

注意力资源限制与双任务的相互干扰机制*

吴彦文¹ 游旭群² 李海霞¹

(¹天水师范学院心理系, 天水 741001) (²陕西师范大学心理学院, 西安 710062)

摘要 采用心理不应期研究范式, 两个反应时实验检测了注意力资源分配的特征以及双任务的相互干扰机制。每次实验中, 要求被试快速、相继对高低音辨别任务(T1)和 Stroop 任务(T2)作出选择性反应, T1 和 T2 间采用 6 种不同的时间间隔(SOA), 以系统考察不同 SOA 条件下两个任务的反应时走势。结果发现: (1) 在重叠的双任务情境中, T1 的中枢加工导致在 T2 上出现显著的 PRP 效应, T2 的中枢反应选择对 T1 的反应选择和反应执行加工同样产生显著的影响。SOA 以及 T2 的难度与复杂度实质性地影响了 T1 的反应选择和反应执行加工。(2) 当两个任务同时需要进行中枢反应选择加工时, 一个任务占用更多的注意资源将导致另一任务获得较少的注意资源, 注意资源量的多寡直接决定了该任务的加工效率。(3) 两个任务的加工相互影响、相互制约, 这种制约机制不仅仅存在于中枢反应选择阶段, 在反应执行阶段仍然存在。

关键词 双任务; 心理不应期; 反应选择; 注意资源; Stroop 任务

分类号 B842

1 引言

双任务操作是指被试同时或继时操作两种快速的反应时任务, 当这两个任务呈现的起点时间间隔不同步(Stimulus onset asynchrony, 简称 SOA)时, 通常发现随着 SOA 的缩短, 任务 1 (简称 T1)和任务 2 (简称 T2)在加工时间上有较高重叠时, T2 的反应时(简称 RT2)会显著延迟(Pashler, 1994a, 1994b)。SOA 缩短导致 RT2 延迟的现象即心理不应期(Psychological refractory period, 简称 PRP)效应(Pashler, 1994b; Pashler, Harris, & Nuechterlein, 2008)。

1931 年 Telford 首次运用 PRP 范式揭示了双任务的干扰现象。他发现在较长的 SOA 条件下, 被试有足够的时间首先完成对 T1 的反应选择(response selection)后再进行 T2 的反应选择时, 对 T2 的反应并不受 T1 加工的干扰。若 SOA 较短, 当 T1 正在进行反应选择加工时 T2 也随即出现, 由于 T1 暂时占据了单通道瓶颈加工器(single-channel bottleneck processor), T2 的反应选择必须等待 T1 完

成其反应选择加工后才能进入容量有限的瓶颈加工器。SOA 越短, T2 到达的越快, T1 和 T2 的重叠程度越高, T2 等待 T1 完成瓶颈加工的时间越长, 任何延长 T1 加工的因素就越容易延长 RT2。

在总结前人研究的基础上, Pashler 提出了反应选择瓶颈(response-selection bottleneck, 简称 RSB)模型。该模型认为, 任何一个任务的加工过程由 3 个独立的阶段组成(如图 1 所示): 瓶颈前阶段(A), 主要负责刺激识别和特征提取; 瓶颈阶段(B, 中枢加工器), 主要负责反应选择; 瓶颈后阶段(C), 主要负责反应执行和动作调整。A 和 C 两个阶段允许多个刺激同时输入, 也能和另一任务的瓶颈阶段并行进行加工。但中枢加工器一次只能加工一个任务, 当 T1 正在进行中枢加工时, T2 的反应选择必须等待 T1 释放中枢瓶颈后才能进入中枢加工器, PRP 效应是由于 T1 的反应选择导致 T2 受到中枢瓶颈(central bottleneck)限制机制的制约(Pashler, 1994a, 1994b)。

根据其理论基础, RSB 模型对 RT1(T1 的反应时)和 RT2 作出了预测: 在 RT1 上, 无论 SOA 和

收稿日期: 2013-05-15

* 教育部人文社会科学基金(项目号: 09YJCXLX025)资助。

通讯作者: 游旭群, E-mail: youxuqun@snnu.edu.cn

T2 难度如何变化, RT1 始终不受 SOA 长短和 T2 难度变化的影响(Case A 和 Case B)。但 RT2 和 RT1 显著不同, 在长 SOA 条件下(Case A), 无论是较简单的 T2 还是较难的 T2, 如果 T1 已经完成了反应选择加工后再进行 T2 的反应选择加工, 那么 T2 的反应选择不会因 T1 占据中枢瓶颈而延迟, 因此 RT2 值为 A、B 和 C 三个独立阶段加工时间的总和。但在短 SOA 条件下(Case B), 当 T1 占据中枢瓶颈时, T2 的反应选择必须等待 T1 完成瓶颈加工, 中枢瓶颈被释放后才可进行。SOA 越短, T2 等待 T1 完成瓶颈加工的时间越长。RT2 值为等待瓶颈的“认知延迟(PRP 效应)”时间和 T2 加工过程之和。同样, T2 的难度也不影响 RT2 值的大小, 因为复杂的、难度大的 T2 可以充分利用等待瓶颈释放的时间来完成其知觉加工(瓶颈测试原理 3, Pashler, 1994a), 因此较难和较简单条件下的 RT2 基本相等。

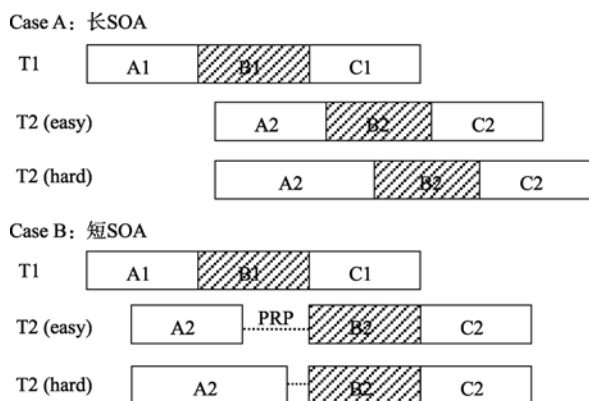


图1 RSB模型的加工过程示意图

Tombu 和 Jolicoeur (2003)在总结了 Pashler 的 RSB 模型的基础上, 再综合 Kahneman (1973, 见 Meyer & Kieras, 1997)一般能量共享模型(general capacity sharing model)以及 Navon 和 Miller (2002)多资源模型(multiple types of resources model)加工思想的基础上提出了中枢资源共享模型(central capacity sharing model, 简称 CCS 模型, 如图 2 所示), 该模型同样认为一个任务的加工过程有刺激识别、反应选择和反应执行三个阶段。但和 RSB 模型不同, 该模型认为中枢加工器是一个并行加工器, 两个任务的反应选择可以并行进行, 但有限的注意资源必须按照任务的需求在两个任务间进行共享(sharing)。当有限的注意资源被两个或多个任务共享时, 两个或多个任务的加工速度都会减慢。

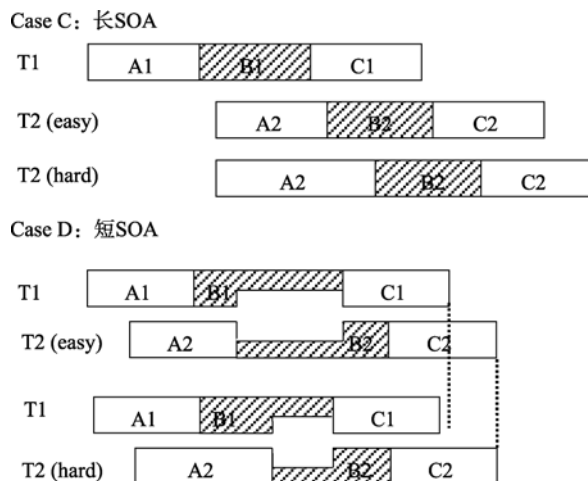


图2 CCS模型加工过程示意图

在其模型的基础上, Tombu 和 Jolicoeur (2003)列举了 6 种 T1 和 T2 在反应选择阶段可能重叠或不重叠的特例。但图 2 中的 Case C 和 D 两种特例基本上概括了绝大多数 PRP 效应的加工过程。

在长 SOA 条件下(Case C), T1 反应选择加工的开始和结束均先于 T2 的反应选择加工, T1 和 T2 的加工过程等同于 RSB 模型对双任务加工的预测。但在短 SOA 条件下(Case D), 只要 T1 和 T2 的反应选择发生重叠, 中枢瓶颈会自动根据任务需求把注意资源按一定的比例分配到两个任务中去, 若 T2 的反应选择占据了部分注意资源, 那么可供 T1 进行反应选择的注意资源量会相应减少, 将导致 T1 的反应选择过程延长, RT1 随即延长。在相同的 SOA 条件下, T2 知觉加工时间越长将推迟 T2 和 T1 反应选择重叠的时间, T1 将有充裕的注意资源进行其反应选择, 从而缩短 RT1, 但延长 T1 的其他任何加工阶段将会延长 RT1。

从两个模型的理论基础来看, 争论主要集中在以下两个方面: (1) 中枢反应选择阶段能否同时处理多个刺激; (2) RT1 是否受 SOA 长短以及 T2 难度与复杂度变化的影响。目前两个模型都得到了大量实验证据的支持, Pashler 等人所作的一系列研究均发现 RT1 独立于 SOA 和 T2 难度变化(Pashler & Johnston, 1989; Pashler, 1994b; Pashler et al., 2008), 因而结论支持 T1 和 T2 的反应选择为系列加工方式。近年来有更多的研究发现 RT1 显著随 SOA 长短和不同难度 T2 的变化而变化(Tombu & Jolicoeur, 2002, 2003, 2005; Lehle & Hübner, 2009; Miller, Ulrich, & Rolke, 2009; Pannebakker et al., 2011; Piai & Roelofs, 2013; Lien, Croswaite, & Ruthruff, 2011;

吴彦文, 游旭群, 2007)。Watter 和 Logan (2006)指出, RT1 受 SOA 和不同难度 T2 的影响表明 T1 在进行中枢反应选择加工时 T2 也进入了中枢加工器, T1 和 T2 的反应选择并行得到了有效的加工。

到目前为止, 在绝大多数 PRP 效应的研究中, 对 T2 主要采用较简单的刺激分类任务 (如箭头朝上还是朝下, 图形的颜色是绿色还是红色等), 但对于较复杂的需要进行语义加工的 T2 材料还尚未涉及。另外由于 RSB 模型关于 RT1 不受 SOA 和 T2 难度影响这一预测的强影响力, 以往绝大多数研究者常把关注点放在 T1 对 T2 各阶段加工的影响上(Pashler & Johnston, 1989; Pashler, 1994b; Pashler et al., 2008), 近年来一些研究报告开始考察 SOA 和 T2 难度是否同样对 T1 各加工阶段产生影响(Tombu & Jolicoeur, 2002, 2003, 2005; Miller et al., 2009; Pannebakker et al., 2011; Piai & Roelofs, 2013; Lien et al., 2011; Töllner, Strobach, Schubert, & Müller, 2012), 但鲜有研究关注 T1 和 T2 的相互影响。

针对瓶颈的位置也存在较多的争议, 目前大量的证据显示 PRP 效应产生于反应选择阶段, 瓶颈的调节机制源于中枢神经系统的结构性限制(如 RSB 模型), 导致两个任务在反应选择水平上必须选择系列加工方式(Pashler & Johnston, 1989)。即使是认为在反应选择阶段能实现注意资源最优共享的 CCS 模型也认为干扰产生于两个任务的反应选择阶段。也有少量的研究显示瓶颈可能发生于两个任务的动作执行阶段, 如 De Jong (1993)提出的双瓶颈模型(dual-bottleneck model)认为, 中枢瓶颈(central bottleneck)阻止两个任务的中枢加工平行进行, 反应触发(response initiation)瓶颈阻止两个反应被相继触发。De Jong (1993)认为 RT2 延迟是由于执行 T1 的反应动作导致 T2 的反应触发被延迟。对于反应触发瓶颈的验证, Töllner 等人 (2012)运用单侧化准备电位(Lateralized readiness potential)发现, 当 T1 产生动作执行需求时, T2 的反应选择和动作执行被显著延迟。Ulrich 等人(2006)发现, 当 T1 开始其反应执行动作时, RT2 同样被显著延迟, 以上两项研究都认为动作执行系统也属于心理不应(refractoriness)的一部分。目前对 PRP 效应的研究成果难以有效整合起来。

为了进一步拓展 PRP 效应受瓶颈机制限制的范围, 本研究依然采用标准的 PRP 范式, 但和传统 PRP 方法不同的是, 本研究融合 Stroop 任务来探讨

PRP 范式下当 T1 (高低音辨别)处于中枢加工时, T1 和 T2 (Stroop 任务)的中枢反应选择能否被同时执行。采用 Stroop 任务主要基于以下两点考虑: (1) Stroop 任务一直被作为测量注意资源分配的“金标准”(gold standard, 见 Roelofs, 2010)。当前 Stroop 任务的研究结果表明, 当颜色字的字色与字义两个维度冲突时, 对颜色字的颜色命名被显著延迟(Brown, Gore, & Carr, 2002; Appelbaum, Boehler, Won, Davis, & Woldorff, 2012), 以 Stroop 任务为材料除了能进一步拓展 PRP 效应受瓶颈机制限制的已知范围外, 还能更好地揭示双任务加工中注意力资源分配的特征。(2) 在 PRP 范式中, 常常采用具有难度级差的 T2, 以考察 T2 的难度效应是否对 T1 产生相应的影响。Stroop 任务的特定属性表明它在控制任务难度上有独特的效果。大量的 Stroop 效应研究表明, 无论采用何种实验形式, 当字色与字义两个维度冲突时相比两个维度一致时被试表现出非常稳定的认知冲突, 用 Stroop 任务来控制 T2 的难度级差具有更好的稳定性。

2 实验一 注意力资源强竞争与双任务干扰

已有研究表明, 汉字的形、音、义具有无意识自动激活的特征(张积家, 陆爱桃, 2010)。按照 CCS 模型的假设, 当 SOA 较短时, 两个任务的中枢反应选择会快速重叠, T2 和 T1 将会对有限的注意资源进行激烈的竞争, 只要 T2 获得少量的注意资源, RT1 会被延迟, SOA 越短, RT1 应该越长。同样, 在 T2 的 Stroop 任务中, 字色和字义在冲突条件下对注意资源竞争的激烈程度要远高于二者一致条件下对注意资源的竞争。假如 T1 和 T2 可以共享有限的注意资源, 那么在冲突条件下 T2 将从 T1 上分享更多的注意资源, 因此, T2 在字色和字义冲突条件下的 RT1 应长于一致条件下的 RT1。但是按照 RSB 模型的假设, 无论 SOA 和 T2 难度如何变化都不会对 RT1 产生显著的影响。本研究一方面验证 RSB 模型和 CCS 模型的核心假设, 另一方面为当代认知心理学研究中的并行加工和系列加工问题提供进一步的实验证据。

2.1 研究方法

2.1.1 被试

本科生 49 名, 男 20 名, 女 29 名。视力或矫正视力正常, 无色盲或色弱患者, 听力正常, 没有参加过类似的实验。

2.1.2 实验材料与仪器

本实验在联想奔Ⅳ计算机上完成,所有刺激均呈现在 17 英寸纯平显示器中央,显示器分辨率为 1024×768,刷新频率为 75 Hz。听觉材料为持续 150 ms 的低音和高音,频率分别为 300 Hz 和 1000 Hz,位速 1144 Kbps,音频采样大小 16 位,音频采样级别 44 kHz,立体声。实验前要求被试认真倾听并能够非常清晰地辨别出两种声音的差异才能参加实验。视觉刺激由 3 个颜色字(红、绿、蓝,简称“色字”)和 3 种颜色(红色、绿色、蓝色,简称“字色”)相互组合构成,字符大小均为 56×54 像素。3 种颜色的色调、饱和度和亮度分别为:红色:0、240 和 120;绿色:80、240 和 120;蓝色:160、240 和 120。字色与字义的条件匹配有:匹配一致共 3 种,红字-红色、绿字-绿色、蓝字-蓝色;匹配冲突共 6 种,如红字用绿色或蓝色书写。考虑到匹配一致和冲突条件下的平衡因素,匹配一致在每种处理条件下重复呈现 2 次。为了消除高音和低音可能存在的差异,所有刺激组合在高音和低音条件下出现的概率相同。因此,每种实验处理条件下有 12 (条件匹配)×6 (SOA)×2 (高音、低音)=144 次刺激组合,重复呈现 4 次,正式实验总次数为 576 次。所有色字均呈现在白色背景上。

2.1.3 实验设计

为了检验 T2 对 T1 的影响,T1 和 T2 均采用 2 条件匹配(字色与字义一致、冲突)×6 SOA (50 ms、100 ms、200 ms、300 ms、500 ms、800 ms)被试内设计。因变量为被试的反应时和正确率。

2.1.4 实验程序

实验程序用 E-prime 1.1 软件编制。每次实验开始时在屏幕中央呈现注视点“+”500 ms,接着出现 500 ms 的空屏,空屏结束后出现声音刺激,呈现时间为 150 ms,视觉刺激从声音呈现后 50 ms、100 ms、200 ms、300 ms、500 ms 或 800 ms 出现,时间为 200 ms,视觉刺激消失后为 2300 ms 的空屏等待被试作出反应,被试作出反应后呈现 1000 ms 的

空屏。对 T1 要求被试听到低音用左手中指按“Z”键,听到高音用左手食指按“X”键。对 T2 要求被试忽略字义只对字色作出反应,红色用右手食指按右侧小键盘“1”键,绿色用右手中指按“2”键,蓝色用右手无名指按“3”键。告知被试两个任务都非常重要,对两个任务都做快而准确的反应,但对 T2 作出反应之前必须先完成对 T1 的反应。当声音刺激或视觉刺激在 2500 ms (视觉刺激控制时间为视觉呈现 200 ms+空屏等待 2300 ms)内没有作出反应时,该次实验的反应时数据不被记录,算作一次错误反应。正式实验前被试先进行 50 次实验练习,熟练掌握实验对左手和右手的按键反应要求,只有练习正确率达到 90%以上才能进入正式实验。正式实验每呈现 50 次刺激休息一次,共休息 11 次,休息时间由自己确定,整个实验过程约持续 60 min。

2.2 结果

对数据进行统计分析前,剔除 4 名 T1 或 T2 正确率低于 80%或对 T1 没有作反应的被试,剔除 2.5 个标准差以外的反应时数据。由于 T1 和 T2 的平均正确率均在 93%以上,故对正确率不再做进一步的分析和处理,各处理条件下的 RT1 和 RT2 结果如表 1 和表 2 所示。

2.2.1 声音任务

按照 RSB 模型,T1 的难度和复杂度使其中枢和中枢前阶段延长 1 ms,RT1 和 RT2 将相应延长 1 ms。那么本研究中的高音和低音这两种不同的音调辨别任务在刺激难度上存在显著的差异吗?为了验证这种可能性,事先对高音和低音条件下的数据进行配对 t 检验,结果发现二者的差异不显著, $t(44) = 1.51, p > 0.05$,说明两种不同的音调辨别任务在刺激难度上无显著的差别,假如 RT1 随 T2 和 SOA 组合条件的变化而变化,那么这个变化不是 T1 本身的难度差异造成的,原因只能来自于 T2 和 SOA 组合产生的难度和复杂度的变化。因此,对 RT1 的数据同样以条件匹配和 SOA 为组内变量进行 2×6 的重复测量多元方差分析。

表 1 不同 SOA 条件下声音任务的反应时(ms)及标准差

条件匹配	SOA					
	50 ms	100 ms	200 ms	300 ms	500 ms	800 ms
一致	983±202	974±176	981±195	996±200	1027±224	1083±289
冲突	1003±210	989±189	983±205	1003±225	1044±228	1102±298
差值	20	15	2	7	17	19

注:差值=冲突条件的反应时-一致条件的反应时,下同。

表 2 不同 SOA 条件下视觉任务的反应时(ms)及标准差

条件匹配	SOA					
	50 ms	100 ms	200 ms	300 ms	500 ms	800 ms
一致	1115±222	1053±195	975±217	902±187	820±175	752±154
冲突	1183±231	1131±199	1037±209	989±207	906±187	843±162
差值	68	78	62	87	86	91

对 RT1 的方差分析发现, 条件匹配的主效应显著, $F(1,44) = 8.67, p < 0.01$, 当 T2 在字色和字义一致时 RT1 (1007 ms) 更快, 当 T2 在字色和字义冲突时 RT1 (1021 ms) 显著变慢; SOA 的主效应非常显著, $F(5,220) = 15.84, p < 0.001$, SOA 在 50 ms、100 ms、200 ms、300 ms、500 ms 和 800 ms 时的 RT1 分别为 993 ms、981 ms、982 ms、999 ms、1036 ms 和 1093 ms。进一步的配对比较发现, SOA 在 50 ms、100 ms 和 200 ms 三种条件下的 RT1 两两差异均不显著($p > 0.05$), SOA 在 300 ms 条件下的 RT1 除了和 SOA 在 50 ms 与 100 ms 条件下的差异不显著外, 和其他三种 SOA 条件下的 RT1 两两差异均显著($p < 0.05$), SOA 在 500 ms 和 800 ms 两种条件下的 RT1 与其他所有 SOA 条件下的 RT1 两两差异均显著($p < 0.01$)。总体上出现随着 SOA 的延长, RT1 延长的趋势。条件匹配和 SOA 的交互作用不显著, $F(5,220) = 0.50, p > 0.05$ 。

2.2.2 视觉任务

对 RT2 的方差分析发现, 条件匹配的主效应非常显著, $F(1,44) = 142.29, p < 0.001$, 一致条件下的 RT2 (936 ms) 显著快于冲突条件下的 RT2 (1015 ms); SOA 的主效应非常显著, $F(5,220) = 289.09, p < 0.001$, 随着 SOA 的缩短, RT2 线性延长, SOA 在 50 ms、100 ms、200 ms、300 ms、500 ms 和 800 ms 条件下的 RT2 分别为 1149 ms、1092 ms、1006 ms、946 ms、863 ms、780 ms。进一步的配对比较发现, 两两差异均达到了非常显著的水平($p < 0.001$)。条件匹配和 SOA 的交互作用不显著, $F(5,220) = 1.07, p > 0.05$ 。

2.2.3 声音任务和视觉任务的相互关系

为了进一步检验 T1 和 T2 的加工是否产生相互影响, 对 RT1 和 RT2 的数据作进一步的处理和分析, 图 3 为各 SOA 条件下 RT1 和 RT2 的交互效应图。方差分析结果表明, RT1 和 RT2 的交互作用非常显著, $F(5,220) = 320.66, p < 0.001$ 。进一步的简单效应分析发现, SOA 在 200 ms 条件下的 RT1 和 RT2 差异不显著, 其余 5 种 SOA 条件下的 RT1 和 RT2 差

异均达到了显著或非常显著的水平, 分别为: 50 ms: $F(1,44) = 60.77, p < 0.001$; 100 ms: $F(1,44) = 27.87, p < 0.001$; 300 ms: $F(1,44) = 6.81, p < 0.05$; 500 ms: $F(1,44) = 44.17, p < 0.001$; 800 ms: $F(1,44) = 65.39, p < 0.001$, 表明 T1 和 T2 之间产生了实质性的相互影响。

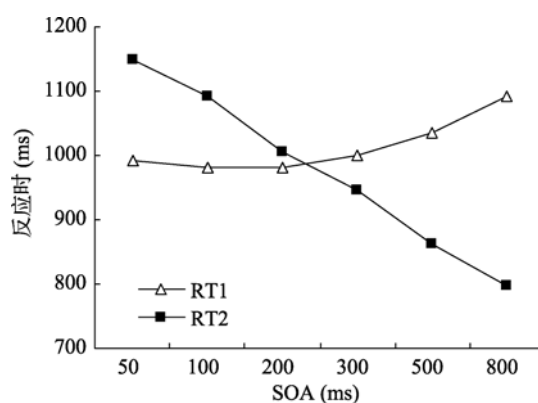


图 3 实验一 T1 和 T2 的交互效应图

2.3 讨论

在 RT2 上出现随着 SOA 的缩短 RT2 线性延长, PRP 效应非常显著的现象, 说明 T1 的反应选择对 T2 的加工产生了非常显著的影响, 即使字色和字义一致条件下依然存在。条件匹配的主效应显著, 出现一致条件下的 Stroop 促进效应和冲突条件下的 Stroop 干扰效应, 说明字义被无意识激活后和当前的颜色任务产生相互影响。在 RT1 上, 条件匹配和 SOA 的主效应同样显著, 说明不同长短的 SOA 和不同难度的 T2 对 T1 的加工产生了显著的影响。T1 和 T2 的交互作用非常显著, 说明 T1 和 T2 的加工相互影响、相互制约, 该结果并不支持 RSB 模型的假设。但本研究却发现 RT1 随着 SOA 的延长而延长, 随着 SOA 的缩短而缩短, 这一点用 CCS 模型也无法作出合理的解释。

3 实验二 注意力资源弱竞争与双任务干扰

实验一结果证实在中枢阶段 T1 和 T2 的反应选

择能够同时得到加工。目前解释 Stroop 效应的自动化加工理论认为, 字义属于自动化加工过程, 无需人的意识控制; 而字色属于控制性加工过程, 需要人有意识地进行控制, 字义的激活速度要比字色的激活速度快 100 ms~200 ms (Roelofs, 2010), 字义的自动激活除了在 T2 上产生了非常显著的 Stroop 效应外, 在 T1 上也存在当 T2 的字色和字义一致时 RT1 更快, 当 T2 的字色和字义冲突时 RT1 显著变慢的类似 Stroop 效应, 说明当 T2 的难度较大时 T2 确实从 T1 上分享了更多的注意资源, T2 和 T1 对有限的注意资源展开了激烈的竞争。若实验要求被试忽略字色, 那么对具有控制性加工特征的字色的激活将会大幅减弱, 这是否将有效避免字色和字义两个维度对有限注意资源的竞争, 从而减弱 T2 从 T1 上抢夺有限的注意资源, 从而减弱或消除双任务的相互干扰? 基于以上假设, 实验二重在考察被试在忽略字色, T2 两个维度对注意资源弱竞争或无竞争条件下, T1 和 T2 的中枢反应选择能否同时得到加工以及 RT1 是否不受 SOA 和 T2 变化的影响。

3.1 研究方法

3.1.1 被试

本科生 52 名, 男 19 名, 女 33 名。视力或矫正视力正常, 无色盲或色弱患者, 听力正常, 没有参加过类似的实验。

3.1.2 实验设计

T1 和 T2 均采用 2 条件匹配(字色与字义一致、冲突) $\times$ 6 SOA (50 ms、100 ms、200 ms、300 ms、500 ms、800 ms) 被试内设计。因变量同实验一。

3.1.3 实验材料与仪器

同实验一。

3.1.4 实验程序

实验程序基本同实验一。不同之处在于: 对 T2 要求被试忽略字色只对字义作出反应, 看到“红”字用右手食指按右侧小键盘“1”键, “绿”字用右手中指按“2”键, “蓝”字用右手无名指按“3”键。

3.2 结果

对资料进行统计分析之前, 剔除 3 名 T1 或 T2 正确率低于 80% 的被试, 剔除 2.5 个标准差以外的反应时数据。由于 T1 和 T2 的平均正确率均在 94% 以上, 同样对正确率不再做进一步的处理和分析, 各处理条件下的 RT1 和 RT2 结果如表 3 和表 4 所示。

3.2.1 声音任务

对高音和低音条件下的 RT1 数据进行检验, 发现二者的差异不显著, $t(48) = 1.47, p > 0.05$ 。因此对 RT1 的数据以条件匹配和 SOA 为组内变量进行 2×6 的重复测量多元方差分析。

对 RT1 的方差分析发现, 条件匹配的主效应显著, $F(1, 48) = 8.77, p < 0.01$, 当 T2 在字色和字义一致时 RT1 (913 ms) 更快, 当 T2 在字色和字义冲突时的 RT1 (925 ms) 显著变慢; SOA 的主效应非常显著, $F(5, 240) = 14.50, p < 0.001$, SOA 在 50 ms、100 ms、200 ms、300 ms、500 ms 和 800 ms 条件下的 RT1 分别为 896 ms、894 ms、895 ms、896 ms、947 ms 和 983 ms。进一步的配对比较发现, SOA 在 50 ms、100 ms、200 ms 和 300 ms 四种条件下的 RT1 两两差异不显著 ($p > 0.05$), 但 SOA 在 500 ms 和 800 ms 两种条件下的 RT1 与其他所有 SOA 条件下的 RT1 两两差异均显著 ($p < 0.001$)。总体上出现随着 SOA 的延长, RT1 延长的趋势。条件匹配和 SOA 的交互作用不显著, $F(5, 240) = 0.80, p > 0.05$ 。

表 3 不同 SOA 条件下声音任务的反应时(ms)及标准差

条件匹配	SOA					
	50 ms	100 ms	200 ms	300 ms	500 ms	800 ms
一致	889±186	883±178	892±192	892±179	938±213	983±259
冲突	902±190	905±187	899±199	902±195	955±210	983±246
差值	13	22	7	11	17	0

表 4 不同 SOA 条件下视觉任务的反应时(ms)及标准差

条件匹配	SOA					
	50 ms	100 ms	200 ms	300 ms	500 ms	800 ms
一致	1047±193	995±192	912±190	839±167	773±165	702±143
冲突	1079±198	1031±197	928±200	868±177	805±158	735±135
差值	31	36	17	29	33	33

3.2.2 视觉任务

对 RT2 的方差分析发现, 条件匹配的主效应非常显著, $F(1,48) = 43.56, p < 0.001$, 一致条件下的 RT2 (878 ms) 显著快于冲突条件下的 RT2 (908 ms); SOA 的主效应非常显著, $F(5,240) = 315.49, p < 0.001$, 随着 SOA 的缩短, RT2 线性延长, SOA 在 50 ms、100 ms、200 ms、300 ms、500 ms 和 800 ms 条件下的 RT2 分别为 1063 ms、1013 ms、920 ms、853 ms、789 ms 和 719 ms。进一步的配对比较发现, 两两差异均达到了非常显著的水平 ($p < 0.001$)。条件匹配和 SOA 的交互作用不显著, $F(5,240) = 0.59, p > 0.05$ 。

3.2.3 声音任务和视觉任务的相互关系

对 RT1 和 RT2 的数据作进一步的处理和分析, 图 4 为各 SOA 条件下 RT1 和 RT2 的交互效应图。方差分析结果表明, RT1 和 RT2 的交互作用非常显著, $F(5,240) = 337.33, p < 0.001$ 。进一步的简单效应分析发现, 除 SOA 在 200 ms 条件下的 RT1 和 RT2 差异不显著外, 其余 SOA 条件下的 RT1 和 RT2 两两差异均达到了显著或非常显著的水平, 分别为: 50 ms: $F(1,48) = 115.48, p < 0.001$; 100 ms: $F(1,48) = 65.78, p < 0.001$; 300 ms: $F(1,48) = 7.29, p < 0.05$; 500 ms: $F(1,48) = 77.35, p < 0.001$; 800 ms: $F(1,48) = 86.37, p < 0.001$, 表明 T1 和 T2 之间产生了实质性的相互影响。

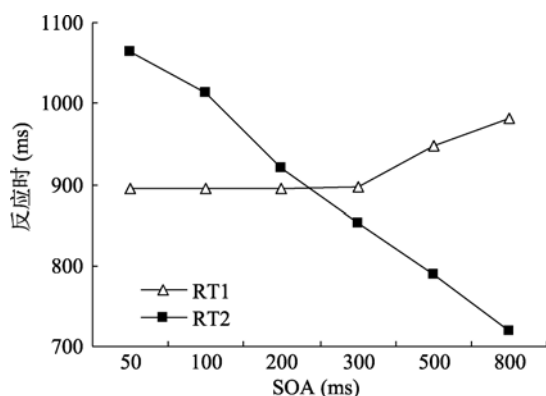


图 4 实验二 T1 和 T2 的交互效应图

3.3 讨论

实验二同样发现, 在 RT2 上存在随着 SOA 缩短, RT2 线性延长, PRP 效应非常显著的现象。条件匹配的主效应显著, 说明字色依然被有效激活。在 RT1 上 SOA 和 T2 的主效应均显著, 说明不同 SOA 和不同难度 T2 的变化对 T1 的加工产生了显著的影响。T1 和 T2 的交互作用非常显著, 说明 T1 和 T2

的加工相互影响、相互制约。本研究同样发现 RT1 随着 SOA 的延长而延长, 随着 SOA 的缩短而缩短, 这一点用 CCS 模型同样无法作出合理的解释。

4 综合讨论

RSB 模型基于离散加工阶段的假设, 认为 T1 和 T2 的反应选择是独立的、系列的, 在 T1 的反应选择完成之前, T2 的反应选择无法开始, 因此 RSB 模型认为 RT1 独立于 SOA 和 T2 难度的变化。而 CCS 模型认为 T1 和 T2 的反应选择能并行进行, 二者可以共享有限的中枢注意资源, RT1 显著受 SOA 和 T2 难度变化的影响。由于 RSB 模型的巨大影响力, 以往心理学家采用 PRP 范式来考察人类对重叠任务的认知加工时, 经常把注意力放在 T1 对 T2 所产生的影响上, 往往忽略了 T2 对 T1 是否产生相应的影响。Tombu 和 Jolicoeur (2003) 指出, 对 PRP 效应的分析必须考虑 T1 的反应模式。本研究不仅关注 T1 对 T2 各加工阶段的实质性影响, 同时还关注 SOA 和 T2 难度级差对 T1 各加工阶段的间接影响以及在不同 SOA 条件下 T1 和 T2 的动态变化关系, 以全面了解 PRP 效应的特征。

在 T1 上, 两个实验结果均发现 RT1 随着 SOA 的缩短而变快, 随着 SOA 的延长而延迟, 这一结果和 RSB 模型的预测相矛盾。按照 RSB 模型的假设, T1 的中枢瓶颈阶段(B)和 T2 非瓶颈阶段(A或C) 的加工能够并行进行, 若 T2 对 T1 产生干扰, 那么干扰只能来自于 T1 和 T2 的中枢反应选择发生重合, T2 对 T1 的干扰来自于 T2 的中枢反应选择阶段。另外, 两个实验结果均发现了 T1 和 T2 间存在显著的交互效应, 这些结果用 RSB 模型都无法作出合理的解释。

但按照 CCS 模型的假设, 当有限的注意资源被分配到两个任务上时, 由于两个任务可用的注意资源量都相应减少, RT1 和 RT2 都会随着 SOA 的缩短而延长。但本研究发现在短 SOA 条件下的 RT1 更快, 而长 SOA 条件下的 RT1 显著变慢, 这一点用 RSB 模型和 CCS 模型关于瓶颈只产生于反应选择阶段的假设无法作出合理的解释, 但该结果支持反应触发瓶颈(De Jong, 1993)以及反应执行属于瓶颈加工的一部分的观点(Ulrich et al., 2006; Töllner et al., 2012), 该结果说明 T1 的动作执行仍然受到类似瓶颈机制的制约(理由见修正模型重叠情境三)。综合数据结果, 本研究认为, 反应选择属于主瓶颈, 反应执行属于次瓶颈, 二者的认知加工都需要占用

注意资源, 但反应选择需要更多的注意资源才能保证任务的正常进行, 而反应执行需要较少的注意资源就能完成。CCS 模型之所以不能解释本研究结果, 主要原因在于 CCS 模型没有考虑到反应执行仍然属于瓶颈加工的一部分, 图 5 为本研究对 CCS 模型的修正图。

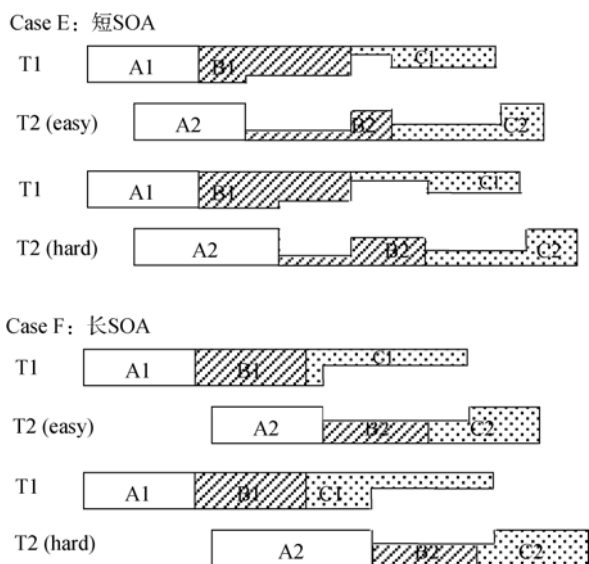


图 5 CCS 模型修正图

根据修正的模型图, 本研究认为, 在重叠的任务情境中, T1 和 T2 在反应选择和反应执行阶段仍然采用注意资源共享的并行加工方式, 但分配到两个任务上的注意资源总量是固定的、有限的(总量为 1), 为了提高双任务的操作效率, T1 和 T2 对资源的共享遵循速度和效益权衡的原则, T1 和 T2 在不同的加工阶段有以下 4 种重叠情境:

(1)重叠情境一: T1 的知觉加工和部分反应选择与 T2 的知觉加工重叠, 主要适合于图 5 中 Case E 以及本研究中 SOA 为 50 ms 等很短 SOA 条件下的重叠情境。在该情境下, 由于 T1 的知觉加工属于非瓶颈加工阶段(由于本研究没有操纵对不同难度 T2 的知觉识别加工, 无法对该阶段的加工进行精确检测, 所以仍然认为该阶段为非瓶颈阶段), T1 和 T2 的知觉加工虽然共享有限的注意资源, 但二者的加工速度都接近单任务条件下的速度。当 T1 完成知觉加工开始反应选择加工时, T1 的反应选择仍占有 100% 的注意资源, T1 反应选择加工的速度仍然接近单任务条件下的加工速度。

(2)重叠情境二: T1 的反应选择与 T2 的反应选择重叠, 主要适合于图 5 中 Case E 以及本研究中 SOA 为 100 ms 和 200 ms 等较短 SOA 条件下的重

叠情境。在该情境下, T1 正在进行其反应选择但还没有完成其反应选择加工时, T2 也进入中枢加工器开始其反应选择, 这时由于注意资源的总量有限, 二者的反应选择对有限的注意资源展开激烈的竞争。为了避免中枢加工器的超负荷, 被试会策略性的把趋近 100% 的注意资源优先分配到 T1 上供其完成反应选择, 但在调整注意资源的过程中有效分配到 T1 上的注意资源量会相应减少(如从 100% 减少到 90%), T1 的加工速度相比占有趋近 100% 注意资源时的加工速度开始变慢, RT1 出现少量的延迟。T2 由于得到的注意资源量非常少(如 10%), T2 的反应选择进展非常缓慢, RT2 显著延迟。但在稍长的 SOA 条件下(如 300 ms 或更长), T1 与 T2 的反应选择重叠越来越少, T1 占有绝大部分注意资源量的时间越少, T2 可得到的注意资源量越多, RT2 越快。

(3)重叠情境三: T1 的反应执行与 T2 的反应选择重叠, 主要适合于图 5 中的 Case E 以及本研究中 SOA 为 500 ms 和 800 ms 等较长 SOA 条件下的重叠情境。在该情境下, T1 占有趋近 100% 的注意资源量完成其反应选择后 T2 才进入中枢加工器开始其反应选择。这时 T1 开始反应执行, 由于反应选择属于主瓶颈, 被试会策略性的把绝大部分甚至 100% 的注意资源分配到 T2 上, RT2 迅速加快。而 T1 用于其反应执行的注意资源量非常少, RT1 显著延迟, T2 的反应选择持续时间越长, RT1 越长。这就是本研究中两个实验均发现 RT1 随着 SOA 的延长而延长, 随着 SOA 的缩短而缩短的主要原因。从这个意义上讲, 两个任务的反应执行阶段确实并非无需注意监控的非瓶颈加工阶段, 对 T1 和 T2 的反应执行加工同样需要分配较多的注意资源量且在人的意识控制条件下才能有效完成。中枢加工器对注意资源的调节和支配不仅存在于反应选择阶段, 在反应执行甚至在整个认知加工过程中都可能存在, 这一点支持 De Jong (1993)、Ulrich 等人(2006)和 Töllner 等人(2012)关于反应执行属于瓶颈加工的观点。当两个任务的反应选择和反应执行重叠后, 被试似乎会依据任务是否超出认知加工负荷的极限而策略性地调整注意资源的分配方案, 在认知加工模式上也会根据认知加工负荷的极限与可得到的注意资源的多少策略性地采用序列加工或并行加工模式。

随着 T2 完成反应选择开始其反应执行时, T1 的反应执行和 T2 的反应执行重叠, 由于二者都为次瓶颈加工阶段, T1 和 T2 的反应执行能够均分注

意资源,二者对反应的动作执行速度都会减慢。但当 T1 的反应执行完成后, T2 的反应执行速度接近单任务条件下的加工速度。

(4)重叠情境四: T1 的反应选择和 T2 的知觉加工重叠,主要适合于图 5 中的 Case F 以及更长 SOA 条件下(如 1000 ms 及以上)的重叠情境。在该情境下, T2 的知觉加工对注意资源的需求量很少,二者认知加工的重叠对有限的注意资源不会产生激烈的竞争, T1 将拥有绝大部分甚至 100% 的注意资源进行其反应选择。随着加工的进展,当 T1 的反应执行和 T2 的反应选择重叠后,就出现重叠情境三描述的加工过程,即 T1 的反应执行速度下降, T2 的反应选择和部分反应执行被延迟。

对于 T2 的难度变化对 RT1 的影响这一问题,RSB 模型假设 RT1 始终不会受 T2 难度变化的影响,但 CCS 模型认为 RT1 会显著受 T2 难度变化的影响。本研究两个实验结果都发现当 T2 在字色和字义冲突时的 RT1 要显著慢于一致时的 RT1,这一点验证了本研究关于字色和字义在冲突条件下 T2 从 T1 上分享了更多的注意资源以及 T1 和 T2 的加工可以共享有限的注意资源的假设。SOA 同样对 T1 产生了显著的影响,尽管 SOA 和 T2 的难度与复杂度对 T1 的影响相对于 T1 对 T2 的影响来说要小得多,但这种影响实质性的存在,这一点完全符合本研究 CCS 修正模型的预测但拒绝 RSB 模型的假设。

在 T2 上,两个实验结果一致性地表明,随着 SOA 的缩短,RT2 显著延迟,PRP 效应十分显著,这和前人对 PRP 效应的研究结果一致(Pashler, 1994b; Tombu & Joliceor, 2002, 2005; Pashler et al., 2008; Pannebakker et al., 2011),说明 PRP 效应是人类认知加工中的固有限制机制,这种限制机制广泛存在于人类的认知、反应选择以及动作执行系统中。黄琳和葛列众(2001)认为,结构限制、信息干扰和资源竞争是造成双任务操作成绩下降的三个相互独立的因素。结合本研究结果,我们认为,瓶颈的结构限制机制可能是存在的,但在双任务加工中,类似瓶颈性质的调节和制约机制主要反映了人类对多重信息加工能力的限制机制。由于注意资源量的有限性,当两个任务同时需要进行反应选择和反应执行加工时,人总是寻求对有限的注意资源进行最优的分配和共享,一个任务占用更多的注意资源将导致另一任务可获得的注意资源量减少,注意资源量的多寡直接决定了该任务的加工效率,注意资源限制是产生典型 PRP 行为结果的主要原因。

对于认知延迟位置,RSB 模型认为在短的 SOA 条件下,当 T1 进行反应选择时, T2 的反应选择处于暂时的停顿(delay)状态,只有 T1 完成其反应选择后 T2 才能进入瓶颈开始其反应选择,假如实验控制使难度较大的 T2 延长其知觉加工 10 ms, RT2 则不会相应地增加 10 ms,因为复杂的、难度大的 T2 可以充分利用等待瓶颈释放的时间来完成其知觉加工, T2 的难度不影响 RT2 值的大小(图 1, 瓶颈测试原理 3, Pashler, 1994a)。而在长 SOA 时,由于 T1 已经完成了反应选择, T2 能顺利得到加工,难度大、知觉加工时间长的 T2 会产生与其难度相应的延迟,这就是 SOA 与 T2 难度间的低加交互(underadditive interaction)效应。RSB 模型最基本的预测是 SOA 和 T2 难度间存在显著的低加交互效应。但本研究两个实验均发现当字色和字义一致时的 RT2 显著快于字色和字义冲突时的 RT2,且 SOA 和 T2 难度间不存在交互效应,这一点符合 RSB 模型瓶颈测试原理 4 (Pashler, 1994a)。按照原理 4,如果不同难度的 T2 与 SOA 无交互作用,那么各 SOA 条件下 T1 对 T2 的延迟正好处于 T2 的瓶颈或瓶颈后的加工阶段,延迟的时间正好等于 T2 在瓶颈中加工复杂的反应选择所花费的时间,二者具有相加效应(additive effect)。按照瓶颈测试原理 4,在本研究中各 SOA 条件下,无论 T1 正在进行反应选择还是反应执行加工, T1 对 T2 的认知延迟主要产生于 T2 的反应选择或反应执行阶段, T1 的反应选择或反应执行对 T2 的反应选择或反应执行产生延迟,同样说明在反应执行阶段仍然可能产生类似瓶颈的制约机制。在短 SOA 条件下, T1 对 T2 延迟的始点产生于 T1 的反应选择阶段,反应选择是主瓶颈,所以在短 SOA 条件下 T1 对 T2 的延迟更多;在长 SOA 条件下, T1 对 T2 延迟的始点产生于 T1 的反应执行阶段,反应执行是次瓶颈,所以长 SOA 条件下 T1 对 T2 的延迟较少。同样,难度较大的 T2 由于知觉加工的延长, T1 和 T2 的反应选择重合较晚,二者反应选择的重叠部分较少, T1 能更快地进入到反应执行阶段,当 T2 的反应选择占用了大量的注意资源时, T1 的反应执行速度大幅下降,因此较难 T2 条件下的 RT1 要显著慢于较简单 T2 条件下的 RT1。

本研究两个实验也一致性地发现了 T1 和 T2 间显著的交互作用,说明 T1 和 T2 的加工相互影响、相互制约,这一点有力地说明 RSB 模型关于双任务加工中只存在 T1 对 T2 的单向干扰,不存在

T1 和 T2 相互干扰的预测是站不住脚的,同时也充分证明了本研究修正模型中关于反应选择和反应执行都属于瓶颈阶段,且两个瓶颈阶段都能同时处理两个或多个刺激的假设。

本研究仅仅检测了在重叠的双任务加工中,两个任务在中枢反应选择和反应执行阶段的相互干扰效应,进一步的研究重在探讨两个任务的知觉加工阶段是否同样需要占用较多的注意资源,即 T2 的知觉加工是否对 T1 各阶段的加工产生显著的影响,以全面揭示双任务干扰的实质。本研究的实验证据对于理解人类自身加工能力的有限性具有非常重要的实际价值,因为在当前人机系统中对机器的设计主要依赖于人类操作能力的水平,更好地理解人类认知和操作能力的限制机制,在机器和程序设计系统中充分利用人工智能具有的强大记忆力、信息的快速搜索和准确的执行能力来辅助人类认知加工和操作能力的不足,以最大限度地提高人类在复杂认知和决策任务中的工作效率。

5 结论

(1)在重叠的双任务情境中,T1 的中枢加工导致在 T2 上出现显著的 PRP 效应,T2 的中枢反应选择对 T1 的反应选择和反应执行加工同样产生显著的影响。SOA 以及 T2 的难度与复杂度实质性地影响了 T1 的反应选择和反应执行加工。

(2)当两个任务同时需要进行中枢反应选择加工时,一个任务占用更多的注意资源将导致另一任务获得较少的注意资源,注意资源量的多寡直接决定了该任务的加工效率。

(3)两个任务的加工相互影响、相互制约,这种制约机制不仅仅存在于中枢反应选择阶段,在反应执行阶段仍然存在。

参 考 文 献

- Appelbaum, L. G., Boehler, C. N., Won, R., Davis, L., & Woldorff, M. G. (2012). Strategic allocation of attention reduces temporally predictable stimulus conflict. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24, 1834–1848.
- Brown, T. L., Gore, C. L., & Carr, T. H. (2002). Visual attention and word recognition in Stroop color naming: Is word recognition “automatic”? *Journal of Experimental Psychology: General*, 131, 220–240.
- De Jong, R. (1993). Multiple bottlenecks in overlapping task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 965–980.
- Huang, L., & Ge, L. Z. (2001). Research on the effects of structure limitation and information interference on dual-task performance. *Acta Psychologica Sinica*, 33, 127–131.
- [黄琳, 葛列众. (2001). 结构限制和信息干扰对双重作业绩效的影响. *心理学报*, 33, 127–131.]
- Lehle, C., & Hübner, R. (2009). Strategic capacity sharing between two tasks: Evidence from tasks with the same and with different task sets. *Psychological Research*, 73, 707–726.
- Lien, M. C., Croswaite, K., & Ruthruff, E. (2011). Controlling spatial attention without central attentional resources: Evidence from event-related potentials. *Visual Cognition*, 19, 37–78.
- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part I. Basic mechanisms. *Psychological review*, 104, 3–65.
- Miller, J., Ulrich, R., & Rolke, B. (2009). On the optimality of serial and parallel processing in the psychological refractory period paradigm: Effects of the distribution of stimulus onset asynchronies. *Cognitive Psychology*, 58, 273–310.
- Navon, D., & Miller, J. (2002). Queuing or sharing? A critical evaluation of the single-bottleneck notion. *Cognitive Psychology*, 44, 193–251.
- Pannebakker, M. M., Jolicoeur, P., Van Dam, W. O., Band, G. P. H., Ridderinkhof, K. R., & Hommel, B. (2011). Mental rotation impairs attention shifting and short-term memory encoding: Neurophysiological evidence against the response-selection bottleneck model of dual-task performance. *Neuropsychologia*, 49, 2985–2993.
- Pashler, H. (1994a). Dual-task interference in simple tasks: data and theory. *Psychological Bulletin*, 116, 220–244.
- Pashler, H. (1994b). Graded capacity-sharing in dual-task interference? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 330–342.
- Pashler, H., & Johnston, J. C. (1989). Chronometric evidence for central postponement in temporally overlapping tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41, 19–45.
- Pashler, H., Harris, C. R., & Nuechterlein, K. H. (2008). Does the central bottleneck encompass voluntary selection of hedonically-based choices? *Experimental Psychology*, 55, 313–321.
- Piai, V., & Roelofs, A. (2013). Working memory capacity and dual-task interference in picture naming. *Acta Psychologica*, 142, 332–342.
- Roelofs, A. (2010). Attention and facilitation: converging information versus inadvertent reading in Stroop task performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 36, 411–422.
- Töllner, T., Strobach, T., Torsten, S. T., & Müller, H. J. (2012). The effect of task order predictability in audio-visual dual task performance: Just a central capacity limitation? *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 6, 75–87.
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2002). All-or-none bottleneck versus capacity sharing accounts of the psychological refractory period phenomenon. *Psychological Research*, 66, 274–286.
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 3–18.
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2005). Testing the predictions of the central capacity sharing model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 790–802.

- Ulrich, R., Fernandez, S. R., Jentzsch, I., Rolke, B., Schröter, H., & Leuthold, H. (2006). Motor limitations in dual-task processing under ballistic movement conditions. *Psychological Science*, 17, 788–793.
- Watter, S., & Logan, G. D. (2006). Parallel response selection in dual-task situations. *Perception & Psychophysics*, 68, 254–277.
- Wu, Y. W., & You, X. Q. (2007). The parallel process of mental rotation in dual-task situation. *Acta Psychologica Sinica*, 39, 785–794.
- [吴彦文, 游旭群. (2007). 双任务情境下心理旋转的并行加工机制. *心理学报*, 39, 785–794.]
- Zhang, J. J., & Lu, A. T. (2010). The automatic activation of phonology and orthography in semantic processing of act pictures. *Studies of Psychology and Behavior*, 8, 1–6.
- [张积家, 陆爱桃. (2010). 动作图片语义加工中语音与字形的自动激活. *心理与行为研究*, 8, 1–6.]

Mechanisms of Attentional Resource Limitations and Dual-task Interference

Wu Yanwen¹; You Xuqun²; Li Haixia¹

(¹ Department of Psychology, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China)

(² School of Psychology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract

In classic *Psychological-Refractory-Period* (PRP) paradigms, decreasing *stimulus onset asynchronies* (SOA) between the two tasks typically leads to increasing reaction time (RT2) to the second task (T2), but there is no influence on the reaction time (RT1) to the first task (T1). Traditionally, the causes of this interference have been considered to be the limitations of attentional resources or the inherent nature of central bottleneck.

The PRP effect has been extensively studied and has been traditionally explained by Pashler's *response selection bottleneck* (RSB) model, which proposes the processing of one task consists of three stages: (1) perceptual identification stage, which selects the task-relevant stimulus and extracts relevant attributes of said stimulus; (2) response selection (bottleneck) stage, which decides upon the appropriate motor response; (3) response execution stage, which mainly executes explicit actions. Perceptual identification stage and response execution stage were generally assumed to operate in parallel with other cognitive processing, but the bottleneck stage was assumed to operate sequentially, meaning the stage of T2 response selection was often postponed until the corresponding stage of response selection of T1 had been completed. Tombu and Jolicoeur (2003) described the *Central Capacity Sharing* (CCS) model, assuming that the capacity limitations of the central stages were not all or none and the processing of both tasks occurred at reducing rates due to the sharing of limited common resources. Thus, the two models had different predictions to the RT1. The RSB model assumed that T1 could get access to the bottleneck as soon as required, so RT1 remained the same at all SOA, whereas the CCS model predicted that RT1 increased with decreasing SOA.

The present research used a standard PRP paradigm, in two reaction time experiments, in which participants made speeded responses to both a tone (T1) and a Stroop task (T2), the two tasks arriving in rapid succession, and stimulus intervals presenting with varying SOA. The aim is to examine the predictions of the RSB model and the CCS model, in the meantime exploring the limitations of attentional resources and the interference mechanisms in dual-task situations.

The results showed that: (1) In the overlapping tasks paradigm, when T1 was processing in the central bottleneck, the response to T2 was heavily affected by the T1, and the effect of PRP was significant. Varied SOA and different difficulty T2 information substantially influenced the response selection and response execution on T1. (2) When two tasks demanded central response selection processing at the same time, the one task using more available attention resources would lead to the other task using less attention resources. The amount of resources directly determined the processing efficiency of this task. (3) There existed interference in dual-task situations, this interference not only existed in the central response selection stage, but also existed in the stage of response execution. Taken together, RT1 effects may occur when central resources are shared between the Task 1 and Task 2 processes. These results provide strong support for CCS models of dual-task interference in the overlapping tasks paradigm.

Key words dual-task; psychological refractory period; response selection; attentional resource; Stroop task