

## 位置分辨与动量误差的资源博弈

### a) 高动量极限下相对动量误差的推导

#### 几何关系

带电粒子在均匀磁场中做圆周运动，曲率半径  $\rho$  与横向动量  $p_T$  的关系：

$$p_T = 0.3 B \rho \quad [\text{GeV}/c, \text{T}, \text{m}]$$

对于弧长为  $L$  的轨迹段，弧的矢高（sagitta）为：

$$s = \rho(1 - \cos(\theta/2)) \approx L^2/(8\rho) = 0.3BL^2/(8p_T)$$

其中使用了小角度近似  $\theta \approx L/\rho \ll 1$ （高动量极限）。

#### 误差传播

对  $s = 0.3BL^2/(8p_T)$  求微分：

$$\frac{\sigma_{\{p_T\}}}{p_T} = \frac{\sigma_s}{s} = \frac{8p_T}{0.3BL^2} \cdot \sigma_s$$

#### 位置测量与 pitch 的关系

在二值读出（binary readout）、电荷分享可忽略的近似下，位置测量误差为：

$$\sigma_x = \frac{p}{\sqrt{12}}$$

其中  $p$  为硅微条 pitch。因此  $\sigma_s \propto \sigma_x \propto p$

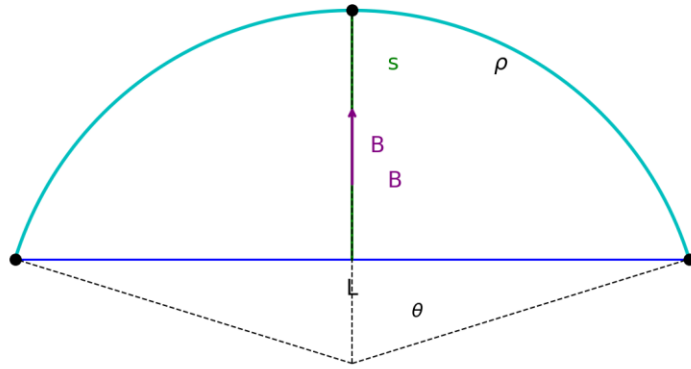
#### 最终简化表达式

$$\frac{\sigma_{\{p_T\}}}{p_T} = p_T \cdot \frac{p}{(BL^2)}$$

。

物理意义：在高动量极限下，相对动量误差与  $p_T$  成正比，这是因为高动量粒子轨迹更直，矢高  $s$  更小，同样的位置误差导致更大的动量相对误差。

Q1: 轨迹几何示意图



## b) 三个独立方案使动量误差缩小一半

### 改变硅微条 pitch $p$

具体改变：将 pitch 缩小为  $\frac{p}{\sqrt{2}}$

理由：直接降低  $\sigma_x$ ，位置分辨率提高，矢高测量更精确。

### 改变磁场强度 $B$

具体改变：将  $B$  提高为  $\sqrt{2} \cdot B$

理由：更强的磁场使相同动量粒子曲率更大，矢高  $s$  增大，降低相对误差。

### 延长探测器臂长 $L$

具体改变：将径迹探测长度  $L$  延长为  $\sqrt{2} \cdot L$

理由：更长的基线使矢高  $s \propto L^2$  显著增大，对位置误差的敏感度降低。

## c) 各方案的致命系统级代价

### 方案一：减小 pitch

代价：

1. 读出通道数爆炸。pitch 减半意味着单位面积通道数变为 4 倍，ASIC、功耗、数据量同步暴增。对于 HL-LHC 级别的  $O(10^9)$  通道，这已经接近技术极限。
2. 信噪比恶化。更窄的微条电容更小，但信号电荷量也减少（相同厚度下），且串扰增加；同时噪声耦合更严重，可能使位置分辨的实际改善达不到理论预期。
3. 制造良率下降。亚  $50 \mu\text{m}$  的 pitch 对光刻、刻蚀工艺要求极高，缺陷密度导致的坏通道比例上升，系统可靠性降低。

### 方案二：增强磁场

代价

4. 磁体系统成本与体积剧增。超导磁体（如 CMS 的 4T 螺线管）的储能  $\propto B^2V$ ，磁场翻倍意味着储能变为 4 倍，磁体线圈、低温系统、支撑结构全部需要重新设计，造价可能上升一个数量级。
5. 径迹重建算法失效风险。强磁场下低  $p_T$  粒子螺旋半径过小，可能在探测器内部多次回旋，导致径迹匹配（pattern recognition）的组合爆炸，触发率和重建效率下降。
6. 材料预算与辐射长度。更强的磁体通常需要更厚的线圈和更多支撑材料，增加对撞区内的物质总量，导致多重散射增强，反而恶化低  $p_T$  粒子的动量分辨率。

### 方案三：延长探测臂长 $L$

代价：

7. 探测器体积与成本指数增长。 $L$  延长  $\sqrt{2}$  倍，桶部探测器的半径和长度都增加，体积  $\propto L^3$ ，意味着硅传感器面积、支撑结构、服务线路全部大幅增加。

8. 径迹投影效应与立体角覆盖。更长的径迹在端盖区域（**endcap**）的投影效应更严重，桶部-端盖衔接处的几何效率下降；同时端盖需要更大的半径来覆盖相同立体角，端盖成本激增。
9. 老化与辐照损伤。更大的体积意味着更多材料处于高辐照区（靠近束流管），且传感器总面积增加，整体辐照损伤预算、退火和更换策略更加困难。

## d) 最不推荐的方案及理由

### 最不推荐：方案二增强磁场 B

在 HL-LHC/CEPC 类实验条件下，磁场系统是整个探测器最昂贵、最笨重、最难升级的子系统。CMS 的 4T 超导螺线管已经是人类工程奇迹，将磁场翻倍在技术上几乎不可行——需要全新的超导材料或巨大的体积增加，且现有隧道空间（LHC 隧道直径 3.7m）无法容纳。

#### 如果坚持此方案的补偿措施

**ASIC 架构：**采用更激进的零压制和片上智能触发，应对强磁场下低  $p_T$  粒子多次回旋导致的通道占用率上升。

**冷却：**磁体储能增加 4 倍，低温制冷功率需同步提升；考虑采用高温超导替代 LTS 以降低液氦消耗。

**材料选择：**磁体线圈采用更紧凑的导体排布，减少线圈厚度以降低物质预算。

**服务线路：**服务线路需重新路由以避开更强的杂散磁场，可能需要铁磁屏蔽或超导电流引线。

#### 为何最终仍“系统上不可行”：

**原因一：隧道空间硬约束。**LHC 隧道直径仅 3.7m，CMS/ATLAS 的磁体已几乎填满可用空间。更强的磁场需要更大的线圈半径，物理上放不进去。

**原因二：能量提取安全。**超导磁体储能 2.7 GJ 已相当于数吨 TNT，翻倍后失超保护系统的能量提取在毫秒级内几乎不可能安全完成，存在灾难性故障风险。

**原因三：经费与工期。**磁体是探测器造价的核心，重新研发强磁场磁体将使项目延期 10 年以上，远超 HL-LHC 的升级时间窗口。

## Q2 : $\beta$ 放射源时间分辨测试的 PCB 设计

### a) PCB 版图和机械结构设计的关键原则

#### 原则一：信号路径最短且等长

要求：四个 AC-LGAD 通道的信号引出路径长度严格匹配，从传感器焊盘到连接器/测试点的传输延迟一致。

影响时间分辨率： $\beta$  粒子在硅中的飞行时间极短，任何通道间的时间抖动都会直接叠加到测量结果中。不等长的信号线会引入系统性的时间偏移和额外的抖动。

#### 原则二：阻抗控制与匹配

要求：高速信号线必须设计为  $50\Omega$  微带线或带状线，避免阻抗不连续；必要时在传感器端或读出端端接匹配电阻。

影响时间分辨率：阻抗失配导致信号反射，波形畸变使定时判别的触发时刻不稳定，引入时间游走和抖动。

#### 原则三：地平面完整性与低电感接地

要求：PCB 必须设计完整、无分割的接地平面，传感器焊盘下方直接打过孔到地平面；避免地环路。

影响时间分辨率：LGAD 信号为电荷脉冲，地电感  $L_g$  上的噪声电压  $V_n = L_g \cdot di/dt$  会直接叠加到信号上。不完整的接地平面增加地电感，恶化信噪比，导致定时抖动增大。

#### 原则四：电源去耦与噪声隔离

要求：每个传感器通道的偏置电压和前端电源独立去耦，去耦电容尽量靠近负载；数字/模拟分区。

影响时间分辨率：偏置电压的纹波会调制 LGAD 的增益和雪崩区电场，导致信号幅度波动，进而通过时间游走影响定时精度。电源噪声是时间分辨的主要非本征来源之一。

#### 原则五：机械稳定性与热管理

要求：PCB 采用高  $T_g$  材料，厚度  $0.7\text{mm}$  需评估是否足够支撑；传感器通过导热胶或银浆与 PCB 良好热接触；必要时设计散热孔或铜块。

影响时间分辨率：LGAD 的增益和雪崩击穿电压具有温度系数。Sr-90 源长时间照射或环境波动导致温升，若散热不良，温漂会改变信号幅度和上升沿，恶化时间分辨。

## b) 数据接口和数据线类型的选择

**选择：SMA 连接器**

**理由：**

**带宽匹配：**LGAD 时间分辨测试需要捕获  $\sim 100$  ps 上升沿的信号，对应带宽需求  $> 3$  GHz。SMA 支持到 18 GHz，完全满足；MMCX 仅 6 GHz 且高频性能不稳定；排线和 RJ45 带宽远远不够。

**阻抗匹配：**LGAD 输出阻抗通常为  $50\Omega$  量级，SMA 的  $50\Omega$  同轴结构可直接匹配，避免反射。

**屏蔽与串扰：**四通道同时读出时，通道间串扰必须最小化。SMA 的同轴屏蔽结构提供  $>80$  dB 的隔离；排线的平行线结构串扰严重。

**机械可靠性：**测试板可能需要频繁移动、对准放射源，SMA 的螺纹锁紧确保连接稳定，不会因振动导致接触电阻变化。

注：若通道数更多或空间极度受限，可考虑 MMCX 侧卧型作为妥协，但需接受更高的插入损耗和稍差的屏蔽。

## c) PCB 俯视图和剖面示意图

**俯视图布局描述：**

PCB 板框为矩形，厚度 0.7mm。板子中央偏上位置放置第一片 AC-LGAD 待测器件，微条沿水平方向排列，pitch  $150\mu\text{m}$ ，electrode width  $50\mu\text{m}$ 。微条两端各有一列打线焊盘，用于金线键合。

板子中央偏下位置放置第二片 AC-LGAD 待测器件，结构与第一片相同但长度更长。

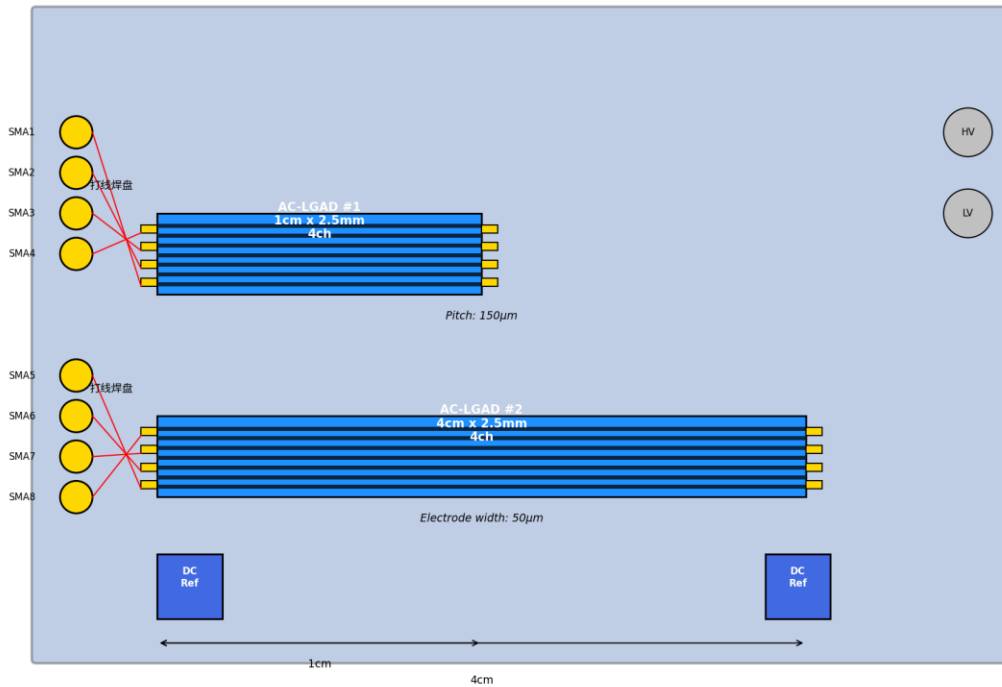
板子左下角和右下角各放置一片 DC-LGAD 参考探测器，用于符合测量和提供时间参考。

板子左侧边缘排列 8 个 SMA 连接器，分别对应两片 AC-LGAD 的 4 个通道。每个 SMA 通过  $50\Omega$  微带线连接到对应的打线焊盘。四通道走线严格等长。

板子右侧边缘放置 HV 和 LV 电源接口。

## Q2: PCB 俯视图 (Top View)

### PCB 测试板 (厚 0.7mm)



### 剖面图结构描述 (从上到下) :

顶层铜：传感器焊盘区域，AC-LGAD 芯片通过导热胶粘接于此。

阻焊层：覆盖非焊盘区域。

AC-LGAD 芯片：厚约 100μm，蓝色矩形，微条面朝上。

导热胶 (Silver Epoxy)：灰色斜线填充区域，厚约 50-100μm，提供机械固定和热传导。

FR-4 基板：棕色半透明区域，厚 0.7mm，介电常数约 4.5。

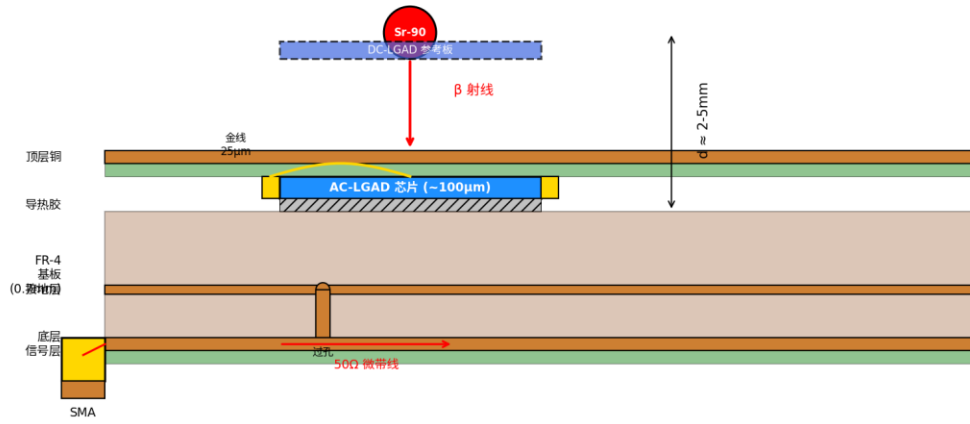
接地层：中间铜层，完整无分割，通过过孔 (Via) 与顶层地连接。

底层信号层：50Ω 微带线走线，连接到过孔和 SMA 焊盘。

底层阻焊：绿色。

SMA 连接器：焊接于底层边缘，中心针连接信号线，外壳接地。

Q2: PCB 剖面示意图 (Cross Section)



**$\beta$  测试双板布局:** 上方为 DC-LGAD 参考板, 下方为 AC-LGAD 测试板, 间距  $d \approx 2-5\text{mm}$  可调。Sr-90 放射源置于最上方,  $\beta$  射线垂直向下穿过参考板后到达测试板。

## Q3 : 拓扑结构的选择——为何不建一个"球" ?

明确立场：反对"多层球面洋葱皮"结构

### 一、物理维度

#### 1. 径迹重建与模式识别的灾难

问题：球面结构中，所有径迹都指向球心，但粒子出射方向覆盖  $4\pi$  立体角。对于高亮度对撞，每束 crossing 产生数千条径迹。

后果：球面的曲率使得径迹在投影到局部切平面时产生严重的几何畸变，传统的直线/圆弧拟合算法失效；模式识别的组合复杂度  $O(N^2)$  或  $O(N^3)$  因立体角重叠而爆炸。

对比：圆柱形桶部中，高  $p_T$  粒子近似直线，径迹在  $r-\phi$  平面投影为圆，在  $z$  方向为直线，可分离处理；端盖处理前向/后向粒子，各自独立。

#### 2. 量能器与径迹探测器的匹配

问题：球面洋葱皮要求每一层都同时是径迹探测器和量能器，或两者必须完美嵌套。

后果：电磁量能器需要大量被动材料来启动簇射，而径迹探测器需要最小化物质。球面结构使两者的材料预算冲突无法调和——无法在保持球对称的同时优化各自的深度和采样结构。

#### 3. 前向物理覆盖效率

问题：球面在极角  $\theta \rightarrow 0, \pi$  处的层间距在径向投影上趋于零。

后果：前向/后向区域的探测器层重叠，通道密度趋于无穷，而物理上束流管必须存在，导致球面在两端被截断，形成不自然的"削顶"结构，反而破坏球对称性。

### 二、工程维度

#### 1. 制造与装配的不可行性

问题：球面分层需要大量非平面传感器，而硅传感器都是平面工艺制造。

后果：将平面硅片贴合到球面上产生机械应力、热膨胀失配、边缘间隙；或需开发曲面传感器，成本和技术风险极高。CMS/ATLAS 的桶部圆柱面已是平面硅片拼接的极限。

#### 2. 服务系统的路由噩梦

问题：球面结构中，冷却管、电缆、光纤必须从每层球壳引出到外部。

后果：在球对称约束下，所有服务线路必须沿径向穿过外层探测器，造成巨大的"服务间隙"，破坏接收度；或需要复杂的同心旋转接头。圆柱形结构中，服务线路沿  $z$  方向从端盖引出，自然且不干扰桶部接收度。

#### 3. 维护与升级的不可达性

问题：球面洋葱皮的内层被外层完全包裹。

后果：任何内层故障或升级都需要拆卸所有外层，类似于"俄罗斯套娃"。LHC 探测器的内层像素探测器设计为可插入/拔出，依赖圆柱形的端盖开口。球面结构使这种维护策略不可能。

### 三、磁场系统集成维度

#### 1. 螺线管线圈的几何冲突

问题：HL-LHC/CEPC 类实验需要大型螺线管磁场，线圈为圆柱形。

后果：球面探测器与圆柱形线圈无法共形，两者之间产生大量无用空间或需要非均匀磁场补偿。圆柱形桶部天然与螺线管线圈共轴，磁场均匀区最大化。

#### 2. 磁场均匀性

问题：螺线管在圆柱坐标系中提供高度均匀的  $B_z$ ，这是径迹曲率测量的基础。

后果：球面探测器要求磁场在球坐标系中均匀，而螺线管的场在球面上严重不均匀（边缘效应），导致动量刻度复杂化，系统误差难以控制。

#### 3. 磁体回轭的布置

问题：磁通返回需要铁轭，通常为圆柱壳+端盖结构。

后果：球面探测器与圆柱形铁轭之间的间隙不规则，磁饱和风险增加；同时铁轭作为强子量能器的吸收体，其非均匀性恶化能量测量。

## 更合理的拓扑结构：改进的"圆柱桶部 + 倾斜端盖"

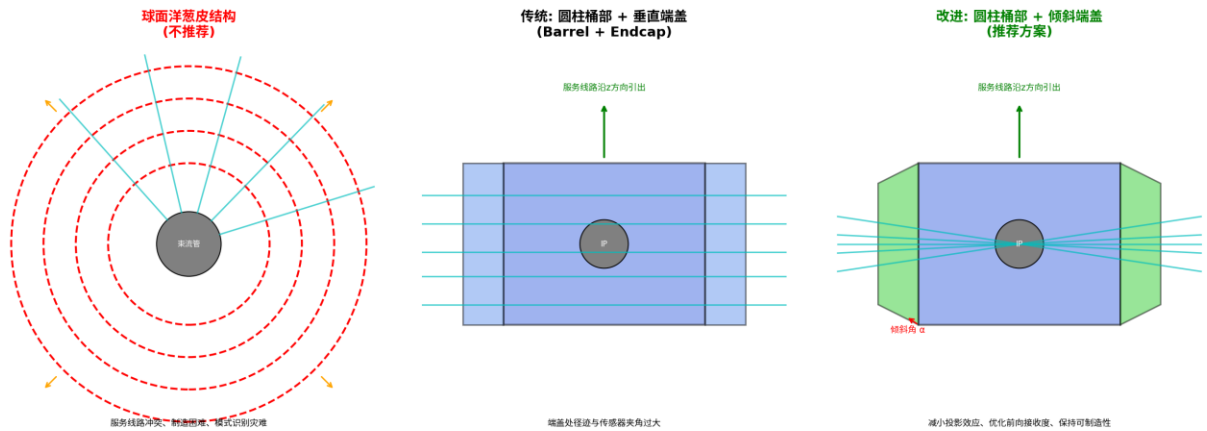
### 结构描述：

中心为束流管，对撞点位于中心。围绕束流管的是多层同心圆柱形桶部，由平面硅传感器拼接而成，传感器平面近似平行于  $z$  轴。

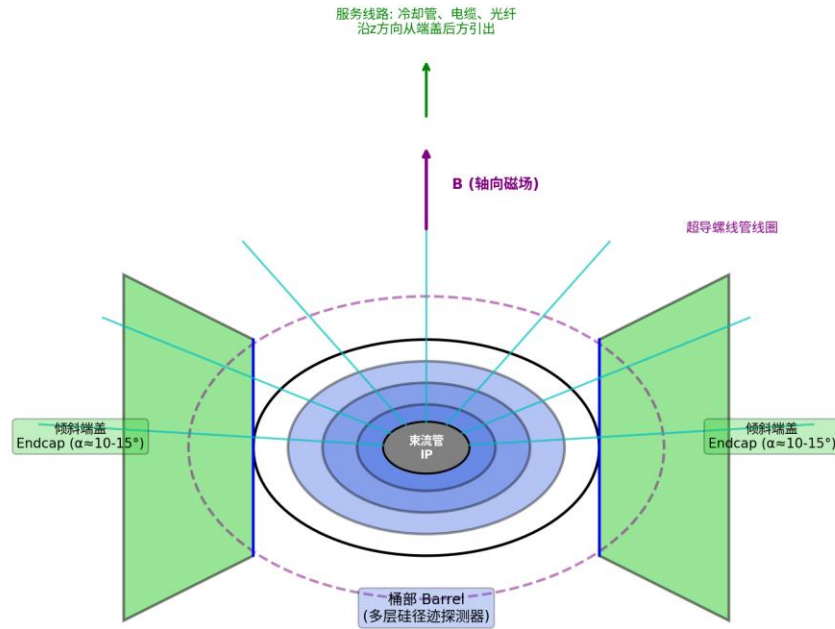
桶部两端各连接一个倾斜端盖。与传统垂直端盖不同，倾斜端盖与  $z$  轴垂面成一定夹角  $\alpha$ ，呈截锥面形状。

超导螺线管线圈环绕桶部，产生轴向均匀磁场  $B_z$ 。服务线路全部沿  $z$  方向从端盖后方的"服务舱"引出。

Q3: 探测器拓扑结构对比



Q3: 改进的探测器拓扑结构 — 圆柱桶部 + 倾斜端盖  
(3D 示意)



**为什么这个结构比球面更优：**

**制造可行性：**桶部为完整圆柱面，可用平面硅片拼接；端盖为圆锥面，可用平面扇形片近似，曲率远小于球面，工艺成熟。

**服务路由：**所有服务沿 z 方向从端盖后方的服务舱引出，不干扰桶部接收度；倾斜端盖增加后方空间，便于冷却管和电缆管理。

**磁场兼容：**完全共形于圆柱形螺线管线圈，磁场均匀区最大化；铁轭可设计为圆柱壳+端盖，与探测器层平行。

**径迹重建：**桶部保持传统的 r-φ 圆拟合 + z 直线拟合；端盖倾斜使前向径迹与传感器法向夹角减小，降低投影效应，改善 z 方向分辨。

**维护升级：**端盖可整体拆卸，桶部内层可通过端盖开口插入/拔出。

**成本可控：**沿用现有 LHC 探测器的供应链和装配经验，风险低；球面需要全新研发。

**倾斜端盖的关键参数：**

倾斜角  $\alpha \approx 10^\circ-15^\circ$ 。

优化目标：使典型前向径迹与端盖传感器法向的夹角  $\approx 30^\circ-45^\circ$ ，平衡投影效应与通道数。

参考：ATLAS 的 Forward ITk 和 CMS 的 TEPX 已采用类似思路，端盖传感器呈"花瓣"状排列，近似圆锥面。