



Lab6 实验报告：进程调度

练习0：填写已有实验

本实验依赖实验2/3/4/5，需要将之前实验的代码填入相应位置。主要修改的文件和内容如下：

1. `alloc_proc` 函数 (`kern/process/proc.c`)

函数用途： `alloc_proc` 用于分配一个新的进程控制块 (PCB)，并对其所有字段进行初始化。这是创建新进程的第一步。

概要设计思路： 在Lab6中，进程控制块新增了与调度相关的成员变量（运行队列指针、时间片、stride值、优先级等），需要在进程初始化时将这些字段设置为合理的初始值，以便后续调度算法能够正确工作。

```

static struct proc_struct *
alloc_proc(void)
{
    // kmalloc: 内核内存分配函数, 用于动态分配指定大小的内存
    struct proc_struct *proc = kmalloc(sizeof(struct proc_struct));
    if (proc != NULL)
    {
        // ===== LAB4 初始化部分 =====
        proc->state = PROC_UNINIT;           // 进程状态设为未初始化
        proc->pid = -1;                       // 进程ID设为-1, 表示尚未分配
        proc->runs = 0;                       // 进程运行次数初始化为0
        proc->kstack = 0;                     // 内核栈地址初始化为0
        proc->need_resched = 0;               // 不需要调度标志初始化为0
        proc->parent = NULL;                  // 父进程指针初始化为空
        proc->mm = NULL;                      // 内存管理结构初始化为空
        proc->tf = NULL;                     // 中断帧指针初始化为空
        proc->pgdir = boot_pgdir_pa;         // 页目录表基址设为内核页目录表
        proc->flags = 0;                      // 进程标志位初始化为0
        // memset: 将指定内存区域设置为特定值 (这里是0)
        memset(&(proc->context), 0, sizeof(struct context)); // 上下文清零
        memset(proc->name, 0, PROC_NAME_LEN); // 进程名清零

        // ===== LAB5 初始化部分 =====
        proc->wait_state = 0;                  // 等待状态初始化为0
        proc->cptr = proc->optr = proc->yptr = NULL; // 进程关系指针全部置空

        // ===== LAB6 初始化部分 2311474 =====
        proc->rq = NULL;                       // 所属运行队列指针初始化为空
        // list_init: 初始化链表节点, 使其prev和next都指向自己
        list_init(&(proc->run_link));          // 初始化运行队列链表项
        proc->time_slice = 0;                  // 时间片初始化为0
        // 初始化斜堆节点的三个指针 (左子树、右子树、父节点) 为空
        proc->lab6_run_pool.left = proc->lab6_run_pool.right = proc->lab6_run_pool.parent = NULL;
        proc->lab6_stride = 0;                 // stride值初始化为0
        proc->lab6_priority = 0;               // 优先级初始化为0
    }
    return proc;                             // 返回分配的进程控制块指针
}

```

2. 时钟中断处理 (kern/trap/trap.c)

函数用途： `interrupt_handler` 中的时钟中断处理部分负责在每次时钟中断时更新系统tick计数，并调用调度器的tick处理函数来更新当前进程的时间片。

概要设计思路： Lab6需要支持时间片轮转调度，因此在时钟中断时需要调用 `sched_class_proc_tick` 来减少当前进程的时间片。当时间片用尽时，会设置 `need_resched` 标志，触发进程调度。

```
case IRQ_S_TIMER:
    // clock_set_next_event: 设置下一次时钟中断的触发时间
    // 这个函数会向SBI发送请求，设置下一次timer中断
    clock_set_next_event();

    // ticks: 全局变量，记录系统启动以来的时钟中断次数
    ticks++;

    // LAB6: 2311474
    // sched_class_proc_tick: 调度框架提供的接口函数
    // 用途：通知调度器当前进程又运行了一个时钟周期
    // 内部会调用具体调度算法的proc_tick函数来处理时间片
    // current: 指向当前正在运行的进程的全局指针
    sched_class_proc_tick(current);

    break;
```

练习1：理解调度器框架的实现

1. sched_class 结构体分析

结构体用途： `sched_class` 是调度类的抽象接口，定义了一个调度算法必须实现的所有操作。通过函数指针实现了策略与机制的分离。

```

struct sched_class {
    const char *name; // 调度类的名字，用于标识和打印

    // init: 初始化运行队列
    // 调用时机: sched_init()中，系统启动时调用一次
    void (*init)(struct run_queue *rq);

    // enqueue: 将进程加入运行队列
    // 调用时机: 进程变为就绪态时 (wakeup_proc)、当前进程需要重新排队时 (schedule)
    void (*enqueue)(struct run_queue *rq, struct proc_struct *proc);

    // dequeue: 将进程从运行队列移除
    // 调用时机: schedule()选中进程后将其从队列移除
    void (*dequeue)(struct run_queue *rq, struct proc_struct *proc);

    // pick_next: 选择下一个要运行的进程
    // 调用时机: schedule()中选择调度目标
    struct proc_struct *(*pick_next)(struct run_queue *rq);

    // proc_tick: 处理时钟中断，更新进程时间片
    // 调用时机: 每次时钟中断时调用
    void (*proc_tick)(struct run_queue *rq, struct proc_struct *proc);
};

```

为什么使用函数指针而不是直接实现：

使用函数指针实现了**策略与机制分离**的设计模式，这是C语言下模拟面向对象编程的方法。好处包括：

- **可扩展性**：添加新调度算法只需实现接口，无需修改框架代码
- **可替换性**：运行时可以切换不同的调度算法
- **解耦合**：调度框架不依赖具体算法实现

2. run_queue 结构体分析

结构体用途：run_queue 用于组织所有处于就绪状态的进程，是调度器进行进程选择的数据来源。

```
struct run_queue {  
    list_entry_t run_list;           // 双向循环链表头，用于RR调度  
    unsigned int proc_num;           // 队列中的进程数量  
    int max_time_slice;              // 最大时间片，进程入队时会重置为此值  
    skew_heap_entry_t *lab6_run_pool; // 斜堆根节点指针，用于Stride调度  
};
```

Lab5 vs Lab6 的差异:

Lab5中没有专门的 `run_queue` 结构，调度直接遍历 `proc_list`。Lab6新增了 `lab6_run_pool` 支持斜堆。

为什么需要支持两种数据结构（链表和斜堆）：

- **链表**：适用于RR调度算法，FIFO特性，入队出队 $O(1)$
- **斜堆**：适用于Stride调度算法，优先队列特性，可以 $O(\log n)$ 获取最小stride进程

3. 调度器框架核心函数

sched_init 函数

函数用途：初始化调度器，将具体的调度算法与调度框架绑定，并初始化运行队列。

```

void sched_init(void)
{
    // list_init: 初始化定时器链表（用于sleep等功能）
    list_init(&timer_list);

    // 关键步骤：绑定调度算法
    // 将全局调度类指针指向具体的调度算法实现
    sched_class = &default_sched_class; // 使用RR调度器
    // sched_class = &stride_sched_class; // 或使用Stride调度器

    // rq: 全局运行队列指针
    // __rq: 静态分配的运行队列结构体
    rq = &__rq;

    // MAX_TIME_SLICE: 最大时间片常量，定义在sched.h中，值为5
    rq->max_time_slice = MAX_TIME_SLICE;

    // 调用具体调度算法的初始化函数
    // 通过函数指针调用，实现了多态
    sched_class->init(rq);

    // cprintf: 内核打印函数，输出调度器名称
    cprintf("sched class: %s\n", sched_class->name);
}

```

wakeup_proc 函数

函数用途：唤醒一个进程，将其状态设为就绪态，并加入运行队列等待调度。

```

void wakeup_proc(struct proc_struct *proc)
{
    // assert: 断言检查, 确保不会唤醒僵尸进程
    assert(proc->state != PROC_ZOMBIE);

    bool intr_flag;
    // local_intr_save: 保存中断状态并关闭中断, 防止并发问题
    local_intr_save(intr_flag);
    {
        // 只有非RUNNABLE状态的进程才需要唤醒
        if (proc->state != PROC_RUNNABLE)
        {
            proc->state = PROC_RUNNABLE; // 设置为就绪态
            proc->wait_state = 0;         // 清除等待状态

            // 如果不是当前进程, 则加入运行队列
            // 当前进程不需要入队, 因为它正在运行
            if (proc != current)
            {
                // sched_class_enqueue: 调度框架的入队封装函数
                sched_class_enqueue(proc);
            }
        }
        else
        {
            // warn: 警告输出, 提示试图唤醒已经就绪的进程
            warn("wakeup runnable process.\n");
        }
    }
    // local_intr_restore: 恢复之前的中断状态
    local_intr_restore(intr_flag);
}

```

schedule 函数

函数用途: 核心调度函数, 负责选择下一个要运行的进程并进行上下文切换。

```

void schedule(void)
{
    bool intr_flag;
    struct proc_struct *next;

    // 关闭中断，保证调度过程的原子性
    local_intr_save(intr_flag);
    {
        // 清除当前进程的调度请求标志
        current->need_resched = 0;

        // 如果当前进程仍然是就绪态（只是时间片用完），则重新入队
        if (current->state == PROC_RUNNABLE)
        {
            sched_class_enqueue(current);
        }

        // 从运行队列中选择下一个要执行的进程
        // sched_class_pick_next: 调度框架的选择封装函数
        if ((next = sched_class_pick_next()) != NULL)
        {
            // 选中的进程从队列中移除
            sched_class_dequeue(next);
        }

        // 如果没有就绪进程，则运行idle进程
        // idleproc: 空闲进程，当没有其他进程可运行时执行
        if (next == NULL)
        {
            next = idleproc;
        }

        // 增加被选中进程的运行次数计数
        next->runs++;

        // 如果选中的不是当前进程，则进行上下文切换
        if (next != current)
        {
            // proc_run: 执行进程切换，切换页表和上下文

```



```

        proc_run(next);
    }
}
local_intr_restore(intr_flag);
}

```

4. 进程调度流程图

```

时钟中断触发 (IRQ_S_TIMER)
↓
interrupt_handler()
├─ clock_set_next_event()    // 设置下次时钟中断
├─ ticks++                  // 增加全局tick计数
└─ sched_class_proc_tick(current) // 调用调度器tick处理
    ↓
    proc_tick()              // 具体算法的tick处理
        ├─ proc->time_slice-- // 时间片减1
        └─ if (time_slice == 0)
            proc->need_resched = 1 // 设置调度标志
    ↓
trap返回前检查
↓
if (current->need_resched)
    └─ schedule()
        ├─ current->need_resched = 0 // 清除标志
        ├─ sched_class_enqueue(current) // 当前进程入队
        ├─ next = sched_class_pick_next() // 选择下一个
        ├─ sched_class_dequeue(next) // 出队
        └─ proc_run(next) // 切换进程

```

need_resched 标志位的作用：

- 标记当前进程是否需要被调度
- 由 `proc_tick` 在时间片用尽时设置
- 在中断返回前检查，触发 `schedule()`
- 实现了抢占式调度的关键机制

5. 调度算法切换机制

要添加新调度算法（如Stride），只需：

1. 实现调度类接口的5个函数
2. 定义调度类结构体
3. 修改 `sched_init()` 中的一行代码：`sched_class = &stride_sched_class;`

设计优势： 只需修改一行代码即可切换调度算法，框架代码无需改动。

练习2：实现 Round Robin 调度算法

1. Lab5 与 Lab6 函数对比

以 `schedule()` 函数为例：

Lab5 实现（FIFO）：

```
void schedule(void) {
    // 直接遍历proc_list查找RUNNABLE进程
    last = (current == idleproc) ? &proc_list : &(current->list_link);
    do {
        if ((le = list_next(le)) != &proc_list) {
            next = le2proc(le, list_link);
            if (next->state == PROC_RUNNABLE) break;
        }
    } while (le != last);
}
```

Lab6 实现（使用调度框架）：

```

void schedule(void) {
    if (current->state == PROC_RUNNABLE) {
        sched_class_enqueue(current);    // 通过框架接口入队
    }
    next = sched_class_pick_next();      // 通过框架接口选择
    if (next != NULL) {
        sched_class_dequeue(next);      // 通过框架接口出队
    }
}

```

为什么要做这个改动：

- Lab5的实现将调度算法与框架耦合，无法灵活切换算法
- Lab6通过抽象接口解耦，支持多种调度算法
- 不做改动将无法使用RR、Stride等高级调度算法

2. RR调度算法实现

RR_init 函数

函数用途：初始化RR调度器的运行队列，将链表设为空，进程计数设为0。

概要设计思路：RR调度使用双向循环链表作为就绪队列，初始化时需要将链表头节点初始化为空链表状态（prev和next都指向自己）。

```

static void
RR_init(struct run_queue *rq)
{
    // LAB6: 2311474

    // list_init: libs/list.h中定义的链表初始化函数
    // 用途：将链表节点的prev和next指针都指向自己，形成空的循环链表
    // 参数：&(rq->run_list) - 运行队列的链表头指针
    list_init(&(rq->run_list));

    // 初始化进程计数为0，表示队列中没有进程
    rq->proc_num = 0;
}

```

RR_enqueue 函数

函数用途： 将一个进程加入到RR调度器的运行队列尾部，并初始化其时间片。

概要设计思路：

1. RR是FIFO式调度，新进程应该加到队列尾部
2. 使用 `list_add_before(&head, &node)` 可以将节点插入到head之前，对于循环链表来说就是队列尾部
3. 如果进程时间片为0（刚用完）或异常值，需要重置为最大时间片
4. 更新进程的运行队列指针和队列计数

```

static void
RR_enqueue(struct run_queue *rq, struct proc_struct *proc)
{
    // LAB6: 2311474

    // assert: 断言检查, 确保进程不在任何队列中 (run_link应该是空的)
    // list_empty: 检查链表节点是否为空 (prev和next都指向自己)
    // 用途: 防止同一个进程被重复入队
    assert(list_empty(&(proc->run_link)));

    // list_add_before: libs/list.h中定义的链表插入函数
    // 用途: 将第二个参数指向的节点插入到第一个参数指向的节点之前
    // 原理: 对于循环双向链表, 头节点之前就是尾部
    // 效果: 实现FIFO队列的入队操作
    list_add_before(&(rq->run_list), &(proc->run_link));

    // 时间片处理:
    // 如果时间片为0 (刚用完被调度出去) 或者大于最大值 (异常情况)
    // 则重置为最大时间片, 给进程一个完整的运行周期
    if (proc->time_slice == 0 || proc->time_slice > rq->max_time_slice) {
        proc->time_slice = rq->max_time_slice;
    }

    // 设置进程所属的运行队列指针, 用于后续检查和操作
    proc->rq = rq;

    // 增加运行队列的进程计数
    rq->proc_num++;
}

```

RR_dequeue 函数

函数用途: 将一个进程从RR调度器的运行队列中移除。

概要设计思路:

1. 首先检查进程确实在队列中
2. 使用 `list_del_init` 将进程从链表中删除并重新初始化其链表节点
3. 更新队列计数

```

static void
RR_dequeue(struct run_queue *rq, struct proc_struct *proc)
{
    // LAB6: 2311474

    // assert: 断言检查, 确保:
    // 1. 进程的run_link不为空 (确实在某个队列中)
    // 2. 进程所属的运行队列就是当前队列rq
    // !list_empty: 检查链表节点是否非空
    assert(!list_empty(&(proc->run_link)) && proc->rq == rq);

    // list_del_init: libs/list.h中定义的链表删除函数
    // 用途: 将节点从链表中删除, 并将该节点重新初始化为空节点
    // 原理: 1. 修改前驱和后继节点的指针, 跳过当前节点
    //        2. 将当前节点的prev和next都指向自己
    // 好处: 删除后节点处于干净状态, 可以安全地再次入队
    list_del_init(&(proc->run_link));

    // 减少运行队列的进程计数
    rq->proc_num--;
}

```

RR_pick_next 函数

函数用途: 从RR调度器的运行队列中选择下一个要运行的进程 (队首进程)。

概要设计思路:

1. RR调度总是选择队首进程 (最早入队的进程)
2. 使用 `list_next` 获取链表头的下一个节点 (即队首)
3. 使用 `le2proc` 宏从链表节点获取进程控制块指针
4. 处理空队列的边界情况

```

static struct proc_struct *
RR_pick_next(struct run_queue *rq)
{
    // LAB6: 2311474

    // list_next: libs/list.h中定义的获取下一个节点的宏
    // 用途：获取链表中指定节点的后继节点
    // 原理：返回 elm->next
    // 这里获取run_list头节点的下一个节点，即队首元素
    list_entry_t *le = list_next(&(rq->run_list));

    // 边界条件检查：判断队列是否为空
    // 如果le等于链表头，说明链表为空（只有头节点，没有实际元素）
    if (le != &(rq->run_list)) {
        // le2proc: kern/process/proc.h中定义的宏
        // 用途：从链表节点指针获取包含该节点的进程控制块指针
        // 原理：使用container_of/to_struct技术
        //      已知结构体成员地址，计算结构体起始地址
        // 参数：le - 链表节点指针
        //      run_link - 链表节点在proc_struct中的成员名
        return le2proc(le, run_link);
    }

    // 队列为空，返回NULL
    return NULL;
}

```

RR_proc_tick 函数

函数用途：处理时钟中断，减少当前运行进程的时间片，时间片用尽时设置调度标志。

概要设计思路：

1. 每次时钟中断时减少当前进程的时间片
2. 当时间片减为0时，设置 `need_resched` 标志
3. 该标志会在中断返回前被检查，触发 `schedule()` 进行进程切换

```

static void
RR_proc_tick(struct run_queue *rq, struct proc_struct *proc)
{
    // LAB6: 2311474

    // 首先检查时间片是否大于0
    // 防止时间片变成负数（虽然理论上不应该发生）
    if (proc->time_slice > 0) {
        // 时间片减1，表示进程又运行了一个时钟周期
        proc->time_slice--;
    }

    // 检查时间片是否用尽
    if (proc->time_slice == 0) {
        // need_resched: 进程控制块中的调度标志
        // 用途：标记该进程需要被调度（让出CPU）
        // 设为1后，在trap返回前会检查此标志并调用schedule()
        // 这是实现抢占式调度的关键机制
        proc->need_resched = 1;
    }
}

```

3. make grade 输出结果

```

llzf@LZF:~/OS/lab6$ make grade
priority:                (3.1s)
-check result:           OK
-check output:           OK
Total Score: 50/50

```

4. RR调度算法优缺点分析

优点:

- 实现简单，易于理解
- 公平性好，每个进程获得相等的CPU时间
- 响应时间可预测（最长等待时间 = $(n-1) \times \text{时间片}$ ）

缺点：

- 不考虑进程优先级
- 时间片设置需要权衡
- 对I/O密集型进程不友好

为什么需要在 `RR_proc_tick` 中设置 `need_resched` 标志：

时钟中断只是减少时间片，不能直接在中断处理中调度。设置标志后，在trap返回前检查该标志，在安全的时机进行调度，避免在中断处理中进行复杂的上下文切换。

5. 拓展思考

优先级RR调度的修改：

1. 使用多个运行队列，每个优先级一个
2. `pick_next` 从最高优先级非空队列选择

多核调度支持：

当前不支持。需要每个CPU一个运行队列、添加自旋锁、实现负载均衡。

练习3：实现 Stride Scheduling 调度算法

1. BIG_STRIDE 常量定义

概要设计思路：

stride使用32位无符号整数，比较时需要处理溢出问题。通过将stride差值转换为有符号整数比较，可以正确处理溢出。为保证 `STRIDE_MAX - STRIDE_MIN` 在有符号32位整数范围内，`BIG_STRIDE` 应取 `0x7FFFFFFF`（32位有符号整数最大值）。

```

/* LAB6 2311474 */
/* BIG_STRIDE的选择原理:
 * 1. stride值会不断增加, 可能溢出32位无符号整数
 * 2. 比较两个stride时, 使用有符号减法: (int32_t)(a - b)
 * 3. 为保证比较正确, 需要 STRIDE_MAX - STRIDE_MIN <= 0x7FFFFFFF
 * 4. 由于 STRIDE_MAX - STRIDE_MIN <= PASS_MAX = BIG_STRIDE / priority
 * 5. 当 priority >= 1 时, 差值最大为 BIG_STRIDE
 * 6. 因此 BIG_STRIDE 应取 0x7FFFFFFF
 */
#define BIG_STRIDE 0x7FFFFFFF

```

2. proc_stride_comp_f 比较函数

函数用途: 斜堆的比较函数, 用于比较两个进程的stride值大小, 决定在斜堆中的位置。

```

static int
proc_stride_comp_f(void *a, void *b)
{
    // le2proc: 从斜堆节点指针获取进程控制块指针
    // lab6_run_pool: 进程控制块中的斜堆节点成员名
    struct proc_struct *p = le2proc(a, lab6_run_pool);
    struct proc_struct *q = le2proc(b, lab6_run_pool);

    // 关键: 使用有符号整数计算差值
    // 这样即使发生溢出, 只要差值在int32范围内, 比较结果仍然正确
    // 例如: 无符号 98 - 65535 = 99 (溢出)
    //         有符号 (int32_t)(98 - 65535) = 99 > 0
    //         说明在逻辑上 98 > 65535 (因为65535溢出了)
    int32_t c = p->lab6_stride - q->lab6_stride;

    // 返回比较结果: 1表示a>b, 0表示相等, -1表示a<b
    if (c > 0)
        return 1;
    else if (c == 0)
        return 0;
    else
        return -1;
}

```

3. stride_init 函数

函数用途：初始化Stride调度器的运行队列，包括链表和斜堆。

概要设计思路：Stride调度使用斜堆作为优先队列，需要初始化斜堆根指针为NULL。同时保留链表初始化以支持链表实现的备选方案。

```
static void
stride_init(struct run_queue *rq)
{
    /* LAB6 2311474 */

    // list_init: 初始化链表（备选实现或其他用途）
    // 即使使用斜堆，也初始化链表以保持一致性
    list_init(&(rq->run_list));

    // lab6_run_pool: 斜堆的根节点指针
    // 初始化为NULL表示空堆
    // 斜堆是一种自平衡的堆结构，不需要额外的初始化
    rq->lab6_run_pool = NULL;

    // 进程计数初始化为0
    rq->proc_num = 0;
}
```

4. stride_enqueue 函数

函数用途：将进程加入Stride调度器的运行队列（斜堆）。

概要设计思路：

1. 使用 `skew_heap_insert` 将进程的斜堆节点插入到优先队列中
2. 斜堆会自动根据比较函数维护堆的性质（最小stride在堆顶）
3. 同样需要处理时间片的初始化

```

static void
stride_enqueue(struct run_queue *rq, struct proc_struct *proc)
{
    /* LAB6 2311474 */

    #if USE_SKEW_HEAP
        // skew_heap_insert: libs/skew_heap.h中定义的斜堆插入函数
        // 用途：将一个节点插入到斜堆中，并返回新的堆根
        // 参数1: rq->lab6_run_pool - 当前堆的根节点
        // 参数2: &(amp;proc->lab6_run_pool) - 要插入的节点
        // 参数3: proc_stride_comp_f - 比较函数
        // 原理：斜堆合并操作，时间复杂度O(log n)摊还
        // 返回值：插入后新的堆根（可能改变）
        rq->lab6_run_pool = skew_heap_insert(rq->lab6_run_pool,
                                            &(proc->lab6_run_pool),
                                            proc_stride_comp_f);
    #else
        // 备选实现：使用链表
        list_add_before(&(rq->run_list), &(proc->run_link));
    #endif

    // 时间片处理（与RR相同）
    // 如果时间片为0或超过最大值，重置为最大时间片
    if (proc->time_slice == 0 || proc->time_slice > rq->max_time_slice) {
        proc->time_slice = rq->max_time_slice;
    }

    // 设置进程所属的运行队列
    proc->rq = rq;

    // 增加进程计数
    rq->proc_num++;
}

```

5. stride_dequeue 函数

函数用途：将进程从Stride调度器的运行队列（斜堆）中移除。

概要设计思路：使用 `skew_heap_remove` 从斜堆中删除指定节点。斜堆支持 $O(\log n)$ 的任意节点

删除。

```
static void
stride_dequeue(struct run_queue *rq, struct proc_struct *proc)
{
    /* LAB6 2311474 */

    #if USE_SKEW_HEAP
        // skew_heap_remove: libs/skew_heap.h中定义的斜堆删除函数
        // 用途：从斜堆中删除指定节点，并返回新的堆根
        // 参数1: rq->lab6_run_pool - 当前堆的根节点
        // 参数2: &(amp;proc->lab6_run_pool) - 要删除的节点
        // 参数3: proc_stride_comp_f - 比较函数
        // 原理：删除节点后合并其左右子树
        // 返回值：删除后新的堆根（可能改变）
        rq->lab6_run_pool = skew_heap_remove(rq->lab6_run_pool,
                                            &(proc->lab6_run_pool),
                                            proc_stride_comp_f);
    #else
        // 备选实现：使用链表
        assert(!list_empty(&(proc->run_link)) && proc->rq == rq);
        list_del_init(&(proc->run_link));
    #endif

    // 减少进程计数
    rq->proc_num--;
}
```

6. stride_pick_next 函数

函数用途：从Stride调度器的运行队列中选择stride值最小的进程，并更新其stride值。

概要设计思路：

1. 斜堆的根节点就是stride最小的进程
2. 使用 `le2proc` 从斜堆节点获取进程控制块
3. 选中进程后，更新其stride值： `stride += BIG_STRIDE / priority`
4. 处理优先级为0的边界情况

```

static struct proc_struct *
stride_pick_next(struct run_queue *rq)
{
    /* LAB6 2311474 */

#ifdef USE_SKEW_HEAP
    // 检查斜堆是否为空
    if (rq->lab6_run_pool == NULL) {
        return NULL;
    }

    // 斜堆的性质：根节点就是最小元素
    // 直接从根节点获取stride最小的进程
    // le2proc：从斜堆节点指针获取进程控制块指针
    // lab6_run_pool：斜堆节点在proc_struct中的成员名
    struct proc_struct *p = le2proc(rq->lab6_run_pool, lab6_run_pool);
#else
    // 备选实现：链表需要遍历找最小
    list_entry_t *le = list_next(&(rq->run_list));
    if (le == &(rq->run_list)) {
        return NULL;
    }

    // 遍历链表找stride最小的进程
    struct proc_struct *p = le2proc(le, run_link);
    le = list_next(le);
    while (le != &(rq->run_list)) {
        struct proc_struct *q = le2proc(le, run_link);
        // 使用有符号比较处理溢出
        if ((int32_t)(q->lab6_stride - p->lab6_stride) < 0) {
            p = q;
        }
        le = list_next(le);
    }
#endif

    // 更新被选中进程的stride值
    // 公式：stride += pass = BIG_STRIDE / priority
    // 边界处理：如果优先级为0，则步长为BIG_STRIDE（最大步长）

```

```

    if (p->lab6_priority == 0) {
        // 优先级为0时，给最大步长，相当于最低优先级
        p->lab6_stride += BIG_STRIDE;
    } else {
        // 正常情况：步长与优先级成反比
        // 优先级越高，步长越小，增长越慢，更容易被再次选中
        p->lab6_stride += BIG_STRIDE / p->lab6_priority;
    }

    return p;
}

```

7. stride_proc_tick 函数

函数用途：处理时钟中断，与RR调度相同，减少时间片并在用尽时设置调度标志。

概要设计思路：Stride调度同样使用时间片控制单次运行时间，tick处理逻辑与RR完全相同。

```

static void
stride_proc_tick(struct run_queue *rq, struct proc_struct *proc)
{
    /* LAB6 2311474 */

    // 如果时间片大于0，减少时间片
    if (proc->time_slice > 0) {
        proc->time_slice--;
    }

    // 如果时间片用尽，设置调度标志
    if (proc->time_slice == 0) {
        proc->need_resched = 1;
    }
}

```

8. Stride算法正比性证明

定理：经过足够长时间后，每个进程分配的时间片数目与其优先级成正比。

证明思路：

设进程 P 的优先级为 $priority_P$, 步长为:

$$pass_P = \frac{BIG_STRIDE}{priority_P}$$

假设在时间 T 内, 进程 P 被调度的 n_P 次, 则其stride增量为:

$$\Delta stride_P = n_P \times pass_P = n_P \times \frac{BIG_STRIDE}{priority_P}$$

由于Stride调度总是选择stride最小的进程, 经过足够长时间后, 所有进程的stride趋于相等:

$$\Delta stride_P \approx \Delta stride_Q$$

即:

$$n_P \times \frac{BIG_STRIDE}{priority_P} \approx n_Q \times \frac{BIG_STRIDE}{priority_Q}$$

化简得:

$$\frac{n_P}{n_Q} \approx \frac{priority_P}{priority_Q}$$

因此, 调度次数 (时间片数目) 与优先级成正比。

9. 多级反馈队列调度算法设计

概要设计:


```

// 数据结构定义
#define MLFQ_LEVELS 4 // 4个优先级队列

struct mlfq_run_queue {
    list_entry_t queues[MLFQ_LEVELS]; // N个队列
    int timeslice[MLFQ_LEVELS];      // 各队列时间片：1, 2, 4, 8
    int proc_num;
};

// 核心函数
void mlfq_init(struct mlfq_run_queue *rq) {
    for (int i = 0; i < MLFQ_LEVELS; i++) {
        list_init(&rq->queues[i]);
        rq->timeslice[i] = 1 << i; // 时间片倍增：1, 2, 4, 8
    }
    rq->proc_num = 0;
}

void mlfq_enqueue(struct mlfq_run_queue *rq, struct proc_struct *proc) {
    int level = proc->priority_level; // 新增字段
    list_add_before(&rq->queues[level], &proc->run_link);
    proc->time_slice = rq->timeslice[level];
    rq->proc_num++;
}

struct proc_struct *mlfq_pick_next(struct mlfq_run_queue *rq) {
    // 从最高优先级队列开始查找
    for (int i = 0; i < MLFQ_LEVELS; i++) {
        if (!list_empty(&rq->queues[i])) {
            list_entry_t *le = list_next(&rq->queues[i]);
            return le2proc(le, run_link);
        }
    }
    return NULL;
}

void mlfq_proc_tick(struct mlfq_run_queue *rq, struct proc_struct *proc) {
    proc->time_slice--;
    if (proc->time_slice == 0) {

```

```
proc->need_resched = 1;
// 时间片用完, 降级
if (proc->priority_level < MLFQ_LEVELS - 1) {
    proc->priority_level++;
}
}
}
```

10.make qemu结果分析

```
kernel_execve: pid = 2, name = "priority".
set priority to 6
main: fork ok,now need to wait pids.
set priority to 5
set priority to 4
set priority to 3
set priority to 2
set priority to 1
child pid 7, acc 1084000, time 2010
child pid 6, acc 892000, time 2010
child pid 5, acc 716000, time 2010
child pid 4, acc 536000, time 2010
child pid 3, acc 364000, time 2010
main: pid 3, acc 364000, time 2020
main: pid 4, acc 536000, time 2020
main: pid 5, acc 716000, time 2020
main: pid 6, acc 892000, time 2020
main: pid 0, acc 1084000, time 2020
main: wait pids over
sched result: 1 1 2 2 3
all user-mode processes have quit.
init check memory pass.
kernel panic at kern/process/proc.c:537:
initproc exit.
```

```
lab6_setpriority(TOTAL + 1);    // 主进程设置优先级为 TOTAL+1 = 6

for (i = 0; i < TOTAL; i++) {  // i = 0, 1, 2, 3, 4
    if ((pids[i] = fork()) == 0) {
        lab6_setpriority(i + 1); // 子进程设置优先级为 i+1
        ...
    }
}
```

所以创建的5个子进程：

循环变量 i	fork() 返回的 PID	设置的优先级 (i+1)
0	pid 3	1
1	pid 4	2
2	pid 5	3
3	pid 6	4
4	pid 7	5

```
set priority to 6    ← 主进程 (TOTAL+1 = 6)
set priority to 5    ← i=4 的子进程 (但优先级应该是 i+1=5)
set priority to 4
set priority to 3
set priority to 2
set priority to 1    ← i=0 的子进程
```

实际上 fork 的顺序是：

- i=0 → 创建子进程，优先级 = 0+1 = 1
- i=1 → 创建子进程，优先级 = 1+1 = 2
- i=2 → 创建子进程，优先级 = 2+1 = 3
- i=3 → 创建子进程，优先级 = 3+1 = 4
- i=4 → 创建子进程，优先级 = 4+1 = 5

主进程 (pid 2) 的优先级是 6。

acc 值与优先级的关系

acc 是累加器，表示进程执行了多少次循环：

```
child pid 7, acc 1084000 → 优先级 5, 执行最多
child pid 6, acc 892000 → 优先级 4
child pid 5, acc 716000 → 优先级 3
child pid 4, acc 536000 → 优先级 2
child pid 3, acc 364000 → 优先级 1, 执行最少
```

比例验证：1084000 : 892000 : 716000 : 536000 : 364000 \approx 5 : 4 : 3 : 2 : 1

这正好等于各进程的优先级比！这证明了 Stride 调度算法正确地按优先级比例分配 CPU 时间。

回答 Stride 调度器溢出问题

提问 1：如何证明 $STRIDE_MAX - STRIDE_MIN \leq PASS_MAX$ ？

证明（使用数学归纳法）：

基础情况：

初始时，所有进程的 stride 值都为 0，因此：

$$STRIDE_MAX - STRIDE_MIN = 0 \leq PASS_MAX$$

归纳假设：

假设在第 k 次调度前，有 $STRIDE_MAX - STRIDE_MIN \leq PASS_MAX$ 成立。

归纳步骤：

在第 k 次调度时，调度器选择**当前 stride 最小**的进程执行（设为进程 P）。

执行后，进程 P 的 stride 更新为：

$$stride'_P = stride_P + pass_P$$

其中 $stride_P = STRIDE_MIN$ (因为 P 是被选中的最小 stride 进程)。

更新后的最大 stride 差值分析:

1. **新的 $STRIDE_MIN'$** : 由于原来的最小值进程 P 增加了 $pass_P$, 新的最小值 $STRIDE_MIN' \geq STRIDE_MIN$ (可能是 P 更新后的值, 也可能是其他进程)
2. **新的 $STRIDE_MAX'$** :
 - 如果 $stride_P + pass_P > STRIDE_MAX$, 则 $STRIDE_MAX' = stride_P + pass_P$
 - 否则 $STRIDE_MAX' = STRIDE_MAX$

情况一: $STRIDE_MAX' = STRIDE_MAX$ (原最大值不变)

$$STRIDE_MAX' - STRIDE_MIN' \leq STRIDE_MAX - STRIDE_MIN \leq PASS_MAX$$

情况二: $STRIDE_MAX' = stride_P + pass_P$ (P 成为新的最大值)

此时新的最小值 $STRIDE_MIN'$ 必然来自其他某个进程 Q, 且 $stride_Q \geq STRIDE_MIN = stride_P$

$$STRIDE_MAX' - STRIDE_MIN' = (stride_P + pass_P) - stride_Q$$

$$\leq (stride_P + pass_P) - stride_P = pass_P \leq PASS_MAX$$

提问 2: BigStride 应该取多少?

分析:

根据上述结论, 我们有:

$$STRIDE_MAX - STRIDE_MIN \leq PASS_MAX = BIG_STRIDE$$

为了利用**有符号整数比较**来正确判断两个无符号 stride 值的大小关系 (即使发生溢出), 我们需要保证:

当计算 $stride_A - stride_B$ 时, 结果用**有符号整数**解释后能正确反映实际大小关系。

关键洞察：

- 对于 32 位无符号整数，范围是 $[0, 2^{32} - 1]$
- 对于 32 位有符号整数，范围是 $[-2^{31}, 2^{31} - 1]$

当两个 stride 之差的绝对值不超过 $2^{31} - 1$ 时，将差值解释为有符号整数可以正确判断大小：

- 如果真实差值为正且 $\leq 2^{31} - 1$ ，有符号解释也为正
- 如果真实差值为负且 $\geq -(2^{31} - 1)$ ，有符号解释也为负

结论：

$$BIG_STRIDE \leq 2^{31} - 1 = 0x7FFFFFFF$$

在 ucore 的实现中：

```
#define BIG_STRIDE 0x7FFFFFFF
```

这样，比较函数可以写成：

```
static int proc_stride_comp_f(void *a, void *b) {  
    struct proc_struct *p = a;  
    struct proc_struct *q = b;  
    int32_t c = p->lab6_stride - q->lab6_stride; // 有符号比较  
    if (c > 0) return 1;  
    else if (c == 0) return 0;  
    else return -1;  
}
```

数值验证（以题目中的 16 位为例）：

- $BIG_STRIDE_{16bit} = 2^{15} - 1 = 32767$
- 当 $stride_A = 98$, $stride_B = 65535$ 时
- $98 - 65535 = -65437$ (数学上)
- 但作为 16 位无符号运算： $98 - 65535 \equiv 99 \pmod{65536}$
- 将 99 解释为有符号 16 位整数仍为 99 (正数)，说明 $98 > 65535$ (在 stride 语义下)

这与理论分析一致： $98 - 65535$ 的真实差值应该是 $98 - 65535 = -65437$ ，但由于溢出前 A 实际上领先 B (stride 更大)，所以比较结果应该是 $A > B$ 。

重要知识点总结

本实验用到的关键函数

函数名	来源	用途
list_init	libs/list.h	初始化双向循环链表节点
list_add_before	libs/list.h	在指定节点前插入新节点
list_del_init	libs/list.h	删除节点并重新初始化
list_next	libs/list.h	获取链表下一个节点
list_empty	libs/list.h	检查链表是否为空
le2proc	kern/process/proc.h	从链表节点获取进程控制块
skew_heap_insert	libs/skew_heap.h	向斜堆插入节点
skew_heap_remove	libs/skew_heap.h	从斜堆删除节点
local_intr_save	kern/sync/sync.h	保存中断状态并关中断
local_intr_restore	kern/sync/sync.h	恢复中断状态
kmalloc	kern/mm/kmalloc.h	内核内存分配
memset	libs/string.h	内存块设置

实验知识点与OS原理对应

实验知识点	OS原理知识点	理解
sched_class结构体	调度器抽象	通过函数指针实现策略与机制分离
run_queue	就绪队列	组织所有可运行进程
time_slice	时间片	进程持续运行的最长时间
need_resched	抢占标志	实现抢占式调度的关键

实验知识点	OS原理知识点	理解
RR调度	时间片轮转	公平调度，简单高效
Stride调度	比例份额调度	按优先级分配CPU时间
斜堆	优先队列	$O(\log n)$ 获取最小元素