



南开大学  
Nankai University

南 开 大 学

计 算 机 学 院

体系结构调研报告

---

## 从主流 CPU 架构纵观体系结构发展现状

---

姓名：张铭徐

学号：2113615

年级：2021 级

专业：计算机科学与技术

指导教师：王刚

2023 年 3 月 7 日

## 摘要

随着人类算力的不断增长，在 2003 年前，频率是决定算力的关键因素；2003 年后，人类的算力依旧在指数型增长，但频率却近乎不变。CPU 的设计者逐渐的从“频率至上”原则转换为“更复杂的处理器设计，更快的时钟频率”的设计思路。并行式设计在众多提高算力的方法中，无疑占据了至关重要的地位。本文将分析当今主流 CPU 的并行架构及相应算力，给出未来并行架构的发展趋势和前景未来。

**关键字：并行架构 算力 CPU**

## 目录

<b>一、 并行体系架构简介</b>	<b>2</b>
(一) 并行体系结构的分类 . . . . .	2
(二) 并行体系结构的发展历程 . . . . .	2
<b>二、 当前主流厂商 CPU 体系结构</b>	<b>3</b>
(一) 苹果系列芯片 . . . . .	3
(二) Intel Core 系列芯片 . . . . .	4
(三) AMD 锐龙系列芯片 . . . . .	5
<b>三、 不同处理器之间横向对比</b>	<b>6</b>
(一) AMD 锐龙与 Intel Core 的对比 . . . . .	6
(二) Intel Core 与 M 系列芯片对比 . . . . .	7
<b>四、 总结</b>	<b>7</b>

## 一、 并行体系架构简介

计算机无疑使新世纪人类最伟大的发明之一，它的出现使得各行各业都焕发了强烈的生机。由于其准确且高速的运算能力，使得我们的科技水平不断提高，可以说，计算机的算力越高，对其他行业的提升也就越大。基于摩尔定律，每间隔 18 个月，计算机的算力就要高一倍，在算力大爆发的时代下，不断更迭体系结构成为了提高计算机性能的必由之路。由于并行的体系结构具有设计简单，能更加充分的利用资源，且具有巨大的功耗优势，使得目前所有的计算机都是并行计算机。

### (一) 并行体系结构的分类

Flynn 分类法：1972 年，Flynn 根据指令和数据流的概念对计算机的体系结构进行了分类，将体系结构分为了以下四类 [3]：

SISD(单指令，单数据流)：SISD 只能在同一时刻执行同一条指令，处理一条数据，故 SISD 被称之为串行计算机。

MISD(多指令，单数据流)：MISD 的设计理念是想要令多个处理器对单个数据应用不同的指令；这种假设的可能性通常被认为是不切实际的。

SIMD(单指令，多数据流)：一般我们将向量计算机称之为 SIMD 计算机；在执行向量操作时，一条指令可以对多个数据（即可以组成一个向量）进行运算，而这正是 SIMD 的设计理念

MIMD(多指令，多数据流)：涉及到多个处理器，在不同的数据上自动执行不同的指令。对于大多数的并行计算机，多个处理单元都是根据不同的控制流程执行不同的操作，处理不同的数据，因此目前我们的并行计算机也被称之为 MIMD 计算机。

### (二) 并行体系结构的发展历程

并行计算机在近 60 年中，发生了翻天覆地的变化。在 60 年代初期，由于晶体管和磁芯存储器的出现，使得处理单元越来越小，存储器成本也大大降低。技术的成熟使得并行计算机横空出世，并迎来了第一个黄金时代。这一时期的并行计算机大多都是一些规模不大的共享存储多处理器系统。到了 60 年代末期，同一个处理器开始设计多个功能相同的功能单元，流水线技术也开始出现了，与单纯提高时钟频率相比，这些并行的特性在处理器内部的应用大大提高了并行计算机系统的性能。

到了 80 年代，计算机界发生了一场惊天的革命，首先是存储系统概念的彻底革新。虚拟存储和缓存这两个概念现在已经应用在了所有的计算机系统中，但是在 70 年代初期，它们的出现带来了一场真的革命。IBM 360/85 系统与 360/91 是属于同一系列的两个型号，360/91 的主频要高于 360/85，所选择的内存速度也更快一些，并且采用了动态调度的指令流水线；但是 360/85 的性能却要好于 360/91，原因就是前者采用了缓存技术，而后者没有。

微处理器的出现也使得并行计算机体系结构迈出了新的一步，最早的微处理器的性能并不是很理想，但是随着机器的字长从 8 位到 16 位，再到今天的 32 位和 64 位，性能也随之显著提高。正是因为微处理器的这种潜力，卡内基梅隆大学开始在当时流行的计算机基础上进行共享存储多处理器系统的研究。

90 年代以来，主要的几种体系结构开始走向融合，融合是具有其必要性的，那便是为了获取更好的性能表现，在当今的 CPU 的设计中，我们可以看到很多体系结构的影子，这些体系结构的融合带来了更强的算力。接下来本文将分析依据当前主流厂商的芯片体系结构来佐证这一点。[1]

## 二、 当前主流厂商 CPU 体系结构

### (一) 苹果系列芯片

说到苹果公司，我们都知道是一家全球闻名的高科技公司，具有极强的生态链，主要经营的业务包括手机，平板，电脑，可穿戴设备等等。苹果公司的产品以生态良好著称，而之所以苹果产品具有特别好的生态链，首先是因为它具有自研的操作系统 IOS 和 Mac OS，再就是苹果的芯片 A 系列和 M 系列芯片。在苹果 M1 芯片发布之前，在 Mac 上搭载的芯片都是从 Intel 公司中购买的。值得注意的是，在 M1 芯片发布之前，Intel 公司的架构都是 X86 结构，而 M1 芯片则采用了 ARM 架构进行设计。[4]

从发布前的 M1 CPU 中，从没有制造过如此大的 ARM 处理器，但 Apple M1 并不是第一个在台式电脑中使用的 ARM CPU。微软已与高通合作，推出了使用 A76 架构的微软 SQ1 芯片“surface pro x”，但其性能和适应性都不好，在市场上没有得到太多关注。事实上，M1 可以被看作是一个进阶版的 A14，使用了大核心 + 小核心的结构。但不同的是，M1 芯片是 4 大核 + 4 小核的设计，比 A14 多了两个大核。同时，作为桌面端的处理器，M1 芯片相比于 A14 也对应的增加了一定的频率以提高性能。下表展示了 M1 芯片和 A14 芯片之间的差别 [2]：

参数指标	A14	M1
核心数	6	<b>8</b>
指令集	ARM	ARM
大核心频率	3.0GHZ	<b>3.2GHZ</b>
小核心频率	1.82GHZ	<b>2.06GHZ</b>
GPU 频率	1.0GHZ	<b>1.3GHZ</b>
制造工艺	5nm	5nm
最大内存	6GB	<b>16GB</b>

表 1: A14 芯片 M1 芯片核心参数对比

在这里，我们再讨论一下 M1 芯片与之前苹果搭载在移动端处理器的差别。在 2020 年 11 月，苹果发布了 M1 芯片，在 2021 款的 MacBook Air 上便搭载了这款芯片。而 2020 款的 MacBook Air 则搭载了 Intel Core i3-1000G4 系列芯片，在售价相同的情况下，2021 款 MacBook Air 的性能表现超过 MacBook Air2020 款很多，下表展示了 Core i3-1000G4 芯片和 M1 芯片核心参数的对比 [2]。

参数指标	Intel Core i3-1000G4	M1
核心数	4	<b>8</b>
指令集	X86	ARM
大核心频率	1.1GHZ(可超频到 3.20GHZ)	<b>3.2GHZ</b>
小核心频率	None	<b>2.06GHZ</b>
GPU 频率	0.3GHZ	<b>1.3GHZ</b>
制造工艺	14nm	<b>5nm</b>
最大显存	<b>32GB</b>	16GB

表 2: Core i3-1000G4 与 M1 芯片核心参数对比

## (二) Intel Core 系列芯片

Intel 作为国际上半导体和计算创新领域的领先厂商，其研发的 CPU 各项指标都极高，在苹果发布 M1 前，Intel 公司所研发的 CPU 性能都远超同济，Intel 的芯片尤其是 Core 系列成为了众多电脑厂商的 CPU 首选。其优越的性能表现和优秀的能效比使其成为了行业标杆般的存在。Intel 发布的 I7 13th 系列芯片因其过于强悍的运算能力使得众多厂商戏称 Intel “牙膏挤爆了”。下面我们将对比 I7 13700 和 I7 12700 这两款芯片的核心参数来解读到底 Intel 是如何将“牙膏挤爆”的。

参数指标	Intel Core i7-13700	Intel Core i7-12700
核心数	<b>16</b>	12
指令集	X86	X86
架构	<b>Raptor Lake S</b>	Alder Lake S
大核心频率	<b>2.1GHZ(可超频到 5.20GHZ)</b>	2.1GHZ(可超频到 4.9GHZ)
小核心频率	<b>1.5GHZ(可超频到 4.1GHZ)</b>	1.6GHZ(可超频到 3.6GHZ)
GPU 频率	0.3GHZ	0.3GHZ
GPU 加速频率	<b>1.60GHZ</b>	1.50GHZ
制造工艺	10nm	10nm
最大显存	64GB	64GB
GeekBench 跑分	<b>2675</b>	2497

表 3: Core 13th 和 Core 12th 芯片核心参数对比

我们发现，事实上，Intel 的这两款芯片对于常规情况下的主频是差不多的，甚至 13 代的芯片小核心的频率还要略低于 12 代，但是在性能表现上，13 代要高出 12 代不少。造成此现象的原因除了 13 代芯片的核心稍多外，更多的还是 13 代芯片采用了全新的架构 Raptor Lake S。相比于 12 代新款的 Alder Lake S,13 代芯片提供的更快 (主频更高) 的性能核 P-core 以及更多的能效核 E-core, 13th 的能效核相较于 12th 多了 4 个，这使得 Intel I7-13700 能够在处理更复杂的任务时有更快的处理速度以及处理低算力需求问题时有更好的能效比。接下来我们再对比一下 11 代 I7 和 12 代 I7 核心参数，如下表所示。

参数指标	Intel Core i7-12700	Intel Core i7-11700
核心数	<b>12</b>	8
指令集	X86	X86
架构	<b>Alder Lake S</b>	Rocket Lake S
大核心频率	2.1GHZ(可超频到 4.9GHZ)	<b>2.5GHZ(可超频到 4.9GHZ)</b>
小核心频率	<b>1.6GHZ(可超频到 3.6GHZ)</b>	None
GPU 频率	0.3GHZ	<b>0.35GHZ</b>
GPU 加速频率	<b>1.50GHZ</b>	1.30GHZ
制造工艺	<b>10nm</b>	14nm
最大显存	64GB	64GB
GeekBench 跑分	<b>2497</b>	207

表 4: Core 11th 和 Core 12th 芯片核心参数对比

从上表我们可以看出, I7 12th 相比于 I7 11th 也有比较大的性能提升, 其主要原因便是核心架构的更改。12 代 I7 首次提出了 P-core 和 E-core 的架构体系, 而 11 代 I7 的 8 个核心全都是性能核心。这使得 11 代 I7 会出现功耗过高的情况。下图展示了在 12 代 I7 中首次出现的 P-Core 和 E-Core 协同工作的内部设计图, 如下图1所示。

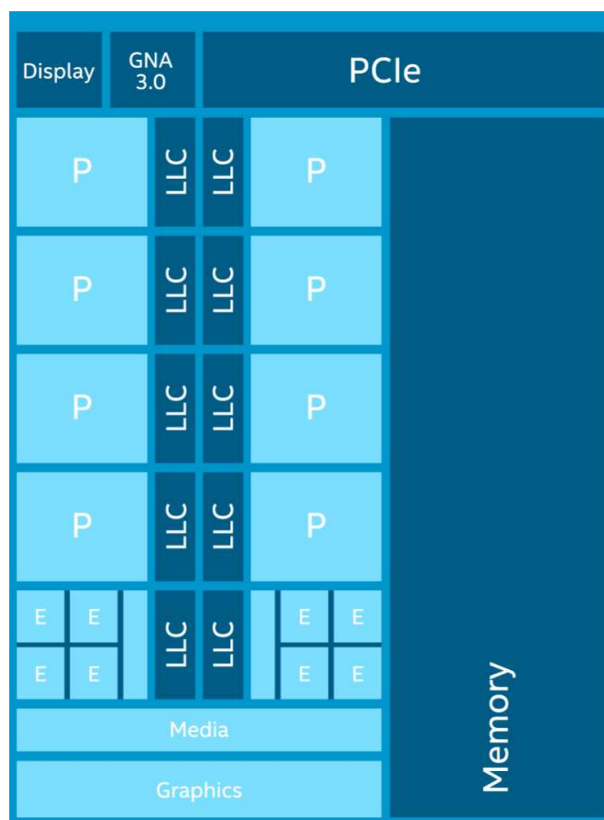


图 1: 内核设计图

I7-12th 为内核性能带来了颠覆性的进步, 也为 x86 架构开创了一种革命性的方法。其性能内核 (P 核) 针对单线程和轻线程性能进行了优化, 而其效率内核 (E 核) 针对扩展高线程工作负载进行了优化。Intel 研发了 Thread Director, 这个功能则有助于实时监控和分析性能数据, 从而将合适的工作线程无缝导向合适的内核, 并优化性能功耗比。

### (三) AMD 锐龙系列芯片

AMD 是美国超威半导体公司, 与 Intel 一样, 也是 CPU 市场的一大巨头, 市场份额仅次于 Intel。近几年发布的 CPU 让一众消费者直呼“AMD Yes!”甚至在 Intel Core 13th 出现之前, 成为了性能之最。AMD 自研的“Zen”架构做出了足够的创新, 才使得其 CPU 性能能产生翻天覆地的变化。那么 AMD 所设计的 CPU 到底有多么大的魔力, 能让口味挑剔的消费者做出如此之高的评价呢? 下面我们对 AMD 最新款 AMD Ryzen 9 7900 和较老款 AMD Ryzen 9 5900, 其核心参数如下表所示。

参数指标	AMD Ryzen 9 7900	AMD Ryzen 9 5900
核心数	12	12
指令集	X86	X86
架构	<b>Zen 4</b>	Zen3
CPU 频率	<b>3.7GHZ</b>	3.0GHZ
加速单核频率	<b>5.4GHZ</b>	4.7GHZ
加速多核频率	<b>4.7GHZ</b>	4.1GHZ
GPU 频率	<b>0.4GHZ</b>	None
GPU 加速频率	<b>2.20GHZ</b>	None
制造工艺	<b>5nm</b>	7nm
最大显存	128GB	128GB
CineBench 跑分	<b>28905</b>	20955

表 5: AMD Ryzen 9 7900 与 AMD Ryzen 9 5900 核心参数对比

我们发现,相比于 Intel 的提升,AMD 的提升幅度更大一些,除了工艺制程的优化外,更重要的是 AMD 在 Zen 微架构上的创新。Zen 4 架构的设计目标有三个方面:第一是性能,IPC(每时钟周期指令数或同频性能)和频率提升幅度都要达到两位数(超过 10%);第二是延迟,通过增大二级缓存、改进缓存有效性,大幅降低平均延迟;第三是能效,在整个 TDP(热设计功耗)范围内,显著降低动态功耗。

而为了实现这一目标,Zen4 对整个微架构体系进行了升级优化,包括前端、执行引擎、载入和存储单元、缓存、指令集等。整体而言,Zen4 架构的核心升级点包括:改进分支预测、增大 OP 指令作缓存、增大指令退役队列、增大整数和浮点寄存器文件、加深核心缓冲吞吐、浮点单元支持 AVX-512 指令、改进载入和存储单元、增大二级缓存。

其次,在 AMD 芯片内部,还首次集成了 GPU 模块,不过 Zen4 IOD 集成的 GPU 非常迷你,只有两个 CU 计算单元(128 个流处理器)、四个 ACE 异步计算引擎、一个 HWS 硬件寄存器,只是个“亮机卡”,用途有二:一是作为基本的显示和视频输出,给那些不需要独显、只需小规模集显的环境,比如商务办公、商业嵌入式、CAD、CAM 等领域。二是作为备用显示设备,在独立显卡故障的时候,提供一个进入系统、排查问题的途径。

### 三、不同处理器之间横向对比

在上面的部分,我们详细的介绍了三家厂商所设计的 CPU 的具体的参数,并且与他们的前代产品做了对比,我们发现,每一代产品相较于前一代产品的提升幅度都不算小,并且每一家都有自己独有的技术水平,都能够使 CPU 的性能发挥的更好更优秀。可是毕竟市场是竞争的,我们在这个部分,将对比这三家厂商自研的 CPU 微架构。由于锐龙和 Intel 都是 X86 指令集下的 CPU,属于同一赛道,故仅用 M 系列芯片与 Intel 处理器对比。

#### (一) AMD 锐龙与 Intel Core 的对比

首先我们来看 Intel 和 AMD 这对老对手,几乎每一个购买电脑的消费者都要面临一个艰难的选择:到底是选择锐龙系列的处理器还是选择 Intel Core 处理器呢?之所以会产生这样的纠结,显然是因为两者各有千秋,互有胜负。我们来看纸面参数的对比:首先 Intel Core 系列芯片和 AMD 锐龙系列芯片在核心设置上就走上了截然不同的道路,自从 Core 12th 后,Intel 便开

始走 P-Core 和 E-Core 协同工作，灵活调度的工作策略；而 AMD 锐龙系列芯片则不区分能效核心和性能核心，所有的核主频都一样。在极限性能的情况下，显然锐龙系列芯片性能释放会更加良好；但是在日常生活中，过高的 CPU 主频则会导致大量的发热现象。

## （二） Intel Core 与 M 系列芯片对比

M1 芯片与英特尔微处理器的不同之处在于，M1 使用了 ARM 架构。ARM 处理器的特点为更轻、更节能，这一特点使其成为智能手机和其他移动设备的理想选择。而 ARM 架构的理想设计是减少过热，甚至不需要使用风扇也不会导致过热的现象出现。虽然 ARM 架构有上述的几个好处，但同时也有缺点。例如，ARM 处理器，如 M1 芯片，需要开发全新的软件。也就是说，M 系列芯片的生态相较于 X86 架构要差很多，需要众多的软件商重新制作软件以便于适配 ARM 架构的处理器，这个工作量十分庞大，所以哪怕到现在，M 系列芯片的兼容性都要差一些。[\[2\]](#)

## 四、 总结

总的来说，三家厂商所设计的芯片各有所长，苹果的 M 系列芯片由于采用了 ARM 指令集，其能效比极高，并且在软件剪辑等任务上的表现极为出色，但是相应的，其兼容性和泛用性打了折扣，同时，因为内部集成的 GPU 频率不高，故进行一些对 GPU 要求较高的任务时表现不佳。但是在续航上，毫无疑问的是 M 系列芯片具有压倒性的优势。

AMD 锐龙系列与 Intel Core 系列的芯片在内部的微架构上走上了两条截然不同的道路：Intel 更加侧重于不同任务场景下不同核心的优化调度，采用 P-Core 和 E-Core 协同工作模式，而 AMD 则是将所有核心的频率统一，不区分大小核心，使得其在极端性能释放环境下具有极强的统治力。

从上面几家厂商的横向和纵向对比中，我们不难发现当今的体系结构发展分为了若干赛道，Intel 所走的便是将并行结构多极化，不同频率核心负责不同复杂度的任务，AMD 为了提高算力和性能所走的路便是提高核心数量，优化芯片制程，提高芯片在极限场景下的性能释放；而 M 系列芯片则是走了全然不同的道路，采用一个全新的指令集进行设计。这几条赛道各有优势，也象征着目前计算机体系结构相关的发展是多元化的，也是大有可为的！此外，对于 CPU 性能的优化也不仅仅局限于体系结构方面的创新，也可以通过优化缓存，提高芯片制程等方法加以改进。相信在不久后，上述三家厂商会在体系结构方面给予我们更大的惊喜和更加巧妙的创新！



## 参考文献

- [1] Ayaz Akram, Anna Giannakou, Venkatesh Akella, Jason Lowe-Power, and Sean Peisert. Performance analysis of scientific computing workloads on general purpose tees. In *2021 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, pages 1066–1076, 2021.
- [2] Vaibhav Dalakoti and Diptamon Chakraborty. Apple m1 chip vs intel (x86). *EPRA International Journal of Research and Development (IJRD)*, 7(5):207–211, 2022.
- [3] R. Duncan. A survey of parallel computer architectures. *Computer*, 23(2):5–16, 1990.
- [4] Zixuan Zhang. Analysis of the advantages of the m1 cpu and its impact on the future development of apple. In *2021 2nd International Conference on Big Data Artificial Intelligence Software Engineering (ICBASE)*, pages 732–735, 2021.