

# 脑电帽原理和使用简介

杨若晓

YANG Ruoxiao

## 0 引言

人类语言是一套特殊的符号系统，具有十分复杂的心理加工机制。语言心理加工的生理基础就是人脑。人们对语言的脑机制研究由来已久，从初期通过解剖研究非正常语言能力者的大脑发现和语言行为息息相关的 broca 脑区和 wernicke 脑区，到现在技术进步背景下利用各种脑成像技术对人脑语言机制的各种探索。而在各种脑成像技术中，脑电技术（Electroencephalogram，简称 EEG）以其具有的高时间分辨率特点和性价比高而被广泛利用。而在脑电技术中，事件相关电位（Event related potential，简称 ERP）通过有意地赋予刺激以特殊的心理意义，利用多个或多样的刺激引起的脑的电位，成为一种特殊的脑诱发电位。由于它不仅能够反映大脑的单纯生理活动，还能反映认知过程中大脑的神经电生理的变化，因而被称为认知电位，在对语言加工的研究中广泛运用。本文将首先对脑电技术原理和 ERP 技术原理进行简单介绍，之后对目前为止发现的与语言加工过程有关的 ERP 成分进行简单说明，最后介绍 16 导脑电帽（MLAEC1/EC2 EEG Electro-Cap System）的基本使用方法。

## 1 脑电技术简介

脑电技术，或者脑电图（EEG）是通过置于头皮表面的电极记录的脑波图谱，是用神经电生理的方法检测而得到的脑神经细胞的活动。脑电图的最大的优越性在于时间分辨率相当高，大约在 1 毫秒左右，这就使得脑电能够相当好地记录到脑波的上升和下降。人类的自发 EEG 波幅（amplitude）约为 10-100  $\mu$  v（1 微伏=1 伏特的百万分之一）。而由心理活动引起的脑电要比自发脑电更弱，一般只有 2 到 10 微伏，通常淹没于自发电位中，所以 ERP 需要从 EEG 中提取。

## 2 事件相关电位（ERP）技术原理

事件相关电位(ERP)是经由将记录到的 EEG 脑部原始电生理信号进行再分析处理而得到的。它是经由内在事件或外在事件刺激所引发的脑电位波形变化，因而可以反应出人类生理或心理活动相关的脑电活动，一般用来研究大脑处理刺激至反应认知过程的活动过程。

### 2.1 事件相关电位 ERP 的基本定义

事件相关电位（ERP）的定义有广义和狭义之分。从广义上来说，凡是外加一种特定的刺激于有机体，在给予刺激或撤销刺激时，在神经系统任何部位引起的电位变化都可称为事件相关电位。从狭义来讲，事件相关电位是指凡是外加一种特定的刺激，作用于感觉系统或脑的某一部位，在脑区引起的电位变化，目前一般 ERP 仅指该狭义定义。有时为更清楚地专指脑产生的事件相关电位，有的场合也会使用“事件相关脑电位（event-related brain potentials）”的说法（魏景汉，罗跃嘉，2002）。

### 2.2 提取 ERP 的基本原理

自发的脑电（EEG）成分复杂而不规则，而一次刺激所诱发的 ERP 波幅约为 2-10 微伏，比自发的 EEG 电位要小得多，淹没于 EEG 中，二者构成小信号和大噪音的关系，无法直接测量研究，所以 ERP 需要从 EEG 中提取。

#### 2.2.1 ERP 的主要特点

ERP 的主要特点有以下三个方面：

##### 2.2.1.1 ERP 需要开放电场

脑电（EEG）是由于皮质大量神经组织的突触后电位同步总和而成，而单个神经元电活动非常微小，不能在头皮记录到，只有神经元群的同步放电才能记录到。这种脑组织神经元排列方向一致的情况，构成所谓的开放电场（open field），反之则是方向不一致相互抵消的封闭电场（closed field）。因此，ERP 只能反映某些脑部的激活情况，而有些脑部即使处于激活状态，但由于其神经元没有能够形成开放电场，ERP 上也是无法反映的。

##### 2.2.1.2 ERP 的潜伏期和波形

ERP 有两个重要特性：潜伏期恒定和波形恒定。潜伏期就是 ERP 波形与刺激间的时间间隔。与 ERP 的两个特性相对，自发脑电则是随机变化的。所以，所以利用这两个恒定就可以通过叠加从 EEG 中将 ERP 提取出来。

### 2.2.1.3 ERP 是平均诱发电位

ERP 是通过原始 EEG 进行叠加得到的，也就是说叠加 n 次后的 ERP 波幅增大了 n 倍，因而需要再除以 n，使 ERP 恢复原形，即还原为一次刺激的 ERP 数值。所以 ERP 也被称为平均诱发电位，平均指的是叠加后的平均。

## 2.2.2 ERP 的提取基础和过程

下面简单介绍 ERP 的提取基础和过程。

### 2.2.2.1 ERP 的采集装置

首先介绍 ERP 的采集装置。

#### 2.2.2.1.1 采集 ERP 时的头部定位系统

采集 ERP 时的头部定位系统是一个电极帽，上面有多个记录或吸收头皮放电情况的电极，这些电极在帽子上的位置是根据国际脑电学会在 1958 年制定的 10-20 国际脑电记录系统(Jasper, 1958)而设置的。

10-20 系统的原则是头皮电极点之间的相对距离以 10% 和 20% 来表示，采用 2 条标志线：1) 矢状线：从鼻根至枕外隆凸的连线，又称中线。从前往后标出 5 个记录点——Fpz, Fz, Cz, Pz 和 Oz。Fpz 之前与 Oz 之后各占中线全长的 10%，其余点间距皆占 20%。2) 两外耳道之间的连线。从左至右也记录 5 个点——T3, C3, Cz, C4 和 T4。T3 和 T4 外侧各占 10%，其余点间距皆占 20%。

经过以上两线的边缘 4 点，以 Cz 为圆心画圆，4 个点间各在圆周上等距地取 2 个点，并在 Fz、C3、Pz、C4 间各取一个点，这样 10-20 系统共由 21 枚有效电极组成。其他的 16 导、32 导、64 导、128 导和 256 导电极帽也是根据 10-20 系统扩展而成的。

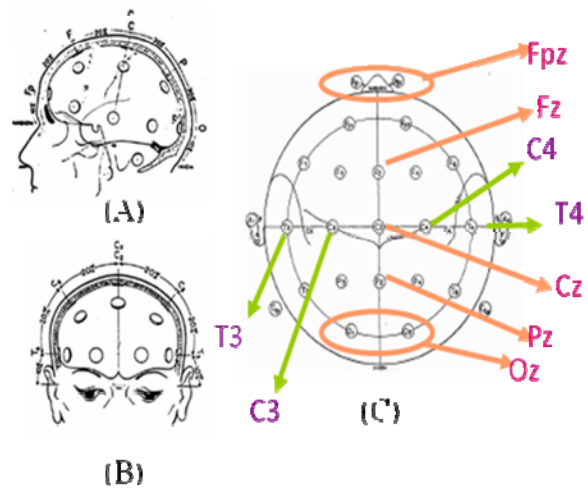


图 1 (A-C) 10-20 国际脑电系统示意图：(A) 矢状线；(B) 冠状线；(C) 10-20 国际脑电系统电极位置。

#### 2.2.2.1.2 ERP 实验室的基本设置

ERP 实验室的基本设施主要包括：1) 洗漱间，用于被试头皮处理，例如洗头等等；2) 主控间，用于监控试验程序呈现、脑波记录和被试实验；3) 被试间，用于被试进行实验，应该具有较好的隔音和隔光效果。

#### 2.2.2.2 采集 ERP 时的叠加技术原理

由于在实际采集数据过程中 ERP 是淹没在 EEG 中的，所以为了从 EEG 中提取出 ERP，需要对被试者施以多次重复刺激“S”，再将每次刺激产生的含有 ERP 的 EEG 加以叠加与平均，最后得到一次刺激的 ERP 值。ERP 可以通过叠加原始 EEG 数据获得的原因在于作为 ERP 背景的 EEG 波形与刺激间没有固定的关系，而其中所含的 ERP 波形在每次刺激后都是相同的（当然不是绝对相同），并且 ERP 波形与刺激之间的时间间隔（即潜伏期）也是固定的，所以经过叠加，ERP 会随叠加次数成比例地增大，而 EEG 则按照随机噪音的方式加和。于是，经过叠加后的 ERP 就会从 EEG 的背景中浮现出来。

#### 2.2.2.3 ERP 数据采集流程

下图 2 和图 3 分别给出了普通情况下 ERP 实验过程的示意图和 ERP 数据提取的主要过程示意图。

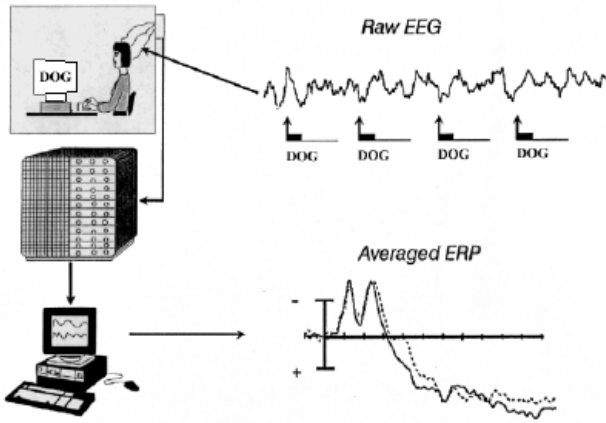


图 2 ERP 实验示意图 (DOG, Data output gate, 数据输出器)。

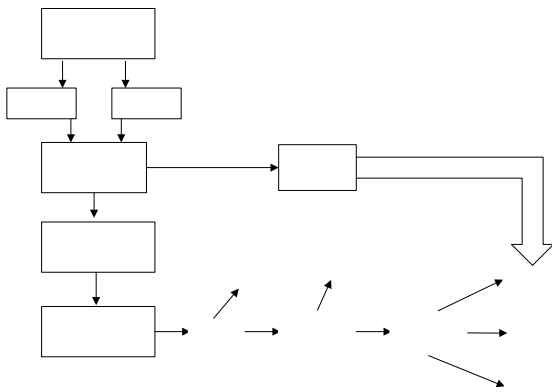


图 3 ERP 数据提取的主要过程示意图。

### 2.2.3 ERP 信号的优点和缺点

ERP 的优点在于：1) 无创性和时间分辨率 (ms) 高；2) 便于与反应时配合进行认知过程 (认知可分为认知过程和认知状态，过程指的就是时间过程) 研究；3) 设备相对简单，对环境的要求不高。

ERP 的主要缺点在于刺激发生系统 ERP 在空间上只能达到厘米级，主要的影响因素是容积导体效应与封闭电场问题。视觉刺激、听觉刺激能采用数学推导来实现脑电的源定位，这种方法获得的脑内激活区域位置的可靠性也是有限的。

## 3 和语言加工有关的 ERP 成分

和语言加工有关的 ERP 成分主要包括 MMN、CPS、(E)LAN、P600/SPS 和 N400。

首先，在语音加工层面，MMN (mismatch negativity, 失匹配负波) 反映了脑对听觉刺激的物理属性的变化进行的自动化的前注意加工过程，MMN 在 1978 年被首次报道 (R. Näätänen, Gaillard, & Mäntysalo, 1978)。数据表明

MMN 可以反映出脑对语音类别的敏感性 (Risto Näätänen et al., 1997)，因而它常常被用来作为语音范畴所对应的一种脑电成分。近来一些研究还试图在更大的语言单位和高级的认知过程中寻找 MMN 的痕迹 (Pulvermuller & Shtyrov, 2006)。测量 MMN 的实验中一般给被试呈现一系列标准的听觉刺激，在这些标准刺激中随机插入与之不同的变异刺激，这时，如果变异刺激与标准刺激相比属于不同的类别，即跨越了类别的界限，就会看到非常明显的 MMN，而同一类别内的变异刺激则不会诱发出 MMN。另外一种和语音加工关系密切的 ERP 成分是新近发现的 CPS (closure positive shift)，CPS 是在关于德语的韵律研究中被发现和命名的 (Steinhauer, Alter, & Friederici, 1999)，它和自然语言的韵律加工关系密切，CPS 的发现在一定程度上说明韵律因素对句法分析的作用。最近基于汉语的 CPS 研究也得到了开展 (Li & Yang)。

(E)LAN 和 P600/SPS 是主要反映句法加工的 ERP 成分。(E)LAN ((Early) Left anterior negativity, 左前负成分) 与句子的句法加工密切相关，如果某个句子环境要求出现某个词类，而实际上出现的不是这个词类的词，那么就会诱发出 (E)LAN。代表句法违反的 LAN 成分独立于与语义违反相关的 N400，因而被认为是与句法违反的直接指标 (刘燕妮 & 舒华, 2003)。P600/SPS (Syntactic Positive Shift, 句法正漂移) 是与句法违反有关的、出现在关键词之后 500-600ms 的正成分 (Osterhout & Holcomb, 1992)，它可以在多种句法违反中出现，如表 3.1 所示。

表 3.1 P600/SPS 效应示例 (刘燕妮 & 舒华, 2003)

短语结构违反 (Phrase structure anomalies)	The scientist criticized Max's of proof the theorem.
句法类别歧义 (syntactic-category ambiguity)	The mental became refining by the goldsmith who was honored.
句子成分位置违反 (Sentence-constituent movement anomalies)	I wonder which dress the guests at the party were shocked when the bride wore.
动词时态违反 (Verb tense anomalies)	The cats won't eating the food that Mary leaves them.

而在语义加工层面，由 Kutas 和 Hillyard (Kutas & Hillyard, 1980) 在 1980 年发现的 N400 被视为反映语义的重要脑电指标。在他们的实验中，他们给被试视觉呈现 7 个词组成的

刺激发生系统  
视觉刺激、听觉刺激  
被试 (电极帽)  
反应时  
反应键  
错误率  
统计  
数字放大器  
数据收集  
与处理系统

采样 叠加 总平均 绘图  
排除伪迹 相减

句子, 每个词单独呈现 700ms,直到句子结束, 其中 75%的句子是语义一致的, 25%的句子是最后一个词与整个句子不一致的。语义不一致的条件会诱发出一个偏后侧分布的负波。

#### 4 实验室脑电帽使用简介

北京大学中文系语言学实验室所有的脑电帽系统为配合 ADInstruments 公司的多导生理记录仪 PowerLab 和 LabChart 及 Scope 软件一起使用的脑电帽系统, 其型号为: MLAEC2 EEG Electro-Cap System 2 (large & medium cap), 为 Electro-Cap International 公司生产, 即下文所说的 ECI 脑电帽。

##### 4.1 实验室脑电帽系统的组成部分

下面将整个脑电帽系统软硬件的构成成分“脑电帽系统”和“采集系统”进行介绍:

###### 1. 脑电帽系统:

- a) 16导 (共16个电极) EC I<sup>TM</sup> 大型脑电帽和中型脑电帽各一个。
- b) 电极适配器(Electrode Board Adapter)。【实验室还未到位】
- c) 身体绑带 (Body Harness)。
- d) 用于临时快速插入的电极2个 (quick insert electrodes)。
- e) 耳部电极2个 (ear electrodes)。
- f) 用于固定额头处两个参照电极的一次性圆形海绵体100个 (disposable sponge disks)。
- g) 用于注射导电膏的注射器2支 (needle/syringe kits)。
- h) 导电膏2盒 (electro-gel)。
- i) 头部测量皮尺 (head measuring tape)。
- j) 脑电帽清洗溶剂 (ivory cleaning liquid)。
- k) 一本纸本使用说明 (a manual)。
- l) 一张关于使用说明的DVD光碟。



图 4 脑电帽系统组成 (MLAEC2 EEG Electro-Cap System 2 (large & medium cap))

###### 2. 采集系统:

- a) 16通道生物电放大器 (GT201 16 Channel Bio Amp), 如图5。
- b) 5导生物电放大缆线 (MLA2540 5-Lead Shielded Bio Amp Cable), 如图6。
- c) LabChart及Scope采集信号软件, 如图7和8。



图 5 16 通道生物电放大器 (GT201 16 Channel Bio Amp)



图 6 导生物电放大缆线 (MLA2540 5-Lead Shielded Bio Amp Cable)

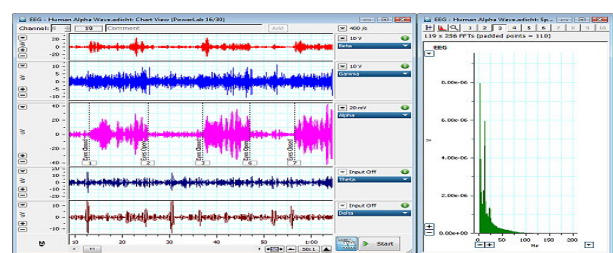


图 7 LabChart采集信号软件

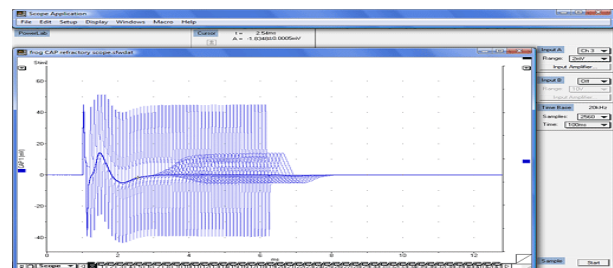


图 8 Scope采集信号软件

## 4.2 实验室脑电帽系统的使用简介

脑电帽系统的使用步骤由以下几个方面组成，以下以成人被试为例进行介绍，如果以婴幼儿为被试，还有一些不同步骤和注意事项，但具体可以参看使用说明手册，在本文不做说明。使用步骤如下：

1. 安装电极适配器 (Installing the Electrode Board Adapter)。使用时可以根据脑电帽电极连接线的颜色插入适配器上相应颜色孔中。

2. 为被试做好带脑电帽和记录脑电前的准备。具体的一些注意事项包括：1) 被试的头发必须是干的；2) 被试头发上的如发夹这样的饰物、帽子和耳环都必须在实验前摘除；3) 对于 ECI 脑电帽，实验前并不要求被试必须清洗头发；4) 在为被试戴脑电帽时，可请被试坐在一个椅背笔直的椅子上，在戴好脑电帽和测量过电阻抗后再请被试移到椅背有倾斜的椅子上或者躺到床上。

3. 为被试戴上身体绑带 (Put the body harness on the patient)。可请被试伸直双臂和地面平行，将身体绑带绑在被试腋窝以下的胸前，使绑带上的按扣眼位于胸前中部，方便后面步骤的使用。身体绑带的松紧要求以被试感到舒服为准。

4. 测量被试头部周长 (Measure the circumference of the head) 以选择大小合适的脑电帽。可以利用和脑电帽系统配合的颜色皮尺或者普通皮尺测量，测量时将皮尺缠绕脑部一圈，缠绕时有两个参照点：鼻根点 (nasion, 即头盖骨中鼻骨和前额骨相连接的那点) 向上 1 英寸的点和枕骨隆突 (inion, 即脑后枕骨外的突出部分) 向上 1 英寸，这两个参照点决定了皮尺的测量范围。如果采用的脑电帽自带的有色彩的皮尺，可以根据实际测量结果看皮尺最后的测量点落于哪种颜色区域，就选择那种颜色的脑电帽，如果最后测量点落入两个颜色交界处，那么选择较大尺寸那个颜色的脑电帽；如采用普通皮尺，则可参考使用手册上给出的标准。

5. 佩戴耳部电极，并注入导电膏和使电极和皮肤紧密接触 (Attach the ear electrodes: add gel and abrade the skin)。

6. 在脑电帽的 Fp1 和 Fp2 两个参照电极点套上一次圆形海绵体 (Place disposable sponge disks around Fp1 and Fp2)。Fp1 和 Fp2 是脑电帽位于前额的两个参照点。

7. 测量和标记 Fp 线 (Measure and mark the Fp line)。在给被试戴脑电帽之前，测量从鼻根点到

枕骨隆突的距离，即第 4 点所述测量头部周长，之后将测量结果的小数点向左移动一位，例如 38cm→3.8cm，之后由鼻根点向上测量头部周长左移一位小数点的距离，获得一个点，在前额处该点的平行位置取两点，使用可清洗笔标记，即为 Fp1 和 Fp2 点。

8. 根据以上测量结果为被试选择尺寸合适的脑电帽，将脑电帽前部的带有一次性海绵体的两点固定在前额已标记的 Fp1 和 Fp2 点，然后用流畅的动作向前往后拉脑电帽，帮助被试戴好脑电帽 (Slip the proper size cap onto the patient's head)。

9. 将脑电帽绑带和身体绑带连接起来 (Attach the cap straps to the body harness)。脑电帽绑带需紧扣身体绑带，否则可能导致后续脑电测量不准。

10. 将脑电帽的电极接线口和电极适配器的连接口相连 (Connect the cap connector to the electrode board adapter)。

11. 用系统所带注射器为每个脑电帽上的电极内注入导电膏；并快速地在电极内前后摇动注射器针管 (Fill each electrode cavity with electro-gel; rock the blunted needle/syringe rapidly back and forth)。注入导电膏时可用左手食指和中指夹住要注射电极，右手使用注射器注入导电膏；注射时可以轻微地提升注射器针管，使其不完全接触头皮，之后注入导电膏，注入量以导电膏刚刚溢出电极一点为准；之后保持针管在电极中，用右手前后快速地前后摇动注射器；当每个电极都注入导电膏后，用干净纱布擦去溢出的导电膏。

12. 检测电极阻抗，保证每个电极的电阻抗都等于或低于 3000 欧姆 (Check the electrode impedance; equaling or being lower to 3K ohms are necessary)。必须保证每个电极的电阻抗都等于或低于 3000 欧姆，否则不能开始脑电记录。如果有电极的电阻抗高于 3000 欧姆，可采用以上 12 中所述方法在该电极内加入适量导电膏，再进行电阻抗测试；如电阻抗依然不符合要求，则可使用“快速插入电极 (Quick Insert Electrode)”插入该电极孔内，并在外面贴上 Micropore 胶带固定该电极，之后需要在电极适配器 (Electrode Board Adapter) 上移除对应的脑电帽电极，而将快速插入电极的连接口连入电极适配器的该位置，注意记录使用快速插入电极的位置和过程，之后再次检测该电极的电阻抗；如果使用快速插入电极后电极电阻抗依然不符合要求，则需直接

向 ECI 公司咨询。当所有电极的电阻抗测试均满足等于或低于 3000 欧姆, 则被试可以进行脑电测试。

13. 请被试移到有倾斜椅背的椅子上或者躺到床上, 使他们的姿势更加舒适一些。(Move the patient to the bed or reclining chair for recording)。

14. 正式记录开始之前, 在被试头部下、后脖颈下放置一块卷好的毛巾 (Place a towel roll under the patient's head before starting the recording)。放置毛巾的缘故是为了防止脑电帽电极和床或椅子产生摩擦。放置毛巾的位置以被试感到舒适为佳, 可根据被试需要灵活调整。

15. 在正式开始记录前需要调试每个电极是否通畅和是否正确地接入相应记录通道 (Electro-Cap system check)。调试时按照电极顺序进行, 主要方法是依次轻敲 (tap) 电极, 观察记录显示屏上是否有相应的波动, 如果有说明电极已通, 可以进行测试下一个电极。如果没有波动显示或者记录通道错误, 则需检查是否敲对电极和通道是否接入正确, 如果问题不能解决, 可联系 ECI 公司进行咨询。

16. 记录脑电实验结束后, 为被试移除脑电帽、耳部电极和身体绑带; 之后用干净毛巾擦除被试额头、耳朵和头发上的导电膏, 经过这些处理后被试可以很容易地洗去头部的残留导电膏 (Patient cleanup)。

17. 清洗脑电帽和对脑电帽的保养 (Cap cleaning and preventive maintenance)。ECI 脑电帽必须在每次实验后进行清洗, 否则会降低其使用寿命。清洗脑电帽时的注意事项包括以下一些: 1) 清洗脑电帽时只能采用系统自带的脑电帽清洗溶剂 (Ivory cleaning liquid) 或者 Palmolive 清洗剂; 2) 清洗时应该取下脑电帽与身体绑带连接的绑带, 脑电帽绑带应单独清洗, 由于其比较厚硬所以可以用刷子和肥皂水清洗, 建议一周清洗一次; 3) 不要将颜色不同的脑电帽混洗, 在最初几次清洗时脑电帽可能会掉色; 4) 清洗脑电帽时注意只将带有电极的脑电帽放入加入了专用清洗剂的水中清洗, 而与适配器相连的电极接头一定不能着水; 5) 用清洗溶剂清洗后, 用清水完整冲洗干净脑电帽; 6) 之后将脑电帽放置晾干, 晾干时一定要注意将脑电帽电极部分放置得低于与适配器相连的电极接头部分, 以防止后者着水; 6) 每个月应该用棉签擦拭脑电帽电极防止氧化物在其中的逐渐堆积。

此外, 实验中可能还会使用到“快速插入电极 (Quick insert electrode)”, 其使用方法可参见上文 13 中关于“检测电极电阻抗”的相关内容。

以上 17 点为使用实验室脑电帽系统时的基本步骤和注意事项, 具体更为详细的内容可以参看纸本使用手册和观看 DVD 光碟的演示说明。

## 6 结语

脑电成分 ERP 波形是大脑对各种事物变化所引起的电活动, 是人对事物认知, 心理行为的一种客观的表现形式, 是“观察脑功能的窗口”, 在心理学、生理学、认知科学、神经科学、临床医学及其他生命科学相关领域具有很高的研究与应用价值。事件相关脑电位(ERP)采集和分析系统, 凭借其精度高、抗干扰性强、操作简便、功能多样等优点, 成为 ERP 分析的有效工具, 是国际和国内科学研究和临床应用方面目前最为流行的研究技术之一; 并已被应用到认知心理学、精神病学、运动医学、临床医学、人体工学等各个科学研究领域。

## 参考文献

- [1] Jasper, H. (1958). The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 10, 371-375.
- [2] Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading Senseless Sentences: Brain Potentials Reflect Semantic Incongruity. *Science*, 207(4427), 203-205.
- [3] Li, W., & Yang, Y. Perception of prosodic hierarchical boundaries in Mandarin Chinese sentences. *Neuroscience*, In Press, Accepted Manuscript.
- [4] Näätänen, R., Gaillard, A. W. K., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42(4), 313-329.
- [5] Näätänen, R., Lehtokoski, A., Lennes, M., Cheour, M., Huotilainen, M., Iivonen, A., et al. (1997). Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature*, 385, 432-434.
- [6] Osterhout, L., & Holcomb, P. J. (1992). Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, 31(6), 785-806.

- [7] Pulvermuller, F., & Shtyrov, Y. (2006). Language outside the focus of attention: The mismatch negativity as a tool for studying higher cognitive processes. *Progress in Neurobiology*, 79(1), 49-71.
- [8] Steinhauer, K., Alter, K., & Friederici, A. D. (1999). Brain potentials indicate immediate use of prosodic cues in natural speech processing. *Nat Neurosci*, 2(2), 191-196.
- [9] 魏景汉, 罗跃嘉 (Ed.). (2002). 认知事件相关脑电位教程. 北京: 经济日报出版社
- [10] 刘燕妮, & 舒华. (2003). ERP 与语言研究. *心理科学进展*, 11(3), 296-302.

(杨若晓 北京大学中国语言文学系语言学实验

室 100871 yangruoxiao@gmail.com)