操作系统lab0 & lab0.5实验报告

李远宇 2110498　　朱霞洋 2113301　　李秉睿 2113087

本次实验中，小组成员研究探讨了启动Qemu，并结合GDB进行远程调试的过程，并通过GDB的单步调试、查看寄存器状态和riscv-5汇编代码的方法，对于Qemu的启动和bootloader以及内核镜像的加载过程有了大致了解。我们将Qemu模拟的virt machine启动的流程分为三个阶段：

1.virt machine加电开机时将计算机系统处理器、内存等初始化，并加载启动启动Bootloader；

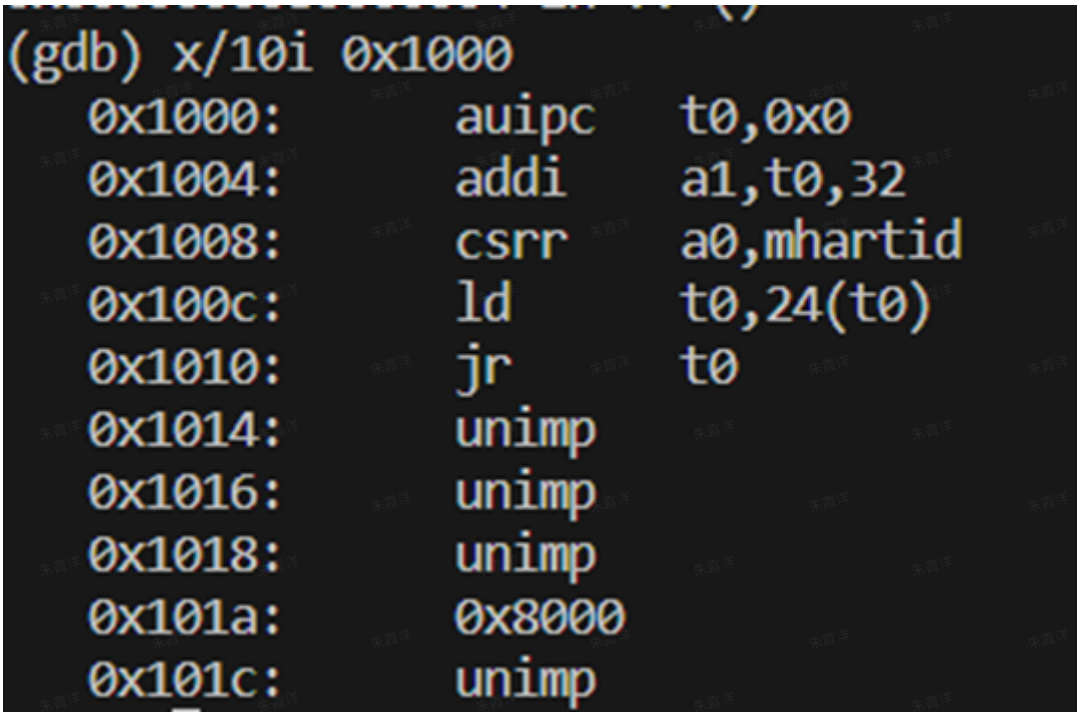
2.Bootloader开始工作，将操作系统镜像os.bin从物理硬盘加载到内存中；

3.控制权交给操作系统，计算机开始工作

接下来将进一步探讨各阶段，并探究Qemu加电时的几条指令的位置和功能，并回答RISC-V硬件加电后的几条指令在哪里，和其完成了什么功能两个问题。

第一阶段：Qemu加电开机，加载启动Bootloader

在电脑开机运行之前，需要Bootloader程序将操作系统加载到内存中。在QEMU模拟的riscv计算机里，其自带的bootloader: OpenSBI固件会被加载到内存地址 0x80000000 开头的区域上，然后将操作系统镜像 os.bin 加载到内存地址 0x80200000 开头的区域上。然而本次实验发现，Qemu加电开机时的前几条指令并不位于0x80000000，而是位于0x1000的复位地址上，说明前几条指令并不是Bootloader，而是一段初始化代码，会将t0寄存器初始化为0x80000000，然后在0x1010处的指令会跳转到t0指向的地址，运行Bootloader



在查阅资料后，我们得知了这段代码的作用：

```
auipc t0, 0x0 ;这是一条"Add Upper Immediate to PC" (AUIPC) 指令。它将立即数 (这里是0
addi a1, t0, 32 ;这是一条"Add Immediate" (ADDI) 指令。它将寄存器 t0 中的值与立即数 32
csrr a0, mhartid ;这是一条"Control and Status Register Read" (CSRR) 指令。它用于读
ld t0, 24(t0) ;这是一条"Load Doubleword" (LD) 指令。它用于从内存地址 t0 + 24 读取一个
jr t0 ;这是一条"Jump Register" (JR) 指令。它将寄存器 t0 中的值解释为跳转目标地址，并跳
```

为了更好地理解Qemu加电启动的流程，以及搞清楚为什么会从0x1000开始运行指令，我们找到了Qemu启动时重置cpu的源码，源码定义了重置cpu的函数，有以下这段代码：

```
// in /target/riscv/cpu.c
static void riscv_cpu_reset(CPUState *cs)
{
    RISCVCPU *cpu = RISCV_CPU(cs);
    RISCVCPUClass *mcc = RISCV_CPU_GET_CLASS(cpu);
    CPURISCVState *env = &cpu->env;

    mcc->parent_reset(cs);
#ifndef CONFIG_USER_ONLY
    env->priv = PRV_M;
    env->mstatus &= ~(MSTATUS_MIE | MSTATUS_MPRV);
    env->mcause = 0;
    env->pc = env->resetvec;
#endif
    cs->exception_index = EXCP_NONE;
    env->load_res = -1;
```

```
17      set_default_nan_mode(1, &env->fp_status);
18  }
```

这段代码首先从传递给函数的 `CPUState` 结构指针中得到RISC-V CPU的状态和配置。然后调用 `mcc->parent_reset(cs)` ，其中 `parent_reset` 调用了RISC-V CPU的父类（通用CPU类）的 `reset` 函数，执行通用的重置操作。

接下来，如果没有定义 `CONFIG_USER_ONLY` ，执行以下操作：

- 设置机器模式。
- 禁用中断和重定位权限模式。
- 表示清除异常原因。
- 将CPU的程序计数器（PC）设置为复位向量地址 `env->resetvec` 。

于是推测env->resetvec的值为0x1000。

执果索因，我们最终在cpu.c引入的头文件中，找到了resetvec设置的线索：

```
static void riscv_any_cpu_init(Object *obj)
{
    CPURISCVState *env = &RISCV_CPU(obj)->env;
    set_misa(env, RVXLEN | RVI | RVM | RVA | RVF | RVD | RVC | RVU);
    static void set_resetvec(CPURISCVState *env, int resetvec)
    set_resetvec(env, DEFAULT_RSTVEC);
}

#if defined(TARGET_RISCV32)
```

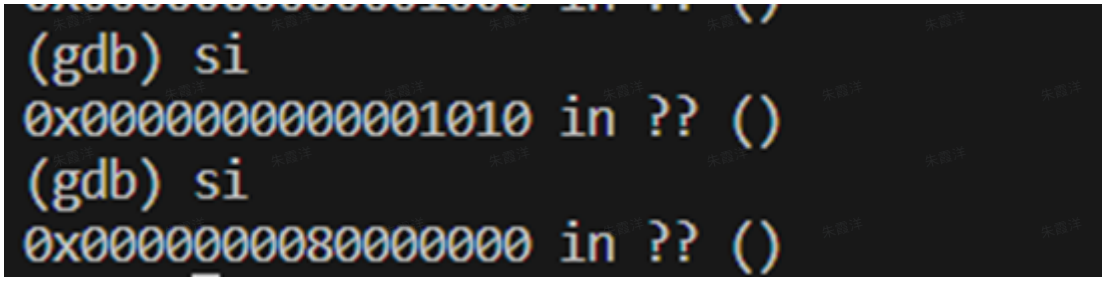
在初始化的阶段中，Qemu内部会执行一个set_resetvec函数，将env->resetvec重置为DEFAULT_RSTVEC，而这个DEFAULT_RSTVEC又在头文件的宏定义中，设置为了固定值0x1000，因此可知，这个复位地址是由Qemu内部决定的，是运行bootloader之前的先导过程，用于初始化电脑的cpu和内存等。

```
#define PGSHIFT                 12

/* Default Reset Vector adress */
#define DEFAULT_RSTVEC      0x1000
```

第二阶段：Bootloader将内核镜像os.bin加载至内存

上面提到，在单步调试时，Qemu加电启动到**0x1010**时，会跳转到Bootloader的内存起始地址开始执行代码：



接下来计算机运行的汇编指令较为冗长复杂，期间涉及多次跳转，因此，我们阅读了在 `qemu` 模拟 `Risc-V` 的 `C` 的源代码中，其中写出了操作系统初始化模拟RiscV环境主板的流程。

```c
// in /target/riscv/virt.c
static void riscv_virt_board_init(MachineState *machine)
{
    const struct MemmapEntry *memmap = virt_memmap;

    RISCVVirtState *s = g_new0(RISCVVirtState, 1);
    MemoryRegion *system_memory = get_system_memory();
    MemoryRegion *main_mem = g_new(MemoryRegion, 1);
    MemoryRegion *mask_rom = g_new(MemoryRegion, 1);
    char *plic_hart_config;
    size_t plic_hart_config_len;
    int i;
    unsigned int smp_cpus = machine->smp.cpus;
    void *fdt;

    /*...*/

    /* boot rom */
    memory_region_init_rom(mask_rom, NULL, "riscv_virt_board.mrom",
                           memmap[VIRT_MROM].size, &error_fatal);
    memory_region_add_subregion(system_memory, memmap[VIRT_MROM].base,
                                mask_rom);

    /*
    load kernel os.bin
    */
    riscv_find_and_load_firmware(machine, BIOS_FILENAME,
                                 memmap[VIRT_DRAM].base);

    if (machine->kernel_filename) {
        uint64_t kernel_entry = riscv_load_kernel(machine->kernel_filename);

        if (machine->initrd_filename) {
```

```
34              hwaddr start;
35              hwaddr end = riscv_load_initrd(machine->initrd_filename,
36                                             machine->ram_size, kernel_entry,
37                                             &start);
38              qemu_fdt_setprop_cell(fdt, "/chosen",
39                                    "linux,initrd-start", start);
40              qemu_fdt_setprop_cell(fdt, "/chosen", "linux,initrd-end",
41                                    end);
42          }
43      }
44
45      /* reset vector */
46      uint32_t reset_vec[8] = {
47          0x00000297,                  /* 1:  auipc  t0, %pcrel_hi(dtb) */
48          0x02028593,                  /*     addi   a1, t0, %pcrel_lo(1b) */
49          0xf1402573,                  /*     csrr   a0, mhartid  */
50  #if defined(TARGET_RISCV32)
51          0x0182a283,                  /*     lw     t0, 24(t0) */
52  #elif defined(TARGET_RISCV64)
53          0x0182b283,                  /*     ld     t0, 24(t0) */
54  #endif
55          0x00028067,                  /*     jr     t0 */
56          0x00000000,
57          memmap[VIRT_DRAM].base,      /* start: .dword memmap[VIRT_DRAM].base */
58          0x00000000,
59                                       /* dtb: */
60      };
61
62      /* copy in the reset vector in little_endian byte order */
63      for (i = 0; i < sizeof(reset_vec) >> 2; i++) {
64          reset_vec[i] = cpu_to_le32(reset_vec[i]);
65      }
66      rom_add_blob_fixed_as("mrom.reset", reset_vec, sizeof(reset_vec),
67                            memmap[VIRT_MROM].base, &address_space_memory);
68
69      /* copy in the device tree */
70      if (fdt_pack(s->fdt) || fdt_totalsize(s->fdt) >
71              memmap[VIRT_MROM].size - sizeof(reset_vec)) {
72          error_report("not enough space to store device-tree");
73          exit(1);
74      }
75      qemu_fdt_dumpdtb(s->fdt, fdt_totalsize(s->fdt));
76      rom_add_blob_fixed_as("mrom.fdt", s->fdt, fdt_totalsize(s->fdt),
77                            memmap[VIRT_MROM].base + sizeof(reset_vec),
78                            &address_space_memory);
79
80      /*...*/
```

```
81
82      g_free(plic_hart_config);
83  }
```

这段代码是 QEMU 中 RISC-V 架构的 virt 机型的初始化代码，它的作用是初始化虚拟机的内存布局和其他必要的配置，特别是针对 RISC-V 的 Virt 机型。

1. `const struct MemmapEntry *memmap = virt_memmap;`：这行代码定义了一个指向内存映射表的指针，该内存映射表描述了虚拟机的内存布局，包括 RAM、设备内存、固件等。

2. `RISCVVirtState *s = g_new0(RISCVVirtState, 1);`：这里创建了一个 RISC-V Virt 机型的状态结构体。这个结构体用于保存虚拟机的状态信息。

3. `MemoryRegion *system_memory = get_system_memory();`：获取系统内存的指针，系统内存是虚拟机中所有内存区域的容器。

4. `MemoryRegion *main_mem = g_new(MemoryRegion, 1);`：创建了一个新的内存区域用于表示主内存，但在这段代码中并没有被初始化。

5. `MemoryRegion *mask_rom = g_new(MemoryRegion, 1);`：创建了一个新的内存区域用于表示引导固件（boot ROM），并命名为 "riscv_virt_board.mrom"。

6. `memory_region_init_rom(mask_rom, NULL, "riscv_virt_board.mrom", memmap[VIRT_MROM].size, &error_fatal);`：初始化引导固件内存区域，该内存区域是只读的，用于存储虚拟机引导时执行的代码。

7. `memory_region_add_subregion(system_memory, memmap[VIRT_MROM].base, mask_rom);`：将引导固件内存区域添加到系统内存中，以便虚拟机可以访问并执行引导代码。

这段代码的核心功能是为 RISC-V Virt 机型初始化内存布局，其中包括主内存和引导固件，以便启动和运行虚拟机。它还涉及到一些其他配置和状态的初始化，以确保虚拟机的正确运行。

```
1      const struct MemmapEntry *memmap = virt_memmap;
2
```

```
    RISCVVirtState *s = g_new0(RISCVVirtState, 1);
    MemoryRegion *system_memory = get_system_memory();
    MemoryRegion *main_mem = g_new(MemoryRegion, 1);
    MemoryRegion *mask_rom = g_new(MemoryRegion, 1);
    char *plic_hart_config;
    size_t plic_hart_config_len;
    int i;
    unsigned int smp_cpus = machine->smp.cpus;
    void *fdt;

    /*...*/

    /* boot rom */
    memory_region_init_rom(mask_rom, NULL, "riscv_virt_board.mrom",
                           memmap[VIRT_MROM].size, &error_fatal);
    memory_region_add_subregion(system_memory, memmap[VIRT_MROM].base,
                                mask_rom);
```

加载内核时，我们发现了加载文件的路径,同时我们观察***riscv_find_and_load_firmware***函数的源码

```
408     riscv_find_and_load_firmware(machine, BIOS_FILENAME,
409                                  memmap[VIRT_DRAM].base);
410
```

```
47 #if defined(TARGET_RISCV32)
48 # define BIOS_FILENAME "opensbi-riscv32-virt-fw_jump.bin"
49 #else
50 # define BIOS_FILENAME "opensbi-riscv64-virt-fw_jump.bin"
51 #endif
52
```

```
// in /target/riscv/virt.c

    /*
    load kernel os.bin
    */

    riscv_find_and_load_firmware(machine, BIOS_FILENAME,
                                 memmap[VIRT_DRAM].base);
```

```
// in /target/riscv/boot.c
```

```
void riscv_find_and_load_firmware(MachineState *machine,
                                  const char *default_machine_firmware,
                                  hwaddr firmware_load_addr)
{
    char *firmware_filename;

    if (!machine->firmware) {
        /*
         * The user didn't specify -bios.
         * At the moment we default to loading nothing when this hapens.
         * In the future this defaul will change to loading the prebuilt
         * OpenSBI firmware. Let's warn the user and then continue.
         */
        if (!qtest_enabled()) {
            warn_report("No -bios option specified. Not loading a firmware.");
            warn_report("This default will change in a future QEMU release. " \
                        "Please use the -bios option to avoid breakages when "\
                        "this happens.");
            warn_report("See QEMU's deprecation documentation for details.");
        }
        return;
    }

    if (!strcmp(machine->firmware, "default")) {
        /*
         * The user has specified "-bios default". That means we are going to
         * load the OpenSBI binary included in the QEMU source.
         *
         * We can't load the binary by default as it will break existing users
         * as users are already loading their own firmware.
         *
         * Let's try to get everyone to specify the -bios option at all times,
         * so then in the future we can make "-bios default" the default option
         * if no -bios option is set without breaking anything.
         */
        firmware_filename = qemu_find_file(QEMU_FILE_TYPE_BIOS,
                                           default_machine_firmware);
        if (firmware_filename == NULL) {
            error_report("Unable to load the default RISC-V firmware \"%s\"",
                         default_machine_firmware);
            exit(1);
        }
    } else {
        firmware_filename = machine->firmware;
    }

    if (strcmp(firmware_filename, "none")) {
```

```
49          /* If not "none" load the firmware */
50          riscv_load_firmware(firmware_filename, firmware_load_addr);
51      }
52
53      if (!strcmp(machine->firmware, "default")) {
54          g_free(firmware_filename);
55      }
56  }
```

这段代码主要包括了以下操作：

1. 检查用户是否指定了 `-bios` 选项，如果没有，则打印警告信息，并提醒用户在未来的版本中需要指定 `-bios` 选项。
2. 如果用户指定了 `-bios default`，则尝试加载默认的 RISC-V 固件（OpenSBI 二进制文件）。如果找不到默认固件文件，则报错并退出。
3. 如果用户指定了自定义固件文件，则加载该自定义固件。
4. 如果用户指定了 `-bios default`，则释放默认固件的文件名内存。

总之，这段代码的目标是确保在启动 RISC-V 虚拟机时能够加载正确的固件或内核，或者提醒用户在未来的版本中指定 `-bios` 选项以保持一致性。

```
1       /* reset vector */
2       uint32_t reset_vec[8] = {
3           0x00000297,                  /* 1:  auipc  t0, %pcrel_hi(dtb) */
4           0x02028593,                  /*     addi   a1, t0, %pcrel_lo(1b) */
5           0xf1402573,                  /*     csrr   a0, mhartid  */
6   #if defined(TARGET_RISCV32)
7           0x0182a283,                  /*     lw     t0, 24(t0) */
8   #elif defined(TARGET_RISCV64)
9           0x0182b283,                  /*     ld     t0, 24(t0) */
10  #endif
11          0x00028067,                  /*     jr     t0 */
12          0x00000000,
13          memmap[VIRT_DRAM].base,      /* start: .dword memmap[VIRT_DRAM].base */
14          0x00000000,
15                                       /* dtb: */
16      };
```

这段代码构建了一个 RISC-V 平台的引导向量，它将系统引导到指定的内存地址，并初始化一些寄存器和 CSR 寄存器的值，以启动操作系统的引导过程。这段代码通常位于处理器的引导 ROM 中，并在硬件上电或重置时执行，从而启动操作系统的加载和执行过程。

1. `0x00000297`：这是一个 RISC-V 汇编指令（机器指令），`auipc` 用于将程序计数器的高 20 位与一个偏移量相加，并将结果存储在目标寄存器（在这里是 `t0`）。这里的 `auipc t0, %pcrel_hi(dtb)` 意味着将当前位置（`1b` 处）到数据表（DTB，Device Tree Blob）的高 20 位偏移量加载到 `t0` 寄存器中。

2. `0x02028593`：这是 `addi` 指令，将 `t0` 寄存器中的值与 `%pcrel_lo(1b)` 中的低 12 位偏移量相加，结果存储在 `a1` 寄存器中。这个操作用于计算相对于当前位置（`1b` 处）的低 12 位偏移量。

3. `0xf1402573`：这是一个 `csrr` 指令，用于读取 CSR（Control and Status Register）寄存器的值。它读取 `mhartid` 寄存器的值（机器模式下的硬件线程 ID），并将结果存储在 `a0` 寄存器中。

4. 条件编译部分：这部分代码根据目标 RISC-V 架构是 32 位还是 64 位来选择不同的指令。在 32 位情况下，它使用 `lw` 指令，而在 64 位情况下，它使用 `ld` 指令。这些指令都是从内存中加载数据到 `t0` 寄存器中。

5. `0x00028067`：这是 `jr` 指令，用于跳转到 `t0` 寄存器中存储的地址，即启动引导过程。这是重要的引导指令。

6. `0x00000000`：这是填充的空指令（NOP），用于保持指令地址对齐。

7. `memmap[VIRT_DRAM].base`：这是一个注释，标志着引导向量的结束。

然后再接着对是否出现异常、加载操作结果、浮点数操作模式进行设置。

```
    /* copy in the reset vector in little_endian byte order */
    for (i = 0; i < sizeof(reset_vec) >> 2; i++) {
        reset_vec[i] = cpu_to_le32(reset_vec[i]);
    }
    rom_add_blob_fixed_as("mrom.reset", reset_vec, sizeof(reset_vec),
                          memmap[VIRT_MROM].base, &address_space_memory);

    /* copy in the device tree */
    if (fdt_pack(s->fdt) || fdt_totalsize(s->fdt) >
            memmap[VIRT_MROM].size - sizeof(reset_vec)) {
        error_report("not enough space to store device-tree");
        exit(1);
```

```
    }
    qemu_fdt_dumpdtb(s->fdt, fdt_totalsize(s->fdt));
    rom_add_blob_fixed_as("mrom.fdt", s->fdt, fdt_totalsize(s->fdt),
                          memmap[VIRT_MROM].base + sizeof(reset_vec),
                          &address_space_memory);

    /*...*/

    g_free(plic_hart_config);
```

这段代码主要是将引导向量和设备树添加到系统的内存中。

1. `for` 循环将引导向量中的每个 32 位字从主机字节序（通常是大端字节序）转换为小端字节序。这是因为不同的 CPU 架构可能使用不同的字节序，而 RISC-V 通常使用小端字节序。`cpu_to_le32` 是一个函数，用于执行这个字节序转换。
2. `rom_add_blob_fixed_as` 函数将处理好的引导向量添加到内存中。它将引导向量的内容存储到名为 "mrom.reset" 的内存区域中，位置是 `memmap[VIRT_MROM].base`。这是引导 ROM 的一部分，用于启动系统。
3. 接下来，代码处理设备树（Device Tree）。它检查设备树是否已打包（packed）并检查设备树的总大小是否适合存储在引导 ROM 中。如果不适合，会输出错误消息并退出程序。
4. `qemu_fdt_dumpdtb` 函数将设备树的内容转储到 `s->fdt` 中，然后使用 `rom_add_blob_fixed_as` 函数将设备树添加到名为 "mrom.fdt" 的内存区域中。设备树通常用于描述硬件和系统配置信息，以便操作系统在引导时使用。
5. 最后，`g_free` 用于释放之前动态分配的 `plic_hart_config` 变量的内存，以便防止内存泄漏。

总之，这段代码负责初始化引导向量、设备树，并将它们存储在系统内存的适当位置，以便在启动过程中使用。这是启动和配置 RISC-V 虚拟机所必需的步骤之一。

之后，程序将依照判断优先级，加载操作系统固件、内核等，此时会返回 **`KERNEL_BOOT_ADDRESS` 即宏定义的 `0x80200000`**，并最后跳转到该地址。

总结下来，bootloader在这个阶段将完成一些 CPU 的初始化工作，并且将操作系统镜像从硬盘加载到物理内存中，最后跳转到操作系统起始地址将控制权转移给操作系统。

第三阶段：操作系统接管计算机，计算机开始运行

在本次实验中，我们在操作系统起始位置0x80200000处打断点并运行到此处，可以发现此时计算机已经开始准备运行程序输出

```
1 (THU.CST) os is loading ...
```