

- 一、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  $\sigma_{p_T}/p_T$  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  $\sigma_{p_T}/p_T$  的简化表达式。假设位置测量误差  $\sigma_x$  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”。

a) 磁场垂直于运动方向，洛伦兹力充当向心力：

$$\frac{mv^2}{R} = qvB$$

其中  $R$  是曲率半径， $m$  是粒子的相对论质量。

$$p_T = eBR$$

$$p_T(\text{GeV}/c) = 0.3BR$$

相对误差通过微分传递：

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{\sigma_R}{R}$$

对于半径为  $R$ 、圆心角为  $\theta$  的圆弧，弦长：

$$L = 2R\sin(\theta/2) \approx R\theta$$

矢高：

$$s = R(1 - \cos(\theta/2)) \approx R \cdot \frac{(\theta/2)^2}{2} = \frac{R\theta^2}{8}$$

用  $L \approx R\theta$  消去  $\theta$ ：

$$s \approx \frac{L^2}{8R}$$

因此曲率半径的相对误差：

$$\frac{\sigma_R}{R} = \frac{\sigma_s}{s} = \frac{8R}{L^2} \sigma_s$$

矢高  $s$  不是直接测量的，而是由多个位置测量点拟合后间接得到的几何量。

以最简单的三点等间距测量为例。设三个测量点坐标为：

$x = -L/2$  处测得  $y_1$

$x = 0$  处测得  $y_2$

$x = +L/2$  处测得  $y_3$

矢高  $s$  的定义是弦中点与径迹中点之差。弦由两 endpoint ( $y_1, y_3$ ) 决定，弦在  $x = 0$  处的值为：

$$y_{\text{chord}}(0) = \frac{y_1 + y_3}{2}$$

矢高:

$$s = y_2 - \frac{y_1 + y_3}{2}$$

设每个测点的位置测量独立, 误差均为  $\sigma_x$ 。由误差传递公式:

$$\sigma_s^2 = \sigma_{y_2}^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(-\frac{1}{2}\right)^2 \sigma_{y_3}^2 = \sigma_x^2 + \frac{1}{4}\sigma_x^2 + \frac{1}{4}\sigma_x^2 = \sigma_x^2 + \frac{1}{2}\sigma_x^2$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{3}{2}}\sigma_x \approx 1.225\sigma_x$$

故

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{\sigma_R}{R} \propto \frac{\sigma_x R}{L^2}$$

将  $R = p_T/(0.3B)$  代入:

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{\sigma_x}{L^2} \cdot \frac{p_T}{B}$$

其中:

$\sigma_x$  是单点位置测量误差, 按题设与硅微条 pitch  $p$  成正比

$B$  是磁场强度

$L$  是径迹在探测器灵敏区内的弧长投影 (近似为灵敏区径向跨度)

b)

改变的参数	理由
缩小硅微条 pitch ( $\sigma_x \rightarrow \sigma_x/2$ )	直接减半位置测量误差, 从而减半动量误差。例如从 $75\mu\text{m}$ pitch 减至 $37.5\mu\text{m}$
磁场加倍 ( $B \rightarrow 2B$ )	增大磁场使曲率增大, 相同位置误差下曲率测量相对精度提高一倍
灵敏区径向跨度加长 $\sqrt{2}$ 倍 ( $L \rightarrow \sqrt{2}L$ )	动量误差与 $1/L^2$ 成正比, 增大 41% 即可使误差减半

c)

方案 1: 缩小 pitch (增加通道密度)

代价:

- 通道数爆炸:** pitch 减半意味着相同面积内通道数翻倍, ASIC 通道数、功耗、数据量均翻倍。在 HL-LHC 高亮度环境下, 数据带宽和触发系统将面临巨大压力。
- 功耗与散热危机:** 前端电子学的功耗密度加倍。桶部径迹探测器通常有极严格的材料预算, 冷却系统需要处理数倍的热量, 可能导致冷却管道增粗, 进而增加材料预算, 形成恶性循环。
- 材料预算增加:** 更多读出通道需要更密集的金属走线、更多的总线、更复杂的电源分配, 直接增加探测器物质厚度。这会恶化多次散射, 反而在高动量极限下可

能抵消位置分辨率的收益（多次散射是另一个系统误差源）。

方案 2：磁场加倍

代价：

1. **超导磁铁成本与应力急剧上升**：将螺线管磁场从典型 3-4T 翻倍到 6-8T，对超导线圈的电磁应力 ( $\propto B^2$ ) 增加 4 倍，需要全新的磁铁设计、更多超导线材、更坚固的机械结构，造价呈超线性增长。
2. **探测器整体尺寸被迫改变**：更高磁场会压缩低动量径迹的曲率半径，可能导致低  $p_T$  粒子无法到达外层探测器，破坏物理性能。若要保持低动量覆盖，整个探测器的内外径比需要重新优化，引发全面的几何重新设计。
3.  **$\mu$  子谱仪等外围系统需重新设计**：更强磁场意味着  $\mu$  子在磁场积分区域内的偏转改变，触发和重建算法需要大改， $\mu$  子谱仪的铁轭也可能需要加厚。

方案 3：加长灵敏区径向跨度 L

代价：

1. **探测器体积大幅增加**：桶部径迹探测器半径需增大 41%，体积约增大  $(1.41)^3 \approx 2.8$  倍。这直接推高整个实验的造价——更大的支撑结构、更多硅模块、更长的服务线缆。
2. **量能器、 $\mu$  子谱仪全都要放大**：桶部径迹探测器是所有子探测器的内层参照。增大其外径意味着电磁量能器、强子量能器、超导磁铁内径全都要相应扩大，成本倍增，是一个“牵一发而动全身”的变化。
3. **长距离服务线缆衰减与延迟**：更长的服务线缆（光纤、电力线、冷却管）会增加信号衰减、传输延迟和电力损失，可能要求中继放大或更高电压供电，进一步增加功耗和材料。

d)

最不推荐方案 3 — 加长灵敏区径向跨度 L

理由：

在 HL-LHC/CEPC 这类对撞机实验中，探测器尺寸早已被整体优化到工程与物理的平衡点。方案 3 要求将桶部径迹探测器外径扩大 41%，会触发整个实验装置的连锁放大。相比之下，方案 1（缩小 pitch）是可以先通过先进 CMOS 工艺和 3D 集成局部吸收的技术演进；方案 2（磁场加倍）虽然昂贵，但至少集中在磁铁系统。而方案 3 的成本和工程量会级联到所有下游子探测器，在给定预算和时间线下几乎没有可行性。

如果坚持方案 3，可能的补偿措施：

1. **ASIC 架构**：开发辐射硬化的更先进节点 ASIC（如 65nm 或 28nm），集成更高密度的放大-甄别-流水线逻辑，降低单通道功耗，并引入板上数据压缩以应对长线缆驱动。
2. **冷却方案**：采用两相  $\text{CO}_2$  冷却，利用其低粘度、高汽化潜热和薄壁管道，尽量减少长距离冷却回路中的材料预算和热梯度。必要时可考虑将热交换器放到探测器更近处进行分级冷却。
3. **轻量化材料选择**：支撑结构全面采用高模量碳纤维复合材料甚至碳化硅泡沫芯夹层，以降低半径增大带来的结构重量膨胀。用铝基或碳基复合材料替代铜作为母线。
4. **服务线路优化**：采用高速光链路（如 25Gbps VTRx+）减少电缆数量，使用串行供电（Serial Powering）架构来减少供电线缆总截面积，以抵消长度增加导致的线缆质量上升。

### 为什么补偿后方案 3 在系统上仍可能不可行：

即使采用了上述补偿措施，一个根本性的矛盾无法解决：隧道和实验大厅的物理空间是有限的。LHC/CEPC 的现有实验洞穴是按当前探测器尺寸设计的，半径扩大 41%意味着探测器外径可能超出安装空间，或与束流管线的其他设备发生干涉。这不是技术补偿能解决的问题，属于边界条件硬约束。

此外，整个实验的合作与审批机制不允许单一子系统的"奢侈"改动引发全局成本失控。量能器、 $\mu$ 子谱仪、磁铁系统的重新设计和重新制造将使项目成本增加数亿甚至更多，时间推后数年，在大型国际合作的政治经济现实下是不可接受的。方案 3 因此是典型的"物理上可算、工程上不可行"的方案。

## 二、你拿到了一批新型传感器：

1.5 mm×1.5 mm 的一通道四方形 DC-LGAD 器件，用于符合和提供时间参考。

1cm x 2.5mm 和 4cm x 2.5mm (pitch=150  $\mu$ m, electrode width =50  $\mu$ 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 0.7mm)，用于  $\beta$  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  $\beta$  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)

### 1. 传输线阻抗严格控制（阻抗匹配原则）

**措施：**由于待测件是 AC 耦合且带有微条结构，信号具有高频特性。PCB 走线必须设计为 50 $\Omega$  特征阻抗的共面波导 (CPW) 或微带线，走线宽度和间距需配合 0.7mm 的板厚进行精确计算。

**对时间分辨率的影响：**阻抗失配会导致信号在 PCB 走线中发生反射，造成脉冲信号的上升沿变缓或产生振铃 (Ringing)。时间分辨率依赖于对脉冲前沿 (Leading Edge) 的精准定时，上升沿变缓会直接增加定时抖动，导致测得的 jitter 远大于器件的真实物理极限。

### 2. 极短的信号走线长度（低衰减与低色散原则）

**措施：**打线焊盘 (Wire Bonding Pad) 应尽可能贴近数据接口 (如 SMA)。设计时要将 4 个通道的走线长度保持绝对一致 (等长设计)，且长度越短越好 (建议 < 2cm)。

**对时间分辨率的影响：**信号在 PCB 介质中传输有损耗，并且存在色散 (高频分量传输比低频慢)。走线越长，信号的高频分量损失越严重，导致脉冲斜率 (dV/dt) 降低。时间抖动  $\sigma_t \propto \frac{1}{dv/dt}$ ，斜率变缓将直接恶化时间分辨能力。

### 3. 极小化的焊盘与寄生电容（低电容原则）

**措施：**用于打线的金线焊盘尺寸不应过大 (建议 80 $\mu$ m×120 $\mu$ m 左右)，且焊盘的接地过孔 (Via) 要尽量远离信号焊盘，避免产生额外的寄生电容。顶层应大面积铺地 (Ground

Pour)。

**对时间分辨率的影响：**AC-LGAD 传感器的输出电容本身就很小，如果 PCB 焊盘和过孔的寄生电容过大，会与传感器的输出产生 RC 延迟，同样会拉长信号的前沿，限制本征时间分辨率的提取。

#### 4. 多层板设计中的抗干扰与接地原则

**措施：**虽然厚度限制为 0.7mm，但建议采用 4 层板设计 (Top-信号/地, Inner1-实心接地, Inner2-电源, Bottom-地)。顶层信号走线必须被两侧和底层的实心地平面包裹。

**对时间分辨率的影响：**4 个通道之间的串扰 (Crosstalk) 会引入额外的噪声。系统本底噪声越大，时间分辨率越差。良好的地平面能提供最短的回流路径，最大限度抑制通道间的串扰和外部环境 (如 Sr-90 产生的电磁干扰) 的耦合。

#### 5. 机械强度与平面度原则 (结构稳定性)

**措施：**0.7mm 的板厚非常薄，容易翘曲。在测试过程中，打线 (引线键合) 对机械应力极其敏感。需要在 PCB 边缘或中心添加加强筋 (如 FR4 补强片或铝合金底板)，确保在打线机操作和加装 Sr-90 放射源 (上方放置) 时 PCB 不发生机械形变。

**对时间分辨率的影响：**探测器的信号极其微弱 (几 fC 到几十 fC)。PCB 发生形变会导致打线 (金线) 的应力发生微变，甚至出现微米级的位移，这会改变接触电阻。不稳定接触会导致基线噪声起伏，严重影响极端弱信号的精确时间测量。

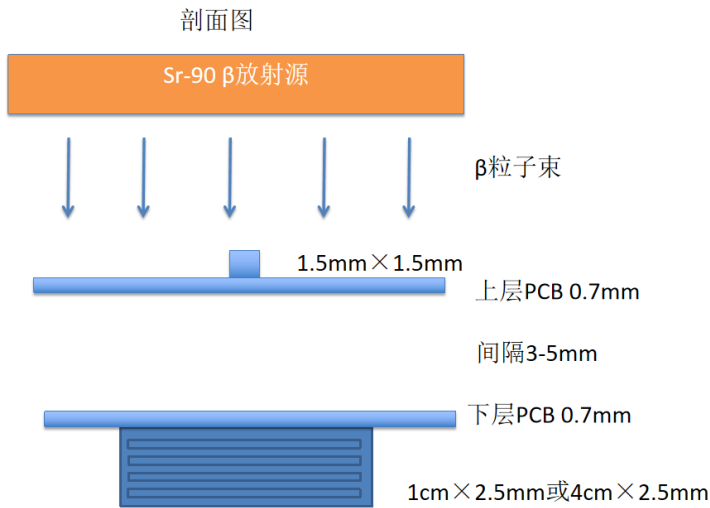
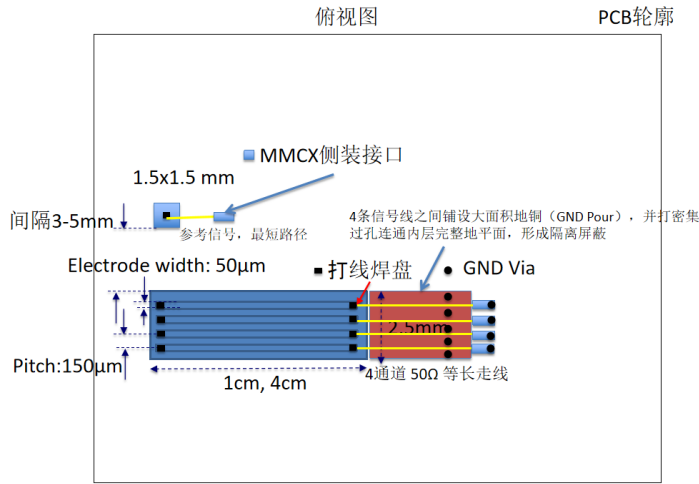
b)

**选择方案：MMCX (侧卧型或竖直型) 或 SMA (侧卧型)。**

**理由：**

1. **微型化与轻量化：**PCB 厚度仅有 0.7mm，且测的是微条型传感器。接口的尺寸必须匹配。SMA、MMCX 均属于同轴射频接口，支持 50Ω 阻抗标准。相比之下，RJ45 以太网接口体积过大，且差分双绞线无法提供如此高带宽下稳定的单端 50Ω 参考地；扁平排线无屏蔽、阻抗不可控且信号互相串扰严重，绝对无法用于 <100ps 级别的时间分辨率测试。
2. **受限于板厚 (高度限制)：**虽然 SMA 是最优的射频接口，但竖直型 SMA 高达 7.5mm，对于 0.7mm 的薄板来说，不仅焊接困难，且机械重心太高极易导致 PCB 断裂或焊接点受力变形。侧卧型 MMCX (高度 ~1.5mm) 或侧卧型 SMA 是极佳的选择，它们可以贴板安装，能确保最小化的信号引脚长度和最佳的高频性能。
3. **射频性能：**MMCX 和 SMA 均提供极佳的屏蔽性能，抗外部环境噪声干扰，确保测试到的信号就是传感器真实产生的信号。

c)



Q3: 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。

## 一、基础概念与物理目标

### 1. 探测器子系统的功能分层

无论几何拓扑如何, 大型对撞机探测器都有以下功能分层:

**径迹探测器:** 置于最内层, 通过在磁场中重建带电粒子的螺旋轨迹, 测量其动量与电荷符号。位置分辨率是其核心指标。

**电磁量能器:** 用于识别并精确测量电子和光子的能量, 通过电磁簇射将其完全吸收。

**强子量能器:** 用于测量强子 (如质子、中子、 $\pi$  介子) 的能量, 通过强子簇射进行吸收。

**$\mu$  子探测器:** 置于最外层, 因  $\mu$  子穿透力极强, 能穿过前面所有物质层, 在此被最

终捕获和识别。

## 2. 核心物理约束：动量分辨率

带电粒子在磁场中偏转，其动量分辨率（即测量精度）与径迹探测器对偏转弧矢量的采样精度直接相关。这个分辨率在粒子飞行轨迹垂直于磁场线时最优，当轨迹与磁场线夹角变小时，偏转投影缩小，分辨率急剧劣化。

## 二、球面拓扑的不可行性分析

我反对该提议，基于以下三个维度的根本性缺陷：

### 1. 物理维度：磁场与测量对称性的失配

现代探测器依赖螺线管磁场，其场线方向沿束流管轴向。在传统的圆柱拓扑中桶部的高横动量粒子的径迹几乎严格垂直于磁场线，获得最佳偏转，实现最高动量分辨。而端盖的粒子径迹与磁场线夹角随赝快度 ( $\eta$ ) 增大而减小，动量分辨逐渐劣化，直至与场线平行的正前方粒子完全无法测量动量。

球面拓扑会使此问题全域化、复杂化。

若磁场依然为轴向均匀场，则粒子径迹与磁场线的夹角将从赤道面到极区连续变化，导致探测器的动量分辨能力在不同极角区域高度不一致且难以标定。若试图构造球对称磁场，则需要完全不同的磁铁系统，这直接引出第二维度的工程物理限制。

### 2. 磁铁集成维度：超导螺线管的力学极限

高场超导螺线管储存巨大能量，线圈承受的径向磁压力 ( $P = B^2/(2\mu_0)$ ) 极高。

圆柱线圈：其力学逻辑是完美的环向应力承力。环形线圈中的张力是均匀且自平衡的，这是最稳定、最省材料的承载方式。

假想的球面线圈：若制造一个球面线圈并通电，磁场力在该几何上的分布将产生巨大的非均匀应力。在“极区”，磁压的合力将产生一个试图将球体沿轴向撕裂的分离力。超导线材（如 NbTi，即铌钛合金）和结构材料无法在维持高电流密度与安全失超余度的同时，承受此种复杂的弯曲与拉伸组合应力。这在机械和超导磁体工程上是不可行的。

### 3. 系统工程维度：集成与可维护性的瓦解

**模块化与安装：**圆柱拓扑的核心优势在于其可沿轴向进行分段组装。各子探测器层可以先在地面完整集成，然后像抽屉一样沿轨道整体推入。球面拓扑要求每一层球壳都必须分割为大量带曲率的瓦片，并必须在束流管周围从内向外悬浮拼装，形成一个自支撑的穹顶结构，失去了简单可行的组装基准和路径。

**服务性通道（电缆与冷却）：**圆柱设计中，数以万计的信号线、电力线和冷却管可以从桶部径向聚集后沿轴向端盖区引出，逻辑清晰，互不干涉。球面设计中，所有服务必须汇聚于“南北极”。这恰巧是前向粒子逃逸的唯一通道，在此形成巨大的物质堆积，将产生极其严重的死区，破坏探测器在近束流方向的接受度。

**内部维护：**最内层径迹探测器受辐照损伤严重，需定期更换。圆柱拓扑可快速拉开端盖，抽出内层。球面拓扑则需逐层解体整个外球壳，这在深地下、高辐射环境中不具备任何可行性与经济性。

## 三、更优方案：“分段圆柱桶部 + 前向锥形延伸”拓扑

结构描述：保持中心区域的超导螺线管和圆柱形桶部子探测器层。在两端，摒弃垂直于束流的平面端盖，代之以一系列同轴的、向对撞点凹陷并沿束流方向延伸的圆锥形探测器层。

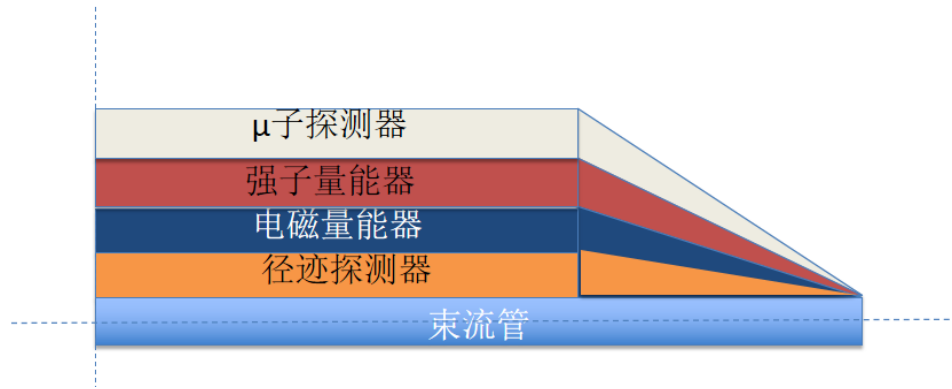


示意图 只画了对称的 1/4

相对球面方案的优势对比：

1. 磁场与动量分辨最优：完整保留了性能最优、技术最成熟的圆柱形螺线管均匀磁场，确保了中心快度区 ( $\eta \approx 0 - 2.5$ ) 的顶级动量分辨率。
2. 前向物理性能的针对性提升：前向锥形设计使得高 $\eta$ 粒子以接近垂直的角度入射量能器层。这极大改善了强子量能器的能量响应线性和电磁量能器的簇射横向包容性，有效解决了传统垂直端盖因粒子斜入射导致的能量漏失和分辨率劣化问题。这精确命中了矢量玻色子散射、前向喷注等 HL-LHC 核心物理目标对前向测量性能的苛刻要求。
3. 工程可实施性：所有子系统仍可分解为基于直线母线展开的圆柱、圆锥和环形模块。这些模块可以在工厂预装，然后沿轴向推入安装并锁定。所有服务线路可沿锥体母线向后引出，完全避开了束流通道，实现了物质最小化与全接受度覆盖。