

双人协作任务中协作绩效的神经人因学探讨

宋晓蕾^{1,2}, 郭笑雨¹

(1.陕西师范大学 心理学院, 西安 710062; 2.陕西省行为与认知神经科学重点实验室, 西安 710062)

摘要: **目的** 从神经人因学的视角出发, 探讨双人协作任务中协作绩效的神经生理机制及其影响和促进。**方法** 采用文献调研和分析方法, 分别对神经人因学、神经工效、人机交互、脑机接口等不同领域的相关文献进行了分析, 首先系统梳理了神经人因学领域中双人协作任务中绩效的研究技术和方法; 其次探讨了神经人因学视角下, 协作任务中的绩效表现及其神经机制; 再次在此基础上探讨了协作绩效的影响因素及如何增强和促进问题; 最后总结了下一步神经人因学领域协作绩效研究如何在未来智能人机交互领域应用。**结论** 神经人因学视角下, 双人协作任务中协作绩效的研究有助于理解人机协同作业或人机组队操作中, 操作者之间的人际表征对协同、组队操作的影响作用, 研究成果可直接应用于协同作业系统的设计和优化, 特别是未来智能时代人机组队的设计和优化, 满足众多复杂的人机系统协同作业设计的需求, 为建立自然高效协同作业的交互模式提供科学依据。

关键词: 联合行动; 联合 Simon 效应; 协作能力; 协作绩效; 神经人因学

中图分类号: TB472; B84 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)04-0011-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.04.002

Neuroergonomics of Collaborative Performance in Two-person Collaborative Task

SONG Xiao-lei^{1,2}, GUO Xiao-yu¹

(1.School of Psychology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2.Shaanxi Key Laboratory of Behavior and Cognitive Neuroscience, Xi'an 710062, China)

ABSTRACT: The work aims to discuss the neuroergonomics mechanism, influence and promotion of collaborative performance in two-person collaborative tasks from the perspective of neuroergonomics. Literature investigation and deep analysis were used to analyze relevant literatures in different fields such as neuro-human factors, neuroergonomics, human-computer interaction and brain-computer interface. Firstly, performance research techniques and methods in the field of neuroergonomics were systematically sorted out. Secondly, the performance and its neural mechanism in joint action tasks were discussed from the perspective of neuroergonomics. Thirdly, on this basis, the influencing factors of joint action performance and ways to enhance and promote issues were further clarified. Finally, ways to apply the result of collaborative performance above to the field of intelligent human-computer interaction in the future were summarized. The study of collaborative performance in joint action tasks from the perspective of neuroergonomics is helpful to understand the effect of interpersonal representations between operators on collaboration and teaming in human-machine collaborative or teaming operations. The results can be directly applied to the design and optimization of the collaborative operation system, especially the design and optimization of the intelligent agent in the future, to meet the needs of collaborative operation design in many complex human-machine systems, and provide scientific basis for the establishment of an interactive model of natural and efficient collaborative operation.

KEY WORDS: joint action; joint Simon effect; collaborative ability; collaborative performance; neuroergonomics

收稿日期: 2020-11-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32071065); 载人航天工程航天医学实验领域项目 (HYZHXM03001); 中央高校基本科研业务费重点项目 (GK202002010)

作者简介: 宋晓蕾 (1975—), 女, 陕西人, 博士, 陕西师范大学心理学院教授、博士生导师, 主要研究方向为空间认知、人机交互、神经人因学、用户体验等。

人是一种社会性生物,在日常生活中经常需要与他人合作,共同完成联合任务,如乐器合奏、双人舞、工作中与同事的合作,这些任务除了要求个体要辨别自己与搭档在任务中各自不同的角色之外,还需要个体协调各自的动作,通过配合更好地完成任务。联合行动指在一定目标的驱动下,任何两个或两个以上的个体,在空间和时间上协调其动作以给环境带来变化的社会互动形式(Joint Action)^[1]。毫无疑问这种能力对于个体有着十分重要的意义。然而几十年来,传统的心理学和人因学往往着眼于单个个体如何与机器或环境相互协调,忽略了双人和多人情景下的机制和影响因素。近十多年来,研究者逐渐发现了这一点,也就是说单人的实验结果似乎与社会互动情境中的实验结果有所差异,而现实中的工作情境往往需要双人乃至多人间的协作,因此单人任务的实验结果似乎难以直接推广到现实中。如从神经人因学的视角来讲,如何在人机系统中使智能机器人像真正的人类一样与同伴协作,使其实时动态地情境感知、理解同伴的意图并完成特定的任务。因此双人协作任务中人与人如何协作与配合的机制研究则显得尤为重要。如何提高协作绩效进而提高人机系统的工效便是本研究关注的问题。

在这样的背景下,主要聚焦于以下两个问题。一是在神经人因学的视角下如何研究双人协作任务机制及影响因素?二是目前神经人因学对于联合任务及其协作绩效的研究进行到了什么程度,是否有可能应用于人因设计以提高系统工效?为了解答这些问题,本文首先介绍和分析了神经人因学领域中,双人协作任务中绩效的研究技术和方法;然后分析了现实生活中复杂的协作任务绩效指标是如何在神经人因学实验中体现和研究的;接着介绍了协作绩效的影响因素及其认知和神经机制;最后讨论了未来的神经人因学研究将如何继续发展以提高人机系统的工效。本文从神经人因学的视角出发,希望涉及到的一些研究和思考可以为读者提供帮助。

1 神经人因学及其测量技术

随着神经科学的发展和新的测量技术的不断应用,心理学对人类认知的研究也逐渐向认知神经科学的方向发展,进而扩展到探索人的大脑在认知过程中的机制和表现,这一趋势也对人因学和工程心理学的研究产生了重要影响。因此,以 Raja Parasuraman 为代表的人因学家基于认知神经科学的原理和脑成像等测量技术,在 1998 年开辟了神经人因学(Neuroergonomics)这一新的研究分类^[2]。这种创新的方法已经得到了一些应用,从复杂系统的操作(如飞机驾驶、核电站监督、自动驾驶、外科手术操作)到改善残疾患者或人类与环境的日常互动的表现。

Parasuraman 认为,神经人因学是研究人类大脑机制,以及心理和生理功能与技术、工作和环境之间关系的科学。目前普遍认为,神经人因学研究的是现实世界工作状态下人的大脑与行为,及其认知功能的神经基础^[3]。其假设是,对复杂的现实生活活动(如人机交互)中潜在的神经认知过程的理解,可以用于提高整个人机协作的安全性和效率。因此,神经人因学的目标与传统人因学或工效学的目标是一致的。

传统人因学研究往往只注重人外在的行为表现,它对于人在人一机器—环境中的绩效的测量也是行为层面上的^[4]。而神经人因学借助了认知神经科学的认知论、方法论和技术水平,在传统人因学对行为的测量基础上深入到人脑的变化中,在脑神经层面帮助人们了解在操作环境中人信息加工的神经机制。已有研究表明,脑科学指标比行为指标可以更好、更敏感地测量人的行为^[5]。

脑电图(EEG)提供了高的时间分辨率,允许在认知过程发生的同一毫秒时间尺度上记录和分析大脑动态。这种高时间分辨率优于血流动力学测量,如功能磁共振成像(fMRI)和功能近红外光谱(fNIRS),它们测量的是形成认知之后的缓慢血流动力学过程,而不是伴随认知过程^[6]。EEG 的第二个重要优势是其便携性。现代放大器系统是小型和轻型的,并允许在现实的工作和日常生活场景中记录移动 EEG。EEG 的第三个优点是,与 fMRI 或 MEG 等传统的脑成像方法相比,其成本相对较低且价格低廉。随之而来的是此技术对空间分辨率的限制,这也是 EEG 最大的缺点^[7]。血流动力学测量,如 fMRI 或 fNIRS,允许在毫米范围内重建信号生成结构,而 EEG 重建的精度限制在厘米范围内。此外,记录下来的信号很容易与非大脑活动混合,比如眼球运动和肌肉收缩,这就需要分析工具来区分大脑和非大脑活动^[8]。EEG 见图 1。

fMRI 通过改变血氧水平依赖性(BOLD)血流动力学反应来观察。它对脑功能的敏感性来自于血流量介导的脱氧血红蛋白浓度和神经活动之间的关系。当一个神经事件在大脑的某个区域发生时,局部的血流



图 1 EEG
Fig.1 EEG

会随之增加,这需要几秒钟的时间来反应,这种增加的血流量导致活化区域局部微血管中脱氧血红蛋白浓度的降低,增加 fMRI 信号,从而直观反映神经活动的动态信息。fMRI 最大的优势在于能更好地测试行为度量的功能相关性及神经相关性^[9]。然而由于其设备特性, fMRI 具有一些无法克服的缺点,这些缺点都限制了该方法在神经人因学研究领域的普及和推广。首先,与其他神经人因学测量手段相比, fMRI 设备的成本高,并且操作相对复杂;其次,在扫描过程中,环境相对封闭,要求被试必须躺下且控制自己的动作并保持相对静止。这些缺点极大地限制了主试和被试的交流和交互,导致扫描结果的推广性较差,对其可应用领域也有限制。fMRI 见图 2。

fNIRS 是一种多波长光学技术,是一种可穿戴和便携式的大脑监测技术。最初开发用于临床监测组织氧合,最终演变为功能性神经成像研究的有效工具。fNIRS 通过在头皮上放置近红外光源和检测器来跟踪和监测大脑皮层血流动力学反应^[10]。随着技术的不断进步,各种近红外光谱仪已经被开发出来,通过测量缺氧血红蛋白 (deoxy-Hb) 和氧合血红蛋白 (oxy-Hb) 的浓度变化来监测局部脑氧的变化,可以保证无创和安全,以及有效的生态效度。研究者已经用近红外光谱研究了各种类型的大脑活动,如运动和认知活动。它以类似 fMRI 的方式测量大脑的血流动力学变化,但 fNIRS 的测量安静(没有操作声音),能提供更高的时间分辨率,不将参与者限制在一个有限的



图 2 fMRI
Fig.2 fMRI

空间,也不要求参与者躺下。这些特性使得 fNIRS 不仅在实验室环境中,而且在工作条件和更有效的生态环境中,是监测与大脑活动相关的血流动力学变化的理想方案^[11]。例如对操作人员在工作站前执行空中交通管制任务的研究中就用到 fNIRS 技术,见图 3。

除了以上脑成像的方法外,眼动仪对眼神的追踪测量也被纳入了神经人因学的研究范畴。人类的视觉与其大部分活动紧密相连,视觉为大脑提供了丰富的信息。例如,很难想象一个有视力障碍的飞机飞行员可以完成飞行任务操作。眼睛是环境 and 大脑之间的重要媒介,能促进人类与日常世界的互动。人类的眼睛不断地移动以引导中央窝(视网膜中央的小区域,具有最高的视觉灵敏度)观察感兴趣的事物。视网膜将进入它的光线神经传导到大脑。重要的是,视网膜是胚胎间脑的一部分,间脑通过多条神经通路逐渐演化成复杂的连接,以支持视觉感知和注意力定向。因此,眼动虽然是对大脑活动的一种间接测量,但在某种程度上,测量离大脑最近的视网膜的技术,实际上是测量肉眼可见的大脑的唯一部分的技术。两种互补的眼动可视化技术见图 4,图 4a 为座舱内眼睛注视的分布,图 4b 为由属性驱动的边缘捆绑(ADEB)方法生成的驾驶员对飞行甲板的视觉扫描路径,该方法可以区分不同固定区域之间的连接员。

2 双人协作任务与协作绩效

所谓协同作业,是指在特定的环境中,由两个或两个以上的操作手共同或协同操作一台(或多台)机器的过程。其特点在于,不仅要求操作手熟悉兵器性能和操作技能,而且要求其具有较强的协作能力。只有加强操作手之间的配合,才能从整体上提高作业绩效。虽然每个交互的具体要求在不同的场合会有所不同,但是协同作业通常被认为是由作业表征、作业监控和作业预测过程支持的^[12]。

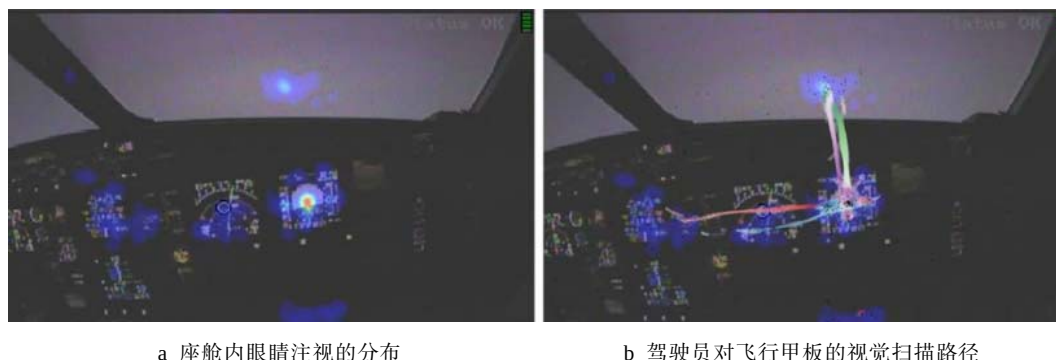
显而易见的是,现实任务与实验室任务相比往往更为复杂,也会被更多因素影响。虽然工作中的绩效指标更加具体多样,但是由于各种因素的制约,研究



a 飞机控制工作站与高分辨率雷达显示器等设备

b fNIRS 传感器垫安装

图 3 空中交通管制任务研究
Fig.3 Air traffic control task research



a 座舱内眼睛注视的分布

b 驾驶员对飞行甲板的视觉扫描路径

图4 两种互补的眼动可视化技术

Fig.4 Two complementary eye movement visualization techniques

者们很难直接测量。因此在实验研究中,合理转化、量化绩效指标就显得尤为重要,生态效度高的指标也可以更好地推广到实际的应用当中。那么在具体的实验研究中,研究者们如何设置绩效,并开展研究就成为了一个重要的问题。在双人协作作业中,采用何种指标来测量两人间的协作程度,既是目前的研究重点也是难点。

在传统人因学研究中,更多采用行为指标来代表协作绩效。例如,设置双人协作才能完成的任務,并对受试者的完成速度或正确率等进行测量,比较典型的有联合 Simon 任务^[13]、联合 flanker 任务^[14]、联合 Stroop 任务^[15-16],以及任务转换^[17]等。协作能力(Collaboration Ability)指两名(或多名)操作者不断表征和整合搭档的动作与目标,并与之协调配合的能力^[17-18],也称共同表征(Co-representation)能力。为了研究操作者如何及多大程度上表征搭档的动作并为之配合,Sebanz 等人于 2003 年基于标准 Simon 任务,设计了联合 Simon 任务^[13],该任务要求两名操作者根据刺激颜色通过左右按键进行反馈,左边的操作者 PL 对蓝色刺激反应,右边操作者 PR 对绿色刺激反应,并忽视刺激出现的空间位置,见图 5。这是一种双人单机的协同作业任务,是测量操作者之间协作能力的典型范式。该范式中,两个操作者共同面对一台机器,协同完成一项联合 go/no-go 任务,忽视了与任务无关的刺激特征,两名操作者轮流执行该任务,出现了刺激与反应空间位置一致时反应更快、正确率更高的现象,即联合 Simon 效应(Joint Simon Effect, JSE, JSE=RT 不一致, RT 一致)。联合 Simon 效应越大,即不一致与一致反应时间的差值越大,操作者不一致的反应时间越长,表明他们越难区分自己和他人,越能把他人整合为自己,操作者与他人的协作与整合能力越强。该效应是反映操作者与他人协作能力程度的一个良好指标^[18-19]。此外,还有一些比较新的任务,如要求受试者共同绘制一些图形(平行四边形)等,受试者需要分别控制光标往左右或上下方向移动。此时,绘制出的图形与标准图形间的差异,就可以代表这个协作任务的协作绩效^[20]。

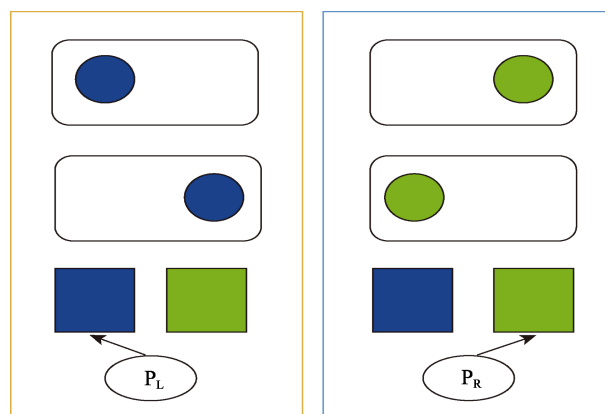


图5 联合 Simon 任务

Fig.5 Joint Simon task

在神经人因学研究和技术发展的推动下,可以采取此前未曾使用过的神经生理指标进行实践应用,例如基于 fNIRS 的超扫描技术就被广泛应用于各种社会情境中的人际交互的研究,而人际脑同步(Interpersonal Brain Synchronization, 简称 IBS)或人际神经同步(Interpersonal Neural Synchronization, 简称 INS)指标则可以用来研究双人协作绩效的高低^[21-22],该指标描述了联合任务中,两个(或两个以上)伙伴的特定大脑区域激活的同步程度。一些使用基于 fNIRS 超扫描技术的研究表明,IBS 在很大程度上代表了人际沟通的质量,并且可以显著预测任务绩效^[23]。然而,基于不同的实验设计,这些研究对参与者的任务绩效和 IBS 的差异有不同的解释。例如以往研究发现,外部刺激如辣椒素引起的疼痛,可激励参与者寻求社会支持,从而大大改善了他们最初糟糕的合作,即两人组的按键反应模式变得更加一致,并在左侧前额叶皮质和右侧顶叶皮质触发显著的 IBS^[24]。另一个可能影响任务绩效和 IBS 的重要因素是双人性别构成。Baker J M 等人(2016 年)发现,拥有至少一个男性的双人组比拥有两个女性的双人组表现要好得多。这可能是由于男性倾向于采用基于个人感知和心理化的行动模式,这更有利于合作表现,而女性则更多地依赖于以行为为中心的社会感知,即女性倾向于简单地使用另一方在任务中的行动来决定自己的反应^[25]。

3 协作绩效的神经生理机制研究

联合任务的认知神经机制一直未得到具体的阐明,甚至尚未得知人际间如何协作和表征的具体机制。这一部分主要介绍协作绩效的脑机制研究。目前此部分的研究较少,起步较晚,因此只进行一个大致的介绍,目前笔者也在进行相关的实验研究。

Yixin C 等人在 2012 年最早使用 fNIRS 技术同时测量了两人合作时的大脑活动,他们让两名被试同时玩电脑游戏,并且计算两名参与者之间的脑间活动一致性。研究发现,参与者右额叶上皮质信号的一致性在合作过程中增加,而在竞争过程中没有增加,一致性的提高也与更好的合作绩效有关^[26]。

此外,Yun K 等人(2012 年)为了检查身体运动同步的神经相关性,同时测量了两名被试在手指运动任务中的大脑活动。发现额顶网络(包括额下回)可能是在合作交互过程中,与行为同步相关联的脑间同步的神经生理学基础^[27]。因此,Ning L 等人使用 fNIRS 同时测量了两名被试在完成游戏时的大脑活动,他们关注的是双侧额下回和双侧顶下小叶中的激活。结果表明,在合作交互的情境下,建构者在右侧额下回中的激活减少,而在竞争环境下,这一部分的激活增加^[28]。

在与他人互动时,认知控制系统面临着如何区分自我产生(内部触发)和他人产生(外部触发)的行为事件的问题。神经科学研究发现,大脑两个核心区域,前内侧额叶皮质(aMFC)和额顶叶交界处(rTPJ),可能参与解决这个问题,并通过加强自身与其他产生事件表示(通过 aMFC)或通过抑制外部触发的事件表示(通过 rTPJ)。Liepelt 等人在 2016 年,利用经颅直流电刺激(tDCS)技术研究了在联合 Simon 任务中,aMFC 和 rTPJ 在在线控制自我生成和他人生成事件表征中起到的一定作用^[29]。

Mayseless N 等人也使用 fNIRS 测量了参与创造性设计任务的交互伙伴之间的脑间同步,发现背外侧前额叶、后额上沟的脑间同步与合作呈正相关。随着合作的增加,两名被试额顶联合区和背外侧前额叶的脑间同步减少^[30]。一项 2020 年的最新 fNIRS 研究也表明,在进行双人运动时,两人间的联合意图和额顶联合区的同步,会对合作绩效产生影响^[26]。

在一项采用 fNIRS 研究音乐演奏双人任务的实验中,研究者发现,与独奏相比,音乐家在小提琴二重奏中,跟随者与领奏的大脑功能性激活模式截然不同。更具体地说,结果表明演奏小提琴二部的音乐家在与独奏相比的二重奏条件下,额顶叶和躯体运动区域有更大的激活^[31]。

综上所述,在联合行动中 aMFC 和 rTPJ 对控制共同表征过程及协作能力的产生起到了一定作用,但其他一些相关脑区的激活情况仍存在争议。由于相关

脑区激活的心理现实性及机制问题仍解释不清,一些重要结论仍存在一定争议甚至冲突,所以影响了研究结果向人机工效领域的转化应用。因此,笔者前期采用近红外技术分别考察了不同人际情境和距离对联合任务表征的影响机制,得出在联合任务中,脑间相关的区域的显著差异出现在了不同的人际情境中,右侧后额上沟(R-pSTS)在合作与竞争情境下均出现了显著的脑间相关性,竞争条件下还出现了左侧后额上沟(L-pSTS)、左侧顶下小叶(L-IPL)和额下回(L-IFG)的脑间相关。上述结果表明,竞争情境会削弱自我—他人的整合能力,但竞争条件下联合行动两个体间的脑间同步更强,联合行动的绩效更高。

4 协作绩效的影响因素

正如前文所言,神经人因学探讨的也是人一机器—环境间的关系,因此将影响双人协作绩效的因素分为两大类:社会因素和非社会因素。社会因素包括人际之间的社会因素、人际距离、人际情境和人际关系等;非社会因素包括采取策略、机器特点、动作和视觉等。参与者所处的社会情境会影响双人协作中的协作绩效,而人际间的情境又十分多变,因此研究者对其进行了深入研究。

4.1 社会因素

有效的社会互动依赖于人类在社会环境中与他人协调的能力。近年来,许多研究试图借助神经人因学的技术来探索合作或竞争情境是否会对联合任务中被试的表现产生影响,以及这一影响的理论依据。

人们经常参与社会交往,而社会交往的成功很大程度上依赖于人们在空间和时间上与他人协调行为的能力^[2,32]。在一些协调活动中,人们只是以等频率模式进行动作,如肩并肩行走或一起唱歌。然而,在其他一些活动中,人们需要在不同频率上执行非镜像模式,例如舞蹈或运动。Pan 等人在 2017 年的研究已经发现,当双人间的关系是教师和学习者时,IBS 会影响新信息的实时获取,并最终影响学习(行为)表现^[33]。在现实生活中,人们有时需要平衡不同的协调策略,以更有效地实现目标^[34],因此,了解人际协调模式如何调节协调结果及相关的脑对脑连接,对人们来说是很重要的。

此外,联合 Simon 任务范式已经应用在协作能力的机制及影响因素的研究上,典型的研究包括人际合作与竞争情境对协作能力影响,以及人际信任情境对协作能力影响。

关于人际合作与竞争情境对协作能力影响的研究,Dolk T 等人采用“假被试”营造了合作和竞争的两种人际情境,发现被试更倾向于在合作情境下注意到共同行动者的动作或任务,而被试在竞争情境下则更多注意自己的任务^[35]。Ruys K I 和 Aarts H 要求两

名被试共同完成听觉 Simon 任务,结果发现共同表征的有无取决于被试是否注意到同伴的意图,而非人际关系属性的异同^[36]。Porcu E 等人的研究发现,调整注意焦点会影响自我-他人整合的程度^[37]。Iani C 等人却认为,对联合 Simon 效应产生影响的并不是是否注意到同伴意图,而是个体感知到的人际关系^[38]。

Ruissen 将采用合作或竞争模式玩俄罗斯方块电脑游戏,作为完成联合任务前的关系操作方式,随后的联合任务结果发现,之前有过游戏合作的被试更容易形成共同表征,而有过竞争的被试在共同表征这一倾向上水平较低^[39]。笔者也曾采用行为实验和近红外技术,考察了个体协作能力的产生及不同人际情境(合作、竞争与独立)对该能力的影响,得出人类个体在 5 岁左右会表现出稳定的协作能力;血液动力学分析表明,合作情境会提高操作者的协作能力(JSE 最大),但竞争情境下两名操作者的脑间同步却比独立和合作情境要强^[40]。

关于人际信任情境对协作能力影响的初步研究,Ferrin D L 等人研究发现,信任与合作是相互依赖的,恰好类似于 DNA 双螺旋结构^[41]。在联合任务中,只有一项研究提到信任对心率唤醒和同步有影响,由此可推测,人际信任可能对操作者的协作能力产生影响^[42]。

社会评价会影响人们在完成联合任务时的认知过程^[34]。在一项研究中,研究者使用 fNIRS 研究了管理(虚拟的)负面社会反馈对合作能力的影响,记录双人任务时的认知表现和神经激活情况。在这项任务中,每对参与者在联合动作后收到了负反馈。结果显示,负反馈能够调节参与者的行为和神经成分的反应。研究者们发现负反馈后,认知能力和协作绩效会下降。此外,负反馈会导致脑间连接减少和脑内连接增加。结果表明,无效的联合行动会产生最差的认知表现,并产生一种更个性化的大脑活动策略,从而限制脑内连接^[43]。

此外还有一些其他的社会因素。例如,参与者在与他人互动时,可以根据获得绩效奖励的依赖程度,灵活地调整自己的注意力分配,从而适应社交互动的情境特异性,在不同的任务中保持相同的位置,也就是说空间特征也可以对联合任务产生影响^[44]。此外,反映执行不确定性也会影响联合任务,一项研究的结果表明,与表征差异相关的冲突可能不是推动 JSE 的关键因素,而围绕执行响应需求(因此而产生的准备程度)的冲突似乎是共同代表的基础^[45]。

4.2 非社会因素

除了情境因素之外,双人任务中其他的人-人、人-机因素也被很多研究者关注。以下会对社会关系、策略选择、机器特点等进行讨论。

在过去很多年的时间里,研究者研究的都是陌生

人间进行的双人任务。然而当这两人间有一定的社会关系时,绩效表现会不会出现变化呢?为了解决这个问题,研究者开始招募夫妻或朋友等具有一定社会关系的被试来进行实验。Abe M O 等人在 2019 年使用 fMRI 研究了夫妻在完成一项联合力量生产任务时的绩效,以及其神经机制^[46]。这项任务的目标是在 30 s 内通过视觉反馈将他们的平均握力匹配到目标值(他们最大握力的 20%);这项任务需要由他人产生的力量来实时调节自己产生的力量。与单一力产生任务相比,联合任务增强了噪声贡献率(NCR)并激活了心智系统,包括内侧前额叶皮质、楔前叶和颞顶叶交界处的双侧后分区。此外,在联合任务中,受试者右侧颞顶叶交界处前分支的特异性激活与 NCR 呈显著正相关。当受试者协调他们的握力时,前后颞顶联合区的有效连通性提高了。这一研究结果表明,合作中个体运动输出的调整程度取决于同伴,是由右颞叶的相互关联的细分来调节的。

个人有一种追求行动效率最大化的动力,这反映出在行动选择中,个人会尽量使达到目标的行动成本最小化。在双人协作中,参与者会优先考虑联合效率或共同效率,最大化联合行动的效用,即使这需要付出自身代价。这就涉及到参与者选择的策略问题,人在与他人合作时可能会采用不同的策略。例如,当两名参与者被要求同时按下按钮时,他们可能会尽快地按下按钮(即时反应策略),或者以延迟模式按下按钮(延迟反应策略)。通过 fNIRS 的超扫描技术记录 IBS,在一项最新的研究中,研究者发现,采用延迟反应策略的夫妻比采用即时反应策略的夫妻和没有明显反应策略的夫妻表现得更好,并采用了一种新的衡量标准(合作系数)来衡量合作水平。此外,在延迟反应条件下,右额叶皮质的 IBS 更强。同时,夫妻感受到的养育压力越大,他们就越有可能在工作中表现出色,他们的大脑同步性也越强,这是因为他们倾向于选择延迟反应策略^[47]。延迟反应策略可以更好地统一两方的反应模式,触发同步的心理过程,使其大脑变得同步。

因为神经人因学强调的是人-机-环境间的关系,所以机器本身的特点也会影响任务绩效。在一项研究中,研究者通过双脑电图和频率标记技术,研究了双人运动中自我和他人运动的神经跟踪是如何支持人际协调和任务绩效的。研究人员将闪烁在 5.7 Hz 和 7.7 Hz 下的 LED 灯分别置于受试者的食指上,让他们产生同步前臂水平运动的新模式。在这些频率下的 EEG 反应显示,在引导自我产生运动时,以及在跟随他人产生运动时,都增强了神经跟踪。在 13.4 Hz(互调频率为 5.7 Hz 和 7.7 Hz)处的自我-他人融合标记,在无领导者时达到峰值,相互适应和运动同步达到最大值,也就是说此时的双人绩效是最高的。此外,EEG 反应的振幅反映了两人同步运动能力的差

异,为理解联合行动背后的感知—运动机制提供了一个神经生理学的基础观点^[48]。

人的视觉和眼部运动与人的各种复杂行动息息相关,研究者也试图借助眼动仪来研究联合 Simon 效应。研究者将联合 Simon 任务与眼动追踪相结合,并要求参与者通过执行特定的扫视来做出响应。研究结果表明,仅仅感知动作效应可能不足以调节眼动的兼容性效应。在个体环境中相容效应的存在表明了眼跳相容任务的具体要求,即对相容目标位置进行朝向眼跳和对不相容目标位置进行反向眼跳。在联合和个体设置中兼容性效果没有区别,而且兼容性效果也没有通过横向视觉动作反馈进行调节,这表明,在眼动反应中没有发现经常被报道的联合 Simon 效应^[49]。

5 协作绩效的增强与干预

在机制之外,什么可以促进、改善协同作业绩效也是目前亟需研究的任务。长期以来,通过外部干预影响大脑活动和提高行为表现的可能性一直令人着迷。如何提高双人协作任务中的协作绩效是社会心理学和社会神经科学研究的核心问题,系统梳理以往的文献,发现通过以下四方面可以提高协作任务的绩效。

5.1 行为训练与协作绩效的增强

行为层面让自己及共同行动者变得可预测,通过行为训练来提高协作任务的绩效。执行联合行动时通常需要对单个行动进行精确的时间协调。Vesper C 等人调查了当人们无法获得关于他人行为的连续或有节奏的信息时,如何在时间的离散点上协调自己的行为,而让自己变得可预测就是一种协调策略。行为变量越少,人际协调越好,有效的协调策略有助于共同表征能力,进而提高联合行动的绩效^[50]。

5.2 脑间同步与协作绩效的增强

人际协作往往伴随脑间同步。王子璇基于近红外超扫描技术对节拍对于联合行动的影响进行了研究^[51]。结果表明,音乐节拍能有效促进人际协作。在此基础上,其又进行了进一步研究:探究节拍强度对人际协作的促进作用。结果发现,在协作条件下,个体间的同步性与节拍的强度有关,强节拍情况下,个体间的同步性增强,同时脑间同步性增强。因此,脑间同步性强也意味着人际协作的绩效更高。与此同时,关于如何提高协作绩效,另一项基于 fNIRS 的研究也表明,相对于等频率模式,不同频率的情况下,双人间的协作绩效更高,左侧额叶区域的 IBS 也相对更大。当个体在不同频率条件下协调时,个体大脑之间的双向影响会增强,同时自我控制在人际协调过程中具有潜在的积极作用^[52]。这一结果与行为实验研究结果一致,即在联合行动中,任务环境在关键程度上

决定了同步的作用,而在更复杂的任务中,与出色的任务结果相关的可能不是行为的同步,而是互补类型的行为,也就是说更加复杂的人际协调会增强双人绩效^[53]。

Liu T 等人的研究揭示了额—颞—顶区域 INS 与竞争绩效之间的潜在关系。共情也是调节社会互动的关键因素^[54]。他们在参与者的双侧额下回中,发现 INS 值与共情得分和表现显著相关。重要的是,在以双侧额下回中的共情得分和 INS 值为回归量时,共情与竞争条件下的绩效均呈现出显著的相关关系。此外,另一项 2014 年的研究证明,任务的表征影响个体在单独和合作情境中模仿连续节奏动作的方式。单独情境中的个体能更好地协调模仿单人情境中的动作,双人情境中的个体能更好地协调模仿双人情境中的动作。这说明了具身模拟和观察对联合行动绩效的促进作用^[55]。

5.3 药物操控与协作绩效的增强

药物操控(对催产素水平的操纵)也能提高协作任务的绩效。Kosfeld M 等人(2005 年)研究发现催产素与人类的信任行为有密切的关系,催产素水平高的被试会表现出更多的信任^[56]。在此基础之上,研究者们进一步推论催产素可能是信任的生理基础之一。Baumgartner 等人通过双盲实验、药物操控和 fMRI 技术,采用“信任游戏”这一经典范式研究了信任行为的神经环路,在知道自己的信任遭到背叛后,注射催产素组的被试的信任行为没有变化,而安慰剂组的被试则会表现出信任行为的减少^[57]。Ruissen 和 De Bruijn 报道了鼻腔缩宫素给药后相对于个人条件,社会条件下的 Simon 任务的 N2 幅度增加,反映了反应冲突的增加,这与催产素促进社会行为的观点一致,可能增强了自我与他人的整合。与此相一致,与单人情境相比,P3 也显示出对联合行动动作计划的敏感性^[58]。

5.4 神经反馈训练与协作绩效的增强

神经反馈训练是自 21 世纪之后,随着神经活动记录技术的不断进步,逐渐发展兴起的一类生物反馈技术。它通过将实时测量的神经活动信号在线处理之后,以感觉形式反馈给被试,要求被试对反馈信号进行自主调节,以实现神经活动信号来源(脑区/脑网络)的调节,并最终达到对个体行为调节的目的^[59]。研究表明,神经反馈训练能够提高个体的血氧控制能力,增强个体的目标脑区在反馈任务中的平均活动水平^[60]。如 fNIRS 神经反馈能够显著提升个体的注意力及抑制控制能力。Sherwood M S 等人以左侧背外侧前额叶为靶脑区,在五次训练中要求被试通过一定策略,提升左侧背外侧前额叶的活动水平,结果发现经过训练后实验组的工作记忆能力有显著提高^[61]。在神经反馈训练过程中,由于脑活动受到被试意志调

节,所以神经反馈训练可以探究特定脑活动和行为之间的关系,并给出因果性的证据。因此,笔者也计划利用神经反馈训练的方式,在联合 Simon 任务中对双人的特定脑区进行刺激与监测,得出脑活动与行为之间的因果关系,并在一定程度上促进绩效的增强。

5.5 神经生理增强技术与协作绩效的增强

过去的十年中,允许与脑功能交互的非侵入性脑刺激(NIBS)技术快速发展,如经颅磁刺激(TMS)和tDCS。NIBS指的是那些不需要涉及电极植入的外科手术就可作用于大脑生理的技术,其在人类系统和认知神经科学中发挥着关键作用,因为它们可以揭示特定的大脑结构或神经元活动模式与给定的认知或运动功能的相关性,特别是当与神经成像和电生理学方法结合使用时。NIBS的主要技术是通过电脉冲或磁脉冲来影响大脑功能^[62]。主要诱导神经元活动(阈上刺激)的刺激技术(如TMS)与主要对正在进行的神经元活动和兴奋性(阈下刺激)发挥调节作用的刺激技术(如tDCS)有所区别^[63]。TMS和tDCS仪器见图6。

TMS包括从放置在头部的线圈中传送磁脉冲到所需的皮层刺激部位。磁场的快速脉冲诱发电流,使大群神经元去极化(根据刺激强度可以产生动作电位),这些神经元主要位于刺激器下方的皮层区域。连接到刺激区域的分布式网络也受到TMS的影响,它可以调节远离刺激部位的皮层下和远端皮层区域^[64]。TMS根据刺激方法的类型发挥作用,例如,作为一个特定大脑区域的短期虚拟损伤,可以增强并刺激部位相关的大脑区域和网络的长期处理与学习能力。这些长期效应通常是一系列重复脉冲TMS(Repetitive Pulses of TMS, rTMS)的结果。rTMS对皮质过程调节行为和认知表现的影响由许多因素介导,包括刺激脉冲的数量、刺激的速率、刺激的模式及刺激的强度。

tDCS涉及放置在头皮上的一对电极直接传递长时间(10~20 min)的低强度电流(12 mA),并被认为是可以改变神经元的静息膜电位,引起皮质神经元的轻微去极化(兴奋)或超极化(抑制)。虽然弱直流电刺激对中枢神经系统的兴奋性的影响在几十年前

就有报道,但是tDCS作为一种便携式、简单自然和无创的调节行为及神经生理活动的工具,如今受到越来越多的关注^[65]。一般来说,tDCS的作用与极性有关。阳极tDCS增加神经元兴奋性,促进长时程增强相关机制,而阴极tDCS则会产生相反的效果。在单次tDCS处理后,其变化会持续超过基线1 h。

TMS和tDCS在神经人因学应用方面对提高双人协作任务的绩效有相当大的影响。经颅磁刺激被发现可以改善在实验室环境下完成各种任务时的知觉、运动和认知表现。对介导TMS和tDCS诱导行为表现增强的神经过程的理解,包括各种机制和相关刺激参数,可能提供对现实世界神经人因学应用可以实现的范例的洞察^[64]。经推测,TMS和tDCS同样可以靠提高人际间脑同步来增强协作绩效。

6 启示与展望

6.1 研究启示

有关协作绩效的神经人因学的研究虽然涉及到方方面面,但是其中具体的影响机制、脑机制和干预机制仍未探明。以往有关研究主要从行为层面关注,什么因素会对联合行动绩效产生什么影响,与现实人机协同作业系统中,可能涉及的复杂情境因素的影响机制揭示的需求仍有相当距离。而且这些因素到底是如何影响协作任务的研究较少,也未能有统一的结论。同时,相比较行为研究,以往有关协作任务的脑机制研究也较少,虽然有些认知神经科学的研究对此问题有所触及,但是这些发现并不具有太多的心理现实性,也就是说即使知道了这些脑区或脑波,仍然不清楚究竟是什么样的因素,以什么样的方式,影响或抑制协作,目前的研究也尚未涉及到如何利用外部刺激直接影响这些脑区,并且提高协作绩效。此外,部分研究的生态效度较低,难以应用于现实的协同作业环境,未来的神经人因学研究需要更好的实验设计。

6.2 研究展望

神经人因学作为一门学科打破了传统人因学、认知心理学和认知神经科学的界限,并为增强现实、战斗战术、工作生活平衡、行人安全、人机交互和自适应自动化等领域的未来研究提供理解和途径。神经人因学的一个主要目标是开发工具,测量任务执行过程中的心理负荷,有可能在不同的工作环境中,实现更安全和更有效的人机交互。神经人因学为传统人因学、神经科学和神经工程等学科提供了概念、理论和技术前景。这一领域应该继续向前推进,增强范式,以理解复杂环境下的人机协作行为,造福于那些移动时思考的人,以及那些移动时与技术互动的人。此外,神经人因学加强了传统人因学的基础理论及研究手段,有助于帮助人们进一步探索复杂作业条件下,人脑功能和认知加工的神经机制。开发高性能的认知监

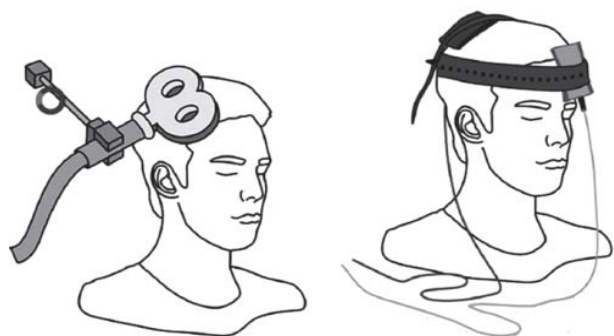


图6 TMS和tDCS仪器

Fig.6 TMS and tDCS instrument

测系统的一个有希望的方法是结合神经生理学模式,例如 EEG 和 fNIRS 技术,这些方法可以提供关于大脑活动的补充信息。创新对与时间动力学相关的 EEG 和 fNIRS 特征描述,将有助于开发高效的多模式精神负荷测量,从而更好地进行研究。

随着神经人因学领域的发展,从实验室走向日常实践,神经人因学应该在研究的设计和執行中扮演更重要的角色。神经人因学的最新发展趋势使其成为设计、开发和使用复杂界面、操作程序,以及任何需要人与机器和人与人交互的工具。神经人因学方法在其全部能力范围内,预计将有助于从单一药物、产品开发和日常程序设计等不同领域,造福社会。例如,眼动和 fNIRS 技术已经应用在了互联网公司的新网页设计中,生理指标可以更好地让公司知道自己的网页可以进行什么改进^[66]。

目前,认知神经科学、工程心理学的发展已经为神经人因学研究提供了研究思路、研究范式和研究技术上的全面支持。随着智能时代的到来,神经人因学这样一门交叉学科会愈发体现出其特殊的价值。比如,提高航空航天工业的安全性至关重要,为了达到这个目标,工程师们需要设计出越来越可靠和强大的系统。然而,这些系统和飞行员之间的人机交互经常出错。具体地说,当操作人员自满或警惕性下降时,会出现 out-of-the-loop (OOL) 性能问题:他们既不能理解系统在做什么,也不能收回手动控制。毫无疑问,这在实际飞行中是一个致命的问题,神经人因学的研究可以帮助工程师更好地理解 and 增强人机协同作业的绩效。

7 结语

关注协同作业任务中操作者之间的协同能力的提高,其研究成果可以直接应用于协同作业系统,特别是未来智能时代人机组队的设计和优化,提高协同作业的任务绩效的设计和优化,满足众多复杂的人机系统(如商用飞机驾驶舱、核电站中央控制室)协同作业设计的需求,为建立自然高效协同作业的交互模式提供科学依据。

参考文献:

- [1] SEBANZ N, BEKKERING H, KNOBLICH G. Joint Action: Bodies and Minds Moving Together[J]. Trends in Cognitive Sciences, 2006, 10(2): 70-76.
- [2] PARASURAMAN R, RIZZO M. Neuroergonomics: The Brain at Work[M]. Oxford: Oxford University Press, Inc. 2007.
- [3] LIU Y, WU C, BERMAN M G. Computational Neuroergonomics[J]. Neuroimage, 2012, 59(1): 109-116.
- [4] 许为, 葛列众. 人因学发展的新取向[J]. 心理科学进展, 2018, 26(9): 1521-1534.
- [5] XU Wei, GE Lie-zhong. New Trends in Human Factors [J]. Advances in Psychological Science, 2018, 26(9): 1521-1534.
- [6] BALDWIN C L, COYNE J T. Dissociable Aspects of Mental Workload: Examinations of the P300 ERP Component and Performance Assessments[J]. Psychologia, 2005, 48(2): 102-119.
- [7] BORGHETTI B J, GIAMETTA J J, RUSNOCK C F. Assessing Continuous Operator Workload with a Hybrid Scaffolded Neuroergonomic Modeling Approach[J]. Human Factors the Journal of the Human Factors & Ergonomics Society, 2017, 59(1): 134-146.
- [8] SILVA F L D. EEG: Origin and Measurement[M]. EEG-fMRI, 2010.
- [9] ARTIEDA J, ALEGRE M, VALENCIA M. Electric Fields of the Brain. the Neurophysics of EEG, Second ed. Paul L. Nunez, Ramesh Srinivasan[J]. Clinical Neurophysiology, 2006, 117(9): 2109-2110.
- [10] 杨海波. 认知神经科学与人机交互的融合: 人机交互研究的新趋势[J]. 包装工程, 2019, 40(22): 55-63.
- [11] YANG Hai-bo. The Fusion of Cognitive Neuroscience and Human-Computer Interaction: New Trends in Human-Computer Interaction Research[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(22): 55-63.
- [12] VILLRINGER A, PLANCK J, HOCK C, et al. Near Infrared Spectroscopy (Nirs): a New Tool to Study Hemodynamic Changes during Activation of Brain Function in Human Adults[J]. Neuroence Letters, 1993, 154(1-2): 101-104.
- [13] BATULA A M, MARK J A, KIM Y E, et al. Comparison of Brain Activation during Motor Imagery and Motor Movement Using fNIRS[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2017: 1-12.
- [14] VESPER C, BUTTERFILL S, SEBANZ N. 2010 Special Issue: a Minimal Architecture for Joint Action[J]. Neural Networks, 2010, 23(8-9): 998-1003.
- [15] SEBANZ N, KNOBLICH G, PRINZ W. Representing Others' Actions: Just Like One's Own?[J]. Cognition, 2003, 88(3): 11-21.
- [16] ATMACA S, SEBANZ N, KNOBLICH G. The Joint Flanker Effect[J]. Sharing Tasks with Real and Imagined Co-Actors, 2011, 211(3-4): 371-385.
- [17] SAUNDERS D R, MELCHER D, VAN ZOEST W. No Evidence of Task Co-Representation in a Joint Stroop Task[J]. Psychological Research, 2019, 83: 852-862.
- [18] MOTONORI Y, CLARKE E L, EGAN D L. Is Your Color My Color? Dividing the Labor of the Stroop Task Between Co-actors[J]. Frontiers in Psychology, 2018, 9: 1407.
- [19] YAMAGUCHI M, WALL H J, HOMMEL B. No Evidence for Shared Representations of Task Sets in Joint Task Switching[J]. Psychological Research, 2017, 81: 1178-1179.

- [18] MARINEZMOYANO I J. Exploring the Dynamics of Collaboration in Interorganizational Settings[J]. Moyano, 2006: 83.
- [19] COLZATO L S, DE BRUIJN E R A, HOMMEL B. Up to “Me” or Up to “Us”? The Impact of Self-Construal Priming on Cognitive Self-Other Integration[J]. *Frontiers in Psychology*, 2012, 3: 341.
- [20] CHENG X, PAN Y, HU Y, et al. Coordination Elicits Synchronous Brain Activity between Co-actors: Frequency Ratio Matters[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2019, 13: 1071.
- [21] CUI X, BRYANT D M, REISS A L. NIRS-based Hyperscanning Reveals Increased Interpersonal Coherence in Superior Frontal Cortex During Cooperation[J]. *Neuroimage*, 2012, 59(3): 2430-2437.
- [22] WANG Q, HAN Z, HU X, et al. Autism Symptoms Modulate Interpersonal Neural Synchronization in Children with Autism Spectrum Disorder in Cooperative Interactions[J]. *Brain Topography*, 2020, 33(1): 112-122.
- [23] HU Y, HU Y, XIANCHUN L, et al. Brain-to-brain Synchronization Across Two Persons Predicts Mutual Prosociality[J]. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2017, 12: 1835-1844.
- [24] CHENBO, WANG, TINGYU, et al. Dynamic Interpersonal Neural Synchronization Underlying Pain-Induced Cooperation in Females[J]. *Human Brain Mapping*, 2019, 40(11): 3222-3232.
- [25] BAKER J M, LIU N, CUI X, et al. Corrigendum: Sex Differences in Neural and Behavioral Signatures of Cooperation Revealed by fNIRS Hyperscanning[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30512.
- [26] YIXIN C, QIHAN Z, SHENG Y, et al. The Influence of Prior Intention on Joint Action: an Fnirs-Based Hyperscanning Study[J]. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2020(12): 12.
- [27] YUN K, WATANABE K, SHIMOJO S. Interpersonal Body and Neural Synchronization as a Marker of Implicit Social Interaction[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 959.
- [28] NING L, CHARIS M, WITT E E, et al. NIRS-Based Hyperscanning Reveals Inter-brain Neural Synchronization during Cooperative Jenga Game with Face-to-Face Communication[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2016, 10: 82.
- [29] LIEPELT, ROMAN, KLEMPOVA, et al. The Medial Frontal Cortex Mediates Self-Other Discrimination in the Joint Simon Task: a tDCS Study[J]. *Journal of Psychophysiology*, 2016, 30(3): 87-101.
- [30] MAYSELESS N, HAWTHORNE G, REISS A L. Real-life Creative Problem Solving in Teams: Fnirs Based Hyperscanning Study[J]. *Neuro Image*, 2019, 203: 116161.
- [31] PATRICIA, VANZELLA, JOANA, et al. fNIRS Responses in Professional Violinists While Playing Duets: Evidence for Distinct Leader and Follower Roles at the Brain Level[J]. *Frontiers in Psychology*, 2019, 10: 164.
- [32] NESSLER J A, GILLILAND S J. Interpersonal Synchronization during Side by Side Treadmill Walking Is Influenced by Leg Length Differential and Altered Sensory Feedback[J]. *Hum Mov*, 2009, 28(6): 772-785.
- [33] YAFENG, PAN, XIAOJUN, et al. Cooperation in Lovers: an Fnirs-Based Hyperscanning Study[J]. *Human Brain Mapping*, 2017, 38: 831-841.
- [34] SKEWES J C, JEGINDO E M, GEBAUER L. Perceptual Inference and Autistic Traits[J]. *Autism the International Journal of Research & Practice*, 2015, 19(3): 301.
- [35] DOLK T, HOMMEL B, PRINZ W, et al. The Joint Flanker Effect: Less Social Than Previously Thought[J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2014, 21(5): 1224-1230.
- [36] RUYS K I, AARTS H. When Competition Merges People’s Behavior: Interdependency Activates Shared Action Representations[J]. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2010, 46(6): 1130-1133.
- [37] PORCU E, LLING L, LAPPE M, et al. Pointing out Mechanisms Underlying Joint Action[J]. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2016, 78(4): 972-977.
- [38] IANI C, ANELLI F, NICOLETTI R, et al. The Role of Group Membership on the Modulation of Joint Action [J]. *Experimental Brain Research*, 2011, 211(3-4): 439-445.
- [39] MARGIT I, RUISSEN, et al. Competitive Game Play Attenuates Self-Other Integration during Joint Task Performance[J]. *Frontiers in Psychology*, 2016, 7: 274.
- [40] 宋晓蕾, 李洋洋, 张诗熠, 等. 人际情境对幼儿联合 Simon 效应的影响机制[J]. *心理发展与教育*, 2017, 33(3): 273-281.
- SONG Xiao-lei, LI Yang-yang, ZHANG Shi-yi, et al. The Influence Mechanism of Interpersonal Situations on the Joint Simon Effect of Young Children[J]. *Psychological Development and Education*, 2017, 33(3): 273-281.
- [41] FERRIN D L, BLIGH M C, KOHLES J C. It Takes Two to Tango: an Interdependence Analysis of the Spiraling of Perceived Trustworthiness and Cooperation in Interpersonal and Intergroup Relationships[J]. *Organizational Behavior & Human Decision Processes*, 2008, 107(2): 161-178.
- [42] PANAGIOTIS, MITKIDIS, JOHN, et al. Building Trust: Heart Rate Synchrony and Arousal during Joint Action Increased by Public Goods Game[J]. *Physiology & Behavior*, 2015, 11(1): 101-106.
- [43] BALCONI M, VANUTELLI M E, GATTI L. Functional Brain Connectivity When Cooperation Fails[J]. *Brain & Cognition*, 2018, 123: 65-73.
- [44] MILANESE N, IANI C, RUBICHI S. Shared Learning Shapes Human Performance: Transfer Effects in Task Sharing[J]. *Cognition*, 2010, 116(1): 15-22.
- [45] KARLINSKY A, LAM M Y, CHUA R, et al. Whose Turn Is It Anyway? The Moderating Role of Response-

- Execution Certainty on the Joint Simon Effect[J]. *Psychological Research*, 2017, 83(5): 833-841.
- [46] ABE M O, KOIKE T, OKAZAKI S, et al. Neural Correlates of Online Cooperation during Joint Force Production[J]. *NeuroImage*, 2019, 191: 150-161.
- [47] TANG Y, LIU X, WANG C, et al. Different Strategies, Distinguished Cooperation Efficiency, and Brain Synchronization for Couples: an fNIR-Based Hyperscanning Study[J]. *Brain and Behavior*, 2020, 12: 1768
- [48] MANUEL V, SYLVIE N, PATTI N, et al. Neural Tracking and Integration of “Self” and “Other” in Improvised Interpersonal Coordination[J]. *NeuroImage*, 2019, 206: 116303.
- [49] LIEPELT R, PORCU E, STENZEL A, et al. Saccadic Eye Movements Do Not Trigger a Joint Simon Effect[J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2019, 26(6): 1896-1904.
- [50] VESPER C, ROBRECHT P R D VAN DER WEL, KNOBLICH G, et al. Making Oneself Predictable: Reduced Temporal Variability Facilitates Joint Action Coordination[J]. *Experimental Brain Research*, 2011, 211(3): 517-530.
- [51] 王子璇. 音乐节拍促进联合行动[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
WANG Zi-xuan. Musical Beats Promote Joint Tapping: Insights from Inter-Brain Synchronization[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [52] SURTEES A, APPERLY I, SAMSON D. I’ve Got Your Number: Spontaneous Perspective-Taking in an Interactive Task[J]. *Cognition*, 2016, 150: 43-52.
- [53] SEBASTIAN W, PANAGIOTIS M, MCGRAW J J, et al. Beyond Synchrony: Joint Action in a Complex Production Task Reveals Beneficial Effects of Decreased Interpersonal Synchrony[J]. *Plos One*, 2016, 11(12): 168306.
- [54] LIU T, SAITO G, LIN C, et al. Inter-Brain Network Underlying Turn-Based Cooperation and Competition: a Hyperscanning Study Using Near-Infrared Spectroscopy [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 84-86.
- [55] RAMENZONI, VERÓNICA C, SEBANZ N, et al. Scaling Up Perception-Action Links: Evidence from Synchronization with Individual and Joint Action[J]. *Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance*, 2014, 40(4): 1551.
- [56] KOSFELD M, HEINRICHS M, ZAK P, et al. Oxytocin Increases Trust in Humans[J]. *Nature*, 2005, 435(7042): 673-676.
- [57] BAUMGARTNER T, HEINRICHS M, VONLANTHEN A, et al. Oxytocin Shapes the Neural Circuitry of Trust and Trust Adaptation in Humans[J]. *Neuron*, 2008, 58(4): 639-650.
- [58] RUISSEN M I, DE BRUIJN E R A. Is It Me or is It You? Behavioral and Electrophysiological Effects of Oxytocin Administration on Self-Other Integration during Joint Task Performance[J]. *Cortex*, 2015, 70: 146-154.
- [59] ASHKAN E, DALBONI DA ROCHA JOSUÉ L, NAGARAJU D B, et al. Ensemble Classification of Alzheimer’s Disease and Mild Cognitive Impairment Based on Complex Graph Measures from Diffusion Tensor Images[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2017, 11: 56.
- [60] GRÖNE M, DYCK M, KOUSH Y, et al. Upregulation of the Rostral Anterior Cingulate Cortex can Alter the Perception of Emotions: fMRI-Based Neurofeedback at 3 and 7 T[J]. *Brain Topography*, 2015, 28(2): 197.
- [61] SHERWOOD M S, KANE J H, WEISEND M P, et al. Enhanced Control of Dorsolateral Prefrontal Cortex Neurophysiology with Real-Time Functional Magnetic Resonance Imaging (rt-fMRI) Neurofeedback Training and Working Memory Practice[J]. *Neuroimage*, 2016, 124: 214-223.
- [62] MCKINLEY R A, BRIDGES N, WALTERS C M, et al. Modulating the Brain at Work Using Noninvasive Transcranial Stimulation[J]. *NeuroImage*, 2012, 59(1): 129-137.
- [63] MA, NITSCHKE, PAULUS, et al. Excitability Changes Induced in the Human Motor Cortex by Weak Transcranial Direct Current Stimulation[J]. *Journal of Physiology*, 2000, 8: 633-640.
- [64] LUBER B, LISANBY S H. Enhancement of Human Cognitive Performance Using Transcranial Magnetic Stimulation (TMS)[J]. *Neuroimage*, 2014, 85(3): 961-970.
- [65] BERGMANN T O, KARABANOV A, HARTWIGSEN G, et al. Combining Non-Invasive Transcranial Brain Stimulation with Neuroimaging and Electrophysiology: Current Approaches and Future Perspectives[J]. *Neuroimage*, 2016: 4-19.
- [66] YAFENG P, GIACOMO N, BEI S, et al. Interpersonal Synchronization of Inferior Frontal Cortices Tracks Social Interactive Learning of a Song[J]. *Neuroimage*, 2018, 12: 280-290.