

(a)

$$p_T = 0.3B\rho$$

近似处理

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

令硅微条 pitch 简写 p , L 之间有 N 层等间距探测器

$$\sigma_s \propto \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad \sigma_x \propto p$$

$$\frac{\sigma_{p_T}}{P_T} \propto \frac{\sigma_S}{S}$$

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

(b)

方案一、减小硅微条 pitch 的间距到原来的 0.5 倍，直接减小 σ_x

方案二、增加探测器层数 N 到原来的 4 倍，测量点更多，经过拟合后降低拟合误差

方案三、增加投影测量长度 L 到原来的 $\sqrt{2}$ 倍，同样的轨迹，测量的 s 变大，测量精度会增大

(c)

方案一、1.单位面积通道数增加，读出数据大量增加，前端读出芯片、数据带宽、触发延迟均呈爆炸式增长。

2.功耗增加，散热系统负担严重。

3. 每根微条的电容减小，信号电荷减少，更易被噪声淹没，可能导致探测效率下降或需要更低的甄别阈值。

方案二、1.径迹探测器位于内层，可容纳的探测器层数受空间、散热、机械强度等限制，大量增加多层结构可能会导致机械结构、散热系统无法承受。

2. 每增加一层，总击中数增加，前端电子学的数据吞吐量、触发系统的处理能力、离线重建的计算量均随之线性增长。

方案三、1.L 增大需要探测器桶部半径和总体积大幅增加，探测器也要随之增加，机

械构造难度增加，成本大增。

2.增加 L 会增加粒子多重散射的概率，测量的数据不准确。

(d)

最不推荐减小硅微条 pitch。理由：

1. 通道数变为 2 倍，前端 ASIC、数据链路、触发、离线存储等整个数据链都要承受 2 倍压力，无法通过局部优化解决。
2. 2 倍功耗意味着冷却系统必须成倍扩容，冷却系统增加物质量，多重散射概率增大，分辨率降低。
3. 信噪比减小，在高辐照环境下，可能导致许多通道信号逼近噪声本底，可能完全失效。

补偿：

- 1.ASIC 架构改造。采用更先进的 CMOS 工艺节点以降低每通道功耗。引入“零 suppressed readout”和“cluster finding”等稀疏读出技术，只读出有信号的通道，减少无效数据带宽。采用更高速的串行化链路应对翻倍的数据吞吐量。
- 2.引入双相 CO₂ 冷却，微通道冷却技术，加快散热。
3. 减小 N+掺杂剂量，导致更大的信号衰减因子，使传感器的信号对击中位置更敏感，有助于在保持时间分辨率的同时优化空间分辨率，补偿信号损失。
- 4.设计噪声更低，读出更灵敏，放大倍数更大的前端 ASIC。例如，采用 SiGe 等新型工艺的 ASIC，以其低功耗、低噪声和高速的特性，被认为是用于 AC-LGAD 多通道读出的理想选择。通过降低电子学噪声，可以在信号本身减弱的情况下，仍保持可接受的 SNR。采用电荷灵敏前放等更适合小电容、快信号的前端拓扑结构，并针对 LGAD 的输入电容进行阻抗匹配优化，以实现更有效的信号收集和放大。

二、

(a)

- 1.前端放大器应该紧邻 LGAD 探测器，并且 AC-LGAD 和 DC-LGAD 引出到放大电路的覆铜线应该粗细、长度一样。信号衰减过多会导致信号采集之后标定的时间产生偏差，将信号在 PCB 上的传输距离降到最短，最大程度减少信号衰减和引入噪声的风险，减小信号衰减带来的时间误差。
- 2.DC-LGAD 和 AC-LGAD 应该在同一水平面，否则粒子到达时间不同，对时间分辨率

会产生很大的测量误差。

3.LGAD 通道之间应该打地过孔，LGAD 输出信号幅度小，频率高，打地过孔可以抑制电磁干扰、增加接地稳定性、屏蔽 pcb 内外部和通道间信号干扰

4. β 放射源的放射区应该比两个传感器的面积大，控制传感器与放射源间距相同，粒子到达时间一样，放射的粒子密度一样。

5.pcb 设计应该遵循 50 Ω 射频系统特征阻抗，阻抗不匹配会导致信号反射、振铃和损耗，直接破坏时间分辨率的测量。

(b)

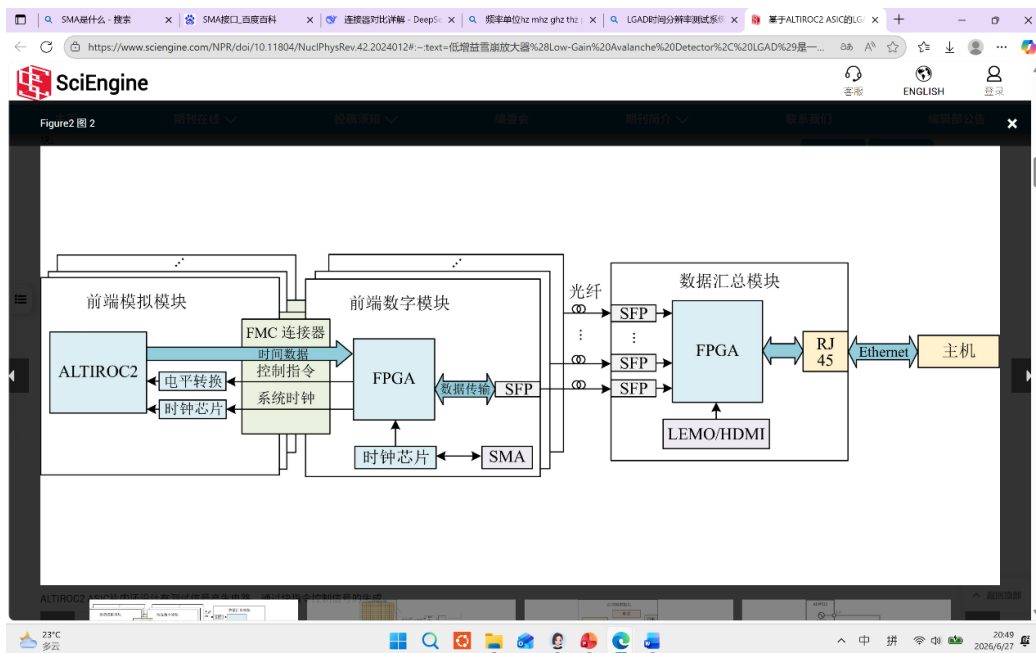
Flat Ribbon Cable & Connector:扁平带状电缆，传输并行数字信号，可供低频信号或一般传输电流用。该电缆导体中心距多为 1.27 毫米，聚氯乙烯绝缘电缆额定电压达 300 伏，特性阻抗范围为 93-125 欧姆，电容值介于 13-20 微微法/英尺。

RJ45 Ethernet Connector: 双绞线以太网连接器，传输网络数据，常用于连接一个实现互联网连接的设备和另一个网络设备。接触电阻为 2.5m Ω ，绝缘电阻为 1000m Ω ，抗电强度为 DC1000V (AC700V) 时，一分钟无击穿和飞弧现象；卡接簧片表面镀金或镀银，可接线径为 0.4mm ~ 0.6mm；插头插座可重复插拔次数不小于 750 次；8 线接触针镀金 509 (inch)。

MMCX: 微小型同轴射频连接器，阻抗一般 50 欧

SMA: 超小型版本 A 微波高频连接器，标准阻抗 50 欧，具备高插拔次数（如 500 次以上）、低电压驻波比和良好的电磁屏蔽性能。接口、线缆和设备阻抗保持一致，可有效减少信号反射与驻波，若阻抗不连续则会导致插入损耗增加和信号失真，采用螺纹连接方式，提供稳定的机械锁紧力，防止高频振动造成接触不良，保证中心导体与外导体稳定接触。同时，其金属外壳和外导体形成完整的电磁屏蔽层，能有效抑制外部电磁干扰(EMI)并防止射频信号向外辐射。PCB 安装连接器直接焊接或安装在印刷电路板上，具体可分为通孔安装、表面贴装 (SMT) 和端发射安装等类型。SMA 接口的标准工作频率范围为直流 (DC) 至 18GHz，部分高精度或特殊设计型号可拓展至 26.5GHz 甚至更高，满足高频信号传输需求。

下面是我参考的论文《基于 ALTIROC2 ASIC 的 LGAD 读出电子学设计》



“模拟前端包含前置放大器、甄别器、数字模拟转换器(Digital-to-Analog Converter, DAC)及时间数字转换器(Time-to-Digital Converter, TDC), 采用放大甄别加时间-数字转换的时间量化方案, 输出 LGAD 信号相对参考时钟的到达时间(Time of Arrival, TOA)和过阈时间(Time of Threshold, TOT)。”

“考虑到数据上传接口的通用性, 与主机通信的接口选择有广泛应用的网口, 使用 TCP 协议将数据上传至主机, 保证数据传输的稳定可靠^[23], 同时主机使用 UDP 协议下发简短的控制指令, 可以降低数据传输逻辑的复杂度。”

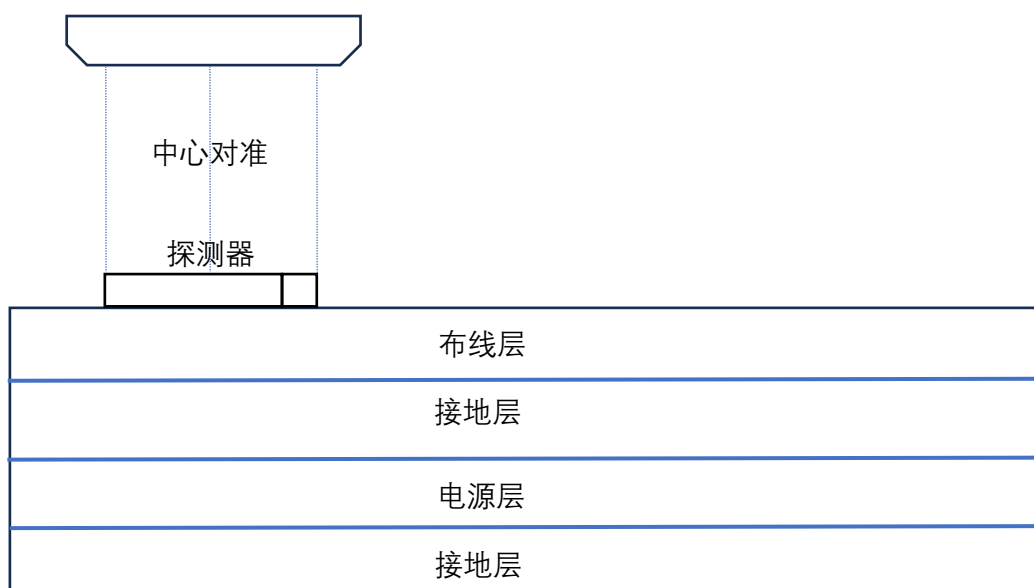
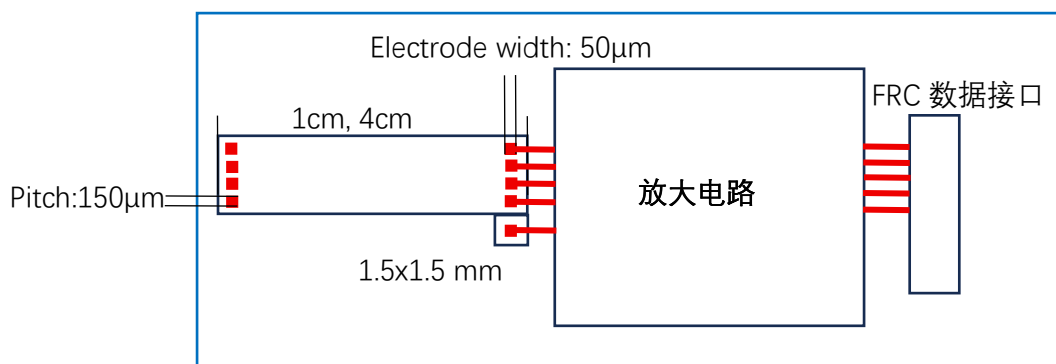
“此外数字汇总模块还要接收外部触发和清零信号, 为与外部触发系统接口匹配, 使用 HDMI 和 SMA 接收触发和清零信号。”



“主机通过网线向数据汇总模块下发配置指令，数据汇总模块通过光纤将指令分发给指定的前端数字模块。前端数字模块接收指令后分解指令数据并通过转接排线向前端模拟模块发送控制信号，前端模拟模块上的各个芯片根据控制信号进行配置。ALTIROC2 ASIC 根据指令生成多组片内测试信号，然后得到多组时间量化数据。这些数据通过转接排线传输给前端数字模块，经过解码和打包后发送给数据汇总模块。数据汇总模块接收两路前端的时间数据，汇总后上传给主机以供数据分析。”

“数字汇总模块还要接收外部触发和清零信号，为与外部触发系统接口匹配，使用 HDMI 和 SMA 接收触发和清零信号。”

使用扁平带状电缆连接前端放大电路和前端数字电路，可以同时并行多路信号。数据汇总模块处理完数据之后会将数据转换为差分信号输出，RJ45 每一对引脚传输一对差分信号，使用 RJ45 连接数据汇总模块和主机。放大电路输出的信号经 SMA 连接到示波器，减少失真，适配高频信号。



三、

反对。

1.物理：对撞产物分布本就是柱对称，并非球对称。强子对撞沿束流 z 轴发生，末态粒子在赝快度 η 分布：大量粒子集中在束流前后向，横向粒子密度适中，柱对称分布，不存在球对称粒子发射特征。

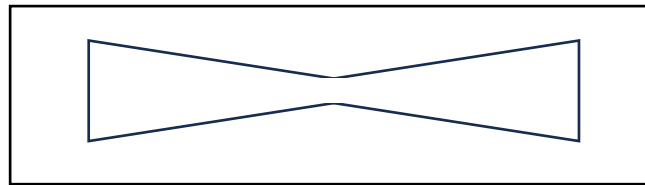
球面结构：不同 η 方向粒子穿越探测器材料厚度不一致。前后向近束流粒子穿过球面薄层，横向粒子穿过很厚多层材料，能量测量、径迹重建系统误差极大，量能器能量刻度无法统一。

柱形桶 + 端盖：固定径向 r 分层厚度，桶区、端盖材料厚度独立匹配对应区间，全 η 区间能量、动量重建一致性最优，适配 HL-LHC 高堆积、高亮度环境。

2.磁场：螺线管磁场与球面的拓扑冲突，球面不是螺线管磁场的等势面。为了容纳球面探测器，磁体线圈也必须弯曲成球面形状，而这在工程上极难实现且成本天文。若仍采用圆柱磁体而探测器是球面，则探测器最外层与磁体边界之间的间隙不一致，导致边缘磁场畸变。径迹重建算法假定 B 场已知且均匀。球面结构导致的局部磁场非均匀性，使得 p_T 的修正项无法解析计算，必须依赖极其昂贵的逐事件三维场图插值，计算量增加数个数量级。

3.系统集成：每一层的曲率半径不同，从里到外每个模块的形状都是独特的，标准化生产难度大成本高。制造公差、对准校准的复杂度呈指数增长。束流管道必须贯穿中心 z 轴，球面两极开孔结构力学薄弱、密封复杂；电缆、冷却水管、高压供气沿圆柱轴向、径向规整布线；球面三维走线杂乱，物料冗余、散热不均衡，高辐射环境下故障率大幅提升。大型探测器分节吊装、分段组装、地下隧道运输依赖直线、圆柱分体结构；完整球面无法分体拆装，一旦内层探测器辐射损坏、电子学故障，无任何检修通道；柱形可轴向抽拉桶部模块、前后吊装端盖，适配长期运行维护、HL-LHC 多阶段升级改造。

内层圆锥台+外侧圆柱体+垂直桶盖



粒子在磁场中轨迹弯曲，这个结构比球形更符合粒子束流在碰撞后发散的轨迹，提高内层像素探测器利用率，减少多重散射的概率，同时整体圆柱体结构对磁场，散热等影响较小