RT-Thread完全开发手册之内部机制

资料下载

课程介绍

对于 RT-Thread 的掌握可以分为 3 个层次：

- 第 1 层：知道怎么使用相关 API 函数
- 第 2 层：知道内部机制
- 第 3 层：掌握代码实现的细节，能够移植

百问网科技在嵌入式操作系统领域深耕 13 年，能够使用 2 天(每天 6 小时)让你达到第 2 层。 这让你能够在日常开发中使用 RT-Thread 并解决疑难问题。 12 月 18 号 RT-Thread 开发者大会即将在深圳举行，作为 RT-Thread 的合作伙伴，我们将在12月11号全天举行一场技术直播，讲解 RT-Thread 的内部机制。

RT-Thread 的线程管理与调度、线程间通信(邮箱/消息队列/信号)、线程间同步(信号量/互 斥量/事件集)的方法，核心都是：

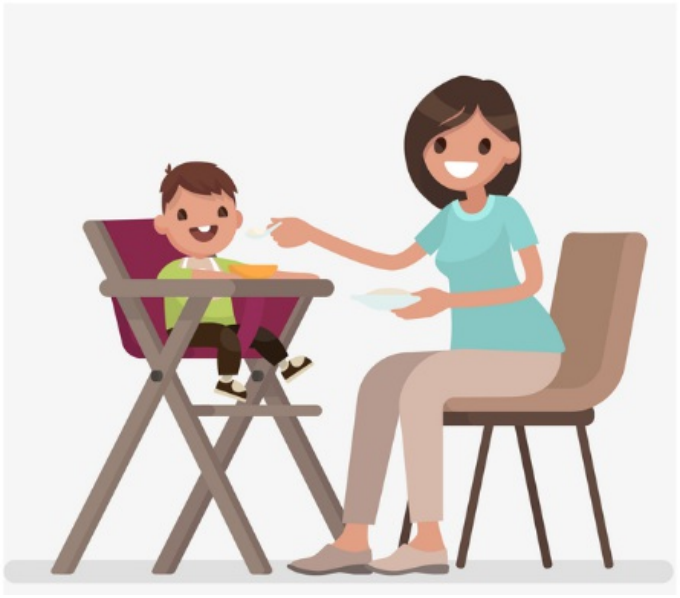
- 链表
- 定时器

基于链表和定时器，可以快速而深入地理解RT-Thread 。

1. RTOS 概念及线程的引入

1.1 RTOS的概念

1.1.1 用人来类比单片机程序和RTOS



妈妈要一边给小孩喂饭，一边加班跟同事微信交流，怎么办？

对于单线条的人，不能分心、不能同时做事，她只能这样做：

- 给小孩喂一口饭
- 瞄一眼电脑，有信息就去回复
- 再回来给小孩喂一口饭
- 如果小孩吃这口饭太慢，她回复同事的信息也就慢了，被同事催：你半天都不回我？
- 如果回复同事的信息要写一大堆，小孩就着急得大哭起来。

这种做法，在软件开发上就是一般的单片机开发，没有用操作系统。

对于眼明手快的人，她可以一心多用，她这样做：

- 左手拿勺子，给小孩喂饭
- 右手敲键盘，回复同事
- 两不耽误，小孩“以为”妈妈在专心喂饭，同事“以为”她在专心聊天
- 但是脑子只有一个啊，虽然说“一心多用”，但是谁能同时思考两件事？
- 只是她反应快，上一秒钟在考虑夹哪个菜给小孩，下一秒钟考虑给同事回复什么信息

这种做法，在软件开发上就是使用操作系统，在单片机里叫做使用RTOS。

RTOS的意思是：Real-time operating system，实时操作系统。

我们使用的Windows也是操作系统，被称为通用操作系统。使用Windows时，我们经常碰到程序卡死、停顿的现象，日常生活中这可以忍受。

但是在电梯系统中，你按住开门键时如果没有即刻反应，即使只是慢个1秒，也会夹住人。

在专用的电子设备中，“实时性”很重要。

1.1.2 程序简单示例

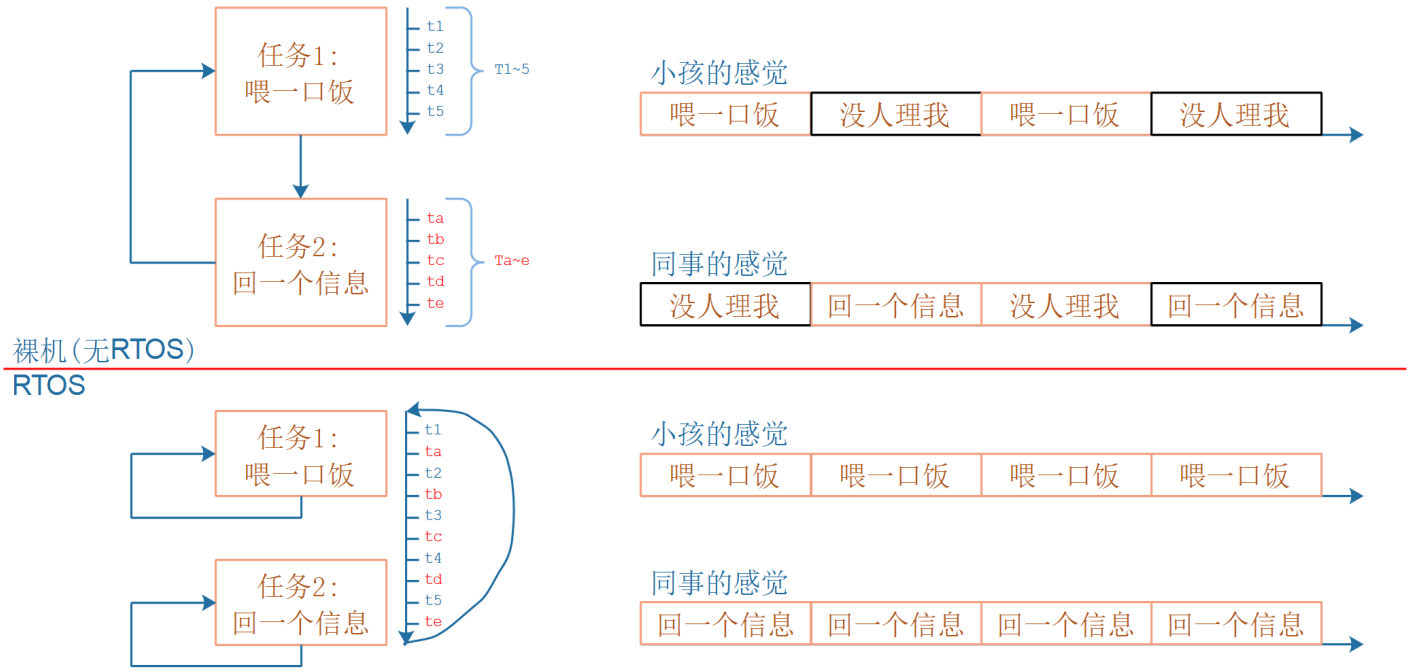
```c // 经典单片机程序 void main() { while (1) { 喂一口饭(); 回一个信息(); }

# }

// RTOS程序
int a;
喂饭() 栈A { int b = 2; int c; c = b+2;==> 1. b+2, 2. c = new val ----------> 切换 while (1) { 喂一口饭(); } }

回信息() 栈B { int b; while (1) { 回一个信息(); } }

void main() { create*task(喂饭); create*task(回信息); start_scheduler(); while (1) { sleep(); } } ```
```



1.1.3 提出问题

什么叫线程？回答这个问题之前，先想想怎么切换线程？怎么保存线程？

- 线程是函数吗？函数需要保存吗？函数在Flash上，不会被破坏，无需保存
- 函数执行到了哪里？需要保存吗？需要保存
- 函数里用到了全局变量，全局变量需要保存吗？全局变量在内存上，还能保存到哪里去？全局变量无需保存
- 函数里用到了局部变量，局部变量需要保存吗？局部变量在栈里，也是在内存里，只要避免栈不被破坏即可，局部变量无需保存
- 运算的中间值需要保存吗？中间值保存在哪里？在CPU寄存器里，另一个线程也要用到CPU寄存器，所以CPU寄存器需要保存
- 函数运行了哪里：它也是一个CPU寄存器，名为"PC"
- 汇总：CPU寄存器需要保存！
- 保存在哪里？保存在线程的栈里
- 怎么理解CPU寄存器、怎么理解栈？

1.2 ARM 架构及汇编

1.2.1 ARM架构

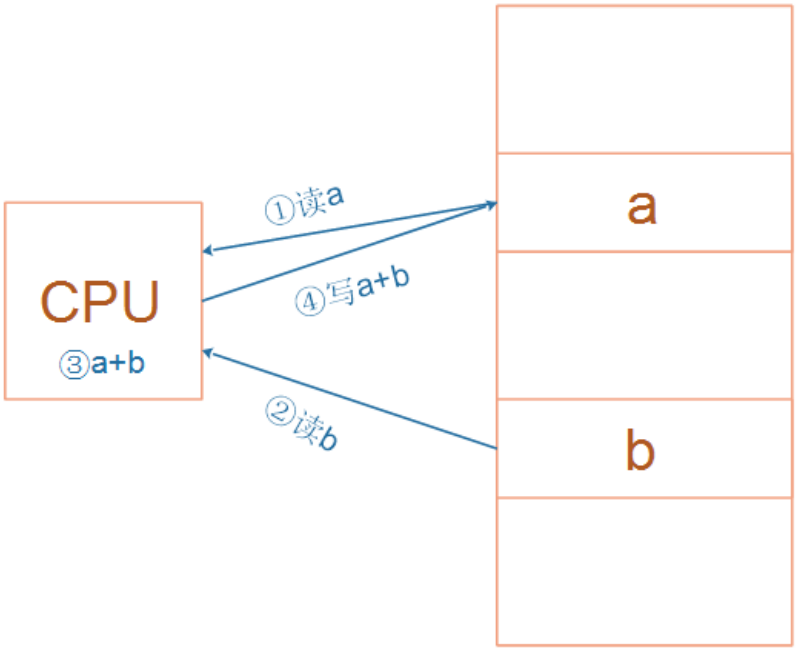
ARM芯片属于精简指令集计算机(RISC：Reduced Instruction Set Computor)，它所用的指令比较简单，有如下特点：

① 对内存只有读、写指令

② 对于数据的运算是在CPU内部实现

③ 使用RISC指令的CPU复杂度小一点，易于设计

比如对于a=a+b这样的算式，需要经过下面4个步骤才可以实现：



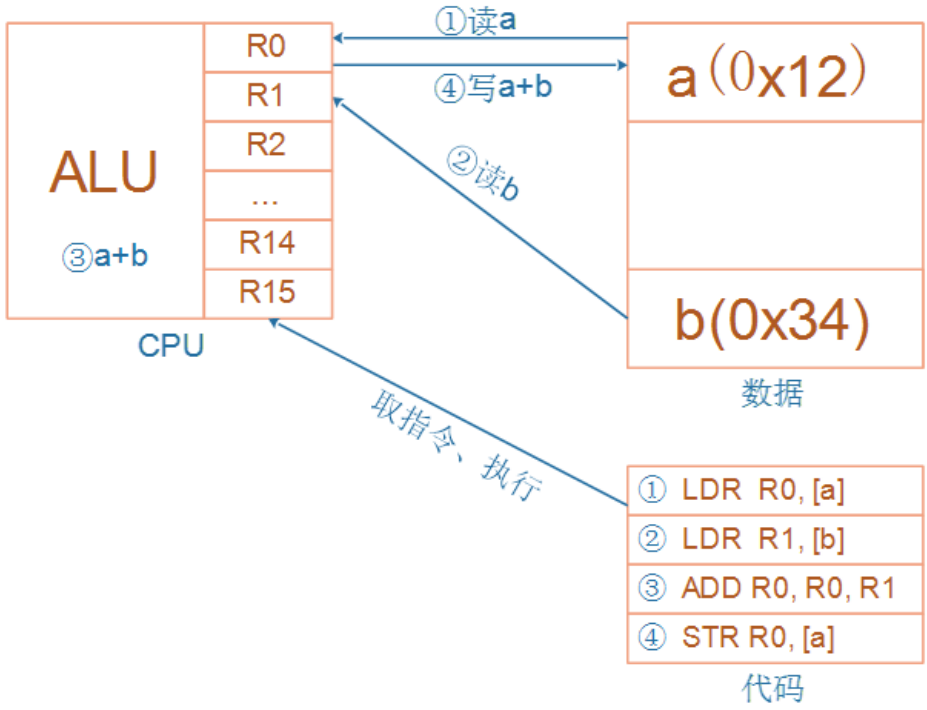
细看这几个步骤，有些疑问：

① 读a，那么a的值读出来后保存在CPU里面哪里？

② 读b，那么b的值读出来后保存在CPU里面哪里？

③ a+b的结果又保存在哪里？

我们需要深入ARM处理器的内部。简单概括如下，我们先忽略各种CPU模式(系统模式、用户模式等等)。



CPU运行时，先去取得指令，再执行指令：

① 把内存a的值读入CPU寄存器R0

② 把内存b的值读入CPU寄存器R1

③ 把R0、R1累加，存入R0

④ 把R0的值写入内存a

CPU内部有r0到r15寄存器，这些寄存器有别名(下图来自百度文库)：

arm 通用寄存器及其别名		
R#	APCS 别名	意义
R0	a1	参数/结果/scratch 寄存器 1
R1	a2	参数/结果/scratch 寄存器 2
R2	a3	参数/结果/scratch 寄存器 3
R3	a4	参数/结果/scratch 寄存器 4
R4	v1	arm 状态局部变量寄存器 1
R5	v2	arm 状态局部变量寄存器 2
R6	v3	arm 状态局部变量寄存器 3
R7	v4 / wr	arm 状态局部变量寄存器 4 / thumb 状态工作寄存器
R8	v5	arm 状态局部变量寄存器 5
R9	v6 / sb	arm 状态局部变量寄存器 6 / 在支持 RWPI 的 ATPCS 中作为静态基址寄存器
R10	v7 / sl	arm 状态局部变量寄存器 7 / 在支持数据栈检查的 ATPCS 中作为数据栈限制指针
R11	v8 / fp	arm 状态局部变量寄存器 8 / 桢指针
R12	ip	内部过程调用 scratch 寄存器
R13	sp	栈指针
R14	lr	链接寄存器
R15	pc	程序计数器

1.2.2 几条汇编指令

需要我们掌握的汇编指令并不多，只有几条：

- 读内存指令：LDR，即Load之意
- 写内存指令：STR，即Store之意
- 加减指令：ADD、SUB
- 跳转：BL，即Branch And Link
- 入栈指令：PUSH
- 出栈指令：POP

视频演示。

汇编并不复杂：

> **加载/存储指令(LDR/STR)**
>
> - 加载指令LDR： `LDR r0,[addrA]` 意思是将地址addrA的内容加载(存放)到r0里面
> - 存储指令STR： `STR r0,[addrA]` 意思是将r0中的值存储到地址addrA上
>
> **加法运算指令(ADD)**
>
> - 加法运算指令(ADD)： `ADD r0,r1,r2` 意思为：r0=r1+r2
> - 减法运算指令(SUB)： `SUB r0,r1,r2` 意思为：r0=r1-r2
>
> **寄存器入栈/出栈指令(PUSH/POP)**
>
> - 寄存器入栈(PUSH)： `PUSH {r3, lr}` 意思是将寄存器r3和pc写入内存栈
>   - 本质是写内存STR指令，高标号寄存器写入高地址的栈里，低标号寄存器写入低地址的栈里
>   - lr即r14，写入地址为`sp-4`的内存，然后：sp=sp-4
>   - r3，写入地址为`sp-4`的内存，然后：sp=sp-4
> - 寄存器出栈指令(POP)： `POP {r3, pc}` 意思是取出内存栈的数据放入r3和pc中
>   - 本质是读内存LDR指令，高标号寄存器的内容来自高地址的栈，低标号寄存器的内容来自低地址的栈
>   - 读地址为`sp`的内存存入r3，然后：sp=sp+4
>   - 读地址为`sp`的内存存入pc，然后：sp=sp+4

1.3 函数运行的本质

如下是一个简单的程序，在配套源码的`01_arm_stack`。

主函数里调用函数`add_val()`：

```c void add_val(int *pa, int *pb) { volatile int tmp;

```
tmp = *pa;
tmp = tmp + *pb;
*pa = tmp;
```

}

int main() { int a = 1; int b = 2;

```
add_val(&a, &b);

return 0;
```

} ```

其中调用函数`add_val()`的汇编代码如下，我们加上了注释：

```
1   /* enter */
2   PUSH    {r3,lr}         //进入函数，寄存器r3、lr的值，都存入内存的栈中(lr保存程序返回地址)
3
4   /* tmp = *pa; */
5   LDR     r2,[r0,#0x00]   //将寄存器r0的值存放到r2，其中r0是函数的第一个参数值(ARM ATPCS规定)
6   STR     r2,[sp,#0x00]   //将寄存器r2的值存储到sp指向的内存
7
8   /* tmp = tmp + *pb;  */
9   LDR     r2,[r1,#0x00]   //将寄存器r1的值存放到r2，其中r1是函数的第二个参数值(ARM ATPCS规定)
10  LDR     r3,[sp,#0x00]   //将寄存器sp指向内存的值存放到r3
11  ADD     r2,r2,r3        //将寄存器r2和r3相加，保存到r2
12  STR     r2,[sp,#0x00]   //将寄存器r2的值存储到sp指向的内存
13
14  /* *pa = tmp; */
15  LDR     r2,[sp,#0x00]   //将寄存器sp指向内存的值存放到r2
16  STR     r2,[r0,#0x00]   //将寄存器r2的值存储到r0，其中r0将作为函数返回值(ARM ATPCS规定)
17
18  /* quit */
```
```

```
19  POP     {r3,pc}         //退出函数，获取内存的栈中的数据放入r3和pc中(此时pc为lr,实现了函数返回)
```

视频里动态演示，重点演示栈的使用。

1.4 什么叫线程？ 怎么保存线程？

现在可以回答这个问题了。

什么叫线程：运行中的函数、被暂停运行的函数

怎么保存线程：把暂停瞬间的CPU寄存器值，保存进栈里。

视频里动态演示：在函数的某个位置，怎么保存当前环境？

2. 创建线程的函数

```
60: int main(void)
61: {
62:     /* 初始化静态线程1，名称是Thread1，入口是thread1_entry */
63:     rt_thread_init(&thread1,                    //线程句柄
64:                    "thread1",                   //线程名字
65:                    thread1_entry,               //入口函数
66:                    RT_NULL,                     //入口函数参数
67:                    &thread1_stack[0],           //线程栈起始地址
68:                    sizeof(thread1_stack),       //栈大小
69:                    THREAD_PRIORITY,             //线程优先级
70:                    THREAD_TIMESLICE);           //线程时间片大小
71:     /* 启动线程1 */
72:     rt_thread_startup(&thread1);
73:
74:
75:     /* 创建动态线程2，名称是thread2，入口是thread2_entry*/
76:     thread2 = rt_thread_create("thread2",           //线程名字
77:                                thread2_entry,       //入口函数
78:                                RT_NULL,             //入口函数参数
79:                                THREAD_STACK_SIZE,   //栈大小
80:                                THREAD_PRIORITY,     //线程优先级
81:                                THREAD_TIMESLICE);   //线程时间片大小
82:
83:     /* 判断创建结果,再启动线程2 */
84:     if (thread2 != RT_NULL)
85:         rt_thread_startup(thread2);
86:
87:     return 0;
88: } « end main »
```

1.函数
2.栈

2.1 参数解析

- 线程做什么？需要提供函数
- 线程随时会别切换，哪些寄存器保存在哪里？需要提供栈：可以实现分配(比如使用数组)，也可以动态分配
- 怎么记录这些信息：栈在哪里？需要有一个线程结构体

2.1.1 线程结构体

rt_thread用来表示一个线程，它的重要成员如下：

- thread->entry：函数指针
- thread->parameter：函数参数
- thread->stack_addr：栈的起始地址
- thread->stack_size：栈大小
- thread->sp：栈顶

- thread->init_priority：初始优先级
- thread->current_priority：当前优先级
- thread->init_tick：一次能运行多少个tick
- thread->remaining_tick：当次运行还剩多少个tick

```c

/** * Thread structure */ struct rtthread { /* rt object */ char name[RTNAMEMAX]; /*< the name of thread */ rtuint8t type; /*< type of object */ rtuint8_t flags; /*< thread's flags */

# ifdef RT_USING_MODULE

```
void   *module_id;   /**< id of application module */
```

# endif

```
rt_list_t   list;                               /**< the object list */
rt_list_t   tlist;                              /**< the thread list */

/* stack point and entry */
void       *sp;                                 /**< stack point */
void       *entry;                              /**< entry */
void       *parameter;                          /**< parameter */
void       *stack_addr;                         /**< stack address */
rt_uint32_t stack_size;                         /**< stack size */

/* error code */
rt_err_t    error;                              /**< error code */

rt_uint8_t  stat;                               /**< thread status */

/* priority */
rt_uint8_t  current_priority;                   /**< current priority */
rt_uint8_t  init_priority;                      /**< initialized priority */
```

if RT_THREAD_PRIORITY_MAX > 32

```
rt_uint8_t  number;
rt_uint8_t  high_mask;
```

endif

```
rt_uint32_t number_mask;
```

if defined(RT_USING_EVENT)

```
/* thread event */
rt_uint32_t event_set;
rt_uint8_t  event_info;
```

endif

if defined(RT_USING_SIGNALS)
```

```
rt_sigset_t     sig_pending;                    /**< the pending signals */
rt_sigset_t     sig_mask;                       /**< the mask bits of signal */
```

ifndef RT*USING*SMP

```
void            *sig_ret;                       /**< the return stack pointer from signal */
```

endif

```
rt_sighandler_t *sig_vectors;                   /**< vectors of signal handler */
void            *si_list;                       /**< the signal infor list */
```

endif

```
rt_ubase_t  init_tick;                          /**< thread's initialized tick */
rt_ubase_t  remaining_tick;                     /**< remaining tick */

struct rt_timer thread_timer;                   /**< built-in thread timer */

void (*cleanup)(struct rt_thread *tid);         /**< cleanup function when thread exit */

/* light weight process if present */
```

ifdef RT*USING*LWP

```
void        *lwp;
```

endif

```
rt_uint32_t user_data;                         /**< private user data beyond this thread */
```

}; ```

2.2 创建线程的过程

创建线程的过程，就是构造栈的过程。

函数调用关系如下：

```shell rt*thread*create // 1. 分配线程结构体 thread = (struct rt_thread *)rt*object*allocate(RT_Object*Class*Thread, name);

```
    // 2. 分配栈
    stack_start = (void *)RT_KERNEL_MALLOC(stack_size);

    // 3. 初始化栈，即构造栈的内容
    _rt_thread_init
        // 3.1 具体操作
        thread->sp = (void *)rt_hw_stack_init
```

```

视频里分析这个函数：

```c
rt_uint8_t *rt_hw_stack_init(void *tentry,
                             void       *parameter,
                             rt_uint8_t *stack_addr,
                             void       *texit)
{
    struct stack_frame *stack_frame;
    rt_uint8_t         *stk;
    unsigned long       i;

    stk  = stack_addr + sizeof(rt_uint32_t);
    stk  = (rt_uint8_t *)RT_ALIGN_DOWN((rt_uint32_t)stk, 8);
    stk -= sizeof(struct stack_frame);

    stack_frame = (struct stack_frame *)stk;

    /* init all register */
    for (i = 0; i < sizeof(struct stack_frame) / sizeof(rt_uint32_t); i ++)
    {
        ((rt_uint32_t *)stack_frame)[i] = 0xdeadbeef;
    }

    stack_frame->exception_stack_frame.r0  = (unsigned long)parameter; /* r0 : argument */
    stack_frame->exception_stack_frame.r1  = 0;                        /* r1 */
    stack_frame->exception_stack_frame.r2  = 0;                        /* r2 */
    stack_frame->exception_stack_frame.r3  = 0;                        /* r3 */
    stack_frame->exception_stack_frame.r12 = 0;                        /* r12 */
    stack_frame->exception_stack_frame.lr  = (unsigned long)texit;     /* lr */
    stack_frame->exception_stack_frame.pc  = (unsigned long)tentry;    /* entry point, pc */
    stack_frame->exception_stack_frame.psr = 0x01000000L;              /* PSR */

    /* return task's current stack address */
    return stk;
```

3. 线程的调度机制(核心是链表与定时器)

3.1 使用链表来管理线程

有很多线程都想运行，优先级各不相同，怎么管理它们？

`c rt_list_t rt_thread_priority_table[RT_THREAD_PRIORITY_MAX];`

每个优先级，都有一个就绪链表：rt*thread*priority_table[优先级]，

线程被创建后，要使用`rt_thread_startup()`来启动它，调用过程为：

```
rt_thread_startup
    rt_thread_resume(thread);
        rt_schedule_insert_thread(thread);
            /* insert thread to ready list */
            rt_list_insert_before(&(rt_thread_priority_table[thread->current_priority]),
                                  &(thread->tlist));
```

3.2 使用链表来理解调度机制

3.2.1 第1个线程是谁？

最高优先级的、ready list里的、第1个线程：

```
150: void rt_system_scheduler_start(void)
151: {
152:     register struct rt_thread *to_thread;
153:     register rt_ubase_t highest_ready_priority;
154:
155: #if RT_THREAD_PRIORITY_MAX > 32
156:     register rt_ubase_t number;
157:
158:     number = __rt_ffs(rt_thread_ready_priority_group) - 1;
159:     highest_ready_priority = (number << 3) + __rt_ffs(rt_thread_ready_table[number]) - 1;
160: #else
161:     highest_ready_priority = __rt_ffs(rt_thread_ready_priority_group) - 1;
162: #endif
163:
164:     /* get switch to thread */
165:     to_thread = rt_list_entry(rt_thread_priority_table[highest_ready_priority].next,
166:                               struct rt_thread,
167:                               tlist);
168:
169:     rt_current_thread = to_thread;
170:
171:     /* switch to new thread */
172:     rt_hw_context_switch_to((rt_uint32_t)&to_thread->sp);
173:
174:     /* never come back */
175: } « end rt_system_scheduler_start »
176:
```

3.2.2 抢占

最高优先级的、ready list里的、第1个线程：

```
187: void rt_schedule(void)
188: {
189:     rt_base_t level;
190:     struct rt_thread *to_thread;
191:     struct rt_thread *from_thread;
192:
193:     /* disable interrupt */
194:     level = rt_hw_interrupt_disable();
195:
196:     /* check the scheduler is enabled or not */
197:     if (rt_scheduler_lock_nest == 0)
198:     {
199:         register rt_ubase_t highest_ready_priority;
200:
201: #if RT_THREAD_PRIORITY_MAX <= 32
202:         highest_ready_priority = __rt_ffs(rt_thread_ready_priority_group) - 1;
203: #else
204:         register rt_ubase_t number;
205:
206:         number = __rt_ffs(rt_thread_ready_priority_group) - 1;
207:         highest_ready_priority = (number << 3) + __rt_ffs(rt_thread_ready_table[number]) - 1;
208: #endif
209:
210:         /* get switch to thread */
211:         to_thread = rt_list_entry(rt_thread_priority_table[highest_ready_priority].next,
212:                                   struct rt_thread,
213:                                   tlist);
214:
```

3.3 使用链表和Tick来理解时间片轮转

FreeRTOS的任务轮转时：每个任务运行一个Tick。

RT-Thread的线程轮转时：每个线程可以运行指定的Tick(创建线程时指定了时间片)：

```
392: rt_thread_t rt_thread_create(const char *name,
393:                              void (*entry)(void *parameter),
394:                              void       *parameter,
395:                              rt_uint32_t stack_size,
396:                              rt_uint8_t  priority,
397:                              rt_uint32_t tick)
```


在线程结构体中会记录tick数值：它运行多少个Tick，才会让出CPU资源。

创建线程时，会调用到函数`rt_thread_init()`，里面会设置Tick参数：

```
c /* tick init */ thread->init_tick = tick; thread->remaining_tick = tick;
```

当前任务还可以运行多少个tick？在thread->remaining_tick中记录；

每发生一次tick中断，thread->remaining_tick减1；

当thread->remaining_tick等于0时，要让出CPU：调用`rt_thread_yield()`

```
67: void rt_tick_increase(void)
68: {
69:     struct rt_thread *thread;
70:
71:     /* increase the global tick */
72:     ++ rt_tick;
73:
74:     /* check time slice */
75:     thread = rt_thread_self();
76:
77:     -- thread->remaining_tick;
78:     if (thread->remaining_tick == 0)
79:     {
80:         /* change to initialized tick */
81:         thread->remaining_tick = thread->init_tick;
82:
83:         /* yield */
84:         rt_thread_yield();
85:     }
86:
87:     /* check timer */
88:     rt_timer_check();
89: } « end rt_tick_increase »
90:
```

`rt_thread_yield()`就是把当前、用完时间的线程，放到就绪链表的最后：

```c
rt_err_t rt_thread_yield(void)
{
    register rt_base_t level;
    struct rt_thread *thread;

    /* disable interrupt */
    level = rt_hw_interrupt_disable();

    /* set to current thread */
    thread = rt_current_thread;

    /* if the thread stat is READY and on ready queue list */
    if ((thread->stat & RT_THREAD_STAT_MASK) == RT_THREAD_READY &&
        thread->tlist.next != thread->tlist.prev)
    {
        /* remove thread from thread list */
        rt_list_remove(&(thread->tlist));

        /* put thread to end of ready queue */
        rt_list_insert_before(&(rt_thread_priority_table[thread->current_priority]),
                              &(thread->tlist));

        /* enable interrupt */
        rt_hw_interrupt_enable(level);

        rt_schedule();

        return RT_EOK;
    }
```

当前线程时间用完，
放到ready list的最后

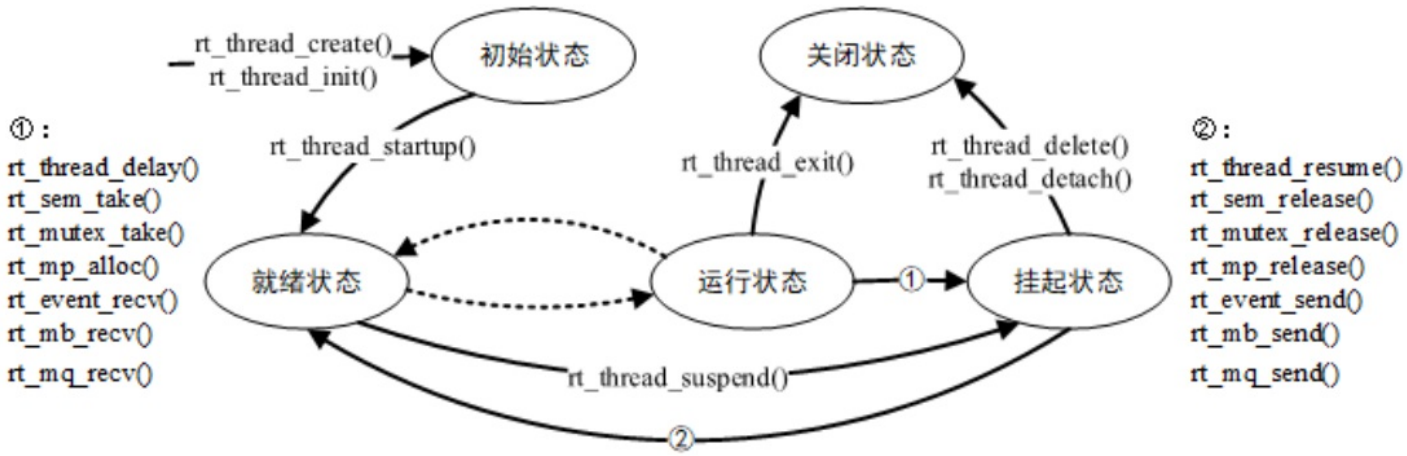
注意：

- 如果有更高优先级线程，即使当前线程是时间片没用完，也会立刻被抢占
- 当它被抢占后，再次运行时：继续运行完剩下的时间

3.5 线程状态的切换(链表+定时器)

参考程序：`RT-Thread_06_taskdelay`

3.5.1 线程状态切换图



3.5.2 核心：链表和定时器

每个线程内部都有一个定时器，它的作用非常大：所有的超时函数都依赖它。

```
c struct rt_thread { ..... struct rt_timer thread_timer; /**< built-in thread timer */ ..... }
```

以`rt_thread_mdelay(50)`为例，它会让当前线程挂起50ms，会先把50ms转换为Tick个数。

也可以使用`rt_thread_delay(50)`，它会让当前线程挂起50个Tick。

挂起过程：

- 把当前线程从就绪链表中取出来
- 设定定时器：

```
198:     /* initialize thread timer */
199:     rt_timer_init(&(thread->thread_timer),
200:                   thread->name,
201:                   rt_thread_timeout,
202:                   thread,
203:                   0,
204:                   RT_TIMER_FLAG_ONE_SHOT);
205:
```

  - 在创建线程时已经设置了超时函数
  - thread*timer->timeout*tick = rt_tick*get()* + *timer->init*tick; // 当前Tick加上某个数值
  - 把定时器放入链表: rt*timer*list[xxx]
- 切换线程：rt_schedule

被唤醒过程：

- 系统每隔一定时间产生Tick中断，Tick中断函数会调用`rt_tick_increase()`

```
67: void rt_tick_increase(void)
68: {
69:     struct rt_thread *thread;
70:
71:     /* increase the global tick */
72:     ++ rt_tick;
73:
74:     /* check time slice */
75:     thread = rt_thread_self();
76:
77:     -- thread->remaining_tick;
78:     if (thread->remaining_tick == 0)
79:     {
80:         /* change to initialized tick */
81:         thread->remaining_tick = thread->init_tick;
82:
83:         /* yield */
84:         rt_thread_yield();
85:     }
86:
87:     /* check timer */
88:     rt_timer_check();
89: } « end rt_tick_increase »
90:
```

- rt*timer*check功能
  - 检查rt*timer*list[xxx]链表，找出超时的定时器，把它从链表中移除
  - 调用定时器的超时函数：`t->timeout_func(t->parameter);`，对于线程自带的定时器，这个函数就是`rt_thread_timeout`

```
832: void rt_thread_timeout(void *parameter)
833: {
834:     struct rt_thread *thread;
835:
836:     thread = (struct rt_thread *)parameter;
837:
838:     /* thread check */
839:     RT_ASSERT(thread != RT_NULL);
840:     RT_ASSERT((thread->stat & RT_THREAD_STAT_MASK) == RT_THREAD_SUSPEND);
841:     RT_ASSERT(rt_object_get_type((rt_object_t)thread) == RT_Object_Class_Thread);
842:
843:     /* set error number */
844:     thread->error = -RT_ETIMEOUT;
845:
846:     /* remove from suspend list */
847:     rt_list_remove(&(thread->tlist));
848:
849:     /* insert to schedule ready list */
850:     rt_schedule_insert_thread(thread);
851:
852:     /* do schedule */
853:     rt_schedule();
854: } « end rt_thread_timeout »
```

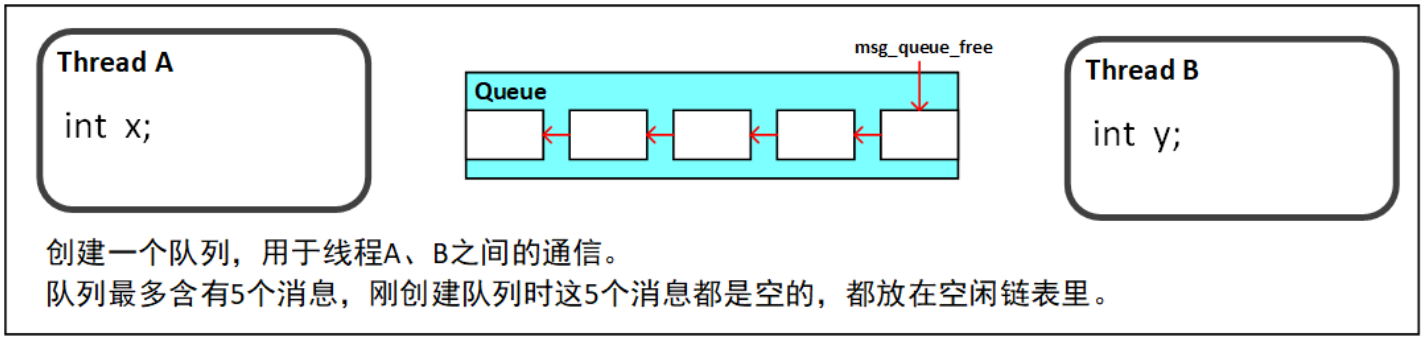
1.表示被唤醒原因是：超时

2.它可能是因为等待队列等原因而挂起，先把它从这些链表中移除

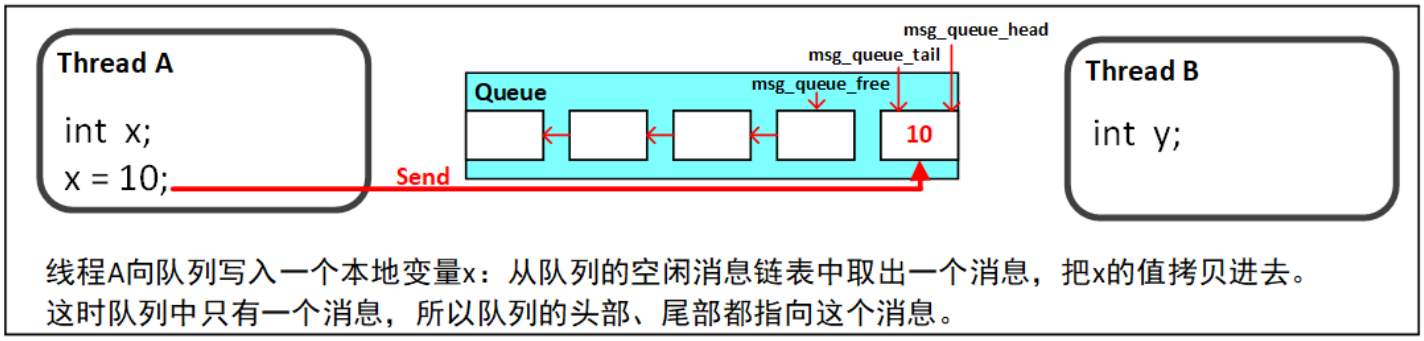
3.把线程放入就绪链表

4.发起调度

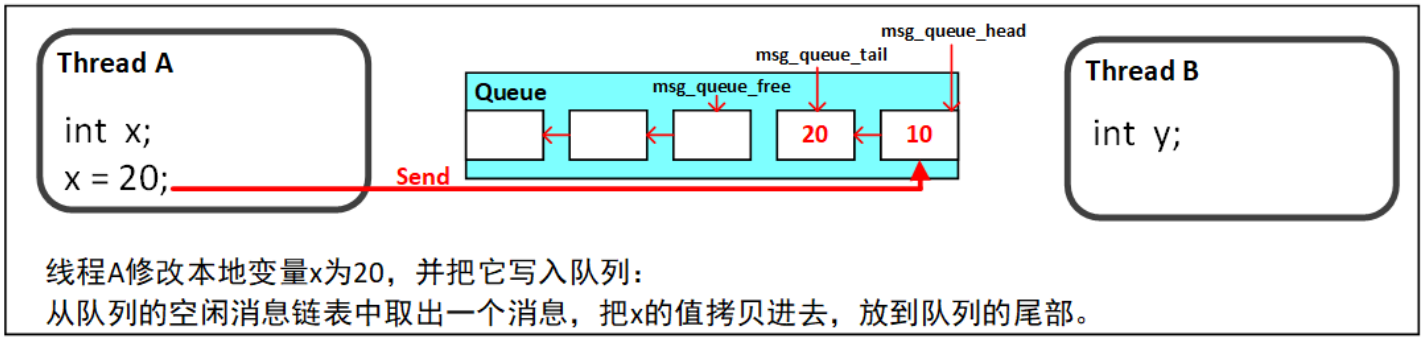
4. 消息队列(queue)



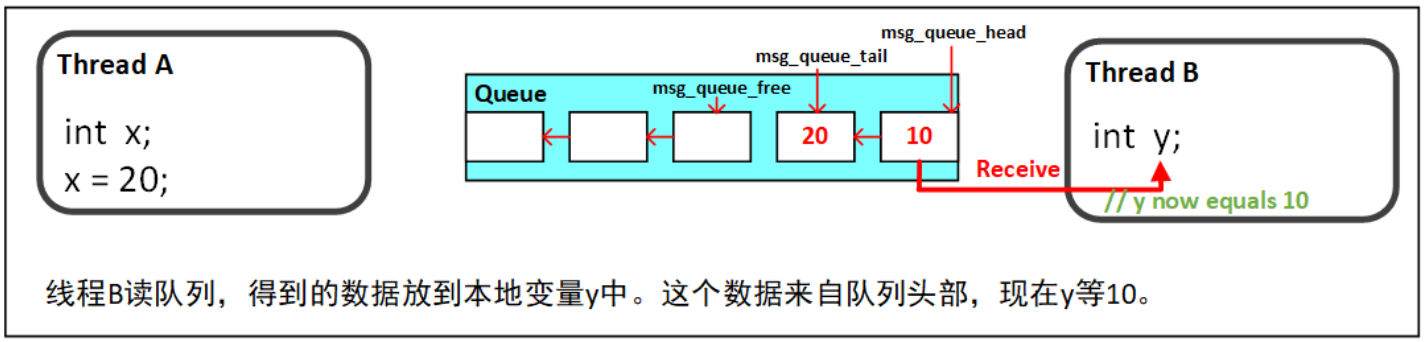
创建一个队列，用于线程A、B之间的通信。
队列最多含有5个消息，刚创建队列时这5个消息都是空的，都放在空闲链表里。



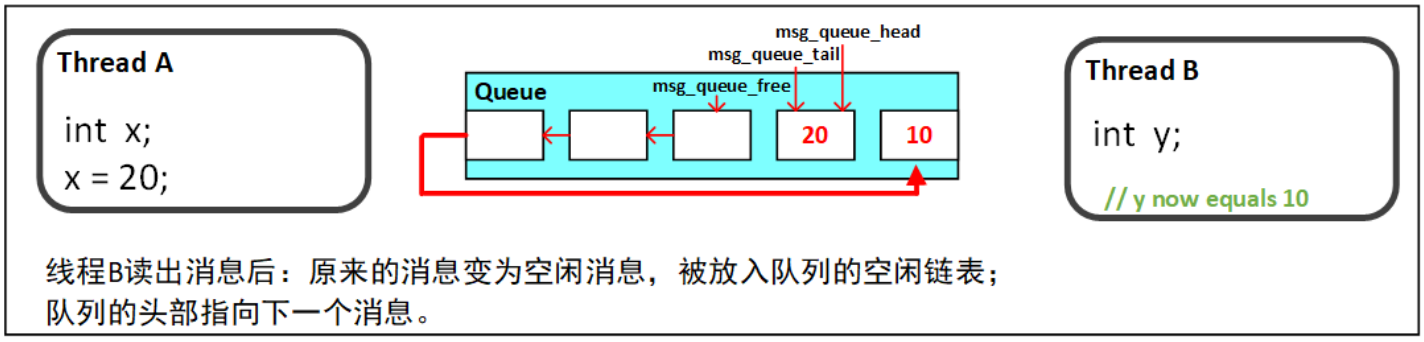
线程A向队列写入一个本地变量x：从队列的空闲消息链表中取出一个消息，把x的值拷贝进去。
这时队列中只有一个消息，所以队列的头部、尾部都指向这个消息。



线程A修改本地变量x为20，并把它写入队列：
从队列的空闲消息链表中取出一个消息，把x的值拷贝进去，放到队列的尾部。



线程B读队列，得到的数据放到本地变量y中。这个数据来自队列头部，现在y等10。

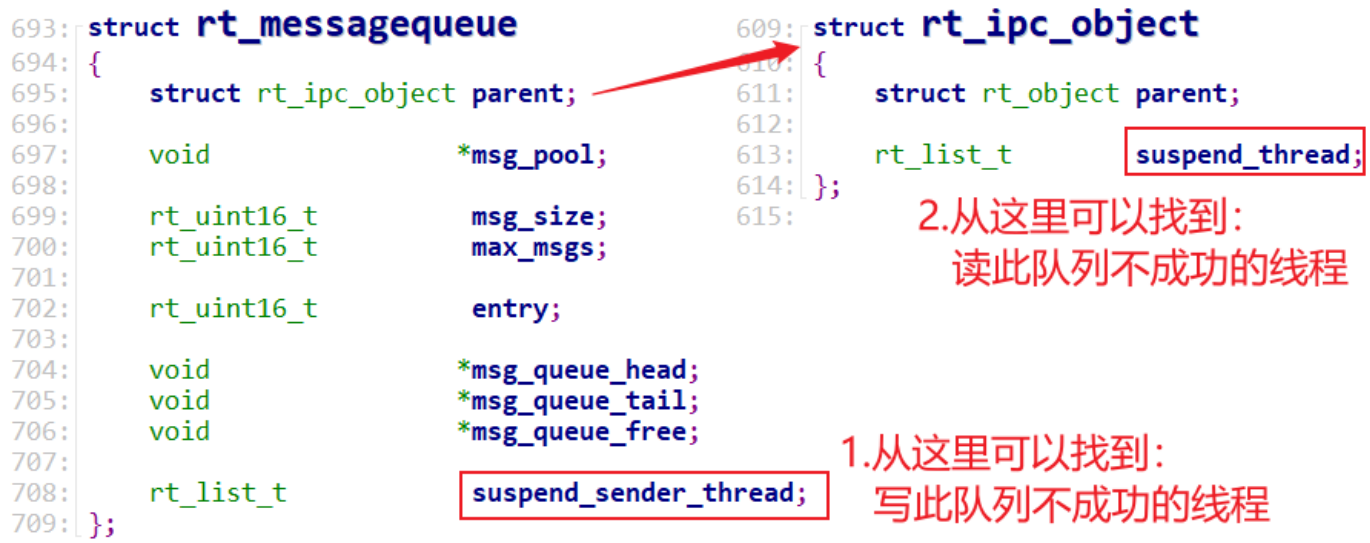


线程B读出消息后：原来的消息变为空闲消息，被放入队列的空闲链表；
队列的头部指向下一个消息。

4.1 核心是：链表和定时器

有两个链表：

- 写队列不成功而挂起
- 读队列不成功而挂起



4.2 操作示例

参考程序：`RT-Thread_08_queue`

4.2.1 写队列

调用过程：

```c rt*mq*send_wait /* 如果不成功：当前线程挂起, 并放入链表: mq->suspend*sender*thread */ rt*ipc*list_suspend(&(mq->suspend*sender*thread), thread, mq->parent.parent.flag);

```
    /* 如果指定了超时时间：最多等多久
     * 设置、启动线程定时器
     */
    rt_timer_start(&(thread->thread_timer));
```

```

一个线程写队列时，如果队列已经满了，它会被挂起，何时被唤醒？

- 超时：注意thread->errro等于"-RT_ETIMEOUT"

```
832: void rt_thread_timeout(void *parameter)
833: {
834:     struct rt_thread *thread;
835:
836:     thread = (struct rt_thread *)parameter;
837:
838:     /* thread check */
839:     RT_ASSERT(thread != RT_NULL);
840:     RT_ASSERT((thread->stat & RT_THREAD_STAT_MASK) == RT_THREAD_SUSPEND);
841:     RT_ASSERT(rt_object_get_type((rt_object_t)thread) == RT_Object_Class_Thread);
842:
843:     /* set error number */
844:     thread->error = -RT_ETIMEOUT;
845:
846:     /* remove from suspend list */
847:     rt_list_remove(&(thread->tlist));
848:
849:     /* insert to schedule ready list */
850:     rt_schedule_insert_thread(thread);
851:
852:     /* do schedule */
853:     rt_schedule();
854: } « end rt_thread_timeout »
```

1.表示被唤醒原因是：超时

2.它可能是因为等待队列等原因而挂起，先把它从这些链表中移除

3.把线程放入就绪链表

4.发起调度

- 别的线程读队列: 注意thread->errro等于默认值

```
2459:
2460:     /* resume suspended thread */
2461:     if (!rt_list_isempty(&(mq->suspend_sender_thread)))
2462:     {
2463:         rt_ipc_list_resume(&(mq->suspend_sender_thread));
2464:
2465:         /* enable interrupt */
2466:         rt_hw_interrupt_enable(temp);
2467:
2468:         RT_OBJECT_HOOK_CALL(rt_object_take_hook, (&(mq->parent.parent)));
2469:
2470:         rt_schedule();
2471:
2472:         return RT_EOK;
2473:     }
```

rt_mq_recv

1.有线程因为写队列而挂起?

2.唤醒它

3.调度