

Lab 2: ChCore Report

思考题 1: 阅读 `_start` 函数的开头, 尝试说明 ChCore 是如何让其中一个核首先进入初始化流程, 并让其他核暂停执行的。

`CNTPCT_EL0` 寄存器报告当前的计数值。`CNTKCTL_EL1` 控制EL0是否可以访问系统定时器¹。

`_start` 函数的开头通过以下步骤来控制多核处理器的初始化:

- `mrs x8, mpidr_el1`: 这个指令读取多处理器亲和性寄存器 (`mpidr_el1`) 的值, 并将结果存储在寄存器 `x8` 中。该寄存器中存储了包含 CPU ID 的信息。在多核系统中, 每个核心都有一个唯一的 CPU ID。
- `and x8, x8, #0xFF`: 代码对存储在 `x8` 中的值与 `0xFF` (十进制255) 进行按位与操作, 得到最低的8位bit, 也即 CPU ID。
- `cbz x8, primary`: 这个指令检查 `x8` 中的结果 (CPU ID) 是否为零。如果 CPU ID 为零, 则当前是第一个核心, 则跳转到标签 `primary`。

对于第一个核心 (CPU ID 0) :

- 代码执行主分支 (`primary`), 继续进行主要核心初始化。

对于其他所有核心 (CPU ID 大于0) :

- `cbz` 不会跳转到 `primary`。
- 这些核心将继续执行 `cbz` 指令后面的代码, 具体来说是有标有 `wait_for_bss_clear` 的部分。

这种方法让第一个核心 (CPU ID 0) 先进入主要初始化流程, 其他核心则持续等待直到看见 `secondary_boot_flag` 变为非 0 值。

练习题 2: 在 `arm64_elX_to_el1` 函数的 `LAB 1 TODO 1` 处填写一行汇编代码, 获取 CPU 当前异常级别。

填写代码为:

```
mrs x9, CurrentEL
```

此代码通过 `CurrentEL` 系统寄存器可获得当前异常级别, 然后写入x9寄存器。经验证, 此时x9的值为12, 表示处在EL3。

练习题 3: 在 `arm64_elX_to_el1` 函数的 `LAB 1 TODO 2` 处填写大约 4 行汇编代码, 设置从 EL3 跳转到 EL1 所需的 `elr_el3` 和 `spsr_el3` 寄存器值。具体地, 我们需要在跳转到 EL1 时暂时屏蔽所有中断、并使用内核栈 (`sp_el1` 寄存器指定的栈指针)。

填入的代码为:

```
adr x9, .Ltarget
msr elr_el3, x9
mov x9, SPSR_ELX_DAIIF | SPSR_ELX_EL1H
msr spsr_el3, x9
```

此代码将跳转地址的链接写入x9寄存器, 然后通过 `msr` 写入异常链接寄存器。然后在借x9寄存器来设置保存的程序状态寄存器 `spsr_el3`, 以达到暂时屏蔽所有中断, 并使用内核栈 `sp_el1` 寄存器指定的栈指针。

```
#define SPSR_ELX_DAIIF          (0b1111 << 6)
#define SPSR_ELX_EL1H          (0b0101)
```

这里两个数是用来设置SPSR寄存器的 `DAIF` 和 `M[4:0]` 的, 分别对应屏蔽所有中断和切换栈指针²。

思考题 4: 说明为什么要在进入 C 函数之前设置启动栈。如果不设置, 会发生什么?

- 因为 C 语言的函数调用机制依赖于栈。当一个函数被调用时, 它的参数、返回地址以及局部变量都会被压入栈中。
- 如果没有设置栈, 那么这些数据就无处存放, 函数无法正确执行, 可能会导致程序崩溃。

思考题 5: 在实验 1 中, 其实不调用 `clear_bss` 也不影响内核的执行, 请思考不清理 `.bss` 段在之后的何种情况下会导致内核无法工作。

`.bss` 段用于存储程序中未初始化的全局变量和静态变量。如果不清零 `.bss` 段, 那么这些变量的初始值将是不确定的, 可能包含任意的非法数据。由于程序通常会在使用这些变量之前对它们进行初始化, 所以可能不影响内核的执行。然而, 如果程序使用了未初始化的全局变量和静态变量, 那么不清零 `.bss` 段可能会得到错误的值, 从而导致内核无法正常工作。

练习题 6: 在 `kernel/arch/aarch64/boot/raspi3/peripherals/uart.c` 中 `LAB 1 TODO 3` 处实现通过 UART 输出字符串的逻辑。

```
early_uart_init();
for(int i = 0; str[i] != '\0'; i++){
    early_uart_send(str[i]);
}
```

首先 `early_uart_init` 初始化 UART, 然后遍历字符串用 `early_uart_send` 函数发送单个字符 (也就是输出字符), 从而实现发送字符串。

练习题 7: 在 `kernel/arch/aarch64/boot/raspi3/init/tools.S` 中 `LAB 1 TODO 4` 处填写一行汇编代码, 以启用 MMU。

```
orr x8, x8, #SCTLR_EL1_M
```

设置 `SCTLR_EL1` 的 `M` 位, 使能 `MMU`³。

思考题 8: 请思考多级页表相比单级页表带来的优势和劣势 (如果有的话), 并计算在 AArch64 页表中分别以 4KB 粒度和 2MB 粒度映射 0~4GB 地址范围所需的物理内存大小 (或页表页数量)。

- 优势: 可以节省大量空间; 在物理地址存在大量空洞的情况下, 非连续的多级页表可以减少空间不必要的开支。
- 劣势: 多级页表增加了访问时间, 带来更多的时间开销。
- 4KB: $4\text{KB} / 64 = 4 * 1024 * 8 / 64 = 512$. 最底层的物理页数为 $4\text{GB} / 4\text{KB} = 2^{20}$. 所需三级页表数 $2^{20} / 512 = 2^{11} = 2048$, 所需二级页表数 $2048 / 512 = 4$, 加上一个一级页表和一个零级页表, 总共需要 $1 + 1 + 4 + 2048 = 2054$ 张页表页数量。所需物理内存为 $2054 * 4\text{KB} = 8216\text{KB}$
- 2MB: 最底层的物理页数为 $4\text{GB} / 2\text{MB} = 2^{11}$. 所需二级页表数 $\lceil 2^{11} / 2^9 \rceil = 4$, 一个一级页表和一个零级页表, 总共需要 $1 + 1 + 4 = 6$ 张页表页数量。所需物理内存为 $6 * 4\text{KB} = 24\text{KB}$

练习题 9: 请在 `init_kernel_pt` 函数的 `LAB 1 TODO 5` 处配置内核高地址页表 (`boot_ttbr1_10`、`boot_ttbr1_11` 和 `boot_ttbr1_12`), 以 2MB 粒度映射。

```
/* TTBR1_EL1 0-1G */
/* LAB 1 TODO 5 BEGIN */
/* Step 1: set L0 and L1 page table entry */
/* BLANK BEGIN */
vaddr = KERNEL_VADDR + PHYSMEM_START;
boot_ttbr1_10[GET_L0_INDEX(vaddr)] = ((u64)boot_ttbr1_11) | IS_TABLE
                                     | IS_VALID | NG;
boot_ttbr1_11[GET_L1_INDEX(vaddr)] = ((u64)boot_ttbr1_12) | IS_TABLE
                                     | IS_VALID | NG;

/* BLANK END */

/* Step 2: map PHYSMEM_START ~ PERIPHERAL_BASE with 2MB granularity */
/* BLANK BEGIN */
for (; vaddr < KERNEL_VADDR + PERIPHERAL_BASE; vaddr += SIZE_2M) {
    boot_ttbr1_12[GET_L2_INDEX(vaddr)] =
        (vaddr - KERNEL_VADDR) /* high mem, va - KERNEL_VADDR = pa */
        | UXN /* Unprivileged execute never */
        | ACCESSED /* Set access flag */
        | NG /* Mark as not global */
        | INNER_SHARABLE /* Sharebility */
        | NORMAL_MEMORY /* Normal memory */
        | IS_VALID;
}
/* BLANK END */

/* Step 2: map PERIPHERAL_BASE ~ PHYSMEM_END with 2MB granularity */
/* BLANK BEGIN */
for (vaddr = PERIPHERAL_BASE + KERNEL_VADDR; vaddr < KERNEL_VADDR + PHYSMEM_END; vaddr += SIZE_2M) {
    boot_ttbr1_12[GET_L2_INDEX(vaddr)] =
        (vaddr - KERNEL_VADDR) /* high mem, va - KERNEL_VADDR = pa */
        | UXN /* Unprivileged execute never */
        | ACCESSED /* Set access flag */
        | NG /* Mark as not global */
        | DEVICE_MEMORY /* Device memory */
        | IS_VALID;
}
/* BLANK END */
/* LAB 1 TODO 5 END */
```

`Vaddr` 要跳转到高位地址, 所以要加上 `KERNEL_VADDR`, 然后通过循环时候 `step` 的大小来控制粒度。需要注意的是

`(vaddr - KERNEL_VADDR) /* low mem, va = pa */`, 这里要设置为物理地址 (低位地址)。

思考题 10: 请思考在 `init_kernel_pt` 函数中为什么还要为低地址配置页表, 并尝试验证自己的解释。

因为在启动mmu的 `el1_mmu_activate` 函数中设置 `sctlr_el1` 后, `chcore`将使用虚拟地址, 然而下一条指令仍位于低地址空间, 使得 `chcore`无法继续初始化。

验证: 删除掉低地址配置代码后进入 `gdb` 将断点打在 `el1_mmu_activate` 函数, 然后进行几步 `si`, `chcore`停止在 `[BOOT] Install kernel page table`, 同时gdb显示进入 `invalidate_cache_all`。

```
os@ubuntu:~/OS-Course-Lab$ make qemu-gdb
boot: init_c
[BOOT] Install kernel page table
```

```
0x880e8 <invalidate_cache_all+76>    lsl     w12, w8, w5
0x880ec <invalidate_cache_all+80>    ubfx    w7, w1, #13, #15
0x880f0 <invalidate_cache_all+84>    lsl     w7, w7, w2
0x880f4 <invalidate_cache_all+88>    lsl     w13, w8, w2
0x880f8 <invalidate_cache_all+92>    orr     w11, w10, w9
0x880fc <invalidate_cache_all+96>    orr     w11, w11, w7
0x88100 <invalidate_cache_all+100>   dc      isw, x11
0x88104 <invalidate_cache_all+104>   subs    w7, w7, w13
>0x88108 <invalidate_cache_all+108>   b.ge    0x880f8 <invalidate_cache_all+92> // b.tcont
0x8810c <invalidate_cache_all+112>   subs    x9, x9, x12
0x88110 <invalidate_cache_all+116>   b.ge    0x880ec <invalidate_cache_all+80> // b.tcont
0x88114 <invalidate_cache_all+120>   add     w10, w10, #0x2
0x88118 <invalidate_cache_all+124>   cmp     w3, w10
0x8811c <invalidate_cache_all+128>   dsb     sy
0x88120 <invalidate_cache_all+132>   b.gt    0x880b4 <invalidate_cache_all+24>
0x88124 <invalidate_cache_all+136>   ic
0x88128 <invalidate_cache_all+140>   isb
0x8812c <invalidate_cache_all+144>   ret
0x88130 <eli_mmu_activate>         stp     x29, x30, [sp, #-16]!

remote Thread 1.1 In: invalidate_cache_all
0x0000000000880a4 in invalidate_cache_all ()
(gdb) si
0x0000000000880a8 in invalidate_cache_all ()
(gdb) si
0x0000000000880ac in invalidate_cache_all ()
(gdb) si 10
0x0000000000880d4 in invalidate_cache_all ()
(gdb) si
0x0000000000880d8 in invalidate_cache_all ()
(gdb) si
0x0000000000880dc in invalidate_cache_all ()
(gdb) si
0x0000000000880e0 in invalidate_cache_all ()
(gdb) si 10
0x000000000088108 in invalidate_cache_all ()
(gdb) si 10
0x000000000088108 in invalidate_cache_all ()
(gdb) si 10
0x000000000088108 in invalidate_cache_all ()
(gdb) a
```

如果将断点打在 `main` 函数，则输入 `ctrl + c` 后会显示 `cannot access memory at address 0x200`

```
(gdb) b main
Breakpoint 1 at 0xffffffff0000008e120
(gdb) c
Continuing.

Thread 1 received signal SIGINT, Interrupt.
0x00000000000000200 in ?? ()
Cannot access memory at address 0x200
```

1. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/453687153>
2. https://blog.csdn.net/weixin_44073864/article/details/111192476
3. <https://blog.csdn.net/jielunqiu/article/details/84939858>