

# 脑功能连接

## PLM (Phase Linearity Measurement) 相位线性测量

两个脑区如果存在功能连接（信息交互），它们的脑电振荡会同步，但这种同步 **不一定表现为“相位差恒定”**。

现实大脑中更常见的是：**相位差随时间以接近线性的方式变化**

（如果两个脑区在交流，信号的相位差不是平的，而是一条**倾斜的直线**）

$$\Delta\phi(t) = \phi_x(t) - \phi_y(t) = C - \Delta f \cdot t$$

- $\Delta f$  = 两个脑区振荡频率的微小差异
- $\Delta\phi(t)$  = 相位差随时间变化
- 线性变化表示两脑区仍同步且存在耦合**

步骤	操作	意义
1. 得到相位差	$\Delta\phi(t)$	描述两个脑区的相位关系
2. 构造干涉信号	$z(t) = e^{i\Delta\phi(t)}$	保留纯相位信息，无振幅影响
3. 对 $z(t)$ 做 FFT	得到频谱 $S_z(f)$	看“相位差变化的频率结构”
4. 计算低频能量比例	$PLM = \frac{\int_1^f S_z(f)df}{\int S_z(f)df}$	判断相位差是否呈线性变化

**PLM 不要求相位差恒定，只要求相位变化有“规律性”（线性趋势）。**

相位差行为	频谱表现	PLM 值	意义
线性变化（有连接）	能量集中在低频	高	两脑区存在耦合
随机变化（无连接）	能量分散	低	两脑区独立

**PLM = 相位差时间结构是否“成直线”的程度**

因为如果两个脑区是相互驱动的振荡系统：

- 它们的频率**不会完全一致**
- 但相位差会有规律地随时间变化

PLM 识别的正是这种 **规律性同步**  
这是 **真实神经网络连接**的本质特征。

## 其他方法

### ImC (Imaginary Part of Coherence) 虚部相干

解决 EEG/MEG 中 **体积传导**（一个源信号无延迟地传播到多个电极）导致的**假连接**问题。  
如果两个电极的信号来自同一个源，信号之间 **不会有时间延迟** → 相位差为 **0** → 其 **互谱的虚部**为 0。

**ImC 只保留互谱的虚部**

$$ImC = \text{Imag} \left( \frac{S_{xy}(f)}{\sqrt{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}} \right)$$

特性	说明
✔ 能消除体积传导影响	因为体积传导产生的连接虚部为 0
✘ 受振幅影响，不是纯相位指标	并非只反映相位同步

### PLI (Phase Lag Index) 相位滞后指数

比 ImC 更进一步：  
**完全基于相位**来衡量连接，且**不受体积传导影响**。

如果两个脑区存在真实交互，信号之间会存在**稳定的相位偏移**（**相位差  $\neq 0$** ），且偏移方向长期一致。

$$PLI = |\langle \text{sign}(\sin(\Delta\phi(t))) \rangle|$$

PLI 假设：

$$\Delta\phi(t) \text{ 必须恒定}$$

但若两个脑区频率略有差别（现实情况）：

- 相位差会缓慢漂移
- **PLI 认为：没有同步（误判）**

特性	说明
✅ 纯相位指标	不依赖振幅，反映真实耦合
✅ 抗体积传导	因为体积传导导致相位差为 0，不会贡献值
❌ 对噪声敏感	相位稍微扰动，就容易错判
❌ 两脑区频率稍有差异 → PLI 失效	相位差漂移会使 $PLI \approx 0$