

▶ 前沿交叉研判



脑科学与类脑技术 前沿交叉研判研究报告

脑科学与类脑技术前沿交叉研判研究 项目组

国家自然科学基金委与中国科学院联合资助

2024

报告撰写组

骆清铭 王以政 蒲慕明 高天明 谌小维 冯建峰 李毓龙
罗敏敏 施路平 徐富强 徐天乐 姚永刚 施 华 周非凡
王 刚

报告评审组

段树民 徐 涛 时松海 陈良怡 胡 霁 蒋田仔 孙衍刚
薛 天

摘要

脑科学探索认知、意识与智能的本质，是人类理解自然的“终极疆域”；类脑技术则受其启发，发展类脑算法、器件、机器人等智能科学与技术。这一交叉领域依赖生物学、医学、信息科学等多学科融合，推动神经生物学、心理学等学科革新，并深化法律、经济学等社会科学。脑科学驱动生物成像、数据科学等前沿分支发展，类脑技术则推动人工智能算法优化，赋能自动驾驶、智能医疗等应用。脑科学与类脑技术有望在国民健康、智能产业、社会发展和国家安全等方面产生重大研究成果，具有深远的社会、经济和军事战略意义。

脑科学与类脑技术面临的关键科学问题包括：1) 脑细胞有多少种类型？如何分类？哪些特征起决定性作用？2) 多模态、多尺度、跨物种标准脑图谱的绘制及脑起源与进化；3) 学习、记忆、认知等功能特异的全脑神经联接图谱的测绘及相互关系研究；4) 神经元及网络的发育演化和调控机制；5) 中枢-外周信息交流和整合的调控；6) 精神疾病的起源；7) 如何基于脑科学和计算科学的思维，发展融合二者的类脑计算思维？8) 生物神经网络能为深度学习带来什么启发？如何开发有生物可行性（biologically plausible）的深度网络学习算法？9) 构建脑机融合智能；10) 数字孪生脑；11) 如何协同破解人工智能大模型与人脑工作机理的“黑盒”问题？12) 脑科技与类脑人工智能的伦理与安全。

亟待解决的核心技术问题包括：1) 非人灵长类动物模型研发；2) 全脑神经元活动及神经化学分子动态的非侵入性观测，神经突触活动的在体观测；3) 全脑范围内对行使特定功能的神经网络的测绘与解析；4) 高精度神经认知编解码及调控技术；5) 大规模脉冲神经网络(SNN)计算平台构建及模型优化技术；6) 多模态小动物脑功能成像与调控一体化技术；7) 脑疾病的神经环路机制解析关键技术；8) 神经调控关键技术；9) 用于启发类脑计算智能的大规模神经网络解析技术问题；10) 灵长类动物认知行为范式的人工智能模型。

在脑科学与类脑技术领域，我国有积极参与国际脑科学前沿领域的团队，建立了一系列国际先进水平的技术平台，在脑科学理论、技术和应用研究方面，做出了一批国际领先的成果。本项目梳理并摸清了我国在脑科学和类脑计算领域的优势方向、领军团队和重要科研基地，调研全国在相关研究领域的发展现状，为下一步

资源布局提供依据。

通过研判，以十四五规划和 2035 年远景目标为纲，基于我国战略需求和优势领域，提出我国在脑科学与类脑技术研究领域的发展思路，即：1) 优先发展脑科学与类脑技术研究的工具和方法；2) 围绕我国自主创新研发的方法，从国家层面设立专项支持，率先推广应用；3) 做好顶层设计，坚持有所为有所不为；4) 持续稳定的研究经费投入和平台建设；5) 培养下一代科学家及科研工作者；6) 主办国际学术会议、高水平国际期刊；7) 参与国际学术组织/联盟的治理，发起和主导国际大科学计划。

报告的最后，提出政策建议，一是加强人才培养，建立科研后备军，二是加强顶层设计，布局合理的研究体系，三是加强优势技术支持，抢占科技话语权。

Abstract

Brain science explores the nature of cognition, consciousness and intelligence, and is the "ultimate frontier" for human beings to understand nature; inspired by it, brain-inspired technology develops machine intelligence such as brain-inspired devices and robots. This interdisciplinary field relies on the integration of biology, medicine, information science and other disciplines to promote the innovation of neurobiology, psychology and other disciplines, and deepen the social sciences such as law and economics. Brain science drives the development of frontier branches such as bioimaging and data science, while brain-inspired technology promotes the optimization of artificial intelligence algorithms, enabling applications such as automatic driving and intelligent medical treatment. Brain science and brain-inspired technology are expected to produce significant research results in national health, intelligent industry, social development and national security, which have far-reaching social, economic and military strategic significance.

The key scientific questions facing brain science and brain-inspired technology include: 1) How many types of neurons and glia are involved in a brain? How to classify? Which characteristics play a decisive role? 2) Multi-modal, multi-scale, and cross-species standard brain mapping unveiling brain origin and evolution; 3) Mapping of whole-brain connectome with specific functions such as learning, memory and cognition and the study of their interrelationships; 4) Development, evolution, and regulation mechanisms of neurons and neuronal networks; 5) Regulation of central-peripheral information exchange and integration; 6) The origins of mental illness; 7) How to develop brain-inspired computational thinking based on the thinking of brain science and computational science? 8) What inspiration can biological neural networks bring to deep learning? How to develop biologically plausible deep network learning algorithms? 9) Building brain-computer fusion intelligence; 10) Digital twin brain; 11) How to explain the black box problem between artificial intelligence models and human brain working mechanisms? 12) Ethical and Safety Considerations in Neurotechnology and Brain-Inspired Artificial

Intelligence.

The core technical problems to be solved include: 1) development of non-human primate models; 2) non-invasive observation of whole-brain neuronal activity and neurochemical molecular dynamics, and in vivo observation of synaptic activity; 3) mapping and analysis of neural networks performing specific functions in the whole brain; 4) high-precision encoding, decoding, and regulation technology in cognitive processes; 5) construction of large-scale spiking neural network (SNN) computing platform with model optimization techniques; 6) integrated technology of multimodal brain functional imaging and regulation for small animals; 7) key technologies to analyze neural circuit mechanisms of brain diseases; 8) key technologies for neuromodulation; 9) technical problems of large-scale neural networks analysis for brain-inspired computational intelligence; and 10) artificial intelligence models based on cognitive behavioral paradigms of primates.

In the field of brain science and brain-inspired technology, China has actively participated in the international frontier of brain science, established a series of international facilities with advanced technologies, and made a number of international leading achievements in brain science theory, technology and application research. This project studies the advantages, leading teams and important research bases in the field of brain science and brain-inspired computing in China, investigates the development status of related research fields in China, and provides a basis for the strategic planning.

Based on the studies, the development strategy include: 1) Give high priority to the development of tools and methods for brain science and brain-inspired technology research; 2) Establish special funds from the national level to support independent innovation technologies, and promote the applications in China and the world; 3) Strengthen top-level design and insist on supporting bases and teams with distinctive strengths and research priorities; 4) Provide long-term and sustained funding to support research and infrastructure; 5) Cultivate the next generation of scientists and researchers; 6) Host and organize international academic conferences. Manage high-level international journals; 7) Participate in the management of international academic

organizations and consortiums. Propose and initiate international big science projects.

In the end of this report, the policy suggestions are raised, including: 1) Strengthen talent cultivation and train more scientists and engineers to devote themselves to brain science and brain-inspired technology fields; 2) Strengthen top-level design and layout rational research system; 3) Strengthen support to China's leading technology with independent innovation.

I 目录

摘要	I
Abstract	III
第一章 战略价值	1
第二章 关键科学问题或核心技术背后的科学问题	3
一、脑科学与类脑技术面临的关键科学问题	3
二、脑科学与类脑技术亟待解决的核心技术问题	8
第三章 我国及国际的研究基础与条件	13
一、脑科学与类脑技术国际发展现状与趋势及我国在国际上的地位	13
二、我国及国际上目前的投入情况	16
三、我国开展脑科学与类脑技术研究的优势与劣势	22
第四章 我国在脑科学与类脑技术领域的发展思路与政策建议	24
一、发展思路	24
二、政策建议	26

第一章 战略价值

脑科学是旨在研究脑的认知、意识与智能的本质与规律的科学，是人类理解自然和人类本身的“终极疆域”。类脑技术是受脑认知科学启发研究类脑算法、计算器件和智能系统的技术。脑科学与类脑技术是基于脑科学领域的研究发展结合认知、信息、纳米等领域的内容的交叉和前沿的创新探索，是科学前沿和提高国家科技水平的新的的重要支撑。脑科学是生命科学重要领域，理解大脑的结构与功能是 21 世纪最具挑战性的前沿科学问题之一。

脑科学与类脑技术依赖生物学、医学、物理学、工程学、化学、材料学、信息科学、计算机科学、心理学等学科的交叉融合发展。一方面，脑科学与类脑技术研究促进了人类对大脑的认知进步，推动神经生物学、基础解剖学、基础医学等学科的知识更新。脑科学的研究成果，已经成为心理学、医学、教育学、计算机科学等多个学科发展的基石，甚至还推动了法律、经济学、哲学等多个学科的深入发展。在法律领域，对决策神经机制的理解有助于更好地评估证人证词的可靠性；在经济学领域，对奖励系统的研究有助于解释消费者行为；在哲学领域，对意识的研究引发了关于自我和存在本质的新的哲学讨论。而类脑技术的发展不仅推动了人工智能的理论前进，也促进了实际应用的广泛落地，如自动驾驶、智能医疗等领域。类脑技术的实现依赖于计算机科学的多项核心技术，包括并行计算、大数据处理和算法优化等。随着类脑技术的发展，这些技术也在不断进步。例如，为了模拟大规模的神经网络，需要更高效的计算架构和存储系统。这些挑战促使计算机科学家不断创新，推动了整个计算机科学领域的技术进步。

脑科学与类脑领域研究对技术创新的需求带动了生物医学影像、生物信息学、认知科学、智能科学、数据科学、数字医疗、脑空间信息学等前沿交叉分支学科的跨越式发展。例如，越来越多的科学家意识到全脑图谱的绘制对于脑科学与类脑研究的重要性，进而对生物成像技术提出“看得见、看得清、看得全、看得懂”等需求。而作为生物信息学的一个前沿分支，多组学技术正如火如荼地应用于全脑图谱绘制。对皮层不同部位的神经联接的绘制可揭示编码认知行为的机制，对人工智能领域的神经网络算法的改进具有指导意义。脑图谱大数据的获取、处理与展示对数据科学提出前所未有的挑战，随着研究对象模式动物从小鼠到非人灵长类再到人

类，脑图谱数据呈指数级增长，数据存储方式需要变革性创新。

脑科学与类脑技术突破传统基础脑科学研究范式启动脑科学研究的新方向，是推动建设科技强国和实现创新跨越发展的新型引擎，是抢占科学前沿战略制高点和国际科技话语权的重要支撑。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》对脑科学与认知科学研究做了战略规划，涉及：“脑功能的细胞和分子机理，脑重大疾病的发生发展机理，脑发育、可塑性与人类智力的关系，学习记忆和思维等脑高级认知功能的过程及其神经基础，脑信息表达与脑式信息处理系统，人脑与计算机对话等。”

脑科学与类脑技术有望在国民健康、智能产业、社会发展和国家安全等方面产生重大研究成果，具有深远的社会、经济和军事战略意义。脑科学的研究将对脑疾病治疗提供科学依据，是护航“健康中国 2030”的基本需要，是保障未来我国社会人力资源相对稳定的重要途径，也能促进相关药物研究与医疗仪器等新兴生物医药产业的发展。对类脑技术的探索将深化和引领世界产业的新一代“智能革命”，催生战略性新兴产业。在国家安全领域，面向军事应用的脑科学与类脑技术有望整体提升“人员-装备-人装结合”系统的作战效能，为打赢未来智能化战争、捍卫国家安全提供强有力的支撑。因此，脑科学和类脑技术研究已成为大国竞争的新阵地，美、欧、日、韩等早于十年前纷纷推出各自的脑科学研究计划，加大投入力度，意图抢占未来发展的战略制高点。

第二章 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

一、脑科学与类脑技术面临的关键科学问题

1. 脑细胞有多少种类型？如何分类？哪些特征起决定性作用？

神经元是组成大脑的基本单元。人脑有近千亿神经元，鼠脑也有近 1 亿神经元。神经元具有分子遗传学特征、形态特征、定位信息、投射特征、电生理特征、电化学特性等，至今无法对其全面而准确定义，而这些特征对于理解脑功能、发现脑疾病的发生机制至关重要。大脑中与神经系统相互作用的胶质细胞、血管细胞、免疫细胞等的类型和功能同样重要。哪些特征对细胞分类乃至神经连接、执行特定脑功能具有决定性作用，是脑科学领域的基础科学问题。美国脑计划从 2014 年开始资助“脑细胞普查”研究，目前已先后在《自然》《科学》正刊发表 3 本专刊、数十篇论文，但只研究了鼠脑和人脑的一小部分，有如冰山一角，仍存在大量未解之谜，分类标准尚无定论。

2. 多模态、多尺度、跨物种标准脑图谱的绘制及脑起源与进化

脑是一个高度复杂的功能网络系统，不同物种演化出独特脑结构与功能以适应环境。探究不同物种脑网络的起源与进化，明确其演化保守性和新生性成分，阐明其与认知功能的内在关联，需要建立跨模态、多尺度、跨物种的脑图谱绘制与数据整合分析，包括发展高效、多维度的神经标记新技术；多模态、多尺度的神经绘制技术，构建整合结构、功能和分子数据的多物种脑图谱数据库；开发计算工具，解析不同层次的脑网络模块及层级关系，建立跨物种脑网络比对框架，鉴别演化保守和新生成分，探索脑网络的演化轨迹。这将揭示认知的神经基础及起源，推动脑科学迈向大数据开放，为跨物种神经疾病模型提供新视角，最终促成脑科学和新一代人工智能的重大理论突破。

3. 学习、记忆、认知等功能特异的全脑神经联接图谱的测绘及相互关系研究

解析大脑认知神经原理，需要从脑结构、脑功能、高级认知功能和认知功能发育等多个层面开展研究。对模式动物和人类大脑神经网络（细胞层面）全景式图谱的绘制是研究脑认知功能的重要基础，需要开展从分子、细胞、网络到行为的全景式研究，从神经细胞群体的动力学出发，系统研究神经活动如何影响记忆分子的表达，进而改变神经元之间的结构连接，最终通过改变神经网络的运行方式来改变行为的输出，从而开展因果性的精准系统研究。需要理解包括感觉和知觉、学习和记忆、情绪和情感、注意和抉择等基本脑功能神经网络和工作机理；理解包括共情心、亲社会行为、意识、语言等高级认知功能的神经网络和工作机理；研究神经网络、遗传和环境因素对认知功能发育的影响。

4. 神经元及网络的发育演化和调控机制

解析不同发育阶段的行为、认知和功能对应的神经网络及其生物学原理和机制，将为理解人脑及其异常导致的疾病，以及类脑设计提供新的视角。急需利用神经标记新技术和神经联接成像新方法，解析大脑的复杂结构网络，不仅包括大脑各区域、核团之间的连接，还涉及神经元与神经元、神经元与非神经元细胞间的详细互动。需要利用神经元亚群特异性表达的基因进行标记，结合电生理记录对每类亚群的可兴奋电学特征进行表征，揭示决定每类亚群可兴奋电学特征的离子通道及受体分子组成，并系统研究其发育程序及演化规律，进而开发应用特异性遗传操控手段探究每类亚群的生理功能。

5. 中枢-外周信息交互和整合的调控

解析外部环境光、声、力和化学因素通过感知系统与神经系统互作的机制，探究中枢神经系统如何通过调控肝脏、肠道等代谢器官，以及脾脏、胸腺、肺等免疫器官来维持机体的稳态，对于理解生理和疾病状态下的身体功能至关重要。急需通过发展先进的外周成像技术，探索中枢神经系统对于外周系统的调控。同时探究中枢神经系统如何响应外周感觉器官的信号，进行信息整合和反馈调节。深入了解这

些互动机制不仅对认识健康和疾病状态下的生物学过程至关重要，也可能开辟针对代谢性和免疫系统疾病的新治疗策略。

6. 精神疾病的起源

精神障碍指的是大脑机能活动发生紊乱，导致认知、情感、行为和意志等精神活动不同程度障碍的总称，主要包括精神分裂症、情绪障碍（抑郁）、神经质（焦虑）、药物或物品使用障碍和人格障碍等。精神疾病是全球面临的共同挑战，全球有近 10 亿人罹患精神疾病，中国精神障碍患者超 1 亿。针对这一挑战，需要在遗传基因、分子蛋白、神经递质、神经影像等多个尺度上探索精神疾病发生、发展、有机联系的生物学机制，并借助遗传学、分子生物学、神经科学和影像学等跨学科技术手段，以期开发更有效的药物治疗策略，实现精神疾病早期诊治的目标。

7. 如何基于脑科学和计算科学的思维，发展融合二者的类脑计算思维？

如何像大脑一样高效执行无监督学习，受脑启发的类脑智能是发展人工智能理论的一条可能路径，但如何借鉴生物智能实现人工智能的突破仍然面临巨大挑战。脑科学和计算科学的核心在于脑科学思维和计算思维。类脑计算是借鉴脑科学基本原理，面向类脑通用智能发展的“非冯·诺依曼架构”的新型计算技术。其发展主要依赖于如何将脑科学和计算机科学有机融合，其中，思维的融合是最高境界。如何将脑科学思维和计算思维有机融合，形成类脑计算思维，是类脑计算的一个重要科学问题。类脑计算思维的建立将指导推动类脑计算理论、架构、芯片、软件、系统、云脑和应用研究，不仅推动计算机科学和脑科学的发展，而且可以推动类脑计算成为脑科学研究的一种新范式，及类脑计算系统成为理解大脑的重要工具。通过研究生物神经网络的结构，抽象出基础的计算原则，可能发展出更强大的计算模型。该模型应具备自主学习和进化、具有类人通用的智能水平。如何开展大规模神经网络中的学习，并在当前神经网络技术的基础上，推动下一代大规模神经网络学习的发展和创新，架构神经科学到人工智能的桥梁，实现通用人工智能，是类脑人工智能的关键科学问题。

8. 生物神经网络能为深度学习带来什么启发？如何开发有生物可行性（biologically plausible）的深度网络学习算法？

现在的深度学习模型主要依靠后向传播方法进行学习，导致大规模模型的训练面临严峻的技术挑战。没有确凿的证据表明生物神经网络也是依靠类似的方法进行学习，那么如此巨大的生物神经网络是如何通过先天因素和后天因素共同形成的还是未解之谜。这方面的突破将带来人工智能的革新。近年来，依靠人工神经网络的深度学习算法取得了很大的发展。但是，当前性能最优的人工神经网络算法，几乎都不具备生物可行性。另一方面，传统神经生物学研究出的学习算法（如 Hebbian plasticity）在深度网络中表现很差，只能完成一些非常简单的任务。但是我们知道，人脑或其他一些动物大脑是可以完成很复杂的认知功能的。填补这个鸿沟对理解大脑功能以及启发新的人工智能算法都有重要意义。目前，传统规划决策算法采用启发式搜索的方法，在面对庞大的搜索空间时效果不佳，而基于机器学习的方法则过于依赖数据，训练效率低且缺乏通用性与泛化性。如何借鉴人脑认知框架，构建高效、鲁棒的规划决策机制，是类脑智能的一个重要科学。类脑规划决策机制将成为构建类脑机器人“大脑”的基础功能模块，也是实现类脑通用智能的重要一步。

9. 构建脑机融合智能

生物智能和人工智能各自具有明显的优势和不足，如何实现二者的桥接，推动性能超过现有生物智能和人工智能的脑机融合智能是重要的研究方向。为此需要发展覆盖多脑区的新一代脑机接口系统，实现高通量、高精度的神经活动检测和调控，支持脑和外部世界直接的高速信息交互，在此基础上构建基于大脑可塑性和人工智能算法的融合系统，提出生物智能与人工智能系统实现优势互补、智能融合的理论，研发脑机融合系统智能生长环境和训练范式，从而推动新型脑机融合智能早日实现。

10. 数字孪生脑

脑科学与类脑智能研究是当前大国竞争的制高点，数字孪生技术已成为继理

论和实验之后的新范式。将数字孪生技术概念和技术用于建立生物大脑的数字替代，是全新的技术路线。目前并没有系统化、成熟的数字孪生脑平台。由于多维度、多模态、跨尺度脑数据的高维度、高异质性、高噪声、高度碎片化等特性，如何对人脑大数据建立新型科学模型，发展高性能算法，重构人脑介观尺度结构与功能全景图，建立“真实”的大脑计算模型结构，是构建数字孪生面临首要问题，也是当前数据科学和人工智能的重大挑战。如何通过对脑结构和功能的建模和仿真，突破脑科学与类脑智能研究的瓶颈，建立国际领先的跨模态、多尺度、跨物种脑图谱知识库，创建脑图谱约束的高保真动态数字孪生脑，建立新一代类脑计算体系，实现基于数字孪生脑的脑认知功能模拟与智能演化，是当前数据科学和人工智能的重大挑战；将为脑疾病机理研究与精准诊疗，以及为脑科学与类脑研究提供新思想、新方法和新范式。

11. 如何协同破解人工智能大模型与人脑工作机理的“黑盒”问题？

现阶段大语言模型已经展示出类人的通用语言理解与生成能力。但是其仍然是“黑盒”模型，缺乏结构、功能、学习机理等方面的解释性，生成时也面临“模型幻觉”等顽疾问题。另一方面，当前神经科学对人类大脑工作机理的理解也仍然不够完善。该领域具有学科交叉特点，将充分融合人工智能大模型与神经科学研究手段，致力于解释人工智能大模型的内在表征与结构功能，发现其认知能力的涌现机制，以新的技术途径探索人类大脑的工作机理。将有助于优化大模型结构与训练过程，降低其学习成本与应用门槛，改善大模型生成时的“模型幻觉”问题。借鉴脑科学处理信息的基本原理，有望发展出异于当前 transformer 大模型的类脑大模型。其亟待解决的关键科学问题是如何借鉴类脑神经网络的时空异构、多尺度联合、局部突触可塑性等机理，以突破内存墙和功耗墙的限制，实现高效能、易扩展、可解释性的类脑大模型。

12. 脑科技与类脑人工智能的伦理与安全

随着脑机接口技术、神经调控技术、类脑人工智能的发展，脑科技与类脑人工智能带来的伦理问题也是非常重要的问题。科学界需要达成相关伦理的共识，包括但不限于如下的问题：谁有权控制你的大脑？谁有权享受大脑增强剂和调控手段？

精神类脑疾病（抑郁、强迫症、精神分裂等）的定义和界限？有精神类疾病的人如果犯罪是否应受惩罚？人工智能可以取代哪一类职业？人工智能应有的伦理和安全标准（如隐私和身份）？能否有普适的脑科技和人工智能的伦理与安全标准？

二、脑科学与类脑技术亟待解决的核心技术问题

1. 非人灵长类动物模型研发

猕猴、狨猴等非人灵长类是最接近于人类的实验动物，建立非人灵长类动物（猕猴为主）脑重大疾病模型，将对脑疾病的诊断、治疗与康复新技术、方法、仪器研发至关重要。目前中国在体细胞克隆猴技术、非人灵长类基因编辑模型猴技术等方面有优势，结合非人灵长类脑图谱的绘制工作，将有望对脑疾病的诊断治疗实现重大突破。

2. 全脑神经元活动及神经化学分子动态的非侵入性观测，神经突触活动的在体观测

在活体条件下准确记录全脑范围内的神经元活动、神经化学分子动态变化、以及突触活动，是脑科学研究中至关重要但极具挑战的目标。目前已有钙成像、多通道胞外记录等成像方法能够大规模观测神经元胞体的活动（action potential），然而难以实现深度脑区的成像，且难以兼顾成像范围和成像质量。因此，发展能够满足高分辨率和成像深度的全脑动态成像技术，是实现全脑活体动态观测的关键问题。而如何设计能够监测神经活动的分子探针是实现活体检测的基础。结合成像技术、分子标记、和成像算法优化，促进跨学科联合解决关键技术问题，最终实现全脑活体分子、细胞长时程、大范围的动态监测。

3. 全脑范围内对行使特定功能的神经网络的测绘与解析

人脑中有约 10¹¹ 个分子类型特异的神经元，它们通过约 10¹⁴ 个突触彼此相互交织形成神经信息传递、处理和整合的立体神经环路。解析神经环路的结构与功能是阐明高级脑功能机理的前提和基础，这需要首先明确构成环路的神经元类型以及在单神经元水平构建跨脑区的网络结构。聚焦于脑行使特定功能的神经网络

解析为具体目标，建立神经元标记、成像、算法重构等技术体系，是亟待解决的关键技术问题。采用病毒学等技术手段，建立高效的投射神经元标记方法和起始细胞特异性的顺向/逆向跨单级突触标记方法，系统性的建立适用于神经网络功能分析，且兼顾结构网络示踪的标记工具集，将为特定功能网络解析提供技术支撑。如何发展模态更多、速度更快、精度更高、动态范围更大的全脑介观神经联接图谱测绘技术，依然是重大技术挑战。全脑图谱测绘与神经元活动记录及组学技术的结合有望在单一大脑样本中实现结构联接信息与功能活动的直接关联。但是如何从成像图像中获得神经网络的拓扑结构是一大难题。现在的主流方法是在图像上用人工重建神经元的三维结构，效率极低。比如从介观图像上追踪 100 万个神经元的全脑投射，需要至少 1500 人每天工作 8 小时，共工作一整年。如果要获得微观尺度上的神经网络结构，所需的人力会再增加几个数量级。目前的自动重构算法在精度上远远无法满足这一需求，亟需开发新的算法和配套软件，利用人工智能技术实现脑内信息的全自动识别、追踪与重构。

4. 高精度神经认知编解码及调控技术

从生物智能视角出发，理解复杂大脑认知过程中对高维信息的动态、有序处理至关重要。亟需开发跨脑区、跨水平、跨时程的高精度脑认知编解码技术，尤其关注 Theta 序列与尖波涟漪（Sharp-wave ripples）在认知重激活中的作用，旨在深入研究其在多维感知信息处理、神经网络节律调节及认知状态动态编码中的关键贡献。开发针对集群活动模式的神经调控技术，并构建毫秒级至亚秒级的认知状态监测与颅内反馈闭环调控系统。该技术在神经疾病治疗、认知障碍修复、脑机接口优化以及人工智能研究等领域具备广泛的应用潜力。

5. 大规模脉冲神经网络(SNN) 计算平台构建与模型优化技术

人工神经网络通常将每个神经元简化为一个单独的点，神经元的输入-输出关系也极为简化。这样的模型与真实生物脑的匹配性差。与之相反，计算神经科学的神经元模型可以高度仿真真实神经元的复杂形态结构和离子通道组成，产生丰富的动力学。然而，这样的模型里大部分的生物细节很可能对网络的计算是不必要的，受算力局限，难以扩展网络规模。目前缺少有效的介于两者之间的模型，既保留一

定的生物神经元的结构以及动力学复杂性，又能有很高的运算效率。这样的大规模网络模型将有助于连接神经科学研究与人工智能研究。将大脑的弹性和计算机的刚性相结合、数据驱动和知识推动相结合、通用知识和推理相结合，形成一种具有时间复杂度和空间复杂度的多模态大规模异构系统。将现有的软件进行解耦和重构，在满足一般集群平台软件基础上，建立满足具有时间复杂度和空间复杂度的多模态大规模异构系统架构的软件构建方案。大规模集成类脑芯片构建类脑系统具有丰富的通信、近乎无限的扩展性、智力能源、矩阵、数据融合和自主侵入的普适计算特性。其亟待解决的科学问题是如何建立新型的计算能效理论和加速理论，以全面优化类脑集群平台的计算能效、通信效率和计算能耗。

6. 多模态小动物脑功能成像与调控一体化技术

啮齿类动物，尤其是小鼠是当今脑科学研究的主要模式生物。啮齿类动物全脑神经元介观结构及其联接研究已取得较大进展。但功能联接研究仍局限于单一脑区，或几个核团间；由于技术限制，目前尚未绘制系统的功能联接图谱。功能磁共振是研究全脑功能联接的核心技术，结合多通道电生理记录、光遗传学、基因编辑等技术，建立多模态小动物脑功能成像与调控一体化技术平台，将为绘制全脑尺度功能网络的联接图谱提供技术支持。

7. 脑疾病的神经网络机制解析关键技术

神经网络是大脑功能实现的关键模块。近几年来基因编辑、分子探针、病毒示踪、显微成像、单细胞测序、大数据分析等新技术快速发展，人们可以从神经突触到全脑网络多个尺度上高效地解析神经网络的结构和活动。在此基础上，急需开发并结合多种交叉学科技术，包括人脑样本处理、高通量显微成像、超深穿透荧光成像、原位测序技术，以及基于人工智能图像处理、数据挖掘、数据展示等方法，将其系统地应用于脑疾病动物模型神经网络和分子机制的解析。这些系统研究将积累大规模关键数据，并有望在解析脑疾病机理和发现新型干预治疗途径方面取得系列重大突破。

8. 神经调控关键技术

神经调控技术通过植入性或非植入性技术，通过电、磁、光、声等物理或化学方法调控神经系统的功能，从而改善神经精神疾病患者的生活质量。这一类技术，例如脑深部电刺激、经颅磁刺激等在近年来得到快速发展，并获越来越广泛的应用，但另一方面，其具体神经机理尚不十分清楚，同时随着物理、化学、材料等交叉学科新技术的发展，各种神经调控技术有相当大的发展空间，其适应症范围也将进一步扩大。亟需优化现有神经调控技术，重点推动创新技术研发，包括神经精准光调控、电场调控和超声调控等，重视机理研究以及临床应用研究，同时完善相关伦理研究和规范。

9. 用于启发类脑计算智能的大规模神经网络解析技术问题

发展脑观测和调控关键技术，解析和模拟大规模神经网络信息处理机制，是启发类脑计算智能的核心技术问题，其中包括：如何利用和发展大规模神经元记录、电生理记录以及单神经元全脑投射重建等关键技术，研究模式动物大脑皮层在智能行为过程中的关键结构和功能特征；如何建立单神经元激活输入-输出信号同步记录技术，解析神经元激活动力学特征与特定神经元信息编码的机制；如何提取与智能行为相关的神经网络功能与结构关键特征参数，构建模拟神经网络信息处理机制的模型；如何在人工神经网络架构中引入单神经元和神经网络动力学的数理模型，构建表征感知-学习-记忆-决策-运动等生物智能行为的智能技术。如何发展模拟生物神经元、神经突触等新材料、新器件、新制程、新工艺，研究能够精细仿真生物神经元和神经突触的神经形态器件，为研制类脑智能载体提供基础支撑。需要突破冯·诺依曼架构，以时空信息处理为中心，模拟生物大脑低功耗、高容错、自主智能涌现等特性，通过各种传感器接收环境刺激并通过和其他主体的交互获得和发展类脑智能，通过开源开放方式促进类脑研究的集成，构建类脑智能软硬件开源体系。

10. 灵长类动物认知行为范式的人工智能模型

灵长类动物的脑结构、生理活动等很多方面与人类高度相似，具有复杂的认知、

社会行为和精巧的运动控制，可以完成与人相似的任务。由于缺乏相应的评估范式和量化体系，当前研究对于灵长类动物认知行为的理解和认识仍然有限。结合人工智能（AI）技术建立标准化的灵长类动物认知行为范式评估系统，通过姿态检测、行为分析和情绪识别等 AI 算法对灵长类动物的学习、情绪、精神、交互等高级认知行为进行定量化监测和评估，能够为脑科学和类脑研究提供数据支撑，对于脑功能认知、神经疾病诊断和类脑智能发展具有重要意义。

第三章 我国及国际的研究基础与条件

一、脑科学与类脑技术国际发展现状与趋势及我国在国际上的地位

近二十年来，脑科学研究有了飞跃进展。分子和细胞水平的研究使人类对脑认知功能的认识完全改观；清醒动物行为和无创性脑影像技术的应用进一步提升了对脑高级功能和脑疾病的认识；脑疾病机制的研究加速了治疗神经系统疾病新药的研发；脑功能的研究也带动了类脑智能产业的发展。

人脑约有近千亿个神经元，一个神经元通过突触与数千乃至上万个其它神经元进行通讯，形成神经网络。认识脑的核心科学问题是，由神经元组成的神经网络如何实现各个认知层面的功能，从较初级的感觉、知觉到较高级的记忆、注意、语言、决策、思维、意识等。脑科学研究可从分子、细胞、网络、脑区和行为各个层次入手。过去百余年，神经科学在微观水平的分子和细胞研究和在宏观水平的认知行为和相关脑区的认识都有长足的进展，但对全脑介观水平的理解仍极为粗浅。我们对极其复杂的大脑神经网络结构，尤其是各脑区之间的长程连接的规律，网络中负责处理各种脑功能的神经网络和其工作原理，都缺乏数据和理论架构。因此，在介观层面、有神经元分辨度的全脑神经网络结构与功能研究，是神经科学公认的未来研究重心。

在过去二十年里，脑结构和脑活动的观测与调控新技术不断出现，对脑功能研究起着巨大的推动作用。从早期电生理记录到今天的在体、实时神经元活动记录和调控技术，神经科学研究技术经历了跨越式的突破。宏观脑影像技术可以在宏观层面获取脑组织的形态和多脑区的电活动和代谢信息；新一代光学成像与光遗传技术，可以在介观层面观测大群神经元和网络的活动并进行网络特异的调控；快速、高通量、时空特异的全脑单细胞基因转录组测序技术，在微观层面为神经元类型鉴别、神经连接特异性标记与追踪、神经网络特异的调控提供了必要的基础。新技术的研发，包括对神经结构和活动的海量数据的处理、分析和建模，以及对理解神经网络工作原理的理论框架，目前仍是严峻的挑战。

在脑科学研究领域，我国在过去二十年里有长足的进展。在神经元分化、发育

过程的谱系分析、神经元分类、发育过程中神经网络的修饰，神经系统老化过程的分子和基因调控机制等，都获得国际瞩目的成果。在感觉信息（尤其是视觉、痛觉和痒觉）处理相关的神经网络研究，已达国际先进水平。在多感觉整合、感觉-运动转换、本能行为和情绪、注意和抉择等的神经网络机制研究，也有重要的发现。在高级认知行为（如复杂决策、自我意识和亲社会行为等）非人灵长类动物模型（猕猴与狨猴）的研究范式的建立，已达国际领先水平。

2016 年全国科技创新大会上，习近平总书记将“脑连接图谱”列为有待破解的六大科技难题之一，他指出：“脑连接图谱研究是认知脑功能并进而探讨意识本质的科学前沿，这方面探索不仅有重要科学意义，而且对脑疾病防治、智能技术发展也具有引导作用”。脑联接图谱是指在介观层面研究神经元和神经网络的空间连接关系。类脑智能则是让计算机具有类似人的意识、思维的信息处理能力，其研究依赖于高分辨的全脑联接图谱。众所周知，脑是一个极其复杂的巨大系统。脑内神经元、胶质细胞、血管等结构与功能信息高度复杂，时空尺度的跨度可达十几个数量级。脑连接及脑活动是在不同时间-空间尺度上演化和变化的，其物质、能量和信息高度耦合，具有空间位置不确定性、空间关系不确定性以及时域不确定性等。如何在大跨度的时间-空间尺度上研究脑连接及脑活动的演化和变化规律是脑科学研究面临的重大挑战。我国在介观（有细胞分辨率）神经连接的全脑图谱绘制和大群神经元的在体电活动观测，已处于国际领跑地位。

全球约有 4.5 亿人患有脑疾病，占全部疾病的 11%，其中孤独症、智障等儿童期脑疾病，抑郁症、精神分裂症等成年期脑疾病及帕金森病、中风等老年期脑疾病具有很高的致死率和致残率，给国家、社会和家庭带来沉重的负担。深入研究各类脑疾病，尤其是重大脑疾病的发病机制，并寻找有效的诊断、治疗方法是全球各国脑科学研究热点和方向。

我国在重大脑疾病研究领域，对各种脑疾病的发病机制研究、早期诊断和治疗技术研发等方面，通过脑科学新理论和新技术的引入，已经开始产生社会、经济效益；针对各种脑疾病的人群队列，在许多医疗单位已陆续开始建立；在疾病动物模型和资源库建设方面，多种重大脑疾病资源库建设、致病基因和早期生物标记筛选、非人灵长类（主要是猕猴）重大脑疾病模型制备等已形成了我国的特色和优势。

类脑芯片已成为下一代信息产业的制高点。类脑芯片借鉴人脑的信息处理方

式，将打破“冯·诺依曼”架构束缚，各国争相发展研究。2016年，美、英、德相继推出了架构不同的以 TrueNorth 芯片、SpiNNaker 芯片、BrainScales 芯片及其相应的软件系统为基础的第一代类脑计算机。2016年也因此被誉为类脑计算机元年。

脑机融合乃至一体化成为重要趋势。脑机接口为人机交互提供了新途径与新手段，将颠覆现有计算系统。2016年，在 DARPA (美国国防高级研究计划局) 的资助下，美国科学家利用颅内电刺激技术首次将智能假肢的触觉信息直接反馈到志愿者脑内，初步实现了感觉信息的反馈，构建了一个双向闭环的脑机接口。2020年埃隆马斯克的 Neuralink 公司的 LinkV 0.9 全植入式脑机接口系统，实现了猕猴脑控玩乒乓游戏的实时展示。脑机接口技术之所以备受各国瞩目，是因为其作为一个高度交叉的领域，涉及微电子、神经科学、材料学、机器人、临床医学等多个学科，应用前景非常广阔。新一代脑机接口技术瞄准超高通道高精密度高带宽脑信号无线记录，通过高频采样达到微秒级时域精度，从而可以完整的采集各个频段的神经生物电信号。同时，新一代脑机接口技术可以通过电刺激、光刺激或药物递送的方式提供实时精确的神经调控，从而实现更好的研究、预防、诊断及治疗。尽管我国脑机交互融合研究整体水平和欧美等发达国家还存在着一定的差距，但在此方面处于积极追赶世界先进水平的状态，比如 2020 年浙江大学实现了高位截瘫病人通过植入式脑机接口技术实现控制机械臂抓取物品。但在脑机接口关键器件和高端装备方面，国内缺乏原创性脑机接口核心技术，而美国对脑机接口器件进行出口管制，对中国脑科学研究、神经疾病患者治疗等均产生不同程度的影响。在个别方面，如深部脑刺激设备研发与临床应用等，我国的研究已经走在国际前沿。

神经网络功能解析与调控技术层出不穷，电、光、磁、声等各种在体的脑神经信息获取与调控手段日趋丰富，为类脑智能研究奠定了重要基础。新近发展的民用意识监测—控制设备，如日本研制的膏药式脑电波传感器等，已初步实现人脑活动实时监测、简单意念控制、刺激大脑提高运动学习技能等。总体上，双光子成像、脑磁图仪、透明脑技术、微电刺激、光遗传激活与抑制，以及超声波等脑信息获取—调控技术实现了多点突破，有望为脑—机双向解析—调控提供丰富的实现手段。

在类脑计算与脑机智能技术领域，全球科研人员正致力于模拟人脑的信息处理方式，以实现更高效的计算能力和智能水平。我国在这一领域取得了国际瞩目的成果，特别是在计算机视觉、语音识别、机器翻译和自然语言理解等方面，已达到

国际先进水平，并在产业化方面迈出了坚实的步伐。

同时，我国也在深度学习芯片体系架构方面有所创新，并在类脑智能机器人方面率先进行了布局。研制成功面向人工通用智能的新型类脑计算芯片——“天机芯”芯片，实现了中国在芯片和人工智能两大领域《自然》论文的零突破；成功研发世界首款多阵列忆阻器存算一体系统，大幅提升计算设备的算力，且比传统芯片的功耗降低 100 倍，能够满足人工智能等复杂任务对计算硬件的高需求；成功研发全球神经元规模最大的类脑计算机，支持 1.2 亿脉冲神经元、近千亿神经突触，神经元数量规模与小鼠大脑相当，能以高效能低功耗处理图像、视频、自然语言相关任务。

二、我国及国际上目前的投入情况

美国是全球启动脑计划最早的国家之一。早在 1989 年，美国就认为二十世纪九十年代是“脑的十年”，投入研发资金已数十年。2010 年，美国国立卫生研究院启动了“人类连接组脑计划（HCP）”，对海量人类大脑进行扫描，希望描绘出大脑所有连接情况，目前已公布前几批数据供研究者下载。2013 年，美国奥巴马政府宣布了为期十年的美国科学与工程重大项目——“美国脑计划”，旨在为理解大脑的新技术和发明提供资金。“美国脑计划”总投资 60 亿美元，被《Science》评价为是与“人类基因组计划”相媲美的重大工程。前五年重点资助新技术，后五年重点资助应用新技术产生的科学发现，当前已进入 2.0 时代。美国脑计划由联邦研究机构与投资神经科学研究的企业、基金会和私营研究机构共同投资，仅美国国立卫生研究院（NIH）已投入 36 亿美元，资助超过 1400 个项目，并制定七大优先资助研究方向：神经细胞分类、神经网络绘制、监测神经活动、干预调控工具、理论数据分析工具、人类神经科学、整合研究手段。

欧盟人脑计划（Human Brain Project，简称 HBP）于 2013 年 10 月入选欧盟的未来旗舰技术项目（Future & Emerging Technologies，简称 FET），是欧盟资助的两个最大的科学项目之一。从欧盟委员会获得 10 亿欧元的资金支持，为期十年，成为全球范围内最重要的人类大脑研究项目。HBP 由多个来源提供资金，其中约一半将由欧盟提供，另一半由成员国和私人资金提供。欧盟脑计划侧重于为脑研究、认知神经科学和其他类脑科学创建和运营欧洲科学研究基础设施，收集、组织和传

播描述脑及其疾病的数据，模拟脑，构建多尺度框架理论和脑模型，开发类脑计算、数据分析和机器人技术等。

日本大脑研究计划（Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies，简称 Brain / MINDS）主要通过对猕猴大脑的研究来加快人类大脑疾病研究，如老年性痴呆和精神分裂症的研究。2014 年 9 月启动，为期十年。为了将普通猕猴开发成为神经科学的模型动物，该项目旨在建立一个多尺度猕猴脑图谱，为实验者开发新技术，创建用于脑疾病模型的转基因品系，并从临床生物标志物领域整合可转化的研究成果。Brain/MINDS 将与全球大脑项目合作，共享技术和资源。资金总额为 400 亿日元，由日本医学研究与发展局（AMED）提供。

我国一直重视脑科学与类脑智能领域的研究。在本世纪初，就将“脑科学与认知”列为基础研究的八个科学前沿问题之一。“十一五”到“十三五”期间投入已超过百亿元。2018 年启动科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目，已启动 4 批，投入 24 亿元。而“中国脑计划”在酝酿十年后，作为科技创新 2030—“脑科学与类脑研究”重大项目，于 2021 年正式启动，围绕脑认知原理解析、认知障碍相关重大脑疾病发病机理与干预技术、类脑计算与脑机智能技术及应用、儿童青少年脑智发育、技术平台建设等 5 个方面开展部署。这是一个十年计划，第一阶段前五年中央财政计划投入 160 亿元。目前已立项 2 批，合同经费 124.75 亿元，实际已下拨 46 亿元。

我国的脑科学平台建设可追溯到第四军医大学 1992 年成立的中国人民解放军神经科学研究所。同年，复旦大学获批医学神经生物学国家重点实验室。1995 年，香港爱国实业家梁銶琚先生赞助 500 万港元在第四军医大学成立梁球琚脑研究中心。1999 年，中国科学院在上海成立神经科学研究所，为研究生和博士后提供高质量的专业训练，培养出的人才已成为中国当前脑科学研究领域的中流砥柱。

经过二十余年发展，我国的脑科学研究机构从最早的集中于上海、北京，到现在全国全面开花，形成北方、长三角中心、南方、西南等多点布局。尤其是近五年来，我国在脑科学与类脑技术研究平台方向加大投入，全国范围已成立多个脑科学研究机构，培养了一批积极参与国际脑科学前沿领域竞争的科学家团队，建立了一系列达到国际先进水平的技术平台，其中不乏国家级平台（表 1）。除了获得科技部认证的国家重点实验室、国家工程实验室、全国重点实验室以外，教育部、中

院、各地政府积极筹措资金，启动区域“脑计划”。

表 1 脑科学与类脑技术领域国家级研究平台（不含国防和军队部门）

批准年份	依托单位	实验室名称
国家重点实验室		
1984	中国科学院自动化研究所	模式识别国家重点实验室
1992	复旦大学	医学神经生物学国家重点实验室
2005	中国科学院生物物理研究所	脑与认知科学国家重点实验室
2005	北京师范大学	认知神经科学与学习国家重点实验室
2007	中国科学院上海生命科学研究院	神经科学国家重点实验室
2009	香港科技大学	分子神经科学国家重点实验室
国家工程实验室		
2012	清华大学	神经调控技术国家工程实验室
2017	中国科学技术大学	类脑智能技术及应用国家工程实验室
全国重点实验室		
2022	浙江大学	脑机智能全国重点实验室
2022	北京理工大学、同济大学	自主智能无人系统全国重点实验室
2022	科大讯飞、中国科学技术大学	认知智能全国重点实验室
2022	中国科学院自动化研究所	多模态人工智能系统全国重点实验室
2023	复旦大学	脑功能与脑疾病全国重点实验室
2023	东南大学、海南大学	数字医学工程全国重点实验室
国家重大科技基础设施		
2017	中国科学院昆明动物研究所	模式动物（灵长类）表型与遗传研究 国家重大科技基础设施
2019	北京大学	多模态跨尺度生物医学成像设施
国家实验室		
2021	昌平国家实验室（北京）	
2021	临港国家实验室（上海）	

2014 年，中科院体制与机制改革，依托神经科学研究所和自动化研究所成立

中科院脑科学与智能技术卓越创新中心，共建单位包括中院、高校、医院、企业等 39 家，分布于上海、北京、合肥、昆明、深圳、武汉、杭州、苏州、福州、重庆、长沙等 15 个城市。同年，依托深圳先进技术研究院成立脑认知与脑疾病研究所。

2018 年，教育部先后批准 2 个脑科学领域的前沿科学中心。复旦大学脑科学前沿科学中心是国家“珠峰计划”首个前沿科学中心。中心以复旦大学脑科学研究院/医学神经生物学国家重点实验室为基础和实体依托，由脑科学研究院/医学神经生物学国家重点实验室、脑科学转化研究院、类脑智能科学技术研究院、脑重大疾病研究和转化研究院等研究机构参与建设，联合生命科学、脑医学、数学、信息科学、材料科学、微电子、类脑智能等多学科研究力量。浙江大学脑与脑机融合前沿科学中心是教育部首批立项建设的六个国家级前沿科学中心之一，总部位于新建的浙江大学医学中心，是浙江大学的“学术特区”，多学科深度交叉的优势明显，基础/临床研究紧密结合，已汇聚生物脑与类脑智能研究领域众多知名学者，拥有“理工信医”结合、不同学科专业优势互补的科技人才队伍。

2018 年，北京和上海先后成立脑科学与类脑研究中心。北京市政府与中国科学院、军事科学院、北京大学、清华大学、北京师范大学、中国医学科学院、中国中医科学院等 7 家单位联合共建北京脑科学与类脑研究中心（所），总体人员规模已超过 600 人。上海脑科学与类脑研究中心是上海市科学技术委员会所属事业单位，新型研发机构。旨在组建长三角脑科学与类脑智能技术相关团队，打造技术支撑和研发共享平台，承接国家重大科研任务。

早在 2016 年，苏州市敏锐捕捉到我国科学家在脑图谱绘制技术的原创性和领先性，投资 4.5 亿元与华中科技大学、苏州工业园区管理委员会和江苏省产业技术研究院四方共建华中科技大学苏州脑空间信息研究院，已建成世界最大的全脑介观连接图谱绘制平台。

2018 年，广州市依托精神健康研究教育部重点实验室、广东省重大精神疾病研究重点实验室、粤港重大精神疾病研究联合实验室和广东省高等学校中西医结合情志病防治基础研究卓越中心，成立粤港澳大湾区脑科学与类脑研究中心。研究方向覆盖脑认知功能解析、重大脑疾病机制和脑认知功能新技术及仪器研发等领域。

2018 年，北京获国家发改委批准建设“十三五”国家重大科技基础设施项目

“多模态跨尺度生物医学成像设施”，打造在时空尺度和成像模态上形成无缝对接的生物医学成像技术“一站式”集群，为生物医学研究提供革命性的新技术、新手段、新工具。建设总投资 17.17 亿元，将于 2024 年底验收。南京市江北新区围绕成像大设施建设南京脑观象台，重点打造“自由行为动物脑成像”的核心能力，力图构建从突触、神经元集群，到神经环路，再到全脑水平的全景式脑功能成像体系，推动重大原创发现，助力脑疾病临床新药创制，启迪类脑与人工智能研究。

2019 年，深圳市布局基础研究机构——深港脑科学创新研究院，依托中科院深圳先进技术研究院建设，共建单位包括南方科技大学、深圳大学、北京大学深圳研究生院等。2020 年批复投资 8.8 亿元建设脑解析与脑模拟重大科技基础设施。该设施作为全球首个跨物种、跨尺度的智能生命健康基础设施，目前已启用。

2020 年，北京成立昌平实验室，围绕新发突发及重大传染病、脑科学与脑疾病、前沿技术与基础研究、人工智能与生物医药等四个方向组织优先领域科研攻关，系统性布局底层技术，汇聚顶尖科技创新力量，加速关键技术突破和重大科研成果转化应用。2021 年挂牌为国家实验室。

2020 年，上海筹建临港实验室，聚焦解决生物医药与脑科学领域重大科技难题，打造生命健康领域战略科技力量，为进一步强化原始创新，推动生物医药与脑科学领域的原创性突破。2021 年挂牌为国家实验室。

2022 年，上海市松江区人民政府与上海交通大学医学院合作共建松江研究院。研究院联动 G60 科创走廊生物医药、脑智科创产业群优质资源，主攻“三脑”（发育脑、精神脑、退变脑），结合神经免疫、神经代谢和神经肿瘤等新兴脑交叉方向，建成“基础-临床-产业”全链条科研平台。

重庆市于 2022 年启动建立重庆脑与智能科学中心，下辖“六院多中心”，包括脑与智能前沿研究院、临床研究医院、脑与智能转化院、脑与智能学院、健康技术工程师研修院、交流服务综合院，布局实验动物中心、公共仪器中心、脑科学数据与神经计算中心、脑科学艺术中心等功能区。中心已建成 4.6 万平方米科研综合载体，面向基础理论、临床诊疗、类脑智能三个方向。

国内多所高校新建脑科学与类脑领域研究所。如清华大学从 2012 年开始布局类脑研究，2014 年创立由 7 个院系组成的“类脑计算研究中心”，从类脑基础理论、器件、材料、芯片、软件、系统、云脑和应用全方位开展类脑计算、感知和智能的

研究；复旦大学在拥有脑科学研究院的基础上，于 2015 年新成立类脑智能科学与技术研究院，2019 年成立脑科学转化研究院；浙江大学在拥有神经科学研究中心的基础上，2014 年成立系统神经与认知科学研究所，2019 年成立脑科学与脑医学学院，开设神经科学本科专业；南京大学于 2018 年成立脑科学研究院；东南大学于 2018 年成立脑科学与智能技术研究院；电子科技大学于 2018 年成立四川省脑科学与类脑智能研究院；哈尔滨工业大学于 2019 年成立脑科学与类脑智能研究中心等。

2020 年，浙江大学筹建浙江省良渚实验室，重点推进重大精神神经疾病等精准诊治创新研究，搭建高标准的公共服务平台，形成从前沿科学、应用基础到临床试验的全链式研发体系，致力于打造国内领先、国际一流的生命健康重大创新平台。

国外民间资本也开始注入我国脑科学研究。美国国际数据集团（IDG）及其创办人麦戈文夫妇共同出资捐赠，在 2011 年分别成立清华大学-IDG/麦戈文脑科学研究院、北京大学 IDG/麦戈文脑科学研究所和北京师范大学 IDG/麦戈文脑科学研究院，2014 年又与中国科学院深圳先进技术研究院合作建立脑认知科学和脑疾病研究所。

复旦大学附属华山医院和上海周良辅医学发展基金会与全球知名的脑科学慈善研究机构陈天桥雒芊芊研究院于 2017 年共同组建上海陈天桥脑健康研究所，预计总投入 5 亿元人民币，已于 2020 年投入使用。这也是陈天桥在全球投资建立的第二个脑研究所，第一个在美国加州理工学院。2021 年，陈天桥又投资 5000 万元给上海市精神卫生中心，合作建设人工智能精神健康实验室。

在脑科学模式动物资源建设方面，中国科学院昆明动物研究所是国内最早开展灵长类动物饲养繁殖与实验的机构之一，拥有符合国际规范的灵长类动物养殖与研究基地和丰富的灵长类动物资源，是“国家非人灵长类实验动物资源库”的依托单位。由昆明动物研究所承担建设的“十二五”国家重大科技基础设施项目“模式动物（灵长类）表型与遗传研究国家重大科技基础设施”已投入试运行。这是世界上首个对灵长类动物表型与遗传进行全尺度研究、国际一流的大型综合研究设施，支撑以人类重大神经与精神疾病、传染性疾病等为主的前沿领域研究，促进相关领域原创性重大理论突破和相关关键技术的临床前应用。

海南三亚崖州湾科技城于 2021 年启动建设非人灵长类种质资源与模型研发中

心，总投资约 7.2 亿元，用地面积约 451 亩，将开展灵长类生物学和生物医学多学科交叉综合研究，有望使我国的灵长类动物模型和临床前研究迅速达到国际一流水平。

三、我国开展脑科学与类脑技术研究的优势与劣势

我国从事脑科学和类脑研究的科学家群体数量总体不如欧美。美国神经科学学会的年会约有 3 万多人参加，而中国神经科学学会的年会大概有 3 千多人参加，约为美国的 1/10。据不完全统计，美国神经科学实验室数量约 6000 余个，也估计是国内实验室数量的 10 倍。

我国科学家在论文发表、专利申请等领域距离欧美发达国家也有较大差距，特别是在《细胞》《自然》《科学》等顶刊的发文量，近年虽然增幅明显，但仍需要时间赶超。

我国科学家在国际舞台的话语权较少，体现在参与脑科学领域国际学会、联盟的人数不多，在国际学术期刊、媒体发表观点性论文、言论的机会不多。能主导某一研究方向的领军科学家不多，这也含有部分国际形势政治因素。

与发达国家相比，我国的脑科学与类脑技术研究团队体量较小、力量分散、研究方向和内容不够集中，以跟踪和拓展国外的研究为主，创新和引领性的内容不多，整体研究水平还有相当差距。更重要的是缺乏“大科学研究计划”的设计、组织与操作经验，缺乏跨越性思维和整体、长远性的谋划，国际影响力和带动力不强。

我国从国家层面给与脑科学与类脑技术的支持起步较晚，“中国脑计划”几乎比欧美日晚十年启动，自 2021 年启动以来，受疫情影响，目前只立项 2 批，且实拨经费比计划中大幅缩减，距五年目标的实施仍有一定差距。

所幸的是，随着我国综合国力的提升，不但基础研究经费的投入不断增加，高校和科研院所的基础设施和科研平台建设经费也在迅速增长。国内相当一部分实验室的科研条件已经达到发达国家一流实验室的硬件水平。在此大环境下，脑科学研究的硬件平台建设得到保障。再加上各地政府对于区域性脑计划的投入，民间资本的进入，脑科学研究仍然得以如火如荼开展。

我国对类脑智能的发展十分重视。国务院于 2017 年发布《新一代人工智能发展规划》。教育部于 2018 年印发《高等学校人工智能创新行动计划》，并于 2019 年

批准首批 35 所高校开设人工智能专业，目前已有 498 所高校成功备案人工智能本科专业，近百所高校获批成立人工智能学院、研究院所等。可以预见，未来在类脑智能领域将培养出大批后备人才梯队，投身类脑智能研究及应用。

我国当前面临的国际形势十分严峻，以美国、欧盟为首的发达国家为达政治目的，严重干涉我国的国际合作进程。这既是劣势又是优势。虽然短期内影响我国科技工作者“走出去”，但长远来看会有更多的留学人员、华籍科学家、甚至外籍科学家“引进来”，壮大我国的脑科学与类脑技术研究队伍。

我国具有经济成本方面的优势。国内开展实验所需的除进口设备和材料之外的费用都比较低，人力资源成本也相对较低。开展动物实验和人体临床实验所需的审批手续和流程规范高效，时间成本较低，有利于吸引国际合作方来中国开展动物和临床实验。

第四章 我国在脑科学与类脑技术领域的发展思路与政策建议

一、发展思路

1. 优先发展脑科学与类脑技术研究工具和方法

“工欲善其事，必先利其器”，现代科学的发展历程表明，重大科学创新往往以科学研究工具和技术方法的突破为先导，研究工具和方法的进步将带动脑科学与类脑技术前沿突破，推动科学原始创新。发挥我国科技工作者团结协作、动手能力强等优势，优先发展脑科学与类脑技术研究工具和方法，是实现弯道超车、抢占科技制高点的有效手段，也是脑科学及类脑技术研究长远发展的基础。

2. 围绕我国自主创新研发的方法，从国家层面设立专项支持，率先推广应用

我国已自主研发的新技术新方法需要得到保护和在科学界推广应用，摆脱被欧美“卡脖子”的困境。然而，不是每一个科学家都有精力从事成果转化工作。在国家层面设立专项支持，能够加快所研发的新技术新方法在脑科学和类脑技术领域的推广应用和迭代，抢占和巩固制高点，提高研发效率，促进科技成果在生命健康、经济建设、国家安全等领域转化落地，提升国家创新体系的整体效能。

3. 做好顶层设计，坚持有所为有所不为

重视需求牵引、问题导向，认清国际形势，立足国内优势方向，团结学术水平高、具备战略眼光的科学家群体，坚持平等学术对话、研讨和评价，为中国的脑科学和类脑技术学科发展“把脉”，为科技管理部门提供立项建议。在我国总体科研水平和资助力度落后的情况下，优先支持领跑、并跑的工作，优先支持“卡脖子”技术研发，坚持有所为有所不为。在大型项目上坚持“首席科学家”、“揭榜挂帅”等制度，引导不同单位的科学家群体分工协作，优势互补，进行有组织的科研活动。

4. 持续稳定的研究经费投入和平台建设

科学研究往往是一个长期探索过程，需要不断试错和迭代。稳定的经费支持能保证优秀的科研人员长期投身于某个领域或项目深入研究。高水平科研活动也离不开先进的研究基础设施的运行和维护。中央财政资金是风向标，其可持续性能够影响地方财政和民间资本的投入。

5. 培养下一代科学家及科研工作者

在基础教育阶段就开始培养学生对脑科学和类脑智能的兴趣，高等教育阶段要提供深厚的专业教育，并鼓励跨学科学习。提供多元化的实践机会，如科普教育、实验室实习、暑期学校、技术培训班等。鼓励学生和青年工作者积极参与国际学术交流。通过多学科交叉培养，有助于产生重大成果。

6. 主办国际学术会议、高水平国际期刊

通过主办国际学术会议，吸引国际同行来华交流，打破国外政治因素的阻碍，维持我国科学界在国际学术活动和学术对话中的参与度。主办高水平国际期刊，坚持开放共享，提升期刊的国际影响力，能够为我国科学家发表高水平工作提供渠道，打破传统“顶刊”对我国相关研究的偏见和垄断，抢占科技话语权。

7. 参与国际学术组织/联盟的治理，发起和主导国际大科学计划

要拥有国际话语权，需要在国际性组织、联盟中获得席位，积极参与国际学术组织、联盟的治理，尊重并遵守国际性组织的运行规则，逐渐掌握主导权。

2018年3月，国务院正式印发《积极牵头组织国际大科学计划和大科学工程方案的通知》。经过多年酝酿和专家反复论证，科技部已明确将“全脑介观神经联接图谱”国际大科学计划列为“十四五”期间重点培育的6个国际大科学计划之一。

二、政策建议

1. 加强人才培养，建立科研后备军

作为前沿交叉学科，需要不同学科和技术背景的人才参与。首先需要鼓励和引导更多高校开设相关专业方向，发展和壮大脑科学与类脑技术交叉学科在本科教育中的范围。其次，增大脑科学与类脑技术相关专业在研究生教育中的招生规模，推广本硕博跨学科贯通培养模式，输送高层次科研人才。第三，利用学会等平台举办多种形式的本科生、研究生学术竞赛，促进学术交流，以培养和造就一批脑科学与类脑技术青年人才。

2. 加强顶层设计，布局合理的研究体系

坚持问题导向，加强顶层设计，促进多学科交叉。依托科技创新 2030 重大项目“脑科学与类脑研究”、“全脑介观神经联接图谱”国际大科学计划、国防领域专项等计划，适时布局、立项相关科研项目。鼓励不同地区发挥资源、政策和人才等优势，建设脑科学与类脑技术研究基地，营造优势互补、合作共赢的开放创新生态。

3. 加强优势技术支持，抢占科技竞争制高点

提升新技术新方法研究的优先级，加大支持力度。对于我国有优势、发展成熟的技术，支持建设示范应用平台/基地，抢占和巩固制高点，促进研究成果向新质生产力/战斗力转化和迭代在全球产业革命和科技竞争中掌握主动权。