高等计算机体系结构
第二讲: 基本概念和ISA

栾钟治
北京航空航天大学 计算机学院 中德联合软件研究所
2021-03-05

1

为什么要学习计算机体系结构?

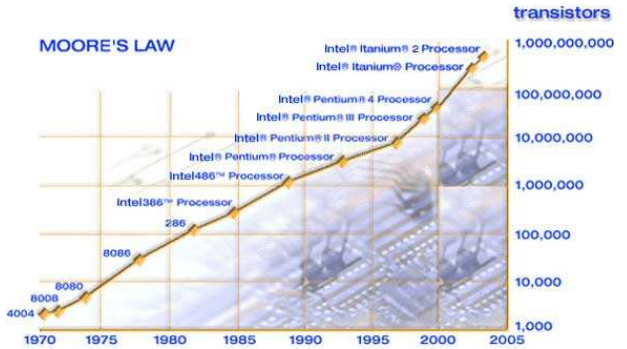
2

什么是计算机体系结构?

- **通过硬件组件的设计、选择、互连以及软硬件接口的设计来创造计算系统的科学与艺术，它使得创造出的计算系统能够满足功能、性能、能耗、成本以及其他特定的目标。**
- 你们很快将会看到体系结构和微体系结构之间的区别

3

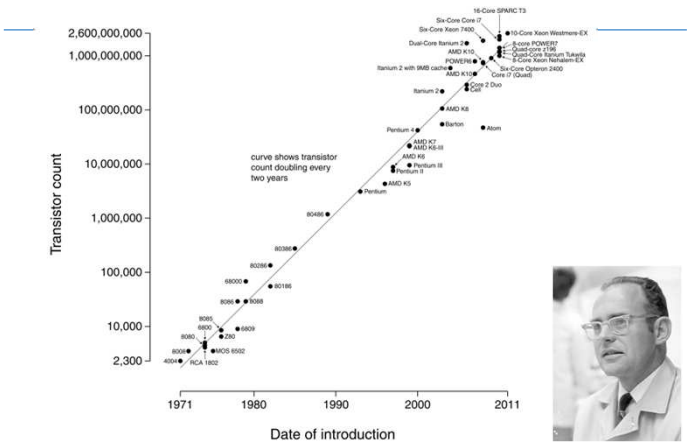
使能: Moore's Law



Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," Electronics Magazine, 1965. 组件数量每隔一年翻一番

Image source: Intel

4



集成电路上晶体管的数量大约每两年翻一番

Image source: Wikipedia

5

5

我们用这些晶体管来做什么

- 请大家在课下的阅读中思考…
  - Patt, "Requirements, Bottlenecks, and Good Fortune: Agents for Microprocessor Evolution," Proceedings of the IEEE 2001.

6

6

为什么要学习计算机体系结构?

- 更好的系统: 使计算机更快、更便宜、更小、更可靠…
  - 通过利用底层技术的进步
- 更新的应用
  - 三维可视化
  - 虚拟现实
  - 个人基因组
- 更好的解决问题
  - 软件的创新与计算机体系结构的发展和改进紧密融合
    - 每年超过一半的硬件性能提升支撑了软件的创新
- 理解计算机为什么会这样工作

7

7

今天的计算机体系结构(I)

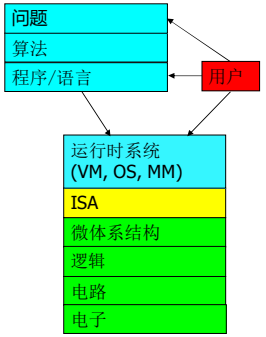
- 计算机工业进入一个大的转变时期:**多核-更多的核**
  - 很多潜在的不同的系统设计可能性
- 很多困难的问题***驱动了***这种转变同时也***由于***这些转变变得更困难
  - 功耗/能耗约束
  - 设计的复杂性→ 多核?
  - 技术扩展的困难→ 新的技术?
  - 存储墙(wall/gap)
  - 可靠性墙/问题(wall/issues)
  - 可编程性墙/问题(wall/problem)
- 这些问题都没有清晰、确定的答案

8

8

今天的计算机体系结构(II)

- 这些问题影响着计算系统的各个层次– 如果我们不改变我们设计系统的方式……

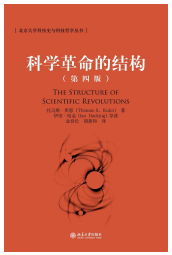


9

9

今天的计算机体系结构(III)

- 如果你理解软件和硬件并且对它们作相应的改变，你可能革新构建计算机的方法
- 你可以发明新的计算、通信和存储模式
- 推荐一本书: Kuhn, "The Structure of Scientific Revolutions" (1962)
  - 前范式阶段
  - 常规阶段
  - 反常阶段
  - 危机阶段
  - 革命阶段



10

10

… 但是, 首先 …

- 让我们来理解基本的概念…
- 只有当你理解得足够好之后才有可能改变…
  - 尤其是那些过去和现在起主导地位的范式
  - 同时，它们的优点和缺点 -- tradeoffs

11

11

基本概念

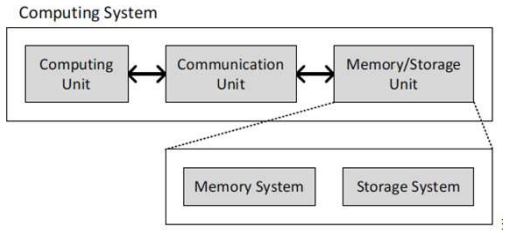
12

12

什么是计算机?

- 三个关键的要素

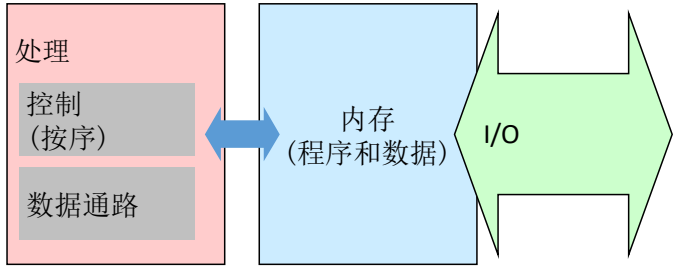
- 计算
- 通信
- 存储 (内存)



13

什么是计算机?

- 我们会讨论所有这三个要素



14

14

冯诺依曼结构/模型

- 也叫*存储程序计算机*(指令在内存中)，两个关键的属性：

- 存储程序
  - 指令存储在一个线性的存储阵列中
  - 内存统一的存储指令和数据
    - 依靠控制信号实现对存储的值的解释

  什么时候一串数字会被解释成一条指令呢?

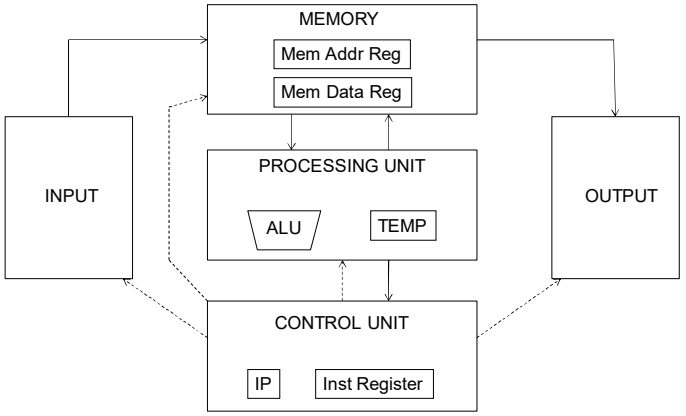
- 顺序的指令处理
  - 一次处理一条指令 (取指、执行)
  - 程序计数器(指令指针) 标识“当前”指令
  - 程序计数器按顺序推进，除了控制转移指令

- 推荐阅读
  - Burks, Goldstein, von Neumann, “Preliminary discussion of the logical design of an electronic computing instrument,” 1946.
  - Patt & Patel, 第四章, “The von Neumann Model”

15

15

冯诺依曼结构/模型(计算机)



16

16

数据流模型(计算机)

- 冯诺依曼模型: 指令的获取和执行按照控制流的顺序
  - 由指令指针来指定
  - 顺序推进除非遇到明确的控制转移指令
- 数据流模型:指令的获取和执行按照数据流的顺序
  - 当操作数准备好
  - 没有指令指针
  - 指令的顺序依赖数据流来确定
    - 每条指令指定结果的接收者
    - 一条指令在获得所有操作数后就可以执行
  - 意味着多条指令可能同时执行
    - 本质上具备更高的并行性

冯诺依曼vs 数据流

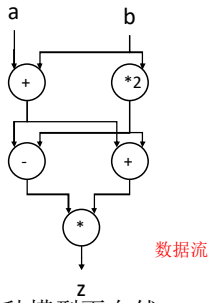
■考虑一个冯诺依曼结构下的程序

❑程序的顺序

❑存储的位置

```
v <= a + b;
w <= b * 2;
x <= v – w;
y <= v + w;
z <= x * y;
```

顺序的

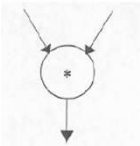


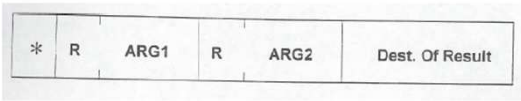
数据流

■如果你是程序员，你觉得哪一种模型更自然?

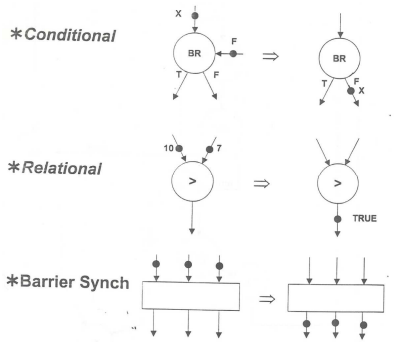
关于数据流

- 在数据流机中，程序由数据流节点构成
  - 数据流节点会在所有输入都准备好时发射(取指和执行)
    - 可以理解为当所有输入获得令牌
- 数据流节点和它的 ISA 表示

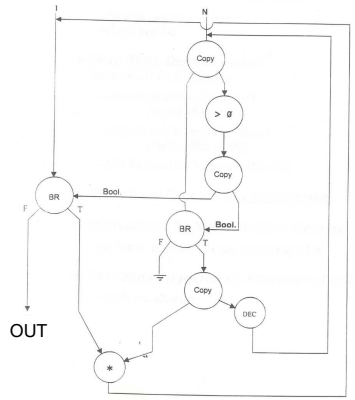




数据流节点



数据流程序的例子



21

21

指令指针—ISA层面的折衷

■是否需要在ISA中设计指令指针?
- ❑**是: 控制驱动，按顺序执行**
  - ■指令在IP指向它时被执行
  - ■IP 按顺序自动改变 (控制转移指令除外)
- ❑**否: 数据驱动，并行执行**
  - ■当所有操作数就位执行指令 (数据流)

■Tradeoff: 涉及到上层
- ❑编程是否方便(对大多数程序员)?
- ❑编译是否方便?
- ❑性能: 并行性如何?
- ❑硬件复杂性如何?

22

22

ISA 和 微体系结构的折衷

- 在微体系结构层面需要作出类似的tradeoff

- ISA: 程序员视角看指令如何执行
  - 程序员看到一个顺序的、控制流驱动的执行序

    vs.
  - 程序员看到一个数据流驱动的执行序

- 微体系结构: 底层实现如何执行指令
  - 微体系结构可以按照任意的序来执行指令，只要它能够按照ISA确定的语义将指令结果呈献给软件即可
    - 程序员应该看到的是ISA确定的序

23

23

让我们回到冯诺依曼结构

- 如果你想了解更多有关数据流…
  - Dennis and Misunas, "A preliminary architecture for a basic data-flow processor," ISCA 1974.
  - Gurd et al., "The Manchester prototype dataflow computer," CACM 1985.

24

24

冯诺依曼结构/模型

- 今天所有主要的*ISA*都遵循冯诺依曼结构
  - x86, ARM, MIPS, SPARC, Alpha, POWER
- 在微体系结构层面, 几乎所有的*具体实现（微体系结构）*都有很大的不同
  - 流水线执行: *Intel 80486 微架构*
  - 多指令并发: *Intel Pentium微架构*
  - 乱序执行: *Intel Pentium Pro微架构*
  - 指令和数据cache分离
- 但是，不管底层采用什么看上去与冯诺依曼模型不符的情况，都不会向上暴露给软件层面
  - ISA 和 微体系结构之间的区别

25

25

再来看什么是计算机体系结构?

- **现代的定义（ISA+实现）:**通过硬件组件的设计、选择、互连以及软硬件接口的设计来创造计算系统的科学与艺术，它使得创造出的计算系统能够满足功能、性能、能耗、成本以及其他特定的目标。
- **传统的定义(只有ISA) :** “体系结构这个术语用来描述程序员所观察到的系统属性，也就是那些不同于数据流和控制流的组织、逻辑设计以及物理实现的概念性的结构和功能性的行为。” *Gene Amdahl*, IBM Journal of R&D, April 1964

26

26

ISA vs. 微体系结构

- ISA
  - 约定软硬件之间的接口
  - 软件开发者需要了解以便编写及调试系统或用户程序
- 微体系结构
  - 某种ISA的一个特定实现
  - 对软件不可见
- 微处理器
  - **ISA, 微架构**, 电路
  - “Architecture” = ISA + microarchitecture

27

27

ISA vs. 微体系结构

- 哪些部分属于ISA 或者微体系结构?
  - 油门: “加速”的接口
  - 发动机内部: “加速”的具体实现
- 在满足ISA的规范前提下具体实现（微架构）可以是多种多样的
  - 加法指令vs. 加法器实现
    - 串行加法器、脉动进位加法器、超前进位加法器等都是微体系结构的一部分
  - x86 ISA 有很多种实现: 286, 386, 486, Pentium, Pentium Pro, Pentium 4, Core, …
- 微体系结构通常比ISA演变的快
  - 只有几种有限的 ISA (x86, ARM, SPARC, MIPS, Alpha) 但是有很多种微架构
  - *Why?*

28

28

ISA

- 指令
  - 操作码、寻址方式、数据类型
  - 指令类型和格式
  - 寄存器、状态码
- 存储（内存）
  - 地址空间、寻址能力、对齐
  - 虚存管理
- 调用, 中断/异常处理
- 访问控制，优先级/特权
- I/O: 内存映射vs. 指令
- 任务/线程管理
- 功耗和温度管理
- 多线程支持，多处理器支持

29

29

微体系结构

- ISA 在具体设计约束和目标之下的具体实现
- 任何在硬件上完成而没有暴露给软件的部分
  - 流水线
  - 指令按序或者乱序执行
  - 访存调度策略
  - 投机执行
  - 超标量处理 (多指令发射)
  - 时钟门控
  - 高速缓存：级数, 大小, 关联方式, 替换策略
  - 预取
  - 电压/频率调节
  - 差错修正

30

30

与两者都相关的属性

- 加法指令的操作码
- 通用寄存器的个数
- 寄存器堆的端口数
- 执行乘法指令需要几个周期
- 机器是否采用流水线指令执行
- ……

- 牢记
  - 微体系结构: ISA 在具体设计约束和目标之下的具体实现

31

31

设计要点（Design Point）

- 一组设计时需要考虑的重要问题
  - 将导致包括ISA和微架构方面的tradeoff
- 关注
  - 成本
  - 性能
  - 最大功耗限制
  - 能耗(电池寿命)
  - 可用性
  - 可靠性和正确性
  - 上市时间

- 设计要点由“问题”空间 (应用)或者面向的用户/市场决定

32

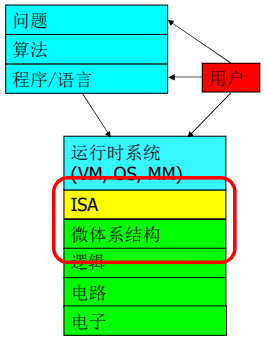
32

Tradeoff: 计算机体系结构的灵魂

- ISA层面的折衷
- 微体系结构层面的折衷
- 系统和任务层面的折衷
  - 如何分配软件和硬件应该承担的工作？
- *计算机体系结构是为满足设计点要求做出合适折衷的科学和艺术*

33

33



34

34