

计算机组成与结构

课程内容:

计算机组成原理、计算机系统结构、微机原理与接口技术

主要参考书:

李伯成, 计算机组成与设计, 清华大学出版社

王爱英, 计算机组成与结构, 清华大学出版社

Stallings W, 计算机组织与结构—性能设计, 清华大学出版社

王爱英, 计算机组成与结构课程辅导, 清华大学出版社

课程: 计算机组成与结构I、计算机组成与结构II

考核: 考试成绩、平时成绩(作业、测试、到课、……)

课程内容:

- 1、绪论
- 2、计算机中的数据表示
- 3、运算方法与运算器
- 4、指令系统与汇编语言
- 5、处理器（CPU）设计
- 6、流水线技术
- 7、存储系统
- 8、输入输出系统
- 9、多机系统

计算机组成与结构 I

计算机组成与结构 II

为什么设置该课程？

作为软件工程专业，本课程是对各种计算机（主要指硬件系统）进行深入理解的最佳课程。能够使我们比较深入的了解作为复杂电子设备工作的基本原理和思想。使机盖内的秘密不再神秘。

IEEE（美国电气电子工程师学会）的计算机学会与ACM（美国计算机协会）共同组织的Joint Task Force on Computing Curricula制定了新世纪第一个计算机课程大纲，这被称为IEEE/ACM Computer Curricula 2001，此大纲将计算机体系结构列为必修的核心课程之一，并在有关报告中指出：

计算机的核心是计算。非此，今天的大多数计算机学科将只是理论数学的分支，对于当今任何计算机领域的专业人员而言，不应当把计算机看成魔术般执行程序的黑匣子，应要求所有的计算机专业学生对计算机系统功能部件，它们的特征、性能，以及之间的相互作用有某种程度的理解和评估。

当然，这里也有实践的关联性。学生需要理解计算机体系结构，以便更好地编制程序使其能在实际机器上高效运行，在选择欲使用的系统时，他们应能理解各种部件间的权衡考虑，如时钟速率与内存的大小。

第1章 绪论

一、计算机的发展

从古至今，人类的计算工具在不断的进步中

- 十个手指
- 算盘
- 计算尺、手摇计算机。

“布尔代数” ----- 现代计算机的理论基础

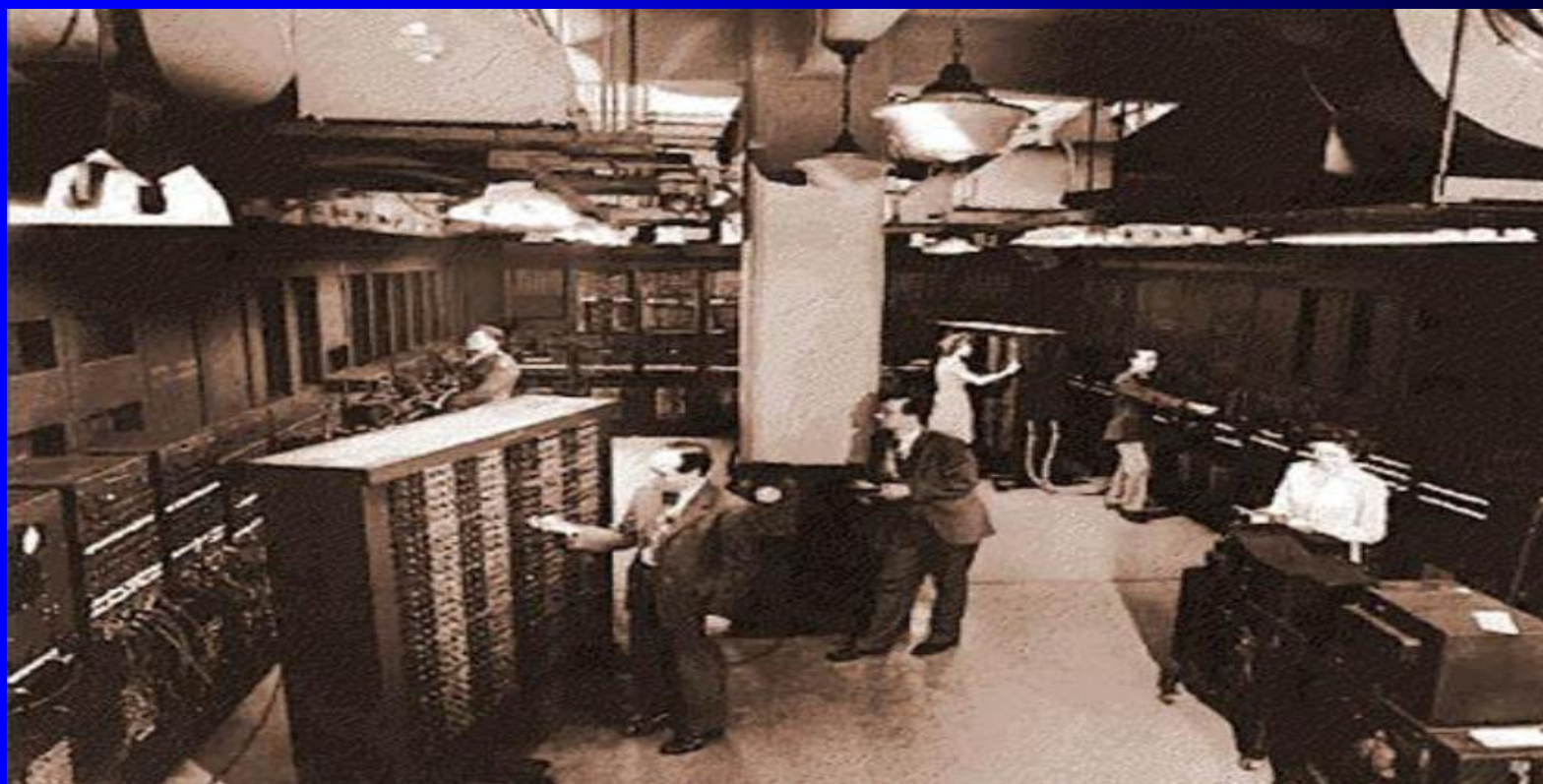
“双稳态触发器” ----- 现代计算机的物质基础

1946年，美国终于发明了一台被称为 **ENIAC** (Electronic Numerical Integrator and Computer) 的电子数字积分和计算机。

1946年6月，Von Neumann提出了以二进制，程序存储和程序控制为核心的思想，奠定了当代**电子数字计算机**体系结构的基础。

- 第1代—电子管计算机

第1代计算机从1946年到1954年。这一代计算机是由电子管、电磁继电器等器件构成。软件主要使用机器语言编程。典型机器有ENIAC、IBM 701等。



- **第2代—晶体管计算机**

第2代计算机所在年代为**1955年到1964年**。这一代计算机采用晶体管、磁芯存储器等构成。软件上有了监控程序对计算机进行管理，并且开始使用高级语言。这个时期的计算机有很多种，如**IBM 7030、Univac LARC**等。

- **第3代—集成电路计算机**

从**1965年到1974年**。这代计算机利用小规模及中规模集成电路芯片，多层印刷电路板及磁芯存储器等构成。在软件上，高级语言迅速发展并出现了分时操作系统。在这个时期里，计算机的应用领域不断扩展，开始向国民经济各部门及军事领域渗透。典型机器如**IBM 360、370，DEC PDP - 8**等等。

- **第4代—超大规模集成电路计算机**

从1975年到1990年出现第4代计算机，特点是：大规模、超大规模集成电路构成，主存也是由超大规模集成电路构成的半导体存储器来实现。典型的计算机有：IBM 3090，VAX 9000，PC机、苹果机等。

软件有如DOS、Windows、Unix等。

- **第5代—高性能智能计算机**

从1991年开始，进入了计算机发展的第5代，采用超大规模、超高速集成电路构成计算机。在结构上，构成计算机已从单处理器向多处理器发展。即使构成微型机也采用多核处理器，目前常见的是4核处理器和8核处理器。用这样的多核处理器构成计算机可获得很高的性能。

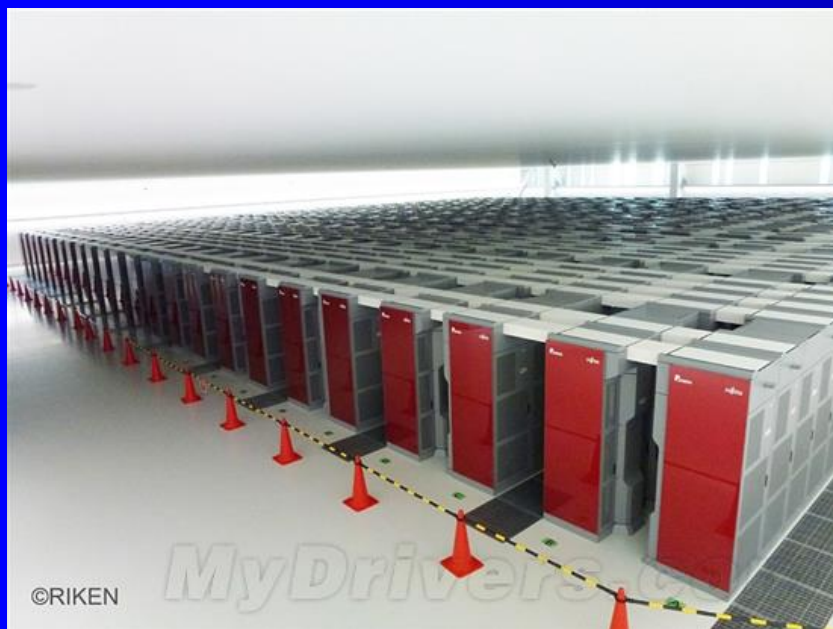
2010年11月14日，国际TOP500组织在网站上公布了最新全球超级计算机500强排行榜，经过技术升级的中国“天河一号”二期系统（天河-1A）取代了美国橡树岭国家实验室的“美洲虎”超级计算机(1750万亿次)，实测运算速度达到每秒2570万亿次，成为目前世界上运算速度最快的超级计算机。

目前，我国拥有“天河一号”和“曙光星云”(1270万亿次)两台千万亿次超级计算机系统。



2011年6月20日，国际TOP500组织在网站上公布了最新全球超级计算机500强排行榜，日本超级计算机“京”（K computer）以每秒8162万亿次的实测运算速度跻身榜首，中国的“天河一号”排名降至第二。

2011年11月3日，日本RIKEN高级计算科学研究院(AICS)、富士通今天联合宣布，世界上最快的超级计算机“京”（K Computer）已经成功提速，Linpack测试的最大计算性能达到了10.51PFlops，也就是每秒钟1.051亿亿次浮点计算，这也是人类首次跨越1亿亿次计算大关。



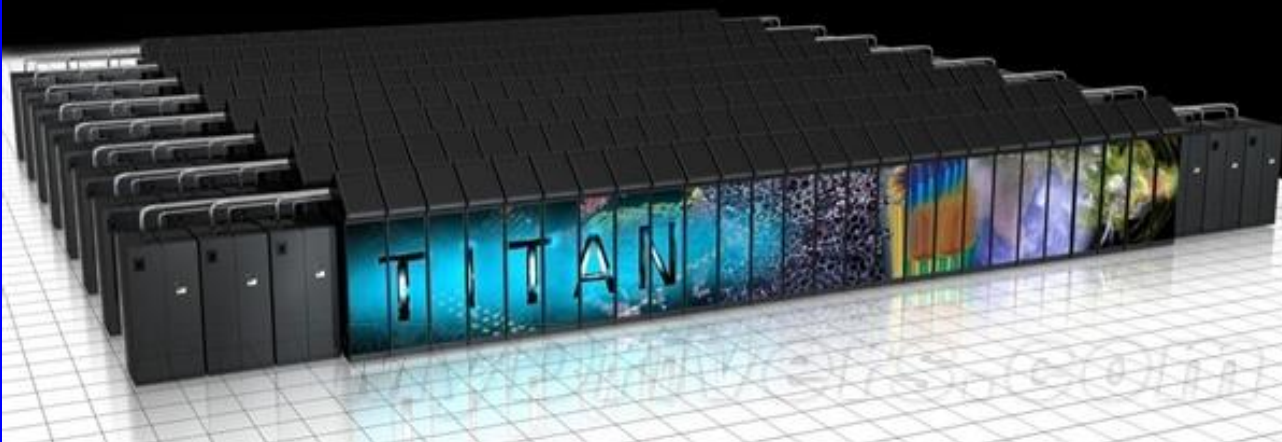
美国能源部2012年11月12日发表声明宣布，在国际TOP500组织当天公布的全球超级计算机500强排行榜上，该部下属橡树岭国家实验室的“泰坦”以每秒17.59千万亿次的实测运算速度登上榜首。

美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室的“红杉”、日本理化研究所的“京”、阿尔贡国家实验室的“米拉”、德国于利希研究中心的JUQUEEN分列第二至第五位。

中国“天河-1A”曾在2010年名列榜首，此次已降至第八的位置。

World's #1 Open Science Supercomputer

Flagship accelerated computing system | 200-cabinet Cray XK7 supercomputer |
18,688 nodes (AMD 16-core Opteron + NVIDIA Tesla K20 GPU) |
CPUs/GPUs working together – GPU accelerates | 20+ Petaflops



北京时间**2013年6月17日**，世界超级计算机**TOP500**组织正式发布了第**41**届世界超级计算机**500**强排名榜，国防科技大学研制的天河二号超级计算机，以峰值计算速度每秒**5.49**亿亿次、持续计算速度每秒**3.386**亿亿次双精度浮点运算的优异性能位居榜首。

第二名至第五名依次为美国“泰坦”、美国“红杉”、日本“京”和美国“米拉”超级计算机。

中国超级计算机继天河一号之后，第二次登上了世界第一的宝座。天河二号成为当今世界运算速度最快、综合技术领先的超级计算机，中国超级计算机研制水平继续处于世界领先行列。

2013年至2015年，六届**TOP500**榜单上“天河二号”一直名列榜首。



天河二号占地面积**720**平方米，内存总容量**1400**万亿字节，存储总容量**12400**万亿字节，最大运行功耗**17.8**兆瓦。相比此前排名世界第一的美国“泰坦”超级计算机，天河二号计算速度是“泰坦”的**2**倍。

2016年6月20日，第47届全球超级计算机TOP500榜单出炉，中国“神威太湖之光”是新的全球第一快系统，采用新的系统，完全采用中国设计和制造的处理器研制而成，LINPACK基准测试测得其运行速度达到每秒 **93千万亿次浮点运算**（93 petaflop/s）。第二至第五名依次为中国“天河二号”、美国“泰坦”、美国“泰坦”、美国“红杉”、日本“京”超级计算机。

2017年11月13日，最新一期全球超级计算机TOP500榜公布，中国“双星”之下，第三至第十名依次是瑞士“代恩特峰”、日本“晓光”、美国“泰坦”，第六至第十名依次是：美国的“红杉”、升级版“三一”与“科里”，日本的“Oakforest-PACS”与“京”。

2016年至2017年，四届TOP500榜单上“神威太湖之光”名列榜首。



神威太湖之光拥有
10649600个计算核心，
包括**40960**个节点，速
度比“天河二号”快**2**倍，
效率更是其**3**倍，“天河
二号”的**LINPACK**性能
是每秒**33.86**千万亿次浮
点运算。

2018年11月，最新一期全球超级计算机TOP500榜公布，第一、二名是美国的“Summit”、“Sierra”，第三、四名是中国的“神威太湖之光”、“天河二号”，第四至第十名依次是国瑞士“代恩特峰”、美国“Trinity、日本“ABCI”、德国“SuperMUC-NG”、美国“泰坦”，美国的“红杉”。

Summit 是IBM和美国能源部橡树岭国家实验室（ORNL）推出的新超级计算机，CPU+GPU异构体系，共4608个节点（每个节点2个IBM Power 9 22核处理器及6个Telsa V100 GPU卡）总的内存容量超过10PB，存储系统容量高达250PB，带宽2.5TB/s。



Summit 峰值速度
200.795 PFlops 要比
神威·太湖之光快 60%，
比同在橡树岭实验室的
Titan要快接近 8 倍。除
CPU外，， 27488块英
伟达 **Tesla V100 GPU**
提供了 95% 的算力。

2019年11月，新一期全球超级计算机TOP500榜公布，美国的Summit保持着超级计算机榜单之首，中国的神威太湖之光和天河2号分别位列第3、第4位，在数量上中国上榜超算达到了228个居首位，而美国则为117台，但性能上，美国上榜超算的性能占榜单性能的37.8%，而中国超算只占到31.9%。

排名	名字	制造商	国家	年份	Rmax [TFlop/s]	Rpeak [TFlop/s]
1	Summit	IBM	美国	2018	148600	200794.88
2	Sierra	IBM / NVIDIA / Mellanox	美国	2018	94640	125712
3	Sunway TaihuLight	NRCPC	中国	2016	93014.59388	125435.904
4	Tianhe-2A	NUDT	中国	2018	61444.5	100678.664
5	Frontera	Dell EMC	美国	2019	23516.4	38745.907
6	Piz Daint	Cray/HPE	瑞士	2017	21230	27154.3
7	Trinity	Cray/HPE	美国	2017	20158.7	41461.15
8	AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI)	Fujitsu	日本	2018	19880	32576.63488
9	SuperMUC-NG	Lenovo	德国	2018	19476.6	26873.856
10	Lassen	IBM / NVIDIA / Mellanox	美国	2018	18200	23047.2

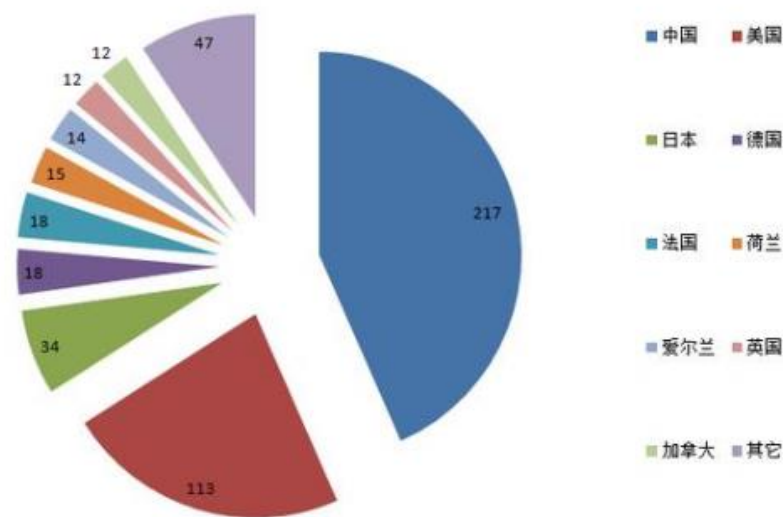
2020年11月发布TOP500计算机

- ✓ NO.1 日本Fugaku（富岳）超级计算机
每秒运算44.2亿亿次（44201 TFlop/s）
- ✓ NO.2 美国Summit（顶点）超级计算机
每秒运算14.86亿亿次（14860 TFlop/s）
- ✓ NO.3 美国Sierra（山脊）超级计算机
每秒运算9.464亿亿次（94640 TFlop/s）
- ✓ NO.4 中国“神威太湖之光”超级计算机
每秒运算9.3亿亿次（93015 TFlop/s）
- ✓ NO.5 美国Selene（超级计算）
每秒运算6.35亿亿次（63460 TFlop/s）
- ✓ NO.6 中国“天河二号”超级计算机
每秒运算6.15亿亿次（61445 TFlop/s）



©RIKEN

2020年11月TOP500国家分布统计图（数量）



摩尔定律（课后阅读）

- 集成电路芯片的集成度每18个月翻一番。

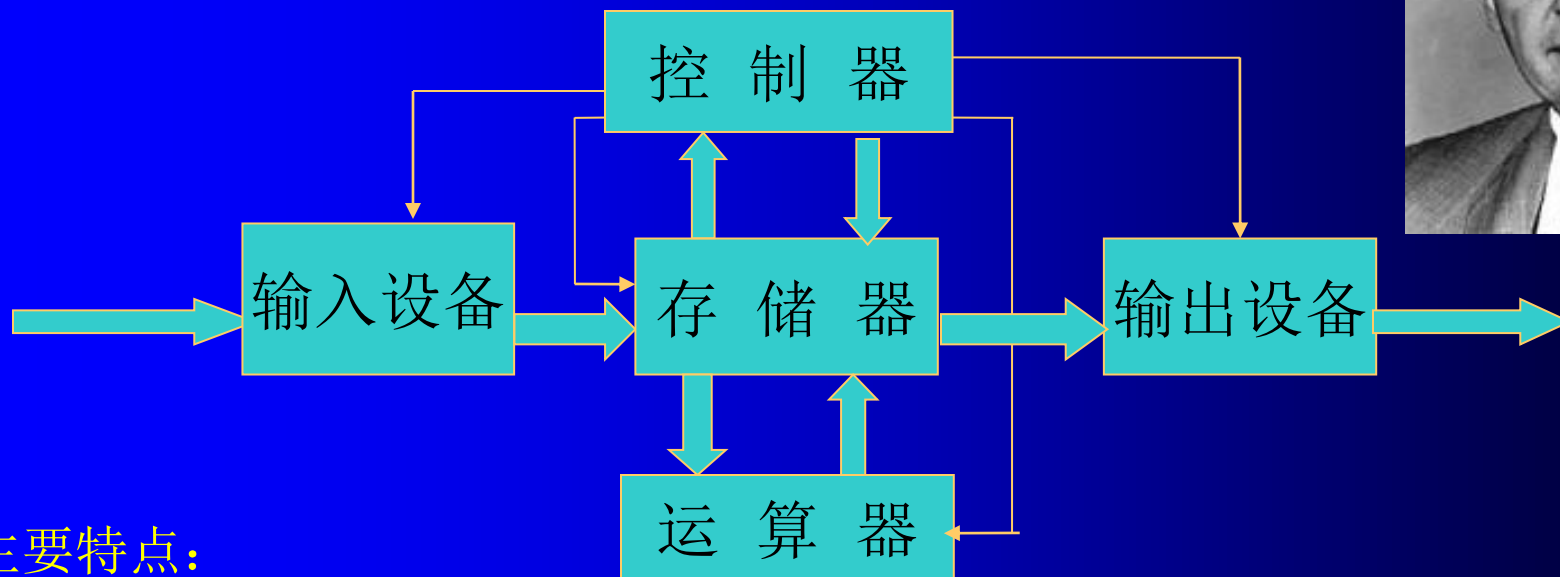
Gordon E. Moore, Intel公司的创始人之一



- 摩尔定律并不是一个物理定律，而是一种预言
- 鞭策工业界不断地改进，并努力去实现它，从根本上讲摩尔定律是一种自我激励的机制，

二、计算机的基本组成

1、Von Neumann计算机的硬件基本组成：



主要特点：

- 二进制

数据表示及运算采用二进制，指令及其他非数值信息也以二进制表示。

- 存储程序控制 ---- 存储程序、程序控制

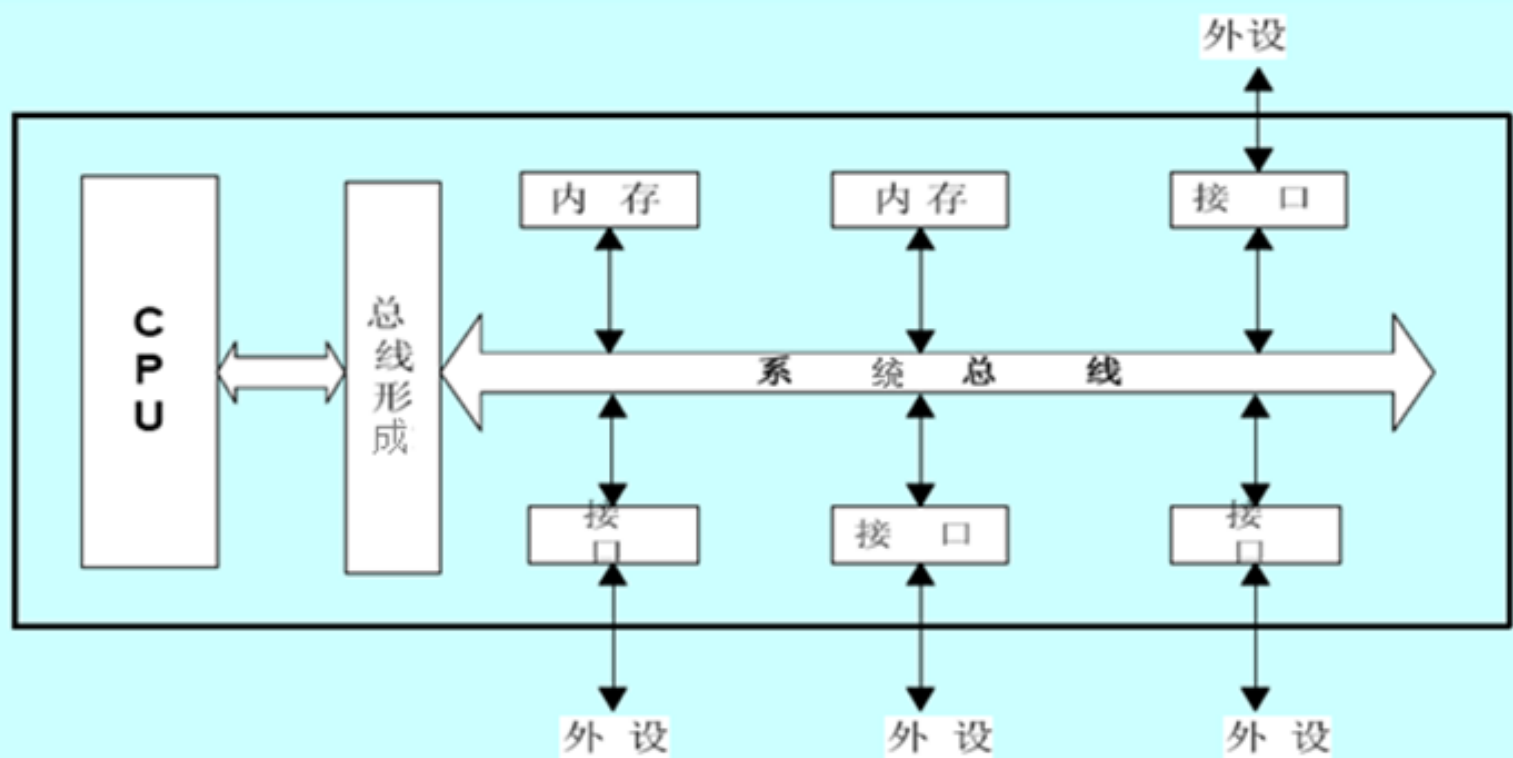
- 建立数学模型，分解为解题步骤 ---- 指令、程序；
- 存储程序 ---- 为计算机连续自动地工作奠定了基础。
- 程序控制 ---- 取出指令并执行

Von Neumann机:

采用Von Neumann体系结构的计算机

- Von Neumann 机的硬件固定，不同的运算功能依靠预先放在存储器中的程序来实现，这是存储程序控制的基本原理，也是区别与其他运算工具的关键。
- 70多年来，计算机体系结构的发展过程，是在冯·诺依曼结构的基础上，围绕如何提高速度、扩大存储容量、降低成本、提高系统可靠性和方便用户使用为目的，不断采用新器件和研制新软件的过程。

总线连接的计算机：PC机的结构（课后阅读）



2、计算机的软件 -- 不同于一般电子设备的本质所在

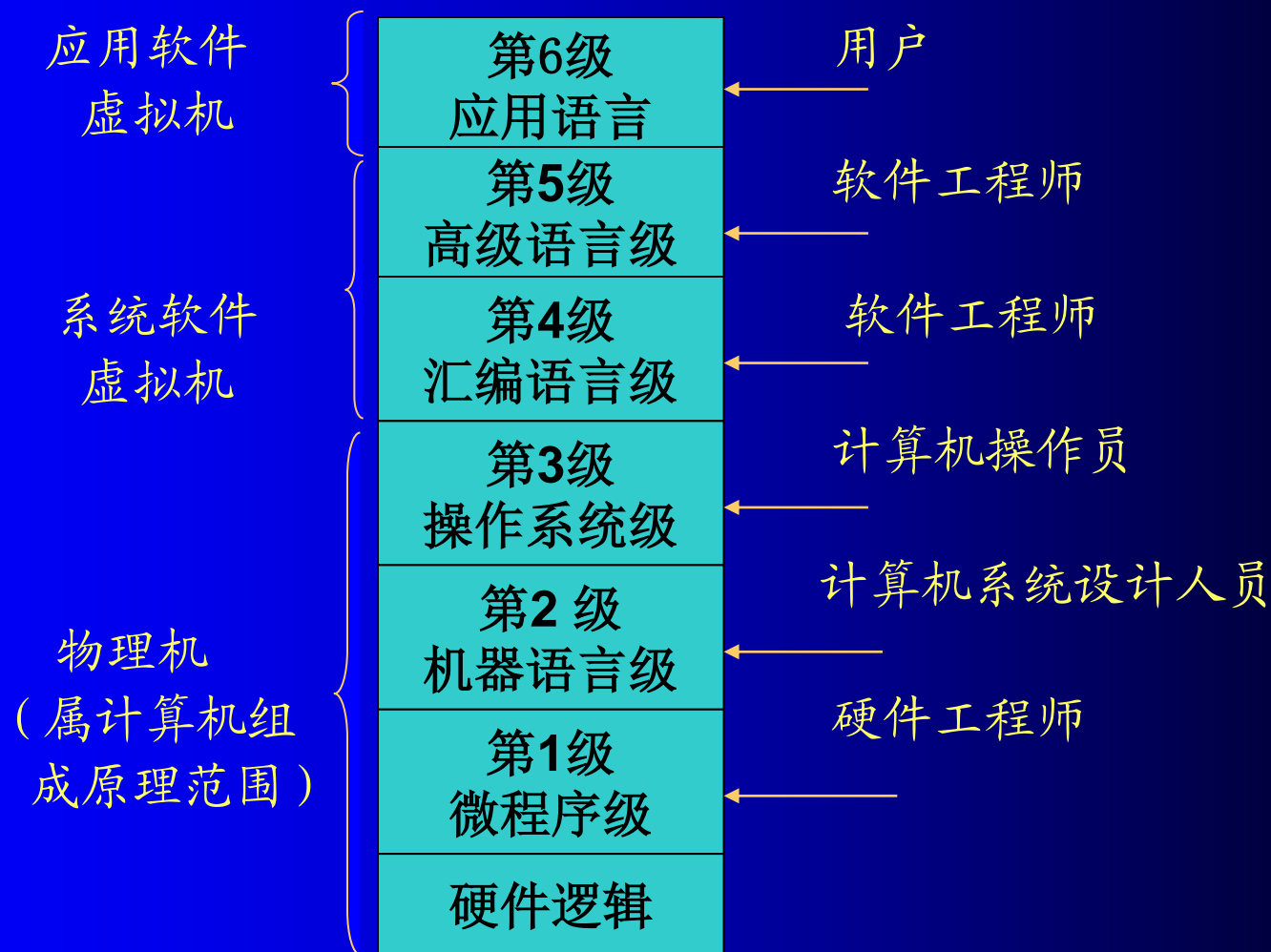
- 计算机语言

机器语言、汇编语言、高级语言

- 软件分类

系统软件、应用软件、中间件

三、计算机系统的层次结构



- ◇ 虚拟机
- ◇ 软件与硬件的逻辑等价性

四、计算机的分类

按规模和功能分类：

巨型机、大型机、中型机、小型机、微机、单片机

按用途分类：

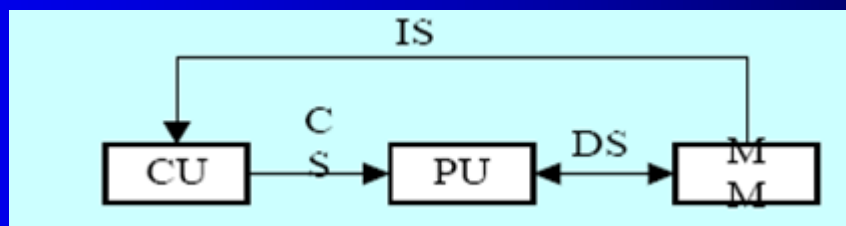
通用机（如：PC机）、专用机（如：嵌入式计算机）

按信息处理的特性分类：费林（FLYNN）分类法

1. 单指令流单数据流计算机SISD
2. 单指令流多数据流计算机SIMD
3. 多指令流单数据流计算机MISD
4. 多指令流多数据流计算机MIMD

◇ 本课程主要学习 SISD，是其它类型计算机系统的基础。

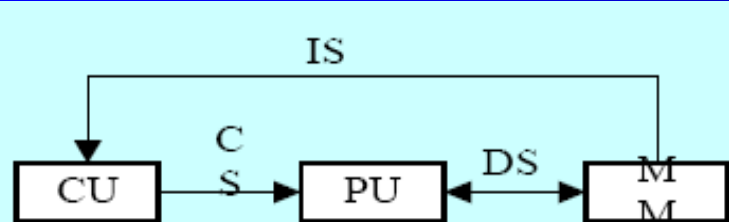
Flynn分类法是按照计算机在执行程序的过程中信息流的特征进行分类的。



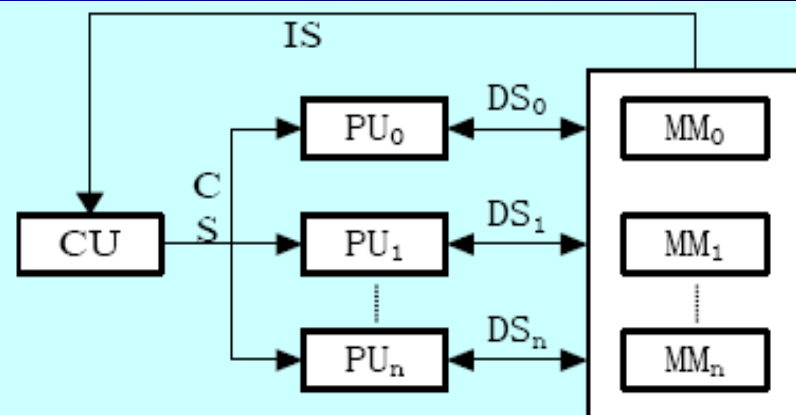
指令流 (IS) —— 机器执行的指令序列，它由存储器流入控制单元 (CU)；

控制流 (CS) —— 指令流进入CU，由CU产生一系列的控制流 (信号)，在控制流的控制下完成指令的功能。

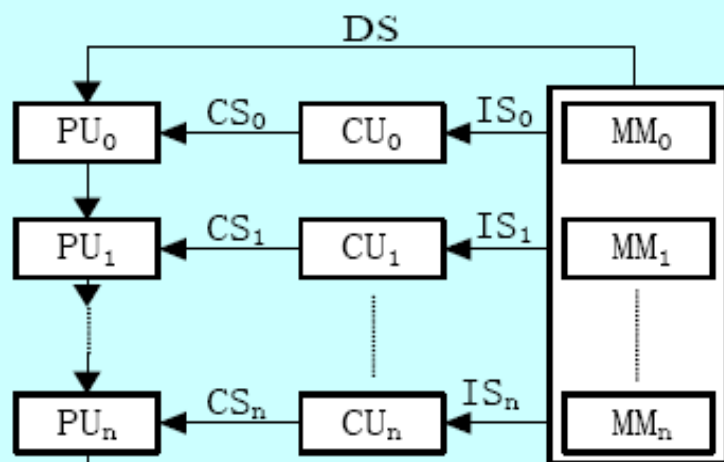
数据流 (DS) —— 由指令流所使用的数据，包括输入数据、中间数据和结果。数据在处理单元 (PU) 中进行处理。



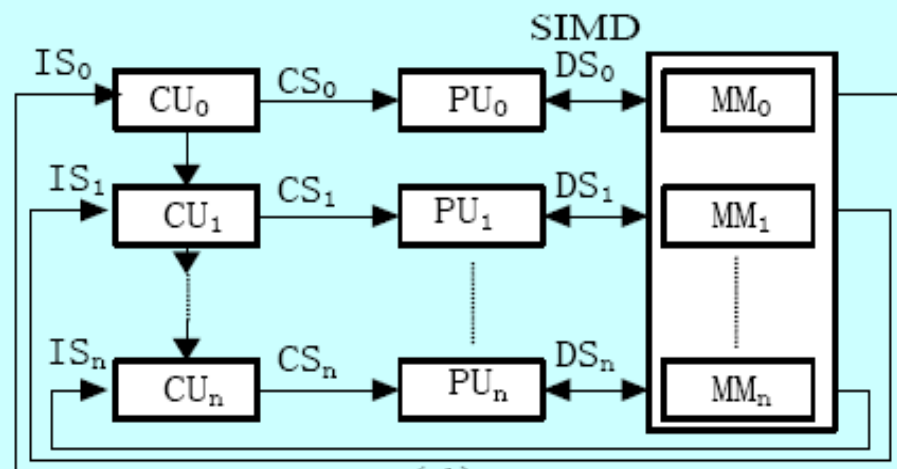
(a) SISD



(b)



(c)
MISD



(d)
MIMD

CU: 控制单元 PU: 处理单元 MM: 主存储器 IS: 指令流 CS: 控制流

五、计算机的性能描述（课后学习）

计算机的性能指标

- 每秒钟执行指令的百万条数**MIPS**
- 每秒钟执行浮点数的百万次操作的数量**MFLOPS**
- 吞吐量
- 响应时间
- **CPU**时间
- 处理器数量

每秒钟执行指令的百万条数 MIPS

用计算机平均每秒钟能执行多少百万条指令来衡量计算机的性能，对于一个给定的程序，其定义如式所示：

$$\text{MIPS} = \frac{\text{指令条数}}{\text{执行时间} \times 10^6}$$

可见：

- ✓ 计算机执行指令的速度愈快，其MIPS 就愈大
- ✓ 一计算机执行不同的程序（指令），可能会得到不同的MIPS。

每秒钟执行浮点数的百万次操作的数量 MFLOPS

另一种描述计算机性能的指标就是每秒钟执行浮点数的百万次操作的数量MFLOPS，其定义如式所示：

$$\text{MFLOPS} = \frac{\text{浮点操作次数}}{\text{执行时间} \times 10^6}$$

可见：

- ✓ 用来描述计算机执行浮点操作的能力
- ✓ 一计算机执行不同的程序（指令），可能会得到不同的MFLOPS。

基准测试程序

- **TPC-C**: 对系统在线处理事务的能力进行评价。以每分钟处理新订单个数(tpmC为单位)。
- **TPC-H**: 对系统在线数据库资料的查询能力进行评价。以每小时完成查询的数量。
- **SPEC web2005**: 用于评价系统同时响应http连接的最大数量。
- **SPEC jApp Server2004**: 用于评价系统基于java平台每秒钟所完成的java操作的最大数量。
- **SPEC CPU2000**: 用于对特定程序包执行时的评估。
- **Linpack**: 在每秒钟内, 利用高斯消元法求解一元N次线性方程组的次数来评价系统的性能。
- **HPCC**: 利用双精度矩阵乘法、傅立叶变换、并行矩阵转置等七个子项全面评价系统的性能。
- **SAP SD**: 测试系统的响应时间及每小时完成的定单数, 用以衡量系统同时执行应用程序及数据库的能力。

● Amdahl定律

$$\begin{aligned}\text{加速比} &= \frac{\text{改进后的系统性能}}{\text{改进前的系统性能}} \\ &= \frac{\text{改进前的系统总执行时间}}{\text{改进后的系统总执行时间}}\end{aligned}\quad (1-1)$$

计算机比改进之前快了多少倍，即加速比。计算机系统的加速比取决于下面两个因素：

- 可改进部分在原系统总执行时间中所占的比，称为可改进比例，用 f_e 表示。例如，程序的总执行时间为100s，可改进的部分是其中的20s，则 $f_e = 0.2$ 。可见， f_e 总是小于或等1的。
- 可改进部分改进后性能提高的程度，通常用部件加速比 r_e 来表示某部件改进后性能提高的比例。

- 假设改进前的系统总执行时间为 T_0 ，可以得出改进后的系统总执行时间 T_n 为：

$$T_n = T_0(1 - f_e + \frac{f_e}{r_e}) \quad (1-2)$$

若加速比用 S_p 表示，根据(1-1)和(1-2)，则加速比 S_p 可表示为：

$$S_p = \frac{1}{(1 - f_e) + \frac{f_e}{r_e}} \quad (1-3)$$

- 式(1-3)中， $(1 - f_e)$ 为不可改进的部分，当可改进部分为0时，那没有可改进的了，则系统的加速比 S_p 就是1。随着可改进部分的增加(f_e 加大)和改进效果的提高(r_e 增加)，系统的加速比 S_p 就会增加。当系统可改进的部分 f_e 确定后，即使这一部分改进后不再需要时间，即 $r_e \rightarrow \infty$ ，则 $S_p = 1 / (1 - f_e)$ 。从而可见，系统性能的改善受可改进部分 f_e 的限制。

- **例1.1** 某计算机系统的某一部件的处理时间为总处理时间的40%，该部件改进后部件加速比为10，试计算改进后系统的加速比 S_p 为多少。

- **解：**由上述题意可知， $f_e = 0.4$ ， $r_e = 10$ ，则

$$S_p = 1 / [(1 - 0.4) + 0.4/10] \approx 1.56$$

由计算可见，即使某一部件的部件加速比已达10倍，但该部件仅影响到总执行时间的小部分，对整个计算机系统的贡献是有限的。所以，改进后系统的加速比只有1.5倍左右。

- **例1.2** 若计算机系统有三个部件a、b、c是可改进的，它们的部件加速比分别为**30**、**30**、**20**。它们在总执行时间中所占的比例分别是**30 %**、**30 %**、**20 %**。试计算这三部件同时改进后系统的加速比。
- **解：**多个部件可同时改进的情况下，**Amdahl**定律可表示为：

$$S_p = \frac{1}{(1 - \sum f_e) + \sum \frac{f_e}{r_e}} \quad (1-4)$$

将已知条件代入式（1-4），计算出 **$S_p \approx 4.35$**

本章作业

第2、10、13题