

# 计算机硬件技术基础

## 课程概况

- 课程是面向非电专业开设一门计算机公共基础课，可以作为专业基础课《计算机组成原理》的入门课程。本课程主要讨论计算机系统各部件的组成及内部工作原理。课程以冯·诺依曼计算机体系作为教学起点，介绍计算机的组织结构和工作原理，剖析计算机的运算器、存储器、控制器和输入输出设备的组成、工作方式及相互关系。
- 通过对本课程学习，学生将了解计算机各大部件的基本工作原理，了解计算机系统的层次化结构概念，理解硬件与软件直接的接口界面，建立起一个完整的计算机系统的整机概念。

2

## 课程学习方式

- 建议先修课程：程序设计语言
- 理论学习：30%（期末理论测试20%+研究报告10%）
- 实践学习：70%（每周实验项目）

3

## 章节

- 1 计算机系统组成概述——物理组成与逻辑组成
- 2 计算机系统的两大功能之一——运算
- 3 运算与控制的核心硬件——中央处理器
- 4 运算与控制的软件支持——处理器的指令系统与汇编程序
- 5 计算机系统上的存储器——向CPU提供巧妇之米
- 6 计算机中的数据传送方式——巧妇之米是如何运送的？
- 7 时序控制的重要保障——定时器计数器
- 8 计算机系统的外部接口——让数据进行长途旅行

4

## 1 计算机系统组成概述—— 物理组成与逻辑组成

5

## 计算机的发展概况

6

## 世界上第一台电子数字计算机

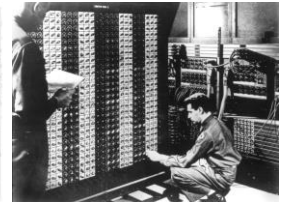
- ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Computer), 美国宾夕法尼亚大学1946年研制成功。
- 18000多个电子管, 1500多个继电器, 耗电150千瓦, 重30吨, 占地150平方米, 运算速度5000次/秒左右。
- 性能低, 耗费巨大, 但却是科学史上的一次划时代的创新, 奠定了电子计算机的基础, 宣告人类进入电子计算机时代。
- 开发团队“莫尔小组”由四位科学家和工程师埃克特、莫克利、戈尔斯坦、博克斯组成, 总工埃克特当时年仅24岁。



The ENIAC today



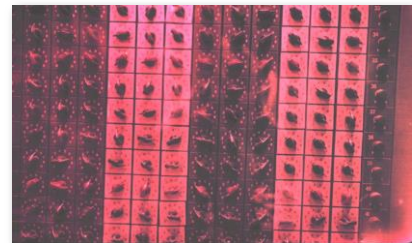
## ENIAC



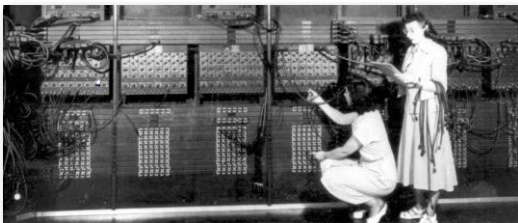
## Vacuum tube in ENIAC



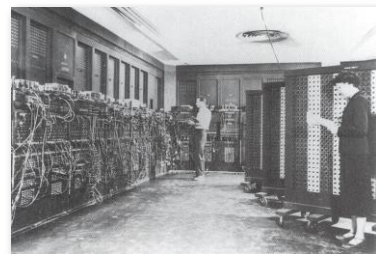
## Input Pannel



## ENIAC Programming

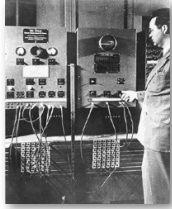


## Debug (线路检查)



### ENIAC的问题

- 十进制计算机
  - 每一位数由一圈共10个真空管表示
- 通过开关和插拔电缆进行手动编程
  - 输入程序和数据可能需要半天时间
- 能否将程序和数据存在存储器中?
- EDVAC
  - (Electronic Discrete Variable Automatic Computer)



### 现代电子计算机之父

- 1944~1945年间, 美籍匈牙利科学家冯·诺伊曼在第一台现代计算机ENIAC尚未问世时注意到其弱点, 并提出一个新机型EDVAC的设计方案, 提到了两个设想:
  - 采用二进制和“存储程序”, 现代计算机最主要思想,
- “现代电子计算机之父”, 冯·诺伊曼体系延续至今。
- 20世纪最重要的数学家之一, 因其在现代计算机、博弈论等领域的重大贡献成为美国科学院院士。



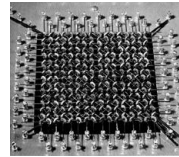
### 1946-1959 第一代电子管计算机时代

- UNIVAC 埃克特和莫克利
  - 第一个进行批量生产的计算机
  - 1951年, 电脑开始走出实验室服务于社会与公众
  - 1952年, UNIVAC因准确地预测美国总统大选结果
- EDVAC 冯诺依曼
  - 1950问世的第一台并行计算机EDVAC
  - 首次实现了冯·诺依曼的两个重要设想: 存储程序和采用二进制
- IBM 701
  - 1952年IBM 701在商战中击败UNIVAC
  - 使IBM实现了全面的转型, 奠定IBM产业霸主地位
  - 负责人杰里尔·哈达德 纳撒尼尔·罗切斯特 IEEE先驱奖



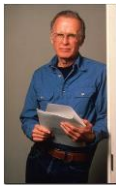
### 存储器的出现

- 1951年, 中国移民王安发明了磁芯存储器, IBM于1956年购买了这项技术专利。



### 高级语言的出现

- 1955年, IBM公司的巴克斯研制成功第一个高级程序语言FORTRAN, 它被广泛用于科学计算。



### 1959-1964 晶体管造就第二代计算机

- 1947年, 贝尔实验室肖克莱、巴丁、布拉顿发明点触型晶体管。
- 晶体管体积小、重量轻、寿命长、发热少、功耗低, 电子线路结构大大改观, 运算速度大幅提高。
- 肖克莱(左)、巴丁(中)、布拉顿(右)于1956年共同获得诺贝尔物理学奖。



### 1959-1964 晶体管造就第二代计算机



■ 1954年美国贝尔实验室于研制成功第一台使用晶体管的第二代计算机TRADIC。相比采用定点运算的第一代计算机，第二代计算机普遍增加了浮点运算，计算能力实现了一次飞跃。



■ IBM1958年制成的1401及后续的1410/1440系列计算机，是第二代计算机中的代表。

- 二代计算机除了用于科学计算，还逐渐被工商企业用来进行商务处理
- 高级语言FORTRAN和COBOL因此也得到了广泛应用。

### 1964-1970 第三代计算机

- 1958年，美国物理学家基尔比和诺伊斯同时发明集成电路。
- 集成电路的出现使得计算机脱胎换骨
- 2000 Nobel Prize



### 世纪豪赌 IBM S/360

- S/360极强的通用性适用于各方面的用户，它具有360度“全方位”的特点，因此得名。
- IBM投入了50亿美元的研发费用，远远超过制造原子弹的“曼哈顿计划”的20亿美元。

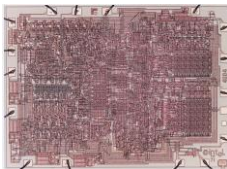


### 霍夫和Intel 4004

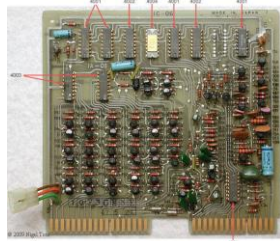
- 1971年1月，Intel公司的霍夫研制成功世界上第一块4位微处理器芯片Intel 4004，标志着第一代微处理器问世，微处理器和微机时代从此开始。
- 1971年11月，Intel推出MCS-4微型计算机系统其包括4001 ROM芯片、4002 RAM芯片、4003移位寄存器芯片和4004微处理器。



### Intel 4004



- 2300个晶体管，性能远超当年的ENIAC，售价200美元。



### 第一台微型计算机：Altair 8800



- 1975年4月，微仪器系统家用电子公司(Micro Instrumentation and Telemetry Systems, MITS)发布第一个通用型Altair 8800，售价375美元，带有1KB存储器。这是世界上第一台微型计算机。
- Altair定位在青年电脑迷市场。
- Paul Allen和Bill Gates在三周内为Altair开发出BASIC语言。不久之后，他们成立了自己的公司——Micro Soft，并将Altair BASIC作为他们第一款产品出售。MITS成为两个未来富翁的第一个客户。

<http://oldcomputers.net/>

Apple

- 1976年3月，Steve Wozniak和Steve Jobs开发出微型计算机Apple I，愚人节这天，两个Steve成立了Apple计算机公司。
- Apple II是第一个带有彩色图形的个人计算机，售价为1300美元。Apple II及其系列改进机型风靡一时，使Apple成为微型机时代最成功的计算机公司。



1981-PC元年

- 1980年7月，“跳棋计划”的13人小组秘密来到佛罗里达州波克罗斯顿镇的IBM研究发展中心，次年8月12日，IBM PC诞生。
- IBM将其命名为Personal Computer
- CPU为主频4.77MHz的Intel 8088
- OS: Microsoft MS-DOS



计算机发展历程

	第一代	第二代	第三代	第四代
年代	1946~	1958~	1965~	1971~
基础器件	电子管	晶体管	集成电路	超大规模集成电路
运算速度	几千~几万次/s	几万~几万次/s	几十万~几百万次/s	MIPS->GIPS->TIPS
存储器	水银延迟线 磁鼓、纸带、卡片	磁芯 磁盘、磁带	半导体 磁盘	半导体 磁盘
特征	机器语言 汇编语言	算法语言 FORTRAN、ALGOL-60、COBOL 操作系统	软件技术、 外设发展迅速 小型计算机	微型计算机 多机处理/网络化
应用范围	科学计算	科学计算、数据处理		

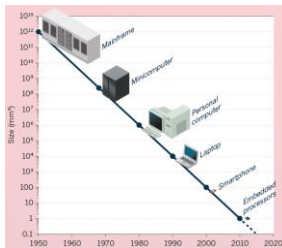
- 速度越来越快、体积越来越小、成本越来越低、功耗越来越低

1965年 Moore's Law

- 摩尔定律
  - 由英特尔（Intel）创始人之一戈登·摩尔（Gordon Moore）提出来的。其内容为：当价格不变时，集成电路上可容纳的晶体管数目，约每隔18个月便会增加一倍，性能也将提升一倍。
  - 这一定律揭示了信息技术进步的速度。

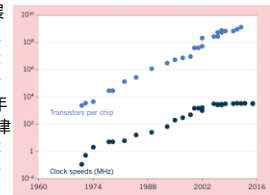


计算设备体积随着半导体工业发展呈指数式缩小



摩尔定律

- 摩尔定律已被集成电路40多年的发展历史准确无误地验证。近年来由于工艺和技术的发展，半导体工艺已接近集成电路极限，集成电路的发展开始逐渐偏离摩尔定律的预测，从2013年开始逐步放缓至3年翻一番，摩尔定律放缓已成了行业的共识。但这些都不能否定摩尔定律的深远影响和巨大贡献。



我国计算机技术的发展

- 1953年开始，1958年研究出第一台计算机103型通用计算机。
- 之后相继研究出了第二代，第三代计算机。
- 80年代研究出了每秒1亿次的巨型机，银河I,II,其他如曙光天眼
- 1985年6月，中国第一台自行研制的微机长城0520研制成功
  - 广告词：“一台我们自己制造的能够处理中文的电脑”。

中国计算机发展史

41

高性能计算机的发展

- 1983年，国防科技大学成功研制的“银河-I”巨型计算机，运算速度达1亿次/秒，标志着我国具备了研制高端计算机系统的能力。
- 后续的发展情况、技术发展经历哪几个阶段？
- 高性能计算，并行计算上已紧跟国际先进水平，是继美国、日本之后的第三大超级计算机的生产国。但计算机的核心部件CPU技术还远远落后。
- 2002年，中科院研究开发的龙芯一号 / GODSON I



国产CPU的崛起之路

42

国产高性能计算机

- 天河1号**：天河1号是中国国防科技大学研制的超级计算机系统，部署在天津，使用中国自主研发的龙芯芯片，曾在2009年全球超级计算机榜单中获得冠军。
- KD-50-I**：这是中国首台国产万亿次高性能计算机，采用龙芯2F芯片，标志着中国在高性能计算机国产化方面的重要突破。
- 神威太湖之光**：神威太湖之光主要用于医疗研究和自然灾害预防等方面，是国家并行计算机工程技术研究中心研制的超级计算机。
- 天河2号**：天河2号是由国防科技大学研制的超级计算机系统，曾在2014年全球超级计算机榜单中获得冠军，速度比第二名快一倍多。

中国高性能计算机发展史

43

我国芯片发展处于一个什么水平？

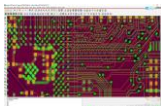
- 在集成电路设计方面**。中国大陆的集成电路设计业超越中国台湾地区，成为全球第二大设计业聚集地，其销售额占全球43.21%。不过，我们设计的产品多为中低档芯片。
- 在制造方面**。到2019年，中国拥有4英寸以上集成电路生产线199条，其中，8英寸生产线有35条；12英寸生产线有28条(全球共121条)。在快闪存储器等一些关键技术，已达到国际先进水平，但产量和产能与市场需求相比，尚有较大差距。
- 在封装方面**。中国企业可以排到世界前10的第3、第6和第7位
- 在设备方面**。部分刻蚀机、大部分离子注入机、扩散、氧化和清洗设备都可以由国产设备供给。

参见：大国竞争「院士谈谈：我国芯片“卡脖子”卡在哪里」

44

芯片“卡脖子”主要“卡”在哪里？

- 目前在大陆市场所用的芯片中，超过70%为国外产品。
- “卡脖子”主要“卡”在两个地方：
  - EDA软件，就是电子设计自动化软件；
  - 材料和设备，特别是极紫外光刻机，主要用于制造微电子芯片、半导体器件等
    - 光刻技术是半导体制造中的核心技术之一，它决定了芯片的最小线宽和集成度，对于提升芯片性能至关重要。
- 这也是美国对中国集成电路产业的打压中，握有的两个“杀手锏”。



芯片“卡脖子”主要“卡”在哪里？

45

芯片“卡脖子”主要“卡”在哪里？

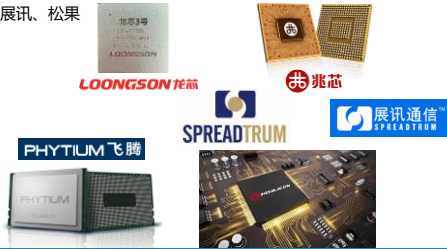
- 武汉光电国家研究中心甘棕松团队通过2束激光，在自研的光刻胶上，光刻出最小9nm线宽的线段，实现了光刻机材料、软件和零部件的三大国产化。
- 全球光刻机市场呈现出寡头垄断的格局，主要由荷兰ASML、日本Nikon和Canon等少数几家企业主导。其中，ASML市场份额占比高达82.1%。其High NA EUV（高数值孔径极紫外光刻机）已被用于开发2nm以下的芯片制程。

46



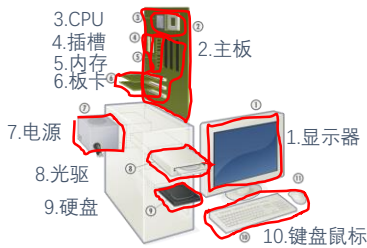
国产芯片现状

- 龙芯、飞腾、申威、兆芯、海光
- 海思、展讯、松果

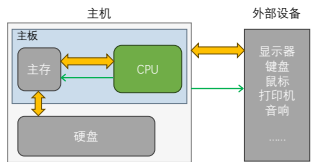


计算机系统的物理组成及特点

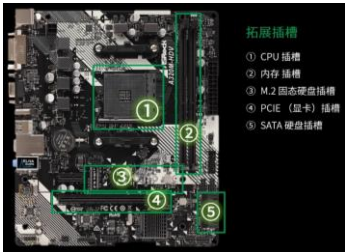
微机的主要部件



微机的组成



主板



主板接口



## 微处理器CPU的发展简史

生产年份	Intel 产品	主要性能说明
1971	4004	第1片4位CPU, 2300个晶体管
1972	8008	第1片8位CPU, 3500个晶体管
1978	8086	第1片16位CPU, 2.9万个晶体管
1982	80286	16位, 13.4万个晶体管
1985	80386	第1片32位CPU, 27.5万个晶体管
1989	80486	32位, 120万个晶体管
1993	Pentium	32位, 310万个晶体管
1995	Pentium Pro	32位, 550万个晶体管

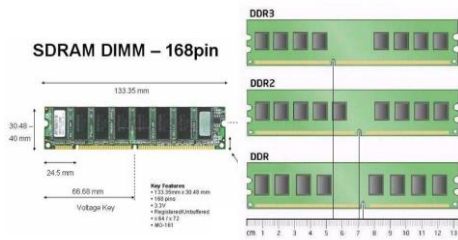
更多資料：<http://zh.wikipedia.org/wiki/英特尔微处理器列表>

## 微处理器CPU的发展简史

生产年份	Intel 产品	主要性能说明
1997	Pentium II	32位, 750万个晶体管, 频率750MHz
1999	Pentium III	32位, 950万个晶体管, 频率
2000	Pentium 4	4200万个晶体管, 频率达2GHz
2005	Pentium D	首个内带两个处理器核心
2006	Core 2 Duo	32/64位兼容CPU, 2.91亿个晶体管
2008-2010	Core i3	64位CPU, 高达5亿个晶体管
	Core i5	
	Core i7	
	第4代Core i*	64位CPU, 大于7亿个晶体管
2013	第4代Core i*	
2017	Core i9	
2021	第12代Core i9	内核数最多达到16核, 最大频率达到5.1GHz, 缓存30M Intel 智能缓存, 二级缓存14MB, 支持最大内存达到128G
2024	Core Ultra 200V系列	新一代AI PC处理器, 主要应用于轻薄本, X86有史以来最具性价比的处理器

## 内存

- SDRAM
- DDR
- DDR2
- DDR3
- DDR4
- DDR5



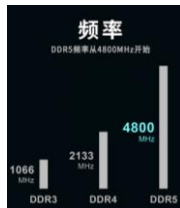
## 内存

- SDRAM
- DDR
- DDR2
- DDR3
- DDR4
- DDR5



## 内存

- SDRAM
- DDR
- DDR2
- DDR3
- DDR4
- DDR5



## 显示器



阴极射线管显示器



LCD液晶显示器



LED液晶显示器



### 固态硬盘 VS 磁性硬盘



读写速度快; 防震抗摔; 低功耗; 无噪音; 工作温度范围大; 轻便

53

### 移动存储

- SD卡/Micro SD(TF)卡
- 移动硬盘
- U盘



55

### 显卡

- AGP显卡
- PCI-E显卡



57

### 光驱

- ROM光驱
- 刻录光驱



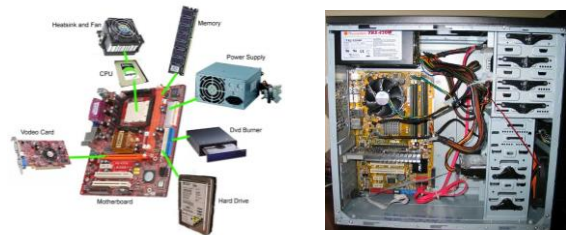
59

### 更多外部设备

- 打印机
- 扫描仪
- 手写板
- 音箱
- 耳麦
- .....

58

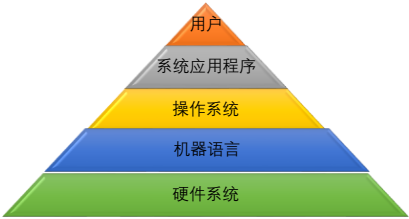
### 基本组装



59

计算机系统的逻辑组成及特点

计算机系统的层次结构



冯·诺依曼

现代电子计算机之父

- 美籍匈牙利数学家
- 1926年，获匈牙利布达佩斯大学数学博士学位(22岁)
- 1931年，普林斯顿大学终身教授(28岁)
- 1933年，转入普林斯顿高等研究院
- 1951~1953年，美国数学学会主席

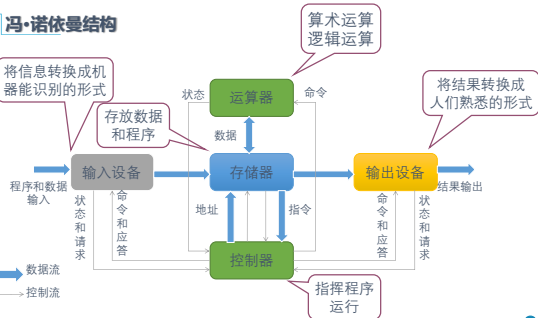


约翰·冯·诺依曼  
John von Neumann  
1903-1957

冯·诺依曼结构

- 计算机应由**运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备**共5个部分组成
- 存储程序原理：
  - 数据和程序均以二进制代码形式不加区别地存放在存储器中，存放位置由存储器地址指定
  - 计算机在工作时能够自动地从存储器中取出指令并执行

冯·诺依曼结构



运算器

- 运算器是执行运算功能的装置
  - 算术运算 (如加、减、乘、除等)
  - 逻辑运算 (如与、或、非等)
- 运算器主要部件是CPU内部的算术逻辑单元及相应的寄存器，同时还保存反映运算结果的状态

|| 控制器

- 控制器负责计算机各部件之间的协调控制，通常由下面几部分组成：
  - 指令寄存器
  - 程序指针寄存器
  - 指令译码部件
  - 控制电路

|| 存储器

- 存储器是用来保存二进制信息的部件
  - 按字节为单元进行组织管理，每个字节占用一个存储单元，每个存储单元有唯一的地址。
  - 存储器中存放的可以是数据信息，也可以是指令信息



|| 输入设备

- 用来输入数据和程序的装置，其功能是将外界的信息转换成计算机能识别的形式并传送到计算机内部



|| 输出设备

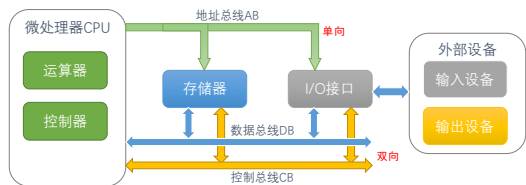
- 用来输出数据和程序的装置，其功能是将计算机内的数据和程序转换成人们所需要的形式并传送到计算机外部



|| 系统总线

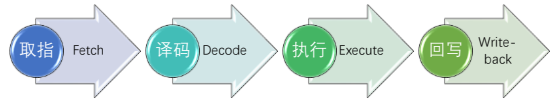
- 总线 (Bus) 是计算机各种功能部件之间传送信息的公共通信干线
  - 地址总线 (Address Bus, AB)
  - 数据总线 (Data Bus, DB)
  - 控制总线 (Control Bus, CB)

|| 系统总线



计算机程序的执行过程

指令执行过程



计算机系统的主要性能指标

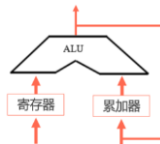
性能指标

- 对于计算机系统的性能评价主要包括两个指标：非时间指标和时间指标。

非时间指标

(1) 机器字长：指机器一次能处理的二进制位数。

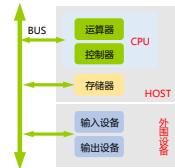
- 由加法器、寄存器的位数决定
- 一般与内部寄存器的位数相等
- 字长越长，表示数据范围越大
- 目前常见的有32位和64位字长



非时间指标

(2) 总线宽度：数据总线一次能并行传送的最大信息的位数。

- 一般指CPU与存储器之间的数据总线位数
- 有些计算机内部与外部数据总线宽度不一致
- Pentium外总线64位，内总线32位（两条32位流水线）



## 非时间指标

### (3) 主存容量

- 主存容量：是指一台计算机主存所包含的存储单元总数。

B 1B = 8bit  
 K 1K = 1024B  
 M 1M = 1024K = 1024 × 1024B  
 G 1G = 1024M = 1024 × 1024 × 1024B  
 T 1T = 1024G = 1024 × 1024 × 1024 × 1024B  
 P 1P = 1024T = 1024 × 1024 × 1024 × 1024 × 1024B

- 地址总线宽度决定了CPU可以访问的物理地址空间
  - 30根, 1G
  - 32根, ?

## 时间指标

### (1) 时钟周期T

- 计算机中最基本、最小的时间单位
- 一个时钟周期内, CPU仅完成一个最基本的动作
- 是时钟频率f的倒数
  - $f = 1/T$ 
    - $f = 100\text{MHz}, T = 10\text{ns}$
    - $f = 1\text{GHz}$

## 时间指标

### (2) CPI (Clock cycles per Instruction)

- 单条指令的CPI、一段程序中所有指令的CPI、指令系统CPI等

- 单条指令的CPI：即执行一条指令所需要的平均时钟周期数 (T的个数)
- 一段程序中所有指令的CPI
  - 程序中所有指令的时钟周期数之和/程序指令总数
  - $= \sum (\text{程序中各类指令的CPI} \times \text{程序中该指令的比例})$

$$CPI = \frac{m}{IC} \quad CPI = \sum_{i=1}^n (CPI_i \times P_i) = \sum_{i=1}^n (CPI_i \times \frac{IC_i}{IC})$$

## 时间指标

### (3) MIPS (Million Instructions Per Second) 每秒钟CPU能执行的指令总条数 (单位: 百万条/秒)

- MIPS
  - 指令条数 ÷ (执行时间 × 10<sup>6</sup>)
  - 指令条数 ÷ { (所有指令CPU时钟周期数之和 × 10<sup>6</sup>) ÷ f }
  - $= f \div (CPI \times 10^6)$

## 时间指标

### (4) MFLOPS

- 计算机每秒钟执行浮点操作的次数
- MIPS: 单位时间内执行的指令条数
- MFLOPS = 程序中的浮点运算次数 / (执行时间 × 10<sup>6</sup>)

MFLOPS (Mega) = 10<sup>6</sup> FLOPS    GFLOPS (Giga) = 10<sup>9</sup> FLOPS  
 TFLOPS (Tera) = 10<sup>12</sup> FLOPS    PFLOPS (Peta) = 10<sup>15</sup> FLOPS

## 时间指标

### (5) CPU时间

- 执行一段程序所需的时间。
  - CPU时间 + I/O时间 + 存储访问时间 + 各类排队时延等
- CPU时间
  - 程序中所有指令的时钟周期数之和 × T
  - 程序中所有时钟周期数之和 / f
  - 总指令数量IC × CPI × T

【例】 用一台40MHz处理器执行标准测试程序，程序所含的混合指令数和每类指令的CPI如表所示，求有效CPI、MIPS速率和程序的执行时间。

指令类型	整数运算	数据传送	浮点操作	控制传送
指令数	45000	32000	15000	8000
CPI	1	2	2	2

【解】：总指令数为： 45000+32000+15000+8000=100000条  
各类指令所占的比例分别是：  
整数运算为45%，数据传送为32%，浮点操作为15%，控制传送为8%。  
有效CPI、MIPS速率和程序的执行时间分别计算如下：  
(1) 有效CPI为  
 $1 \times 0.45 + 2 \times 0.32 + 2 \times 0.15 + 2 \times 0.08 = 1.55 \text{ CPI}$   
(2) MIPS速率为  
 $40 \times 10^6 / (1.55 \times 10^9) \approx 25.8 \text{ MIPS}$   
(3) 程序的执行时间为  
 $100000 \times 1.55 / (40 \times 10^6) \approx 0.003875 \text{ s}$

计算机性能指标

硬件或软件指标	影响什么	如何影响
算法	CPI、MIPS、CPU时间	影响指令数量和指令类型
编程语言	CPI、MIPS、CPU时间	指令数量和指令类型
编译程序	CPI、MIPS、CPU时间	影响指令数量和指令类型
指令集体系结构	f/T、CPI、MIPS、CPU时间	全面影响

练习

■ 假设一台计算机主频为1GHz，在其上运行由 $2 \times 10^6$ 条指令组成的目标代码，程序主要由4类指令组成，他们所占的比例和各自的CPI如下表所示，求程序的CPI和MIPS，求程序执行时间？

指令类型	CPI	指令混合比例
算术和逻辑	1	60%
Load/Store	2	18%
转移	4	12%
Cache缺失访问	8	10%

例子

■ 假设一台计算机主频为1GHz，在其上运行由 $2 \times 10^6$ 条指令组成的目标代码，程序主要由4类指令组成，他们所占的比例和各自的CPI如下表所示，求程序的CPI和MIPS，求程序执行时间？

指令类型	CPI	指令混合比例
算术和逻辑	1	60%
Load/Store	2	18%
转移	4	12%
Cache缺失访问	8	10%

$$\begin{aligned} \text{CPI} &= 1 \times 60\% + 2 \times 18\% + 4 \times 12\% + 8 \times 10\% = 2.24 \\ \text{MIPS} &= f / \text{CPI} \times 10^6 = 1 \times 10^9 / 2.24 \times 10^6 = 446.4 \\ \text{CPU时间} &= 2 \times 10^6 \times \text{CPI} / f = (2 \times 10^6 \times 2.24 / 10^9) = 4.48 \times 10^{-4} \text{ (秒)} \\ \text{CPU时间} &= 1 \text{C} / \text{MIPS} \times 10^6 = 2 \times 10^5 / 446.44 \times 10^6 = 4.48 \times 10^{-4} \text{ (秒)} \end{aligned}$$