



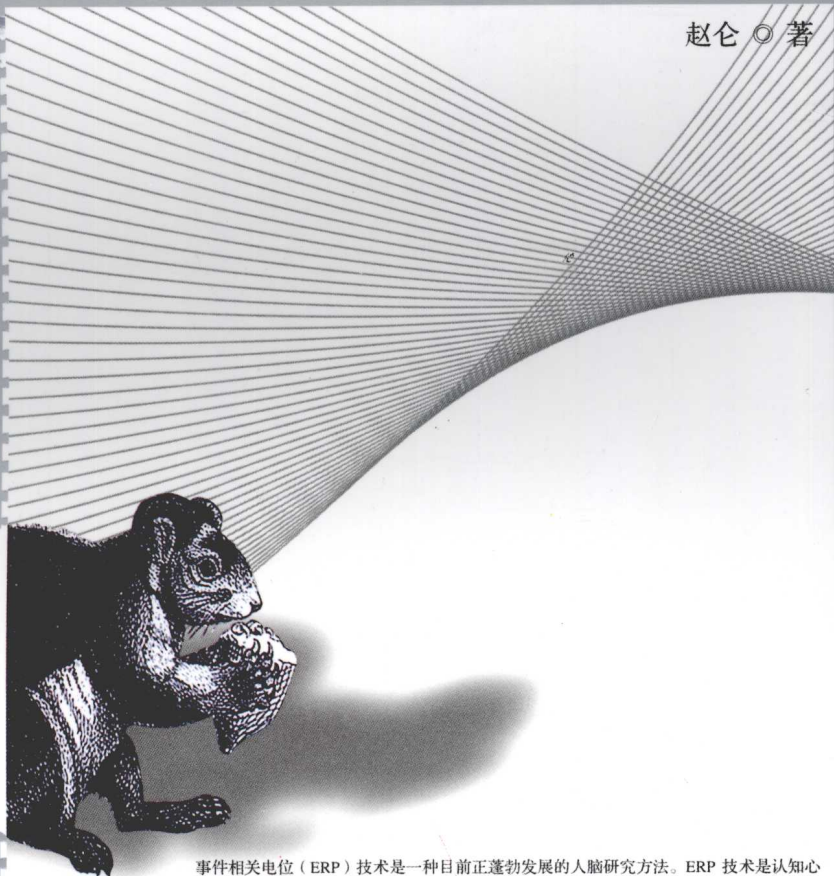
21世纪心理学专业前沿丛书

ERPs

实验教程

(修订版)

赵伦 著



事件相关电位(ERP)技术是一种目前正蓬勃发展的人脑研究方法。ERP技术是认知心理学专业学生必须掌握的实验技能,ERP实验是心理学系认知心理学专业学生的基础课程。以前,这一手段局限于医学研究,而今已延伸到心理学领域。随着高校纷纷在心理系开设认知心理学专业,以及认知心理学专业的学生与研究人员不断扩充,本书的影响力将是其他实验教材所无法企及的。本书是国内最早出版的原创ERP实验教材,它在认知心理学领域的地位无可争议。它是北大、北师大等国内著名院校心理学专业的指定教材。而且,本书作者在心理学领域有较高的知名度,曾任中国载人航天工程空间脑功能研究计划主管设计师;现任中国神经科学学会、中国空间生命科学学会会员。在认知心理学领域,本教材已经奠定了非常广泛的读者基础。



东南大学出版社

21 世纪心理学专业前沿丛书

ERPs 实验教程

(修订版)

赵 仑 著

东南大学出版社

• 南京 •

内容提要

本书简要地介绍了事件相关脑电位(ERPs)研究者应掌握的神经电生理学基础;详细论述了ERP实验的实用知识,包括记录ERP所需的设备及其使用方法、ERP常见成分解析、ERP实验准备和实验中应当注意的问题、ERP离线分析的基本方法以及目前广为采用的ERP分析方法和脑成像技术;举例介绍了几种关于ERP研究的实验设计和结果分析。本书的内容不仅系统完整,而且实用易懂,可读性极强。本书可作为相关专业本科生、研究生的ERP实验教材,不仅适用于刚刚涉足ERP领域的初学者,也适用于有多年经验的ERP研究人员。

图书在版编目(CIP)数据

ERPs 实验教程 / 赵仑著. —2 版(修订本). —南京:东南大学出版社,2010.7

ISBN 978-7-5641-2183-9

I. E… II. ①赵… III. ①认知—脑电位—教材
IV. ①R741.044

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 068915 号

ERPs 实验教程(修订版)

著 者	赵 仑
责任编辑	张 煦
文字编辑	刘冰云
出 版 人	江 汉
出版发行	东南大学出版社
社 址	南京市四牌楼 2 号(210096)
经 销	江苏省新华书店
印 刷	兴化市印刷厂
版 次	2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷
开 本	B5
印 张	22
字 数	444 千字
印 数	1—4000 册
书 号	ISBN 978-7-5641-2183-9
定 价	42.00 元

(凡因印装质量问题,请直接向东大出版社读者服务部调换。电话:025—83792328)

序

揭开人脑活动的奥秘是 21 世纪人类的一项伟大科学探索任务。长期以来,心理学家、神经科学家、临床医师和有关工程技术人员,都在探讨如何利用无损伤的方法来观察人脑进行思维时的特征性变化。20 世纪后半叶以来,随着计算机技术、电子技术和认知心理学的发展,上述探索取得了长足进展,找到了事件相关电位(ERP, event-related potentials)和脑成像这两个可以观察脑活动过程的窗口。

事件相关电位是指与一定心理活动(即事件)相关联的脑电位变化。经过 50 多年的研究,科学家们发现了与注意、信号感知、分析判断、决策及工作记忆内容更新等认知过程相关联的 ERP 成分,并得出与疾病、老化甚至与智力差异相关联的特征性变化。因此,事件相关电位越来越引起有关科技人员的兴趣和关注。而且,ERP 具有毫秒级的时间分辨率、所需设备较为简单和环境适应性强等优点,使得它的应用范围与日俱增。它与空间定位准确但时间分辨率较差的脑成像方法[功能性磁共振成像(fMRI)和正电子发射层扫描术(PET)]形成了相辅相成的并行发展之势。

在越来越多的人对事件相关电位感兴趣的情况下,急需一本能够深入浅出、简明扼要地介绍 ERP 的基本知识,特别是 EEG 记录、分析方法和实验设计的实用教材,于是这本《ERP 实验教程》就应运而生了。

赵仑编著的这本教程,在简要地介绍了大脑的结构和功能以及脑电和 ERP 发生的原理之后,就进入实用知识的论述,包括 ERP 成分的简述、记录 ERP 所需的设备及其使用方法、实验准备和实验设计中应当注意的问题、ERP 离线分析的基本方法以及目前广为采用的各种先进的 ERP 分析方法,并举例介绍了几种关于 ERP 研究的实验设计和结果分析。另外,在第 8 章,对 ERP 研究的数据记录、分析和出版标准进行了翻译和诠释;在第 10 章,还清晰地介绍了脑磁图(MEG)的原理和方法,以使读者对当前的脑研究方法有更全面的了解。

我们有充分的理由相信,无论是刚刚涉足 ERP 领域的读者,还是已有多年经验的 ERP 研究人员,在读完这本教程之后都会有所收获,因为本书的内容不仅系统完整,而且实用易懂,可读性极强。对于对 ERP 有兴趣的读者来说,这本教程的确是雪中送炭。

赵仑自 1993 年从山东医科大学毕业后,一直在航天医学工程研究所脑功能实验室与本人一起从事航天脑功能的研究,他善于学习、勤于钻研,在研究实践中

取得了丰富的经验,而且获得了多项科技奖励。作为同事、老师和朋友,我对赵仑能够在不长的时间内写出这样一本具有很高实用价值的 ERP 教程,感到由衷的高兴和自豪。希望这本书能使更多的年轻科技人员投入到 ERP 研究领域,共同参与到揭开人脑奥秘的伟大事业中去。

魏金河

研究员、博士生导师

曾任航天医学工程研究所所长

中国载人航天工程航天员系统总设计师

国际宇航科学院院士

目 录

第 1 章 ERP 的神经电生理学基础	(1)
第一节 大脑皮层的基本结构	(1)
第二节 脑电的基本特征及其产生机制	(8)
第三节 ERP 的概念和特点	(20)
第 2 章 ERP 实验室及其设备	(27)
第一节 ERP 实验室的建立	(27)
第二节 ERP 研究设备举例	(28)
第三节 电极及其导联组合	(28)
第 3 章 ERP 成分简述	(43)
第一节 ERP 早期成分	(43)
第二节 与运动反应相关的 ERP 成分	(50)
第三节 失匹配负波(Mismatch Negativity,MMN)	(54)
第四节 N2 家族	(63)
第五节 P3 家族	(70)
第六节 语言加工相关的 ERP 成分	(79)
第七节 与记忆相关的 ERP 成分	(91)
第八节 其他 ERP 成分	(96)
第 4 章 ERP 实验设计及注意事项	(102)
第 5 章 ERP 实验过程及注意事项	(120)
第一节 实验前准备	(120)
第二节 ERP 实验过程及相关问题	(122)
第三节 参考电极的选择和转换	(136)
第 6 章 EEG 数据的离线分析	(147)
第一节 离线分析的基本过程	(147)

第二节	记录伪迹的剔除	(157)
第三节	关于数字滤波	(167)
第四节	关于撤反应	(177)
第五节	ERP 数据的测量和分析	(180)
第六节	相减技术的应用	(193)
第 7 章	ERP 分析技术和方法	(203)
第一节	ERP 的时频分析技术	(203)
第二节	短刺激间隔序列中 ERP 的重叠及其矫正	(209)
第三节	独立成分分析与偶极子溯源分析	(217)
第四节	脑电地形图和脑电流密度图	(223)
第 8 章	ERP 研究的数据记录、分析和出版标准	(234)
第 9 章	ERP 实验研究举例	(263)
第一节	无运动二级 CNV	(263)
第二节	Go/Nogo 范式的 ERP 成分研究	(265)
第三节	Attentional Blink 的脑机制研究	(268)
第四节	视觉空间选择注意的 ERP 研究	(272)
第五节	心算的脑机制研究	(276)
第七节	前额叶损伤病人的 ERP 研究	(280)
第八节	右脑损伤偏侧忽视患者的早期信息加工缺陷	(283)
第 10 章	脑磁图及其应用研究	(286)
附录		(305)
参考文献		(333)

第 1 章 ERP 的神经电生理学基础

第一节 大脑皮层的基本结构

脑是人类一切高级行为的物质基础,由 100 亿~160 亿神经细胞和 100 万亿个突触以及比其更多 10 倍的胶质细胞构成。事件相关脑电位(Event-Related Potentials, ERP)是基于脑电提取的,要了解脑生物电的起源和规律,必须对脑的神经解剖有所了解。本节重点介绍 ERP 研究者需了解的大脑皮层的基本结构。

一、大脑皮层的结构

成人大脑的重量为 1 200~1 500 g,男性比女性平均重 90 g。大脑由大脑纵裂分为左右两个半球,每一个大脑半球有背外侧面、内侧面和基底面,其间有许多沟、裂和回。两大脑半球之间由粗大的神经纤维束——胼胝体将其连接。

大脑是人体所有高级神经中枢所在地,其表面覆盖着一层平均厚度为 1.5~4.5 mm 的灰色物质(即灰质),主要由神经细胞所组成,称为大脑皮层。大脑半球的深部为神经细胞的纤维所组成的白色物质,称为白质,它从皮层向里延伸,使两个半球相互联络(胼胝体),并让大脑各区产生联系。鉴于左右半球的分工有所不同,这种联系是必要的,而且各半球的皮层又分成若干不同的区域,具有不同的功能和特点。它的整体功能使人类在进化过程中具有了不同于其他生物的高级智慧。

大脑的基底部有多个大小不等的神经细胞团。其内侧最大者称为丘脑。此外,尚有下丘脑、豆状核、尾状核、杏仁核等。

大脑体积并不太大(约 600 cm³),但大脑皮层繁多的沟回结构,大大增加了大脑的表面积(约 2.5~3.2 m²),这是人脑的一个重要特征。沟回结构相互连接的复杂性不仅是人类作为高等动物的关键,而且也是人类特有的在思维、智力和行为等方面多样性的关键。这种灰色物质(灰质)使每个人具有不同的思维特征,即便是生活在同样环境中的双胞胎,其思维和行为也存在一定的差异。

大脑表面被中央沟、顶枕裂及大脑外侧裂分成额叶、顶叶、枕叶和颞叶(图 1-1~

图 1-4)。其中,颞叶以听觉功能为主,枕叶以视觉功能为主,顶叶是躯体感觉的高级中枢,额叶以躯体的运动功能为主。前额叶皮层和颞、顶、枕皮层之间的联络区则与复杂知觉、注意、思维等脑高级活动有关。

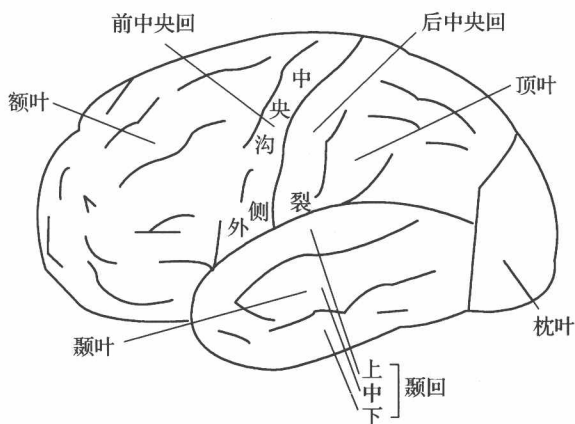


图 1-1 大脑皮层表面示意图
(引自匡培梓主编,生理心理学,1987)

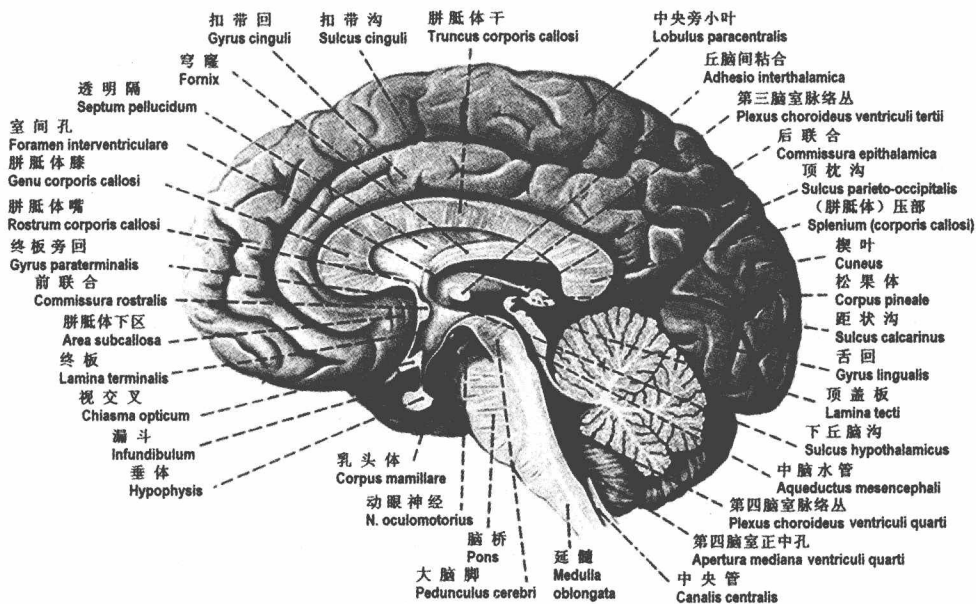


图 1-2 脑的正中矢状断面
(引自郭光文、王序主编,人体解剖彩色图谱,1986)

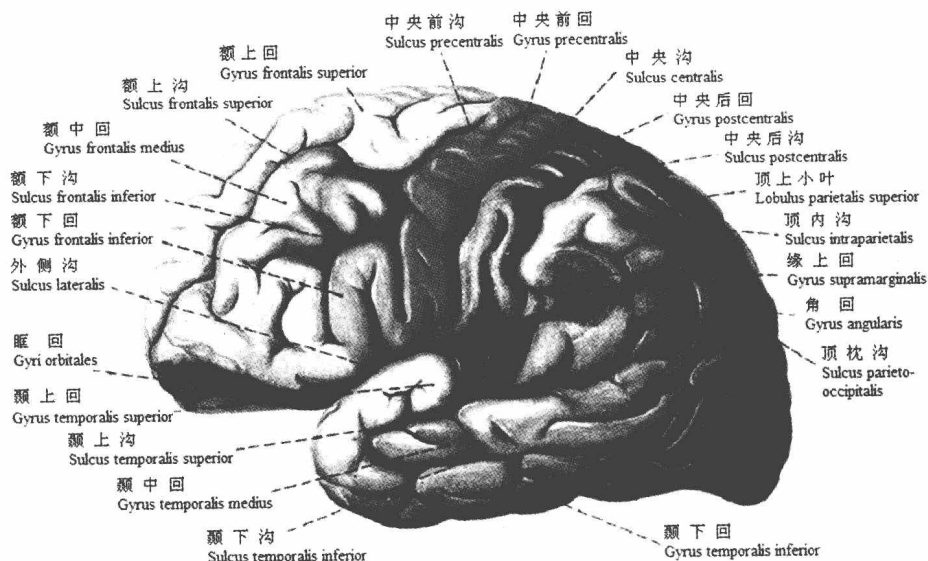


图 1-3 大脑半球外侧面

(引自郭光文、王序主编,人体解剖彩色图谱,1986)

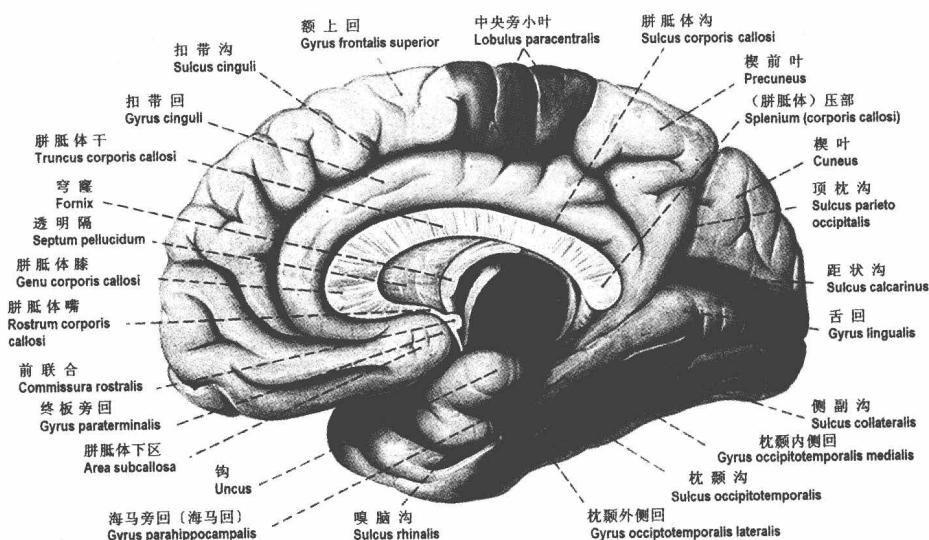


图 1-4 大脑半球内侧面

(引自郭光文、王序主编,人体解剖彩色图谱,1986)

(一) 额叶

额叶由额极起至中央沟和外侧裂以前的部分。其中,在中央前沟之前与之平行又可分为上、下中央前沟;额上沟由中央前沟向前、向下延伸,将额叶之外侧面分作 3 个平行的脑回,即额上回、额中回和额下回;眶沟与眶回位于额底面;嗅沟

与中线平行;扣带回在半球内侧面,扣带沟与胼胝体之间呈半月形或拱形;旁中央小叶为四边形脑回,位于半球内侧面,环绕中央沟的末端。

(二) 顶叶

顶叶前缘为中央沟,后缘连接顶枕裂,下缘抵外侧裂平面,其中有中央后沟,在中央沟之后,且与之平行分为上、下二部。顶间沟为一水平沟,有时与中央后沟相连,顶上小叶在顶间沟水平部之上,其下为顶下小叶;缘上回又称环曲回,为顶下小叶之一部分,围绕外侧裂之后端;角回也是顶下小叶之一部分,围绕颞上沟的后端而与颞中回连接;中央后回为皮层的一般感觉区,位于中央沟与中央后沟之间;楔前叶在顶枕沟与扣带回升支之间,为半球内侧表面的后部。

(三) 枕叶

枕叶为位于顶枕裂连接前切迹间假设线之后的锥状形脑叶。其中,大脑内侧面的枕外侧沟将枕叶分为上、下回;距状裂将枕叶分为楔叶(距状裂与顶间沟之间)与舌回(距状裂与侧副裂后部之间);梭状回的后部在枕叶的复面或底面,颞下沟与侧副裂之间。

(四) 颞叶

颞叶在外侧裂的下方,顶叶的前下方,枕叶的前方;由颞上、中、下沟分为颞上、中、下三回。颞上沟与外侧裂平行,横过颞叶上部;颞中沟在颞上沟之下,并与之平行;颞上回在外侧裂与颞上沟之间,是颞叶外侧面的一部分;颞中回位于颞上沟与颞中沟之间;颞下回在颞中沟之下,其后与枕下回毗连;颞横回在外侧裂下缘,占据颞叶表面上部的后端;颞下沟位于颞叶下部,前抵颞极,后至枕极。梭状回即位于颞下沟的内侧面,颞下回在其外侧面;海马裂由胼胝体压部至海马回钩,位于颞叶的下部内侧面,而海马回即位于海马裂与侧副裂之间,其前部呈钩状故称为海马回钩。

二、大脑皮层神经细胞构成

大脑皮层各部位的厚度不等,这与其功能上的不同有关,其组织学结构甚为复杂。旧皮层的细胞和纤维不形成明显的分层;新皮层则形成一定的层次,每一层主要由形态相似的细胞聚集而成,由外向内一般分为6层(图1-5)。

(1) 分子层:主要由和皮层表面相平行的纤维及少量神经细胞和较多的神经胶质细胞组成。内为水平细胞,轴突横行于皮层表面,具有横向传导功能。

(2) 外颗粒层:为小锥体细胞层,由密集的小锥体细胞组成。

(3) 外锥体细胞层:为主要皮层细胞,由中大型锥体细胞组成,其顶树突长达皮层表面。

(4) 内颗粒层:为星形细胞层,由密集的小星形细胞组成。

(5) 内锥体细胞层:为神经节细胞层或大锥体细胞层,由大锥体细胞组成。

(6) 多形细胞层:由许多不规则的梭状细胞及角状细胞组成。轴突深入邻近白

质,通过胼胝体将神经冲动传达到对侧半球的皮层对应区,亦称胼胝体神经细胞。

皮层的每个区域都接受传入纤维的外来传入冲动,并通过传出纤维将冲动传出。进入皮层的传入纤维有下列几类:

(1) 来自丘脑特异性投射系统的纤维,在第5、6层时不分支,进入第4层内即与该层的神经元形成突触联系,少数轴突与更浅层的某些神经元发生联系。

(2) 来自丘脑非特异性投射系统的纤维,其分支到达大脑皮层第6~1层的广泛区域,与各层神经元有关结构形成突触联络,并与广大皮层区域发生投射关系。

(3) 来自同侧皮层其他区域或对侧半球(如通过胼胝体)的纤维联系。

皮层发出的传出纤维主要源自第3、5层,如锥体束及胼胝体纤维主要起源于3、5层内。

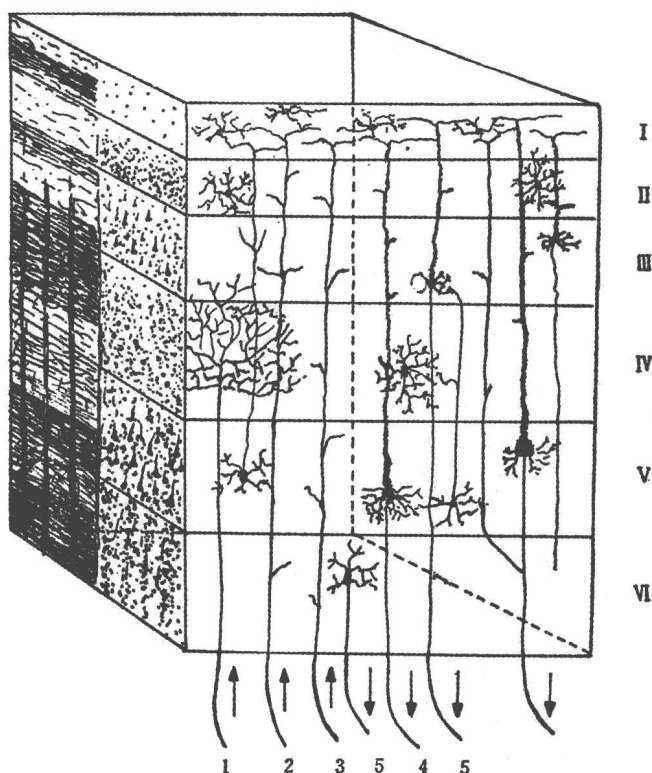


图 1-5 大脑皮层细胞分层及皮层内联系示意图

I:分子层;II:外颗粒层;III:外锥体细胞层;IV:内颗粒层;V:内锥体细胞层;VI:多形细胞层。1. 特异上行投射纤维;2. 联络纤维;3. 非特异上行投射纤维;4. 下行投射纤维;5. 传出联络纤维。(引自沈政、林庶芝著,生理心理学,1989)

在大脑发育过程中,初生婴儿的大脑重量大约为 400 g,是成人脑重的 30%。虽然大脑在生长发育过程中神经元的体积在扩大,联结(树突、轴突和突触)的数目在增加,但神经元的总数目一般是不变的。图 1-6 为神经元及其突触示意图;图 1-7

示增长的大脑发育过程;图 1-8 可见发育中神经网络日益密集和复杂的过程。

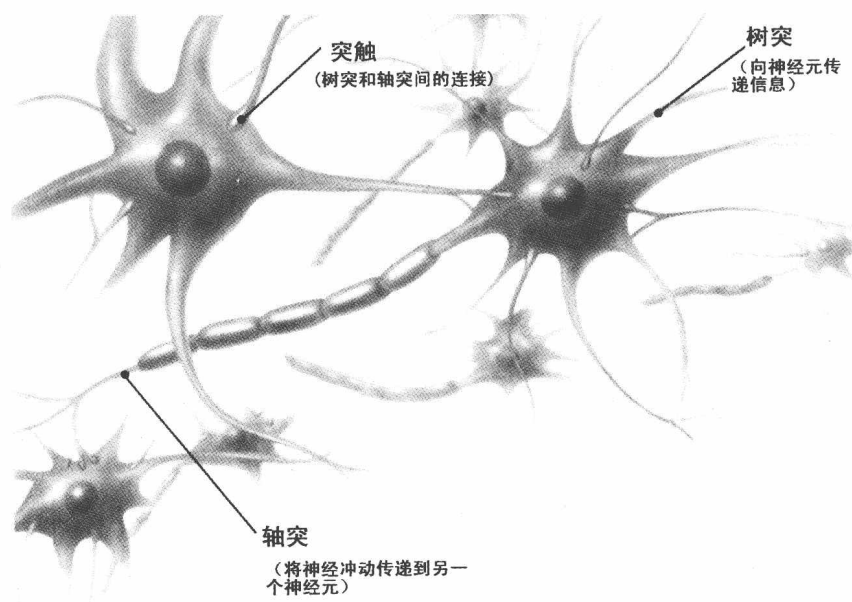


图 1-6 神经元及其突触构成
(引自科学世界,2001 年第 5 期)

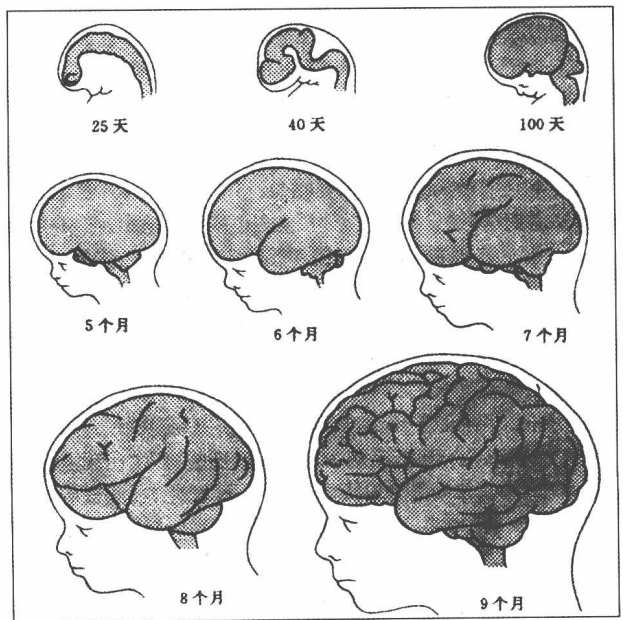


图 1-7 发育中的人脑

(引自 M. Cowan, Scientific American, 1979 年 9 月。苏珊·格林菲尔德著;杨雄里等译,你的大脑,1997)

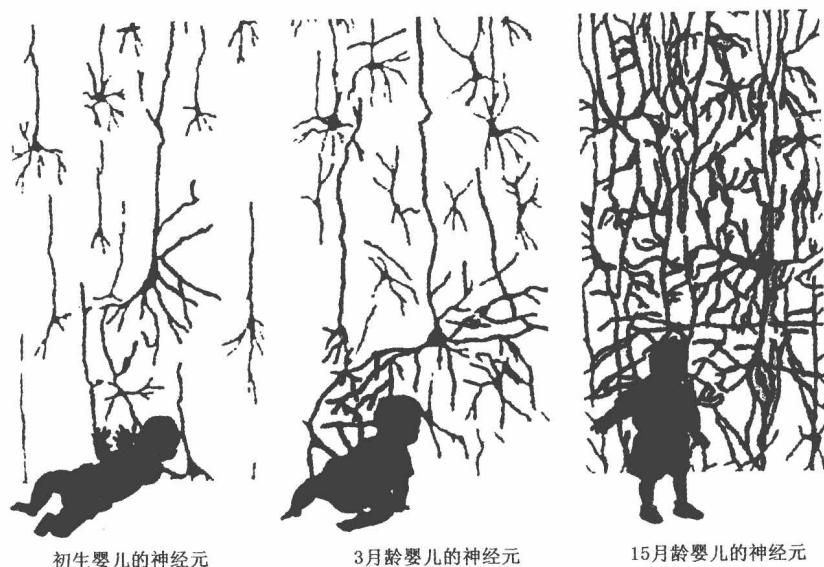


图 1-8 发育过程中日益复杂的神经网络

三、皮层分区

根据神经细胞的排列和类型及有髓纤维的分布情况,可将皮层进行分区。一般认为 Brodmann 的 52 分区较为实用(图 1-9 和图 1-10 为彩图,见书后)。根据大脑皮层的功能进行划分,每个区都有其特定的功能,这些功能还有待于更广泛细致的研究才可能进一步加以说明。当然,脑区的划分方法不是绝对的,每个区都有与其他区相联系的复杂的互动系统:

前联合区:是个体活动的高级控制系统,与记忆、思考、推理和判断等有关。

动眼区:控制眼睛使目光朝向视野中的特定区域。

运动联合区:根据感觉器官所受的刺激使肌体产生动作,并准备好此后应完成序列活动的指令。

运动区:向肌肉发出运动指令。

初级感觉区:对来自皮肤和关节的机械刺激做出反应并识别其位置和强度。

体觉联合区:对躯体所受机械刺激呈现的复杂程度和相互关系做出解释并予以解决。

顶叶联合区:接受空间视觉信息,确定物体的位置和身份,将躯体感觉与视觉和听觉连接起来。

听觉区:接受来自耳朵的声音并区分其强度和频率。

初级视觉区:将来自视网膜的视觉信息分解为基本要素(颜色、方位等),将这些信息传递到视觉联合区。

次级视觉联合区:确定深度。

下颞联合区:即高级视觉联合区,区别、存储颜色以及所见物体的形状。

上颞联合区:即听觉联合区,区别和存储声音。

布氏语言区:控制语言发育。

初生婴儿的神经网络比满 3 个月婴儿要稀少。初生婴儿的大脑重量只有成人的 30%,但神经元的数目大致相等。实际上,一方面神经元在长大,另一方面每个神经元的树突和轴突数目也在增加,这样与它们相关的突触的数量就增加了,范围也扩大和延伸了(引自科学世界,2001 年第 5 期)。

四、不同但统一的大脑两半球

大脑的两个半球从表面看是对称的。两者通过构成胼胝体的神经纤维厚膜连接起来。一般情况下,两个半球在各种功能和活动方面能成功地协同工作,但一个半球对某些事情比较擅长,另一个半球则对另外一些事情更擅长。

首要的最基本的区别是在接收信息方面的差异。每个脑半球都是从相对的一半躯体中接收信息。交叉活动在视觉、触觉和运动系统方面得到了特别的发育。但左撇子的大脑的某些功能并不总是右利手的人大脑功能的镜像。有些左撇子有着惯用右手的人的大脑,他们在体育方面特别擅长右利手的人的动作。在他们的大脑中,从信息到指挥行动历经的行程特别短,因此他们反应的速度更快。

美国神经生理学家、心理学家 Roger Sperry 因分辨出两个半球拥有单独的或主要的不同功能,于 1981 年获得诺贝尔生理学或医学奖。由于其卓越的研究成果,人们从此确认,大脑左半球主要具有语言、意识、概念、分析、计算等功能;而右半球则主要在音乐、绘画、综合、整体性、几何—空间等功能方面更擅长。

需要特别强调的是,左右两半球的功能是互补的。以音乐为例,左半球负责旋律,右半球则负责节奏。意识活动是左右两半球共同作用的结果,而不是像人们长期以来认为的那样,自我意识只存在于左半球。

第二节 脑电的基本特征及其产生机制

ERP 是基于脑电(EEG)提取的,因此,掌握 EEG 的基本知识是进行 ERP 研究最重要的基础之一。

脑不仅支配人的思维和行为,而且也是控制情绪和植物神经功能的最高中枢。能客观地记录时刻变化的脑机能状态的方法,在发现脑电以前是没有的。在这之前要了解中枢神经的机能状态,只有观察末梢神经对刺激的反应。首次发现并明确地描述人脑电活动的是德国精神科教授 Ham Berger。他为了解释精神机能的生物学基础,于 1924 年开始研究人脑的电活动。他把两根白金针状电极通过头部外伤患者的颅骨缺损部插入大脑皮层,成功地记录出有规则的电活动。

进一步证实,这种电活动不需要把电极插入脑内,而通过安置在头皮上的电极也同样可以记录到。他首先把正常人在安静、闭眼时主要出现于枕、顶部的10 Hz、振幅 $50\ \mu\text{V}$ 左右有规则的波命名为 α 波,发现当被试在睁眼视物时, α 波将消失并出现 18~20 Hz、20~30 μV 的波,他把这种快波称为 β 波。Ham Berger 将这种脑电活动总称为脑电图(electroencephalography, EEG)。随着电子计算机技术的进步,由 1958 年起开始生产诱发电位累加器,用其可以记录和观察人的诱发电位,这是脑电图史上划时代的发展。我国国内最早开展脑电图临床应用和研究工作的学者为协和医院的冯应琨教授。

一、脑电的基本特征

脑细胞无时无刻不在进行自发性、节律性、综合性的电活动,将这种电活动的电位作为纵轴,时间特征为横轴,记录下来的电位与时间相互关系的平面图即为脑电图(EEG)。脑电波的频率(或周期)、波幅、位相构成脑电图的基本特征(图 1-11,图 1-12)。

周期和频率 从头颅记录的脑电信号近似于正弦波形。脑电的周期指的是一个波从离开基线,到又返回基线所需的时间,或者说,就是波峰到波峰或波谷到波谷的时间跨度,单位为毫秒(ms)。频率是指单位时间(1 s)内通过的波峰或波谷数,也即单位时间内的周期数。例如,如果 1 s 内有 5 个波峰通过,则其频率为 5 Hz(次/秒),平均周期为 $1/20\ \text{s}$ 或 50 ms。周期和频率为倒数关系,50 Hz 市电(亦称 50 周)的周期即为 20 ms。

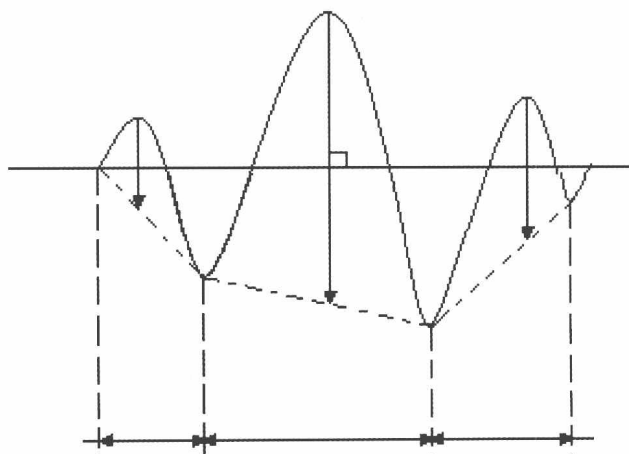


图 1-11 脑电的周期、波幅、基线
3 个波的周期分别为 Period 1、Period 2、Period 3。

波幅 一般情况下,波幅指的是一个波的波峰到波谷的距离。由于脑电或多或少都会出现基线的动荡,因此在测量脑电的波幅时,将相邻的两个波谷进行直

线联结,则这两个波谷之间的波峰与波谷联结线中点的距离即为该波的波幅值。

正常人脑电图波幅的范围一般为 $10 \sim 100 \mu\text{V}$, 约为以毫伏计的心电图的 $1/1\,000$ 。一般情况下, EEG 的波幅代表脑电位的强度, 波幅大小与参与同步放电的神经元数目的多少以及神经元的排列方向等密切相关。如果参与同步放电的神经元数量很多, 神经元排列方向一致, 且与记录电极的距离较近, 则其波幅增高; 反之, 则降低。按照波幅的高度, 可将脑波分为 4 类:

低波幅	$<25 \mu\text{V}$
中波幅	$25 \sim 75 \mu\text{V}$
高波幅	$75 \sim 150 \mu\text{V}$
极高波幅	$>150 \mu\text{V}$

位相 一个随时间序列运动展开的波, 在基线上或下所处的瞬间位置即为该波的位相, 其代表着波的极性及其时间与波幅的相对关系。以脑电基线为标准, 朝上的波称为负相波(负性波), 朝下的波称为正相波(正性波)。同时记录的两个导联脑电的位相取决于脑内放电部位的位置、数目、大小以及电极导联方法和诱导部位。

将两个运动中的波相互比较, 若它们在某个或每个瞬间出现的时间、周期和极性(波峰指向, 正相或负相)都完全一致, 称为同位相; 若先后出现称为有位相差, 以毫秒表示。两个波错位 180° 时称为位相倒置。

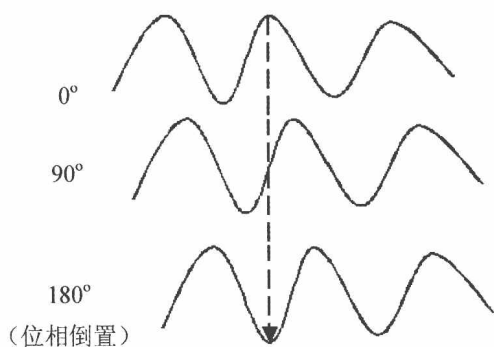


图 1-12 脑电位相示意图

总之, 频率、波幅、位相是脑电特征的 3 个基本要素。其中, 脑波的频率和波幅在某种程度上代表了生理、心理、病理等状态下神经冲动发放的性质和强度, 而位相则提供了冲动产生的可能部位及其可能的焦点灶区。

作为 ERP 研究者, 除了要了解脑电的 3 个基本特征, 尚需了解脑电的其他一些基本概念和特征。

(1) 脑电节律: 脑电中式样相同、周期一致且重复出现的活动, 被称为脑电节律。例如, 成人脑波中 $8 \sim 13 \text{ Hz}$ 的 α 节律。