

CPU 发展报告

CPU (Central Processing Unit), 即中央处理器, 是计算机系统的运算和控制核心。1971 年, Intel 公司推出世界上第一款微处理器 4004; 2022 年, Intel 公司推出 12 代酷睿处理器。五十年间, 随着集成电路的发展, CPU 发展迅速。

(一) CPU 架构发展

CPU 架构是 CPU 厂商给属于同一系列的 CPU 产品定的一个规范, 主要目的是为了区分不同类型 CPU 的重要标示。目前市面上的 CPU 分类主要分有两大阵营, 一个是 Intel、AMD 为首的复杂指令集 CPU, 另一个是以 IBM、ARM 为首的精简指令集 CPU。

X86 架构: 1978 年 6 月 8 日, Intel 发布了史诗级的 CPU 处理器 8086, 由此 X86 架构传奇正式拉开帷幕。首次为 8086 引入 X86 作为计算机语言的指令集, 定义了一些基本使用规则, X86 架构使用的是 CISC 复杂指令集。同时 8086 处理器的大获成功也直接让 Intel 成为了 CPU 巨头, 我们所熟悉的奔腾处理器、酷睿处理器使用的都是 X86 架构。

MIPS 架构: 在上世纪 80 年代由美国斯坦福大学 Hennessy 教授的研究小组研发, 它采用精简指令系统计算结构(RISC)来设计芯片。和 Intel 采用的复杂指令系统计算结构(CISC)相比, RISC 具有设计更简单、设计周期更短等优点, 并可以应用更多先进的技术, 开发更快的下一代处理器。MIPS 是出现最早的商业 RISC 架构芯片之一, 新的架构集成了所有原来 MIPS 指令集, 并增加了许多更强大的功能。MIPS 自己只进行 CPU 的设计, 之后把设计方案授权给客户, 使得客户能够制造出高性能的 CPU。2007 年, 中科院计算机研究所的龙芯处理器获得了 MIPS 的全部专利、指令集授权, 中国开始走上了以 MIPS 为基础的 CPU 研发道路。

PowerPC 架构: PowerPC 是由蓝色巨人 IBM 联合苹果、摩托罗拉公司研发的一种基于 RISC 精简指令集的 CPU, PowerPC 架构最大优点是灵活性非常好, 核心数目灵活可变, 因此在嵌入式设备上具有很高效益, 可以针对服务器市场做超多核, 针对掌机做双核, 因此它具有优异的性能、较低的能量损耗以及较低的散热量。

ARM 架构: ARM 可以说是一个异军突起的 CPU 架构, 采用了 RISC 精简指令集, 而且 ARM 发展到今天, 架构上非常灵活, 可以根据面向应用场景不同使用不同设计的内核, 因此可以广泛用于嵌入式系统中, 同时它高度节能的特性, 目前各种移动设备中全都是它的身影。据统计, 使用 ARM 架构的芯片年出货量高达 200 亿片, 随着物联网时代降临, 对于低功耗性 ARM 芯片需求量会发生爆炸性增长。

虽然历史上出现过许多的 CPU 架构, 它们之间的差异很大。但是, 经过时间和用户的检验, 现在主流的 CPU 架构只剩下 X86 架构和 ARM 架构。二者区别主要在于采用的指令集不同。前者采用 CISC 复杂指令集, 而后者采用 RISC 精简指令集。CISC 可以实现高性能 CPU 设计, 但是设计起来相当麻烦, 要保持庞大硬件设计正确是一件不容易的事情, 还要确保性能有所提升, 不能开倒车, 因此桌面 CPU 研发时间慢慢变长。这时候, 以 ARM 为首的一些 RISC 精简指令系统计算机开始崭露头角了。

对于传统的 X86 处理器, 如果是多核, 内部的多个核心都是一模一样的, 这样的话, 由于一旦软件只能调度一个核心, 处于高频工作, 但由于架构限制, 其余核心也要保持同样的高频率和高电压状态, 这样就浪费了大量的能量在做无用功。后来就发展出了异步多核, 允许不同核心工作在不同频率上, 以此换来更低功耗。

由于移动设备更加在意功耗, 所以 ARM 采用了更加激进的做法, 八个核里面允许有不同 Cortex-A 架构核心, 那就是著名的 ARM bigLITTLE。这样的大小核设计目的很明确, 就是在有限的电池容量中, 兼顾性能、续航的需求, 因此 SoC 内部的 CPU 是采用异构计算, 既有高性能大核心, 也有低功耗小核心。这种大小核架构后来的 Intel 酷睿处理器也开始采

用。

（二）CPU 发展

1. 4004 处理器：

1971 年，Intel 生产出世界上第一块四位 CPU，代号 4004。基于 P 沟道 MOS 硅栅技术，采取 $10\mu\text{m}$ 工艺，拥有 2250 个晶体管，主频 740KHz，处理速度达到 0.06 MIPS，前端总线为 0.74MHz（4 位），socket 为 DIP16。4004 处理器可以执行 4 位运算，支持 8 位指令集和 12 位寻址，指令集为 4 位 BCD 编码。其大小比人类手指甲还小，但是运算性能可以与 ENIAC 媲美。

优点：第一款商用微处理器，相对于 ENIAC，体积小，运算效率高。

2. 8008 处理器：1972 年，Intel 生产出世界上第一块八位 CPU，代号 8008，也是首款在 PC 上使用的处理器。基于 P 沟道 MOS 硅栅技术，采用 $10\mu\text{m}$ 工艺，拥有 3500 个晶体管，主频 0.5MHz，处理速度达到 0.05MIPS（略慢于 4004），socket 为 DIP18。8008 处理器可以执行 8 位运算，支持 14 位寻址，可以访问到 16KB 的内存。虽然其单位时间执行指令数稍慢于 4004，但由于其 8 位运算的优势使其在大多数应用中拥有更好的性能表现。

改进：晶体管数目增加，主频变慢，支持 8 位运算。

缺点：相较于 4004 处理器，单位时间执行指令数较少。

优点：可以执行 8 位运算，大多数应用中性能表现较 4004 处理器提升明显。

3. 8080 处理器：1972 年，Intel 发布 8080 芯片，依然为 8 位处理器，以 N 沟道 MOS 取代了 P 沟道 MOS，使用 $6\mu\text{m}$ 工艺，拥有 6000 个晶体管，主频 2MHz，处理速度达到 0.64MIPS，运算速度比 8008 提升了 10 余倍，socket 为 DIP40。8080 处理器在 8008 处理器的基础上进行了改进，其地址总线为 16 位，可以访问 64KB 的内存，是 8008 的四倍；NMOS 取代 PMOS 的升级；其指令集比 8008 指令集进一步增强等。8080 的成功使其直接影响了后续的 X86 架构处理器。

改进：以 N 沟道 MOS 取代了 P 沟道 MOS，使用 $6\mu\text{m}$ 工艺，晶体管数目增加，主频加快，地址总线宽度增加到 16 位，指令集相比 8008 指令集进一步增强。

优点：运算速度比 8008 提升了 10 余倍，可以访问 64KB 的内存，是 8008 的四倍，指令集相比 8008 指令集进一步增强。

4. 8086/8088 处理器：1978 年，Intel 推出微处理器 8086，也是第一款 16 位处理器，采用 $3\mu\text{m}$ 工艺与特色的 x86-16 指令集，拥有 2.9W 个晶体管，主频 4.77MHz，处理速度达到 0.33MIPS，socket 还是 DIP40 不变。之后，Intel 公司发布了 8088 处理器，采用 x86 指令集，实际上是外部数据总线削减为 8 位的 8086。

改进：采用 $3\mu\text{m}$ 工艺与特色的 x86-16 指令集，晶体管数目增加，数据总线改为 16 位

缺点：在 8086 中，对单一指令仅仅采用 2 级步骤完成（取指，执行）同时 CPU 内只能执行一条指令，非流水线操作。在实模式下用户程序和操作系统拥有同等权利，对访问的地址即为物理地址，而同时程序可以随意修改自己的段基址，因此可以随意修改任意物理地址甚至操作系统的内容；同时，因为各程序使用的逻辑地址即物理地址——“所见即所得”——故微处理器无法支持“多任务”功能。

优点：主频加快，处理速度提升，后来被作为 X86 架构的鼻祖，其使用的 X86 指令集不断被使用、拓展至今。

5. 80286 处理器：1982 年，Intel 发布了 16 位处理器 80286。其兼容 8086 的所有功能，

采用 1.5 μm 工艺与相同的 x86-16 指令集，拥有 13.4W 个晶体管，主频 6MHz 与外频相同，处理速度达到 0.9 MIPS，socket 为正方形包装的 PGA68。

改进：采用 1.5 μm 工艺，晶体管数目增加。

缺点：在 80286 中，对单一指令采用 3 级步骤完成（取指，译码，执行）但是 CPU 内只能执行一条指令，非流水线操作。

优点：其内、外部数据总线皆为 16 位，地址总线 24 位，可寻址 16MB 内存。新增保护模式，改进了实模式下内存访问的不安全性。

6. 80386 处理器：1985 年，Intel 发布了第一款 32 位处理器 80386，采用相同的 1.5 μm 工艺与扩充后的 x86-32 指令集，拥有 27.5W 个晶体管，主频 12.5 MHz 与外频相同，处理速度达到 6 MIPS，性能比 80286 提升约 10 倍，socket 为 PGA132。

改进：晶体管数目增加，增加数据总线和地址总线的宽度，增加虚拟 8086 模式，引入 L1 Cache，添加内存管理单元，扩充指令集内容。

缺点：在 80386 中，对单一指令依然采用 3 级步骤完成（取指，译码，执行），非流水线操作。

优点：其数据总线以及地址总线皆为 32 位，因此能够寻址 4GB 的内存空间，因此为保护模式的优化创立条件——虚拟 8086 模式。引入了新的处理器工作模式——虚拟 8086 模式，真正实现各色程序的多任务处理功能，能兼容之前的老机型程序。首次引入了 L1 Cache（片外），极大的提高了 CPU 访问内存的效率。添加了内存管理单元（MMU），从而使得处理器能够有内存保护，存储器分页管理机制等功能。

7. 80486 处理器：1989 年，Intel 发布了 32 位处理器 80486，采用 1 μm 工艺，指令集为 x86 与 x87 的集合（增加了浮点运算部件），拥有 120W 个晶体管（突破百万晶体管的界限），主频 25 MHz，处理速度达到 20 MIPS，socket 为 PGA。

改进：引入流水线的概念，采用 RISC 技术，引入 Forwarding 技术和 Pre-fetch 技术。片内集成了指令数据统一的 8KB L1 Cache，同时支持外部 L2 Cache。片内集成了增强型 FPU 单元，提出时钟倍频技术，改进 MMU 的性能，扩充指令集，采用新的内部总线传送技术。

优点：加快指令执行效率，实现一个时钟周期内完成一条指令。解决了数据冒险问题，分支操作加快。浮点计算性能增强，CPU 主频增加，大大提高了与内存的数据交换速度。

8. Pentium 处理器：1993 年，Intel 发布了 32 位处理器 Pentium，又被号为 80586，使用的超标量 X86 微体系架构（称为 P5 架构），是 8086 兼容处理器系列中的第五代主要产品，指令集非常接近 80486 与 80386，仅仅做了简单的指令内容增加。其采用 0.8 μm 工艺，拥有 310W 个晶体管，主频 60MHz，处理速度达到 100MIPS（8048 的四倍性能），插槽采用 Socket4/5/6。

改进：采用 0.8 μm 工艺，晶体管数目增加，采用超标量技术。引入对 L1 Cache 进行数据指令分离，引入了 MESI 的 Cache coherence 协议。

缺点：L2 Cache 依然是片外的，极少数情况下除法运算的精度低。Pentium 依然采取 in-order 执行（指令）；同时 CPU 面对 data hazard 时 pipeline 中依然会出现 stall。

优点：系统运行效率大大提升，浮点性能提升，实现更高效的 cache 写回，解决了发热问题。

9. Pentium MMX 处理器：1996 年，Intel 推出了基于 P5 架构的微处理器 Pentium MMX，添加了 MMX 指令集，是对 P5 架构的一次关键升级。采用 0.35 μm 工艺，拥有 450W 个晶体

管，主频 166MHz，插槽采用 Socket7。

改进：添加了 Intel 的 MMX (Multi-Media Extension)指令集，L1 Cache 升级为双倍大小。

优点：处理多媒体的能力上提高约 60%

10. Pentium Pro 处理器：1996 年，Intel 发布了 32 位处理器 Pentium Pro，此为新的 P6 架构。其采用相同的 0.35 μ m 工艺与 x86 指令集(没有支持 MMX 指令集)，拥有 550W 个晶体管，主频 150MHz，处理速度达到 440 MIPS(是 Pentium 的 2~3 倍性能)，插槽采用 Socket8。

改进：实现 CPU 的 L2 Cache 的片内集成，采用了 16KB 片内 L1 Cache (合计)与 256KB L2 Cache。实现了 3 路超标量。

缺点：价格高昂。

优点：L2 Cache 与 CPU 同速。实现了指令流水线的乱序执行。

11. Pentium II 处理器：1997 年，Intel 发布了基于 Pentium Pro 的 P6 架构（此乃 Pentium Pro 的优点）的 32 位处理器 Pentium II，是对 Pentium (P5)与 Pentium Pro (P6)的改进版，其内核代号 Klamath，采用 0.35 μ m 工艺并支持 x86 指令集、MMX 指令集（此乃集合 Pentium 的优点，Pro 中没有支持 MMX），拥有 750W 个晶体管，主频 233MHz，集成了 32KB 片内 L1 Cache (合计)与 512KB 片外 L2 Cache (合计)，socket 为 Slot1。

改进：L2 缓存不再与 CPU 核心保持同速，采用了双重独立总线结构首次采用了最新的 slot1 接口标准。

缺点：L2 Cache 速度较低。

优点：成本降低，其余与 Pentium Pro 相似。

12. Pentium III 处理器：1999 年，Intel 发布了 32 位处理器 Pentium III，第一代内核代号 Katmai，其实就是 PentiumII的简单改进版。采用 0.25 μ m 工艺，指令集为 IA-32（即 x86）、MMX、SSE，拥有 950W 个晶体管，主频 500MHz，处理速度达到，socket 与 Pentium II相同为 Slot 1。

改进：采用 0.25 μ m 工艺，晶体管数目增加，支持 SSE 指令。

缺点：L2 Cache 速度较低。

优点：成本降低，其余与 Pentium Pro 相似。

13. Pentium IV 处理器：2000 年，Intel 发布了第一款 32 位 Pentium IV处理器，并没有沿用 Pentium III的 P6 架构，而是重新设计了新微架构 NetBurst。第一款 Pentium IV的内核为 Willamette。采用 0.18 μ m 工艺，拥有 4200W 个晶体管，主频 1.4GHz（轻松过 GHz），采用 QPB 型 FSB，外频达到了 400MHz，接口方式为 Socket423。

改进：采用 20 级超标量 pipeline，采用了奇贵的 RDRAM 来满足 Pentium 4 的带宽需求。在前端总线引入 QDR 技术，第一次引入 SSE2 指令集。

缺点：发热量大，价格昂贵，高噪音、低性能。

优点：读写达到 4 倍速率，浮点性能增强。

14. Pentium M 处理器：2003 年，Intel 发布了第一代 Pentium-M 架构，内核代号为 Banias，是对 Pentium III（即 P6 架构）的重大修改（Pentium III又是在 Pentium Pro 基础上改的），采用 130nm 工艺，拥有 7700W 个晶体管，主频为 1.3GHz~1.6GHz（性能堪比 Pentium IV的 2.8GHz），插槽使用了 Socket 479（实际上仅 478 个针脚，且各针脚的定义与桌面款的 Socket 478 不一样）。

改进：采用 12 级流水线和 64KB 的片上 L1 Cache。改进的分支预测和预取机制，
缺点：相比而言性能下降。
优点：电池续航提升，分支预测准确率比 Pentium III 高 20%。

15. Core i 系列：

15.1 Tock——Nehalem

2008 年 11 月，Intel 推出了升级架构 Nehalem，内核代号也是 Nehalem，采用 45nm 工艺不变，是第一代 Core i 系列处理器。Nehalem 是在 Core 架构上进行改进的，主频为 1.06GHz~3.33GHz，核心支持 2-8 核，接口采用 LGA1366。Intel 按照 i7、i5、i3 的顺序发布 i 系列处理器，来分别对应高级、中级与入门级市场，采用相同的内核架构。

改进：引入了睿频加速技术，重新引入了超线程技术。引入三级 Cache，将内存控制器集成于片内，直接取消了北桥芯片组。采用 20-24 级 pipeline 和 64 位宏操作融合（MOF）技术。

缺点：

优点：实现性能与省电策略的最大化，扩大了共享的 L3 Cache 大小，Cache 效率大大提高。CPU 与内存的 I/O 性能大大提高，总体性能大大提高。

15.2 Tock——Sandy Bridge

2011 年 1 月，Intel 推出了升级架构 Sandy Bridge，内核代号也是 Sandy Bridge，采用 32nm 工艺不变，是第二代 Core i 系列处理器，其架构是 Nehalem 的后继者。其主频为 1.6GHz~3.6GHz，接口采用 LGA1155，依然是 64KB-256KB-2MB（per core L1, per core L2, shared L3）的 Cache 模式。

改进：对集成的 GPU 架构进行修改，采用了环形总线(Ring Bus)来链接各个 core 以及其 L1/L2 Cache。支持了 AVX 256-bit 指令集，支持 Intel Quick Sync Video 技术。采用 14 到 19 级的 pipeline。

缺点：功耗较大，会造成空载问题。

优点：核显性能增强，核显可以访问共享的 L3 Cache。核之间的通信与交互变得简单。浮点性能、矩阵计算快 90%。硬件视频解码加速。

15.3 Tock——Haswell

2013 年 6 月，Intel 推出了升级架构 Haswell，内核代号也是 Haswell，采用 22nm 工艺不变（更成熟，大幅改善因量子穿隧效应而导致的漏电率），是第四代 Core i 系列处理器。其 Cache 依然是 64KB-256KB-2MB（per core L1, per core L2, shared L3）模式，接口采用 LGA1150。

改进：主板上的电压调节模块（VRM）集成到了 CPU 内部，增加了两个指令集。

缺点：功耗较大，会造成空载问题。

优点：节能，核显开始模块化、可扩展的设计并使用 Gen7.5 架构，方便走后续暴力堆砌核显规格的道路——最高级的核显拥有 40 个 EU，还有大容量 eDRAM 作为 L4 Cache，可同时提升 CPU 与 GPU 性能。

15.4 Tock (Architecture)——Skylake

2015 年 8 月，Intel 推出了升级架构 Skylake，内核代号也是 Skylake，采用 14nm 工艺不变（但比 Broadwell 更成熟），是第六代 Core i 系列处理器。其最高主频高达 4.5 GHz，接口采用 LGA1151。Skylake 同时升级了架构、工艺及核显等，四核称为标配。

改进：内存同时支持 DDR3 与 DDR4，采用了更先进的 14nm 工艺，取消了 Haswell 中引入的 FIVR 电压控制模块。使用网状总线架构代替原来的 ring Bus。

缺点：功耗较大，会造成空载问题。

优点：实现 DDR3、DDR4 的无缝接轨，功耗降低。可超频性得到强化。

15.5 Architecture——Ice Lake

2019 年 8 月，Intel 推出了升级架构 Sunny Cove，其内核代号为 Ice Lake，也更新采用 10nm 新工艺。Ice Lake 是第二代 10nm 工艺处理器（第一代是流产的 Cannon Lake），也是第十代 Core i 系列处理器（另一个是同期发布的 Skylake 架构的 Comet Lake），接口采用 BGA1526。

改进：采用更深的缓冲区与更大的缓存结构，加入了 AVX512 指令集。支持 LPDDR4X 内存，集成 Thunderbolt 3.0 控制器。

优点：缓冲效率大大提升，功耗降低。基于机器学习来让 CPU 提前对未来进行动态睿频。

15.6 Optimization——Tiger Lake

2020 年 9 月，Intel 发布了代号 Tiger Lake 的第十一代 Core 系列微处理器，同时架构升级为 Willow Cove，号称近年来处理器史上一次巨大飞跃：工艺到架构都有极大变化，升级力度在这几代酷睿中是非常明显的。Tiger Lake 采用 10nm+工艺，首次采用全新的 SuperFin 晶体管技术（官方表示它甚至重新定义了 FinFET 工艺）；得益于先进的工艺，从上代的 3.9GHz 一下子提升到 4.8GHz，保持功耗不变的情况下提升了 20%的性能。

改进：GPU 使用全新的 Xe 架构，加入了独立的 GNA 2.0 (Gaussian&Neural Accelerator) 单元（Intel 的低功耗 AI 加速器），采用了大小核架构。

优点：浮点性能提升了 87%，支持 AI 加速指令集 DLBoost，针对全场景 AI 作了加强。能专门针对工作流负载进行优化，实现闲时低功耗待机，忙时加速 AI 运算。