



计算机体系结构

主讲人：韩银和

中国科学院计算技术研究所智能计算机中心
中国科学院大学杭州高等研究院智能科技学院
2023年9月11日

讲义摘录自：胡伟武、汪文祥老师在国科大雁栖湖校区教授的课程

计算机专业的几门“当家”课

- 我们的研究生应该知道：

如何“造”计算机而不仅是如何“用”计算机

- 硬件（CPU）：
 - 计算机组成原理
 - 计算机体系结构
- 软件（OS）：
 - 操作系统
 - 编译原理

我国IT产业发展不平衡

- 我国IT产业应用发达，基础薄弱
- 应用：微信、电商、搜索、电子政务等
- 基础：CPU、操作系统、数据库
- “好比在别人的墙基上砌房子，再大再漂亮也可能经不起风雨，甚至会不堪一击”

全球市值最高的互联网公司排名（2019-11）

排名	公司	雇员	市值（单位：十亿美金\$ B)	总公司	成立时间
1	亚马逊	647,500	\$972.34	美国 西雅图	1994年
2	谷歌	103,549	\$791.01	美国 山顶风光	1998年
5	脸书	25,105	\$575.43	美国 门洛公园	2004年
6	腾讯	44,796	\$434.66	中国 深圳	1998年
4	阿里巴巴	66,421	\$432.12	中国 杭州	1999年
7	网飞	5,400	\$140.45	美国 洛斯加托斯	1997年
15	美国奥多比系统公司	21,200	\$131.80	美国 圣荷西	1982年
12	Salesforce	29,000	\$120.66	美国 旧金山	1999年
8	paypal	21,800	\$100.40	美国 圣荷西	1998年
9	缤客	22,900	\$92.94	美国 康乃狄克州	1996年
10	百度	45,887	\$88.11	中国 北京	2000年
17	字节跳动	10,000	\$78.00	中国 北京	2012年

2020财富世界500强:互联网公司7家上榜 其中中国占4家



2020/08/11 07:18 中国通信第一门户网站飞象网

《财富》官方App于北京时间2020年8月10日与全球同步发布了最新的《财富》世界500强排行榜。

今年上榜的互联网相关公司共有7家，分别是美国的亚马逊、Alphabet公司、Facebook公司，以及来自中国有4家，包括京东集团、阿里巴巴集团、腾讯控股有限公司和小米集团。这些中美互联网大公司的排名较去年均有提升。其中排名提升幅度最大的是阿里巴巴，上升50位。

值得注意的是，京东最靠前列102位，阿里巴巴132位，腾讯197位。



我国IT产业发展不平衡

- 我国IT产业应用发达，基础薄弱
- 应用：微信、电商、搜索、电子政务等
- 基础：CPU、操作系统、数据库
- “好比在别人的墙基上砌房子，再大再漂亮也可能经不起风雨，甚至会不堪一击”

核心芯片/基础软件		主导厂家	主导国家	自给率
服务器、超算	CPU	英特尔、AMD、ARM	美国、英国	0%
	GPU	英伟达、AMD	美国	0%
	存储芯片	三星、美光、海力士	韩国、美国	<5%
	人工智能芯片	英伟达、Google、寒武纪	美国、中国	-
通讯	DSP	TI、博通、CEVA	美国	0%
	基带芯片	高通、博通、华为	美国、中国	22%
	FPGA	Xilinx、Intel	美国	0%
操作系统		微软、Google	美国	0%

核心技术受制于人

我国IT产业人才严重失衡

- 应用型人才充足，基础型人才匮乏
 - Java及JavaScript编程工程师数以百万计，Java/JS虚拟机人才不到百人
 - 熟悉内核的工程师是BAT等网络企业两百万以上年薪猎聘对象
 - 用现成的IP“攒”SOC的人才不缺，设计CPU、GPU等核心IP人才奇缺
- IT教学主要基于国外平台，不熟悉自主平台
 - 中小学信息化教育实际上是“微软培训班”
 - 大学计算机专业主要教学生“用”计算机，而不是“造”计算机
- 研究生教育注重培养写论文的人才，缺少工程能力的培养
 - 积极参与国际学术会议，但缺席国际工程会议（如Java虚拟机）
 - 像Java虚拟机国际会议参会人员多在四、五十岁，有20年以上工程经验

能力一旦丧失，再建起来非常困难

- 前苏联在乌克兰的尼古拉耶夫造船厂
 - 前苏联解体时，比“库兹涅佐夫海军元帅号”更先进的“乌里扬诺夫斯克号” 航母大合拢已近尾声，一家挪威公司提出乌克兰制造6艘船舶，但指定要在乌 里扬诺夫斯克号的0号船台，一家美国钢铁公司提出500美元一吨高价收购该航 母的建造用钢并交了定金。等乌里扬诺夫斯克号拆解完毕，两家公司同时违约
- 运十下马
 - 运十下马原因很多，但要和麦道合作，组装麦道飞机需要使用运十占用的工厂 也是重要原因。《财富》杂志：“因为上海搞过运十，我们才与上海合作，如 果不扳倒运十，美国飞机就不好打进中国”。有 关部门制定的大飞机三步走策 略落空：第一步，中美合作组装MD80/90；第二步，中外合作研制AE100，2005 年服役；第三步，自行设计制造180座飞机，2010年实现
- 恢复能力需要三十年以上：工程能力只能在实践中多轮试错才能形成
 - 我国八十年代还能自主设计计算机，现在从小学到大学都在教如何用计算机

课程介绍

- 对计算机CPU的认识
- 本课程的目的
- 本课程内容和要求

什么是CPU

- 一个6岁小孩的答案
 - CPU就是在一张纸上画一些方块，
 - 然后用线和箭头把这些方块连起来，
 - 再写上几个字，涂上点颜色，
 - 最后一烧，烧出一个亮晶晶的小方块
- 我们比她多知道些什么？

本课程内容和要求

- 就从我按下键盘翻一页幻灯片讲起
 - 为什么我按一下键盘能够翻一页幻灯片？
 - 从按一下键盘到翻一页幻灯片经过了什么过程？包括应用程序、操作系统、硬件系统、处理器、以及晶体管？
 - 程序的运行和芯片中的电子的流动之间的关系？
 - 在上述过程中涉及的重要量化指标（性能、功耗、成本）的关系？
- 这些是本课程希望回答的问题
 - 知其然，还要知其所以然

上知天文、下知地理

- 计算机系统结构的位置
 - 居于系统软件和逻辑电路之间
- 计算机体系结构的演变
 - 1950-60年代: Computer Arithmetic
 - 1970-80年代: Instruction Set Architecture
 - 1990年代后: CPU, Memory, I/O, Multiprocessors……
- 从界限清晰到界限不清晰
 - ISA: RISC、CISC=>Transmeta、Itanium、虚拟机
 - 逻辑和电路: 晶体管=>晶体管+连线

应用、操作系统、编译系统 计算
机系统结构（性能、价格、功耗）
逻辑设计、电路设计、工艺制造

国科大《计算机体系结构》课程设置

- 本科《计算机体系结构基础》：主要强调基础性和系统性
 - 作为软硬件界面的指令系统结构，包含CPU、GPU、南北桥协同的计算机硬件结构，CPU的微结构，并行处理结构，计算机性能分析等五部分主要内容。
- 硕士《计算机体系结构》：主要介绍CPU微结构
 - 包括指令系统结构、二进制和逻辑电路、静态流水线、动态流水线、多发射流水线、运算部件、转移猜测、高速缓存、TLB、多核对流水线的影响等
- 博士《高级计算机体系结构》：主要强调实践性
 - 通过设计真实的（而不是简化的）CPU，运行真实的（而不是简化的）操作系统，对结构设计、物理设计、操作系统做到融会贯通

系列课程的特点

- 一是系统性，体系是“系统的系统”，很难就体系结构本身讲体系结构，需要做到对体系结构、基础软件、电路和器件的融汇贯通。
- 二是基础性，计算机体系结构千变万化，但几十年发展下来沉淀下来的原理性的东西不多，希望从体系结构快速发展的很多现象中找出一些内在的本质的东西。
- 三是实践性，计算机体系结构是实践性很强的学科，要设计在“硅”上运行而不是在“纸”上运行的体系结构。因此课程作业和实验强调实践性。

什么是计算机体系结构

- 计算机体系结构（Computer Architecture）是描述计算机各组成部分及其相互关系的一组规则和方法，是程序员所看到的计算机属性。
 - 计算机体系结构主要研究内容包括指令系统结构（Instruction Set Architecture，简称ISA）和计算机组织结构（Computer Organization）。
 - 微体系结构（Micro-architecture）是微处理器的组织结构，并行体系结构是并行计算机的组织结构。
 - 冯诺依曼结构的存储程序和指令驱动执行原理是现代计算机体系结构的基础。

计算机体系结构的表现方式

- 计算机体系结构可以有不同层次和形式的表现方式。
 - 计算机体系结构通常用指令系统手册和结构框图来表示，结构框图中的方块表示计算机的功能模块，线条和箭头表示指令和数据在功能模块中的流动，结构框图可以不断分解一直到门级或晶体管级。
 - 计算机体系结构也可以用高级语言如C语言来表示，形成结构模拟器，用于性能评估和分析。
 - 用硬件描述语言（如Verilog）描述的体系结构可以通过电子设计自动化（Electronic Design Automation，简称EDA）工具进行功能验证和性能分析，转换成门级及晶体管级网表，并通过布局布线最终转换成版图，用于芯片制造。

本科《计算机体系结构基础》主要内容

- 第一部分：引言（第1章）
 - 体系结构研究内容、主要性能指标、发展趋势以及设计原则
- 第二部分：作为软硬件界面的指令系统结构（第2-4章）
 - 指令反映了结构设计者对应用和基础软件的深刻理解，不仅仅是操作编码
 - 指令系统结构、特权态指令系统结构、软硬件协同
- 第三部分：CPU、GPU、南北桥协同的硬件结构（5-7章）
 - 冯诺依曼结构的具体体现，CPU、GPU、内存、IO之间是如何协同的
 - 计算机硬件结构、计算机接口及总线、计算机系统上电启动过程
- 第四部分：CPU的微结构（第8-9章）
 - 建立指令系统和晶体管之间的“桥梁”，硕士课程的重点内容
 - 运算器设计、指令流水线（控制器设计）
- 第五部分：并行处理结构（第10-11章）
 - 现代计算机通过多层次的并行性开发来提高性能
 - 应用程序的并行行为、多核处理器

硕士《计算机体系结构》主要内容

- 第一部分：计算机体系结构基础

- 01、计算机系统结构基础
- 02、二进制与逻辑电路
- 03、指令系统结构

- 第二部分：指令流水线

- 04、静态流水线
- 05、动态流水线
- 06、多发射与动态调度

- 第三部分：重要功能模块

- 07、功能部件设计
- 08、转移及转移猜测
- 09、CACHE及存储层次
- 10、存储管理

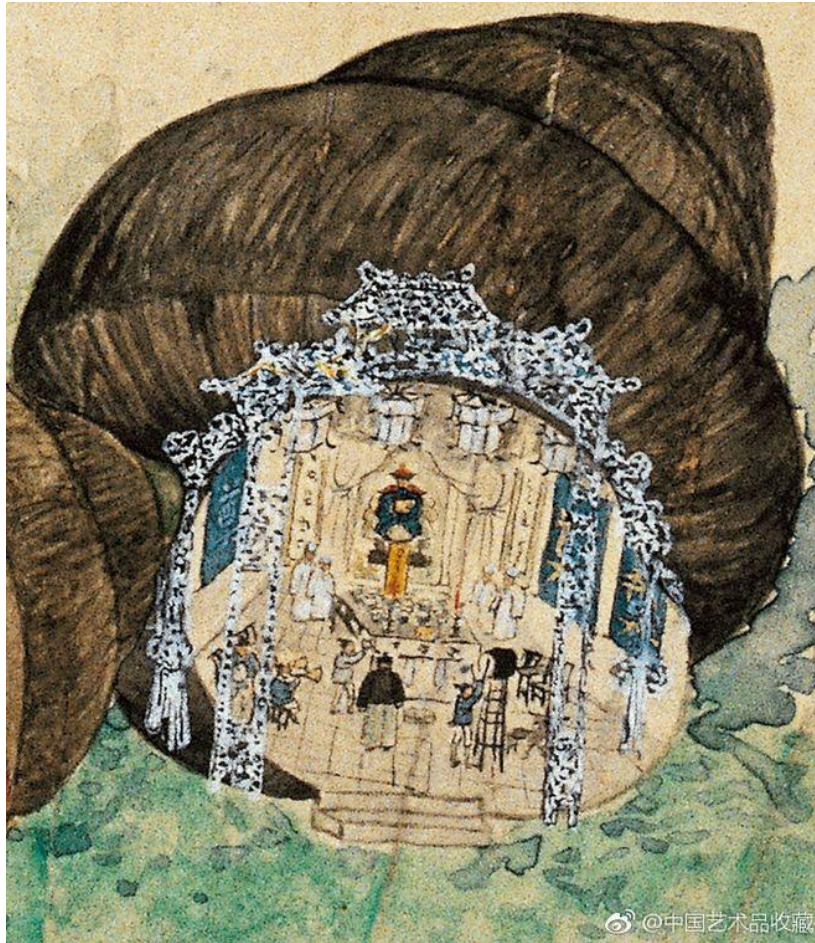
- 第四部分：多核结构

- 11、多处理器结构与并行处理

- 第五部分：实践是最好的课堂

- 12、介绍龙芯10个设计失误

硕士 《计算机体系结构》



“螺丝壳里做道场”

授课老师组



韩银和 研究员

中科院计算所
智能计算机中心



胡瑜 研究员

中科院计算所
智能计算机中心



杨建国 副研究员

中科院微电子所
之江实验室

辅导老师和实践项目

- 辅导老师
 - 闵丰，中国科学院计算技术研究所
- **志愿组队：**设计一个32位、多级流水、多发射的处理器，和C语言软件栈

教材与参考书

- 教材

- 《计算机体系结构》（第二版）：清华大学出版社

- 参考书

- 《计算机体系结构基础》（第二版）：机械工业出版社
- 《MIPS设计透视》：北航出版社
- 《数字集成电路——设计透视》：清华大学出版社

计算机体系结构的研究内容

(一) 什么是计算机

- 现代信息系统
 - PC、服务器、高性能计算机……
 - 防火墙、交换机、打印机……
- 数字化生活
 - 手机、数码相机、数字电视……
- 武器装备
 - 舰船、飞机、坦克、导弹控制系统……

什么是计算机---现代信息系统

超级服务器



防火墙



服务器



打印机扫描仪

交换机

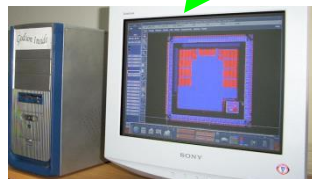


路由器



Internet

终端设备



工作站



什么是计算机---数字化生活



什么是计算机---武器装备



高性能计算应用举例

- 核武器数值模拟：全面核禁试条约签订后，核武器的数值模拟成为唯一可能进行的全系统试验。美国为了满足核武器库管理的需求，需要每秒运算 10^{16-17} 次的计算机。



智能化的趋势与计算机的普及

- 智能化：把通用计算机技术应用于特定领域
 - 智能手机
 - 智能电视
 - 智能电网
 -
- 物联网：把通用计算机技术应用于控制类终端

（二）一以贯之

- 为什么我按一下键盘能够翻一页幻灯片？
- 应用程序（PowerPoint）、操作系统（Windows）、以CPU为核心的硬件系统、晶体管是怎么协同工作的？
- 在上述过程中涉及的重要量化指标（性能、功耗、成本）的关系？

PPT翻页的硬件过程

- 以龙芯处理器为例
 - 键盘产生一个信号送到桥片（南桥、北桥）
 - 桥片通过HT总线向处理器发出外部中断信号
 - 外部中断信号传到控制寄存器模块与Cause的屏蔽位相与
 - 如果没有被屏蔽，再传到寄存器重命名模块并附在四条指令的第一条中送到ROB模块；由于该指令发生了例外，不会送到功能部件执行
 - 当该指令成为ROB的第一条指令被提交时向所有模块发出取消信号，取消该指令后面的所有指令，在EPC等寄存器中保存例外现场，同时在控制寄存器Status中把系统状态置为核心态。
 - 向取指模块发出中断信号，取指模块根据中断类型到0x80000180取指

PPT翻页的软件过程

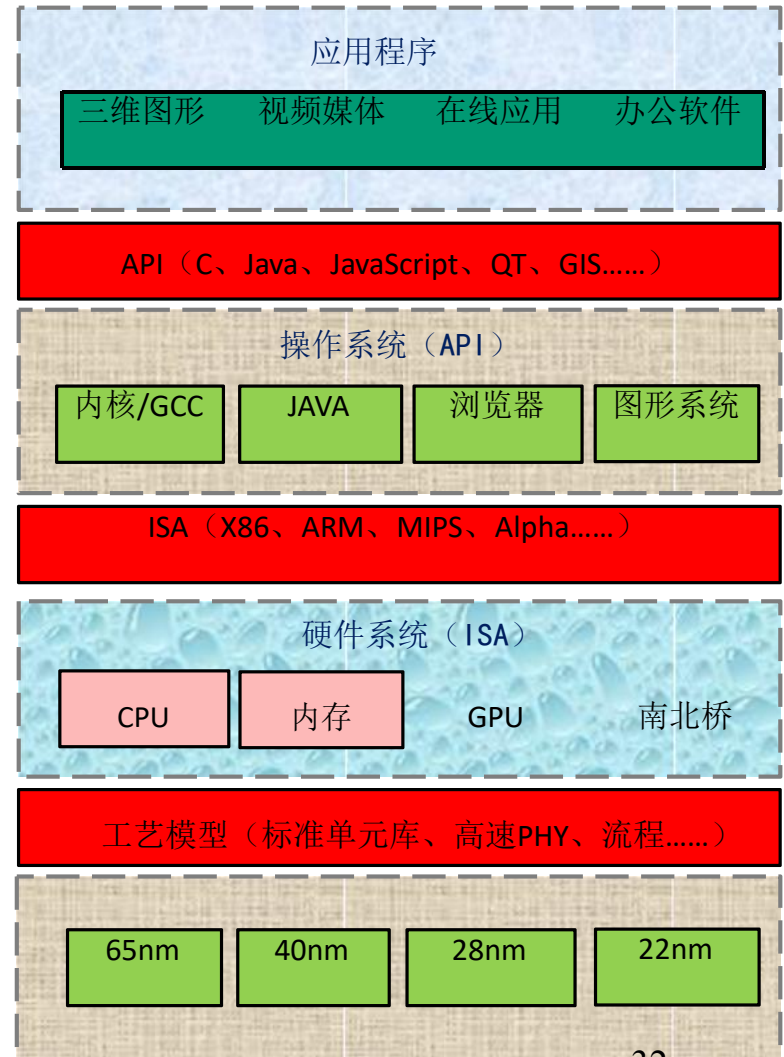
- 以龙芯处理器+Linux操作系统为例
 - 0x80000180为操作系统例外处理代码
 - 操作系统保留现场（把通用寄存器保存到堆栈区）
 - 操作系统通过读Cause寄存器分析例外原因是外部中断
 - 操作系统向桥片中的中断控制器读中断原因，读的同时清中断
 - 操作系统根据中断原因调用驱动程序，读取键盘数据
 - 操作系统唤醒正在由于等待数据而阻塞的进程（Powerpoint）
 - Powerpoint根据读到的键盘数据决定翻一页，调用显示驱动程序
 - 驱动程序把要显示的内容送到显存，并通知GPU
 - GPU通过访问显存空间刷新屏幕
- 翻一页

如果PPT翻页觉得卡顿？

- 系统中有没有其它任务在运行
 - 任务会占用CPU、内存带宽、IO带宽等资源，
- CPU太慢，需要升级？
 - PowerPoint翻页时，CPU干的活不多
 - 可能是下一页包含很多图形，需要GPU画出来，GPU忙不过来
 - 可能是要显示的内容数据量大，把数据从PowerPoint的应用程序空间传给GPU使用的显存，内存带宽不足
 - 在独立显存的情况下，数据如何从内存传输到显存需要专门的机制，如直接内存访问（Direct Memory Access，简称DMA）

上知天文、下知地理

- 指令就是应用的“算子”
 - 哪些硬件实现？哪些软件实现？
- 结构设计结合应用行为
 - Cache利用应用访存局部性
 - 转移猜测利用转移相关性和重复性
- ISA和微结构要考虑OS的需求
 - 页表和TLB
 - 多线程支持、虚拟机支持
- 结构设计要考虑晶体管属性
 - Cache容量影响主频
 - 多发射结构发射电路影响主频



（三）计算机的基本组成

- 计算机为什么用二进制？
- 冯诺依曼结构

休息

（三）计算机的基本组成

- 计算机为什么用二进制？
- 冯诺依曼结构

思维挑战：

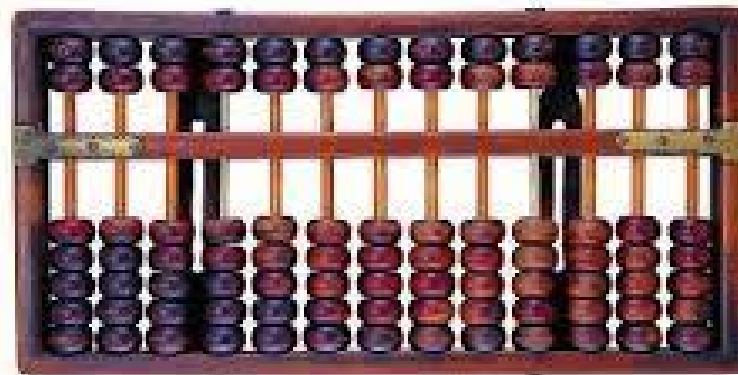
为什么算盘不能看视频，而今天的计算机就可以？

计算设备是人类的星辰大海

算 筹



算 盘



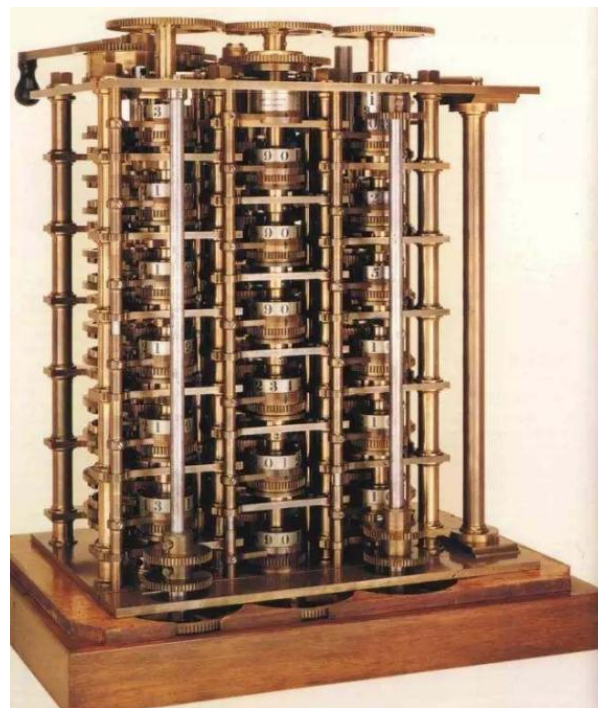
机械自动化计算设备

巴贝奇



- 只能做 $+-\times/$ 、差分等固定计算
- 速度慢，可扩展性差

范式：有限差分方法

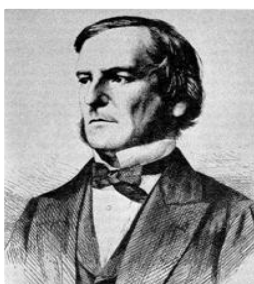


在机械时代，巴贝奇借助机械齿轮构建计算的自动化设备，未能完全实现

电子自动化计算设备-计算机的出现

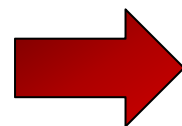
布尔, 1854

《思维规律》



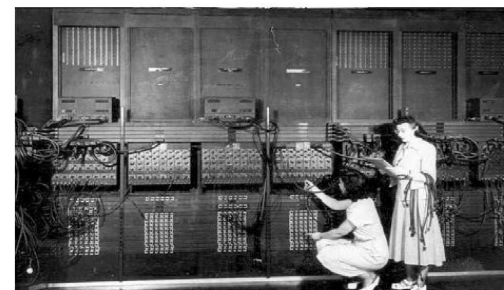
香农, 1937

“继电器和开关电路的符号表示”



ENIAC, 1946年

- 5000次加法/秒
- 18000电子管, 1500继电器



逻辑 → 二值计算

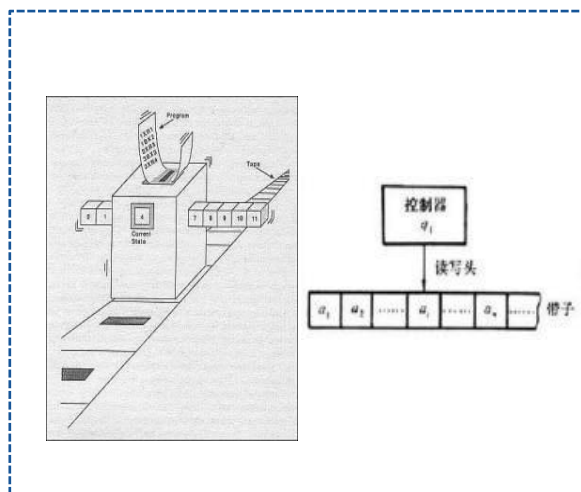
二值计算 → 开关电路

大规模电子管、继电器实现

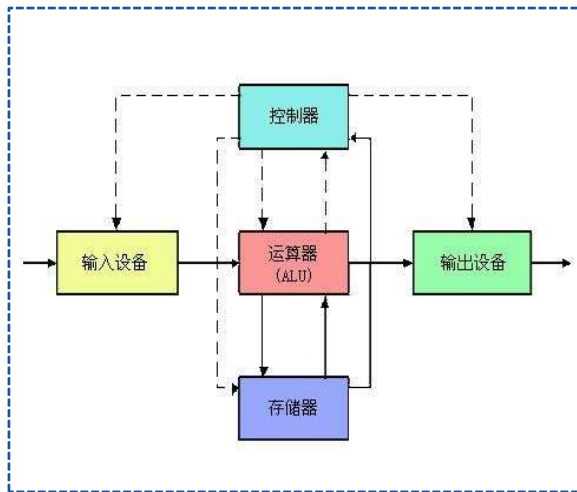
在电子时代, 布尔逻辑+香农开关电路+电子器件, 最终实现了计算的自动化

计算机的通用化

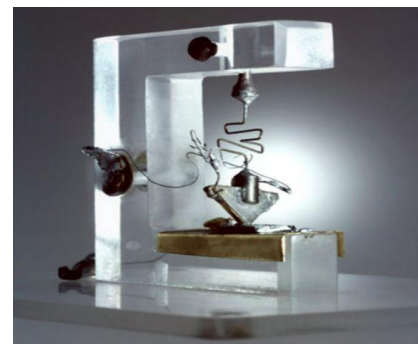
1936年，图灵机模型



1946年，冯·诺伊曼结构



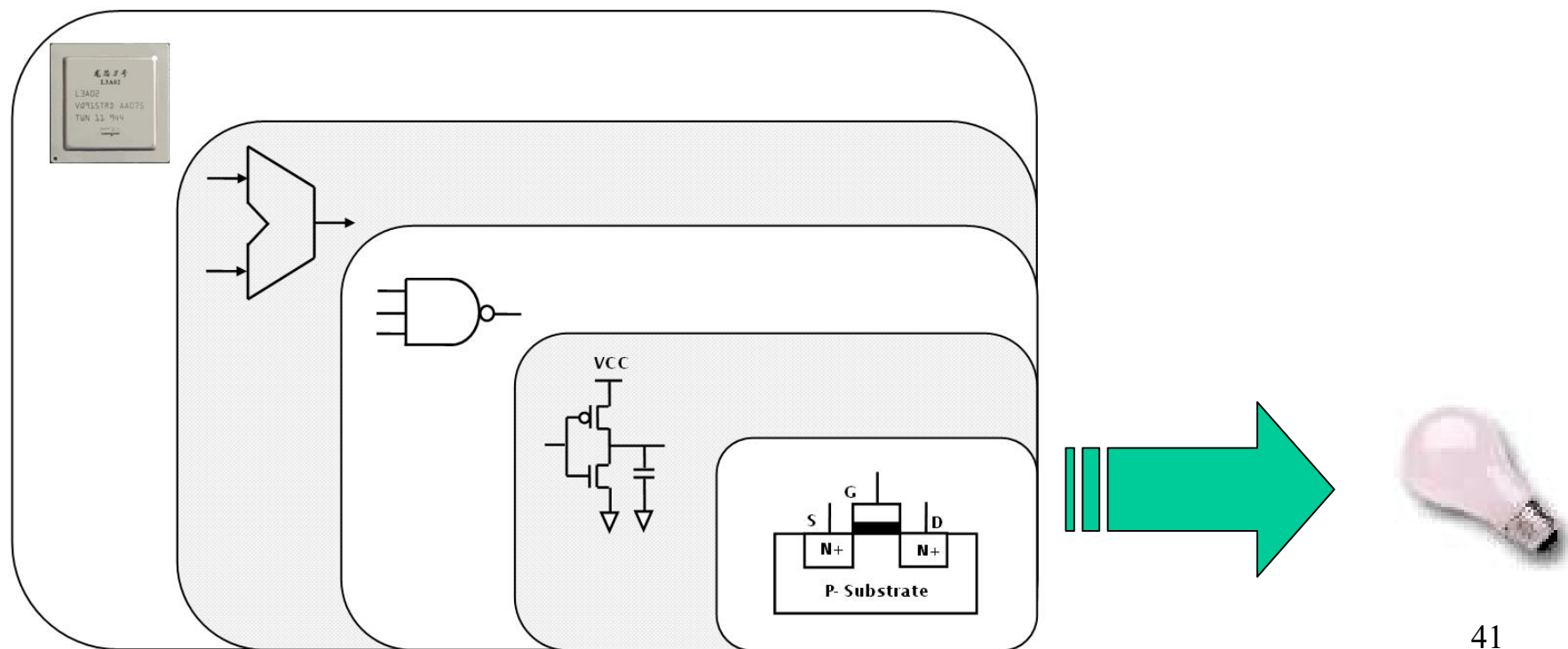
1947年，半导体晶体管



图灵模型+冯诺依曼结构+计算自动化，实现了计算的通用化，半导体支撑了性能不断提升

现在的计算机中为什么用二进制？

计算机是由电子元器件构成的，二进制最易实现。



二进制的历史

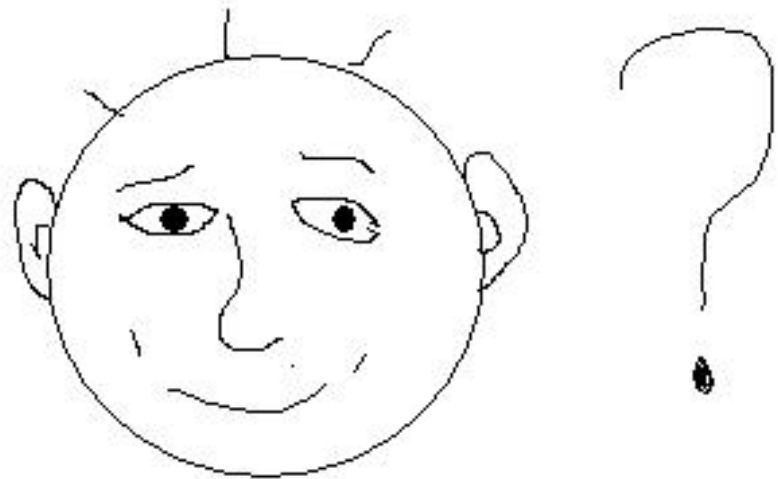
- 莱布尼兹是欧洲最早发现二进制的数学家，
- 冯·诺依曼最早将二进制引入计算机应用，计算机中的数据和程序都采用二进制。
- 中国在公元前2000多年发明的八卦是用一和--两种符号拼出来的，也是二进制。



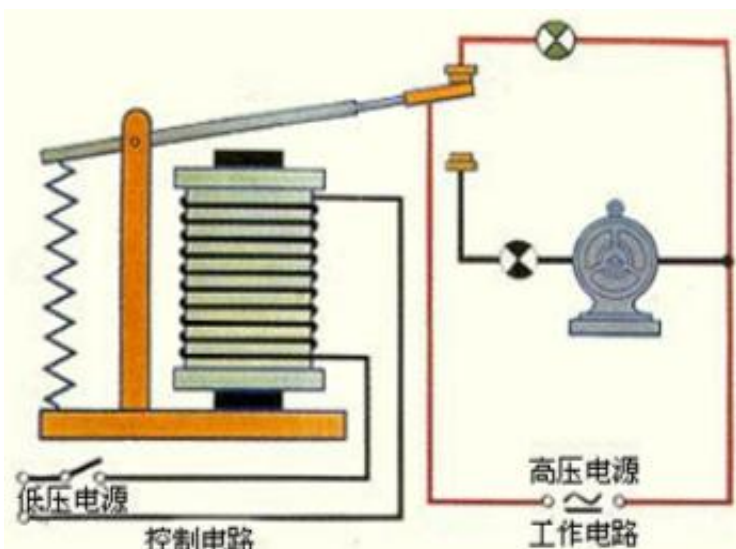
莱布尼兹为奥古斯特公爵制作的二进制纪念章

$$(3 \times 4) + (5 \times 7)?$$

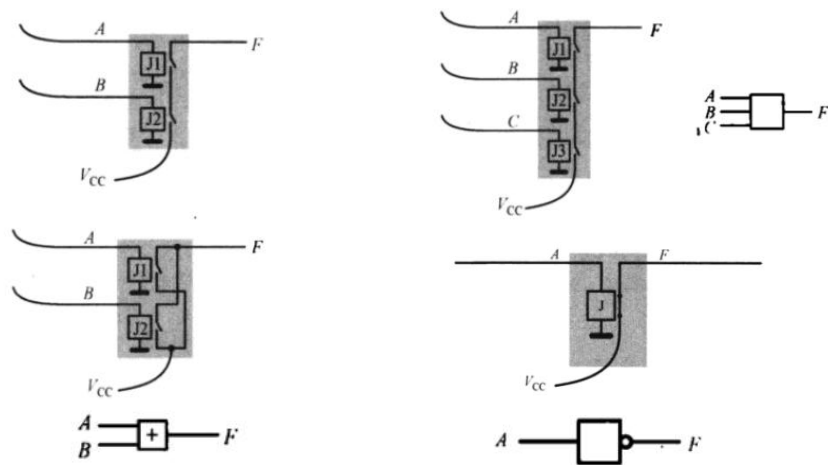
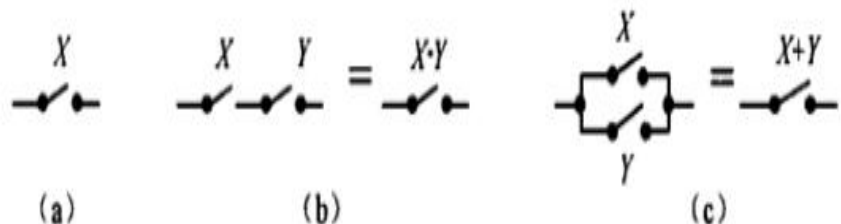
- $3 \times 4 = 12$
- $5 \times 7 = 35$
- $12 + 35 = 47$



计算机为什么选择了二进制

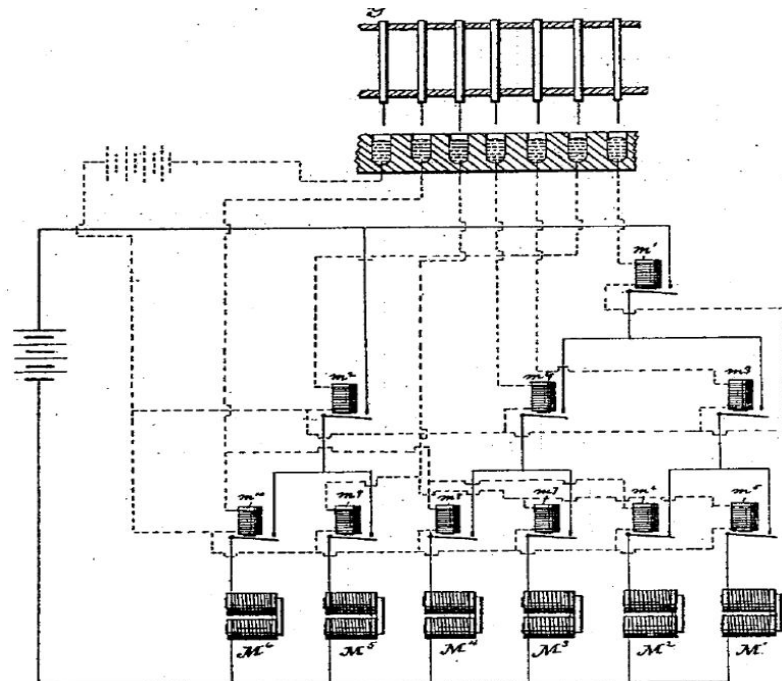
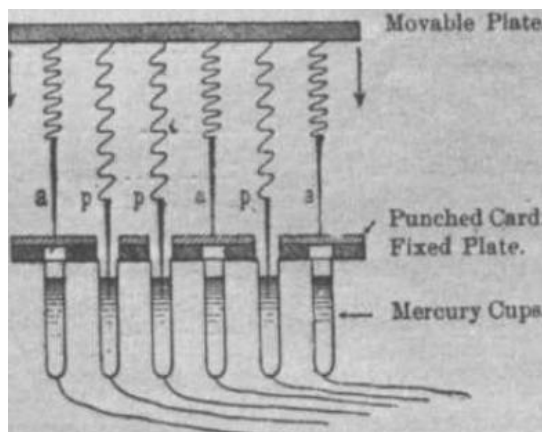


继电器

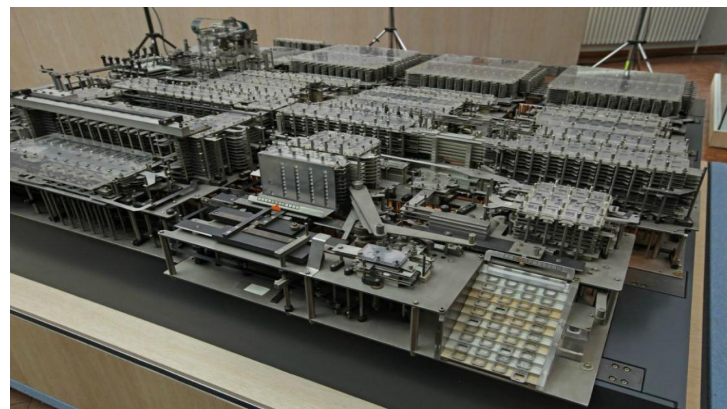


布尔代数	开关电路
$0 \wedge 0 = 0$	一个断开的开关和另一个断开的开关串联 整个电路是断开的
$0 \vee 0 = 0$	一个断开的开关和另一个断开的开关并联,整个电路是断开的
$1 \wedge 1 = 1$	一个闭合的开关和另一个闭合的开关串联,整个电路是联通的
$1 \vee 1 = 1$	一个闭合的开关和另一个闭合的开关并联,整个电路是联通的
$1 \vee 0 = 0 \vee 1 = 1$	一个闭合的开关和另一个断开的开关并联,整个电路是联通的
$1 \wedge 0 = 0 \wedge 1 = 0$	一个闭合的开关和另一个断开的开关串联,整个电路是断开的

计算机为什么选择了二进制



制表机首次将穿孔技术应用到了数据存储上,你可以想象到,使用打孔和不打孔来识别数据



第一台通用电子计算机：ENIAC



[Wiki: ENIAC]

ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator)

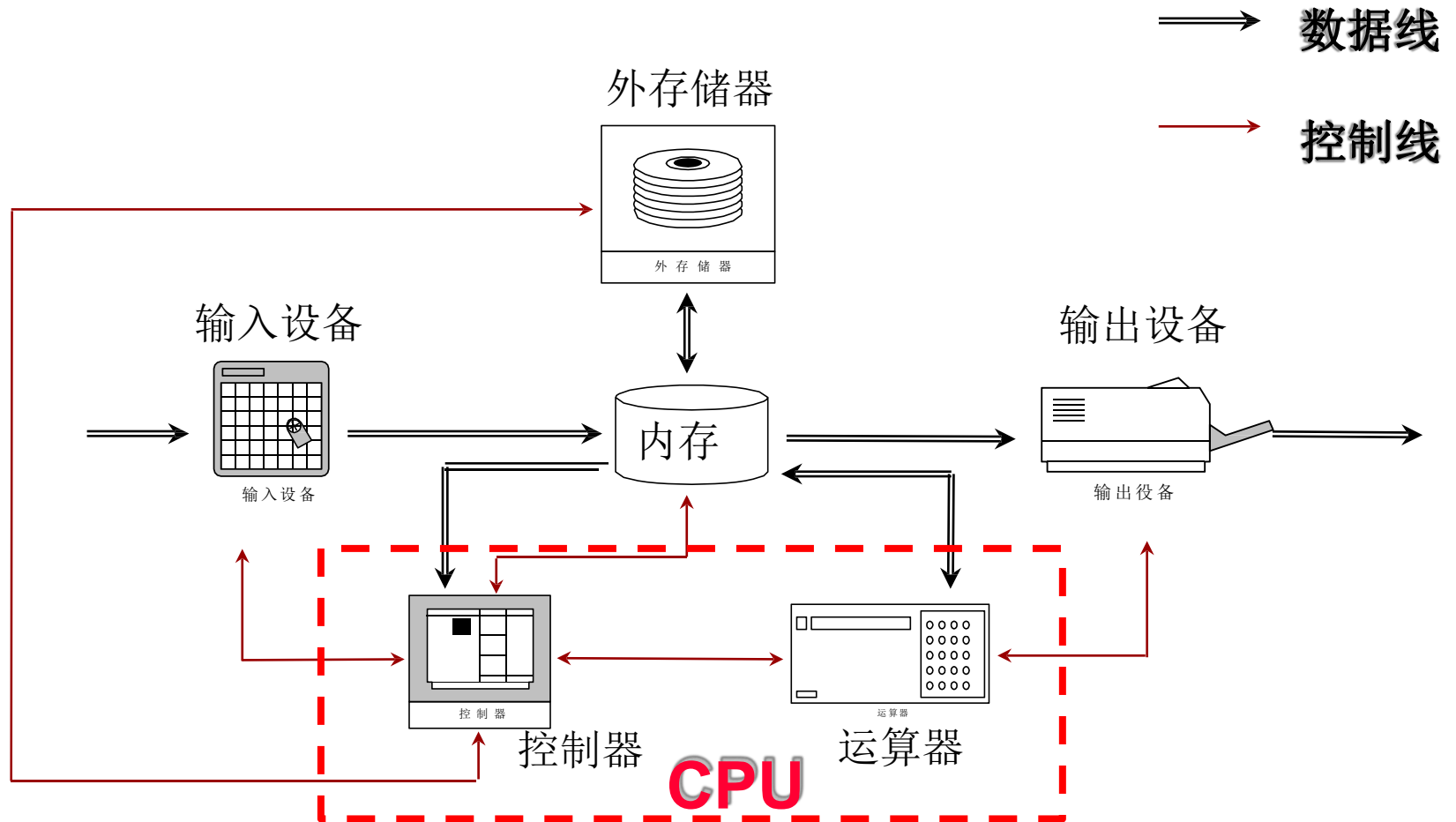
- 应用需求：二战期间，美国军方要求“弹道研究实验室”为陆军炮弹部队**每天提供6张射表**，但按当时的计算工具，即使雇用**200多名计算员**也至少需要**2个多月**才能算完1张射表。
- 由**宾夕法尼亚大学**提出，包含2万个真空管
- 算力：**每秒5000次加法或400次乘法**
- 投资48万美元，重27吨，体积167m²，功耗150kW
- 通用：图灵完备，可编程

冯诺
依曼
架构

布尔
逻辑
计算

晶体
管

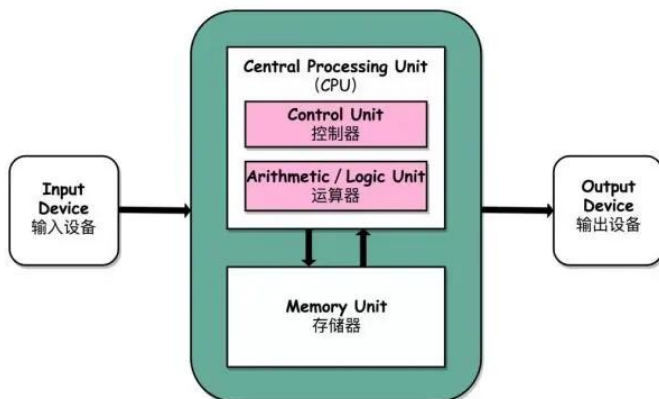
冯诺依曼结构



冯诺依曼结构基本原理

- 存储程序和指令驱动执行

- ① 计算机由存储器、运算器、控制器、输入设备、输出设备五部分组成，其中运算器和 控制器合称为中央处理器（Central Processing Processor，简称CPU）或处理器。

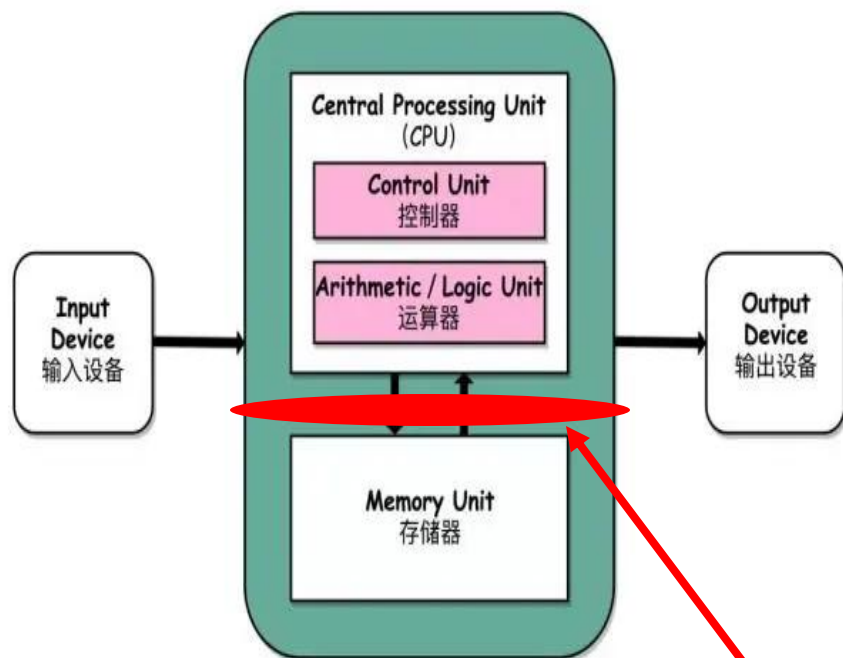


- ② 存储器是按地址访问的线性编址的一维结构，每个单元的位数固定。指令和数据不加区别混合存储在同一个存储器中。
- ③ 控制器从存储器中取出指令并根据指令要求发出控制信号控制计算机的操作。控制器 中的程序计数器指明要执行的指令所在的存储单元地址。程序计数器一般按顺序递增， 但可按指令要求而改变。
- ④ 以运算器为中心，输入输出（Input/Output，简称 IO）设备与存储器之间的数据传送 都经过运算器。

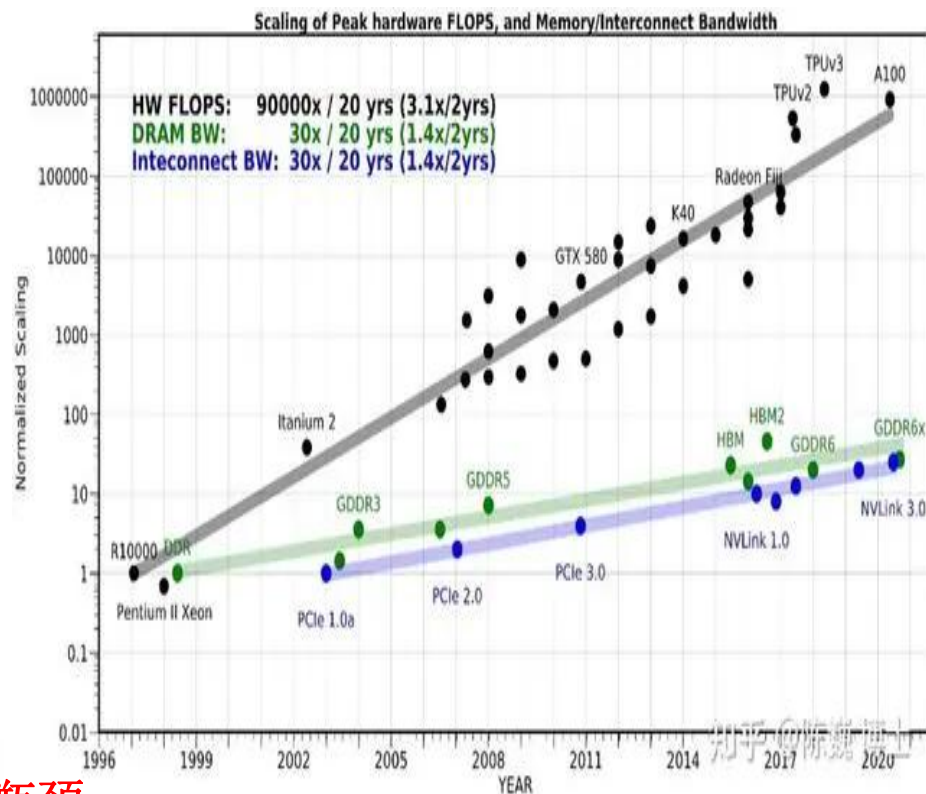
冯诺依曼结构的演进

- 以下演进没有改变存储程序和指令驱动执行的特点
 - ①以运算器为中心改进为以存储器为中心，数据流向更加合理，从而使运算器、存储器和I/O设备能够并行工作。
 - ②由单一的集中控制改进为分散控制。早期的计算机工作速度低，运算器、存储器、控制器和I/O设备可以在同一个时钟信号的控制下同步工作。现在运算器、存储器与I/O设备的速度差异很大，需要异步分散控制。
 - ③从基于串行算法改进为适应并行算法，出现了流水线处理器、超标量处理器、向量处理器、多核处理器、对称多处理机（Symmetric Multiprocessor，简称SMP）、大规模并行处理机（Massively Parallel Processing，简称MPP）和机群系统等。
 - ④出现了为适应特殊需要的专用计算机，如图形处理器（Graphic Processing Unit，简称GPU）、数字信号处理器（Digital Signal Processor，简称DSP）等

冯诺依曼瓶颈



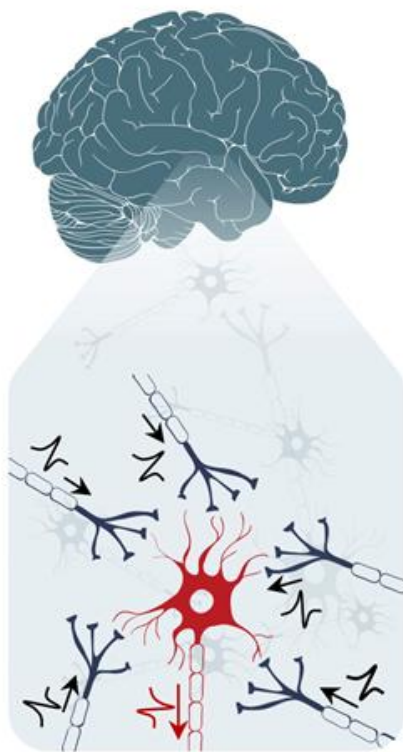
冯诺依曼瓶颈



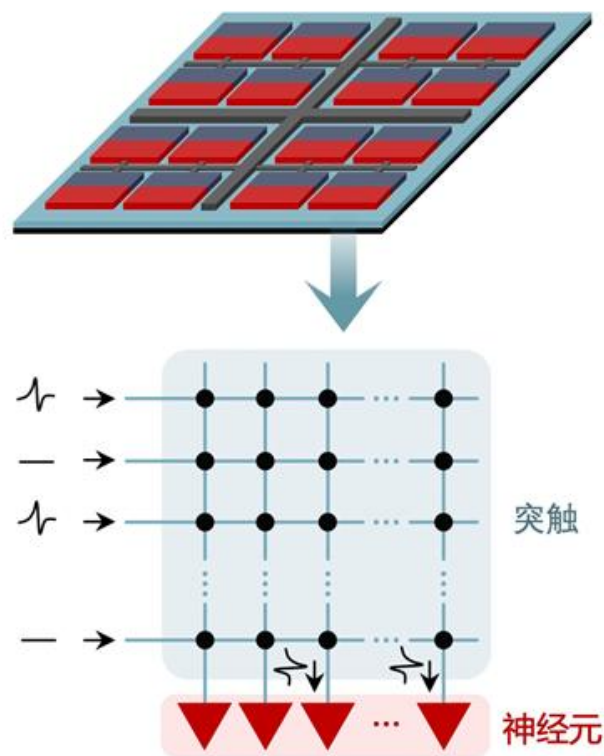
休息

基于忆阻器的类脑计算结构

生物脑结构



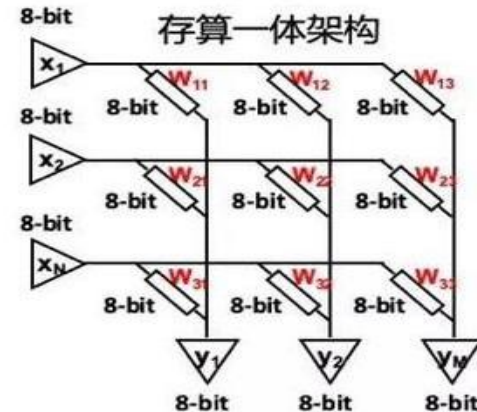
类脑计算芯片架构



存算一体结构

向量-矩阵乘法（深度学习中99%的运算）

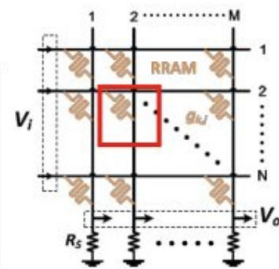
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} w_{11}, \dots, w_{1M} \\ w_{21}, \dots, w_{2M} \\ \dots \\ w_{N1}, \dots, w_{NM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix}^T$$



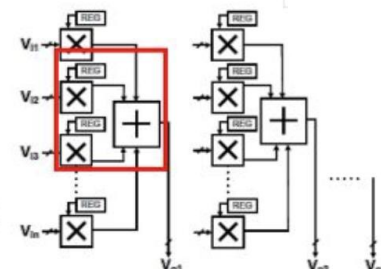
Natural matrix operation

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & g_{m2} & \dots & g_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_n \end{bmatrix}$$

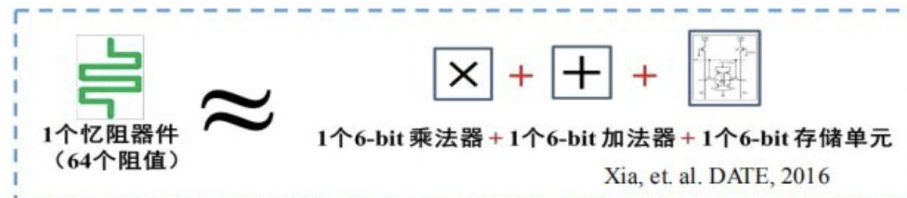
$y_1 = \sum x_i \cdot g_{i1}$ El lab DAC'12



RRAM array
[ASP-DAC, 2015]



CMOS circuit for vector multiplier
[Field-Programmable Technology, 2002]



1 . ~1000

存算一体结构是冯诺依曼架构吗？

辨析课

主题1：
存算一体结构是冯诺依曼架构吗？

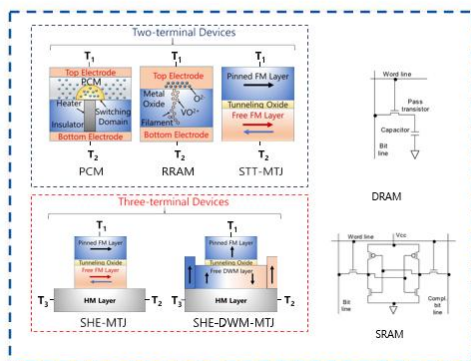
CPU、GPU和存算一体结构比较



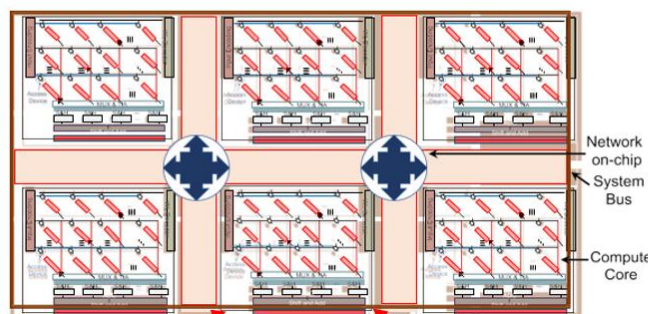
CPU、GPU和存算一体结构比较

存内计算的基本电路模块

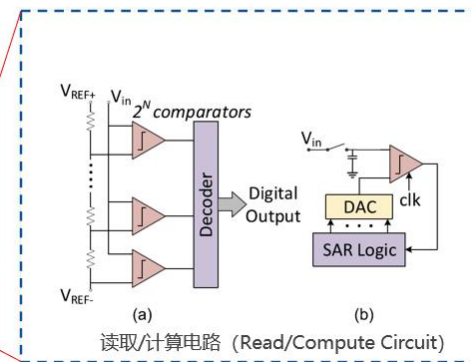
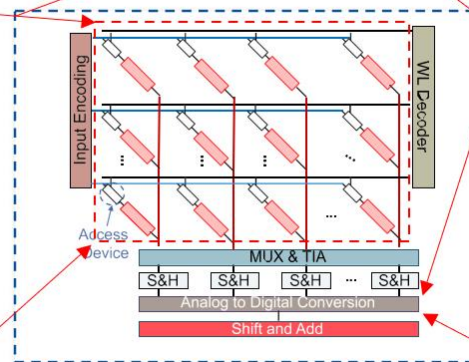
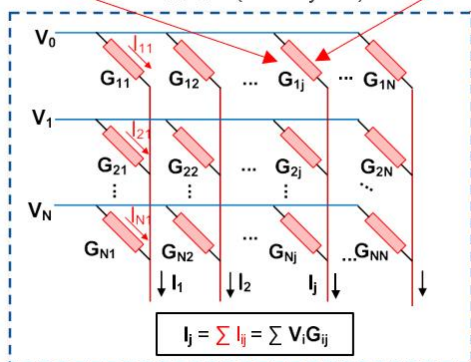
TensorChip



存储单元 (Memory Cell)



存算一体芯片 (Memory Computing Core)



- 存储单元
- 存算阵列
- WL/BL译码
- 采样&保持电路
- 读取/计算/写入电路
- 其他逻辑

辨析课

主题2：

以存算一体结构为例，看冯
诺依曼架构的好处