

华东师范大学心理与认知科学学院
本 科 生 学 士 学 位 论 文

字频对中文整体性视觉加工的影响：来自稳态视觉诱发电位的证据

Does occurrence frequency influences holistic processing of
Chinese characters? Evidence from an SSVEP study

姓 名：戴運維

学 号：10170350241

专 业：心理学

指导教师：周晓林

职 称：教授

完成时间：2021 年 5 月

华东师范大学学位论文诚信承诺

本毕业论文是本人在导师指导下独立完成的，内容真实、可靠。本人在撰写毕业论文过程中不存在请人代写、抄袭或者剽窃他人作品、伪造或者篡改数据以及其他学位论文作假行为。

本人清楚知道学位论文作假行为将会导致行为人受到不授予/撤销学位、开除学籍等处理（处分）决定。本人如果被查证在撰写本毕业论文过程中存在学位论文作假行为，愿意接受学校依法作出的处理（处分）决定。

承诺人签名：

日期： 年 月 日

华东师范大学学位论文使用授权说明

本论文的研究成果归华东师范大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本学位论文作者和指导教师完全了解华东师范大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权华东师范大学可以将论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

保密的毕业论文（设计）在解密后应遵守此规定。

作者签名：

导师签名：

日期： 年 月 日

目 录

| | |
|--|----|
| 摘要 | I |
| Abstract | I |
| 1 前言 | 1 |
| 1.1 汉字视觉加工的整体性 | 1 |
| 1.2 SSVEP 在研究汉字整体性视觉加工中的应用 | 1 |
| 1.3 知觉经验对汉字整体性视觉加工的影响 | 2 |
| 1.4 使用 SSVEP 探究知觉经验与汉字整体性视觉加工的关系 | 3 |
| 2 方法 | 3 |
| 2.1 被试 | 3 |
| 2.2 实验刺激 | 4 |
| 2.3 研究程序 | 5 |
| 2.4 脑电记录与数据处理 | 5 |
| 3 结果 | 6 |
| 3.1 汉字视觉加工的 SSVEP 反应 | 6 |
| 3.2 对左右一致字的 SSVEP 反应 | 7 |
| 3.3 字频对左右不一致字的 IM 信号的影响 | 10 |
| 3.4 探究刺激物对称性与类型对 IM 反应的影响 | 13 |
| 4 讨论 | 14 |
| 参考文献 | 17 |
| 附录 | 19 |
| 致谢 | 25 |

摘要

本研究探讨知觉经验对汉字整体性加工的影响。研究以字频操纵知觉经验，使用稳态视觉诱发电位（SSVEP）中的 IM 频率信号作为整体性加工的电生理指标。实验选取左右结构提手旁的汉字（例如：“控”），使用 SUBTLEX-CH 字频库将汉字分成高频、低频与假字三组，探究字频对 IM 频率信号信噪比的影响；同时采用前人研究使用的左右对称的汉字（例如：“林”）作为填充刺激，以验证实验操纵的有效性。被试需佩戴 32 导脑电帽观看屏幕上闪烁的汉字，汉字的左右部分随机以频率 $f_1 = 6\text{ Hz}$ 或 $f_2 = 7.2\text{ Hz}$ 闪烁，以诱发被试的周期性脑活动（即诱发 SSVEP）。通过比较三组汉字诱发的整体性加工信号（IM 频率信号，即 $f_1 + f_2 = 13.2\text{ Hz}$ ）信噪比，验证“对知觉经验多的汉字有更强的整体性加工”的假设。结果发现 6Hz、7.2Hz 与 13.2Hz 处显著的信号，重复了经典的 SSVEP 效应。同时，针对左右对称的汉字，真字诱发的 IM 信号高于假字，这提示个体对左右对称真字的整体性加工强于假字。但是，针对左右不对称的汉字，则没有发现高频字、低频字与假字组之间的 IM 频率信号差异。进一步分析发现，IM 频率信号在真字和假字之间的差异只体现在左右对称的汉字上，而没有体现在左右不对称的汉字上，这提示汉字的对称性会影响其整体性加工。

关键词： 字频，知觉经验，汉字整体性加工，IM 信号，稳态视觉诱发电位（SSVEP）

Abstract

Current study investigates how perceptual experience influences holistic processing of Chinese characters. We manipulate perceptual experience using the occurrence frequency (based on SUBTLEX-CH database) of Chinese characters and compare IM signal SNR in an SSVEP study that has been proven related to holistic processing. For this purpose, three groups of asymmetric Chinese characters are used: High Frequency, Low Frequency and artificial (fake) characters. We also included two groups of symmetric Chinese characters: real and fake characters to validate our experiment procedure. The two parts of one character are displayed using two different base frequencies ($f_1 = 6\text{ Hz}$ or $f_2 = 7.2\text{ Hz}$), so as to elicit SSVEP responses. We compare group-wise differences of the signal at $f_1 + f_2 = 13.2\text{ Hz}$, which is related to holistic processing of Chinese characters. We found significant signal at 6 Hz, 7.2 Hz and especially 13.2 Hz, as common observed in SSVEP studies. By using symmetric character, we observed, as previous study showed, real characters evoked larger IM responses, indicating a stronger holistic processing for real characters. However, three groups of asymmetric characters did not show significant differences in IM signal SNR. Further more, the stronger IM signal of real was only observed when using symmetric characters, indicating symmetry plays an important role in holistic processing.

Key words: Character frequency, perceptual experience, holistic processing, IM signal, SSVEP

1 前言

1.1 汉字视觉加工的整体性

汉字包括最基本的笔画单位，也包括笔画所组成的结构整体。早期的研究使用反应时研究汉字视觉加工的机制，加工文字时，随着笔画数的增多，加工文字所需的时间也增多，说明汉字视觉加工的基本单位是笔画，而笔画所组成的部件数与反应时有关，说明汉字的加工过程涉及对笔画所组成的结构整体的加工(彭聃龄 & 王春茂, 1997)。

近年来，许多研究关注汉字的视觉加工的整体性特点。其中一个证据来自 Wong et al. (2012)使用组合范式（Composite Paradigm）所做的研究。在每个试次中，研究者要求被试注意先后出现的两个汉字中某一个结构（如左右结构汉字中的左偏旁），并判断该结构在两次出现的汉字之间是否相同。如果被试对于汉字的加工只涉及对其组成部分的单独加工，那么不要求被试注意的部分不会影响被试的判断，然而研究者发现被试在组合范式中仍然会受到不要求他注意的汉字部分的干扰——如果不要要求被试注意的部分前后两次呈现时发生了改变，被试的判断会有更长的反应时。这就说明即使让被试只关注汉字中的某一个部分，被试也自动将汉字作为一个整体加工。这一观点也得到 fMRI 证据的支持(Mo et al., 2015)，研究者发现腹侧视觉系统中存在对汉字整体的表征。

1.2 SSVEP 在研究汉字整体性视觉加工中的应用

Cai et al. (2020)使用稳态视觉诱发电位（Steady-state Visual Evoked Potential, SSVEP）为汉字的整体性视觉加工提供了电生理学证据。SSVEP 指的是视觉刺激周期性变化时在被试脑电中记录到的周期性脑活动，其具有稳定的峰值与相位，因而称之为稳态视觉诱发电位。由于指定的刺激物变化频率与所诱发的 SSVEP 频率一致，我们便可以同时指定多个频率呈现不同的刺激物，并记录所诱发的 SSVEP，使用傅里叶变换等时频分析方法分离出不同频率的信号，从而将大脑对这些不同刺激物的反应分开研究，即频率标记（frequency-tagging）技术(Norcia et al., 2015)。

Cai et al. (2020)使用 SSVEP 研究对中文字的视觉加工。他们分别给被试持续呈现一些左右部分相同的真字和假字，但左右两边的以不同频率(6Hz 与 7.2Hz)闪烁。通过时频分析，研究者分析枕叶电极 O1、O2 与 Oz 处的信号，在 6Hz 与 7.2Hz 的基本频率上观察到对应的脑电反应，表明实验成功诱发了 SSVEP。更重要的是，研究

者还观察到 f_1+f_2 这一频率（13.2Hz）上存在显著的反应，这种诸如 $m f_1+n f_2$ 频率上出现的反应，称为调变反应（Intermodulation Response, IM 反应），这一信号只会基本频率（ f_1 、 f_2 ）上的信号经过非线性组合（如 $f_1 * f_2$ ）时才会产生，而在两个信号之间发生线性组合（如 $f_1 + f_2$ ）时不会产生(Gordon et al., 2019)。Cai et al. (2020)的研究中观察到加工汉字两个部分的信号产生了非线性组合，这提示，对汉字的部分不是单独的加工，而是将其组织成了一个整体。同时，IM 信号在被试注视真字时更强，这表明 IM 反应是对汉字这一有意义的刺激物存在整体性的加工，而不是自下而上的知觉特征导致的。

1.3 知觉经验对汉字整体性视觉加工的影响

对多种类型的刺激物，人们随着与之有关的知觉经验增加会产生自动化的加工，形成一种“知觉专长（perceptual expertise）”（Curby, 2010）。整体性视觉加工也被认为是一种知觉专长(Wong et al., 2012)，对于面孔(Diamond & Carey, 1986; Richler et al., 2008)、汽车(Gauthier et al., 2003)、指纹(Busey & Vanderkolk, 2005)、棋局(Bilalić et al., 2011)、乐谱(Wong et al., 2012)、人工刺激物“Greeble” (Gauthier et al., 1998)等刺激物，专家相比新手都体现出了更强的整体性加工。比如，人们在组合范式中在判断自己相同种族(Michel et al., 2006)或更熟悉的面孔(Harris & Aguirre, 2008)时会受到更多干扰，体现出了更强的整体性加工水平。

最近的研究认为，对文字的加工也是一种知觉专长(Mccandliss et al., 2003; Ventura et al., 2019)。许多研究(Hsiao & Cottrell, 2009; Liu et al., 2016; Richler et al., 2011; Tso et al., 2014; Wong et al., 2012; Wong et al., 2011)也都从知觉经验的角度研究对视觉词的整体加工。Wong et al. (2012)使用上文提到的组合范式，发现汉字母语者相比非母语者受到非注意部分的干扰更强，即对汉字的整体有更强的整体加工。也就是知觉经验提高了整体性加工水平。

然而，知觉经验对汉字整体性加工的影响研究结论不一致。在使用组合范式研究汉语读者与非汉语读者(Wong et al., 2012)，以及汉语母语者与汉语作为第二语言的人(Wong et al., 2011)对汉字整体性加工效应强度的实验中，研究者发现专家比新手对汉字的整体加工更强。但在另一些研究中，汉语读者与非汉语读者(Hsiao & Cottrell, 2009)相比，其对汉字有更少的整体性加工；且简体中文读者与繁体中文读者加工简体中文汉字时，有更少的整体性(Liu et al., 2016)。Richler et al. (2011)在组合范式中通过改变实验条件，发现新手体现出的整体性加工不再出现。因此，新手体现出的整体性加工

是来自于对刺激整体的注意策略，可以通过改变实验条件消除，而老手的整体性加工不受实验条件的影响，这表明老手的整体性加工是自动化的加工过程。因此，作者指出前述研究结论不一致的原因是未考虑到注意策略在组合范式中的作用。

1.4 使用 SSVEP 探究知觉经验与汉字整体性视觉加工的关系

本研究希望进一步探究知觉经验与汉字整体加工的关系。过往研究多使用组合范式（composite paradigm），比较新手和专家对汉字的整体性加工水平，以评估知觉经验的作用。本研究则使用不同频率的汉字操控知觉经验(朱晓平 et al., 1992)，出现频率高的汉字，熟练的中文使用者应会对其有更多的知觉经验。

使用 SSVEP，Cai et al. (2020)发现被试对真字相比假字，在枕叶 O1、O2、Oz 电极处有更强的 IM 频率信号，证明了这一指标能反映对汉字的整体性加工。在他们的研究中，加工真字时的 IM 频率信号在左侧电极 O1 处更强，这一发现也与枕叶皮层在文字的视觉加工上的作用吻合(Dehaene & Cohen, 2011; Liu et al., 2008)。本研究使用相同的范式，以 6Hz、7.2Hz 两个频率呈现汉字的左右两个部分，记录所诱发的 SSVEP，选取 O1、O2、Oz 三个电极作为感兴趣区，并将 IM 反应作为其整体加工的神经指标。由于 IM 反应体现了输入信号在系统中发生的非线性整合，其峰值大小能反应对中文字整体性加工的程度。

值得一提的是，Cai et al. (2020)使用的刺激物左右部分由相同的汉字组成（如“羽”），本研究使用更普遍出现的的左右不一致的汉字（如“控”）。为了达到控制子成分字频的效果，在选取刺激物时固定其中的部首，匹配右半部字的字频。选取更普遍出现的汉字进行实验有助于提高研究的生态效度。

本研究假设对于字频操控的被试有不同知觉经验的汉字，其 IM 频率信号存在但强度有差异，高频汉字引起的 IM 频率信号更强。

2 方法

2.1 被试

本研究共招募 21 名大学生（11 名男性，10 名女性，年龄 $M = 22.19$, $SD = 2.13$ ）。根据 Cai et al. (2020)的研究，这一样本量已经足够观察到汉字整体性加工有关的信号。被试皆为右利手，中文母语者，未被诊断过有阅读相关的障碍，视力或经校正后的视力正常。在实验开始前，被试需签署知情同意书，本研究通过华东师范大学伦理委员会的审批（HR2-1104-2020）。

2.2 实验刺激

本研究使用基于 MATLAB 的 Psychophysics Toolbox Version 3 (Brainard, 1997; Pelli, 1997)呈现刺激物。刺激物在一台 24 寸、144Hz 刷新率的显示器上以 $1,024 \times 768$ 的分辨率呈现，视角大约为 10° 。

实验中共有 25 个汉字刺激物，分为 5 组（图 1）。为了验证字频对整体性加工的影响，设计其中 3 组左右组成部分不一致的汉字，根据汉字出现频率分为高频字组（a 组，字频 $M = 377.6$ 字/百万字， $SD = 280.9$ ）、低频字组（b 组，字频 $M = 1.4$ 字/百万字， $SD = 8.8$ ）、与假字组（c）。每组汉字左半部分部首固定，右半部组成部分为真字，笔画数固定为 8，组间匹配右半部字的字频（ $M = 266.2$ ），本实验挑选提手旁作为部首。为了重复验证 IM 信号能反映汉字的整体性加工，本研究设计两组左右组成部分一致的汉字作为填充刺激以重复 Cai et al. (2020)等人的实验，分为真字组（d）和假字组（e），组成部分为真字，笔画数固定为 8，组间匹配字频（ $M = 450.7$ ）。汉字的出现频率来自 SUBTLEX-CH 数据库(Cai & Brysbaert, 2010)。

实验结束后，被试需要填写一份问卷（附录 2），评价被试是否认识这些汉字，以确保刺激物选取的有效性。

| | | | | | |
|-------------|----|----|----|----|----|
| (a) 高频字组 | 控 | 授 | 据 | 掉 | 接 |
| (b) 低频字组 | 掺 | 掴 | 捻 | 掼 | 挨 |
| (c) 假字组 | 搠 | 掙 | 搵 | 搥 | 搯 |
| (d) 左右一致真字组 | 林 | 双 | 羽 | 喜喜 | 吉吉 |
| (e) 左右一致假字组 | 左左 | 马马 | 千千 | 者者 | 足足 |

图 1 实验所用刺激

Figure 1 Stimuli

为了探究汉字对称性对汉字整体性加工有关效应的影响，本实验从左右不一致的真字中抽取 5 个汉字与左右一致真字组、左右一致假字组与左右不一致假字组在笔画数和子成分字频上匹配，形成左右不一致真字组。将对称性作为一个变量进行分析。

2.3 研究程序

实验一共包含 10 轮，每轮共 5 个试次，被试可以自由选择每轮实验开始的时间(图 2)。每一试次中，屏幕上将出现一个汉字，其左右部分以不同频率(6Hz 或 7.2Hz)闪烁，一共呈现 30 秒，被试被要求注意这个汉字。汉字出现的顺序经伪随机处理。在一个试次结束后，屏幕上将出现持续 5 秒的注视点。为了平衡左右部分的呈现频率，每个汉字将呈现两次，前后的顺序也经伪随机处理。

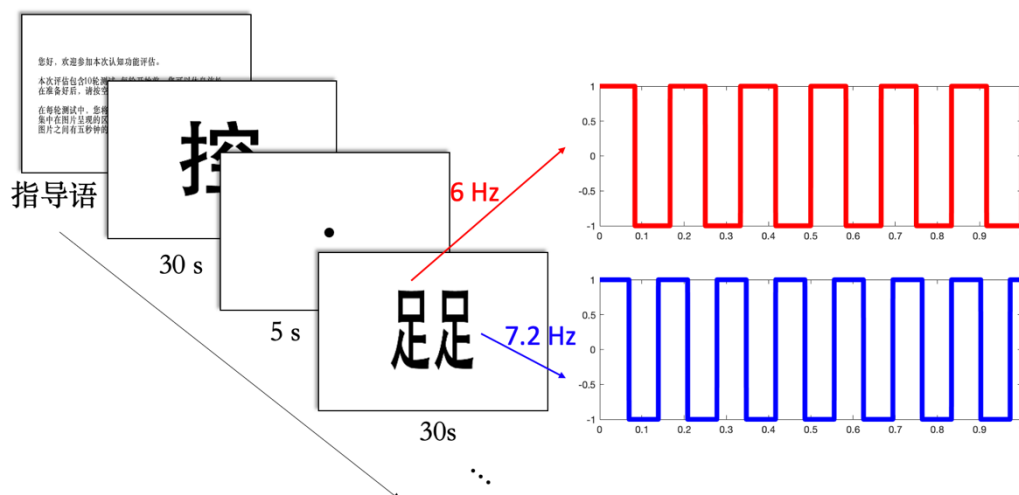


图 2 实验程序

Figure 2 Procedure

2.4 脑电记录与数据处理

在每一轮实验中，被试需要佩戴电极帽并全程将下巴保持在下巴固定器上，以控制眼睛与屏幕的距离，并减少头动。脑电信号由一个 32 导 Ag/AgCl 电极帽 (BrainCapMR, BrainProducts) 采集，离线参考点位于左侧乳突，电极分布遵循国际 10-20 标准(Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T7, T8, AFz, Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, POz, Oz, FC3, FC4, FT7, FT8, CP3, CP4, TP10, VEOG1, VEOG2, HEOG)。脑电信号经放大器(BrainAmpMR, BrainProducts)处理，放大器带通滤波频段为高通 0.1 Hz(时

间常数 1.59155)、低通 100 Hz, 并作 50 Hz 的带阻滤波, 信号采样率为 1000Hz。在记录开始前, 每个电极的电阻保持在 5K Ω 以下。

使用 EEGLAB(Delorme & Makeig, 2004)提供的函数与研究者编写的程序进行脑电数据预处理。被试的脑电数据经过平均重参考, 并根据时间标记分成 50 个试次对应的段落。对所得的每一段信号, 使用 `detrend()`函数去除线性趋势, 这一步骤有助于去除趋势伪迹(trend artifact), 改进时频分析的结果(Bach & Meigen, 1999)。最后, 使用傅里叶变换对脑电信号作时频分析, 分别取得各试次所记录到的脑电活动在各个频率上的信号强度, 并对每个条件的 5 个汉字、2 次呈现做平均处理。为了衡量特定频率上信号的强度, 本研究使用信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)这一指标校正基线信号强度, 计算方法是将该频率上的信号峰值除以基线(该频率 $\pm 0.5\text{Hz}$ 的范围内, 排除该频率以及与该频率相邻的两个频率)上的平均信号幅度(Lithfous & Rossion, 2018)。

为了探究整体性加工的神经机制, 选取 O1、O2、Oz 三个感兴趣电极的信号, 并计算 6 Hz、7.2 Hz 与 13.2 Hz 处的信噪比纳入统计分析。由于 6 Hz 和 7.2 Hz 是实验中呈现刺激物的基本频率, 对于有效的试次而言, 这两个频率上应存在较强的信号。因此, 为了避免无效试次对统计结果的影响, 基本频率信号信噪比低于 1 的试次被剔除。若 O1、O2、Oz 任一电极剔除超过 50%试次, 该被试的数据需要剔除。在实验所收集的 21 个数据中, 一名男性被试的数据满足该剔除标准, 没有纳入最终分析。

3 结果

3.1 汉字视觉加工的 SSVEP 反应

本研究选取左右不一致汉字进行实验, 以验证实验假设。此外, 还设计了(Cai et al., 2020)使用的左右一致汉字, 以探究 IM 信号在反应汉字整体性加工上的有效性并重复实验。平均所有试次与三个感兴趣电极的信号, 进行时频分析, 结果如图 3 所示。可见在 f1、f2 的基本频率上与 mf1、nf2 的谐波(harmonics)处有较明显的信号, 表明以基本频率周期性地呈现汉字的两个部分, 成功诱发了被试这两个频率上的脑电活动。在 f1 + f2 处可见微弱的信号, 这一 IM 频率被认为是汉字整体性加工的生理证据。单样本 t 检验结果表明, 在 O1、O2、Oz 3 个电极处所记录到的 6 Hz、7.2 Hz 与 13.2 Hz 信号的信噪比皆显著大于 1 ($p < .001$)。

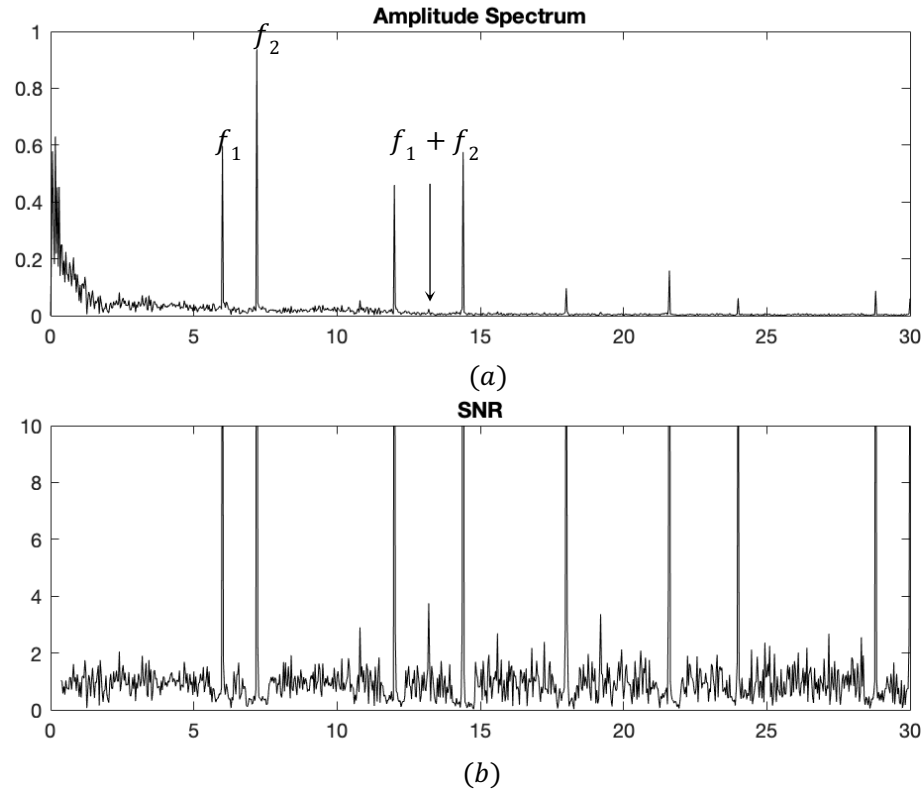


图 3 平均 O1、O2、Oz 电极与所有刺激物条件时的脑电信号 (a) 振幅谱 (b) 信噪比

Figure 3 Grand Average Amplitude Spectrum (a) Amplitude Spectrum (b) Signal-to-noise Ratio (SNR)

3.2 对左右一致字的 SSVEP 反应

为了验证汉字整体性加工与 IM 信号的关系，本实验分别以 6 Hz、7.2 Hz 呈现左右一致刺激物的两个部分。若 IM 信号体现了对汉字的整体性加工(Cai et al., 2020)，应在 13.2 Hz 处出现 IM 信号，且该信号在真字条件下显著强于假字。

对左右一致的真字与假字分别平均 O1、O2、Oz 电极的信号并做频谱分析。在基本频率($f_1 = 6$ Hz, $f_2 = 7.2$ Hz)及其谐波频率(如 $2f_1 = 12$ Hz, $2f_2 = 14.4$ Hz)处可见明显的信号，然而 IM 频率($f_1 + f_2 = 13.2$ Hz)上信号不明显（图 4 表明真字的 IM 信号信噪比较高，振幅谱结果见附录 3 图 9 所示。）。

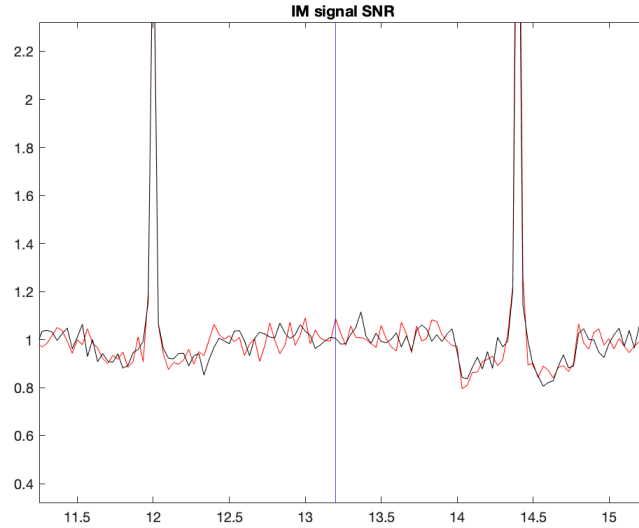


图 4 平均 O1、O2、Oz 电极真字 vs. 假字条件时的脑电信号信噪比。红色：真字；黑色：假字；蓝色标记处为 13.2 Hz

Figure 4 Contrasting real vs. fake characters SNRs, with O1, O2, Oz channels data averaged. Red for real words, black for fake words, blue line indicating 13.2 Hz

单样本 t 检验结果表明，在 O1、O2、Oz 电极处所记录到的 6 Hz 与 7.2 Hz 信号的信噪比皆显著大于 1 ($p < .001$)。与 Cai et al. (2020) 的结果一致，IM 信号($f = 13.2$ Hz)具有较低的信噪比。真字条件下 O1 电极所记录到的 IM 信号强度未显著大于 1($t(20) = 1.387, p = .181$)；在假字条件下，O1($t(20) = -.223, p = .826$)、O2($t(20) = .024, p = .981$)与 O2($t(20) = .477, p = .638$)电极所记录到的 IM 信号信噪比皆未显著大于 1，其余条件下的 IM 信号信噪比显著大于 1(见附录 4 表 2)。

3.2.1 基本频率信号峰值与信噪比 对基本频率信号峰值做 2 (类型：真字、假字) \times 3 (电极：O1、O2、Oz) 的重复测量方差分析，对 6Hz 的信号峰值而言，电极存在($F(2, 38) = 9.633, p < .001, \eta_p^2 = .336$)显著的主效应，主要来自 O1 电极与 O2 ($p = .037$)、Oz ($p < .001$) 电极的显著差异，O1 电极信号峰值比两者显著更小。电极与汉字类型存在显著的交互作用($F(1.295, 24.602) = 4.664, p = .032, \eta_p^2 = .197$ ，结果经 Greenhouse-Geisser 校正)。对 7.2Hz 的信号峰值而言，只发现了电极存在的显著主效应($F(2, 38) = 8.902, p = .001, \eta_p^2 = .319$)。

对基本频率信号信噪比做 2 (类型：真字、假字) \times 3 (电极：O1、O2、Oz) 的重复测量方差分析。对 6Hz 的信号信噪比，电极存在显著的主效应($F(2, 38) = 9.633, p$

$< .001$, $\eta_p^2 = .336$), O1 电极记录到的 6 Hz 信号信噪比比 O2、Oz 电极的显著更小($p < .001$)。对 7.2 Hz 的信号信噪比电极也存在显著的主效应($F(2, 38) = 8.902$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .319$), O1 电极的数值显著小于 Oz 电极($p = .001$)。

3.2.2 IM 频率信号峰值与信噪比 对 IM 信号峰值做 2 (类型: 真字、假字) \times 3 (电极: O1、O2、Oz) 的重复测量方差分析 (见附录 5 图 10), 没有发现汉字类型($F(1, 38) = 2.824$, $p = .109$, $\eta_p^2 = .129$)与电极($F(2, 38) = 1.892$, $p = .165$, $\eta_p^2 = .091$)显著的主效应。且两个因素的交互作用不显著($F(2, 38) = .749$, $p = .48$, $\eta_p^2 = .038$)。

对 IM 信号信噪比做 2 (类型: 真字、假字) \times 3 (电极: O1、O2、Oz) 的重复测量方差分析 (见附录 5 图 11), 没有发现电极($F(1.364, 25.917) = 2.517$, $p = .116$, $\eta_p^2 = .117$, 经 Greenhouse-Geisser 校正)显著的主效应, 且两个因素的交互作用不显著($F(2, 38) = 1.664$, $p = .203$, $\eta_p^2 = .081$)。汉字类型的主效应达到边缘显著水平($F(1, 19) = 4.308$, $p = .059$, $\eta_p^2 = .175$), 这一主效应主要是来自真字和假字条件下 IM 频率信号信噪比的显著差异 (见图 5), 体现为真字条件下记录到更高的 IM 频率信号信噪比。这一结论接近前人研究的发现 (Cai et al., 2020), 即真字的 IM 信号强于假字。

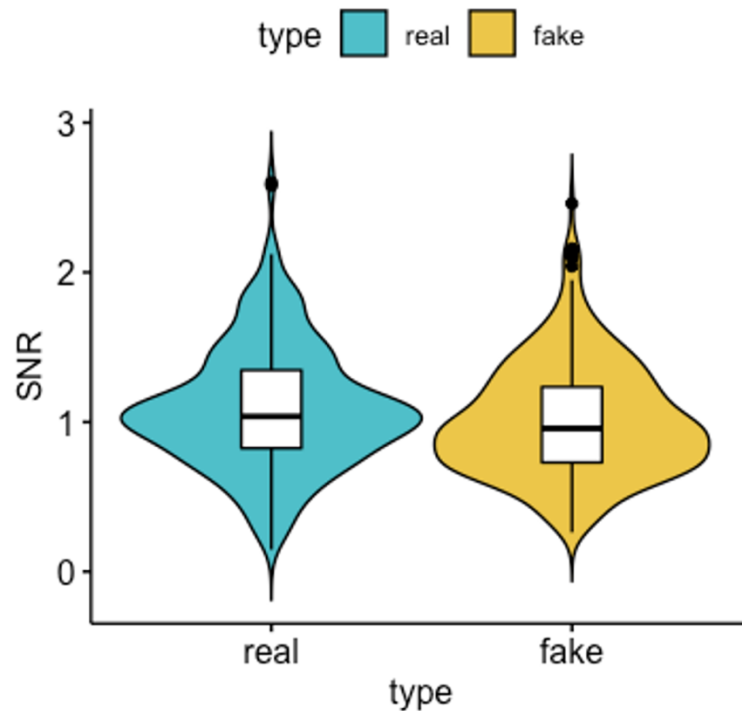


图 5 三个电极真字、假字组间的 IM 信号信噪比强度差异

Figure 5 SNR differences between character group (real vs. fake) across 3 channels

3.3 字频对左右不一致字的 IM 信号的影响

对左右不一致的高频字、低频字与假字分别平均 O1、O2、Oz 电极的信号并做频谱分析，在基本频率($f_1 = 6\text{ Hz}$, $f_2 = 7.2\text{ Hz}$)及其谐波频率(如 $2f_1 = 12\text{ Hz}$, $2f_2 = 14.4\text{ Hz}$)处可见明显的信号，在 IM 频率($f_1 + f_2 = 13.2\text{ Hz}$)上也可见微弱的信号(见附录 6 图 12)。

单样本 t 检验结果表明，在 O1、O2、Oz 3 个电极处所记录到的 6 Hz 与 7.2 Hz 信号的信噪比（见图 6）皆显著大于 1 ($p < .001$)。O1 电极在假字条件下的 IM 信号信噪比未显著大于 1 ($t(20) = .838$, $p = .412$)，其余电极和条件的组合下，IM 信号信噪比皆显著大于 1 ($ps < .05$)。

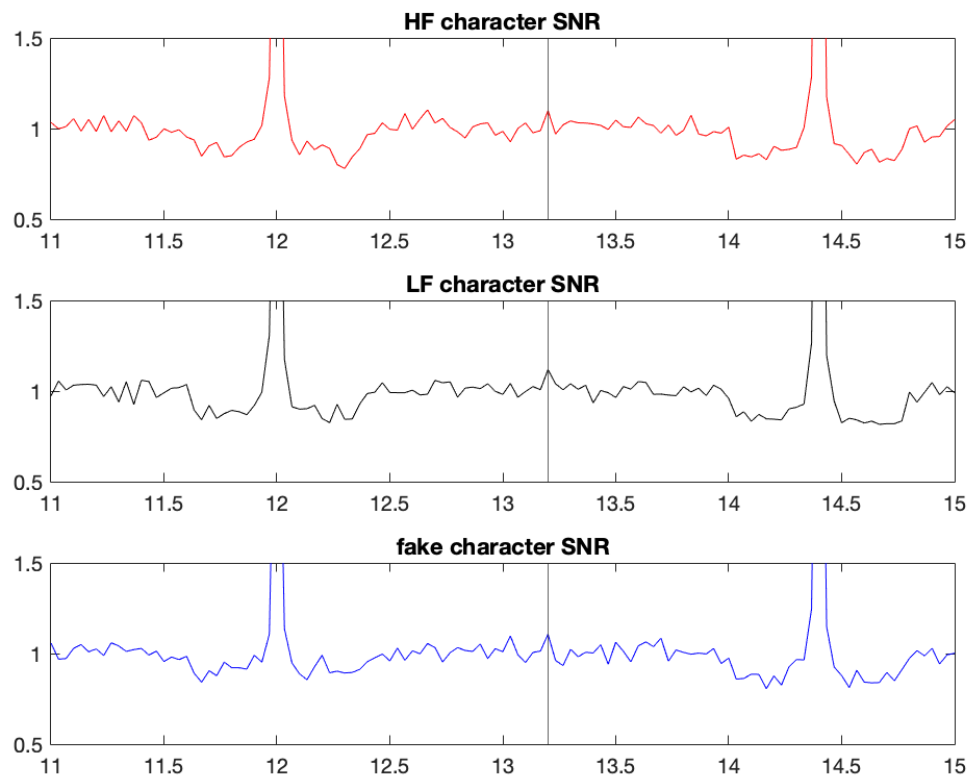


图 6 平均 O1、O2、Oz 电极高频、低频、假字组的信号信噪比。HF: 高频; LF: 低频; fake: 假

字; 蓝色线指示 13.2 Hz 处

Figure 6 SNR across three character groups (HF vs. LF vs. fake) averaged over channel O1, O2 and Oz, blue line indicating 13.2 Hz

3.3.1 基本频率信号峰值与信噪比 分别对 2 个基本频率的信号峰值做 3 (字频：高频、低频、假字) \times 3 (电极：O1、O2、Oz) 的重复测量方差分析。对 6 Hz 的信号峰值而言，电极($F(2, 38) = 15.146, p < .001, \eta_p^2 = .44$)与汉字类型($F(2, 38) = 8.487, p = .001, \eta_p^2 = .309$)有显著的主效应，没有发现显著的交互作用($F(4, 76) = 3.393, p = .013, \eta_p^2 = .152$)。电极的主效应主要来自 O1 电极与 O2 ($p = 0.2$)、Oz ($p < .001$) 电极之间的显著差异，O1 电极的 6 Hz 信号峰值比两个电极都小。字频的主效应来自高频组与假字组之间的显著差异($p = .001$)。对 7.2 Hz 的信号峰值而言，电极也有显著的主效应($F(2, 38) = 12.159, p < .001, \eta_p^2 = .39$)，这一差异来自 O1 和 Oz 电极之间信号峰值的显著差异($p < .001$)，O1 电极的 7.2 Hz 信号峰值更小。字频也有显著的主效应($F(1.316, 25.009) = 21.83, p < .001, \eta_p^2 = .535$ ，经 Greenhouse-Geisser 校正)，高频组的 7.2 Hz 信号峰值显著大于假字组($p = .001$)，但显著低于低频组($p = .037$)。两者的交互作用不显著($F(2.295, 43.601) = 2.22, p = .114, \eta_p^2 = .105$ ，经 Greenhouse-Geisser 校正)。

分别对 2 个基本频率的信号信噪比做 3 (字频：高频、低频、假字) \times 3 (电极：O1、O2、Oz) 的重复测量方差分析。字频对 6 Hz 的信号信噪比有显著的主效应($F(2, 38) = 6.354, p = .04, \eta_p^2 = .251$)，电极对 6 Hz 的信号信噪比也有显著的主效应($F(2, 38) = 12.336, p < .001, \eta_p^2 = .505$)，两者交互作用不显著($F(4, 76) = 2.337, p = .063, \eta_p^2 = .11$)。多重比较结果没有发现高频、低频与假字组之间 6 Hz 信号信噪比的显著差异，而电极的主效应来自 O1 和 O2 电极之间的显著差异，O1 电极的信号比 O2 电极的信号弱($p = .03$)。对 7.2 Hz 的信号信噪比，字频(高频、低频、假字)有显著的主效应($F(2, 38) = 23.22, p < .001, \eta_p^2 = .550$)，电极也有显著的主效应($F(2, 38) = 16.56, p < .001, \eta_p^2 = .466$)，两者交互作用不显著($F(1.99, 37.816) = 2.807, p = .073, \eta_p^2 = .129$ ，经 Greenhouse-Geisser 校正)。事后比较的结果表明电极的主效应主要来自 O1、Oz 两处电极 7.2 Hz 信号信噪比的显著差异，O1 处信号信噪比显著小于 O1 ($p = .008$)、Oz 电极($p < .001$) 信号信噪比；两两三组字频条件下 7.2 Hz 信号的信噪比，发现低频字组相比高频字组有更显著的基本频率信号($p < .001$)。

3.3.2 IM 频率信号峰值与信噪比 对 13.2 Hz 的信号峰值做 3 (字频：高频、低频、假字) \times 3 (电极：O1、O2、Oz) 的重复测量方差分析（见附录 7 图 13），未发现电极 ($F(1.231, 20.924) = .368, p = .695, \eta_p^2 = .021$, 经 Greenhouse-Geisser 校正)、字频 ($F(1.234, 20.981) = .35, p = .606, \eta_p^2 = .02$, 经 Greenhouse-Geisser 校正) 的主效应或交互作用 ($F(2.83, 48.104) = .591, p = .614, \eta_p^2 = .034$, 经 Greenhouse-Geisser 校正)。

对 13.2 Hz 的信号信噪比做 3 (字频：高频、低频、假字) \times 3 (电极：O1、O2、Oz) 的重复测量方差分析（见附录 7 图 14），发现电极的主效应 ($F(2, 34) = 2.812, p = .088, \eta_p^2 = .142$) 边缘显著，事后比较则没有发现电极间的 13.2 Hz 信号信噪比的显著差异 ($\alpha = .05$, 经 Bonferroni 校正)。与假设不同的是，字频对 IM 信号没有显著的主效应 ($F(2, 34) = .117, p = .890, \eta_p^2 = .007$)。电极与字频的交互作用也不显著 ($F(4, 68) = .568, p = .687, \eta_p^2 = .032$)（见图 7）。

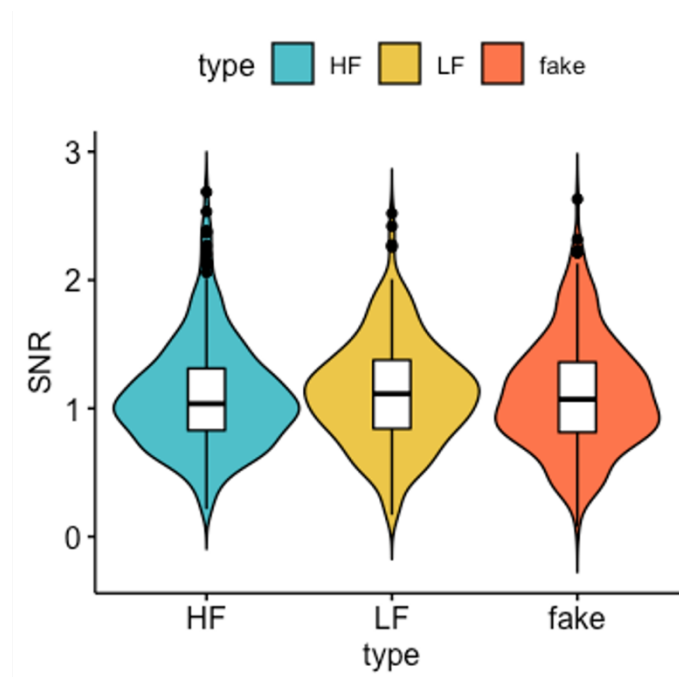


图 7 平均 O1、O2、Oz 电极高频(HF)、低频(LF)与假字(fake)间的 IM 信号信噪比强度差异

Figure 7 SNR differences between character group (HF vs. LF vs. fake) averaged across 3 channels

3.4 探究刺激物对称性与类型对 IM 反应的影响

为了探究刺激物的对称性（左右一致 vs.不一致）与类型（真字 vs.假字）对 IM 反应的影响，对 13.2 Hz 处的信号峰值与信噪比做 $2(\text{对称性}) \times 2(\text{类型}) \times 3(\text{通道})$ 重复测量方差分析。

对 IM 频率信号峰值而言，刺激物的对称性($F(1, 19) = .011, p = .916, \eta_p^2 = .001$)与类型($F(1, 19) = .016, p = .901, \eta_p^2 = .001$)没有显著主效应。通道没有显著的主效应($F(1.449, 27.527) = 1.324, p = .274, \eta_p^2 = .065$, Greenhouse – Geisser 校正)。刺激物类型与对称性之间存在边缘显著的交互作用 ($F(1, 19) = 4.025, p = .059, \eta_p^2 = .175$)。不对称真字和假字所诱发的 IM 频率信号峰值没有显著差异($F(1, 19) = .912, p = .352, \eta_p^2 = .046$)，对称真字和假字所诱发的 IM 频率信号峰值也不存在显著差异($F(1, 19) = 2.637, p = .121, \eta_p^2 = .121$)。

对 IM 频率信号信噪比而言，刺激物的对称性($F(1, 19) = .632, p = .436, \eta_p^2 = .032$)、刺激物类型($F(1, 17) = .013, p = .911, \eta_p^2 = .001$)皆没有显著的主效应。通道($F(1.475, 28.024) = 5.688, p = .014, \eta_p^2 = .23$, Greenhouse – Geisser 校正)的主效应显著，两两比较的结果表明 O1 电极的 IM 信号信噪比显著比 O2 电极小 ($p = .49$)。刺激物类型与对称性之间存在显著的交互作用 ($F(1, 19) = 7.234, p = .015, \eta_p^2 = .276$)（见图 8）。不对称真字和假字所诱发的 IM 频率信号峰值没有显著差异($F(1, 19) = 1.972, p = .176, \eta_p^2 = .094$)，对称真字和假字所诱发的 IM 频率信号峰值也没有发现显著的差异($F(1, 19) = 3.965, p = .061, \eta_p^2 = .173$)。

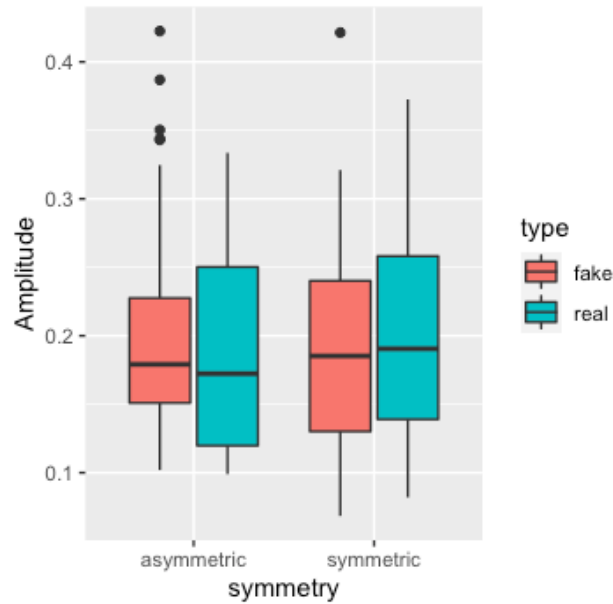


图8 平均 O1、O2、Oz 电极，不同对称性下真字和假字的 IM 信号信噪比

Figure 8 SNR differences between character groups (real vs. fake) averaged across 3 channels

4 讨论

本研究使用 SSVEP 以获得汉字整体性加工有关的信号。被试需要注意左右两边以不同频率($f_1 = 6 \text{ Hz}$, $f_2 = 7.2 \text{ Hz}$)闪烁的刺激物，每个刺激物呈现长达 30 秒。对记录到的脑电活动做时频分析，我们发现在 mf_1 和 nf_2 的频率上有较强的信号，体现在振幅谱上的波峰与这些频率的信号有较高的信噪比上（图 3）。通过周期性的呈现刺激物诱发被试大脑的周期性脑活动，达到标记加工刺激物所涉及的大脑电生理信号的效果的技术，称为频率标记(frequency tagging)。因而，我们可以认为所记录到的 6 Hz、7.2 Hz 上的信号是被试加工汉字不同部分的大脑活动产生的。Cai et al. (2020)进一步发现被试观察真字和假字时记录到的 $f_1+f_2 = 13.2 \text{ Hz}$ 上的信号信噪比在真字条件下更大，这一频率被称为 IM 频率，只有在两个基本频率的信号受到非线性整合时才会出现(Gordon et al., 2019)。这被认为是汉字的两个部分出现整体性加工的证据。

然而，本研究使用类似的左右部分一致的汉字重复实验，仅发现汉字类型（真字 vs.假字）边缘显著的主效应。尽管如此，对真字刺激物的 IM 反应仍然大于对假字的 IM 反应，与前人研究的结论一致（Cai et al., 2020）。本研究的样本量与前人研究相近，但在实验程序上存在差异。为了同时呈现左右一致的刺激物和左右不一

致的刺激物，本实验去除了位于屏幕中心的注视点，只要求被试在刺激物呈现时注意刺激。因此，实验无法保证被试施加了足够的注意。由于周期性呈现的刺激物基本会引起被试该频率上的脑活动，对于该频率上未有明显信号的试次，可以将其视作被试并未注意刺激的无效试次。在数据处理阶段，本研究将基本频率信号信噪比低于 1 的试次去除，以排除掉被试未关注刺激物的试次，然而这一步骤并不能完全将有用的信号与噪音分离出来。未来研究可以考虑需要按键反应的警觉任务以保证被试的专注。此外，本实验还涉及左右不一致的汉字刺激物，因而可能引入了其他噪音，使得与汉字整体性加工有关的效应较弱。

在前人研究中，新手相比专家表现出更强的整体性加工(Diamond & Carey, 1986; Richler et al., 2008)，表明我们对一类刺激物的知觉经验多寡影响我们对其的整体性加工水平。本研究使用字频操纵对汉字的知觉经验，探讨被试加工高频、低频汉字时记录的 IM 反应是否有显著差异。我们假设被试加工高频、低频汉字的 IM 信号的信噪比显著大于加工假字时的 IM 信号信噪比，而加工高频字产生的 IM 反应又强于加工低频字产生的 IM 反应。然而，实验结果并未支持我们的假设。实验中，我们发现高频、低频与假字条件间的 IM 信号信噪比没有显著差异。

值得一提的是，这一结果虽然不能证实我们的假设，也并没有为字频与汉字整体性加工之间的关系提供否定性的证据。在实验中我们记录到的 IM 信号虽然存在（其信噪比显著大于 1，除了 O1 电极假字条件），但真字条件相比假字条件并没有出现显著的信号信噪比差异，这表明我们并未很好记录到汉字整体性加工有关的效应。使用对称性作为变量，我们发现汉字对称性与汉字类型存在显著的交互作用，其表现为对于对称汉字而言，真字的 IM 信号信噪比边缘显著地强于假字，而对于不对称字而言，真字组和假字组没有显著差异。因而，汉字的不对称性影响整体性加工有关的效应。的确，Alp et al. (2018)发现对称性不同的刺激物引起的 IM 反应有差异，研究者分别用两个不同频率呈现图片刺激的不同部分，并比较镜面对称与对照刺激诱发的 IM 频率信号，发现镜面对称的图片刺激引起更强的 IM 信号，表明刺激物的对称性是 SSVEP 研究需要注意的一个变量。未来研究需要进一步使用不对称汉字验证汉字整体性加工有关的效应。同时，使用不对称的刺激物研究汉字整体性加工时，可以考虑使用更多的样本量以获得更大的效应量，使得感兴趣的效应能够凸显出来。

本研究使用字频操纵知觉经验。前人研究使用比较汉语母语者与非中文母语者

(Wong et al., 2012)、控制阅读经验(Liu et al., 2016)与比较真字和假字(Wong et al., 2011)等方式研究知觉经验对汉字整体性加工的影响。由于字频高低没有绝对的界定标准，实验缺乏效应也可能是所选取的变量敏感度有限所导致的。未来研究可以尝试使用新手专家对比等方式操纵知觉经验，或使用人工刺激训练被试，主动操纵其对刺激物的知觉经验，从而进一步探究知觉经验对汉字整体性加工的作用。

本研究的一个创新点是所使用的左右不一致的刺激物。前人研究为了控制刺激物呈现频率、呈现位置与组成部分本身的特征，采用左右一致，由真字组成的汉字（如林）。然而，符合这一特征的汉字对常用的汉字并不具有代表性。为了提高研究的生态效度，本研究使用左右不一致的汉字，固定一个偏旁（提手旁），通过改变右半部分组成汉字达到组成部分刺激物特征的效果，为范式引入了新的研究对象。然而本研究只选择了一个部首（提手旁），未来研究可以尝试不同的部首甚至不同的汉字结构（上下结构、左右结构、内外结构等）以探究汉字整体性加工的规律。

参考文献

- 朱晓平, 喻柏林, & 沈烈敏. (1992). 知觉经验对汉学字形知觉整体性的影响.
- 彭聃龄, & 王春茂. (1997). 汉字加工的基本单元: 来自笔画数效应和部件数效应的证据. *心理学报*, 29(1), 9-17.
- Alp, N., Kohler, P. J., Kogo, N., Wagemans, J., & Norcia, A. M. (2018). Measuring integration processes in visual symmetry with frequency-tagged EEG. *Scientific Reports*, 8(1), 1-11.
- Bach, M., & Meigen, T. (1999). Do's and don'ts in Fourier analysis of steady-state potentials. *Documenta Ophthalmologica*, 99(1), 69-82.
- Bilalić, M., Langner, R., Ulrich, R., & Grodd, W. (2011). Many faces of expertise: fusiform face area in chess experts and novices. *Journal of Neuroscience*, 31(28), 10206-10214.
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, 10(4), 433-436. <https://doi.org/https://doi.org/10.1163/156856897X00357>
- Busey, T. A., & Vanderkolk, J. R. (2005). Behavioral and electrophysiological evidence for configural processing in fingerprint experts. *Vision research*, 45(4), 431-448.
- Cai, Q., & Brysbaert, M. (2010). SUBTLEX-CH: Chinese Word and Character Frequencies Based on Film Subtitles. *PLOS ONE*, 5(6), e10729. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010729>
- Cai, Y., Mao, Y., Ku, Y., & Chen, J. (2020). Holistic Integration in the Processing of Chinese Characters as Revealed by Electroencephalography Frequency Tagging. *Perception*, 49(6), 658-671. <https://doi.org/10.1177/0301006620929197>
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in cognitive sciences*, 15(6), 254-262.
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of neuroscience methods*, 134(1), 9-21.
- Diamond, R., & Carey, S. (1986). Why faces are and are not special: an effect of expertise. *Journal of experimental psychology: general*, 115(2), 107.
- Gauthier, I., Curran, T., Curby, K. M., & Collins, D. (2003). Perceptual interference supports a non-modular account of face processing. *Nature neuroscience*, 6(4), 428-432.
- Gauthier, I., Williams, P., Tarr, M. J., & Tanaka, J. (1998). Training 'greeble' experts: a framework for studying expert object recognition processes. *Vision research*, 38(15-16), 2401-2428.
- Gordon, N., Hohwy, J., Davidson, M. J., van Boxtel, J. J., & Tsuchiya, N. (2019). From intermodulation components to visual perception and cognition-a review. *NeuroImage*, 199, 480-494.
- Harris, A. M., & Aguirre, G. K. (2008). The effects of parts, wholes, and familiarity on face-selective responses in MEG. *Journal of Vision*, 8(10), 4-4.
- Hsiao, J. H., & Cottrell, G. W. (2009). Not all visual expertise is holistic, but it may be leftist: The case of Chinese character recognition. *Psychological Science*, 20(4), 455-463.
- Lithfous, S., & Rossion, B. (2018). Electrophysiological individual face adaptation effects with fast periodic visual stimulation resist long interruptions in adaptation. *Biological psychology*, 133, 4-9.
- Liu, C., Zhang, W.-T., Tang, Y.-Y., Mai, X.-Q., Chen, H.-C., Tardif, T., & Luo, Y.-J. (2008). The visual word form area: evidence from an fMRI study of implicit processing of Chinese characters. *Neuroimage*, 40(3), 1350-1361.
- Liu, T., Chuk, T. Y., Yeh, S. L., & Hsiao, J. H. (2016). Transfer of perceptual expertise: the case of simplified and traditional Chinese character recognition. *Cognitive science*, 40(8), 1941-1968.
- Mccandliss, B. D., Cohen, L., & De Haene, S. (2003). The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(7), 293-299.
- Michel, C., Rossion, B., Han, J., Chung, C.-S., & Caldara, R. (2006). Holistic processing is finely tuned for faces of one's own race. *Psychological Science*, 17(7), 608-615.
- Mo, C., Yu, M., Seger, C., & Mo, L. (2015). Holistic neural coding of Chinese character forms in bilateral ventral visual system. *Brain and language*, 141, 28-34.
- 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(6), 4-4.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10(4), 437-442. <https://doi.org/https://doi.org/10.1163/156856897X00366>
- Richler, J. J., Tanaka, J. W., Brown, D. D., & Gauthier, I. (2008). Why does selective attention to parts

-
- fail in face processing? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34(6), 1356.
- Richler, J. J., Wong, Y. K., & Gauthier, I. (2011). Perceptual expertise as a shift from strategic interference to automatic holistic processing. *Current directions in psychological science*, 20(2), 129-134.
- Tso, R. V.-y., Au, T. K.-f., & Hsiao, J. H.-w. (2014). Perceptual expertise: can sensorimotor experience change holistic processing and left-side bias? *Psychological Science*, 25(9), 1757-1767.
- Ventura, P., Fernandes, T., Leite, I., Pereira, A., & Wong, A. C.-N. (2019). Is holistic processing of written words modulated by phonology? *Acta psychologica*, 201, 102944.
- Wong, A. C.-N., Bukach, C. M., Hsiao, J., Greenspon, E., Ahern, E., Duan, Y., & Lui, K. F. (2012). Holistic processing as a hallmark of perceptual expertise for nonface categories including Chinese characters. *Journal of Vision*, 12(13), 7-7.
- Wong, A. C.-N., Bukach, C. M., Yuen, C., Yang, L., Leung, S., & Greenspon, E. (2011). Holistic processing of words modulated by reading experience. *Plos One*, 6(6), e20753.

附录

1. 实验刺激

表 1 实验所用刺激
Table 1 Stimuli Design

| 分组 | 编号 | 字 | 频 | 子笔画 | 子字 | 部外频 |
|--------|----|-----|--------|-----|----|---------|
| 高频字 | 1 | 控 | 253.32 | 8 | 空 | 331.27 |
| | 2 | 授 | 61.83 | 8 | 受 | 825.94 |
| | 3 | 据 | 271.77 | 8 | 居 | 153.65 |
| | 4 | 掉 | 508.53 | 8 | 卓 | 9.61 |
| | 5 | 接 | 792.34 | 8 | 妾 | 1.05 |
| 低频字 | 6 | 掺 | 5.79 | 8 | 参 | 289.79 |
| | 7 | 捆 | 0.73 | 8 | 国 | 869.15 |
| | 8 | 捻 | 0.34 | 8 | 念 | 160.76 |
| | 9 | 贯 | 0.11 | 8 | 贯 | 10.38 |
| | 10 | 戾 | 0.04 | 8 | 戾 | 0.47 |
| 假字 | 11 | 手+杰 | (假字) | 8 | 杰 | 280.52 |
| | 12 | 手+学 | (假字) | 8 | 学 | 895.88 |
| | 13 | 手+鱼 | (假字) | 8 | 鱼 | 154.22 |
| | 14 | 手+孟 | (假字) | 8 | 孟 | 9.09 |
| | 15 | 手+宕 | (假字) | 8 | 宕 | 0.56 |
| 左右一致真字 | 16 | 林 | 213.3 | 8 | 木 | 105.12 |
| | 17 | 双 | 136.23 | 4 | 又 | 761.49 |
| | 18 | 羽 | 8.71 | 6 | 习 | 171.81 |
| | 19 | 囍 | 0.02 | 24 | 喜 | 1162.06 |
| | 20 | 喆 | 0.47 | 12 | 吉 | 189.79 |
| 左右一致假字 | 21 | 左+左 | (假字) | 10 | 左 | 110.16 |
| | 22 | 马+马 | (假字) | 6 | 马 | 744.9 |
| | 23 | 千+千 | (假字) | 6 | 千 | 169.81 |
| | 24 | 者+者 | (假字) | 16 | 者 | 901.88 |
| | 25 | 足+足 | (假字) | 14 | 足 | 190.37 |

2 问卷

您好，感谢您参与本次实验。本实验的目的是研究汉字视觉加工的机制。为了探讨阅读习惯与汉字视觉加工的关系，需要您完成以下问题。本问卷将占用您 5 分钟。

- 1) 被试编号
- 2) 性别
- 3) 年龄
- 4) 您平均一周阅读汉字的时长大约为？（不局限于纸质书籍）
_____小时
- 5) 您平均一周书写汉字的时长大约为？
_____小时
- 6) - 31) 您是否认识以下汉字？
A: 认识； B: 不认识； C: 不清楚

*注：6 至 31 题的对象为实验中所用的 25 个汉字

3. 平均 O1、O2、Oz 电极对称真字和假字的振幅谱

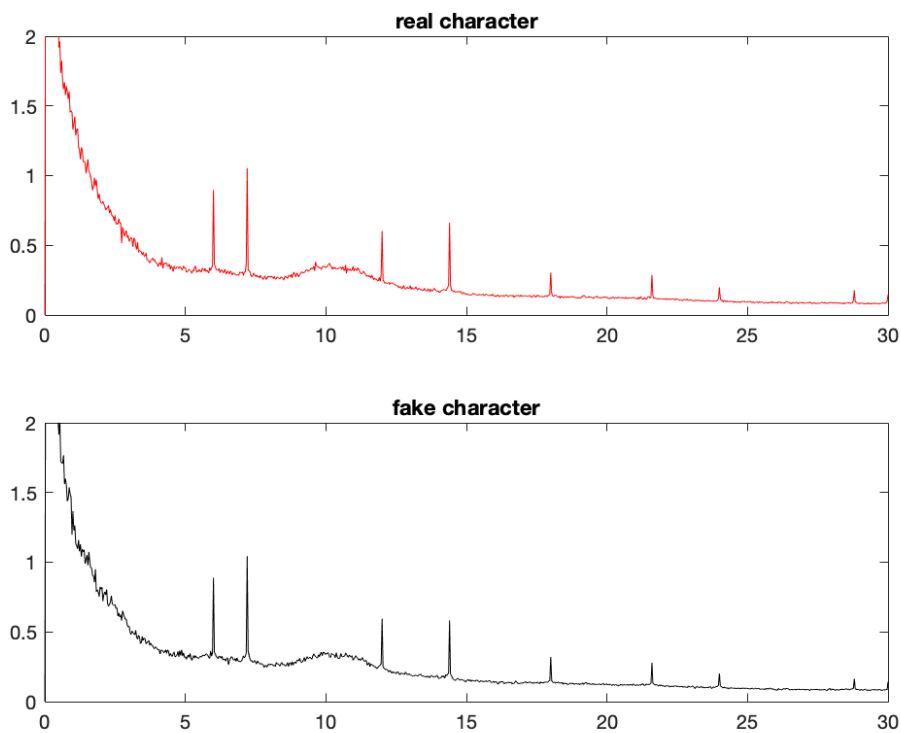


图 9 平均 O1、O2、Oz 电极真字和假字的振幅谱

Figure9 Amplitude Spectrum for real and fake characters averaged over O1, O2 and Oz channels

4. 对称真字、假字在 O1、O2、Oz 电极处各频率信号信噪比的单样本 t 检验结果

表 2 对称真字、假字在 O1、O2、Oz 电极处各频率信号信噪比的单样本 t 检验结果
Table 2 one sample t-test result for symmetry characters

| 汉字类型 | 电极 | 频率 | t | df | sig |
|------|----|---------|--------|----|-------|
| 真字 | O1 | 6 Hz | 8.105 | 20 | 0 |
| | O1 | 7.2 Hz | 7.598 | 20 | 0 |
| | O1 | 13.2 Hz | 1.387 | 20 | 0.181 |
| | O2 | 6 Hz | 7.695 | 20 | 0 |
| | O2 | 7.2 Hz | 6.94 | 20 | 0 |
| | O2 | 13.2 Hz | 2.957 | 20 | 0.008 |
| | Oz | 6 Hz | 7.474 | 20 | 0 |
| | Oz | 7.2 Hz | 6.893 | 20 | 0 |
| | Oz | 13.2 Hz | 1.727 | 20 | 0.1 |
| 假字 | O1 | 6 Hz | 6.896 | 20 | 0 |
| | O1 | 7.2 Hz | 8.379 | 20 | 0 |
| | O1 | 13.2 Hz | -0.223 | 20 | 0.826 |
| | O2 | 6 Hz | 7.842 | 20 | 0 |
| | O2 | 7.2 Hz | 8.023 | 20 | 0 |
| | O2 | 13.2 Hz | 0.024 | 20 | 0.981 |
| | Oz | 6 Hz | 7.386 | 20 | 0 |
| | Oz | 7.2 Hz | 7.815 | 20 | 0 |
| | Oz | 13.2 Hz | 0.477 | 20 | 0.638 |

5. 对称汉字 O1、O2、Oz 通道真字、假字组信号峰值与信噪比差异

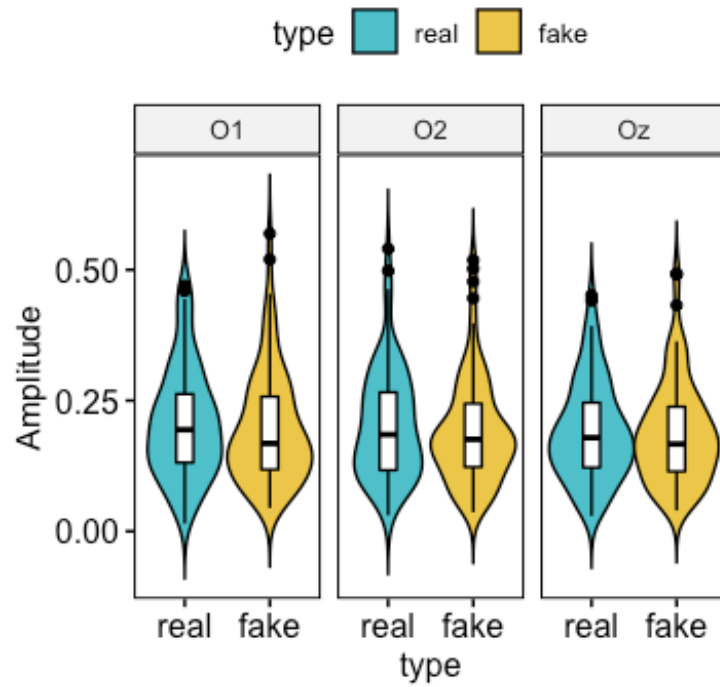


图 10 O1、O2、Oz 电极对称真字、假字的 IM 信号峰值差异。

Figure10 IM signal amplitude for symmetric real vs. fake characters at channel O1, O2 and Oz

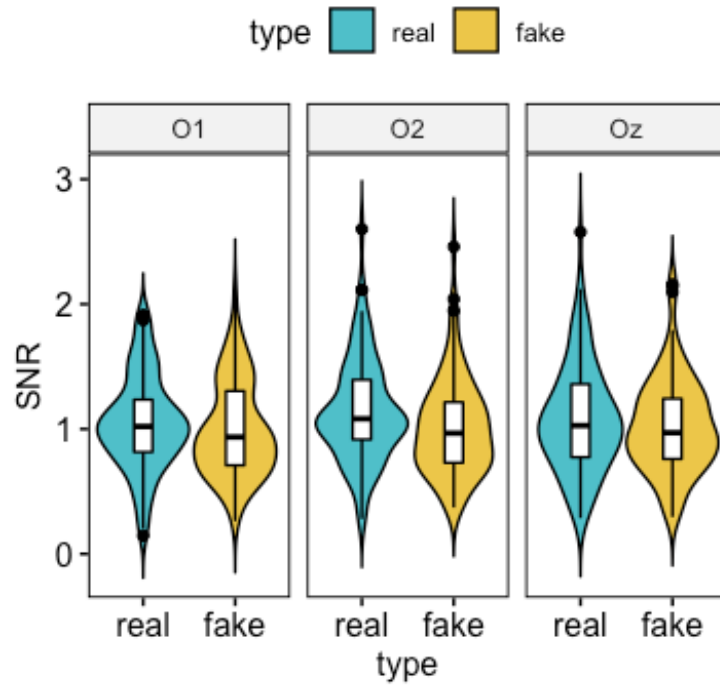


图 11 O1、O2、Oz 电极对称真字、假字的 IM 信号信噪比差异。

Figure11 IM signal SNR for symmetric real vs. fake characters at channel O1, O2 and Oz

6. 平均 O1、O2、Oz 电极不对称高频字、低频字和假字的振幅谱

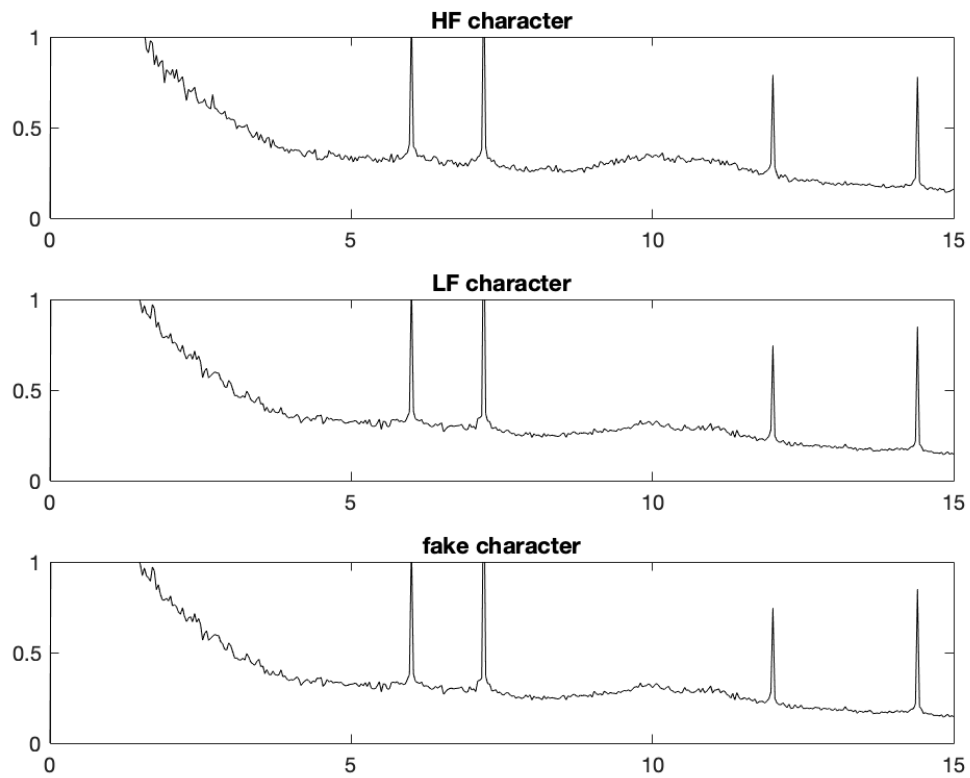


图 12 平均 O1、O2、Oz 电极高频字、低频字和假字的振幅谱。HF: 高频; LF: 低频; fake: 假字

Figure12 Amplitude Spectrum for HF, LF and fake characters averaged over O1, O2 and Oz channels

7. 不对称汉字 O1、O2、Oz 通道高频字、低频字、假字组信号峰值与信噪比差异

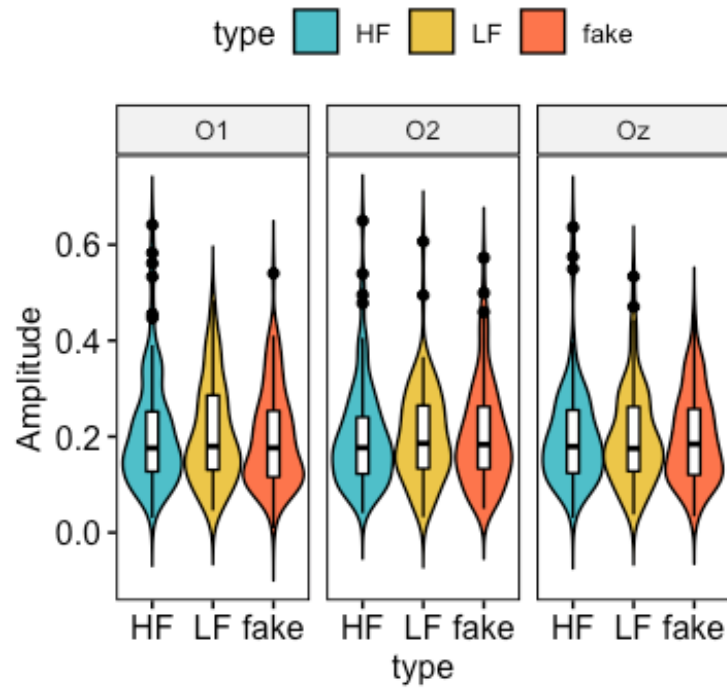


图 13 O1、O2、Oz 电极不对称高频字、低频字、假字的 IM 信号峰值差异。

Figure13 IM signal amplitude for symmetric real vs. fake characters at channel O1, O2 and Oz

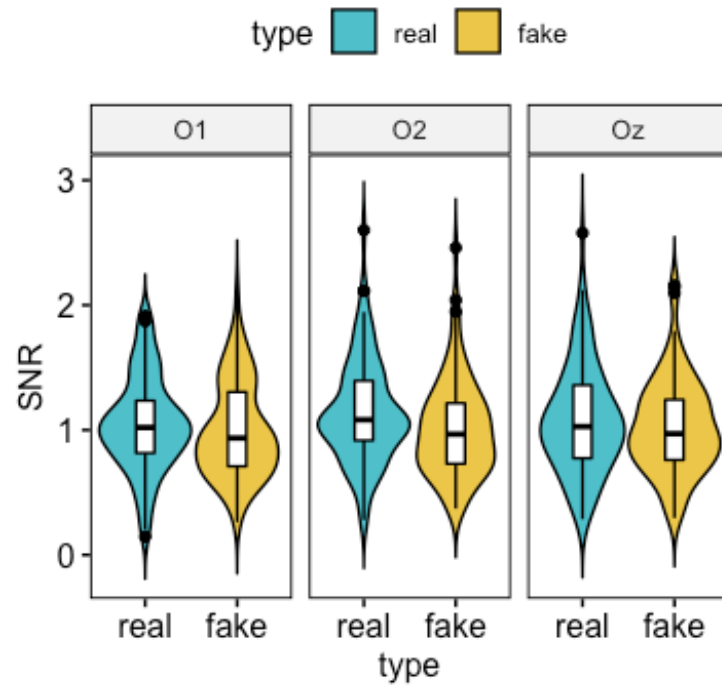


图 14 O1、O2、Oz 电极不对称高频字、低频字、假字的 IM 信号信噪比差异。

Figure14 IM signal SNR for symmetric real vs. fake characters at channel O1, O2 and Oz

致谢

感谢罗霄骁老师、陈静老师、周晓林与王岩老师的悉心指导与提点，这篇论文在他们的支持下完成。感谢黄承仕同学协助我采集脑电数据，他提供的帮助是我采集脑电数据时能将电阻保持在 5k 欧姆的条件下的主要原因。

最初，我并不认为科研会是我未来的工作方向，但在我校心理与认知科学学院进修的四年，我逐渐被吸引走上这条道路。我为此需要感谢库逸轩老师提供的视野和机会，让我对计算神经科学产生兴趣。这篇论文是我学术工作的起点，它并不完善，并不出彩，但独立负责一个项目的经验，将是我收获的最珍贵的毕业礼物。

我要向所有心院的老师们道声抱歉——我已经记不清楚许多课本上知识的细节。但您们所传授的学术诚信与学术严谨之精神，我将永记在心，不敢辜负教恩。