

(a) PCB 版图与机械结构设计的关键原则 (5 项)

原则 1：最小化物质质量 (Low Material Budget)

β 放射源 (如 Sr-90) 发射的电子能量在 MeV 量级, 穿越 PCB 板及传感器本身时不可避免地发生多次库仑散射 (Multiple Coulomb Scattering, MCS)。如 ppt 第 7 页所述, 多次散射导致的轨迹偏差 $\sigma_{d0} \approx \theta \cdot r_1$, 其中散射角 θ 与材料厚度 X/X_0 的平方根成正比。对于时间分辨测试, 散射会使电子到达传感器的路径发生随机偏移, 导致不同通道之间的信号到达时间出现额外的离散 (jitter), 从而恶化时间分辨率。

具体措施：

选用 0.7 mm 厚度的 PCB 基板 (如题目所述), 并在传感器安装区域考虑局部减薄或开窗设计。

使用低原子序数 (Low-Z) 基板材料 (如 Rogers 高频板材或聚酰亚胺柔性板), 其辐射长度 X_0 更长, 等效物质质量更小。

尽量减少传感器附近不必要的铜箔面积, 焊盘尺寸仅满足打线可靠性要求即可。

对时间分辨率的影响：降低散射角离散度 \rightarrow 减小信号到达时间涨落 \rightarrow 提升时间测量精度。

原则 2：最小化寄生参数与阻抗匹配

AC-LGAD 传感器利用交流耦合将信号分配到各微条电极, 其输出为高频快脉冲信号 (上升沿通常在亚纳秒量级)。信号的保真度直接决定时间甄别 (如 CFD, Constant Fraction Discriminator) 的精度。

具体措施：

打线焊盘与传感器电极之间的引线键合 (Wire Bond) 应尽可能短 (通常 < 2 mm), 以减少串联电感。过长的金线/铝线会引入 nH 级电感, 与传感器的结电容形成 LC 谐振, 导致信号过冲或振铃, 恶化时间晃动 (Time Walk)。

PCB 走线需设计为特性阻抗受控的传输线 (如 50Ω 微带线或共面波导), 从前端

放大器输入到后续读出接口全程匹配。

相邻通道走线之间保持足够间距（至少 2-3 倍线宽），必要时在敏感信号间插入接地屏蔽线（Guard Trace），抑制串扰。

对时间分辨率的影响：阻抗失配 → 信号反射 → 波形畸变 → 时间甄别误差增大；串扰 → 通道间时间关联失真。

原则 3：对称与等长布线（Symmetry & Equal-Length Routing）

本测试板包含两种长度的待测 AC-LGAD 器件（1 cm 和 4 cm），且使用 1.5 mm × 1.5 mm DC-LGAD 作为符合参考。参考通道与待测通道之间的相对时间延迟必须在 ps 级别被精确控制或已知。

具体措施：

DC-LGAD 参考传感器到各 AC-LGAD 通道放大器的 PCB 走线长度必须严格等长（长度差控制在 < 100 μm 量级），使 β 粒子同时击中两传感器时，电子学引入的固定延迟差最小。

四通道 AC-LGAD 内部的四条微条信号走线也应等长设计，保证通道间时间偏移（Skew）在可校正范围内。

PCB 版图应采用对称布局：将 DC-LGAD 参考器件置于中央，两种 AC-LGAD 待测器件对称分布于两侧。

对时间分辨率的影响：走线不等长 → 固定时间偏移 → 需额外标定且残余误差影响最终时间分辨率的系统极限。

原则 4：热稳定性与机械刚性

如 ppt 第 13-15 页反复强调，温度梯度与机械形变是探测器几何精度的大敌。对于时间分辨测试，温度变化通过以下路径影响测量结果：

温度变化 → PCB 基板热膨胀 → 传感器与 β 源的相对几何变化 → 粒子飞行路径变化 → 到达时间系统偏移。

温度变化 → 前端 ASIC/放大器的工作点漂移 → 增益与带宽变化 → 时间甄别阈值偏移。

具体措施：

PCB 基板选用低热膨胀系数（CTE）材料（如 Rogers RO4000 系列，CTE ~11–14 ppm/°C），或采用聚酰亚胺柔性基板。

在传感器安装区域下方设计热沉（Thermal Pad），通过导热胶或导热垫将传感器热量传导至 PCB 铜箔层，再传导至外部散热结构。

PCB 机械固定采用三点或四点对称支撑方案，避免单侧悬臂导致的弯曲形变。

如 ppt 第 14 页所述，可在关键区域引入碳纤维加强片（CFRP stiffener），在不显著增加质量的前提下提升局部刚度。

对时间分辨率的影响：热形变 → 几何漂移 → 不可校正的时间系统误差；机械振动 → 打线断裂风险 → 测试失败。

原则 5：电磁屏蔽与接地设计（EMI Shielding & Grounding）

AC-LGAD 传感器的信号幅度通常仅为数 mV 至数十 mV，而实验室环境中的电磁干扰（EMI）可轻易达到同等水平。AC-LGAD 的交流耦合结构使其对共模噪声尤为敏感。

具体措施：

PCB 采用四层或以上的叠层结构：顶层为信号层 + 传感器安装区，第二层为完整地平面（Continuous Ground Plane），第三层为电源平面，底层为辅助信号或第二地平面。完整地平面提供低阻抗回流路径，有效抑制共模噪声。

传感器区域上方考虑加装金属屏蔽罩（如薄铜箔或铝质屏蔽盒），屏蔽罩经多点接地。

所有未使用的 PCB 区域铺设接地铜皮并通过过孔阵列（Via Stitching）连接到内层地平面，形成法拉第笼效果。

电源入口处加装 π 型 LC 滤波器，隔离外部电源噪声。

对时间分辨率的影响：电磁干扰 → 信号上叠加随机噪声 → 时间甄别器抖动（Jitter）增大；共模噪声 → CF 甄别基线波动 → 时间晃动。

(b) 数据接口与数据线类型的选择

在给定的四种数据接口选项中（RJ45 Ethernet Connector、Flat Ribbon Cable & Connector、MMCX、SMA），本测试板选择 SMA 连接器（侧卧型，高 ~4 mm）。

选择理由：

1. 阻抗匹配与带宽：SMA 连接器是标准的 $50\ \Omega$ 同轴射频连接器，工作频率可达 DC–18 GHz（精密型可达 26.5 GHz）。AC-LGAD 的输出信号上升时间在数百皮秒量级，等效带宽 $> 1\ \text{GHz}$ 。SMA 在此频段内具有极低的 VSWR（电压驻波比），能保证信号波形从 PCB 传输线到外部同轴电缆的无反射过渡，而 RJ45 和扁平排线无法提供受控阻抗和足够带宽。

2. 屏蔽性能：SMA 为全封闭同轴结构，天然提供 360° 电磁屏蔽，而扁平排线（Flat Ribbon Cable）缺乏每线屏蔽，在高增益前端附近容易引入 EMI。

3. 与 β 源测试环境的兼容性：在 β 放射源测试中，传感器与前端放大器通常置于暗箱或屏蔽箱内，SMA 连接器可通过穿墙式（Bulkhead）安装实现箱体内外信号的可靠传输。其侧卧型高度仅 ~4 mm，与 0.7 mm PCB 的总高度可控。

4. 与 MMCX 的比较：MMCX 连接器（侧卧型高 ~4 mm）同样具备良好的射频性能，但其为卡扣式（Snap-on）连接，相比 SMA 的螺纹锁紧，机械可靠性较低。在需要反复插拔的测试场景下，SMA 的螺纹连接提供更稳定的电气接触。不过如果 PCB 面积受限，MMCX 的较小尺寸也可作为备选方案。

5. 排除其他选项：

RJ45 Ethernet Connector（高 ~1 cm）：高度过大，在 β 源与传感器近距离布置时产生物理干涉；且其差分阻抗为 $100\ \Omega$ ，与 $50\ \Omega$ 射频系统不匹配。

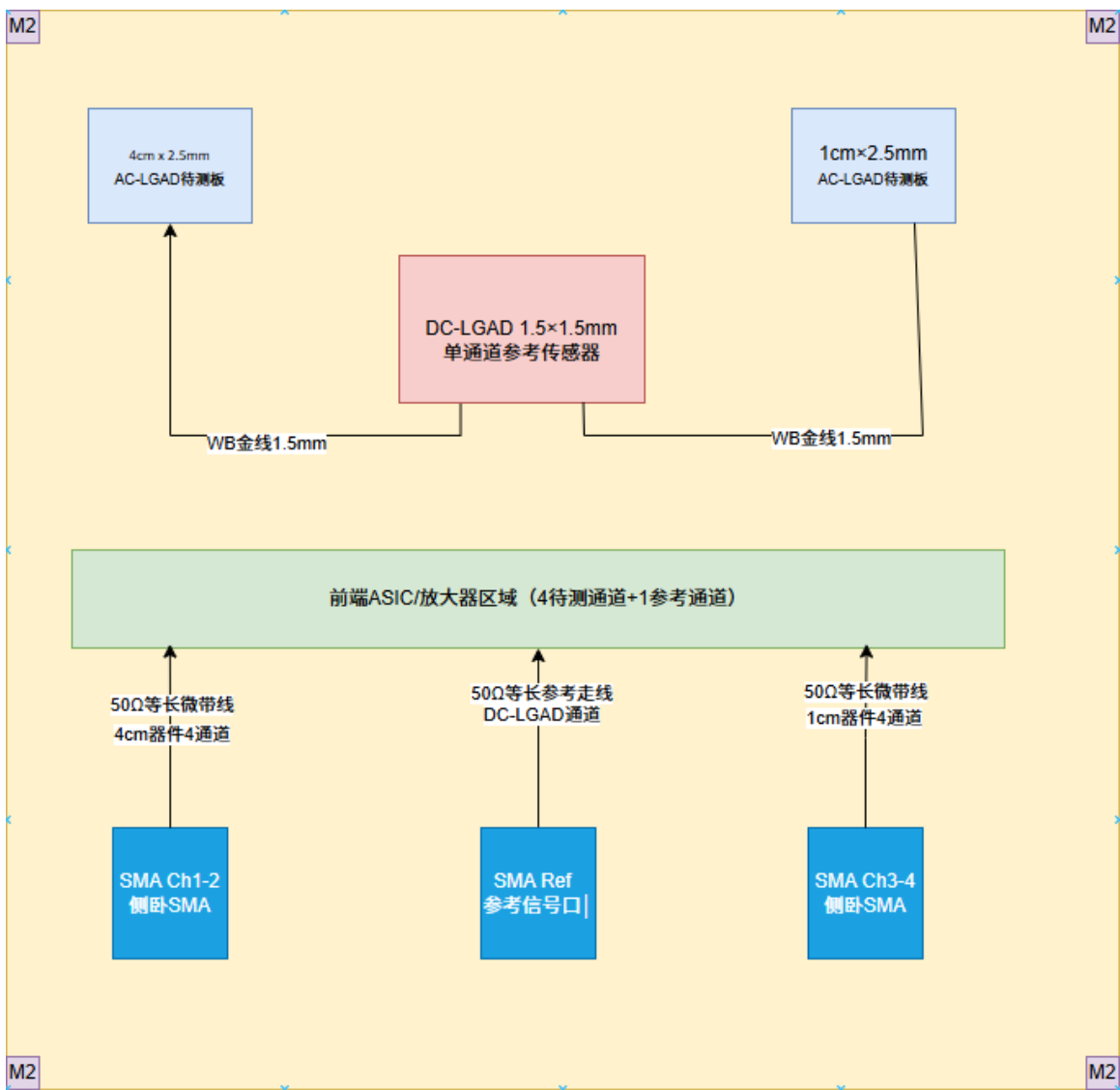
Flat Ribbon Cable (高 ~6 mm) : 无特性阻抗控制, 线间串扰严重, 带宽不足, 不适合亚纳秒级快脉冲信号传输。

(c) PCB 俯视图与剖面示意图

以下为 PCB 设计的俯视图和剖面示意图:

pcb 我不是会很画, 只能大致画个草图

俯视图 (Top View)



标注:

传感器位置：DC-LGAD 居中，AC-LGAD 对称分布两侧 |

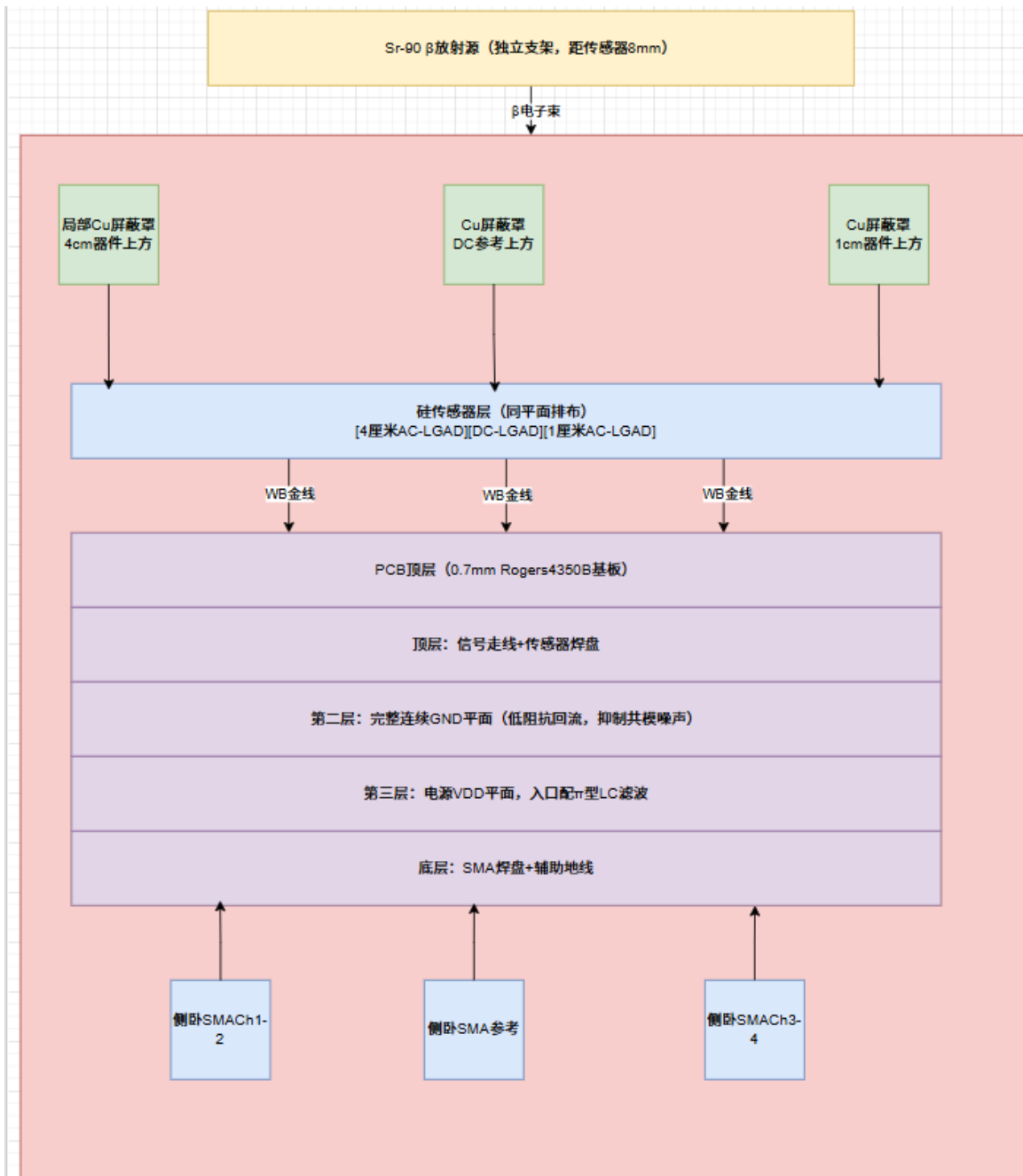
焊盘位置：紧邻各传感器边缘，打线距离 < 2 mm

打线路径：传感器电极 -> 焊盘（箭头标注）

数据接口：SMA 连接器（侧卧型），布置于 PCB 下边缘 |

固定孔：四角 M2 安装孔 x 4 |

剖面示意图（Cross-Section View）— β 源测试布局



标注说明：

- 双板设计：beta 源位于上方（或独立源支架），传感器 PCB 位于下方
- 传感器间距：DC-LGAD 参考传感器置于中央，到两侧 AC-LGAD 中心的距离分别约为 3 cm（到 4 cm 器件）和 1.5 cm（到 1 cm 器件）
- beta 源到传感器上表面距离：~5-10 mm（保证 beta 电子穿透率）

- 屏蔽罩覆盖各传感器及其打线区域
- PCB 底部 SMA 连接器经屏蔽箱面板穿墙输出

关键参数估算

传感器间距：DC-LGAD 置于 PCB 中心，到 4 cm AC-LGAD 中心的距离约 3 cm，到 1 cm AC-LGAD 中心约 1.5 cm。

β 源距离：Sr-90 β 源距传感器上表面 ~8 mm，保证电子在传感器中沉积足够能量。

打线长度：金线/铝线 bonding wire 长度 ≤ 1.5 mm，直径 25 μm ，电感 ~1 nH。

走线阻抗：50 Ω 微带线，线宽根据 PCB 叠层计算（以 Rogers 4350B 为例， $\epsilon_r \approx 3.48$ ，0.7 mm 厚度，50 Ω 线宽 ≈ 1.5 mm）。

SMA 连接器：侧卧型，焊接于 PCB 底面，经屏蔽箱面板 SMA-KK 转接头引出。

Q3：拓扑结构的选择：为何不建一个"球"？

一、物理维度

1.1 对撞几何与动量测量的匹配

在强子对撞机（如 LHC/HL-LHC）中，质子-质子对撞产生的有趣物理事例（如 Higgs、W/Z、顶夸克等）的末态粒子在赝快度（pseudorapidity η ）空间中的分布具有以下特征：

高横动量（high p_T ）粒子集中于中心快度区（ $|\eta| < 1.5$ ），即垂直于束流方向；前向区（ $|\eta| > 2.5$ ）的粒子主要为束流 remnants 和最小偏倚事例。

对于动量测量，如 ppt 第 5 页所述，带电粒子在均匀磁场中弯曲，曲率半径 $\rho \propto p_T / B$ 。轨迹在 r - ϕ 平面（垂直于束流的横截面）上的投影决定了动量分辨率。

圆柱形桶部结构天然匹配这一物理特征：

桶部（Barrel）的同心圆柱层垂直于束流方向排列，每层沿 z 轴延伸覆盖 $|\eta| < 1.5$ – 2.0 ，对高 p_T 物理提供最大杠杆臂（Lever Arm）用于 sagitta 测量。

端盖（Endcap）的垂直圆盘结构覆盖大 η 区域（ $1.5 < |\eta| < 3.0$ ），在粒子以小角度穿越多层环形传感器时提供足够的测量点。

球面结构的问题：

在中心快度区，球面各层的法线方向随极角 θ 变化，不总垂直于束流方向，导致部分层的命中点在高 p_T 轨迹的 r - ϕ 投影中贡献不对称，降低 sagitta 测量精度。

球面曲率在靠近束流管处（ $\theta \approx 90^\circ$ ）与远离处（ $\theta \approx 10^\circ$ ）方向差异巨大，难以在整个 η 范围内维持均匀的动量分辨率。

1.2 顶点分辨率与撞击参数

如 ppt 第 7 页所述，撞击参数分辨率 σ_{d0} 由两项决定：

a 项（高动量极限）：由探测器本征空间分辨率决定， $\sigma_{d0} \propto \sigma_x$ ；

b 项（低动量区域）：由多次散射主导， $\sigma_{d0} \approx \theta_{MCS} \cdot r_1$ ，其中 r_1 是第一层探测器半径。

球面结构的核心矛盾：要使第一层尽可能靠近束流管（减小 r_1 ），球面的最小半径在 $z=0$ 处受束流管外径限制（通常 $\sim 20-30$ mm），但沿 z 方向，束流管在靠近相互作用点处收窄为锥形，球面无法贴合，造成 $|z|>0$ 处 r_1 实际上大于圆柱方案的 r_1 ，浪费了昂贵的径向空间。

圆柱形 Barrel 的内层可以采用可替换的像素层（如 ATLAS IBL），以极小的半径（ ~ 33 mm）贴近束流管，而端盖的环形像素盘独立优化其靠近束流管的程度。两者分工明确，各自解耦优化。

二、磁场维度

2.1 螺线管磁场的天然对称性

几乎所有大型对撞机探测器（ATLAS、CMS、ALICE、STAR 等）均采用超导螺线管（Solenoid）提供轴向均匀磁场 B_z 。螺线管产生的磁场特性为：

在中心区域（ $|z| < L/2$ ， L 为线圈长度）， B 沿 z 方向高度均匀；

磁场线平行于束流轴，在 $r-\phi$ 平面内提供洛伦兹力 $F = qv \times B$ ，使带电粒子在横截面内弯曲。

圆柱形 Barrel + Endcap 拓扑与螺线管磁场高度兼容：

Barrel 层呈圆柱形，所有传感器在 $r-\phi$ 平面内排列，粒子在该平面内的弯曲半径直接与 p_T 相关。

磁场方向（ z ）与传感器的排列方向（ ϕ 向）天然正交，优化了弯曲测量灵敏度。

球面结构的不兼容性：

在球面的高纬度区域（对应 $|\eta|$ 较大的端盖区域），传感器表面法线方向与磁场方向 B_z 的夹角随极角变化。粒子穿越传感器时，其轨迹在传感器平面上的投影并非纯 $r-\phi$ 弯曲，而混入了 z 向分量，导致命中点分辨率在弯曲方向上的有效投影降

低。

在球面的"极点"区域（沿束流方向），传感器几乎平行于束流，洛伦兹力方向几乎在传感器平面内，轨迹弯曲信息提取效率最低。

2.2 磁场均匀区的利用效率

超导螺线管的磁场均匀区（ $\Delta B/B < 1\%$ ）集中在一个轴向范围有限的圆柱体内。球面结构的径向范围沿 z 轴变化——在 $z=0$ 处半径最大，在 $|z|$ 较大处半径缩小——这意味着球面外壳的大部分区域位于磁场均匀区之外，粒子轨迹的曲率测量将引入额外的磁场不均匀性误差。相比之下，Barrel + Endcap 结构的桶部层完全位于磁场均匀区的"甜点"内，端盖的圆盘结构虽然延伸至磁场边缘，但其多层环形设计允许逐层校正磁场不均匀性。

三、系统集成维度

3.1 模块化制造与装配

如 ppt 第 11 页所述，现代硅径迹探测器的装配遵循"Module → Stave/Section → Barrel/Endcap"的层级架构。这一层级化的核心优势在于：

每个模块（Module）可独立进行电学测试、热学验证和机械基准标定；
Stave（桶部）和 Ring/Sector（端盖）作为中间集成层，可并行装配、独立质检；
最终在洁净室中按预定顺序逐层安装，工艺成熟可控。

球面结构的制造挑战：

球面上的每个"贴片"具有不同的曲率半径和法线方向，无法像圆柱桶部那样使用标准化 Stave 复制生产。需要为球面不同纬度区域定制不同曲率的传感器基板，大幅增加制造成本和周期。

模块在球面上的对准（Alignment）难度指数级上升：圆柱面只需 r 、 ϕ 、 z 三个坐标系的标定，球面还需额外的倾角自由度，且各模块之间的相对位置关系非线性。

当前精密几何量测（Metrology）手段（CMM、光学 Survey、激光扫描等）均基于直角坐标或柱坐标系统，针对球面的高精度测量需要全新的硬件和算法开发。

3.2 冷却系统集成

如 ppt 第 14–16 页所述，现代 tracker 采用两相 CO₂ 冷却系统，其核心设计约束为：
冷却管道必须沿支撑结构分布，管道布局受限于几何拓扑；
管道引入的质量必须最小化。

在 Barrel + Endcap 结构中：

桶部冷却管沿 z 向布置，沿圆周均匀分布，管路长度一致，热负载对称；
端盖冷却管沿径向辐射状布置，汇流到外围环形总管。

球面结构中，冷却管道必须沿球面的经线和纬线布置，管道长度和曲率在各处变化，导致冷却剂流量分配不均匀，局部可能出现过热或过冷。更严重的是，球面顶点区域的管道密度远大于边缘区域，引入的质量（管道壁厚 + 冷却剂本身）在中心区集中，恰恰与“中心区质量应最小”的物理需求矛盾。

3.3 服务线路 (Services) 的引出

每个传感器模块需要以下服务线路：电源（模拟 + 数字）、高压偏置、高速数据线（通常为差分对）、慢控制总线（PC 或类似）、温度监测线等。在 Barrel 中，服务线路沿 Stave 长度方向汇集到端部，沿端盖支撑环引出；在 Endcap 中，服务线路沿径向向外引出到外围服务环。路径清晰、可标准化。

球面结构中，服务线路从球面各点汇集到“南极”或“北极”（束流管出口），路径必须沿球面弯曲，且越靠近极点线缆密度越大，造成严重的材料堆积。这种材料堆积恰好在 $|\eta|$ 很大的前向区——而前向区的粒子能量通常较低，对散射极其敏感。

四、更优的拓扑方案：改进型 Barrel + Tilted Endcap

笔者推荐维持并改进“圆柱形桶部 + 倾斜端盖 (Tilted Endcap)”的拓扑结构，其核心改进如下：

1. 桶部 (Barrel) : 维持多层同心圆柱结构 (如 4-5 层 Pixel + 2-3 层 Strip) , 内层 Pixel 半径 ~30 mm, 外层 Strip 半径 ~1 m。各层沿 z 轴延伸约 ± 1.5 m 覆盖 $|\eta| < 2.0$ 。

2. 倾斜端盖 (Tilted Endcap Rings) : 端盖的环形传感器盘不再严格垂直于束流轴, 而是略微向前倾斜 (tilt angle $\sim 10^\circ - 15^\circ$) , 使得粒子穿越时入射角更接近法向, 降低电荷共享效应。此设计已在 ATLAS ITk 端盖中得到验证 (如将环形盘排列成"圣诞树"形) 。

3. 过渡区 (Barrel-Endcap Transition) : 在桶部与端盖的交界处 ($|\eta| \approx 1.5 - 2.0$) , 布置重叠的传感器层 (Overlap Region) , 使粒子在穿越两种结构边界时仍有足够命中点, 消除接受度死区。

Barrel + Tilted Endcap 相对球面方案的优势总结

物理 : 在中心快度区提供最优的 $r-\phi$ 平面弯曲测量精度, 与螺线管磁场天然匹配。

磁场 : 整个桶部位于磁场均匀区内, 测量系统误差最小。

模块化 : 标准化 Stave/Ring 单元, 并行制造与测试, 大幅降低造价与周期。

冷却 : 管道沿规则几何路径布置, 流量分配均匀, 热管理可预测。

服务 : 线缆沿规则方向引出, 无局部材料堆积。

维护性 : 单层 Stave/Ring 可独立拆卸更换, 而不影响相邻层——球面结构中更换任意一片将牵连全局。

成熟度 : Barrel + Endcap 拓扑经过 LEP、Tevatron、LHC 三代对撞机验证, 工程风险可控。

五、结论

综上所述, "多层球面洋葱皮"结构虽然在直觉上看似对称优美, 但在物理测量精度 (磁场匹配与动量分辨率)、工程制造可行性 (非标准化模块、对准困难、冷却不均、服务引出复杂) 以及系统造价与风险控制 (技术成熟度低) 三个维度上全面劣于改进型 Barrel + Endcap 拓扑。探测器设计的核心哲学——如 ppt 第 17-18 页反

复强调的——是"从物理需求出发，在系统层面寻求最优折中，而非追求单一维度的几何完美"。球面方案恰恰违背了这一原则：它为了几何对称性，牺牲了与螺线管磁场的兼容性、模块化制造的可行性以及冷却与服务的工程可实现性。

因此，笔者坚定反对球面方案，推荐在 Barrel + Endcap 框架下继续推进 tilted rings、轻量化复合材料支撑、以及两相 CO₂ 微通道冷却等关键技术，为下一代强子对撞机探测器提供物理性能与工程可行性兼备的最优解。