

# 稳态视觉诱发电位的原理及其应用

吴麟, 沈嫣然, 杨琪\*

阜阳师范大学教育学院, 安徽 阜阳

收稿日期: 2026年3月17日; 录用日期: 2026年5月12日; 发布日期: 2026年5月26日

## 摘要

稳态视觉诱发电位(Steady State Visual Evoked Potentials, SSVEP)是指当视觉系统受到一定频率的周期性光刺激时, 大脑视觉皮层等区域产生的、与刺激频率相关的周期性电生理反应。因SSVEP具有频率特异性强、稳定性良好和信号提取能力较高等特点, 目前该技术已经被广泛应用于认知神经科学和脑机接口等领域。本综述聚焦于SSVEP, 旨在深入分析其产生原理、信号特征及其功能应用, 重点阐述SSVEP最新研究发展, 包括双标记的SSVEP研究。同时, 本文指出视觉刺激的频率选择和实验范式的创新可能是未来重要的研究方向。

## 关键词

稳态视觉诱发电位, 频率标记, 产生机制, 信号特征

# The Principle of Steady-State Visual Evoked Potentials and Its Applications

Lin Wu, Yanran Shen, Qi Yang\*

School of Education, Fuyang Normal University, Fuyang Anhui

Received: March 17, 2026; accepted: May 12, 2026; published: May 26, 2026

## Abstract

Steady-state visual evoked potentials (SSVEPs) refer to periodic electrophysiological responses elicited in the visual cortex and related brain regions when the visual system is exposed to rhythmic visual stimulation at a constant frequency. Owing to their strong frequency specificity, high stability, and robust signal detectability, SSVEPs have been widely applied in cognitive neuroscience and brain-computer interface research. This review focuses on SSVEPs and aims to provide an in-depth analysis of their underlying mechanisms, signal characteristics, and functional applications, with

\*通讯作者。

particular emphasis on recent advances in the field, including studies employing dual-frequency tagging paradigms. Meanwhile, this paper points out that the frequency selection of visual stimuli and innovation in experimental paradigms may be important research directions in the future.

## Keywords

Steady-State Visual Evoked Potentials, Frequency Tagging, Generation Mechanisms, Signal Characteristics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

过往研究采用事件相关电位(Event-Related Potential, ERP)技术从时间进程角度考察大脑如何加工内外部信息,能够较好地揭示认知加工在毫秒水平上的动态进程,因而在知觉、注意、记忆和语言等研究中的重要价值。虽然过去的研究成果较为丰硕,但是ERP技术因易受外在实验材料影响、被试量较大和对被试的要求较高等原因,近年来研究者开始采用稳态视觉诱发电位(Steady State Visual Evoked Potentials, SSVEPs)来探讨大脑加工的时间进程。SSVEP是指在恒定频率闪烁的视觉刺激下,于枕区视觉皮层及其相关网络中产生的连续电反应,其频率与刺激频率及其谐波成分相对应(Regan, 1966)。在刺激频率不同的情况下,SSVEP的响应更倾向特定于不同的频率,并显示出不同的幅度。该电位自上世纪70年代首次被识别以来,逐渐成为研究视觉系统和脑机接口(Brain-Computer Interfaces, BCIs)中的重要工具。ERP与SSVEP都是认知神经科学中常用的脑电研究手段,但二者所擅长回答的科学问题并不相同。因而,SSVEP并不是对ERP的简单替代,而是为研究连续输入、稳定追踪和频率分离等问题提供了另一种重要方法和路径。

为了在连续刺激条件下追踪自下而上的信息加工与整合过程,研究者开始采用频率标记(frequency tagging)的SSVEP技术。频率标记法主要是对特定频率闪烁刺激引发的SSVEP进行量化(Toffanin et al., 2009)。换言之,频率标记技术通过使用不同的频率来标记不同的视觉刺激,使得SSVEP对不同的视觉刺激产生不同的频率响应。这种技术可以允许大脑同时记录不同类别的视觉刺激和提升脑电解码的效率。这也就是说,基于频率标记技术的SSVEP不仅能反映单一刺激的响应,还能够支持多任务处理和多频率信号的同时解码。相关研究表明,频率标记不仅能提升SSVEP的有效性,还能减少实验中的干扰,提高系统的整体性能(Norcica et al., 2015)。

本综述将聚焦于SSVEP,深入分析其产生原理、信号特征及其功能应用,同时探讨SSVEP与其他脑电信号在应用场景和功能上的区别。并重点讨论频率标记在SSVEP中的作用。通过对这些问题的深入探讨,阐述频率标记技术的最新发展。

## 2. SSVEP 的基本原理与特点

早期,虽然通过记录对单个刺激的瞬态诱发电位可以快速了解大脑的感觉系统,但这种方法在研究视觉注意过程时仍有其内在的局限性。其中一个主要限制因素是,瞬态诱发电位的最佳诱发条件是刺激突然出现,并且间隔时间较长(通常为0.3~1.5秒)。因此,在注意实验中,个体往往难以持续聚焦于目标信息并抑制无关刺激的干扰,这是因为注意系统具有自下而上的捕获倾向性(Yantis & Jonides, 1990)。规

避开限制的替代方法是：视觉刺激以 8~10 Hz 或以上的稳定频率重复(例如闪烁的光)呈现。这种重复闪烁的光在视觉皮层引起的 SSVEP 表现为近似正弦振荡的响应，其基本频率与诱发该电位的视觉刺激频率相同(Regan, 1989)。总的来说，与瞬态诱发电位相比，SSVEP 更适合用于视觉加工和注意分配过程的研究，因为 SSVEP 的一个重要特点是其信号对刺激参数(例如闪烁频率，对比度以及空间频率)高度敏感(Regan, 1989)，即不同视觉刺激参数会影响 SSVEP 的幅度和相位。此外，相较于瞬态诱发电位，SSVEP 通常具有较高信噪比，能够更高效地从背景脑电噪声中分离出来(Silberstein & Pipingas, 1995; Morgan et al., 1996)。与此同时，SSVEP 还具有明确的频率特异性，不同刺激频率所诱发的响应可以在频域上加以区分。因此，SSVEP 不仅可以分析单一频率的响应，还可以利用多个频率同时解码多个目标，从而为研究视觉系统对周期性刺激的响应机制提供了手段，这也奠定了其在认知神经科学和脑机接口的基础。

## 2.1. 基于频率标记的 SSVEP 的原理

为了从自下而上的信息处理角度考察两个词汇的语义整合，研究者采用了基于频率标记的 SSVEP 技术。例如，“勤能”和“补拙”分别位于屏幕中央的左侧和右侧，二者同时呈现，“勤能”以 6 Hz ( $f_1$ ) 的频率呈现，“补拙”以 7.5 Hz ( $f_2$ ) 的频率呈现。以此为例，我们将  $f_1$  和  $f_2$  称为基频(fundamental frequency)。实验结果显示，可以在基频  $f_1$  和  $f_2$  处分别观察到“勤能”和“补拙”诱发的 SSVEP 响应，还可以在  $f_1 + f_2$  等互调频率(intermodulation, IM)处观察到“勤能”和“补拙”语义整合时的 SSVEP 响应(一般为  $nf_1 + mf_2$ ，其中  $n$  和  $m$  是整数)。这种互调响应并非对  $f_1$  和  $f_2$  两个基频成分的简单叠加，而是输入频率之间非线性相互作用的结果(Regan & Regan, 1988; Gordon et al., 2019)。通常，枕区记录的脑电频谱会在刺激频率及其倍频处出现峰值。这些峰值往往高于周围频率成分，甚至可达数倍或数十倍，这样的频谱特征正是 SSVEP 中刺激频率起到的“标记”作用(Kabdebon et al., 2022)。借助这种频率标记，不同类别的刺激或不同位置响应可以在频谱上被有效区分。因此，研究者可以利用这种特性，来跟踪大脑中不同刺激的加工过程(刘武巧, 2022)。

以上述的研究为例，本段将概括 SSVEP 产生的三个阶段：外周感受、传入通路与皮层同步振荡。在外周感受阶段，视觉刺激(如以不同频率呈现的汉字词汇)首先经由眼睛感知后，并传递至视网膜。在传入通路阶段，视网膜的光感受器(如视杆细胞和视锥细胞)将不同频率闪烁的汉字信息转化为神经脉冲，从而实现从视网膜到初级视觉皮层(V1 区)的信息传递。该区域负责对视觉信息的初步处理。在皮层同步振荡阶段，当视觉系统受到周期性外部刺激(这里是指闪烁的汉字)时，视觉皮层中的神经元会对该刺激频率产生同步响应，从而形成与刺激频率一致的电生理活动，并最终在头皮脑电中表现为可记录的 SSVEP 信号，即不同频率的汉字会在大脑中诱发与之对应的 SSVEP (Kuś et al., 2013)。这种反应不是单个神经元的放电，而是大量神经元以同步方式活动的结果(Regan, 1989)。需要指出的是，这个过程不仅涉及初级视觉皮层(V1 区)，还包括其他视觉相关区域，如 V2 区、V3 区和 V4 区等。这些视觉区域共同参与了对刺激信息的整合，因此也共同构成了 SSVEP 产生的重要神经基础。例如，当视觉刺激以 10 Hz 频率闪烁，视觉皮层就会产生 10 Hz 的脑电响应，同时可能出现 20 Hz、30 Hz 等谐波成分。若使用两个不同频率刺激(如 7 Hz 和 10 Hz)，可能会在脑电中观测到 IM 成分，如  $|f_1 + f_2| = 17$  Hz 或  $|f_1 - f_2| = 3$  Hz。这通常代表多个神经元之间的非线性交互(Norcica et al., 2015)。

SSVEP 的振幅和相位是两种重要的信号特征。振幅反映了大脑对视觉刺激的响应强度，较高的振幅通常表示刺激较强或个体对目标分配了更多的注意资源；而相位则与大脑对刺激的时间处理有关，它代表了刺激与神经反应之间的时间关系。其中，相位延迟可能反映了从视网膜到皮层以及皮层内不同区域之间的信号传导和时间整合过程。相位属于圆周变量，通常是在  $360^\circ$  或  $2\pi$  弧度范围内变化。振幅和相位可以表示为极坐标系中的向量，其中向量的长度代表响应幅度，极角代表响应相位(Norcica et al., 2015)。

## 2.2. SSVEP 的特点

SSVEP 具有以下显著的特征：(1) SSVEP 具有较强的频率特异性，即大脑对视觉刺激的反应呈现出与刺激频率一致的波动，并与视觉刺激的频率具有同步性。不同频率的刺激会引起大脑不同频率的电生理反应，且这些反应在频谱分析中可以明显区分。(2) SSVEP 具有较高的信噪比。尤其在视觉刺激频率与背景噪声分离较好的情况下，SSVEP 信号更容易从连续脑电活动中提取出来。由于 SSVEP 信号和噪声源的能量在不同频率上的分布不同(即 SSVEP 信号是窄带的，而噪声源是宽带的)，因此这一特性极大地提高了信噪比，使 SSVEP 适合在短时间内捕捉视觉刺激的细微差异(Kabdebon et al., 2022)。但是多个频率的标记可能会导致信号的叠加和相互干扰，进而影响 SSVEP 信号的信噪比(Mu et al., 2022)。(3) SSVEP 具有非线性频率响应特征。由于视觉系统本身的非线性特性，使得 SSVEP 信号除刺激的基频成分外，还常出现谐波和组合频率成分。这表明，SSVEP 并非只是对刺激频率的简单线性反应，还能在一定程度上反映更复杂的时间进程。与此同时，刺激频率的选择性对 SSVEP 响应强度具有重要影响。一般而言，低频刺激通常引发较强的振幅响应，而高频刺激则可能导致较弱的信号(Chen et al., 2019)。

在 SSVEP 相关的问题中，最为关键的问题是视觉刺激呈现频率的确定。早期，Regan (1966)率先发现，亮度刺激闪烁在大约 10 Hz 时会诱发最大反应。此后，其他研究也报告了相似或略高一些的频率范围(Fawcett et al., 2004; Regan, 1989; Srinivasan et al., 2006)。通常情况下，这类研究使用的是低水平的视觉刺激，并从枕叶中部区域记录 SSVEP。然而，产生最大 SSVEP 反应的刺激频率可能受刺激类型和记录位点的影响(Srinivasan et al., 2006)。有研究认为，最适用于诱发 SSVEP 的刺激频率与完成刺激加工所需的时间密切相关：刺激越复杂、加工越精细，单次加工所需的时间越长。例如，呈现不同面孔和相同面孔时，被试的 SSVEP 响应差异主要出现在 4.0~8.33 Hz 范围内，并在 5.88 Hz 达到最大。这说明，较高层次的面孔识别更适合在中等偏低频率下进行(Alonso-Prieto, Belle, Liu-Shuang, Norcia, & Rossion, 2013)。相较于较高频率，较低频率能够为每个刺激提供更充分的加工时间，从而支持对面孔身份信息的精细分析；而当刺激频率达到 8.33 Hz 及以上时，由于单个刺激的加工尚未完成，下一个刺激便已经到来，从而打断了对前一刺激的加工，导致不同面孔与相同面孔之间的差异不再明显。另一方面，频率过低同样不利于频率标记，会使神经反应在时间上更为分散，难以在刺激频率处表现出稳定增强。因此，对于复杂刺激的高层视觉加工而言，中等偏低频率比高频更符合其时间加工特性。此外，相较于较高频率，较低频率还具有另一项优势，即所得反应的相位信息更容易解释(Appelbaum & Norcia, 2009; Cottureau et al., 2011)。

在实际操作中，刺激频率通常在 3 到 20 Hz 的范围内，但这并不是记录 SSVEP 的必要条件。有几项研究已经记录到了在极低频率下的极窄带 SSVEP (Alonso-Prieto et al., 2013; Norcia et al., 2002; Regan & Regan, 1988)，甚至有研究在高达 100 Hz 的基频下发现 SSVEP 成分。这表明，对于 SSVEP 而言，关键的并不是刺激的时间频率，而是呈现时间频率需要与加工刺激所需要的时间相匹配。

## 2.3. 与其他脑电信号的比较

相比在其他频率处产生的电位，SSVEP 在刺激的闪烁频率及谐波频率处产生的响应更大。这反映了大脑对特定频率视觉刺激的同步响应(Vialatte et al., 2010)。由于 SSVEP 信号受到刺激的特定闪烁频率调制，因此通常被认为是反映自下而上的信息加工的重要指标。与许多依赖主动任务反应的实验范式相比，SSVEP 实验通常不需要被试在实验过程中付出过多的认知努力，即对被试的任务操作的主动性要求较低。此外，SSVEP 具有较高信噪比，主要因为其响应集中在与刺激频率相关的窄带频率成分上。需要指出的是，最优刺激频率并非越高越好，而是取决于刺激类型、加工层次和记录位置(Norcia et al., 2015)。

由此可知 SSVEP 与其他常见的脑电信号之间的区别，如 ERP、诱发电位(evoked potentials, EP)和静息状态 EEG。首先，与 ERP 相比，SSVEP 的优势在于信噪比较高，能够更稳定地反映大脑对持续周期性

刺激的响应。一般而言, SSVEP 通常依赖于视觉刺激的频率, 而 ERP 则侧重于对特定事件的即时反应, 更适合用来观察大脑“什么时候”对刺激作出反应, 其优点在于时间分辨率高。然而, ERP 的信号幅度较小, 容易受到背景噪声的干扰, 需要多次重复刺激来提取有效的脑电信号。其次, 与 EP 相比, SSVEP 具有更高的稳定性和频率选择性。EP 通常是由感官刺激引发的脑电反应, 其优点在于刺激简单, 不需要持续的刺激闪烁, 因此, 这种 EP 范式在低频的感觉研究方向具有明显的优势。尽管它可以揭示特定刺激下的脑电反应, 但不像 SSVEP 那样具有明显的频率成分。EP 信号在解码时往往依赖于时间域的信息, 而 SSVEP 则能够通过频域分析提取出较为清晰的频率响应, 这使得 SSVEP 在复杂任务中能够同时解码多个视觉刺激。最后, SSVEP 与静息状态下的 EEG 也存在差异。EEG 主要记录大脑在静息状态下不同脑区在不同频段(如  $\alpha$  波、 $\beta$  波等)的自发脑电活动。EEG 信号提供的信息较为广泛, 但由于其较为复杂且不易直接与外部刺激关联, 因此在解码和应用时相对困难。相比之下, SSVEP 信号在视觉任务中提供了清晰的频率标记, 通过频率分析能够高效提取特定信息, 尤其适用于视觉注意力和脑机接口。

总体而言, SSVEP 与其他脑电信号各有其优势和应用场景。SSVEP 以其高稳定性、高信噪比和频率标记优势, 在多任务并行处理和脑机接口等领域具有独特的应用价值。而 ERP、EP 和 EEG 则更适用于时间域上的认知研究、神经评估等任务。选择何种脑电信号, 应该根据实验的具体需求和研究目的进行合理决策。

### 3. 基于频率标记的 SSVEP 相关研究

#### 3.1. 面孔识别与整体整合

面孔识别作为人类视觉认知的核心能力之一, 其过程涉及大脑对局部特征(诸如眼睛、嘴巴等)与整体特征的整合。基于频率标记的 SSVEP 技术可以通过分别标记不同的面孔特征, 从而为深入解析面孔识别中局部与整体处理的神经机制提供了强有力的支持。

Rossion 和 Boremanse (2011) 采用 SSVEP 范式考察大脑对面孔身份变化的敏感性。实验中, 面孔刺激以 3.5 Hz 的频率周期性呈现, 即每秒呈现 3.5 张面孔; 由于面孔与灰色背景交替出现, 因此整体明暗交替频率为 7 Hz。结果表明, 在正立面孔条件下, 当连续呈现不同身份面孔时, 被试在刺激基频 3.5 Hz 处诱发出显著的 SSVEP 响应; 而当连续呈现的是相同身份面孔时, 3.5 Hz 处的响应明显减弱。这种差异主要分布于右侧枕颞区, 说明该区域对面孔身份信息具有较强敏感性。进一步地, 在倒置面孔条件下, 不同身份面孔与相同身份面孔在 3.5 Hz 处的频率差异基本消失, 表明这种频率标记效应主要反映的是正常面孔加工中的身份辨别过程, 而不是单纯的低层视觉特征重复效应。与此同时, 除基频 3.5 Hz 外, 研究还观察到 7 Hz、10.5 Hz、14 Hz 等谐波成分, 但最核心、最稳定的身份差异主要体现在基频 3.5 Hz 上。

Boremanse 等人(2013)采用双频率标记(frequency-tagging)范式来考察面孔两半部分是否会被整合成一个整体。研究者将完整面孔沿中线分成左、右两半, 分别以 5.88 Hz ( $f_1$ )和 7.14 Hz ( $f_2$ )的频率进行对比度调制闪烁。这样研究者就可以分别在脑电频谱中观察两半面孔对应的基频反应, 以及由两半面孔发生非线性整合所产生的 IM 成分。该研究重点关注的频率包括: 基频 5.88 Hz、7.14 Hz, 二次谐波 11.76 Hz、14.28 Hz, 以及 IM 频率如 1.26 Hz ( $7.14 - 5.88$ )、2.52 Hz ( $2 \times 7.14 - 2 \times 5.88$ )、3.78 Hz、5.04 Hz 和 13.02 Hz ( $5.88 + 7.14$ )等。结果表明, 左右半张面孔分别以 5.88 Hz 和 7.14 Hz 进行频率标记后, 在频谱中诱发了清晰的基频及其谐波反应, 且该反应在三种条件下均存在, 主要表现为对侧后部脑区的显著激活。与此同时, 在完整面孔条件下还观察到显著的 IM 成分, 尤其是差频成分 1.26 Hz、2.52 Hz、3.78 Hz 和 5.04 Hz, 其分布以右侧枕颞区最为明显。相比之下, 间隔条件和错位条件下这些 IM 成分显著减弱或几乎消失, 而基频部分反应并未发生显著变化。进一步的重复实验表明, 倒置面孔同样会显著降低 IM 成分, 但不影响部分频率反应。上述结果说明, IM 成分可以作为面孔整体整合加工的客观神经指标, 而基频反应

主要反映对局部部分的感觉加工。

进一步, Boremanse 等人(2014)操纵了身份重复方式(同一身份重复呈现 vs. 不同身份交替呈现)和面孔构型条件(完整面孔 vs. 两半分离 vs. 两半错位 vs. 倒置面孔)。研究者把一张脸沿中线竖直切成左半脸和右半脸, 然后让这两半脸以不同频率进行对比度调制闪烁。其中一半以 5.88 Hz 的频率闪烁, 另一半以 7.14 Hz 的频率闪烁。结果显示, (1) 在基频反应上, 出现了显著的部分重复抑制效应。也就是说, 当面孔左右两部分在各自的刺激周期中不断更换身份时, 所诱发的基频反应显著强于同一身份重复出现时的反应。这说明被试能够对面孔的局部部分进行身份区分。进一步分析发现, 这种效应在对侧后部脑区更明显, 但其分布范围较广, 并不局限于某一侧的面孔加工区域, 而是在后部多个电极位置都可以观察到。更重要的是, 这种部分重复抑制效应在四种构型条件下并没有显著差异, 也就是说, 无论面孔是完整的、分离的、错位的还是倒置的, 局部部分的身份加工都相对稳定。(2) 在互调反应上, 研究发现了明显的整体整合效应。在完整正立面孔条件下, 左右两半面孔共同诱发了显著的 IM 成分, 尤其是差频成分, 这些反应主要分布在右侧枕颞区。这表明, 当左右两部分能够被知觉系统整合为一个统一的面孔整体时, 大脑会产生额外的整合性神经反应。换句话说, 互调反应可以作为面孔整体加工的客观指标。(3) 面孔构型的改变会显著削弱这种整体整合反应。在“同一身份重复呈现”条件下, 与完整面孔相比, “两半分离”和“两半错位”条件下的互调反应几乎消失; “倒置面孔”条件下虽然仍然存在一定的互调反应, 但明显弱于完整正立面孔, 而且这种减弱在右半球更为突出。在“不同身份交替呈现”条件下, 也得到了相似的结果: 完整面孔条件下仍可观察到一定的互调反应, 但强度弱于同一身份条件, 并且在分离、错位和倒置条件下进一步下降。这说明, 整体整合加工不仅依赖于面孔是否保持正常的空间构型, 也依赖于左右两部分是否具有较高的一致性, 即当两部分更容易被知觉为“同一张脸”时, 整体整合反应更强。

这三项研究的重要贡献在于, 它们把传统关于“面孔整体加工”的行为学结论上升到了可量化的神经层面, 为“面孔为何是整体加工对象”提供了更加直接和客观的电生理证据。同时, 这些研究也说明, 面孔知觉并不是单一过程, 而是由局部特征编码与整体构型整合共同构成, 其中右侧枕颞区在这一过程中尤其关键。就方法学而言, 这一系列工作凸显了频率标记和 IM 分析在研究高阶视觉整合中的优势, 即能够在连续刺激流中分别追踪不同加工层次, 并为知觉整合提供客观指标。

### 3.2. 格式塔与知觉组织

格式塔感知主要关注对部分元素的整体加工, 其核心在于揭示人类如何将分散的视觉元素组合成有意义整体的机制。例如, Alp 等人(2016)借助虚幻矩形的感知实验, 对格式塔感知的神经机制展开了深入研究。实验中, 研究者以不同频率的边缘闪烁作为刺激源。当被试感知到虚幻的矩形时, IM 在虚幻条件下显著增强; 而在不形成虚幻表面知觉的条件下, 这种增强效应明显减弱。这一结果有力地表明, 虚幻表面的知觉形成依赖于大脑对空间上分离信息的整体整合。也就是说, 神经系统能够对空间上分离的诱导物进行整合, 从而形成整体性的知觉表征。这种神经交互作用在虚幻表面感知中扮演着重要角色, 充分体现了格式塔感知中“整体大于部分之和”的特性。类似地, Aissani 等人(2011)利用由四个振荡条形组成的方形运动刺激, 考察了视觉形式-运动整合的神经机制。研究发现, 当观察者将这些局部运动感知为一个整体运动的方形时,  $2f_1 + 2f_2$  的 IM 成分显著增强; 而当刺激被感知为彼此分离的局部运动条段时, 这种增强减弱。该结果表明, IM 可以作为形式-运动整合的神经指标, 说明整体知觉并非局部成分的简单叠加, 而依赖于不同局部运动信息之间的非线性整合。

综合来看, 这些研究一致验证了 SSVEP 对错觉图形和整体感知过程的神经标记功能, 并表明 IM 可以作为衡量错觉整合与格式塔加工的重要客观指标。通过比较错觉图形与非错觉图形条件下 IM 成分的变化, 研究者能够更直接地揭示视觉系统如何将分离的局部线索整合为统一的整体表征的过程。

### 3.3. 注意力调节

注意分配与调节在视觉认知加工过程中占据核心地位,其对人们选择、处理和加工视觉信息有着至关重要的影响。基于频率标记的 SSVEP 技术,对于探究选择性注意在特定空间、颜色或频率维度下的机制具有重要的意义。例如,研究者借助基于频率标记的 SSVEP 技术开展了空间注意任务相关研究(Toffanin et al., 2009)。实验通过六种不同的标记频率,比较了三种注意条件(集中注意、注意分散和忽略)下 SSVEP 的注意效应。实验开始时,提示信号会指示被试应关注左侧、右侧还是两侧的目标。随后,左右两条刺激流——一条位于注视点左侧,另一条位于右侧——同时呈现,每条刺激流中均叠加一个以正弦方式调制亮度的灰色背景方块,采用六种标记频率(8、9.5、10.5、13、17 和 23 Hz)对左右刺激进行频率标记。被试需要在字符流中完成数字“5”的检测任务,同时记录脑电反应。研究结果显示,专注注意条件下的准确率高于注意分散条件,对应视觉区域的 SSVEP 振幅达到最高;在分散注意条件下,振幅处于中间水平;而在忽略条件下,振幅最低。这一结果有力地证实了 SSVEP 能够精准反映注意力在空间维度上的分配状况。除空间注意外,SSVEP 也被广泛用于考察情绪信息加工中的注意调节。Ciobanu 等人(2023)通过双侧同时呈现情绪面孔流,对比了动作类电子游戏玩家(action video game players, AVGPs)与非电子游戏玩家(non-video game players, NVGPs)在注意调节能力的差异。实验中,情绪面孔以特定频率(2.0 Hz 或 2.5 Hz)闪烁,参与者的任务是识别目标情绪。研究发现,AVGPs 在检测目标情绪的任务中,表现显著优于 NVGPs。并且,AVGPs 在顶枕区对 SSVEP 的注意调制效应明显大于 NVGPs。该结果说明,AVGPs 在处理情绪信息时具有更强的注意调节能力,同时也证明了 SSVEP 信号能够反映出这种注意分配的差异,为研究注意力与情绪认知之间的关系提供了有力的实证依据。进一步地,SSVEP 还可用于探讨颜色选择性注意对视觉皮层加工的影响。Panitz 等人(2023)聚焦于颜色选择性注意,深入探讨其对视觉皮层处理过程的影响。在该研究中,实验要求被试关注特定元素(彩色或灰度图案),同时忽略其他图案。研究结果表明,无论是关注彩色图案还是灰度图案,注意条件下的 SSVEP 振幅均显著高于忽略条件和基线水平;研究人员使用基于频率标记的 SSVEP 技术,对参与者的视觉皮层反应进行量化分析。这意味着颜色选择性注意并非局限于特定颜色色调,而是涵盖了更广泛的色彩信息。同时,这种增强效应不一定会对被忽视的刺激产生抑制作用,该发现为理解视觉注意在视皮层处理中的作用机制提供了全新的视角。

### 3.4. 多模态整合

视听整合关注大脑如何将视觉与听觉信息整合,进而构建起对环境的知觉表征。视觉 SSVEP 与听觉刺激相结合,为揭示视觉层级中自下而上与自上而下信息整合的动态过程提供了有效手段。Gordon 等人(2017)采用层级频率标记(Hierarchical Frequency Tagging)要求被试观看包含房屋或面孔的“电影”刺激流,并在每个试次中统计特定图片之一(房子或面孔)出现的次数。实验中,研究者通过让整个视觉刺激以 10 Hz 的频率周期性地地进行明暗变化,诱发了稳定的 SSVEP 反应,以 1.3 Hz 的语义小波诱发频率标记(Semantic Wavelet-Induced Frequency-Tagging, SWIFT)高层语义表征,即让图片按固定节奏从无序逐渐变为可识别、再恢复为无序,从而使大脑在每秒 1.3 次的节律下对图片类别产生稳定反应。在此基础上,研究者考察两者产生的 IM 成分。结果发现,SSVEP、SWIFT 信号以及各种 IM 成分都存在显著的频率标记效应,且三类信号在头皮分布上呈现出不同特征:SSVEP 和 IM 主要分布于枕区,而 SWIFT 更多见于颞顶区域。进一步分析表明,随着刺激确定性的提高,即被试对即将出现刺激的可预测程度增加,SSVEP 信号并未发生显著变化,SWIFT 信号逐渐减弱,而 IM 成分则显著增强。这一结果揭示了知觉并非单纯依赖感觉输入,而是建立在自上而下预测与自下而上信息持续整合的基础之上。与之不同,Drijvers 等人(2021)则将频率标记方法直接应用于视听整合研究。实验中,当运用视觉(68 Hz)和听觉(61 Hz)频率标记技术向被试呈现清晰语音与一致手势的刺激时,研究发现,在听觉和视觉标记信号的 IM 频率(68 Hz-61

Hz = 7Hz)处观测到一个峰值,且该峰值在左侧额下回和左侧颞区表现得最为强烈。该发现表明,IM 频率处增强能够反映出视听整合的难易程度。此研究揭示了大脑在语义情境下整合听觉和视觉信息的非线性过程,为深入研究多模态整合机制提供了重要线索。

### 3.5. 情感与高阶认知研究

情感与高阶认知过程紧密相连,对人类的行为模式和决策过程有着深远影响。研究者也开始尝试使用 SSVEP 探究情绪图片的感知处理机制以及其对神经活动的调节作用。例如,Keil 等人(2012)研究了不同情绪效价对 SSVEP 信号的影响。实验中,被试需要观看以 10 Hz 频率闪烁的三种情绪效价的图片(愉快、中性、不愉快)。结果发现,10 Hz 频率标记成功诱发了稳定的 SSVEP 反应。与中性图片相比,愉快图片在 10 Hz 处的 SSVEP 响应显著增强,且这种增强主要分布于枕叶视觉皮层及顶叶相关区域。同时,愉快图片还提高了视觉皮层与颞叶、顶叶及额叶区域在 10 Hz 频率上的功能耦合。愉快与不愉快图片之间未见显著差异,这表明该效应主要反映情绪唤醒水平对视觉加工和大脑网络协同活动的增强作用。与 Keil 等人(2012)的研究关注点不同,Nie 和 Ku (2023)将研究重点放在情绪信息的早期编码上。结果显示,以 60 Hz 高频闪烁呈现的视觉刺激成功诱发了 SSVEP,且反应主要分布于枕顶区。基于 60 Hz 的 SSVEP 的多变量分析发现,刺激呈现期间情绪效价信息可以被显著解码,其中,三分类条件(积极、消极、中性)以及积极-消极两分类条件均表现出显著高于随机水平的分类准确率,而语义类别信息则未能被成功解码。进一步的分析显示,情绪解码主要依赖于枕顶区电极信号,且在刺激呈现前的基线阶段,不存在可解码的情绪或语义信息。上述结果说明,高频 60 Hz 的 SSVEP 不仅能够稳定标记视觉加工过程,而且能够反映对情绪信息的早期表征。这些发现提示,未来研究者可以通过操纵不同频率的情绪图片,来考察不同阶段的情绪信息。那么,未来研究者能否通过精细操纵情绪图片呈现频率来完整构建情绪加工的认知过程模型,这是一个很有前景的理论问题。

## 4. 未来展望

SSVEP 或者基于频率标记的 SSVEP 研究中的一个重要问题是,研究者如何选择不同的刺激频率。首先,研究者需要考虑不同频率信号之间的相互干扰。如果不同刺激频率过于接近,则可能会出现信号过度的重叠;如果选择的刺激频率过于分散,则可能会出现信号整合的困难。前文虽然提及到在选择不同刺激频率应该考虑刺激的认知加工过程的时间进程,但目前仍缺乏足够且系统的研究证据。更重要的是,高频率的刺激是否会对应着高层级的认知加工过程中的某些早期的微观认知过程(比如目前关注较大的 40 Hz),这也是未知的。这些可能都是未来需要重点探讨的问题。

SSVEP 或者基于频率标记的 SSVEP 的最大的特点就是,研究者可以使用少量的试次,来获得更高的信噪比。但是这种相对的固定的实验范式则很难扩展到其他的实验范式中,所以未来的另一个很有前景的方向便是开发更多的、具有开创性的实验范式。虽然 SSVEP 具有较高的信噪比,但是若将之拓展到更加生活化的场景中,SSVEP 是否还能成为比较有效的、抗干扰的信号。

## 基金项目

感谢安徽省大学生创新训练计划项目基金(项目号: S202410371162)和阜阳师范大学科研项目基金(项目号: 2024KYQD0025)的资助。

## 参考文献

- 刘武巧(2022). 基于 CFS 与 Frequency-Tagging EEG 意识下视觉认知的研究. 硕士学位论文,昆明: 云南大学.
- Aissani, C., Cottreau, B., Dumas, G., Paradis, A. L., & Lorenceau, J. (2011). Magnetoencephalographic Signatures of Visual

- Form and Motion Binding. *Brain Research*, 1408, 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.05.051>
- Alonso-Prieto, E., Van Belle, G., Liu-Shuang, J., Norcia, A. M., & Rossion, B. (2013). The 6 Hz Fundamental Stimulation Frequency Rate for Individual Face Discrimination in the Right Occipito-Temporal Cortex. *Neuropsychologia*, 51, 2863-2875. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.08.018>
- Alp, N., Kogo, N., Van Belle, G., Wagemans, J., & Rossion, B. (2016). Frequency Tagging Yields an Objective Neural Signature of Gestalt Formation. *Brain and Cognition*, 104, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2016.01.008>
- Appelbaum, L. G., & Norcia, A. M. (2009). Attentive and Pre-Attentive Aspects of Figural Processing. *Journal of Vision*, 9, 1-12. <https://doi.org/10.1167/9.11.18>
- Boremanse, A., Norcia, A. M., & Rossion, B. (2013). An Objective Signature for Visual Binding of Face Parts in the Human Brain. *Journal of Vision*, 13, 1-18. <https://doi.org/10.1167/13.11.6>
- Boremanse, A., Norcia, A. M., & Rossion, B. (2014). Dissociation of Part-Based and Integrated Neural Responses to Faces by Means of Electroencephalographic Frequency Tagging. *The European Journal of Neuroscience*, 40, 2987-2997. <https://doi.org/10.1111/ejn.12663>
- Chen, X., Wang, Y., Zhang, S., Xu, S., & Gao, X. (2019). Effects of Stimulation Frequency and Stimulation Waveform on Steady-State Visual Evoked Potentials Using a Computer Monitor. *Journal of Neural Engineering*, 16, Article 066007. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab2b7d>
- Ciobanu, A., Shibata, K., Ali, L., Rioja, K., Andersen, S. K., Bavelier, D., & Bediou, B. (2023). Attentional Modulation as a Mechanism for Enhanced Facial Emotion Discrimination: The Case of Action Video Game Players. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 23, 276-289. <https://doi.org/10.3758/s13415-022-01055-3>
- Cottareau, B. R., Mckee, S. P., Ales, J. M., & Norcia, A. M. (2011). Disparity-Tuned Population Responses from Human Visual Cortex. *Journal of Neuroscience*, 31, 954-965. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3795-10.2011>
- Drijvers, L., Jensen, O., & Spaak, E. (2021). Rapid Invisible Frequency Tagging Reveals Nonlinear Integration of Auditory and Visual Information. *Human Brain Mapping*, 42, 1138-1152. <https://doi.org/10.1002/hbm.25282>
- Fawcett, I. P., Barnes, G. R., Hillebrand, A., & Singh, K. D. (2004). The Temporal Frequency Tuning of Human Visual Cortex Investigated Using Synthetic Aperture Magnetometry. *Neuroimage*, 21, 1542-1553. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.10.045>
- Gordon, J., Bruinsma, W. P., Foong, A. Y., Requeima, J., Dubois, Y., & Turner, R. E. (2019). *Convolutional Conditional Neural Processes*. Arxiv:1910.13556.
- Gordon, N., Koenig-Robert, R., Tsuchiya, N., Van Boxtel, J. J., & Hohwy, J. (2017). Neural Markers of Predictive Coding under Perceptual Uncertainty Revealed with Hierarchical Frequency Tagging. *eLife*, 6, E22749. <https://doi.org/10.7554/eLife.22749.013>
- Kabdebon, C., Fló, A., De Heering, A., & Aslin, R. (2022). The Power of Rhythms: How Steady-State Evoked Responses Reveal Early Neurocognitive Development. *Neuroimage*, 254, Article 119150. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119150>
- Keil, A., Costa, V., Smith, J. C., Sabatinelli, D., McGinnis, E. M., Bradley, M. M., & Lang, P. J. (2012). Tagging Cortical Networks in Emotion: A Topographical Analysis. *Human Brain Mapping*, 33, 2920-2931. <https://doi.org/10.1002/hbm.21413>
- Kuś, R., Duszyk, A., Milanowski, P., Łabęcki, M., Bierzyńska, M., Radzikowska, Z. et al. (2013). On the Quantification of SSVEP Frequency Responses in Human EEG in Realistic BCI Conditions. *PLOS ONE*, 8, E77536. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077536>
- Morgan, S. T., Hansen, J. C., & Hillyard, S. A. (1996). Selective Attention to Stimulus Location Modulates the Steady-State Visual Evoked Potential. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93, 4770-4774. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.10.4770>
- Mu, J., Grayden, D. B., Tan, Y., & Oetomo, D. (2022). Frequency Set Selection for Multi-Frequency Steady-State Visual Evoked Potential-Based Brain-Computer Interfaces. *Frontiers in Neuroscience*, 16, Article ID: 1057010. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1057010>
- Nie, L., & Ku, Y. (2023). Decoding Emotion Form High-Frequency Steady State Visual Evoked Potential (SSVEP). *Journal of Neuroscience Methods*, 395, Article 109919. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2023.109919>
- Norcia, A. M., Appelbaum, L. G., Ales, J. M., Cottareau, B. R., & Rossion, B. (2015). The Steady-State Visual Evoked Potential in Vision Research: A Review. *Journal of Vision*, 15, 1-46. <https://doi.org/10.1167/15.6.4>
- Norcia, A. M., Candy, T. R., Pettet, M. W., Vildavski, V. Y., & Tyler, C. W. (2002). Temporal Dynamics of the Human Response to Symmetry. *Journal of Vision*, 2, 132-139. <https://doi.org/10.1167/2.2.1>
- Panitz, C., Keil, A., & Müller, M. M. (2023). Sustained Selective Attention to Chromatic Information Enhances Visuo-cortical Gain at the Population Level. *European Journal of Neuroscience*, 58, 3518-3530. <https://doi.org/10.1111/ejn.16113>

- 
- Regan, D. (1966). Some Characteristics of Average Steady-State and Transient Responses Evoked by Modulated Light. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 20, 238-248. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(66\)90088-5](https://doi.org/10.1016/0013-4694(66)90088-5)
- Regan, D. (1989). Evoked Potentials and Evoked Magnetic Fields in Science and Medicine. *Human Brain Electrophysiology*, 3, 59-61.
- Regan, M. P., & Regan, D. (1988). A Frequency Domain Technique for Characterizing Nonlinearities in Biological Systems. *Journal of Theoretical Biology*, 133, 293-317. [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(88\)80323-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(88)80323-0)
- Rossion, B., & Boremanse, A. (2011). Robust Sensitivity to Facial Identity in the Right Human Occipito-Temporal Cortex as Revealed by Steady-State Visual-Evoked Potentials. *Journal of Vision*, 11, 1-21. <https://doi.org/10.1167/11.2.16>
- Silberstein, R. B., & Pipingas, A. (1995). Steady-State Visually Evoked Potential Topography During the Wisconsin Card Sorting Test. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 96, 24-35. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(94\)00189-R](https://doi.org/10.1016/0013-4694(94)00189-R)
- Srinivasan, R., Bibi, F. A., & Nunez, P. L. (2006). Steady-State Visual Evoked Potentials: Distributed Local Sources and Wave-Like Dynamics Are Sensitive to Flicker Frequency. *Brain Topography*, 18, 167-187. <https://doi.org/10.1007/s10548-006-0267-4>
- Toffanin, P., De Jong, R., Johnson, A., & Martens, S. (2009). Using Frequency Tagging to Quantify Attentional Deployment in A Visual Divided Attention Task. *International Journal of Psychophysiology*, 72, 289-298. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.01.006>
- Vialatte, F. B., Maurice, M., Dauwels, J., & Cichocki, A. (2010). Steady-State Visually Evoked Potentials: Focus on Essential Paradigms and Future Perspectives. *Progress in Neurobiology*, 90, 418-438. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2009.11.005>
- Yantis, S., & Jonides, J. (1990). Abrupt Visual Onsets and Selective Attention: Voluntary Versus Automatic Allocation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 121-134. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.1.121>