

Q1: 位置分辨与动量误差的资源博弈

相对动量误差公式推导

考虑带电粒子在均匀轴向磁场 B (沿 z 轴) 中的运动。在横向平面 (r - φ) 内, 径迹为圆弧, 曲率半径 R 与横向动量的关系为:

$$pT(\text{GeV}/c) = 0.3 \cdot B(\text{T}) \cdot R(\text{m})$$

设探测器在径迹方向的有效长度 (力臂) 为 L 。在弦的中点处测量的弧高 (sagitta) s 为:

$$s \approx L^2 / (8R)$$

将曲率半径 R 用 pT 表示:

$$s = (0.3 \cdot B \cdot L^2) / (8 \cdot pT)$$

sagitta s 由径迹上 N 个等间距测量点拟合得到。位置测量误差 σ_x 传播到 sagitta 误差:

$$\sigma_s \propto \sigma_x / \sqrt{N}$$

将 σ_s 传播到 σ_{pT} :

$$\sigma_{pT}/pT = \sigma_s/s \propto (\sigma_x \cdot pT)/(B \cdot L^2)$$

对于二值读出 (binary readout)、电荷分享可忽略的硅微条, 位置分辨率与strip pitch p 的关系为:

$$\sigma_x = p/\sqrt{12}$$

因此最终表达式为:

$$\sigma_{pT}/pT \propto (p \cdot pT)/(B \cdot L^2)$$

三个独立方案使动量误差减半

方案	改变的参数	改变幅度	理由
方案A: 减小pitch	σ_x (\propto pitch p)	pitch 减半	$\sigma_x \propto p$, pitch减半直接使 σ_x 减半, 从而 σ_{pT}/pT 减半

方案B: 增强磁场	B	B 翻倍 (如 2T→4T)	$\sigma_{\rho_T}/\rho_T \propto 1/B$, B翻倍使误差减半
-----------	---	----------------	---

方案C: 增大径迹力臂	L	L 增至 $\sqrt{2}$ 倍 (约1.41倍)	$\sigma_{pT}/pT \propto 1/L^2$, L增大 $\sqrt{2}$ 倍使分母 $\times(\sqrt{2})^2=2$, 误差减半
-------------	---	----------------------------	--

各方案在真实工程中的致命代价

方案A: pitch减半

- 通道数翻倍, 功耗剧增:** 同样覆盖面积下读出通道数 $\times 2 \rightarrow$ ASIC数量 $\times 2 \rightarrow$ 总功耗 $\times 2$ 。HL-LHC tracker已有 $\sim 10^8$ 通道, 翻倍后功耗从 $\sim 100\text{mW}/\text{cm}^2$ 升至 $\sim 200\text{mW}/\text{cm}^2$, 超出冷却系统设计裕度。
- 材料预算 (Material Budget) 恶化:** 更多读出通道需要更多金属走线、更多ASIC、更多电源/数据线 \rightarrow 辐射长度 X/X_0 增加 \rightarrow 多次散射增加 \rightarrow 低动量径迹的impact parameter分辨率反而变差。
- DAQ系统崩溃风险:** 数据带宽 $\times 2 \rightarrow$ 需要更高速的光纤链路和更大的后端计算集群 \rightarrow 触发系统延迟增加 \rightarrow L1 trigger rate可能无法满足。
- 电容噪声限制:** 更窄的strip导致极间电容增加 \rightarrow ENC (等效噪声电荷) 增加 \rightarrow 信噪比下降 \rightarrow 实际位置分辨率改善远小于理论预期 (可能只有1.2-1.3倍改善而非2倍)。

方案B: 磁场翻倍 (2T \rightarrow 4T)

- 超导磁铁成本指数增长:** 4T大型螺线管磁铁的导体用量、低温系统、淬火保护系统都是2T的数倍。ATLAS 2T磁铁已经花费 $\sim \$100\text{M}$, 4T设计将远超预算约束。

2. **磁铁厚度增加→前置量能器性能受限**：更厚的磁铁线圈和低温恒温器意味着径迹探测器外的材料更多→光子转换概率增大→电磁量能器能量分辨率和方向分辨恶化。
3. **机械应力与安全问题**：磁场力正比于 B^2 →4T的磁力是2T的4倍→机械支撑需完全重新设计。淬火 (quench) 时储存的能量释放也更危险 ($E \propto B^2V$)。

方案C: 径迹力臂增大 $\sqrt{2}$ 倍

1. **探测器尺寸和成本大幅增加**：桶部半径增大 ~ 1.4 倍意味着圆柱表面积 $\approx \times 2$ →硅传感器面积 $\approx \times 2$ →探测器总成本增加数十亿元量级。
2. **量能器和muon系统的连锁影响**：径迹探测器增大→电磁量能器、强子量能器、muon谱仪全部需要径向膨胀→总成本可能 $\times 3\sim 5$ 。
3. **低动量性能下降**：更大的探测器半径意味着低pT径迹在到达外层之前就已弯曲回束流管→低pT (< 500 MeV) 的接受度下降, 对B物理和重离子物理不利。

最不推荐的方案

最不推荐: 方案A (pitch减半)

理由:

1. 在HL-LHC典型条件下 (pitch $\approx 75\mu\text{m}$ for barrel strips), 进一步减半pitch会进入fundamental的物理极限区域——硅中电荷扩散宽度(5-10 μm) 和 δ -ray效应使得即使pitch减半, 实际位置分辨率也不会等比改善。

2. 功耗翻倍是**级联性系统崩溃**：功率密度从 $\sim 100\text{mW}/\text{cm}^2$ 升至 $\sim 200\text{mW}/\text{cm}^2$ →CO₂冷却系统无法有效散热→传感器温度升高→漏电流指数增长→热失控风险 (Thermal Runaway) 。
3. 方案B和C虽然昂贵，但至少物理上可行且已有先例 (CMS的4T磁铁预研、ATLAS的升级中已经扩大了径迹探测器半径)。方案A的物理极限决定了它“**在系统上不可行**”而不只是代价大。

如果坚持方案A，补偿措施：

1. **ASIC架构**：采用更先进的CMOS工艺节点 (如28nm→更低的数字功耗)，集成更强的片上零压缩 (zero suppression) 和数据压缩，减少数据带宽。同时考虑cluster summing读出代替binary读出，从算法层面恢复分辨率。
2. **冷却系统**：改用CO₂两相冷却系统 (已用于ATLAS ITk)，散热能力比传统单相C6F₁₄高一倍，但需要承受更高的管道压力(100 bar) 。
3. **材料选择**：将传感器减薄到50 μm 甚至更薄，用低质量材料 (CFRP、碳泡沫) 做支撑结构→补偿pitch减半带来的材料预算增加。

Q2： β 放射源时间分辨测试的PCB设计

PCB设计关键原则

1. 50Ω 受控阻抗匹配 (Controlled Impedance)

所有RF信号走线必须设计为精确的50Ω特征阻抗。AC-LGAD输出信号上升时间~1—2ns (带宽~350MHz) , 任何阻抗不连续都会导致信号反射和振铃→过零点的timing jitter增加→时间分辨率恶化。在0.7mm FR4板上, 使用**共面波导 (CPWG: Coplanar Waveguide with Ground)** 结构实现50Ω: 信号线宽度~0.5mm, 信号-地间距~0.15mm。计算使用JLC7628层叠参数。

2. 严格等长走线 (Length Matching)

4个AC-LGAD通道的信号走线长度必须匹配到偏差<0.1mm (对应<0.5ps的时间偏斜, FR4上~150ps/inch) 。DC-LGAD的参考时间通道也需与AC-LGAD通道进行长度匹配。不等长会导致通道间固定的时间偏移 (skew) , 在离线分析中虽可校准, 但会增加系统误差。

3. 完整地平面 + 混合信号隔离

信号层紧邻完整不间断的GND平面 (微带结构) , 确保回流路径最短→最小化环路电感。模拟地 (传感器偏置、放大器前端) 和数字地 (可能的数字接口) 分区, 在ADC/接口芯片下方单点星形连接, 避免数字噪声耦合到模拟前端。接地过孔 (via stitching) 沿信号线两侧每隔 $\lambda/10$ (5mm @ 3GHz) 放置。

4. 最小化寄生参数 (Parasitic Minimization)

Bonding wire长度<2mm (寄生电感~1nH/mm→共2nH, 在2ns上升沿下产生 $L \cdot di/dt$ 电压降) 。

Bonding pad面积 $\approx 100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ (在0.7mm FR4上到GND平面的电容~0.05pF) 。传感器下方的PCB铜皮掏空 (keep-out) , 减少传感器pad到GND的寄生电容→减少信号衰减和噪声耦合。

5. 电磁屏蔽与防护

关键信号区域周围放置双排接地过孔护栏 (via fence) , 间距<1mm。传感器区域设计金属屏蔽罩安装位 (预留SMD屏蔽框焊盘) 。偏置电压走线与信号走线正交或加大间距(1mm) , 防止高压(100—200V bias)耦合到前端。输入保护: 在bonding pad附近放置反并联的快速二极管 (如BAV99) 进行ESD保护, 但需评估其结电容(2pF) 是否可接受。

2.2 数据接口选择

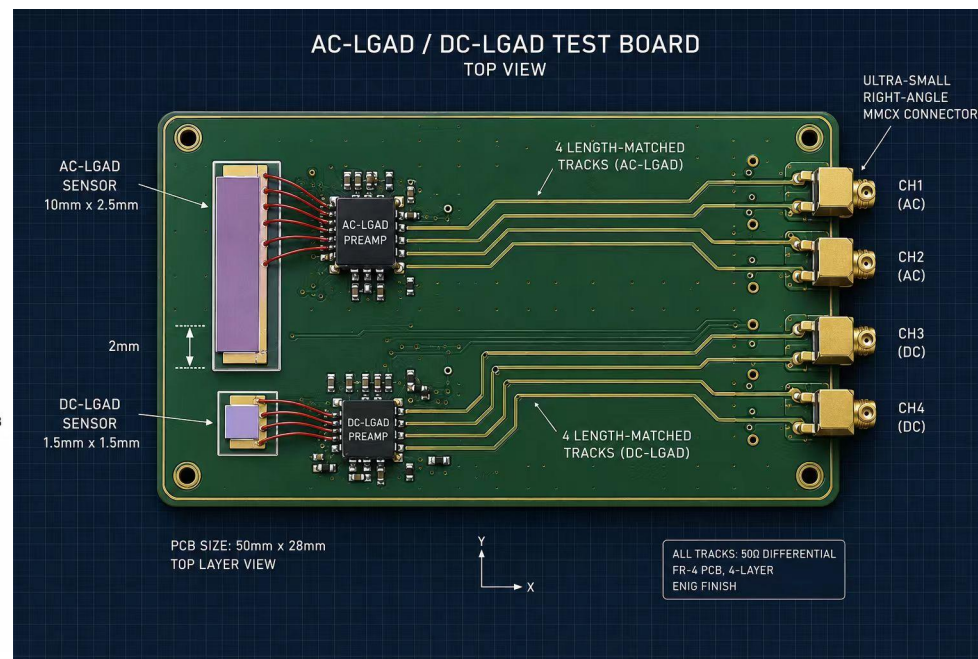
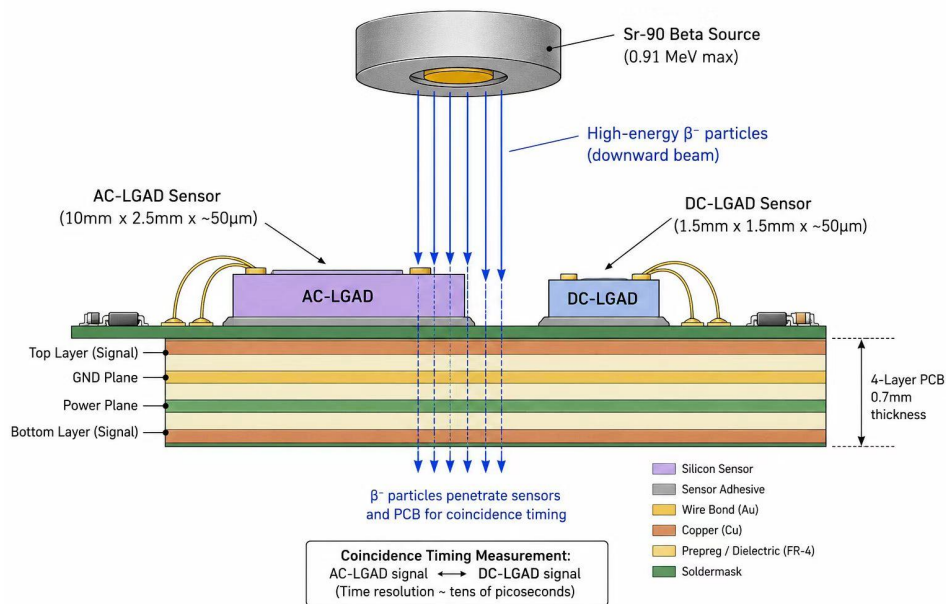
选择：SMA连接器（侧卧型，高度~5mm）

理由：

候选接口	评估
RJ45 Ethernet	× 非受控阻抗(100Ω差模)，带宽不足，无屏蔽→不适合快模拟信号。适合数字数据但需PHY芯片。
Flat Ribbon Cable	× 无阻抗控制，crosstalk严重，无屏蔽。完全不适合ns级信号传输。
MMCX	△ 50Ω受控阻抗，但插拔寿命~500次，体积小但机械强度低，不适合实验室反复操作。
SMA	✓ 50Ω精密阻抗，DC-18GHz带宽，金/不锈钢材质机械坚固，插拔寿命>1000次。是实验室RF测试的标准接口，与示波器/数字化仪直接匹配。

所有SMA连接器的外壳（GND）需通过大面积低感抗通路连接到PCB的GND平面。

2.3 PCB俯视图与剖面图



Q3: 拓扑结构的选择——为何不建一个"球"?

立场: 坚决反对多层球面洋葱皮结构。坚持并改进"圆柱桶部+端盖盘片 (Barrel + Endcap Disks)"拓扑。

物理维度

1. 动量分辨率与磁场均匀性的关系

强子对撞机的超导螺线管产生沿束流方向 (z 轴) 的高度均匀磁场。圆柱桶部几何与B场方向天然对齐——所有径迹层都在同一B场大小和方向下产生sagitta, 使得径迹拟合简洁且解析。

球面结构中, "极区" (forward region, $|\eta| > 2$) 的探测器球面壳层几乎平行于束流线而非垂直于r方向——导致: ①B场在球面不同纬度的投影分量不同, ②径迹穿越球面的几何路径不是简单的圆弧→需要全数值迭代拟合→重建时间增加10-100倍。

结论: 球面破坏了径迹探测器最核心的设计原理——利用均匀磁场下的简单几何关系。

2. 赙快度覆盖的不均匀性

球面结构在中心快度区($\eta \approx 0$) 层间距大 \rightarrow 力臂长 \rightarrow 动量分辨率好。但在前向区($\eta > 2$) , 球面退化为几乎切向的薄壳 \rightarrow 等效层间距急剧缩小 \rightarrow 动量分辨率在forward region恶化2-5倍。

Barrel+Endcap方案通过垂直的端盖盘片在前向区主动提供足够的z方向力臂, 保持全 η 范围的动量分辨率相对均匀。

3. 径迹重建复杂度 (Pattern Recognition)

HL-LHC每个bunch crossing有140-200次pile-up碰撞, 产生数千条径迹。球面几何要求追踪非均匀层间距下的hit pattern \rightarrow 传统Kalman Filter在非均匀几何中收敛变慢 \rightarrow 触发延迟增加 \rightarrow L1 trigger rate可能丢失物理事例。ATLAS/CMS经过30年优化的重建软件完全基于柱坐标。

磁场系统维度

1. 超导螺线管与球面的几何不兼容

圆柱形螺线管产生的是**圆柱形**均匀B场区域 ($|z| < \pm L/2, r < R_{\text{coil}}$) 。球面探测器的"极盖"区域远在均匀场区之外 ($r > R_{\text{coil}}$ 或 $|z| > L/2$) , B场下降至中心值的40-60%且方向偏离z轴 \rightarrow 在这个区域径迹曲率与B场的关系不再简单。

2. "球面超导磁铁"在技术上不存在

如果要想磁场也匹配球面几何, 需要设计球形超导线圈——这是超导磁铁工程中从未实现过的拓扑。球面线圈每匝的径向距离不同 \rightarrow B场在球内的分布不均匀 \rightarrow 无法用作谱仪磁铁(需要知道任意点的B值才能做动量测量)。反之, 圆柱形螺线管是经过LEP/DELPHI/ATLAS/CMS/CEPC验证的成熟技术。

3. 磁铁在探测器内还是外?

经典布局是磁铁包裹径迹探测器(如ATLAS: tracker \rightarrow solenoid \rightarrow calorimeter \rightarrow muon spectrometer) 。如果球面探测器要放在磁铁内 \rightarrow 磁铁必须是球形的(不可行); 如果放在磁铁外 \rightarrow 径迹探测器离开均匀B场区 \rightarrow 无法精确测动量。这是拓扑的根本矛盾。

1. 服务线路 (Services) 无自然通道

圆柱拓扑中，冷却管、电缆、光纤沿z轴从端盖区域集中引出（Barrel staves的services沿z→端盖服务环→向外引出）。球面没有这种天然的"服务走廊"——每个球面瓦片到外部的距离和路径不同，服务线路需要蜘蛛网式的复杂布局。

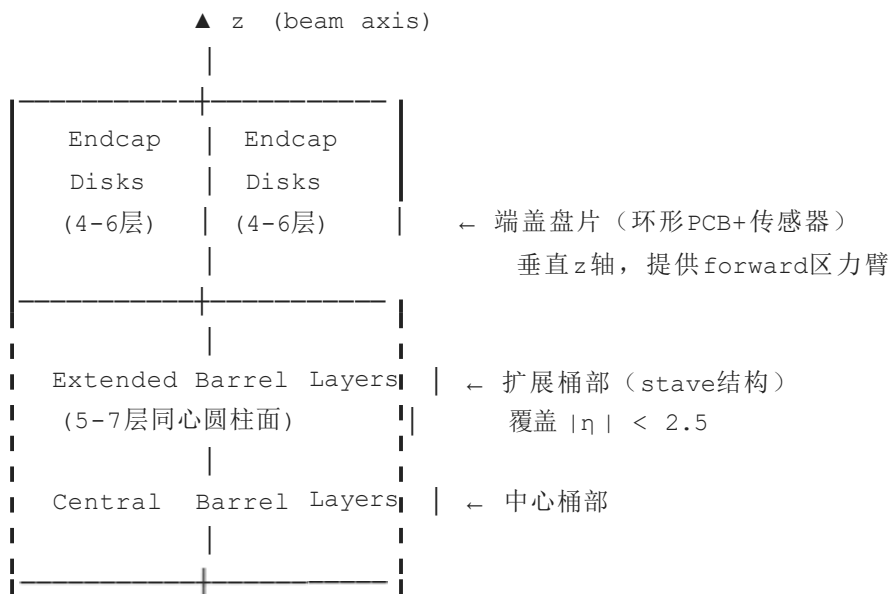
2. 模块化和可建造性

圆柱结构的桶部用长条（Stave: 1m×10cm 矩形）、端盖用扇环（Sector: 标准的环形分段）→所有模块在各自类别内完全相同，可大批量工业化生产。球面结构中每个"纬度带"的瓦片形状和曲率都不同→几乎每个模块都是定制的→生产成本和周期不可接受。

3. 对齐 (Alignment) 和测量 (Metrology)

10 μ m级精度的tracker alignment依赖CMM坐标测量+径迹反推的对齐算法。圆柱/平面结构的对齐只有6个自由度（每个模块），球面结构的自由曲面大大增加了校准参数空间的维度。

3.4 更优方案：超长桶部 + 大面积扩展端盖



| Beam Pipe | (r~25mm) |



超导螺线管磁铁线圈

(包裹整个tracker体积, r~1.2m)

B场方向沿z轴 // 束流方向

桶部staves: 沿z轴排列的矩形长条模块

端盖disks: 在固定z位置的环形板, 传感器布置在同心环上

1. 柱坐标与螺线管B场完美匹配→动量测量公式简洁、精确
2. 桶部+端盖的双区域覆盖保证了全 η 范围 ($|\eta| < 4$) 的均匀性能
3. Stave和Disk是平面/圆柱面模块→可大批量标准化生产 (ATLAS ITk已生产~10,000个模块)
4. Services沿z轴自然路由→不穿过敏感区域→保持低material budget
5. 经过LEP→Tevatron→LHC→HL-LHC四代验证, 技术风险极低