

# 第8章 异常控制流II: ——信号与非本地跳转

教师：吴锐  
计算机科学与技术学院  
哈尔滨工业大学

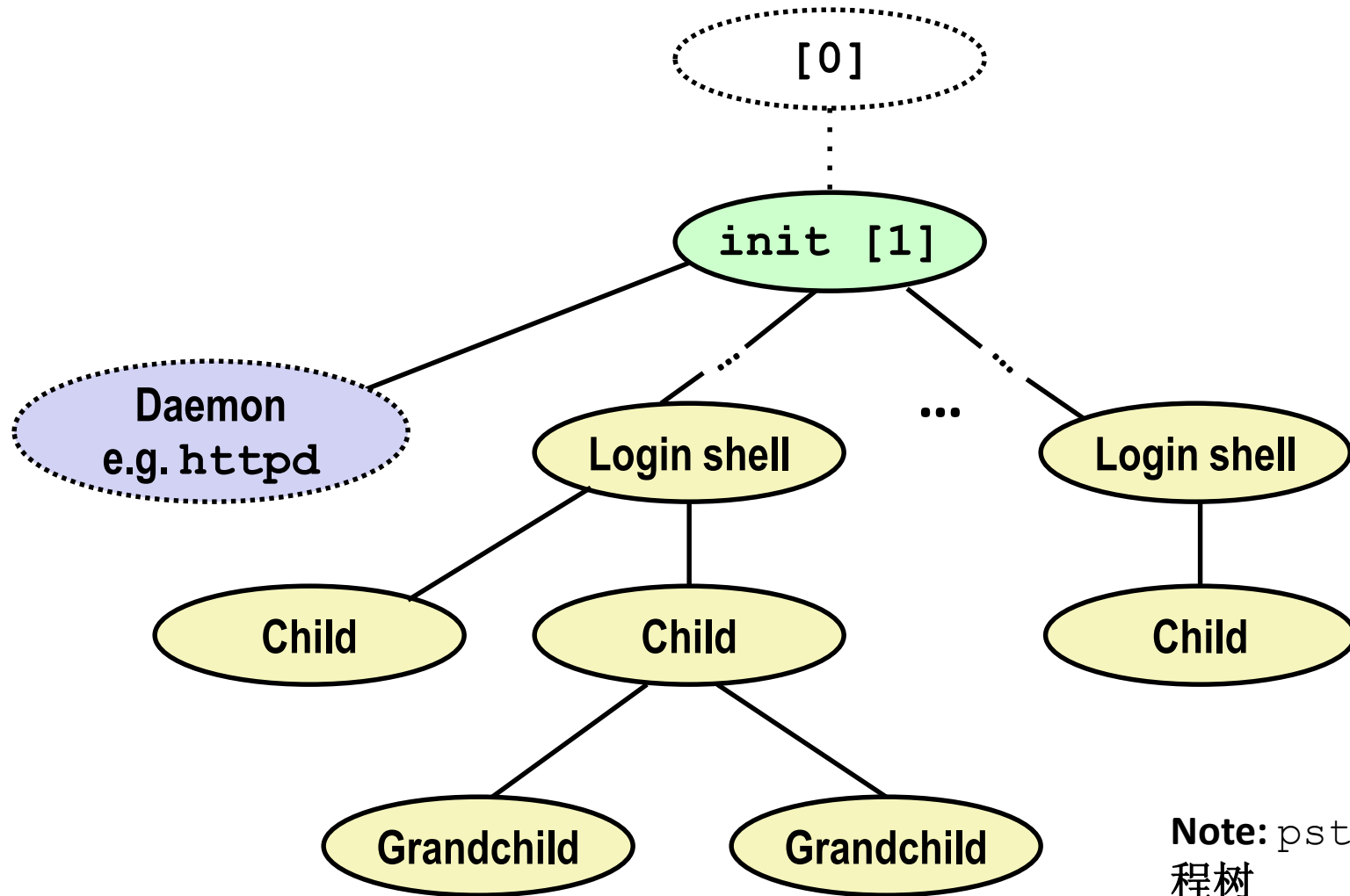
# 异常控制流发生在系统的所有层次

- 异常
    - 硬件和操作系统内核程序
  - 进程上下文切换
    - 硬件定时器和内核程序
  - 信号
    - 内核程序和应用程序
  - 非本地跳转
    - 应用程序
- } 以前的内容
- } 本节内容
- } 课本和补充资料

# 主要内容

- **Shells**
- 信号
- 非本地跳转

# Linux 进程体系



**Note:** `ps tree` 命令查看进程树

# Shell 程序

- **shell** 是一个交互型应用级程序，代表用户运行其他程序
  - **sh** 最早的shell (Stephen Bourne, AT&T Bell Labs, 1977)
  - **csch/tcsh** 变种
  - **bash** 变种、缺省的Linux shell

```

int main()
{
    char cmdline[MAXLINE]; /* command line */

    while (1) {
        /* read */
        printf("> ");
        Fgets(cmdline, MAXLINE, stdin);
        if (feof(stdin))
            exit(0);

        /* evaluate */
        eval(cmdline);
    }
}

```

*shellex.c*

*shell* 执行一系列的  
**读/求值** 步骤

读步骤读取用户的命令行，求值步骤解析命令，代表用户运行

# 一个简单的Shell程序: eval函数

```

void eval(char *cmdline)
{
    char *argv[MAXARGS]; /* Argument list execve() */
    char buf[MAXLINE];    /* Holds modified command line */
    int bg;               /* Should the job run in bg or fg? */
    pid_t pid;            /* Process id */

    strcpy(buf, cmdline);
    bg = parseline(buf, argv);
    if (argv[0] == NULL)
        return; /* Ignore empty lines */

    if (!builtin_command(argv)) {
        if ((pid = Fork()) == 0) { /* Child runs user job */
            if (execve(argv[0], argv, environ) < 0) {
                printf("%s: Command not found.\n", argv[0]);
                exit(0);
            }
        }

        /* Parent waits for foreground job to terminate */父进程等待前台子进程结束
        if (!bg) {
            int status;
            if (waitpid(pid, &status, 0) < 0)
                unix_error("waitfg: waitpid error");
        }
        else
            printf("%d %s", pid, cmdline);
    }
    return;
}

```

shellex.c

# 简单shell例子的问题

- 在这个例子中shell可以正确等待和回收前台作业
- 但是后台作业呢？
  - 后台作业终止时会成为僵死进程
  - 永远不会被回收，因为shell（通常）不会终止
  - 将导致内存泄漏

# 怎么办？

## ■ 解决办法: 异常控制流

- 在后台进程完成时内核将中断正常处理程序提醒我们
- 在Unix里这种提醒机制叫作信号



# 主要内容

- Shells
- 信号
- 非本地跳转

# Linux信号

- **signal** 就是一条小消息，它通知进程系统中发生了一个某种类型的事件
  - 类似于异常和中断
  - 从内核发送到（有时是在另一个进程的请求下）一个进程
  - 信号类型是用小整数ID来标识的(1-30)
  - 信号中唯一的信息是它的ID和它的到达

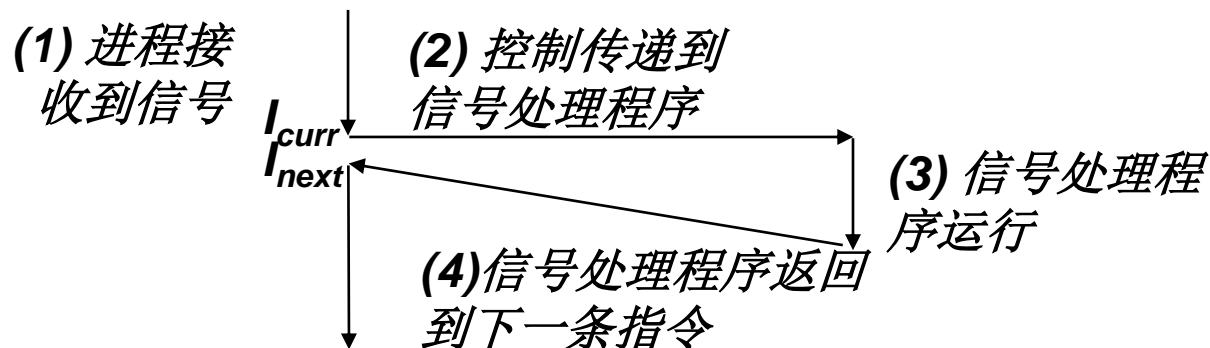
ID	名称	默认行为	相应事件
2	SIGINT	终止	来自键盘的中断
9	SIGKILL	终止	杀死程序(该信号不能被捕获不能被忽略)
11	SIGSEGV	终止	无效的内存引用（段故障）
14	SIGALRM	终止	来自alarm函数的定时器信号
17	SIGCHLD	忽略	一个子进程停止或者终止

# 信号术语：发送信号

- 内核通过更新目的进程上下文中的某个状态，**发送**（**递送**）一个信号给目的进程
- 发送信号可以是如下原因之一：
  - 内核检测到一个系统事件如除零错误(SIGFPE)或者子进程终止(SIGCHLD)
  - 一个进程调用了`kill`系统调用，显式地请求内核发送一个信号到目的进程
    - 一个进程可以发送信号给它自己

# 信号术语: 接收信号

- 当目的进程被内核强迫以某种方式对信号的发送做出反应时，它就**接收**了信号
- 反应的方式:
  - **忽略**这个信号(do nothing)
  - **终止**进程(with optional core dump)
  - 通过执行一个称为信号处理程序 ( **signal handler** ) 的用户层函数**捕获**这个信号
    - 类似于响应异步中断而调用的硬件异常处理程序



# 信号术语: 待处理信号和阻塞信号

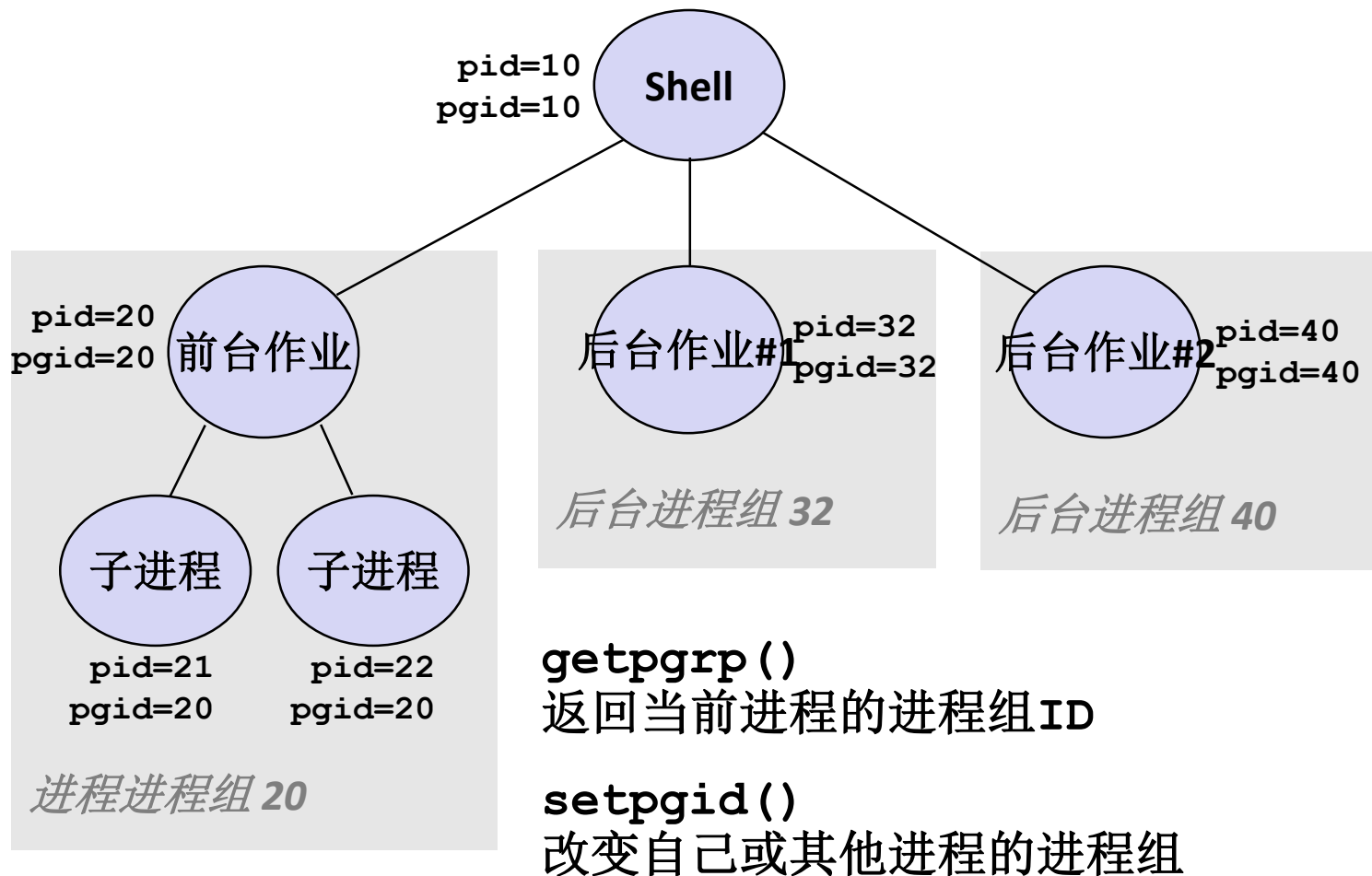
- 一个发出而没有被接收的信号叫做待处理信号 (*pending*)
  - 任何时刻, 一种类型至多只有一个待处理信号
  - Important: 信号不会排队等待
    - 如果一个进程有一个类型为k的待处理信号, 那么任何接下来发送到这个进程的类型为k的信号都会被丢弃
- 一个进程可以选择 *阻塞* 接收某种信号
  - 阻塞的信号仍可以被发送, 但不会被接收, 直到进程取消对该信号的阻塞
- 一个待处理信号最多只能被接收一次

# 信号术语: 待处理位/阻塞位

- 内核为每个进程维护着待处理位向量 (**pending**) 和阻塞位向量 (**blocked**)
  - **pending**: 待处理信号的集合
    - 若传送了一个类型为k的信号, 内核会设置**pending**中的第k位
    - 若接收了一个类型为k的信号, 内核将清除**pending**中的第k位
  - **blocked**: 被阻塞信号的集合
    - 通过 **sigprocmask** 函数设置和清除
    - 也称信号掩码

# 发送信号: 进程组

- 每个进程只属于一个进程组



# 用 `/bin/kill` 程序发送信号

- `/bin/kill` 程序可以向另外的进程或进程组发送任意的信号

## ■ Examples

- `/bin/kill -9 24818`  
发送信号9 (SIGKILL) 给进程24818
- `/bin/kill -9 -24817`  
发送信号SIGKILL给进程组24817中的每个进程  
(负的PID会导致信号被发送到进程组PID中的每个进程)

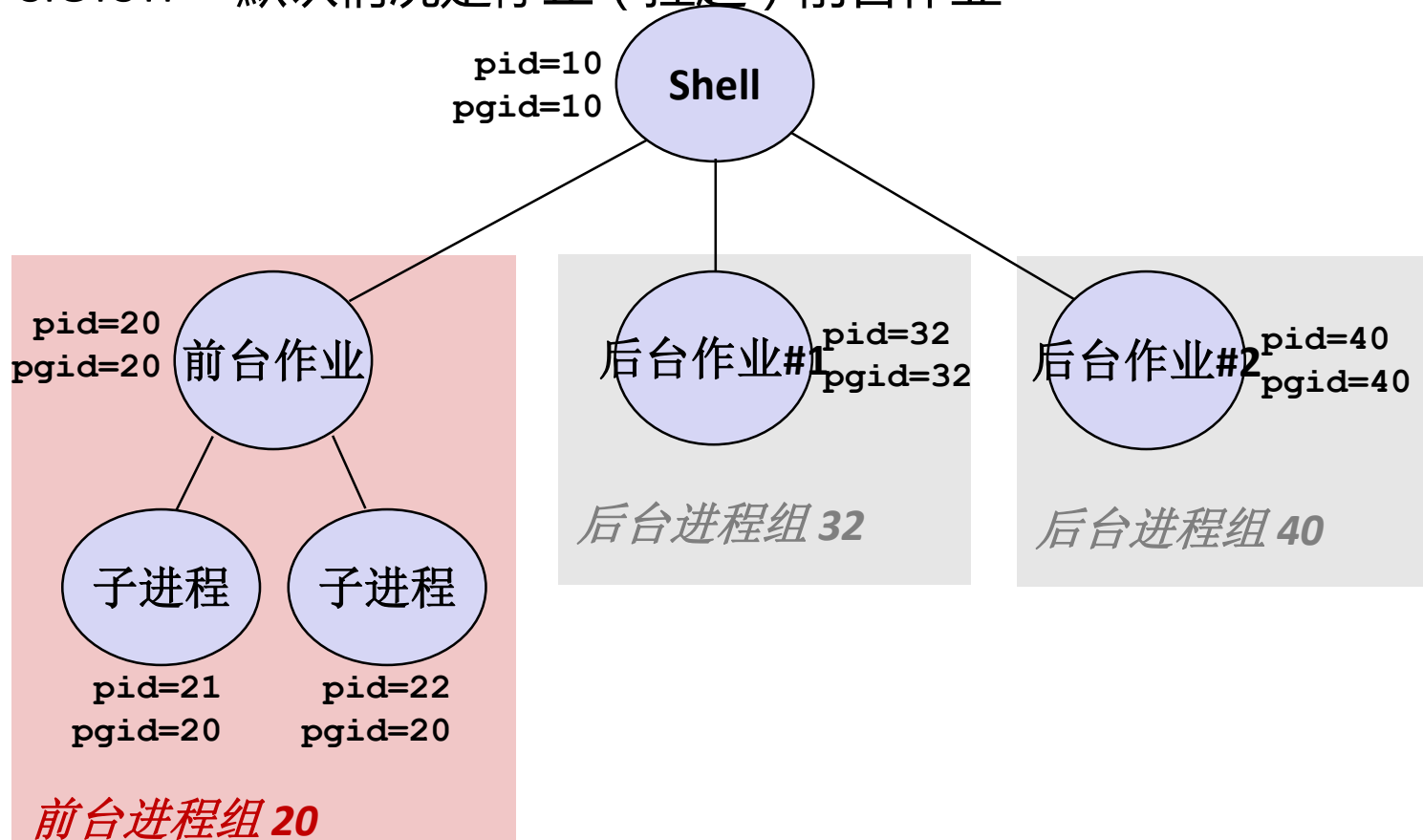
```
linux> ./forks 16
Child1: pid=24818 pgrp=24817
Child2: pid=24819 pgrp=24817
```

```
linux> ps
  PID TTY          TIME CMD
24788 pts/2        00:00:00 tcsh
24818 pts/2        00:00:02 forks
24819 pts/2        00:00:02 forks
24820 pts/2        00:00:00 ps
linux> /bin/kill -9 -24817
linux> ps
  PID TTY          TIME CMD
24788 pts/2        00:00:00 tcsh
24823 pts/2        00:00:00 ps
linux>
```



# 从键盘发送信号

- 输入 **ctrl-c (ctrl-z)** 会导致内核发送一个 **SIGINT (SIGTSTP)** 信号到前台进程组中的每个作业
  - SIGINT – 默认情况是终止前台作业
  - SIGTSTP – 默认情况是停止（挂起）前台作业



# Example of `ctrl-c` and `ctrl-z`

```
bluefish> ./forks 17
Child: pid=28108 pgrp=28107
Parent: pid=28107 pgrp=28107
<types ctrl-z>
Suspended
bluefish> ps w
```

PID	TTY	STAT	TIME	COMMAND
27699	pts/8	Ss	0:00	-tcsh
28107	pts/8	T	0:01	./forks 17
28108	pts/8	T	0:01	./forks 17
28109	pts/8	R+	0:00	ps w

```
bluefish> fg
./forks 17
<types ctrl-c>
bluefish> ps w
```

PID	TTY	STAT	TIME	COMMAND
27699	pts/8	Ss	0:00	-tcsh
28110	pts/8	R+	0:00	ps w

STAT (进程状态) 图例:

*第一个字母:*

S: 休眠

T: 停止

R: 运行

*第二个字母:*

s: session leader

+: 前台进程组

执行“`man ps`” 查看详细内容

# 用 `kill` 函数发送信号

```

void fork12()
{
    pid_t pid[N];
    int i;
    int child_status;

    for (i = 0; i < N; i++)
        if ((pid[i] = fork()) == 0) {
            /* Child: Infinite Loop */
            while(1)
                ;
        }

    for (i = 0; i < N; i++) {
        printf("Killing process %d\n", pid[i]);
        kill(pid[i], SIGINT);
    }

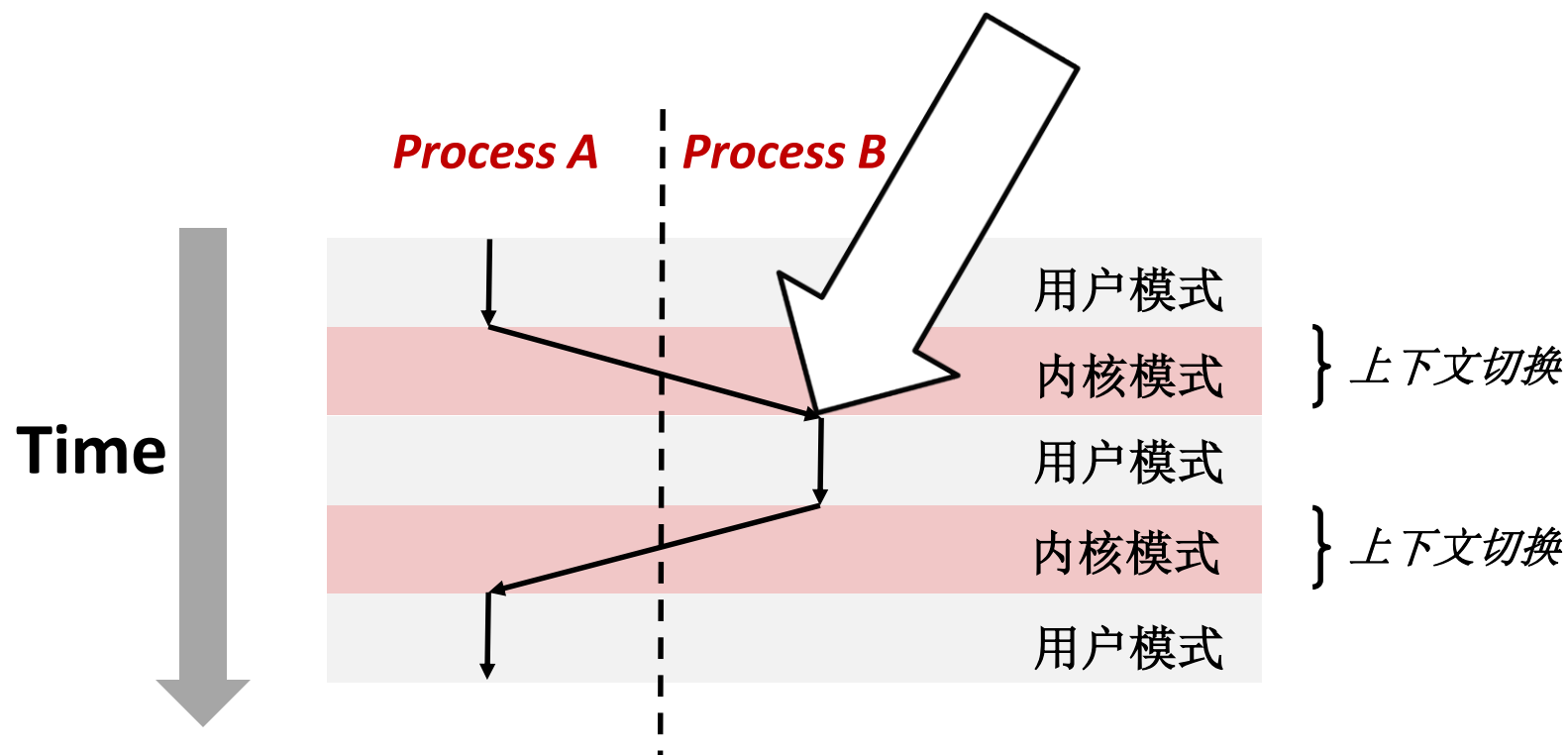
    for (i = 0; i < N; i++) {
        pid_t wpid = wait(&child_status);
        if (WIFEXITED(child_status))
            printf("Child %d terminated with exit status %d\n",
                wpid, WEXITSTATUS(child_status));
        else
            printf("Child %d terminated abnormally\n", wpid);
    }
}

```

*forks.c*

# 接收信号

- 假设内核正在从异常处理程序返回，并准备将控制权传递给进程 $p$



# 接收信号

- 假设内核正在从异常处理程序返回，并准备将控制权传递给进程 $p$ 
  - 内核检查  $pnb = pending \ \& \ \sim blocked$ 
    - 进程 $p$  的未被阻塞的待处理信号的集合
  - If ( $pnb == 0$ ) 如果集合为空
    - 将控制传递到  $p$  的逻辑控制流中的下一条指令
  - Else 不为空
    - 选择集合 $pnb$ 中最小的非零位 $k$ ，强制 $p$  接收信号 $k$ 
      - 收到信号会触发进程 $p$ 采取某种行为
    - 对所有的非零 $k$ 重复
    - 控制传递到 $p$  的逻辑控制流中的下一条指令

# 默认行为

- 每个信号类型都有一个预定义默认行为，是下面中的一种：
  - 进程终止
  - 进程停止（挂起）直到被SIGCONT信号重启
  - 进程忽略该信号

# 设置信号处理程序

- 可以使用 `signal` 函数修改和信号 `signum` 相关联的默认行为:
  - `handler_t *signal(int signum, handler_t *handler)`
- `handler` 的不同取值:
  - `SIG_IGN`: 忽略类型为 `signum` 的信号
  - `SIG_DFL`: 类型为 `signum` 的信号行为恢复为默认行为
  - 否则, `handler` 就是用户定义的函数的地址, 这个函数称为信号处理程序
    - 只要进程接收到类型为 `signum` 的信号就会调用信号处理程序
    - 将处理程序的地址传递到 `signal` 函数从而改变默认行为, 这叫作设置信号处理程序
    - 调用信号处理程序称为捕获信号
    - 执行信号处理程序称为处理信号
    - 当处理程序执行 `return` 时, 控制会传递到控制流中被信号接收所中断的指令处

# 用信号处理程序捕获SIGINT信号

```
void sigint_handler(int sig) /* SIGINT handler */
{
    printf("So you think you can stop the bomb with ctrl-c, do you?\n");
    sleep(2);
    printf("Well...\n");
    fflush(stdout);
    sleep(1);
    printf("OK. :-)\n");
    exit(0);
}

int main()
{
    /* Install the SIGINT handler */
    if (signal(SIGINT, sigint_handler) == SIG_ERR)
        unix_error("signal error");

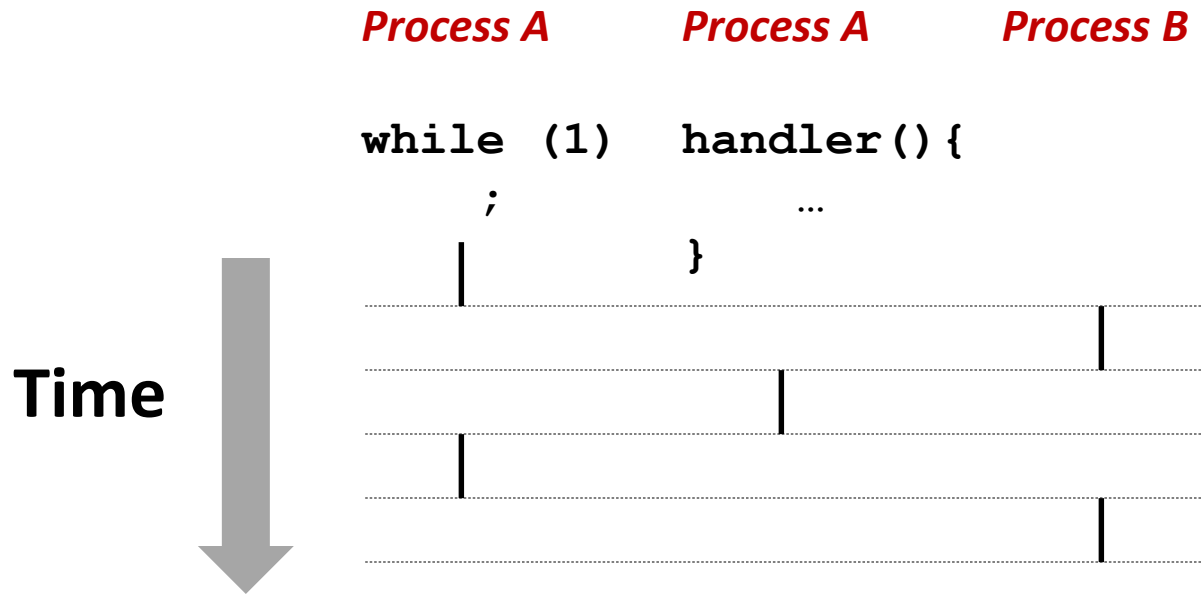
    /* Wait for the receipt of a signal */
    pause();
    return 0;
}
```

sigint.c

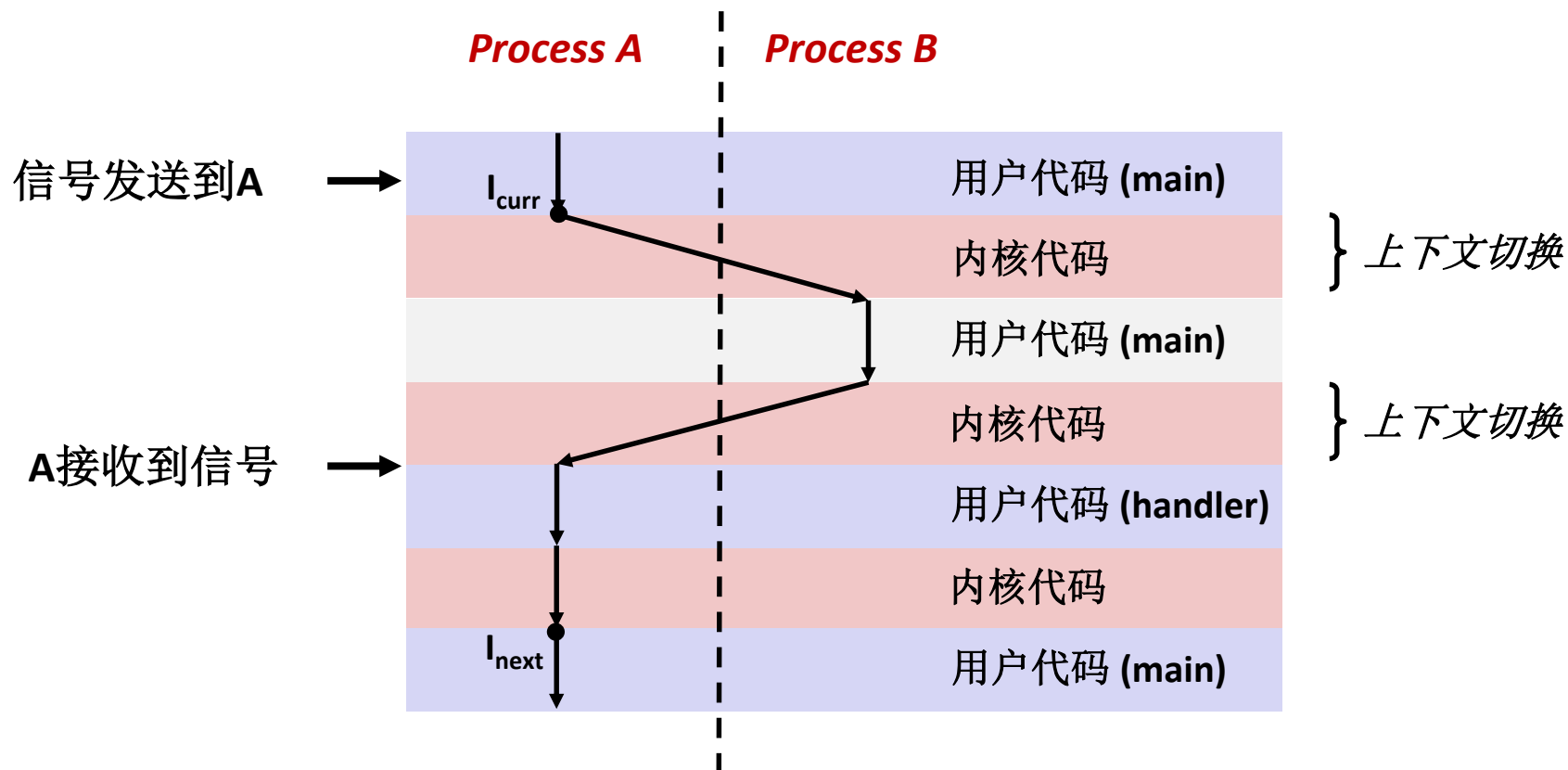


# 作为并发流的信号处理程序

- 信号处理程序是与主程序同时运行的独立逻辑流（不是进程）

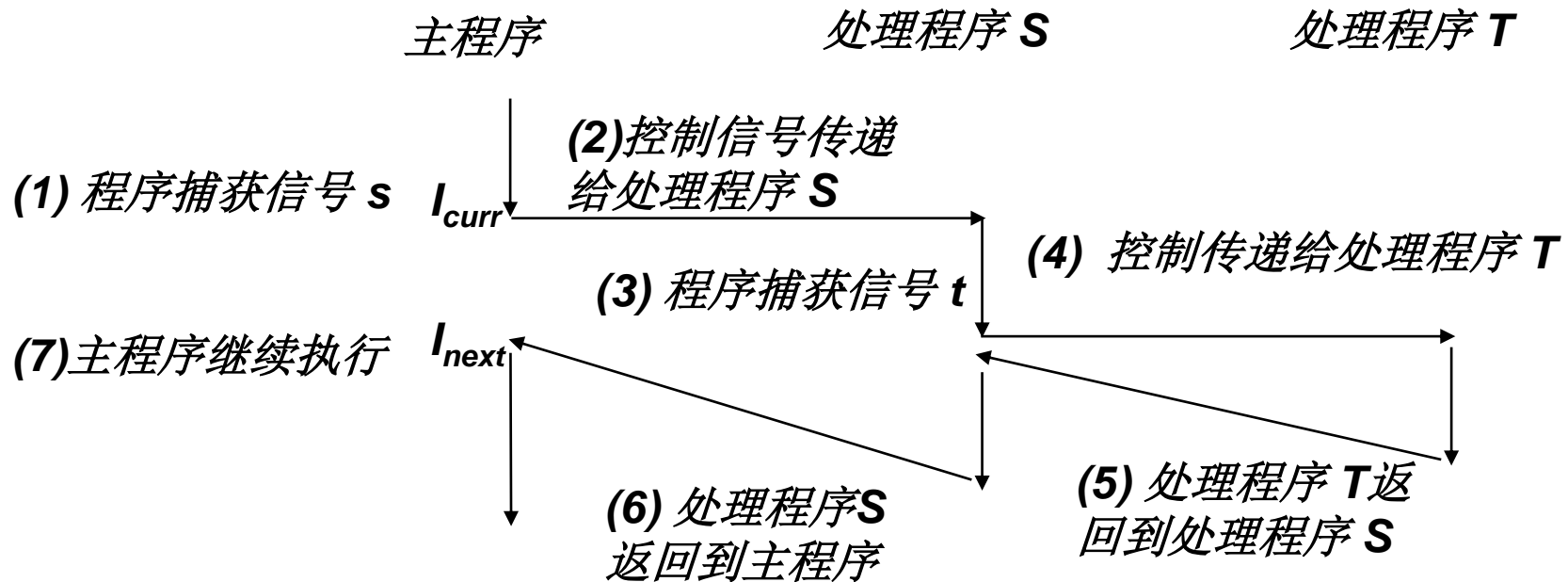


# 另一个角度看作为并发流的信号处理程序



# 嵌套的信号处理程序

- 信号处理程序可以被其他信号处理程序中中断



# 阻塞和解除阻塞信号

## ■ 隐式阻塞机制

- 内核默认阻塞与当前正在处理信号类型相同的待处理信号
- 如，一个SIGINT 信号处理程序不能被另一个 SIGINT信号中断（此时另一个SIGINT信号被阻塞）

## ■ 显示阻塞和解除阻塞机制

- `sigprocmask` 函数及其辅助函数可以明确地阻塞/解除阻塞选定的信号
- 辅助函数
  - `sigemptyset` – 初始化set为空集合
  - `sigfillset` – 把每个信号都添加到set中
  - `sigaddset` – 把指定的信号`signum`添加到set
  - `sigdelset` – 从set中删除指定的信号`signum`

# 临时阻塞接收信号

```
sigset_t mask, prev_mask;

Sigemptyset(&mask);
Sigaddset(&mask, SIGINT);

/* Block SIGINT and save previous blocked set */
Sigprocmask(SIG_BLOCK, &mask, &prev_mask);

/* Code region that will not be interrupted by SIGINT
*/

/* Restore previous blocked set, unblocking SIGINT */
Sigprocmask(SIG_SETMASK, &prev_mask, NULL);
```

# 安全的信号处理

- 信号处理程序很麻烦是因为它们和主程序并发地运行并共享全局数据结构
  - 共享数据结构可能被破坏
- 第12章会详细讲述并发编程
- 这里仅给出一些原则

# 编写处理程序的原则

- **G0: 处理程序尽可能简单**
  - e.g., 简单设置全局标志并立即返回
- **G1: 在处理程序中只调用异步信号安全的函数**
  - `printf`, `sprintf`, `malloc`, and `exit` are not safe!
- **G2: 保存和恢复 `errno`**
  - 确保其他处理程序不会覆盖当前的 `errno`
- **G3: 阻塞所有信号保护对共享全局数据结构的访问**
  - 避免可能的冲突
- **G4: 用 `volatile` 声明全局变量**
  - 强迫编译器从内存中读取引用的值
- **G5: 用 `sig_atomic_t` 声明标志**
  - *原子型标志*: 只适用于单个的读或者写, 不适用 `flag++` 或 `flag=flag+10` 这样的更新 (e.g. `flag = 1`, not `flag++`)
  - 采用这种方式声明的标志不需要类似其他全局变量的保护

# 异步信号安全

- 函数是**异步信号安全**的指函数要么是可重入的（如只访问局部变量，见12.7.2节）要么不能被信号处理程序中断
- Posix保证安全的 **117** 个异步信号安全的函数
  - Source: “man 7 signal”
  - 常见的函数包括:
    - `_exit`, `write`, `wait`, `waitpid`, `sleep`, `kill`
  - 常见的函数里不包括:
    - `printf`, `sprintf`, `malloc`, `exit`
    - `write` 函数是信号处理程序中唯一安全的输出函数



# 开发安全的输出函数

- 在处理程序中使用来自 `csapp.c` 的可重入 `sio` (安全的 I/O 库)

- `ssize_t sio_puts(char s[]) /* 输出一个字符串 */`
- `ssize_t sio_putl(long v) /* 输出一个long类型数 */`
- `void sio_error(char s[]) /* 打印一条错误信息并终止 */`

```
void sigint_handler(int sig) /*sigint.c中SIGINT处理程序的一个安全版本*/
{
    Sio_puts("So you think you can stop the bomb with ctrl-c, do
you?\n");
    sleep(2);
    Sio_puts("Well...");
    sleep(1);
    Sio_puts("OK. :-)\n");
    _exit(0);
}
```

sigintsafe.c

# 正确的信号处理

```

int ccount = 0;
void child_handler(int sig) {
    int olderrno = errno;
    pid_t pid;
    if ((pid = wait(NULL)) < 0)
        Sio_error("wait error");
    ccount--;
    Sio_puts("Handler reaped child ");
    Sio_putl((long)pid);
    Sio_puts(" \n");
    sleep(1);
    errno = olderrno;
}

void fork14() {
    pid_t pid[N];
    int i;
    ccount = N;
    Signal(SIGCHLD, child_handler);

    for (i = 0; i < N; i++) {
        if ((pid[i] = Fork()) == 0) {
            Sleep(1);
            exit(0); /* Child exits */
        }
    }
    while (ccount > 0) /* Parent spins */
        ;
}

```

forks.c

- 待处理信号是不排队的
  - 对每种信号类型，pending位向量只有1位与之对应
  - 因此每种类型最多只能有1个未处理信号。
- 不能用信号来对其他进程中发生的事件计数，如子程序的终止

```

whaleshark> ./forks 14
Handler reaped child 23240
Handler reaped child 23241

```

# 正确的信号处理

- 必须回收所有终止的子进程
  - 将 `wait` 放入一个循环回收所有终止的子进程

```
void child_handler2(int sig)
{
    int olderrno = errno;
    pid_t pid;
    while ((pid = wait(NULL)) > 0) {
        ccount--;
        Sio_puts("Handler reaped child ");
        Sio_putl((long)pid);
        Sio_puts(" \n");
    }
    if (errno != ECHILD)
        Sio_error("wait error");
    errno = olderrno;
}
```

```
whaleshark> ./forks 15
Handler reaped child 23246
Handler reaped child 23247
Handler reaped child 23248
Handler reaped child 23249
Handler reaped child 23250
whaleshark>
```

# 可移植的信号处理

- 不同的Unix版本有不同的信号处理语义
  - 一些老系统在信号被捕获后就恢复为该信号的默认行为
  - 一些被中断的系统调用在信号处理程序返回时也立即返回，并将 `errno` 设置为 `EINTR`
  - 一些系统不阻塞与处理程序同类型的信号
- 解决办法: **sigaction**函数，可明确指定信号处理语义

```
handler_t *Signal(int signum, handler_t *handler)
{
    struct sigaction action, old_action;

    action.sa_handler = handler;
    sigemptyset(&action.sa_mask); /* Block sigs of type being handled */
    action.sa_flags = SA_RESTART; /* Restart syscalls if possible */

    if (sigaction(signum, &action, &old_action) < 0)
        unix_error("Signal error");
    return (old_action.sa_handler);
}
```

csapp.c

# 同步流以避免竞争（并发错误）

- 具有细微同步错误的简单shell，因为它假定父进程在子进程之前运行

```
int main(int argc, char **argv)
{
    int pid;
    sigset_t mask_all, prev_all;

    Sigfillset(&mask_all);
    Signal(SIGCHLD, handler);
    initjobs(); /* Initialize the job list */

    while (1) {
        if ((pid = Fork()) == 0) { /* Child */
            Execve("/bin/date", argv, NULL);
        }
        Sigprocmask(SIG_BLOCK, &mask_all, &prev_all); /* Parent */
        addjob(pid); /* Add the child to the job list */
        Sigprocmask(SIG_SETMASK, &prev_all, NULL);
    }
    exit(0);
}
```

procmask1.c

# 同步流以避免竞争（并发错误）

## ■ 一个简单shell中的SIGCHLD 处理程序

```
void handler(int sig)
{
    int olderrno = errno;
    sigset_t mask_all, prev_all;
    pid_t pid;

    Sigfillset(&mask_all);
    while ((pid = waitpid(-1, NULL, 0)) > 0) { /* Reap child */
        Sigprocmask(SIG_BLOCK, &mask_all, &prev_all);
        deletejob(pid); /* Delete the child from the job list */
        Sigprocmask(SIG_SETMASK, &prev_all, NULL);
    }
    if (errno != ECHILD)
        Sio_error("waitpid error");
    errno = olderrno;
}
```

procmask1.c

# 消除竞争的正确Shell 程序

```
int main(int argc, char **argv)
{
    int pid;
    sigset_t mask_all, mask_one, prev_one;

    Sigfillset(&mask_all);
    Sigemptyset(&mask_one);
    Sigaddset(&mask_one, SIGCHLD);
    Signal(SIGCHLD, handler);
    initjobs(); /* Initialize the job list */

    while (1) {
        Sigprocmask(SIG_BLOCK, &mask_one, &prev_one); /* Block SIGCHLD */
        if ((pid = Fork()) == 0) { /* Child process */
            Sigprocmask(SIG_SETMASK, &prev_one, NULL); /* Unblock SIGCHLD */
            Execve("/bin/date", argv, NULL);
        }
        Sigprocmask(SIG_BLOCK, &mask_all, NULL); /* Parent process */
        addjob(pid); /* Add the child to the job list */
        Sigprocmask(SIG_SETMASK, &prev_one, NULL); /* Unblock SIGCHLD */
    }
    exit(0);
}
```

# 显式地等待信号

## ■ 处理程序显式地等待SIGCHLD信号到达

```
volatile sig_atomic_t pid;

void sigchld_handler(int s)
{
    int olderrno = errno;
    pid = Waitpid(-1, NULL, 0); /* Main is waiting for nonzero pid */
    errno = olderrno;
}

void sigint_handler(int s)
{
}
```

waitforsignal.c



# 显式地等待信号

一个等待前台作业  
终止的shell

```
int main(int argc, char **argv) {
    sigset_t mask, prev;
    Signal(SIGCHLD, sigchld_handler);
    Signal(SIGINT, sigint_handler);
    Sigemptyset(&mask);
    Sigaddset(&mask, SIGCHLD);

    while (1) {
        Sigprocmask(SIG_BLOCK, &mask, &prev); /*显式地 Block SIGCHLD */
        if (Fork() == 0) /* Child */
            exit(0);
        /* Parent */
        pid = 0;
        Sigprocmask(SIG_SETMASK, &prev, NULL); /* 显示地Unblock SIGCHLD */

        /* Wait for SIGCHLD to be received (wasteful!) */
        while (!pid)
            ;
        /* Do some work after receiving SIGCHLD */
        printf(".");
    }
    exit(0);
}
```

waitforsignal.c

# 显式地等待信号

- 程序正确，但循环很浪费
- 改进:

```
while (!pid)    /* Race! */  
    pause();
```

```
while (!pid) /* Too slow! */  
    sleep(1);
```

- 合适的解决方法: **sigsuspend**

# 用 `sigsuspend` 等待信号

- `int sigsuspend(const sigset_t *mask)`
- 等价于下述代码的原子(不可中断的) 版本:

```
sigprocmask(SIG_BLOCK, &mask, &prev);  
pause();  
sigprocmask(SIG_SETMASK, &prev, NULL);
```

# 用 sigsuspend 等待信号

```
int main(int argc, char **argv) {
    sigset_t mask, prev;
    Signal(SIGCHLD, sigchld_handler);
    Signal(SIGINT, sigint_handler);
    Sigemptyset(&mask);
    Sigaddset(&mask, SIGCHLD);

    while (1) {
        Sigprocmask(SIG_BLOCK, &mask, &prev); /* Block SIGCHLD */
        if (Fork() == 0) /* Child */
            exit(0);
        /* Wait for SIGCHLD to be received */
        pid = 0;
        while (!pid)
            Sigsuspend(&prev);
        /* Optionally unblock SIGCHLD */
        Sigprocmask(SIG_SETMASK, &prev, NULL);
        /* Do some work after receiving SIGCHLD */
        printf(".");
    }
    exit(0);
}
```

sigsuspend.c

# 主要内容

- Shells
- 信号
- 非本地跳转
  - 参考书本

# 非本地跳转: `setjmp/longjmp`

- 强大的（但危险的）用户级机制，将控制转移到任意位置
  - 控制转移时不遵守调用/返回规则
  - 对错误恢复和信号处理程序有好处
- `int setjmp(jmp_buf j)`
  - 必须在`longjmp`之前被调用
  - 保存当前调用环境，供后续`longjmp`使用
  - 被调用一次，返回多次
- 执行结果：
  - 在`j`中保存当前调用环境，包括寄存器、栈指针和程序计数器
  - 返回 0

# setjmp/longjmp (cont)

## ■ `void longjmp(jmp_buf j, int i)`

- 含义:
  - 从缓冲区j中恢复调用环境，并触发 `setjmp` 返回
  - 非零的返回值i
- 在 `setjmp` 之后被调用
- 被调用一次，从不返回

## ■ `longjmp` 的执行:

- 从缓冲区j中恢复寄存器内容（栈指针、基址指针、程序计数器）
- 返回值i在 `%eax` 中
- 跳转至保存在缓冲区j中的PC所指示的位置

# setjmp/longjmp Example

- 目标:从深层嵌套函数调用中直接返回

```
/* Deeply nested function foo */  
void foo(void)  
{  
    if (error1)  
        longjmp(buf, 1);  
    bar();  
}  
  
void bar(void)  
{  
    if (error2)  
        longjmp(buf, 2);  
}
```



## setjmp/longjmp Example (cont)

```
jmp_buf buf;

int error1 = 0;
int error2 = 1;
void foo(void), bar(void);

int main()
{
    switch(setjmp(buf)) {
        case 0:
            foo();
            break;
        case 1:
            printf("Detected an error1 condition in foo\n");
            break;
        case 2:
            printf("Detected an error2 condition in foo\n");
            break;
        default:
            printf("Unknown error condition in foo\n");
    }
    exit(0);
}
```

# 非本地跳转的局限

- 工作在堆栈规则下
  - 只能跳到被调用但尚未完成的函数环境中

```

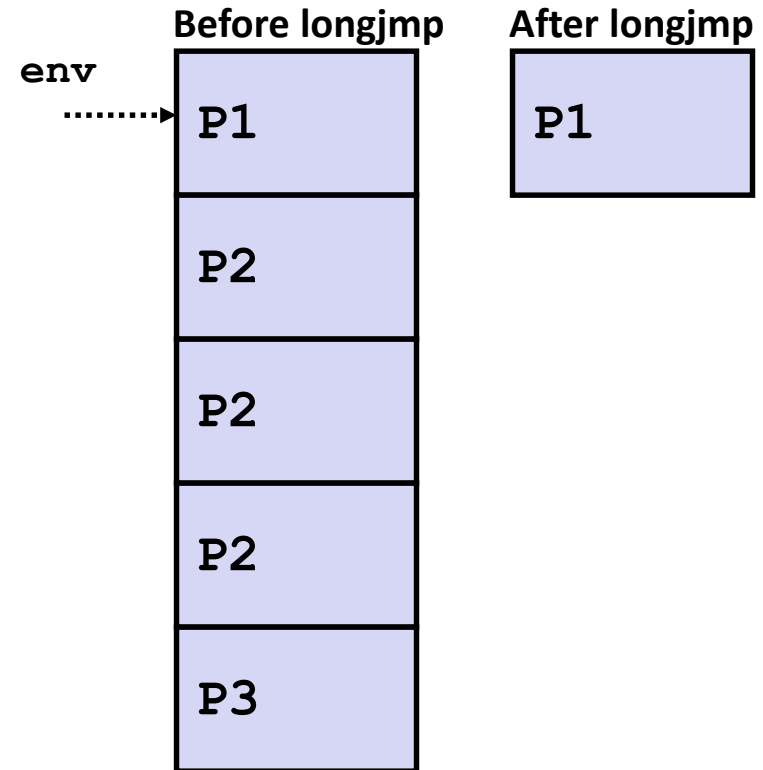
jmp_buf env;

P1()
{
    if (setjmp(env)) {
        /* Long Jump to here */
    } else {
        P2();
    }
}

P2()
{ . . . P2(); . . . P3(); }

P3()
{
    longjmp(env, 1);
}

```



# 非本地跳转的局限(cont.)

- 工作在堆栈规则下
  - 只能跳到被调用但尚未完成的函数环境里

```

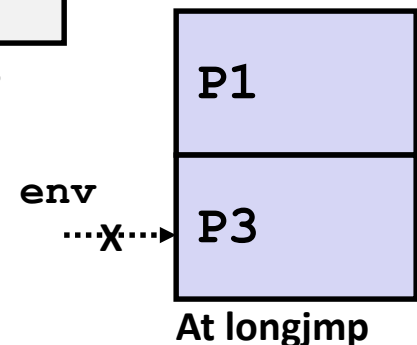
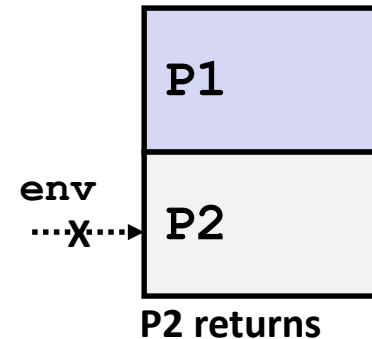
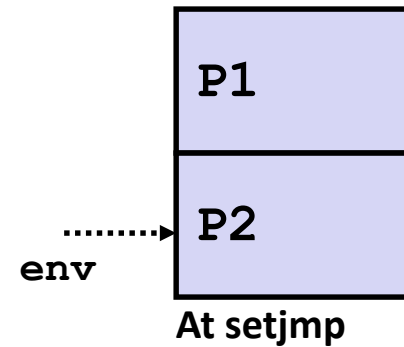
jmp_buf env;

P1 ()
{
    P2 (); P3 ();
}

P2 ()
{
    if (setjmp(env)) {
        /* Long Jump to here */
    }
}

P3 ()
{
    longjmp(env, 1);
}

```



# 综合：利用ctrl-c来重启自身的程序

```
#include "csapp.h"

sigjmp_buf buf;

void handler(int sig)
{
    siglongjmp(buf, 1);
}

int main()
{
    if (!sigsetjmp(buf, 1)) {
        Signal(SIGINT, handler);
        Sio_puts("starting\n");
    }
    else
        Sio_puts("restarting\n");

    while(1) {
        Sleep(1);
        Sio_puts("processing... \n");
    }
    exit(0); /* Control never reaches here */
}
```

```
greatwhite> ./restart
starting
processing...
processing...
processing...
restarting
processing... ← Ctrl-c
processing...
restarting
processing... ← Ctrl-c
processing...
processing...
```

restart.c

# 小结

- 信号提供了进程级的异常处理
  - 可由用户程序产生
  - 可以通过信号处理程序的声明定义信号的行为
  - 要小心书写信号处理程序
  
- 非本地跳转提供进程内的异常控制流（用户级）
  - 在堆栈规则内