

1. 指令 `la sp, bootstacktop` 完成了什么操作，目的是什么？
2. `tail kern_init` 完成了什么操作，目的是什么？

答案

1. `la sp, bootstacktop` 指令分析

完成的操作：

`la` (load address) 是RISC-V的伪指令，将符号 `bootstacktop` 的地址加载到栈指针寄存器 `sp` 中

反汇编得到如下结果：

```
Breakpoint 1, kern_entry () at kern/init/entry.S:7
7          la sp, bootstacktop
(gdb) disas kern_entry
Dump of assembler code for function kern_entry:
=> 0x0000000080200000 <+0>:      auipc    sp,0x3
    0x0000000080200004 <+4>:      mv       sp,sp
    0x0000000080200008 <+8>:      j        0x8020000a <kern_init>
End of assembler dump.
```

在实际汇编中展开为：

```
# 我们写的代码：
# la sp, bootstacktop

# 汇编器看到后：
# 1. 查找 bootstacktop 的地址 = 0x80203000
# 2. 当前PC = 0x80200000
# 3. 计算差值 = 0x80203000 - 0x80200000 = 0x3000
# 4. 生成指令：auipc sp, 0x3

auipc sp, 0x3      # sp = PC + (0x3 << 12) = 0x80200000 + 0x3000 = 0x80203000
```

通过GDB验证：执行后 `sp` 的值从 `0x8001bd80` 变为 `0x80203000`

```

(gdb) i r sp
sp                0x8001bd80      0x8001bd80
(gdb) i r pc
pc                0x80200000      0x80200000 <kern_entry>
(gdb) si
0x0000000080200004 in kern_entry () at kern/init/entry.S:7
7          la sp, bootstacktop
(gdb) i r sp pc
sp                0x80203000      0x80203000 <SBI_CONSOLE_PUTCHAR>
pc                0x80200004      0x80200004 <kern_entry+4>

```

问题1: 为什么不直接写 `li sp, 0x80203000`?

答: RISC-V的立即数指令有长度限制, 32位地址 `0x80203000` 太大, 一条指令放不下 `la` 伪指令会自动处理这个问题

目的:

1. **初始化内核栈:** 为内核分配一个专用的栈空间

```

(gdb) p &bootstack
$1 = (<data variable, no debug info> *) 0x80201000
(gdb) p &bootstacktop
$2 = (<data variable, no debug info> *) 0x80203000 <SBI_CONSOLE_PUTCHAR>

```

- 栈底地址: `bootstack = 0x80201000`
- 栈顶地址: `bootstacktop = 0x80203000`
- 栈大小: 8KB (这个也可以看entry.S的那两个引用文件, `KSTACKSIZE = KSTACKPAGE * PGSIZE = 4096 * 2`)

2. **设置栈顶指针:** 由于栈是从高地址向低地址增长, 所以将 `sp` 设置为栈空间的最高地址

2. `tail kern_init` 指令分析

完成的操作:

- `tail` 是RISC-V的尾调用优化伪指令, 等价于无条件跳转
- 实际展开为 `j kern_init` (上面反汇编kern_entry最后一行就是)
- 不保存返回地址到 `ra` 寄存器, 直接跳转到 `kern_init` 函数 (noreturn)

```

(gdb) si
9          tail kern_init
(gdb) i r pc ra
pc          0x80200008          0x80200008 <kern_entry+8>
ra          0x80000a02          0x80000a02
(gdb) si
kern_init () at kern/init/init.c:8
8          memset(edata, 0, end - edata);
(gdb) i r pc ra
pc          0x8020000a          0x8020000a <kern_init>
ra          0x80000a02          0x80000a02

```

目的:

1. **转移控制权**: 将CPU执行流从汇编代码转交给C语言编写的内核初始化函数
2. **进入真正的内核初始化**: `kern_init` 函数位于 `kern/init/init.c`, 负责:
 - 清空 `.bss` 段 (未初始化的全局变量, 在可执行文件中, `.bss` 段不占实际空间, 编译器只记录 `.bss` 段的大小和位置, 不会在 `bin` 文件中真的存储那么多 0, 这就是为什么文档说: 如果有个大数组, `elf` 文件可能只有几 KB, `bin` 文件却有几 MB, 就是比如我 `int a[1024] = {0};` `elf` 在 `.bss` 这个位置只需要记录“需要4KB的0”这个信息, 但 `bin` 文件却真正有4KB的0)
 - 调用 `cprintf` 输出启动信息
 - 进入死循环

看链接脚本 `kernel.ld`:

`.text` (代码段)

`.rodata` (只读数据)

`.data` (已初始化数据)

`.sdata` (小数据段)

|— `edata` ————— 这里是 `edata` 符号的位置

`.bss` (未初始化数据) ← 这才是 `.bss` 段

|— `end` ————— 这里是 `end` 符号的位置

```
(gdb) p &edata
$1 = (char (*)[]) 0x80203008
(gdb) p &end
$2 = (char (*)[]) 0x80203008
```

说明init.c里面没有未初始化的全局变量

3. **优化调用方式**：使用 `tail` 而不是 `call` 的原因：

- `kern_init` 函数被标记为 `__attribute__((noreturn))`，表示永不返回
- 不需要保存返回地址，节省了栈空间和指令开销

练习2：使用GDB验证启动流程

实验目的

使用 GDB 跟踪 QEMU 模拟的 RISC-V 从加电开始，直到执行内核第一条指令（跳转到 0x80200000）的整个过程。

调试过程

1. 启动调试环境

```
# 终端1：启动 QEMU（等待 GDB 连接）
$ make debug

# 终端2：启动 GDB 并连接到 QEMU
$ make gdb
```

连接成功后，GDB 显示：

```
Remote debugging using localhost:1234
0x0000000000001000 in ?? ()
```

2. 查看初始状态

查看程序计数器（PC）：

```
(gdb) i r pc
pc                0x1000    0x1000
```

观察结果：PC 初始值为 **0x1000**，这是 RISC-V 的**复位地址**。

查看所有通用寄存器：

```
(gdb) i r
ra                0x0        0x0
sp                0x0        0x0
...（所有寄存器都是 0x0）
pc                0x1000    0x1000
```

观察结果：除了 PC，其他所有寄存器都初始化为 0。

3. 反汇编复位地址的代码

```
(gdb) x/10i 0x1000
=> 0x1000:    auipc    t0,0x0
0x1004:    addi    a1,t0,32
0x1008:    csrr    a0,mhartid
0x100c:    ld      t0,24(t0)
0x1010:    jr      t0
0x1014:    unimp
0x1016:    unimp
0x1018:    unimp
0x101a:    0x8000
0x101c:    unimp
```

观察结果：0x1000 处有 5 条有效指令（0x1000 ~ 0x1010），后续是数据或无效指令。

4. 逐条指令分析

指令1: `auipc t0, 0x0` (0x1000)

```
(gdb) si
0x00000000000001004 in ?? ()

(gdb) i r pc t0
pc          0x1004    0x1004
t0          0x1000    4096
```

功能：将当前 PC 的值 (0x1000) 加载到寄存器 `t0`。

目的：为后续的地址计算提供基准。

指令2: `addi a1, t0, 32` (0x1004)

```
(gdb) si
0x00000000000001008 in ?? ()

(gdb) i r a1 t0 pc
a1          0x1020    4128
t0          0x1000    4096
pc          0x1008    0x1008
```

功能：计算 `t0 + 32 = 0x1000 + 32 = 0x1020`，存入 `a1`。

目的：`a1` 可能是传递给 OpenSBI 的参数地址 (数据区)。

指令3: `csrr a0, mhartid` (0x1008)

```
(gdb) si
0x0000000000000100c in ?? ()

(gdb) i r pc a0
pc          0x100c    0x100c
a0          0x0      0
```

功能: 读取 CSR 寄存器 `mhartid` (硬件线程 ID) 到 `a0`。

结果: `a0 = 0`，表示当前是第 0 号核心 (单核系统)。

目的: 在多核系统中区分不同的处理器核心。

指令4: `ld t0, 24(t0)` (0x100c)

先查看要加载的内存地址:

```
(gdb) p/x $t0 + 24
$1 = 0x1018

(gdb) x/2xw 0x1018
0x1018: 0x80000000    0x00000000
```

观察结果: 地址 0x1018 处存储的是 `0x0000000080000000` (64位值)。

执行加载指令:

```
(gdb) si
0x00000000000001010 in ?? ()

(gdb) i r t0 pc
t0          0x80000000    2147483648
pc          0x1010      0x1010
```

功能: 从内存地址 `0x1018` 加载 64 位数据到 `t0`。

结果: `t0 = 0x80000000` (OpenSBI 的入口地址)。

目的：准备跳转到 OpenSBI 固件。

指令5: `jr t0 (0x1010)`

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

(gdb) i r pc
pc                0x80000000      0x80000000
```

功能：无条件跳转到 `t0` 寄存器指向的地址。

结果：`PC = 0x80000000`，成功跳转到 OpenSBI

目的：将控制权移交给 OpenSBI 固件。

5. 进入 OpenSBI 阶段

查看 OpenSBI 的前几条指令：

```
(gdb) x/10i 0x80000000
=> 0x80000000: csrr    a6,mhartid
    0x80000004: bgtz    a6,0x80000108
    0x80000008: auipc   t0,0x0
    0x8000000c: addi    t0,t0,1032
    0x80000010: auipc   t1,0x0
    0x80000014: addi    t1,t1,-16
    0x80000018: sd      t1,0(t0)
    0x8000001c: auipc   t0,0x0
    0x80000020: addi    t0,t0,1020
    0x80000024: ld      t0,0(t0)
```

观察结果：OpenSBI 的代码非常复杂，包含硬件初始化、内存配置等大量操作。

6. 跳过 OpenSBI, 到达内核入口

由于 OpenSBI 的代码有数千条指令, 我们不逐条跟踪, 而是在内核入口设置断点:

```
(gdb) b* kern_entry
Breakpoint 1 at 0x80200000: file kern/init/entry.S, line 7.
(gdb) c
Continuing.
```

左终端显示 OpenSBI 的输出:

```
lzf@LZF:~/OS/lab1$ make debug

OpenSBI v0.4 (Jul  2 2019 11:53:53)

      _ _ _ _ _      _ _ _ _ _      _ _ _ _ _      _ _ _ _ _
     /   \   /   \   /   \   /   \   /   \   /   \   /   \
    /_____\ /_____\ /_____\ /_____\ /_____\ /_____\ /_____\
   /       \ /       \ /       \ /       \ /       \ /       \
  /         \ /         \ /         \ /         \ /         \
 /           \ /           \ /           \ /           \ /           \
/             \ /             \ /             \ /             \ /
\             / \             / \             / \             / \
 \           /   \           /   \           /   \           /   \
  \         /     \         /     \         /     \         /     \
   \       /       \       /       \       /       \       /       \
    \_____/         \_____/         \_____/         \_____/         \
     \   \   \   \   \   \   \   \   \   \   \   \   \   \   \
      _ _ _ _ _      _ _ _ _ _      _ _ _ _ _      _ _ _ _ _

Platform Name      : QEMU Virt Machine
Platform HART Features : RV64ACDFIMSU
Platform Max HARTs  : 8
Current Hart       : 0
Firmware Base      : 0x80000000
Firmware Size      : 112 KB
Runtime SBI Version : 0.1

PMP0: 0x0000000080000000-0x000000008001ffff (A)
PMP1: 0x0000000000000000-0xffffffffffff (A,R,W,X)
```

断点触发:

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

(gdb) i r pc
pc          0x80200000      0x80200000 <kern_entry>
```

成功从复位地址 0x1000 跟踪到了内核入口 0x80200000

关于 `watch *0x80200000` 的说明

尝试使用 watchpoint

在调试过程中，我尝试使用 `watch *0x80200000` 来观察内核何时被加载到内存：

```
(gdb) monitor system_reset
(gdb) set $pc = 0x1000
(gdb) watch *0x80200000
Hardware watchpoint 2: *0x80200000

(gdb) c
Continuing.
^C    # watchpoint 一直未触发，只能手动中断
Program received signal SIGINT, Interrupt.
0x0000000080004fa0 in ?? ()
```

为什么 watchpoint 没有触发？

原因分析：

在本实验的 QEMU 配置中，内核镜像**不是在运行时由 OpenSBI 加载的**，而是在 QEMU 启动时**就直接放置在内存中**。

查看 Makefile 中的 QEMU 启动参数：

[illegible]

QEMU 启动阶段（执行任何指令之前）：

然后开始执行：

由于内核在 `system_reset` 后就已经在内存中，不会再有**写入操作**，因此 `watch` 不会触发。

可以在复位后直接查看 0x80200000 的内容:

结论：这是为了简化实验环境而采用的设计。在真实系统中，Bootloader 需要从硬盘读取内核，但那需要实现复杂的文件系统和驱动程序。

问题回答

问题1：RISC-V 硬件加电后最初执行的几条指令位于什么地址？

答案：0x1000（复位地址）

问题2：它们主要完成了哪些功能？

答案：

位于 0x1000 ~ 0x1010 的 5 条指令完成以下功能：

| 地址 | 指令 | 功能描述 |
|--------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 0x1000 | <code>auipc t0, 0x0</code> | 将当前 PC 值 (0x1000) 加载到 t0 |
| 0x1004 | <code>addi a1, t0, 32</code> | 计算参数地址 (0x1020) 存入 a1 |
| 0x1008 | <code>csrr a0, mhartid</code> | 读取当前硬件线程 ID 到 a0 (值为 0) |
| 0x100c | <code>ld t0, 24(t0)</code> | 从地址 0x1018 加载跳转目标 (0x80000000) 到 t0 |
| 0x1010 | <code>jr t0</code> | 跳转到 t0 (OpenSBI 入口) |

主要功能总结：

- 1. 准备环境参数
 - 获取当前地址作为基准
 - 计算数据区域地址
- 2. 获取硬件信息
 - 读取处理器核心 ID (用于多核系统)
- 3. 加载并跳转到 Bootloader
 - 从固定位置 (0x1018) 读取 OpenSBI 入口地址 (0x80000000)
 - 无条件跳转，移交控制权

设计意图：

这段代码是固化在 ROM 中的最小启动引导代码，其唯一目的是快速将控制权转交给功能更强大的 OpenSBI 固件。OpenSBI 再负责完整的硬件初始化和操作系统加载。

完整启动流程图

阶段1: ROM固件 (MROM)

地址: `0x1000`

功能: 最基础的硬件初始化, 跳转到OpenSBI

↓

阶段2: OpenSBI固件

地址: `0x80000000`

功能: M模式初始化, 加载内核到 `0x80200000`

↓

阶段3: 内核入口 (`entry.S`)

地址: `0x80200000` (`kern_entry`)

功能: 设置内核栈, 跳转到C语言入口

↓

阶段4: C语言入口 (`init.c`)

地址: `0x8020000a` (`kern_init`)

功能: 清空**.bss**段, 输出信息, 进入死循环

实验中的新认知

1. OS启动时是"一无所有"的, 连栈都需要自己创建
2. 没有固件, 内核无法启动 (无法"自举")
3. GDB让我们能"看见"CPU的每一步执行
4. SBI、BIOS/UEFI都是硬件抽象层的实现