

## 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 工程研究前沿见表 1.1.1，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。其中，“光电融合感存算器件与集成”为数据挖掘前沿；“卫星互联网组网理论与关键技术”“超大规模硅基量子芯片”“人工智能辅助软件自动开发”“多智能体系统体系化博弈与智能控制”“工业控制系统信息物理安全”“芯片化卫星激光通信终端”为专家提名前沿；其余为数据挖掘 & 专家提名前沿。各前沿涉及的核心论文 2017—2022 年发表情况见表 1.1.2。

##### (1) 大模型及其计算系统理论与技术

大模型及其计算系统理论与技术是指大规模预训练模型的半监督 / 无监督基础学习理论和参数微调、强化学习等机制组成的高效计算技术，以及在此基础上的模型并行计算与分布式系统及其优化策略和部署方案。大模型是基于自监督等学习机制在大规模数据上进行预训练，具备强大的表示与泛化能力的模型，通常具有较大参数量。大模型摆脱了对大量标注数据的依赖，可通过在特定任务上模型微调、指令微调和上下文学习等方式服务于下游应用，并对多个不同应用场景下的任务具备通用的智能能力。大模型及其计算系统理论与技术的研究目前保持高速迭代，并快速渗透到自然语言、智慧医疗、多模态生成、自动驾驶等应用领域。大模型计算系统理论与技术为提升大模型性能、效率与泛化能力提供了动力与理论基础，主要研究方向包括大模型理论框架、大模型结构与训练机制，以及分布式训练与部署策略。大模型理论框架基于信息论和过参数化理论，研究涌现、同质化等新特性的解释理论，同时建模大模型的计算复杂性。结

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	大模型及其计算系统理论与技术	34	2 231	65.62	2020.2
2	卫星互联网组网理论与关键技术	31	1 354	43.68	2020.5
3	超大规模硅基量子芯片	56	6 779	121.05	2019.7
4	光子集成的量子光源器件	63	4 188	66.48	2019.5
5	超大规模超宽带天线阵列通信理论与技术	19	1 417	74.58	2019.7
6	光电融合感存算器件与集成	56	5 417	96.73	2020.8
7	人工智能辅助软件自动开发	37	586	15.84	2019.8
8	多智能体系统体系化博弈与智能控制	39	1 636	41.95	2019.8
9	工业控制系统信息物理安全	118	5 816	49.29	2019.9
10	芯片化卫星激光通信终端	111	3 047	27.45	2019.6

表 1.1.2 信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	大模型及其计算系统理论与技术	4	3	3	6	8	10
2	卫星互联网组网理论与关键技术	1	2	4	6	9	9
3	超大规模硅基量子芯片	10	6	8	11	11	10
4	光子集成的量子光源器件	10	11	11	11	9	11
5	超大规模超宽带天线阵列通信理论与技术	2	3	4	3	3	4
6	光电融合感存算器件与集成	2	4	6	6	13	25
7	人工智能辅助软件自动开发	5	5	6	6	7	8
8	多智能体系统体系化博弈与智能控制	5	5	5	8	9	7
9	工业控制系统信息物理安全	10	17	22	22	22	25
10	芯片化卫星激光通信终端	9	25	22	18	14	23

构与训练机制方面的研究对大模型“预训练+泛化”的统一框架的计算系统进行优化，设计更高效的自监督机制，平衡模型拟合能力与复杂性。分布式训练与部署策略研究大模型的可扩展性提升方案，利用无服务器计算等方法将训练任务分布在云端多个计算节点，通过并行训练策略突破存储和计算资源的限制。大模型及其计算系统理论与技术未来发展仍需解决隐私安全、评测方法和部署效率三方面问题。首先，大模型的训练与部署需要更高效的加密与安全通信技术，并构建安全可信的计算方案。其次，需要自动化且通用的评估框架对大模型的能力边界、鲁棒性、纠偏能力进行基准测试。最后，大模型的实时性与训练能耗亟须进一步优化。

### (2) 卫星互联网组网理论与关键技术

卫星互联网是继固定通信网和移动通信网之后的第三次互联网革命。具体而言，卫星互联网是以卫星网络作为接入网的无线网络。一方面，卫星互联网突破了地面互联网的覆盖范围，实现了全球无缝覆盖。陆地面积只占全球面积的 29%，即使是在陆地上，地面互联网也只覆盖了部分城市和乡村地区，广大的海洋、沙漠、森林和山地等偏远地区并没有有效的无线覆盖。然而，在这些地区建设新的地面网络建设成本极高、维护难度极大，亟须以卫星网络作为接入网的卫星互联网。随着卫星制造、发射和通信成本的下降，利用卫星网络实现全球覆盖成为可能，这为建设卫星物联网创造了条件。另外，卫星互联网突破了原有的以人联为中心的网络形态，实现了真正的万物互联。近年来，随着经济社会的发展，海量无线设备需要接入无线网络。卫星互联网具有接入容量大、抗毁能力强和天气影响小的优点，为全球范围的物物互联创造了条件。

根据卫星轨道高度的不同，卫星网络通常分为低轨、中轨和高轨三类。低轨卫星网络轨道低，具有较低的传输时延和损耗，通常作为卫星互联网的接入网。例如，美国 SpaceX 公司的星链（Starlink）互联网采用 500 千米左右的轨道高度。但是，低轨卫星移动速度快，一颗卫星的可视时间很小。为了实现全球的无缝覆盖，需要部署大量的低轨卫星进行组网，即低轨卫星星座。近年来，学术界和工业界在卫星互联网的组网理论和关键技术方面开展了大量的工作，取得了重要的突破，主要包括星间通信技术、卫星网络协议、弹性路由协议和移动性管理等。特别是手机直连卫星通信技术的引入，进一步改进了卫星互联网的组网方式，显著增强了卫星互联网的功能。首先，卫星互联网摆脱了对地面设备的依赖，极大地增强了移动

性,真正实现了全球范围的移动接入。其次,现有手机也可以直接接入卫星互联网,实现了向下兼容。最后,卫星互联网与地面网络的协同,达到了天地一体的目标。

### (3) 超大规模硅基量子芯片

量子计算机有望超越经典计算机为人类带来更高的算力,而负责计算和信息处理的量子芯片是其中的核心。量子芯片将量子线路紧密集成到基底上,是发展量子技术的关键组件。与经典芯片中的二进制不同,量子芯片利用量子特性极大地增加了计算的并行性和处理复杂问题的能力。超大规模量子芯片指的是可以容纳数百万个量子比特的芯片,它们是实现通用容错量子计算机的必要条件。考虑到经典计算芯片目前已可容纳数十亿个晶体管,同时集成电路产业拥有成熟的制造技术和基础设施,基于互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺实现的超大规模硅基量子芯片具有天然的扩展性优势,逐渐成为国际量子计算领域的研究热点。

目前,硅基量子芯片的发展涵盖多种路线。其中之一是将量子信息编码至栅控硅基量子点内的电子(空穴)自旋或嵌入硅的磷核自旋上。目前已实现保真度远高于纠错阈值的单量子比特门和双量子比特门,并且成功构建了含有6个量子比特的量子处理器。未来硅基自旋量子比特的发展将着重解决长程耦合和高保真度均一性的问题。此外,借助硅光子集成工艺也可以实现光量子计算和量子通信。目前已在高维度量子纠缠态、量子密钥分发和隐形传态等领域取得显著突破。未来硅光量子技术的发展需要将量子光源、量子态操控器件和单光子探测器等紧凑地集成至单一芯片中,并降低器件损耗。这些进展为在硅基材料上实现量子计算和通信铺平了道路,未来硅基量子芯片将会持续向着大规模、应用化方向发展。

### (4) 光子集成的量子光源器件

光子集成的量子光源器件是指基于平面波导光子集成技术实现的用于量子光学探测、传感、测量、通信等功能的光学器件。近年来在量子光学领域中,利用激光与原子相互作用原理实现新方法和新技术的研究越来越受到重视,特别是将509 nm、633 nm、780 nm、795 nm、852 nm、976 nm、1 064 nm、1 083 nm、1 310 nm、1 550 nm等波长激光器应用于光学原子钟、里德堡探测、量子磁探针、量子陀螺仪、量子通信等已经成为主流。传统用来产生以上波长激光的量子光源器件,以气体、固体激光器或光纤激光器为主,其体积庞大、操作复杂、能耗比低、可靠性不足,难以应对当前空天地海通信、传感、探测等复杂多样应用环境的要求。半导体激光器因其体积小、效率高等特点,非常适合空天地海应用环境,并且具有可直接光电转换、与半导体工艺兼容等优势,能够实现光子集成的量子光源器件。

但是,半导体激光器因谐振腔规模和波导尺寸方面的限制,其光谱噪声高、光束质量差,难以满足量子光学对激光光谱纯度、波长准确度和频率稳定度的要求,因此需要借助外部的光学选频芯片,并通过适当的光学反馈方式,实现对内部激光谐振腔模式的诱导,从而达到激光线宽压窄、噪声抑制和光谱纯化的目的。对于从可见光延伸到近红外的多谱段量子光源,不仅需要解决不同材料体系半导体激光器外延生长、光栅制备、波导刻蚀、腔面镀膜等问题,还需要解决外部光学选频芯片的结构设计与光学反馈的模式损耗控制等问题。

除此之外,为保证波长准确度和频率稳定度,需要针对不同材料体系,为半导体激光器设计专门的电流/温度驱动控制电路。在量子光学中激光频率标准源是最常用的光源器件,为了达到更高的频率稳定性,通常需要利用高精度的驱动控制电路以及原子气室,构建半导体激光器的反馈稳频系统,从而将后者的输出频率锁定到原子或分子跃迁的能级上。但是用于提供跃迁原子的气室体积较大,并且与半导体工艺不兼容,如何实现集成化的半导体激光器的反馈稳频系统,是未来相关领域必须解决的关键难题。

### (5) 超大规模超宽带天线阵列通信理论与技术

超大规模超宽带天线阵列技术是指同时利用超宽带技术及超大规模天线阵列，从扩大带宽、增加天线数两方面出发，实现提高信道容量、进而提升信息传输速率目标的技术。厘米波、毫米波及太赫兹频段可提供数百兆赫兹甚至吉赫兹量级的超大带宽，并且由于相应频段内载波波长短，天线尺寸小，因此支持数量级式提升基站天线数，形成超大规模阵列。超大规模与超宽带技术相辅相成，是满足 6G 信息传输速率需求的有效手段。

频谱是移动通信系统的重要资源之一，随着通信技术的发展，通信系统频段逐步升高、带宽逐渐增大。5G 毫米波频段的研究已形成较为成熟的通信系统模型及传输方案；6G 早期研究重点关注 100 GHz 以上的太赫兹频段，以提供超大带宽，因其具有高路径损耗、信道空间非平稳等特性，多数研究致力于降低太赫兹信道建模的复杂性并提高准确性。然而，随着频率的增加，路径损耗加剧，覆盖性能受限。2022 年，3GPP RAN 第 96 次会议正式将 6 425~7 125 MHz 频段定义为 U6G 授权频谱，并决议通过针对全 6 GHz 频谱（5 925~7 125 MHz）的 Release 18 立项工作。2023 年，中国工业和信息化部发布了新版《中华人民共和国无线电频率划分规定》，将 U6G 频段应用于 IMT（含 5G/6G）系统。该频段路径损耗相对较小，电磁波绕射、穿透能力强，具有良好的无线覆盖性能。由于 U6G 受关注时长有限，截至目前，学术界和工业界对其的研究均较为匮乏，其信道模型暂不明确，为当前阶段关注重点。

不同频段下，超大规模天线阵列系统的信道特性尚未被完全挖掘，所以信道测量及建模是超大规模目前主要的研究方向之一。超大规模信道已被证实具有空间非平稳特性，具体表现在用户所发射的无线信号在到达超大规模天线阵列时形成球面波前，同时信道能量只集中于维度大幅降低的部分子阵列。多数研究基于这一特性进行信道估计、预编码技术、收发信机等传输设计。此外，由于天线数量庞大，超大规模天线阵列系统的射频、功耗和复杂度不容忽视，未来研究需致力于探索低成本系统架构和低复杂度传输方案。

### (6) 光电融合感存算器件与集成

光电融合感存算器件与集成是指将传感、存储、计算功能融合到光电协同作用器件中，并进一步规模化集成。光电融合感存算系统旨在打破传统冯诺依曼存储、计算分离的计算架构所造成的速度和功耗限制，并融合光电传感功能，有助于发展更加智能化、高能效的计算系统。三位合一的光电融合感存算器件作为新兴的智能器件，能够模拟人类视网膜和大脑的工作方式，通过引入光电材料，利用光子调控载流子、离子的输运特性，使得器件在电导率、光响应率参量方面具有高度的可调特性。通过整合光学感知、信息存储和逻辑计算等功能，可以极大地提升图像数据处理速度和能效。

传统机器视觉系统由于数据在传感、内存和处理单元之间的反复搬运，导致高能耗和高延迟，难以满足海量视觉信息实时处理的需求。光电融合感存算技术在云计算、人工智能（AI）、物联网背景下迎来了巨大的发展机遇，在无人驾驶、可穿戴、智能家居等方面具有丰富广泛的应用场景，可实现更高效的机器视觉和类脑计算。

虽然光电融合感存算技术应用前景广阔，但在性能、精准、高效等方面仍存在众多挑战，例如：开发新型功能复合材料实现宽光谱响应，构筑高量子效率的感存算器件；探索晶圆级加工工艺，实现器件的高密度集成；构建智能光电融合感存算系统，完成高阶的信息任务。

### (7) 人工智能辅助软件自动开发

人工智能辅助软件自动开发是指利用人工智能技术来辅助、加速和优化软件开发过程。其核心目标是

通过智能化手段，减少开发人员工作负担，提高软件开发效率和质量。近年来，其主要研究方向包括：① 自动化需求分析，通过机器学习和自然语言处理技术，将用户提供的自然语言需求自动转换为机器可直接理解/分析的需求模型，并对其进行自动分析，这可以帮助开发人员更准确地理解和捕捉用户需求，并减少需求理解上的误差；② 自动化设计和编码，利用机器学习和自然语言处理技术，自动生成设计或代码片段、函数甚至整个模块，这有助于减少手工设计或编码工作量，加速开发过程；③ 自动化测试，利用人工智能技术自动生成测试用例，提高软件测试的覆盖率和缺陷检测能力，从而提升软件质量；④ 自动化集成和部署，可以将开发人员手动编写的代码和自动生成的代码自动集成到一起，并将其自动部署到生产环境中，提高软件交付效率和稳定性；⑤ 智能推荐系统，根据开发人员的开发历史数据和项目需求，推荐适合当前开发上下文的代码、工具和技术等，提高开发人员的开发效率。

从大方向上看，有以下几方面发展趋势。一是编码智能化。代码生成将变得更加智能化和符合开发人员意图，减少后续调整和修改。也可以根据不同项目的特点和需求，自动选择最合适的开发策略和工具，提供更加灵活和高效的智能化开发服务。二是运维自适应。能够根据用户反馈和运维数据变化，不断优化和改进软件运行过程，提升运行质量。三是开发协同化。通过自然语言处理和智能对话技术，与更多开发人员、测试人员和领域专家实时交互和沟通，促进跨领域合作，提供更加友好和高效的开发体验，创造更加全面和优化的解决方案。四是伦理和安全问题隐蔽化。随着开发自动化程度提高，开发人员需要更多关注随之而来的偏隐蔽的伦理问题和安全问题，确保自动生成的代码和决策是可靠、安全的。

#### (8) 多智能体系统体系化博弈与智能控制

多智能体系统体系化博弈与智能控制是指智能体之间通过博弈过程和交互策略，结合智能控制方法，调整智能体的行为和优化系统参数，使系统达成个体利益的平衡和群体利益的最大化。其面临着系统结构复杂、博弈环境不确定、决策信息不完整、结果不可解释等挑战。对此，当前研究热点聚焦于：① 多智能体组织化体系化博弈理论模型，运用并结合多种人工智能学习算法，探索多智能体系统的博弈演化规律；② 多层次、多尺度、多模式、非线性、不确定时变动态系统的建模，实现多智能体分析、模拟、预测、优化和控制；③ 多智能体自主导航与集群协同，应对不确定环境、不完备决策信息、受限制通信情况下多智能体自主化、智能化、规模化难题；④ 多智能体系统中的决策过程，包括合作协商、资源分配、任务分工等，实现智能体之间的有效协作与决策；⑤ 多智能体算法模型的鲁棒性分析框架，降低协同决策算法复杂度，解决数据驱动方法与实际场景存在的模型偏差。

从大方向上看，以下几方面有待进一步探索：① 提高多智能体系统的可解释性和可控性，使系统的行为和决策更易理解与调节，增加系统的可靠性和安全性；② 博弈论、多智能体学习与控制论的进一步深度融合，深化博弈论和智能控制方法，提升系统的整体性能和智能程度；③ 博弈、学习与控制的交叉研究在一些新兴领域（如智能交通、物流管理）的应用。

#### (9) 工业控制系统信息物理安全

工业控制系统（简称工控系统）是由多种自动化采集、监测、控制组件组成的用于工业基础设施自动化运行和监管的系统。工控系统主要分为数据采集与监控系统、分布式控制系统以及可编程控制器。目前，工控系统已成为工业生产、智能电网、智慧交通等国家关键基础设施的神经中枢与运行中心。由于工控系统的重要性与开放互联性，其已成为恶意威胁的首要目标之一。随着攻击者漏洞发现能力与攻击技术的不断提升，工控系统信息物理安全问题日益严峻，其主要指攻击者利用工控系统信息物理融合特性，进而在

信息域与物理域实施协同攻击所带来的“所见非所得，所得非所行”安全困境。例如，攻击者能够通过渗透隔离、入侵检测等信息安全手段，突破冗余容错、安全连锁等物理安全防护机制，贯穿系统监测层、控制层与执行层，对工控系统实施精准打击。这种信息物理融合的安全威胁不仅具备“穿透”信息安全防护手段的可能，还能够利用工控系统的业务特性有针对性地设计具有强协作性和高隐蔽性的恶意数据篡改与欺骗机制。这对工控系统的安全防护提出了巨大的挑战。

目前，工控系统信息物理安全相关研究主要集中在以下三大方面：① 攻击者能力建模/系统脆弱性分析，站在攻击者角度针对工控系统的架构、协议、控制等设计攻击策略，以构建攻击者模型，实现对工控系统的脆弱性分析；② 攻击检测，通过被动收集系统动态运行数据或主动添加动态认证信息，构建系统正常运行特征模式用以检测恶意攻击行为；③ 攻击防御，包括识别恶意攻击节点、移动目标防御、弹性安全控制等防御策略。未来，将进一步面向工控系统大规模、多层级、强耦合等特性开展脆弱性分析与安全防护研究，以实现工控系统的防护升级。

#### （10）芯片化卫星激光通信终端

卫星激光通信具备大带宽、高速率、发射能量集中、抗干扰抗截获能力强等优势，是当前世界各国争相攻克的空间网络技术制高点。芯片化卫星激光通信终端是通过光电集成技术实现卫星激光通信功能的微型设备，它将光电通信器件、电子控制单元等功能全部或部分集成到芯片中，具备体积小、质量轻、功耗低、传输效率高的特点，能够满足高速通信、数据传输、卫星组网等多样化的通信需求。近年来，其主要研究方向包括：① 异质异构光电子集成技术，优化绝缘体上硅（SOI）、硅基薄膜铌酸锂（LNOI）、氮化硅（ $\text{Si}_3\text{N}_4$ ）、磷化铟（InP）等材料体系上的集成芯片设计和制造工艺，提高芯片性能；② 高速激光通信技术，解决激光通信的调制、解调、编解码、信号处理等关键问题，以提高通信速率和传输距离；③ 激光终端可靠性优化技术，改进信号抗干扰能力、温度和辐照等环境适应能力，提高稳定性和寿命。未来，芯片化卫星激光通信终端将进一步集成化，实现更高的传输速率、更远的通信距离、更高的可靠性、更小、更轻、更低功耗，并面向多功能和网络化通信，实现兼容性和互操作性的提升，推动芯片化卫星激光通信终端在导航、中继通信、地球观测、深空探测、低轨互联网星座等多个领域的广泛应用。

## 1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 大模型及其计算系统理论与技术

大模型及其计算系统通过在大规模无标注数据中学习数据的特征表示，对包含较大参数数量的模型进行预训练，具有通用能力强、适用场景广、对标注数据依赖小等优点。然而，由于目前大模型可解释能力差，高度依赖训练数据，训练与部署成本高，大模型及其计算系统理论与技术亟须在理论框架、结构设计、训练与部署策略三方面突破。

首先，在大模型理论框架方面，主要有两大趋势。一是在大模型研究中融合信息论与过参数化理论，探索 GPT 等大模型表达能力的理论极限。二是将图论相关概念引入大模型训练过程的理论分析，如使用超图解释和提升大模型无监督箱式预训练过程的稳定性。该方向的主要研究机构包括哈佛大学、清华大学、浙江大学、海康威视数字技术股份有限公司、华沙大学等。

其次，在大模型结构设计方面，一个重要的发展方向是将大模型结构与迁移学习策略绑定，解决未经

过滤的数据导致的大模型退化和偏见现象，从而提升大模型预测能力的可靠性，另一个发展方向是在模型设计中引入“提示编程（prompt programming）”概念，降低大模型在底层和中层特征的过拟合，通过精心设计的提示（prompt）引导模型更好地理解 and 执行特定任务。该方向的主要研究机构包括 Facebook 人工智能研究院、首尔大学、高雄科技大学等。

最后，在大模型训练与部署策略方面，利用 McDRAM 等新型硬件提升大模型推理的实时性、降低部署过程的能耗，是实现在边缘设备上部署大模型的潜在技术。同时，利用近似计算（approximate computing）技术加速大模型推理过程，或设计针对大模型的定制化二值化策略和量化方法，在未来可能有效提升大模型推理速度并节省计算资源。该方向的主要研究机构包括不来梅大学、新加坡国立大学、华为技术有限公司（以下简称华为）、悉尼大学等。

“大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家见表 1.2.1。美国核心论文数排名第一，约占总论文数的三分之一。中国仅次于美国，但论文平均出版年较晚，处于快速追赶状态。中国的合作对象主要是美国和澳大利亚（图 1.2.1）。排名前十的核心论文产出机构（表 1.2.2）中，有 4 家机构来自中国，其余分布在美国、澳大利亚、新加坡等国家。在机构合作（图 1.2.2）方面，中国的三家机构与悉尼大学合作较为密切，同时中国的三家机构相互合作较为密切。施引核心论文（表 1.2.3）方面，中国排名第一（占比为 44.56%），第二名是美国，其余国家占比均低于 10%；排名前十的施引核心论文产出机构（表 1.2.4）中，除排名第七的哈佛大学外，其余都来自中国，体现了中国科研机构对大模型及其计算系统理论与技术的高度关注。

在过去 5 年中，大模型及其计算系统理论与技术取得了诸多研究成果。然而，从整个领域的发展进程看，其应用与研究仍处于起步阶段，仍存在众多亟待解决的关键瓶颈问题。如图 1.2.3 所示，未来 5~10 年的重点发展方向包括如下几个方面。

第一，模型压缩与分布式训练。当前，以 ChatGPT 为代表的大模型包含了百亿以上的参数，它们在计算资源和存储方面需求巨大，未来发展方向包括更高效的模型压缩和加速技术，以减少模型的参数规模和计算成本，提高其在笔记本式计算机、手机等边缘设备上的部署效率，实现多种计算场景中的实时推断和

表 1.2.1 “大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	11	32.35	1 664	151.27	2019.0
2	中国	9	26.47	419	46.56	2021.0
3	澳大利亚	3	8.82	410	136.67	2019.3
4	德国	3	8.82	129	43.00	2019.3
5	英国	3	8.82	14	4.67	2022.0
6	波兰	2	5.88	63	31.50	2021.0
7	新加坡	2	5.88	14	7.00	2020.0
8	印度	2	5.88	11	5.50	2020.5
9	沙特阿拉伯	1	2.94	51	51.00	2019.0
10	韩国	1	2.94	18	18.00	2020.0

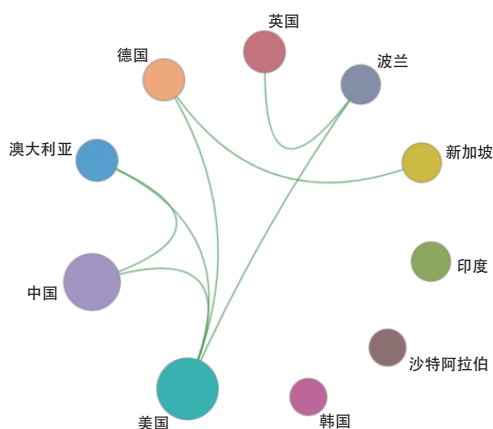


图 1.2.1 “大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.2 “大模型及其计算系统理论与技术”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	篇均被引频次	平均出版年
1	Facebook 人工智能研究院	2	5.88	1 320	660.00	2019.0
2	悉尼大学	2	5.88	396	198.00	2019.0
3	哈佛大学	2	5.88	118	59.00	2019.0
4	华沙大学	2	5.88	63	31.50	2021.0
5	浙江大学	2	5.88	18	9.00	2021.5
6	新加坡国立大学	2	5.88	14	7.00	2020.0
7	华为技术有限公司	1	2.94	346	346.00	2021.0
8	北京大学	1	2.94	346	346.00	2021.0
9	鹏城实验室	1	2.94	346	346.00	2021.0
10	柏林洪堡大学	1	2.94	113	113.00	2017.0

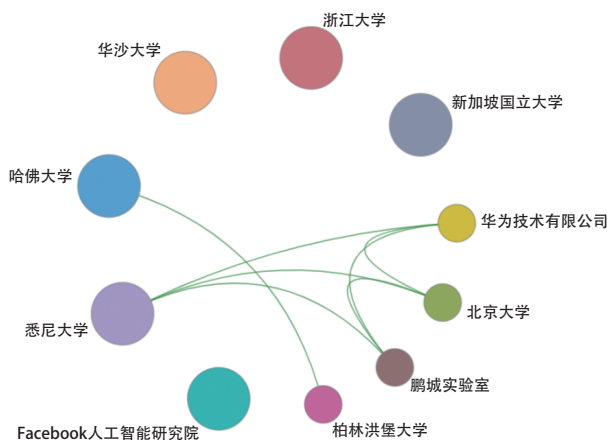


图 1.2.2 “大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络



表 1.2.3 “大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 089	44.56	2021.4
2	美国	557	22.79	2021.0
3	韩国	142	5.81	2021.3
4	英国	125	5.11	2021.2
5	德国	106	4.34	2021.1
6	加拿大	86	3.52	2020.9
7	澳大利亚	83	3.40	2021.3
8	印度	79	3.23	2021.6
9	日本	76	3.11	2021.1
10	法国	55	2.25	2021.0

表 1.2.4 “大模型及其计算系统理论与技术”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	中国科学院	103	22.01	2021.3
2	清华大学	54	11.54	2021.3
3	北京大学	43	9.19	2021.3
4	上海交通大学	42	8.97	2021.3
5	浙江大学	37	7.91	2021.3
6	香港中文大学	34	7.26	2020.5
7	哈佛大学	34	7.26	2020.3
8	电子科技大学	33	7.05	2021.2
9	武汉大学	33	7.05	2021.6
10	哈尔滨工业大学	28	5.98	2021.7

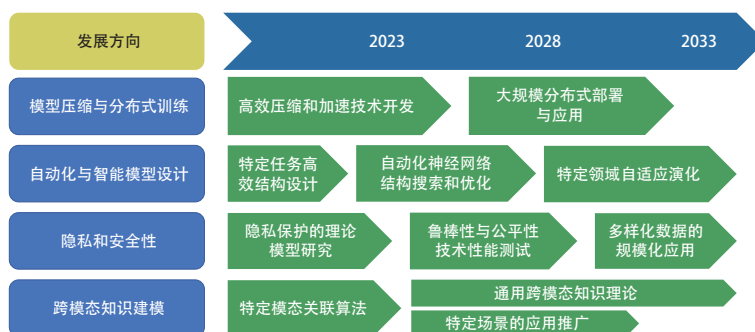


图 1.2.3 “大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿的发展路线

决策。另外，随着模型规模的不断增大，大模型的分布式训练和协同学习将变得更加重要，新的分布式训练策略和技术将有助于加快模型训练速度，同时保持模型性能。

第二，自动化和更智能的模型设计。目前，谷歌、微软等大型企业均依靠其强大的计算资源设计了 T5、Kosmos 等多入一出大模型结构。然而，利用强化学习、进化算法等方法同样可以自动设计出适用于特定任务的高效模型结构，因此自动化的神经架构搜索和模型优化技术未来在大模型领域将得到更大的发展。除了 OpenAI 的 ChatGPT、微软的 MASS、华为的盘古、百度的文心一言、智源的悟道等通用领域的预训练模型，未来必然要求更多针对医疗、金融等特定领域的预训练模型。

第三，隐私和安全性。随着 ChatGPT 在线对话、Dall-E 图文生成等大模型应用不断增多，大模型的隐私性问题也逐渐引起更多关注。未来研究方向包括如何在保护用户数据隐私的同时保持模型的高性能。安全性方面，针对大模型的鲁棒性和公平性问题也将成为研究重点，包括如何让模型在多样化的数据上表现良好，并且避免对不同群体产生偏见。

第四，跨模态知识的建模与推理。尽管现有技术已经实现图像、文字、音频等多模态数据之间的相互关联与生成，但面对蛋白质结构、实时自动驾驶、多方博弈等更复杂和更抽象的推理场景时，白玉兰科学大模型、盘古大模型、Uni-RNA、MathGPT、MathPrompter 等现有技术仍只能依据大量训练数据中的归纳关联进行解答。为使大模型更贴近人类智能，未来的研究重点包括：① 对跨模态大模型的知识进行量化建模与表达；② 探索大模型的推理决策与知识表征的关系；③ 探索大模型多模态知识的可推理性与可解释性。

### 1.2.2 卫星互联网组网理论与关键技术

卫星互联网是互联网领域一场新的变革，具有“全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可信”的特点，为实现全球万物互联的愿景提供了强大支撑，因而受到各国的重视。20 世纪 90 年代，美国摩托罗拉公司就建立了铱星系统，其由 66 颗低轨卫星构成，具有星间链路和星上处理能力。与此同时，美国劳拉公司和高通公司建设了全球星系统，其包含 48 颗低轨卫星，每颗卫星采用透明转发。由于商业上的原因，这两个卫星互联网系统都经历了破产重组。在一段时间的低谷后，最近几年卫星互联网进入第二次热潮，并且规模更加庞大。2017 年，英国一网公司提出 OneWeb 计划，规划发射 1 980 颗卫星，形成覆盖全球的低轨星座。美国 SpaceX 公司更是计划发射 4.2 万颗低轨卫星构成星链（Starlink），支持全球范围内的高速移动通信。近年来，中国也在抓紧开展卫星互联网的建设。例如，中国航天科技集团设计的“鸿雁星座”由 324 颗卫星组成，而中国航天科工集团的“虹云星座”包含 156 颗卫星。

虽然卫星互联网经历了快速发展，但在网络架构、路由协议、星间通信、移动性管理等方面还存在诸多挑战性问题的，有待取得新的突破。

1) 在网络架构方面，目前存在两种主流网络架构。一种是国际移动通信标准化组织 3GPP 主导的非地面网络（non-terrestrial network, NTN）。这一网络架构与地面蜂窝网络相互兼容，是整个 6G 网络的重要组成部分，并且可以实现与现有地面网络的相互兼容，具有开放性。另一种是由 SpaceX 公司专为“星链”设计的网络架构，这一网络架构具有封闭性。该方向的主要研究机构包括哈尔滨工业大学、中国科学院、早稻田大学、华为等。

2) 在路由协议方面，由于卫星网络的高度动态性，卫星位置处于不断变化中，地面网络的路由协议不再适用，因而需要设计新的弹性路由协议。其基本思想是利用星座运动的规律性，将真实卫星节点与虚

拟节点映射，当卫星移动或地面终端进行切换时，虚拟节点之间的路由表在物理节点之间交换，从而完成路由信息交换。该方向的主要研究机构包括萨里大学、SpaceX 公司、北京邮电大学、西安电子科技大学、国防科技大学、北京理工大学等。

3) 在星间通信方面，主要存在两个发展趋势。一是星间微波通信，目前已得到较多应用，技术成熟度高。但是，微波通信具有频段容量有限、难以满足高速通信要求、同频干扰严重等问题。二是星间激光通信，这是新一代卫星互联网普遍采用的星间通信方式。相比于微波通信，激光通信具有带宽大、通信载荷小、抗干扰、保密性强等优点。该方向的主要研究机构包括萨里大学、SpaceX 公司、中国科学院、北京邮电大学、电子科技大学和浙江大学。

4) 在移动性管理方面，一是采用集中式移动性管理，即使用本地代理对终端进行管理，终端每次发起位置更新时都要向本地代理传输消息；二是采用分布式移动性管理，其将全球分为多个区，每个区由覆盖该位置区的卫星群来构成虚拟网关，终端向位置区所在网关进行注册，从而可以满足大规模卫星网络的移动性管理。该方向的主要研究机构包括鹏城实验室、东南大学、卢森堡大学、华为和中兴公司。

该前沿核心论文的主要产出国家见表 1.2.5。中国优势明显，核心论文数排名第一，占比超过 67%，并且与日本、英国、沙特阿拉伯、韩国、加拿大、澳大利亚和挪威都有合作（图 1.2.4）。排名前十的核心论文产出机构（表 1.2.6）中，中国科学院和哈尔滨工业大学并列第一；有 7 家机构来自中国，其余分布在沙特阿拉伯、日本和卢森堡。在机构合作（图 1.2.5）方面，阿卜杜勒阿齐兹国王大学、早稻田大学和西安邮电大学有密切合作。施引核心论文（表 1.2.7）方面，中国仍然排名第一，占比超过 50%，其余国家占比均低于 10%；排名前十的施引核心论文产出机构（表 1.2.8）中，除排名第六的早稻田大学外，其余都来自中国，体现了中国在该方向强劲的研究实力。

目前，卫星互联网已受到各主要国家的高度重视，正以前所未有的速度发展。图 1.2.6 为该前沿的发展路线。以下继续围绕网络架构、路由协议、星间通信和移动性管理 4 个方面概述其发展方向。在网络架构方面，NTN 网络架构目前正处于商讨和标准制定阶段，预计将于 2027 年全面制定并实现商用。在路由协议方面，目前采用的固定路由协议存在固有缺陷，严重制约了网络规模和性能，而弹性网络协议正在逐

表 1.2.5 “卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	21	67.74	1 097	52.24	2020.4
2	日本	4	12.90	350	87.50	2020.8
3	英国	4	12.90	139	34.75	2021.5
4	沙特阿拉伯	3	9.68	141	47.00	2021.3
5	意大利	3	9.68	119	39.67	2020.7
6	韩国	3	9.68	57	19.00	2021.0
7	加拿大	3	9.68	16	5.33	2022.0
8	澳大利亚	2	6.45	72	36.00	2020.5
9	卢森堡	2	6.45	49	24.50	2020.0
10	挪威	1	3.23	89	89.00	2020.0

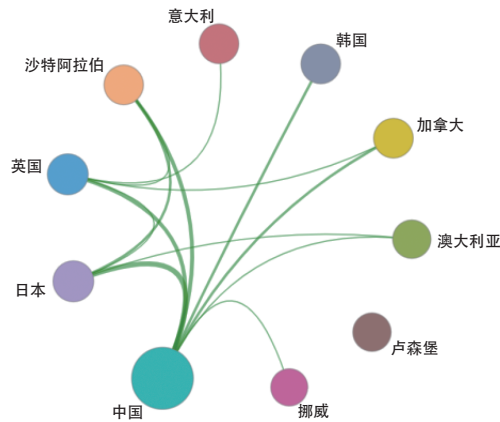


图 1.2.4 “卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6 “卫星互联网组网理论与关键技术”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	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	3	9.68	154	51.33	2019.0
2	哈尔滨工业大学	3	9.68	91	30.33	2020.3
3	阿卜杜勒阿齐兹国王大学	2	6.45	137	68.50	2021.0
4	早稻田大学	2	6.45	137	68.50	2021.0
5	西安邮电大学	2	6.45	137	68.50	2021.0
6	北京理工大学	2	6.45	102	51.00	2021.0
7	鹏城实验室	2	6.45	87	43.50	2019.5
8	西安电子科技大学	2	6.45	71	35.50	2020.5
9	北京邮电大学	2	6.45	63	31.50	2021.0
10	卢森堡大学	2	6.45	49	24.50	2020.0

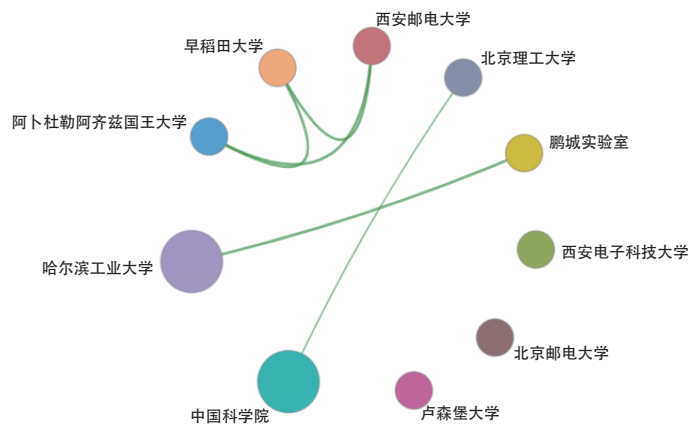


图 1.2.5 “卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	667	51.91	2021.3
2	加拿大	100	7.78	2021.5
3	美国	87	6.77	2021.3
4	英国	77	5.99	2021.3
5	日本	67	5.21	2021.5
6	印度	64	4.98	2021.6
7	韩国	53	4.12	2021.7
8	沙特阿拉伯	48	3.74	2021.6
9	澳大利亚	48	3.74	2021.4
10	意大利	41	3.19	2021.0

表 1.2.8 “卫星互联网组网理论与关键技术”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	哈尔滨工业大学	70	16.09	2021.2
2	北京邮电大学	63	14.48	2021.0
3	西安电子科技大学	44	10.11	2021.5
4	鹏城实验室	39	8.97	2021.4
5	中国科学院	37	8.51	2021.2
6	早稻田大学	34	7.82	2021.6
7	东南大学	32	7.36	2021.2
8	北京理工大学	30	6.90	2021.6
9	中国人民解放军国防科技大学	30	6.90	2021.1
10	电子科技大学	29	6.67	2021.4

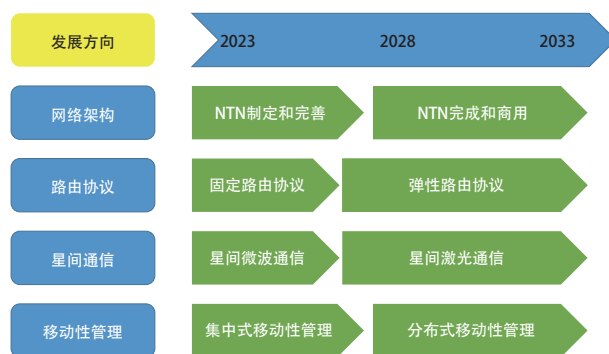


图 1.2.6 “卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿的发展路线

步完善中，预计在 2026 年左右成熟。在星间通信方面，现在使用的微波通信存在速率低和干扰强的问题，正在逐步被星间激光通信代替，预计在 2026 年左右完成替代。在移动性管理方面，集中式管理存在信令开销大和传输时延高的问题，因而正在向分布式管理过渡。卫星互联网的发展趋势：一是从以通信为主向通信、导航和遥感一体化发展，实现多功能卫星互联网的功能；二是从地面设备辅助接入向手机直连卫星通信发展，实现随遇接入的目标；三是从卫星互联网向卫星物联网发展，实现万物互联的愿景。卫星互联网目前已在应急通信、偏远地区通信和物流通信等场景得到应用，随着卫星互联网的快速发展，未来将在经济、社会、军事等领域得到广泛应用。

### 1.2.3 超大规模硅基量子芯片

量子芯片是利用量子力学原理设计和制造的芯片，可用于量子计算和量子通信。与经典芯片采用二进制比特不同，量子芯片利用量子比特作为其基本信息单元。量子比特可以同时处于 0 和 1 的叠加态，通过纠缠在多个量子比特之间共享信息。这使得量子芯片在某些特定问题上具有潜在的巨大优势，能够以更快的速度解决一些经典计算机难以处理的问题，如大数分解、量子模拟和优化问题等。由于量子比特的脆弱性，容易受到周围不可控的环境影响而被破坏，因此制造和操作量子芯片是一项极具挑战的任务。一台通用量子计算机往往需要数百万个量子比特来进行量子纠错，以实现所需的量子优势。然而，单就量子比特数目而言，目前采用的多种物理实现路线，如超导电路、金刚石氮空位色心、俘获离子等技术，仍无法满足需求。因此，制造超大规模量子芯片成为实现通用量子计算机的关键挑战。鉴于传统半导体工业已经成功制造出容纳数十亿个晶体管的芯片，将硅微电子技术与量子技术融合有望在现有的半导体制造基础上构建起量子计算平台。硅基量子芯片与传统半导体工艺的兼容性使其在生产成本、规模化制造以及集成度等方面天然具备优势。这令大规模硅基量子芯片逐渐成为量子计算领域的研究热点，为实现量子计算机的可行性和可扩展性提供了一条前景广阔的道路。

目前，硅基量子芯片呈现出多条发展路线。一条路线是将量子信息编码至栅控硅基量子点内的电子（空穴）自旋，或嵌入硅中的掺杂磷核自旋上。在 1998 年，理论物理学家预测了硅纳米结构中自旋可以承载量子信息，标志着一场实验研究竞赛的开始。通过对单个电子自旋的操控和测量，可以实现单量子比特的操作。而利用两个自旋之间的交换相互作用，可以实现双量子比特门操作。最初的实验采用 III - V 族半导体，但不可避免的超精细相互作用阻碍了其进一步发展。2013 年，几个课题组同时报道了硅基自旋量子比特的突破。这是因为硅可以通过同位素提纯来抑制超精细相互作用，从而显著提高保真度。目前已经实现保真度远高于纠错阈值的单量子比特门和双量子比特门。同时由于硅基量子点和掺杂原子的纳米级物理尺寸，以及与现代集成电路技术兼容，可以在合理的芯片尺寸内扩展为大规模量子比特阵列。目前已经实现包含 6 个量子比特的量子处理器，并且展示了一维和二维构型的更大量子点平台。

另一条路线是利用硅基光子集成工艺来实现光子间的量子纠缠和量子态的操控，进而实现量子计算和量子通信。较长的退相干时间、多自由度、无需真空和低温等优势使得光量子技术脱颖而出。相比于体积庞大、不稳定、可扩展性差的传统光学仪器，利用 CMOS 微纳制造技术制备的硅基光量子芯片具有高集成度、高稳定性、强可控性、易扩展性等优点。目前已经实现单个芯片上数百个光学元件的集成，同时有望单片集成各种核心光量子功能器件，包括量子光源、量子操控光路、单光子探测器等。近年来，硅基光量子芯片在玻色采样、多光子高维度量子纠缠态、量子密钥分发和隐形传态等领域取得显著突破。

近年来，超大规模硅基量子芯片领域取得众多核心研究成果。其核心论文的主要产出国家和主要产出机构情况见表 1.2.9 和表 1.2.10。美国、英国和荷兰在核心论文数方面位居前三名。主要产出机构包括代尔夫特科技大学、布里斯托大学、北京大学等。另外，许多核心论文是由不同国家的不同研究机构合作完成的，其中主要产出国家及主要产出机构间的合作网络分别见图 1.2.7 和图 1.2.8。表 1.2.11 和表 1.2.12 分别列出该领域施引核心论文的主要产出国家和主要产出机构。中国科学院和中国科学技术大学位居前两位，体现了中国对该方向较高的关注度。

从整个领域的发展进程来看，超大规模硅基量子芯片仍处于起步阶段，存在众多亟待解决的关键性问题。如图 1.2.9 所示，超大规模硅基量子芯片领域未来将着重围绕以下几个关键方向发展。

表 1.2.9 “超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	24	42.86	3 059	127.46	2019.7
2	英国	15	26.79	2 436	162.40	2018.7
3	荷兰	13	23.21	2 135	164.23	2019.5
4	澳大利亚	12	21.43	1 441	120.08	2019.7
5	中国	11	19.64	1 603	145.73	2019.5
6	日本	11	19.64	1 075	97.73	2020.1
7	德国	9	16.07	1 621	180.11	2019.8
8	丹麦	6	10.71	748	124.67	2020.3
9	韩国	4	7.14	542	135.50	2019.5
10	瑞士	4	7.14	226	56.50	2021.2

表 1.2.10 “超大规模硅基量子芯片”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	篇均被引频次	平均出版年
1	代尔夫特科技大学	11	19.64	1 940	176.36	2019.5
2	布里斯托大学	9	16.07	1 319	146.56	2018.6
3	北京大学	6	10.71	753	125.50	2020.2
4	丹麦科技大学	6	10.71	748	124.67	2020.3
5	荷兰国家应用科学研究院	6	10.71	577	96.17	2020.0
6	荷兰 QuTech 量子计算实验室	5	8.93	493	98.60	2019.8
7	新南威尔士大学	5	8.93	492	98.40	2019.6
8	斯图加特大学	4	7.14	902	225.50	2020.0
9	赫瑞 - 瓦特大学	4	7.14	741	185.25	2019.0
10	电子科技大学	4	7.14	693	173.25	2018.5

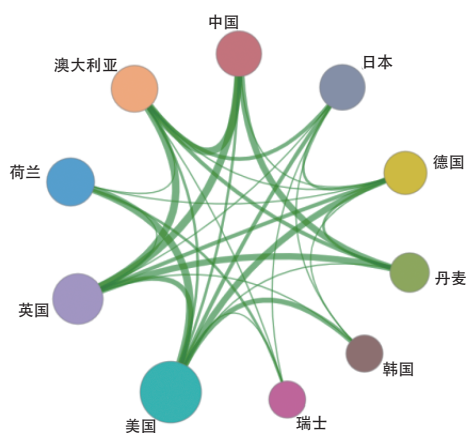


图 1.2.7 “超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿主要国家间的合作网络

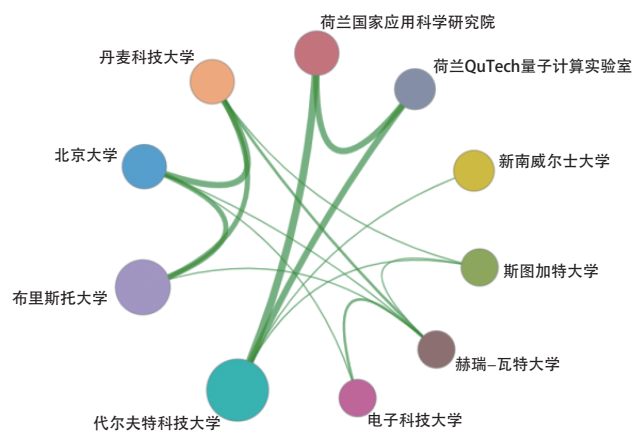


图 1.2.8 “超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	美国	1 281	23.69	2020.6
2	中国	1 157	21.40	2020.8
3	德国	558	10.32	2020.7
4	英国	461	8.53	2020.4
5	澳大利亚	412	7.62	2020.4
6	日本	325	6.01	2020.6
7	加拿大	302	5.59	2020.4
8	法国	273	5.05	2020.5
9	意大利	232	4.29	2020.6
10	荷兰	207	3.83	2020.5



表 1.2.12 “超大规模硅基量子芯片”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	中国科学院	225	16.78	2020.6
2	中国科学技术大学	213	15.88	2020.7
3	代尔夫特科技大学	145	10.81	2020.4
4	新南威尔士大学	112	8.35	2020.5
5	麻省理工学院	111	8.28	2020.6
6	哈佛大学	103	7.68	2020.2
7	悉尼科技大学	93	6.94	2020.6
8	格勒诺布尔-阿尔卑斯大学	89	6.64	2020.8
9	布里斯托大学	85	6.34	2019.9
10	马里兰大学	84	6.26	2020.4



图 1.2.9 “超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿的发展路线

### （1）硅基自旋量子芯片

1) 大规模阵列。自旋量子芯片的实用化需要将每个量子比特的初始化、操控、读取等模块的保真度同时提升到足够高的水平。利用 CMOS 工艺大规模制造高保真度的量子比特是一个具有挑战性的任务，因为自旋量子比特的性质，如谷劈裂、自旋轨道耦合以及量子点间的隧穿耦合等，对原子级的缺陷非常敏感，因此材料的生长质量至关重要。同时，快速检测以及自动化调控每个量子比特的参数也是必要的。

2) 长程耦合。目前硅基自旋量子比特大多是采用近邻耦合，这就需要量子点或者掺杂磷原子之间的间距很近，制约了密集阵列时的布线。发展长程耦合方法允许量子比特分隔更大的距离。目前实验上已经尝试多种方法，如浮栅、微波腔、超导谐振器、电子穿梭等。

### （2）硅基集成光子量子芯片

1) 大规模集成。在单一芯片上集成量子光源、量子态操控光路和单光子探测等功能，并保证各项关键指标同时满足，仍需要克服许多技术难题。降低芯片中光子与周围介质相互作用造成的损耗也是关键。另外，为实现实用化应用，还需要不断提高光子量子芯片能够制备的多光子高维纠缠态的复杂度，以实现足够大的态空间。

2) 多芯片互联。随着量子比特数量的增加，在单一芯片上集成更多光学元件变得愈加困难。未来可能会发挥光通信的优势来实现多芯片间的互联，从而采用分布式量子计算来构建大规模量子处理器。但目前硅基集成光子量子芯片间的高性能互联仍是技术难题，需要发展超低损耗的互联技术，以提高芯片间量子态传输的保真度。

超大规模硅基量子芯片具有巨大的潜在应用价值。硅基自旋量子芯片和硅基集成光量子芯片都有望成为未来量子技术的关键组成部分，对解决复杂问题和提升信息安全产生深远影响。未来，硅基量子芯片将凭借着与传统 CMOS 工艺的兼容性不断向着更大规模和广泛应用的方向迈进。

## 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 工程开发前沿见表 2.1.1，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。其中，“光控相控阵天线技术”“基于脑机接口的无人系统控制技术”“基于人工智能的故障诊断和检测技术”为数据挖掘前沿；其余为专家提名前沿。各开发前沿涉及的核心专利 2017—2022 年公开情况见表 2.1.2。

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	光控相控阵天线技术	260	1 063	4.09	2020.0
2	基于脑机接口的无人系统控制技术	464	1 344	2.90	2019.8
3	面向多样性计算的算力网络构建技术	638	3 034	4.76	2019.9
4	柔性智能触觉传感器	616	5 105	8.29	2019.1
5	高速空间光通信技术	1 018	2 061	2.02	2020.1
6	太赫兹固态相控阵芯片	887	2 022	2.28	2019.9
7	基于人工智能的故障诊断和检测技术	991	5 736	5.79	2020.9
8	大尺寸半导体碳化硅材料与功率芯片	232	366	1.58	2020.1
9	基于光场技术的裸眼 3D 技术	668	3 379	5.06	2019.0
10	增强现实空间操作系统	420	1 949	4.64	2019.9

表 2.1.2 信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	光控相控阵天线技术	25	37	46	42	39	71
2	基于脑机接口的无人系统控制技术	58	78	73	67	88	100
3	面向多样性计算的算力网络构建技术	77	77	109	125	101	149
4	柔性智能触觉传感器	127	136	96	107	82	68
5	高速空间光通信技术	115	138	127	128	214	296
6	太赫兹固态相控阵芯片	94	112	162	133	176	210
7	基于人工智能的故障诊断和检测技术	18	38	99	151	293	392
8	大尺寸半导体碳化硅材料与功率芯片	26	27	21	43	46	69
9	基于光场技术的裸眼 3D 技术	168	154	106	89	75	76
10	增强现实空间操作系统	47	61	72	63	79	98

### (1) 光控相控阵天线技术

光控相控阵天线主要由收发机、导波结构、天线阵列、光敏机制和光控系统五部分组成,通过光照的强度、波长、相位、指向、延时等参数对光敏材料电磁特性在时、空、频、谱域调制,控制天线单元辐射场的幅度、相位和极化,以实现天线阵列辐射特性的精密调控,在军民无线通信、遥感遥测、定位感知、勘探测量等领域具有重要意义。根据辐射频率,其关键技术包括:①用于空间光通信、感知、探测的光学相控阵天线技术;②用于微波通信、感知、探测等的光控微波相控阵天线技术。前者主要向低功耗、高集成度、宽视场、多波束、高时空精度扫描等方向发展。后者以微波光子相控阵技术和光调微波相控阵技术为代表,向低成本、低功耗、宽带宽扫描角和高效率发展。

技术原理区分上,微波光子相控阵技术利用光载微波时延以实现微波信号的宽带同相低损耗传输,技术难点在于实现高集成度光电转换、高精度时延光波导、可扩展微波光子传输系统和小型化高功率可调激光源等。光调微波相控阵技术利用光致微波幅相调谐,以突破传统电调天线阵由于复杂天馈网络和精密半导体制程要求所导致的增益、频率、阵列规模和极化自由度等方面的限制,技术难点在于实现高速高频光控微波开关、高精度光调微波移相、高对比度光敏材料等。光学相控阵为实现广角域、高速率、高分辨力的多束激光扫描,当前研究热点主要聚焦于光束成型网络中光延时和光调制器件的研制,以充分利用热光调制、机械光调制、电光调制、液晶光调制和相变-光调制等技术原理,实现反射式、折射式和全息式光束偏转与赋形。

### (2) 基于脑机接口的无人系统控制技术

基于脑机接口的无人系统控制技术结合神经生物学、信息学、人工智能、无人系统等领域相关技术,通过采集和分析大脑活动产生的生理信号,解码人脑意图,并将其转化为控制指令,再通过编码,实现人脑与无人系统之间的交互与控制。在此技术中,用户无须通过传统的人机交互方式,而是利用脑电等生理信号直接控制无人系统。

主要技术方向包括:①脑信号的采集和传输,采用不同类型的生物传感器(如脑电图仪、眼动仪等)捕捉人脑生理信息,将其放大并转换为数字信号;②脑信号的处理和解码,主要通过信号处理方法,处理复杂、高维的大脑活动数据,包括降噪、特征提取等,以识别脑信号中的特征模式,解码人脑意图;③无人系统指令生成和控制,将识别到的人脑意图特征模式,通过编码技术,转换为对应的控制指令,用于对无人系统(如无人机、无人车、机器人、外骨骼等)的控制。此外,还需要保证人机交互方式的舒适便捷性、稳定性和实时性。

传统的无人系统基于人工智能技术,对小概率突发异常状态应对不足。为此,将脑机接口引入无人系统,利用脑-机智能融合,充分发挥人脑和计算机两者不同智能的优势,是提升无人系统智能性的新途径,预期在航空、航天、航海、无人驾驶、交通安全、助老助残、医疗辅助、救援救灾、工业控制、教育娱乐等领域都有广泛的应用前景。

### (3) 面向多样性计算的算力网络构建技术

算力网络是将跨中心算力通过网络连接的技术理念,依托高速、移动、安全、泛在的网络连接,整合网、云、数、智、安、边、端、链等多层次算力资源,提供数据感知、传输、存储、运算等一体化的新型基础服务,由中国率先提出。其目标是整合多层次算力资源,构建以算力和网络为核心的新型基础设施体系。面向多样性计算的算力网络构建技术是指利用高性能计算与云计算、高性能网络、分布式存储等技术手段,有效整合和调度异构计算资源,为用户提供灵活、高效、可扩展的计算、存储、网络、应用和数据服务。

该技术旨在满足不同应用场景对计算资源多样性和动态性的需求，以支持人工智能、大数据分析、虚拟现实等领域的复杂计算任务。

主要技术方向包括：异构资源集成与协同、算力资源及服务封装、智能任务调度、动态计量计费。异构资源集成与协同是通过统一的接口和协议，将异构计算资源及网络资源连接在一起，形成统一计算资源池，提供给用户灵活、可扩展的计算环境。算力资源及服务封装将底层云平台资源进行统一描述、封装及调用。智能任务调度根据任务的特性和硬件平台的特点，设计合理的调度算法和负载均衡策略，自动选择最优的执行环境和资源配置。动态计量计费对跨管理域组合集群的资源使用情况实现准确计量并提供规范化的计费方式。

随着人工智能的发展，算力网络构建技术将更加智能化，根据任务类型、资源特性、用户需求等因素自动选择最优的计算资源组合和分配策略。未来发展将注重数据隐私保护、网络安全防护和容错机制设计，确保计算资源网络的稳定运行和用户数据的安全性。随着 5G 技术的普及和边缘计算的发展，面向多样性计算的算力网络将与 5G 网络和边缘设备实现更紧密的融合，利用其计算能力和低延迟特性为用户提供更快速、实时响应的计算服务。

#### （4）柔性智能触觉传感器

触觉传感器作为机器人重要的关键支撑技术之一，是连接外部环境与机器人本体的桥梁，旨在模仿人类皮肤的触觉感知能力，实现机器人对外部环境物理信息的灵敏、精确感知。柔性智能触觉传感器结合柔性电子技术和智能感知算法，具备测量适应性和接触信息智能化，能够覆盖复杂机器人体表和物体表面，适于机器人在非结构环境下开展智能交互及操作任务。

目前，其主要技术方向包括：① 柔性材料及其制造技术；② 感知机制与算法；③ 触觉传感仿真；④ 多模态感知集成及操作应用。

首先需要利用具有良好的电学和力学特性的新型柔性聚合物、纳米材料和生物材料，实现柔性触觉传感器的基底材料、感知层材料、电极材料的制造，从而增强传感器的柔弹性、耐用性和适应性。同时，开发通用性的智能感知方法，使传感器实现对接触力、形状、温度、位置等多模态参数灵敏且精准的感知。为应对触觉传感器获得大规模数据成本高昂的特点，开发高质量的触觉传感仿真平台及相应的迁移算法尤为重要。目前具有代表性的视触觉传感器仿真器 Tacchi，能提供丰富的接触信息，提高触觉学习效率。进一步结合多种柔性触觉传感机制与神经网络大模型方法，实现传感器的多模态感知融合，从而更全面、深入地理解环境，提供更加完整、多样、精准的触觉感知反馈，并应用于复杂操作任务，完成从触觉感知到操作的仿生过程。

#### （5）高速空间光通信技术

高速空间光通信技术是指利用激光束作为载波在自由空间进行高速信息传输的通信技术，相对于传统微波方式，具备速率高（可达 100 Gb/s 以上）、抗电磁干扰性强、无频谱限制等优点，同时终端体积小、质量轻、功耗低、易部署。基于上述特点，高速空间光通信技术在探火探月、对地观测、导航侦察、低轨移动通信、紧急救援等军事和民用领域具有重大战略需求与应用价值。然而，由于空间激光传输距离长，光束易发散，且对地接收易受大气吸收折射以及背景光干扰、云层颗粒散射等方面因素影响，空间光通信技术在高功率光源及高谱效调制、高灵敏度抗干扰光信号接收、精密可靠高增益收发天线设计、快速精确捕获跟踪和瞄准技术、高动态高鲁棒光组网技术等方面仍面临诸多挑战，实现高速、稳定可靠、低成本的空间光信息网络是空间激光通信研究的核心目标。近年来，随着全球空间信息网络的规模化部署以及在大

功率半导体激光器、高精度光滤波器件、高灵敏度光学探测器以及快速、精密的光、机、电综合技术方面进行的不懈探索，部分国家已初步具备实现 100 Gb/s 空间激光通信的能力，目前空间激光通信技术逐渐从点对点模式向中继转发和构建高速、智能、一体的激光网络方向发展。

#### (6) 太赫兹固态相控阵芯片

太赫兹固态相控阵芯片通过将收发、开关和幅相控制等器件进行高度集成，在太赫兹通信、感知、雷达、成像系统中对波束指向进行精确调控、对目标进行快速跟踪和探测，在有效提高系统装备智能化、灵活性和作战效能的同时，显著减少装备体积和开发列装成本。太赫兹波是频率在 100 GHz~10 THz 之间的电磁波，其电磁频谱介于微波频段与红外光谱之间，处于传统电子学和光子学研究频段间隙的特殊位置，具有通信传输容量大、分辨率高、穿透性好、光谱特性优异等突出特点。无线应用的普及和频谱资源的枯竭，驱动固态电路向太赫兹方向发展，但由于在太赫兹频段传播损耗大、器件功率受限等原因，需要采用相控阵体制提供天线增益并进行波束动态跟踪，因此，基于先进化合物和硅基集成电路工艺的太赫兹固态相控阵芯片技术，是太赫兹技术的核心发展路线和必然发展方向，在新一代无线通信系统和高精度太赫兹雷达系统中成为研究重点。

近年来，由于化合物和硅基集成电路工艺的不断进步，其截止工作频率和器件性能快速提升，尤其是在摩尔定律的推动下，硅基太赫兹集成电路技术得到突飞猛进的发展。太赫兹固态相控阵技术使太赫兹系统的性能和可靠性全面提升，在显著提高系统集成度、降低系统物理尺寸的同时，极大地降低了系统的成本及应用技术要求。太赫兹固态相控阵芯片技术成为电子信息领域的重要战略方向，2021 年，美国国防部先进计划研究局（DARPA）推出“G 波段阵列电子学”（ELGAR）项目；中国也在该领域进行了相应的布局，未来将向更高频率、更高集成度、更高性能等方向发展。

#### (7) 基于人工智能的故障诊断和检测技术

基于人工智能的故障诊断和检测是利用机器学习模型（如深度神经网络）对数据进行处理，实现对测试对象的故障检测、诊断和预测。近年来，基于人工智能的故障诊断和检测研究受到广泛关注。主要研究方向包括：① 强化智能化故障诊断和检测，如复杂环境下模型的自适应性、不同场景下模型的可迁移性；② 可解释智能故障诊断和检测，如构建可解释的网络模型、分析可视化特征所蕴含的语义信息；③ 弱数据质量下智能故障诊断和检测，如探索生成模型进行数据补齐、基于元学习的诊断与检测算法；④ 基于信息融合的智能故障诊断和检测，如数据级、特征级以及决策级的信息融合；⑤ 轻量化的智能故障诊断和检测，如深度网络的轻量化压缩、边缘端与移动端智能模型。

尽管基于人工智能的故障诊断与检测方法层出不穷，但几大瓶颈问题仍少有涉及，包括：① 数据依赖性大且缺乏数据挖掘过程中的机理解析；② 模型泛化的边界条件与影响因素研究欠缺；③ 可解释性缺乏机理研究及定量标准；④ 人工智能模型步入风险敏感场景时的可信性难以保证。围绕上述问题，加快推动智能故障诊断与检测技术在技术创新、工程实践、可信安全等方面的发展，是未来发展基于人工智能故障诊断与检测技术的重要方向。

#### (8) 大尺寸半导体碳化硅材料与功率芯片

大尺寸半导体碳化硅（SiC）材料主要指直径为 6 英寸<sup>1</sup>甚至更大的碳化硅单晶衬底。利用它们，可以

<sup>1</sup> 1 英寸 = 2.54 厘米。

获得高质量的外延薄膜，进而制造高性能的功率芯片。在“双碳”目标的牵引下，半导体碳化硅材料与芯片的大规模化应用正在到来。作为一种四族化合物半导体材料，碳化硅具有禁带宽度大、热导率高、击穿场强高、电子饱和漂移速率高、化学稳定性和热稳定性好等优异特性。作为新兴的功率半导体材料，由于碳化硅所制备的功率器件与硅功率器件相比具有更高的工作温度、更高的击穿电压、更快的开关速度、更低的导通电阻和更好的耐用性，其有望在电力电子领域——特别是新能源相关的电力电子领域——得到规模化应用。

大尺寸半导体碳化硅材料的主要技术创新方向是提高碳化硅单晶的尺寸和厚度，降低碳化硅单晶的缺陷密度，以期获得更低成本和更高质量的碳化硅衬底。碳化硅单晶尺寸在不断增加，使主流碳化硅衬底尺寸发展到目前的 6 英寸。全球科研机构和公司正在竞相发展 8 英寸碳化硅单晶及衬底技术，积极推进其产业化。碳化硅单晶目前厚度普遍在 10~30 mm，发展到硅单晶的米级还有很长的路要走。碳化硅单晶的体缺陷如微管已经基本消除，但是其他缺陷如线缺陷位错还较多，一般在  $10^3/\text{cm}^2$  量级，有待进一步降低。

碳化硅的功率二极管技术已经比较成熟，但是其功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管（MOSFET）的性能有待大幅提升。首先，MOSFET 注入区的离子激活率亟待提高，这与器件制备过程中离子注入及后续高温退火密切相关。其次，如何优化热氧化及后续退火工艺的关键技术参数，以降低界面缺陷和氧化层缺陷密度，是提升 MOSFET 沟道电子迁移率和栅氧可靠性需要考虑的重要问题。最后，MOSFET 的可靠性必须得到显著改善，这涉及栅氧及后退火改善技术、短路鲁棒性改善技术、抗浪涌和抗雪崩技术、辐照加固技术等。

### （9）基于光场技术的裸眼 3D 技术

基于光场技术的裸眼 3D 技术是指一种通过光线追踪来构造 3D 物体的技术，通过复现包括全光方程中发光位置、观察位置方向的两个发光角度、光的波长  $\lambda$  以及观察时间  $t$  等要素信息，使用户通过双眼直接看到“真实世界里的三维物体”。与传统裸眼 3D 显示技术相比，光场显示在双目视差的基础上增加位移视差，从而拥有超高信息密度和空间带积宽，为用户带来视网膜级的视觉体验。

光场概念于 1936 年被提出，具体可分为光场采集（成像）和光场显示两大部分。光场采集包括相机阵列、微透镜阵列、小孔成像；光场显示包括 Magic Leap 的扫描型、多投影型，斯坦福大学的多层屏技术，理光的多焦面以及集成成像等技术实现类型。其中，扫描型采用高速投影机和旋转定向散射屏产生水平多视点，但其设备和场地要求严格。多投影型采用投影阵列和旋转 / 定向散射屏产生水平多视点，但其设备体积以及成本受限。多层屏技术采用多层液晶屏幕和指向性背光源或普通背光源，算法实现连续景深，目前技术瓶颈集中于算法的研究。多焦面液晶屏幕或者微显示搭配变焦透镜，算法实现连续景深，该领域重点聚焦不同算法的配合研究。集成成像采用 Panel 搭配透镜阵列实现连续景深，利用光场相机得到视频源，再利用阵列透镜复现。

利用光场显示技术在空间中重新构建出三维物体的光场分布，将可实现与自然世界无限接近的立体显示效果。因此，基于光场显示的裸眼 3D 技术将成为未来重要的信息交互模式。受益于半导体显示技术的不断突破与发展，超高分辨率的显示面板为光场裸眼 3D 显示技术提供了更多可能。结合眼球追踪、动作捕捉等实现瞳孔级密集视点下的智能化交互。

显示技术的升级引领将推动包括显示芯片、高分辨率面板材料、3D 内容源等全产业链的技术升级，并赋能上下游生态联动发展。在可预见的未来，随着产业链逐步完善，基于光场技术的裸眼 3D 显示将在医

疗影像、检测、微创手术等方面实现产业化应用突破，此外，在电子工业设计自动化、在线教育模式的创新，商业展览展示、文化、娱乐等领域也将形成全方位赋能。

### （10）增强现实空间操作系统

增强现实空间操作系统是针对扩展现实（XR）设备设计的支持虚实结合、实时交互、逼真呈现的3D操作系统。其主要目标是通过空间感知技术，在现实世界的基础上融合虚拟空间，并通过眼动、手势等识别算法支持3D多模态用户交互，构建支持自然交互的空间应用体系，进而实现沉浸式虚实融合空间的多通道自然交互操作。不同于传统个人电脑和手机端操作系统，增强现实空间操作系统强调用户在三维空间中的沉浸体验，让用户能够在真实物理世界中增加虚拟对象，从而实现更丰富的虚实混合呈现与交互。相较于屏幕界面，空间操作系统能够以更自然、直观的方式进行操作和交互，是构建元宇宙应用生态的基础。

主要研究方向包括：① 空间应用体系，在系统级高性能3D渲染引擎的支持下，面向增强现实空间的交互特性，构建和管理在XR设备上运行的空间应用，定义新的3D应用体系，研究如何最有效地在空间中设计、渲染、使用3D应用；② 空间交互体系，采用以人为中心的设计理念，研究如何基于多种识别算法的多模态交互，实现自然、直观和高效的用户交互新模式；③ 空间感知融合，研究高效的空间定位追踪、环境理解等算法，让XR设备能更好地感知其所在的环境，实现虚拟内容与物理空间的无缝融合。

未来，增强现实空间操作系统有望以全新的空间应用体系颠覆传统的操作系统模式，通过眼动和手势等新型交互方式，提供更为真实、自然的人机界面和空间理解、感知能力以及更强的交互应用，实现混合增强智能信息的高效获取和处理，获得超越现实空间的感受和体验。

## 2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 光控相控阵天线技术

相控阵技术自1899年被提出，已广泛应用于无线通信、遥感遥测、定位感知、勘探测量、安防检测、医疗器械、医学影像等领域，是推动人类科技进步、促进社会生产力发展的军民两用关键共性基础技术。21世纪以来，随着5G/6G移动通信、物联网和人工智能的发展而爆发的大数据，对低成本高速信息传输和相控阵技术提出新的要求。“光互联”作为逐渐代替“电互联”的新载体，用于高速信息的高速传输。随着光调制器、光开关、光波导等器件的发展，“光控”和“光互联”的概念也在微波相控阵技术中得到应用，典型技术代表是微波光子相控阵技术和光调微波相控阵技术。

微波光子相控阵技术聚焦光载微波时延技术，通过光载微波时延实现微波信号的宽带低损耗传输和相移，在极大降低传统电控移相器导致的发热和馈电网络损耗的同时，展宽扫描角度与带宽，并提高系统抗辐照性能。主要发展趋势是提升微波光子芯片集成度，提升光延时精度、范围、连续性，提高光电、电光转换效率，降低微波光子链路损耗，实现大带宽、大延时、大动态范围的波束扫描技术。中国的代表性研究机构包括浙江大学、电子科技大学、清华大学、中国电子科技集团公司等。国外代表性研究机构包括渥太华大学、伦敦大学学院（UCL）、美国海军实验室、弗吉尼亚大学、加利福尼亚大学、大阪大学等。

光调微波相控阵技术聚焦光致微波调谐技术，通过光敏器件实现光控微波天线口面或馈网的幅相调谐，降低传统电调机制导致的馈网损耗以及对精密半导体制程的要求，逐步实现微波相控阵天线在最大增益、天线效率、最高工作频率、可扩展规模、极化自由度等多方面的突破。代表性研究机构包括澳大利亚国立

大学、美国海军实验室、上海科技大学、东南大学、西安电子科技大学、南京航空航天大学等。具体来说，在光调连续微波相位方面，澳大利亚国立大学在 2012 年提出利用光电二极管控制变容二极管实现超材料反射系数调控；东南大学在 2020 年提出利用光电池为电压源控制变容二极管，在 7 GHz 实现反射单元的连续相位调控；西安电子科技大学在 2022 年提出利用光敏电阻分压控制反偏变容二极管，在 6.35 GHz 实现反射单元的连续相位调控。值得一提的是，在光调离散微波相位方面，美国海军实验室在 2020 年提出利用砷化镓光敏电容薄膜控制反射阵天线单元二进制移相；上海科技大学在 2022 年提出利用光敏电阻分流控制开关二极管切换微波反射阵单元负载，首次在超过 10 GHz 频率上实现并验证激光调控的 1 024 单元的单极化光控微波相控阵，实现  $\pm 60^\circ$  无栅瓣大范围扫描，代表了光控微波相控阵天线技术的最新发展。

“光控相控阵天线技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家和机构分别见表 2.2.1 和表 2.2.2。亚洲地区（中国、日本、韩国和印度）在专利公开总量上优势明显。其中，中国在专利公开量上超过其他 9 个国家专利公开数量总和的两倍，但在平均被引数上仅排名第五。美国在专利公开量和平均被引数上均排名第二，综合展现出较高的专利质量和技术价值。英国和加拿大两国虽然平均被引数较高，但专利公开量总量较低。从以上数据来看，该项技术呈现出中、美两国为主导，日、韩两国迎头追赶的趋势。专利产出机构上，以浙江大学、中国电子科技集团和航天恒星科技有限公司为代表的中国企事业单位在数量上优势明显，但在产业化落地方面较美国 Analog 光电有限责任公司有较大差距。专利的主要产出机构也体现了该技术在航空航天等国家重要战略领域的重大需求。光控相控阵技术应用场景的特殊性从某种意义上可能也导致国家与机构间合作较少，由图 2.2.1 可知，只有中国和加拿大在国家层面上有一些交流合作，而各机构之间无交流合作。

光控相控阵技术在取得较大进展的同时也面临诸多问题。在未来 5~10 年，光控微波相控阵天线技术面临频段稀疏化、高频高效化、宽带智能化、低成本集成化以及平面轻小型化的挑战。“光控相控阵天线技术”工程开发前沿的发展路线如图 2.2.2 所示。

微波光子相控阵天线的主要发展趋势包括：① 降低波束赋形光网络的尺寸和功耗；② 提高光时延调控精度；③ 提升波束扫描的空间连续性、空间范围和时空分辨率；④ 降低系统扩展级联的变频损耗；⑤ 实现低激光载波功率下的高链路增益和高信噪比。研究方向包括：① 降低集成器件尺寸和功耗；② 探索光电转换新机理和新方法；③ 提高光延时器件精度和连续性；④ 降低光子微波链路复杂度、成本和损耗。

光调微波相控阵天线在近两年萌芽，在原理发现和技术开发方面还有较多原始创新工作有待开展，主要发展趋势包括：① 提升光控微波开关速率与工作频率；② 探索光致微波调谐新机理和新方法；③ 提高光控微波移相调幅精度与连续性；④ 提高光敏材料和光敏器件调控对比度；⑤ 在通信、感知、存储、计算、防护等多个层面上探索不同载荷、载体、电磁环境和应用场景中可获得的变革型系统性能突破。

光学相控阵天线技术在朝着低功耗、低损耗、高效率、高集成和宽扫描方向发展时，当前的研究热点主要聚焦于光束成型网络中光延时和光调制器件的研制，包括：① 热-光调制技术，基于热光效应改变光波导材料折射率，实现折射式光束偏转扫描；② 机械-光调制技术，通过微纳机械旋转的微镜反射实现反射式光束偏转扫描；③ 电-光调制技术，基于材料的电光效应改变光波导材料（如铌酸锂等）的折射率，实现折射式光束偏转扫描；④ 液晶-光调制技术，通过电压控制液晶取向和折射率，实现折射式光束偏转扫描；⑤ 相变-光调制技术，通过温度控制相变材料（如硫族化合物相变材料）的晶态和非晶态转换，改变相变材料的折射率，实现折射式光束偏转。具体技术方向包括：① 激光器——小型化、低成本、高功率、



表 2.2.1 “光控相控阵天线技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	184	70.77	529	49.76	2.88
2	美国	43	16.54	426	40.08	9.91
3	韩国	13	5.00	57	5.36	4.38
4	日本	10	3.85	3	0.28	0.30
5	俄罗斯	4	1.54	3	0.28	0.75
6	英国	2	0.77	42	3.95	21.00
7	加拿大	1	0.38	8	0.75	8.00
8	德国	1	0.38	0	0.00	0.00
9	以色列	1	0.38	0	0.00	0.00
10	印度	1	0.38	0	0.00	0.00

表 2.2.2 “光控相控阵天线技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	浙江大学	12	4.62	55	5.17	4.58
2	中国电子科技集团	12	4.62	22	2.07	1.83
3	Analog 光电有限责任公司	9	3.46	129	12.14	14.33
4	航天恒星科技有限公司	9	3.46	26	2.45	2.89
5	韩国科学技术院	6	2.31	29	2.73	4.83
6	吉林大学	6	2.31	14	1.32	2.33
7	长春理工大学	5	1.92	39	3.67	7.80
8	清华大学	5	1.92	34	3.20	6.80
9	中国人民解放军国防科技大学	5	1.92	5	0.47	1.00
10	Quanergy 系统公司	4	1.54	33	3.10	8.25

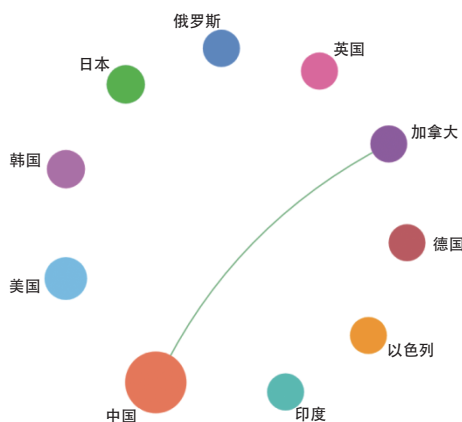


图 2.2.1 “光控相控阵天线技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

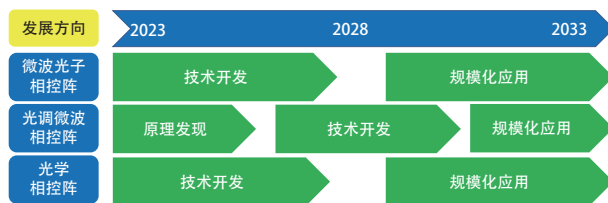


图 2.2.2 “光控相控阵天线技术”工程开发前沿的发展路线

高速率、温度稳定性高、可片上集成的波长可调激光器；② 分光器——易加工、一致性高、低损耗的新型层叠透镜式分光移相器；③ 光相位调制器——易控制、易扩展、易制备、高稳定、高功率、高可靠、高隔离、低串扰、低延迟、低色散、低损耗、低噪声、低成本的液晶光调制器、硅基热光调制器、色散光纤调制器、超材料光调制器；④ 光天线阵列——扫描范围大、调制效率高、集成度高、时空分辨率高、辐射效率高的阵列架构。

总体而言，光控相控阵的典型技术特点是低成本、高性能、制程占优、生存能力强和想象空间大。未来，光控相控阵有望在无线微波回传、蜂窝无线通信、星地毫米波通信、空间光通信、自动驾驶雷达、雷达探测与制导、生物医疗、空天地一体化智能网络等多个场景中获得广泛应用。典型地，对于低轨道星联网，光控相控阵的低成本、高性能、大带宽、抗辐照等优势有助于超大规模卫星相控阵的快速部署，有望在 5 年内得到规模化部署与应用。同时，光控相控阵可作为新型智能反射表面，在改造空天地一体化电波传播环境信道和构建智能可调电磁环境辅助的 6G 无线通信与智能网络中发挥重要作用。

### 2.2.2 基于脑机接口的无人系统控制技术

近年来，人工智能技术的进步推动了无人系统技术朝着智能化的方向迅猛发展，但在面对无人系统可能遭遇的各种突发、异常状况时，基于人工智能的无人系统的表现不尽如人意。将“脑”和“机”的智能相融合，充分发挥两种不同智能的优势，是进一步实现无人系统智能化的重要方向。脑机接口技术的发展使得这种“脑”和“机”的智能融合成为可能。

脑机接口的概念最早于 1970 年由 Jacques Vidal 提出，主要指在人机交互中使用大脑信号来控制计算机或者外部设备。在之后很长一段时间里，受限于软、硬件条件的制约，对大脑意图解码的准确率和可靠性都相对较低，并不能满足无人系统的控制需求。随着近年来脑机接口技术的飞跃式发展，不仅在识别大脑的主动意图上实现较高准确性，同时也能够实现对特定大脑状态的被动监测，于是研究者们开始将脑机接口与无人系统技术相结合。通过特定的实验范式如事件相关电位、稳态视觉诱发电位或运动想象等，通过脑机接口技术较准确地提取受试者的主观意图，实现对无人系统的过程控制。但受限于脑机接口较低的信息传输速率，这种过程控制方式效率很低。为此，研发人员将脑机接口的识别结果转变为预先定义好的特定指令，无人系统基于指令独立自主进行特定的系列动作，实现无人系统多任务的脑机协同控制，这种改进极大地提升了对无人系统的控制效率，但脑与机仍然是两个独立的智能控制系统，并未构成脑机统一的决策与控制系统。近期，研究人员发现在无人系统的目标识别、路径规划等任务中，将脑和机通过决策层或特征层的融合，可以实现更优的任务表现，这使得基于脑机接口的无人系统技术由单向的控制转变为脑机双向的交互和融合。未来，脑机接口技术不仅仅为无人系统提供命令或指令，更可深度融合于目标识别、

路径规划、任务管理等无人系统的日常任务中，从而实现真正的人机融合与智能增强。

“基于脑机接口的无人系统技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家分布情况见表 2.2.3。中国的优势明显,专利公开量和被引数均排名第一,专利公开量约为第二名美国的 15 倍,但平均被引数低于美国。中国的国际合作对象主要是德国,而美国国际合作对象主要是印度,其余国家独立研发(图 2.2.3)。排名前十的专利主要产出机构(表 2.2.4)中,北京理工大学、中国人民解放军军事科学院军事医学研究院等产出的专利最多,但与其余 8 家机构差距较小。平均被引数方面,东南大学最高,其后为上海大学、天津大学和北京理工大学,三者数据相近。另外,前十机构均来自中国,体现了中国对该方向较高的关注度和较强的研发能力。

“基于脑机接口的无人系统控制技术”工程开发前沿的发展路线如图 2.2.4 所示。未来,得益于脑机接口技术的发展,便携化、高信噪比和高通量的脑电信号采集设备将使得对脑功能的解码更为准确,功能近红外光谱、眼动信息等多模态生理信号有望集成化并实现同步采集,互补的多模态信息也将进一步增强脑机接口的可靠性。在此基础上,在基于脑机接口的无人系统中,其脑机控制方式将由低自由度的离散控制方式向高自由度的连续控制方式发展。在这一阶段,无人系统的智能化程度将由脑机的简单结合向脑机融合的混合智能方向发展,其特点是脑与机将在决策层深度融合,从而扩展无人系统对未知、突发状态的应对能力。随着脑机接口和人工智能技术的进一步发展融合,其脑机控制方式将发展为任务层级的控制,此时无人系统自身将更智能化,脑将负责更高级别的认知决策任务。在这一阶段,“脑”与“机”将在信息层进行深度融合,双向的信息感知与决策融合将最终形成一体化的智能体,其特点在于“脑”与“机”将产生协同效应而能够共同解决问题,扩展认知能力,最终使得无人系统更好地处理复杂问题、完成高难度的任务。从系统实用化的角度分析,目前基于脑机接口的无人系统技术已初步完成原理验证并进入到产品研发阶段,后续有望在 10 年内实现从原理样机到小规模应用、进一步到多领域推广应用的阶段。脑机融合是基于脑机接口的无人系统发展的必然趋势,“脑”“机”双智能的结合可以带来许多创新和应用,有望在交通安全、航空航天航海、助老助残、医疗辅助、救援救灾、工业控制等领域产生更多积极影响。

表 2.2.3 “基于脑机接口的无人系统控制技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	370	79.74	1 047	77.90	2.83
2	美国	25	5.39	129	9.60	5.16
3	韩国	20	4.31	64	4.76	3.20
4	印度	19	4.09	12	0.89	0.63
5	日本	11	2.37	24	1.79	2.18
6	德国	5	1.08	10	0.74	2.00
7	法国	4	0.86	23	1.71	5.75
8	巴巴多斯	2	0.43	27	2.01	13.5
9	俄罗斯	2	0.43	4	0.30	2.00
10	巴西	2	0.43	0	0.00	0.00

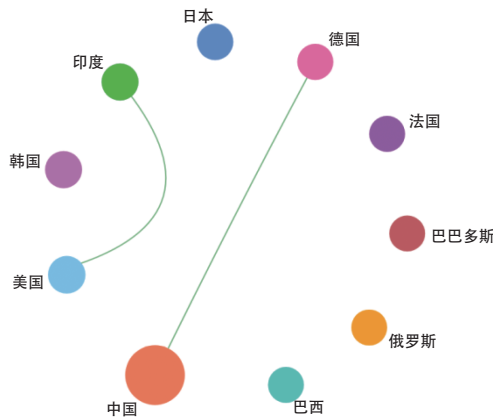


图 2.2.3 “基于脑机接口的无人系统控制技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.4 “基于脑机接口的无人系统控制技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	北京理工大学	8	1.72	51	3.79	6.38
2	中国人民解放军军事科学院军事医学研究院	8	1.72	25	1.86	3.12
3	天津大学	7	1.51	45	3.35	6.43
4	西北工业大学	7	1.51	19	1.41	2.71
5	上海大学	6	1.29	39	2.90	6.50
6	北京航空航天大学	6	1.29	30	2.23	5.00
7	西安交通大学	6	1.29	27	2.01	4.50
8	东南大学	5	1.08	38	2.83	7.60
9	浙江大学	5	1.08	20	1.49	4.00
10	北京邮电大学	5	1.08	9	0.67	1.80

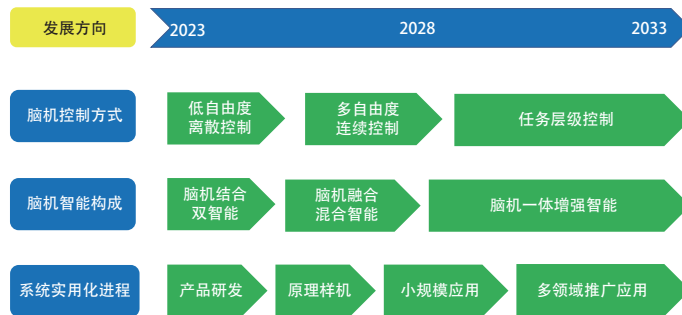


图 2.2.4 “基于脑机接口的无人系统控制技术”工程开发前沿的发展路线

### 2.2.3 面向多样性计算的算力网络构建技术

随着大数据和人工智能技术的快速发展,各行业对计算能力和存储能力的需求也越来越大。面向多样性计算的算力网络构建技术的主要目标是构建一个能够满足异构计算需求的算力网络,以提高计算效率、降低能耗,解决传统计算模型在处理大规模数据以及复杂任务时遇到的算力不足和资源不够等问题。而面向多样性计算的算力网络构建技术通过联合各种计算资源,形成一个强大的算力网络,能够更好地满足不同应用场景下的计算需求,实现高效的数据计算和处理。

面向多样性计算的算力网络构建技术因其能够通过将计算资源进行整合和优化,实现高效的计算能力,具有广阔的应用前景。世界各国政府正针对计算中心与数据中心的资源共享开展系列重要计划,并取得一些突破性进展。美国政府推出高性能计算和数据资源共享联邦计划 XSEDE,旨在通过网络连接多个高性能计算中心,为研究人员和工程师提供广泛的计算和数据资源。欧洲联盟推动了欧洲超级计算机计划(EuroHPC),旨在建立欧洲范围内的超算网络,通过超级计算机联盟 PRACE,给欧洲研究机构 and 工业界提供高性能计算资源。以谷歌、微软、亚马逊为首的科技巨头也分别推出各自的分布式云服务或分布式计算引擎,以实现大规模资源的跨地域共享和调度。在研究领域,美国劳伦斯伯克利国家实验室、洛斯阿拉莫斯国家实验室等针对大规模科学数据共享、应用统一运行时框架进行了探索和试验。

中国该领域相关研究主要由科研机构、高校和电信运营商开展。在东数西算和超算互联网建设背景下,中国科学院计算机网络中心牵头建设国家高性能计算环境,有效整合高性能计算资源,提供具有统一访问入口的高性能计算服务。以国家超级计算济南中心和鹏城实验室分别牵头建设的山东省一体化算力网络和中国智算网络等为代表的新兴算力共享平台也在高速发展,有效推动各省市区的算力、数据、软件等资源的互联与协同。

全球多个国家、地区在开展该领域的研究。如表 2.2.5 和表 2.2.6 所示,美国是该领域专利产出最多的国家,占比高达 74.45%,这表明美国在面向多样性计算的算力网络构建技术方面处于世界领先地位,代表机构有 EMC IP 控股公司、国际商业机器公司(IBM)等。中国是第二大专利产出国,占比为 17.71%。

面向多样性计算的算力网络构建技术通常需要多个机构和企业之间的紧密合作,才能实现数据共享、技术协同和资源优化。目前全球范围内各个机构和企业之间的合作还很少,目前仅有美国和印度间展开了合作(图 2.2.5),机构之间的合作网络尚未形成。因此亟须形成国家和机构之间的合作网络,通过开展科研合作、技术交流和项目合作,来推动该技术的发展和应用。

如图 2.2.6 所示,面向多样性计算的算力网络构建技术在未来 5~10 年有以下几个重点发展方向。

1) 算力网络架构优化:在 Y.2501 算力网络框架的基础上,进行算力网络架构设计和拓扑结构优化。通过建立更加灵活、高效的基础底层通信网络结构,实现更好的计算资源调度和管理,以提高计算能力和性能。

2) 异构资源融合:不同类型的计算资源如中央处理器(CPU)、图形处理器(GPU)、现场可编程门阵列(FPGA)等在算力网络中的融合会继续深入发展。随着计算资源的进一步创新和性能提升,算力网络将更好地利用这些异构资源,提供更高效率的计算能力。例如,出现更强大和高效的加速器、新型服务器架构和处理器设计,进一步推动算力网络的发展。

3) 跨域资源管理与任务协同:跨域资源管理与任务协同的目标是实现计算资源的高效利用和任务执行的高性能。通过跨域资源管理与任务协同,算力网络可以充分利用来自不同领域的计算资源,提高资源

表 2.2.5 “面向多样性计算的算力网络构建技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	475	74.45	2 476	81.61	5.21
2	中国	113	17.71	328	10.81	2.90
3	德国	9	1.41	11	0.36	1.22
4	加拿大	7	1.10	24	0.79	3.43
5	俄罗斯	7	1.10	22	0.73	3.14
6	英国	7	1.10	8	0.26	1.14
7	印度	5	0.78	5	0.16	1.00
8	荷兰	4	0.63	0	0.00	0.00
9	日本	2	0.31	4	0.13	2.00
10	爱尔兰	1	0.16	147	4.85	147.00

表 2.2.6 “面向多样性计算的算力网络构建技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	EMC IP 控股公司	67	10.50	168	5.54	2.51
2	国际商业机器公司 (IBM)	43	6.74	208	6.86	4.84
3	美国银行有限公司	41	6.43	142	4.68	3.46
4	Nuance 通信有限公司	25	3.92	110	3.63	4.40
5	ReliaQuest 控股有限责任公司	18	2.82	26	0.86	1.44
6	微软知识产权许可有限责任公司	15	2.35	49	1.62	3.27
7	Gamalon 有限公司	11	1.72	49	1.62	4.45
8	英特尔公司	10	1.57	12	0.40	1.20
9	北京邮电大学	9	1.41	53	1.75	5.89
10	山东浪潮科学研究院有限公司	9	1.41	1	0.03	0.11

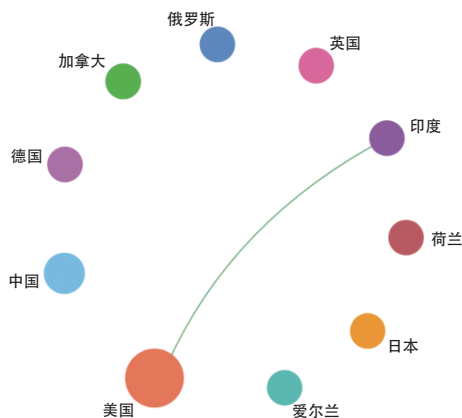


图 2.2.5 “面向多样性计算的算力网络构建技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

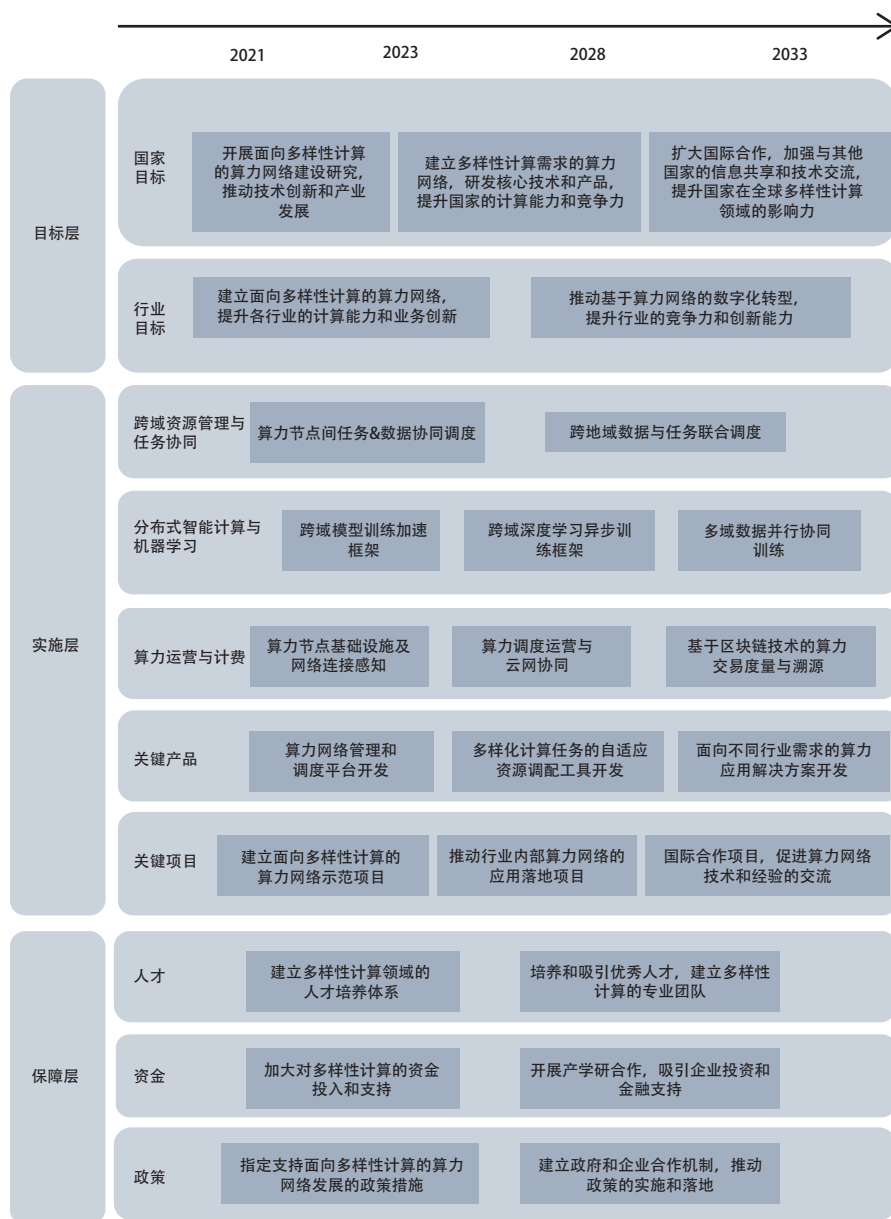


图 2.2.6 “面向多样性计算的算力网络构建技术”工程开发前沿的发展路线

利用率和性能, 同时协同多个任务的执行, 实现更高效的计算和数据处理。这对于促进多样性计算的发展和具有重要应用意义。

4) 算力运营与交易: 算力交易是实现算力网络体系中市场自发调节、协调各服务主体收益的重要手段, 须通过对算力资源的使用情况与负载指标进行多维度、多粒度的信息采集, 建立资源使用时空模型, 实现合理计费。

5) AI 与算力网络的融合: AI 技术的迅速发展将与算力网络相互融合, 为计算任务提供更强大的智能和学习能力。算力网络将通过与深度学习、机器学习、自然语言处理等 AI 算法和技术的集成, 实现智能的资源管理和自动化决策, 以提供更智能化和自适应的计算能力。

6) 安全性与隐私保护技术的加强：随着大规模数据的使用和计算资源的分布，保护数据安全和隐私将成为算力网络发展的重要关注点。未来的算力网络将加强安全性技术，如数据加密、访问控制和身份验证等，以确保计算任务和数据的安全性和对隐私的保护。

在未来的发展趋势中，面向多样性计算的算力网络构建技术将逐渐成为各个领域数据处理和分析的核心技术，将广泛应用于云计算、大数据分析、人工智能、物联网等领域，并推动这些领域的发展和 innovation。此外，该技术还有很大的发展潜力，可以为公共安全、智慧城市、医疗健康、工业制造等领域提供更高效、智能的解决方案。

---

---

## 领域课题组成员

### 审核专家组：

组长：潘云鹤 费爱国

成员（按姓名拼音排序）：

第一组：刘泽金 罗先刚 吕跃广 谭久彬 张广军

第二组：丁文华 段宝岩 何友 吴伟仁 余少华

第三组：柴天佑 陈杰 樊邦奎 费爱国 廖湘科 卢锡城 潘云鹤 赵沁平

学科召集人（按姓名拼音排序）：

陈文华 程鹏 李东升 刘东 刘建国 刘伟 陆振刚 皮孝东 辛斌 杨易 张建华

### 图情专家：

文献：李红 赵惠芳 熊进苏 王凯飞 陈振英

专利：杨未强 梁江海 刘书雷 霍凝坤 吴集 刘焱 杨子宁

执笔组（按姓名拼音排序）：

研究前沿：陈晓明 方崇荣 高飞 韩亚洪 韩瑜 何建平 金石 李戈 刘建国 骆军委  
吴飞 谢涛 于海洋 张颖 周晔 邹灿文

开发前沿：陈文华 方斌 高阳 郝爱民 黄善国 林丰涵 林京 刘莎 骆欢 皮孝东  
唐卓 谢松云

### 工作组：

联络指导：高祥 张佳 张纯洁 邓晁煌

项目秘书：翟自洋 谌群芳 杨未强 胡晓女

项目助理：韩雨珊