

嵌入式处理器技术的发展现状与趋势

吴武飞^{1,2}

¹南昌大学人工智能学院, 江西 南昌

²南昌大学先进信号处理与智能通信江西省重点实验室, 江西 南昌

收稿日期: 2025年10月28日; 录用日期: 2025年11月20日; 发布日期: 2025年12月1日

摘要

嵌入式系统作为专用计算机的重要分支, 具有广泛而多样的应用场景, 其核心嵌入式处理器长期面临体积、可靠性、功耗与成本等方面的严苛要求。随着物联网(IoT)与人工智能(AI)的深度融合, 嵌入式设备数量呈爆发式增长, 通用计算与嵌入式计算的界限日益模糊, 使嵌入式处理器技术的重要性进一步凸显。文章系统回顾了嵌入式处理器技术的历史演进、关键进展与设计目标, 分析了国内外研究现状及差异, 并从五个方面展望其未来发展趋势。文章的研究为嵌入式处理器技术的系统认知与创新发展提供了结构化的分析框架与参考依据。

关键词

嵌入式系统, 物联网, 嵌入式处理器技术, 芯粒(Chiplet), 边缘AI

Development Status and Trends of Embedded Processor Technology

Wufei Wu^{1,2}

¹School of Artificial Intelligence, Nanchang University, Nanchang Jiangxi

²Jiangxi Provincial Key Laboratory of Advanced Signal Processing and Intelligent Communications, Nanchang University, Nanchang Jiangxi

Received: October 28, 2025; accepted: November 20, 2025; published: December 1, 2025

Abstract

Embedded systems, as a key branch of special-purpose computers, have a wide and diverse range of applications. Their core—the embedded processor—has long faced stringent requirements in terms of size, reliability, power consumption, and cost. With the deep integration of the Internet of Things (IoT) and artificial intelligence (AI), the number of embedded devices has exploded, blurring

the lines between general-purpose and embedded computing, further highlighting the importance of embedded processor technology. This article systematically reviews the historical evolution, key advances, and design goals of embedded processor technology, analyzes the current status and differences in domestic and international research, and provides an outlook on its future development trends from five perspectives. This research provides a structured analytical framework and reference basis for the systematic understanding and innovative development of embedded processor technology.

Keywords

Embedded Systems, Internet of Things, Embedded Processor Technology, Chiplets, Edge AI

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1961 年应用于阿波罗登月计划的麻省理工 Apollo 制导计算机(Apollo Guidance Computer, AGC)被认为是最早的嵌入式计算机。大众汽车 Beetle 在 1968 年使用首个电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)调节燃油喷射。嵌入式处理器的发展历程始于 20 世纪 70 年代微处理器的问世。1971 年, 英特尔推出了首款商用微处理器 4004, 标志着嵌入式系统的开端[1]。随后, 8 位和 16 位微处理器相继面世, 被广泛应用于仪器仪表、医疗设备等领域。80 年代, 随着微电子工艺的提升, 微控制器(Microcontroller Unit, MCU)将处理器、存储器和 I/O 接口集成于单一芯片, 推动了嵌入式系统的小型化和高效化。90 年代, 数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)和片上系统(System on Chip, SoC)技术迅速发展, ARM 等嵌入式 CPU 崭露头角。进入 21 世纪, ARM 架构处理器凭借低功耗、高性能的优势, 成为嵌入式领域的主流选择[2]。2015 年后, 第五代精简指令集计算机(Reduced Instruction Set Computer, RISC-V) [3]等开源指令集架构兴起, 为嵌入式处理器创新注入新动力。嵌入式处理器的发展经历了从简单微处理器到高度集成的 SoC, 目前正朝着多样化、开源化的演进过程。现场可编程阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)凭借其高度灵活的硬件可重构性, 成为嵌入式系统中加速计算和定制处理任务的理想选择[4]。随着异构计算、RISC-V、芯粒(Chiplet) [5]等技术的发展, FPGA 将在嵌入式系统中扮演更加关键的角色, 为未来智能计算提供高效解决方案。Chiplet 作为一种构建 SoC 的全新方法, 可提高良率并将成本降低 45%以上 [6], 如图 1 所示。Chiplet 将芯片划分为多个离散元件, 并通过标准化接口连接它们, 使设计人员能够应对 5/6G、AI 和 VR 时代的性能、效率、功耗、尺寸和成本挑战。

在市场占有率方面, 全球出货量最大的嵌入式处理器 MCU 被普遍认为是 STMicroelectronics 公司的 STM32 系列[7]。目前, 中国 MCU 市场呈现出多元化、高性能、国产化的发展趋势。2023 年中国嵌入式系统市场规模约为 180 亿美元, 占全球市场的 16.4%。预计到 2028 年, 中国市场的规模将达到 300 亿美元, 年复合增长率约为 10.5%, 高于全球平均水平[8]。

我国在嵌入式处理器领域面临“双循环”战略下的独特需求: 一方面, 工业自动化、新能源车等新兴领域亟需高可靠、低功耗的定制化处理器(如 RISC-V 在工控芯片渗透率达 38%), 但 ARM 架构授权受限倒逼自主可控; 另一方面, AIoT 设备年出货量超 30 亿台催生边缘算力需求, 而通用处理器在能效比(国产嵌入式芯片达 5TOPS/W)和实时性上难以匹配。中国计算机互联技术联盟(CCITA)表示, 我国可使用成熟的 28 纳米制程生产芯片, 并通过小芯片封装成高性能芯片, 借助 UCIe 互联技术, 可实现与 16 甚至

7 纳米芯片相当的性能[9]。当前国际竞争聚焦 Chiplet 异构集成与存算一体架构,我国亟需精准跟踪技术路线,关注其关键科学挑战和工艺问题,避免错失万亿级智能终端市场主导权。掌握嵌入式处理器发展动态,是突破高性能芯片“工艺墙”制约、构建自主产业生态的关键突围路径。因此,接下来我们将围绕嵌入式处理器国内外研究现状展开详细讨论。

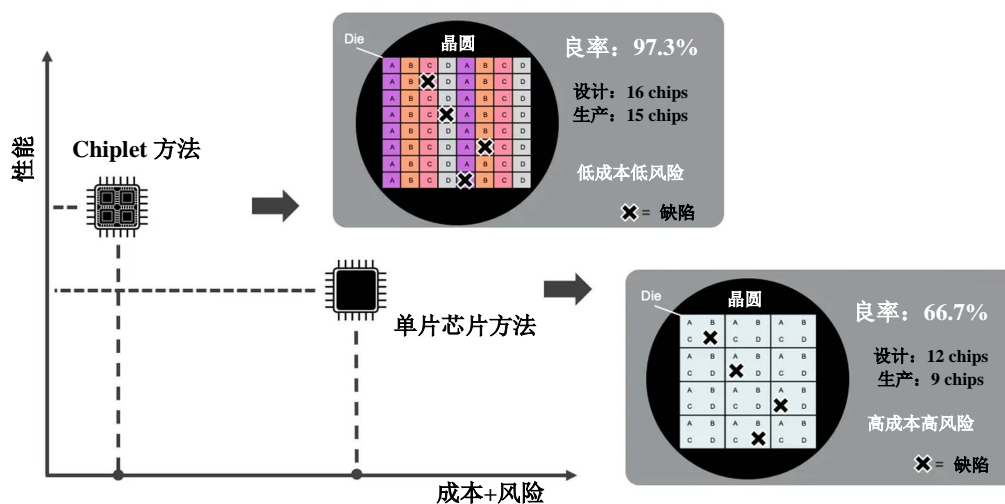


Figure 1. Performance and cost comparison of Chiplets and monolithic chip approaches [6]

图 1. Chiplet 与单片芯片方法的性能和成本比较[6]

2. 国内外研究现状

2.1. 国内研究现状

近年来,国内嵌入式处理器领域呈现出异构集成、高性能与国产化相结合的发展趋势。复旦微推出的 FMQL20SM ARM+FPGA SoC 平台[9],基于四核 ARM Cortex-A7 处理器与 85K 可编程逻辑资源,实现 PS 端与 PL 端协同工作,满足机载、工业等多场景应用,并由创龙科技基于该平台设计,实现国产化率 100%。同时,芯动科技于 2022 年发布的 Innolink™ Chiplet 技术[10],通过跨工艺、跨封装的异构集成,兼容 UCIe 标准,填补了国内在这一领域的空白。另一方面,云天励飞推出的 IPU-X6000 加速卡,基于国产 14nm Chiplet 工艺打造,具备 256T 算力和高速 C2C Mesh 互联技术,支持大模型推理,进一步推动了 AI 应用在嵌入式领域的发展[11]。

国产 RISC-V 架构的兴起为嵌入式 FPGA 提供更多自主可控的应用场景,如 AIoT、自动驾驶等。国产 RISC-V IP 核(芯来科技 N300 系列)适配国产 FPGA(安路科技 PH1A 系列),形成全自主技术链[12]。关键领域应用方面,航天控制系统采用 RISC-V+FPGA 方案,抗辐照指标达 300krad(Si)[13],华为、海思、长江存储等公司为代表,也相继推出了包括 FPGA 与 ARM 架构融合的异构计算平台,满足了对高性能计算密集型应用的需求。

2.2. 国外研究现状

ARM 公司 M 系列在全球嵌入式处理器市场中保持领先地位,并持续推动智能硬件的创新与普及,当前最新的 M 系列采用的是 Armv8-M,为了给嵌入式设备提供所有神经网络处理所需的动力,2023 年,Arm 针对物联网应用领域发布了 Cortex-A320 [14],这是 ARM 推出的首款针对边缘工作负载的 64 位 Armv9 CPU 内核。

近年来, Chiplet 技术[5]被广泛应用于高性能计算、服务器、人工智能加速器等领域。同时, Intel 也在其 Foveros 等先进封装技术中采用了 Chiplet 理念, 推动了 3D 封装和高带宽互连的发展[15]。ARM 在 2025 年推出了首个公开规范的 Chiplet 系统架构(CSA), 通过模块化设计和标准化接口, 推动了 Chiplet 技术的普及和生态建设[16]。低功耗一直是嵌入式领域永恒的主题之一, 高通在 2024 年推出 QCC730 Wi-Fi 解决方案[17], 与此同时, 功耗相比前代降低 88%, 适用于电池供电的工业、商业和消费级应用。值得注意的是, UCIe 2.0 已于 2024 年 8 月发布, 相比 1.0 版本, 2.0 标准在带宽密度和功耗表现上更优, 同时增强对 3D 封装、系统可管理性和兼容性的支持[18]。在 EDA 工具方面, Keysight 推出“Chiplet PHY Designer 2025”, 以支持 UCIe 2.0 和 OCP BoW 标准, 可用于 AI 和数据中心级高速 Chiplet 设计[19]。

2.3. 国内外研究对比

当前, 国内外在嵌入式处理器技术方面均正处于高速发展状态且各具特色, 其中国外在嵌入式技术的生态系统建设方面较为成熟, 如 NVIDIA 的 CUDA 和 TensorRT 工具链, 为开发者提供了强大的支持。国内在 RISC-V 生态系统的建设上取得了显著进展, 如 Chisel 3.6 开源硬件设计语言在自动化 Chiplet 设计中的应用。值得注意的是, 由于国外嵌入式技术起步早, 积累厚, 因此其在高端市场占据主导地位。例如, 美国、欧洲和日本等地区的企业在汽车电子、航空航天、工业自动化等领域拥有巨大的市场份额并正引领 Chiplet 技术的发展及生态构建; 值得注意的是, 近年来国内相关研究和从业者紧密拥抱开源、RISC-V 等新型技术生态, 加快了嵌入式处理器技术的发展和應用。

3. 嵌入式处理器技术发展趋势及研判

嵌入式处理器技术正呈现新的发展趋势, 正朝着低功耗、高性能、异构多核、开源等方向发展。随着 AIoT、边缘计算、5G、自动驾驶等应用的兴起, 未来嵌入式处理器将进一步强化 AI 加速、低功耗、安全内建、MCU + 无线一体化等方向发展。主要体现在以下五个方面:

(1) 边缘 AI 计算能力增强: 推动嵌入式处理器集成 AI 加速单元, 英伟达 Jetson、谷歌 Edge TPU, 以及 ARM Ethos 等都面向 AI 推理优化, 支持边缘设备的智能计算需求。NXP 正在将嵌入式处理器演进为高性能异构平台, 如为软件定义汽车而生 S32 系列统一架构覆盖整车各类控制域(动力、ADAS、车身、网关等), 近年来 NXP 越来越多地将 AI/ML 功能下放到嵌入式 SoC 上, 尤其是边缘设备, 例如面向边缘视觉应用推出的 i.MX 8M Plus 内置神经网络加速器。

趋势: 在不依赖云的情况下实现本地智能(安全、实时、低延迟、长生命周期学习), 让 AI 技术无处不在。

(2) 安全性内建成为标配: 随着 SoC 复杂度提升(集成 CPU、GPU、NPU、ISP、无线、加密单元等), 导致 SoC 攻击面增大, 因此所有新一代 SoC 均强在芯片设计的最初阶段就系统性地融入安全机制即“Security by Design, 简称 SbD”。尤其在汽车领域, 硬件级安全机制成为刚需, 例如 NXP 提供 EdgeLock 安全架构, 涵盖安全启动、密钥存储、加密加速、物理防护等, 以支持 PSA Certified、Arm TrustZone、SE050 安全芯片等标准; 于此同时, ARM TrustZone、RISC-V PMP(物理内存保护)、Intel SGX 等技术也加强了数据加密、安全引导等能力, 以满足车规级、工业控制等应用的安全需求。Chiplet 的出现标志着半导体技术在性能、可扩展性和灵活性方面的重大转变。然而, Chiplet 也带来了独特的安全挑战, 尤其是在功能安全关键的嵌入式领域的应用, 其安全问题是处理器完整性和可靠性的基础。

趋势: 安全性从可选项变成默认配置, 成为设计起点和基础规范。

(3) 面向低功耗物联网优化: 在物联网(IoT)方面, RM Cortex-M、Cortex-A 系列不断迭代, 采用更先进的制程工艺(如台积电 5 nm、三星 3 nm), 集成低功耗特性, 如 big.LITTLE 架构、高能效计算等, 以满

足物联网(IoT)和边缘计算对低功耗的需求。NXP 近年来推出轻量、低功耗的嵌入式处理器 LPC 系列,其特点主要有超低功耗、快速启动,适合电池供电场景。

趋势: 将 MCU + 无线一体化(如支持蓝牙、Zigbee、Thread、Matter 等协议),降低 IoT 产品 BOM 成本和开发复杂度。

(4) RISC-V 生态正快速崛起: 作为开源指令集架构(ISA),RISC-V 自 2015 年起快速发展,全球众多企业(如 SiFive、华为、阿里平头哥等)纷纷推出基于 RISC-V 的嵌入式芯片。其开放性降低了芯片设计门槛,推动产业生态加速成熟。作为 ARM 授权费用增长的替代选项,RISC-V 也成为了 NXP、ST、TI 及 Microchip 等主流嵌入式处理器厂商的重要备选方案。随着 RISC-V 架构的发展,国产 MCU 正加速替代进口产品,逐步提升市场份额。香山作为全球性能领先的一款开源 RISC-V 处理器核,支持 RV64GCBVH,目前受到国内外的广泛关注。

趋势: 开源凝聚共识,契合市场规律,加速 RISC-V 技术推广。

(5) Chiplet 技术发展及应用: Chiplet 技术为快速实现定制的高性能嵌入式处理器硬件提供了新的技术路线。与此同时,也存在一些新的亟待解决的问题。例如,面向新一代嵌入式与实时系统在片上多芯粒(Chiplets)集成中的关键互联需求。(1) 需要有高带宽、低延迟、低功耗、可扩展且具备高可靠性的互联网络协议及控制 IP (网络片上互连(Network-on-Chip, NoC) IP); (2) 针对异构工艺和多厂商芯粒协同带来的兼容性挑战,需要统一的互联协议框架与行业标准。

趋势: Chiplet 技术背景下,高效可靠的网络片上互连(Network-on-Chip, NoC) IP 方案及其行业标准的制定需进一步突破。

4. 结语

综上所述,嵌入式处理器技术在物联网与人工智能深度融合的背景下,展现出持续发展的重要性与广阔前景。本文系统回顾了嵌入式处理器的历史演进、关键技术进展及设计目标,并对国内外研究现状进行了对比分析,进一步梳理了该领域的发展脉络与差异。在此基础上,从边缘 AI 计算能力增强、安全性内建、低功耗物联网优化、RISC-V 生态发展以及 Chiplet 技术应用五个方面对未来发展趋势进行了研判。嵌入式处理器正朝着低功耗、高性能、异构多核及开源化方向发展,同时强化 AI 加速、硬件安全、无线集成和模块化设计,以满足智能终端、边缘计算、车规级应用等多样化需求。未来,随着开源架构的推广、异构多核与 Chiplet 技术的广泛应用,嵌入式处理器的设计将更加灵活、高效与安全,推动整个产业生态的优化与创新。总体而言,本文的综述不仅为理解嵌入式处理器技术的演进规律提供了系统性认知,也为相关研究与工程实践提供了理论参考与战略指导。

参考文献

- [1] Faggin, F., Shima, M., Mazor, S., *et al.* (1996) The History of the 4004 Microprocessor: The First CPU on a Chip. *IEEE Micro*, **16**, 10-20.
- [2] ARM Ltd (2015) The Evolution of the ARM Architecture and Its Role in Low-Power Embedded Systems. UK: ARM Holdings.
- [3] Waterman, A., Lee, Y., Patterson, D., *et al.* (2014) The RISC-V Instruction Set Manual, Volume I: User-Level ISA, Version 2.0. EECS Department, University of California.
- [4] Doe, J. (2021) FPGA-Enhanced Embedded Systems for Real-Time Processing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **17**, 2003-2012.
- [5] Kothari, G.N. (2024) Chiplet Based High-Performance Processing Systems. State University of New York at Binghamton.
- [6] Keysight Technologies (2024) What is a Chiplet, and Why Should You Care? <https://www.keysight.com/blogs/en/tech/sim-des/what-is-a-chiplet-and-why-should-you-care>

-
- [7] STMicroelectronics (2025) STM32 32-Bit Arm® Cortex®-M Microcontrollers. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>
 - [8] IDC (2023) Worldwide Embedded Systems Market Forecast 2023-2028. IDC.
 - [9] 复旦微电子. FMQL20S400M ARM + FPGA SoC 国产平台简介[EB/OL]. <https://www.fmsh.com/68a87800-b264-b6d3-30a9-d2e5fdb6e1b4/>, 2025-04-10.
 - [10] 芯动科技. Innolink™ Chiplet 技术介绍[EB/OL]. <https://www.innosilicon.com.cn/ip-solution/ucie>, 2025-04-10.
 - [11] 中国日报. 国产推理算力革命: 云天励飞 IPU-X6000 加速卡[EB/OL]. <https://tech.chinadaily.com.cn/a/202407/24/WS66a0ac2aa3107cd55d26c654.html>, 2024-07-24.
 - [12] 芯来科技. 芯来助力中移芯昇发布两款 RISC-V 内核通信芯片[EB/OL]. 2023-08-15. <https://www.nucleisys.com/newsdetail.php?id=258>, 2024-07-20.
 - [13] 张伟, 李航. 基于 RISC-V 与国产 FPGA 的星载控制系统设计[J]. 宇航学报, 2023, 44(7): 1023-1031.
 - [14] Arm (2025) Arm® Cortex®-A320: Introducing Cortex-A320: Ultra-efficient Armv9 CPU Optimized for IoT. <https://newsroom.arm.com/blog/introducing-arm-cortex-a320-cpu>
 - [15] Intel Corporation (2024) Intel Foveros 3D Packaging Technology White Paper. <https://cdrdv2-public.intel.com/826148/Volume%206%20Intel%20Advanced%20Packaging%20Technology.pdf>
 - [16] Chen, S., Zhang, H., Ling, Z., *et al.* (2024) The Survey of Chiplet-Based Integrated Architecture: An EDA Perspective. <https://arxiv.org/abs/2411.04410>
 - [17] Qualcomm Technologies (2024) QCC730 Wi-Fi Solution Product Brief. <https://www.qualcomm.com/wi-fi/products/qcc730>
 - [18] UCIE Consortium (2024) UCIE Consortium Releases 2.0 Specification Supporting Manageability System Architecture and 3D Packaging. UCIE Consortium. https://files.futurememorystorage.com/proceedings/2024/20240808_SPOS-301-1_UCIE_Consortium_Das_Sharma.pdf
 - [19] Keysight Technologies (2024) Keysight Expands Chiplet Interconnect Standards Support in Chiplet PHY Designer 2025. <https://www.keysight.com/gb/en/about/newsroom/news-releases/2025/0121-pr25-026-keysight-expands-chiplet-interconnect-standards-support-in-chiplet-phy-designer-2025.html>