

编者按 脑科学和类脑智能技术是当前国际重要科技前沿，其对人类健康和新一代人工智能技术及新型信息产业的发展意义重大，是国际科技界必争的重要战略领域。我国即将启动“中国脑计划”（脑科学和类脑研究）重大科技专项，以期在未来15年内，使我国在该领域处于国际前沿地位。为此，本刊特策划推出“脑科学与类脑智能”专题，系统评述国内外脑科学和类脑智能技术研究进展、未来15年发展趋势和有望解决的重大科学问题，以及我国在该领域的特色和优势。希望其对上述重大专项的实施、推进和我国相关领域的研究有所借鉴和助益。本专题由蒲慕明院士、郭爱克院士、谭铁牛院士、张旭院士共同指导推进。

脑科学与类脑研究概述^{*}



蒲慕明^{1,3**} 徐波^{2,3*} 谭铁牛^{2,3**}

1 中国科学院上海生命科学研究院神经科学研究所 上海 200031

2 中国科学院自动化研究所 北京 100190

3 中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心 上海 200031

摘要 脑科学和类脑智能技术是两个重要的前沿科技领域；二者相互借鉴、相互融合的发展是近年来国际科学界涌现的新趋势。脑科学研究对大脑认知神经原理的认识，提升了人类对自身的理解和脑重大疾病的诊治水平，也为发展类脑计算系统和器件、突破传统计算机架构的束缚提供了重要的依据。文章概括性地总结了国际脑科学和智能技术领域的总体进展，未来15年的发展趋势和有望解决的重大科学问题，以及我国在这两领域发展的特色和优势。

关键词 脑科学，神经网络，脑疾病，人工智能，类脑研究，智能机器人

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.07.001

人类的大脑是生物演化的奇迹，它是由数百种不同类型的上千亿的神经细胞所构成的极为复杂的生物组织。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；理解认知、思维、意识和语言的神经基础，是人类认识自然与自身的终极挑战。脑科学对各种脑功能神经基础的解析，对有效诊断和治疗脑疾病有重要的临床意义；脑科学所启发的类脑研究可推动新一代人工智能技术和新型信息产业的发展。

《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：“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。”近年来，脑科学在基础研究和应用方面酝

^{*}资助项目：中科院战略性
先导科技专项项目（B类）
（XDB0200000）

^{**} 通讯作者

修改稿收到日期：2016年7
月10日

酿着历史性的重大突破，发达国家纷纷推出大型脑研究计划；我国政府亦将启动“脑科学与类脑研究”国家科技重大专项：侧重以探索大脑认知原理的基础研究为主体，以发展类脑人工智能的计算技术和器件及研发脑重大疾病的诊断干预手段为应用导向。面对激烈的国际竞争以及迫切的社会需求，“脑科学与类脑研究”项目的实施，将有助于我国在脑认知原理、类脑人工智能和脑疾病诊治的前沿领域取得重大突破，在国际上产生引领作用。

1 国际脑科学和类脑研究的回顾与前瞻

1.1 脑科学的回顾

现代神经科学的起点是神经解剖学和组织学对神经系统结构的认识和分析。从宏观层面，Broca 和 Wernicke 对大脑语言区的定位，Brodman 对脑区的组织学分割，Penfield 对大脑运动和感觉皮层对应身体各部位的图谱绘制、功能核磁共振成像对在活体进行任务时脑内依赖于电活动的血流信号等，使我们对大脑各脑区可能参与某种脑功能已有相当的理解。由于每一脑区的神经元种类多样，局部微环路和长程投射环路错综复杂，要理解神经系统处理信息的工作原理，必须先具有神经元层面的神经联结结构和电活动信息。20 世纪在神经元层面从下而上的研究也有了一些标志性的突破，如 Cajal 对神经系统的细胞基础及神经元极性结构和多样形态的分析，Sherrington 对神经环路和脊髓反射弧的定义，Adrian 发现神经信息以动作电位的频率来编码信息的幅度，Hodgkin 和 Huxley 对从动作电位的离子机制并发现各种神经递质及其功能，Katz 和 Eccles 对化学突触传递的分析，Hubel 和 Wiesel 发现各种视觉神经元从简单到复杂的感受野特性，Bliss 和 Ito 等人发现突触的长期强化和弱化现象，O'keefe 等人发现对特定空间定位有反应的神经元等，使我们对神经元如何编码、转导和储存神经信息有了较清楚的理解，但是这些神经元的特性是如何通过局部环路和长程环路产生的，我们的理解还十分有限。至

于对环路中的神经信息如何产生感知觉、情绪、思维、抉择、意识、语言等各种脑认知功能的理解更为粗浅。问题的关键是，我们对脑功能相关的神经环路结构和神经信息处理机制的解析仍极不清楚。

1.2 脑科学领域的重大问题：从图谱制作到机制解析

就像 20 世纪 90 年代“全基因组测序”是理解生物体基因基础的关键，“全脑图谱的制作”已成为脑科学必须攻关的关口。核磁共振等脑成像技术大大推动了人们在无创条件下对大脑宏观结构和电活动的理解^[1]。但是由于这些宏观成像技术的低时空分辨率（秒、厘米级），不能满足在解析大脑神经网络结构和工作原理时的需求，目前急需有介观层面细胞级分辨率（微米级）神经网络的图谱和高时间分辨率（毫秒级）的载体神经元集群的电活动图谱。完整的全脑图谱制作的必要过程中，对每个脑区神经元种类的鉴定是必要的一步。目前使用单细胞深度 RNA 测序技术对小鼠大脑进行的鉴定中，已发现许多新的神经元亚型。利用在这些神经元亚型特异表达的分子作为标记，可以绘制各脑区各种类型神经元的输入和输出联接图谱。对一个神经元亚型的最好的定义是连接和功能的定义：接受相同神经元的输入并对相同脑区的相同神经元有输出的一群神经元。在建立结构图谱后，需要描叙各个神经联接在进行脑功能时的电活动图谱，这就需要有对神经元集群在体内的观测手段。有了神经元层面的网络电活动的图谱，并进一步用操纵电活动的方式来决定该电活动与脑功能的因果关系，就能逐步解析脑功能的神经基础。

上述三类脑图谱（神经元种类图谱、介观神经联接图谱、介观神经元电活动图谱）的制作将是脑科学界长期的工作。以目前已有的技术，鉴别小鼠全脑的所有神经元的类型和介观层面的全脑神经网络结构图谱制作至少需要 10—15 年，而对非人灵长类（如猕猴）则可能需要 20—30 年以上的时间。当然，与过去人类基因组测序一样，脑结构图谱制作的进展速度很大程度上依赖于介观层面观测新技术的研发，后者又依赖于对新技术研发

和图谱制作的科研投资。值得注意的是,在全脑神经联接图谱未完成前,神经科学家针对特定脑功能的已知神经环路,对其工作机制已作出了许多有意义的解析。尤其是在过去10年中,使用小鼠为模型,利用光遗传方法操纵环路电活动,对特定神经环路的电活动与脑认知功能之间的因果关系的理解,取得了前所未有的进展^[2,3]。神经系统内所有的脑功能环路都存在于彼此相连的神经网络之中,许多认知功能的神经环路都牵涉到许多脑区的网路,全脑的结构和电活动图谱是完整地理解大脑功能神经基础所必需的^[4]。

许多动物都具有基本脑认知功能,例如感觉和知觉、学习和记忆、情绪和情感、注意和抉择等,这些功能的神经环路和工作机理研究,可使用各种动物模型(包括果蝇、斑马鱼、鼠、猴等);但是对高等脑认知功能,如共情心、思维、意识、语言等,可能有必要使用非人灵长类(如猕猴和狨猴)为实验动物。介观神经网络的神经元类别、结构性和功能性的联接图谱绘制,在未来20年将是不可或缺的脑科学领域。我国科学家有望在此领域发挥引领作用。

1.3 脑健康领域的重大问题:脑疾病的早期诊断和干预

据世界卫生组织定量评价,全球各类疾病给社会造成的负担中,脑疾病占28%,已超过心血管疾病或癌症。其中备受关注的脑疾病包括神经发育疾病(如自闭症)、精神疾病(如抑郁症)和神经退行性疾病(如老年痴呆症等)。神经发育疾病是一类由脑部生长和发育缺陷导致的疾病,表现为情绪、认知等功能的异常。不少病变发生的时期较早,在婴儿期或童年期就有表现。其中自闭症(又称孤独症)主要表现为人际交往、情感、语言交流等方面的障碍,以及狭隘的兴趣和重复刻板等怪异行为。我国0—6岁低龄儿童占人口总数近8%,自闭症的发病率很高,一般平均在1%左右。根据局部抽样调查数据保守推算,我国患儿人数已过百万,受自闭症困扰的人群可能达千万。精神疾病是由神经系统病变导致的行为和心理活动紊乱,表现为认

知、情感、意志等精神活动出现不同程度的障碍。其中抑郁症最为普遍,据中国疾病预防控制中心调查,我国抑郁症的发病率超过4%,患者人数超过3000万,已成为影响我国人民生活的主要病症之一。神经退行性疾病是一类以神经元的结构和功能逐渐丧失以至死亡为特征的神经系统病变。其中常见的是老年痴呆症(又称为阿尔茨海默综合征),在65岁及以上的人群中发病率约13%,并且发病率随着年龄的增长而大幅提高。85岁及以上的人群,约有一半以上患有此病。2014年我国老龄人口已突破2亿大关,并且将以每年100万的速度增长。我国属老年痴呆症的高发地区,目前患者人数超过600万,居全球首位,且呈明显上升趋势。

目前科学界对这三类重大脑疾病(幼年期自闭症和智障,中年期抑郁症和成瘾、老年期的退行性脑疾病)的病因仍不了解,治疗的措施也十分缺乏。早期诊断和早期干预将是对脑疾病最有效的医疗方式。人类需要继续探索这些脑重大疾病的致病机理,致病机理的完全理解仍有赖于阐明脑认知功能的神经基础^[5]。在完全理解机理之前,急需研发出有效的脑重大疾病预警和早期诊断的各种指标,包括基因变异的检测、血液体液和脑脊液中的分子成分、脑影像及脑功能的指标等。对诊断出的早期患者,需要早期干预,以延缓或预防脑疾病的出现。我们需要研发早期干预的药理、生理和物理新技术和新仪器。目前医疗界已在使用一些物理刺激技术来治疗脑疾病,如穿颅磁刺激(TMS)、穿颅直流电刺激(tDCS)、深度脑刺激(DBS)等,这些刺激方法的精度和刺激模式需进一步优化,而优化的过程仍依赖于脑科学对认知功能的神经环路所获得的新信息。新药物和新型生理物理干预技术的研发,需要合适的动物模型,因此,建立脑重大疾病的非人灵长类模型是不可或缺的一环。

1.4 人工智能发展的回顾

1956年夏季,以麦卡锡、明斯基等为首的一批有远见的年轻科学家探讨用机器模拟智能,并提出了人工智

能这一术语,60年来该领域的理论和技术都得到了迅速的发展。

图灵奖获得者 Allen Newell 以认知心理学为核心,探索认知体系结构。至今在认知心理学与人工智能领域广泛应用于心智建模的认知体系结构 SOAR 与 ACT-R 都是在 Newell 直接领导下或受其启发而发展起来的,并以此为基石实现了对人类各种认知功能的建模^[6,7]。David Marr 不但是计算机视觉的开拓者^[8],还奠定了神经元群之间存储、处理、传递信息的计算基础,特别是对学习与记忆、视觉相关环路的神经计算建模作出了重要贡献^[9-12]。Hodgkin 与 Huxley 依据生理实验结果创建了第一个精细的动作电位模型^[13],Misha 等人构建了神经元之间的突触计算模型^[14]。由瑞士洛桑联邦理工大学(EPFL)发起的“蓝脑计划”自2005年开始实施,经过10年的努力,目前专注于极为精细的微观神经元及其微环路建模,较为完整地完成了特定脑区内皮质柱的计算模拟^[15]。但总体而言,以上工作要真正实现认知功能的模拟还有很大鸿沟需要跨越^[16]。

人工智能符号主义研究的出发点是对人类思维、行为的符号化高层抽象描述,20世纪70年代兴起的专家系统是该类方法的代表。而以人工神经网络为代表的联接主义的出发点正是对脑神经系统结构及其计算机制的初步模拟。人工神经网络的研究可以追溯到20世纪40年代^[17],有些还借鉴了脑神经元之间突触联接的赫布法则作为其学习理论^[18]。感知器(Perceptron)是浅层人工神经网络的代表,由于其权值自学习能力引起了巨大关注^[19]。Minsky 等人指出,单层感知器无法表示异或函数的缺陷使得人工神经网络研究一度陷入低谷,而反向传播算法的提出解决了多层感知机学习的难题^[20]。随后 Minsky 在文献^[19]中提出的第二个问题,即当时计算能力的提升不足以支持大规模神经网络训练的问题长期限制了人工神经网络的发展,直至深度学习的诞生及其支撑硬件平台的发展^[21]。在深度学习提出之前,Rumelhart 等人重新提出误差反向传播算法,其在非线性模式分类中显示的强

大性能带动了人工神经网络研究和应用的一轮热潮^[22]。

LeCun 等人提出的卷积神经网络受到了 Fukushima 等人更早提出的 Neocognitron 的启发^[23,24]。深度学习算法提出之后,随着 GPU 并行计算的推广和大数据的出现,在大规模数据上训练多层神经网络成为可能,从而大大提升了神经网络的学习和泛化能力。然而,增加层数的人工神经网络仍然是脑神经系统的粗糙模拟,且其学习的灵活性仍远逊于人脑^[16]。

在人工神经网络的研究中,大多数学者主要关心提升网络学习的性能。Poggio 及其合作者的工作是人工神经网络向更类脑方向发展的典范,特别是其模仿人类视觉信息处理通路构建的 HMAX 模型上的一系列工作^[25,26]。此外,Bengio 及其合作者融合了脑的基底神经节与前额叶的信息处理机制,提出了类脑强化学习,也是人工神经网络向更类脑的方向发展有较大影响力的工作^[27]。加拿大滑铁卢大学 Eliasmith 团队的 SPAUN 脑模拟器是多脑区协同计算领域标志性的工作^[28]。由 Hawkins 提出的分层时序记忆(Hierarchical Temporal Memory)模型更为深度地借鉴了脑信息处理机制,主要体现在该模型借鉴了脑皮层的6层组织结构及不同层次神经元之间的信息传递机制、皮质柱的信息处理原理等^[29,30]。

从问题求解目标讲,几乎所有的人工智能系统都需要首先进行人工形式化建模,转化为一类特定的计算问题(如搜索、自动推理、机器学习等)进行处理,因而人工智能系统都被称为专用人工智能系统。IBM DeepBlue 系统击败国际象棋世界冠军卡斯帕罗夫、IBM Watson 问答系统在“危险边缘”挑战赛中击败人类对手、Siri 等自动人机对话与服务系统的出现、Google 汽车自动驾驶等都从不同视角展示了这个领域的进展。而最为震撼的是,2016年3月份 Google 的 AlphaGo 程序首次利用深度学习技术击败人类围棋世界冠军。这些人工智能系统的出现,有力地推动了人工智能技术和应用的发展,也使得人工智能成为目前 IT 领域最为引人注目的领域。

1.5 类脑人工智能发展的重大问题：具有自主学习能力的智能系统

人工智能技术代表着国家竞争力，并正在以前所未有的速度渗透到现代服务业、工业和军事等领域中。随着老龄化社会的到来，需要大量具备能理解人类意图并进行人机协同工作的智能机器人，欧盟 SPARC 就启动了全球最大的民用机器人研发计划；以 IBM Watson 为代表，将有大量具备复杂数据整合和分析能力的人工智能用于医疗、法律、政府决策等领域，正在替代很多专业领域的白领工作；通过人工智能技术实现无人驾驶，不但释放大量劳动力、提高生活质量，且是另外一个万亿级规模产值的领域。我国人口红利的消失也迫切需要发展各种智能机器人替代蓝领工人，智能化成为未来工业发展的必然趋势。德国“工业 4.0”，软银集团的孙正义提出 2050 年机器人拯救日本经济，美国总统奥巴马提出的以机器人为核心的高端制造业回归，无不对中国智能产业发展构成重大挑战。美国的 X47-B 无人机实现在航母上的自主起降，美国的 BigDog 能在多种复杂环境中自如稳定行进，世界军事强国已逐步形成以加速发展智能化武器装备为核心的竞争态势。可以说，没有智能技术武装的服务业、工业和军事的大国之间的较量，就犹如侏儒和巨人的格斗。

(1) 人工智能要满足现实需求还缺乏足够的适应性。图灵机计算的本质是需要人们对现实世界进行形式化的定义，模型能力取决于人对物理世界的认知程度，因此人限定了机器描述问题、解决问题的程度。这使得目前的智能系统在感知、认知、控制等多方面都存在巨大瓶颈。例如还难以实现海量多模态信息的选择性感知与注意、模式识别与语言理解在处理机制与效率等方面与人脑相比还存在明显不足，需要针对某个专用问题非常依赖人工输入知识或提供大规模标记训练样本^[16]。

(2) 目前的人工智能技术缺乏通用性。语音识别、图像处理、自然语言处理、机器翻译等采用不同的模型和不同的学习数据，两种不同的任务无法采用同一套系

统进行求解，不同任务之间知识也无法共享。而人脑却采用同一个信息处理系统进行自动感知、问题分析与求解、决策控制等。

(3) 目前基于深度学习方法已经在人工智能领域取得了很大的成功，然而其代价是高耗能。例如在执行 AlphaGo 这样的任务时，共动用了 1 202 个 CPU 核和 176 GPU 核，采用了 40 个搜索线程进行计算。按照这个耗能计算，我们还无法想象要实现一个具备大脑功能的智能系统按照目前的水平需要多少供电。而人类大脑的功耗仅在 20W 左右。

Ailamaki 等人^[31]指出：“除人脑以外，没有任何一个自然或人工系统能够具有对新环境与新挑战的自适应能力、新信息与新技能的自动获取能力、在复杂环境下进行有效决策并稳定工作直至几十年的能力。没有任何系统能够在多处损伤的情况下保持像人脑一样好的鲁棒性，在处理同样复杂的任务时，没有任何人工系统能够媲美人脑的低能耗性。”近年来，脑与神经科学、认知科学的进展使得在脑区、神经簇、神经微环路、神经元等不同尺度观测的各种认知任务中，获取脑组织的部分活动相关数据已成为可能。人脑信息处理过程不再仅凭猜测，而通过多学科交叉和实验研究获得的人脑工作机制也更具可靠性。因此，受脑信息处理机制启发，借鉴脑神经机制和认知行为机制发展类脑智能已成为近年来人工智能与计算科学领域的研究热点^[16]。

新一代人工智能需要在上述脑研究启发下，以多脑区、多模态和多任务协同为核心，研究神经网络微观刺激调控和宏观动态演化、视听触感知通道及协同、长时短时记忆与决策、运动视觉与规划控制等，建立具有生物和数学基础的计算模型与学习方法，实现具有自主学习能力的智能系统。

2 国际大型脑研究计划概述

近年来国际上兴起了脑科学研究的热潮，发达国家纷纷推出大型脑研究计划。其中最受关注的是 2013 年美

国和欧盟分别提出的“通过推动创新型神经技术开展大脑研究计划（Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies, BRAIN）”和“人脑计划（Human Brain Project, HBP）”，以及2014年日本启动的“脑智（Brain/MIND）计划”。美国的脑计划侧重于新型脑研究技术的研发^[32,33]，从而揭示脑的工作原理和脑的重大疾病发生机制，其目标是像人类基因组计划那样，不仅要引领前沿科学发展，同时带动相关高科技产业的发展。在未来10年将新增投入45亿美元。参与此计划的机构包括美国政府科研资助机构（如NIH、NSF、DARPA）、民间基金会（Kavli、Simon基金会）和研究所以（Allen研究所）。在计划启动之初，美国NIH成立了工作小组，邀请专家在全美各地召开讨论会征求意见，并为此计划提出了9项优先发展的领域和目标，其中依序为：鉴定神经细胞的类型并达成共识；绘制大脑结构图谱；研发新的大规模神经网络电活动记录技术；研发一套调控神经环路电活动的工具集；建立神经元电活动与行为的联系；整合理论、模型和统计方法；解析人脑成像技术的基本机制；建立人脑数据采集的机制；脑科学知识的传播与人员培训。

欧盟是世界最大的经济体，多年来对脑科学及相关疾病的研究有大量投入。2012年7月“欧洲第七框架计划（FP7）”将“脑部疾病防治”和“涉及健康、材料、神经科学与神经机器人的信息通信技术”作为新的资助主题，共投入19.2亿欧元。2013年1月欧盟正式公布“人脑计划”（HBP）为未来新兴技术旗舰计划（FET-Flagship）的两大计划之一。该计划原由瑞士的神经学家Henry Markram构思并领导筹划^[34]，目标是用超级计算机来模拟人类大脑，用于研究人脑的工作机制和未来脑疾病的治疗，并借此推动类脑人工智能的发展。参与的科学家来自欧盟各成员国的87个研究机构。

日本在2014年启动的国家脑计划的目标是“使用整合性神经技术制作有助于脑疾病研究的大脑图谱（Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for

Disease Studies, Brain/MINDS）”^[35]，为期10年，第一年2700万美元，以后逐年增加。此计划聚焦在使用猕猴为动物模型，绘制从宏观到微观的脑联结图谱，并以基因操作手段，建立脑疾病的猕猴模型。

3 中国脑计划

过去两年内，在科技部的组织下，中国脑科学和智能技术相关领域的专家举行了10余次讨论。这些会议达成的基本共识是，我国急需启动一项国家级“脑科学和类脑研究”计划；并建议此计划应依据我国的特色、优势、需求和目前的科研力量，以理解脑认知功能的神经基础为研究主体，以脑机智能技术和脑重大疾病诊治手段研发为两翼，在未来15年内使我国的脑认知基础研究、类脑研究和脑重大疾病研究达到国际先进水平，并在部分领域起到引领作用（图1）。脑认知原理的研究将可能产生有重大国际影响的基础科学成果；脑重大疾病的研究可望建立早期诊断与早期干预的技术体系，大幅度降低脑疾病的经济与社会负担。类脑研究和脑机智能技术是未来高科技领域的关键；类脑计算系统的突破将推动我国信息产业并带动工业、农业、金融及国防等领域的跨越式发展。

在脑计划讨论中，专家们提出了一些未来研究的重点内容。在脑认知的神经基础原理领域，包括基本脑认知功能（感觉和知觉、学习和记忆、情绪和情感、注意和抉择等）以及高等脑认知功能（同理心、思维、自我意识、语言等）的神经环路和工作机理、人脑宏观神经网络和模式动物介观神经网络的结构性及功能性全景式

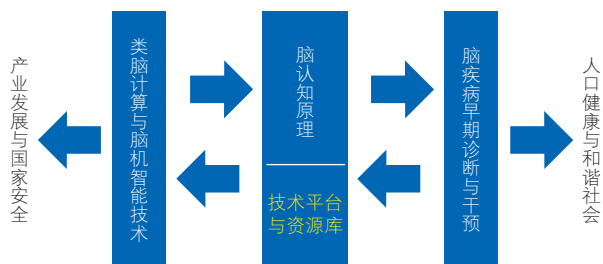


图1 中国脑计划的总体格局

图谱的绘制。在类脑计算与脑机智能技术领域,包括类脑计算理论和新一代人工神经网络计算模型、类神经形态的处理器和类脑计算机、类脑计算系统所需要的软件环境 and 应用平台、可自我学习和能适应环境而成长的机器人、脑机接口和脑机融合的新模型和新方法、脑活动(电、磁、超声)调控技术等。在脑重大疾病与健康领域,包括了阐释脑重大疾病(如幼年期自闭症和智障,中年期抑郁症和成瘾、老年期的退行性脑疾病)的致病机理、确立脑重大疾病预警和早期诊断的各种指标(包括基因谱、血液和脑脊液、脑影像和脑功能指标)、脑重大疾病早期干预、治疗与康复的(药理、生理和物理)新手段和器件的研发、建立非人灵长类动物(猕猴为主)的脑重大疾病模型等。为支撑这些研究,需要建立关键核心技术研发与推广的三类全国性平台:脑结构与功能研究新技术平台、脑重大疾病临床研究技术平台、类脑研究工程平台。总之,与欧、美、日新启动的脑计划相比,中国脑计划所包含的内容更为广泛,同时对社会需求有更直接的对应^[36]。

4 中国脑科学和类脑智能技术的优势领域

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》将“脑科学与认知”列入基础研究8个科学前沿问题之一。“973”“863”计划和科技支撑计划等对脑科学研究总投入约14亿元人民币,国家自然科学基金资助脑研究的经费近20亿元人民币,2012年起中科院启动的B类先导专项“脑功能联结图谱计划”,每年投入经费约6000千万元人民币。通过以上项目的实施,我国已培养了一批积极参与国际脑科学前沿工作的科学家团队,建立了一些国际先进水平的技术平台;在脑和神经元发育的分子机制、基因组分析和基因操作技术、突触可塑性、胶质细胞与神经元的交互作用、视觉感知功能环路、情感情绪的调控机制、学习记忆和抉择等脑认知功能的神经基础、多模态脑成像技术、脑电信号采集分析、宏观和介观层面脑网络结构的观测和分析技术等

方面,已取得了一批国际水平的成果;理解脑疾病(如老年痴呆症、帕金森病、抑郁症、精神分裂症、毒品成瘾等)的发病机制、精神类疾病的相关基因研究、精神神经药物研发和进一步研发脑疾病的预防、早期诊断和治疗手段等方面已具有了初步的条件;脑疾病的转基因猕猴模型制作,已居国际领先;多种脑重大疾病患者的资源库建设、致病基因和早期生物标记的筛选等领域已建立了一定的基础。但是,与发达国家相比,整体水平仍有相当差距,尤其是支撑脑科学研究的先进技术的原创和研发能力差距甚大;国际影响力有限,同时缺乏整体、系统性的统筹规划。面对时不我待的新形势,我国必须抓住机遇,推动脑科学研究的跨越式发展。

脑机智能也得到了我国“973”“863”和自然科学基金项目的支持,其分布在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》前沿技术中的“智能感知”和“虚拟现实”等领域,同时在重点领域与优先主题中“数字媒体内容技术”也包含了人工智能技术。

“973”“863”计划和科技支撑计划等从不同角度对人工智能研究进行了支持。自2008年开始,国家自然科学基金委启动了重大研究计划“视听觉信息的认知计算”,连续5年资助了73个项目。“在感知特征提取、整合和表达”“感知数据的机器学习和理解”以及“多模态信息协同计算”等核心科学问题上取得进展。2012年起中科院启动的B类先导专项“脑功能联结图谱计划”,从2015年开始也专门将智能技术纳入其中,进行融合。

通过以上项目的实施,我国在计算机视觉、语音识别、机器翻译和自然语言理解等领域已达国际先进水平,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。但是,与发达国家相比,在支撑类脑智能的前沿研究以及软硬件结合的类脑智能机器人领域的原创与研发能力方面差距甚大。我们迫切需要按照“顶天立地”的原则,一方面抓两个学科的融合,产生原始创新的理论和方法;另一方面要进一步加强技术的应用和产业

化，迎头赶上人工智能浪潮的到来。

5 中科院脑科学与智能技术卓越创新中心

为配合国家科技发展的战略需求和相应的体制与机制改革，中科院在“四类机构”改革的框架下，于2014年8月成立了“脑科学卓越创新中心”，以上海生科院神经科学所为依托单位。鉴于脑科学与类脑研究交叉和融合发展的需求，“脑科学卓越创新中心”在2015年扩容为“脑科学与智能技术卓越创新中心”（简称为“脑智中心”）。脑智中心是跨学科、跨院校的组织；目标在以科学问题为导向，凝聚中科院的科研实力，通过团队合作和学科交叉融合，解决在脑科学和类脑智能技术两个前沿领域的重大问题。

脑智中心有4个特点：（1）中心的科研骨干来自中科院20个研究所和中科院外若干高校（图2）。每位科研骨干加入中心后，都须参与一个或多个研究团队，以合作的形式对团队成员共同感兴趣的重大前沿科学问题进行攻关（图3）。（2）与其他已有的实验室联盟不同，中心明确要求每位学术骨干把主要的工作精力投入到完成中心团队的研究课题中。依据中心、学术骨干、骨干所在单位签订的“三方工作协议”，所在工作单位将积极支持骨干完成中心任务，提供必要的科研条件，并按照中科院制定的《卓越中心章程》认定与采纳中心对参与成员的考核结果。（3）中心所组织的全国性科研团队，将配合或承担国家中长期重大科研项目的任务。（4）中心也是中科院科研体制改革的实验平台，将探索各种机制，以期最大程度地避免中科院各单位间研究内容的同质化与碎片化。脑智中心的共建单位多、学科多样、文化差异较大，给有效交流合作带来相当的难度。为此中心采取了一些措施，包括中心成员每年必须在中心其他共建单位蹲点两个星期以上，进行开课、讲座和实验工作；启动双导师研究生制度等。脑智中心将不断尝试新的机制，促进不同研究背景的科学家之间的交流合作，并建立团队合作，攻克重大科学问题。

中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心 CAS Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology (CEBSIT)		
依托单位	上海生科院神经科学研究所	自动化研究所
共建单位 (23)	昆明动物研究所 中国科学技术大学 生物物理研究所 深圳先进研究所 武汉病毒研究所 遗传与发育研究所 心理研究所 营养科学研究所 武汉物理与数学研究所 华东理工大学 第三军医大学	国家纳米中心 计算技术研究所 合肥物质研究院 上海微系统与信息技术研究所 武汉光电国家实验室(筹) 高能物理研究所 苏州纳米研究所 半导体研究所 苏州医学工程技术研究所 科大讯飞 马普计算研究所 中国科学院大学

图2 中科院脑科学与智能技术卓越中心参与单位

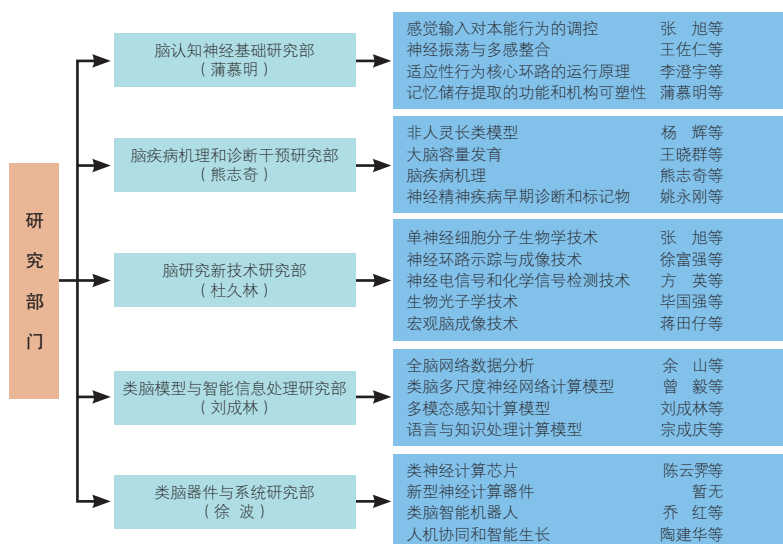


图3 中心科研攻关问题与团队组织

中心的科研工作包括5个领域：（1）在“脑认知功能的环路基础”领域，中心将研究感觉输入是如何启动和调节动物的本能行为、神经元震荡活动在多感觉信息处理和整合中的作用、记忆储存与提取的神经机制、适应性行为和高级认知功能（如自我意识、共情心和语言等）的神经环路基础。（2）在“脑疾病机理与诊断干预”领域，中心正在利用基因操作技术，研制脑疾病的猴类模型和脑认知研究的工具猴。中心也在研究人类特有基因在调节脑容量和脑疾病致病机理的作用；研制能早期诊断发育性、精神性和神经退行性脑疾病的基因、分子和认知功能指标。（3）在“脑研究新技术”研究方

向,中心正在完善鉴别神经元类型的单细胞基因分析方法、病毒感染示踪标记神经环路的方法、记录电信号和化学信号的微电极阵列技术,以及各种观测脑结构和功能的光学、磁共振影像新技术。(4)在“类脑模型与智能信息处理”研究方向,中心在介观和宏观水平对光学和磁共振成像数据进行全脑联结组分析,研发多感觉模式感知和能准确辨认图像、语音并理解语义的信息计算模型。(5)在“类脑器件与系统”研究方向,中心正在研发类神经元计算芯片、新一代的神经网络计算器件、类脑智能机器人以及人机协同的智能训练和生长环境。

6 结语

虽然,脑科学与类脑研究是两个目标完全不同的领域:脑科学的目标是要理解大脑的结构和功能、演化来源和发育过程,以及神经信息处理的机制。类脑研究的目标是研发出新一代的智能技术,推动信息产业的发展。但在竞争激烈的国际科技界,哪个国家能领先占领脑科学和类脑研究的高地,很大程度要看谁能首先做到这两个领域真正地融合发展。中科院脑科学与智能技术卓越创新中心的成立,迈出了重要的一步。

参考文献

- 1 Van Essen, D.C. Cartography and Connectomes. *Neuron*, 2013, 80:775-790.
- 2 Adamantidis A et al. Optogenetics: 10 years after ChR2 in neurons--views from the community. *Nature Neuroscience*, 2015, 18(9):1202-1212.
- 3 Rajasethupathy P, Ferenczi E, Deisseroth K. Targeting Neural Circuits. *Cell*, 2016, 165(3):524-534.
- 4 Kandel, E. The New Science of Mind and the Future of Knowledge, *Neuron*, 2013, 80: 546-560.
- 5 Insel TR, Landis SC. Twenty-five years of progress: the view from NIMH and NINDS. *Neuron*, 2013, 80:561-567.
- 6 Anderson J R. How can the human mind occur in the physical universe? Oxford, UK: Oxford University Press, 2007.
- 7 Laird J E, Newell A, Rosenbloom P S. SOAR: an architecture for general intelligence. *Artificial Intelligence*, 1987, 33(1): 1-64.
- 8 Marr D. Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information. New York, USA: W.H. Freeman and Company, 1982.
- 9 Marr D. A theory for cerebral neocortex. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 1970, 176: 161-234.
- 10 Marr D. Simple memory: a theory for archicortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1971, 262 (841): 23-81.
- 11 Marr D. Approaches to biological information processing. *Science*, 1975, 190: 875-876.
- 12 Marr D, Poggio T. Cooperative computation of stereo disparity. *Science*, 1976, 194 (4262): 283-287.
- 13 Hodgkin A L, Huxley A. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of physiology*, 1952, 117 (4): 500-544.
- 14 Tsodyks M, Pawelzik K, Markram H. Neural networks with dynamic synapses. *Neural Computation*, 1998, 10(4): 821-835.
- 15 Markram H. The blue brain project. *Nature Reviews Neuroscience*, 2006, 7 (2): 153-160.
- 16 曾毅, 刘成林, 谭铁牛. 类脑智能研究的回顾与展望. *计算机学报*, 2016, 39(1): 212-222.
- 17 Farley B G, Clark W A. Simulation of self-organizing systems by digital computer. *IRE Transactions on Information Theory*, 1954, 4(4):76-84.
- 18 Minsky M L, Papert S. Perceptrons: introduction to Computational Geometry. Cambridge, USA: The MIT Press, 1969.
- 19 Werbos P. Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. Ph.D Thesis. Cambridge, UK: Harvard University, 1974.
- 20 Hinton G E, Osindero S, Teh Y W. A fast learning algorithm for

- deep belief nets. *Neural Computation*, 2006, 18 (7): 1527-1554.
- 21 Hinton G E, Osindero S, Teh Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural Computation*, 2006, 18 (7): 1527-1554.
 - 22 Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back-propagation errors. *Nature*, 1986, 323(9): 533-536.
 - 23 LeCun Y, Boser B E, Denker J S, et al. Handwritten digit recognition with a back-propagation network. *Advances in Neural Information Processing Systems 2*. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 1990, 396-404.
 - 24 Fukushima K, Miyake S. Neocognitron: a new algorithm for pattern recognition tolerant of deformation and shifts in position, *Pattern Recognition*, 1982, 15(6): 455-469.
 - 25 Riesenhuber M, Poggio T. Hierarchical models of object recognition in cortex. *Nature Neuroscience*, 1999, 2(11): 1019-1025.
 - 26 Serre T, Oliva A, Poggio T. A feedforward architecture accounts for rapid categorization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(15): 6424-6429.
 - 27 Rivest F, Bengio Y, Kalaska J. Brain inspired reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems 17*. Cambridge, USA: The MIT Press, 2004: 1129-1136.
 - 28 Eliasmith C, Stewart T C, Choo X, et al. A large-scale model of the functioning brain. *Science*, 2012, 338(6111): 1202-1205.
 - 29 Hawkins J. *On intelligence*. New York, USA: Times Books, 2004.
 - 30 George D, Hawkins J. Towards a mathematical theory of cortical micro-circuits. *PLoS Computational Biology*, 2009, 5(10): e1000532.
 - 31 Ailamaki A, Alvandpour A, Amunts K, et al. The human brain project: a report to the european commission. Technical Report, 2012.
 - 32 Alivisatos AP, Chun M, Church GM, et al. The brain activity map project and the challenge of functional connectomics. *Neuron*, 2012, 74:970-974.
 - 33 “Advisory Committee to the Director”. Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies (BRAIN) Working Group. National Institutes of Health. Retrieved 14 April 2013.
 - 34 Markram H (2012) The human brain project. *Sci Am* 306:50-55.
 - 35 Okano H, Miyawaki A, Kasai K. Brain/MINDS: brain-mapping project in Japan. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2015, 370:1668.
 - 36 Poo, M-m. Where to the mega brain projects? *Natl. Sci. Rev.* 2014, 1: 12-14.

Brain Science and Brain-Inspired Intelligence Technology—An Overview

Poo Muming^{1,3} Xu Bo^{2,3} Tan Tieniu^{2,3}

(1 Institute of Neuroscience, Shanghai Institutes for Biological Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China;

2 Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3 Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China)

Abstract Brain science and brain-inspired intelligence technology are two important frontier areas in science and technology. There is an emergent trend in recent years for interaction and fusion of ideas and approaches in these two areas. Elucidation of the basic neural circuit principles of cognitive processes in the brain not only allows us to understand ourselves better but also facilitates the diagnosis and intervention of brain diseases. It also helps the development of brain-like computing methods and devices, and provides the basis for a new generation of computers with design beyond von Neumann architecture. Here we provide an overview of the current status and recent international development, future trend and

prospects for solving major problems, and special features and advantages of Chinese researchers in these two areas.

Keywords brain science, neural network, brain disease, artificial intelligence, brain-inspired research, intelligent robot

蒲慕明 中科院外籍院士，中科院上海生命科学院神经科学所所长、研究员，中科院脑科学与智能技术卓越创新中心主任。1970年毕业于台湾清华大学物理系，1974年于美国 Johns Hopkins 大学获生物物理学博士学位。1976—1985 年在美国加州大学艾文分校生物物理系任助理教授、副教授、教授，1984—1986 年任北京清华大学生物系主任，1985—2000 年任美国耶鲁大学、哥伦比亚大学、美国加州大学圣地亚哥分校讲座教授，2001—2006 年任美国加州大学伯克利分校分子与细胞生物学系讲座教授和神经生物学部主任，2006—2013 年任该校 Paul Licht 生物学杰出讲座教授。1999 年起任中科院神经科学所首任及现任所长、神经可塑性研究组组长。获得奖项及荣誉称号包括：美国科学院院士、中科院外籍院士、美国 Ameritec 奖、法国巴黎高等师范学院和香港科技大学荣誉博士学位、中华人民共和国国际科学技术合作奖、求是杰出科学家奖、中科院杰出科技成就奖（集体）、Gruber 神经科学奖等。2011 年起任科技部重大科学问题导向“973”计划“人类智力的神经基础”首席科学家，2012 年起任中科院战略性先导科技专项（B 类）“脑功能联结图谱”首席科学顾问。E-mail: mpoo@ion.ac.cn

Poo Muming Director of Institute of Neuroscience, CAS, Head of Laboratory of Neural Plasticity, and Director of CAS Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology. Poo received B.S. degree in physics from Tsinghua University (Taiwan), China in 1970 and his Ph. D in biophysics from Johns Hopkins University in 1974. Since 1976, he was on the faculty of UC Irvine, Yale University, Columbia University, UCSD, and UC Berkeley, where he had served as the Head of Division of Neurobiology of Department of Molecular and Cell Biology (2001—2006) and Paul Licht Distinguished Professor in Biology. He was the founding Chairman of Department of Biological Sciences and Biotechnology of Qinghua University (Beijing) during 1984—1986. Poo had received Ameritec Prize (2001), China International Science & Technology Cooperation Award (2005), Qiushi Distinguished Scientist Award (2011), Gruber Prize in Neuroscience (2016), and Docteur Honoris Causa from Ecole Normale Supérieure (Paris) and Hong Kong University of Science and Technology. He is a member of Academia Sinica, National Academy of Sciences (USA), and Chinese Academy of Sciences. He is currently the Chief Scientific Advisor of the CAS Strategic Priority Research Project (Class B) on “Mapping Brain Functional Connections”. Dr Poo’s research interests focus on cellular and molecular mechanisms underlying axon guidance, synaptogenesis and synaptic plasticity. E-mail: mpoo@ion.ac.cn

徐波 男，中科院自动化所所长、研究员，中科院脑科学与智能技术卓越创新中心副主任，中国中文信息学会副理事长。曾任国家“863”计划信息技术领域专家组专家。长期从事人工智能研究，主要研究领域包括：类脑智能、类脑认知计算模型、自然语言处理与理解、类脑机器人。E-mail: xubo@ia.ac.cn

Xu Bo Male, professor, president of Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, and deputy director of the Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences. He also serves as an associate president of Chinese Information Processing Society of China. He was a steering committee member of National high-tech Programme (“863”). His main research interests include brain-inspired intelligence, brain-inspired cognitive models, natural language processing and understanding, brain-inspired robotics, etc. E-mail: xubo@ia.ac.cn

谭铁牛 男，中科院院士，中科院副院长、党组成员，中科院自动化所研究员、智能感知与计算研究中心主任。1964

年出生于湖南省茶陵县。1984年毕业于西安交通大学,并于1986年、1989年分别获得英国帝国理工学院硕士与博士学位。2013年当选中科院院士,2014年当选英国皇家工程院外籍院士,2014年当选发展中国家科学院(TWAS)院士,2015年当选巴西科学院通讯院士。曾任模式识别国家重点实验室主任、中科院自动化所所长、中科院副秘书长、中科院副秘书长兼任国际合作局局长。中共“十六大”、“十七大”、“十八大”代表。模式识别与计算机视觉专家,主要从事模式识别、图像处理和计算机视觉方面的研究。曾任或现任 *IEEE T-PAMI*、*Pattern Recognition*、*Pattern Recognition Letters* 等多个国际学术刊物的编委以及 *International Journal of Automation and Computing* 和《自动化学报》主编。中国人工智能学会副理事长,国际电子电气工程师学会(IEEE)和国际模式识别学会Fellow,曾任国际模式识别学会第一副主席和IEEE生物识别理事会主席。先后获国家自然科学奖二等奖、国家技术发明奖二等奖和国家科技进步奖二等奖等。E-mail: tnt@nlpr.ia.ac.cn

Tan Tieniu Male, professor of computer vision and pattern recognition, Vice President of the Chinese Academy of Sciences. He is Member of the Chinese Academy of Sciences, International Fellow of the UK Royal Academy of Engineering, Fellow of The World Academy of Sciences for the advancement of sciences in developing countries (TWAS), Corresponding Member of the Brazilian Academy of Sciences, and Fellow of the IEEE and IAPR (International Association for Pattern Recognition). Tan received his BSc in electronic engineering from Xi'an Jiaotong University, China in 1984, and his MSc and PhD degrees in electronic engineering from Imperial College London, UK in 1986 and 1989 respectively. In October 1989, he joined the Department of Computer Science, The University of Reading, UK, where he worked as Research Fellow, Senior Research Fellow and Lecturer. In January 1998, he returned to China to join the National Laboratory of Pattern Recognition (NLPR), CAS Institute of Automation as a full professor. He was the Director General of the Institute from 2000—2007, Director of the NLPR from 1998—2013, and Deputy Secretary-General of the Chinese Academy of Sciences from 2007—2015. He is currently Director of the Center for Research on Intelligent Perception and Computing at the Institute of Automation. He has published more than 500 research papers in refereed international journals and conferences in the areas of image processing, computer vision and pattern recognition, and has authored or edited 11 books. He holds more than 70 patents. His current research interests include biometrics, image and video understanding, and information forensics and security. E-mail: tnt@nlpr.ia.ac.cn