



清华大学
Tsinghua University

第一单元 第五讲

运算器部件组成及设计

刘卫东

计算机科学与技术系

本讲概要



清华大学
Tsinghua University

✚ 运算器功能与组成概述

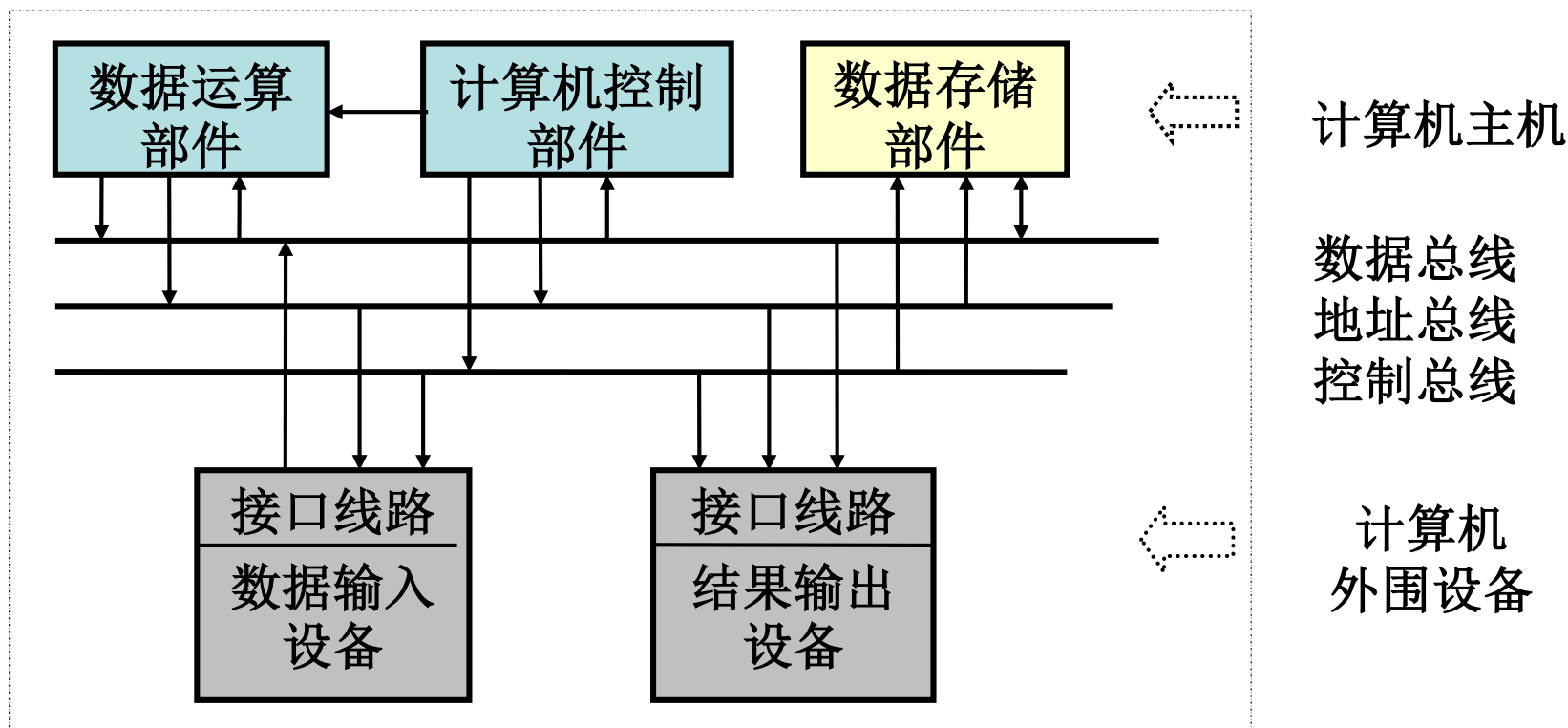
✚ 定点运算器实例Am2901

✚ 用VHDL描述Am2901

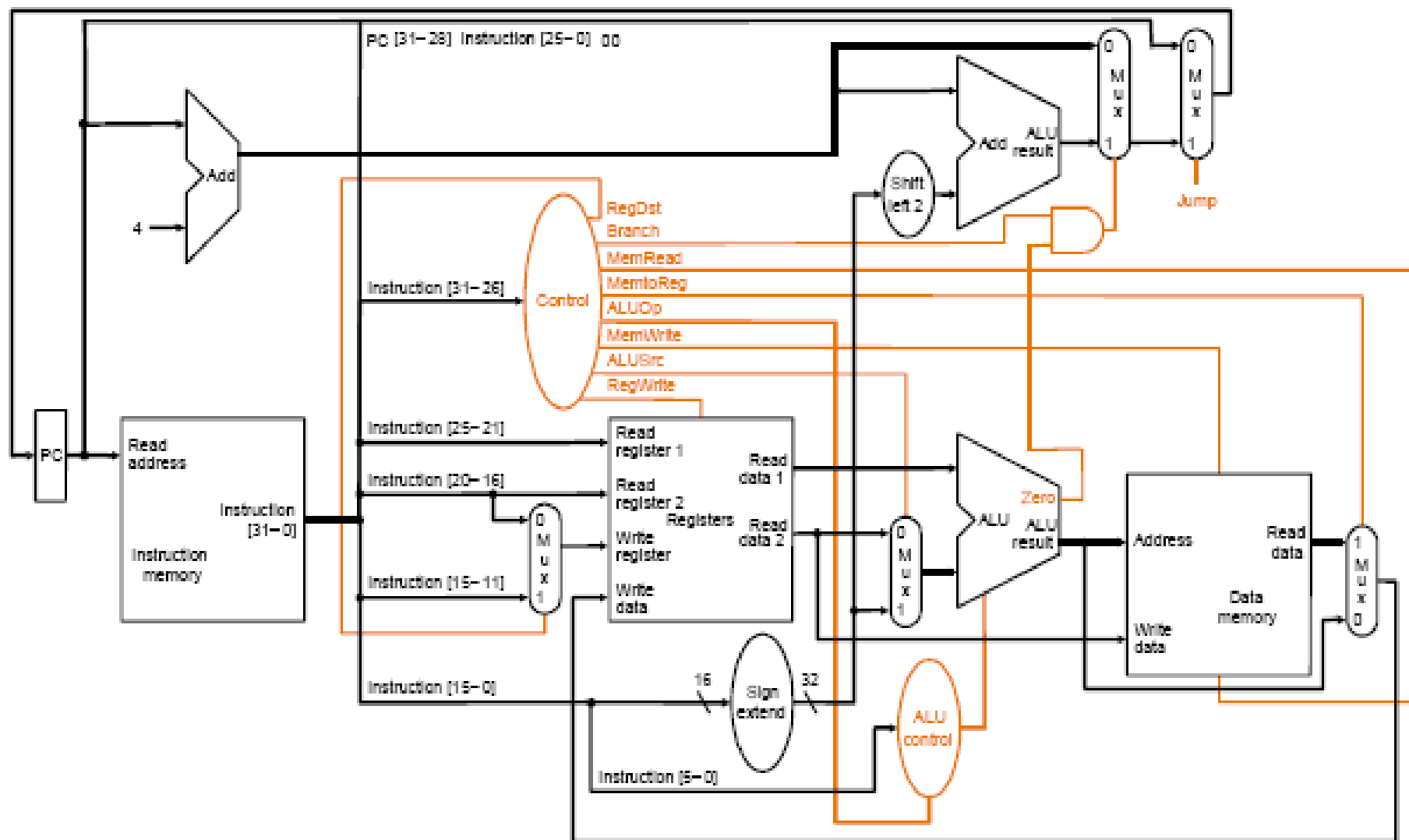
硬件系统的功能部件



计算机的 CPU



CPU示例





运算器的基本功能

✚ 完成算术、逻辑运算，产生运算结果

ALU执行 $+$ 、 $-$ 、 \times 、 \div 、 \wedge 、 \vee 、 \neg

并给出运算结果的状态信息

C、Z、V、S

✚ 暂存运算所用操作数

寄存器组、立即数、数据总线

✚ 暂存运算的中间结果

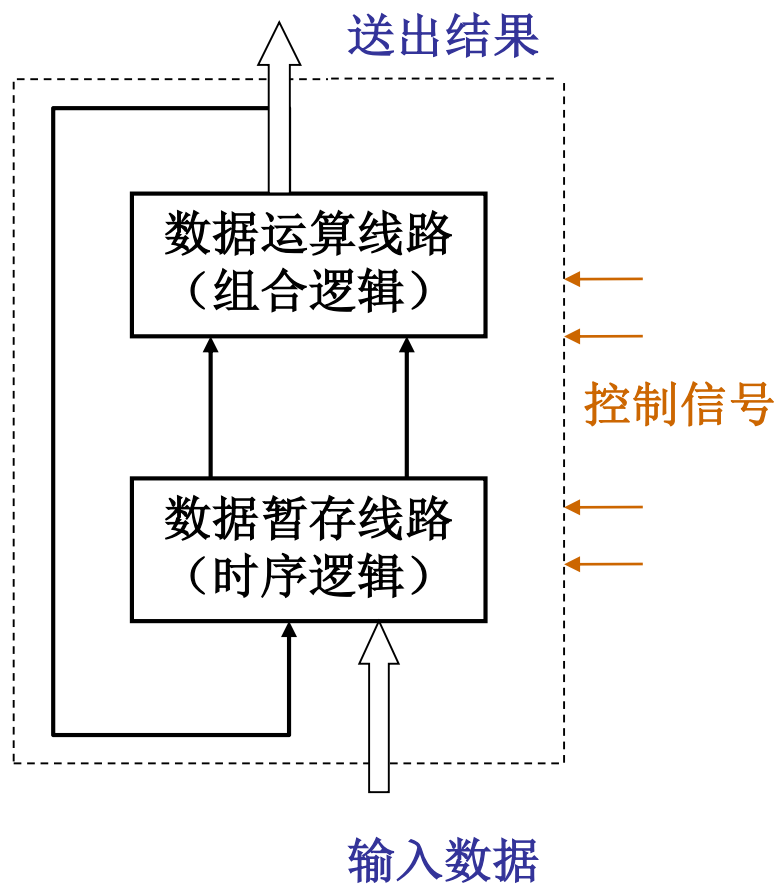
寄存器组、Q寄存器、移位线路

✚ 输出运算结果

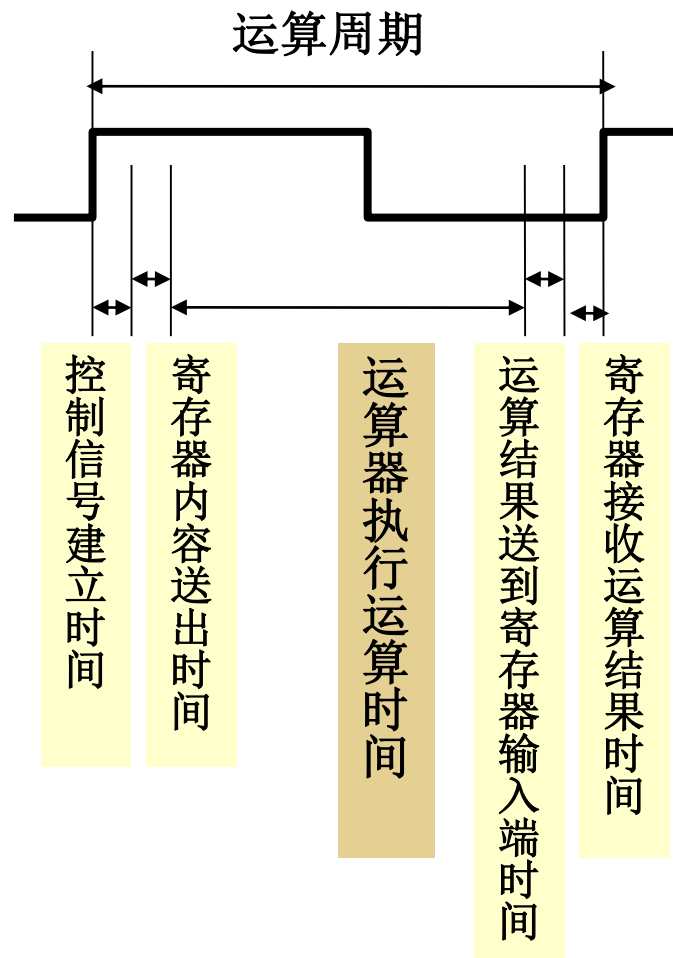
寄存器组、数据总线

运算器是计算机系统中执行数据运算、处理的功能部件，类似于一个工厂中的生产加工车间，由ALU和寄存器组等组成

执行一次运算的时序关系



运算器组成示意图



一个运算周期中各时间段示意图

两种不同类型的运算器



运算器包括 **定点运算器** 和
浮点运算器 两种类型

定点运算器：

主要完成对整数类型数据的算术运算、逻辑类型数据的逻辑运算

浮点运算器：

主要完成对浮点类型数据的算术运算，也用于完成长整数、BCD等类型的数据运算

定点运算器功能与组成



✦ 完成算术与逻辑运算功能

算术逻辑单元 (ALU)

✦ 暂存参加运算的数据和中间结果

通用寄存器组

✦ 乘除法运算的硬件支持线路

乘商寄存器 (Q寄存器)

✦ 接收数据输入和送出运算结果

✦ 作为处理机内部数据通路 (Data Path)

通过几组多路选择器电路实现相互连接，以便数据传送

ALU的实现方案



ALU用于执行2路数据的算术和逻辑运算

例如： $+$ 、 $-$ 、 \times 、 \div 、 \wedge 、 \vee 等

在第4讲已经讲过实现这几种运算的算法

例如：补码加减、逻辑运算、原码一位乘除等

还给出了实现这些运算的原理性线路框图

A存放：

被加数

高位积

被除数

逻辑数1

B存放：

加数

被乘数

除数

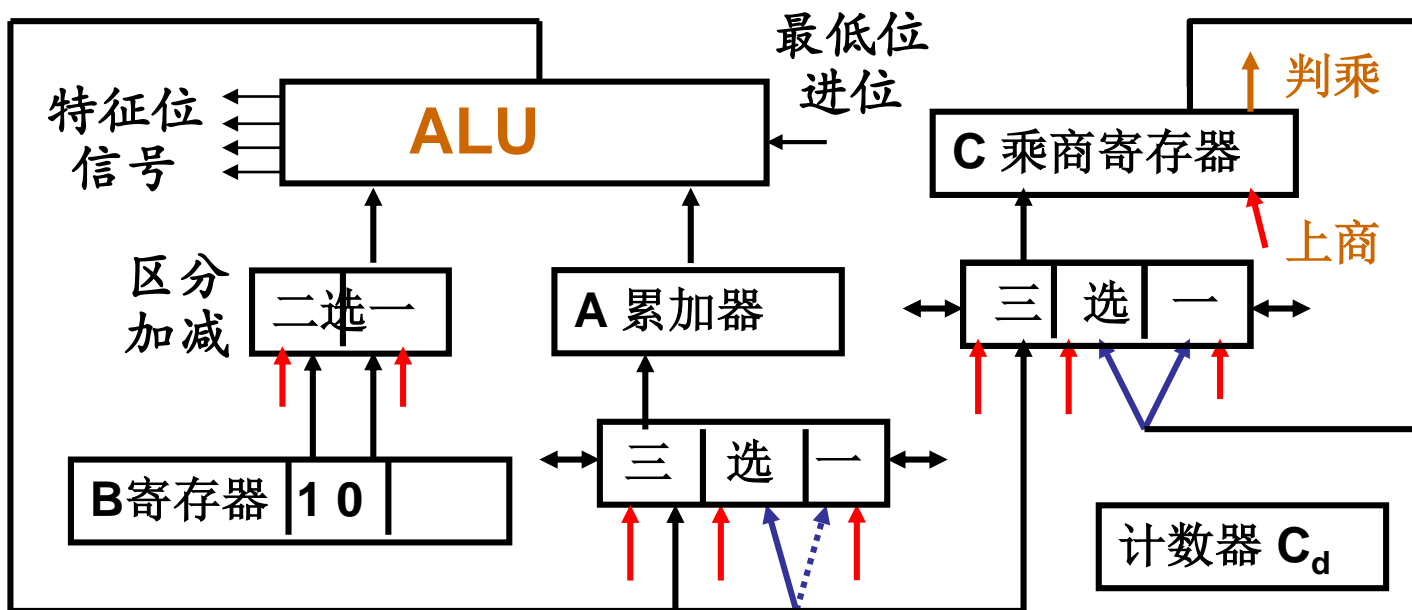
逻辑数2

乘除运算

用加减和

移位多次

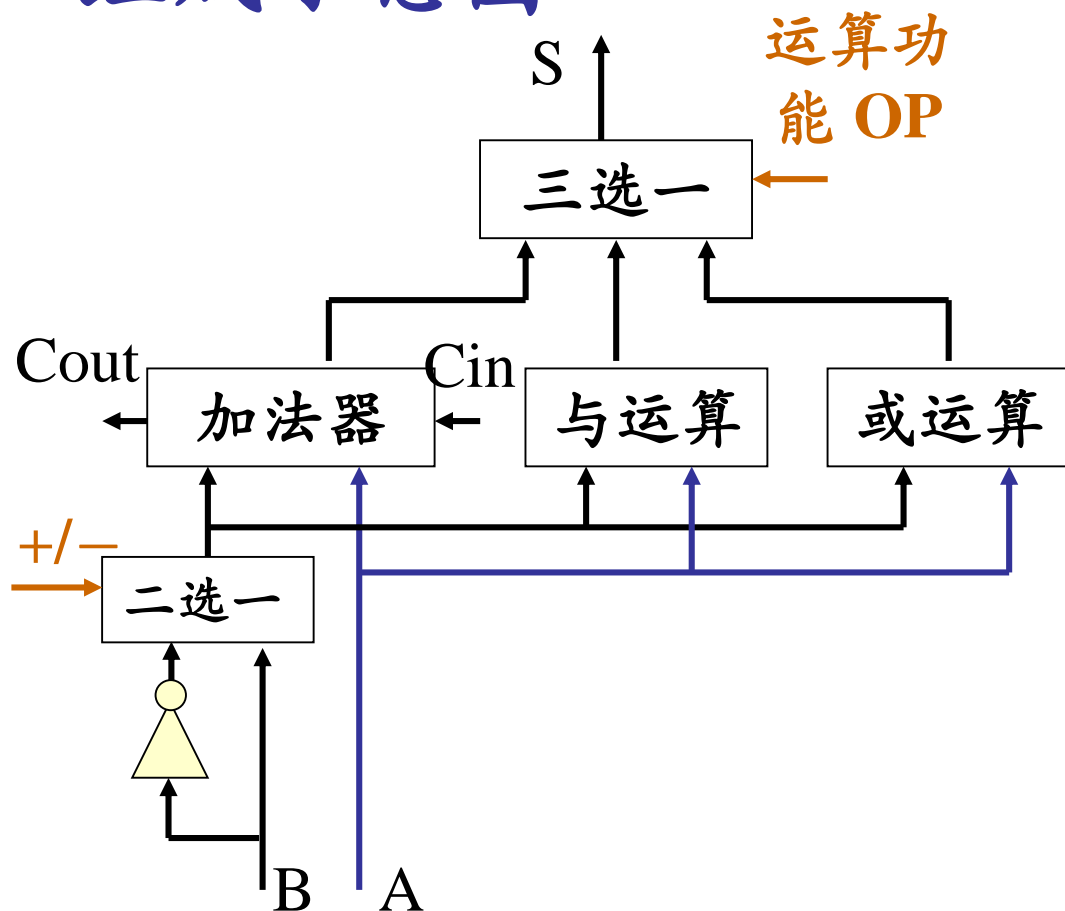
迭代完成



设计实现 ALU 线路



一位的ALU的线路设计：1、首先画出其组成示意图



输入数据 A、B

加减进位输入 Cin

加减进位输出 Cout

3种运算用3部分电路

运算结果S, 3选1得到

运算功能选择输出

加/减选择 B 或 /B

设计实现 ALU线路



2、接着写出功能的真值表

OP	A	B	Cin	S	Cout
00	0	0	0	0	0
00	0	1	0	1	0
00	1	0	0	1	0
00	1	1	0	0	1
00	0	0	1	1	0
00	0	1	1	0	1
00	1	0	1	0	1
00	1	1	1	1	1

(加法)

OP	A	B	S (与)
10	0	0	0
10	0	1	0
10	1	0	0
10	1	1	1

OP	A	B	S (或)
11	0	0	0
11	0	1	1
11	1	0	1
11	1	1	1

设计实现 ALU线路



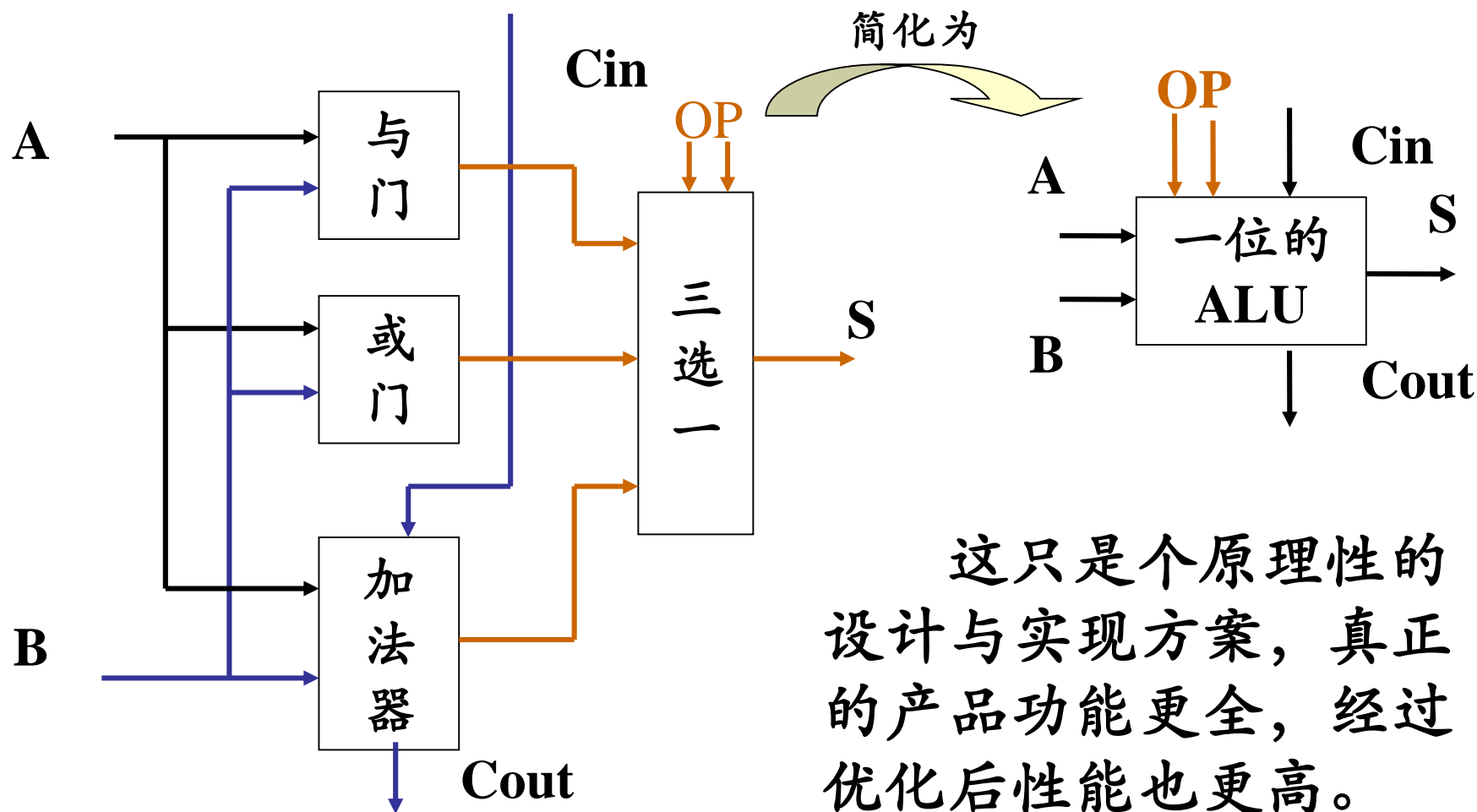
3、按真值表写逻辑表达式

$$\begin{aligned} S = & (/OP1 \cdot /OP0) \cdot (A \cdot /B \cdot /Cin && \text{加法运算} \\ & + /A \cdot B \cdot /Cin \\ & + /A \cdot /B \cdot Cin \\ & + A \cdot B \cdot Cin) \\ & + (OP1 \cdot /OP0) \cdot (A \cdot B) && \text{与运算} \\ & + (OP1 \cdot OP0) \cdot (A + B) && \text{或运算} \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} Cout = & (/OP1 \cdot /OP0) \cdot (A \cdot B && \text{加法运算} \\ & + A \cdot Cin \\ & + B \cdot Cin) \end{aligned}$$

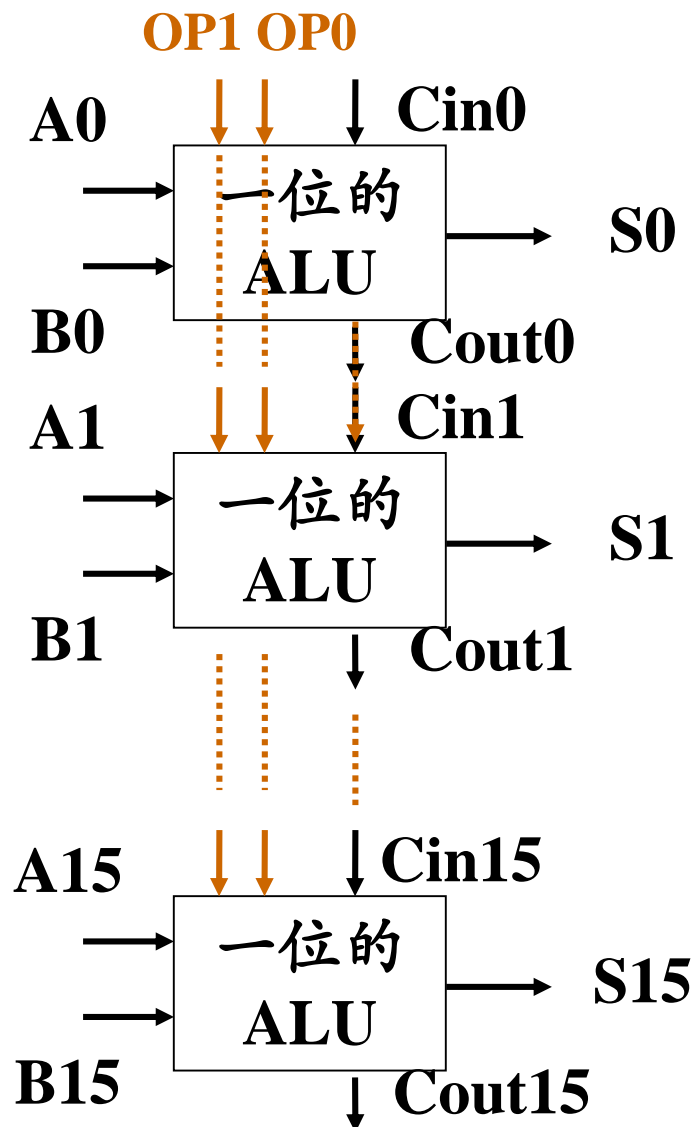
设计实现 ALU 线路



4、按逻辑表达式画电路图



设计实现 16位ALU



用 16 个一位的 ALU 实现一个 16 位的 ALU，使其并行执行算逻运算，使每位 ALU 处在不同的数位上，信号名加位序号。

需要把每一位上的 ALU 的进位输出信号和相邻高位的进位输入信号正确连接；并把全部位上的控制信号连接在一起，使它们同步执行相同的运算功能，从而对两个 16 位的数据执行正确的运算功能，产生正确的结果。

还需要解决进位信号传送速度，可采用超前进位的方案。

位片结构运算器Am2901



- ❖ AMD公司1975年推出Am2900系列
- ❖ 4位位片结构运算器
- ❖ 可实现3种算术运算和5种逻辑运算
- ❖ 应用广泛
 - ❖ Nova、DEC、TEC
- ❖ 作为例子来了解运算器的基本实现
 - ❖ 了解运算器（Datapath）和控制器的相互关系
 - ❖ 为设计CPU打好基础



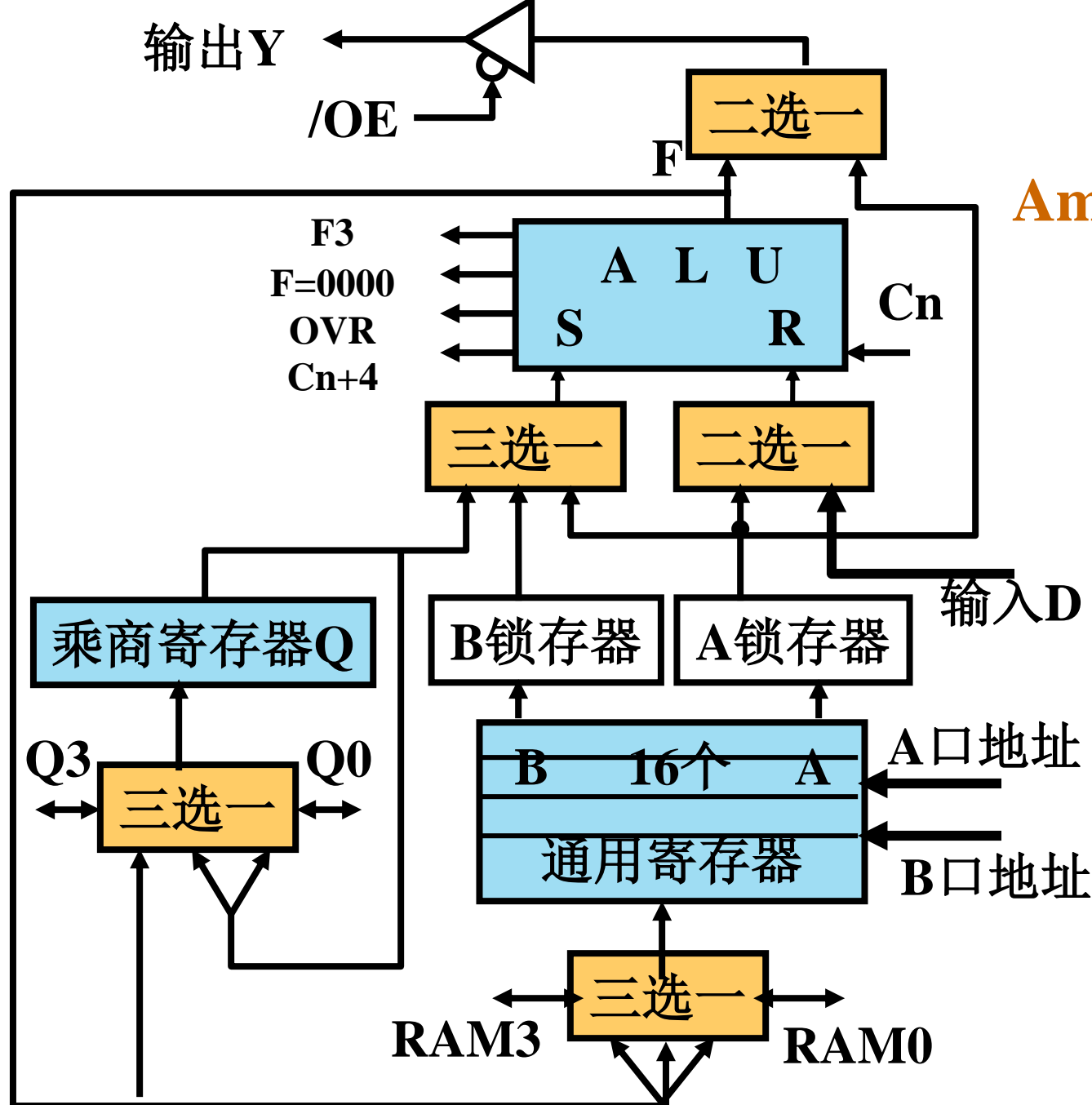
Am2901内部组成

组成

算逻运算部件
通用寄存器组
乘商寄存器 Q

功能

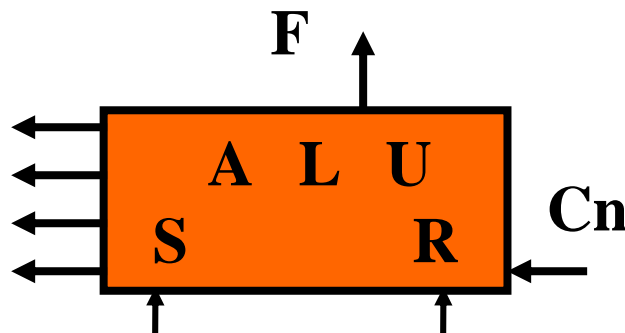
8种运算功能
8种数据组合
8种结果处理





符号位
结果为零
结果溢出
进位输出

F3
F=0000
OVR
Cn+4



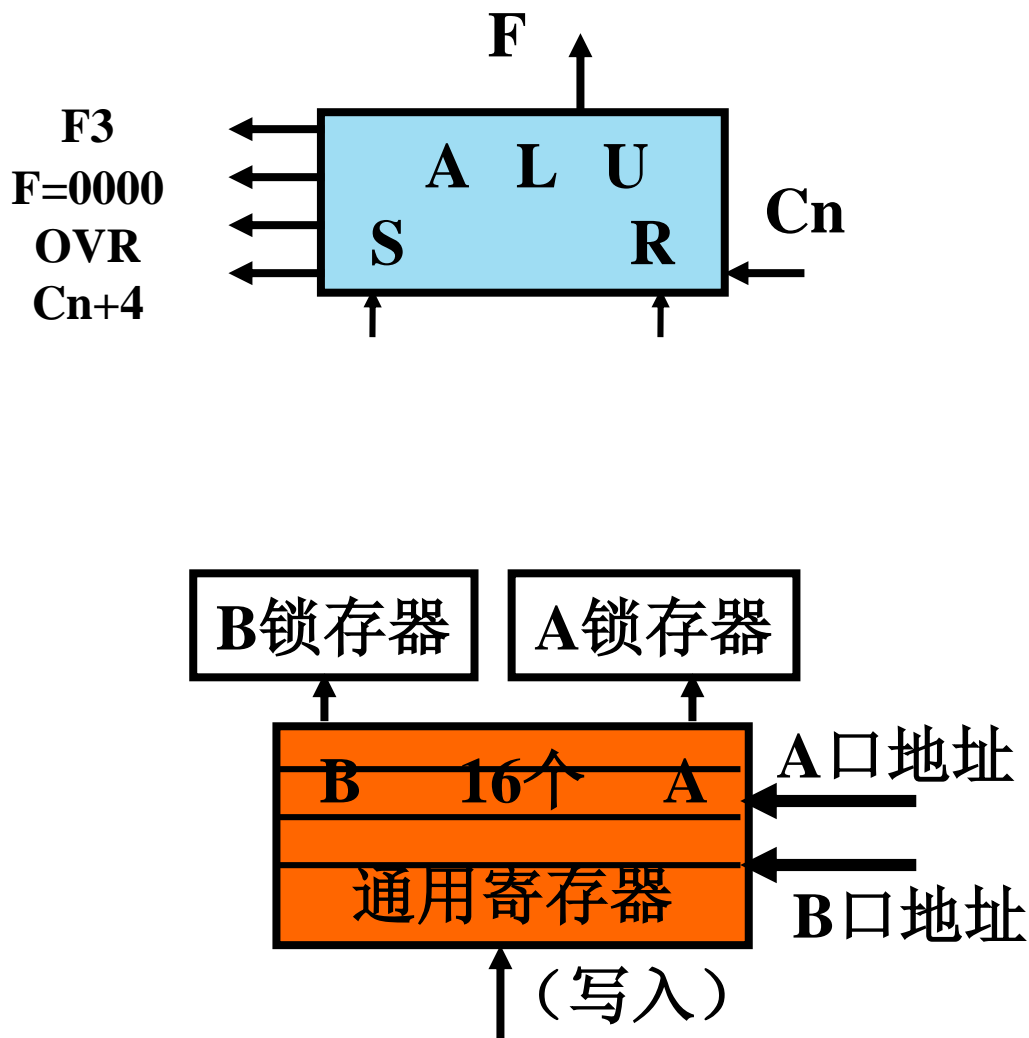
Am2901芯片是一个 4 位的位片结构的运算器器件,其内部组成如下:

第一个组成部分是算逻运算部件ALU,完成 3 种算术运算和 5 种逻辑运算,共计 8 种功能。

其输出为 F, 两路输入为 S、R, 最低位进位Cn, 4个状态输出信号如图所示

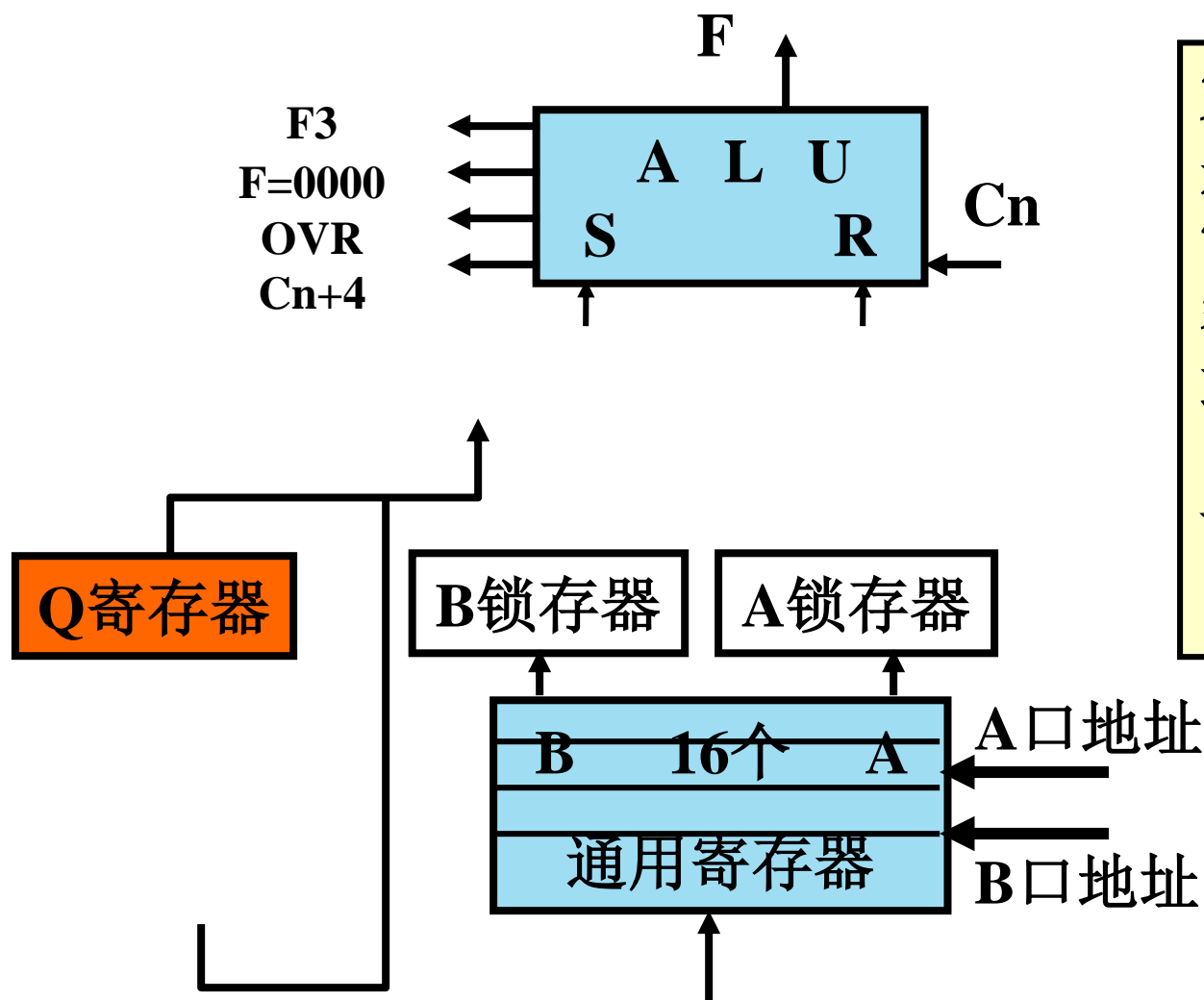
3 位功能选择码 8 种运算功能

000	$R+S$
001	$S-R$
010	$R-S$
011	$R \vee S$
100	$R \wedge S$
101	$\overline{R \wedge S}$
110	$R \oplus S$
111	$\overline{R \oplus S}$

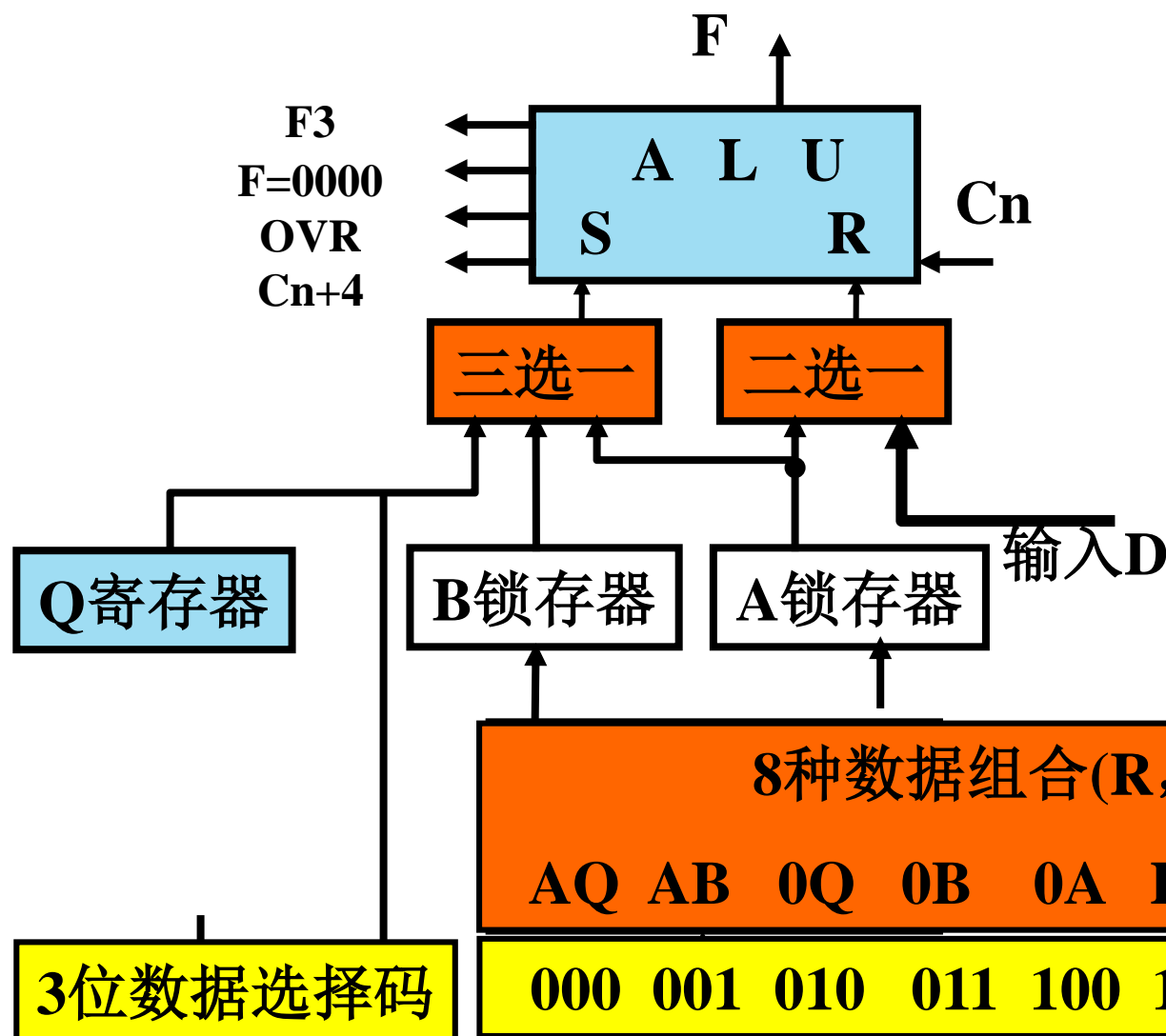


第二个组成部分是通用寄存器组由16个寄存器构成，并通过B口与A口地址选择被读的寄存器，B口地址还用于指定写入寄存器

通过B口地址、A口地址读出的数据将送到B、A锁存器，要写入寄存器的数据由一个多路选择器送来。

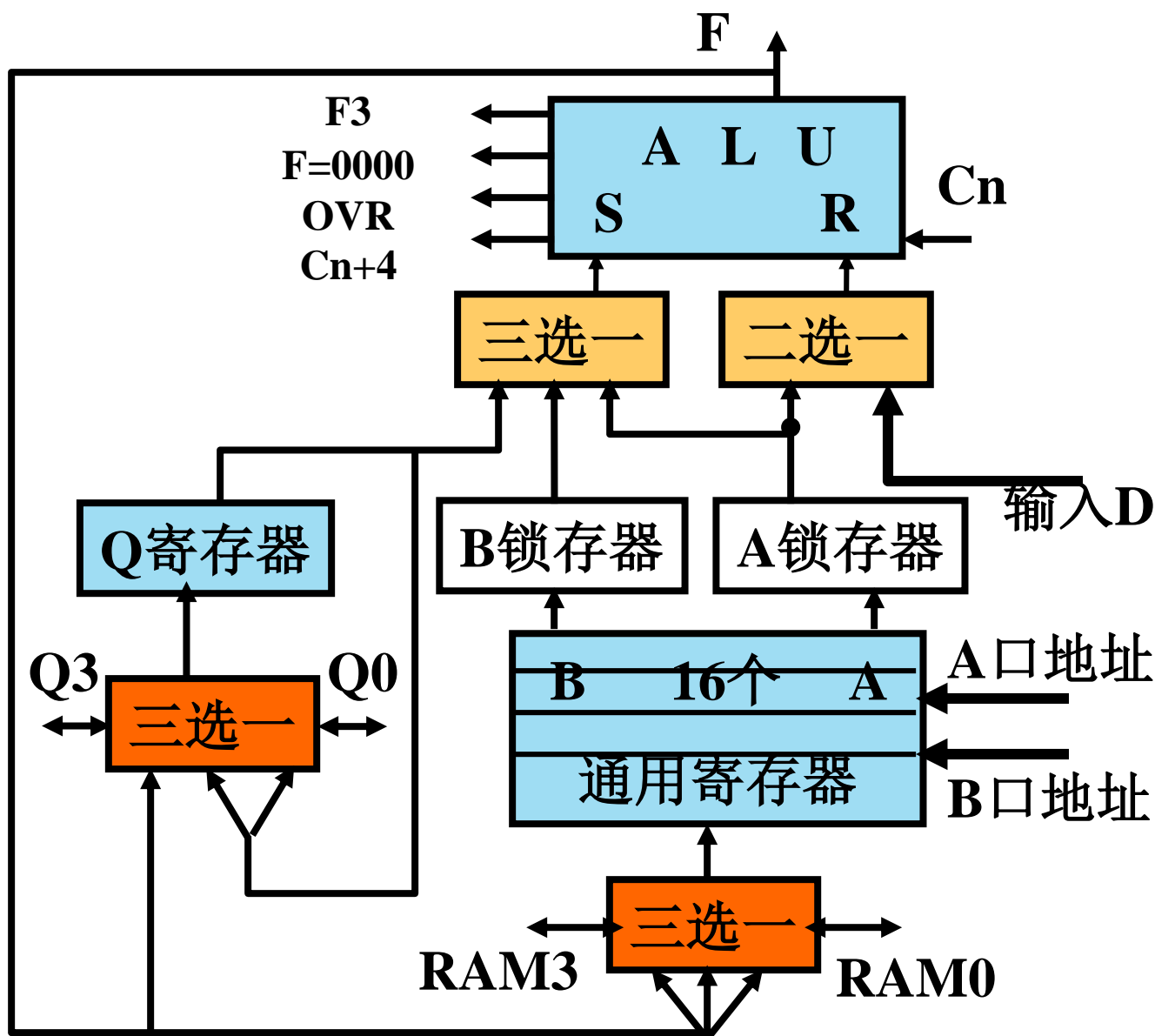


第三个组成部分是乘商寄存器Q 它能为自己的内容完成左右移位功能，其输出可以送往ALU，并可接收ALU的输出结果。



一组三选一门和另一组二选一门用来选择送向ALU的R、S输入端的数据来源，包括Q寄存器、A口、B口、外部输入D数据的8种不同组合。

第四个是5组门,包括



一组三选一门完成把ALU的输出、或右移一位、或左移一位的值送往通用寄存器组，最高、最低位移位信号有双向入/出问题

一组三选一门完成Q寄存器的右移一位、或左移一位、或接收ALU输出值的功能，最高、最低位移位信号有双向入/出问题。



输出Y

/OE

F

二选一

F3
F=0000
OVR
Cn+4

A L U
S R

Cn

三选一

二选一

输入D

Q寄存器

B锁存器

A锁存器

Q3 Q0

三选一

B 16个 A

通用寄存器

A口地址

B口地址

RAM3

三选一

RAM0

一组二选一门，选择把A口数据或ALU结果送出芯片，以给出输出Y的数据，Y输出的有无还受输出使能 /OE信号的控制，仅当 /OE为低是才有Y输出， /OE为高，Y输出为高阻态。

8 种结果处理



3位控制码	通用寄存器	Q寄存器	Y输出
000		$Q \leftarrow F$	F
001			F
010	$B \leftarrow F$		A
011	$B \leftarrow F$		F
100	$B \leftarrow F/2$	$Q \leftarrow Q/2$	F
101	$B \leftarrow F/2$		F
110	$B \leftarrow 2F$	$Q \leftarrow 2Q$	F
111	$B \leftarrow 2F$		F

输出Y

/OE

二选一

F

F3
F=0000
OVR
Cn+4

A L U
S R Cn

三选一

二选一

输入D

Q寄存器

B锁存器

A锁存器

Q3

Q0

三选一

B 16个 A
通用寄存器
A口地址
B口地址

RAM3

三选一

RAM0

运算器，三大件
运算 暂存 乘除快
多路选通连起来

数据组合有内外
运算功能指明白
存移输出巧安排

运算功能选择
← I5 I4 I3

数据组合选择
← I2 I1 I0

运算结果处理
← I8 I7 I6



算逻运算部件

通用寄存器组

乘商寄存器 Q

功能

8种运算功能

8种数据组合

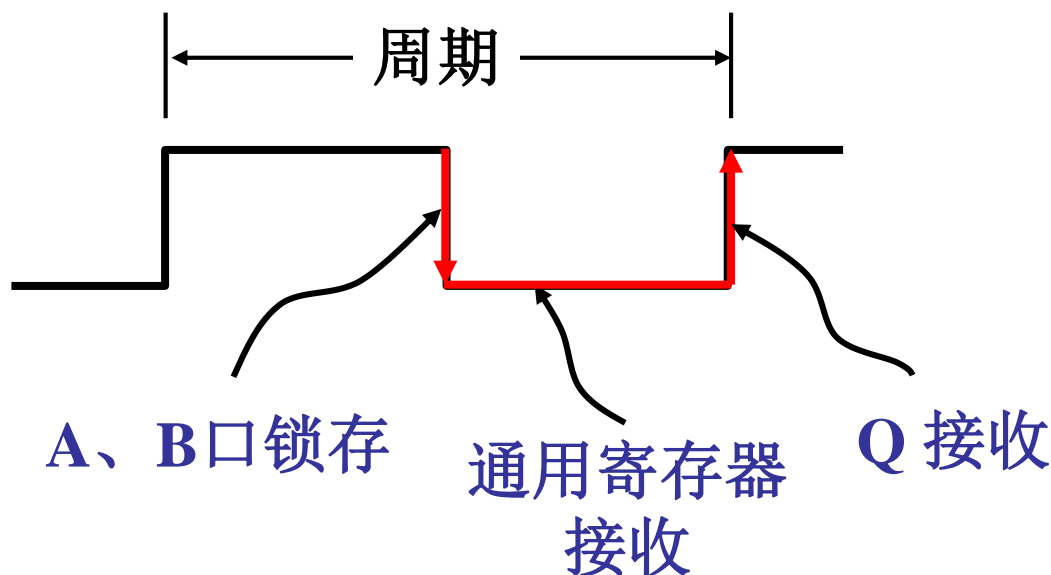
8种结果处理

运算器的时钟信号 CP



时钟脉冲信号 CP 用于控制寄存器和锁存器的动作时间，注意两个跳变沿和低电平的作用。

锁存器，在时钟脉冲的高电平期间，其输入信号直接“穿”过线路送到其输出端，用脉冲**下降沿**把输入信号存储起来用于后续的输出。



通用寄存器是 R_S 触发器，**低电平**期间接收输入。

Q 寄存器是 D 型 触发器，用脉冲**上升沿**接收输入。

Am2901控制信号汇总表



编 码	I8 I7 I6			Y	I5 I4 I3			I2 I1 I0	
	B	Q						R	S
000		$Q \leftarrow F$		F	$R + S$			A	Q
001				F	$S - R$			A	B
010	$B \leftarrow F$			A	$R - S$			0	Q
011	$B \leftarrow F$			F	$R \vee S$			0	B
100	$B \leftarrow F/2$	$Q \leftarrow Q/2$		F	$R \wedge S$			0	A
101	$B \leftarrow F/2$			F	$\overline{R} \wedge S$			D	A
110	$B \leftarrow 2F$	$Q \leftarrow 2Q$		F	$R \oplus S$			D	Q
111	$B \leftarrow 2F$			F	$\overline{R \oplus S}$			D	0

Am2901操作使用表



操作功能	控制信号						
	B口	A口	I8 I7 I6	I5 I4 I3	I2 I1 I0	Cn	
$R0 \leftarrow R0 + R1$ $Y \leftarrow F$	0000	0001	011	000	001	0	
$R2 \leftarrow R2 - R0$ $Y \leftarrow A口$	0010	0000	010	001	001	1	
右移							
$R0 \leftarrow R0 + R1$ $Y \leftarrow F$	0000	0001	101	000	001	0	
$Q \leftarrow R0$ $Y \leftarrow F$	/	0000	000	000	100	0	
$R0 \leftarrow R0 \wedge R1$ $Y \leftarrow A口$	0000	0001	010	100	001	0	
$R0 \leftarrow R0 \wedge R1$ $Y \leftarrow F$	0000	0001	011	100	001	0	

VHDL语言简介



❖ 硬件描述语言HDL

- ❖ Hardware Description Language

- ❖ IEEE 国际标准: VHDL, Verilog

❖ HDL打破软、硬件的界限

- ❖ 传统的数字系统设计分为:

 - ◆ 硬件设计 (硬件设计人员)

 - ◆ 软件设计 (软件设计人员)

- ❖ HDL是硬件设计者和 EDA工具之间的界面

VHDL特点



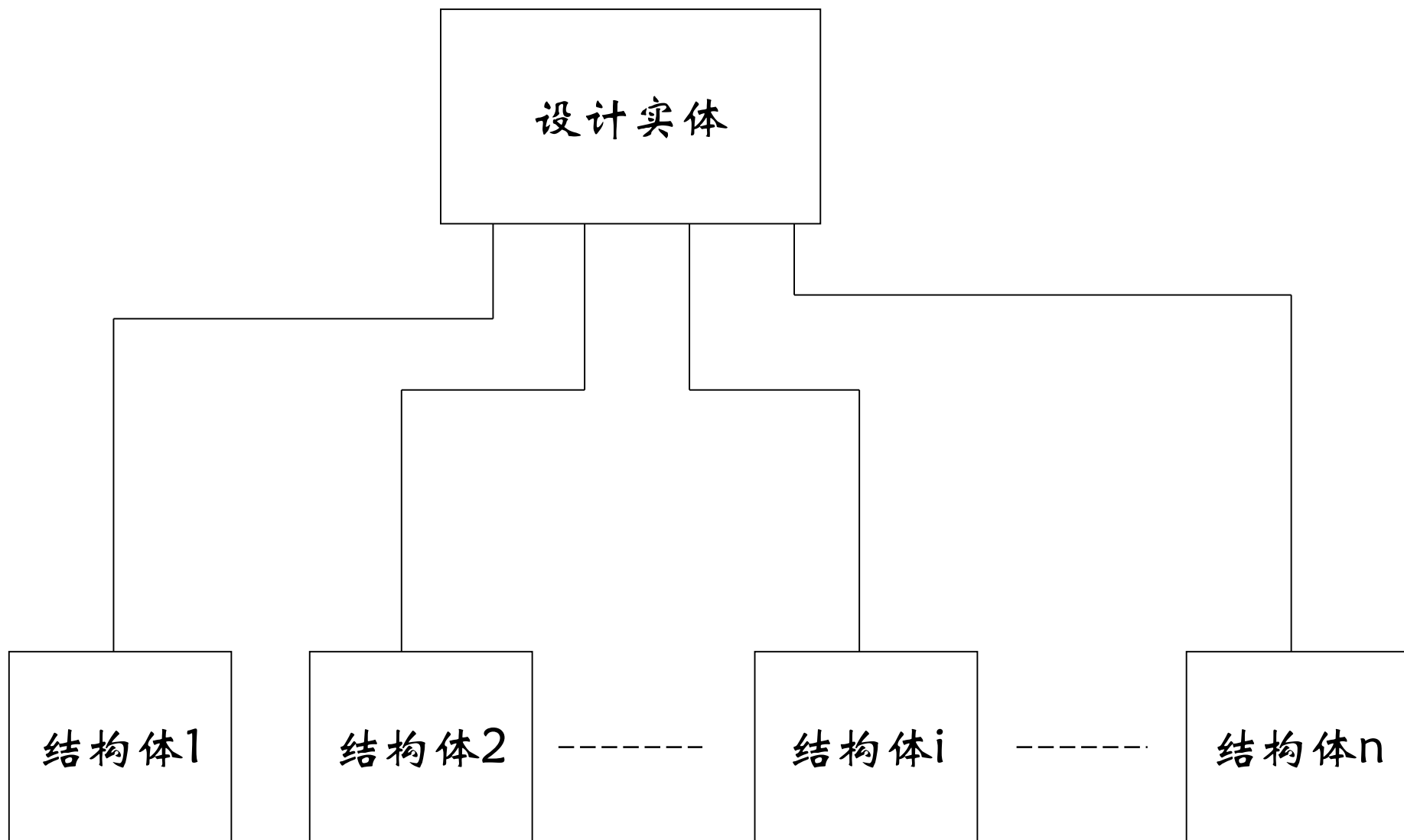
- ✚ VHDL具有强大的语言结构
- ✚ 系统硬件描述能力强、设计效率高
- ✚ 具有较高的抽象描述能力
- ✚ 可读性强，易于修改和发现错误
- ✚ 移植性好

基本结构



- ❖ 模块化 —— 以实体为描述对象
- ❖ 层次化 —— 元件例化，复合语句
- ❖ 行为描述 —— 进程为最小单位
- ❖ 灵活组合 —— 编译单元，配置

基本设计单元



用VHDL设计Am2901



❖ 逻辑设计

- ❖ 功能分析

❖ 设计描述

- ❖ 自顶向下设计方法

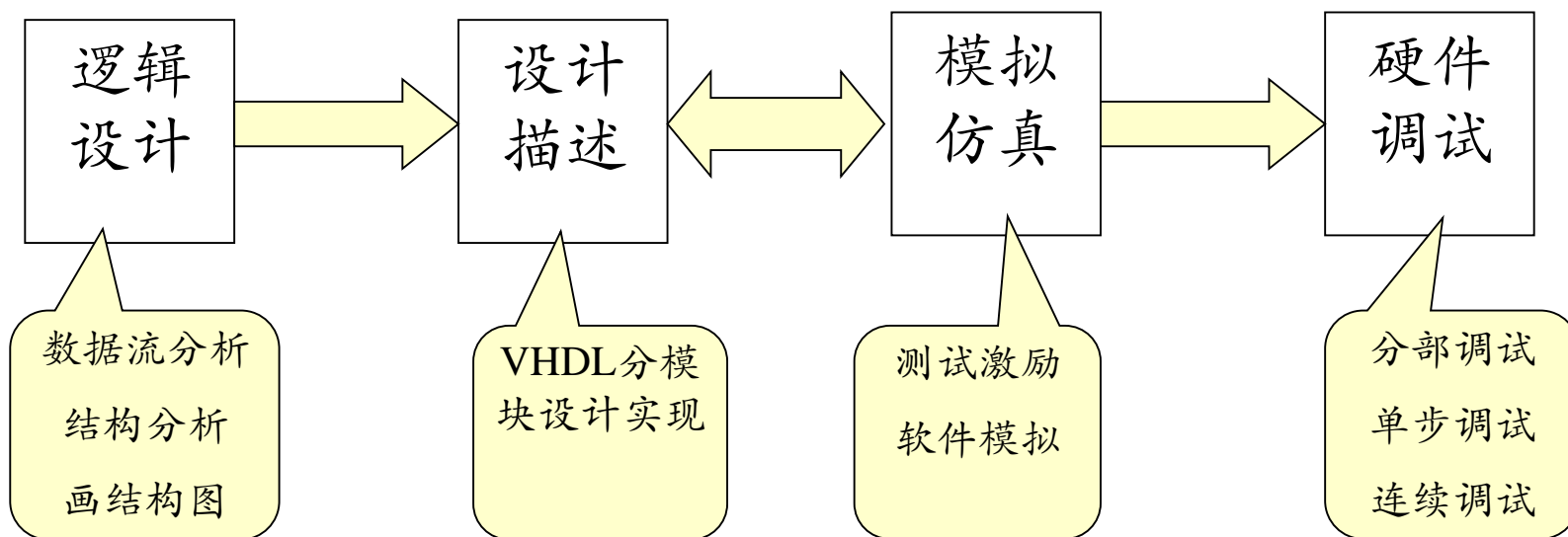
- ❖ 划分模块

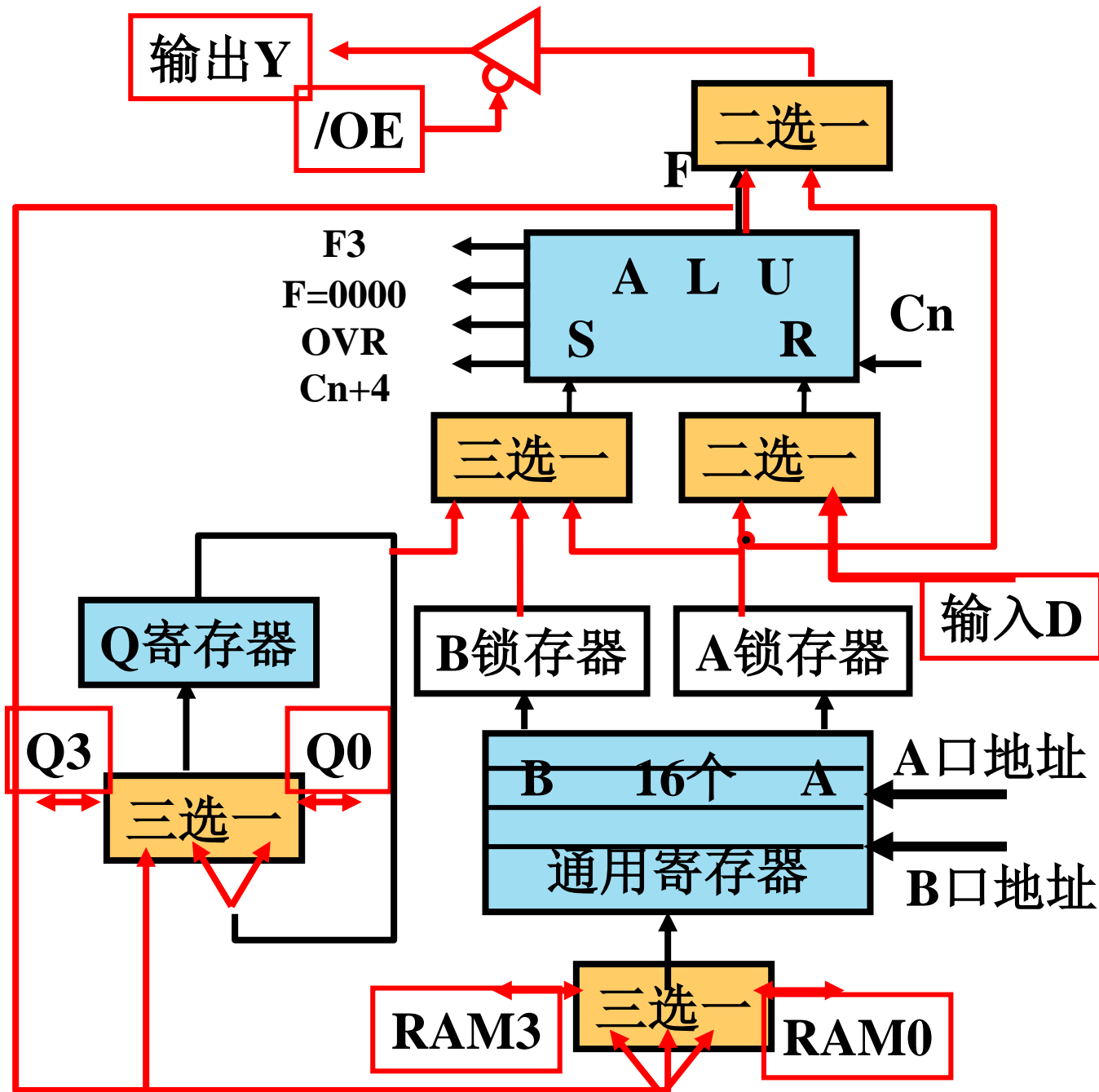
 - ◆ ALU、Register Files（读/写）、A和B锁存器

❖ 模拟仿真

❖ 硬件调试

设计流程





Am2901实体设计



```
ENTITY Am2901 is          --在实体部分说明这个部件的输入输出信号的属性和数据类
PORT (CP                  : IN STD_LOGIC;          --时钟信号
      D                   : IN STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNTO 0); -- 4 位的输入数据信号
      Cin                 : IN STD_LOGIC;          --最低位进位输入信号
      ADDR_A,ADDR_B       : IN STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNTO 0); --A、B口的寄存器编号
      I8_6,I5_3,I2_0      : IN STD_LOGIC_VECTOR(2 DOWNTO 0); -- 3 组 3 位的控制信号

      RAM0_,RAM3_,Q0_,Q3_ : INOUT STD_LOGIC;       --双向的移位入出信号
      Cy,Over,Zero,Sign   : OUT STD_LOGIC;         --输出的各标志位信号
      Y : OUT STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNTO 0)         -- 4 位的输出数据信号
    );
END;
```

定义了Am2901的外部接口

Am2901结构体定义



ARCHITECTURE behave OF Am2901 is --说明本部件的用到的变量与信号

VARIABLE A_ADDR,B_ADDR :INTEGER RANGE 0 TO 15; --寄存器编号的取值范围

 --说明运算器内部使用的电路及其涉及到的连接关系

SIGNAL MUL_R_SEL,MUL_S_SEL,MUL_Q_SEL,MUL_REG_SEL :

 STD_LOGIC_VECTOR(1 DOWNT0 0);

SIGNAL R,S,F,A,B,Q,REG_A,REG_B,Q_IN,REG_IN,A_TEMP,B_TEMP :

 STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNT0 0);

SIGNAL Q3_OUT,Q0_OUT,RAM0_OUT,RAM3_OUT : STD_LOGIC;

SIGNAL REG_W,Q_W : IN STD_LOGIC; --REG 和Q的写命令

subtype register_type is std_logic_vector(3 downto 0);

type register_heap is array (0 to 15) of register_type;

signal regs : register_heap; --说明由16个寄存器组成的寄存器组

定义了Am2901的内部信号

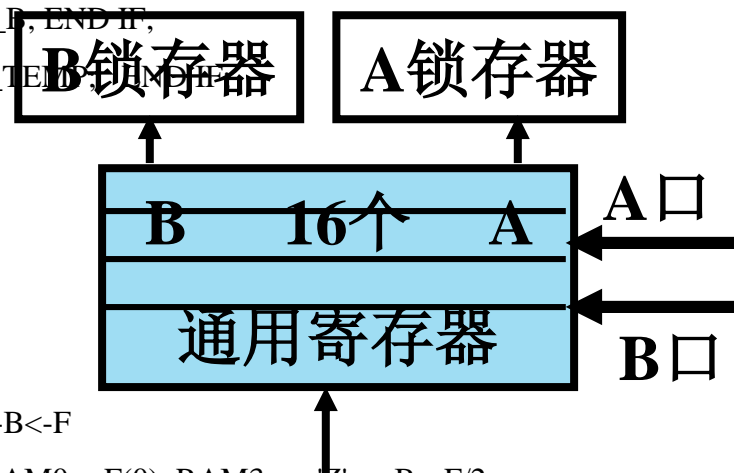


```

A_ADDR := CONV_INTEGER(UNSIGNED(ADDR_A)); --变换寄存器编号为整数类型
B_ADDR := CONV_INTEGER(UNSIGNED(ADDR_B));
REG_A <= REG_ARRAY(ADDR_A);           --用给出的2个寄存器编号,
REG_B <= REG_ARRAY(ADDR_B);           --取出2个寄存器的内容
PROCESS(CP)      --锁存器A、B的锁存控制与输出
BEGIN
    IF CP'EVENT AND CP='0' THEN A_TEMP<=REG_A; B_TEMP<=REG_B; END IF;
    IF CP='1' THEN A<=REG_A; B<=REG_B; ELSE A<=A_TEMP; B<=B_TEMP; END IF;
END PROCESS;

PROCESS(CP)      --选择写入寄存器组的数据, 完成写入操作
BEGIN
    CASE I8_6 IS      --选择写入的数据
        WHEN "010" OR "011" => REG_IN<=F;           --B<-F
        WHEN "100" OR "101" => REG_IN<=RAM3_ & F(3 DOWNT0 1); RAM0<=F(0); RAM3_<='Z'; --B<-F/2
        WHEN "110" OR "111" => REG_IN<=F(2 DOWNT0 0) & RAM0_; RAM3<=F(3); RAM0_<='Z'; --B<-2F
        WHEN OTHERS=>NULL;
    END CASE;
    IF CP='0' THEN      --如果REGs 允许写, 则在时钟的低电平期间完成写入
        IF REG_W='1' THEN REG_ARRAY(B_ADDR)<=REG_IN; END IF;
    END IF;
END PROCESS;

```



WITH I5_3 SELECT F --选择ALU的运算功能并完成运算

R+S+CIN WHEN "000",
S-R-CIN WHEN "001",
R-S-CIN WHEN "010",
R OR S WHEN "011",
R AND S WHEN "100",
NOT(R) AND S WHEN "101",
R XOR S WHEN "110",
NOT(R XOR S) WHEN "111",
(OTHERS => 'Z') WHEN OTHERS;

PROCESS Flag_bit(CP) --产生ALU运算结果的标志位信息

CASE I5_3 IS --只有加减运算影响进位输出 Cy 和溢出 Over 信号

WHEN "000"=>Cy <=(S(3) and R(3)) or(R(3) and not F(3))or (not F(3) and S(3)); --加法运算

Over<=(S(3) and R(3) and not F(3)) or (not S(3) and not R(3) and F(3));

WHEN "001"=>Cy <= (S(3)and not R(3)) or (not R(3)and not F(3))or (not F(3)and S(3)); --减法运算

Over<= (S(3)and not R(3)and not F(3)) or (not S(3)and R(3)and F(3));

WHEN "010"=>Cy <= (R(3)and not S(3)) or (not S(3)and not F(3))or (not F(3)and R(3)); --减法运算

Over<= (R(3)and not S(3)and not F(3)) or (not R(3)and S(3)and F(3));

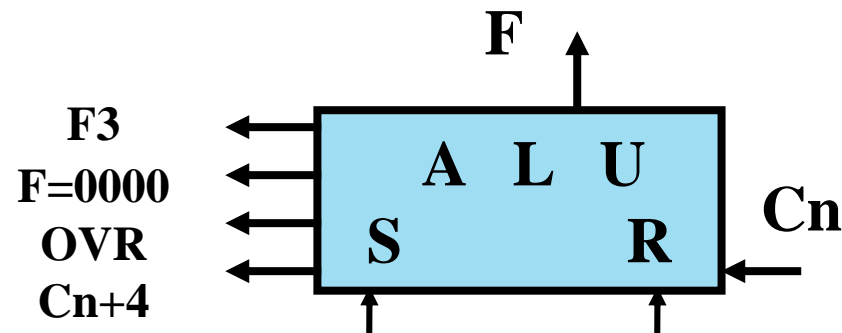
WHEN OTHERS=> null;;

END CASE;

Sign<=F(3); --结果符号位的值 Sign

IF F="0000" THEN Zero<='1'; ELSE Zero<='0'; END IF; --结果为零标志 Zero

END PROCESS;



PROCESS (CP,I2_0,I8_6) --选择ALU的输入数据来源和计算结果处理方案

BEGIN

CASE I2_0 IS --确定送到ALU的2路输入数据的来源

WHEN "000" => MUL_R_SEL<="01"; MUL_S_SEL<="11"; -- A->R, Q->S

WHEN "001" => MUL_R_SEL<="01"; MUL_S_SEL<="10"; -- A->R, B->S

.....

WHEN OTHERS => NULL;

END CASE;

CASE I8_6 IS --确定对运算结果是否保存、保存到哪个寄存器、运算器输出的内容

WHEN "000" => REG_W<='0'; Q_W<='1'; Y<=F; --F->Q

WHEN "001" => REG_W<='0'; Q_W<='0'; Y<=F;

.....

WHEN OTHERS=>NULL;

END CASE;

END PROCESS;

WITH MUL_R_SEL SELECT R --选择ALU的R输入端的数据来源

A WHEN "01",

D WHEN "10",

"0000" WHEN OTHERS;

WITH MUL_S_SEL SELECT S --选择ALU的S输入端的数据来源

A WHEN "01",

B WHEN "10",

Q WHEN "11", "0000" WHEN OTHERS;



二选一

三选一

二选一

三选一

三选一

小结



- ✚ 运算器基本组成
- ✚ 运算器的基本设计过程
- ✚ 运算器Am2901
 - ▣ 4位运算器
 - ▣ 8种运算功能
 - ▣ 8种数据来源组合
 - ▣ 8种数据输出方式
 - ▣ VHDL方式实现举例

阅读和思考



❖ 实验分组：

- ❖ 已在网络学堂发布

❖ 阅读

- ❖ Am2901的有关材料
- ❖ 《计算机硬件实验教程》 VHDL 一章

❖ 思考

- ❖ 用VHDL语言实现完整的Am2901.

国庆节快乐



清华大学
Tsinghua University

