



南開大學
Nankai University

计算机学院
并行程序设计

多核 CPU 的调研报告

姓名：刘心源

学号：2112614

专业：计算机科学与技术

2023 年 3 月 12 日

目录

1 历史概述	2
1.1 并行结构体系发展历史	2
1.2 CPU 的发展历史	2
2 并行体系结构的发展现状：以 CPU 调研为例	2
2.1 特点	3
2.1.1 Intel 酷睿 13 芯片	3
2.1.2 AMD Zen4	3
2.1.3 Apple Silicon M2	4
2.2 横向对比——以 Intel 酷睿 13 代与 AMD Zen4 为例	5
2.3 纵向对比——以 Apple Silicon 为例	6
3 CPU 上的多核并行计算技术	6
3.1 总结	6
3.2 CPU 并行体系结构的发展未来	6

1 历史概述

从计算机诞生之日起，人们就不断向着提高计算机的运行速度而努力，并且已经取得了显著成就。人们在研制越来越新的计算机时，一个共同的特点就是采用并行体系结构。

1.1 并行结构体系发展历史

人们的沟通以及工作效率随着计算机技术的发展得到了很大程度的提高。计算机的发展大体上可以分成两个阶段，分别是串行阶段与并行阶段。并行计算阶段就是在串行计算的基础上，使得许多组处理单元相互协调、相互调度来完成数据以及计算等处理的一种方式。

1.2 CPU 的发展历史

1971 年，intel 公司推出第一枚 CPU——4004，在当时被用作 Basicom 计算器这种小东西的“大脑”。1974 年，第一台电脑的“大脑”——8088 芯片问世。IBM 公司于 1978 年采用 Intel8088 芯片，拉开电脑时代的序幕。^[1]

1997 年，Intel 推出了包含 750 万个晶体管的 Pentium 2，开创了 CPU 发展的新纪元。1999 年春季，Intel 推出 Pentium 3 处理器，它是第一款专为提高用户的互联网计算体验而设计的 CPU，最重要的技术创新之一是互联网 SSE 指令集，它有 70 条 SSE 指令集，使用户能够享受音频、视频、动画和三维效果。

2000 年 11 月 21 日，Pentium 4 处理器诞生，该产品采用 Intel 全新的 NetBurst 体系架构，为数字时代的用户提供个性化快速处理音频/视频、进行庞大的 3D 游戏等功能。

处理器名称	出现年代	工艺/纳米	集成晶体管数	频率/Hz	位数
4004	1971	10	2300	108k	4
8088	1974	2	2.9 万	4.77M	8
80286	1982	2~1.5	13.4 万	6M~20M	16
80386	1985	1.5~1	27.5 万	16M~50M	32
80486	1989	1.0~0.8	100 万	33M~120M	32
Pentium	1993	0.8~0.6	300 万	60M~233M	32
Pentium 2	1997	0.25	750 万	233M~450M	32
Pentium 3	1999	0.25~0.18	950 ~ 2810 万	500M~800M	32
Pentium 4	2000	0.18	4200 万	1.0G~1.7G	32

表 1: Intel 公司 CPU 的发展历史

2 并行体系结构的发展现状：以 CPU 调研为例

CPU 是中央处理器 (Central Processing Unit) 的缩写，由控制单元、逻辑单元和存储单元三大部分组成，可以进行运算、分析、判断并控制计算机各部分协调工作。目前世界上能生产 CPU 的厂商主要有 Intel、AMD、IBM、Motorola 和台湾的威盛等，其中 Intel 占据了约四分之三的市场份额。本文根据现在最新的 CPU 芯片：Intel 酷睿 13、AMD Zen4，Apple Silicon M2 Pro/Max 三者进行调研，从中简要分析出现阶段并行体系结构的发展现状。

2.1 特点

2.1.1 Intel 酷睿 13 芯片

Intel* 酷睿 13(13th Gen Intel Core processor) 采用先进的性能混合架构，拥有多达 8 个性能核心 (P-Core) 和多达 16 个高效核心 (E-Core)。其中 E-Core 是来自低功耗产品线 Atom，Atom 是针对嵌入式低功耗设备，性能远低于 P-Core。

核心	作用
Performance-Cores (P-Cores)	经过优化以处理单线程和轻线程
	增强游戏和生产工作力工作量
Efficient-Cores (E-Cores)	经过优化以处理扩展的高度线程化工作负载
	最大限度地减少后台任务管理的中断

表 2: P-Core 和 E-Core 的定义

Intel 酷睿 13 代处理器提供更快 P-Cores 和更多的 E-Cores，支持 DDR4/DDR5 和 PCIe4.0/5.0。这可以多任务处理和给可配置性的选择最大限度地提供平台。Intel 酷睿 13 代带来了最多 24 核心、最高 5.8GHz 睿频频率、更大二级缓存、相近性能 25% 的功耗。多核性能再提升 41%。Intel 芯片继续混合架构并做了增强优化，其中 P-Core 升级为 Raptor Cove 架构，重点改进了缓存体系。而 E-Core 架构不变，但是数量翻番。i9 系列最多 16 个，组成 8+16 的 24 核心 32 进程。而其他 i7、i5 系列也提升了档次，E 核数量增多。

		核心数	核心增加数	频率	频率提高量	线程增加数
Intel 酷睿	i5-13600K	14	4	最高高达 5.1GHz	+200MHz 睿频频率	4
	i7-13700K	16	4	最高高达 5.4GHz	+400MHz 睿频频率	4
	i9-13900K	24	8	最高高达 5.8GHz	+600MHz 睿频频率	8

表 3: Intel 产品家族各代的巨大提升

由表格可知，更多核心、更高频率是 Intel 酷睿 13 代最显著的变化。

代数	型号	核心数	线程数	最大主频
7	i7-7700K	4	8	4.5GHz
8	i7-8086K	6	12	5.0GHz
9	i9-9900K	8	16	5.0GHz
10	i9-10900K	10	20	5.2GHz
11	i9-11900K	8	16	5.3GHz
12	i9-12900H	16	20	5.2GHz
13	i9-13900H	24	24	5.4GHz

表 4: Intel Core 历代处理器参数

2.1.2 AMD Zen4

Zen 4 是 AMD 于 2022 年 9 月 27 日发布的 CPU 微架构的代号。基于“Zen 4”架构的锐龙 7000 系列处理器基于优化的高性能 TSMC 5nm 工艺构建，拥有多达 16 核心 32 线程，具有卓越的性能和领先的能效。作为全球首款高性能 x86 5nm CPU，锐龙 7000 系列展示出“Zen 4”架构的非凡速度，将游戏和内容创作性能提升到了一个新的水平。除了核心之外，锐龙 7000 系列处理器还配备了全新的 6nm I/O 芯片，支持硬件加速视频编解码。

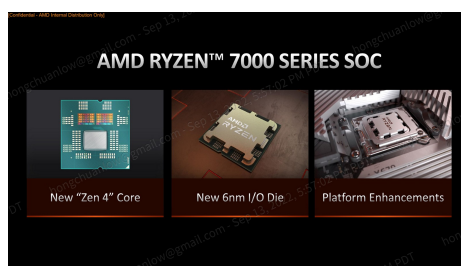


图 2.1: AMD 处理器微架构 Zen4

AMD 选择了业界称之为小晶片 chiplet 的方式来满足桌面和服务市场，内部包含 CPU 内核、L3 Cache 等单元。同时锐龙 7000 采用同构异频设计，例如在 Ryzen 9 7950 处理器中，有 8 个内核的全核最高频率为 5.7GHz，但是另外 8 个内核则是 5.38GHz。

如图2.3所示，该图是 Ryzen 9 7950 关闭变频模式后（相当于锁定频率，主要用于需要稳定频率的顶层测试）的状态图，此时处理器奔一直空跑 NOP 指令，处理器相当于没有实际负载但是依然维持较高转速的发动机。

Core	CPU	Avg_MHz	Busy%	Bzy_MHz	TSC_MHz	IPC	IRQ	CorWatt	PkgWatt
0	0	5696	100.00	5696	4500	0.11	6809	54.85	95.08
1	1	5696	100.00	5696	4500	0.11	447	3.75	3.85
2	2	5696	100.00	5696	4500	0.11	429	3.79	3.85
3	3	5696	100.00	5696	4500	0.11	443	3.87	3.85
4	4	5696	100.00	5696	4500	0.11	436	3.82	3.85
5	5	5696	100.00	5696	4500	0.11	447	3.88	3.85
6	6	5696	100.00	5696	4500	0.11	444	3.82	3.85
7	7	5696	100.00	5696	4500	0.11	455	3.87	3.85
8	8	5375	100.00	5375	4500	0.11	429	2.92	2.91
9	9	5375	100.00	5375	4500	0.11	419	2.91	2.94
10	10	5375	100.00	5375	4500	0.11	429	2.94	2.93
11	11	5375	100.00	5375	4500	0.11	435	2.93	2.93
12	12	5375	100.00	5375	4500	0.11	413	2.93	2.92
13	13	5375	100.00	5375	4500	0.11	433	2.92	2.92
14	14	5375	100.00	5375	4500	0.11	427	2.92	2.92
15	15	5375	100.00	5375	4500	0.11	427	2.92	2.92

图 2.2: Ryzen 9 7950 锁定频率后的状态图（图源于网络）

由图可知两组内核的微架构是一样的，这意味着两者的 IPC 理论上没有根本的区别，两组内核的唯一区别就是频率和耗电。其次高低频率的同构设计可以简化调度设计。这一块将在横向分析一部分进行更加详细的阐述。

当然，从高低频率核心之间的 30% 耗电差，可以看到 Zen 4 为了这 6% 的频率所需要付出的代价。

根据 AMD 官方提供的资料，在同样的 4GHz 运作频率、8 核心比较基础之下，Zen 4 微架构相较于前一代 Zen 3 微架构，其 IPC（Instructions Per Clock/Cycle）于多款测试软体的几何平均效能提升了 13%

2.1.3 Apple Silicon M2

M 系列芯片是 Apple 的自研芯片，Apple 的设计思路之一就是将功能在硬件上模块化、定制化，对于不同领域、不同功能需求，专门设计对应模块，再将其整合到一起，这也是 arm 设计的思想。M 系列芯片相较于之前 Apple 在 Macbook 上所用的 Intel 芯片，适配性以及能力得到增强。

如图2.3所示（测试结果由相比前代基于 2.4GHz8 核 Intel 酷睿 i9 处理器、配备 8GBHBM2 显存的 Radeon Pro 5600M 显卡、64GBRAM 和 8TB 固态硬盘的 16 英寸 MacBook Pro 系统得出）

作为“片上系统”，M2 Pro 芯片集成几个不同组件，包括 CPU、GPU、统一内存架构（RAW）等，将多组件集中在一个芯片上可以让 Apple Silicon 运行地更快。

Apple M2 Pro 芯片提升 M2 芯片原有架构，使用多达 12 核的中央处理器以及最高达 32GB 的高速统一内存。M2 Max 芯片在 M2 Pro 的强大性能基础上更进一步，带来翻倍的统一内存带宽，以及最高达 96GB 的统一内存。业界领先的性能功耗比，使 M2 Max 在性能及能效上成为遥遥领先世界的

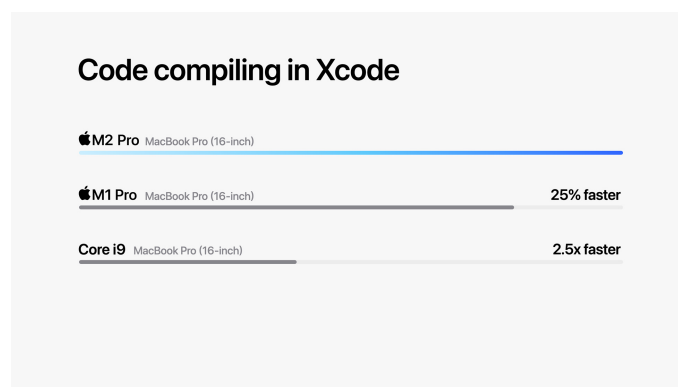


图 2.3: Apple 历代 CPU 对比

专业级笔记本电脑芯片。两款芯片还有增强的定制技术加持，包括速度更快的 16 核神经网络引擎和 Apple 强大的媒体处理引擎。

如图2.4所示。。

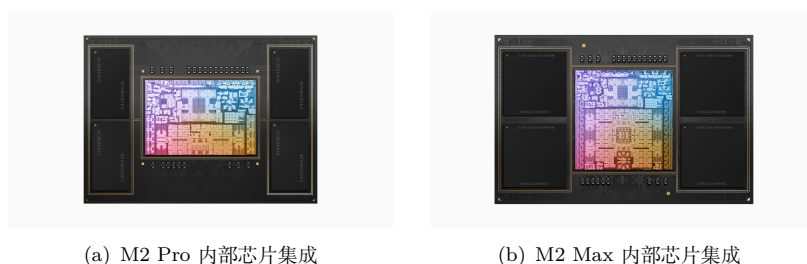


图 2.4: M2 Pro 与 M2 Max 的内部集成

2.2 横向对比——以 Intel 酷睿 13 代与 AMD Zen4 为例

Intel 与 AMD 的芯片工作方式不一样。AMD 采用多核协助处理，核心数量比 Intel 多。而 Intel 则是单核拟多核处理。目前 CPU 主流发展方式向着多核前行。但是 Intel 目前的主要发展方向还是将单核做强。Intel 在集成更多的处理器核心的竞赛中落在了后面，现在 AMD 在高端桌面处理和主流桌面处理器方面的产品，英特尔都望尘莫及。

AMD 的主流桌面处理器 16 核锐龙 9 3950X 提供的核心数量和线程数量是英特尔最强大的酷睿 i9-9900K 的两倍。同时，AMD 的高端处理器锐龙 Threadripper 3990X 的核心数更是达到了 64 核心和 128 线程，这是英特尔的高端型号 halo 的 3.5 倍。AMD 的 CPU 倾向于提供更多的核心数，或者更多的线程数以及更快的 PCIe 4.0。

自 Intel 酷睿 12 代起，引入了 P 核 +E 核的设计，其中 E 核来自于针对嵌入式低功耗设备的 Atom 产品线，性能远低于 P 核。在 Intel 酷睿 12 代发布的时候，只有 Windows 11 是提供了 Intel Thread Director 支持的，在当时其他操作系统例如 Linux 上，任务有可能会优先在 E-core 上运行，此时给这类用户的体验就非常糟糕。

而 Zen4 则没有这个问题，根据实测，不管是 Windows 11 还是 Linux Kernel 5.15，Zen4 都能将任务优先指派给高频内核，即使是指派给低频核，两者的实际性能也是差别不大。从桌面用户角度来看，Zen4 的高低频内核设计在大部分情况下都是最优解。

2.3 纵向对比——以 Apple Silicon 为例

M2 Pro 芯片采用第二代 5 纳米制程工艺，内部共计集成 400 亿只晶体管，相比 M1 Pro 芯片增加近 20%，相比 M2 芯片则增加了一倍。M2 Pro 芯片实现了 200GB/s 的统一内存带宽，为 M2 芯片的 2 倍，同时提供高达 32GB 的低延迟统一内存。新一代 10 核或 12 核中央处理器包含高达 8 颗高性能核心和 4 颗高能效核心，因此其多线程处理速度比 M1 Pro 芯片的 10 核中央处理器快达 20%。使用 Adobe Photoshop 等 app 处理高强度工作流时速度更快，而相较于搭载最快 Intel 处理器的 MacBook Pro，Xcode 编译的速度提升了最多 2.5 倍。

M2 Max 芯片内部集成了 670 亿只晶体管，比 M1 Max 芯片多 100 亿只，是 M2 芯片的 3 倍以上，将 Apple 芯片的功能和性能表现更进一步。统一内存带宽高达 400GB/s，是 M2 Pro 芯片的 2 倍、M2 芯片的 4 倍，还支持高达 96GB 的高速统一内存。用户能瞬间开启大型文件，同时使用多个 Pro 级 app 工作也变得无比迅速流畅。

	M1	M2	M1 Pro	M2 Pro
制造工艺	5nm	5nm (加强)	5nm	5nm (加强)
CPU 高性能核心	4	4	8	8
CPU 高能效核心	4	4	2	4
提升效果		多线程处理性能综合较 M1 芯片提升 18%		多线程处理速度较 M1Pro 芯片提升快 20%

表 5: Apple 历代芯片对比

M2 Max 在单核基准测试中的成绩为 1889 分，多核基准测试中的成绩为 14586 分，而 M1 Max 的单核和多核基准测试成绩分别为 1750 分和 12200 分，这意味着新一代芯片的单线程和多线程性能分别提升 10 % 和 20%。

3 CPU 上的多核并行计算技术

3.1 总结

多核并行计算的硬件基础是多核处理器，多核处理器中的每个核心都是一个单独的处理器，可有独立的高速缓冲存储器。程序必须采取多线程的方式，同一时刻在多个核心运行实现并行计算。^[2]

根据对于市场上三种较新的 CPU 的调研，我们可以看到目前由于受到功耗限制，仅仅提高单核芯片的速度会产生过多的热量并且无法带来相应的性能改善。速度稍快的处理器的成本也将大大增加。所以目前较新的 CPU 都采用的多核并行的体系结构。

Intel 工程师们开发了多核芯片，让其满足“横向扩展”，从而提高性能。但是不同公司对于多核发展都有自己的设计思路。如 Intel 公司虽然采用了多核，但是仍然在尝试将单核性能增强。AMD 公司注重多核，通过不断的堆积多核来提升芯片的性能。Apple 则是另辟蹊径，虽然也采用增加核心来提升 CPU 的性能，但是做得更好的则是将 CPU 与自身系统完美融合。

3.2 CPU 并行体系结构的发展未来

目前 CPU 正向着多核并行计算的方向迈进，不论是单核性能还是多核数量都在不断地提升。但是，这种堆叠是有限度的。除了多核，还有其他不同层次的并行度，比如指令集并行、线程级并行、请求级别并行；除了指令级并行 ILP，还有访存级并行 MLP。提高处理并行度是一种很有效的优化手段。

随着登纳德缩放定律结束、摩尔定律衰退，而阿姆达尔定律正当其时，这意味着低效性将每年的性能改进限制在几个百分点。获得更高的性能改进需要新的架构方法，就是 DSA (Domain-Specific Architectures，特定领域的体系结构。目前 Apple 所做的就是这种领域的体系结构。虽然目前 Apple

的 M 系列芯片论单核性能与 Intel i9 仍然有一点差距，多核堆叠数量也比不过 AMD，但是 Apple 将芯片在特定领域的性能做得很好，与系统适配度很高，因而 M 系列芯片在计算机市场上也占有一席之地。

参考文献

- [1] 冯亚林, 张蜀平, and 赵和义. Cpu 的过去, 现在与未来. 微电子学, (5):362–365, 2002.
- [2] 秦书茂 and 叶海建. 并行计算在多核平台上的实现与应用研究. 计算机系统应用, (12):3, 2013.