

序 言

P R E F A C E

1949年11月1日，中国科学院成立，肩负起领导和推动全国科技事业发展、服务国家工农业和国防现代化建设的历史使命。1955年，党中央决定成立中国科学院学部，其目的在于遴选和汇聚全国各领域最优秀的科学家，在国家科技发展的重大决策中发挥学术领导和战略咨询的核心作用。70多年来，国家科技体制不断完善，中国科学院作为国家战略科技力量，始终把服务国家、造福人民作为根本宗旨，始终践行把握科技发展大势、前瞻研判未来方向、支撑国家科技决策的使命担当。以今天中国数字经济的奔腾算力和现代工业体系的智能控制为例，其最核心的技术原点与产业基石，可追溯至1956年中国科学院学部委员和领域专家研讨提出的发展计算技术、半导体技术、无线电电子学、自动化技术“四大紧急措施”。世纪之交，在全球知识经济浪潮兴起、中国实施“科教兴国”战略的背景下，中国科学院决定持续发布《科学发展报告》《高技术发展报告》《中国可持续发展报告》三大报告，向政府和决策层系统报告世界和中国科技发展的情况，为决策提供科技发展的背景资料和依据，向公众系统传播最新最前沿的知识。“三大报告”对国家、地方及产业界的发展理念、政策制定、发展重点选择产生了深远的影响。

当前，我国正处在为2035年基本实现社会主义现代化目标

而接续奋斗的关键节点，加快高水平科技自立自强，引领发展新质生产力，已成为我们必须回答好的时代命题；与此同时，新一轮科技革命和产业变革深度交织，科技创新成为大国博弈的主战场，科学、技术与社会之间的互动关系正在经历深刻重构。在这一历史方位下，中国科学院落实“国家科学技术界最高学术机构、国家科学技术思想库、自然科学基础研究与高技术综合研究的国家战略科技力量”使命定位，发挥学部的组织领导作用，发挥院士群体凝聚引领全国科学家的作用，发挥专业研究支撑平台和团队的作用，系统凝练思想库成果产出，聚焦“决策咨询系列”“学术引领系列”“科学文化系列”“科学普及系列”，打造优质、特色、体系化的一流思想库系列成果品牌，支撑国家科学技术思想库建设。

其中，“学术引领系列”策划推出新版《科学发展报告》《高技术发展报告》《可持续发展报告》《科技基础能力发展报告》四个报告，由中国科学院六个专业学部常务委员会和学部学术与出版工作委员会负责，组织各领域中国科学院院士及团队、中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院文献情报机构等多支专业力量共同编纂。四个报告的体系结构完整、互为支撑，以科学报告提供认知依据，以高技术报告支撑能力跃迁，以科技基础能力报告强化系统韧性，以可持续发展报告锚定长远价值导向，从影响国家长远发展和人类共同未来的根本性、战略性科技问题出发，进行前瞻性的战略研判和发展比较分析，以期搭建科技界与决策层、社会公众之间持续沟通的桥梁。

《高技术发展报告》系列研究与出版始于1998年，是面向决策、面向公众的年度报告，至今已出版23本。报告聚焦基于前沿科学原理、具有高知识密度和高创新强度且能引领产业变革的技术集群，覆盖信息、生物、能源、材料、先进制造、海洋和航空航天等高技术领域，追踪全球发展趋势态势，研判前沿高技术进展，分析高技术产业国际竞争力，揭示高技术的社会影响，提出促进中国高技术发展的思路与建议。20余年来，《高技术发展报告》已成为我国科技战略研究的重要品牌，为建设创新型国家和科技强国提供了有益智力支撑。

新版《高技术发展报告》呈现出新的特色和亮点。一是领域遴选和选题设置彰显国家战略导向和全球视野。报告关注的信息、生物、能源、材料与高端制造、航空航天、海洋等高技术领域，体现了全球科技发展的战略制高点和最前沿，也与我国重大战略部署高度契合。二是产出基于深厚的学术底蕴和研究水平。报告由中国科学院信息技术科学部常务委员会和技术科学部常务委员会牵头负责。报告各章节均建立在院士专家们长期、系统的研究积累之上，体现了对特定技术方向的深度挖掘与精准把握，夯实了报告的专业深度。三是报告力求全面系统、前沿深入，能及时、多方位反映各领域前沿进展与发展趋势，更加体现当前高技术迭代加速、交叉融合、竞争加剧的新态势。此外，报告紧扣“抢占最前沿和主战场、重塑全球秩序和发展格局”主线，构建“发展展望—前沿进展—动态扫描—创新模式与治理”的内容框架，形成更为有序衔接的整体。四是服务多元读者群体，不仅是面向科

研人员的学术参考，更是面向产业界、政策制定者以及社会公众的国家科学技术思想库品牌产品。

《2025 高技术发展报告》包括四章主体报告和附录。

第一章“高技术发展展望”，围绕信息技术领域和技术科学领域的重点方向，扼要剖析发展历程、现状、前沿问题、年度技术发展态势和未来展望。旨在加快构建自主、安全、高效的高技术生态，以科技自立自强支撑高质量发展和现代化建设。

第二章“高技术前沿进展”，重点分析了信息领域的人工智能、集成电路、传感器、光电融合、信息超材料 5 个技术方向，生物领域的基因编辑技术方向，能源领域的能源转化利用、氢氨融合、储能 3 个技术方向，材料与高端制造领域的高端制造装备、材料、随机流形材料 3 个技术方向，以及航空航天与力学领域的空天技术方向，共 5 个领域合计 13 个高技术方向的前沿进展和未来展望。

第三章“高技术动态扫描”，通过文献信息，追踪分析信息技术、生物技术、能源技术、材料与高端制造四个领域高技术科技战略政策、研发布局和主要研究进展。

第四章“高技术创新模式与治理”，基于高技术创新战略与政策、高技术创新模式、高技术与产业应用、高技术与社会等维度，分析高技术创新发展的模式和政策。

附录部分记录了近三年高技术领域重要获奖情况，包括图灵奖、中国专利奖金奖、国家科学技术进步奖以及国家技术发明奖等。

受篇幅所限，报告所呈现的内容不一定能体现技术发展的全貌，重点是从当年受关注度较高的高技术前沿领域和中外科研人员所取得的重大成果中，择要进行介绍与评述。

本报告凝聚了众多院士专家的智慧 and 心血。在此谨向参与报告研究、撰写的众多院士专家团队致以衷心感谢，向参与了本年度报告的咨询与审稿工作（按照姓氏笔画排序）的丁晶晶、王兴军、王钦宏、王海鹏、王曾晖、帅永、田杰棠、刘中民、刘辛军、李泠、李哲、李大力、李正风、李印实、李海旺、李廉林、杨军、肖俊、张正平、张敏灵、陆洋、陈云霄、陈建兵、季泉江、胡志坚、胡燕萍、段海滨、施思齐、聂洪光、高彩霞、梁正、鲁兵安、曾文、温珂、谢曼、雷亚国、廖小飞、蔡国田、谭周亮、穆荣平等专家，参与报告支撑工作的中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院武汉文献情报中心、中国科学院成都文献情报中心及中国科学院上海营养与健康研究所等团队，一并表示衷心感谢。

中国科学院信息技术科学部第十七届常务委员会主任



中国科学院技术科学部第十七届常务委员会主任



2026年5月

目 录

C O N T E N T S

序言

第一章 高技术发展展望

1.1 信息技术发展展望

梅 宏 王润声 宋令阳 等 / 002

1.2 技术科学前沿展望

杨 卫 何雅玲 / 022

第二章 高技术前沿进展

2.1 人工智能技术前沿进展

胡事民 陈熙霖 唐 杰 等 / 040

2.2 从集成电路到集成系统的变革

毛军发 / 057

2.3 传感器技术前沿进展

王 巍 郑海荣 / 067

2.4	光电融合技术前沿进展	
	祝宁华 李 明 陈建平 等	/ 079
2.5	信息超材料技术前沿进展	
	崔铁军 张浩驰 张乐鹏 等	/ 095
2.6	基因编辑技术前沿进展	
	曹晓风 范月蕾 高彩霞 等	/ 109
2.7	能源转化利用技术前沿进展	
	姜培学 金红光 胥蕊娜	/ 128
2.8	氢氨融合新能源技术前沿进展	
	张清杰 薛勃飞 张 莉 等	/ 142
2.9	储能技术前沿进展	
	赵天寿 李文甲 韩美胜 等	/ 156
2.10	高端制造装备技术前沿进展	
	丁 汉 陶 波 黄 涛 等	/ 171
2.11	材料技术前沿进展	
	成会明 刘 岗 周砚磊	/ 185
2.12	随机流形材料技术前沿进展	
	李 杰 任晓丹	/ 202
2.13	空天技术前沿进展	
	李应红 赵群力 田建东 等	/ 216

第三章 高技术动态扫描

3.1	信息技术领域动态扫描	
	张 娟 韩文艳 王艺蒙 等	/ 236

3.2 生物技术领域动态扫描	
丁陈君 陈 方 邓诗碧 等	/ 254
3.3 能源技术领域动态扫描	
汤 匀 岳 芳 李 倩 等	/ 273
3.4 材料与高端制造领域动态扫描	
万 勇 吴文涛 郭文娟 等	/ 293

第四章 高技术创新模式与治理

4.1 根技术筑基未来产业新生态	
王晓明 沈 华 刘明熹	/ 310
4.2 “人工智能 + 制造” 塑造新优势	
郭京京 杨 捷 冯 泽	/ 319
4.3 人工智能驱动科技与产业共链创新	
余 江 张 越 陈 凤	/ 334
4.4 支撑集成电路产业技术突破的创新政策	
睦纪刚 蔺 洁 王 婷 等	/ 349
4.5 贯通基础研究与工程化的能源颠覆性技术创新路径	
郭剑锋 许金华 孙德强	/ 366
4.6 脑机接口的技术风险与治理	
鲁 晓 李 瑞 欧阳梦平	/ 379

附 录

附录一 2023 年和 2024 年图灵奖简介	/ 400
附录二 2023 年和 2025 年中国专利奖金奖简介	/ 401
附录三 2023 年度国家科学技术进步奖特等奖和一等奖简介	/ 407
附录四 2023 年度国家技术发明奖一等奖简介	/ 409

CONTENTS

Preface

Chapter 1 Outlook for High Technology

- 1.1 Outlook for Information Technology Development / 020
- 1.2 Frontiers and Prospects of Technical Sciences / 036

Chapter 2 Frontiers in High Technology

- 2.1 Frontier in Artificial Intelligence Technology / 056
- 2.2 Transitions from Integrated Circuits to Integrated Systems / 066
- 2.3 Frontier in Sensor Technology / 077
- 2.4 Frontier in Photonics and Electrics United Technology / 093
- 2.5 Frontier in Information Metamaterial Technology / 108
- 2.6 Frontier in Gene Editing Technology / 126
- 2.7 Frontiers in Energy Conversion and Utilization Technology / 140
- 2.8 Frontier in Hydrogen-Ammonia New Energy Technology / 155
- 2.9 Frontier in Energy Storage Technology / 170
- 2.10 Frontier in High-End Manufacturing Equipment Technology / 184
- 2.11 Frontier in Materials Technology / 201
- 2.12 Frontier in Stochastic Manifold Materials Technology / 214
- 2.13 Frontier in Aerospace Technology / 233

Chapter 3 Scanning of High Technology

- 3.1 Information Technology / 253

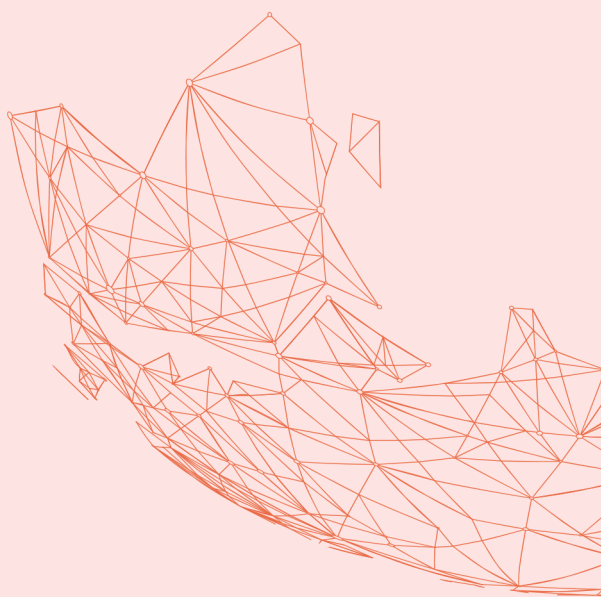
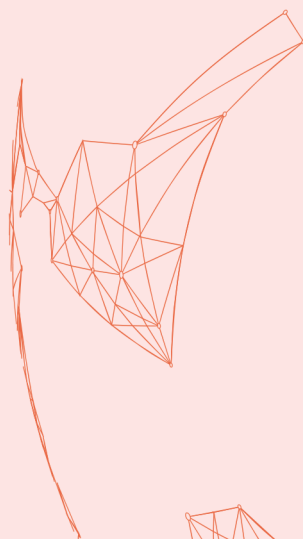
3.2 Biotechnology	/ 272
3.3 Energy Technology	/ 291
3.4 Materials and High-End Manufacturing	/ 307

Chapter 4 Innovation and Governance of High Technology

4.1 Building the Future Industrial Ecosystem on Root Technology	/ 318
4.2 “Artificial Intelligence+Manufacturing” Shapes New Advantages	/ 333
4.3 AI-Driven Co-Chain Innovation across Science and Industry	/ 347
4.4 Innovation Policies Supporting Technological Breakthroughs in the Integrated Circuit Industry	/ 365
4.5 An Innovation Path for Disruptive Energy Technologies Bridging Basic Research and Engineering Application	/ 378
4.6 Technical Risks and Governance of Brain-Computer Interfaces	/ 396

Appendix

1. Brief Introduction to the Turing Award for 2023 and 2024	/ 400
2. Brief Introduction to the Gold Prize of China Patent Award for 2023 and 2025	/ 401
3. Brief Introduction to the Special Prize and the First Prize of the State Scientific and Technological Progress Award for 2023	/ 407
4. Brief Introduction to the First Prize of The State Technological Invention Award for 2023	/ 409





第一章

高技术发展 展望

Outlook for High Technology

1.1 信息技术发展展望

梅 宏¹ 王润声¹ 宋令阳¹ 韩红桂² 金 鑫¹ 刘譞哲¹ 王亚沙¹

(1. 北京大学; 2. 北京工业大学)

自 20 世纪 40 年代电子计算机诞生起, 信息技术一直保持着高速发展。当前, 以互联网、移动通信、人工智能等为代表的新一代信息技术, 已经成为全球研发投入最集中、创新最活跃、应用最广泛、辐射带动作用最大的科技领域, 也是世界各主要国家最为重要的战略发展方向。近年来, 信息技术发展呈现出两个重要特征: 一是随着互联网的快速发展, 其应用领域从信息空间不断向人类社会和物理世界延伸, 万物数字化催生人机物三元融合的泛在计算新模式; 二是深度学习的突破性进展带来数据驱动的人工智能 (artificial intelligence, AI) 发展热潮, AI 赋能各行各业及各个科技领域成为新的增长点。两个维度的合力促使信息技术正在经历重大变革, 数字化、网络化、智能化、泛在化和绿色化成为信息技术发展的核心驱动力及主要趋势。

本文尝试从“系统”的视角来分析研判信息技术的发展现状和趋势, 即从信息系统的主要构成及其关系, 以及信息系统与外部环境间“感联知控”的交互作用出发, 从微纳电子与光电子器件、通信与网络、控制与自动化、计算与软件、数据科学与人工智能五个技术领域, 梳理信息技术领域的重要进展, 总结关键科学问题和核心技术难题, 展望未来趋势并提出发展建议。

一、信息技术领域发展现状及挑战分析

1. 发展现状

信息技术是研究信息的产生、获取、存储、表示、处理、传输、利用及其相互作用规律的学科，是用于管理、处理和应用信息所采用的各种技术的总称，其基于计算机、通信和控制等技术来设计、开发和部署并应用信息系统。

本文从“系统”的视角来分析研判信息技术的发展现状和趋势。将信息系统分为基础器件层、支撑系统层和应用系统层，其与外部环境具有“感联知控”^①的交互作用，如图 1 所示。具体而言，“感”主要关注如何感知和获取信息，并刻画信息之间的依赖关系和时空关联，以建立人类社会、物理世界到数字世界的映射；“联”主要关注如何支持各类信息源的接入，构造高效、可靠、安全的互联网络，以实现海量、多元、异构信息的传输、共享和汇聚；“知”主要关注如何建立有效的信息表征方式、处理方法和分析决策机制，以实现基于各类信息充分融合的认知决策；“控”主要关注如何实现信息系统的快速反应、灵活适应、精准控制、全局协同和持续演化。

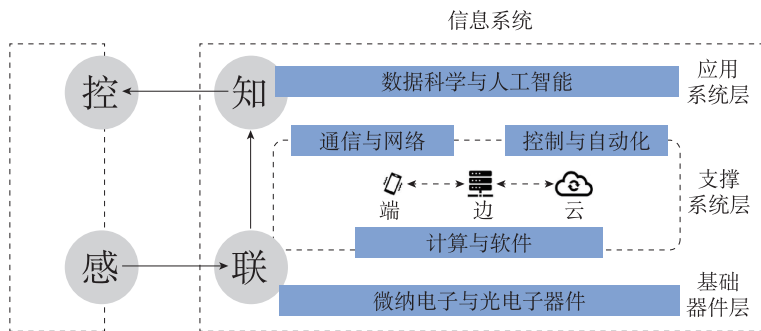


图 1 信息系统

大体而言，一个信息系统的结构组成可以划分为三个层次。①基础器件层，

^① “感联知控”存在于多个层级和方面。为行文方便，本文只从一个具体系统的视角来进行分析，不考虑“系统之系统”情形。

包括微纳电子器件、光子/光电子器件、电子元器件等，主要负责信息的数字化表示和存储，构成信息系统的物理硬件基础；②支撑系统层，包括计算与软件系统、通信与网络系统、控制与自动化系统等，主要负责信息的传输、处理、管理、应用等；③应用系统层，主要是对信息进行综合利用，形成服务终端用户的各类业务系统。作为一个整体，信息系统各组成部分相互支撑、协同工作，以对外提供服务。

2. 战略意义、国内外现状及挑战分析

进入 21 世纪以来，以新一代信息技术为代表的新质生产力，特别是集成电路、算力基础设施、基础软件、人工智能等前沿技术，成为驱动全球经济增长的重要引擎。信息技术已经成为世界各国最为重要的战略发展方向，各国政府纷纷推出相关计划和法案推动信息技术发展。在我国，信息技术及信息产业也一直是国家发展的重中之重。

近年来，信息技术正在经历新一轮的深刻变革，呈现出两个重要特征：一方面，随着互联网的快速发展，应用领域向人类社会和物理世界延伸，万物数字化催生人机物三元融合的泛在计算新模式；另一方面，深度学习的突破性进展带来数据驱动的人工智能发展热潮，AI 赋能各行各业及各个科技领域成为新的增长点。合力之下，数字化、网络化、智能化、泛在化和绿色化成为信息技术发展的核心驱动力和主要趋势。“数字化”是指将信息转换成计算机可处理的 0-1 编码的过程，实现数据资源的获取和积累，奠定信息化的基础；“网络化”构建平台，促进数据资源的流通和汇聚；“智能化”展现能力，通过多源数据的融合分析实现信息应用的类人智能，帮助人类更好地认知复杂事物和解决问题；“泛在化”则指信息技术广泛深度融入人类社会和物理世界，“无处不在、无迹可寻”；“绿色化”指面向节能和绿色发展目标，追求信息技术的低功耗和高能效。

我国拥有大规模、需求旺盛、发展速度快、国际贸易活跃的市场，具有发展信息技术的巨大优势。进入新时代，以信息化为代表的新一轮科技革命和产业变革与中国式现代化形成历史性交汇，为我们实现中华民族伟大复兴提供了难得的

历史机遇。近年来，我国信息技术领域的基础研究和技术研发取得了长足进步，未来仍然需要进一步加强前瞻性基础理论研究、提高关键核心技术自给率和体系化能力，支撑社会经济数字化转型和数字中国建设。

二、重点技术领域

面向数字化、网络化、智能化、泛在化和绿色化的发展趋势，信息系统的发展面临以下关键科学问题和核心技术难题。第一，突破感知极限，即实现对泛在环境的广域深度感知，特别是向极微、极远、极深发展；第二，算通控一体，即构建计算、通信和控制深度融合协同的一体化系统；第三，云边端融合，即通过网络将云、边和端的资源互联以实现无缝集成、统一管理并提供可信服务；第四，数据驱动智能，即利用机器学习等技术手段，实现数据的融合应用以更好地提供智能化服务；第五，低功耗高能效，即信息系统发展应符合节能和绿色发展的目标。

基于上述关键科学问题和核心技术难题，以下围绕微纳电子与光电子器件、通信与网络、控制与自动化、计算与软件、数据科学与人工智能五个重点领域，梳理和分析信息技术领域重点进展和成果。

1. 微纳电子与光电子器件

随着摩尔定律逼近物理极限，集成电路技术体系进入新工艺、新器件和新架构协同创新的“后摩尔时代”，并在先进器件工艺、传感技术、芯片架构和光电融合等方面形成了紧密的共生演进关系：器件工艺通过结构与材料革新奠定性能基石，传感技术拓展功能边界，芯片架构变革响应算力爆发需求，光电融合则突破互连瓶颈链接计算与感知^[1,2]。

（1）器件工艺正在从单一的晶体管微缩向“结构革新+先进封装”的双轮驱动模式发展^[3]。在逻辑器件层面，以台积电、三星为代表的领军企业将全环绕栅极场效应晶体管（gate-all-around field-effect transistor, GAAFET）结构确立为2 nm及以下节点的主流方案，较鳍式场效应晶体管（fin field-effect transistor，

FinFET)能更有效抑制短沟效应带来的漏电流,实现40%—50%的功耗降低。在工艺方面,5 nm/3 nm逻辑工艺节点全面引入极端紫外(extreme ultraviolet, EUV)光刻,并引入钌(Ru)、钴(Co)等新型金属以突破互连电阻瓶颈;我国先进制程逻辑工艺稳步演进至7 nm节点并实现规模化生产。在存储器领域,三维NAND(3D NAND)闪存堆叠层数迈向300层级,动态随机存储器(dynamic random-access memory, DRAM)导入了极紫外光刻技术;我国在该领域已形成局部突破,长江存储率先量产基于Xtacking 3.0架构的232层闪存,长鑫存储实现LPDDR5等先进DRAM的自主研发,标志着国产存储密度进入国际第一梯队。在功率器件领域,以碳化硅/氮化镓(SiC/GaN)为代表的第三代半导体加速向8 in^①制造转型,利用宽禁带材料极低的导通电阻和开关损耗,显著降低系统损耗。在先进封装领域,芯粒(Chiplet)架构和UCIe标准成为主流,推动封装从“片上系统”(system on chip, SoC)向“芯粒异构集成”的范型转移^[4]。2.5D封装工艺(如CoWoS)采用超大尺寸中介层解决了高带宽内存(high bandwidth memory, HBM)的集成难题,而3D封装工艺实现了从微凸块向混合键合(hybrid bonding)的发展,将互连通信功耗降低至0.15 pJ/bit以下。我国封装产业紧跟前沿,构建了成熟的晶圆级扇出型封装(fan-out wafer-level packaging, FOWLP)能力与2.5D/3D集成能力,有力支撑了高性能算力芯片的发展。

(2) 传感器件正在从单一物理量检测向多模态和集成化方向发展。与逻辑、存储器件的纵向微缩相并行,传感器件沿着“超越摩尔”(More than Moore)技术路线发展。在材料维度,薄膜压电(如AlN、PZT)与新型二维、钙钛矿、聚合物复合材料的突破,推动多模态感知的精细度与广度提升;碳化硅(SiC)等宽禁带材料则赋予了传感器在高温高压极端环境下的优异性能。在异构融合维度,异质集成技术将传感单元与计算电路融合,形成多模态感算融合器件与系统,打破传感与计算边界,大幅降低了原始数据传输成本,为“后摩尔时代”万物智联奠定了坚实的硬件基础^[5]。

(3) 芯片架构正在从面向通用计算(general-purpose computing)走向面向

① 1 in=25.4 mm。

特定领域 (domain-specific)。在人工智能与大数据需求驱动下,以图形处理器 (graphics processing unit, GPU) 为代表的智算芯片架构快速发展,通过引入张量核心 (tensor core) 并支持低精度数值格式 (如 BF16、FP8、FP4), 结合 HBM, 大幅降低了逻辑门翻转功耗和内存访问功耗。为进一步降低总拥有成本, Google TPU 等云服务商自研芯片, 针对特定矩阵运算与软件栈 (如 TensorFlow) 进行深度定制, 推动计算架构从“单芯片优化”向“芯片-系统-软件栈一体化”转型, 较 GPU 进一步提升了计算效率。我国智算芯片也取得重要突破, 华为昇腾系列自研架构与软件栈已在万亿参数大模型训练中规模化应用, 摩尔线程、沐曦、壁仞等企业在国产 GPU 领域也取得了关键性进展。此外, 数据处理器 (data processing unit, DPU)、基础设施处理器 (infrastructure processing unit, IPU) 等新型硬件也开始在数据中心投入应用。其中, DPU 接管了网络虚拟化、存储管理及安全加解密等任务; IPU 则通过构建独立于中央处理器 (central processing unit, CPU) 的控制平面, 物理隔离租户负载与云管理任务, 从而提供高效的资源管控与安全隔离机制。这些架构创新标志着产业竞争焦点已从单纯的芯片制程微缩, 转向通过软硬件协同设计和异构硬件协同工作来获取系统级性能收益。

(4) 数据传输架构正在从传统电互连发展为光电融合^[6]。近五年, 为了解决计算过程中的海量数据传输能耗问题, 硅光技术在数据中心大规模商用, 推动光模块速率从 100 Gb/s 向 400 Gb/s 到 800 Gb/s 演进, 并实现了小于 10 pJ/bit 的超低互连能耗, 显著降低了数据传输功耗。硅光收发模块正以高速率增长, 逐步替代传统分立器件成为主流。技术演进的核心在于集成工艺从单一硅基向异质集成迈进: 硅基异质集成激光器通过晶圆键合技术将 III - V 族材料与硅波导结合, 实现了大功率 (>100 mW) 集成光源, 为解决硅材料的间接带隙发光难题提供了有效方案。同时, 调制器架构经历了深刻变革。为应对单波 200 G+ 需求, 硅基薄膜铌酸锂 (thin-film lithium niobate, TFLN) 异质集成调制器成为热点, 可支持超过 100 GHz 带宽, 且仅需极低的驱动电压, 大幅降低了驱动电路功耗。此外, 结合微环谐振器与梳状激光器技术, 实现了密集波分复用 (dense wavelength division multiplexing, DWDM), 大幅提升了单芯片通信容量密度。这些突破预示着光互

连正从板级向片间（Chip-to-Chip）甚至片内（On-Chip）渗透。

2. 通信与网络

随着信息化应用的规模化发展，通信与网络逐步迈入以高性能、低时延、高可靠和确定性为核心目标的演进阶段。移动通信网络通过提升频谱效率支撑海量终端设备高速率连接，计算机网络通过提供超大传输承载容量实现跨域高效数据流动，天基通信网络则通过密集低轨卫星部署实现广域全覆盖的网络服务能力。

（1）移动通信技术进一步向大带宽、广覆盖、低时延、高可靠发展。第五代移动通信（5G）系统围绕增强型移动宽带（enhanced Mobile Broadband, eMBB）、大规模机器类通信（massive Machine Type Communication, mMTC）和超可靠低时延通信（Ultra-Reliable Low-Latency Communication, URLLC）三大典型场景取得了实质性进展。eMBB 以网络传输极限频谱效率提升与网络容量扩展为目标，基于大规模阵列（如反射/透射超表面等）低功耗多天线技术并结合密集组网下的干扰管理机制，提升空间复用能力和网络容量^[7]，已在中国移动等运营商网络实现大规模部署，满足视频直播等行业场景对高速率移动数据服务的增长需求；mMTC 以在有限带宽资源下的海量终端稳定接入为目标，采用窄带物联等技术，通过超窄带载波设计和增强链路预算，解决低功耗终端的广覆盖与可靠接入问题^[8]，已在智能电表、城市基础设施监测等系统中广泛应用，具备每平方公里百万级终端连接能力；URLLC 以低时延与高可靠性权衡共存的性能保障为目标，采用边缘计算架构，将控制与数据处理逻辑下沉至近端节点，从体系结构上减少通信和处理时延，并构建确定性网络，通过路径预留、周期化调度形成可预测的转发平面，提供端到端最大时延上界与可靠性保证^[9]，我国三大运营商均已在车联网系统中开展示范应用，具备提供毫秒级时延与高传输可靠性的通信能力。

（2）计算机网络进一步向高性能、可编程、高可靠发展。随着网络规模持续扩大，传统依赖静态配置的运行模式难以满足复杂多变的业务需求。近年来，相关领域的研究聚焦于通过传输硬件能力提升与网络状态感知、智能控制相结合，实现广域骨干网络与数据中心网络在容量与时延上的协同优化。在广域骨干网络

方面,核心方向是光传输能力的系统性突破与单纤容量持续提升。针对跨区域、超长距离和超大带宽需求,网络传输速度由 100 Gb/s 级提升至 Tb/s 级,依托高阶相干调制、超高速光电器件及 C+L 波段扩展,显著提升链路频谱效率和能效。低损耗光纤成为新建骨干网的重要介质,空芯光纤和空间复用多芯光纤等新结构为突破单模光纤容量瓶颈提供新路径^[10]。在数据中心网络方面,面向大规模算力集群的高吞吐、低时延通信能力构建成为热点。以远程直接内存访问(remote direct memory access, RDMA)、NVLink 为代表的网络技术已实现规模化部署,成为支撑分布式存储和模型训练的关键基础。围绕其对丢包和拥塞敏感的问题,无损以太网、精细化拥塞控制及端到端反馈机制取得系统进展,并结合可编程交换芯片实现快速感知与调控^[11]。时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)技术通过时间同步与调度机制引入确定性通信能力,已形成 IEEE 802.1 TSN 标准体系,保障微秒级时延与高可靠服务。

(3) 天基网络通信技术向广覆盖、高速率、低时延和天地一体化融合方向发展。低轨卫星星座已成为天基通信体系建设的重要形态,通过大规模卫星组网与星间链路互连,可实现全球连续覆盖与宽带接入能力的显著提升。在关键技术方面,星间高速链路与高通量卫星载荷成为提升天基网络性能的重要方向。通过多波束高通量载荷与激光星间通信技术,可构建高速数据中继网络并显著提升系统容量与传输效率。以 Starlink、OneWeb 为代表的低轨卫星系统,通过部署大规模卫星并引入激光星间链路,实现 Gb/s 级卫星宽带接入能力与毫秒级传输时延,显著改善传统地球同步卫星系统时延高、容量受限的问题。在体系架构方面,天基网络正由传统卫星通信系统向天地一体化信息网络演进,通过卫星与地面蜂窝网络、互联网及专用网络深度融合,实现跨域协同通信与网络资源统一调度。随着低轨星座规模化部署与天地融合通信技术持续推进,天基网络正逐步演进为支撑海洋通信、航空互联网、应急保障及全球物联网的重要信息基础设施。

3. 控制与自动化

控制与自动化正步入以智能化、分布式、多任务为核心特征的发展阶段^[12]:

智能化控制通过边缘计算与虚实映射技术实现主动决策下沉与预测优化，分布式控制依托事件驱动与信任机制构建低时延高可靠架构，多任务控制则借助工艺知识库与多任务协同突破复杂场景协作瓶颈。

(1) 从被动响应发展为主动智能决策控制。其代表性重要突破为工业过程控制的本地化实时决策，针对工业系统模型保真度与计算效率平衡的技术难题，深度融合边缘计算与工业控制系统，推动生产控制从“云端集中决策”转向“边缘分布式自治”^[13]。例如，中国石化全球首座数字孪生智能乙烯工厂应用该技术后，不仅降低了操作人员的操作频次，还大幅提升了乙烯装置整体控制精度。

(2) 从集中式架构发展为多层级分布式控制。其代表性重要突破为多层级事件驱动控制，主要是以不同事件的发生驱动控制任务的执行。采用多层级事件驱动控制能兼顾控制性能和软件性能，减少通信频次以节省能量和资源，支撑低时延、高可靠的分布式控制架构^[14]。美国霍尼韦尔（Honeywell）和艾默生（Emerson）、法国施耐德电气（Schneider Electric）以及我国的中控技术股份有限公司均在分布式控制技术方面取得了显著进展，能够实现对工业生产过程的全面监测和控制，具备先进的数据分析和优化功能。

(3) 从单一任务发展为多任务协同控制。针对流程工业中多设备在复杂工况下的协作难题，其通过构建“感知—决策—执行”分层协同架构，使不同设备能够实时感知上下游工况变化，自主调整各生产任务运行参数并协调作业。美国霍尼韦尔开发的 Uniformance 过程控制平台、日本横河电机推出的 Centum VP 系统均已集成协同控制模块，通过设备间实时数据交互与策略协商，显著提升复杂工况下的生产稳定性。

4. 计算与软件

面向人机物融合泛在计算的新模式和新场景，“软件定义一切”“万物均需互联”“一切皆可编程”“人机物自然交互”是其基本特征。新型计算硬件不断出现，系统软件在支撑云原生、大数据和人工智能方面取得重要突破，软件工程则在人工智能技术的推动下，呈现出“数据—知识双驱动、人机协作、自动合成”的新