第七课　进程通信

一、基本概念

1. 何为进程间通信

进程间通信(Interprocess Communication, IPC)是指两个，
或多个进程之间进行数据交换的过程。

2. 进程间通信分类

1) 简单进程间通信：命令行参数、环境变量、信号、文件。

2) 传统进程间通信：管道(fifo/pipe)。

3) XSI进程间通信：共享内存、消息队列、信号量。

4) 网络进程间通信：套接字。

二、传统进程间通信——管道

1. 管道是Unix系统最古老的进程间通信方式。

2. 历史上的管道通常是指半双工管道，
   只允许数据单向流动。现代系统大都提供全双工管道，
   数据可以沿着管道双向流动。

3. 有名管道(fifo)：基于有名文件(管道文件)的管道通信。

1) 命令形式

```
# mkfifo fifo
# echo hello > fifo    # cat fifo
```

2) 编程模型

步骤	进程A	函数	进程B	步骤
1	创建管道	mkfifo	----	
2	打开管道	open	打开管道	1
3	读写管道	read/write	读写管道	2
4	关闭管道	close	关闭管道	3
5	删除管道	unlink	----	

范例：wfifo.c、rfifo.c

图示：fifo.bmp

4. 无名管道(pipe)：适用于父子进程之间的通信。

```
#include <unistd.h>

int pipe (int pipefd[2]);
```

1) 成功返回0，失败返回-1。

2) 通过输出参数pipefd返回两个文件描述符，
   其中pipefd[0]用于读，pipefd[1]用于写。

3) 一般用法

A. 调用该函数在内核中创建管道文件，并通过其输出参数，
   获得分别用于读和写的两个文件描述符；

B. 调用fork函数，创建子进程；

C. 写数据的进程关闭读端(pipefd[0])，
   读数据的进程关闭写端(pipefd[1])；

D. 传输数据；

E. 父子进程分别关闭自己的文件描述符。

图示：pipe.bmp

范例：pipe.c

三、XSI进程间通信
---

1. IPC标识

内核为每个进程间通信维护一个结构体形式的IPC对象。
该对象可通过一个非负整数形式的IPC标识来引用。

与文件描述符不同，IPC标识在使用时会持续加1，
当达到最大值时，向0回转。

2. IPC键值

IPC标识是IPC对象的内部名称。
若多个进程需要在同一个IPC对象上会合，
则必须通过键值作为其外部名称来引用该对象。

1) 无论何时，只要创建IPC对象，就必须指定一个键值。

2) 键值的数据类型在sys/types.h头文件中被定义为key_t，
   其实际类型就是long int。

3. 客户机进程与服务器进程在IPC对象上的三种会合方式

1) 服务器进程以IPC_PRIVATE为键值创建一个新的IPC对象，
   并将该IPC对象的标识存放在某处(如文件中)，
   以方便客户机进程读取。

2) 在一个公共头文件中，
   定义一个客户机进程和服务器进程都认可的键值，
   服务器进程用此键值创建IPC对象，
   客户机进程用此键值获取该IPC对象。

3) 客户机进程和服务器进程，
   事先约定好一个路径和一个项目ID(0-255)，
   调用ftok函数，将该路径和项目ID组合成键值。

```
#include <sys/types.h>
#include <sys/ipc.h>

key_t ftok (const char* pathname, int proj_id);
```

pathname - 一个真实存在的文件或目录的路径名。

proj_id - 项目ID，仅低8位有效，其值域为[0,255]。

成功返回键值，失败返回-1。

注意：起作用的是pathname参数所表示的路径，
而非pathname字符串本身。
因此假设当前目录是/home/soft01/uc/day07，则
ftok (".", 100);
和
ftok ("/home/soft01/uc/day07", 100);
的返回值完全相同。

4. IPC对象的创建

1) 若以IPC_PRIVATE为键值创建IPC对象，
   则永远创建成功。

2) 若所指定的键值在系统范围内未与任何IPC对象相结合，
   且创建标志包含IPC_CREAT位，则创建成功。

3) 若所指定的键值在系统范围内已与某个IPC对象相结合，
   且创建标志包含IPC_CREAT和IPC_EXCL位，则创建失败。

5. IPC对象的销毁/控制

IPC_STAT - 获取IPC对象属性
IPC_SET - 设置IPC对象属性
IPC_RMID - 删除IPC对象

四、共享内存
---

1. 基本特点

1) 两个或者更多进程，
共享同一块由系统内核负责维护的内存区域，
其地址空间通常被映射到堆和栈之间。

图示：shm.bmp

2) 无需复制信息，最快的一种IPC机制。

3) 需要考虑同步访问的问题。

4) 内核为每个共享内存，
维护一个shmid_ds结构体形式的共享内存对象。

2. 常用函数

```
#include <sys/shm.h>
```

1) 创建/获取共享内存

```
int shmget (key_t key, size_t size, int shmflg);
```

A. 该函数以key参数为键值创建共享内存，
或获取已有的共享内存。

B. size参数为共享内存的字节数，
建议取内存页字节数(4096)的整数倍。
若希望创建共享内存，则必需指定size参数。
若只为获取已有的共享内存，则size参数可取0。

C. shmflg取值：

0 - 获取，不存在即失败。

IPC_CREAT - 创建，不存在即创建，
已存在即获取，除非...

IPC_EXCL - 排斥，已存在即失败。

D. 成功返回共享内存标识，失败返回-1。

2) 加载共享内存

```
void* shmat (int shmid, const void* shmaddr,
    int shmflg);
```

A. 将shmid参数所标识的共享内存，
映射到调用进程的地址空间。

B. 可通过shmaddr参数人为指定映射地址，
也可将该参数置NULL，由系统自动选择。

C. shmflg取值：

0 - 以读写方式使用共享内存。

SHM_RDONLY - 以只读方式使用共享内存。

SHM_RND   - 只在shmaddr参数非NULL时起作用。
             表示对该参数向下取内存页的整数倍，
             作为映射地址。

D. 成功返回映射地址，失败返回-1。

E. 内核将该共享内存的加载计数加1。

3) 卸载共享内存

```
int shmdt (const void* shmaddr);
```

A. 从调用进程的地址空间中，
   取消由shmaddr参数所指向的，共享内存映射区域。

B. 成功返回0，失败返回-1。

C. 内核将该共享内存的加载计数减1。

4) 销毁/控制共享内存

```
int shmctl (int shmid, int cmd, struct shmid_ds* buf);

struct shmid_ds {
    struct ipc_perm shm_perm;   // 所有者及其权限
    size_t          shm_segsz;  // 大小(以字节为单位)
    time_t          shm_atime;  // 最后加载时间
    time_t          shm_dtime;  // 最后卸载时间
    time_t          shm_ctime;  // 最后改变时间
    pid_t           shm_cpid;   // 创建进程ID
    pid_t           shm_lpid;   // 最后加载/卸载进程ID
    shmatt_t        shm_nattch; // 当前加载计数
    ...
};

struct ipc_perm {
    key_t          __key; // 键值
    uid_t          uid;   // 用户ID
    gid_t          gid;   // 组ID
    uid_t          cuid;  // 创建者用户ID
    gid_t          cgid;  // 创建者组ID
    unsigned short mode;  // 权限字
    unsigned short __seq; // 序列号
};
```

A. cmd取值：

IPC_STAT - 获取共享内存的属性，通过buf参数输出。

IPC_SET - 设置共享内存的属性，通过buf参数输入，
           仅以下三个属性可设置：

    shmid_ds::shm_perm.uid

shmid_ds::shm_perm.gid
shmid_ds::shm_perm.mode

IPC_RMID - 标记删除共享内存。
并非真正删除共享内存，只是做一个删除标记，
禁止其被继续加载，但已有加载依然保留。
只有当该共享内存的加载计数为0时，
才真正被删除。

B. 成功返回0，失败返回-1。

3. 编程模型

步骤	进程A	函数	进程B	步骤
1	创建共享内存	shmget	获取共享内存	1
2	加载共享内存	shmat	加载共享内存	2
3	使用共享内存	...	使用共享内存	3
4	卸载共享内存	shmdt	卸载共享内存	4
5	销毁共享内存	shmctl	----	

范例：wshm.c、rshm.c

五、消息队列

1. 基本特点

1) 消息队列是一个由系统内核负责存储和管理，
并通过消息队列标识引用的数据链表。

2) 可以通过msgget函数创建一个新的消息队列，
或获取一个已有的消息队列。
通过msgsnd函数向消息队列的后端追加消息，
通过msgrcv函数从消息队列的前端提取消息。

3) 消息队列中的每个消息单元除包含消息数据外，
还包含消息类型和数据长度。

4) 内核为每个消息队列，
维护一个msqid_ds结构体形式的消息队列对象。

2. 常用函数

```
#include <sys/msg.h>
```

1) 创建/获取消息队列

```
int msgget (key_t key, int msgflg);
```

A. 该函数以key参数为键值创建消息队列，

或获取已有的消息队列。

B. msgflg取值：

0 - 获取，不存在即失败。

IPC_CREAT - 创建，不存在即创建，
已存在即获取，除非...

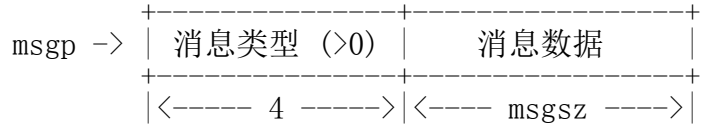
IPC_EXCL - 排斥，已存在即失败。

C. 成功返回消息队列标识，失败返回-1。

2) 向消息队列发送消息

```
int msgsnd (int msqid, const void* msgp,
    size_t msgsz, int msgflg);
```

A. msgp参数指向一个包含消息类型和消息数据的内存块。
该内存块的前4个字节必须是一个大于0的整数，
代表消息类型，其后紧跟消息数据。
消息数据的字节长度用msgsz参数表示。



注意：msgsz参数并不包含消息类型的字节数(4)。

B. 若内核中的消息队列缓冲区有足够的空闲空间，
则此函数会将消息拷入该缓冲区并立即返回0，
表示发送成功，否则此函数会阻塞，
直到内核中的消息队列缓冲区有足够的空闲空间为止
(比如有消息被接收)。

C. 若msgflg参数包含IPC_NOWAIT位，
则当内核中的消息队列缓冲区没有足够的空闲空间时，
此函数不会阻塞，而是返回-1，errno为EAGAIN。

D. 成功返回0，失败返回-1。

3) 从消息队列接收消息

```
ssize_t msgrcv (int msqid, void* msgp,
    size_t msgsz, long msgtyp, int msgflg);
```

A. msgp参数指向一个包含消息类型(4字节)，
和消息数据的内存块，
msgsz参数表示期望接收的字节数(不含消息类型的4个字节)。

B. 若所接收到的消息数据字节数大于msgsz参数，
即消息太长，且msgflg参数包含MSG_NOERROR位，
则该消息被截取msgsz字节返回，剩余部分被丢弃。

C. 若msgflg参数不包含MSG_NOERROR位，消息又太长，

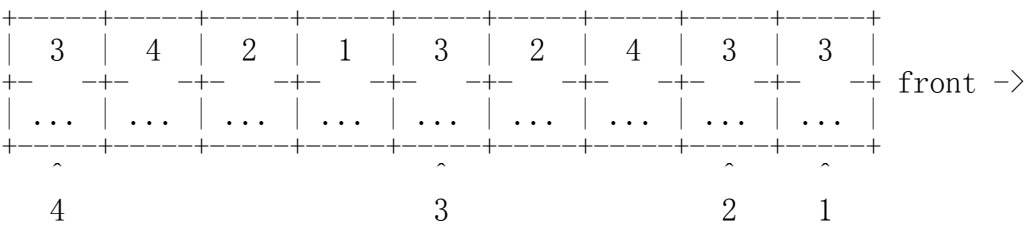
则不对该消息做任何处理，直接返回-1，errno为E2BIG。

D. msgtyp参数表示期望接收哪类消息：

=0 - 返回消息队列中的第一条消息。

>0 - 若msgflg参数不包含MSG_EXCEPT位，
则返回消息队列中第一个类型为msgtyp的消息；
若msgflg参数包含MSG_EXCEPT位，
则返回消息队列中第一个类型不为msgtyp的消息。

<0 - 返回消息队列中类型小于等于msgtyp的绝对值的消息。
若有多个，则取类型最小者。




```
msgrcv (..., ..., ..., 3, ...);
```

E. 若消息队列中有可接收消息，
则此函数会将该消息移出消息队列，
并立即返回所接收到的消息数据的字节数，
表示接收成功，否则此函数会阻塞，
直到消息队列中有可接收消息为止。

F. 若msgflg参数包含IPC_NOWAIT位，
则当消息队列中没有可接收消息时，此函数不会阻塞，
而是返回-1，errno为ENOMSG。

G. 成功返回所接收到的消息数据的字节数，失败返回-1。

4) 销毁/控制消息队列

```
int msgctl (int msqid, int cmd, struct msqid_ds* buf);

struct msqid_ds {
    struct ipc_perm msg_perm;     // 权限信息
    time_t          msg_stime;    // 最后发送时间
    time_t          msg_rtime;    // 最后接收时间
    time_t          msg_ctime;    // 最后改变时间
    unsigned long   __msg_cbytes; // 消息队列中的字节数
    msgqnum_t       msg_qnum;     // 消息队列中的消息数
    msglen_t        msg_qbytes;   // 消息队列能容纳的最大字节数
    pid_t           msg_lspid;    // 最后发送进程ID
    pid_t           msg_lrpid;    // 最后接收进程ID
};

struct ipc_perm {
    key_t          __key; // 键值
    uid_t          uid;   // 用户ID
    gid_t          gid;   // 组ID
```

```
    uid_t          cuid;  // 创建者用户ID
    gid_t          cgid;  // 创建者组ID
    unsigned short mode;  // 权限字
    unsigned short __seq; // 序列号
};
```

A. cmd取值：

IPC_STAT - 获取消息队列的属性，通过buf参数输出。

IPC_SET - 设置消息队列的属性，通过buf参数输入，
           仅以下四个属性可设置：

    msqid_ds::msg_perm.uid
    msqid_ds::msg_perm.gid
    msqid_ds::msg_perm.mode
    msqid_ds::msg_qbytes

IPC_RMID - 立即删除消息队列。
           此时所有阻塞在对该消息队列的，
           msgsnd和msgrcv函数调用，
           都会立即返回失败，errno为EIDRM。

B. 成功返回0，失败返回-1。

3. 编程模型

步骤	进程A	函数	进程B	步骤
1	创建消息队列	msgget	获取消息队列	1
2	发送接收消息	msgsnd/msgrcv	发送接收消息	2
3	销毁消息队列	msgctl	----	

范例：wmsq.c、rmsq.c

练习：基于消息队列的本地银行。

代码：bank/

六、信号量
---

1. 基本特点

1) 计数器，用于限制多个进程对有限共享资源的访问。

2) 多个进程获取有限共享资源的操作模式

A. 测试控制该资源的信号量；

B. 若信号量大于0，则进程可以使用该资源，
   为了表示此进程已获得该资源，需将信号量减1；

C. 若信号量等于0，则进程休眠等待该资源，
   直到信号量大于0，进程被唤醒，执行步骤A；

D. 当某进程不再使用该资源时，信号量增1，
   正在休眠等待该资源的其它进程将被唤醒。

2. 常用函数

```
#include <sys/sem.h>
```

1) 创建/获取信号量

```
int semget (key_t key, int nsems, int semflg);
```

A. 该函数以key参数为键值创建一个信号量集合
   (nsems参数表示集合中的信号量数)，
   或获取已有的信号量集合(nsems取0)。

B. semflg取值：

0   - 获取，不存在即失败。

IPC_CREAT - 创建，不存在即创建，
            已存在即获取，除非...

IPC_EXCL - 排斥，已存在即失败。

C. 成功返回信号量集合标识，失败返回-1。

2) 操作信号量

```
int semop (int semid, struct sembuf* sops,
    unsigned nsops);

struct sembuf {
    unsigned short sem_num; // 信号量下标
    short          sem_op;  // 操作数
    short          sem_flg; // 操作标记
};
```

A. 该函数对semid参数所标识的信号量集合中，
   由sops参数所指向的包含nsops个元素的，
   结构体数组中的每个元素，依次执行如下操作：

a) 若sem_op大于0，
   则将其加到第sem_num个信号量的计数值上，
   以表示对资源的释放；

b) 若sem_op小于0，
   则从第sem_num个信号量的计数值中减去其绝对值，
   以表示对资源的获取；

c) 若第sem_num个信号量的计数值不够减(信号量不能为负)，
   则此函数会阻塞，直到该信号量够减为止，

以表示对资源的等待；

d) 若sem_flg包含IPC_NOWAIT位，
则当第sem_num个信号量的计数值不够减时，
此函数不会阻塞，而是返回-1，errno为EAGAIN，
以便在等待资源的同时还可做其它处理；

e) 若sem_op等于0，
则直到第sem_num个信号量的计数值为0时才返回，
除非sem_flg包含IPC_NOWAIT位。

B. 成功返回0，失败返回-1。

3) 销毁/控制信号量

```
int semctl (int semid, int semnum, int cmd);
int semctl (int semid, int semnum, int cmd,
    union semun arg);

union semun {
    int              val;   // cmd取SETVAL，第semnum个信号量的计数值
    struct semid_ds* buf;   // cmd取IPC_STAT/IPC_SET，信号量集合属性
    unsigned short*  array; // cmd取GETALL/SETALL，信号量计数值数组
    struct seminfo*  __buf; // cmd取IPC_INFO，信号量内核参数信息
};

struct semid_ds {
    struct ipc_perm sem_perm;  // 权限信息
    time_t          sem_otime; // 最后一次调用semop的时间
    time_t          sem_ctime; // 最后改变时间
    unsigned short  sem_nsems; // 信号量集合中的信号量数
};

struct ipc_perm {
    key_t          __key; // 键值
    uid_t          uid;   // 用户ID
    gid_t          gid;   // 组ID
    uid_t          cuid;  // 创建者用户ID
    gid_t          cgid;  // 创建者组ID
    unsigned short mode;  // 权限字
    unsigned short __seq; // 序列号
};

struct seminfo {
    int semmap; // 信号量映射的条目数量(semmns)
    int semmni; // 信号量集合的最大数量(128)
    int semmns; // 系统范围内的最大信号量数(semmni*semmsl)
    int semmnu; // 系统范围内的撤销结构体数(semmns)
    int semmsl; // 每个信号量集合的最大信号量数(250)
    int semopm; // 每次调用semop所能操作的最大信号量数(32)
    int semume; // 每个进程撤销条目的最大数量(semopm)
    int semusz; // 撤销结构体(struct sem_undo)的字节数(20)
    int semvmx; // 最大信号量计数值(32767)
    int semaem; // 进程退出时，对信号灯量的最大调整量(semvmx)
};
```

A. cmd取值：

IPC_STAT - 获取信号量集合的属性，通过arg.buf输出。

IPC_SET - 设置信号量集合的属性，通过arg.buf输入，
           仅以下四个属性可设置：

    semid_ds::sem_perm.uid
    semid_ds::sem_perm.gid
    semid_ds::sem_perm.mode

IPC_RMID - 立即删除信号量集合。
           此时所有阻塞在对该信号量集合的，
           semop函数调用，都会立即返回失败，
           errno为EIDRM。

GETALL   - 获取信号量集合中每个信号量的计数值，
           通过arg.array输出。

SETALL   - 设置信号量集合中每个信号量的计数值，
           通过arg.array输入。

GETVAL   - 获取信号量集合中，
           第semnum个信号量的计数值，
           通过返回值输出。

SETVAL   - 设置信号量集合中，
           第semnum个信号量的计数值，
           通过arg.val输入。

注意：只有针对信号量集合中某个具体信号量的操作，
才会使用semnum参数。针对整个信号量集合的操作，
会忽略semnum参数。

B. 成功返回值因cmd而异，失败返回-1。

3. 编程模型

步骤	进程A	函数	进程B	步骤
1	创建信号量	semget	获取信号量	1
2	初始信号量	semctl	----	
3	加减信号量	semop	加减信号量	2
4	销毁信号量	semctl	----	

范例：csem.c、gsem.c

七、IPC命令
----

1. 显示

ipcs -m - 显示共享内存(m: memory)
ipcs -q - 显示消息队列(q: queue)
ipcs -s - 显示信号量(s: semphore)
ipcs -a - 显示所有IPC对象(a: all)

2. 删除

ipcrm -m ID - 删除共享内存
ipcrm -q ID - 删除消息队列
ipcrm -s ID - 删除信号量