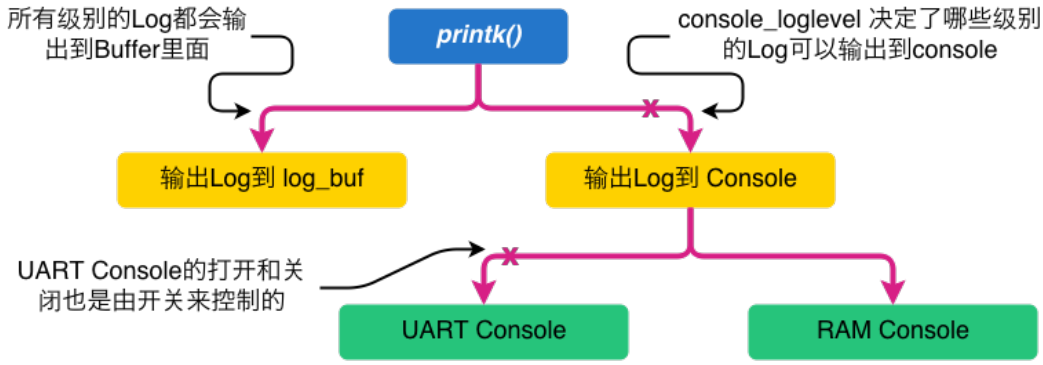
目录

1. Linux 相关日志的打印

1.1. printk

在开发 Linux device Driver 或者跟踪调试内核行为的时候经常要通过 Log API 来 trace 整个过程，Kernel API printk()是整个 Kernel Log 机制的基础 API，几乎所有的 Log 方式都是基于 printk 来实现的。

当然，利用 printk 还有一些需要注意的地方，在详细讲述之前先分析一下 printk()实现，大致流程如下图所示：



从上图可以看出，printk 的流程大致可以分为两步：

- 将所有 Log 输出到内核的 Log Buffer，该 Log Buffer 是一个循环缓冲区，其地址可以在内核中用 log_buf 变量访问
- 根据设定的 Log 级别决定是否将 Log 输出到 Console

基于以上内容，我们打印的 Log 最终会走向两个位置：

- Log Buffer：该 Buffer 里面的内容可以存储在/proc/kmsg
- Console：Console 的实现可以有很多，目前我们用到的有 UART Console（串口）和 RAM Console。通向 UART Console 的 Log 会在对应的 UART 端口打印出来。

对于 Console Log，不可避免的对系统性能有影响。所以对于 Console Log 设置了两道关卡：

- 第一个是对 Log 级别进行过滤，只能输出高优先级的 Log；
- 第二个是为 UART 设置单独的开关，在不必要的时候可以将其关闭以提高系统性能。这里提到了 Log 优先级，那什么是 Log 优先级呢？

1.1.1. dmesg 内核日志的查看

dmesg 是一个 Linux 命令，用于查看内核环缓冲区中的系统消息。它提供了一个逐条显示内核启动消息、硬件检测、设备驱动程序加载、内核模块加载、错误报告和其他与系统运行相关的信息的方法。dmesg 命令允许你查看系统在启动时以及运行时发生的事件和问题。

以下是一些使用 dmesg 命令的常见场景和用法：

❑ 查看最近的内核消息：你可以简单地在终端中运行 dmesg 命令，它将显示最近的内核消息，包括启动信息和运行时事件。

❑ 过滤消息：你可以使用管道操作符（|）将 dmesg 的输出传递给其他命令来过滤和查找特定类型的消息。例如，可以使用 dmesg | grep "error" 来仅显示包含 "error" 关键字的消息。

❑ 保存消息到文件：如果你希望将内核消息保存到文件以供后续查看，你可以将 dmesg 的输出重定向到文件，如 dmesg > messages.txt。

❑ 清除内核缓冲区：有时，内核消息缓冲区可能会被填满。你可以使用 dmesg -c 命令来清除缓冲区，重置计数器。

```
[root@imx6ull:~]# dmesg
[    3.303487] kobject: 'gpio-rc-recv' (8849ea00): kobject_uevent_env
[    3.303521] kobject: 'gpio-rc-recv' (8849ea00): fill_kobj_path: path = '/bus/platform/drivers/gpio-rc-recv'
[    3.303591] kobject: 'coda' (8849ea80): kobject_add_internal: parent: 'drivers', set: 'drivers'
[    3.304532] kobject: 'coda' (8849ea80): kobject_uevent_env
[    3.304563] kobject: 'coda' (8849ea80): fill_kobj_path: path = '/bus/platform/drivers/coda'
[    3.304640] kobject: 'soc-camera-pdrv' (8849eb00): kobject_add_internal: parent: 'drivers', set: 'drivers'
[    3.304855] kobject: 'soc-camera-pdrv' (8849eb00): kobject_uevent_env
[    3.304884] kobject: 'soc-camera-pdrv' (8849eb00): fill_kobj_path: path = '/bus/platform/drivers/soc-camera-pdrv'
[    3.304946] kobject: 'mxc_v4l2_output' (8849eb80): kobject_add_internal: parent: 'drivers', set: 'drivers'
[    3.305367] kobject: 'mxc_v4l2_output' (8849eb80): kobject_uevent_env
[    3.305397] kobject: 'mxc_v4l2_output' (8849eb80): fill_kobj_path: path = '/bus/platform/drivers/mxc_v4l2_output'
[    3.305461] kobject: 'pxp-v4l2' (8849ec00): kobject_add_internal: parent: 'drivers', set: 'drivers'
[    3.305999] kobject: 'video4linux' (8849ccc0): kobject_add_internal: parent: 'pxp_v4l2', set: '(null)'
[    3.306078] kobject: 'video0' (88493010): kobject_add_internal: parent: 'video4linux', set: 'devices'
[    3.306523] kobject: 'video0' (88493010): kobject_uevent_env
[    3.306561] kobject: 'video0' (88493010): fill_kobj_path: path = '/devices/soc0/pxp_v4l2/video4linux/video0'
[    3.306615] pxp-v4l2 pxp_v4l2: initialized
```

dmesg 的输出通常包括以下类型的信息：

❑ 内核启动信息：显示内核在启动时的消息，包括硬件检测、设备初始化等。

❑ 设备驱动程序信息：显示关于加载的设备驱动程序和设备的消息。

❑ 内核模块信息：如果有内核模块加载或卸载，相关的信息会被显示出来。

❑ 错误和警告：显示系统中的错误、警告和异常情况。

❑ 时间戳：每条消息通常都包括一个时间戳，显示消息产生的时间。

请注意，dmesg 命令只会显示内核缓冲区中的有限数量的最新消息。如果系统在重启之后运行了很长时间，一些早期的消息可能会被覆盖。因此，对于长期运行的系统，最好将重要的消息记录到文件中以供后续查看。

1.1.2. printk 的日志等级设置

printk()是在内核空间使用的，其作用和在用户空间使用 printf()一样，执行 dmesg 命令可以显示 printk()写入的行。根据所打印消息的重要性不同，可以选用 include/linux/kern_levels.h 中定义的八个级别的日志消息，下面将介绍它们的含义。

目录：100ask_imx6ull-sdk/Linux-4.9.88/include/linux/kern_levels.h

```
#define KERN_EMERG      KERN_SOH "0"    /* system is unusable */
#define KERN_ALERT      KERN_SOH "1"    /* action must be taken immediately */
#define KERN_CRIT       KERN_SOH "2"    /* critical conditions */
#define KERN_ERR        KERN_SOH "3"    /* error conditions */
#define KERN_WARNING    KERN_SOH "4"    /* warning conditions */
#define KERN_NOTICE     KERN_SOH "5"    /* normal but significant condition */
#define KERN_INFO       KERN_SOH "6"    /* informational */
#define KERN_DEBUG      KERN_SOH "7"    /* debug-level messages */

#define KERN_DEFAULT    KERN_SOH "d"    /* the default kernel loglevel */
```

以下代码显示如何打印内核消息和日志级别：

```
printk(KERN_ERR "This is an error\n");
```

如果省略调试级别（printk("This is an error\n")），则内核将根据

CONFIG_DEFAULT_MESSAGE_LOGLEVEL 配置选项（这是默认的内核日志级别）向该函数提供一个调试级别。

我们看一下 imx6 平台对应的默认的内核日志级别。

```
[root@imx6ull:~]# cat /proc/sys/kernel/printk
7       7       1       7
```

4 个值的含义依次如下：

- console_loglevel：当前 console 的 log 级别，只有更高优先级的 log 才被允许打印到 console；
- default_message_loglevel：当不指定 log 级别时，printk 默认使用的 log 级别；
- minimum_console_loglevel：console 能设定的最高 log 级别；
- default_console_loglevel：默认的 console 的 log 级别。

1.1.3. 如何屏蔽等级日志控制机制

```
static void console_cont_flush(char *text, size_t size)
{
        unsigned long flags;
        size_t len;

        raw_spin_lock_irqsave(&logbuf_lock, flags);

        if (!cont.len)
                goto out;
        /*
        if (suppress_message_printing(cont.level)) {
                cont.cons = cont.len;
                if (cont.flushed)
                        cont.len = 0;
                goto out;
        }
        */

        /*
         * We still queue earlier records, likely because the console was
         * busy. The earlier ones need to be printed before this one, we
         * did not flush any fragment so far, so just let it queue up.
         */
        if (console_seq < log_next_seq && !cont.cons)
                goto out;
```

```
static bool suppress_message_printing(int level)
{
        return (level >= console_loglevel && !ignore_loglevel);
}
```

1.1.4. printk 打印的基本用法

printk 函数的原型如下：

```
int printk(const char *format, ...);
```

- format 是格式化字符串，包含要打印的文本和占位符。占位符以 % 开头，指定要插入的数据类型。
- ... 表示可变参数列表，将根据格式字符串中的占位符进行替换。

以下是一些常见的格式说明符：

- %d：格式化整数
- %s：格式化字符串
- %c：格式化字符

- %x：格式化十六进制数

1.1.5. 如何在内核中使用 printk

1、包含头文件：
首先，您需要在内核代码文件中包含 <linux/kernel.h> 头文件。

```
#include <linux/kernel.h>
```

2、调用 printk：
在内核代码中，使用 printk 函数打印消息。例如：

```
int value = 42;
printk(KERN_INFO "This is an informational message. Value: %d\n", value);
```

3、选择适当的日志级别：
选择适当的日志级别：
printk 使用不同的日志级别来控制消息的显示。常见的日志级别有：

- KERN_ERR：错误消息
- KERN_WARNING：警告消息
- KERN_INFO：信息消息

在调用 printk 时，将适当的日志级别与消息一起使用。

1.2. printk 相关衍生函数

内核还提供了接口，我们就可以不用传入等级参数了。
接口定义位于： Linux-4.9.88/include/linux/printk.h

```
/*
 * These can be used to print at the various log levels.
 * All of these will print unconditionally, although note that pr_debug()
 * and other debug macros are compiled out unless either DEBUG is defined
 * or CONFIG_DYNAMIC_DEBUG is set.
 */
#define pr_emerg(fmt, ...) \
        printk(KERN_EMERG pr_fmt(fmt), ##__VA_ARGS__)
#define pr_alert(fmt, ...) \
        printk(KERN_ALERT pr_fmt(fmt), ##__VA_ARGS__)
#define pr_crit(fmt, ...) \
        printk(KERN_CRIT pr_fmt(fmt), ##__VA_ARGS__)
#define pr_err(fmt, ...) \
        printk(KERN_ERR pr_fmt(fmt), ##__VA_ARGS__)
#define pr_warning(fmt, ...) \
        printk(KERN_WARNING pr_fmt(fmt), ##__VA_ARGS__)
#define pr_warn pr_warning
#define pr_notice(fmt, ...) \
        printk(KERN_NOTICE pr_fmt(fmt), ##__VA_ARGS__)
#define pr_info(fmt, ...) \
        printk(KERN_INFO pr_fmt(fmt), ##__VA_ARGS__)
/*
 * Like KERN_CONT, pr_cont() should only be used when continuing
 * a line with no newline ('\n') enclosed. Otherwise it defaults
 * back to KERN_DEFAULT.
 */
#define pr_cont(fmt, ...) \
        printk(KERN_CONT fmt, ##__VA_ARGS__)

/* pr_devel() should produce zero code unless DEBUG is defined */
#ifdef DEBUG
#define pr_devel(fmt, ...) \
        printk(KERN_DEBUG pr_fmt(fmt), ##__VA_ARGS__)
#else
#define pr_devel(fmt, ...) \
        no_printk(KERN_DEBUG pr_fmt(fmt), ##__VA_ARGS__)
#endif
```

1.3. 动态打印

/sys/kernel/debug/dynamic_debug/control 文件是用于全局控制 Linux 内核动态调试功能的关键文件，可以帮助你在不重新编译内核的情况下对调试输出进行管理。

```
[root@imx6ull:~]# ls /sys/kernel/debug/dynamic_debug/
control
```

1.3.1. defconfig 配置

```
CONFIG_DEBUG_FS=y
CONFIG_DYNAMIC_DEBUG=y
```

启用 CONFIG_DYNAMIC_DEBUG 会增加一些开销，包括额外的代码和一些运行时开销。因此，在生产环境中，可能会考虑禁用动态调试功能以减少性能开销和日志量。

1.3.2. dynamic debug 参数介绍

参考文件：

```
root@100ask:/home/book/100ask_imx6ull-sdk/Linux-4.9.88/Documentation# ls dynamic-debug-howto.txt
dynamic-debug-howto.txt
```

相关参数：

- p：打开动态打印语句。
- f：打印函数名
- l：打印行号
- m：打印模块名字
- t：打印线程 ID

使用案例如下：

```
Examples
========

// enable the message at line 1603 of file svcsock.c
nullarbor:~ # echo -n 'file svcsock.c line 1603 +p' >
                                <debugfs>/dynamic_debug/control

// enable all the messages in file svcsock.c
nullarbor:~ # echo -n 'file svcsock.c +p' >
                                <debugfs>/dynamic_debug/control

// enable all the messages in the NFS server module
nullarbor:~ # echo -n 'module nfsd +p' >
                                <debugfs>/dynamic_debug/control

// enable all 12 messages in the function svc_process()
nullarbor:~ # echo -n 'func svc_process +p' >
                                <debugfs>/dynamic_debug/control

// disable all 12 messages in the function svc_process()
nullarbor:~ # echo -n 'func svc_process -p' >
                                <debugfs>/dynamic_debug/control

// enable messages for NFS calls READ, READLINK, READDIR and READDIR+.
nullarbor:~ # echo -n 'format "nfsd: READ" +p' >
                                <debugfs>/dynamic_debug/control

// enable messages in files of which the paths include string "usb"
nullarbor:~ # echo -n '*usb* +p' > <debugfs>/dynamic_debug/control

// enable all messages
nullarbor:~ # echo -n '+p' > <debugfs>/dynamic_debug/control

// add module, function to all enabled messages
nullarbor:~ # echo -n '+mf' > <debugfs>/dynamic_debug/control
```

1.3.3. dynamic debug 的查看与设置

动态打印在 debugfs 文件系统中有个 control 文件节点，文件节点记录了系统中所有使用动态打印技术的文件名路径、打印所在的行号、模块名字和要打印的语句。

```
cat /sys/kernel/debug/dynamic_debug/control |busybox grep "suspend"
```

```
[root@imx6ull:~]# cat /sys/kernel/debug/dynamic_debug/control |busybox grep "suspend"
arch/arm/vfp/vfpmodule.c:465 [vfp]vfp_pm_suspend =_ "%s: saving vfp state\012"
kernel/power/suspend.c:74 [suspend]freeze_enter =p "PM: suspend-to-idle\012"
kernel/power/suspend.c:78 [suspend]freeze_enter =p "PM: resume from suspend-to-idle\012"
kernel/power/suspend.c:507 [suspend]enter_state =p "PM: Preparing system for sleep (%s)\012"
kernel/power/suspend.c:517 [suspend]enter_state =p "PM: Suspending system (%s)\012"
kernel/power/suspend.c:523 [suspend]enter_state =p "PM: Finishing wakeup.\012"
drivers/video/fbdev/mxc/mipi_dsi_samsung.c:885 [mipi_dsi_samsung]mipi_dsi_runtime_suspend =_ "mipi dsi busfreq high release.\012"
drivers/video/fbdev/mxc/mxc_epdc_fb.c:5192 [mxc_epdc_fb]mxc_epdc_fb_runtime_suspend =_ "epdc busfreq high release.\012"
drivers/video/fbdev/mxc/mxc_epdc_v2_fb.c:5735 [mxc_epdc_v2_fb]mxc_epdc_fb_runtime_suspend =_ "epdc busfreq high release.\012"
drivers/video/fbdev/mxsfb.c:2433 [mxsfb]mxsfb_runtime_suspend =_ "mxsfb busfreq high release.\012"
drivers/dma/pxp/pxp_dma_v2.c:1831 [pxp_dma_v2]pxp_runtime_suspend =_ "pxp busfreq high release.\012"
drivers/dma/pxp/pxp_dma_v3.c:8063 [pxp_dma_v3]pxp_runtime_suspend =_ "pxp busfreq high release.\012"
drivers/base/syscore.c:54 [syscore]syscore_suspend =_ "Checking wakeup interrupts\012"
drivers/base/power/domain.c:443 [domain]genpd_runtime_suspend =_ "%s()\012"
drivers/base/power/domain.c:479 [domain]genpd_runtime_suspend =_ "suspend latency exceeded, %lld ns\012"
drivers/base/power/domain.c:798 [domain]pm_genpd_suspend_noirq =_ "%s()\012"
drivers/base/power/domain_governor.c:49 [domain_governor]default_suspend_ok =_ "%s()\012"
drivers/base/power/clock_ops.c:399 [clock_ops]pm_clk_suspend =_ "%s()\012"
drivers/base/power/clock_ops.c:508 [clock_ops]pm_clk_runtime_suspend =_ "%s\012"
```

如上不是所有的日志都会在 dmesg 中打印，我们的 dev_dbg 就不会直接显示在 dmesg 中。

只有 =p 的日志才会打印。

配置文件开启 dev_dbg 的打印功能，使用下述配置即可：

- 打开一个文中所有动态打印语句

```
echo -n "file gadget.c +p "> /sys/kernel/debug/dynamic_debug/control
```

- 打开一个模块所有动态打印语句

```
echo "module dwc3 +p" > /sys/kernel/debug/dynamic_debug/control
```

- 打开一个函数中所有的动态打印语句

```
echo "func svc_process +p" > /sys/kernel/debug/dynamic_debug/control
```

- 打开文件路径中包含 usb 的文件里所有的动态打印语句

```
echo -n "*usb* +p" > /sys/kernel/debug/dynamic_debug/control
```

- 打开系统所有的动态打印语句

```
echo -n "+p" > /sys/kernel/debug/dynamic_debug/control
```

- 打开系统所有的动态打印语句

```
echo -n "func svc_process -p" > /sys/kernel/debug/dynamic_debug/control
```

上面是打开动态打印语句的例子，除了能打印 pr_debug()/dev_dbg()函数中定义的输出外，还能打印一些额外信息，例如函数名、行号、模块名字和线程 ID 等。

1.3.4. dynamic debug 的查看与设置

在.c 文件开头添加如下代码：

```
#undef dev_dbg
#define dev_dbg dev_info
#undef pr_debug
#define pr_debug pr_info
```

1.3.5. 启动时候如何动态打印

在调试一些系统启动方法的代码，例如 USB 核心初始化等，这些代码在系统进入 shell 终端时已经初始化完成，因此无法及时打开动态打印语句。这时可以在内核启动时传递参数给内核，在系统初始化时动态打开它们，这是一个实际工程中非常好用的技巧。

在内核 commandline 中添加”dwc3.dyndbg=+plft“字符串。

还可以在各个子系统的 Makefile 中添加 ccflags 来打开动态打印。

```
ccflags-y := -DDEBUG
ccflags-y +=  -DVERBOSE_DEBUG
```

2. 内核函数调用堆栈打印

我们将介绍内核函数调用堆栈打印的相关方法：

- dump_stack 函数
- WARN_ON(condition)宏
- BUG_ON (condition)宏
- panic (fmt...)函数

BUG_ON 和 WARN_ON 是 Linux 内核中的两个宏，用于在代码中进行调试和错误处理。它们在不同的情况下用于检查条件，并根据条件的真假触发不同的操作。下面是它们的区别：

- BUG_ON 用于严重错误检查，如果条件为真，则会导致内核 "BUG"，通常用于开发和调试。
- WARN_ON 用于警告潜在问题，如果条件为真，则会在系统日志中打印警告，通常用于生产系统中进行诊断。

2.1. 什么是堆栈

在 Linux 操作系统中，函数调用栈（Function Call Stack）与一般的计算机系统中的调用栈原理相同，用于管理函数调用和返回的过程。它在程序执行期间跟踪函数的调用层次、局部变量的分配和释放，以及函数之间的数据传递。函数调用栈在 Linux 内核中起着关键作用，帮助管理用户空间程序的执行。

下面是关于 Linux 函数调用栈的一些要点：

- 栈帧（Stack Frame）：每次函数被调用时，一个新的栈帧会被压入调用栈的顶部。栈帧包含了函数的参数、局部变量、返回地址以及其他与函数执行相关的信息。当函数执行完毕后，对应的栈帧会被弹出，控制权返回给调用它的函数。
- 栈指针（Stack Pointer）：栈指针是一个指向当前栈顶的指针，用于确定栈帧的位置。
- 栈溢出（Stack Overflow）：函数调用栈的大小是有限的，过多的函数嵌套或递归调用可能导致栈溢出。栈溢出会导致程序异常终止，因此在编写程序时需要注意控制函数调用的层次和递归深度。

2.2. dump_stack 函数

dump_stack 是一个在 Linux 内核中用于打印调试信息的函数。它通常用于故障排除和调试，以帮助开发人员识别发生问题的位置和上下文。

具体来说，dump_stack 函数的作用是在调试输出中显示当前的函数调用栈信息，包括

函数调用的层次、调用链以及各个栈帧中的相关信息。这对于跟踪程序的执行路径、定位错误和了解程序的上下文非常有帮助。

dump_stack 函数通常在内核代码中使用，例如在驱动程序、中断处理程序、异常处理程序或其他需要进行故障排除的地方。它可以用于以下几种情况：

- 故障排除：当发生异常或错误时，通过在相关位置调用 dump_stack，可以在控制台或系统日志中打印出调用栈信息，以帮助开发人员快速定位问题。
- 分析崩溃：当内核发生崩溃（kernel panic）时，dump_stack 可以用于在崩溃信息中打印出最后的函数调用栈，帮助分析导致崩溃的原因。
- 性能分析：在性能分析场景中，dump_stack 可以用于捕获特定代码路径的函数调用栈，以帮助分析程序的性能瓶颈。

2.2.1. 什么是 dump_stack

dump_stack 函数的主要作用是将当前内核堆栈的跟踪信息打印到系统日志中。这有助于开发人员在调试内核代码时了解当前的函数调用路径，以及在哪里发生了特定的问题。通过分析 dump_stack 的输出，开发人员可以识别代码中的潜在问题，例如未预期的函数调用顺序、死锁等。

2.2.2. 如何使用 dump_stack

我们以分析 USB 调用关系为例：

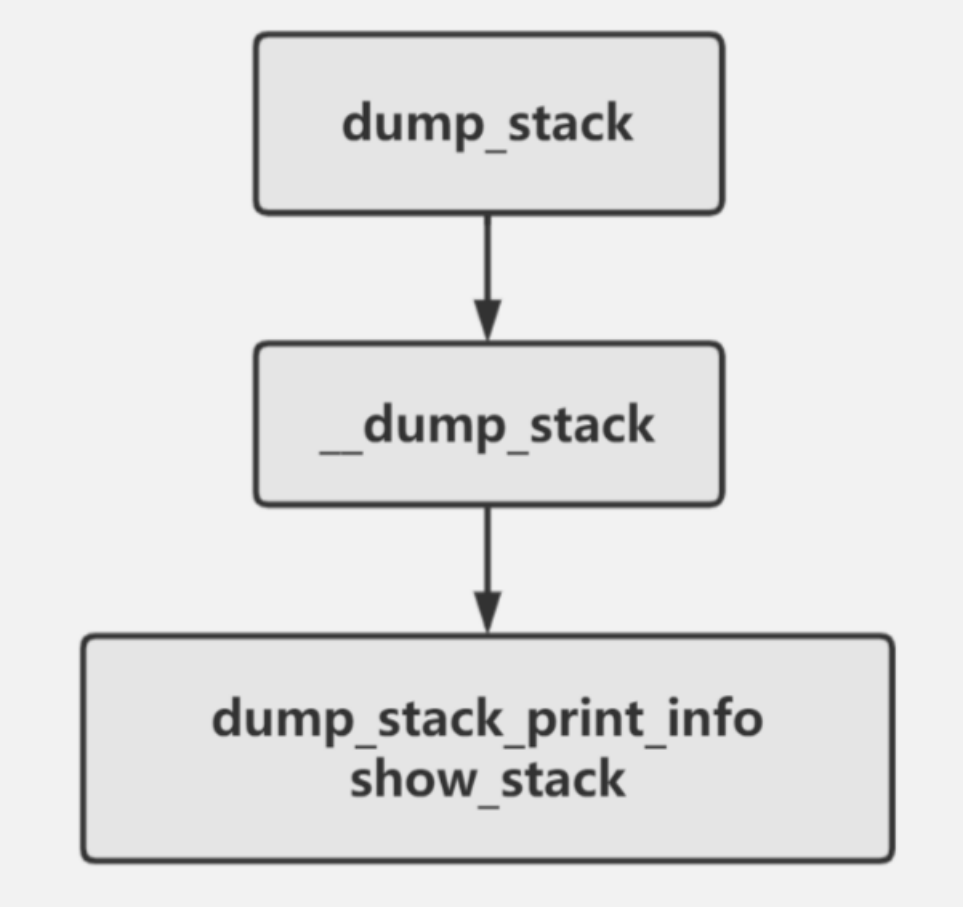
```
+#include <asm/ptrace.h>

static int composite_bind(struct usb_gadget *gadget,
        struct usb_gadget_driver *gdriver)
{
...
+     printk("[xxx-dump] in %s, line = %d, dump start\n", __func__, __LINE__);
+     dump_stack();
+     printk("[xxx-dump] in %s, line = %d, dump end\n", __func__, __LINE__);
...
}
```

打印结果如下：

```
[    3.872143] Call trace:
[    3.872155] [<        (ptrval)>] dump_backtrace+0x0/0x520
[    3.872159] [<        (ptrval)>] show_stack+0x14/0x20
[    3.872164] [<        (ptrval)>] dump_stack+0x8c/0xac
[    3.872170] [<        (ptrval)>] composite_bind+0x3c/0x1c8
[    3.872173] [<        (ptrval)>] udc_bind_to_driver+0x8c/0x118
[    3.872177] [<        (ptrval)>] usb_gadget_probe_driver+0xc4/0xf0
[    3.872180] [<        (ptrval)>] usb_composite_probe+0xb0/0xd8
[    3.872185] [<        (ptrval)>] init+0x13c/0x270
[    3.872188] [<        (ptrval)>] do_one_initcall+0x4c/0x150
[    3.872193] [<        (ptrval)>] kernel_init_freeable+0x138/0x1dc
[    3.872198] [<        (ptrval)>] kernel_init+0x10/0x110
[    3.872201] [<        (ptrval)>] ret_from_fork+0x10/0x18
[    3.872204] [xxx-dump] in composite_bind, line = 2263, dump end
```

2.2.3. dump_stack 原理

通过 grep，发现 dump_stack 函数原型存在于 kernel/lib/dump_stack.c 文件中。它的实现流程如下图所示：




```
static void __dump_stack(void)
{
        dump_stack_print_info(KERN_DEFAULT);
        show_stack(NULL, NULL);
}
```

可以看到关键的两个函数分别是 dump_stack_print_info 和 show_stack。其中第一个函数是用来打印 info 信息的，而第二个函数是用来打印 Call trace 的。

2.3. WARN_ON 宏的使用

WARN_ON (condition)函数作用：在括号中的条件成立时，内核会抛出栈回溯，打印函数的调用关系。通常用于内核抛出一个警告，暗示某种不太合理的事情发生了。

WARN_ON 实际上也是调用 dump_stack，只是多了参数 condition 判断条件是否成立，例如 WARN_ON(1)则条件判断成功，函数会成功执行。

2.3.1. WARN_ON 宏的原型

WARN_ON 是 Linux 内核代码中的一个宏，用于在代码中进行警告检查。它用于检查某些条件是否满足，如果条件不满足，它会在内核日志中输出一条警告消息。WARN_ON 宏的原型如下：

```
#define WARN_ON(condition) ({ \
    int __ret_warn_on = !!(condition); \
    if (unlikely(__ret_warn_on)) \
        printk(KERN_WARNING "WARNING: Condition %s at %s:%d/%s\n", \
            #condition, __FILE__, __LINE__, __func__); \
    unlikely(__ret_warn_on); \
})
```

这个宏在编译时会将条件 condition 转换为一个非零值（如果条件满足），然后在运行时检查这个值，如果为真（即条件满足），就会输出一条警告信息。这种警告通常用于标识一些可能会导致问题的代码路径，以便在开发和调试过程中提醒开发人员进行进一步的检查。

以下是 WARN_ON 宏的一些关键部分解释：

- condition：要检查的条件表达式。
- !!(condition)：将条件表达式转换为整数值 0 或 1。
- __ret_warn_on：用于存储条件的检查结果。
- unlikely(__ret_warn_on)：将条件检查的结果传递给 unlikely 宏，用于优化分支预测。

2.3.2. WARN_ON 案例

```
#include <linux/module.h>
#include <linux/kernel.h>
static int __init helloworld_init(void)
{
    printk(KERN_EMERG "helloworld_init\r\n");
    WARN_ON(1);
    return 0;
}
static void __exit helloworld_exit(void)
{
    printk(KERN_EMERG "helloworld_exit\r\n");
}
module_init(helloworld_init);
module_exit(helloworld_exit);
MODULE_LICENSE("GPL v2");
```

在第 6 行添加了 WARN_ON(1)，驱动加载之后打印信息如下：

```
1054.509100] pstate: 40400009 (nZcv daif +PAN -UAO)
1054.509117] pc : helloworld_init+0x28/0x1000 [helloworld]
1054.509131] lr : helloworld_init+0x28/0x1000 [helloworld]
1054.509142] sp : ffffff800c8ebb60
1054.509152] x29: ffffff800c8ebb60 x28: ffffff80011b2000
1054.509165] x27: 0000000000000000 x26: 0000000000000000
1054.509177] x25: ffffff80011ae250 x24: ffffff80097a7000
1054.509189] x23: ffffff80097a7000 x22: 0000000000000000
1054.509200] x21: ffffff80011b1000 x20: ffffff8009546000
1054.509212] x19: ffffff800993cca0 x18: 000000000000000a
1054.509221] x17: 0000000000000000 x16: 0000000000000000
1054.509233] x15: 000000000007c3d4 x14: ffffff80899c0e37
1054.509245] x13: ffffffffffffffff x12: 0000000000000030
1054.509257] x11: 00000000fffffffe x10: ffffff80099c0e3f
1054.509268] x9 : 0000000005f5e0ff x8 : 2d5d206572656820
1054.509279] x7 : 747563205b2d2d2d x6 : 0000000000038530
1054.509291] x5 : 0000000000000001 x4 : ffffffc07fed1900
1054.509302] x3 : ffffffc07fed1900 x2 : acdae0e19d26f800
1054.509313] x1 : 0000000000000000 x0 : 0000000000000024
1054.509329]
1054.509329] PC: 0xffffff80011b0fa8:
1054.509340] 0fa8  ******** ******** ******** ******** ******** ******** ******** ********
1054.509376] 0fc8  ******** ******** ******** ******** ******** ******** ******** ********
1054.509399] 0fe8  ******** ******** ******** ******** ******** ******** a9bf7bfd 910003fd
1054.509420] 1008  aa1e03e0 d503201f 90ffffe0 91011800 95fa6138 90ffffe0 91015c00 95fa6135
1054.509437] 1028  d4210000 52800000 a8c17bfd d65f03c0 00000000 00000000 00000000 00000000
1054.509456] 1048  00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000
1054.509474] 1068  00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000
1054.509490] 1088  00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000
```

可以看到 helloworld_init 函数的调用关系以及寄存器值就都打印了出来。
至此关于 WARN_ON 函数的测试就完成了。

2.4. BUG_ON 宏的使用

内核中有许多地方调用类似 BUG_ON()的语句，它非常像一个内核运行时的断言，意味着本来不该执行到 BUG_ON()这条语句，一旦 BUG_ON()执行内核就会立刻抛出 oops，导致栈的回溯和错误信息的打印。大部分体系结构把 BUG()和 BUG_ON()定义成某种非法操作，这样自然会产生需要的 oops。参数 condition 判断条件是否成立，例如 BUG_ON(1)则条件判断成功，函数会成功执行。

2.4.1. BUG_ON 宏的原型

```
#define BUG_ON(condition) do { if (condition) BUG(); } while (0)
```

该宏采用了一个条件表达式作为参数，并在条件为真时触发内核的 "BUG"。

2.4.2. BUG_ON 案例

这里仍然以最简单的 helloworld 驱动为例进行 BUG_ON 函数演示:

```
#include <linux/module.h>
#include <linux/kernel.h>
static int __init helloworld_init(void)
{
    printk(KERN_EMERG "helloworld_init\r\n");
    BUGON(1);
    return 0;
}
static void __exit helloworld_exit(void)
```

```
{
    printk(KERN_EMERG "helloworld_exit\r\n");
}
module_init(helloworld_init);
module_exit(helloworld_exit);
MODULE_LICENSE("GPL v2");
```

```
[   56.922491] pstate: 40400009 (nZcv daif +PAN -UAO)
[   56.927323] pc : helloworld_init+0x1c/0x1000 [helloworld]
[   56.932758] lr : helloworld_init+0x1c/0x1000 [helloworld]
[   56.938170] sp : ffffff800c773b60
[   56.941503] x29: ffffff800c773b60 x28: ffffff80011a2000
[   56.946837] x27: 0000000000000000 x26: 0000000000000000
[   56.952166] x25: ffffff800119e250 x24: ffffff80097a7000
[   56.957494] x23: ffffff80097a7000 x22: 0000000000000000
[   56.962820] x21: ffffff80011a1000 x20: ffffff8009546000
[   56.968147] x19: ffffff800993cca0 x18: 000000000000000a
[   56.973472] x17: 0000000000000000 x16: 0000000000000000
[   56.978801] x15: 00000000000d55fc x14: ffffff80899c0e37
[   56.984133] x13: ffffffffffffffff x12: 0000000000000030
[   56.989467] x11: 00000000fffffffe x10: ffffff80099c0e3f
[   56.994794] x9 : 0000000005f5e0ff x8 : 6c726f776f6c6c65
[   57.000120] x7 : 00000000017ed73b x6 : ffffffc07feb9908
[   57.005449] x5 : ffffffc07feb9908 x4 : 0000000000000000
[   57.010777] x3 : ffffffc07fec2648 x2 : d9912f59efd61900
[   57.016104] x1 : 0000000000000000 x0 : 000000000000000f
[   57.021431]
```

可以看到 helloworld_init 函数的调用关系以及寄存器值就都打印了出来。

2.5. panic (fmt…)函数

panic(fmt...)函数:输出打印会造成系统死机并将函数的调用关系以及寄存器值就都打印了出来。

2.5.1. panic 的原型

panic 函数是 Linux 内核中用于触发系统崩溃（kernel panic）的函数。当内核代码遇到无法继续执行的严重错误情况时，可以调用 panic 函数，导致系统停止运行并输出崩溃信息。这有助于开发人员在故障排除过程中获取关键信息。

```
void panic(const char *fmt, ...) __noreturn __cold;
```

- void panic(const char *fmt, ...): 这部分声明了 panic 函数，它接受一个格式化字符串 fmt 和可变参数列表 ...，用于指定触发内核崩溃时要输出的错误信息。
- __noreturn: 这是一个编译器属性，表示函数不会返回。一旦 panic 函数被调用，系统将无法继续正常执行，因此这个属性用于告诉编译器不要生成函数返回的相关代码。这是因为一旦触发内核崩溃，不应该尝试从 panic 函数返回到正常执行。
- __cold: 这也是一个编译器属性，用于标记函数为“冷”函数，即很少被调用的函数。在内核代码中，一些函数可能只在特定的情况下被调用，因此标记为冷函数可以优化代码，以便更好地适应 CPU 缓存。panic 函数通常是在严重错误情况下才会被调用，因此被标记为冷函数是合适的。

2.5.2. panic 的案例

这里仍然以最简单的 helloworld 驱动为例进行 panic 函数的演示:

```
#include <linux/module.h>
#include <linux/kernel.h>
static int __init helloworld_init(void)
{
     printk(KERN_EMERG "helloworld_init\r\n");
     panic("!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!");
     return 0;
}
static void __exit helloworld_exit(void)
{
     printk(KERN_EMERG "helloworld_exit\r\n");
}
module_init(helloworld_init);
module_exit(helloworld_exit);
MODULE_LICENSE("GPL v2");
```

和原 helloworld 驱动程序相比，在第 6 行添加了 panic("!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!")，驱动加载之后打印信息如下

```
[   70.102261] Call trace:
[   70.104741]  dump_backtrace+0x0/0x188
[   70.108418]  show_stack+0x24/0x30
[   70.111746]  dump_stack+0x8c/0xb4
[   70.115067]  panic+0x138/0x2b0
[   70.118137]  helloworld_init+0x28/0x1000 [helloworld]
[   70.123205]  do_one_initcall+0xa0/0x1c0
[   70.127047]  do_init_module+0x54/0x1d8
[   70.130809]  load_module+0x1ae4/0x1c30
[   70.134566]  __se_sys_finit_module+0xd8/0xf4
[   70.138847]  __arm64_sys_finit_module+0x24/0x30
[   70.143377]  el0_svc_common.constprop.0+0xe8/0x168
[   70.148171]  el0_svc_handler+0x70/0x8c
[   70.151928]  el0_svc+0x8/0xc
[   70.154827] SMP: stopping secondary CPUs
[   70.158833] PMU CRU:
[   70.161045] 00000000: 00006064 00001481 00000000 00000007 00007f00 00000000 00000000 00000000
[   70.169575] 00000020: 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000
```

2.5.3. panic 的手动触发

执行 echo c > /proc/sysrq-trigger 可以触发内核 panic，可借此研究内核 panic 子系统。

```
[root@imx6ull:~]# echo c > /proc/sysrq-trigger
[73521.235605] sysrq: SysRq : Trigger a crash
[73521.239864] Unable to handle kernel NULL pointer dereference at virtual address 00000000
[73521.249822] pgd = 891ac000
[73521.252600] [00000000] *pgd=88d39835, *pte=00000000, *ppte=00000000
[73521.260150] Internal error: Oops: 817 [#1] PREEMPT SMP ARM
[73521.265686] Modules linked in: inv_mpu6050_spi inv_mpu6050 evbug 100ask_adxl345_spi 100ask_spidev 100ask_irda 100ask_rc_nec 100ask_dht11 100ask_ds18b20 8723bu
[73521.280249] CPU: 0 PID: 330 Comm: sh Not tainted 4.9.88 #1
[73521.285782] Hardware name: Freescale i.MX6 UltraLite (Device Tree)
[73521.292012] task: 8877c000 task.stack: 885fe000
[73521.296607] PC is at sysrq_handle_crash+0x24/0x2c
[73521.301361] LR is at sysrq_handle_crash+0x20/0x2c
[73521.306120] pc : [<804943e0>]    lr : [<804943dc>]    psr: 600c0013
[73521.306120] sp : 885ffea8  ip : 00000000  fp : 000b57d0
[73521.317650] r10: 00000000  r9 : 00000002  r8 : 00000000
[73521.322924] r7 : 810309e4  r6 : 00000007  r5 : 00000063  r4 : 00000001
[73521.329498] r3 : 00000000  r2 : 00000000  r1 : 00000001  r0 : 00000063
[73521.336076] Flags: nZCv  IRQs on  FIQs on  Mode SVC_32  ISA ARM  Segment none
[73521.343261] Control: 10c53c7d  Table: 891ac06a  DAC: 00000051
[73521.349054] Process sh (pid: 330, stack limit = 0x885fe210)
[73521.354673] Stack: (0x885ffea8 to 0x88600000)
[73521.359096] fea0:                   810100dc 80494934 00000002 00000000 00000000 882ab880
[73521.367344] fec0: 00000000 00000002 00000000 80494da0 80494d4c 8025b0c4 89192e40 8025b068
[73521.375590] fee0: 0031e540 885fff80 00000000 80201dec 863e8778 00000301 00000000 00000060
[73521.383835] ff00: 00000000 00000000 00000000 885fff10 885fe000 80213ce0 00000001 885fffb0
[73521.392080] ff20: 888bb000 0000000a 89192cc0 0000000a 00000000 88036d98 88036d98 89192e40
[73521.400325] ff40: 00000002 0031e540 885fff80 00000000 00000002 80202bec 0000000a 8021fc78
[73521.408571] ff60: 89192cc0 89192e40 89192e40 00000000 00000000 0031e540 00000002 80203984
[73521.416816] ff80: 00000000 00000000 0031f5e0 00000002 0031e540 76e9fd58 00000004 80108544
[73521.425060] ffa0: 885fe000 80108380 00000002 0031e540 00000001 0031e540 00000002 00000000
[73521.433306] ffc0: 00000002 0031e540 76e9fd58 00000004 00000001 0009e980 000b8220 000b57d0
[73521.441550] ffe0: 00000000 7e873a34 76e036c9 76e3f006 000c0030 00000001 00000000 00000000
[73521.449826] [<804943e0>] (sysrq_handle_crash) from [<80494934>] (__handle_sysrq+0x124/0x180)
[73521.458339] [<80494934>] (__handle_sysrq) from [<80494da0>] (write_sysrq_trigger+0x54/0x64)
[73521.466763] [<80494da0>] (write_sysrq_trigger) from [<8025b0c4>] (proc_reg_write+0x5c/0x80)
[73521.475191] [<8025b0c4>] (proc_reg_write) from [<80201dec>] (__vfs_write+0x1c/0x114)
[73521.483009] [<80201dec>] (__vfs_write) from [<80202bec>] (vfs_write+0xa4/0x168)
[73521.490392] [<80202bec>] (vfs_write) from [<80203984>] (SyS_write+0x3c/0x90)
```

2.5.4. panic 相关调试节点

- /proc/sys/kernel/panic 节点

```
[root@imx6ull:~]# cat /proc/sys/kernel/panic
0
```

/proc/sys/kernel/panic 是 Linux 操作系统中的一个特殊文件，用于配置内核发生严重错误时的行为。当系统遇到无法处理的严重错误（例如内核崩溃或死锁）时，内核会尝试采取一些措施，其中之一就是触发系统崩溃（kernel panic）。/proc/sys/kernel/panic 节点允许您配置触发内核崩溃前的延迟时间。

该文件的内容是一个整数，表示在内核发生严重错误后触发系统崩溃之前的等待时间（以秒为单位）。如果将该值设置为 0，则内核将立即触发崩溃，而不会等待。如果设置为一个正整数，则内核会等待指定的秒数后触发崩溃。如果将该值设置为负数，则内核将不会自动触发崩溃，而是等待管理员手动干预。

以下是一些示例：

- /proc/sys/kernel/panic 的内容为 0，表示内核遇到严重错误会立即触发崩溃。
- /proc/sys/kernel/panic 的内容为 10，表示内核在遇到严重错误后会等待 10 秒后触发崩溃。
- /proc/sys/kernel/panic 的内容为 -1，表示内核在遇到严重错误后不会自动触发崩溃，而是等待管理员手动决定。

这是一个系统级的设置，对于确保系统的稳定性和可靠性非常重要。在生产环境中，根据需要进行适当的配置，以便在严重错误发生时能够及时采取适当的操作

- /proc/sys/kernel/panic_on_oops 节点

```
[root@imx6ull:~]# cat /proc/sys/kernel/panic_on_oops
0
```

panic_on_oops 是 Linux 操作系统中的一个配置节点，用于控制在内核发生 oops 错误（较轻的内核错误）时是否触发系统崩溃（kernel panic）。当内核代码遇到一些未预期的错误情况，但仍然可以继续执行时，它可能会产生 oops 错误。panic_on_oops 节点允许您配置内核在遇到 oops 错误时的行为。

该节点的内容是一个整数，表示内核在发生 oops 错误时的行为方式：

- 0：不触发系统崩溃，只记录 oops 错误日志，内核继续执行。
- 1：触发系统崩溃（kernel panic），即使发生较轻的 oops 错误。

默认情况下，大多数 Linux 系统中的 panic_on_oops 节点的值为 0，这意味着内核在遇到 oops 错误时不会触发系统崩溃，而只会记录错误信息。

在调试和故障排除期间，将 panic_on_oops 设置为 1 可能会更有帮助，因为它会在发生 oops 错误时立即停止系统并生成调试信息，以便进行更深入的分析。但在生产环境中，通常建议将其保持为默认值 0，以确保系统的稳定性。

- /proc/sys/kernel/panic_on_oops 节点

```
[root@imx6ull:~]# cat  /proc/sys/kernel/panic_on_warn
0
```

/proc/sys/kernel/panic_on_oops 是 Linux 操作系统中的一个配置节点，用于控制在内核发生 oops 错误（较轻的内核错误）时是否触发系统崩溃（kernel panic）。当内核代码遇到一些未预期的错误情况，但仍然可以继续执行时，它可能会产生 oops 错误。panic_on_oops 节点允许您配置内核在遇到 oops 错误时的行为。

该节点的内容是一个整数，表示内核在发生 oops 错误时的行为方式：

- 0：不触发系统崩溃，只记录 oops 错误信息，内核继续执行。
- 1：触发系统崩溃（kernel panic），即使发生较轻的 oops 错误。

默认情况下，大多数 Linux 系统中的 panic_on_oops 节点的值为 0，这意味着内核在遇到 oops 错误时不会触发系统崩溃，而只会记录错误信息。