

《中国电子信息工程科技发展研究》 编写说明

当今世界，以数字化、网络化、智能化为特征的信息化浪潮方兴未艾，信息技术日新月异，全面融入社会经济生活，深刻改变着全球经济格局、政治格局、安全格局。电子信息工程科技作为全球创新最活跃、应用最广泛、辐射带动作用最大的科技领域之一，不仅是全球技术创新的竞争高地，也是世界各主要国家推动经济发展、谋求国家竞争优势的重要战略方向。电子信息工程科技是典型的“使能技术”，几乎是所有其他领域技术发展的重要支撑，电子信息工程科技与生物技术、新能源技术、新材料技术等交叉融合，有望引发新一轮科技革命和产业变革，为重塑社会经济生产结构提供新质生产力。电子信息工程科技作为最直接、最现实的工具之一，直接将科学发现、技术创新与产业发展紧密结合，极大地加快了科学技术发展的进程，成为改变世界的重要力量。电子信息工程科技也是新中国成立 70 多年来特别是改革开放 40 多年来，中国经济社会快速发展的重要驱动力。在可预见的未来，电子信息工程科技的进步和创新仍将是推动人类社会发展的最重要的引擎之一。

把握世界科技发展大势，围绕科技创新发展全局和长远问题，及时为国家决策提供科学、前瞻性建议，履行好国家高端智库职能，是中国工程院的一项重要任务。为此，中国工程院信息与电子工程学部决定组织编撰《中国电子信息工程科技发展研究》(以下简称“蓝皮书”)。2018 年 9 月至今，编撰工作由余少华、陆军院士负责。“蓝皮书”分综合篇和专题篇，分期出版。学部组织院士并动员各方面专家 300 余人参与编撰工作。“蓝皮书”编撰宗旨是：分析研究电子信息领域年度科技发展情况，综合阐述国内外年度电子信息领域重

要突破及标志性成果，为我国科技人员准确把握电子信息领域发展趋势提供参考，为我国制定电子信息科技发展战略提供支撑。

“蓝皮书”编撰指导原则如下：

1) 以新质生产力为抓手，为科技创新攻关提供有益参考。

2) 写好年度增量。电子信息工程科技涉及范围宽、发展速度快，综合篇立足“写好年度增量”，即写好新进展、新特点、新挑战和新趋势。

3) 精选热点亮点。我国科技发展水平正处于“跟跑”“并跑”“领跑”的三“跑”并存阶段。专题篇力求反映我国该领域发展特点，不片面求全，把关注重点放在发展中的“热点”和“亮点”问题。

4) 综合与专题结合。“蓝皮书”分“综合”和“专题”两部分。综合部分较宏观地介绍电子信息科技相关领域全球发展态势、我国发展现状和未来展望；专题部分则分别介绍 13 个子领域的热点亮点方向。

5 大类和 13 个子领域如图 1 所示。13 个子领域的颗粒度不尽相同，但各子领域的技术点相关性强，也能较好地与学部专业分组对应。

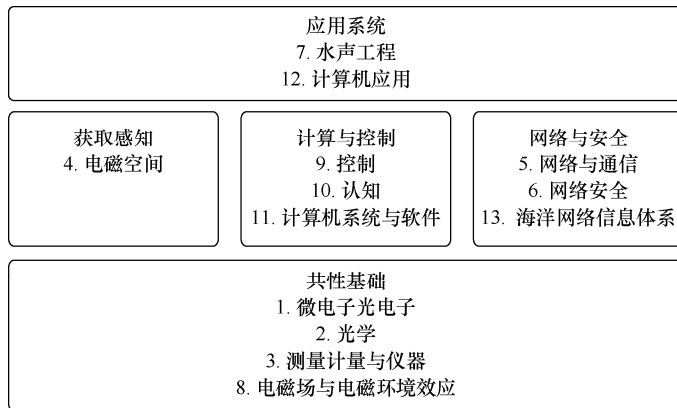


图 1 子领域归类图

至今，“蓝皮书”陆续发布多部综合篇、系列专题和英文专题等，见表 1。

表 1 “蓝皮书”整体情况汇总

序号	年份	中国电子信息工程科技发展研究——专题名称
1	大本子	中国电子信息工程科技发展研究
2	2018	中国电子信息工程科技发展研究（领域篇）——传感器技术
3		中国电子信息工程科技发展研究（领域篇）——遥感技术及其应用
4	大本子	中国电子信息工程科技发展研究 2017
5	2019	5G 发展基本情况综述
6		下一代互联网 IPv6 专题
7		工业互联网专题
8		集成电路产业专题
9		深度学习专题
10		未来网络专题
11		集成电路芯片制造工艺专题
12		信息光电子专题
13		可见光通信专题
14	大本子	中国电子信息工程科技发展研究（综合篇 2018—2019）
15	2020	区块链技术发展专题
16		虚拟现实和增强现实专题
17		互联网关键设备核心技术专题
18		机器人专题
19		网络安全态势感知专题
20		自然语言处理专题
21	2021	卫星通信网络技术发展专题
22		图形处理器及产业应用专题
23	大本子	中国电子信息工程科技发展研究（综合篇 2020—2021）

续表		
序号	年份	中国电子信息工程科技发展研究——专题名称
24	2022	量子器件及其物理基础专题
25		微电子光电子专题
26		光学工程专题
27		测量计量与仪器专题
28		网络与通信专题
29		网络安全专题
30		电磁场与电磁环境效应专题
31		控制专题
32		认知专题
33		计算机应用专题
34		海洋网络信息体系专题
35		智能计算专题
36	2023	大数据技术及产业发展专题
37		遥感过程控制与智能化专题
38		操作系统专题
39		数据中心网络与东数西算专题
40		大科学装置专题
41	2024	软件定义晶上系统（SDSoW）专题
42		ChatGPT 技术专题
43		数字孪生专题
44		微电子光电子国内外发展态势研究
45		光学工程国内外发展态势研究
46		电磁空间学科发展及国内外发展态势研究
47		网络与通信国内外发展态势研究
48		网络安全国内外发展态势研究
49		海洋网络信息技术国内外发展态势研究

续表

序号	年份	中国电子信息工程科技发展研究——专题名称
50	2025	测量计量与仪器国内外发展态势研究
51		全空间无人系统专题
52		卫星通信网络之“星链”发展态势
53		后摩尔时代微纳新器件电磁场专题
54		智慧供应链专题
55		生成式人工智能引领法律科技：机遇、挑战与未来之路
56		情感计算国内外发展态势研究
57		生态环境大模型研究与应用发展
58	2026	AI 先进计算技术专题

从 2019 年开始，先后发布《电子信息工程科技发展十四大趋势》、《电子信息工程科技十三大挑战》、《电子信息工程科技十四大技术挑战》（2019 年、2020 年、2021 年、2022 年、2023 年）5 次。科学出版社与 Springer 出版社合作出版了 5 个专题，见表 2。

表 2 英文专题汇总

序号	英文专题名称
1	Network and Communication
2	Development of Deep Learning Technologies
3	Industrial Internet
4	The Development of Natural Language Processing
5	The Development of Block Chain Technology

相关工作仍在尝试阶段，难免出现一些疏漏，敬请批评指正。

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心

前 言

计算技术是现代文明的基石之一。自 20 世纪人类发明计算机以来，计算技术的迅猛发展为人类社会进入信息化时代奠定了基础。经过大半个世纪的发展，计算技术已形成相对清晰的技术谱系，包括基础理论及定律、物理载体(包括材料、工艺、器件、架构、整机)、软件算法三部分。其中，物理载体作为计算使能技术，对整个计算技术及产业的推动具有直接作用，一直以来都是世界各国科技竞争的战略高地。当前主流的经典计算范式由硅基器件技术和冯·诺依曼计算架构组成，因而可称为“硅-冯”范式。计算架构和器件技术相互影响，相互促进，架构是器件技术走向应用的桥梁，而器件技术的进步则促进了架构的创新。一段时期以来，硅基器件工艺逐渐逼近物理极限，而冯·诺依曼架构的存储程序模式也越来越难以满足应用发展的需求。随着人工智能(artificial intelligence, AI)算力需求的爆发式增长，业内通过改进器件工艺、提升器件性能的方式来应对海量数据所需的高密度、实时性和多样化的算力需求已难以为继。重新定义器件结构、计算架构、系统软件等，并在新兴计算领域寻求种种可能，以期获得较佳的技术路径变得异常重要。

在中国工程院 2023 年度战略研究与咨询重点课题“国外新兴前沿计算技术发展态势研究”项目的支持下，中国电子科技集团公司第五十八研究所、中电科发展规划研究院有限公司、中国工程院战略咨询中心等单位的相关专家、学者深入研究了国外新兴前沿计算技术发展现状、趋势，围绕世界各主要国家的新兴前沿计算技术相关战略、科研布局，以及经典与新兴范式计算技术发展态势等展开分析并形成调研报告，成为本书的基础，又经《中国电子信息工程科技发展研究》指导组余少华院士的建议将书名定为《AI 先进计算

技术专题》，围绕面向 AI 的先进计算技术进一步凝练修改，并更新、补充了部分数据和研究进展(截至 2025 年 12 月)。

本书围绕经典与新兴两种计算范式，对面向 AI 的前沿计算技术发展态势进行分析，对比了各国的相关战略和政策，梳理了当下经典范式计算技术体系发展阶段及其存在的物理极限和种种问题，提出在该范式下计算技术终将“告别器件微缩，进入三维集成”。业界一方面通过系统技术协同优化(system technology co-optimization, STCO)设计、3D 集成和异构集成等多维度创新以应对单纯器件微缩的局限；另一方面鉴于经典范式计算技术已愈发难以应对非结构化数据处理要求，难以适应日益复杂的计算任务，因而需要融合新兴计算范式，在围绕“新型物理变换”的量子计算和模仿人脑机制的类脑计算等技术路径寻求突破。基于以上技术发展趋势研判，提出近、远期发展思路，为我国先进计算技术布局、政策部署、发展战略规划及产业体系完善提供参考。由于计算技术体系结构庞大、涉及领域繁多，在研究之初课题组在陈左宁院士等专家的指导下将研究目标聚焦于以器件、工艺、材料和器件架构为主的计算底层“使能”技术，试图将影响我国 AI 计算产业最关键的底层器件发展问题分析清楚并提出针对性建议，故对计算基础理论、软件算法和硬件整机等领域未有涉及，希望读者谅解。

本书分为 7 章，第 1 章对先进计算技术的内涵和体系架构做了总体概述，第 2 章围绕 AI 大模型和主流计算平台深入解读 AI 应用驱动下先进计算行业的发展态势，第 3 章重点分析经典范式计算器件技术面临的问题和主要发展趋势，第 4、5 章分别介绍以量子计算、类脑计算为代表的主要新兴范式计算技术发展态势，第 6 章介绍并分析国内外面向 AI 的先进计算产业发展战略和政策，第 7 章对面向 AI 的先进计算技术的整体发展趋势做了分析研判，并针对我国 AI 计算产业提出近、远期发展思路。

本书的编写得到了中国工程院费爱国院士、陈左宁院士、余少华院士、卢锡城院士、吴汉明院士、邓中翰院士等专家的指导和工程院、江南计算机技术研究所、国家超级计算无锡中心、青岛

国实科技集团有限公司、南京智能计算中心、浙江大学、腾讯、华为、芯来科技等产学研单位的大力支持，在此表示感谢。先进计算技术专业领域繁多、发展日新月异，由于编著者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请批评指正。

目 录

《中国电子信息工程科技发展研究》编写说明

前言

第 1 章 先进计算技术发展概述	1
1.1 经典计算的内涵与体系架构	1
1.1.1 经典计算理论	2
1.1.2 物理载体	2
1.1.3 软件算法	4
1.2 新兴计算的内涵与体系架构	4
1.2.1 量子计算	5
1.2.2 类脑计算	5
1.2.3 其他新兴计算技术	6
参考文献	7
第 2 章 面向 AI 的先进计算平台发展态势研究	8
2.1 AI 大模型	8
2.1.1 技术发展现状	9
2.1.2 行业发展趋势	12
2.2 主要计算平台	18
2.2.1 云计算	18
2.2.2 超级计算	26
2.2.3 端侧计算	34
参考文献	39
第 3 章 经典计算技术发展态势研究	41
3.1 技术发展现状	41
3.1.1 基础研究论文情况	41

3.1.2 专利情况	43
3.2 技术演进路线	45
3.2.1 器件尺寸微缩延续	45
3.2.2 三维集成渐成趋势	49
3.2.3 计算架构融合创新	59
3.2.4 新兴技术进入视线	66
3.3 未来发展趋势	76
3.3.1 器件微缩临界, 行业拐点渐至	76
3.3.2 放下器件微缩, 转向三维集成	77
参考文献	78
第 4 章 量子计算技术发展态势研究	83
4.1 技术发展现状	83
4.1.1 基础研究论文情况	83
4.1.2 专利情况	83
4.2 主要技术路线	87
4.2.1 超导量子计算	87
4.2.2 硅基量子计算	97
4.2.3 光量子计算	104
4.2.4 囚禁离子阱量子计算	109
4.2.5 中性原子量子计算	113
4.2.6 核磁共振量子计算	115
4.2.7 拓扑量子计算	117
4.3 未来发展趋势	120
4.3.1 技术发展趋势	120
4.3.2 应用前景	121
参考文献	124
第 5 章 类脑计算技术发展态势研究	125
5.1 技术发展现状	125
5.1.1 基础研究论文情况	125

5.1.2 专利情况	127
5.2 主要技术路线	129
5.2.1 神经元模型的构建与仿真技术	129
5.2.2 脑区连接与神经网络重构技术	130
5.2.3 神经元活动的记录与解析技术	131
5.2.4 神经网络计算模型与算法	132
5.2.5 类脑计算的硬件实现技术	133
5.3 未来发展趋势	139
5.3.1 技术发展趋势	139
5.3.2 应用前景	140
参考文献	142
第 6 章 面向 AI 的先进计算产业发展战略和政策研究	143
6.1 国外发展战略和政策	143
6.1.1 美国	143
6.1.2 欧盟	145
6.1.3 英国	147
6.1.4 日本	147
6.2 国内发展战略和政策	148
6.3 面向 AI 的先进计算产业发展战略演进与分析	150
参考文献	152
第 7 章 面向 AI 的先进计算技术发展趋势研判	154
7.1 发展趋势研判	154
7.2 近、远期发展思路	156
参考文献	160
结束语	161
缩略词表	163

第 1 章 先进计算技术发展概述

先进计算是面向从量变到质变的信息需求，在计算方式、位置、算法或机理等方面产生进步和革新新兴计算技术及产业的统称。纵观历史，人类社会的计算技术经历了从结绳计数、基于机械原理的计算器到电子计算机的诞生，再到现代的超级计算、云计算乃至量子计算等，每一次计算范式的革新都显著推动了社会生产力的跨越式提升。近年来，大数据、人工智能(AI)技术的深度融合与广泛应用，对计算能力提出了前所未有的高要求——不仅需要巨大的算力规模，更强调计算效率、能效比及对复杂 AI 工作负载的适配能力。在这一背景下，先进计算已成为支撑 AI 技术从理论走向产业应用、赋能经济社会数字化转型和实现产业能级跃升的核心驱动力^[1]。

当前，先进计算技术发展呈现出双轨并行的趋势：一方面是围绕 AI 训练与推理等新型计算任务，不断优化和扩展现有计算架构，以应对模型规模持续扩大、实时性要求不断提升的应用挑战；另一方面则是通过探索量子计算、类脑计算等非冯·诺依曼架构的新兴计算范式来解决传统计算方法难以解决的问题。两类并行路线正推动先进计算体系朝着更高效、更智能、更适应 AI 时代复杂应用场景的方向演进。

1.1 经典计算的内涵与体系架构

硅-冯经典计算是现代计算技术范畴中发展最成熟、占据主流地位的技术范式，经历了大半个世纪的发展，目前已形成相对清晰的技术框架，具体包括基础理论及定律、物理载体(包括材料、工艺、器件、架构、整机)、软件算法三部分，如图 1-1 所示^[2]。



图 1-1 经典计算的技术框架

1.1.1 经典计算理论

经典计算理论主要包括图灵的可计算性理论、香农对布尔代数的工程化应用理论、冯·诺依曼的计算机架构理论等，这些理论奠定了现代计算技术的基础。随着 AI 技术及应用的发展，对数据模型和类人智能基本要素及其相互作用机制的探索，以及对不确定性计算理论的研究，将成为 AI 计算理论发展的关键方向。

1.1.2 物理载体

作为实现计算理论的物理载体，其技术范围涉及材料、工艺、器件、架构及整机等，由于器件是计算底层的硬件基础，本书主要聚焦计算器件及其工艺、材料展开论述。半导体材料是电子信息技术的核心，用于制造多种电子器件，其按照工艺类型可以分为晶圆制造材料、器件制造材料和封装材料。其中，晶圆制造材料最为关键，其大致经历了三个发展阶段，即从硅、锗到砷化镓、碲化铟，再到宽禁带半导体材料(如碳化硅、氮化镓等)，不同材料根据其不同特性应用于各个领域。但整体来看，目前全球半导体材料仍以硅材料为主，其占半导体器件的 95%以上和集成电路的 99%以上，且短期

内难以被取代^[3]。

工艺技术按照工序先后可分为芯片制造及封装两大类。常见的芯片制造工艺有互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)工艺、绝缘体上硅(silicon-on-insulator, SOI)工艺、双极 CMOS 工艺、射频 CMOS 工艺等,它们都有各自的特点和应用领域。封装方面,随着技术的不断提升,业内从过去的传统封装(双列直插式封装、四边扁平封装、球栅阵列封装、四边无引脚扁平封装等)逐渐向晶圆级封装(扇入、扇出)、倒装、2.5D/3D 封装等方向演进。

器件按照主要功能可分为计算器件、存储器件、传输器件等。计算器件主要有中央处理器(central processing unit, CPU)、图形处理器(graphics processing unit, GPU)、专用集成电路(application specific integrated circuit, ASIC)、现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)和神经网络处理器(neural network processing unit, NPU)等,其中, GPU 由于其强大的并行计算能力和成熟的软件生态,已成为当前主流的智能算力芯片。存储器件在人工智能时代依旧至关重要,当前,传统的静态随机存取存储器(static random access memory, SRAM)、动态随机存取存储器(dynamic random access memory, DRAM)、闪存(flash memory, Flash)技术持续优化,容量和速度不断提升,同时,新型存储技术如相变、阻变、磁、铁电材料存储技术等正在发展,在未来有望为人工智能应用提供更加高效、可靠的存储解决方案。传输类芯片主要包括通信芯片(有线/无线)、总线接口芯片、高速信号传输芯片等,人工智能时代,传输类芯片正朝着高速低延迟、智能化、低功耗、多模多频方向发展。

计算架构类型多种多样,每种架构都有其特点和适用领域,常见类型有同构计算、异构计算、可重构计算、存算一体等。为适应人工智能应用需求,目前智能计算芯片多采用异构计算架构,即集成不同类型的处理器或计算单元,但该架构对软件算法及硬件制造要求比较高。此外,为突破冯氏架构存算分离的瓶颈,存算一体计算技术备受关注,但目前尚不成熟,短期内很难实现大

规模商用。

整机方面主要包括数据中心服务器、高性能计算(high performance computing, HPC)平台、个人计算机(personal computer, PC)及嵌入式终端产品等,在 AI 技术快速发展的背景下,整机除了继续朝着性能提升、能效比优化方向发展,也在逐步与 AI 技术融合,表现出一些新特性,例如,服务器具备更强的自我管理和修复能力,能够自动应对各种故障和异常情况,PC 和嵌入式终端产品具备更好的人机交互能力和自适应性。此外,随着应用场景的多样化,整机产品将越来越注重定制化和多样化。

1.1.3 软件算法

软件算法如编译器、数据库、操作系统、基本输入输出系统(basic input output system, BIOS)等对计算技术发展至关重要。在 AI 时代,大模型发展迅速,软件算法在模型训练和应用中扮演关键角色。编译器需不断优化以提升代码性能,数据库技术需不断创新以支持复杂数据处理,操作系统要高效管理资源并适应云计算、AI 等新模式,BIOS 需不断更新以确保系统的稳定性和兼容性。

1.2 新兴计算的内涵与体系架构

新兴计算是相较于传统计算技术在理论、硬件、系统以及应用等方面进行创新与优化的计算技术及产业的统称,其具备先进性、泛在性和多样性的特点,旨在提高算力、能效、灵活性,实现人、机、物间高效互通。典型代表有量子计算、类脑计算等。目前,产业界、学术界在新兴计算领域主要沿两大方向寻路,一个是沿着改变宏观量子行为的“电荷物理变换”方向前行摸索,寻找操控微观量子行为的“新型物理变换”技术;另一个是沿着改变“存储程序”的方向前行摸索,寻找模仿人脑“原位存算”机制的“类脑”架构技术。

1.2.1 量子计算

量子计算是遵循量子力学规律,调控量子信息物理单元(又称量子比特)进行并行运算的新型计算模式,是一种变革性的计算模式^[4]。量子计算的核心在于量子力学的态叠加和干涉原理,这些原理使量子比特能够同时存在于多种状态的叠加之中,从而极大地扩展了量子信息处理的效率和潜力,相较于传统经典信息处理方式,量子计算展现出无可比拟的优势。在物理载体方面,量子计算技术已经涵盖多种不同的实现方式,包括但不限于超导材料、硅基量子点、光子量子以及拓扑量子计算等,这些先进的量子计算器件连同量子存储器 and 量子效应器等关键硬件组件,共同构成了量子计算机的算力底座,它们负责执行量子计算中的基本操作,如量子门操作,从而实现量子信息的精确操控;在软件算法层面,量子计算同样需要一套完整的工具链,包括量子算法、量子编程语言以及量子编译器等,这些软件工具使开发者能够将高级的量子算法转换为量子计算机可以理解和执行的汇编代码,进而在量子处理器上实现复杂的量子运算。当前,量子计算正处于一个关键的转折点,从前沿科学研究逐步向实际应用领域迈进,尽管仍面临众多技术挑战和瓶颈,但其潜力巨大,被广泛认为有能力在未来解决许多传统计算机难以攻克的问题。随着量子计算技术的不断进步和成熟,其有望在药物研发、材料科学、密码学、大数据分析等领域发挥重要作用,为人类社会带来深远影响。

1.2.2 类脑计算

类脑计算(又称神经形态计算)是借鉴生物神经系统信息处理模式和结构的计算理论、体系结构、芯片设计及应用模型与算法的总称,其具备自主学习、获取新信息和新技能的能力,以及进行交互、推理从而做出决策的能力,同时具有高并行性、高容错性、高连接性、存算融合和低功耗特性^[5],这些特性使其在对功耗、延迟敏感的边缘计算领域具有广泛的应用价值和潜力。类脑计算的基础理论融合了脑科学、神经科学、认知科学甚至统计物理等学科的知识,致

力于解决现有传统计算技术在计算效率、能耗等方面面临的挑战。在物理载体方面,类脑计算器件主要有数字 CMOS、数模混合 CMOS 以及基于新原理新材料的器件,这些器件具有存算一体的架构特征,有助于实现存储处理一体化、超低能耗、真正超大规模并行;在软件算法方面,类脑计算需要神经网络模型与算法、神经形态工具链、编译器等。编译器将上层软件模型编译为面向特定神经形态硬件的指令代码,并在相应的控制处理器上执行,从而实现复杂的计算任务。当前,各种“类脑计算”主要基于现有技术模拟、仿真、逐步“逼近”大脑的信息处理机制,尽管距离实现真正的神经形态计算还有很大差距,但其发展正逐渐推动智能技术向人类水平的通用智能的目标逐渐逼近。随着人类对脑机制理解的进一步深入和相关技术的不断进步,类脑计算有望在未来解决许多传统计算机难以处理的问题,为人工智能的发展带来巨大变化。

1.2.3 其他新兴计算技术

光计算是采用光作为信息处理的基本载体、基于光学单元构建光学系统,通过必要的光学操作,从而实现信息处理和数据运算的新型计算体系。当前,以深度神经网络(deep neural network, DNN)为代表的人工智能技术的兴起,使海量精度不高的线性矩阵-矩阵乘加(linear matrix-matrix multiply accumulate, MM-MAC)操作的算力需求(深度学习算法中80%以上的计算都是MM-MAC)刚好与并行光计算的优势相契合,这也正是光计算再次兴起的核心驱动力。目前,光计算的实现方式主要有非集成式自由空间光学系统,基于马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)、微环谐振器(micro-ring resonator, MRR)和半导体光放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)等核心器件的集成光计算架构,以及基于相变材料、超表面、3D 波导等新型材料平台的混合集成架构。由于缺乏较为实用的表达非线性函数的光子器件以及真正意义上的光子信息存储手段,目前的光计算实质上是一种融合经典计算的“光电混合”计算架构,真正意义上的光计算尚在早期探索阶段;此外,光与量子相

结合的光量子计算技术也是新兴计算领域的研究热点之一。因此,本书仅在第3章和第4章分别针对光电集成(光电混合)、光量子计算技术做一些介绍。

生物计算是指利用生物系统固有的信息处理机理进行研究和开发的一种新型计算模式,包括利用有机或生物材料在分子层面构成有序体系,这些体系能够通过物理化学过程实现信息的检测、处理、传输和存储。生物计算为医学、环境科学等技术领域带来了变革潜力。当前,生物计算在多个领域取得了进展,在药物发现与开发领域,通过建模生物系统识别药物靶点、加速药物开发,例如,Recursion(美国)和Insitro(美国)利用机器学习和计算生物学推动药物发现;在神经计算领域,利用生物神经元进行计算,如FinalSpark(瑞士)的远程神经元实验平台和Cortical Labs(澳大利亚)的CL1生物计算机,可用于药物发现和神经形态计算研究;在数据存储领域,利用合成DNA存储数据,提供高密度和长寿命的存储解决方案。但是生物计算目前依旧面临众多挑战,例如,生物系统的高度复杂性使得计算单元和系统的标准化和扩展困难;确保生物计算机能够处理复杂计算并保持可靠性是重大挑战,需进一步研究解决;利用活体生物进行计算或引发伦理争议,尤其是关于生命形式操作的道德考量等。由于生物计算目前仍处于早期探索阶段,距离实现AI计算应用仍有很长的路要走,因此,本书不作为重点内容展开讨论。

参 考 文 献

- [1] 王晓明, 鹿文亮, 侯云仙. 推动人工智能产业迈向更高水平[N]. 经济日报, 2025-05-05.
- [2] 先进计算发展研究报告[R]. 中国信息通信研究院, 2018.
- [3] 共正资本. 半导体产业材料[硅片][EB/OL]. (2024-08-22)[2024-08-23]. https://mp.weixin.qq.com/s/X2qLLZSNqZbdTdMTWof_GQ.
- [4] 冯蕊. 启科量子: 在浩瀚的量子征途上扬帆远航[J]. 中关村, 2022(10): 36-37.
- [5] 张玲, 刘国柱, 于宗光. 人工神经形态器件发展现状与展望[J]. 电子与封装, 2021, 21(6): 14. DOI: 10.16257/j.cnki.1681-1070.2021.0601.

第 2 章 面向 AI 的先进计算平台 发展态势研究

在数字化时代背景下，人工智能技术凭借其强大的算力、先进的算法和海量的数据，深刻影响着计算行业的发展。在这一进程中，AI 大模型作为 AI 计算的核心，通过深度学习和机器学习技术，极大地扩展了计算的边界，为云计算、超级计算等传统计算平台带来显著变化。这些计算平台的演进不仅推动了计算行业的技术革新，还促进了数据处理能力的飞跃，加速了科学发现和商业决策的过程。随着 AI 技术的进一步渗透和多样化应用场景的拓展，算力需求将更加多元化，这将催生出更多创新的计算平台，以满足不同行业和领域的特定需求，推动 AI 先进计算产业蓬勃发展，开启一个智能、高效的计算新时代。

2.1 AI 大模型

当前，人工智能已经广泛应用于安防识别、智能推荐、语音对话等应用场景。随着产业发展需求层级的不断深入，以及数字经济、智能经济、数字化转型、新基建等政策的加快推进，人工智能赋能千行百业以实现大规模工程化应用落地并迎来高速发展的窗口期。如何缩短人工智能研发周期、降低开发应用成本、提升实际工作效率，已成为各行业关注的核心问题。过去，在分散化的人工智能模型研发模式下，单一场景需多个模型支撑，每个模型都需经过算法开发、数据处理、训练和调优。因此，提升人工智能的通用性成为加速产业智能化的关键。

AI 大模型是指具有大规模参数和复杂结构的深度神经网络

模型，通常在训练过程中高度依赖海量的数据资源和强大的计算能力^[1]，具有通用性、泛化性和迁移性，能降低人工智能应用门槛，为其大规模落地带来新希望。生成式人工智能(generative artificial intelligence, GenAI)技术的发展水平在很大程度上能反映 AI 大模型的技术发展水平。2022 年 11 月底，人工智能对话聊天机器人 ChatGPT 推出，短短几个月时间，2023 年 1 月 ChatGPT 的月活跃用户数已达 1 亿，成为史上用户数增长最快的消费者应用。包括英伟达首席执行官黄仁勋在内的许多人将其描述为 GenAI 的“iPhone 时刻”。这是因为 OpenAI 平台使所有用户更容易访问先进的 GenAI 程序，特别是大型语言模型(large language model, LLM)，这些模型已经达到新的性能水平，展示了各种实际应用的潜力，引发了一波研究和开发浪潮^[2, 3]。ChatGPT 的出现标志着通用人工智能的起点和强人工智能的拐点，是里程碑式的技术进步，引发了新一轮的人工智能革命。自 ChatGPT 出现后，国内外大量企业涌入 AI 大模型的赛道。

2.1.1 技术发展现状

1. 基础研究论文情况

据科睿唯安(Web of Science)SCIE 数据库统计，2016~2025 年(2025 年数据仅统计至 8 月)，全球生成式人工智能领域论文数量呈现逐年递增趋势，如图 2-1 所示，尤其是 2024 年，同比增长率达 30.8%，预计 2025 年全球生成式人工智能主题出版物数量将突破 55000 篇。从国家和地区来看，如图 2-2 所示，中国的生成式人工智能领域论文数量达 116476 篇，排名第 1，美国为 71291 篇，排名第 2。欧洲方面，英国、德国分别排名第 3 和第 4，论文数量分别为 20964 篇、20579 篇。亚洲其他国家方面，印度排名第 5，论文数量为 14448 篇。总体来看，中美两国在生成式人工智能领域的论文数量远超其他国家。

2. 专利情况

据德温特(DI)专利数据库统计，2016~2025 年(2025 年数据仅统

计至 8 月),生成式人工智能领域专利数量及主要发明人所在地情况如图 2-3 所示。2023 年以前,每年只有少量专利发表,2022 年 ChatGPT 的问世让生成式人工智能成为行业研究热点,全球生成式人工智能专利成果发表量激增,尤其是中美两国。2024 年,全球生成式人工智能领域专利成果发表超 14000 项,同比增长率达 158%。

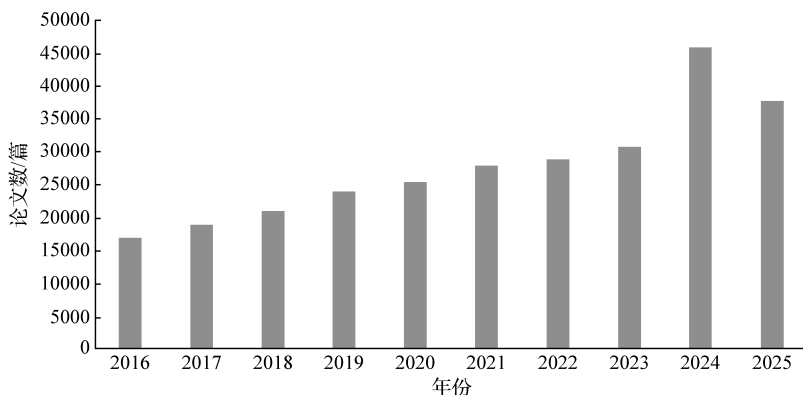


图 2-1 2016~2025 年(2025 年数据仅统计至 8 月)全球生成式人工智能领域论文数量
(数据来源: Web of Science 数据库)

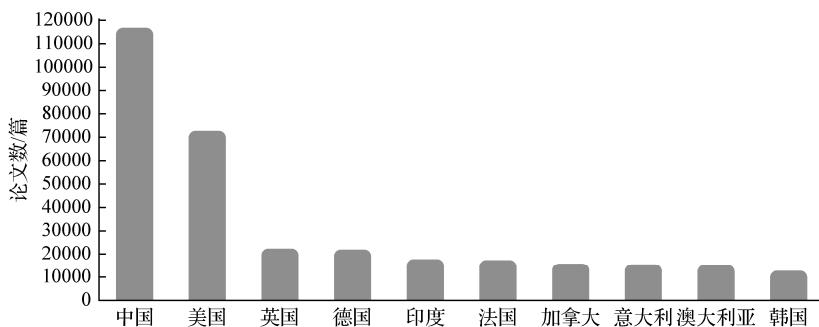


图 2-2 2016~2025 年(2025 年数据仅统计至 8 月)全球生成式人工智能领域
论文数量排名
(数据来源: Web of Science 数据库)

从国家和地区来看,中国在全球生成式人工智能领域专利申报中处于优势地位。2016~2025 年(2025 年数据仅统计至 8 月),中国