



计算机组织与体系结构

Computer Architectures

陆俊林

北京大学本科生主干基础课

2018.5.24

第十讲 中断和异常

本讲要点

首先介绍中断和异常，重点讲解CPU内部的异常，其次分析CPU外部的中断，并讲解中断控制器，然后分析定时与技术的需求，并讲解定时器，最后从系统的角度讲解中断和定时的功能。



主要内容

通过学习本课程
了解计算机的发展历程，理解计算机的组成原理，掌握计算机的设计方法



I 中断和异常

II 中断控制器

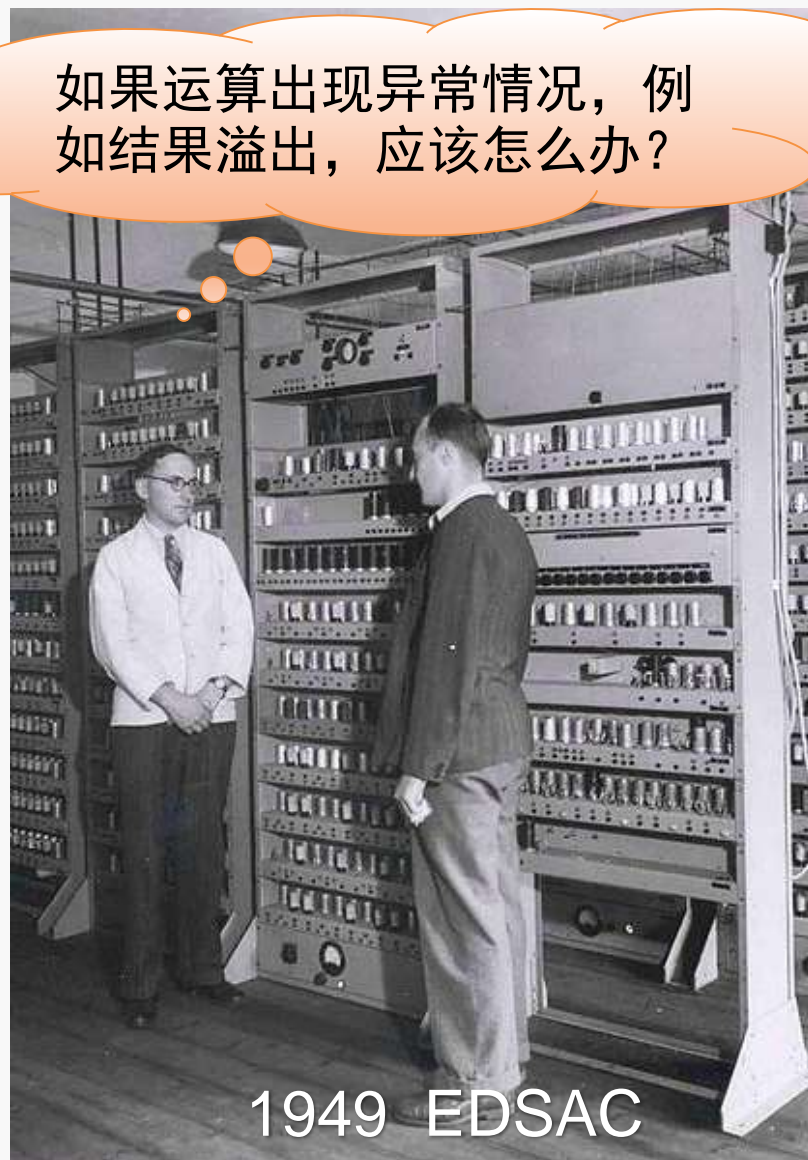
III 定时器

IV 系统中的中断和定时

早期的电子计算机

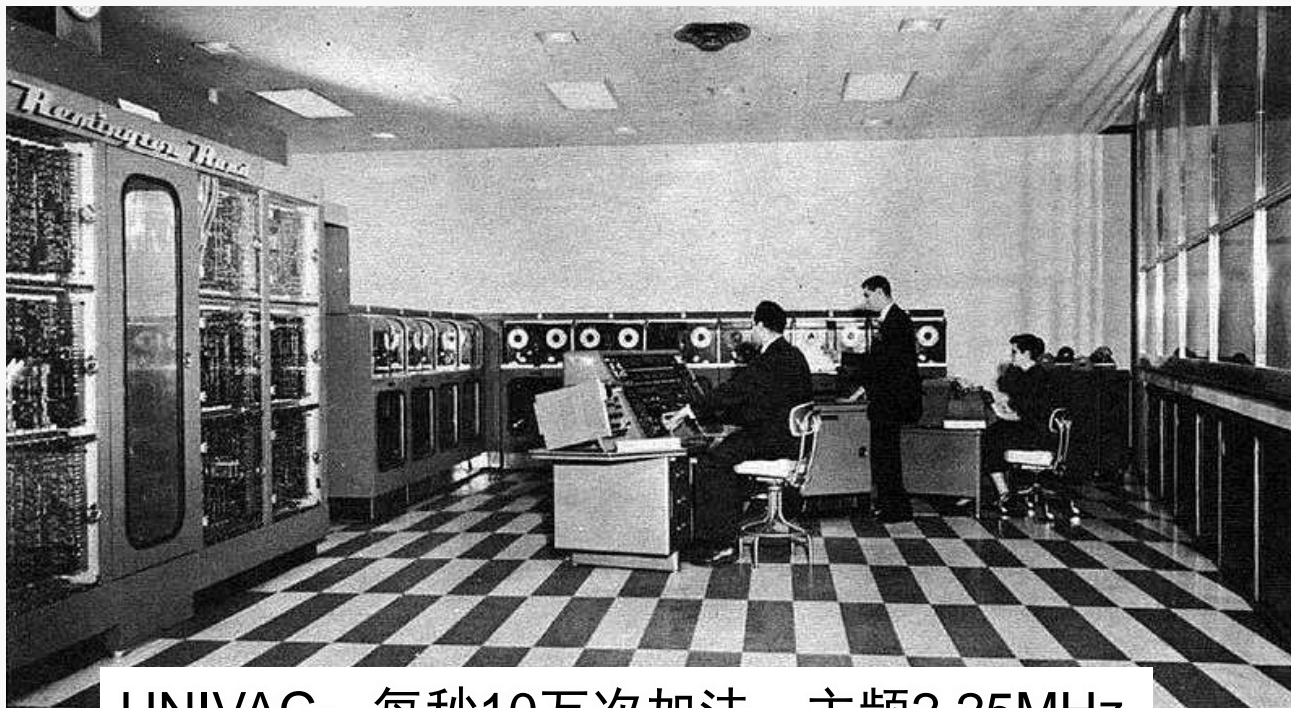


如果运算出现异常情况，例如结果溢出，应该怎么办？



异常处理的起源

- 第一个带有异常处理的系统：UNIVAC，1951年
 - 算术运算溢出时：转向地址0执行两条修复指令，或者停机



UNIVAC：每秒10万次加法，主频2.25MHz

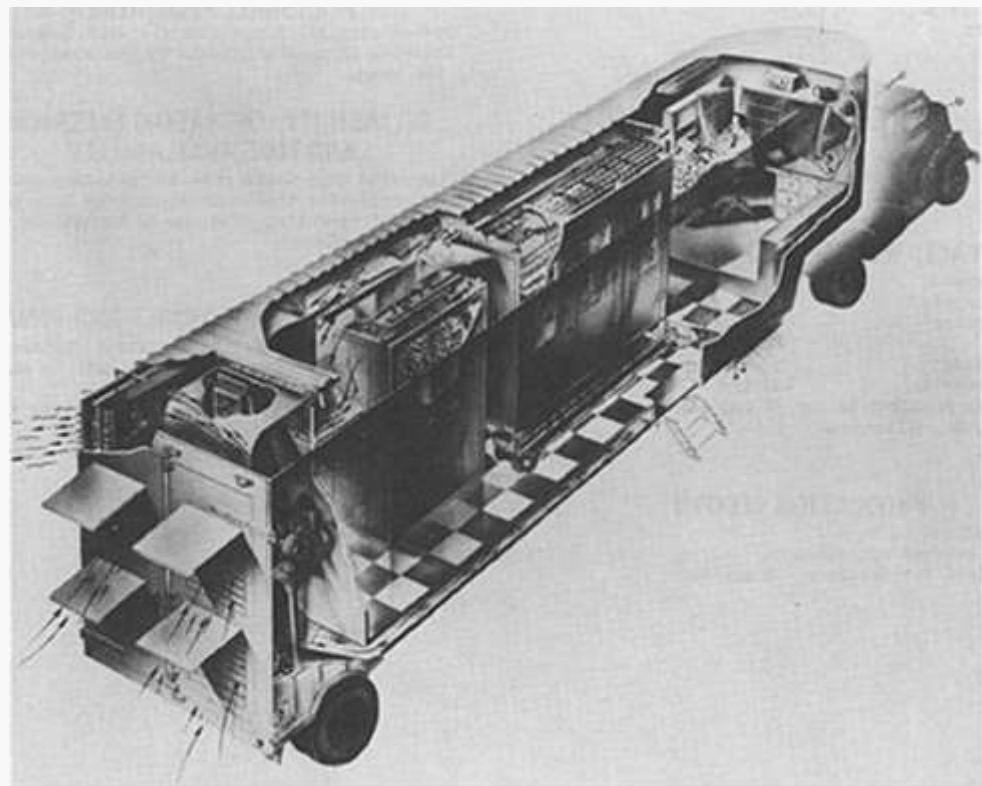
中断处理的起源

- 第一个带有外部中断的系统：DYSEAC，1954年
 - 有两个程序计数器（PC），根据I/O信号进行切换



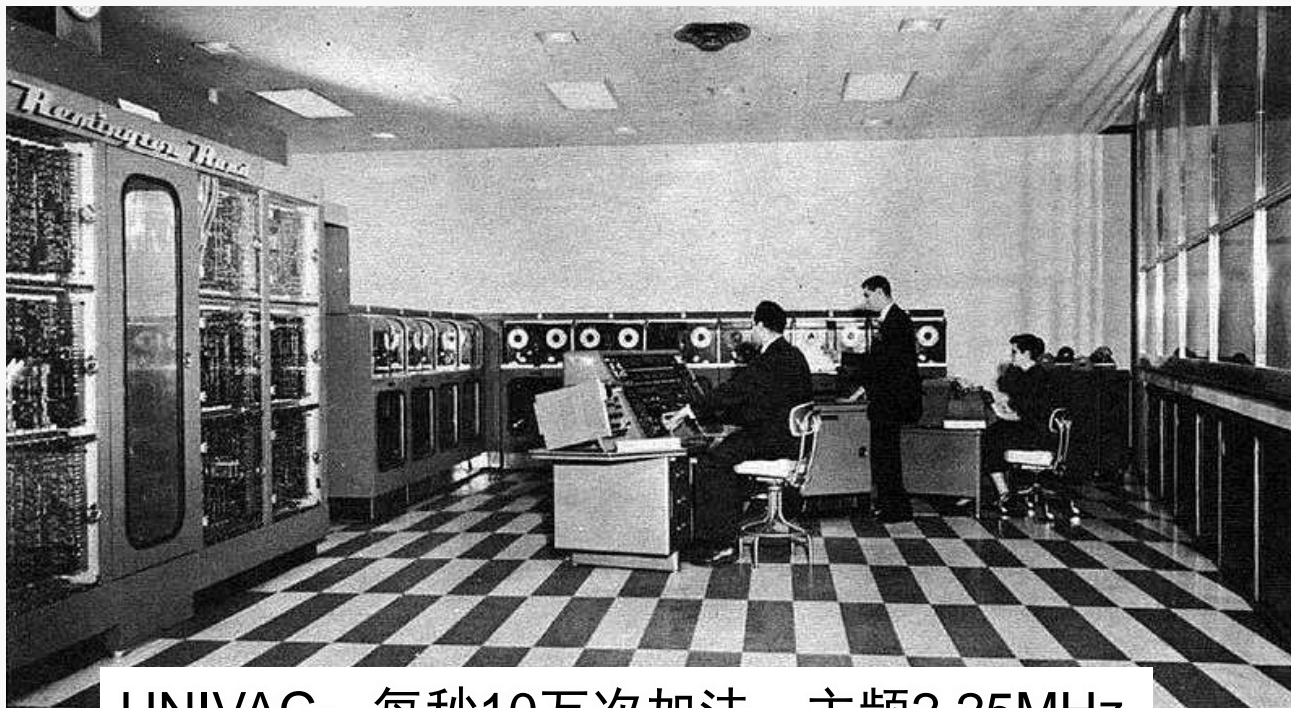
FIGURE 2.3. Van No. 1, containing the DYSEAC control center and computer including the memory memory.

DYSEAC：装在两个卡车拖车上，12吨+8吨



中断和异常处理的起源

- 第一个带有异常处理的系统：UNIVAC，1951年
 - 算术运算溢出时：转向地址0执行两条修复指令，或者停机
 - 1955年，UNIVAC 1103 增加了外部中断，用于风洞数据的实时收集



UNIVAC：每秒10万次加法，主频2.25MHz

CPU遇到的“事件”



1. 在程序运行时，系统外部、内部或现行程序本身出现需要特殊处理的“事件”
2. CPU立即强行中止现行程序的运行，改变机器的工作状态并启动相应的程序来处理这些“事件”
3. 处理完成后，CPU恢复原来的程序运行

这些“事件”被称为“中断”或“异常”

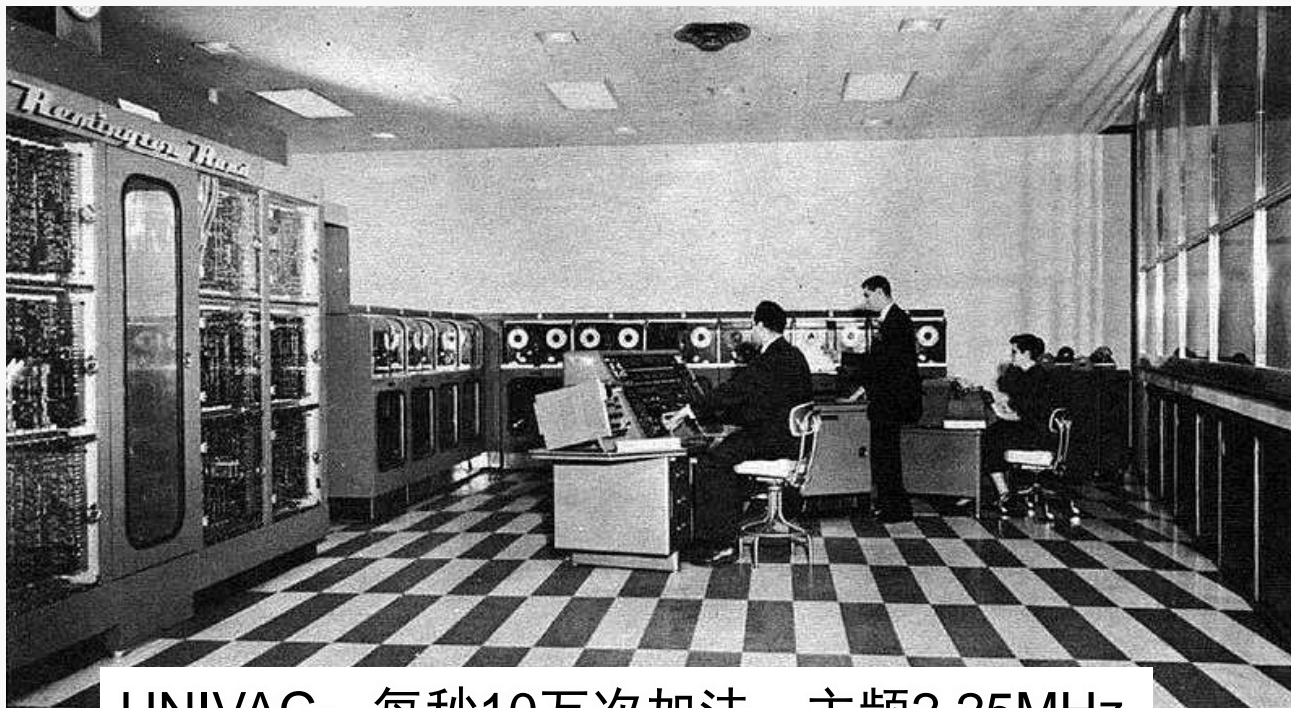
“事件” 的命名



常见的命名方式	一	二	三	四
外部事件	外部中断	硬件中断	中断	中断
内部事件	内部中断	软件中断	异常	异常
统称	中断 interrupt	中断 interrupt	中断 interrupt	异常 exception

异常处理的起源

- 第一个带有异常处理的系统：UNIVAC，1951年
 - 算术运算溢出时：**转向地址0执行两条修复指令**，或者停机
 - 1955年，UNIVAC 1103 增加了外部中断，用于风洞数据的实时收集

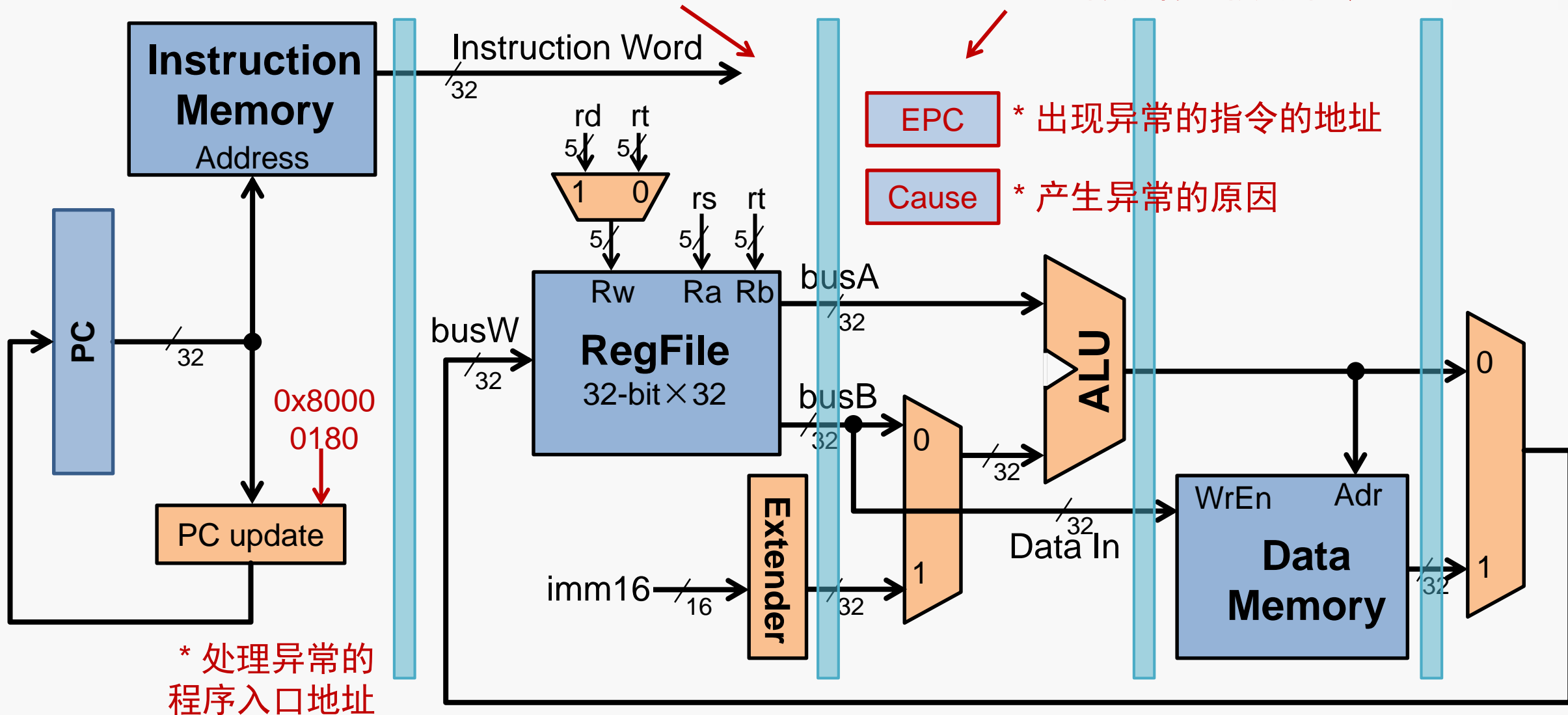


UNIVAC：每秒10万次加法，主频2.25MHz

处理异常的硬件修改（MIPS流水线简化示意图）

←----- 取指 -----> ←----- 译码 -----> ←----- 执行 -----> ←----- 访存 -----> ←----- 写回 ----->

* ID.Flush 清除译码阶段的指令 * EX.Flush 清除执行阶段的指令



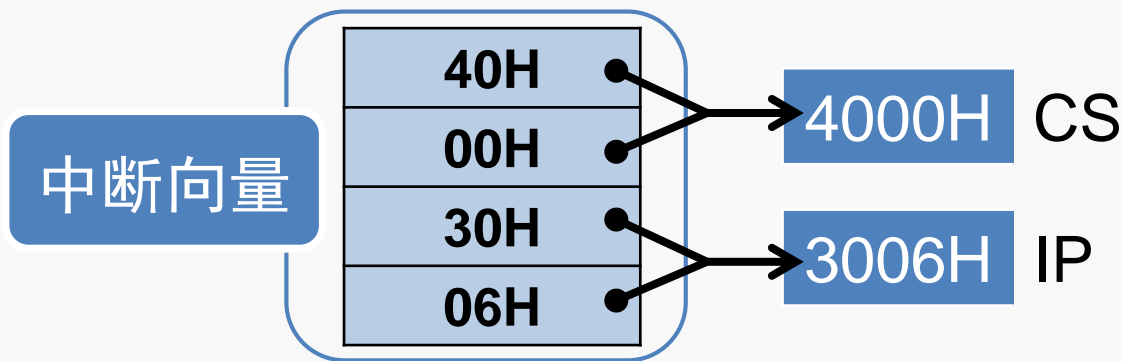
MIPS CPU的异常处理



- ④ 在EPC中保存出现异常的指令的地址
 - EPC: Exception Program Counter, 异常程序计数器
 - 需要将当前保存的指令地址-4
- ④ 清空流水线中之后的指令
- ④ 记录产生异常的原因
- ④ 把控制权转交给操作系统的特定地址
 - 转移到特定地址执行下一条指令

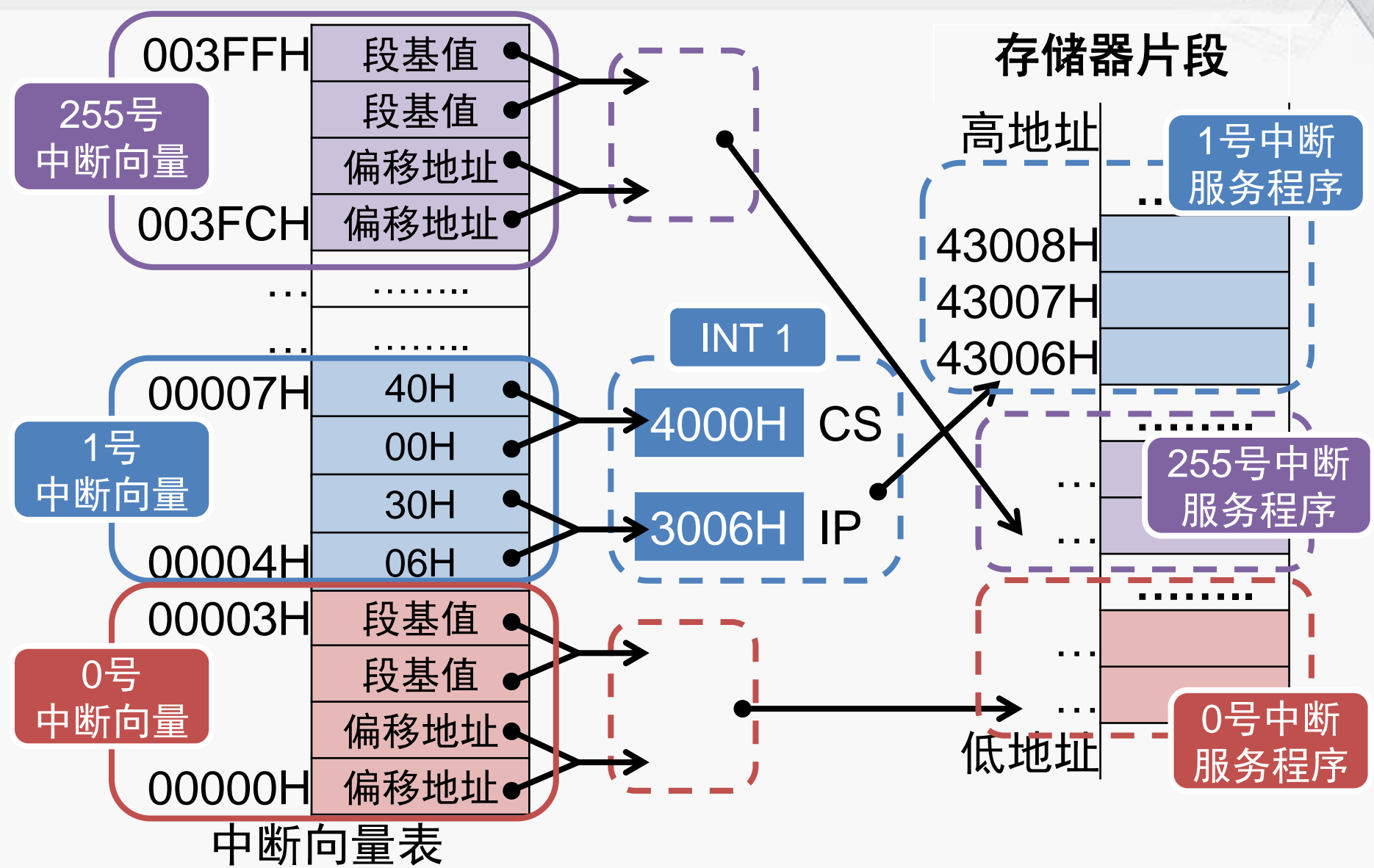
中断向量 (interrupt vector)

- 中断向量：中断服务程序的入口地址
- 每个中断类型对应一个中断向量（4字节）
 - 前两个字节单元存放中断服务程序入口地址的偏移量（IP），低字节在前，高字节在后
 - 后两个字节单元存放中断服务程序入口地址的段基值（CS），低字节在前，高字节在后

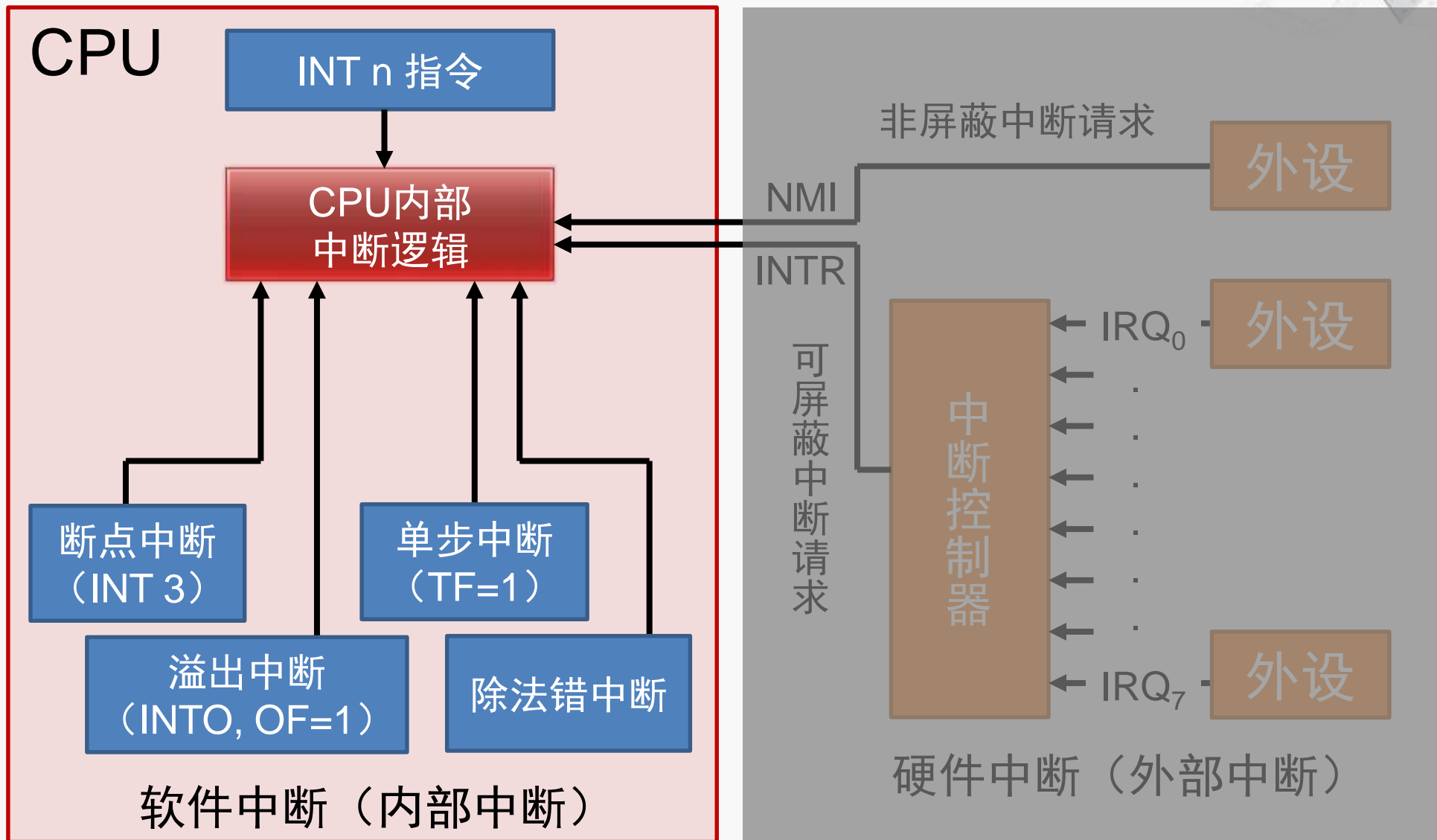


* Intel x86实模式示例

中断向量和中断服务程序



中断的检测（示例：x86系统）



8086的中断向量表



中断用途	类型号	说明
供用户定义的中断 (224个)	类型255	
	
	类型32	
保留的中断 (27个)	类型31	
	
	类型5	
专用的中断 (5个)	类型4	溢出
	类型3	断点
	类型2	非屏蔽
	类型1	单步
	类型0	除法错



80386 ~ Core2的中断向量表

中断用途	类型号	说明	类型号	说明
专用的中断 (19个)	类型9	协处理器段超限		
	类型8	双中断错	类型18	机器检查**
	类型7	协处理器不存在	类型17	对齐检查**
	类型6	未定义的操作码	类型16	协处理器出错*
	类型5	边界	类型15	未分配
	类型4	溢出	类型14	页面出错*
	类型3	断点	类型13	一般性保护
	类型2	非屏蔽	类型12	堆栈段超限
	类型1	单步	类型11	段不存在
	类型0	除法错	类型10	无效任务状态段

中断用途	类型号
供用户定义的中断 (224个)	类型255

	类型32
保留的中断 (13个)	类型31

	类型19

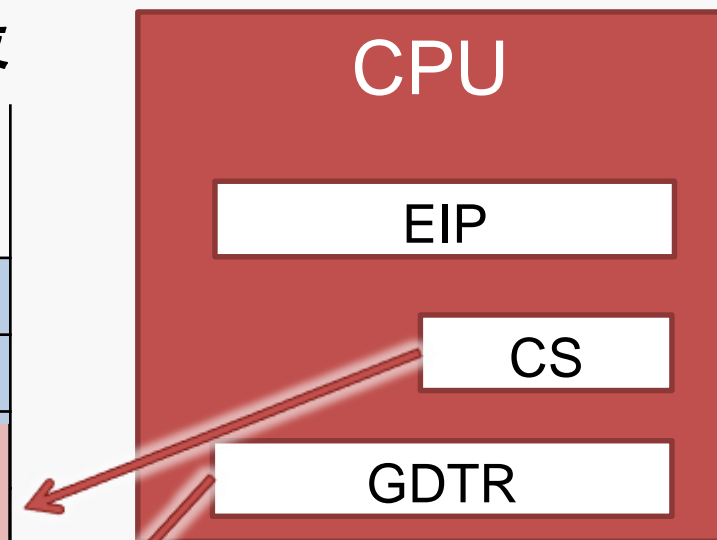
* 自80386起
**自80486起



IA-32的存储器寻址

保护模式下，段基址不在CS中，而是在内存中
存储器片段

高地址								
描述符8191								
描述符8190								
其中一个... 描述符→	字节7 基地址	字节6 其它	字节5 权限	字节4	字节3 基地址	字节2	字节1 段界限	字节0
描述符1								
描述符0								
低地址								



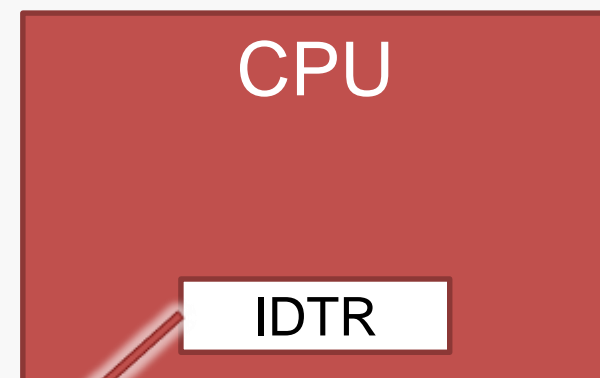
- GDT: 全局描述符表
- GDTR: 全局描述符表的地址寄存器
- GDT可在系统中的任何存储单元，通过GDTR定位



保护模式的中断操作

- 中断向量表位置不同，其它操作与实模式类似
- 存储器片段

高地址							
描述符255							
描述符254							
.....	字节7	字节6	字节5	字节4	字节3	字节2	字节1
.....	地址A31~A16		优先级等信息		段选择符		地址A15~A0
描述符1							
描述符0							
低地址							



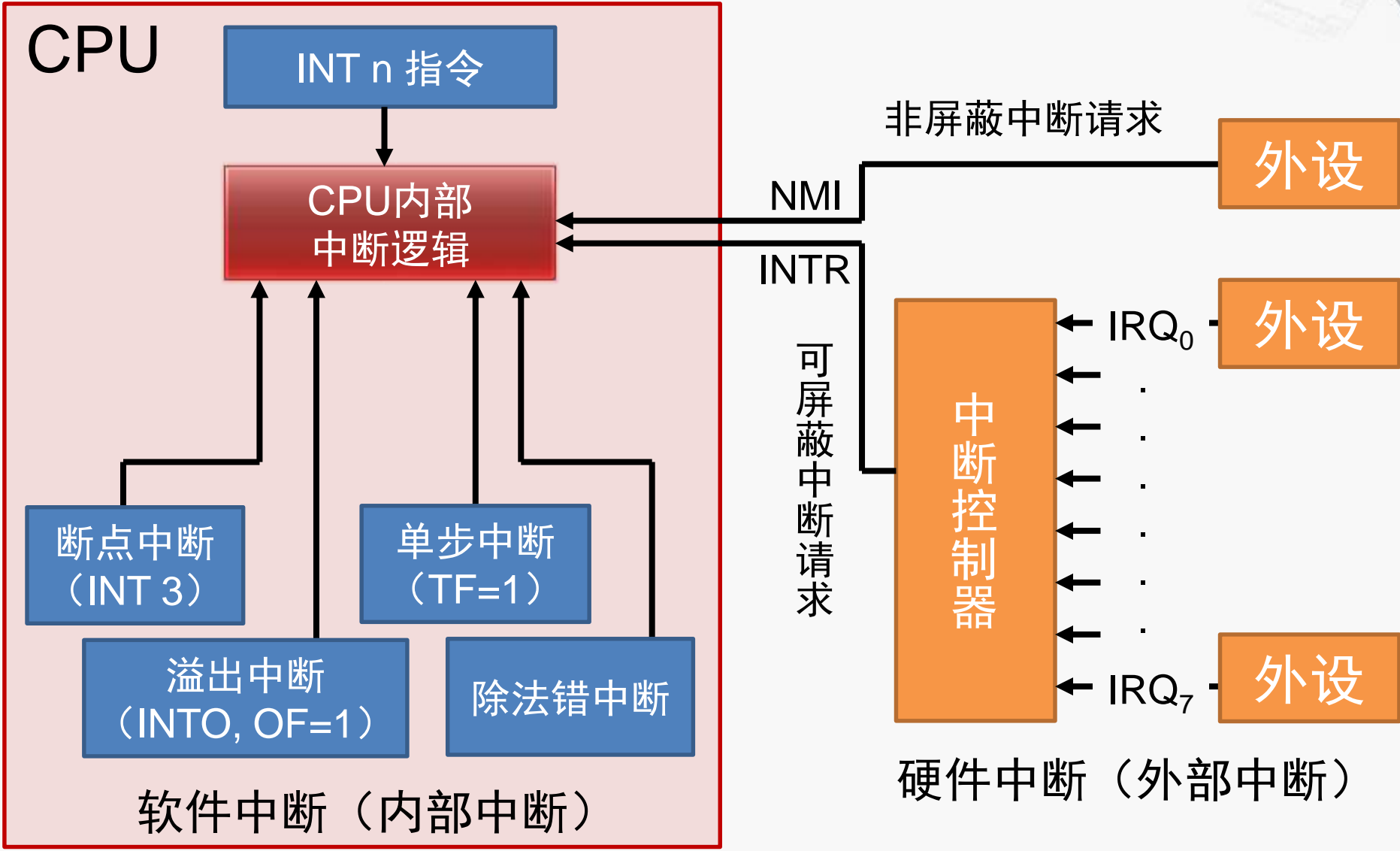
IDTR：中断描述符表地址寄存器

IDT可在系统中的任何存储单元，通过IDTR定位

中断描述符表（interrupt descriptor table, IDT）
每个中断描述符8个字节，256个中断描述符共2K字节



中断的检测（示例：x86系统）



主要内容

通过学习本课程
了解计算机的发展历程，理解计算机的组成原理，掌握计算机的设计方法

I 中断和异常



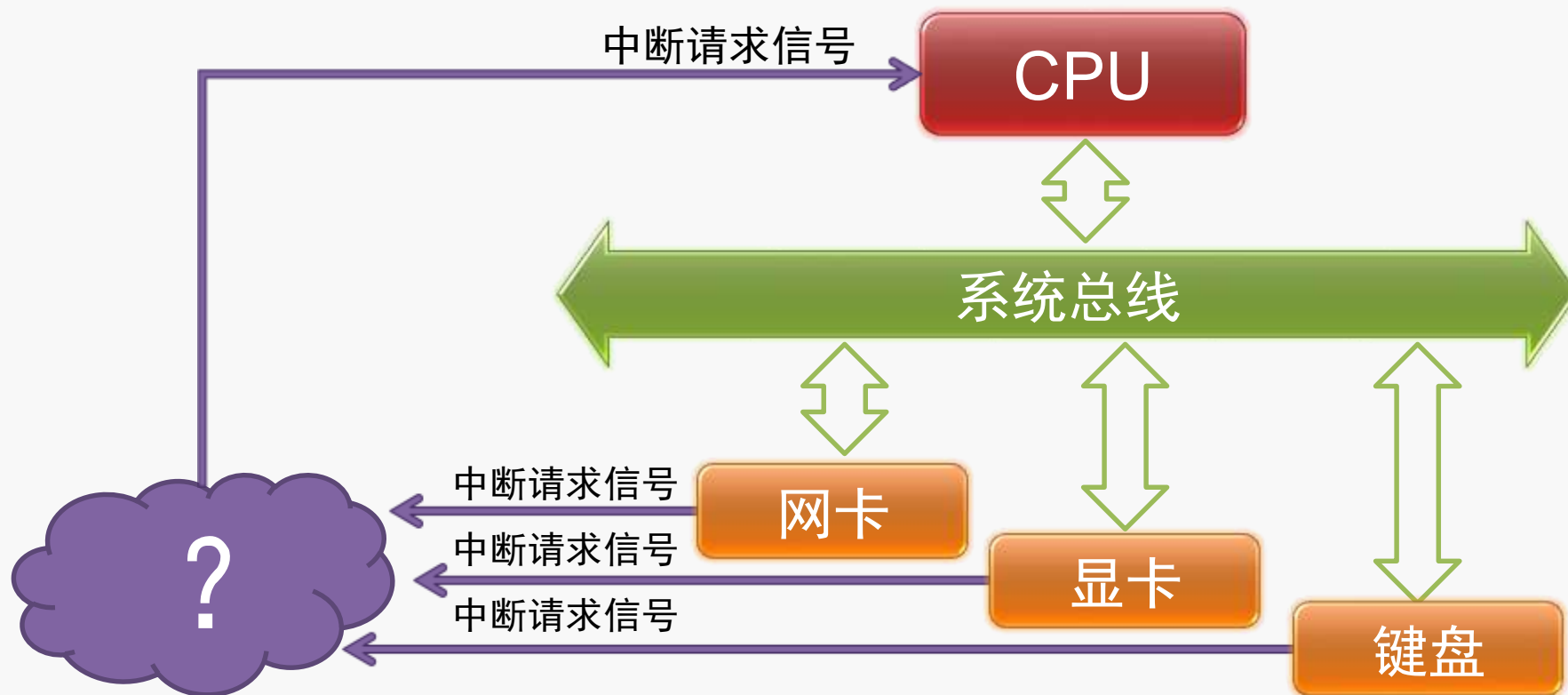
II 中断控制器

III 定时器

IV 系统中的中断和定时

外部中断的需求

- ❶ 优先级：多个中断请求同时出现，如何确定响应次序？
- ❷ 屏蔽：可否屏蔽指定I/O接口设备的中断请求？



外部中断优先级的确定方法



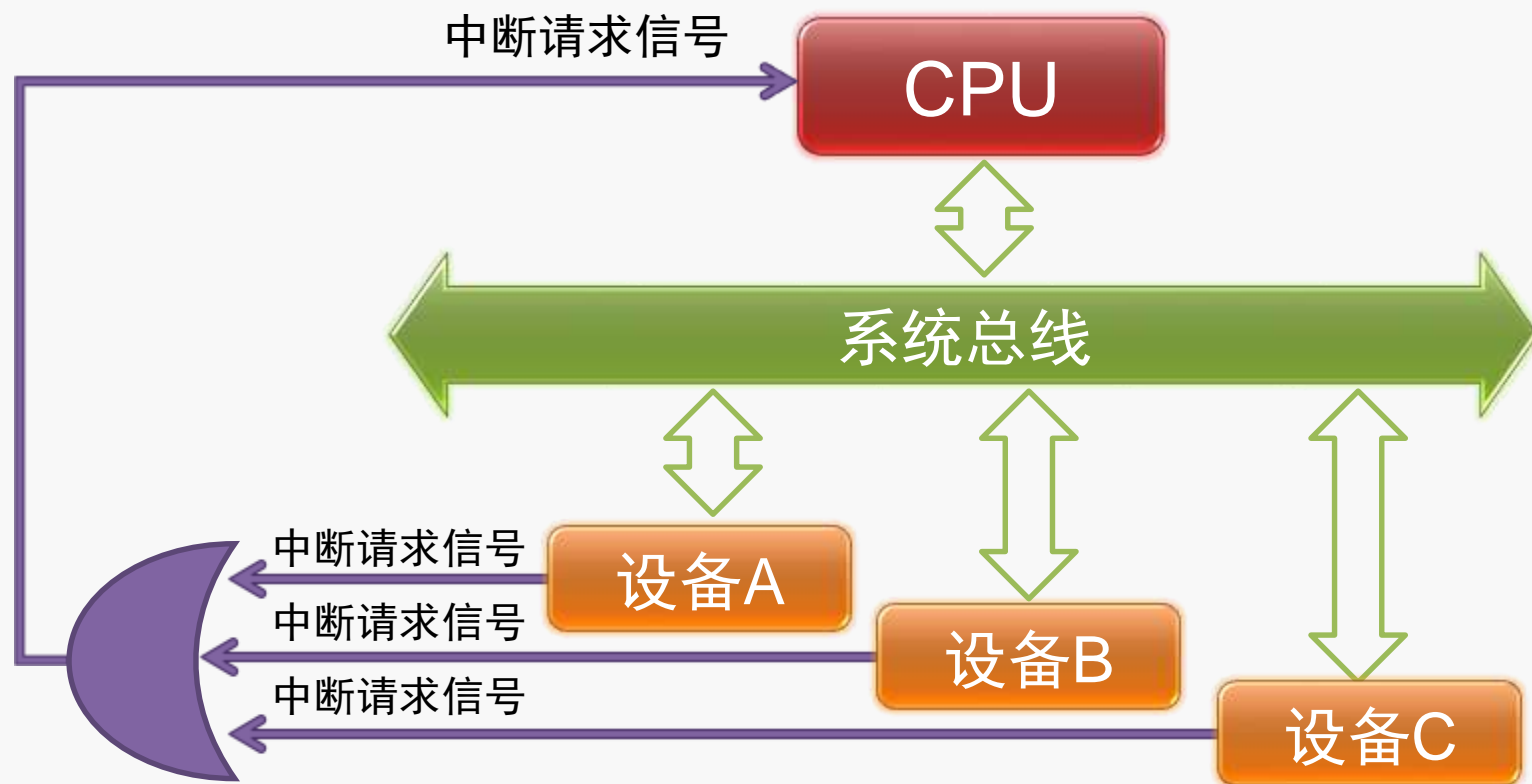
1. 软件查询确定中断优先级
2. 硬件中断优先级编码电路
3. 可编程中断控制器

1. 软件查询确定中断优先级

- 采用软件查询法解决中断优先级只需要少量硬件电路

硬件电路：

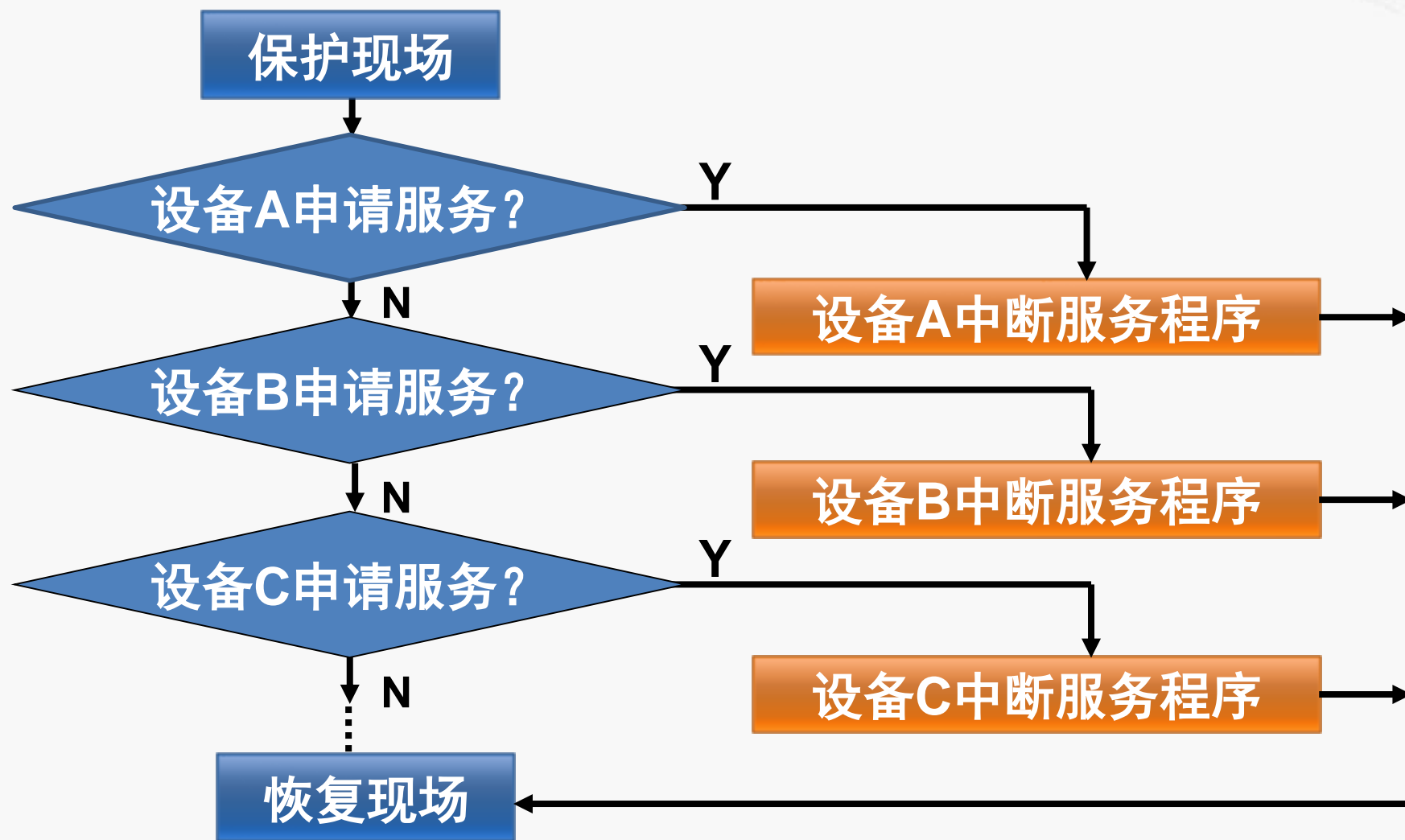
将所有的外部
中断请求信号相
“或”，产生一个
总中断请求信号
INTR发给CPU



带优先级的查询程序

- ④ 在中断服务程序的开始部分，需安排一段查询程序
- ④ 查询的先后顺序体现不同设备的中断优先级
 - 先查的设备具有较高优先级
 - 后查的设备具有较低优先级
- ④ 一般来说，总是先查询速度较快或是实时性较高的设备

软件查询流程图



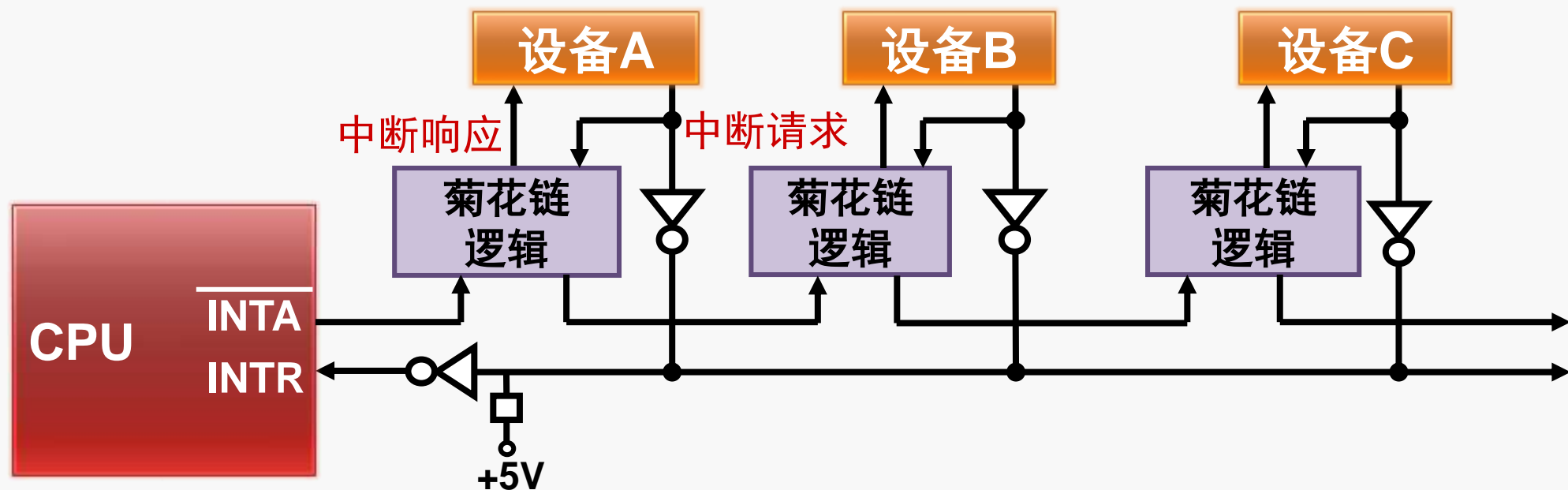
2. 硬件中断优先级编码电路

- 菊花链优先级排队电路
 - 一种优先级管理的简单硬件方案

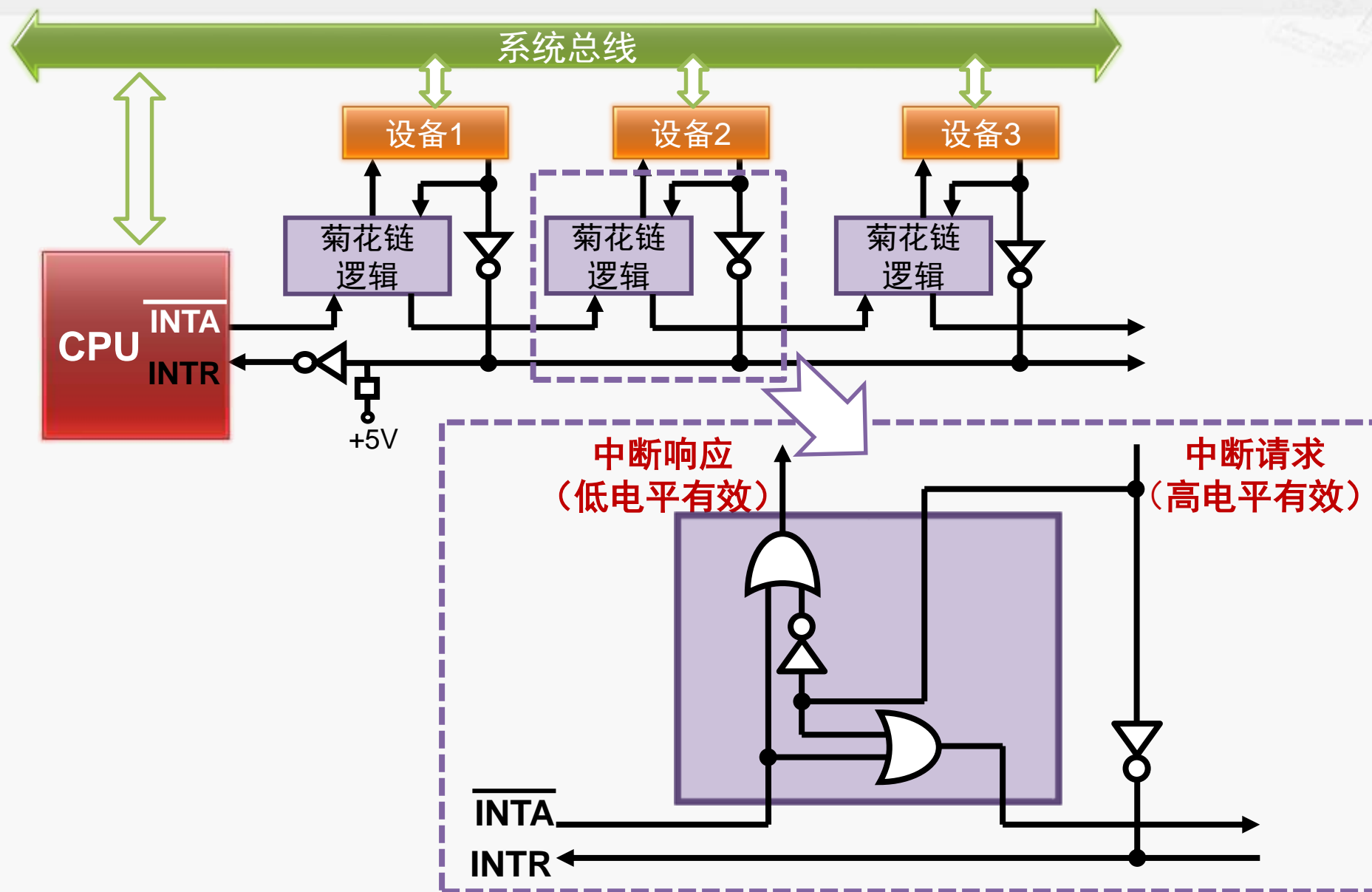


典型的菊花链优先级结构

- 在每个设备接口设置一个简单的逻辑电路，根据优先级顺序来传递或截留CPU发出的中断响应信号，以实现响应中断的顺序



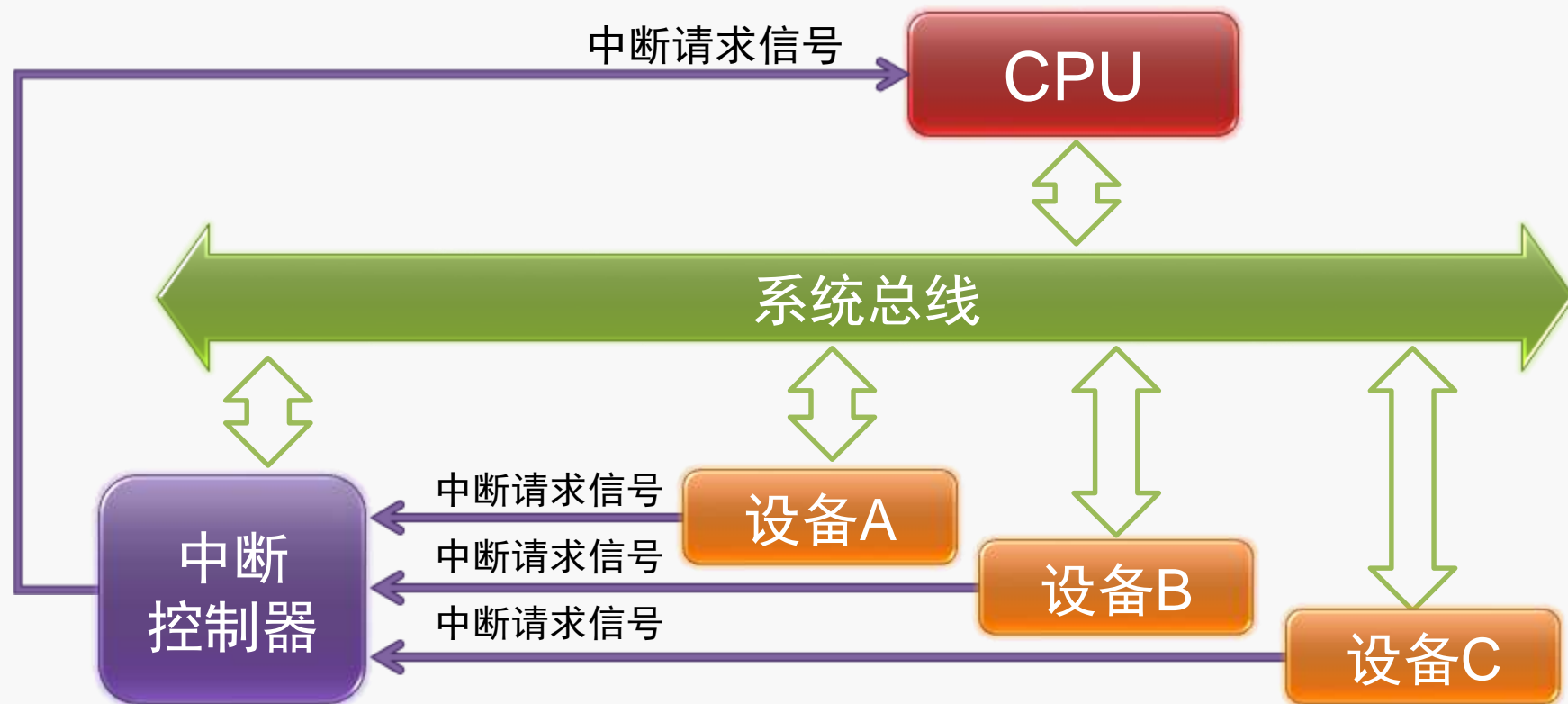
菊花链逻辑的电路实现



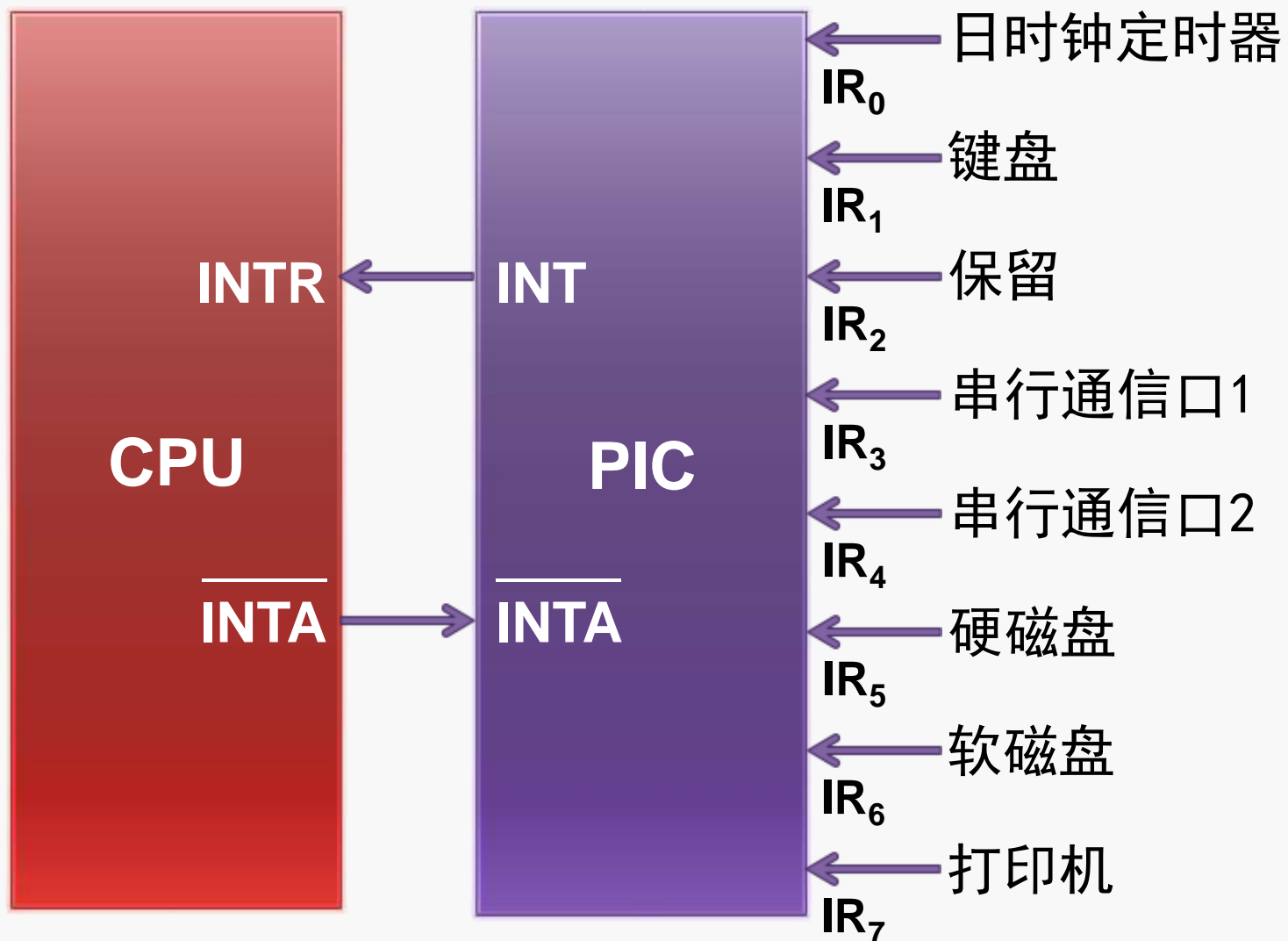
3.可编程中断控制器

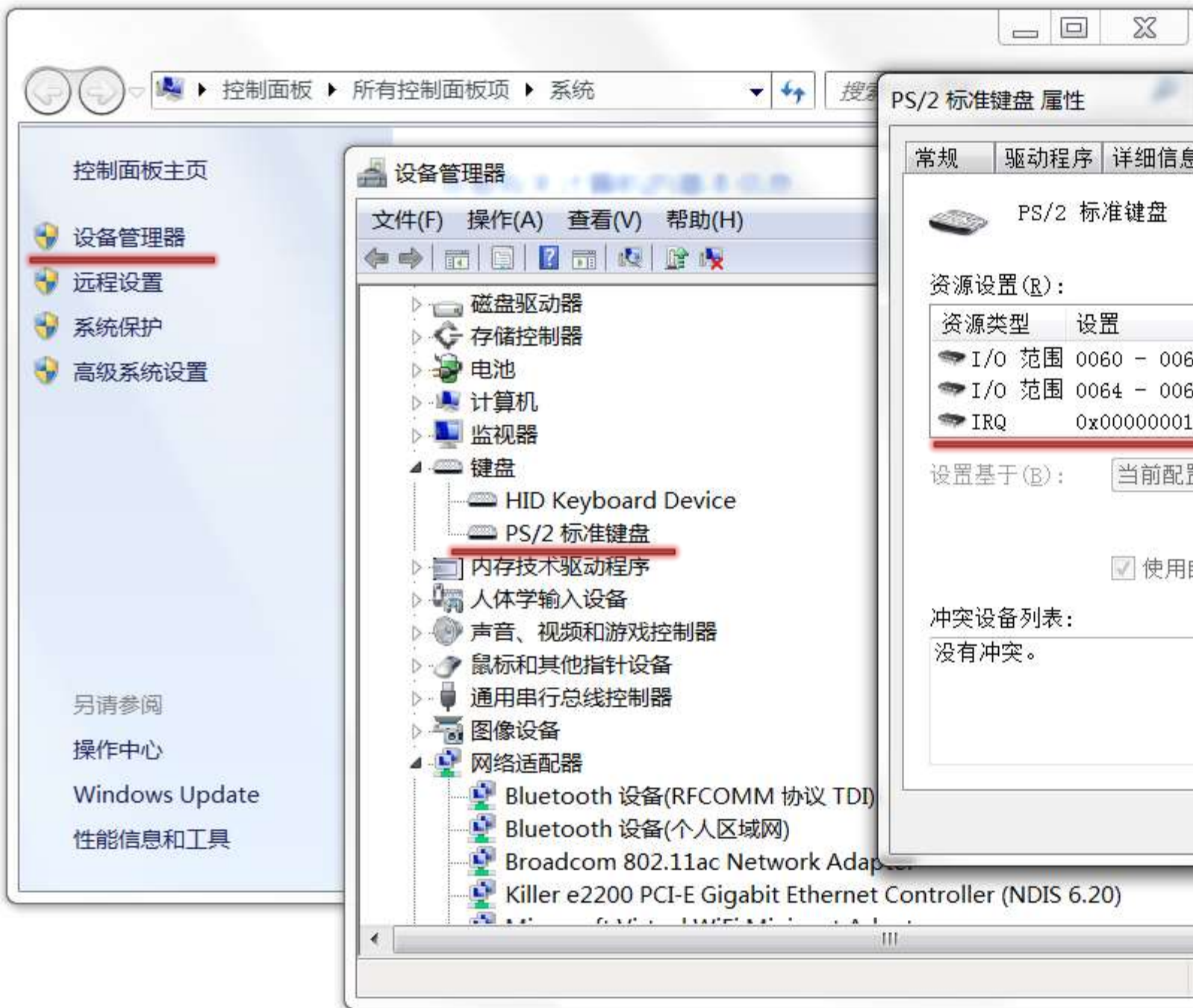
- 现代PC机中多采用可编程中断控制器来处理中断
- 例如：典型的可编程中断控制器8259A

- 管理和控制CPU的外部中断请求
- 实现中断优先级的判决
- 为CPU提供中断类型码
- 选择屏蔽设备的中断请求

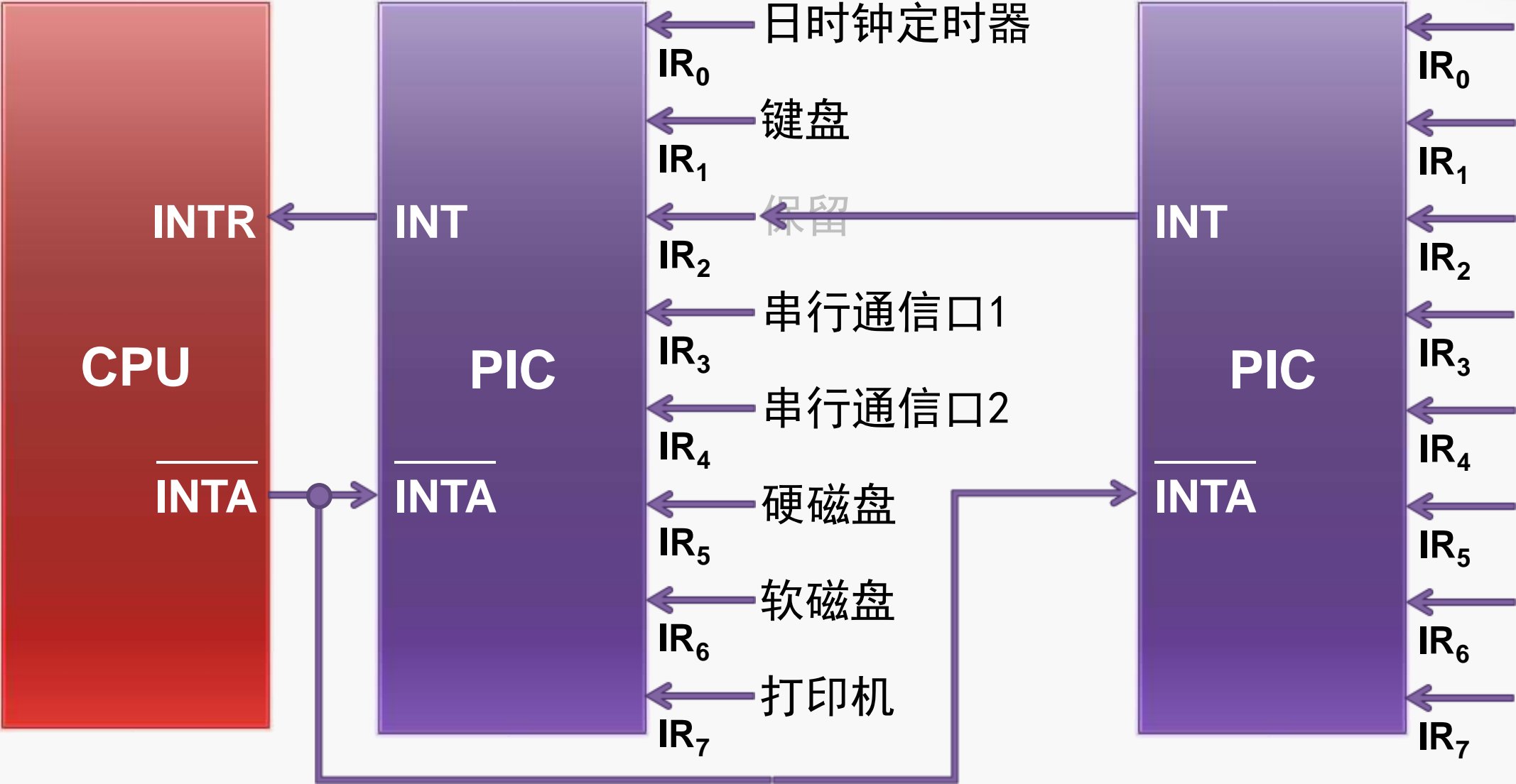


中断控制器在IBM PC/XT中的连接结构





中断控制器在IBM PC/AT中的连接结构



控制面板 > 所有控制面板项 > 系统

搜索控制面板

控制面板主页

设备管理器

远程设置

系统保护

高级系统设置

另请参阅

操作中心

Windows Update

性能信息和工具

设备管理器

文件(F) 操作(A) 查看(V) 帮助(H)

Intel(R) Xeon(R) processor E3-1200 v3/4th Gen Core
Microsoft ACPI-Compliant Embedded Controller
Microsoft ACPI-Compliant System
Microsoft System Management BIOS Driver
Microsoft Windows Management Interface for ACPI
Microsoft Windows Management Interface for ACPI
Microsoft 虚拟驱动器枚举器驱动程序
Numeric data processor
PCI 总线
Plug and Play Software Device Enumerator
Programmable interrupt controller
STMicroelectronics 3-Axis Digital Accelerometer
Synaptics SMBus Driver
System CMOS/real time clock
System timer
UMBus Enumerator
UMBus Root Bus Enumerator
复合总线枚举器
显示适配器

Programmable interrupt controller 属性

常规 驱动程序 详细信息 资源

Programmable interrupt controller

资源设置(R):

资源类型	设置
I/O 范围	0020 - 0021
I/O 范围	0024 - 0025
I/O 范围	0028 - 0029

设置基于(B): 当前配置

☒ 使用自动设置(U) 更改设置(C)...

冲突设备列表:
没有冲突。

确定 取消

中断控制器的发展

- ▶ 可编程中断控制器：PIC
 - Programmable Interrupt Controller
- ▶ 高级可编程中断控制器：APIC
 - Advanced Programmable Interrupt Controller

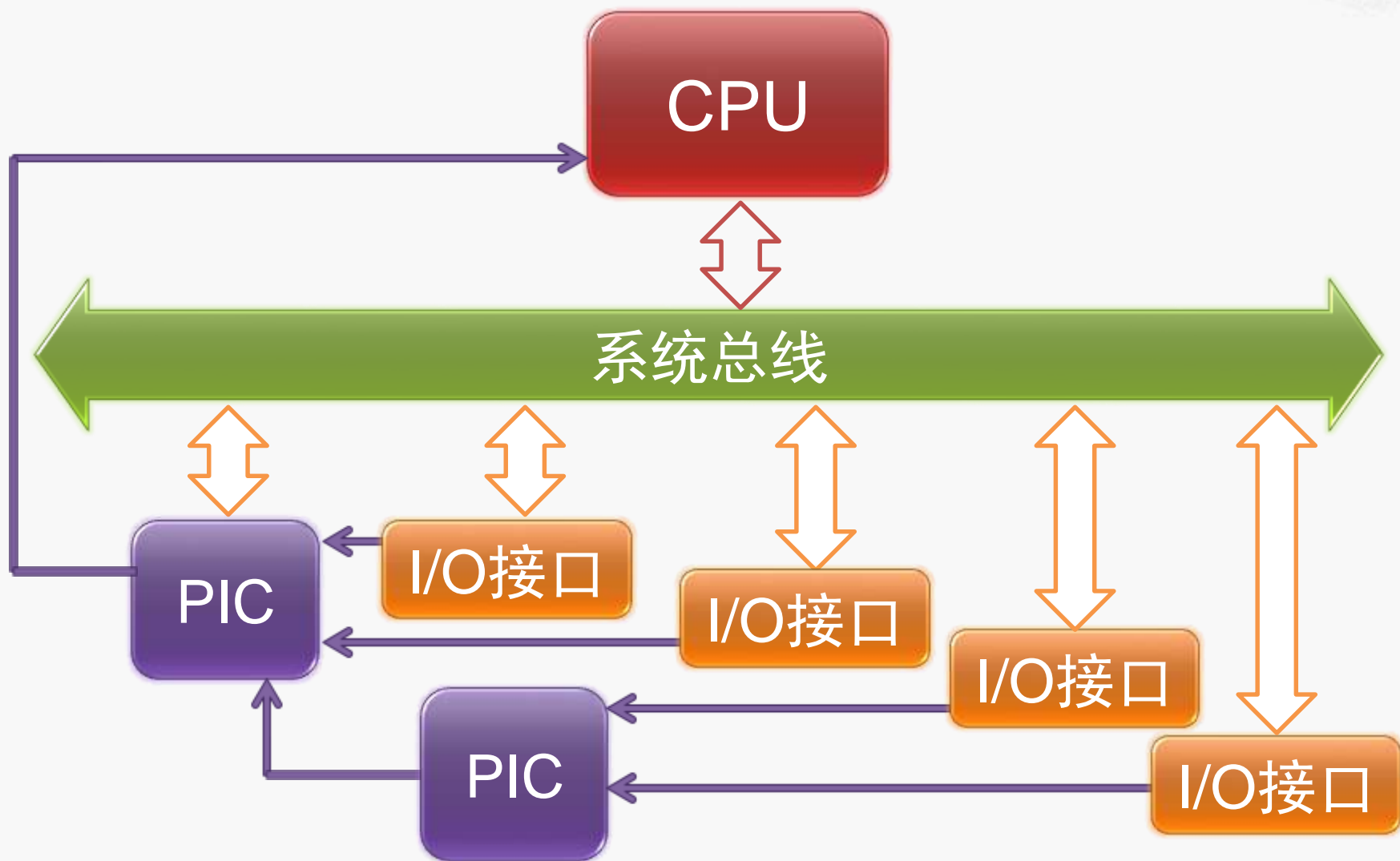


PIC示例：8259A

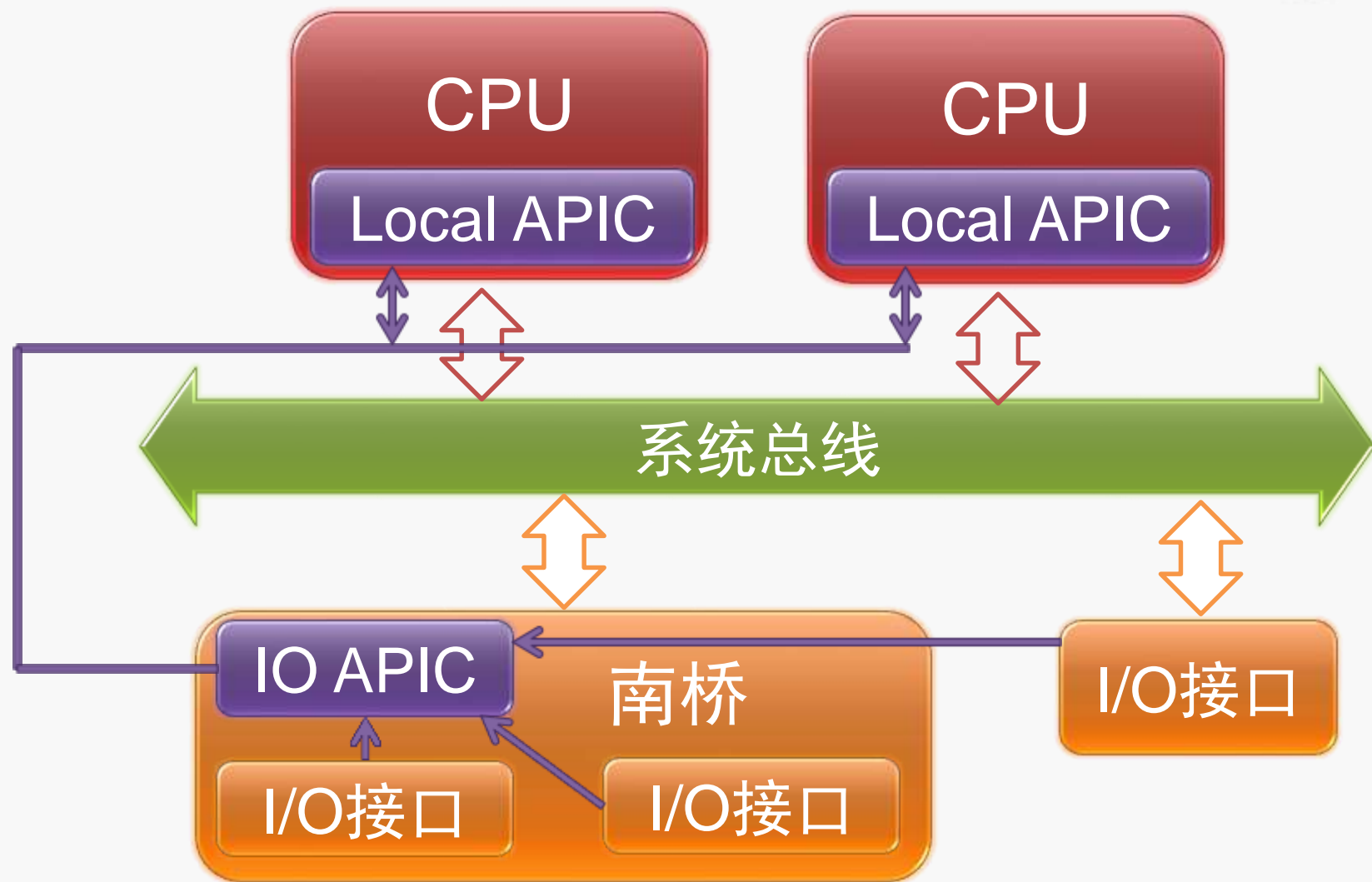


APIC示例：82093AA

早期PC机中的中断控制器



当前PC机中的中断控制器



主要内容

通过学习本课程
了解计算机的发展历程，理解计算机的组成原理，掌握计算机的设计方法

I 中断和异常

II 中断控制器

III 定时器

IV 系统中的中断和定时



计数/定时的基本概念



▶ 计数

- 主要是指对外部事件发生的次数进行计量

▶ 定时

- 主要是指产生一段准确的时延
- 定时是对固定的时间单位进行计数
- 定时本质上也是计数，定时是以计数为基础的

计数/定时的主要用途



④ 计算机系统

- 提供系统的日时钟
- 接口电路的工作节拍、信息传送的同步信号
- 保证在确定时刻完成规定动作
- 提供时间基准，供操作系统切换进程使用

④ 工业测控系统

- 计数：对零件和产品的计数、对车流量的统计
- 定时：定时采样、定时检测、定时扫描

④ 声音/音乐

- 由计数/定时的基本功能派生而来

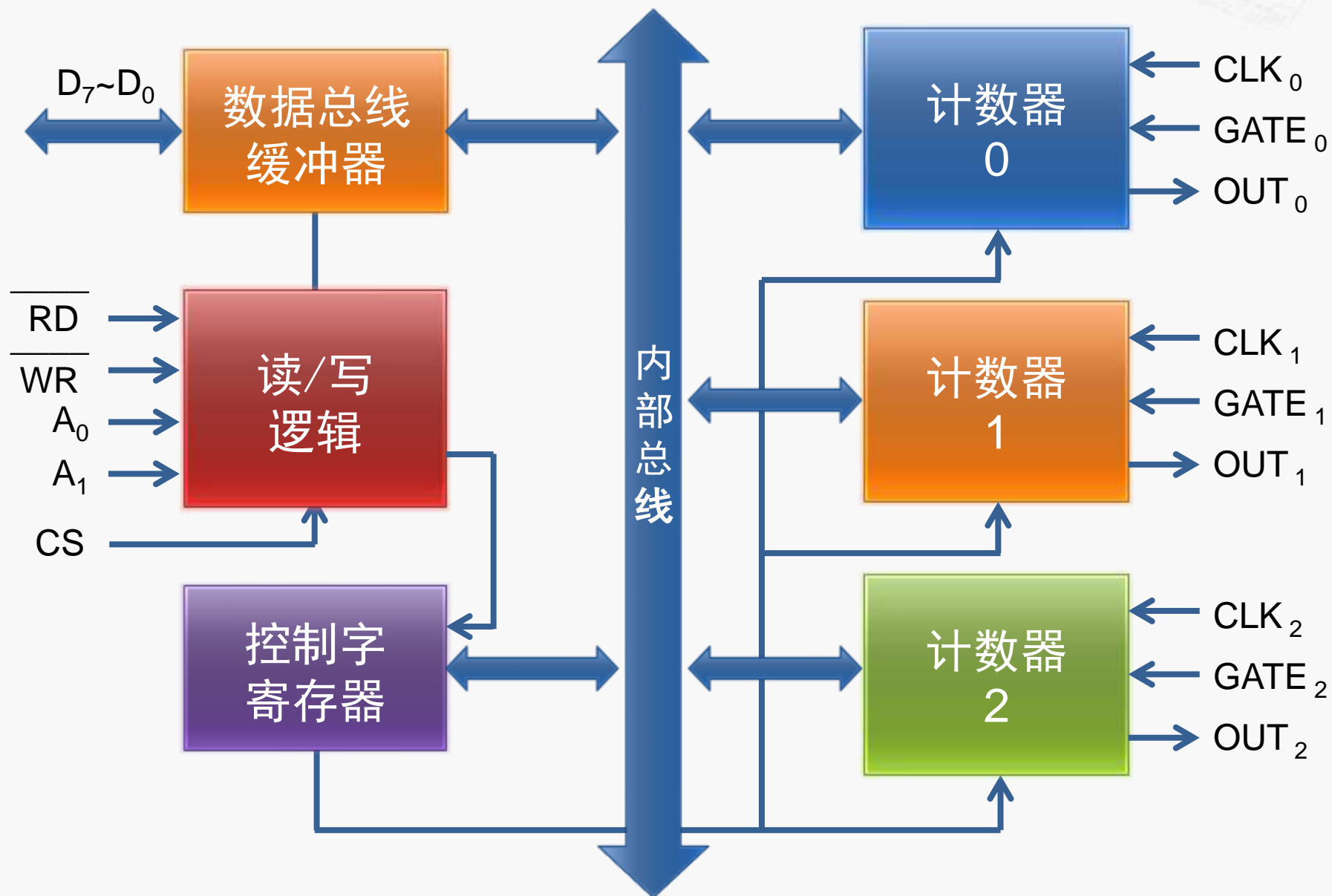
可编程计数器/定时器

- ④ 软硬件相结合的定时计数方法，采用专用的定时电路，其定时值通过软件进行控制
- ④ 特点：功能灵活，使用方便
- ④ 早期的典型产品
 - Zilog Z80-CTC
 - Intel 8253(8254)



Intel 8253
可编程计数器/定时器

定时器（8253）的内部结构



定时器的内部主要部件

❶ 计数器0、计数器1、计数器2

- 3个计数器/定时器通道
- 3个通道的操作是完全独立的



- **CLK**: 时钟输入信号，作为计数脉冲，可以是非周期性脉冲，也可以是频率精确的周期性脉冲
- **GATE**: 门控输入信号，对计数过程进行控制，具体作用视工作方式而定
- **OUT**: 计数输出信号，“计数到零/定时时间到”输出，输出信号形式视工作方式而定

设备管理器

文件(F) 操作(A) 查看(V) 帮助(H)

- Intel(R) Xeon(R) processor E3-1200 v3/4th Gen Core
- Microsoft ACPI-Compliant Embedded Controller
- Microsoft ACPI-Compliant System
- Microsoft System Management BIOS Driver
- Microsoft Windows Management Interface for ACPI
- Microsoft Windows Management Interface for ACPI
- Microsoft 虚拟驱动器枚举器驱动程序
- Numeric data processor
- PCI 总线
- Plug and Play Software Device Enumerator
- Programmable interrupt controller
- STMicroelectronics 3-Axis Digital Accelerometer
- Synaptics SMBus Driver
- System CMOS/real time clock
- System timer
- UMBus Enumerator
- UMBus Root Bus Enumerator
- 复合总线枚举器

显示适配器

System timer 属性

常规 驱动程序 详细信息 资源

System timer

资源设置(R):

资源类型	设置
I/O 范围	0040 - 0043
I/O 范围	0050 - 0053
IRQ	0x00000000 (00)

设置基于(B): 当前配置

☒ 使用自动设置(U) 更改设置(C)...

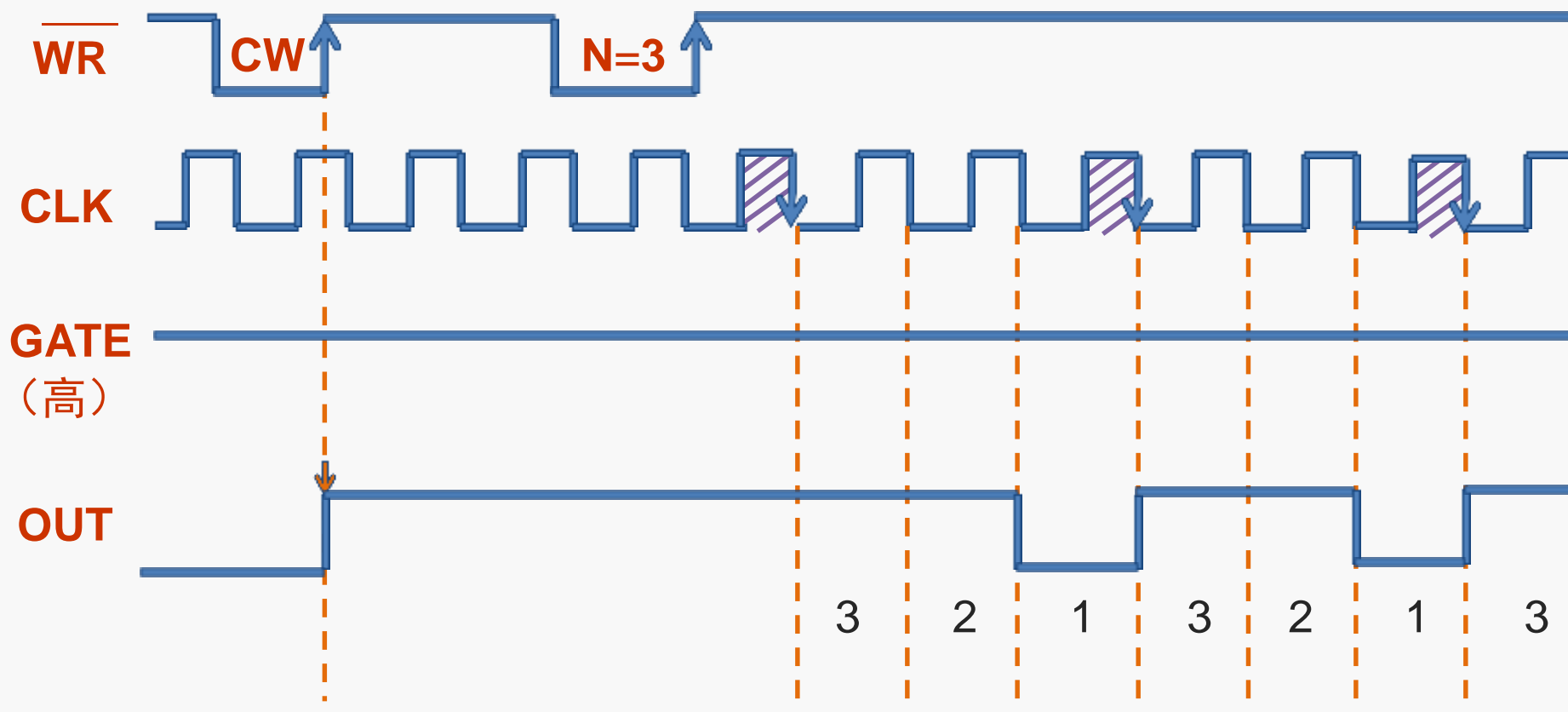
冲突设备列表:

没有冲突。

确定 取消

方式2：分频器

- 输出波形：每输入N个CLK脉冲，输出宽度为1个CLK周期的负脉冲



方式2的主要特点及用途



④ 触发方式

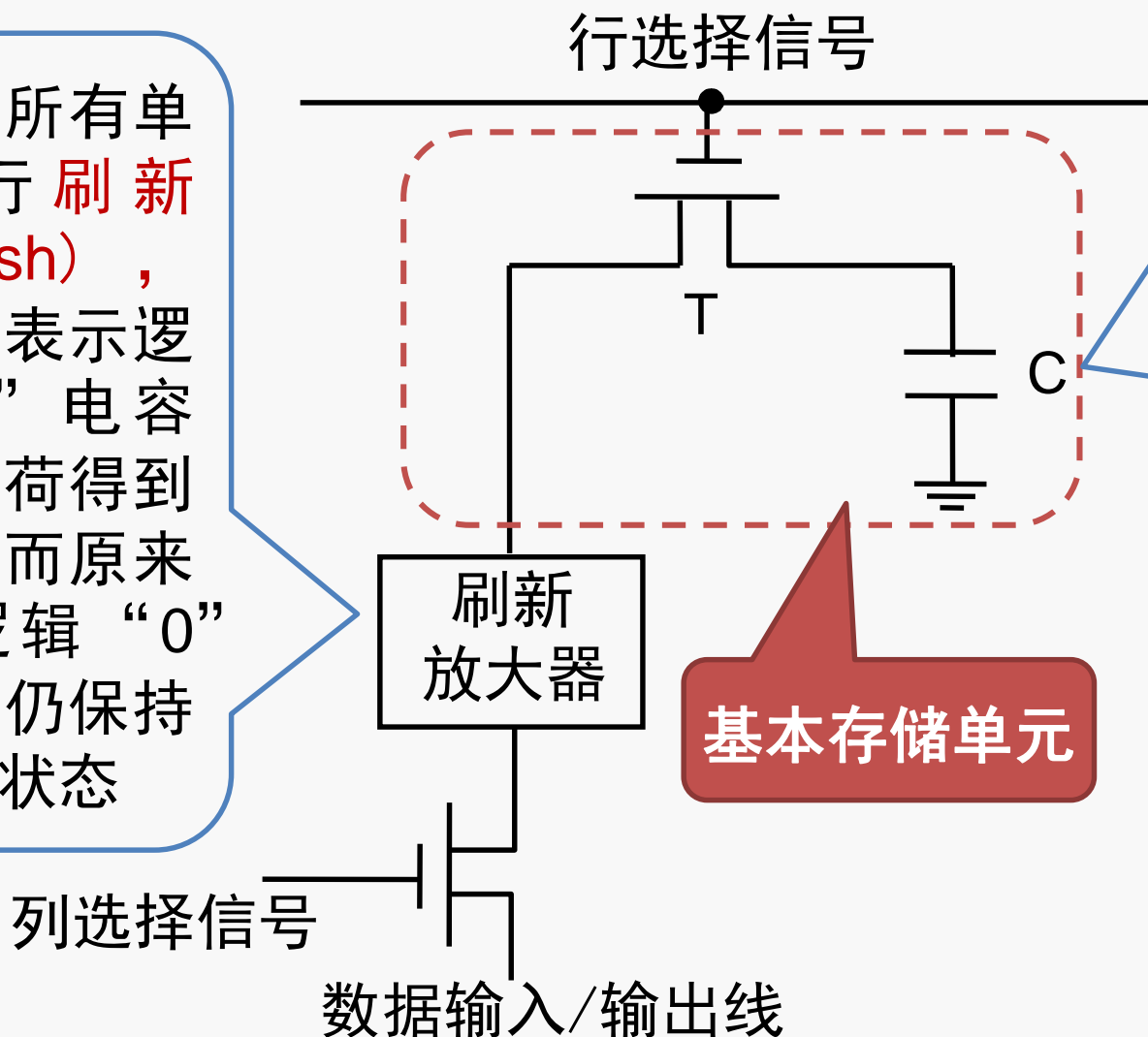
- 软件启动，自动重复，周期性输出固定频率的脉冲
- 又称为Rate Generator

④ 主要用途

- 脉冲速率发生器，类似 “Divide-by-N” Counter
$$\text{Count}(N) = \text{Input}(\text{Hz}) \div \text{Frequency of Output}$$

DRAM的定时刷新

定期对所有单元进行刷新(Refresh)，使原来表示逻辑“1”电容上的电荷得到补充，而原来表示逻辑“0”的电容仍保持无电荷状态



任何电容均存在漏电效应，经过一段时间后电容上的电荷会流失殆尽，导致所存信息丢失

用方式2产生DRAM定时刷新信号

- IBM PC XT/AT中，8253通道1的专用功能

- DRAM刷新频率

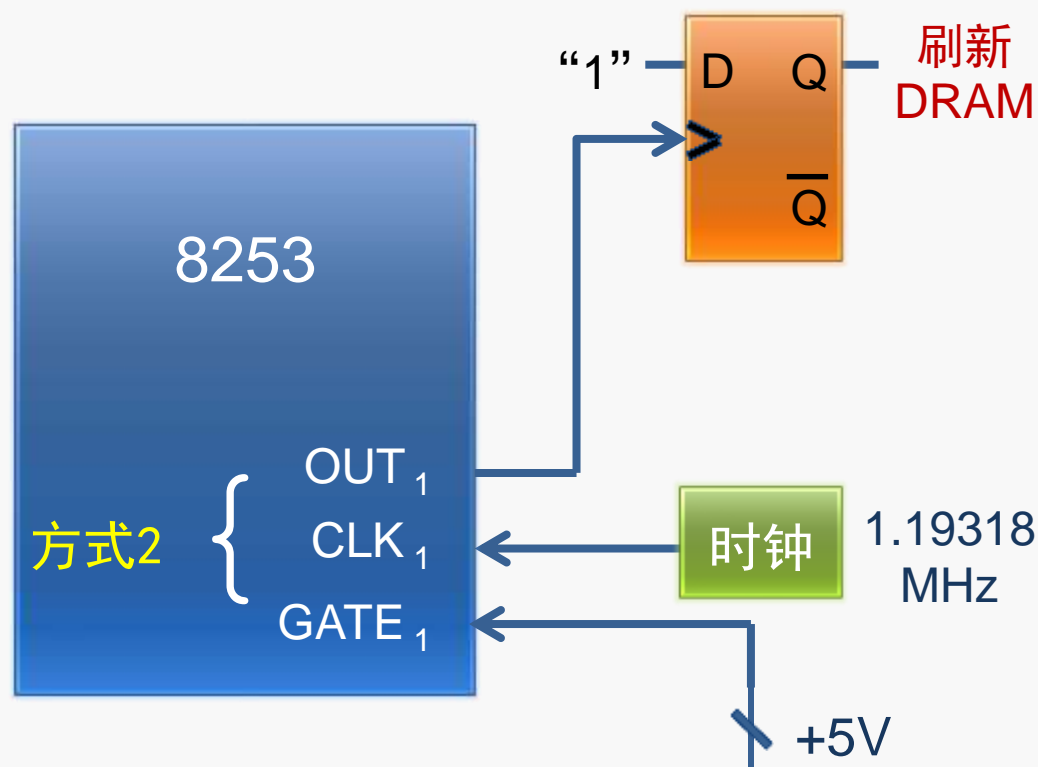
 - 若每2ms需刷新128次，则刷新频率为64KHz

- 计数通道1

 - 方式2

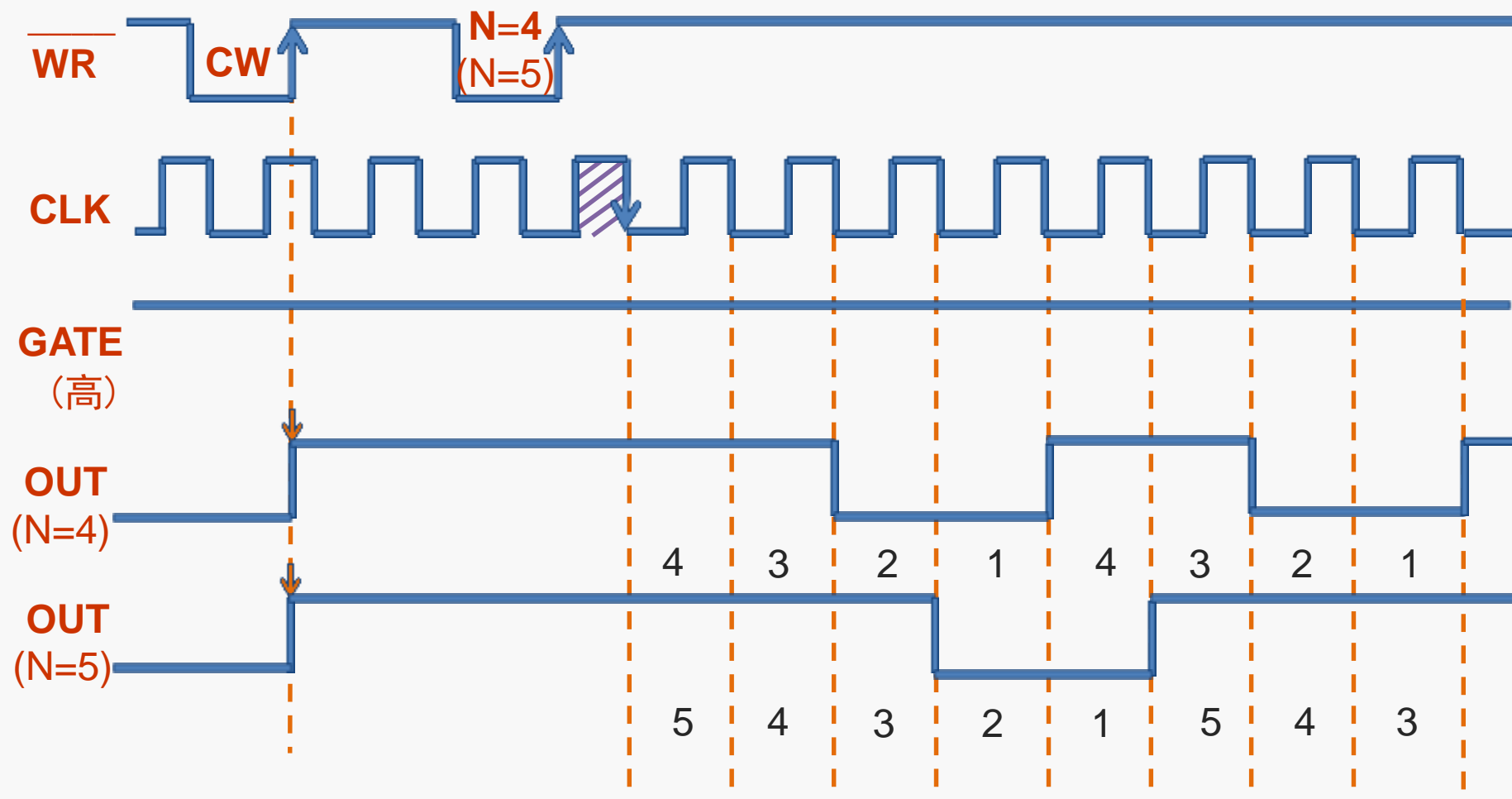
 - 计数初值：18

$$1.19318\text{MHz} \div 64\text{KHz} = 18$$



方式3：方波发生器

输出波形：对称方波或基本对称的矩形波



方式3的主要特点及用途



④ 触发方式

- 软件启动，自动重复，周期性输出固定频率的的方波
- 又称为Square Wave Generator

④ 主要用途

- 产生系统的时钟
- 扬声器发声控制

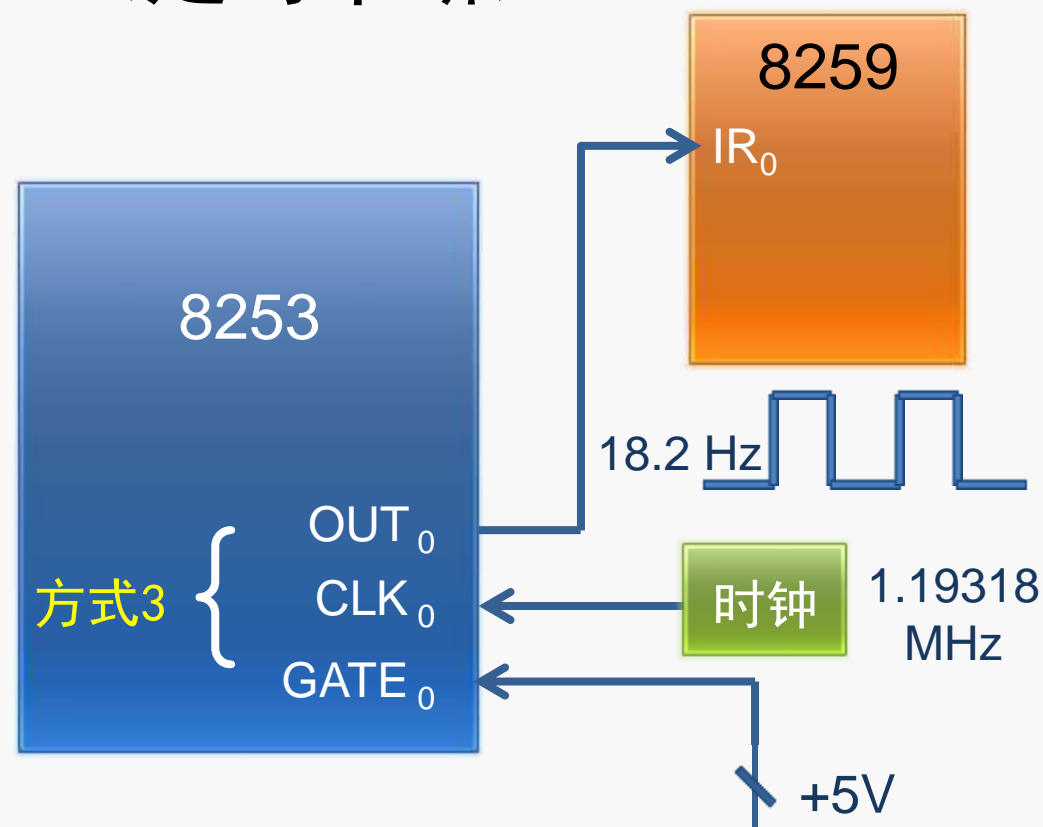
用方式3产生系统的时钟

- IBM PC XT/AT中，8253通道0的专用功能
- 为系统软件产生基本计时单位（定时中断）

- 计数通道0

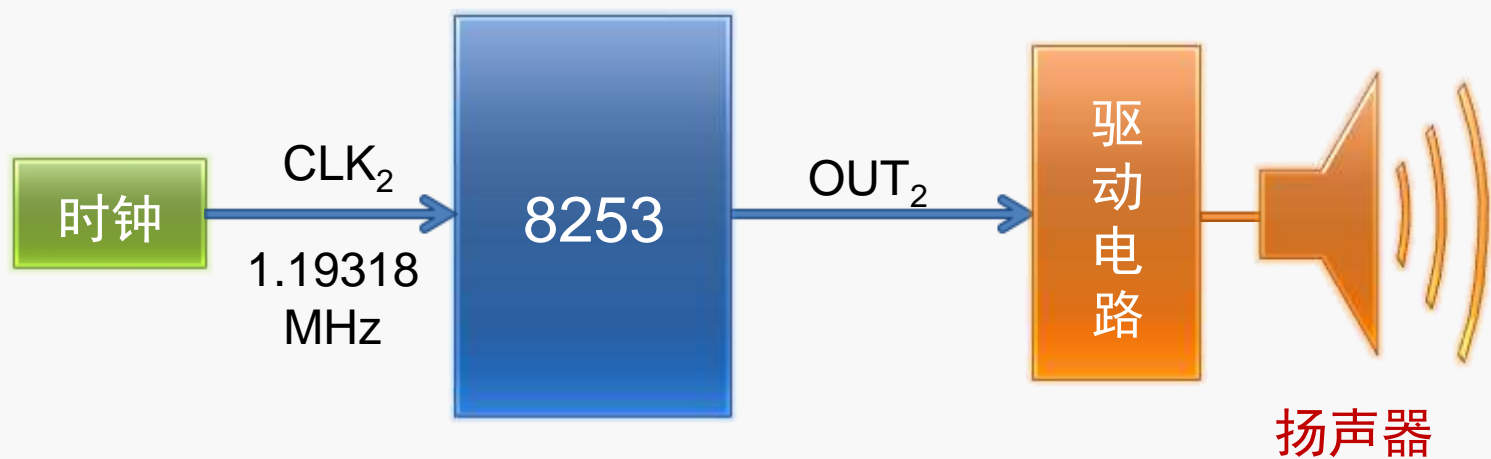
- 方式3
- 计数初值：最大值65536
- 输出方波频率：18.2Hz
- 定时中断间隔：54.945ms

$$1.19318\text{MHz} \div 65536 = 18.2\text{Hz}$$



用方式3控制扬声器发声

- ▶ IBM PC XT/AT中，8253通道2的专用功能
- ▶ 计数通道2
 - 方式3
 - 设置计数初值控制扬声器声音频率



主要内容

通过学习本课程
了解计算机的发展历程，理解计算机的组成原理，掌握计算机的设计方法

I 中断和异常

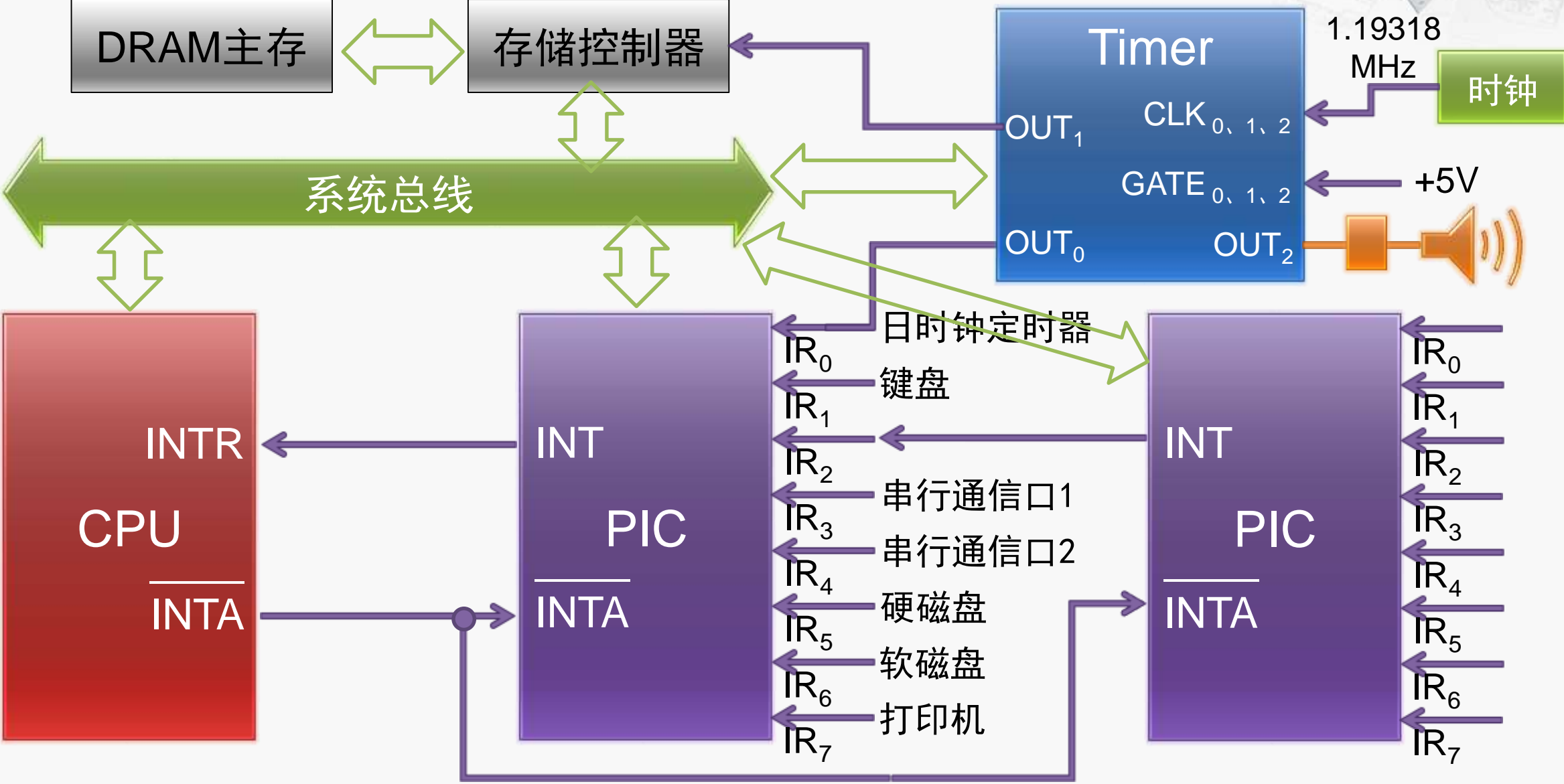
II 中断控制器

III 定时器

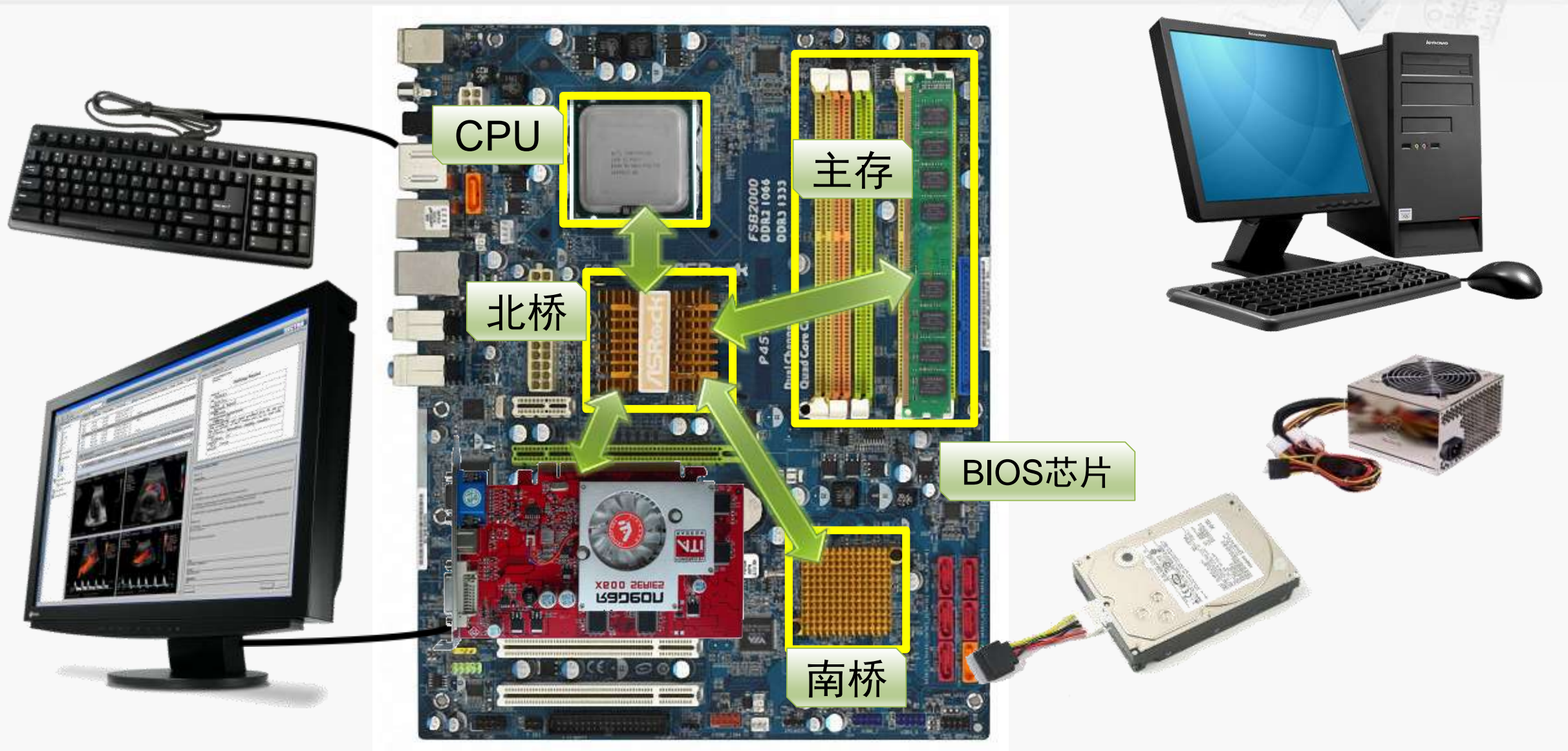
IV 系统中的中断和定时



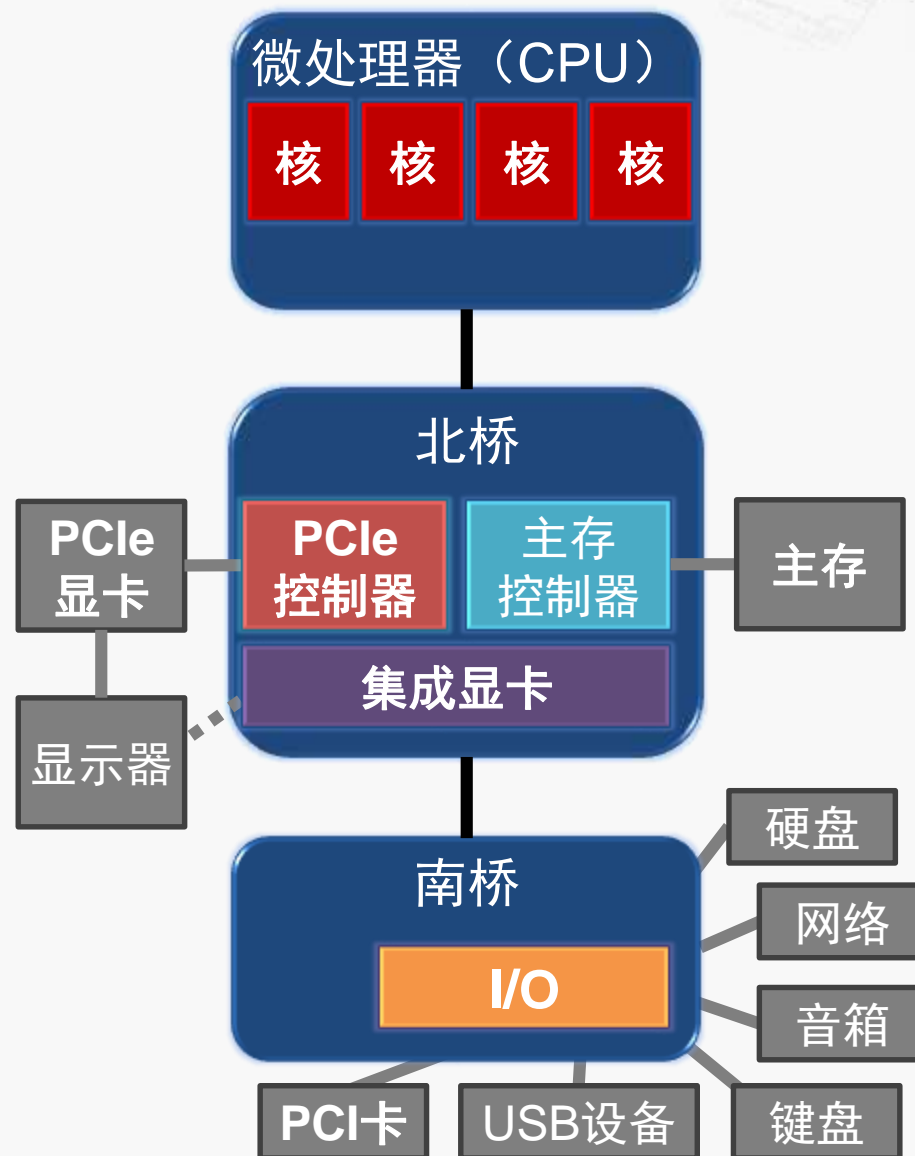
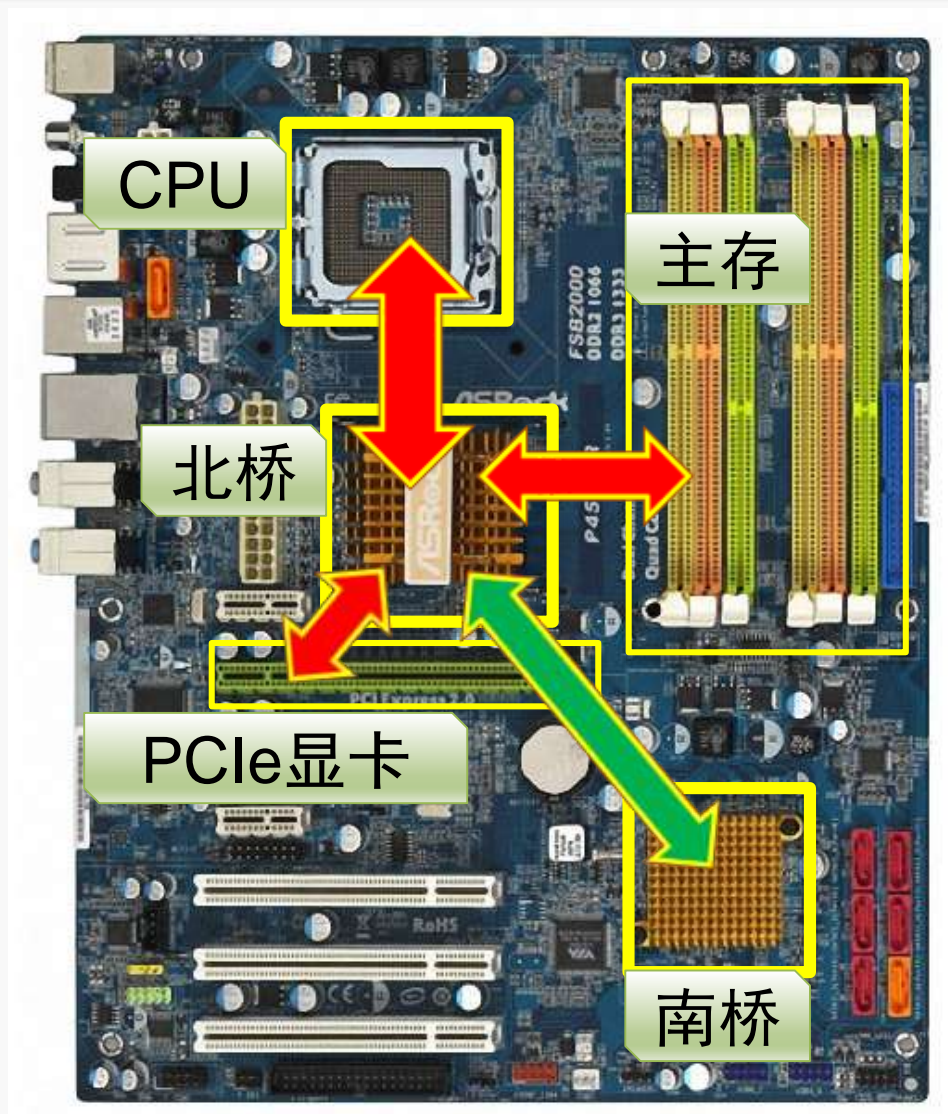
中断控制器和定时器在IBM PC/AT中的连接结构



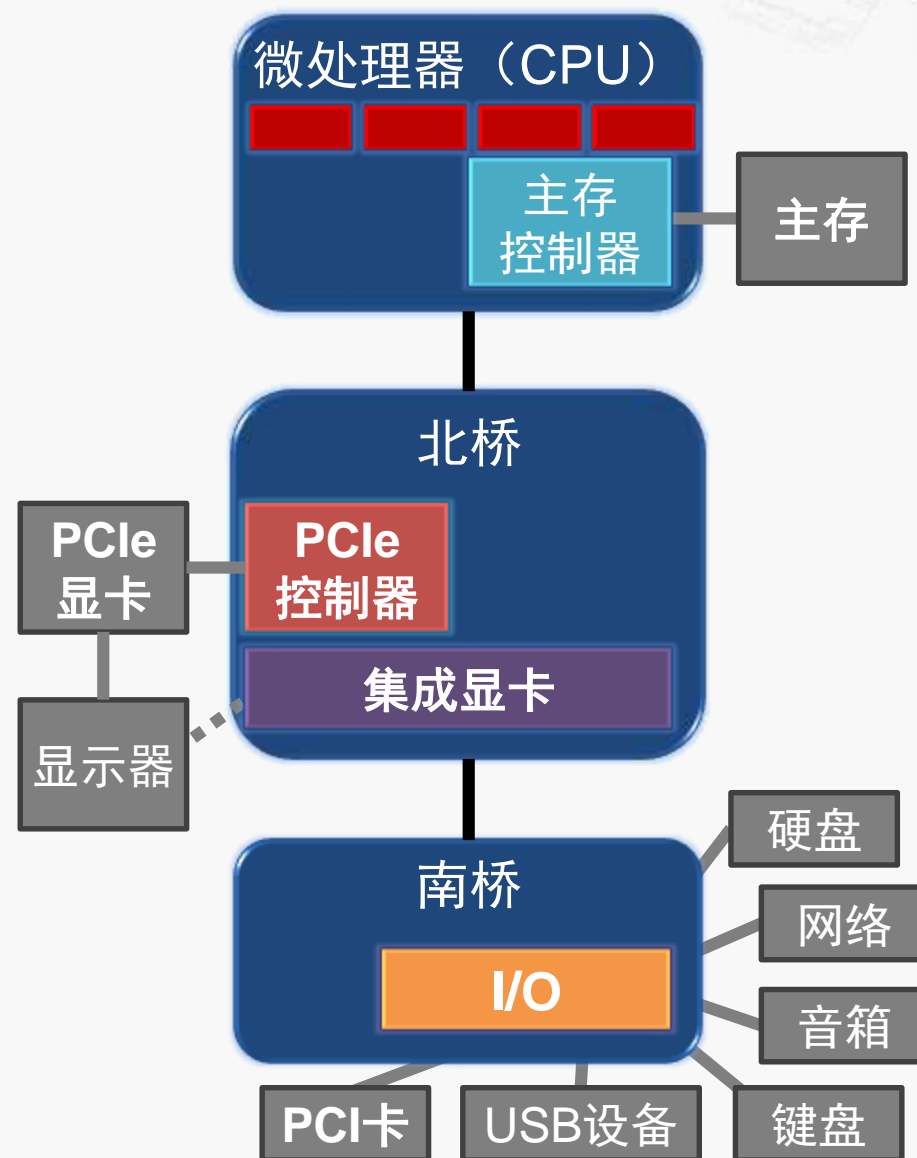
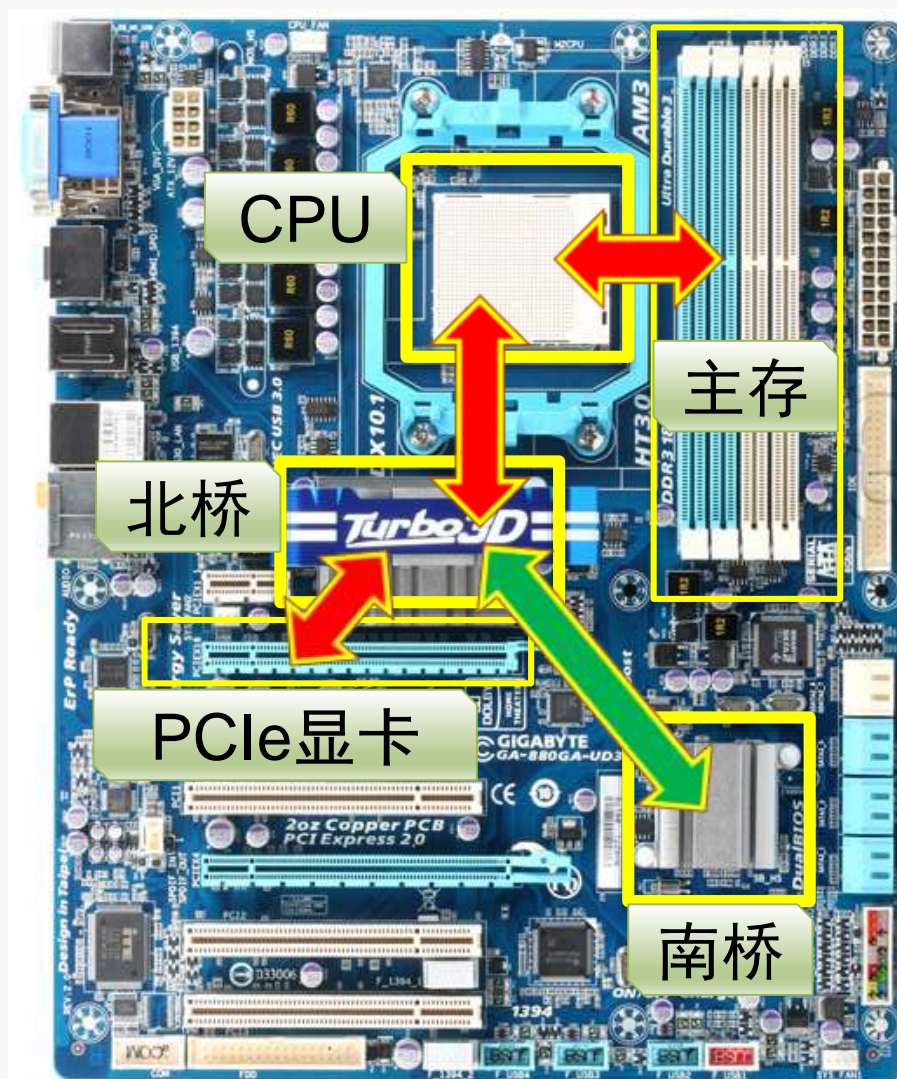
现代电子计算机的实现



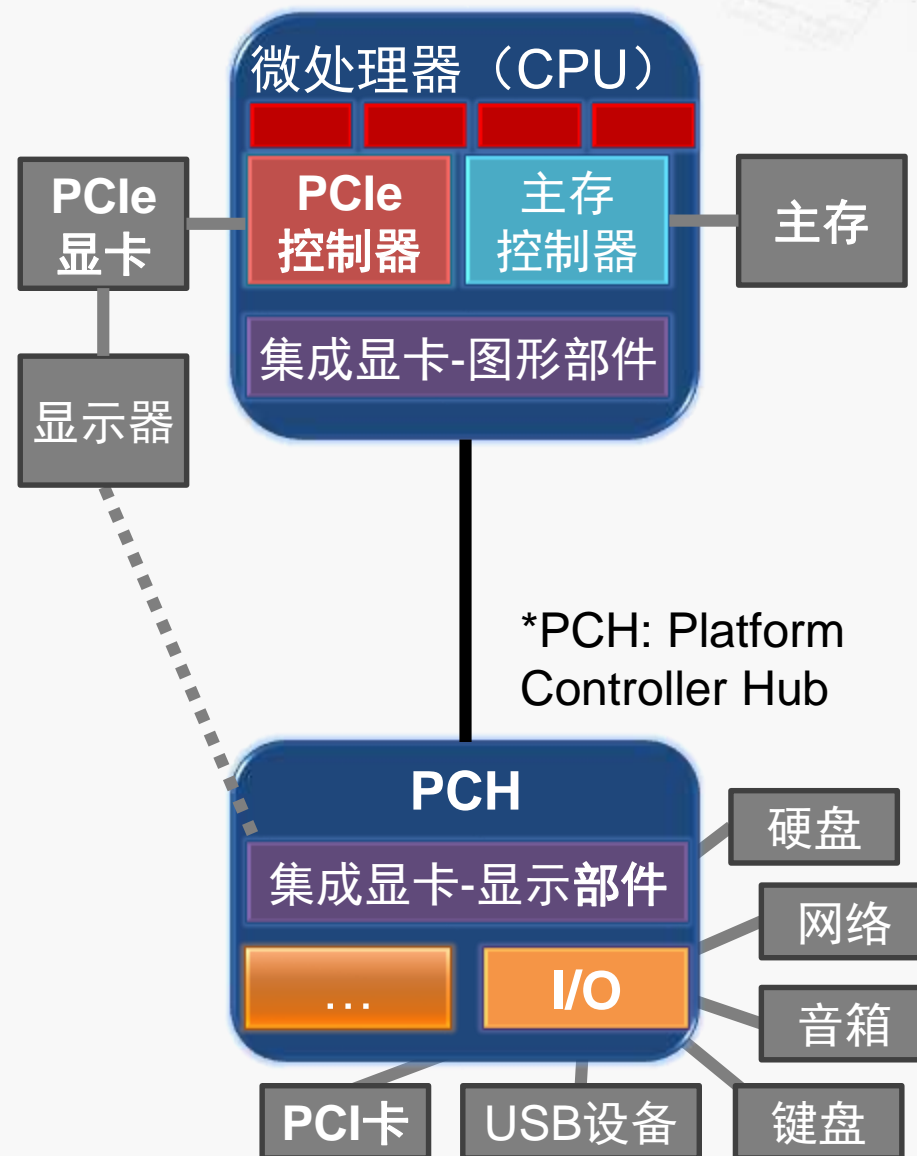
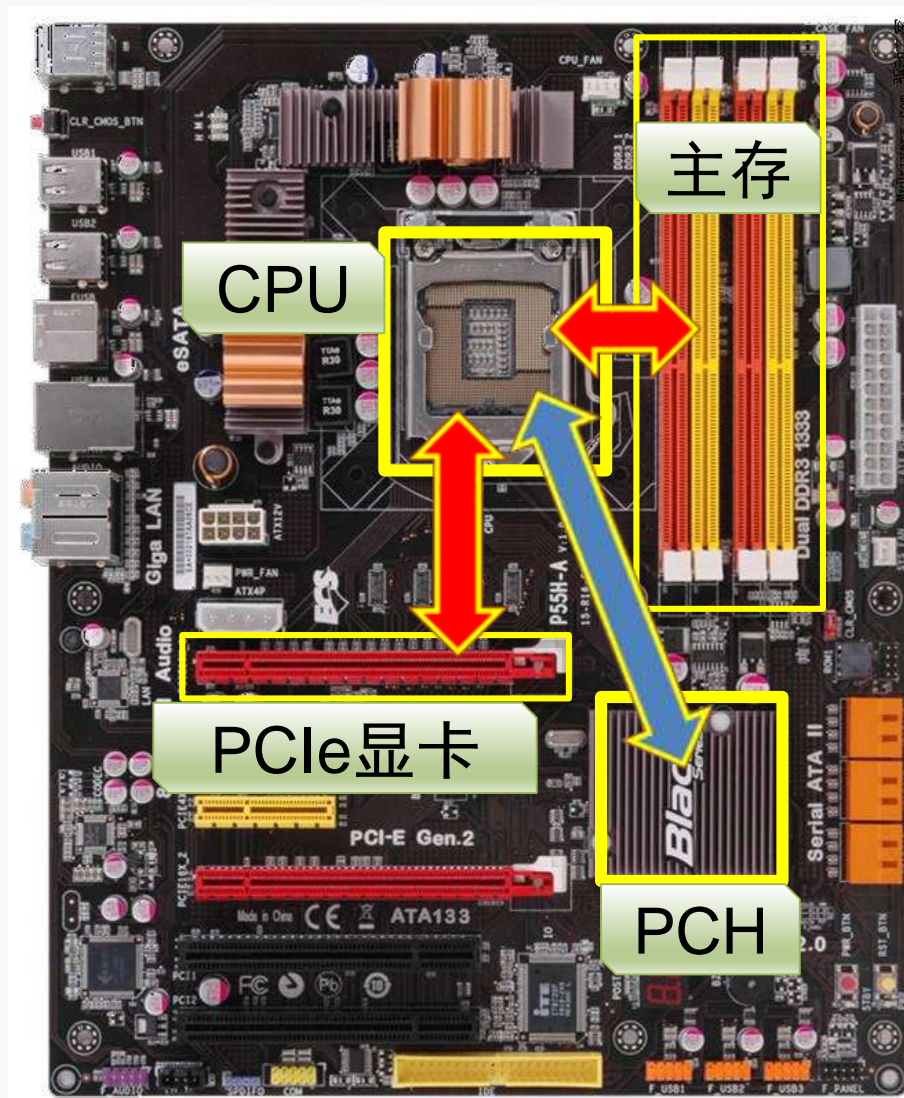
南北桥架构的演变 (1)



南北桥架构的演变（2）

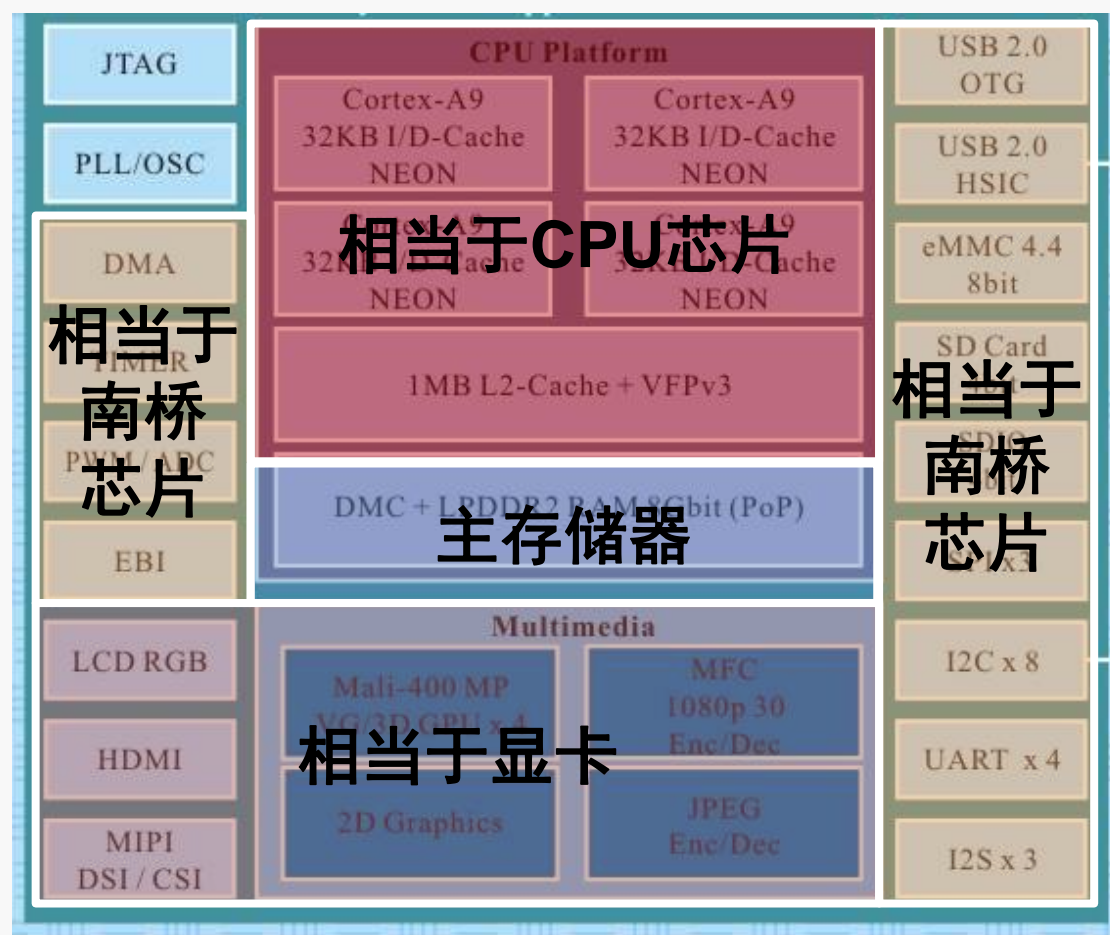
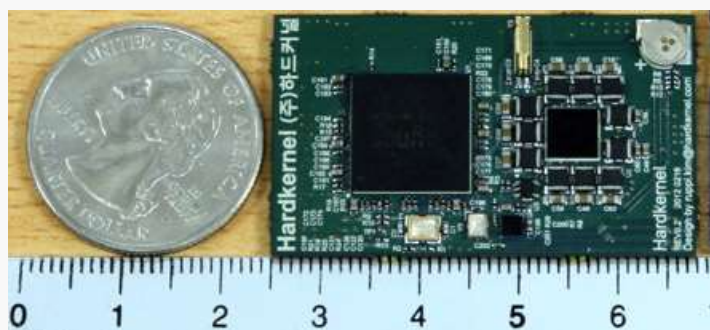


南北桥架构的演变 (3)



系统芯片 (System-on-a-Chip, SoC)

- 将计算机或其他电子系统集成成为单一芯片的集成电路
- 在智能手机、平板电脑等移动计算设备上得到广泛应用





本讲到此结束，谢谢 欢迎继续学习本课程

计算机组织与体系结构 Computer Architectures
主讲：陆俊林