

## 蝶变 ARM

1929 年开始的经济大萧条，改变了世界格局。前苏联的风景独好，使得相当多的人选择了马克思。惧怕布尔什维克红色力量的人投入了法西斯的怀抱，剩余的人选择了妥协与折中。整个世界的迅速分解使得第二次世界大战成为必然。

1933 年，罗斯福成为美国第三十二任总统，开始实施新政。这些新政使美国摆脱了危机，决定了二战的走向。罗斯福的背后站着的是凯恩斯，凯恩斯的国家资本主义化解了整个资本主义阵营有史以来最大的一次危机。“妥协与折中”得以持续。

战后的世界属于巨型公司，这些公司借助国家资本的力量，持续着垄断。这些垄断的初衷并非都是恶意的，在美国这却是一个早在 1890 年就立法制止的。1911 年，美国烟草公司被分拆。1982 年，美国电报电话公司被分拆。

这些分拆很难抵达 IT 业。1975 年成立的 Microsoft 虽然多次被推入拆分的风口浪尖，却从未被拆分。IBM 和 Intel 多次遭到分拆的威胁，也安然无恙。连分拆的支持者都注意到这样一个事实，这些公司不是依靠国家资本获得垄断地位，而是依靠多年苦心积攒的知识产权坚持到现在。

这类垄断之忧不在颢奥而在萧墙之内。在这些巨型 IT 公司中，最低层的工作人员需要经过多达十几级的汇报关系，才能到达首席执行官。在这十几级汇报链中，向上所传递最多的就是粉饰太平。

微不足道的小问题在这些大公司中也能引发无尽的讨论。为解决某个问题而举行的会议，经常被无休止地扩大，从一个会议扩展为多个会议，从几个人参与变为几十人参与。这个问题变得已不再重要时，内部并无统一意见。

西方巨型公司的弊端在于欧美所倡导的民主代价过于昂贵。撒切尔夫人是欧洲第一个深刻认识到这些问题的最高执政官。历史上，英国并不重视中小企业的发展，在凯恩斯主义盛行的二十世纪五十年代，英国经历了三次大规模的企业兼并。至撒切尔夫人执政，巨型企业大行其道。更多的人发现这些大型企业并不能提高生产效率，大范围的垄断与集中，已使英国经济举步维艰。

上世纪八十年代，撒切尔夫人开始变革，剑锋所指，巨型公司纷纷解体，中小企业如雨后春笋般涌现。撒切尔的私有化，货币控制，削减福利与抑制工党的四项举措，客观上拯救了英国经济，也使这位值得尊敬的女士誉满天下，谤满天下。

ARM 在这样的大背景之下诞生，这注定了这些创始人不会也不愿意使 ARM 成为巨型公司，这也是取得如此成就的 ARM，人数尚不过两千的最重要原因。ARM 最初的简称是 Acorn RISC Machine。Acorn Computer 创立于 1978 年，总部位于剑桥，由 Andy Hopper(剑桥大学)，Chris Curry(Sinclair Research)和 Herman Hauser(剑桥大学)创建[48]。

Acorn 最初使用 MOS Technology 6502 处理器搭建处理器系统。MOS Technology 6502 是一颗 8 位处理器，设计这颗处理器的工程师来自摩托罗拉的 MC6800 设计团队[48]。基于 6502 处理器，Acorn 开发了最令其自豪的处理器系统 BBC Micro[49]。

在上世纪 80 年代至 90 年代，BBC Micro 处理器系统主宰英国的教育市场。当时还有另外一个基于 6502 处理器的系统，Apple II[50]。从这时起，Acorn 和 Apple 这两个设计理念及产品形态相似的公司结下了不解之缘，有些人将 Acorn 公司称为“*The British Apple*”[51]。也是在这个时候，Acorn 迎来了一生中的对手 Intel。基于 Intel x86 构架的 PC 对同时代的处理器厂商是一场噩梦，很少有公司能够醒来。服从或者灭亡，别无选择。Acorn 选择服从，向 Intel 申请 80286 处理器样片，Intel 拒绝了这个请求[52]。

工程师对剩余的处理器，进行了充分的评估。结果令人失望。此时的 Acorn 没有选择，认真地考虑是否需要研制一颗属于自己的处理器。他们没有任何处理器设计经验，为数不多的工程师们除了才华，只有梦想。才华与梦想恰能改变整个世界。

1983 年 10 月, Acorn 启动了代号为 Acorn RISC 的项目, 由 VLSI Technology 负责生产。1985 年 4 月 26 日, VLSI 成产出第一颗 Acorn RISC 处理器, ARM1。ARM1 的结构非常简单, 仅有个 25,000 晶体管, 甚至没有乘法部件[52]。当时并没有人留意这颗芯片, 更多的人关注 Intel 在 1985 年 10 月 17 日发布的 80386 处理器[36]。

没有人认为这颗略显寒酸的 ARM1 能给 80386 带来任何冲击, 甚至包括研发这颗芯片的 Acorn 工程师。做为处理器厂商, 与 Intel 活在同一个时代是一场悲剧, 无论是 Acorn, IBM 亦或是不可一世的 DEC。Intel 并不是不犯错误, 只是有限的几个错误都能被及时修复。才华横溢的 Intel 工程师将处理器的故事演绎至巅峰, 他们的竞争对手也因此步入地狱。

Acorn 不得不选择回避, 这也决定了 ARM 处理器的设计理念是 low-cost, low-power 和 high-performance。这个理念与 21 世纪智能手机的需求不谋而合, 却是 Intel 强加给 ARM 的。Intel 在不经意间为自己树立了一个强大的对手, 这个对手在 Intel 的庇护之下一步步长大。并不夸张地说, 没有 Intel 就没有 ARM 的今天。

因为对 low-cost 和 low-power 的追求, Acorn 选择了 RISC, 而不是 CISC, 在上世纪 80 年代, RISC 与 CISC 孰优孰劣尚无定论。在当时采用 RISC 技术可以看得到的优势是可以更少的芯片资源, 更少的开发人员实现一个性能相对较高的处理器芯片[53]。Intel 使用了 CISC 架构, 很大程度上也决定了 Acorn 选择了 RISC。刘备的“每与操相反, 事乃可成”, 对于 Acorn 就是“与 Intel 不同, 便有机会”。

ARM 的成长仍然缓慢, 陆续发布的 ARM2 与 ARM3 没有激起波澜。只有为数不多的公司选择 ARM3 处理器开发产品。一些公司将 ARM3 处理器用于研发, 最有名的公司就是 Apple[53]。在当时, Apple 也是屈指可数的对 ARM 友善的公司。

Acorn 无论是在财务上还是在技术上都遭遇了瓶颈。销售量达到 150 万台的 BBC Micro 没有给 Acorn 带来足够的财富, 与席卷天下的 PC 相比这微不足道[54]。ARM3 与 Intel 在 1989 年发布的 80486 也没有太多可比性。危机最终降临到 Acorn 这个年轻的公司, 1985 年 2 月, 当时的 IT 巨头 Olivetti 出资 12M 英镑收购 Acorn 49.3%的股份[55]。Olivetti 的庇护没有给 Acorn 带来机遇。

Olivetti 创建于上世纪初, 对智慧与品质苛刻地执着使得他们的产品陈列在纽约的现代艺术博物馆中, 出现在许多经典的影片中。这些产品没有改变这个公司的最终命运。Olivetti 最终涉足 PC 领域, 使用 Zilog 的 Z8000, 挑战在这个领域所向无敌的 Intel。

Olivetti 收购 Acorn 后, 更多地将 ARM 处理器用于研发, 真正的产品使用 Zilog 系列。这段时间是 Acorn 最艰难的日子。Acorn 的创始人 Andy Hopper 最终选择从 Olivetti 独立。出乎意料之外, Olivetti 支持了 Andy 的决定。

1990 年 11 月, Acorn(事实上是 Olivetti Research Lab), Apple 和 VLSI 共同出资创建了 ARM。Acorn RISC Machine 正式更名为 Advanced RISC Machine[55]。在 1996 年, Olivetti 在最困难的时候将所持有的 14.7%的 Acorn 股份出售给了雷曼兄弟[56]。

当时的 Apple 正在为代号 Newton 的项目寻找低功耗处理器。Newton 项目的终极目标是实现地球上第一个 Tablet。Apple 对 Tablet 的前景寄予厚望, 他们直接将公司 Logo 上的 Isaac Newton 作为项目的名称。Apple 最初的 Logo 是在苹果树下深思的牛顿。两个 Steve[i]将公司命名为 Apple, 与喜欢吃苹果没有任何联系, 只因为是苹果而不是鸭梨砸到了牛顿头上。Newton Tablet 的想法过于超前, 最糟糕的是 Jobs 当时并不在 Apple。Apple 用并不太短的时间证明了一条真理, 没有 Jobs 的 Apple 和没有乔丹的公牛没有太大区别。1996 年 3 月, Steve Jobs 再次回到 Apple, 两年后取消了这个并不成功的项目[57]。等到 Jobs 再次推出 iPad Newton 时, 已是十几年之后的事情了[58]。

Apple 投入 3 百万美金拥有了 ARM 公司 43%的股份[60], 但是并没有把宝押在 ARM 公司, Apple 真正关注的是在 1991 年与 IBM 和 Motorola 组建的 AIM[59]。在 1998 年, ARM 公司

在英国和美国同时上市后，Apple 逐渐卖出了这些股份。在 2010 年，Apple 即便准备好了 80 亿美金，却也无法收购 ARM。

上世纪九十年代初期的 ARM 公司，财务依然拮据，起初 12 个员工只能挤在谷仓<sup>[ii]</sup>中办公，廉价 License 的商业模式更不被人看好。虽然依靠 Apple 的鼎力相助，ARM6<sup>[iii]</sup>得以问世，却没有改变 Apple 和 ARM 的命运。Newton 项目设计的是本应该属于下一个世纪的 Tablet，ARM6 被 PC 处理器和当时多如牛毛的 RISC 处理器笼罩，无所作为。

上世纪 90 年代属于 PC 领域。AMD 的异军突起，及其与 Intel 的竞争，构建了上世纪九十年代处理器领域一道最炫目的风景线，服务器领域属于 DEC。1992 年 2 月 25 日，DEC 发布的 Alpha21064 处理器，主频达到 150MHz<sup>[61]</sup>，而 Intel 在第二年发布的 Pentium 处理器，主频仅有 66MHz<sup>[62]</sup>。

整个 90 年代，处理器世界都在惊叹着 Alpha 处理器所创造的奇迹。DEC 陆续发布的 Alpha 系列处理器即便是放到二十一世纪的今天，设计理念依然并不落后。DEC 工程师是在为 21 世纪设计处理器芯片。在 Alpha21x64 系列处理器的编号中，'21'代表二十一世纪，而'64'代表 64 位处理器<sup>[63]</sup>。

上帝并不青睐 DEC 公司，科技与商业的严重背离酿成了巨大的灾难。Alpha 处理器的技术尚未抵达巅峰，DEC 的财务已捉襟见肘。1994~1998 年，DEC 不断地向世界各地兜售资产。至 1997 年，DEC 出售的资产已遍及五大洲，二十多个国家<sup>[64]</sup>。1998 年 1 月 26 日，DEC 正式被 Compaq 收购<sup>[65]</sup>。在 DEC 解体的最后一段日子里两个公司最为受益，一个是 Intel，另一个就是 ARM。

在 ARM 的起步阶段，鼎力相助的是 Apple，最先 License ARM 内核的却是英国本土的 GEC 半导体公司。在 1993 年因为 Apple 的引荐，ARM 处理器跋山涉水来到日本，与 Sharp 建立了合作关系。在此之前 Sharp 与 Apple 一直在合作开发 Newton 项目。

这些合作并没有缓解 ARM 的财务危机，ARM 一直在追寻真正属于自己的客户。1993 年，Cirrus Logic<sup>[iv]</sup>和德州仪器公司 TI(Texas Instruments)先后加入 ARM 阵营。TI 给予了 ARM 雪中送炭的帮助。TI 正在说服当时一家并不知名的芬兰公司 Nokia 与他们一同进入通信移动市场。TI 在 DSP 领域已经取得了领袖地位，但并不熟悉 CPU 业务，在屈指可数的可以被操控的公司中，最终选择了 ARM<sup>[67]</sup>。

ARM 迎来了上天赐予的机会。通过与 Nokia 和 TI 的密切合作，ARM 发明了 16 位的 Thumb 指令集，真正意义上创建了基于 ARM/Thumb 的 SoC 商业模式<sup>[67]</sup>。ARM 已经逐渐摆脱了财务危机，业务不断扩大。至 1993 年底，ARM 已有 50 个员工，销售额达到 10M 英镑。同年 ARM 迎来了公司成立以来最重要的一颗处理器内核，ARM7<sup>[67]</sup>。ARM7 使用的 Die 尺寸是 Intel 80486 的十六分之一，售价仅为 50 美金<sup>[v]</sup>左右。较小的 Die 尺寸，使 ARM7 处理器获得了较低的功耗，适合手持式应用<sup>[67]</sup>。

ARM7 处理器引起了当时的处理器巨头 DEC 的关注。1995 年，DEC 开始研发 StrongARM。与其他 License ARM 内核的半导体厂商不同。DEC 获得了 ARM 架构的完整授权，DEC 可以使用 ARM 的指令集，设计新的处理器架构，这个特权后来被 Intel 和 Marvell 陆续继承。第二年的 2 月 5 日，DEC 正式发布 SA110 处理器，开始提供样片<sup>[68]</sup>。SA110 处理器迅速得到了业界的认可，Apple 开始使用 SA110 处理器开发 MessagePAD 2000 <sup>[69]</sup>。

StrongARM 处理器在设计中注入了 Alpha 处理器的一些元素。StrongARM 使用 5 级顺序执行的流水线，分离了指令和数据 Cache，添加了 DMMU 和 IMMU 功能部件，每个 MMU 中包含 32 个全互连结构的 TLB，添加了 16 级深度的 WB(Write Buffer)<sup>[70]</sup>。至此 ARM 处理器更像是一颗微处理器，而不再是微控制器。

DEC 的帮助使 ARM 处理器达到了前所未有的高度。更为重要的是，这颗 160MHz，DMIPS 为 185 的处理器，功耗低于 500mW<sup>[70]</sup>。这不仅引起了工业界的浓厚兴趣，学术界也开始

真正关注 ARM 处理器。1997 年,DEC 如期发布了第二颗 StrongARM 芯片,SA1100。SA1100 在 SA110 的基础上增加了一些外部设计。第二年 Intel 为 SA1100 提供了一个伴侣芯片 SA1101, SA1100+SA1101 也成为了许多 PDA 厂商的首选。1999 年, Intel 发布了最后一颗 StrongARM 处理器 SA1110[vi], 和对应的伴侣芯片 SA1111。

StrongARM 的成功没有帮助 DEC 摆脱财务危机。而 DEC 却找到了一个更容易赚钱的途径。1997 年 5 月, DEC 正式起诉 Intel, 宣称 Intel 在设计 Pentium, Pentium Pro 和 Pentium II 处理器时侵犯了 DEC 的 10 条专利。1997 年 9 月, Intel 反诉 DEC 在设计 Alpha 系列处理器时侵犯了 Intel 多达 14 条专利[72]。

在 IT 界, 这样的官司大多不了了之。1997 年 11 月 27 日, DEC 和 Intel 选择和解。DEC 向 Intel 提供除 Alpha 处理器之外的所有硬件设计授权, 进一步支持 Intel 开发 IA64 处理器。同时 Intel 花费了 625M 美金购买 DEC 在 Hudson 的工厂, Israel Jerusalem 和 Texas Austin 的芯片设计中心。这两个公司还签署了长达十年的交叉授权协议[72]。

DEC 的技术注入使 Intel 的 x86 处理器迈入新的时代, Intel 具备了向所有 RISC 处理器同时宣战的能力, 最终一统 PC 和服务领域。Intel 还从 DEC 获得了 StrongARM。克雷格·贝瑞特认为这是上天赐予 Intel 的机会, x86 处理器与 StrongARM 的组合, 将使 Intel 的处理器遍及世界上任何需要处理器的领域。

为了迎接 StrongARM 的到来, 贝瑞特放弃了 Intel 自己的 RICS 处理器, i860 和 i960。Intel 为 StrongARM 起了一个炫目的名字 XScale, 动用了积蓄已久史上最为强大的 Ecosystem, 强势进军嵌入式领域。

一时间, XScale 处理器遍及嵌入式应用的每一个领域, 用于手持终端的 PXA 系列, 用于消费类电子的 IXC/Intel CE 系列, 用于存储的 IOP 系列, 用于通信的 IXP 系列。Intel 的处理器技术极大地促进了 ARM 内核的发展, 借用 PC 帝国的 Ecosystem 使 ARM 处理器从生产到设计一步领先于所有嵌入式行业的竞争者。首先成为 XScale 处理器试金石的是摩托罗拉半导体的 68K 处理器。

在 XScale 系列处理器诞生之前, 68K 处理器主宰嵌入式领域, Apple Macintosh 最初也使用 68K 处理器。在 1997 年, 摩托罗拉销售了 79M 片 68K 处理器, 而 Intel 的 x86 处理器一共卖出了 75M 片[73]。这是 68K 处理器最后的辉煌。Intel 和 TI 主导的 ARM 处理器终结了 68K 处理器。摩托罗拉半导体面对 ARM 的强势出击毫无准备。ARM 处理器不断地蚕食 68K 的市场份额, 直到完全占有。

1995 年, 摩托罗拉半导体的香港设计中心发布第一颗用于手持式设备的 DragonBall 处理器, MC68328(EZ/VZ/SZ)[74], 这是香港半导体界最好的时代。而 StrongARM/XScale 很快结束了香港设计中心的幸福生活。面对 ARM 的挑战, DragonBall 最终屈服, DragonBall MX(Freescale i.MX)系列处理器开始使用 ARM9。使用 ARM 内核并没有改变摩托罗拉香港设计中心的命运, 这个设计中心最终不复存在。

在工业控制领域, 68K 内核进化为 ColdFire[vii]。ColdFire 在 HP 的中低端打印机中取得的成就几乎是最后的绝唱。在通信领域, 摩托罗拉半导体抛弃了基于 68K 内核的 MC68360, 研发出基于 PowerPC 架构的 MPC860 处理器。这颗处理器是通信时代的经典之作, 摩托罗拉半导体陆续推出了一系列基于 PowerPC 内核的通信处理器, 却再也没有重现 MPC860 时代的君临天下。近期推出的 QorIQ[viii]系列处理器面对多核 MIPS 处理器总是滞后一拍。摩托罗拉半导体, 昔日的王者优雅地没落。摩托罗拉半导体于 1955 年推出第一个锗晶体管, 开创了半导体集成电路产业, 在整个 60 年代一骑绝尘, 70 年代末迎来了 68K 的辉煌。即使在 1985 年, 摩托罗拉还是全球第三大半导体公司。而怀抱通吃整个产业链的野心, 对封闭式系统的挚爱, 使摩托罗拉连同半导体部门在同一棵石头上跌到了一次又一次。至 21 世纪, 摩托罗拉半导体(Freescale)的排名在十名左右, 2009 年的排名仅为第 17 位。

击败了摩托罗拉半导体的 Intel 没有感到一丝喜悦，更多的是寒气。2006 年，Intel 的业绩跌入低谷，这也使得当时的 CEO 贝瑞特作出了一个艰难的选择，2006 年 6 月 27 日，Intel 将 PXA 系列处理器出售给了 Marvell[12]。

Intel 虽然保留了 ARM 处理器的授权，却已彻底退出了 ARM 阵营。这是 Intel 一个非常谨慎而且坚决的选择。Intel 需要扑灭后院的熊熊烈火。在 PC 领域，AMD 率先推出了 64 位的 K8 处理器[75]，并在 2005 的 Computex 上，发布双核处理器 Athlon 64。Intel x86 最引以为豪的性能优势已不复存在。

这段时间 Intel 只能依靠工艺与强大的商务能力与 AMD 的 Athlon64 处理器周旋。2008 年 11 月，Intel 正式发布基于 Nehalem 内核，用于台式机的 Core i7 处理器[76]，用于服务器的 Xeon 处理器，Core i3/i5 也如期而至。Nehalem 内核使 Intel 彻底战胜了 AMD。这颗处理器也是 Intel 开始研发 x86 处理器以来，第三个里程碑产品，之前的两个里程碑分别是 80386 和 Pentium Pro。从这时起 AMD 处理器在性能上再也没有超过 Intel。Intel 解决了最大的隐患后，却发现 ARM 处理器已非吴下阿蒙。

ARM7 之后，ARM8 内核于 1996 年发布。ARM8 内核生不逢时。与 ARM7 相比，ARM8 在没有显著提高功耗的前提下，性能提高了一倍，依然无法和 DEC 的 StrongARM 抗衡[77][78]。仅有少量手机在原型设计中考虑过使用 ARM8 内核，ARM 也仅为用户提供了 CPU 样板。ARM8 的失败并没有阻碍 ARM 内核的进一步发展，与 StrongARM 的竞争没有消减 ARM 阵营的实力，反而激发了 ARM 处理器不断向前的动力。1997 年 ARM9 正式发布，DMIPS 指标首次超过了 1.0 大关。ARM9 是一个重要的里程碑产品。这个产品标志着 ARM 处理器正式进入微处理器领域，而不再是简单的微控制器。

ARM9 将 ARM7 的 3 级指令流水线提高到 5 级，与 StrongARM 使用的流水线结构较为相似。进一步细化的流水线使得 ARM9 最高的时钟频率达到 220MHz，而 ARM8 仅为 72MHz[78]。ARM9 进一步优化了 Load 和 Store 指令的效率，ARM9 不再使用普林斯顿结构，而转向哈佛结构，使用了独立的指令与数据 Cache。

ARM9 的指令执行部件分离了 Memory 和 Write Back 阶段，这两个阶段分别用于访问存储器并将结果回写到寄存器。这些技术的应用使得 ARM9 可以在一个周期内完成 Load 和 Store 指令，而在 ARM7 中，Load 指令需要使用 3 拍，而 Store 指令需要使用 2 拍。

ARM9 可以通过增强的编译器调整指令顺序来解决 RAW(Read-after-Write)[ix]类相关。ARM9 的这些功能增强，使得在相同的工艺下，其执行性能是 ARM7 的一倍左右[79]。ARM7 并没有被淘汰，简练的设计极大降低了功耗，Apple 在 2001 年 10 月 23 日[80]发布的 iPod 依然使用了 ARM7 处理器[81]。

ARM7 与 ARM9 的合理布局，使得 ARM 阵营迅猛发展。基于 ARM7 和 ARM9 内核的 SoC 处理器迅速遍及世界的每一个角落。ARM 内核依然在前进。1998 年的 EPF(Embedded Processor Forum) ARM10 内核正式推出。2000 年 4 月 12 日，Lucent 发布了第一颗基于 ARM10 的处理器芯片[83]。

ARM10 内核的设计目标依然是在相同的工艺下，双倍提升 ARM9 的性能。而提高性能的第一步是提高指令流水线的时钟频率，而流水线中最慢的逻辑单元决定了时钟频率。ARM10 使用了 6 级流水线结构，但并不是在 ARM9 的 5 级流水线的基础上增加了一级，而是进行了细致取舍而调优。最终的结果是在使用相同的工艺时，ARM10 内核可使用时钟频率为 ARM9 内核的 1.5 倍[82][84]。

ARM10 内核重新使用了 ARM8 内核的系统总线，将 ARM9 的 32 位系统总线提高到 64 位。这也使得 ARM10 可以在一个时钟周期内完成两条寄存器与存储器之间的数据传递，大幅提高了 Load Multiple 和 Store Multiple 指令的效率[84]。

ARM10 改动了 Cache Memory 系统，与 ARM9 相比提高了存储器系统的效率。ARM10 的指

令与数据 Cache 使用虚拟地址，64 路组相连接结构，引入了高端处理器中流水线与 Cache 交换数据的 Streaming Buffer 和 Cache Line filling 部件[84]。

ARM10 内核优化了存储器读指令。实现了最为简单的乱序执行机制。当一条存储器读指令没有执行完毕，其后不相关的指令可以继续执行。ARM10 对乘法指令进行了特别的优化，设置了一个新型的 16×32 的乘法和乘加部件，还设置了两级乘法指令流水，使得每一个时钟周期可以执行一条乘法指令[84]。同时 ARM10 内核增加了对浮点运算的支持。

从技术的角度上看，ARM10 远胜过 ARM9，但是没有办法在商业上与 ARM9 一较高下。ARM10 的命运与 ARM8 惊人的一致。生不逢时的 ARM8 与 StrongARM 不期而遇，ARM10 与 XScale 生活在同一年代。

Intel 的工程师面对 ARM 的指令流水线耐不住技痒，ARM10 的指令流水线与之前的 ARM 内核相比，可以说是一个飞跃，而与同年代的高端处理器相比只是一个玩具。Intel 的帮助极大促进了 ARM 处理器的发展。

Intel 在保证 XScale 架构低功耗的同时，引入已经在 Pentium Pro 系列处理器上非常成熟的 Superpipelined RISC 技术[85]，借助 Intel 的工艺优势，使得 XScale 处理器的最高运行频率达到了 1.25GHz[86]。此时 Intel 开发的处理器步入了高频低能的陷阱，1.25GHz 的 PXA3XX 性能仅比 624MHz 的 PXA270 的执行效率高 25%[86]。

XScale 架构并没有使 Intel 盈利。ICG(Intel Communication Group)部门和 WCCG(Wireless Communications and Computing Group)部门给 Intel 带来的是巨额亏损，ICG 在 2002~2004 年的亏损分别为\$817M, \$824M 和\$791M[87]。2003 年 12 月 11 日，Intel 宣布将 WCCG 合并到 ICG 中，并在 2004 年 1 月 1 日生效。

这次合并没有挽救 XScale 的命运。在 2006 年，AMD 的步步紧逼使 Intel 迎来了 20 年以来最糟糕的一季财务报表。Intel 开始了有史以来最大规模的裁员。2006 年 7 月 13 日，Intel 宣布取消 1000 个经理职务[89]，2006 年 9 月 5 日，Intel 裁员 10%[90]。

在此之前 Intel 将 XScale 处理器中 Marvell 还愿意接收的部分出售[12]。Marvell 需要的并不是 XScale 内核，而是 Intel 从 DEC 获得的对 ARM 指令集的完整授权，很快 Marvell 推出了基于标准 ARM v5/v6/v7 的处理器，而不再单独依靠 XScale。XScale，这个几乎耗尽 Intel 全部心血的架构，已经走到了最后尽头。

Intel 退出 ARM 阵营，不是因为缺少\$600M 现金。和许多人预料的并不相同，Intel 并不是为了主推 Atom 处理器，而放弃 XScale。而是因为 Intel 用长达八年的时间发现了一个事实，ARM 的廉价 License 策略并不能使之获利，而必须做 Atom。

ARM 的廉价 License 的获益者是 ARM 自身，随着处理器厂商的不断加入，ARM 阵营获得了迅猛发展，这也加速了处理器厂商的优胜劣汰。但是 Intel 发现的事实依然适用于所有正在使用 ARM 授权的半导体厂商。

最令 ARM 内核尴尬的是，依靠这个号称最为开放的处理器内核，获取暴利的是一些做着史上最为封闭系统的公司。凭借 ARM 内核，Qualcomm 为 3G 专利找到了最佳载体，Apple 不断兜售着各类新奇的电子设备。来自通信领域的 Cisco，华为陆续加入 ARM 阵营。ARM，这个来自半导体领域的处理器，并没有使这个领域受益。ARM 的出现，极大降低了处理器的设计门槛，使得单纯依靠半导体技术，为做处理器而做处理器的厂商举步维艰。

Intel 首当其冲。Intel 的错误在十几年前已然犯下。贝瑞特本应该做出对 Intel 最为有利选择，从 DEC 那里获得 StrongARM 后，再亲手终结 StrongARM。贝瑞特不经意的失误为 Intel 的未来树立了一个强大的对手，也使整个处理器世界更加精彩。

ARM 从 XScale 处理器中获得了足够的能量，可以不依赖任何厂商。他们的命运已经牢牢地掌握在自己手中。2002 年 12 月，ARM1136 内核发布[91]。2004 年 7 月 19 日，ARM1176 内核发布[92]。2005 年 3 月 10 日，ARM1156 内核发布[93]。在此之前的 ARM 处理器虽然

得到了广泛应用，但是从纯技术的角度上看这些处理器微不足道。

ARM11 基于 ARMv6 指令集，之前 ARM 还开发了 V1, V2, V2a, V3, V4 和 V5 指令集。ARM 使用的内核与指令集并不一一对应。如 ARM9 使用 V4 和 V5 指令集，XScale 使用 V5 指令集。ARM7 最初使用 V3，而后使用 V4，最后升级到 V5。在 ARM 指令集后还包含一些后缀如 ARMv5TEJ，其中 T 表示支持 Thumb 指令集，E 表示支持 Enhanced DSP 指令，而 J 表示支持 Jazelle DBX 指令。

ARM v4 包含最基础的 ARM 指令集；v5 增强了 ARM 与 Thumb 指令间交互的同时增加了 CLZ(Count Leading Zero)和 BKPT(Software Breakpoint)指令；ARMv5TE 增加了一系列 Enhanced DSP 指令，如 PLD(Preload Data), LDRD(Dual Word Load), STRD(Dual Word Store) 和 64 位的寄存器传送指令如 MCRR 和 MRRC。ARM v4 和 v5 在指令集上变化不大，v5 也可以向前兼容 v4 指令集[94]。

而 v6 指令集并不能 100%向前兼容 v5 的指令集。由于 ARMv6 对存储器访问模型的大规模更改，完全的向前兼容不再可能。从 x86 处理器苛求的向前兼容的角度上看，这些改动并不完美，正是这些不完美使 ARM 内核轻装前进。

ARM 的指令集使用 RISC 架构，但是在 ARM 指令集中依然包含许多 CISC 元素。与 PowerPC 指令集相比，ARM 的指令集凌乱得多，这为指令流水线的译码部件制造了不小的麻烦。在 ARM 内核包含三类指令集，一个是 32b 长度的 ARM 指令，一个是 16b 长度的 Thumb 指令，还有一类由 8 位组成的变长 Jazelle DBX(Direct Bytecode eXecution)指令集。在 ARM 架构为数不多的指令集中，有两类指令值得特别关注，一个是 Conditional Execution 指令，另一个是移位指令。

绝大多数 ARM 的数据访问指令都支持条件执行功能。所谓条件执行是指指令可以根据状态位，有选择地执行。使用这种方式可以在一定程度上降低条件转移指令预测失败时所带来的系统延时。在计算 GCD(Greatest Common Divisor)时，ARM 的条件执行指令发挥了巨大的作用，如图 2 所示。

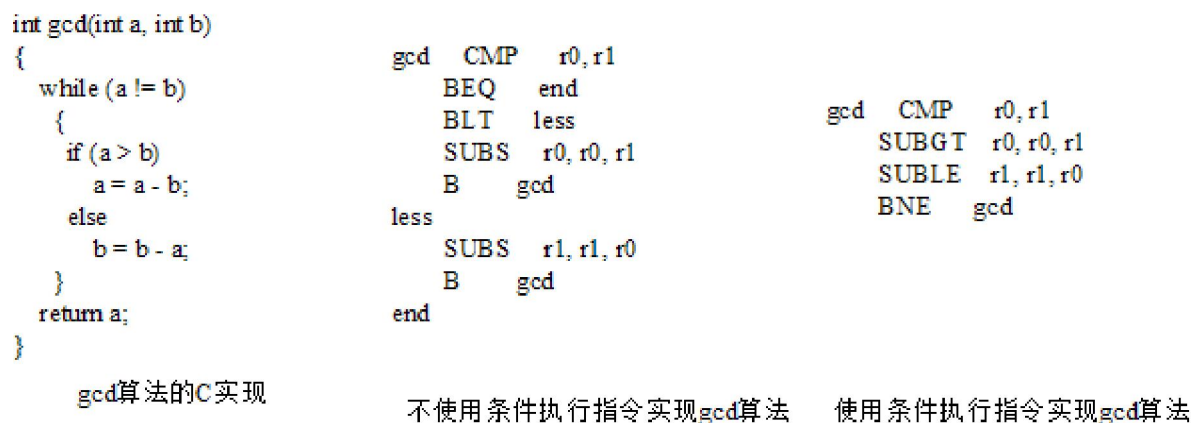


图 2 gcd 算法的实现[94]

通过上图可以发现由于 SUBGT 和 SUBLE 指令可以根据 CMP 指令产生的状态决定是否执行，因此显著降低了代码长度。ARM 指令集还对移位操作进行了特别的处理，ARM 不含有单独的移位指令，使用了 Barrel Shifter 技术，与其他指令联合实现移位操作，使用这种方法可以有效提高某些运算的效率，如图 3 所示。



$r0 = r1 \times 5$	$r2 = r3 \times 105$
	$r2 = r3 \times 15 \times 7$
$r0 = r1 + r1 \ll 2;$	$r2 = r3 \times (16 - 1) \times (8 - 1)$
ADD r0, r1, r1, LSL #2	RSB r2, r3, r3, LSL #4
	RSB r2, r2, r2, LSL #3

图 3 Barrel Shifter 的使用

这些特殊的指令使 ARM 内核有别于其他处理器内核，但并不意味着极大提高了执行效率。首先 CMP 指令，SUBGT 和 SUBLE 指令有较强的相关性，不能并发执行。此外现代处理器的条件预测单元也可以极大降低条件转移指令的命中率。一些处理器，如 x86 的 CMOV 指令和 PowerPC 的 isel 指令使用了更小的代价实现了 ARM 的条件执行功能。

ARM 内核在条件执行指令时占用了 4 个状态位，影响了指令集和寄存器的扩展。在绝大多数 RISC 处理器中具有 32 个通用寄存器，而 ARM 内核仅有 16 个通用寄存器[x]。ARM 的特殊移位操作，增加了指令的相关性，在有些情况下，不利于多发射流水线的实现，也增加了指令流水中预约站 RS(Reservation Station)的实现难度。

计算机体系结构是一个权衡的艺术，尺有所短，寸有所长。不同的内核都有自己最为合适的应用，不经过认真的量化分析不能轻易得出孰优孰劣的结论。不过仍有一个结论，在现阶段依然适用，处理器领域历经多年的优胜劣汰，所剩无几的处理器内核在激烈的竞争中日渐趋同。

ARM11 内核使用了现代处理器中常用的一些提高 IPC 的技术，这是 ARM 处理器的一个重要里程碑。ARM11 内核引起了计算机科学的两泰山北斗，David A. Patterson 和 John L. Hennessy 的注意。他们以 ARM11 内核为主体，而不再是 MIPS，书写了计算机体系结构的权威著作，《Computer Organization and Design, Fourth Edition: The Hardware/Software Interface》。这也是学术界对 ARM 处理器有史以来的最大认可。

ARM11 可以支持多核，采用了 8 级流水线结构，率先发布的内核其主频在 350~500MHz 之间，最高主频可达 1GHz。在使用 0.13 $\mu$ m 工艺，工作电压为 1.2V 时，ARM11 处理器的功耗主频之比仅为 0.4mW/MHz。ARM11 增加了 SIMD 指令，与 ARM9 相比 MPEG4 的编解码算法实现速度提高了一倍，改变了 Cache memory 的结构，使用物理地址对 Cache 行进行索引[95]。ARM11 终于使用了动态分支预测功能，设置了 64 个 Entry，4 个状态的 BTAC(Branch Target Address Cache)[95]。

ARM11 进一步优化了指令流水线对存储器系统的访问，特别是在 Cache Miss 的情况之下的存储器读写访问。在 ARM11 内核中，当前存储器读指令并不会阻塞后续不相关的指令执行，即便后续指令依然是存储器读指令，只有 3 个存储器读指令都发生 Cache Miss 的情况，才会阻塞指令流水线[95]。

虽然 ARM11 没有使用 RISC 处理器常用的 out-of-order 加 Superscaler 技术，在一个时钟周期之内仅能顺序发射一条指令，但是支持 out-of-order completion 功能，即在执行单元中的不相关的指令可以乱序结束，而不用等待之前的指令执行完毕。

ARM11 的这些功能增强，相对于 ARM9/10 是一个不小的技术飞跃。但是与其他处于同一时代的 x86，PowerPC 和 MIPS 处理器相比，仍然有不小的差距。ARM11 内核的存活之道依然是性能功耗比。

依靠着强大的性能功耗比，ARM11 内核取得了巨大的商业成功。ARM11 内核并不是一个性能很高的处理器，但是随着处理器性能的不不断提升，量变引发了质变。ARM11 内核的出现，使得 Smart Phone 的出现成为可能。

在此之前，基于 ARM9，XScale 处理器的手机只是在 Feature Phone 的基础上添加了少许智能部件。ARM11 的出现加速了手机阵营的优胜劣汰，Apple，HTC 在智能手机领域异军突



起，Motorola 一蹶不振。ARM11 之后，ARM 迎来了爆发式增长，迅速陆续发布了 Cortex A8 和 A9 内核。

ARM 处理器内核的快速更新，使 Nokia 这个对新技术反应迟钝的公司，一步步走向衰退。在 2010 年 9 月底开始出货的 Nokia N8[96]，居然还在使用着 680MHz 主频的 ARM11 处理器[97]，这款产品却号称是 Nokia 最新的旗舰产品，它的竞争对手早已使用了 1GHz 主频的 Cortex A8 处理器。

Cortex 处理器是一个分水岭，从 1983 年开始的 ARM 内核，迎来了一颗真正意义的现代处理器。ARM 已经破茧成蝶，不再是低功耗伴随着低能的处理器。从这一刻起，ARM 处理器具备了和 Intel，一较高下的能力。2010 年 4 月 3 日，Apple 的 Jobs 正式发布 iPad，ARM 随之进入平板电脑领域[99]。ARM 已将战火烧到了 Intel 的后院。

抛弃了 XScale 架构的 Intel，并没有放弃手机处理器。2009 年 1 月 23 日，Nokia 与 Intel 在手机领域建立长期合作伙伴关系[103]。2009 年 6 月 4 日，Intel 收购 Windriver[102]。2010 年 5 月 4 日，Intel 正式发布用于智能手机和平板电脑，代号为 Moorestown 的处理器[100]。2010 年 8 月 29 日，Intel 收购 Infineon 的无线部门[104]。在 2011 年左右，Intel 将发布用于智能手机，代号为 Medfield 的处理器[101]。一系列的合作与收购，使 Intel 具备了进入手机领域的能力。

至此 ARM 之于 PC 领域，x86 之于手机领域的野心，已昭然若揭。2010 年 9 月 9 日，ARM 正式发布代号为 Eagle，5 倍 ARM9 架构的 Cortex A15 内核，这颗处理器所关注的应用是高端手机，家庭娱乐，无线架构，还有低端服务器[98]。Cortex A15 向世人宣布除了 PC，他们还要 Server。

ARM，这个曾被 Intel 鄙视，被其扶植，被其抛弃的处理器，直面挑战 Intel 的 x86 处理器。这场较量是今后处理器领域 5 到 10 年的主旋律。最终结果将影响处理器领域今后 20 年的格局。不要认为 ARM 处理器没有进入 PC 领域的可能，也不要认为 ARM 处理器可以继续在手机领域中所向披靡。

---

[i] 苹果公司的两个创始人就叫 Steve，一个是 Steve Wozniak，另一个是众所周知的 Steve Jobs。Steven Wozniak 是 Apple I 和 Apple II 的发明者。两个 Steve 在 1976 年 4 月，在一个车库中成立众所周知的 Apple。

[ii] 英国的谷仓文化与美国的车库文化相近，是新技术的摇篮。

[iii] ARM 公司从 ARM3 直接升级到 ARM6。

[iv] 我第一次准备使用的 ARM 处理器是 Cirrus Logic 的 EP7312。当时我还在使用 Altera 的 EPLD，名称是 EP7132，我偶尔混淆这两个芯片的名称。在一个机缘巧合之下，粗心的采购将我需要购买的 EP7132 买成了 EP7312，这颗芯片也是我购买的第一颗 ARM 处理器。

[v] 当时的处理器价格高得离谱，50 美金已经是很廉价了。

[vi] 我从 SA1110 开始接触 ARM 处理器，那是一个永远值得回忆的时代。

[vii] 我在摩托罗拉半导体部门第一次接触的就是 Coldfire 处理器，目前这颗处理器仍然在不断发展中，这颗芯片与 68K 在汇编语言层面兼容，但是目标代码并不兼容。

[viii] QorIQ 系列处理器基于 E500 mc 内核，与 E500 v2 有些微小差异。我的第一本著作是基于 E500 内核的《Linux PowerPC 详解—核心篇》，当时准备写一套丛书，包括核心篇和应用篇。应用篇主要写外部设备，后来的《PCI Express 体系结构导读》源自《Linux PowerPC 详解—应用篇》，应用篇应该包含网络协议，PCI Express 和 USB 总线，后来把网络协议部分和 USB 总线部分删掉了。

[ix] 在处理器体系结构中，重点关注的有三类相关问题，RAW，WAR 和 WAW。使用寄存器重命名技术可以解决 WAR 和 WAW 相关。

[x] 考虑到 ARM 在 ARM11 内核之前都不支持动态分支预测，和多发射，使用条件执行指令还是能够提高 ARM7/9 内核的执行效率。