0. 前言

实验概述

了解QEMU启动流程，基于OSDK运行Hello World内核

实验内容

1. 了解实验背景，RISC-V与Asterinas
2. 配置实验所需的环境，安装OSDK
3. 基于OSDK编写并运行Hello World内核
4. 基于Hello World内核，跟踪系统启动流程

1. 实验背景

RISC-V

RISC发明者是美国加州大学伯克利分校教师David Patterson，RISC-V（读作risk-five）是第五代精简指令集，也是由David Patterson指导的项目。2010年伯克利大学并行计算实验室(Par Lab) 的1位教授和2个研究生想要做一个项目，需要选一种计算机架构来做。当时面临的的是选择X86、ARM，还是其他指令集，不管选择哪个都或多或少有些问题，比如授权费价格高昂，不能开源，不能扩展更改等等。所以他们在2010年5月开始规划自己做一个新的、开源的指令集，就是RISC-V。

RISC-V特点

1. **模块化的指令子集。**RISC-V的指令集使用模块化的方式进行组织，每一个模块使用一个英文字母来表示。RISC-V最基本也是唯一强制要求实现的指令集部分是由I字母表示的基本整数指令子集，使用该整数指令子集，便能够实现完整的软件编译器。其他的指令子集部分均为可选的模块，具有代表性的模块包括M/A/F/D/C。
2. **规整的指令编码。**RISC-V的指令集编码非常的规整，指令所需的通用寄存器的索引（Index）都被放在固定的位置。因此指令译码器（Instruction Decoder）可以非常便捷的译码出寄存器索引然后读取通用寄存器组（Register File，Regfile）。
3. **优雅的压缩指令子集。**基本的RISC-V基本整数指令子集（字母I表示）规定的指令长度均为等长的32位，这种等长指令定义使得仅支持整数指令子集的基本RISC-V CPU非常容易设计。但是等长的32位编码指令也会造成代码体积（Code Size）相对较大的问题。为了满足某些对于代码体积要求较高的场景（譬如嵌入式领域），RISC-V定义了一种可选的压缩（Compressed）指令子集，由字母C表示，也可以由RVC表示。RISC-V具有后发优势，从一开始便规划了压缩指令，预留了足够的编码空间，16位长指令与普通的32位长指令可以无缝自由地交织在一起，处理器也没有定义额外的状态。
4. **特权模式。**RISC-V架构定义了三种工作模式，又称特权模式（Privileged Mode）：Machine Mode：机器模式，简称M Mode。Supervisor Mode：监督模式，简称S Mode。User Mode：用户模式，简称U Mode。RISC-V架构定义M Mode为必选模式，另外两种为可选模式。通过不同的模式组合可以实现不同的系统。
5. **自定制指令扩展。**除了上述阐述的模块化指令子集的可扩展、可选择，RISC-V架构还有一个非常重要的特性，那就是支持第三方的扩展。用户可以扩展自己的指令子集，RISC-V预留了大量的指令编码空间用于用户的自定义扩展，同时，还定义了四条Custom指令可供用户直接使用，每条Custom指令都有几个比特位的子编码空间预留，因此，用户可以直接使用四条Custom指令扩展 出几十条自定义的指令。

参考资料:

1. RISCV手册中文版
2. 特权级架构简介
3. RISCV汇编手册

Asterinas

来自GitHub的介绍：Asterinas（星绽）是一个*安全*、*快速*、*通用*的操作系统内核。 它提供与Linux相同的ABI，可无缝运行Linux应用， 但比Linux更加*内存**安全*和*开发者友好*。

- 星绽在内存安全性方面远胜Linux。 它使用Rust作为唯一的编程语言， 并将*unsafe Rust*的使用限制在一个明确定义且最小的可信计算基础（TCB）上。 这种新颖的方法， 被称为框内核架构， 使星绽成为一个更安全、更可靠的内核选择。
- 星绽在开发者友好性方面优于Linux。 它赋能内核开发者们 （1）使用生产力更高的Rust编程语言， （2）利用一个专为内核开发者设计的工具包（称为OSDK）来简化他们的工作流程， （3）享受MPL所带来的灵活性， 可自由选择开源或闭源他们为星绽所开发的内核模块或驱动。

本学期将会使用Asterinas中的OSDK作为系统开发工具，方便快捷进行开发与学习操作系统。

2. 实验环境安装与OSDK介绍

环境安装

Docker/Podman

Docker 是一种开源的容器化技术，它允许开发者将应用及其依赖打包到一个轻量级、可移植的容器中，然后可以在任何支持Docker的机器上运行这个容器。在Docker发展的同时，也出现了一个替代品podman，它提供了一种更轻量级的替代方案。与 Docker 不同，Podman 无需后台守护进程，使其更加安全和灵活。除此之外podman无需特权模式即可运行容器，利于服务器的开发权限管理。

在本学期的实验中，我们将会使用podman作为容器管理工具。由于podman的使用与docker兼容，因此已经安装了docker的同学也可以直接用docker来运行，不会影响后续实验。

podman安装：

```
# Ubuntu & Debian
sudo apt-get -y install podman
# CentOS
sudo yum -y install podman
# Fedora
sudo dnf -y install podman
```

podman简单使用：

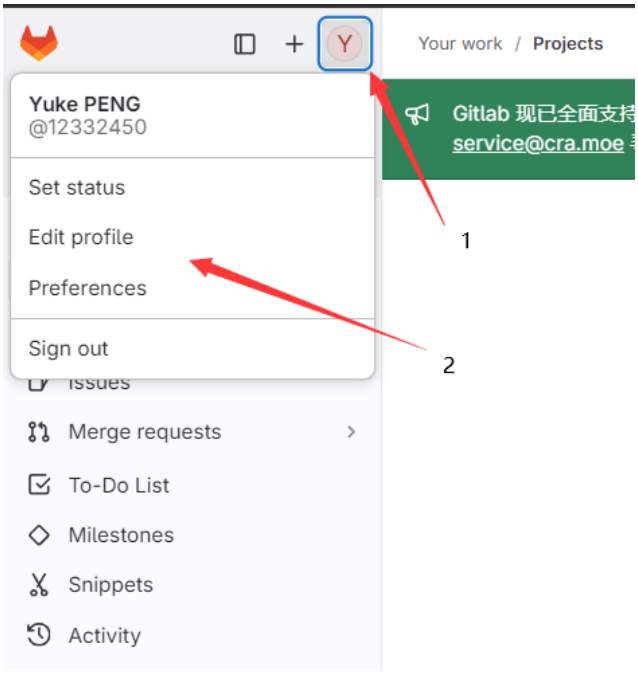
以下是官方给出的样例，不需要大家运行：

```
# Getting help
podman --help
podman <subcommand> --help

# Downloading (Pulling) an image:
podman pull docker.io/library/httpd

# list all images:
podman images

# Running a container:
podman run -dt -p 8080:80/tcp docker.iolibrary/httpd

# Stopping the container:
podman stop -l

# List containers:
podman ps -a

# Removing the container:
podman rm -l
```

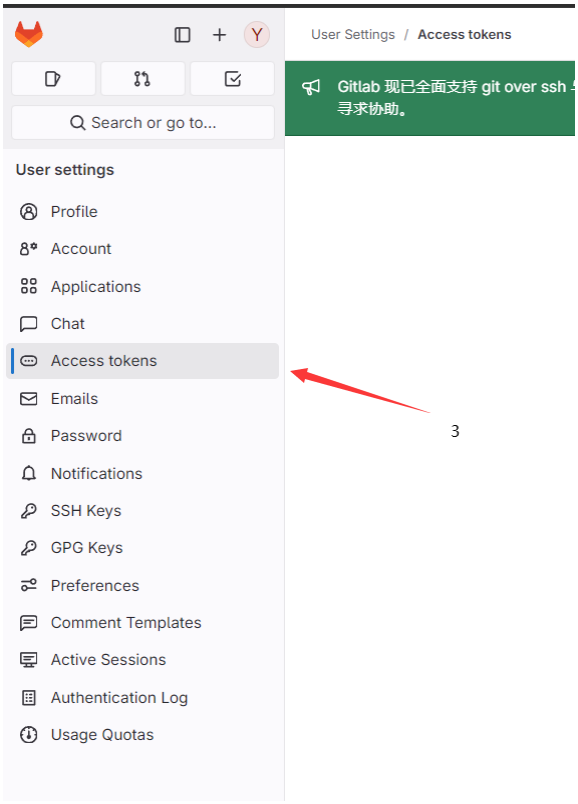
镜像拉取

在南科大GitLab（https://mirrors.sustech.edu.cn/git/）上使用SUSTech CAS注册帐号后，根据以下流程生成一个访问密钥（Personal Access Token）：

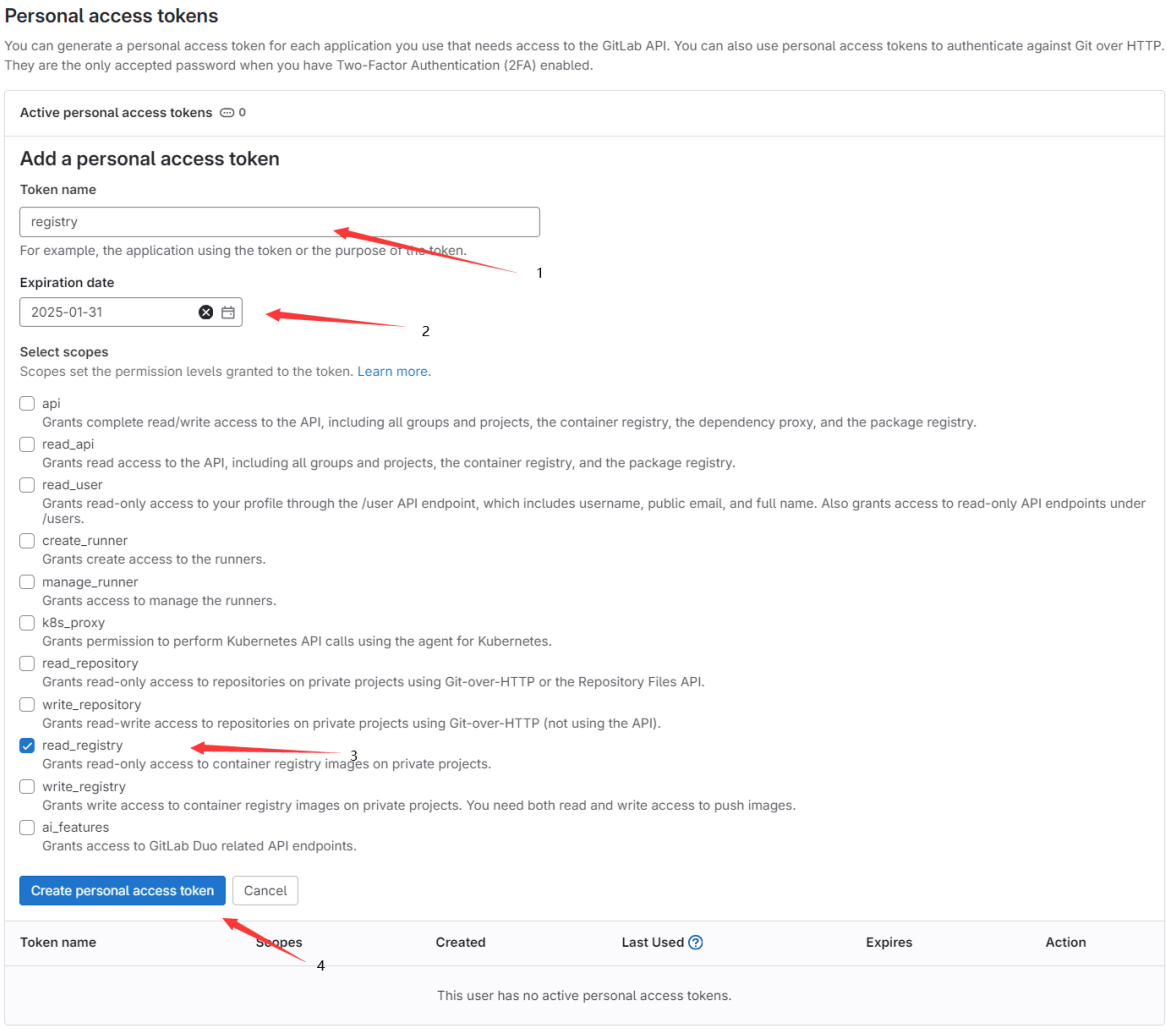
1. 点击个人头像，点击Edit Profile



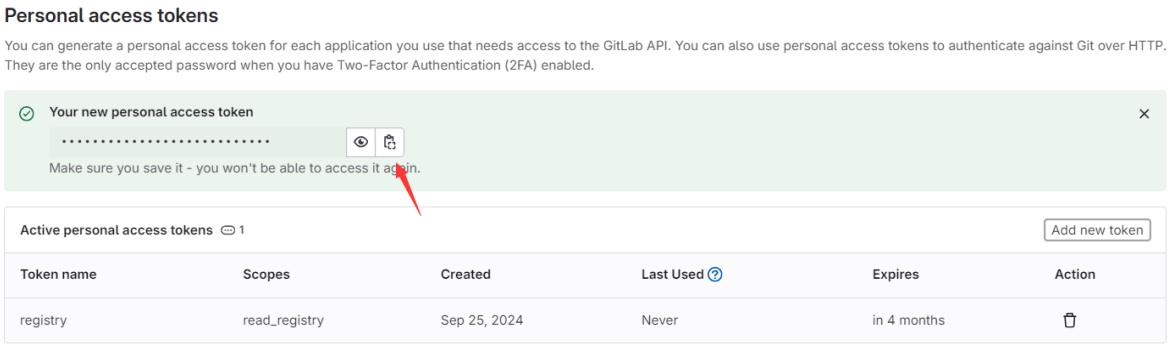
2. 点击Access Token



3. 点击Add New Token，输入相关信息。请将密钥过期时间设置至学期末，scopes选择read_registry。



4. 复制密钥并保存，**注意之后将无法再在网页上获取到这个密钥**，请妥善保管，不要泄漏给他人！！！



5. 使用podman login进行登录，拉取镜像并运行：

```
podman login glcr.cra.ac.cn
# then input your student id and key

# pull the image **In School**
podman pull glcr.cra.ac.cn/operating-systems/asterinas_labs/lab1-rust/os_lab:0.1.0

# run the containers
podman run -v .:/root/os-lab --name os_lab -it glcr.cra.ac.cn/operating-systems/asterinas_labs/lab1-rust/os_lab:0.1.0 /bin/bash
```

以下指令可以用于重启或删除已有的容器或镜像:

```
# restart the kernel_lab containers
podman start -a os_lab

# remove the containers
podman rm os_lab

# remove the image
podman rmi glcr.cra.ac.cn/operating-systems/asterinas_labs/lab1-
rust/os_lab:0.1.0
```

OSDK介绍

OSDK (Operating System Development Kit)的设计目标是简化Rust操作系统的开发流程。该工具提供一个命令行工具称为`cargo-osdk`. `cargo-osdk`可以在Cargo的基础是作为子命令使用，尽可能将Rust操作系统的编译，运行，测试的流程与普通Rust程序开发一致。

OSDK为Rust操作系统的开发带来了以下好处：

1. OSDK与集成库提供操作系统基础功能，如线程创建，端口访问，中断处理等机制。开发者可以忽略这些底层功能的开发，集中在操作系统的功能实现上，降低操作系统功能的开发门槛与前置工作量。
2. OSDK与集成库提供了一套操作系统通用库的开发工具。开发者可以通过使用OSDK与集成库来复用其他操作系统所编写的系统组件。
3. OSDK与集成库提供了一套简单的系统测试工具。开发者在进行操作系统测试时可以像普通Rust程序一样进行测试用例的编写与运行。
4. OSDK与集成库可以避免开发者使用unsafe，带来更安全的系统开发。

> **Unsafe关键字**
>
> 操作系统开发中会存在一些需要绕过Rust安全模型的情况，例如和硬件交互，根据指针访问特定地址。为了应对这种情况，Rust提供了 `unsafe` 关键字来绕过Rust的安全模型。具体地说，它允许我们使用以下五种操作
>
> - 解引用裸指针
> - 调用不安全的函数和方法
> - 访问或修改可变静态变量
> - 实现不安全的trait
> - 访问union的字段
>
> 我们将会在之后的课程学习中逐步踏入unsafe的领域，以学习操作系统底层架构。

通过输入`cargo osdk`，我们可以获得OSDK的所有命令（注：命令可能会随着更新出现调整），其中最常用的命令有：

1. new: Create a new kernel package or library package which depends on OSTD.
2. build: Compile the project and its dependencies
3. run: Run the kernel with a VMM
4. test: Execute kernel mode unit test by starting a VMM

在本节中我们将会使用`cargo osdk new`来新建一个Hello World内核，通过`run`来运行内核。

3. Hello World内核

3.1 创建Hello World内核

与`cargo new`不同，OSDK默认创建的是一个操作系统组件而非一个真正的内核，因此我们需要指定新建的项目为内核：`cargo osdk new --kernel hello-world-os`，创建后的项目结构为：

```
.
├── Cargo.toml
├── OSDK.toml
├── rust-toolchain.toml
└── src
    └── lib.rs

1 directory, 4 files
```

1. `Cargo.toml`为Rust项目配置文件，OSDK会默认将OSTD加入到依赖当中以支持开发，并将OSDK所使用的临时目录排除在工作区外。
2. `OSDK.toml`为该Rust操作系统项目的配置文件，里面会指定项目类型，系统启动方式，与QEMU的启动参数。在本学期的实验课中，我们不会或极少修改该配置文件，感兴趣的同学可以查看Asterinas对于配置文件的各字段介绍。
3. `rust-toolchain.toml`指定了该Rust项目的工具链以及操作系统编译必须添加的组件，同样在本学期的实验课中不会修改该配置文件
4. `src/lib.rs`为该Rust操作系统项目的主文件，默认为：

```rust
#![no_std]
// The feature `linkage` is required for `ostd::main` to work.
#![feature(linkage)]
#![deny(unsafe_code)]

use ostd::prelude::*;

#[ostd::main]
fn kernel_main() {
    println!("Hello world from guest kernel!");
}

```

Rust操作系统和普通Rust程序的开发会有一些区别，可以通过对该文件解析来一步步分析：

1. `#![no_std]`： 该字段表明该Rust项目不会使用到std库，可以运行在裸机环境下而无需Linux/Windows作为基础环境。
2. `#![feature(linkage)]`：该字段为`ostd::main`正常工作的前提条件，`#![feature(xxx)]`代表会启用Rust中实验特性，这些特性未在stable版本的工具链中启用，需要使用nightly版本。
3. `#![deny(unsafe_code)]`：该字段会让编译器在编译该库时一旦遇到unsafe代码，就会触发编译错误。
4. `#[ostd::main]`：该字段用于表明OSTD初始化完成后进入到的os函数入口，里面的函数目前只会打印一条输出信息。

> OSDK为了方便开发者，忽略了一些操作系统开发细节，在使用osdk编译后，可以在`target/osdk/base`下找到这些隐藏的细节：

```rust
#![no_std]
#![no_main]

extern crate hello_world_os;

#[panic_handler]
fn panic(info: &core::panic::PanicInfo) -> ! {
  extern "Rust" {
      pub fn __aster_panic_handler(info: &core::panic::PanicInfo) -> !;
  }
  unsafe { __aster_panic_handler(info); }
}
```

文件解析：

1. `#![no_main]`：该字段会禁止可执行二进制文件发布`main`符号，阻止当前crate的main函数执行，一般在系统指定其它程序入口的时候使用。
2. `#[panic_handler]`：在之前的开发中我们会遇到`panic!()`用于标明程序产生不可预估的错误，这一个宏实际上是会进入到系统指定的`panic_handler`中，以进行栈回溯等操作。std环境中Rust会提供一个默认的中断处理函数，相反在`no_std`中，我们需要自己实现一个处理函数。OSDK为我们提供了拥有栈回溯的中断处理函数，不需要我们自行实现。

3.2 运行Hello World内核

在`hello-world-os`的目录下输入`cargo osdk run --target-arch=riscv64`即可启动一个QEMU然后运行Hello World内核，输出`Hello world from guest kernel!`

3.3 总结

Host（Linux）阶段：

1. **创建项目**：OSDK根据自身包含的项目模板，创建一个依赖于OSTD的Rust项目，并加入Rust操作系统中的特殊处理如`no_std`，`no_main`等。
2. **编译项目**：Rust编译器编译内核代码，在其中OSDK提供的宏会标记我们提供的入口函数。
3. **启动准备**：根据启动协议的不同，OSDK此时会对二进制程序进行特殊处理，例如打包成协议特定的文件。
4. **启动阶段**：根据`OSDK.toml`中配置的启动信息，执行QEMU程序。

4. 系统启动流程

本节中我们将会打通从操作系统入口到`ostd::main`的路径。

4.1 操作系统的第一条指令

4.1.1 Bootloader (OpenSBI/RustSBI)

我们需要硬盘上的程序和数据。比如崭新的windows电脑里C盘已经被占据的二三十GB空间，除去预装的应用软件，还有一部分是windows操作系统的内核。在插上电源开机之后，就需要运行操作系统的内核，然后由操作系统来管理计算机。

问题在于，操作系统作为一个程序，必须加载到内存里才能执行。而“把操作系统加载到内存里”这件事情，不是操作系统自己能做到的，需要一个名为Bootloader的加载器来辅助加载。在RISC-V中，OpenSBI或RustSBI便是这样的角色。

常规操作系统的启动过程：

1. 开机自检
2. 固件（如BIOS）启动，进行硬件环境初始化，加载并启动Bootloader
3. Bootloader将操作系统内核代码加载（load）到内存中，并且启动（boot）操作系统
4. 操作系统启动

> 在计算机中，**固件(firmware)**是一种特定的计算机软件，它为设备的特定硬件提供低级控制，也可以进一步加载其他软件。固件可以为设备更复杂的软件（如操作系统）提供标准化的操作环境。对于不太复杂的设备，固件可以直接充当设备的完整操作系统，执行所有控制、监视和数据 操作功能。 在基于 x86 的计算机系统中, BIOS 或 UEFI 是固件；在基于RISCV的计算机系统中，OpenSBI是运行在**M态（M-mode）**的固件。
>
> RISCV有四种特权级（privilege level）。 其粗略的分类为： U-mode是用户程序、应用程序的特权级，S-mode是操作系统内核的特权级，M-mode是固件的特权级。

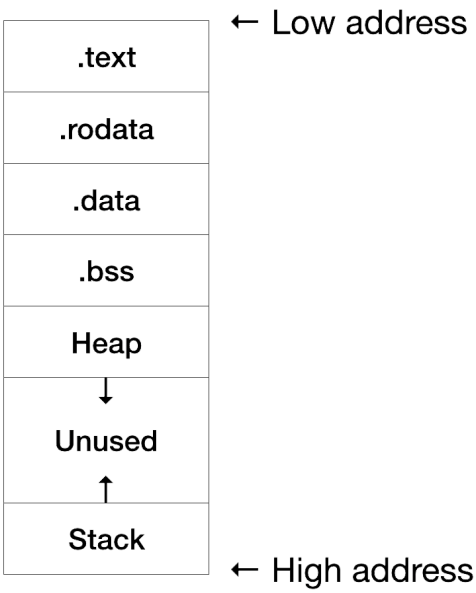
Level	Encoding	全称	简称
0	00	User/Application	U
1	01	Supervisor	S
2	10		
3	11	Machine	M

4.1.2 链接器

在RISC-V中，我们会使用OpenSBI来作为bootloader，加载并启动操作系统。OpenSBI工作完成后，总会把program counter跳到`0x80200000`这个内存地址开始执行，所以我们要把操作系统镜像放在这个位置上，该操作便是由**链接器**完成的。链接器的作用是把输入文件(往往是 .o文件)链接成输出文件(往往是elf文件)。一般来说，输入文件和输出文件都有很多section, 链接脚本(linker script)的作用，就是描述怎样把输入文件的section映射到输出文件的section, 同时规定这些section的内存布局。

我们在链接脚本`osdk/src/base_crate/riscv64.ld.template`里把操作系统的入口点定义为`_start`，所以程序里需要有一个名称为`_start`的符号。我们在`ostd/src/arch/riscv/boot/boot.S`编写了一段汇编代码, 里面包含`_start`作为整个内核的入口点。最后，在链接脚本中将`_start`作为二进制程序的开头，并将该地址设为`0x80200000`。

> **程序的内存布局**

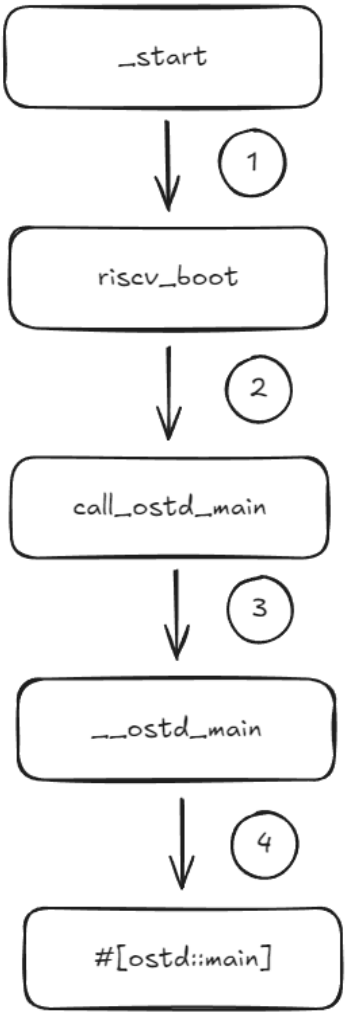


一般来说，一个程序按照功能不同会分为下面这些段：

- .text 段：代码段，存放汇编代码
- .rodata 段：只读数据段，顾名思义里面存放只读数据，通常是程序中的常量
- .data 段：存放被初始化的可读写数据，通常保存程序中的全局变量
- .bss 段：存放被初始化为 0 的可读写数据，与 .data 段的不同之处在于我们知道它要被初始化为 0，因此在可执行文件中只需记录这个段的大小以及所在位置即可，而不用记录里面的数据，也不会实际占用二进制文件的空间
- Stack：栈，用来存储程序运行过程中的局部变量，以及负责函数调用时的各种机制。它从高地址向低地址增长
- Heap：堆，用来支持程序**运行过程中**内存的**动态分配**，比如说你要读进来一个字符串，在你写程序的时候你也不知道它的长度究竟为多少，于是你只能在运行过程中，知道了字符串的长度之后，再在堆中给这个字符串分配内存

4.2 从第一条指令到#[ostd::main]

从_start开始，一直查找函数调用可以得到以下调用链：



这些函数所做的事情有：

1. `_start`：系统基础入口，bootloader跳转到操作系统执行的第一个汇编函数。`_start`会进行一些最基础的操作，以支持Rust代码的正常执行。
2. `riscv_boot`：根据协议的不同，将获取系统信息的回调函数注册到系统的对应位置。
3. `call_ostd_main`：一个中间层，用于衔接上层到`__ostd_main`的调用。
4. `__ostd_main`：调用`ostd::init`进行基础功能初始化，随后调用`#[ostd::main]`标记的函数。

> `#[ostd::main]`是一个过程宏，它会根据传入的内容自动进行代码扩展，在索引的代码中我们可以找到以下关键代码：
>
> ```
> quote!(
>     #[no_mangle]
>     #[linkage = "weak"]
>     extern "Rust" fn __ostd_main() -> ! {
>         // SAFETY: The function is called only once on the BSP.
>         unsafe { ostd::init() };
>         #main_fn_name();
>         ostd::prelude::abort();
>     }
>
>     #main_fn
> )
> .into()
> ```
>
> 其中`quote!`我们可以忽略掉，关键在于里面的内容，其中有几个关键信息：

> 1. `extern "Rust" fn __ostd_main() -> ! { }`：该函数是ostd的主函数，通过extern "Rust"将该函数暴露给Rust程序的其他部分，更准确地说，该函数会在ostd的boot模块初始化完成后进行调用。该函数中会使用`ostd::init`来对系统进行早期初始化，之后调用我们提供的函数。
> 2. `#[no_mangle]`：该标记会让Rust不对该函数名进行修改。Rust为每个函数进行了随机化处理，编写的函数名和编译后的函数名非常不一致，编译后的函数名中会包含大量随机的数字或者字符。因此这里使用`no_mangle`来表明该函数名不能进行随机化处理，而是需要原有的名字暴露给其他地方，通过获取该符号来调用函数。
> 3. `#main_fn`：该函数即为我们编写的程序入口，具体为何是这样的标记在此处不再展开，感兴趣的同学可以阅读Rust过程宏的相关内容。

4.3 总结

Guest（QEMU）阶段：

1. **Bootloader:** Bootloader进行M-mode初始化，为加载操作系统进行支持。
2. **OSTD/boot:** Bootloader处理完成后，跳转到0x8020_0000地址处，并执行操作系统第一条指令，此时就进入到了boot模块，只是暂时还位于汇编代码区域。boot模块会进行两步操作，第一步在汇编语言中，为Rust系统之后的正常运行做些准备，第二步是在Rust语言中，将获取系统信息的回调函数注册到系统的对应位置。
3. **OSTD/init:** boot模块处理完毕后，会调用`call_ostd_main`，间接调用到`__ostd_main`中以进行系统基础功能初始化。OSTD系统的初始化较为复杂，之后的实验课会对部分内容进行分析。
4. **OS/main:** 待OSTD初始化完毕后，会调用`#[ostd::main]`标记的函数。最后打印出"Hello world from guest kernel!"。

5. 上手练习

1. 尝试模仿Rust std环境下的测试用例，编写OSDK下的测试用例（Hint: Replace test with ktest）
2. OSTD采用了日志系统，可以通过指定不同的日志等级来获得不同输出，这些输出将会在之后的操作系统实验中带来非常有效的信息。尝试运行: `cargo osdk run --target-arch=riscv64 --kcmd-args="ostd.log_level=error"`来查看不同输出日志，除此之外，可以用warn，info，debug，trace来代替命令中的error，以获得越来越详细的日志。

思考题: Rust的std和alloc/core之间的关系?