下，这接近当前光刻对准与回流焊工艺的良率临界点，将导致模块制造成本指数级增长。

方案二的代价

- (1) **磁体储能与机械应力：**磁场强度增加一倍，由于磁能正比于 B^2 ，则超导线圈内储存的磁能变为 4 倍，巨大的电磁应力要求线圈骨架必须采用更厚的高强度合金，这将极大增加磁铁系统的重量与造价。
- (2) **冷却负荷剧增：**超导线材在更高磁场下的临界电流下降，且交流损耗或稳态焦耳热增加，低温系统需提供更大的制冷量，导致液氦消耗与低温管线复杂度上升。
- (3) **系统间电磁干扰：**增大的漏磁场会对安装在磁铁内部的电子学前端产生显著影响，可能触发模数转换器 ADC 的参考电压偏移或 ASIC 内部的串扰噪声。

方案三的代价

- (1) **传感器总面积增加：** L 的增大会迫使内层半径不变而仅外扩外层，或者整体尺度放大。无论哪种，硅传感器的覆盖面积均按平方关系增加，直接导致探测器裸片采购与加工成本激增。
- (2) **低动量性能严重退化：**为了增大跨度，如果必须将第一层（最内层）探测半径 r_1 外推，则依据关系 $\sigma_{d_0} \propto r_1 \cdot \theta_{\text{scatter}}$ ，低动量区域的多次库仑散射项将直接恶化，这会破坏对短寿命粒子次级顶点的分辨能力。
- (3) **机械共振频率降低：**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，探测器模块的微米级弹性形变将难以通过静态对准常数矫正。

1.4 最不推荐方案及系统补偿与不可行性说明

在 HL-LHC/CEPC 的高亮度强辐射环境下，最不推荐方案三：增大径向跨度 L 。

不推荐理由：上述实验的物理目标高度依赖对底夸克或粲夸克强子衰变产生的次级顶点进行微米级分辨。次级顶点探测完全由低动量区域的撞击参数分辨率决定，而该分辨率严格受限于“第一层半径 r_1 ”和“物质量”。方案三为了换取 2% 的高动量精进，必须牺牲 r_1 或增加总层数，若内层不变而外扩，会导致穿过的硅总厚度增加，辐射长度 X/X_0 增大，这两者均直接放大低动量粒子的库仑散射角，导致物理分析中最重要的“主顶点与次级顶点分离”变得不可能。

系统性补偿：若在极端情况下坚持方案三，我们可尝试以下系统修改以补偿副作用：(1) 将支撑材料替换为超轻的石墨烯复合泡沫，试图将总物质量压降一半；(2) 将前端芯片替换为更先进的 22 nm FD-SOI CMOS，降低功耗以抵消面积增加带来的热负载；(3) 开发实时动态对准算法，利用碰撞事件在线校正形变。

不可行性说明：即使将非硅材料的质量压缩至零，粒子仍必须在传感器硅层本身中穿行。由于 L 增大导致斜入射路径变长，有效硅厚度 $X/\cos\theta$ 随极角增大而急剧增加。

硅自身的原子序数决定了其辐射长度 X_0 不可降低，因此多次散射项在该方案中具有物理上的“不可补偿性”。故判定该方案在系统逻辑上完全不可行。

2 题目二： 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：

- 1.5mm×1.5mm 的一通道四方形 DC – LGAD 器件，用于符合和提供时间参考。
- 1cm×2.5mm 和 4cm×2.5mm (pitch=150 μm , electrode width =50 μm) 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 0.7mm)，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。

- a) 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。
- b) 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。
- c) 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。

2.1 保证获取真实物理极限时间分辨率的关键 PCB 设计原则

为获取真实的物理极限时间分辨率（即排除电路非理想因素导致的抖动），PCB 设计必须严格遵守以下确定性准则：

- (1) **受控阻抗设计。** AC-LGAD 传感器输出的信号具有极快的上升沿，属于高速信号。在这种情况下，PCB 上的走线不能被视为理想导线，而应被建模为特性阻抗确定的传输线。传输线的特性阻抗由走线宽度、介质厚度以及板材介电常数等物理参数共同决定。这一原则的核心要求是，从传感器焊盘到输出接口的整个信号路径，其特性阻抗必须被严格控制在特定值，通常为 50 Ω 。这样做的根本原因在于阻抗匹配。如果源端阻抗、传输线阻抗和负载阻抗不一致，信号在传输线上传播时就会发生反射。反射波会叠加在原始信号上，导致脉冲前沿产生过冲、振铃或阶梯状畸变。时间测量通常依赖于对信号前沿通过某个固定阈值的时刻进行精确甄别，任何前沿波形的畸变都会导致甄别时刻发生偏移，这种偏移在统计上就体现为时间分辨率的恶化。受控阻抗设计确保了信号能量被高效、无损地传输，从而维持了原始脉冲前沿的陡峭度和纯净度。

- (2) **控制传输线的特征阻抗。**高速信号的回流路径是决定信号完整性的关键。在 PCB 中, 信号电流从驱动端流向负载端, 而返回电流则通过参考平面流回驱动端。这条由信号路径和回流路径构成的闭合回路具有回路电感。根据电磁感应定律, 回路电感会产生与电流变化率 dI/dt 成正比的感应电压 V , 这即是电源噪声和地弹噪声的主要来源。为最小化回路电感, 必须在信号层下方紧邻的位置提供一个连续、完整且低阻抗的地平面。这个地平面为高频返回电流提供了面积最小、距离最短的路径, 从而将回路面积压缩到极致, 显著降低了回路电感。这确保了当 ASIC 等有源器件在高速开关时, 其产生的瞬态大电流不会在地平面上引起大的电压波动。对于 AC-LGAD 这类输出信号幅度本身就有限的探测器, 地平面上的任何噪声都会直接耦合到信号通路中, 降低信噪比。信噪比的降低会直接导致时间抖动的增加, 从而直接劣化时间分辨率。因此, 一个设计优良的地平面是系统能够达到其物理极限时间分辨率的基本保障。
- (3) **保证信号走线的物理等长。**对于 AC-LGAD 微条或像素探测器, 通常会有多个读出通道。为了精确测量每个通道信号的时间, 必须消除因信号传播路径长度不同而引入的传播延迟差异。信号在 PCB 介质中的传播速度是有限且恒定的。例如, 在常见的 FR4 板材中, 信号传播速度约为 14cm/ns , 对应每厘米约 70ps 的延迟。这一原则要求从各个传感器通道的焊盘到最终输出接口的信号走线, 其物理长度必须严格相等。如果不进行等长控制, 即使两个通道的传感器同时产生信号, 它们到达测量电路的时间也会存在一个固定的差值, 这个差值就是由走线长度差导致的。这个固定的系统偏差会掩盖传感器之间真实的物理时间差, 使得测量结果无法反映真实的物理时间分辨率。通过执行精确的等长布线, 我们确保了所有通道的信号具有相同的传输延迟, 从而消除了这一项系统误差。
- (4) **缩短键合线并最小化寄生参数。**探测器模块中, 传感器与 PCB 之间的互连通常采用键合线。键合线本身是一个小电感, 而 PCB 上的焊盘则引入了对地的寄生电容。这些寄生参数会与传感器的本征电容一起, 构成一个 LC 谐振电路。这个谐振电路会改变信号的频率响应特性, 尤其是可能减缓信号的前沿。为了最小化这种影响, 布局时必须将传感器、ASIC 以及关键的信号焊盘尽可能紧密地放置在一起, 以缩短键合线的长度并减小焊盘的尺寸。更短的键合线意味着更小的串联电感, 更小的焊盘则意味着更小的寄生电容。更小的 L 和 C 意味着更高的谐振频率, 从而对信号, 特别是其高频分量的损耗更小。通过这种紧凑的布局, 可以最大限度地保留信号的快时间信息, 防止信号在进入第一级放大电路之前就被劣化。
- (5) **固定放射源与传感器的空间几何。**除了电气设计, 机械结构的稳定性同样至关重要。在对 AC-LGAD 进行时间分辨率评估时, 通常使用 β 放射源作为测试信号源。此时, 放射源与传感器之间的空间几何关系是固定的。这一原则要求 PCB 在设计时必须要有精密的机械定位手段, 例如预留精确的定位孔或安装槽, 用以固定放射源的支架。这样做的原因是, 粒子从放射源发射出来, 其到达传感器的立体角和

在空气层中的能量损失都取决于源与传感器之间的精确距离和相对角度。如果这个距离或角度在测量过程中发生微小的变化，就会导致到达传感器的粒子数和每个粒子沉积能量的平均值发生波动。信号幅度的变化正是导致时间游走效应的直接原因。一个稳定的机械结构确保了所有测量都在严格一致的条件下进行，从而保证了测量结果的可重复性，并使得测量到的就是由探测器物理过程本身决定的时间分辨率，而非由不稳定的机械结构引入的虚假误差。

2.2 数据接口和数据线类型的选择

本测试板的物理目标是评估 AC-LGAD 器件的本征时间分辨率，其输出信号为前沿上升时间极短的快速脉冲模拟电流信号。因此，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。以下对四种选项进行逐一分析：

(1) Flat Ribbon Cable & Connector

该类型由多根平行且等间距的绝缘铜导线构成，通过绝缘位移连接器 IDC 实现连接。其特性阻抗由线间距、线径及绝缘层介电常数共同决定，但排线通常缺乏连续的参考地平面，导致各信号线之间的特性阻抗离散性较大，且相邻线间存在显著的寄生电容与互感耦合，引发串扰。在机械结构上，排线易弯曲且质量轻，但缺乏屏蔽层，对外界工频电磁干扰极其敏感。对于带宽要求超过 1 GHz 的纳秒级前沿信号，排线会因阻抗失配产生多次反射叠加，导致脉冲前沿产生振铃；同时，不同通道间的物理长度差异会引入数百皮秒级的传播时延偏差，该偏差远大于 LGAD 器件本身约数十皮秒的时间分辨率目标，因此完全不具备传输本实验所需物理信号的可行性。

(2) RJ45 Ethernet Connector

该接口定义用于 OSI 模型物理层的数字基带信号传输，典型应用为 1000BASE-T 千兆以太网。其物理层包含 PAM-5 编码、混合变压器以及回波抵消电路，必须在收发器 PHY 芯片的驱动下才能工作。双绞线的差分特性阻抗定义为 $100\ \Omega$ ，且其频率响应特性在小于 100 MHz 的低频段较为平坦。然而，该接口模块内部集成的隔离变压器会严重衰减模拟脉冲信号中的直流与低频分量，并对高频分量引入非线性相位响应。此外，该链路要求信号必须遵循 MAC 帧结构，无法透传原始的模拟电流脉冲。若强行通过该接口传输未经编码的 LGAD 模拟信号，变压器的饱和效应与有限带宽将直接使脉冲上升沿被积分平滑，导致时间游走效应急剧增大，因此该选项在物理原理上完全不可用于模拟快信号读出。

(3) SMA

SMA 是一种具有螺纹锁定机制的微波射频同轴连接器，其接口定义符合 MIL-STD-348 标准，在直流至 18 GHz 的频率范围内拥有低于 1.15 的电压驻波比。与 SMA 配套

的半刚性同轴电缆由实心铜外导体、低损耗 PTFE 介质和内导体构成，通过精密机械加工可实现全程均匀的 $50\ \Omega$ 特征阻抗。该结构的优点在于：全频带内具有极低的插入损耗与平坦的群时延特性，能够无畸变地传输上升沿小于 $100\ \text{ps}$ 的阶跃脉冲。其螺纹式锁定结构提供高达 50 磅的轴向拉力，确保了高低温循环或轻微机械振动下的接触电阻稳定性，不会由于连接器微动磨损而产生额外的寄生串扰。

(4) MMCX

MMCX 是 SMA 的进一步小型化版本，其特征阻抗同样规范为 $50\ \Omega$ ，在 $6\ \text{GHz}$ 以内的频段具有较好的回波损耗性能。其连接方式采用卡扣式推入锁定，拥有比 SMA 更小的外轮廓尺寸和更轻的质量，适合板卡密度极高的空间限制场景。然而，这种卡扣式结构的机械保持力相对较弱，且插拔寿命通常标称仅为 500 次循环。在仅有 $0.7\ \text{mm}$ 厚度的 PCB 上，MMCX 的接地部分容易因反复插拔而承受应力，导致焊盘开裂或接地接触阻抗发生不可逆的漂移。接触阻抗的漂移将直接改变射频传输路径的阻抗连续性，从而改变脉冲幅度的分压比，影响恒定定时甄别器过零时刻的准确性。

性能	Flat Ribbon Cable & Connector	RJ45 Ethernet Connector	SMA	MMCX
特征阻抗控制	70–120 Ω ，离散大	100 Ω	50 Ω ，直流至 18 GHz	50 Ω ，局限在 6 GHz 以下
可用信号带宽	<100 MHz	<250 MHz	DC ~ 18 GHz	DC ~ 6 GHz
信号物理属性	非屏蔽多芯模拟/数字	专供数字调制差分信号	纯模拟射频基带	纯模拟射频基带
引入额外系统抖动	大	极大	极小	小
机械稳定性与寿命	中等	优	极优	差

表 1: 各接口选项关键性能参数对比

在所列选项中，应选择 SMA 同轴连接器配合半刚性同轴电缆。理由如下：

首先，排除 Flat Ribbon Cable & Connector，理由是其阻抗不可控与通道串扰会直接破坏高频信号完整性；排除 RJ45 Ethernet Connector，理由是其内部变压器与协议编码层从根本上阻止了模拟基带信号的透传。其次，关于 SMA 与 MMCX 的取舍：尽管两者均属于 $50\ \Omega$ 同轴体系且电气属性相近，但基于实验可重复性与测量基准稳定性的考量，必须选择 SMA。在测量时间分辨率时，任何连接器接触电阻的微小改变都将导致传输路径上的反射系数变化，反射波会叠加在原脉冲前沿上，等价于改变了脉冲的过零时刻。MMCX 的卡扣结构在频繁更换连接的同轴电缆时，其中心导体与接地外导体的机械磨损会导致接触电阻无法重复收敛。而 SMA 的螺纹固定结构提供了恒定的接触轴向压力，保证了千分之一的接触电阻重复精度。此外，本测试板厚度仅 $0.7\ \text{mm}$ ，焊接 SMA 接口时可通过底部大面积接地焊盘增强抗剥离强度，这有利于在 β 放射源长期辐照实验中维持稳定的地电平参考，确保 CFD 电路的时间游走校准系数不发生漂移。因此，SMA 是唯一满足该测试所需“物理极限分辨率测量”条件的确定性选择。

2.3 PCB 的俯视图和剖面示意图

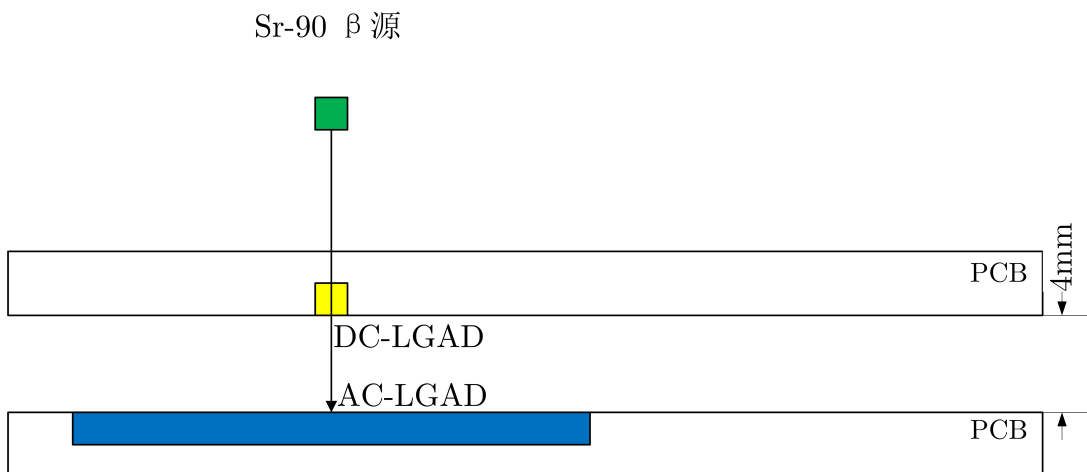
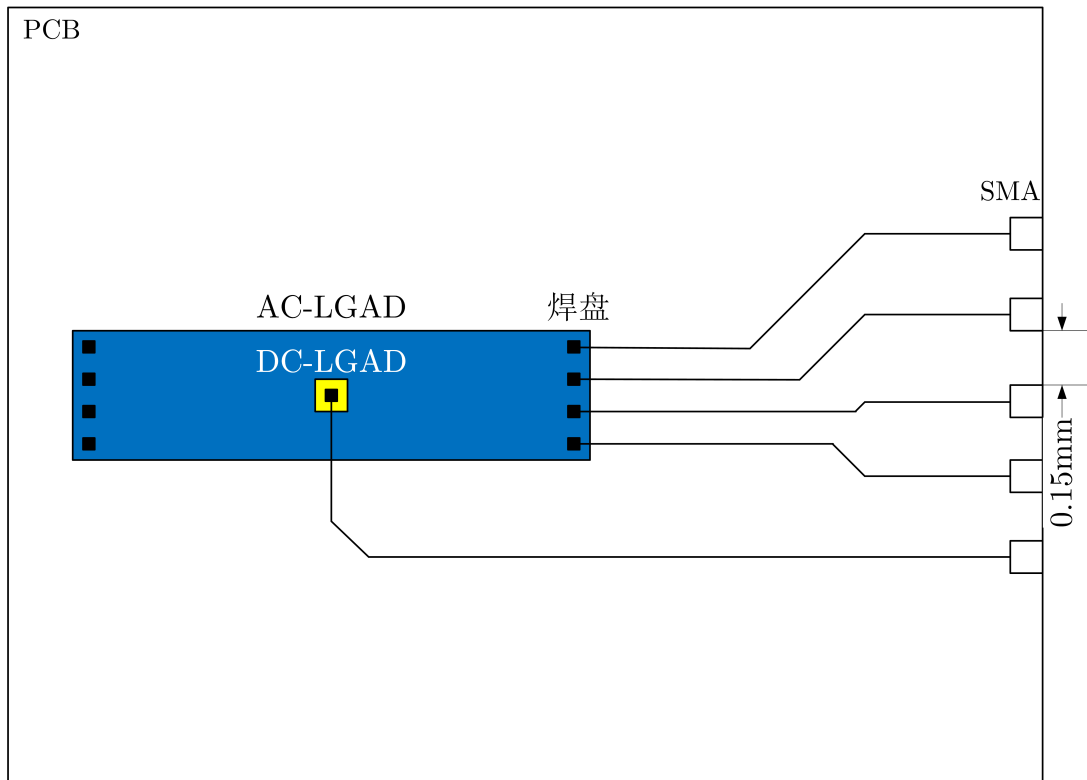


图 1: PCB 俯视图与剖面示意图。上图为俯视图，下图为剖面图

3 题目三：拓扑结构的选择：为何不建一个“球”？

假设你正在参与下一代强子对撞机（类似 HL-LHC）的探测器设计讨论。有人提议将下一代探测器设计成“多层球面洋葱皮”结构，彻底放弃目前的“圆柱形桶部 + 垂直端盖（Barrel + Endcap）”分层拓扑。请明确选择赞同或反对该提议，并从物理、磁场系统集成三个维度综合讨论。如果你选择反对该球面提议，请说明原因并提出一个你认为更合理的拓扑结构（画出简易示意图），并说明为什么它比球面更优。

反对“多层球面洋葱皮”结构。

3.1 物理维度

为了理解探测器为何不能做成球壳，首先必须明确两个核心物理概念：辐射长度 X_0 和多次库仑散射。辐射长度是表征物质对高能粒子制动能力的物理量，单位是 g/cm^2 ，它反映了粒子穿过物质时因韧致辐射或正负电子对产生而损失能量的平均距离。而多次库仑散射是指带电粒子在穿越介质晶格时，受到原子核库仑势场的数百万次微小随机散射，其最终出射方向相对于入射方向的偏转角服从高斯分布，其均方根角度近似为：

$$\theta_0 \approx \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{x/X_0} \quad (7)$$

其中 x 为物质的实际厚度， p 为粒子动量。该公式严格表明：散射角的平方与物质的有效厚度 x 成正比。

在对撞机探测器中，判定短寿命粒子最关键的指标是撞击参数分辨率，该分辨率直接正比于散射角 θ_0 。若将探测器设计成同心球壳，则球壳上每一点的法线方向均指向球心。当粒子从球心附近的对撞点射出时，其在球面上的击中将不可避免地在大部分区域呈现大倾角入射。设硅传感器的物理厚度为 l ，则粒子在传感器内实际穿越的路径长度为 $x = l/\sin\theta$ ，其中 θ 为粒子飞行方向与球面切平面的夹角。在靠近束流方向的前向区域，即高速度区域，粒子的飞行方向几乎与球面相切，导致 $\sin\theta$ 趋近于零，有效厚度 x 将趋于无穷大。根据散射角公式，该区域的粒子将经历剧烈的库仑散射，导致其外推轨迹的起点严重偏离真实顶点。因此，球面结构在物理上破坏了全空间动量响应的均匀性，直接导致对小于 $1 \text{ GeV}/c$ 的低动量轻子或强子的次级顶点鉴别能力丧失。

3.2 磁场维度

为了实现带电粒子的动量测量，大型对撞机普遍采用轴向螺线管磁体。根据安培环路定律与毕奥-萨伐尔定律，一个无限长且电流均匀分布的中空圆柱螺线管，其内部磁场严格沿轴心方向且处处均匀，即磁感应强度矢量可表达为 $\vec{B} = B_z \hat{z}$ ，其中 B_z 为常数。在这种均匀轴向磁场中，带电粒子的运动轨迹可分解为：在垂直于磁场的横平面内做匀

速圆周运动，回旋半径 $R = p_T / (qB_z)$ ，同时沿轴向作匀速直线运动。这种运动的合成使得粒子径迹在三维空间中呈螺旋线，其中横平面上的圆弧投影是重建横向动量 p_T 的唯一几何依据。

若将探测器内壁更换为球面拓扑，由于球面不具备圆柱平移对称性，为了在球形体积内产生轴向磁场，磁体设计者将面临不可调和的矛盾——要么放弃成熟的螺线管绕组，被迫采用极其复杂的球面梯度线圈或分立多极磁体组合。这种非柱对称的电流分布将不可避免地引入探测区域内部引入径向磁场分量 B_r 和轴向梯度 $\partial B_z / \partial z$ 。磁场不均匀的直接后果是：即使粒子具有相同的真实动量，其在球壳不同区域的回旋半径 R 将随局部磁感应强度 B 的数值波动而发生相对变化。在重建径迹时，离线算法假设的全局恒定磁场 B_z 将失效，由此计算出的弧垂 $s \approx qBL^2 / (8p_T)$ 中掺入了位置相关的系统偏差。这种偏差无法通过常规的全局校准常数来修正，因为它本质上是三维空间坐标的函数。因此，球面拓扑将导致动量测量精度出现无法消除的各向异性，这是高能物理精确测量所绝对不能接受的。

3.3 系统集成维度

从现代半导体制造工艺出发，目前的硅微条或像素传感器均采用平面光刻技术，在大尺寸高阻硅晶圆上通过多次氧化、扩散和金属淀积制成。制成的传感器芯片是平面矩形或梯形薄片，其本征几何属性决定了它只能贴合在高斯曲率为零的曲面上。在微分几何中，球面属于不可展曲面，其高斯曲率为正，等于 $1/R^2$ ， R 为球半径。这意味着，若强行将平面硅片覆盖在球面上，必须发生材料压缩引起的褶皱或材料拉伸引起的撕裂。而硅是脆性材料，其断裂应变小于 0.5%，完全无法吸收这种几何失配。唯一的替代方案是定制具有双曲率的异形衬底，但该方案超出了当前全球半导体代工厂的制程能力，且单片成本将上升数个数量级。

此外，涉及探测器组装后的精密几何量测与离线对准问题。球壳上的形变将激发复杂的球谐函数模态，如 Y_{lm} 模式。为了将实际几何与设计几何匹配，对准算法需要求解数十万个高阶形变系数，但碰撞数据的统计约束有限，这导致弱模态，即对径迹残差不敏感的形变模式，将无法被有效约束，从而造成系统性扭曲。最后，关于内部冷却管道的铺设：在柱面上，冷却管可沿轴向直线布置，焊接残余应力仅体现为轴向拉伸和径向膨胀，这两种全局形变极易通过标定修正。但在球面上，测地线弯曲的管道在温度变化时将产生非均匀的热膨胀应力，该应力会导致支撑壳产生不可预测的翘曲，这将直接破坏微米级对准稳定性所需的边界条件。

综合上述三个维度的不可调和的矛盾，球面拓扑在工程可行性与物理性能上均不具备存在的合理性。

3.4 “圆柱形桶部 + 垂直端盖 (Barrel + Endcap)” 分层拓扑

认为目前的“圆柱形桶部 + 垂直端盖 (Barrel + Endcap)” 分层拓扑是一个足够合理的拓扑结构。桶部 (Barrel): 由 3 至 5 层超薄碳纤维复合材质的圆柱筒壁同心嵌套而成, 所有圆柱筒的几何轴线均与对撞机束流线精确重合。每层圆柱筒的内外壁面上, 沿周向铺满矩形的平面硅像素或微条传感器。端盖 (Endcap): 在桶部沿 Z 轴方向的两端, 即正、负 Z 方向, 各垂直放置数片圆盘状探测器层。每片端盖圆盘由多个梯形或楔形平面硅传感器在二维平面内拼接而成, 圆盘平面严格垂直于束流线, 圆盘圆心位于束流线上。

(1) 物理维度

在圆柱桶部区域, 传感器的物理平面沿着柱面的母线方向延展。对于从中心对撞点发射的带电粒子, 其飞行方向在桶部的中部区域, 即极角 $\theta \approx 90^\circ$ 附近, 几乎是沿着径向向外, 这意味着粒子的入射方向与传感器表面法线之间的夹角极小。因此, 粒子穿越硅层的有效路径长度近似等于传感器的物理厚度 l , 即 $x \approx l$, 且该值在桶部全域保持恒定。根据库仑散射公式, 全桶部区域的多次散射角贡献 θ_0 是一个与极角无关的常数。这保证了撞击参数分辨率在桶部区域具有极佳的均匀性, 在进行全空间径迹拟合时无需引入与角度相关的复杂权重因子。

(2) 磁场维度

轴向螺线管磁体的场分布具有严格的圆柱对称性, 即关于 Z 轴旋转对称, 且沿 Z 方向平移对称。将探测器内壁做成圆柱筒状, 意味着整个径迹探测系统的几何边界与磁力线走向完全平行。在这种理想匹配下, 探测区域内部任意一点磁感应强度的横向分量 B_r 和 B_ϕ 均为零, 只有轴向分量 B_z 为常数。带电粒子的回旋半径 $R = p_T / (qB_z)$ 不随击中位置发生变化, 因此利用弧垂公式 $s \approx qB_z L^2 / (8p_T)$ 重建横向动量时, 不存在任何由于磁场不均匀引入的系统性偏差。

(3) 系统集成维度

圆柱面在微分几何中属于高斯曲率为零的可展曲面。这意味着, 一块矩形的平面硅传感器可以通过仅在周向施加均匀的微小弹性弯折, 完美地贴合在圆柱筒壁上, 而不会产生面内褶皱或撕裂。现有的传感器拼接工艺在柱面上具有极其成熟的数学铺砌方案, 可以有效控制相邻模块间的拼接缝隙。在圆柱结构中, 冷却微通道管沿 Z 轴方向作轴向直线布置。当冷却液带走热量导致温度变化时, 管道和支撑筒仅发生两种全局形变: 径向热膨胀和轴向热伸长。这两种形变均具有严格的一阶线性特征, 可以通过全局几何缩放校准常数 k_r 和 k_z 在离线对准软件中完美修正。在柱面加端盖的模型中, 每个探测器模块的安装误差被严格描述为六自由度刚体运动。在最小二乘全局拟合中, 求解这六个

参数所需的数学约束极少，且海森矩阵条件数良好，能够快速收敛。端盖区域的梯形模块同样只涉及平面内的刚体旋转与平移。

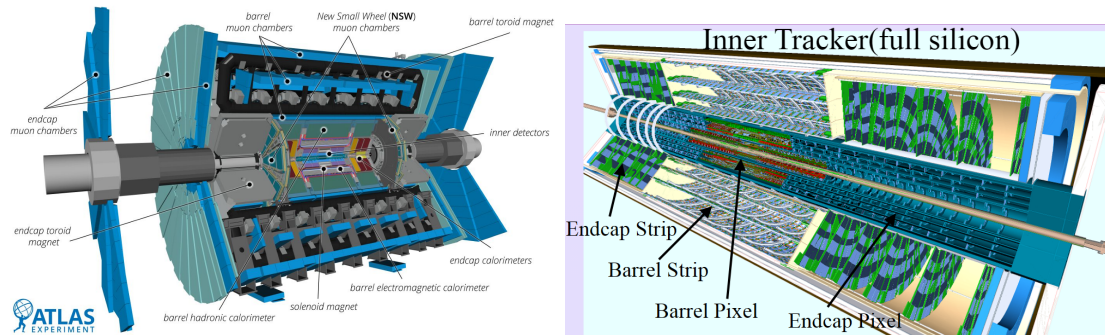


图 2: ATLAS 的“圆柱形桶部 + 垂直端盖” (Barrel + Endcap) 的分层拓扑结构

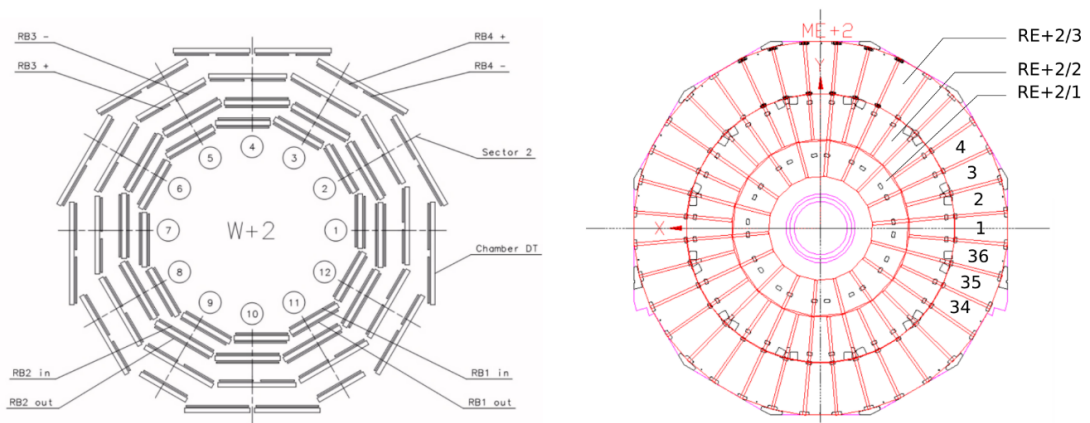


Figure 3.7: CMS RPC system layout in the Barrel (left) and in the endcap (right).

图 3: CMS 的“圆柱形桶部 + 垂直端盖” (Barrel + Endcap) 的分层拓扑结构