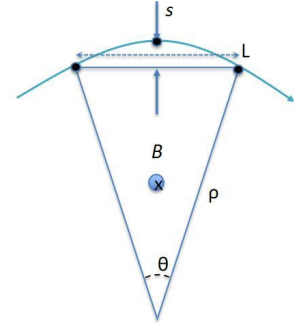


# 作业

## Q1: 位置分辨与动量误差的资源博弈

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。



- 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）。
- 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。
- 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。
- 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”。

$$(a) \quad qvB = \frac{mv^2}{R} \quad ①$$
 得:  $p_T = qBR$ 

$$R = (\frac{L}{2})^2 + (R-s)^2 \quad ②$$
 得:  $s \approx \frac{L^2}{8R} = \frac{qBL^2}{8p_T}$ 
 对  $s$  做误差传递
 
$$\sigma_s = \left| \frac{\partial s}{\partial p_T} \right| \sigma_{p_T} = \frac{qBL^2}{8p_T^2} \sigma_{p_T}$$
 得:  $\sigma_{p_T} = \frac{8p_T^2 \sigma_x}{qBL^2}$ 
 两边同除  $p_T$ 

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{8p_T \sigma_x}{qBL^2}$$

$$\therefore \sigma_x \propto \text{pitch}$$

$$\therefore \frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \cdot \text{pitch}}{BL^2}$$

(b) :

由 (a) 可知，误差与 pitch 成正比

方案 1: 缩小硅微条 pitch

修改参数: 传感器条间距  $p \rightarrow p/2$

原理:  $\sigma_x \propto p$ ,  $p$  减半则  $\sigma_x$  减半, 公式中分子直接减半, 相对动量误差整体缩小一半。

方案 2: 增强磁场强度  $B$  (磁场加倍)

修改参数: 螺线管磁场  $B \rightarrow 2B$

原理: 相对误差与  $B$  线性反比,  $B$  翻倍后分母增大一倍, 整体误差减半。

方案 3: 增大探测器臂长  $L$  (探测层径向距离扩大  $\sqrt{2}$  倍)

修改参数: 径迹有效测量臂长  $L \rightarrow \sqrt{2}L$

原理: 误差与  $L^2$  成反比,  $L$  扩大  $\sqrt{2}$  时  $L^2$  翻倍, 分母增大一倍, 整体误差减半。

(c) :

方案 1: pitch 减半 (微条变细一倍)

读出电子通道数量直接翻倍 同样面积的硅传感器, 条数量翻倍。配套的读出芯片 ASIC 数量、数据传输带宽、供电功耗全部翻倍。加速器辐射环境下, 芯片越多, 损坏概率越高, 故障大幅增加。

传感器信噪比变差 单根微条变窄, 金属电极电容变大, 电路噪声升高。粒子撞击产生的电信号变弱, 噪声占比提升, 实际位置误差没法完美减半, 达不到理论预期。

加工与组装难度暴增 光刻需要更高精度, 硅片生产良率下降, 生产成本翻倍; 细条出线布线空间不足, 柔性电路板更容易漏电、短路。

方案 2: 磁场 B 加倍

超导磁体成本、制冷负荷指数上涨 磁场从 4T 提升到 8T, 超导线圈线材用量、低温液氮制冷机组、支撑钢结构重量大幅增加, 加速器隧道需要加固土建, 整体造价提升数倍。

全探测器辐射剂量上升 强磁场会把次级散射粒子、同步辐射光子全部收拢在探测器内部, 硅传感器、电子芯片受到的辐射损伤加速, 探测器寿命大幅缩短。

后端探测器全部失效, 需同步改造 量能器、 $\mu$  子探测器的工作性能依赖磁场区间, 磁场翻倍后原有刻度全部作废, 整套后端探测系统要重新设计, 改造范围覆盖整个探测器。

方案 3: 臂长 L 放大 $\sqrt{2}$ 倍 (探测器整体放大)

探测器体积暴涨, 隧道空间不足 内层探测器径向尺寸扩大, 原有加速器束流管道、隧道空间放不下, 需要开挖扩建隧道, 土建工期、成本极高。

材料物质厚度增加, 粒子散射恶化 探测器框架、冷却管道、线缆全部拉长, 粒子穿过探测器时会和材料发生更多散射, 额外引入新的动量误差, 抵消精度提升收益。

机械形变系统误差变大 更大尺寸的探测器支架, 受低温、磁力、重力影响形变更明显, 两层传感器之间的位置偏移会产生固定系统偏差, 需要极高精度的实时位置校准系统。(d)

(d) :

HL-LHC/CEPC 条件下最不推荐方案: 磁场加倍

成本与工期完全不可控

HL-LHC 现有超导磁体已经是工程极限, 升级磁体需要全新研发超导材料、大型低温制冷系统, 改造周期长达十年以上, 造价远超另外两套方案; 而缩小 pitch、放大探测器径向尺寸仅改造探测器本体。

全实验子系统连锁改造, 牵一发而动全身 磁场改变会影响径迹探测器、量能器、 $\mu$  子探测器、束流诊断设备所有子系统, 每一套都要重新刻度、重新研发, 系统协调难度极大; 另外两个方案仅影响内层硅探测器。

辐射与探测器寿命矛盾无法根治 强磁场压缩次级粒子运动范围, 内层硅探测器辐照剂量成倍上涨, HL-LHC 本身高亮度束流环境下, 传感器老化速度会超出更换维护周期。

1: 如果强行坚持加倍磁场, 如何补偿副作用?

ASIC 电子架构优化 采用辐照加固专用工艺芯片, 集成多通道降噪电路, 降低强辐射带来的噪声漂移; 设计分段动态阈值读出, 抵消磁场带来的信号偏移。

冷却系统升级 采用两相液氦 / 液氮复合冷却, 同步冷却磁体与内层探测器, 降低热形变; 增加独立低温屏蔽层, 阻挡同步辐射热负载。

材料与结构补偿 内层传感器选用薄化低辐射硅片, 搭配碳纤维低膨胀支架抵消磁力形变; 外围量能器加装磁场屏蔽铁轭, 隔绝磁场对后端探测器的干扰。

服务线路优化 线缆改用低阻抗辐照耐损同轴电缆，分散布线减少磁场涡流发热；独立分区供电，避免强磁场下供电回路产生感应电流干扰读出信号。

## 2: 无法有效补偿的底层原因

即便做上述改造，依然存在本质不可消除的系统缺陷：

超导磁体本身的极限约束：磁体的应力、低温漏热不存在低成本成熟工程方案，现有工业制造能力难以批量稳定生产；

束流物理的固有副作用：磁场增强带来的次级粒子聚焦效应无法屏蔽，探测器辐照剂量提升是磁场本身的物理结果，屏蔽材料只会额外增加散射；

全局刻度矛盾：磁场改变会彻底改变粒子响应刻度，所有物理仿真、重建算法、触发系统都要完全重写，软件与数据分析成本远超硬件改造，项目资源无法承载。

综上，磁场加倍方案在加速器大型对撞机系统层面整体不可行。