

人脑信息处理和类脑智能研究进展

鲍艳伟^{1,2}, 任福继^{2,3*}

1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230601
2. 安徽高端智能机器创新研究院, 合肥 230088
3. 电子科技大学计算机科学与工程学院, 成都 611731

摘要 脑科学被视为理解宇宙、自然与人类关系的“终极疆域”, 人类从未停止对人脑的探索以及对其运行机制的模仿。过去几个世纪, 人类对人脑的解剖构造和人脑各部分的独特功能有了一定的认识, 但对人脑的信息处理机制、智能的形成等问题还需要持续深入探索。同时, 借鉴人脑的信息处理方式开展类脑智能研究, 对扩展与应用人类智能具有重要作用, 是人工智能的下一个发展目标。从人工智能技术视角提出了大数据驱动的人脑信息处理机制、多脑区协同的人类智能形成机制、多标志物联动的脑疾病发展机理、多模态融合类脑深度计算机理等关键科学问题, 并建议从多学科交叉融合、产学研合作促进、国际化交流共享、战略性规划部署及科研型人才培养等方面加强脑科学及类脑智能研究。

关键词 脑科学; 信息处理; 类脑智能

人的大脑是人体中最微妙的智能器官, 重约 1.5 kg, 仅占身体重量的 2%~3%, 体积仅有 1.4 dm³; 但它几乎控制着人的所有行为, 并使之成为独特和个性化的自我。大脑如何处理各类信息? 大脑何以形成人类智能? 意识是怎样形成的? 计算机能否全面超越人类大脑? 人工智能是真的智能吗? 人类能否理解自己的大脑? ……这些关于大脑和智能的一系列问题, 也是一系列极具挑战性的

跨学科问题。在过去几个世纪, 随着解剖学、心理学、现代医学影像学等学科的持续发展, 人类已经对大脑的解剖构造和大脑各部分的独特功能有了一定的认识, 例如顶叶负责整合感觉和直觉, 也获得了大量关于人类大脑如何运转的知识, 如神经元传导神经电信号。但是关于大脑、智能、意识、情感、学习、进化等问题, 仍然需要科研工作者去探索。

收稿日期: 2022-12-02; 修回日期: 2023-03-14

作者简介: 鲍艳伟, 博士研究生, 研究方向为先进智能、情感计算、人机交互等, 电子信箱: baoyanwei007@sina.com; 任福继(通信作者), 教授, 研究方向为先进智能、情感计算、智能机器人等, 电子信箱: renfuji@uestc.edu.cn

引用格式: 鲍艳伟, 任福继. 人脑信息处理和类脑智能研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(9): 6-16; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.09.001

人脑作为信息处理中心,承担着来自外界视觉、听觉、语言等多源信息的加工处理任务以及在此基础上意识、情绪、决策等智能表现的形成任务。它赋予人类阅读理解、分析计算、判断推理、归纳总结的能力,使人类拥有了学习记忆和规划创造、感知与表达喜怒哀乐、联想与思考、自我认知及参与社交等不可或缺的能力。人类所有的高级生命活动都要依赖人脑的正常运作,甚至大部分的基本生物功能都要通过脑来完成。

近10年,以深度神经网络为主要助推力的人工智能技术取得了长足的进步,人们开始讨论计算机是否等同于人脑,人工智能能否与人类智能媲美。很明显,计算机和人工智能技术彻底改变了人类的生活、工作和社交方式,但人工智能距离超越人类智能还有很长的路要走。目前,越来越多的深度神经网络模型是基于对人脑的模仿而构建,但实质上,人们对于人脑在基础神经结构组织及运行机制、高级脑功能的实现等方面还知之甚少,对人脑信息处理机制、人类智能的形成机制尚不清楚,脑科学对人工智能技术的支撑还很有限。例如人类可以在不提供大量训练数据的情况下学习和成长,并且可以灵活地将所学知识应用于与学习时不同的案例;但人工智能目前正遭遇这一瓶颈,不仅需要大数据作为学习样本,在模型的可扩展性方面也有很大的不足。若能清晰地了解人类智能形成机制,阐明人脑信息处理机制,将极大地推进先进人工智能理论突破以及在真实环境中的广泛应用。因此,对人脑信息处理机制和类脑智能的探索是人类科学事业面临的极具意义的重大挑战之一。

1 脑科学相关研究的内涵、科学意义与战略价值

脑科学研究是指从化学分子、神经细胞,神经环路、大脑皮层,大脑结构、功能分区等层级出发,以破解大脑信息处理原理和人类智能形成机制为目标,对层级内状态变化及层级间相互作用进行的系统性、整体性研究。人脑信息处理机制是指大脑在感知内外环境信息,对信息进行加工、比较、分

辨、存储以及融合等处理,并最终对机体运行构成影响的过程中,大脑功能单元内部运行方式、大脑功能单元之间组合方式以及大脑功能单元与外部功能单元交互方式的集合。人类智能形成机制是指在生命系统中以大脑为核心对信息加工处理的基础上,通过感知、理解和创造的相互作用过程,形成语言、情感、学习、认知、思考、意识、社交以及进化等能力,并协同完成复杂目标任务的内在机理的集合。

人类大脑主要由2种不同类型的细胞构成:大约1000亿个神经元、数目和神经元相差无几的胶质细胞。神经元的功能是接收、分析和传递信息,通过树突接收和收集来自其他神经元的信息,胞体作为微处理器对信息进行适当分析处理,轴突将处理后的信息传递给其他神经元。胶质细胞为神经元提供营养支持和保护。功能相同的神经元细胞通过复杂的神经纤维连接汇集在一起,形成神经网络和主导各种脑功能的神经环路,基于细胞结构和排列的不同构成大脑额叶、顶叶、颞叶等不同脑区,进而细化为数10个不同区域,并通过专属的信息处理模式和特定的联结对应不同的生理功能。人脑信息处理机制主要研究单个神经元、神经元群和神经系统在处理信息过程中的工作方式,例如神经元处理信息方式、神经元间信息沟通、多源信息融合方式等。人类智能形成机制主要研究从单个神经元到认知智能层面的行为体系,即探究在神经环路上流动的电信号怎样通过逐级的层级、分块结构形成感知、情感、学习和思考等智能表现。

要通过研究不同神经元产生、处理和传导信息的机理,认识实现人脑各种功能的神经环路基础,阐明人脑的功能实现形式和结构组织方式,发现人类智能形成的机制原理,助推人脑和类脑两个领域的研究和应用发展。在脑科学研究及脑功能实现中,两种机制密不可分、相互作用、相互影响,共同实现大脑基本功能和高级智能。同时,在类脑智能及人工智能研究中,两种机制互为支撑、相互协作、相互配合,共同引导深度神经网络模型、智能决策、类脑芯片等领域前进,有望成为带动人工智能研究发生“革命性”突破和进步的关键动力之一,具有重要

的科学意义和战略价值。

脑科学是 21 世纪最重要的前沿学科之一,通过揭示人脑本身工作机制、研发脑疾病诊治手段、推动人工智能技术发展,进而产生重大科技创新,为解决经济社会发展中的复杂现实问题、重塑国家产业体系和核心竞争力提供强劲推动力,对人类健康、经济发展和社会进步具有重要意义。

1) 人脑功能机理研究推动实现自我认知与塑造。脑科学是人类理解自然界现象和人类本身的“终极疆域”。通过破译人脑的功能和机制,实现对人脑自身的洞察和理解,包括对自己的思想、意识的察觉以及对自己想法、行为的评判,在与环境的交互过程中调节作为决策中心的脑功能的整合和控制机制,从而实现人脑的自我认知与塑造。脑神经网络有一个极有利于适应环境的特性,那就是可塑性。人脑的可塑性是指人脑内部的突触、神经元之间的连接可以由于环境、学习、经验等因素的影响建立新的连接,从而影响个体的行为。发育期的神经网络具有高度可塑性,成年人的脑同样具有可塑性,人类智力的发展和经验的积累根本上是人脑持续塑造的过程。对脑功能机理的研究将进一步发现人脑神经网络的发育、再造规律和工作机理,加深我们理解思维、智力、创造力的神经基础,启发人类设计出提升人脑智力发育和创新思维能力的教育开发模式,有助于持续塑造和挖掘大脑潜力,促进人类进化。

2) 人脑神经系统研究推动关联疾病预防与康复。人脑局部功能异常导致的神经和精神疾病,例如阿尔茨海默病、帕金森病、自闭症、癫痫、药物成瘾、精神分裂症、抑郁症和创伤性脑损伤,不仅仅对个人、家庭和社会造成巨大伤害,同时也是当今社会医疗和保健体系面临的最严重问题之一。然而,目前全球的科学家对于此类神经和精神疾病的病因、发病机制等仍没有清晰的认识,可靠有效的诊疗手段和治疗药物更是无从谈起。该领域现有研究和诊治存在病例数据少、病症确诊难、干预时间晚、治疗手段少、药物效果差等问题。对脑神经系统开展分子、细胞、结构和功能脑影像方面的研究有助于解析各种脑功能相关的神经环路,有效解析

大脑的信息,探明神经系统疾病的病因和发病机制,确定康复医疗应该针对的神经环路,探索预防和治疗的新手段、新技术和新方法,早发现、早干预、早治疗,提高对神经系统疾患的预防、诊断、治疗服务水平,关爱人类健康生活,促进社会和谐发展。

3) 人脑智能机制研究推动人工智能创新与拓展。近年来,深度神经网络模型和机器学习技术极大地带动了人工智能领域的发展。广大人工智能研究者已经意识到脑科学对人工智能发展的重要支撑作用。深度网络的发展很大程度上受到了脑科学的启发,诸多人工神经网络模型就是从信息更新和传递的角度对人类神经网络组织结构和信息处理方式进行模拟,取得了巨大突破和应用成效,在模式识别、自动控制、生物信息挖掘等领域表现出较好的智能特性。数据、模型和算力这三驾驱动人工智能发展的“马车”致使人工智能技术发展瓶颈逐步显现。自主学习能力、学习效率、能效比、鲁棒性、可迁移性、自适应性、可解释性等问题突显了深度神经网络诸多缺陷,制约其广泛应用和进一步发展。人脑智能机制研究,通过大脑信息处理、学习能力、记忆环路及语言功能等方面的研究,构建脑科学和人工智能间的驱动纽带,构建脑智能驱动的新型人工神经网络模型,发现神经元信息处理与机器学习优化算法的关联关系,逐步强化对人类智能的模拟和仿生。类脑芯片、脑机接口、新型网络模型、自主学习算法、多模态融合、智能决策、小样本学习等相关研究成果将颠覆现阶段技术认知,为人类社会创造一系列产品和服务,大大促进经济发展和社会进步。

2 脑科学相关领域的现状和主要问题

21 世纪被称为脑科学的世纪。进入 21 世纪以后,科技发达国家和国际组织充分认识到脑科学研究的重要意义,相继加大投入并启动了脑科学计划,推动技术创新,开展多学科交叉和多层次的脑智科学研究,国际上关于脑与类脑领域的研究发展迅速。2010 年,美国启动人类连接组项目(Human

Connectome Project, HCP), 以获取和分享人脑结构和功能连接的高分辨率数据为目标, 使用磁共振成像技术绘制人类大脑中所有的神经连接图谱, 用于研究人脑网络组织特性, 以期解决与之相关的人类脑皮层解剖连接、功能连接和变异的基本问题, 彻底改变心理疾病、神经退行性疾病及大脑损伤的诊断和治疗现状。2013年4月, 美国启动推动创新神经技术的脑研究项目(Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies, BRAIN), 旨在绘制脑的动态图谱, 显示脑细胞和神经环路在时间、空间维度的相互作用, 探索大脑如何以“思维速度”处理信息。2013年10月, 欧盟启动人类大脑工程项目(Human Brain Project, HBP), 运用人工智能工程思维, 通过构建神经信息平台、大脑模拟平台、高性能分析和计算平台、医学信息平台、神经形态计算平台、神经机器人学平台等研究平台, 利用超级计算机技术来分析、模拟、测试和应用脑功能。2014年9月, 日本面向神经疾病启动集成神经技术的大脑图谱研究项目(Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies, Brain/MINDS), 通过融合灵长类动物多种神经技术的研究加快人类大脑疾病的研究。此外, 澳大利亚、加拿大、韩国也启动了脑科学相关的专项计划, 对大脑功能和机制开展研究工作。

中国科技部于2021年9月发布科技创新2030—“脑科学与类脑研究”(Brain Science and Brain-Like Intelligence Technology)重大项目申报指南, 重点围绕脑认知、脑医学、类脑智能开展研究, 搭建关键技术平台, 抢占脑科学前沿研究制高点, 标志着中国脑计划项目正式启动。目前, 中国科学院、复旦大学、北京大学、清华大学等70多家高校、科研院所已成立超过100个脑科学研究机构, 近千个研究组系统性开展脑科学相关研究。

一般来讲, 脑科学研究有3个方面, 一是认识脑, 以脑认知的神经原理为主要研究内容, 用于搞清楚大脑的信息处理机制、脑功能环路解析以及感知、意识、情感、学习、思维等功能分区和定位; 二是保护脑, 以大脑健康发育、脑疾病发病机理与防治方法为主要研究内容, 用于弄明白人类大脑健康发

育的过程和异常发生的根源, 进而研发药物成瘾、脑损伤、老年痴呆、精神分裂等神经性精神性疾病的康复和预防技术手段; 三是创造脑, 以开展大脑功能机理驱动类脑智能为研究内容, 广泛开展人工智能为导向的类脑研究, 通过计算和系统模拟推进脑认知计算模型、脑信息处理、类脑芯片、脑机接口、智能机器人等人工智能领域的研究与应用。

2.1 研究内容一: 认识脑

按照人脑解剖的角度来划分, 人脑分为左、右半球, 其中左脑主要从事连续性、延续性和分析性思维, 控制人的分类、记忆、推理、判断等行为, 是逻辑思维的源头; 而右脑则主要从事无序性、跳跃性和直觉性思维, 控制人的情感、艺术、灵感、想象等行为, 是创造力的源泉。胼胝体是联络左右脑半球的纤维构成的纤维束板, 能够维持两半球间的协调活动。进一步地, 人脑又可以细分为额叶、顶叶、枕叶、颞叶、小脑和脑干等部分。其中, 额叶与人类的判断、语义表达、情绪表达、行为控制、自我意识、人格、注意力等功能相关; 顶叶与人类触觉、味觉、嗅觉、空间感知、视觉、阅读、数学计算等功能相关; 枕叶与视觉信号整合、阅读、理解等功能相关; 颞叶与人的语言理解、音乐、记忆、听觉、情感、学习等功能相关; 小脑与人的动作协调、动作记忆等功能相关; 脑干与视觉反射、听觉反射、自主神经系统、机体调控等功能相关。进一步, 根据大脑皮质的细胞成分、密度、排列、构筑等特点, 将大脑皮质分为52分区, 也称作布罗德曼分区(图1), 每个分区与特定的功能相关。这样的划分对于研究大脑工作机制具有十分重要的意义, 它将感觉和运动功能划分为

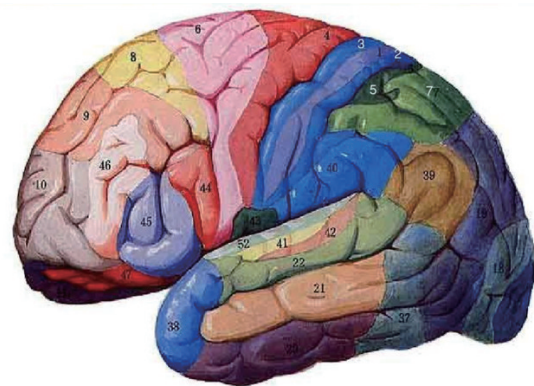


图1 大脑皮质布罗德曼分区

原级、次级和高级3个层次,原级皮质区只对特定的感觉刺激反应,次级皮质区处理由特定感觉通道传递过来的信息,高级皮质区一般位于顶叶、额叶、颞叶三脑叶边界重叠区域,将各种感觉信息整合成高层次的认知。

随着研究的持续深入开展,科学家在通过细化脑功能分区、丰富脑分区关联功能,逐步深化对人脑信息处理机制以及高级认知的形成过程的理解。2021年的研究发现,大脑左侧额下回、前岛叶皮层都参与了弱关联的语义和弱编码的情景记忆的提取,揭示了辅助语义记忆和情景记忆提取的共有神经环路,从而使得大脑能够灵活地提取功能不同的长时记忆^[1]。针对记忆如何维持问题,研究发现学习过程可诱导皮层星形胶质细胞产生新的激活信号,该信号由尼古丁受体所介导,是记忆维持的重要细胞机制,为理解记忆维持的机制阐明了新方向^[2]。有研究团队发现皮层和基底节神经元都有编码工作记忆的能力,并且皮层对于不同试验类型的编码轨迹受基底节到丘脑投射的特异性影响,而基底节的选择性也依赖于皮层,揭示了皮层、基底节和丘脑形成的多脑区网络共同调控工作记忆(短时记忆成分)信息的形成^[3]。长期以来,人们认为大脑听觉皮层的语言处理遵循先后顺序,即先处理听觉信息,然后将其转化为语言信息。然而,2021年8月,国外的一项研究发现声音和语言信息在大脑中是并行处理的,揭示颞上回可能独立于初级听觉皮层发挥作用,有望促进传统语音处理模型更新升级。文献[4]解析了从次级运动皮层到上丘的环路功能,揭示了它在决策相关运动规划中的关键作用及其信息处理机制,为人们理解运动规划背后的神经环路机制提供了新的实验证据。文献[5]在神经环路水平揭示了基于任务结构知识实现感知类别灵活决策的大脑运算机制,对于探索基于知识的灵活认知行为的神经环路运算原理起到关键的推动作用。文献[6]表明,alpha频段神经振荡采用不同相位分别对高显著性和低显著性的特征信息进行选择性加工,支持了注意过程的节律性和动态性,体现了大脑利用时间维度在视觉信息加工中的“时分复用”机制。文献[7]表明,知觉学习源于负责认

知功能的前额叶联合皮层和负责感觉编码的视皮层的协同作用,全面剖析了知觉学习导致熟能生巧的神经机制,对理解大脑学习的原理具有重要启示。文献[8]揭示了跨模态的词-义整合中心及其与认知控制系统之间的互动关系,揭示视觉字形区的本质或为多模态信息整合,为语义控制系统如何调控语义加工提供了全新的结果,强调了语义控制机制与语义表征之间的相互关系在很大程度上独立于模态和任务类型。

单个神经元具有精细的信息处理能力,是人脑信息处理的基础单元,它们通过不同的突触连接模式形成特定的神经环路,从而执行某种特别的功能。经过长期的研究,科学家了解了神经元越来越多的连接模式以及功能,通过对连接模式如何介导特定功能的研究,有助于进一步解析神经系统中信息处理和智能形成的原理。但是出于技术、数据、伦理等限制,现在的脑科学研究还限于小范围、小领域和小场景,通用原理和机制等问题还待进一步探索和突破,如单个神经元如何实现信息处理功能?神经元及其包含的所有突触相互之间连接模式的一般性原理是什么?神经元连接基础之上的信息层级编码、并行处理、决策融合、智能形成机制是什么?

2.2 研究内容二:保护脑

精神疾病是指在各种生物学、心理学以及社会环境因素影响下脑功能失调,导致认知、情感、意志和行为等精神活动出现不同程度障碍为临床表现的疾病。研究者认为,相比于特定的大脑化学因子,神经细胞间的连接、神经细胞生长以及神经网络功能才是影响某些精神疾病的主要因素。神经生物学家、精神病学家已经发现大脑前额叶、前扣带回、杏仁核、海马、丘脑等脑区、神经环路及其神经递质、神经营养因子、神经力学等的异常与大脑功能及其精神疾病有密切关系。例如杏仁核和情绪紧密相关,海马体在处理长时程记忆和回忆中发挥主要功能,丘脑将接收到的感觉信息传递给大脑皮层的对应区域并与双相情感障碍相关联。神经递质则可以通过给机体相应的刺激以保证大脑更好地行使功能,例如谷氨酸在双向抑郁症和精神分

裂症中发挥作用。对脑神经系统疾病的研究有助于阐明神经系统疾病的病因、机制,给精神疾病的诊断和治疗带来新的启发和帮助。

在构建脑疾病数据集方面,复旦大学构建的国际脑科学全维度脑库——张江国际脑库,完成合作采集脑卒中、抑郁症等国内重大脑疾病数据 1.5 万例。2023 年,张江国际脑库围绕精神分裂症、抑郁症、自闭症、脑卒中、精神退行性疾病以及大学生人群等 6 个队列,采集环境、行为、遗传、脑影像、神经等数据,将为脑疾病研究提供重要支撑。有研究团队基于静息态全脑功能连接建立预测模型,发现新冠肺炎疫情前个体脑影像能够显著预测疫情严重期的焦虑分数,该结果加深了对焦虑的神经基础的理解,为早期识别诊断焦虑障碍个体提供了关键的神经标记,也为情感障碍的神经干预治疗提供了重要的大脑靶点^[9]。文献[10]利用多模态磁共振成像技术,结合计算机化的认知任务,发现在帕金森早期中脑黑质致密部的结构损伤可能通过调节基底神经节的功能紊乱,影响患者加工序列信息的能力,反映出临床常用的抗帕金森药物无法治愈帕金森症的原因。文献[11]揭示了丘脑底核在序列工作记忆中的调节作用以及丘脑底核的异常激活与帕金森病序列工作记忆损伤的关系,提示下调丘脑底核的激活和上调丘脑底核与纹状体之间的功能连接可能是改善帕金森病患者序列工作记忆的潜在策略。不同神经精神症状的脑损伤机制不尽相同,文献[12]总结了阿尔兹海默症患者中各症状的大脑损伤模式,发现前扣带皮层是所有症状共同损伤的区域,并且前额叶区域,尤其是眶额叶皮层,是与大多数神经精神症状相关的关键区域。相比之下,前扣带-皮层下回路与阿尔兹海默症的淡漠相关,额叶-边缘回路与抑郁相关,而杏仁核回路与焦虑相关。文献[13]发现腹侧被盖区到中缝背核存在 2 条平行的抑制性通路,其中一条通路特异地参与吗啡成瘾,激活它可以显著降低对吗啡的耐受和成瘾,但不影响吗啡的镇痛效果,为吗啡成瘾的治疗提供了新靶点。文献[14]聚焦在高级枕叶皮层(MT 区)进行研究,结合视觉运动感知测量和临床诊断,从分子到行为揭示了抑郁患者视觉感知皮

层的功能异常(信息输入端),从而有望实现抑郁症的大规模筛查和疾病诊疗的关口前移。国外研究发现抑郁症、双相情感障碍、精神分裂症和强迫症,在大脑结果异常方面表现出惊人的高度相似性,研究结果显示这 4 种精神疾病结构异常的共享大脑区域主要位于与认知加工、记忆和自我意识相关的皮层区域。不同精神疾病共享的和特定于疾病的脑结构特征将促进未来精神疾病的智能诊断,例如抑郁症与非抑郁症在杏仁核区域有明显的对比表征,如图 2 所示。

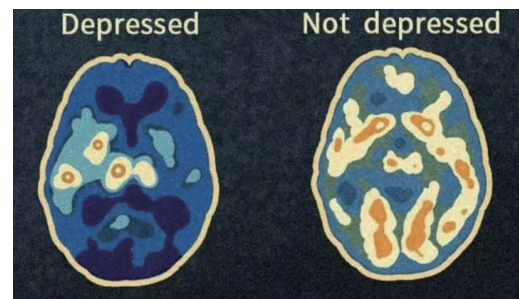


图2 抑郁症与非抑郁症杏仁核区域对比

研究人员和医学工作者对精神疾病的认识正在逐渐加深,对于其病因、机制也进行了更广泛的探查,并由此启发尝试了不同的诊断和治疗方案。然而,精神疾病的病因、发病机理、可逆性恢复原理等极其复杂,目前对于精神疾病的研究现在还处于点状突破的阶段,缺乏多点联动的精神疾病协同研究。潜在的研究问题包括:特定精神疾病与不同神经精神症状是否存在因果关联关系?是否存在某一标志物可以在分子、神经、行为、病理等多个水平作为某类精神疾病的一致性指征?某类精神疾病的关联脑区和神经环路到底有哪些,其致病机制是什么?此外,现实中的一些精神疾病患者,在承受精神痛苦的同时会在某一领域表现出超出常人的创造力,如贝多芬、牛顿等都有双相情感障碍的典型表现,但他们却成为了各自领域的天才。这其中的机制原理也是一项非常有意义的研究内容。

2.3 研究内容三:创造脑

近年来,各国的研究人员一致认为高度智能化构想的实现需要从脑科学中获得启发,于是类脑智能应运而生。类脑智能是受大脑神经运行机制和

认知行为机制启发,以计算建模为手段,通过软硬件协同实现的机器智能。对大脑的结构和功能理解是人类认识世界、认识自我的最终挑战,对目前的人工智能系统具有启发和验证意义,而类脑研究的目的在于认识大脑的基础上拓展大脑的智能,以便加深人类对自然、社会的影响,同时强化对人类自身的服务。类脑智能的研究主要从3方面开展:一是类脑计算软件系统,包括认知智能的计算和迁移学习机制、人工神经网络学习方法的创新与优化、脑启发的神经网络模型、多模态协同感知等;二是类脑芯片硬件系统,包括类脑芯片、忆阻器、类脑芯片设计及应用、类脑感知与信息处理工程化等;三是类脑应用产品系统,包括智能机器人、脑机接口器件、脑控设备等。

深度神经网络的建模和计算是以借鉴人脑为基础,例如利用激活函数更新权重思想来源于著名的生物学上的赫布定律(Hebb's rule),经常一起激活的神经元连接会加强,卷积神经网络(CNN)借鉴了人脑视觉的分层处理机制,注意力机制(attention mechanism)出于对人类视觉的研究,强化学习和人脑的多巴胺系统联系密切等。当前,数据驱动的网络模型智能遭遇了海量高质量标注数据不足、自主学习能力弱、迁移效果差、功耗高以及逻辑推理能力不足等瓶颈。认知能力驱动类脑智能有望有效补充上述模型的功能空缺并启发促进其持续优化。

人类可以通过少量的样本认识一种新物体,例如幼儿只需要几张图片就可以知道什么是“狗”、什么是“猫”。传统机器学习方法则需要构建分类模型并基于大量数据训练优化才能识别,并且识别准确性、灵活性等方面不及人类表现。在人类快速学习能力的启发下,研究人员提出了少样本学习(few-shot learning),试图通过少量样本进行快速学习。数据依赖的另一个解决方案是通过主动学习(active learning)降低人工标注数据的成本。该方案的思路是通过机器学习方法获取分类难度大的样本,并对此类样本进行人工确认和标注,最后用标注过的数据扩充原有数据集,从而实现机器学习模型性能的螺旋式上升。近几年,预训练技术成

功激活了神经网络对大规模无标注数据的自监督学习能力。预训练模型是通过在通用无标注数据上预训练得到的一个通用基础模型,相当于人类所拥有的基础先验知识。在此基础上,当模型被应用到新的任务,只需要对不同特定任务的有标注数据进行微调即可,而不需要针对每个任务专门研制模型。特别是基于Transformer的大规模预训练模型,如今无论是在单模态数据的多任务通用性,还是在多模态联合学习的能力上,都证明了自身的潜力。另外,人类在学习新事物时会充分利用以前学到的知识,这也是预训练模型的思想来源,元学习(meta learning)的目的是让机器学会学习(learning to learn),是指通过学习一些先验知识来辅助学习新的任务,增加了解决问题的灵活性,是更接近人类举一反三、触类旁通的学习方式,与少样本学习、预训练模型、迁移学习等概念紧密关联。上述人类认知启发的类脑智能方法有望将数据驱动的深度学习技术推向新的发展阶段。

科学家在类脑智能硬件和应用产品方面也取得了进展。类脑芯片,就是模拟大脑工作方式,在芯片架构上不断接近人脑,在功耗和计算学习能力上超越传统芯片。2019年8月,清华大学施路平团队开发出了全球首款异构融合类脑计算芯片^[5]。该芯片结合了类脑计算和基于计算机科学的机器学习,这种融合技术有望提升各个系统的能力,促进人工通用智能的研究和发展。2020年1月,清华大学微电子所、未来芯片技术高精尖创新中心钱鹤、吴华强团队与合作者研发出全球首款多阵列忆阻器存算一体芯片,实现了基于忆阻器阵列芯片卷积网络的完整硬件^[6]。该项成果在处理CNN时能效比前沿的图形处理器芯片(GPU)高2个数量级。2021年2月,北京大学黄如、叶乐课题组与合作者研制了一颗国际上功耗最低的通用型AIoT唤醒芯片,是国际迄今为止首次且唯一的“异步事件驱动型AIoT芯片”^[7]。该芯片语音关键词识别率达94%,异常心电图识别率达99%,功耗仅148 nW,可供5 mm纽扣电池(2 mAh)使用5年。2021年12月,新加坡科技与设计大学(SUTD)Desmond Loke团队开发出一种基于二维(2D)材料的新型人工突

触,能用于可高度扩展的类脑计算,并证明了这种人工突触可以同时作为功能性和沉默突触的相同设备,可显著降低硬件成本^[18]。2022年2月,复旦大学李卫东团队开发了多通道全无线神经信号记录芯片模组,为深入研究大脑机理提供了高通量、微负荷神经元同步记录与分析系统,并成功应用于原发性癫痫非人灵长类动物模型建立^[19]。

脑机接口(Brain-Computer Interface)是指通过在人脑神经与外部设备(如机器人、智能假肢等)间建立信息通路,来实现神经系统和外部设备间信息交互与功能整合的技术。该技术直接使用大脑进行计算、控制,可有效扩展大脑的应用。2020年5月,美国贝勒医学院Daniel Yoshor研究团队通过脑机接口技术,使用动态电流刺激大脑皮层,将视觉信息直接传递给大脑,帮助失明患者绕过受损的眼部和神经,恢复视力^[20]。2021年4月,美国Neuralink公司在猴子大脑中成功测试了脑机接口技术的基础上,实现了猴子仅通过大脑意念就可以玩模拟乒乓球电子游戏^[21]。2021年5月,由斯坦福大学、霍华德·休斯医学研究所(HHMI)、布朗大学等机构的科研人员联合研究开发了意念写字系统,如图3所示,并从脑电信号中解码手写字母的动作,可以使瘫痪人士将意念中的写字动作实时转换成屏幕上的文字^[22]。其他类似的研究成果和产品还包括仿生义肢、意念操控机器人等,相关脑机接口产品应用于医疗领域,对智能辅助、助残养老等领域具有重要意义。

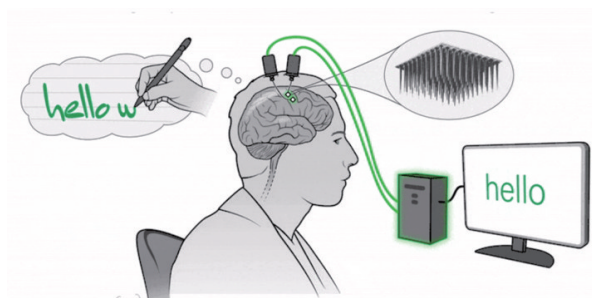


图3 脑机接口实现意念写字

虽然类脑智能领域已经取得了一系列鼓舞人心的科研成果,也涌现出一批优秀的科技产品,但相对大脑本身的智能程度来说,现阶段类脑智能的研究成果依然不够智能,研究发展依然缓慢。这主要是受限于以下3个方面的因素:一是大脑认知机理尚不清楚,对人类大脑的认识和开发还远远不足;二是类脑计算模型和算法尚不精确,缺乏多脑区的联合协同建模;三是受现有计算架构和能力的约束,计算、存储、并行率等方面差异较大。另外,脑机接口技术是类脑领域目前唯一产业化的方向,其产品的体积、功耗、安全、延时、造价等问题都值得关注。

3 未来发展方向和需要解决的关键科学问题

大脑是地球上最复杂的信息传感与处理系统,其结构复杂、功能复杂、机理复杂,比目前规模最大的超级计算机还要复杂无数倍。1906年,高基和拉蒙因对神经系统结构的研究有杰出贡献,共同获得诺贝尔生理或医学奖。从此至今的100多年里,神经元功能“突触”概念、神经冲动的化学传递机制、神经状态控制的离子机制、视觉系统的机理、大脑定位导航系统及机理等诸多脑科学相关的研究获得了诺贝尔奖。这些脑科学领域的重要发现大多涉及大脑的信息处理和智能形成。目前,研究人员已对大脑的信息传导机制、大脑功能分区有相对清楚的理解,但是对大脑的信息处理、网络结构、高级认知功能等还知之甚少。可以说人类对大脑已经有了初步的认识,但还缺乏深入理解和重大突破。

2018年,中国科学家讨论确定了“中国脑计划”的内容,按照“一体两翼”的结构开展全面研究。所谓的“一体两翼”与目前正在开展的脑科学研究内容是基本一致,很好地指明了该领域未来发展的大方向。“中国脑计划”也因此成为世界范围内公认最完善、方向最好的脑计划。在“一体两翼”研究框架下,脑科学未来可能的发展方向包括:(1)基于

人脑信息处理机制的脑认知研究;(2) 大脑结构图谱绘制及其信息挖掘研究;(3) 脑功能性疾病的早期检测与预防研究;(4) 精神类疾病致病机理与诊治方法研究;(5) 类脑计算与类脑智能理论与应用研究。

需要解决的关键科学问题包括以下4点。

1) 大数据驱动的人脑信息处理机制。进行脑认知功能研究的前提是研究清楚神经元的种类、类型与分布,以及对大脑结构图谱进行绘制,即要清楚大脑汇总每一类神经元的相互连接关系,明白信息的输入输出路径。这两项工作工程庞大,世界各国都已经开始研究。这些关键数据将为人脑信息处理机制的研究提供极其重要的支撑。采用人工智能思维,以大数据为驱动,挖掘不同类型数据的共享信息,构建数据的多层级表示,开展大数据的时序特征提取与时空融合,挖掘过程中电信号出现的位置、时间、强度等信息,实现对信息处理中并行、时序、层级、关联等关系的把握,从而了解人脑信息处理机制,同时也实现了人工智能技术对脑科学研究的反哺,相互反馈促进。

2) 多脑区协同的人类智能形成机制。大脑是由不同的脑区来完成不同的功能,多个脑区之间又有联合学习的能力。感知器官从外界收集到的信息分别经过对应脑区大脑皮层处理后,经特定脑区转化为更复杂的特征组合,并最终形成意识。可见,在与外界的频繁交互过程中,大脑各部分的协同配合才能形成智能。研究联合多脑区特征的智能融合技术,构造多脑区状态信息的联合表达,构建多脑区信息的多层次协同分析理论,厘清智能形成过程中各脑区的作用、功能和定位,从而不仅可以进一步明确人类智能的形成机制,还能在构建人工神经网络新框架、类人智能等方面产生积极的引领和推动作用。

3) 多标志物联动的脑疾病发展机理。早期诊断和早期干预是对脑疾病最有效的医疗方式。在人类完全理解脑疾病的致病机理前,需要研究有效预警和早期诊断的各种指标或标志物,包括但不限于基因、体液、不同水平的脑相关标志物。脑疾病和标志物存在多对多的关系,单一标志物无法作为

脑疾病发展状态的有效指征。通过研究多标志物的联动状态趋势,将有助于发现脑疾病的发生、发展机理,有助于研发疾病诊治的药理、生理和物理新技术和新方法,同时也有助于发现新的关联标志物,从多维度、多角度、多方位拓展脑疾病的综合治疗策略,从而为突破帕金森、阿尔茨海默、自闭症等脑疾病提供强有力支撑。

4) 多模态融合类脑深度计算机理。大脑具有强大的多模态信息处理能力,虽然目前深度学习的研究已经能够有效描述视觉、听觉等单模态感知数据中的高层语义信息,却难以支撑类人智能的多模态融合计算技术与应用。研究多模态融合类脑深度计算机理,揭示多种类人智能多模态数据的最优化融合策略,发现多模态实时数据并行加速的深度学习方案和高效的硬件加速方法,建立迭代反馈和分层融合的协同认知过程和计算模型,从而不但能够提升类脑智能的综合性能,更重要的是有助于使用信息技术模仿大脑功能,对大脑开展反向工程,在模仿过程中促进大脑机制的探索。

4 可实施的建议与措施

1) 多学科交叉融合。脑科学研究是人类一直探究的重点领域之一,其作用明显、影响深远。脑科学的研究与应用是一个多学科融合的大项目,涉及范围广泛。近年来,该领域研究成果取得一些进展,若进一步深入发展需要多学科的交叉和融合。这些学科包括生物学、医学、工程学、心理学、人工智能、计算机科学等。

2) 产学研合作促进。类脑智能方面要强化政产学研合作,打通创新链条、促进创新发展,从科研、技术和产业等多个维度构建体系化布局,持续加大对原始科研创新的重视力度,推动理论、方法和技术体系的创新。围绕实施创新驱动发展战略,加快打造协同创新平台,有力促进科技难题攻坚和成果转化。借鉴国内外先进经验,突出产学研多方合作在脑科学与类脑研究创新中的合力作用,构建国内多方协同的创新、创业体系。

3) 国际化交流共享。脑信息处理及人类智能

形成机制是全人类需要共同破解的难题,面对人类共同的“终极疆域”,在开放、共享、合作、交流的国际格局中,脑科学领域的国际合作与交流、全球创新网络融入、国际创新资源整合尤为重要。措施包括整合世界各地科研机构力量,组建跨学科、跨地域的科研团队;促进数据资源标准统一,推动国际数据共享;建立有利于研究成果转化应用的合作机制;推动脑科学领域成果的教育与普及等。

4) 战略性规划部署。为破解脑科学及类脑研究实力分散、投入分散、方向分散、转化困难等问题,需从国家层面面向科学、面向社会、面向健康,统揽全局、科学规划中国脑科学领域的前沿布局,整合相关科研团队、平台、市场等有生力量,优化并集中政策、人员、经费、场地等资源配置,明确部署重点领域和技术突破点,集中力量办大事。强化对脑科学、人工智能领域的持续投入,加强对相关领域基础教育的重视,构建合理高效、稳定持久、可持续发展的长期发展规划。

5) 科研型人才培养。要推进科研型人才培养机制改革,创新人才培养方案,加强人才培养力度。脑科学与类脑研究是专业跨度大、集成度高、综合性强、准入门槛高的新兴学科,在人才培养的过程中应大胆探索构建新学科教学体系,主动改革传统的学科设置和评价模式,引导学生开展跨学科学习和研究,提高自主创新能力。加强高层次人才队伍建设,创造有利于自主创新人才成长的良好体制、机制环境,激励中青年优秀科研人才脱颖而出。

参考文献(References)

- [1] Vatansever D, Smallwood J, Jefferies E. Varying demands for cognitive control reveals shared neural processes supporting semantic and episodic memory retrieval[J]. *Nature Communication*, 2021, 12: 2134.
- [2] Zhang K, Förster R, He W J, et al. Fear learning induces $\alpha 7$ -nicotinic acetylcholine receptor-mediated astrocytic responsiveness that is required for memory persistence[J]. *Nature Neuroscience*, 2021, 24: 1686-1698.
- [3] Wang Y, Yin X X, Zhang Z Z, et al. A Cortico-basal ganglia-thalamo-cortical channel underlying short-term memory[J]. *Neuron*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.08.002>.
- [4] Duan C A, Pan Y X, Ma G F, et al. A cortico-collicular pathway for motor planning in a memory-dependent perceptual decision task[J]. *Nature Communication*, 2021, 12: 2727.
- [5] Liu Y, Xin Y, Xu N L. A cortical circuit mechanism for structural knowledge-based flexible sensorimotor decision-making[J]. 2021, 109(12): 2009-2024.e6.
- [6] Jia J, Fan Y, Luo H. Alpha-band phase modulates bottom-up feature processing[J]. *Cerebral Cortex*, 2022, 32(6): 1260-1268.
- [7] Jing R, Yang C, Huang X, et al. Perceptual learning as a result of concerted changes in prefrontal and visual cortex[J]. *Current Biology*, 2021, 31(20): 4521-4533.
- [8] Qin L, Lyu B J, Shu S, et al. A heteromodal word-meaning binding site in the visual word form area under top-down frontoparietal control[J]. *The Journal of Neuroscience*, 2021, 41(17): 3854-3869.
- [9] He L, Wei D, Yang F, et al. Functional connectome prediction of anxiety related to the COVID-19 pandemic[J]. *American Journal of Psychiatry*, 2021, 178(6): 530-540.
- [10] Liu W, Wang C, He T, et al. Substantia nigra integrity correlates with sequential working memory in Parkinson's disease[J]. *Society for Neuroscience*, 2021, 41(29): 6304.
- [11] Ye Z, Zhang G Y, Zhang Y S. The role of the subthalamic nucleus in sequential working memory in de novo Parkinson's disease[J]. *Movement Disorders*, 2021, 36(1): 87-95.
- [12] Chen Y, Dang M, Zhang Z. Brain mechanisms underlying neuropsychiatric symptoms in Alzheimer's disease: A systematic review of symptom-general and-specific lesion patterns[J]. *Molecular Neurodegeneration*, 2021, 16(1): 38.
- [13] Li Y, Li C Y, Xi W, et al. Rostral and caudal ventral tegmental area GABAergic inputs to different dorsal raphe neurons participate in opioid dependence[J]. *Neuron*, 2021, 109(23): 3893-3894.
- [14] Liu D Y, Ju X, Gao Y, et al. From molecular to behavior: Higher order occipital cortex in major depressive disorder[J]. *Cerebral Cortex*, 2021(10): 10.
- [15] Pei J, Deng L, Song S, et al. Towards artificial general intelligence with hybrid Tianjic chip architecture[J]. *Nature*, 2019, 572: 106-111.
- [16] Yao P, Wu H, Gao B, et al. Fully hardware-implemented memristor convolutional neural network[J]. *Nature*,

- 2020, 577: 641–646.
- [17] Wang Z, Liu Y, Zhou P, et al. A 148-nW reconfigurable event-driven intelligent wake-up system for AIoT nodes using an asynchronous pulse-based feature extractor and a convolutional neural network[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2021, 56(11): 3274–3288.
- [18] Hao S, Zhong S, Ji X, et al. Activating silent synapses in sulfurized indium selenide for neuromorphic computing[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(50): 60209–60215.
- [19] Yang X, Chen Z, Wang Z, et al. A natural marmoset model of genetic generalized epilepsy[J]. Molecular Brain, 2022, 15(1): 1–4.
- [20] Beauchamp M S, Oswald D, Sun P, et al. Dynamic stimulation of visual cortex produces form vision in sighted and blind humans[J]. Cell, 2020, 181(4): 774–783.
- [21] Neuralink show & tell fall 2022 news roundup[EB/OL]. [2023-03-14]. <https://www.teslarati.com/elon-musk-neuralink-show-and-tell-fall-2022-updates>.
- [22] Rajeswaran P, Orsborn A L. Neural interface translates thoughts into type[J]. Nature, 2021, 593: 197–198.

Advances and prospects of human brain information processing and brain-like intelligence

BAO Yanwei^{1,2}, REN Fuji^{2,3*}

1. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China
2. Innovative Research Institute on High-end Intelligent Machines of Anhui, Hefei 230088, China
3. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract Brain science is regarded as the "ultimate frontier" to understand the relationship between universe, nature and human beings, and human beings have never stopped exploring human brain and imitating its mechanism. In the past few centuries, human beings have gained certain understanding of the anatomical structure of human brain and unique functions of each part of the human brain, but its information processing mechanism, the formation of intelligence and other issues need to be further explored. At the same time, it is of great significance to investigate the information processing way of human brain to the study of brain-like intelligence, which plays an important role in expansion and application of human intelligence and is the next goal of AI. Based on extensive research on brain science and brain-like intelligence research at home and abroad, this paper addresses some key scientific issues from a perspective of AI technology in terms of brain information processing mechanism driven by big data, human intelligence formation mechanism based on multiple brain regions collaboration, development mechanism of brain diseases with multi-marker linkage and the mechanism of brain-like depth computing based on multi-modal fusion. It is also suggested to strengthen brain science and brain-like intelligence research from the aspects of interdisciplinary integration, industry-university-research cooperation promotion, international exchange and sharing, strategic planning and deployment, training of scientific talents and so on.

Keywords brain science; information processing; brain-like intelligence ●



(责任编辑 王丽娜)