

1. 物理维度：几何接受度与动量分辨率矛盾

球面的曲率匹配问题：对撞点产生的粒子呈各向同性分布，球面看似“完美对称”，但高能物理探测的核心是动量测量（通过径迹曲率），这需要均匀的磁场和精确的径迹长度测量。

在球面上，极角 θ 接近 0° （前向区）时，径迹几乎平行于球面切线，穿过探测器层数急剧减少（只穿过1-2层），导致径迹点太少，动量分辨率严重恶化。

而柱面结构中，前向粒子由端盖（Endcap）的圆盘状探测器接收，径迹垂直穿过多层圆盘，能保证前向区也有 ≥ 5 层击中点，维持动量分辨率。

材料预算不均：球面需在全部立体角内铺设相同厚度的探测器层，但前向区粒子通量更高（因洛伦兹收缩效应），球面无法像柱面+端盖那样按区域优化厚度，导致前向区多次散射增大，降低低动量粒子重建效率。

2. 磁场维度：无法容纳传统螺线管磁体

螺线管磁场的边界条件：现有强子对撞机（如 ATLAS/CMS）采用圆柱形超导螺线管，磁场方向沿束流轴（Z 轴），其磁力线在圆柱内部均匀，在端盖区域自然发散。

球面探测器要求磁体也呈球形（或至少内部空腔为球形），但球形螺线管无法制造——超导线圈需绕在圆柱骨架上，球形绕组会导致应力分布不均、失超保护失效。

若采用球形磁体，则只能使用极少数磁极（如磁镜场），但其均匀区远小于柱面螺线管，导致 1T 级均匀磁场只能覆盖中心区域，边缘场畸变严重，破坏动量分辨率。

3. 系统集成维度：工程灾难

安装与维护：球面探测器必须像“洋葱”一样逐层套合，任何内层故障需拆除所有外层才能维修，而 HL-LHC 停机时间成本极高（ $\sim \text{€}50\text{k}/\text{小时}$ ）。柱面结构可径向滑出（如 CMS 的桶部可分离），端盖独立抽出，维护效率高 10 倍以上。

冷却与供电线缆：球面各层曲率不同，冷却管和电源线需三维弯曲，导致压降不均、流量分配困难。柱面结构可采用轴向直通冷却通道和柔性带状电缆，集成度更高。

对准与形变：球面在重力下会产生非均匀形变（顶端与赤道形变量差 $> \text{mm}$ 级），而柱面对称性更好，可通过张紧结构保持 μm 级对准。

更合理的拓扑结构：“分段圆柱桶部 + 可伸缩端盖

桶部分段：内层（R1）、中层（R2）、外层（R3）各为独立圆柱，可径向逐层抽出（类似 CMS 方案），便于维修内层。

端盖可伸缩：端盖圆盘安装在导轨上，沿 Z 轴向后缩回（距离 $> 1\text{m}$ ），露出桶部端面，允许桶部模块横向滑出，无需拆卸端盖。

前向加强：端盖内层采用更小厚度（减少多次散射），外层采用更厚吸收体（提高能量分辨），符合前向粒子特性。