

听觉刺激对稳态视觉诱发电位影响研究*

陈晓蒙¹ 覃玉荣¹ 赵隆¹ 陈妮^{2,3}

(1. 广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004; 2. 广西大学电气工程学院 南宁 530004;

3. 广西医科大学基础医学院 南宁 530021;)

摘要: 基于稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potential, SSVEP)和听觉脑机接口技术目前已成为研究重点。未来的挑战是研究基于视觉和听觉联合统一系统框架的脑机接口技术。多感觉在不同脑区间存在的跨膜整合以及视听双刺激的交互作用,给该技术研究带来较大困难,故研究听觉刺激对枕区 SSVEP 影响很有意义。在闪光刺激频率为 12 Hz, 占空比分别为 5%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、95% 条件下,分别加入 500、1 000、1 500 Hz 的正弦纯音、响度为 50 dB 的听觉刺激,研究听觉对 SSVEP 的变化规律。结果表明,对同一受试者,视听双刺激条件下 SSVEP 随占空比变化依然呈现“窗口”效应,听觉刺激对 SSVEP 影响起增强或抑制作用。此外听觉刺激对 SSVEP 影响出现的占空比“窗口”的位置、数量以及对 SSVEP 增强或抑制作用的程度也因人而异。结果为更好研究视听相互作用机理及其在脑机接口技术应用提供有意义的实验依据。

关键词: 听觉刺激;SSVEP;占空比

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Effect of auditory stimulation on steady-state visual evoked potentials

Chen Xiaomeng¹ Qin Yurong¹ Zhao Long¹ Chen Ni^{2,3}

(1. College of Computer and Electronics Information, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. College of Preclinical Medicine, Guangxi Medical University, Nanning 530021, China)

Abstract: Steady-state visual evoked potential (SSVEP) is widely used in brain interface and medical clinical diagnosis when the lock is locked and the signal-to-noise ratio and transmission rate are higher. The interaction between auditory and visual stimuli has great influence on brain cognition and its application. Therefore, it is very meaningful to study the effect of auditory stimulation on SSVEP. At the frequency of 12 Hz, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% and 95% of the light stimulation frequency, respectively, add 500, 1 000, 1 500Hz sine pure tone, loudness of 50 dB of auditory stimulation, the study of SSVEP changes in the law. The results showed that SSVEP showed a “window” effect with the change of duty cycle in the same subjects, and the effect of auditory stimulation on SSVEP was enhanced or inhibited. In addition, the position, number, and degree of enhancement or inhibition of the “window” of the auditory stimulus impact on SSVEP is also due to the fact that SSVEP is enhanced or inhibited. The results provide a meaningful experimental basis for better study of the mechanism of interaction between brain and brain signals produced by visual and auditory stimuli.

Keywords: auditory stimulation; SSVEP; duty cycle

0 引言

目前基于稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potential, SSVEP)和听觉脑机接口系统已广泛应用于脑机接口研究中^[1]。未来的挑战是研究基于视觉和听

觉联合统一系统框架的脑机接口技术^[2]。多感觉在不同脑区间存在的跨膜整合以及视听双刺激的交互作用^[3-6],给该技术研究带来较大困难。

视觉和听觉是人类两大重要器官,视、听刺激对各自产生的脑电信号交互作用将对大脑认知产生较大影响。有学

收稿日期:2017-03

*基金项目:国家自然科学基金(61161009)、广西自然科学基金(2016GXNSFAA380068)、广西高校中青年教师基础能力提升项目(KY2016LX043)资助

者通过研究 P300 电位幅值和潜伏期,发现大脑在视听双刺激下更容易整合信息,具有视觉为主、听觉为辅的协同补偿和交叉干扰作用^[7]。文献 [8] 以正弦纯音和 Gabor 光栅分别为听觉和视觉刺激进行实验,研究单一视觉和视听双刺激下的事件相关电位的差异波,发现视听不相关任务范式下视听跨模整合现象。还有学者研究发现视听双通道模式的事件相关电位比单一通道模式下的响应更强^[9]。这些研究结果均表明不相关或相关的视听刺激会导致大脑信息整合。

单一视觉刺激下 SSVEP 随光脉冲频率变化外,还随占空比变化且存在“多窗口”效应^[10-11],为 SSVEP 输出峰值选择提供了有效参考。然而当视听双刺激时,SSVEP 随占空比的变化是否依然存在 SSVEP 的“窗口”变化特性,听觉刺激对 SSVEP 起增强或抑制作用,这是值得深入研究的问题,相关研究尚未见报道。

本文拟基于不同光脉冲占空比,分别研究单一视觉和视听双刺激条件下的 SSVEP 变化规律,以探讨听觉刺激对 SSVEP 变化规律尤其是其“多窗口”效应的影响,为更好进行视听信息整合机理及脑机接口技术研究提供有意义的实验依据。

1 方法与实验

1.1 实验采集系统

脑电数据采集由美国 BIOPAC 公司生产的 MP150 多导生理记录系统完成,配有在线、离线分析的可视化软件 Acqknowledge4.0,对收集的脑电数据进行相关的处理分析。

1.2 实验方法

1.2.1 实验对象与环境

实验选择 6 名在校研究生作为受试志愿者,平均年龄 24 周岁。实验对象均无癫痫等相关脑神经类疾病,视力和听力正常。

实验涉及视觉和听觉刺激,为保证最小的外界干扰影响,实验选择在晚上一间安静专用实验室内进行,实验过程中要求受试者佩戴护目镜、耳机及脑电帽,保持身心平静,关闭通信设备,避免电磁干扰。受试者被提前一天告知实验内容,实验当天要求受试者清洗头发,保持头皮洁净,实验前进行 0.5~1 h 的充分休息,以保持实验时精神状态良好。

1.2.2 外刺激条件

视觉刺激为白色闪光,由 DDS 信号发生器驱动 LED 产生,呈现在特制的护目镜上,受试者佩戴护目镜接受闪光刺激。DDS 信号发生器可驱动 LED 产生不同频率、不同占空比的闪光刺激组合。本次实验中视觉刺激频率为 12 Hz,占空比有 9 组,分别为 5%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、95%。听觉刺激由声音编辑软件 Audacity 产生,分别为 500、1 000、1 500 Hz 三种正弦纯音,

响度为 50 dB。受试者佩戴入耳式双通道耳机接受听觉刺激。

1.2.3 实验方案

实验收集受试者视觉皮层枕区左右脑区(左 O_1 、右 O_2)的稳态视觉诱发电位,脑电帽电极安置遵循国际“10/20 系统”以大脑顶区电极点 F_z 为参考正极, O_1 、 O_2 分别为左右枕区的参考负极,公共接地电极为左耳垂。测得 F_z - O_1 、 F_z - O_2 电位分别为左右枕区的脑电数据。

实验过程分别对受试者进行单一视觉刺激、视听同时刺激两种条件的实验。单一视觉刺激实验,受试者佩戴特制护目镜,接受频率 12 Hz、9 种占空比的白色闪光刺激,闪光刺激时长 15 s,刺激前后均保留约 10~15 s 空白刺激时间(即无闪光刺激)用来记录受试者无刺激状态脑电信号。

视听同时刺激,在单一视觉刺激的基础上,15 s 闪光刺激时间内随机加入三段不同频率时长 1 s 的听觉刺激,听觉刺激间隔为 1 s。无论单一视觉、视听同时条件下的实验,均进行 3 组相同刺激条件的重复实验。

2 数据处理

2.1 伪迹处理

常见的脑电伪迹有眼电、心电、肌电以及电磁干扰等,其中眼电成分最为明显。为获取比较纯净的 SSVEP,在采集脑电的同时,将受试者的垂直眼电信号作为一单独的通道,利用 Acqknowledge4.0 自带的一种盲源分离信号处理技术,独立分量分析(ICA)法去除眼电^[12]。

2.2 滤波处理

本实验闪光刺激为 12 Hz,SSVEP 成分三次以上谐波比较微弱,同时为去除 50 Hz 工频干扰,选择 0~40 Hz 巴特沃斯低通滤波器对去除眼电伪迹的脑电数据进行滤波处理。

2.3 功率谱分析

对收集到的 6 位受试者的脑电数据进行相关的伪迹处理,滤波处理等预处理后,将刺激前 15 s 的脑电数据作为对照组,对照组表示受试者无刺激时背景脑电信号(通常被视为背景噪声),将刺激时的 15 s 数据作为实验组,实验组表示接受刺激时的脑电信号(含背景噪声)。分别对每一次实验中的对照组与实验组数据进行功率谱变换,两者作差取绝对值,以基波(12 Hz)、二次谐波(24 Hz)、三次谐波(36 Hz)处的功率值之和作为单次实验的 SSVEP 功率。3 次重复实验数据的 SSVEP 功率作平均作为每组刺激条件下最终的 SSVEP 平均总功率 $P(\bar{v}^2)$ 。对视听双刺激的 SSVEP 做类似处理,区别是听觉刺激时长为 1 s,选取的对照组为听觉刺激前随机的时间间隔为 1 s 的刺激时段。

2.4 归一化处理

因不同受试者实验数据存在差异,为更好研究不同占空比光脉冲条件下听觉刺激对 SSVEP 的影响,将 SSVEP 平均总功率的实验数据进行归一化处理(以所有占空比条

件下的平均总功率之和为归一化因子,单个占空比平均总功率除以该因子作为归一化值),如表 1 所示,同时为直观反应听觉刺激对 SSVEP 的影响,研究 $R = P_{VA}/P_V$, 其中 P_{VA} 为视听双刺激下的 SSVEP 平均总功率; P_V 为单一光脉冲刺激时的 SSVEP 平均总功率。若 R 值大于 1, 说明听觉对原有的单一视觉下的 SSVEP 有增强作用; R 值小于 1, 说明听觉对原有的单一视觉下的 SSVEP 有抑制作用。

表 1 A-F 受试者单一视觉 SSVEP 平均总功率 ($/10^{-9} \sigma^2$)

占空比	A	B	C	D	E	F
5%	1.54	2.81	2.01	1.19	6.28	2.56
20%	2.45	2.87	1.05	1.66	6.12	3.05
30%	1.68	1.72	1.38	1.20	6.42	4.52
40%	2.46	2.08	1.15	1.49	3.23	1.05
50%	3.56	2.4	0.89	1.59	5.58	2.54
60%	3.50	1.65	0.91	1.39	7.37	3.49
70%	2.03	2.14	4.06	1.06	9.95	1.88
80%	2.18	1.31	6.03	8.92	0.89	1.35
95%	0.86	2.02	1.08	0.49	0.45	0.81

2.5 统计学分析

利用 SPSS 22 对视听双刺激与单一视觉的 SSVEP 在每个占空比作配对 t 检验,以单一视觉刺激下的 SSVEP 平均总功率为检验值对每位受试者作单样本 t 检验,以 $P = 0.05$ 为标准检验视听双刺激对 SSVEP 影响的显著性。

3 结果与讨论

图 1 为 A~F 受试者在单一光脉冲刺激下 SSVEP 平均总功率(归一化值)随占空比变化;图 2 为 6 位受试者实验得到的 R 值变化趋势。图 1 表明,在单一光脉冲作用下,6 位受试者的 SSVEP 平均总功率随占空比变化出现了“多窗口”效应,与相关学者 40%~50% 以及 60%~80% 处 SSVEP 响应最大的研究结论相符^[13-15]。

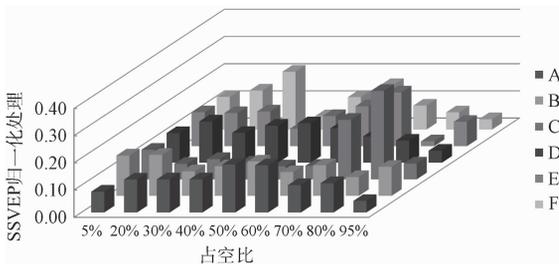


图 1 A~F 受试者 SSVEP 归一化 P 随光脉冲占空比变化

图 2 为 A~F 受试者视听双刺激 SSVEP 归一化 P 随光脉冲占空比变化图。可以看出,视听双刺激条件下,6 位受试者 SSVEP 平均总功率随光脉冲占空比变化也出现

了“多窗口”效应。与单一视觉时的情况相比(对照图 1),“窗口”的位置或有重叠或出现新的“窗口”。

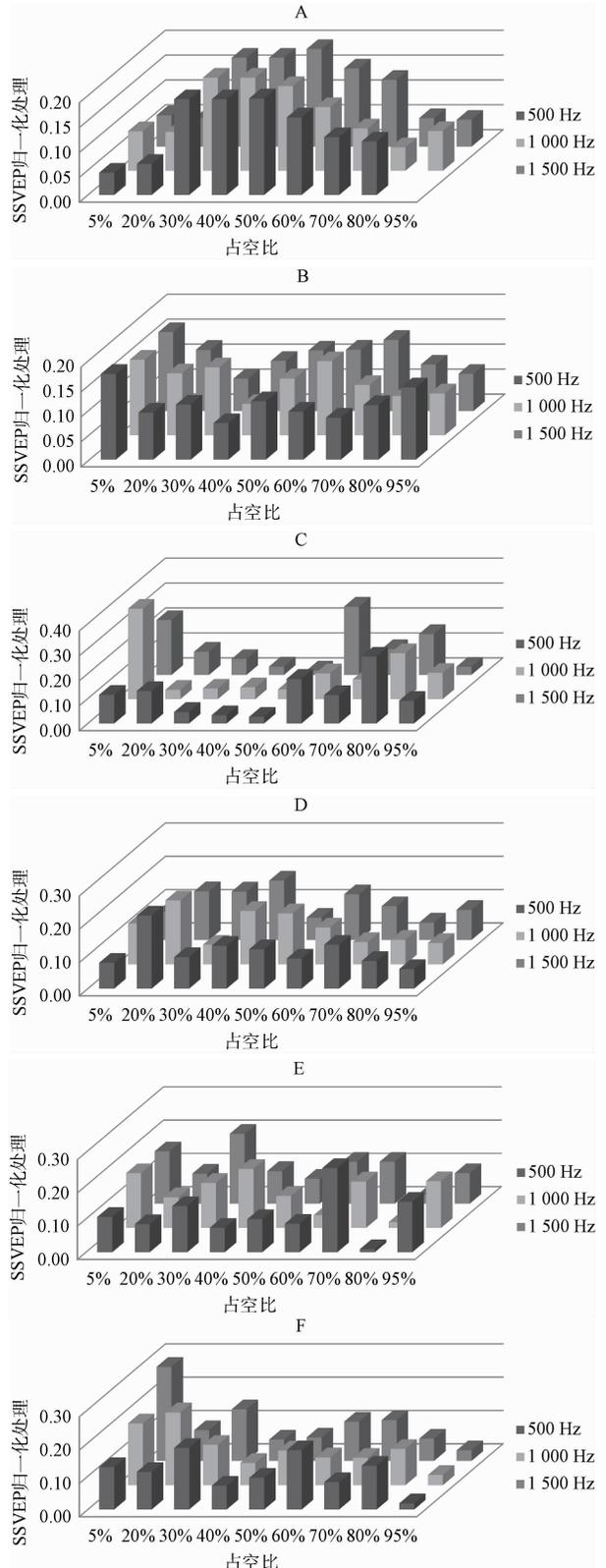


图 2 A~F 受试者视听双刺激 SSVEP 归一化 P 随光脉冲占空比变化

为直观反映听觉对 SSVEP 的影响,绘制 6 位受试者 R 值如图 3 所示。在不同刺激光脉冲占空比条件下,听觉刺激对 SSVEP 的影响起增强或抑制作用,且变化情况因人而异。听觉刺激对 SSVEP 增强作用比较明显的是受试者 D,在 27 个刺激光脉冲占空比和音频组合中,除 5 处的 R 值小于 1 外,其余 R 值均大于 1,说明此时听觉刺激对 SSVEP 起增强作用。听觉刺激对 SSVEP 更多体现出抑制作用的是受试者 A,在 27 个占空比和音频组合中只有 6 处 SSVEP 有增幅作用,其余 21 个组合的 R 值均小于 1,说明此时听觉对 SSVEP 起抑制作用。相关文献研究也表明,听

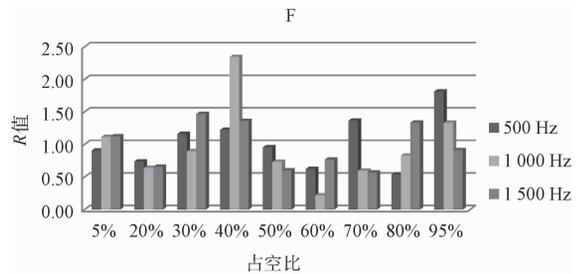
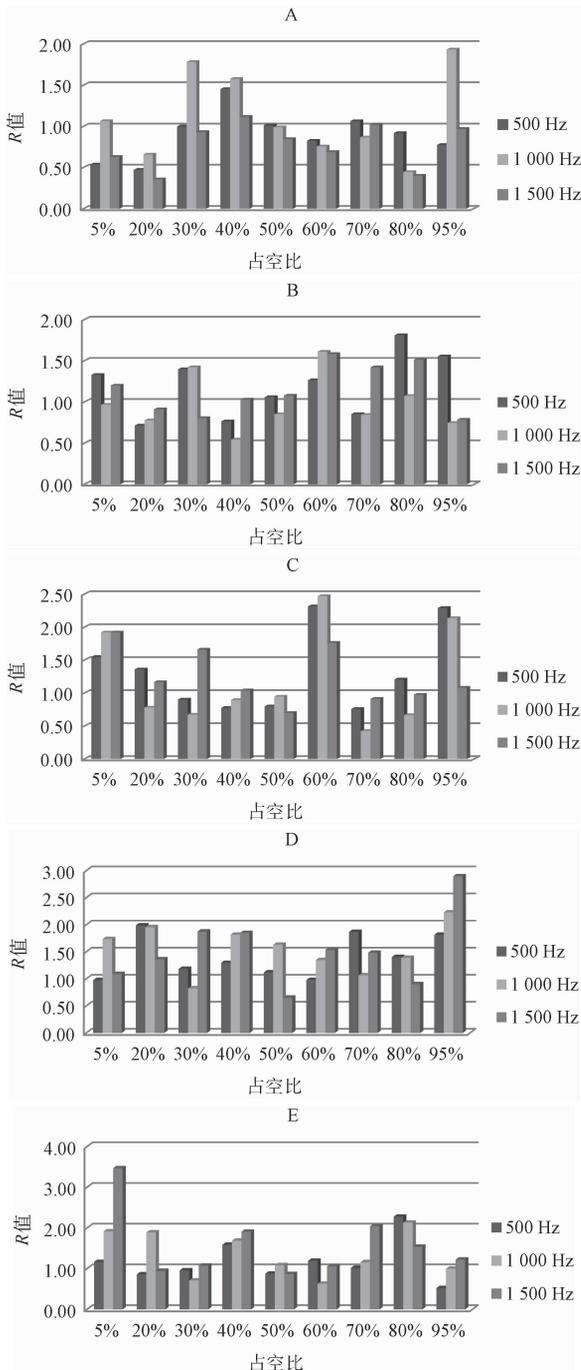


图 3 A~F 受试者的 R 值变化趋势



觉会对视觉皮层的响应产生衰减或增强^[16-17]。

作统计分析前,首先对原始样本数据进行正态分布检验,对不符合正态分布的数据进行适当正态转换(以 10 为底进行对数变换)以便符合配对 *t* 检验条件。对所有受试者在各占空比条件下,作视听双刺激对单一视觉的 SSVEP 配对 *t* 检验,部分占空比下的统计检验如表 2~4 所示。结果发现不是所有占空比条件都有显著性差异,在占空比 20%、60%、80% 时显著差异明显。

表 2 20%占空比下视听双刺激与单一视觉 SSVEP 配对 *t* 检验

	A	B	C	D	E	F	$\bar{x} \pm s$	<i>t</i> 检验
0	2.93	2.92	2.91	2.86	2.87	2.92	2.90±0.03	—
500	2.99	2.95	2.91	2.91	2.89	2.93	2.93±0.04	<i>P</i> <0.05
1 000	2.96	2.94	3.01	2.91	2.90	2.87	2.93±0.05	
1 500	3.01	2.93	2.91	2.94	2.90	2.92	2.94±0.04	<i>P</i> <0.05

表 3 60%占空比下视听双刺激与单一视觉 SSVEP 配对 *t* 检验

	A	B	C	D	E	F	$\bar{x} \pm s$	<i>t</i> 检验
0	2.91	2.96	2.83	2.88	2.85	2.86	2.88±0.05	—
500	2.92	2.95	2.88	2.98	2.89	2.89	2.92±0.04	<i>P</i> <0.05
1 000	2.93	2.93	2.94	2.95	2.96	2.94	2.94±0.01	<i>P</i> <0.05
1 500	2.94	2.93	2.83	2.94	2.87	2.90	2.90±0.04	

表 4 80%占空比下视听双刺激与单一视觉 SSVEP 配对 *t* 检验

	A	B	C	D	E	F	$\bar{x} \pm s$	<i>t</i> 检验
0	2.94	2.88	2.87	2.95	2.97	2.88	2.92±0.04	—
500	2.95	2.94	2.85	2.98	3.05	2.92	2.95±0.07	<i>P</i> <0.05
1 000	3.00	2.98	2.90	2.98	3.02	2.92	2.97±0.05	<i>P</i> <0.05
1 500	3.01	2.95	2.87	3.02	2.99	2.95	2.97±0.06	

对每位受试者以单一视觉时的 SSVEP 平均总功率为检验值,作视听双刺激的单样本检验。结果表明,不同受试者出现显著差异性对应的占空比情况各不相同。比如受试者 A 出现显著性差异的占空比分别在 20%、40%、60%,其中在 20%和 60%处,视听双刺激的 SSVE 平均总功率均低

于单一视觉时的,而在,如图 5 所示 40%处,视听双刺激时的 SSVEP 明显高于单一视觉刺激的;对于受试者 D 出现显著性差异的占空比在 20%、40%和 95%,此时视听双刺激的 SSVEP 均明显高于单一视觉刺激,如所 6 所示。

表 5 受试者 A 的 SSVEP 单样本 t 检验 ($/10^{-9}v^2$)

	检验值	500	1 000	1 500	t 检验	
受试者 A	5%	1.54	0.83	1.65	0.97	
	20%	2.45	1.16	1.62	8.79	$p < 0.05$
	30%	1.68	1.68	3.00	1.57	
	40%	2.46	3.58	3.88	2.76	$p < 0.05$
	50%	3.56	3.61	3.53	3.02	
	60%	3.50	2.90	2.66	2.43	$p < 0.05$
	70%	2.03	2.16	1.76	2.07	
	80%	2.18	2.00	0.98	0.89	
	95%	0.86	0.67	1.66	0.83	

表 6 受试者 D 的 SSVEP 单样本 t 检验

($/10^{-9}v^2$)

	检验值	500	1 000	1 500	t 检验	
受试者 D	5%	1.19	1.17	2.08	1.30	
	20%	1.66	3.31	3.25	2.27	$p < 0.05$
	30%	1.20	1.42	0.99	2.25	
	40%	1.49	1.94	2.71	2.76	$p < 0.05$
	50%	1.59	1.78	2.60	1.04	
	60%	1.39	1.36	1.87	2.13	
	70%	1.06	1.99	1.13	1.57	
	80%	0.89	1.25	1.24	0.81	
	95%	0.49	0.88	1.08	1.41	$p < 0.05$

4 结 论

本文通过设计视听双刺激实验,测得枕区 SSVEP 脑电数据。实验结果表明,对同一受试者,视听双刺激条件下 SSVEP 随占空比变化依然呈现“窗口”效应,听觉刺激对 SSVEP 影响起增强或抑制作用。听觉刺激对 SSVEP 影响出现的占空比“窗口”的位置、数量以及对 SSVEP 增强或抑制作用的程度也因人而异。对此现象,我们推测视听双刺激作用条件下,视觉和听觉皮层神经元相应产生兴奋电冲动而在大脑头皮上产生电位,大脑头皮上的 EEG 脑电信号为兴奋视觉和听觉皮层神经元在大脑头皮上产生的电位的叠加。由于光脉冲占空比,以及听觉频率、响度等外刺激参数的不同选取,使得不同位置、不同数量的听觉皮层神经元细胞产生电冲动而在大脑头皮上产生的电位变化不同,因此产生的 SSVEP 随占空比和音频等参数变化规律也不一样。听觉刺激对 SSVEP 的影响机理需要进行更深入的研究和探讨。本文研究结果为视听相互影响机理研究及其

在脑机接口技术应用提供很有意义的实验依据。

参考文献

- [1] 李鹏海,许敏鹏,万柏坤,等. 视觉诱发电位脑-机接口实验范式研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10): 2340-2351.
- [2] GAO S, WANG Y, GAO X, et al. Visual and auditory brain - computer interfaces [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2014, 61 (5): 1436-1447.
- [3] ZANGENEHPOUR S, ZATORRE R J. Crossmodal recruitment of primary visual cortex following brief exposure to bimodal audiovisual stimuli [J]. Neuropsychologia, 2010, 48(2): 591-600.
- [4] 闫慧芳. 跨模态感觉刺激的脑源分析[D]. 北京:北京协和医学院, 2011.
- [5] 聂旻. 视觉与听觉跨模态转换的认知和应用研究[D]. 上海:上海交通大学, 2010.
- [6] 李文. 隐性视觉注意与听觉跨通路刺激范式诱发的相关事件电位信号分析与识别[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [7] 乔晓艳,彭佳卉. 视听诱发脑电特征提取与大脑认知机理分析[J]. 测试技术学报, 2013, 27(6): 509-515.
- [8] YANG J, LI Q, GAO Y, et al. Task-irrelevant auditory stimuli affect audiovisual integration in a visual attention task: Evidence from event-related potentials [C]. 2011 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME), IEEE, 2011: 248-253.
- [9] KAGANOVICH N, SCHUMAKER J. Electrophysiological correlates of individual differences in perception of audiovisual temporal asynchrony [J]. Neuropsychologia, 2016(86): 119-130.
- [10] HUANG G, YAO L, ZHANG D, et al. Effect of duty cycle in different frequency domains on SSVEP based BCI: A preliminary study[C]. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE, 2012: 5923-5926.
- [11] WU Z. The difference of SSVEP resulted by different pulse duty-cycle[C]. 2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems, 2009.
- [12] 李涛,张方,姜金辉. 基于 HHT 变换和独立分量技术的模态参数识别[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3): 42-45.
- [13] 覃玉荣,龙安,刘伶俐,等. 不同占空比光刺激对稳态视觉诱发电位的影响研究[J]. 电波科学学报,

- 2016,31(2):18.
- [14] LEE P L, YEH C L, CHENG J Y S, et al. An SSVEP-based BCI using high duty-cycle visual flicker[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2011, 58(12): 3350-3359.
- [15] 郭湛超, 覃玉荣, 赵隆. 视觉通路下闪光刺激对SSVEP影响的仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,30(4): 653-659.
- [16] MURRAY M M, THELEN A, THUT G, et al. The multisensory function of the human primary visual cortex [J]. Neuropsychologia, 2016 (83): 161-169.
- [17] MEREDITH M A, ALLMAN B L, KENISTON L P, et al. Auditory influences on non-auditory cortices[J]. Hearing Research, 2009, 258(1): 64-71.

作者简介

陈晓蒙,1989年出生,广西大学在读硕士研究生,主要研究方向为脑电信号处理。

E-mail: sinkmeng@163.com

覃玉荣,1965年出生,毕业于华南理工大学,工学博士,现任广西大学教授,主要研究方向为生物医学信号处理、无线通信等。

E-mail: qyr111@163.com

赵隆,1989年出生,广西大学在读硕士研究生,主要研究方向为脑-机接口应用。

E-mail:zhaolongmx@163.com

陈妮,1982年出生,广西大学在读博士研究生,广西医科大学讲师,主要研究方向为信号分析与处理。

E-mail:lizi0908@163.com