

第 18 章 Linux 系统对中断的处理

18.1 进程、线程、中断的核心：栈

中断中断，中断谁？

中断当前正在运行的进程、线程。

进程、线程是什么？内核如何切换进程、线程、中断？

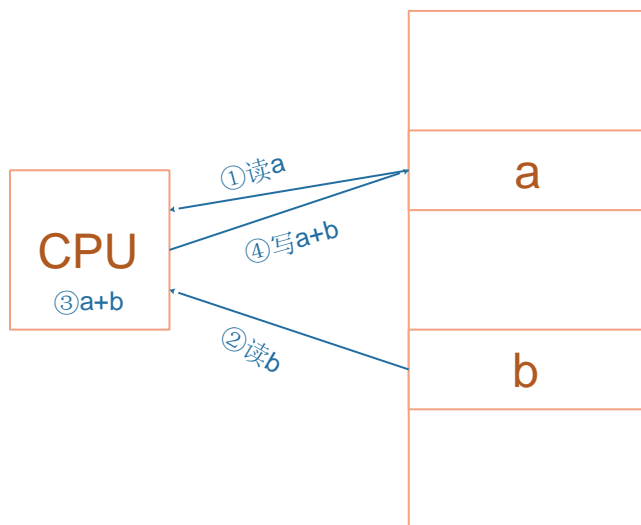
要理解这些概念，必须理解栈的作用。

18.1.1 ARM 处理器程序运行的过程

ARM 芯片属于精简指令集计算机(RISC: Reduced Instruction Set Computing)，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 $a=b$ 这样的算式，需要经过下面 4 个步骤才可以实现：



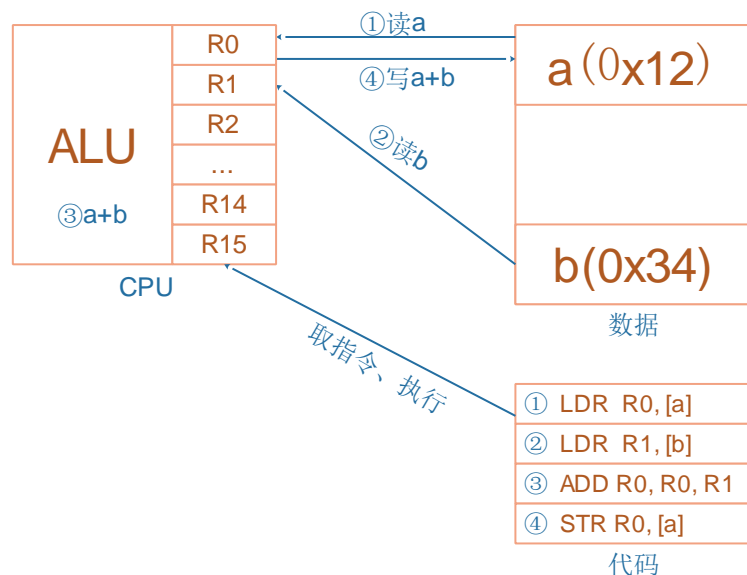
细看这几个步骤，有些疑问：

- 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)。

注意：如果想理解 ARM 处理器架构，应该从裸机开始学习。我们即将写好近 30 个裸机程序的文档，估计还 3 月底发布。

注意：为了加快学习速度，建议先不看裸机。



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

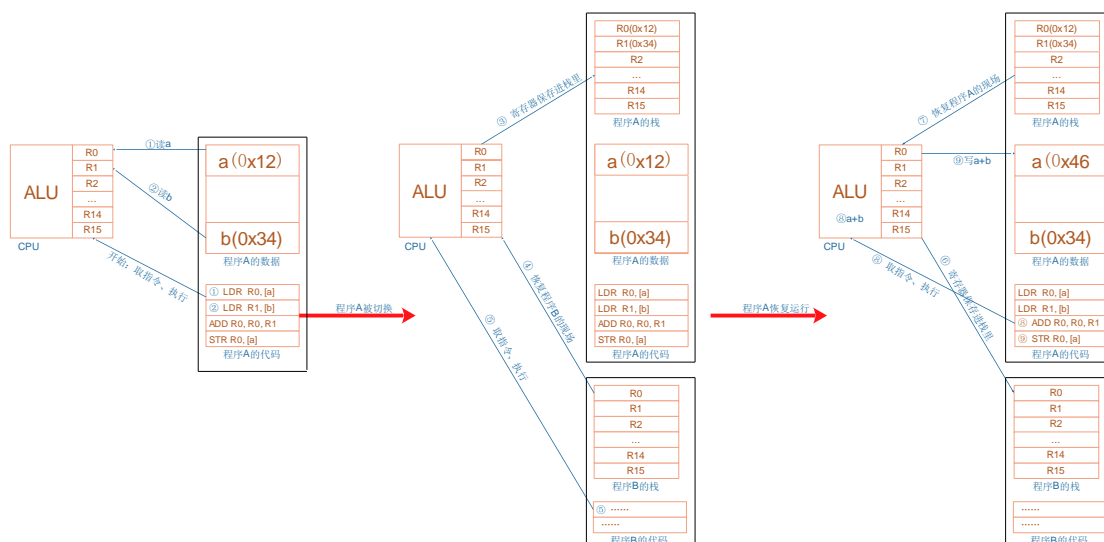
18.1.2 程序被中断时，怎么保存现场

从上图可知，CPU 内部的寄存器很重要，如果要暂停一个程序，中断一个程序，就需要把这些寄存器的值保存下来：这就称为保存现场。

保存在哪里？内存，这块内存就称之为栈。

程序要继续执行，就先从栈中恢复那些 CPU 内部寄存器的值。

这个场景并不局限于中断，下图可以概括程序 A、B 的切换过程，其他情况是类似的：



a. 函数调用：

在函数 A 里调用函数 B，实际就是中断函数 A 的执行。

那么需要把函数 A 调用 B 之前瞬间的 CPU 寄存器的值，保存到栈里；

再去执行函数 B；

函数 B 返回之后，就从栈中恢复函数 A 对应的 CPU 寄存器值，继续执行。

b. 中断处理

进程 A 正在执行，这时候发生了中断。

CPU 强制跳到中断异常向量地址去执行，

这时就需要保存进程 A 被中断瞬间的 CPU 寄存器值，

可以保存在进程 A 的内核态栈，也可以保存在进程 A 的内核结构体中。

中断处理完毕，要继续运行进程 A 之前，恢复这些值。

c. 进程切换

在所谓的多任务操作系统中，我们以为多个程序是同时运行的。

如果我们能感知微秒、纳秒级的事件，可以发现操作系统时让这些程序依次执行一小段时间，进程 A 的时间用完了，就切换到进程 B。

怎么切换？

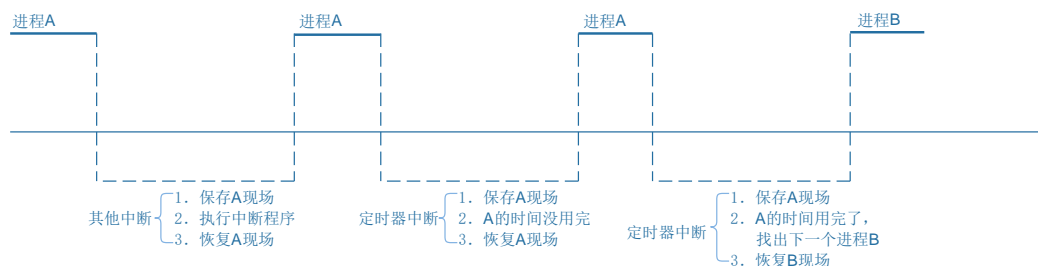
切换过程是发生在内核态里的，跟中断的处理类似。

进程 A 的被切换瞬间的 CPU 寄存器值保存在某个地方；

恢复进程 B 之前保存的 CPU 寄存器值，这样就可以运行进程 B 了。

所以，在中断处理的过程中，保存着进程的保存现场、恢复现场。

进程的调度也是使用栈来保存、恢复现场：



18.1.3 进程、线程的概念

假设我们写一个音乐播放器，在播放音乐的同时会根据按键选择下一首歌。把事情简化为 2 件事：发送音频数据、读取按键。那可以这样写程序：

```
int main(int argc, char **argv)
{
    int key;

    while (1)
    {
        key = read_key();

        if (key != -1)
        {
            switch (key)
            {
                case NEXT:
                    select_next_music(); // 在 GUI 选中下一首歌
                    break;
            }
        }
        else
        {
            send_music();
        }
    }

    return 0;
}
```

这个程序只有一条主线，读按键、播放音乐都是顺序执行。

无论按键是否被按下，read_key 函数必须马上返回，否则会使得后续的 send_music 受到阻滞导致音乐播放不流畅。

读取按键、播放音乐能否分为两个程序进行？可以，但是开销太大：读按键的程序，要把按键通知播放音乐的程序，进程间通信的效率没那么高。

这时可以用多线程之编程，读取按键是一个线程，播放音乐是另一个线程，它们之间可以通过全局变量传递数据，示意代码如下：

```
int g_key;
void key_thread_fn()
{
    while (1)
```

```
{
    g_key = read_key();
    if (g_key != -1)
    {
        switch (g_key)
        {
            case NEXT:
                select_next_music(); // 在 GUI 选中下一首歌
                break;
        }
    }
}

void music_fn()
{
    while (1)
    {
        if (g_key == STOP)
            stop_music();
        else
        {
            send_music();
        }
    }
}

int main(int argc, char **argv)
{
    int key;

    create_thread(key_thread_fn);
    create_thread(music_fn);
    while (1)
    {
        sleep(10);
    }
    return 0;
}
```

这样，按键的读取及 GUI 显示、音乐的播放，可以分开来，不必混杂在一起。

按键线程可以使用阻塞方式读取按键，无按键时是休眠的，这可以节省 CPU 资源。

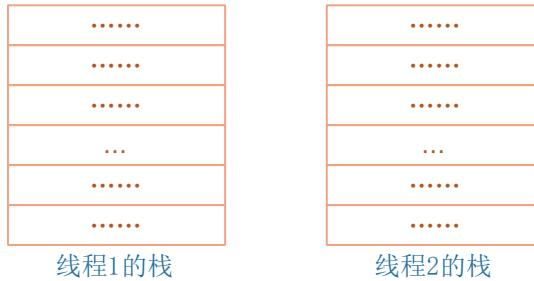
音乐线程专注于音乐的播放和控制，不用理会按键的具体读取工作。

并且这 2 个线程通过全局变量 g_key 传递数据，高效而简单。

在 Linux 中：资源分配的单位是进程，调度的单位是线程。

也就是说，在一个进程里，可能有多个线程，这些线程共用打开的文件句柄、全局变量等等。

而这些线程，之间是互相独立的，“同时运行”，也就是说：每一个线程，都有自己的栈。如下图示：



18.2 Linux 系统对中断处理的演进

从2005年我接触Linux到现在15年了,Linux中断系统的变化并不大。比较重要的就是引入了 threaded irq: 使用内核线程来处理中断。

Linux 系统中有硬件中断, 也有软件中断。

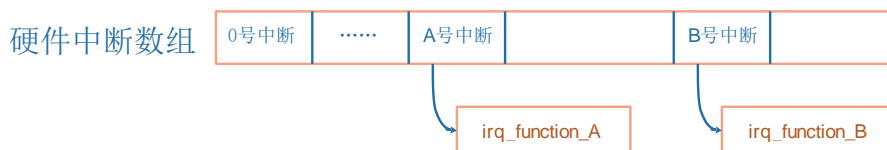
对硬件中断的处理有2个原则: 不能嵌套, 越快越好。

参考资料: <https://blog.csdn.net/myarrow/article/details/9287169>

18.2.1 Linux 对中断的扩展: 硬件中断、软件中断

Linux 系统把中断的意义扩展了, 对于按键中断等硬件产生的中断, 称之为“硬件中断”(hard irq)。每个硬件中断都有对应的处理函数, 比如按键中断、网卡中断的处理函数肯定不一样。

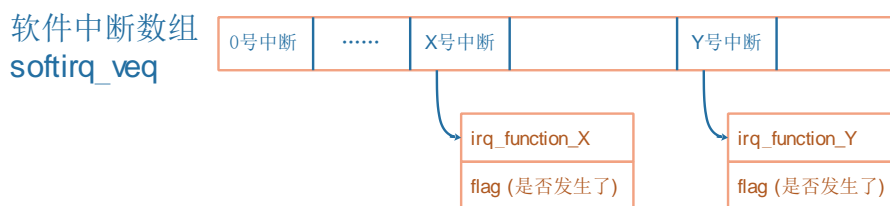
为方便理解, 你可以先认为对硬件中断的处理是用数组来实现的, 数组里存放的是函数指针:



注意: 上图是简化的, Linux 中这个数组复杂多了。

当发生 A 中断时, 对应的 irq_function_A 函数被调用。硬件导致该函数被调用。

相对的, 还可以人为地制造中断: 软件中断(soft irq), 如下图所示:



注意: 上图是简化的, Linux 中这个数组复杂多了。

问题来了:

a. 软件中断何时生产?

由软件决定, 对于 X 号软件中断, 只需要把它的 flag 设置为 1 就表示发生了该中断。

b. 软件中断何时处理?

软件中断嘛, 并不是那么十万火急, 有空再处理它好了。

什么时候有空? 不能让它一直等吧?

Linux 系统中，各种硬件中断频繁发生，至少定时器中断每 10ms 发生一次，那取个巧？
在处理完硬件中断后，再去处理软件中断？就这么办！

有哪些软件中断？

查内核源码 include/linux/interrupt.h

```
enum
{
    HI_SOFTIRQ=0,
    TIMER_SOFTIRQ,
    NET_TX_SOFTIRQ,
    NET_RX_SOFTIRQ,
    BLOCK_SOFTIRQ,
    IRQ_POLL_SOFTIRQ,
    TASKLET_SOFTIRQ,
    SCHED_SOFTIRQ,
    HRTIMER_SOFTIRQ, /* Unused, but kept as tools rely on the
                     numbering. Sigh! */
    RCU_SOFTIRQ,      /* Preferable RCU should always be the last softirq */
    NR_SOFTIRQS
};
```

怎么触发软件中断？最核心的函数是 raise_softirq，简单地理解就是设置 softirq_vec[nr] 的标记位：

```
extern void raise_softirq(unsigned int nr);
```

怎么设置软件中断的处理函数：

```
extern void open_softirq(int nr, void (*action)(struct softirq_action *));
```

后面讲到的中断下半部 tasklet 就是使用软件中断实现的。

18.2.2 中断处理原则 1：不能嵌套

官方资料：中断处理不能嵌套

<https://git.kernel.org/pub/scm/linux/kernel/git/torvalds/linux.git/commit/?id=e58aa3d2d0>

CC

中断处理函数需要调用 C 函数，这就需要用到栈。

中断 A 正在处理的过程中，假设又发生了中断 B，那么在栈里要保存 A 的现场，然后处理 B。

在处理 B 的过程中又发生了中断 C，那么在栈里要保存 B 的现场，然后处理 C。

如果中断嵌套突然暴发，那么栈将越来越大，栈终将耗尽。

所以，为了防止这种情况发生，也是为了简单化中断的处理，在 Linux 系统上中断无法嵌套：即当前中断 A 没处理完之前，不会响应另一个中断 B(即使它的优先级更高)。

18.2.3 中断处理原则 2：越快越好

妈妈在家中照顾小孩时，门铃响起，她开门取快递：这就是中断的处理。她取个快递敢花上半天吗？不怕小孩出意外吗？

同理，在 Linux 系统中，中断的处理也是越快越好。

在单芯片系统中，假设中断处理很慢，那应用程序在这段时间内就无法执行：系统显得很迟顿。

在 SMP 系统中，假设中断处理很慢，那么正在处理这个中断的 CPU 上的其他线程也无法执行。

在中断的处理过程中，该 CPU 是不能进行进程调度的，所以中断的处理要越快越好，尽早让其他中断能被处理——进程调度靠定时器中断来实现。

在 Linux 系统中使用中断是挺简单的，为某个中断 `irq` 注册中断处理函数 `handler`，可以使用 `request_irq` 函数：

```
static inline int __must_check  
request_irq(unsigned int irq, irq_handler_t handler, unsigned long flags,  
            const char *name, void *dev)
```

在 `handler` 函数中，代码尽可能高效。

但是，处理某个中断要做的事情就是很多，没办法加快。比如对于按键中断，我们需要等待几十毫秒消除机械抖动。难道要在 `handler` 中等待吗？对于计算机来说，这可是一个段很长的时间。

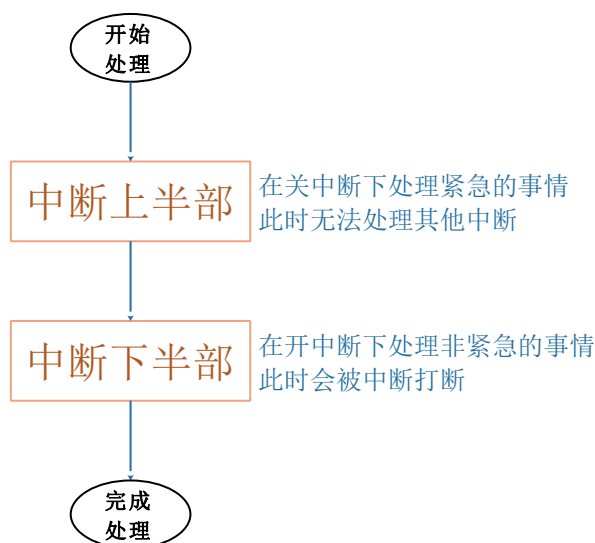
怎么办？

18.2.4 要处理的事情实在太多，拆分为：上半部、下半部

当一个中断要耗费很多时间来处理时，它的坏处是：在这段时间内，其他中断无法被处理。换句话说，在这段时间内，系统是关中断的。

如果某个中断就是要做那么多事，我们能不能把它拆分成两部分：紧急的、不紧急的？

在 `handler` 函数里只做紧急的事，然后就重新开中断，让系统得以正常运行；那些不紧急的事，以后再处理，处理时是开中断的。



中断下半部的实现有很多种方法，讲 2 种主要的：tasklet(小任务)、work queue(工作队列)。

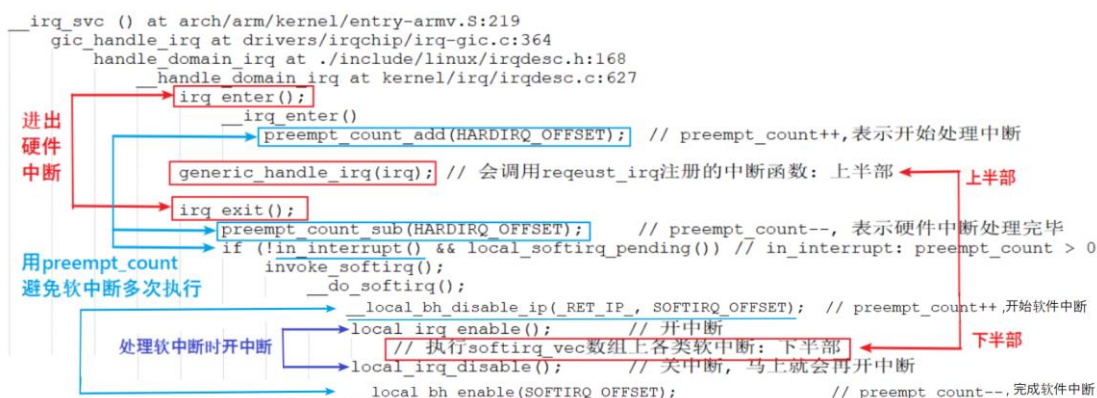
18.2.5 下半部要做的事情耗时不是太长：tasklet

假设我们把中断分为上半部、下半部。发生中断时，上半部下半部的代码何时、如何被调用？

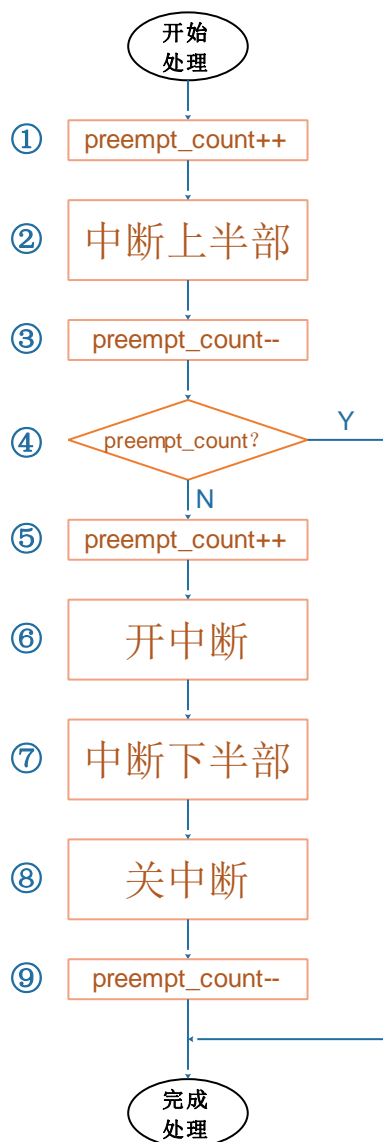
当下半部比较耗时但是能忍受，并且它的处理比较简单时，可以用 tasklet 来处理下半部。tasklet 是使用软件中断来实现。

```
enum
{
    HI_SOFTIRQ=0,
    TIMER_SOFTIRQ,
    NET_TX_SOFTIRQ,
    NET_RX_SOFTIRQ,
    BLOCK_SOFTIRQ,
    IRQ_POLL_SOFTIRQ,
    TASKLET_SOFTIRQ, ← tasklet软件中断, 用来处理中断下半部
    SCHED_SOFTIRQ,
    HRTIMER_SOFTIRQ, /* Unused, but kept as tools rely on the
                      numbering. Sigh! */
    RCU_SOFTIRQ, /* Preferable RCU should always be the last softirq */
    NR_SOFTIRQS
};
```

写字太多，不如贴代码，代码一目了然：



使用流程图简化一下：



假设硬件中断 A 的上半部函数为 `irq_top_half_A`，下半部为 `irq_bottom_half_A`。
使用情景化的分析，才能理解上述代码的精华。

a. 硬件中断 A 处理过程中，没有其他中断发生：

一开始，`preempt_count = 0`；

上述流程图①～⑨依次执行，上半部、下半部的代码各执行一次。

b. 硬件中断 A 处理过程中，又再次发生了中断 A：

一开始，`preempt_count = 0`；

执行到第⑥时，一开中断后，中断 A 又再次使得 CPU 跳到中断向量表。

注意：这时 `preempt_count` 等于 1，并且中断下半部的代码并未执行。

CPU 又从①开始再次执行中断 A 的上半部代码：

在第①步 `preempt_count` 等于 2；

在第③步 `preempt_count` 等于 1；

在第④步发现 `preempt_count` 等于 1，所以直接结束当前第 2 次中断的处理；

注意：重点来了，第 2 次中断发生后，打断了第一次中断的第⑦步处理。当第 2 次中断处理完毕，CPU 会继续去执行第⑦步。

可以看到，发生 2 次硬件中断 A 时，它的上半部代码执行了 2 次，但是下半部代码只执行了一次。所以，同一个中断的上半部、下半部，在执行时是多对一的关系。

c. 硬件中断 A 处理过程中，又再次发生了中断 B：

一开始，`preempt_count = 0`；

执行到第⑥时，一开中断后，中断 B 又再次使得 CPU 跳到中断向量表。

注意：这时 `preempt_count` 等于 1，并且中断 A 下半部的代码并未执行。

CPU 又从①开始再次执行中断 B 的上半部代码：

在第①步 `preempt_count` 等于 2；

在第③步 `preempt_count` 等于 1；

在第④步发现 `preempt_count` 等于 1，所以直接结束当前第 2 次中断的处理；

注意：重点来了，第 2 次中断发生后，打断了第一次中断 A 的第⑦步处理。当第 2 次中断 B 处理完毕，CPU 会继续去执行第⑦步。

在第⑦步里，它会去执行中断 A 的下半部，也会去执行中断 B 的下半部。

所以，多个中断的下半部，是汇集在一起处理的。

总结：

- 中断的处理可以分为上半部，下半部
- 中断上半部，用来处理紧急的事，它是在关中断的状态下执行的
- 中断下半部，用来处理耗时的、不那么紧急的事，它是在开中断的状态下执行的
- 中断下半部执行时，有可能会被多次打断，有可能会再次发生同一个中断
- 中断上半部执行完后，触发中断下半部的处理
- 中断上半部、下半部的执行过程中，不能休眠：中断休眠的话，以后谁来调度进程啊？

18.2.6 下半部要做的事情太多并且很复杂：工作队列

在中断下半部的执行过程中，虽然是开中断的，期间可以处理各类中断。但是毕竟整个中断的处理还没走完，这期间 APP 是无法执行的。

假设下半部要执行 1、2 分钟，在这 1、2 分钟里 APP 都是无法响应的。

这谁受得了？

所以，如果中断要做的事情实在太耗时，那就不能用软件中断来做，而应该用内核线程来做：在中断上半部唤醒内核线程。内核线程和 APP 都一样竞争执行，APP 有机会执行，系统不会卡顿。

这个内核线程是系统帮我们创建的，一般是 `kworker` 线程，内核中有很多这样的线程：

```
book@book-virtual-machine:~$ ps -A |grep kworker
  4 ?          00:00:00 kworker/0:0H
 18 ?          00:00:00 kworker/1:0H
 24 ?          00:00:00 kworker/2:0H
 30 ?          00:00:00 kworker/3:0H
 36 ?          00:00:00 kworker/4:0H
 42 ?          00:00:00 kworker/5:0H
```

kworker 线程要去“工作队列” (work queue) 上取出一个一个“工作” (work)，来执行它里面的函数。那我们怎么使用 work、work queue 呢？

a. 创建 work:

你得先写出一个函数，然后用这个函数填充一个 work 结构体。比如：

```
static DECLARE_WORK(aer_recover_work, aer_recover_work_func);
```

work结构体 函数

b. 要执行这个函数时，把 work 提交给 work queue 就可以了：

```
schedule_work(&aer_recover_work);
```

上述函数会把 work 提供给系统默认的 work queue: system_wq，它是一个队列。

c. 谁来执行 work 中的函数？

不用我们管，schedule_work 函数不仅仅是把 work 放入队列，还会把 kworker 线程唤醒。此线程抢到时间运行时，它就会从队列中取出 work，执行里面的函数。

d. 谁把 work 提交给 work queue？

在中断场景中，可以在中断上半部调用 schedule_work 函数。

总结：

- 很耗时的中断处理，应该放到线程里去
- 可以使用 work、work queue
- 在中断上半部调用 schedule_work 函数，触发 work 的处理
- 既然是在线程中运行，那对应的函数可以休眠。

18.2.7 新技术：threaded irq

使用线程来处理中断，并不是什么新鲜事。使用 work 就可以实现，但是需要定义 work、调用 schedule_work，好麻烦啊。

太懒了太懒了，就这 2 步你们都不愿意做。

好，内核是为懒人服务的，再杀出一个函数：

```
extern int __must_check request_threaded_irq(unsigned int irq, irq_handler_t handler,
                                             irq_handler_t thread_fn,
                                             unsigned long flags, const char *name, void *dev);
```

哪个中断？ 上半部函数，可以为空

线程里运行的函数

你可以只提供 `thread_fn`，系统会为这个函数创建一个内核线程。发生中断时，内核线程就会执行这个函数。

说你懒是开玩笑，内核开发者也不会那么在乎懒人。

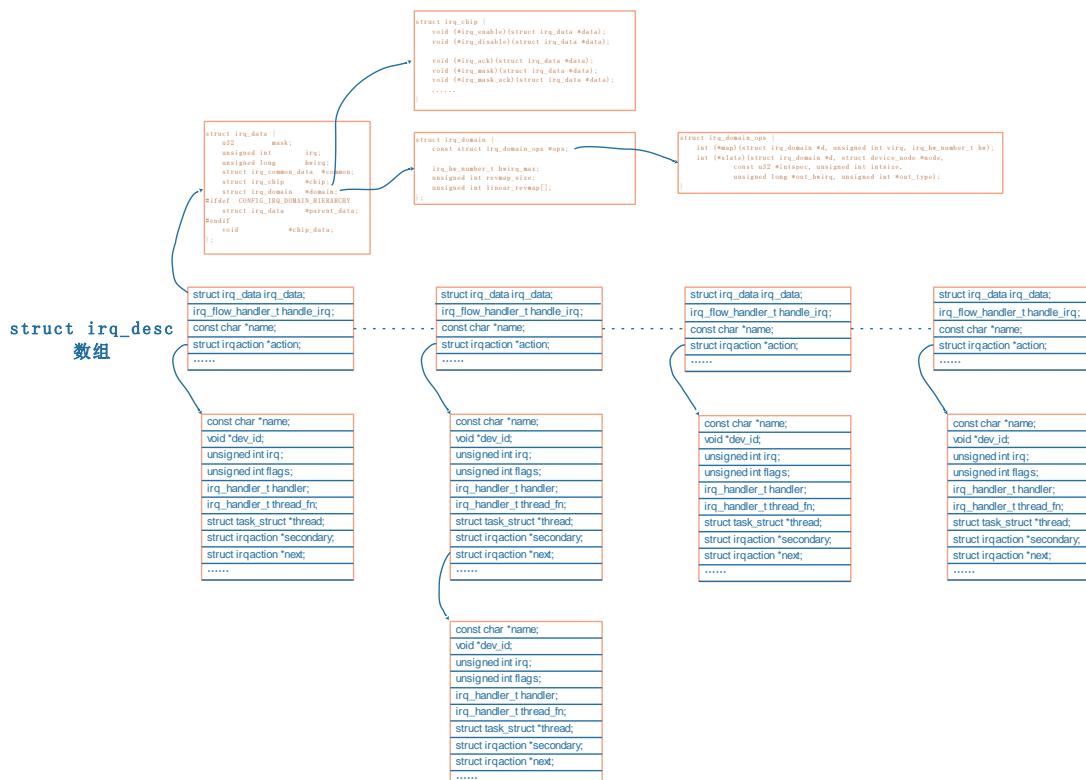
以前用 work 来线程化地处理中断，一个 worker 线程只能由一个 CPU 执行，多个中断的 work 都由同一个 worker 线程来处理，在单 CPU 系统中也只能忍着了。但是在 SMP 系统中，明明有那么多 CPU 空着，你偏偏让多个中断挤在这个 CPU 上？

新技术 `threaded_irq`，为每一个中断都创建一个内核线程；多个中断的内核线程可以分配到多个 CPU 上执行，这提高了效率。

18.3 Linux 中断系统中的重要数据结构

本节内容，可以从 `request_irq(include/linux/interrupt.h)` 函数一路分析得到。

能弄清楚下面这个图，对 Linux 中断系统的掌握也基本到位了。



最核心的结构体是 `irq_desc`，之前为了易于理解，我们说在 Linux 内核中有一个中断数组，对于每一个硬件中断，都有一个数组项，这个数组就是 `irq_desc` 数组。

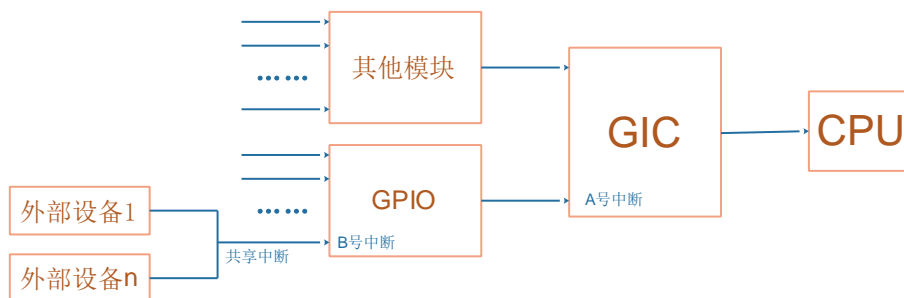
注意：如果内核配置了 CONFIG_SPARSE_IRQ，那么它就会用基数树(radix tree)来代替 irq_desc 数组。SPARSE 的意思是“稀疏”，假设大小为 1000 的数组中只用到 2 个数组项，那不是浪费嘛？所以在中断比较“稀疏”的情况下可以用基数树来代替数组。

18.3.1 irq_desc 数组

irq_desc 结构体在 include/linux/irqdesc.h 中定义，主要内容如下图：

```
struct irq_data irq_data;  
irq_flow_handler_t handle_irq;  
const char *name;  
struct irqaction *action;  
.....
```

每一个 irq_desc 数组项中都有一个函数：handle_irq，还有一个 action 链表。要理解它们，需要先看中断结构图：



外部设备 1、外部设备 n 共享一个 GPIO 中断 B，多个 GPIO 中断汇聚到 GIC(通用中断控制器)的 A 号中断，GIC 再去中断 CPU。那么软件处理时就是反过来，先读取 GIC 获得中断号 A，再细分出 GPIO 中断 B，最后判断是哪一个外部芯片发生了中断。

所以，中断的处理函数来源有三：

① GIC 的处理函数：

假设 irq_desc[A].handle_irq 是 XXX_gpio_irq_handler(XXX 指厂家)，这个函数需要读取芯片的 GPIO 控制器，细分发生的是哪一个 GPIO 中断(假设是 B)，再去调用 irq_desc[B].handle_irq。

注意：irq_desc[A].handle_irq 细分出中断后 B，调用对应的 irq_desc[B].handle_irq。

显然中断 A 是 CPU 感受到的顶层的中断，GIC 中断 CPU 时，CPU 读取 GIC 状态得到中断 A。

② 模块的中断处理函数：

比如对于 GPIO 模块向 GIC 发出的中断 B，它的处理函数是 `irq_desc[B].handle_irq`。

BSP 开发人员会设置对应的处理函数，一般是 `handle_level_irq` 或 `handle_edge_irq`，从名字上看是用来处理电平触发的中断、边沿触发的中断。

注意：导致 GPIO 中断 B 发生的原因很多，可能是外部设备 1，可能是外部设备 n，可能只是某一个设备，也可能是多个设备。所以 `irq_desc[B].handle_irq` 会调用某个链表里的函数，这些函数由外部设备提供。这些函数自行判断该中断是否自己产生，若是则处理。

③ 外部设备提供的处理函数：

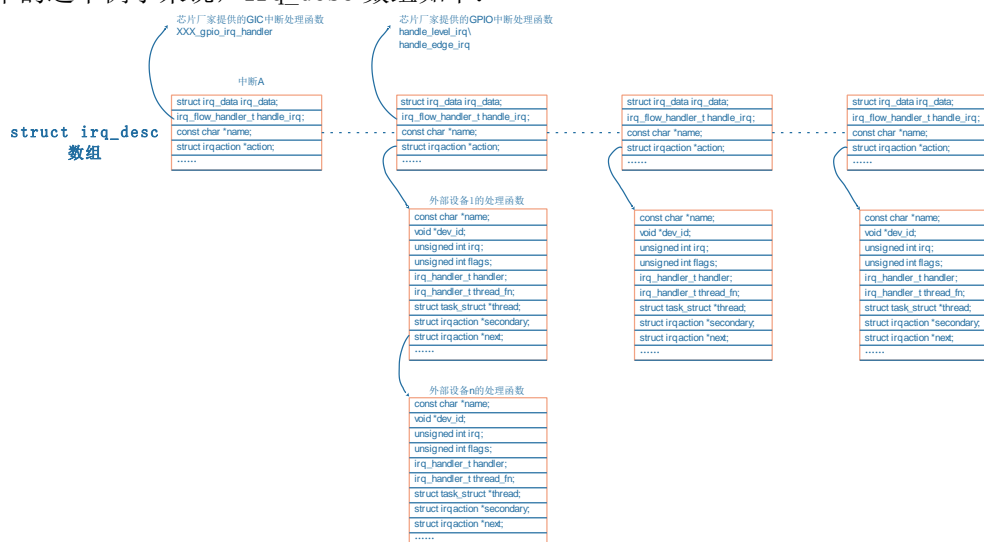
这里说的“外部设备”可能是芯片，也可能总是简单的按键。它们的处理函数由自己驱动程序提供，这是最熟悉这个设备的“人”：它知道如何判断设备是否发生了中断，如何处理中断。

对于共享中断，比如 GPIO 中断 B，它的中断来源可能有多个，每个中断源对应一个中断处理函数。所以 `irq_desc[B]` 中应该有一个链表，存放着多个中断源的处理函数。

一旦程序确定发生了 GPIO 中断 B，那么就会从链表里把那些函数取出来，一一执行。

这个链表就是 action 链表。

对于我们举的这个例子来说，`irq_desc` 数组如下：



18.3.2 irqaction 结构体

irqaction 结构体在 `include/linux/interrupt.h` 中定义，主要内容如下图：

```
const char *name;
void *dev_id;
unsigned int irq;
unsigned int flags;
irq_handler_t handler;
irq_handler_t thread_fn;
struct task_struct *thread;
struct irqaction *secondary;
struct irqaction *next;
.....
```


当调用 `request_irq`、`request_threaded_irq` 注册中断处理函数时，内核就会构造一个 `irqaction` 结构体。在里面保存 `name`、`dev_id` 等，最重要的是 `handler`、`thread_fn`、`thread`。

`handler` 是中断处理的上半部函数，用来处理紧急的事情。

`thread_fn` 对应一个内核线程 `thread`，当 `handler` 执行完毕，Linux 内核会唤醒对应的内核线程。在内核线程里，会调用 `thread_fn` 函数。

可以提供 `handler` 而不提供 `thread_fn`，就退化为一般的 `request_irq` 函数。

可以不提供 `handler` 只提供 `thread_fn`，完全由内核线程来处理中断。

也可以既提供 `handler` 也提供 `thread_fn`，这就是中断上半部、下半部。

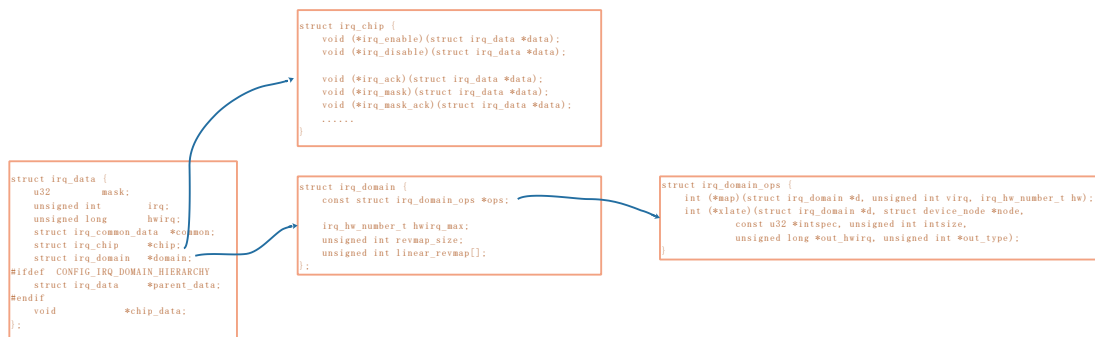
里面还有一个名为 `secondary` 的 `irqaction` 结构体，它的作用以后再分析。

在 `request_irq` 时可以传入 `dev_id`，为何需要 `dev_id`？作用有 2：

- ① 中断处理函数执行时，可以使用 `dev_id`
 - ② 卸载中断时要传入 `dev_id`，这样才能在 `action` 链表中根据 `dev_id` 找到对应项
- 所以在共享中断中必须提供 `dev_id`，非共享中断可以不提供。

18.3.3 irq_data 结构体

`irq_data` 结构体在 `include/linux/irq.h` 中定义，主要内容如下图：



它就是个中转站，里面有 `irq_chip` 指针 `irq_domain` 指针，都是指向别的结构体。

比较有意思的是 `irq`、`hwirq`，`irq` 是软件中断号，`hwirq` 是硬件中断号。比如上面我们举的例子，在 GPIO 中断 B 是软件中断号，可以找到 `irq_desc[B]` 这个数组项；GPIO 里的第 x 号中断，这就是 `hwirq`。

谁来建立 `irq`、`hwirq` 之间的联系呢？由 `irq_domain` 来建立。`irq_domain` 会把本地的 `hwirq` 映射为全局的 `irq`，什么意思？比如 GPIO 控制器里有第 1 号中断，UART 模块里也有第 1 号中断，这两个“第 1 号中断”是不一样的，它们属于不同的“域”——`irq_domain`。

18.3.4 irq_domain 结构体

`irq_domain` 结构体在 `include/linux/irqdomain.h` 中定义，主要内容如下图：

```
struct irq_domain {
    const struct irq_domain_ops *ops;
    irq_hw_number_t hwirq_max;
    unsigned int revmap_size;
    unsigned int linear_revmap[];
};

struct irq_domain_ops {
    int (*map)(struct irq_domain *d, unsigned int virq, irq_hw_number_t hw);
    int (*xlate)(struct irq_domain *d, struct device_node *node,
        const u32 *intspec, unsigned int intsize,
        unsigned long *out_hwirq, unsigned int *out_type);
};
```

当我们后面从设备树讲起，如何在设备树中指定中断，设备树的中断如何被转换为 irq 时，irq_domain 将会起到极大的作用。

这里基于入门的解度简单讲讲，在设备树中你会看到这样的属性：

```
interrupt-parent = <&gpio1>;
interrupts = <5 IRQ_TYPE_EDGE_RISING>;
```

它表示要使用 gpio1 里的第 5 号中断，hwirq 就是 5。

但是我们在驱动中会使用 request_irq(irq, handler) 这样的函数来注册中断，irq 是什么？它是软件中断号，它应该从“gpio1 的第 5 号中断”转换得来。

谁把 hwirq 转换为 irq？由 gpio1 的相关数据结构，就是 gpio1 对应的 irq_domain 结构体。

irq_domain 结构体中有一个 irq_domain_ops 结构体，里面有各种操作函数，主要是：

① xlate

用来解析设备树的中断属性，提取出 hwirq、type 等信息。

② map

把 hwirq 转换为 irq。

18.3.5 irq_chip 结构体

irq_chip 结构体在 include/linux/irq.h 中定义，主要内容如下图：

```
struct irq_chip {
    void (*irq_enable)(struct irq_data *data);
    void (*irq_disable)(struct irq_data *data);

    void (*irq_ack)(struct irq_data *data);
    void (*irq_mask)(struct irq_data *data);
    void (*irq_mask_ack)(struct irq_data *data);
    .....
};
```

这个结构体跟“chip”即芯片相关，里面各成员的作用在头文件中也列得很清楚，摘录部分如下：

```
* @irq_startup: start up the interrupt (defaults to ->enable if NULL)
* @irq_shutdown: shut down the interrupt (defaults to ->disable if NULL)
* @irq_enable: enable the interrupt (defaults to chip->unmask if NULL)
* @irq_disable: disable the interrupt
* @irq_ack: start of a new interrupt
* @irq_mask: mask an interrupt source
* @irq_mask_ack: ack and mask an interrupt source
* @irq_unmask: unmask an interrupt source
* @irq_eoi: end of interrupt
```

我们在 request_irq 后，并不需要手工去使能中断，原因就是系统调用对应的 irq_chip 里的函数帮我们使能了中断。

我们提供的中断处理函数中，也不需要执行主芯片相关的清中断操作，也是系统帮我们调用 irq_chip 中的相关函数。

但是对于外部设备相关的清中断操作，还是需要我们自己做的。

就像上面图里的“外部设备 1”、“外部设备 n”，外设备千变万化，内核里可没有对应的清除中断操作。

18.4 在设备树中指定中断_在代码中获得中断

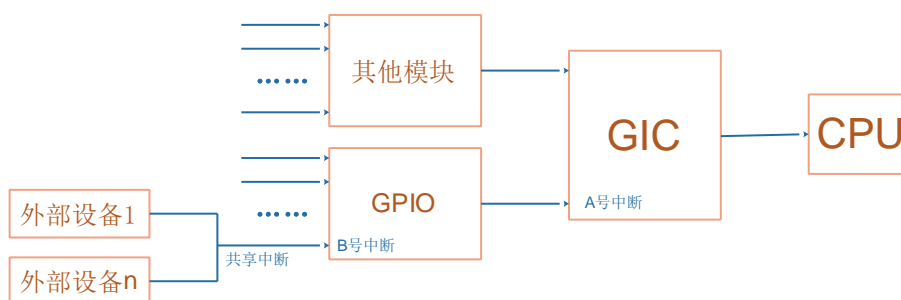
18.4.1 设备树里中断节点的语法

参考文档：

内核 Documentation\devicetree\bindings\interrupt-controller\interrupts.txt

18.4.4.1 设备树里的中断控制器

中断的硬件框图如下：



在硬件上，“中断控制器”只有 GIC 这一个，但是我们在软件上也可以把上图中的“GPIO”称为“中断控制器”。很多芯片有多个 GPIO 模块，比如 GPIO1、GPIO2 等等。所以软件上的“中断控制器”就有很多个：GIC、GPIO1、GPIO2 等等。

GPIO1 连接到 GIC，GPIO2 连接到 GIC，所以 GPIO1 的父亲是 GIC，GPIO2 的父亲是 GIC。

假设 GPIO1 有 32 个中断源，但是它把其中的 16 个汇聚起来向 GIC 发出一个中断，把另外 16 个汇聚起来向 GIC 发出另一个中断。这就意味着 GPIO1 会用到 GIC 的两个中断，会涉及 GIC 里的 2 个 hwirq。

这些层级关系、中断号(hwirq)，都会在设备树中有所体现。

在设备树中，中断控制器节点中必须有一个属性：interrupt-controller，表明它是“中断控制器”。还必须有一个属性：#interrupt-cells，表明引用这个中断控制器的话需要多少个 cell。

#interrupt-cells 的值一般有如下取值：

① #interrupt-cells=<1>

别的节点要使用这个中断控制器时，只需要一个 cell 来表明使用“哪一个中断”。

② #interrupt-cells=<2>

别的节点要使用这个中断控制器时，需要一个 cell 来表明使用“哪一个中断”；

还需要另一个 cell 来描述中断，一般是表明触发类型：

第 2 个 cell 的 bits[3:0] 用来表示中断触发类型(trigger type and level flags)：

1 = low-to-high edge triggered, 上升沿触发

2 = high-to-low edge triggered, 下降沿触发

4 = active high level-sensitive, 高电平触发

8 = active low level-sensitive, 低电平触发

示例如下：

```
vic: intc@10140000 {
    compatible = "arm,versatile-vic";
    interrupt-controller;
    #interrupt-cells = <1>;
    reg = <0x10140000 0x1000>;
};
```

如果中断控制器有级联关系，下级的中断控制器还需要表明它的“interrupt-parent”是谁，用了“interrupt-parent”中的哪一个“interrupts”，请看下一小节。

18.4.4.2 设备树里使用中断

一个外设，它的中断信号接到哪个“中断控制器”的哪个“中断引脚”，这个中断的触发方式是怎样的？这 3 个问题，在设备树里使用中断时，都要有所体现。

① interrupt-parent=<&XXXX>

你要用哪一个中断控制器里的中断？

② interrupts

你要用哪一个中断？

Interrupts 里要用几个 cell，由 interrupt-parent 对应的中断控制器决定。在中断控制器里有“#interrupt-cells”属性，它指明了要用几个 cell 来描述中断。

比如：

```
i2c@7000c000 {
    gpioext: gpio-adnp@41 {
        compatible = "ad,gpio-adnp";
```

```
interrupt-parent = <&gpio>;
interrupts = <160 1>;

gpio-controller;
#gpio-cells = <1>;

interrupt-controller;
#interrupt-cells = <2>;
};
.....
};
```

③ 新写法: interrupts-extended

一个“interrupts-extended”属性就可以既指定“interrupt-parent”，也指定“interrupts”，比如：
interrupts-extended = <&intc1 5 1>, <&intc2 1 0>;

18.4.2 设备树里中断节点的示例

以 100ASK_IMX6ULL 开发板为例，在 arch/arm/boot/dts 目录下可以看到 2 个文件：imx6ull.dtsi、100ask_imx6ull-14x14.dts，把里面有关中断的部分内容抽取出来。

```
intc: interrupt-controller@00a01000 {
    compatible = "arm,cortex-a7-gic";
    #interrupt-cells = <3>;
    interrupt-controller;
    reg = <0x00a01000 0x1000>,
        <0x00a02000 0x100>;
};

soc {
    #address-cells = <1>;
    #size-cells = <1>;
    compatible = "simple-bus";
    interrupt-parent = <&gpc>;

    gpc: gpc@020dc000 {
        compatible = "fsl,imx6ul-gpc", "fsl,imx6q-gpc";
        reg = <0x020dc000 0x4000>;
        interrupt-controller;
        #interrupt-cells = <3>;
        interrupts = <GIC_SPI 89 IRQ_TYPE_LEVEL_HIGH>;
        interrupt-parent = <&intc>;
        fsl,mf-mix-wakeup-irq = <0xfc00000 0x7d00 0x0 0x1400640>;
    };

    gpio1: gpio@0209c000 {
        compatible = "fsl,imx6ul-gpio", "fsl,imx35-gpio";
        reg = <0x0209c000 0x4000>;
        interrupts = <GIC_SPI 66 IRQ_TYPE_LEVEL_HIGH>,
            <GIC_SPI 67 IRQ_TYPE_LEVEL_HIGH>;
        gpio-controller;
        #gpio-cells = <2>;
        interrupt-controller;
        #interrupt-cells = <2>;
    };

    spidev: icm20608@0 {
        compatible = "invensense,icm20608";
        interrupt-parent = <&gpio1>;
        interrupts = <1 1>;
        spi-max-frequency = <8000000>;
        reg = <0>;
    };
};
```

drivers/irqchip/irq-gic.c

arch/arm/mach-imx/gpc.c

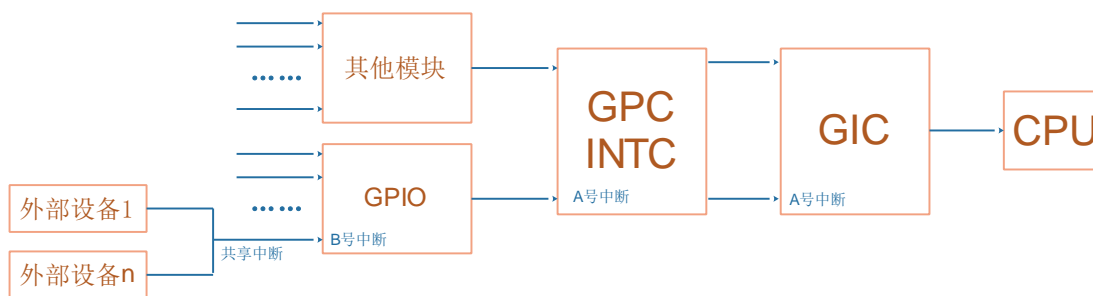
drivers/gpio/gpio-mxc.c

drivers/iio/imu/inv_mpu6050/inv_mpu_spi.c

以上都是厂家BSP工程师实现的(imx6ull.dtsi)

使用

从设备树反推 IMX6ULL 的中断体系，如下，比之前的框图多了一个“GPC INTC”：



GPC INTC 的英文是：General Power Controller, Interrupt Controller。它提供中断屏蔽、中断状态查询功能，实际上这些功能在 GIC 里也实现了，个人觉得有点多余。除此之外，它还提供唤醒功能，这才是保留它的原因。

18.4.3 在代码中获得中断

之前我们提到过，设备树中的节点有些能被转换为内核里的 `platform_device`，有些不能，回顾如下：

A. 根节点下含有 `compatible` 属性的子节点，会转换为 `platform_device`

B. 含有特定 `compatible` 属性的节点子节点，会转换为 `platform_device`

如果一个节点的 `compatible` 属性，它的值是这 4 者之一：“simple-bus”, “simple-mfd”, “isa”, “arm, amba-bus”,

那么它的子节点(需含 `compatible` 属性)也可以转换为 `platform_device`。

C. 总线 I2C、SPI 节点下的子节点：不转换为 `platform_device`

某个总线下子节点，应该交给对应的总线驱动程序来处理，它们不应该被转换为 `platform_device`。

18.4.3.1 对于 `platform_device`

一个节点能被转换为 `platform_device`，如果它的设备树里指定了中断属性，那么可以从 `platform_device` 中获得“中断资源”，函数如下，可以使用下列函数获得 `IORESOURCE_IRQ` 资源，即中断号：

```
/**
 * platform_get_resource - get a resource for a device
 * @dev: platform device
 * @type: resource type // 取哪类资源? IORESOURCE_MEM、IORESOURCE_REG
 * // IORESOURCE_IRQ 等
 * @num: resource index // 这类资源中的哪一个?
 */
struct resource *platform_get_resource(struct platform_device *dev,
                                     unsigned int type, unsigned int num);
```

18.4.3.2 对于 I2C 设备、SPI 设备

对于 I2C 设备节点，I2C 总线驱动在处理设备树里的 I2C 子节点时，也会处理其中的中断信息。一个 I2C 设备会被转换为一个 `i2c_client` 结构体，中断号会保存在 `i2c_client` 的 `irq` 成员里，代码如下 (`drivers/i2c/i2c-core.c`)：

```
static int i2c_device_probe(struct device *dev)
{
    struct i2c_client *client = i2c_verify_client(dev);
    struct i2c_driver *driver;
    int status;

    if (!client)
        return 0;

    if (!client->irq) {
        int irq = -ENOENT;

        if (dev->of_node) {
            irq = of_irq_get_byname(dev->of_node, "irq");
            if (irq == -EINVAL || irq == -ENODATA)
                irq = of_irq_get(dev->of_node, 0);
        } else if (ACPI_COMPANION(dev)) {
            irq = acpi_dev_gpio_irq_get(ACPI_COMPANION(dev), 0);
        }
        if (irq == -EPROBE_DEFER)
            return irq;
        if (irq < 0)
            irq = 0;
    }
}
```

从设备树里解析出中断号

对于 SPI 设备节点，SPI 总线驱动在处理设备树里的 SPI 子节点时，也会处理其中的中断信息。一个 SPI 设备会被转换为一个 spi_device 结构体，中断号会保存在 spi_device 的 irq 成员里，代码如下 (drivers/spi/spi.c)：

```
static int spi_drv_probe(struct device *dev)
{
    const struct spi_driver *sdrv = to_spi_driver(dev->driver);
    struct spi_device *spi = to_spi_device(dev);
    int ret;

    ret = of_clk_set_defaults(dev->of_node, false);
    if (ret)
        return ret;

    if (dev->of_node) {
        spi->irq = of_irq_get(dev->of_node, 0);
        if (spi->irq == -EPROBE_DEFER)
            return -EPROBE_DEFER;
        if (spi->irq < 0)
            spi->irq = 0;
    }
}
```

从设备树里解析出中断

18.4.3.3 调用 of_irq_get 获得中断号

如果你的设备节点既不能转换为 platform_device，它也不是 I2C 设备，不是 SPI 设备，那么在驱动程序中可以自行调用 of_irq_get 函数去解析设备树，得到中断号。

18.4.3.4 对于 GPIO

参考：drivers/input/keyboard/gpio_keys.c

可以使用 gpio_to_irq 或 gpiod_to_irq 获得中断号。

举例，假设在设备树中有如下节点：

```
gpio-keys {
    compatible = "gpio-keys";
    pinctrl-names = "default";

    user {
        label = "User Button";
        gpios = <&gpio5 1 GPIO_ACTIVE_HIGH>;
        gpio-key,wakeup;
        linux,code = <KEY_1>;
    }
}
```

```
};  
};
```

那么可以使用下面的函数获得引脚和 flag:

```
button->gpio = of_get_gpio_flags(pp, 0, &flags);  
bdata->gpiod = gpio_to_desc(button->gpio);
```

再去使用 gpiod_to_irq 获得中断号:

```
irq = gpiod_to_irq(bdata->gpiod);
```


18.5 编写使用中断的按键驱动程序

写在前面的话：对于 GPIO 按键，我们并不需要去写驱动程序，使用内核自带的驱动程序 `drivers/input/keyboard/gpio_keys.c` 就可以，然后你需要做的只是修改设备树指定引脚及键值。

但是我还是要教你怎么从头写按键驱动，特别是如何使用中断。因为中断是引入其他基础知识的前提，后面要讲的这些内容都离不开中断：休眠-唤醒、POLL 机制、异步通知、定时器、中断的线程化处理。

这些基础知识是更复杂的驱动程序的基础要素，以后的复杂驱动也就是对硬件操作的封装彼此不同，但是用到的基础编程知识是一样的。

18.5.1 编程思路

18.5.1.1 设备树相关

查看原理图确定按键使用的引脚，再在设备树中添加节点，在节点里指定中断信息。

例子：

```
gpio_keys_100ask {
    compatible = "100ask,gpio_key";
    gpios = <&gpio5 1 GPIO_ACTIVE_HIGH
            &gpio4 14 GPIO_ACTIVE_HIGH>;
    pinctrl-names = "default";
    pinctrl-0 = <&key1_pinctrl
                &key2_pinctrl>;
};
```

18.5.1.2 驱动代码相关

首先要获得中断号，参考上面《18.4.3 在代码中获得中断》；

然后编写中断处理函数；

最后 `request_irq`。

18.5.2 先编写驱动程序

参考：内核源码 `drivers/input/keyboard/gpio_keys.c`

使用 GIT 命令载后，源码 `gpio_key_drv.c` 位于这个目录下：

```
01_all_series_quickstart\
  04_快速入门_正式开始\
    02_嵌入式 Linux 驱动开发基础知识\source\
      06_gpio_irq\
        01_simple\
```

18.5.2.1 从设备树获得 GPIO

```
count = of_gpio_count(node);
for (i = 0; i < count; i++)
    gpio_keys_100ask[i].gpio = of_get_gpio_flags(node, i, &flag);
```

18.5.2.1 从 GPIO 获得中断号

```
gpio_keys_100ask[i].irq = gpio_to_irq(gpio_keys_100ask[i].gpio);
```

18.5.2.2 申请中断

```
err = request_irq(gpio_keys_100ask[i].irq, gpio_key_isr, \
    IRQF_TRIGGER_RISING | IRQF_TRIGGER_FALLING, "100ask_gpio_key", &gpio_keys_100ask[i]);
```

18.5.2.3 中断函数

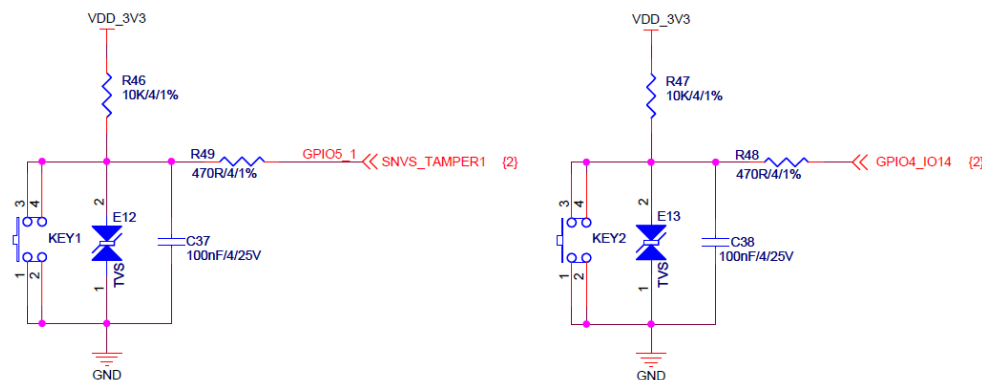
```
static irqreturn_t gpio_key_isr(int irq, void *dev_id)
{
    struct gpio_key *gpio_key = dev_id;
    int val;
    val = gpiod_get_value(gpio_key->gpiod);

    printk("key %d %d\n", gpio_key->gpio, val);

    return IRQ_HANDLED;
}
```

18.6 IMX6ULL 设备树修改及上机实验

18.6.1 查看原理图确定按键引脚

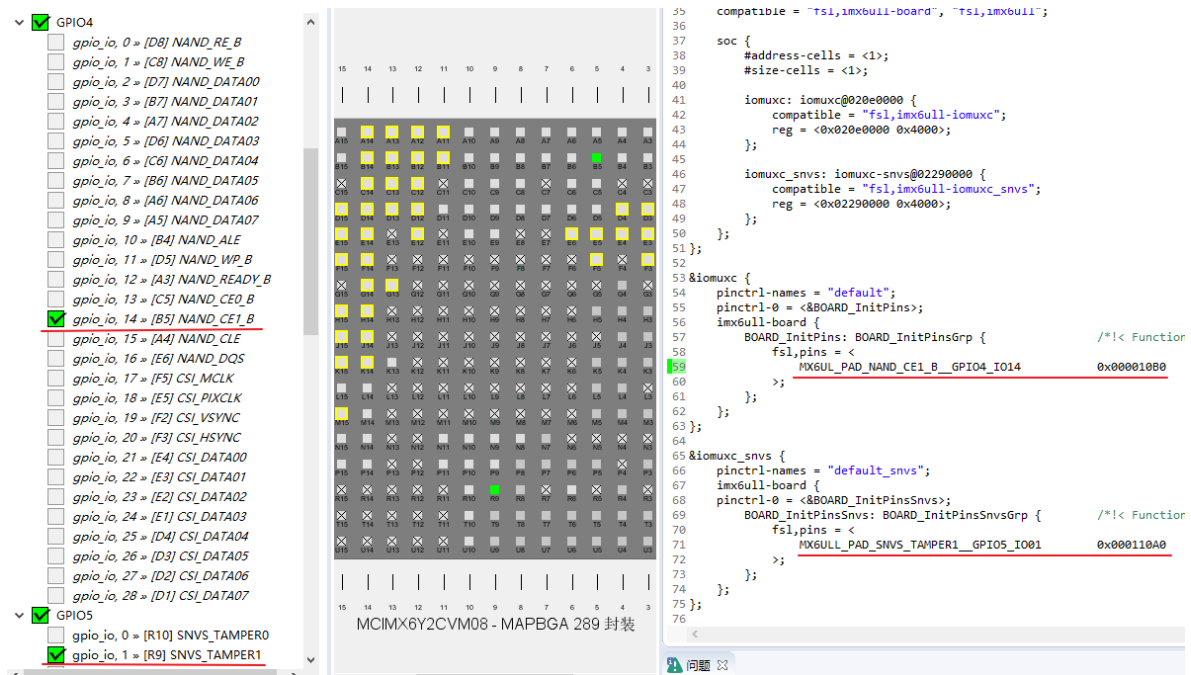


18.6.2 修改设备树

对于一个引脚要用作中断时，

- 要通过 PinCtrl 把它设置为 GPIO 功能；
- 表明自身：是哪一個 GPIO 模块里的哪一个引脚

运行 NXP 提供的图形化设备树配置工具“i.MX Pins Tool v6”，点击左侧选中 GPIO5_I001、GPIO4_I014，如下图所示：



按上图右侧去修改设备树 arch/arm/boot/dts/100ask_imx6ull-14x14.dts，修改结果放 GIT 中。
使用 GIT 命令载后，源码 100ask_imx6ull-14x14.dts 位于这个目录下：

```
01_all_series_quickstart\
04_快速入门_正式开始\
    02_嵌入式 Linux 驱动开发基础知识\source\
        06_gpio_irq\
            01_simple\
                device_tree\
```

主要内容摘录如下：

GPIO5_I001 的 pinctrl 定义：

```
&iomuxc_snvs {
    pinctrl-names = "default_snvs";
    pinctrl-0 = <&pinctrl_hog_2>;
    imx6ul-evk {
        key1_pinctrl: key1_pinctrl { /*!< Function assigned for the core: Cortex-A7[ca7] */
            fsl,pins = <
                MX6ULL_PAD_SNVS_TAMPER1__GPIO5_I001 0x000110A0
            >;
    };
};
```

GPIO4_I014 的 pinctrl 定义：

```
&iomuxc {
    pinctrl-names = "default";
    pinctrl-0 = <&pinctrl_hog_1>;
    imx6ul-evk {
```

```
key2_pinctrl: key2_pinctrl{ /*!< Function assigned for the core: Cortex-A7[ca7] */
    fsl,pins = <
        MX6UL_PAD_NAND_CE1_B__GPIO4_I014          0x000010B0
    >;
};
```

定义这 2 个按键的节点:

```
gpio_keys_100ask {
    compatible = "100ask,gpio_key";
    gpios = <&gpio5 1 GPIO_ACTIVE_HIGH
            &gpio4 14 GPIO_ACTIVE_HIGH>;
    pinctrl-names = "default";
    pinctrl-0 = <&key1_pinctrl
                &key2_pinctrl>;
};
```

把原来的 GPIO 按键节点禁止掉:

```
gpio-keys {
    compatible = "gpio-keys";
    pinctrl-names = "default";
    status = "disabled";    // 这句是新加的
```

18.6.3 上机实验

实验步骤如下:

1. 编译设备树, 把 100ask_imx6ull-14x14.dtb 放到板子的/boot 目录, 重启开发板。
2. 编译驱动程序, 安装驱动程序, 操作按键。

大概命令列出如下:

```
// 1. 在电脑上设置工具链
export ARCH=arm
export CROSS_COMPILE=arm-linux-gnueabi-
export PATH=$PATH:/home/book/100ask_imx6ull-sdk/ToolChain/gcc-linaro-6.2.1-2016.11-x86_64_arm-linux-gnueabi/bin

// 2. 进入内核目录后执行:
make dtbs    // 生成 arch/arm/boot/dts/100ask_imx6ull-14x14.dtb, 请把它放到板子的/boot 目录

// 3. 编译驱动: 先进入驱动程序目录, 执行 make 即可, 把生成的 gpio_key_drv.ko 放到开发板上

// 4. 重启开发板后, 在板子上执行:
echo "7 4 1 7" > /proc/sys/kernel/printk
insmod gpio_key_drv.ko
```

// 5. 按下、松开按键，可以看到输出信息：

```
[ 48.396584] key 110 0
[ 48.569403] key 110 1
[ 49.321805] key 129 0
[ 49.498734] key 129 1
```

参考资料

中断处理不能嵌套：

<https://git.kernel.org/pub/scm/linux/kernel/git/torvalds/linux.git/commit/?id=e58aa3d2d0cc>

cc

genirq: add threaded interrupt handler support

<https://git.kernel.org/pub/scm/linux/kernel/git/torvalds/linux.git/commit/?id=3aa551c9b4c40018f0e261a178e3d25478dc04a9>

Linux RT(2)－硬实时 Linux(RT-Preempt Patch)的中断线程化

<https://www.veryarm.com/110619.html>

Linux 中断管理 (1)Linux 中断管理机制

<https://www.cnblogs.com/arnoldlu/p/8659981.html>

```
Breakpoint 1, gpio_keys_gpio_isr (irq=200, dev_id=0x863e6930) at
drivers/input/keyboard/gpio_keys.c:393
393 {
(gdb) bt
#0 gpio_keys_gpio_isr (irq=200, dev_id=0x863e6930) at
drivers/input/keyboard/gpio_keys.c:393
#1 0x80270528 in __handle_irq_event_percpu (desc=0x8616e300, flags=0x86517edc) at
kernel/irq/handle.c:145
#2 0x802705cc in handle_irq_event_percpu (desc=0x8616e300) at kernel/irq/handle.c:185
#3 0x80270640 in handle_irq_event (desc=0x8616e300) at kernel/irq/handle.c:202
#4 0x802738e8 in handle_level_irq (desc=0x8616e300) at kernel/irq/chip.c:518
#5 0x8026f7f8 in generic_handle_irq_desc (desc=<optimized out>)
at ./include/linux/irqdesc.h:150
#6 generic_handle_irq (irq=<optimized out>) at kernel/irq/irqdesc.c:590
#7 0x805005e0 in mxc_gpio_irq_handler (port=0xc8, irq_stat=2252237104) at
drivers/gpio/gpio-mxc.c:274
#8 0x805006fc in mx3_gpio_irq_handler (desc=<optimized out>) at drivers/gpio/gpio-
mxc.c:291
#9 0x8026f7f8 in generic_handle_irq_desc (desc=<optimized out>)
at ./include/linux/irqdesc.h:150
#10 generic_handle_irq (irq=<optimized out>) at kernel/irq/irqdesc.c:590
```

```
#11 0x8026fd0c in __handle_domain_irq (domain=0x86006000, hwirq=32, lookup=true,
regs=0x86517fb0) at kernel/irq/irqdesc.c:627
#12 0x80201484 in handle_domain_irq (regs=<optimized out>, hwirq=<optimized out>,
domain=<optimized out>) at ./include/linux/irqdesc.h:168
#13 gic_handle_irq (regs=0xc8) at drivers/irqchip/irq-gic.c:364
#14 0x8020b704 in __irq_usr () at arch/arm/kernel/entry-armv.S:464
```