



# 计算机组成原理

## 第一讲

张 展

哈尔滨工业大学计算学部  
容错与移动计算研究中心

# 授课教师

- 张展 博士，教授，博士生导师
  - 科学园**C2**栋 **510**房间
  - 综合楼**504**房间
  - 研究方向：可穿戴计算、容错计算、  
边端智能计算
  - 电子邮件 **zz@ftcl.hit.edu.cn**
  - QQ :**846839004**
- 助教  
宋子明、张鹏、曲思蒙、王隐然
  - 科学园**C2**栋 **514**房间

## 课程QQ群

要求：

1. 全体同学加入该群
2. 入群后群名片修改为：学号+姓名
3. 可在群里讨论学习问题，但不许发表任何不合适的言论
4. 课程的通知文件会在群里发布



群名称：2024春计算机组成原理-张恩  
群号：590552111

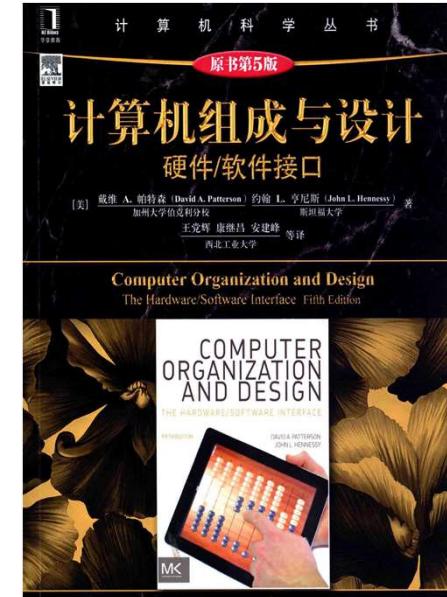
群号：590552111

# 课程概貌

- 讲授内容
  - 基本部件的结构和组织方式
  - 基本运算的操作原理
  - 基本部件和单元的设计思想
- 特色
  - 计算机组成的一般原理，不以具体机型为依托
  - 采用自顶向下的方式、层层细化
- 教材
  - 唐朔飞. 计算机组成原理（第3版）. 高等教育出版社

# 参考教材

- David A. Patterson. John L. Hennessy. Computer Organization & Design: A Hardware/Software Interface



- 谭志虎等. 计算机组成原理（微课版）. 人民邮电出版社
- 袁春风等. 计算机组成与系统结构（第2版）. 清华大学出版社

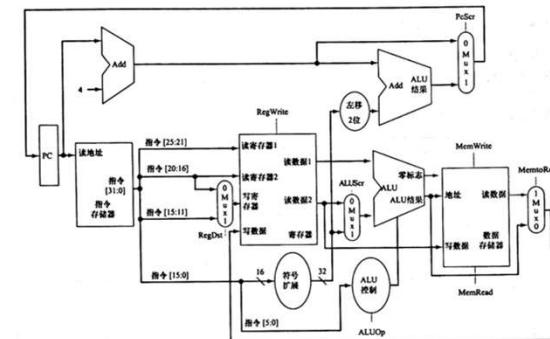
# 授课思路及重点

知其然

知其所以然

- 计算思维导论
- 计算机系统
- 高级语言程序设计
- .....
- 掌握数据通路实现机理
- 掌握性能评价的基本方法
- 初步掌握构建软硬协同的系统观

数据通路



性能评价



# 授课主要内容

1 緒論

2 計算方法

3 存儲系統

4 指令系統

5 CPU結構和控制器、數據通路

6 总線

7 输入输出系統



# 成绩构成

- 成绩构成：平时作业**10%** + 实验**15%** + 大作业**5%** + 期末试卷**70% = 100%**
- 课堂教学环节
  - 抓总体框架、讲主干概念、结合例子、提问互动
- 其它环节
  - 每章课后作业
  - 大作业以设计为主，报告形式
  - 四次硬件实验
  - 课后交流（QQ、邮件、课间答疑）

# 第1部分 系统概论

1.1 计算机系统简介

1.2 计算机的基本组成

1.3 计算机系统的主要技术指标

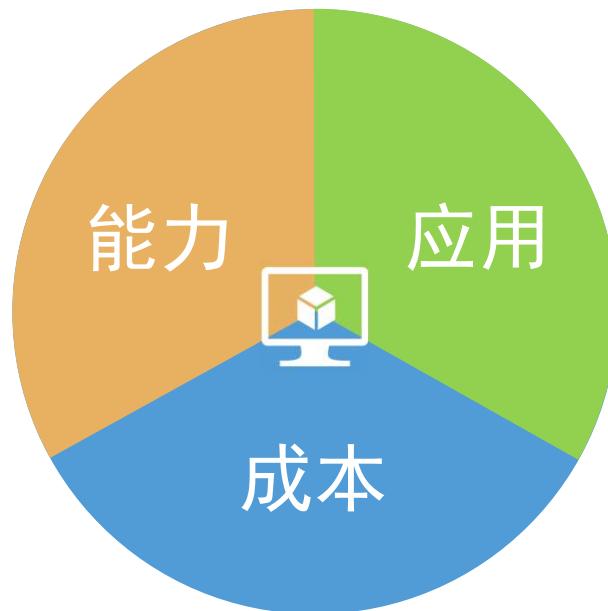
## 1.1 计算机系统简介

形形色色的各类计算机

# 信息技术的发展规律

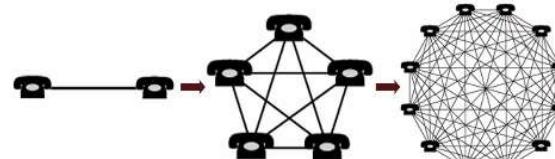
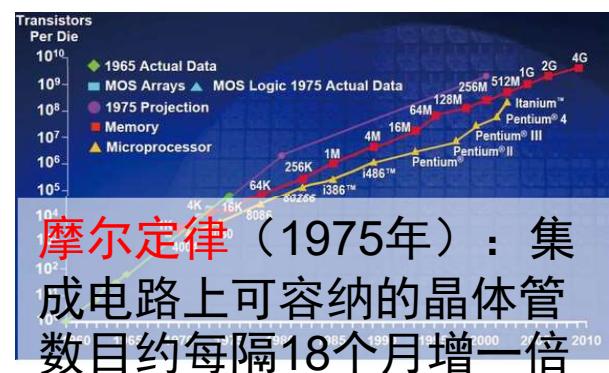
- 信息技术的发展始终围绕 **能力、应用、成本** 三大目标

追求高能力（如功能、性能、智能、易用、复杂性控制等）是信息技术的客观需求，也是人类追求科学技术极限的主观愿望使然

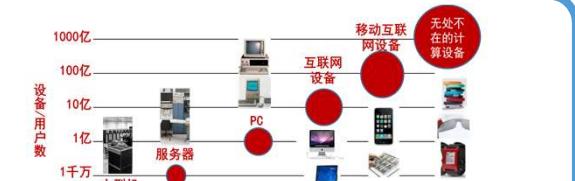


信息技术和产业发展迅猛的主要原因在于应用的广度、深度和迫切程度

信息技术和应用的实现需要大量的人力、时间、资金、材料、能耗等成本



**梅特卡夫定律** (1973年)：  
网络的价值随着用户数量的  
平方数增加而增加。



- 现代计算机的多态性



# 跑得最快的计算机 (截止2013年11月)

Rank	Site 国家	System 名称	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)
1	National Super Computer Center in Guangzhou China	Tianhe-2 (MilkyWay-2) - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 31S1P 中国国防科技大学	3,120,000	33,862.7	54,902.4
2	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	Titan- Cray XK7 , Opteron 6274 16C 2.2GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x 制造商: Cray Inc. 克雷公司 所属: 美国能源部Oak Ridge国家实验室	560,640	17,590.0	27,112.5
3	DOE/NNSA/LLNL United States	Sequoia- BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom 制造商: IBM 所属: 美国能源部、美国国家核安全管理局	1,572,864	17,173.2	20132.7
4	RIKEN Advanced Institute for K computer, Computational Science (AICS) Japan	for K computer, SPARC64 VIIIfx 2.0GHz, Tofu interconnect 制造商: Fujitsu 富士通 所属: 日本计算科学研究院机构	705,024	10510.0	11280.4
5	DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	Mira- BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom 制造商: IBM 所属: 美国能源部/ SC /Argonne国家实验室IB	786,432	8,586.6	10066.3

# Tianhe-2



---

<b>Site:</b>	National Super Computer Center in Guangzhou
<b>Manufacturer:</b>	NUDT
<b>Cores:</b>	3,120,000
<b>Linpack Performance (Rmax)</b>	33,862.7 TFlop/s
<b>Theoretical Peak (Rpeak)</b>	54,902.4 TFlop/s
<b>Power:</b>	17,808.00 kW
<b>Memory:</b>	1,024,000 GB
<b>Interconnect:</b>	TH Express-2
<b>Operating System:</b>	Kylin Linux
<b>Compiler:</b>	icc
<b>Math Library:</b>	Intel MKL-11.0.0
<b>MPI:</b>	MPICH2 with a customized GLEX channel

---

# “天河2号”超级计算机



天河2号



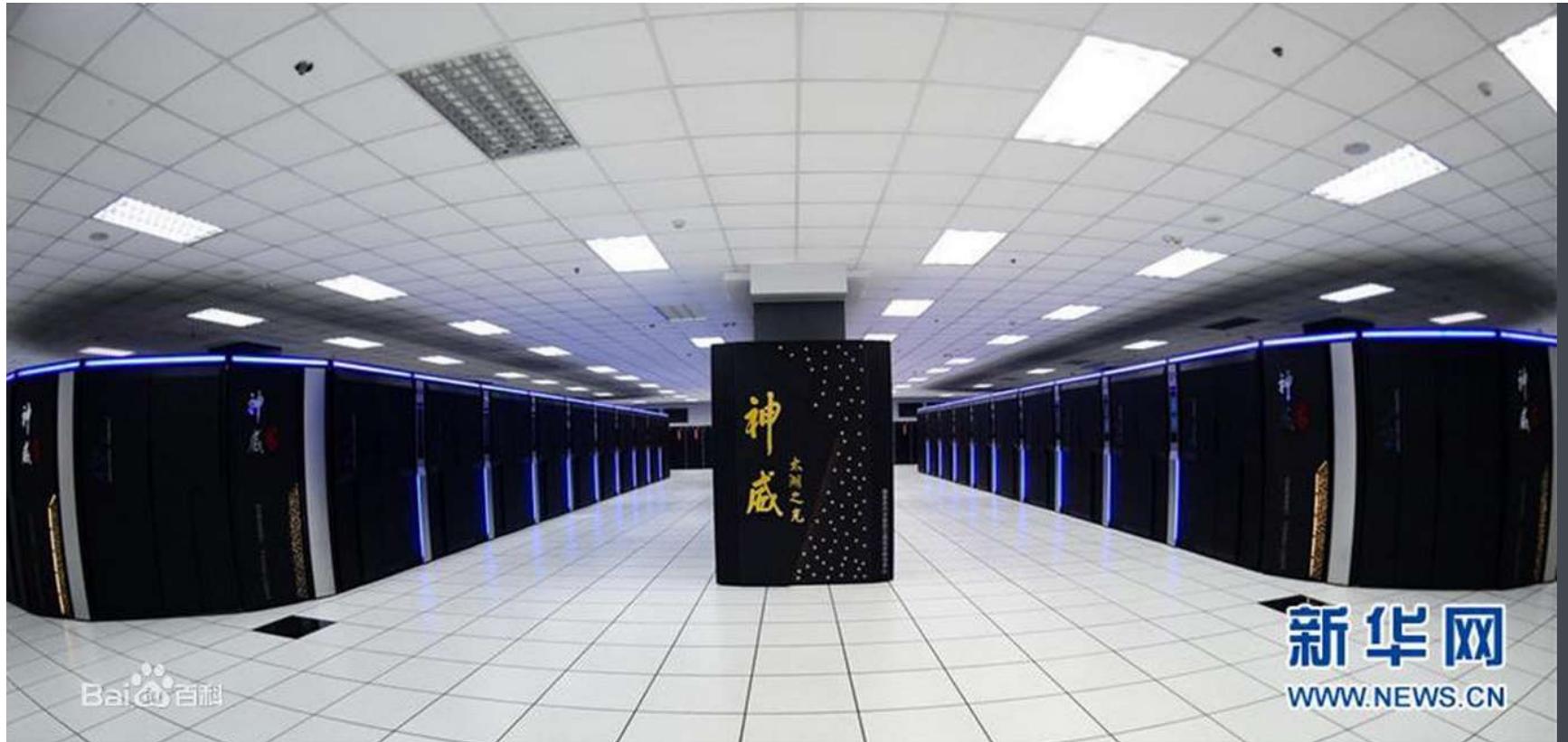
天河1号

天河二号超级计算机是全球第一台峰值性能突破5亿亿次(50PFlops)的超级计算机，与此前排名世界第一的美国“泰坦”系统相比，占地面积是它的85%，性能却是它的两倍。天河二号超级计算机独创了新型“异构多态”的体系结构，实现了多类型计算资源、输入输出资源和服务资源的灵活配置，在系统管理软件方面采用了多层次的容错设计、机器管理机器的自治的故障管理技术等等，可以更方便的分析、诊断和处理故障，标志着中国已掌握了世界领先的超算体系架构和作业调度管理等这些核心技术。

# 跑得最快的计算机 (截止2016年11月)

Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	National Supercomputing Center in Wuxi China	<b>Sunway TaihuLight</b> - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway NRCPC	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
2	National Super Computer Center in Guangzhou China	<b>Tianhe-2 (MilkyWay-2)</b> - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 31S1P NUDT	3,120,000	33,862.7	54,902.4	17,808
3	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	<b>Titan</b> - Cray XK7 , Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x Cray Inc.	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
4	DOE/NNSA/LLNL United States	<b>Sequoia</b> - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom IBM	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
5	DOE/SC/LBNL/NERSC United States	<b>Cori</b> - Cray XC40, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Aries interconnect Cray Inc.	622,336	14,014.7	27,880.7	3,939

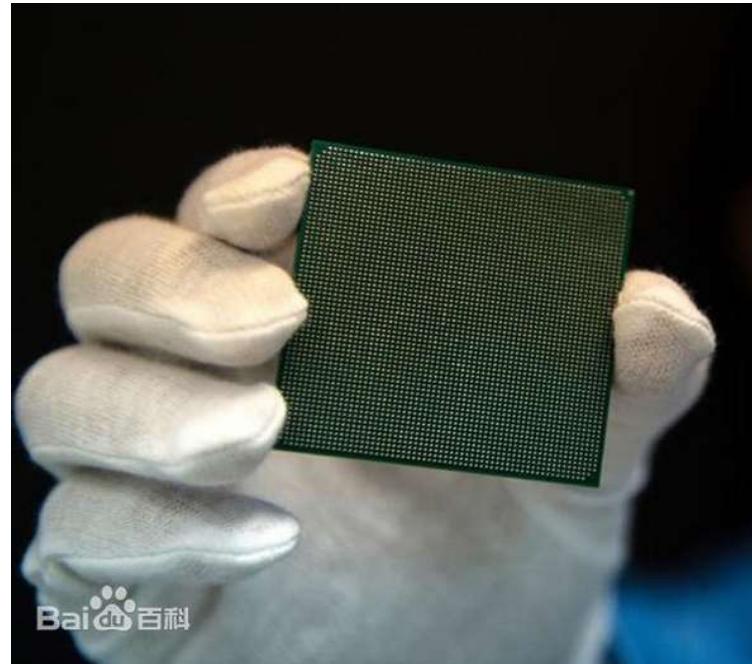
# 太湖之光



神威·太湖之光超级计算机安装了40960个中国自主研发的“[申威26010](#)”众核处理器，该众核处理器采用64位自主申威指令系统，峰值性能为12.5亿亿次/秒，持续性能为9.3亿亿次/秒。

神威·太湖之光超级计算机由40个运算机柜和8个网络机柜组成。每个运算机柜比家用的双门冰箱略大，打开柜门，4块由32块运算插件组成的超节点分布其中。每个插件由4个运算节点板组成，一个运算节点板又含2块“[申威26010](#)”高性能处理器。一台机柜就有1024块处理器，整台“神威·太湖之光”共有40960块处理器。<sup>17</sup>

# 太湖之光



申威26010众核处理器

在“神威·太湖之光”上运行的“全球大气非静力云分辨模拟”应用获得**2016**年度“戈登·贝尔”奖，实现了我国高性能计算应用成果在该奖项上零的突破。此次全球共有6项应用成果入围“戈登·贝尔”奖最终提名，其中3项都是依托“神威·太湖之光”完成的。其余2项应用分别为[国家海洋局](#)海洋一所与清华大学合作的“高分辨率海浪数值模拟”和中科院网络中心的“钛合金微结构演化相场模拟”。

# 最新排名

[www.top500.org](http://www.top500.org) 每年6月和11月两次更新

Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	<b>Frontier</b> - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	8,699,904	1,194.00	1,679.82	22,703
2	<b>Aurora</b> - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU Max, Slingshot-11, Intel DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	4,742,808	585.34	1,059.33	24,687
3	<b>Eagle</b> - Microsoft NDv5, Xeon Platinum 8480C 48C 2GHz, NVIDIA H100, NVIDIA Infiniband NDR, Microsoft Microsoft Azure United States	1,123,200	561.20	846.84	

我们的系统性能？

# 高性能容错计算机：HP的NON-STOP系列

- 多级冗余容错结构
- 松耦合ServerNet网络互连
- 支持容错的可扩展系统互联技术
- CPU锁步和自检测技术
- 数据和通路纠错技术
- 基于系统软件的故障恢复技术
- 负载的自动分布和故障恢复技术
- 满足快速切换要求的进程对技术



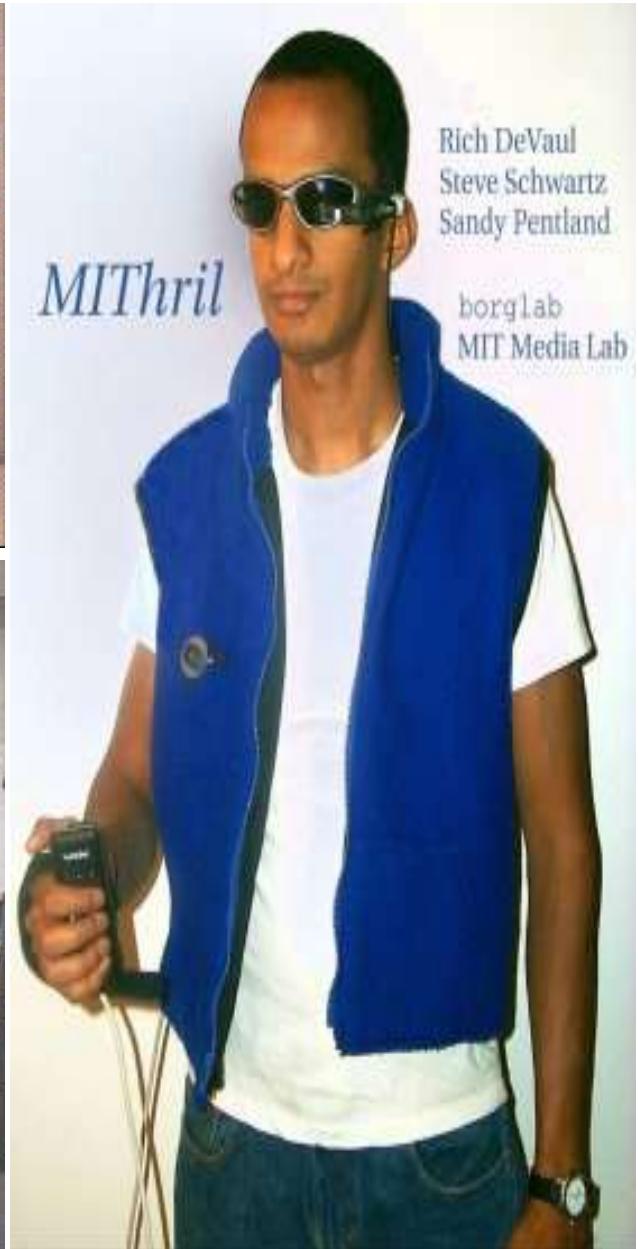
# 高性能容错计算机- Superdome2

- 支持64路4核处理器，内存可达4TB
- Superdome 2在灵活性、可扩展性和可用性方面实现超过100项技术创新。这些创新包括容错的Crossbar Fabric，该技术允许在刀片和I/O端口间对数据进行全冗余的智能路由，使基础设施的可靠性提高了4.5倍。
- Superdome2 采用最新的英特尔安腾9300系列四核处理器，显著地提高了服务器的综合表现，包括新的可靠性、可扩展性和虚拟化功能。



# 嵌入式计算机

## 穿戴计算机(Wearable Computer)



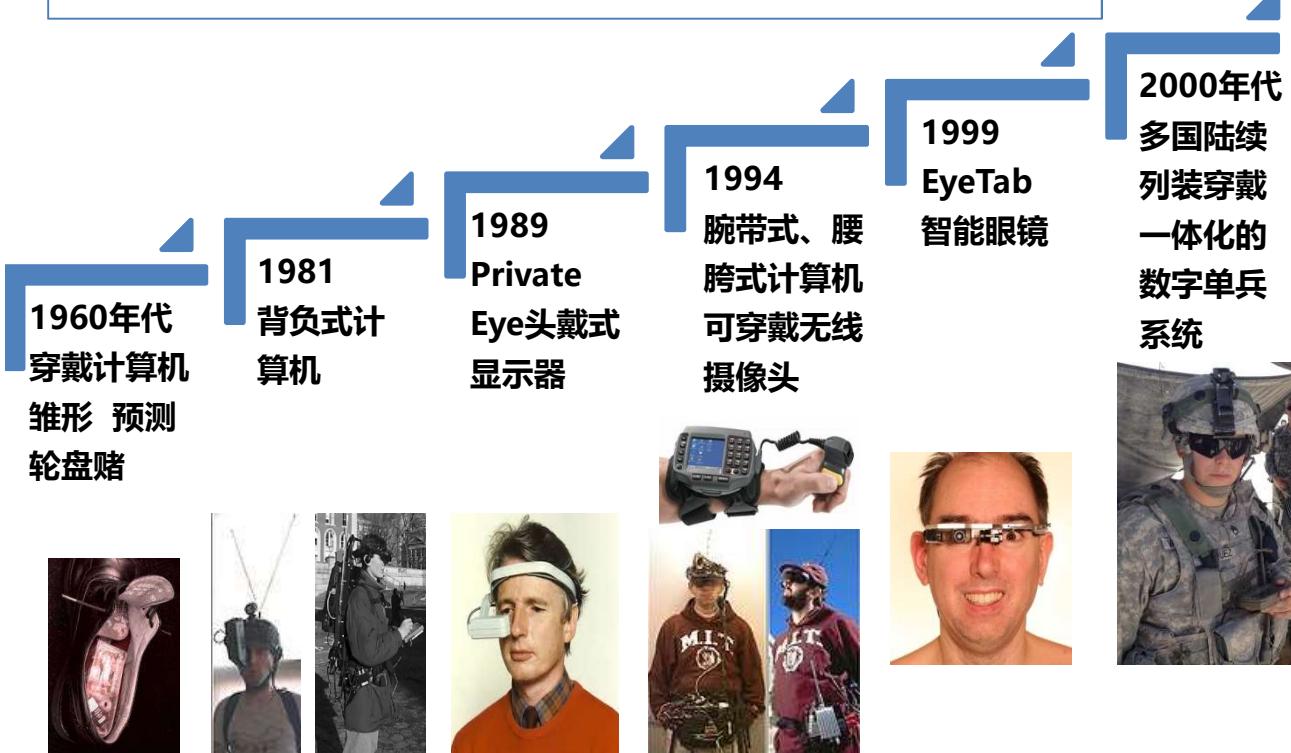
# 穿戴计算机(Wearable Computer)

Steve Mann's "wearable computer" and "reality mediator" inventions of the 1970s have evolved into what looks like ordinary eyeglasses.



# 问题和需求：推动人-机-物和谐计算环境进一步发展

- 构建人-机-物和谐环境的重要组成，计算机与通讯技术不断进步的产物，信息化真正融入人类生活
- 形态向着多样化发展：背负式、腕带式、手持式、腰跨式、佩戴式、穿戴一体化数字单兵系统、动力外骨骼等样式的可穿戴计算机



“人们能够穿着计算设备  
随时随地通信”  
——史蒂夫 曼恩

# 可穿戴计算设备的应用

——医疗是可穿戴设备市场增长最为迅速的应用领域

- 可穿戴设备在无扰式远程监护方面具有广阔的应用前景，用于监测评估身体健康状况、预警慢性疾病以及帮助帕金森症、糖尿病、心脏病、高血压和其他疾病患者管理疾病
- 可穿戴设备在老年人、残障人士生活辅助方面具有广阔的应用前景，用于看、听、说、行、记忆等生活能力增强以及肌体复健等
- 可穿戴便携移动医疗设备市场升温，2016年中国市场规模超过20亿人民币



生命体征监测服(FIT)



记录脑电心电的耳机



盲人阅读器



应对记忆力减退的眼镜



帮助瘫痪病人行走的外骨骼



血压实时监测仪



血氧实时监测仪



手语翻译手环



残疾人复健设备

# 可穿戴计算设备的应用

## ——运动健身是最具潜力的应用领域

- 可穿戴设备可以有效地帮助运动员提高成绩，帮助消费者增强运动体验
- 应用覆盖：计步与计算热量消耗的手环、手机、纽扣、跑鞋等大众消费品以及智能泳镜、智能滑雪镜、高尔夫手套等专业运动器材
- 与大数据结合的典范：德国国家队在日常训练中，使用多种传感器采集球员数据并进行大数据分析，据此设计技战术，充分发挥球员能力，为取得世界杯冠军打下坚实基础
- BI公司预计，运动健身未来可能超过医疗成为出货量最大的应用类型



NIKE+iPod miCoach速度传感器



智能跑鞋



智能泳镜



GolfSense手套



智能滑雪护目镜

# 可穿戴计算系统技术问题与现状

## —— 技术体系

### 可穿戴计算的典型特征

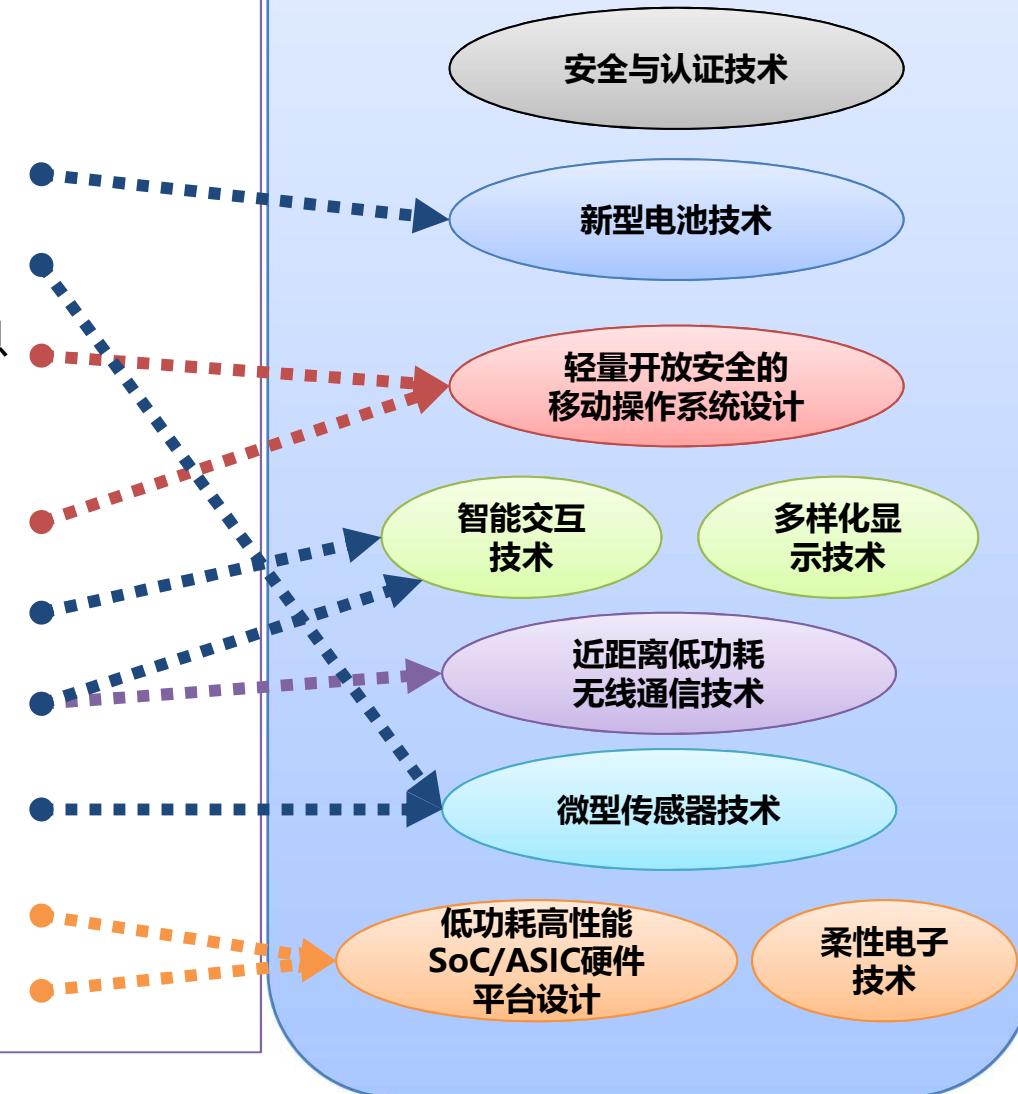
#### • 基本运行方式

- 持续性：长续航、持续交互
- 增强性：增强感知和智慧
- 介入性：过滤、调整和干预信息

#### • 基本特性

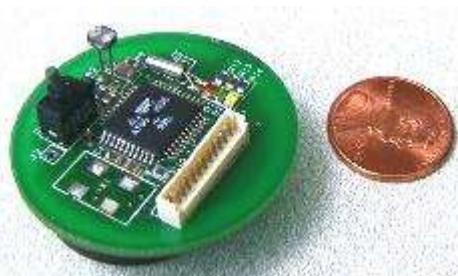
- 用户随时可以控制
- 随时可以得到用户注意
- 用户可与他人随时交互
- 多模态传感能力随时感知环境
- 不可独占用户注意力
- 不可约束用户活动和运动

### 可穿戴计算系统技术体系

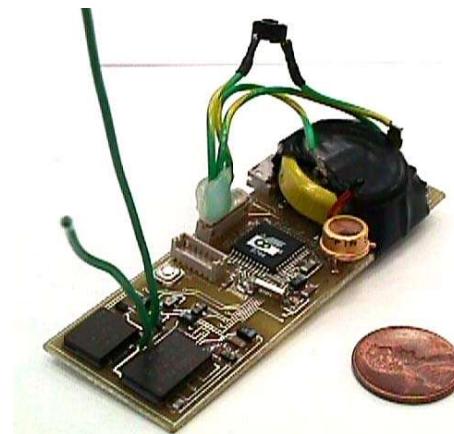


# 无线感知节点

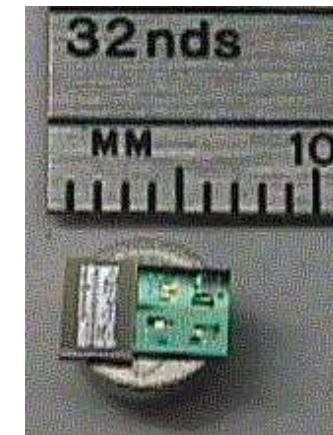
## ► Modern Sensor Nodes



UC Berkeley: COTS Dust



UC Berkeley: COTS Dust



UC Berkeley: Smart Dust



UCLA: WINS



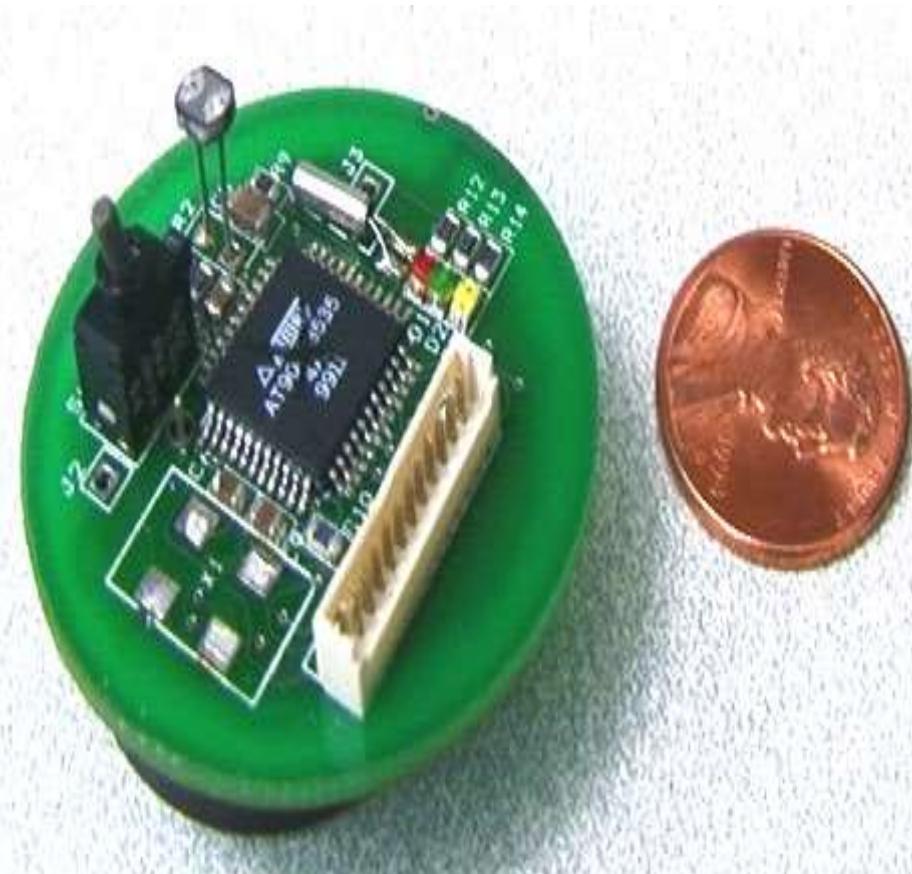
Rockwell: WINS



JPL: Sensor Webs

# 无线感知节点

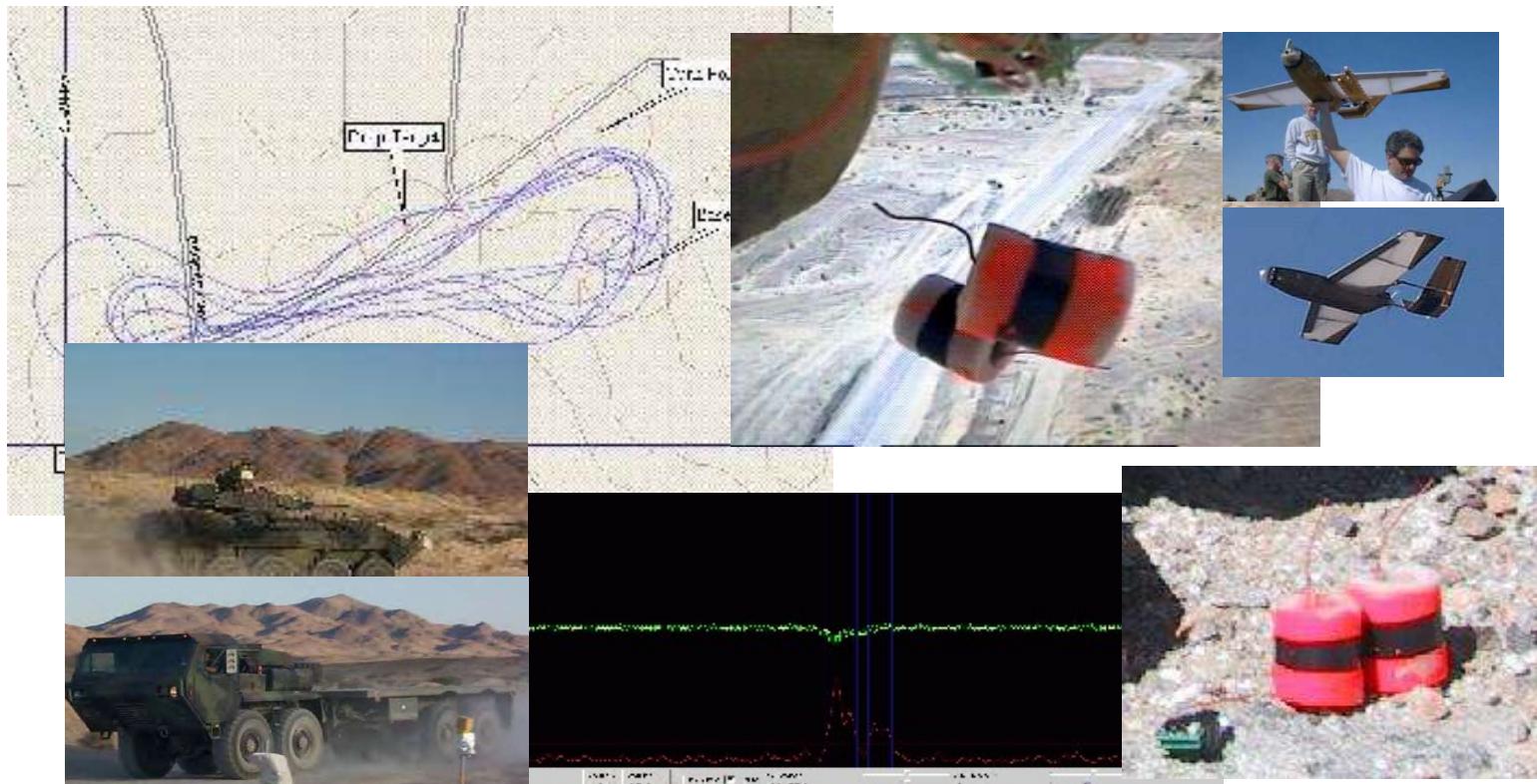
## ► Berkeley Motes-WeC Mini Mote



- 19.1 Kbps
- 20m Range
- Light Sensing
- Temperature Sensing
- 4 MHz - 3.0 V
- 8 Kb -Program Memory
- 512 b - Data Memory

# WSN应用—军事侦察实例

- DARPA的SensIT计划项目之一：无人机部署传感器网络用于车辆跟踪



# WSN应用—冰河监测

- ▶ 利用WSN监测冰河的变化情况，目的在于通过分析冰河环境的变化来推断地球气候的变化

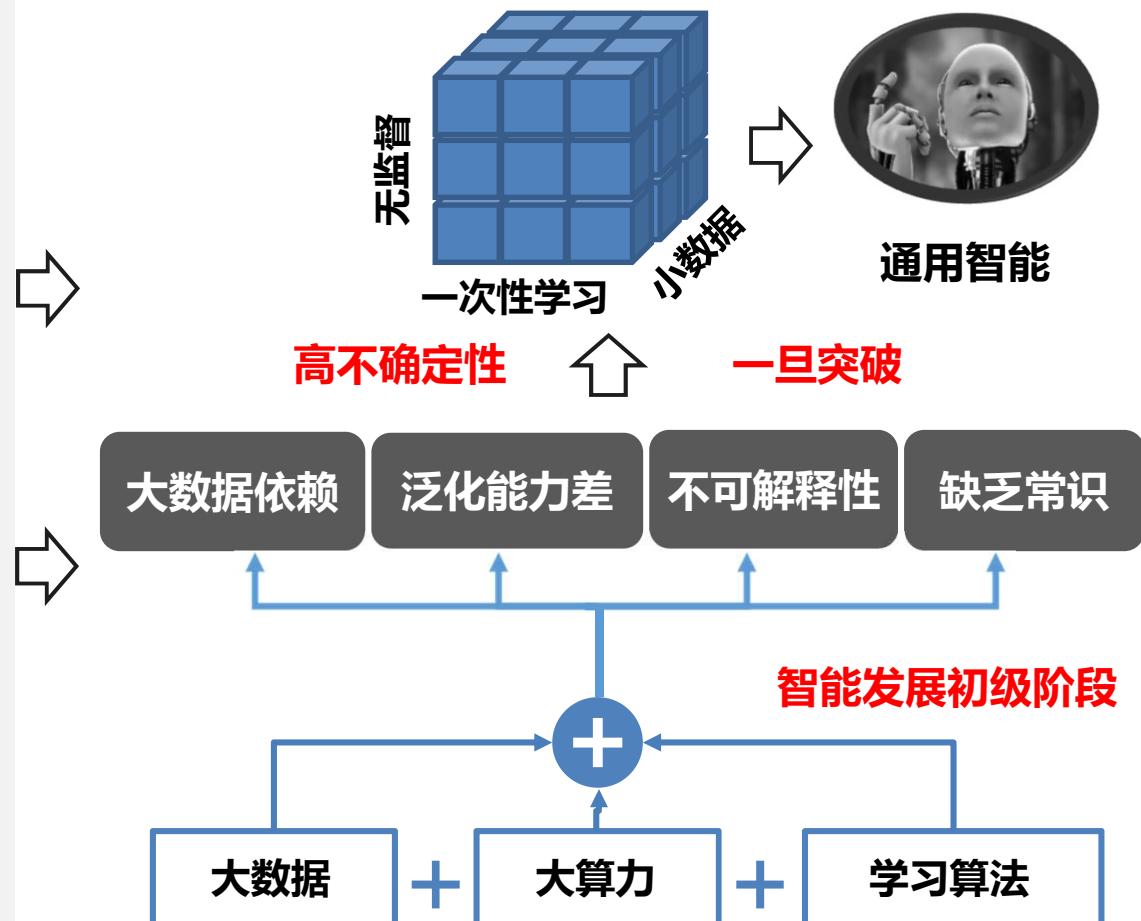


# System for AI

## 浅层次动因

- 信息 **环境** 巨变  
互联网、物联网、超级计算.....
- 社会新 **需求** 爆发  
智慧城市、智能医疗、智能交通
- AI 技术** 和目标巨变  
大数据、多媒体、虚拟现实.....  
计算智能、感知智能 → 认知智能

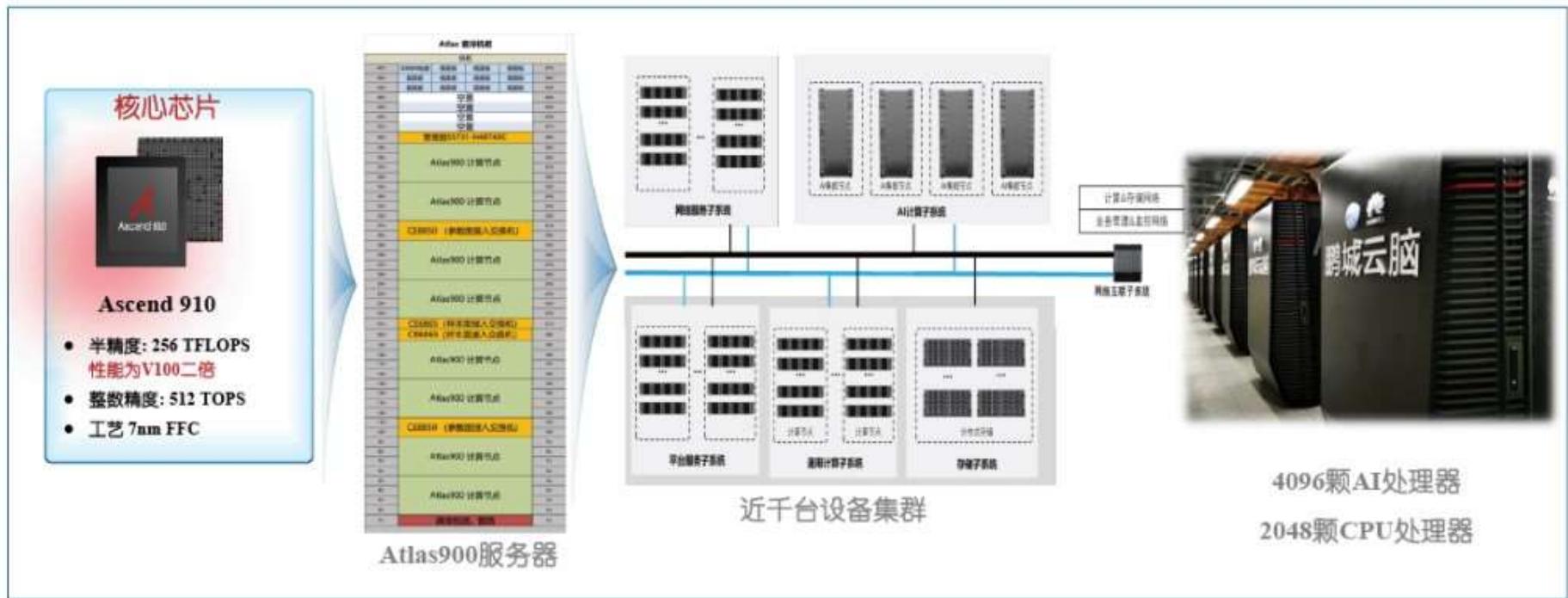
## 深层次动因：瓶颈、挑战与机遇



# System for AI

独特优势		在关键技术领域存在软肋			面临的竞争问题		
海量的数据资源		缺少自主可控的芯		缺乏安全可信的魂		缺少自我进化生态	
巨大的应用需求		→ GPU → TPU → FPGA		→ 深度学习 → AlphaX → Watson			
加速的技术积累							
深厚的市场潜力							
有力的政策支持							
			核心器件和芯片断供怎么办？		开源开放平台断源怎么办？		
			基础理论发动专利保护怎么办？		终止合作，人才交流，教育……		

# System for AI: 一个例子



鹏城云脑II期系统

配置: 华为Atlas 900AI集群、由4096颗AI处理器昇腾910组成  
性能: 100亿亿次的半浮点运算、存储容量64PB、网络延迟2微秒

# 1.1 计算机系统简介

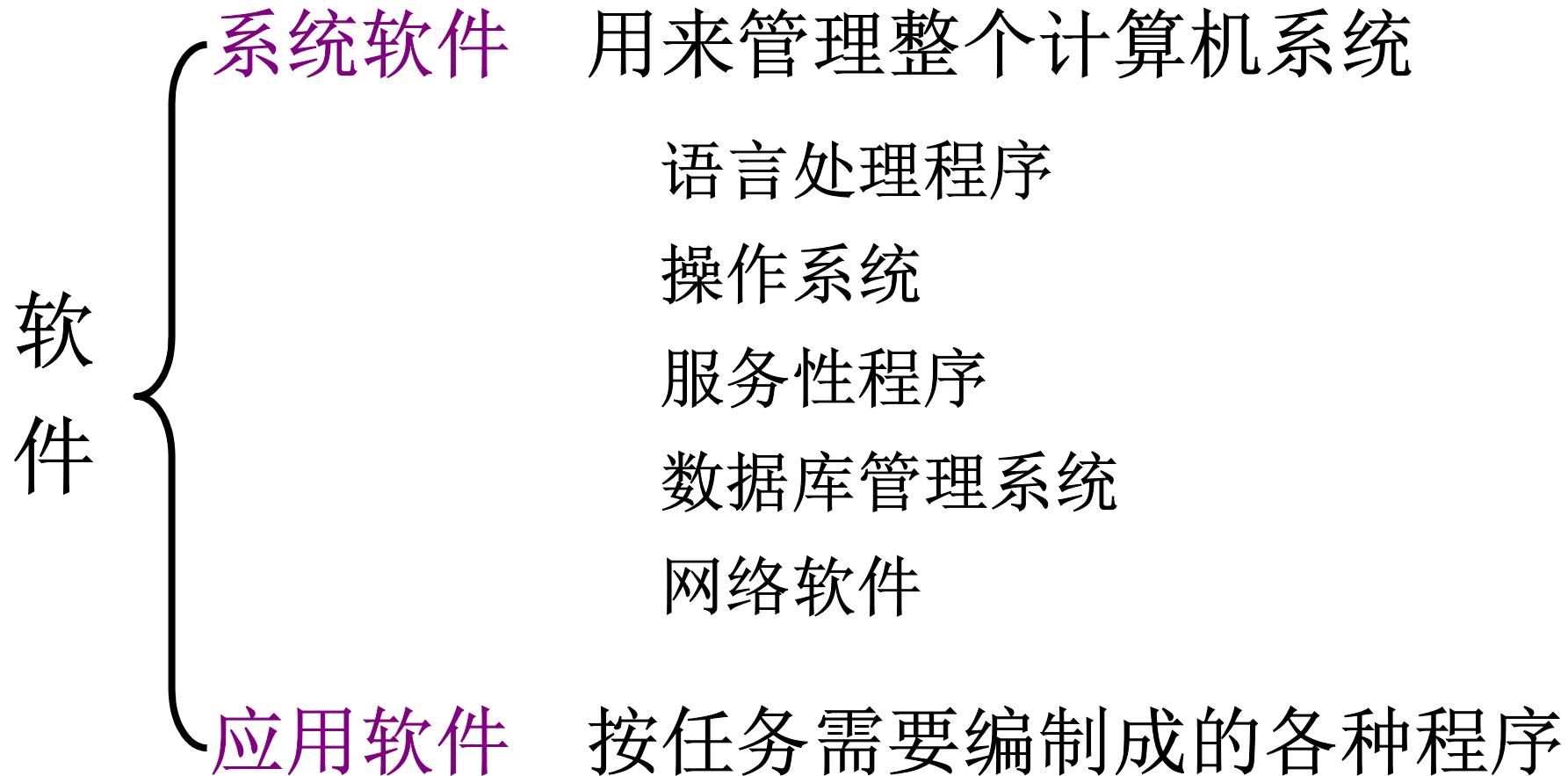
## 一、计算机的软硬件概念

### 1. 计算机系统

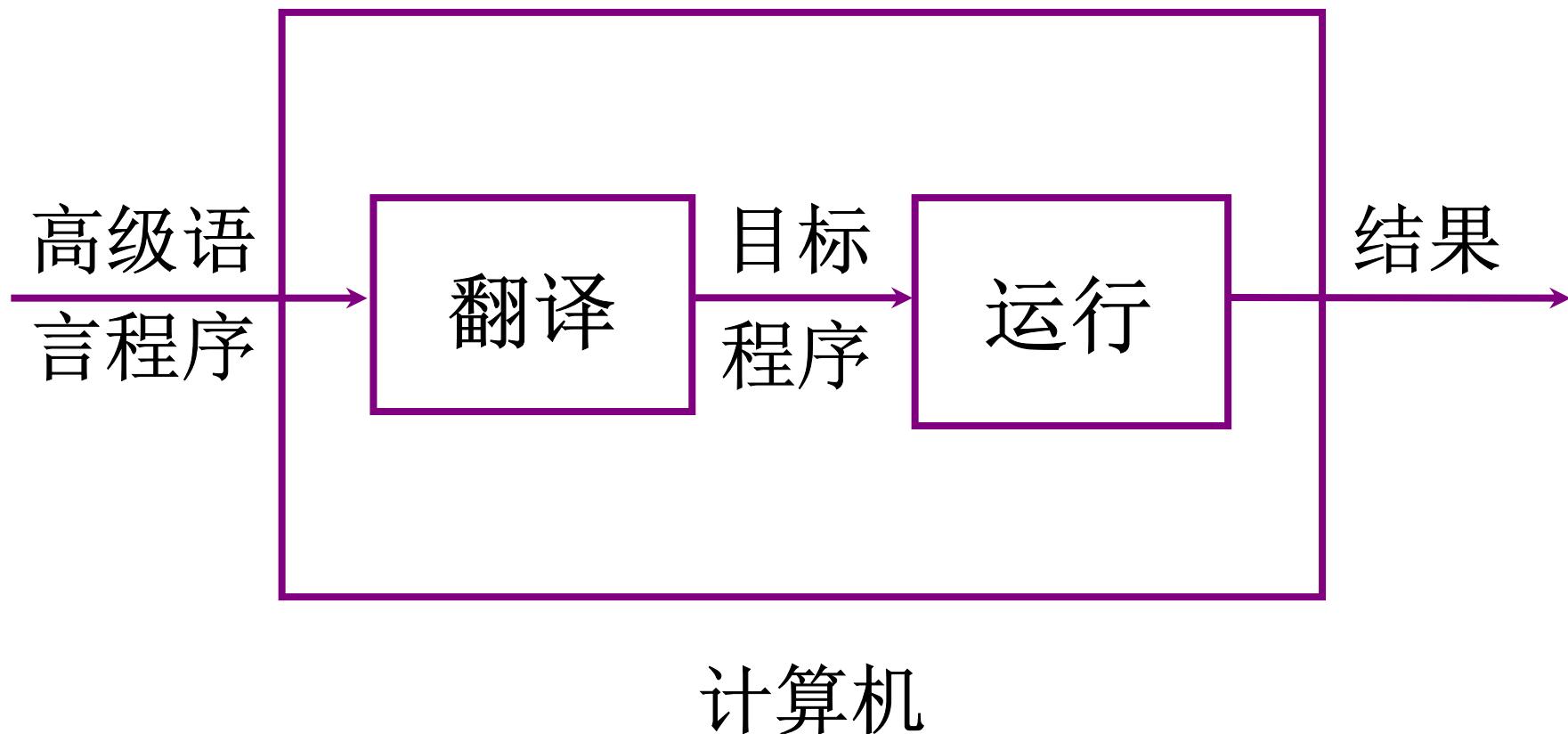
计算机系统 { 硬件    计算机的实体，  
                如主机、外设等  
                软件    由具有各类特殊功能  
                的信息（程序）组成



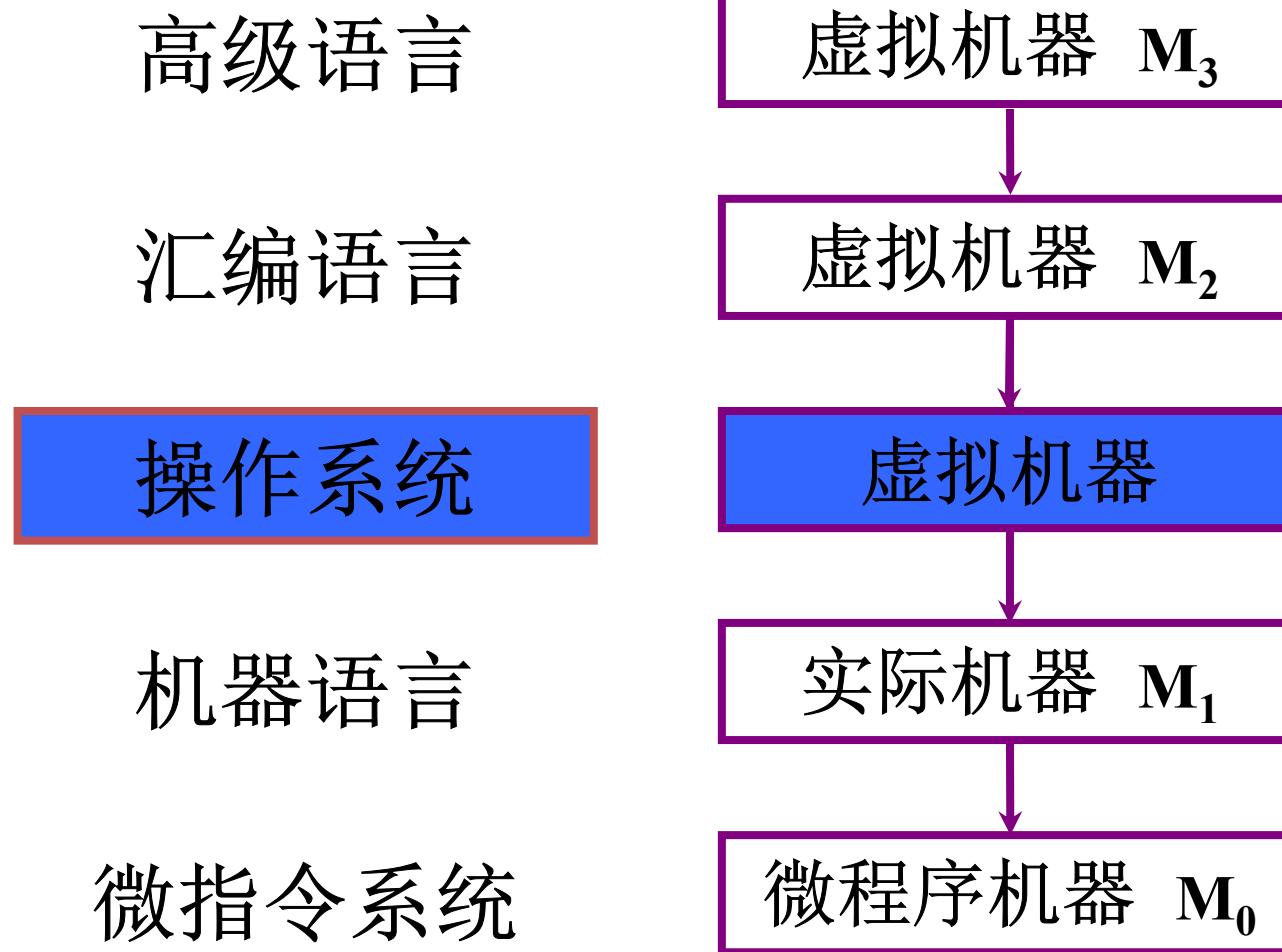
# 1.1



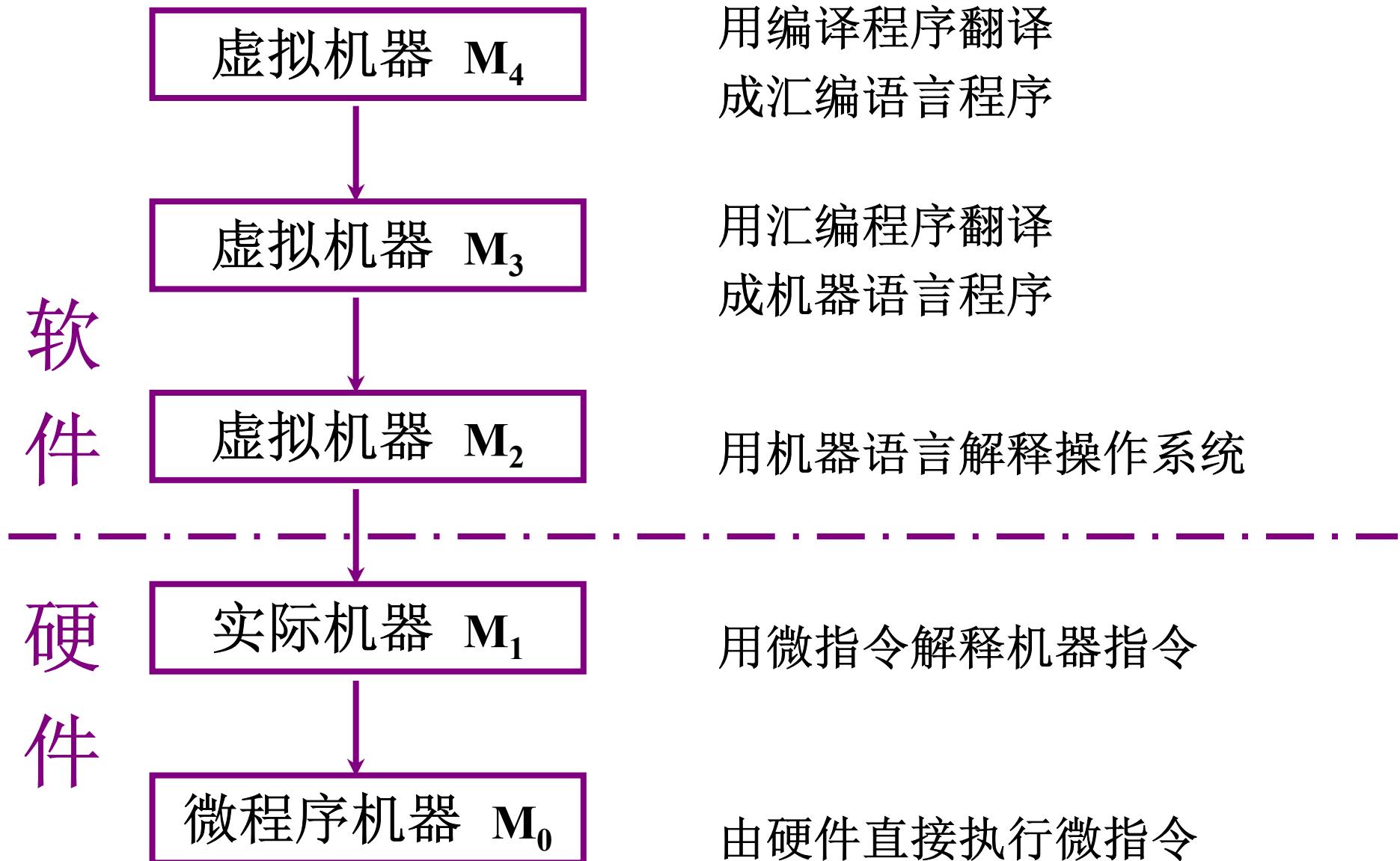
## 2. 计算机的解题过程



## 二、计算机系统的层次结构



# 1.1



### 三、计算机体系结构和计算机组成

有无乘法指令

计算机 程序员所见到的计算机系统的属性  
体系结构 概念性的结构与功能特性

(指令系统、数据类型、寻址技术、I/O机理)

计算机 实现计算机体系结构所体现的属性  
组成 (具体指令的实现)

如何实现乘法指令



Architecture = Instruction Set Arch. + Organization

## Computer Design

### Instruction Set Design

- Machine Language
- Compiler View
- "Computer Architecture"
- "Instruction Set Architecture"

"Building Architect"

“建筑设计师”: 功能定义与设计

### Computer Hardware Design

- logic & physical Implementation
  - Logic Designer's View
  - "Micro-Architecture"
  - " Computer Organization"
- "Construction Engineer"

“建造工程师”: 具体逻辑结构设计  
和物理实现技术

例如，是否提供“乘法指令”是ISA设计要考虑的问题；如何实现乘法指令（用专门乘法器还是用一个加法器+移位器实现）是组成(Organization)考虑的问题；如何布线、用什么材料和工艺设计等是实现技术(Technology)考虑的问题。

## 1.2 计算机的基本组成

冯.诺依曼结构计算机

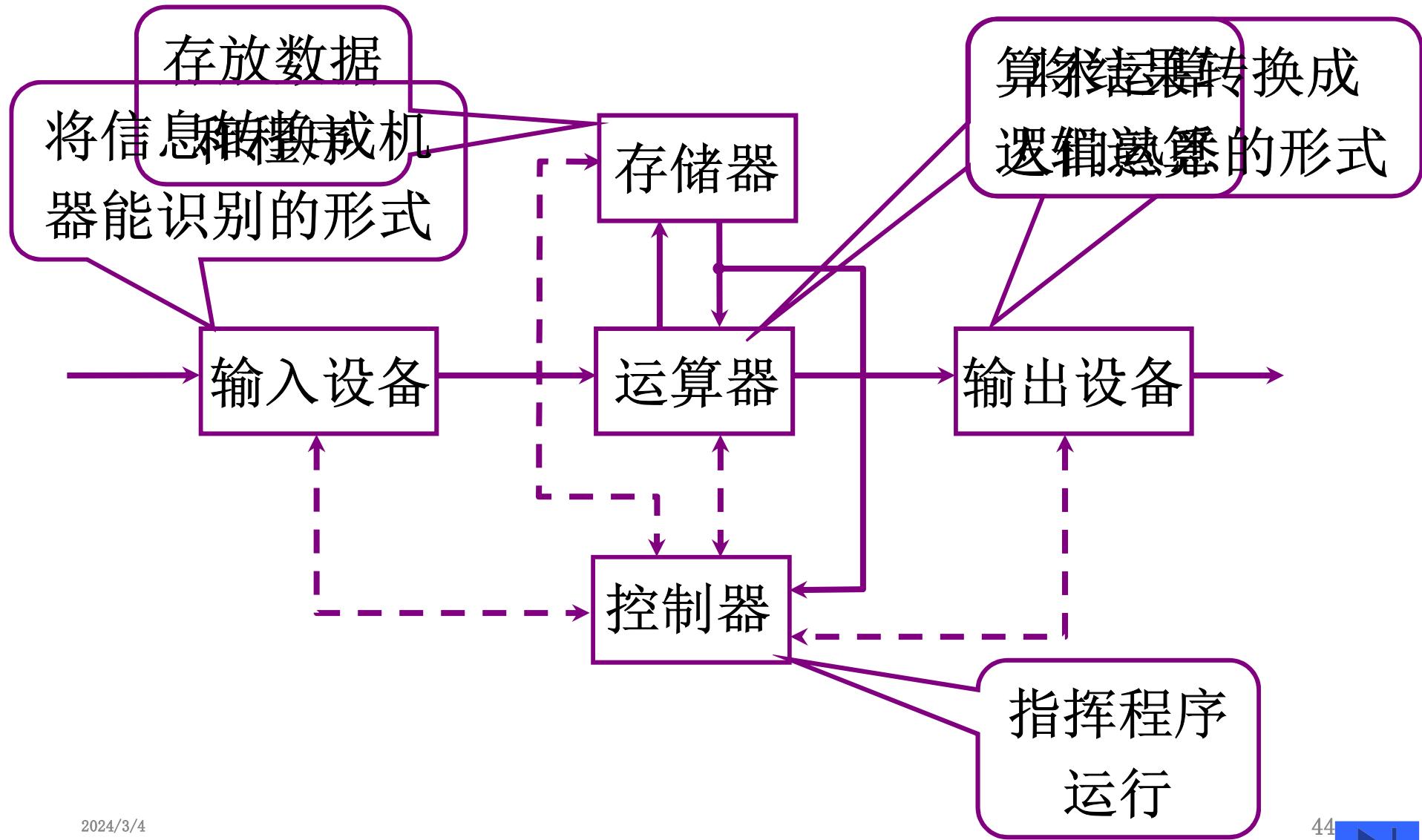
# 1.2 计算机的基本组成

## 一、冯·诺依曼计算机的特点

1. 计算机由五大部件组成
2. 指令和数据以同等地位存于存储器，  
可按地址寻访
3. 指令和数据用二进制表示
4. 指令由操作码和地址码组成
5. 存储程序
6. 以运算器为中心

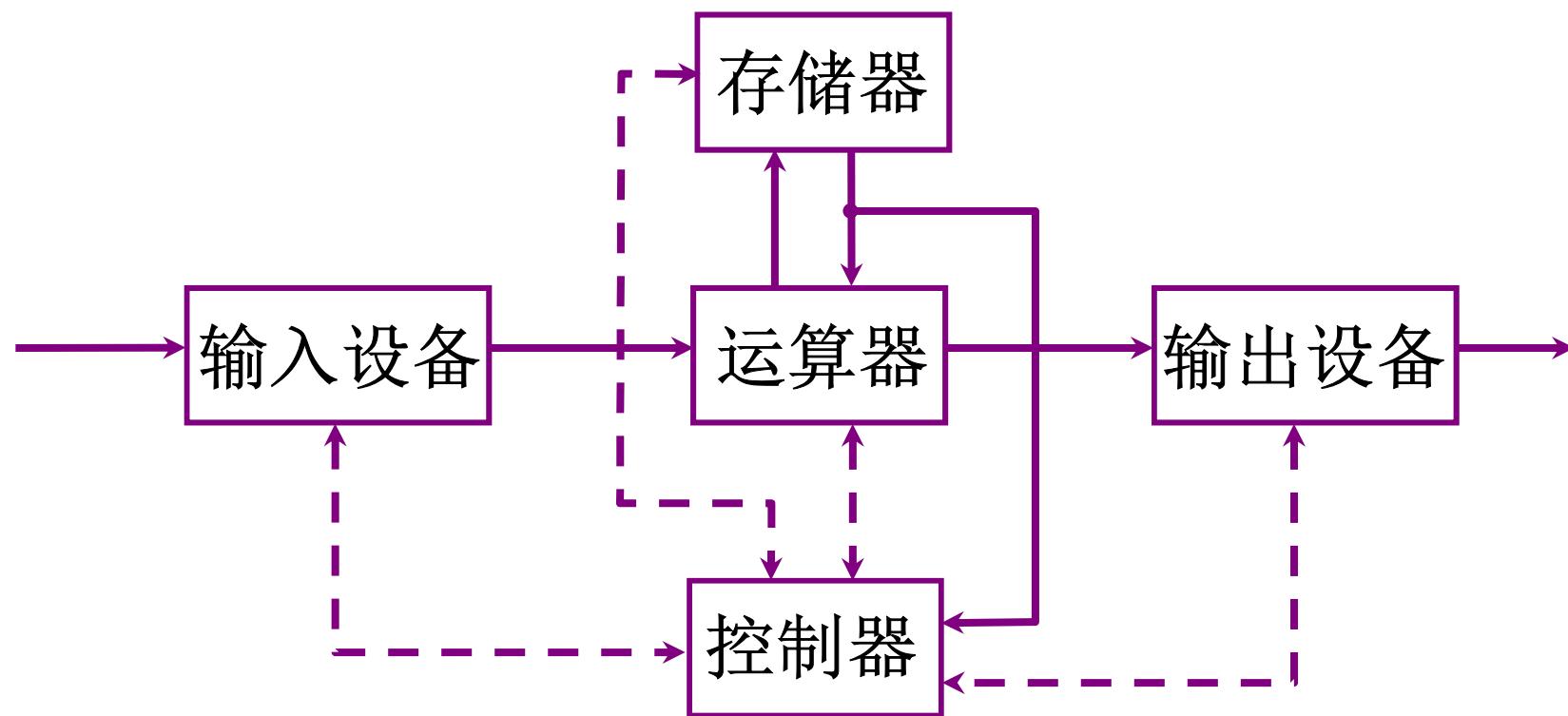


# 冯·诺依曼计算机硬件框图



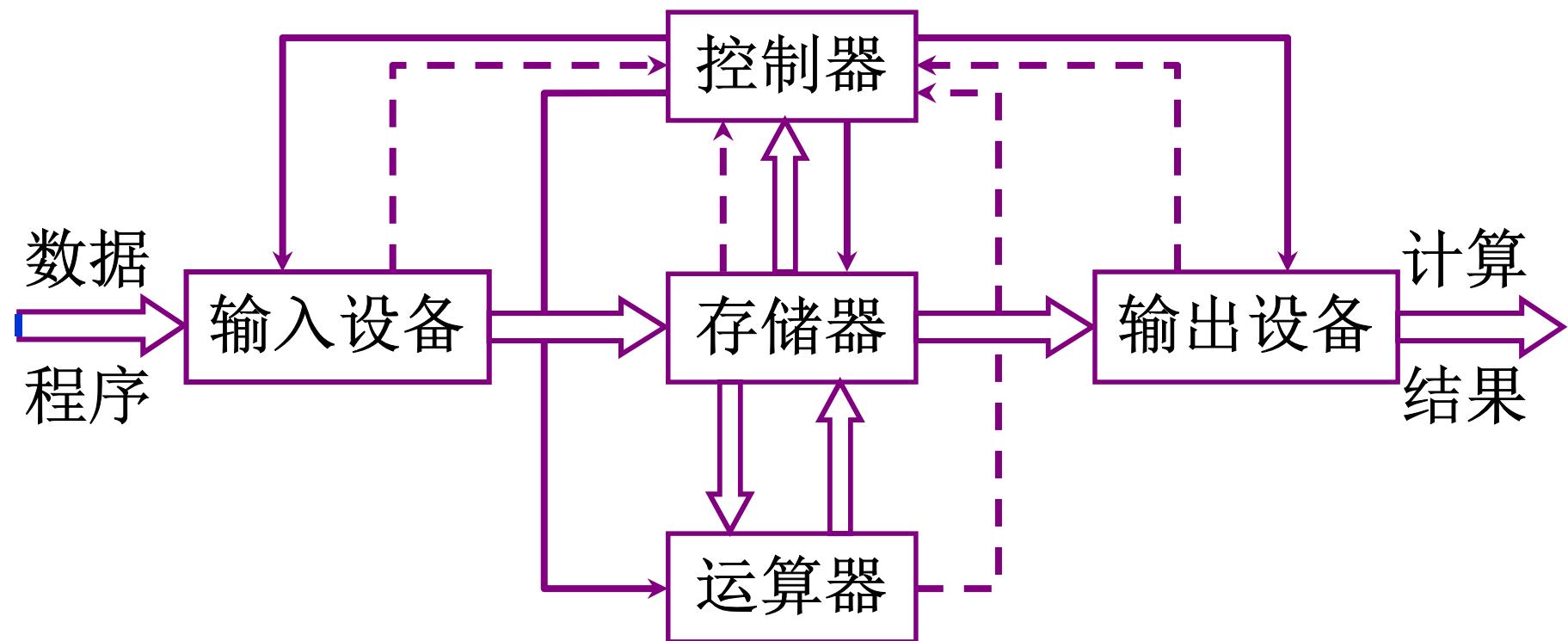
# 冯·诺依曼计算机硬件框图

1.2



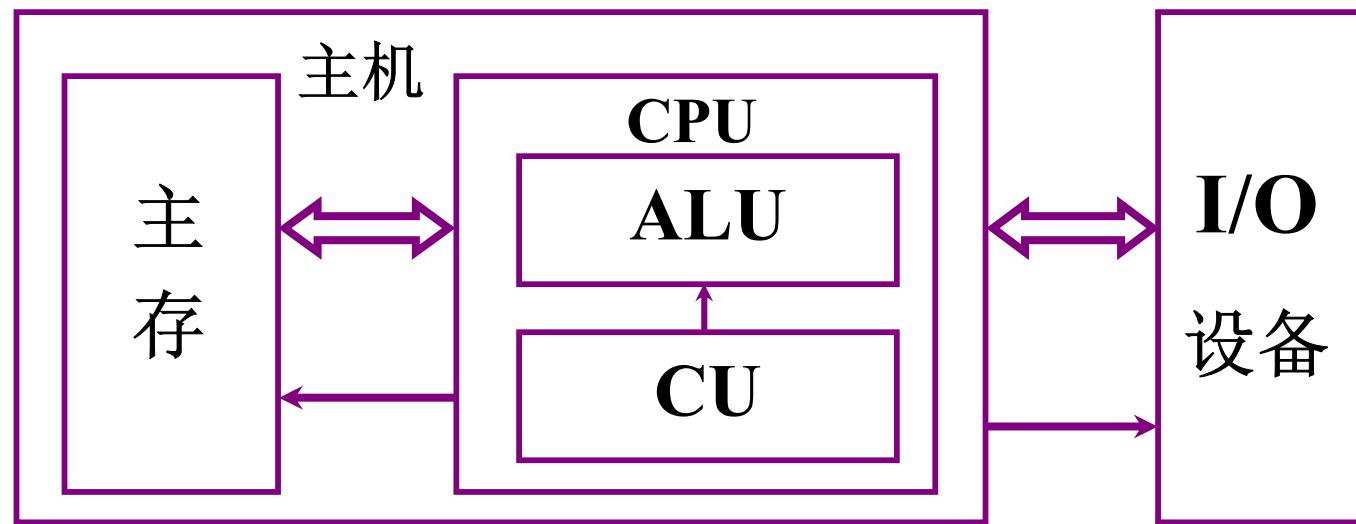
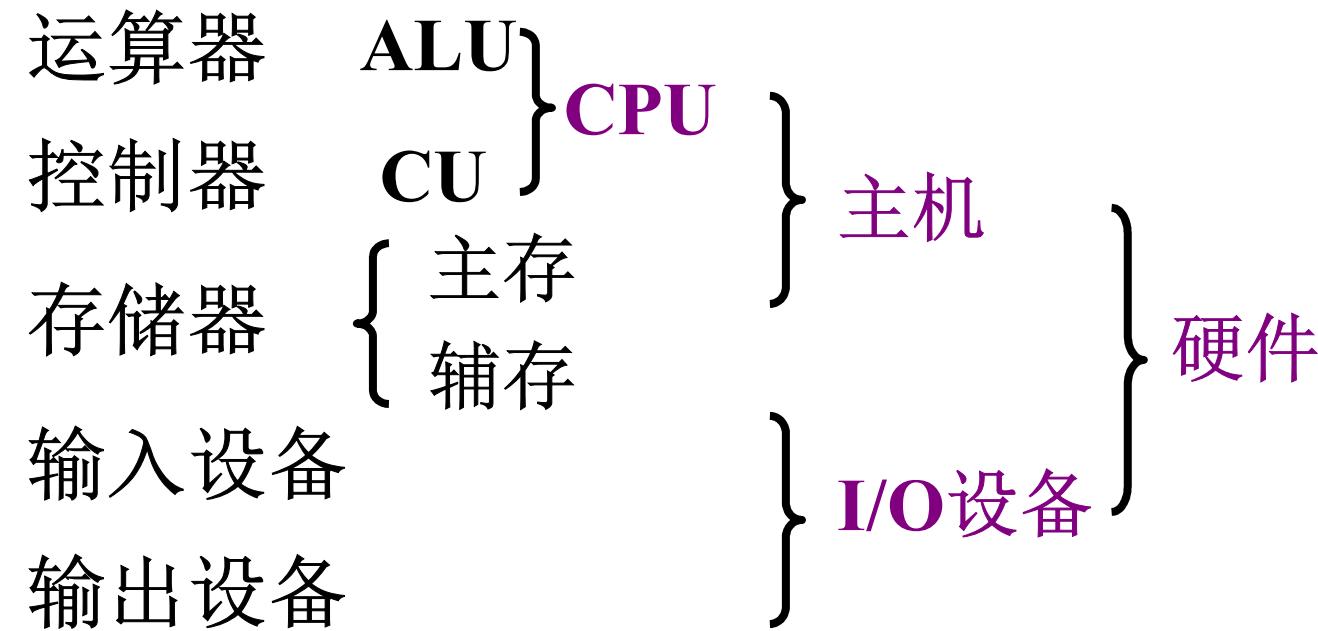
## 二、计算机硬件框图

### 1. 以存储器为中心的计算机硬件框图



1.2

## 2. 现代计算机硬件框图



### 三、计算机的工作步骤

1.2

#### 1. 上机前的准备

- 建立数学模型
- 确定计算方法

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \frac{x^9}{9!} - \dots$$

$$y_{n+1} = \frac{1}{2} \left( y_n + \frac{x}{y_n} \right) \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

- 编制解题程序

程序 —— 运算的 全部步骤

指令 —— 每 一个步骤



# 编程举例

## 1.2

计算  $ax^2 + bx + c = (ax + b)x + c$

取  $x$  至运算器中

乘以  $x$  在运算器中

乘以  $a$  在运算器中

存  $ax^2$  在存储器中

取  $b$  至运算器中

乘以  $x$  在运算器中

加  $ax^2$  在运算器中

加  $c$  在运算器中

取  $x$  至运算器中

乘以  $a$  在运算器中

加  $b$  在运算器中

乘以  $x$  在运算器中

加  $c$  在运算器中



## 指令格式举例

操作码	地址码
-----	-----

取数       $\alpha$        $[\alpha] \rightarrow \text{ACC}$

000001    0000001000

存数       $\beta$        $[\text{ACC}] \rightarrow \beta$

加           $\gamma$        $[\text{ACC}] + [\gamma] \rightarrow \text{ACC}$

乘           $\delta$        $[\text{ACC}] \times [\delta] \rightarrow \text{ACC}$

打印        $\sigma$        $[\sigma] \rightarrow \text{打印机}$

停机



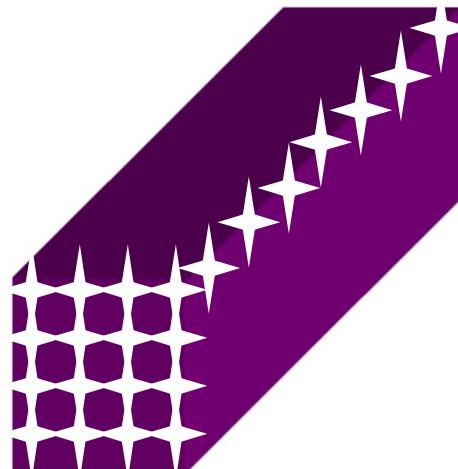
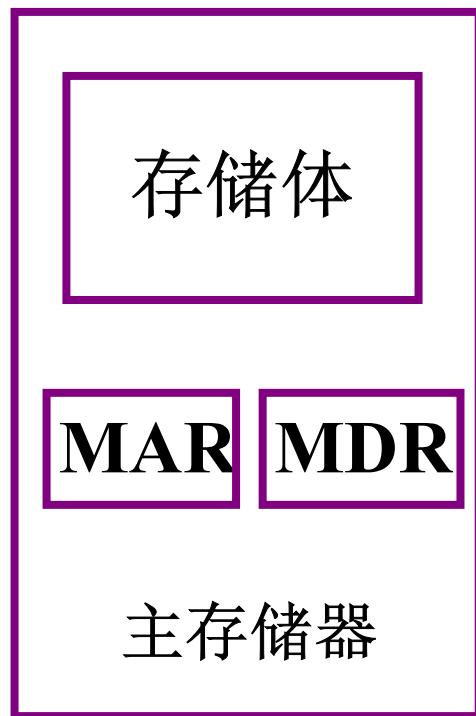
# 计算 $ax^2 + bx + c$ 程序清单

1.2

指令和数据存于 主存单元的地址	指令		注释
	操作码	地址码	
0	000001	0000001000	取数x至ACC
1	000100	0000001001	乘a得ax,存于ACC中
2	000011	0000001010	加b得ax+b ,存于ACC中
3	000100	0000001000	乘x得 (ax+b)x,存于ACC中
4	000011	0000001011	加c得 $ax^2 + bx + c$ ,存于ACC
5	000010	0000001100	将 $ax^2 + bx + c$ ,存于主存单元
6	000101	0000001100	打印
7	000110		停机
8	$x$		原始数据 $x$
9	$a$		原始数据 $a$
10	$b$		原始数据 $b$
11	$c$		原始数据 $c$
12			存放结果



# (1) 存储器的基本组成

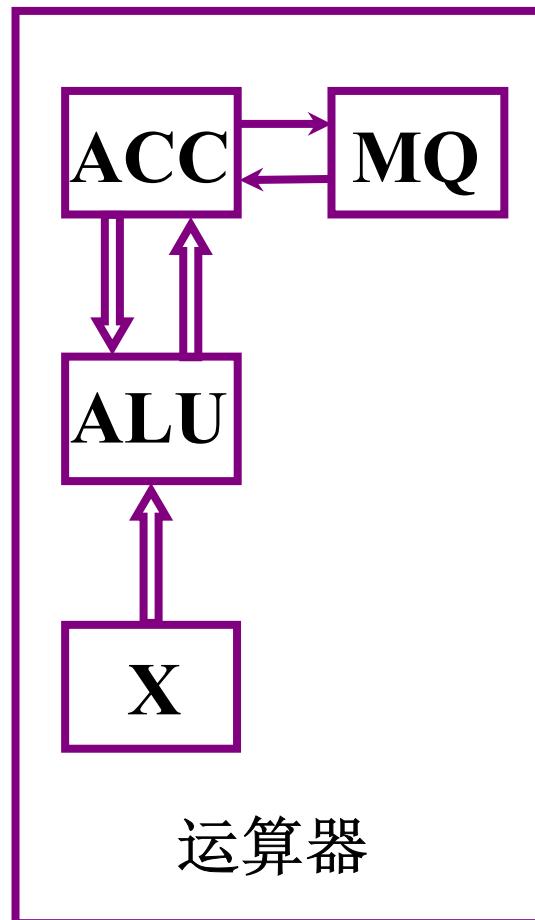


**MAR** 存储器地址寄存器  
反映存储单元的个数

**MDR** 存储器数据寄存器  
反映存储字长

设  $\text{MAR} = 4$  位  
 $\text{MDR} = 8$  位  
存储单元个数 16  
存储字长 8

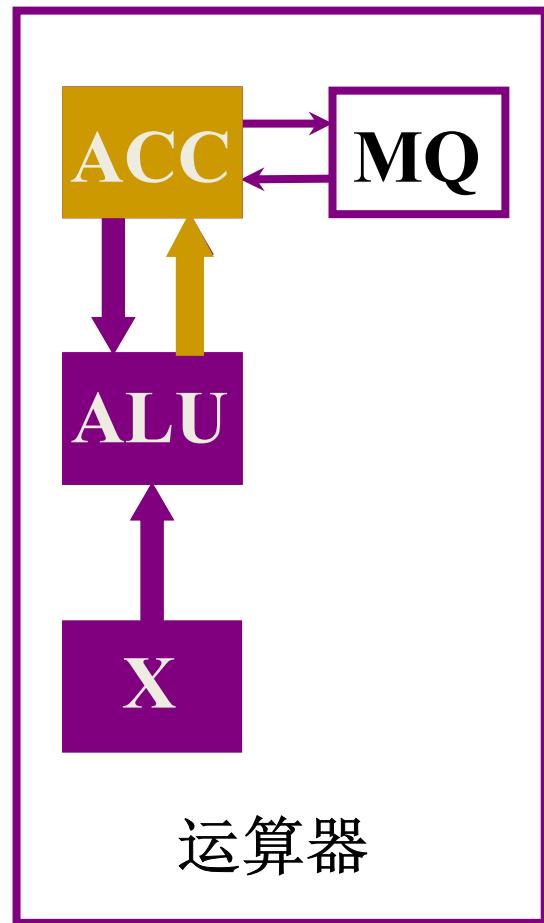
## (2) 运算器的基本组成及操作过程



	ACC	MQ	X
加法	被加数和		加数
减法	被减数差		减数
乘法	乘积高位	乘数 乘积低位	被乘数
除法	被除数 余数	商	除数



## ① 加法操作过程



指令

加 M

初态

ACC

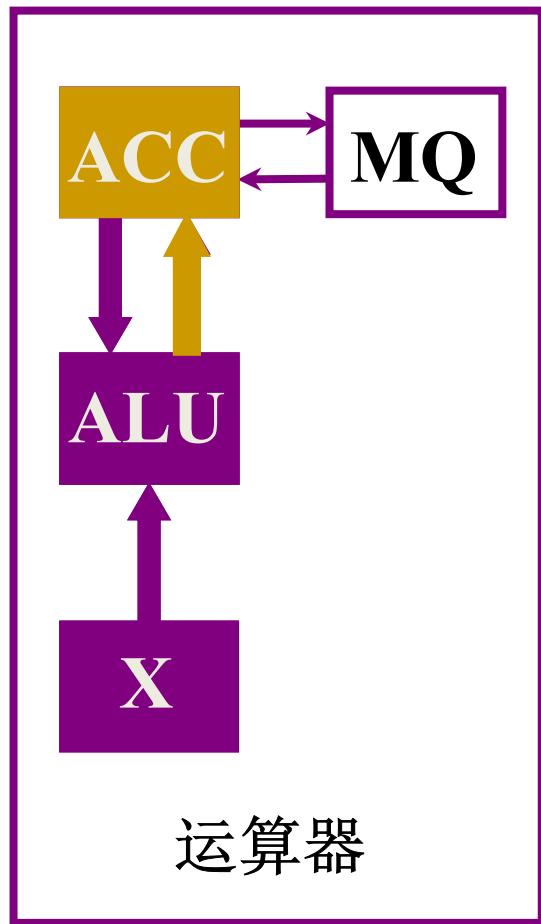
被加数

$$[M] \longrightarrow X$$

$$[ACC] + [X] \longrightarrow ACC$$



## ② 减法操作过程



指令



初态

ACC

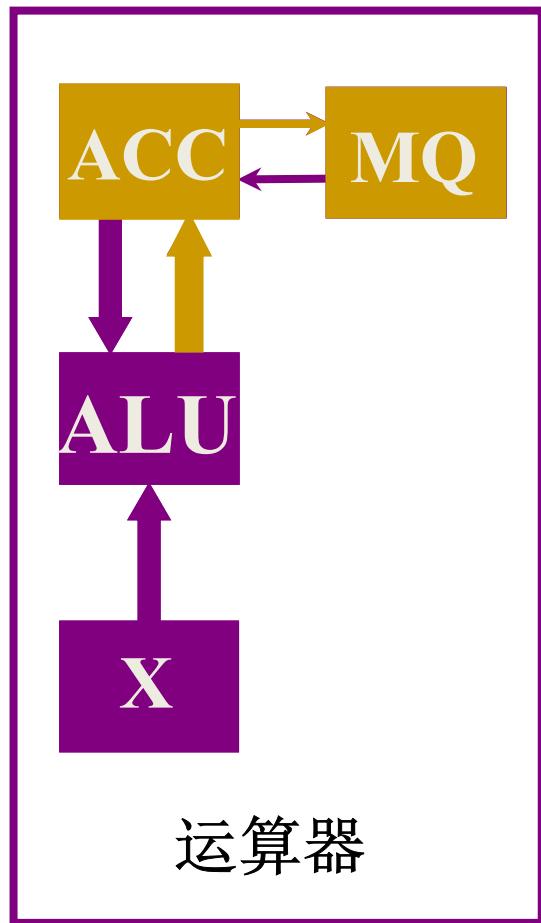
被减数

$$[M] \longrightarrow X$$

$$[ACC] - [X] \longrightarrow ACC$$



## ③ 乘法操作过程



指令



初态

ACC

被乘数

$$[M] \longrightarrow MQ$$

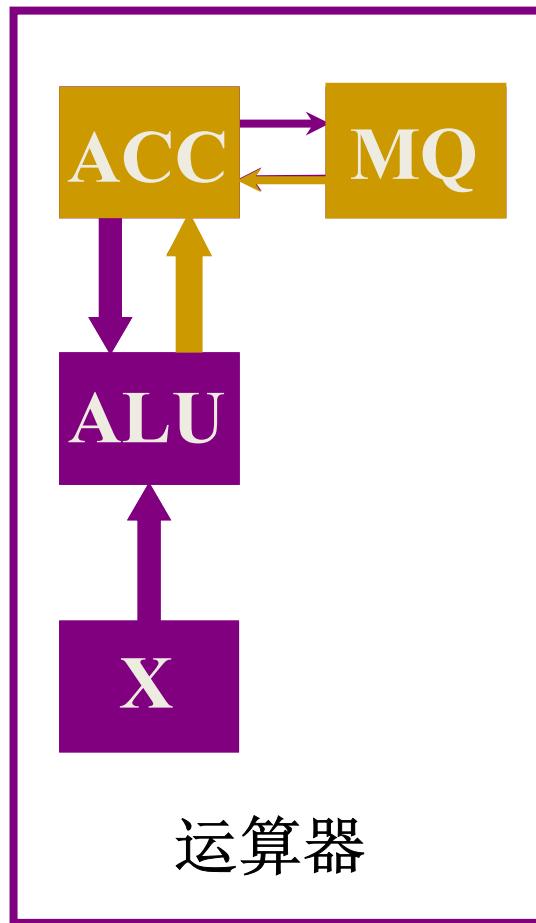
$$[ACC] \longrightarrow X$$

$$0 \longrightarrow ACC$$

$$[X] \times [MQ] \longrightarrow ACC // MQ$$



## ④ 除法操作过程



指令

除	M
---	---

初态

ACC

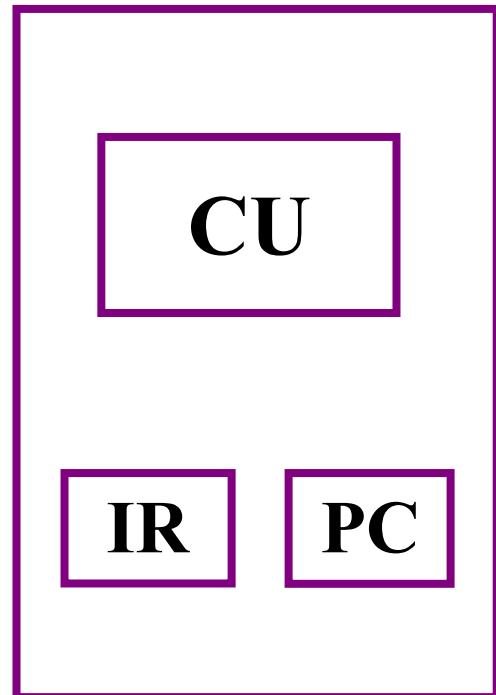
被除数

 $[M] \longrightarrow X$  $[ACC] \div [X] \longrightarrow MQ$ 

余数在ACC中



## (3) 控制器的基本组成



完成  
一条  
指令

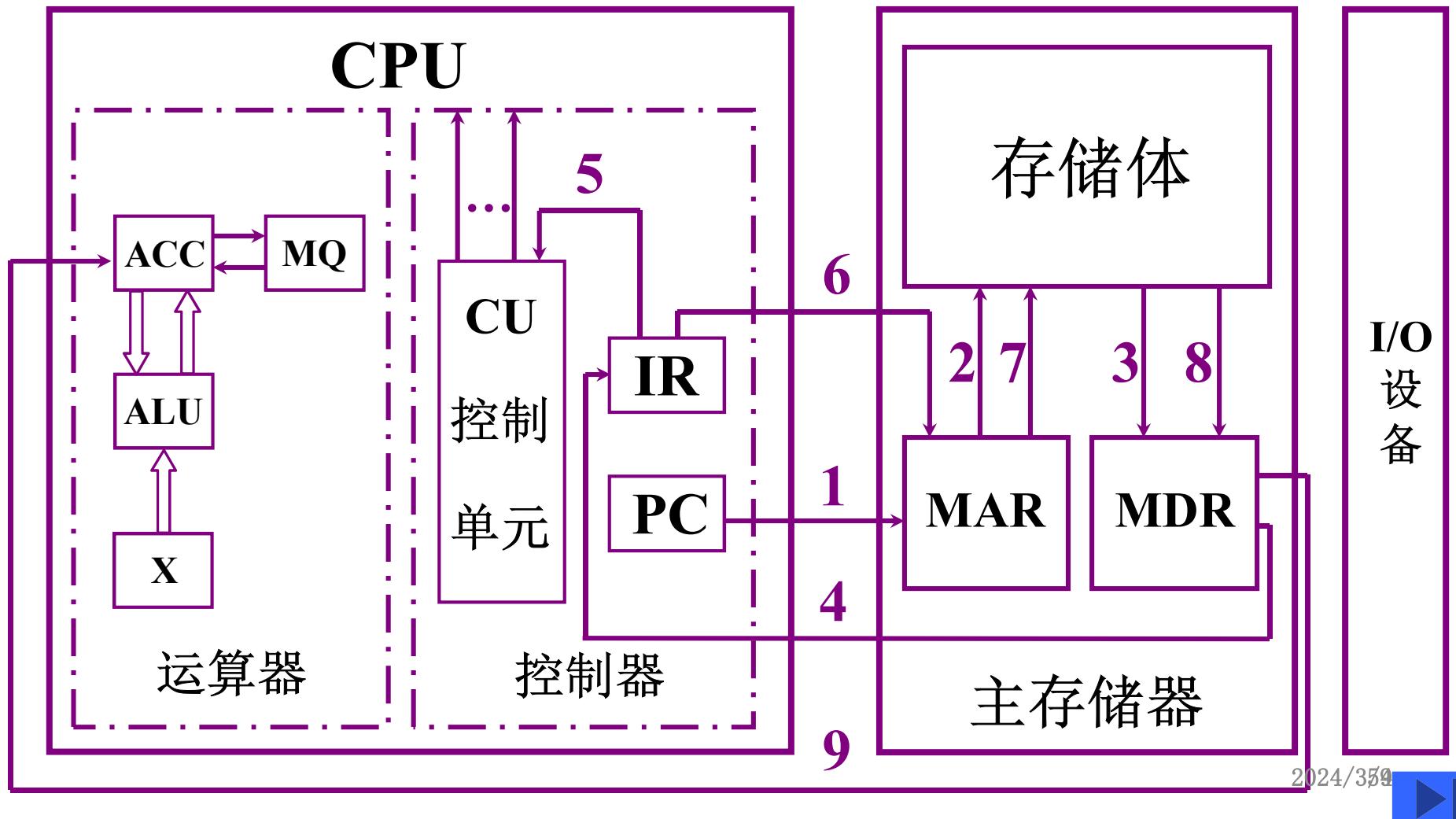
取指令      PC  
分析指令      IR  
执行指令      CU

PC 存放当前欲执行指令的地址，  
具有计数功能  $(PC) + 1 \rightarrow PC$

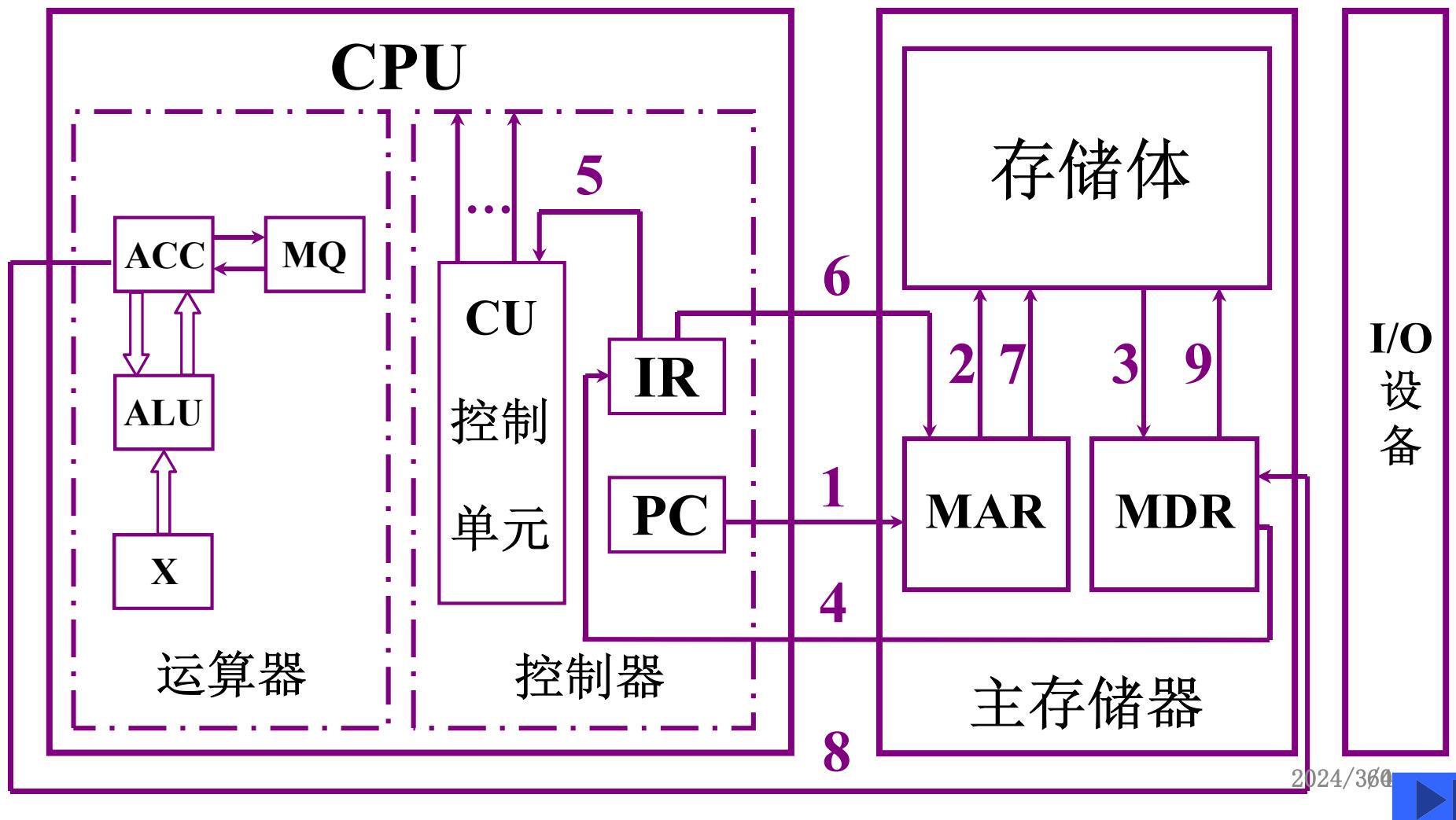
IR 存放当前欲执行的指令



## (4) 主机完成一条指令的过程 以取数指令为例



## (4) 主机完成一条指令的过程 以存数指令为例



(5)  $ax^2 + bx + c$  程序的运行过程

- 将程序通过输入设备送至计算机
- 程序首地址 → PC
- 启动程序运行
- 取指令 PC → MAR → M → MDR → IR , (PC ) + 1 → PC
- 分析指令 OP(IR) → CU
- 执行指令 Ad(IR) → MAR → M → MDR → ACC
- :
- 打印结果
- 停机



## 对照参考：

