

行为振荡的 Theta 节律存在于跨通道 刺激冲突与反应冲突加工中*

许红慧^{1,2,3} 徐怡冉⁴ 杨国春⁵ 南威治⁶ 刘 勋^{1,2}

(¹中国科学院心理研究所行为科学重点实验室, 北京 100101) (²中国科学院大学心理学系, 北京 100049)

(³中南民族大学教育学院, 武汉 430074) (⁴湖北艺术职业学院文化服务与管理学院, 武汉 430079)

(⁵广东省智能科学与技术研究院, 珠海 519031) (⁶广州大学教育学院心理系/脑与认知科学中心, 广州 510006)

摘要 Theta 振荡与认知控制密切相关。以往研究发现 theta 振荡参与跨通道刺激冲突与反应冲突的加工, 然而, theta 振荡与跨通道刺激冲突和反应冲突程度之间的关系目前仍不清楚。本研究采用视听 Stroop 任务, 结合具有高时间分辨率的行为采样方法对该问题进行探究。结果表明大脑对任务相关通道刺激的加工节律受任务无关通道刺激的影响。当任务无关刺激与任务相关刺激相同或冲突时, 大脑对任务相关刺激的加工节律为 theta; 当任务无关刺激为中性刺激时, 大脑则以 alpha 节律加工任务相关刺激。此外, 研究发现, 在听觉任务中, 反应冲突幅度在视听刺激呈现时间间隔(Stimulus Onset Asynchrony, SOA)上表现出 theta 振荡; 在视觉任务中, 刺激冲突幅度在 SOA 上表现出 theta 振荡。当前结果表明冲突加工在行为上表现出节律性, 揭示了 theta 振荡与冲突幅度之间的关系, 将注意的节律性理论扩展到认知控制的冲突加工领域。

关键词 跨通道, 刺激冲突, 反应冲突, 行为振荡, Theta

分类号 B842

1 引言

人们每天都要处理大量视听刺激, 当来自不同通道的信息内容不一致时, 会相互竞争并诱发冲突, 从而对当前信息的加工产生干扰。在行为上表现为个体的反应时延长和错误率增加。在面对干扰信息时, 大脑如何解决冲突, 一直是认知控制领域研究的重点。Stroop 任务是考察认知控制机制的经典实验范式(Stroop, 1935)。在色-词 Stroop 任务中, 要求被试对字的颜色进行反应, 而忽略字的语义。结果显示当字的语义和印刷色不一致时, 会产生冲突效应, 表现为不一致条件的反应时和错误率比一致条件高。大量研究表明 Stroop 任务包含刺激冲突与反应冲突两个加工阶段(Augustinova et al., 2018; Burca et al., 2021; De Houwer, 2003; van Veen &

Carter, 2005; Zhang & Kornblum, 1998)。在刺激表征阶段, 任务无关信息(字的语义)的表征和任务相关信息(字的印刷颜色)的表征在同一个语义范畴(颜色)内, 当两种表征语义不同时, 产生刺激冲突; 在反应选择阶段, 字的语义和颜色激活了相应的反应, 当这两种反应不同时, 产生反应冲突。认知控制对刺激以及反应的选择性加工, 使人们能够在众多相互竞争的刺激和反应中做出最优选择(Nieuwenhuis & Yeung, 2005)。

Theta 振荡(4~8 Hz)在冲突加工中发挥着关键作用, 其中额中 theta 振荡被认为与认知控制功能密切相关。研究表明额中 theta 能量对认知控制需求敏感, 能够反映冲突监测和冲突解决过程(Cohen & Cavanagh, 2011; Cohen & Donner, 2013)。采用单通道视觉刺激, 一些研究发现刺激冲突与反应冲突

收稿日期: 2025-05-15

* 国家自然科学基金中德重大国际合作项目(62061136001/DFG TRR-169, project B4)、中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金(37301/CZQ25016)资助。

通信作者: 刘勋, E-mail: liux@psych.ac.cn

都增强了额中 theta 能量(Haciahmet et al., 2021; Jiang et al., 2015; Nigbur et al., 2012), 但也有研究仅观察到反应冲突对 theta 能量的调制作用(Haciahmet et al., 2023)。采用跨通道视听刺激, 研究发现在听觉任务中(被试对听觉刺激反应而忽略视觉刺激), 只有反应冲突增强了额中 theta 能量(Xu, Yang, Göschl, et al., 2024); 而在视觉任务中(被试对视觉刺激反应而忽略听觉刺激), 只有刺激冲突增强了额中 theta 能量(Xu, Yang, Wu, et al., 2024)。尽管跨通道冲突与单通道视觉冲突的结果有些不同, 但这些研究一致表明额中 theta 振荡与刺激冲突和反应冲突的加工密切相关。然而, 脑电研究主要通过条件间 theta 能量的对比, 考察 theta 振荡是否参与了刺激冲突与反应冲突的加工, 缺乏对 theta 振荡与行为表现之间关系的深入探究。尽管一些研究通过相关分析探讨了 theta 振荡与行为表现之间的相关性(Jiang et al., 2015; Xu, Yang, Göschl, et al., 2024), 但尚未有研究系统考察 theta 振荡与跨通道刺激冲突和反应冲突程度之间的关系。

行为振荡的相关研究为探究神经振荡与行为表现之间的关系提供了新视角。行为振荡是指心理现象在行为上表现出的节律性活动(杨阳 等, 2019; 章小丹 等, 2021), 被认为是大脑内部神经元集群节律性加工的结果(Helfrich et al., 2018; Kienitz et al., 2022)。为了探究神经振荡与行为表现之间的关系, 研究者通常采用线索-目标范式(Huang et al., 2015; Landau & Fries, 2012)。该范式通过呈现线索刺激将大脑内部神经振荡的相位重置, 随后在较短的时间间隔内呈现一个目标刺激。由于不同时间点呈现的目标刺激处于神经振荡的不同相位上, 因此会导致被试的行为表现出周期性波动。通过操纵线索刺激与目标刺激之间的 SOA, 密集地探测被试在不同 SOA 上的行为表现, 从而刻画出行行为表现随 SOA 波动的时序。将时间序列进行傅里叶变换可以得到行为表现的振荡频率, 建立神经振荡与行为表现之间的关系。采用这种方法, 研究发现视觉和听觉注意对空间位置、特征等的加工在探测表现上, 以 theta 或者 alpha 节律周期性变化(Fiebelkorn et al., 2013; Landau & Fries, 2012; Mo et al., 2019; Plöchl et al., 2022; Song et al., 2014)。基于行为振荡的相关研究结果, Fiebelkorn 和 Kastner (2019)提出了注意的节律性理论。该理论认为注意网络的 theta 振荡通过周期性地调制高级脑区与感觉皮层或运动皮层之间的功能连接, 实现注意在任

务相关位置的节律性采样与转移。值得注意的是, 行为振荡的 theta 节律不仅存在于注意对外部环境的采样上, 也体现在内部认知加工中(Huang et al., 2015; Pomper & Ansorge, 2021)。已有研究表明大脑对一致和不一致条件的知觉预测在行为上表现出 theta 振荡(Huang et al., 2015)。特别地, 在工作记忆保持阶段, 研究发现大脑对两个视觉模板表征的击中率在时间进程上以 theta 节律动态变化(Pomper & Ansorge, 2021)。由于工作记忆是认知控制的一个核心成分(Miller & Cohen, 2001), 这一结果说明行为振荡的 theta 节律可能并不只局限于注意网络, 而有可能涉及更高级的认知控制系统。目前, 行为振荡的 theta 节律是否存在于认知控制的冲突加工中仍不清楚。

综上, 本研究从行为振荡的研究视角, 探究 theta 振荡与跨通道刺激冲突和反应冲突程度之间的关系。已有脑电研究发现, 选择性注意的通道会影响 theta 振荡在跨通道刺激冲突与反应冲突加工中的发生阶段(Xu, Yang, Göschl, et al., 2024; Xu, Yang, Wu, et al., 2024)。基于此, 我们设计了两个行为实验, 分别在听觉任务(实验 1)和视觉任务(实验 2)中考察 theta 振荡与冲突幅度之间的关系。先前研究采用行为振荡的方法, 在注意(Mo et al., 2019; Senoussi et al., 2019)、知觉预测(Huang et al., 2015)和工作记忆(Pomper & Ansorge, 2021)等领域发现, 个体的行为表现呈现出与神经振荡相同的节律。支持了“行为振荡是神经振荡在行为层面的外在表现”这一观点(Helfrich et al., 2018; Kienitz et al., 2022)。据此, 我们提出以下假设: 在行为层面, theta 振荡的发生阶段与脑电研究所观察到的阶段一致, 具体表现为: 在听觉任务中, theta 振荡出现在跨通道反应冲突加工阶段(Xu, Yang, Göschl, et al., 2024), 表现为跨通道反应冲突幅度在 SOA 上以 theta 节律周期性变化; 在视觉任务中, theta 振荡出现在跨通道刺激冲突加工阶段(Xu, Yang, Wu, et al., 2024), 表现为跨通道刺激冲突幅度在 SOA 上以 theta 节律周期性振荡。本研究在研究视角和理论上具有创新性: 在研究视角上, 首次将行为振荡方法引入认知控制的冲突加工领域, 相较于以往脑电研究主要关注 theta 振荡是否参与刺激冲突或反应冲突的加工(Nigbur et al., 2012; Xu, Yang, Göschl, et al., 2024; Xu, Yang, Wu, et al., 2024), 本研究通过考察冲突幅度随 SOA 的动态变化, 揭示 theta 振荡与刺激冲突和反应冲突幅度之间的动态关系。在理

论上,本研究为注意的节律性理论提供了跨通道冲突加工的实证证据,将该理论的适用范围从注意、知觉预测等领域扩展至高级认知控制的冲突加工领域。

2 实验 1: 听觉任务中 theta 振荡与跨通道刺激冲突和反应冲突程度之间的关系

2.1 方法

2.1.1 被试

由于行为振荡被认为是神经振荡在行为上的表现(Helfrich et al., 2018),为了在行为上探测到 theta 振荡,根据使用了相同范式的脑电研究的被试量($N = 40$) (Xu, Yang, Göschl, et al., 2024),实验 1 计划招募 40 名被试。实验 1 共招募了 43 名被试。由于 3 名被试在至少一个条件下的正确率低于 55%,因此有 3 名被试的数据不纳入分析,有效被试量为 40 (年龄: 23 ± 2.4 岁, 15 名男生)。被试身体健康,无其他精神疾病,视力或矫正视力正常,听力正常,均为右利手。被试在实验前签署了知情同意书,并在完成实验后获得一定的报酬。

2.1.2 实验刺激与材料

实验刺激由 PsychoPy3 软件呈现。被试距离显示器(1920×1080 像素,刷新率 60 Hz,宽度为 48 cm)57 cm。视觉刺激是黑色字,为“红”、“黄”、“蓝”、“绿”、“莫”、“结”中的一种,呈现在一个大小为 $6.9 \text{ cm} \times 6.9 \text{ cm}$ 的灰色正方形中央,大小为 $2.2 \text{ cm} \times 2.2 \text{ cm}$,视角为 2.2° 。听觉刺激为男性发音的双耳呈现的语音,内容为“hong”、“huang”、“lan”、“lv”中的一种。实验刺激材料与以往脑电研究的实验刺激相同(Xu, Yang, Göschl, et al., 2024)。

2.1.3 实验设计与流程

在实验 1 中,被试对听觉刺激反应,忽略视觉刺激(比如“hong”和“lan”按“F”键,“huang”和“lv”按“J”键)。根据刺激与反应之间的映射关系,把试次分为 4 种类型:一致条件(Congruent, CO):视觉刺激与听觉刺激一致,比如看到“蓝”字,听到声音“lan”;刺激不一致条件(Stimulus Incongruent, SI):视觉刺激与听觉刺激语义不一致但对应相同的按键反应,比如看到“红”字,听到“lan”;反应不一致条件(Response Incongruent, RI):视觉与听觉刺激不一致,并且视听刺激对应不同的按键反应,比如看到“绿”听到“lan”(另一半实验刺激为看到“黄”听到“lan”);中性条件(Neutral, NEU):视觉刺激为“莫”

或者“结”,听觉刺激为“hong”、“huang”、“lan”和“lv”中的一种,见图 1A。刺激冲突幅度为刺激不一致条件与一致条件的差值,反应冲突幅度为反应不一致条件与刺激不一致条件的差值。视听刺激之间的 SOA 有 25 个水平,从 -200 ms 到 200 ms 以 16.67 ms 为步长变化。负值代表任务无关刺激先呈现,正值代表任务相关刺激先呈现。这样设置 SOA 有两个原因:一是以往研究表明干扰刺激呈现在任务相关刺激之前和之后 200 ms 的范围内,都能对任务相关刺激产生干扰,产生跨通道冲突(Donohue et al., 2013)。因此, -200 ms 到 200 ms 范围内的 SOA 都能探测到冲突。二是 SOA (-200 ms 到 200 ms) 的范围覆盖了 theta 振荡($4 \sim 7 \text{ Hz}$, 周期 $143 \sim 250 \text{ ms}$) 的完整周期。因此,我们使用了 25 个 SOA 对行为表现进行密集采样来追踪被试的冲突幅度随时间的变化。

为了让被试熟悉按键规则,在正式实验之前,被试需要完成三组练习,每组练习 20 个试次。练习一只有视觉刺激,被试需要对屏幕上呈现的汉字语义反应,“红”或“蓝”按“F”键,“黄”或“绿”按“J”键。练习二只有听觉刺激,被试需要对听到的声音刺激按键反应,“hong”或“lan”按“F”键,“huang”或“lv”按“J”键。在练习三中,视听刺激呈现的时间间隔为 SOA,被试的任务是对听觉刺激反应而忽略视觉刺激,按键规则与练习一、二相同。在进入正式实验之前,每组练习的正确率需要达到 85% 以上。在正式实验中,每个被试总共完成 17 组,前 16 组每组 120 个试次,第 17 组共有 80 个试次。每个 SOA 条件下每种试次类型有 20 个试次,试次类型的个数比为:一致条件 : 中性条件 : 刺激不一致条件 : 反应不一致条件 = 1 : 1 : 1 : 1。每个被试需要完成 2000 个试次。

实验流程如图 1C 所示,屏幕上首先呈现一个 $100 \sim 300 \text{ ms}$ 的注视点,接着呈现视觉刺激和听觉刺激 450 ms ,视听刺激呈现的时间间隔为 SOA,最后呈现 $1000 \sim 1200 \text{ ms}$ 的注视点。听觉刺激呈现后,被试反应时不超过 1550 ms 的反应将被记录,超过 1550 ms 没有反应的试次被标记为错误试次(Xu, Yang, Göschl, et al., 2024)。

2.1.4 数据分析

对于每个被试,去掉练习试次、错误试次、反应时(reaction time, RT)处于 3 个标准差之外,以及 RT 小于 200 ms 的数据。被试在每种试次类型、每个 SOA 下的有效试次数均值为 18 ($SD = 0.36$)。为

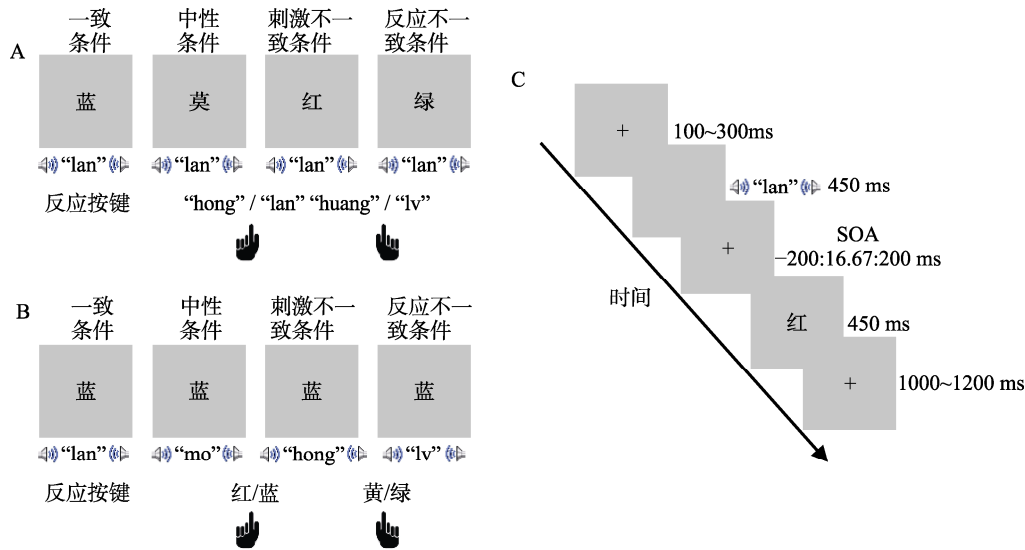


图 1 实验 1 与实验 2 的实验设计和流程图

注：图 A、B 分别为听觉任务和视觉任务的实验设计图，图 C 为实验流程图。
负值代表任务无关刺激先呈现，正值代表任务相关刺激先呈现。SOA: Stimulus Onset Asynchrony。

了检验刺激冲突与反应冲突幅度是否显著，将各个条件下的 SOA 合并，然后对试次类型(一致条件，中性条件，刺激不一致条件和反应不一致条件)进行单因素重复测量方差分析。

接着，对于 RT 数据，在被试内对每个试次进行标准化，即将被试内所有试次看成一个分布，计算每个试次的 Z 分数。标准化是为了去掉被试间由于运动反应带来的较大变异(Huang et al., 2015)。接着使用 NoiseTools 工具包分别对各个试次类型进行去趋势分析(detrend, 使用二阶多项式方法) (De Cheveigné & Arzounian, 2018)，得到各个试次类型的趋势(trend)数据。接着将每个试次的 Z 值减去该 SOA 条件下对应的 trend 值，得到每个试次去趋势后的数据。去趋势是为了去掉经典的启动效应和期待效应的影响(Fiebelkorn et al., 2013; Huang et al., 2015; Wang et al., 2020)。后续分析将基于去趋势后的数据。

试次类型的频谱分析：使用总体被试数据分析(aggregate subject data analysis)方法对各个试次类型的时间序列进行频谱分析。对于每个试次类型、每个 SOA，将所有被试的试次汇总到一起，计算每个 SOA 下的均值；接着在 400 ms 的时间序列上对各个试次类型进行傅里叶变换(Liu & Luo, 2019; Tomassini et al., 2017)。为了检验不同频率幅值的波动是否随机，我们进行了置换检验。即在去趋势的数据上，对于每个试次类型，将每个被试的 SOA 随机交换，然后按 SOA 将所有被试的试次汇总到一

起，计算不同 SOA 下的均值，并进行傅里叶变换。这样迭代 1000 次，每一次迭代得到不同频率对应的幅值。对于每个频率，得到一个 1000 次的幅值分布。检验实际观测值在 1000 次分布中的位置是否达到显著。然后将实际的 p 值在频率间进行 FDR 矫正， α 为 0.05。

为了检验总体被试数据分析的结果是否可靠，我们使用了另一种方法进行分析，即单试次线性建模方法(single-trial liner model approach) (Tomassini et al., 2017)。对于每个试次类型，每个被试，每个频率(0 到 12.5 Hz, 以 0.5 为步长)，使用一般线性模型的方法对单个试次进行拟合：将 $sine$ 和 $cosine$ 得到的相位值作为回归因子(任务相关刺激呈现时刻(t)的相位为 $2\pi \times f \times t$ (f 为正弦波的频率, t 为任务相关刺激相对于任务无关刺激呈现的时间))，对每个试次去趋势的 RT 数据进行预测。相位的预测值计算公式为：

$$\text{预测值} = \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2}$$

预测值标准误的计算使用 Jackknife 方法(Efron & Gong, 1983)。在组水平上，使用双变量 Hotelling's T -square 检验 beta 系数(β_1 和 β_2 分别为 $sine$ 和 $cosine$ 的系数)的均值与 0 之间的差异是否显著(无多重比较矫正)。

刺激冲突与反应冲突的频谱分析：为了得到刺激冲突与反应冲突幅度在时间序列上的振荡信息，在去趋势的数据上，分别计算每个被试在各个 SOA 条件下的刺激冲突与反应冲突幅度，即在条

件之间的差异上进行傅里叶变换(Fiebelkorn et al., 2013)。由于只能在被试水平上计算刺激冲突与反应冲突幅度,因此,对于刺激冲突与反应冲突的分析只使用总体被试数据分析方法。即在被试水平上,将所有被试的不同 SOA 水平下的数据汇总到一起,计算每个 SOA 下的均值,然后分别对刺激冲突与反应冲突幅度的时间序列进行傅里叶变换。

2.2 结果

合并 SOA 后的 RT 结果: 合并 SOA 后的各个试次类型的 RT 结果见图 2A。试次类型(一致条件,中性条件,刺激不一致条件和反应不一致条件)的单因素重复测量方差分析结果表明,试次类型的主效应显著, $F(3, 117) = 171.80, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.82$ 。两两比较的结果显示,一致条件($M = 685$ ms, $SE = 16.13$)显著快于刺激不一致条件($M = 744$ ms, $SE = 16.78$), $t(39) = -12.10, p < 0.001$, Cohen's $d = -0.59$, 95% CI = [-72.92, -45.68], 说明刺激冲突显著;刺激不一致条件显著快于反应不一致条件($M = 770$ ms, $SE = 15.65$), $t(39) = -9.64, p < 0.001$, Cohen's $d = -0.25$, 95% CI = [-32.72, -18.08], 说明反应冲突显著。此外,一致条件显著快于中性条件($M = 735$ ms, $SE = 15.47$), $t(39) = -13.35, p < 0.001$, Cohen's $d = -0.49$, 95% CI = [-60.35, -39.55], 以及反应不一致条件, $t(39) = -15.72, p < 0.001$, Cohen's $d = -0.84$, 95% CI = [-99.67, -69.73]。中性条件显著快于刺激不一致条件, $t(39) = -3.35, p = 0.011$, Cohen's $d = -0.09$, 95% CI = [-17.12, -1.59], 以及反应不一致条件, $t(39) = -13.77, p < 0.001$, Cohen's $d = -0.34$, 95% CI = [-41.76, -27.74]。总的来说,合并 SOA 后的 RT 结果表明,刺激冲突与反应冲突都显著。

试次类型的频谱分析结果: 各个试次类型随

SOA 的变化曲线见图 3(A-B)。各个条件的原始 RT 随着 SOA 增大而增大(图 3A)。图 3B 显示的是去趋势后各个试次类型的 RT 值围绕 0 上下波动。为了检验这种波动里面是否含有 theta 振荡信息,我们使用总体被试数据分析方法和单试次线性建模方法进行频谱分析。总体被试数据分析的频谱分析结果见图 3C。一致条件和刺激不一致条件显著的峰值频率为 3.8 Hz ($ps < 0.001$), 反应不一致条件显著的峰值频率为 7.5 Hz ($p < 0.001$), 中性条件显著的峰值频率 9.4 Hz ($p < 0.001$)。所有的 p 值都经过 FDR 矫正。

单试次线性建模方法与总体被试数据分析的结果类似。单试次线性建模的频谱分析结果见图 3D。组水平上的 Hotelling T-square statistics 检验结果如下:一致条件和刺激不一致条件显著的峰值频率为 5 Hz (p 值分别为: $p = 0.004, p < 0.001$), 反应不一致条件显著的峰值频率为 7.5 Hz ($p < 0.001$), 中性条件显著的峰值频率为 7.5 Hz ($p = 0.038$)。

刺激冲突与反应冲突的频谱分析结果: 刺激不一致条件与一致条件标准化和去趋势后的差异(刺激冲突),以及反应不一致条件与刺激不一致条件标准化和去趋势后的差异(反应冲突)随 SOA 的变化见图 4A。频谱分析的结果显示,刺激冲突的振荡频率不显著, $p > 0.05$; 反应冲突显著的峰值频率为 3.8 Hz ($p = 0.048, FDR$ corrected) (见图 4B)。

2.3 讨论

实验 1 采用 2-1 视听 Stroop 任务,结合高时间分辨率的行为采样方法,探究听觉任务中 theta 振荡与跨通道刺激冲突和反应冲突程度之间的关系。合并 SOA 后的 RT 结果表明刺激冲突与反应冲突都显著,重复了以往的研究结果(Xu, Yang, Göschl, et al., 2024)。在试次类型上,总体被试数据分析和

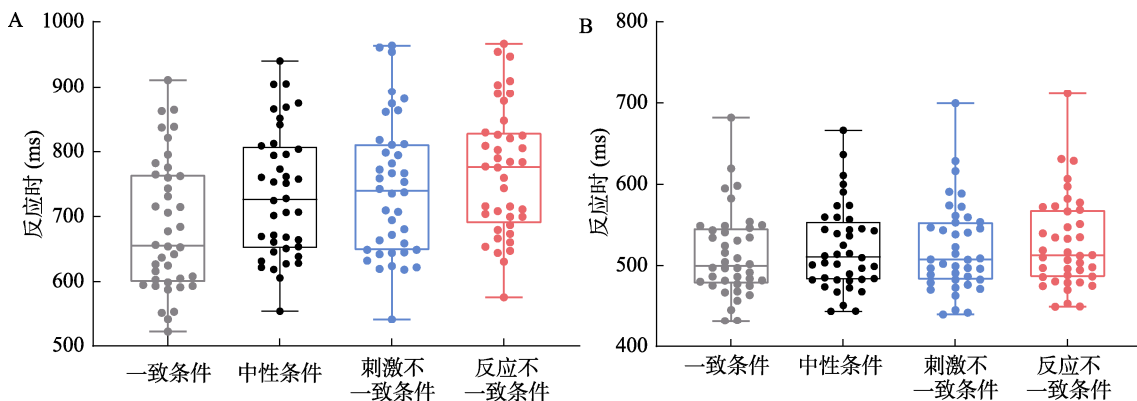


图2 实验1(A)与实验2(B)合并 SOA 后的 RT 结果

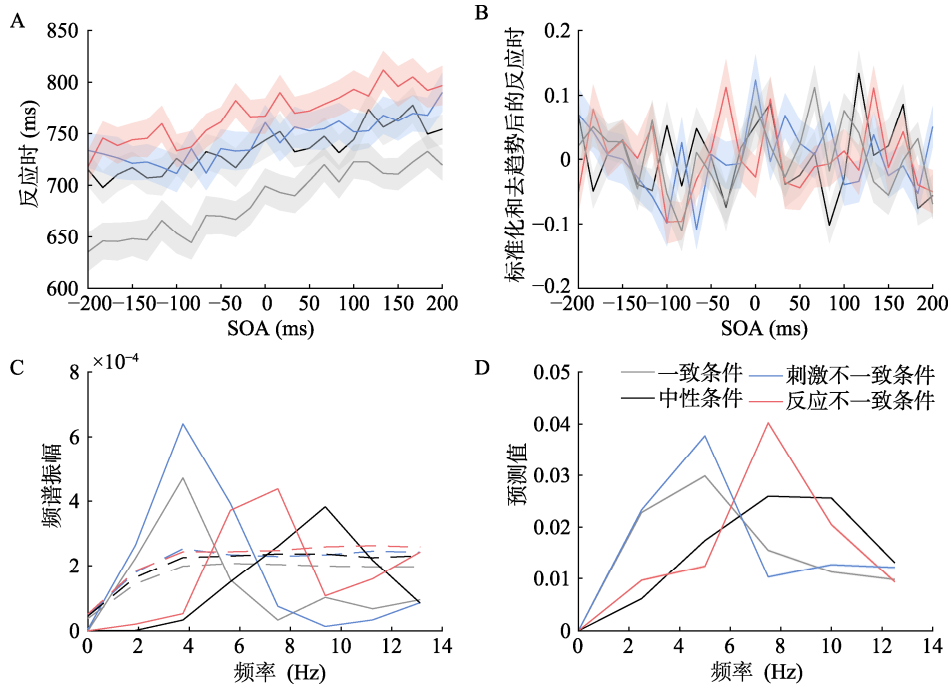


图 3 实验 1 中各个试次类型的 RT 随 SOA 的变化及频谱分析结果

注：实验 1(听觉任务)各个试次类型随 SOA 变化的曲线图(A-B)：原始 RT 值(A)，标准化和去趋势后的 RT 值(B)。各个试次类型的频谱分析结果(C-D)：总体被试数据分析方法(C)，虚线代表显著的临界点($p < 0.05$, FDR corrected)；单试次线性建模方法(D)。SOA 负值代表视觉先呈现，SOA 正值代表听觉刺激先呈现。彩图见电子版，下同。

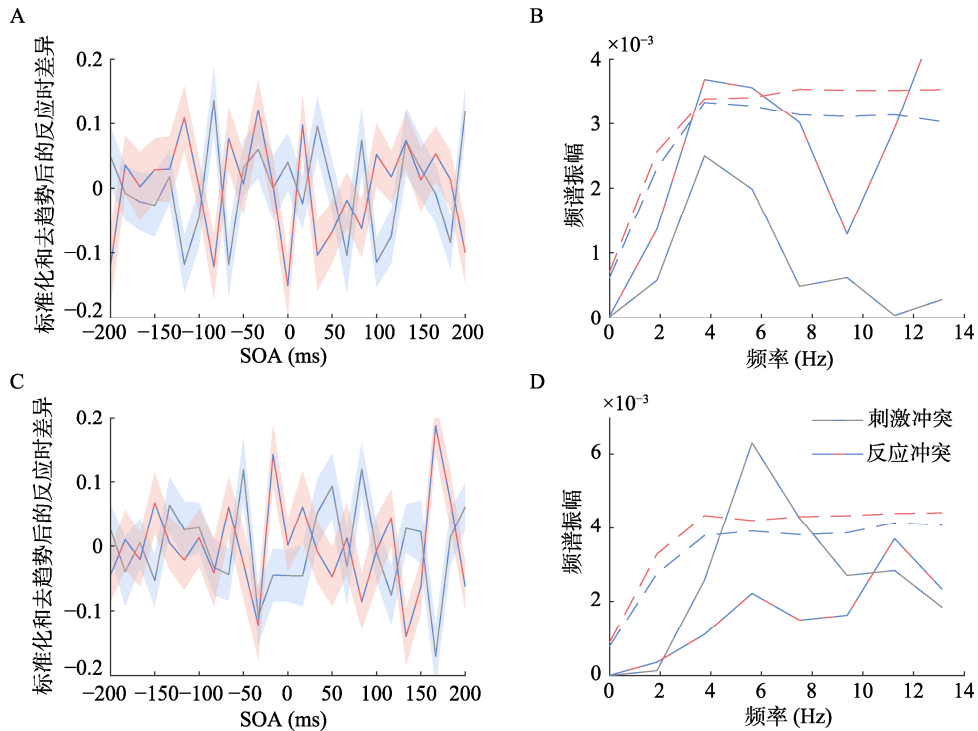


图 4 实验 1 与实验 2 的刺激冲突与反应冲突的标准化和去趋势后的 RT 及频谱分析结果

注：实验 1：听觉任务(A-B)，实验 2：视觉任务(C-D)。虚线代表显著的临界点($p < 0.05$, FDR corrected)。

单试次线性建模方法的频谱分析结果表明，一致条件、刺激不一致条件和反应不一致条件以 theta (4~7.5 Hz) 节律振荡，而中性条件以 alpha (9.4 Hz) 节律振荡。以往行为振荡的研究将 theta 波段定义

为 4~8 Hz (Fiebelkorn et al., 2013)，因此，本研究将 7.5 Hz 定义为 theta 频段。特别地，刺激冲突与反应冲突的频谱分析结果表明，反应冲突幅度以 theta (3.8 Hz) 频率振荡，没有发现刺激冲突的显著振荡

频率。这一结果支持了实验 1 的研究假设,即在听觉任务中,反应冲突幅度以 theta 频率振荡。

在听觉任务中,只有跨通道反应冲突幅度在 SOA 上呈现 theta 振荡。Theta 振荡发生在跨通道反应冲突加工阶段与以往脑电研究结果一致(Xu, Yang, Göschl, et al., 2024)。相比于脑电研究(Xu, Yang, Göschl, et al., 2024),当前研究采用具有较高分辨率的行为采样方法,进一步揭示了 theta 振荡与冲突幅度之间的关系。由于行为振荡被认为是神经振荡在行为上的表现(Kienitz et al., 2022),我们推测行为上发现的 theta 振荡节律可能反映了认知控制的 theta 振荡对冲突幅度的周期性调制作用。当前研究说明了认知控制的冲突加工在行为上表现出节律性。如果这种现象反映了认知控制的普遍加工模式,那么视觉任务中也应该在行为表现上观察到 theta 振荡。在视觉任务中,先前脑电研究在神经层面发现 theta 振荡参与跨通道刺激冲突加工(Xu, Yang, Wu, et al., 2024),然而,在行为层面,跨通道刺激冲突幅度是否呈现 theta 节律振荡模式目前仍不清楚。实验 2 将在视觉任务中,考察 theta 振荡与跨通道刺激冲突幅度之间的关系。

3 实验 2: 视觉任务中 theta 振荡与跨通道刺激冲突和反应冲突程度之间的关系

3.1 方法

3.1.1 被试

实验 2 的被试量估计与实验 1 相同,根据使用了相同范式的脑电研究(Xu, Yang, Wu, et al., 2024),实验 2 计划招募 40 名被试。实验 2 共招募了 40 名被试(年龄: 22 ± 2.4 岁, 17 名男生)。被试身体健康,无其他精神疾病,视力或矫正视力正常,听力正常,均为右利手。被试在实验前签署了知情同意书,并在完成实验后获得一定的报酬。

3.1.2 实验刺激与材料

实验刺激和材料与实验 1 相同。

3.1.3 实验设计与流程

在实验 2 中,被试对视觉刺激反应,忽略听觉刺激。与实验 1 相同,根据刺激与反应之间的映射关系,把试次分成 4 种类型:一致条件:视觉刺激和听觉刺激一致;刺激不一致条件:视觉刺激和听觉刺激语义不一致但对应相同的按键反应;反应不一致条件:视觉和听觉刺激不一致,并且视听刺激对应不同的按键反应;中性条件:听觉刺激为“mo”

或者“jie”,视觉刺激为“红”、“黄”、“蓝”和“绿”中的一种(见图 1B)。SOA 有 25 个水平,从 -200 ms 到 200 ms 以 16.67 ms 为步长变化。负值代表任务无关刺激(听觉刺激)先呈现,正值代表任务相关刺激(视觉刺激)先呈现。实验 2 的实验流程与实验 1 类似,见图 1C。不同之处在于,视觉刺激呈现后,被试反应时不超过 1550 ms 的反应将被记录,超过 1550 ms 没有反应的试次被标记为错误试次(Xu, Yang, Wu, et al., 2024)。

3.1.4 数据分析

对于每个被试,去掉练习试次、错误试次、RT 处于 3 个标准差之外,以及 RT 小于 200 ms 的数据。被试在每种试次类型、每个 SOA 下的有效试次数均值为 19 ($SD = 0.29$)。接下来的数据分析流程与实验 1 相同。首先计算合并 SOA 后的刺激冲突与反应冲突幅度是否显著,然后在标准化和去趋势的数据上进行试次类型、刺激冲突与反应冲突幅度的频谱分析。

3.2 结果

合并 SOA 后的 RT 结果:合并 SOA 后,各个试次类型的 RT 结果见图 2B。试次类型(一致条件,中性条件,刺激不一致条件和反应不一致条件)的单因素重复测量方差分析结果表明,试次类型的主效应显著, $F(3, 117) = 38.85, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.50$ 。两两比较的结果显示,一致条件($M = 513$ ms, $SE = 8.27$)显著快于刺激不一致条件($M = 521$ ms, $SE = 8.67$), $t(39) = -7.71, p < 0.001$, Cohen's $d = -0.15$, 95% CI = [-10.79, -5.07], 说明刺激冲突显著;刺激不一致条件显著快于反应不一致条件($M = 527$ ms, $SE = 8.93$), $t(39) = -5.32, p < 0.001$, Cohen's $d = -0.11$, 95% CI = [-9.04, -2.83], 说明反应冲突显著。此外,一致条件显著快于中性条件($M = 522$ ms, $SE = 8.22$), $t(39) = -6.78, p < 0.001$, Cohen's $d = -0.15$, 95% CI = [-11.51, -4.82], 以及反应不一致条件, $t(39) = -8.69, p < 0.001$, Cohen's $d = -0.26$, 95% CI = [-18.30, -9.43]; 中性条件与刺激不一致条件的差异不显著, $t(39) = 0.20, p = 1.000$, Cohen's $d = 0.004$, 95% CI = [-3.03, 3.50]; 中性条件显著快于反应不一致条件, $t(39) = -3.72, p = 0.004$, Cohen's $d = -0.11$, 95% CI = [-9.96, -1.44]。总的来说,合并 SOA 后的 RT 结果表明,刺激冲突与反应冲突都显著。

试次类型的频谱分析结果:同实验 1,各个试次类型的原始 RT 值与标准化、去趋势后的 RT 值

随 SOA 的变化曲线见图 5 (A-B)。在图 5A 中, 各个试次类型随着任务无关刺激先呈现到任务相关刺激先呈现, 反应时逐渐变大, 然后保持不变。在图 5B 中, 标准化和去趋势后的各个试次类型的 RT 值围绕着 0 上下波动。为了检验各个试次类型的波动是否含有振荡信息, 我们分别使用总体被试数据分析方法和单试次线性建模方法对各个试次类型进行频谱分析, 结果见图 5 (C-D)。总体被试数据分析方法的频谱分析结果见图 5C。结果显示, 一致条件显著的峰值频率为 5.6 Hz ($p < 0.001$); 反应不一致条件显著的峰值频率为 5.6 Hz ($p < 0.001$); 中性条件显著的峰值频率为 9.4 Hz ($p < 0.001$); 刺激不一致条件没有发现显著的频率, $p > 0.05$ 。所有的 p 值都经过 FDR 矫正。单试次线性建模方法的频谱分析结果见图 5D。组水平上的 Hotelling T-square statistics 检验结果(未矫正)如下: 一致条件显著的峰值频率为 5 Hz ($p < 0.001$), 刺激不一致条件显著的峰值频率为 5 Hz ($p = 0.034$), 反应不一致条件显著的峰值频率为 5 Hz ($p < 0.001$), 中性条件显著的峰值频率为 10 Hz ($p < 0.001$)。

刺激冲突与反应冲突的频谱分析结果: 刺激不一致条件与一致条件标准化和去趋势后的差异(刺激冲突), 以及反应不一致条件与刺激不一致条件

标准化和去趋势后的差异(反应冲突)随 SOA 的变化曲线见图 4C。刺激冲突与反应冲突的频谱分析结果见图 4D。结果显示, 刺激冲突显著的峰值频率为 5.6 Hz ($p < 0.001$, FDR corrected)。没有发现反应冲突的显著频率, $ps > 0.05$ 。

3.3 讨论

实验 2 在视觉任务中, 考察 theta 振荡与跨通道刺激冲突和反应冲突程度之间关系。对合并 SOA 后的 RT 数据进行分析, 发现跨通道刺激冲突和反应冲突幅度显著。在行为振荡的结果上, 与实验 1 发现的结果相同, 一致条件、刺激不一致条件和反应不一致条件以 theta (5~5.6 Hz) 节律振荡, 而中性条件以 alpha (9.4~10 Hz) 节律振荡。值得注意的是, 实验 2 在视觉任务中发现跨通道刺激冲突幅度呈现 theta (5.6 Hz) 节律振荡。Theta 振荡发生在跨通道刺激冲突加工阶段与以往视觉任务的脑电研究发现一致(Xu, Yang, Wu, et al., 2024), 支持了我们的研究假设。实验 1 与实验 2 采用相同的视听刺激, 在听觉和视觉任务中均发现跨通道冲突幅度呈现 theta 振荡, 表明认知控制的冲突加工可能普遍具有节律性加工模式。

以往研究发现跨通道冲突效应具有不对称性, 即视觉对听觉的干扰比听觉对视觉的干扰大

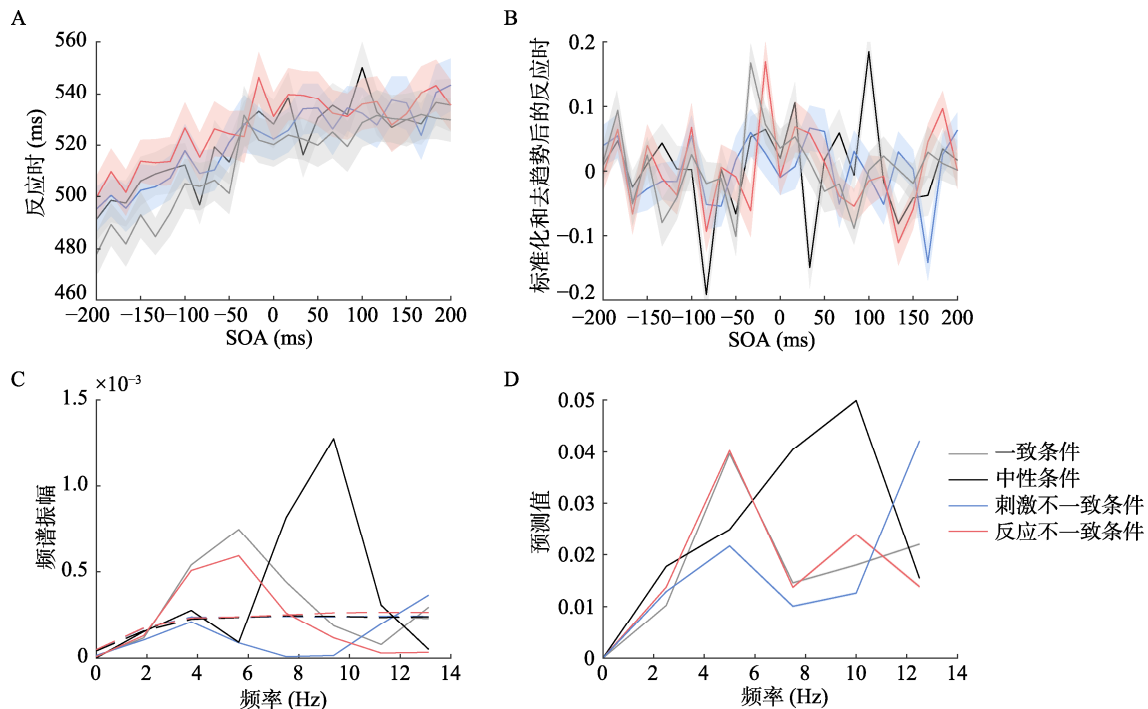


图 5 实验 2 中各个试次类型的 RT 随 SOA 的变化及频谱分析结果

注: 实验 2(视觉任务)中各个试次类型随 SOA 变化的曲线(A-B): 原始 RT 值(A), 标准化和去趋势后的 RT 值(B)。各个试次类型的频谱分析结果(C-D): 总体被试数据分析方法(C), 虚线代表显著的临界点($ps < 0.05$, FDR corrected); 单试次线性建模方法(D)。SOA 负值代表听觉先呈现, SOA 正值代表视觉刺激先呈现。

(Donohue et al., 2013)。本研究在不同阶段的冲突加工中均发现了这种不对称性, 即听觉任务中的跨通道刺激冲突与反应冲突幅度都显著大于视觉任务(见图 A1)。这一结果与前人研究不同, Chen 和 Zhou (2013)发现在跨通道刺激冲突中, 视觉对听觉的干扰比听觉对视觉的干扰大, 但是在跨通道反应冲突中, 则表现相反。实验设计不同可能导致了不同的实验结果。Chen 和 Zhou (2013)的研究中只有视听同时呈现(SOA = 0)条件, 而当前研究采用的 SOA 则包含了-200 ms 到 200 ms 的范围。我们推测不同的 SOA 可能会影响不同阶段冲突在跨通道冲突效应上的不对称性。将来研究可以对这一问题进行深入探究。

实验 1 中反应冲突的 theta 频率(3.8 Hz)低于实验 2 中刺激冲突的 theta 频率(5.6 Hz)。相比于刺激冲突, 反应冲突的幅度更大(结果见附录), 意味着大脑解决反应冲突的难度更大, 需要更多的认知控制需求。我们推测, theta 频率在反应冲突中比刺激冲突中小, 可能反映了 theta 频率随着认知控制需求的增大而减小。这一推测与以往研究发现一致(Senoussi et al., 2022)。Senoussi 等人(2022)根据计算建模以及以往行为和脑电研究结果, 提出认知控制的 theta 节律随着任务需求的变化而变化到最优频率上。具体表现为当任务难度比较高时, 较低的 theta 频率有较好的行为表现; 而当任务难度比较低时, 较高的 theta 频率有较好的行为表现。因此, 当前研究从行为振荡的角度支持了 theta 频率随着任务需求的增加而向低频 theta 偏移的观点。

4 总讨论

本研究采用 2-1 视听 Stroop 任务, 结合具有高时间分辨率的行为采样方法, 探究 theta 振荡与跨通道刺激冲突和反应冲突幅度之间的关系。结果表明, 无论在听觉任务中还是在视觉任务中, 当任务无关刺激与任务相关刺激相同(一致条件)或冲突(刺激不一致条件和反应不一致条件)时, 大脑对任务相关刺激的加工在行为上表现出 theta (4~7.5 Hz) 振荡; 当任务无关刺激是中性刺激(中性条件)时, 大脑对任务相关刺激的加工在行为上表现出 alpha (9.4~10 Hz) 振荡。此外, 研究发现, 在听觉任务中, 跨通道反应冲突幅度在 SOA 上呈现出 theta (3.8 Hz) 振荡模式; 在视觉任务中, 跨通道刺激冲突幅度在 SOA 上呈现出 theta (5.6 Hz) 振荡模式。据我们所知, 当前研究首次在行为层面发现了认知控制的冲突

加工在行为上表现出节律性。本研究揭示了 theta 振荡与跨通道刺激冲突和反应冲突幅度之间的关系, 扩展了注意的节律性理论, 加深了人们对认知控制的 theta 振荡机制的理解。

4.1 大脑对任务相关通道的刺激加工节律受任务无关通道刺激的影响

本研究在听觉与视觉任务中均发现, 大脑对一致条件、刺激不一致条件和反应不一致条件的加工在行为上表现出 theta 振荡, 这一结果与以往知觉预测相关的行为振荡研究一致。Huang 等人(2015)通过视觉启动范式发现一致条件与不一致条件的反应时在 SOA 上表现出 theta 节律振荡模式。由于该实验中, 任务相关刺激总是在任务无关刺激之后呈现。因此, 该研究中的 theta 振荡主要反映的是知觉预测过程。而在本研究中, 任务相关刺激可能先于或后于任务无关刺激呈现。因此, 本研究在行为上发现的 theta 节律不仅涉及知觉预测过程, 还体现了冲突加工过程。说明行为振荡的 theta 节律存在于更高级的认知控制加工中。

此外, 研究发现中性条件在 alpha (9 Hz)频段上振荡。Alpha 节律在行为振荡研究中通常被解释为初级感觉皮层对刺激固有的知觉采样频率(Dugué & VanRullen, 2017; Michel et al., 2022), 广泛存在于视觉(Jia et al., 2022)和听觉加工中(Ho et al., 2019)。与此一致, 本研究中中性条件的任务无关刺激不含颜色信息, 与任务相关刺激之间没有竞争。因此, 中性条件不涉及注意资源的分配, 而更多涉及知觉加工过程。我们推测 alpha 振荡可能反映了听觉任务或视觉任务中感觉皮层对任务相关通道刺激的知觉加工。

值得注意的是, 只有中性条件在 SOA 上呈现出 alpha 节律振荡模式, 其他条件在 SOA 上呈现出 theta 节律振荡模式。与中性条件相比, 一致条件、刺激不一致条件和反应不一致条件的加工都涉及注意资源的分配。当前结果支持了知觉以 alpha 节律采样, 而注意以 theta 节律采样的观点(Dugué & VanRullen, 2017; Michel et al., 2022)。Dugué 和 VanRullen (2017)提出视觉皮层以固有的 alpha 节律采样环境信息并将其传递至高级脑区; 当需要注意调控时, 高级脑区通过 theta 振荡将调控信息反馈至视觉皮层, 重置感觉皮层的 alpha 节律。根据任务相关性, 行为表现的 alpha 节律可能会被 theta 节律掩盖, 从而在行为上表现出 theta 振荡。注意的节律性理论进一步提出, theta 节律可能反映了高级脑

区对感觉皮层或运动皮层的周期性调制作用(Fiebelkorn & Kastner, 2019)。基于上述理论,我们推测:第一个刺激的呈现重置了相应感觉皮层的神经振荡,使其以 alpha 节律进行采样。第二个刺激出现时,如果其与第一个刺激无关(中性条件),由于不涉及注意资源的分配,高级脑区不对感觉皮层反馈,感觉皮层继续以 alpha 节律进行采样,因此,中性条件在行为上表现出 alpha 节律振荡。如果第二个刺激与第一个刺激之间有相关性(一致条件、刺激不一致条件或反应不一致条件),则涉及注意资源在不同刺激或不同反应选择之间的分配(Nigbur et al., 2012),额中区通过 theta 振荡对感觉皮层或运动皮层进行调制,重置感觉皮层的 alpha 振荡,在行为上表现出 theta 振荡。

4.2 跨通道刺激冲突幅度与反应冲突幅度在 SOA 上呈现 theta 振荡

与我们的假设一致,在听觉任务中,跨通道反应冲突幅度在 SOA 上呈现 theta 振荡模式;在视觉任务中,跨通道刺激冲突幅度在 SOA 上呈现 theta 振荡模式。Theta 振荡在跨通道冲突加工中的发生阶段与以往脑电研究结果一致(Xu, Yang, Göschl, et al., 2024; Xu, Yang, Wu, et al., 2024),支持了行为振荡是大脑内部神经振荡在行为上的表现这一观点(Helfrich et al., 2018; Kienitz et al., 2022)。大量神经振荡的结果表明冲突加工伴随着额中区 theta 能量的增强(Cohen & Cavanagh, 2011; Cohen & Donner, 2013; Nigbur et al., 2012; Nigbur et al., 2011)。特别地,反应冲突的解决伴随着额中区与外侧额叶,以及额中区与运动区之间 theta 相位同步性的增强(Nigbur et al., 2012; Xu, Yang, Göschl, et al., 2024),而刺激冲突的解决可能与额中区和后顶部脑区的 theta 功能连接增强有关(Nigbur et al., 2012)。基于行为振荡与神经振荡之间的关系(Helfrich et al., 2018; Kienitz et al., 2022),我们推测听觉任务中,跨通道反应冲突幅度在 SOA 上呈现 theta 振荡,可能反映了额中区 theta 振荡对外侧额叶以及运动区的周期性调制作用;视觉任务中,跨通道刺激冲突幅度在 SOA 上呈现 theta 振荡,可能反映了额中区 theta 振荡对后顶部脑区的周期性调制作用。

本研究首次在行为层面揭示了认知控制的冲突加工中存在 theta 振荡的节律性特征。以往研究表明注意过程在行为上表现出 theta 节律振荡现象(Fiebelkorn et al., 2013; Jia et al., 2017; Landau &

Fries, 2012; Re et al., 2019; Song et al., 2014)。基于这些发现, Fiebelkorn 和 Kastner (2019)提出了注意的节律性理论,该理论指出注意系统通过 theta 节律对信息进行周期性采样,行为上表现出的 theta 节律可能反映了高级脑区对感觉皮层或运动皮层的自上而下的周期性调控机制(Fiebelkorn & Kastner, 2019)。近年来,研究证据进一步表明,工作记忆的加工在行为上同样表现出 theta 节律(Pomper & Ansorge, 2021),提示行为振荡的 theta 节律可能普遍存在于多种认知加工过程中。本研究采用跨通道冲突加工范式,在不同任务中均发现了跨通道冲突幅度的 theta 节律振荡现象。这一发现为认知控制的冲突加工过程具有节律性提供了直接的行为证据。在冲突加工研究中,冲突幅度越大代表着个体的认知控制能力越差(Egner, 2008)。本研究从行为层面说明认知控制不是固定的,而是动态变化的,为探究认知控制的动态加工机制提供了新的研究视角。总的来说,本研究为认知控制的节律性加工提供了行为层面的实证证据,在理论上将注意的节律性理论扩展至认知控制的冲突加工领域。

不同选择性注意任务中, theta 振荡发生在跨通道冲突的不同加工阶段。具体表现为:听觉任务中, theta 振荡发生在跨通道反应冲突加工阶段;视觉任务中, theta 振荡发生在跨通道刺激冲突加工阶段。以往脑电研究采用事件编码理论解释 theta 振荡在刺激冲突与反应冲突上的发生阶段(Haciahmet et al., 2023; Xu, Yang, Göschl, et al., 2024)。该理论认为,大脑在处理外界信息时采用同一种编码方式对信息中的知觉、运动和背景相关的特征进行编码,并以分布式加工方式将这些特征表征在事件文件(event file)中。如果选择性地增强刺激或反应特征,可相应增强事件文件中对应特征的编码,进而影响注意对刺激特征或反应特征的选择(Hommel, 2019),最终影响 theta 振荡的发生阶段。然而,在本研究中,无论视觉任务还是听觉任务,任务无关刺激的呈现时间可能早于或晚于任务相关刺激。因此,当前研究难以从实验设计上推测大脑选择性地增强了刺激特征还是反应特征,从而影响了 theta 振荡在冲突加工中的发生阶段。因此,事件编码理论不能很好地解释当前研究结果。未来研究仍需进一步探讨不同选择性注意任务影响 theta 振荡在跨通道刺激冲突与反应冲突中发生阶段的具体机制。

4.3 研究局限与展望

尽管当前研究揭示了 theta 振荡与冲突幅度之

间的关系,将注意的节律性理论扩展到了认知控制的冲突加工领域。但是,当前研究仍存在一些不足。尽管我们推测 theta 振荡可能反映了额中区对感觉区或运动区皮层的周期性调制作用,但当前研究难以阐明额中区如何动态调制感觉区或运动区,从而在行为上表现出 theta 节律振荡的冲突效应。未来研究可采用颅内脑电技术,结合高时间分辨率的行为采样方法,对这一问题进行更深入的探讨。

此外,本研究的 SOA 设置同时包含了任务无关刺激先呈现(SOA < 0)和任务相关刺激先呈现(SOA > 0)两种条件,其结果可能不同于仅包含单一呈现顺序(SOA > 0 或 SOA < 0)的实验设计。已有研究采用脑电技术在不同 SOA (-200 ms 至 200 ms)条件下考察冲突加工的认知控制机制,发现冲突监测指标(不一致负波, N_{inc})和冲突解决指标(晚期正成分, LPC)在不同 SOA 下均存在(Appelbaum et al., 2014),表明不同 SOA 条件下的冲突加工可能共享相似的认知控制机制。基于此,我们推测无论任务无关刺激先呈现或后呈现,都可能在 SOA 上表现出冲突幅度的 theta 节律振荡现象。然而,以往研究显示,与任务无关刺激后呈现相比其先呈现会产生更大的冲突幅度(Donohue et al., 2013),提示两者在认知控制需求上存在差异。已有研究发现认知控制的 theta 节律会随着认知控制需求增大而向低频 theta 偏移(Senoussi et al., 2022)。因此,我们推测任务无关刺激先呈现条件与后呈现条件可能在 theta 频率的大小上存在差异。由于本研究中任务无关刺激先呈现或后呈现的 SOA 范围只有 200 ms,不能完全覆盖 theta 振荡的一个周期(~250 ms),因此,当前研究无法对这一推测进行验证。未来研究可分别对任务无关刺激先呈现和后呈现两部分进行行为振荡研究,以进一步探讨两者在振荡模式上的潜在差异。

5 结论

当前研究采用 2-1 视听 Stroop 任务,结合高时间分辨率的行为采样方法,发现听觉任务中,跨通道反应冲突幅度在 SOA 上呈现 theta 振荡模式;视觉任务中,跨通道刺激冲突幅度在 SOA 上呈现 theta 振荡模式。这些发现表明认知控制加工在行为上表现出节律性,不仅揭示了 theta 振荡与跨通道刺激冲突和反应冲突程度之间的关系,也扩展了注意的节律性理论。

致谢:衷心感谢浙江师范大学王成博士在数据分析方面给与的帮助,感谢匿名审稿人和编委对本文提出的宝贵意见!

参 考 文 献

- Appelbaum, L. G., Boehler, C. N., Davis, L. A., Won, R. J., & Woldorff, M. G. (2014). The dynamics of proactive and reactive cognitive control processes in the human Brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(5), 1021-1038.
- Augustinova, M., Silvert, L., Spatola, N., & Ferrand, L. (2018). Further investigation of distinct components of Stroop interference and of their reduction by short response-stimulus intervals. *Acta Psychologica*, 189, 54-62.
- Burca, M., Beaucousin, V., Chausse, P., Ferrand, L., Parris, B. A., & Augustinova, M. (2021). Is there semantic conflict in the Stroop task? *Experimental Psychology*, 68(5), 274-283.
- Chen, Q., & Zhou, X. L. (2013). Vision dominates at the prereponse level and audition dominates at the response level in cross-modal interaction: Behavioral and neural evidence. *The Journal of Neuroscience*, 33(17), 7109-7121.
- Cohen, M. X., & Cavanagh, J. F. (2011). Single-trial regression elucidates the role of prefrontal theta oscillations in response conflict. *Frontiers in Psychology*, 2, 30.
- Cohen, M. X., & Donner, T. H. (2013). Midfrontal conflict-related theta-band power reflects neural oscillations that predict behavior. *Journal of Neurophysiology*, 110(12), 2752-2763.
- De Cheveigné, A., & Arzounian, D. (2018). Robust detrending, rereferencing, outlier detection, and inpainting for multichannel data. *NeuroImage*, 172, 903-912.
- De Houwer, J. (2003). On the role of stimulus-response and stimulus-stimulus compatibility in the Stroop effect. *Memory & Cognition*, 31(3), 353-359.
- Donohue, S. E., Appelbaum, L. G., Park, C. J., Roberts, K. C., & Woldorff, M. G. (2013). Cross-modal stimulus conflict: The behavioral effects of stimulus input timing in a visual-auditory Stroop task. *PLoS One*, 8(4), e62802.
- Dugué, L., & VanRullen, R. (2017). Transcranial magnetic stimulation reveals intrinsic perceptual and attentional rhythms. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 154.
- Efron, B., & Gong, G. (1983). A leisurely look at the bootstrap, the jackknife, and cross-validation. *The American Statistician*, 37(1), 36-48.
- Egner, T. (2008). Multiple conflict-driven control mechanisms in the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(10), 374-380.
- Fiebelkorn, I. C., & Kastner, S. (2019). A rhythmic theory of attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(2), 87-101.
- Fiebelkorn, I. C., Saalman, Y. B., & Kastner, S. (2013). Rhythmic sampling within and between objects despite sustained attention at a cued location. *Current Biology*, 23(24), 2553-2558.
- Haciahmet, C. C., Frings, C., Beste, C., Münchau, A., & Pastötter, B. (2023). Posterior delta/theta EEG activity as an early signal of Stroop conflict detection. *Psychophysiology*, 60(3), e14195.
- Haciahmet, C. C., Frings, C., & Pastötter, B. (2021). Target amplification and distractor inhibition: Theta oscillatory dynamics of selective attention in a flanker task. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 21(2), 355-371.

- Helfrich, R. F., Fiebelkorn, I. C., Szczepanski, S. M., Lin, J. J., Parvizi, J., Knight, R. T., & Kastner, S. (2018). Neural mechanisms of sustained attention are rhythmic. *Neuron*, 99(4), 854–865.
- Ho, H. T., Burr, D. C., Alais, D., & Morrone, M. C. (2019). Auditory perceptual history is propagated through alpha oscillations. *Current Biology*, 29(24), 4208–4217.
- Hommel, B. (2019). Theory of Event Coding (TEC) V2. 0: Representing and controlling perception and action. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 81(7), 2139–2154.
- Huang, Y., Chen, L., & Luo, H. (2015). Behavioral oscillation in priming: Competing perceptual predictions conveyed in alternating theta-band rhythms. *Journal of Neuroscience*, 35(6), 2830–2837.
- Jia, J. R., Fan, Y., & Luo, H. (2022). Alpha-band phase modulates bottom-up feature processing. *Cerebral Cortex*, 32(6), 1260–1268.
- Jia, J. R., Liu, L., Fang, F., & Luo, H. (2017). Sequential sampling of visual objects during sustained attention. *PLoS Biology*, 15(6), e2001903.
- Jiang, J., Zhang, Q. L., & Van Gaal, S. (2015). EEG neural oscillatory dynamics reveal semantic and response conflict at difference levels of conflict awareness. *Scientific Reports*, 5(1), 12008.
- Kienitz, R., Schmid, M. C., & Dugué, L. (2022). Rhythmic sampling revisited: Experimental paradigms and neural mechanisms. *European Journal of Neuroscience*, 55(11–12), 3010–3024.
- Landau, A. N., & Fries, P. (2012). Attention samples stimuli rhythmically. *Current Biology*, 22(11), 1000–1004.
- Liu, L., & Luo, H. (2019). Behavioral oscillation in global/local processing: Global alpha oscillations mediate global precedence effect. *Journal of Vision*, 19(5), 12.
- Michel, R., Dugué, L., & Busch, N. A. (2022). Distinct contributions of alpha and theta rhythms to perceptual and attentional sampling. *European Journal of Neuroscience*, 55(11–12), 3025–3039.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167–202.
- Mo, C., Lu, J. S., Wu, B. C., Jia, J. R., Luo, H., & Fang, F. (2019). Competing rhythmic neural representations of orientations during concurrent attention to multiple orientation features. *Nature Communications*, 10(1), 5264.
- Nieuwenhuis, S., & Yeung, N. (2005). Neural mechanisms of attention and control: Losing our inhibitions? *Nature Neuroscience*, 8(12), 1631–1633.
- Nigbur, R., Cohen, M. X., Ridderinkhof, K. R., & Stürmer, B. (2012). Theta dynamics reveal domain-specific control over stimulus and response conflict. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(5), 1264–1274.
- Nigbur, R., Ivanova, G., & Stürmer, B. (2011). Theta power as a marker for cognitive interference. *Clinical Neurophysiology*, 122(11), 2185–2194.
- Plöchl, M., Fiebelkorn, I., Kastner, S., & Obleser, J. (2022). Attentional sampling of visual and auditory objects is captured by theta-modulated neural activity. *European Journal of Neuroscience*, 55(11–12), 3067–3082.
- Pomper, U., & Ansorge, U. (2021). Theta-rhythmic oscillation of working memory performance. *Psychological Science*, 32(11), 1801–1810.
- Re, D., Inbar, M., Richter, C. G., & Landau, A. N. (2019). Feature-based attention samples stimuli rhythmically. *Current Biology*, 29(4), 693–699.
- Senoussi, M., Moreland, J. C., Busch, N. A., & Dugué, L. (2019). Attention explores space periodically at the theta frequency. *Journal of Vision*, 19(5), 22.
- Senoussi, M., Verbeke, P., Desender, K., De Loof, E., Talsma, D., & Verguts, T. (2022). Theta oscillations shift towards optimal frequency for cognitive control. *Nature Human Behaviour*, 6(7), 1000–1013.
- Song, K., Meng, M., Chen, L., Zhou, K., & Luo, H. (2014). Behavioral oscillations in attention: Rhythmic α pulses mediated through θ band. *Journal of Neuroscience*, 34(14), 4837–4844.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643–662.
- Tomassini, A., Ambrogioni, L., Medendorp, W. P., & Maris, E. (2017). Theta oscillations locked to intended actions rhythmically modulate perception. *Elife*, 6, e25618.
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2005). Separating semantic conflict and response conflict in the Stroop task: A functional MRI study. *NeuroImage*, 27(3), 497–504.
- Wang, C., Li, H., Jia, L., Li, F., & Wang, J. (2020). Theta band behavioral fluctuations synchronized interpersonally during cooperation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 27(3), 563–570.
- Xu, H. H., Yang, G. C., Göschl, F., Nolte, G., Ren, Q. Y., Li, Z. H., ... Liu, X. (2024). Distinct and common mechanisms of cross-model semantic conflict and response conflict in an auditory relevant task. *Cerebral Cortex*, 34(3), bhae105.
- Xu, H. H., Yang, G. C., Wu, H. Y., Xiao, J., Li, Q., & Liu, X. (2024). Distinct mechanisms underlying cross-modal semantic conflict and response conflict processing. *Cerebral Cortex*, 34(2), bhad539.
- Yang, Y., Qi, Z. Y., Zhang, K. H., & Luo, W. B. (2019). Behavioral oscillations and their performance in attention and perception. *Chinese Science Bulletin*, 64(5), 546–554.
- [杨阳, 齐正阳, 张珂焱, 罗文波. (2019). 行为振荡:揭示心理过程动态变化的新现象. *科学通报*, 64(5), 546–554.]
- Zhang, H., & Kornblum, S. (1998). The effects of stimulus-response mapping and irrelevant stimulus-response and stimulus-stimulus overlap in four-choice Stroop tasks with single-carrier stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(1), 3–19.
- Zhang, X. D., Zhang, L. J., Ding, Y. L., & Qu, Z. (2021). Behavioral oscillations in attentional processing. *Advances in Psychological Science*, 29(3), 460–471.
- [章小丹, 张浙今, 丁玉珑, 曲折. (2021). 注意过程中的行为振荡现象. *心理科学进展*, 29(3), 460–471.]

Behavioral theta oscillations in cross-modal stimulus conflict and response conflict processing

XU Honghui^{1,2,3}, XU Yiran⁴, YANG Guochun⁵, NAN Weizhi⁶, LIU Xun^{1,2}

⁽¹⁾ CAS Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Beijing 100101, China)

⁽²⁾ Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040, China)

⁽³⁾ School of Education, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China)

⁽⁴⁾ School of Cultural Services and Management, Hubei Vocational College of Art, Wuhan 430079, China)

⁽⁵⁾ Guangdong Institute of Intelligence Science and Technology, Hengqin, Zhuhai 519031, China)

⁽⁶⁾ Department of Psychology and Center for Brain and Cognitive Sciences, School of Education, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract

Theta oscillations are closely associated with cognitive control. Accumulating evidence indicates their involvement in processing both cross-modal stimulus conflict and response conflict. However, the relationship between theta oscillations and the magnitude of these conflicts remains unclear. Research on behavioral oscillations, which shows that theta rhythms are linked to periodic patterns in behavioral performance, provides a novel perspective for investigating how theta oscillations are related to the magnitude of cross-modal stimulus conflict and response conflict.

To address this issue, we used an audiovisual Stroop task with a 2-to-1 stimulus-response mapping and a time-resolved behavioral approach. Given previous evidence that sensory modality modulates theta oscillations during cross-modal stimulus conflict and response conflict processing, we conducted two experiments. In Experiment 1 ($N = 43$), participants responded to auditory stimuli while ignoring visual distractors (auditory task). In Experiment 2 ($N = 40$), participants responded to visual stimuli while ignoring auditory distractors (visual task). This design allowed us to investigate the relationship between theta oscillations and the magnitude of cross-modal stimulus and response conflicts in the auditory and visual tasks, respectively.

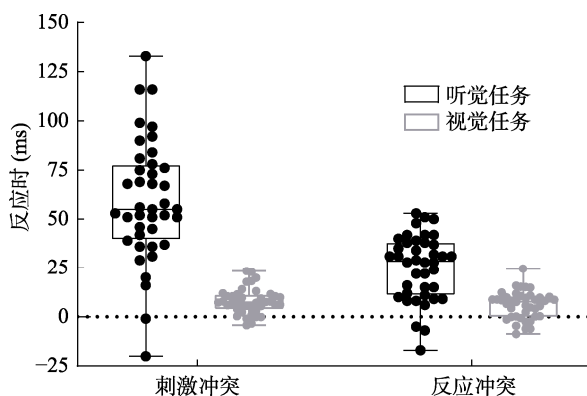
The results demonstrated that the rhythmic processing of task-relevant stimuli was modulated by task-irrelevant stimuli. When the task-irrelevant stimuli were either the same as or different from the task-relevant stimuli (including both stimulus and response incongruency), response times exhibited rhythmic fluctuations in the theta band (4~7.5 Hz). In contrast, when task-irrelevant stimuli were neutral, the processing was characterized by oscillations in the alpha band (9.4~10 Hz). Furthermore, we found that the magnitude of the cross-modal response conflict fluctuated rhythmically at a theta frequency (3.8 Hz) in the auditory task, whereas the magnitude of the cross-modal stimulus conflict fluctuated rhythmically at a theta frequency (5.6 Hz) in the visual task.

In summary, the present study demonstrates that cognitive control processes exhibit theta oscillations at the behavioral level, which directly modulate the magnitude of cross-modal stimulus conflict and response conflict. These findings elucidate the relationship between theta oscillations and conflict magnitude, and extend the rhythmic theory of attention to the domain of cognitive control in conflict processing.

Keywords cross-modal, stimulus conflict, response conflict, behavioral oscillation, theta

附录：实验 1 与实验 2 的比较

为了比较不同任务条件下跨通道刺激冲突与反应冲突的大小，我们计算了实验 1 与实验 2 中刺激冲突与反应冲突幅度，并进行了 2 (任务条件：听觉任务、视觉任务) \times 2 (冲突条件：刺激冲突、反应冲突) 的混合设计方差分析，其中任务条件为组间变量，冲突条件为组内变量。结果显示，任务条件的主效应显著, $F(1, 78) = 158.97, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.67$; 冲突条件的主效应显著, $F(1, 78) = 36.87, p < 0.001$; 任务条件与冲突条件的交互作用显著, $F(1, 78) = 29.13, p < 0.001$ 。简单效应分析发现，在跨通道刺激冲突幅度上，听觉任务 ($M = 59 \text{ ms}, SE = 3.54$) 显著大于视觉任务 ($M = 8 \text{ ms}, SE = 3.54$), $t(39) = 12.60, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 2.82, 95\% \text{ CI} = [41.40, 61.34]$; 在跨通道反应冲突幅度上，也发现了听觉任务 ($M = 25 \text{ ms}, SE = 2.02$) 显著大于视觉任务 ($M = 6 \text{ ms}, SE = 2.02$), $t(39) = 4.77, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.07, 95\% \text{ CI} = [13.77, 25.16]$ 。结果见附图 A1。这一结果说明跨通道刺激冲突幅度与反应冲突幅度在听觉任务中都比在视觉任务中大，并且实验间跨通道刺激冲突的差异比跨通道反应冲突的差异更大。



附图 A1 实验 1 (听觉任务)和实验 2 (视觉任务)中跨通道刺激冲突幅度与跨通道反应冲突幅度的比较

在刺激冲突与反应冲突幅度的 θ 振荡上，由于只能在被试水平上计算刺激冲突与反应冲突幅度，无法对每个被试的单个试次进行拟合。根据前人研究(Fiebelkorn et al., 2013)，我们使用总体被试数据分析方法。由于该方法只能得到一个刺激冲突幅度与反应冲突幅度的 θ 值，因此无法做实验间的统计分析。我们在实验 2 的讨论部分对实验 1 和实验 2 发现的冲突幅度的 θ 值大小上进行了讨论。