



# 第五章 脑功能的电生理学成像

- ❖ 1. 脑电图概述
- ❖ 2. 脑电的生物物理基础
- ❖ 3. 诱发脑电与事件相关电位
- ❖ 4. 脑电正问题与逆问题



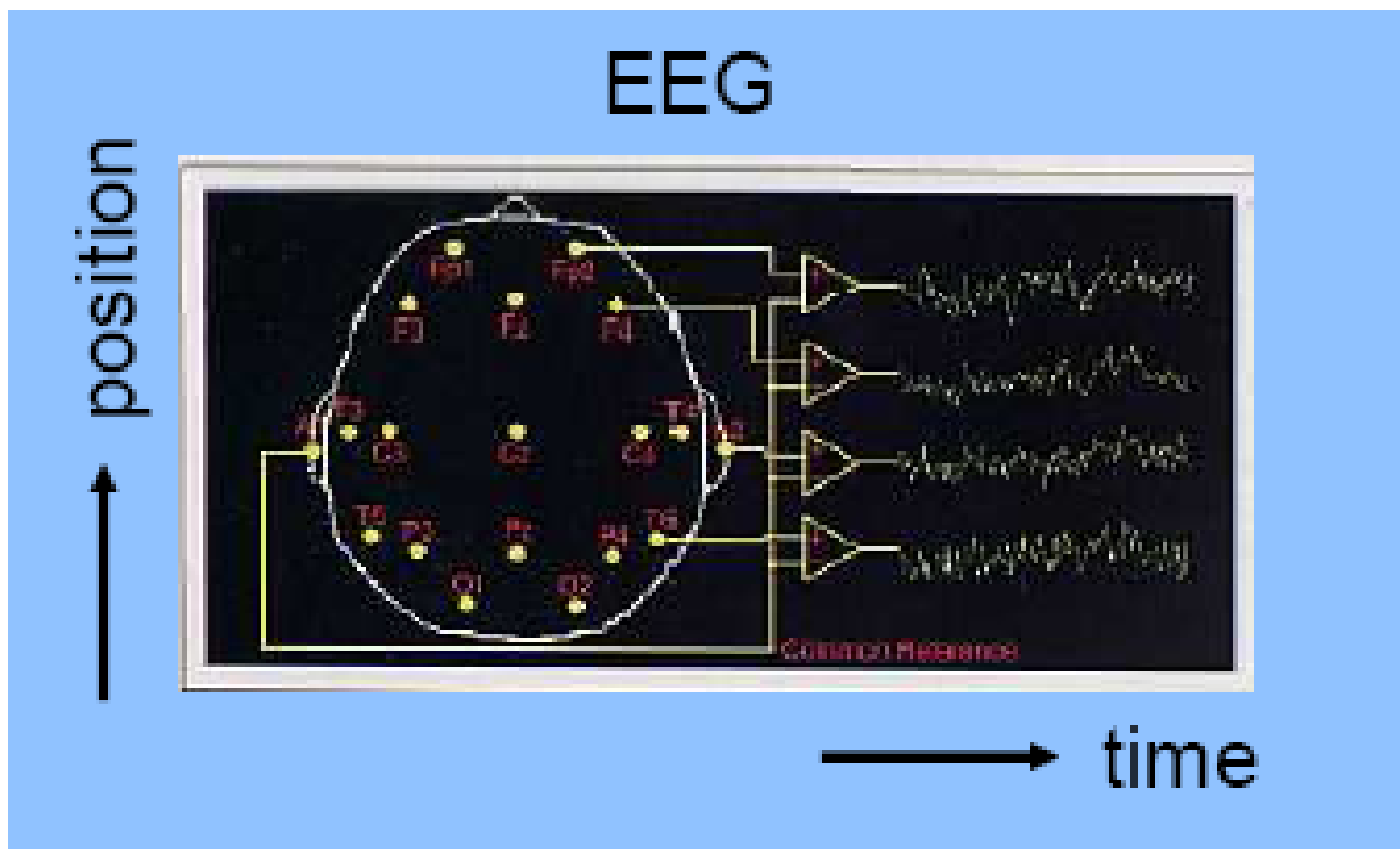
# 5.1 脑电图概述

## 一、历史回顾





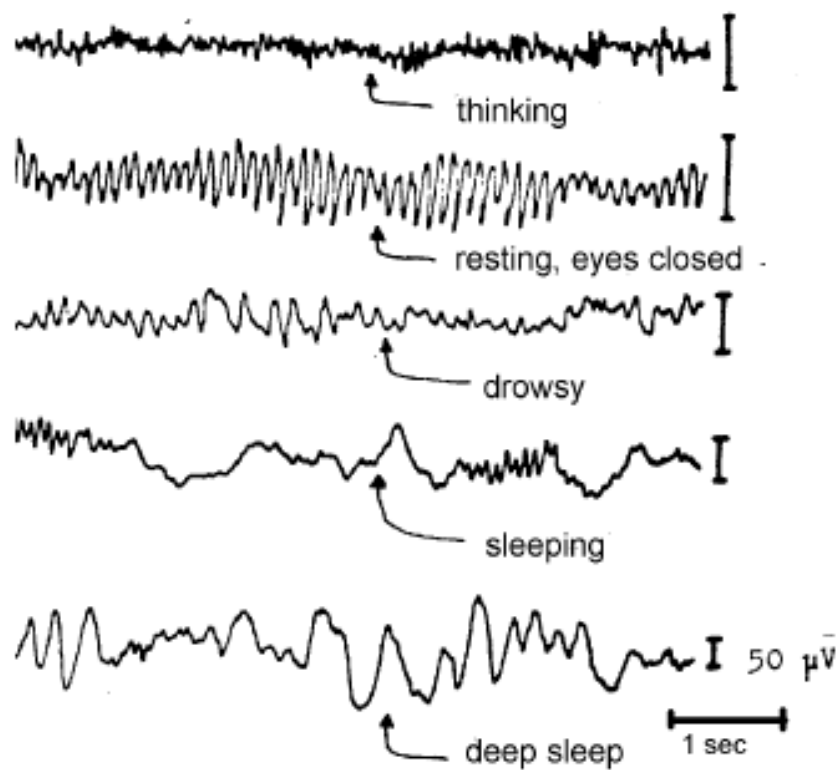
## 5.1 脑电图概述





## 5.1 脑电图概述

### EEG during different mental activities





## 5.1 脑电图概述

- ❖ 英国的**Recharad Caton**（1842~1926）被认为是第一个研究脑电活动的人。他在1875年发现兔和猴脑上有微弱的电活动。
- ❖ 德国的精神病学家**Hans Berger**（1873~1941）被认为是人类脑电图的发现者。他在1929年首次记录到了人类的脑电图（**EEG**）。

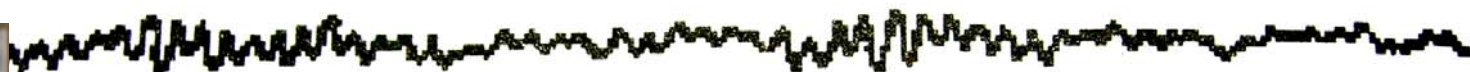


图 1-1 人的 EEG

第一个人类的 EEG 记录,受试者为 Berger 的儿子



## 5.1 脑电图概述

- ❖ 1932年，Hans Berger和Dietsch用Fourier技术分析EEG；
- ❖ 1934年，Fisher和Lowenbach记录了癫痫放电；
- ❖ 1935年，Foerster和Altenburger采集了外科手术时的皮层电图；
- ❖ 1937年，Dawson用叠加法证实了诱发电位；
- ❖ 1947年，美国EEG协会成立，并举行了第一次国际EEG会议；
- ❖ 20世纪70年代，诱发电位技术广泛应用于临床；
- ❖ .....



## 5.1 脑电图概述

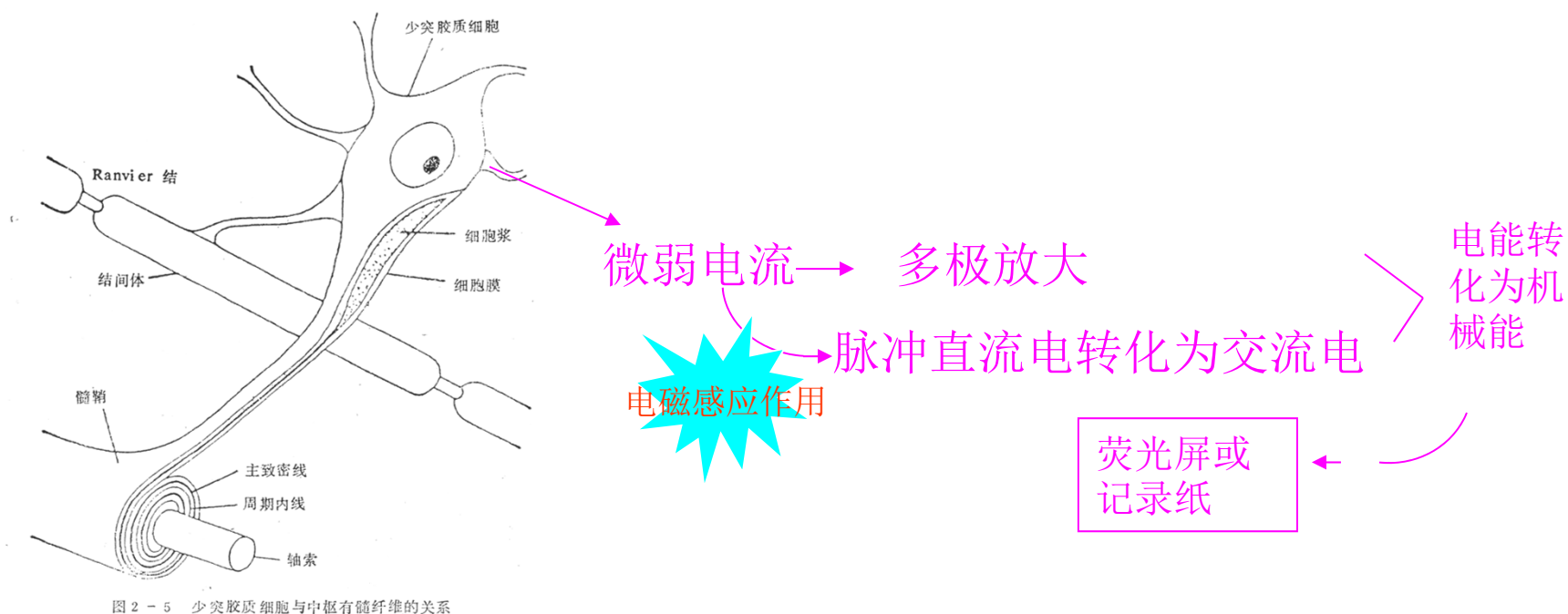
### EEG的临床意义

**EEG**是通过在脑的各相应区域（在头皮、硬膜下等）安放电极，描记大脑神经细胞活动所产生的生物电活动，因此**EEG**是反应大脑功能状态的电生理技术。



## 5.1 脑电图概述

检查脑功能状态的电生理技术。

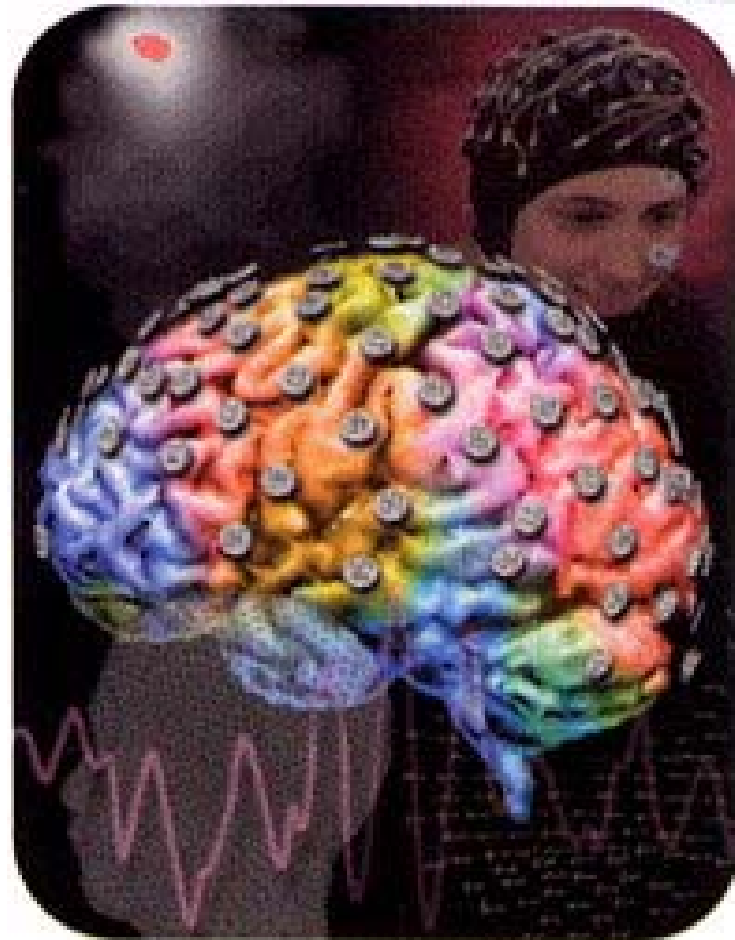


头皮EEG是脑电活动的间接图像。





## 5.1 脑电图概述





## 5.1 脑电图概述

## EEG临床意义

- ❖ 新技术的问世取代了很多老的检查方法，如新的影像技术取替了气脑造影，脑室造影及通过血管造影对脑占位病变的诊断。
- ❖ 作为反映大脑功能状态的脑电图学，过去、现在及将来仍不失其在临床诊断及科学研究的价值。
- ❖ 电子技术的发展促进了**EEG**学的发展：录像监测、动态**EEG**、数字化脑电图、定量技术、偶极子定位等。



# 5.1 脑电图概述

## 二、脑电图及其基本特征

### 1. 脑电波的分类

自发脑电活动和诱发脑电活动

脑电图（**electroencephalogram, EEG**）和  
事件相关电位（**event-related potential, ERP**）

一般说的脑电图（**EEG**）是专指自发脑电。



## 5.1 脑电图概述

- ❖ **脑电图**是由电极记录下来的大脑细胞群的**自发性生物电活动**。以电位为纵轴，时间为横轴将它以曲线的形式显示出来，即为**脑电图**。

EEG 是从头颅表面记录的综合电位，它以不同的频率、波幅、位相及波形反映脑的生物电改变。通常认为EEG记录了脑“自发的”电位，其意是指在清醒、安静、闭目状态下或在睡眠下记录的脑电位。

无论个体是处于清醒状态还是睡眠状态，由于包括大脑在内的中枢神经系统无可避免地要接受来自体内外环境的各种刺激，所以 EEG 并非“绝对”的自发电位。



# 5.1 脑电图概述

---

## 2. 脑电波的特征

- ❖ 具有其它波（如电波、光波）的特征—频率、波幅、波形及时相的变化
- ❖ 脑波代表大脑皮层某一区域神经细胞群活动同步的电位差，因此还具有出现方式、在相应各皮质区域的分布和对不同刺激的反应性等特征。



## 5.1 脑电图概述

- (1) 脑波具有在时间和空间分布上不断变换的特征，因此，脑波的**电位（振幅）、时间（周期）及相位**构成了脑电图的基本特征；
- (2) 按振幅大小，脑波可分为：**低幅（ $<25\mu\text{V}$ ）、中幅（ $25\sim75\mu\text{V}$ ）、高幅（ $75\sim150$ ）、极高幅（ $>150\mu\text{V}$ ）**。
- (3) 脑波的相位又被称为脑波的**极性**。通常规定，以基线为标准，**波顶朝上**的波称为**负相（阴性）波**，**波顶朝下**的波称为**正相（阳性）波**。



## 5.1 脑电图概述

### 频率

#### ❖ 表示方法

一周波/秒, **C/S, CPS, Hertz (Hz)**

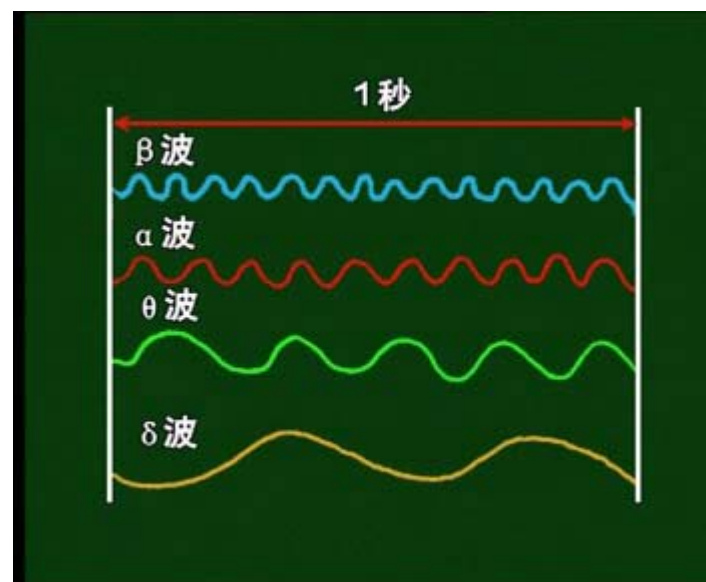
常规走纸速度 **3cm = 1秒**

临床常用的人类脑电频率在**0.5—30HZ**之间。

近年来的, 低频和高频电活动也成为了研究热点

**Ripple: 80~250Hz**

**Fast ripple: 250~500Hz**





## 5.1 脑电图概述

### 脑电波的主要成分

		和田丰治分类	Walter 分类
慢波	{ $\delta$ 波	0.5~3Hz	$\delta$ 波 0.5~3.5Hz
	{ $\theta$ 波	4~7Hz	$\theta$ 波 4~7Hz
	{ $\alpha$ 波	8~13Hz	$\alpha$ 波 8~13Hz
快波	{ $\beta$ 波	13~30Hz	$\beta$ 波 14~25Hz
	{ $\gamma$ 波	>31Hz	$\gamma$ 波 >26Hz





## 5.1 脑电图概述

### 波幅

代表一个波的高度

#### ❖ 表示方法

—用 $\mu V$  表示

—通过测定一个波的垂直距离与定标信号的高度比较确定

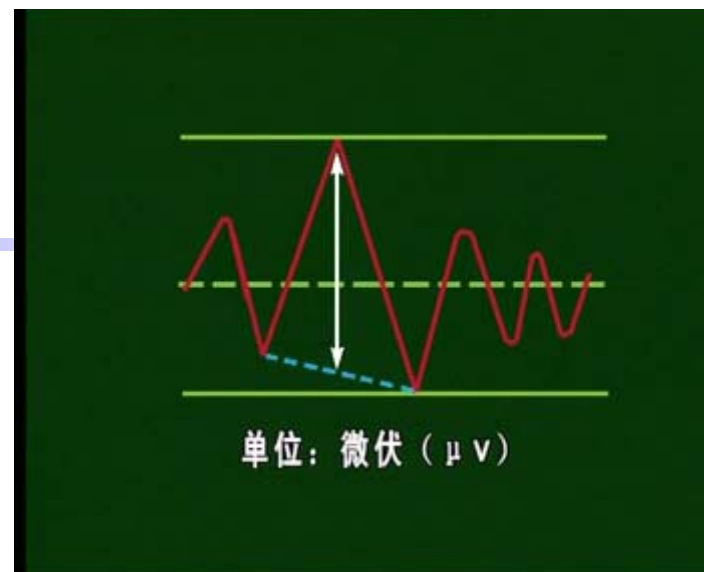
如果定标信号高度是 $5\text{mm}=50\mu V$ ，那么 $1\text{mm}=10\mu V$      $10\text{mm}=100\mu V$

#### ❖ 按波幅大小分为

低波幅  $<25\mu V$ ，中波幅 $25\sim75\mu V$ ，高波幅 $>75\mu V$

#### ❖ 除 $\alpha$ 节律外，头的二侧相应部位记录的脑电活动波幅不对称是异常表现

#### ❖ 注意：波幅不对称常由脑外因素引起，特别是记录电极的空间距离不等或阻抗不同





## 5.1 脑电图概述

### 波形

- ❖ 二个电极间电位差变化的形式 谓之波形。
- ❖ 二个相同的波连续出现，谓之电活动。
- ❖ 三个以上大小、形状相同的脑波称之为节律。

常见的不同波形的波：

正弦波 波的上行及下降支清楚圆滑

单时相波 是一种自基线向上或向下的单一方向的偏转

双时相波 是含自基线向上与向下二个成份的波

三相波 一基线上、下交替发生的三个成份构成，第一相为较小的负相波，第二相为正相波，第三相为高于第一相的负相波。

一常见于代谢性脑病，尤见于肝性脑病。也见于癫痫、颅脑外伤及朊病毒感染性等疾病。



## 5.1 脑电图概述

棘波 形似尖钉，时限为**20~70**毫秒。

尖波 尖峰样，时限**>70ms**（**70~200ms**）

通常上行支较陡，下行支较坡。

棘慢复合波 由1个棘波和1个慢波组成

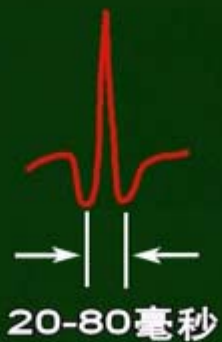
多棘慢复合波 由2个或2个以上的棘波和1个慢波组成。

多棘波 由2个或2个以上的棘波连续出现。

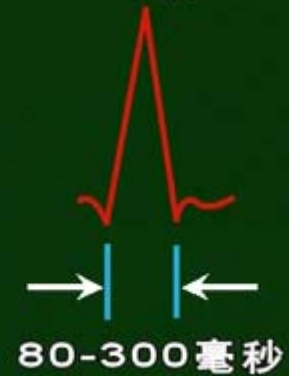
精神运动性变异型波 波幅**50~70 $\mu$ V**，**4~7cps**的带有切迹的节律性电活动。此种带有切迹的慢波由二个负相波组成，中间有1个正相偏转。呈短至长程出现，多见于中颞区。

**14/sec**及**6/sec**正性棘波 弓形，见于一侧或双侧后颞及临近区域，出现在思睡期和轻睡期。

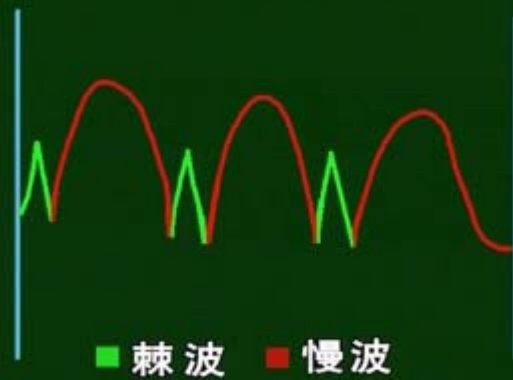
棘波



尖波



棘-慢综合波



# 三相波





## 5.1 脑电图概述

### 脑波特点---出现方式

短程：持续出现1~2秒钟

长程：持续出现5~10秒钟

节律性：有规律的反复出现

无规律性：高度节律失调

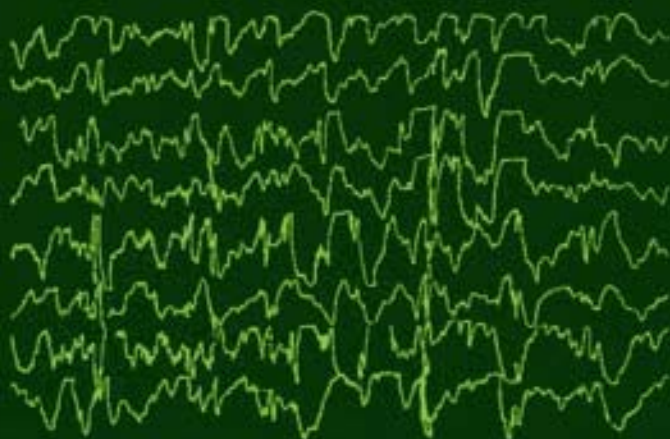
散在或偶尔出现          游走性

爆发出现                  间歇出现

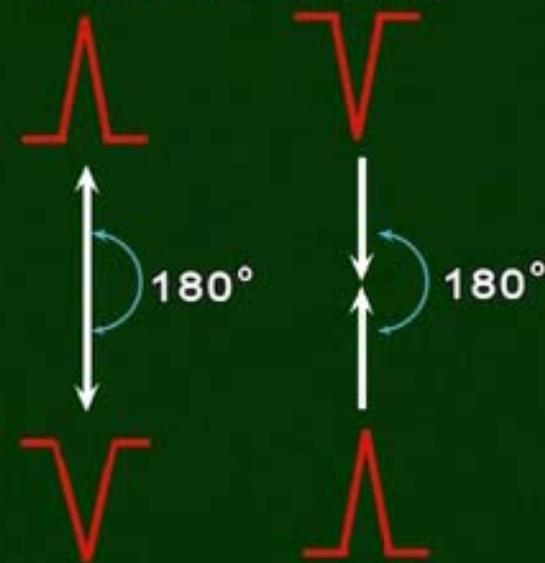


## 5.1 脑电图概述

高幅失律



位相倒置示意图





## 5.1 脑电图概述

### 脑波特征---分布与广度

- ❖ 普遍性或弥散性
- ❖ 一侧性分布
- ❖ 局灶性分布 应与普遍分布所伴有的某个区域偏盛区分。
  - 局灶慢波 在波幅高的区域波率最低
  - 局灶尖波（有波散倾向）在病灶部位尖波较持续





## 5.1 脑电图概述

---

### 脑波特征---反应性

通过各种方法诱致的正常和异常的  
**EEG**改变，称为反应性。这些方法包括睁  
闭眼试验、过度换气、光或其它感觉刺激  
、警醒水平的变化等。



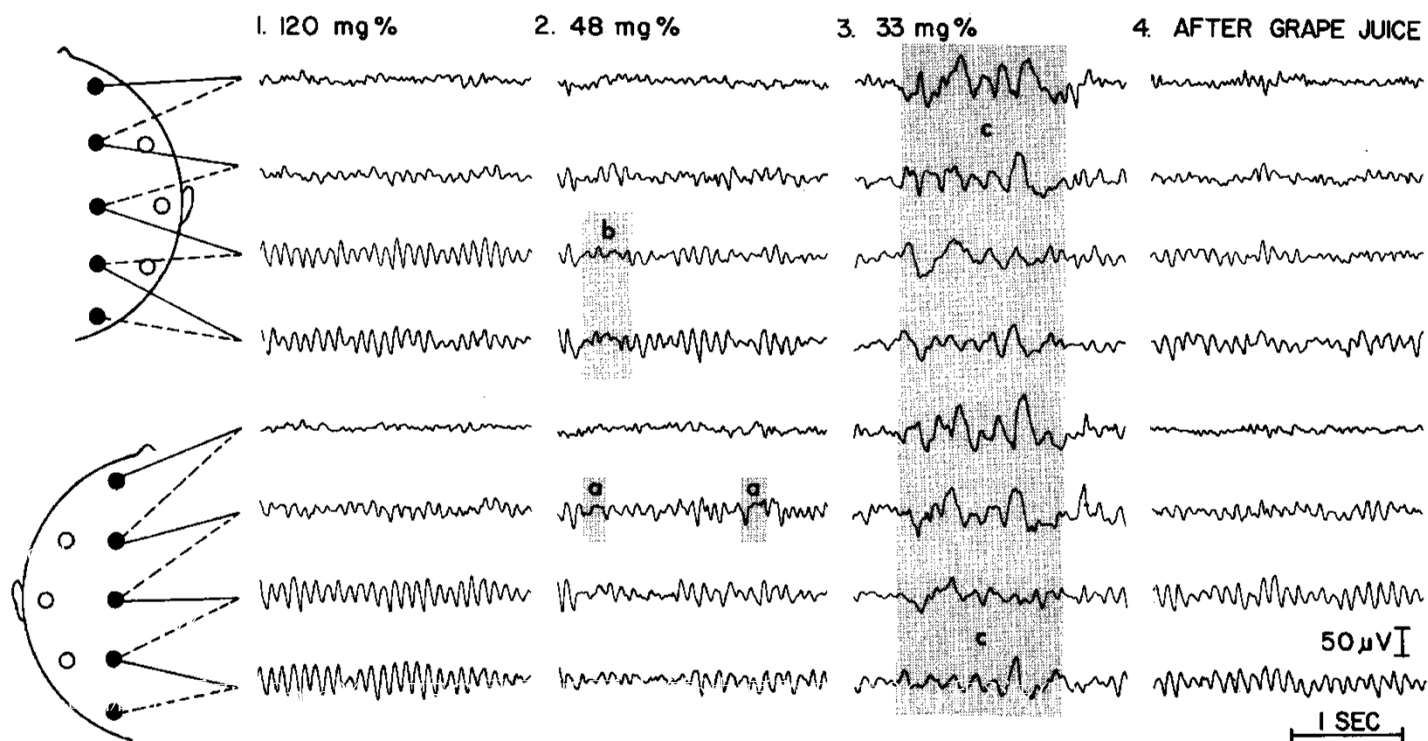
## 5.1 脑电图概述

### EEG特征

- ❖ **EEG**是脑功能状态的指示器
- ❖ 脑功能受内外环境的影响→反映脑功能状态的**EEG**也受内外环境的影响。包括：
  - 生理因素    年龄  
                    睡眠-清醒周期  
                    精神活动
  - 物理因素    光，声等
  - 化学因素    药物
  - 代谢因素    血糖，有毒代谢产物等



## 5.1 脑电图概述





## 5.1 脑电图概述

### 三、脑电图的检查方法

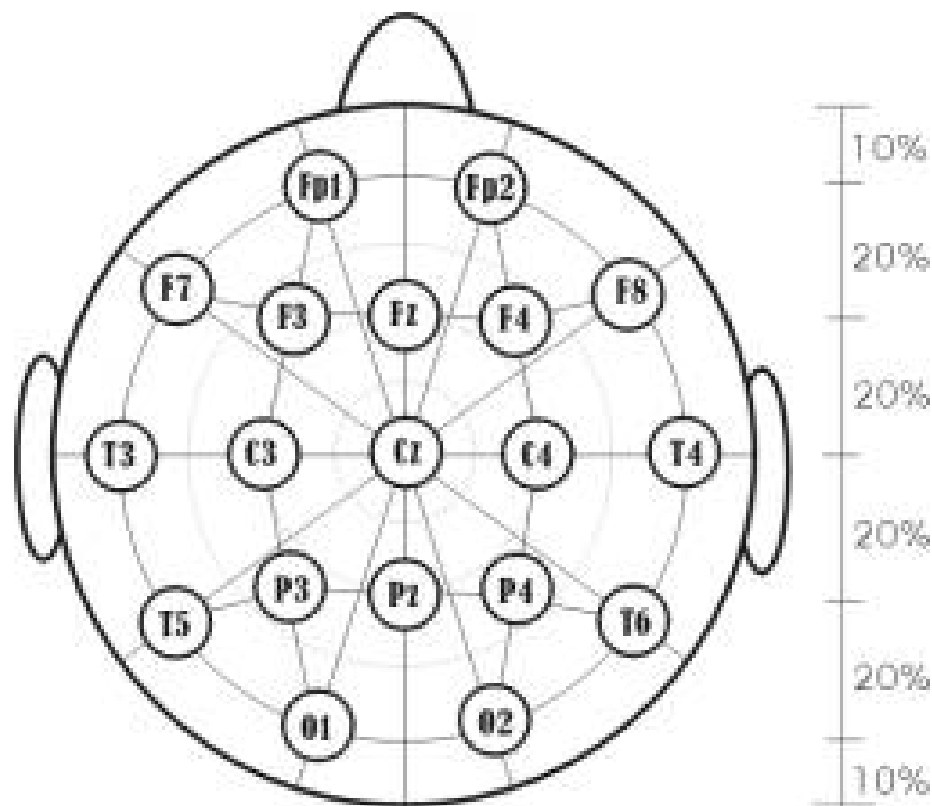
- 脑电图仪为**放大百万倍的微伏级**精密电子设备；
- 临床上使用的脑电图仪一般为**8、12、16、32**导程等规格；在认知研究中一般使用**32、64、96、128或256**导程的脑电图仪；
- 记录**EEG**所使用的电极有漏斗状电极、盘状电极和**针状电极**；
- 关于电极的位置，有许多种放置方法，如**Montreal、Cohn和Gibbs**等。但应用最多的是**10-20系统法**（国际**EEG**学会的标准安放法）。



# 国际10-20系统(the 10-20 international System)电极放置法

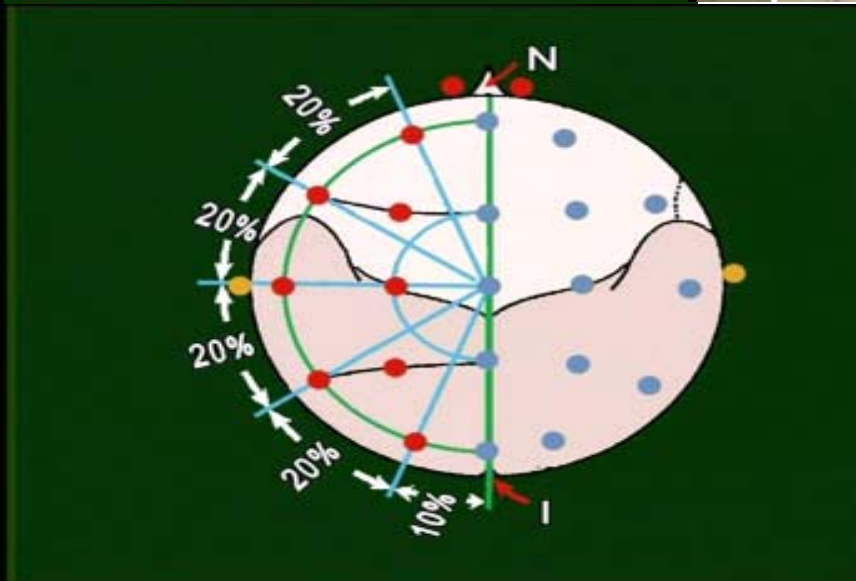
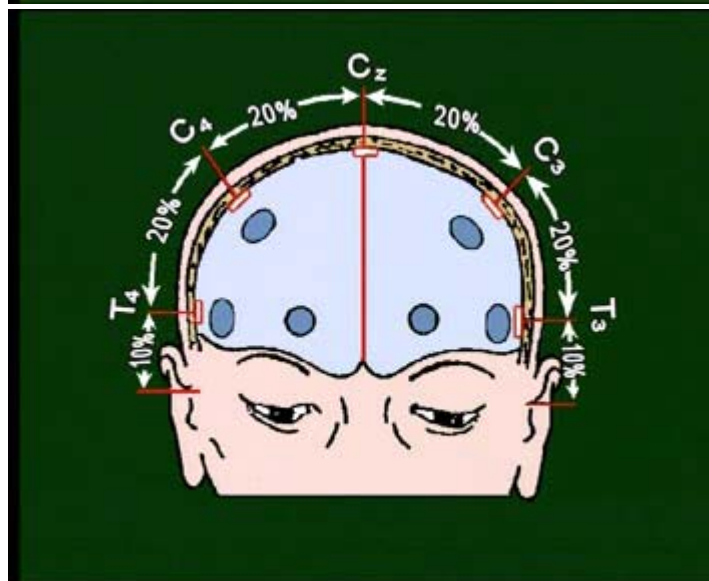
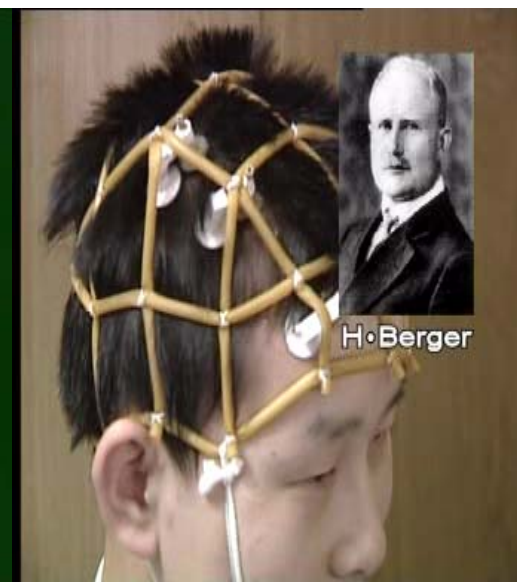
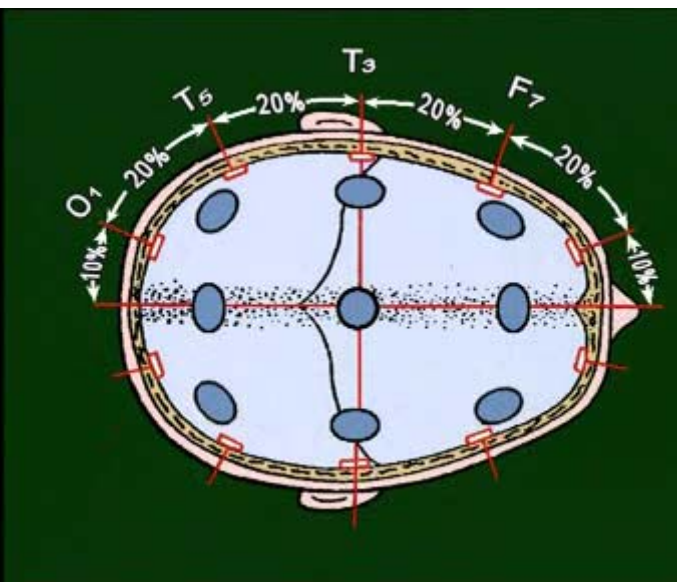
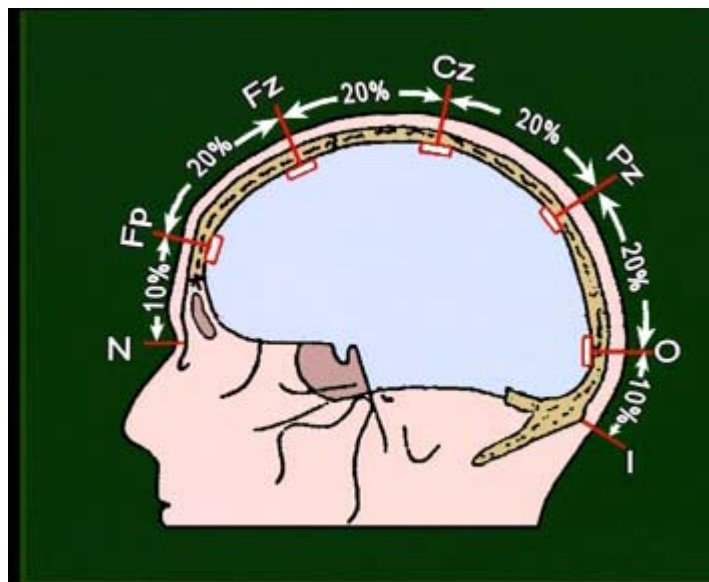
其特点是:

- ❖ 电极有各自的名称: 位于左侧的是奇数, 右侧的是偶数。
- ❖ 接近中线的用较小的数字, 较外侧的用较大的数字。
- ❖ 电极名称包括电极所在头部分区的第一个字母。
- ❖ 诸点电极的间隔均以**10%**和**20%**来测量。





# 电极安放10/20系统



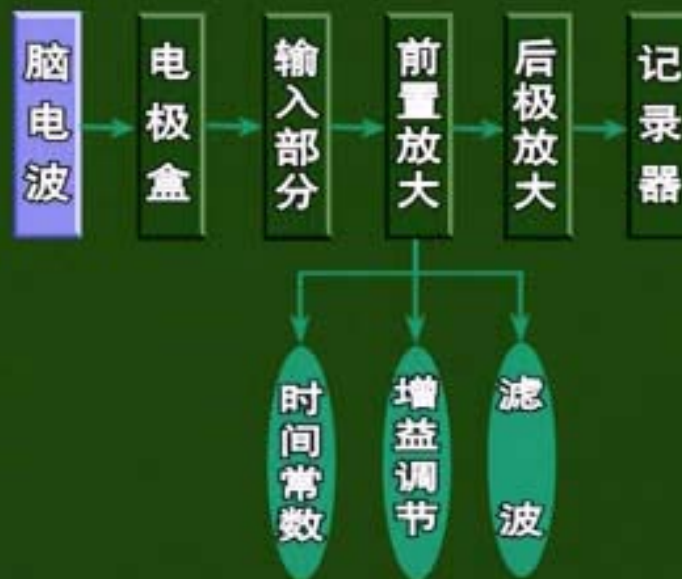




## 5.1 脑电图概述



脑电采集系统





# 第五章 脑功能的电生理学成像

- ❖ 1. 脑电图概述
- ❖ 2. 脑电的生物物理基础
- ❖ 3. 诱发脑电与事件相关电位
- ❖ 4. 脑电正问题与逆问题



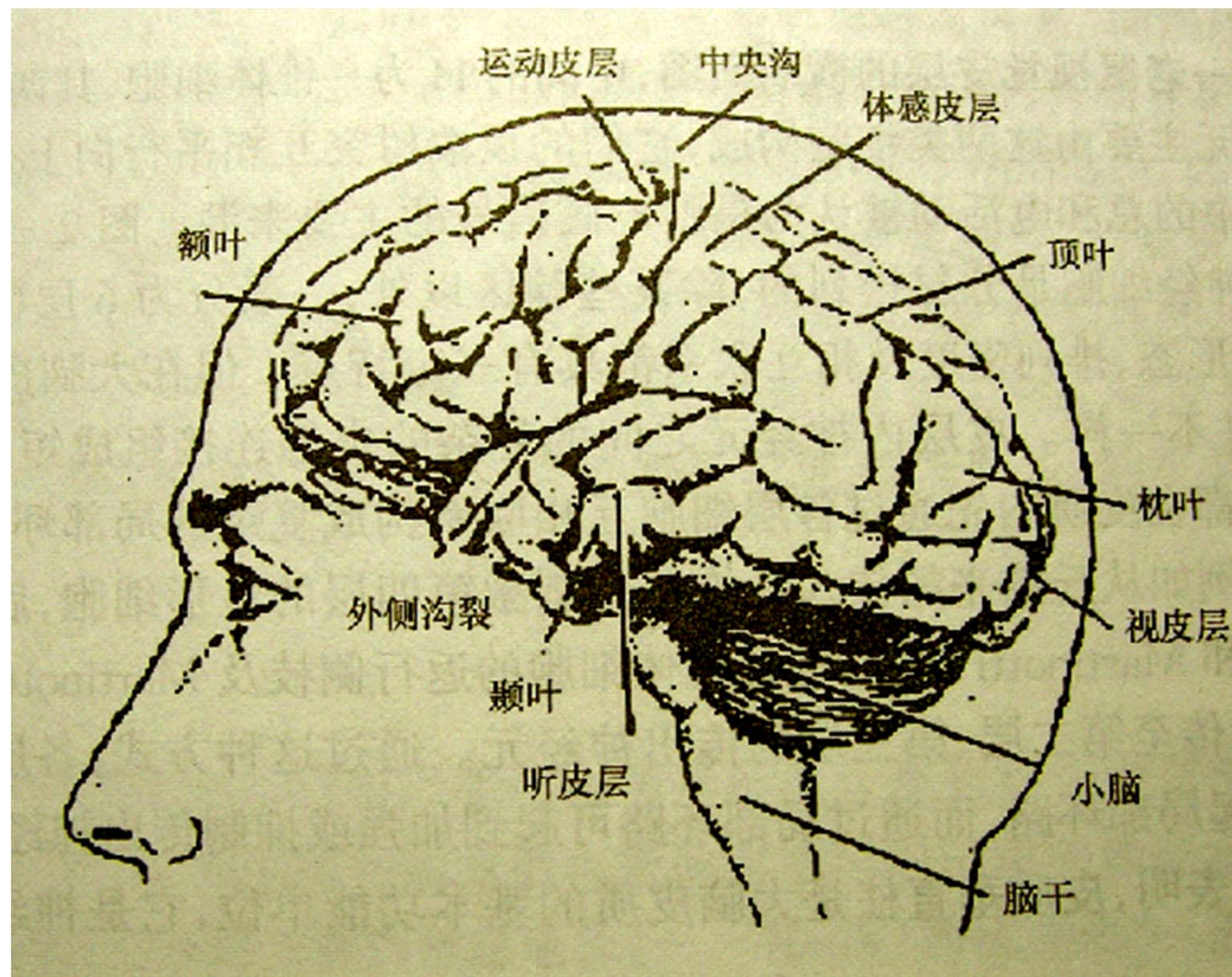


## 5.2 脑电的生物物理基础

### 一、大脑的解剖结构

脑的纵向沟裂将脑分成左右**半球**。

依据脑表面的沟及裂可以将大脑半球分成**额、颞、顶、枕**四个叶。





## 5.2 脑电的生物物理基础

- ❖ 人脑中大约有**1000**亿个神经细胞，其中**大脑皮质**有**140**亿个细胞，每个细胞约有**1**万个神经连接，形成了及其**复杂庞大的神经细胞网络**；
- ❖ 神经细胞之间的信息传递以**化学传递**为主，而参与化学活动的神经递质多达**50**种，他们是高度复杂的**脑机能活动的主要生物学基础**；
- ❖ 构成脑的除了神经细胞之外，还有**10**倍于神经细胞的**胶质细胞**，为支撑结构，旨在维持适宜的离子浓度和输送营养物质；
- ❖ 脑皮层之下是大量的**神经纤维（白质）**，主要起沟通不同皮质区的作用。



## 5.2 脑电的生物物理基础

- ❖ 解剖知识对于脑电研究具有三方面的意义：
  - (1) 细胞层次上的结构决定了神经电活动如何形成宏观的电流源；
  - (2) 电导率在宏观尺度上的分布规律是求解脑电正问题的基础；
  - (3) 详细的解剖知识有助于提高脑电逆问题的研究。





## 5.2 脑电的生物物理基础

### 二、神经细胞的生物电现象

#### 1. 神经元

**H—锥体细胞, F—星形细胞**

皮层神经元主要由这两类细胞构成。它们的顶端树突互相平行向上延伸，构成灰质的表层，这一层中的总和电活动被认为是**脑电信号的主要来源**。



图 2-2 老鼠视觉皮层横断面



## 5.2 脑电的生物物理基础

- ❖ 锥体细胞的**树突**（**dendrite**）是向上呈树丛状延伸的部分；**轴突**（**axon**）是从细胞体长出的长纤维。
- ❖ 细胞体和树突上一般有几千个来自其它神经元的**突触**（神经元与神经元之间的机能接触部分）。

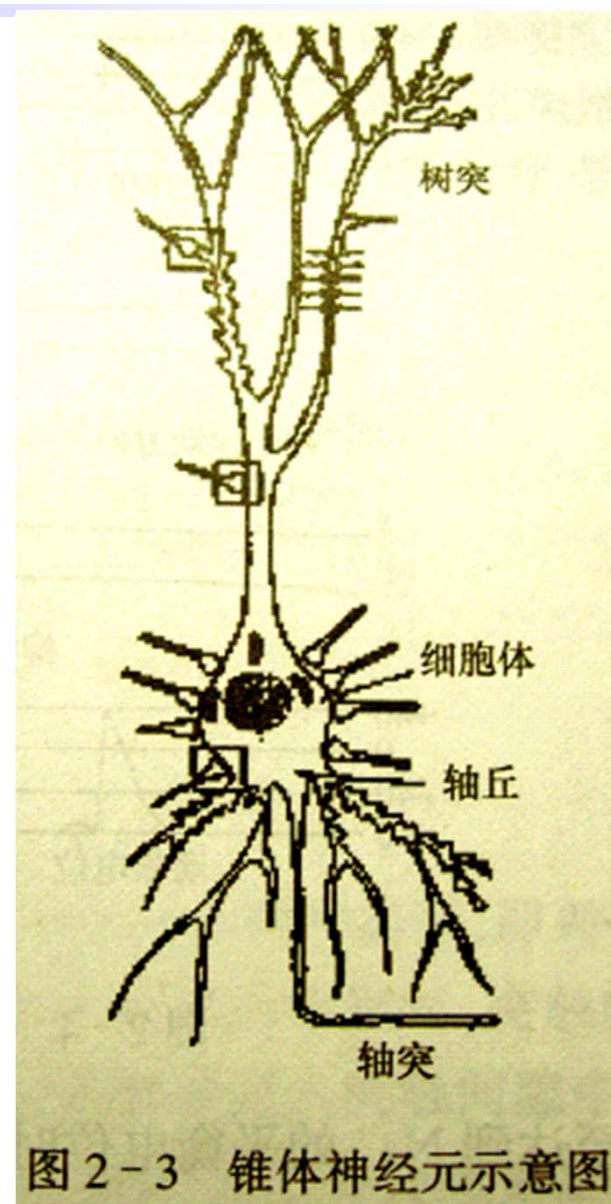


图 2-3 锥体神经元示意图



## 5.2 脑电的生物物理基础

### 2. 静息电位

- 电生理实验表明，神经元和肌肉细胞等或组织细胞在处于静息状态时，膜内的电位较膜外的电位为负，这种膜内外的电位差称为**静息电位**（**resting potential**）或**膜电位**（**membrane potential**）。
- 静息电位的产生主要是有细胞膜内的 $K^+$ 向膜外扩散所致。





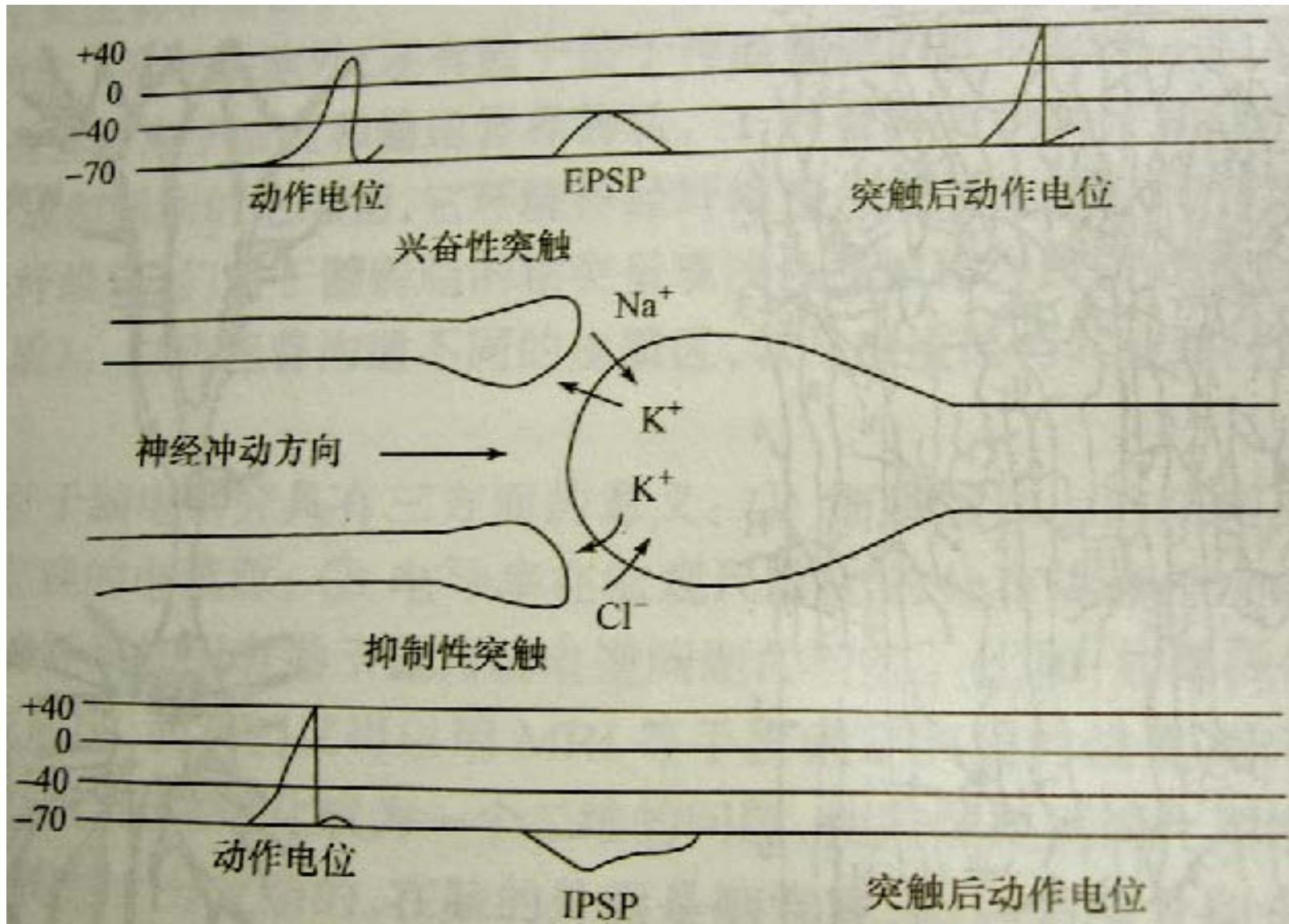
## 5.2 脑电的生物物理基础

### 3. 动作电位

- 当神经元受到刺激而兴奋时产生可传的导电位变化称为**动作电位**（**action potential**）。
- 动作电位的表现表现为膜内静息电位（一般**-70uV**）的迅速消失，然后是一个**正电位的上升**（一般**+40uV**）。
- 这种在极短时间内出现的**膜外为负、膜内为正**的倒转过程称为**超射**。
- 此后，细胞膜又很快恢复到原来的状态。
- 动作电位的产生主要是由于细胞膜上的**Na<sup>+</sup>通道被激活**而迅速开放，**Na<sup>+</sup>**向膜内流动。



## 5.2 脑电的生物物理基础







## 5.2 脑电的生物物理基础

### 4. 突触后电位

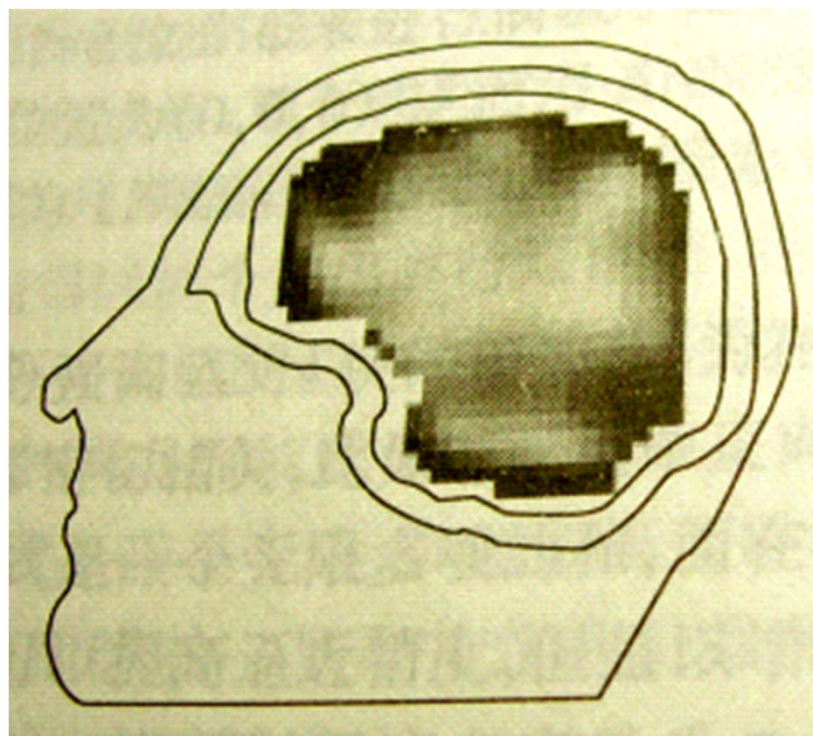
- **神经动作电位**作为一种信息沿着神经元网络进行**传递**。这种传递主要是靠化学递质来完成的，仅有个**别传递是依靠突触来进行的**。
- 神经元与神经元之间的机能接触部分称为**突触**。通过突触可以使神经活动信息做定向传导。
- 根据突触对下一个神经元机能活动的影响，可以将突触分为**兴奋性突触**和**抑制性突触**两种。对应地，可分别形成**兴奋性突触后电位**（EPSP）和**抑制性突触后电位**（IPSP）。



## 5.2 脑电的生物物理基础

### 三、脑电的发生机制

- **脑电图**是指用电极在头皮表面记录的电位变化（**EEG**）；如果把电极放到颅内的皮层表面，则相应的记录称为**皮层电图**（**ECoG**）。
- 关于**EEG/ECoG**的**形成原理**虽有较多的研究，但目前**仍尚未完全阐明**。下面介绍一些主要观点。





## 5.2 脑电的生物物理基础

### 1. 突触后电位与脑电波

- 在动物实验中，应用微电极记录，发现脑波主要与大脑皮质神经细胞的突触后电位变化有关；要在皮质表面出现电位变化形成脑波，需要许多神经元的突触后电位出现同步的变化；
- 从大脑皮质的神经元组成来看，细胞排列很不一致，其电活动难以总合形成较强的电场。而锥体细胞排列整齐，其树突互相平行且垂直于皮质表面，容易形成同步合成强的电位变化。因此，目前普遍认为脑波主要是由大脑皮质的锥体细胞顶树突的突触后电位总合而成。



## 5.2 脑电的生物物理基础

### 2. 脑波的节律性

- 在大脑皮质表面或头皮上记录下来的脑波是一种自发性的电位变化。这种自发性的节律放电现象，可能是由于神经元的自律性放电引起的。
- 在大脑内部的每个神经元都与其他神经元共同组成环状网络，现今认为正是这种大量存在的神经元回路对脑波的节律性的产生起着主要的作用。



# 第五章 脑功能的电生理学成像

- ❖ 1. 脑电图概述
- ❖ 2. 脑电的生物物理基础
- ❖ 3. 诱发脑电与事件相关电位
- ❖ 4. 脑电正问题与逆问题



## 5.3 诱发脑电与事件相关电位

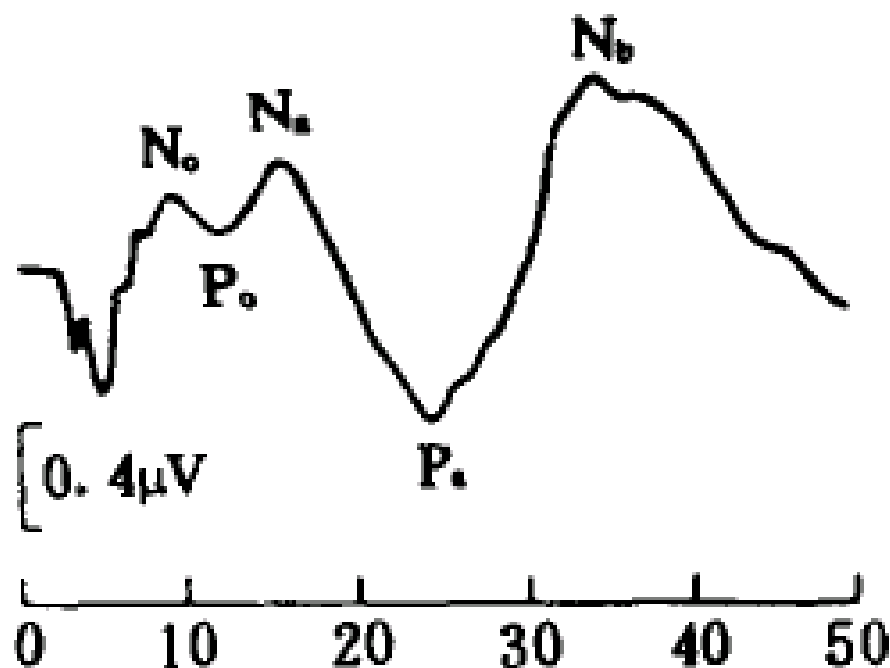
### 一、诱发脑电的概念

- 人为地给予刺激而引发的电位（脑电信号）称为**诱发脑电**(电位)（**evoked potentials, EP**）。
- 通常将由与心理因素有关的刺激所引发的脑电信号称为**事件相关电位**（**event-related potentials, ERP**）。
- 自发脑电（**EEG**） 无时不在。**EP/ERP**是出现在自发脑电（**EEG**）的**背景**之上的，它们通常比**EEG**的**信号弱**，常采用**叠加平均技术**进行信号的提取。



## 5.3 诱发脑电与事件相关电位

- ❖ 诱发电位的出现与给定的刺激有一定的锁时关系（**time locked**），即特定的诱发电位有**固定的潜伏期**。这是**EP/ERP**的一个很重要的特点。







## 5.3 诱发脑电与事件相关电位

### 二、ERP的主要刺激模式

#### (1) odd-ball模式

包括两种刺激：一种刺激偶然出现，作为靶刺激（或偏差刺激）。另一种刺激以大概率出现，作为标准刺激。

#### (2) 选择性注意模式（selective attention）

分别在两个或多个通道上（如双耳、双眼等）呈现一系列的刺激，要求被试者从一个通道上注意偶然出现的靶信号。

#### (3) 记忆比较模式（memory comparison）

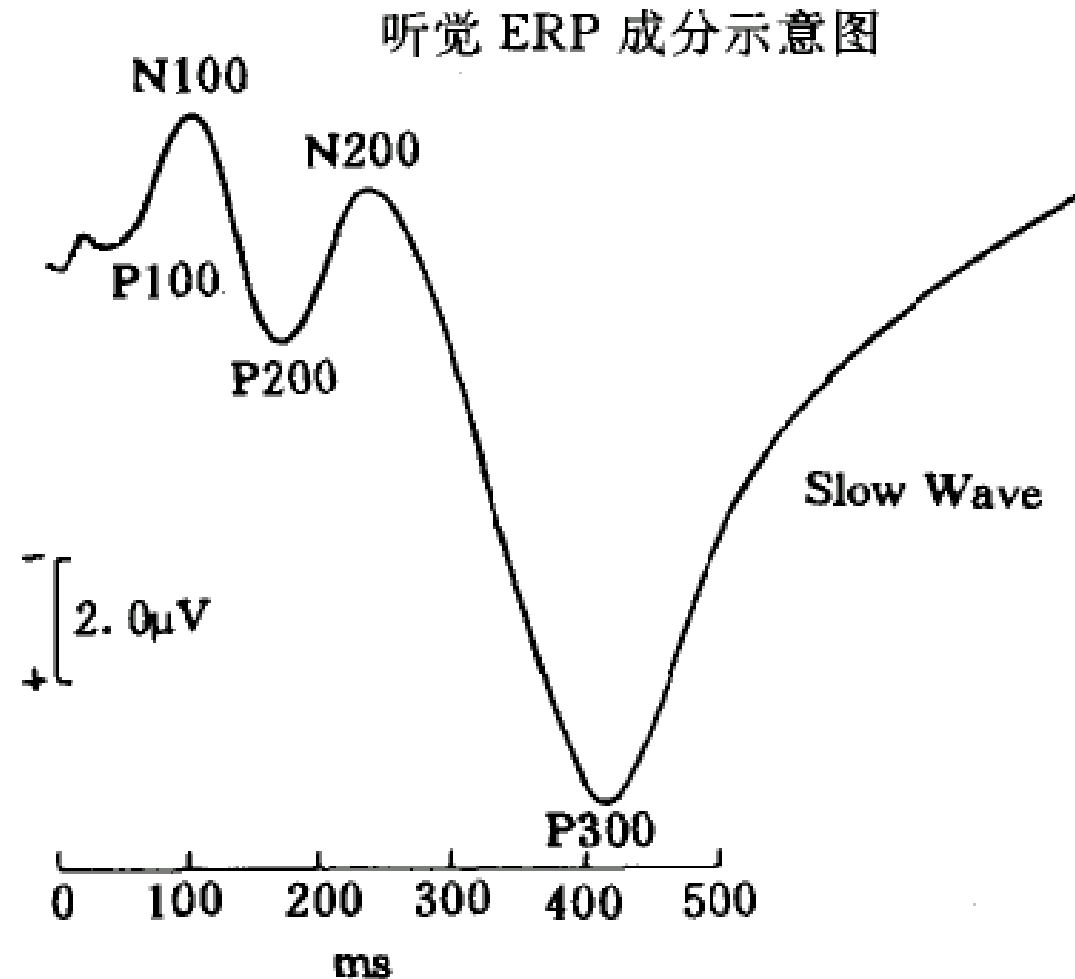
被试者从若干非靶刺激中找出短期记忆的靶信号。





## 5.3 诱发脑电与事件相关电位

### 三、ERP的主要成分

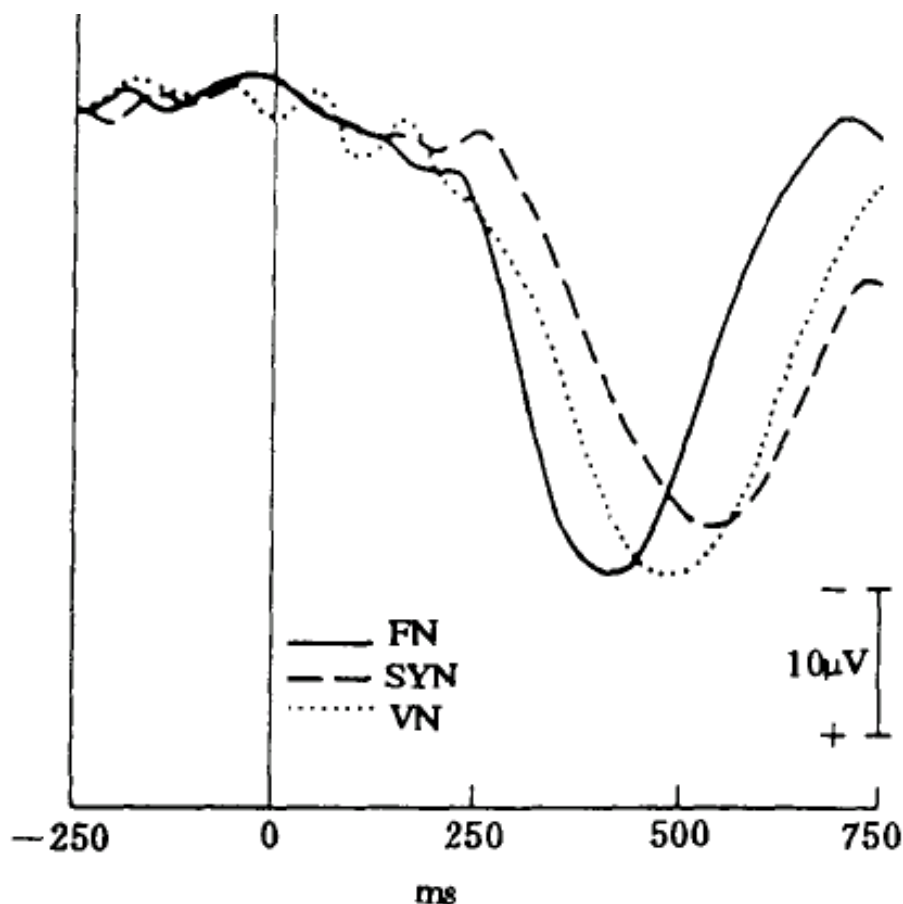




## 5.3 诱发脑电与事件相关电位

### 1. P300

- 一般在**odd-ball**刺激模式可以出现。
- 在非注意条件下不能引起**P300**。在一定程度上**P300**的幅度与所投入的心理资源成正比。潜伏期随任务难度的增加而延长。

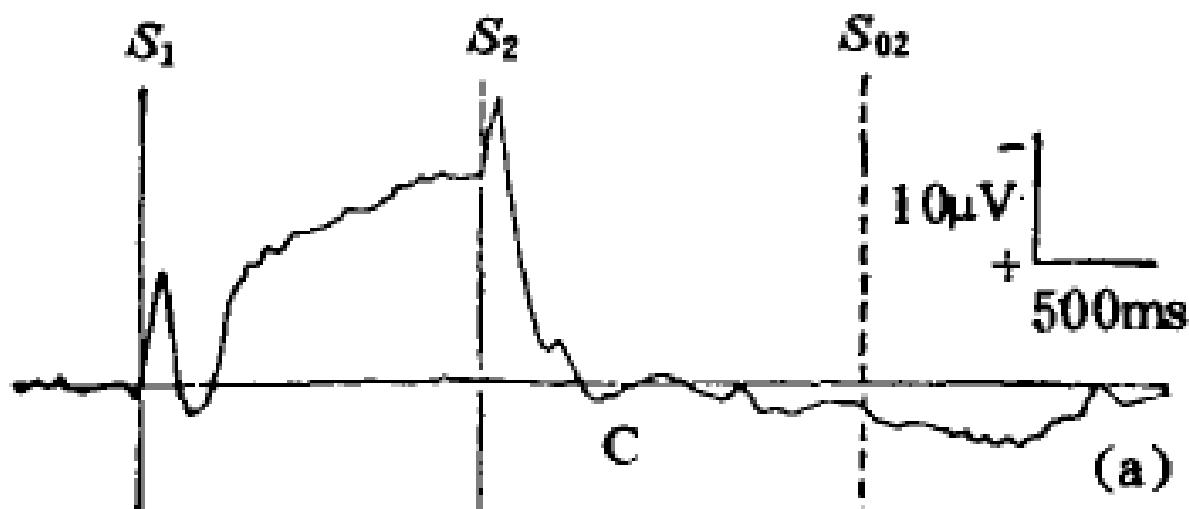




## 5.3 诱发脑电与事件相关电位

### 2. CNV (contingent negative variation, 伴随性负变化或关联负变)

- 在预备信号与命令信号出现。
- 波形负向偏转。
- 主要与心理因素有关。





## 5.3 诱发脑电与事件相关电位

### 3. MMN (mismatch negativity, 失匹配负波)

仍然运用上述产生 P300 的 Oddball 实验模式，标准刺激为 1000Hz 的短纯音，偏差刺激为 800Hz 的短纯音，仅令被试者专心阅读，不注意这些听觉刺激。此时在约 250ms 内偏差刺激比标准刺激引起更高的负波。

由于这一刺激变化是在非注意条件下产生的，亦即在被试者非意识的条件下产生的，而这一非意识的外界变化引起了一定形式的脑波 MMN，可见此 MMN 反映了脑对信息的自动加工。



## 第五章 脑功能的电生理学成像

- ❖ 1. 脑电图概述
- ❖ 2. 脑电的生物物理基础
- ❖ 3. 诱发脑电与事件相关电位
- ❖ 4. 脑电正问题与逆问题



## 5.4 脑电正问题与逆问题

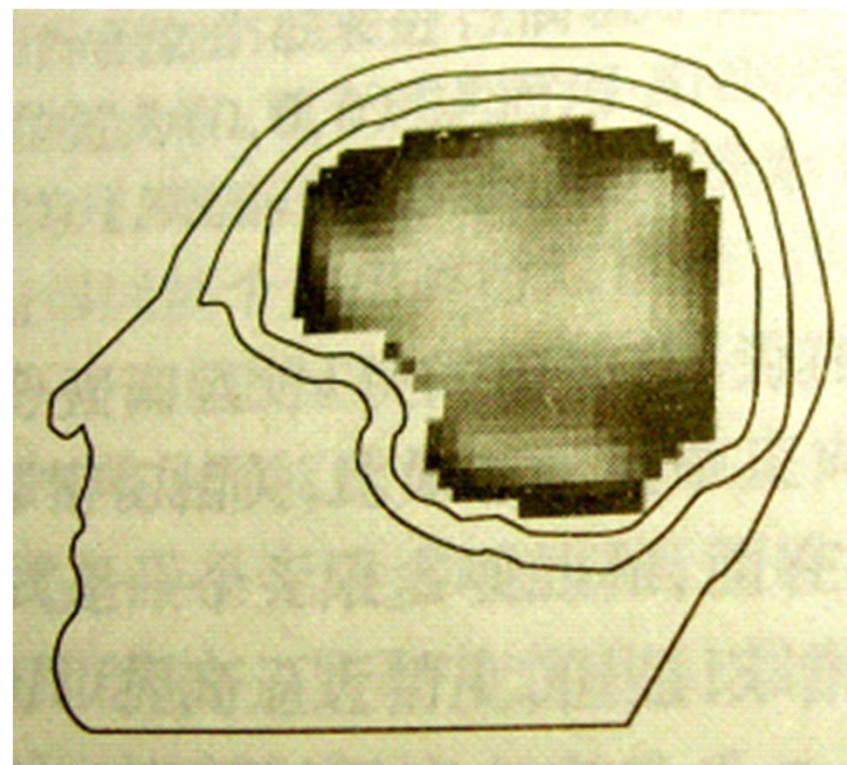
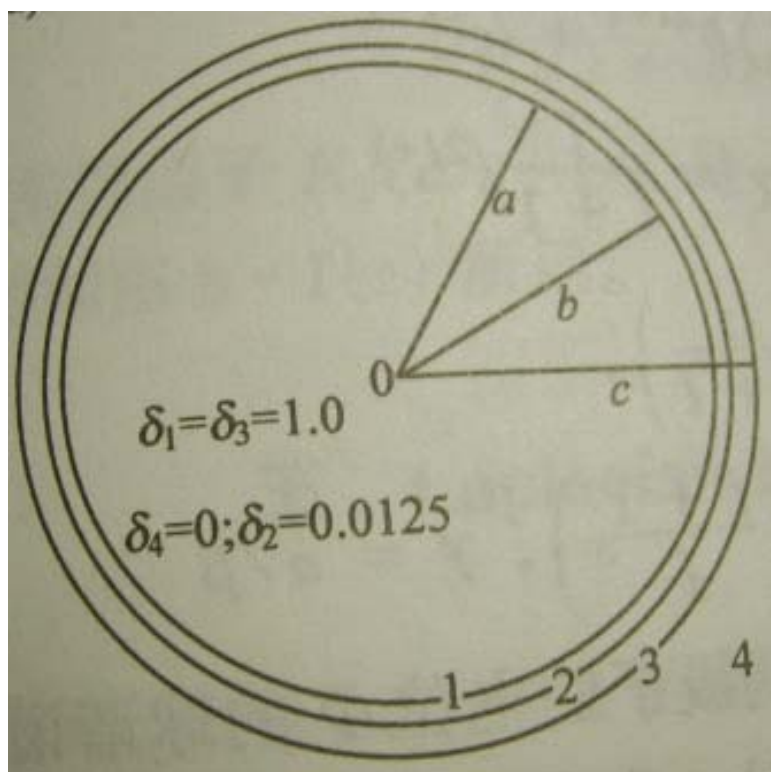
### 一、脑电正问题

- 脑电正问题是指在已经知道脑电源和头模型的情况下，计算头皮表面的电位的问题。
- 脑电源的模型主要有
  - (1) 偶极子 (**dipole**)
  - (2) 电荷层 (**charge layer**)
  - (3) 分布源 (**distributed source**)



## 5.4 脑电正问题与逆问题

- 头模型主要有球模型和真实头模型。







## 5.4 脑电正问题与逆问题

❖ 三层球模型的解析解为：

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \frac{1}{4\pi\delta} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{A_n}{r^{n+1}} + B_n r^n \right) \begin{vmatrix} P_n^0(\cos\theta) \\ P_n^1(\cos\theta)\cos\phi \end{vmatrix}, f < \frac{r}{R} \leq b \\ \Phi_2 &= \frac{1}{4\pi\delta k} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{C_n}{r^{n+1}} + D_n r^n \right) \begin{vmatrix} P_n^0(\cos\theta) \\ P_n^1(\cos\theta)\cos\phi \end{vmatrix}, b \leq \frac{r}{R} \leq c \\ \Phi_3 &= \frac{1}{4\pi\delta} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{E_n}{r^{n+1}} + F_n r^n \right) \begin{vmatrix} P_n^0(\cos\theta) \\ P_n^1(\cos\theta)\cos\phi \end{vmatrix}, c \leq \frac{r}{R} \leq 1\end{aligned}$$





## 5.4 脑电正问题与逆问题

- ❖ 复杂真实形状头模型的正问题电位计算方法：
  - 边界元法 (**boundary element method, MEM**)
  - 有限差分法 (**finite difference method, FDM**)
  - 有限体元法 (**finite volume method, FVM**)
  - 有限元法 (**finite element method, FEM**)

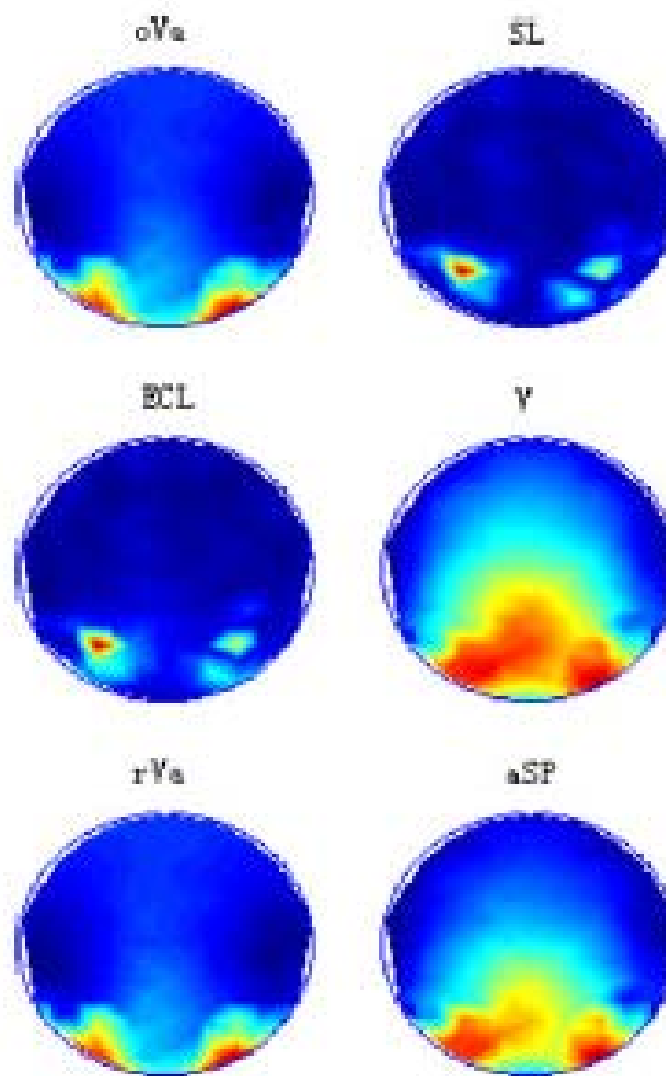


## 5.4 脑电正问题与逆问题

### 二、脑电逆问题

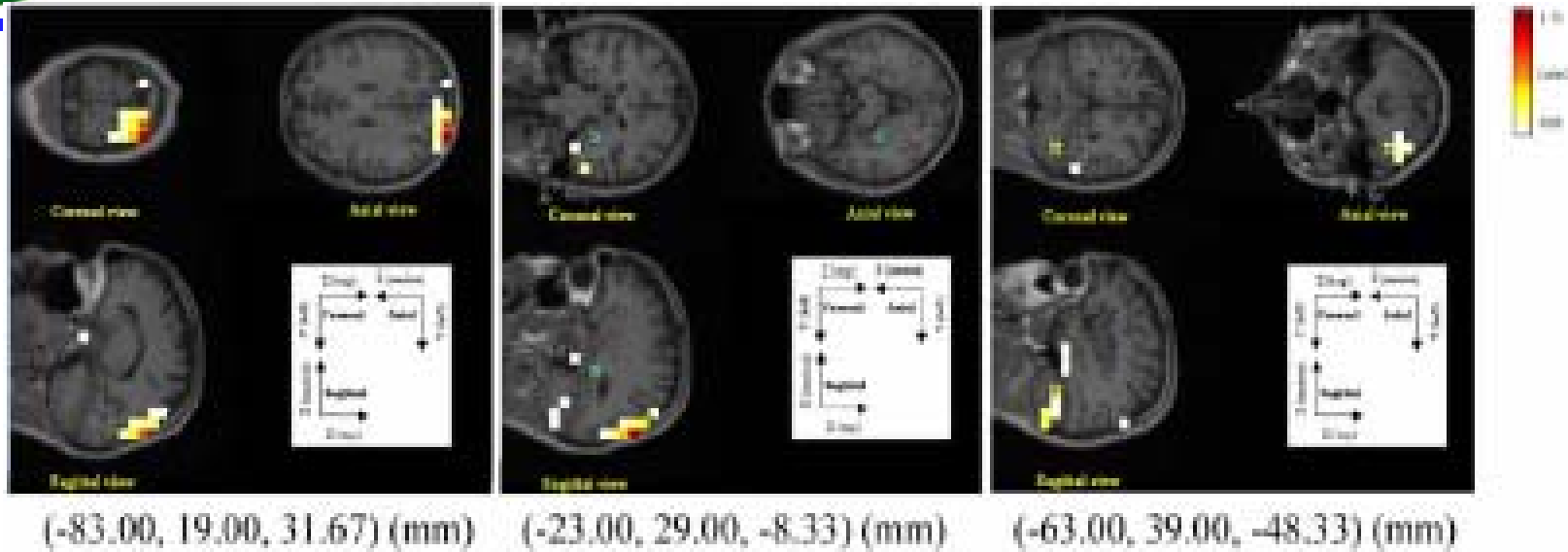
已知头皮（或皮层）电位分布和头模型，求解电流源的大小、分布等。

- 偶极子定位
- 分布源反演
- 高分辨率成像

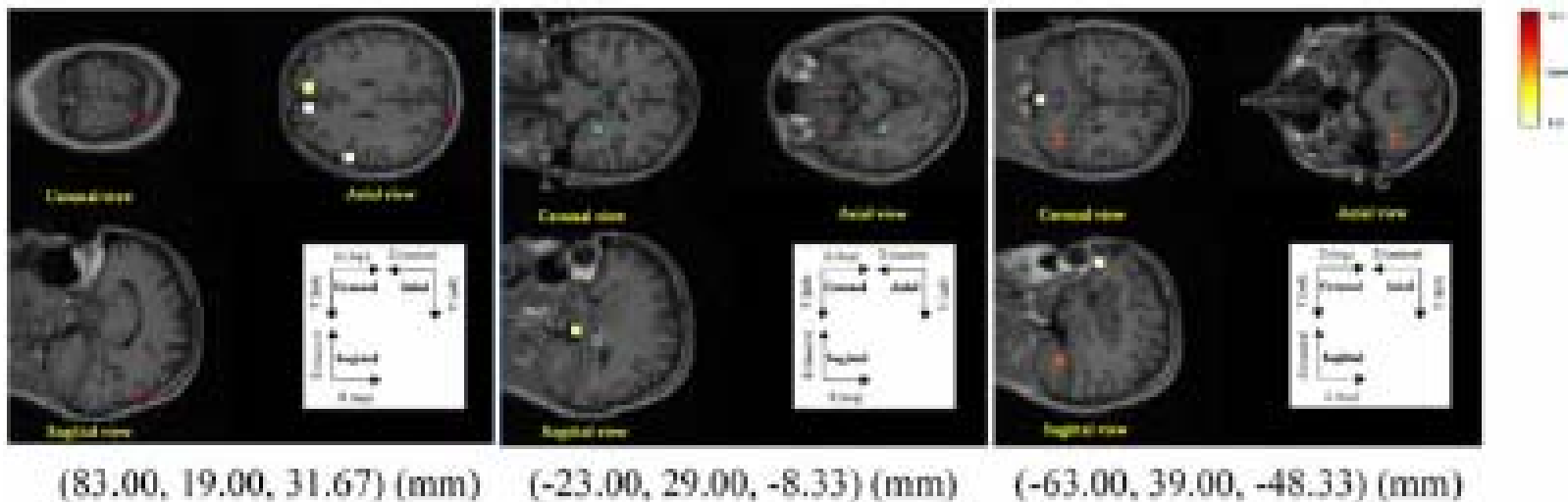




# LORETA 源定位(Xu P,IEEE BME 2007



(a)





# EEG software

---

- ❖ EEGLab
- ❖ REST