



## 第三章

---

# 信息与电子工程前沿

---

## 3.1 工程研究前沿

### 3.1.1 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 3.1，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，“量子与经典计算融合的计算体系”为数据挖掘与专家提名前沿，其余均为专家提名前沿。各前沿涉及的核心论文 2019—2024 年发表情况见表 3.2。

#### (1) 高速低功耗片上光互连技术

高速低功耗片上光互连技术是通过在芯片或多芯片系统中引入光互连通信链路，利用光信号在高带宽、低延迟和低功耗方面的优势，突破传统电互连在速率、能耗和信号完整性方面的瓶颈。该技术对满足人工智能（AI）、高性能计算（HPC）、数据中心和未来超大规模集成芯片的需求具有重要意义。

该技术研究重点主要集中在器件、架构和集成等层面：① 在器件层面，新型片上光学元件的设计与优化是目前研发重点，例如高速电光调制器、高灵敏度光电探测器以及高效波分复用与解复用器件，以提升互连速率并降低单比特能耗；② 在整体架构层面，片上光网络（ONoC）、芯片间光互连以及光输入/输出（Optical I/O）接口的设计是提升带宽密度和通信效率的重要方向；③ 在集成技术层面，电子与光子的深度融合被视为集成技术演进的关键，例如光子器件与互补金属氧化物半导体（CMOS）电路协同优化，电子-光子集成回路（EPIC）、异质集成

表 3.1 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	高速低功耗片上光互连技术	243	3 499	14.40	2021.4
2	跨域异构无人系统智能控制理论与方法	146	1 613	11.05	2022.2
3	通感算智控一体化网络系统理论与技术	172	25 737	149.63	2021.2
4	多智能体构建及协同技术	256	20 996	82.02	2021.0
5	类生命机器人基础理论	197	4 784	24.28	2022.1
6	跨介质远距离光电探测与通信技术	144	1 948	13.53	2021.7
7	宏观尺度原子级精度制造机理与方法	313	38 112	121.76	2020.6
8	量子与经典计算融合的计算体系	412	57 702	140.05	2020.8
9	晶圆双面器件与双面互连技术	47	325	6.91	2021.9
10	毫米波太赫兹射频前端集成电路	167	9 344	55.95	2020.5

表 3.2 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	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	高速低功耗片上光互连技术	44	57	26	43	29	44
2	跨域异构无人系统智能控制理论与方法	14	17	14	25	37	39
3	通感算智控一体化网络系统理论与技术	22	38	39	42	26	5
4	多智能体构建及协同技术	50	54	59	48	33	12
5	类生命机器人基础理论	22	26	22	35	28	64
6	跨介质远距离光电探测与通信技术	22	20	22	26	17	37
7	宏观尺度原子级精度制造机理与方法	90	72	61	57	29	4
8	量子与经典计算融合的计算体系	91	89	123	53	41	15
9	晶圆双面器件与双面互连技术	8	5	6	6	9	13
10	毫米波太赫兹射频前端集成电路	49	47	29	29	12	1

和共封装光学（CPO）等方案，正不断推动该领域向大规模应用迈进。

展望未来，该前沿发展趋势主要体现在以下方面：① 传输带宽将持续提升，借助多波长复用、硅光调制器优化以及集成光放大技术等，有望突破目前电互连的瓶颈，实现 Tb/s 级的片上通信；② 能效优化将成为关键驱动力，通过低功耗激光器、高速低损耗光波导和智能功率管理策略，光互连能在保持高吞吐量的同时显著降低系统能耗；③ 系统集成度和模块化设计将不断增强，片上光互连将逐步向可扩展的模块化芯粒平台演进，使得处理器、存储器和专用加速器能够灵活组合；④ 智能化管理和动态调度将成为趋势，通过片上光网络的自适应路由、负载均衡和热管理技术，光互连系统将能够根据应用需求实时优化性能与功耗，为高性能计算、人工智能训练与推理以及云数据中心的算力扩展提供强有力支撑。

### （2）跨域异构无人系统智能控制理论与方法

跨域异构无人系统智能控制理论与方法是指针对空、天、地、海等多域协同任务场景中存在的多类型无人系统（如无人机、无人艇、无人车、无人潜航器等），通过构建统一的智能决策与控制框架，突破单域、同构无人系统控制方法的固有限制，从而实现跨域协同感知、跨域信息互联以及跨域任务协作等关键目标。这一研究前沿不仅关注单个无人平台的自主智能，更强调异构无人系统群体在跨域复杂环境中执行任务的整体协同与群体效能。

从研究内涵来看，跨域异构无人系统智能控制的核心在于探索跨域控制机理与智能决策机制，重点解决多源数据融合困难、跨域动力学差异显著、任务需求高度动态化等问题。因而，当前主要研究方向包括：① 跨域感知与信息融合方法，即针对不同平台与环境所采集的多源异构数据，研究鲁棒一致性建模、时空对齐与多模态信息融合方法，以提升全局态势感知能力；② 自主协同与鲁棒控制算法，即探索在受限通信、强对抗和复杂环境下的分布式鲁棒控制与协同算法，确保无人系统群体能够稳定、高效地完成任任务；③ 任务分配与智能决策机制，即结合强化学习、博弈论与分布式优化理论，研究多任务动态分配与智能决策方法，以提升系统在大规模任务场景中的自主性与灵活性。

展望未来，跨域异构无人系统智能控制理论与方法的发展仍面临 3 个亟待突破的关键问题：

① 可验证的学习控制方法，即在保证学习型算法自适应性的同时，建立严格的可验证性与安全性分析框架；② 能力级联与软硬件协同，即进一步探索无人系统在感知、通信、计算、执行等多层次能力之间的级联耦合与优化机制；③ 标准化接口与互操作性，即推动跨平台、跨域的统一接口与标准体系建设，实现不同类型无人系统的高效互联与无缝协作，最终建立跨域协同生态。

总体来看，跨域异构无人系统智能控制理论与方法正在从概念探索逐步迈向系统化、工程化和实用化阶段，并有望成为推动未来无人系统技术体系升级的重要引擎。

### （3）通感算智控一体化网络系统理论与技术

通感算智控一体化网络系统理论与技术是面向数字化、网络化、智能化时代的新型网络体系架构与理论框架，融合多维信息服务能力，对信息服务资源进行系统性的一体化优化。它以网络为基础，目标是让网络实现从数据传输的“通信管道”向“信息服务网络”的革命性转变。该体系突破传统网络单一数据传输角色局限，通过深度融合通信（高效数据传输）、感知（环境状态精准获取）、计算（数据处理与资源调度）、智能（自主分析与决策支持）及控制（精准指令执行与反馈调节）五大核心要素，构建具备“环境感知、实时通信、智能分析、自主决策、精准调控”的综合信息服务系统，旨在以网络通信为基础，解决传统网络中感知与通信割裂、计算与智能脱节、控制响应滞后等问题，通过多要素协同优化与动态适配，实现通、感、算、智、控的基础设施化的普惠服务。

主要研究方向包括：① 在通感融合方向，通过新型通感融合空口设计、多源协作化感知以及基于毫米波的目标感知算法，兼顾目标感知精度与通信性能，实现通信与感知功能资源共享；② 在通算融合方向，联合感知通算资源并通过“算力路由”等技术进行联合调度，构建端、边、云算力协同计算环境，提升用户体验及资源利用效率；③ 在通智融合方向，不仅要通过意图识别与映射、网络信息测量、网络策略生成与验证等技术实现网络“内生智能”，提升网络运行、运维效率，还需针对 AI 应用与智能体带来的流量模式变化、实时性传输需求、多因素身份认证机制以及细粒度访问控制策略等挑战，提出面向智能体通信网络的架构设计方案，支撑异构多智能体间任务的调用与协作；④ 在通控融合方向，聚焦构建支持超低时延与确定性传输的实时交互机制，保障精准调控的时效性、可靠性与安全性。

未来需结合低空经济、物理数字混合、AI 普惠的发展趋势，进一步深化多维度信息服务能力的协同效用，提出多要素系统化融合的基础理论，在端网协同的操作系统、中间件等一体化计算环境实现突破，在支持跨架构计算的基础上，实现系统级异构资源的动态优化调配，形成“感知-通信-计算-智能-控制”无缝衔接的多要素网络服务新范式。

### （4）多智能体构建及协同技术

多智能体构建及协同技术旨在通过设计多个具备自主决策能力（包括自主感知、决策与执行能力等）的智能体，模拟人类社会学习与群体协作机制，研究多智能体的高效协同与竞争机制，实现复杂任务整体目标优化的智能计算与控制范式。该方向关注单智能体体系结构与学习机制，更强调多智能体之间在共享、部分共享或不完备信息条件下的交互、协作与博弈，最终突破单智能体的能力局限，通过群体智能涌现提升系统的适应性、鲁棒性和可信性，为实际场景提供可扩展的智能化解决方案。

多智能体构建主要依托机器学习、控制、分布式系统等相关技术，研究智能体的自主感知、环境建模、规划决策与任务执行方法；协同技术侧重于任务分解与分配、信息交互与融合、群体协作与冲突解决等关键问题，探索从个体智能到群体智能的涌现机制。研究重点包括：多智能体体系结构设计与可扩展建模，多智能体的标准通信协议构建，多智能体分布式协同目标优化，多智能体间实时交互与合作机制，多智能体博弈与联盟策略，以及人机混合智能系统中的协同模式等。

该项技术正驱动人工智能从“单体智能”向“群体智能”跃进，通过分工协同、资源优化等技术攻克复杂系统管控难题。未来仍需通信架构精简、安全框架标准化、伦理规范制定等方向持续突破，深度融合具身智能与虚实交互技术，为工业4.0与人机共生智能社会建设提供底层引擎，最终实现“1+1>2”群体智能效应。

#### (5) 类生命机器人基础理论

类生命机器人基础理论是研究生命系统与机电系统在分子、细胞和组织尺度深度融合中的基本原理与科学问题。该领域聚焦于揭示生命功能单元与人工组件在结构、能量与信息层面的耦合机制，致力于构建一套能够系统阐释类生命系统感知、驱动与智能功能实现的理论框架，以突破传统机器人的能力边界和发展范式。

主要研究方向包括：① 生物-机电跨介质接口理论，探索细胞与人工材料界面间力、电、化学信号的传导与交互机制；② 类生命功能单元建模，发展基于生物能量转换、信息传递与处理机制的建模方法；③ 生命-机电系统协同理论，研究生物元件与人工元件之间的功能耦合及动态互作用机制；④ 类生命智能基础理论，探索基于生命本征特性的感知-决策-控制闭环机理，以及碳基-硅基混合智能的理论模型与增强机制。

发展趋势主要包括：① 深化生机系统融合机制，发展生物-机器多尺度界面动态自适应耦合理论体系；② 加强类生命系统定量建模，构建可量化、可解释、可预测的类生命系统精准控制模型；③ 推动跨尺度理论整合，建立从分子、细胞到组织层级的跨层级偶联理论；④ 实现理论与实验的紧密结合，通过类生命系统平台迭代完善理论框架，最终形成系统化的类生命机器人基础理论体系。

#### (6) 跨介质远距离光电探测与通信技术

跨介质远距离光电探测与通信技术是指基于空中平台向海水发射蓝绿波段激光，实现高效、高精度大气及海洋跨介质剖面参数探测和高速通信。该技术利用蓝绿激光可以穿透海气界面及海水的特性，实现远距离、大深度的信息传输，根据激光在大气、海表和海水水体返回的后向回波信号实现对大气及海洋垂直剖面参数的探测。

针对跨介质远距离光电探测与通信技术面临的探不深、测不准、稳定性不足等瓶颈问题和应用短板，主要依托高效调制编码技术、光信号动态非线性压缩、光子数可分辨探测、最大比分集多孔径自适应阵列接收和匹配海水最佳透过率的太阳暗线蓝绿脉冲激光等核心技术，拓展海洋穿透深度，抑制太阳背景光和海面波动的干扰，大幅提升跨介质远距离光电探测与通信技术在真实海况下的适用能力。

研究趋势包括：① 提升太阳背景光抑制能力，发展全天时跨域通信探测技术，进一步提升跨介质远距离光电探测与通信系统的天时适应性；② 发展智能场景自适应技术，提升跨介质远距离光电探测与通信系统对水质、时段的环境适应性；③ 发展跨介质通信探测一体化技术，研制小型化、低功耗通信探测一体系统，提升水下平台跨域协同探测能力。跨介质远距离光电探测与通信技术为大范围海洋资源、生态和海岛礁调查和监测提供新的立体遥感技术，为水下海洋环境监测等领域提供跨介质双向高速通信手段。

#### （7）宏观尺度原子级精度制造机理与方法

宏观尺度原子级精度制造是在毫米到米量级宏观尺度下，基于材料原子级离散化和量子理论，使用原子量级的精确材料去除、增加和控制等方法，结合原子级表征、实时监测和闭环控制，实现宏观器件的原子级形貌和精度控制，是新制造范式（亦即制造范式Ⅲ）中核心使能技术主要组成部分。

其研究方向主要分为两个层面：① 机理层面上主要研究基于量子力学的制造基础新理论，包括原子键断裂、扩散重排、自组织作用机制，多场耦合对原子迁移的驱动规律，局域能量输入与原子限域/增减的关系，原子级制造中表界面效应与缺陷工程和原子到宏观器件的跨尺度映射理论；② 方法层面上则基于新机理开发可控工艺，如离子束、激光、原子层刻蚀/沉积、多场耦合加工，并结合原子级表征、实时监测和闭环控制，实现原子级到宏观尺度的精度一致性。

该前沿未来发展趋势包括：① 机理层面上聚焦制造理论体系重构，基于量子力学理论发展多尺度、多物理场协同作用机制研究，建立从原子层去除、表面重排到宏观形貌演化的统一模型，实现原子级加工精度和加工量的可预测与可设计；② 方法层面上则向高效化、智能化和规模化发展，利用多能场耦合加工、原子层级增/减材工艺、缺陷自修复等技术，提高加工速率与稳定性；③ 融合加工过程原子级原位表征、实时反馈控制和数字孪生，实现自适应调控和全流程闭环优化，推动宏观尺度原子级制造的颠覆性应用落地。

#### （8）量子与经典计算融合的计算体系

量子与经典计算融合的计算体系是结合量子并行计算与经典控制的新型计算范式，旨在通过优势互补攻克单一架构难以解决的复杂问题。其核心在于分工：量子处理单元（QPU）利用叠加与纠缠等特性执行核心计算，而经典计算机则负责数据处理、流程控制与算法优化等关键辅助任务。

针对这种混合系统，目前研究主要集中在算法和软硬件系统集成。在算法层面，聚焦于含噪声中等规模量子（NISQ）硬件开发和优化有效的混合算法。其中，变分量子算法（VQA）是融合计算的典范。它通过一个经典的优化器来迭代调整一个参数化的量子线路，巧妙地将量子态制备与测量任务交给 QPU，而将繁重的参数优化任务交还给经典计算机。其代表性算法包括用于量子化学与材料科学的变分量子本征求解器（VQE），以及用于解决组合优化问题的量子近似优化算法（QAOA）。另一个算法的前沿领域是量子机器学习（QML），它探索如何将变分量子线路用作机器学习模型的一部分，例如设计量子神经网络，期望在模式识别和数据分类等领域提供超越经典算法的能力。在软硬件集成层面，核心目标是构建高效、低延迟的量子-经典协同执行

环境。这是一个系统工程挑战，关键研究方向包括：开发能将高级算法语言高效编译为 QPU 物理指令的编译器；设计能够最小化经典与量子处理器之间通信延迟的控制软件和中间件；探索将 QPU 作为加速器无缝集成到经典高性能计算中心的系统架构。其最终目标是通过端到端优化，实现软硬件的深度耦合。

该前沿正沿着算法与软硬件协同两个层面并行演进，共同推动该领域从理论探索走向实际应用。在算法层面，发展趋势正从通用框架转向面向应用的“问题感知”式深度优化。为超越 VQE 和 QAOA 等基础模型，在特定问题上更快取得“量子优势”，算法设计正日益走向定制化。例如，在组合优化领域，通过构造能够编码问题约束的驱动哈密顿量，或通过高效生成可行解空间并在其内部进行搜索，均可显著提升求解速度与解的质量。这种设计是能更高效利用有限量子资源的关键。在软硬件协同层面，核心趋势是以性能为驱动的深度集成，旨在从根本上解决量子与经典计算单元间的通信延迟瓶颈，实现二者的高速互联。其实现路径涵盖从构建统一的混合软件架构与指令集，到最终实现片上物理集成，从而构建一个无缝且高效的混合计算系统，为解决更复杂的计算难题提供坚实基础。

#### （9）晶圆双面器件与双面互连技术

晶圆双面器件与双面互连技术是在同一晶圆的正反两面分别构筑有源器件与金属互连网络，并通过垂直通孔实现双面器件或电路的电源与信号互连，是当前国际先进集成电路技术发展的重要方向。其代表性技术——倒装堆叠晶体管（FFET）通过正/背面有源区的自对准和双面引脚布局，可将标准单元电路高度压缩近一半，增加了器件密度和布局布线空间，从而大幅提升芯片集成度。双面互连可有效提升电路绕线自由度，降低布线拥塞、信号延迟和 IR 损耗。更进一步，倒装三维集成（Flip 3D, F3D）则通过晶圆双面电路和双面混合键合，将有源层与互正反两面连层交替构建于晶圆两侧，实现高密度封装级三维堆叠。

晶圆双面器件与双面互连技术主要研究方向涵盖：① 基础工艺（晶圆键合、低温互连、衬底减薄、背部光刻）；② 器件结构优化（双面结构改进、热管理）；③ 双面供电与信号布线协同（跨面通孔形成、拥塞与寄生控制）；④ 双面标准单元电路与电子设计自动化（EDA）支撑（双输出库建模、跨面设计规则和布局布线）；⑤ 电路设计方法学。此外，由于该前沿与先进封装[如混合键合芯粒互连、2.5D/3D 硅中介层（SiP）]自然兼容，可将先进逻辑制程与先进封装技术深度融合，打破传统芯粒级与器件级三维集成之间的界限。

晶圆双面器件与双面互连技术的发展趋势包括：① 从即将进入量产的背面供电技术，发展到背面互连及双面互连，再到双面功能单元，最终实现双面芯片集成及多层堆叠三维集成技术；② 实现逻辑标准单元高度进一步压缩，电路互连性能大幅提升，并通过 F3D 模块化循环实现可扩展的多层堆叠架构；③ 多学科设计技术协同优化（DTCO）将深度协同器件、工艺、互连、EDA 与体系结构，推动先进逻辑与先进封装的统一演进，实现更高集成度、更低能耗和更优系统性能，对后摩尔时代三维集成技术的长期演进具有重大战略意义。

#### （10）毫米波太赫兹射频前端集成电路

毫米波太赫兹射频前端集成电路是工作在毫米波（30~300 GHz）和太赫兹（0.1~10 THz）频

段的无线通信系统核心模块，集成了调制器、放大器和天线等组件，负责信号的调制、解调、发射与接收等任务，利用充足的频谱资源实现信号的超高速率传输，是 6G 无线通信、车载雷达和卫星互联网等前沿技术的关键组成部分。

近年来，该前沿的主要研究方向包括：① 制程突破与工艺创新，提高核心器件晶体管的截止频率，将其可用频率扩展至太赫兹频段；② 毫米波太赫兹通信系统及关键电路创新，优化收发链路架构以及频率源、放大器等关键模块的设计，提升系统性能；③ 系统集成创新，利用异构集成、三维堆叠等技术将不同工艺节点或不同材料的芯片整合在单个封装系统，提高系统的集成度；④ 波束成形技术创新，通过优化相控阵系统架构并开发自适应校准算法，实现更高精度波束成形，增强抗干扰性能。

未来研究趋势主要包括：① 硅基工艺性能突破，进一步提升晶体管的截止频率；② 高频化与宽带化演进，满足 6G 通信与超分辨率雷达需求；③ 融合人工智能技术，系统化设计电路模块以及优化实时信号处理，提升电路设计效率；④ 采用更先进的封装技术，例如在三维堆叠中集成多材料芯粒，提升能效与功能密度。

### 3.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

#### 3.1.2.1 高速低功耗片上光互连技术

随着人工智能与数据中心规模的快速增长，功耗墙与带宽墙问题愈发突出，传统电互连在传输距离、速率和能效方面已接近物理极限。相比之下，光互连凭借在带宽密度、链路距离和能效上的系统级优势，被认为是支撑算力规模化与绿色计算的关键基础设施，也是推动计算体系结构从“以算为中心”向“算-存-互联协同”转变的重要技术路径。高速低功耗片上光互连正是这一趋势的代表性方案，它通过在芯片上或封装层级集成电光调制器、光电探测器、复用器与波导，以光互连取代传统电互连，实现高带宽、低时延和低能耗的数据传输。其技术路线涵盖 ONoC、Optical I/O，以及结合先进封装的 CPO/XPO 等架构。

这一前沿技术的发展源于硅光子与 CMOS 工艺兼容性的早期探索，经过高速电光调制器、光电探测器和低损耗波导等器件性能的持续突破，以及小规模系统原型的演示，逐渐积累了基础。目前，片上光互连正在由实验室技术快速向产业化应用过渡，其在未来计算体系结构中的战略地位将日益凸显。近年来，随着先进封装、异质集成和光电协同设计的进展，光互连将在芯粒架构、处理器与加速器的互连中发挥更广泛的作用，并有望与人工智能计算、云计算和高性能网络深度结合，成为支撑新一代计算与通信体系结构的关键技术基础。

高速低功耗片上光互连技术的研究重点在于带宽与能耗之间的平衡。器件方向聚焦于低电压高速电光调制器、低暗噪声光电探测器，以及低损耗、低串扰的波分复用与解复用器件，以优化链路性能和能效；系统层面则围绕 ONoC 拓扑结构设计、流量调度和 Optical I/O 接口规范展开，光交换与光缓存架构的探索也在进行中；在集成与封装层面，电子-光子集成电路、异质集成、3D/2.5D 封装以及 CPO/XPO 的热-光-电协同设计和可靠性问题受到持续关注。

与此同时，研究正逐步面向 AI 训练和芯粒处理器互连等应用场景，力求在新一代高性能计算中发挥支撑作用。

在科研机构层面，国外的麻省理工学院、斯坦福大学、加州大学圣芭芭拉分校、比利时微电子研究中心（IMEC）等在硅光与封装协同方面保持领先产出；国内则以中国科学院、清华大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、华中科技大学等为代表，在器件研发、系统原型和工程化推进上均有布局。在产业界，英特尔（Intel）、国际商业机器公司（IBM）、博通、迈威尔等企业围绕 Optical I/O、CPO/XPO 和代工平台构建起了完整的生态体系。同时，OIF、IEEE 802.3、COBO 等国际标准化组织不断推动接口、调制格式与链路规范的统一，而由产业联盟主导的多源协议（MSA）则在光模块封装、接口定义与互操作性方面发挥了重要作用，共同促进了光互连技术的生态成熟与规模化应用。跨机构合作的重点正逐步从器件与系统验证扩展到标准化、可制造性与可靠性评估，并进一步延伸至工具链和软件栈的协同发展。

“高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家见表 3.3。中国的核心论文数排名第一，占总论文数的 32.10%；美国紧随其后，占 31.69%；中国的平均出版年比美国的晚半年。排名前十的核心论文产出机构中，4 家来自中国、3 家来自美国、2 家来自比利时、1 家来自希腊（表 3.4）。除美国外，主要核心论文产出国家集中在东亚和西欧（图 3.1）。主要产出机构中，以比利时微电子研究中心、根特大学以及希腊的塞萨洛尼基亚里士多德大学三者间合作最多（图 3.2）。施引核心论文方面，中国领先，约占 45.65%，第二名是美国，其余国家占比均低于 10%（表 3.5）；排名前十的施引核心论文产出机构主要集中在中国和美国（表 3.6），体现了中美科研机构对该主题的高度关注。

未来 5~10 年，高速低功耗片上光互连技术将从“可行性验证”走向“规模化应用”的关键阶段（图 3.3）。其发展重点首先体现在器件迭代方面，但相比于单一器件性能的突破，未来的研究重心将逐渐转向系统级能效优化和集成度提升。

表 3.3 “高速低功耗片上光互连技术”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	78	32.10	1 333	17.09	2021.8
2	美国	77	31.69	1 892	24.57	2021.2
3	日本	21	8.64	131	6.24	2020.9
4	英国	20	8.23	336	16.80	2021.4
5	比利时	18	7.41	260	14.44	2020.4
6	希腊	14	5.76	105	7.50	2020.4
7	德国	12	4.94	43	3.58	2021.1
8	法国	9	3.70	115	12.78	2020.0
9	意大利	9	3.70	67	7.44	2022.2
10	韩国	9	3.70	54	6.00	2022.0

表 3.4 “高速低功耗片上光互连技术”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	17	7.00	131	7.71	2022.0
2	比利时微电子研究中心	13	5.35	185	14.23	2020.5
3	上海交通大学	11	4.53	414	37.64	2022.8
4	塞萨洛尼亚里士多德大学	11	4.53	87	7.91	2020.0
5	加州大学斯塔芭拉分校	10	4.12	588	58.80	2021.8
6	华中科技大学	10	4.12	356	35.60	2021.6
7	浙江大学	9	3.70	213	23.67	2022.0
8	根特大学	9	3.70	124	13.78	2020.0
9	英特尔公司	8	3.29	413	51.62	2022.0
10	哥伦比亚大学	8	3.29	276	34.50	2020.9

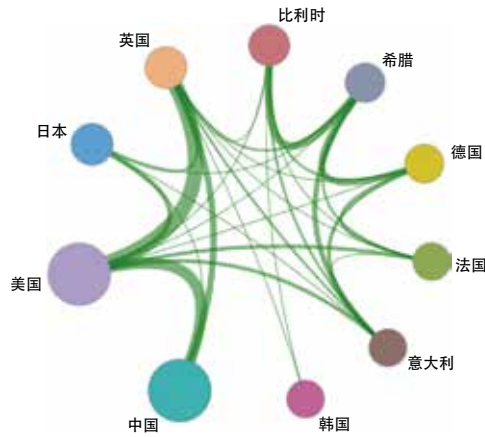


图 3.1 “高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

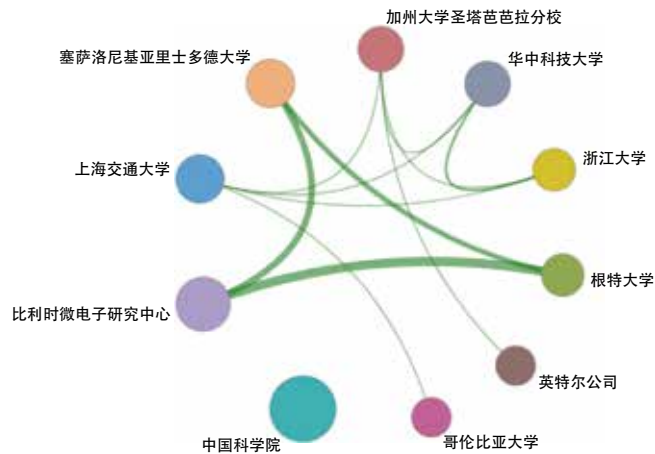


图 3.2 “高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 3.5 “高速低功耗片上光互连技术”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	1 300	45.65	2023.0
2	美国	654	22.96	2022.6
3	英国	141	4.95	2022.5
4	日本	128	4.49	2022.5
5	加拿大	114	4.00	2022.5
6	德国	112	3.93	2022.8
7	新加坡	86	3.02	2022.9
8	意大利	82	2.88	2022.9
9	印度	78	2.74	2022.7
10	韩国	77	2.70	2022.7

表 3.6 “高速低功耗片上光互连技术”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	238	24.24	2023.0
2	浙江大学	125	12.73	2023.0
3	上海交通大学	118	12.02	2022.6
4	华中科技大学	101	10.29	2023.0
5	加州大学圣塔芭芭拉分校	90	9.16	2021.7
6	北京大学	63	6.42	2022.7
7	鹏城实验室	53	5.40	2023.2
8	北京邮电大学	51	5.19	2023.3
9	哈尔滨工业大学	49	4.99	2022.7
10	慧与科技公司	48	4.89	2022.0

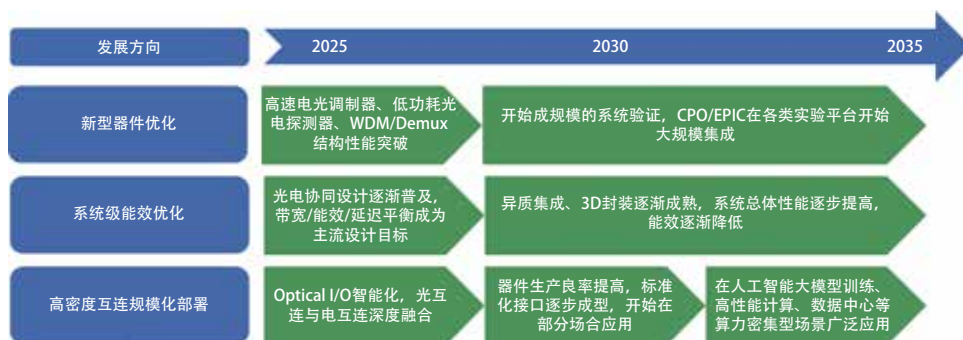


图 3.3 “高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿的发展路线

在发展趋势上：① 高速电光调制器、低功耗光电探测器以及 WDM/Demux 等关键组件仍将持续优化，以提升速率和降低能耗。共封装光学（CPO）、电子-光子集成电路（EPIC）等新型架构将在 2030 年前后实现规模化验证和应用，推动光互连从实验室逐步走向产业部署。② 通过异质集成、三维封装以及光电协同设计，片上光互连和芯片间通信能够实现更高层次的整体优化，逐步克服传统电互连的带宽和能耗瓶颈。③ Optical I/O 智能化、光互连与电互连深度融合将成为重要方向，器件生产良率和标准化接口也将不断成熟，进一步降低大规模应用的门槛。未来，片上光互连不仅是半导体与光子学交叉融合的技术制高点，更是算力体系持续演进的核心动力。在算力需求快速攀升的背景下，其能效和带宽优势将为 AI 模型训练、高性能计算、超大规模数据中心等场景提供关键支撑。尤其是图形处理单元（GPU）、芯粒架构的互连需求，将推动高速光互连成为支撑异构计算与分布式系统的核心基础设施。

总体来看，未来高速低功耗片上光互连将逐步渗透至服务器、加速器互连、边缘智能设备等产业化部署，并有望与新型计算范式相结合，如类脑计算和量子加速，从而拓展应用边界。该前沿不仅具有巨大的技术潜力，也将在算力、能效与系统架构优化的驱动下，展现广阔的产业化和应用前景。

### 3.1.2.2 跨域异构无人系统智能控制理论与方法

跨域异构无人系统智能控制旨在通过集成空、天、地、海等多域的异构无人平台，突破传统单域任务的局限，解决复杂环境下的跨域协同瓶颈。其核心是依托“感知—决策—执行”的闭环智能控制架构，实现跨域异构无人系统任务级自主，在灾害救援、军事协同、智慧城市等应用场景中展现出巨大的颠覆性潜力。

跨域异构无人系统研究最初起源于单域同构多平台协同（如多旋翼无人机编队、车联网协作）以及单平台多传感器融合的延伸。随着无人平台类型日益多样化、任务复杂性不断提升，单域无人系统逐渐难以满足多任务需求。例如，在海空联合作战、天地一体化观测以及空地协同物流等任务中，单一域内的无人系统往往存在感知盲区、决策滞后或执行能力不足等问题。近年来，传感器的小型化、边缘计算能力的提升以及异构通信技术的发展，使研究重心逐步从“同构群体的队形控制”转向“异构平台跨域协同与任务映射”。在过去 5 年间，人工智能与深度学习的快速发展进一步推动了该领域的进展：一方面，基于数据驱动的行为生成方法与模型驱动的安全保障框架实现并行发展；另一方面，边缘-云协同计算架构使复杂的全局规划能够在分布式环境下实时完成，从而显著提升了跨域协作的可行性与规模化应用前景。

跨域异构无人系统的研究兼具战略价值、社会价值与经济价值。在战略层面，它有助于提升国防态势感知与快速反应能力；在社会层面，它可广泛应用于灾害救援与环境监测；在经济层面，它将推动智慧物流与自动化港口等新兴产业的发展。通过不同平台的能力互补，跨域协作能够显著提升任务效率与系统鲁棒性。例如，高速远距侦察平台与近距执行平台的协同可缩短响应时间并降低风险暴露；异构感知融合可提高目标识别与跟踪的可靠性。因此，相关理论与方法的成熟程度将直接决定跨域自主系统在复杂环境下的实用化水平与安全可控性。

当前的主要研究方向可以概括为3类：跨域感知与信息融合方法、自主协同与鲁棒控制算法、任务分配与智能决策机制。其中，在跨域感知与信息融合方法方面，强调解决数据异步、带宽受限与语义不一致问题，重点研究时序对齐、信息可信度评估、基于图/因果的多模态融合等方法，并结合不确定性量化技术实现鲁棒感知与认知。在自主协同与鲁棒控制算法方面，将强化学习、在线自适应估计与鲁棒控制结合，提出具有安全性和稳定性保障的协同控制算法，以支持无人系统在未知、动态环境中稳健运行。在任务分配与智能决策机制方面，提出“局部低阶控制+全局策略规划”的分层架构，局部层侧重保障平台安全与稳定，全局层则面向任务分配与跨平台路径协同，并在此基础上，利用深度强化学习、模仿学习和博弈论等方法，实现策略生成的实时性与全局性能最优。

“跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家见表3.7。中国的核心论文数排名第一，占总论文数的51.37%；美国和意大利紧随其后，分别位列第二、三位。此外，英国核心论文数虽然排名第五，但其篇均被引频次却位居第一，体现了论文的高质量。排名前十的核心论文产出机构中，7家来自中国，其余3家分别来自新加坡、挪威及英国（表3.8）。主要产出国家间的合作网络如图3.4所示，中美之间的合作交流最为频繁。

表 3.7 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”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	中国	75	51.37	997	13.29	2022.7
2	美国	32	21.92	291	9.09	2021.4
3	意大利	11	7.53	63	5.73	2021.9
4	印度	9	6.16	124	13.78	2021.6
5	英国	7	4.79	212	30.29	2021.4
6	德国	7	4.79	30	4.29	2022.4
7	西班牙	6	4.11	62	10.33	2021.7
8	葡萄牙	6	4.11	40	6.67	2022.3
9	加拿大	5	3.42	30	6.00	2021.4
10	法国	5	3.42	21	4.20	2022.0

表 3.8 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”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	西安电子科技大学	5	3.42	140	28.00	2023.4
2	北京邮电大学	4	2.74	111	27.75	2021.5
3	电子科技大学	3	2.05	243	81.00	2021.3
4	上海交通大学	3	2.05	31	10.33	2022.3
5	武汉大学	3	2.05	18	6.00	2024.0
6	浙江大学	3	2.05	7	2.33	2023.7
7	同济大学	3	2.05	6	2.00	2022.0
8	南洋理工大学	3	2.05	1	0.33	2024.0
9	奥斯陆大学	2	1.37	205	102.50	2021.0
10	坎皮纳斯州立大学	2	1.37	112	56.00	2020.0

机构合作方面，中国的多家机构之间存在合作关系，中国的西安电子科技大学、浙江大学与新加坡南洋理工大学间交流紧密（图 3.5）。施引核心论文方面，中国遥遥领先，超过总数的一半，第二名是美国，其余国家占比均低于 10%（表 3.9）；排名前十的施引核心论文产出机构如表 3.10 所示，10 家机构全部来自亚洲，且除排名第五的南洋理工大学来自新加坡外，其余 9 家都来自中国，体现了亚洲特别是中国的科研机构对该主题的高度关注。

在过去 5 年中，跨域异构无人系统智能控制理论与方法取得诸多研究成果。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，存在众多亟待解决的瓶颈问题。如图 3.6 所示，未来 5~10 年，跨域异构无人系统智能控制将沿以下 3 条主线演进：

第一，可验证的学习控制方法。在保持性能提升的同时，发展面向控制任务的安全强化学习、对抗鲁棒训练与证明性策略合成方法。通过将“学习”与“验证”深度结合，使得控制策略既能具备高性能，又能在实际应用前提供形式化的安全性与稳定性证明，从而显著降低工程应用风险。这一方向将推动“黑箱式学习”逐步走向“可解释、可验证、可部署”的新范式。

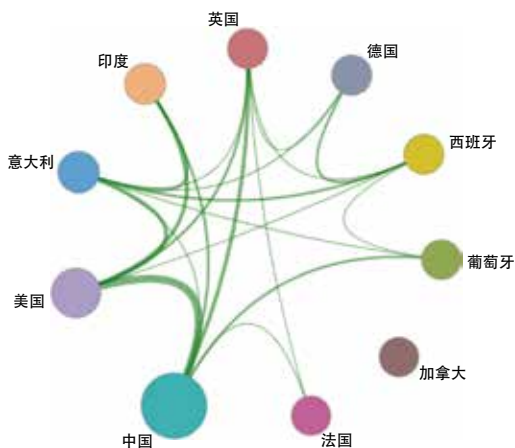


图 3.4 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

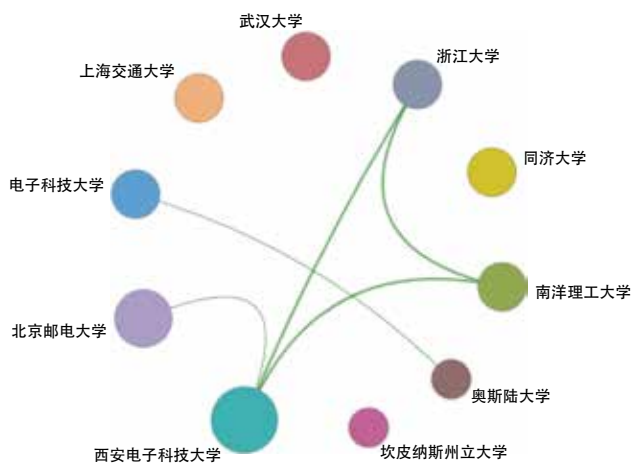


图 3.5 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 3.9 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”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	895	51.82	2023.3
2	美国	176	10.19	2022.9
3	印度	115	6.66	2023.2
4	英国	109	6.31	2022.9
5	韩国	78	4.52	2022.9
6	沙特阿拉伯	78	4.52	2023.0
7	加拿大	72	4.17	2022.7
8	澳大利亚	59	3.42	2023.2
9	意大利	57	3.30	2023.2
10	新加坡	47	2.72	2023.1

表 3.10 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”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	西安电子科技大学	39	10.99	2023.0
2	北京邮电大学	38	10.70	2023.0
3	中国科学院	35	9.86	2023.1
4	上海交通大学	34	9.58	2022.9
5	南洋理工大学	32	9.01	2023.6
6	中国石油大学（华东）	31	8.73	2023.2
7	北京航空航天大学	31	8.73	2023.5
8	电子科技大学	30	8.45	2022.4
9	北京理工大学	29	8.17	2023.4
10	南京航空航天大学	28	7.89	2023.6



图 3.6 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿的发展路线

第二，能力级联与软硬件协同。未来研究将强调软硬件能力的级联与协同，推动形成从仿真验证、半实物测试到实地试验的多层级验证体系与标准化评估指标，加速技术从实验室走向实际应用。同时，平台的感知、算力与通信能力将逐步走向“能力池化、服务化”，即将原本绑定于

平台的能力抽象为可调用的服务模块。任务执行则通过跨域的“能力编排”与调度来完成，实现真正意义上的软件定义跨域系统。

第三，标准化接口与互操作性。为推动跨域无人系统的规模化应用，需要建立统一的国际/行业标准，包括通信协议、能力描述语言与数据交换格式等。这不仅能够显著降低跨平台集成的复杂性与成本，还将促进跨组织、跨领域的系统级互操作。此外，在技术发展的同时，还需要构建配套的政策与法规框架，确保跨域协作合法合规、安全且符合伦理规范。通过技术标准与制度规范的双轮驱动，有望逐步形成一个开放、共享且可持续发展的跨域无人系统生态。

### 3.1.2.3 通感算智控一体化网络系统理论与技术

通感算智控一体化网络是新一代信息技术融合创新的代表，反映了智能时代对网络能力的更高要求。从 1G、2G 语音服务时代，到 3G、4G 移动互联网时代，再到 5G 服务化架构开启了以行业专网为代表的产业互联网时代，网络一直扮演着“通信管道”的角色，提供基本的数据传输能力。随着 5G-A/6G、低空经济、算力网络、AI 大模型应用的发展，迫切需要网络转变角色，深入信息的采、传、算、控全流程，深度融合多技术要素，拓展全新的能力维度。国际电信联盟无线电通信组标准化组织（ITU-R）明确了“通信-感知-计算-智能-控制”融合目标，该领域不仅涉及通信工程、人工智能、系统工程等多学科交叉，更需突破传统网络架构，用理论创新与技术攻关推动网络从“被动连接”向“主动智能”转型，成为支撑未来数字经济发展的新型基础设施。

该领域的发展可划分为 3 个层面：① 基础层面，各维度持续突破，如通信迈向超高速、确定性传输，感知侧重多频段、高精度、多源数据融合技术；② 融合层面，实现多要素协同，如通感融合尝试利用通信基站附加雷达感知功能，通算融合通过分布式计算、异构算力缓解端侧高算力需求；③ 一体层面，以任务为中心，重点突破通感算智控多能力的系统性整合、内生式部署，通过统一资源编排、联合状态感知、多要素协同调度来保障服务的任务高效执行和用户体验质量（QoE）。

该领域的发展是“数智化”时代的发展要求，是新场景、新需求的触发：通信与感知的互补解决了传统雷达感知依赖专用设备的成本高、覆盖有限等问题，催生 6G 通感一体（ISAC）新业务；通算融合突破端、边、云异构算力的协同，通过计算任务卸载，满足推理、渲染等任务对算力的高需求；通智融合将赋予网络智能分析与决策能力，解析用户意图，实现用户定制化服务、网络的“自动驾驶”；通控融合保障了控制指令的可靠传输与即时执行，其构建的低时延、高可靠通信-控制闭环，支撑工业互联网中设备精准协同、自动安全避险、远程操控等应用。通感算智控一体化网络系统以“通”为基础，通过多要素协同，让网络成为信息服务的平台。

“通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家见表 3.11。中国的核心论文数排名第一，约占总论文数的 69%；其次为美国，占比为 29.65%；英国、澳大利亚和加拿大紧随其后；这几个主要产出国家的论文平均出版年都集中在 2021 年上半年。国家间的交流主要以中国、美国为核心展开，各国合作密切（图 3.7）。排名前十的核心论文主要产出机构如表 3.12 所示，9 家来自中国、1 家来自新加坡。各产出机构间合作频繁，除中国科学院外，都至少与其中 3 家有合作关系，其中澳门大学更是与超过半数的机构进行了合作（图 3.8）。施引核心论文方面，中国排名第一，约占 48%，美国占比为 11.10%，排名第二

(表 3.13)；排名前十的施引核心论文主要产出机构中，除南洋理工大学外，其余 9 家机构都来自中国(表 3.14)，体现了中国科研机构对该前沿的高度关注。

表 3.11 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”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	中国	119	69.19	17 643	148.26	2021.2
2	美国	51	29.65	8 819	172.92	2021.2
3	英国	25	14.53	5 802	232.08	2021.6
4	澳大利亚	22	12.79	4 391	199.59	2021.1
5	加拿大	19	11.05	2 633	138.58	2021.1
6	新加坡	17	9.88	2 844	167.29	2020.8
7	韩国	14	8.14	1 997	142.64	2021.0
8	法国	10	5.81	2 112	211.20	2021.0
9	意大利	9	5.23	3 978	442.00	2020.8
10	德国	9	5.23	1 533	170.33	2021.8

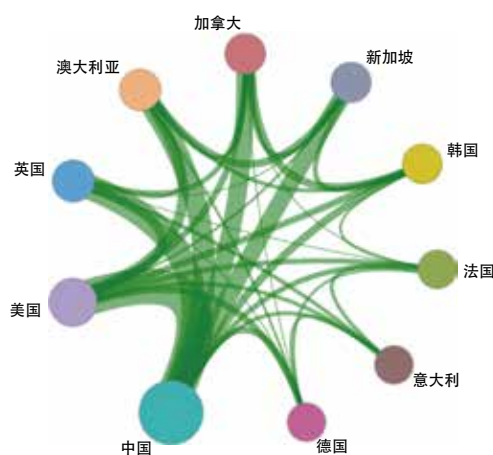


图 3.7 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 3.12 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”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	北京邮电大学	19	11.05	3 757	197.74	2021.6
2	东南大学	14	8.14	1 617	115.50	2022.3
3	浙江大学	11	6.40	1 854	168.55	2021.1
4	南洋理工大学	9	5.23	1 747	194.11	2020.6
5	电子科技大学	9	5.23	1 604	178.22	2020.8
6	澳门大学	9	5.23	1 070	118.89	2021.8
7	西安电子科技大学	8	4.65	1 051	131.38	2021.4
8	南方科技大学	7	4.07	2 243	320.43	2021.9
9	清华大学	7	4.07	1 180	168.57	2021.7
10	中国科学院	7	4.07	1 057	151.00	2020.0

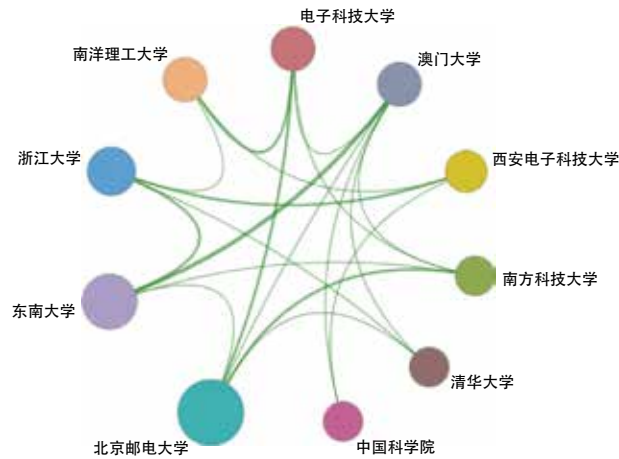


图 3.8 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 3.13 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”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	10 598	47.93	2023.0
2	美国	2 455	11.10	2022.8
3	英国	1 751	7.92	2023.0
4	加拿大	1 226	5.54	2022.8
5	印度	1 184	5.35	2023.1
6	韩国	1 153	5.21	2023.0
7	澳大利亚	899	4.07	2022.8
8	新加坡	800	3.62	2023.3
9	沙特阿拉伯	773	3.50	2023.0
10	德国	717	3.24	2023.1

表 3.14 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”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	北京邮电大学	898	16.21	2023.0
2	东南大学	798	14.41	2023.3
3	西安电子科技大学	526	9.50	2023.0
4	电子科技大学	526	9.50	2023.1
5	清华大学	485	8.76	2023.0
6	南洋理工大学	482	8.70	2023.3
7	浙江大学	460	8.30	2023.2
8	中国科学院	403	7.28	2022.9
9	上海交通大学	355	6.41	2023.2
10	北京交通大学	303	5.47	2023.1

当前，通感算智控一体化网络系统理论与技术的应用和研究仍处于起步阶段，存在众多亟待解决的关键性、基础性问题。如图 3.9 所示，该前沿未来 5~10 年重点发展方向包括 5 个方面：

- 1) 通感融合方向：从单站感知向终端感知、多站协作发展，从低频、毫米波向太赫兹演进，以一体化协议与架构、网络化协作、AI 辅助感知等实现高精度感知与通信。
- 2) 通算融合方向：以端边云算力的普惠服务为目标，通过端网协同的操作系统、中间件等深度协同计算环境的突破实现算力的按需调用，通过“在网计算”“算力路由”等技术，突破算网资源的联合感知和调度，并实现国际标准化。
- 3) 通智融合方向：向网络智能自治、“自动驾驶”能力演进，实现网络内生智能、全域智能服务，结合分布化、机会式模型推理等 AI 应用架构，实现网络架构与 AI 应用架构的一体适配，向智能体通信网络方向发展。
- 4) 通控融合方向：从通信与控制协同架构、跨域控制与多系统协同向实时化、精准化、自治化发展，实现通信与控制指令的微秒级同步，支撑无人化产线等新一代工业互联网。
- 5) 通感算智控一体：向多模态协同、多要素融合的平台化服务网络发展，通过全局优化实现关键要素的资源动态调配，形成“通信-感知-计算-智能-控制”无缝衔接的新范式，突破算力、连接、能效的瓶颈。

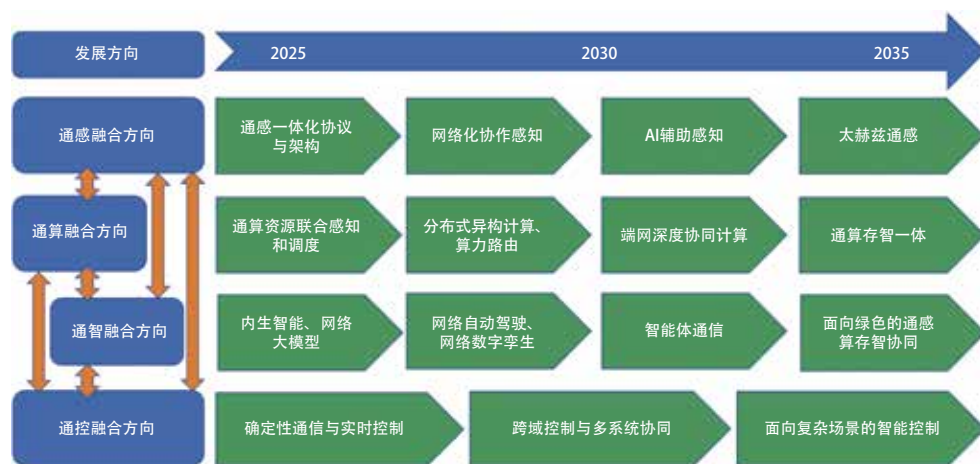


图 3.9 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿的发展路线

## 3.2 工程开发前沿

### 3.2.1 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 3.15，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，“高端装备制造数字孪生与精准调控技术”“大模型推理和优化部署技术开源实现”“大尺寸复杂工业零部件实时检测方法”为数据挖掘与专家提名前沿，其余为专家提名前沿。各开发前沿涉及的核心专利 2019—2024 年公开情况见表 3.16。

表 3.15 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	被引数	平均被引数	平均公开年
1	人工智能赋能的科研自动化系统开发	79	138	1.75	2022.9
2	极紫外光刻元件检测技术	270	1 111	4.11	2022.3
3	亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化	451	4 163	9.23	2022.7
4	灵巧手智能感知与控制技术	211	921	4.36	2021.6
5	高端装备制造数字孪生与精准调控技术	348	1 189	3.42	2022.5
6	大模型推理和优化部署技术开源实现	160	239	1.49	2023.4
7	大尺寸复杂工业零部件实时检测方法	368	737	2.00	2022.2
8	智能体驱动的电子设计自动化技术	76	390	5.13	2022.8
9	端到端低时延高吞吐智算网技术	173	1 551	8.97	2022.8
10	水下地形光学测量设备	172	559	3.25	2022.9

表 3.16 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	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	人工智能赋能的科研自动化系统开发	2	7	9	3	15	43
2	极紫外光刻元件检测技术	27	29	38	31	45	100
3	亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化	24	29	41	47	120	190
4	灵巧手智能感知与控制技术	29	34	37	38	42	31
5	高端装备制造数字孪生与精准调控技术	20	29	32	64	75	128
6	大模型推理和优化部署技术开源实现	1	7	2	14	30	106
7	大尺寸复杂工业零部件实时检测方法	39	34	38	67	76	114
8	智能体驱动的电子设计自动化技术	2	5	2	17	19	31
9	端到端低时延高吞吐智算网技术	5	6	14	32	50	66
10	水下地形光学测量设备	6	5	14	29	45	73

### (1) 人工智能赋能的科研自动化系统开发

人工智能科研自动化 (artificial intelligence research automation, AIRA) 旨在赋予 AI 类似或超越人类科学家的科研能力, 进而实现 AI 辅助或主导下的自动化科学研究, AIRA 的实现将极大地提升科研与科技创新的速度和质量, 从而促进科研范式的颠覆性转变, 即从人类智能主导的科研模式向 AI 主导的科研范式转变。“人工智能赋能的科研自动化系统开发”的内涵就是通过研发先进的 AI 驱动的系统或平台并深度应用于科研全流程, 以赋能 AIRA 的实现。

该前沿的主要研发方向围绕 AI 系统在研究闭环中的赋能范围展开, 最终目的是使 AI 能够更全面地应用于更多科研环节, 以实现部分科研环节或者完整科研闭环的 AIRA。一个真实的科研过程闭环通常包含“研究想法和问题的提出—研究方案和实验的设计—实验的执行和完成—实验结果的收集和分析—研究结论和报告的产生—研究评议”。为此, 根据 AI 系统在研究闭环中

所赋能的自动化范围，可以分为部分式 AIRA 系统的研发和完全式 AIRA 系统的研发：如果一个 AI 系统能够以自动化的方式辅助或完成上述一个或多个环节，则称之为部分式 AIRA 系统；而如果一个 AI 系统能够以独立自主的方式完成或主导上述科研闭环，则称之为完全式 AIRA 系统。

该前沿的研究趋势包括：全学科通用的科学数据电子化方法与标准规范；面向研究闭环的流程自动化与任务编排技术；AI 自动化的创新研究想法与问题的提出；AI 自动化的研究方案与实验设计；AI 或机器人驱动的自动化实验执行与数据采集；AI 自动化的实验结果收集与分析；AI 研究结论、报告与论文的自动化生成；AI 自动化的研究评议，新型学术发表范式的探索；AIRA 系统的安全与合规治理；通用型与领域专用型 AIRA 系统的研发与应用；跨学科与跨机构的开放共享与创新科研合作分工机制。

## （2）极紫外光刻元件检测技术

极紫外（EUV）光刻元件检测技术是指针对 EUV 光刻系统中关键光学元件（如掩模、反射镜、多层膜、滤光片、投影光学系统等）的精密检测、缺陷定位与性能评估的技术体系。由于极紫外光刻使用的波长极短且对污染、缺陷极为敏感，任何微小瑕疵都会显著影响成像质量与工艺稳定性，从而直接制约芯片制程的良率与分辨率。因此，相关检测技术与设备仪器必须具备高灵敏度、高分辨率与高精度，以满足形貌、缺陷、光学参数等多维度的综合需求，保障 EUV 光刻系统的高性能制造与长期稳定运行。

极紫外光刻元件检测技术是保障先进制程稳定量产的核心基础能力，其主要研究方向包括：

① 自主研发高端检测装备与核心仪器，包括高精度 EUV 计量系统、真空兼容检测平台、超高稳定光源模块以及纳米级运动控制装置，以满足先进节点严格的计量要求；② 在 EUV 波段下开展原位与在线波长检测，实现制程与检测环境的一致性，减少环境差异引起的测量误差；③ 利用干涉测量、散射计、EUV 显微成像等方法对多层膜和反射镜的膜层厚度均匀性、反射率及应力状态进行高精度评估；④ 针对掩模在制造、修复及服役全过程中可能出现的缺陷进行快速检测与修复效果验证，并结合人工智能与大数据分析技术，对缺陷模式和演化趋势进行建模，实现器件寿命预测与预测性维护；⑤ 通过全生命周期质量管理，将检测、分析与工艺调整构建成闭环，持续提升设备利用率和制程良率。

未来，极紫外光刻元件检测技术将朝着更高分辨率、更高速率和非接触化的方向发展，并与光刻机深度融合实现实时在线监测，实现半导体加工全流程的实时在线监测与自适应质量控制。国际上的领先机构和企业正集中资源突破多个维度的技术瓶颈，包括面向 EUV 投影物镜的超稳定干涉测量、多层膜反射率的绝对定标计量、掩模缺陷在纳米至皮米范围内的精准识别与分类，以及在真空超洁净环境下的波前动态测量。同时，人工智能与大数据分析在缺陷机理建模、寿命预测以及预测性维护中的应用也正逐步成熟，实现检测数据与工艺优化的闭环联动。全球各方还在推进覆盖硬件架构、光源稳定性控制、光学传感器灵敏度提升和高速数据处理平台的系统级突破，并着力构建可跨国互认的计量标准体系，以适配 2 nm 及以下节点的大规模量产需求。当下，在该领域内的国际合作不仅集中于标准同步和数据互认，还向核心技术联合研发、关键器件联合验证等方向扩展，为推动 EUV 检测技术的持续创新与产业生态完善奠定基础。

### （3）亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化

亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化，是指在芯片设计与制造过程中有意识地将制造约束、工艺可行性与工艺可调节项前置并融入设计决策，通过跨层次的联合建模、联合优化与双向反馈，使设计意图与制造能力形成闭环互驱，从而在功耗、性能、面积与成本（PPAC）等系统级目标上实现全局最优的一整套方法论。其旨在打破传统设计与制造的壁垒，应对原子级物理效应和高昂成本压力，建立一个由 AI 驱动、二者深度融合的闭环生态系统，以驱动芯片研发范式从分阶段线性流程向系统级协同设计过程演进。

当前该前沿的研究主要聚焦于三大核心方向。首先是设计端智能化，在亚 5 nm 节点下，传统设计空间探索已难以应对极端的 PPA 权衡，AI 原生 EDA 工具成为必然选择。例如，利用强化学习与生成模型，不仅可在极大搜索空间内自主发现近似最优解，还能对更小节点的可行设计提前验证和迁移优化。其次是制造端智能化，亚 5 nm 节点工艺极度复杂，工艺误差已接近原子级别，通过在晶圆厂部署 AI 和数字孪生技术，实现对光刻、沉积、蚀刻等关键工艺的超高精度建模、预测与控制，提升良率和效率，同时虚拟工艺线可在设计初期即评估未来更小制程的可行性与风险。最后，也是最关键的，构建连接设计与制造的桥梁，通过设计-工艺协同优化（DTCO）、系统-工艺协同优化（STCO）等方法论，将制造端的约束和可能性实时反馈并融入设计决策中。这一机制确保设计制造协同优化不仅能适应现有工艺，还能进一步随节点尺度减小而持续进化。这些研究方向的融合是推动亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化从理念走向现实的基石。

为应对亚 5 nm 及未来节点挑战，芯片系统设计与制造工艺协同优化将从当前分散的方法论演进为一个全栈式、自学习的智能平台，并形成自我演进的新生态：物理制造数据持续优化设计 AI，而更智能的设计则指导产生更优的制造结果，实现生态的自我进化。其最终形态将是一个能让设计工具实时查询虚拟工厂状态、实现从材料到系统全栈协同优化的智能系统，为后摩尔时代的计算创新提供源源不断的动力。

### （4）灵巧手智能感知与控制技术

灵巧手智能感知与控制技术主要指灵巧手融合视觉、触觉、力觉等多模态物理信息，实现作业环境与对象的智能感知，并且模仿人手的控制策略，实现灵巧手精准抓取操作的技术。

灵巧手智能感知与控制技术主要依托视触力觉集成感知、高功率密度驱控一体化和高维自由度仿人手操作技能学习技术，开发高密度集成感知的灵巧手触觉传感器，结合深度学习、强化学习、扩散模型等方法，研究多区域通道的接触感知、多模态感知与高维自由控制的紧耦合集成以及通用操作技能迁移学习等问题。例如，人形机器人结合灵巧手感知与控制技术，可以更广泛应用于多种场景的多个任务。

灵巧手智能感知与控制的发展趋势包括：① 研发更通用、可快速迁移新任务的视触力觉感知集成“灵巧操作技能基础模型”；② 提升灵巧手的小型化、轻量化、智能化，满足通用人形机器人的操作需求；③ 探索人机协作中的自然语言交互控制，提升操作技能学习效率。灵巧手智能感知与控制发展的最终目标是在动态真实世界中实现接近甚至超越人类水平的通用、鲁棒操作能力，服务于医疗康复、先进制造、家庭服务、太空作业等广泛场景，进一步解放人类的双

手，推动社会的进步与发展。

#### (5) 高端装备制造数字孪生与精准调控技术

高端装备制造数字孪生与精准调控技术主要指通过物理机理、数据驱动或数物融合等建模方式，构建与实际制造工艺过程一致并随之动态演变的高保真孪生模型，基于孪生模型的虚拟感知与预测能力，实现对工艺参数的在线调控，以保证高端装备的制造精度。

该领域目前主要研究方向包括：① 多物理场耦合的工艺孪生建模，构建高精度代理模型，表征复杂工艺过程涉及的力、热、流体等多物理场耦合作用；② 数字孪生模型的动态更新，基于多模态传感器数据融合，利用数据同化、参数估计等技术实现孪生模型随物理空间的同步演化；③ 孪生模型验证与不确定性量化，基于概率表征与不确定性传播理论，量化数据感知、数据同化、孪生建模、物理执行等多源不确定性及其对模型预测的综合影响；④ 孪生模型驱动的制造工艺在线决策，基于孪生模型对制造精度的预测能力，采用预测控制、强化学习等方法实现在线的工艺滚动优化。

该领域未来发展方向包括：① 全制造周期集成，从加工、装配等单一工艺环节的数字孪生，向跨工艺、全制造周期的系统化集成发展；② 服役性能数字孪生，制造精度直接影响装备的服役性能，可以在制造过程中进一步预测服役性能，并实现面向服役性能的制造工艺调控；③ 实时性与边缘孪生，借助边缘计算、GPU 加速等技术，支持高实时的工艺孪生与决策。

#### (6) 大模型推理和优化部署技术开源实现

随着大语言模型（large language model, LLM）和多模态基础模型在自然语言处理、计算机视觉、代码生成等领域的广泛应用，其推理效率与部署可扩展性正成为制约产业化落地的关键瓶颈。为应对这一挑战，开源社区与产业界正加速推进大模型在推理加速、内存压缩、异构硬件适配、分布式部署等方面的优化技术研究，并致力于提供可复用、可扩展的开源实现。

该工程前沿聚焦于以下几个核心方向：① 以张量并行与流水线并行为代表的并行策略实现，用于支持百亿级至万亿级模型的分布式部署；② 模型量化、剪枝与蒸馏等轻量化技术，以减少推理时的计算与存储开销；③ 适配多样化硬件架构（如 GPU、TPU、ASIC、FPGA 等）的推理编译优化；④ 低延迟推理与弹性服务调度机制，以支撑在线服务与边缘计算场景；⑤ 标准化的开源工具链构建，如 vLLM、SGLang、llama.cpp、TensorRT-LLM、LMDeploy、KTransformers 等，推动行业生态协同发展。

未来趋势将进一步体现为“异构融合、高效弹性、自治部署、全链条开源”的综合能力建设，推动大模型由“能用”向“高效可用”演进，从而支持智能化应用在千行百业的规模化部署。

#### (7) 大尺寸复杂工业零部件实时检测方法

大尺寸复杂工业零部件通常是指物理尺寸超出标准加工或检测设备包络范围的复杂结构部件，如飞机蒙皮、高铁车身、风电叶片等高端装备大型零部件。大尺寸复杂工业零部件实时检测技术涵盖对检测对象几何尺寸测量数据的快速获取、处理和即时反馈，同时强调对零部件外观缺陷、内部结构异常、装配偏差等各类质量问题的自动化识别与判断。

目前，大尺寸复杂工业零部件实时检测方法主要研究方向包括：① 多源感知与数据融合——

整合激光跟踪仪、室内 GPS、高速摄影测量系统、无损检测以及机器视觉等多种先进传感器，实现对大型零部件几何信息、表面形貌、缺陷特征等多维度数据的实时、高频采集；② 人工智能与深度学习辅助——利用深度学习强大的特征提取和模式识别能力，实现对微小、低对比度、不规则缺陷的精准识别与分类，包括点云配准、去噪、分割算法优化，以及基于神经网络的几何特征与缺陷识别；③ 实时数据处理与闭环反馈——开发高效的数据处理算法和自适应控制系统，确保检测结果能够即时反馈至生产线，指导加工、装配或进行缺陷修复，从而实现生产过程的实时监控与闭环质量控制；④ 专用自动化检测系统构建——发展固定式和柔性化的专用检测系统，通过集成关节臂机器人、直线运动单元、载运平台等自动化执行机构，实现对不同尺寸、批量零部件的高效自动化检测。

未来，大尺寸复杂工业零部件实时检测方法将朝着全面智能化和自动化方向深度发展：

① 自主分析与智能决策——系统将能够基于三维模型、标注和知识库，自动提取检测要素、规划检测路径，并进行检测流程与精度的仿真，最终实现对产品质量状态的自主判断；② 自主学习与自适应优化——系统将具备从海量检测数据中学习缺陷模式、优化检测流程、提升评价方法的自适应能力，从而持续降低人工干预成本，显著提升检测效率与质量；③ 检测数据与产品全生命周期质量管理——将检测数据融入数字孪生体系，贯穿产品设计、制造、使用、维护的全生命周期，提供全面的质量追溯与风险预判。

#### （8）智能体驱动的电子设计自动化技术

智能体驱动的电子设计自动化（EDA）技术是指以智能体系统为核心，面向电子系统设计，智能化地实现集成电路设计数据生成，并利用 EDA 工具进行设计优化，以满足电子系统需求的 EDA 与 AI 相结合的系列技术。该智能体系统可由多个具备不同集成电路设计领域知识的智能体组合而成，通过任务分配与协助，为设计者提供从需求定义到设计实现的端到端解决方案。

主要技术包括：① 集成电路设计领域大模型技术——具备集成电路设计知识、EDA 工具使用方法；② 设计需求分解技术——将电子系统设计需求分解为 EDA 工具所需的输入及约束，并生成测试方案及测试用例；③ 设计数据生成技术——能够生成数字电路的硬件代码、模拟类电路的拓扑结构及参数、三维集成芯片的架构及子芯粒功能定义；④ 设计优化技术——智能体系统基于强化学习或传统优化算法调用 EDA 工具完成芯片的功能及物理设计优化。

智能体驱动的 EDA 技术需在以下方面重点布局：① 数字逻辑芯片功能设计智能化技术——基于生成式 AI 技术生成 RTL 代码、测试方案及测试向量，并结合代码分析 / 仿真等验证技术完成芯片的功能验证；② 数字逻辑芯片物理设计智能化技术——通过智能体系统和 EDA 工具的联动，完成数字芯片版图设计并确保其满足时序及物理签核要求；③ 模拟芯片设计智能化技术——通过智能体系统和 EDA 工具的联动，完成模拟芯片电路拓扑选择与参数优化、版图设计及后仿验证，并确保其满足物理验证及可靠性需求；④ 三维集成芯片系统设计智能化——通过智能体系统完成三维集成芯片架构设计、功能划分，以及物理设计环节的芯粒布局规划与 TSV/BUMP 分布设计。

#### （9）端到端低时延高吞吐智算网技术

端到端低时延高吞吐智算网技术是智能计算与通信网络传输深度融合的新型基础设施技术，

具体是在智能计算与大规模分布式系统环境下，构建能够提供极低时延和高吞吐率的多模态信息传输与处理网络，以满足人工智能训练、推理以及科学计算等对算力和通信提出的低时延、高吞吐等极致性能要求。该前沿的核心在于突破传统网络在带宽利用、时延控制和智能调度上的瓶颈，深度融合计算架构、理论与方法，实现计算与通信资源的深度协同与高效调度。

其主要研究方向包括：① 新型通算一体化网络架构设计，探索软件定义网络（SDN）、网络功能虚拟化（NFV）和可编程交换机技术，支持大规模算力互联和动态资源编排；② 高性能通算一体化传输协议与调度机制，研究基于远程直接存储器访问（RDMA）、智能网卡和拥塞控制的新型协议，以降低传输开销并提升并行计算效率，实现低时延传输；③ 智能算网融合，利用 AI 驱动的网络优化方法，实现自适应流量调度、拥塞预测和资源按需分配；④ 异构资源协同，打通中央处理器（CPU）、GPU、张量处理器（TPU）和专用加速器之间的高速互联通道，形成多层次低时延通信能力。

发展趋势上，该技术将朝着智算网一体化和算力即服务的方向演进。一方面，未来智算网将与云、边、端紧密结合，构建跨地域、跨架构的统一算力调度平台，满足多样化 AI 应用场景；另一方面，将更加注重确定性低时延与弹性高带宽的并存，借助光互联、量子通信等新兴技术提升算网基础能力。同时，绿色节能和安全可信也是未来的重要趋势，力求在提升性能的同时兼顾可持续发展和隐私保护。端到端低时延高吞吐智算网技术正驱动网络从“信息传输通道”向“智能算力中枢”演进，成为 AI 时代的关键基础设施。通过系统级创新与垂直整合，该技术将助力实现“算力无处不在、网络智能高效”的愿景，赋能数字经济高质量发展。

#### （10）水下地形光学测量设备

水下地形光学测量设备通过主动发射光信号，接收并分析回波信号特性来反演海底三维地形信息。设备主要分为两类：一类搭载于水下移动平台，对深海海底进行精细测量；另一类搭载于空中平台，对浅水区域海底地形进行精细测量。

其主要研究方向包括：① 复杂介质光传输优化——研究抑制水体吸收、散射及大气-水界面动态效应的光学技术与精确校正模型，提升信号光传输距离；② 微弱信号探测与识别——研究高灵敏度探测技术和识别算法，增强对水下远距离极弱回波的捕获与辨别能力；③ 动态环境适应性提升——研究平台运动、水流扰动及波浪影响的方法，保障复杂作业环境下的测量稳定性与精度；④ 智能信息反演与处理——研究基于深度学习的数据处理技术，实现地形特征自动提取、三维地形重建、底质分类等功能。

该前沿的发展趋势表现为：① 发展单光子探测、多波段融合等新型水下激光雷达技术，实现更低功耗、更远探测距离、更高测深精度；② 发展深度集成的人工智能算法，实现海量激光雷达数据的实时噪声智能过滤、地形特征自动识别和在线三维重构。

### 3.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

#### 3.2.2.1 人工智能赋能的科研自动化系统开发

人工智能科研自动化（AIRA）是一个新兴方向，旨在让 AI 自动化完成从立题、文献调研与

评审、假说与实验设计、实验实施到论文生成的全流程科研闭环。其兴起建立在近年大模型能力的跃升之上（以 2023 年发布的 GPT-4 为代表，而 2025 年最新发布的 GPT-5 已在所有领域具备博士级知识问答能力）。

当前研究以面向特定科研环节的部分式 AIRA 为主，如文献调研与评审环节已有 AutoSurvey 与 DeepReview 等系统；也出现了面向计算机领域的完全式 AIRA 探索，如 Sakana AI 在 2025 年发布的“AI Scientist-v2”可自动完成从提出研究思路、设计实验，到编写代码、进行实验乃至撰写论文的全过程，其自动生成的论文已被计算机顶级会议 ICLR 2025 接收。在需要真实物理实验的学科，探索主要体现在三个方向：面向特定实验的自动化实验室（如加州大学伯克利分校 A-Lab 连续自主运行 17 天，发现 41 种新材料）、人形或类人机器人进行实验，以及“AI 主脑+人类代理”的人机协作范式（2023 年，西湖大学进行了“AI 主脑科学家”研究的首次探索；2025 年，斯坦福大学在 *Nature* 发表的研究展示了由 AI 担任首席科学家设计纳米抗体、人类完成合成与验证）。

AIRA 的重要性在于 AI 能够进行大规模、不间断的研究，有望显著提升创新速度并带来成果爆发式增长，有效提高国家科技竞争力。其主要研究方向包括：① 建立全学科通用的科研数据电子化方法与平台，制定统一数据标准与规范；② 面向各科研环节开发对应的 AIRA 系统；③ 推动分立的部分式系统协同整合与自动化流程编排，迈向覆盖科研闭环的完全式 AIRA；④ 突破以统计拟合为主的训练范式，引入因果推理与新型模型架构以增强创新能力；⑤ 在自然科学等需真实实验的领域实现完全式 AIRA。

“人工智能赋能的科研自动化系统开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家见表 3.17。结果显示，作为一个新兴方向，目前该前沿的核心专利总量偏少，主要集中在中国、印度、美国等国家。其中，中国公开的核心专利占全球总公开量的约 75%，展现了中国对这个领域浓厚的研究兴趣；美国虽然专利公开量仅占 1.75%，但在平均被引数上表现出色，位居第一。该前沿核心专利的主要产出机构见表 3.18，排名前十的主要产出机构的专利公开量差距不大；但在平均被引数上，武汉大学、中国石油天然气股份有限公司位居前列，体现了其较高的专利质量。

表 3.17 “人工智能赋能的科研自动化系统开发”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	43	75.44	48	92.31	1.12
2	印度	10	17.54	0	0.00	0.00
3	美国	1	1.75	4	7.69	4.00
4	瑞士	1	1.75	0	0.00	0.00
5	以色列	1	1.75	0	0.00	0.00
6	越南	1	1.75	0	0.00	0.00

表 3.18 “人工智能赋能的科研自动化系统开发”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	北京大学	2	3.51	2	3.85	1.00
2	中南大学	2	3.51	1	1.92	0.50
3	浙江大学	2	3.51	1	1.92	0.50
4	中国电子科技集团	2	3.51	0	0.00	0.00
5	上海大学	2	3.51	0	0.00	0.00
6	苏雷什·吉扬·维哈尔大学	2	3.51	0	0.00	0.00
7	武汉大学	1	1.75	12	23.08	12.00
8	中国石油天然气股份有限公司	1	1.75	9	17.31	9.00
9	武汉朗立创科技有限公司	1	1.75	6	11.54	6.00
10	天津职业技术师范大学	1	1.75	5	9.62	5.00

“人工智能赋能的科研自动化系统开发”工程开发前沿的发展路线如图 3.10 所示。当前，AIRA 研发仍处于起步阶段，面临诸多亟待突破的挑战。未来 5~10 年的重点将聚焦于以下 4 个方向：

第一，部分式 AIRA 系统。开发针对特定科研环节的部分式 AIRA 系统（如针对研究想法提出、研究方案和实验设计、任务编排、实验执行、论文撰写、同行评议等环节），在关键节点实现可落地的环节级自动化能力，为后续的端到端整合奠定基础。

第二，AI 驱动的自动化创新想法提出系统。AIRA 的根本目标不是自动复现已知发现，而是自动化产生并推动突破现有科技边界的新发现。为此：① 突破支撑创新的因果推理技术，使设想生成超越统计拟合，兼顾因果一致性与可证伪性；② 构建面向创新的新型模型与系统架构，建立持续学习与自主创新机制，在反馈中不断提升假说质量与新颖性；③ 迈向能够自动提出重大（或突破性）创新科研想法的 AIRA 系统，即在重大科学问题上具备提出突破性设想的能力，并形成从设想到验证的可执行路径。



图 3.10 “人工智能赋能的科研自动化系统开发”工程开发前沿的发展路线

第三，AI 驱动的自动化实验系统。尽管 AI 已具备较强的语言智能，但仍缺乏感知真实世界的有效途径与“躯体”，因此“实验设计—执行—验证”是迈向完全式 AIRA 的核心与最大挑战。即便 AI 能够提出创新设想，但若不能转化为可行的实验方案并在真实物理环境中完成验证，则缺乏科学实证性。为此：① 建立“AI 主脑+人类实验代理”的协作机制与平台，由 AI 主脑统筹设计与决策、人类完成操作与验证，打通“虚拟—现实”闭环；② 面向专门实验开发模块化自动化设备，并攻关设备的通用互联与自动化模块调度，提升复用与编排效率；③ 在上述路径成熟基础上，探索可执行实验的人形或类人机器人，进一步扩展实验自动化的通用性与覆盖面。

第四，完全式 AIRA 系统。当前完全式 AIRA 主要见于计算机科学领域；该领域可在虚拟空间以代码完成实验、无须与真实物理世界交互，因而实现门槛相对较低。但 AIRA 的终极目标是面向全学科的科研自动化。为此：① 数据是科学与 AI 的共同基石，需搭建全学科通用的科研数据电子化技术、标准与平台，统一数据结构与规范，支撑跨学科共享与流程追溯，为完全式 AIRA 提供坚实数据基础；② 推进部分式 AIRA 的协同整合、串联应用与自动化流程编排，将分散的环节级能力连成可复用、可追踪的端到端流程；③ 开发面向全学科、可自动化完整科研闭环的 AIRA 系统，形成从想法生成、实验实施到论文撰写与评审的自主闭环，并在多学科场景稳定运行。

### 3.2.2.2 极紫外光刻元件检测技术

极紫外光刻元件检测技术是支撑 EUV 光刻系统高精度制造、保障系统稳定高效运行的关键技术，主要涉及在真空短波长条件下对掩模版、投影物镜等核心光学元件的形貌精度、表面粗糙度、膜层厚度、缺陷分布以及波前特性等进行精密测量。由于 EUV 光刻使用的波长仅为 13.5 nm，其光学元件的反射率、缺陷尺寸和波前误差要求达到纳米甚至皮米量级，因此，检测技术必须具备超高分辨率、超高精确度以及快速反馈能力，该技术贯穿于 EUV 光刻机的研发、生产、调试与运行的全生命周期，是实现整机集成不可或缺的核心技术之一。

自 20 世纪末以来，随着 EUV 光刻技术的推进以及光学计量与真空超精密检测技术的快速进步，极紫外光刻元件检测技术得到快速发展。早期工作主要集中在干涉波前检测和反射率测量，比如在 2003 年德国物理技术联邦研究院（PTB）建成首套 EUV 反射率绝对测量装置，2010 年起，随着荷兰阿斯麦（ASML）等公司在商业化 EUV 光刻机上的布局，国际上陆续出现面向高数值孔径（High-NA）投影物镜的相位干涉检测系统，并被用于多层膜反射镜的量化评估。针对 EUV 掩模 <10 nm 缺陷检测难题，2016 年美国科磊（KLA）公司推出基于散射计量与离轴照明的掩模检测平台，实现了缺陷的自动识别与分类，有效提升掩模良率与生产效率。同一时期，日本尼康公司与东京大学合作开发全场真空波前检测系统，用于极紫外反射镜像差参数的高精度标定。近年来，中国在高端检测装备国产化方面开始布局，一些高校与科研院所完成了原理验证和样机研制，但整体仍处于实验室阶段，距离大规模工业化应用尚有差距。这些成果为未来 EUV 光刻机核心元件的检测自主化奠定了技术基础，同时推动了部分核心元件检测标准和溯源体系的初步建设。

当前在极紫外光学元件检测方面，全球已经形成以 ASML、蔡司（Zeiss）、KLA 为主导的技术格局，美国、荷兰、日本等国已在多层膜计量、掩模缺陷检测、真空波前测量等关键环节建立成熟的工业体系，在国际竞争中保持技术领先。相比之下，中国虽然在清华大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所等单位的带动下，在多层膜反射镜表面形貌检测、掩模缺陷检测等方向取得阶段性成果，但整体仍处于技术积累和系统验证阶段，与国际先进水平存在明显差距，亟须在核心检测装备、关键传感器与高精度算法等领域加大研发投入，加快突破瓶颈，健全检测标准体系与产业化链条，实现国产化与自主可控，保障先进半导体制造的战略安全。

“极紫外光刻元件检测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家见表 3.19。从国家层面看，核心专利主要来自 7 个国家，其中中国、德国、日本在专利公开量上位居前列，合计约占全球总公开量的 68%。美国虽然在公开量上位居第六，但平均被引数高居第一，在高价值专利数量上保持领先地位。日本专利公开量和平均被引数排名分别为第三和第二，凸显其技术质量与影响力优势。新加坡虽然专利公开量排名第七，但平均被引数排名第三，也展现了较高的专利质量与技术价值。表 3.20 列出了该前沿核心专利的主要产出机构。从机构层面看，卡尔蔡司半导体制造技术有限公司、台湾积体电路制造股份有限公司（简称台积电）、ASML 公司等国际龙头企业

表 3.19 “极紫外光刻元件检测技术”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	74	27.41	178	16.02	2.41
2	德国	67	24.81	236	21.24	3.52
3	日本	44	16.30	341	30.69	7.75
4	韩国	36	13.33	57	5.13	1.58
5	荷兰	25	9.26	80	7.20	3.20
6	美国	23	8.52	216	19.44	9.39
7	新加坡	1	0.37	4	0.36	4.00

表 3.20 “极紫外光刻元件检测技术”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	卡尔蔡司半导体制造技术有限公司	61	22.59	226	20.34	3.70
2	台湾积体电路制造股份有限公司	34	12.59	140	12.60	4.12
3	ASML 公司	27	10.00	80	7.20	2.96
4	吉光株式会社	17	6.30	129	11.61	7.59
5	三星电子有限公司	16	5.93	35	3.15	2.19
6	雷傣光电科技株式会社	13	4.81	30	2.70	2.31
7	KLA 公司	12	4.44	182	16.38	15.17
8	ESOL 有限公司	9	3.33	15	1.35	1.67
9	韩国汉阳大学产业合作基金会	8	2.96	6	0.54	0.75
10	纽富来科技株式会社	6	2.22	13	1.17	2.17

业在公开量上处于第一梯队，但在平均被引数上，KLA 公司显著高于全球平均水平，表明其成果在业内具有重要影响力。在国家合作方面，全球范围内专利合作较为有限，主要集中在日本与德国之间（图 3.11），这可能是受该领域技术保护的影响。

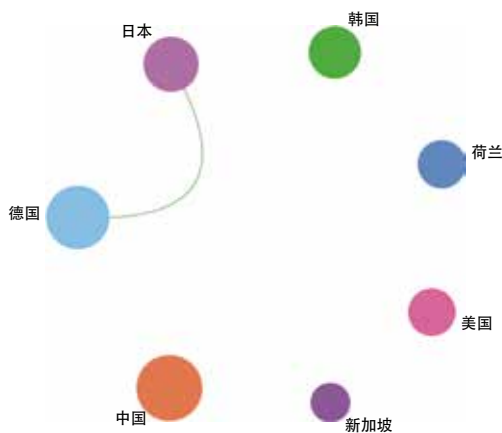


图 3.11 “极紫外光刻元件检测技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

在过去 5 年中，极紫外光刻元件检测技术在反射镜多层膜计量、EUV 掩模缺陷检测、真空波前测量等方向取得显著进展。在全球范围内，行业正朝着更高精度、更高稳定性和智能化检测方向演进。然而，从整体产业化与规模化应用程度看，仍存在技术与工程瓶颈，包括：原位检测系统在长周期稳定性与环境适应性方面不足、多模态计量数据融合算法不够成熟、缺陷智能识别与分类精度有待进一步提升、跨国检测标准体系尚未完全统一。在 EUV 投影物镜干涉检测、X 射线反射率计量与真空波前干涉等领域，高端检测装备的核心系统目前仍主要由荷兰、德国、日本、美国等国的领先企业掌控。未来 5~10 年，全球发展的重点将围绕“高精度、高稳定性、可持续与可控的供应生态”三大目标推进，如图 3.12 所示，重点方向包括以下 5 个方面：

1) 高端检测装备的研发与性能突破。面向 EUV 投影物镜、掩模、反射镜等核心部件，研发新一代干涉检测仪、X 射线反射率计量系统、真空波前干涉仪等高精度设备，实现光学系统、光源、传感器、控制单元与计量软件的高水平集成与长周期稳定运行，并与高数值孔径（High-NA）工艺深度适配。在系统层面强调模块化与可互操作接口设计、热-力-真空稳定性、污染抑制与超净装配、在役校准与可维护性，并通过联合研发与多元化供应链增强生态韧性。

2) 原位实时检测技术。将波前传感器、缺陷检测模组直接集成至 EUV 光刻机曝光系统，实现生产全流程的在线监控、误差补偿与动态调节。突破真空环境下的高速干涉计量、环境扰动主动抑制、低延迟数据链路与毫秒级处理架构，使检测系统在亚纳米级精度、毫秒级响应下长期稳定运行，支撑量产线良率与稳定性的持续提升。

3) 多模态高精度计量融合技术。融合相移干涉、剪切干涉、Shack-Hartmann 波前传感、散射成像等多种方法，对 EUV 元件的形貌、反射率、相位与缺陷进行协同测量，实现多源数据的精确对齐与误差分离。建立统一的计量建模与融合算法框架，达到亚纳米级综合测量精度；同时推动开放数据格式与跨设备互操作，降低跨平台比对与溯源成本。

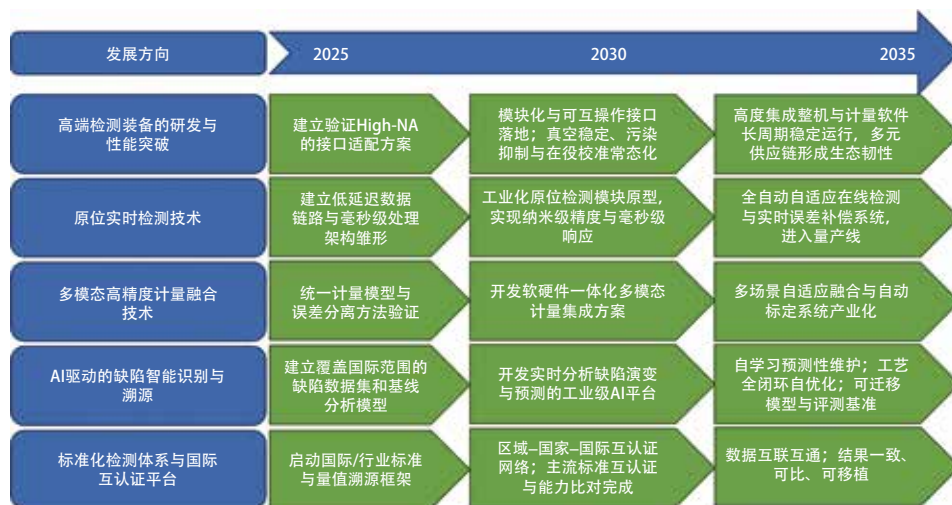


图 3.12 “极紫外光刻元件检测技术”工程开发前沿的发展路线

4) AI 驱动的缺陷智能识别与溯源。基于深度学习与模式识别技术，对大规模图像与波前数据进行实时特征提取、缺陷定位、成因分析与趋势预测。构建涵盖多类 EUV 缺陷的高质量训练数据集，在部署侧发展轻量化推理与边缘算力方案，打通设计—制造—检测—运维的工艺闭环，实现预测性维护与自适应工艺优化，同时兼顾数据安全与跨区域合规。

5) 标准化检测体系与国际互认证平台。推进面向 EUV 反射镜、投影物镜、掩模等对象的检测标准在全球范围内的协调与统一，建设国际互认证的计量与检测平台，支持跨国产线与跨机构应用。各主要技术体在推进本国标准的同时，加强与国际标准体系的兼容性，确保检测数据的全球通用性与可信性；同步完善量值溯源与不确定度评估体系，构建由区域/国家级计量机构与同步辐射装置组成的互认证网络，配套参考样品与标准工件，开展方法学比对与能力验证，确保检测结果一致、可比、可移植，从而提升全球产业链协同效率与行业话语权。

### 3.2.2.3 亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化

在亚 5 nm 时代，芯片系统设计制造协同的内涵和实践都发生了质的飞跃。其发展历程大致经历了 3 个阶段：① 可制造性设计，主要是在设计后端考虑制造规则，进行被动规避。② 设计—工艺协同优化（DTCO），开始在晶体管和标准单元层面进行主动的联合优化。三星在其 3 nm GAA 工艺中，利用 DTCO 充分发挥了纳米片宽度可连续调节的优势，为设计者提供了比 FinFET 更精细的 PPA 权衡空间。③ 如今，这一理念已演进至系统—工艺协同优化（STCO），并与人工智能深度融合。目前，行业正从系统、架构、封装到器件的全栈层面进行协同考量。一个典型的例子是超威半导体公司（AMD）的 Instinct MI300 系列加速器，它通过 STCO 理念，将 5 nm 的 GPU 芯粒、6 nm 的 I/O 芯粒以及 HBM3 高带宽内存，利用台积电的 CoWoS-S 先进封装技术整合为一体，实现了 CPU 与 GPU 的紧密协同。

设计制造协同的重要性体现在 3 个层面：技术上，它是突破后摩尔时代性能瓶颈、延续摩尔定律精神的核心技术路径；经济上，面对呈指数级增长的开发成本，它是控制成本、缩短研发周

期、提升投资回报率的关键；产业与战略上，它正在重塑全球半导体产业的竞争格局，掌握高效协同优化方法的企业和国家，将在未来的高科技竞争中占据战略制高点。

设计制造协同的理念为后摩尔时代提供了突破性能瓶颈、控制开发成本的核心路径，是确保半导体产业可持续发展的关键。面对 2 nm 节点超过 7 亿美元的设计成本和极高的制造不确定性，其主要研究方向均围绕着提升效率、降低风险和最大化系统性能展开。在 AI 原生 EDA 方向，新思科技（Synopsys）的 DSO.ai 平台利用强化学习，为瑞萨电子的汽车微控制单元（MCU）设计流程实现了超过 10% 的 PPA 改进，并显著缩短了开发周期，这就是通过智能化手段应对复杂性的直接体现。在虚拟制造方向，IMEC 等机构正大力投入于高保真工艺建模，旨在设计早期就能通过仿真精确预测晶体管性能和可变性，避免昂贵的设计周期。而在先进封装协同设计方向，业界正聚焦于解决 3D 堆叠带来的热密度挑战，研究微流控散热等颠覆性技术，以确保像英特尔 Foveros Direct 这类直接混合键合技术能够发挥其最大的系统性能优势。

如表 3.21 所示，“亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家高度集中于北美、东亚和西欧。受益于巨大的研发投入，中国在 AI 辅助 EDA 等方向进步迅速，专利公开量位居第一，但平均被引数排名第七，说明高影响力研究与产业化结合方面仍需进一步加强。美国凭借其顶尖大学、EDA 公司和半导体巨头的创新铁三角，在专利公开量上位居第二。而比利时、荷兰、日本、法国则在平均被引数上稳居前四席，显现出其在该前沿上的高度影响力。表 3.22 展示了该领域在机构层面的主要格局：台积电、IBM、Intel 等制造巨头是将理论转化为生产力的核心，其专利公开量占据前三；格芯、东京电子、Intel、三星电子等公司的高平均被引数体现了它们在这个领域强大的技术影响力；中国的中芯国际集成电路制造（上海）有限公司、中国科学院微电子研究所也在前十榜单上占有一席之地，说明其在该领域也具有一定影响力。

如图 3.13 所示，国际合作网络以美国为核心，链接德国、英国、中国和法国等国。其中美国与德国、英国之间的合作尤为密切，而其他各国相互间的合作还较为有限。由此可见，全球范围内各个国家之间的交流合作仍需进一步开展，以便更好地推动该技术的发展和应用。

表 3.21 “亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化”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	238	52.77	1 435	34.47	6.03
2	美国	135	29.93	937	22.51	6.94
3	韩国	46	10.20	617	14.82	13.41
4	日本	19	4.21	803	19.29	42.26
5	印度	5	1.11	0	0.00	0.00
6	法国	4	0.89	130	3.12	32.50
7	德国	3	0.67	2	0.05	0.67
8	比利时	2	0.44	188	4.52	94.00
9	英国	2	0.44	2	0.05	1.00
10	荷兰	1	0.22	74	1.78	74.00

表 3.22 “亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化”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	台湾积体电路制造股份有限公司	173	38.36	1 318	31.66	7.62
2	IBM 公司	62	13.75	580	13.93	9.35
3	Intel 公司	31	6.87	679	16.31	21.90
4	三星电子有限公司	31	6.87	617	14.82	19.90
5	应用材料公司	20	4.43	84	2.02	4.20
6	中芯国际集成电路制造（上海）有限公司	18	3.99	33	0.79	1.83
7	中国科学院微电子研究所	13	2.88	6	0.14	0.46
8	高通公司	11	2.44	26	0.62	2.36
9	东京电子有限公司	10	2.22	203	4.88	20.30
10	格芯公司	6	1.33	134	3.22	22.33

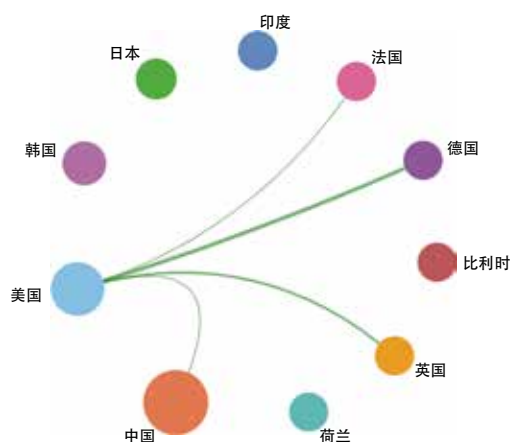


图 3.13 “亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化”工程开发前沿主要国家间的合作网络

亚 5 nm 时代，芯片系统设计与制造工艺的协同优化将不再是零散工具的集合，而是演进为一个全栈式、闭环化、自学习的智能平台。未来 5~10 年，这一演进将深刻重塑芯片的创造方式，主要有以下 4 个发展方向（图 3.14）：

1) 工艺节点的持续推进：继续探索更小制程节点的可行路径。通过发展如纳米线、二维材料等新型晶体管结构以及更先进的光刻技术，克服物理极限和成本压力。设计制造协同优化在这一过程中发挥关键作用，通过联合仿真与反馈机制降低风险、加速技术迭代。

2) AI 原生电子设计自动化：面向亚 5 nm 高复杂度芯片设计需求，构建以 AI 为核心驱动的原生电子设计自动化体系。通过跨层次设计智能生成与优化，打通从系统架构到物理版图的全流程智能建模与布局机制；依托高置信度智能验证与评估技术，实现设计阶段的行为分析、规则检查与性能预测一体化集成；同时发展工艺自适应的设计迁移优化方法，提升设计在不同工艺节点间的复用效率与制造适配能力，加速高性能芯片的敏捷开发与迭代。

3) 虚实融合的智能制造：针对亚 5 nm 制造工艺的复杂性与精度瓶颈，构建融合仿真先验与实测数据的智能制造建模框架。依托虚实融合的核心工艺建模，实现对光刻、蚀刻等关键工序的高保真建模与快速预测；面向工艺流程间的耦合关系，发展长流程工艺因果建模与优化机制，提升对制程状态演化与缺陷生成的全局掌控能力；探索超高维新工艺路径优化策略，以强化学习与专家知识协同引导，实现新材料、新结构条件下的高效工艺流程发现与验证。

4) 系统目标驱动的闭环优化：以 PPA、良率、鲁棒性等系统级指标为牵引，构建设计与制造之间高效联动的闭环优化机制。通过跨层次系统级建模与映射，建立设计意图、物理结构与制造可行性之间的因果关联模型；引入设计制造双向反馈与调节机制，打通从缺陷检测到设计优化的反馈通路，实现设计制造协同迭代；进一步发展多目标协同优化智能系统，融合因果推理与强化学习，完成跨流程、多目标约束下的全局最优策略搜索，推动设计与制造从串联走向共构共优。

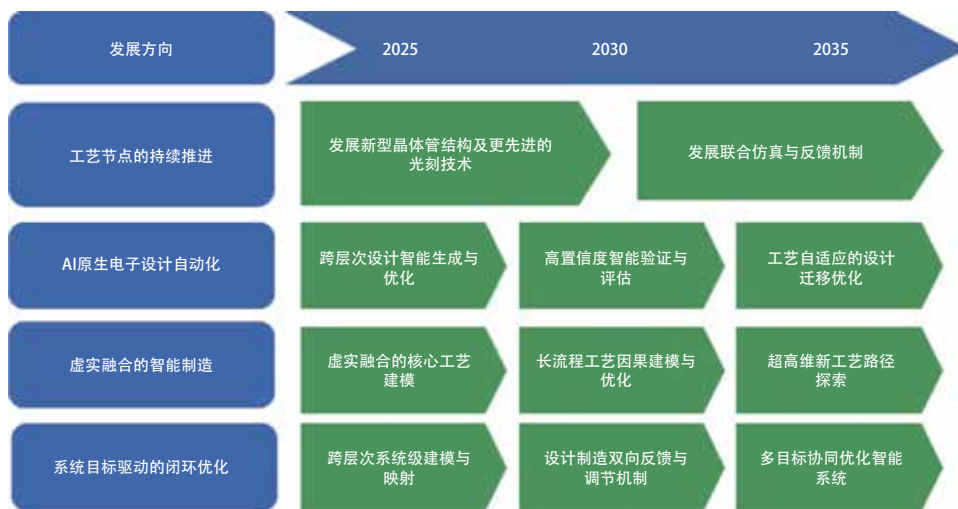


图 3.14 “亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化” 工程开发前沿的发展路线

## 领域课题组成员

组长：潘云鹤 费爱国

学科召集人（按拼音顺序）：

陈文光 程 龙 陆振刚 邵晓鹏 辛 斌 邢成文 杨 俊 张建华 张 岳 周 鹏  
卓 成

**前沿遴选组（按拼音顺序）：**

卜伟海 陈迟晓 陈文华 陈 谐 程宝平 戴道铤 邓启文 樊凌雁 韩亚洪 何荣茂  
 贺诗波 胡春光 黄崇文 黄 辰 黄岩军 霍凝坤 霍宇驰 贾伟乐 金 晶 景丽萍  
 李 刚 李 戈 李海莉 李伟钢 李文博 李园春 李忠奎 刘 东 刘 伟 刘湘雯  
 刘晓明 刘 焱 刘准钊 路 延 马 健 潘振岗 钱 徽 钱文生 秦 飞 秦家虎  
 隋修宝 孙 滔 汤璧均 唐 江 田 震 王 璠 王纪奎 吴冠豪 吴 集 吴易明  
 夏书银 谢 晖 邢孟道 许 驰 徐嘉伟 徐 静 许迎科 徐余江 薛春来 杨红霞  
 杨 青 杨树明 叶新江 尹建伟 余 翔 曾雪锋 詹启伟 张 川 张 杰 赵鲁豫  
 赵亚军 赵 焯 郑道勤 周 俊 朱秋国

**图情组：**

霍凝坤 梁江海 夏江国 刘书雷 杨未强 何丽莎 韩雨珊

**执笔组（按拼音顺序）：**

研究前沿：卜伟海 房丰洲 景丽萍 李园春 刘 东 孙 滔 谢 晖 尹建伟 曾志刚  
 张文富  
 开发前沿：方 斌 黄崇文 刘晓明 吴国俊 徐 静 杨树明 曾雪锋 章明星 张 岳  
 卓 成

**工作组：**

联络指导：高 祥 张纯洁 谌群芳 邓晃煌

项目秘书：翟自洋

项目助理：何丽莎

