计算机组成原理

第十五讲

刘松波

哈工大计算学部

模式识别与智能系统研究中心

5.6 DMA方式

- 一、DMA方式的特点
  - 1、DMA和程序中断方式的数据通路
  - 2、DMA与主存交换数据的三种方式
    - 停止CPU访问主存、周期挪用、DMA与CPU交替访问
- 二、DMA接口的功能和组成
  - 1、DMA接口的功能
  - 2、DMA接口的组成
- 三、DMA的工作过程
  - 1、DMA的传送过程
    - 预处理、DMA传送过程示意、数据的输入和输出过程
  - 2、DMA接口与系统的连接方式
  - 3、DMA方式与程序中断方式的比较

二、DMA 接口的功能和组成 5.6

1. DMA 接口功能

(1) 向 CPU 申请 DMA 传送

(2) 处理总线 控制权的转交

(3) 管理 系统总线、控制 数据传送

(4) 确定 数据传送的 首地址和长度

修正 传送过程中的数据 地址 和 长度

(5) DMA 传送结束时，给出操作完成信号

三、DMA 的工作过程

1. DMA 传送过程

预处理、数据传送、后处理

(1) 预处理

通过几条输入输出指令预置如下信息

• 通知 DMA 控制逻辑传送方向（入/出）

• 设备地址 ⟶ DMA 的 DAR

• 主存地址 ⟶ DMA 的 AR

• 传送字数 ⟶ DMA 的 WC

(2) DMA 传送过程示意

CPU

预处理：
主存起始地址 ⟶ DMA
设备地址 ⟶ DMA
传送数据个数 ⟶ DMA
启动设备

↓

数据传送：
继续执行主程序
同时完成一批数据传送

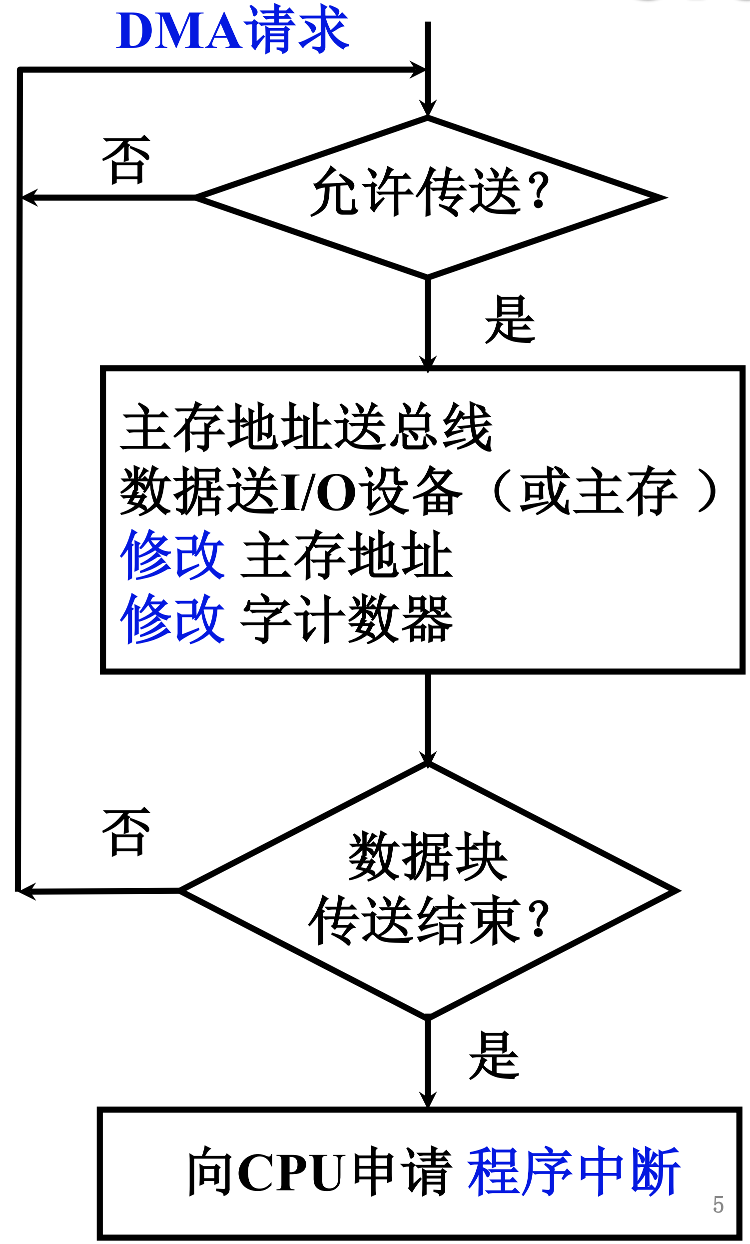
↓

后处理：
中断服务程序
做 DMA 结束处理

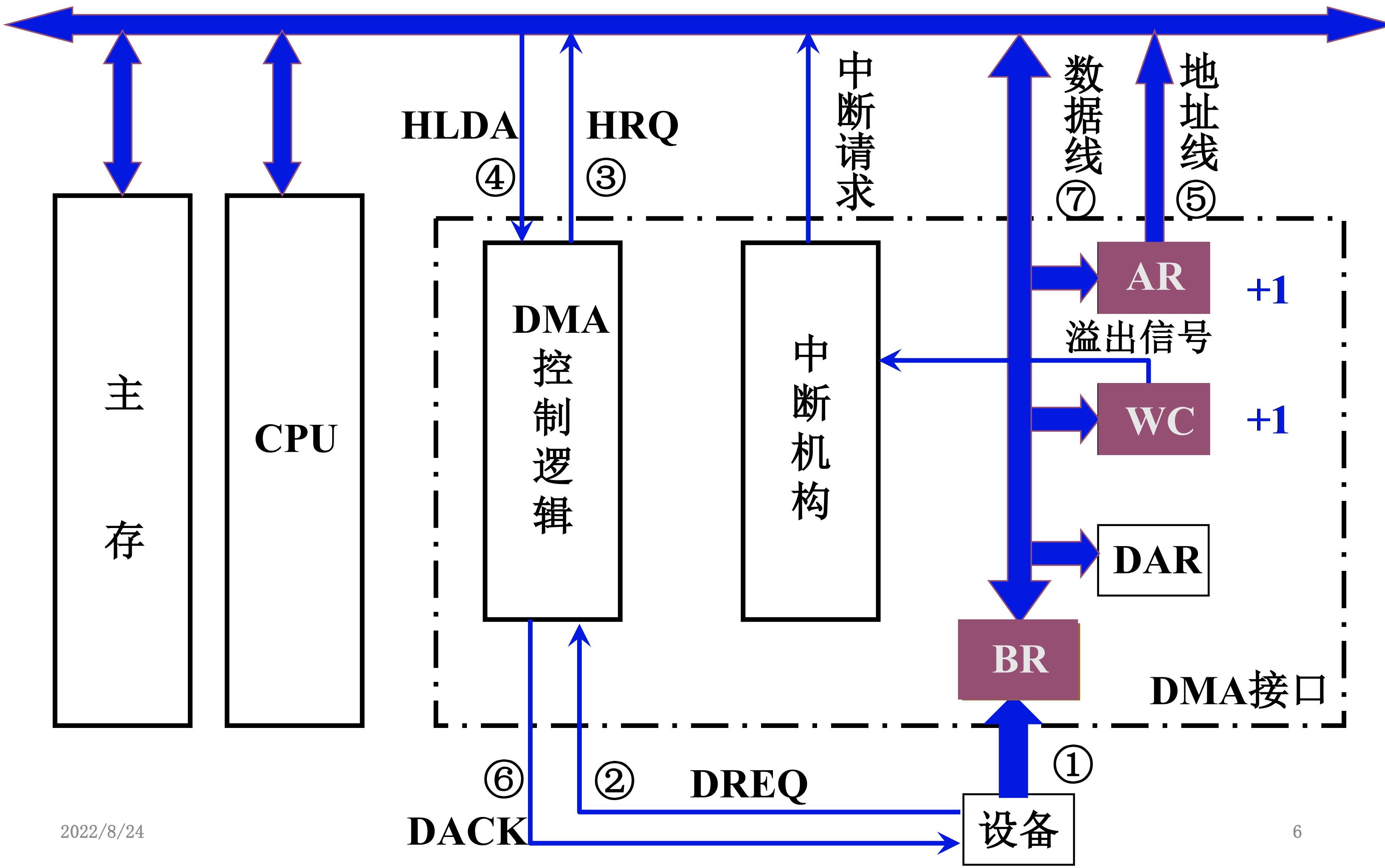
↓

继续执行主程序

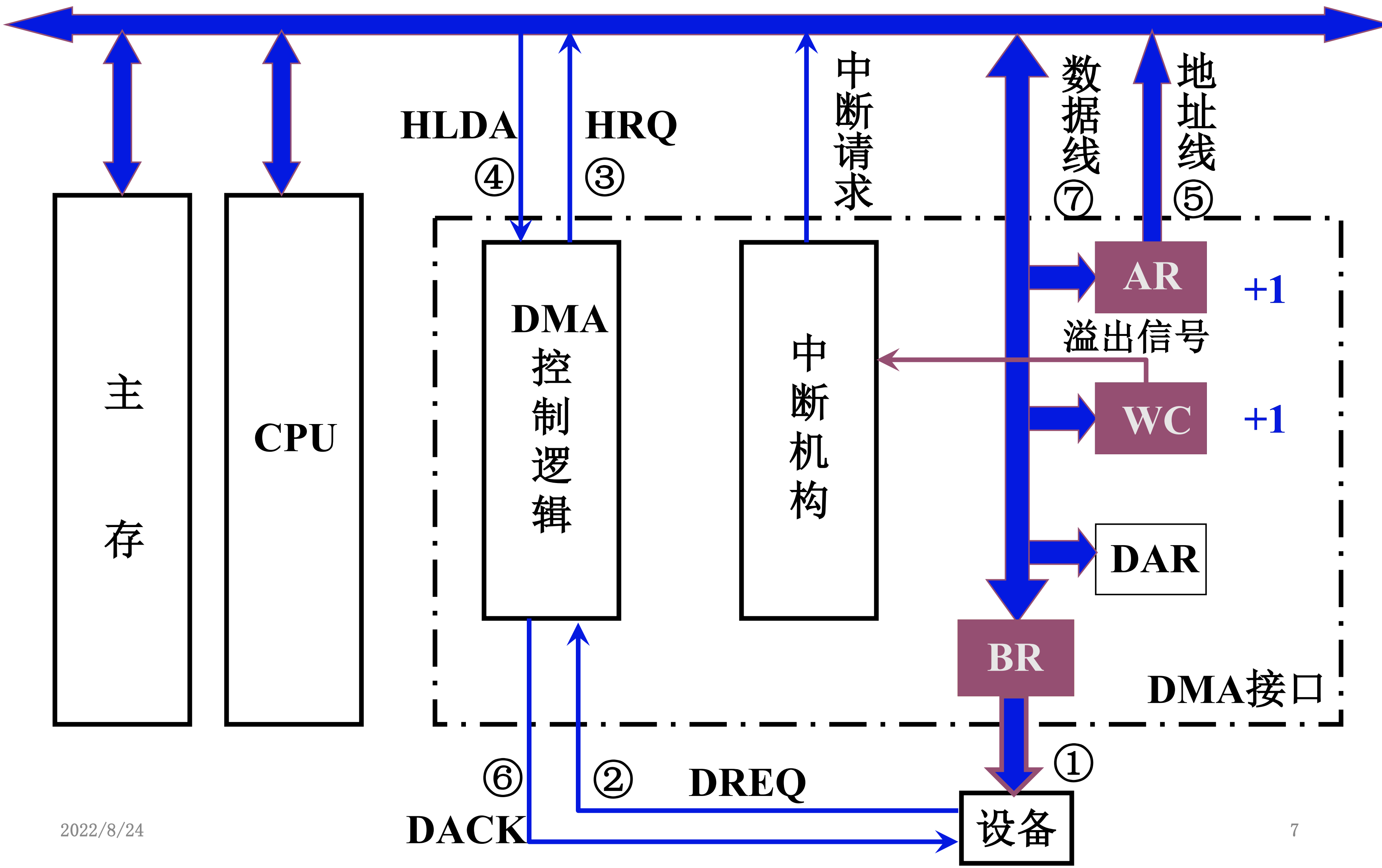
数据传送



(3) 数据传送过程（输入） 5.6



(4) 数据传送过程（输出） 5.6



(5) 后处理

校验送入主存的数是否正确

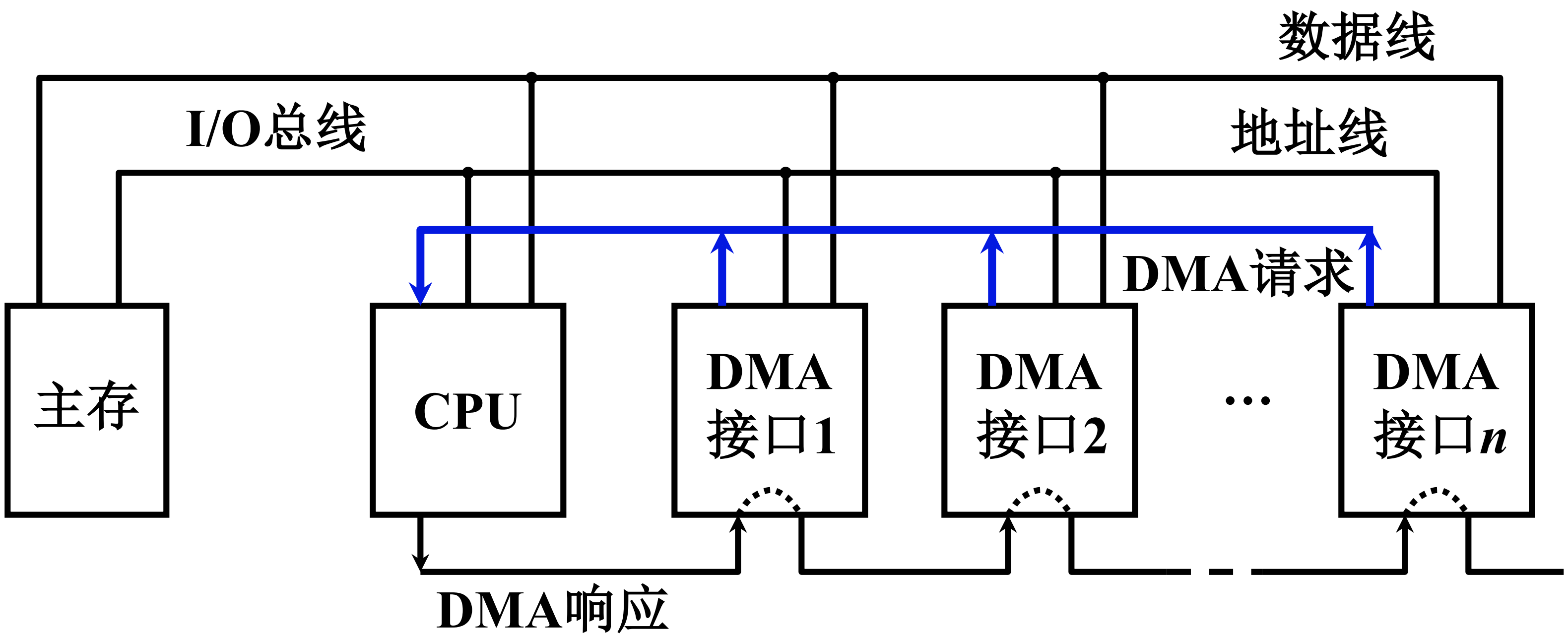
是否继续用 DMA

测试传送过程是否正确，错则转诊断程序

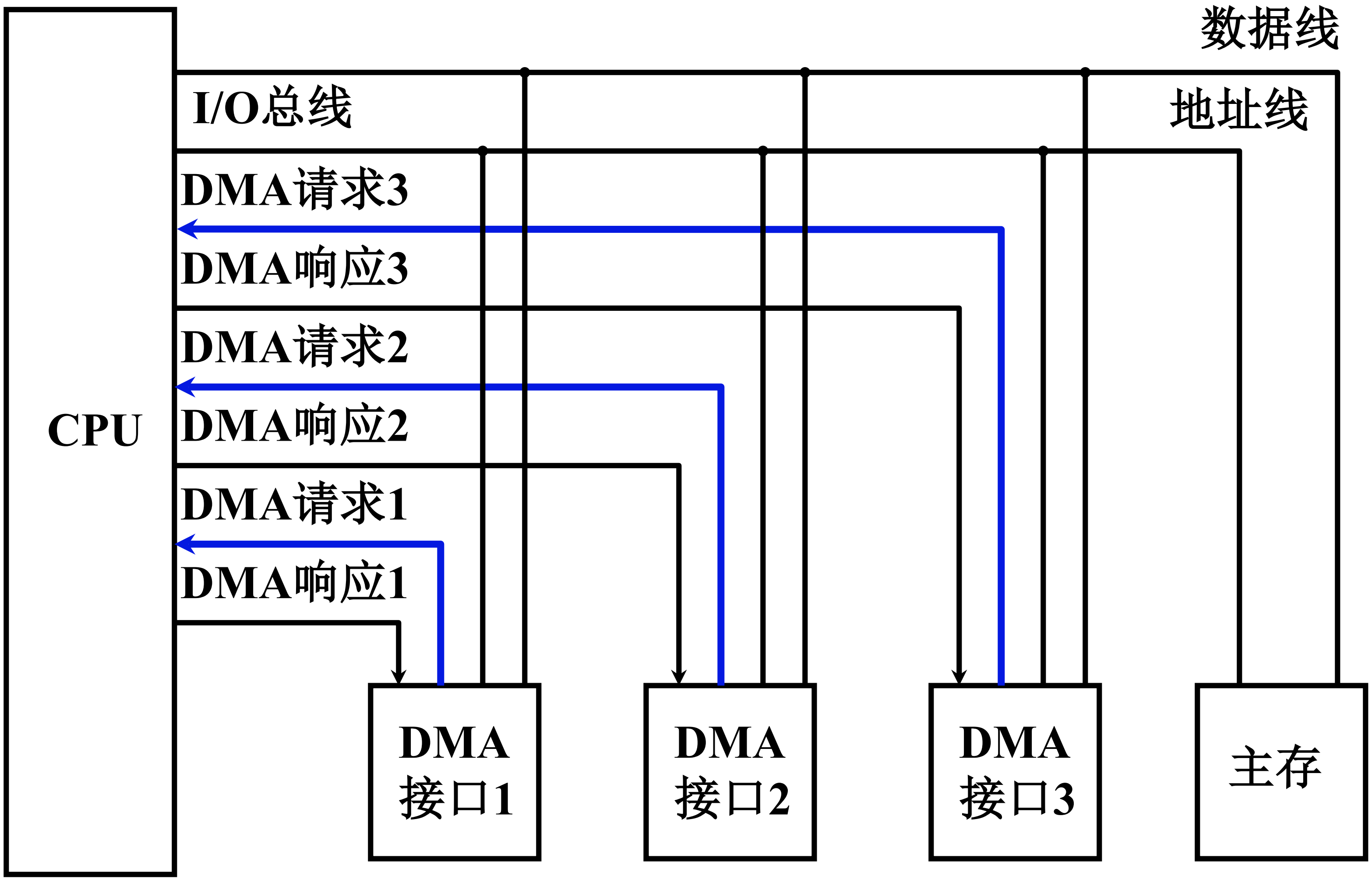
由中断服务程序完成

2. DMA 接口与系统的连接方式

(1) 具有公共请求线的 DMA 请求



(2) 独立的 DMA 请求

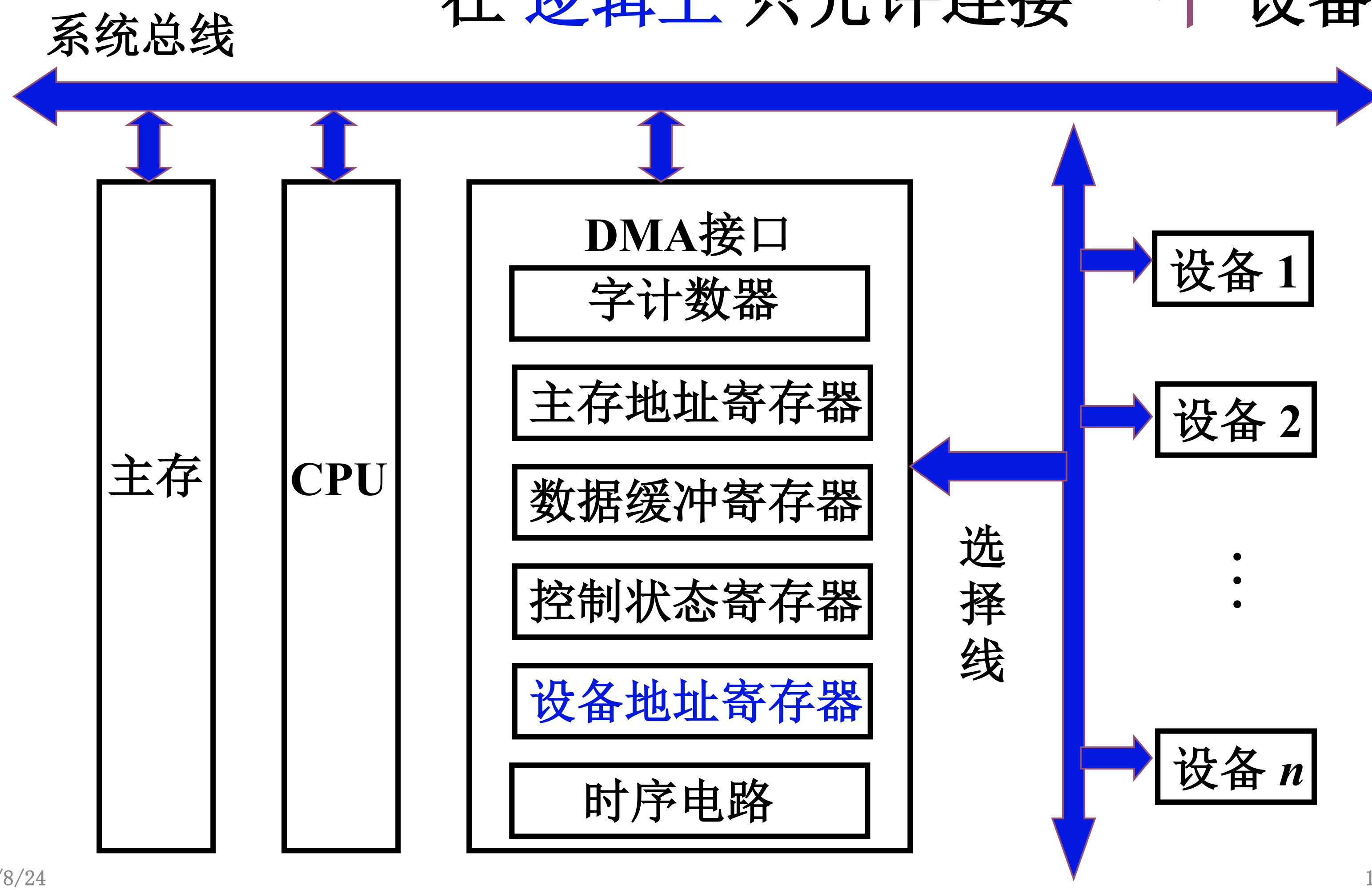

数据线
I/O总线
地址线
DMA请求3
DMA响应3
DMA请求2
CPU
DMA响应2
DMA请求1
DMA响应1
DMA
接口1
DMA
接口2
DMA
接口3
主存

3. DMA 方式与程序中断方式的比较 5.6

	中断方式	DMA 方式
(1) 数据传送	程序	硬件
(2) 响应时间	指令执行结束	存取周期结束
(3) 处理异常情况	能	不能
(4) 中断请求	传送数据	后处理
(5) 优先级	低	高

四、DMA 接口的类型

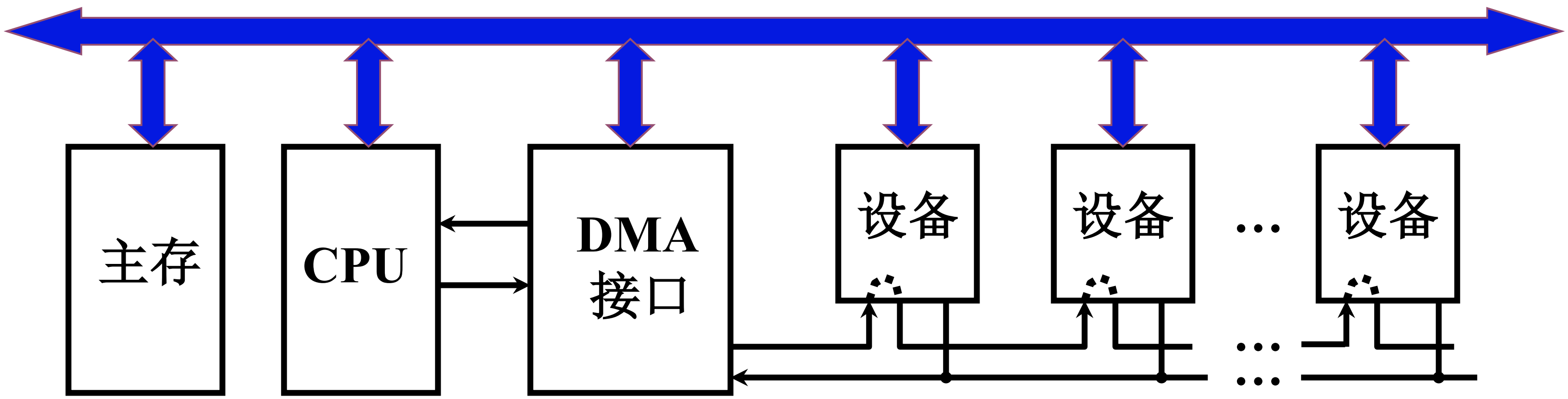
1. 选择型　　在 物理上 连接 多个 设备
在 逻辑上 只允许连接 一个 设备



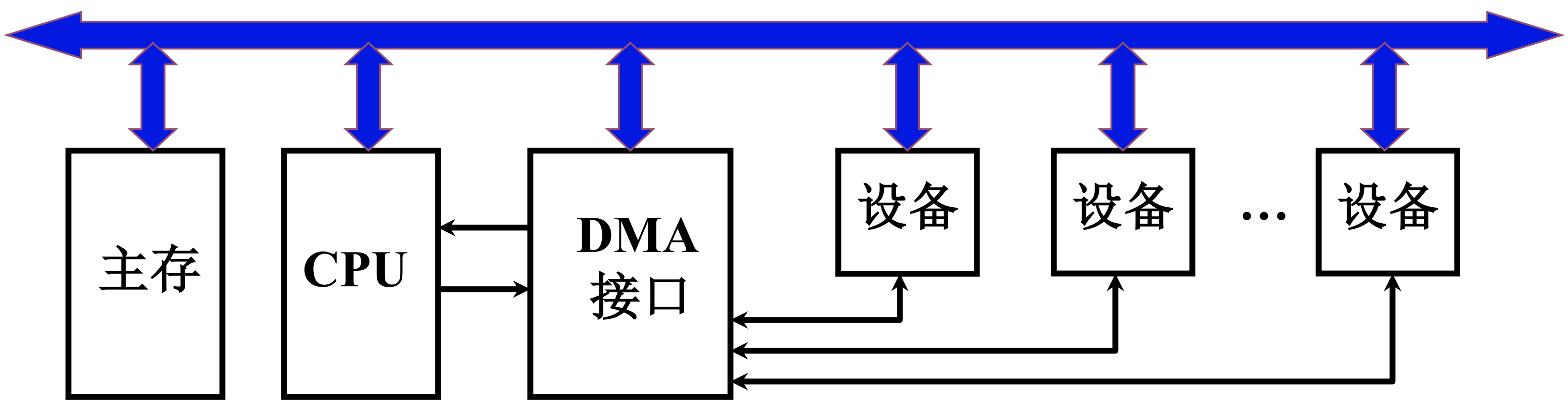
2. 多路型 在 物理上 连接 多个 设备

在 逻辑上 允许连接 多个 设备同时工作

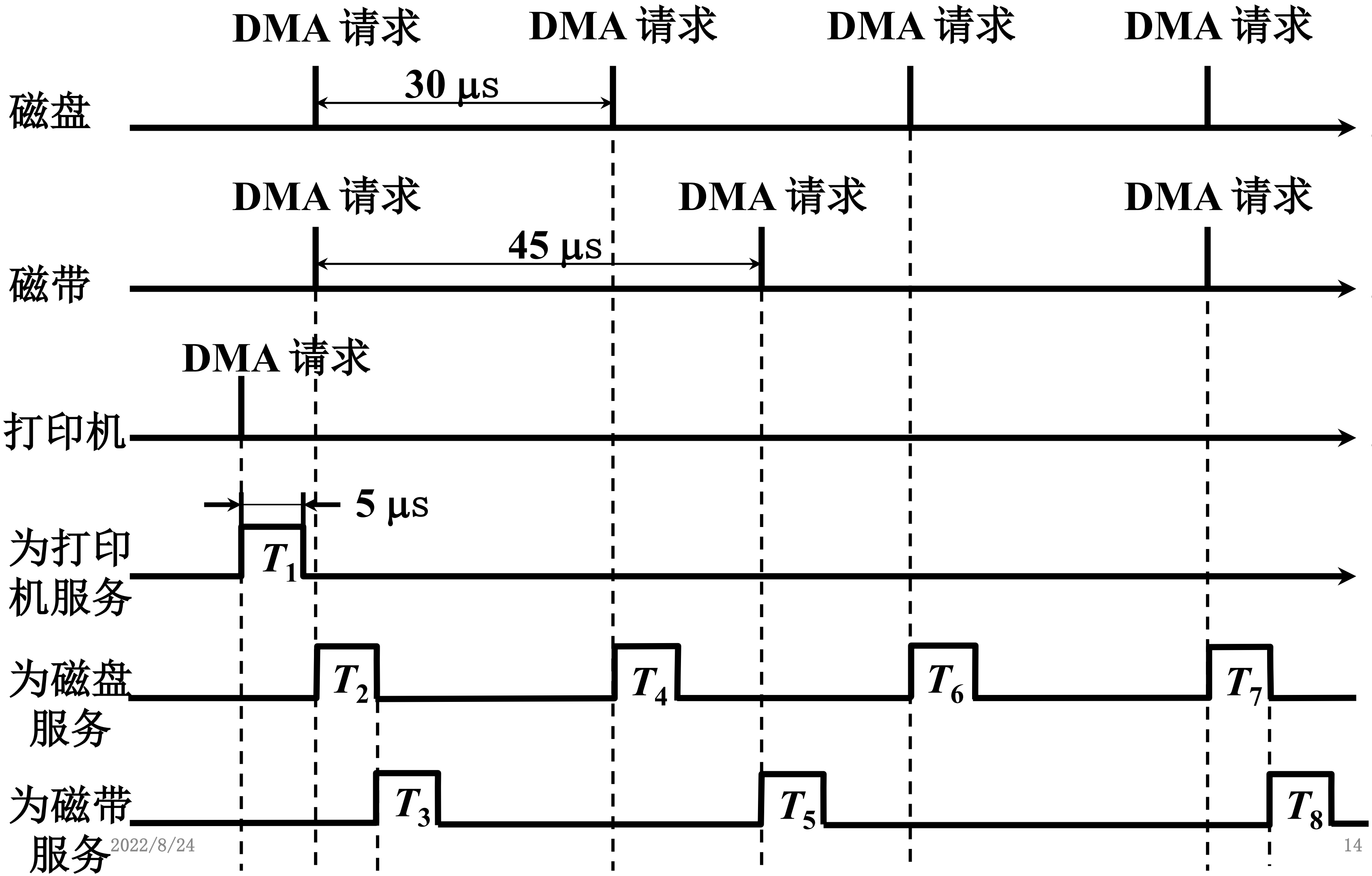
链式



独立请求式



3. 多路型 DMA 接口的工作原理



第 6 章　计算机的运算方法

6.1 无符号数和有符号数

6.2 数的定点表示和浮点表示

6.3 定点运算

6.4 浮点四则运算

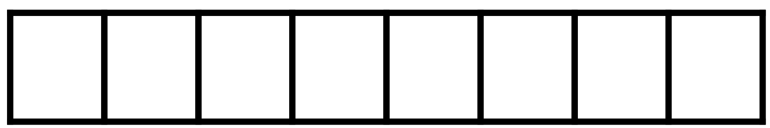
6.5 算术逻辑单元

6.1 无符号数和有符号数

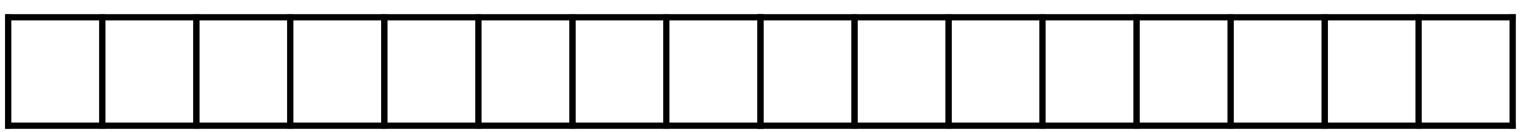
一、无符号数

寄存器的位数

反映无符号数的表示范围



8 位　　　　　　0 ~ 255



16 位　　　　　0 ~ 65535

二、有符号数

1. 机器数与真值

真值	机器数	
带符号的数	符号数字化的数	
+ 0.1011	0 | 1011	小数点的位置
– 0.1011	1 | 1011	小数点的位置
+ 1100	0 | 1100	小数点的位置
– 1100	1 | 1100	小数点的位置

2. 原码表示法

(1) 定义

整数

$$[x]_{原} = \begin{cases} 0,\ x & 2^n > x \geq 0 \\ 2^n - x & 0 \geq x > -2^n \end{cases}$$

x 为真值　　　n 为整数的位数

如　$x = +1110$　　　$[x]_{原} = 0\,,1110$

用 **逗号** 将符号位和数值部分隔开

$x = -1110$　　　$[x]_{原} = 2^4 + 1110 = 1\,,1110$

带符号的绝对值表示

小数

$$[x]_{原} = \begin{cases} x & 1 > x \geq 0 \\ 1 - x & 0 \geq x > -1 \end{cases}$$

x 为真值

如

$x = +0.1101$ $\quad [x]_{原} = 0.1101$

用 小数点 将符号位和数值部分隔开

$x = -0.1101$ $\quad [x]_{原} = 1 - (-0.1101) = 1.1101$

$x = +0.1000000$ $\quad [x]_{原} = 0.1000000$

用 小数点 将符号位和数值部分隔开

$x = -0.1000000$ $\quad [x]_{原} = 1 - (-0.1000000) = 1.1000000$

(2) 举例

6.1

例 6.1 已知 $[x]_{原} = 1.0011$ 求 x -0.0011

解：由定义得

$$x = 1 - [x]_{原} = 1 - 1.0011 = -0.0011$$

例 6.2 已知 $[x]_{原} = 1,1100$ 求 x -1100

解：由定义得

$$x = 2^4 - [x]_{原} = 10000 - 1,1100 = -1100$$

例 6.3　已知 $[x]_{原} = 0.1101$　求 x

解：根据 定义 $\because [x]_{原} = 0.1101$

$\therefore \quad x = +0.1101$

例 6.4　求 $x = 0$ 的原码

解：设 $x = +0.0000$　　$[+0.0000]_{原} = 0.0000$

$x = -0.0000$　　$[-0.0000]_{原} = 1.0000$

同理，对于整数　　$[+0]_{原} = 0,0000$

$[-0]_{原} = 1,0000$

$\therefore \quad [+0]_{原} \neq [-0]_{原}$

原码的特点：简单、直观 6.1

但是用原码作加法时，会出现如下问题：

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

能否 只作加法？

找到一个与负数等价的正数 来代替这个负数

就可使 减 ⟶ 加

3. 补码表示法

(1) 补的概念

- 时钟

逆时针

$$\begin{array}{r} 6 \\ -\ 3 \\ \hline 3 \end{array}$$

顺时针

$$\begin{array}{r} 6 \\ +\ 9 \\ \hline 15 \\ -\ 12 \\ \hline 3 \end{array}$$

时钟以12为模

可见 -3 可用 $+9$ 代替 减法 ⟶ 加法

称 $+9$ 是 -3 以 12 为模的 补数

记作 $-3 \equiv +9 \pmod{12}$

同理 $-4 \equiv +8 \pmod{12}$

$-5 \equiv +7 \pmod{12}$

结论

- 一个负数加上 "模" 即得该负数的补数
- 一个正数和一个负数互为补数时
  它们绝对值之和即为 模 数
  - 计数器（模 16） 1011 ⟶ 0000 ?

$$\begin{array}{r} 1011 \\ -\ 1011 \\ \hline 0000 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 1011 \\ +\ 0101 \\ \hline \boxed{1}0000 \end{array}$$

自然去掉

可见 -1011 可用 $+0101$ 代替

记作 $-1011 \equiv +0101 \quad (\mathrm{mod}\ 2^4)$

同理 $-011 \equiv +101 \quad (\mathrm{mod}\ 2^3)$

$-0.1001 \equiv +1.0111 \quad (\mathrm{mod}\ 2)$

(2) 正数的补数即为其本身

6.1

两个互为补数的数 $-1011 \equiv +0101 \pmod{2^4}$

分别加上模 $+10000$　　$+10000$

结果仍互为补数 $+0101 \equiv +\boxed{1}0101$

丢掉

$\therefore +0101 \equiv +0101 \pmod{2^4}$

可见 $+0101 \rightarrow +0101$

? $\rightarrow -1011$

? $\boxed{0},0101 \longrightarrow +0101$

? $\boxed{1},0101 \longrightarrow -1011$

$2^{4+1} - 1011 = 100000$

-1011

$1,0101$

$\pmod{2^{4+1}}$

用 逗号 将符号位和数值部分隔开

(3) 补码定义

整数

$$[x]_{补} = \begin{cases} 0，x & 2^n > x \geq 0 \\ 2^{n+1} + x & 0 > x \geq -2^n \end{cases} \pmod{2^{n+1}}$$

x 为真值　　　　n 为整数的位数

如　$x = +1010$　　　　$x = -1011000$

$[x]_{补} = 0,1010$

用 逗号 将符号位和数值部分隔开

$$[x]_{补} = 2^{7+1} + (-1011000)$$
$$= 100000000$$
$$-\quad 1011000$$
$$1,0101000$$

小数

$$[x]_{补} = \begin{cases} x & 1 > x \geq 0 \\ 2 + x & 0 > x \geq -1 \pmod 2 \end{cases}$$

x 为真值

如 $x = +0.1110$　　　　$x = -0.1100000$

$[x]_{补} = 0.1110$

$$\begin{aligned}[x]_{补} &= 2 + (-0.1100000) \\ &= 10.0000000 \\ &\quad - 0.1100000 \\ &\overline{\quad 1.0100000} \end{aligned}$$

用 小数点 将符号位

和数值部分隔开

(4) 求补码的快捷方式

设 $x = -1010$ 时

则 $[x]_{补} = 2^{4+1} - 1010 = 11111 + 1 - 1010$

$$
\begin{array}{rr}
 = 100000 & = 11111 + 1 \\
 -1010 & -1010 \\
\hline
 = 1,0110 & \boxed{10101} + 1 \\
 & = 1,0110
\end{array}
$$

又 $[x]_{原} = \boxed{1,1010}$

当真值为 负 时，补码 可用 原码除符号位外每位取反，末位加 1 求得

(5) 举例

例 6.5　已知 $[x]_{补} = 0.0001$

求 x

解：由定义得　$x = +0.0001$

例 6.6　已知 $[x]_{补} = 1.0001$　　$[x]_{补} \xrightarrow{?} [x]_{原}$

求 x　　$[x]_{原} = 1.1111$

解：由定义得　　$\therefore x = -0.1111$

$$x = [x]_{补} - 2$$

$$= 1.0001 - 10.0000$$

$$= -0.1111$$

例 6.7　已知 $[x]_{补} = 1,1110$

求 x

解：　由定义得

$[x]_{补} \xrightarrow{?} [x]_{原}$

$x = [x]_{补} - 2^{4+1}$

$= 1,1110 - 100000$

$= -0010$

$[x]_{原} = 1,0010$

$\therefore x = -0010$

当真值为 负 时，原码 可用 补码除符号位外每位取反，末位加 1 求得

练习　求下列真值的补码　6.1

真值		$[x]_{补}$	$[x]_{原}$
$x = +70 = 1000110$		$0,1000110$	$0,1000110$
$x = -70 = -1000110$		$1,0111010$	$1,1000110$
$x = 0.1110$		0.1110	0.1110
$x = -0.1110$		1.0010	1.1110
$x = \boxed{0.0000}$	$[+0]_{补} = [-0]_{补}$	$\boxed{0.0000}$	0.0000
$x = \boxed{-0.0000}$		$\boxed{0.0000}$	1.0000
$x = -1.0000$		1.0000	不能表示

由小数补码定义

$$[x]_{补} = \begin{cases} x & 1 > x \geq 0 \\ 2 + x & 0 > x \geq -1 \pmod 2 \end{cases}$$

$$[-1]_{补} = 2 + x = 10.0000 - 1.0000 = 1.0000$$

4. 反码表示法

(1) 定义

整数

$$[x]_{反} = \begin{cases} 0，x & 2^n > x \geq 0 \\ (2^{n+1} - 1) + x & 0 \geq x > -2^n \ (\bmod 2^{n+1} - 1) \end{cases}$$

x 为真值　　　　n 为整数的位数

如　$x = +1101$　　　　$x = -1101$

$[x]_{反} = 0,1101$　　　　$[x]_{反} = (2^{4+1} - 1) - 1101$

$= 11111 - 1101$

$= 1,0010$

用 逗号 将符号位

和数值部分隔开

小数

$$[x]_{反} = \begin{cases} x & 1 > x \geq 0 \\ (2 - 2^{-n}) + x & 0 \geq x > -1 \ (\mathrm{mod}\ 2 - 2^{-n}) \end{cases}$$

x 为真值　　n 为小数的位数

如

$x = +0.1101$　　　　$x = -0.1010$

$[x]_{反} = \ 0.1101$　　　　$[x]_{反} = (2 - 2^{-4}) - 0.1010$

$= 1.1111 - 0.1010$

$= 1.0101$

用 小数点 将符号位

和数值部分隔开

(2) 举例

例6.8　已知 $[x]_{反} = 0,1110$　求 x

解：　由定义得　$x = +1110$

例6.9　已知 $[x]_{反} = 1,1110$　求 x

解：　由定义得　$x = [x]_{反} - (2^{4+1} - 1)$

$= 1,1110 - 11111$

$= -0001$

例 6.10　求 0 的反码

解：　设 $x = +0.0000$　　$[+0.0000]_{反} = 0.0000$

$x = -0.0000$　　$[-0.0000]_{反} = 1.1111$

同理，对于整数　$[+0]_{反} = 0,0000$　$[-0]_{反} = 1,1111$

$\therefore\ [+0]_{反} \neq [-0]_{反}$

三种机器数的小结

- 最高位为符号位，书写上用“,”（整数）或“.”（小数）将数值部分和符号位隔开
- 对于正数，原码＝补码＝反码
- 对于负数，符号位为 1，其数值部分
  原码除符号位外每位取反末位加 1 ⟶ 补码
  原码除符号位外每位取反 ⟶ 反码

例6.11　设机器数字长为 8 位（其中 1 位为符号位）对于整数，当其分别代表无符号数、原码、补码和反码时，对应的真值范围各为多少？

二进制代码	无符号数对应的真值	原码对应的真值	补码对应的真值	反码对应的真值
00000000	0	+0	±0	+0
00000001	1	+1	+1	+1
00000010	2	+2	+2	+2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
01111111	127	+127	+127	+127
10000000	128	-0	-128	-127
10000001	129	-1	-127	-126
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11111101	253	-125	-3	-2
11111110	254	-126	-2	-1
11111111	255	-127	-1	-0

例6.12 已知 $[y]_{补}$ 求$[-y]_{补}$

解： 设 $[y]_{补} = y_0 . y_1 y_2 \cdots y_n$

<I> $\boxed{[y]_{补} = 0. y_1 y_2 \cdots y_n}$

$[y]_{补}$连同符号位在内， 每位取反， 末位加 1

即得$[-y]_{补}$

$$\boxed{[-y]_{补} = 1.\overline{y_1}\,\overline{y_2} \cdots \overline{y_n} + 2^{-n}}$$

<II> $\boxed{[y]_{补} = 1. y_1 y_2 \cdots y_n}$

$[y]_{补}$连同符号位在内， 每位取反， 末位加 1

即得$[-y]_{补}$

$$\boxed{[-y]_{补} = 0.\overline{y_1}\,\overline{y_2} \cdots \overline{y_n} + 2^{-n}}$$

5. 移码表示法

补码表示很难直接判断其真值大小

如 十进制	二进制	补码	
$x = +21$	$+10101$	0,10101	错
$x = -21$	-10101	1,01011	大
$x = +31$	$+11111$	0,11111	错
$x = -31$	-11111	1,00001	大

$x + 2^5$

$+10101 + 100000 = 110101$ 大 正确

$-10101 + 100000 = 001011$

$+11111 + 100000 = 111111$ 大 正确

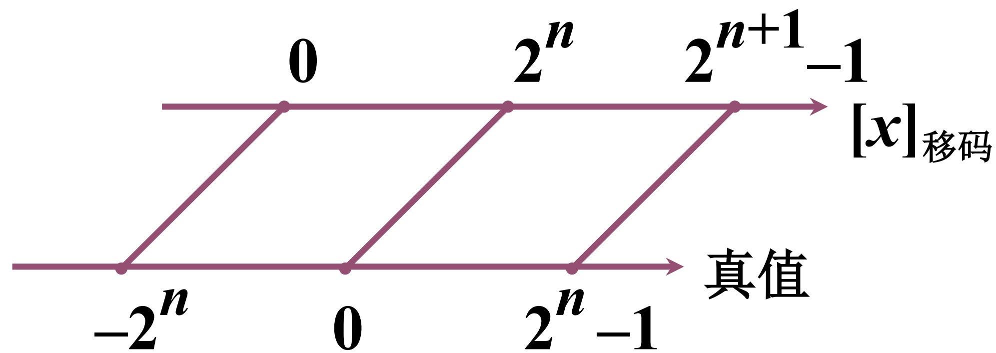
$-11111 + 100000 = 000001$

(1) 移码定义

$$[x]_{移} = 2^n + x \quad (2^n > x \geq -2^n)$$

x 为真值，n 为 整数的位数

移码在数轴上的表示



如 $x = 10100$

$$[x]_{移} = 2^5 + 10100 = 1,10100$$

$x = -10100$

$$[x]_{移} = 2^5 - 10100 = 0,01100$$

用 逗号 将符号位和数值部分隔开

(2) 移码和补码的比较

设 $x = +1100100$

$[x]_{移} = 2^7 + 1100100 = 1,1100100$

$[x]_{补} = 0,1100100$

设 $x = -1100100$

$[x]_{移} = 2^7 - 1100100 = 0,0011100$

$[x]_{补} = 1,0011100$

补码与移码只差一个符号位

(3) 真值、补码和移码的对照表

真值 x (n=5)	$[x]_{补}$	$[x]_{移}$	$[x]_{移}$对应的十进制整数
- 1 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0
- 1 1 1 1 1	1 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 1	1
- 1 1 1 1 0	1 0 0 0 1 0	0 0 0 0 1 0	2
⋮	⋮	⋮	⋮
- 0 0 0 0 1	1 1 1 1 1 1	0 1 1 1 1 1	31
± 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0	32
+ 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 1	1 0 0 0 0 1	33
+ 0 0 0 1 0	0 0 0 0 1 0	1 0 0 0 1 0	34
⋮	⋮	⋮	⋮
+ 1 1 1 1 0	0 1 1 1 1 0	1 1 1 1 1 0	62
+ 1 1 1 1 1	0 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1	63

(4) 移码的特点

- 当 $x = 0$ 时 $[+0]_{移} = 2^5 + 0 = 1,00000$

  $[-0]_{移} = 2^5 - 0 = 1,00000$

  $\therefore [+0]_{移} = [-0]_{移}$

- 当 $n = 5$ 时 最小的真值为 $-2^5 = -100000$

  $[-100000]_{移} = 2^5 - 100000 = 000000$

  可见，最小真值的移码为全 0

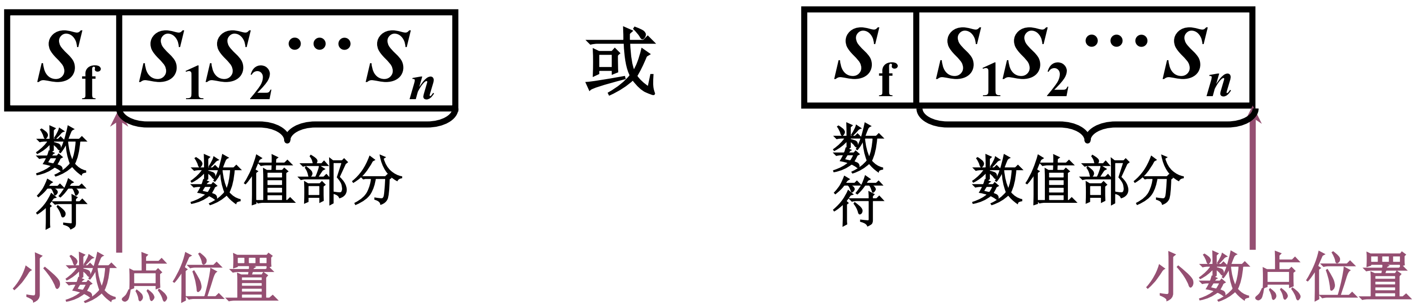
  用移码表示浮点数的阶码

  能方便地判断浮点数的阶码大小

6.2 数的定点表示和浮点表示

小数点按约定方式标出

一、定点表示



定点机	小数定点机	整数定点机
原码	$-(1-2^{-n}) \sim +(1-2^{-n})$	$-(2^n-1) \sim +(2^n-1)$
补码	$-1 \sim +(1-2^{-n})$	$-2^n \sim +(2^n-1)$
反码	$-(1-2^{-n}) \sim +(1-2^{-n})$	$-(2^n-1) \sim +(2^n-1)$

二、浮点表示 6.2

$N = S \times r^j$ 浮点数的一般形式

S 尾数 j 阶码 r 基数（基值）

计算机中 r 取 2、4、8、16 等

当 $r = 2$ $N = 11.0101$

✓ $= 0.110101 \times 2^{\boxed{10}}$ 规格化数 二进制表示

$= 1.10101 \times 2^{1}$

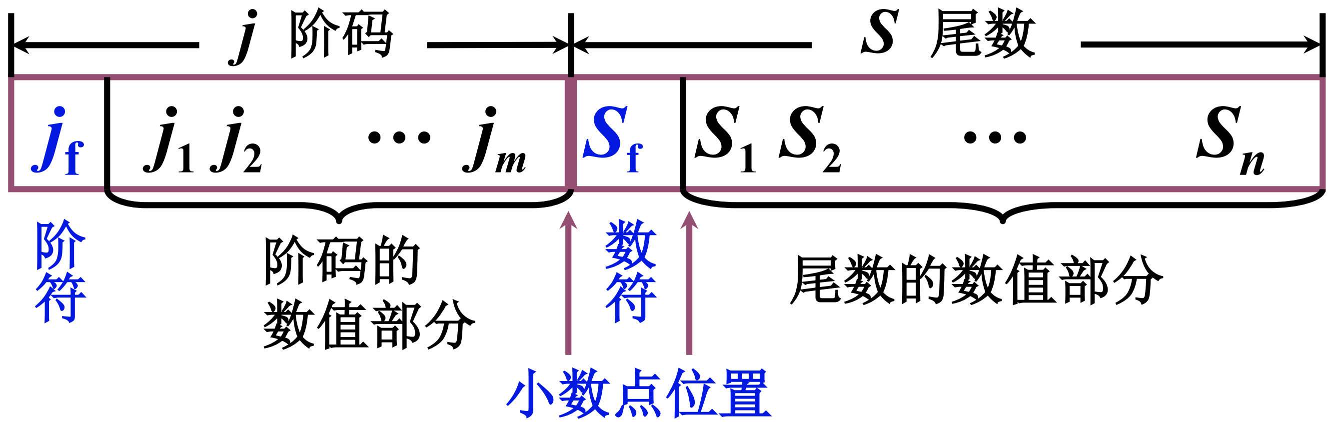
$= 1101.01 \times 2^{-10}$

✓ $= 0.00110101 \times 2^{100}$

计算机中 S 小数、可正可负

j 整数、可正可负

1. 浮点数的表示形式



S_f 代表浮点数的符号

n 其位数反映浮点数的精度

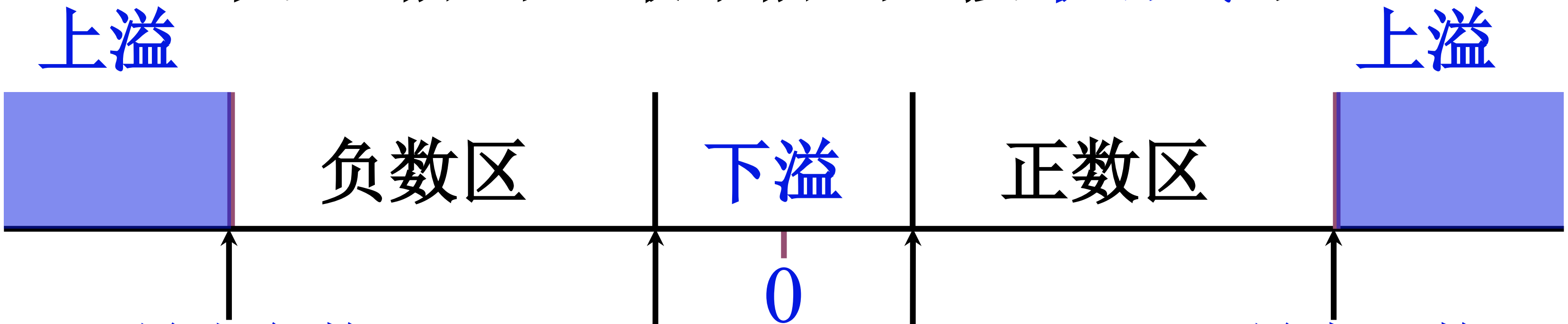
m 其位数反映浮点数的表示范围

j_f 和 m 共同表示小数点的实际位置

2. 浮点数的表示范围

上溢　阶码 > 最大阶码

下溢　阶码 < 最小阶码　按 机器零 处理



最小负数

$-2^{(2^m-1)} \times (1-2^{-n})$

$-2^{15} \times (1-2^{-10})$

最大负数

$-2^{-(2^m-1)} \times 2^{-n}$

$-2^{-15} \times 2^{-10}$

最小正数

$2^{-(2^m-1)} \times 2^{-n}$

$2^{-15} \times 2^{-10}$

最大正数

$2^{(2^m-1)} \times (1-2^{-n})$

$2^{15} \times (1-2^{-10})$

设 $m = 4$

$n = 10$