图灵机的思想与模型简介

战德臣

哈尔滨工业大学　　教授.博士生导师

教育部大学计算机课程教学指导委员会委员

Research Center on Intelligent Computing for Enterprises & Services, Harbin Institute of Technology

战德臣 教授

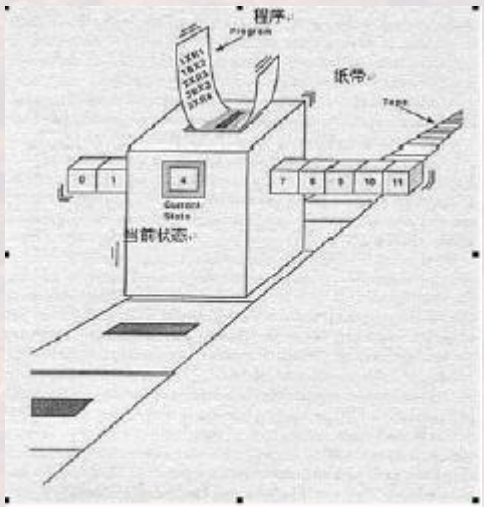
图灵及其贡献

◆图灵(Alan Turing, 1912~1954)，出生于英国伦敦，19 岁入剑桥皇家学院，22 岁当选为皇家学会会员。

◆1937 年，发表了论文《论可计算数及其在判定问题中的应用》，提出了**图灵机模型**，后来，冯·诺依曼根据这个模型设计出历史上第一台电子计算机。

◆1950 年，发表了划时代的文章：《机器能思考吗?》,成为了人工智能的开山之作。

◆计算机界于1966年设立了最高荣誉奖：**ACM图灵奖**。



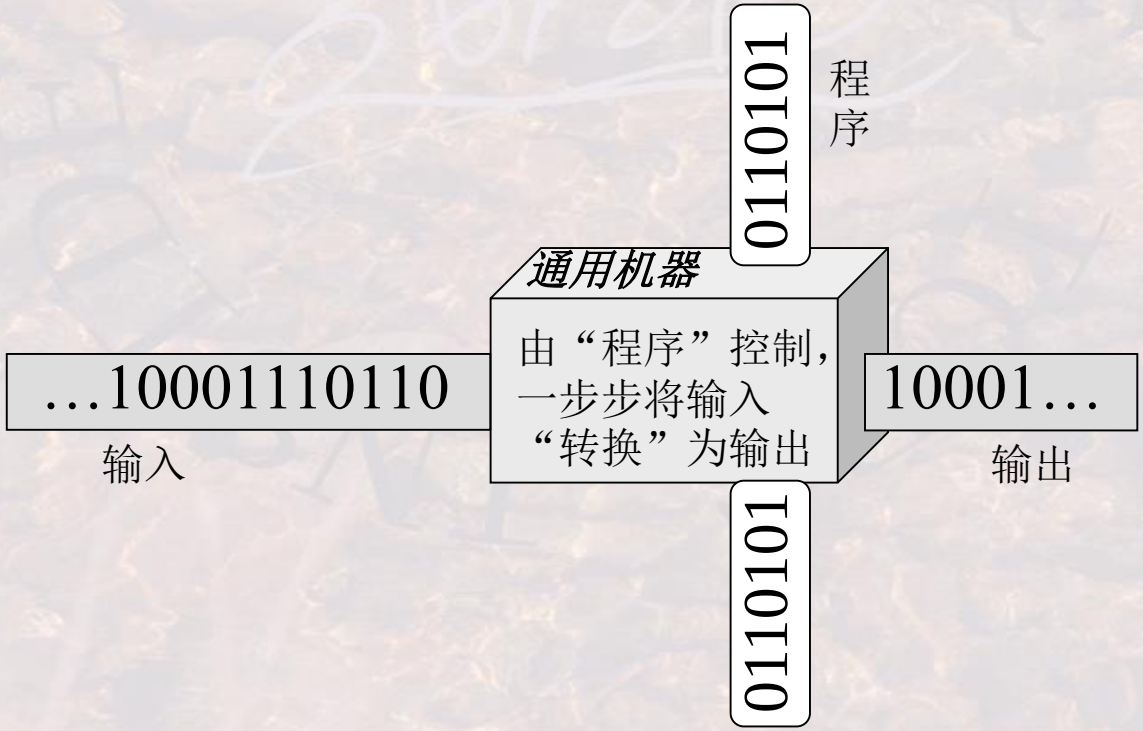
图灵机装置示意图

你能查阅一下哪些人获得图灵奖了吗？
因为什么贡献而获奖呢？

战德臣 教授

什么是计算

◆所谓计算就是计算者(人或机器)对一条两端可无限延长的纸带上的一串0或1，执行指令一步一步地改变纸带上的0或1，经过有限步骤最后得到一个满足预先规定的符号串的变换过程。



战德臣 教授

图灵机的思想

是关于数据、指令、程序及程序/指令自动执行的基本思想。

- 输入被制成一串0和1的纸带，送入机器中----**数据**。如000100001000011…
- 机器可对输入纸带执行的**基本动作**包括：“翻转0为1”，或“翻转1为0”，“前移一位”，“停止”。
- 对基本动作的控制----**指令**，机器是按照指令的控制选择执行哪一个动作，指令也可以用0和1来表示：**01**表示“翻转0为1”(当输入为1时不变)，**10**表示“翻转1为0”(当输入0时不变), **11**表示“前移一位”, **00**表示“停止”。
- 输入如何变为输出的控制可以用指令编写一个**程序**来完成, 如: 01111011011011100…
- 机器能够读取程序，按程序中的指令顺序读取指令，

读一条指令**执行**一条指令。由此实现**自动计算**。

战德臣 教授

图灵机模型

◆基本的图灵机模型为一个七元组,如右图

◆几点结论:

(1) 图灵机是一种思想模型，它由一个控制器(有限状态转换器)，一条可无限延伸的带子和一个在带子上左右移动的读写头构成。

(2) 程序是五元组<q,X,Y,R(或L或N),p>形式的指令集。其定义了机器在一个特定状态q下从方格中读入一个特定字符X时所采取的动作为在该方格中写入符号Y, 然后向右移一格R (或向左移一格L或不移动N), 同时将机器状态设为p供下一条指令使用。

$M=(Q,\Sigma,\Gamma,\delta,q_0,B,F)$

其中:

Q:状态的有穷集合

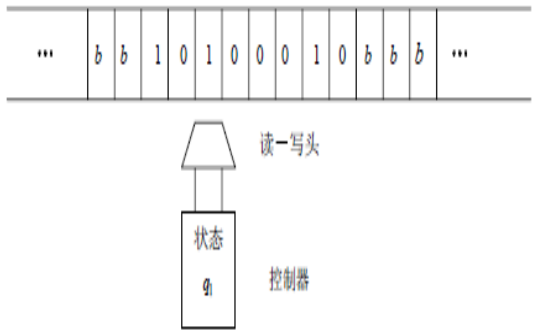
q_0:开始状态

F:终止状态集合

Γ:带符号表

B:空白符号

Σ:输入字母表



δ:移动函数,(1):$\delta(q,X)=(p,Y,R)$表示M在状态q读入符号X,将状态改为p,并在这个X所在的带方格中印刷符号Y,然后将读头向右移动一格.

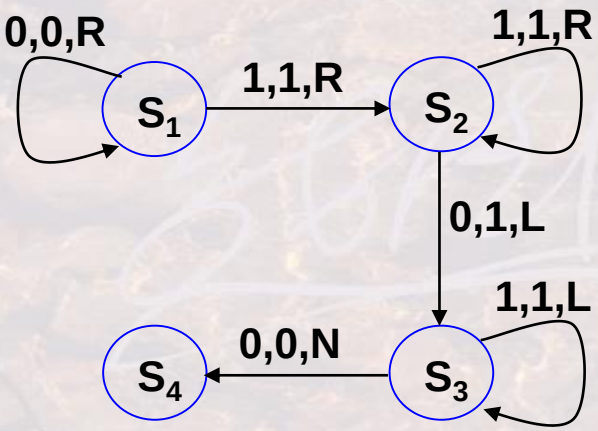
(2):$\delta(q,X)=(p,Y,L)$表示M在状态q读入符号X,将状态改为p,并在这个X所在的带方格中印刷符号Y,然后将读头向左移动一格.

战德臣 教授

图灵机模型示例。 (注:(q,X,Y,R(或L或N),p), 状态图中圆圈内的是状态，箭线上的是<X,Y,R>, 其含义见前页)

S_1：开始状态
S_2：右移状态
S_3：左移状态
S_4：停机状态

$(S_1,0,0,R,S_1)$
$(S_1,1,1,R,S_2)$
$(S_2,1,1,R,S_2)$
$(S_2,0,1,L,S_3)$
$(S_3,1,1,L,S_3)$
$(S_3,0,0,N,S_4)$



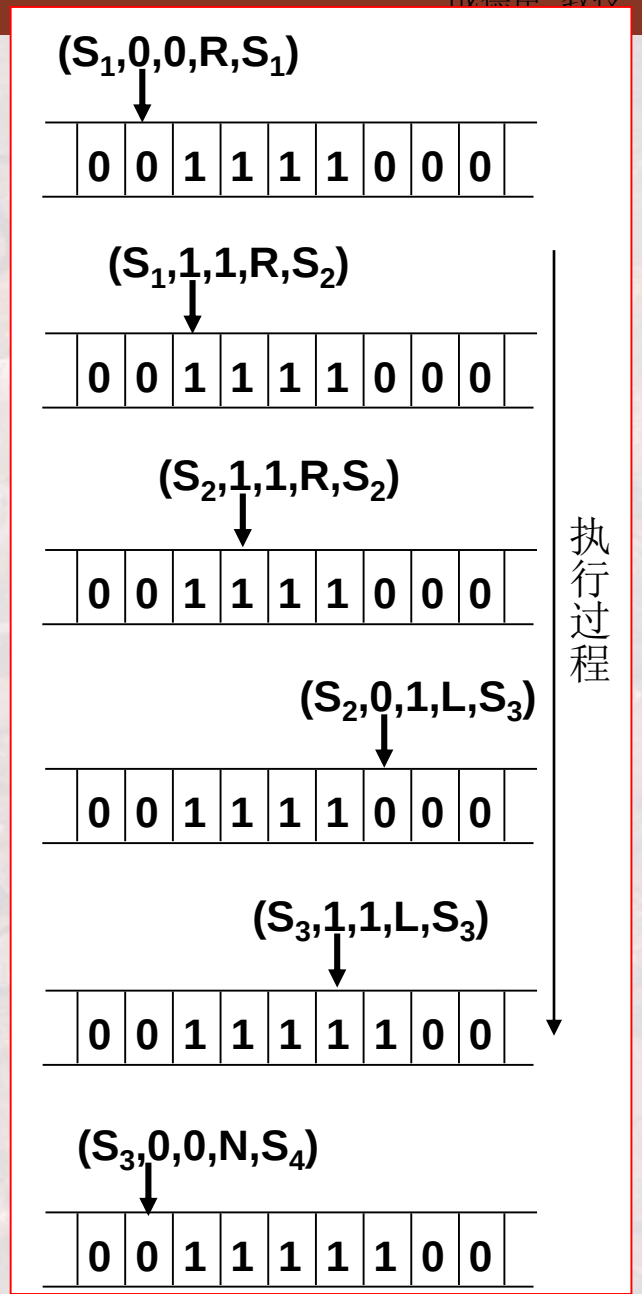
控制器

0	0	1	1	1	1	0	0	0

0	0	1	1	0	0	0	1	1

你能否用另一个输入模拟一下这个程序的执行呢?

功能：将一串连续1的后面再加一位1



战德臣 教授

几点结论(续):

◆(3)图灵机模型被认为是计算机的基本理论模型

----计算机是使用相应的程序来完成任何设定好的任务。图灵机是一种离散的、有穷的、构造性的问题求解思路，一个问题的求解可以通过构造其图灵机(即程序)来解决。

◆(4)图灵认为：凡是能用算法方法解决的问题也一定能用图灵机解决；凡是图灵机解决不了的问题任何算法也解决不了----图灵可计算性问题。

(4)小结?

战德臣 教授


程序&指令
(计算规则)
输入
按计算规则(程序)
对输入进行变换
得到输出
输出
输入/输出都是0
和1的形式表达
程序和指令也是
0和1的形式表达
程序可用状态
转换图来表达

冯.诺依曼计算机: 思想与构成

战德臣

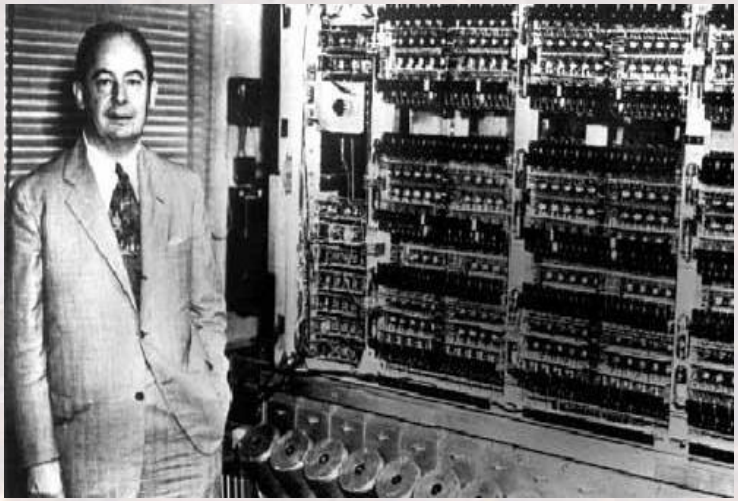
哈尔滨工业大学　　教授.博士生导师

教育部大学计算机课程教学指导委员会委员

Research Center on Intelligent Computing for Enterprises & Services, Harbin Institute of Technology

战德臣 教授

冯.诺依曼(Von.Neumann)计算机



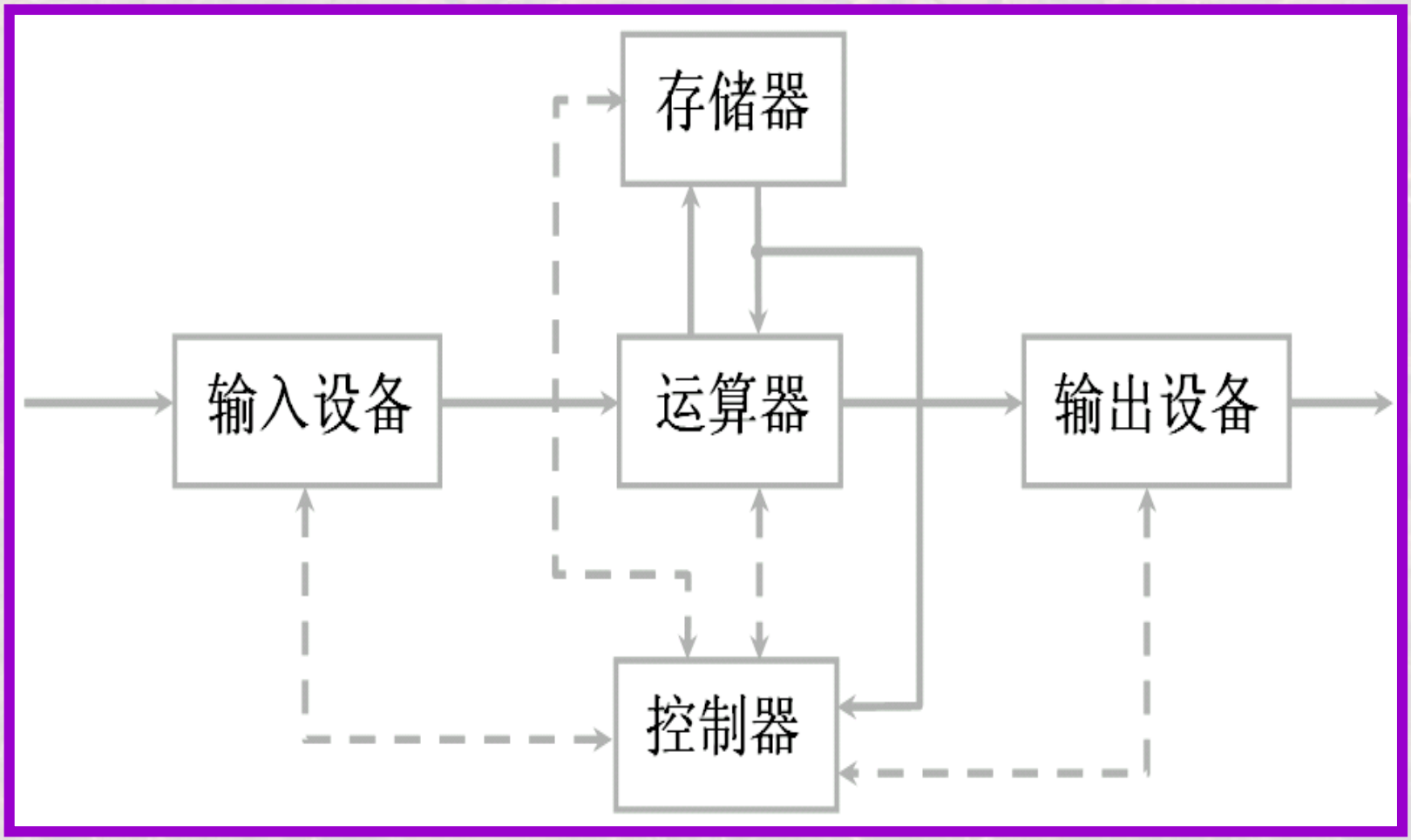
◆1944~1945年间，冯.诺伊曼提出“存储程序”的计算机设计思想，并进行了实践，现代计算机普遍来讲属于冯.诺伊曼机体系。

◆冯.诺伊曼机的基本思想：

- **运算**和**存储**分离
- **存储程序**：**指令和数据**以同等地位事先**存于存储器**，可按地址寻访，**连续自动执行**。
- 五大部件构成：**运算器**、**控制器**、**存储器**、**输入设备**和**输出设备**
- 指令和数据用**二进制**表示，指令由操作码和地址码组成
- 以运算器为中心，控制器负责解释指令，运算器负责执行指令

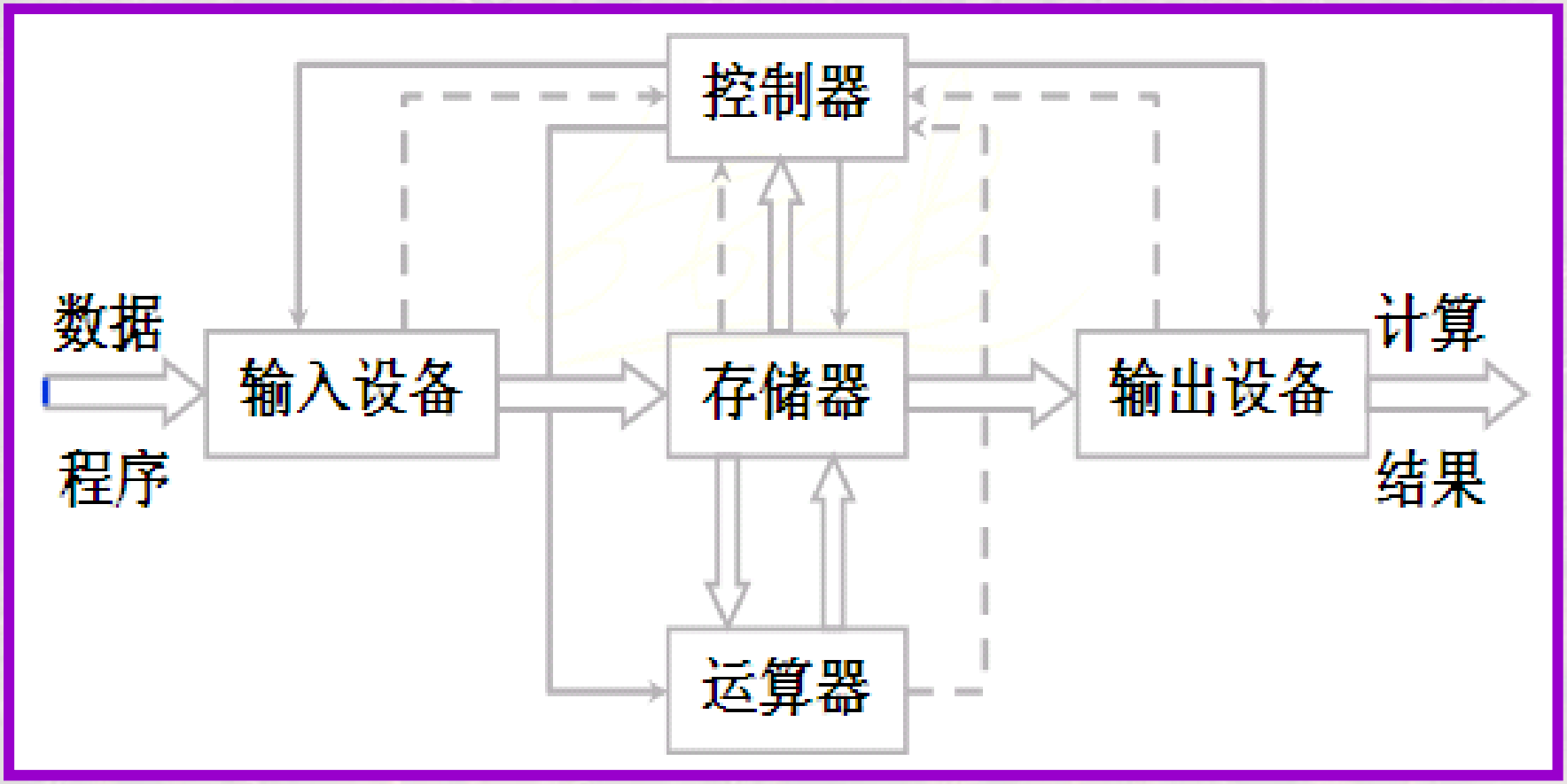
战德臣 教授

以运算器为中心的冯.诺依曼计算机构成图



战德臣 教授

以存储器为中心的现代计算机构成图

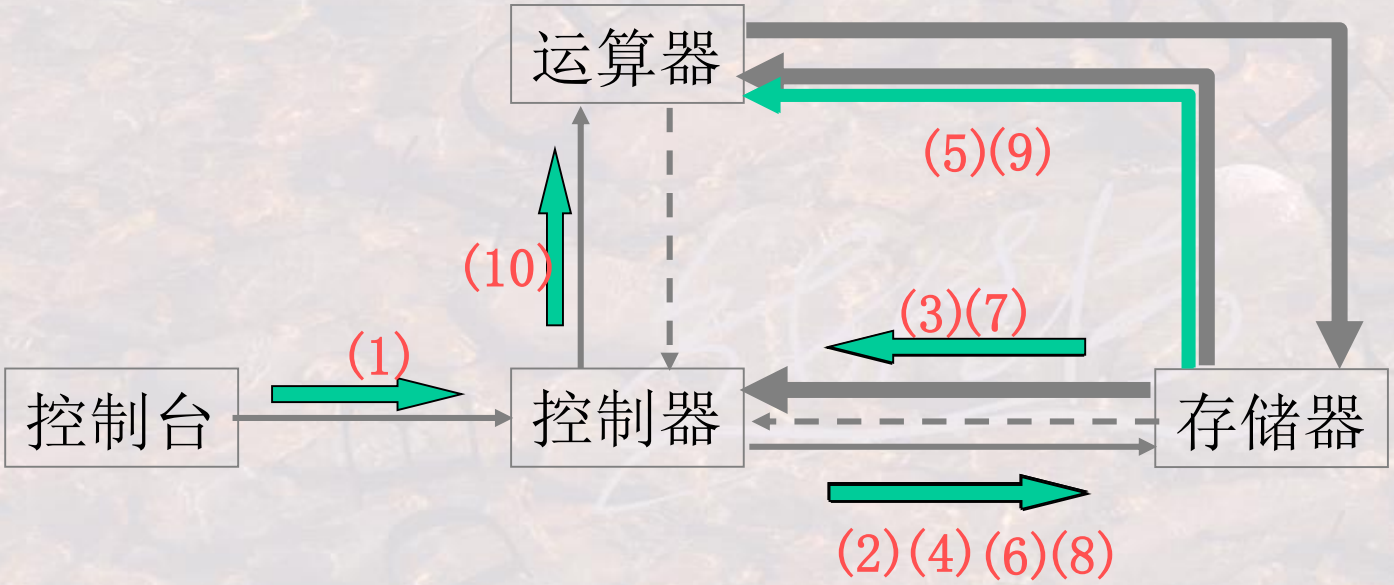


同样是五个部件，以不同的结构来连接，便体现了不同的性能----这就是“系统”：强调“结构”，强调部件连接后的整体性、协同性

(4)冯.诺依曼计算机的工作原理是怎样的?

战德臣 教授

工作原理



存储地址	存储内容(以语义形式表述)
0	指令：取出 125 号单元的操作数(即操作数 x)至运算器中
1	指令：乘以 126 号单元的操作数(即操作数 a, 得 $x \times a$ 在运算器中)
…	…
125	数据：数 x
126	数据：数 a
…	…

(1) 启动控制器工作

(2) 发送第1条指令地址

(3) 取出指令并分析指令

(4) 执行指令：发送操作数x所在地址

(5) 执行指令：取出操作数x

(6) 发送下一条指令地址

(7) 取出指令并分析指令

(8) 执行指令：发送操作数a所在地址

(9) 执行指令：取出操作数a

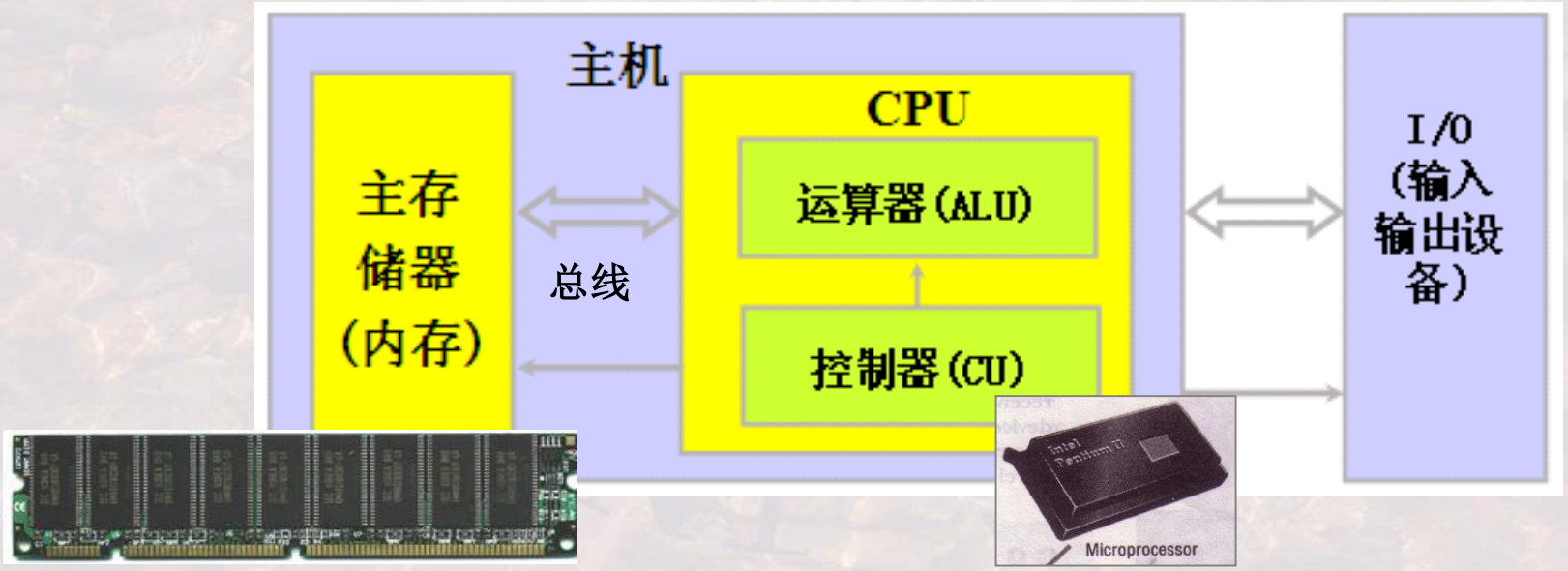
(10) 执行指令：通知运算器计算a乘x

(11) 继续后续指令的取指、执行…

计算机的基本部件

◆**CPU**：中央处理单元(Central Process Unit)，将运算器和控制器集成在一块芯片上，形成微处理器。

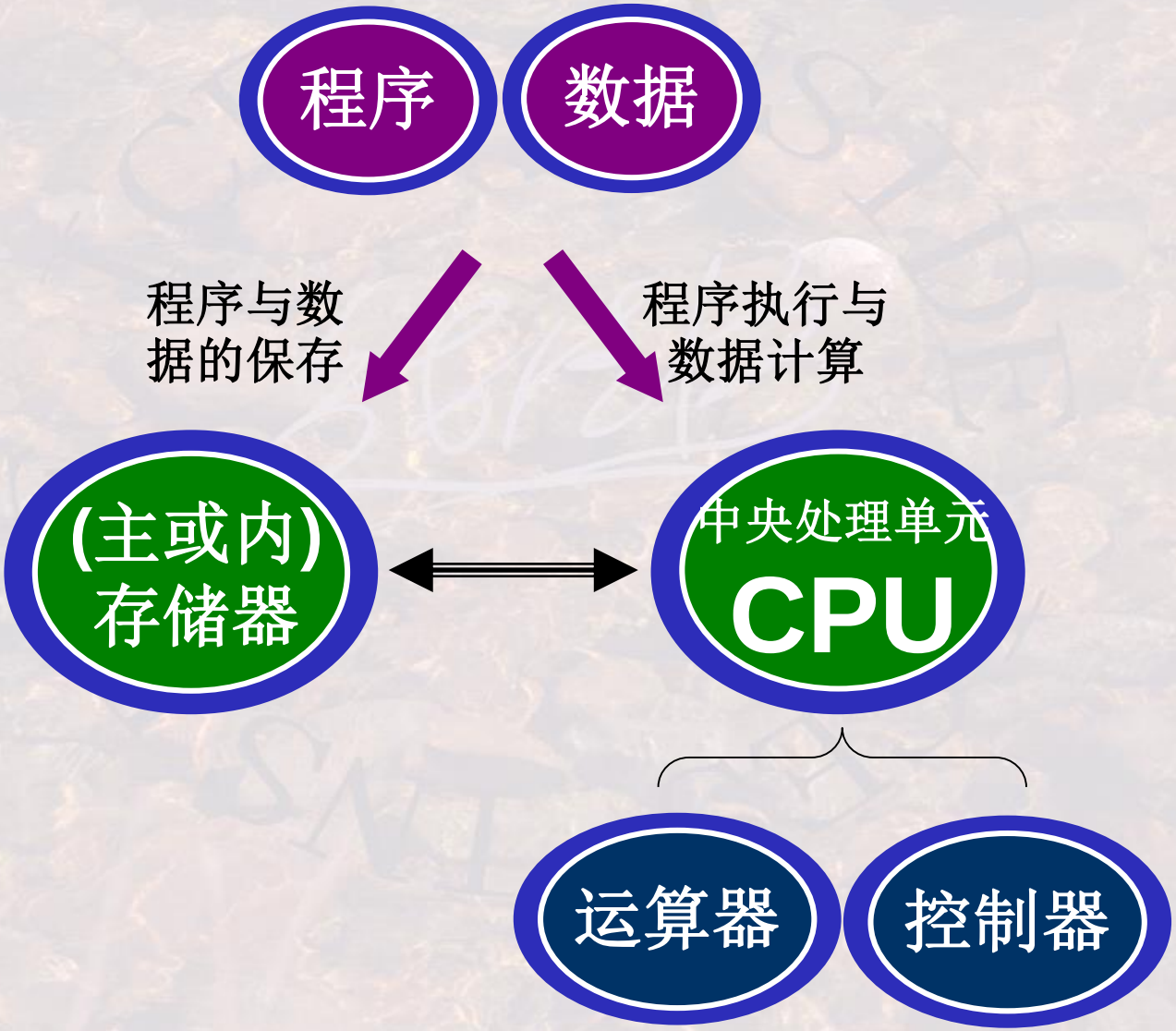
◆**CPU、主存储器、I/O设备及总线成为现代计算机的四大核心部件。**



现代计算机里面，一个微处理器(芯片)可能包含多个CPU，即多核.

(6)小结

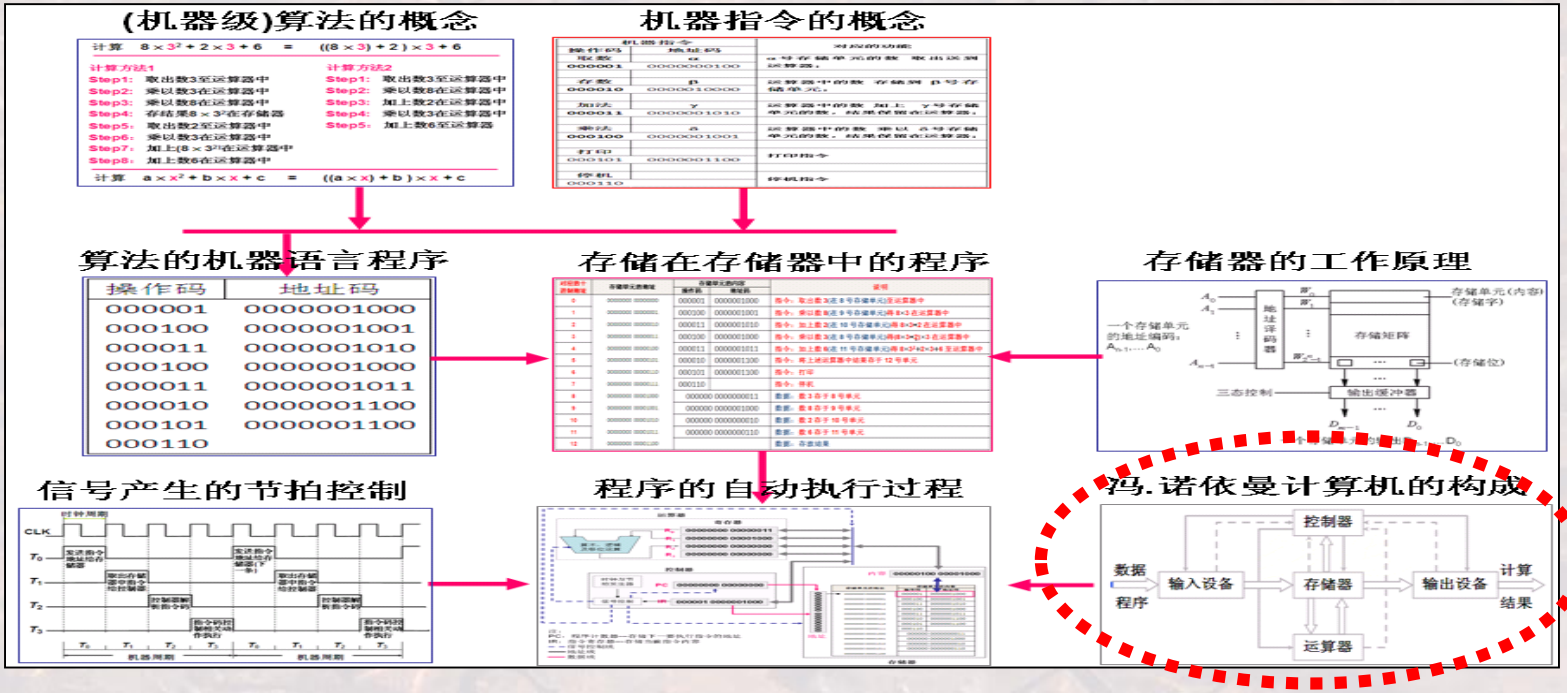
战德臣 教授



(7)在“冯.诺依曼机执行程序的基本思维”中的位置?

战德臣 教授

基本目标：理解程序是如何被执行的



基本思维：机器级算法与程序➔机器指令与指令系统➔存储器➔存储程序➔运算器与控制器➔机器级程序的执行；

算法程序化➔程序指令化➔指令存储化➔执行信号化

自动存取：存储器的工作原理

战德臣

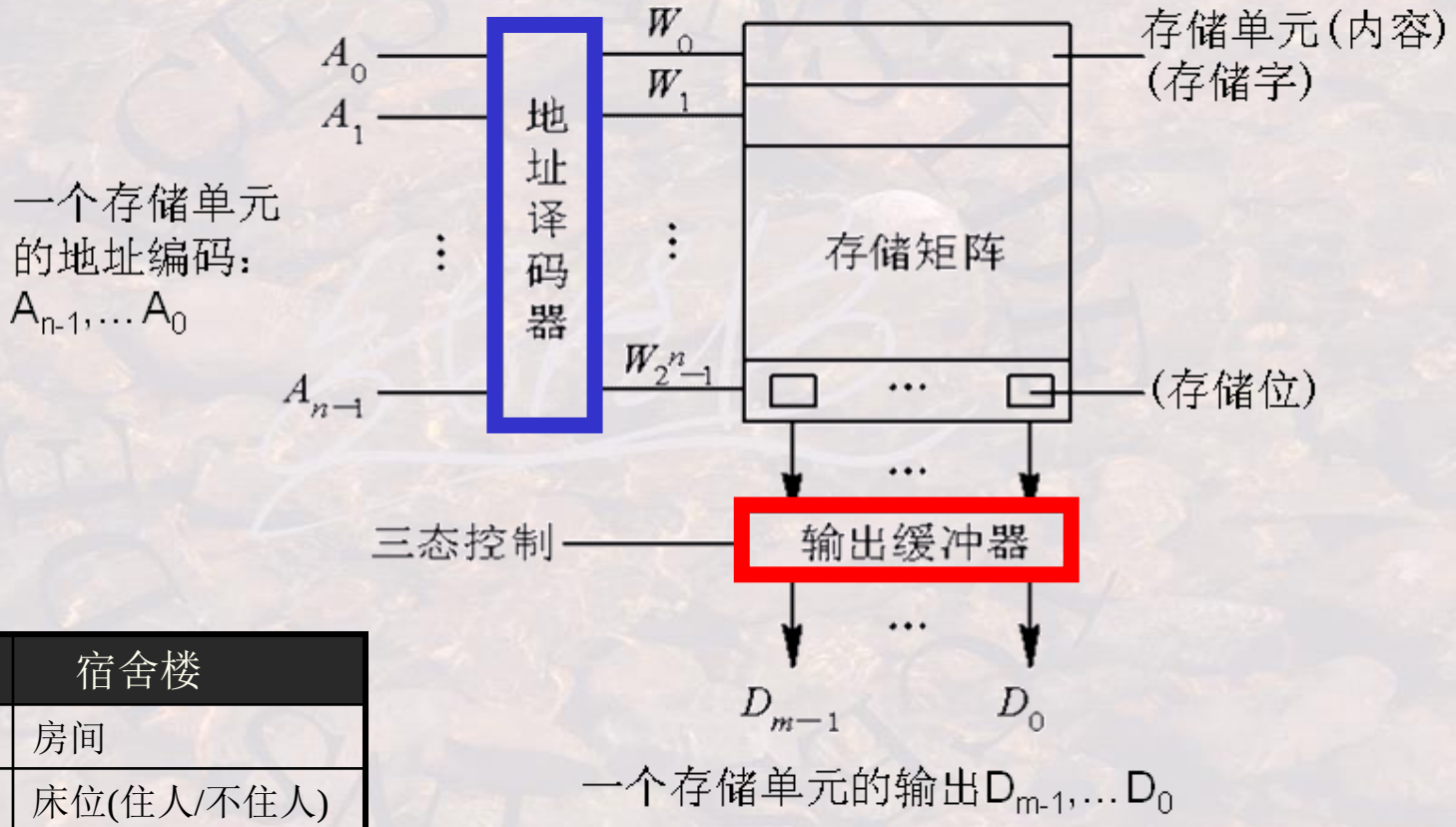
哈尔滨工业大学　　教授.博士生导师

教育部大学计算机课程教学指导委员会委员

Research Center on Intelligent Computing for Enterprises & Services, Harbin Institute of Technology

战德臣 教授

存储器的基本结构



概念映射

存储器	宿舍楼
存储单元	房间
存储位(存0或存1)	床位(住人/不住人)
地址编码$A_{n-1}\ldots A_0$	房间号
单元控制线W_i	房间钥匙
输出缓冲器	公共的走廊及大门
…	… …

从存储器与宿舍楼的概念对比中，你能发现什么异同吗？

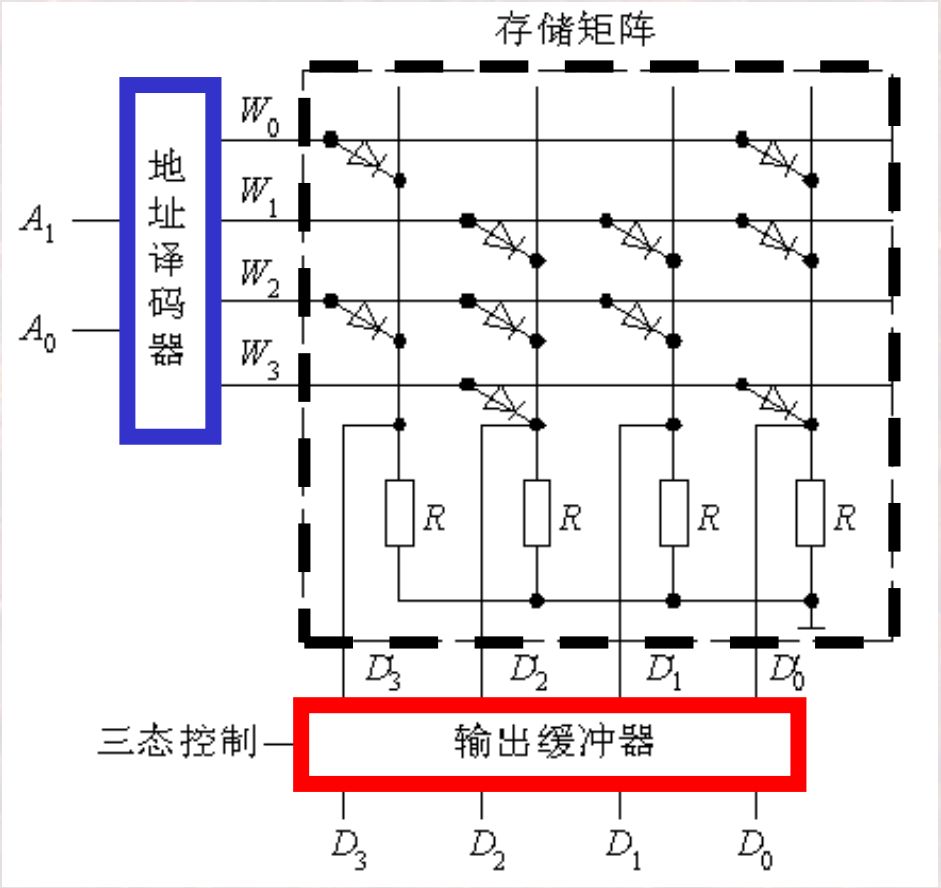
战德臣 教授

存储器内部的实现示例

◆当地址线和数据线间连接有二极管时，则存储的是1，否则，存储的是0

■当地址线和数据线间连接有二极管时，由地址线决定其是输出1或0，即：当地址线为高电平时，则输出1，而当地址线为低电平时，则输出0；

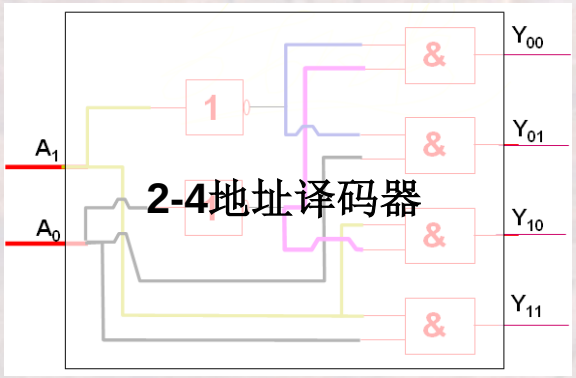
■没有连接的，则不受地址线影响，始终输出低电平0；



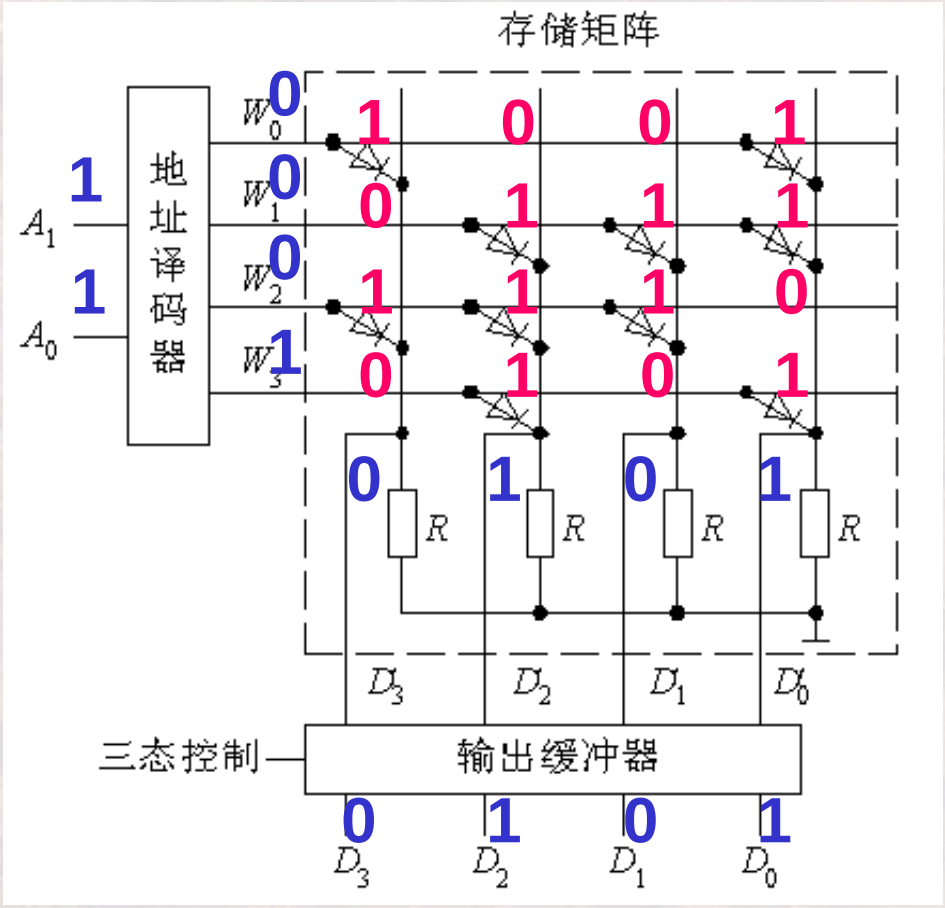
二极管ROM结构示例
(2位地址控制4个信息单元, 每个信息单元是4位0/1码)

战德臣 教授

存储器内部的实现示例



将地址编码转换为地址单元控制信号
类比:将房间号转换成房间钥匙



二极管ROM结构示例
(2位地址控制4个信息单元, 每个信息单元是4位0/1码)

存储矩阵的逻辑控制关系示例

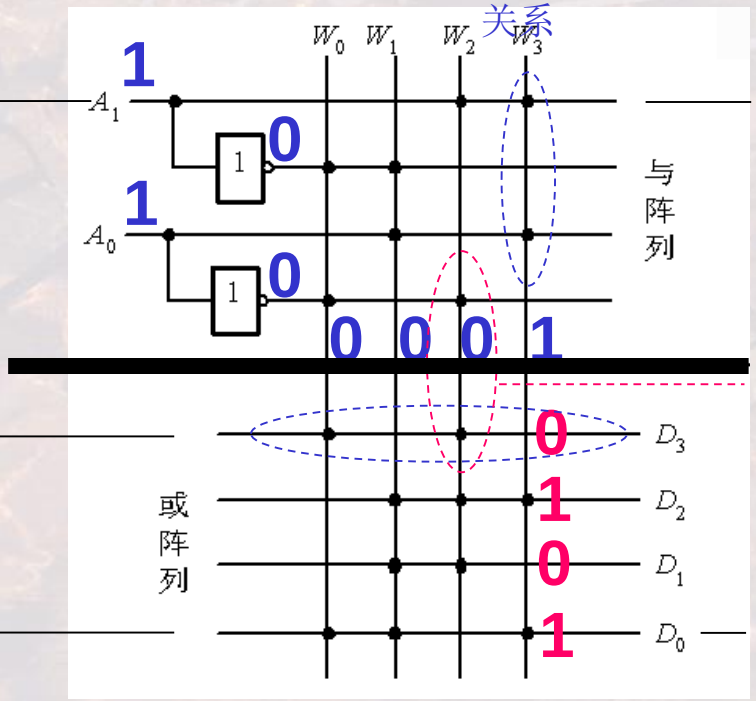
$W_0 = (\text{NOT } A_0) \text{ AND } (\text{NOT } A_1)$
$W_1 = A_0 \text{ AND } (\text{NOT } A_1)$
$W_2 = (\text{NOT } A_0) \text{ AND } A_1$
$W_3 = A_0 \text{ AND } A_1$

$D_3 = W_0 \text{ OR } W_2$
$D_2 = W_1 \text{ OR } W_2 \text{ OR } W_3$
$D_1 = W_1 \text{ OR } W_2$
$D_0 = W_0 \text{ OR } W_1 \text{ OR } W_3$

高/低电平信号，即0,1，通过连接点相互传递

W_i是地址线

同一地址线上各连接点之间是“与”关系



A_k是地址编码线

地址编码线与地址线有点连接，无点不连接

上半区通过“与”关系产生地址线上的最终信号传递到下半区

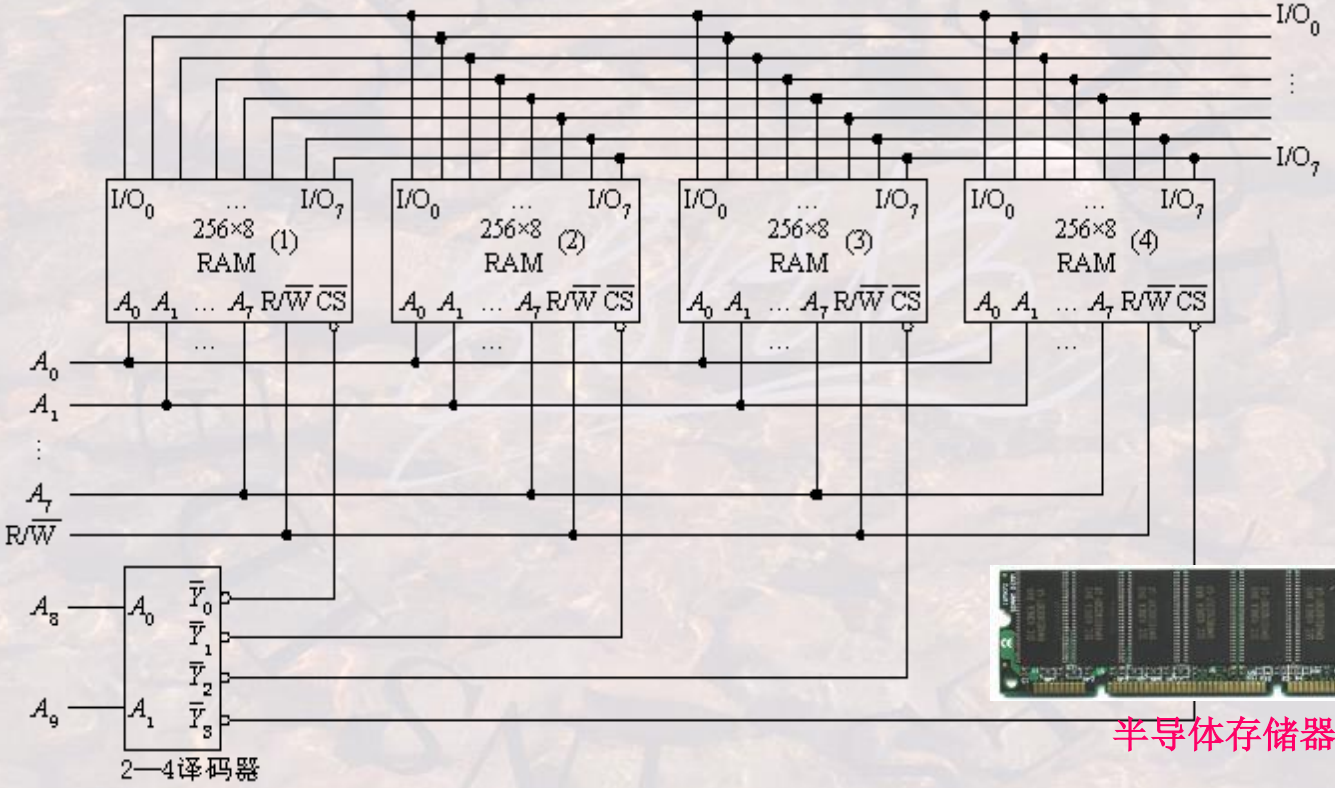
同一条数据线上各连接点之间是“或”关系

地址线与数据线有点连接，无点不连接

D_j是数据线

战德臣 教授

用多个存储器芯片可搭建容量更大的存储器



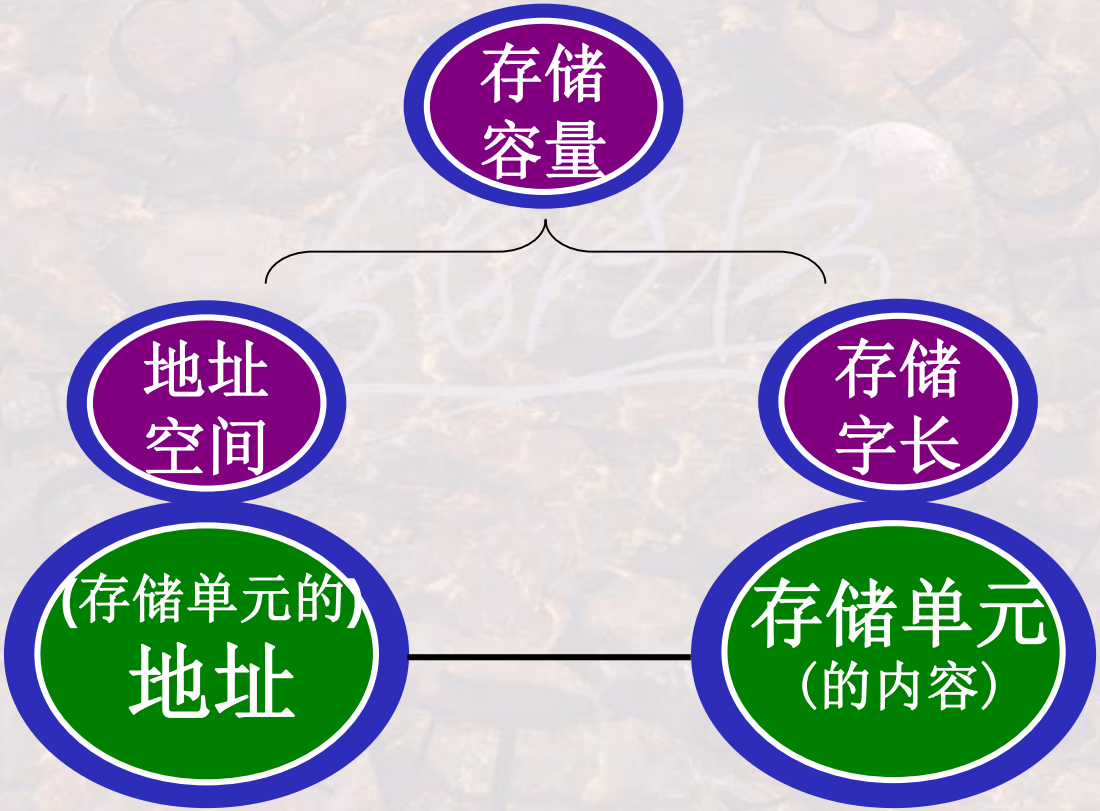
半导体存储器芯片示例

利用4个256x8存储器芯片扩展出1024x8存储器的电路图

问：从概念的角度，你能说说存储器扩展要解决什么问题吗?
提示：地址编码空间, 存储字长.

(4)小结?

战德臣 教授

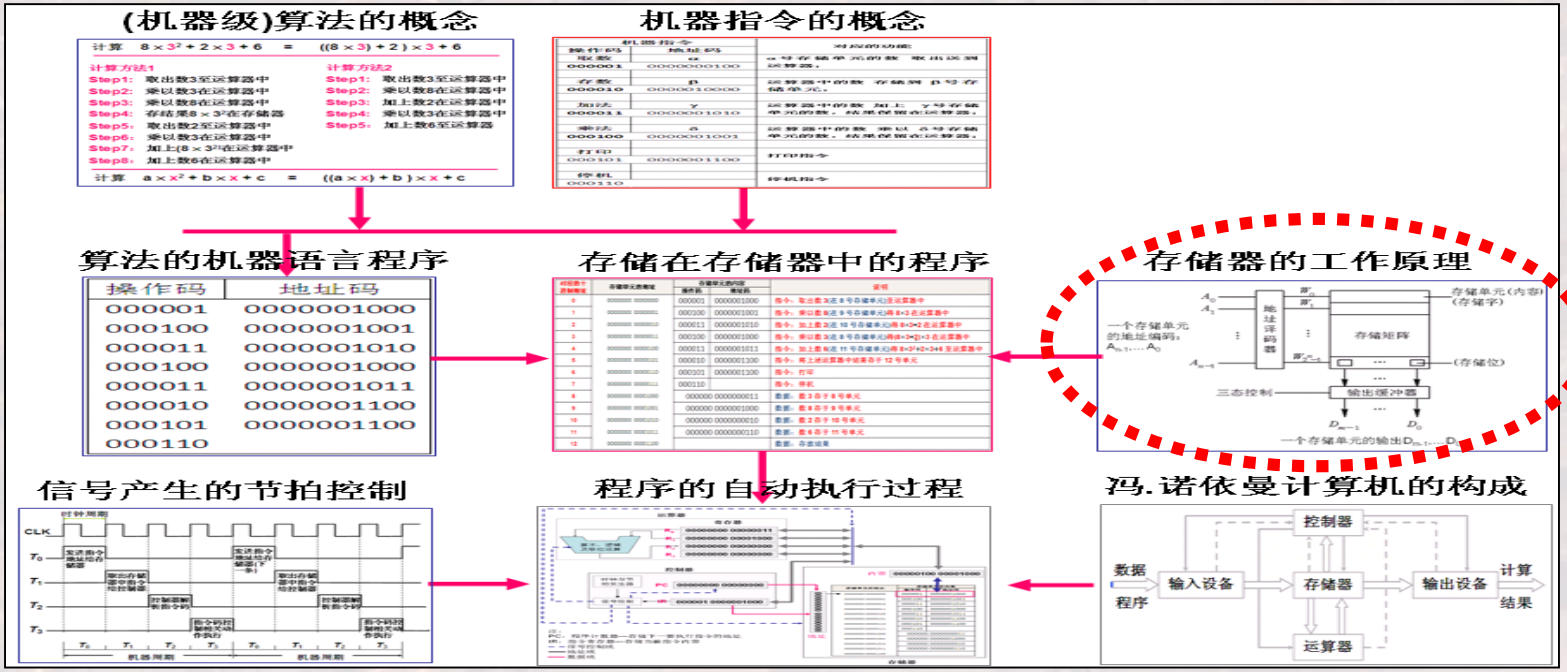


自动存取：存储器的工作原理

(5)在“冯.诺依曼机执行程序的基本思维”中的位置？

战德臣 教授

基本目标：理解程序是如何被执行的



基本思维：机器级算法与程序➔机器指令与指令系统➔存储器➔存储程序➔运算器与控制器➔机器级程序的执行；

算法程序化➔程序指令化➔指令存储化➔执行信号化

机器指令与机器级程序

战德臣

哈尔滨工业大学　　教授.博士生导师

教育部大学计算机课程教学指导委员会委员

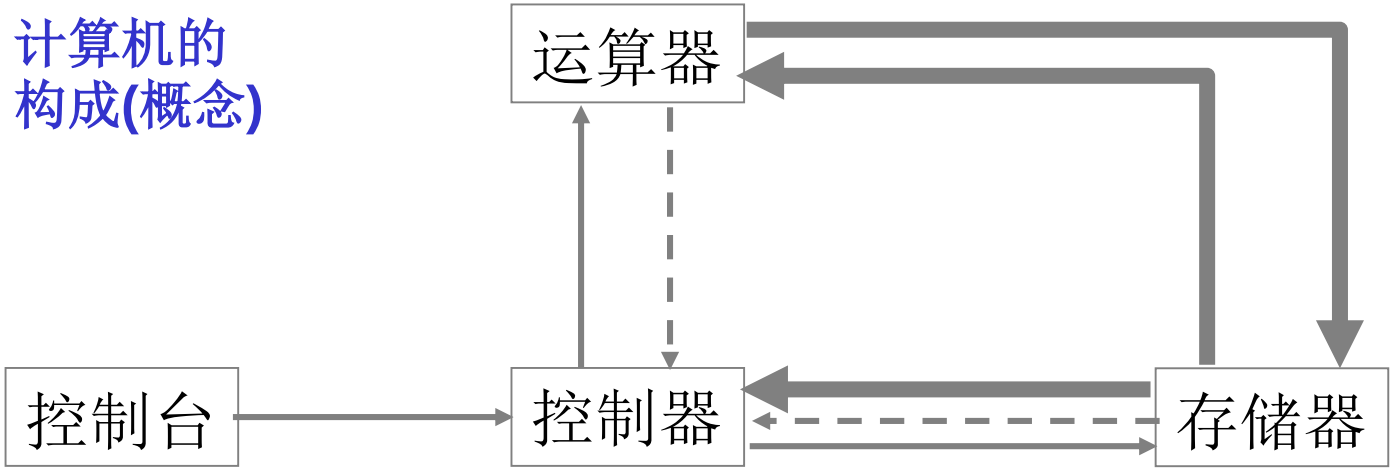
Research Center on Intelligent Computing for Enterprises & Services, Harbin Institute of Technology

战德臣 教授

问题---计算机如何计算一个运算式?

$$8\times3^2+2\times3+6$$

计算机的
构成(概念)



存储地址	存储内容(以语义形式表述)
0	指令：取出 125 号单元的操作数(即操作数 x)至运算器中
1	指令：乘以 126 号单元的操作数(即操作数 a, 得 $x\times a$ 在运算器中)
…	…
125	数据：数 x
126	数据：数 a
…	…

战德臣 教授

算法---从冯.诺依曼计算机的角度

可在机器上执行的求解问题的操作规则及步骤, 被称为可执行的算法。

计算 $8\times3^2+2\times3+6$ = $((8\times3)+2)\times3+6$

计算方法1

Step1: 取出数3至运算器中
Step2: 乘以数3在运算器中
Step3: 乘以数8在运算器中
Step4: 存结果8×3^2在存储器中
Step5: 取出数2至运算器中
Step6: 乘以数3在运算器中
Step7: 加上(8×3^2)在运算器中
Step8: 加上数6在运算器中

计算方法2

Step1: 取出数3至运算器中
Step2: 乘以数8在运算器中
Step3: 加上数2在运算器中
Step4: 乘以数3在运算器中
Step5: 加上数6至运算器中

问：怎么看待算法节省的步数? ---算法需要“优化”

战德臣 教授

机器指令 -机器语言

- 机器指令是CPU可以直接分析并执行的指令，一般由0和1的编码表示。
- 指令 ≈ 操作码 + 地址码;

操作码	地址码
000001	00 00000111
000100	00 00001010

(如取数，加法等操作)　(操作中的数据的来源)

000001　0000000100

000001　0000001100

000001　0000001000

机器指令		对应的功能
操作码	地址码	
取数	α	α号存储单元的数 取出送到运算器;
000001	0000000100	
存数	β	运算器中的数 存储到 β号存储单元;
000010	0000010000	
加法	γ	运算器中的数 加上 γ号存储单元的数，结果保留在运算器;
000011	0000001010	
乘法	δ	运算器中的数 乘以 δ号存储单元的数，结果保留在运算器;
000100	0000001001	
打印		打印指令
000101	0000001100	
停机		停机指令
000110		

机器指令与机器级程序

(4)怎样用机器指令表达算法?

战德臣 教授

$((8 \times 3) + 2) \times 3 + 6$

机器级算法

计算方法2

Step1: 取出数3至运算器中

Step2: 乘以数8在运算器中

Step3: 加上数2在运算器中

Step4: 乘以数3在运算器中

Step5: 加上数6至运算器中

机器级程序

```
000001  0000001000
000100  0000001001
000011  0000001010
000100  0000001000
000011  0000001011
000010  0000001100
000101  0000001100
000110
```

机器指令		对应的功能
操作码	地址码	
取数	α	α号存储单元的数 取出送到运算器;
000001	0000000100	
存数	β	运算器中的数 存储到 β号存储单元;
000010	0000010000	
加法	γ	运算器中的数 加上 γ号存储单元的数，结果保留在运算器;
000011	0000001010	
乘法	δ	运算器中的数 乘以 δ号存储单元的数，结果保留在运算器;
000100	0000001001	
打印		打印指令
000101	0000001100	
停机		停机指令
000110		

机器指令

“3”存储在8号存储单元

“8”存储在9号存储单元

“2”存储在10号存储单元

“6”存储在11号存储单元

(5)将机器级程序和数据装载进存储器中？

战德臣 教授

存储器

计算$8\times3^2+2\times3+6$的程序；

计算ax^2+bx+c的程序。

机器级程序

对应的十进制地址	存储单元的地址	存储单元的内容		说明
		操作码	地址码	
0	00000000 00000000	000001	0000001000	指令：取出 8 号存储单元的数(即 3)至运算器中
1	00000000 00000001	000100	0000001001	指令：乘以 9 号存储单元的数(即 8)得 8×3 在运算器中
2	00000000 00000010	000011	0000001010	指令：加上 10 号存储单元的数(即 2)得 8×3+2 在运算器中
3	00000000 00000011	000100	0000001000	指令：乘以 8 号存储单元的数(即 3) 得(8×3+2)×3 在运算器中
4	00000000 00000100	000011	0000001011	指令：加上 11 号存储单元的数(即 6)得 $8\times3^2+2\times3+6$ 至运算器中
5	00000000 00000101	000010	0000001100	指令：将上述运算器中结果存于 12 号存储单元
6	00000000 00000110	000101	0000001100	指令：打印
7	00000000 00000111	000110		指令：停机
8	00000000 00001000	000000	0000000011	数据：数 3 存于 8 号单元
9	00000000 00001001	000000	0000001000	数据：数 8 存于 9 号单元
10	00000000 00001010	000000	0000000010	数据：数 2 存于 10 号单元
11	00000000 00001011	000000	0000000110	数据：数 6 存于 11 号单元
12	00000000 00001100			数据：存放结果

程序与数据以同等地位存于存储器中

战德臣 教授

高级语言程序的示例

计算ax^2+bx+c

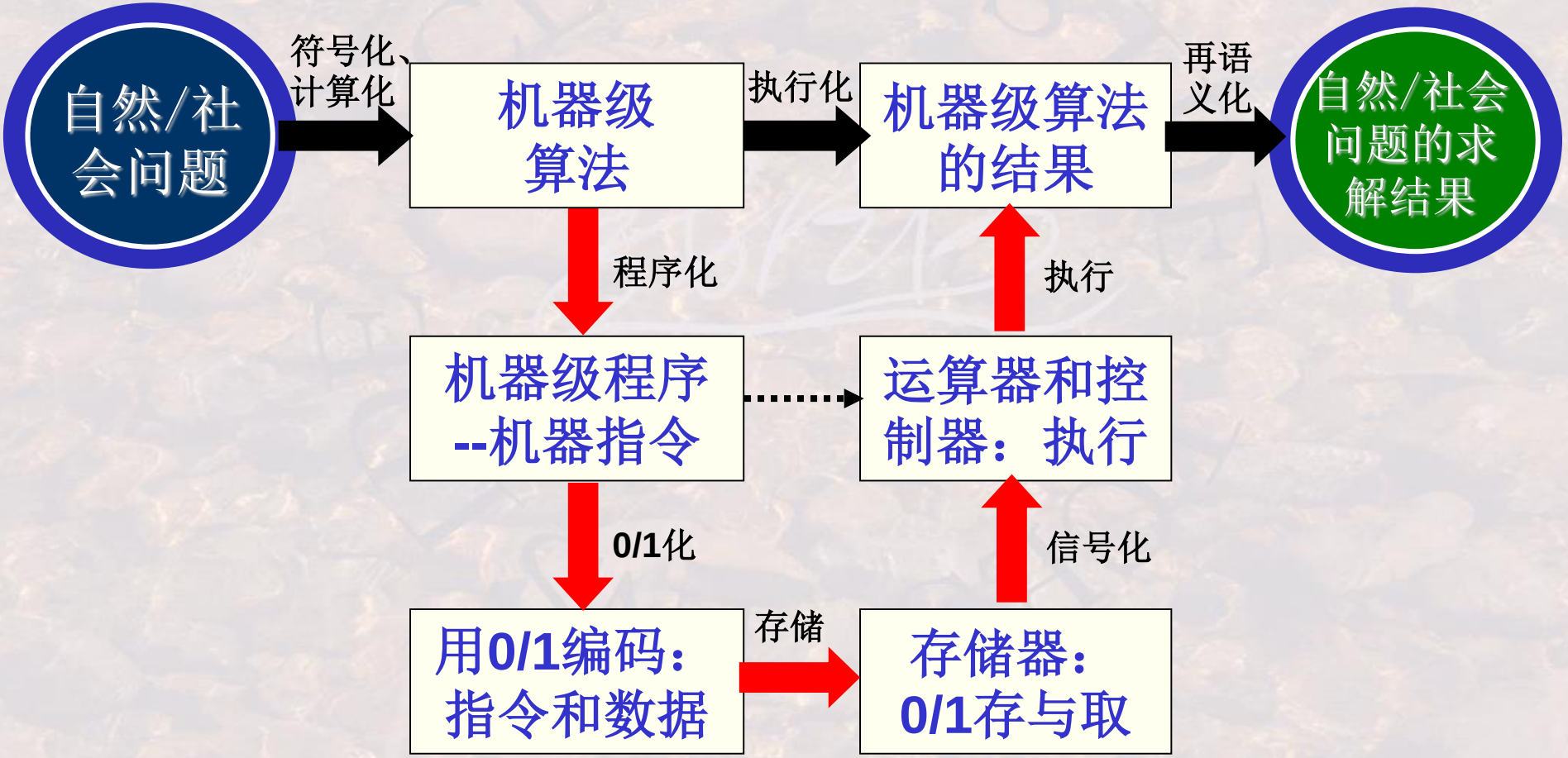
其中**a,x,b,c**是变量。

变量的地址是由编译程序在编译过程中自动分配的，也即是说编译器根据当时编译的情况，分配**a,x,b,c**为8号，9号，10号，11号存储单元，并产生上述的机器指令程序

```
Main(){
    int result;        //定义变量 result
    int   x;           //定义变量 x
    int   a;           //定义变量 a
    int   b;           //定义变量 b
    int   c;           //定义变量 c
    x = 3;             //将 3 赋值给 x
    //数据赋值过程中也可在运行过程中进行
    a = 8;             //将 8 赋值给 a
    b= 2;              //将 2 赋值给 b
    c= 6;              //将 6 赋值给 c
    result = a * x * x + b * x + c;
    //计算 a*x*x+b*x+c 并赋值给 result
    print   result;    //打印 result 的值
    }
```

(7)小结?

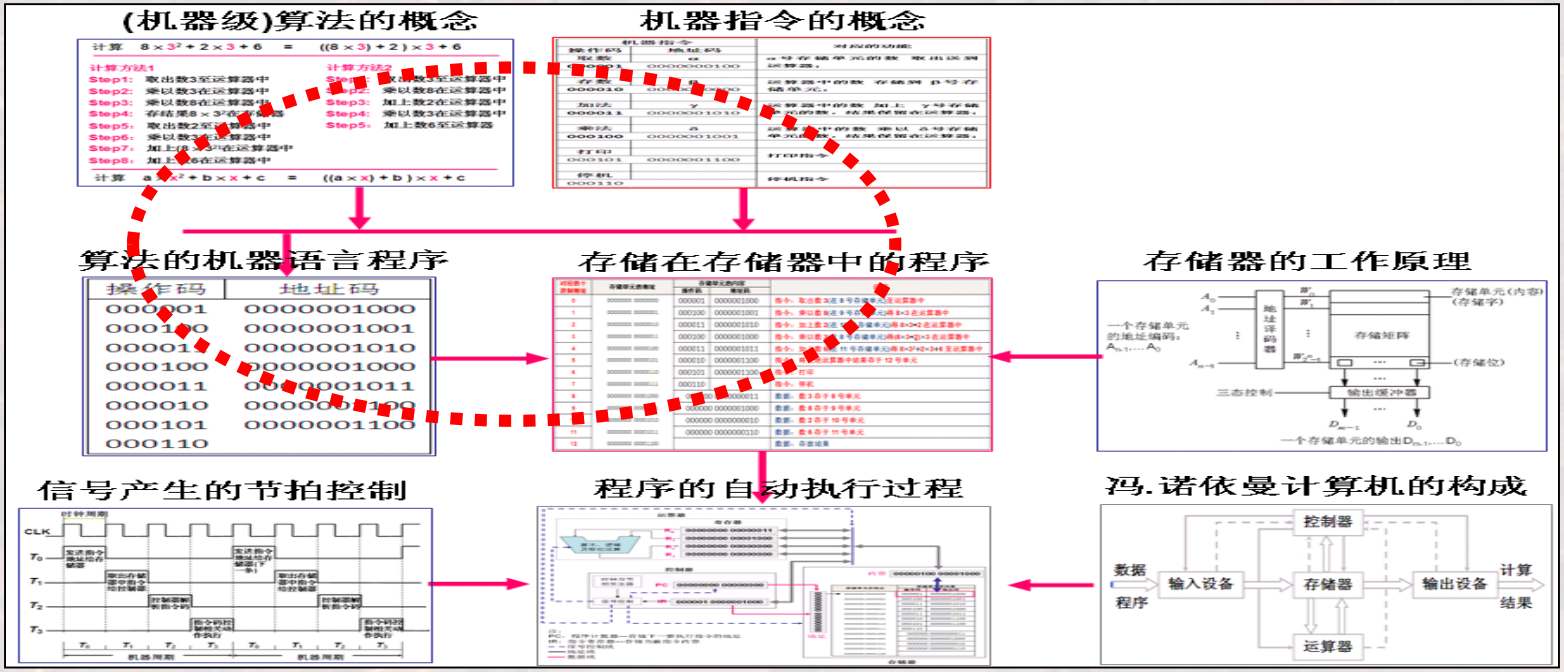
战德臣 教授


自然/社会问题
符号化、计算化
机器级算法
执行化
机器级算法的结果
再语义化
自然/社会问题的求解结果
程序化
执行
机器级程序--机器指令
运算器和控制器：执行
0/1化
信号化
用0/1编码：指令和数据
存储
存储器：0/1存与取

(8)在“冯.诺依曼机执行程序的基本思维”中的位置?

战德臣 教授

基本目标：理解程序是如何被执行的



基本思维：机器级算法与程序➔机器指令与指令系统➔存储器➔存储程序➔运算器与控制器➔机器级程序的执行；

算法程序化➔程序指令化➔指令存储化➔执行信号化

机器级程序的执行机制

战德臣

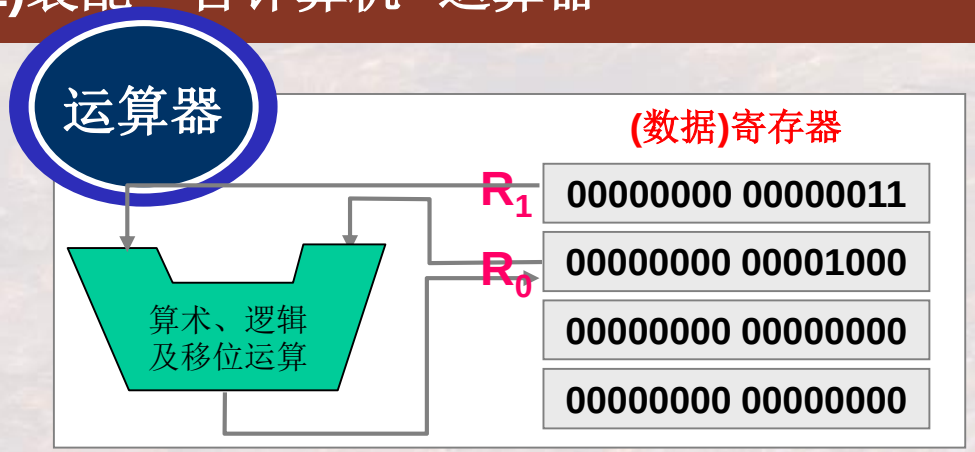
哈尔滨工业大学　　教授.博士生导师

教育部大学计算机课程教学指导委员会委员

Research Center on Intelligent Computing for Enterprises & Services, Harbin Institute of Technology

(1)装配一台计算机--运算器

战德臣 教授



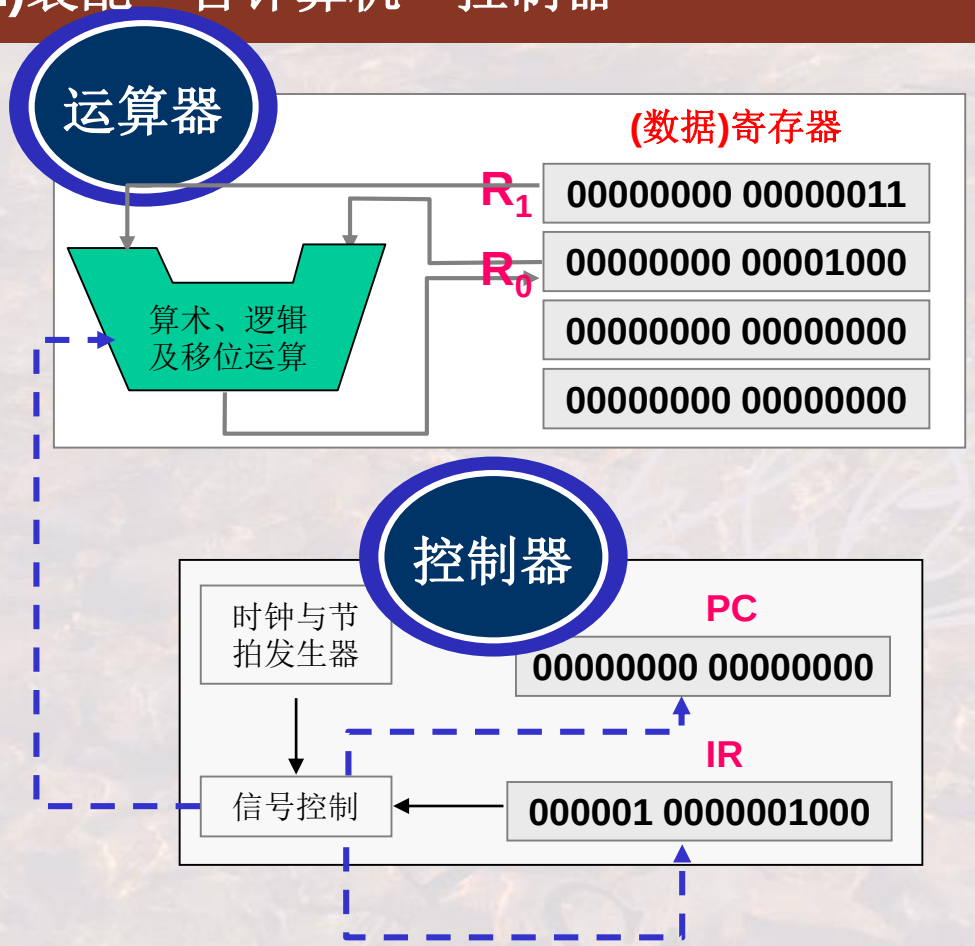
- (数据)寄存器
- 算术逻辑部件

$R_0 = R_1\ \theta\ R_0$

(赋值, R_0既是一个操作数，又保存运算结果)。
其中θ为算术、逻辑及移位运算符

机器级程序的执行机制
(2)装配一台计算机—控制器

战德臣 教授



- 程序计数器PC
- 指令寄存器
- 信号控制器
- 时钟与信号发生器

注：

PC：程序计数器---存储下一要执行指令的地址

IR：指令寄存器---存储当前指令内容

信号控制线

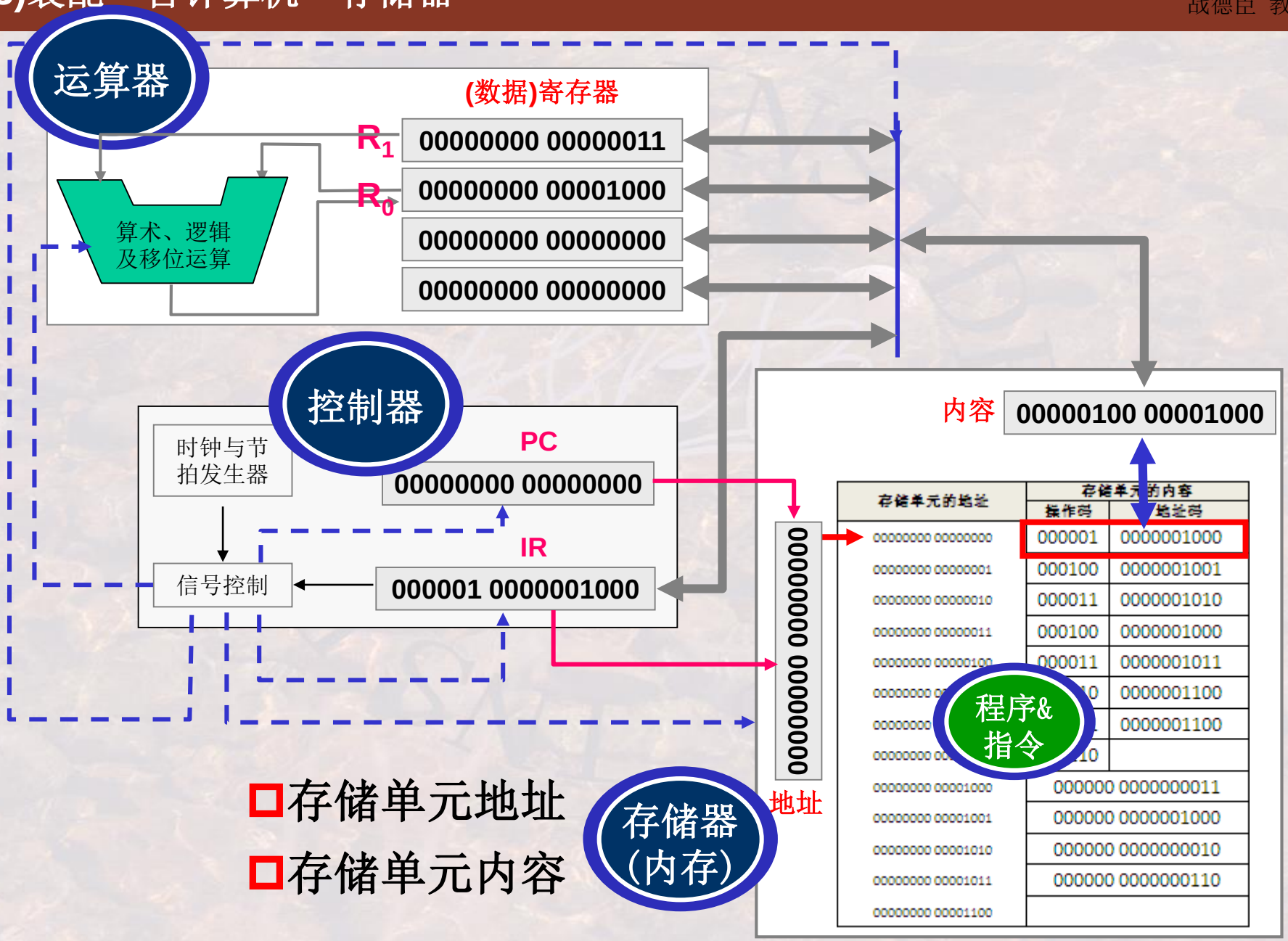
数据线

地址线

机器级程序的执行机制

(3)装配一台计算机—存储器

战德臣 教授



- 存储单元地址
- 存储单元内容

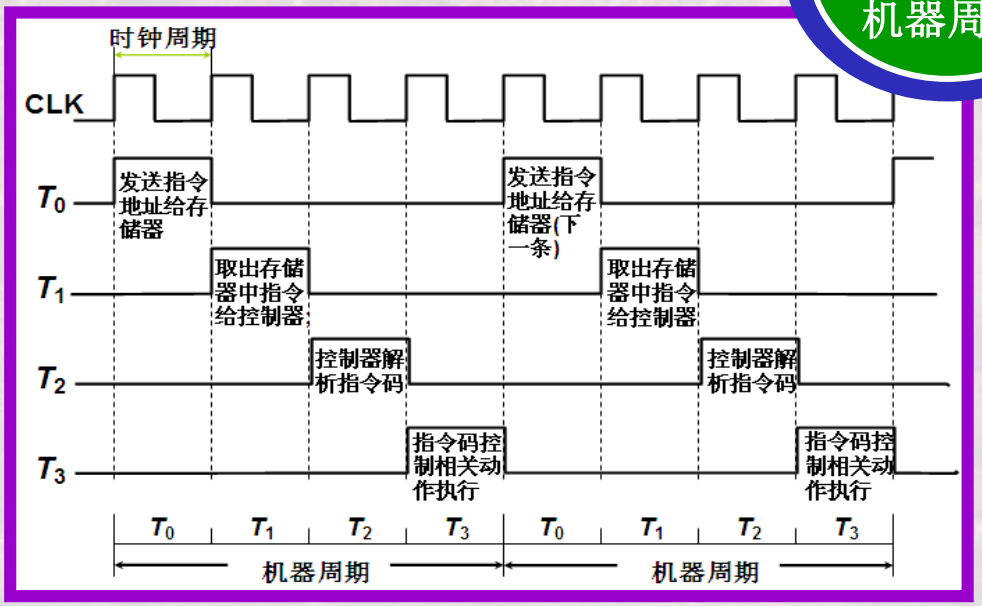
战德臣 教授

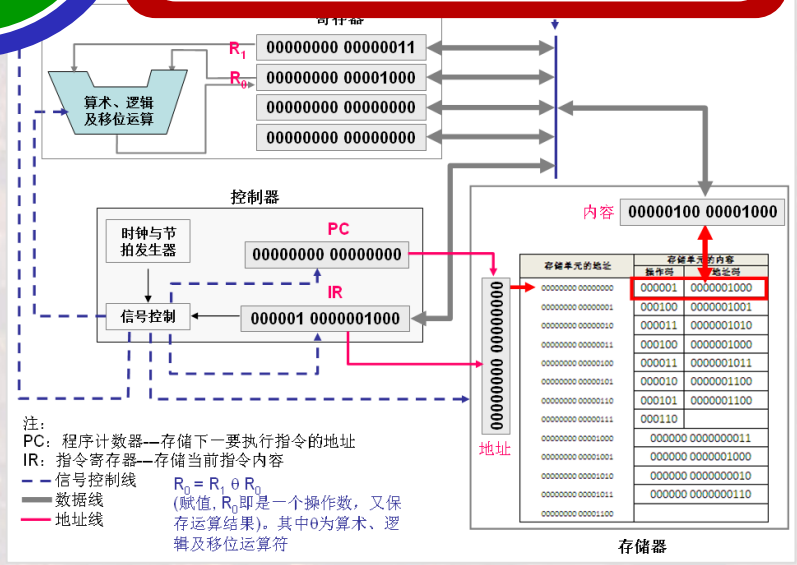
指令执行

- ◆不同的指令，由一组不同的电信号构成
- ◆同一指令的电信号在时钟与节拍的控制下按次序产生与传输
- ◆一条指令占用一个或多个机器周期，一个机器周期又分为多个节拍
- ◆最小的时间区隔单位--时钟周期

时钟周期、节拍与机器周期

指令执行的信号化--即在节拍控制下有序地发出各种电信号



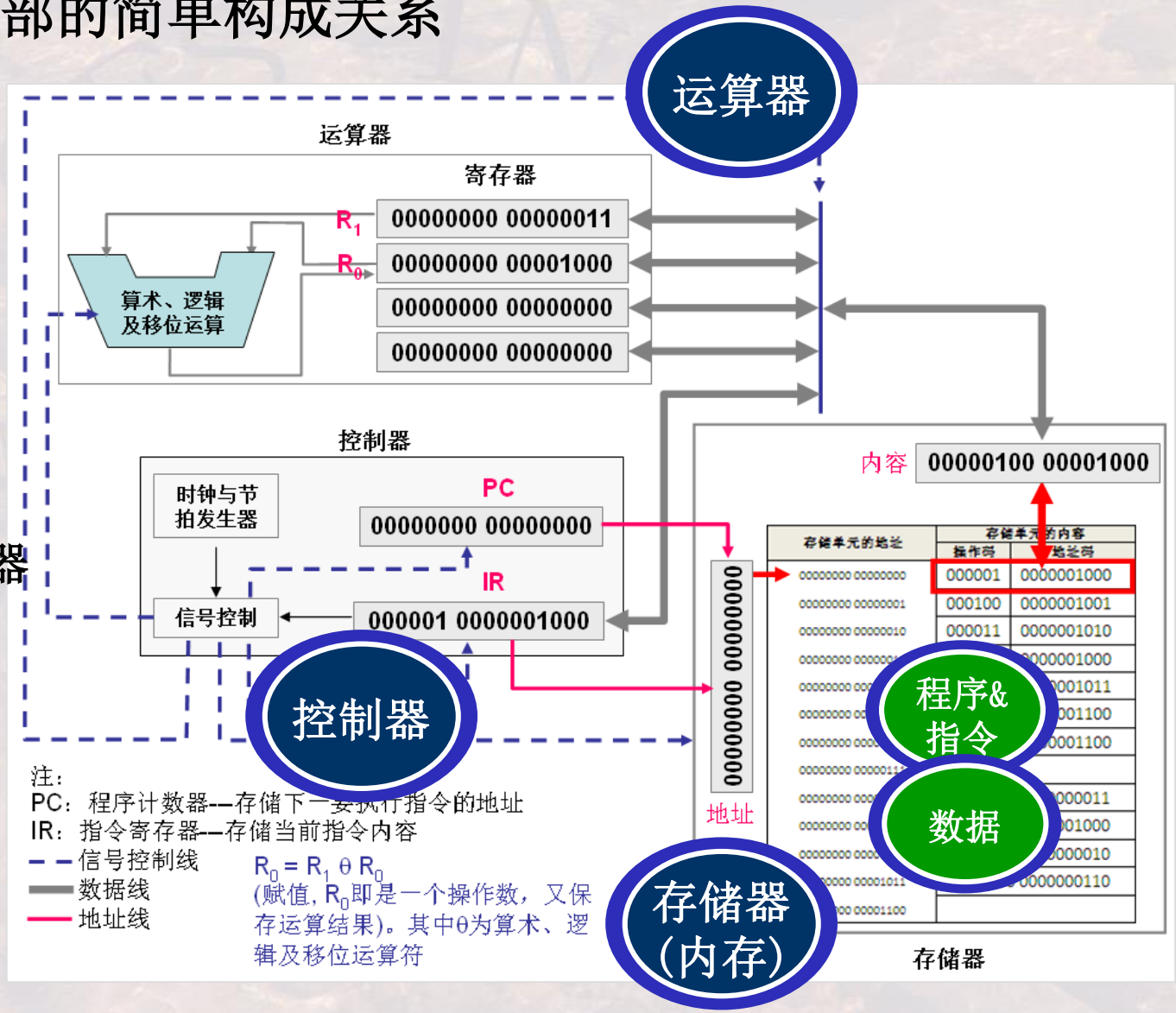


问：机器的“主频”指的是什么?

战德臣 教授

计算机各部件内部的简单构成关系

- 寄存器
- 算术逻辑部件
- 程序计数器PC
- 指令寄存器
- 信号控制器
- 时钟与信号发生器
- 存储单元地址
- 存储单元内容

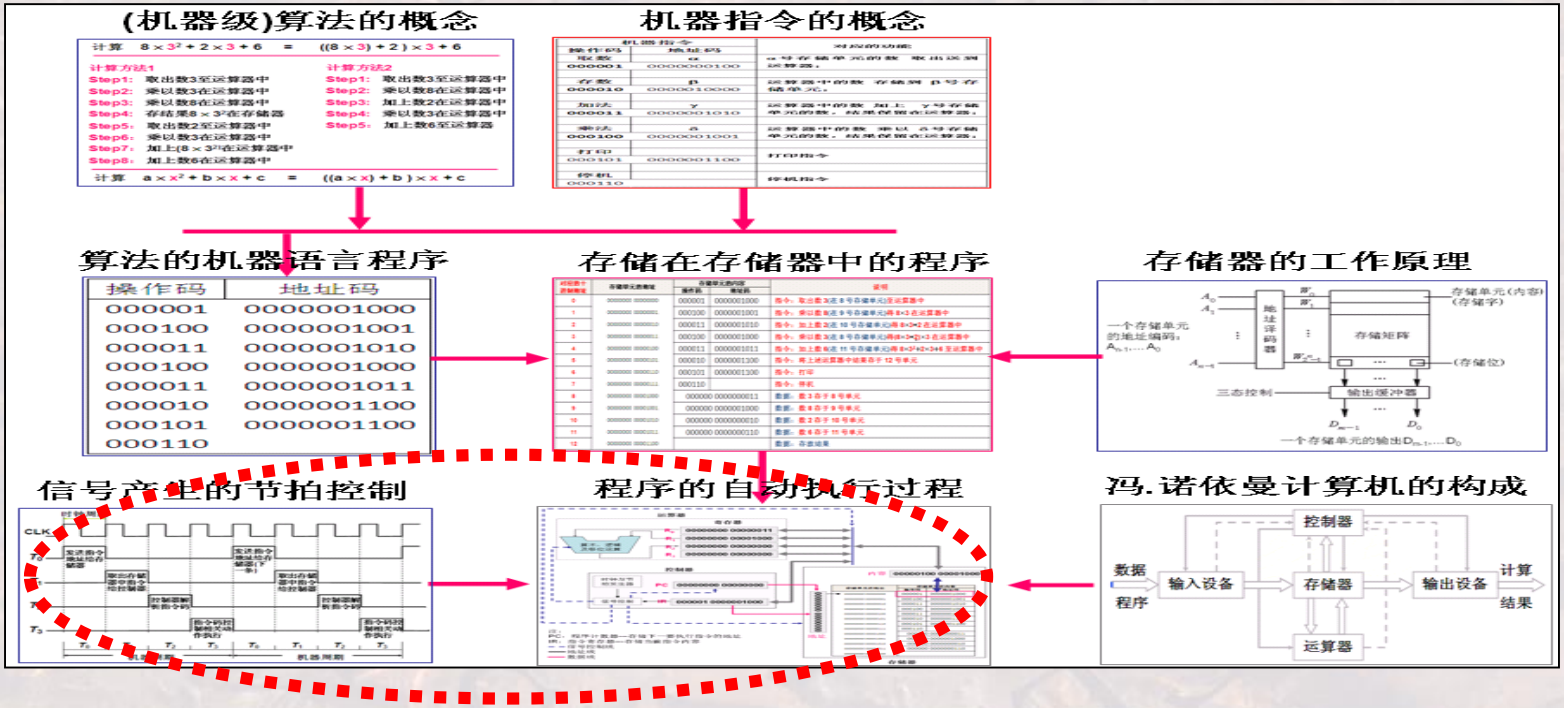


机器级程序的执行机制

(6)在“冯.诺依曼机执行程序的基本思维”中的位置?

战德臣 教授

基本目标：理解程序是如何被执行的



基本思维：机器级算法与程序➔机器指令与指令系统➔存储器➔存储程序➔运算器与控制器➔机器级程序的执行；

算法程序化➔程序指令化➔指令存储化➔执行信号化

机器级程序的执行过程模拟

战德臣

哈尔滨工业大学　　教授.博士生导师

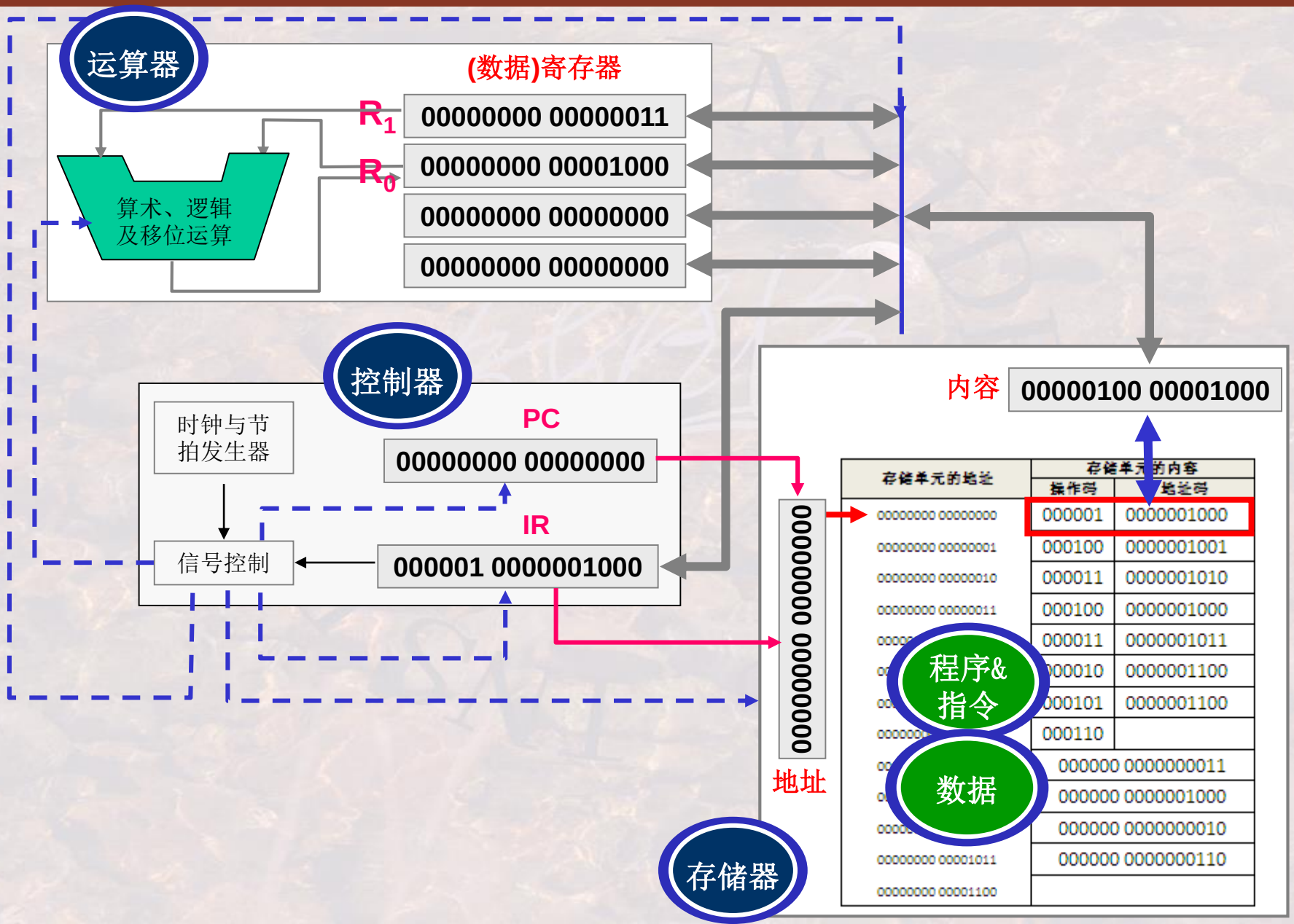
教育部大学计算机课程教学指导委员会委员

Research Center on Intelligent Computing for Enterprises & Services, Harbin Institute of Technology

机器级程序的执行过程模拟

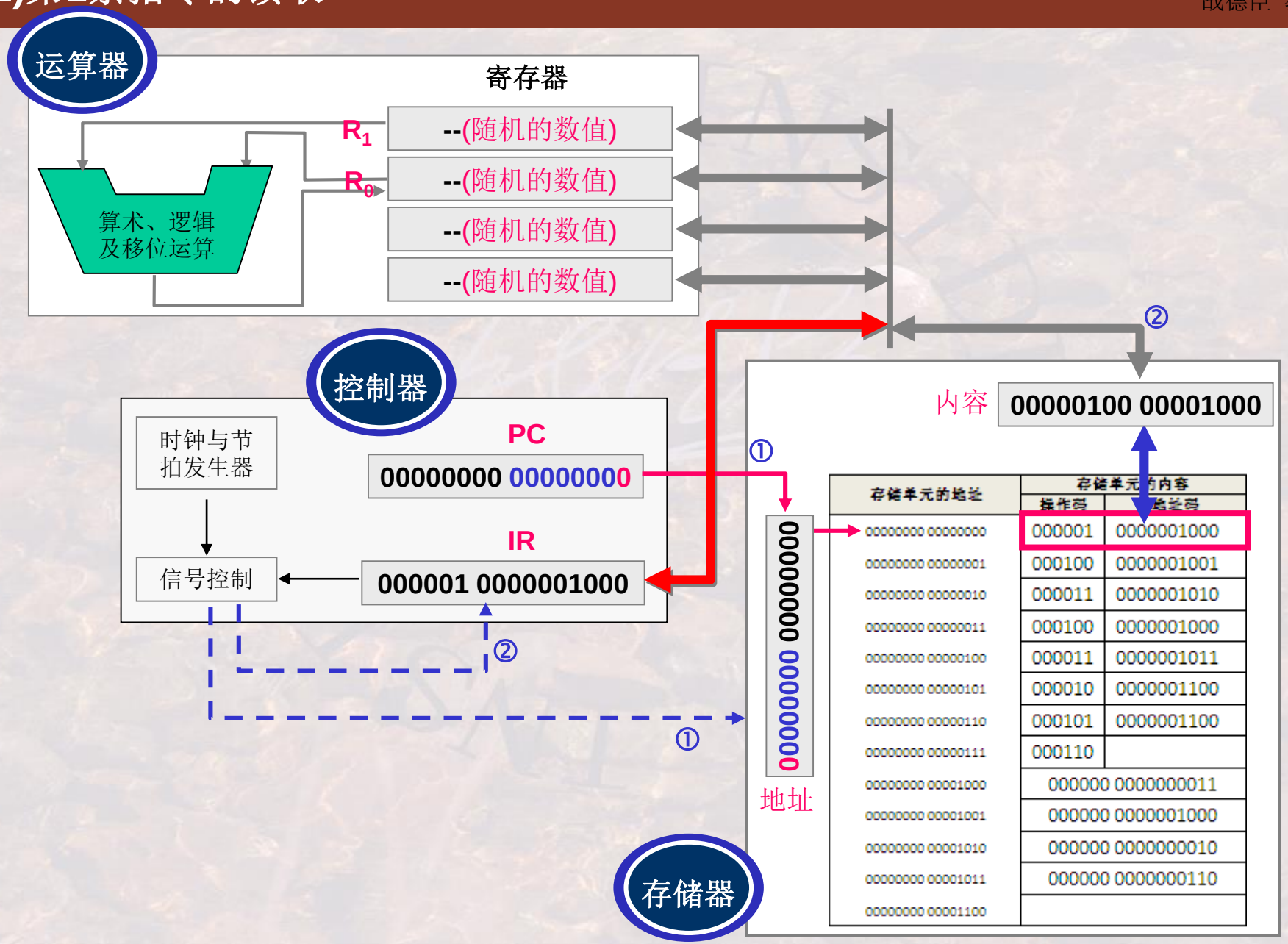
(1)程序和数据已经装入存储器中如何执行呢？

战德臣 教授



机器级程序的执行过程模拟
(2)第1条指令的读取

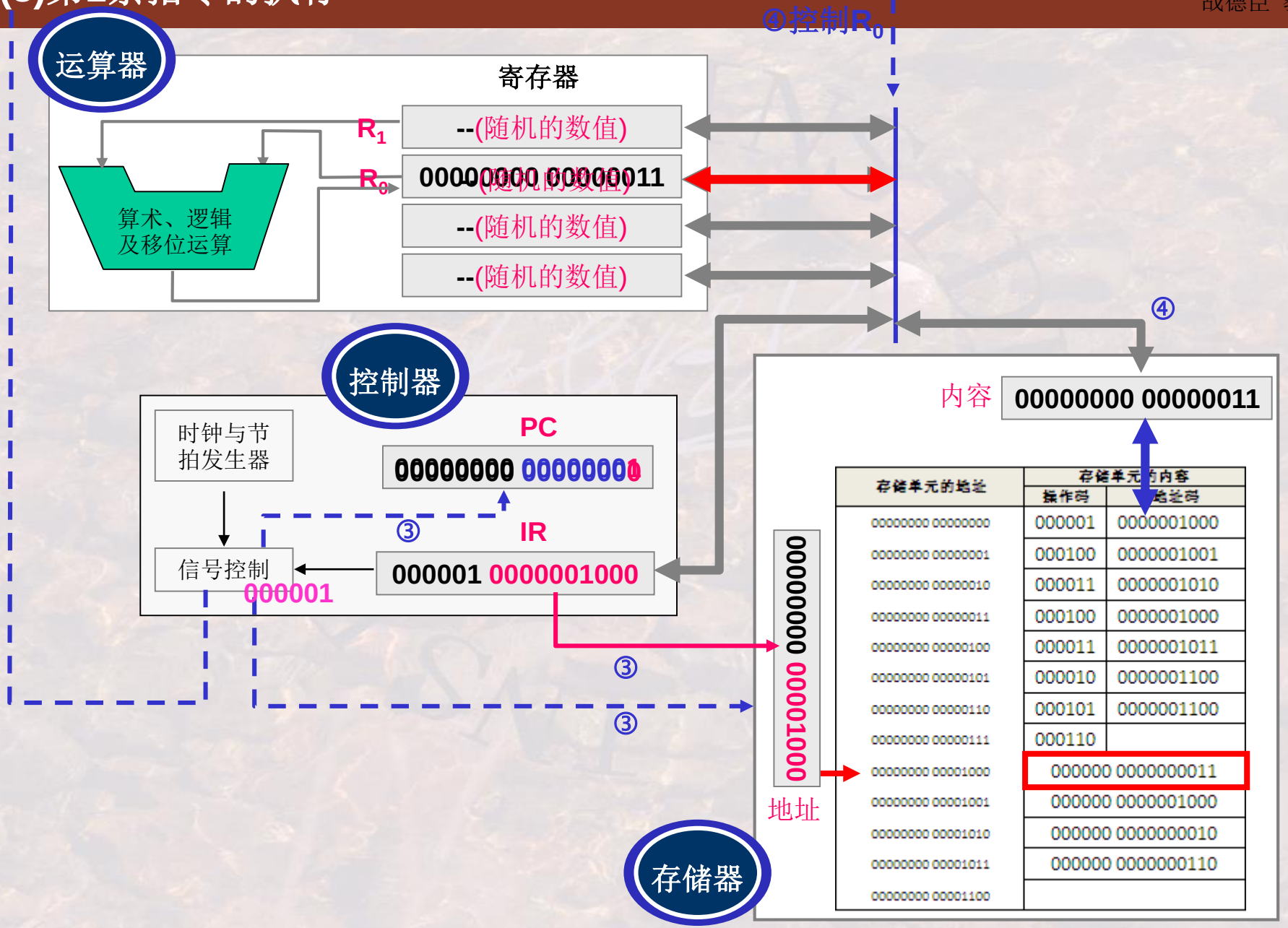
战德臣 教授



机器级程序的执行过程模拟

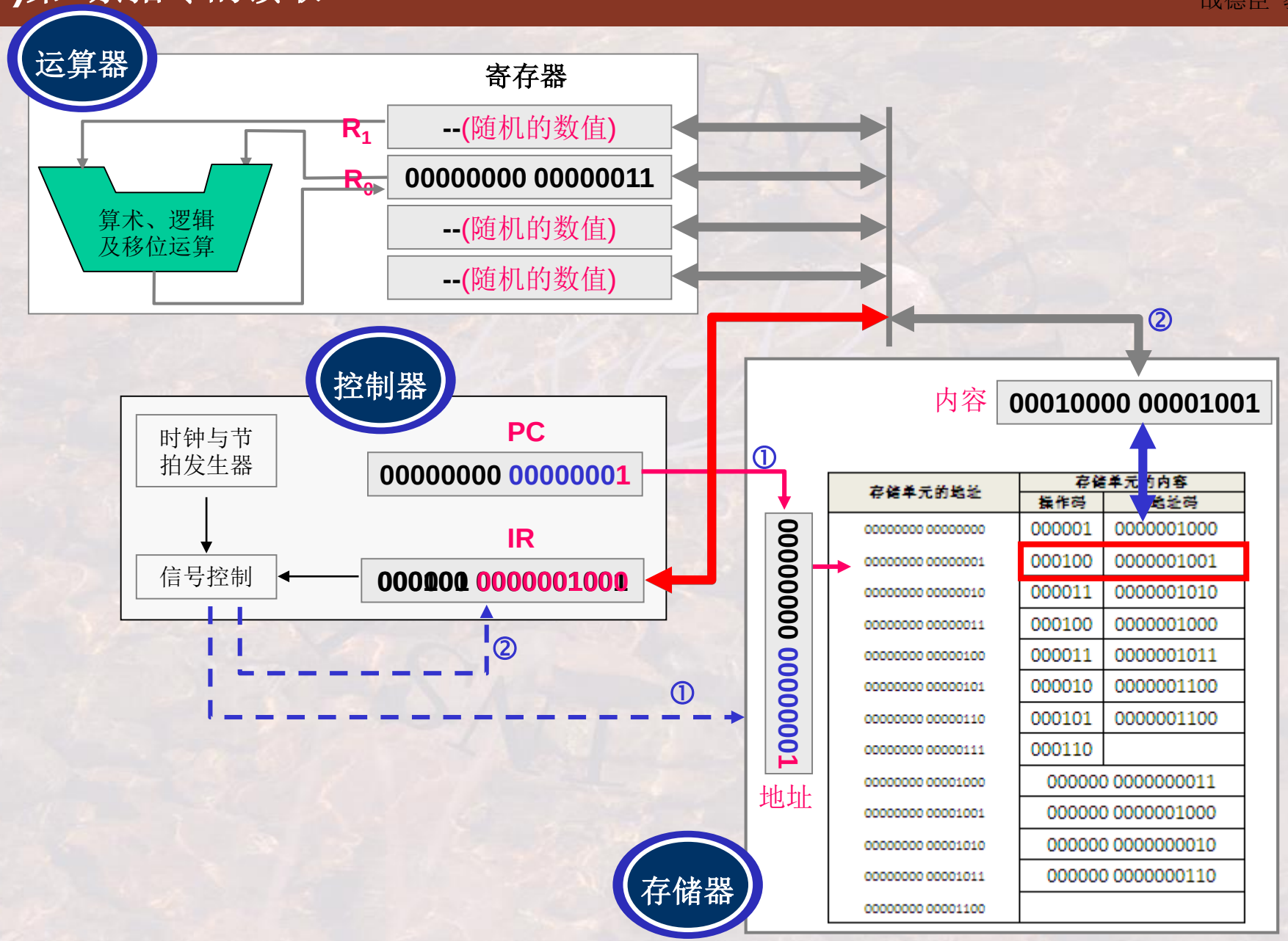
(3)第1条指令的执行

战德臣 教授



机器级程序的执行过程模拟
(4)第2条指令的读取

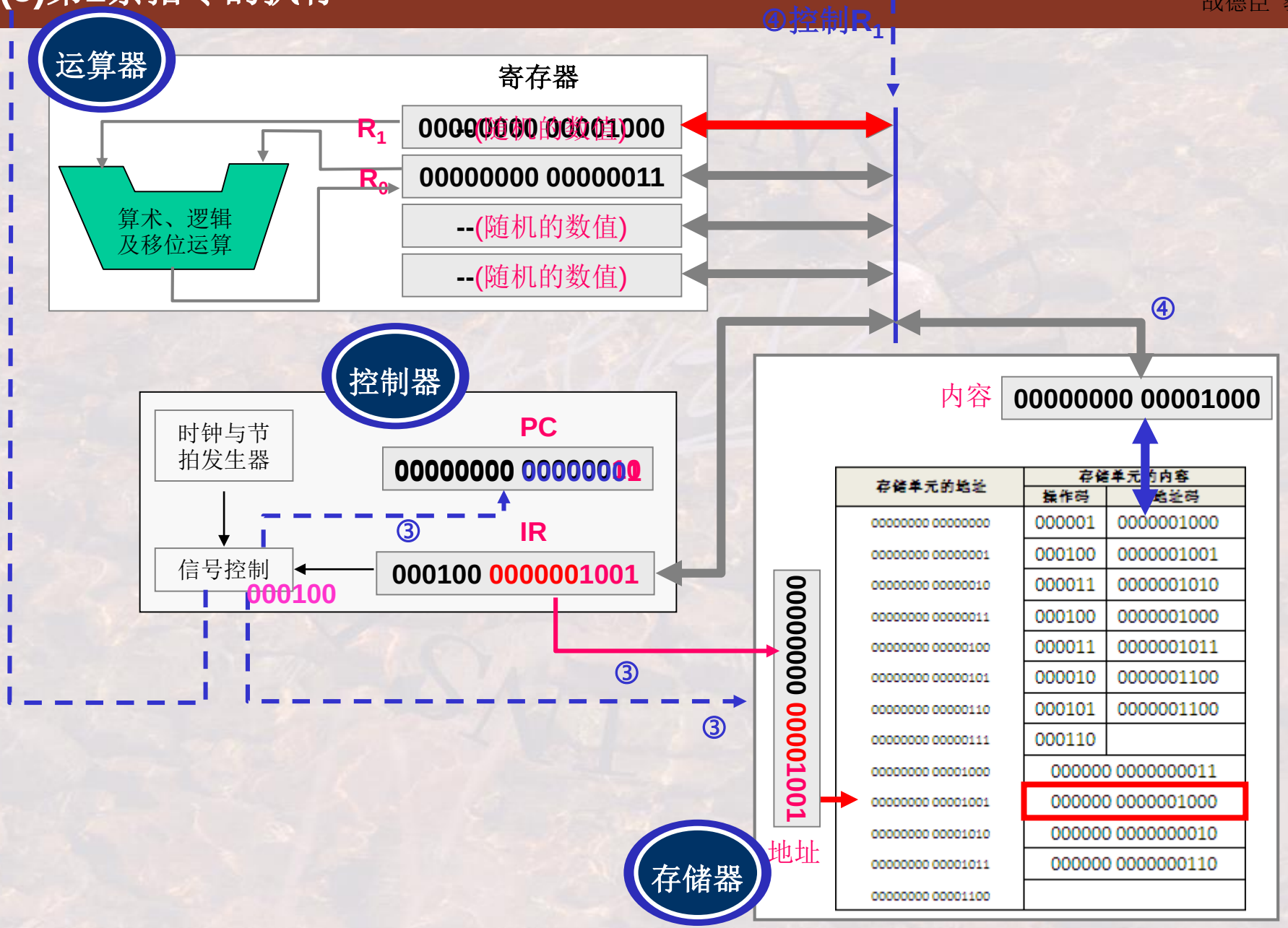
战德臣 教授



机器级程序的执行过程模拟

(5)第2条指令的执行

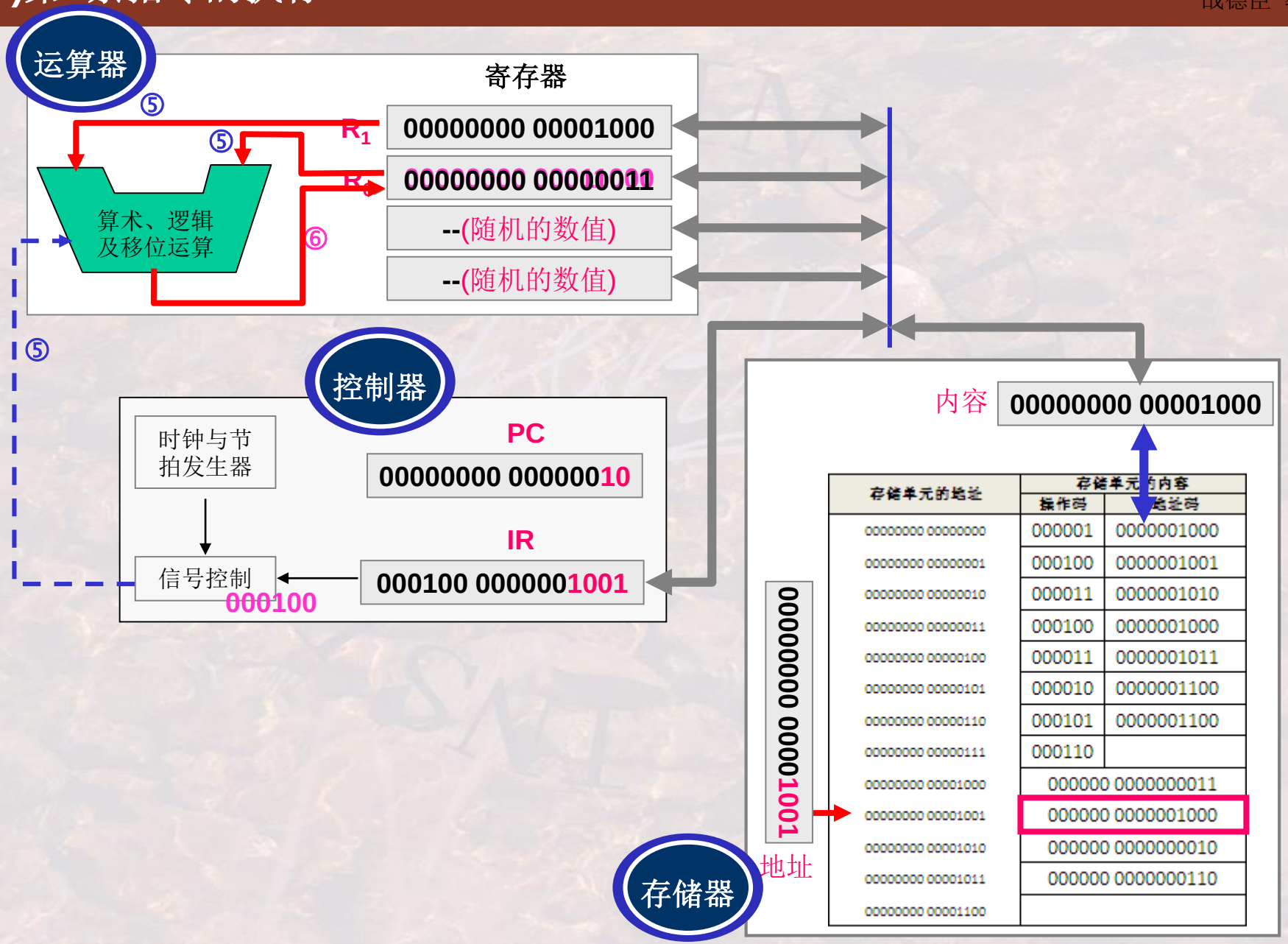
战德臣 教授



机器级程序的执行过程模拟

(5)第2条指令的执行

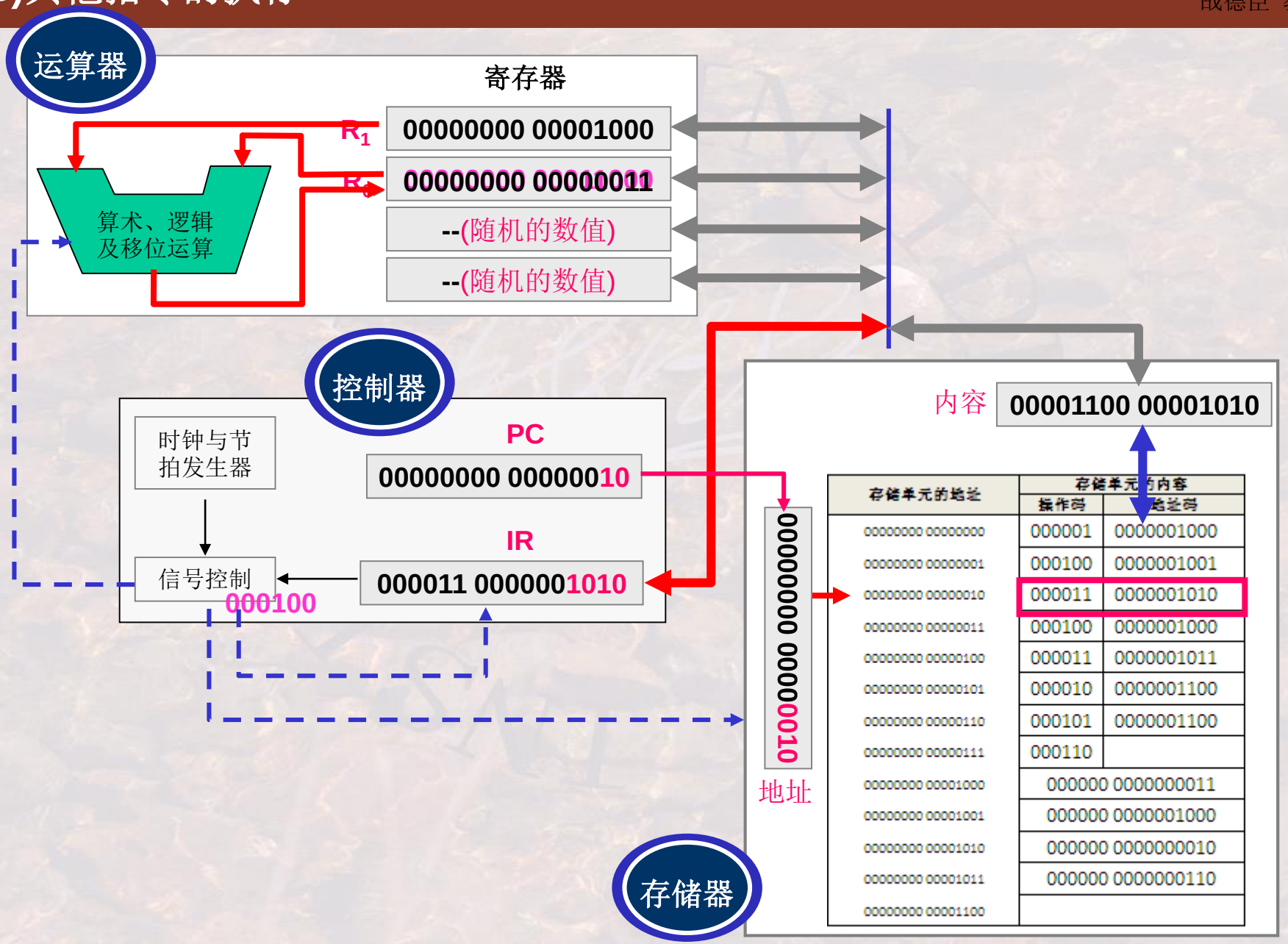
战德臣 教授



机器级程序的执行过程模拟

(6)其他指令的执行

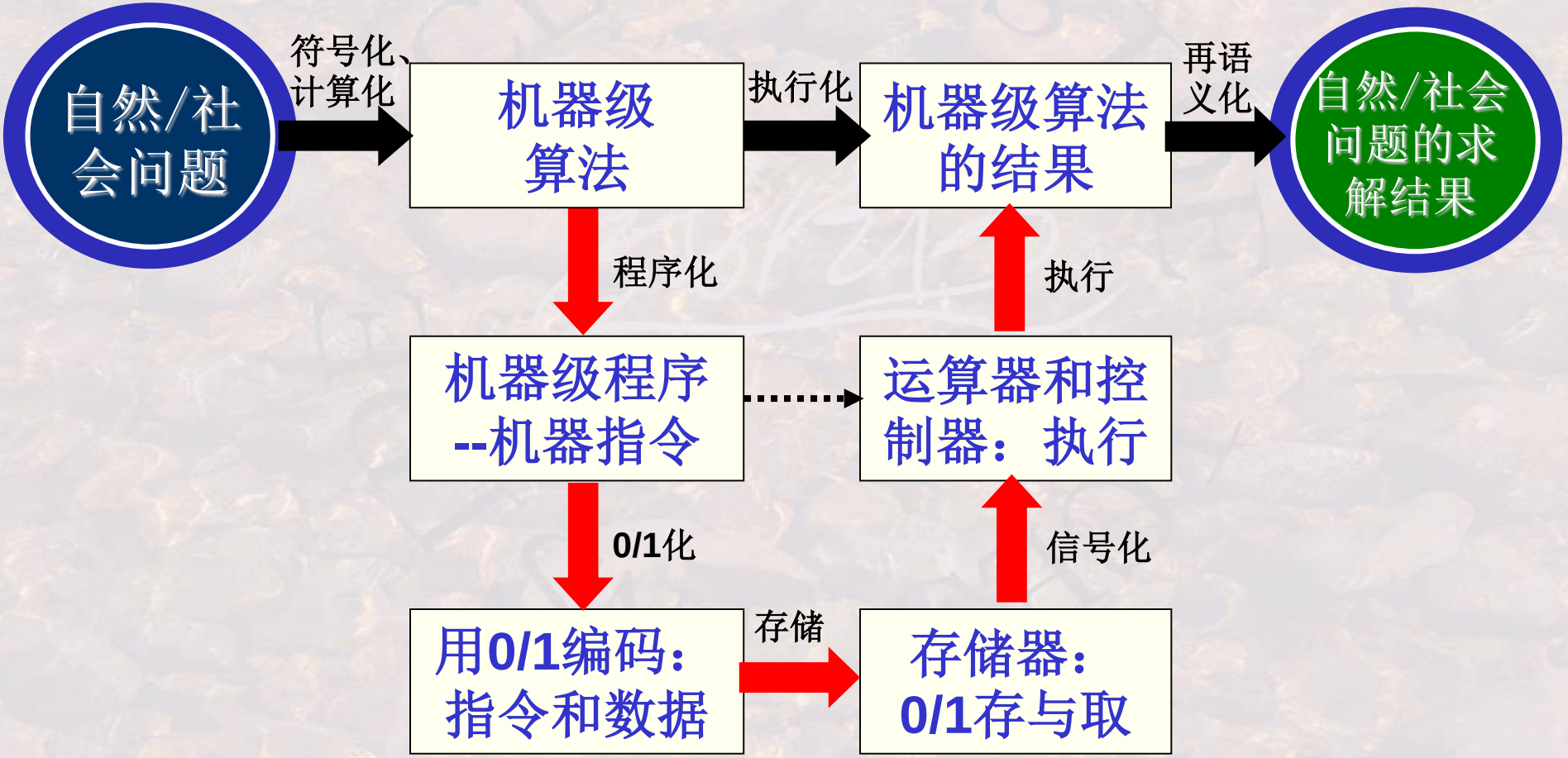
战德臣 教授



机器级程序的执行过程模拟

(7)小结?

战德臣 教授

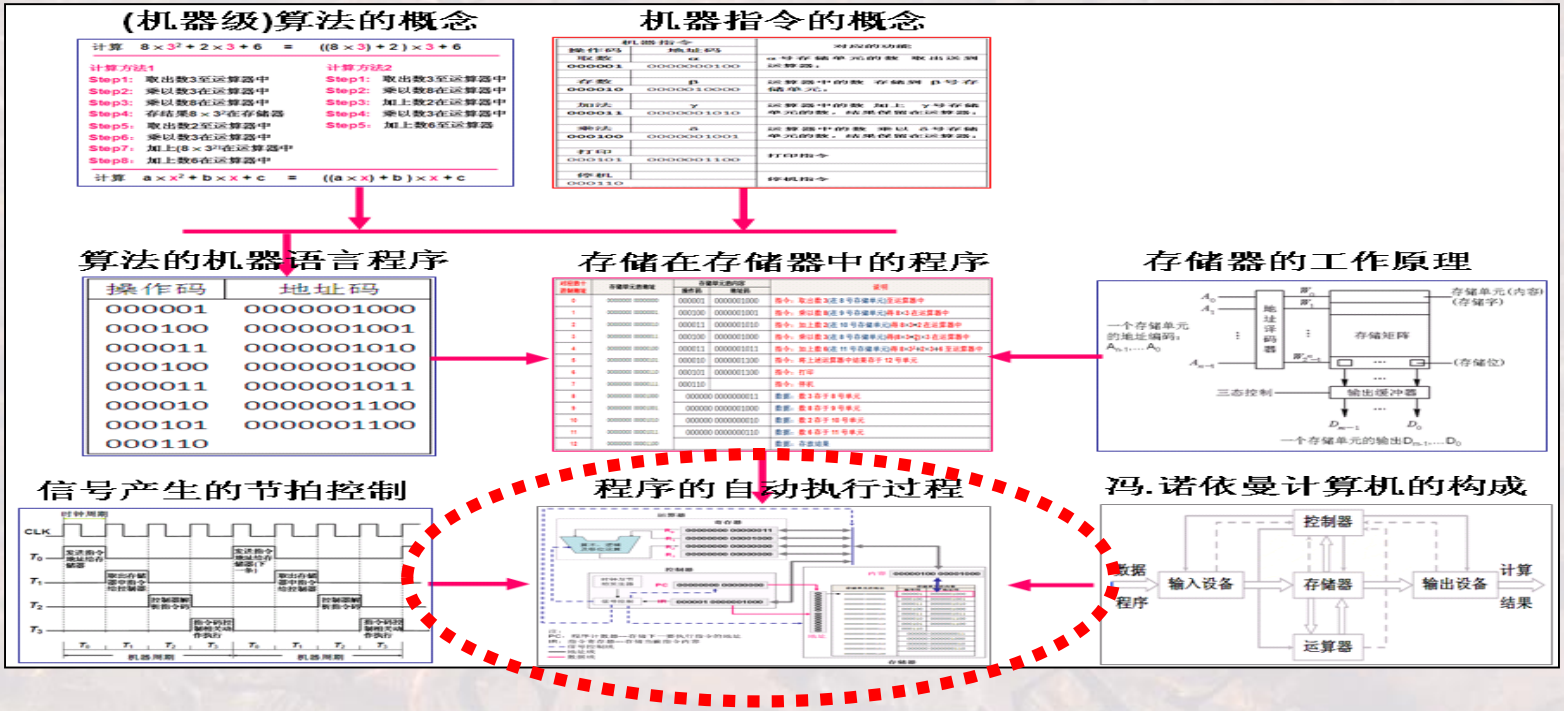


机器级程序的执行过程模拟

(8)在“冯.诺依曼机执行程序的基本思维”中的位置?

战德臣 教授

基本目标：理解程序是如何被执行的



基本思维：机器级算法与程序➔机器指令与指令系统➔存储器➔存储程序➔运算器与控制器➔机器级程序的执行；

算法程序化➔程序指令化➔指令存储化➔执行信号化