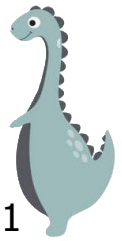
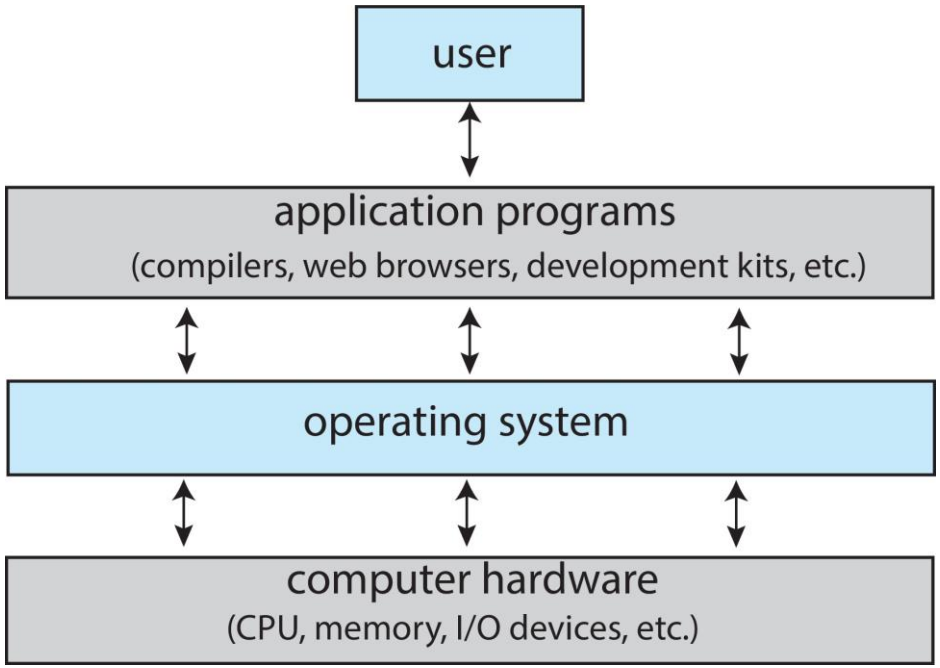
第2章 操作系统的运行环境和运行机制

- 本章内容
  - 1.计算机硬件系统对操作系统的支持，重要寄存器的作用
  - 2.CPU状态
  - 3. 中断/异常机制
  - 4.原语
  - 4. 系统调用及其实现

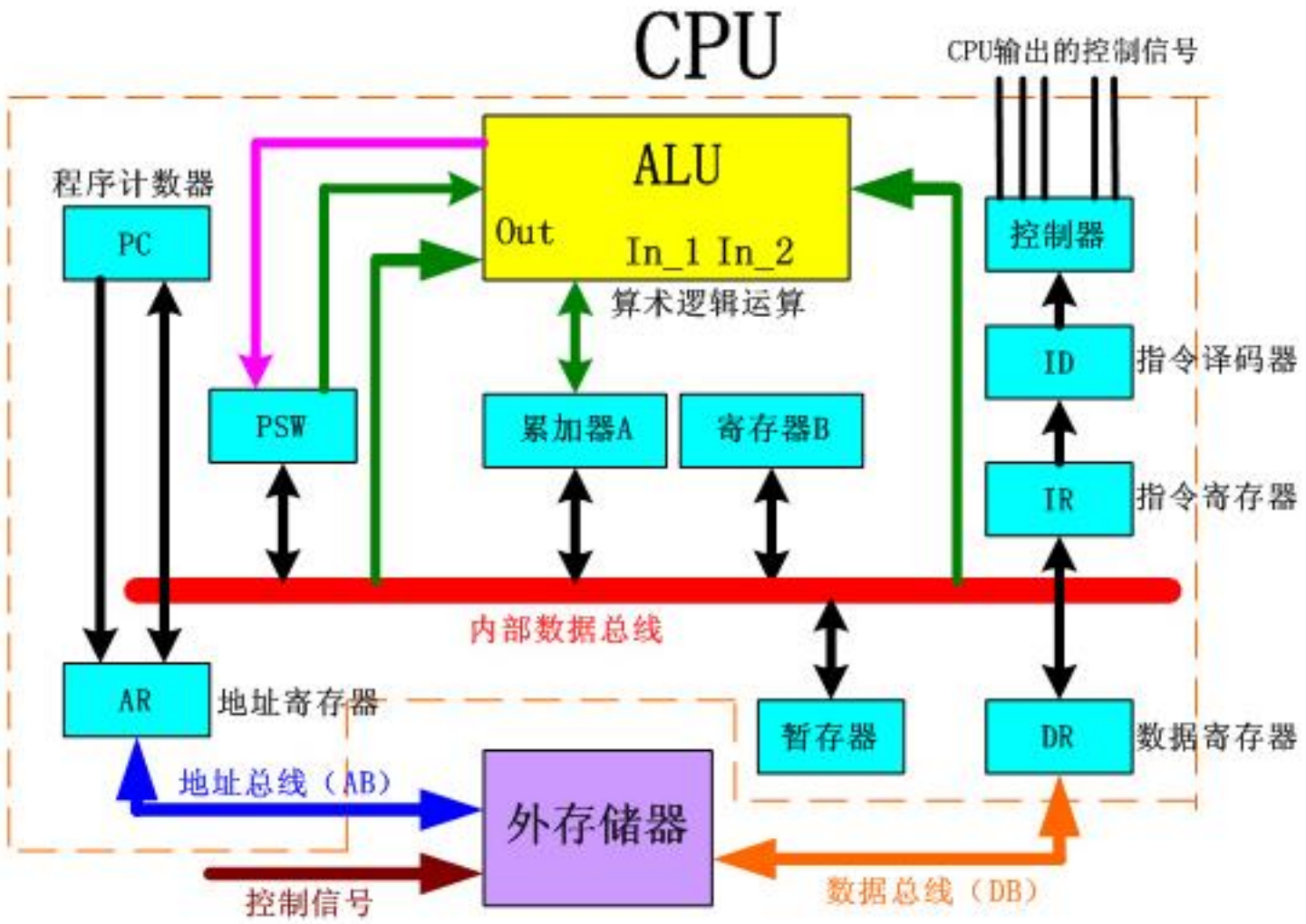


计算机系统的抽象结构

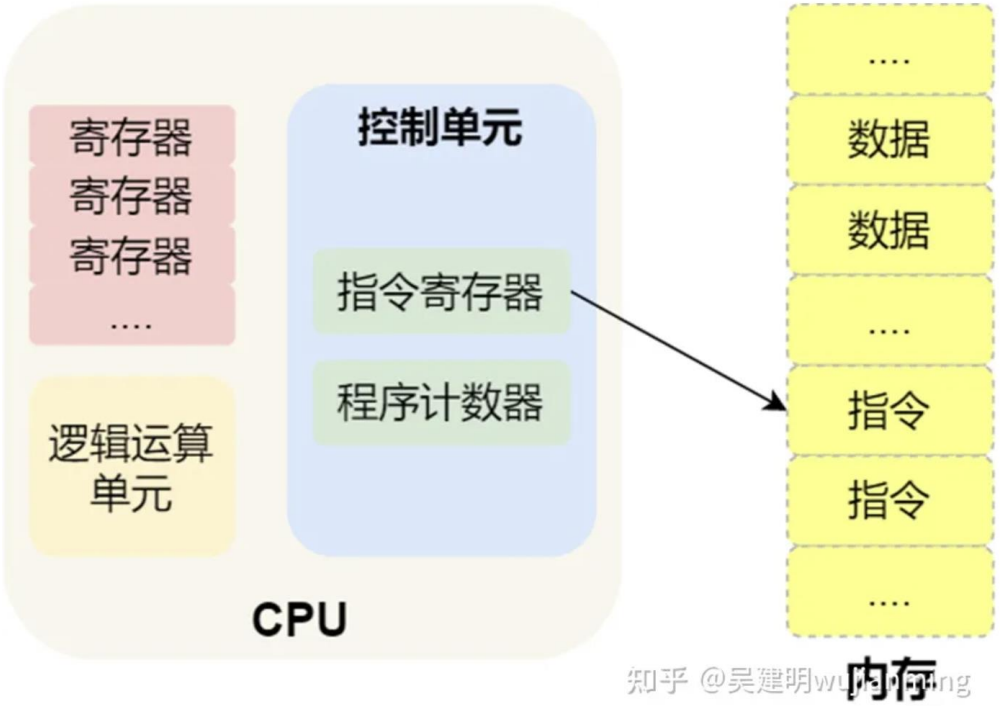


- 用户
  - 人, 机器, 其它计算机
- 应用程序
  - Word, 编译器, web 浏览器, 数据库系统, 视频游戏
- 操作系统
  - 控制和协调不同应用程序和用户之间对硬件的使用
- 硬件
  - CPU, 内存, I/O 设备

CPU的内部结构图


CPU
CPU输出的控制信号
ALU
Out
In_1 In_2
算术逻辑运算
程序计数器
PC
PSW
累加器A
寄存器B
控制器
ID
指令译码器
IR
指令寄存器
内部数据总线
AR
地址寄存器
暂存器
DR
数据寄存器
地址总线（AB）
外存储器
控制信号
数据总线（DB）

CPU的工作流程



- **取指**：CPU读取程序计数器（PC）中的地址作为指令的地址，从内存中读取指令。
- **译码**：CPU将取得的指令进行译码，以确定它要执行的操作。
- **执行**：CPU执行指令的操作，可能涉及到算术、逻辑、移位等操作。
- **写回**：CPU将执行结果写回到寄存器或内存中。

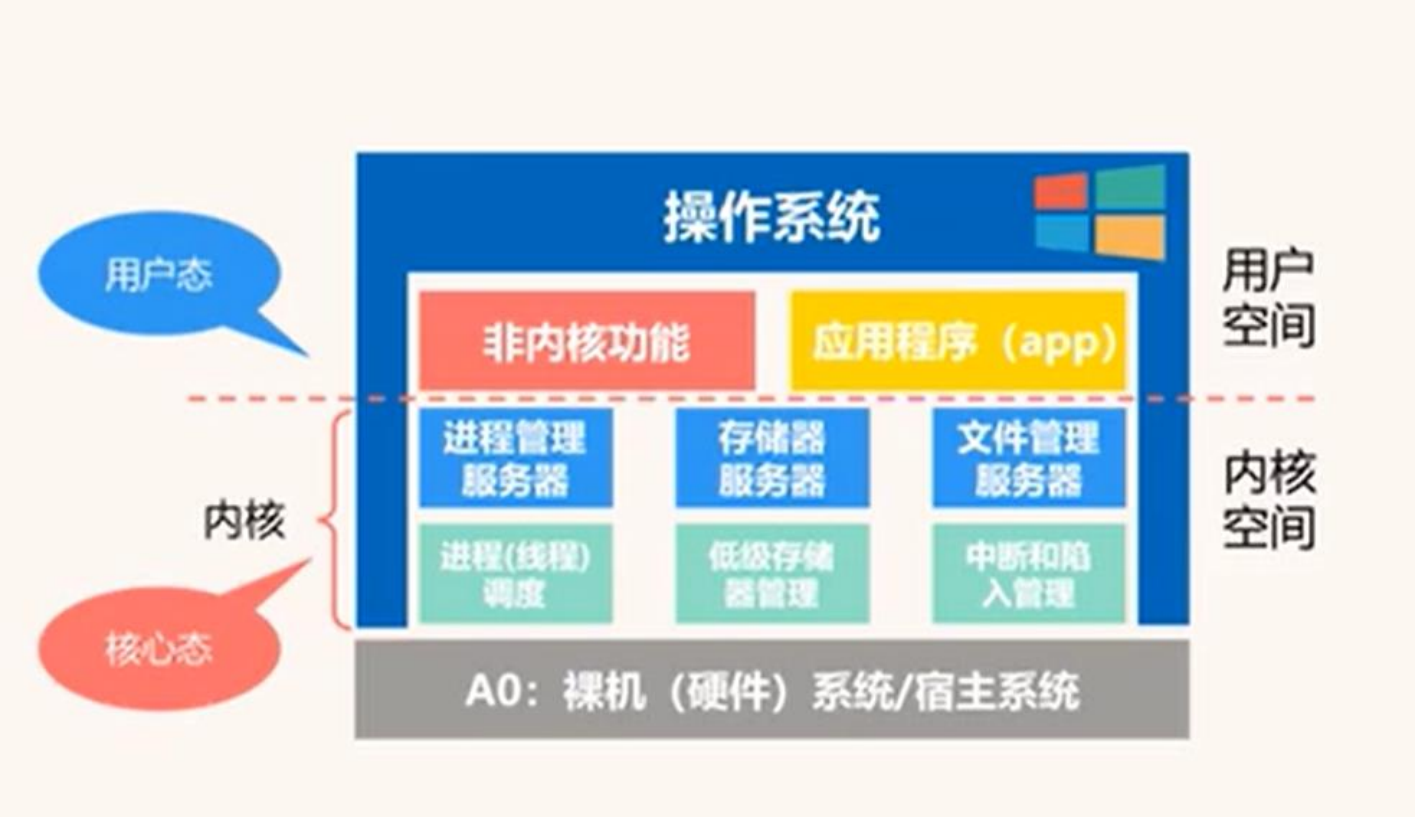
CPU的状态

- 什么是CPU的状态？
  - CPU的态，又称为CPU的特权级，是CPU的工作状态。当前CPU正在执行哪类程序，决定CPU的态。
- 为什么要区分CPU的状态？

管理程序	用户程序
管理系统资源	使用资源，提出申请
控制程序运行	被控制

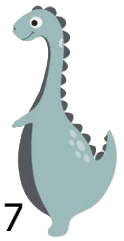
区分处理机状态的目的：保护操作系统

CPU的状态


操作系统
用户态
非内核功能
应用程序（app）
用户空间
进程管理服务器
存储器服务器
文件管理服务器
内核
内核空间
进程(线程)调度
低级存储器管理
中断和陷入管理
核心态
A0：裸机（硬件）系统/宿主系统

CPU状态的分类

- 内核态
  - 操作系统的管理程序执行时机器所处的状态，在此状态下处理机可使用全部指令(包括一组特权指令)；使用全部系统资源(包括整个存储区域)。
- 用户态
  - 用户程序执行时CPU所处的状态，在此状态下禁止使用特权指令，不能直接取用资源与改变机器状态，并且只允许用户程序访问自己的存储区域。



CPU的状态

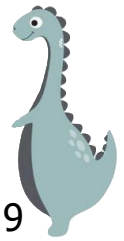
- 内核态与用户态的区别

内核态	用户态
操作系统的程序执行	用户程序执行
使用全部指令	禁止使用特权指令
使用全部系统资源 (包括整个存储区域)	只允许用户程序 访问自己的存储区域

- CPU的特权指令集
  - 涉及外部设备的输入/输出指令，修改特殊寄存器的指令，改变机器状态的指令

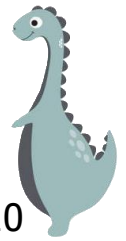
不同架构的CPU的特权级

- ARM架构
  - 定义了四个特权级别，分别是User（用户模式），FIQ（快速中断模式），IRQ（中断请求模式）和SVC（超级用户模式）。用户模式是普通应用程序运行的模式，而其他三种模式主要用于处理各种中断和异常。
- RISC-V架构
  - 定义了四种特权级别，分别是User（U），Supervisor（S），Hypervisor（H），Machine（M）。User级别用于运行用户程序，Supervisor级别用于运行操作系统内核，Hypervisor级别用于运行虚拟机管理器，Machine级别则是硬件级别，具有最高的特权。
- x86架构
  - 定义了四个特权级别，从Ring 0到Ring 3。其中，Ring 0具有最高的特权，通常用于运行操作系统内核。Ring 1和Ring 2很少使用，而Ring 3具有最低的特权，用于运行用户程序。



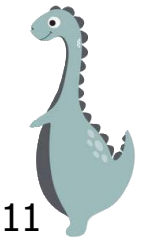
CPU中的重要寄存器

- **程序计数器（PC）**
  - 用于记录下一条要执行的指令的地址。当处理器执行完一条指令后，PC寄存器会自动更新为下一条指令的地址。
- 指令寄存器（IR）
  - IR寄存器用于记录最近取出并解码的指令。
- **程序状态字（PSW）寄存器**
  - PSW寄存器用于记录处理器的运行状态，如条件码、模式、控制位等。PSW寄存器中的一些位可以影响处理器的行为，如中断允许位、处理器状态位等。
- 通用寄存器（General Registers）
  - 通用寄存器是一组可以被用户程序和操作系统程序使用的寄存器，用于保存数据或地址。
- 控制寄存器（Control Registers）
  - 控制寄存器是一组只能被操作系统程序使用的寄存器，用于控制和配置处理器的一些特性和功能。



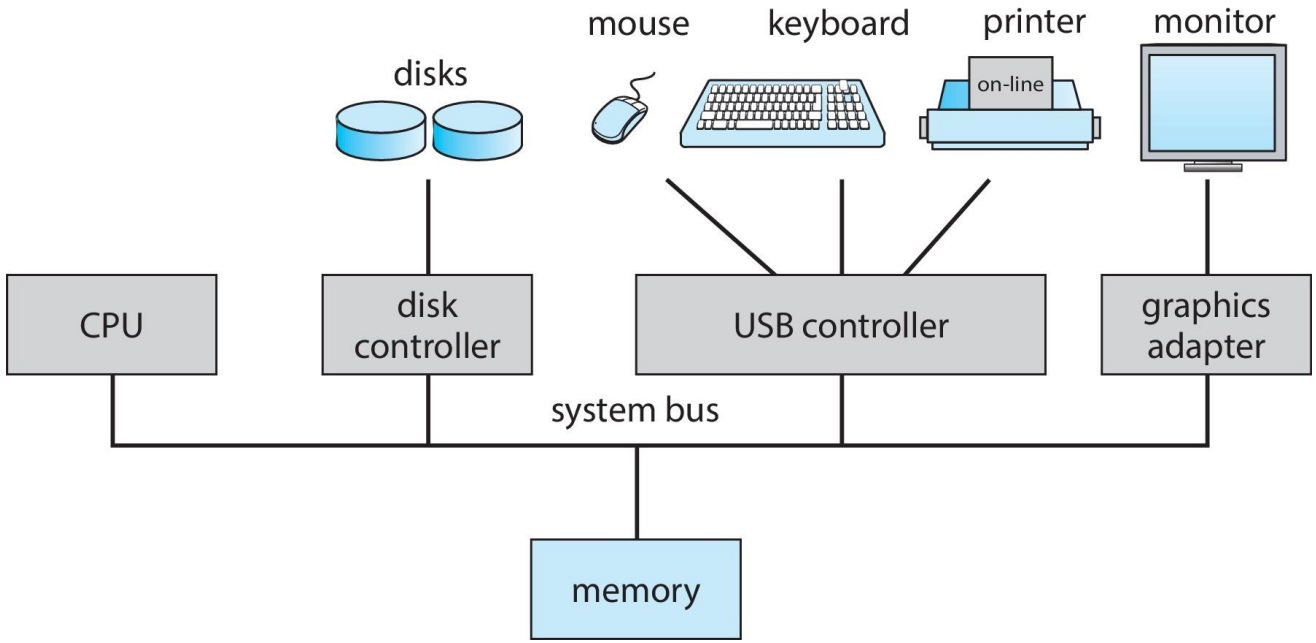
CPU特权级切换的三个场景

- 应用程序调用操作系统提供的**系统调用**，此时应用程序通过执行系统调用指令将CPU的特权级从用户态切换到内核态
- 应用程序执行一条指令触发了**异常**，导致CPU的特权级从用户态切换到内核态，比如访内存指令触发了缺页异常
- 应用程序执行过程中，CPU收到一条来自外设的**中断**，对中断的处理导致CPU的特权级从用户态切换到内核态



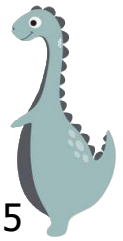
计算机系统的硬件结构

- CPU、设备控制器通过公共总线连接，从而可以访问共享内存
- CPU和设备并发执行，竞争内存周期



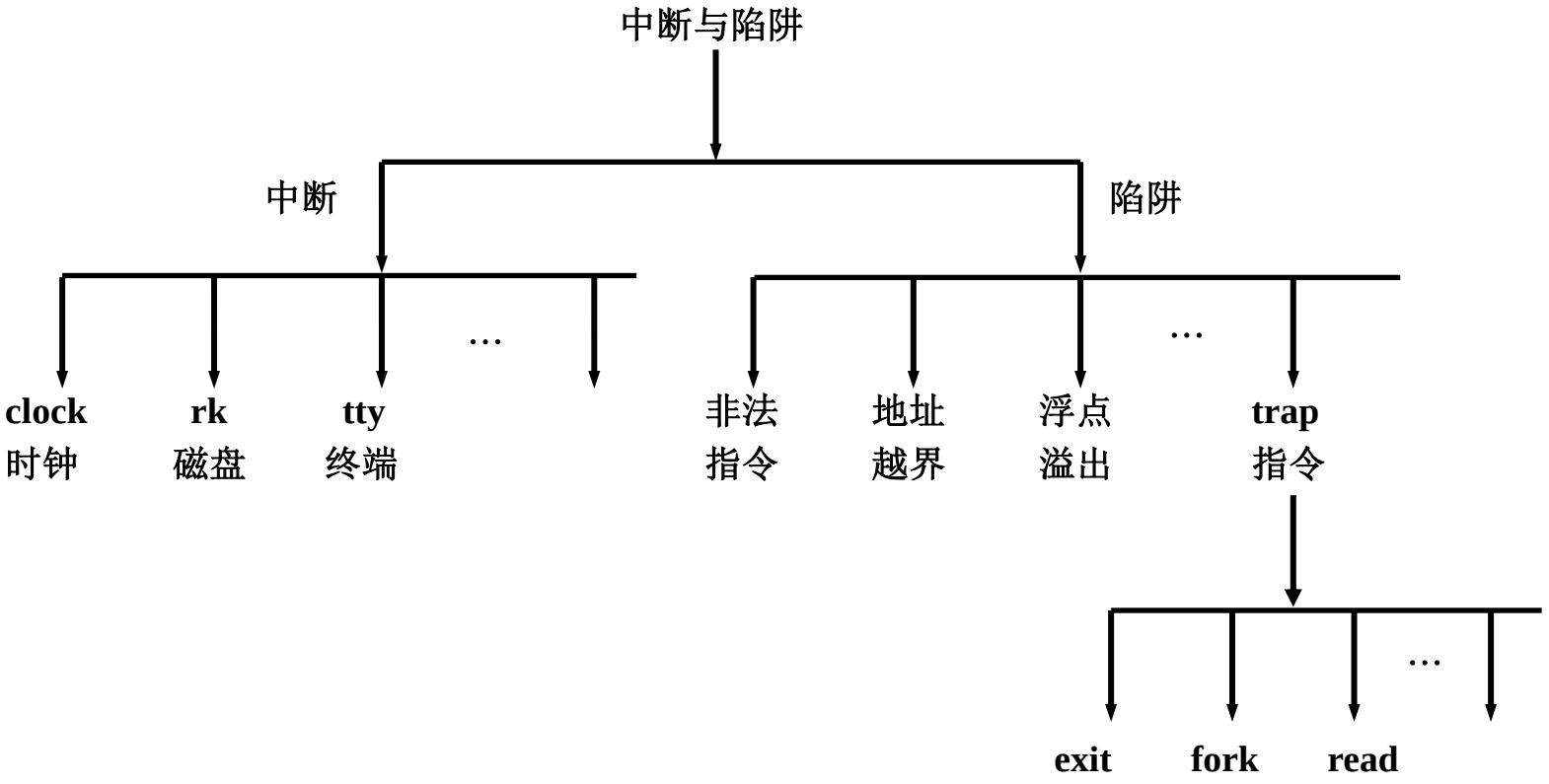
中断机制中的常见功能

- 中断一般通过中断向量将控制权转移到中断服务例程，中断向量包含所有服务例程的地址
- 中断架构必须保存被中断指令的地址
- 陷阱或异常是由错误或用户请求引起的软件生成的中断
- 操作系统是中断驱动的



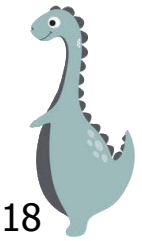
中断的分类

- 按中断来源分
  - 中断：由处理机外部事件引起的中断
  - 陷阱trap（异常）：由处理机内部事件引起的中断



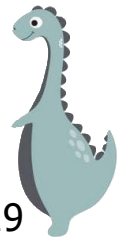
中断的分类

- 按中断功能分类
  - 输入输出中断：I/O传输结束或出错中断
  - 外中断：时钟中断、操作员控制台中断、通信中断等
  - 机器故障中断：电源故障、主存取指令错等
  - 程序性中断：定点溢出、用户态下用内核态指令
  - 访管中断：对操作系统提出某种需求时所发出的中断、非法操作有时也被称为系统调用(System Call)、陷阱(Trap)或者软件中断(Software Interrupt)

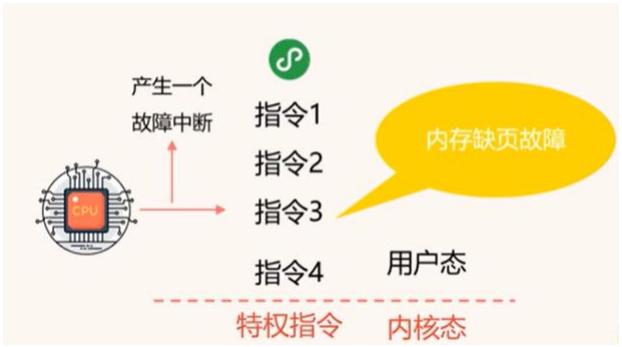


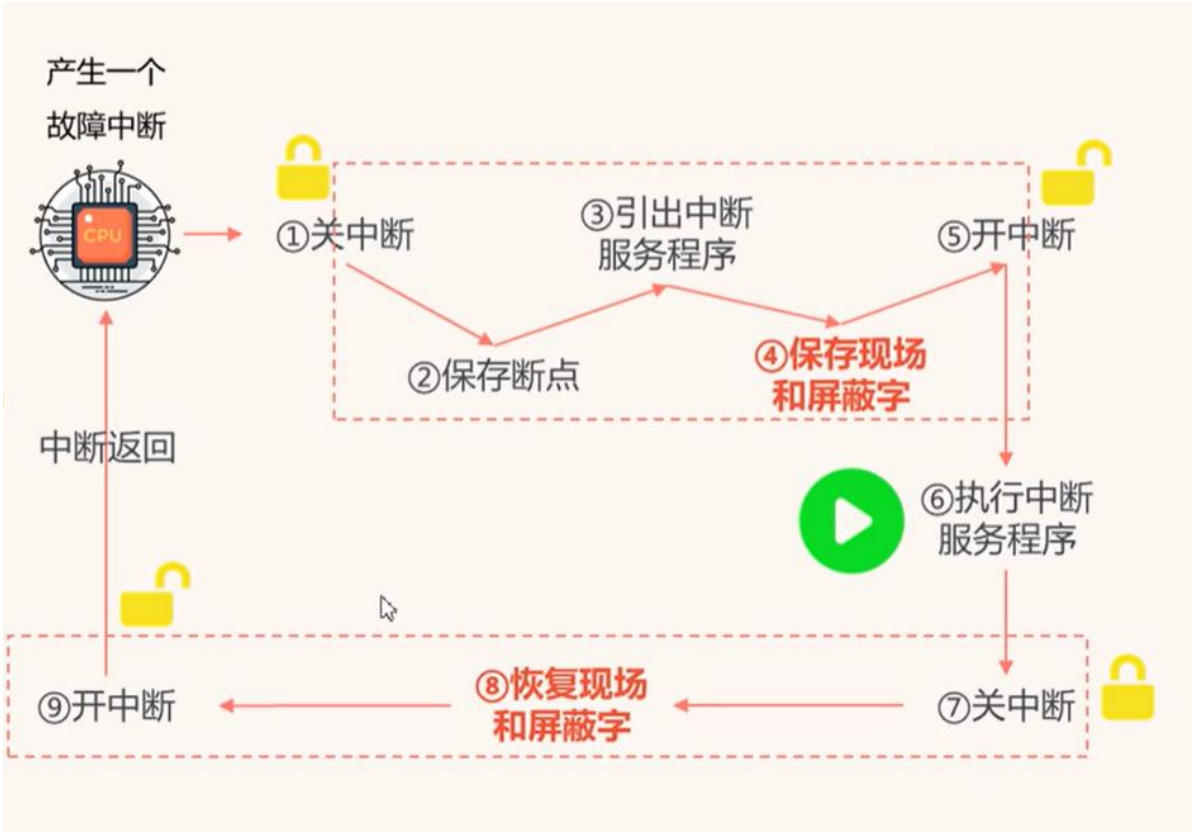
中断的分类

- 按中断方式分类
  - 强迫性中断
    - 不是正在运行的程序所期待的中断，如：输入输出中断、外中断、机器故障中断、程序性中断
  - 自愿中断
    - 是运行程序所期待的事件。如：访管中断

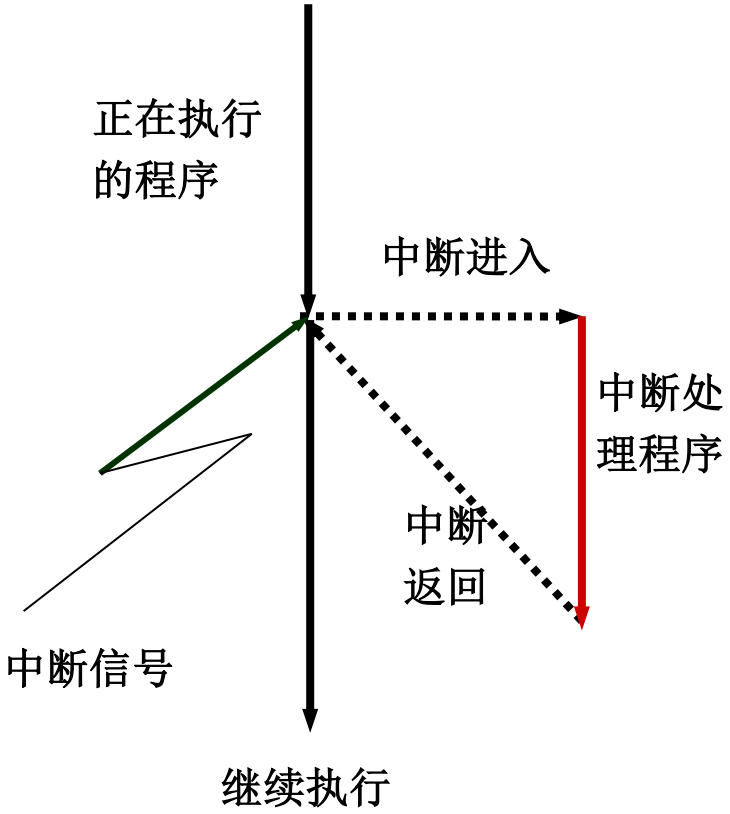


中断处理过程


产生一个
故障中断
CPU
指令1
指令2
指令3
指令4
内存缺页故障
用户态
特权指令
内核态


产生一个
故障中断
CPU
①关中断
②保存断点
③引出中断
服务程序
④保存现场
和屏蔽字
⑤开中断
⑥执行中断
服务程序
⑦关中断
⑧恢复现场
和屏蔽字
⑨开中断
中断返回

中断响应



中断概念示意图

- **中断响应**：当中央处理机CPU发现已有中断请求时，中止现行程序执行，并自动引出中断处理程序的过程。
- 中断响应需要硬件支持
  - PC—指令计数器
  - PSW—状态寄存器
  - 系统堆栈—内存的固定区域
  - 中断向量表—内存的固定区域

保存现场与恢复现场

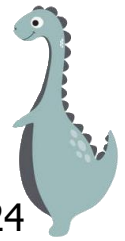
- 什么是现场？
  - 在中断的那一时刻能确保程序继续运行的有关信息

    ①后继指令所在主存的单元号

    ② 程序运行所处的状态

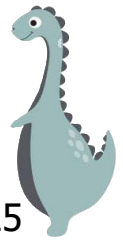
    ③ 指令执行情况

    ④ 程序执行的中间结果等



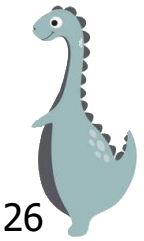
保存现场与恢复现场

- **保存现场**
  - 当中断发生时，必须立即把现场信息保存在主存中，这一工作称之为保存现场
- **恢复现场**
  - 程序重新运行之前，把保留的该程序现场信息从主存中送至相应的指令计数器、通用寄存器或一些特殊的寄存器中。完成这些工作称为恢复现场



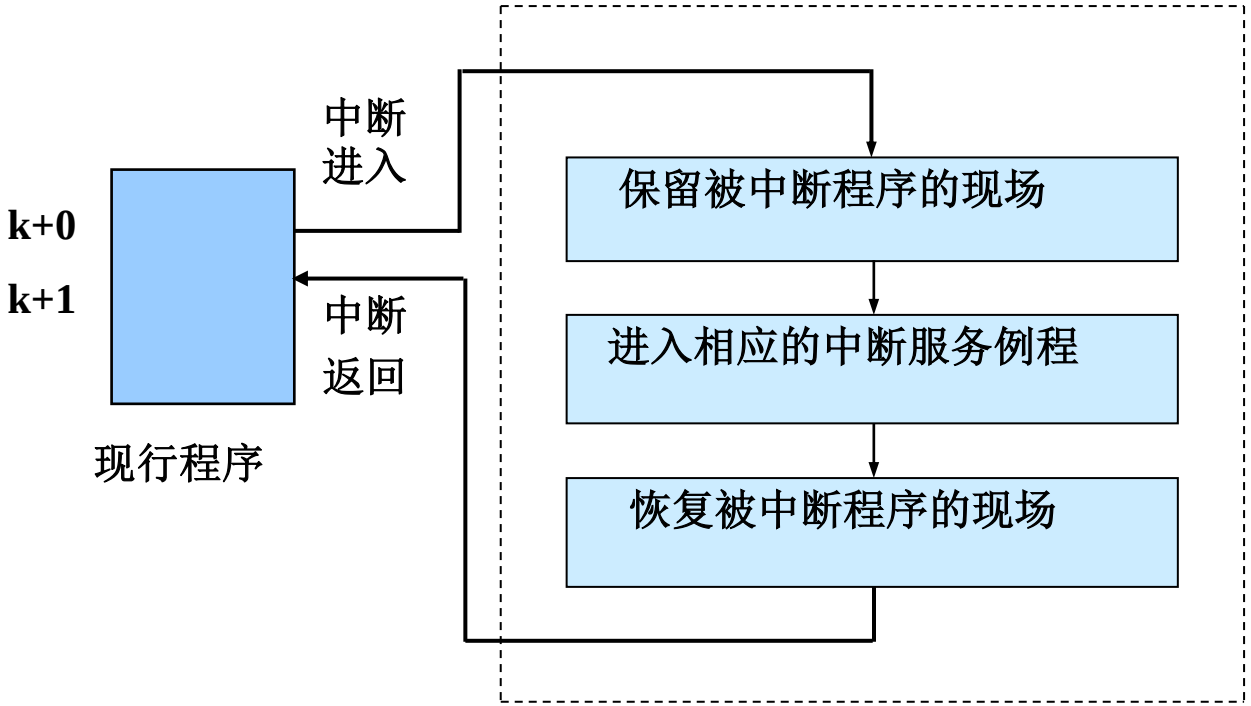
保存现场与恢复现场

- 程序状态字（PSW）
  - 当前程序执行时机器所处的状态信息
  - 通常存储在CPU的一个特殊寄存器中，不同的CPU架构有不同的定义
  - 通通常包含以下信息
    - 条件码：记录最近一次算术或逻辑操作的结果，比如：结果是否为零、是否有进位或借位、是否溢出等
    - 中断使能/禁止位：决定是否允许响应中断
    - 用户/内核模式位：标识当前CPU处于用户模式还是内核模式
    - 其他特定于具体处理器架构的标志位



中断处理程序

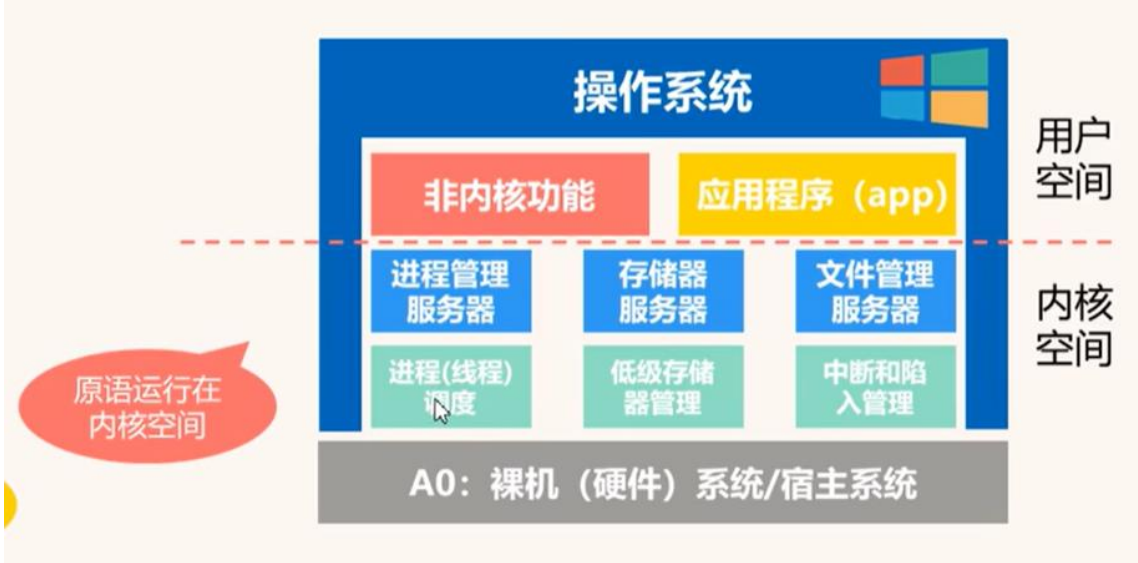
- 当硬件完成了中断进入过程后，由相应的中断处理程序得到控制权，进入了软件的中断处理过程



中断处理过程示意图

原语

- 原语：是一种不可再分的原子操作，执行过程中不会被中断。
  - 由若干条指令组成
  - 用来完成某个功能
  - 执行过程不能被中断



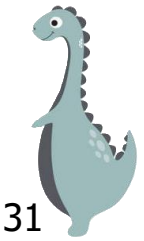
系统调用

- 什么是系统调用？

系统调用示意图

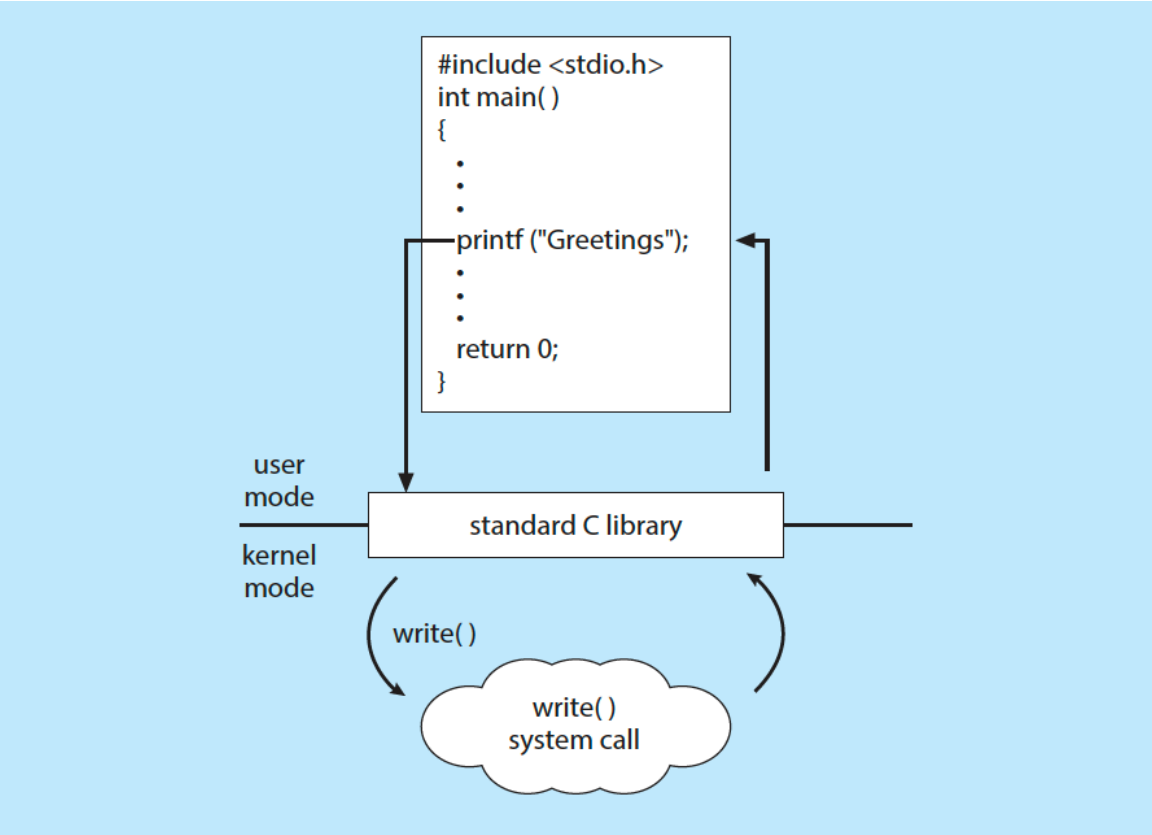
系统调用

- 是操作系统提供的服务的编程接口
- 通常用高级语言（如 C 或 C++）编写
- 大多数程序通过高级应用程序编程接口（API）而不是直接使用系统调用
- 最常见的三个 API：Windows 的 Win32 API，基于 POSIX 的系统（包括几乎所有版本的 UNIX、Linux 和 Mac OS X）的 POSIX API，以及 Java 虚拟机（JVM）的 Java API



标准C函数库

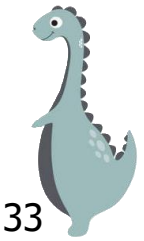
- C 程序调用 printf() 库函数，该函数调用 write() 系统调用



代码示例

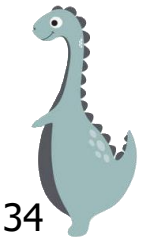
```
// linux/init/main.c
 static int printf(const char *fmt, ...)
{
        va_list args;
        int i;

        va_start(args, fmt);
        write(1,printbuf,i=vsprintf(printbuf, fmt, args));
        va_end(args);
        return i;
}
```



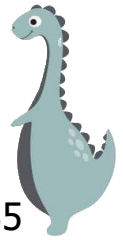
代码示例

```
int write(int fd, const char * buf, off_t count){
    long __res;
    __asm__ volatile (
        "int $0x80"
        : "=a" (__res)
        : "0" (__NR_write),
          "b" ((long)(fd)),
          "c" ((long)(buf)),
          "d" ((long)(count))
    );
    if (__res >= 0) { return (int)__res; }
    errno = -__res;
    return -1;
}
```



代码示例

```
1  # linux/kernel/system_call.s
2
3  nr_system_calls = 72        # Linux 0.11 版本内核中的系统共调用总数。
4  .globl system_call      # 定义入口点
5  system_call:
6      cmpl $nr_system_calls-1,%eax    # 调用号如果超出范围的话就在eax中置-1并退出
7      ja bad_sys_call
8      push %ds                        # 保存原段寄存器值
9      push %es
10     push %fs
11     pushl %edx
12     pushl %ecx      # push %ebx,%ecx,%edx as parameters
13     pushl %ebx      # to the system call
14
15     # 设置ds、es为0x10，内核数据段。
16     movl $0x10,%edx
17     mov %dx,%ds
18     mov %dx,%es
19
20     movl $0x17,%edx     # fs points to local data space
21     mov %dx,%fs
22     call sys_call_table(,%eax,4)        # 间接调用指定功能C函数
23     pushl %eax
24 ...
```



标准API示例

EXAMPLE OF STANDARD API

As an example of a standard API, consider the `read()` function that is available in UNIX and Linux systems. The API for this function is obtained from the `man` page by invoking the command

```
man read
```

on the command line. A description of this API appears below:

```
#include <unistd.h>

ssize_t    read(int fd, void *buf, size_t count)
```

return value — function name — parameters

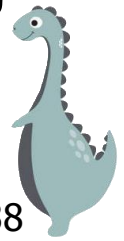
A program that uses the `read()` function must include the `unistd.h` header file, as this file defines the `ssize_t` and `size_t` data types (among other things). The parameters passed to `read()` are as follows:

- `int fd`—the file descriptor to be read
- `void *buf`—a buffer into which the data will be read
- `size_t count`—the maximum number of bytes to be read into the buffer

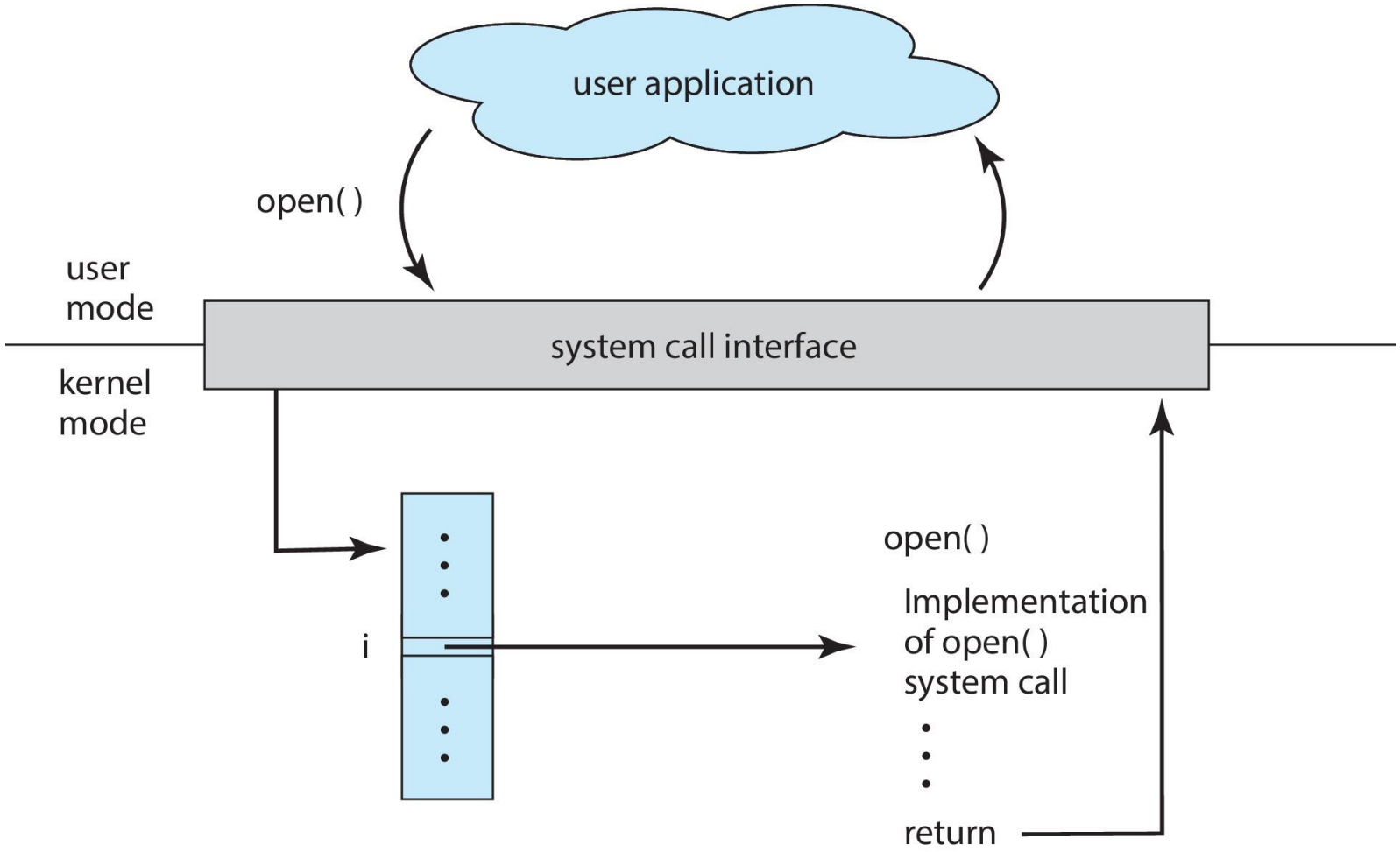
On a successful read, the number of bytes read is returned. A return value of 0 indicates end of file. If an error occurs, `read()` returns –1.

系统调用的实现

- 每个系统调用都与一个编号相关联
  - 系统调用接口根据这些编号维护一个索引表
- 系统调用接口在操作系统内核中调用所需的系统调用，并返回系统调用的状态和任何返回值
- 调用者不需要了解系统调用的具体实现方式
  - 只需要遵循 API 并理解操作系统对调用的结果会做什么
  - API 将操作系统接口的大部分细节隐藏起来，对程序员不可见
    - 由运行时支持库管理（一组内置于编译器所包含的库中的函数）



API：打开文件的系统调用

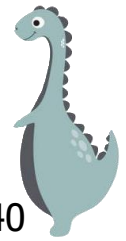


访管中断

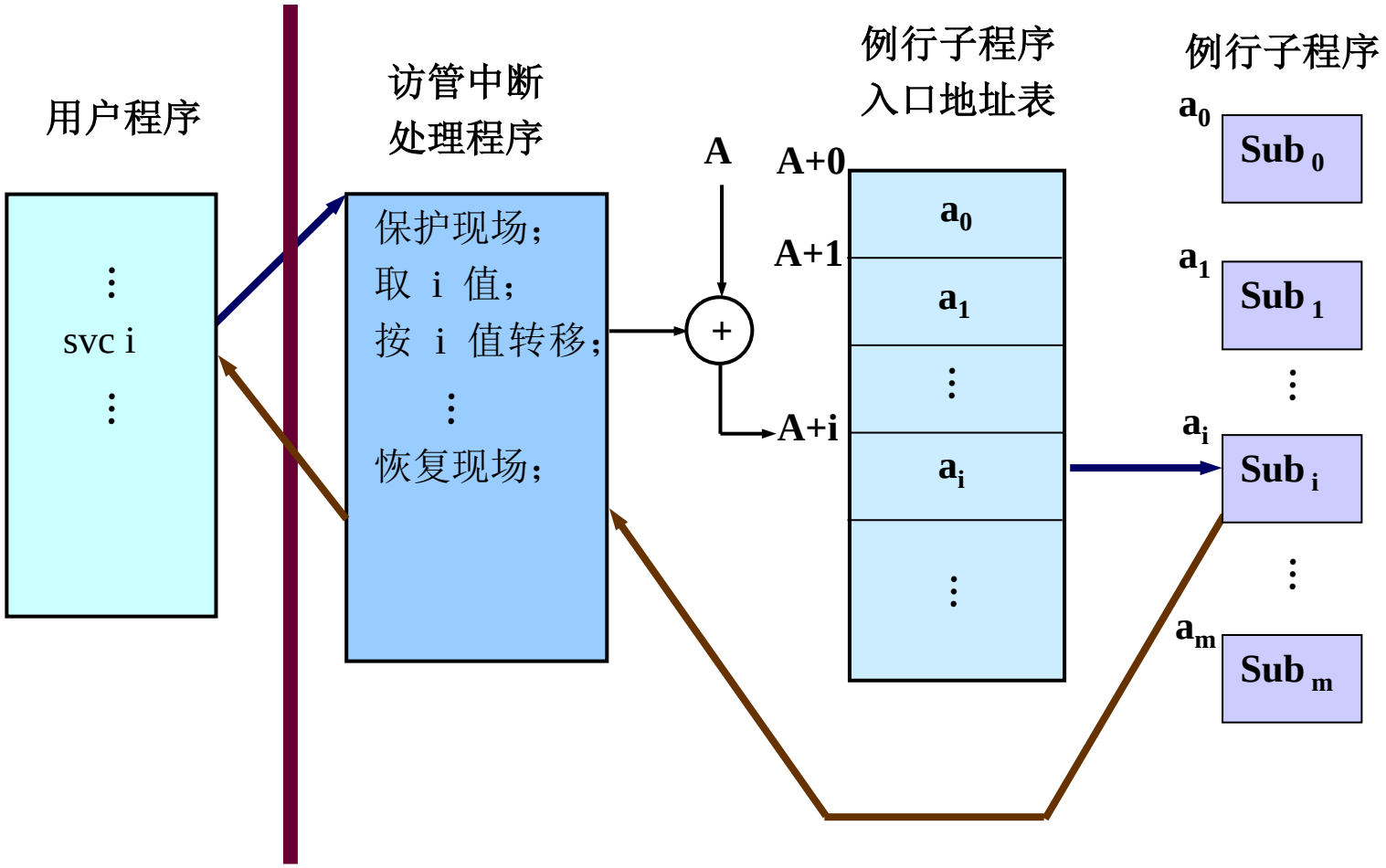
- 当处理机执行到访管指令时发生中断，该中断称为访管中断，它表示正在运行的程序对操作系统的某种需求。
- 操作系统提供实现各种功能的例行子程序，其中的每一个功能对应访管指令的一个**功能号**。例如：

  svc 0　　显示一个字符

  svc 1　　打印一个字符串
- 系统调用是用户在程序一级请求操作系统服务的一种手段，它是带有一定功能号的“访管指令”。其功能是由操作系统中的程序完成的，即由软件方法实现的。



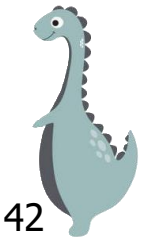
访管中断的实现



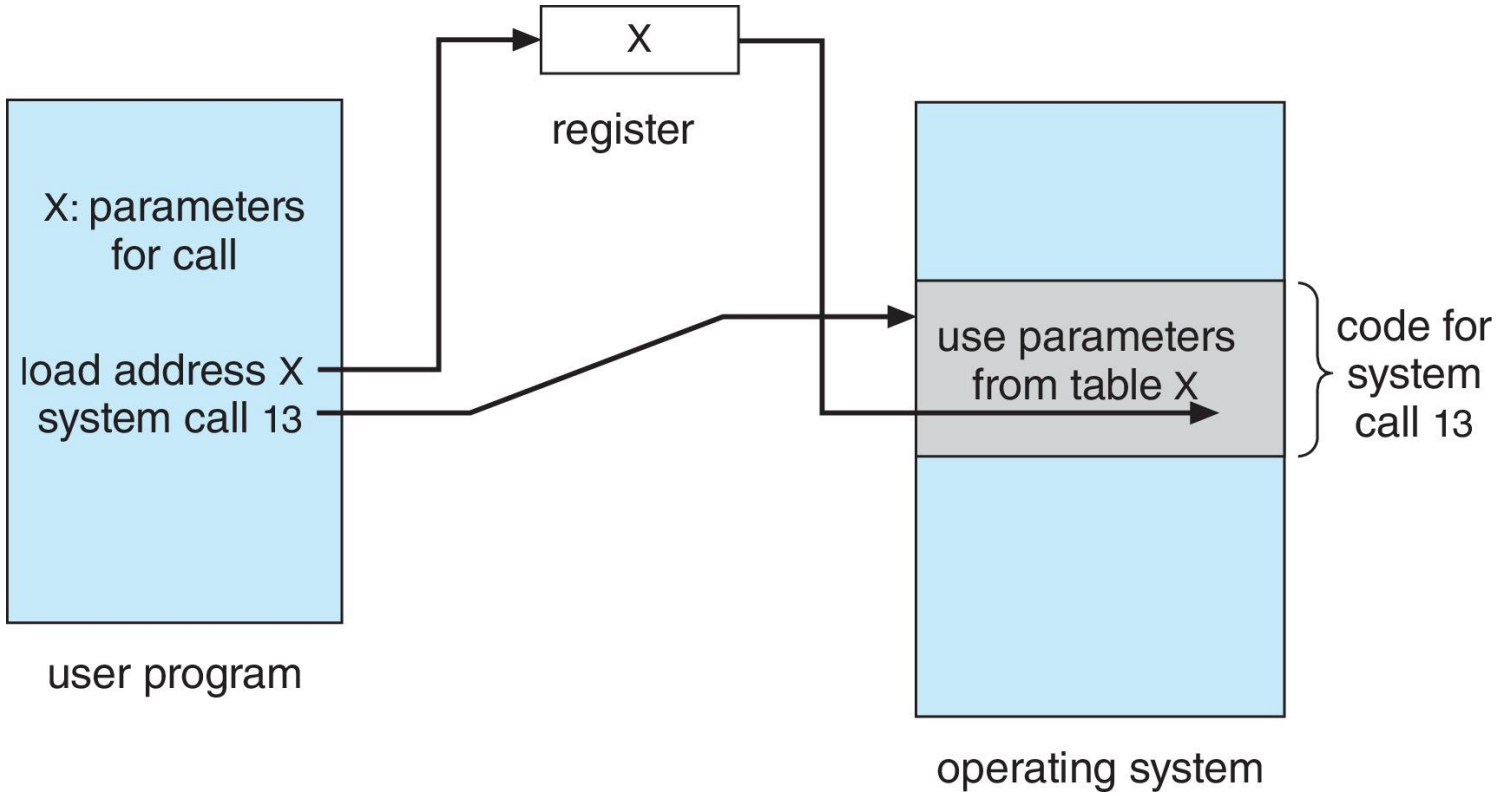
系统调用的执行过程

系统调用的参数传递

- 除了所需系统调用的标识符之外，还需要更多的信息
- 具体的信息类型和数量根据操作系统和调用而变化
- 有三种常见的方法用于将参数传递给操作系统
  - 将参数传递到寄存器中
    - 在某些情况下，可能会有多个参数超过寄存器数量
  - 将参数存储在内存中的块或表中，并将块的地址作为参数传递到寄存器中
    - 这种方法被 Linux 和 Solaris 使用
  - 程序将参数放置或推送到堆栈中，并由操作系统从堆栈中弹出
  - 块和堆栈方法不限制传递的参数数量或长度

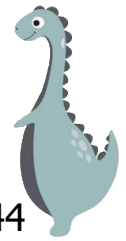


通过表来进行参数传递


X
register
X: parameters for call
load address X
system call 13
user program
use parameters from table X
code for system call 13
operating system

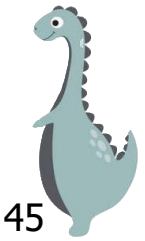
系统调用的类型

- 进程控制
  - create process, terminate process
  - end, abort
  - load, execute
  - get process attributes, set process attributes
  - wait for time
  - wait event, signal event
  - allocate and free memory
  - dump memory if error
  - Debugger for determining bugs, single step execution
  - Locks for managing access to shared data between processes



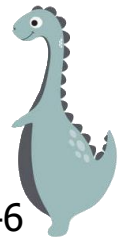
系统调用的类型

- 文件管理
  - create file，delete file
  - open，close file
  - read， write，reposition
  - get and set file attributes
- 设备管理
  - request device, release device
  - read, write, reposition
  - get device attributes, set device attributes
  - logically attach or detach devices



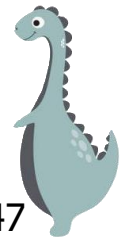
系统调用的类型

- 信息维护　Information maintenance
  - get time or date, set time or date
  - get system data, set system data
  - get and set process, file, or device attributes
- 通信　Communications
  - create, delete communication connection
  - send, receive messages if **message passing model** to **host name** or **process name**
    - From **client** to **server**
  - **shared-memory model** create and gain access to memory regions
  - transfer status information
  - attach and detach remote devices



系统调用的类型

- 保护
  - control access to resources
  - get and set permissions
  - allow and deny user access



Windows和Unix的系统调用

EXAMPLES OF WINDOWS AND UNIX SYSTEM CALLS

The following illustrates various equivalent system calls for Windows and UNIX operating systems.

	Windows	Unix

Process control	`CreateProcess()`
	`ExitProcess()`
	`WaitForSingleObject()`
		`fork()`
		`exit()`
		`wait()`

File management	`CreateFile()`
	`ReadFile()`
	`WriteFile()`
	`CloseHandle()`
		`open()`
		`read()`
		`write()`
		`close()`

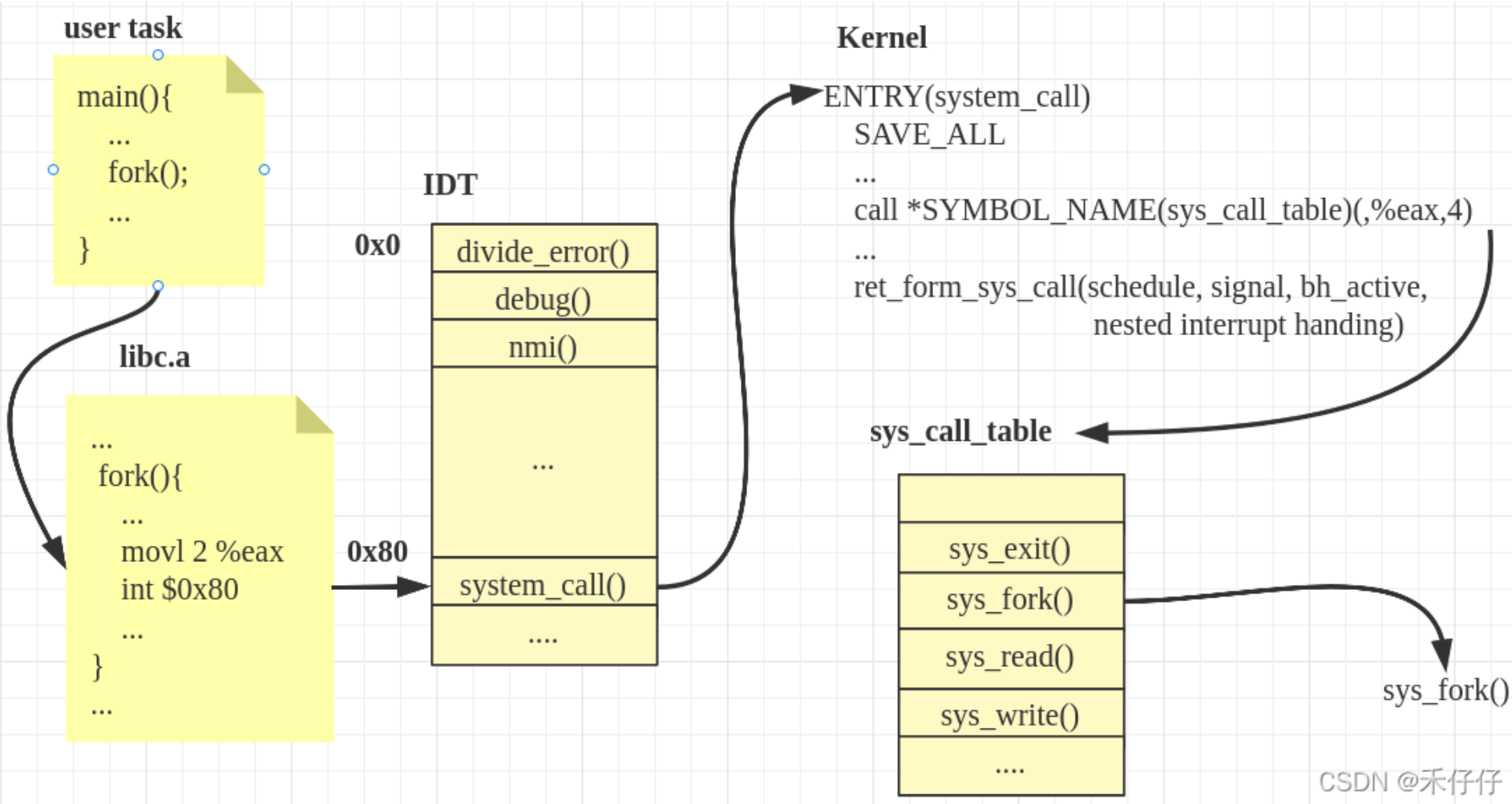
Device management	`SetConsoleMode()`
	`ReadConsole()`
	`WriteConsole()`
		`ioctl()`
		`read()`
		`write()`

Information maintenance	`GetCurrentProcessID()`
	`SetTimer()`
	`Sleep()`
		`getpid()`
		`alarm()`
		`sleep()`

Communications	`CreatePipe()`
	`CreateFileMapping()`
	`MapViewOfFile()`
		`pipe()`
		`shm_open()`
		`mmap()`

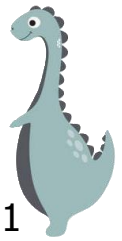
Protection	`SetFileSecurity()`
	`InitlializeSecurityDescriptor()`
	`SetSecurityDescriptorGroup()`
		`chmod()`
		`umask()`
		`chown()`

Linux的系统调用



Linux的系统调用实现机制

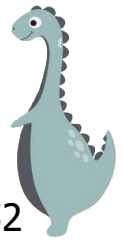
- 系统调用的进入
  - ① 执行指令触发系统调用
    - X86触发系统调用的指令为int 0x80或syscall
    - Riscv触发系统调用的指令为ecall
  - ② OS查看寄存器中的值来决定具体执行哪个系统调用
  - ③ 处理机的状态由用户态陷入到内核态
  - ④ 执行系统调用处理程序。
  - ⑤ 当系统调用处理完毕后，通过特定的指令返回到用户态。



Linux的系统调用实现机制

- 系统调用号
  - ① linux中，每个系统调用被赋予一个唯一的系统调用号
  - ② 系统调用号定义在include/asm-i386/unistd.h头文件中
  - ③ 系统调用号格式如下

```
#define __NR_restart_syscall        0
#define __NR_exit                   1
#define __NR_fork                   2
#define __NR_read                   3
#define __NR_write                  4
#define __NR_open                   5
……
……
#define __NR_mq_getsetattr          282
```



Linux的系统调用实现机制

- 系统调用表

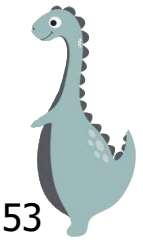
① 系统调用表记录了内核中所有已注册过的系统调用，

它是系统调用的跳转表。

② 系统调用表是一个函数指针数组，表中依次保存所有

系统调用的函数指针

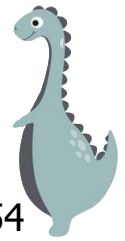
③ Linux系统调用表保存在arch/i386/kernel/下的entry.S中



Linux的系统调用实现机制

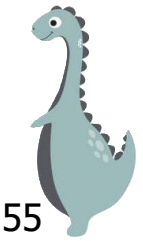
- 系统调用表
  - ④ 系统调用表格式如下

```
ENTRY(sys_call_table)
        .long sys_restart_syscall       /* 0 */
        .long sys_exit                  /* 1 */
        .long sys_fork                  /* 2 */
        .long sys_read                  /* 3 */
        .long sys_write                 /* 4 */
        .long sys_open                  /* 5 */
        ……
        ……
        .long sys_mq_getsetattr         /* 282 */
```

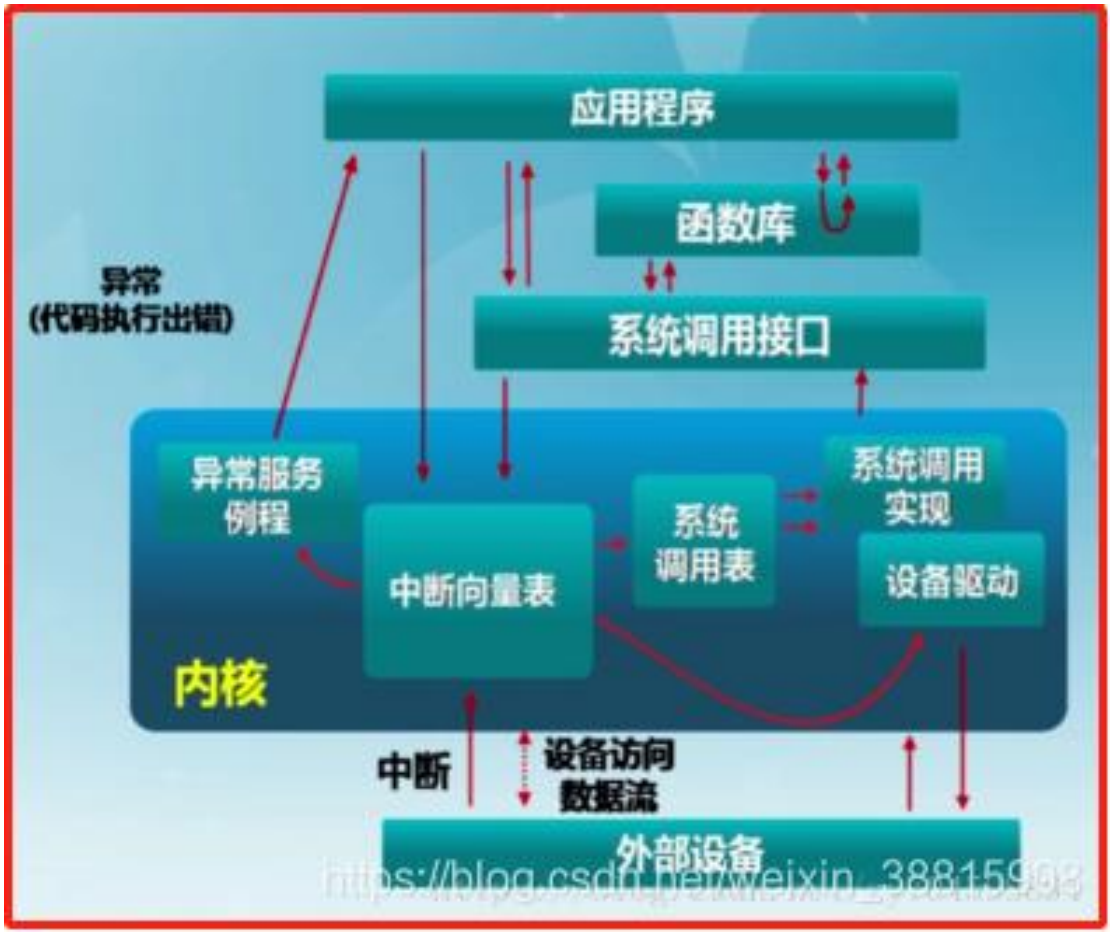


Linux的系统调用实现机制

- 系统调用处理程序
  - 保存和恢复用户空间的上下文（即寄存器的状态）。
  - 从寄存器中获取系统调用的编号和参数。
  - 根据系统调用的编号在系统调用表中查找对应的处理函数并执行。
  - 将系统调用的结果返回给用户空间。

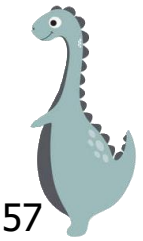


中断、异常和系统调用


应用程序
函数库
异常
(代码执行出错)
系统调用接口
异常服务
例程
中断向量表
系统
调用表
系统调用
实现
设备驱动
内核
中断
设备访问
数据流
外部设备

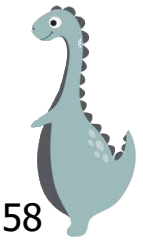
为什么应用程序是OS特定的

- 在一个系统上编译的应用程序通常无法在其他操作系统上执行
- 每个操作系统都提供自己独特的系统调用
  - 拥有自己的文件格式等
- 应用程序可以是多操作系统的
  - 使用解释型语言编写，如 Python，Ruby，并且解释器可用于多个操作系统
  - 使用包含运行应用程序的虚拟机的语言编写的应用程序（如 Java）
  - 使用标准语言（如 C），在每个操作系统上单独编译以便在每个操作系统上运行
- 应用程序二进制接口（ABI）是 API 的体系结构等价物，定义了不同二进制代码组件如何在给定操作系统、体系结构、CPU 等条件下进行接口。



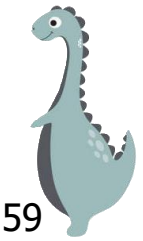
练习题

- 从应用程序的视角来看，异常和中断的区别是什么？
- 在发生CPU的特权级切换时，CPU会自动保存当前的执行状态，包括程序计器(PC)、栈指针(Stack Pointer, SP)等。请分析：如果不保存PC和SP，会出现什么问题？



练习题

- 系统调用和库函数或API之间是什么关系？
- 操作系统提供的系统调用有哪几种参数传递的方法？
- 请解释说明系统调用机制涉及的概念：访管指令、系统调用号、参数传递、系统调用表、系统调用实现函数。



选择题1

- 操作系统提供给编程人员的接口是_____。

A.系统调用　　B.子程序

C.库函数　　D.高级语言