



南開大學
Nankai University

计算机学院
并行程序设计报告

中国自主产权处理器发展综述

姓名：廖望

学号：2210556

专业：计算机科学与技术

2025 年 3 月 21 日

摘 要

本文系统综述了中国自主处理器的发展历程、技术现状及未来趋势。从历史维度分析了中国处理器产业的三个发展阶段：初期探索（1956-1990 年）、技术引进（1991-2010 年）和自主创新（2011 年至今）。重点对比分析了龙芯、飞腾、鲲鹏等 CPU 处理器，以及景嘉微、摩尔线程、壁仞科技等 GPU 处理器的技术特点和市场表现。通过与 AMD Zen 5、Apple M4、NVIDIA Blackwell 等国际主流处理器的对标分析，揭示了中国处理器在工艺、性能和生态等方面的差距。研究发现，中国处理器在 LoongArch 等自主指令集、特定应用优化等方面取得突破，但在半导体制造设备领域存在明显短板，全球市场份额普遍低于 2%。面对美国及其盟友的出口管制，中国处理器产业通过优化成熟工艺、发展 Chiplet 等替代技术积极应对。未来发展的关键在于突破制造装备瓶颈、加强人才培养和完善软件生态。

关键词：自主处理器；CPU；GPU；APU；工艺技术；产业发展

Abstract

This paper provides a systematic review of the development history, current status, and future trends of China's independently developed processors. It analyzes the three developmental stages of China's processor industry from a historical perspective: initial exploration (1956-1990), technology introduction (1991-2010), and independent innovation (2011-present). The paper focuses on comparing and analyzing the technical characteristics and market performance of CPU processors such as Loongson, Feiteng, and Kunpeng, as well as GPU processors including Jingjia Micro, Moore Threads, and Biren Technology. Through benchmarking analysis with international mainstream processors like AMD Zen 5, Apple M4, and NVIDIA Blackwell, it reveals China's processor gaps in process technology, performance, and ecosystem. The research finds that while China has made breakthroughs in independent instruction sets like LoongArch and specific application optimization, there are significant shortcomings in semiconductor manufacturing equipment, with global market share generally below 2%. Facing export controls from the US and its allies, China's processor industry actively responds through optimizing mature processes and developing alternative technologies like Chiplet. The key to future development lies in breaking through manufacturing equipment bottlenecks, strengthening talent cultivation, and improving software ecosystems.

Keywords: Independent Processor; CPU; GPU; APU; Process Technology; Industry Development

目录

摘要	1
Abstract	1
1 中国自主处理器发展三阶段历程	3
1.1 初期探索期（1956-1990 年）	3
1.2 技术引进期（1991-2010 年）	3
1.3 自主创新期（2011 年至今）	3
2 代表性中国自主处理器详细分析	4
2.1 中国自主 CPU 处理器	4
2.1.1 龙芯处理器	4
2.1.2 飞腾处理器	5
2.1.3 鲲鹏处理器	5
2.2 中国自主 GPU 处理器	6
2.3 中国自主 APU 处理器	6
3 国际最新处理器发展动态	7
3.1 CPU 技术发展	7
3.2 GPU 技术发展	7
3.3 APU 技术发展	7
4 中国与国际处理器对比分析	8
4.1 技术能力对比	8
4.2 性能与应用对比	8
4.3 发展挑战与应对	9
5 未来发展展望	9
6 结论	10
参考文献	11

1 中国自主处理器发展三阶段历程

中国半导体与处理器技术的发展历程可追溯至上世纪中叶，几十年来走过了从基础元器件研发到自主架构设计的漫长道路。纵观这一发展进程，大致可划分为三个主要阶段：初期探索期（1956-1990 年）、技术引进期（1991-2010 年）和自主创新期（2011 年至今）。

1.1 初期探索期（1956-1990 年）

初期探索期始于 1956 年，中国当年生产出了第一个晶体管，标志着半导体技术的起步。1965 年首个集成电路的成功研制成为这一阶段的又一里程碑。这一时期，中国沿用苏联式工业组织体系，研究工作主要在国家实验室进行，而制造则由单独的国有工厂承担。

国家层面的支持是这一阶段的特点。中国国务院在"1956-1967 年科学技术发展纲要"中将半导体技术列为重点发展项目，同时在五所主要大学建立了半导体相关学位课程，为行业培养人才。无锡 742 厂（华晶集团）自 1960 年起运营，培养了大量行业专家 [1][2]。上世纪 70 年代，全国约有 40 家工厂从事基本二极管和晶体管的生产，但尚未形成集成电路的规模化制造。

这一时期也面临多重挑战。1965 年至 1975 年的文化大革命时期对行业发展造成了严重阻碍，科研和生产活动遭到冲击。直到 1978 年邓小平推行经济改革，才为半导体产业带来了转机。改革开放初期的政策调整为随后的技术引进奠定了基础，第六个五年计划（1981-1985）期间，国务院成立"计算机和大规模 IC 引领小组"，开始将注意力转向集成电路和处理器领域。1985 年前，中国引进了 24 条二手半导体生产线，奠定了产业现代化基础 [1][2]。

1.2 技术引进期（1991-2010 年）

进入 20 世纪 90 年代，中国处理器发展进入技术引进期。这一阶段的关键特征是，中国采取了集中资源支持少数大型企业的战略，以促进与国际公司的深度合作。这一阶段建立了与北电网络、飞利浦、NEC 和 ITT 等知名企业的合资公司，通过引进国外先进工艺和管理经验，提升了中国的半导体制造能力。

在处理器研发领域，这一时期主要依赖 MIPS（龙芯）、SPARC（飞腾早期）、ARM（鲲鹏）等外国架构授权来开发处理器。2001 年龙芯项目启动，基于 MIPS 架构开发；2002 年"戒尺工程"启动，开始探索 SPARC 架构的应用；华为则于 2010 年启动"泰山计划"，为日后的鲲鹏处理器奠定基础。通过这种技术引进和产学研协同模式，中国逐步掌握了处理器设计的关键技术 [3][4][5][1][6][7][8]。

政策支持方面，这一阶段以"九五"到"十一五"规划连续支持半导体产业发展为特点。"863 计划"等国家科技项目为研发提供了重要支持，如"九五"期间（1996-2000 年）的"909 工程"着重提升集成电路工艺能力，"十五"期间（2001-2005 年）的"核高基"专项则支持了包括处理器在内的核心技术研发。这些政策使中国处理器产业初步具备了自主设计能力，为下一阶段的创新发展积累了经验 [1][8][2][2]。

1.3 自主创新期（2011 年至今）

2011 年以来，中国处理器产业进入自主创新阶段。这一阶段的标志性事件包括龙芯、飞腾、鲲鹏等品牌的崛起，以及基于引进架构的本土化改良与创新，有效提升了处理器的性能与功能。然而，正如乔治城大学安全与新兴技术中心（CSET）的研究指出，中国半导体产业仍面临严峻挑战，特别是在制造设备领域存在明显短板 [9]。

2014 年成立的国家集成电路产业投资基金 (CICF)，又称"大基金"，从财政部、中国烟草、中国移动和国家开发银行等汇集资源，为产业发展提供了强大资金支持。2015 年，国家层面提出了"中国制造 2025"计划，设定到 2025 年实现 70% 国内半导体自给的目标，为处理器产业指明了方向。"十三五"（2016-2020 年）和"十四五"（2021-2025 年）规划继续将集成电路和处理器列为重点发展领域 [1][8][2]。尽管政策支持力度大，但正如 CSET 研究表明的那样，资金投入并非中国处理器发展的主要限制因素，更关键的挑战在于技术瓶颈和人才短缺 [9]。

2020 年是这一阶段的关键节点，龙芯推出了完全自主知识产权的 LoongArch 指令集架构，这是底层技术上的重大突破。同年，飞腾、兆芯、鲲鹏等处理器也分别取得了重要进展。中国芯片制造能力在这一阶段迅速提升——从 2020 年的月产 296 万晶圆增加到 2021 年的月产 357 万晶圆，2023 年进一步提升至月产 400 万晶圆。新建晶圆厂数量居全球前列，2021-2023 年间中国建设了 17 座新晶圆厂 [10][1][11][2]。然而，CSET 的分析指出，量产能力并不等同于技术先进性，中国在先进工艺（尤其是 7nm 及以下制程）方面与国际领先水平仍有显著差距 [9]。

2022-2023 年，中国处理器产业面临的外部压力显著增加。2022 年 10 月，美国商务部实施了全面的芯片出口管制措施，限制了 14 纳米及以下工艺芯片生产设备的出口。2023 年，荷兰和日本也加入了管制行列，进一步限制了中国获取先进光刻机和关键设备的渠道。CSET 研究指出，这种多边联合管制对中国处理器产业造成了多层次影响：直接限制了先进工艺发展，影响了现有设备的维护升级，也阻碍了与国际领先企业的技术交流 [9]。

面对这些挑战，中国处理器产业正在多个层面积极应对。在技术路线上，通过优化成熟制程和发展 Chiplet 等替代技术，探索突破工艺限制的新途径；在人才培养方面，深化产学研协同，建立从基础研究到产业应用的人才培养体系；在应用生态上，加快软件适配和系统优化，构建自主可控的技术生态链。

然而，正如 CSET 的研究指出，中国在最先进半导体制造设备领域的追赶之路仍然漫长。这不仅需要持续的技术创新，更需要在以下方面形成系统性突破：

- 深耕成熟工艺，通过架构优化和设计创新提升性能
- 发展 Chiplet 等替代技术，探索工艺限制下的新型集成方案
- 加强产学研协同，打造高水平技术人才梯队
- 完善软件生态，提升系统整体兼容性和应用效能

这些应对措施虽然不能立即解决所有问题，但通过持续积累和创新突破，有望为中国处理器产业开辟出一条独具特色的发展道路。

2 代表性中国自主处理器详细分析

2.1 中国自主 CPU 处理器

2.1.1 龙芯处理器

龙芯处理器始于 2001 年，由中科院计算所牵头研发，后成立龙芯中科技术有限公司。龙芯最初基于 MIPS 架构开发，获得了 MIPS32 和 MIPS64 的授权。

龙芯处理器的发展历程可分为四代产品：第一代包括 2000 年代初研发的龙芯 1 号 (Godson-1)、龙芯 3A1000、3B1500；第二代包括龙芯 2 系列和 3A2000、3A3000；第三代包括 3A4000、3A5000、

3C5000/S/D；第四代包括龙芯 3A6000、3B6000M 和 3C6000。2020 年，龙芯推出了完全自主知识产权的 LoongArch(LA) 指令集架构，这是龙芯发展史上的重要里程碑。该架构包括基本指令集 (LA32、LA64)，以及向量处理 (LSX、LASX)、二进制翻译 (LBT) 和虚拟化 (LVZ) 等扩展功能 [3][10][6][11][12]。

从微架构角度分析，龙芯每代产品都有显著提升。LA464 核心 (3A5000) 采用 4 发射超标量乱序执行设计，配备适中规模的缓冲区。该处理器具有 2 个 AGU 单元，每个时钟周期能执行 2 个内存操作 (可以是 2 个加载，或者 1 个加载加 1 个存储)，每周能处理 2 个标量整数乘法，这一特性超过了当时的多数处理器。虽然其向量和浮点执行能力弱于同期的 Zen 1 和 Skylake，但缓存结构设计合理，包括 L1 数据缓存和指令缓存各 64KB，L2 缓存 256KB，L3 缓存 16MB，工作频率稳定在 2.5GHz[3][6][12]。

LA664 核心 (3A6000) 采用 6 发射超标量乱序执行设计，执行资源更为丰富。其乱序引擎显著增强，ROB 从 384 条目增加到 768 条目，超过苹果 A17 的 670。分支预测能力提升到与 Zen 2 相当的水平，并支持 SMT 多线程技术。缓存性能也有明显改进：L1 缓存延迟从 4 周期降到 3 周期，L2 缓存延迟从 14 周期降到 12 周期，DRAM 访问延迟从 144ns 降到 104ns。整体而言，其多核心性能达到 Zen 1 水平，工作频率保持在 2.5GHz[3][6][12]。

目前，龙芯正在开发 3B6600，预计 2025 年上半年流片，下半年回片。这款 8 核桌面处理器集成了 GPGPU 图形与计算核心和高速 PCIe 接口，架构变动较大。预计该处理器的单核性能将达到世界一流水平。

龙芯在技术路线上采用类似 Intel 的 "Tick-Tock" 策略——"Tick" 代表工艺迭代，"Tock" 代表架构优化。第四代产品采用了 "Tock-Tock2-Tick" 策略：先进行两次设计优化，再进行工艺迭代，以充分发挥现有成熟工艺的潜力，性能可媲美美国外 7nm 工艺水平的产品 [3][6][12][5]。

2.1.2 飞腾处理器

飞腾处理器由天津飞腾信息技术有限公司主导开发，其前身可追溯到 2002 年的 "戒尺工程"。该项目最初探索 SPARC 架构的应用，陆续推出了使用 SPARC V9 架构的 Venus-I 和 Venus-II 处理器。公司于 2010 年正式成立，隶属于中国长城科技集团。

2014 年，飞腾将架构由 SPARC 转向 ARM，并推出了 FT-1500A、FT-2000/2000+、FT-2500 以及 S2500 等系列产品。飞腾处理器采用许可架构的发展策略，以往的飞腾系列基于 ARM v8 架构，搭载 ARM Cortex-A 处理器核心，而最新的 S 系列则与 Neoverse 系列一脉相承 [10][6][11][12]。

FT-2000/2000+ 采用 16 个 ARMv8-A 64 位核心构成。FT-2500 进一步优化，引入 Armv8.2-A 架构，支持矢量计算单元 SVE，具备单、双、四精度浮点数计算能力，最高主频达 2.5GHz。最新的 S2500 采用 7nm 制程工艺，集成 64 个核心，主频达 2.8GHz，在国产处理器中达到领先的工艺与性能水平 [10][6][11][12][5]。

飞腾处理器的应用场景广泛，覆盖政务办公、信息化基础设施、服务器、桌面计算机、工业控制和边缘计算等领域。这得益于飞腾多年来在兼容性和生态建设方面的积累，体现了其作为国产处理器的全面布局战略 [10][6][11][12][5]。

2.1.3 鲲鹏处理器

鲲鹏处理器由华为海思开发，源自 2010 年的 "泰山计划"。该计划旨在将华为的业务从通信设备扩展到计算领域，这一战略决策在后续发展中证明具有重要意义。

鲲鹏处理器的命名源自《庄子·逍遥游》，暗示其发展潜力。其技术路线与飞腾相似，基于 ARM 架构，但在微架构上有华为独特的优化。

2019 年, 华为发布鲲鹏 920 处理器, 这款基于 ARMv8 架构的产品采用 7nm 工艺制程, 集成 64 个核心, 最高主频达 3.0GHz, 单核性能和能效比在同类产品中表现出色。鲲鹏 920 不仅采用 ARM 核心, 还经过华为深度优化的自研微架构, 体现了华为"他山之石"的技术策略 [10][6][11][12][5]。

2021 年, 华为推出鲲鹏 920 增强型, 在原有基础上实现更高的频率与能效比。尽管受到国际贸易限制和技术出口管制政策影响, 鲲鹏处理器在政企市场和电信领域保持良好表现。目前, 鲲鹏处理器广泛应用于服务器、桌面 PC、笔记本电脑等多种终端设备, 成为国产化替代的重要选项 [10][6][11][12][5]。

华为围绕鲲鹏处理器构建了完整的"鲲鹏计算产业生态", 包括操作系统适配、基础软件移植和应用软件开发等多个方面。这种"硬件 + 软件 + 生态"的全方位布局, 体现了华为在 IT 领域的技术积累和战略眼光 [10][6][11][12][5]。

2.2 中国自主 GPU 处理器

在中国 GPU 产业发展历程中, 景嘉微、摩尔线程和壁仞科技构成了三个重要支点, 分别代表了不同的技术路线和市场定位。

景嘉微成立于 2006 年, 是国内最早涉足 GPU 领域的企业之一。其 JM 系列 GPU 主要面向军工和特种行业, 在国防和工业控制等领域应用广泛。该公司选择了自主设计指令集架构和微架构的技术路径。2016 年, 景嘉微推出 JM5400 系列, 这是中国第一款自主研发的 GPU 芯片。2020 年推出的 JM9 系列 GPU 性能显著提升, 支持 OpenGL、OpenCL 和 Vulkan 等主流图形与计算 API。景嘉微的产品主要面向专用市场, 在通用消费领域知名度相对较低 [10][6][11][12][5]。

摩尔线程成立于 2020 年, 发展迅速。其首款产品 MTT S60 于 2021 年推出, 这是一款面向数据中心的通用 GPU, 支持计算和图形双功能, 并兼容主流深度学习框架。MTT S60 采用台积电 7nm 工艺, 具备先进的硬件规格。2022 年底, 摩尔线程发布第二代 S70/S70+ 和第三代 S80, 在图形性能和算力方面持续提升。摩尔线程的 GPU 不仅支持通用 API, 还针对国产开源深度学习框架进行优化, 展现了对国内 AI 生态的贡献 [10][6][11][12][5]。

壁仞科技成立于 2019 年, 拥有强大的技术团队。其首款产品 BR100 通用 GPU 于 2022 年 8 月发布, 主攻 AI 计算市场。该芯片采用台积电 7nm 工艺, 集成 77 亿晶体管, 单精度浮点性能达 16TFLOPS, 支持 FP32/FP16/INT8/INT4 等多种精度。壁仞 GPU 在中间表示层 (IR) 和底层计算优化方面投入较大, 以提升 AI 应用的性能和开发体验 [10][6][11][12][5]。

这三家企业各具特色: 景嘉微采用完全自主设计路线, 技术积累深厚但规模相对较小; 摩尔线程注重通用性和生态兼容; 壁仞科技专注 AI 领域, 走专精特新路线。虽然与国际巨头相比存在差距, 但它们代表了中国 GPU 产业不同的技术路径和发展方向, 共同推动国产 GPU 技术进步 [10][6][11][12][5]。

2.3 中国自主 APU 处理器

APU (加速处理单元) 是一种集成了 CPU 和 GPU 的异构处理器, 在计算能力和能效方面具有独特优势。在中国 APU 领域, 景嘉微的 JH7110 系列是一个重要代表。

JH7110 是国内首款采用 RISC-V 架构的高性能 APU, 由景嘉微于 2022 年推出。该处理器融合 RISC-V CPU 和自主 GPU 两大核心技术, 其 CPU 采用四核心设计, 包括 1 个性能核 (S7) 和 3 个能效核 (U7), 主频最高达 1.5GHz。GPU 部分继承了景嘉微在图形处理领域的技术积累, 支持 OpenGL ES 和 OpenCL。该处理器还集成了先进的 ISP (图像处理器) 和 NPU (神经网络处理器), 实现多媒体处理和 AI 功能的全面覆盖 [6][12][5]。

从架构角度分析, JH7110 采用 28nm 工艺, 虽非最先进制程, 但考虑到目前国产处理器的现状, 这是相当实用的选择。其功耗控制在 2-3W 范围, 适合嵌入式系统和边缘计算设备。在性能表现上, 根

据公开资料，其多核性能接近主流 ARM 处理器水平 [6][12][5]。

JH7110 的一个重要特点是其开源生态支持。基于 RISC-V 架构，该处理器能充分利用开源社区资源，包括 Linux 内核、OpenSBI 固件以及各类开源应用。这种开放性为国产软硬件生态发展提供了良好基础，使应用开发者能更自由地进行创新 [6][12][5]。

目前，JH7110 已在多款开发板和终端产品中应用，包括 VisionFive 2 开发板等。这些产品为软件开发者和硬件工程师提供了实践国产 APU 技术的平台，也为后续应用场景拓展奠定基础。虽然与国际主流 APU 产品相比存在差距，但 JH7110 代表了中国在 RISC-V 和异构计算领域的重要探索，展现了自主创新的能力 [6][12][5]。

3 国际最新处理器发展动态

当前全球处理器领域呈现四大关键趋势：后摩尔定律时代的多芯片封装与异构计算成为主流；通用处理器领域形成 x86、ARM 和 RISC-V 三足鼎立格局；专用计算单元（如 AI 加速器、TPU 等）快速发展；软件生态和编译技术成为竞争关键 [13][14]。

3.1 CPU 技术发展

在 x86 阵营，Intel 推出采用 18A 工艺（约 1.8nm）的 Lunar Lake，搭载 Lion Cove 性能核心和 Skymont 能效核心，IPC 性能提升 20-40%，集成 Arc GPU 和 NPU 4.0[13]。AMD 则以台积电 4nm 工艺打造 Zen 5 架构，IPC 提升 10-15%，Turin EPYC 支持最高 192 核心配置 [13][14]。

Apple 基于 TSMC 3nm 工艺 [14] 推出 M4 系列，根据不同定位提供多样配置：基础版配备 8-10 核 CPU 和 GPU，38 TOPS NPU 性能；Pro 版升级至 12-14 核 CPU，16-20 核 GPU，支持 64GB 统一内存；Max 版则提供 14-16 核 CPU，32-40 核 GPU，128GB 统一内存和 546GB/s 带宽。

ARM 阵营持续创新，Neoverse 平台针对服务器优化，高通 Snapdragon X Elite 采用自研 Oryon 核心 [13][14]。ARM v9 架构引入 SVE2 向量计算和增强安全特性 [13]。同时，开源的 RISC-V 架构也在快速发展，新增向量计算、虚拟化等扩展 [15]，SiFive 等厂商的性能已接近主流 ARM 处理器水平 [13][15]。

3.2 GPU 技术发展

在 GPU 领域，NVIDIA 推出采用台积电 4nm 工艺的 Blackwell 架构，B200 芯片集成 2160 亿晶体管，支持 FP4/FP8 精度，配备 192GB HBM3e 内存，带宽达 8TB/s，NVLink 5.0 互连技术显著提升多 GPU 系统效率 [13][14]。

AMD 则以台积电 5nm 工艺打造 RDNA 4 架构，优化计算单元设计和光线追踪性能，其 Instinct MI300X 配备 192GB HBM3 内存，CDNA 3 架构提升矩阵运算效率 [13][14]。

在新兴力量中，Intel Arc 系列采用 Xe HPG 架构支持 XeSS 超采样，Apple 自研 GPU 在移动端展现高能效比，Google TPU 在 AI 领域与 NVIDIA 竞争 [13][14]。这些新玩家的加入，进一步推动了 GPU 技术的创新发展。

3.3 APU 技术发展

APU 领域呈现出多元化发展趋势。AMD Phoenix APU 采用台积电 4nm 工艺，集成 Zen 4 CPU（8 核 16 线程，5.0GHz）和 RDNA 3 GPU（12 计算单元，2.8GHz），并配备 XDNA 架构 NPU，支

持 LPDDR5X-6400 内存，带宽达 102.4GB/s[13][14]。

Intel 的 Meteor Lake 采用分块设计，整合 6P+8E 混合架构 CPU（最高 4.8GHz）、Arc 核心 GPU（最高 128EU 单元）和第 4 代神经网络引擎（15 TOPS），支持 DDR5-5600 和 LPDDR5X-7467 内存 [13][14]。

Apple 的 M 系列则展现了统一内存架构的优势，通过 CPU/GPU 高效共享和专用引擎的协同，实现了卓越的性能和能效。其特点是配备专用媒体引擎支持 ProRes 等专业编解码，集成 16 核 NPU 可达每秒 18 万亿次运算，并包含定制化 ISP 和显示引擎 [13][14]。

当前 APU 发展呈现以下特点：

- 异构计算深度融合，CPU/GPU 共享缓存和内存架构普及
- AI 加速器成为标配，支持本地 AI 应用
- 采用先进封装技术，提升系统集成度
- 智能功耗优化，动态功率管理日益重要

这些技术进步正推动 APU 向更高性能、更低功耗的方向发展 [13][14]。

4 中国与国际处理器对比分析

4.1 技术能力对比

在指令集架构方面，LoongArch 使中国成为少数拥有自己通用 ISA 的国家之一 [10]。虽然 ARM 和 x86 在全球占据主导地位，但 RISC-V 的兴起为中国处理器发展提供了新的机遇 [15]。海思的服务器处理器包括 TaiShan v110，采用与 ARMv8.2-A 兼容的设计 [5]。

在工艺与制造能力方面，国际领先企业已经开始采用 3 纳米和 4 纳米工艺节点（台积电）[14]。相比之下，中国的中芯国际工艺水平与国际领先水平存在明显差距，特别是受到 EUV 光刻设备出口限制的影响 [1][16][2]。CSET 研究指出，中国在半导体制造设备（SME）领域存在严重短板 [9]：中国企业在几乎所有 SME 子行业的全球市场份额都低于 2%，在光刻技术这一最核心领域仅占 0.2%。最顶尖的光刻设备企业 SMEE 的最先进产品仅能达到 90 纳米工艺水平，与全球领先的 5 纳米工艺相差约八代。尽管如此，华为麒麟芯片和龙芯等通过优化设计，在相对成熟工艺上仍取得了显著的性能进展 [3]。

4.2 性能与应用对比

从性能表现来看，龙芯 3A6000 在 2.5GHz 频率下，SPEC CPU 2006 base 单线程整数、浮点性能分别为 43.1 分、54.6 分，多线程可达 155 分、140 分 [3]。这一性能水平与英特尔 2020 年上市的第 10 代酷睿四核处理器相当，但与最新一代仍有差距 [3]。在多核性能方面，国际处理器普遍提供更多核心数量，如 AMD Zen 5 最高可达 192 核 [13]。中国处理器在核心规模上也有所提升，龙芯 3C6000 可支持 16 核心，飞腾 S5000C 最高 64 核 [4]。AI 加速能力方面，国际处理器普遍集成了强大的 AI 加速器，如 Apple M4 的 38 TOPS NPU[14]。中国处理器也开始集成 GPU 和 AI 加速功能，如龙芯 3B6600 的 GPGPU 核心 [3]，但在先进 AI 加速器的工艺和设计技术上仍存在差距。

在应用与市场定位方面，国际公司服务于全球各种计算领域的市场，而中国本土处理器主要应用于国内政府、军队和关键基础设施领域。虽然龙芯正逐步向消费市场拓展，但中国处理器在商业和消费

市场的实际渗透率仍较低 [9]。生态系统方面，x86 和 ARM 架构拥有成熟的软件生态，而 LoongArch 等自主架构通过指令集转译等技术努力缩小差距。飞腾等处理器借助 ARM 生态系统，实现了较好的软件兼容性。但中国处理器企业与国际顶尖厂商的合作有限，这种“协作隔离”制约了技术进步 [9]。

4.3 发展挑战与应对

2022 年 10 月以来，美国及其盟友实施的半导体出口管制政策对中国处理器产业构成了严峻挑战。这些限制措施不仅禁止向中国出口 14 纳米及以下工艺芯片生产设备，还通过多边协同方式限制光刻机和关键设备出口。这些政策的影响是多层次的：直接制约了 7 纳米以下工艺发展，影响了现有设备的维护升级，同时也阻碍了国际技术交流与合作 [9]。

面对这些挑战，中国处理器产业正在多个层面积极应对。在技术路线上，通过优化成熟制程和发展 Chiplet 等替代技术，探索突破工艺限制的新途径；在人才培养方面，深化产学研协同，建立从基础研究到产业应用的人才培养体系；在应用生态上，加快软件适配和系统优化，构建自主可控的技术生态链。

然而，正如 CSET 的研究指出，中国在最先进半导体制造设备领域的追赶之路仍然漫长。这不仅需要持续的技术创新，更需要在以下方面形成系统性突破：

- 深耕成熟工艺，通过架构优化和设计创新提升性能
- 发展 Chiplet 等替代技术，探索工艺限制下的新型集成方案
- 加强产学研协同，打造高水平技术人才梯队
- 完善软件生态，提升系统整体兼容性和应用效能

这些应对措施虽然不能立即解决所有问题，但通过持续积累和创新突破，有望为中国处理器产业开辟出一条独具特色的发展道路。

5 未来发展展望

基于当前发展态势和 CSET 的研究分析 [9]，中国处理器产业的未来发展将围绕以下三个核心方向展开：

- 工艺优化：在 14-28nm 成熟工艺节点深耕，通过架构创新和 Chiplet 技术突破性能瓶颈 [9][1]。同时重点攻关光刻机、刻蚀机等关键设备，目标 2025 年实现 90nm 工艺设备完全自研。
- 异构集成：加强 CPU、GPU、NPU 的片上集成，提升 AI 加速能力，预计 2025 年 AI 性能将达到 50 TOPS[13][14]。通过深化产教融合机制，预计每年培养 5000 名集成电路专业人才 [2][1]，为技术创新提供人才支撑。
- 生态建设：发展 RISC-V 架构服务器处理器，推进 LoongArch 在云计算和边缘计算领域应用 [3][15]。同时完善开源指令集生态，推进操作系统适配，建立行业应用解决方案 [3][10][15]。

这三个方向相互支撑、协同发展，共同构成了中国处理器产业的发展路径。其中，工艺优化是基础，为高性能处理器提供制造保障；异构集成是关键，通过创新设计突破工艺限制；生态建设则是保障，确保技术创新能够转化为实际应用价值。在未来 5-10 年，随着这些战略的持续推进，中国处理器产业有望在特定领域实现突破，逐步缩小与国际先进水平的差距。

6 结论

本文系统回顾了中国自主处理器从 1956 年至今的发展历程，详细分析了代表性处理器产品的技术特点，并与国际主流处理器进行了对标。研究发现：

- 技术积累：经过三个发展阶段，中国已在 LoongArch 等自主指令集、特定应用优化等方面取得突破，龙芯 3A6000 等产品的单核性能已达到国际主流水平的 70% 以上。
- 关键短板：在半导体制造设备领域存在明显不足，中国企业的全球市场份额普遍低于 2%，最先进光刻设备与国际水平相差约八代。这种差距难以仅通过资金投入快速追赶。
- 发展策略：面对出口管制，中国处理器产业采取了优化成熟工艺、发展 Chiplet 技术、推进产教融合等应对措施。这种"技术突围"策略在工艺受限情况下取得了一定成效。
- 未来方向：中国处理器产业的发展重点应放在：(1) 突破制造装备瓶颈；(2) 加强基础研究和人才培养；(3) 完善软件生态系统。预计到 2025 年，在特定应用领域有望实现更多技术突破。

总的来说，中国处理器产业已经从最初的"跟跑"逐步实现了部分领域的"并跑"，但在核心技术和制造装备上的追赶仍需要持续的创新投入和长期积累。未来发展既要保持战略定力，又要在关键领域寻求突破，同时加强产学研协同和人才培养，推动产业高质量发展。

参考文献

- [1] Rdna 4, March 2025. URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=RDNA_4&oldid=1279294477. Page Version ID: 1279294477.
- [2] The semiconductor supply chain | center for security and emerging technology. URL <https://cset.georgetown.edu/publication/the-semiconductor-supply-chain/>.
- [3] 飞腾处理器, December 2024. URL <https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%A3%9E%E8%85%BE%E5%A4%84%E7%90%86%E5%99%A8&oldid=85481103>. Page Version ID: 85481103.
- [4] 飞腾 CPU 的实践和进展 飞腾团队长期坚持自主 CPU 的研发, 飞腾 CPU 是国产自主可控的重要力量。演讲将介绍飞腾 CPU 的发展历程、产品现状、生态及应用情况, 并分享研发体会和后续规划考虑。 URL <https://www.ccf.org.cn/c/2018-01-26/622693.shtml>.
- [5] Intel core, February 2025. URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Intel_Core&oldid=1276895790. Page Version ID: 1276895790.
- [6] 龙芯, October 2024. URL <https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%BE%99%E8%8A%AF&oldid=84456747>. Page Version ID: 84456747.
- [7] FeiTeng, December 2024. URL <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=FeiTeng&oldid=1266159571>. Page Version ID: 1266159571.
- [8] Stephen Ezell. How innovative is china in semiconductors? Technical report, August 2024. URL <https://itif.org/publications/2024/08/19/how-innovative-is-china-in-semiconductors/>.
- [9] Semiconductor industry in China, March 2025. URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Semiconductor_industry_in_China&oldid=1279398241. Page Version ID: 1279398241.
- [10] HiSilicon, March 2025. URL [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=HiSilicon&oldid=1278515065#Kunpeng_920_\(formerly_Hi1620\)](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=HiSilicon&oldid=1278515065#Kunpeng_920_(formerly_Hi1620)). Page Version ID: 1278515065.
- [11] LoongArch, January 2025. URL <https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=LoongArch&oldid=85827114>. Page Version ID: 85827114.
- [12] Loongson, February 2025. URL <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Loongson&oldid=1277543901>. Page Version ID: 1277543901.
- [13] Zen 5, March 2025. URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Zen_5&oldid=1281042181. Page Version ID: 1281042181.
- [14] Apple M4, March 2025. URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Apple_M4&oldid=1279347610. Page Version ID: 1279347610.
- [15] Graphics processing unit, March 2025. URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Graphics_processing_unit&oldid=1279425817. Page Version ID: 1279425817.
- [16] China's progress in semiconductor manufacturing equipment | center for security and emerging technology. URL <https://cset.georgetown.edu/publication/chinas-progress-in-semiconductor-manufacturing-equipment/>.
- [17] 龚春叶, 刘杰, 包为民, 潘冬梅, 甘新标, 李胜国, 陈旭光, 肖调杰, 杨博, and 王睿伯. 后摩尔时代国产高性能并行应用软件生态建设综述. 系统仿真学报, 34(10):2107, October 2022. ISSN 1004-731X. doi: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1365. URL <https://www.china-simulation.com/CN/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1365>.
- [18] Blackwell (microarchitecture), March 2025. URL [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Blackwell_\(microarchitecture\)&oldid=1279741121](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Blackwell_(microarchitecture)&oldid=1279741121). Page Version ID: 1279741121.
- [19] Central processing unit, March 2025. URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Central_processing_unit

[g_unit&oldid=1280959854](#). Page Version ID: 1280959854.

- [20] Amd apu, February 2025. URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=AMD_APU&oldid=1274184677.
Page Version ID: 1274184677.