

操作系统课程设计实验报告

黄毅成

2024.7.16

目录

1	Lab: Xv6 and Unix utilities	2
1.1	实验目的	2
1.2	实验步骤	2
1.2.1	运行 xv6	2
1.2.2	实现 sleep	3
1.2.3	实现 pingpong	3
1.2.4	实现 prime	4
1.2.5	实现 find	7
1.2.6	实现 xargs	9
1.3	评测结果	10
1.4	实验小结	11
2	Lab: System calls	11
2.1	实验目的	11
2.2	实验步骤	11
2.2.1	实现 trace	11
2.2.2	实现 sysinfo	14
2.3	评测结果	16
2.4	实验小结	16
3	Lab: Page tables	17
3.1	实验目的	17
3.2	实验步骤	17
3.2.1	实现系统调用加速	17
3.2.2	实现页表打印	18
3.2.3	实现被访问页面侦测	20
3.3	评测结果	23

1 Lab: Xv6 and Unix utilities

1.1 实验目的

本实验旨在熟悉 xv6 操作系统及其系统调用。通过本次实验，我将学习如何在 xv6 环境中设置并运行操作系统，理解并实现基本的 UNIX 实用程序。这包括启动 xv6、获取并管理源代码、编译和运行操作系统、以及实现和测试具体的系统调用和应用程序。本实验将帮助深入理解操作系统的运行机制 and 开发流程，为后续更复杂的操作系统编程打下坚实基础。

具体将实现以下程序：

- sleep 程序：编写一个 xv6 版本的 sleep 程序，使其根据用户指定的 ticks 暂停。
- pongpong 程序：编写一个使用管道和 fork 系统调用在父子进程间传递字节的程序。
- primes 程序：编写一个基于管道的并发素数筛选程序，将数值在进程间传递并筛选素数。
- find 程序：编写一个简化版的 find 程序，遍历目录树查找特定文件名。
- xargs 程序：编写一个简化版的 xargs 程序，从标准输入读取行并为每行运行一个命令。

在实现和测试这些系统调用的过程中，我们将深入理解操作系统的内部机制，并掌握如何在用户程序中调用这些功能。

1.2 实验步骤

1.2.1 运行 xv6

1. 利用以下指令获取 Lab xv6 源代码，查看 util 分支。

```
$ git clone git://g.csail.mit.edu/xv6-labs-2021
$ cd xv6-labs-2021
$ git checkout util
```

2. 输入 make qemu 命令构建并运行 xv6。

```
$ make qemu

...

xv6 kernel is booting

hart 2 starting
hart 1 starting
init: starting sh
```

1.2.2 实现 sleep

1. 根据题目提示，可以实现如下代码：

sleep.c

```
#include "kernel/types.h" // 包含内核类型定义
#include "user/user.h" // 包含用户模式下的库函数

int main(int argc, char *argv[])
{
    // 检查命令行参数是否等于2，即程序名和等待时间参数
    if (argc != 2)
    {
        fprintf(2, "Error: Parameters Error\n"); // 打印错误信息
        exit(1); // 退出程序，返回状态码1
    }

    sleep(atoi(argv[1])); // 调用 sleep 函数，等待指定的秒数

    exit(0); // 程序正常退出，返回状态码0
}
```

2. 在 Makefile 文件中的 UPROGS 加上 \$U/_sleep\后利用 make qemu 命令编译启动 xv6 操作系统；
3. 在 xv6 命令行中运行 sleep，程序将暂停执行一段指定的时间：

```
$ sleep 10
```

1.2.3 实现 pingpong

1. 首先创建两条管道和用于储存数据的缓冲区。

初始化管道和缓冲区

```
int fd1[2];
int fd2[2];

pipe(fd1);
pipe(fd2);

char buffer[16];
```

2. 利用 `fork()` 创建子进程。

fork() 函数

```
if (fork() != 0)
{
    // 父线程执行的代码...
}
else
{
    // 子线程执行的代码...
}
```

3. 在父进程中发送 “ping” 并接收 “pong”。

父进程

```
// 父线程执行的代码
write(fd1[1], "ping", strlen("ping"));
read(fd2[0], buffer, 4);
printf("%d: received %s\n", getpid(), buffer);
```

4. 在子进程中发送 “pong” 并接收 “ping”。

子进程

```
// 子线程执行的代码
read(fd1[0], buffer, 4);
printf("%d: received %s\n", getpid(), buffer);
write(fd2[1], "pong", strlen("pong"));
```

5. 把程序写在 `pingpong.c` 中，用同样的方法在 `xv6` 中运行程序，可以观察到父子进程分别输出的结果。

```
$ pingpong
5: received ping
4: received pong
```

1.2.4 实现 prime

1. 首先了解程序的原理。原理示意图1-1。程序通过递归创建进程和使用管道通信的方式，逐步筛选出素数。每个进程从管道中读取数值，将第一个数识别为素数，并过滤掉其倍数，然后将剩余的数传递给下一个进程继续处理，从而并发地筛选出所有素数。

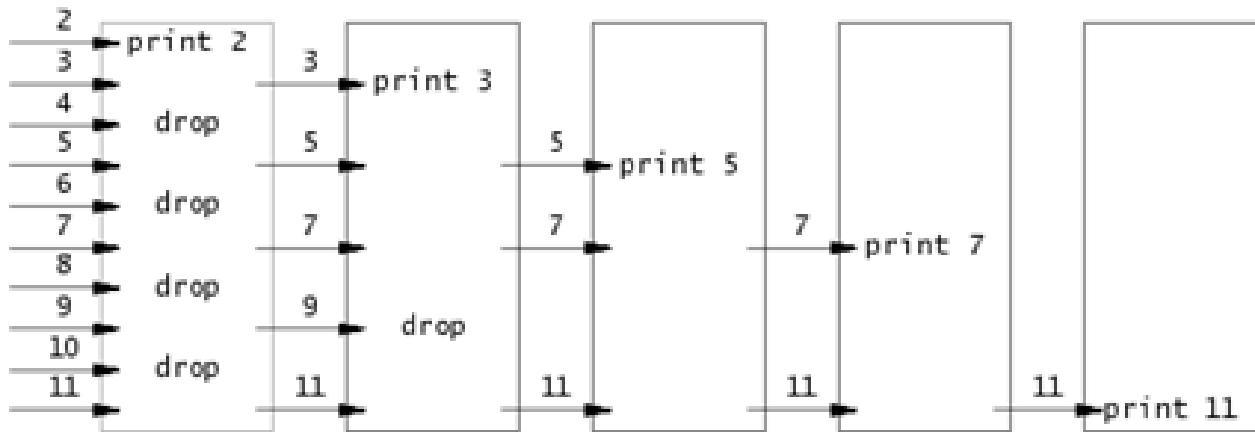


图 1-1: primes 程序原理

2. 把输出质数，创建子进程并向其传送数据的过程整合为一个递归函数。要注意文件描述符的回收，防止资源超限。

new_prime_proc 函数的实现

```

void new_prime_proc(int *old_pipe)
{
    close(old_pipe[1]); // 关闭旧管道的写端

    int first_num;
    // 从旧管道中读取第一个数，如果读取失败则退出
    if (!read(old_pipe[0], &first_num, sizeof(first_num)))
    {
        close(old_pipe[0]); // 关闭旧管道的读端
        exit(0); // 退出进程
    }

    fprintf(1, "prime %d\n", first_num); // 打印第一个数，即当前的素数

    int new_pipe[2];
    pipe(new_pipe); // 创建新管道

    int p_id = fork(); // 创建子进程
    if (p_id == 0)
        new_prime_proc(new_pipe); // 子进程递归调用处理新管道
    else
    {
        int t;
        // 在父进程中，从旧管道中读取数，如果不是first_num的倍数则写入新管道
    }
}
  
```

```

while (read(old_pipe[0], &t, sizeof(t)))
{
    if (t % first_num != 0)
    {
        write(new_pipe[1], &t, sizeof(t));
    }
}

close(old_pipe[0]); // 关闭旧管道的读端
close(new_pipe[0]); // 关闭新管道的读端
close(new_pipe[1]); // 关闭新管道的写端

wait((int *)0); // 等待子进程结束
}
}

```

3. 在主函数中将 2 35 写入管道，调用递归函数。

main() 函数的实现

```

int main()
{
    int p[2];
    pipe(p); // 创建管道
    int i;
    // 向管道中写入从2到35的所有数
    for (i = 2; i <= 35; i++)
        write(p[1], &i, sizeof(i));
    new_prime_proc(p); // 调用处理函数处理管道中的数

    exit(0); // 退出程序
}

```

4. 把程序写在 primes.c 中，运行程序得到结果。

```

$ primes
prime 2
prime 3
...
prime 31

```

1.2.5 实现 find

1. 首先，仿照 ls.c 实现一个辅助函数 char*fntname(char *path)，把路径末尾的文件名提取出来，实现过程略。
2. 利用深度优先搜索的思想，实现一个 find 函数递归寻找文件。

find 函数的实现

```
void find(char *path, char *target)
{
    char buf[512], *p;
    int fd;
    struct dirent de;
    struct stat st;

    // 打开指定路径的文件或目录
    if ((fd = open(path, 0)) < 0)
    {
        fprintf(2, "find: cannot open %s\n", path);
        return;
    }

    // 获取文件或目录的状态信息
    if (fstat(fd, &st) < 0)
    {
        fprintf(2, "find1: cannot stat %s\n", path);
        close(fd);
        return;
    }

    // 根据文件或目录的类型进行处理
    switch (st.type)
    {
    case T_FILE:
        // 如果是文件，比较文件名是否与目标名称相同
        if (strcmp(target, path2name(path)) == 0)
        {
            printf("%s\n", path); // 输出文件路径
        }

        break;
```

```

case T_DIR:
    // 如果是目录，检查路径长度是否超出缓冲区范围
    if (strlen(path) + 1 + DIRSIZ + 1 > sizeof buf)
    {
        printf("find: path too long\n"); // 输出错误信息，路径过长
        break;
    }
    strcpy(buf, path); // 将路径复制到缓冲区
    p = buf + strlen(buf);
    *p++ = '/';

    // 遍历目录中的每个文件或子目录
    while (read(fd, &de, sizeof(de)) == sizeof(de))
    {
        if (de.inum == 0)
            continue; // 跳过空目录项

        memmove(p, de.name, DIRSIZ); // 将文件或目录名复制到缓冲区末尾
        p[DIRSIZ] = 0; // 添加字符串结束符

        // 获取文件或目录的状态信息
        if (stat(buf, &st) < 0)
        {
            // 输出错误信息，无法获取文件或目录的状态信息
            printf("find2: cannot stat %s\n", buf);
            continue;
        }

        // 排除当前目录和上级目录的特殊情况
        if (strlen(de.name) == 1 && de.name[0] == '.')
            continue;
        if (strlen(de.name) == 2
            && de.name[0] == '.'
            && de.name[1] == '.')
            continue;
        find(buf, target); // 递归调用查找函数，继续查找子目录
    }
    break;
}

```



```
    close(fd); // 关闭文件或目录
}
```

3. 在主函数中调用 find 函数。
 4. 将程序写在 find.c 中，运行程序得到结果。
-

```
$ find . b
./a/b
./b
```

1.2.6 实现 xargs

1. 首先初始化一些变量。

初始化

```
int i;
int arg_count = 0; // 参数数量计数器
char *args[MAXARG]; // 参数数组，最大长度为MAXARG
int initial_arg_count = arg_count; // 存储初始参数数量的位置

int line_index = 0; // 当前行的索引
char input_char; // 用于读取字符
char *current_line; // 指向当前处理的行
char line_buffer[512]; // 临时存储字符串的缓冲区
current_line = line_buffer;

// 将命令行参数复制到参数数组args中
for (i = 1; i < argc; ++i)
{
    args[arg_count++] = argv[i];
}
```

2. 循环处理读取的字符。

输入处理循环

```
while (read(0, &input_char, 1) > 0)
{
    // 对输入字符的操作...
}
```

3. 循环中的字符处理:

- 对于普通字符, 将其加入到当前行末尾;
- 遇到空格, 表示一个参数已经结束, 将参数添加到参数列表之中;

空格的处理

```
current_line[line_index] = '\0'; // 添加字符串结束符
line_index = 0; // 重置索引
args[arg_count++] = current_line; // 将当前单词添加到参数数组
char line_buffer[512]; // 重新分配缓冲区
current_line = line_buffer;
```

- 遇到回车, 表示一行结束, 将最后一个参数加入参数列表之中并执行命令。

回车的处理

```
// 处理换行符, 将当前行作为参数
current_line[line_index] = '\0'; // 添加字符串结束符
line_index = 0; // 重置索引

args[arg_count++] = current_line; // 将当前行添加到参数数组
args[arg_count] = 0; // 设置参数数组的结束标志

if (fork()) // 创建子进程
{
    wait(0); // 父进程等待子进程结束
    arg_count = initial_arg_count; // 重置参数数量
}
else
{
    exec(argv[1], args); // 子进程执行命令
}
```

4. 将程序写入 xargs.c 中, 运行程序得到结果。

```
$ echo hello too | xargs echo bye
bye hello too
```

1.3 评测结果

利用 grade-lab-util 脚本评测, 得到结果见图1-2

```

(base) aaa@aaa-virtual-machine:~/xv-6/xv6-labs-2021$ ./grade-lab-util
make: "kernel/kernel"已是最新。
== Test sleep, no arguments == sleep, no arguments: OK (1.2s)
== Test sleep, returns == sleep, returns: OK (1.0s)
== Test sleep, makes syscall == sleep, makes syscall: OK (1.0s)
== Test pingpong == pingpong: OK (1.0s)
== Test primes == primes: OK (1.0s)
== Test find, in current directory == find, in current directory: OK (1.0s)
== Test find, recursive == find, recursive: OK (1.4s)
== Test xargs == xargs: OK (1.0s)
== Test time ==
time: OK
Score: 100/100

```

图 1-2: 评测结果

1.4 实验小结

本实验中我初步了解了 xv6 这个操作系统的基本结构。了解了其利用 qemu 模拟器运行、编程的基本方法。本实验中需要实现的多为基本的系统功能，让我对 Unix 操作系统有了更深入的了解。

此外 primes 是我认为这里面最难的程序。首先，理解这个程序的实现原理就花费了我不少时间。在之后实现这个程序的过程之中，我在处理管道、父子进程的关系的时候遇到了一些困难。不过最后我还是成功实现了程序，这对我理解管道、进程并行有很大的帮助。

2 Lab: System calls

2.1 实验目的

本实验旨在进一步熟悉系统调用，重点掌握如何添加系统调用，理解系统调用的工作原理，内核态和用户态的联系。

本实验实现了两个系统调用：

- System call tracing: 实现对系统调用的跟踪；
- Sysinfo: 收集有关正在运行的系统的信息。

2.2 实验步骤

2.2.1 实现 trace

1. 首先，根据提示，在 Makefile 的 UPROGS 中添加 \$U/_trace\。
2. 在 user.h 文件的 system calls 部分添加 trace 函数。

对 user.h 的改动

```
// system calls
int fork(void);

...
// 添加 trace函数
int trace(int);
```

3. 在 usys.pl 末尾添加 entry("trace"); 以便在汇编语言中添加这个函数。
4. 进入 kernel 文件夹，在 syscall.h 中添加 SYS_trace 系统调用号的定义，值往下类推，即为 22。

对 syscall.h 的更改

```
// System call numbers
#define SYS_fork 1

...
// 为trace添加系统调用号
#define SYS_trace 22
```

5. 更改进程结构体。在 proc.h 中的进程结构体最后添加一个掩码 trace_mask，用于记录哪些进程要被追踪。

对进程结构体的更改

```
struct proc
{
    struct spinlock lock;
    ...
    // 添加掩码
    int trace_mask;
};
```

6. 在 sysproc.c 文件中，添加系统调用函数 sys_trace，在调用时设置掩码。

实现 sys_trace 系统调用

```
uint64 sys_trace(void)
{
    // 获取参数
    int mask;
    if (argint(0, &mask) < 0)
        return -1;
    // 获取当前进程
    struct proc *p = myproc();
```

```

// 写入掩码
p->trace_mask = mask;
return 0;
}

```

7. 在 syscall.c 中修改 syscall 函数，使其根据掩码判断是否输出当前调用信息。

对 syscall 函数的修改

```

void syscall(void)
{
    int num;
    struct proc *p = myproc();

    num = p->trapframe->a7;
    if (num > 0 && num < NELEM(syscalls) && syscalls[num])
    {
        p->trapframe->a0 = syscalls[num]();

        // 获得掩码
        int trace_mask = p->trace_mask;

        // 如果掩码对应，输出当前系统调用信息
        if ((trace_mask >> num) & 1)
        {
            printf("%d: syscall %s -> %d\n",
                p->pid,
                syscall_names[num - 1],
                p->trapframe->a0);
        }
    }
    else
    {
        ...
    }
}

```

8. 修改 proc.c 中的 freeproc 函数和 fork 函数，确保掩码在进程释放时重置掩码、在子进程创建时传递掩码。

```
static void freeproc(struct proc *p)
{
    if (p->trapframe)
        kfree((void *)p->trapframe);
    ...

    // 添加了这一行
    p->trace_mask = 0;
}

int fork(void)
{
    ...

    // 把子进程的掩码也设置为与父进程相同
    np->trace_mask = p->trace_mask;

    ...
}
```

2.2.2 实现 sysinfo

1. 首先，先仿照 trace 中的方法，在 Makefile、syscall.h、syscall.c、user.h、user.pl 中注册名为 sysinfo 的系统调用。
2. 在 kalloc.c 中仿照 kalloc 函数读取空闲内存链表的方式，实现一个计算空闲内存空间大小的函数 acquire_freemem。

acquire_freemem 的实现

```
uint64 acquire_freemem()
{
    struct run *r;
    uint64 cnt = 0;

    // 锁
    acquire(&kmem.lock);
    r = kmem.freelist;
    // 遍历链表
    while (r)
```

```

{
    r = r->next;
    cnt++;
}
// 释放锁
release(&kmem.lock);
// 返回空间大小（页数乘页尺寸）
return cnt * PGSIZE;
}

```

3. 在 `proc.c` 中，实现一个计算非使用状态进程个数的函数 `acquire_nproc`，利用记录进程的数组 `struct proc proc[NPROC]`。

acquire_nproc 的实现

```

uint64 acquire_nproc()
{
    struct proc *p;
    int cnt = 0;

    for (p = proc; p < &proc[NPROC]; ++p)
    {
        acquire(&p->lock);
        if (p->state != UNUSED)
            cnt++;
        release(&p->lock);
    }

    return cnt;
}

```

4. 最后，在 `sysproc.c` 中完成 `sys_sysinfo` 函数的实现。利用 `argaddr` 读取参数的地址，利用 `copyout` 对地址进行写入。

sys_sysinfo 的实现

```

uint64 sys_sysinfo(void)
{
    struct sysinfo info;
    uint64 addr;
    struct proc *p = myproc();
}

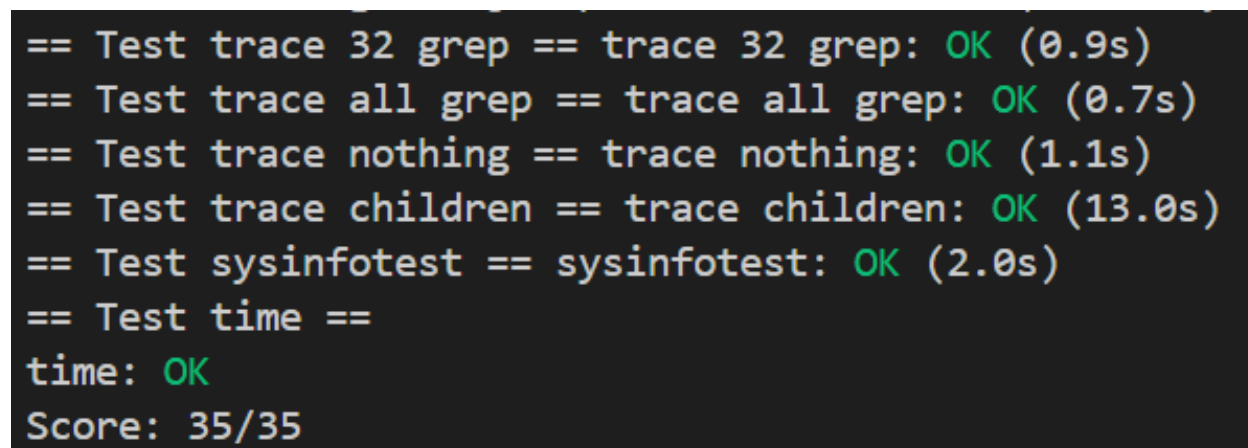
```

```
// 计算空闲进程数
info.nproc = acquire_nproc();
// 计算空闲内存数
info.freemem = acquire_freemem();

// 获取参数
if (argaddr(0, &addr) < 0)
    return -1;
// 写入结构体
if (copyout(p->pagetable, addr, (char *)&info, sizeof(info)) < 0)
    return -1;
return 0;
}
```

2.3 评测结果

利用 grade-lab-syscall 脚本评测，得到评测结果如图2-3所示。



```
== Test trace 32 grep == trace 32 grep: OK (0.9s)
== Test trace all grep == trace all grep: OK (0.7s)
== Test trace nothing == trace nothing: OK (1.1s)
== Test trace children == trace children: OK (13.0s)
== Test sysinfotest == sysinfotest: OK (2.0s)
== Test time ==
time: OK
Score: 35/35
```

图 2-3: 评测结果

2.4 实验小结

在本实验中，我实现了两个系统调用。通过实验，我了解到了在内核中实现系统调用的一整套流程。

在实验中，为了实现我自己的系统调用，我阅读了许多 kernel 的代码，对内核有了更好的了解。通过仿照内核代码中一些函数的实现以及提示，我才得以完成我自己的系统调用。我在阅读内核代码的时候也遇到了一些困难，花费了不少时间来理解代码的含义。

这次实验大大加深了我对系统调用的了解，为之后的实验打下基础。

3 Lab: Page tables

3.1 实验目的

本实验中将涉及到操作系统中重要的**页表**概念。操作系统中的页表是一种数据结构，用于实现虚拟内存和物理内存之间的地址映射。每个进程都有自己的页表，将虚拟地址映射到物理地址，从而使得操作系统能够有效地管理内存，提供内存保护和共享内存功能。页表的概念对于操作系统课程至关重要，因为它涉及到内存管理、进程隔离和系统性能等核心问题。理解页表如何工作，有助于深入掌握操作系统的内存管理机制，了解虚拟内存的实现细节，并且能够解决与内存管理相关的各种问题。

本实验中将探索页表的具体操作并对其进行修改，以加快某些系统调用并检测哪些页面被访问。具体将实现以下内容：

- 利用页表加速系统调用；
- 打印页表；
- 检测被访问的页表。

3.2 实验步骤

3.2.1 实现系统调用加速

1. 首先，在 `proc.c` 文件中修改 `proc_pagetable` 函数，仿照前面的代码添加用户页表的映射，注意内存权限应为 `PTE_U`。

对 `proc_pagetable` 函数的修改

```
pagetable_t proc_pagetable(struct proc *p)
{
    pagetable_t pagetable;

    ...

    // 添加的部分
    if (mappages(pagetable, USYSCALL, PGSIZE,
                (uint64)(p->usyscall), PTE_R | PTE_U) < 0)
    {
        uvmunmap(pagetable, USYSCALL, 1, 0);
        uvmunmap(pagetable, TRAMPOLINE, 1, 0);
        uvmfree(pagetable, 0);
        return 0;
    }

    return pagetable;
}
```

2. 在 proc.c 文件中修改 allocproc 函数，仿照前面的代码，给进程分配用户页表。

对 allocproc 函数的修改

```
static struct proc * allocproc(void)
{
    ...

    // 添加的部分
    if ((p->usyscall = (struct usyscall *)kalloc()) == 0)
    {
        freeproc(p);
        release(&p->lock);
        return 0;
    }
    p->usyscall->pid = p->pid;

    ...

    return p;
}
```

3. 在 proc.c 文件中修改 freeproc 函数，仿照前面的代码，释放用户页表。

对 freeproc 函数的修改

```
freeproc(struct proc *p)
{
    ...
    // 添加的部分
    if (p->usyscall)
        kfree((void *)p->usyscall);
    p->usyscall = 0;
    ...
}
```

4. 如此设置，系统就能利用用户页表实现更快地进程号查询，从而加速系统调用。

3.2.2 实现页表打印

1. 首先，阅读 vm.c 文件中 freewalk 函数的代码，了解如何对页表项进行递归遍历和访问。

```
// Recursively free page-table pages.
// All leaf mappings must already have been removed.
void freewalk(pagetable_t pagetable)
{
    // there are 2^9 = 512 PTEs in a page table.
    for (int i = 0; i < 512; i++)
    {
        pte_t pte = pagetable[i];
        if ((pte & PTE_V) && (pte & (PTE_R | PTE_W | PTE_X)) == 0)
        {
            // this PTE points to a lower-level page table.
            uint64 child = PTE2PA(pte);
            freewalk((pagetable_t)child);
            pagetable[i] = 0;
        }
        else if (pte & PTE_V)
        {
            panic("freewalk: leaf");
        }
    }
    kfree((void *)pagetable);
}
```

2. 仿照 freewalk 函数，实现递归打印页表的 vmprint 函数

```
void vmprint(pagetable_t pagetable, uint64 depth)
{
    // 如果递归深度大于2，则直接返回，RISC-V只有三级页表
    if (depth > 2)
        return;

    // 如果是最顶层页表，打印页表的地址
    if (depth == 0)
    {
        printf("page table %p\n", pagetable);
    }

    // 定义一个静态的前缀数组，用于打印格式化输出
```

```

static char *prefix[] = {"..", ".. ..", ".. .. ."};

// 页表中有 $2^9 = 512$ 个页表项
for (int i = 0; i < 512; i++)
{
    pte_t pte = pagetable[i]; // 获取当前页表项
    if (pte & PTE_V) // 如果页表项有效
    {
        // 打印当前页表项的信息, 包括前缀、索引、页表项和物理地址
        printf("%s%d: pte %p pa %p\n", prefix[depth], i, pte, PTE2PA(pte))
            ;
        uint64 child = PTE2PA(pte); // 获取下一级页表的物理地址
        vmprint((pagetable_t)child, depth + 1); // 递归打印下一级页表
    }
}
}

```

3. 在 def.h 中声明 vmprint 函数以便调用。

4. 在 exec.c 文件中, 对 exec 函数进行修改, 调用 vmprint 函数, 使其在进程号为 1 是打印页表。

对 exec 函数的修改

```

int exec(char *path, char **argv)
{
    ...

    // 添加的语句
    if (p->pid == 1)
        vmprint(p->pagetable, 0);

    ...
}

```

3.2.3 实现被访问页面侦测

1. 首先, 在 riscv.h 文件中添加一个 PTE_A 常量, 查阅 RISC-V 手册可知其值应为 0b00100000, 即 2^6 。

PTE_A 的定义

```
#define PTE_A (1L << 6)
```

2. 在 vm.c 文件中实现 vm_pgaccess 函数，利用 PTE_A 标志判断给定虚拟地址的页表项是否被访问，若被访问返回 1 并清除 PTE_A 标志。在 def.h 中添加函数的声明。

vm_pgaccess 函数的实现

```
int vm_pgaccess(pagetable_t pagetable, uint64 va)
{
    pte_t *pte; // 页表项指针

    // 如果虚拟地址超出最大允许值，返回0
    if (va >= MAXVA)
        return 0;

    // 获取虚拟地址对应的页表项指针
    pte = walk(pagetable, va, 0);
    // 如果页表项不存在，返回0
    if (pte == 0)
        return 0;

    // 如果页表项的访问标志位被设置
    if ((*pte & PTE_A) != 0)
    {
        // 清除访问标志位
        *pte = *pte & (~PTE_A);
        // 返回1表示访问标志位被清除
        return 1;
    }

    // 如果访问标志位未设置，返回0
    return 0;
}
```

3. 在 sysproc.c 中补全 sys_pgaccess 系统调用，使之能够把页面访问的情况记录在掩码之中。

sys_pgaccess 函数的实现

```
int sys_pgaccess(void)
{
    uint64 addr; // 内存起始地址
    int len; // 内存区域的页数
    int bitmask; // 存储结果的用户地址
```

```

// 获取系统调用的第一个参数（内存起始地址），并检查是否成功
if (argaddr(0, &addr) < 0)
    return -1;

// 获取系统调用的第二个参数（内存区域的页数），并检查是否成功
if (argint(1, &len) < 0)
    return -1;

// 获取系统调用的第三个参数（存储结果的用户地址），并检查是否成功
if (argint(2, &bitmask) < 0)
    return -1;

// 检查页数是否在合理范围内（0到32页）
if (len > 32 || len < 0)
    return -1;

int res = 0; // 用于存储访问标志结果
int i;
struct proc *p = myproc(); // 获取当前进程结构体

// 遍历每一页，检查访问标志并存储结果
for (i = 0; i < len; i++)
{
    int va = addr + i * PGSIZE; // 计算每一页的虚拟地址
    int abit = vm_pgaccess(p->pagetable, va); // 检查页表项的访问标志

    res = res | abit << i; // 将访问标志结果合并到res中
}

// 将结果拷贝到用户空间，如果失败则返回-1
if (copyout(p->pagetable, bitmask, (char *)&res, sizeof(res)) < 0)
    return -1;

// 成功返回0
return 0;
}

```

3.3 评测结果

利用 grade-lab-pgtbl 脚本评测，得到评测结果如图3-4所示。

```
make: "kernel/kernel"已是最新。
== Test pgtbltest == (1.1s)
== Test   pgtbltest: ugetpid ==
   pgtbltest: ugetpid: OK
== Test   pgtbltest: pgaccess ==
   pgtbltest: pgaccess: OK
== Test pte printout == pte printout: OK (0.9s)
== Test answers-pgtbl.txt == answers-pgtbl.txt: OK
== Test usertests == (243.4s)
== Test   usertests: all tests ==
   usertests: all tests: OK
== Test time ==
time: OK
Score: 46/46
```

图 3-4: 评测结果

3.4 实验小结

在本次实验中，我深入探索了操作系统中的页表概念，并通过一系列具体的实现来加深对该概念的理解。页表是操作系统中管理虚拟内存的重要数据结构，它通过将虚拟地址映射到物理地址，实现内存保护和内存共享功能。我通过本实验的操作，掌握了页表的操作方法和实现细节。

我在本实验上花费了不少时间，复习了操作系统课上讲过的页表概念，并研究内核代码。实验总体来说是有些难度。

在实验过程中，我不仅巩固了操作系统中页表的基本概念，还通过实际编程和调试，掌握了页表的具体实现方法和应用场景。通过这些实践操作，我更深入地理解了操作系统的内存管理机制，并积累了宝贵的编程经验和调试技巧。这些知识和技能对于我后续解决实际问题将大有裨益。