

人机协同视域下非接触式脑机接口产业的非对称超越路径

钱学明¹, 丁 婧^{2*}

¹无锡科技职业学院物联网与人工智能学院, 江苏 无锡

²无锡科技职业学院文化旅游学院, 江苏 无锡

收稿日期: 2026年7月17日; 录用日期: 2026年8月31日; 发布日期: 2026年9月10日

摘 要

新一轮科技革命和产业变革正在推动机器由劳动资料向具有感知、计算和反馈能力的协同参与者转变, 传统社会分工理论因而面临新的解释边界。本文以人机协同为视角, 在梳理人机关系由机械替代、信息交互向智能协同演进的基础上, 提出人机协同分工概念, 并从认知分工对认知交互的结构性需求出发, 论证脑机接口成为战略性新兴产业的重要逻辑。进一步引入空间生产理论, 构建创新主体关系空间的分析框架, 考察脑机接口技术演进对科研、临床、制造、平台和应用主体关系的重组作用。研究表明, 脑机接口由侵入式向非侵入式、非接触式和多模态方向演进, 使创新主体关系由科研临床中心型逐步转向跨产业网络型, 为我国依托智能感知、集成电路、人工智能、先进制造和应用场景优势实现非对称超越提供了新的可能。通过比较无锡与北京、上海、深圳等城市的能力结构, 本文提出无锡应以非侵入式脑机接口为技术基础, 以非接触式脑机接口为前沿方向, 依托物联网、智能传感、集成电路和系统集成优势, 强化跨区域科研临床协同与本地场景验证, 形成差异化的产业发展路径。

关键词

人机协同分工, 脑机接口, 非接触式脑机接口, 创新主体关系空间, 非对称超越, 无锡

Asymmetric Pathways to Breakthroughs in the Non-Contact Brain-Computer Interface Industry from the Perspective of Human-Machine Collaboration

Xueming Qian¹, Jing Ding^{2*}

¹School of Internet of Things and Artificial Intelligence, Wuxi Vocational College of Science and Technology, Wuxi Jiangsu

*通讯作者。

文章引用: 钱学明, 丁婧. 人机协同视域下非接触式脑机接口产业的非对称超越路径[J]. 人工智能与机器人研究, 2026, 15(5): 1156-1164. DOI: 10.12677/airr.2026.155105

²School of Culture and Tourism, Wuxi Vocational College of Science and Technology, Wuxi Jiangsu

Received: July 17, 2026; accepted: August 31, 2026; published: September 10, 2026

Abstract

A new round of technological revolution and industrial transformation is driving machines to evolve from mere tools of labor into collaborative participants with sensing, computing, and feedback capabilities, thereby presenting new interpretive challenges for traditional theories of the division of labor. From the perspective of human-machine collaboration, this paper traces the evolution of the human-machine relationship from mechanical substitution and information exchange to intelligent collaboration. Based on this analysis, it introduces the concept of collaborative division of labor between humans and machines and, drawing on the structural requirements of cognitive interaction for cognitive division of labor, argues the key rationale for brain-computer interfaces (BCIs) becoming a strategic emerging industry. Furthermore, by incorporating spatial production theory, the paper constructs an analytical framework for the relational space of innovation actors and examines how the evolution of BCI technology reshapes the relationships among research, clinical, manufacturing, platform, and application actors. The study indicates that the evolution of brain-computer interfaces from invasive to non-invasive, non-contact, and multimodal technologies is gradually shifting the relationships among innovation actors from a research and clinical center-oriented model to a cross-industry network-oriented model. This provides new possibilities for China to achieve asymmetric leapfrog development by leveraging its strengths in intelligent sensing, integrated circuits, artificial intelligence, advanced manufacturing, and application scenarios. By comparing the capability structures of Wuxi with those of cities such as Beijing, Shanghai, and Shenzhen, this paper proposes that Wuxi should take non-invasive brain-computer interfaces as its technological foundation and non-contact interfaces as its frontier direction. Leveraging its strengths in the Internet of Things, intelligent sensing, integrated circuits, and systems integration, Wuxi should strengthen cross-regional scientific research and clinical collaboration as well as local scenario validation to forge a differentiated industrial development path.

Keywords

Human-Machine Collaborative Division of Labor, Brain-Computer Interface, Non-Contact Brain-Computer Interface, Relational Space among Innovation Actors, Asymmetric Leapfrogging, Wuxi

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

新一轮科技革命和产业变革正在推动人工智能、智能机器人、神经工程、物联网和生命科学等技术加速融合。机器不再只是按照既定程序完成机械执行任务,而是逐步具备环境感知、信息处理、状态识别、反馈调节和辅助决策能力。脑机接口通过建立大脑或神经系统与外部设备之间的信息通道,使人的运动意图、认知状态和神经活动能够被机器识别,并使机器反馈进入人的感知和行为调节过程,由此成为人机交互由外显操作向神经与认知层面延伸的重要技术形态。Wolpaw 等[1]对脑机接口的概念、结构与通信控制功能进行了经典界定;Lebedev 和 Nicolelis [2]分析了脑机接口由基础神经科学研究向神经功

能恢复和人机系统连接的发展趋势; Nicolas-Alonso 和 Gomez-Gil [3]系统梳理了不同信号采集方式、处理方法与应用领域; Lance 等[4]进一步指出, 脑机接口正在由面向特定患者的辅助技术, 向融合脑、行为、任务和环境信息的广义人机系统发展。国内相关研究也逐渐由信号采集和算法解码[5]扩展到临床康复[6]、智能交互[7]、伦理治理[8]和产业应用[9], 脑机接口已呈现出多学科交叉和多主体协同的发展特征。脑机接口现有研究已经覆盖通信控制、神经康复、智能交互及多场景应用, 并逐步关注技术从实验室环境向现实应用转化所面临的稳定性和适应性问题的。

脑机接口等新技术的发展正在改变传统分工关系[10]。人工智能和智能制造研究开始关注机器由工具向协同参与者转变[11], 以及人机能力互补[12]、共同决策[13]和动态任务分配[14]等问题。相关研究表明, 人机协同并非简单地以机器替代劳动者, 而是通过重新配置人的判断、创造和责任能力与机器的感知、计算和执行能力, 形成新的复合生产方式。目前, 分工理论较少将具有感知、计算和反馈能力的机器纳入分工主体, 脑机接口研究也较少从人机协同分工的结构性需求解释其由技术走向产业的内在逻辑。

近年来, 脑机接口也正由侵入式、非侵入式向低接触、非接触和多模态方向演进, 逐渐改变科研机构、医院、芯片企业、传感器企业、平台企业和应用主体之间的关系结构。技术路线变化所引起的创新主体关系空间重构, 以及这种重构为非传统脑科学中心带来的区域进入机会, 构成了新技术发展中亟待研究的新问题。

从人机协同视角研究非接触式脑机接口产业, 不仅有助于拓展传统分工理论的主体边界, 也有助于从创新主体关系变化中解释不同技术路线的产业化条件。在此基础上考察无锡如何依托物联网、智能传感、集成电路和系统集成能力, 避免与脑科学和临床资源优势城市的对称竞争, 对于认识未来产业的形成机制、区域技术路线选择及非对称超越具有理论与实践价值。

2. 从社会分工到人机协同分工

社会分工理论形成于以人类劳动为中心的生产体系之中。无论是劳动者之间的专业化分工, 还是企业、部门与产业之间的职能分化, 其基本前提都是人作为劳动主体, 机器作为劳动资料参与生产[10]。

随着技术条件演进, 生产活动中的人机关系大体经历了机械替代、信息交互和智能协同三个阶段。在机械替代阶段, 蒸汽机、机床、流水线和自动化设备以动力系统和执行系统的形式替代部分体力劳动, 形成“人决策、机器执行”的基本结构。

计算机和信息技术的发展推动人机关系进入信息交互阶段。人与机器之间的关系也由直接操控转向借助键盘、鼠标和图形界面进行信息交换。人与机器之间形成了功能分配, 但这种分配仍以预设程序和相对固定的职责边界为基础。

人工智能、智能机器人和神经工程等新技术的发展, 正在推动人机关系由信息交互转向智能协同。借助传感器、算法模型和计算系统, 机器能够持续获取环境信息, 识别复杂模式, 并在目标和规则约束下生成方案、调整行为。人机关系逐渐转向人在不同自主程度下对机器进行授权、监督和干预[11]。Seeber 等提出了“机器作为队友”的研究议题, 表明人工智能开始进入以往主要由人承担的团队协作过程[13]。

机器认知能力的增长, 使传统社会分工的理论边界面临新的问题。以往分工主要回答不同劳动者、组织和产业如何配置任务; 智能技术条件下, 还需要回答人的能力与机器能力如何在同一任务中进行配置。因此, 我们将在共同任务目标和人的价值约束下, 根据人与智能机器的能力差异, 将感知、计算、判断、执行和反馈等功能进行配置, 并通过持续的信息交互形成复合生产能力的新型分工形态, 称为“人机协同分工”。与传统社会分工相比, 人机协同分工并非只是增加了机器这一参与要素, 而是在三个方面改变了分工的基本结构: 分工对象由完整岗位和固定工序进一步深入到感知、分析、判断与执行等能力单元; 分工依据由劳动者之间的技能差异扩展为人类能力与机器能力之间的异质互补; 分工关系则由

事先确定的静态配置转向依据人的状态、机器可靠性和外部环境不断调整的动态配置。

从社会分工到人机协同分工,并不是对马克思分工理论的否定,而是沿着生产工具变革推动劳动过程重组的基本逻辑,对其分析主体和适用条件作进一步拓展。人机协同分工理论不仅需要解释机器替代了哪些劳动,更需要解释人与机器如何交换信息、配置能力和调整控制关系。这一理论拓展,也为进一步分析连接人的神经活动、认知状态与机器系统的新型技术何以产生,提供了必要的逻辑起点。

3. 人机协同分工下的脑机接口战略性新兴产业

人机协同分工主体由人扩展到人与机器后,分工界面不断向人的认知过程深入。机械替代阶段是行为分工,分工界面位于“认知-行为”的边界上,交互通道是运动神经与肌肉执行系统。信息交互后是信息分工,分工界面落在“高级认知-低级认知”的边界上,但交互仍然依赖运动输出(打字、点击、语音发声)。大模型和生成式 AI 的突破,使机器具备了生成性、推理性和一定程度的情境理解能力。机器以“协作者”的身份参与认知过程。此时,分工界面已经深入认知层面:人类负责价值判断、意图锚定、道德权衡和创造性突破;机器负责信息综合、模式识别、方案生成和风险评估[12][13]。

当分工界面从“行为”推进到“认知”,交互却仍然依赖肌肉-外设通道时,人机系统将面临三重结构性矛盾。

首先,人的复杂意图必须经过语言组织、肢体动作或设备操作才能传递给机器,交互效率受到打字速度、语音表达和动作能力的限制。其次,认知活动中的模糊意向、注意变化、情绪状态和认知负荷难以完全转化为外显行为,意图在表达过程中不可避免地发生简化、延迟或损耗。第三,传统交互系统主要能够读取人已经表达出来的指令,却难以连续识别人在任务过程中的疲劳、分心、紧张和认知负荷,机器因而无法依据人的实时状态主动调整协作方式。认知分工越深入,这些限制对人机系统整体效能的约束就越明显。

因此,认知层面的分工必然提出认知层面的交互需求。当机器开始参与人的认知与决策过程,人机交互就不能始终停留在动作、语言和外部设备层面,而需要进一步建立能够识别人的意图、认知状态与神经活动的信息通道。

脑机接口通过采集和解析神经信号,将大脑活动与外部计算、控制或反馈系统连接起来[1][3],使机器获得传统行为交互难以提供的信息。其一,脑机接口能够拓展意图传递通道。其二,脑机接口能够提高认知状态的可感知性。其三,脑机接口具有形成实时闭环的潜力。Lance 等[4]已经指出,脑机接口的发展正在由单一脑信号控制转向融合大脑、行为、任务和环境信息的广义人机系统。近年来的研究进一步表明,脑机接口正在沿着高通量信号获取、智能解码、闭环反馈和多模态融合方向发展[15][16]。

由此可见,脑机接口不是对键盘、鼠标、语音和手势交互的简单替代,而是人机交互界面向认知层面延伸的技术路径。这种迁移不只是技术上的优化选择,而是认知分工深化所产生的结构性要求。正如移动通信支撑泛在连接一样,脑机接口有望成为人机交互基础设施。

脑机接口由技术路径转化为战略性新兴产业,还在于其具有显著的枢纽性和战略性。脑机接口并非单一设备或单项算法,而是神经科学、人工智能、集成电路、智能传感、医疗器械、先进材料和信息通信等技术交叉融合的结果[15][17]。其突破能够带动神经信号采集、低功耗芯片、智能算法、康复装备和人机交互系统共同发展,并向医疗康复、养老助残、工业安全、智能驾驶和智能生活等领域扩散[16][18]。脑机接口所连接的不是某一项孤立功能,而是人的认知能力与机器智能之间的新型接口,因此具有推动多个产业重新组合的杠杆效应。

脑机接口的战略性还在于,其直接关系未来人机交互方式、神经数据利用和智能系统控制权。脑机接口一旦由医疗辅助技术扩展为普遍的人机交互技术,其技术标准、数据规则、伦理边界和监管制度将

直接影响产业生态的形成。因而, 脑机接口竞争不仅是产品和市场竞争, 也是核心技术、平台标准和治理规则的竞争。其对未来生产方式、人机关系和产业组织可能产生的基础性影响。

人机协同分工的深化不仅改变人与机器之间的任务边界, 也使认知信息在神经感知、数据处理、算法判断、终端执行和场景反馈之间持续流动, 推动医学、信息技术和装备制造等主体进入同一创新过程, 从而成为创新主体关系空间重构的内在动力。

4. 脑机接口创新主体的空间重构

人机协同分工揭示了认知任务在人与机器之间的重新配置, 而这种任务重组需要通过科研、医疗、企业和应用主体之间认知任务流、数据流与技术资源的重新组织才能实现。由此, 人机关系的变化进一步转化为创新主体关系的变化。空间生产理论认为, 空间并非生产活动展开的静态容器, 而是由技术、资本、制度及主体关系共同塑造的社会产物。列斐伏尔指出, 社会关系不仅存在于空间之中, 也通过生产空间获得具体形态[19]。因此, 新技术的作用并不限于提高生产效率, 还会打破原有主体之间的边界与联结方式, 重新配置知识、资源和权力, 进而形成新的关系空间。本文所说的“创新主体关系空间”, 并非单纯的地理集聚, 而是科研机构、医院、企业、政府和应用主体围绕技术创新形成的知识流动、资源交换和协同关系, 具体表现为参与主体范围、核心主体位置、资源依赖方式和协同网络结构的变化。人机协同分工决定需要配置哪些认知任务和技术能力, 创新主体关系空间则反映这些任务与能力如何在不同主体之间组织和连接。

脑机接口技术具有显著的空间重构作用。早期脑机接口以神经信号采集、意图解码和临床辅助为主, 技术创新主要依赖脑科学研究机构、高水平医院和生物医学工程实验室。特别是侵入式脑机接口涉及植入电极、神经外科、临床试验和伦理审查, 科研与临床资源构成创新活动的核心, 材料、器械和算法企业主要围绕这些核心机构参与研发。近年来侵入式脑机接口在高通量神经电极、植入式芯片、无线通信和临床功能替代等方面取得进展, 但长期稳定性、生物相容性和规模化临床转化仍构成主要约束[20][21]。由此形成的创新主体关系空间具有较强的专业性、封闭性和中心化特征, 技术能力往往集中于少数科研与医疗资源优势城市。

非侵入式脑机接口降低了技术对手术植入和临床环境的依赖, 使创新主体关系由医学科研体系向电子信息 and 装备制造领域扩展。脑电信号处理、智能算法、专用芯片、康复设备和人机交互终端的重要性不断提高, 人工智能企业、集成电路企业、设备制造商和应用机构逐渐进入创新网络[22]。脑机接口由实验室和医院中的专用技术, 逐步转化为需要多类主体共同参与的复合技术系统, 其创新关系也由围绕单一核心机构的纵向链条, 转向跨学科、跨产业的网络化协同。

随着脑机接口向低接触、非接触和多模态方向演进, 创新主体关系空间进一步发生变化。无需植入但仍依赖头皮电极或可穿戴设备的技术称为非侵入式脑机接口, 进一步减少电极、佩戴及接触约束的形态称为低接触式脑机接口, 不以人体与采集设备直接接触为必要条件的认知状态感知技术称为非接触式脑机接口; 多模态则指脑信号、生理信号、行为信息与环境信息的融合机制[23]。神经与认知状态的识别越来越需要脑信号、眼动、表情、语音、生理状态和环境信息的协同处理, 其技术实现依赖智能传感、低功耗芯片、边缘计算、人工智能算法、物联网平台和应用场景的共同支撑。认知任务流由单一设备内部处理转向感知、计算、判断和反馈环节的跨主体协同, 数据流也由科研机构或医院内部的封闭使用转向传感器、算法平台、终端设备和场景主体之间的连续传递。创新活动因而不局限于脑科学机构和医院, 而是扩展到传感器企业、芯片企业、平台企业、终端制造商及场景运营主体。技术由植入人体向融入设备 and 环境演进的过程, 同时也是创新主体关系由专业中心型向开放网络型演进的过程。

需要说明的是, 上述技术演进并不意味着非接触式路线将取代侵入式和非侵入式路线。侵入式脑机

接口能够直接获取高质量神经信号，更适用于重度运动障碍辅助、精细神经控制和临床治疗，但受到手术风险、生物相容性、长期稳定性和伦理监管的制约[20] [21]；非侵入式脑机接口安全性较高、应用门槛较低，但信号易受噪声干扰，空间分辨率和跨个体稳定性相对有限[22] [24]；非接触式与多模态技术则通过脑信号、生理信号、行为信息和环境信息的融合降低使用负担，更适合自然场景中的连续感知，但其脑信息表征具有一定间接性，并面临环境干扰、个体差异、模型泛化和结果解释等问题[23] [24]。不同技术路线的性能边界与适用场景，决定了其所依赖的知识、设施和创新主体存在明显差异，具体比较见表 1。

Table 1. Realistic boundaries and innovation actors of different brain-computer interface technology routes
表 1. 不同脑机接口技术路线的现实边界与创新主体

技术路线	主要优势	现实制约	典型适用场景	主要创新主体
侵入式	神经信号质量高，可支持精细识别与控制	手术风险高，长期稳定性、生物相容性及伦理监管要求严格	重度运动障碍辅助、神经功能恢复、临床治疗	脑科学机构、神经专科医院、植入器械企业
非侵入式	安全性较高，使用和临床风险相对较低	易受噪声干扰，空间分辨率及跨个体稳定性有限	康复训练、辅助控制、认知监测	医疗机构、算法企业、可穿戴设备企业
非接触式与多模态	使用负担低，适合连续感知和自然场景部署	脑信息表征较间接，易受环境和个体差异影响，泛化与可解释性不足	疲劳监测、注意力识别、情绪与认知负荷评估、人机协同	传感器、芯片、人工智能、物联网、终端及场景企业

脑机接口技术演进由此改变了区域参与产业竞争的能力条件。脑科学与临床资源仍然是技术创新的重要基础，但已不再是决定产业进入机会的唯一因素。智能感知、集成电路、人工智能、先进制造、系统集成及场景开放能力在创新关系空间中的地位不断上升。技术路线之间并非简单的优劣关系，而是形成了面向不同任务和场景的功能分工。非接触式与多模态技术的现实价值，也不在于替代侵入式技术的高精度优势，而在于将脑机交互由少数临床场景扩展到更广泛的生产生活环境，并由此吸纳更多产业主体进入创新网络。由此，人机协同分工提出的认知任务重组，经由技术能力组合、数据流动和主体协同，最终表现为创新主体关系空间的重构。这一新型关系空间为产业基础不同的城市提供了差异化进入的可能，也构成分析非接触式脑机接口非对称超越机会的理论基础。

5. 新空间下的非接触式脑机接口产业

新型创新主体关系空间形成以后，脑机接口产业的竞争逻辑也随之改变。产业优势不再完全取决于是否拥有最强的脑科学机构、神经外科医院或植入式器件企业，而更多取决于能否将感知、计算、制造、平台和场景等分散能力组织为高效协同的产业网络。对于脑科学基础研究和高端临床资源相对不足，但具有完整电子信息产业体系、智能制造能力和大规模应用市场的国家，这种变化提供了不同于侵入式路线的进入机会。

非接触式脑机接口正是这一新空间中具有非对称超越潜力的技术形态。它并非脱离神经活动的一般智能感知，而是以人的意图、注意、疲劳、情绪和认知负荷识别为目标，通过脑信号、生理信号、行为信息和环境信息的多模态融合，减少对植入手术和复杂穿戴设备的依赖[22]-[24]。其优势不在于单一脑信号精度的绝对领先，而在于利用多源信息互补，提高真实场景中认知状态识别的连续性、稳定性和可用性。

这一技术方向与我国既有产业能力具有较高适配性。我国在智能传感器、集成电路、人工智能算法、

通信网络、智能终端和先进制造等领域已经形成较为完整的产业链, 在多类技术快速组合、系统集成和工程转化方面具有优势。同时, 工业制造、交通出行、康复养老、智能家居和公共安全等领域提供了丰富的应用场景。近年的研究表明, 脑机接口的应用正在由神经功能恢复逐步延伸至认知交互、智能环境和日常生活场景[18][25]。我国由此可以将竞争重点由高风险、高门槛的植入环节, 转向多模态感知、低功耗计算、边缘智能和场景化系统解决方案。

这种发展方式构成了非对称超越。所谓非对称超越, 是指后发国家不沿先发国家的优势技术路线进行全链条对称追赶, 而是利用技术演进带来的产业网络重构, 选择与自身能力结构相匹配的新技术环节和应用场景, 占据新的关键节点。欧美在脑科学基础研究、侵入式电极和临床试验方面具有先发优势, 若完全沿其路径发展, 我国将面临长周期、高投入和强监管约束。非接触式脑机接口则将竞争重心转向传感融合、算法协同、芯片适配、终端制造和场景服务, 使我国能够以系统性能、使用成本、场景覆盖和产业扩散能力形成综合优势。

非接触式脑机接口还能够推动应用范围由特定医疗场景向生产生活环境扩展。技术嵌入车辆、工厂、家庭和康养空间后, 脑机接口可以由专用设备转变为环境智能的一部分, 应用主体也由医疗机构扩展到制造企业、平台企业和公共服务机构[18][23][25]。由此形成的规模应用和数据反馈, 将进一步推动算法、器件和系统迭代。

非对称超越并不意味着放弃脑科学基础研究和非侵入式技术。更可行的路径是以非侵入式脑机接口为技术基础, 以非接触式、多模态和场景化应用为前沿突破, 推动基础研究、工程开发和应用验证相互支撑, 从而在新的创新主体关系空间中形成区别于先发国家的发展路径。

6. 无锡脑机接口产业的非对称超越路径

新型创新主体关系空间为无锡进入脑机接口产业提供了可能, 但这种可能能否转化为现实优势, 取决于其能力结构与技术路线是否匹配。北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会与北京市经济和信息化局联合印发的《加快北京市脑机接口创新发展行动方案(2025-2030)年》将脑认知原理解析、脑功能神经机制解析、神经计算与编解码列为重点研究方向, 并提出到2027年推动小型化高通量植入式传感器、高通量采集刺激一体化植入式芯片、植入式微型电池等产品性能达到国际领先水平[26]。上海市科学技术委员会印发的《上海市脑机接口未来产业培育行动方案(2025~2030年)》以医疗级场景为核心, 提出到2027年推动5款以上侵入式、半侵入式脑机接口产品完成医疗器械型式检验、完成临床试验, 并引育5家以上具有脑机接口核心技术与产品研发能力的自主创新企业和10家以上产业链骨干企业[27]。深圳市工业和信息化局印发的《深圳市加快推进人工智能终端产业发展行动计划(2025~2026年)》提出, 到2026年全市人工智能终端产业规模达到8000亿元以上、力争1万亿元, 人工智能终端产品产量突破1.5亿台, 推出50款以上爆款人工智能终端产品, 并打造60个以上典型应用场景[28]。由此可见, 北京、上海和深圳分别在原创研究与核心器件、医疗级产品临床转化、智能终端产品化等方面形成了不同的发展重点, 无锡若沿其优势方向进行全面追赶, 难以在短期内形成竞争优势。

与上述城市相比, 无锡的优势不在脑科学原始创新和高端临床资源, 而在物联网、智能传感、集成电路、先进制造和系统集成形成的产业组合。《无锡市2024年国民经济和社会发展计划执行情况》显示, 2024年无锡物联网、集成电路等7个产业集群规模超过2000亿元, “465”产业集群营业收入达到1.81万亿元[29]。这显示出无锡较强的关联产业集聚和工程转化基础。非接触式脑机接口需要将多源感知、边缘计算、智能算法、通信连接和应用终端集成为可在真实环境中运行的系统, 这与无锡既有产业能力具有较强关联。因此, 无锡不宜将发展重点放在高风险、长周期的植入式脑机接口, 而应以非侵入式技术积累认知状态识别和人机闭环能力, 以非接触式技术拓展环境感知与场景应用, 形成区别于先发城市的

技术定位。

这一定位需要从单项技术招商转向产业能力组织。无锡可以围绕认知状态感知系统, 连接本地传感器、芯片、算法、通信和装备制造企业, 形成从器件、模组到终端系统的协同开发体系; 同时引入外部脑科学研究机构和高水平医院, 承担神经机理验证、数据标注和医学评价, 使无锡的工程能力与北京、上海的科研临床能力形成跨区域互补。由此, 无锡不必补齐脑机接口产业的所有环节, 而应集中占据多模态感知、低功耗处理、系统集成和规模制造等关键节点。

技术优势最终需要通过场景验证转化为产业优势。无锡可优先选择与本地产业和公共服务需求联系紧密的工业安全、康复养老、智能驾驶和智慧家居等场景, 建设可重复测试和持续迭代的应用环境。场景开放不应停留在示范展示, 而应形成数据采集、产品测试、效果评价和标准制定的完整机制, 使企业能够在真实使用中改进算法与设备, 并逐步形成可复制的解决方案。

因此, 无锡脑机接口产业的非对称超越, 不是绕开基础研究追求低端应用, 也不是复制北京、上海和深圳的发展模式, 而是以非侵入式为技术基础、非接触式为前沿方向, 以跨区域科研临床协作为能力补偿, 以本地产业链和场景验证为主要支撑。通过在新型创新主体关系空间中重新配置内外部资源, 无锡有望由脑机接口技术的跟随者转变为非接触式系统集成与场景应用的重要节点。

7. 总结

本文立足人机协同视角, 对传统分工理论进行了拓展, 提出了人机协同分工的基本内涵, 并据此论证了脑机接口成为战略性新兴产业的重要逻辑。通过引入创新主体关系空间, 分析脑机接口技术演进对创新主体结构的重组作用, 进而说明非接触式脑机接口为我国形成非对称超越提供了新的产业机会。通过比较无锡与北京、上海、深圳等城市的能力差异, 本文提出无锡应形成以非侵入式技术为基础、以非接触式技术为前沿的发展路径, 并依托物联网、智能传感、集成电路和系统集成优势构建差异化竞争能力。

基金项目

本研究得到了全国高等院校计算机基础教育研究会计算机基础教育教学研究项目(编号: 2025-AFCEC-648)、2025 年江苏省高校“大学生素质教育类课程教学改革研究”专项课题(编号: 2025DSZ178)、江苏省科技副总项目(2023)、江苏高校“青蓝工程”项目(中青年学术带头人(2022))、无锡市哲学社会科学招标课题(编号: WWSK25-C-02)、无锡市科协软科学研究课题(编号: KX-25-B39)的资助和支持。

参考文献

- [1] Wolpaw, J.R., Birbaumer, N., McFarland, D.J., Pfurtscheller, G. and Vaughan, T.M. (2002) Brain-Computer Interfaces for Communication and Control. *Clinical Neurophysiology*, **113**, 767-791. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(02)00057-3)
- [2] Lebedev, M.A. and Nicolelis, M.A.L. (2006) Brain-Machine Interfaces: Past, Present and Future. *Trends in Neurosciences*, **29**, 536-546. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.07.004>
- [3] Nicolas-Alonso, L.F. and Gomez-Gil, J. (2012) Brain Computer Interfaces, a Review. *Sensors*, **12**, 1211-1279. <https://doi.org/10.3390/s120201211>
- [4] Lance, B.J., Kerick, S.E., Ries, A.J., Oie, K.S. and McDowell, K. (2012) Brain-Computer Interface Technologies in the Coming Decades. *Proceedings of the IEEE*, **100**, 1585-1599. <https://doi.org/10.1109/jproc.2012.2184830>
- [5] 高小榕, 王文鹏, 高上凯. 脑-机接口研究进展[J]. 生物医学工程杂志, 2007, 24(4): 941-944.
- [6] 明东, 许敏鹏, 安旭, 等. 脑机接口技术在神经功能康复中的应用与发展[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(1): 1-7.
- [7] 吕宝粮, 郑文明. 情感脑机接口研究进展[J]. 模式识别与人工智能, 2020, 33(2): 95-105.

- [8] 王国豫, 王前. 脑机接口技术的伦理问题及其治理[J]. 自然辩证法通讯, 2022, 44(1): 1-7.
- [9] 明东, 许敏鹏, 安旭, 等. 脑机接口技术发展现状与趋势[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 1-11.
- [10] 马克思. 资本论: 第1卷[M]. 北京: 人民出版社, 2004.
- [11] Sheridan, T.B. (2016) Human-Robot Interaction: Status and Challenges. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, **58**, 525-532. <https://doi.org/10.1177/0018720816644364>
- [12] Jarrahi, M.H. (2018) Artificial Intelligence and the Future of Work: Human-AI Symbiosis in Organizational Decision Making. *Business Horizons*, **61**, 577-586. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.03.007>
- [13] Seeber, I., Bittner, E., Briggs, R.O., de Vreede, T., de Vreede, G., Elkins, A., *et al.* (2020) Machines as Teammates: A Research Agenda on AI in Team Collaboration. *Information & Management*, **57**, Article ID: 103174. <https://doi.org/10.1016/j.im.2019.103174>
- [14] Semeraro, F., Griffiths, A. and Cangelosi, A. (2023) Human-Robot Collaboration and Machine Learning: A Systematic Review of Recent Research. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **79**, Article ID: 102432. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102432>
- [15] 肖松, 程和平, 吴朝晖, 等. 脑机接口技术发展现状及未来展望[J]. 科学与社会, 2024, 14(3): 2-25.
- [16] 阮梅花, 张丽雯, 凌婕凡, 等. 2023 年脑机接口领域发展态势[J]. 生命科学, 2024, 36(1): 39-47.
- [17] Sun, Y., Chen, X., Liu, B., Liang, L., Wang, Y., Gao, S., *et al.* (2025) Signal Acquisition of Brain-Computer Interfaces: A Medical-Engineering Crossover Perspective Review. *Fundamental Research*, **5**, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.04.011>
- [18] Xu, S., Liu, Y., Lee, H. and Li, W. (2024) Neural Interfaces: Bridging the Brain to the World beyond Healthcare. *Exploration*, **4**, Article ID: 20230146. <https://doi.org/10.1002/exp.20230146>
- [19] Lefebvre, H. (1991) *The Production of Space*. Blackwell Publishing.
- [20] 邱文灿, 马良, 郭浩月, 等. 植入式脑机接口系统实现、临床进展与技术挑战[J]. 生物化学与生物物理进展, 2024, 51(10): 2478-2497.
- [21] Villa, J., Cury, J., Kessler, L., Tan, X. and Richter, C. (2024) Enhancing Biocompatibility of the Brain-Machine Interface: A Review. *Bioactive Materials*, **42**, 531-549. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2024.08.034>
- [22] Edelman, B.J., Zhang, S., Schalk, G., Brunner, P., Müller-Putz, G., Guan, C., *et al.* (2025) Non-Invasive Brain-Computer Interfaces: State of the Art and Trends. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, **18**, 26-49. <https://doi.org/10.1109/rbme.2024.3449790>
- [23] 刘迎欣, 李明, 于扬, 等. 混合脑机接口在人机交互领域的应用综述[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(12): 2077-2089.
- [24] Rahman, N., Khan, D.M., Masroor, K., Arshad, M., Rafiq, A. and Fahim, S.M. (2024) Advances in Brain-Computer Interface for Decoding Speech Imagery from EEG Signals: A Systematic Review. *Cognitive Neurodynamics*, **18**, 3565-3583. <https://doi.org/10.1007/s11571-024-10167-0>
- [25] Zhang, H., Jiao, L., Yang, S., Li, H., Jiang, X., Feng, J., *et al.* (2024) Brain-Computer Interfaces: The Innovative Key to Unlocking Neurological Conditions. *International Journal of Surgery*, **110**, 5745-5762. <https://doi.org/10.1097/js9.0000000000002022>
- [26] 北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会 北京市经济和信息化局关于印发《加快北京市脑机接口创新发展行动方案（2025-2030 年）》的通知[EB/OL]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202501/t20250109_3984788.html, 2025-01-08.
- [27] 关于印发《上海市脑机接口未来产业培育行动方案（2025-2030 年）》的通知[EB/OL]. <https://www.shanghai.gov.cn/cxcysj/20260330/9f8facca7b3b45cea254b60045bbc993.html>, 2025-01-10.
- [28] 市工业和信息化局关于印发《深圳市加快推进人工智能终端产业发展行动计划（2025-2026 年）》的通知[EB/OL]. https://www.sz.gov.cn/szst2010/wgkzl/jcgk/jcygk/zdzcjc/content/post_12052977.html, 2025-03-03.
- [29] 无锡市 2024 年国民经济和社会发展计划执行情况[EB/OL]. <https://www.wuxi.gov.cn/doc/2025/03/07/4517484.shtml>, 2025-03-07.