练习1：理解内核启动中的程序入口操作

理解内核启动中的程序入口操作

练习内容

阅读 $kern/init/entry.S$内容代码，结合操作系统内核启动流程，说明指令 $la\ sp, bootstacktop$ 完成了什么操作，目的是什么？ $tail\ kern_init$ 完成了什么操作，目的是什么？

具体实验过程

因为需要结合操作系统内核启动流程，所以我们首先需要明确的是操作系统内核启动流程是什么：

1. **硬件初始化**: CPU上电后，从固定地址开始执行
2. **引导加载器(Bootloader)**: 将内核加载到内存地址 `0x80200000`（在$kernel.ld$中定义的 `BASE_ADDRESS`）
3. **内核入口点**: 跳转到 `kern_entry` 标签开始执行内核代码
4. **栈初始化**: 设置内核栈
5. **内核初始化**: 调用 `kern_init` 函数

(1)$la\ sp$,$bootstacktop$

明确了流程之后我们需要首先解读指令$la\ sp$,$bootstacktop$

la的完整指令名称叫$load\ address$，这个指令将$bootstacktop$的地址加载到了栈指针寄存器sp中，其中$bootstacktop$是在汇编代码末尾定义的标签，指向栈顶位置。这段指令的目的是：初始化内核栈: 为内核建立一个可用的栈空间。其中栈空间的大小: 根据 $memlayout.h$ 定义，栈大小为 $KSTACKSIZE = KSTACKPAGE * PGSIZE = 2 * 4096 = 8KB$，同时栈增长方向: 在RISC-V架构中，栈是向下增长的，所以 `sp` 指向栈顶（高地址）

总结来说整个栈的布局如下：

```
高地址 → bootstacktop  ← sp指向这里
         |             |
         |   8KB栈     |
         |   空间       |
低地址 → bootstack
```

(2)$tail\ kern\_init$

$tail$ 是一个伪指令，相当于尾调用优化的跳转,实际上等价于 $jal\ x0, kern\_init$，即跳转到 $kern\_init$ 函数但不保存返回地址。这个操作的目的有三个：

1. 转移控制权: 将程序控制权转移给C语言编写的 `kern_init` 函数
2. 节省栈空间: 使用尾调用避免在栈上保存返回地址，因为这是一个不会返回的调用
3. 开始C代码执行: 从汇编代码过渡到C代码，开始真正的内核初始化

我们了解完$tail\ kern_init$这个指令的意思之后，我们来看看$kern_init$函数，我们使用$grep$命令之后看到了在$init.c$文件里面的$kern_init$函数的定义：

```c
int kern_init(void) {
    extern char edata[], end[];
    memset(edata, 0, end - edata);  // 清零BSS段

    const char *message = "(THU.CST) os is loading ...\n";
    cprintf("%s\n\n", message);     // 输出启动信息
    while (1);                      // 无限循环（目前只是演示）
}
```

为了搞清楚这个函数的具体作用，我们于是往上的结构去寻找，找到了$kern_entry$再继续向上寻找，找到了$kernel.id$脚本，最终获得了整个流程：

1. CPU启动 → 固定地址加载内核 → 跳到链接脚本指定的入口点（`kern_entry`）
2. `kern_entry`（汇编） → 初始化栈等 → 跳到`kern_init`（C语言）
3. `kern_init`（C语言） → 进行内核初始化

GDB调试信息

我们可以在`GDB`中进行以下调试：

```
(gdb) info address bootstack
Symbol "bootstack" is at 0x80201000 in a file compiled without debugging.
(gdb) info address bootstacktop
Symbol "bootstacktop" is at 0x80203000 in a file compiled without debugging.
(gdb) info registers sp
sp             0x0      0x0
(gdb) b* kern_entry
Breakpoint 1 at 0x80200000: file kern/init/entry.S, line 7.
(gdb) c
Continuing.

Breakpoint 1, kern_entry () at kern/init/entry.S:7
7           la sp, bootstacktop
(gdb) info address bootstack
Symbol "bootstack" is at 0x80201000 in a file compiled without debugging.
(gdb) info address bootstacktop
Symbol "bootstacktop" is at 0x80203000 in a file compiled without debugging.
(gdb) info registers sp
sp             0x8001bd80       0x8001bd80
(gdb) si
0x0000000080200004 in kern_entry () at kern/init/entry.S:7
7           la sp, bootstacktop
(gdb) info registers sp
sp             0x80203000       0x80203000 <SBI_CONSOLE_PUTCHAR>
(gdb)
```

如上所示，我们查看符号地址：

```
(gdb) info address bootstack
(gdb) info address bootstacktop
```

输出

```
Symbol "bootstack" is at 0x80201000
Symbol "bootstacktop" is at 0x80203000
```

查看设置栈前后 sp 的变化：

执行指令

```
(gdb) info registers sp
```

我们发现，一开始，

```
sp = 0x0
```

我们在`kern_entry`处设置断点之后执行程序在此处中断，然后再单步执行之后查看sp寄存器，执行指令：

```
(gdb)si
(gdb)info registers sp
```

我们可以发现`sp`的值被设置为了`0x80203000`，这与`bookstacktop`一致，说明栈帧已经成功创建！

继续执行并观察跳转：

```
(gdb) si
(gdb) info registers pc
```

此时`pc`跳到了`kern_init`的地址，说明`tail kern_init`已经执行。

练习2: 使用GDB验证启动流程

首先，我们使用`make`命令来测试代码的`makefile`，得到结果如下：

```
(base) lamp@gsags:/mnt/d/desktop/os/lab1$ make
make: Warning: File 'obj/kern/driver/console.d' has modification time 1.8 s in the future
+ cc kern/init/entry.S
+ cc kern/init/init.c
+ cc kern/libs/stdio.c
+ cc kern/driver/console.c
+ cc libs/printfmt.c
+ cc libs/readline.c
+ cc libs/sbi.c
+ cc libs/string.c
+ ld bin/kernel
riscv64-unknown-elf-objcopy bin/kernel --strip-all -O binary bin/ucore.img
make: warning:  Clock skew detected.  Your build may be incomplete.
```

make成功，说明我们的`makefile`是正确的。

接着，我们使用makefile里定义好的命令行，利用`make`后生成的`ucore.img`打开qemu模拟器：

```
make debug
```

这样，我们的qemu就已经启动并在后台运行了。接下来，我们再开启一个wsl窗口，运行`make gdb`并连接到qemu：

运行结果如下：

```
(base) lamp@gsags:/mnt/d/desktop/os/lab1$ make gdb
riscv64-unknown-elf-gdb \
    -ex 'file bin/kernel' \
    -ex 'set arch riscv:rv64' \
    -ex 'target remote localhost:1234'
GNU gdb (SiFive GDB-Metal 10.1.0-2020.12.7) 10.1
Copyright (C) 2020 Free Software Foundation, Inc.
License GPLv3+: GNU GPL version 3 or later <http://gnu.org/licenses/gpl.html>
This is free software: you are free to change and redistribute it.
There is NO WARRANTY, to the extent permitted by law.
Type "show copying" and "show warranty" for details.
This GDB was configured as "--host=x86_64-linux-gnu --target=riscv64-unknown-el
f".
Type "show configuration" for configuration details.
For bug reporting instructions, please see:
<https://github.com/sifive/freedom-tools/issues>.
Find the GDB manual and other documentation resources online at:
    <http://www.gnu.org/software/gdb/documentation/>.

For help, type "help".
Type "apropos word" to search for commands related to "word".
Reading symbols from bin/kernel...
The target architecture is set to "riscv:rv64".
Remote debugging using localhost:1234
0x0000000000001000 in ?? ()
```

然后，我们使用`info registers`查看所有寄存器的信息：

```
(gdb) info registers
ra             0x0        0x0
sp             0x0        0x0
gp             0x0        0x0
tp             0x0        0x0
t0             0x0        0
t1             0x0        0
t2             0x0        0
fp             0x0        0x0
s1             0x0        0
a0             0x0        0
a1             0x0        0
a2             0x0        0
a3             0x0        0
a4             0x0        0
a5             0x0        0
a6             0x0        0
a7             0x0        0
s2             0x0        0
s3             0x0        0
s4             0x0        0
s5             0x0        0
s6             0x0        0
s7             0x0        0
s8             0x0        0
s9             0x0        0
s10            0x0        0
s11            0x0        0
t3             0x0        0
t4             0x0        0
t5             0x0        0
t6             0x0        0
pc             0x1000     0x1000
(gdb)
```

发现输出了寄存器的信息，说明我们连接成功了。

然后我们使用`x/20i $pc`命令查看当前位置的最近20条指令，输出如下：

```
(gdb) x/20i $pc
=> 0x1000:      auipc   t0,0x0
   0x1004:      addi    a2,t0,40
   0x1008:      csrr    a0,mhartid
   0x100c:      ld      a1,32(t0)
   0x1010:      ld      t0,24(t0)
   0x1014:      jr      t0
   0x1018:      unimp
   0x101a:      0x8000
   0x101c:      unimp
   0x101e:      unimp
   0x1020:      unimp
   0x1022:      0x8700
   0x1024:      unimp
   0x1026:      unimp
   0x1028:      fnmadd.s        ft6,ft4,fs4,fs1,unknown
   0x102c:      unimp
   0x102e:      unimp
   0x1030:      c.slli64        zero
   0x1032:      unimp
   0x1034:      unimp
```

我们可以看到，`0x1014`上的jr指令跳转到了`t0`寄存器的位置，这里应该是重点，因为之后的命令都不会再被执行

我们使用`si`进行单步执行，然后查看涉及到的寄存器的值，来分析发生了什么变化：

```
(gdb) si
(gdb) info r t0
t0             0x1000   4096
(gdb) si
0x0000000000001008 in ?? ()
(gdb) info r a2
a2             0x1028   4136
(gdb) si
0x000000000000100c in ?? ()
(gdb) info r a0
a0             0x0      0
(gdb) si
0x0000000000001010 in ?? ()
(gdb) info r a1
a1             0x87000000       2264924160
(gdb) si
0x0000000000001014 in ?? ()
(gdb) info r t0
t0             0x80000000       2147483648
```

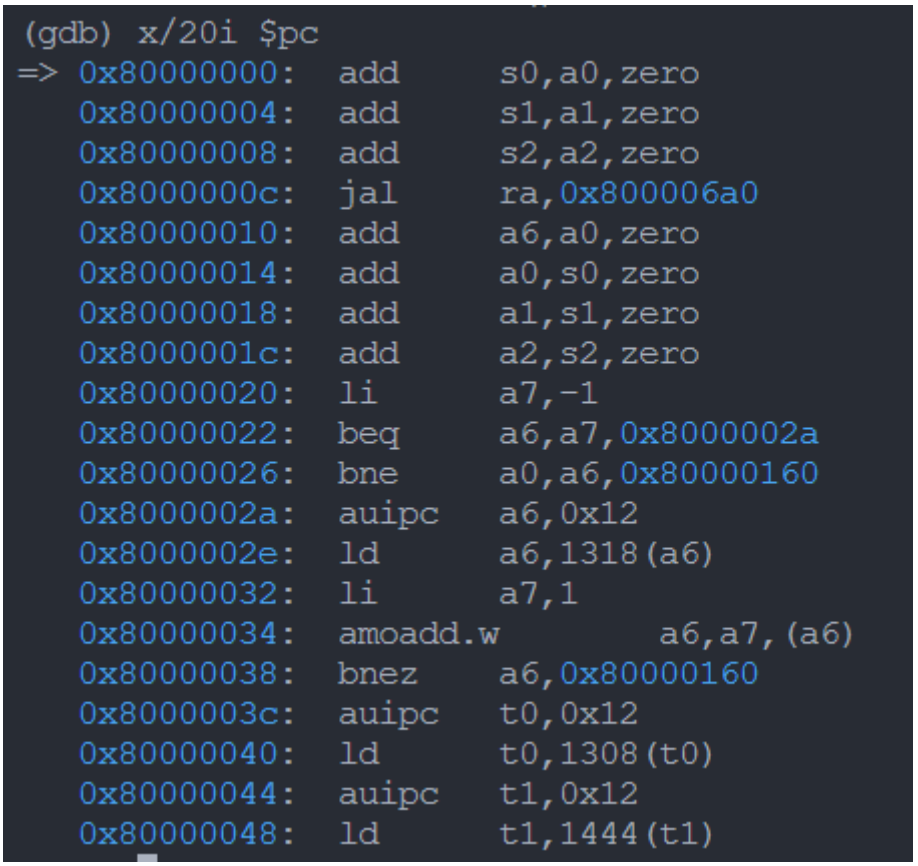
分析以上指令和相关寄存器的值的变化，我们可以看到，程序先将将当前PC地址(0x1000)加载到t0寄存器，作为基地址（因此第一次查看t0的值变成了0x1000），然后让a2指向t0+40（因此a2变为0x1028），再让a0读取硬件线程id，再从t0+32加载数据到a1。

以上均不是重点，在第六条指令（`0x1014`的`jr t0`）上，我们从地址`0x1018`（t0+24）上加载数据存到t0作为跳转目标。可以看到这次指令执行完毕之后，t0的值变为了`0x80000000`，说明我们将要跳转到`0x80000000`的位置。

我们继续执行`si`，执行这步jr，发现跳转到了`0x80000000`

```
(gdb) si
0x0000000080000000 in ?? ()
```

此时我们再查看下附近的20条指令



由于这部分代码很长，因此我们直接设置断点然后观察SBI何时将我们内核代码写入`0x80200000`

```
watch *kern_entry
c
```

在这之后，终端卡死在`continue`界面没有输出，我们手动`ctrl+c`中断debug，发现程序停止在`kern_init`里。这是因为，`watch`指令是检测到观测点的数值变化才会停止，但是我们的代码一开始就将内核加载，所以`0x80200000`不会有数值变化。

```
(base) lamp@gsags:/mnt/d/desktop/os/lab1$ make gdb
riscv64-unknown-elf-gdb \
    -ex 'file bin/kernel' \
    -ex 'set arch riscv:rv64' \
    -ex 'target remote localhost:1234'
GNU gdb (SiFive GDB-Metal 10.1.0-2020.12.7) 10.1
Copyright (C) 2020 Free Software Foundation, Inc.
License GPLv3+: GNU GPL version 3 or later <http://gnu.org/licenses/gpl.html>
This is free software: you are free to change and redistribute it.
There is NO WARRANTY, to the extent permitted by law.
Type "show copying" and "show warranty" for details.
This GDB was configured as "--host=x86_64-linux-gnu --target=riscv64-unknown-el
f".
Type "show configuration" for configuration details.
For bug reporting instructions, please see:
<https://github.com/sifive/freedom-tools/issues>.
Find the GDB manual and other documentation resources online at:
    <http://www.gnu.org/software/gdb/documentation/>.

For help, type "help".
Type "apropos word" to search for commands related to "word".
Reading symbols from bin/kernel...
The target architecture is set to "riscv:rv64".
Remote debugging using localhost:1234
0x0000000000001000 in ?? ()
(gdb) watch *0x80200000
Hardware watchpoint 1: *0x80200000
(gdb) c
Continuing.
^C
Program received signal SIGINT, Interrupt.
kern_init () at kern/init/init.c:12
12          while (1)
(gdb)
```

接下来，我们重新打开两个窗口，进入qemu和gdb，然后这次，我们使用

```
b *kern_entry
c
```

目的是进入 `kernel.ld` 文件中所定义的 `base_address`,也就是加载地址的位置。在执行完这个命令之后，得到的输出结果如下：

```
(base) lamp@gsags:/mnt/d/desktop/os/lab1$ make gdb
riscv64-unknown-elf-gdb \
    -ex 'file bin/kernel' \
    -ex 'set arch riscv:rv64' \
    -ex 'target remote localhost:1234'
GNU gdb (SiFive GDB-Metal 10.1.0-2020.12.7) 10.1
Copyright (C) 2020 Free Software Foundation, Inc.
License GPLv3+: GNU GPL version 3 or later <http://gnu.org/licenses/gpl.html>
This is free software: you are free to change and redistribute it.
There is NO WARRANTY, to the extent permitted by law.
Type "show copying" and "show warranty" for details.
This GDB was configured as "--host=x86_64-linux-gnu --target=riscv64-unknown-el
f".
Type "show configuration" for configuration details.
For bug reporting instructions, please see:
<https://github.com/sifive/freedom-tools/issues>.
Find the GDB manual and other documentation resources online at:
    <http://www.gnu.org/software/gdb/documentation/>.

For help, type "help".
Type "apropos word" to search for commands related to "word".
Reading symbols from bin/kernel...
The target architecture is set to "riscv:rv64".
Remote debugging using localhost:1234
0x0000000000001000 in ?? ()
(gdb)  b *0x80200000
Breakpoint 1 at 0x80200000: file kern/init/entry.S, line 7.
(gdb) c
Continuing.

Breakpoint 1, kern_entry () at kern/init/entry.S:7
7           la sp, bootstacktop
(gdb)
```

可以看到，我们停在了entry.s里的`la sp bootstacktop`这一行代码中，说明在这里，我们加载地址执行的汇编代码是这一行，也就是给栈顶指针sp赋值的这一块，同时，他也是我们定义的`kern_entry`这个标签下的代码位置。

接下来，我们再使用`x/10i $pc`观察下`0x80200000`附近的十条指令：

```
=> 0x80200000 <kern_entry>:     auipc   sp,0x3
   0x80200004 <kern_entry+4>:   mv      sp,sp
   0x80200008 <kern_entry+8>:   j       0x8020000a <kern_init>
   0x8020000a <kern_init>:      auipc   a0,0x3
   0x8020000e <kern_init+4>:    addi    a0,a0,-2
   0x80200012 <kern_init+8>:    auipc   a2,0x3
   0x80200016 <kern_init+12>:   addi    a2,a2,-10
   0x8020001a <kern_init+16>:   addi    sp,sp,-16
   0x8020001c <kern_init+18>:   li      a1,0
   0x8020001e <kern_init+20>:   sub     a2,a2,a0
```

我们查看下栈顶指针附近的十个内存单元的内容：

```
(gdb) x/10x $sp
0x8001bd80:     0x8001be00      0x00000000      0x8001be00      0x00000000
0x8001bd90:     0x46444341      0x55534d49      0x00000000      0x00000000
0x8001bda0:     0x00000000      0x00000000
```

可以发现，是一系列杂乱的数据。

接下来我们单步执行，然后再次查看sp附近十个单元的内容：

```
gdb) si
0x0000000080200004 in kern_entry () at kern/init/entry.S:7
7           la sp, bootstacktop
(gdb) x/10x $sp
0x80203000 <SBI_CONSOLE_PUTCHAR>:       0x00000001      0x00000000
0x000000000x00000000
0x80203010:     0x00000000      0x00000000      0x00000000      0x00000000
0x80203020:     0x00000000      0x00000000
```

发现已经基本都被清零，说明已经完成了内存清零的工作。

我们再单步执行几次，发现这一段内存全都是清零的了。

```
(gdb) si
9           tail kern_init
(gdb) x/10x $sp
0x80203000 <SBI_CONSOLE_PUTCHAR>:       0x00000001      0x00000000
0x000000000x00000000
0x80203010:     0x00000000      0x00000000      0x00000000      0x00000000
0x80203020:     0x00000000      0x00000000
(gdb) si
kern_init () at kern/init/init.c:8
8           memset(edata, 0, end - edata);
(gdb) x/10x $sp
0x80203000 <SBI_CONSOLE_PUTCHAR>:       0x00000001      0x00000000
0x000000000x00000000
0x80203010:     0x00000000      0x00000000      0x00000000      0x00000000
0x80203020:     0x00000000      0x00000000
(gdb)
```

> 在这一段过程中，曾有过疑问：内存清零不是kerninit里才干的事情吗？为什么在kernentry里单步执行，还没tail kern init就已经清零了？
>
> 在询问大模型以及自己思考之后，可以给出回答：kernentry这行汇编代码指令的作用是把bootstacktop赋值给sp，于是我们要查看的sp附近的内存单元就跳转到了botstacktop这里。所以，原来显示的是没有被清零的内存数据，执行了这条指令之后就变成了已经被清空过的bss段的数据。这是展示位置发生了变化。通过观察我们先后查看寄存器的地址，我们也可以看见，刚到kern_entry的时候，查看的地址是`0x8001bd80`，`0x8001bd90`，`0x8001bda0`，而单步执行后，看到的地址全都是`0x80203000`，`0x80203010`，`0x80203020`等，

在`kern_entry`设置了栈顶之后，就进入了我们用c语言自定义的内核初始化函数`kern_init`.然后我们追踪到`kern_init`，打好断点，

然后一路执行过去：

```
(gdb) b kern_init
Breakpoint 2 at 0x8020000a: file kern/init/init.c, line 8.
(gdb) c
Continuing.

Breakpoint 2, kern_init () at kern/init/init.c:8
8           memset(edata, 0, end - edata);
```

可以看到，我们进入了init.c文件中定义的kern_init()函数的第二行代码中。这行代码的意思是将栈空间重置为0.至于为什么不是跳转到第一行的`extern char edata[], end[];`是因为，它是变量的声明，而不是实际的代码执行。它告诉编译器，这两个符号在其他地方定义（通常是链接脚本），但不会生成任何指令。

然后我们可以查看一下`kern_init()`函数的完整反汇编代码（使用`disassemble kern_init`指令）：

```
(gdb) disassemble kern_init
Dump of assembler code for function kern_init:
=> 0x000000008020000a <+0>:     auipc   a0,0x3
   0x000000008020000e <+4>:     addi    a0,a0,-2 # 0x80203008
   0x0000000080200012 <+8>:     auipc   a2,0x3
   0x0000000080200016 <+12>:    addi    a2,a2,-10 # 0x80203008
   0x000000008020001a <+16>:    addi    sp,sp,-16
   0x000000008020001c <+18>:    li      a1,0
   0x000000008020001e <+20>:    sub     a2,a2,a0
   0x0000000080200020 <+22>:    sd      ra,8(sp)
   0x0000000080200022 <+24>:    jal     ra,0x802004b6 <memset>
   0x0000000080200026 <+28>:    auipc   a1,0x0
   0x000000008020002a <+32>:    addi    a1,a1,1186 # 0x802004c8
   0x000000008020002e <+36>:    auipc   a0,0x0
   0x0000000080200032 <+40>:    addi    a0,a0,1210 # 0x802004e8
   0x0000000080200036 <+44>:    jal     ra,0x80200056 <cprintf>
   0x000000008020003a <+48>:    j       0x8020003a <kern_init+48>
End of assembler dump.
```

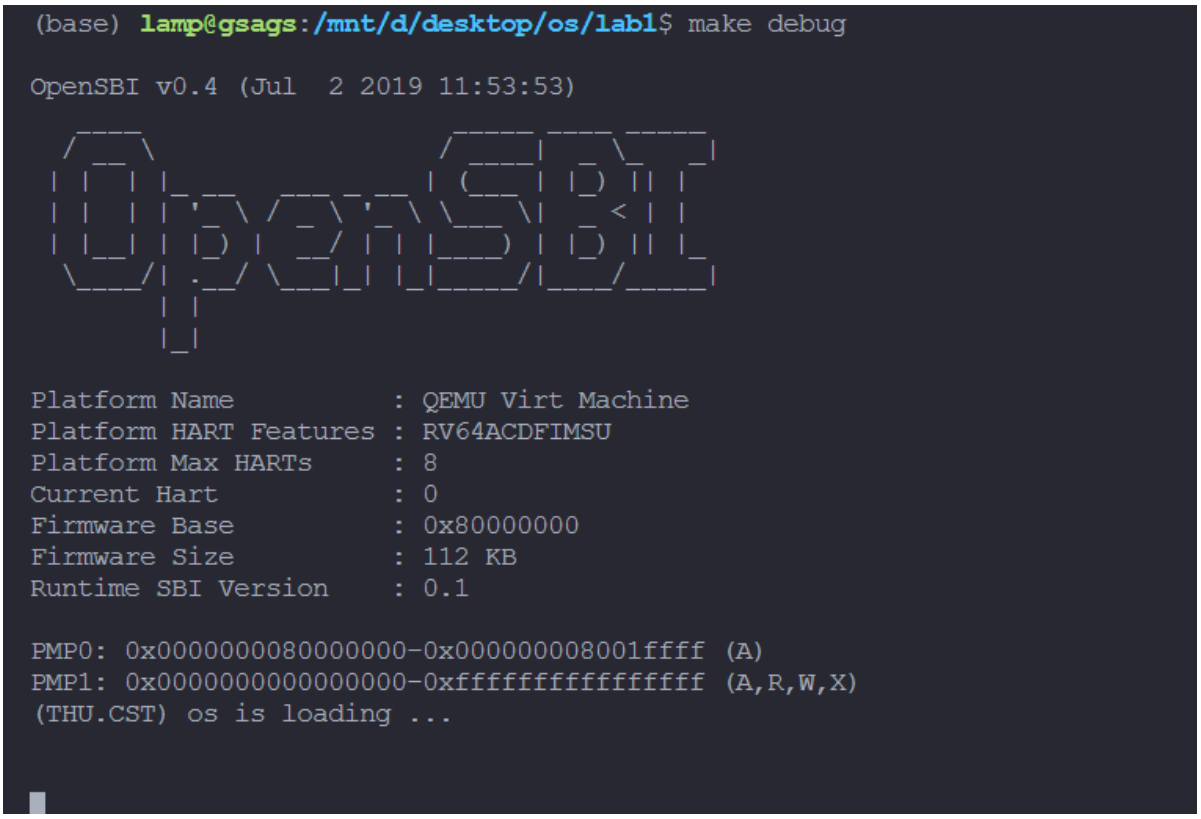
> 这里针对之前没有学过的新指令`auipc`给出一些笔记：它的作用是将立即数加到当前 PC 的高位，也就是将当前程序计数器（`PC`）的高 20 位加上一个立即数（`imm`），结果存入目标寄存器。
>
> 例如，第一行代码`auipc  a0,0x3`的意思就是 a0 = pc + 0x3 << 12，这行指令的目的是计算出全局变量的基地址，然后让下一行指令再对低位进行细微的调整来获得最终的变量地址。

在前四行，我们分别将`edata`、`end`的地址计算出并保存到`a0`和`a2`寄存器中，然后保存栈顶指针到`ra`寄存器里，在`0x0000000080200022`使用`jal`跳转调用`memset`函数进行清零操作。

值得注意的是，我们有一个while(1)的死循环代码，在这里，就是使用j指令跳转到当前j指令的地址，形成一个死循环。

> 这是显然的，因为从调试信息我们呢可以看到，j指令的地址就是kern_init+48，跟我们j指令跳转的目的地址一样。

然后我们再输入c进行continue，发现`qemu`的`debug`窗口出现了我们在`kern_init`函数中定义的输出：`(THU.CST) os is loading ...\n`，也代表我们的代码运行完毕了。具体执行效果如下：



问题回答

问题 1：RISC-V 硬件加电后最初执行的指令位于什么地址?

> 位于0x1000

问题 2：这些指令主要完成了哪些功能?

> 完成的功能如下：
>
> - `auipc t0,0x0`：用于加载一个20bit的立即数，`t0`中保存的数据是`(pc)+(0<<12)`。用于PC相对寻址。
> - `addi a1,t0,32`：将`t0`加上`32`，赋值给`a1`。
> - `csrr a0,mhartid`：读取状态寄存器`mhartid`，存入`a0`中。`mhartid`为正在运行代码的硬件线程的整数ID。
> - `ld t0,24(t0)`：双字，加载从`t0+24`地址处读取8个字节，存入`t0`。
> - `jr t0`：寄存器跳转，跳转到寄存器指向的地址处（此处为`0x80000000`）。