

5-20-2024

Brain science and brain-inspired intelligence in intelligent era

Xu ZHANG

Chinese Neuroscience Society, Shanghai 200032, China; Guangdong Institute of Intelligence Science and Technology, Zhuhai 519031, China, xu.zhang@gdiist.cn

Recommended Citation

ZHANG, Xu (2024) "Brain science and brain-inspired intelligence in intelligent era," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 39 : Iss. 5 , Article 6.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20240305003>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol39/iss5/6>

This High Ground of Science and Innovation is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.



Brain science and brain-inspired intelligence in intelligent era

Abstract

With intelligence technology as the core technology and intelligent computing power as the productive force, the intelligent era has once again pushed brain science to the forefront of world science and technology. Brain science is the science that studies the nature and rule of cognition and intelligence of human, animal, and machine. A comprehensive analysis of the structure and functional connection rule of the nervous system will eventually draw the functional connectivity map of the brain. In the past decade, neuroscience research has been committed to systematically analyzing the types of neurons and neural structural connections of the nervous system, and has made phased progress under the drive of single-cell transcriptome analysis, neural network structure tracer and other technologies. The analysis of the human brain, the most complex information and intelligence system, will enlighten the brain-inspired intelligence theory and technology, that is, the intelligence theory and technology inspired by brain science/ neuroscience. In the era of intelligence, the interdisciplinary research paradigm of brain science research has promoted brain-inspired intelligence research fields such as brain-computer interface and brain-inspired intelligent computing to join brain science. Neural decoding and coding techniques of brain-computer interface provide important functional research techniques and methods for mapping functional neural networks of human brain, and explore the application in the clinical diagnosis and treatment of brain diseases. Brain-inspired computing is becoming a new paradigm of brain science research. By learning from the basic principles of brain processing information and learning, a new type of brain-inspired computing system with high energy efficiency, high speed and intelligence can be developed. The use of the developed brain-inspired computing system can accelerate the development of brain simulation and digital brain, promote the understanding of brain mechanism and the treatment of brain diseases, and develop digital brain science and brain medicine. The newly emerged spiking neural network-based intelligent processor has laid the foundation for the construction of large-scale brain-inspired intelligent computing system, and the future brain-inspired supercomputing power is likely to exceed the human brain computing power, which will affect the transformation of intelligent science and technology and the development of human society.

Keywords

neuroscience, brain imaging, brain connectivity map, brain-computer interface, brain-inspired intelligence, brain-inspired computing, spiking neural network processor, brain-inspired processor (BPU)

引用格式:张旭. 智能时代的脑科学与类脑智能研究. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 840-850, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240305003.
Zhang X. Brain science and brain-inspired intelligence in intelligent era. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(5): 840-850, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240305003. (in Chinese)

智能时代的 脑科学与类脑智能研究

张 旭

1 中国神经科学学会 上海 200032
2 广东省智能科学与技术研究院 珠海 519031

摘要 以智能科技为核心技术、智能算力为生产力的智能时代再次把脑科学推向世界科学与技术前沿。脑科学是研究人、动物和机器的认知与智能的本质和规律的科学。对神经系统结构和功能联结规律进行全面解析将最终绘制成脑功能联结图谱,近10多年来神经科学研究致力于系统性地解析神经系统的神经元类型和神经结构连接,在单细胞转录组分析、神经网络结构示踪等技术推动下取得了阶段性进展。解析人类大脑这一最为复杂的信息和智能系统,会启迪类脑智能理论和类脑智能技术,即脑科学/神经科学启发的智能理论和技术。在智能时代,脑科学的多学科交叉研究范式促使脑机接口、类脑智能计算等类脑智能研究领域加入脑科学。脑机接口的神经解码和编码技术为绘制人脑功能神经网络图谱提供了重要的功能研究技术和方法,并且可探索在脑疾病临床诊治上的应用。类脑计算正成为脑科学研究的一种新范式,借鉴脑处理信息和学习的基本原理发展高效、高速和智能的新型类脑计算系统,利用发展的类脑计算系统可以加速发展脑模拟和数字大脑,促进理解大脑运行机制和治疗脑疾病,发展数字脑科学和脑医学。新近出现的脉冲神经网络智能处理器为构建大规模类脑智能计算系统奠定了基础,未来类脑超级算力极可能超过人类大脑算力,影响智能科技变革和人类社会的发展。

关键词 神经科学, 脑成像, 脑功能神经网络图谱, 脑机接口, 类脑智能, 类脑计算, 脉冲神经网络芯片, 类脑处理器 (BPU)

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20240305003

CSTR 32128.14.CASbulletin.20240305003

资助项目:国家自然科学基金(32192413、32030050),广东省重点领域研发计划(2023B0303010002),
广东省高水平创新研究院项目(2021B0909050004)

修改稿收到日期:2024年5月8日

20世纪90年代末,随着互联网的出现,人类社会步入智能时代,其标志是计算机科学和信息技术迅速发展、互联网普及、大数据兴起、人工智能(AI)技术进步。智能时代是以智能科技为核心技术、智能算力^①为代表性生产力的时代。近年来,随着计算机算力的增加,AI技术得到了快速发展和应用,人们推测当计算机的智能算力超过人脑的算力时,可能引发智能科技的变革。理解人脑如何能够低能耗地进行大规模智能计算的原理是开发下一代智能算力的源泉。脑科学(brain science)是研究人、动物和机器的认知与智能的本质和规律的科学。人类大脑是最为复杂的信息和智能系统,对脑感知、认知功能神经网络的解析会启迪类脑智能理论和类脑智能技术^②。脑科学研究将如何贡献于智能时代的社会发展?在智能时代,脑科学研究正凸显它的多学科交叉研究的特征,以及学术研究与工程技术并举的特征,脑科学由此新纳入了脑机接口、类脑智能计算等研究领域^[1,2]。解析脑认知功能网络是发展类脑智能的基础。2023年,研究者绘制了小鼠大脑的完整细胞图谱,以及较为全面的人脑和非人灵长类动物大脑图谱,脑机接口进入人体临床试验。类脑智能研究与开发是脑科学新的前沿领域。新近出现的类脑处理器单元^③使构建大规模类脑智能计算系统成为可能,未来类脑超级算力极可能超过人类大脑算力,促进智能科技变革和影响人类社会的发展。

1 智能时代脑科学的新领域——类脑智能

1.1 智能时代的科技内涵

智能时代的内涵是通过机器智能的发展和应用,推动一场以大数据为基础的技术革命,智能计算系统能够模拟和扩展人类的智能,具备感知、理解、学习

和决策等能力。目前,计算机机器智能在语音识别、机器翻译、文本摘要或创作及自动回答问题等领域逐渐超越人类智能,能够处理原本只有人类才能处理的复杂问题。人机环境系统之间的紧密协作和优势互补,人机交互不仅仅依赖于计算机知识和数学算法,还融合了哲学、神经科学、心理学、语言学、社会学等学科,实现全面和综合性智能化应用,通过物联网、大数据分析和AI等技术的融合,设备、系统和环境更加智能互联和协同。智能技术帮助人类创新和创造,模拟、延伸和扩展人类智能,拓展人类认知的疆界,深刻地改变人类社会结构、生活方式和社交模式。

智能时代的核心科技是智能科技。智能时代生产力的特征是智能算力,超级智能计算系统(super intelligent computer)、智能芯片(intelligent chip)等智能计算设施和器件是制造智能算力的关键技术。脑科学及神经科学(neuroscience)、计算机科学、数学、普适智能计算系统、无线传感器网络、智能物联网和区块链等智能技术,推动着新的科技革命与产业变革。智能化设备和系统的大规模、综合性运用,构建大型综合性智能互联和智能化管理系统,形成智能经济和智能社会,使人类的生产和生活方式发生根本性的改变,推动人类社会的高效和可持续发展。

1.2 类脑智能科技的内涵

脑科学已经成为世界科技战略制高点,人类开始描绘“智力蓝图”(intelligence blueprint),其目的是理解认知等大脑高级功能的物质及结构基础,在防治认知障碍性疾病的同时,建立一套脑科学的智能理论和类脑智能科技。

狭义类脑智能(brain-inspired intelligence)是借鉴生物脑的感知认知行为机制和信息传递机制,构建

① Intelligent computing power, 又称“智能算力”。

② 脑科学、神经科学启发的智能科学和技术(brain-inspired intelligence science and technology)。

③ Brain-inspired processor unit, 简称为“BPU”。

相关类脑智能算法、模型和系统，并通过软硬件协同实现的机器智能。狭义类脑智能与传统的AI有较大的区别，后者是一门结合了数学、计算机科学、心理学等多学科理论发展起来的新技术。类脑智能计算^④的计算速度快、能耗少、逻辑分析和推理能力更强，类脑智能计算机体积小。类脑智能有望对计算系统架构、智能芯片、智能计算机、智能机器人进行颠覆性创新，在智能时代有着广泛的应用前景。

广义的类脑智能包括类脑血管系统等生物脑的非神经元及神经网络系统。大脑是能量消耗和热量产生最显著的器官，大脑消耗人体20%—25%的能量，安静时大脑产热为人体产热量的16%，大脑思考时消耗人体30%—50%的能量，产热也增加。脑血管丰富、血流量大，思考时脑血流加快、散热增加，人体皮肤血液循环是主要散热途径。类脑血管散热系统有助于设计更加节能、更小体积、更为安静、更快速度和更加智慧的类脑智能计算机系统。广义的类脑智能还包括正在兴起的类脑组织工程（brain-like tissue engineering），其应用多能干细胞诱导分化的方法，获取具有大脑细胞类型及结构的类脑器官，模拟和重现大脑的结构和功能及疾病发生过程，并探索类脑器官的潜在医学应用，以期恢复、维持或改善损伤大脑的功能。

因此，类脑智能的科技目标是分别在硅基和碳基上构造类似生物脑的结构和功能/智能，并在智能芯片、计算机、机器人、脑医学等方面加以应用。类脑智能研究领域已成为脑科学的一部分^[1]，使传统的脑科学研究成为从发现步入创造的一门学科，其科研成果也呈现多种形式和类型。类脑智能也写入了《神经科学》教科书^[2]。中国神经科学学会成立了脑机接口与交互分会和类脑智能分会，发表了《类脑智能产业与技术发展路线图》^[3]。2022年Nature发文，认为类

脑计算急需一幅宏大蓝图^[4]。

2 解析脑认知功能网络

解析脑认知功能网络是最终阐明智力起源的必由之路，同时可揭示人脑的工作原理，提升和扩展人的智力和创造性，启发类脑智能理论和类脑智能技术。人脑认知神经网络的功能依赖于860亿个神经元互相联结的物理模式，大量神经元通过复杂的联结以模块化的多层次结构来实现感知和认知功能。神经元在微纳米尺度上通过突触连接的构架与信号传递，在百微米尺度表现为大脑皮质功能柱等局域神经环路与信息编码，而在宏观尺度上实现不同脑区的神经网络联结与认知功能。值得注意的是长期以来缺乏对人脑左右半球的推理、演绎、逻辑、数理、情感、语言、社会认知、艺术、创造等高级功能的深入解析，以及其深层次的信息处理机制。

对脑感知认知神经网络结构的研究主要通过神经元类型和神经结构连接进行系统性的普查，绘制多尺度（从突触到脑区到整个大脑）、多分辨率的脑图谱（brain atlas）。对人脑感知认知神经网络功能及机理的研究主要通过脑形态和分子成像、脑机接口等技术检测神经元及神经环路活动，记录大脑脑区一定时期内较为完整的神经元动态活动，各类神经递质的存储、释放、调制等活动过程，解析脑功能的编码与解码机制。脑机接口正在发展生物相容性好的柔性脑机接口系统，以及高集成度和高分辨率的脑电、脑磁信号采集和智能化分析技术平台。通过对神经系统结构和功能联结规律进行全面解析将最终绘制成脑功能联结图谱（brain connectivity map）。

2023年，在美国“脑计划”和中国“脑计划”分别支持下，小鼠大脑的完整细胞图谱，以及迄今最全面的人脑和非人灵长类动物大脑的遗传、细胞和结构

④ Brain-inspired computing, 又称“类脑智算”。

组成图谱得以绘制^[5,6]。中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心及合作者开发了高精度大视场时空组学测序技术，绘制了猕猴皮层的细胞类型、分子特征及其空间分布图谱^[7]。北京大学开发了一系列神经肽荧光探针，实现了对特定神经肽生物活性的实时、在体、高效和特异性的检测，为研究神经肽在生理和病理状态下的释放过程、调控和功能提供了重要工具^[8]。Musall 等^[9]发现了大脑皮层锥体细胞类型在决策过程中驱动不同功能的皮质活动模式，揭示了神经元类型特异性的皮层动力学塑造了感知决策。Stine 等^[10]报道了上丘在终止积累证据、进行选择决策中起着重要作用。Gordon 等^[11]在大脑运动皮层发现了“躯体感觉-

认知活动网络”。广东省智能科学与技术研究院（以下简称“广东省智能院”）揭示了一条新的且不通过丘脑的脊髓-皮层直接通路（图 1），并阐明了此通路在痛觉调控中起重要作用，突破了躯体感觉信息必须经由丘脑传递至大脑皮层的传统观点，建立了皮层神经元直接接受脊髓投射神经元调控的新概念^[12]。

近期脑机接口技术取得了重要的进展。美国加州大学旧金山分校通过语言脑机接口使一位 18 年前因脑干中风造成的失语症患者重获语言沟通能力，实时文本合成速率在 78 个词/分钟，错误率 25%^[13]。中国科学院微系统与信息技术研究所、复旦大学附属华山医院和上海脑虎科技有限公司以蚕丝蛋白材料、微机电

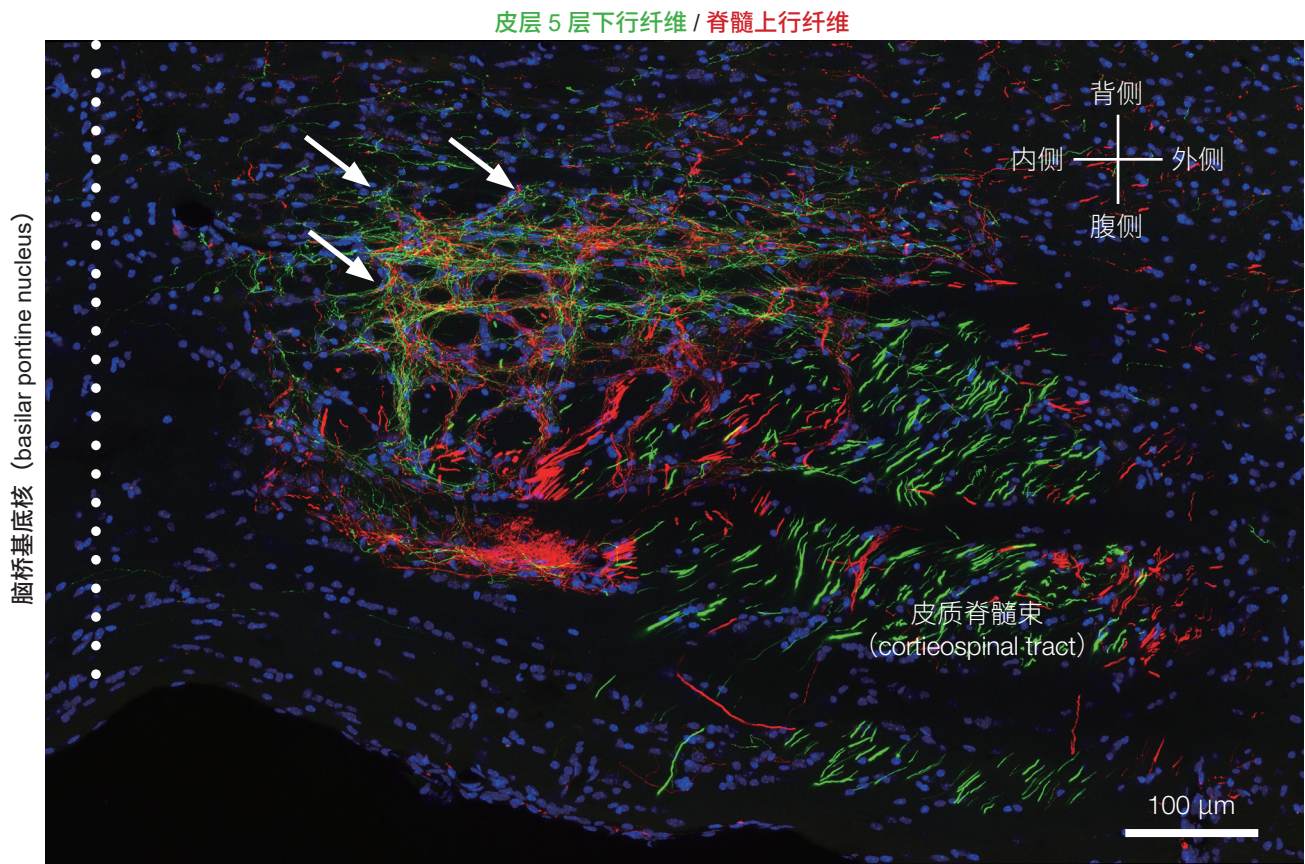


图 1 脊髓-皮层直接通路中大脑感觉运动皮层第 5 层下行运动调控神经纤维和脊髓上行躯体感觉神经纤维在脑桥基底核中交汇（箭头）并形成直接联接

Figure 1 In direct pathway of spinal cord to cerebral cortex, descending motor-regulatory nerve fibers of the fifth layer of sensorimotor cortex and ascending somatosensory nerve fibers of spinal cord intersect in basilar pontine nucleus (arrow), forming a direct connection

系统 (MEMS) 等技术研制出的高通量、高密度、超柔性的记录电极, 针对柔性脑机接口植入过程中的创伤问题, 开发了一种类蚊口器仿生柔性神经探针 (图2), 能够穿透硬脑膜实现多脑区微创植入, 可感知植入过程中颅内血管的存在并提供损伤预警, 并可实现大脑神经信号的术后即时采集和长期稳定跟踪^[14]。他们开展了单神经元记录、运动功能重建和汉语合成相关的柔性脑机接口人体临床试验 34 例, 在国际上率先通过柔性脑机接口实现了癫痫患者实时多通道单神经元放电脉冲信号记录, 实现了患者实时运动解码通过意念完成打乒乓球的电子游戏 (延迟小于 50 毫秒, 准确率大于 90%), 实现了临床汉语语音语调解码与合成 (在无语言模型辅助下语音合成成功率高于 90%)。

解析认知功能神经网络, 将为基于神经环路的干

预措施、中枢神经系统的功能调节、神经精神疾病的治疗提供灵感与思路。应用遗传学、分子生物学、物理化学技术、脑机接口与交互技术研究感知与认知神经元的发育、病变和衰老过程, 以及认知障碍性疾病病因和治疗, 将引领新的诊断和治疗技术的发展和运用, 提高人类的生活质量。2023 年, 浙江大学发现新型抗抑郁药物氯胺酮与其靶点 N-甲基-D-天冬氨酸 (NMDA) 受体相互作用中独特的生物物理特性可能是其发挥长效作用的关键因素, 为改造氯胺酮和开发更安全有效的新型抗抑郁药物提供了方向^[15]。中国科学院深圳先进技术研究院提出了一种用于治疗帕金森病的新型神经调控技术, 在不影响大脑其他神经环路的情况下对帕金森病累及的关键神经环路进行精准靶向干预, 为临床治疗提供了新策略^[16]。厦门大学发现

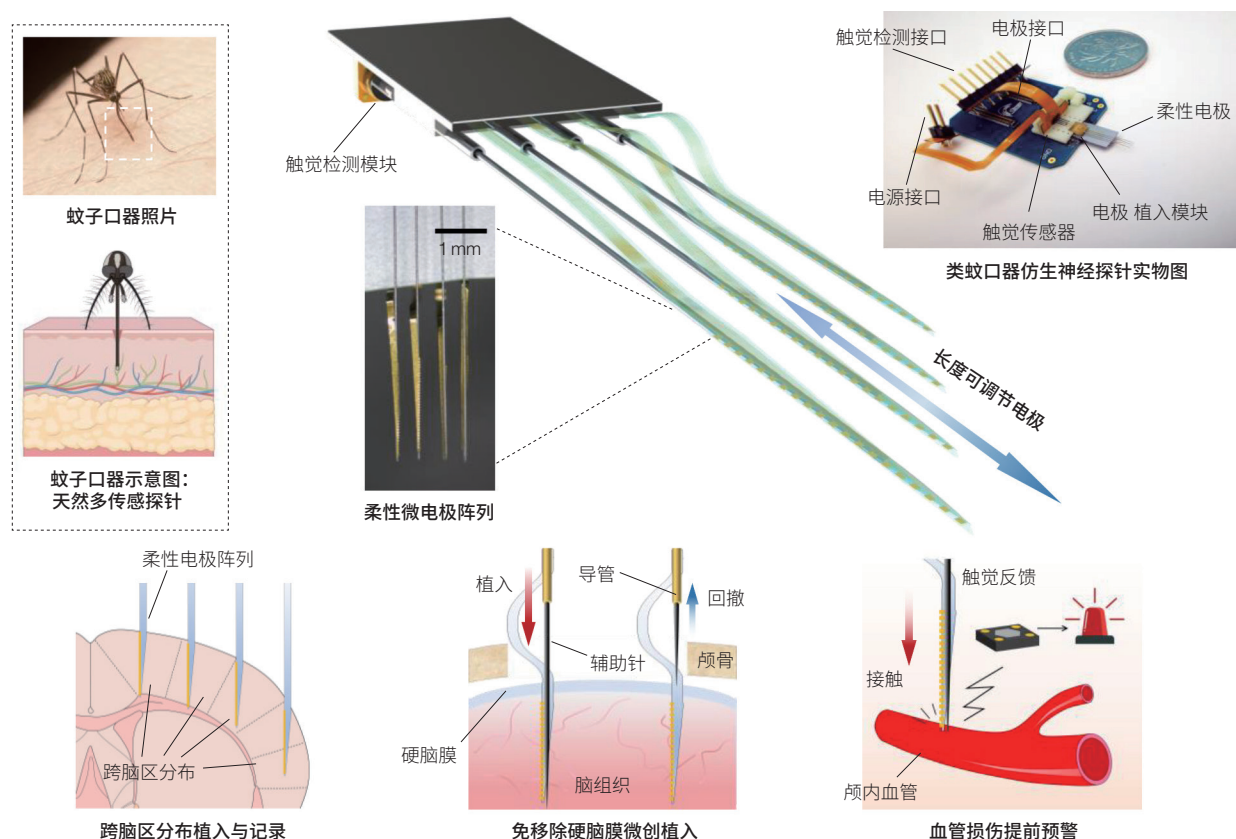


图2 类蚊口器仿生柔性神经探针及其大脑神经信号采集装置

Figure 2 Mosquito mouthpiece-like biomimetic flexible neural probe linked to device for acquisition of neural signals

了游离的主要组织相容性复合体I组成亚基 β_2 -微球蛋白是介导淀粉样蛋白毒性的关键致病因子，修正和丰富了阿尔茨海默病（AD）淀粉样蛋白学说^[17]。我国企业界也开始从事脑疾病基础研究和药靶研究，上海魁特迪生物科技有限公司在2023年报道了人类DNA损伤诱导性转录物4样转录物（DDIT4L）内含子保留（DIR）与AD样认知障碍和淀粉样斑块形成有关^[18]。未来，可以期待我国更多的企业研发机构会投入脑疾病机理研究和诊疗技术开发。

3 开发类脑智能

人类大脑是最为复杂的信息和智能系统，对脑认知功能网络的理解会启迪类脑智能理论和类脑智能技术。类脑智能研究要发展类脑智能算法、感知认知模型和技术，目前主要体现在借助人脑信息处理机制，用脉冲信号表示时序信息的脉冲神经网络（SNN）^⑤计算，有效地处理大量的非结构化数据，如图像、声音和文本等。类脑智能将从“脑结构启发”向“兼顾脑结构启发和脑功能启发”迈进，“感知”和“认知”智能协同发展，由“专用智能”向“通用智能”转变。目前的研究方向有：①借鉴人脑存储和计算合二为一的特点，研发存算一体计算框架和算法模型，突破“存算墙”的限制；②实现类脑器件的三维高度集成，研制出规模化、可扩展的通用存算一体芯片和包含多种类脑器件的融合类脑芯片；③发展适用于类脑计算的编程语言、工具和编译器；④借鉴人脑自主学习、推理演绎、涌现等高级功能机制，逐步实现机器的感知智能、自主记忆、推理与抉择、自然语言、多模态协同感知与社会认知等功能。在智能传感器、便携式智能信息工具、低能耗高速度和高存储的类脑智能芯片和计算机等智能系统支撑下，构建类脑智能物

联网，实现智能交通、智能医疗、无疆界全方位个性化服务、智能社会管理和决策体系等新社会形态和模式。

3.1 绿色类脑智能计算

国际上类脑智能算法及计算系统研究得到持续进展。2023年，Kim等^[19]提出了一种将卷积神经网络（CNN）^⑥和SNN相结合的互补深度神经网络（C-DNN）处理器，通过异构的SNN和CNN处理核，利用各自优点实现高精度低功耗的推理和训练，实现了超高能效的类脑异构融合计算。Frenkel等^[20]比较了模拟生物神经处理系统的自下而上设计方法和为解决实际AI应用问题而设计的自上而下方法，并提出了实现类脑系统的竞争优势所需的方法和框架。Rathi等^[21]探讨了基于SNN的类脑计算，通过跨学科的方法，对设备、电路和算法进行多层优化，提供了一种端到端的实现方式，以实现高能效的类脑计算处理。美国IBM报道了一种大规模并行、高效能的神经推理架构——Northpole，具有存算一体、主动存储和空间计算的特点，以及协同优化、高利用率的编程模型^[22]。

近年来，我国在类脑计算方面不仅在基础理论上而且在产业技术上，都走在世界前列。2023年，清华大学报道了类脑多模态混合神经网络及通用位置识别系统^[23]，以及一种新型的基于忆阻器神经形态芯片的边缘学习技术^[24]。广东省智能院发布了首个以BPU“天琴芯”和类脑晶圆芯片“天琴芯·海”为技术支撑的类脑智能计算系统（图3）。BPU是更接近生物脑信息处理特性的智能处理器，采用类似神经脉冲发放传递的通信机制，支持事件驱动的大规模异步并行计算。相对于同样擅长并行计算的图形处理器（GPU）、张量处理器（TPU）和神经网络处理器（NPU），BPU对于非结构化、随机排布、稀疏的数据

⑤ 脉冲神经网络:spiking neural network,SNN。

⑥ 卷积神经网络:convolutional neural network,CNN。

运算具有更高的处理效率。因此：①在算力能效上，“天琴芯”通过借鉴人脑存算一体和脉冲传导的运作模式，突破冯·诺依曼瓶颈，消除“内存墙”和“功耗墙”的制约，实现类脑计算“速度更快、功耗更低”的算力突破。②在集成技术上，“天琴芯·海”突破了晶圆级芯片互联、封装、供电、散热等多种关键技术，单颗晶圆芯片可支持2亿神经元拟态计算。③在节能减噪上，“天琴芯”系统使用无源散热系统，借鉴人脑血管散热模式，不需要电力支持可实现计算热量的长距离传导，为数据中心减少40%的能耗。北京大学和广东省智能院还推出了BrainPy脑动力学仿真与类脑计算通用编程框架（图4）^[25]。它是一个功能强大、灵活且可扩展的通用编程框架，支持脑动力学的模拟、训练、分析等多种应用场景，实现高效的代码执行，为类脑智能计算领域提供了一个统一的编程框架。

3.2 类脑智能超级计算系统

类比于动物进化的规律，随着算力的增加，智能会加速发展。在过去数十年，摩尔定律与并行计算使计算能力提升了百万倍，现在可能到了智能飞跃的拐点。2017年，美国微软公司向OpenAI公司投资10亿美元，双方在Azure云计算服务平台上构建AI超级计

算机，拟使用强大的GPU算力以实现算法上的创新，研发通用人工智能（AGI），2022年发布了著名的ChatGPT——AI技术驱动的自然语言处理工具。2023年，AI芯片公司美国Cerebras Systems和总部位于阿联酋的技术控股集团G42宣布，将携手打造一个由9台互联的超级计算机组成的网络，该网络上的第一台超级计算机“Condor Galaxy 1”（CG-1）已经上线，算力高达4 exaFLOPS。CG-1与已知的GPU集群不同，由64台CS-2计算机组成，每台CS-2由一个WSE-2晶圆芯片驱动，是目前性能最强的AI超级计算机。然而，传统计算机与AI超级计算机的信号-数据转换和高精度计算在能源和时间上产生高成本，复杂的深度学习模型耗费惊人的高训练成本。高能耗在很大程度上是由于冯·诺依曼架构的数字计算系统处理数据和储存数据是在不同的地方，处理器的大部分时间和精力都消耗在数据传输上。高能耗的现有超算系统不是可持续发展的AI应用平台。

人脑有860亿个神经元形成神经环路和网络，能耗约20瓦，而相同大小的人工神经网络数字模拟的能耗约8兆瓦。类脑智能计算技术极有可能突破传统的超级计算机和现在的AI超级计算机所遇到的智能演化环境天花板和高能耗天花板。2024年，澳大利亚的国

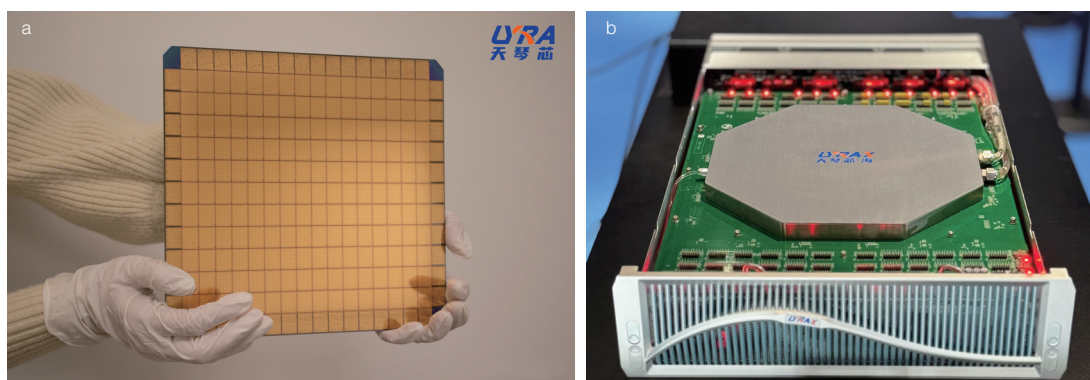


图3 类脑智能计算系统

Figure 3 Brain-inspired intelligence computing system

(a) 类脑晶圆芯片“天琴芯·海”；(b) 类脑晶圆计算机

(a) Brain-inspired wafer chip “LYRA·X”; (b) Brain-inspired wafer computer

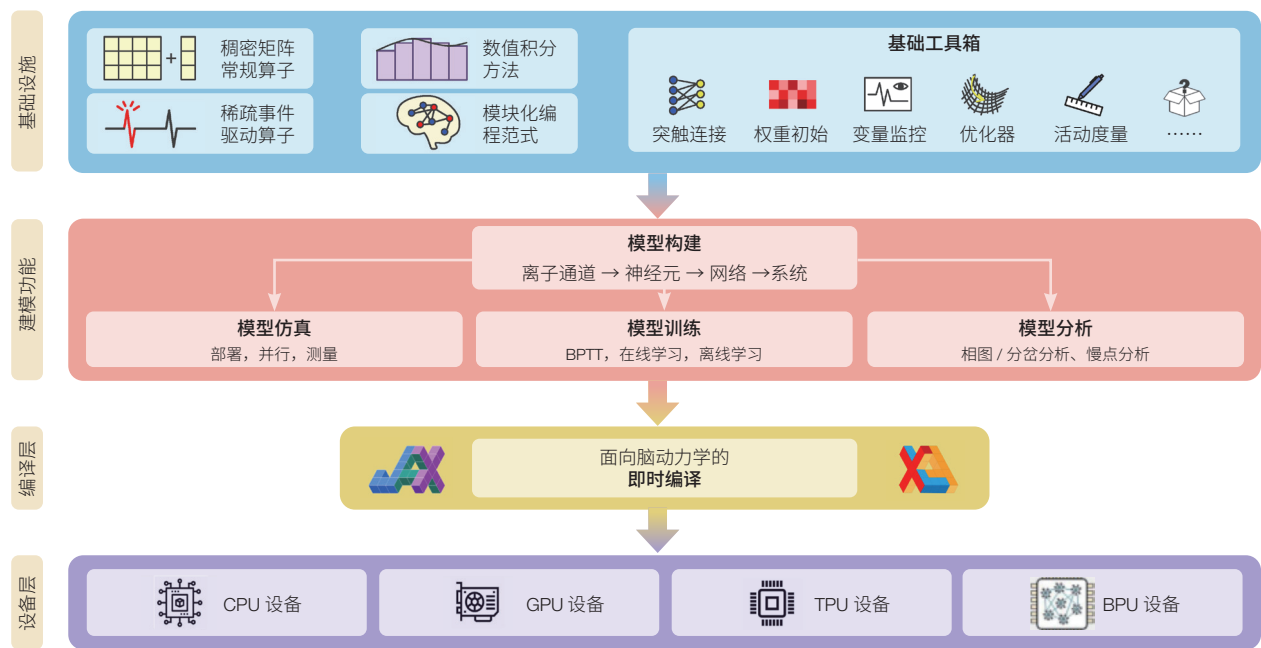


图4 BrainPy脑动力学仿真与类脑计算通用编程框架

Figure 4 BrainPy brain dynamics simulation and general programming framework for brain-inspired computing

际神经形态系统中心联合英特尔公司和戴尔公司将制造一台“深南”（DeepSouth）神经形态超级计算机，预计在投入使用。“深南”采用高度并行化的架构，每秒能进行228万亿次突触操作，通过计算机软件程序和硬件设备来全面模拟人脑突触，从而对突触处理大脑信息的方式进行建模，研究大脑工作原理。*Nature*发布的“2024九大科技变革预测”中包括了欧洲第一台超过10亿次计算的超算Jupiter、美国国家实验室的Aurora和Capitan，用于创建人类心脏和大脑数字孪生模型、地球气候高分辨率模拟等。2024年，广东省智能院基于创制的天琴芯系列BPU，将构建类脑异构融合智能计算机，类脑智能算力达到全人脑神经元规模，将是智能算力高和能效顶尖的类脑计算科研设备。

4 结论与展望

脑科学是智能时代的科技前沿。在一系列研究技术促进下，人类大脑功能联结图谱终将被成功绘制，

脑机接口、类脑智能理论和类脑智能技术在未来数年内将成为脑科学和脑医学研究和拓展的重要方向。我们还可以期待类脑智能超级计算机的算力超过人类大脑算力，类脑智能算力作为智能时代的新生产力会给智能科技乃至人类社会带来重大变革。

在这一具有时代特征的脑科技发展历程中，我们需要更有效地强化跨学科合作。通过国家和地方设立的脑科学和类脑智能研究计划，开展学科交叉研究，促进学术机构的科研人员和产业界合作研究；建立以任务为导向的类脑智能研究机构，以及国际合作研究网络，汇集相关学科及研究领域优秀科技人员，整合相关的各类技术方法，进行系统性设计和集成，让集成电路、计算机科学家和工程师、数学家、物理学家、材料学家、分子细胞生物学家等与神经科学家有共同的语言，在整个研究和开发过程中通力合作，将脑启发的科学原理应用于智能计算的软硬件设计和制造；建立跨机构的类脑智能人才培养体系，设立相应的硕士和博士培训计划，与相关产业密切互动合作

培训高技能的技术人员。

在这一征途中我们面临着系统性和发展机遇。目前，AI算法和应用技术与开发已经持续了数十年，现在各AI赋能的行业依赖于传统的大规模数字数据分析和处理，现有的AI算力的高能耗与低效率将阻碍智能技术的广泛应用。类脑智能研究与开发可以提供下一代颠覆性的低碳产业技术和一系列新的智能产业，然而，类脑智能技术及产业提升和演变还需要长期努力，建立其发展生态。为了实现类脑智能研究的快速发展和社会价值，我们需要建立学术界与产业界密切合作的有效机制，引入政府科研经费和商业资金，以支持脑及类脑智能科学研究，支持初创脑科技企业、新的衍生企业和转型企业的发展。我国将会有更多的科研机构、大学、科技企业参与脑科学及类脑智能研究，多学科交叉和产学研合作机制正促成我国在脑医学、类脑智能研究和开发以及相关产业走向世界前列。

致谢 感谢鲍岚、时颖超、环宇翔、钟帅和蔡冰提供论文素材、参与论文内容讨论；感谢蔡冰（图1）、陶虎（图2）、环宇翔/马宁/林士峰（图3）、吴思（图4）提供图片。

参考文献

- Hodson R. The brain. *Nature*, 2019, 571: S1.
- 韩济生. 神经科学(第4版). 北京: 北京大学医学出版社, 2022.
Han J S. *Neuroscience* (4th edition). Beijing: Peking University Medical Press, 2022. (in Chinese)
- 中国科学技术协会. 类脑智能产业与技术发展路线图. 北京: 中国科学技术出版社, 2023.
China Association for Science and Technology. Roadmap for the Development of Brain-Inspired Intelligence Industry and Technology. Beijing: China Science and Technology Press, 2023. (in Chinese)
- Mehonic A, Kenyon A J. Brain-inspired computing needs a master plan. *Nature*, 2022, 604: 255-260.
- Weninger A, Arlotta P. A family portrait of human brain cells. *Science*, 2023, 382: 168-169.
- Zeng B, Liu Z Y, Lu Y F, et al. The single-cell and spatial transcriptional landscape of human gastrulation and early brain development. *Cell Stem Cell*, 2023, 30(6): 851-866.
- Chen A, Sun Y D, Lei Y, et al. Single-cell spatial transcriptome reveals cell-type organization in the macaque cortex. *Cell*, 2023, 186(17): 3726-3743.
- Wang H, Qian T R, Zhao Y L, et al. A tool kit of highly selective and sensitive genetically encoded neuropeptide sensors. *Science*, 2023, 382: eabq8173.
- Musall S, Sun X N R, Mohan H, et al. Pyramidal cell types drive functionally distinct cortical activity patterns during decision-making. *Nature Neuroscience*, 2023, 26(3): 495-505.
- Stine G M, Trautmann E M, Jeurissen D, et al. A neural mechanism for terminating decisions. *Neuron*, 2023, 111(16): 2601-2613.
- Gordon E M, Chauvin R J, Van A N, et al. A somato-cognitive action network alternates with effector regions in motor cortex. *Nature*, 2023, 617: 351-359.
- Cai B, Wu D, Hong Xie H, et al. A direct spino-cortical circuit bypassing the thalamus modulates nociception. *Cell Research*, 2023, 33(10): 775-789.
- Metzger S L, Littlejohn K T, Silva A B, et al. A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control. *Nature*, 2023, 620: 1037-1046.
- Zhou Y, Yang H R, Wang X Y, et al. A mosquito mouthpart-like bionic neural probe. *Microsystems & Nanoengineering*, 2023, 9: 88.
- Ma S S, Chen M, Jiang Y H, et al. Sustained antidepressant effect of ketamine through NMDAR trapping in the LHb. *Nature*, 2023, 622: 802-809.
- Chen Y F, Hong Z X, Wang J Y, et al. Circuit-specific gene therapy reverses core symptoms in a primate Parkinson's disease model. *Cell*, 2023, 186(24): 5394-5410.
- Zhao Y N, Zheng Q Y, Hong Y J, et al. β_2 -Microglobulin coaggregates with A β and contributes to amyloid pathology

- and cognitive deficits in Alzheimer's disease model mice. *Nature Neuroscience*, 2023, 26(7): 1170-1184.
- 18 Li K C, Shi H X, Li Z, et al. Human DDIT4L intron retention contributes to cognitive impairment and amyloid plaque formation. *bioRxiv*, 2023, doi: <http://doi.org/10.1101/2023.12.30.573740>.
- 19 Kim S, Kim S, Hong S, et al. C-DNN: A 24.5-85.8TOPS/W complementary-deep-neural-network processor with heterogeneous CNN/SNN core architecture and forward-gradient-based sparsity generation// *IEEE International Solid-State Circuits Conference*. San Francisco: IEEE, 2023: 334-336.
- 20 Frenkel C, Bol D, Indiveri G. Bottom-up and top-down approaches for the design of neuromorphic processing systems: Tradeoffs and synergies between natural and artificial intelligence. *Proceedings of the IEEE*, 2023, 111(6): 623-652.
- 21 Rathi N, Chakraborty I, Kosta A, et al. Exploring neuromorphic computing based on spiking neural networks: Algorithms to hardware. *ACM Computing Surveys*, 2023, 55(12): 1-49.
- 22 Yu F W, Wu Y J, Ma S C, et al. Brain-inspired multimodal hybrid neural network for robot place recognition. *Science Robotics*, 2023, 8(78): eabm6996.
- 23 Zhang W B, Yao P, Gao B, et al. Edge learning using a fully integrated neuro-inspired memristor chip. *Science*, 2023, 381: 1205-1211.
- 24 Wang C M, Zhang T Q, Chen X Y, et al. BrainPy, a flexible, integrative, efficient, and extensible framework for general-purpose brain dynamics programming. *eLife*, 2023, 12: e86365.
- 25 Modha D S, Akopyan F, Andreopoulos A, et al. Neural inference at the frontier of energy, space, and time. *Science*, 2023, 382: 329-335.

Brain science and brain-inspired intelligence in intelligent era

ZHANG Xu

(1 Chinese Neuroscience Society, Shanghai 200032, China;

2 Guangdong Institute of Intelligence Science and Technology, Zhuhai 519031, China)

Abstract With intelligence technology as the core technology and intelligent computing power as the productive force, the intelligent era has once again pushed brain science to the forefront of world science and technology. Brain science is the science that studies the nature and rule of cognition and intelligence of human, animal, and machine. A comprehensive analysis of the structure and functional connection rule of the nervous system will eventually draw the functional connectivity map of the brain. In the past decade, neuroscience research has been committed to systematically analyzing the types of neurons and neural structural connections of the nervous system, and has made phased progress under the drive of single-cell transcriptome analysis, neural network structure tracer and other technologies. The analysis of the human brain, the most complex information and intelligence system, will enlighten the brain-inspired intelligence theory and technology, that is, the intelligence theory and technology inspired by brain science/neuroscience. In the era of intelligence, the interdisciplinary research paradigm of brain science research has promoted brain-inspired intelligence research fields such as brain-computer interface and brain-inspired intelligent computing to join brain science. Neural

decoding and coding techniques of brain-computer interface provide important functional research techniques and methods for mapping functional neural networks of human brain, and explore the application in the clinical diagnosis and treatment of brain diseases. Brain-inspired computing is becoming a new paradigm of brain science research. By learning from the basic principles of brain processing information and learning, a new type of brain-inspired computing system with high energy efficiency, high speed and intelligence can be developed. The use of the developed brain-inspired computing system can accelerate the development of brain simulation and digital brain, promote the understanding of brain mechanism and the treatment of brain diseases, and develop digital brain science and brain medicine. The newly emerged spiking neural network-based intelligent processor has laid the foundation for the construction of large-scale brain-inspired intelligent computing system, and the future brain-inspired supercomputing power is likely to exceed the human brain computing power, which will affect the transformation of intelligent science and technology and the development of human society.

Keywords neuroscience, brain imaging, brain connectivity map, brain-computer interface, brain-inspired intelligence, brain-inspired computing, spiking neural network processor, brain-inspired processor (BPU)

张 旭 中国科学院院士,发展中国家科学院院士,中国医学科学院学部委员。广东省智能科学与技术研究院院长、研究员。兼任上海脑-智工程中心主任、中国神经科学学会理事长。长期从事神经系统疾病的分子细胞生物学机理研究。
E-mail: xu.zhang@gdiist.cn

ZHANG Xu Neuroscientist. Academician of Chinese Academy of Sciences, Fellow of the World Academy of Sciences for the advancement of science in developing countries (TWAS), and Member of Chinese Academy of Medical Sciences. President, Professor and Principal Investigator of the Guangdong Institute of Intelligence Science and Technology. Director of Shanghai Brain-Intelligence Project. President of Chinese Neuroscience Society. He has long been studied on the molecular and cellular mechanisms of neurological diseases. E-mail: xu.zhang@gdiist.cn

■ 责任编辑: 文彦杰