



中山大學 软件工程学院  
SUN YAT-SEN UNIVERSITY SCHOOL OF SOFTWARE ENGINEERING

# 计算机组成原理

授课老师：吴炜滨



## ➤ 定点运算

- 移位运算
- 加减法运算
- 乘法运算
- 除法运算

## ➤ 定点运算

- 移位运算

- 移位运算的数学意义
- 算术移位规则
- 算术移位的硬件实现
- 算术移位与逻辑移位的区别

# 移位运算



## ■ 移位的数学意义

- 实现数据的放缩

$$15.\text{m} = 1500.\text{cm}$$

小数点右移 2 位

$$\begin{aligned} N &= (d_{n-1}d_{n-2} \cdots d_1d_0.d_{-1}d_{-2} \cdots d_{-m})_r \\ &= d_{n-1}r^{n-1} + d_{n-2}r^{n-2} + \cdots + d_1r^1 + d_0r^0 + d_{-1}r^{-1} + \cdots + d_{-m}r^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} d_i r^i \end{aligned}$$

# 移位运算



## ■ 移位的数学意义

- 实现数据的放缩

$$15.\text{m} = 1500.\text{cm}$$

小数点右移 2 位

- 机器用语
  - 15 相对于小数点 左移 2 位 ( 小数点不动 )
  - 计算机中左移
    - 绝对值扩大 (二进制, 左移一位扩大两倍)
  - 计算机中右移
    - 绝对值缩小 (二进制, 右移一位缩小为原来的1/2)
- 在计算机中, 移位与加减配合, 能够实现乘除运算

# 算术移位规则



## ■ 算术移位

- 有符号数的移位
- 使机器数的移位与其对应真值进行移位的效果相同
  - 左移一位，对应真值的绝对值扩大两倍
  - 右移一位，对应真值的绝对值缩小为原来的1/2

## ■ 算术移位规则

- 仅改变真值的绝对值
  - 符号位不变，仅移动数值位
- 数值位空位添补规则：使其与真值进行移位的效果相同
  - 真值进行移位时，数值位空位添补规则
    - 正数/负数：左移/右移，空位都添0

$$x = +0.x_1x_2 \dots x_k$$

$$x = -0.x_1x_2 \dots x_k$$

# 算术移位规则



## ■ 算术移位规则

- 符号位不变，仅移动数值位
- 数值位空位添补规则：使其与真值进行移位的效果相同

真值	码 制	添补代码
正数	原码、补码、反码	0
负数	原 码	0
	补 码	左移 添 0
		右移 添 1
	反 码	1

$$x = +0.x_1x_2 \dots x_k$$
$$[x]_{\text{原、补、反}} = 0.x_1x_2 \dots x_k$$
$$x = -0.x_1x_2 \dots x_k$$
$$[x]_{\text{原}} = 1.x_1x_2 \dots x_k$$
$$x = -0.x_1x_2 \dots x_k100 \dots 000$$
$$[x]_{\text{补}} = 1.\bar{x}_1\bar{x}_2 \dots \bar{x}_k100 \dots 000$$
$$x = -0.x_1x_2 \dots x_k$$
$$[x]_{\text{反}} = 1.\bar{x}_1\bar{x}_2 \dots \bar{x}_k$$

# 举例



■ 设机器数字长为 8 位（含 1 位符号位），写出 $A = +26$ 时，三种机器数左、右移一位和两位后的表示形式及对应的真值，并分析结果的正确性。

解：  $A = +26 = +11010$   
则  $[A]_{原} = [A]_{补} = [A]_{反} = 0,0011010$

移位操作	机 器 数	对应的真值
	$[A]_{原} = [A]_{补} = [A]_{反}$	
移位前	0,0011010	+26
左移一位	0,0110100	+ 52
左移两位	0,1101000	+104
右移一位	0,0001101	+13
右移两位	0,0000110	+ 6



# 举例



- 设机器数字长为 8 位（含 1 位符号位），写出  $A = -26$  时，三种机器数左、右移一位和两位后的表示形式及对应的真值，并分析结果的正确性。

解：  $A = -26 = -11010$

原码

移位操作	机 器 数	对应的真值
移位前	1,0011010	- 26
左移一位	1,0110100	- 52
左移两位	1,1101000	- 104
右移一位	1,0001101	- 13
右移两位	1,0000110	- 6

# 举例



- 设机器数字长为 8 位（含 1 位符号位），写出  $A = -26$  时，三种机器数左、右移一位和两位后的表示形式及对应的真值，并分析结果的正确性。

解：  $A = -26 = -11010$

$[A]_{\text{原}} = 1,0011010$

补码

移位操作	机 器 数	对应的真值
移位前	1,1100110	- 26
左移一位	1,1001100	- 52
左移两位	1,0011000	- 104
右移一位	1,1110011	- 13
右移两位	1,1111001	- 7

# 举例



- 设机器数字长为 8 位（含 1 位符号位），写出 $A = -26$ 时，三种机器数左、右移一位和两位后的表示形式及对应的真值，并分析结果的正确性。

解：  $A = -26 = -11010$

$[A]_{\text{原}} = 1,0011010$

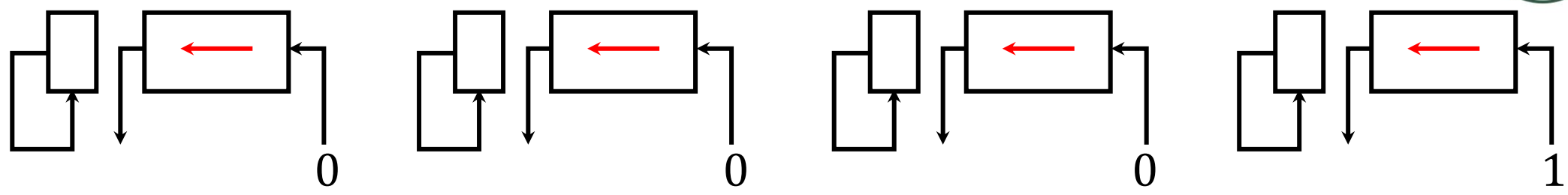
反码

移位操作	机 器 数	对应的真值
移位前	1,1100101	- 26
左移一位	1,1001011	- 52
左移两位	1,0010111	- 104
右移一位	1,1110010	- 13
右移两位	1,1111001	- 6

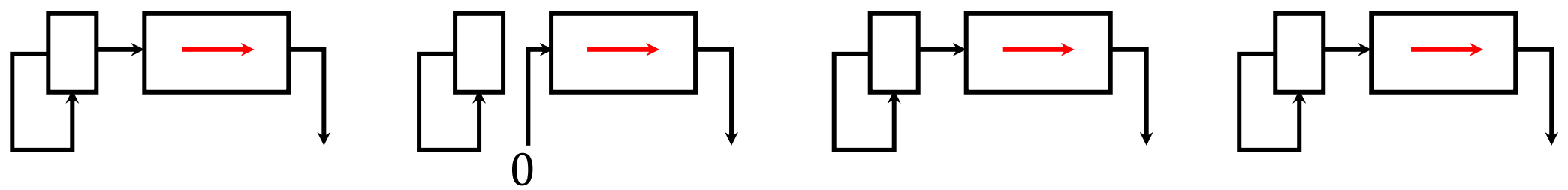
# 算术移位的硬件实现



左移



右移



(a) 真值为正                      (b) 负数的原码                      (c) 负数的补码                      (d) 负数的反码

←丢 1	出错	出错	正确	正确
→丢 1	影响精度	影响精度	影响精度	正确

# 算术移位和逻辑移位的区别



## ■ 算术移位

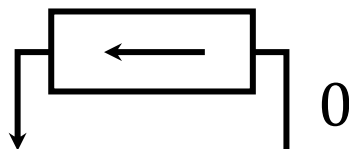
- 有符号数的移位，符号位要保持不动

## ■ 逻辑移位

- 无符号数的移位，所有位都会参与移位运算

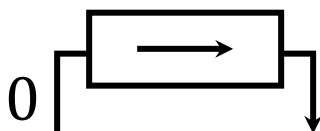
## ■ 逻辑左移

- 低位添 0，高位移丢



## ■ 逻辑右移

- 高位添 0，低位移丢



# 算术移位和逻辑移位的区别



■ 例如

01010011

10110010

逻辑左移      10100110

逻辑右移      01011001

算术左移      00100110

算术右移  
(补码)      11011001



## ➤ 定点运算

- 加减法运算

# 用补码作加减法运算



## ■ 用原码作加减法运算的问题

- 需要根据操作数的符号，确定作加法还是减法，并设计、使用加法器/减法器
- $\pm 0$ 原码不统一

要求	数1	数2	实际操作	结果符号
加法	正	正	加	正
加法	正	负	减	可正可负
加法	负	正	减	可正可负
加法	负	负	加	负



# 用补码作加减法运算



## ■ 用反码作加减法运算的问题

- $\pm 0$ 反码不统一
- 电路实现较麻烦
- 反码：多用于原码与补码间转换的过渡

## ■ 用补码作加减法运算

- $\pm 0$ 补码统一
- 补码：找到一个与负数等价的正数来代替负数，实现了加减法形式的统一
  - 原理：计算机当中机器字长有限，使其存在模，运算溢出的最高位将被丢掉
- 现代计算机中都采用补码作加减法运算

## ➤ 定点运算

- 加减法运算

- 补码加减法运算的公式
- 补码加减法溢出的判断
- 补码加减法的硬件配置

# 加减法运算



## ■ 补码加减运算公式

- 加法

- 连同符号位一起相加，和的符号，通过计算过程自动产生，符号位产生的进位**自然丢掉**：  
计算结果按 $2^{n+1}$ 取模（对整数）或按2取模（对小数）

$$\text{整数} \quad [A + B]_{\text{补}} = [A]_{\text{补}} + [B]_{\text{补}} \pmod{2^{n+1}}$$

$$\text{小数} \quad [A + B]_{\text{补}} = [A]_{\text{补}} + [B]_{\text{补}} \pmod{2}$$

# 加减法运算



## ■ 补码加减运算公式

### • 减法

- $[-B]_{\text{补}}$  由  $[B]_{\text{补}}$  连同符号位在内，每位取反，末位加1而得
- 连同符号位一起相加，和的符号，通过计算过程自动产生，符号位产生的进位**自然丢掉**：计算结果按  $2^{n+1}$  取模（对整数）或按2取模（对小数）

$$A - B = A + (-B)$$

$$\text{整数} \quad [A - B]_{\text{补}} = [A + (-B)]_{\text{补}} = [A]_{\text{补}} + [-B]_{\text{补}} \pmod{2^{n+1}}$$

$$\text{小数} \quad [A - B]_{\text{补}} = [A + (-B)]_{\text{补}} = [A]_{\text{补}} + [-B]_{\text{补}} \pmod{2}$$

# 举例



- 设机器字长为5位（含1位符号位）， $A = 0.1011$ ， $B = -0.0101$ ，求  $[A + B]_{\text{补}}$

解：

验证

$$\begin{array}{rcl} [A]_{\text{补}} & = & 0.1011 \\ + [B]_{\text{补}} & = & 1.1011 \end{array}$$

$$\hline [A]_{\text{补}} + [B]_{\text{补}} = 10.0110 = [A + B]_{\text{补}}$$

丢掉

$$\therefore A + B = 0.0110$$

$$\begin{array}{r} 0.1011 \\ - 0.0101 \\ \hline 0.0110 \end{array}$$

# 举例



- 设机器字长为5位（含1位符号位）， $A = -9$ ， $B = -5$ ，求  $[A + B]_{\text{补}}$

解：

$$\begin{array}{rcl} [A]_{\text{补}} & = & 1, 0111 \\ + [B]_{\text{补}} & = & 1, 1011 \\ \hline [A]_{\text{补}} + [B]_{\text{补}} & = & \boxed{1}1, 0010 = [A + B]_{\text{补}} \end{array}$$

丢掉

验证

$$\begin{array}{r} -1001 \\ + -0101 \\ \hline -1110 \end{array}$$

$$\therefore A + B = -1110$$

# 举例



- 设机器数字长为 8 位 (含 1 位符号位) 且  $A = 15$ ,  $B = 24$ , 用补码求  $A - B$

解:

$$A = 15 = 0001111$$
$$B = 24 = 0011000$$

$$\begin{array}{rcll} [A]_{\text{补}} & = & 0,0001111 & [B]_{\text{补}} = 0,0011000 \\ + [-B]_{\text{补}} & = & 1,1101000 & \\ \hline [A]_{\text{补}} + [-B]_{\text{补}} & = & 1,1110111 & = [A - B]_{\text{补}} \\ \therefore A - B & = & -1001 & = -9 \end{array}$$

# 练习



- 设  $x = \frac{11}{16}$  ,  $y = \frac{7}{16}$  , 用补码求  $x + y$  (假设机器字长为5位, 包括一位的符号位, 而且这台机器是一个纯小数的定点机)

解:

$$x = \frac{1011}{10000} = 0.1011$$

$$y = \frac{111}{10000} = 0.0111$$

$$[x]_{\text{补}} = 0.1011$$

$$[y]_{\text{补}} = 0.0111$$

$$[x + y]_{\text{补}} = 0.1011 + 0.0111 = 1.0010$$

$$\therefore x + y = -0.1110 = -\frac{14}{16}$$

错

因为正确运算结果大于1, 超出小数定点机能表示的范围 $[-1, 1)$



# 练习



- 设机器数字长为 8 位（含 1 位符号位） 且  $A = -97$ ,  $B = +41$ , 用补码求  $A - B$

解:  $A = -1100001$   $B = 0101001$

$$[A]_{\text{补}} = 1,0011111 \quad [B]_{\text{补}} = 0,0101001$$

$$[-B]_{\text{补}} = 1,1010111$$

$$[A - B]_{\text{补}} = 1,0011111 + 1,1010111 = 10,1110110$$

$$\therefore A - B = +1110110 = +118$$

错 因为正确运算结果超出该整数定点机能表示的范围 $[-128, +127]$

# 溢出判断：补码定点加减运算



## ■ 一位符号位判溢出

- 参加加法的两个数（减法时为被减数 $[A]_{\text{补}}$ 和“求补”以后的减数 $[-B]_{\text{补}}$ ）**符号不同**，不会发生溢出
- 参加加法的两个数（减法时为被减数 $[A]_{\text{补}}$ 和“求补”以后的减数 $[-B]_{\text{补}}$ ）**符号相同**，其结果的符号与原操作数的符号不同，即为溢出

- 硬件实现

- **数值最高位的进位  $\oplus$  符号位的进位 = 1**      **溢出**

- 如

$$\begin{array}{l} \text{两个正数相加: } 1 \oplus 0 = 1 \\ \text{两个负数相加: } 0 \oplus 1 = 1 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{两个正数相加: } 1 \oplus 0 = 1 \\ \text{两个负数相加: } 0 \oplus 1 = 1 \end{array}} \right\} \text{有 溢出}$$

$$\begin{array}{l} \text{两个负数或一正一负相加: } 1 \oplus 1 = 0 \\ \text{两个正数或一正一负相加: } 0 \oplus 0 = 0 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{两个负数或一正一负相加: } 1 \oplus 1 = 0 \\ \text{两个正数或一正一负相加: } 0 \oplus 0 = 0 \end{array}} \right\} \text{无 溢出}$$

# 溢出判断：补码定点加减运算



## ■ 一位符号位判溢出

- 硬件实现

- 数值最高位的进位  $\oplus$  符号位的进位 = 1      溢出
- 记录数值最高位的进位、符号位的进位
- 把这两个进位送入到一个异或电路
- 异或电路输出等于1，给溢出标志置1表示发生了溢出，如果输出等于0，就没有发生溢出

# 溢出判断：补码定点加减运算



## ■ 两位符号位判溢出：变形补码

## ■ 变形补码

- 有两位符号位
- 小数

$$[x]_{\text{补}'} = \begin{cases} x & 1 > x \geq 0 \\ 4 + x & 0 > x \geq -1 \pmod{4} \end{cases}$$

- $x$  为真值
- 正数：00.XXXXXX (符号位：00，数值部分：与 $x$ 相同)
- 负数：11.XXXXXX (符号位：11，数值部分： $x$  数值部分每位取反，末位加一)

# 溢出判断：补码定点加减运算



## ■ 变形补码

- 有两位符号位
- 整数

$$[x]_{\text{补}'} = \begin{cases} 00, x & 2^n > x \geq 0 \\ 2^{n+2} + x & 0 > x \geq -2^n \pmod{2^{n+2}} \end{cases}$$

- $x$  为真值,  $n$  为整数数值位的位数
- 正数: 00, XXXXXX (符号位: 00, 数值部分: 与 $x$ 相同)
- 负数: 11, XXXXXX (符号位: 11, 数值部分:  $x$  数值部分每位取反, 末位加一)

# 溢出判断：补码定点加减运算



## ■ 变形补码

- 运算规则：2位符号位连同数值部分一起运算，高位符号位产生的进位自动丢掉

- 小数

$$[x + y]_{\text{补}'} = [x]_{\text{补}'} + [y]_{\text{补}'} \pmod{4}$$

$$[x - y]_{\text{补}'} = [x]_{\text{补}'} + [-y]_{\text{补}'} \pmod{4}$$

- 整数

$$[x + y]_{\text{补}'} = [x]_{\text{补}'} + [y]_{\text{补}'} \pmod{2^{n+2}}$$

$$[x - y]_{\text{补}'} = [x]_{\text{补}'} + [-y]_{\text{补}'} \pmod{2^{n+2}}$$

# 溢出判断：补码定点加减运算



## ■ 两位符号位判溢出：变形补码

- 结果的双符号位 **相同**      **未溢出**

00.×××××	00,×××××
11.×××××	11,×××××

- 结果的双符号位 **不同**      **溢出**

<b>1</b> 0.×××××	<b>1</b> 0,×××××
<b>0</b> 1.×××××	<b>0</b> 1,×××××

- **最高符号位** 代表其 **真正的符号**
- 第二个符号位是运算的数值溢出的部分

# 补码加减法的硬件配置



## ■ 二进制加法运算

- 各位逐位相加，进位从右至左传递
- 硬件实现：从一位加法入手

$$\begin{array}{r} X_n \dots X_2 X_1 X_0 \\ + Y_n \dots Y_2 Y_1 Y_0 \\ \hline ?_n \dots ?_2 ?_1 ?_0 \end{array}$$

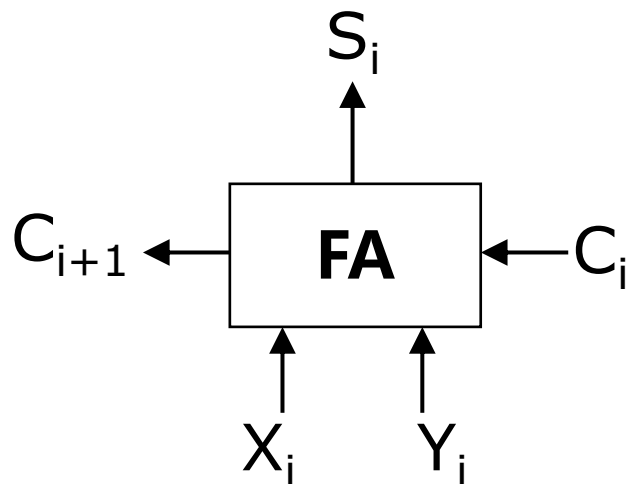


# 补码加减法的硬件配置



## ■ 带进位链的一位全加器

- 算术运算变成逻辑电路



$$S_i = X_i \oplus Y_i \oplus C_i$$

被加数 $X_i$	加数 $Y_i$	低位进位输入 $C_i$	和数 $S_i$	高位进位输出 $C_{i+1}$
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

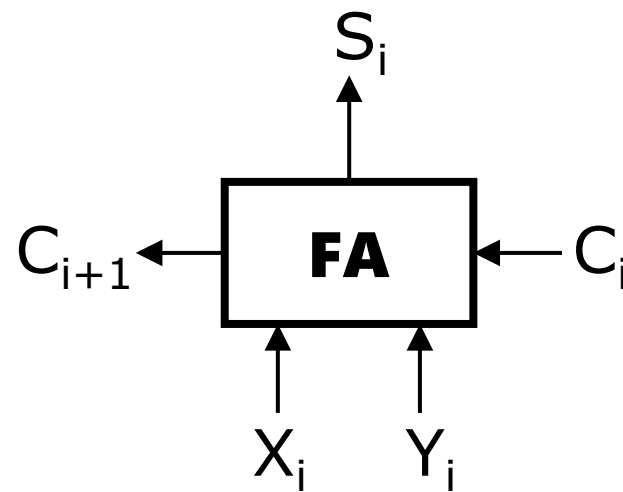
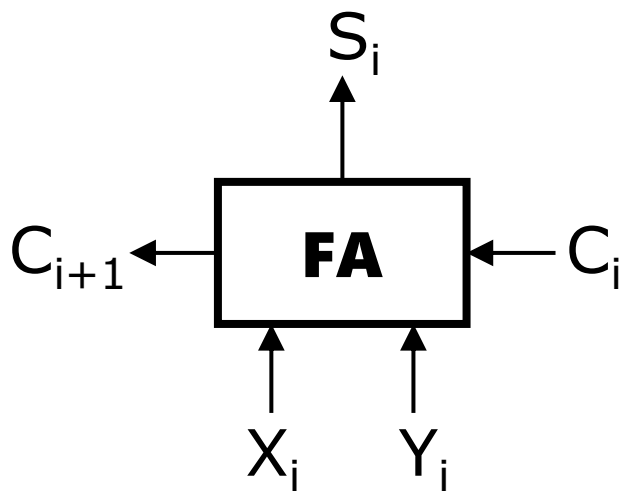
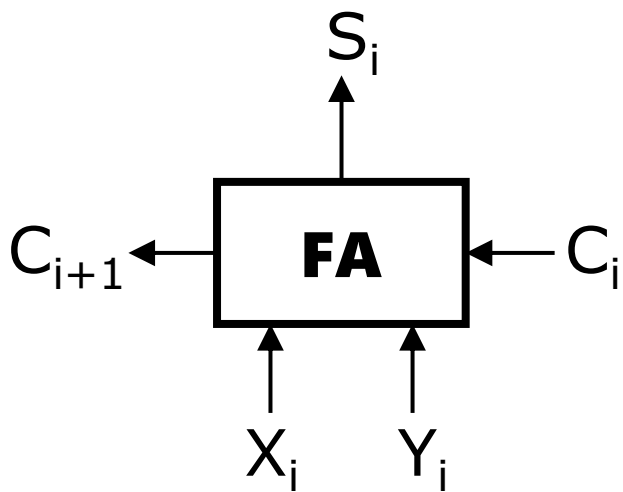
$$C_{i+1} = X_i Y_i + (X_i \oplus Y_i) C_i$$

# 补码加减法的硬件配置



## ■ $n+1$ 位加法器

- 包含 $n+1$ 个全加器

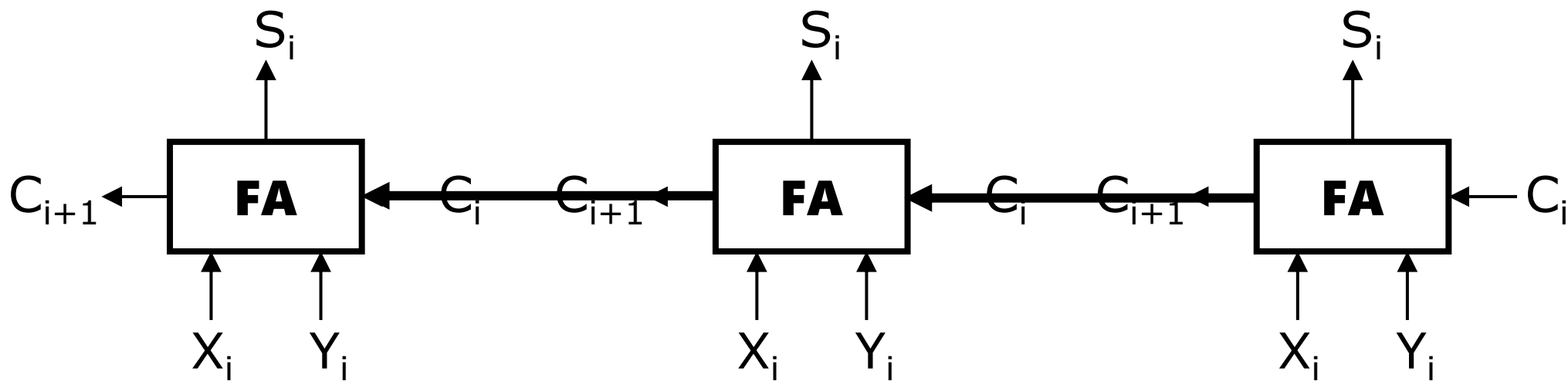


# 补码加减法的硬件配置



## ■ $n+1$ 位加法器

- 包含 $n+1$ 个全加器
- 将 $n+1$ 个一位全加器串联
- 低位进位输出连接到高位进位输入

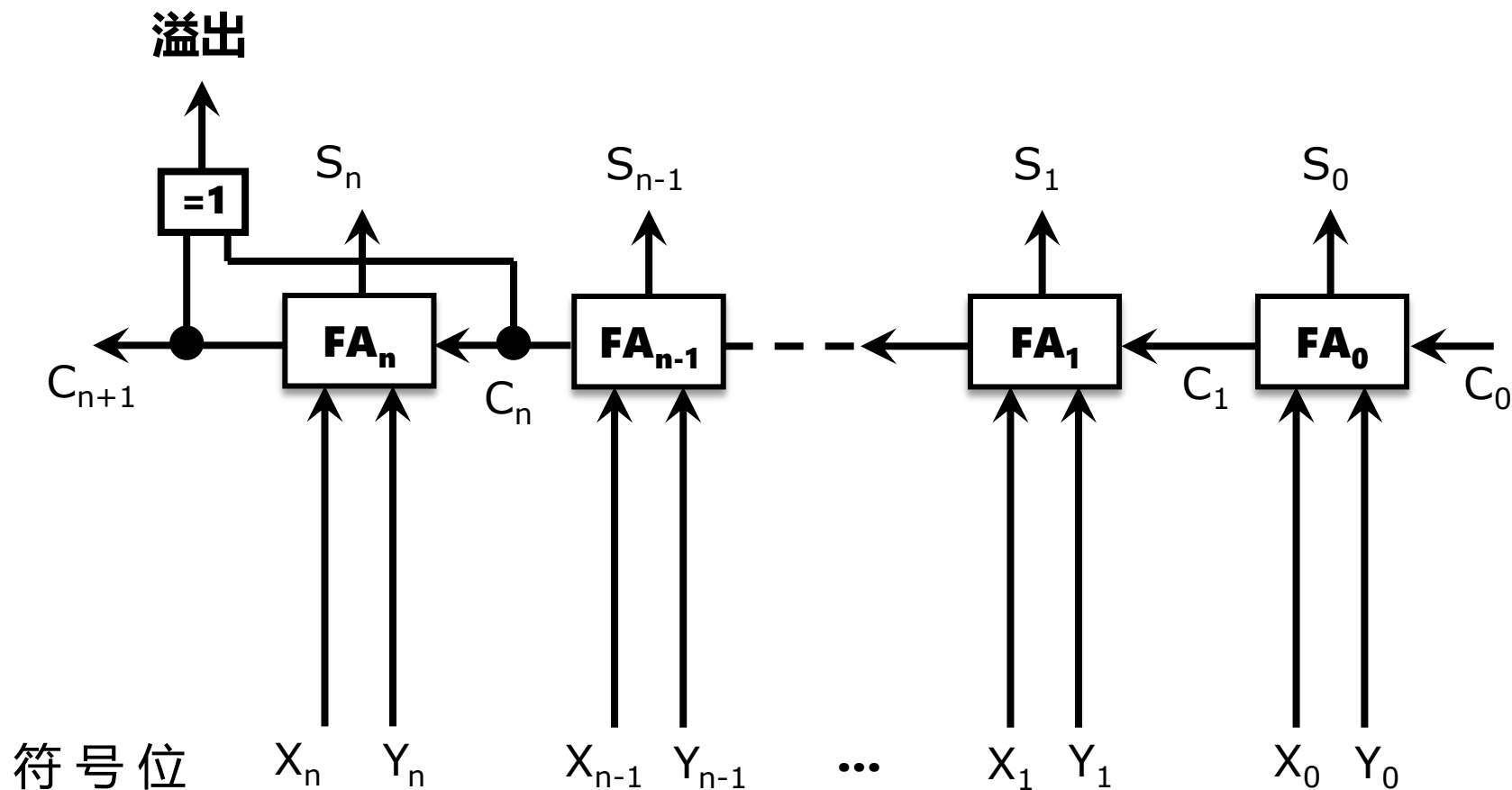


# 补码加减法的硬件配置



## ■ $n+1$ 位加法器

- 增加溢出判断 (单符号位)

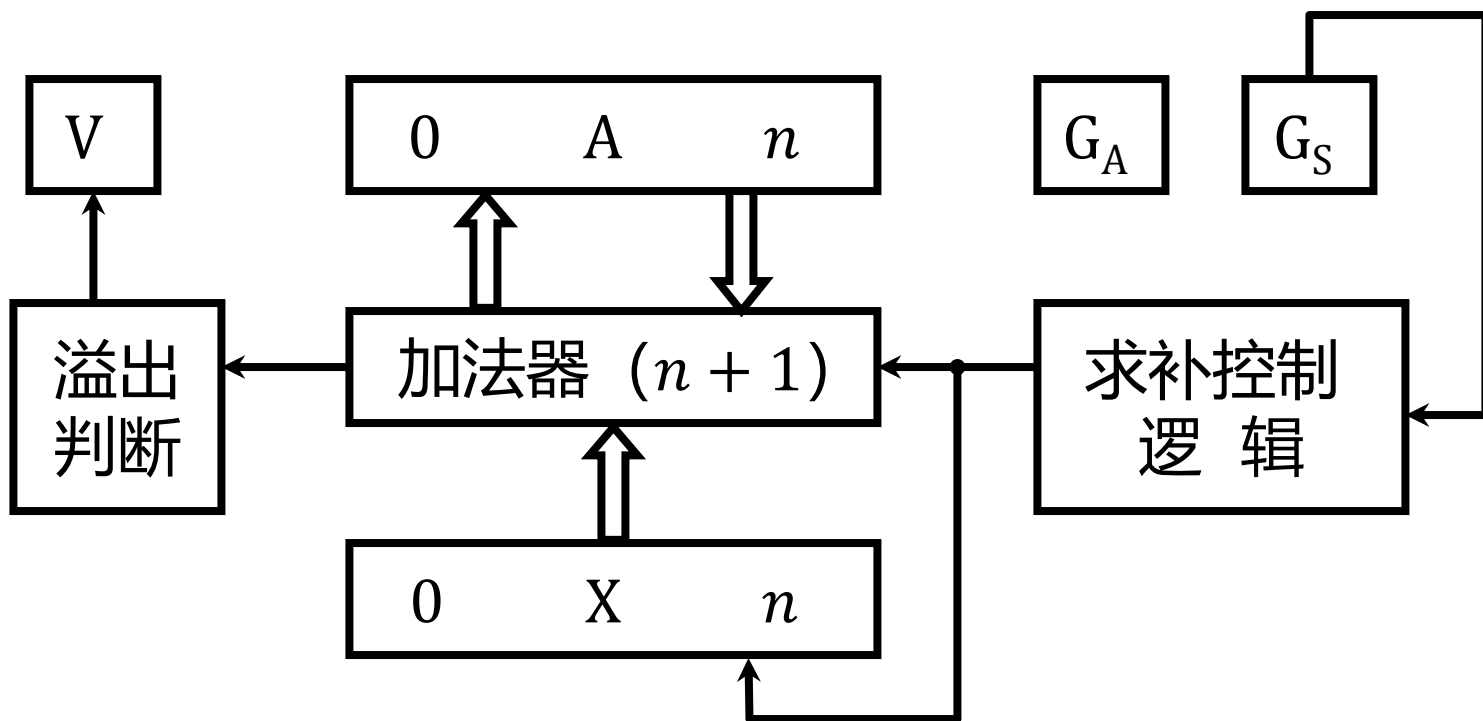


# 补码加减法的硬件配置



## ■ 补码定点加减法的硬件配置

- 寄存器A、X、加法器均  $n + 1$  位（1位符号位， $n$ 位数值位）
- A：被加数（或被减数）的补码，X：加数（或减数）的补码
- $G_A$ ：加法标记， $G_S$ ：减法标记，V：溢出标记

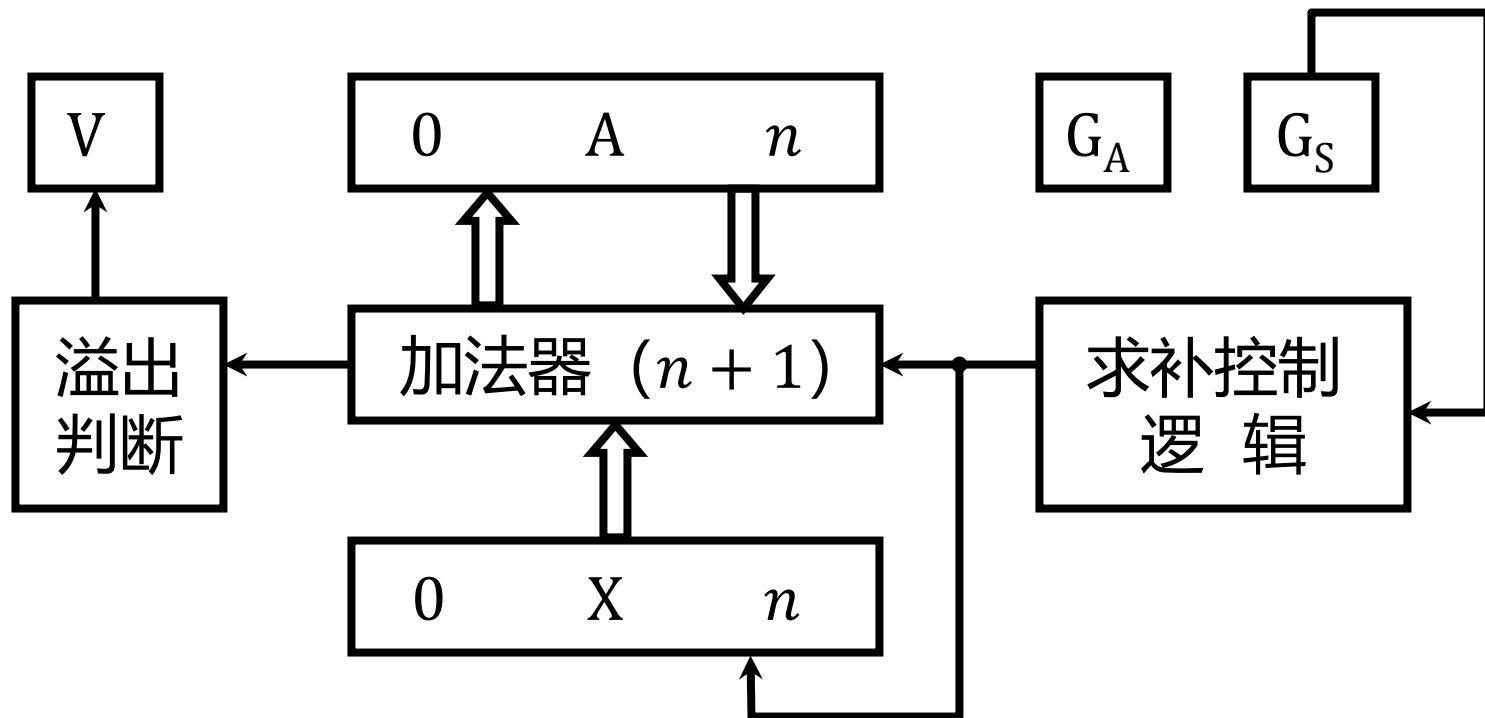


# 补码加减法的硬件配置



## ■ 补码定点加减法的硬件配置

- 当作减法时，用减法标记  $G_S$  控制求补逻辑
- 将  $X$  送至加法器，同时使加法器的最末位外来进位为1，来求减数的补码





谢谢！