计算机组成原理

第7章 指令系统

系统结构研究所

大　纲

四.　指令系统

（一）　指令格式

1、指令的基本格式

2、定长操作码指令格式

3、扩展操作码指令格式

（二）　指令的寻址方式

1、有效地址的概念

2、数据寻址和指令寻址

3、常见寻址方式

（三）　CISC和RISC的基本概念

Contents

7.1 机 器 指 令

指令：就是让计算机执行某种操作的命令。

指令系统：一台计算机中所有机器指令的集合称为这台计算机的指令系统。

系列计算机：指基本指令系统相同且基本体系结构相同的一系列计算机。

系列机能解决软件兼容问题的必要条件是该系列的各种机种有共同的指令集，而且新推出的机种的指令系统一定包含旧机种的所有指令，因此在旧机种上运行的各种软件可以不加任何修改地在新机种上运行。

7.1 机 器 指 令

指令的一般格式：

操作码字段	地址码字段

n位操作码字段的指令系统最多能够表示2^n条指令。

1. 操作码 指令应该执行什么性质的操作和具有何种功能。

(1) 长度固定

用于指令字长较长的情况，RISC

如 IBM 370 操作码 8 位

(2) 长度可变

操作码分散在指令字的不同字段中

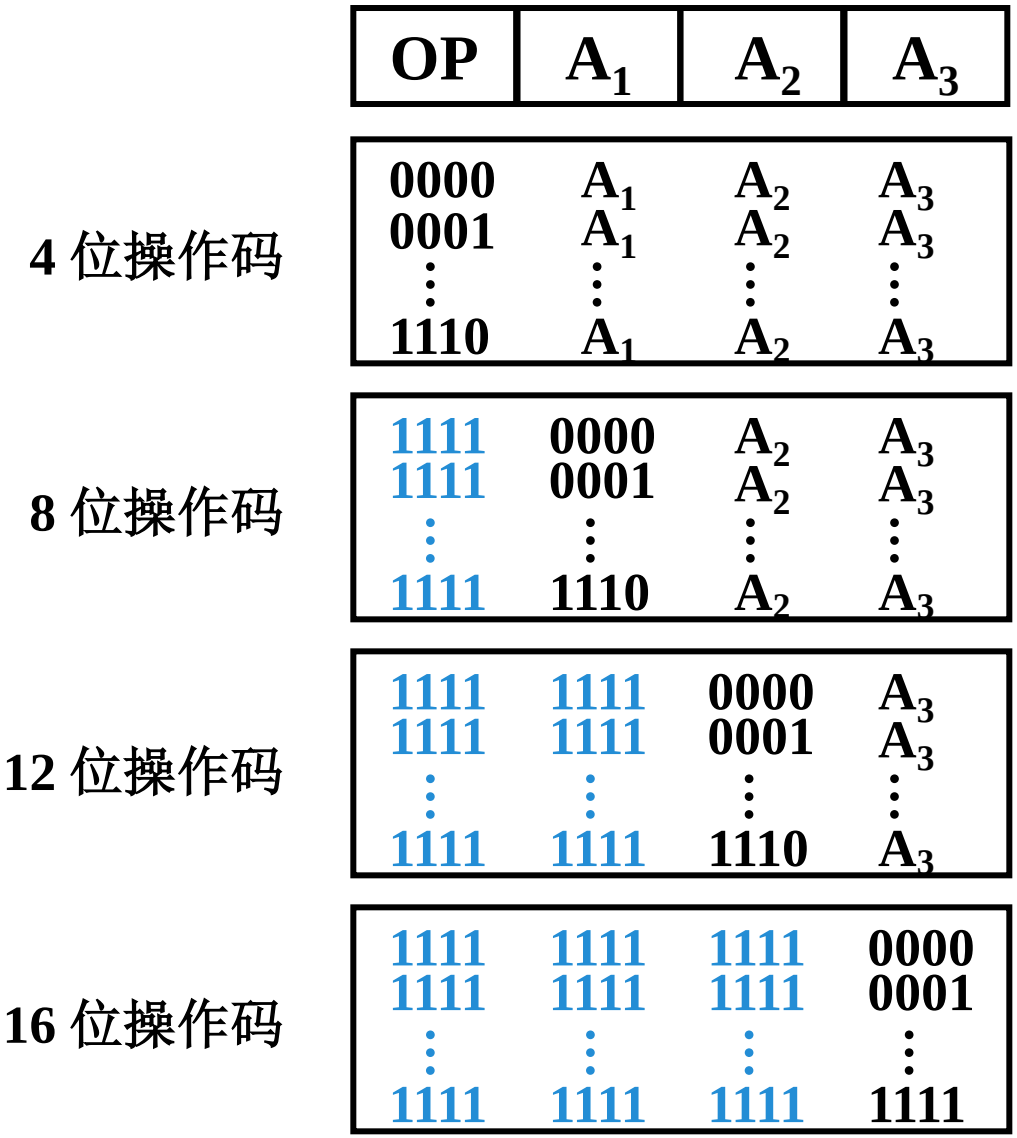
(3) 扩展操作码技术

操作码的位数随地址数的减少而增加

OP	A_1	A_2	A_3	
4 位操作码	0000	A_1	A_2	A_3	最多15条三地址指令
	0001	A_1	A_2	A_3	
	⋮	⋮	⋮	⋮	
	1110	A_1	A_2	A_3	
8 位操作码	1111	0000	A_2	A_3	最多15条二地址指令
	1111	0001	A_2	A_3	
	⋮	⋮	⋮	⋮	
	1111	1110	A_2	A_3	
12 位操作码	1111	1111	0000	A_3	最多15条一地址指令
	1111	1111	0001	A_3	
	⋮	⋮	⋮	⋮	
	1111	1111	1110	A_3	
16 位操作码	1111	1111	1111	0000	16条零地址指令
	1111	1111	1111	0001	
	⋮	⋮	⋮	⋮	
	1111	1111	1111	1111	

(3) 扩展操作码技术

操作码的位数随地址数的减少而增加

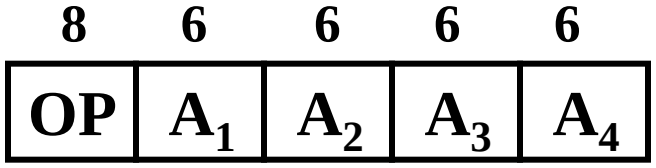


三地址指令操作码
每减少一种可多构成
2^4 种二地址指令

二地址指令操作码
每减少一种可多构成
2^4 种一地址指令

2. 地址码

(1) 四地址



A_1 第一操作数地址

A_2 第二操作数地址

A_3 结果的地址

A_4 下一条指令地址

(A_1) OP $(A_2) \longrightarrow A_3$

设指令字长为 32 位

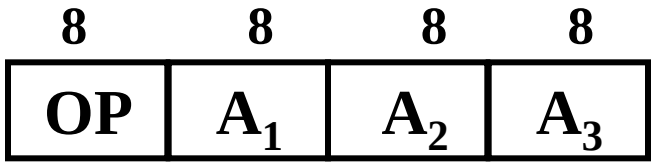
操作码固定为 8 位

4 次访存

寻址范围 $2^6 = 64$

若 PC 代替 A_4

(2) 三地址



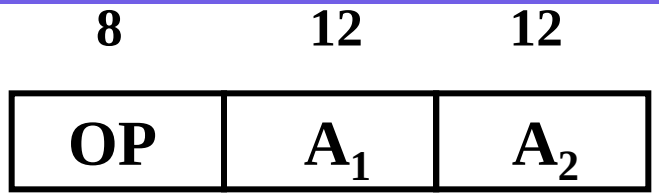
(A_1) OP $(A_2) \longrightarrow A_3$

4 次访存

寻址范围 $2^8 = 256$

若 A_3 用 A_1 或 A_2 代替

(3) 二地址

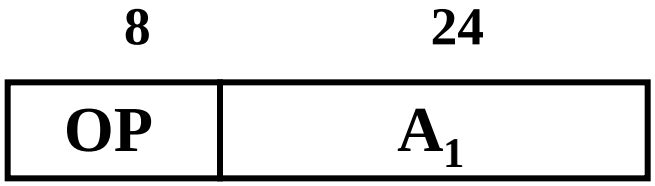


或 (A_1) OP $(A_2) \longrightarrow A_1$　　4 次访存

(A_1) OP $(A_2) \longrightarrow A_2$　　寻址范围 $2^{12} = 4$ K

若结果存于 ACC　3次访存　　若ACC 代替 A_1（或A_2）

(4) 一地址



(ACC) OP $(A_1) \longrightarrow$ ACC　　寻址范围 $2^{24} = 16$ M

(5) 零地址　无地址码

1.无需任何操作数，如空操作指令、停机指令等；2.所需操作数地址是默认的。

二、指令字长

指令字长决定于
- 操作码的长度
- 操作数地址的长度
- 操作数地址的个数

1. 指令字长 固定

指令字长 = 存储字长＝机器字长

2. 指令字长 可变

按字节的倍数变化

小结

- 当用一些硬件资源代替指令字中的地址码字段后
  - 可扩大指令的寻址范围
  - 可缩短指令字长
  - 可减少访存次数
- 当指令的地址字段为寄存器时

  三地址　OP　R_1，R_2，R_3

  二地址　OP　R_1，R_2

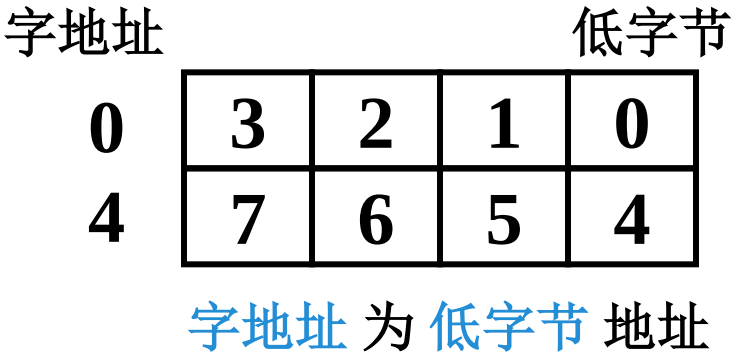
  一地址　OP　R_1
  - 可缩短指令字长
  - 指令执行阶段不访存

7.2 操作数类型和操作种类

一、操作数类型

地址	无符号整数
数字	定点数、浮点数、十进制数
字符	ASCII
逻辑数	逻辑运算

二、数据在存储器中的存放方式



字地址 为 低字节 地址

字地址 为 高字节 地址

存储器中的数据存放（存储字长为32位）

边界对准

地址（十进制）				
0	字（地址 0）			
4	字（地址 4）			
8	字节（地址11）	字节（地址10）	字节（地址 9）	字节（地址 8）
12	字节（地址15）	字节（地址14）	字节（地址13）	字节（地址12）
16	半字（地址18）✓		半字（地址16）✓	
20	半字（地址22）✓		半字（地址20）✓	
24	双字（地址24）▲			
28	双字			
32	双字（地址32）▲			
36	双字			

边界未对准

地址（十进制）			
0	字(地址2)		半字(地址0)
4	字节(地址7)	字节(地址6)	字(地址4)
8	半字(地址10)		半字(地址8)

三、操作类型

1. 数据传送

源	寄存器	寄存器	存储器	存储器
目的	寄存器	存储器	寄存器	存储器
例如	MOVE	STORE MOVE PUSH	LOAD MOVE POP	MOVE

置“1”，清“0”

2. 算术逻辑操作

加、减、乘、除、增 1、减 1、求补、浮点运算、十进制运算

与、或、非、异或、位操作、位测试、位清除、位求反

如 8086　ADD SUB MUL DIV INC DEC CMP NEG
AAA AAS AAM AAD
AND OR NOT XOR TEST

3. 移位操作

算术移位　逻辑移位

循环移位（带进位和不带进位）

4. 转移

(1) 无条件转移　JMP

(2) 条件转移

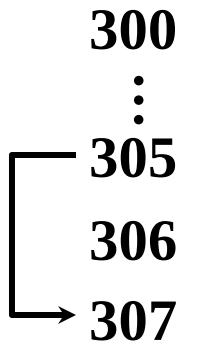
结果为零转　（Z = 1）JZ

结果溢出转　（O = 1）JO

结果有进位转（C = 1）JC

跳过一条指令 SKP（skip）

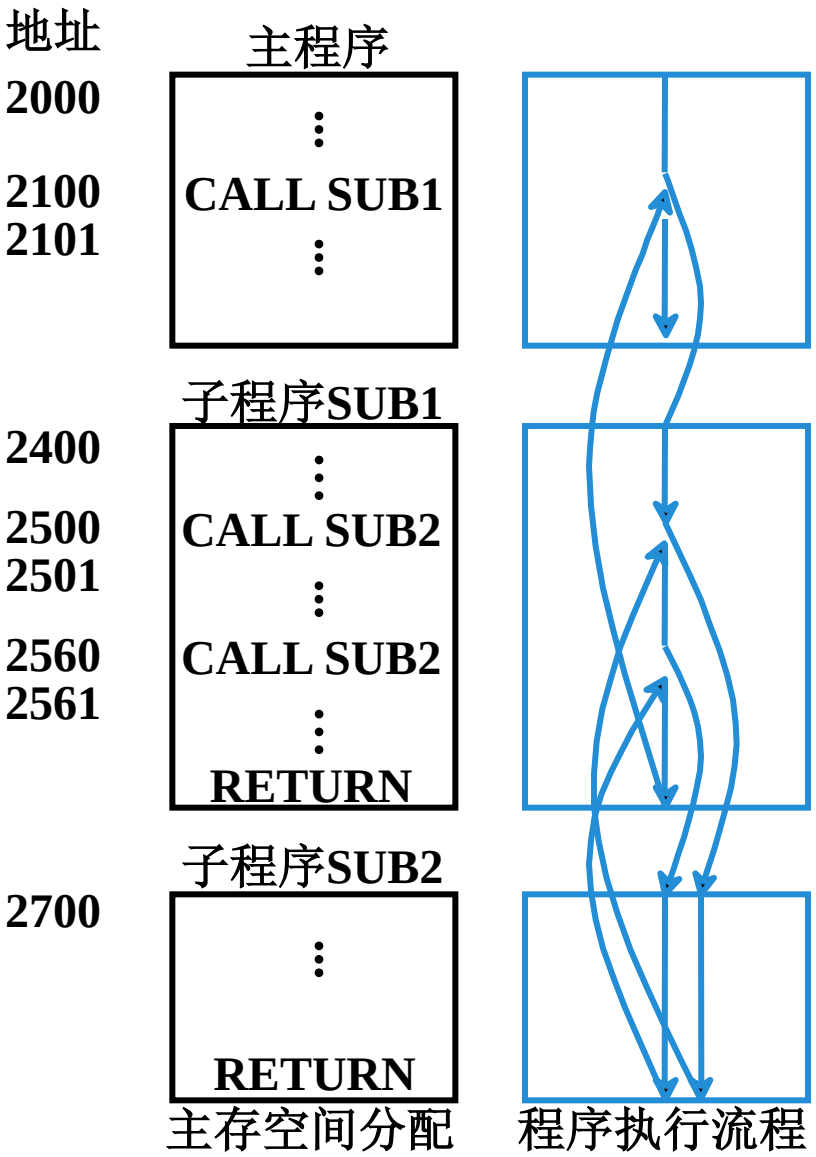
如



完成触发器

SKP DZ D = 0 则跳

(3) 调用和返回


地址
主程序
2000
2100
CALL SUB1
2101
子程序SUB1
2400
2500
CALL SUB2
2501
2560
CALL SUB2
2561
RETURN
子程序SUB2
2700
RETURN
主存空间分配
程序执行流程

(4) 陷阱（Trap）与陷阱指令

意外事故的中断

- 一般不提供给用户直接使用

  在出现事故时，由 CPU 自动产生并执行（隐指令）

- 设置供用户使用的陷阱指令

  如 8086　　INT　TYPE　　软中断

  8位常数，表示中断类型

  提供给用户使用的陷阱指令，完成系统调用

5. 输入输出

入　　端口地址 ⟶ CPU 的寄存器

如　　IN AL, *n*　　IN AL, DX

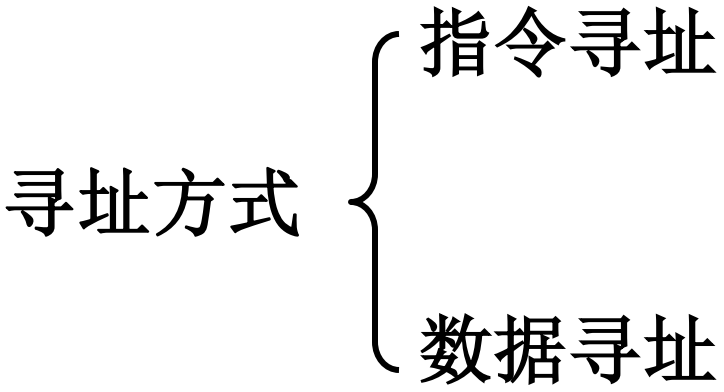
出　　CPU 的寄存器 ⟶ 端口地址

如　　OUT *n*, AL　　OUT DX, AL

7.3 寻 址 方 式

寻址方式　确定 本条指令 的 操作数地址

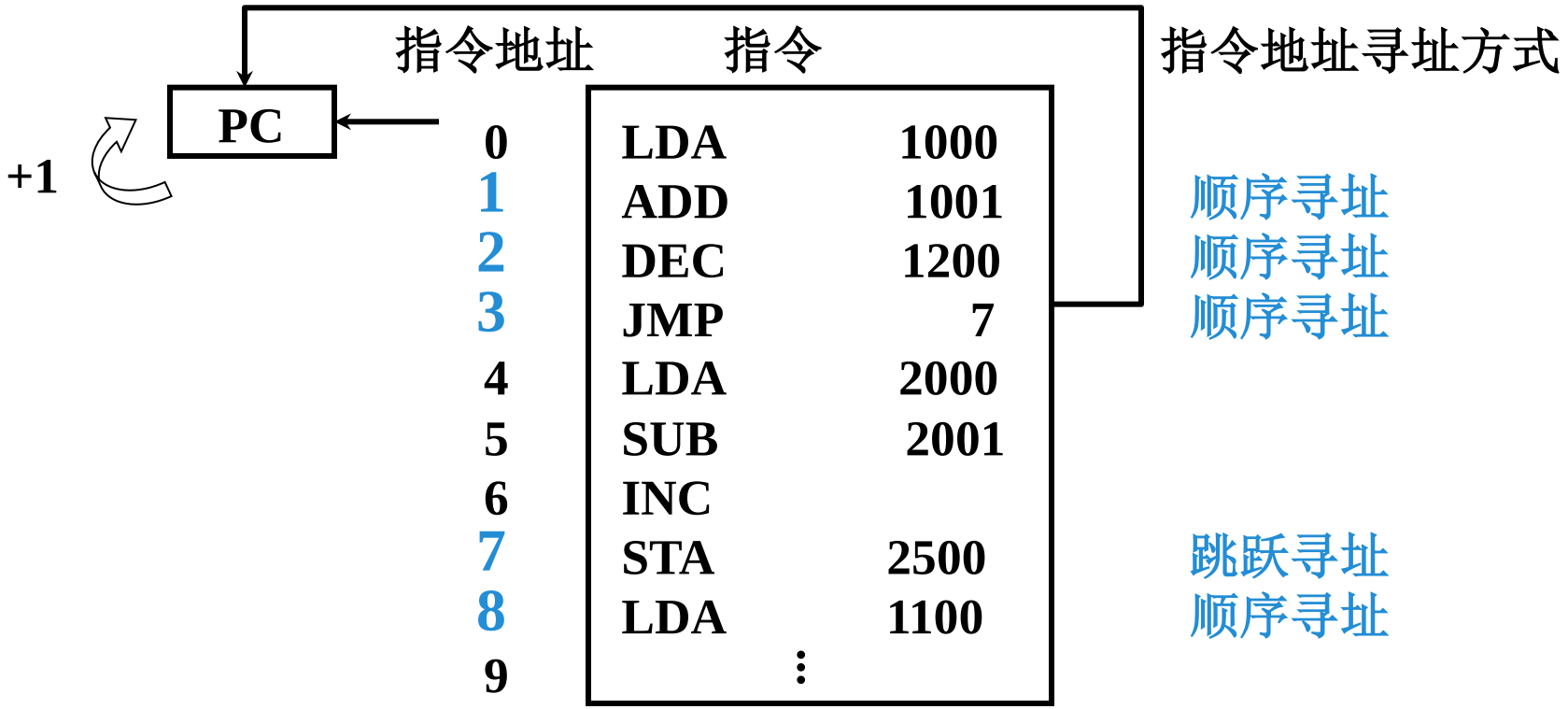
下一条 欲执行 指令 的 指令地址



一、指令寻址

顺序　　(PC) + 1 ⟶ PC

跳跃　　由转移指令指出



二、数据寻址

操作码	寻址特征	形式地址 A

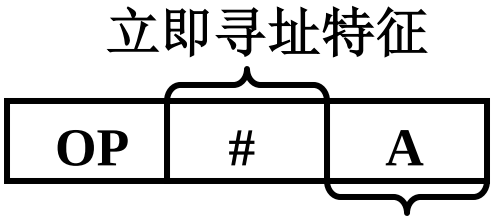
形式地址　　指令字中的地址

有效地址　　操作数的真实地址

约定　　指令字长 = 存储字长 = 机器字长

1. 立即寻址

形式地址 A 就是操作数

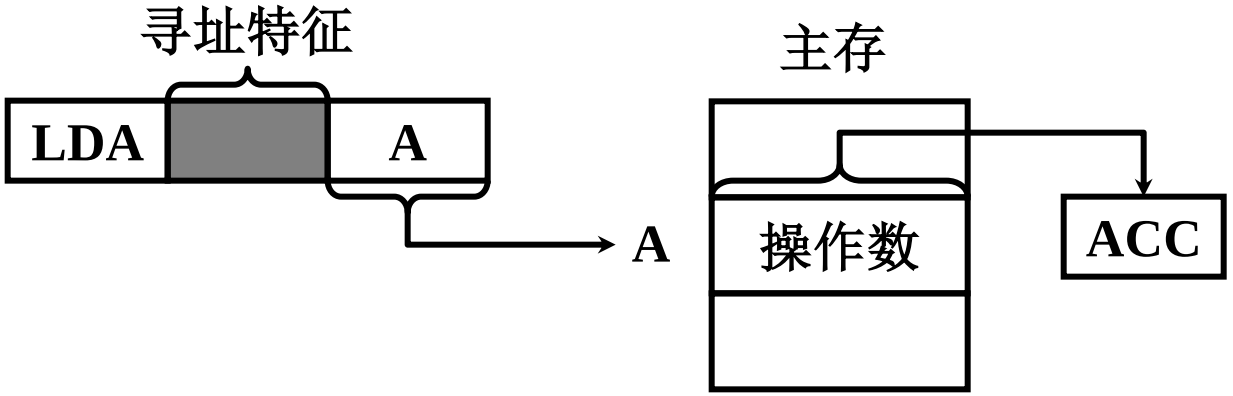


可正可负　补码

- 指令执行阶段不访存
- A 的位数限制了立即数的范围

2. 直接寻址

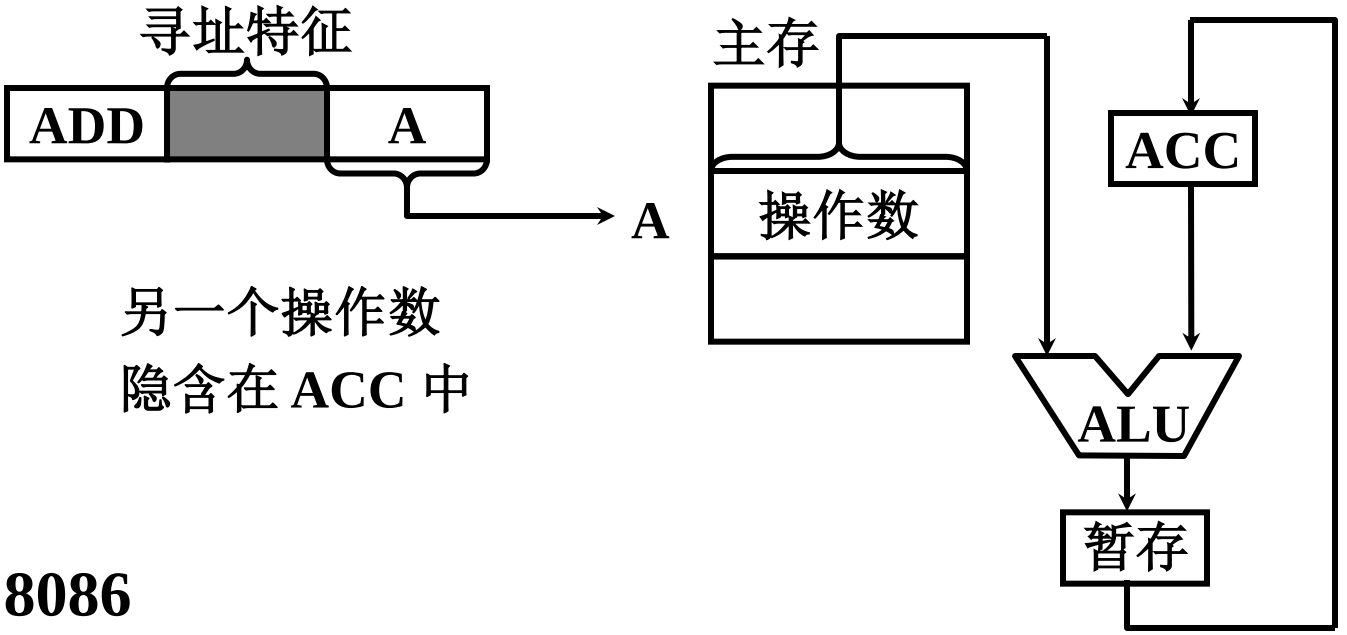
EA = A　　有效地址由形式地址直接给出



- 执行阶段访问一次存储器
- A 的位数决定了该指令操作数的寻址范围
- 操作数的地址不易修改（必须修改A）

3. 隐含寻址

操作数地址隐含在操作码或某个寄存器中



如 8086

MUL 指令　被乘数隐含在 AX（16位）或 AL（8位）中

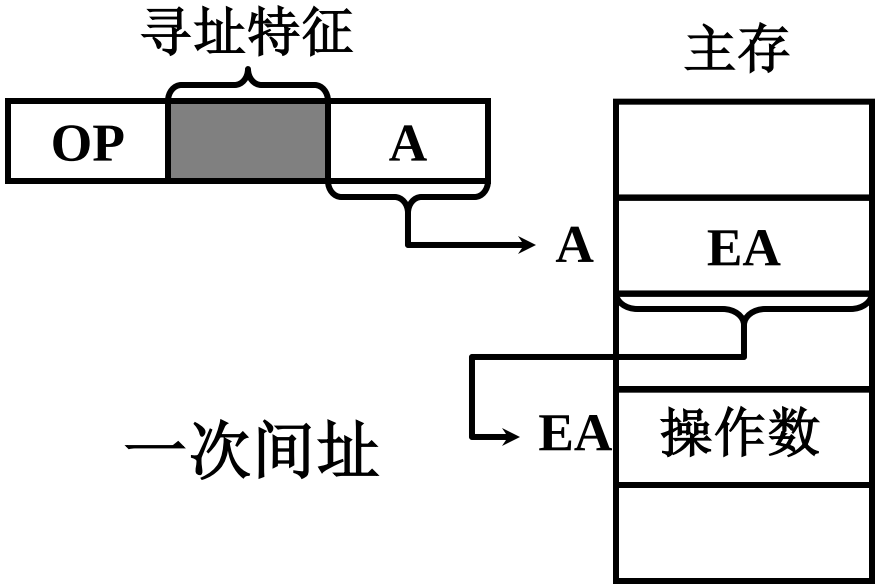
MOVS 指令　源操作数的地址隐含在 SI 中

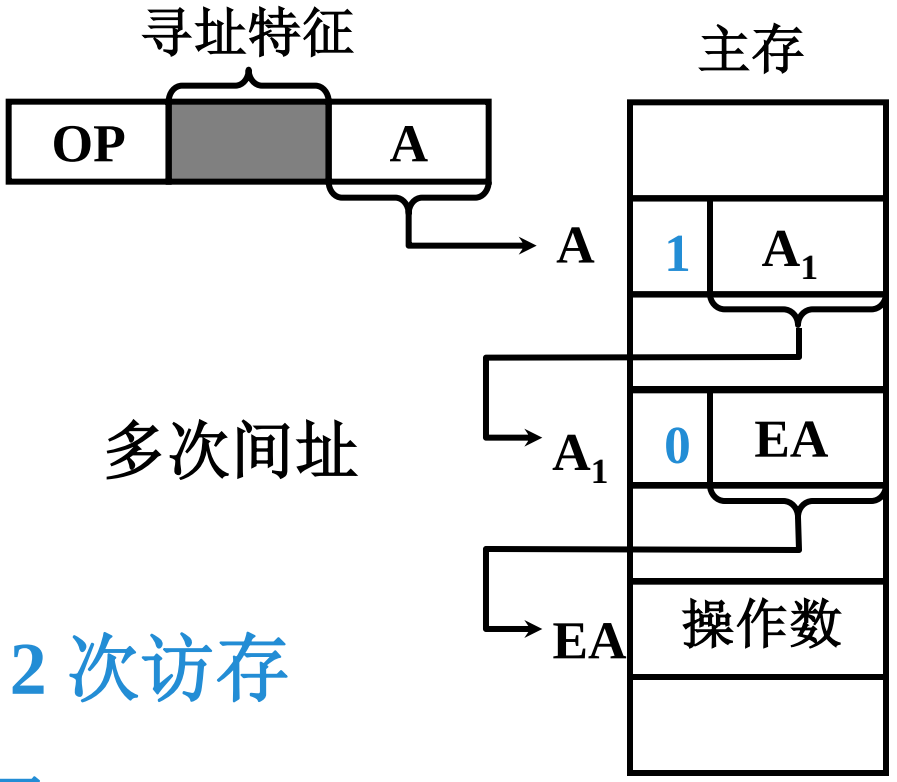
目的操作数的地址隐含在 DI 中

- 指令字中少了一个地址字段，可缩短指令字长

4. 间接寻址

EA =（A） 有效地址由形式地址间接提供

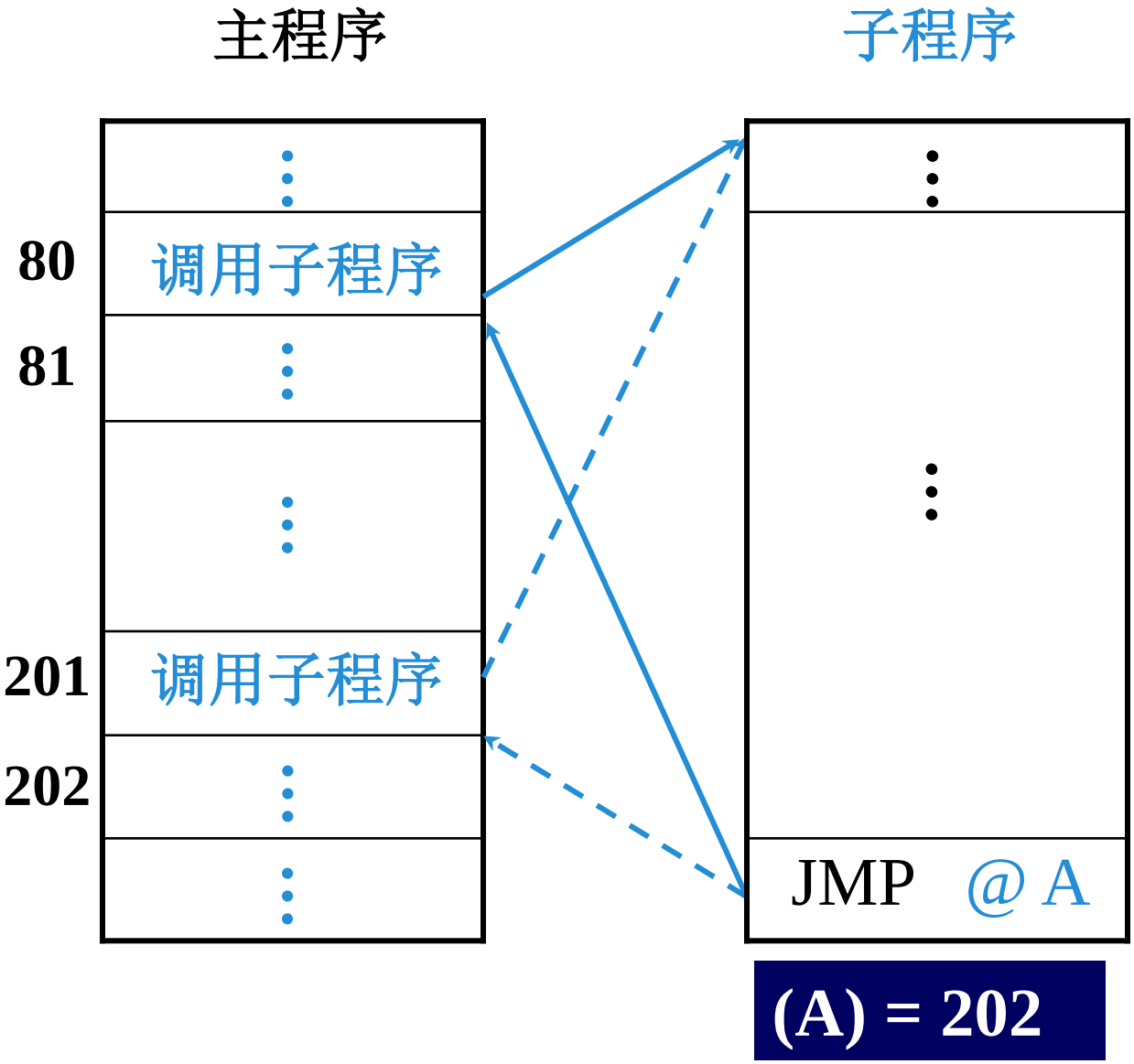




- 执行指令阶段 2 次访存
- 可扩大寻址范围
- 便于编制程序

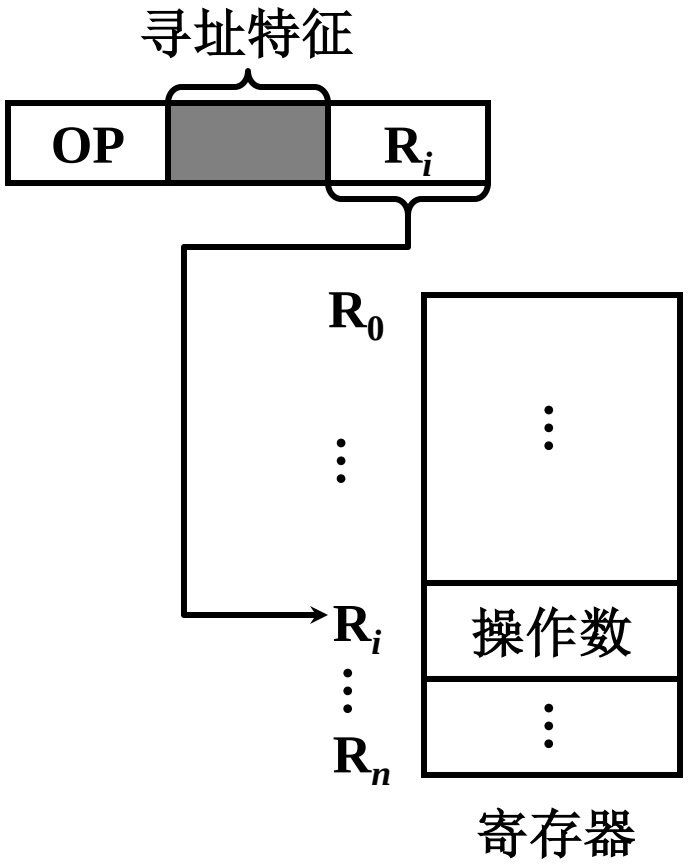
多次访存

间接寻址编程举例



5. 寄存器寻址

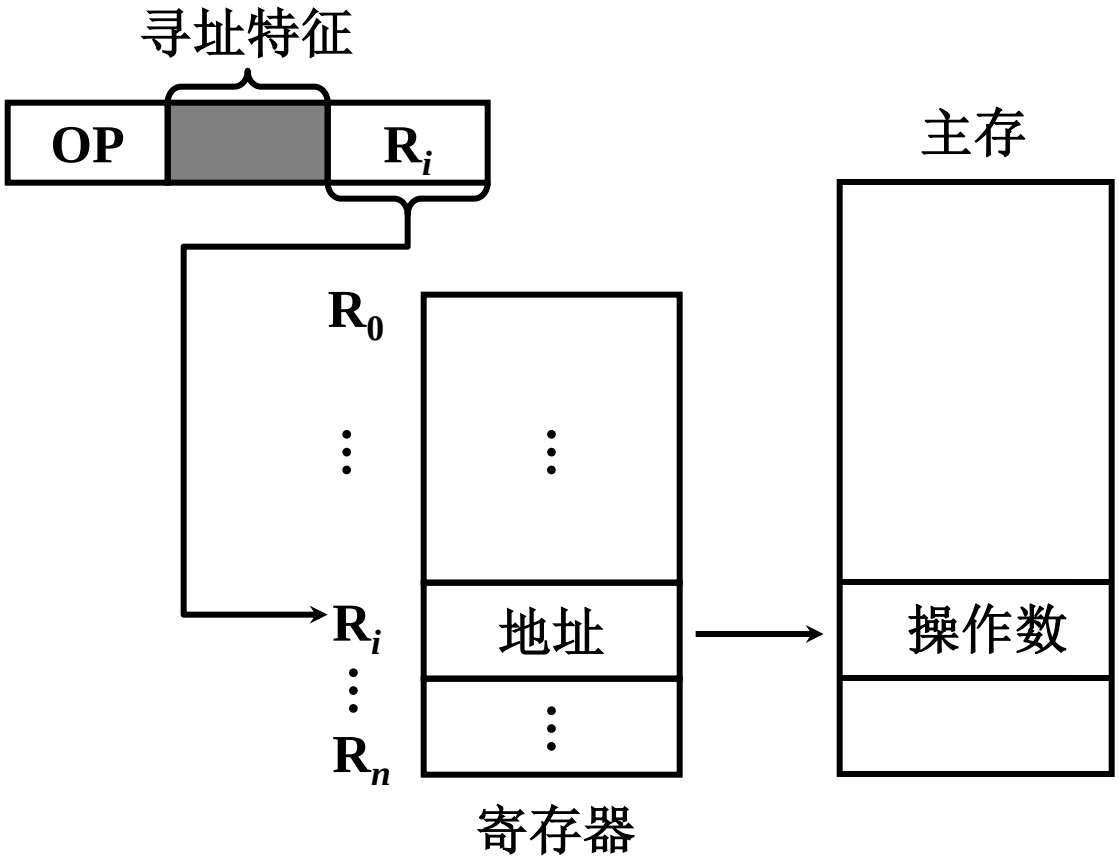
$EA = R_i$　　有效地址即为寄存器编号



- 执行阶段不访存，只访问寄存器，执行速度快
- 寄存器个数有限，可缩短指令字长

6. 寄存器间接寻址

$EA = (R_i)$　　有效地址在寄存器中

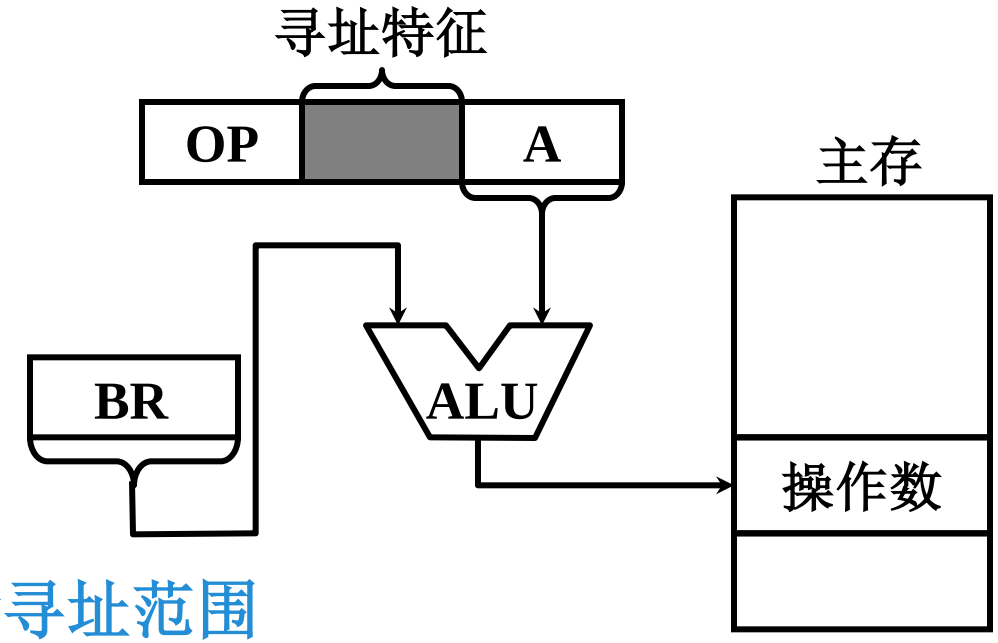


- 有效地址在寄存器中， 操作数在存储器中，执行阶段访存

7. 基址寻址

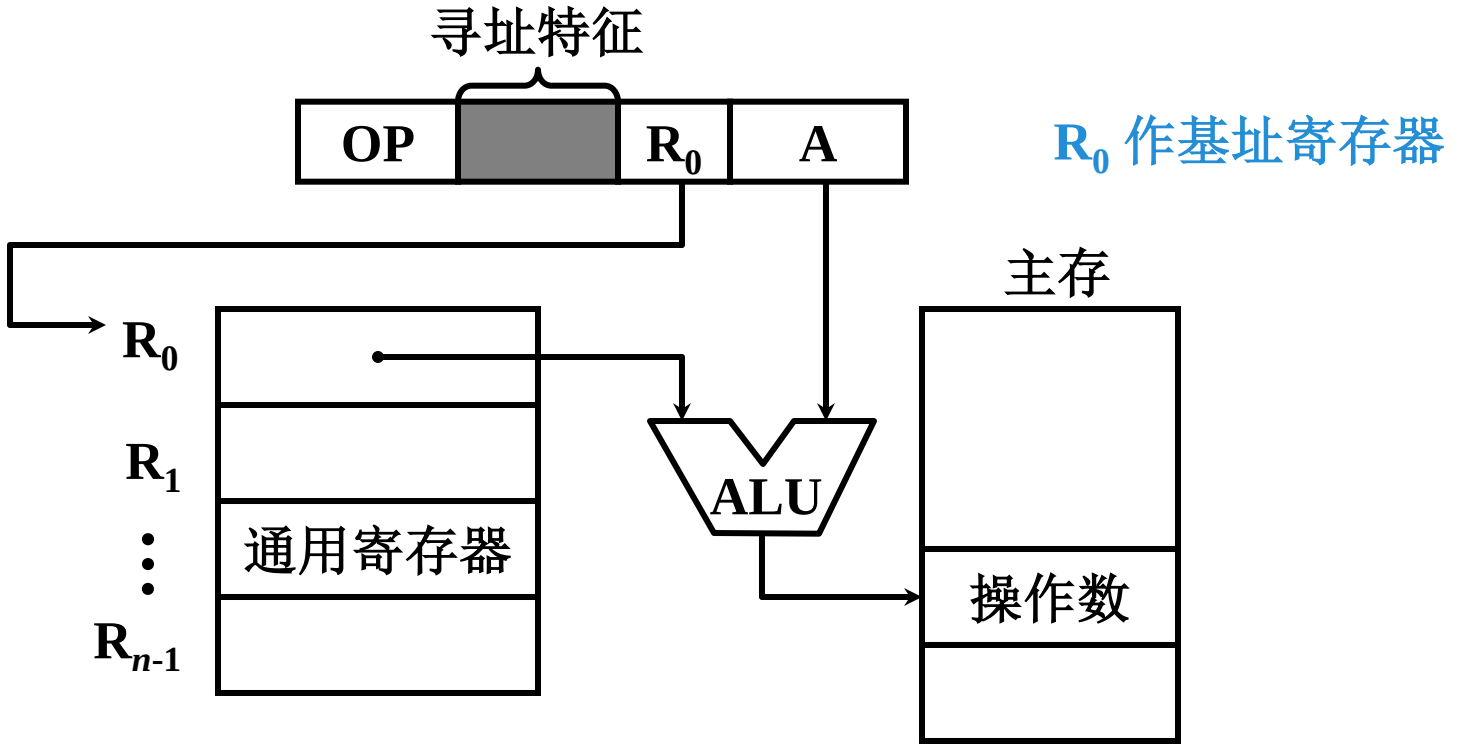
(1) 采用专用寄存器作基址寄存器

EA = (BR) + A　　BR 为基址寄存器



- 可扩大寻址范围
- 有利于多道程序
- BR 内容由操作系统或管理程序确定
- 在程序的执行过程中 BR 内容不变，形式地址 A 可变

(2) 采用通用寄存器作基址寄存器



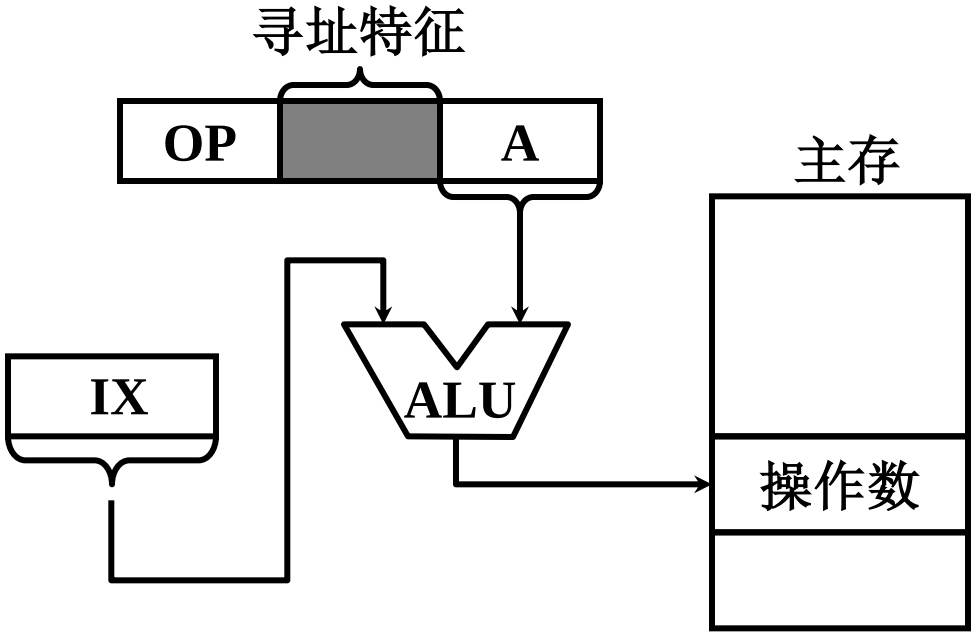
- 由用户指定哪个通用寄存器作为基址寄存器
- 基址寄存器的内容由操作系统确定
- 在程序的执行过程中 R_0 内容不变，形式地址 A 可变

8. 变址寻址

$EA = (IX) + A$

IX 为变址寄存器（专用）

通用寄存器也可以作为变址寄存器



- 可扩大寻址范围
- IX 的内容由用户给定
- 在程序的执行过程中 IX 内容可变，形式地址 A 不变
- 便于处理数组问题

例 设数据块首地址为 D，求 *N* 个数的平均值

直接寻址

```
LDA    D
ADD    D + 1
ADD    D + 2
  ⋮
ADD    D + ( N -1 )
DIV    # N
STA    ANS
```

共 *N* + 2 条指令

变址寻址

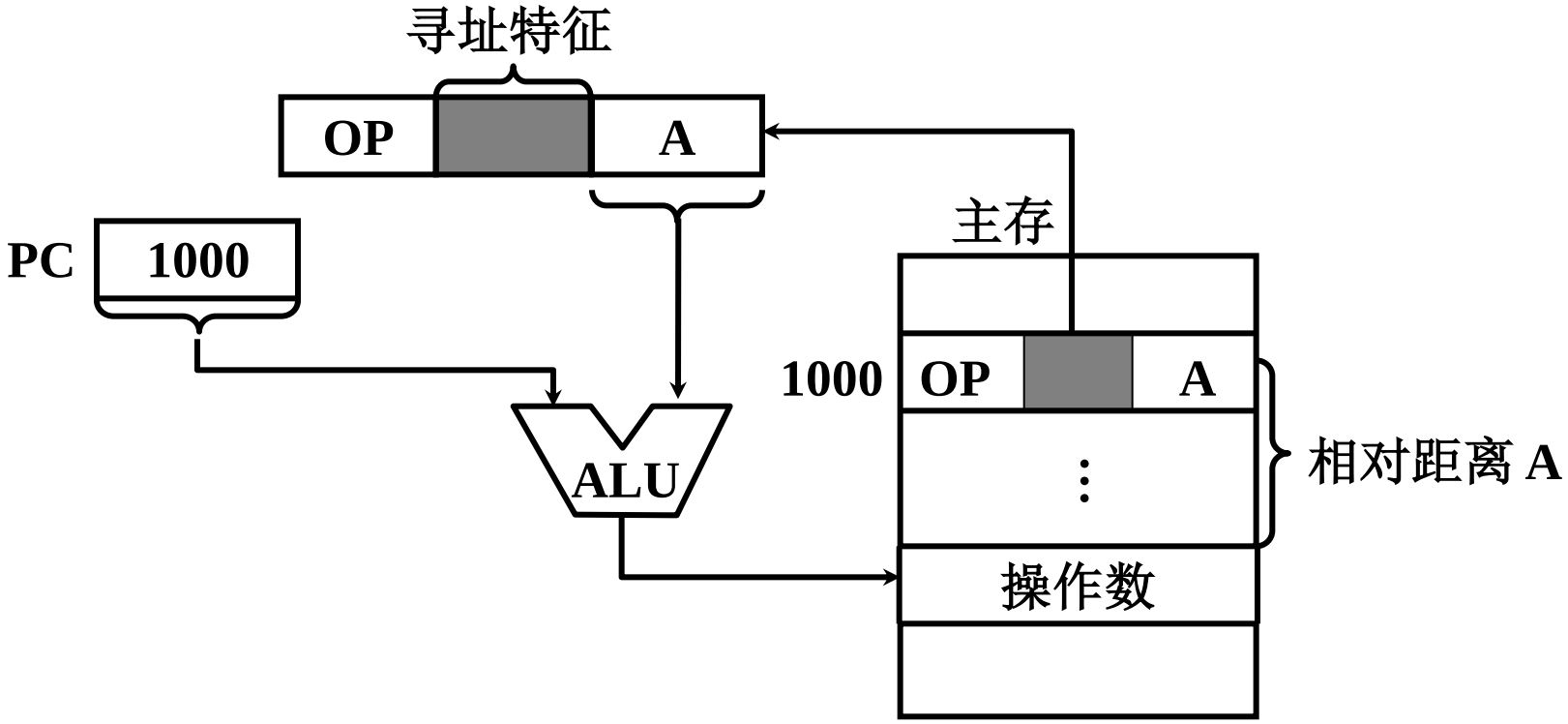
```
       LDA    # 0      0 ⟶ ACC
       LDX    # 0      X 为变址寄存器
M      ADD    X, D    D 为形式地址
       INX            (X) +1⟶ X
       CPX    # N      (X) 和 #N 比较
       BNE    M       结果不为零则转
       DIV    # N
       STA    ANS
```

共 8 条指令

9. 相对寻址

EA = (PC) + A

A 是相对于当前指令的位移量（可正可负，补码）



- A 的位数决定操作数的寻址范围
- 有利于编写浮动程序
- 广泛用于转移指令

(1) 相对寻址举例

```
        LDA    # 0
        LDX    # 0
M       ADD    X, D
M+1     INX
M+2     CPX    # N
M+3     BNE    M  ——→  * – 3
        DIV    # N
        STA    ANS
```

* 相对寻址特征

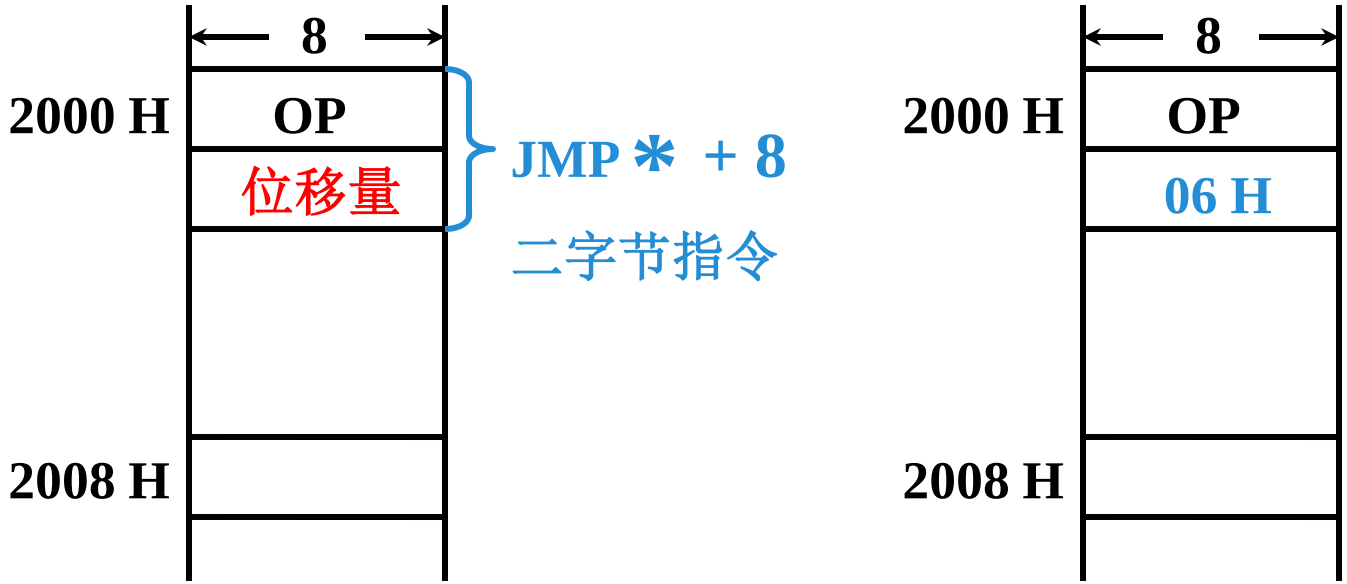
M 随程序所在存储空间的位置不同而不同

而指令 BNE *– 3 与 指令 ADD X, D 相对位移量不变

指令 BNE *– 3 操作数的有效地址为

EA = (M+3) – 3 = M

(2) 按字节寻址的相对寻址举例



设 当前指令地址 PC = 2000H

转移后的目的地址为 2008H

因为 取出 JMP * + 8 后 PC = 2002H

故 JMP * + 8 指令 的第二字节为 2008H - 2002H = 06H

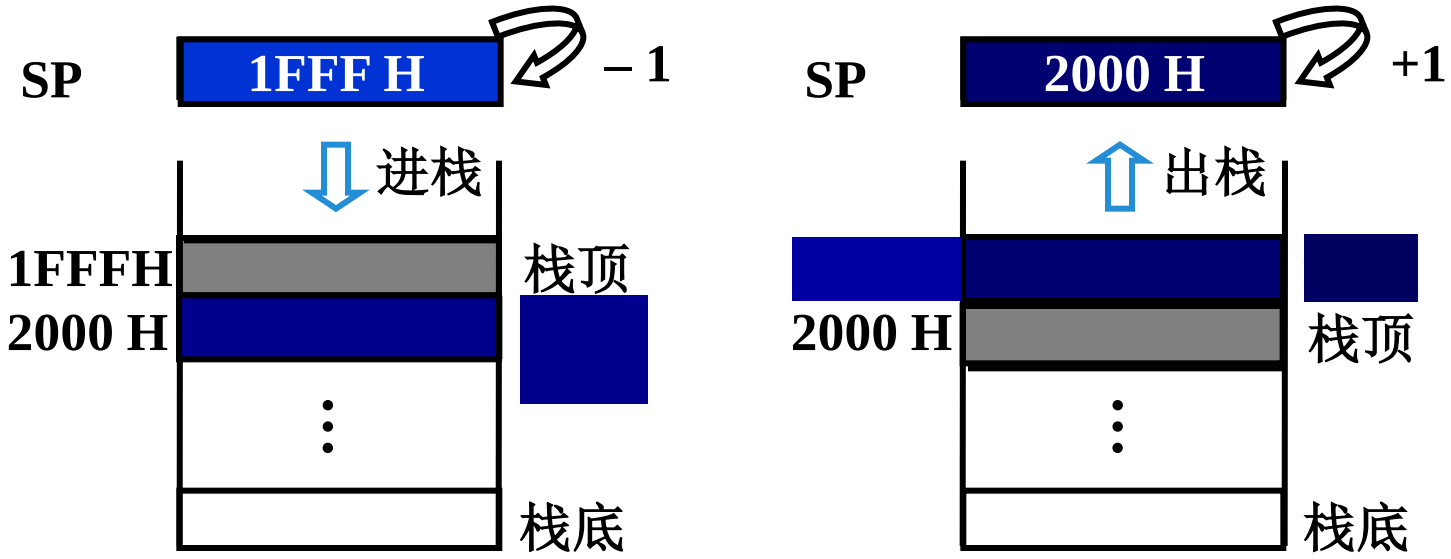
10. 堆栈寻址

(1) 堆栈的特点

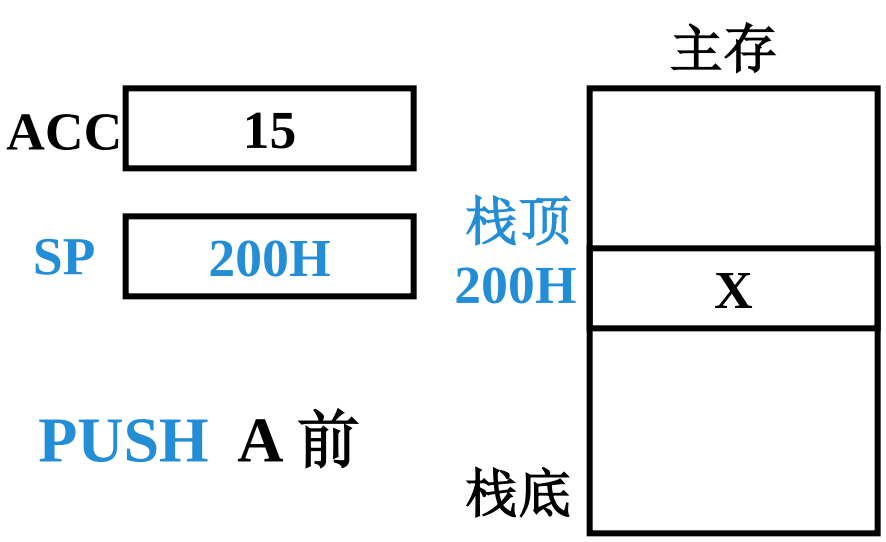
堆栈 { 硬堆栈　多个寄存器
　　 软堆栈　指定的存储空间

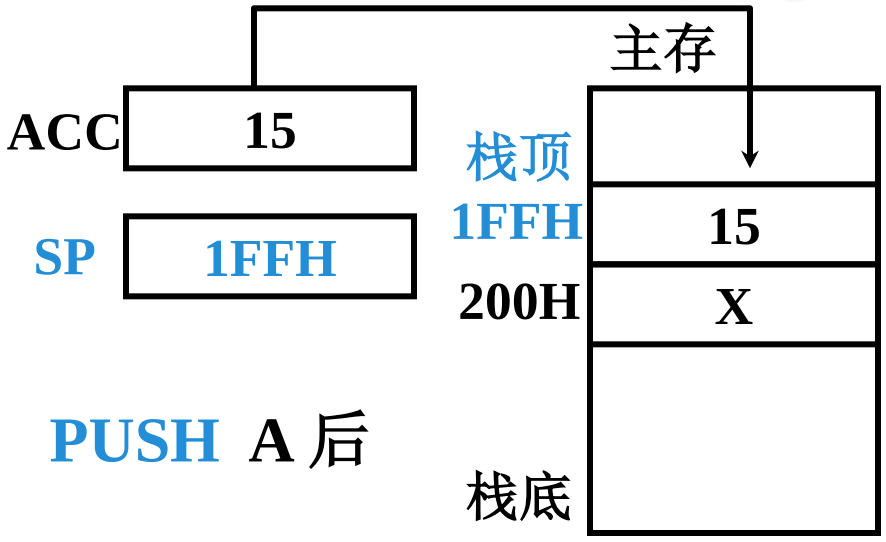
先进后出（一个入出口）　栈顶地址 由 SP 指出

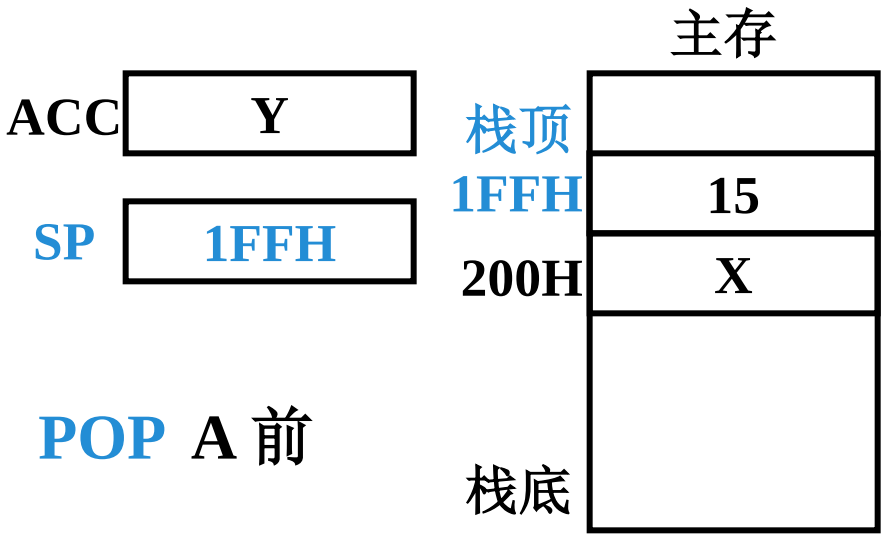
进栈　（SP）– 1 ⟶ SP　　出栈　（SP）+ 1 ⟶ SP

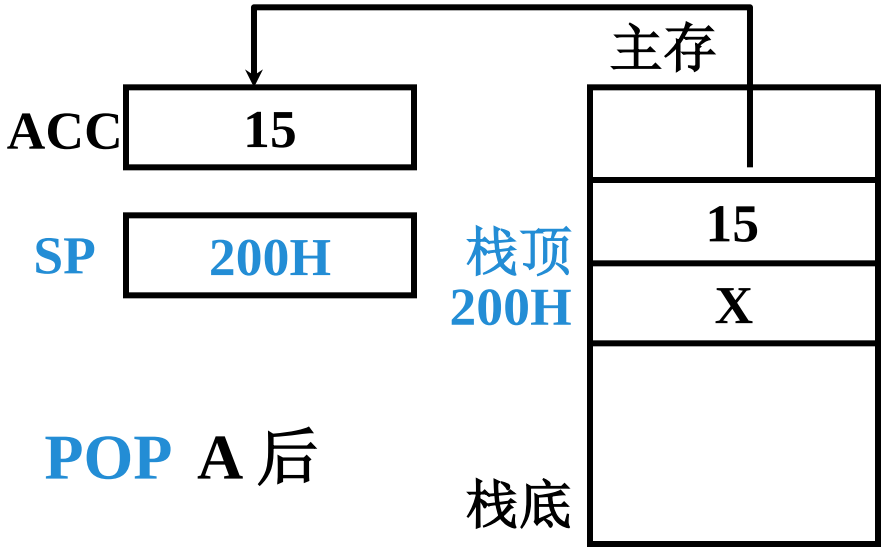


(2) 堆栈寻址举例


主存
ACC
15
SP
200H
栈顶
200H
X
PUSH A 前
栈底


主存
ACC
15
SP
1FFH
栈顶
1FFH
15
200H
X
PUSH A 后
栈底


主存
ACC
Y
SP
1FFH
栈顶
1FFH
15
200H
X
POP A 前
栈底


主存
ACC
15
SP
200H
15
栈顶
200H
X
POP A 后
栈底

(3) SP 的修改与主存编址方法有关

① 按 字 编址

进栈　（SP）– 1 ⟶ SP

出栈　（SP）+ 1 ⟶ SP

② 按 字节 编址

存储字长 16 位　进栈　（SP）– 2 ⟶ SP

出栈　（SP）+ 2 ⟶ SP

存储字长 32 位　进栈　（SP）– 4 ⟶ SP

出栈　（SP）+ 4 ⟶ SP

假设（R）=1000，（1000）=2000，（2000）=3000，（3000）=5000，（PC）=4000,则以下寻址方式下访问到的指令操作数的值是多少

（1） 直接寻址　2000

（2） 间接寻址 1000

（3） 寄存器间接寻址　R

（4） 相对寻址 -1000

7.4 指令格式举例

一、设计指令格式时应考虑的各种因素

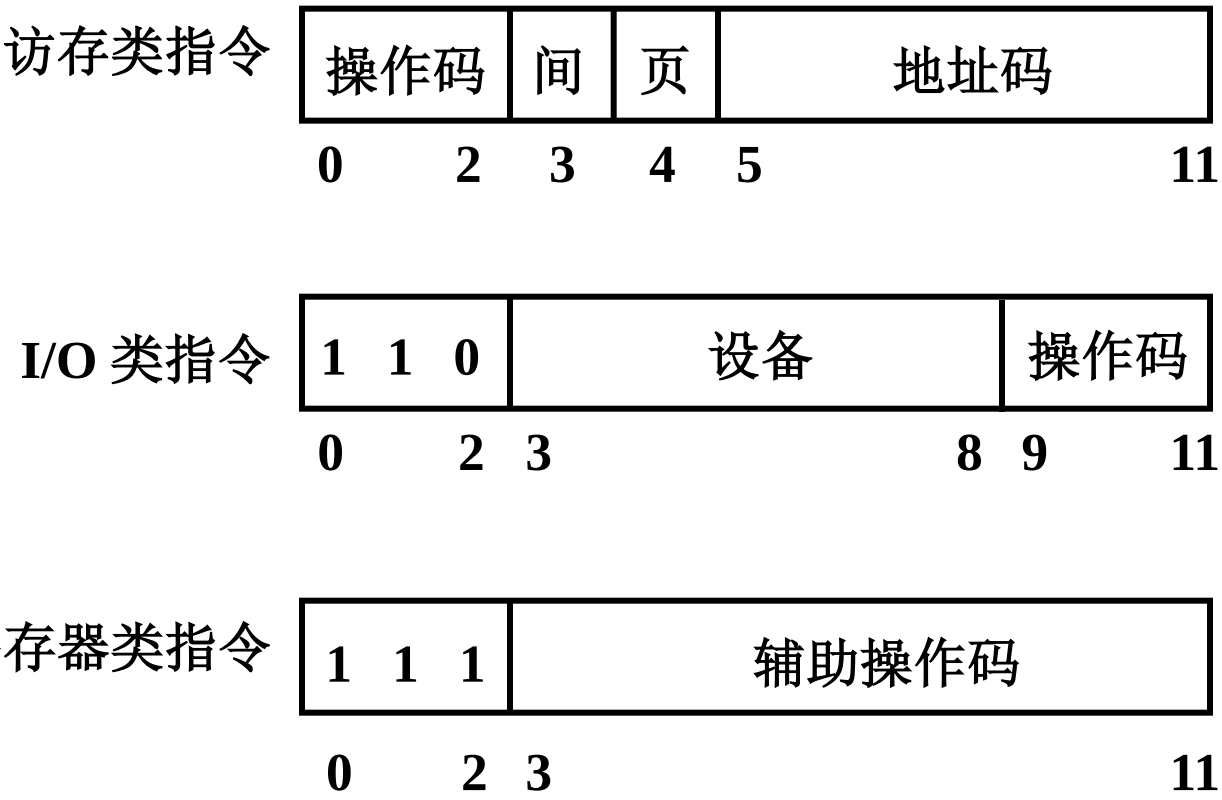
1. 指令系统的 兼容性 （向上兼容）

2. 其他因素

操作类型	包括指令个数及操作的难易程度
数据类型	确定哪些数据类型可参与操作
指令格式	指令字长是否固定
	操作码位数、是否采用扩展操作码技术，
	地址码位数、地址个数、寻址方式类型
寻址方式	指令寻址、操作数寻址
寄存器个数	寄存器的多少直接影响指令的执行时间

二、指令格式举例

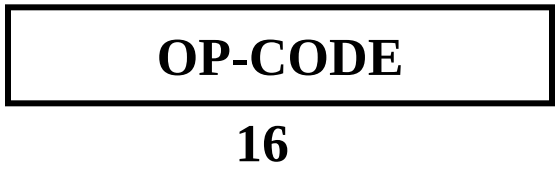
1. PDP – 8　　指令字长固定 12 位



采用扩展操作码技术

2. PDP – 11

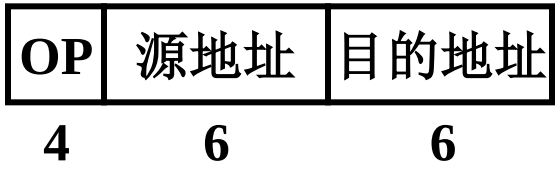
指令字长有 16 位、32 位、48 位三种



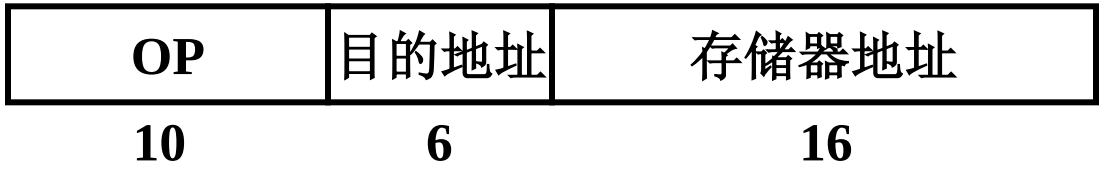
零地址 (16 位)

扩展操作码技术

一地址 (16 位)



二地址 R – R (16 位)

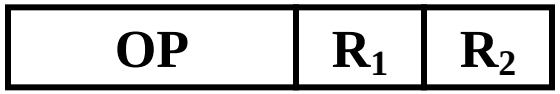


二地址 R – M (32 位)

二地址 M – M (48 位)

3. IBM 360

RR 格式



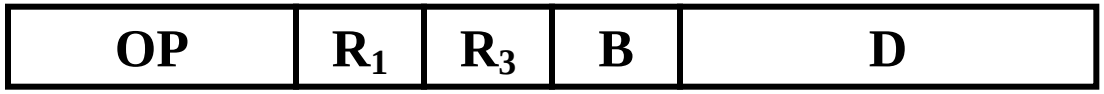
二地址 R – R

RX 格式

二地址 R – M

基址加变址寻址

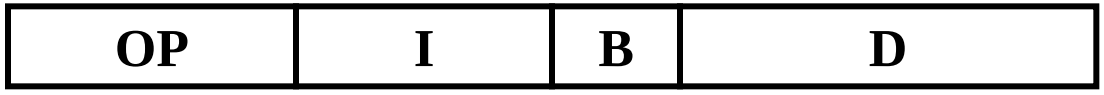
RS 格式



三地址 R – M

基址寻址

SI 格式



立即数 – M

基址寻址

SS 格式

二地址 M – M

基址寻址

4. Intel 8086

(1) 指令字长　1 ~ 6 个字节

INC　AX　1 字节

MOV　WORD PTR[0204], 0138H　6 字节

(2) 地址格式

零地址	NOP		1 字节	
一地址	CALL	段间调用	5 字节	
	CALL	段内调用	3 字节	
二地址	ADD AX，BX		2 字节	寄存器 – 寄存器
	ADD AX，3048H		3 字节	寄存器 – 立即数
	ADD AX，[3048H]		4 字节	寄存器 – 存储器

三、指令格式设计举例

根据需要设计指令格式 —— 自学

- 扩展操作码技术

7.5 RISC 技术

一、RISC 的产生和发展

RISC（Reduced Instruction Set Computer）

CISC（Complex Instruction Set Computer）

80 — 20 规律　　—— RISC技术

- **典型程序中 80% 的语句仅仅使用处理机中 20% 的指令**
- **执行频度高的简单指令，因复杂指令的存在，执行速度无法提高**

? **能否用 20% 的简单指令组合不常用的 80% 的指令功能**

二、RISC 的主要特征

- 选用使用频度较高的一些 简单指令，
  复杂指令的功能由简单指令来组合
- 指令 长度固定、指令格式种类少、寻址方式少
- 只有 **LOAD / STORE** 指令访存,其余指令的操作都在寄存器之间进行。
- **CPU** 中有多个 通用 寄存器
- 采用 流水技术，大部分指令在一个时钟周期内完成
- 采用 组合逻辑 实现控制器
- 采用 优化 的 编译 程序

二、RISC 的主要特征

- 1956年：一条指令就可以编出通用程序
- 一条传送指令CMOVE就可以做出一台计算机
- 1982年：8位的单指令计算机（SIC）出现

三、CISC 的主要特征

- 系统指令 复杂庞大，各种指令使用频度相差大
- 指令 长度不固定、指令格式种类多、寻址方式多
- 访存 指令 不受限制
- CPU 中设有 专用寄存器
- 大多数指令需要 多个时钟周期 执行完毕
- 采用 微程序 控制器
- 难以 用 优化编译 生成高效的目的代码

四、RISC和CISC 的比较

1. RISC更能 充分利用 VLSI 芯片的面积

2. RISC 更能 提高计算机运算速度

   指令数、指令格式、寻址方式少，
   通用 寄存器多，采用 组合逻辑 ，
   便于实现 指令流水

3. RISC 便于设计，可 降低成本，提高 可靠性

4. RISC 有利于编译程序代码优化

5. RISC 不易 实现 指令系统兼容

第7章 指令系统回顾

- **7.1 机器指令**
  - 指令的一般格式：扩展操作码技术
  - 指令字长：影响因素
- **7.2 操作数类型和操作类型**
  - 操作数类型：地址、数字、字符、逻辑数据
  - 数据在存储器中存放方式：边界对齐、大小端
  - 操作类型：数据传送、算数逻辑、移位、转移、I/O
- **7.3 寻址方式**

- **7.3 寻址方式**
  - 指令寻址：顺序和跳跃
  - 数据寻址：有效地址计算、特点
    - 立即数、直接、隐含、间接
    - 寄存器、寄存器间接、基址、变址、相对
- **7.4 指令格式举例**
  - 考虑因素、设计举例
- **7.5 RISC技术**
  - RISC产生背景和特征、CISC特征、对比

Thank You !

计 算 机 组 成 原 理

指令字长为16位，每个地址码为6位，采用扩展操作码的方式，设计14条二地址指令，100条一地址指令，100条零地址指令。

（1）画出扩展图。（2）给出指令译码逻辑。

（3）计算操作码平均长度。

解：（1）操作码扩展如下：

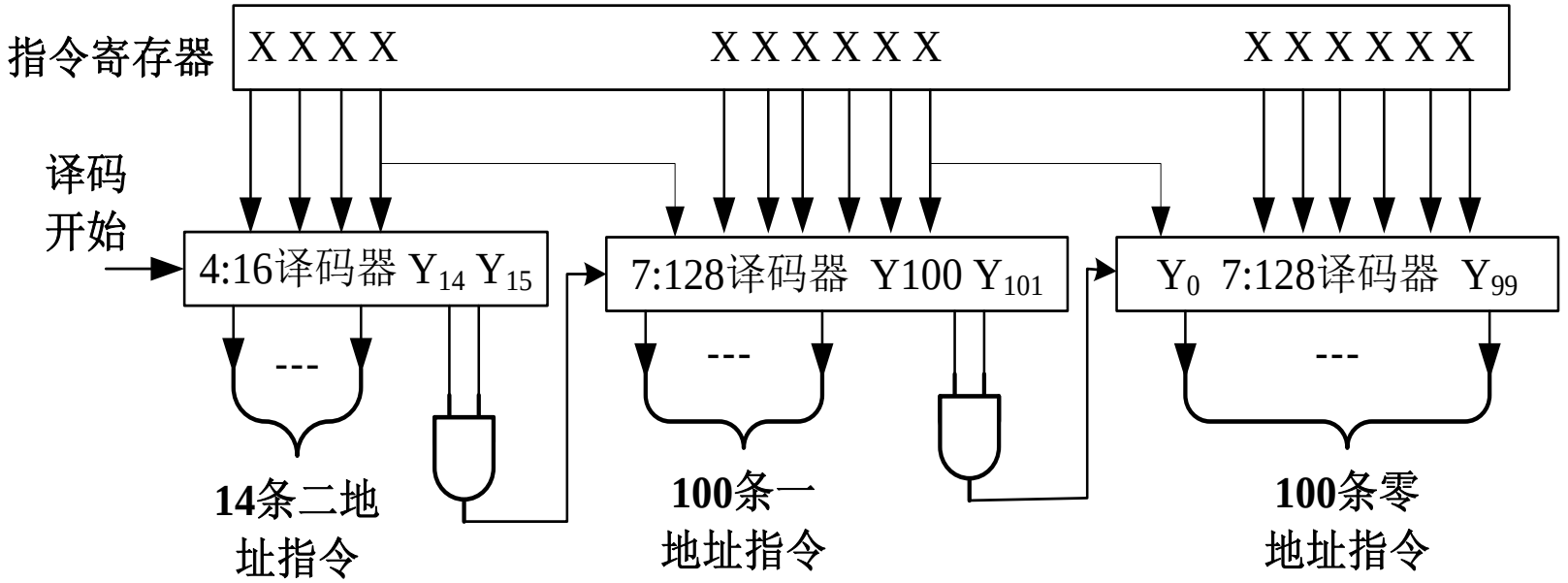
```
0000  xxxxxx  xxxxxx
 ┆      ┆      ┆        14条二地址指令
1101  xxxxxx  xxxxxx
1110  000000  xxxxxx
 ┆      ┆      ┆        100条二地址指令
1111  100011  xxxxxx
1111  100100  000000
 ┆      ┆      ┆        100条二地址指令
1111  100101  100011
```

指令字长为16位，每个地址码为6位，采用扩展操作码的方式，设计14条二地址指令，100条一地址指令，100条零地址指令。

（1）画出扩展图。（2）给出指令译码逻辑。

（3）计算操作码平均长度。

解：（2）指令译码逻辑：



指令字长为16位，每个地址码为6位，采用扩展操作码的方式，设计14条二地址指令，100条一地址指令，100条零地址指令。

（1）画出扩展图。（2）给出指令译码逻辑。

（3）计算操作码平均长度。

解：（3）操作码平均长度

=（4×14+10×100＋16×100）/214≈12.4

例：设相对寻址的转移指令占两个字节，第一字节是操作码，第二字节是相对位移量，用补码表示。每当CPU从存储器取出一个字节时，即自动完成(PC)+1→PC。

（1）设当前PC值为3000H，问转移后的目标地址范围是多少？

解：（1）由于相对寻址的转移指令为两个字节，第一个字节为操作码，第二个字节为相对位移量，且用补码表示，故其范围为-128～+127，即80H～7FH。又因PC当前值为3000H,且CPU取出该指令后，PC已修改为3002H，因此最终的转移目标地址范围为3081H～2F82H，即3002H + 7FH =3081H至3002H-80H=2F82H

思考：若PC为16位，位移量可正可负，PC相对寻址范围为多大？

解：相对寻址中，PC提供基准地址，位移量提供修改量，位移量为16位可正可负，则相对寻址范围为：（PC）-2^{15} ~（PC）$+2^{15}-1$

例：设相对寻址的转移指令占两个字节，第一字节是操作码，第二字节是相对位移量，用补码表示。每当CPU从存储器取出一个字节时，即自动完成(PC)+1→PC。

（2）若当前PC值为2000H,要求转移到01BH，则转移指令第二字节的内容是什么？

解：（2）若PC当前值为2000H，取出该指令后PC值为2002H，故转移指令第二字节应为

201BH－002H=19H。

例：设相对寻址的转移指令占两个字节，第一字节是操作码，第二字节是相对位移量，用补码表示。每当CPU从存储器取出一个字节时，即自动完成(PC)+1→PC。

（3）若当前PC值为2000H，指令JMP * -9（*为相对寻址特征）的第二字节的内容是什么？

解：根据汇编语言指令JMP*－9，即要求转移后的目标地址为2000H－09H=1FF7H，但因为CPU取出该指令后PC值已修改为2002H，故转移指令的第二字节的内容应为-11（十进制），写成补码为F5H。