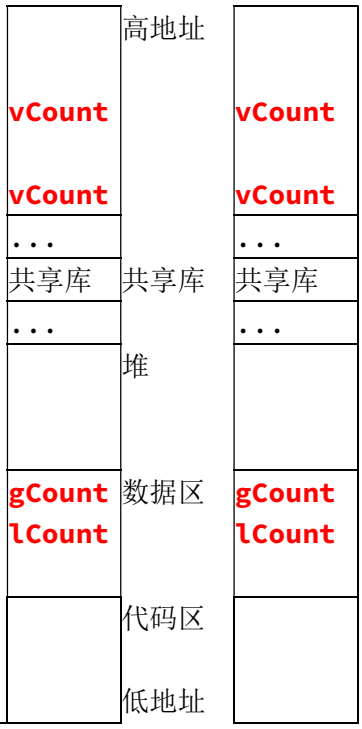
1. 线程 API：给出三种以下程序可能的输出，假设系统调用都成功。

```
void subtask(void* args_) {
    int idx = (int) args_;
    printf("%d ", idx);
    return;
}

int main(void) {
    pthread_t threads[6];
    for (int i = 1; i <= 6; i++) {
        pthread_create(threads[i - 1], NULL, subtask, (void*) i);
        if (i % 3 == 0) {
            for (int j = i - 2; j <= i; j++) {
                pthread_join(threads[j - 1], NULL);
            }
        }
    }
    return 0;
}
```

1 2 3 4 5 6
1 3 2 4 5 6
2 1 3 4 5 6
(只需要满足前三个数是 1,2,3 的一个排列，后三个数是 4,5,6 的一个排列即可)

2. **volatile** 保证定义的变量存放在内存中，而不总是在寄存器里。右侧为两个进程的地址空间。请在合适的位置标出变量 gCount、vCount 与 lCount 的位置。如果一个量出现多次，那么就标多次。

```
long gCount = 0;
void *thread(void *vargp) {
    volatile long vCount = *(long *)vargp;
    static long lCount = 0;
    gCount++; vCount++; lCount++;
    printf("%ld\n", gCount+vCount+lCount);
    return NULL;
}

int main() {
    long var; pthread_t tid1, tid2;
    scanf("%ld", &var);
    fork();
    pthread_create(&tid1,NULL,thread,&var);
    pthread_create(&tid2,NULL,thread,&var);
    pthread_join(tid1, NULL);
    pthread_join(tid2, NULL);
```



```
    return 0;
}
```

父进程　　子进程

3. 下面的程序会引发竞争。一个可能的输出结果为 2 1 2 2。解释输出这一结果的原因。

```
long foo = 0, bar = 0;

void *thread(void *vargp) {
    foo++; bar++;
    printf("%ld %ld ", foo, bar); fflush(stdout);
    return NULL;
}

int main() {
    pthread_t tid1, tid2;
    pthread_create(&tid1, NULL, thread, NULL);
    pthread_create(&tid2, NULL, thread, NULL);
    pthread_join(tid1, NULL);
    pthread_join(tid2, NULL);
    return 0;
}
```

【答】线程 1 将 foo、bar 改为 1 以后被线程 2 打断，线程 2 将 foo 改为 2 以后被线程 1 打断，线程 1 输出了 2 1，线程 2 将 bar 改为 2，并输出了 2 2。

4. 判断以下说法的正确性

（×） 在一个多线程程序中，其中一个线程主动调用 exit(0);只会导致该线程退出。

（×） 在同一进程中的两个线程 A 和 B，线程 A 不可以访问存储在线程 B 栈上的变量。

（√） 在同一进程中的两个线程 A 和 B 共享相同的堆，所以他们可以通过堆上的缓冲区完成线程间的通信。

（×） 在同一进程中的两个线程 A 和 B 共享相同的栈，所以他们可以通过栈上的缓冲区完成线程间的通信。

（×） 在进行线程切换后，TLB 条目绝大部分会失效

（√） 一个线程的上下文比一个进程的上下文小得多，因此线程上下文切换要比进程上下文切换快得多

（√） 每个线程都有它自己独立的线程上下文，包括线程 ID、程序计数器、条 件码、通用目的寄存器值等

（√） printf()是线程安全函数

5. 考虑以下程序

```
#define WORMS 8

typedef struct {
    pthread_t tid;
    char *msg;
} pthread_args;
```

```
static void *spawn_worm(void *arg) {
    pthread_args *args = (pthread_args *)arg;
    char msg[100];
    // copies formatted string to MSG
    sprintf(msg, "Worm #%ld", args->tid);
    args->msg = msg;
}
int main() {
    pthread_args args;
    int s;
    for (int i = 0; i < WORMS; i++) {
        s = pthread_create(&args.tid, NULL, &spawn_worm, &args);
        if (s != 0) {
            return 1;
        }
    }
    for (int i = 0; i < WORMS; i++) {
        s = pthread_join(args.tid, NULL);
        if (s == 0) {
            printf("%s\n", args.msg);
        }
    }
    return 0;
}
```

你预期这个程序将给出如下输出：

```
ics@pku ~$ gcc silkworm.c - o silkworm - lpthread
ics@pku ~$./silkworm
Worm 1
Worm 2
Worm 3
Worm 4
Worm 5
Worm 6
Worm 7
Worm 8
ics@pku ~$
```

但实际上，运行时程序的输出是这样的：

```
ics@pku ~$./silkworm


ics@pku ~$
```

修改以上的程序使之能够确定地产生预期的输出。你可以修改最多 5 行代码。

```
/* Line 10 */ char* msg = (char*) malloc(100 * sizeof(char));
/* Line 16 */ pthread_t tid[WORMS];
/* Line 18 */ int failed = pthread_create(&tid[i], NULL, &spawn_worm, &tid[i]);
/* Line 25 */ int failed = pthread_join(tid[i], &worm_msg);

Alternative:
/* Line 10 */ char* msg = (char*) calloc(100, sizeof(char));
/* Line 16 */ pthread_t* tid = (pthread_t*) malloc(WORMS * sizeof(pthread_t));
/* Line 18 */ int failed = pthread_create(&tid[i], NULL, &spawn_worm, &tid[i]);
/* Line 25 */ int failed = pthread_join(tid[i], &worm_msg);
```

This program has 2 issues:

Memory is allocated on the stack for the string, which is why we see an empty line being outputted.

Each thread reuses the same tid, so the first pthread_join will block until tid 8 finishes. The remainder of the pthread_join will fail.

Full credit was given for removing the # from the print statement, though this was an unintentional error.

6. 某次考试有 30 名学生与 1 名监考老师，该教室的门很狭窄，每次只能通过一人。考试开始前，老师和学生进入考场（有的学生来得比老师早），当人来齐以后，老师开始发放试卷。拿到试卷后，学生就可以开始答卷。学生可以随时交卷，交卷后就可以离开考场。当所有的学生都上交试卷以后，老师才能离开考场。

请用信号量与 PV 操作，解决这个过程中的同步问题。所有空缺语句均为 PV 操作。

全局变量：

stu_count：int 类型，表示考场中的学生数量，初值为 0

信号量：

mutex_stu_count：保护全局变量，初值为 1

mutex_door：保证门每次通过一人，初值为 **1**

mutex_all_present：保证学生都到了，初值为 **0**

mutex_all_handin：保证学生都交了，初值为 **0**

mutex_test[30]：表示学生拿到了试卷，初值均为 **0**

Teacher： // 老师	Student(x)： // x 号学生

P(mutex_door)
从门进入考场
V(mutex_door)
 	
P(mutex_all_present) // 等待同学来齐
for (i = 1; i <= 30; i++)
V(mutex_test[i]) // 给 i 号学生发放试卷
 	
P(mutex_all_handin) // 等待同学将试卷交齐
P(mutex_door)
从门离开考场
V(mutex_door)
	P(mutex_door)
	从门进入考场
	V(mutex_door)
	
	P(mutex_stu_count);
	stu_count++;
	if (stu_count == 30)
	V(mutex_all_present)
	V(mutex_stu_count);
	
	P(mutex_test[i]) // 等待拿自己的卷子
	学生答卷
	
	P(mutex_stu_count);

	stu_count--; if (stu_count == 0) **V(mutex_all_handin)** V(mutex_stu_count); **P(mutex_door)** 从门离开考场 **V(mutex_door)**

7．死锁

信号量 w,x,y,z 均被初始化为 1。下面的两个线程运行时可能会发生死锁。给出发生死锁的执行顺序。

线程 1	①P(w) ②P(x) ③P(y) ④P(z) ⑤V(w) ⑥V(x) ⑦V(y) ⑧V(z)
线程 2	ⅠP(x) ⅡP(z) ⅢP(y) ⅣP(w) ⅤV(x) ⅥV(y) ⅦV(w) ⅧV(z)

【答】①→Ⅰ→Ⅱ→Ⅲ，此时线程 1 占用了 w 而在等待 x，线程 2 占用了 x 而在等待 w。这两道题对于信号量的操作都没有带“&”，期末考试的时候看上下文，可能对于信号量的操作需要带“&”。

8．竞争

以下几段代码创建两个对等线程，并希望第一个线程输出 0，第二个输出 1；但有些代码会因为变量 myid 的竞争问题导致错误，请你判断哪些代码会在 myid 上存在竞争。如果不存在竞争，请你判断这段代码是否一定先输出 0 再输出 1？

A．不会，因为两个线程 myid 对应 heap 中不同位置的变量

```
void *foo(void *vargp) {
    int myid;
    myid = *(int *)vargp;
    free(vargp);
    printf("Thread %d\n", myid);
}
```

```
int main() {
    pthread_t tid[2];
    int i, *ptr;
    for (i = 0; i < 2; ++i) {
        ptr = malloc(sizeof(int));
        *ptr = i;
        pthread_create(&tid[i], 0,
foo, ptr);
    }
    pthread_join(tid[0], 0);
    pthread_join(tid[1], 0);
}
```

B．存在竞争，两个 myid 都是对 main 函数堆栈中 i 的引用

```
void *foo(void *vargp) {
    int myid;
    myid = *(int *)vargp;
    printf("Thread %d\n", myid);
}
```

```
int main() {
    pthread_t tid[2];
    int i;
    for (i = 0; i < 2; ++i) {
        pthread_create(&tid[i], 0,
foo, &i);
```

	}
	pthread_join(tid[0], 0);
	pthread_join(tid[1], 0);
	}

C. 不存在竞争，因为创建线程传递的是值而非指针。

void *foo(**void** *vargp) {
int myid;
myid = (int)vargp;
printf("Thread %d\n", myid);
}
	int main() {
	pthread_t tid[2];
	int i;
	for (i = 0; i < 2; ++i) {
	pthread_create(&tid[i], 0, foo, (**void** *)i);
	}
	pthread_join(tid[0], 0);
	pthread_join(tid[1], 0);
	}

D. 存在竞争，两个对等线程和主线程都会访问 i，即使在对等线程中加了互斥锁进行保护，但是主线程仍然可以修改 vargp 对应的内存（也就是 i）的值

sem_t s;
 	
void *foo(**void** *vargp) {
int myid;
P(&s);
myid = *(int *)vargp;
V(&s);
printf("Thread %d\n", myid);
}
	int main() {
	pthread_t tid[2];
	int i;
	sem_init(&s, 0, 1);
	for (i = 0; i < 2; ++i) {
	pthread_create(&tid[i], 0, foo, &i);
	}
	pthread_join(tid[0], 0);
	pthread_join(tid[1], 0);
	}

E. 不存在竞争，因为这段代码实现了同步，三个线程对 i 的访问实现了完全互斥，同时这段代码也保证先输出 0 再输出 1

sem_t s;
 	
void *foo(**void** *vargp) {
int myid;
myid = *(int *)vargp;
V(&s);
printf("Thread %d\n", myid);
}
	int main() {
	pthread_t tid[2];
	int i;
	sem_init(&s, 0, 0);
	for (i = 0; i < 2; ++i) {
	pthread_create(&tid[i], 0, foo, &i);
	P(&s);
	}
	pthread_join(tid[0], 0);
	pthread_join(tid[1], 0);

	}

9. 读者写者问题

一组并发的线程想要访问一个共享对象，有无数的读者和写者想要访问共享对象，读者可以和其它读者同时访问，而写者必须独占对象。以下是第一类读者写者问题的代码。

```
void reader() {
    P(&mutex);
    readcnt++;
    if (readcnt == 1)
        P(&w); /* line a */
    V(&mutex);
    /* reading... line b */
    P(&mutex);
    readcnt--;
    if (readcnt == 0)
        V(&w);
    V(&mutex);
}
```

```
void writer() {
    P(&w); /* line c */
    /* writing... line d */
    V(&w);
}
```

(1) 假设在时刻 0~4 分别有五个读、写者到来：它们的顺序为 R1, R2, W1, R3, W2；已知读操作需要等待 3 个周期，写操作需要等待 5 个周期；假设忽略其他语句的执行时间、线程的切换/调度的时间开销，因此在任意时刻，每个读者、写者只能处在上面标注好的 abcd 四处语句，请你分析这五个读者/写者线程终止的顺序？

R1R2R3W1W2 or R1R2R3W2W1

时刻	R1	R2	W1	R3	W2
0	b				
1	b	b			
2	b	b	c		
3	-	b	c	b	
4	-	-	c	b	c
5	-	-	c	b	c
6	-	-	c/d	-	d/c

根据上表分析可知两个写者将等待最后一个读者退出执行 V(&w)语句才得以继续执行；由于 V 操作会随机唤醒一个睡眠在 P 操作的线程，所以 W1 和 W2 的执行顺序不可知。

(2) 基于(1)的发现，这段代码容易导致饥饿，于是一位同学规定：当有写者在等待时，后来的读者不能进行读操作，写出了第二类读者写者问题的代码如下（所有信号量初始化为 1）：

```
void reader() {
    P(&r); /* a */
    P(&mutex);
    readcnt++;
    if (readcnt == 1)
        P(&w); /* b */
    V(&mutex);
```

```
void writer() {
    P(&mutex);
    writecnt++;
    if (writecnt == 1)
        P(&r); /* d */
    V(&mutex);
    P(&w); /* e */
```

```
    V(&r);
    /* reading...  c */
    P(&mutex);
    readcnt--;
    if (readcnt == 0)
        V(&w);
    V(&mutex);
}
```

```
    /* writing... f */
    V(&w);
    P(&mutex);
    writecnt--;
    if (writecnt == 0)
        V(&r);
    V(&mutex);
}
```

这段代码会导致死锁，请你列举一种可能导致死锁的线程控制流，并提出一种改进的方案。

初始时刻某个读者和写者同时到来，读者执行 P(&r)，写者执行 P(&mutex)，然后两个线程都无法继续执行，后来的线程也会阻塞在第一个 P 操作。

解决方案：1.使用不同的信号量实现对 readcnt 和 writecnt 的互斥保护；2.将读者线程 V(&r)移到 P(&r)的后面；3. 调换 a 处和下一行 P(&mutex)的顺序。

(3) 在修改了(2)中的问题后，请你基于第二类读者写者问题的代码再回答(1)中的题目。

R1R2W1W2R3

时刻	R1	R2	W1	R3	W2
0	c				
1	c	c			
2	c	c	e		
3	-	c	e	a	
4	-	-	f	a	e
5	-	-	f	a	e
6	-	-	f	a	e
7	-	-	f	a	e
8	-	-	f	a	e
9	-	-	-	a	f

10. 线程安全函数

吴用功同学找了一个找素数的函数 next_prime，ta 在实现这个函数的线程安全版本 ts_next_prime 的时候出现了问题，请你帮助 ta。

```
struct big_number *next_prime(struct big_number current_prime) {
    static struct big_number next;
    next = current_prime;
    addOne(next);
    while(!isNotPrime(next))
        addOne(next);
    return &next;
}

struct big_number *ts_next_prime(struct big_number current_prime) {
    return next_prime(current_prime);
```

```
}
```

A. 现在的 ts_next_prime 为什么线程不安全？

返回了一个指向静态变量的指针

B. 下面的代码是否线程安全？

```
struct big_number *ts_next_prime(struct big_number current_prime)
{
    struct big_number *value_ptr;

    P(&mutex); /* mutex is initialized to 1*/
    value_ptr = next_prime(current_prime);
    V(&mutex);

    return value_ptr;
}
```

并不安全，在 V 语句后，其他线程也可以调用 next_prime，进而导致 value_ptr 静指向的静态变量 next 被修改。

C. 请使用 lock&copy 技术实现线程安全的 ts_next_prime

```
sem_t mutex;
struct big_number *ts_next_prime(struct big_number current_prime)
{
    struct big_number *value_ptr;
    struct big_number *ret_ptr = ______________________;

    P(&mutex); /* mutex is initiallized to 1*/
    value_ptr = next_prime(current_prime);
    ____________________________________;
    V(&mutex);

    return ret_ptr;
}
```

(struct big_number *)malloc(sizeof(struct big_number))

memcpy(ret_ptr, value_ptr, sizeof(struct big_number))

并发编程（15 分）

“生产者-消费者”问题是并发编程中的经典问题。本题中，考虑如下场景：

a. 所有生产者和所有消费者**共享同一个 buffer**

b. 生产者、消费者各有 NUM_WORKERS 个（**大于一个**）

c. buffer 的容量为 BUF_SIZE，**初始情况下 buffer 为空**
d. 每个生产者向 buffer 中添加一个 item；若 buffer 满，则生产者等待 buffer 中有空槽时才能添加元素
e. 每个消费者从 buffer 中取走一个 item；若 buffer 空，则消费者等待 buffer 中有 item 时才能取走元素

1. 阅读以下代码并回答问题（**代码阅读提示：主要关注 producer 和 consumer 两个函数**）

```c
/* Producer-Consumer Problem (Solution 1) */

#include "csapp.h"

#define BUF_SIZE 3
#define NUM_WORKERS 50
#define MAX_SLEEP_SEC 10

volatile
static int items = 0; /* How many items are there in the buffer */

static sem_t mutex; /* Mutual Exclusion */
static sem_t empty; /* How many empty slots are there in the buffer */
static sem_t full;  /* How many items are there in the buffer */

static void sync_var_init() {
    Sem_init(&mutex, 0, 1);

    /* Initially, there is no item in the buffer */
    Sem_init(&empty, 0, BUF_SIZE);
    Sem_init(&full, 0, 0);
}

static void *producer(void *num) {
    ①;
    ②;

    /* Critical section begins */
    Sleep(rand() % MAX_SLEEP_SEC);
    items++;
    /* Critical section ends */

    V(&mutex);
    V(&full);
```

```
34.
35.     return NULL;
36.}
37.
38.static void *consumer(void *num) {
39.     ③;
40.     ④;
41.
42.     /* Critical section begins */
43.     Sleep(rand() % MAX_SLEEP_SEC);
44.     items--;
45.     /* Critical section ends */
46.
47.     V(&mutex);
48.     V(&empty);
49.
50.     return NULL;
51.}
52.
53.int main() {
54.     sync_var_init();
55.
56.     pthread_t pid_producer[NUM_WORKERS];
57.     pthread_t pid_consumer[NUM_WORKERS];
58.
59.     for (int i = 0; i < NUM_WORKERS; i++) {
60.         Pthread_create(&pid_producer[i], NULL, producer, (v
   oid *)i);
61.         Pthread_create(&pid_consumer[i], NULL, consumer, (v
   oid *)i);
62.     }
63.
64.     for (int i = 0; i < NUM_WORKERS; i++) {
65.         Pthread_join(pid_producer[i], NULL);
66.         Pthread_join(pid_consumer[i], NULL);
67.     }
68.}
```

a) 补全代码（请从以下选项中选择，可重复选择，每个 1 分，共 4 分）

①_____（24 行）

②_____（25 行）

③_____（39 行）

④_____（40 行）

选项：

A. P(&mutex)

B. P(&empty)
C. P(&full)

b) 如果交换 24 行与 25 行（两个 P 操作），_____（单选，2 分）
   A. 有可能死锁
   B. 有可能饥饿
   C. 既不会死锁，也不会饥饿

c) 交换 32 行与 33 行（两个 V 操作）是否可能造成同步错误？_____（2 分）
   A. 可能
   B. 不可能

d) rand 函数是不是线程安全的？_____（1 分）
   A. 是
   B. 不是

   28 行与 43 行对 rand 函数的使用是否会导致竞争？_____（1 分）
   A. 会
   B. 不会

   已知 rand 函数的实现如下（来源：https://github.com/begriffs/libc/blob/master/stdlib.h 和 https://github.com/begriffs/libc/blob/master/stdlib.c）：

```c
#define RAND_MAX 32767

unsigned long _Randomseed = 1;

int rand() {
    _Randomseed = _Randomseed * 1103515425 + 12345;
    return (unsigned int)(_Randomseed >> 16) & RAND_MAX;
}

void srand(unsigned int seed) {
    _Randomseed = seed;
}
```

解析：a) BACA; b) A; c) B; d) BB
本小题是“生产者-消费者”问题用信号量的经典解法。
a、b 考察的是资源申请和互斥的顺序。
c 考察的是对死锁的分析
d 考察是是线程安全，以及线程不安全的函数在给定场景下是否会出错

评论：这是一道基础题，考察对基础问题的掌握程度，同学们应当能快速得到这些分数。尽管代码较长，但是代码可读性好、结构清晰，同时也是同学们熟悉的代码，阅读应当没有障碍。

2. 考虑“生产者-消费者”问题的另一种解法（**代码阅读提示：12-69 行之外均与上一种解法相同**）

```c
/* Producer-Consumer Problem (Solution 2) */

#include "csapp.h"

#define BUF_SIZE 3
#define NUM_WORKERS 50
#define MAX_SLEEP_SEC 10

volatile
static int items = 0; /* How many items are there in the buffer */

static sem_t mutex;                /* Mutual Exclusion */
static sem_t sem_waiting_producer; /* Wait for empty slots */
static sem_t sem_waiting_consumer; /* Wait for available items */

volatile static int num_waiting_producer = 0;
volatile static int num_waiting_consumer = 0;

static void sync_var_init() {
    Sem_init(&mutex, 0, 1);

    Sem_init(&sem_waiting_producer, 0, ①);
    Sem_init(&sem_waiting_consumer, 0, ①);
}

static void *producer(void *num) {
    P(&mutex);
    while (items == BUF_SIZE) {
        num_waiting_producer++;
        ②;
        ③;
        P(&mutex);
    }

    /* Critical section begins */
    Sleep(rand() % MAX_SLEEP_SEC);
    items++;
    /* Critical section ends */

    if (num_waiting_consumer > 0) {
```

```
40.         num_waiting_consumer--;
41.         V(&sem_waiting_consumer);
42.     }
43.     V(&mutex);
44.
45.     return NULL;
46. }
47.
48. static void *consumer(void *num) {
49.     P(&mutex);
50.     while (items == 0) {
51.         num_waiting_consumer++;
52.         ④;
53.         ⑤;
54.         P(&mutex);
55.     }
56.
57.     /* Critical section begins */
58.     Sleep(rand() % MAX_SLEEP_SEC);
59.     items--;
60.     /* Critical section ends */
61.
62.     if (num_waiting_producer > 0) {
63.         num_waiting_producer--;
64.         V(&sem_waiting_producer);
65.     }
66.     V(&mutex);
67.
68.     return NULL;
69. }
70.
71. int main() {
72.     sync_var_init();
73.
74.     pthread_t pid_producer[NUM_WORKERS];
75.     pthread_t pid_consumer[NUM_WORKERS];
76.
77.     for (int i = 0; i < NUM_WORKERS; i++) {
78.         Pthread_create(&pid_producer[i], NULL, producer, (v
    oid *)i);
79.         Pthread_create(&pid_consumer[i], NULL, consumer, (v
    oid *)i);
80.     }
81.
```

```
82.     for (int i = 0; i < NUM_WORKERS; i++) {
83.         Pthread_join(pid_producer[i], NULL);
84.         Pthread_join(pid_consumer[i], NULL);
85.     }
86.}
```

a) 补全补全代码（请从以下选项中选择，④⑤无需填写，每个 1 分，共 3 分）

①_____（21、22 行）

②_____（29 行）

③_____（30 行）

选项：

A. 0
B. 1
C. P(&sem_waiting_producer)
D. V(&mutex)

b) 如果 27 行和 50 行的 while 换成 if，是否可能造成同步错误？_____（2 分）

A. 可能
B. 不可能

解析：a) ADC; b) A

a 考察对代码理解，①涉及的两个信号量用于线程的休眠，因此在任意时刻，这两个信号量的值都是 0；②③应当先释放 mutex，然后再等待，注意信号量的 V 操作并不会丢失（信号量的值必然会加一），因此即便这两个 P、V 操作之间可能被打断，这个程序仍然是正确的。

b 考察对控制流的分析，在如下场景下这一修改会造成同步错误：一个线程从 27 行的 P 操作中被唤醒以后，被中断，另一线程比前述线程优先获取 mutex（26 行），且在 27 行测试得到 false，因此这个 slot 被这个新来的线程使用。

评论：本题较难，尤其是 b。

本题的背景，是用信号量模拟条件变量，所以 b 的解法实际上是用条件变量解决“生产者-消费者”问题。

删除部分代码，还可以得到用自旋锁的解法。

b 中的 while 是条件变量、管程中的经典问题。

本题中的代码均经过理论与实践双重验证。