

语言与动作的神经网络耦合：基于EEG的研究

宣麒麟¹, 杨慧²

1. 共青科技职业学院, 九江市, 江西省, 中国

2. 昆明理工大学, 昆明市, 云南省, 中国

摘要: 近年来, 随着认知神经科学的发展, 语言与动作之间的关系成为研究的热点领域之一。许多研究表明, 语言不仅仅是大脑中单独处理的过程, 还与身体动作密切相关。本研究旨在探讨语言与动作在大脑神经网络中的耦合机制, 采用脑电图 (EEG) 技术对实验参与者在语言任务与动作任务双重条件下的脑活动进行实时监测与分析。通过结合不同的实验条件 (语言处理、动作执行及二者结合), 本研究评估了大脑中涉及语言与运动功能的神经网络如何相互作用, 特别是前额叶、运动皮层及颞叶区域的协同活动。研究结果表明, 语言与动作任务之间存在显著的神经耦合, 揭示了大脑中语言与动作共享的神经资源, 支持了语言与动作共用神经理论的观点。本研究同时也为语言学习、康复治疗等领域提供了新的神经科学依据。

关键词: 神经网络耦合; 语言处理与动作执行; 脑电图 (EEG); 认知神经科学

Neural Coupling of Language and Action: An EEG-Based Study

Qilin Xuan¹, Hui Yang²

1. Gongqing Institute of Science and Technology, Jiujiang City, Jiangxi Province, China

2. Kunming University of Science and Technology, Kunming City, Yunnan Province, China

Abstract: In recent years, with the development of cognitive neuroscience, the relationship between language and action has become a hot topic of research. Many studies have shown that language is not solely processed in the brain, but is closely related to bodily actions. This study aims to explore the coupling mechanism between language and action in the brain's neural networks. Electroencephalography (EEG) technology was used to monitor and analyze the brain activity of participants in real-time under dual-task conditions involving both language and action tasks. By combining different experimental conditions (language processing, action execution, and their combination), the study evaluated how neural networks involved in language and motor functions interact, with a focus on the synergistic activity in the prefrontal cortex, motor cortex, and temporal lobe regions. The results indicated significant neural coupling between language and action tasks, revealing shared neural resources in the brain for language and action, supporting the theory of Shared Neural Networks for Language and Action (SNNLA). This research provides new neuroscientific insights for fields such as language learning and rehabilitation therapy.

Keywords: Neural Coupling; Language Processing and Action Execution; EEG; Cognitive Neuroscience

1 引言

1.1 研究背景

语言与动作在大脑中的关联性长期以来深受神经科学和认知心理学家的关注。大脑中的语言与运动系统被认为是相互联系的, 尤其在执行与语言

相关的任务时，涉及神经区域与运动相关区域存在协同作用[1]。例如，当人们听到与某些动作相关的动词时，运动皮层会被激活，表明语言处理过程与动作执行的神经机制之间存在交互关系。这种现象已在多项脑成像研究中得到证实，特别是在电生理学研究中，进一步表明语言与动作系统的共享神经基础。

语言与动作共用神经理论（Shared Neural Networks for Language and Action）是探讨这种关系的核心理论。该理论提出，大脑中的语言与动作网络不是独立运行的，而是共用一套神经回路[2]。早期研究发现，在语言产生与动作执行过程中，前额叶、运动皮层以及颞叶之间是相互关联的。这种理论的不断发展为理解语言与动作之间的神经耦合提供了新思路，也为后续实验研究提供了基础。

1.2 研究问题与目的

本研究通过EEG技术探讨语言与动作任务的神经网络耦合机制，其主要研究问题如下：

①单一语言任务和单一动作任务下，大脑的神经活动模式有哪些显著特征？

②同时执行语言任务和动作任务时，大脑的脑电活动是否存在耦合效应？该耦合效应具体表现如何？

③不同脑区之间的神经功能连接与同步性在单任务与双重任务条件下如何变化？

本研究旨在通过EEG技术探讨语言与动作任务的神经网络耦合机制，主要研究目的包括：

①探索单一语言任务和动作任务下的大脑神经活动。

②分析双重任务条件下的脑电活动耦合效应。

③探讨不同脑区间的神经功能连接与同步性。

1.3 研究意义

本研究为理解语言与动作的神经网络耦合机制提供了直接证据。通过EEG技术，揭示语言与动作任务间的耦合效应，为语言习得、康复训练等领域提供神经科学依据。具体而言，在语言康复和动作协调训练中，理解语言与动作的神经耦合机制可以帮助设计更有效的干预措施。此外，该研究也为运动认知与语言处理的理论模型提供了实证支持，进一步推动了神经语言科学与运动神经科学的交叉研究。

2 文献综述

2.1 神经语言科学发展历程

神经语言学的研究历史可以追溯到20世纪早期，随着神经解剖学技术的进步，研究者逐渐揭示了大脑中与语言处理相关的核心区域，如布罗卡区和韦尼克区[3]。这些发现为语言处理的神经基础奠定了基础。20世纪末期，随着神经成像技术的发展，尤其是fMRI、PET等技术的应用，学者们也开始探索更复杂的语言网络和语义加工过程[4]。近年来，EEG等电生理技术因其高时间分辨率，成为探讨语言加工时间动态的有效工具[5]。

2.2 动作执行与大脑运动网络

大脑的运动系统主要由初级运动皮层（M1）、运动前区（PMA）以及额顶网络（PPC）组成，这些区域在动作计划、执行以及控制过程中发挥重要作用[6, 7]。研究表明，动作不仅涉及简单的肌肉活动，还伴随着大脑中复杂的神经活动，特别是在前额叶皮层和运动皮层的共同参与下，动作的规划和执行得以顺利完成。这些发现为进一步探索语言与动作的耦合机制提供了基础。

2.3 EEG在认知与运动神经科学的应用

EEG作为一种高时间分辨率的神经成像技术，在认知神经科学与运动神经科学中具有广泛的应用。通过EEG，可以记录神经元的同步化活动，捕捉大脑在语言处理、动作执行等任务中的神经动力学特征。EEG技术的优势在于能够实时监测脑电活动，使其成为研究语言与动作耦合效应的理想工具[8]。近年来，EEG功率谱分析和事件相关电位（ERP）分析技术的发展进一步推动了认知与运动神经科学的研究。

2.4 语言与动作之间的神经耦合研究现状

近年来，语言与动作神经耦合的研究逐渐兴起。研究表明，语言任务（如动词的处理）会激活与动作相关的脑区，尤其是运动皮层和前额叶[9]。通过脑电和功能成像的双重手段，研究者能够更精确地揭示语言与动作任务的协同活动模式。现有研究的焦点主要集中在语言理解过程中，如何通过动作的关联性，促进语言的加工效率和准确性。

3 研究方法

3.1 参与者

实验对象为健康的右利手成年人，年龄在18-35岁之间，无神经系统疾病或认知障碍。所有参与者

的视力正常或经矫正正常，且均为母语为中文的受试者。参与者在实验前签署知情同意书，并接受简单的语言和动作能力测试，确保他们的任务执行能力符合实验要求。

3.2 实验设计

语言任务：实验中使用词汇识别和句子生成任务，词汇识别任务要求参与者识别屏幕上出现的动词，并进行语义判断；句子生成任务要求参与者根据给定的关键词，生成简短句子。任务中包含动作相关和非动作相关的词汇，借此分析语言与动作的神经耦合效应。

动作任务：实验设计包括手指运动和物体抓握任务，要求参与者根据屏幕提示，执行相应的简单动作。动作任务的难度设置为中等强度，以确保受试者能够在任务期间保持专注而不过度疲劳。

双重任务条件：在双重任务条件下，受试者同时执行语言任务和动作任务。实验通过交替呈现语言和动作刺激，记录大脑在执行双重任务条件下的神经活动，以检测语言与动作之间的神经网络耦合效应。

3.3 数据采集

EEG设备为64通道电极帽，采样率为1000Hz。实验过程中，参与者头戴EEG设备，采集他们在不同任务条件下的脑电信号。脑电信号的采集严格遵守标准操作流程，确保数据的准确性与可重复性。通过收集采集完毕的数据生成可视化图像进行全面分析（图1所示）。

实验过程中，主要监测的脑区包括前额叶（主要负责语言和认知控制）、运动皮层（负责动作执行）、以及颞叶（与语义处理密切相关）。针对分析相关语言的EEG信号数据（图2所示），相关任务动作的EEG信号数据（图3所示），双任务下前额皮质EEG信号数据（图4所示）以及双任务下运动皮层EEG信号数据（图5所示）。以上这些区域是本研究关注的核心脑区，通过对这些区域的脑电活动进行分析，可以揭示语言与动作任务中的神经耦合效应。

3.4 数据分析

EEG数据的预处理包括去伪影（如：眼电伪影和肌电伪影），并使用独立成分分析（ICA）技术进行去噪处理。经过预处理后的数据用于后续功率谱分析和ERP分析，旨在探讨不同任务条件下的神经活动模式。



图1 前额叶和颞叶区域脑电波可视化图像

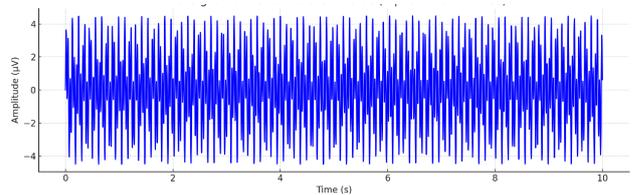


图2. 任务相关语言的 EEG 信号（ α 和 β 波）

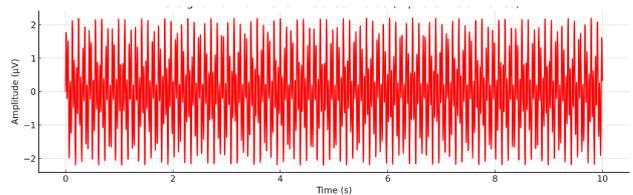


图3. 与任务相关动作的脑电信号（ α 和 β 波）

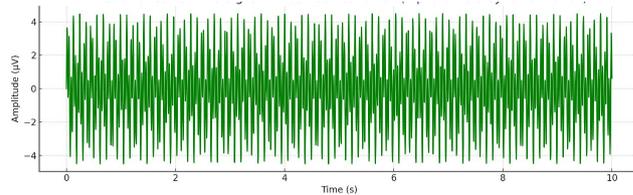


图4. 双任务条件下的前额皮质脑电图信号（ α 和 β 波）

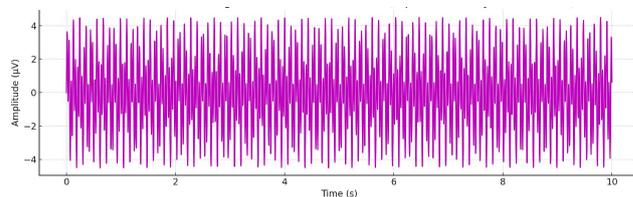


图5. 双任务条件下的运动皮层脑电信号（ α 和 β 波）

功率谱分析用于量化不同频段（如 α 、 β 、 γ 波段）下的脑电活动强度，ERP 分析则关注特定刺激事件引发的时间锁定电位变化，揭示不同任务条件下的神经响应模式。功能连接分析主要用于评估脑区间神经同步性，采用相干性分析和相位同步指数（PSI）等方法，量化前额叶、运动皮层及颞叶之间的神经网络连接强度。

4 研究结果

4.1 单一任务条件下的神经活动

语言任务中（如词汇识别和句子生成），参与者的 EEG 数据表明，前额叶皮层和颞叶区域出现显著的 α 波段和 β 波段活动增强，尤其是在处理与动作相关的词汇时，这些脑区的活动明显强于非动作相关词汇。其中包含了 α 波段（8-12 Hz）和 β 波段（12-30 Hz）的增强信号，由此可看到信号振幅较大，尤其是 β 波段活动更为显著。

动作任务中，运动皮层和前额叶区域的 β 波段活动显著增强，尤其是在手指运动和物体把握任务中，运动皮层的活动强度明显。EEG 数据表明，动作的执行主要涉及运动皮层的活动，前额叶参与了动作的计划和控制，表现为任务开始前的准备电位。

4.2 双重任务条件下的耦合效应

双重任务条件下（同时进行语言和动作任务），EEG 数据显示出语言与动作之间的明显神经耦合效应。在前额叶皮层和运动皮层通道信号中，使用前额叶（如 Fp1, Fp2）和运动皮层（如 C3, C4）的 EEG 信号； α 波和 β 波在同步性表现中，生成两个任务之间的 α 波和 β 波同步信号，反映神经网络的协同活动；在双重任务期间，信号增强反应中，增加 α 波和 β 波的振幅和同步性，显示耦合效应。尤其是在前额叶皮层和运动皮层， α 波和 β 波段的同步性显著增强，表明两种任务之间的神经网络存在协同活动。所以在参与者在处理动作相关语言时，前额叶和运动皮层之间的神经活动时间上有高度一致性，进一步支持了语言与动作共用神经网络的假设。

双重任务条件下，前额叶与运动皮层、颞叶的功能连接强度明显增强，尤其是在语言任务涉及动作语义时，这些区域之间的相位同步性显著提升。相关性分析结果表明，不同脑区间的神经同步性在双重任务条件下表现得更为显著，说明语言与动作任务在执行过程中有共同的神经基础。

4.3 不同脑区间的协同作用分析

EEG 数据中的相关性分析结果揭示了前额叶、运动皮层、颞叶之间的神经协同作用。在双重任务条件下，这些脑区的同步性明显增强，尤其是在动作相关的语言任务中，颞叶和运动皮层的功能连接强度显著增加。研究表明，语言与动作任务的耦合效应不仅涉及这些脑区的个体活动，还包括它们之间的动态协同作用。

5 讨论

5.1 语言与动作神经耦合的理论解释

本研究结果支持了语言与动作共用神经理论的观点。语言任务，特别是涉及动作语义的词汇和句子生成任务，激活了运动皮层与前额叶的神经活动，表明这些区域在语言和动作的执行中具有共享的神经网络。此外，EEG 分析的结果显示，语言与动作任务的同时执行增强了这些脑区之间的时间一致性，进一步证实了语言与动作之间存在神经耦合机制。

5.2 结果与现有文献的对比分析

本研究的发现与现有的神经语言学和运动科学文献相一致。以往的研究表明，动作语义词汇的处理会激活运动皮层，而本研究进一步通过 EEG 实时记录揭示了这些任务之间的协同作用。与之前的 fMRI 研究不同的是，本研究通过 EEG 高时间分辨率的分析，捕捉了语言与动作任务之间的动态神经耦合，为进一步理解它们的时序交互提供了更多证据。

5.3 语言与动作的脑区功能分布

本研究验证了前额叶、运动皮层及颞叶在语言与动作耦合中的重要作用。前额叶不仅在语言任务中负责认知控制，还在双重任务条件下调控动作执行。运动皮层的作用集中在动作的执行和语言中动作语义的处理，颞叶则参与了语义的解码和语言理解。三者之间的协同作用形成了语言与动作共用的神经网络基础，为理解复杂的语言与动作耦合提供了新见解。

5.4 对未来研究的启示

本研究为未来的语言习得和康复训练应用提供了神经科学依据。对于语言学习者，尤其是在学习涉及动作的语言时，增强动作与语言之间的神经耦合可能会提高学习效果。在康复训练中，基于语言与动作的神经耦合，可以设计结合动作与语言的训练任务，帮助脑损伤患者恢复语言和动作功能。未来的研究可以进一步探讨这些机制在不同人群中的差异，以及如何优化训练干预。语言与动作共用的神经网络基础，为理解复杂的语言与动作耦合提供了新见解。

6 结论

通过 EEG 技术，本研究探讨了语言与动作任务的神经网络耦合机制。结果表明，语言任务，尤其是涉及动作语义的任务，激活了运动皮层、前额叶和颞叶之间的神经网络。双重任务条件下，语言与动作的神经网络耦合效应进一步增强，表明这些任务之间存在

神经共享的基础。

语言与动作神经网络耦合的意义在于, 它揭示了大脑在处理语言与动作任务时的复杂协同机制。这一发现不仅为语言与动作的神经科学研究提供了新见解, 也为语言习得、康复训练等领域提供了理论支持, 具有广泛的应用价值。

参考文献

- [1] 李慧红. 浅谈体育锻炼与大脑的相互作用 [J]. 读与写 (教师). 2021, 000(7): 1.
- [2] Blumenthal-Dramé A, Malaia E. Shared Neural and Cognitive Mechanisms in Action and Language: The Multiscale Information Transfer Framework [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science, 2019, 10(2): e1484.
- [3] Geschwind, N. The Organization of Language and The Brain. Science[J], 1970, 170: 940-944.
- [4] Brown C M, Hagoort P. The Cognitive Neuroscience of Language: Challenges and Future Directions [M]. The Neurocognition of Language. Oxford University Press, 1999, 3-14.
- [5] Pylkkänen, Liina; Marantz, Alec. Tracking The Time Course of Word Recognition with MEG[J]. Trends in Cognitive Sciences. 2003-05, 7 (5): 187-189.
- [6] Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, et al. The Primary Motor Cortex: Upper Motor Neurons That Initiate Complex Voluntary Movements[M]. Neuroscience. 2nd edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2001.
- [7] Banker L, Tadi P. Neuroanatomy [M]. Precentral Gyrus. 2019.
- [8] 陈秋云. A Review of the Frontier Application of EEG Technology Abroad. Advances in Clinical Medicine [J]. 2023, 13(09): 14653-14663.
- [9] 刘莹, 苏得权. 具身认知视角下身体动词语义理解的神经机制 [J]. 心理学进展. 2022, 12(4): 1146-1150.

Copyright © 2024 by author(s) and Global Science Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

