

第5讲 机器是如何执行程序的：认识计算机

黄宏

华中科技大学计算机学院

honghuang@hust.edu.cn

第5讲 机器是如何执行程序的：认识计算机

2

本讲要学习的概念和思维

机器级算法

计算 $8 \times 3^2 + 2 \times 3 + 6 = ((8 \times 3) + 2) \times 3 + 6$

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

机器程序

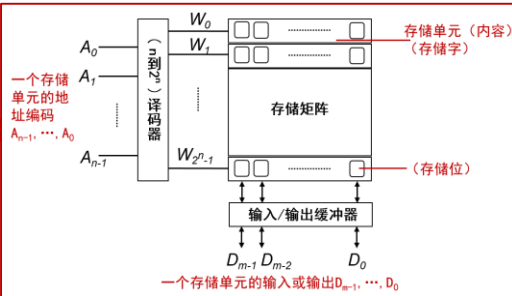
| | |
|--------|------------|
| 000001 | 0000001000 |
| 000100 | 0000001001 |
| 000011 | 0000001010 |
| 000100 | 0000001000 |
| 000011 | 0000001011 |
| 000010 | 0000001100 |
| 000101 | 0000001100 |
| 000110 | 0000000000 |

| 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; |
| 存数 | β | 运算器中的数 存储到 β 号存储单元; |
| 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; |
| 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; |
| 打印 | | 打印指令 |
| 停机 | | 停机指令 |

机器指令

基本思维：算法程序化→程序指令化→指令存储化→执行信号化

存储器

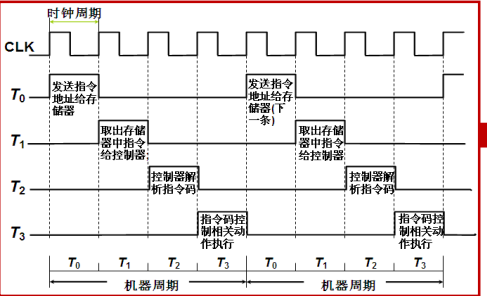


地址 (编号)

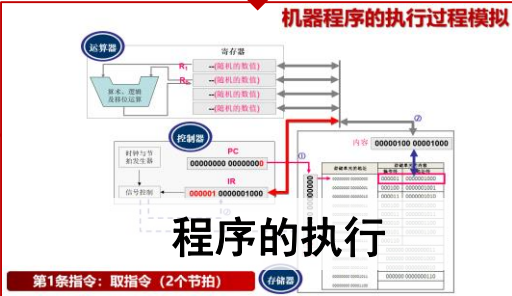
| | | |
|----------|----------|------------------|
| 00000000 | 00000000 | 0000010000001000 |
| 00000000 | 00000001 | 0001000000001001 |
| 00000000 | 00000010 | 0000110000001010 |
| 00000000 | 00000011 | 0001000000001000 |
| 00000000 | 00000100 | 0000110000001011 |
| 00000000 | 00000101 | 0000100000001100 |
| 00000000 | 00000110 | 0001010000001100 |
| 00000000 | 00000111 | 0001100000000000 |

程序在存储器中

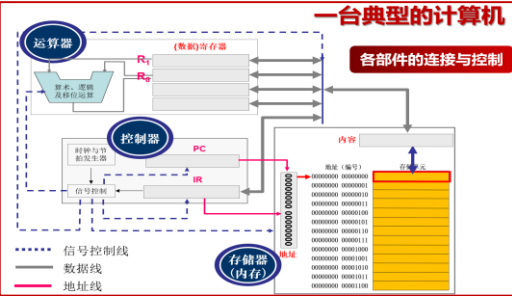
信号次序控制



机器程序的执行过程模拟



典型计算机



第5讲 机器是如何执行程序的：认识计算机

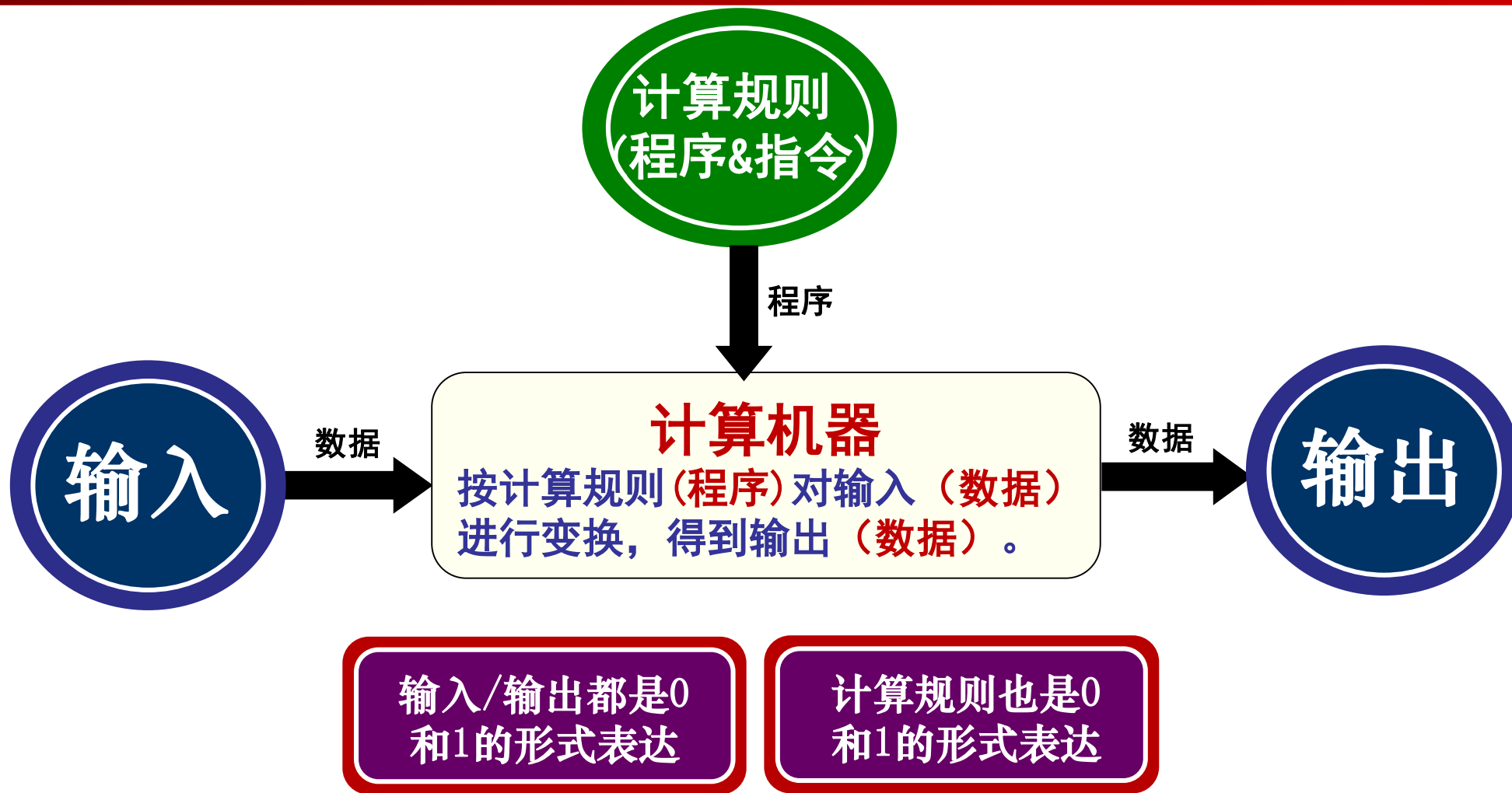
3

- 一、计算机器的功能与构成
- 二、机器指令与机器程序
- 三、一台典型的计算机
- 四、机器程序的执行过程模拟

计算机器的功能与构成

4

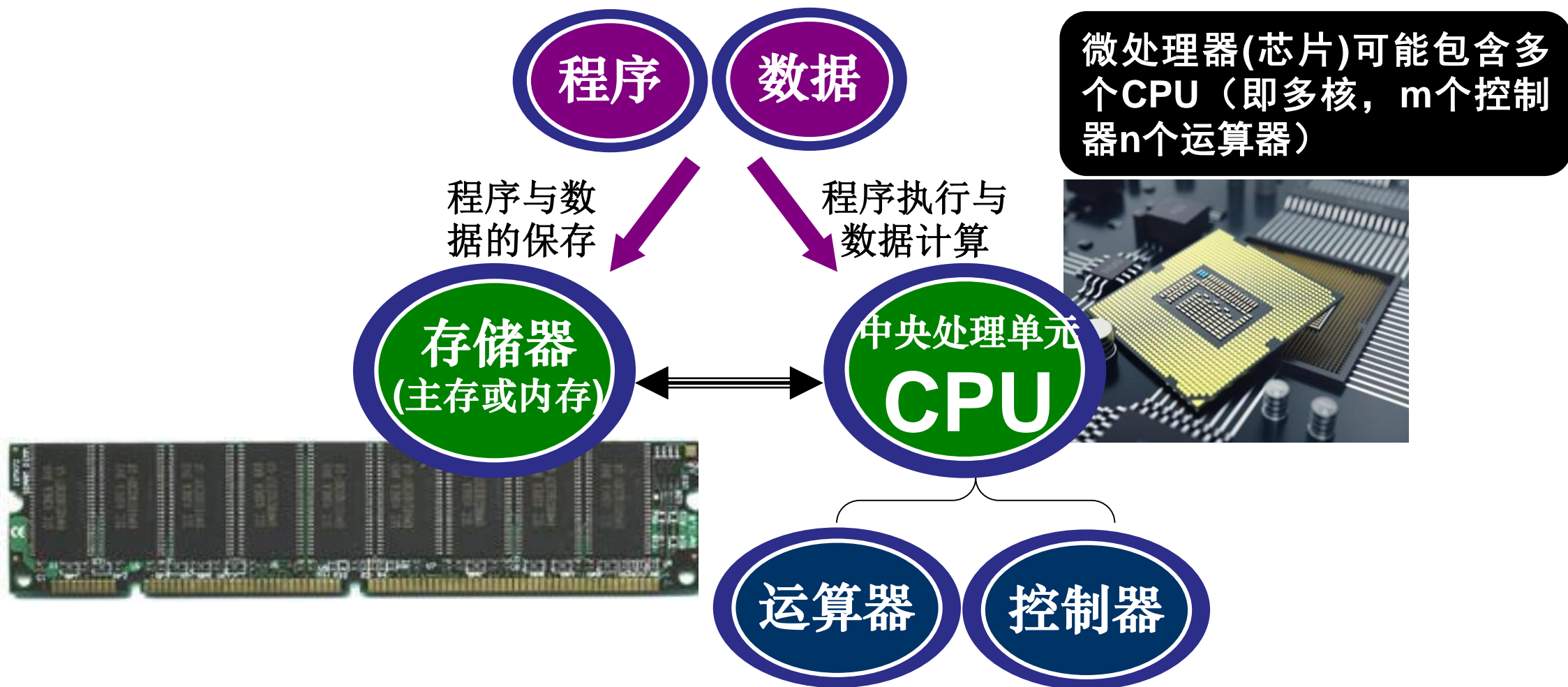
(1) 计算机器的基本功能



计算机器的功能与构成

5

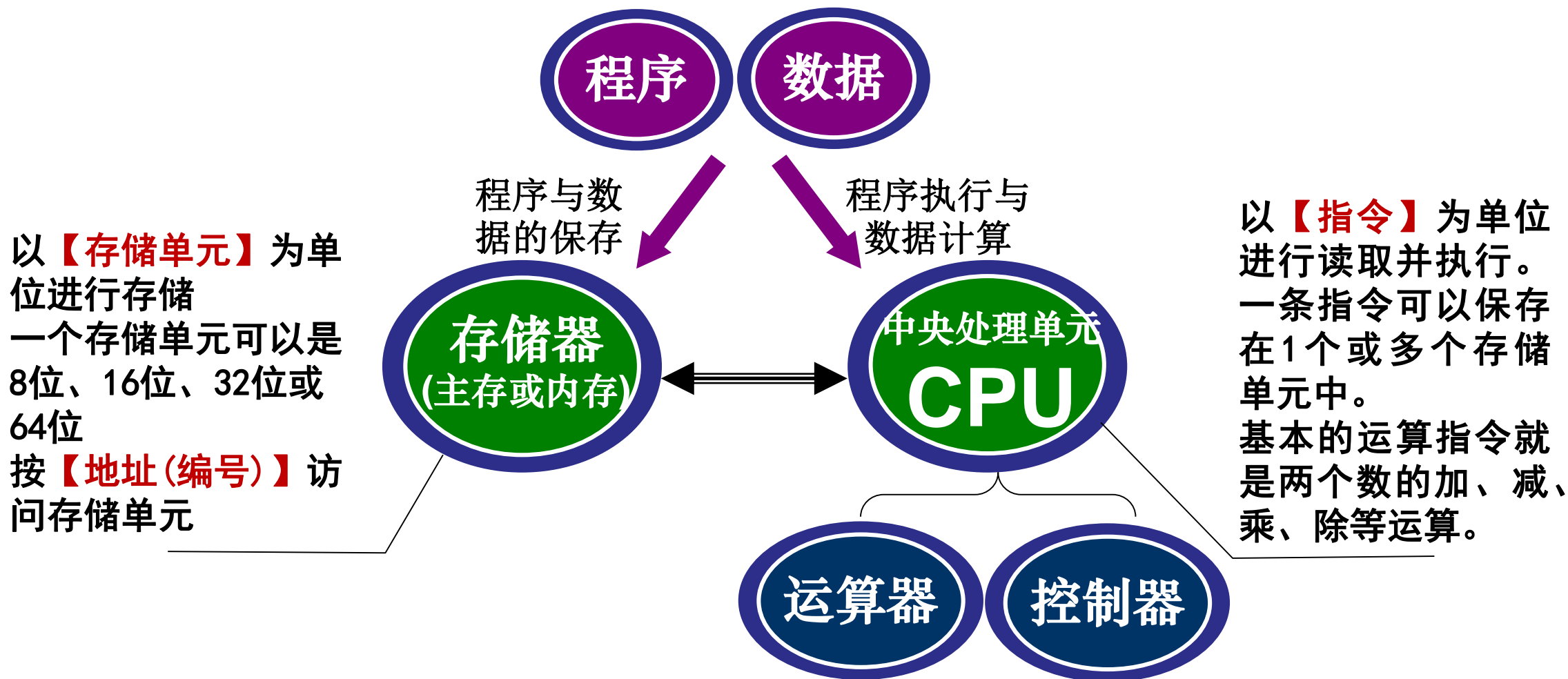
(2) 计算机器的核心部件



计算机器的功能与构成

6

(3) 计算机器的核心概念



第5讲 机器是如何执行程序的：认识计算机

7

- 一、计算机器的功能与构成
- 二、机器指令与机器程序
- 三、一台典型的计算机
- 四、机器程序的执行过程模拟

机器指令与机器程序

8

(1) 计算机如何计算一个运算式?

$$8 \times 3^2 + 2 \times 3 + 6$$

机器指令与机器程序

9

(2) 机器级算法

算法——机器可以执行的求解问题的规则及步骤。

$$\text{计算 } 8 \times 3^2 + 2 \times 3 + 6 = ((8 \times 3) + 2) \times 3 + 6$$

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”

机器指令与机器程序

10

(3) 机器指令

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

(如取数，加法等操作) (操作中的数据来源于)

000100 0000001010

000100 0000000100

000011 0000001100

000011 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 | | |

机器语言——机器能够执行的所有指令的集合

机器指令与机器程序

11

(4) 机器程序：将机器级算法用机器指令进行表达

假设数字3、8、2、6及算式结果分别存储在8号、9号、10号、11号和12号存储单元

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

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 | | |
| 000110 | | |



机器指令与机器程序

12

(5) 将机器程序和数据装载进存储器中?

计算 $8 \times 3^2 + 2 \times 3 + 6$ 的程序

000001 0000001000
000100 0000001001
000011 0000001010
000100 0000001000
000011 0000001011
000010 0000001100
000101 0000001100
000110 0000000000

机器程序



| 地址 (编号) | |
|----------|----------|
| 00000000 | 00000000 |
| 00000000 | 00000001 |
| 00000000 | 00000010 |
| 00000000 | 00000011 |
| 00000000 | 00000100 |
| 00000000 | 00000101 |
| 00000000 | 00000110 |
| 00000000 | 00000111 |
| 00000000 | 00001000 |
| 00000000 | 00001001 |
| 00000000 | 00001010 |
| 00000000 | 00001011 |
| 00000000 | 00001100 |

| 存储单元 |
|------------------|
| 0000010000001000 |
| 0001000000001001 |
| 0000110000001010 |
| 0001000000001000 |
| 0000110000001011 |
| 0000100000001100 |
| 0001010000001100 |
| 0001100000000000 |
| 0000000000000011 |
| 0000000000001000 |
| 0000000000000010 |
| 0000000000000011 |
| |

存储器

程序

数据

机器指令与机器程序

13

(6) 改改机器程序，体验机器程序

| 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 $8 \times 3 + 2$ 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 $(8 \times 3 + 2) \times 3$ 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 $8 \times 3^2 + 2 \times 3 + 6$ 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 | 00000001000 | 数据：数 8 存于 9 号单元 |
| 10 | 00000000 00001010 | 000000 | 00000000010 | 数据：数 2 存于 10 号单元 |
| 11 | 00000000 00001011 | 000000 | 00000000110 | 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

机器指令与机器程序

14

(6) 改改机器程序，体验机器程序

计算 $8 \times 3^2 + 2 \times 3 + 6$ 的程序

计算 $5 \times 4^2 + 3 \times 4 + 7$ 的程序

计算 $ax^2 + bx + c$ 的程序?

000001 0000001000

000100 0000001001

000011 0000001010

000100 0000001000

000011 0000001011

000010 0000001100

000101 0000001100

000110 0000000000

机器程序



地址 (编号)

| | |
|----------|----------|
| 00000000 | 00000000 |
| 00000000 | 00000001 |
| 00000000 | 00000010 |
| 00000000 | 00000011 |
| 00000000 | 00000100 |
| 00000000 | 00000101 |
| 00000000 | 00000110 |
| 00000000 | 00000111 |
| 00000000 | 00001000 |
| 00000000 | 00001001 |
| 00000000 | 00001010 |
| 00000000 | 00001011 |
| 00000000 | 00001100 |

存储单元

| |
|------------------|
| 0000010000001000 |
| 0001000000001001 |
| 0000110000001010 |
| 0001000000001000 |
| 0000110000001011 |
| 0000100000001100 |
| 0001010000001100 |
| 0001100000000000 |
| 0000000000000000 |
| 0000000000000000 |
| 0000000000000000 |
| 0000000000000000 |
| 0000000000000000 |

存储器

程序

数据

机器指令与机器程序

15

读一读程序，能发现什么吗？

| 地址 (编号) | 存储单元 |
|----------|----------|
| 00000000 | 00000000 |
| 00000000 | 00000001 |
| 00000000 | 00000010 |
| 00000000 | 00000011 |
| 00000000 | 00000100 |
| 00000000 | 00000101 |
| 00000000 | 00000110 |
| 00000000 | 00000111 |
| 00000000 | 00001000 |
| 00000000 | 00001001 |
| 00000000 | 00001010 |
| 00000000 | 00001011 |
| 00000000 | 00001100 |

取出11号存储单元的数(数字3)至运算器中
乘以10号存储单元的数(数字5)得 5×3 在运算器中
加上9号存储单元的数(数字4)得 $5 \times 3 + 4$ 在运算器中
乘以11号存储单元的数(数字3)得 $(5 \times 3 + 4) \times 3$ 在运算器中
加上8号存储单元的数(数字2)得 $5 \times 3^2 + 4 \times 3 + 2$ 至运算器中
将上述运算器中结果存于12号存储单元。

打印12号存储单元中的数
停机

2
4
5
3
7

| 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 | 000000100 | |
| 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 | | |

机器指令与机器程序

读一读程序，能发现什么吗？

| 存储单元的地址编码 | 存储单元的内容 |
|------------------|------------------|
| 0000000000001000 | 0000010000001000 |
| 0000000000001001 | 0000110000001001 |
| 0000000000001010 | 0000110000001010 |
| 0000000000001011 | 0000100000001010 |
| 0000000000001100 | 0001110000001010 |
| | |

- 取出8号存储单元的数 (即数0000010000001000，十进制为1032) 至运算器中
- 加上9号存储单元的数(即数0000110000001001，十进制为3081) 得到3081+ 1032，即4113 在运算器中
- 加上10号存储单元的数(即数0000110000001010，十进制为3082) 得到4113+3082，即7195在运算器中
- 将结果存入10号存储单元(即7195的二进制数，0001110000011011 存储到0000000000001010号 (即10号) 单元)
- 跳转到10号单元的指令继续执行(10号单元存储的是什么)

...

程序

存储单元中的内容可能是指令，也可能是数据，还可能既是指令又是数据

当用跳转指令改变程序执行次序时，要注意其指向的是否是指令？可能会出现错误

存储器中的程序是可能被修改的，即初始时是执行预期的程序，而再执行时可能就不是了

| 机器指令 | | 指令能够完成的功能 |
|--------|------------|--------------------------------------|
| 操作码 | 地址码 | |
| 取数 | α | 将 α 号存储单元的数 取出 送到 运算器； |
| 000001 | 0000000100 | |
| 存数 | β | 将运算器中的数 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 | |
| 跳转 | σ | 跳转到 σ 号存储单元所存储的指令； |
| 000111 | 0000001100 | |
| 打印 | θ | 打印 θ 号存储单元的数，将其输出； |
| 000101 | 0000001100 | |
| 停机 | | 停机指令 |
| 000110 | 0000000000 | |

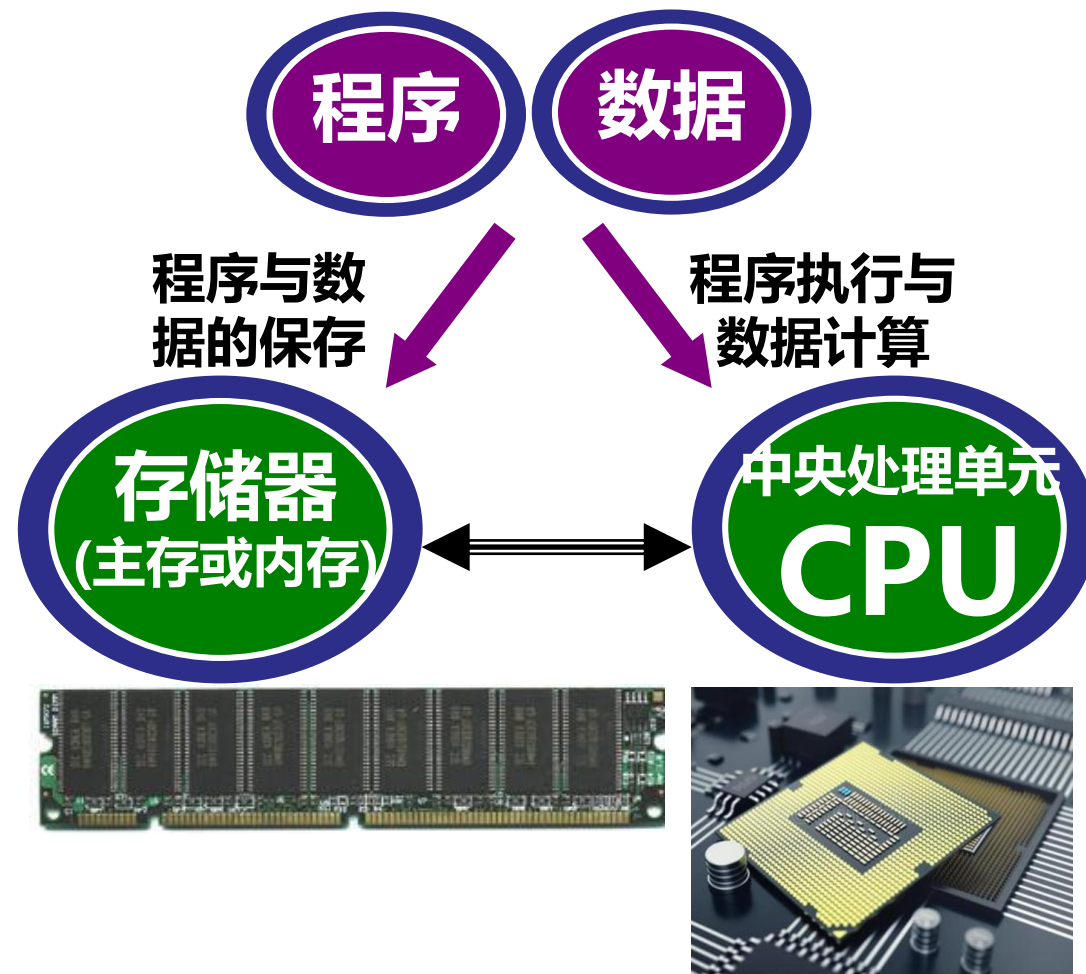
指令系统

机器指令与机器程序

17

小结

- 指令是一种01形式的编码
- 机器程序是用机器指令编制的程序
- CPU所能识别并执行的所有指令就称为指令系统。用该指令系统中的指令编写出的程序，该CPU能够执行
- 数据和指令以同等地位存储于存储器中，即一个存储单元存储的可能是指令，也可能是数据，还可能既是指令又是数据
- 存储在存储单元中的数据或指令在执行过程中可能被改变，也可能前一秒是指令，后一秒就为数据
- 机器程序编写好后，先存于存储器中，然后CPU会一条一条的读取该程序的每一条指令予以执行——存储程序



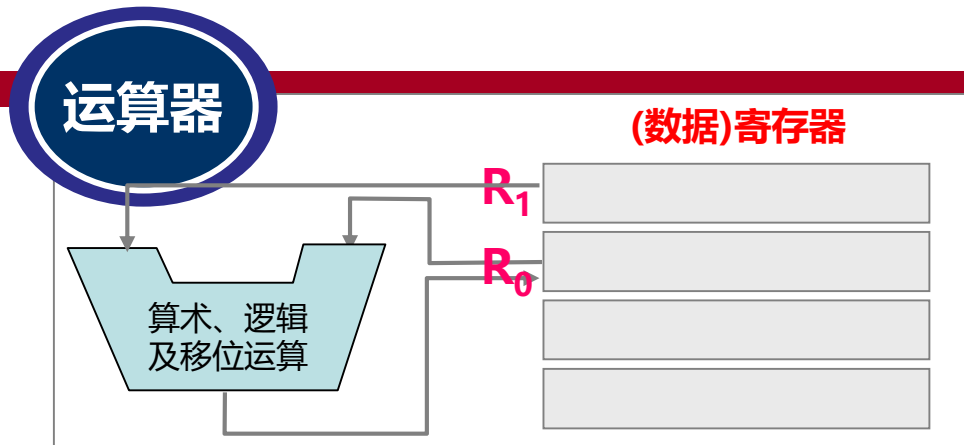
第5讲 机器是如何执行程序的：认识计算机

18

- 一、计算机器的功能与构成
- 二、机器指令与机器程序
- 三、一台典型的计算机
- 四、机器程序的执行过程模拟

一台典型的计算机

19



运算器

□ (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

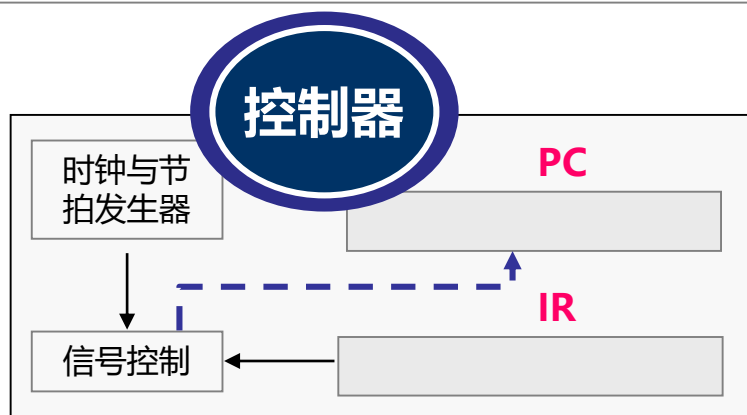
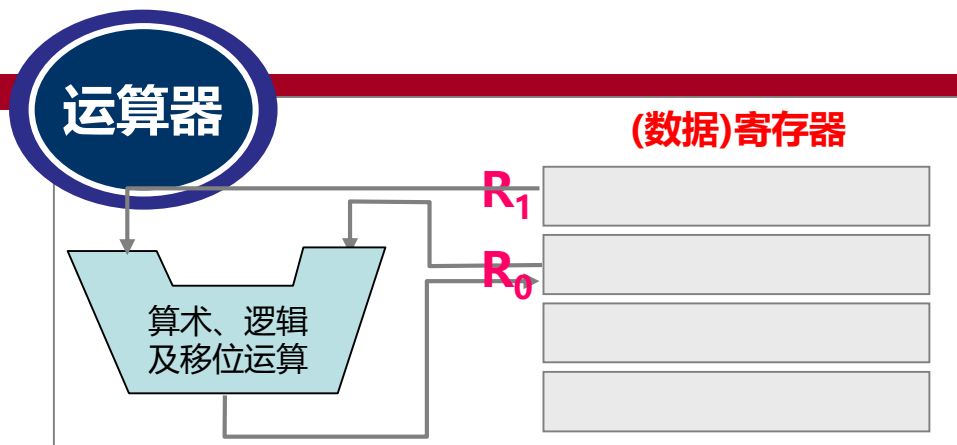
为什么要如此设计呢? 减少指令的长度

两个操作数都在存储器中: 只需给出一个存储单元地址

000011 000000101

利用寄存器进行腾挪

一台典型的计算机



将要执行哪一个程序，
则将该程序的地址送
给PC。否则PC值自动
加1，按顺序执行

控制器

- 程序计数器PC
- 指令寄存器IR
- 信号控制器—发出控制信号
- 时钟与节拍发生器—控制操作次序

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

一台典型的计算机

运算器

算术、逻辑
及移位运算

(数据)寄存器

R_1

R_0

控制器

时钟与节
拍发生器

PC

信号控制器

IR

存储器

□ 存储单元地址

□ 存储单元内容

存储器
(内存)

内容

地址 (编号)

存储单元

地址

| | |
|----------|----------|
| 00000000 | 00000000 |
| 00000000 | 00000001 |
| 00000000 | 00000010 |
| 00000000 | 00000011 |
| 00000000 | 00000100 |
| 00000000 | 00000101 |
| 00000000 | 00000110 |
| 00000000 | 00000111 |
| 00000000 | 00001000 |
| 00000000 | 00001001 |
| 00000000 | 00001010 |
| 00000000 | 00001011 |
| 00000000 | 00001100 |

一台典型的计算机

22

运算器

(数据)寄存器

各部件的连接与控制

存储器被连接到多个位置，怎么控制传递给谁？

控制器

时钟与节拍发生器

PC

IR

信号控制

内容

存储单元

地址（编号）

00000000 00000000
00000000 00000001
00000000 00000010
00000000 00000011
00000000 00000100
00000000 00000101
00000000 00000110
00000000 00000111
00000000 00001000
00000000 00001001
00000000 00001010
00000000 00001011
00000000 00001100

地址

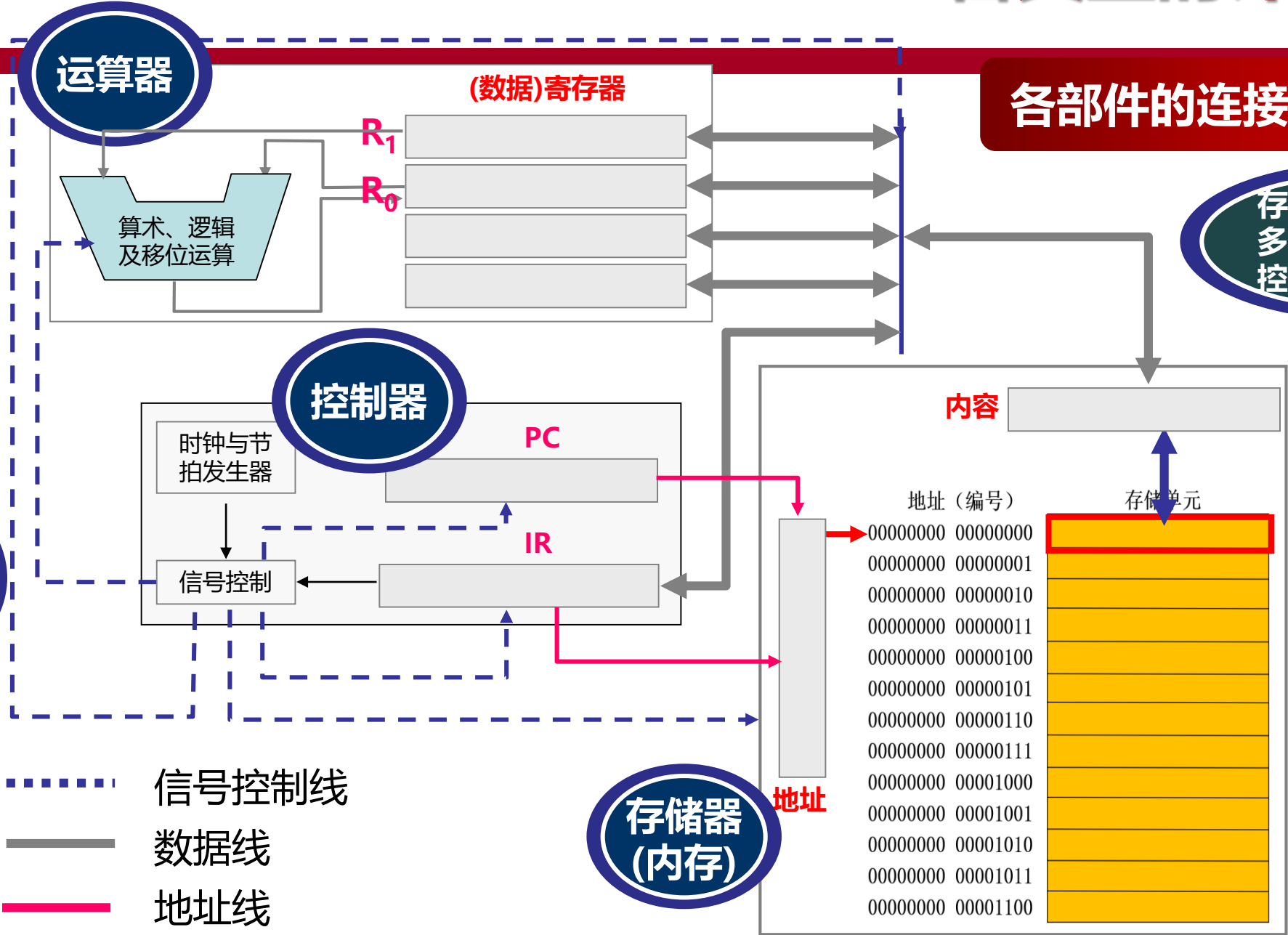
存储器
(内存)

信号控制线

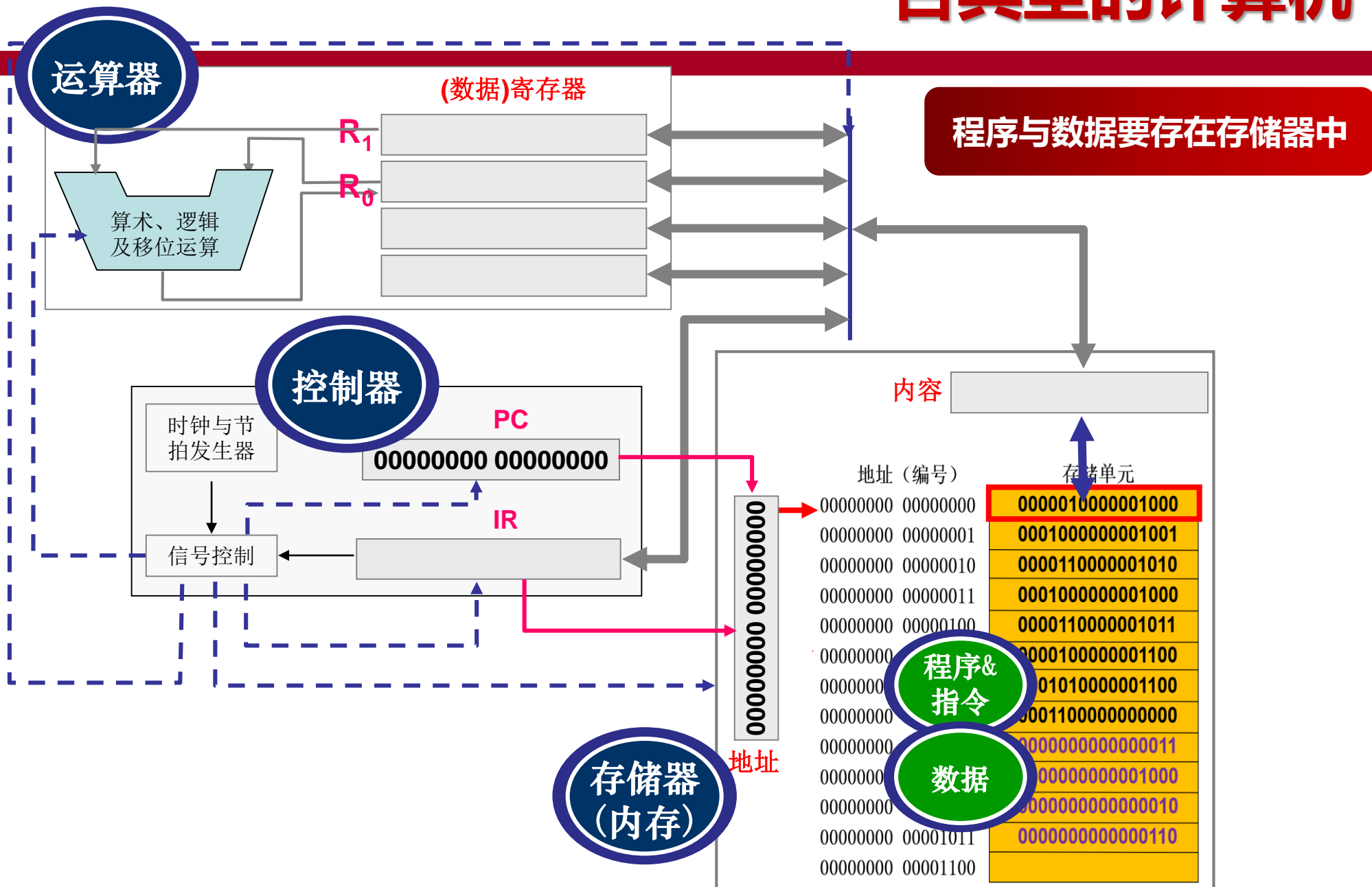
数据线

地址线

信号控制部件
给谁发信号，
谁就接收；否
则不接收



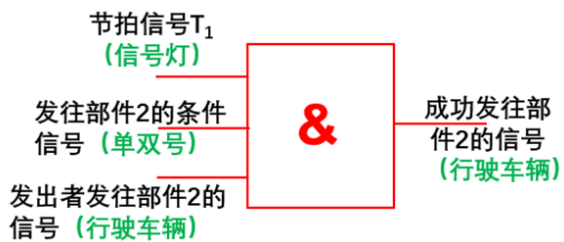
一台典型的计算机



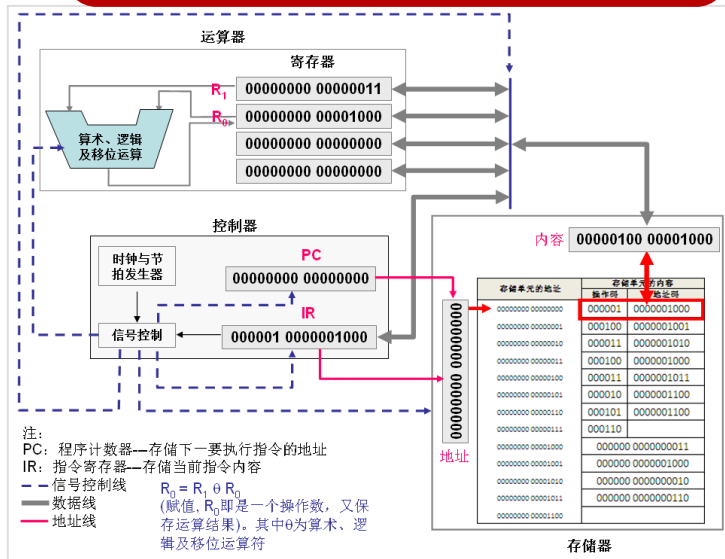
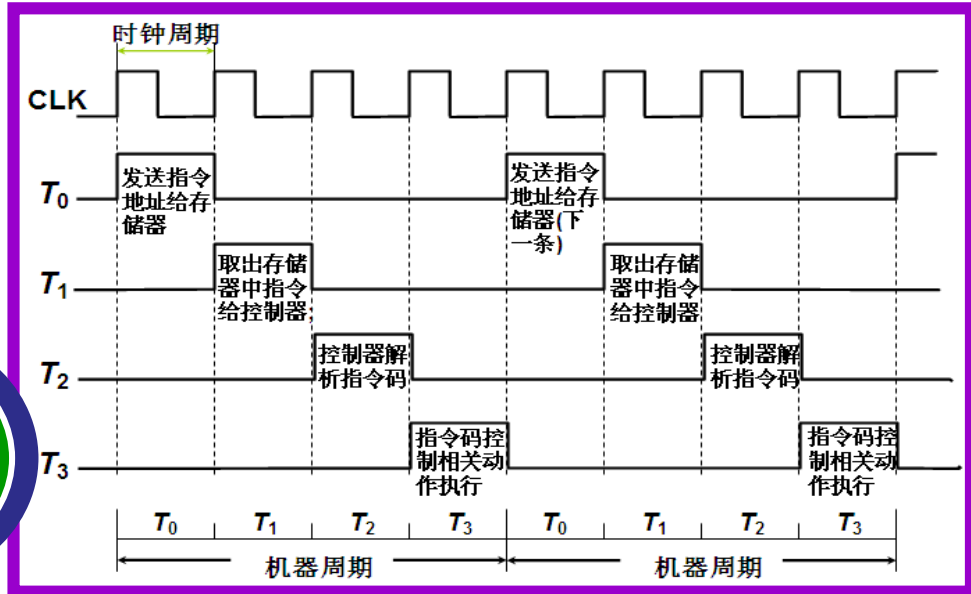
指令执行

- ◆不同的指令，由一组不同的电信号构成。有些电信号需要按次序完成。
- ◆最小的时间区隔单位--时钟周期。不同的时钟周期状态称为节拍。
- ◆多个节拍构成一个机器周期。一条指令占用一个或多个机器周期。
- ◆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。

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



时钟周期、节拍与机器周期



问：机器的“主频”指的是什么？

机器的“主频”指的是该时钟发生的频率，是区分不同信号的最小时间单位。

一台典型的计算机

计算机各部件内部的简单构成关系

运算器

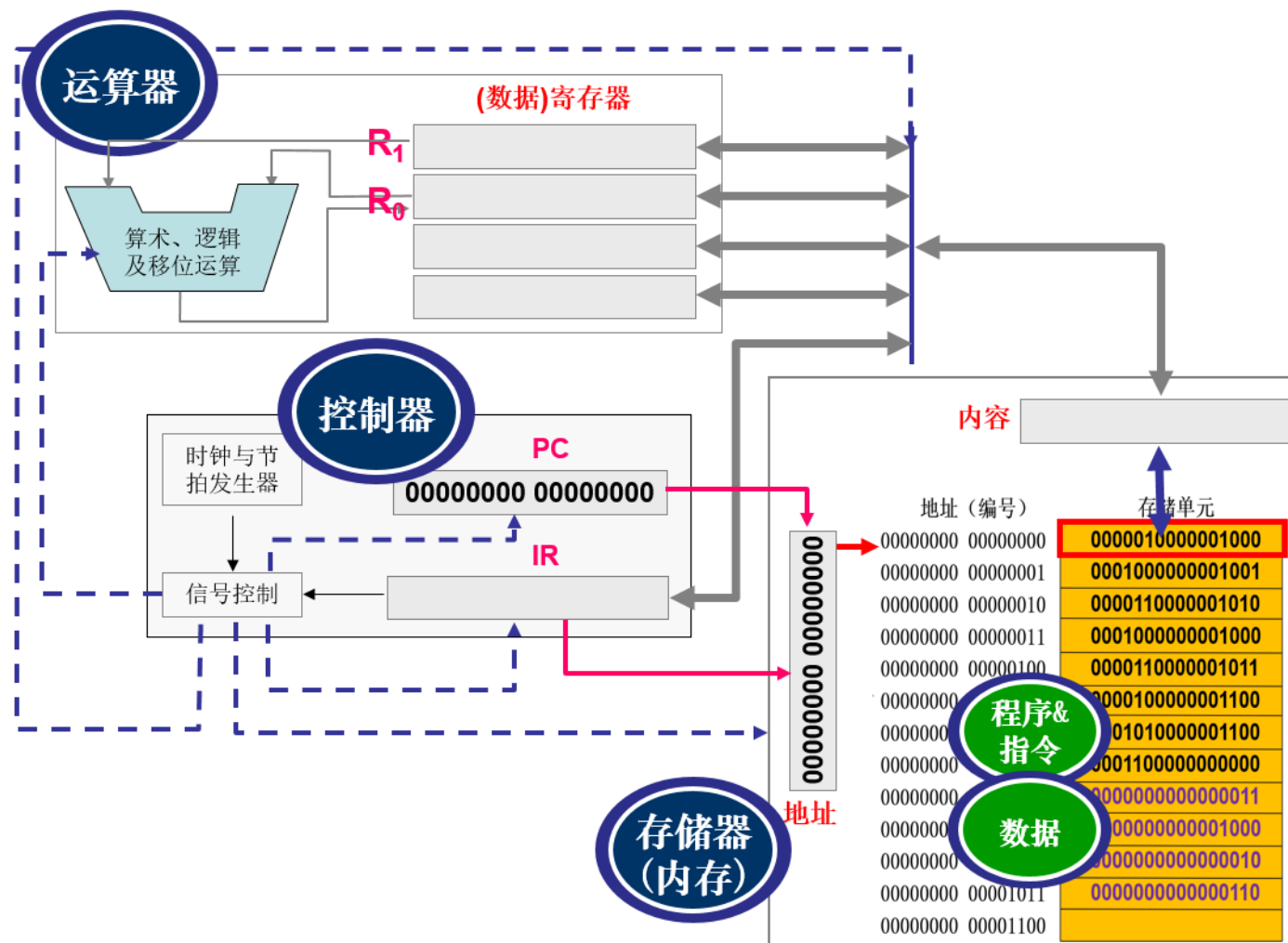
- 寄存器
- 算术逻辑部件

控制器

- 程序计数器PC
- 指令寄存器IR
- 信号控制器
- 时钟与节拍发生器

存储器

- 存储单元地址
- 存储单元内容



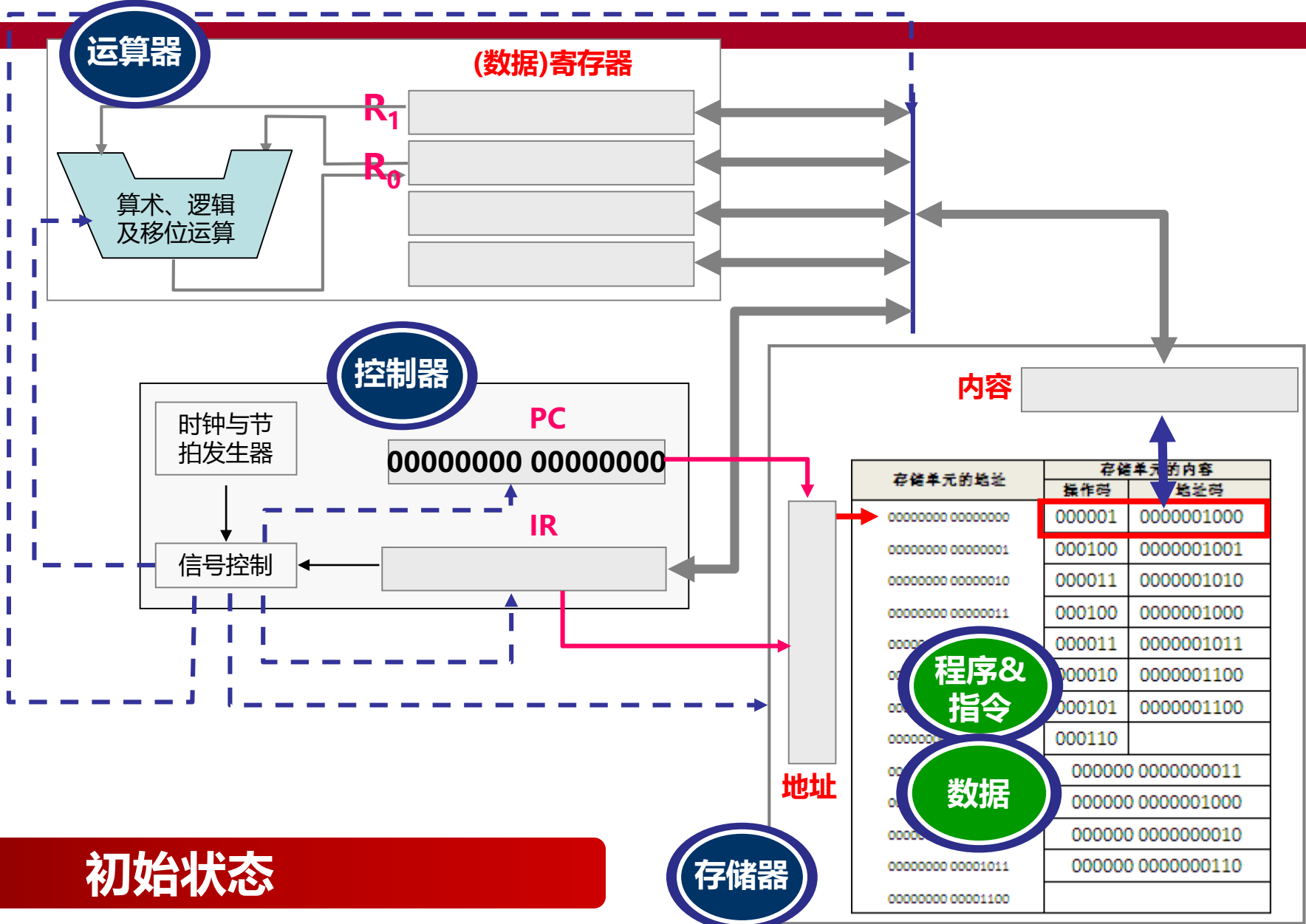
第5讲 机器是如何执行程序的：认识计算机

26

- 一、计算机器的功能与构成**
- 二、机器指令与机器程序**
- 三、一台典型的计算机**
- 四、机器程序的执行过程模拟**

机器程序的执行过程模拟

27

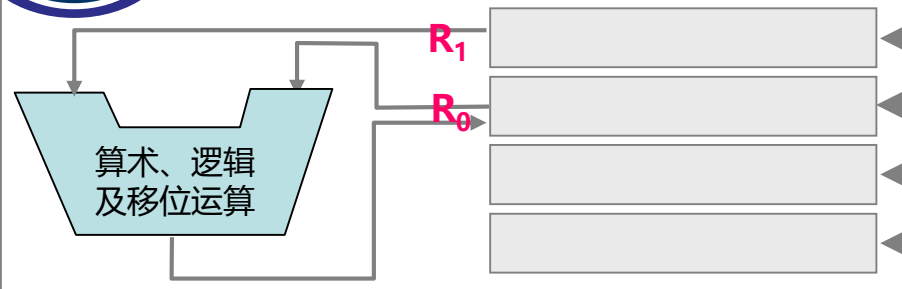


机器程序的执行过程模拟

28

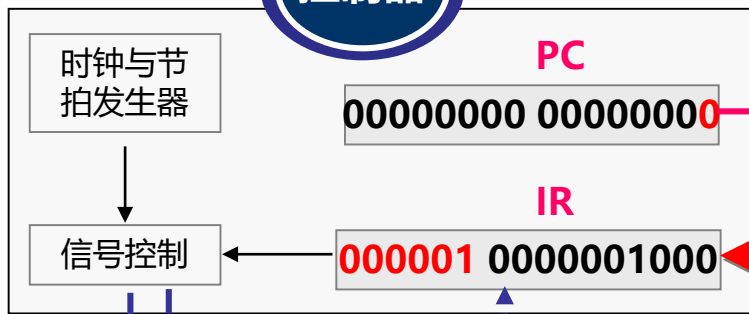
运算器

寄存器



模拟的要点：1注意存储单元的地址和内容；2注意各寄存器的变化

控制器

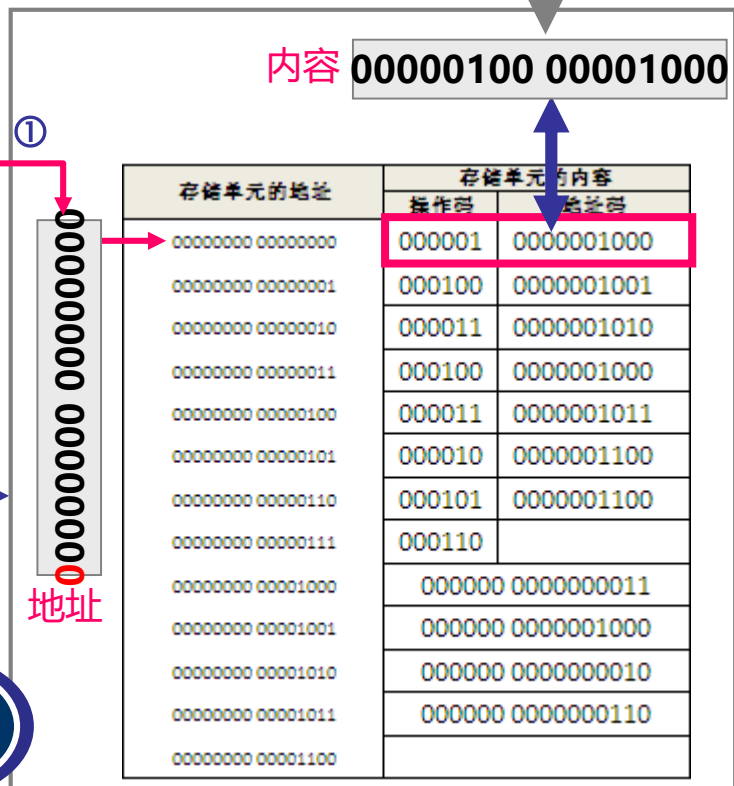


加强理解：完成什么操作（发出什么信号）；2各信号发出的次序与控制

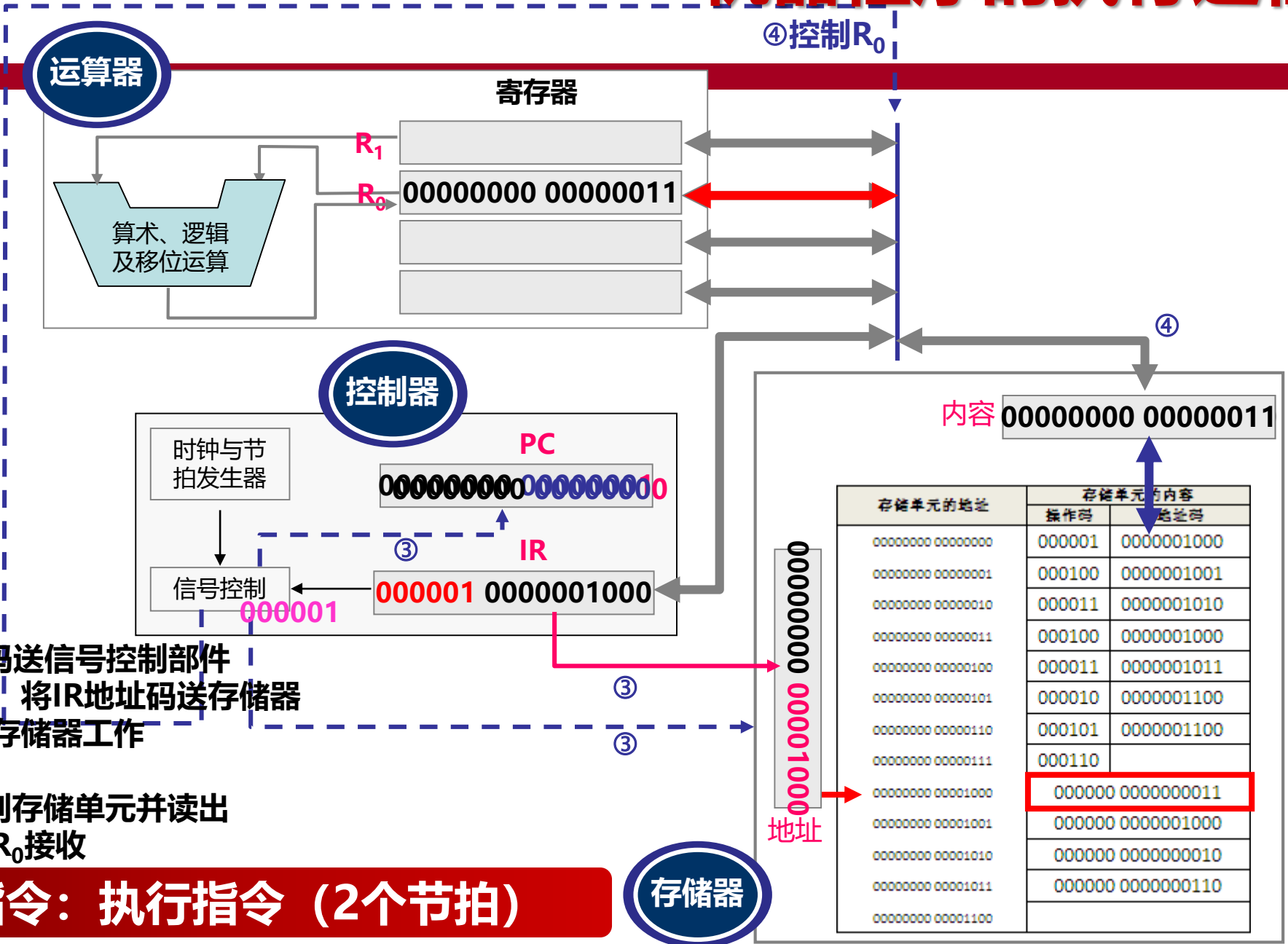
T0①：将PC值送存储器，信号发生器发控制信号通知存储器工作
T1②：按地址找到存储单元并通过内容寄存器输出其内容；信号发生器发控制信号通知IR接收，指令码000001传递给信号发生器，接下来信号发生器将根据指令码000001产生并发送控制信号

第1条指令：取指令（2个节拍）

存储器



机器程序的执行过程模拟



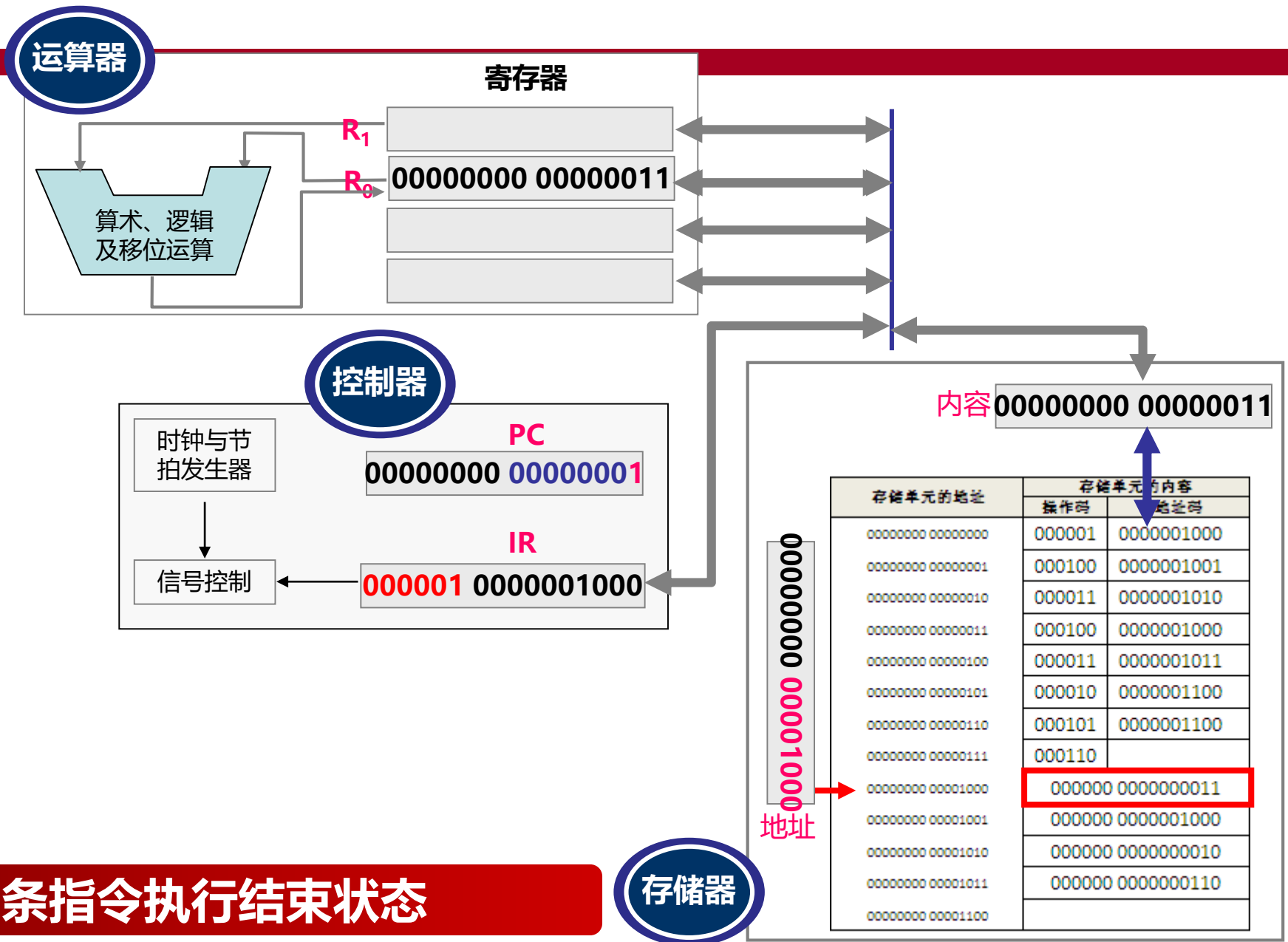
T2③: IR的操作码送信号控制部件
识别是取数指令, 将IR地址码送存储器
发控制信号通知存储器工作
PC值自动加1

T3④: 按地址找到存储单元并读出
发控制信号通知R₀接收

第1条指令: 执行指令 (2个节拍)

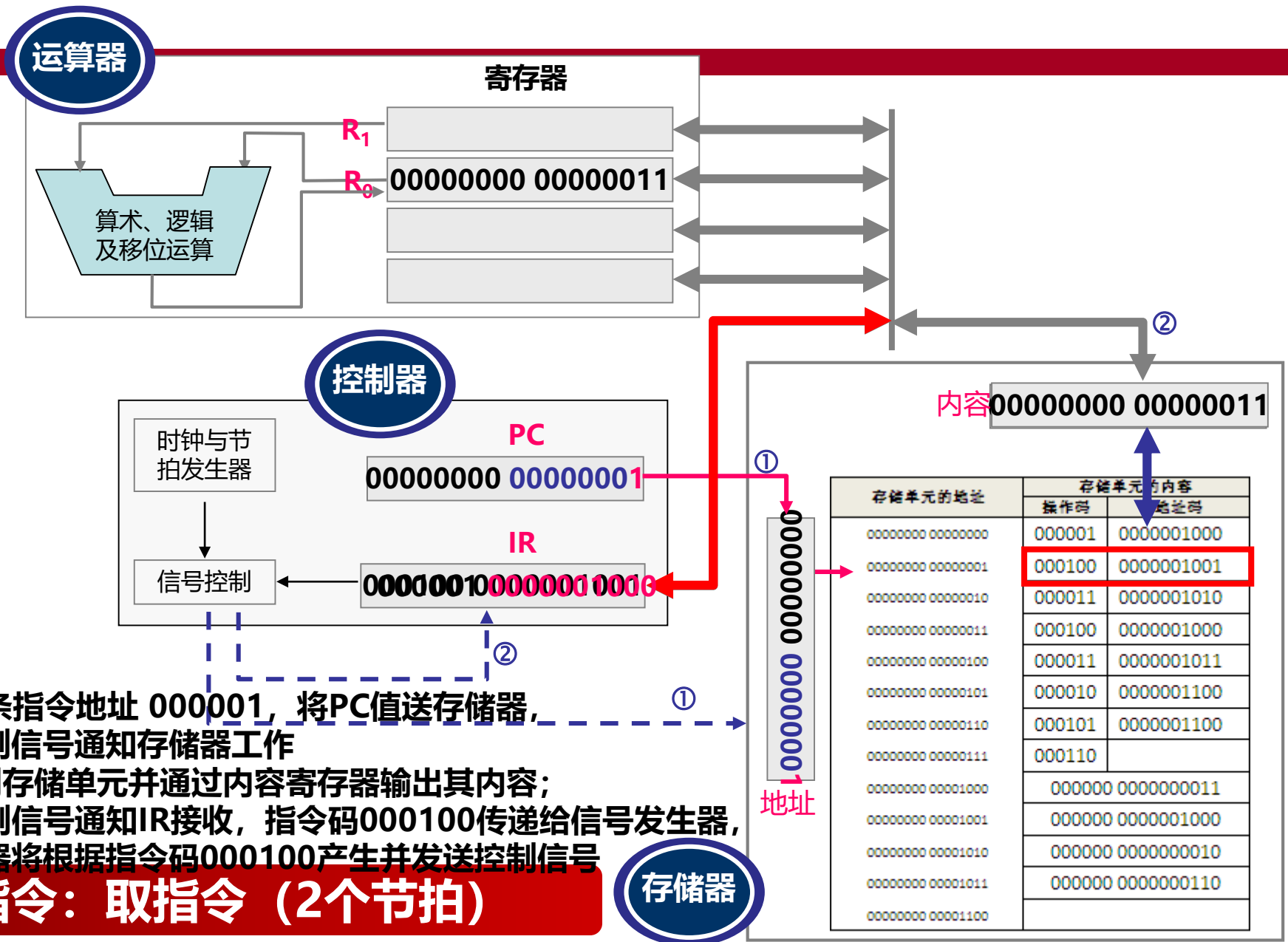
存储器

机器程序的执行过程模拟



第1条指令执行结束状态

机器程序的执行过程模拟

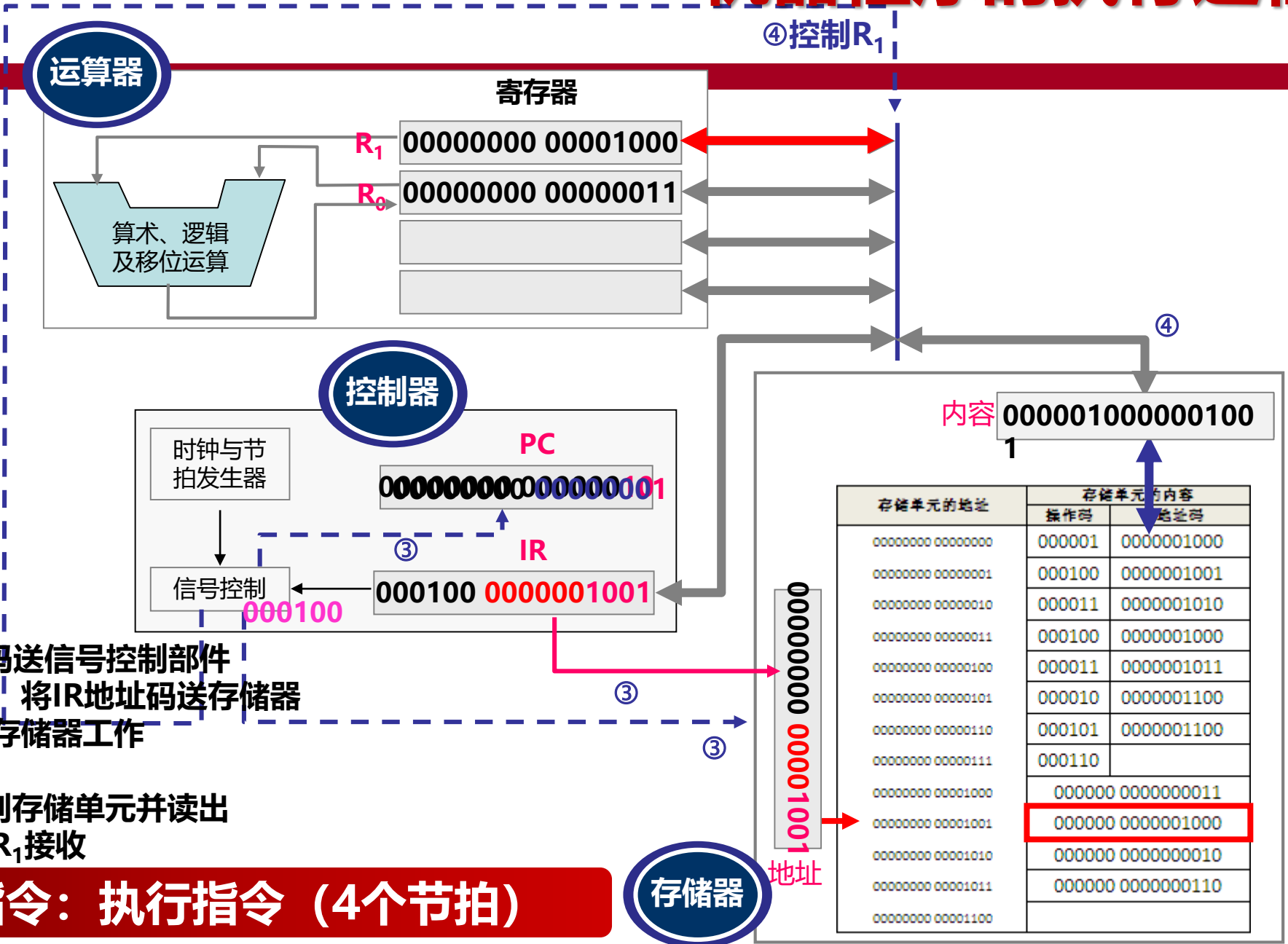


T0①: PC存下一条指令地址 000001, 将PC值送存储器, 信号发生器发控制信号通知存储器工作

T1②: 按地址找到存储单元并通过内容寄存器输出其内容; 信号发生器发控制信号通知IR接收, 指令码000100传递给信号发生器, 接下来信号发生器将根据指令码000100产生并发送控制信号

第2条指令：取指令（2个节拍）

机器程序的执行过程模拟

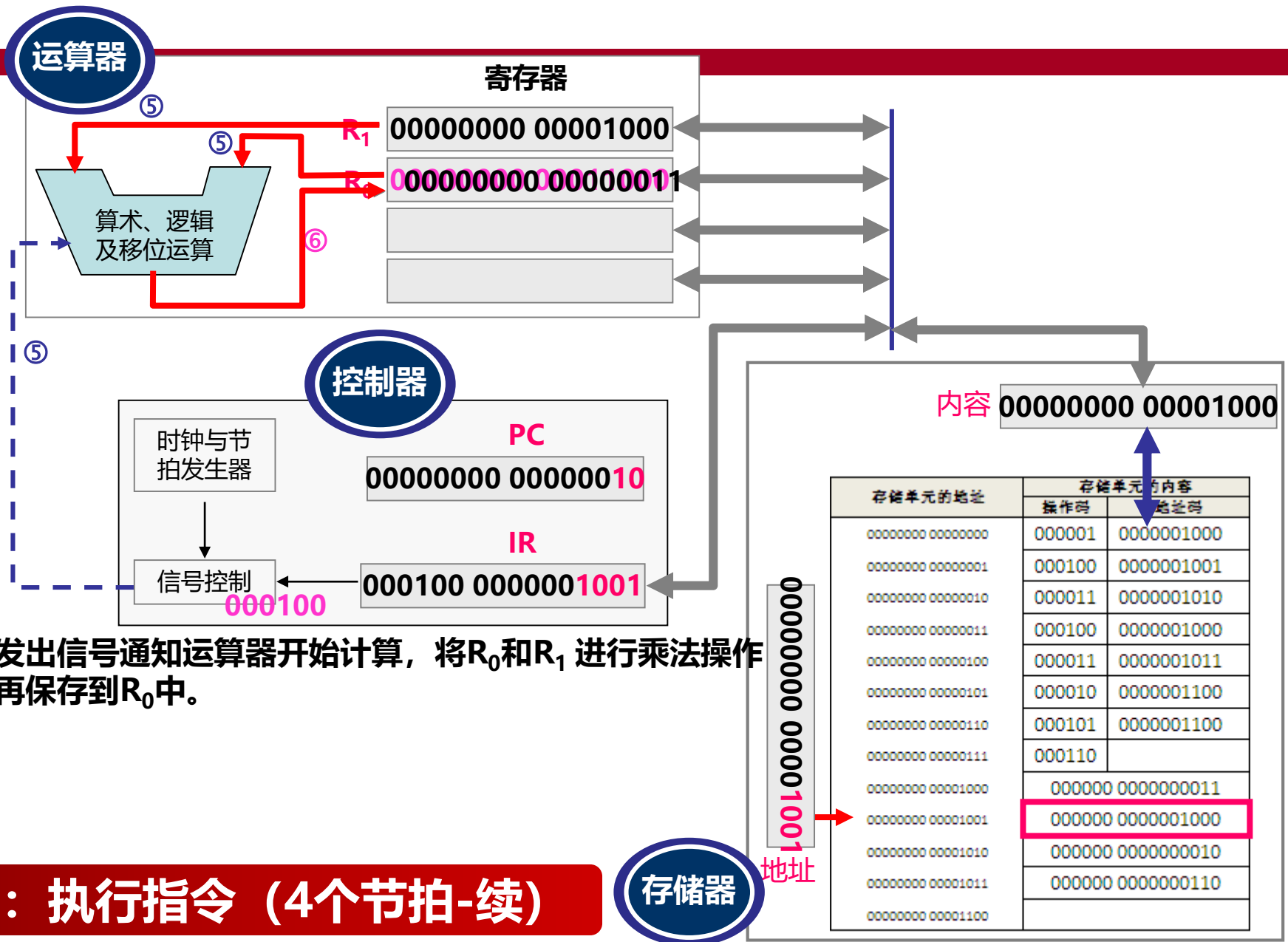


T2③: IR的操作码送信号控制部件
识别是取数指令, 将IR地址码送存储器
发控制信号通知存储器工作
PC值自动加1
T3④: 按地址找到存储单元并读出
发控制信号通知R₁接收

第2条指令: 执行指令 (4个节拍)

存储器

机器程序的执行过程模拟



T4⑤: 信号发生器发出信号通知运算器开始计算, 将R₀和R₁ 进行乘法操作
T5⑥: 运算的结果再保存到R₀中。

第2条指令: 执行指令 (4个节拍-续)

机器程序是如何被执行的

34

小结

系统思维/硬件思维：计算+。理解基本的计算系统是如何构造和如何执行程序思维，对于将来接触机器硬件相关的内容非常重要，对于理解操作系统、理解复杂的互联网环境、云环境等尤为重要。



第5讲 机器是如何执行程序的：认识计算机

35

小结

