

脑物理学

吴殿鸿 郭立文 贾诚 王家昌

国家自然科学基金资助项目

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书从物理学、生物学、心理学和信息论角度,概括了近20年来,国外对人大脑的研究结果。主要内容有脑电磁场的测量方法、脑电磁场的理论计算和计算机模拟,脑内电磁场源的定位及影响定位精度的各种因素。脑电磁场与思维活动,即与心理工作的关系,最后介绍了大脑思维活动的一种可能模型。

本书可供物理专业、生物专业、医学专业和心理学专业的本科生、研究生、教师以及从事这方面研究的专业人员参考。

脑 物 理 学

Nao Wulixue

吴殿鸿 郭立文 贾 诚 王家昌

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

绥化县印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 6.5 字数 146千字

1995年6月第1版 1995年6月第1次印刷

印数 1-1 000

ISBN 7-5603-1086-9/O·72 定价 8.00元

序

《脑物理学》一书详细地介绍了脑电磁场的测量方法、理论计算和计算机模拟，特别介绍了利用弱信号检测理论，如何把深埋在噪声中与思维活动有关的事件相关脑电位(ERP)和事件相关脑磁场(ERF)检测出来。

本书第五六章介绍了皮层功率谱(CPS)、ERP和ERF与心理工作，如学习记忆、选择注意、语言处理等的关系；第三四章介绍了脑电磁场的理论和用此理论与最小二乘法，如何实现脑电磁场的脑内偶极子源的定位，以及影响定位精度的各种因素。这就给寻找与心理工作对应的脑内神经元的活动提供了有效的方法，给当今世界对人脑的研究，在从分子、细胞层次只能研究脑的低级功能和黑匣子式的研究脑的高级功能之间建立起联系，这种联系对进一步研究人脑复杂结构与高级功能之间的关系是非常有意义的。

本书第一章介绍了脑物理学的发展简史和物理学家的责任，第七章介绍了思维活动的一种可能模型，并对21世纪生物学、生物物理与脑物理学的发展作了展望。

综上所述，脑物理学属于物理学、生物学、医学、心理学和信息论等许多学科交叉的边缘学科。《脑物理学》这样的专业著作，目前国内外都很少见，它的出版有助于边缘学科的发展，对广大读者扩大知识面、开发和研究边缘学科是很有意义的。本书作者有较宽的知识面，多年来从事生命科学

方面的研究，阅读了大量脑物理学、心理生理学方面的文献。该书的出版为愿意深入了解这方面内容的读者创造了条件。对我国配合“脑的十年”，紧跟世界脑科学的研究，无疑是难能可贵的好著作。

皮名嘉

1995年3月6日

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 奥妙无穷的大脑	1
§ 1-2 孜孜不倦地探索	3
§ 1-3 物理学家的责任	4
参考文献	5
第二章 实验方法	7
§ 2-1 EEG 的检测	7
§ 2-2 CPS 的检测	11
§ 2-3 ERP 的检测	13
§ 2-4 MEG 的检测	18
§ 2-5 利用 CT 扫描测量人的头部的各种参数	26
§ 2-6 t 检验	31
参考文献	37
第三章 脑电位和脑磁场的计算	39
§ 3-1 均匀球模型单偶极子源头皮电位分布的 理论计算	41
§ 3-2 非均匀球模型单偶极子源头皮电位分布的 理论计算	43
§ 3-3 Barnard 积分微分方程	48
§ 3-4 边界元法	53
参考文献	70

第四章 脑内电磁场的产生器	72
§ 4-1 用最小二乘法求脑内产生器	72
§ 4-2 偶极子定位	80
§ 4-3 头模型对偶极子定位的影响	110
§ 4-4 影响偶极子定位精度的因素	131
参考文献	142
第五章 脑磁场的特性	146
§ 5-1 神经生理学的解释	146
§ 5-2 对语音响应的研究	148
§ 5-3 对注意的研究	151
§ 5-4 对图样切换视觉处理的研究	153
§ 5-5 磁场的 μ 节律	159
§ 5-6 经络、穴位与天目磁	167
参考文献	173
第六章 脑电场特性	175
§ 6-1 皮层功率谱的特性	175
§ 6-2 事件前电位和感觉分量	179
§ 6-3 早期负分量	182
§ 6-4 晚期认知分量	187
参考文献	194
第七章 结束语	197
§ 7-1 大脑系统的简单描述	197
§ 7-2 思维处理的一种可能模型	198
§ 7-3 有待探索的问题	199
参考文献	200
后记	202

第一章 绪 论

§ 1-1 奥妙无穷的大脑

人的大脑是一堆有 1 000 — 1 500 克重、 10^{11} 个神经元组成的活物质。其功能简直太奥妙无比了。首先是内部调节功能,大脑时刻从内环境中收取信息,加以处理后再发送给有关器官,加以调节。例如,大脑所需要的营养不足,便马上发出饥饿的信号,指令进食器官多吃食物;如需要多供应血量时,便马上命令心脏加快收缩,导致血液循环加快。大脑的这种调节功能使有机体始终保持完好的内部平衡。其次,人的大脑能随时从外界环境中收取信息,加以处理,并用此调节整个身体的姿态,以保持和外部环境的协调与一致。比如,向前急驰的人,突然看见地面上有一条水沟,大脑便把视觉收集到的水沟信息加以处理,作出判断,命令腿部有关肌肉收缩用力,跳过水沟。这种每时每刻地从环境中提取信息,并加以处理,再调节身体,使之与环境保持统一的功能,是很简单的,动物也都能做到。但如果想用一部人造机器来实现这种功能,那便是非常复杂、庞大的机器人了,但毕竟还是能用机器来实现的。E. A. Spiegel 专门研究了如何用计算机来模拟人脑的功能^[1],他发现大脑的许多功能都可以用计算机来模拟,但是有两点是无法模拟的,一是大脑的记忆是无法抹掉的,而计算机的记

忆,即存贮在磁盘上的信息是完全可以抹掉的;另一个是大脑能产生意愿,而计算机只能按照已经编制好的程序进行运算,无法产生自己的意愿。

其实,人的大脑不仅可以存贮大量模式的信息,而且还可以把任意两个或两个以上模式的信息抽出来,并且加以比较,而把这种比较结果,用一种更高级的“模式”来表示,这就是概念。计算机也可以把两个或多个量加以比较,但比较的结果只能是“是”或“否”,而不能产生概念。人的大脑还能把许多概念加以比较,建立联系,有时还能纳入完整的逻辑体系,这就是理论,这就是新的科学思想。计算机无论如何也是不可能做到这些的。人们把计算机叫做电脑,实在是抬举它了。众所周知,爱因斯坦的大脑产生了狭义相对论和广义相对论;普朗克和玻耳的大脑产生了物理学中的量子理论;维纳的大脑产生了控制论;马克思和列宁的大脑产生了马列主义;毛泽东的大脑产生了毛泽东思想。这些科学理论和科学思想的创立和发展对当代历史产生了重要影响和推动作用。人们试图找到爱因斯坦、普朗克、维纳、马克思、列宁等等,这些自然科学和社会科学的巨匠的大脑与普通人的大脑到底有什么不同,美国普林斯顿大学的脑研究中心,前苏联的列宁格勒脑研究所,分别对爱因斯坦和列宁的大脑进行了仔细研究,制成了几万张切片,在各种选定的先进仪器上进行分析。至今,爱因斯坦的大脑重 1 240 克,列宁大脑重 1 280 克,都和普通人脑没有什么区别。现在还没有找到结构上的任何不同。那么,到底为什么爱因斯坦和维纳等科学家会创立这样伟大的科学理论,马克思、列宁会创立无产阶级革命的学说,从大脑的结构上,谁也说不清存在的原因。我们只能用一句活来概括,那就是人大脑的功能真是奥妙无穷!

§ 1-2 孜孜不倦地探索

各类科学家都在孜孜不倦地探索大脑思维的奥秘,哲学家试图理解“思维的脑”或“脑的思维”;物理学家试图理解“物理的脑”或“脑的物理学”;生物学家试图理解“生物的脑”或“脑的生物学”;计算机专家试图理解“计算的脑”或“脑的计算”等等^[2]。毋庸置疑,各类科学家都在探索研究脑的方法,首先是如何从正在思维的脑中提取信息,这必须是无损伤探测或非侵入式记录。早在1929年,德国的Berger等人第一次记录到了脑电波 EEG (electroencephalogram)。第二年,就记录到了,人在睁眼注意某一现象时, α 波大大降低,当时称为 α 波阻断^[3],这为各类科学家研究大脑的活动,提供了有效的方法。1954年,D. Gabor等人第一次将用于心电图的偶极子定位法(DLM)应用到寻找脑电波 EEG 的产生器中^[4],此后,弱信号检测理论和计算机科学的不断发展,科学家的研究手段也就多了。1965年,Sutton等人利用幅度信噪比正比于迭加次数的平方根,检测到事件相关脑电位 ERP(event-related brain potential),特别是第一次记录到 P300 分量^[5]。此后,许多人证明 P300 波的幅度和潜伏期对学习、记忆、遇到惊奇事件、或思维方式改变等许多心理因素有关。1970年,J. E. Zimmerman等人^[6]利用超导量子干涉器件(SQUID)制成了超导磁强计,用来测量脑磁场分布,大脑在思维或调节活动中,伴随有磁场产生,这种磁场极其微弱,仅是地球磁场的 10^8-10^9 分之一。在1989年,R. Hari等人^[7],还测到了脑磁图(MEG)在人做语言发音、选择注意时的变化情况。这就给物理学家及其它科学家们把大脑看作是一个电磁系统提供了依据。在近20年间,

关于大脑的实验研究和理论研究都有了很大发展,对脑的模型从均匀球模型到非均匀三球壳、四球壳模型发展到偏心球壳模型,对脑电、磁产生器的模型,从单偶极子模型到四极子模型,以致于多极子模型。并且对均匀球模型、非均匀三球壳模型、单偶极子源、头皮电位分布,已解出解析解。

现在,采用最小二乘法对各种头模型,估算单偶极子源、双偶极子源的位置、取向和强度,已有许多报道。1967年,A. C. L. Barnard 等人,在任意源的情况下,对任意形状多层导体模型,如何求任意界面上的电位分布,建立了著名的 Barnard 积分方程^[6],这是一个第二类 Fredholm 积分方程,再加上利用计算机进行数值求解,已为进行大脑的理论研究奠定了坚实的基础。随着科学技术的不断发展和研究手段的进步,我们相信在不久的将来,无论在实验研究上,还是在理论研究上,都会有重大的进展和新的突破。

§ 1-3 物理学家的责任

在各类科学家对脑的研究中,物理学家是首当其冲的。当把人的大脑看作是一个电磁系统时,已经证明它是遵守物理学中的电磁规律的,被刺激或心理活动激活的脑细胞,充当激励电磁场的源。那么,大脑的复杂的思维活动是否也遵从物理规律呢?著名的数学物理学家 Pogernose 的回答是肯定的。到底遵守什么样的物理规律?至今,人们还未找到。寻找的任务就落在当今和未来的物理学家的肩上。现在,一些人提出,把人的大脑可以看作是一个自组织学习控制的巨系统。这样的巨系统应选择多少个、什么样的参数来描述?这些参数随时间变化应满足什么样的方程?方程的解应具有什么特点?所有

这些问题都是今后物理学家们所必须思考并回答的问题。现在已有人提出,这些参数所满足的方程应该非线性的二阶或三阶的偏微分方程,其解应该是具有稳定、分支和混沌等特点,分支表示作判断时可能出现的几种选择,混沌表示忘却或不知道等等。现在对这些问题比较乐观的预言,是到下个世纪的中期,会有重大的进展或在某些方面可能有重大突破。到那时候,正如中科院生物物理所的郭爱克研究员所说^[2],这将使我们清除那些超自然观念的尘埃,在“神经的人间”重新找回我们的内心世界,而且最终地跨越在生物学与社会学之间以及身心与灵魂之间的鸿沟。实现从必然王国向自由王国的飞跃。21 世纪的神经科学将充满奋斗、论争和进步,将会有新的发现、新概念的引进、新思想的提出、新技术的开拓、新的里程碑的出现。同时,必然伴随着新的更伟大的科学革命——智能革命的孕育。

参 考 文 献

- [1] Spiegel EA. Should the Brain be Regarded as a Computer? Appl. Neurophysiol. 1983,46:7—10
- [2] 中国科学院生物科学与技术局,中国科学院上海文献情报中心编,未来十年的生命科学,第一版,上海,上海科学技术出版社,1991:12—18
- [3] Berger H. über das Elektrenkephalogramm des Menschen Zweite Mitteilung, J. Psychol. Neurol (Lpz), 1930,40:160—179
- [4] Gabor D. and Nelson CV. Determination of the Resultant Dipole of the Beart from Measurements on

- the Body Surface, *J. Appl. phys.* 1954, 25:413 — 416
- [5] Sutton S, Braren M, Zubin J., et al. Evoked Potential Correlates of Stimulus Uncertainty. *Science*, 1965, 150:1187 — 1188
- [6] Zimmerman JE, Thiene P, Harding JT, *J. Appl. Phys*, 1970, 41:1581
- [7] Hari R and Lounasmaa OV. Recording and Interpretation of Cerebral Magnetic Fields. *Science*, 1989, 244:432 — 436
- [8] Barnard ACL, Duck JM, Lynn MS, et al, The Application of Electromagnetic Theory to Electrocardiology II. *Biophys. J*, 1967, 7:436 — 491

第二章 实验方法

这一章主要介绍脑电场、脑磁场的测量方法,以及与求脑内源有关的头颅参数测量方法等。最后介绍,用统计方法给出测量结果置信度的 t 检验法。

说明一下,电势和电位本是一个概念,电场中某点的电势或电位,表示放在该点单位正电荷所具有的势能或位能。因为在生理学中习惯用电位,在物理学中习惯用电势,为了符合两种习惯,我们采取混用。在生理叙述中用电位,在物理叙述中则用电势。

§ 2-1 EEG 的检测

人不论是在思考问题或是在吃饭、睡眠,还是在运动、唱歌,头皮上都有电位变化,这个电位通常在 $10 - 50\mu\text{V}$ 之间,通过放大器,记录笔记录下来,这就是通常所说的脑电波,也称为脑电图,英文缩写为 EEG。为了与下面要讲的与刺激事件有关的脑电变化加以区别,故称其为自发脑电波。自发脑电波按其频率分为 α 波 ($8-13\text{Hz}$), β 波 ($14-30\text{Hz}$), θ 波 ($4-7\text{Hz}$) 和 δ 波 ($0.02-4\text{Hz}$)。

这些波可以在人头皮的不同区域同时出现并被测出,但在枕叶区域 α 波比较显著,在额叶与顶叶区域 β 波比较显著。几乎所有正常人,大脑在处于平衡、休息状态时,均有 α 波出

现。当人睁开眼睛或受到某种刺激时， α 波会立即消失而呈现快波，这一现象称为 α 波阻断。人在困倦时，一般可出现 θ 波。成人在清醒状态下，几乎没有 δ 波，但在睡眠期间，皮层脑电可以出现 δ 波。癫痫病患者，其脑电图呈现棘波、尖波、棘慢综合波等。探其源，即寻找这些波的脑内产生器是脑物理学的重要任务之一。

要能很好地对脑电进行放大的放大器应具备以下特点^[1]：1) 高输入阻抗，一般要大于 $50\text{M}\Omega$ ；2) 高增益，高共模抑制比，幅度增益在 $(1 - 5) \times 10^6$ 范围可调，共模抑制比CMRR(common mode rejection ratio)要大于80分贝，以降低干扰噪声；3) 要低噪声，噪声电压 $V_n < 1\mu\text{V}$ ；4) 要隔离，即前置放大器要浮地，与后面的主放大器要实现电的隔离，隔离电阻要大于 $10^9\Omega$ ，以实现病人保护。放大器的通带宽度在0.5—30Hz之间可调，其结构图如图2-1所示。 A_0 为输入缓冲级，通常就近将电极设置在输入盒内，在电极和缓冲放大器之间设有电极阻抗检查电路，以便监视电极与放大器、电极与头皮之间接触是否良好。缓冲级 A_0 后边为差动放大器 A_1 ，以提高共模抑制比； C_1 用以隔离电极的极化电压，同相放大器 A_2 、 A_3 和 A_4 除了逐次放大大脑电信号外，还实现灵敏度调节；低通滤波器和高通滤波器分别实现放大器的多种频段的选定。 T_1 、 T_2 为50Hz陷波，在50Hz干扰无法抑制时，把它接入信号通路。

记录电极配置采用国际10—20电极系统。如图2-2所示。左边为断面配置尺寸，右边为俯视位置。共有25个电极。中间的 F_z 、 C_z 和 P_z 也记作 F_c 、 C_c 和 P_c 。根据不同需要可选择不同电极组合，如研究心理工作产生的不对称性，采用6导联，选 F_3 、 F_4 、 C_3 、 C_4 、 P_3 和 P_4 ，乳突或耳垂接参考电极，前额FP接

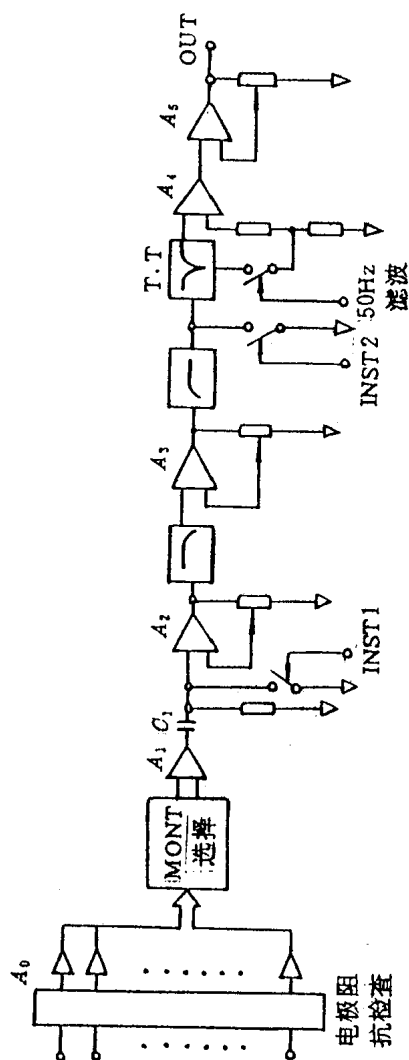


图 2-1 EEG 放大器结构

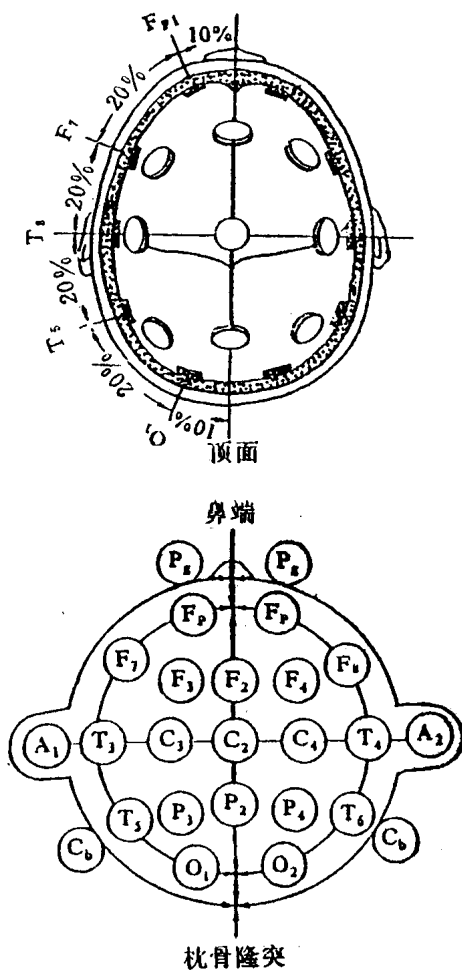


图 2-2 国际 10—20 电极系统

地。

§ 2-2 CPS 检测

2-2-1 CPS 记录

CPS 是皮层功率谱密度(cortical power spectrum)的英文缩写。CPS 通常采用 1971 年 Wiener-Khinchine(W-K)所定义的脑电信号自相关函数(ACF)的傅立叶变换。设 EEG 信号为 $S(t)$, 则其自相关函数为

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)S(t - \tau)dt \quad (2-2-1)$$

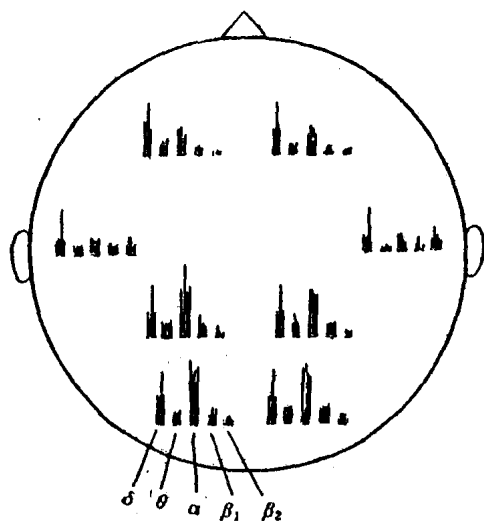


图 2-3 各频段内功率的直方图