



人类互动脑-脑耦合的计算方法

王益文^{1,2*}, 杨雪^{1,2}, 姚小强^{1,2}, 付超^{1,2}

1. 福州大学经济与管理学院, 福州 350108;

2. 福州大学心理与认知科学研究所, 福州 350108

* 联系人, E-mail: wangeven@126.com

2020-07-09 收稿, 2020-09-14 修回, 2020-09-14 接受, 2020-09-15 网络版发表

国家自然科学基金(71942002, 31771238)和国家社会科学基金重大项目(19ZDA361)资助

摘要 人类互动的神经生理本质是个体脑与脑之间的相互关联, 脑-脑耦合及脑间同步正是这种相互关联的具体体现. 作为一种新的研究手段, 超扫描能够揭示以往单脑研究无法揭示的信息, 在探讨社会互动问题的神经机制方面具有重要价值. 随着信号采集和数据分析方法的快速发展, 超扫描研究正在经历从研究“离线”认知向研究真实社会互动, 从严格控制的实验室范式向可以自由交互的“田野研究”范式跨越. 本文在介绍耦合、同步等核心概念的基础上, 以时间、技术发展为主线, 对常见脑-脑耦合指标及其适用条件进行述评, 同时对脑-脑耦合的相关理论进行介绍, 并对未来研究方向进行了展望. 本文所综述的脑-脑耦合强度表征和计算方法对人类社会化互动研究具有潜在的推动作用.

关键词 超扫描, 脑-脑耦合, 脑间同步, 社会互动, 耦合强度

1 脑-脑耦合的研究起源与发展

人与人之间的社会交互是社会认知的核心特征, 研究人脑在社会交互过程中的动态活动有助于深入了解我们的社会本质^[1]. 囿于研究逻辑、理论框架和技术手段等因素的限制, 传统神经影像技术对社会交互的研究主要包括人与电脑交互、人与人交互但只记录一个脑、人与人交互同时记录两个脑, 但交互是“离线”的等几种情况. 这些研究集中于“离线”的社会认知, 并没有对社会互动过程进行直接测量^[2,3]. 大量研究表明, 人类的大部分社会交互是“在线”形式的信息传递, 这种社会交互的效应不能被认为是单个大脑社会认知效应的简单相加^[4,5], 而应该被看作是两个或多个大脑相互作用的结果^[6]. 为了更好地考察个体间合作、竞争等社会互动时的神经活动, 对个体间的大脑交流过程

进行直接观察是十分必要的, 超扫描(同时扫描两名或多名个体并记录其大脑活动, hyperscanning)正是为了满足上述需要而产生的一种新技术^[7,8].

Duane和Behrendt^[9]是最早对多人大脑活动进行同步记录的研究者, 他们对双胞胎组合和非双胞胎组合进行同步记录 and 对比, 以研究双胞胎之间是否有心灵感应, 但这种技术当时并没有引起研究者的重视. 直到21世纪初, 这种研究方法重新引起了人们的关注. 2002年, Montague等人^[7]采用两台磁共振仪研究了双人进行欺骗任务时的大脑活动, 并首次在论文题目中使用了“hyperscanning”这个复合词, 该研究也因此被普遍认为是第一个超扫描研究(图1(a)). 2005年, King-Casas等人^[10]在世界上首次实现了加州理工学院(California Institute of Technology)和上千里之外的得克萨斯州贝勒医学院(Baylor College of Medicine)的两台功能核磁共

引用格式: 王益文, 杨雪, 姚小强, 等. 人类互动脑-脑耦合的计算方法. 科学通报, 2021, 66: 501-514

Wang Y W, Yang X, Yao X Q, et al. Computational methods of brain-to-brain coupling during human interaction (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 501-514, doi: [10.1360/TB-2020-0642](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0642)

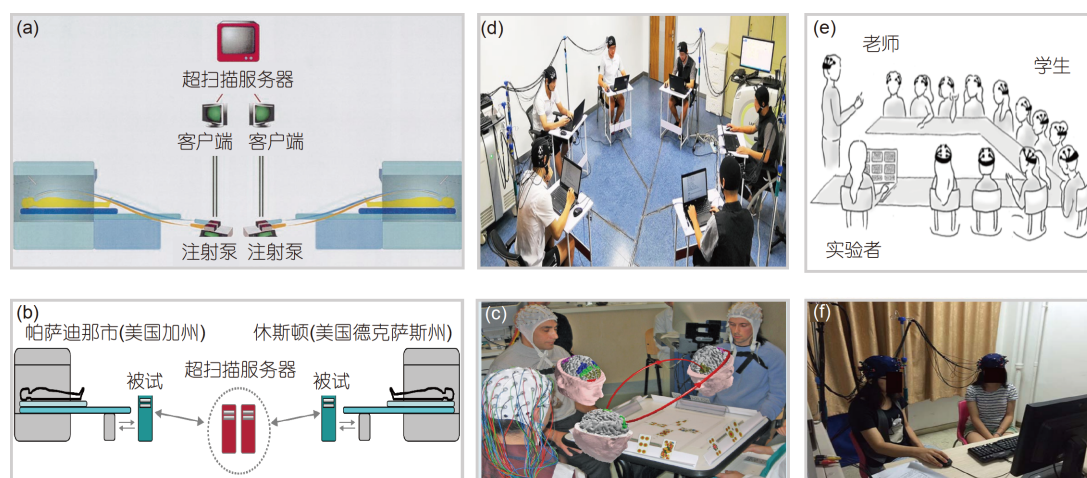


图1 (网络版彩色)超扫描研究示例。(a) 双人fMRI超扫描研究^[7]; (b) 远程双人fMRI超扫描研究^[10]; (c) 4人EEG超扫描研究^[41]; (d) 多人fNIRS超扫描研究^[40]; (e) 多人EEG超扫描研究^[43,44]; (f) 双人fNIRS超扫描研究^[49]

Figure 1 (Color online) Examples of hyperscanning studies. (a) Double fMRI-hyperscanning^[7]; (b) long-range double fMRI-hyperscanning^[10]; (c) four-person EEG-hyperscanning^[41]; (d) multi-person fNIRS-hyperscanning^[40]; (e) multi-person EEG-hyperscanning^[43,44]; (f) double fNIRS-hyperscanning^[49]

振设备的远程连接(图1(b)),“在线”考察了人们在经济交换任务中的神经互动特征。2006年,Babiloni等人^[8]第一次给出了超扫描的确切定义:对两人或多人大脑的血液动力学特性或神经电生理活动进行同步记录的技术。这些研究标志着社会互动研究从研究“离线”认知向研究真实社会互动的跨越。

在此后的十多年里,超扫描技术迅速发展,不但在需要严格控制的实验室研究如决策博弈^[2,11~17]和言语互动^[18~21]等任务中得到广泛应用^[22],而且被逐步引入到动作协同^[23~30]、纸牌游戏^[31~33]、飞行模拟^[34,35]、乐器/歌曲合奏^[36~39]和群际冲突^[40]等可以自由交互的自然情境中。例如,Astolfi和Babiloni团队^[41]将脑电图超扫描和扑克牌游戏相结合,研究了4个个体同时进行合作或竞争活动时的大脑互动过程(图1(c));采用多人-多轮-真实互动-实时反馈的群际“攻击-防守”互动实验范式(3人为攻击组,3人为防守组)。国内马燧娜团队^[40]首次揭示了群体凝聚力和内群体成员的神经活动同步性在群际冲突中的作用机制(图1(d))。这些研究把脑-脑耦合技术拓展到功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)^[7,42]、脑电图(electroencephalogram, EEG)^[23,41,43,44]、脑磁图(magnetoencephalography, MEG)^[45]以及近红外光学成像(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)^[46~49]等多个技术领域(图1),极大地提高了社会互动研究的生态效度。

通过课堂教学将人类世代积累下来的知识传递下去是人类文明得以延续和繁荣的重要途径。长期以来,

由于研究手段等因素的限制,研究者无法对教学过程的脑机制开展实证研究。近年来,随着便携式超扫描设备(主要是EEG和fNIRS设备)的发展和去噪计算能力的提高,超扫描研究被进一步应用到了真实课堂教学情景中。如纽约大学Dikker团队(图1(e))在真实课堂教学情境中对十多人的大脑EEG活动进行了同步记录,是最早将超扫描技术应用于真实课堂教学情景的研究团队^[43,44]。同一时期,国内卢春明团队^[49](图1(f))、李先春团队^[50]也在课堂教学的超扫描研究方面做了积极探索并取得了丰硕成果。上述研究将最新的脑科学研究方法应用于教育科学领域,系统探讨了教育教学领域的重要理论问题,无疑将会对教育科学研究的实证化,以及脑科学、教育学和心理学的深度融合产生重要影响。同时,这些研究也是超扫描研究走出实验室,由严格控制的实验室研究范式向真实、自然情景中的“田野研究”范式转变的标志。

与超扫描研究的快速发展过程相对应,近年来,耦合(coupling)、脑-脑耦合(brain-to-brain coupling)、脑间同步(inter-brain synchronization, interpersonal brain synchronization)、脑-脑同步(brain-to-brain synchronization)、脑波同步(brain-wave synchronization)、相位同步(phase synchronization)以及神经同步(neural synchronization)等术语频繁出现在超扫描研究的题目和关键词中。但目前相关领域尚缺乏对这些概念的辨析及概念间关系的梳理,这难免会给读者,尤其是初学者带来一定的理解困难。鉴于此,本文对超扫描研究中的

两个核心概念进行辨析,对常见的脑-脑耦合强度计算指标进行梳理,并介绍脑-脑耦合相关理论对未来研究方向进行展望。

2 脑-脑耦合与脑间同步

耦合(coupling)一词最早来源于物理学,指两个或两个以上体系或两种运动形式通过相互作用而彼此影响以至联合起来的现象。在经济和社会领域的研究中,耦合常被用来表示两个或两个以上系统(或个体)之间的一种相互关系。这种关系可以通俗地理解为耦合系统中各子系统以及各元素之间的相互依赖、相互作用和相互影响^[51,52]。在超扫描研究中,耦合指单个大脑内两个或多个脑区之间,以及两个或多个大脑之间的相互作用和影响。为了与单脑内不同脑区之间的耦合进行区别,两个或多个大脑之间的耦合又被称为脑-脑耦合(brain-to-brain coupling, BBC, 图2(b))。超扫描研究中,耦合主要有以下4个方面的含义: (1) 耦合指同频率信号间的相位同步(phase synchrony)。大脑是以一种网络化的方式进行信息加工的,来自同一大脑不同脑区或两个不同大脑的信号出现耦合,有时会表现为同频率信号的相位同步变化,这种相位同步性是对两列信号对应试次间相位差恒定程度的度量^[53]; (2) 耦合指低频信号相位和低频信号能量之间的相互影响,即相位-波幅耦合(phase-amplitude coupling, PAC)。以往研究发现,远距离脑区间的调控多借助于低频振荡,而高频信号往往是局部活动的特征。因此,局部脑加工(高频信号)与长距离低频信号间的耦合反映了大脑网络的信息整合,在信号特征上会表现为高频信号的能量随信号中低频成分的相位变化^[54]; (3) 耦合指大脑内或大脑间不同脑区之间的功能连接。在基于图论和复杂网络分析技术的超扫描研究^[11,16,35]及一些fMRI超扫描研究中^[7,10,14],耦合指大脑内或大脑间不同脑区之间的功能连接^[55]; (4) 在完成复杂认知任务时,耦合表现为远距离脑区之间的信息交流以及高级脑区对低级脑区的认知控制。如已有研究发现,老年人在多任务游戏中,额中区和枕区的Theta频段相位耦合代表了高级脑区对低级脑区的认知控制^[56]。复杂认知任务中,高级脑区对低级脑区的认知控制也会表现为高级脑区的低频振荡活动相位与低级脑区的高频振荡能量之间的耦合^[57]。

同步(synchronization)的本意是指某人或某事同时进行或产生,如音画同步、动作同步等。在科学术语中,同步指两个或两个以上随时间变化的量在变化过程中

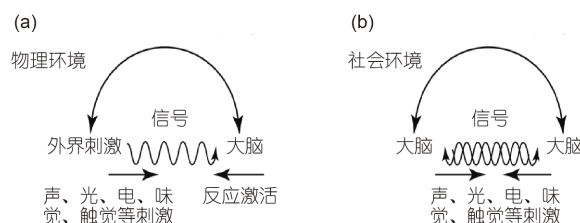


图2 刺激-脑耦合与脑-脑耦合^[51]. (a) 刺激-脑耦合; (b) 脑-脑耦合
Figure 2 Two types of coupling^[51]. (a) Stimulus-to-brain coupling; (b) brain-to-brain coupling

保持一定的相对关系,在时间上出现一致性与统一化的现象。在超扫描研究中,同步指来自不同大脑或大脑内不同脑区的信号在频率、相位、波幅等特征上表现出的一致性(稳定的相对关系)。为了跟单脑内不同脑区之间的信号同步进行区别,两个或多个大脑之间的信号同步又被称为脑间同步(inter-brain synchronization, IBS)。与传统单脑研究相比,超扫描研究关注的重点是两个或多个大脑活动之间的关系,这种关系的主要表现之一就是两个或多个大脑之间神经活动的同步性,这也是“同步”一词经常出现在超扫描研究中的原因。为了便于理解,我们借用Burgess^[58]所画的示意图(图3)来帮助读者理解脑间同步的几种可能情况。其中,图3(a)表示两个系统相互作用、相互影响,最终达到平衡状态(两个系统之间不再有能量交换)的情形,把这种同步称为互动同步;图3(b)表示两个系统受同一外界刺

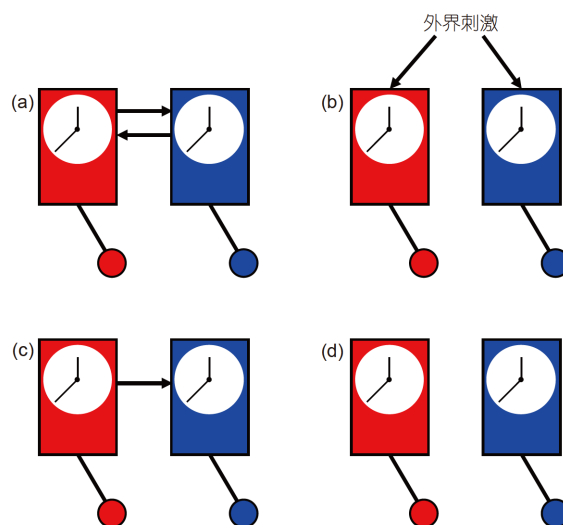


图3 (网络版彩色)几种可能的同步^[58]. (a) 互动同步; (b) 诱发同步; (c) 驱动同步; (d) 巧合同步

Figure 3 (Color online) Types of synchrony^[58]. (a) Reciprocal synchrony; (b) induced synchrony; (c) driven synchrony; (d) coincidental synchrony

激的驱动(诱发)而最终达到同步的情形,这种同步被称为诱发同步;图3(c)表示一个系统受到另一个系统的稳定驱动而与该系统保持同步的情形,这种同步被称为驱动同步;图3(d)则表示两个系统之间没有任何形式的互动,仅仅是因为两个系统的固有频率相同而出现的同步,这被称为巧合同步,是一种“伪同步”。

综上,对超扫描、脑-脑耦合及脑间同步之间的关系可总结如下:超扫描是一种技术手段,意指对两个或多个大脑的神经活动进行同步记录。脑-脑耦合指的是两个或多个大脑之间的相互作用和相互影响。脑-脑耦合有时会表现为脑间同步,此时,同步程度可以表征脑-脑耦合的强度,但脑-脑耦合并不等同于脑间同步。除了脑间同步外,脑-脑耦合还可以表现为脑内及脑间功能连接、交互作用等。此外,出现脑间同步也不意味着肯定存在脑-脑耦合,因为还有伪同步的可能(图3(d))。

3 脑-脑耦合强度的表征与计算方法

在管理和社会领域的研究中,耦合状态常通过两个指标来表征:耦合强度和耦合协调度。耦合强度指耦合系统中各子系统以及各元素之间相互作用、相互影响的总强度,被用来评价具有相互联系的系统彼此影响、相互依赖的程度。耦合强度仅是对系统相互作用强弱程度的测度,对于强弱程度的利弊以及系统间所具有的协调效应则不能加以判断。耦合协调度是在各系统之间或系统内部各要素之间彼此影响、互相作用的基础上,对系统之间协调发展、良性耦合程度的测度,能充分体现系统协调发展的趋势及变化规律,并对其状况好坏做出评价^[59]。在超扫描研究中,研究者重点关注的是耦合强度。因此,下面我们基于的信号特征为分类依据,以时间、技术发展为主线,对超扫描研究中常见脑-脑耦合指标的特点、适用条件及计算方法进行述评。

3.1 相关分析——循环相关系数

循环相关系数(circular correlation coefficient, CCorr)反映两列信号相位方差之间的共变程度。如果两列信号分别为 ϕ 和 φ ,则其循环相关系数(CCorr)定义为^[58,60]

$$CCorr_{\phi, \varphi} = \frac{\sum_{k=1}^N \sin(\phi - \bar{\phi}) \sin(\varphi - \bar{\varphi})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N \sin^2(\phi - \bar{\phi}) \sin^2(\varphi - \bar{\varphi})}}. \quad (1)$$

其测量原理是:根据信号当前时刻的相位可以预测其

很短时刻后的相位,对于两列相关信号,如果一列信号某时刻的实际相位稍微提前于该时刻的预期(理论)相位,则另一列信号的相位也应该出现类似的提前,即两列相关信号的相位方差应该是共变的。循环相关系数的取值范围在0~1,0表示两列信号的相位之间没有任何共变,1表示两列信号的相位是完全共变的^[60,61]。在一项考察握手减缓疼痛的研究中,研究团队招募了20对情侣并把他们分成3组,一组握着伴侣的手完成实验,另一组的男性伴侣坐在女性旁边但不握手,最后一组的男性伴侣坐在隔壁房间。实验要求女性抓住一根因灌注热水而能引发疼痛的水管并要求她们报告自身感受到的疼痛程度,同时要求她们的男性伴侣评估她们感受到的疼痛程度。研究发现,相对于有疼痛没接触或者没有接触没疼痛的情侣组合,在有疼痛且接触条件下,握手能够增加受痛情侣疼痛相关脑区间的Alpha-μ节律耦合,且这些脑区间的循环相关系数与受痛者的疼痛减轻程度以及她们伴侣的共情准确性显著正相关^[19]。

3.2 相位锁定值

相位锁定值(phase-locking value, PLV)通过两列信号之间的相位差来衡量它们之间的同步性。相位锁定值表示相位差在复平面单位圆上的分布情况。如果相位差是均匀分布的,那么相位锁定值等于0,表示相位完全不同步;如果相位差是常数则相位锁定值等于1,表示两列信号的相位完全同步。由下式计算信号 i 和信号 j 之间的相位锁定值^[12,53,62]:

$$\varphi(f, t) = \tan^{-1} \left(\frac{C(f, t)_i}{C(f, t)_r} \right), \quad (2)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j, \quad (3)$$

$$PLV_{ij} = \left| \frac{1}{N} \sum \exp(\varphi_{ij}) \right|, \quad (4)$$

式中, $C(f, t)_i$ 和 $C(f, t)_r$ 分别表示傅里叶系数的实部和虚部, N 表示数据点的数目, $|\cdot|$ 表示其复数模值。相位锁定值是EEG超扫描研究中使用最多的脑-脑耦合指标,被广泛用于协作互动^[23,24]、合作博弈^[12,13]和动作模仿^[25,63]等研究领域。例如,结合EEG超扫描和社会协同任务,韩世辉团队^[23,24]研究了催产素和外界威胁信息影响社会合作的神经机制。结果发现,催产素^[24]和外来威胁信息(领土威胁)^[23]都可以提高个体在社会协同任务中的脑间同步性,被试间Alpha节律^[24]及Gamma节律^[23]上的脑间同步可以很好地预测其行为同步性。在

合作博弈方面,以相位锁定值为耦合强度指标,Jaeseung Jeong团队^[12]考察了两名博弈者在囚徒困境中用非言语线索估计他人合作意图时的神经动态并发现,相对于两人之间有隔板的情况,两人直接面对面互动时,他们更多地选择跟对方合作,在右侧颞-顶联合区表现出更高的Alpha频段同步,且Alpha频段同步可以预测他们随后的决策选择。同样以囚徒困境为实验任务,胡谊团队^[13]考察了收益结构(高/低合作结构)和互动对象(人/机器)交互影响合作决策的神经机制并发现,较之与机器博弈,个体与真人博弈时表现出更高的合作比率以及Theta频段和Alpha频段的脑间同步性,且个体感知到的协同性调节了博弈情境与脑间同步的关系,这表明不同的收益结构会诱发不同的神经加工过程。

相关系数和相位锁定值都是针对信号相位特征的脑-脑耦合指标。这两个指标仅对相位敏感,对幅度不敏感,而且不涉及任何参数,能够充分体现EEG超扫描高时间分辨率的优势。相位重排理论(phase resetting theory)认为,神经振荡是对环境的时间采样,显著的事件(如外界输入的物理刺激)可以引发正在进行的神经振荡进行相位重排以匹配这些事件的时间结构,并优化对它们的编码^[64,65]。根据相位重排理论,研究者认为社会互动导致人际神经(相位)同步增加的原因在于,社会互动过程中每个互动者都在发出显著的社会信号(如凝视、身体姿势、声音等言语或非言语线索),这些信号作为神经同步的触发器引发了自己及搭档正在进行的神经振荡的相位重排,从而导致两列信号的相位差保持恒定(PLV)或出现共变(CCorr)^[18]。

3.3 相干分析——小波变换相干

相干(coherence)分析测量特定频率下两列信号之间的公共功率(幅度)程度,并对该频率下这些信号之间的功能耦合(functional coupling)进行量化。这个指标是针对信号的幅度特征提出的,与其相位无关,能很好地适应血氧信号的特点,多用在功能磁共振超扫描^[7]和近红外超扫描研究中^[27,29,30,39,66]。小波变换相干(wavelet transform coherence, WTC)系数反映两列时域信号进行小波变换后的相干性,计算时首先对两个时间序列 $x(n)$ 和 $y(n)$ 进行连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)^[67]。

$$W_n^X(s) = \sqrt{\frac{\delta_t}{s}} \sum_{n'=1}^N x_{n'} \varphi_0 \left[(n' - n) \frac{\delta_t}{s} \right], \quad (5)$$

式中, n 为时间点, s 是小波尺度, δ_t 是采样周期, N 是时间序列长度。然后由式(6)对两个时间序列进行交叉小波变换(cross wavelet transform)后由式(7)计算其小波变换相干性:

$$W^{XY}(n, s) = W^X(n, s) W^{Y*}(n, s), \quad (6)$$

$$R_n^2(s) = \frac{|s(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)}, \quad (7)$$

式中, $*$ 为复共轭, S 为平滑算子。小波变换相干是近红外超扫描研究中使用最多的脑-脑耦合指标,其范围在0~1之间,0表示完全不相干,1表示完全相干。一系列近红外超扫描研究分别发现,合作任务中,相对于朋友组和陌生人组,爱人组被试间右侧额上回区域的脑间同步显著增强,且这种增强与他们的合作行为正相关^[27],相对于独立任务组(两名被试各自独立完成任务),协作任务组(两名被试共同完成一个协作任务)的被试不但表现出更高的行为同步和助人倾向,而且在左侧额中区域表现出与任务及被试间亲社会倾向显著正相关的脑间同步^[30],不同性别组合(男-男、男-女、女-女)可以调节合作交流中的脑间同步性,混合性别被试之间的脑同步显著高于同性别被试^[29]。

由于近红外数据采集设备的便携性和对噪声的高容忍性,近红外超扫描及与其对应的小波变换相干不仅在上述严格控制的实验室研究中得到广泛应用,而且在可自由交互的真实课堂情境中展现了其便携、易穿戴和高噪声容忍等优点。如2018年,卢春明团队^[49]探讨了师生间脑同步在教学过程中的作用机制并发现,课堂教学中教师颞-顶联合区的脑活动与大约10 s后学生颞叶前部的脑活动有显著的脑间同步,且老师-学生脑间同步越强,教学效果越好(图1(f))。2019年,李先春团队^[50]对教学模式、基础知识等因素影响教学效果的神经机制进行探讨时发现,师生左侧前额叶间的脑同步在学生自我报告的互动水平与其学习成绩之间起中介作用并能预测教学效果。这些研究将超扫描及脑-脑耦合技术应用于真实课堂情景,为教育教学领域的重要理论问题(如“预测-传递”模型)提供了重要的实证支持。

3.4 相干分析——有向相干系数

如果两个脑区或两个大脑间存在相互作用与影响,

那么具体是谁影响谁,上面提到的3个耦合指标是无法回答的.基于多元自回归模型(multivariable autoregressive model)和格兰杰因果(Granger Causality)原则,超扫描研究中引入部分有向相干系数(generalized partial directed coherence, GPDC)来表征两列信号间的信息流动方向和因果性关系^[58].GPDC同时测量通道(channel) i 对通道 j 的定向影响程度以及通道 i 对网络中所有通道的影响,并据此判断通道间信号流动的定向因果关系.计算GPDC时首先要对时间序列信号建立一个合适的多元自回归模型,该模型除了估计通道之间的耦合强度之外,还可以提供因果线性交互效应的信息.通过傅里叶变换得到的多元自回归模型参数频率描述如下:

$$A(f) = I - \sum_{p=1}^P A_p \exp\left(-2\pi i p \left(\frac{f}{f_s}\right)\right), \quad (8)$$

式中, A_p 是模型参数, I 是 M 维单位矩阵, f_s 是采样率, $t^2 = -1$.对每一对通道(i, j), GPDC $_{ij}$ 由下式算出^[18,68,69]:

$$GPDC_{ij}(f) = \frac{\frac{1}{\delta_i} |A_{ij}(f)|}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \frac{1}{\delta_m^2} |A_{mj}(f)|^2}}, \quad (9)$$

式中, δ_i^2 表示 $X_i(t)$ 的方差. GPDC $_{ij}$ 的取值在0~1之间,表示从通道 i 流向通道 j 的信号占有从通道 i 中流出信号的比例. GPDC $_{ij}$ 接近0表示两通道间没有联系, GPDC $_{ij}$ 越大表示通道 i 越可能是通道 j 的格兰杰原因.

GPDC既适用于高时间分辨率的EEG信号^[17,18,34,35,55],也适用于基于血氧信号的功能磁共振超扫描和近红外超扫描^[27,39].由于可以提供两列信号间的信息流动方向和因果性关系^[58],GPDC常被用来确定非言语交流^[18]、模仿学习^[39]及合作博弈^[17,27]等社会交互过程中互动双方的主从关系.如一项脑电超扫描研究发现,成人对婴儿的神经活动有显著的格兰杰(Granger)因果影响,且这种影响在直视和转身直视两种条件下比在斜视条件下更强,表明在交流过程中,直视增强了婴儿和成人之间的双向神经耦合^[18].基于近红外超扫描和格兰杰因果分析发现,在学习唱歌的社会交互学习任务中,教授者到学习者的平均因果关系显著大于学习者到教授者的平均因果关系,教授者的大脑活动可以显著预测学习者的大脑活动,反之则不成立.这表明,在练习唱歌的社会互动过程中,教授者占主导地位而学习者处于从属地位^[39];在合作任务中,恋人组被试从女性到男性方向的同步性显著强于从男性到女性方向

的同步性,这表明恋人组女性和男性在合作过程中所扮演的角色不同,女性在合作过程中处于主导地位^[27].

3.5 基于图论的脑-脑耦合指标

研究者认为,现实生活中人们的大部分社会活动是一种“在线”互动.这种在线互动中,互动个体的大脑之间会形成一个整合系统(two-in-one系统)^[5,51,70,71].该系统是一种复杂的非线性系统^[72,73],其效果不能看成是两个单脑效果的简单相加^[4,5,74],这与格式塔学派“整体大于部分之和”的观点是一致的.部分学者把这种整合系统称为超脑网络(hyper-brain network),用图论(graph theory)和复杂脑网络分析方法对超脑网络的网络特征(如最短路径长度、连通效率、模块化系数、小世界网络属性等)进行分析,并以此表征脑-脑耦合强度^[36,38,75~77].为了便于理解基于图论的耦合指标,有必要先简要介绍几个图论中的核心概念.在数学上,一个网络可以抽象表示为一个图,它由一组节点(node)和连接这些节点的若干条边(edge)组成,即图 $G(V, E)$ 由节点集合 V 和边集合 E 两个集合构成.两个节点之间如果有边相连,这两个节点就称为邻接的.用 a_{ij} 表示两个节点 i 和 j 之间的边数,矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 就是图 G 的邻接矩阵,反映了网络中两两节点之间的邻接状态.如果两个节点 i, j 是邻接节点,则 $a_{ij}=1$;否则 $a_{ij}=0$.根据连接节点的边是否具有方向性可以把图分为有向图和无向图两种,边没有方向的图称为无向图,边有方向的图称为有向图.对网络中互相连接的节点之间的统计特性进行分析的最重要描述是度(degree).某节点的度为 k 表示与这个节点直接相连的边的个数是 k .有向图中的度还可分为入度和出度,节点 i 的入度表示有向图中所有节点中指向节点 i 的弧的个数,节点 i 的出度表示有向图中节点 i 指向其他节点的弧的个数^[33].节点的度越大表示与这个节点相连的边越多,这个节点在整个网络中也就越重要.

(i) 最短路径长度(shortest path length).最短路径长度是网络结构研究中一个非常重要的参数,描述网络中从某一节点到另一节点的最近路线选择,选用最短路径可以减少信息传递时间以提高效率.从节点 i 到节点 j 的路线中,经过的边数最少的一条通路称为这两点之间的最短路径,网络中任意两个节点间最短路径长度的平均值就是整个网络的最短路径长度^[35]:

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} l_{ij}, \quad (10)$$

式中, N 表示节点数目, l_{ij} 表示节点 i, j 之间的最短路径长度。

(ii) 全局效率(global efficiency)和局部效率(local efficiency). 最短路径长度计算两个节点间的最佳路径规划, 如果网络中存在两个不能连通的节点, 这两个节点间就会产生一个无穷大的最短路径长度, 这是没有意义的. 为此, 图论中引入了全局效率(global efficiency)和局部效率(local efficiency)的概念^[2,16]:

$$\text{全局效率: } E_g = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j=1}^N \frac{1}{l_{ij}}, \quad (11)$$

$$\text{局部效率: } E_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_g(i), \quad (12)$$

式中, N 为节点总数, l_{ij} 是节点 i, j 之间的最短路径长度. 根据全局效率的计算公式不难发现, 其与最短路径长度成反比, 最短路径长度越小, 全局效率越高, 节点间的信息传递速度越快. 局部效率是所有节点全局效率的平均值, 是度量网络局部区域节点之间信息传输能力的参数. 全局效率和局部效率的取值都在0~1之间, 0表示没有连通, 1表示最大的连通^[2,16,35,55].

(iii) 可分割系数(divisibility, D)和模块化系数(modularity, Q). 可分割系数和模块化系数衡量一个图能被分成两个(对应两个大脑)或多个节点集合(模块)的程度^[55].

$$D = \frac{W}{\sum_{ij} [w_{ij} (1 - \delta(c_i, c_j)) + k]}, \quad (13)$$

$$Q = \frac{1}{W} \sum_{ij} \left(w_{ij} - \frac{s_{iout} s_{jin}}{W} \right) d(C_i, C_j), \quad (14)$$

式中, c_i 和 c_j 分别表示节点 i, j 所属的模块, 如果节点 i 和 j 属于同一个模块(如来自同一大脑), 则 δ 函数取值为1, 否则 δ 函数取值为0. s_{iout} 和 s_{jin} 分别表示节点 i 的出度和节点 j 的入度, K 是一个常数. 可分割系数和模块化系数越大, 一个网络越适合被分成两个或多个模块^[35,78,79].

(iv) 小世界网络特性(small-world network). 1998年, Watts和Strogatz^[80]通过对网络的边进行概率划分并重新排列连接, 得到了一种介于规则网络(regular network)和随机网络(random network)之间的新型网络——小世界网络. 这种网络具有较高的集群系数和较短的路径长度, 同时集中了规则网络和随机网络的优势^[81,82]. 在大脑网络研究的历史上, 人们曾先后用规则网络和随机网络来模拟大脑网络, 但大量研究表明, 大

脑既不是一个完全的随机网络, 也不是一个完全的规则网络, 而是具有“经济性的”小世界网络, 即具有较小的特征路径长度和较大的聚类系数. 小世界系数是表征某个网络是否具有小世界特性的指标, 由下式计算^[81]:

$$\delta = \frac{C_{\text{real}} L_{\text{random}}}{C_{\text{random}} L_{\text{real}}}, \quad (15)$$

式中, C_{real} 和 L_{real} 为所要分析网络的聚类系数和特征路径长度; C_{random} 和 L_{random} 为随机网络的聚类系数和特征路径长度. 如果小世界系数 $\delta > 1$, 说明所研究的网络具有小世界网络特性.

基于图论的复杂脑网络分析技术在脑科学领域的应用是当前超扫描研究的热点之一^[83~86]. 囚徒困境中策略使用的超扫描研究发现, 相对于双方都采取合作策略或以牙还牙策略, 当双方相互背叛(都采取背叛策略)时, 他们超脑网络的连接效率更低, 模块化系数更高, 超脑网络连接模式的变化可以预测个体的背叛选择^[2,15,55].

3.6 基于事件相关电位的脑-脑耦合指标——峰潜伏期差异和波幅差异

大部分脑-脑耦合指标是针对信号的频域特征(振幅、频率、相位等)提出的. Zhang等人^[87]在一项基于事件相关电位(event-related potentials, ERP)超扫描研究中首次以两名被试的ERP峰潜伏期差异(latency difference)和波幅差异(amplitude difference)为耦合指标, 探讨了信念刷新(belief updating)在合作博弈中的作用并发现, 双方都预期对方会合作且双方确实都选择了合作条件下的P3b潜伏期差异显著小于只有一方预期对方会合作但双方都选择了合作的条件. 这说明互惠预期能够通过信念刷新强化个体间的心态同步(mind-set synchrony)与合作行为. 这是超扫描研究领域第一篇以时域特征(峰潜伏期和波幅)为耦合指标的ERP超扫描研究^[87].

3.7 表征多人脑同步水平的脑-脑耦合指标——总相依水平

以上耦合指标适合表征两人之间的脑-脑耦合强度, 但不能衡量两人以上群体的总体脑-脑耦合强度. Dikker团队^[43,44]对真实课堂教学情境中十多人的EEG活动进行同步记录, 并提出了能表征多人之间总体脑-脑耦合水平的指标——总相依水平(total interdependen-

dence, TI). 对于同步记录的时间序列对 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , $\dots$, (x_n, y_n) , 总相依水平由下式算出:

$$TI_{x,y} = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \ln(1 - C_{xy}^2(\lambda)) d\lambda, \quad (16)$$

式中, $C_{xy}(\lambda)$ 是两个时间序列 x, y 在频率 $f = \lambda / 2\pi$ 处的相干系数^[88-90].

4 总结与展望

自2002年第一篇超扫描研究^[7]发表以来, 超扫描研究在近十几年里得到了迅速发展, 涉及功能磁共振成像、脑电图、脑磁图和近红外光学成像等多种神经影像技术. 在对相关研究进行梳理的基础上发现, 以下3方面的问题值得以后的超扫描研究予以重点关注.

4.1 脑-脑耦合指标及其选择

在物理和电子工程领域, 一列信号的特征可以用波幅、周期、频率和相位等多个指标来描述. 与此对应, 神经研究发现, 外界事件刺激诱发的大脑活动可能表现为相位反应^[91,92]、频率反应^[93]、振幅反应^[94,95]或产生新增成分^[96,97]等多种形式, 因此, 现有超扫描研究中使用多种不同指标来表征脑-脑耦合强度就不足为奇了. 在本文所述的脑-脑耦合指标中, 相关系数和相位锁定值都是针对信号的相位特征的, 它们只对相位敏感, 对信号幅度不敏感; 与之相反, 相干系数只对信号的幅度特征敏感, 既适用于高时间分辨率的EEG信号, 也适用于基于血氧信号的功能磁共振超扫描和近红外超扫描研究; 其中, 定向相干分析的优势在于可以提供两列信号间的信息流动方向和因果性关系^[58], 这一特点常被用来确定参与者在社会互动中的主从关系. 与上述指标针对某种信号特征不同, 基于图论的耦合指标把互动个体大脑之间形成的整合系统^[5,51,70,71]看作是一个超脑网络(hyper-brain network), 并通过网络特征来刻画脑-脑耦合强度. 通过上述分析发现, 脑-脑耦合的强度表征指标是随着信号采集技术和数据分析方法的发展而逐步发展起来的. 近年来, Zhang等人^[87]提出的基于事件相关电位的脑-脑耦合指标和Dikker团队^[43,44]提出的表征多人之间总体脑-脑耦合水平的指标(总相依水平, total interdependence, TI)则是这个发展过程仍在蓬勃进行的典型例证, 体现了研究者对超扫描研究领域理解的逐步深入. 不难推断, 随着信号采集和数据分析方法的进一步发展, 必将会有更多新的耦合指标

被提出, 那么这些指标孰优孰劣, 在具体的研究中应该如何选择耦合指标就成了一个值得思考的问题. 虽然已有一些研究对不同耦合指标进行了对比并给出了一些指标选择的建议^[58,98], 但总体而言, 这方面的研究还远不充足. 由于不同耦合指标有不同的特点和适用条件, 对于指标选择, 我们的建议是应该根据具体的研究方法、技术设备和研究问题进行选择, 没有最好的指标, 只有最适合的指标. 此外, 现有的超扫描研究大多只用一个耦合指标来衡量耦合强度, 同时选用多个耦合指标来表征耦合强度并进行相互印证是否有助于增加研究的可靠性是一个有待进一步探讨的问题^[2,15,33,55]. 最后, 现有超扫描研究重点关注的是耦合强度, 然而如前所述, 耦合强度只能表征系统相互影响的强弱程度, 无法对强弱程度的利弊以及系统间的协调程度做出判断, 而耦合协调度则可以补充上述不足^[59]. 因此, 在超扫描研究中同时考虑耦合强度和耦合协调度或有助于加深我们对社会互动中脑-脑耦合本质的理解, 也是值得未来超扫描研究关注的一个方向.

4.2 脑-脑耦合的相关理论

相位重排理论认为个体在社会互动过程中发出的显著社会信号触发了互动双方的神经振荡, 并导致两列信号间表现出稳定的相位关系. 为了帮助读者理解脑间同步的产生机制, Burgess^[58]描述了4种可能的脑间同步情况(图3), 分别是互动同步(图3(a))、诱发同步(图3(b))、驱动同步(图3(c))和巧合同步(图3(d)). 不难发现, 相位重排理论只适合解释图3(b)所示的诱发同步现象. 此时, 作为神经同步触发器的凝视、身体姿势、声音等言语或非言语线索可以看作是双脑系统的公共外界刺激源. 诱发同步和相位重排理论适合解释个体间没有互动, 只是在完成相似或相同任务(如看同一部电影^[99])时的脑间同步现象, 对互动同步和驱动同步则无法给予很好的解释. 互动同步(两个系统通过相互作用和影响最终达到平衡状态)适合解释博弈决策、合作协同等对追踪、揣测他人意图(心理理论)有较高要求的回合型互动任务中出现的同步现象; 而驱动同步(一个系统受另一个系统的稳定驱动而与该系统保持同步)则更适合解释乐器演奏、动作模仿和教育教学等参与者之间有明确主从关系的互动任务中, 追随者(模仿者、学习者)和领导者(教授者)之间的同步. 综上, 与脑-脑耦合指标的迅速发展相一致, 脑-脑耦合及脑间同步的相关理论也在不断发展中. 最近提出的对脑间

同步和心智同步的理论分析^[100]以及一些包含计算模型的理论分析^[101,102]很好地反映了这方面的进展。但总体而言,现有的超扫描理论研究还远不充分,在整合现有理论的基础上提出解释力更强的理论仍是未来超扫描理论研究的重要方向之一。

4.3 脑-脑耦合的意义解释

目前,研究者较为一致地认为,单脑内不同脑区间的耦合反映了大脑的信息整合过程^[103~106],但对于双脑或多脑间脑-脑耦合所代表的意义,研究者尚未达成一致,主要有合作互动假说(cooperative interaction hypothesis)和相似任务假说(similar task hypothesis)两种解释。合作互动假说认为,脑-脑耦合反映了合作者之间的心智同步(mindset synchrony),意味着两个或多个个体在进行需要相互适应、协作的合作性互动^[2,11~16,107,108]。与合作互动假说不同,相似任务假说认为,脑-脑耦合仅仅意味着两个或多个个体正在进行相似的动作或认知任务^[23~28,35,63,78],脑-脑耦合反映的仅仅是动作或任务需求的相似性而非个体间的心态同步。郝宁团队^[109]采用新的实验范式对上述两种假设进行了检验。该研究共招募被试44名并将他们随机两两配对后组成22个三人小组(第三名小组成员由实验助手担任)。每个小组完成同样的一个约5 min的团体头脑风暴任务,该任务要求小组成员按照轮流模式尽可能多地报告在一个具体情境中自己觉得新颖、创新的处理方法。两名真被试先报告,实验助手(即假被试)最后报告。假被试只需报告事先准备好的答案,不需要考虑真被试的报告内容。这样操作的目的是,虽然假被试和两名真被试在完成同一个任务,但他与真被试之间无任何合作性互动,而两名真被试对此并不知情。他们认为,这是需合作完成的团体任务,即两名真被试配对可以看作是在完成一项合作互动任务,而真被试和假被试配对可以看作是在完成一项相似任务。这样便能够在同一个小组内比较“存在合作互动的两个组员(两个真被试)之间的脑间同步”和“不存在合作互动的两个组员(任意一个真被试和一个假被试)之间的脑间同步”的差异。结果表明,真被试组背外侧前额叶之间的脑间同步显著高于真被试-假被试组合,且真被试组在这两个脑区的脑间同步随着时间逐渐提升。这在一定程度上

支持了合作互动假说,即脑间同步意味着个体之间的合作性互动^[109]。

尽管上述研究在一定程度上支持了合作互动假说,但需要注意的是,合作互动假说与相似任务假说并不是完全互斥,他们之间是一种相互补充的关系。合作互动假说适合解释Burgess^[58]所描述的互动同步,而相似任务假说则更适合解释他们所描述的诱发同步。因此,脑-脑耦合所代表的意义仍需后续研究持续关注,如前所述,超扫描研究中,耦合主要有以下4个方面的含义:(1)耦合指同频率信号间的相位同步性^[53];(2)耦合指低频信号相位和高频信号能量之间的相互影响,即相位-波幅耦合^[54];(3)耦合指大脑内或大脑间不同脑区之间的功能连接^[7,10,11,14,16,35];(4)在完成复杂的认知任务时,耦合指远距离脑区之间的信息交流,以及高级脑区对低级脑区的认知控制^[56,57]。同时,神经研究发现,外界事件刺激诱发的大脑活动可能表现为信号在相位^[91,92]、频率^[93]、振幅^[94,95]等特征上的变化,耦合在不同表现形式中的意义是不同的,这在一定程度上增加了耦合意义解释的困难。因此我们建议,在讨论耦合、同步所代表的意义时一定要结合具体的耦合指标、任务类型和互动方式等因素进行综合考虑。例如,同时型任务(如动作模仿)可能反映了被试身体动作的同步,其结果适合用相似任务假说和诱发同步来解释;回合型任务则更可能反映了被试由意图、动机层面的心智同步所产生的脑间活动同步^[110],因此其结果更适合用合作互动假说和互动同步来解释。在仅具备协作因素而无冲突因素的任务(如协作任务)和双方均选择合作策略的合作任务中,脑间同步可能体现了任务所包含的协作因素的多少;在不具备协作因素,却对追踪、揣测他人意图有较高要求的回合型冲突任务中,脑间同步可能体现的是被试间的心智同步,表明对他人意图的揣测或可促使脑间活动同步的提升^[122]。

综上所述,超扫描研究重点关注两个或多个大脑活动之间的关系,在探究人类互动的神经机制方面具有先天优势,对理解人类的社会本质具有重要价值。然而,目前超扫描研究仍处于起步阶段,相关理论研究尚不完备,对现有理论进行整合并提出统合力更强的理论是未来超扫描理论研究的重点。本文对相关概念和耦合强度计算方法的梳理有利于该领域的良性发展。

参考文献

- 1 Babiloni F, Astolfi L. Social neuroscience and hyperscanning techniques: Past, present and future. *Neurosci Biobehav Rev*, 2014, 44: 76-93

- 2 Babiloni F, Astolfi L, Cincotti F, et al. Cortical activity and connectivity of human brain during the prisoner's dilemma: An EEG hyperscanning study. In: The 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. 4953–4956
- 3 Astolfi L, Vecchiato G, Toppi J, et al. Estimation of the cortical activity from simultaneous multi-subject EEG recordings during social interactions. *Neurosci Lett*, 2011, 500: e8
- 4 Hari R, Himberg T, Nummenmaa L, et al. Synchrony of brains and bodies during implicit interpersonal interaction. *Trends Cogn Sci*, 2013, 17: 105–106
- 5 Konvalinka I, Roepstorff A. The two-brain approach: How can mutually interacting brains teach us something about social interaction? *Front Hum Neurosci*, 2012, 6: 215
- 6 Scholkman F, Holper L, Wolf U, et al. A new methodical approach in neuroscience: Assessing inter-personal brain coupling using functional near-infrared imaging (fNIRS) hyperscanning. *Front Hum Neurosci*, 2013, 7: 813
- 7 Montague P R, Berns G S, Cohen J D, et al. Hyperscanning: Simultaneous fMRI during linked social interactions. *Neuroimage*, 2002, 16: 1159–1164
- 8 Babiloni F, Cincotti F, Mattia D, et al. P36.8 hypermethods for EEG hyperscannings. *Clin Neurophysiol*, 2006, 117: 180–181
- 9 Duane T D, Behrendt T. Extrasensory electroencephalographic induction between identical twins. *Science*, 1965, 150: 367
- 10 King-Casas B, Tomlin D, Anen C, et al. Getting to know you: Reputation and trust in a two-person economic exchange. *Science*, 2005, 308: 78–83
- 11 Astolfi L, Cincotti F, Mattia D, et al. Imaging the social brain: Multi-subjects EEG recordings during the “Chicken's game”. In: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 2010. 1734–1737
- 12 Jahng J, Kralik J D, Hwang D U, et al. Neural dynamics of two players when using nonverbal cues to gauge intentions to cooperate during the Prisoner's Dilemma Game. *Neuroimage*, 2017, 157: 263–274
- 13 Hu Y, Pan Y, Shi X, et al. Inter-brain synchrony and cooperation context in interactive decision making. *Biol Psychol*, 2018, 133: 54–62
- 14 Krueger F, McCabe K, Moll J, et al. Neural correlates of trust. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 20084–20089
- 15 Astolfi L, Cincotti F, Mattia D, et al. Estimation of the cortical activity from simultaneous multi-subject recordings during the prisoner's dilemma. In: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2009. 1937–1939
- 16 De Vico Fallani F, Astolfi L, Cincotti F, et al. Extracting information from cortical connectivity patterns estimated from high resolution EEG recordings: A theoretical graph approach. *Brain Topogr*, 2007, 19: 125–136
- 17 Ciaramidaro A, Toppi J, Casper C, et al. Multiple-brain connectivity during third party punishment: An EEG hyperscanning study. *Sci Rep*, 2018, 8: 6822
- 18 Leong V, Byrne E, Clackson K, et al. Speaker gaze increases information coupling between infant and adult brains. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 13290–13295
- 19 Goldstein P, Weissman-Fogel I, Dumas G, et al. Brain-to-brain coupling during handholding is associated with pain reduction. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 2528–2537
- 20 Kawasaki M, Yamada Y, Ushiku Y, et al. Inter-brain synchronization during coordination of speech rhythm in human-to-human social interaction. *Sci Rep*, 2013, 3: 1692
- 21 Liu Y, Piazza E A, Simony E, et al. Measuring speaker-listener neural coupling with functional near infrared spectroscopy. *Sci Rep*, 2017, 7: 43293
- 22 Bei L T, Jiang K, Li X C, et al. From the view of game theory: A new model for hyperscanning multi-subject interaction paradigm (in Chinese). *Adv Psychol Sci*, 2019, 27: 1284–1296 [卑力添, 蒋柯, 李先春, 等. 博弈论视角下的超扫描多人互动任务新模型. 心理科学进展, 2019, 27: 1284–1296]
- 23 Mu Y, Han S, Gelfand M J. The role of gamma interbrain synchrony in social coordination when humans face territorial threats. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2017, 12: 1614–1623
- 24 Mu Y, Guo C, Han S. Oxytocin enhances inter-brain synchrony during social coordination in male adults. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2016, 11: 1882–1893
- 25 Yun K, Watanabe K, Shimojo S. Interpersonal body and neural synchronization as a marker of implicit social interaction. *Sci Rep*, 2012, 2: 959
- 26 Wang C, Zhang T, Shan Z, et al. Dynamic interpersonal neural synchronization underlying pain-induced cooperation in females. *Hum Brain Mapp*, 2019, 40: 3222–3232
- 27 Pan Y, Cheng X, Zhang Z, et al. Cooperation in lovers: An fNIRS-based hyperscanning study. *Hum Brain Mapp*, 2017, 38: 831–841
- 28 Osaka N, Minamoto T, Yaoi K, et al. Neural synchronization during cooperated humming: A hyperscanning study using fNIRS. *Proc-Soc Behav Sci*, 2014, 126: 241–243
- 29 Cheng X, Li X, Hu Y. Synchronous brain activity during cooperative exchange depends on gender of partner: A fNIRS-based hyperscanning study. *Hum Brain Mapp*, 2015, 36: 2039–2048

- 30 Hu Y, Hu Y, Li X, et al. Brain-to-brain synchronization across two persons predicts mutual prosociality. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2017, 12: 1835–1844
- 31 Babiloni F, Cincotti F, Mattia D, et al. High resolution EEG hyperscanning during a card game. In: 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. 4957–4960
- 32 Babiloni F, Cincotti F, Mattia D, et al. Hypermethods for EEG hyperscanning. In: International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. 3666–3669
- 33 Astolfi L, Toppi J, De Vico Fallani F, et al. Neuroelectrical hyperscanning measures simultaneous brain activity in humans. *Brain Topogr*, 2010, 23: 243–256
- 34 Astolfi L, Toppi J, Borghini G, et al. Cortical activity and functional hyperconnectivity by simultaneous EEG recordings from interacting couples of professional pilots. In: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2012. 4752–4755
- 35 Toppi J, Borghini G, Petti M, et al. Investigating cooperative behavior in ecological settings: An EEG hyperscanning study. *PLoS One*, 2016, 11: e0154236
- 36 Müller V, Sängler J, Lindenberger U. Intra- and inter-brain synchronization during musical improvisation on the guitar. *PLoS One*, 2013, 8: e73852
- 37 Lindenberger U, Li S C, Gruber W, et al. Brains swinging in concert: Cortical phase synchronization while playing guitar. *BMC Neurosci*, 2009, 10: 22
- 38 Sängler J, Müller V, Lindenberger U. Intra- and interbrain synchronization and network properties when playing guitar in duets. *Front Hum Neurosci*, 2012, 6: 312
- 39 Pan Y, Novembre G, Song B, et al. Interpersonal synchronization of inferior frontal cortices tracks social interactive learning of a song. *Neuroimage*, 2018, 183: 280–290
- 40 Yang J, Zhang H, Ni J, et al. Within-group synchronization in the prefrontal cortex associates with intergroup conflict. *Nat Neurosci*, 2020, 23: 754–760
- 41 Astolfi L, Toppi J, De Vico Fallani F, et al. Imaging the social brain by simultaneous hyperscanning during subject interaction. *IEEE Intell Syst*, 2011, 26: 38–45
- 42 Lee R F, Dai W, Jones J. Decoupled circular-polarized dual-head volume coil pair for studying two interacting human brains with dyadic fMRI. *Magn Reson Med*, 2012, 68: 1087–1096
- 43 Bevilacqua D, Davidesco I, Wan L, et al. Brain-to-brain synchrony and learning outcomes vary by student-teacher dynamics: Evidence from a real-world classroom electroencephalography study. *J Cogn Neurosci*, 2019, 31: 401–411
- 44 Dikker S, Wan L, Davidesco I, et al. Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom. *Curr Biol*, 2017, 27: 1375–1380
- 45 Baess P, Zhdanov A, Mandel A, et al. MEG dual scanning: A procedure to study real-time auditory interaction between two persons. *Front Hum Neurosci*, 2012, 6: 83
- 46 Funane T, Kiguchi M, Atsumori H, et al. Synchronous activity of two people's prefrontal cortices during a cooperative task measured by simultaneous near-infrared spectroscopy. *J Biomed Opt*, 2011, 16: 077011
- 47 Cui X, Bryant D M, Reiss A L. NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation. *Neuroimage*, 2012, 59: 2430–2437
- 48 Ikeda S, Nozawa T, Yokoyama R, et al. Steady beat sound facilitates both coordinated group walking and inter-subject neural synchrony. *Front Hum Neurosci*, 2017, 11: 147
- 49 Zheng L, Chen C, Liu W, et al. Enhancement of teaching outcome through neural prediction of the students' knowledge state. *Hum Brain Mapp*, 2018, 39: 3046–3057
- 50 Liu J, Zhang R, Geng B, et al. Interplay between prior knowledge and communication mode on teaching effectiveness: Interpersonal neural synchronization as a neural marker. *Neuroimage*, 2019, 193: 93–102
- 51 Hasson U, Ghazanfar A A, Galantucci B, et al. Brain-to-brain coupling: A mechanism for creating and sharing a social world. *Trends Cogn Sci*, 2012, 16: 114–121
- 52 Fu X Y, Jing X X, Shi Q Z. Calculation and analysis of coupling degree of the transportation corridor & economic belt system on the basis of ANN (in Chinese). *J China Railway Soc*, 2010, 32: 85–92 [付晓豫, 荆新轩, 施其洲. 基于神经网络的运输通道-经济带系统的耦合度计算与分析. *铁道学报*, 2010, 32: 85–92]
- 53 Lachaux J P, Rodriguez E, Martinerie J, et al. Measuring phase synchrony in brain signals. *Hum Brain Mapp*, 1999, 8: 194–208
- 54 Canolty R T, Knight R T. The functional role of cross-frequency coupling. *Trends Cogn Sci*, 2010, 14: 506–515
- 55 De Vico Fallani F, Nicosia V, Sinatra R, et al. Defecting or not defecting: How to “read” human behavior during cooperative games by EEG measurements. *PLoS One*, 2010, 5: e14187

- 56 Anguera J A, Boccanfuso J, Rintoul J L, et al. Video game training enhances cognitive control in older adults. *Nature*, 2013, 501: 97–101
- 57 Helfrich R F, Knight R T. Oscillatory dynamics of prefrontal cognitive control. *Trends Cogn Sci*, 2016, 20: 916–930
- 58 Burgess A P. On the interpretation of synchronization in EEG hyperscanning studies: A cautionary note. *Front Hum Neurosci*, 2013, 7: 881
- 59 Dai J J, Li C C. Analysis on the coupling coordination degree between road transport and macro-economy (in Chinese). *Management*, 2017, (1): 212 [代晶晶, 李灿灿. 道路运输与宏观经济的耦合协调度分析. *经营管理者*, 2017, (1): 212]
- 60 Jammalamadaka S R, Sengupta A. *Topics in Circular Statistics*. Singapore: World Scientific, 2001
- 61 Berens P. CircStat: A MATLAB toolbox for circular statistics. *J Stat Softw*, 2009, 31: 1–21
- 62 Roach B J, Mathalon D H. Event-related EEG time-frequency analysis: An overview of measures and an analysis of early gamma band phase locking in schizophrenia. *Schizophr Bull*, 2008, 34: 907–926
- 63 Dumas G, Nadel J, Soussignan R, et al. Inter-brain synchronization during social interaction. *PLoS One*, 2010, 5: e12166
- 64 Schack B, Klimesch W. Frequency characteristics of evoked and oscillatory electroencephalic activity in a human memory scanning task. *Neurosci Lett*, 2002, 331: 107–110
- 65 Schroeder C E, Lakatos P. Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection. *Trends Neurosci*, 2009, 32: 9–18
- 66 Dai B, Chen C, Long Y, et al. Neural mechanisms for selectively tuning into the target speaker in a naturalistic noisy situation. *Nat Commun*, 2018, 9: 2405
- 67 Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlin Process Geophys*, 2004, 11: 561–566
- 68 Baccalá L A, Sameshima K. Partial directed coherence: A new concept in neural structure determination. *Biol Cybern*, 2001, 84: 463
- 69 Sameshima K, Baccalá L A. Using partial directed coherence to describe neuronal ensemble interactions. *J Neurosci Methods*, 1999, 94: 93–103
- 70 Sängér J, Müller V, Lindenberger U. Directionality in hyperbrain networks discriminates between leaders and followers in guitar duets. *Front Hum Neurosci*, 2013, 7: 234
- 71 Koike T, Tanabe H C, Sadato N. Hyperscanning neuroimaging technique to reveal the “two-in-one” system in social interactions. *Neurosci Res*, 2015, 90: 25–32
- 72 Beer R D. Dynamical approaches to cognitive science. *Trends Cogn Sci*, 2000, 4: 91–99
- 73 Froese T, Iizuka H, Ikegami T. From synthetic modeling of social interaction to dynamic theories of brain-body-environment-body-brain systems. *Behav Brain Sci*, 2013, 36: 420–421
- 74 Hari R, Kujala M V. Brain basis of human social interaction: From concepts to brain imaging. *Physiol Rev*, 2009, 89: 453–479
- 75 Müller V, Lindenberger U. Hyper-brain networks support romantic kissing in humans. *PLoS One*, 2014, 9: e112080
- 76 Müller V, Lindenberger U. Cardiac and respiratory patterns synchronize between persons during choir singing. *PLoS One*, 2011, 6: e24893
- 77 Liu D, Liu S, Liu X, et al. Interactive brain activity: Review and progress on EEG-based hyperscanning in social interactions. *Front Psychol*, 2018, 9: 1862
- 78 Astolfi L, Toppi J, Vogel P, et al. Investigating the neural basis of cooperative joint action. An EEG hyperscanning study. In: *The 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2014. 4896–4899
- 79 Astolfi L, Toppi J, Casper C, et al. Investigating the neural basis of empathy by EEG hyperscanning during a Third Party Punishment. In: *The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2015. 5384–5387
- 80 Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 1998, 393: 440–442
- 81 He Y, Chen Z J, Evans A C. Small-world anatomical networks in the human brain revealed by cortical thickness from MRI. *Cerebr Cortex*, 2007, 17: 2407–2419
- 82 Bassett D S, Bullmore E. Small-world brain networks. *Neuroscientist*, 2006, 12: 512–523
- 83 Toppi J, Ciaramidaro A, Vogel P, et al. Graph theory in brain-to-brain connectivity: A simulation study and an application to an EEG hyperscanning experiment. In: *The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2015. 2211–2214
- 84 Sporns O, Chialvo D R, Kaiser M, et al. Organization, development and function of complex brain networks. *Trends Cogn Sci*, 2004, 8: 418–425
- 85 Strogatz S H. Exploring complex networks. *Nature*, 2001, 410: 268–276
- 86 Wang X F, Chen G R. Complex networks: Small-world, scale-free and beyond. *IEEE Circuits Syst Mag*, 2003, 3: 6–20
- 87 Zhang D, Lin Y, Jing Y, et al. The dynamics of belief updating in human cooperation: Findings from inter-brain ERP hyperscanning. *Neuroimage*, 2019, 198: 1–12
- 88 Gel’fand I M, Yaglom A M. Calculation of the amount of information about a random function contained in another such function. *Amer Math Soc Transl Ser*, 1959, 2: 191–198
- 89 Wen X, Mo J, Ding M. Exploring resting-state functional connectivity with total interdependence. *Neuroimage*, 2012, 60: 1587–1595
- 90 Geweke J. Measurement of linear dependence and feedback between multiple time series. *J Am Stat Assoc*, 1982, 77: 304–313

- 91 Gruber T, Müller M M. Oscillatory brain activity dissociates between associative stimulus content in a repetition priming task in the human EEG. [Cerebr Cortex](#), 2004, 15: 109–116
- 92 Klimesch W, Schack B, Schabus M, et al. Phase-locked alpha and theta oscillations generate the P1-N1 complex and are related to memory performance. [Cogn Brain Res](#), 2004, 19: 302–316
- 93 Ijspeert A J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review. [Neural Networks](#), 2008, 21: 642–653
- 94 Klimesch W. Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. [Trends Cogn Sci](#), 2012, 16: 606–617
- 95 Tallon-Baudry C. Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation. [Trends Cogn Sci](#), 1999, 3: 151–162
- 96 Mäkinen V, Tiitinen H, May P. Auditory event-related responses are generated independently of ongoing brain activity. [Neuroimage](#), 2005, 24: 961–968
- 97 Mazaheri A, Picton T W. EEG spectral dynamics during discrimination of auditory and visual targets. [Cogn Brain Res](#), 2005, 24: 81–96
- 98 Astolfi L, Cincotti F, Mattia D, et al. Comparison of different cortical connectivity estimators for high-resolution EEG recordings. [Hum Brain Mapp](#), 2007, 28: 143–157
- 99 Hasson U, Furman O, Clark D, et al. Enhanced intersubject correlations during movie viewing correlate with successful episodic encoding. [Neuron](#), 2008, 57: 452–462
- 100 Shamay-Tsoory S G, Mendelsohn A. Real-life neuroscience: An ecological approach to brain and behavior research. [Perspect Psychol Sci](#), 2019, 14: 841–859
- 101 Shamay-Tsoory S G, Saporta N, Marton-Alper I Z, et al. Herding brains: A core neural mechanism for social alignment. [Trends Cogn Sci](#), 2019, 23: 174–186
- 102 Vasil J, Badcock P B, Constant A, et al. A world unto itself: Human communication as active inference. [Front Psychol](#), 2020, 11: 417
- 103 Morgan H M, Muthukumaraswamy S D, Hibbs C S, et al. Feature integration in visual working memory: Parietal gamma activity is related to cognitive coordination. [J Neurophysiol](#), 2011, 106: 3185–3194
- 104 Tseng P, Chang Y T, Chang C F, et al. The critical role of phase difference in gamma oscillation within the temporoparietal network for binding visual working memory. [Sci Rep](#), 2016, 6: 32138
- 105 Kumar G V, Kumar N, Roy D, et al. Segregation and integration of cortical information processing underlying cross-modal perception. [Multisens Res](#), 2018, 31: 481–500
- 106 Tang X, Wu J, Shen Y. The interactions of multisensory integration with endogenous and exogenous attention. [Neurosci Biobehav Rev](#), 2016, 61: 208–224
- 107 Astolfi L, Cincotti F, Mattia D, et al. Simultaneous estimation of cortical activity during social interactions by using EEG hyperscannings. In: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 2010. 2814–2817
- 108 Chiu P H, Kayali M A, Kishida K T, et al. Self responses along cingulate cortex reveal quantitative neural phenotype for high-functioning autism. [Neuron](#), 2008, 57: 463–473
- 109 Lu K, Hao N. When do we fall in neural synchrony with others? [Soc Cogn Affect Neurosci](#), 2019, 14: 253–261
- 110 Liu T, Pelowski M. Clarifying the interaction types in two-person neuroscience research. [Front Hum Neurosci](#), 2014, 8: 276

Summary for “人类互动脑-脑耦合的计算方法”

Computational methods of brain-to-brain coupling during human interaction

Yiwen Wang^{1,2*}, Xue Yang^{1,2}, Xiaoqiang Yao^{1,2} & Chao Fu^{1,2}¹ School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;² Institute of Psychological and Cognitive Sciences, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China* Corresponding author, E-mail: wangeven@126.com

Hyperscanning—the simultaneous recording of hemodynamic or neuroelectric activity of the brain—is the new technology to directly observe the brain communication between individuals. Since the publication of the first hyperscanning study in 2002, it has developed rapidly in the past decade. Brain-to-brain coupling (BBC) technology of human interaction was widely used in the research of action coordination, cooperative game, classroom teaching and other interactive tasks, which involved the use of functional magnetic resonance imaging (fMRI), Electroencephalogram (EEG), magnetoencephalography (MEG), functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) and other neuroimaging technologies. In addition, hyperscanning research experienced a leap from pseudo-interaction to real interaction, a leap from a strictly controlled laboratory paradigm to the “field research” paradigm in nature situations. Based on the differentiation and analysis of the core concepts such as coupling and synchronization, taking the development of time and technology as the main line, this paper reviewed the common BBC indicators and their application conditions, introduced the related theories and forecasted the future research direction of BBC.

In hyperscanning study, BBC refers to the interaction and influence of two or more brains, or between two or more brain regions within a single brain, while the inter-brain synchronization (IBS) refers to the consistency (relative stability) in frequency, phase, and other characteristics of signals from different brain or different regions of the brain. Thus, the similarities and differences between hyperscanning, BBC and IBS can be summarized as follows: Hyperscanning is the technique of recording the neural activity of two or more brains simultaneously. BBC refers to the interaction or interaction between two or more brains. BBC sometimes manifests as IBS, the degree of IBS can represent the strength of BBC in this case, but BBC is not the same as IBS: (1) In addition to IBS, BBC can also be manifested as functional connections and interactions between the brains; (2) due to the possibility of pseudo-synchronization, the occurrence of IBS does not mean that there must be BBC.

In the field of physics and electronic engineering, the characteristics of a signal can be described by multiple indicators such as amplitude, period, frequency and phase. Accordingly, neurologic studies have found that brain activity induced by external events may take the form of phase response, frequency response, amplitude response, and production of new components. Therefore, it is not surprising that many different indicators are used to characterize the strength of BBC in existing hyperscanning studies. These indicators including the circular correlation coefficient (CCorr), wavelet transform coherence (WTC), directed coherence, phase-locking value (PLV), the coupling indexes based on the event-related potentials (ERP) such as the latency difference and the amplitude difference, the coupling indexes based on the Graph Theory such as the shortest path length, global efficiency, local efficiency, divisibility, modularity, small-world network.

Through the review, we found the following three issues deserve the attention of the future hyperscanning research. Firstly, as different coupling indicators have different characteristics and applicable conditions, we suggest that the selection of indicators should be based on specific research methods, technical equipment and research problems. There are no best indicators, only the most suitable ones. Secondly, the existing theory of BBC is not complete, integrating existing theories and proposing theories with stronger explanatory power should be the focus of future hyperscanning theory research. Thirdly, there are many forms of coupling in neural processing, and the meaning of coupling is different in different forms. Therefore, it is necessary to take into account the comprehensive consideration of the specific research task type, interactive mode and other factors when discussing the significance of coupling.

hyperscanning, brain-to-brain coupling, inter-brain synchronization, social interaction, coupling intensity

doi: [10.1360/TB-2020-0642](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0642)