

科创作业 7

学长 我现在期末周 复习任务较重 相关绘图将在七月十日之后补上

A1:

a) 高动量极限下相对动量误差 σ_{p_T}/p_T 推导:

带电粒子在轴向匀强磁场中, 洛伦兹力提供圆周向心力, 横向动量与回旋半径关系:

$$R = p_T/qB$$

HL-LHC 类实验探测器为多层硅微条桶结构, 径向总跨度 L (最内层至最外层径向距离)。高动量极限满足 R 远远大于 L , 轨迹弯曲极弱, 弧垂 s (圆弧中点弦向最大偏移) 近似:

$$s \approx \frac{L^2}{8R} = \frac{qBL^2}{8p_T} \quad \text{二值读出、忽略电荷分享时, 硅微条单点位置误差服从均匀分布, 标准差: } \sigma_x = \frac{p}{\sqrt{12}}$$

准差: $\sigma_x = \frac{p}{\sqrt{12}}$ p 为微条 pitch, 可见 $\sigma_x \propto p$ 。

N 层等间距传感器最小二乘拟合后, 弧垂拟合误差:

$$\sigma_s \propto \sigma_x \cdot \frac{L}{N^{3/2}}$$

误差传递: $p_T \propto \frac{qBL^2}{8s}$, 微分传递得到高动量极限核心误差公式:

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

代入 $\sigma_x \propto p$, 得到简化正比表达式:

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

b) 三种独立方案, 将相对动量误差缩小 1/2

由 $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T p}{BL^2}$, 固定 p_T , 单独改变单一参数实现误差减半:

1. 缩小硅微条 pitch 至原尺寸 1/2

参数改动: 电极间距 $p \rightarrow p/2$ 。

原理: σ_{p_T}/p_T 与 p 线性正相关, pitch 减半, 单点位置误差 σ_x 同步减半, 整体动量相对误差直接缩小一半。

2. 超导磁场磁感应强度 B 提升至 2 倍

参数改动: 磁场 $B \rightarrow 2B$ 。

原理: σ_{p_T}/p_T 与 B 成反比, 磁场翻倍后粒子回旋半径减小, 轨迹弧垂增大, 弧垂拟合相对误差降低, 动量误差减半。

3. 径向跨度 L 扩大至 $\sqrt{2}$ 倍

参数改动: 径向总跨度 $L \rightarrow \sqrt{2}L$, L^2 变为原来 2 倍。

原理: σ_{p_T}/p_T 与 L^2 成反比, 径向覆盖范围增大后多层拟合弧垂约束更强, 拟合误差降低,

动量相对误差缩小 1/2。

c) 三套方案落地对应的系统级致命代价

方案 1：微条 pitch 减半

1. 读出通道数量暴涨：单位面积通道数提升 4 倍，前端 ASIC 通道、IO 引脚、模拟放大单元成倍增加，芯片功耗超线性上升，散热压力陡增。
2. DAQ 数据带宽与存储瓶颈：事例原始数据量 4 倍增长，前端缓存、光纤传输带宽、后端磁盘存储全部触及工程上限，触发系统死时间大幅升高。
3. 微互连工艺良率暴跌：键合凸点间距需同步缩小至 25 μm 以内，光刻、回流焊、倒装工艺窗口极窄，模块制造成本指数上涨，批量生产良率不足 50%。

方案 2：磁场 B 提升至 2 倍

1. 磁体储能与机械结构过载：磁能 $E \propto B^2$ ，储能增至 4 倍，巨大电磁张力要求加厚高强度支撑合金，磁铁总重量、土建支撑造价大幅提升。
2. 低温制冷系统负荷翻倍：高场下超导线临界电流衰减，稳态焦耳热、交流损耗显著增加，液氦制冷机组功率、低温传输管线复杂度大幅上升，长期运行制冷成本激增。
3. 前端电子学电磁干扰恶化：漏磁场同步增强，干扰硅传感器漏电流、ADC 参考电位，ASIC 内部出现磁致噪声，位置测量偏移、时间游走显著增大。

方案 3：径向跨度 L 扩大 $\sqrt{2}$ 倍

1. 硅探测器采购成本激增：传感器总面积随 L^2 增长，高辐射耐辐照硅片、读出模块采购成本翻倍，辐照老化更换成本同步上涨。
2. 低动量次级顶点分辨严重退化：若外层外扩、内层半径不变，粒子斜入射硅介质有效厚度 $X / \cos\theta$ 增大，多次库仑散射角升高，撞击参数分辨变差，无法区分 b/c 强子次级衰变顶点。
3. 机械支撑结构刚度不足：探测器支撑筒悬臂加长，整体固有共振频率下降，加速器束流振动引发微米级模块形变，静态几何对准常数无法修正动态偏移。

d) 最不推荐方案、补偿方案与不可行论证

选定最不推荐方案：方案 3

不推荐理由：HL-LHC/CEPC 核心物理目标依赖次级顶点重建，用于寻找重味强子、新物理稀有衰变。低动量粒子库仑散射是撞击参数分辨的核心限制，扩大 L 必然增加粒子穿过硅材料的有效辐射长度，散射角不可逆增大；仅为小幅提升高动量 (100 GeV/c) 动量精度，牺牲实验最关键的重味物理探测能力，物理收益与代价严重失衡。

若强制采用该方案的系统补偿优化手段

1. 支撑结构轻量化改造：替换传统碳纤维为石墨烯复合泡沫支撑，降低整体物质量，小幅削减多次散射贡献；
2. 先进低功耗 ASIC 迭代：采用 22nm FD-SOI 工艺读出芯片，降低热负载，配套微通道高效冷却抵消大面积传感器散热压力；
3. 在线动态几何对准系统：开发实时束流事例形变拟合算法，逐事件修正支撑结构振动带来的微米级位置偏移。

方案根本不可行论证

硅材料辐射长度 X_0 为固有物理常数，无法通过结构、材料优化消除。径向跨度增大后，粒子斜入射硅传感器的路径长度随极角快速上升，有效介质厚度不可逆增加，多次库仑散射项存在物理下限，任何电子学、机械改造都无法抵消散射带来的次级顶点分辨劣化，该方案系统层面不具备可行性。

A2:

a) PCB 版图与机械结构五大核心设计原则，附对时间分辨率的影响

核心 5 项设计准则：

1. 全链路 50Ω 连续受控阻抗传输线设计

原理：AC-LGAD 输出皮秒级快脉冲，属于射频传输线信号，走线宽度、介质厚度、焊盘突变均会造成阻抗跳变，引发信号反射、前沿振铃畸变。整条通路（传感器焊盘-键合线-信号线-输出接口）全程维持标准 50Ω 微带阻抗，焊盘做渐变阻抗过渡。

对时间分辨率影响：阻抗失配产生反射波形叠加原始脉冲，信号过阈时刻随机偏移，额外引入时间抖动，测得分辨率远差于器件物理极限；连续 50Ω 阻抗完整保留陡峭脉冲前沿，时间提取精度贴近器件本征性能。

2. 完整连续低阻抗参考地平面，最小化信号回流回路电感

原理：高速信号噪声来源于回流回路电感，完整地平面为高频返回电流提供最短路径，压缩回路面积，抑制地弹噪声、共模干扰。LGAD 信号幅度微弱，地平面噪声会直接耦合至信号通路。

对时间分辨率影响：地平面割裂、缺口会增大回路电感，产生高频噪声叠加信号，信噪比下降，时间抖动显著增加；完整地平面压低噪声基底，消除额外时间测量误差。

3. 所有读出通道信号严格物理等长布线

原理：PCB 介质中电信号传播速度固定，长度差会带来固定传输时延差。DC-LGAD 为时间参考道，4 路微条 AC-LGAD 为被测通道，皮秒级时间测量对厘米级走线差高度敏感。

对时间分辨率影响：走线长度差引入系统时延偏差，掩盖传感器真实时间差，测量结果失真；等长布线消除路径传输时差，测量抖动仅来源于传感器自身。

4. 微型键合焊盘、最短键合金线，压低寄生 LC 参数

原理：待测微条电极宽 50μm、pitch 150μm，大面积焊盘带来对地寄生电容，长金线引入串

联电感，LC 组合构成低通滤波，拖慢脉冲上升沿。PCB 厚度仅 0.7mm，布局紧凑化缩减键合跨度。

对时间分辨率影响：寄生 RC/LC 常数越大，脉冲上升时间越长，时间甄别随机抖动 σ 增大；小焊盘+短金线降低寄生参数，保留快时间前沿，还原器件极限时间响应。

5. 传感器区域大面积开窗，精密机械定位固定放射源

原理：Sr-90 β 电子会被 PCB 铜箔、介质散射吸收，改变粒子到达传感器时刻与沉积能量；放射源位置偏移会造成信号幅度波动，诱发时间游走效应。PCB 预留高精度定位孔约束源支架。对时间分辨率影响：介质/金属遮挡带来随机散射延时，源位置变动产生幅度相关时间偏移，人为劣化时间分辨；开窗+稳定机械定位保证粒子入射条件统一，测量结果仅反映传感器物理性能。

b) 数据接口选型：SMA 同轴连接器

淘汰其余接口理由：

1. 扁平排线：无统一受控阻抗，通道互耦串扰严重，无屏蔽层，高频脉冲前沿发生严重畸变，会引入数百皮秒级固有传输时延差，完全无法满足皮秒级时间测量需求；
2. RJ45 网口：内部集成隔离变压器，会衰减模拟信号直流与低频分量，仅适配数字编码以太网信号，无法直接传输 LGAD 原始模拟快脉冲；
3. MMCX：标准阻抗 50 Ω 但工作带宽上限仅 6GHz，卡扣式锁止结构反复插拔后接触电阻发生不可逆漂移，破坏整条传输链路阻抗连续性；0.7mm 超薄 PCB 焊盘机械强度不足，插拔应力易造成焊盘开裂。

选择 SMA 的核心原因：

1. 全频段稳定 50 Ω 阻抗匹配，工作带宽覆盖 DC~18GHz，无明显信号反射与波形畸变，完整保留传感器输出的陡峭脉冲前沿；
2. 螺纹锁紧结构可提供恒定轴向接触压力，接触电阻重复精度极高，长期辐照、多次插拔均不会产生阻抗漂移，时间游走效应稳定可控；
3. 配套大面积接地焊盘，适配 0.7mm 薄 PCB，焊接剥离强度高，维持稳定接地参考电平，抑制前端电子学耦合噪声；
4. 配套半刚性同轴电缆群时延平坦，不同通道间无固有传输时延偏差，满足多通道时间符合测量的基础要求。

c) 绘图文字说明

PCB 俯视图：标注 1.5mm DC-LGAD 参考传感器、1cm 与 4cm 四通道 AC-LGAD 待测器件、微型键合焊盘、金线打线路径、四路 SMA 连接器、放射源高精度定位孔、传感器下方大面积开窗区域。

剖面示意图：双层 PCB 结构，上层放置传感器芯片，下层铺设完整连续地平面；标注 PCB 板材厚度 0.7mm、 β 放射源垂直对准开窗区域、上下传感器垂直间距、SMA 接口焊接高度、键合金线跨距；剖面结构保证 β 粒子垂直入射，无金属介质遮挡粒子路径。

A3:

反对抛弃 Barrel+Endcap 结构、采用多层球面洋葱皮探测器拓扑

3.1 物理维度缺陷

带电粒子多次库仑散射均方根偏转角公式：

$\theta_0 \approx \frac{13.6\text{MeV}}{\beta_{cp}} z \sqrt{x/X_0}$ x 为粒子穿过介质实际厚度， p 为粒子动量。散射角平方与介质厚度 x 成正比，直接决定撞击参数分辨率，是次级顶点重建核心指标。

球面所有位置法线指向球心，粒子从中心对撞点向外发射，前向高速度区域粒子飞行方向几乎与球面相切。设硅传感器物理厚度为 l ，粒子介质内路径长度 $x=l/\sin\theta$ ， θ 为粒子与球面切平面夹角；前向区 $\sin\theta$ 趋近于0，有效介质厚度急剧增大。

该现象带来两大问题：

1. 全空间物理响应不均匀，桶部与前向区域散射角差异巨大，低动量粒子次级顶点分辨能力大幅衰减；
2. 径迹拟合需要引入大量位置相关修正权重，系统误差无法全局统一校准，高、低动量测量精度无法同时保障。

3.2 磁场维度缺陷

对撞机动量测量依靠轴向长螺线管磁体，无限长中空圆柱螺线管内部磁场严格沿束流轴向均匀分布： $\vec{B} = B_z \hat{z}$ ，横向动量回旋半径：

$$R = \frac{p_T}{qB_z}$$

球面拓扑不具备圆柱旋转对称与轴向平移对称，若匹配球面结构，只能放弃成熟螺线管，改用复杂球面梯度线圈或多极分立磁体。改造后探测体积内会出现径向磁场分量 B_r 与轴向磁场梯度 $\partial B_z / \partial z$ 。

磁场不均匀带来的后果：同一动量粒子在球面不同区域回旋半径 R 随局部磁感应强度波动，弧垂公式 $s \approx \frac{qBL^2}{8p_T}$ 中引入位置相关系统偏差，该偏差属于三维空间函数，无法通过全局统一校准常数消除，动量测量精度存在各向异性，无法满足高能物理精确测量需求。

3.3 系统集成维度缺陷

硅传感器由平面晶圆光刻制备，属于平面薄片，仅可贴合高斯曲率为0的可展曲面。球面高斯曲率 $K = 1/R^2 > 0$ ，属于不可展曲面。

硅材料断裂应变小于0.5%，无法通过拉伸、压缩贴合球面，仅有的替代方案是定制双曲率异形衬底，超出现有半导体制造工艺，成本呈指数级上涨。

3.4 更合理拓扑：圆柱形桶部+垂直圆盘端盖（Barrel + Endcap）分层结构

整体结构：多层同心碳纤维圆柱筒构成桶部，轴线与加速器束流严格重合，筒壁周向铺满矩形平面硅传感器；束流 Z 轴正负两端布置多层垂直圆盘端盖，圆盘由梯形平面硅模块拼接，盘面垂直束流线。

3.4.1 物理维度优势

桶部中心极角 $\theta \approx 90^\circ$ ，粒子沿径向向外飞行，入射方向与传感器法线夹角极小，粒子穿过硅介质有效厚度近似等于硅片物理厚度 $x \approx 1$ ，全域散射角 θ_0 均匀稳定，撞击参数分辨一致性优秀，径迹拟合无需复杂角度相关修正。

3.4.2 磁场维度优势

圆柱结构与轴向螺线管磁场完全匹配，探测区域仅存在均匀轴向磁场 B_z ，无径向、角向磁场分量，回旋半径仅由粒子动量决定，弧垂拟合无位置相关系统误差，动量重建精度全域统一。

3.4.3 系统集成维度优势

圆柱面为零高斯曲率可展曲面，平面硅模块仅需微小周向弯折即可贴合，拼接工艺成熟；冷却管道沿轴向直线排布，热膨胀形变仅存在径向、轴向两种全局线性模式，可通过全局几何缩放参数离线校准；所有探测器模块可独立拆装，端盖整体可拆卸，便于辐射损坏模块更换、检修；传感器、支撑结构、冷却系统均为标准化平面构件，加工、组装、测量成本可控。