

· 生物电子学 ·

基于事件相关电位近似熵识别心理意识真实性的研究

赵敏¹, 赵春临^{1,2}

(1. 武警工程大学信息工程系 西安 710086; 2. 电子科技大学生物医学工程系 成都 610054)

【摘要】 研究受试者在隐藏信息测试(CIT)模式下心理意识真实性识别。通过对15名受试者进行测试并记录其事件相关(ERP)脑电信号, 对不同刺激信息诱发的ERP信号的近似熵进行分析。研究结果显示, 当刺激信息出现时, 近似熵出现了明显的下降趋势; 刺激任务完成后, 近似熵回升到刺激前水平。以近似熵下降百分比作为近似熵下降程度的量化参数, 对比不同类型刺激信息诱发ERP信号的近似熵下降百分比, 发现无关刺激在刺激反应过程中, 对应的近似熵下降百分比显著大于相关刺激和靶刺激的下降百分比($p < 0.001$), 说明近似熵的下降程度可以作为识别受试者隐藏信息的一种辅助特征参数。

关键词 近似熵; 事件相关电位; 测谎; 心理意识

中图分类号 R318.04, R395.9 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.05.025

The Study of Mentality Facticity Identification Based on Approximate Entropy of Event Related Potential

ZHAO Min¹ and ZHAO Chun-lin^{1,2}

(1. Information Engineering Department, Army Police Engineering University Xi'an 710086;

2. Biomedical Engineering Department, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The present study focuses on the identifying subject's mentality facticity during concealed information test (CIT). Total 15 subjects were tested in CIT paradigm and the event related potential (ERP) evoked by three categories stimuli was obtained simultaneously. The results show that the approximate entropy (ApEn) of ERPs decrease as stimulus appears and increase as stimulus over. Meanwhile, decreasing percentage of ApEn was employed as quantitative parameter, it is found that the parameter of ERPs corresponding to irrelevant stimulus is significantly larger than that of probe and target stimulus ($p < 0.001$). The findings indicate that decreasing percentage of ApEn could be used as an additional feature parameter to identify subject's concealed information effectively.

Key words approximate entropy; event related potential; lie detection; mentality facticity

心理意识真实性是人脑对客观存在的反映, 通常人们在社会交往中, 利用各种行为或语言来掩饰或否定自己的真实意识, 以达到欺骗对方的目的, 其多数含有刻意的欺骗, 成为社会和经济发展的不安定因素。因此心理意识真实性检测, 俗称测谎, 成为刑侦、反恐、安全审查、认知损伤评估及人事评测等部门迫切需要而十分关注的技术。

目前, 国内外关于测谎的研究主要集中在传统测谎仪和基于脑电(electroencephalogram, EEG)波的测试研究。传统测谎仪也称为多参数心理测试仪, 主要通过记录受试者在被询问某些问题时表现出的皮肤电、呼吸、脉搏等生理参数的变化, 来识别是

否说谎。其测试机理是人在说谎过程中, 由于恐惧和焦虑等情感反应会引发自主神经系统生理反应值出现异常, 而这些生理反应值也极易受到主观心理因素(焦虑与紧张等)的影响^[1]。传统测谎技术虽然在案件侦查中起到了一定的辅助作用, 但是由于其测试机理本身的不足, 使传统测试技术的理论基础和应用受到诸多质疑^[1-2]。基于EEG的测试研究主要从说谎的认知过程方面探索一些有效的谎言识别指标, 得到广泛研究的是基于事件相关电位(event related potential, ERP)测谎方法^[3-5]。事件相关电位的有效成分可以反映大脑的认知和注意等认知过程, 相对于传统测试技术更具有认知决定性。同时,

收稿日期: 2014-06-25; 修回日期: 2015-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(30870654)

作者简介: 赵敏(1978-), 女, 博士, 主要从事生物医学信号处理及模式识别方面的研究。

它在研究内容上注重从神经生理角度探索说谎者对相关信息的感知觉、注意、记忆、决策及反应冲突等心理现象形成过程中的信息编码及特征提取^[6]。因此, 基于EEG的测试得到了国内外学者更为广泛的关注。

脑电信号包含了丰富的与意识相关的信息。相关研究发现, 由特定的外部刺激信息诱发的有效成分, 可以反映大脑的认知、注意机制及信息处理过程, 而欺骗性的决定是在对信息的认知基础上做出的。说谎是一个与认知、情感、冲突等密切相关的复杂的过程, 而脑电非线性分析能提供大脑认知功能活动变化轨迹等情况, 动态的、短时程的非线性动力学分析方法更适合研究认知过程中大脑功能活动的变化规律^[7]。文献[8]指出由外部刺激诱发的脑电活动的变化, 可以被认为大脑从无序向有序状态的转变, 反之亦然。近似熵作为一种非线性测度, 反映了一个时间序列随其长度的增长出现新模式的速率, 即信号接近随机的程度。本文主要对受试者在隐藏信息测试(concealed information test, CIT)^[6,9]模式下诱发的事件相关脑电信号的近似熵进行了相关的研究, 探索说谎心理意识和诚实心理意识状态下的脑电动力学特征。

1 实验及数据采集

实验对象: 在校大学生志愿者15名, 包括本科生和研究生, 没有任何精神疾病和脑病病史, 男性11名, 女性4名, 年龄为21~24岁, 正常或矫正视力。实验时间为上午9:30~10:30或下午3:30~4:30, 整个实验过程在正常照明、安静、尽量舒适的室内环境进行。每个受试者完成两组实验, 要求受试者在测试过程中尽量避免身体移动。

测试方法如下: 采用受试者的真实姓名或无关姓名和真实生日或无关日期作为两组实验的被测试信息, 以“你是XXX?”、“生日是X月X日?”的形式出现, 测试序列的编排和出现依据典型的CIT范式^[6,9], 包括三类刺激信息^[10-11]:

- 1) 探测刺激(Probe), 测试者和被测试者都知晓的真实情况信息问题(真实姓名或生日), 但受试者试图隐瞒并故意否认的项, 回答“不是”, 即说谎项。
- 2) 无关刺激(Irrelevant), 与探测刺激同类性的非真实情况信息问题(无关姓名或日期), 也是要求受试者的确实否认的项, 回答“不是”, 在该实验的两组测试中分别是5个陌生人的姓名和与生日无关的日期信息问题。

- 3) 靶刺激(Target), 由测试者专门指定的无关刺激, 但是要求受试者当该刺激信息出现时完成与其他两类信息相反的反应任务, 即做肯定回答“是”, 其作用主要是要求受试者在测试过程中集中注意力并监督其是否配合实验。在该实验中, 为了统一回答问题时“是”和“不是”的对应关系, 对靶刺激信息做了修改, 指定一个受试者认识人的姓名以“你认识XX?”和“国庆是10月1日?”的提问方式作为靶刺激。

每组测试共160次刺激随机出现, 无关刺激112次(70%), 探测刺激和靶刺激各24次(15%), 刺激呈现的时间1.5 s, 刺激之间间隔在2.0~2.2 s随机。受试者按照实验要求, 对随机出现的刺激问题判断后, 以尽快按下鼠标“左键”或“右键”的形式回答“是”或“不是”。一组测试完成后受试者休息5 min后进行下一组测试。

EEG数据采集用标准10-20导联头皮电极系统32导电极帽记录FP₁、FP₂、F₇、F₃、F_z、F₄、F₈、FT₇、FC₃、FC_z、FC₄、FT₈、T₇、C₃、C_z、C₄、T₈、TP₇、CP₃、CP_z、CP₄、TP₈、P₇、P₃、P_z、P₄、P₈、O₁、O_z、O₂共30通道脑电信号, 同时记录垂直眼电EOG, 参考电极为双侧乳突, 前额接地, 放大器的通带频带为0.3~70 Hz, 采用频率1 000 Hz, 各导联阻抗均小于5 kΩ。采集的数据经去除眼电伪迹。取刺激出现前500 ms到后1 500 ms的数据作为分析数据, 平均各类刺激的分段数据得到对应各类刺激的ERP数据。15个受试者每人进行两组实验, 共30组样本数据供后需分析。

2 近似熵算法

文献[7]提出近似熵(approximate entropy, ApEn), 是一种适用于短数据的信号复杂性度量工具, 非常适合研究信号性质的动态变化的要求。近似熵在应用中的优势在于:

- 1) 估计所需要的数据点数少(100~5 000), 一般1 000点;
- 2) 对偶尔产生的瞬态强干扰有很好的承受力, 抗干扰及噪声能力较强;
- 3) 可以分析随机信号和确定性信号, 以及由随机信号和确定性信号叠加的信号。近似熵的以上特性使其非常适合生物电信号的分析, 特别是本文分析的脑电信号就是一种由与大脑活动状态或意识活动有关的确定性成分和随机的脑电信号组成的信号。

假设原始信号数据序列为 $\{x(n)\} = x(1), x(2), \dots, x(N)$, 数据总长度为 N , 近似熵的算法步骤如下^[7,10]:

1) 设定模式维数 m , 将序列 $\{x(n)\}$ 按照序号顺序组成一组 m 维矢量:

$$\mathbf{X}(i)=[x(i),x(i+1),\dots,x(i+m-1)] \quad (1)$$

式中, $i=1,2,\dots,N-m+1$ 。

2) 对于每个 i 值, 计算矢量 $\mathbf{X}(i)$ 与其余矢量 $\mathbf{X}(j)$ ($j=1,2,\dots,N-m+1, j \neq i$)之间的距离为:

$$d[\mathbf{X}(i),\mathbf{X}(j)]=\max_{0 \leq k \leq m-1} [|x(i+1)-x(j+k)|] \quad (2)$$

3) 给定阈值 $r(r>0)$ 为预先选定的相似容限, 对每一个 i 值统计 $d[\mathbf{Y}(i),\mathbf{Y}(j)]<r$ 的数目及此数目与总的矢量个数 $N-m+1$ 的比值, 即有:

$$C_i^m(r)=\text{Num}\{d[\mathbf{X}(i),\mathbf{X}(j)]<r\}/(N-m+1) \quad (3)$$

式中, $C_i^m(r)$ 反映了序列中 m 维模式在相似容限 r 的意义下相互近似的概率; $i=1,2,\dots,N-m+1$ 。

4) 对 $C_i^m(r)$ 取对数后求平均, 记为:

$$\phi^m(r)=\frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_i^m(r) \quad (4)$$

5) 再对 $m+1$, 重复以上步骤, 得到 $C_i^{m+1}(r)$ 、 $\phi^{m+1}(r)$, 则理论上序列近似熵为:

$$\text{ApEn}(m,r)=\lim_{N \rightarrow \infty} [\phi^m(r)-\phi^{m+1}(r)] \quad (5)$$

在实际应用中, 信号为有限长序列, N 为有限值, 那么根据以上步骤计算序列长度为 N 时, ApEn的估计值为:

$$\text{ApEn}(m,r,N)=\phi^m(r)-\phi^{m+1}(r) \quad (6)$$

近似熵值与 m 、 r 取值有关, 文献[1]根据实践经验建议取 $m=2$, $r=(0.1 \sim 0.2)SD_x$ 。

3 事件相关电位(ERP)的近似熵分析

已有研究显示^[10,13-15]CIT实验模式产生的ERP信号分布主要集中于大脑中线部位, 即Fz、Cz和Pz等导联处, 且中线各个导联的ERP信号的变化趋势基本相同。图1所示为三类刺激信息在Pz导联诱发的某一被试的ERP波形。

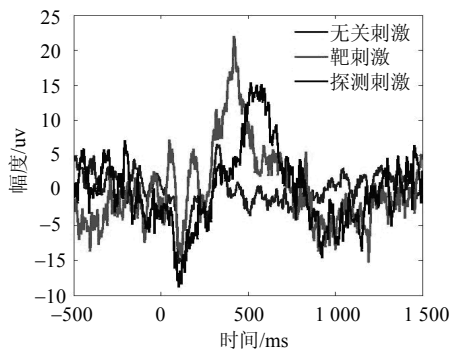


图1 某一受试者对应三类刺激信息在Pz导联的ERP波形

根据本文的近似熵算法中的式(6), 其中 $m=2$, $r=0.2SD_x$ (SD_x 表示每个数据段的均方差), 计算图1中

的不同刺激信息诱发ERP脑电信号的近似熵在 $-500 \sim 1500$ ms内的动态变化。近似熵计算窗口长度为200 ms(采样率为1 000 Hz), 移动步长25 ms。对应式(6)中, $N=200$, 即从数据开始的200个点由式(6)计算其近似熵值, 然后向前移动25个点, 再计算其近似熵值, 得到一个近似熵序列值。分别计算无关刺激、探测刺激和目标刺激在Fz、Cz和Pz3个导联的近似熵。所有受试者反应三类刺激信息诱发的ERP的近似熵分别在Fz、Cz和Pz的3个导联的总平均值, 如图2所示。比较不同刺激诱发的ERP信号的近似熵的变化情况, 发现了三类刺激诱发的ERP信号在刺激出现后近似熵都有明显的变化, 在刺激开始后, 近似熵下降, 反应任务结束后, 近似熵回升; 比较三类刺激对应的近似熵下降趋势程度发现, 无关刺激诱发的ERP信号的近似熵相对于探测刺激和靶刺激有更大的下降趋势。这种趋势在3个导联上比较一致。

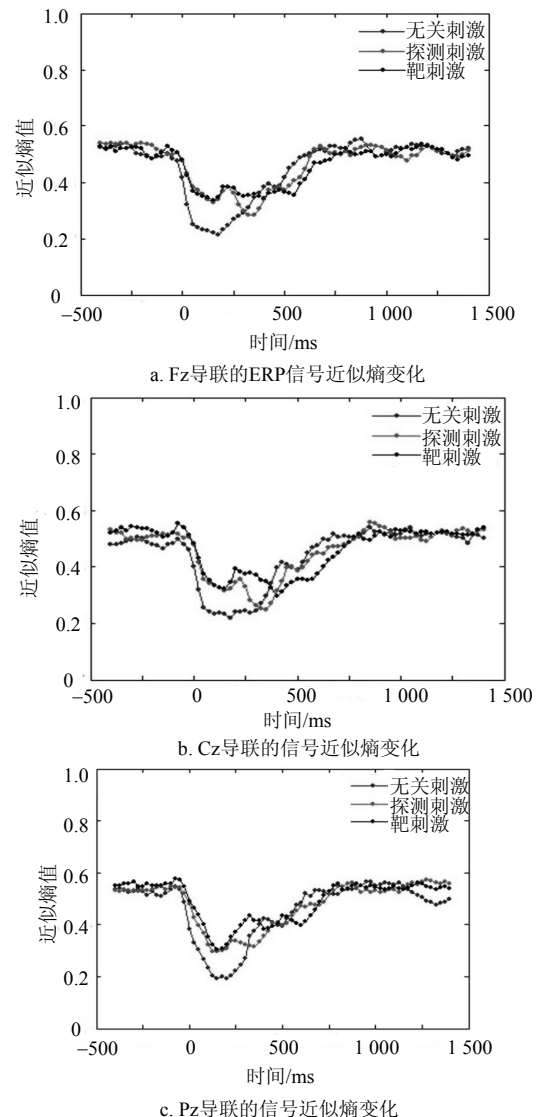


图2 三类刺激信息诱发的ERP信号, 分别在Fz、Cz和Pz导联的近似熵动态变化

依据上述3种刺激对应的ERP信号的近似熵随时间的动态变化结果, 选择Pz导联的信号分别计算个人测试数据在刺激前(-500~0 ms), 刺激中(0~750 ms)和刺激后(750~1 250 ms)3个时间段的近似熵的平均值进行比较, 并进行均值和标准差统计, 数据统计结果如表1所示。

表1 三类刺激信息在Pz导联诱发的ERP的近似熵, 在刺激前、刺激中和刺激反应后的近似熵均值统计结果表

刺激类型	近似熵均值(标准差)		
	刺激前	刺激中**	刺激反应后
无关	0.527 5±0.070 4	0.338 1±0.091 7	0.546 4±0.083 6
相关	0.543 8±0.073 0	0.397 1±0.097 5	0.537 2±0.080 4
目标	0.543 1±0.079 0	0.393 9±0.098 3	0.541 0±0.079 1

**表示p<0.05

对所有样本数据以刺激类型为因素的单因素方差分析结果显示, 刺激中的近似熵在三类刺激之间差异性显著: $F(2,87)=3.60, p=0.031$, 多元比较结果显示, 探测信息在刺激中时间段的近似熵显著大于无关刺激的近似熵($p=0.019$), 靶刺激信息的近似熵也显著大于无关刺激的近似熵($p=0.027$), 而在探测与目标之间没有显著性差异($p=0.052$); 刺激前和刺激反应后的近似熵在三类刺激信息之间均无显著性差异($p>0.05$)。这一结果说明在隐藏信息测试模式下, 探测刺激信息和无关刺激信息在刺激中时间段的动力学特征有明显不同的变化趋势值, 因此可作为识别隐藏信息的有效特征之一。

同时, 为了说明刺激中相对刺激前的近似熵的下降趋势程度, 计算了每一个受试者反应三类刺激信息诱发ERP信号在刺激中(0~500 ms)时间段的近似熵的最小值(记为 A_{2min})相对于刺激前(-500~0 ms)时间段的平均值(记为 A_{1ave})的下降百分比Rd作为量化参数为:

$$Rd(i) = (A_{1ave}(i) - A_{2min}(i)) \times 100\% / A_{1ave}(i) \quad (7)$$

式中, i 表示刺激类型。

图3所示为三类刺激信息的ERP近似熵的下降趋势程度(Rd)的总平均, 探测刺激和靶刺激的近似熵平均下降了57.4%和57.55%, 而无关刺激的近似熵平均下降值为72.18%。单因素方差分析结果显示, 近似熵下降百分比在三类刺激信息之间差异性显著, $F(2,87)=11.818, p<0.000 1$ 。多元比较结果显示, 无关和相关刺激、无关和靶刺激之间差异性显著 $p<0.000 1$, 相关和靶刺激无明显差异 $p=0.967$ 。该结果说明在隐藏信息测试模式下, 探测刺激和无关刺激诱发ERP的近似熵呈现明显不同的下降趋势程度。

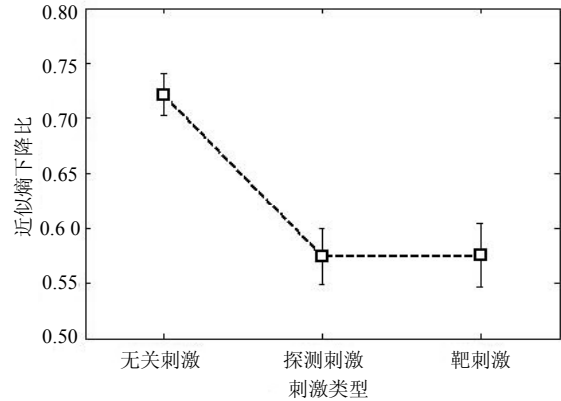


图3 三类刺激信息的Rd的总平均值和标准误差图

4 结束语

本文通过对隐藏信息测试模式下的三类刺激诱发的ERP信号的近似熵, 随时间动态变化曲线和刺激触发的3个阶段的近似熵均值进行了分析研究。结果显示, 对受试者施加刺激后, 其诱发的ERP信号的复杂度明显降低, 刺激反应结束后, 又回升到刺激前状态。这是因为大脑在处理外部刺激信息时, 被认为是一个从无序向有序状态的转变, 反之亦然。而近似熵作为一种非线性测度, 反映了一个时间序列随其长度的增长出现新模式的速率, 即信号接近随机的程度。因此, 近似熵可以从非线性动力学角度反应受试者大脑, 在反应不同刺激信息时的微状态的不确定性。

依据近似熵的在刺激前后的下降趋势变化, 本文应用每一个受试者反应三类刺激信息诱发ERP信号, 在刺激中(0~500 ms)时间段的近似熵的最小值相对于刺激前(-500~0 ms)时间段的平均值的下降百分比Rd作为近似熵最大下降程度的量化参数。结果发现, 无关信息诱发的ERP信号的近似熵下降百分比(72.18%)显著高于相关刺激和靶刺激的下降百分比(57.4%和57.55%)。说明受试者在反应无关刺激信息时可能处于一种更有序的微状态, 其具体的理论和生理意义尚不明确, 还需要后续的相关研究解释。其次, 该结论的得出是依据受试者的个人信息(姓名和生日)作为被测试的隐藏信息, 同时样本量相对较少, 因此需要在后续的工作中增加样本量和以非个人信息作为隐藏信息测试的研究进一步验证。

本文的实验数据是在西安交通大学生物医学研究所重点实验室采集完成的, 感谢提供帮助的老师和同学们。

参 考 文 献

- [1] SURYANARANYANAN P, KUMAR D K, BURTOR P. Validity of polygraphs[C]//International Conference of the Engineering in Medicine & Biology Society. Shanghai, China: IEEE, 2005: 1200-1203.
- [2] FORD E B. Lie detection: Historical, neuropsychiatric and legal dimensions[J]. International Journal of Law and Psychiatry, 2006, 29(3): 159-177.
- [3] MEIJER E H, SELLE N K, ELBER L, et al. Memory detection with the concealed information test: a meta analysis of skin conductance, respiration, heart rate, and P300 data[J]. Psychophysiology, 2014, 51(9): 879-904.
- [4] MEIXNER J B, ROSENFELD P. A mock terrorism application of the P300-based concealed information test[J]. Psychophysiology, 2010, 48(2): 149-154.
- [5] MEIXNER J B, ROSENFELD J P. Detecting knowledge of incidentally acquired, real-world memories using a p300-based concealed-information test[J]. Psychological Science, 2014, 25(11): 1994-2005.
- [6] ROSENFELD J P, HU X, PEDERSON K. Deception awareness improves P300-based deception detection in concealed information tests[J]. International Journal of Psychophysiology, 2012, 86(1): 114-121.
- [7] PINCUS S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1991, 88(6): 2297-2301.
- [8] OSVALDO A R. Entropy changes in brain function[J]. International Journal of Psychophysiology, 2007, 64(1): 75-80.
- [9] AMBACH W, DUMMEL S, LUER T, et al. Physiological responses in a concealed information test are determined interactively by encoding procedure and questioning format[J]. International Journal of Psychophysiology, 2011, 81(3): 275-282.
- [10] 赵敏, 郑崇勋, 赵春临, 等. 基于多通道事件相关电位的心理意识真实性检测[J]. 生物医学工程学杂志, 2010, 27(3): 641-646.
ZHAO Min, ZHENG Chong-xun, ZHAO Chun-lin, et al. Identification of mentality facticity based on multi-channel event-related potentials[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2010, 27(3): 641-646.
- [11] 赵敏, 郑崇勋, 赵春临. 利用小波分解和支持向量机的心理意识真实性识别研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 119-124.
ZHAO Min, ZHENG Chong-xun, ZHAO Chun-lin, et al. Identification of mentality facticity based on wavelet decomposition and support vector machines[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(4): 119-124.
- [10] 洪波, 唐庆玉, 杨福生, 等. 近似熵、互近似熵的性质、快速算法及其在脑电和认知研究中的初步应用[J]. 信号处理, 1999, 15(2): 100-108.
HONG Bo, TANG Qing-yu, YANG fu-sheng, et al. ApEn and cross-ApEn: Property, fast algorithm and preliminary application to the study of EEG and cognition[J]. Signal Processing, 1999, 15(2): 100-108.
- [11] ZHAO M, ZHENG C X, ZHAO C L. A new approach for concealed information identification based on ERP assessment[J]. Journal of Medical Systems, 2012, 36(4): 2401-2409.
- [12] MEIXNER J B, ROSENFELD P. A mock terrorism application of the P300-based concealed information test[J]. Psychophysiology, 2010, 48 (2): 149-154.
- [13] 赵敏, 郑崇勋, 赵春临, 等. 利用Fisher判别式和事件相关电位的心理意识真实性识别[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(8): 133-136.
ZHAO Min, ZHENG Chong-xun, ZHAO Chun-lin, et al. Identification of mentality facticity based on fisher discriminant analysis and event-related potentials[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(8): 133-136.

编辑 黄 莘