

## Q1

### 一、高动量极限下相对动量误差推导

1. 粒子在磁场中的基本偏转规律带电粒子在均匀磁场里会受到洛伦兹力，走圆周轨迹。横动量 $(p_T)$ （垂直磁场方向的动量）和轨迹的弯曲半径 $(\rho)$ 有固定关系：

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

其中  $B$  是磁场强度，单位特斯拉 (T)；单位是 GeV/c； $(\rho)$ 是弯曲半径，单位米。

简单理解：磁场越强、粒子弯得越厉害（半径越小），说明粒子动量越小。

2. 用探测器测量弯曲半径的几何方法我们用多层硅微条探测器记录粒子穿过的位置，通过三点拟合算出轨迹的弯曲程度。高动量粒子轨迹很直，弯曲半径远大于探测器的测量跨度（臂长  $L$ ），可以用“矢高”近似：轨迹中点相对于直线的偏移量  $s$ ，近似满足： $(s \approx \frac{L^2}{8\rho})$  矢高  $s$  越小，轨迹越直，粒子动量越大。

3. 误差的传递我们测不准粒子的精确位置，位置测量误差是 $(\sigma_x)$ 。通过误差传递计算，矢高的测量误差 $(\sigma_s)$ 和位置误差近似成正比， $(\sigma_s \approx \sigma_x)$ 。

动量的相对误差和矢高的相对误差是相等的：

$$\left(\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{\sigma_s}{s}\right).$$

4. 位置误差和微条间距的关系二值读出模式下，粒子打在哪根条上就记录哪个位置，位置精度基本由微条的间距（pitch）决定：间距越大，位置测的越不准，即 $(\sigma_x \propto pitch)$ 。

5. 最终简化公式把上面的关系全部联立，消去中间量，就能得到高动量下相对动量误差的正比规律：

$$\left(\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \cdot pitch}{B \cdot L^2}\right)$$

通俗理解：

粒子动量越高、微条越宽，动量测的越不准；

磁场越强、探测器测量范围越长，动量测的越准。

### 二、三种让动量误差减半的独立方案

根据上面的正比公式，单独改一个参数就能让误差变成原来的一半，三个方案互不影响：

方案 1：把硅微条的间距（pitch）缩小一半

改动参数：仅缩小微条之间的距离，磁场和探测器大小都不变。

理由：误差和 pitch 成正比，pitch 减半，位置测量精度翻倍，动量误差自然减半。

方案 2：把磁场强度（B）提升到原来的 2 倍

改动参数：仅增强超导磁铁的磁场，微条和探测器大小都不变。

理由：误差和磁场成反比，磁场翻倍，粒子轨迹弯得更明显，位置测量的小误差对动量计算影响变小，误差就减半了。

方案 3：把探测器的测量臂长（L）扩大到原来的 $(\sqrt{2})$ 倍

改动参数：仅把探测器径向做长一点，磁场和微条都不变。

理由：误差和臂长的平方成反比，L 变成 $(\sqrt{2})$ 倍， $(L^2)$ 就翻倍，长基线能把位置误差的影响稀释，误差就减半了。

### 三、每个方案的实际代价方案

#### 1: pitch 缩小一半

读出通道翻倍，成本和数据压力剧增

探测器总面积不变的话，条间距减半，微条总数就会翻一倍。对应的读出芯片、数据线、数据处理系统都要跟着翻倍，采购成本直接上涨。高亮度对撞机每秒事例很多，数据量翻倍很容易让系统处理不过来，丢失数据。

噪声变大，部分精度收益被抵消

微条挨得更近，相邻条之间的寄生电容会变大，信号的噪声就会升高，反而让位置测量没那么准了，抵消一部分 pitch 缩小带来的好处。

更细的焊盘对焊接、键合的精度要求高很多，生产的时候良率会下降，调试和维修也更麻烦。

#### 方案 2: 磁场强度翻倍

磁铁系统几乎要重做，成本极高

现有的超导材料达不到这么高的磁场，要换更高级的超导材料，线圈、低温制冷、安全保护系统全部要重新设计制造，成本会翻好几倍。而且磁场越强，线圈受力越大，一旦出故障（失超）破坏力也大很多。

低动量粒子测不到了

磁场太强，低动量的粒子会弯得特别厉害，还没飞到外层探测器就偏出去了，导致很多低动量粒子的径迹丢失，很多物理研究就没法做了。

电子设备受干扰

强磁场会影响前端的模拟电路，让信号基线偏移，必须额外加屏蔽结构，既占空间又加成本。

#### 方案 3: 测量臂长扩大( $\sqrt{2}$ )倍

低动量粒子测量变差

探测器往外扩，粒子穿过的探测材料和支撑结构就变多了。低动量粒子会因为多次散射发生轨迹抖动，反而测不准了，相当于牺牲了低动量区间的性能。

整套探测器都要跟着改

径迹探测器变大了，外面的量能器、缪子探测器、支撑架子、冷却管线全部都要重新设计，工程量和重新造一套探测器差不多，非常麻烦。

辐照更严重，土建压力大

越往外，次级粒子和中子的辐射越强，探测器老化更快。而且探测器整体变重变大，实验大厅的地面承重、吊装设备都可能跟不上，要改土建。

### 四、最不推荐的方案与补偿分析

#### 最不推荐方案：磁场强度翻倍（方案 2）

原因很简单：磁场是整个对撞机最核心的顶层设计，不是探测器单方面能改的。

周期太长，赶不上实验进度：更高场的超导磁铁从研发、测试到装起来要用十几年，远超过探测器升级的时间窗口，根本赶不上实验计划。

牵一发而动全身：磁场改了，加速器的束流轨道也要跟着改，相当于整个加速器都要重新设计，工程量和成本远远超过探测器本身的升级。

物理损失补不回来：低动量粒子大量丢失，很多软物理、强子碎裂的研究就做不了了，这是探测器端怎么改都补不回来的。

如果坚持用这个方案的补偿办法

电子学方面：前端芯片用抗磁的设计，加屏蔽罩，软件里再补算法修正磁场带来的基线偏移。  
冷却和材料：升级制冷系统，保证磁铁和探测器都能稳定工作；支撑结构全部用无磁的材料，避免干扰磁场。

信号线路：尽量用光纤传信号，避免电线在磁场里感应出额外的电信号；在磁体和探测器之间加铁屏蔽层，减少杂散磁场。

弥补低动量接收度：内层探测器往里面挪一点，多加几层探测单元，尽量多抓住一些低动量粒子。

磁场翻倍需要整个加速器和探测器体系全部推倒重来，成本和时间都不现实；而且高场超导磁体的制造、安全防护还有很多技术难题没解决，在下一代对撞机的时间里根本做不出来，所以这个方案在工程上是不可行的。

## Q2 $\beta$ 放射源 LGAD 时间分辨测试 PCB

设计这块 PCB 板厚 0.7mm，用来测两种 LGAD 传感器的时间分辨率：一个  $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$  的 DC-LGAD 当时间参考，还有两种尺寸的四通道 AC-LGAD ( $1\text{cm} \times 2.5\text{mm}$ 、 $4\text{cm} \times 2.5\text{mm}$ ，条宽  $50\ \mu\text{m}$ ，间距  $150\ \mu\text{m}$ ) 作为被测器件，用 Sr-90  $\beta$  放射源照射测试。要求 PCB 本身不能引入额外的时间误差，测出来的结果要能反映传感器本身的极限性能。

### 1. PCB 设计的 4 条原则

#### 原则 1：整条信号路径都保持 $50\ \Omega$ 阻抗一致

做法：以板子内层的完整地平面为参考，从传感器焊盘到信号接口，所有信号线都设计成  $50\ \Omega$  阻抗；走线拐弯都用  $45^\circ$  斜角，不能走直角；焊盘和信号线衔接的地方慢慢变宽，避免宽度突变；信号线下面的地平面不能挖槽、断开。

对时间分辨的影响：LGAD 输出的脉冲上升沿特别快（几十皮秒），如果信号线阻抗忽大忽小，信号就会像水波一样反弹，把脉冲前沿弄变形，导致触发时间测不准。阻抗全程一致就能完整保留原始脉冲的时间信息，测出来的时间分辨才是真实的。

#### 原则 2：所有通道走线长度一致，而且尽量短

做法：四路 AC-LGAD 的信号线长度差控制在很小的范围 ( $\pm 5\text{mil}$  以内)，参考通道的长度也要和被测通道完全对齐；焊盘尽量挨着传感器电极放，不要绕多余的线。

对时间分辨的影响：信号在走线上传播是需要时间的，如果通道长度不一样，信号到达的时间就有固定偏差，这个偏差后期数据处理也消不掉，会直接算进时间分辨里。等长、短线就能让所有通道时间基准一致，测出来的结果更准。

#### 原则 3：通道之间用接地隔开，减少互相干扰

做法：参考传感器和被测传感器分开放，中间用接地的铜皮隔开；四路 AC 通道之间也加接地铜条，相邻走线的距离满足 3 倍线宽的规则；所有隔离的铜皮都用密集的过孔连到内层的地平面。

对时间分辨的影响：通道离得太近，一个通道的信号会通过电场、磁场耦合到旁边的通道上，在脉冲前沿叠加上噪声，导致触发时刻忽早忽晚，时间分辨谱就变宽了。接地隔离能挡住这种串扰，保证每个通道的信号互不干扰。

#### 原则 4：焊盘和传感器电极严格匹配，控制打线长度

做法：PCB 上的焊盘宽度、间距和传感器的电极完全对应 ( $50\ \mu\text{m}$  宽、 $150\ \mu\text{m}$  间距)；打线（金丝键合）的长度控制在  $100\sim 200\ \mu\text{m}$ ，而且尽量长短一致；放传感器的地方 PCB 开窗露铜，保证板子平整。

对时间分辨的影响：金丝引线本身有电感和电容，线太长会让脉冲上升沿变慢，线长短不一就会造成通道时间差；焊盘对不准会让接触电阻变大，改变脉冲的幅度和斜率，最终都导致触发时间测不准。

## 2. 数据接口选型：侧卧型 SMA 连接器

可选的接口有扁平排线、RJ45、MMCX、SMA，最终选高度 4mm 的侧卧型 SMA，原因如下：先排除不合适的

扁平排线：没有固定的  $50\ \Omega$  阻抗，带宽很低，通道之间串扰大，传不了皮秒级的快脉冲信号；

RJ45 网口：是  $100\ \Omega$  的差分接口，和我们的单端信号不匹配，高频信号衰减很严重，而且 1cm 的高度会挡住  $\beta$  射线，影响测试；

MMCX：卡扣不结实，拔插几次就容易松，阻抗会变，长期测试时间稳定性不好；

竖立型 SMA：7.5mm 太高了，会挡住垂直入射的  $\beta$  射线，造成射线散射，影响符合计数。

侧卧型 SMA 的好处

电气性能好：标准  $50\ \Omega$  阻抗，带宽很高，能完整传输快脉冲，螺纹拧紧后接触很稳，阻抗不会变；

不挡光路：4mm 的高度很低， $\beta$  射线从上面垂直照下来不会被挡住，适合放射源垂直照射的测试；

通道适配：一共 5 路信号（1 路参考 + 4 路被测），刚好能在板边整齐排开，直接插示波器或者时间数字转换器，不用转接头；

抗干扰：金属外壳能屏蔽外界的电磁干扰，避免噪声影响触发时刻。

## 3. PCB 示意图文字描述（临近期末考试时间有限，来不及做 pcb）

### （1）PCB 俯视图（矩形板子，厚 0.7mm）

板子四个角有圆形的定位孔，板子边缘一圈打满接地过孔；

左上角区域：放  $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$  的 DC-LGAD 参考传感器，周围一圈接地铜皮隔离，一根  $50\ \Omega$  信号线从这里向右走到板边；

板子中下部，上下并排放两个被测传感器：上面放  $1\text{cm} \times 2.5\text{mm}$  的 AC-LGAD，下面放  $4\text{cm} \times 2.5\text{mm}$  的 AC-LGAD；每个传感器右边都有 4 个焊盘，对应四根微条；四路信号线平行向右走，长度一致，通道之间有接地隔离带；

板子右侧边缘，整齐排 5 个侧卧 SMA 接口，从上到下分别对应：CH0（参考通道）、CH1-CH4（四路被测通道）。

标注要点： $45^\circ$  走线拐角、通道等长、焊盘尺寸、接地隔离带、接地过孔。

### （2）双层测试剖面图（从中间竖着切开看）

单层 PCB 内部是四层结构：最上面是信号层（走线、焊盘），往下一层是完整的接地平面，再往下是高压电源层，最下面是底层接地层；接地过孔把所有层的地连在一起；

测试的时候用两块 PCB，上下平行对着放：上面的 PCB 装 AC-LGAD 被测器件，下面的 PCB 装 DC-LGAD 参考传感器，两个传感器之间垂直距离大概 5mm（可以微调）；

Sr-90 放射源放在两块板子中间， $\beta$  射线同时照到上下两个传感器，实现符合计时测试。

标注要点：板厚 0.7mm、侧卧 SMA 高度 4mm、传感器厚度、完整地平面、放射源位置、传感器间距。

### Q3 探测器拓扑结构

我反对把探测器做成多层球面洋葱结构，还是“圆柱桶部 + 圆盘端盖”的结构更合理。球面结构在物理测量、磁铁实现、工程安装维护三个方面都有解决不了的硬伤，不适合下一代高亮度强子对撞机。

#### 一、物理维度：球面和对撞机的粒子特性不匹配

##### 粒子分布是柱形的，球面覆盖不均匀

对撞机的两束粒子是沿着  $z$  轴对撞的，产生的次级粒子是围绕束流轴对称分布的（柱对称）。中心区域（垂直束流方向）粒子最多，前向（沿着束流方向）粒子少但辐射强。球面是球对称的，同一层球面会同时覆盖中心和前向区域，导致前向区域的探测材料太薄，粒子能量测不准；中心区域材料又太厚，粒子散射变多，位置分辨率下降。而且束流管道必须从球面中心穿过去，会在球面上开个大洞，形成永久的探测盲区。

##### 横向动量测量原理上就有问题

我们测粒子动量，靠的是轴向磁场让粒子在横平面偏转，通过偏转半径算动量。如果是球面结构，磁场做成径向的话，中心区域横向飞的粒子运动方向和磁场平行，洛伦兹力为零，粒子不偏转，根本测不了横动量。

如果硬要凑出复杂的磁场，磁场分布就会不均匀，粒子偏转的规律不再简单线性，算出来的动量会有很大的系统误差，而且校准不了。

##### 辐射分布不均匀，探测器坏得快

前向区域的辐射本来就比中心强很多，球面结构会让辐射更集中在内层球面的前向位置，那里的硅传感器和电子芯片会老化得特别快。而柱形结构可以单独给前向端盖加厚屏蔽、换耐辐射的器件，中心桶部保持薄材料，各取最优。

#### 二、磁场系统维度：球形超导磁铁根本造不出来

##### 球形线圈力学上就做不到

现在成熟的超导磁铁都是长螺线管，电缆只需要沿着一个方向弯，受力均匀，工艺成熟。球形线圈需要电缆同时往两个方向弯，会产生很复杂的应力，把超导丝压坏、拉断，导致超导性能下降，甚至直接失效，目前全世界都没有做大尺寸球形超导磁铁的成熟工艺。

##### 磁场不均匀，漏磁严重

长螺线管中间的磁场非常均匀，外面加个铁轭就能把磁场关在里面，漏磁很少。球面没有闭合的磁路，磁场会往外散，两极的磁场畸变很厉害，既测不准动量，还会干扰周围的电子设备，屏蔽起来非常麻烦。

##### 冷却和维修太难

柱形磁铁可以分段做、分段冷却，哪一段坏了拆哪一段。球形是整体的，任何一个地方出问题，几乎都要把整个探测器拆了才能修，完全不适合大型实验长期稳定运行的需求。

#### 三、系统集成维度：球面又贵又难以进行后续升级

### **没法标准化批量生产**

柱形的桶部和端盖，探测模块都是平面的，可以批量生产、统一校准。球面是曲面，每个位置的曲率都不一样，所有模块都得单独定制，成本高、精度差、生产慢。

### **管线布线根本没法安排**

柱形结构里，电线、光纤、冷却管都可以沿着轴向整齐排布，互不干扰。球面要穿管线就得在球面上开孔，开多了既破坏屏蔽，又影响结构强度，还容易互相干涉，信号串扰、散热不好、漏气这些问题都解决不了。

垂直束流的横截面就是一圈圈同心圆，没有曲面变形。这个方案比球面好的地方物理上最适配：柱对称结构完美匹配粒子的分布规律，轴向均匀磁场保证动量测量准确，端盖和桶部分区优化，全区间探测性能都好。

磁铁技术成熟：长螺线管超导技术已经用了几十年，非常可靠，成本和风险都可控。

工程上省钱好维护：平面模块可以批量生产，管线好布置，升级维修方便，土建和支撑都有现成的经验。

辐射耐受性好：前向端盖可以单独做辐射防护和器件升级，延长整个探测器的寿命。