

血管性痴呆患者脑电信号的多通道 线性描述符特征研究

娄武涛¹, 徐进¹, 盛恒松¹, 赵松珍²

(1. 西安交通大学生物医学信息工程教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学第一附属医院神经内科, 710061, 西安)

摘要: 为提取能有效区分血管性痴呆(VaD)患者与正常老年人的神经电生理特征标识,采用多通道线性描述符对两组受试者在执行 oddball 视觉探测任务过程中的脑电(EEG)信号进行特征提取研究. 通过对任务状态和平静状态下多通道 EEG 的 3 个多通道线性描述符分析表明,在执行探测任务过程中, VaD 患者的场强变化率 Φ 和空间复杂度 Ω 明显高于正常老年人,而在平静状态下却无显著差异,两组受试人群的有效场强均没有显著差异. 分别对比不同受试人群在任务状态和平静状态下的 3 个描述符,结果表明,两组受试者在任务状态下的有效场强 Σ 比平静状态明显增高, Φ 和 Ω 明显降低,而且 VaD 患者 3 个描述符任务状态相对于平静状态的变化率要明显低于正常老年人. 因此,多通道线性描述符可以有效地反映人脑认知功能的衰退,为 VaD 患者的脑电特征提取提供了一种新的方法.

关键词: 血管性痴呆;脑电;多通道线性描述符

中图分类号: R318.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)04-0121-05

Electroencephalogram Feature Extraction for Vascular Dementia Patients Based on Multichannel Linear Descriptors

LOU Wutao¹, XU Jin¹, SHENG Hengsong¹, ZHAO Songzhen²

(1. Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Education Ministry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Neurology, First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China)

Abstract: To extract the electroencephalogram (EEG) features for diagnosis of vascular dementia (VaD), the multichannel linear descriptors are applied to analyze EEG signal recorded during an oddball visual detection task. The VaD group shows significantly higher Φ and Ω values compared with the elderly control during the task condition, and there is no obvious difference between VaD group and control in the resting state. Both the VaD group and the control show a higher Σ value and lower Φ and Ω values in task compared with that at rest. And the varying rates of the three descriptors in the resting state compared to task in VaD group are significantly larger than that in control. The multichannel linear descriptors could reflect the cognition function decline of VaD group, and thus provide a novel method for the EEG feature extraction of VaD patients.

Keywords: vascular dementia; electroencephalogram; multichannel linear descriptors

血管性痴呆(VaD)是老年性痴呆中的一种常见类型,主要是由于脑部多个缺血灶引起的明显的皮

层功能障碍.在我国等亚洲国家,VaD居各种痴呆类型中的第一位,在西方国家是仅次于阿尔茨海默痴呆(AD)的第二大痴呆类型,随着全球老龄化的发展,VaD将会成为全球第一大痴呆类型^[1-2].

目前,临床上对 VaD 的诊断主要是基于各种神经心理学测试量表和临床体征,这些方法不仅费时,而且存在较强的主观性,较难为 VaD 的诊断提供客观的评价标准.核磁共振、功能性核磁共振等影像学手段虽然能够为 VaD 的诊断提供一些客观的诊断依据,但由于其检查费用较高,不适于普及推广.脑电(EEG)作为一种无创、低成本、高时域分辨率的技术手段,近年来已成为研究人类脑认知功能的有效方法之一,并在老年性痴呆疾病的应用研究方面取得了一定的成果.

当今,国内外对 VaD、AD 等痴呆患者 EEG 的研究主要集中在 EEG 的时频波形特征、脑电地形图、功率谱、复杂度、近似熵等线性或非线性方法上^[3-4],而且绝大多数方法主要都是基于单通道 EEG 的特征分析,对多通道 EEG 信号的分析较少.基于多通道 EEG 信号的研究,可以使多个导联的 EEG 信息相互联系,实现对相应脑区的整体功能刻画,获取更加丰富、全面的脑功能信息. Wackermann 提出的多通道线性描述符^[5-7],通过从有效场强、场强变化率和空间复杂度 3 个方面来描述多通道 EEG 信号的特征,从而实现对脑区整体功能状况的多角度反映,因而有望成为 VaD 患者 EEG 特征提取的一种有效方法.

在基于 EEG 的痴呆研究中,很多都是针对痴呆患者在平静状态下的 EEG 信号进行的^[4].在本文的研究中,我们针对 VaD 患者通常存在注意、决策等功能上的缺失和不足,设计基于视觉通道的 oddball 视觉探测(即颜色辨识)任务,并利用多通道线性描述符对执行任务过程中的多通道脑电信号进行分析.由于认知状态下的 EEG 信号必将会蕴含更多 VaD 患者独有的特征信息,而多通道线性描述符的分析方法能够从宏观上刻画大脑整体功能的状态.因此,本文的研究将会更有效地揭示出 VaD 患者区别于正常人的脑功能差异,为临床 VaD 的早期诊断提供新的途径.

1 实验设计与信号采集

本实验包括 VaD 组和正常对照组. VaD 组包括 12 名随机选自经西安交通大学第一附属医院神经内科确诊的 VaD 病人,其中男性 7 名,女性 5 名,

平均年龄为 69.25 ± 10.56 岁. 所有 VaD 患者均有过中风经历,并且随后出现认知能力的下降,而且有 AD 家族史的 VaD 患者排除在外. 经简易智能量表(MMSE)检查的平均值和标准差为 22.58 ± 4.42 分. 自采集脑电信号前一个月起,病人未服用任何可以影响脑电信号的药物.

对照组 12 名受试者来自从社会征集的老年志愿者,均智力正常,无脑损伤、精神及神经系统病史,其中男性 4 名,女性 8 名,其平均年龄为 67.17 ± 5.97 岁,MMSE 平均值和标准差为 29.08 ± 0.9 分.

实验采用视觉通道诱发的 oddball 模式,即对受试者的视觉通路实施两种图片刺激,一种刺激出现的概率大,为非靶刺激,另一种刺激出现的概率小,为靶刺激,两种刺激随机出现. 要求受试者关注靶刺激,在靶刺激出现时,尽快做出按键反应,对非靶刺激不做任何反应. 本实验设计的刺激图片为红色圆和绿色圆,位于屏幕中心,直径为 2 cm,背景为黑色. 绿圆为靶刺激,以 20% 的概率随机出现,共出现 60 次,红圆为非靶刺激,以 80% 的概率随机出现,共出现 240 次,刺激呈现时间为 80 ms,刺激间隔为 $1\ 000 \sim 1\ 200$ ms.

实验信号记录采用美国 Neuroscan 公司生产的 128 导联 ERP 系统,电极放置参照国际 10/20 标准,记录 32 导脑电信号. 以双耳乳突连线作为参考电极,电极与皮肤间阻抗小于 5 k Ω ,信号频带为 0.5 ~ 100 Hz,采样频率为 500 Hz.

在信号采集过程中,注意环境干扰、受试者配合等因素的影响,以确保得到高质量的信号. 除了采集 EEG 信号外,实验过程中还同时记录了受试者对靶刺激的反应时间(RT)和任务完成情况.

2 多通道线性描述符特征提取

2.1 多通道线性描述符

Wackermann 为描述脑电信号在某一状态下的宏观情况,引入了有效场强 Σ 、场强变化率 Φ 和空间复杂度 Ω 3 个多通道线性描述符^[5-7],其定义如下: 考虑 K 个电极同时采集的 EEG 信号共 N 个采样点构成的向量 $\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_N\}$,其中 $\mathbf{u}_i$ ($i=1, 2, \dots, N$)是在第 i 个时间点由 K 个电极同时记录到的 EEG 组成的 K 维向量. 首先,对各通道 EEG 做零均值处理,令

$$m_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{u}_i\|^2 \quad (1)$$

$$m_1 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left\| \frac{\Delta \mathbf{u}_i}{\Delta t} \right\|^2 \quad (2)$$

式中: $\Delta \mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_i$; $\Delta t = 1/f_s$, f_s 是采样频率, 则有效场强为

$$\Sigma = (m_0/K)^{1/2} \quad (3)$$

场强变化率为

$$\Phi = (1/2\pi)(m_1/m_0)^{1/2} \quad (4)$$

由 $\mathbf{u}_i$ 构造得到协方差矩阵

$$\mathbf{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^T \quad (5)$$

计算得到 $\mathbf{C}$ 的特征值 $\lambda_1, \dots, \lambda_K$, 并对其作归一化处理, 得到 $\lambda'_1, \dots, \lambda'_K$

$$\lambda'_i = \lambda_i / \sum_{j=1}^K \lambda_j, \quad i = 1, \dots, K \quad (6)$$

从而得到空间复杂度参数为

$$\Omega = \exp\left(-\sum_{i=1}^K \lambda'_i \ln \lambda'_i\right) \quad (7)$$

Σ 反映了相应脑区的有效场强, 即能量的大小; Φ 反映了相应脑区的场强变化率, 即该脑区总体能量随时间变化的快慢程度; Ω 反映了 K 个导联的 EEG 信号构成的空间复杂度, 量化了 EEG 的同步化程度, Ω 值越大, 同步性越低, 反之亦然。

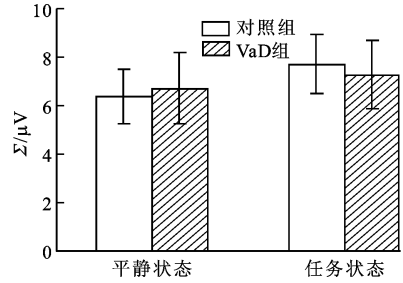
2.2 预处理

利用 Neuroscan 4.3 对采集到的多通道脑电信号进行预处理, 除去噪声干扰和伪迹, 并对信号进行 0.5~30 Hz 带通滤波。由于 VaD 组和正常老年组受试者对靶刺激的平均反应时间分别为 (392.3 ± 45.6) ms 和 (364.9 ± 46.4) ms, 所以受试者对靶刺激的反应主要集中在靶刺激出现后 400 ms 内, 即这段时间受试者处于任务状态。为对比靶刺激对受试者的影响, 选取靶刺激出现前 400 ms 作为平静状态。对去除干扰的脑电信号, 分别截取每个靶刺激出现前、后 400 ms 的平静状态和任务状态的数据段进行处理, VaD 组与对照组各得到 45.5 ± 7.6 和 48.1 ± 5.1 段平静状态和任务状态的数据。由于受试者参与视觉探测的相关脑区主要集中在额、中央和顶区^[3], 因此仅选择位于额区(F3、F_z 和 F4)、中央区(C3、C_z 和 C4)和顶区(P3、P_z 和 P4)的 9 个导脑电信号进行多通道线性描述符分析。

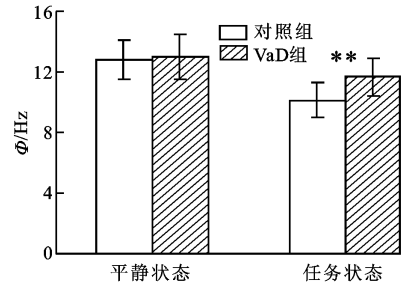
3 结果

对每个受试者, 分别计算其平静状态和任务状态下的 Σ 、 Φ 、 Ω 3 个描述符, 为减小参数波动的影响, 分别计算每个受试者所有数据段 3 个参数的平均值, 以代表受试者的 Σ 、 Φ 、 Ω 3 个描述符。分别对平静

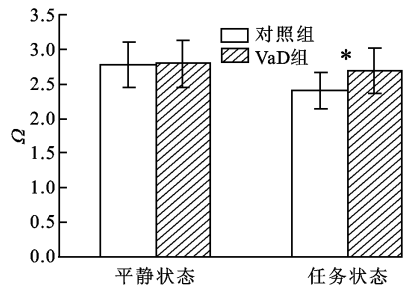
状态和任务状态下两组受试者的 3 个描述符利用 SPSS 软件进行独立 t 检验, 显著性水平为 0.05, 结果如图 1 所示。在平静状态下, VaD 组和正常老年组的 3 个线性描述符均无差异 ($p > 0.05$); 在任务状态下, VaD 组场强变化率 Φ ($p < 0.01$) 和空间复杂度 Ω ($p < 0.05$) 明显高于正常老年组, 而有效场强 Σ 并无显著差异。



(a) 有效场强



(b) 场强变化率

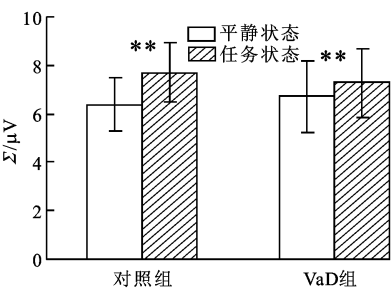


(c) 空间复杂度

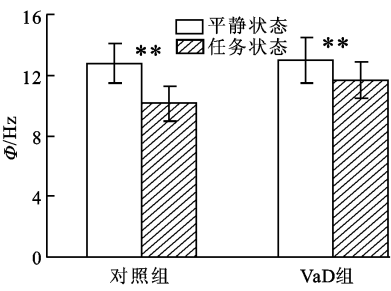
* 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$

图1 相同状态下两组受试者 3 个描述符的差异

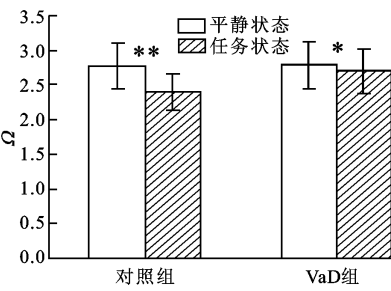
为研究任务对受试者 EEG 的影响, 分别对两组受试者平静状态和任务状态下的结果进行配对 t 检验, 结果如图 2 所示。VaD 组和正常老年组任务状态下的 Σ (VaD 组 $p < 0.01$, 正常老年组 $p < 0.01$) 明显高于平静状态, 而 Φ (VaD 组 $p < 0.01$, 正常老年组 $p < 0.01$) 和 Ω (VaD 组 $p < 0.05$, 正常老年组 $p < 0.01$) 明显低于平静状态。



(a)有效场强



(b)场强变化率



(c)空间复杂度

* 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$

图 2 两组受试者分别在不同状态下 3 个描述符差异

从上述结果可以看出, VaD 患者和正常老年人从平静状态到任务状态时 3 个线性描述符的变化趋势是相同的, 只是在变化的程度上明显不同, 因此定义 3 个线性描述符的变化率为各描述符在任务状态与平静状态的差值除以该描述符在平静状态下的值。

分别计算 VaD 组和对照组 3 个描述符的变化率, 并利用 SPSS 进行独立 t 检验, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, VaD 组 3 个描述符 Σ 、 Φ 和 Ω 在任务状态相对于在平静状态下的变化率明显低于对照组。

4 讨论与结论

由于 VaD 患者主要表现在注意、决策和短时记

表 1 VaD 组和对照组 3 个多通道线性描述符任务状态相对于平静状态的变化率

描述符变化率	对照组	VaD 组	<i>p</i>
$\Delta\Sigma/\%$	21.299 ± 11.634	9.053 ± 8.548	0.008
$\Delta\Phi/\%$	-20.571 ± 8.089	-10.166 ± 5.851	0.002
$\Delta\Omega/\%$	-12.693 ± 12.074	-3.317 ± 4.115	0.024

忆等认知功能上的障碍, 本文采用的 oddball 视觉探测任务可以很好地反映受试者的注意和决策能力, 相对于平静状态下的 EEG 而言, 其中蕴含更多的特征信息。

由上述结果可知, 在执行颜色辨识任务过程中, VaD 患者的脑电信号与正常老年人相比, 其多通道线性描述符中的 Φ 和 Ω 更大。这些差异表明, 在执行该任务过程中, VaD 患者相应脑区的总体能量随时间的变化更快, 即激活程度更大, 而且其空间复杂度更高, 即同步性更低。这可能是由于 VaD 患者相应脑区神经元的损伤, VaD 患者为了很好地完成实验任务, 需要激活更多的神经元, 这导致了 VaD 患者在任务状态下神经元活动同步性的下降。Yoshimura 对 AD 患者的分析同样表明, AD 患者的空间复杂度 Ω 要明显高于正常老年组, 但有效场强 Σ 和场强变化率 Φ 却无显著差异^[8]。

分析两组受试者在平静状态和任务状态下多通道线性描述符的变化情况表明, 任务状态与平静状态相比, 两组受试者相应脑区的有效场强 Σ 均明显增高, 而场强变化率 Φ 和空间复杂度 Ω 均明显下降。这表明受试者在执行任务过程中神经元同步性活动增强, 与任务状态较平静状态更为复杂、大脑需要调动更多的资源来完成相应任务有关。同时, VaD 患者 3 个描述符任务状态相对于平静状态的变化率明显小于正常老年组, 反映出由于 VaD 患者脑功能的衰退, 从而不能有效地激活相应脑区神经元来完成任。这一结果比单纯使用任务状态下的多通道线性描述符更加灵敏, 而且与先前利用近似熵的分析结果一致^[9]。

因此, 多通道线性描述符可以很好地反映 VaD 患者脑功能状态的改变, 在任务状态下可有效地区分 VaD 患者与正常老年人, 为 VaD 患者脑电特征提取的研究提供了一条新的途径, 所提取的 3 个线性描述符的变化率更有望用于临床 VaD 的早期诊断。

参考文献:

- [1] LOOI J C L, SACHDEV P S. Differentiation of vascular dementia from AD on neuropsychological tests [J]. *Neurology*, 1999, 53(4): 670-678.
- [2] ROMAN G C. Vascular dementia may be the most common form of dementia in the elderly [J]. *Journal of the Neurological Sciences*, 2002, 203/204: 7-10.
- [3] 杜占芳,徐进,郑崇勋. 颜色辨识状态下 ERP 时频特征与认知能力的相关性研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2009, 28(5): 658-661.
DU Zhanfang, XU Jin, ZHENG Chongxun. The study of relationship between cognitive ability and time-frequency characteristics of ERP during color identification [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2009, 28(5): 658-661.
- [4] JEONG J. EEG dynamics in patients with Alzheimer's disease [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2004, 115(7): 1490-1505.
- [5] WACKERMANN J. Beyond mapping: estimating complexity of multichannel EEG recordings [J]. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 1996, 56(1): 197-208.
- [6] WACKERMANN J. Towards a quantitative characterisation of functional states of the brain: from the non-linear methodology to the global linear description [J]. *International Journal of Psychophysiology*, 1999, 34(1): 65-80.
- [7] WACKERMANN J, ALLEFELD C. On the meaning and interpretation of global descriptors of brain electrical activity: including a reply to X. Pei et al [J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2007, 64(2): 199-210.
- [8] YOSHIMURA M, ISOTANI T, YAGYU T, et al. Global approach to multichannel electroencephalogram analysis for diagnosis and clinical evaluation in mild Alzheimer's disease [J]. *Neuropsychobiology*, 2004, 49(3): 163-166.
- [9] 徐进,杜占芳,郑崇勋,等. 基于近似熵的认知能力对事件相关电位的影响研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(10): 1300-1303.
XU Jin, DU Zhanfang, ZHENG Chongxun, et al. Influence of cognitive faculty on event-related potential with approximate entropy analysis [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(10): 1300-1303.

[本刊相关文献链接]

强迫选择实验中的心理测量函数研究. *西安交通大学学报*, 2010,44(6): 104-108.

脑电信号中肌电伪差的实时去除方法研究. *西安交通大学学报*, 2010,44(4):114-118.

利用小波分解和支持向量机的心理意识真实性识别研究. *西安交通大学学报*, 2010,44(4):119-124.

基于独立成分分析和流形学习的眼电伪差去除. *西安交通大学学报*, 2010,44(2):113-118.

心算任务中与自主神经有关的头皮脑电活动研究. *西安交通大学学报*, 2009,43(10):124-128.

脑深部刺激电极的结构优化及其模拟分析. *西安交通大学学报*, 2008,42(12):1537-1540.

基于多导脑电复杂性测度的脑疲劳分析. *西安交通大学学报*, 2008,42(12):1555-1559.

一种医学 X 射线图像动态范围扩展方法. *西安交通大学学报*, 2008,42(12): 1468-1471.

基于信息积累技术的大脑运动意识任务分类. *西安交通大学学报*, 2008,42(12): 756-759.

基于近似熵的认知能力对事件相关电位的影响研究. *西安交通大学学报*, 2008,42(10): 1300-1303.

基于 Fisher 判据时频分析的运动相关脑电特征选择及优化. *西安交通大学学报*, 2008,42(8): 1026-1030.

基于信息积累技术的大脑运动意识任务分类. *西安交通大学学报*, 2008,42(6):756-759.

CT 模体投影解析计算及其在射束硬化校正中的应用. *西安交通大学学报*, 2008,42(6):664-668.

基于脑电功率谱-连续隐马尔科夫链的精神疲劳分级模型. *西安交通大学学报*, 2007,41(12): 1474-1478.

经验模态分解和 Kolmogorov 测度的癫痫预测算法. *西安交通大学学报*, 2007,41(11):1364-1367.

基于样本熵的注意力相关脑电特征信息提取与分类. *西安交通大学学报*, 2007,41(10):1237-1241.

基于功率谱分析的头皮电位和心率变异性关系研究. *西安交通大学学报*, 2007,41(8):991-994.

基于多通道线性描述参数的生理性精神疲劳分析. *西安交通大学学报*, 2007,41(6):737-740.

发射调频信号提高医学超声图像的信号噪声比. *西安交通大学学报*, 2007,41(6):741-745.

基于多导脑电特征的生理性精神疲劳分析. *西安交通大学学报*, 2007,41(2):250-254.

基于 Tsallis 熵和近似熵的认知事件相关电位动态复杂度分析. *西安交通大学学报*, 2007,41(2): 245-249.

(编辑 杜秀杰)