Linux 设备模型浅析之固件篇

Linux 设备模型，仅仅看理论介绍，比如 LDD3 的第十四章，会感觉太抽象不易理解，而通过阅读内核代码就更具体更易理解，所以结合理论介绍和内核代码阅读能够更快速的理解掌握 linux 设备模型。这一序列的文章的目的就是在于此，看这些文章之前最好能够仔细阅读 LDD3 的第十四章。固件 firmware，一般是在芯片中可运行的程序代码或配置文件，比如 CY68013 USB2.0 芯片，它里面有一个 8051 内核，可执行代码可以在线下载到其 ram 中运行。内核中 firmware 模块的作用是使得驱动程序可以调用其 API 获得用户空间的固件（一般存放在/lib/firmware 目录下）再通过一定的通信方式（比如 I2C、UART 和 USB 等）下载到芯片里。以下就以 CY68013 为例子说明固件下载的原理。阅读这篇文章之前，最好先阅读文章《Linux 设备模型浅析之设备篇》、《Linux 设备模型浅析之驱动篇》和《Linux 设备模型浅析之驱动篇》。在文章的最后贴有一张针对本例的图片，可在阅读本文章的时候作为参照。

一、cy68013 的 8051 单片机程序是 intel 的 hex 格式，用 keil 软件编译生成。需要下载的可执行程序有两个，一个是"cy68013_loader.hex"程序，另一个是"cy68013_fw.hex"程序。前者是作为下载后者的守护程序，也就是说先下载"cy68013_loader.hex"程序到 cy68013 的 ram 中运行，然后其负责"cy68013_fw.hex"程序的下载运行及固化(可以固化到外接 i2c eeprom 中)。这两个固件存放在/lib/firmware 目录中。其中会用到两个 API，request_firmware()例程和 release_firmware()例程。前者前者的使用方式是 **request_firmware**(&fw_entry, "cy68013_loader.hex", &cy68013->udev->dev)，请求加载一个固件，用来获取 cy68013_loader.hex 固件的数据，数据保存在 fw_entry->data 中，大小是 fw_entry->size。后者的使用方式是 **release_firmware**(fw_entry)，释放获取的资源。request_firmware()例程的定义如下：

```
int request_firmware(const struct firmware **firmware_p, const char *name,
            struct device *device)
{
      int uevent = 1;
      return _request_firmware(firmware_p, name, device, uevent); //  uevent = 1，会产生 uevent 事件
}
```

代码中，

1. 第一个形参 struct firmware 的定义如下:

```
struct firmware {
         size_t size;              // firmware 的大小
         const u8 *data;           // 指向保存 firmware 数据的 buffer
}。
```

本例中，cy68013->udev->dev 生成的 sys 目录是/sys/devices/pci0000:00/0000:00:1d.7/usb2/2-1，后面生成的 firmware device 的目录在该目录下。下面分析_request_firmware()例程。

二、**_request_firmware()**例程会睡眠，直到固件下载完成，其定义如下：

```
static int _request_firmware(const struct firmware **firmware_p, const char *name,
                  struct device *device, int uevent)
```

```
{
        struct device *f_dev;
        struct firmware_priv *fw_priv;
        struct firmware *firmware;
        struct builtin_fw *builtin;
        int retval;

        if (!firmware_p)
                return -EINVAL;

        // 分配 struct firmware 结构体，在 release_firmware()例程中释放
        *firmware_p = firmware = kzalloc(sizeof(*firmware), GFP_KERNEL);
        if (!firmware) {
                dev_err(device, "%s: kmalloc(struct firmware) failed\n",
                        __func__);
                retval = -ENOMEM;
                goto out;
        }

        // 先从内置在内核的固件中查找，如果找到了就返回
        for (builtin = __start_builtin_fw; builtin != __end_builtin_fw;
            builtin++) {
                if (strcmp(name, builtin->name)) // 通过名字查找
                        continue;
                dev_info(device, "firmware: using built-in firmware %s\n",
                         name);
                firmware->size = builtin->size;
                firmware->data = builtin->data;
                return 0;
        }

        if (uevent)
                dev_info(device, "firmware: requesting %s\n", name);

        // 这里做了比较多的工作，后面分析
        retval = fw_setup_device(firmware, &f_dev, name, device, uevent);
        if (retval)
                goto error_kfree_fw;

        fw_priv = dev_get_drvdata(f_dev);

        // 显然，前面已经设置为 1 了，所以会执行
        if (uevent) {
                 /* 说明正在执行装载 firmware ， 设置一个定时器，在定时器超时回调例程中调用
                complete()例程。*/
                if (loading_timeout > 0) {
                        fw_priv->timeout.expires = jiffies + loading_timeout * HZ; // 默认是 10s
                        add_timer(&fw_priv->timeout);
                }
```

```
                /* 通知用户空间，让 udev 或 mdev 处理，后者会再调用一个脚本来处理，该脚本
                是/lib/udev/firmware.sh 文件，在后面会分析 */
                kobject_uevent(&f_dev->kobj, KOBJ_ADD);
                wait_for_completion(&fw_priv->completion); // 阻塞，等待用户空间程序处理完
                set_bit(FW_STATUS_DONE, &fw_priv->status);
                del_timer_sync(&fw_priv->timeout);          // 删除定时器
        } else
                wait_for_completion(&fw_priv->completion);      // 等待用户空间程序处理完毕

        mutex_lock(&fw_lock);
        // 检查返回状态，看是否出现了问题
        if (!fw_priv->fw->size || test_bit(FW_STATUS_ABORT, &fw_priv->status)) {
                retval = -ENOENT;
                release_firmware(fw_priv->fw);
                *firmware_p = NULL;
        }
        fw_priv->fw = NULL;
        mutex_unlock(&fw_lock);
        device_unregister(f_dev);     // 删除掉之前注册的 f_dev
        goto out;

error_kfree_fw:
        kfree(firmware);
        *firmware_p = NULL;
out:
        return retval;
}
```

代码中，

1. **fw_setup_device()**例程的定义如下：

```
static int fw_setup_device(struct firmware *fw, struct device **dev_p,
                           const char *fw_name, struct device *device,
                           int uevent)
{
        struct device *f_dev;
        struct firmware_priv *fw_priv;
        int retval;

        *dev_p = NULL;
        retval = fw_register_device(&f_dev, fw_name, device); // 注册 f_dev，后面分析
        if (retval)
                goto out;

        /* Need to pin this module until class device is destroyed */
        __module_get(THIS_MODULE);    // 增加对本模块的引用

        fw_priv = dev_get_drvdata(f_dev);  // 获取私有数据

        fw_priv->fw = fw;     // 反向引用
```

```
        /* 生成名为"data"的二进制属性文件，其位于/sys/devices/pci0000:00/0000:00:1d.7/usb2/2-
        1/firmware/2-1 目录下，可以用于读写 firmware 数据 */
        retval = sysfs_create_bin_file(&f_dev->kobj, &fw_priv->attr_data);
        if (retval) {
                dev_err(device, "%s: sysfs_create_bin_file failed\n", __func__);
                goto error_unreg;
        }

        /* 生成名为"loading”的属性文件，其位于/sys/devices/pci0000:00/0000:00:1d.7/usb2/2-
        1/firmware/2-1 目录下，用于控制 firmware 的加载过程 */
        retval = device_create_file(f_dev, &dev_attr_loading);
        if (retval) {
                dev_err(device, "%s: device_create_file failed\n", __func__);
                goto error_unreg;
        }

        // 设置可发送 uevent 事件，在《Linux 设备模型浅析之 uevent 篇》中曾分析过
        if (uevent)
                f_dev->uevent_suppress = 0;
        *dev_p = f_dev;
        goto out;

error_unreg:
        device_unregister(f_dev);
out:
        return retval;
}
```

代码中，

1.1. dev_attr_loading 的定义如下：

static DEVICE_ATTR(**loading**, 0644, firmware_loading_show, firmware_loading_store)。显然是一个 device 类型的属性结构体，有 firmware_loading_show()例程和 firmware_loading_store()例程两个读写方法，分别用于读出加载的命令和写入加载的命令，定义如下：

```
static ssize_t firmware_loading_show(struct device *dev,
                                     struct device_attribute *attr, char *buf)
{
        struct firmware_priv *fw_priv = dev_get_drvdata(dev);
        // 如果是在 FW_STATUS_LOADING 状态，则变量 loading 为 1
        int loading = test_bit(FW_STATUS_LOADING, &fw_priv->status);
        return sprintf(buf, "%d\n", loading); // 最终会输出到用户空间
}

static ssize_t firmware_loading_store(struct device *dev,
                                      struct device_attribute *attr,
                                      const char *buf, size_t count)
{
        struct firmware_priv *fw_priv = dev_get_drvdata(dev);
        int loading = simple_strtol(buf, NULL, 10); // 将用户空间传递的值保存在 loading 变量中
```

```
	switch (loading) {
	case 1:		// 标志着开始加载固件，要清除之前所获取的资源
		mutex_lock(&fw_lock);
		if (!fw_priv->fw) { // 如果清除好了，则直接返回
			mutex_unlock(&fw_lock);
			break;
		}
		vfree(fw_priv->fw->data);	// 释放存放固件数据的 buffer
		fw_priv->fw->data = NULL;
		fw_priv->fw->size = 0;
		fw_priv->alloc_size = 0;
		// 设置状态为 FW_STATUS_LOADING
		set_bit(FW_STATUS_LOADING, &fw_priv->status);
		mutex_unlock(&fw_lock);
		break;
	case 0: // 停止加载固件
		// 如果正在 loading，则唤醒被阻塞的例程
		if (test_bit(FW_STATUS_LOADING, &fw_priv->status)) {
			complete(&fw_priv->completion);
			clear_bit(FW_STATUS_LOADING, &fw_priv->status);
			break;
		}
		/* fallthrough */
	default:
		dev_err(dev, "%s: unexpected value (%d)\n", __func__, loading);
		/* fallthrough */
	case -1: // 由于产生了错误，取消固件的加载，并丢弃任何已经加载的数据
		fw_load_abort(fw_priv);
		break;
	}

	return count;
}
```

1.2. fw_register_device()例程代码如下：

```
static int fw_register_device(struct device **dev_p, const char *fw_name,
			      struct device *device)
{
	int retval;
	// 获取 struct firmware_priv 大小的内存
	struct firmware_priv *fw_priv = kzalloc(sizeof(*fw_priv),
						GFP_KERNEL);
	// 获取 struct device 大小的内存
	struct device *f_dev = kzalloc(sizeof(*f_dev), GFP_KERNEL);的

	*dev_p = NULL;
```

```
	if (!fw_priv || !f_dev) {
		dev_err(device, "%s: kmalloc failed\n", __func__);
		retval = -ENOMEM;
		goto error_kfree;
	}

	init_completion(&fw_priv->completion);

	// 用于生成名为"data"的二进制属性文件，该结构体后面分析
	fw_priv->attr_data = firmware_attr_data_tmpl;

	// 拷贝 fw_name 到 fw_priv->fw_id
	strlcpy(fw_priv->fw_id, fw_name, FIRMWARE_NAME_MAX);

	// 设置软定时器回调例程，用于设定用户加载固件的时间，后面会分析该回调例程
	fw_priv->timeout.function = firmware_class_timeout;
	fw_priv->timeout.data = (u_long) fw_priv;  // 设置私有数据，将传送给回调例程
	init_timer(&fw_priv->timeout);       // 初始化时钟

	dev_set_name(f_dev, dev_name(device));   // 名字跟父设备的名字相同，也就是“2-1”
	f_dev->parent = device; // 在本例中是 usb_device.dev
	f_dev->class = &firmware_class;     // 类型是 firmware_class，后面会分析
	dev_set_drvdata(f_dev, fw_priv);     // 保存私有数据到 f_dev
	f_dev->uevent_suppress = 1;
	/* 注册到设备模型中，生成/sys/devices/pci0000:00/0000:00:1d.7/usb2/2-1/firmware/2-1 目
	录，该例程的具体实现过程可参照《Linux 设备模型浅析之设备篇》。*/
	retval = device_register(f_dev);
	if (retval) {
		dev_err(device, "%s: device_register failed\n", __func__);
		goto error_kfree;
	}
	*dev_p = f_dev;
	return 0;

error_kfree:
	kfree(fw_priv);
	kfree(f_dev);
	return retval;
}
```

代码中，

1.2.1. 属性结构体 **irmware_attr_data_tmpl** 的定义如下：

```
static struct bin_attribute firmware_attr_data_tmpl = {
	.attr = {.name = "data", .mode = 0644},
	.size = 0,
	.read = firmware_data_read,
	.write = firmware_data_write,
};
```

显然，其定义了名为"data"的属性文件，有 firmware_data_read()和 firmware_data_write()两个读

写的方法，前者将 buffer 中的固件数据读出，后者将固件数据写到 buffer 中，都是被应用程序间接调用，分别定义如下：

```
static ssize_t
firmware_data_read(struct kobject *kobj, struct bin_attribute *bin_attr,
                   char *buffer, loff_t offset, size_t count)
{
        struct device *dev = to_dev(kobj);
        // 获取私有数据，在前面的 fw_register_device()例程中保存了此私有数据
        struct firmware_priv *fw_priv = dev_get_drvdata(dev);
        struct firmware *fw;
        ssize_t ret_count;

        mutex_lock(&fw_lock);
        fw = fw_priv->fw;
        // 判读是否已经完成
        if (!fw || test_bit(FW_STATUS_DONE, &fw_priv->status)) {
                ret_count = -ENODEV;
                goto out;
        }
        // 从 fw->data 中将固件数据拷贝到 buffer，此 buffer 中的数据最终传递到用户空间
        ret_count = memory_read_from_buffer(buffer, count, &offset,
                                            fw->data, fw->size);
out:
        mutex_unlock(&fw_lock);
        return ret_count;
}

static ssize_t
firmware_data_write(struct kobject *kobj, struct bin_attribute *bin_attr,
                    char *buffer, loff_t offset, size_t count)
{
        struct device *dev = to_dev(kobj);
        struct firmware_priv *fw_priv = dev_get_drvdata(dev);
        struct firmware *fw;
        ssize_t retval;

        if (!capable(CAP_SYS_RAWIO))
                return -EPERM;

        mutex_lock(&fw_lock);
        fw = fw_priv->fw;
        // 判读是否已经完成
        if (!fw || test_bit(FW_STATUS_DONE, &fw_priv->status)) {
                retval = -ENODEV;
                goto out;
        }
        // 根据固件数据的实际大小重新分配内存
        retval = fw_realloc_buffer(fw_priv, offset + count);
        if (retval)
```

```
                goto out;

        // 将固件数据拷贝到 fw->data 中
        memcpy((u8 *)fw->data + offset, buffer, count);

        fw->size = max_t(size_t, offset + count, fw->size);
        retval = count;
out:
        mutex_unlock(&fw_lock);
        return retval;
}
```

1.2.2. firmware_class_timeout()超时回调例程定义如下：

```
static void firmware_class_timeout(u_long data)
{
        struct firmware_priv *fw_priv = (struct firmware_priv *) data;
        fw_load_abort(fw_priv);
}
```

代码中，

1.2.2.1. 调用了例程 fw_load_abort()，其定义如下：

```
static void fw_load_abort(struct firmware_priv *fw_priv)
{
        set_bit(FW_STATUS_ABORT, &fw_priv->status);  // 超时了，所以 abort
        wmb();
        complete(&fw_priv->completion);   // 唤醒阻塞的进程
}
```

1.2.3. firmware_class 的定义如下：

```
static struct class firmware_class = {
        .name           = "firmware", // 将会生成/sys/class/firmware 目录
        // 在《Linux 设备模型浅析之 uevent 篇》说明过，在产生 uevent 事件时输出环境变量
        .dev_uevent     = firmware_uevent,
        .dev_release    = fw_dev_release, // 释放所有资源，主要是释放内存
}
```

其在 firmware_class_init()例程中被初始化，该例程定义如下：

```
static int __init firmware_class_init(void)
{
        int error;
        // 注册 firmware_class 并初始化，生成/sys/class/firmware 目录
        error = class_register(&firmware_class);
        if (error) {
                printk(KERN_ERR "%s: class_register failed\n", __func__);
                return error;
        }
        /* 生成/sys/class/firmware/timeout 属性文件，用于获取和设置固件下载超时时间，后面分
        析 */
        error = class_create_file(&firmware_class, &class_attr_timeout);
        if (error) {
```

```
                printk(KERN_ERR "%s: class_create_file failed\n",
                    __func__);
                class_unregister(&firmware_class);
        }
        return error;

}
```

代码中，

1.2.3.1. class_attr_timeout 定义如下：

static CLASS_ATTR(timeout, 0644, firmware_timeout_show, firmware_timeout_store)，显然定义了一个 class 类的属性结构体，firmware_timeout_show 例程和 firmware_timeout_store 例程分别定义如下：

```
static ssize_t firmware_timeout_show(struct class *class, char *buf)
{
        return sprintf(buf, "%d\n", loading_timeout); // 将变量 loading_timeout 值向用户空间传递
}
static ssize_t firmware_timeout_store(struct class *class, const char *buf, size_t count)
{
        // 将用户空间传递进来的值赋给变量 loading_timeout
        loading_timeout = simple_strtol(buf, NULL, 10);
        if (loading_timeout < 0)
                loading_timeout = 0;
        return count;
}
```

2. 现在说说之前提到过的 **firmware.sh** shell 脚本，其定义如下：

```
#!/bin/sh -e

// 固件存放的目录，通常是位于后者，/lib/firmware 中
FIRMWARE_DIRS="/lib/firmware/$(uname -r)   /lib/firmware"

err() {
        echo "$@" >&2
        logger -t "${0##*/}[$$]" "$@" 2>/dev/null || true
}

/* 先判断"loading”属性文件是否存在。DEVPATH 是由内核通过 uevent 事件输出的环境变量(一个目录)，在本例中是/sys/devices/pci0000:00/0000:00:1d.7/usb2/2-1/firmware/2-1 目录。*/
if [ ! -e /sys$DEVPATH/loading ]; then
        err "udev firmware loader misses sysfs directory"
        exit 1
fi

// 从前面的定义中可看出， FIRMWARE_DIRS 有两个可能的目录，/lib/firmware/$(uname -r)和/lib/firmware，所以做个遍历加载。
for DIR in $FIRMWARE_DIRS; do
        [ -e "$DIR/$FIRMWARE" ] || continue        // 如果目录存在就执行
        echo 1 > /sys$DEVPATH/loading     // 开始加载
```

```
        cat "$DIR/$FIRMWARE" > /sys$DEVPATH/data  // 将固件数据写入到“data”属性文件中
        echo 0 > /sys$DEVPATH/loading     // 停止加载
        exit 0  // 成功，则返回
done

// 如果执行到这里，说明没有找到固件，故写入-1
echo -1 > /sys$DEVPATH/loading
err "Cannot find  firmware file '$FIRMWARE'"
exit 1
```

三、此时获取到了固件数据，但还要通过 USB 将其下载到 CY68013 芯片中运行。具体过程不在本文的内容范围内，就不予讲述分析了。

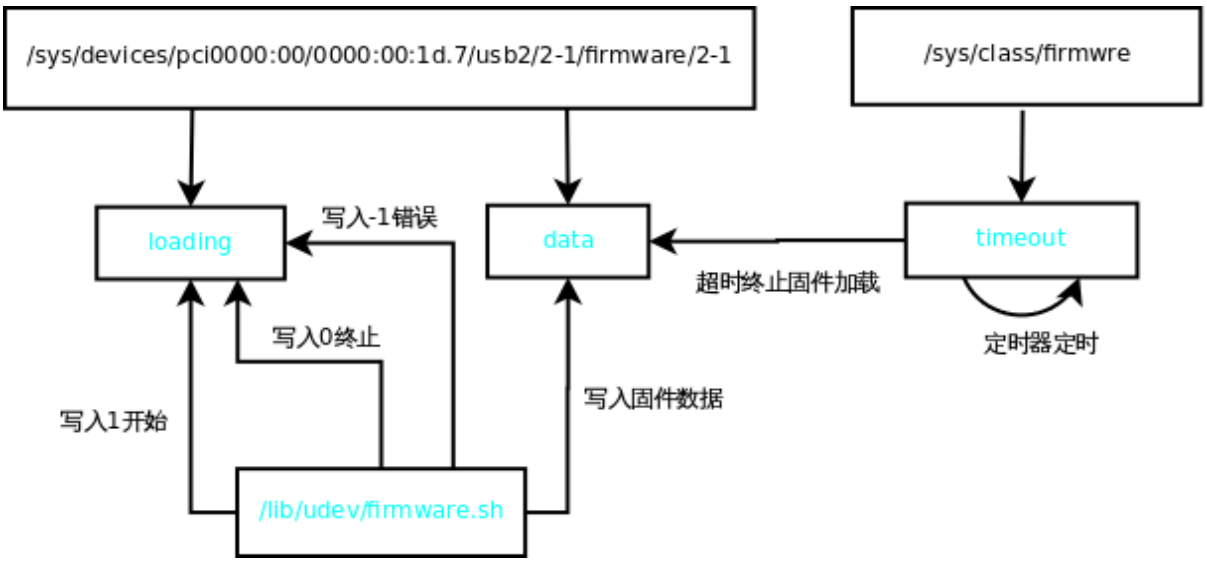
四、最后调用 release_firmware()例程释放掉在 request_firmware()例程中申请的资源，该例程的定义如下：

```
void
release_firmware(const struct firmware *fw)
{
        struct builtin_fw *builtin;

        if (fw) {
                for (builtin = __start_builtin_fw; builtin != __end_builtin_fw;
                    builtin++) {
                        if (fw->data == builtin->data)
                                goto free_fw;
                }
                vfree(fw->data); // 如果固件不是内置在内核中，则释放掉存放固件的 fw->data
        free_fw:
                kfree(fw);      // 释放掉结构体 fw
        }
}
```

至此，一次固件的加载就这样完成了。总体而言，固件的加载是通过 linux 设备模型产生一个 uevent 事件，通知用户空间的程序 udev 或 mdev 来实现。后者再调用脚本 firmware.sh（PC 机上）将固件数据通过属性文件"data"写入到内核中，然后驱动程序通过一定的通信方式将其下载到芯片中，比如本例中的 CY68013 芯片，PC 机就是通过 USB 总线下载到其中的。。

附图：



注：

1. 其中黑色字体的矩形表示是个文件夹；
2. 其中青色字体的矩形表示是个文件；