

Lab 0: RV64 内核调试

1 实验目的

按照实验流程搭建实验环境，掌握基本的 Linux 概念与用法，熟悉如何从 Linux 源代码开始将内核运行在 QEMU 模拟器上，学习使用 GDB 跟 QEMU 对代码进行调试，为后续实验打下基础。

2 实验内容及要求

- 学习 Linux 基本知识
- 安装 Docker，下载并导入 Docker 镜像，熟悉 docker 相关指令
- 编译内核并用 GDB + QEMU 调试，在内核初始化过程中设置断点，对内核的启动过程进行跟踪，并尝试使用 GDB 的各项命令

请各位同学独立完成实验，任何抄袭行为都将使本次实验判为0分。

请跟随实验步骤完成实验并根据本文档中的要求记录实验过程，最后删除文档末尾的附录部分，将文档导出并命名为“**学号_姓名_lab0.pdf**”，以 pdf 格式上传至学在浙大平台。

3 操作方法和实验步骤

3.1 安装 Docker 环境并创建容器 (25%)

请参考【[附录B.Docker使用基础](#)】了解相关背景知识。

3.1.1 安装 Docker 并启动

请参照 <https://docs.docker.com/get-docker/> 自行在本机安装 Docker 环境，安装完成后启动 Docker 软件。

docker 卡在 start 界面的 Windows 用户，可看 <https://github.com/docker/for-win/issues/13662> 来解决。By 杨煜卓同学

mac用户需要在docker desktop设置中取消选项（默认勾选） Use Rosetta for x86_64/amd64 emulation on Apple Silicon

3.1.2 下载并导入 Docker 镜像

为了便于开展实验，我们在 [镜像](#) 中提前安装好了实验所需的环境（RISC-V 工具链、QEMU 模拟器），相关环境变量也以设置完毕。请下载该 Docker 镜像至本地。

下载好的镜像包不需要解压，后面命令中直接使用。

接下来建议大家使用终端操作，而非使用桌面端等 UI 程序，这样每一步操作有迹可循，易于排查问题。

- Windows 用户：可以使用系统自带的 PowerShell 软件，命令提示符 (cmd) 软件不推荐使用。
- MacOS 用户：使用默认终端即可。
- Linux 用户：使用默认终端即可。

在执行每一条命令前，请你对将要进行的操作进行思考，给出的命令不需要全部执行，并且不是所有的命令都可以无条件执行，请不要直接复制粘贴命令去执行。

以下给出的指令中，\$ 提示符表示当前运行的用户为普通用户，# 代表 Shell 中注释的标志，他们并非实际输入指令的一部分。

导入失败的同学请查看自己的 C 盘空间是否满。

```
# 进入 oslab.tar 所在的文件夹
$ cd path/to/oslab # 替换为你下载文件的实际路径

# 导入docker镜像
$ docker import oslab.tar oslab:2025

# 查看docker镜像
$ docker image ls
```

REPOSITORY	TAG	IMAGE ID	CREATED	SIZE
oslab	2025	9192b7dc0d06	47 seconds ago	2.89GB

请在此处添加你导入镜像的执行命令及结果截图：

答：

```
PS C:\Users\41467\Desktop\3up\OS> docker import oslab.tar oslab:2025
sha256:c99a1fb6b1b30b07a727dc0e06cf7d4e82e051d4eca4abc3b35df23174205965
PS C:\Users\41467\Desktop\3up\OS> docker image ls
```

REPOSITORY	TAG	IMAGE ID	CREATED	SIZE
oslab	2025	c99a1fb6b1b3	11 minutes ago	3.97GB
<none>	<none>	59a80727d27b	23 hours ago	3.97GB

3.1.3 从镜像创建一个容器并进入该容器

请按照以下方法创建新的容器，并建立 volume 映射([参考资料](#))。建立映射后，你可以方便的在本地编写代码，并在容器内进行编译检查。

什么是 volumn 映射？其实就是把本地的一个文件夹共享给 Docker 容器用，无论你在容器内修改还是在本地环境下修改，另一边都能感受到这个文件夹变化了。

你也可以参照[文档](#)中提供的，通过配置 VSCode 智能提示来直接连接到 Docker 容器内进行进行实验，**如若此，请提供你使用软件直接在 Docker 容器内进行编辑的截图即可。下文的建立映射关系可以跳过。**

如果你使用 VSCode 或其他具有直接连接 Docker 容器功能的软件，你也可以直接在 Docker 容器内进行编辑，而无需建立映射关系，如若此，请提供你使用软件直接在 Docker 容器内进行编辑的截图即可。

Windows 中的路径一般分 C, D, E 等多盘符, 因此 Windows 下的路径一般为 xx盘符:\xx路径, 例如 C:\Users\Administrator, 而 Linux 下与 Windows 不同, Linux 只有一个根目录 /, 例如 /home/oslab/lab1 表示 根目录下的 home 文件夹下的 oslab 文件夹 下的 lab1 文件夹, 在映射路径时请按照自己系统的路径描述方法填写。更多细节可自行搜索学习。

Linux 下一般默认 /home 文件夹用来存放用户文件, 而别的路径用来存放系统文件, 因此请在映射文件夹的时候映射到 /home 的文件夹目录下。/home/aaa 表示 aaa 用户的用户文件所在目录, 同理 /home/oslab 表示 oslab 用户的用户文件所在目录。如果你使用的是虚拟机, 请映射到 /home/自己用户名的目录下, 一般情况下 ~ 符号等价于 /home/当前用户名, 详情请自行搜索 Linux 下 /home 目录含义。

一般来说, aaa 用户不能访问 bbb 用户的用户文件, 也就是不能访问/修改 /home/bbb 文件夹。但 Docker 容器中用的是 root 用户登录, 相当于 Windows 中的管理员权限, 因此可以访问 /home/oslab 下的文件。

指令仅做参考, 注意修改指令中的路径为你自己设置的路径。**如果你使用的是 Windows 系统, 建议不要将本地新建的目录放在 C 盘等位置。避免后续指令权限问题。本地目录和映射的目录路径不需要相同。**

```
# 首先请在本地新建一个目录用作映射需要
$ cd /path/to/your/local/dir
$ mkdir os_experiment

# 创建新的容器, 同时建立 volume 映射
$ docker run -it -v
/path/to/your/local/dir/os_experiment:/home/oslab/os_experiment --name oslab
oslab:2025 /bin/bash
oslab@3c1da3906541:~$
```

请在此处添加一张你执行 Docker 映射的命令及结果截图:

答:

```
PS C:\Users\41467\Desktop\3up\OS> cd D:\OS
PS D:\OS> mkdir os_experiment

    目录: D:\OS

Mode                LastWriteTime         Length Name
----                -
d-----          2025/9/29    20:16             os_experiment

PS D:\OS\os_experiment> docker run -it -v D:/OS/os_experiment:/home/oslab/os_experiment --name oslab oslab:2025 /bin/bas
h
root@e162671aa0b5:/# cd /home/oslab/
```

请解释该命令各参数含义:

- `docker run -it -v /path/to/your/local/dir/os_experiment:/home/oslab/os_experiment -name oslab oslab:2025 /bin/bash`

答:

- `docker run`: 创建一个新的容器并执行一条命令
- `--name oslab`: 将这个新的容器取名为oslab
- `-i`: 保持STDIN打开, 可以理解为以“交互模式”来运行这个容器
- `-t oslab:2025 /bin/bash`: 为容器重新分配一个交互终端, 这里设为oslab:2025的/bin/bash
- `-v`: 挂载数据卷, 将本地主机的 `/path/to/your/local/dir/os_experiment` 目录挂载到容器内的 `/home/oslab/os_experiment` 目录, 实现主机与容器之间的文件共享
- `--name oslab`: 为容器指定一个名称 oslab, 便于后续通过名称引用容器

3.1.4 测试映射关系

为测试映射关系是否成功, 你可以在本地映射目录中创建任意文件, 并在 Docker 容器中进行检查。

```
# 在你的本地映射目录中, 创建任意文件
$ cd /path/to/your/local/dir/os_experiment
# 在类linux系统中使用touch命令新建文件, 在windows PowerShell中使用type nul > testfile
命令新建文件
$ touch testfile
$ ls
testfile
```

以上指令将在你的本地映射目录创建一个文件, 接下来在容器中执行指令进行检查。

```
# 在 Docker 容器中确认是否挂载成功
root@dac72a2cc625:/home/oslab/os_experiment$ ls
testfile
# 退出docker, 退出后容器将变为关闭状态, 再次进入时需要重新启动容器 (不是重新创建容器)
root@dac72a2cc625:/home/oslab/os_experiment$ exit
```

可以看到创建的文件存在, 证明映射关系建立成功, 接下来你可以使用你喜欢的 IDE 在该目录下进行后续实验的编码了。

请在此处添加你测试映射关系的全指令截图:

答:

```
PS D:\OS\os_experiment> new-item testfile
```

目录：D:\OS\os_experiment

Mode	LastWriteTime		Length	Name
----	-----		-----	----
-a----	2025/10/2	14:33	0	testfile


```
root@e162671aa0b5:/# cd /home/oslab/os_experiment
root@e162671aa0b5:/home/oslab/os_experiment# ls
qlsupersky testfile
```

其他常用docker指令如下，在后续的实验过程中将会经常使用这些命令：

```
# 查看当前运行的容器
$ docker ps
CONTAINER ID   IMAGE          COMMAND         CREATED        STATUS        PORTS        NAMES

# 查看所有存在的容器
$ docker ps -a
CONTAINER ID   IMAGE          COMMAND         CREATED        STATUS        PORTS        NAMES
95efacf34d2c   oslab:2025     "/bin/bash"    About a minute ago  Exited (0) About a minute ago   oslab

# 启动处于停止状态的容器
$ docker start oslab
$ docker ps
CONTAINER ID   IMAGE          COMMAND         CREATED        STATUS        PORTS        NAMES
95efacf34d2c   oslab:2025     "/bin/bash"    2 minutes ago  Up 26 seconds  oslab

# 进入已经运行的容器
$ docker attach oslab
root@95efacf34d2c:/#

# 在已经运行的docker中运行/bin/bash命令，开启一个新的进程
$ docker exec -it oslab /bin/bash
root@95efacf34d2c:/#
```

3.2 编译 Linux 内核 (25%)

请参考【[附录E.LINUX 内核编译基础](#)】了解相关背景知识。

```

# 以下指令均在容器中操作

# 进入实验目录
$ cd /home/oslab/lab0

# 查看当前目录文件
$ ls
linux  rootfs.ext4

# 创建目录，用来存储编译结果
$ mkdir -p build/linux

# 编译 Linux 内核
$ make -C linux \
    O=/home/oslab/lab0/build/linux \
    CROSS_COMPILE=riscv64-unknown-linux-gnu- \
    ARCH=riscv \
    CONFIG_DEBUG_INFO=y \
    defconfig \
    all \
    -j$(nproc)

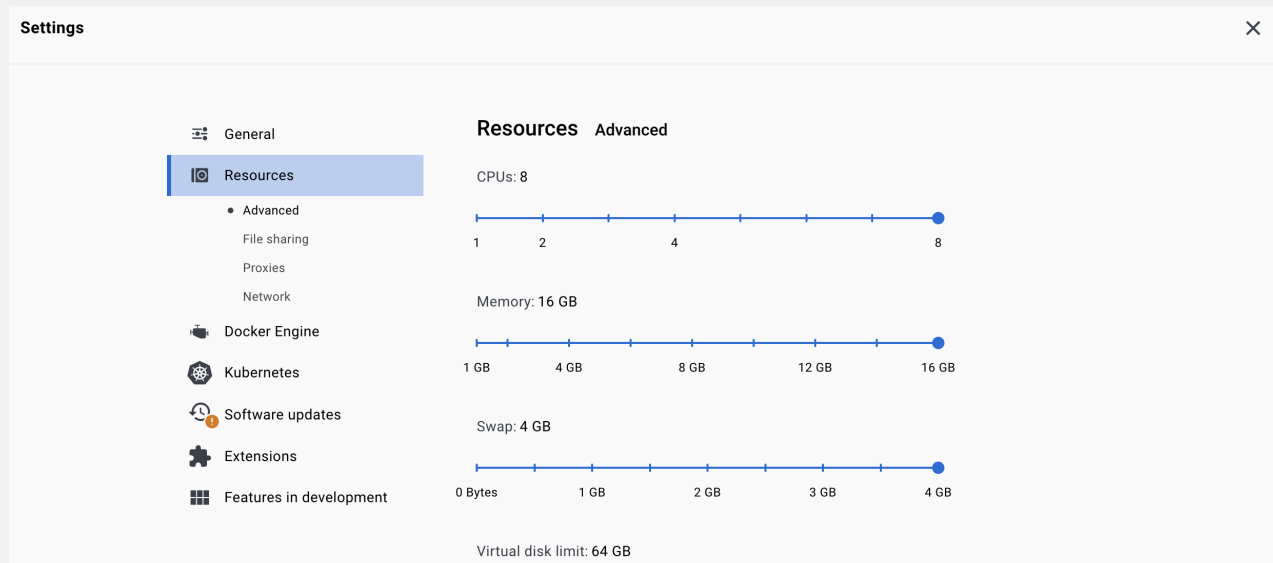
```

有关 make 指令和 makefile 的知识将在 Lab1 进一步学习。这里简单介绍一下编译 Linux 内核各参数的含义。

-C linux	表示进入 linux 文件夹，并执行该目录下的 makefile 文件。因此，你执行该命令时应在 /home/oslab/lab0 路径下。
O=.....	指定变量 O 的值，O 变量在 linux makefile 里用来表示编译结果输出的路径
CROSS_COMPILE=.....	指定变量 CROSS_COMPILE 的值，linux makefile 中使用 CROSS_COMPILE 变量的值作为前缀选择编译时使用的工具链。例如本例子中， riscv64-unknown-linux-gnu-gcc 即是实际编译时调用的编译器。
ARCH=.....	指定编译的目标平台
CONFIG_DEBUG_INFO=y	同上，当该变量设置时，编译过程中将加入 -g 配置，这会使得编译结果是包含调试信息的，只有这样我们才可以比较好的进行调试。
defconfig	指定本次编译的目标，支持什么编译目标是 linux makefile 中已经定义好的，defconfig 就表示本次编译要编译出 defconfig 这个目标，该目标代表编译需要的一些配置文件。
all	指定本次编译的目标，目标是可以有多个的。这里的 all 并不表示编译所有目标，而是 makefile 中定义好的一个名称为 all 的编译目标。该目标代表 linux 内核。
-j\$(nproc)	-j 表示采用多线程编译，后跟数字表示采用线程数量。例如 -j4 表示 4 线程编译。这里的 \${nproc} 是 shell 的一种语法，表示执行 nproc 命令，并将执行的结果替换这段字符串。 nproc 命令会返回本机器的核心数量。

编译报错为 Error.137 的同学，可能是电脑性能不足，可以将最后的参数改为 -j1，降低资源消耗。改为 -j1 后仍然报错。可尝试创建swap虚拟内存。

在docker的设置中可以调整给docker分配的资源数量，可以根据需要适当调整。



如果还不行的话，可以给电脑分配更多的虚拟内存解决，Linux 上可以创建 swap 分区，Windows 上可以在我的电脑，高级设置中修改虚拟内存大小。

请在此处添加一张你的编译完成的结果截图：

答：

```
MODPOST vmlinux.symvers
MODINFO modules.builtin.modinfo
GEN modules.builtin
LD .tmp_vmlinux.kallsyms1
KSYM .tmp_vmlinux.kallsyms1.o
LD .tmp_vmlinux.kallsyms2
KSYM .tmp_vmlinux.kallsyms2.o
LD vmlinux
SYSMAP System.map
MODPOST Module.symvers
OBJCOPY arch/riscv/boot/Image
CC [M] fs/nfs/flexfilelayout/nfs_layout_flexfiles.mod.o
GZIP arch/riscv/boot/Image.gz
LD [M] fs/nfs/flexfilelayout/nfs_layout_flexfiles.ko
Kernel: arch/riscv/boot/Image.gz is ready
make[1]: Leaving directory '/home/oslab/lab0/build/linux'
make: Leaving directory '/home/oslab/lab0/linux'
root@e162671aa0b5:/home/oslab/lab0#
```

3.3 使用 QEMU 运行内核 (25%)

请参考【[附录C.QEMU使用基础](#)】了解相关背景知识。

注意，QEMU的退出方式较为特殊，需要先按住 **ctrl+a**，放开后再按一次 **x**。


```
$ cd /home/oslab/lab0
```

如果不在上面目录下执行的话，请手动修改 `-kernel` 和 `file=....` 的文件路径，这里使用的是相对路径

```
$ qemu-system-riscv64 \  
    -nographic \  
    -machine virt \  
    -kernel build/linux/arch/riscv/boot/Image \  
    -device virtio-blk-device,drive=hd0 \  
    -append "root=/dev/vda ro console=ttyS0" \  
    -bios default -drive file=rootfs.ext4,format=raw,id=hd0 \  
    -netdev user,id=net0 -device virtio-net-device,netdev=net0
```

执行成功会提示登录，默认用户名为 `root`，密码为空，这里输入 `root` 进入即可

Welcome to Buildroot

buildroot login:

登录成功后，你可以在这个模拟运行的内核系统里到处看看。使用 `uname -a` 指令来确定你运行的系统是 `riscv64` 架构。

请在此处添加一张你成功登录后的截图：

答：

```
Starting syslogd: OK  
Starting klogd: OK  
Running sysctl: OK  
Starting mdev... OK  
modprobe: can't change directory to '/lib/modules': No such file or directory  
Initializing random number generator: OK  
Saving random seed: [ 52.501174] random: dd: uninitialized urandom read (512 bytes read)  
OK  
Starting network: udhcpc: started, v1.31.1  
udhcpc: sending discover  
udhcpc: sending select for 10.0.2.15  
udhcpc: lease of 10.0.2.15 obtained, lease time 86400  
deleting routers  
adding dns 10.0.2.3  
OK
```

```
Welcome to Buildroot
```

```
buildroot login: root
```

```
#
```

```
# █
```

请在此处添加一张你运行 ` **uname -a** **` 指令后的结果截图：**

答：

```
# uname -a  
Linux buildroot 5.8.11 #1 SMP Wed Oct 1 10:47:57 UTC 2025 riscv64 GNU/Linux
```

3.4 使用 GDB 调试内核 (25%)

请参考【[附录D.GDB使用基础](#)】了解相关背景知识。学会调试将在后续实验中为你提供帮助，推荐同学们跟随[GDB调试入门指南](#)教程完成相应基础练习，熟悉 GDB 调试的使用。

首先请你退出上一步使用 QEMU 运行的内核，并重新使用 QEMU 按照下述参数模拟运行内核（**不是指在上一步运行好的 QEMU 运行的内核中再次运行下述命令！**）。

```
$ qemu-system-riscv64 \
    -nographic \
    -machine virt \
    -kernel build/linux/arch/riscv/boot/Image \
    -device virtio-blk-device,drive=hd0 \
    -append "root=/dev/vda ro console=ttyS0" \
    -bios default -drive file=rootfs.ext4,format=raw,id=hd0 \
    -netdev user,id=net0 -device virtio-net-device,netdev=net0 \
    -S \
    -s
```

-S: 表示启动时暂停执行，这样我们可以在 GDB 连接后再开始执行
-s: -gdb tcp::1234 的缩写，会开启一个 tcp 服务，端口为 1234，可以使用 GDB 连接并进行调试

上述命令由于 `-S` 的原因，执行后会直接停止，表现为没有任何反应。**接下来再打开一个终端，进入同一个 Docker 容器，并切换到 lab0 目录，使用 GDB 进行调试。**

```
# 进入同一个 Docker 容器
$ docker exec -it oslab /bin/bash

# 切换到 lab0 目录
$ cd /home/oslab/lab0/

# 使用 GDB 进行调试
$ riscv64-unknown-linux-gnu-gdb build/linux/vmlinux
```

顺序执行下列 GDB 命令，写出每条命令的含义并附上执行结果的截图。（可以全部执行后一起截图，不需要每个命令截一次图）

```
(gdb) target remote localhost:1234
```

- 含义：target remote 命令表示远程调试，而 1234 是上述 QEMU 执行时指定的用于调试连接的端口号。
- 执行结果：

```
[(gdb) target remote localhost:1234
Remote debugging using localhost:1234
0x0000000000000100 in ?? ()
```

```
(gdb) b start_kernel
(gdb) b *0x80000000
(gdb) b *0x80200000
(gdb) info breakpoints
(gdb) delete 2
(gdb) info breakpoints
```

- 含义:

```
(gdb) b start_kernel      # start_kernel是一个宏，指向内核的起始地址，b代表打断点
(gdb) b *0x80000000      # 在内存0x80000000位置打断点
(gdb) b *0x80200000      # 在内存0x80200000位置打断点
(gdb) info breakpoints   # 展示当前所有断点的信息
(gdb) delete 2           # 删除序号为2的断点
(gdb) info breakpoints
```

- 执行结果:

```
[(gdb) target remote localhost:1234
Remote debugging using localhost:1234
0x0000000000001000 in ?? ()
(gdb) b start_kernel
Breakpoint 1 at 0xfffffe000001714: file /home/oslab/lab0/linux/init/main.c, line 837.
(gdb) b *0x80000000
Breakpoint 2 at 0x80000000
(gdb) b *0x80200000
Breakpoint 3 at 0x80200000
(gdb) info breakpoints
Num      Type             Disp Enb Address            What
1        breakpoint       keep y  0xfffffe000001714 in start_kernel at /home/oslab/lab0/linux/init/main.c:837
2        breakpoint       keep y  0x0000000080000000
3        breakpoint       keep y  0x0000000080200000
(gdb) delete 2
(gdb) info breakpoints
Num      Type             Disp Enb Address            What
1        breakpoint       keep y  0xfffffe000001714 in start_kernel at /home/oslab/lab0/linux/init/main.c:837
3        breakpoint       keep y  0x0000000080200000
```

```
(gdb) continue
(gdb) delete 3
(gdb) continue
(gdb) step
(gdb) s
(gdb) (不做输入，直接回车)
(gdb) next
(gdb) n
(gdb) (不做输入，直接回车)
```

- 含义:

```
(gdb) continue # 运行到下一个断点
(gdb) delete 3 # 删除序号为3的断点
(gdb) continue # 运行到下一个断点
```

```
(gdb) step          # 运行到下一条源代码，包括进入函数
(gdb) s             # step的简写
(gdb) (不做输入，直接回车) # 空回车则重复前一个命令，这里实际执行了step
(gdb) next          # 运行到下一条源代码，不进入函数
(gdb) n             # next的简写
(gdb) (不做输入，直接回车) # 空回车则重复前一个命令，这里实际执行了next
```

- 执行结果:

Continuing.

Breakpoint 3, 0x0000000080200000 in ?? ()

[(gdb) delete 3

[(gdb) continue

Continuing.

Breakpoint 1, start_kernel () at /home/oslab/lab0/linux/init/main.c:837

837 set_task_stack_end_magic(&init_task);

[(gdb) step

set_task_stack_end_magic (tsk=<optimized out>) at /home/oslab/lab0/linux/kernel/fork.c:863

863 *stackend = STACK_END_MAGIC; /* for overflow detection */

[(gdb) s

start_kernel () at /home/oslab/lab0/linux/init/main.c:838

838 smp_setup_processor_id();

[(gdb)

smp_setup_processor_id () at /home/oslab/lab0/linux/arch/riscv/kernel/smp.c:38

38 cpuid_to_hartid_map(0) = boot_cpu_hartid;

[(gdb) next

start_kernel () at /home/oslab/lab0/linux/init/main.c:841

841 cgroup_init_early();

[(gdb) n

843 local_irq_disable();

[(gdb)

844 _ early_boot_irqs_disabled = true;

```
(gdb) disassemble
(gdb) nexti
(gdb) n
(gdb) stepi
(gdb) s
```

- 含义:

```
(gdb) disassemble # 反汇编，将机器码翻译为汇编语言
(gdb) nexti       # 运行到下一条机器指令，不进入函数
(gdb) n           # 运行到下一条源代码，不进入函数
(gdb) stepi       # 运行到下一条机器指令，包括进入函数
(gdb) s           # 运行到下一条源代码，不进入函数
```

- 执行结果:

```
Dump of assembler code for function start_kernel:
0xffffffff000001714 <+0>:      addi      sp,sp,-80
0xffffffff000001716 <+2>:      sd         ra,72(sp)
0xffffffff000001718 <+4>:      sd         s0,64(sp)
0xffffffff00000171a <+6>:      sd         s1,56(sp)
0xffffffff00000171c <+8>:      addi      s0,sp,80
0xffffffff00000171e <+10>:     sd         s2,48(sp)
0xffffffff000001720 <+12>:     sd         s3,40(sp)
0xffffffff000001722 <+14>:     sd         s4,32(sp)
0xffffffff000001724 <+16>:     sd         s5,24(sp)
0xffffffff000001726 <+18>:     sd         s6,16(sp)
0xffffffff000001728 <+20>:     auipc     a0,0x100a
0xffffffff00000172c <+24>:     addi      a0,a0,1560 # 0xffffffff00100bd40 <init_task>
0xffffffff000001730 <+28>:     auipc     ra,0x205
0xffffffff000001734 <+32>:     jalr      92(ra) # 0xffffffff00020678c <set_task_stack_end_magic>
0xffffffff000001738 <+36>:     jal       ra,0xffffffff000003730 <smp_setup_processor_id>
0xffffffff00000173c <+40>:     jal       ra,0xffffffff000008d4e <cgroup_init_early>
0xffffffff000001740 <+44>:     csrci     sstatus,2
=> 0xffffffff000001744 <+48>:     li        a5,1
0xffffffff000001746 <+50>:     auipc     a4,0x106f
0xffffffff00000174a <+54>:     sb        a5,-1786(a4) # 0xffffffff00107004c <early_boot_irqs_disabled>
0xffffffff00000174e <+58>:     jal       ra,0xffffffff000004606 <boot_cpu_init>
0xffffffff000001752 <+62>:     auipc     a1,0x9ff
0xffffffff000001756 <+66>:     addi      a1,a1,-1682 # 0xffffffff000a00c0 <linux_banner>
0xffffffff00000175a <+70>:     auipc     a0,0xb3d
--Type <RET> for more, q to quit, c to continue without paging--
```

```
[(gdb) nexti
0xffffffff000001746      844      early_boot_irqs_disabled = true;
[(gdb) n
850      boot_cpu_init();
[(gdb) stepi
boot_cpu_init () at /home/oslab/lab0/linux/arch/riscv/include/asm/current.h:31
31      return riscv_current_is_tp;
[(gdb) s
2492      set_cpu_online(cpu, true);
(gdb)
```

- 请回答: nexti 和 next 的区别在哪里? stepi 和 step 的区别在哪里? next 和 step 的区别是什么?

答:

- nexti和next / stepi和step的区别在于是执行到下一行机器码还是下一行源代码, 因为一行源代码可以对应多条机器码。
- next和step的区别在于是否进入函数。当前一条代码是函数时, step将进入到函数的第一行, 而next将会将这个函数视作一条指令直接执行完毕。如果当前代码不是函数时两者没有区别。

```
(gdb) continue
# 这里如果卡住 用ctrl+c强行中断
(gdb) quit
```

- 含义:

```
(gdb) continue # 执行到下一个断点
(gdb) quit     # 退出调试
```

- 执行结果:

```
[(gdb) continue
Continuing.
^C
Program received signal SIGINT, Interrupt.
0x00000000000062ad4 in ?? ()
[(gdb) quit
A debugging session is active.

        Inferior 1 [process 1] will be detached.

Quit anyway? (y or n) y
Detaching from program: /home/oslab/lab0/build/linux/vmlinux, process 1
Ending remote debugging.
[Inferior 1 (process 1) detached] _
```

vmlinux 和 Image 的关系和区别是什么？为什么 QEMU 运行时使用的是 Image 而不是 vmlinux？

提示：一个可执行文件包括哪几部分？从 vmlinux 到 Image 发生了什么？

答：vmlinux：是编译后生成的完整的、未压缩的 ELF 格式内核文件。它包含内核代码、数据以及符号表、调试信息等元数据，主要用于调试。

Image：是由 vmlinux 经过 objcopy 工具处理后的纯二进制镜像文件。它移除了 ELF 头、符号表等所有元数据，只保留运行所必需的代码和数据段，是内核的“纯净”可执行体。

QEMU 内置的引导加载器设计用于加载纯二进制格式的操作系统镜像：

直接可执行：Image 文件可以被直接加载到内存的指定地址并执行，无需复杂的 ELF 解析器。

简洁高效：它体积更小，加载更快，不包含任何运行时不需要的调试信息，符合内核引导的通用规范。

vmlinux 是用于调试的“原始可执行文件”，而 Image 是用于引导和运行的“精炼可执行体”。QEMU 作为模拟器，其引导流程需要后者。

4 讨论和心得

本次实验感觉难度不高，主要是了解了许多不知道的专有名词，然后严格按照实验步骤一步步进行就可以了。其中有一步感觉有点问题，是3.1.4 测试映射关系，该步骤在指导本地创建新文件的描述有问题，如果严格按照文档进行power shell会报错，虽然不影响实验的进行。

通过本次实验为之后的OS实验打下了基础，也对Linux内核有了更深入的了解。