

认知电位研究方法的进展和趋势*

周 曙 魏景汉

(中国科学院心理研究所脑高级功能研究室, 北京, 100101)

脑电图 (electroencephalography, EEG) 或称脑波 (brain wave) 是反映脑功能的客观指标, 其意义的确定依赖神经科学和心理科学。在受控实验中, 用各类刺激和受试者的行为等为“标志”将 EEG 分割成片段 (事件相关脑波, event related EEG), 分类叠加及平均这些脑波片段即获得平均事件相关电位 (event related potentials, ERP), ERP 又称认知电位 (cognitive potentials)。认知电位研究方法的进展和趋势主要表现在三方面: (1) 用非线性理论和方法分析和认识脑波, 注重其动态信息的获取; (2) 重视提取多通道认知电位蕴含的高阶信息, 结合计算机技术实现认知过程可视化 (visualization); (3) 寻求脑波时空模式的心理意义不仅依赖卓越的认知实验范式设计, 建模仿真方法也将占据一席之地。

1 非线性理论指导认知电位的动态信息获取

通常认为 ERP 是埋藏在事件相关脑波中的低信噪比信号并假设信号与噪声以线性叠加方式结合 (加法模型), 运用平均叠加方法时, 同一类事件不得不重复数十次才可获得满意信噪比的对应 ERP, 这样就丢失了脑波中丰富的动态信息。为减少叠加次数乃至提取单次 ERP, 现已出现如参数模型、子波分析和神经网络等方法, 这些方法往往首先需要平均 ERP 为模板, 以获得接近模板的结果作为追求目标, 并未区分事件相关脑波的变异和噪声。

事件相关脑波的变异性研究表明加法模型不能解释其如此大的潜伏期和波幅变化, 甚至有学者得出了事件相关脑波与刺激事件并非确定性关系的结论, 新的实验结果也发现与认知活动有关的脑波变异至少不低于平均波形。这些研究提示大脑并没有运用平均叠加原理处理信息, 寻找脑波与心理和行为水平的实时对应关系是一个挑战, 平均 ERP 仅仅是一种统计“不变量” (invariant), 它主要由事件相关脑波中与事件出现时刻锁相的成分构成, 而同样含有大量信息的非锁相成分和低频成分大大削弱了。

脑波非线性动力学分析表明大脑利用混沌机制处

理信息, 脑波可视为确定性随机性的混沌时间序列。混沌理论为理解事件相关脑波的确性和随机性的关系提供了一种非线性模型, 神经系统作为适应外部环境的非线性系统, 与认知过程耦合的脑波也表现出非平稳性及很大的变异性, 这些属于信号本身的特性, 可以说动态信息就包含在其中, 事件相关脑波低信噪比的观念可能并不正确。另一方面, 额外记录的脑波主要反映电极部位的皮层网络功能, 从中直接获取同时参与认知过程的脑深部结构 (包括内侧颞叶和海马等) 的动态信息是困难的, 但由于深部结构通过与皮层网络的广泛耦合仍可显示其作用, 混沌学中由时间序列通过相空间重构恢复系统动力学信息的全息思想为揭示这种影响提供了理论基础。

对认知电位变异性的理解有赖于对脑波产生机制的深入认识, 在当前难以区分事件相关脑波中噪声和变异的情况下, 最佳策略是直接分析它。如要保留事件相关脑波的锁相和非锁相成分时, 可首先进行频域变换, 依据相位与刺激的关系分类后再做后续处理, 这是一条优于平均叠加法、长期受到忽视但更加合理的道理。直接提取和利用事件相关脑波的形态信息也同样可行, 我们以模糊神经网络对一种常用范式 (oddball paradigm) 的事件相关脑波进行聚类分析, 找出了 4 种基本形态, 依据这类信息运用混合神经网络对其分类, 正确率可达 89%。

2 多通道认知电位高阶信息的提取及可视化

神经生理研究表明物体的特征 (大小、颜色及方位等) 在视皮层不同区域加工, 但人们知觉到的却不是这些分散加工的特征而是一个个统一的整体, 离散特征与整体知觉的“矛盾”构成视觉特征整合 (binding) 问题。动物实验发现视觉刺激诱发的视皮层内相距较远的 (可以跨越两个半球) 功能柱的神经元发放通过局部场电位 (local field potentials, LFP) 锁相同步。动物在从事视觉运动协调 (visuomotor coordination) 任务时, 感觉皮层及运动皮层的神经活动也存在同步现象。同步化也许是认知过程 (甚至意识产生) 中存在的普遍机制。此

* 国家自然科学基金 (39700043) 及博士后科学基金资助项目。

外,动物实验研究提示与感觉知觉和行为水平对应的脑波不变量以某种空间模式表达。上述实验结果表明神经系统的不同区域可能利用了高阶信息而不仅仅是平均发放率这样的一阶信息进行通讯和协同。由于 LFP 是脑波的重要组成部分,单个神经元通过 LEP 这样的宏观水平的“集体”活动发挥影响,即脑波可能作为载波或其它目前尚不了解的方式参与了神经信息加工(如神经编码)而非无关紧要的附加现象(epiphenomena)。

目前常见的由脑波功率谱和波幅等特征插值构成的空间模式仅仅从能量角度刻划大脑,并未反映大脑各区域内在的协同功能。在上述实验研究的影响下,运用相关/相干分析提取多通道认知电位的高阶信息开始受到重视,这可验证认知过程是许多神经集群协同工作的结果的猜测。我们运用大脑三维模型及相应的插值技术,结合多变量自回归参数模型提取听觉汉字再认任务的多通道 ERP 高阶信息,其中偏相干等频段特征构成的脑波时空模式呈现出多个动态变化的神经集群,直观反映了认知过程中大脑不同区域的功能耦合。

多通道认知电位研究面临的挑战是如何从巨量、高维数据中寻求其心理意义,现已开始运用聚类分析、因素分析、独立分量分析(independent component analy-

sis)及投影寻踪(projection pursuit)等信息处理和多元统计方法进行降维和归因分析。基于脑波分析的功能成像是简化巨量数据分析的必要条件之一,与信息技术的紧密结合将实现认知过程的实时可视化。

综合多通道认知电位的另一种方法是从头皮电位推测颅内神经发生源,也称为脑波逆问题,这是一类非线性不适定(ill posed)问题,通常只能获得一定约束条件下的“最优”解。这些约束条件既有人工的也有实际的,如最小二乘方解、偶极子假设、电磁场理论和神经解剖等,采用动态的多源网络模型可望在分析大脑高级功能的研究中发挥作用。

3 认知电位时空模式与建模方法相结合

认知电位时空模式可能是认知过程现象和本质的统一,就其作用已提出了“认知代码”等假说,受神经振荡和脑波研究的启示,已出现相应运用人工神经网络建模的研究。与从神经生物学实验结果出发的自底向上道路互为补充,从整体宏观(网络)水平包括认知电位时空模式实验出发建模是自顶向下的道路,虽然这方面研究才开始,尚缺乏有影响的成果,但建立大脑同胚模型无疑是加深对脑波实质和脑工作原理认识的重要途径。

(接第 611 页)

以上结果表明标准集未知题具有易错性。分析数集和构图也没有消除这一点。但是,构图与分析数集和以直接方式解题相比较,有显著的促进作用。构图组的解题时间虽然远远多于直接解题组和分析数集组,但是其效果却不能简单地归因为时间增多,因为分析数集组的解题时间也是显著长于直接解题组,但是没有产生积极的效果。本研究认为构图解题的积极效果主要来源于构造了问题模型,问题信息是集约的、可视的和结构化的。

3.2 分析数集或构图与列式之间的正误关系分析

比较集未知题是比较容易解决的问题,仅仅采用关键词就可以解决的问题,例如见“多”用加,见“少”用减,所以,即使数集分析错误或者构图错误,也不影响正确列式。对于分析数集组,在 10% 的题次(1 人作 1 题计为 1 题次)上分析数集错误,其中 7% 的题次列式正确,对于构图组,6% 的错误,其中 5% 的列式正确。在标准集未知题上,对于分析数集组,数集分析错误(14%),列式也主要是错误的(10%);对于构图组,同样如此,8% 的构图错误,他们均列式错误。关于这一点,两个组别之间是一致的,即在表征阶段出现错误,列式均错误;但是,两组之间也有不一致的地方,对于构图组,只要构图正确(92%),列式几乎全部正确

(90%),对于分析数集组,与构图组比较起来,分析数集正确(86%),不能保证列式基本正确(只有其中 72% 的正确),这表明构图与列式之间联系的紧密程度大于分析数集与列式之间联系的紧密程度。这一点结合前面的实验结果,即分析数集组与直接解题组之间在解题效果上没有差异,可以认为,分析数集对列式没有产生显著作用,甚至可以认为,语义分析无助于解题熟练者解题。但是构图却与之相反,构图促进了问题解决,也就是以构图分析作为一种类型的模型分析有助于问题解决。

3.3 本研究的教學含义

目前在样例教学中,普遍将图示作为样例的一部分,这是有助于样例学习的。但是,在样例学习中,是否应该包括对问题情境的概念分析呢?例如关系应用题中的数集分析。根据本研究,在随后解题效果上,对问题情境的模型分析优于概念分析,至少可以认为,要更为重视模型分析。此外,根据本研究建议学生解题时构造出可视图形并据此解答。

4 结论

对于解题熟练者,构图有助于减少解题错误。在教学中要重视类似于构图的模型分析。