**Intel、ARM和MIPS嵌入式处理器比较**

张垒基（组长，ARM部分、引言部分撰写，排版）

北京理工大学计算机学院07111801班，学号1120180455，北京 100081

(zhangleiji20000@163.com)

朱泊霖（MIPS部分、三种嵌入式处理器比较部分撰写）

北京理工大学计算机学院07111801班，学号1120180459，北京 100081

(borlin2000@163.com)

唐小娟（Intel部分、摘要部分撰写）

北京理工大学计算机学院07111801班，学号1120180207，北京 100081

(txj0920@139.com)

#### The Comparison Between Intel、ARM and MIPS Embedded Microprocessors

Zhang Leiji

(Class 07111801, School of Computer Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Zhu Bolin

(Class 07111801, School of Computer Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Tang Xiaojuan

(Class 07111801, School of Computer Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract** In recent years, with the development of computer technology and products, the development of the microprocessor also contributes to the progress of the embedded microcontroller processor, embedded system refers to the, to apply as the center, on the basis of computer technology, software and hardware can be cut, to adapt to the application system for function, reliability, cost, volume and power consumption strict requirements, dedicated computer system. Embedded system is applied more and more widely in the industrial field, and far exceeds all kinds of general computers in the number of applications. In addition, embedded system is user-oriented, product-oriented, application-oriented, so in power consumption, volume, cost, reliability, speed, processing capacity and other aspects are restricted by the application requirements, users also put forward higher and higher requirements for it. In recent years, Intel, ARM and MIPS, as the leading embedded processors, have been developing the embedded system continuously, and have become the typical representatives of more widely used. They have different applications in different occasions. This paper refers to a large number of literature and materials, Intel, ARM, MIPS embedded processor from different aspects of the introduction, finally, the three of them are summarized and compared, let readers have a more profound understanding of microprocessor.

**Key words** embedded microprocessors; Intel; ARM; MIPS

摘要 近年来，随着计算机技术和产品的发展，微处理器的发展也推动了嵌入式微处理器的进步，所谓嵌入式系统是指，以应用为中心，以计算机技术为基础，软硬件可裁剪，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。嵌入式系统在工业领域应用越来越广，在应用数量上远远超过了各种通用计算机。除此之外，嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的，因此在功耗、体积、成本、可靠性、速度、处理能力等各个方面都受到应用要求的制约，用户对它也提出了越来越高的要求。而Intel、ARM、MIPS作为嵌入式处理器的翘楚，近年来不断发展嵌入式系统，也成了使用较为广泛的典型代表，他们在不同的场合中有不同的应用。本文查阅了大量的文献和资料，对Intel、ARM、MIPS嵌入式处理器从不同方面进行介绍，最后，对他们三者进行总结比较，让读者对微处理器有一个更为深刻的了解。

关键词嵌入式处理器；Intel；ARM；MIPS

在日常生活中，嵌入式处理器已经渗透到了我们的方方面面，如：微波炉、冰箱、空调等等家电都使用了嵌入式处理器，还有我们平日所使用的科学计算器，也都使用了嵌入式处理器。嵌入式处理器以其体积小、功耗低、性能强的特点，越来越得到市场的青睐。

Intel、ARM和MIPS作为处理器芯片的三大厂商，在嵌入式处理器上几乎占据了全部的市场份额，但这三种嵌入式处理器又各有各的特点，本文将首先对Intel、ARM和MIPS三种嵌入式处理器的七个方面作较为详细的介绍，然后对比分析这三种嵌入式处理器的不同之处，从而让读者能够对这三种处理器的异同有更深刻的认识。

## Intel嵌入式处理器

Intel在相当长的历史时期里处理器的发展都处于领先地位。1971年，Intel推出了第一款微处理器Intel 4004，体积小、重量轻、价格低廉促使产生了4位的4040和8位的8008；1973年，Intel进一步推出了8位微处理器8080，执行速度达到了500KIPS，地址总线16条，寻址范围可达64KB；1977年，处理器8084正式成为嵌入式系统家庭中的第一个成员，之后的8086以及现在仍然有人在使用的8096处理器成为了嵌入式的经典；20世纪90年代，Intel发布了Intel386处理器以及奔腾处理器，提出EIA战略，抢占了嵌入式市场；直到2008年，Intel发布了面向移动计算市场的Atom处理器，它的计算能力更强、超低功耗，体型也轻便小巧。接下来我将从结构、指令集等七方面对它的特点进行介绍，以便于和ARM、MIPS进行比较。

### 处理器结构

这里以Intel80960[1]举例，它包括了虚拟存储器管理、浮点功能单元和寄存器记分牌。处理器分成三层结构：核心、数字和保护层。核心层主要是和RISC相关的操作，数字支持浮点操作等，保护结构主要是进程管理、虚存管理、多处理器技术等等。

### 指令集架构

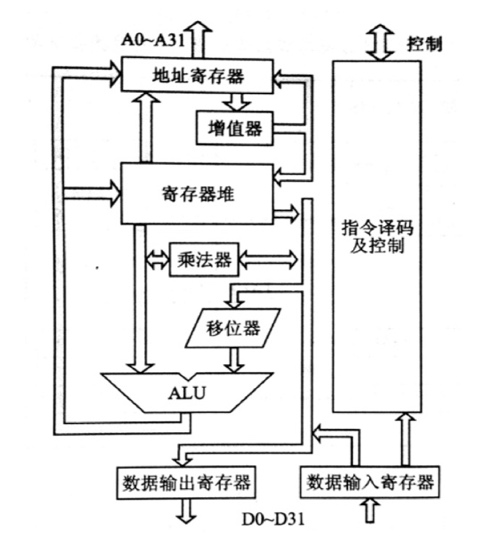
指令集架构主要分为复杂指令集（CISC）和精简指令集(RISC)[2]，Intel采用的主要是复杂指令集，它的特点是用较少的指令可以完成更多的操作，这样它的执行速度会很快，但是执行每个指令类型都需要额外的晶体管和电路元件，指令集越大，随之微处理器也会更复杂，执行操作就相对减慢了。

### 指令集位数

处理器指令集架构的位数也是衡量性能的一个重要因素。指令集位数是指CPU中通用寄存器的宽度，它决定了CPU处理能力的强弱，一般来说指令集位数越多越好，但是Intel并没有直接开发64位的x86指令，因为从原来32位架构进化出64位，效率会很低，于是它重新推出了一个叫IA64的处理器，由此制造了Itanium系列处理器，但是IA64并没有很成功，到现在使用的是AMD64，IA64已经基本被放弃了。不过目前来讲，在嵌入式微处理器的使用中，广泛使用的还是32位架构，但是在高速嵌入式中，64位架构已经成为主流。

### 流水线

在提高CPU计算能力的过程中，流水线技术十分重要，同时对处理器的发展也影响深远。流水线是指，为了提高CPU的利用率，加快执行速度，将指令分成多个阶段，并行执行不同指令的不同阶段，从而提高它的吞吐率。

Intel的i486引入了五级流水线，这时候的CPU不是仅仅只运行一条指令，同一级流水线在同一时刻运行着不同的指令，大大提高了程序的性能。后来的奔腾Pro处理器架构增加了其他的特性，比如说猜测执行，流水线的扩展，“超标量流水线”的提出，这些使得处理器的性能又进一步提高了。2002年发布的奔腾4处理器引入了超线程技术，同时为了让CPU的乱序执行部件得到充分的利用，加入了第二套前端部件，这让操作系统看到了两个处理器，某种程度上实现了多线程技术。在流水线的互锁问题上，Intel采用的是记分牌方法，用硬件去实现重安排指令。

### 处理器工艺

一般来说，制造工艺的纳米数越小。能量使用效率越高。在2020年，Intel推出了新一代10nm工艺，也叫10nm SuperFin工艺，号称是有史以来节点工艺性能提升最大的一次了，这代工艺主要用于Tiger Lake、DG1低功耗独显以及更高性能的SG1独显。

### 过程调用

Intel支持过程调用使用的是4套16个局部寄存器以及一套16个全局寄存器，但是由于寄存器数目多，在进行上下文进程切换的过程中全部写入内存，花费时间较多。

在浮点参数上，Intel在浮点计算的芯片上添加了32个浮点寄存器，速度较于其他类型的嵌入式处理器慢了很多。

### 设计目标

Intel设计的强项在于超高性能的台式机和服务器处理器，过去十几年中，大多数服务器和电脑用的都是Intel处理器，所以在进入移动行业，它使用的复杂指令集架构移植到体积较小的移动设备其实不是那么容易。Intel i7的发热率大约是45瓦，也就是ARM处理的15倍。为了提高能量的使用效率，Intel提出的Atom系列处理器采用了温度控制设计，必须使用22纳米制造工艺。总的来说，制造工艺的纳米数越小，能量使用效率越高。

## ARM嵌入式处理器

CISC体系指令集非常庞大、指令长度和指令执行周期不固定、各种指令的使用频度相差悬殊、控制器硬件复杂、不利于采用流水线技术。针对这些弱点，美国加州大学伯克利分校的Patterson教授带领他的研究团队设计和实现了“伯克利RISC 1”处理器[3]。在1983年至1985年间，英国的Acorn公司开发出第一代ARM RISC处理器。到了20世纪90年代，由于手机产业的爆发式发展，ARM在全球范围扩展开来，占据了高性能、低功耗、低成本的嵌入式应用领域的领先地位。

### 处理器结构

ARM处理器的结构主要包括通用寄存器堆、ALU、乘法器、桶式移位器、指令译码及控制单元等等，并采用了高速AMBA总线接口[4]。

图2.1.1 ARM处理器的结构

Fig2.1.1 the structure of ARM processor

### 指令集架构

ARM采用精简指令集（RISC），它只选择使用频度很高的那些指令，在此基础上增加少量能有效支持操作系统和高级语言以及其他功能的有用指令，从而大大减少了指令的条数，目前RISC指令集中的指令条数都控制在100条以内。

ARM的指令都是32位定长，在内存中以4字节边界保存，并且，指令系统可采用的寻址方式限制在两种以内，指令的格式也限制在两种之内，从而方便译码以及流水线的实现。

### 指令集位数

ARM处理器过去采用的是16/32位双指令集，到了2011年11月，ARM公司发布了新一代处理器架构ARMv8，这是ARM公司首款支持64位指令集的处理器架构。ARMv8不仅有支持64位处理的Arrch64技术，而且它的另一个执行状态Arrch32还能兼容以前的32位处理技术。

### 流水线

流水线技术通过多个功能部件并行工作，从而使得程序执行时间得到缩短，进而能够提高处理器的吞吐量，因此流水线技术成为了处理器设计中最为重要的技术之一。ARM7处理器核使用了典型三级流水线的冯·诺伊曼结构，ARM9系列则采用了基于五级流水线的哈佛结构。通过增加流水线级数简化了流水线各级的逻辑，进一步提高了处理器的性能。

### 处理器工艺

处理器的制作工艺指的是处理器中硅晶圆的大小，一般硅晶圆越小，处理器中集成的硅晶圆的数量就越多，功能就更强大且功耗更小。目前，ARM已经开发出7nm的制作工艺，并且5nm的制作工艺也即将被开发出来。

### 过程调用

ARM通用寄存器的个数很多，一般不少于32个，通过数量较多的寄存器可以减少访存的操作，而且所有的指令中只有存（Store）和取（Load）指令才能访问内存，因此可以极大地加快指令执行的速度。

ARM还采用了重叠寄存器窗口技术，即在相邻过程调用中，低区和高区共用一组物理寄存器，这样可以使得两个过程直接交换参数，大大减少了过程调用和返回的执行时间。

### 设计目标

ARM处理器目前分成三个系列——A系列、R系列、M系列。每个系列都有独特的特征，A系列 主要是面向应用的处理器，R面向实时性处理 器，M主要是面向微控制器[5]。ARM处理器的每一个系列提供了一套特定的性能来满足设计者对功耗、性能和体积的需求，从而覆盖特定的市场范围。

## MIPS嵌入式处理器

MIPS架构，英文全称为Microprocessor without Interlocked Piped Stages Architecture，即无内部互锁流水级的微处理器，在计算机学科的术语中，MIPS还是用来衡量计算机性能的重要指标之一，表示计算机每秒执行多少百万条指令(Million Instructions Per Second)，因此该词有一语双关之意。同ARM架构一样，MIPS是典型的精简指令集(RISC)架构。MIPS架构处理器的机制是尽量使用软件的方法来避免流水线中数据相关的问题，最早于20世纪80年代初由斯坦福大学的Hennessy教授及其研究小组研制成功[6]，通过指令的流水线技术来提升CPU运算速度，这样程序指令就可以像流水一样不间断被执行，该处理器也成为MIPS R系列处理器的原型。MIPS公司最早由Hennessy教授创办，如今的MIPS技术公司被Wave Computing收购，是RISC处理器领先的知识产权提供商，进行MIPS架构处理器的授权。MIPS公司早期推出了R系列的处理器，如R2000、R3000、R8000、R12000，后来MIPS公司将战略重心转移到嵌入式领域，推出了MIPS32、MIPS64等架构。为了适应高性能和低功耗处理器的需要，MIPS公司又陆续开发了32位处理器内核MIPS32 4Kc与64位处理器内核MIPS64 5Kc。

### 处理器结构

以MIPS R3000为例，这是一款使用流水线而速度很快的处理器，依靠软件实现了许多的功能，这也符合MIPS架构的机制，曾经是在美国推荐的实时军用嵌入式计算机系统的处理器结构。该处理器采用了5级流水线，除了CPU内核以外，还包括控制处理器(CP)，包含快表(Translation Lookaside Buffer, TLB)和内存管理单元(MMU)。除了CP外，R3000还支持外部R3010数字协处理器和另外两个外部协处理器。R3000不包含自己的一级Cache，而是片上高速缓存控制器，控制单独的外部数据和指令高速缓存。

### 指令集架构

下面以常用的MIPS32架构为例，介绍其指令集架构。

根据设计RISC的基本原则，指令条数大大减少，一般不超过100条，而扩大了通用寄存器的个数，一般不少于32个寄存器，以尽可能减少访存操作。MIPS32架构也是如此。MIPS32的寄存器包括了通用寄存器和特殊寄存器两种类型。

MIPS32架构包括32个通用寄存器[7]，编号从$0到$31，其中寄存器$0是一个特殊的寄存器，无论对其进行任何的操作，结果始终是0。剩余寄存器结构基本一致，功能各有区别。

表3.1.1 MIPS32的32个通用寄存器及其功能

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 寄存器编号 | 寄存器名 | 功能 |
| 0 | zero | 返回值始终为0 |
| 1 | at | 汇编暂存寄存器 |
| 2、3 | v0、v1 | 子程序调用返回值 |
| 4~7 | a0~a3 | 子程序调用参数 |
| 8~15 | t0~t7 | 临时寄存器，子程序使用时无需存储和恢复 |
| 16~23 | s0~s7 | 子程序寄存器变量，子程序使用时需要存储和恢复 |
| 24、25 | t8、t9 | 临时寄存器，子程序使用时无需存储和恢复 |
| 26、27 | k0、k1 | 中断、异常处理程序保存系统参数 |
| 28 | gp | 全局指针 |
| 29 | sp | 堆栈指针 |
| 30 | s8/fp | 子程序帧指针 |
| 31 | ra | 子程序返回地址 |

除了通用寄存器以外，还设置了3个特殊寄存器：PC、HI和LO。其中，PC是程序计数器，保存当前指令的地址；HI是高位寄存器，用来保存乘法运算结果的高32位以及除法运算的余数；LO是低位寄存器，用来保存乘法运算结果的低32位以及除法运算的商。

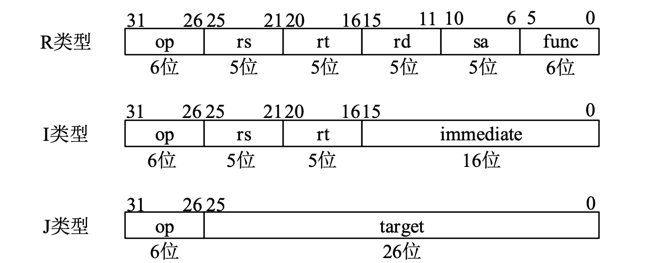
作为典型的RISC指令，MIPS32的所有指令都具有相同的长度，属于规整型指令，一般有三种指令类型：寄存器类型（R型）、立即数类型（I型）和跳转类型（J型）。

图3.2.1 MIPS32指令集的三种指令格式

Fig3.2.1 three instruction formats of MIPS32 set

对于数据存储的字节次序，MIPS32架构同时支持大端方案(MSB)和小端方案(LSB)，大端方案是将数据的高位部分保存在低地址中，将数据的低位部分保存在高地址中，小端方案恰好相反。

MIPS32架构主要有四种寻址方式：寄存器寻址、立即数寻址、寄存器相对寻址、PC相对寻址，前两种常用于跳转指令，第三种常用于加载存储指令，第四种常用于分支指令。

### 指令集位数

IPS嵌入式处理器有32位架构、64位架构、微型架构。MIPS32位架构指令集是MIPS I以及MIPS II的扩展集，从流行的R4000/R5000类64位处理器衍生出特权模式异常处理和存储器管理等功能，向上兼容MIPS64。MIPS64整合了强大的功能，向下兼容MIPS32。而微型架构microMIPS集成代码压缩技术，M14K和M14Kc是首先执行microMIPS的处理器内核。

### 流水线

流水线技术可以实现在指令执行时多条指令重叠进行操作的并行技术，提高了处理器的性能。MIPS架构可以采用五级流水线技术，将一条指令的执行划分成五个阶段，包括取指、译码、执行、访存、写回五个部分，在执行某一条指令的某一阶段时，可以重叠执行下一条指令的上一个阶段，例如在执行一条指令的译码阶段时，可以进行下一条指令的取指。

为了提高流水线的效率，MIPS还引入了延迟槽的技术，如分支延迟槽，位于分支后的一条指令，不管分支是否发生，总是被执行。因为分支指令执行时需要跳转到目标指令的地址，确定目标前无法完成取指的操作。采用分支延迟槽后，利用了这个时间片，使得流水线不断流。

### 处理器工艺

以典型的国产MIPS处理器龙芯为例，2019年12月24日，龙芯发布新一代龙芯3A4000/3B4000，采用28nm工艺，通过设计优化成倍提升性能。与ARM和Intel相比，还有不少差距。

### 过程调用

MIPS的过程调用，通过a0~a3四个子程序调用参数寄存器传递参数，通过v0、v1两个子程序调用返回值寄存器传递返回值，通过ra寄存器保存返回地址。

### 设计目标

MIPS的战略重心就在嵌入式领域，设计目标是在嵌入式系统中实现高性能和低功耗的要求，广泛应用于嵌入式系统中，上个世纪的八九十年代是其发展的黄金期，是RISC处理器中最流行的架构，应用领域覆盖游戏机、路由器、打印机等常用嵌入式设备，在工业控制、消费电子、仪器仪表、军工设备中有较大优势[8]。美国2006年发射的“新视野”号探测器，其处理器就是MIPS R3000A，并于2015年传回了目前最清晰的冥王星照片。国内的龙芯是著名的MIPS处理器，由中科院计算所研制，获得了MIPS公司的授权。

## Intel、ARM、MIPS嵌入式处理器比较

根据前文对Intel、ARM、MIPS三种嵌入式处理器的介绍，下面从指令集架构、性能与功耗、应用与发展前景

从指令集架构来看，Intel的嵌入式处理器使用复杂指令集CISC架构(x86)，指令的数量比较多，功能也比较强大，但是通用寄存器数量较少，这也增加了访存的次数，同时复杂的指令转换成微指令执行时解码也比较复杂，一定程度上影响了速度。芯片的结构比较复杂，体积很难做小。ARM和MIPS都是典型的精简指令集RISC架构，通用寄存器的数量很多，指令是定长的，指令的功能也较为简单，利于采用流水线技术提高性能。MIPS的寻址方式相对于ARM更加复杂一些。在流水线的结构上，MIPS使用编译器来解决分支、负载延迟槽，而ARM设置了桶形移位器(barrel shifter)，提高了数学逻辑运算的速度。[9]

从性能和功耗来看，这两者是矛与盾的关系，我们希望获得性能强、功耗低的处理器，但是往往二者不可兼得。Intel的性能是最强的，而功耗也是最大的。ARM的功耗最低，但性能一般不如Intel和MIPS。对于嵌入式处理器来说，功耗是十分关键的因素，甚至有许多情况下是采用电池供电的，功耗高、耗电量大的嵌入式处理器有时是不可用的，这也是Intel目前面临的最大问题。在工艺和制程方面，ARM是最领先的，最先进移动处理器已经实现了5nm的量产。

从应用与发展前景来看，Intel主攻方向是桌面级和PC的处理器，在嵌入式领域也有涉及，但是在当前的移动互联网时代，ARM是主流，应用主要覆盖移动系统开发的基本内核。MIPS主要面向高性能的工作站和服务器，在数字电视、数字机顶盒、宽带客户端等领域有广泛应用。ARM的生态比MIPS领先许多，而二者的指令集并不兼容。从发展前景看，Intel依然会深耕桌面级处理器，ARM继续引领移动处理器，向多内核结构发展，MIPS则转向硬件多线程功能。移动处理器领域已经是ARM的天下，MIPS要想获得快速发展，应该抓住物联网、万物互联的机遇，主动搭建自己的生态。

## 4 结束语

本文首先分别对Intel、ARM和MIPS三种嵌入式处理器的七个方面作了较为详细的介绍，最后又将这三种嵌入式处理器进行了对比分析，从而让读者能够对Intel、ARM和MIPS三种嵌入式处理器有更深刻的了解以及能够更清楚地了解他们的共同之处和不同之处。

对于Intel、ARM和MIPS三种不同的嵌入式处理器，我们不能简单地认为哪一种最好、哪一种最差，它们各自都有各自的优点和缺点。当然，通过设计这三种嵌入式处理器的厂家相互竞争、相互促进，相信在未来，我们可以使用到功能更加强大、价格更加低廉的嵌入式处理器。

**参 考 文 献**

[1] 黄永葵，赵云忠，毕国楦等. 实时嵌入式系统MIPS R3000和Intel 80960处理器的适用性评估. 航天计算技术[J]

[2] 邓豹，邓豹，孙靖国.国产嵌入式处理器发展综述.航空计算技术[J]

[3] 何荣森,何希顺,张跃.从ARM体系看嵌入式处理器的发展[J].微电子学与计算机,2002,19(5):42-45. DOI:10.3969/j.issn.1000-7180.2002.05.015.

[4] 任哲等.ARM体系结构及其嵌入式处理器.北京:北京航空航 天大学出版社.2008

[5] Peter, Greenhalgh. ARM的A/R/M设计目标:适合能处理器来执行对应的任务[J]. 电子产品世界, 2016(8):30-33.

[6] 范学英,张明新,王登磊.嵌入式系统概述[J].自动化技术与应用,2008(02):113-115. [8] Chiueh T, Huang L. Efficient real-time index updates in text retrieval systems [R]. New York: Stony Brook, 1998

[7] 郑宜嘉. 一种兼容MIPS32指令集的RISC微处理器的设计与验证[D].西安电子科技大学,2017. [10] PACS-1： public-access computer systems forum [EB/OL]．Houston,Tex：University of Houston Libraries, 1989 [1995-05-17]．http://info.lib.uh.edu/pacsl.html

[8] 李常. 嵌入式MIPS微处理器设计[D].清华大学,2010.

[9] 姚卫国.嵌入式处理器MIPS和ARM[J].环球市场信息导报,2012,(8):50.