稳态视觉诱发电位及其在视觉选择性注意研究中的应用

陈晓宇¹, 程子健¹, 胡成谥¹, 梁腾飞¹, 刘强^{1,2*}

1. 辽宁师范大学脑与认知神经科学研究中心, 大连 116029;

2. 四川师范大学脑与心理科学研究院, 成都 610000

* 联系人, E-mail: lq780614@163.com

2020-03-30 收稿, 2020-05-18 修回, 2020-05-18 接受, 2020-05-19 网络版发表

国家自然科学基金(31970986)资助

摘要 以固定频率发生周期性变化的视觉刺激信号进入大脑后, 将会诱发一系列与之频率相同的周期性脑电位, 这个电位叫做稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potentials, SSVEP). SSVEP广泛应用于脑机接口和人类认知研究中. 相同频率下, SSVEP的振幅高低与视觉注意资源分配具有相关性, 因此在视觉选择性注意研究中常常使用SSVEP作为表征注意分配的电生理指标. 以SSVEP为指标进行视觉选择性注意研究时, 主要的应用手段是频率标记. 频率标记是指让被标记刺激发生特定频率的周期性变化, 从而诱发与之频率相同的SSVEP, 并以每个刺激诱发的SSVEP的振幅作为注意资源分配水平的指标. 根据研究目的不同, 在频率标记的基础上进一步发展出了快速周期性视觉刺激范式和随机运动点阵范式用于视觉注意的研究. 视觉选择性注意中, SSVEP适用于基于空间的注意和基于特征的注意研究. 今后使用SSVEP对视觉选择性注意进行研究时, 可以试图增加如情绪诱发、奖励和惩罚、工作记忆表征等影响视觉选择性注意的研究变量, 也可以以SSVEP为指标, 建立基于特征的注意和基于空间的注意之间的联系. 此外, 脑机接口研究中开发的针对SSVEP的算法也许可引入视觉选择性注意研究中.

关键词 稳态视觉诱发电位, 视觉选择性注意, 频率标记, 注意资源

脑电波是大脑内部神经元集体放电的结果, 可以反映大脑即时的活动状态, 是一种非常稳定的生理现象. 对脑电波进行记录所得到的结果就是脑电图(electroencephalogram, EEG). 事件或外部物理刺激发生突然的变化会引起一个瞬态的脑电波改变, 叫做诱发电位(evoked potentials), 也称为事件相关电位(event-related potential, ERP)^[1~4]. 当刺激以周期性方式反复变化时, 则可以记录到一个与刺激呈现频率相同的连续周期性电位, 即稳态诱发电位(steady-state evoked potentials). 最早发现稳态诱发电位的是Regan, 他要求被试观察以正弦方式闪烁的单个光刺激序列, 并记录被试脑电. 结果发现, 在被试的头皮后部出现了一个与视

觉刺激闪烁频率有相同振荡频率的连续电位, 并将这种周期性电位命名为稳态诱发电位^[5]. 这种由视觉刺激引起的稳态诱发电位叫做稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potentials, SSVEP). 除了稳态视觉诱发电位之外, 周期性地刺激其他感觉通道也会引起稳态诱发电位. 比如, 以一定频率的声音刺激被试听觉系统, 会产生稳态听觉诱发电位^[6~8].

发现稳态视觉诱发电位以后, Morgan等人^[9]的研究结果进一步表明, SSVEP的振幅会随着视觉注意资源的投入水平发生改变, 即与被忽视的刺激相比, 被注意的刺激所诱发的SSVEP振幅更高, 这项研究第一次将视觉注意和SSVEP进行了联系.

引用格式: 陈晓宇, 程子健, 胡成谥, 等. 稳态视觉诱发电位及其在视觉选择性注意研究中的应用. 科学通报, 2020, 65: 2601–2614

Chen X Y, Cheng Z J, Hu C M, et al. Steady-state visual evoked potential and its applications in studying visual selective attention (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2601–2614, doi: [10.1360/TB-2020-0009](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0009)

人脑每时每刻都要接收大量视觉信息。因为人脑的信息加工能力有限,所以需要选择小部分优先性高的视觉信息做进一步加工并滤除优先性低的信息,这个过程被称作视觉注意(visual attention)^[10]。Posner和Boies^[11]认为选择是注意的基本功能之一。注意选择信息的过程叫做选择性注意(selective attention)。当选择性注意针对的是视觉通道的信息时,就是视觉选择性注意。根据注意选择信息时的基本依据不同,可以对视觉选择性注意进一步分类,其中最具有代表性的三个类别是基于空间的注意、基于客体的注意和基于特征的注意^[10]。SSVEP振幅和注意资源投入之间存在正相关关系,因此,可以使用SSVEP的振幅作为视觉选择性注意的指标。

使用SSVEP来探索视觉选择性注意需要借助特定的手段,这就是频率标记(frequency tagging),即用不同的呈现频率标记不同的项目或者空间位置,并诱发对应频率的SSVEP。因为同一个项目在不同的注意状态下会诱发振幅不同的SSVEP,振幅高低又反映了被试在相应条件下投入到此项目的选择性注意资源,所以在进行多个项目的频率标记时,可以通过比较每个项目在不同条件下的振幅来分析不同条件下注意资源的分配规律^[12,13]。

近年来,SSVEP的应用成为一个非常火热的研究方向,并出现了很多相关的综述性文章,其中最具有代表性的是2010年Vialatte等人^[14]和2015年Norcia等人^[15]发表的综述文章,其内容几乎涵盖了SSVEP的所有方面。虽然它们内容广泛,但是没有特地针对任何一个应用方面进行精细的梳理,包括本文所阐述的SSVEP在视觉注意研究中的应用。此外,在它们发表之后,对SSVEP本身的研究和有关SSVEP的应用方面均取得了进步,这导致以上两篇文章存在一定的时效性问题。同时,直到目前,大部分中文的SSVEP相关综述的主题聚焦于SSVEP在脑机接口(brain-computer interface, BCI)中的应用,虽然SSVEP在视觉选择性注意研究方面的应用已经十分普遍,但是仍然没有中文文献系统介绍这部分内容。本文将在介绍SSVEP近几年取得进步的基础上,重点探讨SSVEP在视觉选择性注意研究中的应用,以填补国内没有相关综述的空白。本文将简要介绍SSVEP及其产生机制,让读者对SSVEP有一个大体认识。在此基础上,对比ERP和SSVEP的特点,分析二者各自在应用上的优缺点,阐明为何SSVEP是一个优秀的视觉选择性注意脑电指标。此外,本文会重点介绍

SSVEP在视觉注意研究中的具体应用方式——频率标记,并通过汇总近年来以SSVEP为指标的注意研究相关文献,分析SSVEP在具体应用中的优劣势。最后,本文将对SSVEP今后在视觉选择性注意领域的应用进行展望,以期给读者启发。

1 稳态视觉诱发电位及其产生机制

1.1 稳态视觉诱发电位介绍

稳态视觉诱发电位是一种有着固定周期和相位的振荡电位,反映了大脑表征周期性视觉刺激的生理机制^[14]。SSVEP的诱发需要合适的快速周期性变化的视觉刺激序列。

诱发SSVEP的周期性刺激模式可以是正弦波形式的或者方波形式的。将这些波形分解,其最小单元是中心对称的单个周期(图1(d))。符合单个周期曲线的刺激呈现方式有多种,常用的方式一般可以分为两个类别:

图1 (网络版彩色)单个变化周期的刺激变化模式。(a)亮度变化(闪烁);(b)图案呈现/消失;(c)图案模式反转;(d)单个变化周期的方波波形

Figure 1 (Color online) Stimulus change modes in a single cycle. (a) Luminance change (flicker); (b) pattern onset/offset; (c) state pattern reversal; (d) square wave for a single cycle

亮度变化(即闪烁)和图案变化。亮度变化指的是在一个周期单元内,刺激经历一个最亮到最暗的可觉察变化(图1(a))。图案变化又可以进一步分成图案模式反转(pattern reversal)和图案呈现/消失(pattern onset/offset)。图案呈现/消失是指在一个周期单元中,图案一半时间呈现,一半时间消失,这种刺激模式和明度变化的刺激模式非常类似(图1(b));图案模式反转指的是在单个周期内,图案呈现模式发生一次反转(或颜色反相,即color inversion)^[16](图1(c))。但是,在实际应用中也不仅限于这些方式,在许多针对面孔刺激的研究中,也会将照片完成一次淡入和淡出的过程作为一个周期单元(前1/2周期中,图片从背景中逐渐显现,后1/2周期中,图片逐渐降低灰度变为与背景同色)^[17-19]。这些刺激呈现单元经过不断重复,构成有固定频率的刺激序列,并被用于诱发对应频率的SSVEP。

规律变化的视觉刺激序列以及环境中的其他噪音信息通过人眼和神经传递到大脑,引起特定神经细胞群体发生同步放电,这些电信号被放置在头皮上的电极记录成为脑电信号。这些脑电信号中包含了复杂的信息,我们将之粗略分为SSVEP信号和背景噪音信号。因为背景噪音信号是相位和频率混乱的随机信号,无特定规律,且可以通过叠加平均来消除,所以提取夹杂在背景噪音信号中的SSVEP可以通过多个试次的叠加平均来实现。为了有效得到流畅的SSVEP波形,需要在实验设计时就将不同试次中相同频率的刺激序列进行相位对齐。因为视觉刺激从人眼进入大脑的时间是固定的,当视觉周期性刺激序列的相位对齐时,产生的SSVEP信号相位也会对齐,进而可以通过叠加平均从背景干扰信号中分离。笔者在实际研究中发现,每个频率条件设置大于50个试次,就可以叠加平均得到比较流畅的SSVEP波形。

在时域上,SSVEP信号表现为一组和刺激呈现序列同频率的波。现有脑电研究表明,SSVEP在时域上的波形可以分成两个进程:从刺激呈现开始到刺激呈现后约500 ms之间为SSVEP波形建立进程;从刺激呈现后约500 ms到刺激停止为SSVEP的主体部分^[15]。此外,有脑磁图研究表明,周期性刺激结束后,SSVEP相关神经振荡还会持续约400 ms^[20]。理论上时域的SSVEP波形主体部分应该类似正弦波,但是实际上低频刺激诱发的SSVEP波形是复杂的,只有在刺激呈现频率大于10 Hz的时候,SSVEP波形才会接近正弦曲线^[12]。

脑电数据的分析中,需要对脑电信号进行关键特

征提取。SSVEP主要特征(characteristics)有3个,分别是频率、振幅和相位^[21]。针对健康被试,SSVEP的相位取决于视觉刺激序列的相位,在视觉选择性注意研究中,这方面的研究比较少且意义有限。SSVEP的频率与诱发它的刺激序列的频率相同,将SSVEP的时域波形转换为以振幅为纵轴的频域,可以在频域看到稳定的特征峰,这个特征峰正位于刺激频率上。值得注意的是,以图案模式反转方式呈现的刺激诱发的SSVEP频域特征峰在刺激频率的二倍频上^[15]。除了上述主要特征峰,频域上还存在着SSVEP相关的谐波特征峰。谐波特征峰出现在刺激频率的整数倍频上(图2),谐波的产生可能是因为刺激一般以方波序列来呈现,或是因为从视觉刺激进入视觉系统直至产生SSVEP的这个过程本身就是非线性的^[15]。一般情况下,谐波的特征峰低于主特征峰,但是个别情况下(如1 Hz低频闪烁时)谐波的特征峰会比主特征峰更高。

在注意研究中,最重要的SSVEP特征是它的振幅,因为振幅与注意资源投入相关。SSVEP的振幅可以定义为一段时间内的SSVEP信号经傅里叶变换转化为频域后,其主要频率特征峰的高度(图2(c))。SSVEP的振幅受到多种因素的影响。首先,个体的差别知觉阈限会影响SSVEP的产生。当周期性变化的刺激无法引起被试的差别感受时,是无法引发SSVEP的^[15]。其次,刺激物理属性上差异也会导致SSVEP振幅不同,比如相同的刺激亮度和刺激方式下不同颜色的刺激所诱发的SSVEP振幅并不相同^[22]。再次,认知因素对SSVEP的振幅也有影响,比如对刺激模式的适应会导致SSVEP振幅下降^[23]。最后,一些生理因素也会影响SSVEP,比如疾病、药品和疲劳等^[24-27]。此外,不同刺激频率的序列诱发的SSVEP振幅也存在显著差异。一项研究系统地探索了1~100 Hz闪烁刺激诱发的SSVEP,发现小于90 Hz的闪烁都可以引起SSVEP。同时,同等刺激强度下,在10、20、40、80 Hz上发现了相比周围频率更高的振幅,研究者认为这个现象反映了SSVEP的电生理机制^[28]。

1.2 SSVEP的电生理机制和神经机制

SSVEP的电生理机制仍然存有争议。目前,解释SSVEP产生的代表性理论有两种:相位重排理论(phase reset model)和叠加理论(superposition hypothesis)。

相位重排理论认为,大脑接收到刺激信号后,会通过改变固有脑节律的相位来表征这个刺激^[28]。它将

图2 (网络版彩色)SSVEP的诱发及其特点。(a) 给被试呈现以3 Hz正弦形式闪烁的图案呈现/消失序列,并记录其脑电信号;(b) 记录到的脑电数据进行试次间叠加平均后,所得到的脑电信号类似正弦波;(c) 将时域的SSVEP数据进行傅里叶变换得到频域的SSVEP,发现在频域上,与刺激呈现频率相同的3 Hz位置上有特征峰,在6和9 Hz上有谐波特征峰

Figure 2 (Color online) SSVEP evocation and its characteristics. (a) Present a 3 Hz sinusoidal pattern onset/offset flicker to participant and record the EEG signals. (b) Overlay and average signals, so that we get the SSVEP waveform in time domain which is like a sine wave. (c) Convert the time domain SSVEP to frequency domain using the Fourier transform method. There is a characteristic peak in 3 Hz which is the flicker's frequency, and 6 and 9 Hz have harmonic characteristic peaks

SSVEP现象解释为在大脑接收到周期性刺激时,大脑的固有震荡发生相位调整,这些调节了相位的固有震荡共同合成一个新的节律来表征这个周期性刺激。因为与皮层固有震荡相关联,受限于固有震荡的性质,SSVEP振幅受刺激强度的影响程度在不同刺激频率之间存在差异,应该存在一个振幅受到刺激强度影响最大的最适频率^[29]。如上文所述,同等条件下,在刺激呈现序列的频率为10、20、40、80 Hz时,会产生相对于其他频率更高的振幅,表明大脑对这几个频率更加敏感,也就是说这几个频率就是最适频率,这个现象支持了相位重排理论。最近有综述完整地论述了这个问题^[30]。

叠加理论认为,稳态脑电反应是一系列瞬态ERP的线性叠加,SSVEP的振幅和刺激强度是完全线性的,不存在对刺激强度更加敏感的最适频率^[31]。其主要证据是低频刺激诱发的SSVEP波形可以分解为多个类似ERP的波形,同时单个ERP通过计算机模拟叠加,可以得到类似SSVEP的波形^[32,33]。

这两种理论各自都能解释一部分现象,最近的研究趋势是将这两种理论进行融合。一些研究认为,在频

率较低的频带上,SSVEP的产生主要是事件诱发电位的叠加在起作用。而在较高的频带上,事件诱发电位无法足够敏锐地表征刺激时,相位重排则成为表征闪烁刺激的主要方式^[34]。

在视觉选择性注意研究中,相比于电生理机制,认识SSVEP的神经基础更加重要。大部分研究认同SSVEP源自枕叶皮层,尤其是初级视觉皮层。一些fMRI或PET与EEG的联合研究发现,频率表象主要激活V1区^[35]。一项应用颅内EEG手段的研究发现,闪烁刺激的频率表象甚至以网膜定位的方式出现在V1区^[36]。因此,在注意研究中,一般认为SSVEP反映了注意对初级视觉皮层的作用。SSVEP产生的脑区和刺激所用的材料也有关系,明度变化的刺激和图案模式反转的棋盘格刺激所激活的脑区并不相同,单色闪烁刺激有着更小的激活区域,其激活范围主要局限在视觉区,相比而言,图案模式反转的棋盘格刺激会激活更广泛的脑区,并且激活最大的脑区出现在中部颞叶^[37]。

此外,一些脑成像功能连接方面的研究表明,SSVEP的产生可能与不同脑区之间的长距离信息交流有关。视觉皮层和额叶之间的功能连接强度,视觉皮层

到额叶的信息流强度都可能会影响SSVEP的诱发。虽然这些研究没有得到确定的因果关系,但仍旧对理解SSVEP的脑机制有重要意义^[38-40],也许可以帮助理解为何作为额叶功能的注意可以在源于枕叶的SSVEP上体现。

2 视觉选择性注意研究中的SSVEP

视觉注意就是从进入视觉系统的大量信息中选择一部分进行加工并进入意识的过程。视觉注意过程受到自上而下的认知因素和自下而上的刺激因素影响。认知因素包括已有知识、期待和目标,受认知因素驱动的注意叫做自上而下的注意。而刺激因素主要和刺激本身的特点有关,比如刺激的凸显程度。由刺激因素引起的注意叫做自下而上的注意^[41]。视觉注意研究的核心问题是注意如何进行选择,即视觉选择性注意的问题。视觉选择性注意需要自上而下的注意和自下而上的注意同时参与^[42],其研究焦点也经过了不断变迁,早期人们探索的主要问题是注意选择发生的阶段,聚焦于究竟是先选择后加工还是先加工后选择的问题,后来研究焦点转移到注意进行选择的基本单元是什么。在视觉选择性注意研究中,研究者只有选择客观灵敏的指标,才能更好地衡量注意资源的分配情况。

在探索视觉选择性注意的过程中,使用最早也最重要的指标是行为指标,其中最具有代表性的是反应时(reaction time, RT)和正确率。当被试注意某个项目时,就会在该项目发生改变的时候做出更快更准确的反应,行为指标上表现为反应时缩短和正确率提高。反应时又是二者中更常用的指标。反应时指的是从刺激呈现到被试做出反应动作之间的时间间隔。这段短暂的时间里发生了许多生理和心理活动,包括感觉器官感知到刺激、大脑加工信息、神经传导及肌肉反应等^[43]。在认知神经科学研究中,研究者致力于直接地探索大脑活动,反应时和正确率作为对大脑活动的间接反映,掺杂了太多大脑活动之外的过程,难以满足研究者需求,所以需要找到可以尽量单纯地反映大脑加工信息过程的指标,在此需求下,一些可以直接反映认知过程中大脑活动的生理指标受到重视。

2.1 视觉选择性注意的电生理指标: ERP还是SSVEP

相比于行为指标,脑电信号可以更加直接地反映大脑活动,因此成为认知神经科学中常用的研究手段。

研究发现,一些ERP成分对视觉选择性注意中的注意分配十分敏感,可以用作衡量注意资源的生理指标^[1-4]。

被普遍用作视觉选择性注意指标的ERP成分是P300和N2pc。P300指的是刺激呈现后出现的第3个正波,一般潜伏期为300~350 ms,是一个出现稍晚的内源性成分,对注意资源分配敏感,被广泛应用在基于空间的注意研究中。通常P300的使用有比较严格的限制,需要使用Odd-ball范式,控制目标刺激出现的比例在20%左右才可以获得明显的P300成分^[44]。N2pc是一种与空间选择性注意密切相关的ERP成分,反映了对任务相关刺激进行的空间选择性加工,它是一个出现在目标刺激的对侧后部头皮区域的负波,潜伏期为200~300 ms,其波幅常被作为在目标刺激上注意资源分配量的指标。在应用时,N2pc需要使用视觉搜索范式和线索-目标范式来诱发^[45]。

虽然ERP和SSVEP一样,振幅和注意资源投入成正比,并被作为视觉选择性注意的脑电指标,但是其在具体应用上会受到很多因素的制约。首先,从范式上讲,P300需要目标刺激以Odd-ball的方式出现,而N2pc则只能通过有限的几个视觉搜索范式和线索-目标范式获得。其次,在注意研究中,往往要求目标和分心物同时出现并诱发对应的ERP,这种情况下比较两者注意资源分配才有意义。为了使目标和分心物可以同时诱发出对应的ERP,必须利用左右脑在处理视觉信息时的相对独立性,使目标刺激和分心刺激呈现在异侧视野,在不同的脑半球加工,才能获得目标和分心物分别在两侧脑半球上诱发的ERP的差异波。如果刺激全部出现在同侧视野或者出现在视野中线上,那么就会因为目标和分心物诱发的ERP发生混淆而无法实现比较。这种受到严格限制的刺激呈现方式制约了ERP在注意研究领域的使用,使得ERP仅仅能粗糙地反映注意的空间分布,并引入了大脑半球差异这一额外变量。

相比于ERP指标,SSVEP指标在应用中受到的制约更少。区别于ERP需要使用固定的范式和呈现方式来获得,SSVEP在注意中的应用方式则是一种思路——让空间位置或者项目以特定频率周期性序列地呈现,进而在脑电上收集到对应频率的SSVEP,这就相当于给特定位置或项目打上了一个唯一的频率标记(frequency tagging),从而建立外在刺激和内在脑电反应之间的联系。通过比较不同条件下同一个项目诱发的SSVEP振幅就可以比较被试在这些条件下对这个项目的注意资源的投入。因为SSVEP的频率和闪烁刺激的频率完全

一致, 所以就算多个刺激距离很近, 只要它们的频率不同, 收集到的SSVEP信号在频域上就会产生分离的特征峰, 这种应用上的灵活性大大拓宽了脑电指标在注意研究中的使用范围。

ERP属于诱发电位, 是单个刺激突然变化引起的短暂脑电活动, 这意味着它只能反映注意在刺激变化这个特定时刻的分配, 是一种对连续的注意状态变化的瞬时取样, 而无法对连续的注意状态进行连续监测。当需要探索连续注意分配的时间动态时, 一般采用设置时间梯度的行为指标。但是这种方法得到的注意时间动态仍然不够连续, 并且有着行为指标固有的缺点, 比如反映的内在过程复杂。SSVEP是一个对注意敏感的持续性的波, 只要对每个项目对应的标记频率进行滤波, 就可以得到频率标记的振幅随着时间的变化过程, 进而能够通过振幅的连续变化来描述注意的动态变化^[46-48]。

实际上, SSVEP和ERP所反映的注意阶段很可能也存在差异。一项研究使用ERP和SSVEP两种指标探讨了在什么尺度上注意焦点会发生分裂, 发现当两个目标处在同一象限时, SSVEP没有体现出注意焦点分裂的特点, 而事件相关电位P300则很明显地出现两个分离的波峰。两种指标在结果上的不一致性暗示SSVEP和ERP所反映的注意加工阶段并不相同。SSVEP反映的过程可能更靠近表征范围更广的知觉阶段, 而无法反映靠近注意后期的精细选择过程^[49]。但是, 目前的实证性结果也不能够完全支持SSVEP只反映初级视觉皮层上发生的注意早期活动这一观点。虽然如上文所述, 产生SSVEP的脑区主要在初级视觉皮层, 并且随着诱发SSVEP的材料发生变化, 也可能存在额叶上的激活。但一项fMRI研究也发现, 额叶也存在与SSVEP相关的脑激活^[50], 这表明SSVEP可能有反映注意更后期阶段的潜能。总的来说, 可以认为SSVEP直接反映了视觉选择性注意初级阶段的活动, 同时可以间接反映视觉选择性注意中高级脑区对低级脑区的调控。当需要探讨更高级的注意加工阶段时, 使用ERP作为脑电指标更加合适。

综上所述, 相比于行为指标, 脑电指标有着更高的灵敏度, 并且可以更加直接地反映大脑活动。而在脑电指标中, 相比于ERP指标, SSVEP的应用范式更加灵活, 对刺激呈现的空间分布限制也更小, 同时因为它是一个持续性的波, 其振幅对注意的变化十分敏感, 所以通过分析其振幅随着时间的变化, 就可以探索注意资源投

入随时间的变化过程, 这是ERP很难做到的^[51]。

2.2 SSVEP在视觉选择性注意中的应用方式——频率标记

在视觉注意研究中, SSVEP已经成为一种被广泛使用的脑电指标。在视觉注意中应用SSVEP, 最重要的是理解SSVEP的应用方式和SSVEP与具体应用相关的特性。

影响SSVEP应用的特性很多。首先, 用于诱发SSVEP的刺激序列频率对SSVEP的波形和波幅有重要影响。在视觉注意的研究中, 研究者常常使用的是5~25 Hz的低中频带, 因为这个频带的SSVEP信号对于注意的变化更加敏感^[12]。一般来说, 这个频带上的SSVEP的振幅与注意资源投入量成正比。但是这种正比关系并不总是成立。一些实验结果表明, 当刺激项目以alpha频带(8~13 Hz)的频率闪烁的时候, 被注意项目的SSVEP振幅反而低于非注意项目, 或者二者差异很小^[15,52], 越是接近个体固有alpha带中心, 这种负相关越强^[52,53]。更加系统的研究表明, SSVEP的注意效应在80 Hz以下的频率带上都会出现, 但是只有在theta和gamma频带上, 注意量和SSVEP幅值才存在正相关关系, 在alpha频带则是负相关^[54]。所以当刺激以alpha频带上的频率发生闪烁时, 就需要谨慎地解释SSVEP的振幅和注意之间的关系。除此之外, 谐波振幅也受注意影响, 当目标频率的振幅变化不明显时, 谐波的变化也可以作为注意变化的依据^[54]。除了频率, 刺激强度也可以显著影响SSVEP的产生和振幅。实验设计中, 只有使项目的周期性变化可觉察, 同时使刺激的物理强度尽量一致, 才能在诱发出SSVEP的同时保证不同项目诱发的振幅有可比性。最后, SSVEP作为一个注意分配指标, 在具体应用中除了最常用的振幅之外, 也有人用信噪比作为指标。所谓信噪比, 一般指的是目标频率振幅高于其周围小范围内频率的振幅平均值的百分比。

频率标记的技术特点决定了应用SSVEP的具体方式。频率标记的关键操作是使特定项目发生周期性可觉察的变化, 并通过监测相应频率SSVEP作为其脑电标记。笔者按照视觉研究中频率标记的嵌入方式, 将之分成两类, 即空间嵌入频率标记和时间嵌入频率标记(图3)。空间嵌入频率标记是指, 当项目或者位置在空间上有明确的界限时, 多个项目或空间以不同的频率发生周期性变化, 以此方式打上特定的频率标记。Morgan等人^[9]的空间注意实验就是空间嵌入的典型应用。

图 3 (网络版彩色)空间嵌入的频率标记和时间嵌入的频率标记。(a) 空间嵌入频率标记。图示为单个刺激在同一位置以5 Hz闪烁。(b) 时间嵌入频率标记。图示为两个刺激, 棋盘格刺激每秒出现4次, 太阳刺激每秒出现1次。虽然两种呈现方式遵循的闪烁波形相同, 但是时间嵌入模式下, 在1 s时间内, 太阳作为一个引起注意的特殊刺激出现了1次, 并且这个呈现模式在之后的每一秒重复出现, 最终诱发了1 Hz的SSVEP。此模式的刺激呈现方式将最终引起脑电频域上出现5和1 Hz两个特征峰

Figure 3 (Color online) Spatially nested and temporally nested frequency tagging. (a) Spatially nested frequency tagging. A single stimulus is presented in the same place and flickers with 5 Hz. (b) Temporally nested frequency tagging. 2 stimuli are nested in one 5 Hz sine wave. One of them is presented 4 times a second sequentially and the other is presented 1 time a second. This mode will evoke a 5 Hz SSVEP and a 1 Hz SSVEP simultaneously

和空间嵌入相对的是时间嵌入频率标记。时间嵌入主要是快速周期性视觉刺激(fast periodic visual stimulation, FPVS)(图3(b))。FPVS指的是同一空间不同项目以一定规律快速地等时间间隔地序列呈现。这样做可以使不同项目在空间上一致, 但时间线有差异, 这种时间线上的差异使得不同项目以不同的频率呈现, 进而诱发不同频率的SSVEP。这个范式在视觉选择性注意研究中并不常用。Smout和Mattingley^[55]在探讨空间注意是否可以调节被可见刺激掩蔽的阈下刺激表象时, 就联合使用了空间嵌入和FPVS技术。他们分别用不同的频率标记了左右视野的空间位置, 并在这些刺激中周期性地掺入了干扰。如果被试注意到了某一侧空间上的干扰, 那么将会在干扰物频率对应的脑电频率上出现一个特征峰。

2.3 SSVEP在视觉选择性注意研究中的具体应用

视觉选择性注意按照进行选择的依据, 可以分为基于空间的注意、基于客体的注意和基于特征的注意等^[10]。SSVEP非常适合用于研究基于空间的注意。同时, 借助频率标记, 研究者也开发出了可以用于研究非空间注意的范式, 拓宽了脑电指标在视觉选择性注意研究中

应用范围。接下来本文将从基于空间的注意和非空间注意(主要是基于特征的注意和基于客体的注意)两个方面来介绍SSVEP在视觉选择性注意中的具体应用。

2.3.1 基于空间的注意

最早提出的视觉注意基本单元是空间位置, 所以也将这种注意叫做基于空间的注意。这一类注意的研究主题围绕着注意焦点的特征展开, 比如注意焦点的形状、注意焦点的数量、注意的空间分布等。基于空间的注意理论中, 最有影响力的是注意焦点的聚光灯模型。该模型认为, 注意就像聚光灯一样, 先进行位置的选择, 之后对注意位置的信息进行知觉加工。基于空间的注意的研究一般采用空间线索化范式, 在该范式中, 刺激呈现在视野中不同位置, 并采用外源性线索(如边框闪烁)引导被试将注意焦点投射到某个位置(线索化)。一般来说, 线索化的位置会比未线索化的位置有更好的注意加工, 表现为更短的反应时和更高的正确率^[45]。与之不同, 使用SSVEP进行注意的空间分配研究时, 只需要使不同的空间位置以不同的频率闪烁, 就可以通过其诱发的SSVEP振幅来反映其注意资源分配。Müller和Hübner^[56]在一项探索注意空间分配灵活性的研究中, 使用不同频率标记了两个均位于视野中央的

项目,它们位置重叠但大小不同.要求被试的注视点一直保持在中央的较小项目上,并注意重叠的较大的项目.结果发现,中央较小刺激会发生抑制,而对较大刺激的注意资源分配会增加,虽然此时中央较小的刺激一直处于被试的视觉中心.这个结果表明注意资源的空间分配可能很灵活,甚至可能变成以中央注视点为圆心的中空环形.在空间定位方面,SSVEP不但优于ERP,相较于其他脑成像技术(如fMRI)也有其独特优势.其他脑成像技术根据视野位置和皮层激活之间的拓扑关系来进行空间定位,受限于所用技术的空间精度和数据分析方法,其空间定位仍然比较粗略,只能分离界限非常明确的大范围视野.而SSVEP跳脱出了拓扑关系的逻辑,做到了当被频率标记的多个项目处于同一个1/4视野时,仍然可以很好地分离这些项目的频率标签^[57],同时相比于其他方法,频率标记的操作也更简单.因此可以说,对于大部分基于空间的注意问题的探讨,SSVEP是最优指标.

除了空间定位精细,SSVEP的另一个优势是其波幅在时域的变化可以灵敏反映注意变化的连续的时间动态.最近比较典型的应用是Li等人^[46]使用SSVEP的方法探索了返回抑制现象(inhibition of return).返回抑制指的是当一个空间位置被线索化后,一开始会使得被试对紧接着出现在该位置上的目标刺激的反应时缩短,但是当线索和目标呈现之间的时间间隔超过220 ms,则会发生对目标刺激反应时的延长,表明在220 ms以后,目标位置由注意激活状态变为了注意抑制状态.行为实验中,一般采用空间线索范式,设置多个线索-目标呈现时间差(cue-target onset asynchrony, CTOA, 即线索和目标之间的时间间隔),通过绘制CTOA为横轴、对应CTOA下被试对目标的反应时为纵轴的曲线来反映返回抑制的时间进程.在本研究中,作者也采取了标准的空间线索范式.和一般行为实验的区别是,他们用频率标记了目标可能出现的位置,并且将CTOA设置为一个固定的时间区间(1400 ms),通过在这段时间内被频率标记的空间所诱发的SSVEP振幅变化来反映此位置注意的变化.结果表明,SSVEP的振幅随时间的动态变化与之前的行为研究类似,也表现出明显的两阶段现象,并且由激活转化为抑制的时间节点在200 ms左右,短于之前行为研究所得220 ms,减少的20 ms很可能就是反应阶段所需的时间.这个研究的优势是指标更客观,时间进程更细致,同时也因为大大减少了需要设置的条件数量进而减少了总试次数

量,然而这个研究也有些无法避免的缺点,这些缺点也是SSVEP作为指标时难以避免的缺陷——SSVEP实验和行为实验的内在加工过程可能并不完全相同.在传统的行为返回抑制实验中,因为每个试次的CTOA具有不确定性,被试必须尽快将注意脱离线索化位置,这可能会让被试更加警觉,对线索化位置的抑制也可能更强.而此研究将CTOA控制在了一个相同的时间上,这必然使得被试的注意更加涣散,并存在一个预期效应,导致注意不会那么集中和灵活.总体上,这个研究确实更加客观精细地探究了空间注意的时间进程和返回抑制的过程,但是行为实验和脑电实验所得到的结果也许并不是完全等价的.

2.3.2 非空间注意

视觉选择性注意研究不单单是针对基于空间的注意,也包括一些非空间注意,典型的是基于特征的注意和基于客体的注意.当要求被试注意几个空间上重叠的客体时,被试可以对要求注意的客体进行加工,而忽视重叠的其他客体,这就是基于客体的注意^[58].基于客体的注意理论认为,注意选择可以基于客体本身进行,而不考虑空间位置,这就要求在实验中排除空间因素,这也是其和空间注意研究最大的不同.客体的组成基本单元是特征,实际上注意的基本单元也可以是特征,即基于特征的注意.基于特征的注意理论认为,单个特征或者几个特征的组合都可以作为单位被注意系统选择性加工.基于特征的注意研究所关注的内容,除了是否存在特征注意之外,还有基于特征的注意本身的特点,以及多特征捆绑客体的注意过程等等.

Müller等人^[59]通过创新的随机运动点阵范式(random dot kinematograms, RDK)开创了使用SSVEP进行基于特征的注意研究的先河.他们在同一空间位置里混合放置颜色不同(红/蓝)的两种随机运动点阵,从而消除实验中的空间因素,并施加不同的频率标记来探讨每种点阵的注意分配.实验中要求被试在随机运动的目标色点阵发生一定比例同向运动时做出反应,这个设置延长了特征注意维持的时间,进而达到了使用SSVEP对基于特征的注意进行探测的目的.

但是,RDK范式探索特征注意也有一定的局限性.本质上,该范式中不同项目具有不同的呈现频率,所以被试也可能通过频率来进行特征搜索.同时,特征注意本身是一个很快的过程,RDK范式让这个过程中持续进行,因此得到的结果也可以被解释为被试注意目标特征的时间更长,而注意非目标特征的时间更短,最终引

起注意累积效应的差异。比如, Andersen等人^[60]使用RDK范式探索了对双特征捆绑客体的基于特征的注意。实验以两个特征维度(颜色和方向)捆绑而成的4种客体(红色/蓝色×竖直/水平)为材料, 要求被试注意由特定特征值捆绑而成的客体(如红色竖直)。结果发现, 当分心物和目标在某个特征维度有相同的特征值时(如红色水平、蓝色竖直), 此分心物诱发的SSVEP振幅高于完全没有相同特征的分心物(如蓝色水平)诱发的SSVEP振幅。虽然作者认为此结果支持了单个特征维度的激活是平行的这一观点, 但是如上文所述, RDK范式使得特征注意过程持续性进行, 那么错误注意发生的次数也会相应增加。在对这种由两个特征定义的目标进行搜索的时候, 被试更容易对和目标有相同特征的分心物发生错误的注意, 而较少误判无相同特征的分心物, 最终导致总体上与目标有相同特征的分心物刺激激活提高。

也有研究以SSVEP为指标, 研究构成同一客体的不同特征维度在进行基于特征的注意时的特性。如一项最新的研究采用了一种可以同时标记一个客体上的两种不同特征的新频率标记方法, 发现当要求被试注意一个双特征捆绑客体的单个特征维度时, 会引起这个客体上目标特征维度的激活升高, 而非目标特征维度的激活下降。这表明, 就算两个特征共同定义了一个客体, 进行基于特征的注意选择时仍然是以特征为基本依据, 而不会考虑这个特征所属的客体。当同时注意这个客体上的两个特征时, 两个特征SSVEP激活的平均值会降低, 表明在特征整合为客体时, 可能需要消耗一部分注意资源, 也可能是两个特征维度发生了竞争^[61]。

除了对注意空间焦点内的项目进行探索, 注意空间焦点之外发生了什么也是重要的研究内容。使用行为实验探讨注意空间焦点之外的情况时, 常常需要设立大量探测空间焦点内项目的迷惑性无效试次和较少比例探测空间焦点之外项目的有效试次。为了得到足够数量的有效试次, 试次总数将大大增加, 这无疑是费时费力的, 且大大增加了被试的疲劳程度。此外, 被试因为知道有可能被问及空间焦点之外的项目, 所以可能策略性地将空间焦点扩大, 或者偶尔注意外周视野, 这使得外周视野实际上不是完全任务无关。应用SSVEP能够避免这些问题。将外周无关区域或者无关项目进行频率标记并以其SSVEP的振幅作为注意分配指标, 就可以在实验无须设置无效试次的基础上, 让外周刺激真正地任务和任务无关, 也排除了猜测等无关因素。

Painter等人^[62]和Forschack等人^[47]就利用SSVEP这一特性探讨了在空间注意焦点之外的目标特征是否会引起注意, 并得到了肯定的结果。这些发现引领了随后一系列的研究^[63-65]。有趣的是, 最近研究发现, 在虚拟的三维空间中进行基于特征的目标搜索时, 空间注意焦点之外的目标特征也有更高的SSVEP的激活^[66]。可以说, SSVEP的应用使得外周视野的注意分配不再是一个难以客观测量的盲区。

SSVEP虽然可以解决基于特征的注意研究中的很多问题, 但是却无法很好地直接探索基于客体的注意。基于客体的注意研究中最常用的研究方法是要求被试注意几个空间上重叠的客体。很多研究也采用另一种方法: 让被试注意整合在同一个客体上的两个目标, 并将这种条件下的行为结果和只注意同一个客体上的单个目标时的行为效率进行比较, 结果通常是注意同一客体上两个目标的加工效率和注意单个目标条件下相同, 这支持了注意的单元可以是客体的假设^[58]。将客体注意的范式移植到频率标记的思想下有很多难以逾越的困难。客体注意研究要求消除客体之间的空间差异, 需要将多个客体进行空间上的重叠。在这种限制下, 如果我们使用不同的频率来标记不同的客体, 那么重叠区域的频率将无法界定。如果我们仅仅标记不重叠的位置, 因为我们使用的是比较低的频率, 肉眼很容易看出不同频率的区别, 这时候频率就变成了区分客体的一个特征, 那么被试为了降低任务难度, 可能会通过观察频率特征来选择客体, 这样的话就是一种特征选择而不是客体选择。同样地, 如果是在一个客体上寻找特定目标的范式, 如果我们将客体内部的不同项目进行频率标记, 那么这些频率标记可能会将这个客体割裂成多个部分, 被试就无法将多个项目整合为一个整体来注意, 这样就不再是基于客体的选择, 而是被归类为基于特征的选择。

3 展望

由周期性呈现的视觉刺激诱发的SSVEP受到注意资源分配的影响, 因此可以作为一个指标来衡量注意分配。在视觉选择性注意研究中, 对SSVEP的应用通过频率标记来实现。频率标记后的空间位置或者项目可以诱发对应频率的SSVEP, 进而精细地反映被试对不同项目或者不同空间位置的注意资源分配及注意状态变化。上文已经比较全面地介绍了近年来使用SSVEP方法进行视觉选择性注意研究的进展和SSVEP在应用

中的优势和局限性,同时也介绍了SSVEP的电生理机制及其与ERP的差异.接下来,我们将对未来SSVEP在视觉选择性注意研究中的应用趋势做进一步展望.

目前,SSVEP已经可以作为研究视觉选择性注意的一个比较完善的指标,并有诸多实际应用的例子,我们可以利用已有SSVEP研究范式来进一步探索影响视觉选择性注意的因素.比如,情绪状态对视觉选择性注意的影响.研究发现,特质焦虑高的被试被诱发负面情绪之后,会引起返回抑制现象的消失^[67].但是,这并不能说明返回抑制真的消失了,因为行为实验并不能精确地探索时间进程,该现象也可以被解释为返回抑制维持的时间缩短.如果未来通过SSVEP的方法对此问题进行研究也许可以解决这个争论.此外,也可以尝试引入影响注意优先性的变量,比如威胁性信息、奖励和惩罚等.例如,目前已有研究引入威胁相关的信息作为变量,探索了威胁相关和目标相关的特征信息同时存在时,目标相关的基于特征的注意是否会受到威胁相关特征选择的影响^[68].工作记忆中的内容也导致注意偏向.当在工作记忆任务的记忆保持期加入次级搜索任务时,如果搜索任务中某个项目和工作记忆中处于内部注意焦点的记忆内容相同,那么这个项目将捕获被试的注意,也就是说,此时的视觉选择性注意受到了内部表征的影响^[69,70].未来可以将SSVEP作为指标更加直接地探索工作记忆中的表征对视觉选择性注意的影响.探索这些问题将会加深人们对工作记忆表征究竟是如何进行存储这一问题的理解^[71].

此外,SSVEP对位置和特征都可以进行标记,可以

利用这一特性探究基于空间的注意和基于特征的注意之间的关系.引导搜索理论认为,基于特征的注意会先平行地进行全局分析,之后序列地将注意依次集中到激活最高的位置上进行加工和筛选,也就是空间指向性注意发生在特征选择之后^[72].可以设计一个需要被试从基于空间的注意转换到基于特征的注意的任务,如果发现在注意方式转换前后,不同位置的注意分配方式相同,那么表明基于空间的注意在这种条件下是优先于基于特征的注意的,这样的结果会在一定程度上修正目前公认的引导搜索理论.

除了直接的理论研究,SSVEP还有一个非常重要的应用场合,那就是脑机接口.BCI研究致力于使大脑的信息与外接设备发生交互,进而实现人与机器的在信息同步性上的融合,并为此开发了多样的算法.与认知研究类似,在BCI研究中,SSVEP也被当作一种标签来使用,通常会给不同的刺激输入标记不同的频率,相关BCI算法就可以使用更少的脑电训练数据得到更准确的大脑活动解码信息^[73].BCI研究中使用的算法也许可以推广到认知研究中,尤其是视觉选择性注意研究.当利用SSVEP分析被试对多个项目的注意分配时,需要设置多种条件,使每个标记频率遍历每个注意条件的项目,这种操作会使条件数量和试次数量大大提升,增加被试压力,降低实验效率.未来可以通过算法分析被试在观察同时呈现但标记频率不同的项目时的脑电数据,以算法得到的结果来表示不同频率标记的项目的注意状态,这将可能消除不同频率之间的不可比性,进而简化实验设计,降低条件数量.

参考文献

- 1 Vanvooris S, Hillyard S A. Visual evoked-potentials and selective attention to points in space. *Percept Psychophys*. 1977, 22: 54–62
- 2 Papakostopoulos D, Blackmore S. Reviews: Human brain electrophysiology: Evoked potentials and evoked magnetic fields in science and medicine, from sentence to symbols: Readings on consciousness. *Perception*, 1993, 22: 375–377
- 3 Regan D. Some early uses of evoked brain responses in investigations of human visual function. *Vis Res*, 2009, 49: 882–897
- 4 American Clinical Neurophysiology Society. Guideline 9B: Guidelines on visual evoked potentials. *J Clin Neurophysiol*, 2006, 23: 138–156
- 5 Regan D. Some characteristics of average steady-state and transient responses evoked by modulated light. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1966, 20: 238–248
- 6 Dobie R A, Wilson M J. Low-level steady-state auditory evoked potentials: Effects of rate and sedation on detectability. *J Acoust Soc Am*, 1998, 104: 3482–3488
- 7 Linden R D, Picton T W, Hamel G, et al. Human auditory steady-state evoked potentials during selective attention. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1987, 66: 145–159
- 8 Rance G, Rickards F W, Cohen L T, et al. The automated prediction of hearing thresholds in sleeping subjects using auditory steady-state evoked potentials. *Ear Hear*, 1995, 16: 499–507
- 9 Morgan S T, Hansen J C, Hillyard S A. Selective attention to stimulus location modulates the steady-state visual evoked potential. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1996, 93: 4770–4774

- 10 Liang T F, Wu H Y, Zhang Y, et al. Attentional selection in the perceptual scenes and internal working memory representations: A unitized perspective (in Chinese). *Adv Psychol Sci*, 2018, 26: 625–635 [梁腾飞, 吴海燕, 张引, 等. 知觉场景与工作记忆表征中的注意选择: 一个统一的视角. *心理科学进展*, 2018, 26: 625–635]
- 11 Posner M I, Boies S J. Components of attention. *Psychol Rev*, 1971, 78: 391–408
- 12 Toffanin P, de Jong R, Johnson A, et al. Using frequency tagging to quantify attentional deployment in a visual divided attention task. *Int J Psychophysiol*, 2009, 72: 289–298
- 13 Di Russo F, Pitzalis S, Aprile T, et al. Spatiotemporal analysis of the cortical sources of the steady-state visual evoked potential. *Hum Brain Mapp*, 2007, 28: 323–334
- 14 Vialatte F B, Maurice M, Dauwels J, et al. Steady-state visually evoked potentials: Focus on essential paradigms and future perspectives. *Prog Neurobiol*, 2010, 90: 418–438
- 15 Norcia A M, Appelbaum L G, Ales J M, et al. The steady-state visual evoked potential in vision research: A review. *J Vis*, 2015, 15: 4
- 16 Odom J V, Bach M, Barber C, et al. Visual evoked potentials standard. *Docum Ophthalmol*, 2004, 108: 115–123
- 17 Lithfous S, Rossion B. Electrophysiological individual face adaptation effects with fast periodic visual stimulation resist long interruptions in adaptation. *Biol Psychol*, 2018, 133: 4–9
- 18 Xu B, Liu-Shuang J, Rossion B, et al. Individual differences in face identity processing with fast periodic visual stimulation. *J Cogn Neurosci*, 2017, 29: 1368–1377
- 19 Wieser M J, Miskovic V, Keil A. Steady-state visual evoked potentials as a research tool in social affective neuroscience. *Psychophysiology*, 2016, 53: 1763–1775
- 20 Spaak E, de Lange F P, Jensen O. Local entrainment of alpha oscillations by visual stimuli causes cyclic modulation of perception. *J Neurosci*, 2014, 34: 3536–3544
- 21 Labecki M, Nowicka M M, Suffczynski P. Temporal modulation of steady-state visual evoked potentials. *Int J Neur Syst*, 2019, 29: 1850050
- 22 Floriano A, Diez Pablo F, Freire Bastos-Filho T. Evaluating the influence of chromatic and luminance stimuli on SSVEPs from behind-the-ears and occipital areas. *Sensors*, 2018, 18: 615
- 23 Retter T L, Rossion B. Visual adaptation provides objective electrophysiological evidence of facial identity discrimination. *Cortex*, 2016, 80: 35–50
- 24 Krishnan G P, Vohs J L, Hetrick W P, et al. Steady state visual evoked potential abnormalities in schizophrenia. *Clin Neurophysiol*, 2005, 116: 614–624
- 25 Tarafdar K K, Pradhan B K, Nayak S K, et al. Data mining based approach to study the effect of consumption of caffeinated coffee on the generation of the steady-state visual evoked potential signals. *Comput Biol Med*, 2019, 115: 103526
- 26 Alimardani F, Cho J H, Boostani R, et al. Classification of bipolar disorder and schizophrenia using steady-state visual evoked potential based features. *IEEE Access*, 2018, 6: 40379–40388
- 27 Zhang S, Gao X. The effect of visual stimuli noise and fatigue on steady-state visual evoked potentials. *J Neur Eng*, 2019, 16: 056023
- 28 Herrmann C S. Human EEG responses to 1–100 Hz flicker: Resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena. *Exp Brain Res*, 2001, 137: 346–353
- 29 Notbohm A, Kurths J, Herrmann C S. Modification of brain oscillations via rhythmic light stimulation provides evidence for entrainment but not for superposition of event-related responses. *Front Hum Neurosci*, 2016, 10: 10
- 30 Zoefel B, ten Oever S, Sack A T. The involvement of endogenous neural oscillations in the processing of rhythmic input: More than a regular repetition of evoked neural responses. *Front Neurosci*, 2018, 12: 95
- 31 Capilla A, Pazo-Alvarez P, Darriba A, et al. Steady-state visual evoked potentials can be explained by temporal superposition of transient event-related responses. *PLoS One*, 2011, 6: e14543
- 32 Moratti S, Clementz B A, Gao Y, et al. Neural mechanisms of evoked oscillations: Stability and interaction with transient events. *Hum Brain Mapp*, 2007, 28: 1318–1333
- 33 Heinrich S P, Groten M, Bach M. Relating the steady-state visual evoked potential to single-stimulus responses derived from M-sequence stimulation. *Doc Ophthalmol*, 2015, 131: 13–24
- 34 Xu M, Jia Y, Qi H, et al. Use of a steady-state baseline to address evoked vs. oscillation models of visual evoked potential origin. *Neuroimage*, 2016, 134: 204–212
- 35 Pastor M A, Artieda J, Arbizu J, et al. Human cerebral activation during steady-state visual-evoked responses. *J Neurosci*, 2003, 23: 11621–11627
- 36 Wittevrongel B, Khachatryan E, Fahimi Hnazaee M, et al. Representation of steady-state visual evoked potentials elicited by luminance flicker in human occipital cortex: An electrocorticography study. *Neuroimage*, 2018, 175: 315–326
- 37 Han X, Xie J, Luo A, et al. Comparison of visual cortex functional connectivity patterns based on steady-state monochromatic flicker and oscillating checkerboard visual stimulus. In: 2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), Honolulu, HI, 2018. 732–736
- 38 Xu P, Tian C, Zhang Y, et al. Cortical network properties revealed by SSVEP in anesthetized rats. *Sci Rep*, 2013, 3: 2496

- 39 Yan Z, Gao X. Functional connectivity analysis of steady-state visual evoked potentials. *Neurosci Lett*, 2011, 499: 199–203
- 40 Li F, Tian Y, Zhang Y, et al. The enhanced information flow from visual cortex to frontal area facilitates SSVEP response: Evidence from model-driven and data-driven causality analysis. *Sci Rep*, 2015, 5: 14765
- 41 Corbetta M, Shulman G L. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nat Rev Neurosci*, 2002, 3: 201–215
- 42 Jefferies L N, Enns J T, Di Lollo V. The exogenous and endogenous control of attentional focusing. *Psychol Res*, 2019, 83: 989–1006
- 43 Fan Z L, Chen M. A comparison study of reaction time in depression and anxiety (in Chinese). *Chongqing Med*, 2011, 40: 1061–1062 [范征莉, 陈敏. 焦虑症与抑郁症患者反应时研究. 重庆医学, 2011, 40: 1061–1062]
- 44 Wu Y, Sui G Y, Cao X H. ERP studies of endogenous and exogenous attention (in Chinese). *Adv Psychol Sci*, 2007, 15: 71–77 [吴燕, 隋光远, 曹晓华. 内源性注意和外源性注意的ERP研究. 心理科学进展, 2007, 15: 71–77]
- 45 Yao S X, Yang D, Qi S Q, et al. Studies on the N2PC component in visual spatial attention (in Chinese). *Adv Psychol Sci*, 2012, 20: 365–375 [姚树霞, 杨东, 齐森青, 等. 视觉空间注意研究中的N2PC成分述评. 心理科学进展, 2012, 20: 365–375]
- 46 Li A S, Zhang G L, Miao C G, et al. The time course of inhibition of return: Evidence from steady-state visual evoked potentials. *Front Psychol*, 2017, 8: 1562
- 47 Forschack N, Andersen S K, Müller M M. Global enhancement but local suppression in feature-based attention. *J Cogn Neurosci*, 2017, 29: 619–627
- 48 Andersen S K, Muller M M. Behavioral performance follows the time course of neural facilitation and suppression during cued shifts of feature-selective attention. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 13878–13882
- 49 Shioiri S, Honjyo H, Kashiwase Y, et al. Visual attention spreads broadly but selects information locally. *Sci Rep*, 2016, 6: 35513
- 50 Srinivasan R, Fornari E, Knyazeva M G, et al. Fmri responses in medial frontal cortex that depend on the temporal frequency of visual input. *Exp Brain Res*, 2007, 180: 677–691
- 51 Celestia G G. Steady-state and transient visual evoked potentials in clinical practice. *Ann N Y Acad Sci*, 1982, 388: 290–305
- 52 Gulbinaite R, van Viegen T, Wieling M, et al. Individual alpha peak frequency predicts 10 Hz flicker effects on selective attention. *J Neurosci*, 2017, 37: 10173–10184
- 53 Kizuk S A D, Mathewson K E. Power and phase of alpha oscillations reveal an interaction between spatial and temporal visual attention. *J Cogn Neurosci*, 2017, 29: 480–494
- 54 Gulbinaite R, Roozendaal D H M, VanRullen R. Attention differentially modulates the amplitude of resonance frequencies in the visual cortex. *Neuroimage*, 2019, 203: 116146
- 55 Smout C A, Mattingley J B. Spatial attention enhances the neural representation of invisible signals embedded in noise. *J Cogn Neurosci*, 2018, 30: 1119–1129
- 56 Müller M M, Hübner R. Can the spotlight of attention be shaped like a doughnut? Evidence from steady-state visual evoked potentials. *Psychol Sci*, 2002, 13: 119–124
- 57 Itthipuripat S, Garcia J O, Serences J T. Temporal dynamics of divided spatial attention. *J Neurophysiol*, 2013, 109: 2364–2373
- 58 Chen Z. Object-based attention: A tutorial review. *Atten Percept Psychophys*, 2012, 74: 784–802
- 59 Müller M M, Andersen S, Trujillo N J, et al. Feature-selective attention enhances color signals in early visual areas of the human brain. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103: 14250–14254
- 60 Andersen S K, Muller M M, Hillyard S A. Attentional selection of feature conjunctions is accomplished by parallel and independent selection of single features. *J Neurosci*, 2015, 35: 9912–9919
- 61 Brummerloh B, Gundlach C, Müller M M. Attentional facilitation of constituent features of an object does not spread automatically along object-defining cortical boundaries. *J Cogn Neurosci*, 2019, 31: 278–287
- 62 Painter D R, Dux P E, Travis S L, et al. Neural responses to target features outside a search array are enhanced during conjunction but not unique-feature search. *J Neurosci*, 2014, 34: 3390–3401
- 63 Jiang Y, Wu X, Gao X. A category-specific top-down attentional set can affect the neural responses outside the current focus of attention. *Neurosci Lett*, 2017, 659: 80–85
- 64 Müller M M, Gundlach C, Forschack N, et al. It takes two to tango: Suppression of task-irrelevant features requires (spatial) competition. *Neuroimage*, 2018, 178: 485–492
- 65 Brummerloh B, Müller M M. Time matters: Feature-specific prioritization follows feature integration in visual object processing. *Neuroimage*, 2019, 196: 81–93
- 66 Chu V C, D’Zmura M. Tracking feature-based attention. *J Neural Eng*, 2019, 16: 016022
- 67 Pérez-Dueñas C, Acosta A, Lupiáñez J. Attentional capture and trait anxiety: Evidence from inhibition of return. *J Anxiety Disord*, 2009, 23: 782–790
- 68 Boylan M R, Kelly M N, Thigpen N N, et al. Attention to a threat-related feature does not interfere with concurrent attentive feature selection.

- [Psychophysiology](#), 2019, 56: e13332
- 69 Olivers C N L, Meijer F, Theeuwes J. Feature-based memory-driven attentional capture: Visual working memory content affects visual attention. [J Exp Psychol Hum Percept Perform](#), 2006, 32: 1243–1265
- 70 Hollingworth A, Beck V M. Memory-based attention capture when multiple items are maintained in visual working memory. [J Exp Psychol Hum Percept Perform](#), 2016, 42: 911–917
- 71 Thigpen N, Petro N M, Oswald J, et al. Selection of visual objects in perception and working memory one at a time. [Psychol Sci](#), 2019, 30: 1259–1272
- 72 Wolfe J M. Guided Search 2.0 A revised model of visual-search. [Psychon Bull Rev](#), 1994, 1: 202–238
- 73 Xu G H, Zhang F, Xie J, et al. Brain-computer interface paradigms and signal processing strategy for steady state visual evoked potential (in Chinese). [J Xi'an Jiaotong Univ](#), 2015, 49: 1–7, 108 [徐光华, 张锋, 谢俊, 等. 稳态视觉诱发电位的脑机接口范式及其信号处理方法研究. [西安交通大学学报](#), 2015, 49: 1–7, 108]

Summary for “稳态视觉诱发电位及其在视觉选择性注意研究中的应用”

Steady-state visual evoked potential and its applications in studying visual selective attention

Xiaoyu Chen¹, Zijian Cheng¹, Chengmi Hu¹, Tengfei Liang¹ & Qiang Liu^{1,2*}

¹ Research Center of Brain and Cognitive Neuroscience, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

² Institute of Brain and Psychological Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610000, China

* Corresponding author, E-mail: lq780614@163.com

Steady-state visual evoked potentials (SSVEP), an evoked brain potential, possesses the same frequency as periodic visual stimuli evoking potentials. It is extensively utilized in Brain-Computer Interface and human cognitive research. Moreover, the amplitude of SSVEP is sensitive to resources allocation of visual selective attention, and therefore can always serve as a corresponding electrophysiological indicator.

In comparison with event-related potentials (ERPs) presented by P300 and N2pc, SSVEP index can be flexibly applied to a variety of paradigms and avoid errors caused by the brain lateralization as different items can be present in the center or in the same region of the view. Furthermore, SSVEP can reflect attention variation because of its continuity and sensibility to attention fluctuation. Besides, ERPs and SSVEP may reflect diverse attentive stages, and certain evidence suggests the attentive stage that SSVEP reflects is earlier compared with ERPs. Specifically, SSVEP may reflect the regulation that brain regions in charge of advanced cognitive function act on the visual cortex or the earlier stage of visual attention. Nevertheless, ERPs might reveal a later stage accomplished by brain regions responsible for higher-order cognitive processes such as the parietal lobe.

In the study of visual selective attention, the frequency tagging is primarily employed to induce SSVEP. Visual stimuli are presented periodically at various frequencies to evoke SSVEP so that the stimuli are frequency tagged. We are able to figure out the allocation of attentive resources in those conditions by means of comparing SSVEP amplitude that the same stimulus evokes in a wide range of conditions. The frequency tagging is particularly appropriate to visual selective attention, especially feature-based and space-based attention. Benefiting from its accurate and sensitive reflection of attentive spatial distribution, SSVEP-based frequency tagging is widely adopted in space-based attention and directly proves the attention focus is shape-flexible and dividable but not always a solid circle. On the other hand, researchers developed the random dot kinematograms (RDK) paradigm for feature-based attention, which prolongs instantaneous feature-based attention process so that SSVEP can detect it. With RDK paradigm, researchers find strong evidence that feature-based attention does exist and has a global attentive activation. However, the other kind of visual selective attention, object-based attention, cannot be explored by frequency tagging because periodic flicker will be a highlighted feature so that participants will consider it as an object recognition marker and further destroy the integrity of the object.

In the future, researchers can attempt to add emotion, reward and punishment, and working memory representations as research variables, or to build connections between feature-based attention and spatial-based attention in the process of using SSVEP to explore visual selective attention. In addition, the results of BCI algorithms for SSVEP have a potential for being a new visual selective attention index.

steady-state visual evoked potential, visual selective attention, frequency tagging, attention resource

doi: [10.1360/TB-2020-0009](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0009)