

微处理器的未来*

作者: 虞有澄 (Albert Y. C. Yu)

编译: 刘宇航

关键词: 微处理器 趋势 性能 体系结构 机遇

按语:对趋势的预测和把握,能够带来战略规划上的时间提前量。这篇于1996年发表在*IEEE Micro*上论述“微处理器的未来”的文章,其论述的全面性、深刻性令人耳目一新。作者虞有澄思考问题的角度和大部分结论在25年后的今天仍然成立,在芯片技术被“卡脖子”的背景下对我们具有特别的启发和参考意义。如果我们很难设想25年后的情景,不妨先看一看25年前的设想。

虞有澄出生于上海,曾是全球最先进处理器的推动者,并因而被称为“掌握英特尔技术命脉的华人”。英特尔(Intel)前总裁安迪·格鲁夫这样评价他:没有人比虞有澄更有资格说出英特尔是如何塑造出微处理器,以及微处理器如何塑造出英特尔的。CCCF特邀专栏作家刘宇航翻译了此文,并给出了自己的一些见解(见尾注)。

引言

在我担任英特尔的微处理器产品总监期间,经常有人请我描绘未来的微处理器。就算是在我们最新的处理器刚刚面世,甚至还没有得到充分使用的时候,人们本能地希望获得他们正走向何处,而不是已经走过何处的信息。

至今,我和我的同事们已经用了大约十年的时间来试着确定未来微处理器的趋势。尽管这些都是基于开发新技术时所固有的各种未知因素,但总体来讲,我们已接近目标。但是在对10年后的微处理器发表评论前,即*Micro 2006*,回顾我们之前对于今天以及2000年的微处理器的陈述可能是有帮助的^[1,2]。我们可以从中了解到我们正确的地方和错误的地方。这一回顾将帮助我们深入探究未来十年微处理器重要的发展趋势。

性能与资本成本

在过去的十年里,微处理器性能的发展速度超出了预期;可不幸的是,制造端的资金成本也是如此。表1列出了我们在1989年对于今天微处理器以100 MIPS (Millions of Instructions Per Second, 百万指令每秒)运行的性能预测,相当于ISPEC95达到2.5分,时钟频率为150 MHz。令人惊讶的是,今天的性能远远超出了这一水平。英特尔奔腾Pro处理器的运行速度为400 MIPS, ISPEC95约为10分,时钟频率为200 MHz。这种巨大的性能提升刺激了从移动计算机到服务器上的各种商业、家庭和娱乐应用程序的发展。也正因如此,今天个人计算机的市场份额比我们几年前预期的要大得多¹。

然而坏消息是,生产先进微处理器需要的投资成本比所有人预计的都高。在英特尔,我们在摩尔

* 本文译自 Yu Albert. The future of microprocessors [J]. *IEEE Micro*, 1996: 46-53, 并加入译者的见解。

表1 未来微处理器的设想趋势

特点	1989对1996年的预言	1996年的实际情况	1989对2000年的预言	1996对2000年的预言	1996对2006年的预言	
晶体管数量 (单位: 百万)	8	6	50	40	350	
芯片面积* (单位: 英寸)	0.800	0.700	1.2	1.1	1.4	
线宽 (单位: 微米)	0.35	0.35	0.2	0.2	0.2	
性能	MIPS	100	400	700	2400	20000
	ISPEC95	2.5	10	17.5	60	500
	时钟频率	150	200	250	900	4000

*方形芯片的单边长度

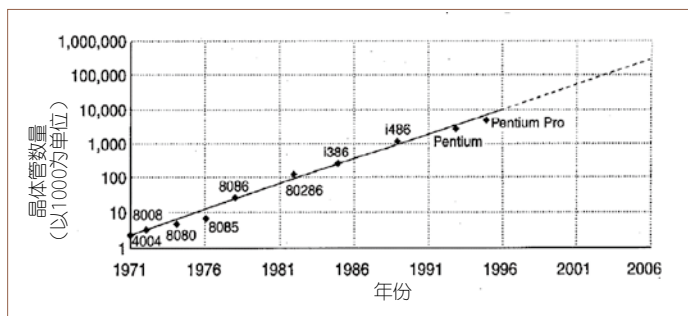


图1 摩尔定律图示

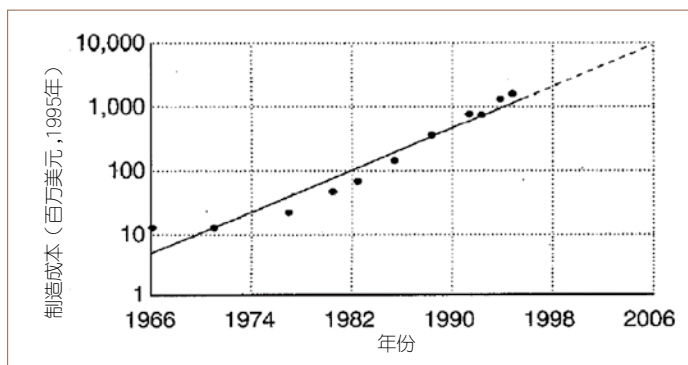


图2 摩尔第二定律图示

定律（一个处理器上的晶体管数量大约每18个月翻一番）的基础上，补充提出了摩尔第二定律：随着芯片复杂程度的增加，制造（fabrication）成本呈指数增长（参见图1和图2）。1986年，我们在晶圆厂制造出了包含25万个晶体管的386处理器，耗资2亿美元。如今，奔腾Pro处理器包含600万个晶体管，但需要20亿美元的生产设备²。

展望未来，一个重要的技术事实是，摩尔定律将继续占据统治地位，每个芯片上的晶体管数量将以指数方式增加。今天，性能的发展趋势得以保持，这要归功于原始晶体管数量之上的微体系结构和设计创新³。作为迄今为止最大的微处理器市场——个人计算机市场，将以一个较大的速度继续增长。个人计算机市场可以提供消化巨额制造资本成本所需的成交量市场。可以肯定的是，当器件的几何尺寸远低于亚微米范围时，会有许多关键的技术难题需要我们去解决。但所有的迹象都表明，2006年及其之后的微处理器发展前景值得期待。

重新审视2000年的微处理器

如表1所示，我们曾在1989年预计，到2000年时，一个处理器将在1.2（平方）英寸的芯片上搭载约5000万个晶体管。现在看来，整个行业在2000年有望在1.1英寸的芯片上装载4000万个晶体管。这20%的差距并非技术因素导致，而是因为经济因素，是合理的芯片成本所要求的（见图1）。

芯片技术

我们对芯片工艺线宽度的预期是完全正确的⁴，

因为英特尔目前正在为奔腾和奔腾 Pro 处理器生产 0.35 微米的芯片。我相信线宽将继续下降, 2000 年会下降到 0.2 微米, 2006 年会下降到 0.1 微米 (见图 3)。与此同时, 电介质厚度和供电电压相应地会下降。在可见的未来, 这种巨大的缩减将持续下去。在过去的十年里, 金属互连线路的数量已经从 2 个增加到 5 个, 而且由于我们需要更多的互连线路来连接所有设备, 这一数量还将进一步增加^[3]。实际上, 这是我们所面临的限制性能的最大因素之一 (请参阅后文的讨论)。

另外, 从芯片到封装, 最终到整个系统电路板的互连问题, 是限制性能的另一个主要因素。实际上, 我们希望构造单片以避免芯片往外发送信号时的性能损失。因此, 我们在 486 处理器上增加了高速缓存和浮点单元。对于奔腾 Pro 处理器, 我们将二级高速缓存和处理器封装在一起以满足两者间的带宽需求。未来的趋势将是在芯片上集成更多的性能敏感和带宽敏感元件, 并不断提高封装互连性能。多家公司正在研究多芯片模块 (Multichip Module, MCM) 技术以完全消除芯片封装, 我相信这将是高性能处理器未来的一个重要趋势。

性能

令人惊喜的是, 微处理器的实际性能大大超出了 1989 年的预期。出现这种情况有以下几个原因。尽管芯片工艺的发展已非常接近预期目标, 但我们已经通过新型微体系结构和电路技术获得

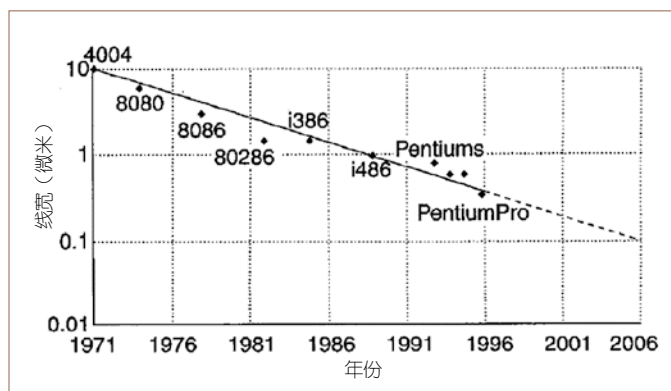


图3 线宽随时间变化图示

了更高的频率。此外, 每个时钟周期的指令数量增加得更快, 我们也已经采用了超量体系结构和更高的并行度⁵。同时, 编译技术也有许多创新之处可以进一步提高性能。我认为这些趋势仍将继续^[4,5]。

到 2000 年, 时钟频率将达到约 900 MHz, ISPEC95 为 60 分。这种超高的时钟速率将对用于功率和时钟分配的芯片金属互连线路的电阻和电容提出更高的要求。这些包含数百万个晶体管的器件在封装和电源管理方面也面临新的障碍。

体系结构

在 20 世纪 80 年代后期, 有关“哪种微处理器体系结构是实现最高性能的关键”这一问题引起了很多争论。精简指令集计算 (Reduced Instruction Set Computing, RISC) 的倡导者“吹嘘”RISC 有更快的速度、更低的制造成本, 且实现最简单。复杂指令集计算 (Complex Instruction Set Computing, CISC) 的拥护者则认为, 他们的技术提供了软件兼容性、紧凑的代码尺寸以及与未来的 RISC 匹配的性能。

如今, 关于体系结构的争论已几乎不再是问题。双方的辩论和竞争都对行业有利, 因为双方都从对方那里学到了很多, 而这加快了创新⁶。两者在性能和成本上确实没有明显的区别。IBM ROMP、Intel 80860 和早期的 Sun Sparc 等纯粹的 RISC 芯片, 以及 DEC VAX、Intel 80286 和 Motorola 6800 等纯粹的 CISC 芯片都已不复存在。明智的芯片架构师和设计师已经将两大阵营的最佳创意融入了当今的设计中, 从而消除了特定体系结构实现之中的差异。实现的质量对于设计性能最高、成本最低的芯片起了最重要的作用。

在 7 年前 (1989 年) 的 *IEEE Spectrum*^[1] 中, 我们的愿景是 2000 年的微处理器将具有多个并行工作的通用 CPU。但实际情况恰恰相反, 单个芯片中没有使用多个独立 CPU, 而是实现了更高层次的并行。奔腾处理器采用了具有两个整型流水线的超量体系结构,

而奔腾 Pro 处理器将其扩展到了三个。其他处理器（如 HP PA 和 IBM PowerPC 等）也使用了类似的超标量体系结构。我认为未来会一直持续这种趋势⁷。

人机接口

用于人机接口的晶体管数量也在增加。人机接口功能指的是那些有助于使个人电脑或其他设备更具吸引力且更易于使用的功能，包括三维图形、全动态视频、声音生成与识别以及图像识别。尽管我们无法确切地知道未来的微处理器将如何使用这些功能，但我坚信图形、声音和 3D 图像将发挥巨大作用。我们生活在一个 3D 的彩色世界中，自然就希望我们的计算机也能够反映出 3D 图形。一旦具备了创建这些特征的计算能力，应用程序开发人员将有巨大的机会将计算推向新的领域。因此，微处理器芯片将会有更高比例的晶体管应用于这些领域。

1989 年，我们为人机接口和图形功能预留了 400 万到 800 万个晶体管，约占我们对 2000 年估算量（微处理器全部晶体管）的 10%。我们针对奔腾处理器新采取的多媒体扩展（MMX）技术和 Sun UltraSparc 的可视指令集（Visual Instruction Set, VIS），是用于加速图形、多媒体和通信应用程序的通用指令的例子⁸。

带宽

随着复杂芯片的出现，未来微处理器设计将逐渐成为系统设计。微处理器设计人员必须考虑与芯片有关的所有事物，包括系统总线和 I/O 等。随着原始处理器速度的提高，系统带宽在防止出现瓶颈方面变得愈加重要。CPU 和内存之间以及其他系统组件之间需要有非常高的带宽以提供芯片能够实现的实际速度增益。为此，微处理器总线的吞吐量需要不断提高。PCI（Peripheral Component Interconnect）是容许个人电脑显著扩大 I/O 带宽的主要标准之一。

如今，英特尔正在与 PC 社区合作，带头开发图形加速端口（Accelerated Graphics Port, AGP）。

这项工作增加了图形加速器和系统其他部分之间的带宽。AGP 对于完整实现涉及 3D 和其他高分辨率图形的应用程序来说至关重要。随着通信对于个人电脑变得越来越重要和互联网应用程序的扩展，我们将需要更高的通信带宽⁹。

设计

过去我们预测，我们对高级计算机辅助设计工具的依赖将会猛增，实际上也的确如此。今天，我们正在仿真从行为级到寄存器传输级的整个芯片，而不只是其中的一部分。CAD 工具可帮助输入各种电路逻辑数据、验证芯片的全局时序、提取实际的布局统计数据，并对照着原始的模拟假设进行验证。综合（synthesis）也是迅速发展中的一个领域，先是逻辑综合，之后发展到数据路径综合。这些功能极大地提高了设计生产效率。

未来的发展将提高布局密度（以降低产品成本）并提高性能（以实现新的应用）。这是特别具有挑战性的，因为与晶体管相比，互连正成为限制性能的更大因素。除了电气仿真之外，热仿真和封装仿真也将在 2000 年成为常态（norm）。除芯片外，大趋势是将仿真扩展到包括处理器、芯片组、图形控制器、I/O 和内存在内的整个系统。

虽然我们关于“对于 CAD 的依赖和快速创新”的预测是相当准确的¹⁰，但其设计复杂性和所需的设计团队规模却超出了人们的预期。两名工程师曾在 9 个月内开发出了第一个微处理器。而现在的微处理器设计需要数百人组成一个团队一起工作。

尽管设计生产力已得到了极大提高，但也只是勉强能跟上不断增长的复杂性和性能。展望未来，我认为一个最具挑战性的领域将是我们如何实现设计生产力的飞跃。将 CAD 工具真正标准化并且完全可交互操作明显有助于此。而今天的情况并非如此，这导致业界在处理相互冲突以及专用的接口方面浪费了宝贵的资源。

测试

测试复杂的微处理器已经成为了一个大难题。

尽管与微处理器测试相关的投资仍然比晶圆测试相关的资本要少，但微处理器测试相关投资规模的增长已经超出了我们的预期。为什么呢？首先，由于处理器的频率增加、引脚数量众多（奔腾 Pro 处理器以 200 MHz 运行并具有 387 个引脚），所以测试仪器的价格会更高。其次，以前花费 5 万美元的测试仪器，今天要花费超过 500 万美元。最后，由于芯片的复杂性和质量要求（低于 500 DPM（Defects Per Million，每百万次缺陷数）），测试时间也会持续提高。最终会导致用于测试的整个工厂空间和投资成本猛增。

在 1989 年，我们预见到 2000 年将有更大比例的晶体管用于自我测试——在总共 5000 万个晶体管中约有 300 万个（占总量的 6%）。这个领域出现了很多革新。如今，奔腾 Pro 处理器中大约有 5% 的晶体管都支持内置的自我测试。因此我们对 2000 年的预测是：大约 6% 左右的晶体管将用于测试；这个比例在 2006 年可能会增加。

兼容性

我们曾在 1989 年提出，二进制兼容性对于投资的保护和持续至关重要。如今，对于企业而言，每年都有大量的软件库投入使用，并且正变得越来越有价值。即使它们能支持速度更快的计算机，公司也不想抛弃它们。因此，倘若存在诸如大规模并行处理之类的根本架构的变化，我们也必须保持未来与现今的微处理器之间的兼容性。除非能将系统性能提高两倍或更多，不兼容的硬件才值得被使用。当下更是如此，并且兼容性将继续成为未来微处理器最重要的一大业务和用户需求。当然，软件也正在变得更加可移植，但是如果大的新增收益，没有人会投入资源重新编译和维护软件的另一个二进制版本。

同时，确保兼容性的工作量也大幅增加。不同操作系统、应用程序和系统配置数量的增长已经远远超出了先前的估计。当然，芯片阶段之后的兼容性验证

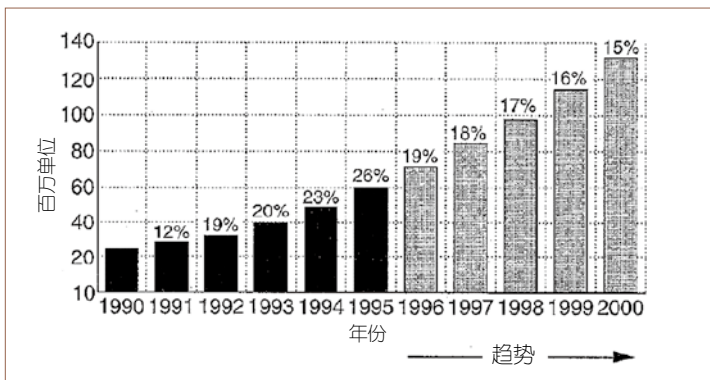


图4 PC出货量趋势(来源: Dataquest, 1996年4月)

工作要比其之前艰巨得多，而在软件模型或硬件仿真器上快速解决技术问题仍是一项艰巨的任务。

市场细分规模

当奔腾处理器还在筹备阶段时，我们预计 1995 年的销量只有 300 万。然而根据 IDC 的报告，1995 年奔腾处理器的出货量接近 6000 万。这二十倍的增长对整个行业来说都是巨大的。例如，图 4 展示了 Dataquest 对于 2000 年个人电脑出货量的预估，预测会稳定增长 15%~19%。对我们所有人来说，幸运的是，这一细分市场规模的扩大将吸引更多的研发资金和投资资本涌入，推动微处理器按照摩尔定律的指数速度发展¹¹。

那么2006年微处理器情况会如何呢？

一旦理解了相对于早期版本我们所处的位置，那么展望十年后的 2006 年就容易得多了。

晶体管与芯片尺寸

从表 1 和摩尔定律可以得出，10 年内晶体管的数量可以跃升至大约 3.5 亿个。请注意，许多前几代的处理器仍将大量出货。

晶片尺寸将提升至 1.4 英寸，以便容纳大量的晶体管和互连线路。而线宽会缩小到仅 0.1 微米，从而将现在的光学系统扩展到物理极限。我们将不

得不去寻找其他替代方案。根据摩尔定律的预测，芯片技术将继续快速发展，并且电压会继续降低至远低于 1 V。

性能与体系结构

到 2006 年，性能会提升至难以置信的 4 GHz 或者 ISPEC95 达到 500 分^[6]。一切迹象都表明，性能革新方面的机会比以往任何时候都多。驱动性能增长的两大趋势仍将是更高的并行性和更高的频率。为了开发出更高的并行性，我们将更加关注编译器 and 库的优化。为了提高频率，我们需要微体系结构、电路设计、精确模拟以及互连方面的进步。

我已经发现了很多可以在未来几年实现的好想法。性能的驱动力显然不局限于微处理器，而是来源于整个系统，因为我们需要建立一个平衡的系统为用户提供能力。有趣的是，早期的微处理器借鉴了大型机中许多优秀的架构思想。而从现在起，我们将超越一切大型机的性能。因此，在业界进行更多投资以进行长期研究并加强与高校的合作是很有必要的¹²。

障碍

在实现这种复杂度的微处理器之前，我们需要解决几个技术和逻辑上的障碍。最基本的一项是解决设计复杂性和设计团队规模迅速扩大的问题。较大的设计团队在其内部很难进行协调和沟通。从一开始就进行正确的设计是很有必要的，但随着设计复杂度以指数形式增加，将变得越来越困难。在我们对 2006 年所预先考虑的设计中，兼容性验证会变得难以想象的困难。全面地测试所有可能的计算与兼容性组合，工作量是巨大的。我们需要在验证技术上取得突破，才能进入到 3.5 亿晶体管的领域。

另一个需要突破性思维的领域是功耗。速度更快的微处理器显然需要更多的功耗，但我们也需要一种方法将热量从芯片上通过封装和系统散发出去。为了降低片上功耗，我们需要突破电压需求，将其降到 1V 以下。我们需要在低功耗微架构、设计和软件方面进行创新，以遏制功耗的上升。对于

移动应用，整个电子系统的功耗需要保持在 20 W 以下。功耗问题对于微处理器以及系统中的其他组件（如图形控制器和磁盘驱动器）来说，都是一个很大的挑战。

如前所述，互连是限制性能的主要因素。在科学家发现低电阻、低电容的材料之前，这种现象会一直持续下去。今天的奔腾 Pro 处理器有五个金属层，未来的处理器会需要更多。镀金技术历来需要多年的时间才能发展，因此我们迫切需要这一领域的研究，以便制造 2006 年的微处理器。

市场细分

历史上，我们曾犯过低估微处理器需求的错误。虽然我无法准确估计销量，但确实可以预见个人电脑和微处理器市场在未来十年会强劲增长。美国的个人电脑市场虽已走向成熟，但新兴市场才刚起步，特别是在东南亚、南美和东欧。

除了开拓新的地域市场，新的功能市场也将不断出现。尽管在下个世纪将如何使用计算能力是未来科学家需要构思的事情，但历史表明，伟大的创新是建立在充足的计算能力之上的。例如，在第一台个人计算机出现之前，没有人能预见到第一个电子表格，因为没有框架可以实现这种创新。我们的任务是利用不断提高的计算能力构造微处理器和个人计算机平台基础设施。这样，使用它们的创新的点子也将随之而来。

正如我们前面所提到的，有一个方面我认为需要很高的 MIPS（当然，也就一定需要高带宽了），这就是人机接口改进，例如 3D、各种多媒体、视觉、声音和手势。未来的应用程序将越来越多地融合视频、声音、动画、颜色、3D 图像和其他可视化技术，这会让个人计算机和应用程序更易于使用。在这一领域，推动个人计算机发展的细分市场是消费，而不是企业。尽管企业市场还在为更清晰地解释和呈现大量信息而挣扎，但家庭用户正在引导企业人员发现创造性的方法，以图形化的形式解决问题。对于具有事业心的应用设计者来说，使用 3D 可视化技术使复杂业务信息更清晰化存在巨大的机遇。拥

有强大图形化能力的处理器更易于将信息可视化，而不是数字显示，也使得解释信息变得更加容易。拥有智能用户接口的个人计算机将使用户成为信息的主动搜集者而不是被动吸收者。

一些人认为，面对互联网的巨大成功，台式机只需要更低的处理器性能，而不是更高。还在筹划中的那些所谓的网络计算机容许用户去下载必要的小程序和数据以供临时使用。这些设备可能会找到一个小众市场，但台式机（或者说客厅里的）处理器性能取决于用户希望获得的互联网体验。如果他们只是想浏览传统类型的数据，一个稍微差一点的处理器就足够了。但如果他们想要丰富的多媒体体验，浏览3D图像和获取声音相关的信息，将需要相当高的MIPS¹³。

另一个需要迫切关注的方面是硬件和软件开发之间的历史性滞后问题。软件总是滞后于可用的硬件；往往在应用程序利用了新的硬件功能时，供应商又发布了新一代硬件。广泛的面向对象设计可能有助于弥补这一差距，但我们需要在软件开发方面进行突破以保证软件开发跟得上硬件开发的脚步。我相信这是一个具有巨大机遇的

领域。谁能第一个充分利用即将到来的微处理器能力提供创新的应用程序，谁毫无疑问就是领导者。过去25年里，我们所走的微处理器道路很容易延续到未来10年。性能可以继续提升，直到2006年，我们将在一块1.7英寸的芯片上集成将近4亿个晶体管。然而，制造资本成本将在数十亿美元的范围之内，因此需要通过很大的出货量来压低单价。在我们实现这样一个芯片之前，除了巨大的制造成本，我们还有很大的技术障碍需要克服。我们需要知道如何测试和验证4亿个晶体管，如何连接它们，给它们供电，以及给它们降温。然而，一旦我们掌握了如此强大的计算能力，就可以为各个领域的巨大革新和细分市场机遇奠定基础，无论是商业计算还是儿童教育娱乐产品¹⁴。有一件事我可以肯定地预测：2006年，微处理器将为我们带来充满惊喜的应用程序和设备，将极大地改变我们的世界。 ■

致谢：感谢英特尔的同事 Richard Wirt 和 Wen-Hann Wang 在收集和规划预测数据方面提供的帮助。

尾注：

¹ 这一段提到了整个计算机市场的划分，包括移动计算机、服务器、个人计算机等。

² 奔腾 Pro 处理器相对 Intel 386 处理器，相隔 10 年（1986~1996 年），晶体管数量为 24 倍，制造成本为 10 倍。注意图 1~3 的纵轴都是对数坐标。

³ 巧妇难为无米之炊，巧妇可为有米之炊。巧妇难为无米之炊，说的是原材料的重要性。巧妇可为有米之炊，说的是厨艺的重要性。“原始晶体管”（raw transistor）就像刚从菜市场买回的尚未加工的食材，芯片微体系结构设计师就像厨师，他们的工作包括对素材的加工、组合、剪裁、融合、调度等。

⁴ 这一节的两段话是非常有见地的洞察，25 年后的今天（2021 年）仍然有效。2020 年，*Science* 上的一篇文章指出的“大部件”（big component）思想实际上就是上面这段话讲到的思想。存储墙问题、互连问题，都与片上、片外的巨大差别有关。片上与片外在功能和逻辑上没有区别，只有性能和成本的区别。在早期，一级高速缓存和浮点单元都是在处理器之外的，但后来（从 Intel 486 处理器开始）做到了同一个晶片（die）上，也就是说，一级高速缓存和浮点单元成为了处理器的一部分。二级高速缓存在历史上相当长的时间里是分立元件，再后来（从奔腾 Pro 处理器开始）二级高速缓存和处理器被封装在一起，最后被做到同一个晶片上。

⁵ 在 25 年后的今天（2021 年），开发利用并行度、时钟和电源的分配仍是重要的问题。

⁶ “从对方那里学到了很多東西，而这加快了创新”采用了辩证法，矛盾的事物之间互相取长补短，否定之否定，加速了技术的演进。

⁷ 在 25 年后看这段话，我们会感觉很有意思。1989 年作者预测 2000 年在同一微处理器芯片中使用多个独立 CPU，1996 年作者发现并不是这样，而是单芯片上有更高的并行度（主要使用超标量技术，即在一个处理器中有多条流水线）。现在看来，多核技术最终还是出现了（在 2005 年左右）。事非经过不知难，技术预测不容易。1989 年作者的预测是对还是错？从趋势上，是对的；在具体时间上，有不准确的方面。对未来，时间跨度越长，我们往往看得越模糊。但是，对历史，时间跨度越长，我们往往看得越清楚。

⁸ 这一段预测实际上暗含了后来 GPU 的发展。

⁹ 带宽在 1996 年是一个重要因素，25 年后的今天（2021 年）仍然是一个重要因素。

¹⁰ 原文对“关于 A 的预测是相当准确的”的英文表达是“A is pretty much on target”。

¹¹ 出货量大，会带来更多的研发资金和资本投资，这是摩尔定律成立的内在原因之一。

¹² 这一段提到了两个重要思想，一是“系统均衡”的思想，不要只关注微处理器，还要关注整个系统；二是“不能吃老本”的思想，在微处理器性能比较弱的时候，有大型机可以参照，当微处理器性能超过大型机的时候，进一步的性能提升需要新的基础研究的支撑，而基础研究需要长期投入，高校或研究所在这方面往往具有企业不具有的优势。

¹³ 这一段实际上在论述边缘计算和云计算的权衡。当然边缘计算和云计算是后来的概念。

¹⁴ 计算能力的提高，意味着生产力的提高。

参考文献

- [1] Gelsinger P P, Gargini P A, et al. Microprocessors circa 2000[J]. *IEEE Spectrum*, 1989, 26(10):43-47.
- [2] Gelsinger P P, et al. 2001: A Microprocessor Odyssey[M]// *Technology 2001, The Future of Computing and Communications*, D. Leebaert, ed., The MIT Press, Cambridge, Mass., 1991:95-113.
- [3] The National Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Assoc., San Jose, Calif., 1995.
- [4] Colwell R P, Steck R L. A 0.6 μm BiCMOS processor with dynamic execution[C]// *Solid-State Circuits Conference, 1995. Digest of Technical Papers. 42nd ISSCC, 1995 IEEE International*. IEEE, 1995.
- [5] Weiser U. Intel MMX Technology-An Overview [C]// *Proc. Hot Chips Symp.*, 1996:142.
- [6] Special Issue: Celebrating the 25th Anniversary of the Microprocessor. *Microprocessor Report*, Aug. 5, 1996.

作者：

虞有澄 (Albert Y. C. Yu)

时任英特尔公司微处理器产品组高级副总裁兼总经理，主要负责 Intel 架构的处理器产品（奔腾、奔腾 Pro 和未来的微处理器等），并监管平台架构、设计技术、微处理器软件产品和微型计算机研究实验室。

编译：



刘宇航

CCF 高级会员，CCCF 特邀专栏作家，CCF 职业伦理和学术道德委员会常务委员。中国科学院计算技术研究所副研究员。主要研究方向为计算机体系结构、高性能计算、存储系统、智能并发系统。
liuyuhang@ict.ac.cn

（本文责任编辑：郭得科）