中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

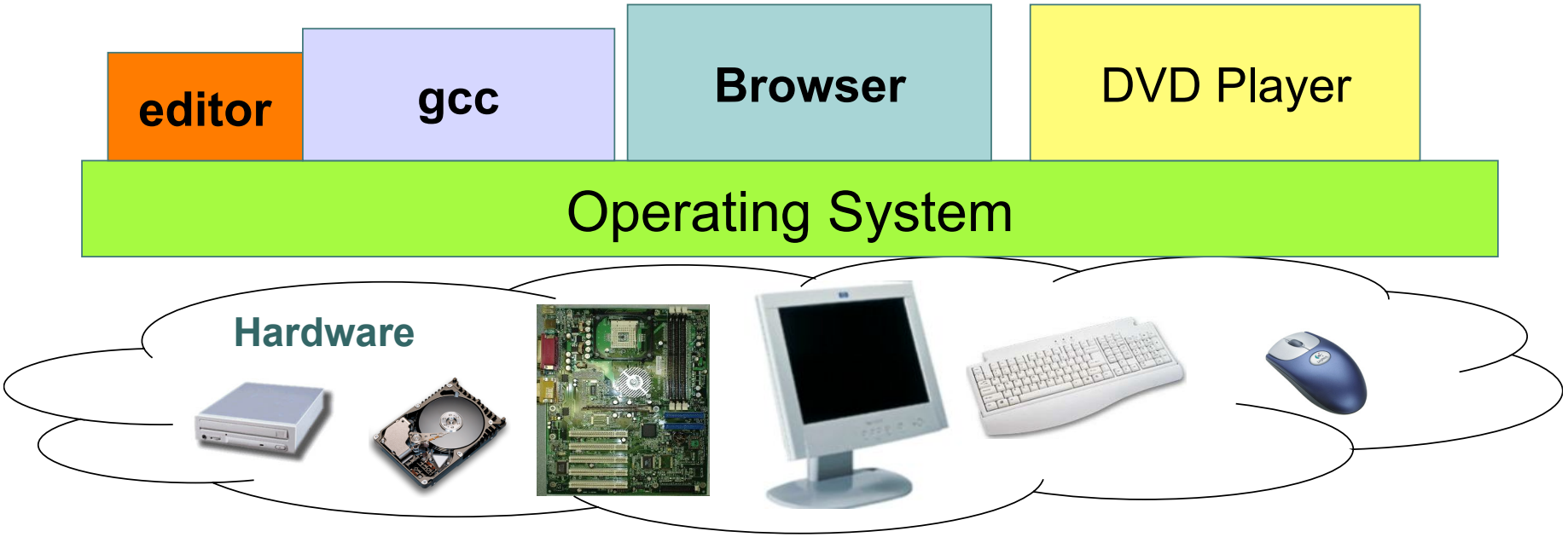
操作系统结构与组成

中国科学院大学计算机学院

2024-08-28

回顾Intro01：什么是操作系统？

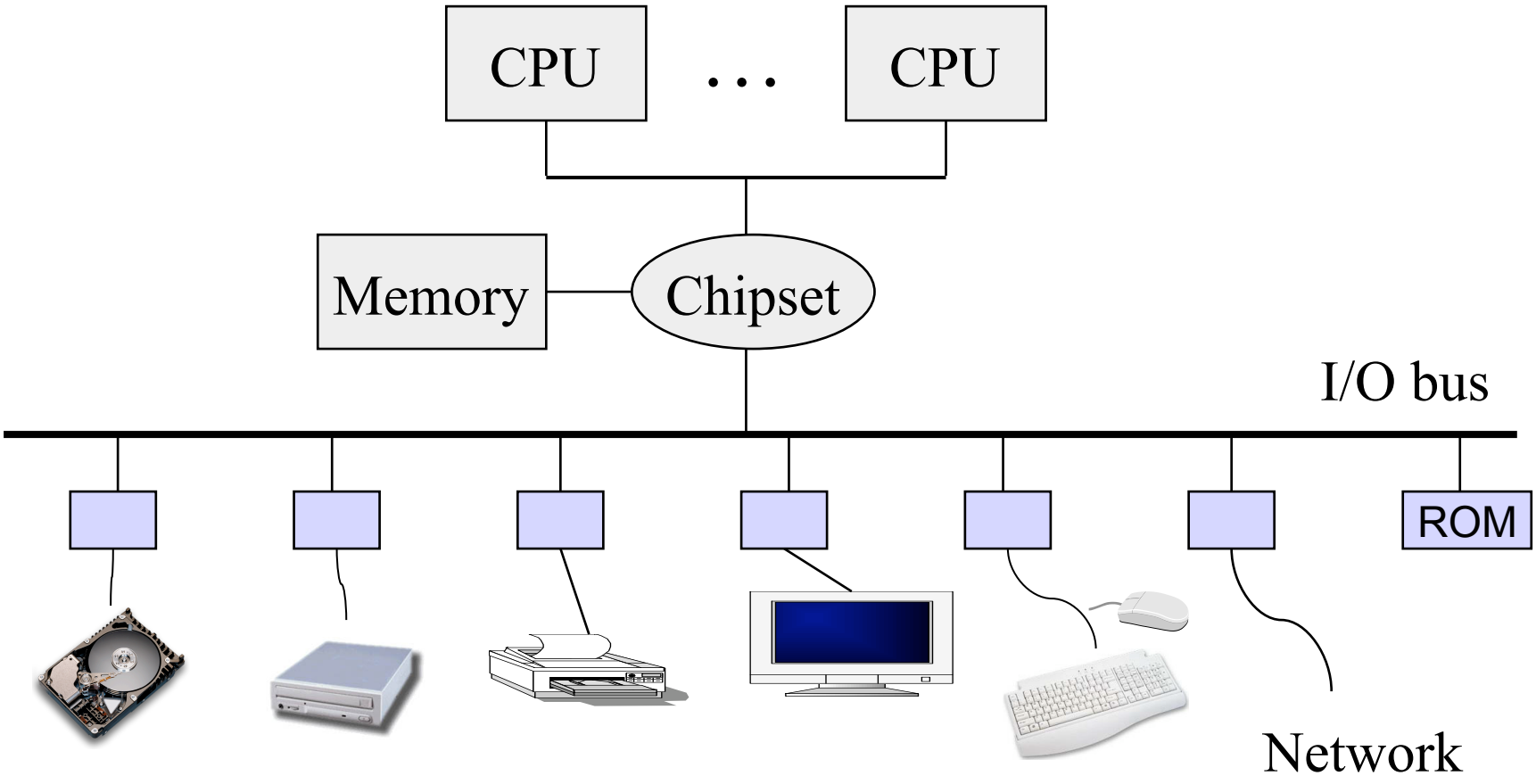
- 承上启下
  - 在应用和硬件之间的一层软件
  - 对上层软件提供硬件抽象、实现共用功能和操作接口
  - 对底层硬件进行管理、实现共享、保证隔离



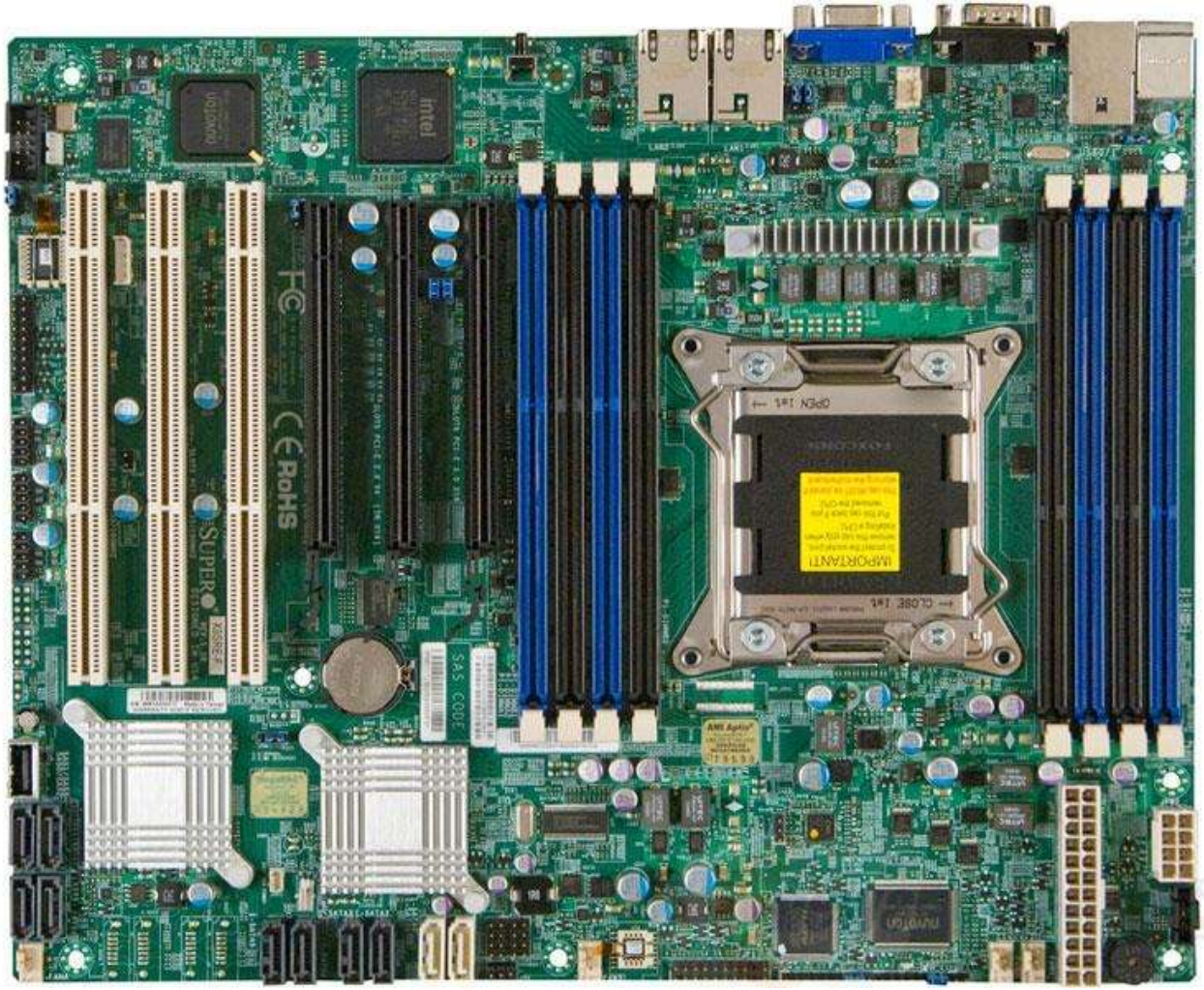
内容提要

- 操作系统结构
  - 内核态与用户态
  - 中断与系统调用
  - 操作系统启动
  - 常见内核架构
- 操作系统组成

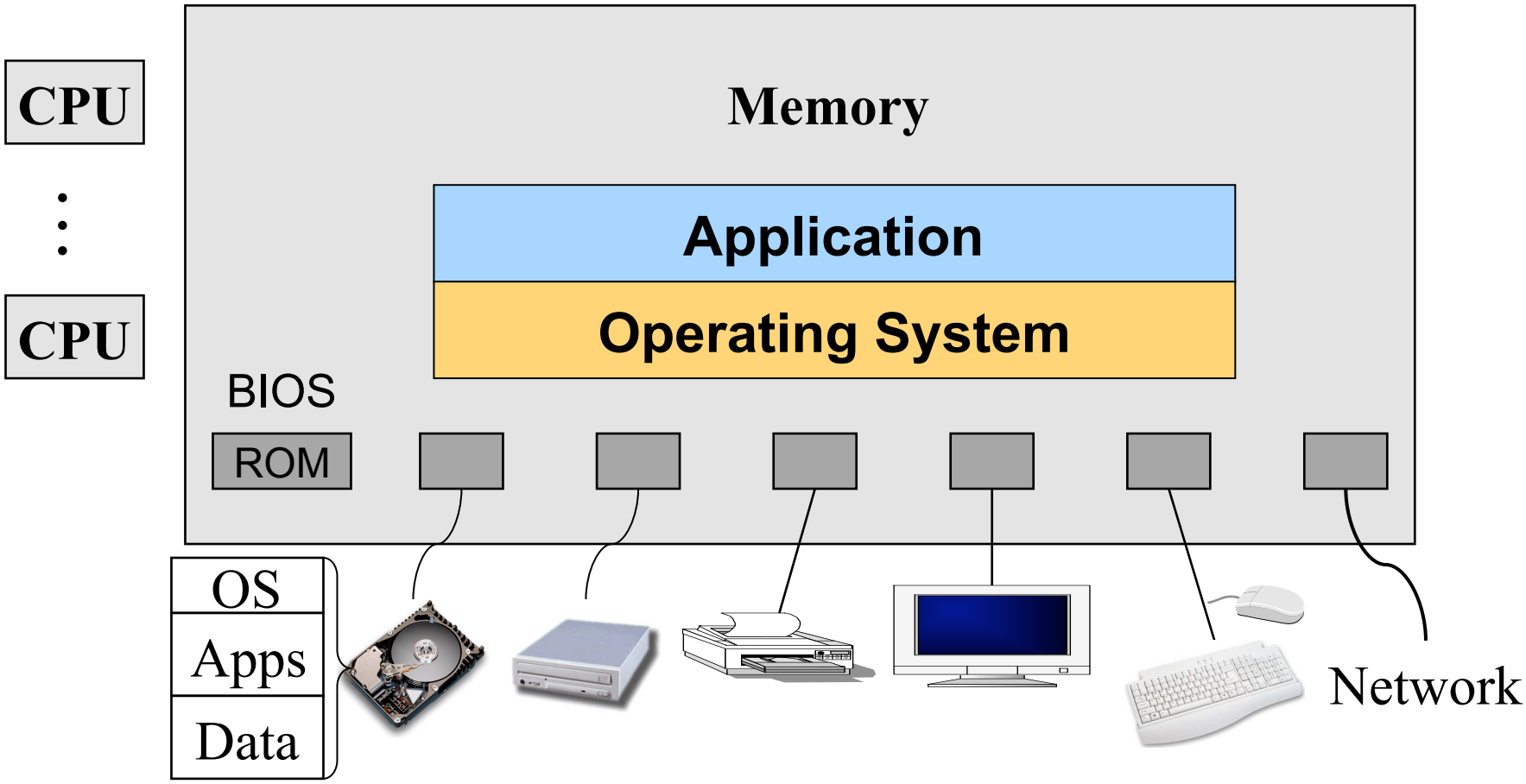
典型的计算机系统硬件结构



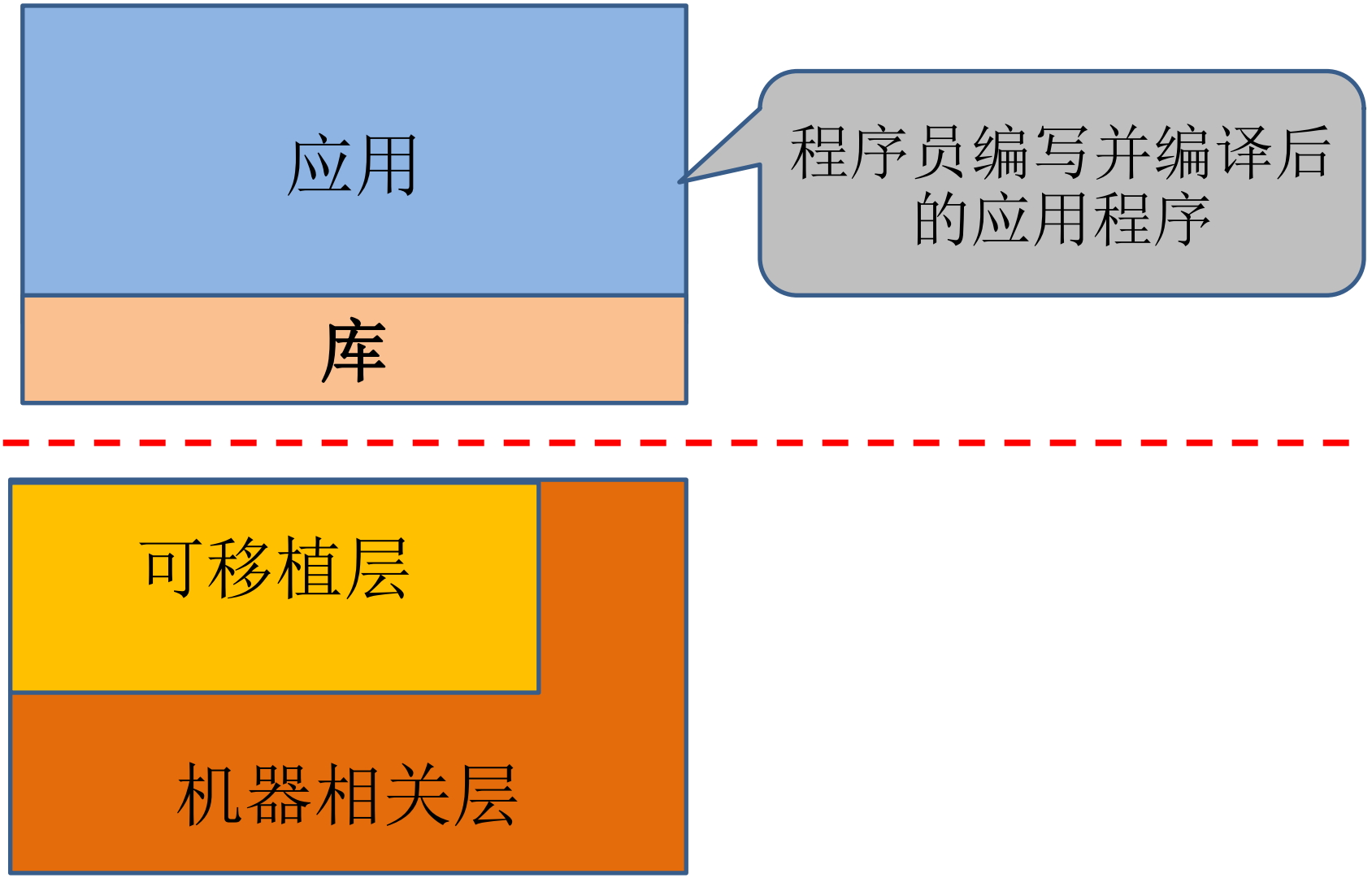
典型的计算机硬件主板



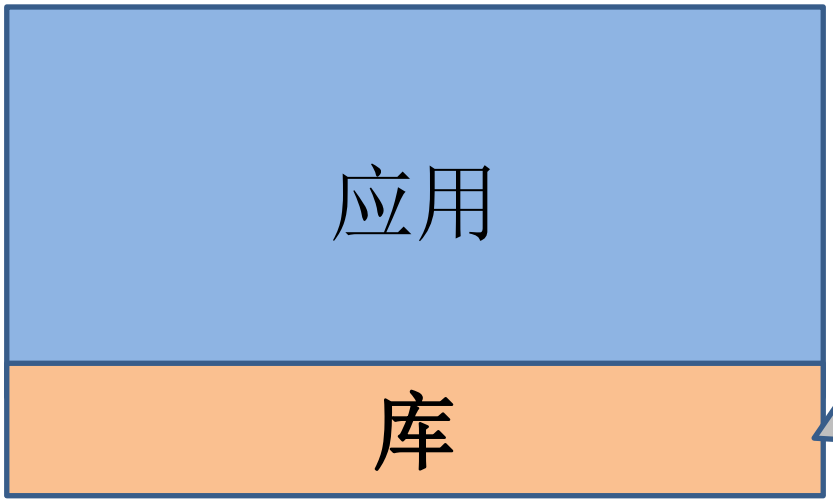
典型的计算机系统


CPU
CPU
Memory
Application
Operating System
BIOS
ROM
OS
Apps
Data
Network

典型的UNIX操作系统结构



典型的UNIX操作系统结构

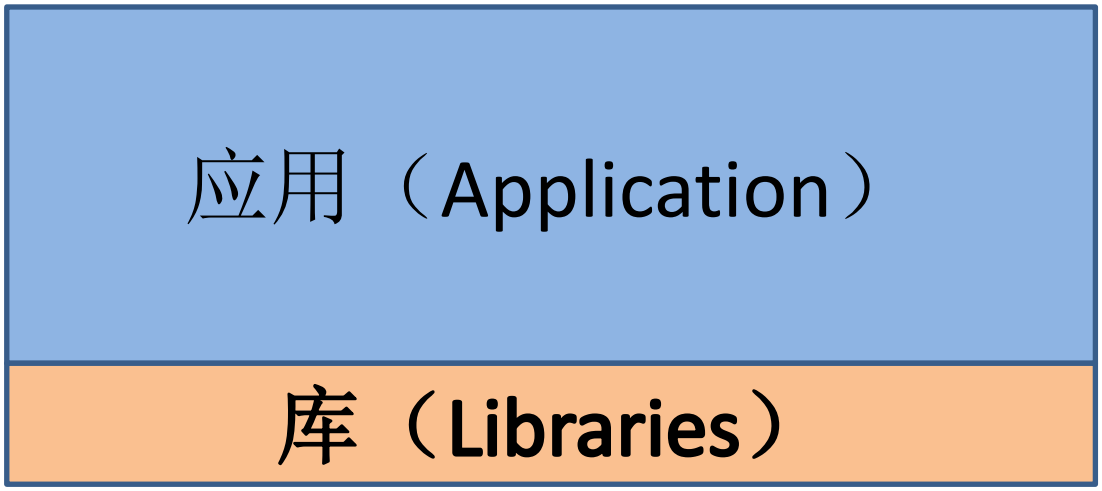


- 精心设计的代码
- 预编译好的对象
- 通过头文件定义
- 通过链接器引入
- 类似函数调用
- 程序加载时必须定位

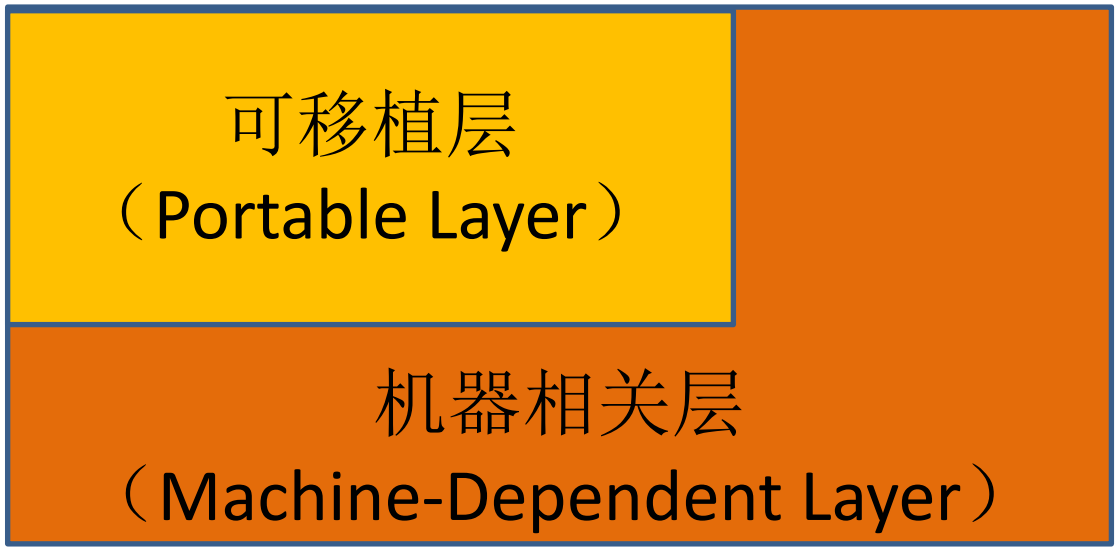
库示例：stdio.h

```
FILE    *fopen(const char *, const char *);
int      fprintf(FILE *, const char *, ...);
int      fputc(int, FILE *);
int      fputs(const char *, FILE *);
size_t   fread(void *, size_t, size_t, FILE *);
FILE    *freopen(const char *, const char *, FILE *);
int      fscanf(FILE *, const char *, ...);
int      fseek(FILE *, long int, int);

int      printf(const char *, ...);
int      putc(int, FILE *);
int      putchar(int);


int      vfprintf(FILE *, const char *, va_list);
int      vprintf(const char *, va_list);
int      vsnprintf(char *, size_t, const char *, va_list);
int      vsprintf(char *, const char *, va_list);
```

典型的UNIX操作系统结构



用户态(User mode)



内核态(Kernel mode)

为什么需要区分用户态和内核态

- 审视操作系统的功能范围
  - 应用程序生命周期管理、调度与切换
  - 内存资源分配、回收
  - 外部设备访问和控制
- 审视应用程序的操作边界
  - 应用程序A执行开关中断操作，是否允许？
  - 应用程序A修改OS的代码和数据结构，是否允许？
  - 应用程序A写入磁盘的任意位置，是否允许？

为什么需要区分用户态和内核态

- 操作系统设计的诉求
  - 能操作计算机系统的各类资源，同时让应用程序不能随意访问计算机资源
  - 操作系统自身不能受到应用程序的干扰
  - 隔离是操作系统设计的一个基本诉求
    - CPU操作隔离
    - 内存访问隔离

如何支持用户态和内核态

- CPU具有不同特权级
  - CPU设计有特权寄存器
    - MIPS：Coprocessor 0系列寄存器，CP0_Status, CP0_Cause等
    - RISC-V：CSR系列寄存器，mstatus，mcause，sstatus，scause等
  - 特权寄存器用于管理机器状态、中断、内存访问等
  - 特权寄存器需要使用特权指令在特定的特权级别进行访问
    - MIPS：mfc0，mtc0等
    - RISC-V：csrr，csrw等
  - 在非特权级执行特权指令，会触发异常

特权级别	运行
M态	BIOS
S态	操作系统
U态	应用程序

RISC-V指令集

高4位值	运行级别
00	所有态
01	S态和M态
10	M态

RISC-V CSR寄存器高4位含义

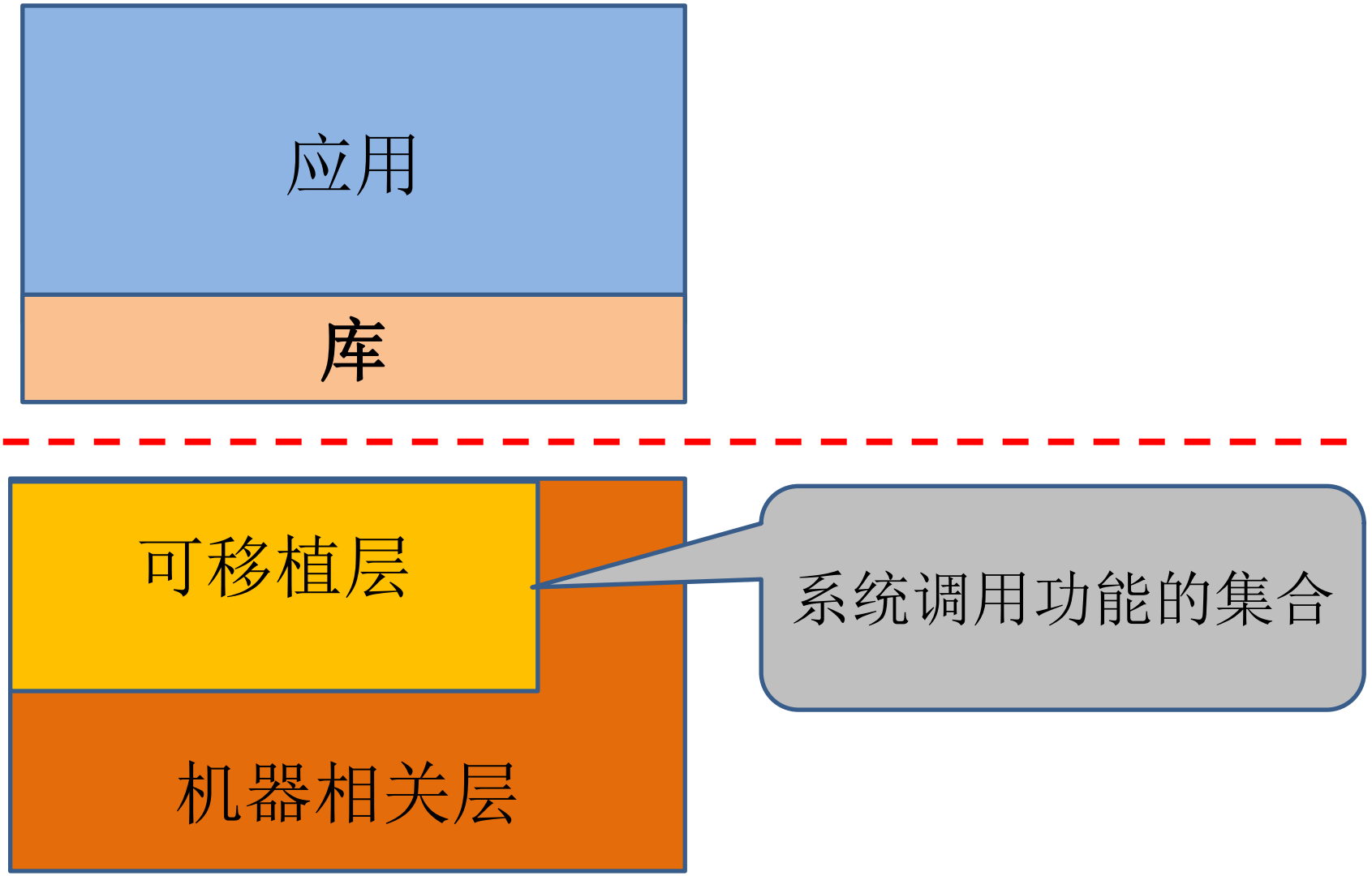
内核态的保护机制

- 利用处理器特权级实现CPU操作隔离
- 利用页表机制实现内存访问隔离（后续介绍）

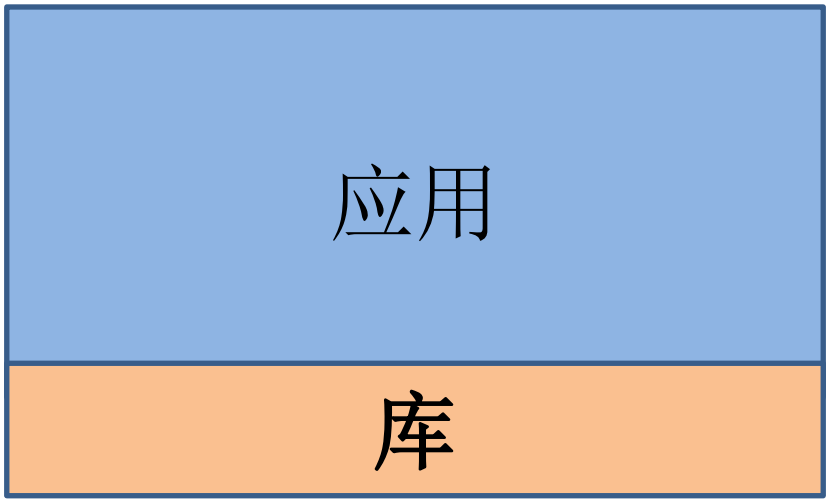
非特权级（用户态）
- 常规指令
- 访问用户内存

特权级（内核态）
- 常规指令
- 特权指令
- 访问用户内存
- 访问内核内存

典型的UNIX操作系统结构



典型的UNIX操作系统结构

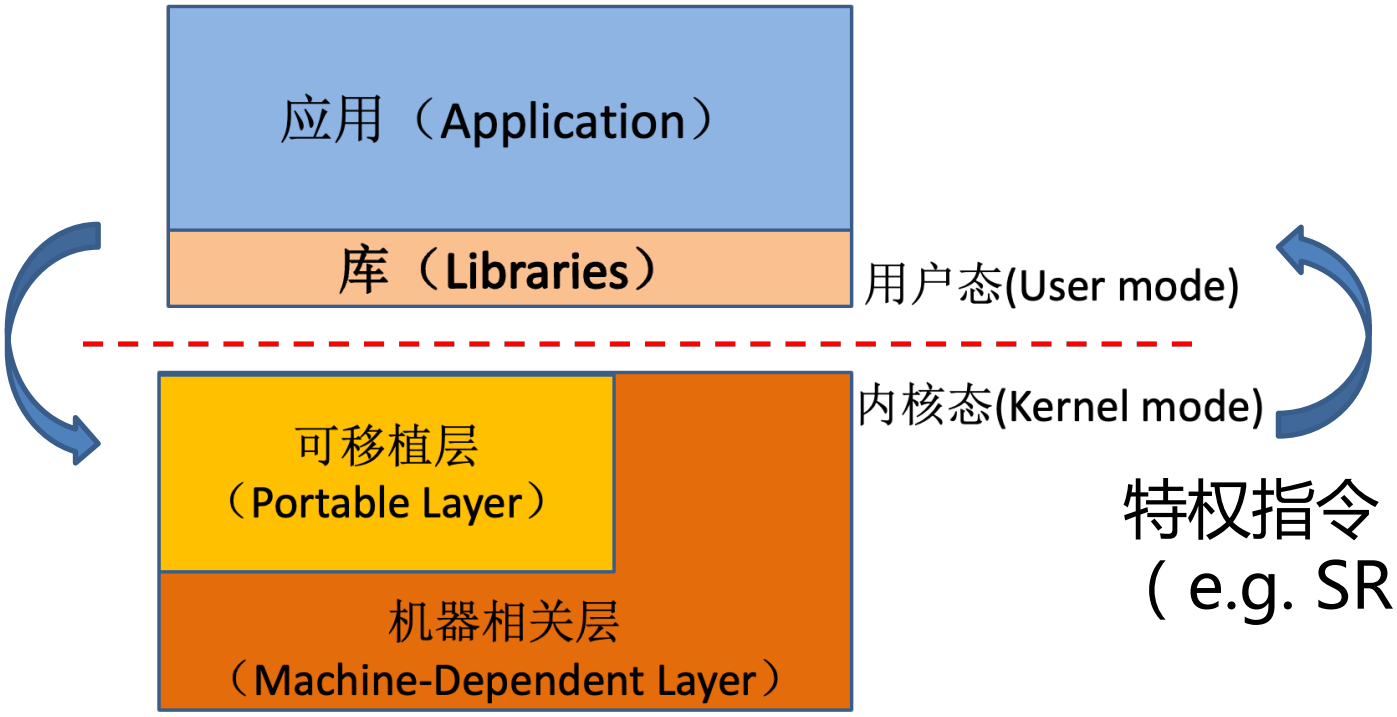


- 启动
- 初始化
- 中断和例外
- I/O设备驱动
- 内存管理
- 处理器调度
- 模式切换

用户态-内核态切换

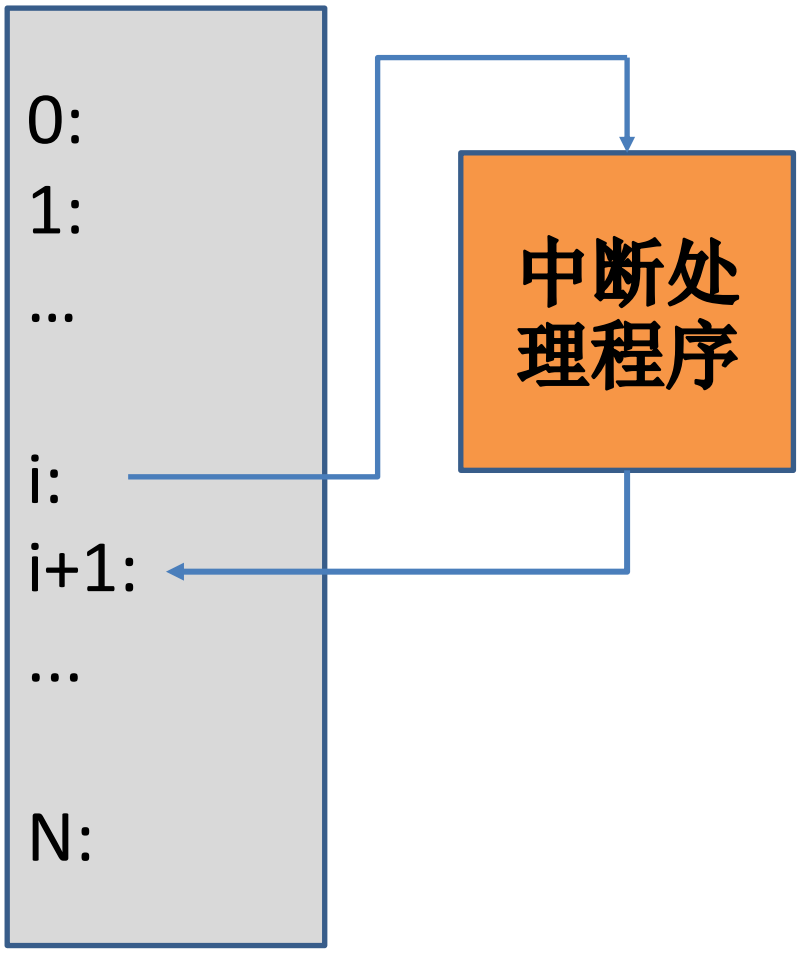
- 特权级和非特权级切换

- 硬件中断
- 系统调用
- 异常



硬件中断

- 硬件中断（Hardware Interrupt）
  - 由外部事件（外部设备）触发
    - 例如，时钟中断，硬盘读写请求完成，移动鼠标，键盘输入
  - 硬件中断产生与当前正在执行的进程无关
  - 硬件中断可以被关闭
    - 例如 x86架构 EFLAGS寄存器 bit 9（Interrupt enable Flag）
- 中断处理程序（Interrupt Service Routines，ISR）
  - 中断处理程序运行在内核
- 最终恢复被中断的进程



软件中断（系统调用）

- 软件中断
  - 编程者用相应软件中断指令触发
  - 例如
    - 32位Linux操作系统通过INT 0x80 指令触发系统调用
    - 64位Linux操作系统使用syscall指令触发系统调用

```
.section .data
msg:
        .ascii "Hello world!\n"

.section .text

.globl _start
_start:
        movl $4, %eax    系统调用号
        movl $1, %ebx    输出位置
        movl $msg, %ecx
        movl $13, %edx   字符串长度
        int $0x80

        movl $1, %eax
        movl $0, %ebx
        int $0x80
```

32位x86架构下系统调用示例

软件中断（系统调用）

- 系统调用实现示例

```
asmlinkage long sys_getpid(void)
{
  return current-> tgid;
}
```

异常

- 异常（Exceptions）
  - 由当前正在执行的进程产生
- 类型
  - 出错（Fault）：处理后，重新执行触发异常的指令
    - 例如，缺页异常
  - 陷入（Trap）：处理后，执行触发异常指令的下一条指令
    - 例如，调试断点
  - 中止（Abort）：不再执行指令

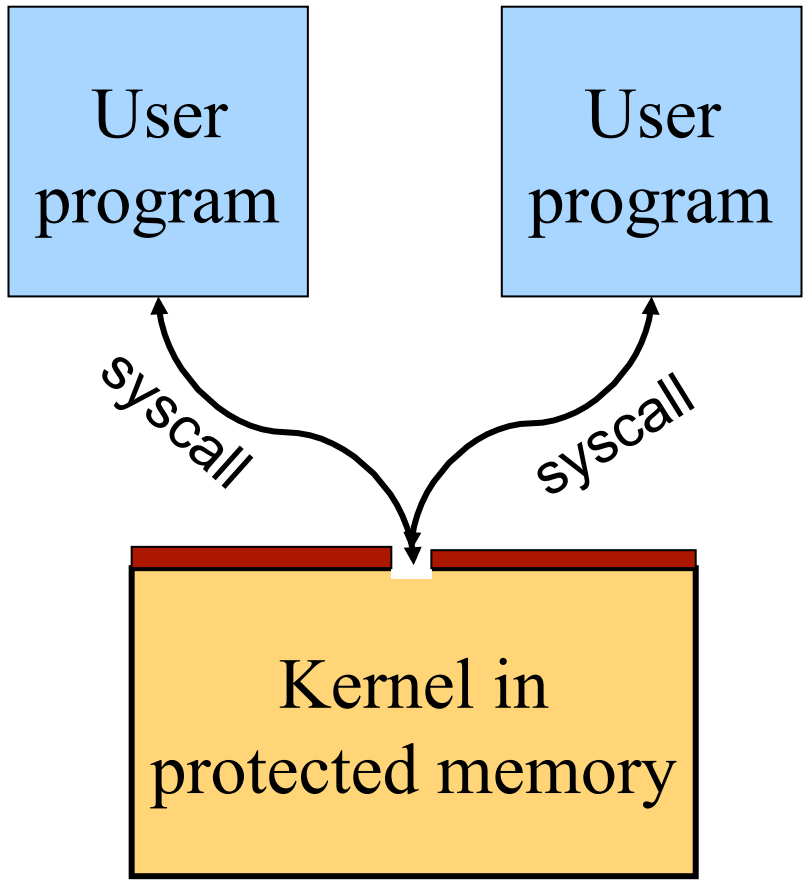
中断向量表示例

- 中断向量表
  - 操作系统中用于管理中断和异常处理的关键数据结构，保存在内存中的固定位置
  - 表中每个条目包含一个中断处理程序的入口地址，指向实际的中断服务例程

中断号	中断服务例程入口地址
IRQ0	0x10002000 （时钟中断处理程序）
IRQ1	0x10003000 （键盘中断处理程序）
IRQ2	0x10004000 （串口1中断处理程序）
IRQ3	0x10005000 （串口2中断处理程序）
...	...
IRQn	0x1000XXXX （其他中断处理程序）

系统调用机制

- 系统调用
  - 关键、核心功能由内核完成
- 过程
  - 系统调用参数传递
  - 系统模式从用户态切换到内核态
  - 执行系统调用功能
  - 返回结果，切换到用户态



系统调用机制

- 系统调用执行流程

EntryPoint:

switch to kernel stack

save context

check R_0

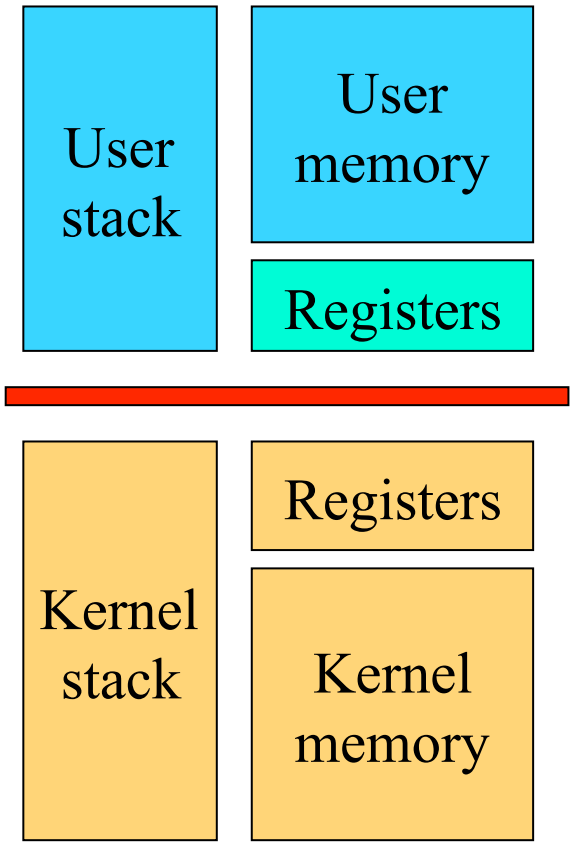
call the real code pointed by R_0

place result in R_{result}

restore context

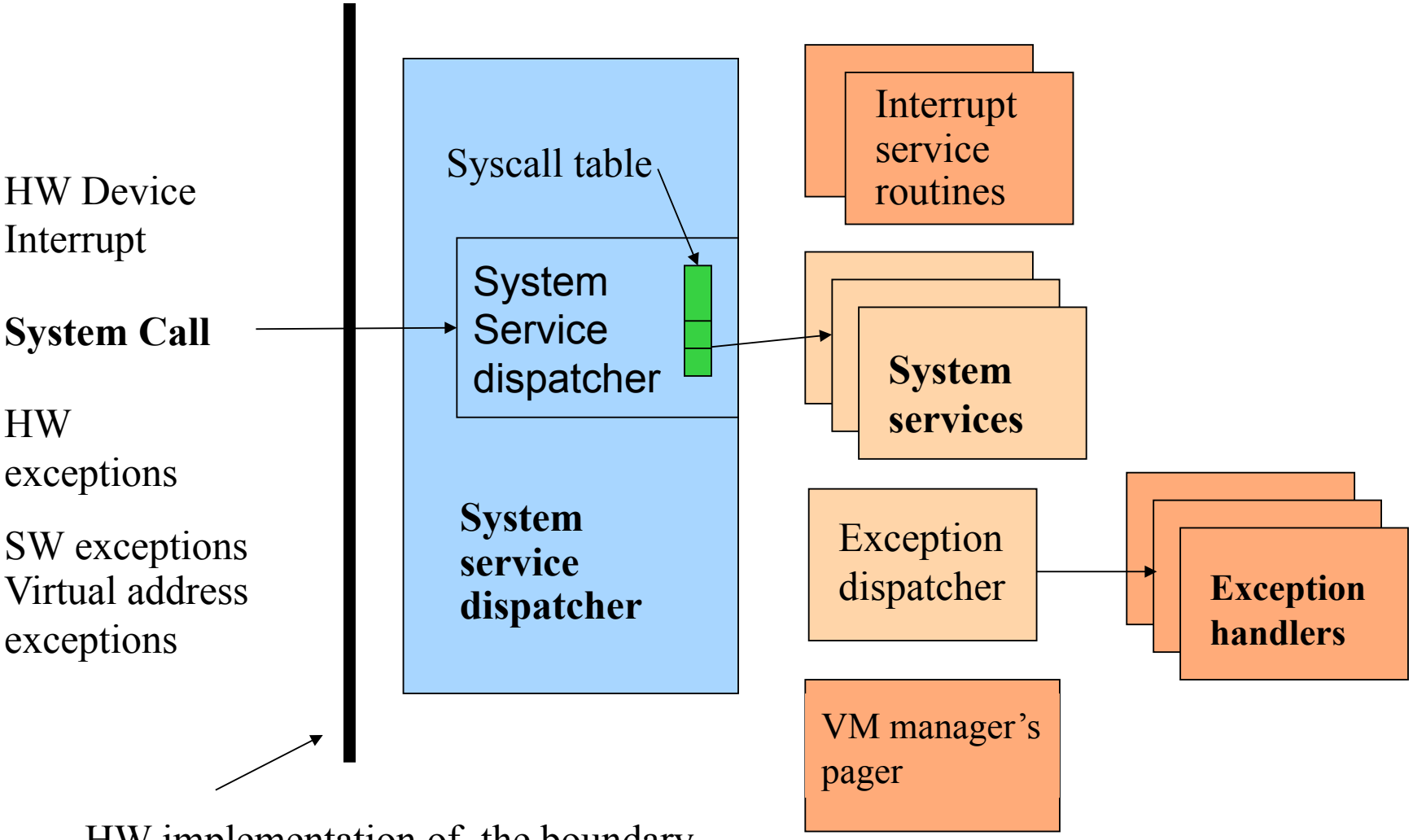
switch to user stack

iret (change to user mode and return)



(Assume passing parameters in registers)

系统调用机制


HW Device Interrupt
System Call
HW exceptions
SW exceptions
Virtual address exceptions
Syscall table
System Service dispatcher
System service dispatcher
Interrupt service routines
System services
Exception dispatcher
Exception handlers
VM manager's pager
HW implementation of the boundary

系统调用

- 操作系统的API
  - 应用和操作系统之间的接口
- 种类：
  - 进程管理: sys_fork, sys_execve, sys_exit, sys_getpid …
  - 内存管理: sys_brk
  - 文件管理: sys_write, sys_read, sys_open, sys_close …
  - 设备管理: sys_ioctl
  - 通信: sys_signal, sys_pipe

Linux syscalls

1	sys_exit
2	sys_fork
3	sys_read
4	sys_write
5	sys_open
6	sys_close
7	sys_waitpid
8	sys_creat
9	sys_link
10	sys_unlink
11	sys_execve
12	sys_chdir

33	sys_access
34	sys_nice
35	not implemented
36	sys_sync
37	sys_kill
38	sys_rename
39	sys_mkdir
40	sys_rmdir
41	sys_dup
42	sys_pipe
43	sys_times
44	not implemented
45	sys_brk

系统调用方法

- 直接调用对应库函数，由库函数进一步调用系统调用
- 使用通用的C库函数syscall
  - long syscall(long sys_number, ...)
- 使用内联汇编和软件中断指令调用

```
int read(int fd,char* buf,int size)
{
        move fd,buf,size to  R1 R2 R3
        move READ to R0
        int $0x80
        move result to Rresult
}
```

如何向内核态传递参数

- 寄存器传参
  - 系统调用参数被加载到寄存器
    - 例如，RISC-V a0-a7寄存器可以用于传参
  - 可用寄存器个数 vs. 系统调用参数个数
- 栈传参
  - 系统调用参数个数多于寄存器数量，或者参数太大不适合使用寄存器
  - 参数通过栈传递
- 内存向量(数组)传参
  - 一个寄存器传递起始地址
  - 向量位于用户地址空间

系统调用返回

- 系统调用
  - 通过寄存器返回结果，例如X86 eax寄存器
  - 怎么把错误返回给调用者
    - 将错误码保存在全局变量errno
    - perror函数读取errno

系统调用 vs. 库函数调用

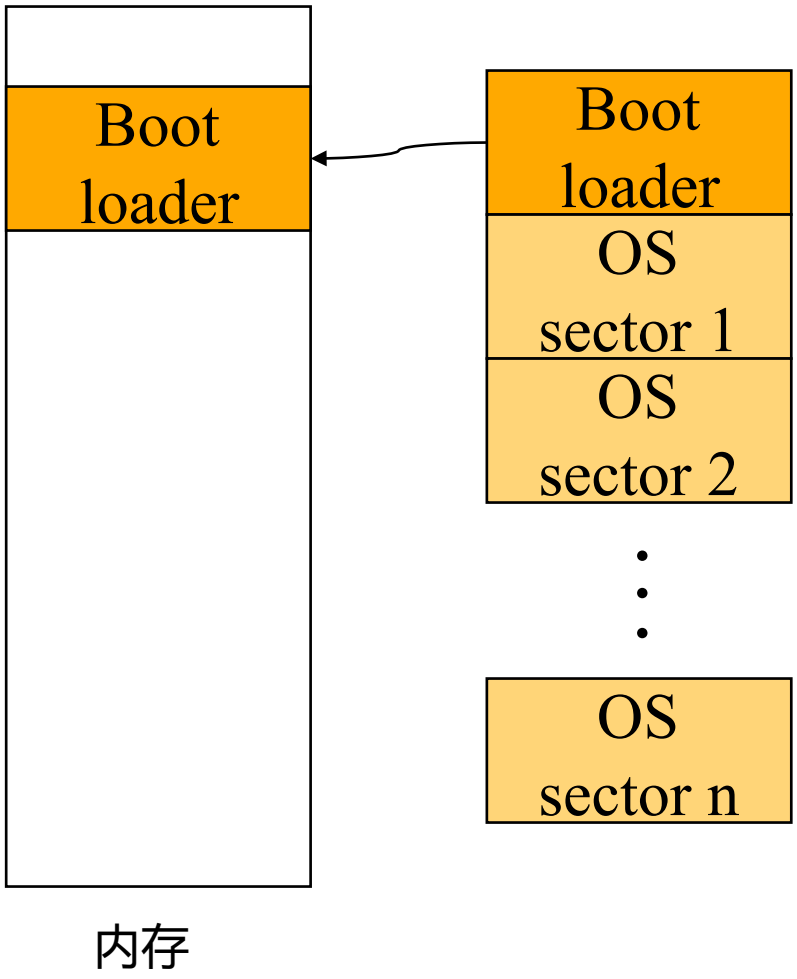
- 以内存管理为例
- 内核
  - 分配带硬件保护的页面
  - 分配一大块(多个页面)给库
  - 不关心小粒度的分配
  - sbrk()/brk()/mmap()
- 库
  - 提供 malloc/free函数用于分配/释放
  - 应用使用这些函数细粒度管理内存
  - 当页面用完后，库函数会向内核批量请求更多的页面

系统调用 vs. 库函数调用

- 系统调用
  - 陷入内核，在内核态执行具体功能
  - 依赖于操作系统的实现
  - 伴随着内核态和用户态切换
- 库函数调用
  - 在进程用户态空间执行功能
  - 过程调用
- 为什么还需要库函数？

操作系统启动

- 计算机上电
- 处理器Reset
  - 设置到初始状态
  - 跳转到ROM代码（BIOS）
  - 初始化启动所需最少的设备
- 从持久存储加载BootLoader
- 跳转到BootLoader执行
- 加载OS其余的部分
- 初始化OS并运行

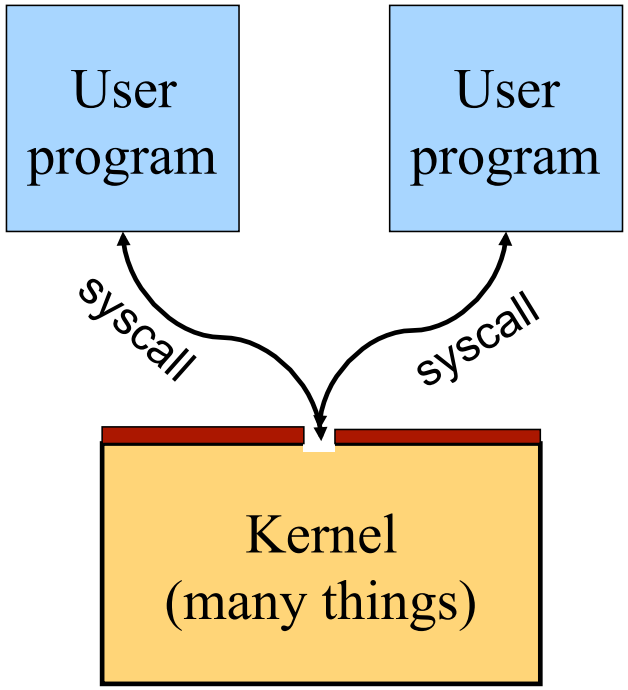


内核架构 -- 宏内核（Monolithic）

- 在内核态实现操作系统所有功能
- 应用通过调用系统调用使用操作系统提供的功能
- 例子：
  - Linux
  - BSD Unix
  - Windows
- 好处：
  - 内核所有函数共享地址空间
  - 内核模块相互调用方便高效
- 缺点：
  - 不稳定：模块crash → 系统crash
  - 不灵活：新增模块 → 内核编程

The UNIX Time-Sharing System

Dennis M. Ritchie and Ken Thompson
Bell Laboratories

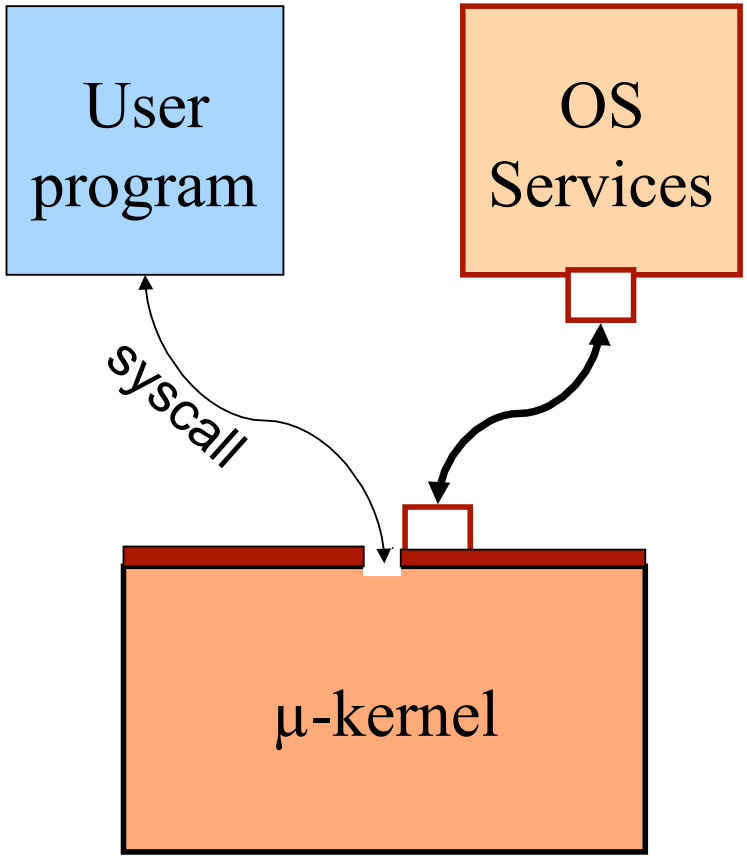


内核架构 -- 微内核（microkernel）

- 操作系统部分功能服务作为用户态的常规进程
- 应用通过消息获取服务进程的服务
- 例子：
  - Mach (CMU)
  - MINIX(Andrew Tanenbaum)
- 好处：
  - 开发灵活
  - 故障隔离
- 缺点：
  - 应用程序和OS服务通信效率低
  - 用户态程序漏洞多，保护机制不完整

CMU Mach Project

http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/mach/public/www/mach.html

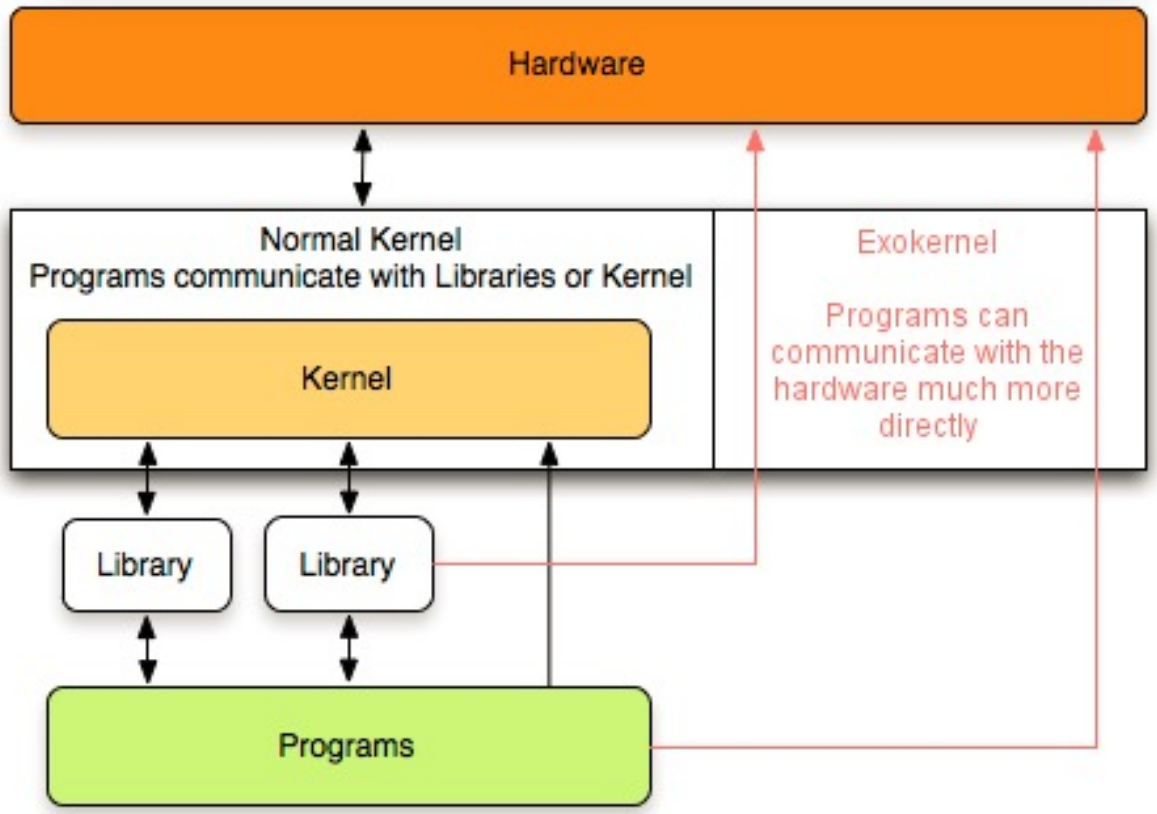


内核架构 -- 库操作系统（LibOS）

- 应用程序直接通过库与底层硬件交互
- 库函数完成OS功能
- 例子：
  - Exokernel
  - ExOS
- 好处
  - 效率高
- 缺点
  - 通用性差
  - 无法和其他程序共享资源

Exokernel: An Operating System Architecture for Application-Level Resource Management

Dawson R. Engler, M. Frans Kaashoek, and James O'Toole Jr.
M.I.T. Laboratory for Computer Science

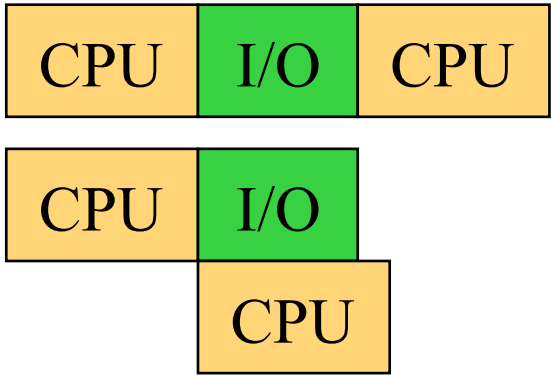


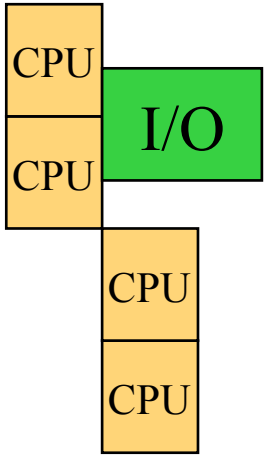
内容提要

- 操作系统结构
- 操作系统组成

处理器管理

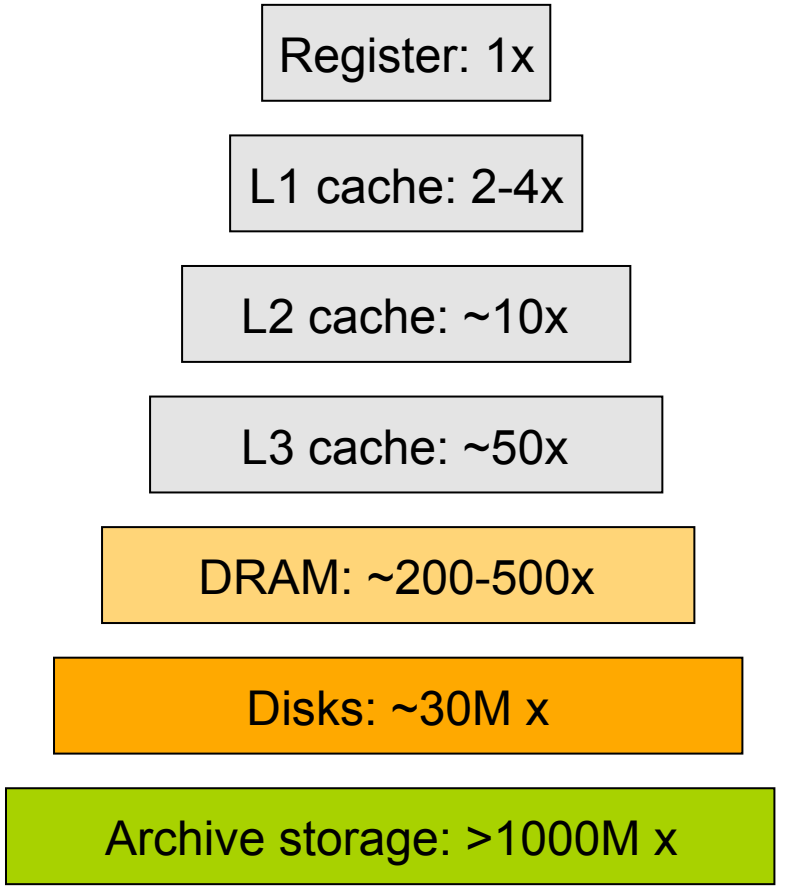
- 目标：
  - I/O和计算重叠
  - 分时复用
  - 多个CPU的分配
- 研究问题：
  - 不能浪费CPU：调度
  - 同步和互斥
  - 公平、无死锁





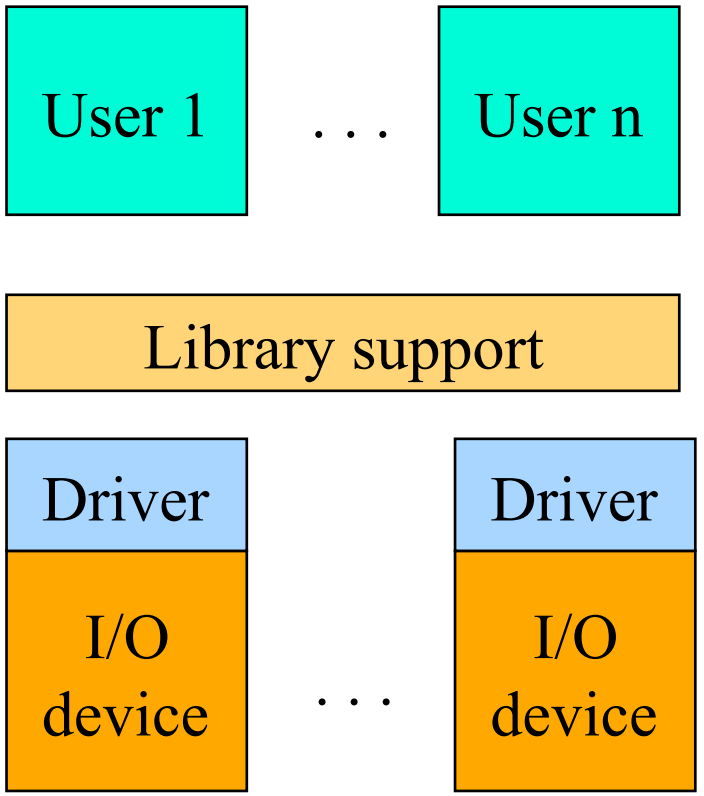
内存管理

- 目标
  - 支持程序的运行
  - 分配和管理
  - 与持久化存储交换数据
- 研究问题
  - 访问效率和便捷性
  - 公平共享
  - 数据访问保护



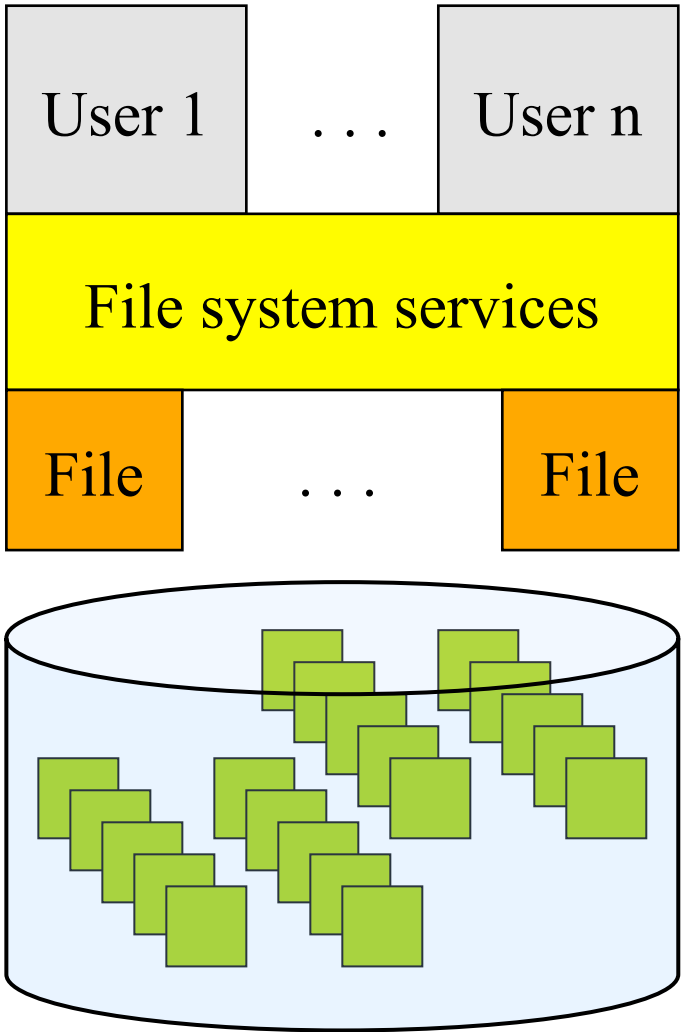
I/O设备管理

- 目标
  - 设备和应用之间的交互
  - 可动态插拔设备
- 研究问题
  - 访问效率
  - 驱动稳定性
  - 安全保护



文件系统

- 目标
  - 管理磁盘空间
  - 映射文件和磁盘块
  - 保证数据可靠性保证
- 研究问题
  - 数据访问效率
  - 数据可靠性
  - 数据安全保护



窗口系统（GUI）

- 目标
  - 人机交互
  - 检查和管理系统的接口
- 研究问题：
  - 多方式输入、输出

总结

- 操作系统结构
  - 内核态和用户态的区分
    - 安全保护的需求
    - 用户程序、 库、可移植层、 机器相关层
  - 内核态和用户态切换
    - 硬件中断
    - 软件中断（系统调用）
    - 异常
  - Bootloader
  - 内核架构：宏内核、微内核

总结

- 操作系统的组成
  - 进程管理
  - 内存管理
  - 文件系统
  - I/O设备管理
  - 用户接口