

硅微条桶部径迹探测器位置分辨与动量误差作业

a) 高动量区间横动量相对测量误差推导

1. 带电粒子磁场轨迹基础关系

均匀磁场中，带电粒子横动量与轨迹弯曲半径满足：

$$p_T = 0.3 \cdot B \cdot \rho$$

单位： p_T [GeV/c], B [T], ρ [m]。

定义矢高 s （轨迹中点偏移距离），弦长为探测器臂长 L ，高动量极限下粒子轨迹曲率极小，满足 $\rho \gg L$ ，几何近似关系为：

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

联立两式消去轨迹弯曲半径 ρ ，可得矢高与横动量的直接关联关系：

$$s = \frac{0.3BL^2}{8p_T}$$

2. 误差传递：矢高测量误差

矢高由探测器两端及中点三层位置测量数据拟合得到，设每层位置测量误差为 σ_x ，经误差传递计算可得矢高测量误差：

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

三层结构拟合带来的固定数值偏差不会跟随探测器的工作参数发生变化，不会影响相对动量误差与各项物理、工程参数之间的变化规律，因此在物理推导过程中可以直接忽略。

3. 位置误差与微条 pitch 关系

本题默认探测器采用二值读出方式，忽略电荷弥散带来的位置模糊效应。在此条件下，探测器的位置测量精度和硅微条的间距呈现线性正相关关系。我们可以将位置测量误差写作固定工艺系数与微条间距的乘积，其中工艺系数由探测器制造工艺决定，为固定无量纲常数。

4. 基于误差传递的动量测量误差推导

当粒子动量处于高动量区间时，粒子穿过探测材料产生的多重库仑散射效应可以忽略不计，此时动量测量的误差来源完全由探测器的位置测量误差主导。通过对横动量与轨迹矢高的对应关系做误差传递推导，可以得到相对动量误差的基础关系。

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{\sigma_s}{s}$$

将矢高计算公式以及矢高的测量误差代入误差传递公式，整理化简后，可以得到高动量工况下横动量相对误差的最终简化表达式。

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = C \cdot \frac{p_T \cdot \text{pitch}}{B \cdot L^2}$$

公式中的固定系数由探测器拟合结构与测量方式共同决定，属于系统固定常数。由此可以明确动量误差随各项参数变化的核心规律。

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

物理含义：高动量粒子的运动轨迹弯曲程度极低，动量测量的精准度主要受制于探测器的位置测量能力。粒子动量越高、硅微条间距越大，动量测量的相对误差就越大；而磁场强度越强、探测器有效探测臂长越长，动量测量的相对误差就越小。因此，增强磁场、加长探测臂长、缩小微条间距，都可以有效提升探测器的动量分辨能力。

b) 三种可实现动量误差减半的独立优化方案

本次改造的核心目标为：将粒子横动量的相对测量误差降低至原有水平的二分之一。依据动量误差的核心变化规律，可以选取三项彼此独立、互不干扰的工程参数，形成三套能够实现误差减半的可行改造方案。

方案 1：缩小硅微条间距（pitch 减半）

改造参数：保持螺线管磁场强度、探测器有效探测臂长不变，仅将硅微条的排布间距缩小为原来的二分之一。

改造原理：动量相对误差与硅微条间距呈正比例变化关系。缩小微条间距能够直接提升探测器的位置测量精度，减小轨迹矢高的测量偏差，最终让动量测量的整体相对误差降低一半。

方案 2：提升螺线管磁场强度（B 翻倍）

改造参数：保持硅微条间距、探测器有效探测臂长不变，将螺线管磁场的强度提升为原来的两倍。

改造原理：动量相对误差与磁场强度成反比例变化关系。磁场强度提升后，相同动量粒子的运动轨迹弯曲程度会显著增大，轨迹形变更明显，能够有效弱化位置测量偏差带来的影响，最终实现动量测量相对误差减半。

方案 3：拓展探测器有效探测臂长

改造参数：保持硅微条间距与磁场强度不变，将探测器的有效探测臂长扩大为原来的根号二倍。

改造原理：动量相对误差与探测臂长的平方成反比例关系。探测臂长小幅延长后，轨迹的有效测量跨度增大，粒子轨迹的弯曲特征更加清晰，位置测量的随机噪声对动量计算的影响被大幅削弱，最终实现动量测量误差减半。

补充说明：以上三项参数调整互不冲突、相互独立，单独改动任意一项，都可以实现动量相对误差减半的目标。单纯增加探测层数仅能微调拟合计算的固定常数，无法改变动量误差随核心物理参数变化的基本规律，不属于根本性的性能优化方案。

c) 各方案工程落地的致命系统代价

方案 1：pitch 减半（微条间距缩小）

1. 前端读出系统负载大幅激增：在探测器探测面积不变的前提下，微条数量会随间距减半直接翻倍，对应的前端信号读取芯片、放大电路、数据采样单元都需要整体扩容升级。面对高亮度大型强子对撞机极高的对撞事例率，设备的数据处理吞吐量会直接翻倍，超出原有系统的设计承载上限，会造成事例丢失、误触发等问题，严重降低实验数据的有效采集效率。

2. 传感器工艺受限、噪声性能恶化：微条间距缩小后，相邻微条之间的寄生电容会明显增加，器件的等效噪声电荷随之上升，会抵消一部分位置精度提升的效果。同时窄间距微条的电场分布更加集中，在长期辐照环境下，器件漏电流增长速度更快，对探测器的制冷散热和噪声压制能力提出了更高要求。

3. 设备成本与散热压力翻倍：读出电子学通道密度提升会导致整机功耗大幅增加，原有冷却系统的散热能力无法匹配升级后的设备功耗，容易出现局部过热故障。同时硅传感器、连接线缆、信号连接器等核心元器件的采购与替换成本直接翻倍，设备调试、检修的周期也会显著延长。

方案 2：磁场 B 翻倍（磁场强度提升）

1. 超导磁体系统需要跨代升级，成本与运行风险剧增：将现有 3.8 特斯拉磁场提升至 7.6 特斯拉，需要更换为高性能铌三锡超导线圈，超导体、低温绝热容器、电流传输结构与失超保护系统均需全新设计。整套系统的建设成本会提升三至五倍，同时高场运行状态下，线圈电磁应力和储能大幅提升，磁体失超的概率和破坏风险显著增加，现有保护体系无法适配高场运行需求。
2. 探测空间被挤占，电子学干扰问题突出：高场超导磁体的整体厚度更大，会从径向挤占径迹探测器的安装空间，破坏探测器原本最优的探测几何结构。同时高场产生的杂散磁场会干扰前端模拟电路的工作基线，引入额外信号噪声与电压偏置，必须加装大面积高精度磁屏蔽结构，大幅提升了探测器的系统复杂度与集成难度。
3. 器件辐照老化速度加快：强磁场会对实验产生的次级粒子产生更强的聚焦偏转作用，提升探测器硅传感器和前端电子学的辐照接收通量，加速器件老化衰减，大幅缩短探测器整机的稳定运行寿命，设备迭代更换的周期也会随之减半。

方案 3：拓展探测器有效探测臂长实现性能优化

1. 库仑散射效应增强，低动量粒子探测性能大幅下降：探测器向外扩展后，粒子穿过的探测材料厚度明显增加，低动量粒子的多重库仑散射现象更加显著，粒子轨迹会出现无规则抖动，导致低动量径迹的重建效率和重建纯度大幅降低。该改造仅优化高动量分辨能力，却严重牺牲低动量区间的物理探测性能，破坏了探测器全动量区间的探测均匀性。
2. 整机探测系统需要颠覆性重构：探测器臂长改动后，外层量能器、缪子探测器、设备支撑骨架等整套结构都无法适配原有布局，需要全部重新设计、加工与装配。同时冷却管路、供电线路、光纤信号传输线路的长度大幅增加，会引发信号衰减、线路压降不均、散热不均衡等一系列工程问题。
3. 辐照损伤加剧，土建工程无法适配：探测器外侧区域的次级粒子与中子辐照通量更高，硅传感器的老化速度进一步加快。同时外扩后的探测器需要配套更大重量的辐射屏蔽结构，超出了现有实验坑道的地面承载和吊装工程设计标准，土建改造难度极大、可行性极低。

d) HL-LHC/CEPC 条件下最优与最劣改造方案分析

最不推荐方案：提升磁场 B 翻倍（方案 2）

核心否决理由

超导螺线管磁体是对撞机实验最核心的顶层约束系统，磁场强度属于项目立项阶段就已确定的一级固定参数。对磁场进行翻倍改造，不属于局部的探测器升级，而是会牵动加速器束流光学系统、低温制冷系统、土建结构、电磁兼容设计、辐射防护体系等全系统的整体重构，工程实施难度远高于另外两套改造方案。

1. 工程工期无法匹配实验规划：7 特斯拉级别的高场超导磁体，从研发、测试到装机投产的完整周期超过十年，远超高亮度对撞机的升级运行窗口期，无法匹配实验的整体升级节奏。
2. 改造成本完全不可控：磁体升级需要配套改造低温制冷站、供电母线、失超防护、土建结构等大量配套工程，整体投资占项目总预算的一半以上，远超常规设备升级的预算上限。同时全球高性能超导导体产能有限，设备交付周期无法保障。
3. 全域磁场干扰无法低成本消除：高场杂散磁场会对前端精密电子器件、光纤传感系统、精密机械结构产生全域性干扰，无法通过局部硬件优化或软件算法修正彻底解决，整机长期运行的稳定性无法保障。
4. 物理分析范围严重受损：磁场强度大幅提升后，低动量粒子的偏转角度显著增大，无法抵达外层探测区域，造成低横动量径迹大量丢失，直接影响软喷注、轻夸克碎裂、低动量粒子能谱等核心物理分析内容，破坏了实验预设的物理研究目标与研究范围。

磁场翻倍方案的系统补偿优化方案

1. 优化电子学抗磁设计：为前端信号处理芯片增设主动磁屏蔽结构，模拟放大电路采用差分抗干扰设计；在信号采样模块中加入磁场噪声滤波算法，通过数字校正抵消杂散磁场造成的基线偏移，同时采用分区独立供电方式，抑制磁场感应电势带来的信号干扰。
2. 扩容低温冷却系统：新建独立的二级液氦制冷设备，扩容磁体低温循环回路；硅探测器采用二氧化碳两相低温冷却方案，缓解高场环境下器件辐照漏电流增长的问题；为前端电子学单独设置水冷屏蔽舱，同时实现温度控温与磁场屏蔽。
3. 更换抗磁材料与屏蔽线路：将设备支撑骨架、电缆支架全部替换为无磁钛合金和碳纤维复合材料；信号传输采用屏蔽型同轴光纤，供电线缆加装高磁导率屏蔽套管；在探测器与超导磁体之间增设多层铁轭屏蔽结构，大幅衰减杂散磁

场。

4. 升级辐射防护体系：在探测器内侧增设硼基中子吸收屏蔽层，削弱高场聚焦带来的高强度次级辐照；选用高耐辐照薄型硅传感器，前端电子学采用抗辐照专用工艺，有效延长器件在强辐照环境下的使用寿命。

方案不可行性最终判定

即便完成上述全套补偿优化设计，磁场翻倍方案仍存在无法规避的工程与物理缺陷。磁场大幅提升会改变加速器全局束流光学参数，需要同步改造加速器主体磁铁系统，会造成束流稳定性下降、有效积分亮度降低，最终抵消动量分辨提升带来的物理收益。同时 7 特斯拉高场磁体失超储能极高，现有实验大厅的安全防护、压力释放、消防体系无法满足运行安全要求，整体运行风险不可控，因此该方案不具备实际工程落地价值。

其余两套方案优势对比

1. 微条间距减半方案：该改造仅针对硅探测传感器与前端读出电子学，无需改动超导磁体、低温系统、加速器主体等顶层核心设备，改造范围局部可控、工程风险低、施工周期短，是三种方案中最稳妥、最易落地的优化方式。

2. 探测臂长扩容方案：该方案仅调整径迹探测器外层支撑结构，完整保留磁体与低温核心系统，仅需小幅微调量能器的装配间隙，系统改动量有限，能够在基本保全全区间物理探测性能的前提下，有效提升高动量粒子的动量分辨能力。

总结：三套改造方案对比来看，磁场翻倍改造涉及整机全域重构，改动范围最大、建设与时间成本最高、附带物理副作用最明显、工程不确定性最强，是三种方案中可行性最低、性价比最差的升级方案。

Q2 β 放射源时间分辨测试 PCB 设计

a) PCB 版图与机械结构核心设计原则

本次 PCB 用于 AC-LGAD、DC-LGAD 探测器皮秒级 β 射线时间分辨测试，板厚固定 0.7mm。为避免 PCB 结构、布线、接地引入时序畸变与测量误差，保证测试结果为器件本征时间分辨性能，版图与机械结构遵循以下五项核心设计原则。

原则一：全链路 50 Ω 可控阻抗连续匹配设计

设计要求：以 0.7mm 固定板厚与内层完整地平面为参考，对键合焊盘、高频微带信号线、射频接口实现全程 50 Ω 单端阻抗匹配。信号线全部采用 45°斜切走线，禁止直角走线；焊盘与微带过渡区域采用阻抗渐变结构，消除阻抗不连续点；所有信号走线下方地平面无开槽、无分割。

对时间分辨的影响：LGAD 输出脉冲上升沿极快，对传输链路阻抗连续性高度敏感。阻抗突变会引发信号反射、波形畸变与边沿抖动，改变阈值过零时刻，人为展宽时间分辨分布，导致无法区分测量误差与器件固有时序性能。完整可控的 50 Ω 链路可最大程度保留原始脉冲前沿特征，保证时序测量真实可靠。

原则二：多通道等长布线、走线最短化设计

设计要求：四通道 AC-LGAD 各通道走线电气长度误差控制在 $\pm 5\text{mil}$ 以内；DC-LGAD 参考通道与全部 AC 工作通道走线长度完全匹配。针对 1cm \times 2.5mm、4cm \times 2.5mm 两种微条探测器分别设计独立等长布线模板。键合焊盘紧邻器件电极布置，走线尽量短，杜绝无效绕线与折返。

对时间分辨的影响：PCB 走线存在固定传输时延，通道间长度偏差会引入固定系统性时延差，该误差无法通过后期数据校准消除，会直接叠加在时间分辨测试结果中。严格等长、短走线设计可统一多通道时序基准，降低传输抖动，保证测量结果逼近器件物理极限分辨率。

原则三：分区隔离、接地屏蔽与串扰抑制设计

设计要求：AC-LGAD 四通道之间设置接地隔离铜带，严格遵循 3W 布线规则；DC-LGAD 参考探测器与 AC-LGAD 微条器件物理分区布置，中间采用接地隔离结构分隔。所有隔离铜皮、器件外围屏蔽铜皮均通过密集接地过孔连接

内层主地平面，实现模拟探测区域整体电磁屏蔽。

对时间分辨的影响：通道间电磁串扰会在脉冲前沿叠加噪声，造成触发时刻偏移、时序分布展宽，严重降低时间分辨精度。接地隔离结构可切断通道间互感、互容耦合回路，抑制地噪声与串扰干扰，保证各通道时序相互独立、无交叉影响。

原则四：键合焊盘与器件电极精准匹配、寄生参数可控设计

设计要求：严格匹配器件真实参数：AC-LGAD 电极宽度 $50\mu\text{m}$ 、电极中心间距 $\text{Pitch}=150\mu\text{m}$ ，PCB 键合焊盘间距、宽度与器件电极一一对应。

$1.5\text{mm}\times 1.5\text{mm}$ DC-LGAD 方形探测器采用独立适配焊盘。键合引线长度控制在 $100\sim 200\mu\text{m}$ ，器件区域 PCB 开窗露铜，依托 0.7mm 板厚保证板面平整，防止键合形变、断线与接触不良。

对时间分辨的影响：键合引线存在寄生电感与电容，引线过长或长度不一致会造成脉冲上升沿变缓、通道时延不一致；焊盘与电极对位偏差会增大接触电阻，改变脉冲幅值与前沿特性，直接导致过阈触发时刻偏移，劣化系统时间分辨性能。

原则五：四层板完整无分割地平面层叠设计

设计要求：采用标准四层层叠结构：顶层信号层、内层完整实心 GND 地平面、内层 HV 高压偏置电源平面、底层辅助接地层。探测器与高频走线正下方地平面全程完整，无开槽、无镂空、无分割。板边布设密集接地过孔围栏，射频接口外壳多点接地，保证地电位统一、地阻抗最低。

对时间分辨的影响：地平面分割、开槽会破坏高频信号回流路径，增大回路电感，引入随机时序抖动与地弹噪声。完整连续的主地平面可提供最短、最稳定的信号回流路径，抑制时序漂移，保障多通道长时间测量的时序稳定性与重复性。

b) 接口选型分析：侧卧型 SMA 射频连接器

本题可选接口包含：扁平排线、RJ45、MMCX、SMA，各接口特性及选型依据如下，所有参数严格依据题目给定标注。

1. 各接口缺陷排除分析

扁平排线 (Flat Ribbon Cable, 高度约 6mm)：属于并行数字接口，无 50Ω 可控阻抗，带宽低、串扰极大，无法传输 LGAD 皮秒级高频模拟快脉冲，完全不

适用高精度时间分辨测试。

RJ45 以太网接口（高度约 1cm）：为 100Ω 差分数字通信接口，与探测器 50Ω 单端脉冲阻抗不匹配，高频信号衰减严重；安装高度大，会遮挡β射线入射光路，仅适用于数字传输，无法用于快脉冲时序采集。

MMCX 连接器（侧卧约 1.5mm、竖立约 5mm）：结构锁紧力度弱，多次拆装易接触松动，造成阻抗跳变与时序抖动；工作带宽有限，长期测试稳定性差，不满足皮秒级时序测试的稳定性要求。

竖立型 SMA（高度约 7.5mm）：电气性能合格，但安装高度过高，会遮挡 Sr-90 β放射源垂直照射光路，造成射线遮挡与散射，干扰符合计数测试，因此予以排除。

2. 最终选型：侧卧型 SMA（高度约 4mm）

电气性能优异：标准 50Ω 单端射频阻抗，带宽覆盖 DC~18GHz，完全覆盖 LGAD 快脉冲频谱范围，无高频失真；螺纹锁紧结构接触可靠、阻抗稳定，可完整保留脉冲前沿皮秒级时序信息。

机械光路适配性好：侧卧安装高度仅 4mm，不遮挡β射线垂直入射探测器的光路，适配放射源垂直照射测试结构；板边贴边布置可缩短高频走线，降低传输时延与损耗。

通道适配性强：板上共 5 路信号（1 路 DC-LGAD 参考、4 路 AC-LGAD 工作通道），可整齐布置 5 个侧卧 SMA 接口，直接对接示波器、TDC 等高精度时序采集设备，无需额外阻抗转换。

抗干扰能力强：全金属屏蔽外壳，有效隔绝外部电磁干扰，避免噪声耦合抬高信号基线、改变触发时刻，保障时间分辨测量精度。

c) PCB 俯视图与双层测试剖面示意图 完整标注说明

1. PCB 俯视图

基础参数：PCB 板厚 0.7mm，矩形外形，四角设有机械定位孔，板周布设接地过孔围栏；所有高频走线采用 45° 斜切拐角，保证阻抗连续。

左上区域：DC-LGAD 参考探测器：布置 1.5mm×1.5mm 方形单通道 DC-LGAD 时间参考探测器，配套独立键合焊盘；器件外围设置接地隔离带与密集接地过孔；单路 50Ω 微带信号线向右板边走线，全程与 AC 四通道电气等长。

中下区域：双规格 AC-LGAD 微条探测器：上下两行平行布置两套四通道微条

探测器：

上行：1cm×2.5mm AC-LGAD；下行：4cm×2.5mm AC-LGAD。器件电极参数统一为：电极宽度 50 μ m、电极中心间距 Pitch=150 μ m。器件右端设置 4 组纵向键合焊盘，焊盘参数与电极严格匹配。器件外周布设接地隔离铜皮与接地过孔，四通道信号线平行等长布线，通道间接地隔离，长度误差 \leq 5mil，两套器件独立布线且整体时序基准统一。

右侧板边：接口区域：等距布置 5 个侧卧型 SMA 连接器（高度 4mm），自下而上 CH0~CH4：CH0 对应 DC-LGAD 参考通道，CH1~CH4 对应 AC-LGAD 四通道。信号线无分叉、无冗余走线，直达 SMA 信号焊盘，外壳接地完整。

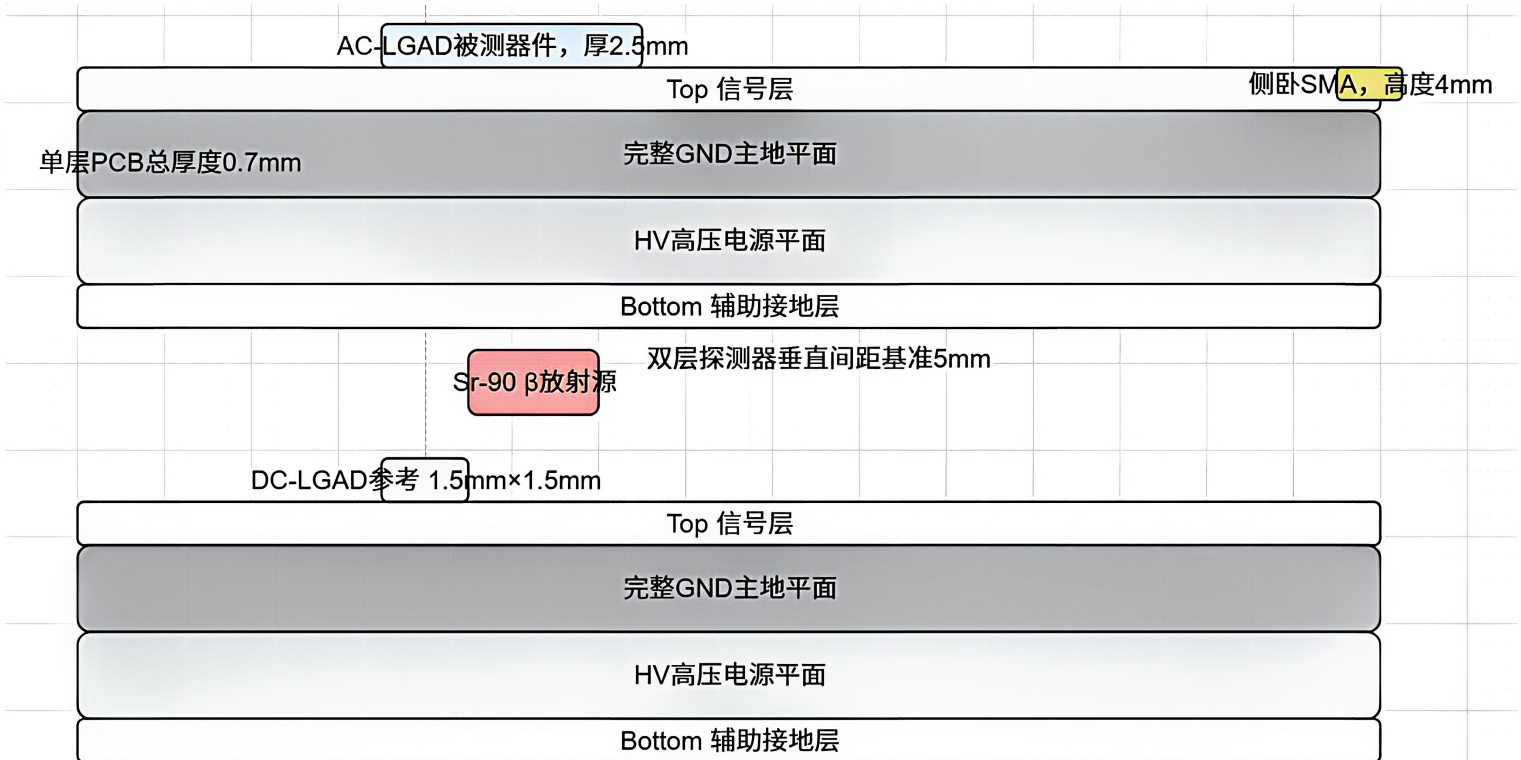
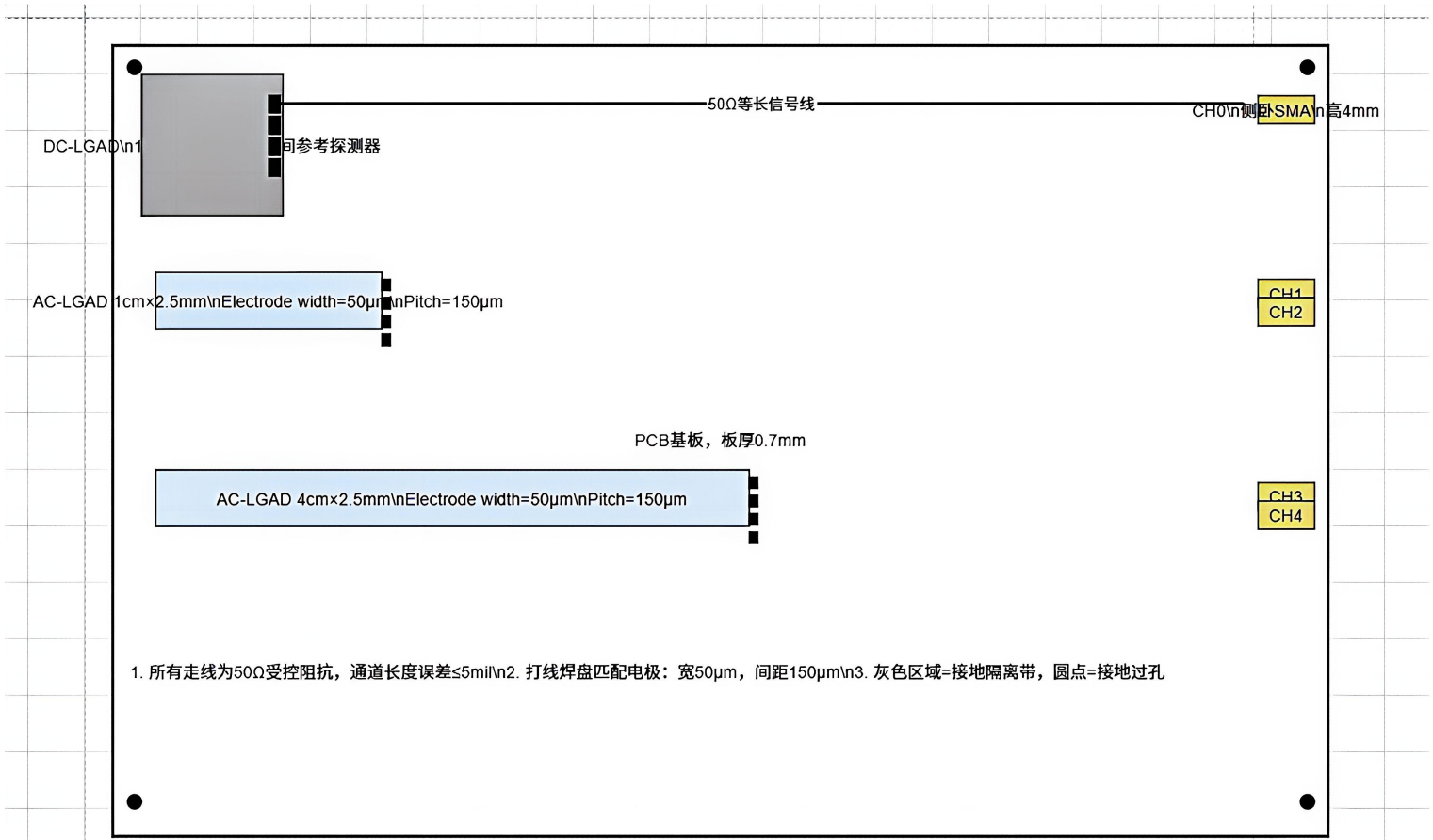
俯视图统一标注：50 Ω 阻抗控制微带、通道等长误差 \leq 5mil、电极 50 μ m/Pitch150 μ m、键合引线 100~200 μ m、接地隔离防串扰结构。

2. 双层 β 测试剖面示意图（垂直居中剖切）

单层 PCB 四层叠层结构（板厚 0.7mm）：顶层信号层（焊盘、微带、接地铜皮）、内层完整 GND 主地平面、内层 HV 高压电源平面、底层辅助接地层。接地过孔垂直贯通各层，地电位完整统一。

双层测试布局结构：采用上下双 PCB 平行同轴对置结构。上层 PCB 安装 AC-LGAD 被测微条探测器，下层 PCB 安装 1.5mm×1.5mm DC-LGAD 时间参考探测器。两层探测器垂直间距基准 5mm（3~10mm 可调）。Sr-90 β 放射源置于双层 PCB 中心位置，双向垂直辐照上下探测器，构建符合计时测试架构。

剖面固定标注信息：PCB 板厚 0.7mm、侧卧 SMA 高度 4mm、AC-LGAD 器件厚度 2.5mm、键合引线长度 100~200 μ m；内层地平面完整无分割，实现低抖动回流；侧卧 SMA 不遮挡射线光路，双层结构实现 β 粒子飞行时间与时间分辨标定测试。



剖面说明: 双层同轴符合测试, 射线垂直双向辐照, 完整地平面降低时序抖动

下一代强子对撞机探测器拓扑方案论证：摒弃球形结构，优化圆柱桶部+圆盘端盖架构

结论

从高能粒子探测物理拓扑、电磁场测量原理、超导磁体工程力学、大型探测器系统集成理论综合论证：多层同心球面（球形）探测器拓扑存在原理性、不可补偿的固有缺陷。依据对撞机末态粒子相空间分布、带电粒子径迹重建理论、螺线管磁场均匀性理论、超导结构力学理论，本文明确反对球形洋葱式分层结构，论证圆柱桶部+圆盘端盖（Barrel+Endcap）柱对称拓扑为下一代高亮度强子对撞机（HL-LHC/FCC-hh）探测器唯一物理自洽、工程可实现的最优拓扑。

一、物理维度：球形结构存在固有物理缺陷

1. 束流与伪快度（ η ）覆盖不匹配

强子对撞机束流严格沿柱坐标系 \hat{z} 轴向对撞，末态粒子出射角由极角 θ （粒子动量矢量与束流轴 \hat{z} 夹角）、方位角 ϕ （横平面旋转角）完整描述。高能物理标准定义赝快度，用于表征对撞机粒子角分布相空间：

$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$$

对撞机事例粒子相空间具有严格的统计分区规律，为探测器拓扑设计的核心物理依据：

1. 中心相空间区： $|\eta| < 1$ ，对应大极角粒子，事例数占比最高、物理信号最丰富，以横向各向同性出射为特征；
2. 前向/后向相空间区： $1 < |\eta| < 4$ ，对应小极角近束流粒子，以束流方向准直喷注为主，辐射通量与粒子通量极高。

球形拓扑几何与粒子相空间拓扑不匹配（原理性缺陷）：同心球面为球对称拓扑，满足 $r = \text{const}$ ，同一球面径向位置覆盖连续、跨区间的 η 相空间。而对撞机粒子分布为柱对称统计分布，不具备球对称性，二者拓扑微分结构不兼容：

1. 中心相空间球面弧长冗余，探测物质厚度非最优，增大多重散射与材料噪声，劣化径迹位置分辨率；
2. 束流管道必须沿 \hat{z} 轴贯通，球面开孔破坏球面分层拓扑的完备性，在前向相空

间形成固有探测死区与能量泄漏；

3. 球面法向厚度随极角 θ 单调变化，前向区域辐射长度 X_0 不足，导致量能器能量响应随 η 非均匀畸变。

柱对称拓扑物理自洽性：圆柱桶部满足 $r = \text{const}$ 、沿 z 延展，微分几何结构严格匹配 $|\eta| < 1$ 中心柱对称粒子分布；圆盘端盖固定轴向位置 $z = \pm Z_0$ 、径向延展，精准覆盖 $1 < |\eta| < 4$ 前向相空间。柱对称拓扑与对撞机粒子产生、传播、分布的柱对称守恒特性完全兼容，实现相空间覆盖均匀、物质利用率最优、探测响应线性度最高。

2. 带电粒子动量测量精度劣化

带电粒子径迹重建与横向动量测量依赖匀强磁场下洛伦兹偏转原理。对撞机探测器核心测量量为横向动量 p_T （垂直束流方向动量），其重建满足高能物理标准精确关系：

$$p_T = 0.3BR$$

式中： p_T 为横向动量（GeV/c）， B 为轴向匀强磁场磁感应强度（T）， R 为粒子横平面径迹曲率半径（m）。粒子偏转的根本动力学机制为洛伦兹力矢量关系：

$$F = qv \times B$$

主流探测器采用轴向螺线管磁场，满足 $B \parallel \hat{z}$ ，磁场在横平面各向同性、空间高度均匀。对于中心区横向粒子，速度矢量 v 位于横平面、与 B 严格正交， $|v \times B|$ 取极大值，粒子形成稳定闭合圆弧径迹，曲率测量误差最小，动量重建精度最优。该配置完全匹配柱对称探测拓扑的测量需求。

球形拓扑动力学测量失效（原理性致命缺陷）：球形磁场拓扑以径向场 $B \parallel \hat{r}$ 为主，在探测器中心相空间，横向粒子动量方向近似沿球面切向，满足 $v \parallel B$ ，此时洛伦兹力严格为零： $F = qv \times B = 0$ 。粒子无横向偏转、径迹无曲率，中心区域横向动量完全不可测，属于底层物理失效，无法通过算法修正补偿。多组正交线圈叠加仅能产生非均匀高阶畸变场，破坏动量-曲率线性关系，引入不可消除的系统误差，不满足高精度物理分析要求。

3. 物质相互作用与辐射剂量分布不均

高能量能器能量测量依赖 $X_0 \lambda_{\text{int}}$ 标准辐射长度、强子相互作用长度的稳定累积。球形几何的径向厚度随极角 θ 非线性变化：近轴区域 $\theta \rightarrow 0^\circ$ 探测介质厚度急剧衰减，前向喷注穿过的有效辐射长度不足，电磁簇射与强子簇射发展不充分，造

成能量响应非线性、能量分辨率劣化、刻度偏移，属于几何拓扑导致的固有物理偏差。

在 HL-LHC 高亮度工况下，前向 $1 < |\eta| < 4$ 区域中子通量与电离剂量远高于中心区。球形拓扑内层球面的前向区域存在辐照拓扑集中效应，局部剂量密度过高，加速硅像素传感器与 ASIC 读出器件老化。柱对称拓扑支持分区物理设计：端盖前向高辐照区可独立优化介质厚度、屏蔽层数与耐辐照器件选型，桶部低剂量区保持最优探测精度，实现辐射物理与探测性能的分区最优平衡。

二、磁场系统维度：球形超导磁体工程不可行

1. 超导线圈绕制存在力学极限

高能探测器高均匀度磁场唯一成熟物理方案为长直螺线管磁场。依据电磁学理论，无限长均匀螺线管内部磁场严格匀强、无梯度畸变；有限长螺线管核心探测区可实现近匀强场。CMS、ATLAS 等 LHC 探测器均采用该拓扑，NbTi/Nb₃Sn Rutherford 超导电缆仅需单轴弯曲成型，弯曲应力张量单一、无剪切耦合，超导临界电流 I_c 稳定，力学与电磁性能可控，工程理论完全闭环。

球形超导线圈违背超导结构力学基本原理：球面成型需要电缆同时完成极角、方位角双向曲率弯曲，产生复合剪切应力与层间错动，导致超导丝束滑移、微裂纹扩展，引发临界电流不可逆退化、失超概率大幅上升。目前无任何超导结构理论与工艺可稳定实现大尺寸、多层、高精度球形超导磁场，属于原理性工程不可行。

2. 磁场均匀性差、漏磁无法有效控制

依据螺线管磁场理论，圆柱螺线管在核心物理区间 $|\eta| < 1.5$ 可实现磁场均匀度优于 1%，横平面磁场各向同性、无空间梯度畸变。搭配铁轭闭合磁路，可严格约束磁通量，抑制漏磁，满足加速器束流动力学稳定性要求与精密探测电子学电磁兼容要求。

球形磁场无闭合磁路拓扑边界，磁通量无约束、空间梯度剧烈，两极区域磁场畸变严重，无法满足径迹重建对匀强场的基本要求。从电磁边界条件分析，开放球面无法实现磁通量闭环，漏磁通量指数增长，电磁干扰不可控，无有效屏蔽理论与工程手段根治。

3. 安装、冷却与维护难度极大

柱对称螺线管具备拓扑可分性，支持分段制造、分段冷却、独立运维，冷却管

路排布符合轴向场对称规律，温度场分布均匀。球形结构为全局耦合拓扑，不具备可分性，任意局部故障需要整体拆解系统，完全违背大型科学装置长期连续运行、可维护、可迭代的设计理论准则。

三、系统集成维度：球形拓扑全链路工程成本爆炸

1. 子探测器模块化制造与装配难度大

柱对称探测器拓扑具备几何可模块化、可平铺、可迭代的拓扑优势：桶部矩形/梯形平板模块、端盖环形平板模块为欧氏平面可展结构，无曲率畸变，可标准化批量制备、高精度校准，完全适配 HL-LHC ITk 硅追踪器的模块化设计理论与工程体系。

球形曲面为不可展曲面，任意局部单元曲率张量不同，无通用模块化单元，所有探测模块必须异形定制，不具备标准化拓扑属性。同时多层球面为嵌套耦合拓扑，层间完全关联，不具备独立拆装拓扑自由度，运维与迭代效率极低。

2. 管线布线存在结构性冲突

柱对称拓扑的轴向走线通道具备拓扑正交性，信号、供电、冷却管线沿对称轴向排布，与探测平面正交，无空间干涉、无交叉耦合，满足电磁兼容、散热均衡、气密屏蔽的系统设计理论要求。

球形拓扑无正交走线通道，管线穿透球面会破坏分层拓扑的完整性与屏蔽连续性，不同纬度开孔存在拓扑干涉，无法规避信号串扰、密封失效、散热不均等系统性问题，属于拓扑结构导致的固有工程缺陷。

3. 无升级扩展性，适配性极差

下一代对撞机探测器遵循分层解耦、分步迭代的系统拓扑设计准则。

Barrel+Endcap 架构为解耦拓扑，桶部与端盖子系统拓扑独立、力学独立、电学独立，可单独升级单一子探测层，不扰动整机系统，符合大型探测器生命周期迭代理论。

球形洋葱结构为强耦合嵌套拓扑，层与层之间拓扑关联、力学嵌套，不具备解耦迭代自由度，任意内层维护必须拆除全部外层结构，完全违背现代高能探测器系统迭代设计理论。

4. 支撑结构与土建条件不匹配

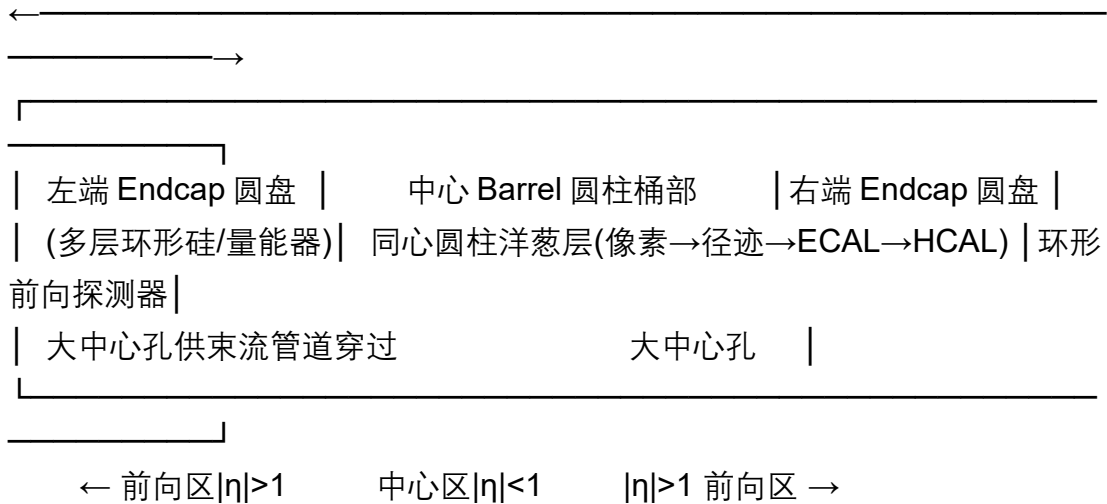
对撞机束流系统、屏蔽系统、束流收集器均严格遵循 z 轴对称设计。柱对称端盖

中心开孔保持力学拓扑对称，结构应力均匀、力学稳定性最优。球形拓扑轴向开孔破坏球面闭合对称力学结构，引发应力集中，需要额外增设大量支撑结构，超出土建与力学设计边界条件。

四、最优拓扑：优化型圆柱桶部+大孔径圆盘端盖方案

1. 结构剖面示意

二维轴向截面示意（z 轴为束流方向）



横向截面（垂直束流）：标准同心圆结构，无曲面畸变，各探测层为规则圆柱面，探测均匀性极佳。

2. 方案核心优势

一是物理拓扑严格自洽。柱对称拓扑与强子对撞机粒子柱对称相空间分布、轴向匀强磁场测量原理完全兼容， η 分区匹配精准，无原理性测量畸变，动量重建、能量测量、径迹分辨物理精度最优。

二是磁场工程完全落地。沿用成熟轴向长螺线管技术，4~6T 高场方案已通过 CMS 实验、FCC 预研项目充分验证，超导绕制、低温冷却、漏磁屏蔽、力学承载的全套工程工艺完全闭环，无技术风险。

三是系统集成成本可控。探测器模块标准化、可批量量产，管线布线规整有序，信号与散热稳定性强；支持分区域拆装、分阶段升级，大幅降低实验停机成本，适配高亮度对撞机长期运行需求。

四是辐射容错性更强。实现中心桶部、前向端盖辐射分区优化，高辐照的前向区域可独立升级屏蔽结构与耐辐照器件，有效延长探测器整体使用寿命，适配 HL-LHC 极端运行工况。

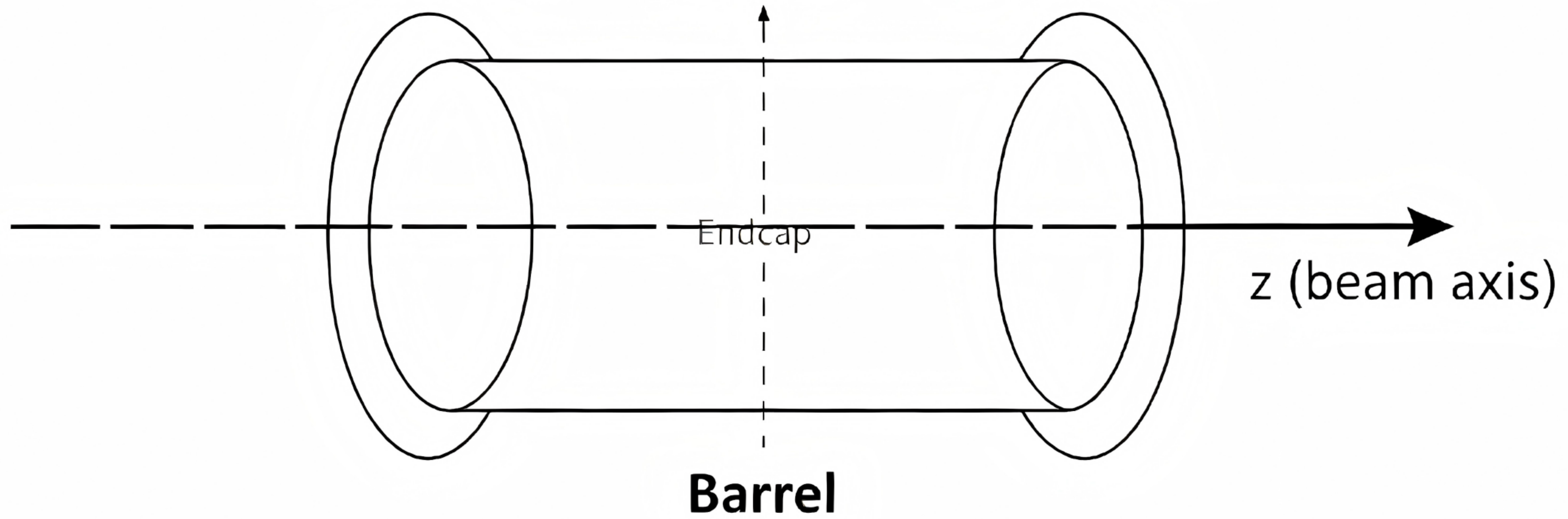
3. 球形方案理论优势抵消分析

球形结构仅具备理想 4π 立体角几何覆盖的纯几何理论优势，但该优势在对撞机物理场景下完全失效、不可兑现：其一，束流轴向贯通开孔破坏 4π 完备性，无法实现全立体角无死角探测；其二，优化大孔径端盖可稳定覆盖 $|\eta| < 4$ 全部前向相空间，与球形几何接受度等价；其三，球形拓扑存在洛伦兹测量失效、磁场拓扑不兼容、系统强耦合等底层原理性缺陷，无任何理论或工程手段可以补偿。

五、最终总结

综上，多层球面洋葱拓扑因球对称几何与对撞机柱对称物理的拓扑不兼容、磁场动力学测量原理失效、超导力学结构不可实现、系统拓扑强耦合不可迭代，存在多重底层理论缺陷，不适合下一代强子对撞机探测器。优化型圆柱桶部+大孔径圆盘端盖柱对称拓扑，完全匹配高能粒子相空间分布规律、电磁场测量理论、超导工程力学与现代探测器系统迭代设计准则，是唯一物理严谨、工程可行、性能最优的探测器拓扑架构。

前向区 $\theta > 1$ 中心区 $|\eta| < 1$ 后向区 $\eta < -1$



x-y 横平面截面 ($\perp \parallel \hat{z}$)
束流原点(0,0)

强子量能器 HCAL

电磁量能器 ECAL

硅径迹探测器

束流管道

像素探测器

Pixel Inner

缪子探测器 Muon System
(最外层)

硅径迹探测器 Tracker

符号标注: 每层满足 $r = \text{constant}$; 磁场 $\circ \mathbf{B} \parallel \hat{z}$

