

学术前沿专栏:可激发介质网络动力学

【特约主持人】弭元元:清华大学长聘副教授,国家自然科学基金优秀青年基金获得者

【主持人按语】1958年,Frédéric Bremer发表了关于脑波性质、起源、同步性及功能意义的开创性综述,系统梳理了相关理论与实验数据.历经半个多世纪的发展,皮层节律研究现已演进为神经科学中多学科交叉融合的重要领域.网络振荡现象不仅吸引着致力于从生物物理机制解读网络行为的神经生理学家,也为理论学家提供了理想窗口,用以探索生物物理学与突触环路如何通过相互作用涌现出集体网络动力学特征.鉴于认知过程涉及大规模脑结构网络的协同运作,阐明不同脑区间间的神经元相互作用显得尤为重要——这一研究目标正日益通过多电极记录与先进成像技术的结合实现.值得注意的是,同步振荡(即广义的神经元同步)可能在同时参与认知过程的神经群体间发挥关键作用,实现精准的时序协调与信息交流.

这些理论机制在研究实践中得到了具体体现:在网络动力学领域,振荡同步现象已在多种耦合振子系统中有重要发现,例如《非线性耦合振子系统的相位-频率同步》研究;在斑图动力学方面,《基于储备池计算的预测机制为奇异态振荡波头轨迹预测》提供了预测波头的新方法,推进了该方向的发展.

非线性耦合振子系统的相位-频率同步

刘维清,林境鸿

(江西理工大学 理学院,江西 赣州 341000)

摘要:跨频耦合下的相位-频率同步反映了不同频率振子之间的相互作用,即频率与相位之间的动态关联.这种现象在大脑中被广泛观察到,它被认为是协调不同脑区并整合多种时间尺度下信息处理的关键机制,帮助大脑处理不同复杂的任务.通过非线性耦合 Poincaré 模型观察 2 种互连结构中的相位-频率同步现象,并通过频谱分析确定不同频率振子耦合作用强度对相位频率同步的影响.理论分析了低频振荡相位对高频振荡频率的影响及其机制.该研究不仅可以丰富振子同步动力学行为研究,还有助于理解大脑不同区域之间的功能协调机制,并为神经网络的建模与优化提供新的视角.

关键词:神经元;跨频耦合;相位-频率同步;锁相;频谱分析;Poincaré 模型

中图分类号:O415.3

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2025)06-0001-07

具有不同频率的耦合神经元的集群行为与大脑的功能实现密切相关^[1-2].大脑皮层中,不同频率的神经元振荡同时存在并相互作用,形成不同形式的脑电波如 α 波(8~13 Hz), β 波(13~30 Hz), γ 波(30~80 Hz),

收稿日期:2025-01-25;**修回日期:**2025-02-23.

基金项目:国家自然科学基金(12465008).

作者简介(通信作者):刘维清(1977—),男,江西兴国,江西理工大学教授,博士,研究方向为理论物理,E-mail:lwq_jx@163.com.

引用本文:刘维清,林境鸿.非线性耦合振子系统的相位-频率同步[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(6):1-7.
(Liu Weiqing, Lin Jinghong. Phase-frequency synchronization of the nonlinear coupled neuron oscillators system [J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(6): 1-7. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.01.25.0001.)

θ 波(4~7 Hz)等.大脑不同区域的神经元产生多种频率的神经振荡,其相位、幅值与频率之间存在复杂的相互作用.理解这些复杂相互作用下形成的各种形式同步对理解大脑的认知功能与疾病病理机制具有重要作用.其中,跨频耦合^[3-4]是指不同频率范围内的神经振荡之间存在相互调节和交互作用的现象,常表现为相位-幅度耦合,如 θ - γ 和 α - γ 波之间的耦合,相位-相位耦合和相位-频率耦合等.跨频耦合现象不仅与正常的认知功能有关,还与多种脑部疾病的产生机理有着密切联系,尤其在理解癫痫、帕金森病、精神分裂症等许多脑部疾病的产生机理方面扮演着重要角色.

作为跨频率耦合常见的表征之一,相位-振幅耦合(PAC)^[5]是指高频振子振荡的振幅(或功率)受控于低频振子振荡的相位的现象(图 1).这一现象最早发现于海马体中,其中低频的 θ 波相位可以有效调节高频的 γ 波振幅,形成相位-振幅耦合的典型模式^[6-7].相位-振幅耦合揭示了大脑中不同频率振荡之间的协同作用,并在记忆^[8]、注意力^[9]、学习^[10]等大脑活动过程中扮演了重要角色.此外,跨频率耦合的另一种重要表现形式相位-频率耦合^[11].它是指耦合振子系统中,高频振荡的振子的振荡频率受低频振荡的相位调控的现象,其在大脑功能实现如认知过程^[12-13]中发挥着关键作用.两者在神经信号中的表现和测量方法存在显著差异.相位-幅度耦合通常是通过提取高频振荡信号的振幅,并检查其与低频振荡相位之间的关系来进行测量.而相位-频率耦合更多关注的是低频相位调控高频振荡的频率的现象,而非振幅的调制.在无噪声环境下的密集放电的锥体-中间神经元高频振荡网络中,观察到这种相位频率调制现象,其中涵盖了连续性或间歇性的跨频耦合设置^[14].在低频振荡调制的最小锥体-中间神经元模型中,当低频振荡输入达到峰值时,无论输入目标是锥体细胞还是抑制细胞^[15],都会导致高频振荡加速.尽管相位-频率耦合的研究尚处于起步阶段,但其在强耦合神经网络中频繁出现,尤其在强耦合作用下的低频振荡与高频振荡之间表现得更加显著.在这些网络中,低频振荡的相位不仅可能调节高频振荡的振幅,还可能对其频率产生显著的影响.这样的耦合效应在不同的神经活动模式中发挥重要作用,尤其是在需要精确调节不同频率振荡之间相互作用的大脑功能过程中.

在各种神经成像技术所记录的大脑信号(如脑电图^[16](EEG)以及颅内记录^[17-18])中,研究者已发现相位-频率耦合广泛存在于大脑的多个神经网络中.相位-频率耦合不仅揭示了大脑不同频率振荡之间的相互作用,还提供了深入理解神经活动协调和信息传递机制的重要线索^[19-20].因此,更加深入地理解人类大脑不同脑区之间产生的相位-频率耦合机制在大脑功能中的应用具有重要意义.相比于复杂的生物神经元模型,Poincaré 模型^[21]的简洁性有助于理论上解析描述耦合神经元振子系统中的跨频耦合现象,进而帮助理解大脑不同区域之间的相互作用.Poincaré 模型不仅提供了对系统全局参数的深入理解,还可以分析网络参数对神经元的集体行为^[22-23]的影响.通过 Poincaré 模型的 2 种主要连接结构(外源性输入和相互作用)构建跨频率耦合模型,分析大脑神经网络中的相位-频率耦合.在外源性输入作用下,通过引入频率调节,可以有效激发低频振子相位与高频振荡频率之间的耦合,且强耦合条件下这一现象更加显著.此外,相互作用结构下,振子之间的作用赋予相位-频率耦合新的表现形式,连接的强化不仅有助于相位-频率耦合现象的产生,还能显著增强低频振荡相位对高频振荡频率的影响.这些结果为理解大脑神经网络中跨频率耦合的机制提供了重要的理论支持,并为探索大脑功能的动态特性提供了新的视角.

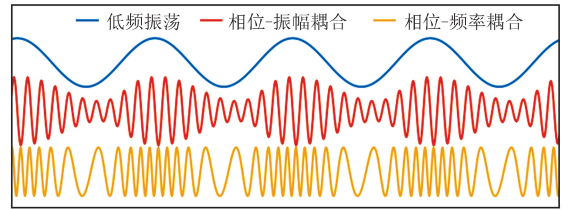


图1 跨频耦合

Fig. 1 Cross-frequency coupling

1 模型

采用耦合 Poincaré 模型振子如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_f = \gamma x_f (a_f - \rho_f) - y_f \omega_f - \epsilon_s y_f x_s, \dot{y}_f = \gamma y_f (a_f - \rho_f) + x_f \omega_f + \epsilon_s x_f x_s, \\ \dot{x}_s = \gamma x_s (a_s - \rho_s) - y_s \omega_s - \epsilon_f y_s x_f, \dot{y}_s = \gamma y_s (a_s - \rho_s) + x_s \omega_s + \epsilon_f x_s x_f, \end{cases} \quad (1)$$

其中, x, y 为振子状态 2 维分量;下标 f, s 分别对应高频和低频;松弛参数 $\gamma=1, a(a_f=a_s=6)$ 为固有振幅;振幅 $\rho=\sqrt{x^2+y^2}$; ω 为固有角频率; ϵ_f, ϵ_s 分别为高频对低频和低频对高频的耦合作用强度.振子之间的相

互作用通过乘性耦合实现.单个振子的相位定义为 $\theta = \arctan(y/x)$.高频振荡模拟人脑的海马体^[10],纹状体以及其他的大脑区域中的快频信号.快频信号常常被认为是与感知、记忆存储等认知过程相关的动态过程.低频振荡模拟大脑感觉皮质层的各种感觉信号,其与刺激响应和感觉信号的传递密切相关.高频和低频振荡之间的相互作用有利于在大脑不同区域间传递信息并协调神经活动,进而影响大脑的认知功能和感知处理能力.

2 外源性输入结构

首先观察高频振子在低频振子的作用下产生相位-频率耦合现象.模型(1)中取 $\epsilon_f = 0$.此时,高频振子仅受到低频振子的影响而不会反向影响低频振子,其中 ϵ_s 表示低频振子对高频振子的驱动耦合作用强度.不失一般性,低频振子的初始角频率取 $\omega_s \approx 0.478$ Hz(图 2(a)),高频振子的角频率 $\omega_f \approx 4.78$ Hz.耦合强度 $\epsilon_s = 2$ 时(图 2(b)),高频振荡(红实线)在低频振子的作用下,振幅并不受低频振荡的影响而保持初始振幅值 $a = 6$,而其振荡频率受低频振荡(蓝实线)的相位变化而周期性地发生变化,且变化周期与低频振荡的相位变化周期一一对应,即高频振荡的频率随着低频振荡相位变化而相应地变化而产生相位-频率耦合.耦合强度增加($\epsilon_s = 4$,图 2(c))后,在一个低频振荡的相位变化周期($0 \sim 2\pi$)内,高频振荡的频率波动范围增加,其时间序列表现为具有更大的密集区和稀疏区的区分度.这表明随着耦合强度的增加,低频振荡对高频振荡频率的调控效应变得更加显著,频率调节的区间更宽.高频振子在耦合强度 $\epsilon_s = 2$ 时,在低频振子驱动下,高频振子的主要频率分量由原来的 4.78 Hz 展宽为 2.8~6.7 Hz 如图 2(d)(红线),当耦合强度 $\epsilon_s = 4$ 时,频谱的频率范围明显增宽至 0.95~8.60 Hz 如图 2(d)(绿线)所示,频率展宽效应更加明显,这表明低频振荡相位变化对高频振荡的频率调控作用变得更加显著.为了确定低频振子的耦合作用强度对相位-频率耦合的影响,分别计算高频分量在耦合强度 $\epsilon_s = 0 \sim 4$ 时的频率变化幅度,以进一步量化低频振荡相位分量对高频振荡频率调节的影响.对不同耦合强度下高频振子信号进行希尔伯特变换,并提取其瞬时频率以计算其瞬时频率的变化幅度(瞬时频率的最大值与最小值之差)如图 2(e)所示.结果表明,随着耦合强度的增加,瞬时频率的变化幅度呈线性增长趋势.例如,当耦合强度从 1 增加到 4 时,频率表变化幅度从 3.8 Hz 增长至 7.6 Hz.在耦合强度 $\epsilon_s = 0$ 时,高频振子表现为单频振荡,其频率的变化幅度为 0.在耦合强度为 $\epsilon_s = 2$ 时,高频振荡的瞬时频率变化幅度约为 3.8 Hz,而 $\epsilon_s = 4$ 时,高频振荡的瞬时频率变化幅度约为 7.6 Hz.

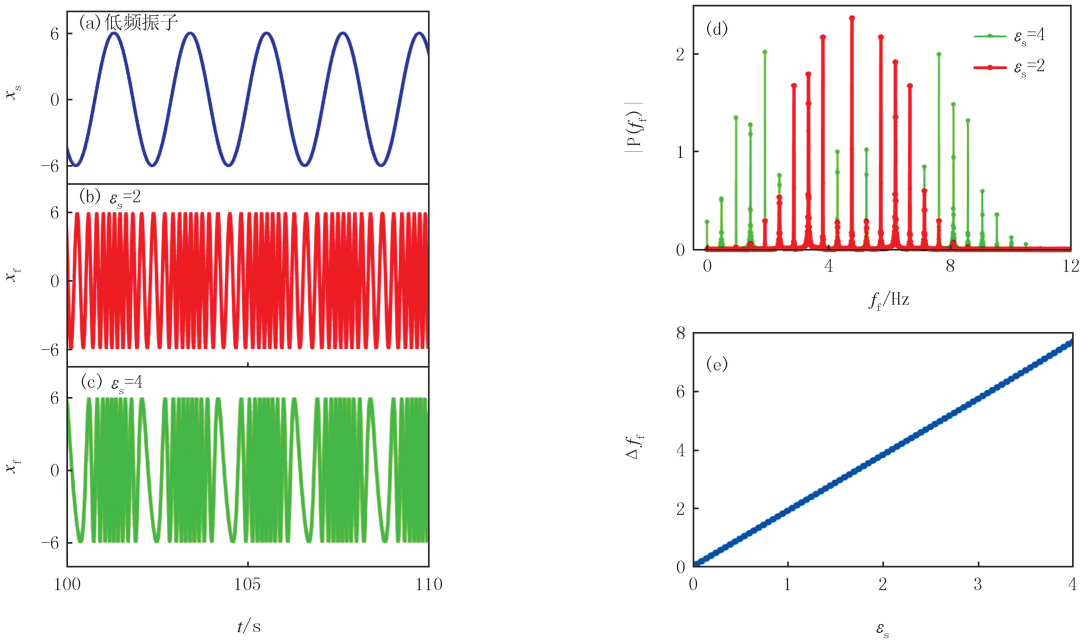


图2 低频振子对高频振子的影响($f_s=0.478$ Hz, $f_f=4.78$ Hz)
Fig.2 The influences of a slow oscillator on a fast oscillator($f_s=0.478$ Hz, $f_f=4.78$ Hz)

同样地,低频振子在高频驱动下,会叠加高频成分(图 3).耦合强度 $\epsilon_f = 2$ 时,叠加的高频振荡幅度较小,

出现了 4.3 Hz 和 5.178 Hz 等新频率;当 $\epsilon_s = 4$ 时,高频振荡的幅度增加,高频频谱峰高上升,原低主频 (0.478 Hz) 峰高下降,新频峰升高.低频振子受到高频振子的调制.

3 相互作用结构

同一个脑区中,不仅低频神经元对高频神经元有作用,高频神经元也会对低频神经元产生反向相互作用.不同频率的神经元之间的相互作用在大脑功能的实现中发挥了重要作用.因此,有必要进一步研究高频和低频神经元相互作用下的相位-频率耦合动力学行为,以探索不同频率的振荡如何在大脑区域中相互影响和协调.

为了更清晰地观察相互作用的影响,同时考虑高频和低频振子之间的相互作用,并分析耦合强度 ϵ_f 和 ϵ_s 对相位-频率耦合的影响.图 4(a) 给出了高频振子的瞬时频率的变化幅度随耦合强度变化.结果表明,随着低频振子对高频振子的驱动耦合强度 ϵ_s 的增加,高频振子的振荡频率变化幅度逐渐增加.而高频振子对低频振子的驱动耦合强度 ϵ_f 的增加,对高频振子的振荡频率的影响较小. ϵ_s 增加到一定值时,低频振荡对高频振荡的调制效果占据主导地位,随着 ϵ_s 逐渐增大,瞬时频率的变化幅度也随之增加.当 ϵ_f 和 ϵ_s 均增大到某一临界值时,高频和低频的瞬时频率的变化幅度开始逐渐减小,表现出系统趋于稳定的特性(图 4(a-b) 中的右上角部分).这一现象表明,在强耦合作用下,系统内的相互作用产生了一种内在约束机制,使得高频振荡频率的变化趋于稳定.图 4(b) 展示了低频振子的瞬时频率幅度如何受到 ϵ_f 和 ϵ_s 的调制.与高频振荡不同,在此条件下 ϵ_f 表现为主要控制因素,主导了低频振荡瞬时频率幅度的变化趋势,同时可以发现低频振子的瞬时频率幅度明显大于高频振子.对于给定的某一 ϵ_s 值,当 ϵ_f 增加到一定值时,低频振荡的频率变化幅度突然增加,且此变化幅度远大于低频振荡的频率变化幅度.类似于图 4(a) 的结果,当 ϵ_f 和 ϵ_s 同时增大到某一阈值后,低频振荡瞬时频率幅度也开始逐渐减小(图 4(b) 中的右上角部分),同样呈现出系统的稳定性.这种现象表明,无论是高频还是低频振荡,当耦合强度超越某一临界点时,系统会趋于同步稳态,从而减少频率波动.

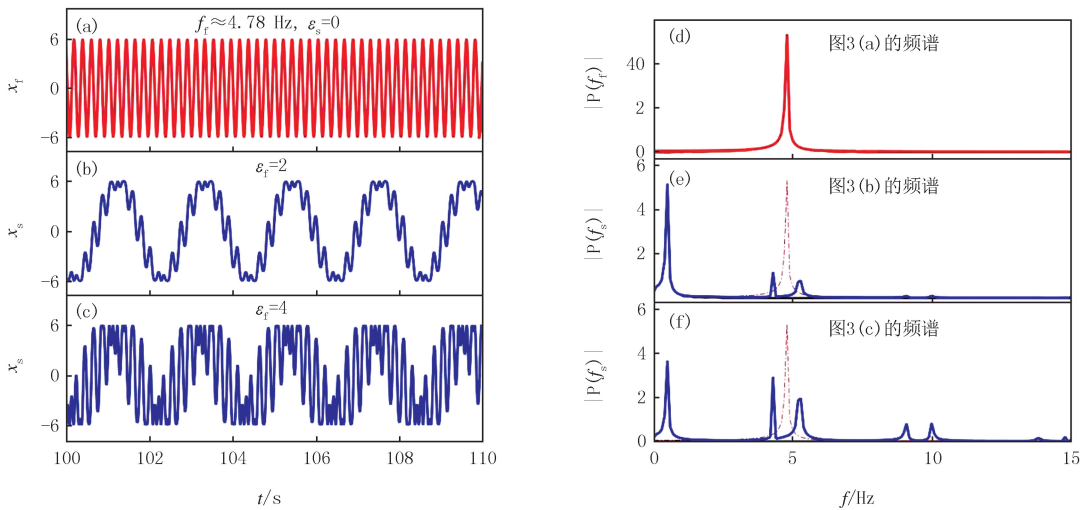


图3 高频振子对低频振子的影响

Fig. 3 The influences of a fast oscillator on a slow oscillator

相位-频率耦合现象发生在振子振子相互作用较小的情况下.高频振荡的频率并未完全同步于低频振荡周期,而是在某些特定的相位位置上发生调节,表现为频率的波动与低频振荡的相位之间存在一定的耦合关系.接下来,通过设置不同的耦合强度,进一步探讨这些耦合强度如何影响系统的同步动力学现象.当 $\epsilon_f = 2$, $\epsilon_s = 3$ 时,2 个振子振荡的作用是相互的,低频振荡的相位影响着高频振荡的频率波动,同时高频振荡的频率波动也对低频振子的振荡波动产生了反馈效应.可以看到,在低频振荡的周期内,低频相位作用于高频振荡的频率分量,同时高频振荡的频率波动通过相位调节作用反馈到低频振荡.图 5(a,d,g) 展示了这一相互耦合的效果,表明高频和低频振荡之间的相互作用不是单向的,而是一个复杂的双向调控过程.随着耦合强度不断增强,系统中高频和低频振荡之间的相互作用逐渐加强,表现出更为显著的耦合特性.这种增强的相互作用促进了部分相位同步现象的产生,如图 5(b,e,h) 所示,从频谱图分析可以清晰地看到,高频和低频振荡的

不同频率分量之间逐渐呈现出互相对应关系,表明两者的耦合并非独立或单向,而是存在复杂的双向调控机制.随着耦合强度的进一步增大,系统中高频振荡和低频振荡的相互作用持续增强,最终会导致相位锁定现象的产生,结果如图 5(c,f,i)所示.当耦合强度达到一定阈值时,高频振荡和低频振荡的相位逐渐趋于紧密同步,形成了一种稳定的相位锁定状态.这种状态表明 2 种振荡之间的耦合作用达到了新的平衡,动态行为从复杂的双向调制过渡到稳定的同步模式.通过频谱图分析可以进一步验证这一现象,当耦合强度超过阈值时,高频振荡和低频振荡的频率分量表现出明确的同步特征,频谱中原本分散的频率成分逐渐集中并对齐.这种频率对齐的行为清晰地揭示了相位锁定过程中,高频和低频振荡之间的耦合机制如何促使其频率和相位达到同步.

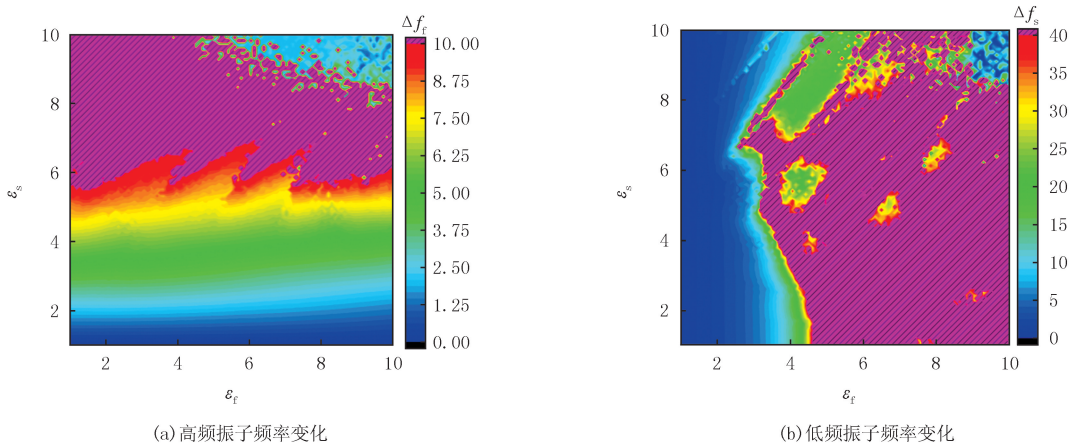


图4 跨频耦合振子的同步相图
Fig. 4 The synchronous phase diagrams of cross-frequency coupling oscillators

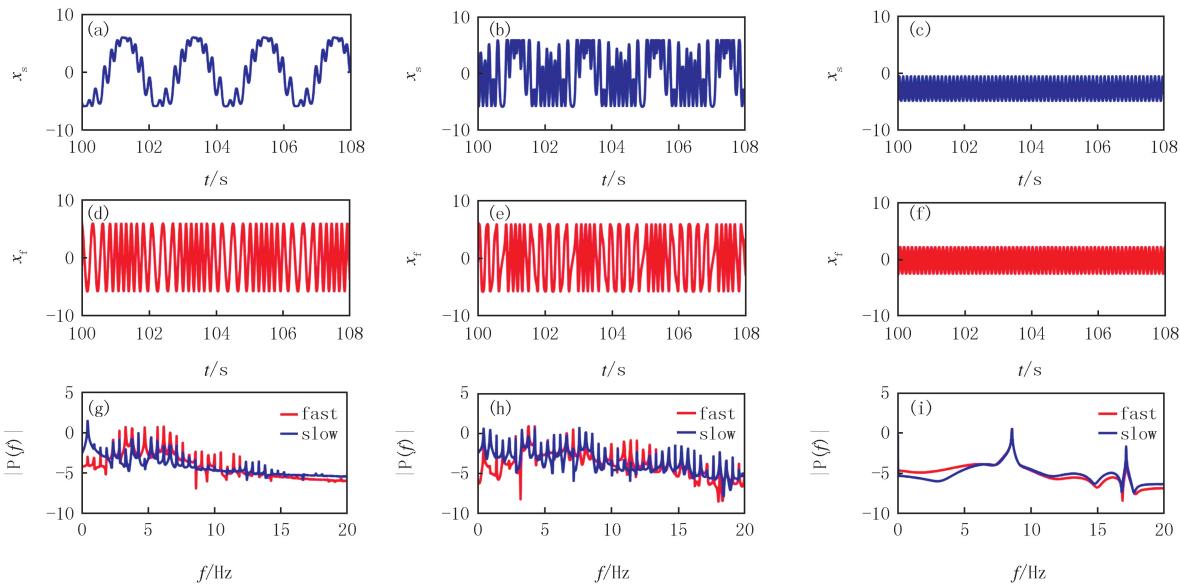


图5 相位-频率耦合的3个示例
Fig. 5 3 examples of phase-frequency coupling

当 $\epsilon_f=0$ 且 $\epsilon_s=2$ 时,系统仅存在低频振荡相位对高频振荡频率的单向影响(图 6(a)).此时,低频振荡的相位调控高频振荡的频率,导致高频振荡的瞬时频率随低频振荡的相位增加而产生周期性的波动,此时,耦合系统出现了相位-频率耦合同步态,即低频相位对高频频率产生了显著的调制效应.

当 $\epsilon_f>0$ 且 $\epsilon_s>0$ 时,低频振荡相位和高频振荡频率之间的相互作用变得更加复杂(图 6).当 $\epsilon_f=\epsilon_s=2$ 振荡的瞬时频率整体上受低频振荡相位的调制,而且也在高频频率对低频振荡相位产生一定反作用的情况下发生了扰动.即高频振荡的频率变化与低频相位基本一致,但伴随着一些微小的扰动;当 $\epsilon_f=2, \epsilon_s=8$ 低频

振荡相位产生的反作用更加明显,进一步产生了频率振荡幅度的变化.

4 理论分析

为了进一步分析相位-频率耦合产生的机制,可以对外源性输入结构下的 Poincaré 模型引入极坐标,令 $x = \rho \cos \theta, y = \rho \sin \theta$, 式(1)变为:

$$\begin{cases} \dot{\rho}_f = (a - \rho_f)\rho_f, \dot{\theta}_f = \omega_f + \epsilon_s \rho_s \cos(\theta_s), \\ \dot{\rho}_s = (a - \rho_s)\rho_s, \dot{\theta}_s = \omega_s. \end{cases} \quad (2)$$

其中, ϵ_s 为低频振子对高频振子的驱动作用强度.由 $\dot{\theta}_s = \omega_s$, 可得 $\dot{\theta}_f = \omega_f + \epsilon_s \rho_s \cos(\omega_s t)$. 高频振子的瞬时频率 $f = \frac{\omega_f + \epsilon_s \rho_s \cos(\omega_s t)}{2\pi}$. 可得, 高频振子的频率变化幅度 $\Delta f = \frac{\omega_f + \epsilon_s \rho_s}{2\pi} - \frac{\omega_f - \epsilon_s \rho_s}{2\pi} = \frac{\epsilon_s \rho_s}{\pi}$. 因为低频振子为简谐振动, 振幅 $\rho_s = a$ 恒定. 上式可写为

$$\Delta f = \frac{\epsilon_s a}{\pi}. \quad (3)$$

高频振子瞬时频率的变化幅度 Δf 与 ϵ_s 成正比, 斜率为 $a/\pi = 6/\pi$, 与图 2(e) 结果一致. 此外, 还分别计算了 $a=4, 6, \epsilon_s=2, 3$ 的情况, 数值计算结果与式(3)均一致. 验证了低频振子固有振幅 a 对 Δf 的调控作用. 相位-频率耦合是一种普遍存在的机制, 当外部信号直接作用于原信号的频率分量时, 这种现象就会产生. 它反映了不同频率振荡之间的相互调制关系, 尤其是在低频振荡信号相位影响高频振荡信号频率动态时.

5 结 论

探讨了高频振荡与低频振荡之间的相位-频率耦合现象, 重点分析了不同耦合拓扑结构下神经元振荡的同步行为及其对大脑功能的潜在影响. 通过 Poincaré 模型的数值仿真, 揭示了低频振荡相位如何调节高频振荡的频率, 进而产生相位-频率耦合效应. 研究发现, 随着耦合强度的增加, 高频振荡的频率逐渐趋向低频振荡周期的相位, 且这种效应在耦合强度增大时变得更加显著. 此外, 通过频谱分析和瞬时频率标准差计算, 量化了低频振荡相位对高频振荡频率调节的强度, 结果表明高频振荡的频率波动随着耦合强度的增大而变得更加剧烈. 进一步探讨了相互作用结构下的相位-频率耦合现象. 当高频振荡和低频振荡在同一脑区内相互作用时, 系统表现出非锁相态到锁相态的过渡, 且两者之间的相互作用可以通过双向调节机制进行描述. 特别是在双向相互作用条件下, 高频振荡频率和低频振荡相位之间的耦合效应变得更加复杂和显著. 最后, 探讨了相位-频率耦合的产生机制,

即外源低频振荡信号对原高频振荡信号频率成分的直接调制作用. 通过对 Poincaré 模型的极坐标化处理, 得到了高频振子频率幅度与低频振子耦合强度及固有幅度之间的函数关系. 该解析解与数值计算结果高度吻合, 验证了模型的有效性和理论分析的准确性. 总的来说, 本研究为理解大脑神经网络中跨频率耦合的机制提供了新的见解, 展示了低频振荡相位对高频振荡频率的调控效应, 并为未来探索大脑功能的动态特性和跨

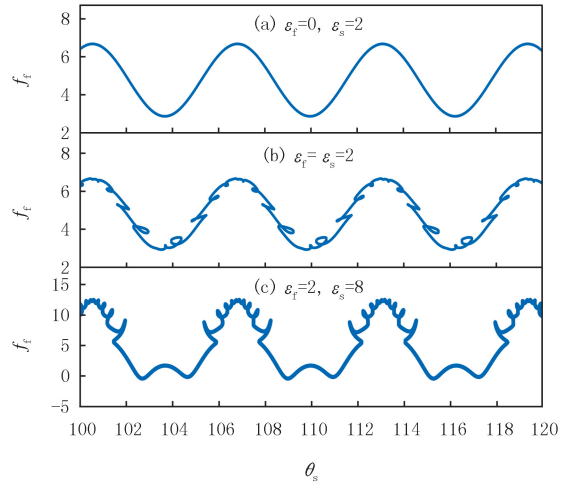


图6 高频振荡频率对低频振荡相位的响应曲线

Fig.6 The response curves of low-frequency oscillation phase to high-frequency oscillation frequency

频率交互提供了重要的视角.这些研究成果对于深入理解大脑神经网络的功能和潜在的认知处理机制具有重要意义,未来可用于进一步研究神经科学、脑电图分析及神经调控等领域.

参 考 文 献

[1] HEBB D O.The first stage of perception:growth of the assembly[J].The Organization of Behavior,1949,4(60):78-60.

[2] BUZSÁKI G.Neural syntax:cell assemblies,synapsembles,and readers[J].Neuron,2010,68(3):362-385.

[3] CANOLTY R T,EDWARDS E,DALAL S S,et al.High gamma power is phase-locked to Theta oscillations in human neocortex[J].Science,2006,313(5793):1626-1628.

[4] 何沛妍,杨丽新,党元辰,等.电磁效应下耦合时滞神经元动力学分析[J].东北师大学报(自然科学版),2023,55(4):96-104.

HE P Y,YANG L X,DANG Y C,et al.Dynamic analysis of coupled neurons with time delay under electromagnetic effect[J].Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition),2023,55(4):96-104.

[5] CANOLTY R T,KNIGHT R T.The functional role of cross-frequency coupling[J].Trends in Cognitive Sciences,2010,14(11):506-515.

[6] BUZSÁKI G,LEUNG L W,VANDERWOLF C H.Cellular bases of hippocampal EEG in the behaving rat[J].Brain Research,1983,287(2):139-171.

[7] BUZSÁKI G,BUHL D L,HARRIS K D,et al.Hippocampal network patterns of activity in the mouse[J].Neuroscience,2003,116(1):201-211.

[8] ROUX F,UHLHAAS P J.Working memory and neural oscillations: α - γ versus θ - γ codes for distinct WM information? [J].Trends in Cognitive Sciences,2014,18(1):16-25.

[9] LAKATOS P,KARMOS G,MEHTA A D,et al.Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection[J].Science,2008,320(5872):110-113.

[10] TORT A B L,KOMOROWSKI R W,MANNS J R,et al.Theta-gamma coupling increases during the learning of item-context associations [J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2009,106(49):20942-20947.

[11] JENSEN O,COLGIN L L.Cross-frequency coupling between neuronal oscillations[J].Trends in Cognitive Sciences,2007,11(7):267-269.

[12] LISMAN J E,JENSEN O.The Theta-gamma neural code[J].Neuron,2013,77(6):1002-1016.

[13] AXMACHER N,HENSELER M M,JENSEN O,et al.Cross-frequency coupling supports multi-item working memory in the human hippocampus[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2010,107(7):3228-3233.

[14] FONTOLAN L,KRUPA M,HYAFIL A,et al.Analytical insights on Theta-gamma coupled neural oscillators[J].Journal of Mathematical Neuroscience,2013,3(1):16.

[15] ONSLOW A C E,JONES M W,BOGACZ R.A canonical circuit for generating phase-amplitude coupling[J].PLoS One,2014,9(8):e102591.

[16] RAY S,MAUNSELL J H R.Differences in gamma frequencies across visual cortex restrict their possible use in computation[J].Neuron,2010,67(5):885-896.

[17] MUNIA T T K,AVIYENTE S.Time-frequency based phase-amplitude coupling measure for neuronal oscillations[J].Scientific Reports,2019,9(1):12441.

[18] ROBERTS M J,LOWET E,BRUNET N M,et al.Robust gamma coherence between macaque V1 and V2 by dynamic frequency matching [J].Neuron,2013,78(3):523-536.

[19] HYAFIL A,GIRAUD A L,FONTOLAN L,et al.Neural cross-frequency coupling:connecting architectures,mechanisms,and functions [J].Trends in Neurosciences,2015,38(11):725-740.

[20] HYAFIL A.Misidentifications of specific forms of cross-frequency coupling:three warnings[J].Frontiers in Neuroscience,2015,9:370.

[21] GU C G,ROHLING J H T,LIANG X M,et al.Impact of dispersed coupling strength on the free running periods of circadian rhythms[J].Physical Review E,2016,93(3):032414.

[22] GU C G,YANG H J,RUAN Z Y.Entrainment range of the suprachiasmatic nucleus affected by the difference in the neuronal amplitudes between the light-sensitive and light-insensitive regions[J].Physical Review E,2017,95(4):042409.

[23] 刘维清,石世嫔.耦合振子系统中振幅包络同相同步向反相同步的转变[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(5):43-51.

LIU W Q,SHI S P.Amplitude envelope transition from in-phase to anti-phase synchronization in coupled oscillators system[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(5):43-51.

Web,Cham:Springer,2018:593-607.

[15] LIU P,WEI H C,HOU X C,et al.LinkSAGE:optimizing job matching using graph neural networks[EB/OL].[2025-02-10].https://arxiv.org/abs/2402.13430.

[16] BROWN T B,MANN B,RYDER N,et al.Language models are few-shot learners[C]//Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems.[S.l.]:ACM,2020:1877-1901.

[17] XUE L T,CONSTANT N,ROBERTS A,et al.MT5:a massively multilingual pre-trained text-to-text transformer[EB/OL].[2025-02-10].https://arxiv.org/abs/2010.11934.

[18] LECUN Y,BENGIO Y,HINTON G.Deep learning[J].Nature,2015,521(7553):436-444.

[19] GRAVES A.Long short-term memory[M]//Supervised Sequence Labelling with Recurrent Neural Networks.Berlin:Springer,2012:37-45.

[20] DEVLIN J,CHANG M W,LEE K,et al.BERT:pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[EB/OL].[2025-02-10].https://arxiv.org/abs/1810.04805.

Job matching model based on graph convolutional networks

Sun Qingying, Zhou Han, Liu Siyan, Li Jiahong, Xi Qian

(School of Computer Science and Technology, Huaiyin Normal University, Huaian 223300, China)

Abstract: We propose a job matching model based on Graph Convolutional Networks(GCN). The model firstly represents company job postings and user resumes, then models user resumes and job requirements using the graph structure in GCN. By leveraging graph convolutional network propagation and aggregation operations, a representation that better reflects the matching relationship is obtained, ultimately achieving the matching of job postings and resumes. Experimental results show that the model proposed in this paper improves the *F1* score by 3.3 percentage points compared with the baseline model, effectively enhancing the matching performance between job postings and user resumes.

Keywords: graph convolutional networks; graph structure; job matching; natural language processing

[责任编辑 陈留院 杨浦]

(上转第 7 页)

Phase-frequency synchronization of the nonlinear coupled neuron oscillators system

Liu Weiqing, Lin Jinghong

(School of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Phase-frequency synchronization, as one kind of the cross frequency couplings, reflects the interaction between neurons of different frequencies, that is, the dynamic association between frequency and phase. This phenomenon is widely observed in the brain. It is considered to be a key mechanism for coordinating different brain regions and integrating information processing at multiple time scales, helping the brain to handle different complex tasks. The phase-frequency synchronization phenomenon in the two interconnected structures was observed through the nonlinear coupled Poincaré model, and the influence of the intensity of coupling between neurons of different frequencies on the phase-frequency coupling was determined through spectral analysis. Theoretical analysis was conducted to further explore the influence of the phase of low-frequency oscillations on high-frequency oscillations and its regulatory mechanism. This study can not only enrich the study of neuronal synchronization dynamics behavior, but also help to understand the functional coordination mechanism between different brain regions and provide a new perspective for the modeling and optimization of neural networks.

Keywords: neuron; cross-frequency coupling; phase-frequency synchronization; phase locking; spectral analysis; Poincaré model

[责任编辑 杨浦 刘洋]