

二、信息与电子工程

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向（见表 1.1.1）。其中，“面向光互联、光计算及光传感的硅基集成光子器件”“面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术”“人工微纳结构对光及电磁场的调控”基于科睿唯安高被引聚类得出；“类脑智能”来自美国、欧盟、中国等 8 个国家或地区近两年自然科学基金资助项目主题聚类分析；“新一代神经网络及其应用”基于 SciVal 主题显著度分析得出；“天地一体化组网”“脑成像技术”“感知-通信-计算-控制协同融合理论与方法”“混合增强智能”“量子化精密计量/测量技术与相关理论”由专家补充。

2013—2018 年，各前沿涉及的核心论文发表情况见表 1.1.2，其中，“新一代神经网络及其应用”

核心论文发表数量增速最为显著。

(1) 类脑智能

人工智能已成为新一轮科技革命和产业变革的核心驱动力。与当前以算法为核心的人工智能技术路线不同，类脑智能试图借鉴、模仿进而超越生物大脑的感知和认知功能，是实现通用人工智能（强人工智能）这一终极目标的重要技术途径之一。

类脑智能的技术路线主要分为两种：自顶向下的功能模拟路线，自底向上的结构仿真路线。两者既针锋相对，又密不可分。功能模拟以认知科学为基础，借鉴大脑认知机理来设计新的人工智能模型，但由于揭示认知机理极端困难，因此突破时间难以预测。结构仿真以神经科学为基础，通过精细仿真生物神经元、突触和神经环路，试图构造出逼近生物神经系统的装置，再通过刺激训练产生类似功能，预计在数十年内会渐次突破。

近年来，大脑观测、解析技术与仪器快速进步，神经科学和认知科学快速发展，各国纷纷推出“脑计划”，如果蝇脑解析取得突破，人脑精细解析有望在 20 年内实现。与此同时，精细仿真生物神经

表 1.1.1 信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	类脑智能	337	19 232	57.07	2014.3
2	天地一体化组网	122	6424	52.66	2015.0
3	脑成像技术	941	64 743	68.80	2014.2
4	感知-通信-计算-控制协同融合理论与方法	26	2057	79.12	2014.7
5	混合增强智能	472	20 783	44.03	2014.5
6	面向光互联、光计算及光传感的硅基集成光子器件	45	4020	89.33	2014.9
7	面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术	655	49 476	75.54	2015.7
8	人工微纳结构对光及电磁场的调控	51	5602	109.84	2014.6
9	量子化精密计量/测量技术与相关理论	30	2973	99.10	2014.6
10	新一代神经网络及其应用	679	38 644	56.91	2016.0

表 1.1.2 信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
1	类脑智能	119	102	56	40	14	6
2	天地一体化组网	25	26	25	24	14	8
3	脑成像技术	337	266	192	99	41	6
4	感知-通信-计算-控制协同融合理论与方法	6	8	5	2	4	1
5	混合增强智能	136	129	98	66	34	9
6	面向光互联、光计算及光传感的硅基集成光子器件	6	14	13	6	3	3
7	面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术	38	88	138	202	157	32
8	人工微纳结构对光及电磁场的调控	13	13	11	9	5	0
9	量子化精密计量 / 测量技术与相关理论	10	5	7	5	0	3
10	新一代神经网络及其应用	56	47	126	169	203	78

元和神经突触的功能器件纷纷出现，首台能够精细仿真人类大脑的机器有望于 2022 年建成，结构仿真和功能模拟有望实现快速对接和互动，从而显著加速类脑智能的发展。

（2）天地一体化组网

天地一体化网络作为基础设施，以地面网络为基础、空间网络为延伸，可实现互联网、移动通信网络、空间网络的互联互通，向天基、空基、陆基、海基等各类用户活动提供信息保障。针对天地一体化网络规模庞大，拓扑结构呈现立体多层次化、高度异构性，业务种类繁多的特点，天地一体化组网研究需设计结构清晰、功能简洁、易于高效实现的网络体系结构，使网络既能适应通信技术的快速发展与变化，又能支持层出不穷的新型应用。

国外在天地一体化网络领域侧重于对卫星-地面网络的研究，天基系统由传统高轨星座向中低轨星座发展，建立市场化投融资与经营、建造新型工厂并批量制造的发展模式。我国在这一领域的研究起步较晚，受限于全球建站和频率轨位资源，在组网技术上面临挑战，亟需利用航空航天工业和互联网产业的技术基础，积极介入并运营好这一新兴市场。

立足基础和现状，我国未来天地一体化组网的

主要研究方向为：地/海/空/天一体化的组网架构设计，适用于大规模、高异构性的空间网络协议族研究，高动态轻量级移动性切换机制研究，多维网络资源协同管理控制技术研究。

（3）脑成像技术

脑结构错综复杂，包含上千亿个神经元，彼此之间又有着百万亿个连接。时至今日，脑的核心功能，如情绪和情感等，仍然是未解的难题。这是攻克严重危害人类身心健康的神经系统重大疾病的关键，也将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重要依据，决定着未来人工智能的深度发展方向。

自 16 世纪末显微镜发明以来，每次显微成像技术的突破都给生命科学研究带来里程碑式的发展。近年来，脑成像技术在成像的分辨率、速度、深度和视场 4 个方面均取得重大进步。针对脑环路多尺度特性的新型脑成像技术，将为国家“脑计划”在多个层面上解析脑环路结构与功能提供关键引领和支撑，主要研究方向包括：发展高通量三维结构与功能成像和样品处理新技术，以及图像数据处理分析新方法，实现以细胞级分辨率对不同生物全脑神经元类型、连接与活动的快速定量解析；发展大范围、深穿透度的在体高分辨光学成像等新技术，

实现清醒和自由活动动物神经活动的高时空分辨率；发展光电关联等超微成像新技术，实现对神经突触等亚细胞结构的超微解析和定量表征。未来进一步提高活体脑成像的成像深度，开展神经环路的高速高分辨三维重构，探索精准脑结构和功能成像，既是脑成像技术的发展趋势，也是当前国际研究的难点和重点之一。

(4) 感知-通信-计算-控制协同融合理论与方法

未来大规模物联网节点的感知、通信和计算能力高度集成，所有节点都将参与数据获取、加工、传输和反馈；同时这些过程深度耦合，使得未来网络的节点模型、流量模型、控制模型将发生明显改变；网络中信息的演变将呈现新规律，并进一步促使未来网络架构出现革命性演变，形成所谓的感知-通信-计算-控制协同融合网络。当前，感知-通信-计算-控制协同融合网络的基础理论基本上处于空白状态，迫切需要研究和突破。

重点针对未来规模化网络的复杂场景和需求，研究和探索能有效衡量网络性能的本质信息度和综合指标体系，建立感知-通信-计算-控制协同融合网络的新型信息论模型与高效分析方法；突破未来网络在感知、通信、计算和控制过程深度耦合以及在网络资源受限、状态空间巨大且动态变化等复杂条件下的信息演变规律和渐进极限性能，揭示网络信息瓶颈与网络智能的形成和演进规律；建立后香农时代信息理论体系，为未来大规模物联网提供理论技术支撑。

(5) 混合增强智能

人工智能的远期目标是制造能够像人类一样学习与思考的机器。智能机器已成为人类的伴随者，人与智能机器的交互、混合是未来社会的发展形态。但是人类面临的许多问题具有不确定性、脆弱性和开放性，任何智能程度的机器都无法完全取代人类，这就需要将人的作用或人的认知模型引入人工智能系统，形成混合增强智能形态，这种形态是人工智

能或机器智能可行的、重要的成长模式。

在新一轮科技革命与产业变革推动下，人工智能正快速应用于各个产业，并深度渗入组织运营与管理过程，为组织生态带来颠覆性变革。组织人与智能机器实现价值互惠与价值共创将成为最优发展模式，人机混合增强智能是支撑这种发展模式的核心关键技术。

混合增强智能正沿着两条技术路线发展：人在回路的混合增强智能，受脑和神经科学启发的混合增强智能。前者重点研究如何把人的作用引入智能系统计算模型，形成提升智能水平的反馈回路；后者研究重点是构建受脑启发的认知计算模型和自主学习。

目前混合增强智能发展迅速。体现人在回路混合增强智能的“以人为本”的人工智能研究，在金融、医疗、管理等领域大量应用。脑科学、神经科学与人工智能正在不断交叉并相互促进，新型认知计算模型、支撑认知计算的混合计算架构也不断涌现。不难发现，混合增强智能作为新一代人工智能的特征日趋明显，已成为人工智能新的引领方向。

(6) 面向光互联、光计算及光传感的硅基集成光子器件

硅光子技术是基于硅和硅基衬底材料（如SiGe/Si、SOI），通过与现有互补金属氧化物半导体（CMOS）兼容的工艺进行光子器件和光电器件的开发和集成，利用这些器件对光子进行处理和操纵，从而实现光互联、光计算及光传感等功能。硅光子技术结合了集成电路（IC）技术的超大规模、超高精度制造的特性和光子技术超高速率、超低功耗的优势，属于战略前沿方向。

各类硅基集成光子器件是硅光子技术的核心基础和前提，包括硅基光发射器、硅基光探测器、硅基调制器、硅基光波导器件等。硅基光发射器用于产生光波作为信息载体，如硅基发光二极管和硅基激光器，目前研究集中于基于硅基掺杂与缺陷调

控的高效发光机理、新型发光纳米材料的集成和调控等。硅基光探测器用于接收光信号并转换为电信号，然后传输给计算单元，目前研究集中于提高探测灵敏度、降低暗电流和提高带宽等。硅基调制器用于将计算单元产生的电信号加载到光波上，目前研究集中在提高调制速率、降低插损和提高调制深度。硅基光波导器件是光传输的通道，包括路由器、波分复用器和偏振复用器等，目前研究集中在设计和制备新型结构以提高信息传输的容量。

(7) 面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术

大规模天线无线传输技术是 5G 区别于现有其他无线通信系统的核心技术之一。大规模天线无线传输系统是指基站配置数量非常多（通常几十到几百根，高出现有系统 1~2 个数量级）的天线，在同一时频资源上服务若干个用户。在多小区、时分双工情况下，各基站配置无限数量天线的极端工况时，大规模天线无线传输系统具有一些与单小区、有限数量天线工况的不同特征。在天线配置方式上，可以集中配置在一个基站上，形成集中式大规模天线无线传输系统；也可以分布式地配置在多个节点上，形成分布式大规模天线无线传输系统。

大规模天线无线传输技术的收益有：空间分辨率与现有多输入多输出（MIMO）技术相比显著增强，能深度挖掘空间维度资源，使得网络中多个用户可在同一时频资源上利用空间自由度与基站同时通信，在无需增加基站密度和带宽的条件下大幅度提高频谱效率；可将波束集中在很窄范围内，大幅度降低干扰；可大幅降低发射功率，提高功率效率；当天线数量足够多时，最简单的线性预编码和线性检测器性能趋于最优，且噪声和不相关干扰都可忽略不计。

为充分挖掘大规模天线无线传输的潜在技术优势，5G 采用匹配实际应用场景的信道模型，分析其对信道容量的影响。在实际信道模型、适度导频开销、可接受的实现复杂度情况下，研究可达的频谱效

率、功率效率，并深入研究最优的无线传输、信道信息获取、多用户共享空间无线资源的联合资源调配等方法。目前已经商业部署的 6 GHz 以下（Sub-6 GHz）5G 基站普遍采用 64 根天线配置，后续为进一步提升效率和改善覆盖，Sub-6 GHz 5G 演进和 5G 毫米波系统有望采用 256 根甚至更多天线。

(8) 人工微纳结构对光及电磁场的调控

电磁场超构材料是由一系列尺寸在亚波长结构单元设计出来的具有特定电磁响应的人工复合材料，在光波段和红外波段可由人工微纳结构组成。电磁场超构材料具有超常规的电磁物理特性，可对电磁场进行高效调控，引发一系列重要潜在应用，如完美成像、超构透镜、隐身斗篷等。近 10 年来，超常媒质和人工微纳结构对光以及电磁场的调控，两次被《Science》评选为年度十大科学进展。

经过十多年发展，电磁场超构材料研究已成为涵盖多个分支、概念日益丰富的独立学科，不再局限于固体物理、材料科学、力学、应用电磁学和光电子学，而是作为电磁波和光波调控的重要技术手段，引发了信息技术、国防工业、新能源技术、微纳加工技术等领域的重大变革。目前，主要国家的政府层面、学术界、工业界均对这种人工微纳结构的研发和制备给予高度重视，美国国防部支持开展了超构人工微纳结构研究计划，将其列入“六大颠覆性基础研究领域”；欧洲高额资助了 50 多位该领域顶尖科学家和相关实验室开展集中攻关方式的研究；日本即使在经济低迷的情况下，仍高额资助了至少两个人工超构微纳结构的技术研究课题；大型半导体研发与制造公司 Intel、AMD 和 IBM 等也纷纷成立联合基金，资助这类课题的技术研发。

(9) 量子化精密计量 / 测量技术与相关理论

2019 年 5 月 20 日起，国际单位制（SI）的 7 个基本单位均启用了基于基本物理常数的新定义，单位秒（s）、米（m）、千克（kg）、安培（A）、开尔文（K）、摩尔（mol）、坎德拉（cd）将分

别使用基本物理常数来定义：铯 133 原子不受干扰的基态超精细能级跃迁频率 ($\Delta\nu_{\text{cs}}$)、真空中光速 (c)、普朗克常数 (h)、基本电荷 (e)、玻尔兹曼常数 (k)、阿伏伽德罗常数 (N_A)、频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射的光视效能 (K_{cd})。SI 新定义将确保未来 SI 制的持续稳定性，为诸多新技术包括量子技术的发展奠定坚实基础。

基于上述新 SI 单位的量子化精密测量技术方兴未艾。利用量子系统、量子现象或量子特性对物理量展开精密测量，优势体现为极高灵敏度及准确性，在磁场及电场测量、时频测量、温度测量等领域已得到应用。未来，随着量子理论与技术进步，量子化精密计量 / 测量朝着扁平化、极低噪声以及极高准确度的方向发展，逐渐渗透并改变传统测量理论与方法，在微观与宏观层面均实现极高准确度和精密度的测量。

(10) 新一代神经网络及其应用

受生物脑研究启发，人工神经网络 (ANN) 以从输入到输出的非线性映射模拟神经元的输入 - 输出变换为标志，成为一种经典机器学习方法。新一代神经网络的快速发展主要得益于深度学习神经网络理论的突破。深度学习神经网络的主要研究方向包括：神经网络学习理论 (如泛化能力和正则化方法)、监督 / 无监督深度学习神经网络、卷积神经网络、序列神经网络、注意力模型、神经网络压缩和加速、神经网络结构自动搜索以及新型神经网络模型 (如记忆神经网络、生成对抗神经网络和深度强化学习神经网络)，主要应用于数据表示学习、计算机视觉、模式识别、语音识别和合成、自然语言处理、机器人等人工智能相关领域。

深度学习神经网络因其在图像分类、语音识别和机器翻译等应用中取得的巨大性能提升，得到工业界高度关注。当前神经网络也面临着学习策略自主性不高、训练资源需求高、动态开放环境适应性差、隐私安全防护等级低等重大挑战。推动新一代神经网络研究的发展趋势包括并不限于：构建基于脑认

知的神经网络模型，深度神经网络的可解释性，小样本和元学习的神经网络模型，神经网络的对抗博弈与安全性。

1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 类脑智能

类脑智能研究工作可以追溯到 20 世纪 80 年代美国诺贝尔奖获得者杰拉尔德·艾德曼提出并研制的系列“仿脑机”和加州理工学院卡弗·米德教授开创的“神经形态工程”。2000 年以来，发达国家相继启动神经形态计算系统研制。2015 年 10 月美国能源部组织了“神经形态计算：从材料到架构”主题研讨会。2016 年，3 台大型神经形态计算系统相继上线运行：德国海德堡大学的 Brain-ScaleS 系统、英国曼彻斯特大学的 SpiNNaker 系统和美国 IBM 公司基于 TrueNorth 芯片构造的系统。类似系统还包括斯坦福大学的 Neurogrid、英国阿尔斯特大学的 Si elegans 以及 Intel 公司近年来主推的 Loihi 神经形态芯片与系统。据 2017 年 5 月综述论文“A Survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware”统计，从 1985 年开始，神经形态技术相关的论文数量快速增长，累计 2682 篇，表明类脑系统工程技术实现是类脑智能方向发展的主力。

我国在类脑智能方面的相关研究超过 10 年。2015 年 9 月，北京市启动实施“脑科学研究”专项，“脑认知与类脑计算”作为两大任务之一，从理论基础研究、类脑计算机研制和类脑智能应用 3 个层次布局了 9 方面任务，包括：大脑结构解析平台、认知功能模拟平台、神经形态器件、类脑处理器、机器学习芯片、类脑计算机、视听感知、自主学习和自然会话。专项调动了本地区脑科学研究力量协同攻关重大共性技术，取得了重要进展，例如：清华大学施路平团队提出了类脑混合计算范式架构，开发了“天机”系列类脑芯片，成果 2019 年作为

封面文章发表在《Nature》；北京大学黄铁军团队对灵长类视网膜进行高精度解析仿真，提出模拟视网膜机理的仿生视频脉冲编码模型，2018年研制成功脉冲阵列式超速全时仿视网膜芯片，“超速”人眼千倍。国家级研究层面，2016年以来“脑科学与类脑智能”重大科技项目实施方案正式编制，预计不久将会启动。2018年科技部发布“科技创新2030——新一代人工智能”重大项目指南，明确将神经形态技术和芯片列为重要研究方向。

“类脑智能”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区分布情况见表1.2.1。美国脑科学研究基础雄厚，类脑智能研究也在学术机构和企业

界全面展开，核心论文数量和被引频次均占全球一半以上。英国核心论文占全球近20%，德国、加拿大和荷兰各占10%左右，我国和瑞典、西班牙、意大利各占5%左右。我国的国际合作对象主要是美国与加拿大，其他国家之间的相互合作比较均衡（见图1.2.1）。核心论文产出机构也比较集中（见表1.2.2和图1.2.2），达到10篇的机构中，除了脑科学研究重镇瑞典卡罗琳斯卡学院外，均为脑科学与人工智能领域著名大学，如哈佛大学、耶鲁大学、麦吉尔大学、牛津大学、斯坦福大学、爱丁堡大学、剑桥大学和多伦多大学。施引核心论文数量方面（见表1.2.3），美国占比超过1/3，英国

表 1.2.1 “类脑智能”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家/地区

序号	国家/地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	169	50.15%	10 431	54.24%	61.72
2	UK	64	18.99%	4337	22.55%	67.77
3	Germany	40	11.87%	1871	9.73%	46.78
4	Canada	39	11.57%	2568	13.35%	65.85
5	Netherlands	30	8.90%	2313	12.03%	77.10
6	Australia	21	6.23%	1553	8.08%	73.95
7	China	21	6.23%	1133	5.89%	53.95
8	Sweden	17	5.04%	837	4.35%	49.24
9	Spain	17	5.04%	765	3.98%	45.00
10	Italy	16	4.75%	1398	7.27%	87.38

表 1.2.2 “类脑智能”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Harvard Univ	17	5.04%	1037	5.39%	61.00
2	Yale Univ	13	3.86%	1099	5.71%	84.54
3	McGill Univ	13	3.86%	834	4.34%	64.15
4	Univ Oxford	13	3.86%	1316	6.84%	101.23
5	Stanford Univ	13	3.86%	918	4.77%	70.62
6	Univ Edinburgh	13	3.86%	588	3.06%	45.23
7	Univ Toronto	10	2.97%	767	3.99%	76.70
8	Univ Cambridge	10	2.97%	623	3.24%	62.30
9	Karolinska Inst	10	2.97%	487	2.53%	48.70
10	Univ Minnesota	9	2.67%	1010	5.25%	112.22



图 1.2.1 “类脑智能”工程研究前沿主要国家/地区间的合作网络

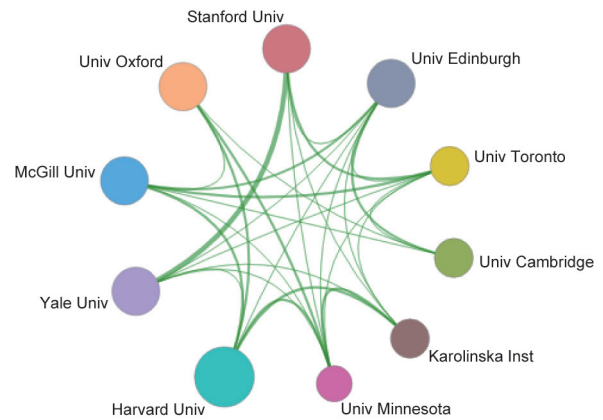


图 1.2.2 “类脑智能”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “类脑智能”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	6725	35.51%	2016.8
2	UK	2382	12.58%	2016.9
3	China	1899	10.03%	2017.2
4	Germany	1680	8.87%	2016.8
5	Canada	1344	7.10%	2017.0
6	Australia	1017	5.37%	2017.0
7	Netherlands	983	5.19%	2016.9
8	Italy	909	4.80%	2017.0
9	France	735	3.88%	2016.8
10	Spain	679	3.59%	2016.9

和我国超过 10%，其他与产出国分布基本相当，表明我国在类脑智能领域追赶势头明显。排名前 10 位的施引核心论文产出机构中，6 家来自美国（见表 1.2.4）。

1.2.2 天地一体化组网

针对天地一体化网络规模庞大、拓扑结构呈现立体多层次化和高度异构性、业务种类繁多的特点，设计出一套结构清晰、功能简洁、易于高效实现的网络体系结构，这是天地一体化网络技术研究需要解决的首要问题。目前世界上主要国家和地区的发展重点为：美国致力于商用天地一体化网络的大规

模建设，如 Starlink 大规模制造并发射低成本低轨卫星、Google Loon 项目推进到商业化阶段；欧盟致力于卫星-地面网络与 5G 网络融合，重点研究与网络功能虚拟化/软件定义网络（SDN/NFV）的结合，H2020 计划中的多个项目已建成原型；我国已设立天地一体化信息网络重大工程，启动低轨卫星网络建设计划。

天地一体化组网技术研究主要围绕以下几个方向开展。

（1）地/海/空/天一体化的组网架构设计

天地一体化网络的基础设施分为高轨卫星、低轨卫星、高空飞行器、海上移动设备和地面设备等。

表 1.2.4 “类脑智能”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Harvard Med Sch	396	11.79%	2017.6
2	Univ Toronto	362	10.78%	2016.9
3	Univ Coll London	314	9.35%	2016.8
4	Stanford Univ	313	9.32%	2016.7
5	Kings Coll London	307	9.14%	2016.8
6	Univ Oxford	306	9.11%	2016.8
7	Univ Penn	300	8.93%	2017.1
8	Harvard Univ	298	8.87%	2015.9
9	Yale Univ	264	7.86%	2016.9
10	Univ Cambridge	249	7.42%	2017.0

这些设施在覆盖范围、传输时延、带宽成本、容量、频率等方面各有优缺点。协调利用各类设备优势特征组成复合协同网络，充分运用 SDN 等网络领域新技术，提升系统可控性、高效承载各类业务，这是天地一体化组网架构设计的关键内容。

（2）适用于大规模、高异构性的空间网络协议族

天地一体化组网方面已经提出国际空间数据系统咨询委员会（CCSDS）、延迟容忍网络（DTN）、快照、互联网协议（IP）等多种网络协议。面向航天器可采用 CCSDS 协议，间歇性连接情况下可采用 DTN 协议，规律性运动情况下可采用快照协议，地表用户可采用 IP 协议实现宽带组网应用，最新研究提出将内容中心网络协议（CCN）用于该领域。空间网络协议族还需要进一步丰富内容并适配天地一体化网络的具体场景。

（3）高动态轻量级移动性切换机制

针对所构建的网络节点特别是低轨卫星高动态运动、面向用户的多星多波束频繁切换等特点，重点开展高动态轻量级的移动性切换机制研究，有效降低网间移动切换时的时延、解决数据丢失问题，在空间网络资源受限的情况下提高网络移动性切换效能。

（4）多维网络资源协同管理控制技术

面向天基网络与地面网络的融合需求，将 SDN/NFV 等技术应用于天地一体化网络，实现多维网络资源虚拟化切片和服务质量保障、应用驱动的网络控制、按需网络资源调度等关键技术的突破以及安全可靠的网络管理，达到卫星互联网与地面互联网高效管控与互联互通的目标。

天地一体化组网工程研究前沿的核心论文排名前 3 位的是美国、中国和德国（见表 1.2.5）。从核心论文主要产出机构（见表 1.2.6）来看，排名前 3 位的机构为东南大学、CALTECH 和清华大学。从主要国家/地区间合作网络（见图 1.2.3）来看，相关国家/地区均有密切合作。从主要机构间合作网络（见图 1.2.4）来看，东南大学和解放军理工大学间合作关系较为密切。从施引核心论文的主要产出国家或地区统计结果（见表 1.2.7）来看，中国、美国和德国名列前 3，其中中国以 1753 篇论文居榜首，所占比例达 26.93%。从施引核心论文的主要产出机构（表 1.2.8）来看，排名前 3 的机构为中国科学院、美国 NASA 和北京邮电大学。

1.2.3 脑成像技术

我们正在亲历一场关于脑—智自然观的革命

表 1.2.5 “天地一体化组网”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	47	38.52%	2141	33.33%	45.55
2	China	27	22.13%	1256	19.55%	46.52
3	Germany	27	22.13%	994	15.47%	36.81
4	France	23	18.85%	1540	23.97%	66.96
5	Italy	19	15.57%	972	15.13%	51.16
6	UK	19	15.57%	768	11.96%	40.42
7	Australia	18	14.75%	801	12.47%	44.50
8	Canada	15	12.30%	770	11.99%	51.33
9	Netherlands	12	9.84%	562	8.75%	46.83
10	Switzerland	9	7.38%	413	6.43%	45.89

表 1.2.6 “天地一体化组网”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Southeast Univ	8	6.56%	309	4.81%	38.63
2	CALTECH	7	5.74%	296	4.61%	42.29
3	Tsinghua Univ	7	5.74%	274	4.27%	39.14
4	NASA	6	4.92%	435	6.77%	72.50
5	Army Engineering Univ of PLA	6	4.92%	259	4.03%	43.17
6	Max Planck Inst Biogeochem	6	4.92%	171	2.66%	28.50
7	Chinese Acad Sci	5	4.10%	380	5.92%	76.00
8	ETH	5	4.10%	232	3.61%	46.40
9	Univ Calif Berkeley	5	4.10%	237	3.69%	47.40
10	Univ Texas Austin	5	4.10%	249	3.88%	49.80

注：CALTECH 表示 California Institute of Technology；NASA 表示 National Aeronautics and Space Administration；ETH 表示 Swiss Federal Institute of Technology Zurich。



图 1.2.3 “天地一体化组网”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

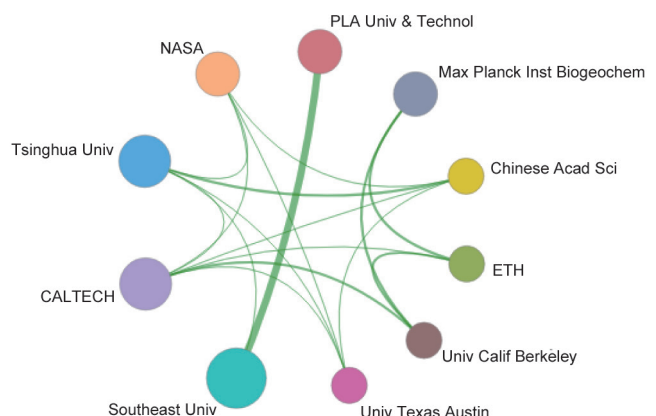


图 1.2.4 “天地一体化组网”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “天地一体化组网”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	1753	26.93%	2017.5
2	USA	1428	21.94%	2017.2
3	Germany	560	8.60%	2017.1
4	UK	536	8.23%	2017.5
5	France	431	6.62%	2017.2
6	Italy	411	6.31%	2016.9
7	Canada	398	6.11%	2017.4
8	Australia	308	4.73%	2017.3
9	Spain	260	3.99%	2017.2
10	India	217	3.33%	2017.3

表 1.2.8 “天地一体化组网”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	367	26.14%	2017.3
2	NASA	144	10.26%	2016.9
3	Beijing Univ Posts & Telecommun	143	10.19%	2017.0
4	Univ Chinese Acad Sci	131	9.33%	2017.5
5	Tsinghua Univ	122	8.69%	2017.5
6	Caltech	112	7.98%	2016.8
7	Univ Maryland	86	6.13%	2017.2
8	Southeast Univ	81	5.77%	2017.3
9	Beijing Normal Univ	77	5.48%	2017.3
10	Wuhan Univ	72	5.13%	2017.6

性转变。鉴于脑科学研究在科学、经济、社会和军事领域的重大价值，发达国家纷纷抢占脑与认知科技的战略制高点。美国、欧盟和日本先后出台了“脑计划”，力图取得重大突破，为未来人工智能深度发展提供关键基础，并推动类脑智能与脑机融合为基础的新兴产业变革性发展。

脑科学研究具有科学前沿和综合交叉的双重特征，脑成像技术是深入解析脑功能联结组的有效手段。深入解析脑功能联结组，实质上是对大脑工作原理的反向工程破译，在此基础上有望发展出基于大脑的构造和线路原理的新型计算系统，突破现代

计算机和人工智能应对复杂问题的技术瓶颈，构建具有自组织和自我深度学习能力乃至新型类神经人工智能系统。

近年来，脑科学基础研究发展迅猛，人工智能、脑机接口技术方兴未艾，脑科学研究已迈入黄金时期。随着脑科学研究的逐步深入，科学家在脑成像技术方面提出了更高目标，重点探索如何将脑组织结构的宏观、介观与微观有机融合，绘制脑功能连接图谱，以系统性把握脑组织的结构与功能，开发并优化光、声、电、磁遗传学等非入侵性工具应用于神经与精神疾病。脑成像技术的主要发展方向为：

高分辨率的大脑结构解析方法和技术，包括高通量三维结构、功能成像与样品处理新技术，图像数据处理分析新方法，用于实现以细胞分辨率对不同物种全脑神经元类型、联结与活动的快速定量解析；

大范围、深穿透度的在体高分辨光学成像等新技术，用于实现清醒和自由活动动物神经活动的高时空分辨率解析；光电关联等超微成像新技术，用于实现对神经突触等亚细胞结构的超微解析和定量表征。

“脑成像技术”工程研究前沿的核心论文方面（见表 1.2.9），排名前 3 位的是美国、英国和德国。

核心论文主要产出机构方面（见表 1.2.10），排名前 3 位的是哈佛大学、伦敦国王学院和斯坦福大学。

主要国家或地区间的合作网络方面（见图 1.2.5），相关国家或地区之间均存在非常密切的合作关系。

主要机构间的合作网络方面（见图 1.2.6），相关机构间存在紧密合作关系。施引核心论文主要产出国家或地区统计方面（见表 1.2.11），美国、中国和英国排列前 3 名，中国以 6423 篇论文排名第 2，占比 11.77%。

施引核心论文主要产出机构方面（见表 1.2.12），哈佛医学院、伦敦大学学院和多伦多大学位列前 3 名。

表 1.2.9 “脑成像技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	561	59.62%	41 453	64.03%	73.89
2	UK	174	18.49%	14 613	22.57%	83.98
3	Germany	117	12.43%	9494	14.66%	81.15
4	Canada	80	8.50%	7192	11.11%	89.90
5	Netherlands	73	7.76%	7700	11.89%	105.48
6	China	67	7.12%	6081	9.39%	90.76
7	France	55	5.84%	4512	6.97%	82.04
8	Italy	46	4.89%	4930	7.61%	107.17
9	Switzerland	42	4.46%	3520	5.44%	83.81
10	Australia	41	4.36%	3141	4.85%	76.61

表 1.2.10 “脑成像技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Harvard Univ	75	7.97%	6817	10.53%	90.89
2	Kings Coll London	42	4.46%	2308	3.56%	54.95
3	Stanford Univ	41	4.36%	3277	5.06%	79.93
4	Univ Penn	40	4.25%	3235	5.00%	80.88
5	Univ Coll London	35	3.72%	4082	6.30%	116.63
6	Yale Univ	34	3.61%	2668	4.12%	78.47
7	Univ Calif Los Angeles	34	3.61%	3173	4.90%	93.32
8	Univ Toronto	31	3.29%	2661	4.11%	85.84
9	Univ Oxford	29	3.08%	3720	5.75%	128.28
10	Massachusetts Gen Hosp	29	3.08%	2953	4.56%	101.83

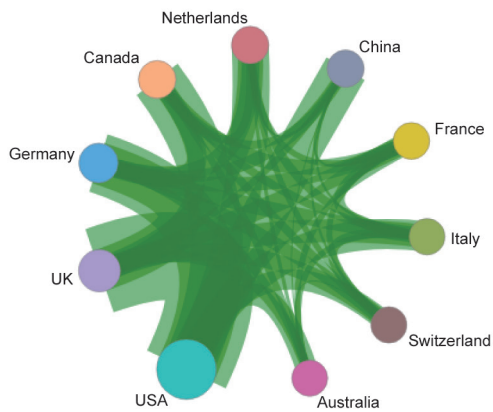


图 1.2.5 “脑成像技术”工程研究前沿主要国家/地区间的合作网络

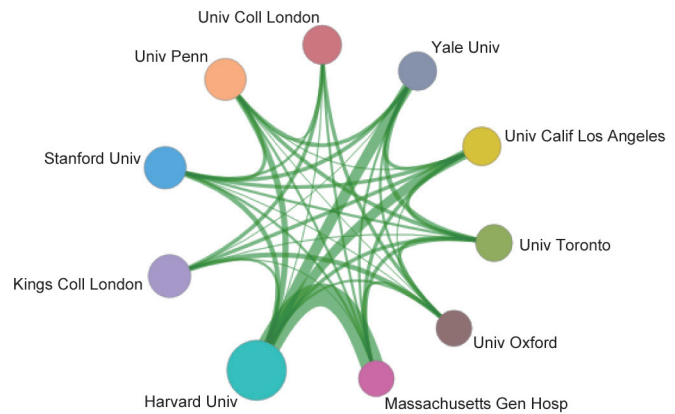


图 1.2.6 “脑成像技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “脑成像技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家/地区

序号	国家/地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	20 120	36.88%	2016.8
2	China	6423	11.77%	2017.1
3	UK	5800	10.63%	2016.8
4	Germany	5221	9.57%	2016.8
5	Canada	3455	6.33%	2016.9
6	Netherlands	2799	5.13%	2016.8
7	Italy	2637	4.83%	2016.9
8	France	2532	4.64%	2016.8
9	Australia	2156	3.95%	2016.9
10	Switzerland	1755	3.22%	2016.8

表 1.2.12 “脑成像技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Harvard Med Sch	1300	12.68%	2017.6
2	Univ Coll London	1106	10.79%	2016.9
3	Univ Toronto	996	9.72%	2016.8
4	Kings Coll London	976	9.52%	2016.6
5	Stanford Univ	948	9.25%	2016.7
6	Harvard Univ	894	8.72%	2015.6
7	Univ Penn	873	8.52%	2017.0
8	Chinese Acad Sci	823	8.03%	2017.0
9	Univ Oxford	811	7.91%	2016.8
10	Univ Calif San Francisco	766	7.47%	2016.8

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向（见表 2.1.1）。其中，“图像视频分析识别系统与技术”“基于微纳电子技术的传感器开发”“手术机器人技术”基于科睿唯安专利地图分析得出，其余 7 项为专家推荐。各开发前沿涉及的核心专利 2013—2018 年公开情况见表 2.1.2。

(1) 毫米波高速通信技术

毫米波高速通信技术是指利用毫米波频段频谱资源实现高速信息传输的通信方式。毫米波的频率范围为 26.5~300 GHz，对应的波长范围为 1~10 mm。利用这一频段丰富的频谱资源，信息传输速率可达 Gbps 甚至 Tbps 量级。一方面，毫米波与太赫兹集成电路的电性能随着频率升高而下降，成本随着频率升高而升高；另一方面，在相同增益情况下，天线及无源元件尺寸随着频率升高而减小；此外，利用空间分割特性，可大幅度提高频率复用率。工业和信息化部已将 24.75~27.5 GHz 和

表 2.1.1 信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	毫米波高速通信技术	293	4246	14.49	2015.4
2	超精密仪器技术及智能化	186	237	1.27	2015.7
3	图像视频分析识别系统与技术	227	18 350	80.84	2014.1
4	基于微纳电子技术的传感器开发	213	382	1.79	2015.9
5	手术机器人技术	286	44 560	155.80	2014.5
6	高效人工智能芯片技术	184	256	1.39	2016.8
7	基于石墨烯等纳米新材料的传感器单元及测量技术	221	918	4.15	2015.3
8	柔性可穿戴光电子器件应用技术	48	356	7.42	2016.4
9	物联网安全检测技术	48	36	0.75	2016.8
10	基于合成孔径雷达的图像处理、目标识别以及特征学习	329	882	2.68	2016.0

表 2.1.2 信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	毫米波高速通信技术	21	18	26	40	52	90
2	超精密仪器技术及智能化	18	20	31	34	35	38
3	图像视频分析识别系统与技术	89	71	35	28	4	0
4	基于微纳电子技术的传感器开发	35	22	28	26	49	53
5	手术机器人技术	80	87	45	53	16	5
6	高效人工智能芯片技术	3	3	4	13	36	81
7	基于石墨烯等纳米新材料的传感器单元及测量技术	14	22	31	27	41	40
8	柔性可穿戴光电子器件应用技术	0	2	2	14	15	13
9	物联网安全检测技术	1	2	4	7	18	16
10	基于合成孔径雷达的图像处理、目标识别与特征学习	15	36	70	62	63	75

37~42.5 GHz 这两个毫米波频段确定为 5G 实验频段。作为毫米波高速通信系统的核心技术，大规模 MIMO 系统利用大规模天线阵列调控电磁波，进行波束成形，能够有效提高系统的通信容量和速率。这也给毫米波通信技术带来挑战，包括：基站和终端架构、多通道芯片、器件封装、系统空口测量（OTA）等。毫米波通信系统发展趋势包括实现高数据吞吐率、系统一体化集成等。

（2）超精密仪器技术及智能化

测量仪器一般是指在认识世界过程中，为取得目标物某些属性值而进行衡量所需要的第三方标准或工具。超精密仪器是指测量仪器中精度水平最高、对科学前沿研究和技术前沿开发起到引领和支撑作用的最尖端仪器。超精密仪器主要技术方向包括：尖端科学探索仪器技术（引力波探测、新原理显微镜等）、生产中的工程测量仪器技术（动态测量、超精密激光测量、工业透射测量等）、生物医疗仪器技术（高分辨率生物显微镜、冷冻电镜等）、计量及测量基标准技术等。随着信息技术蓬勃发展，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术兴起，超精密仪器技术在进一步提升测量精度和多参量同时测量基础上，呈现集成化、信息化、网络化和智能化的发展趋势。

（3）图像视频分析识别系统与技术

图像视频分析识别系统主要基于图像视频等信息，利用各类具备学习能力的智能算法，完成特定的分析、识别、统计和预测等任务。通过融合图像处理、计算机视觉、模式识别、人工智能和自动控制等方面的先进理念和技术，并伴随着网络、通信和边缘计算等技术的迅速发展，图像视频分析识别系统与技术趋于成熟，广泛应用于无人零售、互联网内容监管、安防、交通和体育赛事，在医疗、无人驾驶、增强现实等方向的应用也初露端倪。

深度学习背景下的图像视频分析识别技术的发展方向有：开发具有更强计算能力和更低功耗的边缘计算设备，降低终端摄像头与中心节点之间的通

信需求；进一步提升各类采集设备分辨率，提高其在光照不理想情况下的图像采集质量；基于性能不断加强的图形处理器（GPU）等硬件设备，提升高清视频实时分析能力；发展更为有效的人工智能大数据分析技术，严格控制虚警（假阳性）率，不断提升数据分析准确性和效率；通过引入地理信息系统（GIS）等标准信息，建立更加完善、自动化程度更高的跨摄像头分析识别技术。

（4）基于微纳电子技术的传感器开发

传感器是能感受被测量并按照确定的函数关系转换成可用输出信号的器件或装置。随着以数字化、网络化和智能化为核心的电子信息技术时代到来，传感器技术也在向高性能、多功能、微型化、集成化、智能化方向发展，还要求成本低、寿命长、性能稳定。以集成电路技术为代表的微纳电子技术，具有批量加工微米或纳米尺度电子器件的能力，汇聚和融合微电子、微机械、化学、生物医学、纳米技术等多学科研究成果，可为传感器的微型化、集成化、智能化以及批量化生产提供有效解决途径，从而使微纳传感器在工业物联网、消费电子、生物医学、汽车、机器人、航天、军事等领域应用更加广泛。例如，基于片上系统技术的智能传感器，具有实现物联网中局部节点的计算功能，将原始数据实时转化为行动，实现快速响应和规避网络延迟；

作为人机交互的重要接口，触觉传感器能够收集人体和局部环境的力学特性信息，与微纳电子技术融合后，使其可穿戴性、生物兼容性、机械耐久性不断改进；通过汲取生物系统的优点，基于微纳电子技术研制的新型仿生类传感器不断涌现，如仿生电子鼻、电子眼、电子舌和电子耳等集成传感器；

气体传感器是智能识别系统的关键组成，而采用了比表面积大的低维纳米材料的气体传感器在灵敏度、快速响应、恢复特性方面具有独特优势；前沿微纳电子机械技术的引入，可实现生物医学传感器的微型化、集成化和自动化，使测量和控制更加精确，甚至可达到分子和原子水平。

值得指出的是，微纳机电系统传感器能将特征尺度为微米或纳米的机械、电子、光学等功能结构集成为一体，显著提高传感器的微型化、智能化、多功能化水平，有着巨大应用价值和广阔市场前景。微纳机电系统传感器研究具有多学科交叉和多样化特征，多种基础科学、工程和技术问题交错耦合，相关研究重点是专用集成微型仪器、微传感器阵列、多传感器组合等。

（5）手术机器人技术

手术机器人技术是以空间定位、快速计算、人工智能、3D 数字化医疗影像、先进机器人等现代科技为基础，面向医疗手术的一种机器人技术，通常由人机交互与显示、医学图像、系统软件、机器人装置、定位装置等功能模块构成。手术机器人主要研究方向有：人机交互协作控制技术，面向远程操作的临场感技术与虚拟现实技术，3D 数字化医疗影像技术，面向医疗的多传感器信息融合技术，能够完成灵巧、精细操作的机器人机构设计，面向医疗的空间跟踪定位、实时标定及配准技术等。

手术机器人具有增强手术灵巧性，提高操作精确性、稳定性、安全性等显著优势，能在人体腔道、骨盆、血管密集的解剖结构中完成精细的手术操作，有利于人体器官的重建和恢复。目前，手术机器人在骨科、牙科、外科、神经科、眼科等多个医疗专业得到应用，但存在便携性差、费用高、需要借助医生操控、缺乏诊治疾病和临床决策能力等不足。主要发展趋势是研发小型化、轻型化、低成本的通用手术机器人，以及能够独立完成诊治疾病、临床决策、操控的自主手术机器人。

（6）高效人工智能芯片技术

人工智能芯片是执行人工神经网络和机器学习等人工智能算法的集成电路芯片。作为支撑人工智能的硬件基础，这种芯片为智能处理提供强大的计算能力，成为推动人工智能进步和发展的核心技术。随着物联网、自动驾驶、可穿戴设备、移动计算等

边缘计算领域智能应用的爆发，摩尔定律下的芯片性能提升趋缓、冯·诺依曼架构难以满足新兴人工智能算法需求等不足日益凸显，如何提高人工智能芯片的处理能效成为制约拓展应用和普及的瓶颈问题。

目前，经过软硬件优化的通用人工智能芯片、基于细粒度可重构技术的现场可编程逻辑门阵列（FPGA）主要面向云端应用，同时支持训练和推理，但由于功耗高而难以满足高能效的处理需求。正在发展中的高效人工智能芯片包括：针对人工智能算法进行专门硬件加速的专用芯片，这是当前的主流形式，根据电路实现方式不同又细分为数字人工智能芯片、数模混合人工智能芯片、基于忆阻器等新型器件的人工智能芯片、光学人工智能芯片；

基于生物脑启发的神经形态计算芯片，具有高度仿生、低功耗、低延时的优势。相关研究未来发展方向有：基于近存储/存储内计算的人工智能芯片、软件定义硬件的人工智能芯片、基于新型存储器的人工智能芯片等。

（7）基于石墨烯等纳米新材料的传感器单元及测量技术

纳米材料是指尺寸小于 100 nm 的超小颗粒构成的零维、一维、二维材料或由基本单元构成的三维材料的总称，包括富勒烯、碳纳米管、石墨烯等。纳米材料具备独特的物理化学性质，表现出一系列特别的光学、磁学、力学、电学以及催化性能，在传感器领域展现了良好的应用前景，受到广泛关注。石墨烯作为一种独特的六边形蜂窝网状结构二维晶体，具有超大的比表面积、优异的导电性、超高的机械强度、易于功能化、良好的透光性等优点。由其制成的传感单元，每个原子与感应环境充分接触，由此改变其物理属性，用来测量磁场、压力、光信号和分子材料等，可应用于物理传感、化学传感、生物传感等领域。基于石墨烯材料的电化学生物传感作为结合生物和信息的前沿交叉技术，可用来测量生命体中化学小分子，如一氧化氮（NO）、过

氧化氢 (H_2O_2)、多巴胺、脱氧核糖核酸 / 核糖核酸 (DNA/RNA) 等, 也可用来测量蛋白质大分子和生物细胞等, 有望在生物科学和医疗健康领域产生深远影响。相关技术的研究重点是提高石墨烯传感器的精度和灵敏度, 优化传感器的体积和结构, 尽快实现医疗应用。

(8) 柔性可穿戴光电子器件应用技术

柔性可穿戴光电子是将具有电源供给、信号传输、物质传感与检测、数据读取、成像显示等单种或多种功能的光电子器件集成在柔性基板上的新兴应用技术。相关研究涉及机械力学、光电子器件、数值模拟、柔性材料、半导体加工、印刷压印、增材制造、系统集成、信号传感、信号处理等多个学科方向。与传统光电子器件相比, 柔性可穿戴光电子器件最大的特性就是突破传统硬性脆性材料的机械束缚, 超轻、超薄, 具有较大灵活性, 能够在弯曲、折叠、压缩或拉伸等各种机械改变状态下维持正常光电性能。这类器件在光电子皮肤、智能机器人传感、可穿戴可植入生理监测与治疗等领域应用潜力巨大。

为适应人工智能与信息物联网时代对柔性可穿戴设备的新型需求, 未来研究的重点方向有: 优化材料选择和机械结构设计, 实现光电子器件的超高柔韧性; 研究具有可拓展性的多功能器件阵列形式, 实现大面积范围内的高分辨、高灵敏、快速响应的多维信号 (如方向、应力、温度、湿度、生物化学物质等) 检测; 发展柔性电子与光子器件的系统化集成技术, 实现柔性可穿戴光电子器件的自供电、自发光以及信号的无线传输和实时解读; 研究具有生物相容性甚至可降解的可植入可穿戴柔性光电子器件, 探索在疾病诊断与治疗、理疗康复等生命健康领域的应用; 开发制备柔性光电子器件的新工艺, 实现低成本大规模制造。

(9) 物联网安全检测技术

物联网是实现“万物互联”的核心和关键, 现已广泛应用于能源、交通、海洋、空天等领域的感知和监控, 但其安全防御机制普遍比较薄弱, 给各

类关键基础设施带来很大隐患。物联网安全检测技术对物联网中各类软硬件设备、系统安全状态进行获取和评估, 以发现物联网的隐含风险, 为进一步安全加固和防御提供支持。

物联网安全检测主要技术方向有: 物联网节点操作系统与应用软件安全监测, 物联网协议与通信接口安全脆弱性分析, 物联网芯片安全监测, 物联网安全远程监测预警技术。随着高级持续威胁等新型攻击方式的出现, 针对物联网的威胁日益复杂化和泛化, 物联网威胁情报感知与共享、全网安全态势感知作为未来发展重点, 将为防御各类新型攻击提供有力保障和支持。此外, 物联网安全检测的标准化也是重要研究方向。

(10) 基于合成孔径雷达的图像处理、目标识别与特征学习

合成孔径雷达 (SAR) 作为微波成像雷达, 具有全天时、全天候、多波段、多极化、强穿透等优点, 广泛应用于民用和军用领域。随着 SAR 数据获取能力提升, 相应的图像解译技术受到高度重视, 衍生出 SAR 图像处理、目标识别和特征学习等诸多热点课题。SAR 图像处理目的是增强目标并弱化背景, 包括降噪、增强、校正、配准、分割等环节。目标特征学习用于整合、提炼 SAR 图像的有效信息, 将图像数值转化为特征矢量, 代表性方法有主分量分析、核主分量分析和非负矩阵分解等。目标识别利用 SAR 图像的幅度、相位、纹理、极化等目标特征, 构造分类器来区分不同类型或相似目标, 代表性方法有基于模板匹配、基于模式分类、基于稀疏表示和基于深度学习等。

相关发展趋势有: 多源图像综合利用, 应用 SAR 参数可变和多系统协同可获得多幅图像, 综合处理能够有效提高应用性能; 多尺度处理, 充分提取目标特征, 为分类器提供更多的判决依据; 深度学习方法, 整合预处理和特征提取, 由端到端的架构实现很高的识别精度; 任务驱动型设计, 自顶而下、统筹目标识别过程, 形成一体化数据处理链路。

2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 毫米波高速通信技术

5G 毫米波通信系统网络设备主要包括基站 (BS) 和核心网 (N)。BS 主要包括有源阵列天线单元 (AAU) 和基带单元 (BBU)。其中, AAU 通常为天线、射频与基带预处理一体化集成形态, 并采用大规模 MIMO 技术克服较高的路径损耗, 终端主要采用分组相控阵。目前, 5G 毫米波 AAU 一般采用较大规模天线阵列 (如 256 根), 用于提高传输速率和系统容量, 其中多通道、高性能一体化射频集成技术被广泛采用。针对毫米波终端, 考虑体积、能耗、成本的约束, 架构一般采用较小规模的天线阵列 (如 4 根), 且天线和射频芯片的一体化集成以毫米波前端模组形式出现。毫米波多通道高集成度芯片成为技术攻关方向, 拟在同一块芯片上集成多个射频收发通道, 进而减小体积、成本和功耗, 由此支持毫米波基站和终端的小型化。为提高毫米波系统性能, 对封装技术提出严格要求, 发展以封装天线为代表的先进技术来实现天线和射频多通道芯片的一体化集成。此外, 高集成度给评估系统性能带来挑战, 传统的指标测试失效, 基于空口的测量技术应运而生。相应的测量标准、测量设备和测量方法正在深入研究。

毫米波高速通信技术对 5G/6G、下一代无线互联网、空/天/海/地一体化卫星通信网络等领域产生关键使能作用, 成为未来电子通讯产业的核心支撑技术, 也是世界各国长期战略扶持和重点发展的领域。全球机构重点研究开发 50 GHz 以下频谱资源, 主要国家均对频谱划分提出相关建议, 正在积极推进毫米波通信技术和产业布局。目前, 本方向专利公开量有 293 项 (见表 2.1.1), 呈逐年递增趋势 (见表 2.1.2), 美国、中国和日本排列前 3 位 (见表 2.2.1)。核心专利主要产出机构 (见表 2.2.2) 方面, 美国的 ITLC、QCOM 和日本的 MATU 排名前 3 位。国家或地区间合作网络 (见图 2.2.1) 集中在中国、美国、俄罗斯、瑞典等。主要机构间的合作并不密切 (见图 2.2.2)。

综上, 毫米波高速通信技术在全球逐步形成了包括工艺代工、器件研制、芯片设计、封装测量、系统集成在内的较为完整的产业链。我国已有相关技术积累和产业基础, 应从战略高度重视该领域的基础研究、核心技术研发与产业发展, 进一步加强整合能力。

2.2.2 超精密仪器技术及智能化

超精密仪器技术是指测量仪器中精度最高、能力最强、对科学前沿研究和技术前沿开发起到引领

表 2.2.1 “毫米波高速通信技术” 核心专利主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	117	39.93%	3392	79.89%	28.99
2	China	80	27.30%	100	2.36%	1.25
3	Japan	49	16.72%	288	6.78%	5.88
4	South Korea	30	10.24%	236	5.56%	7.87
5	Russia	8	2.73%	731	17.22%	91.38
6	Israel	7	2.39%	18	0.42%	2.57
7	Germany	3	1.02%	4	0.09%	1.33
8	Netherlands	2	0.68%	19	0.45%	9.50
9	Taiwan of China	2	0.68%	7	0.16%	3.50
10	Sweden	2	0.68%	4	0.09%	2.00

表 2.2.2 “毫米波高速通信技术”核心专利主要产出机构

序号	机构	国家/地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	ITLC	USA	34	11.60%	1501	35.35%	44.15
2	QCOM	USA	28	9.56%	610	14.37%	21.79
3	MATU	Japan	17	5.80%	27	0.64%	1.59
4	SMSU	South Korea	13	4.44%	185	4.36%	14.23
5	SONY	Japan	12	4.10%	296	6.97%	24.67
6	HUAW	China	12	4.10%	18	0.42%	1.50
7	BDCO	USA	8	2.73%	268	6.31%	33.50
8	GLDS	South Korea	8	2.73%	10	0.24%	1.25
9	IBMC	USA	6	2.05%	9	0.21%	1.50
10	APPY	USA	5	1.71%	160	3.77%	32.00

注：ITLC 表示 Intel Corporation；QCOM 表示 Qualcomm Inc.；MATU 表示 Panasonic Corp.；SMSU 表示 Samsung Electronics Co., Ltd.；SONY 表示 Sony Corp；HUAW 表示 Huawei Technologies Co., Ltd.；BDCO 表示 Broadcom Corp.；GLDS 表示 LG Electronics Inc.；IBMC 表示 International Business Machines Corp.；APPY 表示 Apple Inc.。

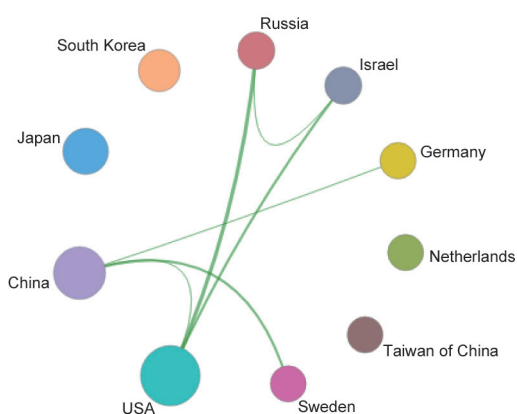


图 2.2.1 “毫米波高速通信技术”主要国家/地区间合作网络

和支撑作用的一类高精尖仪器技术。一个国家仪器技术的发展水平往往标志着这个国家的创新能力、科学技术发展水平及核心竞争能力。世界科技强国都是仪器强国。超精密仪器技术是构建国家测量体系、引领科学探索、实现技术创新的必备手段，也是支撑精准医疗和高端装备制造业高质量发展不可或缺的手段。

超精密仪器一直引领着世界科学探索和尖端工业的发展。截至 2018 年，诺贝尔奖总数为 374 项，其中约 72% 的物理学奖、81% 的化学奖、95% 的

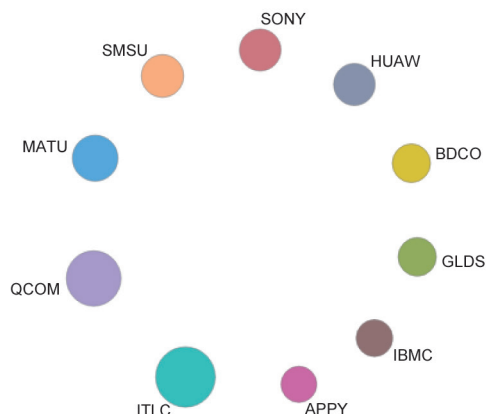


图 2.2.2 “毫米波高速通信技术”主要机构间合作网络

生理学或医学奖都是借助相关尖端仪器完成的。超精密仪器呈现精密化、集成化、网络化和智能化等发展趋势。

(1) 新原理仪器的研发。不断提高仪器精度是仪器科学追求的永恒目标，基于新原理的仪器研发是未来仪器精度水平进步的关键，不仅能够提升现有测量参量的精度水平，亦可实现对新参量的测量。例如，扫描隧道显微镜的发明使人类第一次能够实时观察单个原子在物质表面的排列状态和表面电子行为有关的物化性质，使测量分辨率提升到原

子级水平，对表面科学、材料科学、生命科学领域研究起到重大推动作用。当前新原理超精密仪器不断被开发，如 X 射线三维显微镜，可在不破坏检测对象的情况下，实现对其内部结构的高分辨率成像；扫描电子显微镜也出现高通量化、飞秒级超快时间分辨率、原位观测等趋势。

(2) 计量基准技术趋向量子化。复现和保存国际单位制 SI 中基本单位的经典方法是使用实物基准，而实物基准具有稳定性不高、难以准确复制等缺点。量子化计量基准具有小型化和芯片化的优势，可以直接嵌入超精密仪器与装备中，可实现实时校准，使仪器与装备的精度水平达到最优，显著提高装备制造效率。未来发展重点方向还包括对基本物理常数(如牛顿万有引力常数、普朗克常数、阿伏加德罗常数、玻尔兹曼常数等)和基本物理量(如质量、电压、电流等)的更高精度计量。

(3) 测量仪器朝着网络化、智能化方向发展。随着人工智能、云计算、大数据技术、移动互联网技术及产业链的日趋完善，仪器技术的未来发展将从功能化向智能化方向转变，从单一参数测量仪器向复合式多参数测量仪器转变。这些新型智能化超精密仪器将在宇宙开发、深海探测、环境监测以及生物工程众多领域发挥重要作用。

本方向核心专利共有 186 项(见表 2.2.3)，中国、日本和中国台湾排名前 3 位。从核心专利主要产出机构(见表 2.2.4)来看，排名前 3 的机构为 CNNU、BEIT、CHAV。主要国家或地区间研究相对独立(见图 2.2.3)，主要机构间合作关系不够密切(见图 2.2.4)。

2.2.3 图像视频分析识别系统与技术

随着智能手机和高清摄像头的普及、各类短视频网站和直播平台的爆发，越来越多视频数据需要快速准确处理和分类。根据互联网公开数据，中国智能手机数量已达 13 亿人次，视频监控摄像头已超过 2 亿个，海量视频数据的高效分析需求成为驱动图像视频分析识别技术快速发展的首要推动力。

图像视频分析识别的核心技术可分为 3 个层次：特征提取，目标检测、分割、识别、检索，目标跟踪、场景理解、视频摘要、行为检测与识别、多摄像头信息融合等。第 1 层次技术较为底层，早期主要使用人工设计的特征提取算法，如方向梯度直方图(HOG)、尺度不变特征变换(SIFT)、局部二值模式(LBP)、哈尔特征(Harr)等方法；近年来，随着深度神经网络特别是卷积神经网络的发展，显式的特征提取过程已被“端到端”的神经网络取代。第 2 层次技术更多针对单幅图像分析，

表 2.2.3 “超精密仪器技术及智能化”核心专利主要产出国家/地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	173	93.01%	206	86.92%	1.19
2	Japan	4	2.15%	6	2.53%	1.50
3	Taiwan of China	3	1.61%	1	0.42%	0.33
4	Germany	2	1.08%	3	1.27%	1.50
5	South Korea	2	1.08%	3	1.27%	1.50
6	Switzerland	1	0.54%	18	7.59%	18.00
7	USA	1	0.54%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4 “超精密仪器技术及智能化” 核心专利主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	CNNU	China	6	3.23%	5	2.11%	0.83
2	BEIT	China	4	2.15%	13	5.49%	3.25
3	CHAV	China	4	2.15%	3	1.27%	0.75
4	SGCC	China	4	2.15%	1	0.42%	0.25
5	UNBA	China	3	1.61%	7	2.95%	2.33
6	HAIT	China	3	1.61%	0	0.00%	0.00
7	MITO	Japan	2	1.08%	7	2.95%	3.50
8	HIMTT	China	2	1.08%	6	2.53%	3.00
9	UYBT	China	2	1.08%	5	2.11%	2.50
10	CAER	China	2	1.08%	4	1.69%	2.00

注：CNNU 表示 China National Nuclear Corp.；BEIT 表示 Beijing Institute of Technology；CHAV 表示 China Aviation Industry Corp.；SGCC 表示 State Grid Corporation of China；UNBA 表示 Beihang University；HAIT 表示 Harbin Institute of Technology；MITO 表示 Mitsubishi Heavy Ind Co., Ltd.；HIMTT 表示 Hunan Inst Measuring & Testing Technolog；UYBT 表示 Beijing University of Technology；CAER 表示 China Aerospace Science and Technology Corp.。

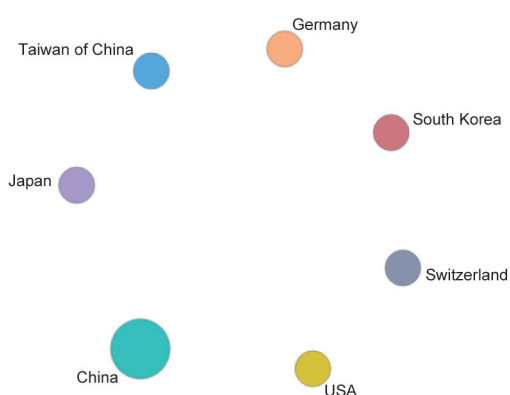


图 2.2.3 “超精密仪器技术及智能化” 主要国家 / 地区间合作网络

同样随着深度神经网络发展，上述任务大多可以在分类识别网络基础上，对部分网络结构进行修改即可实现。第 3 层次技术，需要对一路甚至多路视频进行综合分析，在单帧图像分析基础上，结合诸如空间、语音、摄像头相对位置等信息，完成更为抽象和复杂的分析识别任务。

图像视频分析识别系统根据任务不同也可分为

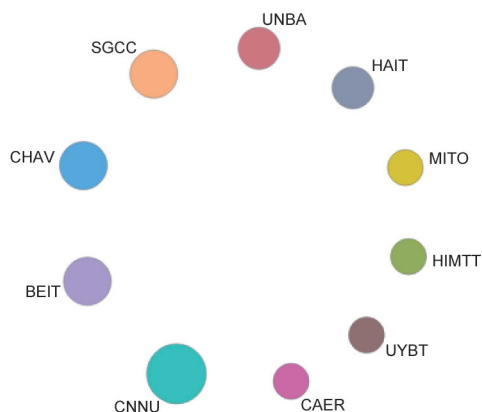


图 2.2.4 “超精密仪器技术及智能化” 主要机构间合作网络

3 个层次：描述性分析、预测性分析和回顾性分析。描述性分析重点在于分析当前图像视频中关键目标、人物、场景的状态，目前大部分图像视频分析识别系统都处于这一层次，但是更高层次的分析依赖于精准的描述性分析。预测性分析根据当前图像视频状态对未来短时间或一段时间内关键目标、人物、场景的状态进行预测。回顾性分析根据当前图

像视频状态（一般为异常状态）推断之前有哪些图像视频与当前（异常）状态相关。

本方向核心专利主要产出国家或地区、主要产出机构、主要国家或地区间合作网络及主要机构间合作网络分别见表 2.2.5、表 2.2.6、图 2.2.5 和图 2.2.6。核心专利公开量和被引数排名前 3 位的是美国、日本

和以色列，其中美国在专利公开量和被引数方面均占据绝对领先地位。国家和地区间的合作网络也是以美国为中心，以美国与日本和欧洲国家的合作为主。中国在公开量和被引数两项指标均占据第 8 位。核心专利主要产出机构排名前 3 位的是 HONE、PELI 和 GOOG，但不同机构之间合作较少。

表 2.2.5 “图像视频分析识别系统与技术”核心专利主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	173	76.21%	15 338	83.59%	88.66
2	Japan	25	11.01%	1441	7.85%	57.64
3	Israel	8	3.52%	488	2.66%	61.00
4	Netherlands	5	2.20%	282	1.54%	56.40
5	France	4	1.76%	424	2.31%	106.00
6	UK	4	1.76%	361	1.97%	90.25
7	South Korea	4	1.76%	265	1.44%	66.25
8	China	4	1.76%	200	1.09%	50.00
9	India	3	1.32%	174	0.95%	58.00
10	Germany	2	0.88%	125	0.68%	62.50

表 2.2.6 “图像视频分析识别系统与技术”核心专利主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	HONE	USA	28	12.33%	6261	34.12%	223.61
2	PELI	USA	15	6.61%	1091	5.95%	72.73
3	GOOG	USA	9	3.96%	531	2.89%	59.00
4	FOTO	Ireland	8	3.52%	585	3.19%	73.13
5	SONY	Japan	8	3.52%	436	2.38%	54.50
6	APPY	USA	7	3.08%	428	2.33%	61.14
7	ADOB	USA	6	2.64%	595	3.24%	99.17
8	MITK	USA	6	2.64%	376	2.05%	62.67
9	MICT	USA	6	2.64%	366	1.99%	61.00
10	AMAZ	USA	6	2.64%	254	1.38%	42.33

注：HONE 表示 Honeywell International Inc.；PELI 表示 Pelican Imaging Corp.；GOOG 表示 Google Inc.；FOTO 表示 Fotonation Ltd.；ADOB 表示 Adobe Systems Inc.；MITK 表示 Mitek Systems Inc.；MICT 表示 Microsoft Corp.；AMAZ 表示 Amazon Technologies Inc.。



图 2.2.5 “图像视频分析识别系统与技术”主要国家/地区间合作网络

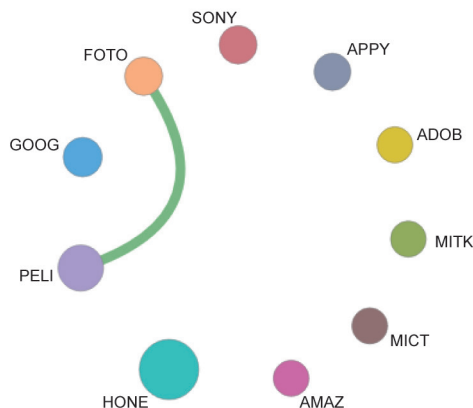


图 2.2.6 “图像视频分析识别系统与技术”主要机构间合作网络

领域课题组成员

课题组组长：潘云鹤 卢锡城

课题副组长：谭久彬 吕跃广 陈杰

专家组

院士专家：

第一组：谭久彬 庄松林 李天初 张广军

姜会林 刘泽金

第二组：吕跃广 段宝岩 吴曼青 陈志杰

余少华 丁文华

第三组：陈杰 潘云鹤 卢锡城 赵沁平

柴天佑 费爱国 吴建平

副组长助理：陆振刚 车吉斌 孙健

其他专家（按姓氏拼音排序）：

白洋 陈金宝 陈麟 陈晓明 崔勇

付俊 韩亚洪 郝翔 黄进 江天

金仲和 李东升 李天成 刘雷波 刘伟

刘显著 斯科 孙秉珍 陶金 王丹

伍军 徐杨 徐志伟 张川 朱亦鸣

朱永文 庄伟

工作组

学术指导：吴朝晖 鲁东明 吴飞

图情专家：杨未强 刘书雷 耿国桐 陈振英

梁江海 霍凝坤 吴集 杨筱 李乾

史尘 叶文莹 李红 周云平 王凯飞

联络员：王成俊 王兵 张佳

秘书：翟自洋 胡晓女 杨未强

执笔组（按姓氏拼音排序）：

白洋 韩亚洪 洪伟 黄铁军 江天

金仲和 李浩宇 李天初 梁江海 林宏焘

刘江 刘雷波 浦剑 仇成伟 斯科

谭久彬 王海明 伍军 徐华平 薛建儒

余超 张朝阳 庄伟