

## 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。2016—2021 年, 各前沿相关的核心论文发表情况见表 1.1.2。

##### (1) 空天地海一体化通信组网理论与技术

空天地海一体化网络是以地基网络为基础, 天基网络、空基网络和海基网络为补充和延伸, 为广域空间范围内的各种网络应用提供泛在、智能、协同、高效的信息保障基础设施。在空天地海一体化网络中, 空基网络由高空通信平台、无人机自组网络等组成, 具有覆盖增强、使能边缘服务和灵活网络重构等作用; 天基网络由各种卫星系统构成天基骨干网和天基接入网, 实现全球覆盖、泛在连接、宽带接入等功能; 地基网络主要由地面互联网、移动通信网组成, 负责业务密集区域的网络服务; 海

基网络主要是通过海上无线网络、海上卫星网络等满足海洋活动的通信需求。通过多维度网络的深度融合, 空天地海一体化网络可以有效地综合利用各种资源, 进行智能网络控制和信息处理, 从而游刃有余地应对需求迥异的网络服务, 实现“网络一体化、功能服务化、应用定制化”的目标, 在广域移动覆盖、物联网、智能交通、遥感和监控、军事等领域中展现出广阔的应用前景。天基网络——特别是低轨卫星星座相关技术——处于核心地位, 是构建无所不在、无所不联、无所不知的空天地海一体化网络的关键使能技术。目前, 美国 SpaceX 公司的“Starlink”（星链）项目是低轨卫星星座竞争中的佼佼者, 其计划发射 4.2 万颗卫星, 构成一个可以覆盖全球的宽带卫星通信网络。截至 2022 年 8 月, 已有超过 3 000 颗在轨低轨卫星, 全球已有超越 50 万宽带接入订阅用户。空天地海一体化网络同时面临着高动态、强异构、超复杂、多需求等挑战, 其主要研究方向包括网络架构设计、通信协议设计、网络资源管理与优化、高效传输技术以及网络安全

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	空天地海一体化通信组网理论与技术	41	3 283	80.07	2019.6
2	可信人工智能理论与算法	157	29 067	185.14	2019.5
3	互补金属氧化物半导体 (CMOS) 硅基太赫兹成像技术	122	1 528	12.52	2018.3
4	硅基人工智能光子计算芯片理论与设计	86	2 505	29.13	2019.8
5	空间引力波超精密探测技术	220	38 208	173.67	2018.9
6	原子尺度集成电路制造	69	5 595	81.09	2018.7
7	脑机接口技术临床应用研究	219	8 489	38.76	2018.8
8	类人机器人行为发育学习与认知技术	77	519	6.74	2018.5
9	量子电路与芯片理论	57	7 432	130.39	2019.0
10	未来工业互联网体系架构与全要素互联技术	77	5 146	66.83	2019.4

注: 序号 3、4 这两个前沿采用全部检出论文作为核心论文。

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	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	空天地海一体化通信组网理论与技术	2	2	6	5	10	16
2	可信人工智能理论与算法	5	14	22	31	32	53
3	互补金属氧化物半导体 (CMOS) 硅基太赫兹成像技术	22	25	22	17	20	16
4	硅基人工智能光子计算芯片理论与设计	3	6	5	10	25	37
5	空间引力波超精密探测技术	25	29	34	35	43	54
6	原子尺度集成电路制造	10	10	12	12	12	13
7	脑机接口技术临床应用研究	25	31	35	39	41	48
8	类人机器人行为发育学习与认知技术	12	12	14	14	13	12
9	量子电路与芯片理论	7	7	7	8	14	14
10	未来工业互联网体系架构与全要素互联技术	4	6	12	14	15	26

与隐私等。

### (2) 可信人工智能理论与算法

可信人工智能，旨在增强复杂人工智能系统和算法（如深度神经网络）的可信度。具体地，可信性概念蕴含了不同层面的含义：① 人工智能系统在知识表征方面的可解释性与可量化性；② 人工智能系统在表达能力方面的可解释性与可量化性，包括泛化能力、鲁棒性、公平性与隐私保护性等；③ 人工智能系统在学习与优化能力方面的可解释性；④ 众多人工智能算法内在机理的可解释性。

为了推进可信人工智能的发展，当前的研究热点聚焦于：① 定性或定量地解释人工智能系统建模的知识表征，如可视化深度神经网络中间层特征所蕴含的语义信息、量化输入变量对系统决策的重要性等；② 评估、解释、提升人工智能系统的表达能力，包括泛化能力、鲁棒性和公平性等；③ 解释人工智能系统优化算法有效性的原因，探索并发现当前经验性优化算法的潜在缺陷等；④ 设计可解释的人工智能系统，在系统设计阶段增强可信性。

尽管可信人工智能近年来受到广泛关注，但几大关键性瓶颈问题仍少有涉及与探索。这些问题包括：① 探索、定位并量化决定人工智能系统表达能力的本质因素；② 对众多经验性的人工智能

算法内在机理的统一与解释，揭示众多算法有效性背后的公共本质，实现对前人算法的去芜存菁；③ 理论驱动的人工智能系统的设计与优化。事实上，国际上已有少数研究机构与团队（如麻省理工学院、上海交通大学等）发现上述关键性问题，并对这些问题做出一些前瞻性探索。

### (3) 互补金属氧化物半导体 (CMOS) 硅基太赫兹成像技术

太赫兹成像技术利用连续或脉冲太赫兹波作用于目标物，用太赫兹探测器接收透过物体或被物体表面反射的太赫兹波信号，获得目标各点透射或反射的太赫兹波强度和相位信息，通过频谱分析和数字信号处理实现目标成像。在电磁波谱中，太赫兹波位于微波与红外波段之间，具有高透射性、低能量性、相干性、瞬态性等特点。这使得太赫兹成像技术具有传统成像技术（如可见光、超声波和 X 射线成像）无法比拟的优势，在国家安全、安全检查、生物医学以及环境监测等方面表现出广阔的应用前景。近年来，随着硅基工艺的不断升级，其射频性能得到很大提升，基于硅基工艺实现的太赫兹成像技术引起国内外学者的研究兴趣。互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 太赫兹成像技术具有小尺寸、低功耗等特点，能够满足高集成和低成本的大

赫兹成像商用需求。CMOS 硅基太赫兹成像技术已经在分辨力方面取得了多项技术突破，康奈尔大学基于 55 nm BiCMOS（双极互补型金属氧化物半导体）工艺研制出具有 2 mm 横向分辨力和 2.7 mm 距离分辨力的 220 GHz 成像系统。但如何突破衍射极限，进一步提升成像分辨力，依然是重要的研究方向。此外，针对硅基工艺在太赫兹频段的复杂寄生和耦合效应、太赫兹集成电路分布效应以及太赫兹源同步技术的研究，也是该领域的研究重点。

#### （4）硅基人工智能光子计算芯片理论与设计

人工智能（artificial intelligence, AI）是引领未来的战略性技术，而算力是支撑人工智能蓬勃发展的坚实基础。随着微处理器性能提升滞缓，摩尔定律面临失效，传统电子计算芯片由于“功耗墙”和“内存墙”的存在难以适应 AI 算力增长需求。与电子相比，光子作为信息载体具有先天的优势：低延迟、低功耗、高通量和并行性。硅基人工智能光子计算芯片通过利用硅基光子集成工艺，在硅基波导内基于光的物理传输特性实现线性模拟计算，可为人工智能应用提供具有强劲算力的光学芯片方案。

近年来，硅基人工智能光子计算芯片研究受到国内外广泛关注。主要研究方向包括可应用于图像处理的矩阵卷积光子计算芯片、积分与微分光子芯片、复数域傅里叶变换光子芯片、储水池光子计算芯片、光子神经形态计算（类脑计算）芯片、NP 问题的启发式算法求解器、脉冲神经网络光子芯片等。

硅基光子计算被视为后摩尔时代突破传统电子计算极限的潜在可行方案。随着硅基光电子集成度的不断提高，光子计算芯片不仅能极大地加快 AI 算法处理速度，同时也为新型处理器架构创造了可能。将光子模拟计算和电子数字逻辑运算结合，实现优势互补的光电协同信号处理架构，将变革现有计算系统模式，构建高算力、低功耗的新型计算基础体系，是未来必然的发展趋势。

#### （5）空间引力波超精密探测技术

空间引力波探测是指利用多颗卫星在太空中组成巨型激光干涉仪进行引力波探测的方法。

空间引力波探测主要面向毫赫兹附近的引力波探测频段，该频段在引力波源方面有类型丰富、数量众多、空间分布多样的优势，在对应的引力波信号方面有强度大、持续时间长等特征，这些因素使得毫赫兹频段成为引力波探测中的黄金频段，对于天体物理、宇宙学和基础物理等的研究都具有十分重要的意义。

空间引力波探测的核心技术包括两大方面：一是建立引力波探测的“探头”，利用一组在引力场中做近乎理想惯性运动的参考物体为测量引力波导致的距离变化提供空间位置上的基准点，对应的技术称为空间惯性基准技术，需要攻克高精度惯性传感、微牛顿级推进、高精度无拖曳控制等难题；二是建立引力波探测的“尺子”，利用激光测量位于不同卫星上的惯性基准点之间的距离变化，对应的技术称为星间激光干涉测量技术，需要攻克超稳光学平台、长寿命星载稳频激光、弱光锁相等难题。

空间引力波探测还要求革新航天器研制理念，比如原本属于卫星平台的推进器现已成为构建引力波“探头”的关键一环，卫星平台的结构和热稳定性等也已成为决定引力波探测能否成功的关键因素，因此引力波探测航天器的设计和研制需要打破平台和载荷之间的界限，作为一个整体来考虑。

空间引力波探测对于任何一个科技强国都是一大挑战。欧洲航天局在经过近 30 年准备后，初步计划在 21 世纪 30 年代发射人类第一个空间引力波探测器，美国计划以参与者身份加入该项目；日本一直在推动发射自己的空间引力波探测器；中国正在积极开展空间引力波探测研究，力争抢占该领域制高点，科技部已于 2020 年启动实施“引力波探测”重点研发计划，重点包括对空间引力波探测关键共性技术的支持。

### （6）原子尺度集成电路制造

所谓原子尺度，在集成电路中一般是指原子层厚度的尺度。原子层厚度取决于原子大小和晶格结构，通常是在 0.1 nm 的量级范围，比如 0.2~0.5 nm。集成电路发展到 10 nm 节点以下，关键物理尺寸、关键微图形的误差容许范围、测量设备的精度等都已进入原子尺度范围。晶体管结构中越来越多的关键层厚度或宽度达到几个原子层厚度的范围，比如栅介质厚度、功函数金属栅材料厚度、鳍式场效应晶体管（fin field-effect transistor, FinFET）中 Fin 的宽度等均不超过 10 个原子层，集成电路制造工艺中常用的原子层沉积（atomic layer deposition, ALD）设备，每个周期（cycle）能够实现 0.03~0.07 nm 厚度的薄膜沉积，远低于原子层厚度。除了这种绝对尺度，在集成电路大规模量产中，为了提高良率，更为关注厚度或宽度的控制范围，比如功函数金属栅材料厚度偏差不能超过一个原子层，否则晶体管阈值电压和性能将出现不可接受的偏差，包含有上百亿个晶体管的芯片将会失效。为了确保上述尺寸的可精确测量，集成电路制造中使用的高精度测量设备其最高精度已经达到 0.01 nm，小于一个原子层厚度。除此之外，学术界对于用二维材料、氧化物沟道材料制备晶体管等相关元器件及简单电路的研究较多，也为将来进一步实现原子尺度集成电路制造提供新的途径。

### （7）脑机接口技术临床应用研究

脑机接口系统旨在建立一种脑与外部设备之间直接的双向交流通道，以同时实现对外部设备的控制和对脑的调控，从而达到监测脑状态、治疗脑疾病、增强脑功能等目的。自 20 世纪 70 年代“脑机接口”概念首次提出，脑机接口技术迎来了长足发展，并在近十年呈现爆炸式发展趋势。脑机接口关键技术包括：用于采集大规模神经信号的电极设计、制造与微创植入技术；从复杂大规模神经信号中估计脑状态的神经解码技术；用于调控神经群活动的电、磁、光刺激干预技术；基于神经反馈的智能优

化神经调控技术；融合神经信号存储、解码、干预与调控为一体的高性能、低功耗智能芯片技术等。

脑机接口技术在精神/神经疾病的诊断、治疗、康复等方面具有丰富广泛的应用场景。例如，面向恢复运动和感知功能的脑机接口主要通过神经信号解码大脑的运动状态，之后用于驱动外界设备，并同时直接向大脑提供感觉反馈，为治疗瘫痪等运动失能疾病提供了全新手段。近年来，这一类脑机接口进一步延伸到探索语言功能解码、视力功能恢复等更加精细的运动和感知功能修复。面向认知功能增强的脑机接口主要通过外界设备重建或者增强脑区间的沟通通路，进而修复或增强特定的认知功能，例如开发记忆假体以探索增强患者受损的记忆功能。面向神经和精神疾病治疗的脑机接口主要通过利用神经信号实时引导外界设备刺激脑区以精准干预疾病，这一类脑机接口在治疗帕金森综合征、癫痫、难治性抑郁症等重大神经和精神疾病方面展现了巨大潜力。

虽然脑机接口技术的临床应用前景广阔，但在性能、精准、高效、安全等方面仍存在众多挑战，例如：开发长期稳定、生物兼容、时空分辨率高的神经信号采集及神经刺激硬件；开发精确、稳定的脑机接口解码算法，以达到对各种复杂外部设备的精细控制；开发精准、鲁棒的脑机接口调控算法，以达到对各种大脑状态有效、安全的调控；研究脑机接口技术的伦理与数据安全等。

### （8）类人机器人行为发育学习与认知技术

类人机器人能够在与周围物理世界的交互中，以发育学习方式强化自身行为能力，提升机器人的运动、操作，以及理解、记忆和推理等类人认知水平，表现出更加智能的行为动作。相关技术称为类人机器人发育学习和认知技术。其研究方向包括：① 自主行为发育；② 具身智能（机器人在真实物理环境下执行各种各样的任务中完成本体结构和智能的进化过程）；③ 可供性研究（机器人与环境之间的潜在行为以及这些潜在行为的影响）；④ 机

机器人学习平台（仿真软件或者实物真机）。因此，首先需要开发具有学习和认知能力的类脑构架的新算法，尤其是记忆和学习。开发行为认知系统，可以使机器人像人类一样做到在运动技能和行为智能上主动、内驱和终身地学习与发育。在不同环境和任务中的可泛化的感知表示方法以及交织的多模态感知联合学习也至关重要。其次，将人工智能看作具有物理实体去进行研究，在仿真环境中研究机器人身体随自然选择的变化——区别于将 AI 仅看作算法，这是完全不同的范式。同时，对机器人任务的可供性研究在救援和探索等任务中是必要的。分析机器人与环境之间的潜在行为以及这些潜在行为的影响，可以使机器人更好地在未知环境中完成任务。最后，需要进一步改进或者开发机器人平台，这更有利于对机器人与人类、环境之间的相互作用功能关系进行细致分析。

### （9）量子电路与芯片理论

量子电路模型是描述量子算法的一种通用语言，其将量子算法表示为一系列量子门和测量等操作。许多著名量子算法（包括 Shor 算法、Grover 算法和 HHL 算法等）都使用量子电路模型来给出具体描述。除此之外，量子电路模型也被广泛应用于量子物理、化学系统的模拟。目前，量子计算已经进入含噪中尺度量子（noisy intermediate-scale quantum, NISQ）时代，物理实验硬件所能支持的量子电路规模、深度和量子比特数都存在固有限制，量子电路的优化程度直接影响着量子计算机的适用范围。针对各种实际计算问题，设计规模尽量小、深度尽量浅、比特数尽量少的量子电路是量子电路领域的重要研究方向之一。另外，刻画不同资源禀赋下量子电路的计算能力以及与经典电路计算能力的差异也是一个重要研究方向。

量子芯片是将量子电路小型化、集成化的工程化实现，是量子计算与量子通信等任务实现实用化与商业化的必然路径。根据量子电路所依赖物理平台的不同，量子芯片的技术路线可以分为超导量子

芯片、半导体量子点量子芯片、光量子芯片等。目前，超导量子芯片从可集成的量子比特规模上领先于其他系统；半导体量子点系统由于其良好的扩展性和集成性，是实现固态量子计算的有力候选者；光学量子系统由于传统光芯片工艺和光通信技术的积累，在工程层面具有天然优势。量子芯片目前最主要的挑战是量子门的保真度、弛豫时间、串扰和测量误差，未来发展的重要方向之一是实现更大规模的电路集成，并不断提升量子比特相干特性、操控精度与速度以及可扩展性。

### （10）未来工业互联网体系架构与全要素互联技术

“工业互联网”一词最早由美国通用电气公司（GE）于 2012 年提出，主要面向预测性维护，走向工业自动化智能化。随后，以德国为代表的欧洲国家于 2013 年提出“工业 4.0”，中国于 2015 年提出“中国制造 2025”，赋予了“工业互联网”更丰富的内涵，逐渐完善形成当前工业互联网全要素体系。

工业互联网体系架构包括基础网络、平台能力和安全保障三大方面。全要素互联包括人、机器、物料、法则、环境等通过网络、标识系统的连接。同时，也涵盖贯穿价值链、供应链、产业链及研发、生产、物流等全生命周期的连接技术。这些技术包括四个方面：一是互通互联、确定性传输、标识解析以及算网融合等网络技术；二是数据的采集、清洗、训练、分析等数据技术；三是信息物理系统（cyber-physical systems, CPS）、模型和应用分析、供应链和生命周期管理等智能化平台和管理技术；四是网络、数据、物理安全等安全技术。

工业互联网已经由概念共识进入尝试部署阶段。平台、标识、5G 等具体技术已经开始应用于工业中。工业互联网标识解析体系已在中国五大顶级节点上线运行。其技术和应用呈现以下趋势：  
① 更具体，基于工业互联网总体体系架构，考虑衍生出适用于指导各类场景落地的子架构，拓展中

小企业应用；②更融通，信息技术（IT）、运营技术（OT）和通信技术（CT）进一步一体化发展，解决云网生态互联问题，并通过虚实结合、数字孪生、确定性无损连接等提升生产制造各个环节的效率和质量；③更安全，隐私保护、数据可信技术将进一步受到重视，解决人员、系统、设备的安全问题；④更完备，以通信领域的优势推动整个自动化系统的发展，构筑先进的工业全要素互联体系，贯通上下游，支持新的工业结构的形成。

### 1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

#### 1.2.1 空天地海一体化通信组网理论与技术

空天地海一体化通信组网是融合空基、天基、地基、海基的一体化组网技术，它能弥补传统地面网络在覆盖性、组网灵活性和节点差异性方面的不足，是实现“网络随地接、服务随心享”的重要条件和基础设施。然而，由于现有各通信系统机制不统一，资源分布差异性大，无线信道更加复杂多变，且网络安全性难以保证，空天地海一体化网络亟须在网络架构、通信协议、资源管控和高效传输四方面突破，因此对于该领域的技术前沿解读也从这四方面展开。

第一，在网络架构设计方面，主要有两大趋势。国际移动通信标准化组织 3GPP（3rd Generation Partnership Project，第三代合作伙伴计划）力主推进非地面网络（non-terrestrial network，NTN）（包含卫星、无人机等所有非地面网络）与地面蜂窝网络融合，使得 NTN 成为 5G 网络以及未来 6G 网络中的一部分，从而形成互联互通的空天地海一体化网络。另一个趋势是以软件定义网络和网络功能虚拟化技术为核心的虚拟化网络架构，形成高效、全局可控、低成本的空天地海一体化网络管控架构。该方向的主要研究机构包括滑铁卢大学、清华大学、北京交通大学等。

第二，在通信协议设计方面，CCSDS 协议通

过对相邻帧的迭代处理，可实现空天地海网络中有效载荷限制下近乎无损的多媒体流传输，极大地扩展了空间飞行任务信息系统的配套交换能力；DVB 系列协议克服了传统上行链路功率控制对射频前端体积的限制，有效提高了卫星通信链路的频谱效率，从而能进行空间段的优化，并大幅度降低基于卫星的 IP 服务成本。然而，这两种协议提出的时间较早，目前包括 3GPP 在内的多家组织和机构也在探索新型空天地海一体化网络通信协议。

第三，在网络资源管控方面，目前主要有两个研究趋势：一是 AI 驱动的资源管控技术，它能适应传统空天地海融合网络中网络节点多、决策空间大、资源异构的特点，从而有效提高网络资源的利用率；二是以服务功能链或者网络切片为载体的资源调度技术，它通过软件定义网络和网络功能虚拟化技术将全网资源切片化，在保障用户之间业务隔离性的同时，亦能保障多维需求指标的满足，从而实现未来网络服务定制化的关键目标。该方向的主要研究机构包括清华大学、滑铁卢大学、西安电子科技大学、中国人民解放军国防科技大学等。

第四，在高效传输技术方面，星间激光通信被认为是实现高速星间链路的潜在技术，相比于基于射频的星间通信，其可通过更小的天线尺寸实现更高的数据传输速率。同时，由于激光光束的特性，星间激光链路具有更窄的波束和更高的指向性，从而能在消除干扰的同时提供更高的安全性。目前，工程应用中主要的星间链路通信方式仍然是微波通信，预计将于 2023 年年底实现初步的星间激光通信测试及部署。该方向的主要研究机构有北京航空航天大学、西安电子科技大学、东南大学、北京交通大学和美国东北大学等。

此外，低轨卫星星座系统建设也是空天地海一体化通信组网的重要发展方向。铱星移动通信系统是目前最早计划实施并部署的全球覆盖卫星网络，提出于 20 世纪 90 年代，但由于资金和技术等原因，美国铱星公司破产重组，逐渐淡出人们的视野。

2015年，美国SpaceX公司提出的“Starlink”让低轨卫星网络成为学术界和工业界的热点，其宣布将发射上万颗低轨卫星为全球提供高速带宽接入。截至目前，“Starlink”已经完成初步部署，下载速度最高可达301 Mbps，并向几十个欧美国家提供了网络接入。除此之外，中国也有多个预备建设的低轨卫星通信系统，包括“天启”“鸿雁”“蔚星”“星网巨型星座”等，其中最早的预计能于2023年年底完成部署。

“空天地海一体化通信组网理论与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家分布情况见表1.2.1。中国的优势明显，核心论文数排名世界第一，约为第二名加拿大的3倍。中国的国际合作对象主要是加拿大，并与英国、美国和日本等都有一

定程度的合作（图1.2.1）。排名前十的核心论文主要产出机构（表1.2.2）中，滑铁卢大学产出的论文最多；另外，有6家机构来自中国，其余分布在日本、挪威和英国。在机构合作（图1.2.2）方面，中国的5家机构与滑铁卢大学、2家机构与萨里大学的合作较为密切，北京理工大学与挪威奥斯陆大学也有部分合作。施引核心论文数量（表1.2.3）方面，中国排名第一（占比为49.62%），第二名是美国，其余国家的占比均低于10%；排名前十的施引核心论文产出机构（表1.2.4）中，除第五名滑铁卢大学外，其余都来自中国，体现了中国对该方向较高的关注度。

目前，“空天地海一体化通信组网理论与技术”在国内处于不同发展水平，但整体而言，都正处

表 1.2.1 “空天地海一体化通信组网理论与技术”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	中国	35	85.37	2 958	84.51	2019.6
2	加拿大	13	31.71	1 260	96.92	2019.9
3	英国	8	19.51	613	76.62	2019.9
4	日本	7	17.07	781	111.57	2020.0
5	美国	6	14.63	328	54.67	2020.7
6	挪威	3	7.32	499	166.33	2019.0
7	沙特阿拉伯	3	7.32	127	42.33	2021.0
8	新加坡	3	7.32	126	42.00	2020.0
9	澳大利亚	2	4.88	220	110.00	2019.0
10	印度	2	4.88	129	64.50	2020.5

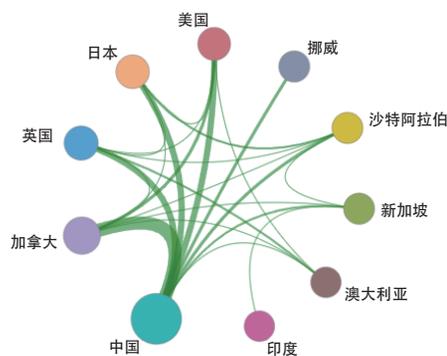


图 1.2.1 “空天地海一体化通信组网理论与技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.2 “空天地海一体化通信组网理论与技术”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	滑铁卢大学	8	19.51	978	122.25	2019.6
2	西安电子科技大学	7	17.07	788	112.57	2019.9
3	东南大学	7	17.07	483	69.00	2020.0
4	清华大学	5	12.20	296	59.20	2019.8
5	日本东北大学	4	9.76	677	169.25	2019.2
6	奥斯陆大学	3	7.32	499	166.33	2019.0
7	北京理工大学	3	7.32	456	152.00	2018.3
8	萨里大学	3	7.32	362	120.67	2020.3
9	北京交通大学	3	7.32	341	113.67	2018.3
10	紫金山实验室	3	7.32	285	95.00	2020.7

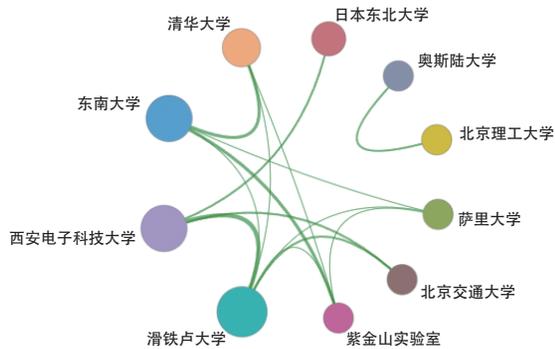


图 1.2.2 “空天地海一体化通信组网理论与技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “空天地海一体化通信组网理论与技术”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	1 634	49.62	2020.4
2	美国	340	10.32	2020.4
3	加拿大	310	9.41	2020.2
4	英国	219	6.65	2020.5
5	韩国	147	4.46	2020.6
6	印度	141	4.28	2020.5
7	澳大利亚	130	3.95	2020.3
8	沙特阿拉伯	119	3.61	2020.6
9	日本	107	3.25	2020.4
10	德国	75	2.28	2020.3

于设计和初步部署阶段。图 1.2.3 为“空天地海一体化通信组网理论与技术”工程研究前沿的发展路线。从技术指标来看，到 2025 年，全球低轨卫星的星座最大规模为千颗级别，预计到 2030 年，单星座

卫星规模将达到万颗级别；从传输性能来看，未来 5 年内，低轨卫星网络的测试速率可达 500 Mbps，延迟最低可实现 60 ms，而在 2027 年到 2032 年，低轨卫星网络的测试速率将达到最低 5 Gbps，延迟

表 1.2.4 “空天地海一体化通信组网理论与技术”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	西安电子科技大学	166	15.26	2020.3
2	北京邮电大学	161	14.80	2020.3
3	东南大学	141	12.96	2020.6
4	清华大学	111	10.20	2020.2
5	滑铁卢大学	110	10.11	2019.9
6	南京邮电大学	76	6.99	2020.6
7	北京航空航天大学	76	6.99	2020.2
8	北京交通大学	67	6.16	2020.0
9	鹏城实验室	66	6.07	2020.7
10	南京航空航天大学	59	5.42	2020.5



(a) 关键指标描述



(b) 发展成度描述

图 1.2.3 “空天地海一体化通信组网理论与技术”工程研究前沿的发展路线

最低能实现 20 ms；从全球卫星网络总吞吐量来看，2022 年到 2024 年将达到 97 Tbps，而在 2025 年到 2028 年将达到总吞吐量 218 Tbps，并在 2032 年前达到 820 Tbps。从发展方向来说，目前该工程研究前沿主要发展方向有空天地海组网构建、星间通信技术、空天地海组网通信协议、卫星多模融合终端和潜在应用开发五个主要方面。其中，在空天地海组网构建方面，目前全球正处于初步的低轨卫星星座骨干搭建与系统终端测试阶段，预计到 2025 年年底完成星座骨干的搭建，并在 2032 年之前根据应用需求补充低轨和极低轨卫星。在星间通信技术方面，当前低轨卫星星座网络星间通信技术较为薄弱，所使用的通信技术主要为微波通信，激光通信尚处研发阶段，预计在 2025 年开始激光传输技术的普及和正式使用。在卫星多模融合终端方面，终端对质量、体积、异构组网兼容、应用集成等方面有较高要求，同时需要适应于多系统、多频段、多网络和多应用等。目前看来，有关卫星多模的技术只处于初步阶段，相关的产品也局限于网关与较大终端，这给野外工作、边境巡逻、应急抢险救援通信及单兵作战等带来极大的不便利性，预计在 2025—2032 年，便携终端将能设计完成并投入市场。在潜在应用开发方面，目前空天地海一体化组网与通信的应用场景主要集中于广域宽带接入、军事通信、物联网、车联网等方面，应用范围比较狭窄。未来将开始对更多潜在业务进行探索，以进一步发挥空天地海一体化网络的潜在能力。除此之外，在 3GPP、IMT-2030 等国际标准化组织的大力推动下，目前空天地海一体化通信与组网的标准化已经正式起步，部分议程正在逐步开展，预计在未来 5~10 年中，相关的技术、协议、指标要求等都将进一步完善。

### 1.2.2 可信人工智能理论与算法

复杂人工智能系统（如深度神经网络）的巨大成功令人工智能领域产生了飞跃式的变革。然而，由于其复杂的结构和庞大的参数体量，这些系统通

常被视为黑盒系统。人们既无法理解系统内在的决策逻辑，也无法解释系统在表达能力方面的优势与缺陷，如解释神经网络为何具有优越的性能但却在对抗攻击下极其脆弱等。人工智能系统在决策过程、表达能力、优化能力等方面的不可解释性，极大地损害了系统的可信、可控与安全性，进而阻碍了人工智能在应用领域尤其是智能医疗、自动驾驶等高风险领域的广泛普及。

为了建立可信、可控、安全的人工智能，学术界与工业界致力于增强人工智能系统与算法的可解释性。具体地，可信人工智能旨在增强人工智能系统在知识表征、表达能力、优化与学习能力等方面的可解释性与可量化性以及增强人工智能算法内在机理的可解释性。

近年来，可信人工智能的主要研究方向包括：  
① 定性或定量地解释人工智能系统所建模的知识表征，如可视化中层表达蕴含的语义信息、量化输入变量对系统决策的重要性等；  
② 评估、解释、提升人工智能系统的表达能力，包括理论证明或实证研究神经网络泛化性、鲁棒性等边界，解释神经网络的泛化性、鲁棒性、表征瓶颈等的内在机理，发展各种方法（如对抗训练）提升系统鲁棒性、公平性或避免隐私泄漏等；  
③ 解释人工智能系统优化算法有效性的内在机理，探索当前经验性优化算法的潜在缺陷，如解释随机梯度下降、随机失活等优化手段为何有效，发现批归一化等经典优化操作的潜在数学缺陷等；  
④ 设计可解释的人工智能系统，在系统设计阶段将可信性嵌入系统结构中，如通过设计卷积神经网络的目标函数，使高层卷积层的每个滤波器自动地表示某种语义。

近年来，可信人工智能领域受到广泛关注，并取得众多核心研究成果。表 1.2.5 和表 1.2.6 分别列出了可信人工智能领域核心论文的主要产出国家、主要产出机构。表 1.2.7 和表 1.2.8 分别列出了该领域施引核心论文的主要产出国家和主要产出机构。可以看出，代表性的研究机构主要包括麻省理工学

表 1.2.5 “可信人工智能理论与算法”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	67	42.68	21 672	323.46	2018.9
2	中国	36	22.93	1 990	55.28	2020.0
3	英国	19	12.10	1 389	73.11	2019.8
4	德国	18	11.46	1 501	83.39	2019.5
5	意大利	12	7.64	319	26.58	2020.3
6	奥地利	9	5.73	627	69.67	2020.0
7	韩国	8	5.10	750	93.75	2019.8
8	澳大利亚	7	4.46	1 170	167.14	2019.9
9	加拿大	7	4.46	776	110.86	2019.3
10	瑞士	7	4.46	282	40.29	2019.3

表 1.2.6 “可信人工智能理论与算法”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	加利福尼亚大学洛杉矶分校	11	7.01	875	79.55	2019.2
2	斯坦福大学	8	5.10	2 638	329.75	2018.2
3	高丽大学	6	3.82	716	119.33	2019.5
4	格拉茨医科大学	6	3.82	586	97.67	2019.7
5	比萨大学	6	3.82	199	33.17	2019.8
6	加利福尼亚大学伯克利分校	5	3.18	4 561	912.20	2017.2
7	柏林工业大学	5	3.18	710	142.00	2019.2
8	弗劳恩霍夫·海因里希·赫兹研究所	5	3.18	695	139.00	2019.4
9	上海交通大学	5	3.18	123	24.60	2020.6
10	格拉纳达大学	4	2.55	1 086	271.50	2020.2

表 1.2.7 “可信人工智能理论与算法”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	7 372	33.09	2020.4
2	美国	5 719	25.67	2020.2
3	英国	1 722	7.73	2020.3
4	德国	1 471	6.60	2020.4
5	韩国	1 130	5.07	2020.4
6	澳大利亚	915	4.11	2020.4
7	加拿大	901	4.04	2020.3
8	日本	890	3.99	2020.3
9	意大利	771	3.46	2020.4
10	印度	739	3.32	2020.4

院、中国科学院、上海交通大学等，分布在美国、中国等国家。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，其中主要产出国家之间

的合作网络和主要产出机构间的合作网络分别见图 1.2.4 和图 1.2.5。

尽管可信人工智能近年来受到广泛关注，但大

表 1.2.8 “可信人工智能理论与算法”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	750	22.27	2020.3
2	浙江大学	333	9.89	2020.4
3	清华大学	325	9.65	2020.1
4	哈佛大学	282	8.37	2020.4
5	斯坦福大学	276	8.19	2020.2
6	上海交通大学	266	7.90	2020.3
7	麻省理工学院	260	7.72	2020.2
8	电子科技大学	245	7.27	2020.4
9	北京大学	216	6.41	2020.2
10	武汉大学	212	6.29	2020.4

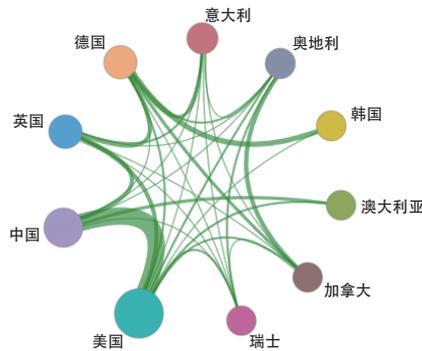


图 1.2.4 “可信人工智能理论与算法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

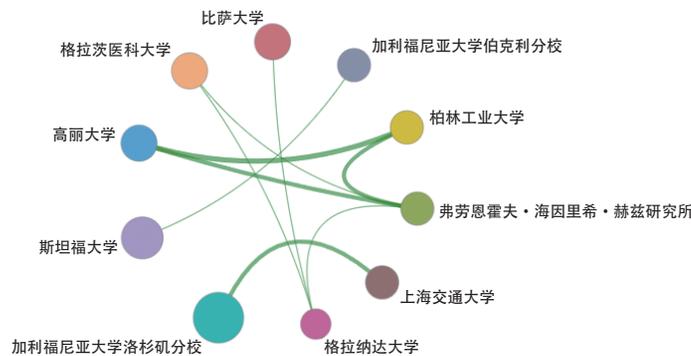


图 1.2.5 “可信人工智能理论与算法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

多数研究仍停留在工程性算法层面，如可视化神经网络的神经元、估计输入变量的重要性、用对抗攻击下的准确率评估神经网络的鲁棒性等，而对于可信人工智能领域中几大关键性、根本性的瓶颈问题却少有涉及与探索。这些问题包括：

1) 探索、定位并量化决定人工智能系统表达能力的本质因素。具体地，人工智能系统的众多指标（如网络结构、优化手段等）都会影响系统的表达能力，但这些指标往往蕴含了许多与表达能力无关的冗余因素，并不能揭示决定表达能力的根本因素。只有确切地定位表达能力的决定性因素，才能准确地评估、解释系统的表达能力。

2) 对当前众多经验性的人工智能算法内在机理的统一与解释。为解决某一个研究问题，学者们往往会从不同的经验性角度提出不同的人工智能算法。实际上，这些算法背后往往蕴含着相同或相似的内在机理。对这些不同经验性算法内在机理的统一与解释，可以揭示这些算法的公共本质，并从本质层面评估和比较这些算法的可靠性。

3) 理论驱动的人工智能系统的设计与优化，尤其是神经网络系统。目前人工智能系统的结构设计、训练优化大都是经验主义的，即人们从大量实验观察中找出行之有效的结构设计和优化方法。然而，我们需要找到统一的理论反馈指导系统的设计与优化，令人工智能系统具备满足特定任务需求的表达能力，方能真正实现系统的可控性。

事实上，国际上已有少数研究团队，发现并

重视了上述关键性问题，并在这些方向上做出了前瞻性的探索。例如，上海交通大学的团队统一地解释了众多提升对抗迁移性的算法；加利福尼亚大学伯克利分校的团队提出“自洽性”与“简约性”原则是人工智能系统的基石，并用这些原则指导设计了表征可解释、训练可解释的人工智能系统。

在过去 10 年中，可信人工智能取得诸多研究成果。然而，从整个领域的发展进程看，其仍处于起步阶段，仍存在众多亟待解决的关键性瓶颈问题。具体地，如图 1.2.6 所示，未来 5~10 年的重要发展方向包括如下几个方面。

第一，完善对知识表征的解释。当前对知识表征的解释大多源于启发性直觉，缺乏理论可靠性；这些解释也往往没有标准的答案以供参考，因此无法从实证角度验证解释的可靠性。因此，未来的研究重点可能包括：① 统一现有众多经验性解释，揭示其公共本质；② 发展具有理论保证的新解释；③ 客观评估解释的可靠性。

第二，深入发展对表达能力的解释与量化。未来的研究重点可能包括：① 探索并定位决定人工智能系统表达能力的本质因素；② 如何统一地解释众多提升表达能力的人工智能算法的内在机理；③ 提出精确的量化指标，评估系统的真实表达能力；④ 解释并证明系统在表达能力方面的特点和缺陷。

第三，理论驱动的人工智能系统的设计与优化。



图 1.2.6 “可信人工智能理论与算法”工程研究前沿的发展路线

目前，人们往往是从大量实验观察中找出行之有效的结构设计和优化方法，而可信人工智能需要我们找到统一的理论，有的放矢地反馈指导系统的设计与优化。为了实现这一目标，未来的研究重点可能包括：①探索神经网络的网络结构与知识表征的关系；②探索神经网络的模型性能与知识表征的关系；③探索神经网络的众多表达能力（如泛化性、鲁棒性、公平性等）与知识表征的关系。

### 1.2.3 互补金属氧化物半导体（CMOS）硅基太赫兹成像技术

传统太赫兹成像器件及系统的实现方式主要基于纯电子器件和纯光电两种。前者主要依赖于肖特

基二极管和Ⅲ-V族器件，后者主要依赖于光电导、光整流和量子级联激光器。这些设备在实际使用中成本高昂、体积庞大，有些甚至需要冷却设备辅助。此外，它们与传统的微电子封装不兼容，进一步增加了集成化难度。近年来，随着硅基工艺的快速发展，基于互补金属氧化物半导体（CMOS）硅基工艺实现的太赫兹成像技术具有低功耗和小尺寸等特点，能够满足低成本和高集成度的市场化需求，逐渐成为国际太赫兹成像领域的研究热点。

针对CMOS硅基太赫兹成像技术的研究情况分析如表1.2.9所示。美国、德国和中国在核心论文数量方面位居世界前三名，但在论文被引频次方面，中国下滑至第五名，被日本和法国赶超。表1.2.10

表 1.2.9 “互补金属氧化物半导体（CMOS）硅基太赫兹成像技术”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	38	31.15	519	13.66	2018.3
2	德国	33	27.05	359	10.88	2018.7
3	中国	18	14.75	107	5.94	2018.4
4	法国	10	8.20	147	14.70	2017.6
5	波兰	10	8.20	42	4.20	2020.4
6	立陶宛	10	8.20	41	4.10	2020.3
7	以色列	6	4.92	17	2.83	2016.8
8	瑞士	6	4.92	12	2.00	2017.2
9	日本	5	4.10	222	44.40	2018.8
10	英国	4	3.28	102	25.50	2017.0

表 1.2.10 “互补金属氧化物半导体（CMOS）硅基太赫兹成像技术”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	篇均被引频次	平均出版年
1	伍珀塔尔大学	20	16.39	294	14.70	2018.5
2	维尔纽斯大学	9	7.38	39	4.33	2020.7
3	普林斯顿大学	8	6.56	301	37.62	2018.8
4	波兰科学院高压物理研究所	8	6.56	39	4.88	2020.8
5	加利福尼亚大学洛杉矶分校	8	6.56	20	2.50	2019.6
6	密歇根大学	6	4.92	109	18.17	2018.0
7	立陶宛约翰斯·泽梅蒂斯军事学院	5	4.10	20	4.00	2020.8
8	南京大学	5	4.10	8	1.60	2018.6
9	格拉斯哥大学	4	3.28	102	25.50	2017.0
10	康奈尔大学	4	3.28	97	24.25	2017.5

展示了对该工程研究前沿中核心论文主要产出机构的分析：在核心论文数量方面，伍珀塔尔大学和维尔纽斯大学位居前列，中国只有南京大学排进前十。在论文被引频次方面，普林斯顿大学、伍珀塔尔大学和密歇根大学进入前三，南京大学论文被引频次位居末位。在国家间的合作网络（图 1.2.7）方面，中国的主要合作伙伴为美国；德国与欧洲、美洲和亚洲地区国家建立了广泛的合作关系。在机构间的合作网络（图 1.2.8）方面，欧洲大陆的立陶宛约纳斯·泽梅蒂斯军事学院、维尔纽斯大学和波兰科学院高压物理研究所建立了稳定的合作关系，美国的康奈尔大学分别与加利福尼亚大学洛杉矶分校、密歇根大学建立了合作关系。表 1.2.11 所示为该前沿中施引核心论文的主要产出国家。中国占比超过三分之一，位居世界第一，美国和德国分别位列第二、第三名。在表 1.2.12 所示施引核心论文的主要

产出机构排行榜中，中国占据绝对优势，有 7 家中国机构位列世界前十，另外 2 家为美国机构、1 家为德国机构。

CMOS 硅基太赫兹成像技术的研究主要集中在高灵敏度、高集成度和高分辨力三个方面。最初的成像技术采用非相干的直接检测技术，但其灵敏度低、输入功率要求大，对固态电子产品也极具挑战性。0.13  $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS（锗化硅双极互补金属氧化物半导体）工艺相干成像收发器芯片的提出，将灵敏度提升 10 倍以上。为实现更高的分辨力成像，基于相干成像的阵列规模也逐渐扩大。但传统的相干检测阵列中的本振信号大多采用中心化设计，很不利于阵列规模的扩大。基于 65 nm CMOS 工艺的 32 单元锁相密集外差接收阵列，可允许 2 个交错的  $4 \times 4$  阵列芯片在  $1.2 \text{ mm}^2$  的芯片范围内集成，使得整个接收机阵列更加紧凑。在成像横向

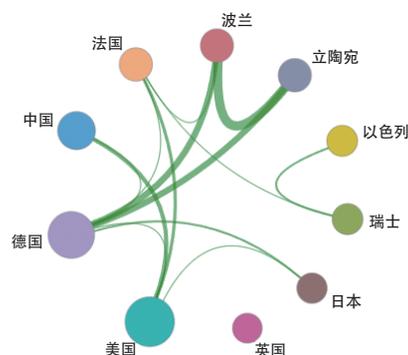


图 1.2.7 “互补金属氧化物半导体（CMOS）硅基太赫兹成像技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

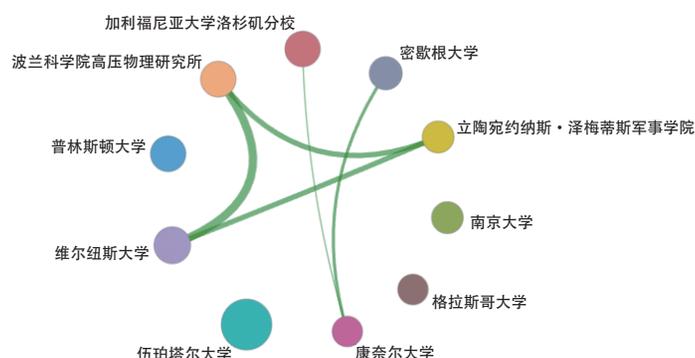


图 1.2.8 “互补金属氧化物半导体（CMOS）硅基太赫兹成像技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “互补金属氧化物半导体 (CMOS) 硅基太赫兹成像技术” 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	464	34.73	2020.1
2	美国	276	20.66	2019.7
3	德国	150	11.23	2019.7
4	日本	76	5.69	2020.3
5	韩国	76	5.69	2019.9
6	英国	63	4.72	2019.8
7	西班牙	52	3.89	2019.9
8	印度	51	3.82	2020.2
9	意大利	50	3.74	2020.0
10	法国	44	3.29	2019.6

表 1.2.12 “互补金属氧化物半导体 (CMOS) 硅基太赫兹成像技术” 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	中国科学院	89	23.67	2019.9
2	华中科技大学	40	10.64	2019.8
3	伍珀塔尔大学	36	9.57	2019.3
4	天津大学	35	9.31	2019.9
5	电子科技大学	34	9.04	2020.2
6	普林斯顿大学	29	7.71	2019.8
7	北京大学	26	6.91	2020.0
8	浙江大学	23	6.12	2020.2
9	东南大学	23	6.12	2020.0
10	麻省理工学院	21	5.59	2019.6

分辨力提升方面，基于 55 nm BiCMOS 工艺的完全集成超宽带逆合成孔径成像技术可实现 2 mm 的横向分辨力和 2.7 mm 的距离分辨力。

迄今为止，太赫兹成像分辨力取得了多项技术突破，但硅集成太赫兹成像器的分辨力一直受到衍射极限的限制，只能达到毫米范围的光斑尺寸。生物医学或材料表征中的许多应用需达到微米级分辨力，这可以通过从远场到近场成像来实现，并可实现 10~12  $\mu\text{m}$  范围的横向分辨力。

在低成本和高集成度的市场化需求下，基于 CMOS 硅基的太赫兹成像研究在过去 10 年逐渐成

为热点，并取得飞速进步，产生了大量研究成果并推动太赫兹成像技术的发展。随着工艺的持续进步，太赫兹成像技术逐渐向高集成度、高精度度、大阵列等方向发展，但同时也面临着三大挑战：

1) 在不断的工作频率条件下，有源器件模型的有效性和无源器件的损耗逐渐制约了硅基工艺太赫兹电路的快速发展。同时，硅基工艺多层金属和多层介质的特点使得各个器件在太赫兹频段产生非常复杂的寄生、耦合效应，大大增加了太赫兹电路的设计难度。

2) 太赫兹频段波长短，有利于系统的集成。

但太赫兹电路容易产生分布效应，也更容易受到表面粗糙度的影响，因此需要根据创新封装和互联技术实现系统的集成。

3) 为了实现较高的角度分辨力，当从单个通道到阵列芯片的扩展时，需要保证多通道的协同工作，因此对源同步的技术提出了更高的要求。为了保证探测和信号传递的准确性，需要更复杂的校准系统来协同工作。

BCC Research 预测，2029 年全球主流太赫兹技术的市场规模可达 35 亿美元。其中不包括硅基集成电路行业带来的市场份额，主要原因在于 CMOS 硅基太赫兹技术的发展与成熟化相对滞后。图 1.2.9 所示为该前沿的发展路线。到 2029 年左右，将可实现芯片制作并启动相关在片测试；到 2032

年方可完成技术优化和集成研究，并实现芯片尺寸和分辨力的突破。可以预见，在未来 10 年，利用 CMOS 硅基实现太赫兹技术的集成化将推动太赫兹成像技术迈向更大的市场规模。

## 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。2016—2021 年，各开发前沿涉及的核心专利公开情况见表 2.1.2。



图 1.2.9 “互补金属氧化物半导体 (CMOS) 硅基太赫兹成像技术”工程研究前沿的发展路线

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	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	超大规模数字孪生可视化与仿真系统	483	2 865	5.93	2020.1
2	集成片上光源	832	1 548	1.86	2018.7
3	多源信息融合的定位技术	909	3 745	4.12	2018.7
4	人机物融合泛在操作系统	404	1 095	2.71	2018.6
5	量子微波测量技术	638	4 523	7.09	2017.3
6	光学元件原子及近原子尺度制造与测量技术	224	1 766	7.88	2017.8
7	超低功耗物联网技术及芯片制造	987	2 691	2.73	2019.3
8	人工智能电子设计自动化 (EDA) 技术	954	4 468	4.68	2019.7
9	基于强化学习的无人系统进化算法	990	5 867	5.93	2020.0
10	中低轨空间通信网络技术	908	4 957	5.46	2019.1

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	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	超大规模数字孪生可视化与仿真系统	6	7	28	69	164	209
2	集成片上光源	122	97	164	153	121	175
3	多源信息融合的定位技术	116	125	182	145	145	196
4	人机物融合泛在操作系统	73	50	78	52	85	66
5	量子微波测量技术	188	247	120	40	22	21
6	光学元件原子及近原子尺度制造与测量技术	62	46	44	34	26	12
7	超低功耗物联网技术及芯片制造	40	79	179	213	245	231
8	人工智能电子设计自动化(EDA)技术	31	39	81	181	289	333
9	基于强化学习的无人系统进化算法	15	29	54	192	266	434
10	中低轨空间通信网络技术	77	101	143	155	179	253

### (1) 超大规模数字孪生可视化与仿真系统

数字孪生是实现物理与虚拟实体之间实时连接、双向映射、仿真推演、动态交互与反馈控制的技术体系，能够将物理实体或系统的结构、属性、状态和行为映射到虚拟环境中，形成高保真的动态数字模型，为观察、理解、认识、控制和改造物理世界提供了一种有效的技术手段。超大规模数字孪生可视化与仿真技术是数字孪生技术体系的核心环节，在科学研究、生产制造中起着至关重要的作用，是地理信息、生物医药研究，大型工程设计，生产制造等领域的重要工具。云计算以及图形处理器（GPU）等技术的发展产生的巨大并行处理能力，结合时空同步、分布式并行仿真、可视化算法、数据结构以及体系结构等技术，使得计算密集型操作成为可能，在云计算平台分布式访问、调度和管理大规模仿真数据，并支撑数亿个三角面的大规模网格，使得仿真和可视化达到极高的分辨率。多尺度建模、分布式高性能计算成为解决此类问题必备的技术，同时随着数据驱动的机器学习方法的发展，以及物联网技术使得更多的物理要素数字化在线，融合机器学习、多尺度建模以及分布式计算技术，为解决超大规模数字孪生的建模、仿真模拟和可视化提供了无约束创新的潜力，也为系统自身可持续进化提供了无限可能。

### (2) 集成片上光源

随着后摩尔时代的到来，集成电路正向着集成光子芯片的方向过渡，目的是实现光子产生以及超高速传输、处理和探测。在集成光子芯片领域，如何将光源集成在芯片上是一大难题。利用成熟的CMOS工艺可批量大规模生产硅基光电子芯片，但硅是间接带隙半导体，出光效率较差。为了在片上集成发光器件，可采用载流子注入技术提高硅的发光强度，利用多晶硅的反向偏置PN结结合雪崩倍增现象产生可见光和红外光；另一种方法是将Ⅲ-V族半导体激光器通过晶圆键合或外延生长的方式单片或异质集成在硅晶圆上，目前磷化铟、氮化硅、铟镓砷等材料在硅晶圆上的集成技术已经成熟并实现商业化。最近，片上集成光源领域有如下一些新的发展趋势和方向：第一，多材料融合光电芯片，即按照集成光子芯片的功能划分，将相应多种半导体材料集成在一个芯片上，可大大提高芯片的功能化和适用性；第二，针对片上光源多波长输出的迫切需求，采用光参量振荡集成的方法，通过微弱泵浦光和微腔中材料的非线性效应，在片上实现波长的高效非线性转换；第三，利用片上光源结合光频梳技术，实现多个频率激光梳的片上光谱输出，在光原子钟和片上精密检测领域应用广泛；第四，光量子芯片中的单光子量子源的集成，采用量

子点或色心光源实现多功能光量子芯片。

### (3) 多源信息融合的定位技术

多源信息融合的定位技术是指对多传感器提供的多类型数据进行处理,提取与目标位置有关的特征信息,并利用这些特征信息实现目标定位的技术。常用的特征信息包括到达时间、到达时间差、到达角及接收信号强度等。对这些特征信息建立相应的数学模型,再根据参数估计准则构建非线性估计问题,最后通过求解该非线性估计问题获得目标位置估计。目标定位的技术方向主要有:① 精确性,定位精度通常为这一技术所考虑的首要目标;② 鲁棒性,复杂传输环境下的测量值存在大量不确定因素,因此定位技术的鲁棒性也成为必须考虑的重要因素之一;③ 高速性,定位技术的计算复杂度以及工程易实现性是工程应用中的关键因素。

未来多源信息融合的定位技术有以下发展趋势:

1) 融合多类型传感器和多类型测量,解决异构异步异质多源信息融合难题。例如,毫米波系统能够提供高精度的测距和测向信息,使厘米级定位成为可能;图像信息与电磁波信息的结合将提供更丰富的信息,全面覆盖可见和不可见环境的定位需求。

2) 复杂场景下的多/群目标与弱目标定位。例如混合近远场多点目标、刚体/集群目标定位,以及深空、水下等弱探测目标精准定位等。

3) 数据驱动的智能定位技术。机器学习等理论方法的快速发展为复杂定位问题提供新的求解手段。

### (4) 人机物融合泛在操作系统

互联网、大数据、人工智能、物联网等新一代信息技术的发展开启了信息化的新阶段,特别是随着人机物融合泛在计算时代的到来,出现了面向各种新型应用模式和新的应用场景的人机物融合泛在操作系统(ubiquitous operating system, UOS)。

泛在操作系统拥有与 Linux、Windows 等传统操作系统一致的功能目标,即向下屏蔽管理异构资源、向上凝练沉淀应用共性;同时也体现了操作系统概念的泛化,即面向不同的计算模式和应用场景,需要构建不同的操作系统。广义上,泛在操作系统既包括面向服务器、计算机、智能移动设备、传感器等不同规模计算设备的操作系统,也包括面向物联网、机器人、智慧城市、智慧家居等不同应用场景的操作系统。狭义上,泛在操作系统特指秉承泛在计算思想,面向泛在化计算资源管理,支持泛在应用开发运行,具有泛在感知、泛在互联、轻量计算、轻量认知、反馈控制、自然交互等新特征的新形态操作系统。国际上,泛在操作系统在物联网、智能机器人、智慧城市等领域已有相关的系统实现与应用,但是并没有统一的研发部署,也没有形成大规模研发成果、技术体系和标准规范。在中国,泛在操作系统得到学术界和产业界广泛关注,获得国家自然科学基金专项项目支持,并且被写入工业和信息化部“十四五”软件与信息服务发展规划。在产业界,腾讯、海尔等一批企业在物联网、云计算、智慧城市、智慧交通、智慧建筑、智能家居等领域的新型操作系统研发上也开展了积极探索和实践,为不同行业用户的数字化转型提供了重要的系统软件平台支撑。

### (5) 量子微波测量技术

量子微波测量技术是基于量子力学特性——特别是量子纠缠、量子叠加和量子隧穿等效应——在量子系统中产生、操控、传输和测量微波的技术。量子微波测量技术将量子技术的高关联、高复用、强鲁棒与微波的灵活性、全天候、易调控等优势相融合,其探测灵敏度较传统微波技术提升 50 dB,实现微波探测能力从当前的数百千米拓展至 2 000 km 以上的跨越;其工作带宽相比于传统微波技术提升 1 个量级,达到 100 GHz,显著提升现有微波探测信道容量;其抗毁伤能力提升 3 个量级,并且同等探测威力下反射截面缩小 4 个

量级，实现“自隐身”功能。因此，量子微波测量技术被认为是新一代信息系统跨代变革的颠覆性技术。

量子微波测量的主要研究方向可分为两类：一是将量子系统（原子、金刚石、光子等）应用于雷达、电子对抗等微波系统中，利用量子系统特有的巨大优势进行微波信号的传输和处理；二是利用传统系统（光频梳、机械谐振腔）实现微波频段的量子关联，拓展量子信息技术的多频域发展。量子微波测量的进一步发展将围绕解决未来微波探测和信息系统面临的跨波段、跨介质、跨尺度、跨系统的科学难题展开，朝着多功能、小型化、集成化、网络化、协同化方向发展。

当下全球范围都开展了以实际应用为牵引的量子微波探测，已在功率灵敏度、抗毁伤能力、动态范围等技术指标上实现了对传统微波技术的超越，在带宽和电场灵敏度方面也制定了明确的技术提升方案，以尽快将量子微波测量的优势工程化、实用化。整体来看，量子微波技术将是新一代微波信息领域的核心技术，在雷达探测、电子对抗、集约通信等军事领域，以及医疗、安检、导航、电信等商业领域中有着广泛的应用前景。

### （6）光学元件原子及近原子尺度制造与测量技术

随着科学技术的不断发展，以极紫外光刻、先进光源和超透镜等为代表的现代光学工程迫切需要具有超光滑无损表面、极小尺度特征结构的高端核心光学元件。目前，广泛基于机器精度实现的可控光学制造技术已无法满足此类光学元件原子级精度及性能的需求，以制造对象及过程直接作用于原子，实现材料原子级去除、增加或迁移的原子及近原子尺度制造（atomic and close-to-atomic scale manufacturing, ACSM）将是制造此类极端光学元件的下一代核心技术。光学元件 ACSM 的最终目标是将光学制造技术全面引入原子级精度及尺度，这需要从内在机理、工艺、表征与测量、仪器与设

备等领域的共性问题出发，探索新的光学制造范式。在原子及近原子尺度下，ACSM 的基础理论体系已从经典理论跨越到量子理论，基于量子理论阐释 ACSM 过程中单原子操纵、多原子相互作用及其与宏观尺度联系的内在机理研究将是开展后续研究工作的基石。光学元件 ACSM 工艺需要将能量直接作用于原子，建立具有一定通用性的多维制造系统，并创新性地借助原子间的作用力，使原子自发形成特定的功能结构，以达到核心光学元件的规模化、高效能、高精度制造目标。ACSM 高精度测量技术是保证基于 ACSM 的光学元件最终使用性能和可靠性的前提。然而，ACSM 的量子特性使得测量过程存在影响测量对象状态的可能性，解耦 ACSM 测量过程引入的扰动将成为提高测量精度的关键技术问题。

### （7）超低功耗物联网技术及芯片制造

以智能芯片为基石和核心，智能物联网设备需要融合数据的感知、存储、计算、决策等多种功能。在传统物联网系统中，传感器芯片、模数转换芯片、处理器芯片、存储器芯片等都是分立器件，这使得设计环节割裂，缺乏全局优化，难以克服系统的功耗和能效瓶颈。低功耗物联网芯片技术通过将感知、存储、计算等处理过程融合，形成一体化的异构芯片架构，有效降低数据搬移的开销，减少无效数据的处理，从根本上突破整体系统能效瓶颈。在该研究领域，前沿的技术发展方向有低功耗数据感知技术、高能 AI 硬件加速技术、低功耗芯片架构技术等。

低功耗数据感知技术旨在通过新型数据采集电路拓扑降低数据采集芯片功耗，提升数据感知精度，如从传统“电压域”数据转换转变为“电荷域”“时间域”等数据转换模式，从传统奈奎斯特转换转变为自适应采样转换等；高能 AI 硬件加速技术旨在通过轻量级硬件加速器设计提升芯片计算能力，提升芯片计算能效，如从传统“冯·诺依曼架构”计算模式转变为“存内计算”的计算架构模式，减

少数据传输损耗并提升芯片计算能力；低功耗芯片架构技术旨在通过新型芯片体系架构设计降低芯片功耗，尤其是长时间的待机功耗，如从传统“同步计算”体系架构转变为“异步事件驱动型”无时钟低功耗架构，通过匹配芯片的工作活跃度与实际事件行为来显著降低待机功耗。此外，前沿研究也在持续探索数据感知、计算、存储、传输的多环节协同创新，发展“感知-计算-存储-传输”一体化集成的高能效超低功耗物联网芯片。

#### (8) 人工智能电子设计自动化(EDA)技术

电子设计自动化(electronic design automation, EDA)是指利用计算机算法和软件辅助集成电路设计的方法，是现代超大规模芯片设计、验证与制造的必要手段。人工智能电子设计自动化，又称人工智能辅助EDA，指利用人工智能技术辅助EDA算法流程进行建模、优化、验证等。它能够有效提升优化效果，加速设计流程迭代，进而提升芯片设计的质量。根据EDA算法所处流程环节的不同，人工智能辅助EDA的研究大体可以分为六类：系统级解空间探索、综合、物理设计、制造、验证测试和运行时管理。这六大方向的研究近年来增长迅猛，自2016年以来，在主流EDA会议和期刊发表的相关论文数量增长约2倍，特别是在系统级解空间探索、综合、物理设计、制造等方向，吸引了包括来自中国、美国、欧洲、日本、韩国等国家和地区工业界与学术界团队展开探索性研究。EDA三巨头中的新思科技(Synopsys)公司和楷登电子(Cadence)公司近两年分别发布商用解空间探索工具DSO.ai和Cerebrus。随着制造工艺演进和芯片设计复杂度提高，人工智能技术在EDA领域有广泛的应用前景。

#### (9) 基于强化学习的无人系统进化算法

基于强化学习的无人系统进化算法旨在利用强化学习算法生成无须人工干涉的智能体行为决策与控制策略，并随时间不断提升性能。强化学习介于监督学习与非监督学习之间，通过单个或

群体智能体与环境的交互以及评价机制产生经验并用于训练。

相比于非人工智能无人系统决策控制算法，基于强化学习的无人系统进化算法不受线性化等既定手段的约束，有更宽的工作区间，能够适应更多变的复杂场景。

无人系统进化算法除需要考虑收敛速度、训练精度、抗过拟合等常规指标以外，还面临着系统实物性能约束、仿真域-现实域差异、策略实物安全性和持续进化等新挑战，进而产生了新的科学问题和技术手段。

由于现实世界中无人系统的运算性能普遍低于专用计算设备，基于强化学习的无人系统进化算法需要有较低的运算规模，以适应低性能条件下的高频率、高动态交互。现阶段涌现出多任务多场景元学习、高维策略知识蒸馏、高维输入表征学习、云计算与边缘计算等技术。

同时，为提升数据采集效率和规避机械损耗，早期训练通常在仿真环境中进行。仿真域与现实域不可避免的差异导致了向现实无人系统迁移时，强化学习策略的性能有所下降。为提升面对域差异的鲁棒性，现阶段涌现出域参数在线辨识、对抗式训练域随机化、分布式鲁棒优化、自编码策略变换等技术。

另外，现实场景对无人系统进化算法的安全性也提出更高要求。现阶段涌现出多传感器融合风险检测、信任域策略优化、动作空间动态约束等技术。

持续进化性要求算法在现实世界部署后仍能继续收集数据并优化策略、提升性能，具备更高的数据利用效率和适应动力学系统或场景条件剧变的能力。现阶段涌现出先验奖励塑型、小样本迁移学习、分布式计算等技术。

基于强化学习的无人系统进化算法下一阶段发展方向包括：更精确的仿真环境和在线系统辨识、无人系统本体能力提升、融合无人系统动力学先验

知识的具身智能、复杂场景多任务综合自主决策、异构无人系统群智协作与多智能体信息融合、现实场景中的高效安全能力演进等。

### （10）中低轨空间通信网络技术

中低轨空间通信网络技术指依托运行在中低地球轨道的卫星星座，通过星间、星地链路构建广域通信系统，实现空间探测器、载人飞船、卫星、地面站、地面终端、高空飞行器的网络接入和互联互通，服务环境监测、军事侦察、太空探险、空中上网、偏远地区通信等。主要技术方向包括空间激光通信、星间路由转发、卫星波束管理、切换控制等。空间激光通信主要包括高速激光调制、捕获追踪对准、激光信号检测等技术。星间路由转发主要包括卫星和终端用户编址、路由规划等技术。卫星波束管理主要包括星载多波束天线、预编码、捷变跳波束、频率多色复用等技术。切换控制主要包括波束间切换、星间切换、星间链切换等技术。未来发展趋势包括：① 为提升网络容量，卫星星座由低密度向高密度演进，但需解决星间按需建链、干扰规避以及星间频繁切换等问题；② 网络将与软件定义和虚拟化技术深度结合，实现可编程的空间路由转发及网络功能灵活部署，研究重点包括软定义卫星载荷设计、网络功能部署策略等；③ 网络由单一通信功能向“通信-计算-感知-定位”一体化发展，实现低时延遥感信息分发和精准定位，研究重点包括通信定位一体化信号设计、遥感信息在轨智能处理、位置辅助的通信功能增强等。

## 2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 超大规模数字孪生可视化与仿真系统

数字孪生是企业数字化转型的深化阶段和未来愿景，融合多种技术支撑以数据为核心的业务发展。“孪生（twins）”概念最早可追溯到20世纪60年代美国国家航空航天局（NASA）的“阿波罗计划”。随着计算机仿真、网络通信、传感器等技

术的发展，2002年，Michael Grieves教授提出数字孪生的概念和模型，并将其应用到产品全生命周期管理中。2010年，NASA发布的Area 11技术路线图的“基于仿真的系统工程”部分中，首次提出数字孪生的概念，定义为：“数字孪生是指充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据，集成多学科、多尺度的仿真过程，它作为虚拟空间中对实体产品的镜像，反映了相对应物理实体产品的全生命周期过程。”2017—2019年，Gartner连续三年将数字孪生列为十大战略科技发展趋势之一，并定义其为对现实世界中实体或系统在虚拟空间的数字化映射。与此同时，西门子、通用电气、微软等也不断提出数字孪生概念定义，并推出相应产品。

超大规模数字孪生可视化与仿真系统是数字孪生的核心，是数字孪生技术业务价值化、规模化和商业化的关键。数字孪生涉及全真映射、仿真维护以及闭环控制三个方面。全真映射是采用数字孪生技术提供一个观察和认识世界的上帝视角，将现实世界中分布在不同空间的人、事、物同步到一起，在虚实环境中全真呈现，而且可以超越现实实现空间折叠、时间坍塌，支持跨越时空的在场协同，让人能够沉浸式地参与到生产过程中，更真实和更亲密地互动。数字孪生的仿真维护是基于全真互联的模拟复现或预测，是静态与动态、虚拟与现实、过去与现在融合的模拟，是基于大规模、精细化数据和优化与智能算法驱动的，一定程度上超越了传统意义的模拟仿真。在全真映射和仿真维护方面，超大规模数字孪生可视化与仿真是数字孪生最核心的基础能力，比如飞机设计和总装模拟应用，有400万到1800万个零部件，传统的技术和方法无法满足总体评估；另外一个典型案例就是建筑领域的建筑信息模型（building information modeling, BIM）可视化和结构分析，目前为了利用BIM数据做可视化或结构分析，必须做轻量化处理，极大地限制了整体研究或全量结构模拟的可能。在智慧城市、城市级交通以及海洋治理等领域也存在类似的现实

问题，要想实现全真孪生的数实融合，超大规模数字孪生可视化与仿真系统是必备的核心技术。

“超大规模数字孪生可视化与仿真系统”工程开发前沿中，核心专利的主要产出国家以及机构情况见表 2.2.1 和表 2.2.2。中国、美国以及德国基础研究和应用落地都比较明显，在专利方面处于明显的领先地位。从专利产出的机构看，西门子和通用电气领先优势明显，在产业化落地方面取得非常明显的成果。比如，西门子把数字孪生作为“工业 4.0”的核心技术支柱，与其传统同业软件优势相结合，在智能制造方面领先优势明显；通用电气很早就采用孪生技术，支撑飞机发动机的状态检测和预测性

维修，并把发动机售卖逐步升级到全生命周期维护，是从产品到服务的商业模式升级。中国以北京航空航天大学、北京理工大学等院校为主，主要还是理论和应用基础研究，同时也体现了数字孪生在航空航天和国防领域的应用需求。在应用领域，能源和工业也是潜力巨大的行业，国家电网无人值守变电站、设备质检维修等方向已落地。由上可见，在“超大规模数字孪生可视化与仿真系统”工程开发领域，各国政府都将其放在重要位置，企业和相关科研机构也都有很好的进展，但从主要国家间以及主要机构间的合作来看，横向合作相对比较少，只有美国和德国在国家层面有一些交流合作（图 2.2.1）。

表 2.2.1 “超大规模数字孪生可视化与仿真系统”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 /%	被引频次	被引频次比例 /%	平均被引频次
1	中国	356	73.71	1 715	59.86	4.82
2	美国	68	14.08	747	26.07	10.99
3	德国	24	4.97	196	6.84	8.17
4	韩国	13	2.69	28	0.98	2.15
5	日本	4	0.83	34	1.19	8.50
6	澳大利亚	4	0.83	21	0.73	5.25
7	芬兰	2	0.41	9	0.31	4.50
8	瑞士	2	0.41	1	0.03	0.50
9	英国	1	0.21	78	2.72	78.00
10	加拿大	1	0.21	17	0.59	17.00

表 2.2.2 “超大规模数字孪生可视化与仿真系统”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 /%	被引频次	被引频次比例 /%	平均被引频次
1	西门子公司	23	4.76	274	9.56	11.91
2	通用电气公司	22	4.55	305	10.65	13.86
3	北京航空航天大学	17	3.52	89	3.11	5.24
4	国家电网有限公司	15	3.11	22	0.77	1.47
5	广东工业大学	11	2.28	196	6.84	17.82
6	西安交通大学	11	2.28	69	2.41	6.27
7	中国电子科技集团有限公司	8	1.66	94	3.28	11.75
8	广东电网有限责任公司	8	1.66	22	0.77	2.75
9	北京理工大学	8	1.66	21	0.73	2.62
10	国际商业机器公司（IBM）	6	1.24	40	1.40	6.67

超大规模数字孪生可视化与仿真系统是构造现实社会的镜像、扩展和延伸的关键技术之一。当前超大规模数字孪生可视化与仿真系统加速向建模精确化、呈现实时化、分析精准化、计算高效化、应用灵活化等方向发展。在可视化方面，精细化、沉浸式是其核心发展方向，通过视觉、听觉、触觉等全息提高虚拟场景或虚实融合场景的动态逼真度，同时会对交互方式产生巨大改变，在虚拟现实中添加全新的维度。在仿真方面，逐步向机理与数据驱动融合、虚拟与现实集成方向发展，由单体、过程仿真向分布式群体仿真演进，从而更好地支撑群体智能和人机混合群体智能发展。在计算方面，分布式、并行以及高性能计算等不断和数字孪生可视化与仿真系统结合，提升数字孪生系统的计算性能。此外，借助 5G 乃至 6G 等高速通信网络，实现万物互联和实时的虚实融合，伴随着数字化转型共识在各行各业的形成，其在城市治理、工业制造、零售、医疗等领域应用逐步深入，并向全生命周期渗透，将催生一批行业数字化转型新模式、新业态，未来发展前景广阔。

图 2.2.2 为未来 5~10 年“超大规模数字孪生可视化与仿真系统”工程开发前沿的发展路线。根据咨询公司 Markets & Markets 2019 年发布的报告，

数字孪生市场有望从 2019 年的 38 亿美元跃升至 2025 年的 358 亿美元。超大规模数字孪生可视化与仿真系统作为数字孪生技术的核心，其应用将在交通、物流、城市、制造等领域不断渗透，并从单点场景应用走向行业全生命周期应用。例如：交通领域会涉及道路施工和设计、交通优化分析、资产智能运维、安全驾驶智能辅助等多类场景；城市领域会涉及设计优化和仿真、智慧工地、雨洪模拟、智能应急响应等多类场景；制造领域会涉及智能产品研发、生产工艺优化、车间智能调度、设备预测性维护、工厂安全生产等多类场景。这些都涉及规模化、大尺度、精细化的可视化和模拟仿真，以便更好地实现人在环的仿真推演，最终辅助决策。此外数字孪生的应用也将向医疗、农业等领域不断延伸。

### 2.2.2 集成片上光源

从 1947 年第一只晶体管问世开始，集成电路技术极大地推动了科技进步，成为信息社会的重要基石。随着社会进步和技术发展，人们对信息的需求也越来越多，这对集成电路的信息获取和处理能力提出更高要求。然而，在后摩尔时代，集成电路面临着不可逾越的电互联导致的延时和功耗方面的

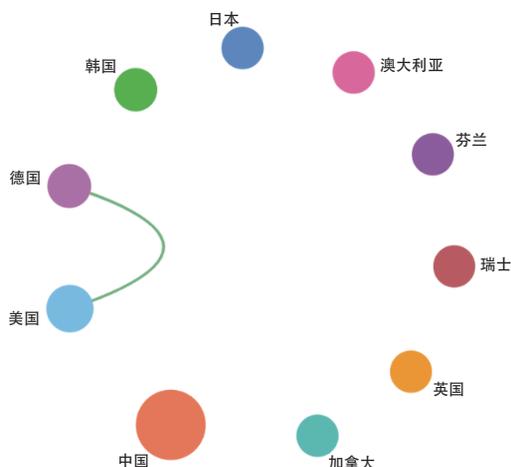


图 2.2.1 “超大规模数字孪生可视化与仿真系统”工程开发前沿主要国家间的合作网络

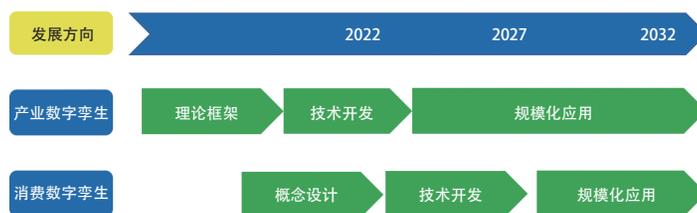


图 2.2.2 “超大规模数字孪生可视化与仿真系统”工程开发前沿的发展路线

限制。于是，随着摩尔定律走向末路，人们提出利用光子作为信息载体替代电子的设想，即通过光电子和微电子的融合，利用片上光互联代替传统的电互联，实现信息的高速传输，同时降低电互联的寄生电阻。对于微电子而言，深亚微米下电互联存在严重的延时和功耗问题，迫切需要引入光电子，利用光互联解决电互联问题。对于光电子而言，需要借助成熟的微电子加工工艺平台，实现大规模、高集成度、高成品率、低成本的批量化生产。

光电集成芯片能在片上完成光子产生、光信息传输、处理和探测，在过去 10 年中已成为学术界和产业界最热门的方向之一。其中，片上集成光源可为光电集成芯片提供相干光源，产生光信息，其性能决定了芯片的应用范围和实现功能。集成片上光源通过一体化设计和现代半导体加工工艺，相比于传统的光设备，在降低尺寸、质量、功耗和成本方面优势巨大，同时推动先进光刻技术、纳米制造技术、微纳制造工艺和材料科学发展的产业升级。

硅基光电集成芯片技术是指基于硅材料的光电子芯片设计、制作与集成技术。单晶硅凭借其大光学带宽、强可扩展性、低廉的成本、高效的片上路由和高折射率，成为光子芯片最成熟、广泛的平台。硅基光电集成电路（optoelectronic integrated circuit, OEIC）可以与 CMOS 工艺兼容，借助成熟的微电子加工工艺平台，可以实现大规模批量生产，具有低成本、高集成度、高可靠性的优势，是实现光电子和微电子集成、光互联的最佳方案。晶圆集成的片上光源技术在光互联和高速光计算领域将给光通信链路带来更高的带宽密度和速度。此外，

在精密测量领域，将实现小型化和低功耗化的特性，将光原子钟和光谱仪从设备迁移到芯片上。在光计算上，利用多波长光梳技术可实现多波长的并行计算能力，在计算速度上实现多个数量级的提升。在传感领域，片上光源技术将实现并行激光雷达体系，提升采样速率，降低功耗，实现复杂应用（如自动驾驶等）的物联网高速传感和处理。

当前，硅基探测器、光调制器、光开关、光波导等均已实现突破。但是，片上硅基光源依然缺少成熟方案。硅材料的间接带隙特性，决定了其发光效率低下，难以作为有源材料制作高性能发光器件。如何将光源集成在硅基芯片上是一大难题。近年来，人们从发光原理、材料、器件结构等多个角度开展了大量硅基光源研究，从早期硅基发光二极管（light emitting diode, LED），如 PN 结发光、金属-绝缘层-半导体（metal-insulator-semiconductor, MIS）结构发光、肖特基结发光，到载流子注入硅基雪崩倍增发光、硅稀土掺杂发光，硅纳米晶体激光器、硅锗激光器等，发光效率不断提高。但这些光源的性能与 III-V 激光器相比还有一定的差距。所以，在集成片上光源未成熟前，工业界的方案是利用高精度封装将外部光源与硅光芯片耦合成组件。那么，如何让性能优异的硅基光电子芯片集成具有低功耗、长寿命、大功率等优异功能的片上光源呢？

III-V 族半导体是具有直接带隙和优秀光学、电学性质的材料，砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）量子阱和量子点激光器已经商用。传统的 III-V 族光源虽然有较高的量子效率，但是与现有的集成电

路工艺不兼容。将Ⅲ-V族半导体激光器与硅材料集成在一个硅晶圆上的思路自然产生。保证光源制造工艺兼容现有集成电路工艺一直是该领域的热点和难点。目前的技术是通过混合集成(将材料转移至硅晶圆上,如直接放置或晶圆键合)或单片集成(直接在硅晶圆上生长材料,如外延生长)将成熟的Ⅲ-V族材料激光器引入到硅晶圆上。混合集成工艺成熟,例如通过晶圆键合技术,人们可将Ⅲ-V族材料外延层利用苯并环丁烯(BCB)辅助黏结键合技术集成至硅芯片上方,由Ⅲ-V族材料产生的光可通过倏逝波耦合的方式进入硅光子回路,完成片上光源与硅光子芯片的混合集成,但其工艺成本较高,难以实现较大规模的集成。单片集成有望把原生Ⅲ-V族材料光子器件的工艺与技术应用于硅光子光源中,得到性能优异的片上光源,被认为是硅芯片上光源大规模生产的终极解决方案。硅上异质外延Ⅲ-V族材料技术面对的问题主要是Ⅲ-V族材料与硅间严重的晶格失配,这将导致位错、反相畴等缺陷的产生,严重限制Ⅲ-V激光器的寿命和性能。位错缺陷,在生长中可在衬底和有源区之间加入位错阻挡层或其他缓冲层结构。而对于反相畴缺陷,采用选区生长技术在图形化的硅衬底上外延Ⅲ-V族材料,能够有效地限制反相畴缺陷对有源区的影响。与混合集成光源相比,单片集成方案最

主要的优势是其能够与硅光子工艺同步缩小线宽、提高集成度,在大规模光子集成芯片的研制中有巨大潜力,这也是硅光子技术的主要发展方向。目前磷化铟(InP)、氮化硅(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)、铟镓砷(InGaAs)等材料在硅晶圆上的集成技术已经成熟并实现商业化。此外,具有极低损耗、大透光窗口、优秀的非线性效应的SiN-on-Si平台,弥补了Si在低于1100nm波长时透光窗口截止的缺陷,在AR/VR、度量、生物医药、传感等领域具有新的应用。

“集成片上光源”工程开发前沿中专利的主要产出国家分布情况见表2.2.3,中国、美国和日本分列前三位。其中,中国的专利公开量优势巨大,是第二名美国的三倍多,反映出中国在国家战略中将片上集成光源领域列为优先发展方向,在该领域涉及的材料、物理、光电子学、精密制造等细分领域取得长足进步。但专利的平均被引频次只及美国的三分之一,反映出中国在原创专利方面还有很多不足。在国家合作方面(图2.2.3),美国作为集成片上光源领域原创技术最多的国家,与韩国、英国和澳大利亚有着紧密合作。这几个国家在片上集成光源领域分工比较明确,技术优势可以实现互补。在排名前列的主要机构合作方面,各机构之间合作不紧密,表明目前该领域竞争非常激烈,头部机构非常注意保护自己的原创技术。具体来说,美国制

表 2.2.3 “集成片上光源”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 /%	被引频次	被引频次比例 /%	平均被引频次
1	中国	565	67.91	724	46.77	1.28
2	美国	165	19.83	602	38.89	3.65
3	日本	31	3.73	67	4.33	2.16
4	韩国	20	2.40	14	0.90	0.70
5	德国	7	0.84	45	2.91	6.43
6	加拿大	7	0.84	21	1.36	3.00
7	英国	5	0.60	34	2.20	6.80
8	新加坡	5	0.60	19	1.23	3.80
9	印度	5	0.60	0	0.00	0.00
10	澳大利亚	3	0.36	6	0.39	2.00

造集成光子研究所 (AIM Photonics)、英特尔公司和惠普实验室, 拥有多条高水平硅光工艺线, 具备从硅光芯片设计培训到制造封装的全流程能力。例如, 2016 年, 英特尔公司公布了第一个商业化硅基异质集成产品, 实现了 InP 激光器与 Si 高速 Mach-Zehnder 干涉仪的单片集成, 实现 100 Gbps 收发器产品系列, 英特尔公司的成果和其垂直整合的商业模式已证明硅基异质集成的技术可行性。中国在科研和产业化水平上同国外差距逐步缩小, 在硅光集成领域, 中国目前有联合微电子中心有限责任公司 (CUMEC)、中国科学院微电子研究所 (IMECAS) 和上海微技术工业研究院 (SITRI)

的硅光平台具有芯片加工能力, 例如 CUMEC 基于自主工艺平台实现了硅基窄线宽激光器, 波长调谐范围 1 520~1 580 nm, 功率大于 10 dBm, 线宽小于 100 kHz, 具备低相位噪声、高集成度、成本低等特点, 在基于相干检测的硅光雷达、高速相干光通信模块、气体检测、光纤传感方面有较广泛的应用前景。科研机构方面, 北京大学、浙江大学、上海交通大学、中国科学院半导体研究所等单位在片上光源频率梳、多材料融合芯片等方面做了大量前沿工作 (表 2.2.4)。

集成片上光源领域有如下一些新的发展趋势和方向 (图 2.2.4):

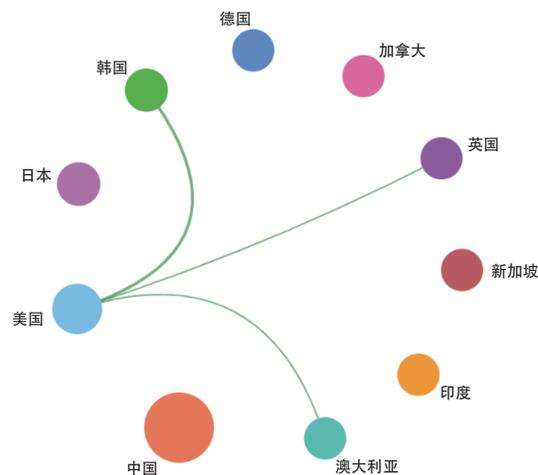


图 2.2.3 “集成片上光源”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.4 “集成片上光源”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 /%	被引频次	被引频次比例 /%	平均被引频次
1	Inphi 公司	26	3.12	50	3.23	1.92
2	宁波大叶园林设备股份有限公司	23	2.76	20	1.29	0.87
3	浙江大学	14	1.68	21	1.36	1.50
4	中国科学院半导体研究所	13	1.56	27	1.74	2.08
5	国际商业机器公司 (IBM)	13	1.56	26	1.68	2.00
6	美国海军	12	1.44	5	0.32	0.42
7	北京大学	11	1.32	21	1.36	1.91
8	英特尔公司	9	1.08	57	3.68	6.33
9	武汉光迅科技股份有限公司	9	1.08	43	2.78	4.78
10	上海交通大学	7	0.84	28	1.81	4.00

第一，多材料体系融合光电芯片，实现Ⅲ-V族化合物、氮化硅、二氧化硅、聚合物、铌酸锂、铝钾砷和磷化铟等材料在硅晶圆上的集成工艺技术开发，目标能涵盖可见光、近红外、中红外、太赫兹等频段。使用的方法包括转移印刷工艺，基于可逆黏附技术，将数千个由不同材料制成的设备集成到一个晶圆上。多材料集成打造硅/先进光电材料（Ⅲ-V、LiNbO<sub>3</sub>等）混合集成工艺平台。

第二，针对片上光源多波长输出的迫切需求，开发纳米级光参量振荡器（optical parametric oscillator, OPO）硅基芯片级光源，通过微弱泵浦光和微腔中材料的非线性效应，在片上实现波长的高效非线性转换，得到传统硅基芯片技术难以实现的波长输出，在基于芯片的原子钟或便携式生化分析器件领域应用广泛。

第三，将片上半导体锁模激光器与集成非线性光频梳器件结合起来，实现化合物半导体、氮化硅、铌酸锂等材料和硅晶圆的单片集成和混合集成并实现量产，达到低功耗和窄线宽超短光脉冲，提供数百条等距且相干的激光线，能精确对应梳齿线的频率间隔，不仅可以制造光原子钟以精确测量时间，也可以让光纤通信各通道之间的干扰减少，使单根光纤传输的信号量增加几个数量级，在气体成分分析、全球定位系统（GPS）、天体观测、激光雷达等技术上也有广泛应用。目前可以实现最小线宽达到 140 Hz 的窄线宽外腔激光器、梳齿宽度为 12 nm 的量子点激光梳。

第四，量子点激光器。量子点（quantum dot,

QD）的离散分布特点使基于量子点的激光器具有更好的温度特性和更低的阈值电流。例如，胶量子点采用简单的无模板自组装方法可制备谐振腔，砷化铟量子点作为增益介质，可外延生长 GaAs 衬底。在光泵浦作用下，实现微纳片上激光器。此外，集成光量子芯片中的片上纠缠光源可通过集成半导体高质量量子点、金刚石色心和二维材料缺陷态等实现，未来的可能方向为对自组装量子点的偏振纠缠光子对的混合集成片上量子光源的研究。目前最好的按需单光子和纠缠光子量子点源发射的能量大大高于硅带隙，所以需要混合Ⅲ-V集成技术。

片上集成光源一个典型的应用场景是激光雷达。目前的激光雷达体积和质量较大、功耗和成本较高，未来趋势是利用光子集成芯片代替目前由分立光学元件搭建的激光雷达，可大大减小体积和质量，功耗和成本也大幅降低。这可通过集成片上光源经过光互联，片上光信号与光开关进行路由，实现光子的芯片层面的发射和接收一体化，将光源和锗硅光电探测器集成在一个芯片中。利用该芯片实现对不同距离目标的相干检测，实现相干激光雷达的扫描和测距功能。

片上集成光源另一个应用场景是传感。为了实现片上集成的光学传感检测，需要将光源、光探测单元与光传感单元进行片上集成来获得片上直接输出传感信号的能力，实现完全的片上集成检测芯片，异质外延、转印、键合等多材料集成技术被开发出来以实现光源、光传感、光探测的单片集成。目前，波导型片上集成光学传感检测芯片的折



图 2.2.4 “集成片上光源”工程开发前沿的发展路线

射率传感检测限达到  $10^{-6}$  RIU 量级, 气体检测限达到 ppb ( $10^{-9}$ ) 量级, 对化学分子和生物分子的检测也达到  $\text{pg}/\text{mm}^2$  量级, 展示了良好的应用潜力。该芯片还可以方便地集成到手机、无人机等平台, 实现便携式应用, 并通过大数据、云计算和物联网技术实现功能强大的现场检测。此外, 在光通信领域, 富士通实验室的 Tanaka 等设计了一种无需温度控制的硅光子发射机芯片, 采用高精度倒装焊设备将 III-V 族材料半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA) 集成在 SOI 衬底上, 与波导端面对准, 和 SOI 波导一起构成混合集成激光器。

### 2.2.3 多源信息融合的定位技术

目标定位是空天预警、精确打击等传统军事应用的核心功能之一, 也是无人驾驶、智慧交通等重大民事应用的关键技术。近年来, 高超速目标、无人机、机器人、自动驾驶等各类新兴应用, 以及未来 6G 应用场景对目标定位技术提出更高要求, 也驱动了这一技术的快速发展。

传统的目标定位技术主要应用于视距传播环境, 研究重点在于复杂非线性定位问题的描述和精确求解。然而, 复杂传输环境具有传输信道复杂、测量精度低、先验信息少等特点, 使得传统视距定位技术无法满足定位需求。因此, 复杂传输环境中的高精度目标定位问题成为长期以来的

研究热点和难题。在这一背景下, 一系列计算复杂度低的高精度鲁棒定位方法被提出并得到实际应用。具体来说, 在测量手段上, 新型传感器 (如超宽带传感器、毫米波雷达、高精度视觉传感器) 的应用提高了测量信息的精度, 同时带来数据量剧增的难题; 在问题描述上, 针对动态非视距/超视距环境下先验信息少等特点, 众多鲁棒定位方法被提出并得以应用, 对计算性能提出更高要求; 在求解手段上, 凸优化方法得以广泛应用并大幅度提高了低信噪比下的定位性能, 同时保持了较低的计算复杂度。机器学习等技术和方法的引入获得一些崭新的定位求解方法, 但同时新方法的可信性和可解释性还有待加强。

近年来, 毫米波雷达、超宽带传感器、蓝牙、图像处理等设备和技术的发展为定位技术的应用提供了新思路。毫米波系统所提供的高精度测距和测向信息在实现高精度目标定位的同时还能够实现环境建图; 超宽带传感器与蓝牙 5.1 设备的结合为低成本室内定位系统提供了可能; 而图像处理技术与电磁波定位技术的结合可以覆盖可见和不可见环境的定位。

“多源信息融合的定位技术”的核心专利主要产出国家和机构分别见表 2.2.5 和表 2.2.6。可以看出, 中国核心专利公开量排名第一, 占比达 73.6%, 且被引频次比例达 55.01%, 显示出中国在

表 2.2.5 “多源信息融合的定位技术”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 /%	被引频次	被引频次比例 /%	平均被引频次
1	中国	669	73.60	2 060	55.01	3.08
2	美国	97	10.67	1 046	27.93	10.78
3	韩国	39	4.29	121	3.23	3.10
4	德国	30	3.30	178	4.75	5.93
5	日本	23	2.53	72	1.92	3.13
6	荷兰	6	0.66	124	3.31	20.67
7	加拿大	6	0.66	31	0.83	5.17
8	法国	5	0.55	9	0.24	1.80
9	印度	5	0.55	4	0.11	0.80
10	瑞典	4	0.44	37	0.99	9.25

这一领域的引领地位。在核心专利公开量排名前十位的机构中，中国机构占4家，其中百度集团股份占比排名第一位，这也显示出中国机构在这一领域的引领作用。同时，核心专利产出机构主要集中在百度、谷歌等互联网公司以及通用、现代、福特等汽车公司，也凸显了定位技术在机器人、自动驾驶等应用中的关键作用。从图 2.2.5 中可以看出，仅少数国家之间存在合作。而各机构之间不存在合作。这说明各国家及机构之间在这一领域的技术开发上相对独立。

未来 5~10 年，“多源信息融合的定位技术”

工程开发前沿的发展路线如图 2.2.6 所示，主要包含以下几个方面。

(1) 定位环境

1) 毫米波定位。随着 5G 毫米波系统的逐渐商用，毫米波系统中的定位技术将逐步得到开发应用。并且，毫米波定位与北斗等卫星定位系统合作，可实现室内外无缝高精度定位，将为灾害救援、智能交通和物联网等应用提供保障。

2) 水下目标定位。由于水下传输环境的特殊性，基于电磁波的定位技术无法在水下环境直接应用。因此，针对水下环境的目标定位技术将

表 2.2.6 “多源信息融合的定位技术”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 /%	被引频次	被引频次比例 /%	平均被引频次
1	百度集团股份有限公司	17	1.87	79	2.11	4.65
2	通用汽车公司	7	0.77	46	1.23	6.57
3	南京邮电大学	7	0.77	19	0.51	2.71
4	现代汽车公司	7	0.77	3	0.08	0.43
5	谷歌公司	6	0.66	59	1.58	9.83
6	国际商业机器公司 (IBM)	6	0.66	54	1.44	9.00
7	福特全球科技有限责任公司	6	0.66	29	0.77	4.83
8	浙江大学	6	0.66	17	0.45	2.83
9	华南理工大学	6	0.66	11	0.29	1.83
10	电装株式会社	6	0.66	6	0.16	1.00

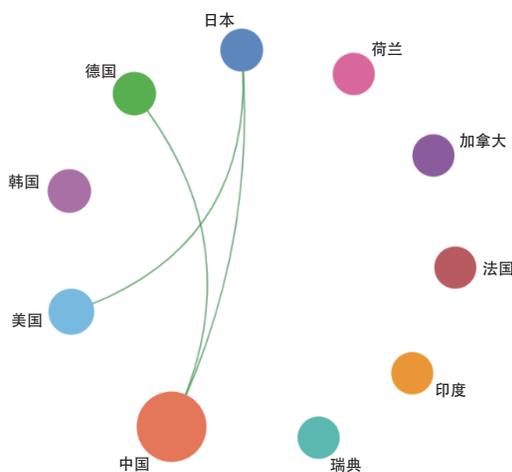


图 2.2.5 “多源信息融合的定位技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

得到升级，这将对海洋安全和监测起到至关重要的作用。

### (2) 目标类型

目标类型上将实现点目标向刚体乃至集群目标定位的转变。自动驾驶、机器人等应用不仅需要目标位置信息，还需要方位信息，这需要将目标看作刚体，使得刚体目标定位成为未来的研究热点。在

高精度雷达的支持下，未来5~10年内，刚体定位有望在自动驾驶、机器人等应用中得到普及。

### (3) 定位技术

随着机器学习算法的逐渐成熟及芯片运算能力的提升，复杂传输环境（如室内、水下等）的定位问题有望通过智能机器学习算法得以解决。这将革新现有定位技术，大大提升其应用价值。



图 2.2.6 “多源信息融合的定位技术”工程开发前沿的发展路线

## 领域课题组人员

### 审核专家组:

组长: 潘云鹤 卢锡城

成员(按姓氏拼音顺序):

第一组: 姜会林 李得天 李天初 刘泽金

罗毅 吕跃广 谭久彬 张广军

第二组: 陈志杰 丁文华 段宝岩 龙腾

吴曼青 余少华 张宏科

第三组: 柴天佑 陈杰 费爱国 蒋昌俊

卢锡城 潘云鹤 赵沁平

遴选专家组(按姓氏拼音顺序,标\*为学科召集人):

第一组: 陈凡 陈麟\* 丁晔 范知元

郭欣 何伟 胡春光 胡欢 孔令杰

李九生 林晓 刘东 陆振刚\* 马建军

苏全民 吴冠豪 肖定邦 杨树明 杨未强

袁璐琦 张虎忠 张文喜

第二组: 卜伟海 蔡一茂\* 陈浩 陈文华

胡程 黄韬 李刚 李潇 刘琦

刘伟\* 刘勇攀 马志强 皮孝东 权伟

施龙飞 时昕 孙滔 唐海 唐克超

王绍迪 吴军 夏志良 许珂 姚尧

虞志益 张建华\* 张杰 赵博 赵鲁豫

赵宁

第三组: 陈博 陈章 丁志军 董德尊

董威 高飞 郭耀 李天成\* 卢剑权

尚超 苏菡 孙晓明 王钢 王孟昌

王晓辉 王晓英 吴鸿智 颜深根 俞俊

余涛 张广艳\* 张俊\* 张瑜 郑永斌

朱秋国

### 图情专家:

文献: 李红 熊进苏 赵惠芳 陈振英

**专利：** 杨未强 梁江海 刘书雷 霍凝坤  
吴 集 徐海洋 宋 锐

**执笔组（按姓氏拼音顺序）：**

**研究前沿：**

卜伟海 承 楠 邓辉琦 方 斌 胡 程  
马建军 梅健伟 潘 纲 孙 滔 孙晓明  
叶贤基 张虎忠 张拳石 张伟锋

**开发前沿：**

陈 麟 房丰洲 郭 耀 李天成 林亦波

刘建国 刘 伟 彭木根 苏奎峰 王 刚  
叶 乐 朱秋国

**工作组：**

**联络指导：**

高 祥 张 佳 张纯洁 邓晁煌 王 兵

**项目秘书：**

翟自洋 谌群芳 杨未强 胡晓女

**项目助理：**

韩雨珊