

在RT-Thread Smart上支持rust语言编写的用户态程序

在RT-Thread Smart上支持rust语言编写的用户态程序

- 一、项目概述
 - 1.1 项目背景
 - Rust语言的优势
 - 1.2 项目预期目标
 - 1.3 项目达成目标
 - 1.3 项目目录结构
- 二、赛题分析与调研
 - 2.1 外部函数接口库 Libc
 - 2.2 Rust编译目标
 - 2.3 Rust标准库
 - 2.4 分析与总结
- 三、开发环境搭建
 - 3.1 安装qemu-system-aarch64
 - 3.2 安装musl gcc工具链
 - 3.3 安装xmake和scons工具
 - 3.4 安装ncurses库
 - 3.5 构建内核镜像
 - 3.6 获取用户态的开发SDK
- 四、外部函数接口库
- 五、编译器添加编译目标
- 六、编写标准库
 - 6.1 marco_main
 - 6.2 stdout库
 - 6.3 stdin库
 - 6.4 thread库
 - 6.5 mutex库
 - 6.6 fs库
- 七、标准库测试程序及测试结果
 - 7.1 测试统一说明
 - 7.2 stdout库测试
 - 7.3 stdin库测试
 - 7.4 thread库测试
 - 7.5 mutex库测试
 - 7.6 fs库测试
- 八、项目总结与未来展望
- 九、参赛体会
- 十、参考资料

一、项目概述

1.1 项目背景

嵌入式平台广泛应用于各类电子设备中，其核心需求之一是能够高效地执行特定任务。这些平台通常具有资源受限的特点，包括有限的处理能力、存储空间和电源供应。因此，实时操作系统（RTOS）成为嵌入式系统的关键组件，它能够提供确定性、高可靠性和低延迟的任务调度和资源管理。

RT-Thread Smart（简称rt-smart）是RT-Thread开源实时操作系统的一个扩展版本，专为嵌入式平台设计。它继承了RT-Thread的核心特性，如高实时性、模块化和灵活性，同时增强了用户态应用程序的支持，使其能够运行复杂的用户态任务。

目前，RT-Thread Smart的用户态应用程序主要支持C/C++语言，并使用musl libc作为其标准库。C/C++语言在嵌入式系统中有着深厚的历史积淀，丰富的库和工具链使其在嵌入式开发中占据重要地位。然而，随着嵌入式系统的复杂性增加，以及对安全性和开发效率的更高要求，C/C++的某些局限性逐渐显现，如手动内存管理的复杂性和潜在的安全漏洞。

Rust语言的优势

Rust语言自诞生以来，迅速崭露头角，特别是在系统编程领域。其核心特点包括：

1. **内存安全**：Rust通过所有权系统和借用检查器，确保在编译时避免空指针、悬垂指针和数据竞争等常见的内存安全问题。
2. **高性能**：Rust编译后的程序能够接近甚至达到C/C++的性能，这对于资源受限的嵌入式系统尤为重要。
3. **并发性**：Rust提供了安全且高效的并发编程模型，使得开发者能够充分利用多核处理器的能力，而不必担心并发带来的复杂性和安全问题。
4. **现代化开发体验**：Rust拥有强大的包管理器（Cargo），现代化的语法和工具链，极大地提升了开发者的生产力和代码质量。

将Rust语言引入RT-Thread Smart，不仅能够丰富其用户态应用程序的开发语言选择，还能为嵌入式开发带来诸多优势，如Rust的内存安全特性可以减少因内存错误导致的系统崩溃和安全漏洞。Rust的现代化语法和工具链能够加速开发流程，减少调试和维护时间等。

1.2 项目预期目标

1. Rust语言支持库（已完成）

编译并运行rt-smart操作系统。编译一个最小的Rust语言程序，使之能在rt-smart操作系统上运行；查阅rt-smart的文档和资料，了解其中可用的系统调用。查阅rt-smart与编译器有关的文档，了解rt-smart遵守的调用约定；选择一个系统调用的模块，制作一个封装和处理这部分系统调用的库。依赖于这个库，用户可以编写应用于rt-smart操作系统的应用程序，并使用里面的系统调用。请参考libtock-rs。

2. 制作一个到rt-smart的Rust编译目标（已完成）

查阅Rust语言相关的资料，了解Rust语言目前支持哪些平台。Rust语言是否拥有面向嵌入式操作系统专门的编译目标？请举例；作为一个独立的平台，rt-smart提供平台相关的开发方法。请为Rust编译器添加一个名为“aarch64-rt-smart”的编译目标。使用该目标得到的二进制程序，能直接应用到rt-smart支持的平台上；请将第一题的成果视作标准库的一部分，选择一个系统调用的模块，为aarch64-rt-smart添加std标准库对应模块的代码。

3. Rust生态中的rt-smart平台（已完成）

许多的库实现和平台有关系，这些库通常需要特定的操作系统功能支持。比如num_cpus，它在不同平台上调用不同的系统调用，达到列出CPU核数量的功能。查阅资料，列出几个这样的库。[您可能需要浏览crates.io或lib.rs](#)。选择一个Rust生态中的库，为其添加代码，使之能支持rt-smart操作系统的相关功能。

1.3 项目达成目标

1. 通过封装 `aarch64-smart-museabi` 上的C库函数，基于Rust的FFI机制（Foreign Function Interface，外部函数接口），封装成Rust程序能够调用的接口，再通过静态库链接的方式将库函数链接到最终的应用程序中，保证函数能够被正确调用，从而使得Rust应用程序能够调用 `rtsmart` 操作系统提供的系统功能，为封装Rust功能库提供依赖
2. 通过修改Rust编译器中对于编译平台的支持，添加一个到 `aarch64-unknown-rtsmart` 的编译目标，提供如 `llvm_target`、`linker`、`max_atomic_width`、`pointer_width`、`data_layout`、`arch` 等 `aarch64-unknown-rtsmart` 架构和系统有关的target option，使得Rust编译器能够编译出适配当前架构与系统的机器指令，使得应用程序能够在目标平台上运行
3. 基于目标1封装的libc库，编写Rust生态中常用的标准库函数。即为Rust编写一个针对 `aarch64-unknown-rtsmart` 平台的标准库，使得用户能够调用标准库的函数编写更加复杂的应用程序。当前项目编写的主要标准库包括：用于标准输出的 `stdout` 库，用于标准输入的 `stdin` 库，用于创建、运行、操作、删除线程的 `thread` 库，用于保障线程安全的 `mutex` 库，用于创建文件、操作文件读写的 `fs` 库

1.3 项目目录结构

代码和文档都存储Gitlab仓库中。以下是仓库目录和文件描述：

```
.project2210132-226009/
├── README.md           //项目说明文件
├── 技术文档.md         //技术文档
├── 技术文档.pdf        //技术文档PDF版本
├── img/                //技术文档图片
├── examples/           //标准库测试程序
│   ├── example1/hello  //libc和rust编译目标的测试，最小的Rust语言程序
│   ├── example2/hello  //测试marco_main属性宏和stdout库的测试程序
│   ├── example3/thread_test //测试thread库的测试程序
│   ├── example4/mutex_test //测试mutex库的测试程序
│   ├── example5/read_test //测试stdin库的测试程序
│   └── example6/file_test //测试fs库的测试程序
├── libc/               //Rust在不同系统平台的外部函数接口
├── marco_main/         //将Rust风格的main函数转换为C风格的main函数的属性宏
├── rtsmart-std/        //基于libc开发的rtsmart平台上的标准库
│   ├── src/           //源代码
│   │   ├── api/       //封装调用libc的api
│   │   ├── prelude/   //预引入的库
│   │   ├── fs.rs      //fs库
│   │   ├── lib.rs     //模块声明
│   │   ├── malloc.rs  //内存分配器
│   │   ├── mutex.rs   //mutex库
│   │   ├── put.rs     //stdout库的辅助模块
│   │   ├── stdin.rs   //stdin库
│   │   ├── stdout.rs  //stdout库
│   │   ├── thread.rs  //thread库
│   │   └── time.rs    //time库
├── rust/               //为添加编译目标，在rust编译器源代码中修改或添加的文件
├── video/              //标准库测试程序的演示视频
└── worklog/            //每周的工作日志
```

二、赛题分析与调研

根据预期目标可知，本项目的主要任务分为三个部分，分别是封装Rust在rt-smart系统平台上的外部函数接口库 `libc`、向Rust编译器添加一个到 `aarch64-unknown-rtsmart` 平台的编译目标、编写rt-smart平台上的Rust标准库

2.1 外部函数接口库 `libc`

该库是基于Rust的 `FFI` 功能实现的，`FFI` 全称是 `Foreign Function Interface`，即实现不同编程语言间的函数级相互调用，对于复杂的项目，可以充分复用不同编程语言的已有功能，减小开发负担。Rust语言作为一种新时代的系统级编程语言，它同 `C/C++` 一样都是直接将程序代码编译为机器指令码执行，相比 `Java, Python` 等底层使用虚拟机解释执行字节码及使用垃圾回收的语言，在实现 `FFI` 时容易得多。利用 `C/C++` 的已有的生态基础，Rust 很多底层代码不用重复造轮子，直接通过 `FFI` 封装复用已有的 `C/C++` 库，这对于一门新语言能快速广泛的运用到项目中是至关重要的。

Rust 调用 C 的情况，我们需要在 Rust 中声明需要调用的 C 函数，这样 Rust 在编译生成调用符号及调用规范时，便会采用 C 的规范去编译。Rust 中也是采用 `extern "C"` 的方式去声明 C 的调用接口，不过 Rust 并不知道实际 C 函数的实现是否安全，所以一般在申明前加上 `unsafe` 关键字（非必须，但是C函数调用必须处于 `unsafe` 块中）。示例如下：

```
use libc::c_int;

#[link(name = "add")]
unsafe extern "C" {
    fn add(c_int, c_int) -> c_int;
}

fn main() {
    let a: i32 = 10;
    let b: i32 = 20;
    let c: i32 = unsafe { add(a, b) };
}
```

不像 C 和 C++ 都可以使用支持 C++ 的编译器进行编译，Rust 和 C 需要使用各自不同的编译器进行编译，最后在链接起来。Rust 调用 C 通常是先将 C 代码编译为静态库文件，然后在构建 Rust 程序时，在链接阶段链接到 C 静态库。

我们可以在声明代码块前加上特定的 rust 属性宏 `#[link(name = "add")]` 去指导编译器链接到某个具体的静态库。

如此，我们的 `libc` 库的作用就是将这些C库函数引入并链接到Rust应用程序中来，使得我们的Rust应用程序能够调用这些C库函数

2.2 Rust编译目标

Rust编译器对不同平台的支持由编译器下的`compiler/rust_target`来定义，用于告知编译器应生成何种输出，以下是编译器支持的部分编译目标：

```
supported_targets! {
    ("x86_64-unknown-linux-gnu", x86_64_unknown_linux_gnu),
    ("x86_64-unknown-linux-gnu32", x86_64_unknown_linux_gnu32),
    ("i686-unknown-linux-gnu", i686_unknown_linux_gnu),
    ("i586-unknown-linux-gnu", i586_unknown_linux_gnu),
```

```

("loongarch64-unknown-linux-gnu", loongarch64_unknown_linux_gnu),
("loongarch64-unknown-linux-musl", loongarch64_unknown_linux_musl),
("m68k-unknown-linux-gnu", m68k_unknown_linux_gnu),
("csky-unknown-linux-gnuabi2", csky_unknown_linux_gnuabi2),
("csky-unknown-linux-gnuabi2hf", csky_unknown_linux_gnuabi2hf),
("mips-unknown-linux-gnu", mips_unknown_linux_gnu),
("mips64-unknown-linux-gnuabi64", mips64_unknown_linux_gnuabi64),
("mips64el-unknown-linux-gnuabi64", mips64el_unknown_linux_gnuabi64),
("mipsisa32r6-unknown-linux-gnu", mipsisa32r6_unknown_linux_gnu),
("mipsisa32r6el-unknown-linux-gnu", mipsisa32r6el_unknown_linux_gnu),
("mipsisa64r6-unknown-linux-gnuabi64", mipsisa64r6_unknown_linux_gnuabi64),
("mipsisa64r6el-unknown-linux-gnuabi64",
mipsisa64r6el_unknown_linux_gnuabi64),
("mipsel-unknown-linux-gnu", mipsel_unknown_linux_gnu),
("powerpc-unknown-linux-gnu", powerpc_unknown_linux_gnu),
("powerpc-unknown-linux-gnuspe", powerpc_unknown_linux_gnuspe),
("powerpc-unknown-linux-musl", powerpc_unknown_linux_musl),
("powerpc64-ibm-aix", powerpc64_ibm_aix),
("powerpc64-unknown-linux-gnu", powerpc64_unknown_linux_gnu),
("powerpc64-unknown-linux-musl", powerpc64_unknown_linux_musl),
("powerpc64le-unknown-linux-gnu", powerpc64le_unknown_linux_gnu),
("powerpc64le-unknown-linux-musl", powerpc64le_unknown_linux_musl),
("s390x-unknown-linux-gnu", s390x_unknown_linux_gnu),
("s390x-unknown-linux-musl", s390x_unknown_linux_musl),
("sparc-unknown-linux-gnu", sparc_unknown_linux_gnu),
("sparc64-unknown-linux-gnu", sparc64_unknown_linux_gnu),
("arm-unknown-linux-gnueabi", arm_unknown_linux_gnueabi),
("arm-unknown-linux-gnueabihf", arm_unknown_linux_gnueabihf),
("armeb-unknown-linux-gnueabi", armeb_unknown_linux_gnueabi),
("arm-unknown-linux-musleabi", arm_unknown_linux_musleabi),
("arm-unknown-linux-musleabihf", arm_unknown_linux_musleabihf),
("armv4t-unknown-linux-gnueabi", armv4t_unknown_linux_gnueabi),
("armv5te-unknown-linux-gnueabi", armv5te_unknown_linux_gnueabi),
("armv5te-unknown-linux-musleabi", armv5te_unknown_linux_musleabi),
("armv5te-unknown-linux-ucLibceabi", armv5te_unknown_linux_ucLibceabi),
("aarch64-unknown-linux-musl", aarch64_unknown_linux_musl),
("x86_64-unknown-linux-musl", x86_64_unknown_linux_musl),
("i686-unknown-linux-musl", i686_unknown_linux_musl),
("i586-unknown-linux-musl", i586_unknown_linux_musl),
("mips-unknown-linux-musl", mips_unknown_linux_musl),
("mipsel-unknown-linux-musl", mipsel_unknown_linux_musl),
("mips64-unknown-linux-muslabi64", mips64_unknown_linux_muslabi64),
("mips64el-unknown-linux-muslabi64", mips64el_unknown_linux_muslabi64),
("hexagon-unknown-linux-musl", hexagon_unknown_linux_musl),
("hexagon-unknown-none-elf", hexagon_unknown_none_elf),
("mips-unknown-linux-ucLibc", mips_unknown_linux_ucLibc),
("mipsel-unknown-linux-ucLibc", mipsel_unknown_linux_ucLibc),
("i686-linux-android", i686_linux_android),
("x86_64-linux-android", x86_64_linux_android),
.....
}

```

每个编译目标，都有一份对应的target配置，用于告诉编译器特定平台的一些特定信息，例如：

- `llvm_target` :用于指定 `LLVM`（底层编译框架）如何识别和生成目标代码的格式。

- `pointer_width`: 定义指针的宽度（位数）。例如 `aarch64` 架构的指针宽度就是64。
- `data_layout`: 指定了内存中的数据如何对齐和排列。这对编译器如何处理数据结构和内存访问至关重要。
- `arch`: 目标架构，让编译器能够将程序编译成指定架构的指令
- `max_atomic_width`: 指定目标平台上支持的最大原子操作宽度。
- `env`: 指定目标平台的环境。它通常用于描述标准库和工具链的类型。
- `linker`: 指定用于目标平台的链接器。
-

因此在本项目中，需要将 `aarch64-unknown-rtsmart` 该编译目标对应的编译配置信息加入到Rust编译器的源代码中，再将当前编译目标注册到其所支持的target中，重新编译rust编译器，即可观察到新编译的rust编译器可支持该编译目标。

再在应用程序编译时配置编译目标为 `aarch64-unknown-rtsmart`，即可编译出在该平台上运行的二进制文件

```
[build]
target = "aarch64-unknown-rtsmart"

[target.aarch64-unknown-rtsmart]
linker = "aarch64-linux-musleabi-gcc"
```

2.3 Rust标准库

Rust的标准库源代码位于Rust编译器源代码的library/std下，封装了许多系统功能，以库函数的方式提供给用户进行调用。

Rust语言的设计目标是能编写操作系统内核的系统编程语言。使用静态编译，不采用GC机制，保证开发出的应用极高性能；具备现代编程语言的高效率语法，并在编译阶段就保证内存安全，并发安全，分支安全等安全性。现代高级语言的标准库是语言的一个紧密的组成部分，标准库负责语言众多关键特性实现。RUST的库也是如此，但与其他采用GC方案的语言不同，其他语言编程目标是在操作系统之上运行的用户态程序，只需要考虑一种模型。RUST则需要考虑操作系统内核与用户态两种模型。C语言在解决这个问题方法是只提供用户态的标准库，操作系统内核的库由各操作系统自行实现。RUST的现代语言特性决定了标准库无法象C语言那样把操作系统内核及用户态程序区分成完全独立的两个部分，所以只能更细致的设计，做模块化的处理。RUST标准库体系分为三个模块：语言核心库--`core`；`alloc` 库；用户态 `std` 库。

- `core` 库是Rust语言核心库，适用于操作系统内核及用户态，包括Rust的基础类型，基本Trait, 类型行为函数，其他函数等内容。`core`库是硬件架构和操作系统无关的可移植库。主要内容有编译器内置intrinsic函数，包括内存操作函数，算数函数，位操作函数，原子变量操作函数等，这些函数通常与CPU硬件架构紧密相关，且一般需要汇编来提供最佳性能。intrinsic函数实际上也是对CPU指令的屏蔽层。基本数据类型，包括整数类型，浮点类型，布尔类型，字符类型，单元类型，内容主要是实现运算符Trait, 类型转换Trait, 派生宏Trait等，字符类型包括对 `unicode`，`ascii` 的不同编码的处理。整数类型有大小端变换的处理。还有字符串、时间库、类型转换、基础派生宏等内容。
- `alloc` 库主要实现需要进行动态堆内存申请的智能指针类型，集合类型及他们的行为，函数，Trait 等内容，仅建立在 `core` 库模块之上。`std` 会对 `alloc` 模块库的内容做重新的封装。`alloc` 库适用于操作系统内核及用户态程序。包括：基本内存申请；`Allocator Trait`；`Allocator` 的实现结构 `Global`，基础智能指针：`Box`，`Rc`，动态数组内存类型：`RawVec`，`Vec`，字符串类型：

`&str`, `String` , 并发编程指针类型: `Arc` , 指针内访问类型: `Cell`, `RefCell` 还有些其他类型, 一般仅在标准库内部使用

- `std` 库是在操作系统支撑下运行的只适用于用户态程序的库, `core`库实现的内容基本在`std`库也有对应的实现。其他内容主要是将操作系统系统调用封装为适合rust特征的结构和Trait,包括: 1.进程, 线程库 2.网络库 3.文件操作库 4.环境变量及参数 5.互斥与同步库, 读写锁 6.定时器 7.输入输出的数据结构, 8.系统事件, 对 `epoll`, `kevent` 等的封装。可以将`std`库看做基本常用的容器类型及操作系统封装库。

因此在我们的项目中, 就是基于 `core` 库、 `alloc` 库, `libc` 编写标准库中的一些功能库, 具体实现设计可以参考Rust编译器中的源代码, 也可以自己自由发挥, 只要能提供需要的功能即可。

2.4 分析与总结

基于上述的调研, 可以得到我们当前项目的设计思路流程图

三、开发环境搭建

3.1 安装qemu-system-aarch64

我们选择的目标平台为 `aarch64`, 因此我们首先需要安装 `qemu-system-aarch64`, 用于支持rt-smart内核

```
sudo apt install qemu-system-aarch64
```

3.2 安装musl gcc工具链

然后需要安装 `musl gcc` 工具链, 下载地址为: https://download.rt-thread.org/download/rt-smart/toolchains/aarch64-linux-musleabi_for_x86_64-pc-linux-gnu_latest.tar.bz2

然后配置环境变量:

```
# aarch64 musl gcc
export RTT_CC=gcc
export RTT_EXEC_PATH=/yourpath/aarch64-linux-musleabi_for_x86_64-pc-linux-gnu/bin
export RTT_CC_PREFIX=aarch64-linux-musleabi-
export PATH=$PATH:$RTT_EXEC_PATH
```

使用命令 `source ~/.bashrc` 刷新环境变量配置文件

之后可使用命令 `aarch64-linux-musleabi-gcc -v` 检查 `musl gcc` 工具环境变量是否正确设置

3.3 安装xmake和scons工具

```
sudo add-apt-repository ppa:xmake-io/xmake
sudo apt update
sudo apt install xmake
sudo apt-get install scons
```

3.4 安装ncurses库

```
sudo apt-get install libncurses5-dev
```

3.5 构建内核镜像

首先将rt-smart的源码下载到本地: <https://github.com/RT-Thread/rt-thread.git>

进入到 `qemu-virt64-aarch64` 目录下

```
cd ../rt-thread/bsp/qemu-virt64-aarch64/ #打开 rt-thread 项目目录中的 bsp/qemu-  
virt64-aarch64 目录  
scons --menuconfig
```

选择Smart内核

然后在该目录下执行 `scons` 命令开始编译内核

3.6 获取用户态的开发SDK

将Smart的userapps仓库克隆下来:

```
git clone https://github.com/RT-Thread/userapps.git
```

首先运行env.sh 添加一下环境变量

```
source env.sh
```

进入 apps 目录进行编译

```
cd apps  
xmake f -a aarch64 # 配置为 aarch64平台  
xmake -j8
```

运行 `xmake smart-rootfs` 制作 rootfs , 运行 `xmake smart-image` 制作镜像

```
xmake smart-rootfs  
xmake smart-image -f fat -o ../prebuilt/qemu-virt64-aarch64-fat/fat.img #制作 fat  
镜像
```

这个fat.img镜像即可作为虚拟机内的文件系统

修改qemu.sh中的路径即可完成挂载

进入到userapp/sdk/rt-thread/lib/aarch64/cortex-a目录下

获取到里面的两个库文件, 分别是静态库 `librtthread.a` 和动态库 `librtthread.so`, 这两个库文件用于之后编译应用程序时进行链接, 找到对应支持的库函数

四、外部函数接口库

下载 `libc` 的源代码


```
git clone https://github.com/rust-lang/libc.git
```

在 `src` 目录下添加 `rtsmart` 目录

将定义的外部函数接口写入到 `rtsmart/mod.rs` 下

在 `Cargo.toml` 中的第34行的 `targets` 中添加 `aarch64-unknown-rtsmart` 目标:

```
targets = [  
    "aarch64-apple-darwin",  
    "aarch64-apple-ios",  
    "aarch64-linux-android",  
    "aarch64-pc-windows-msvc",  
    "aarch64-unknown-freebsd",  
    "aarch64-unknown-fuchsia",  
    "aarch64-unknown-hermit",  
    "aarch64-unknown-linux-gnu",  
    "aarch64-unknown-linux-musl",  
    "aarch64-unknown-netbsd",  
    "aarch64-unknown-openbsd",  
    "aarch64-unknown-rtsmart",  
    ...  
]
```

前面提到, 定义外部函数接口时需要指定链接的静态库

在本项目中, 我们的 `rt-smart` 的 `libc` 就链接了如下静态库:

```
#[link(name = "util", kind = "static",  
cfg(target_feature = "crt-static"))]  
#[link(name = "rt", kind = "static",  
cfg(target_feature = "crt-static"))]  
#[link(name = "pthread", kind = "static",  
cfg(target_feature = "crt-static"))]  
#[link(name = "m", kind = "static",  
cfg(target_feature = "crt-static"))]  
#[link(name = "dl", kind = "static",  
cfg(target_feature = "crt-static"))]  
#[link(name = "c", kind = "static",  
cfg(target_feature = "crt-static"))]  
#[link(name = "rtthread", kind = "static",  
cfg(target_feature = "crt-static"))]  
#[link(name = "gcc_eh", kind = "static",  
cfg(target_feature = "crt-static"))]  
#[link(name = "gcc", kind = "static",  
cfg(target_feature = "crt-static"))]  
#[link(name = "util", cfg(not(target_feature = "crt-static")))]  
#[link(name = "rt", cfg(not(target_feature = "crt-static")))]  
#[link(name = "pthread", cfg(not(target_feature = "crt-static")))]  
#[link(name = "m", cfg(not(target_feature = "crt-static")))]  
#[link(name = "dl", cfg(not(target_feature = "crt-static")))]  
#[link(name = "c", cfg(not(target_feature = "crt-static")))]  
#[link(name = "rtthread", cfg(not(target_feature = "crt-static")))]
```

之后在 `build.rs` 中查找这些静态库并链接进项目即可:

```
println!("cargo:rustc-link-search=/opt/aarch64-smart-musleabi/aarch64-linux-musleabi/lib");
println!("cargo:rustc-link-lib=static=util");
println!("cargo:rustc-link-lib=static=rt");
println!("cargo:rustc-link-lib=static=pthread");
println!("cargo:rustc-link-lib=static=m");
println!("cargo:rustc-link-lib=static=dl");
println!("cargo:rustc-link-lib=static=c");
println!("cargo:rustc-link-lib=static=rtthread");
println!("cargo:rustc-link-lib=static=gcc_eh");
println!("cargo:rustc-link-lib=static=gcc");
// Avoid unnecessary re-building.
println!("cargo:rerun-if-changed=build.rs");
```

这里就需要用到前面获取的用户态开发SDK里的 `librtthread.a` 这一静态库了

五、编译器添加编译目标

找到 `rust/compiler/rustc_target/src/spec`

在targets文件夹中添加文件 `aarch64_unknown_rtsmart.rs`

在base文件夹中添加 `rtsmart_base.rs` 文件

这些文件用于定义编译目标平台的一些特性，用于告知编译器应生成何种输出

```
pub fn target() -> Target {
    let mut base = base::rtsmart_base::opts();
    base.max_atomic_width = Some(128);
    base.env = "gnu".into();
    base.linker = Some("aarch64-linux-musleabi-gcc".into());

    Target {
        llvm_target: "aarch64-unknown-linux-gnu".into(),
        metadata: crate::spec::TargetMetadata {
            description: None,
            tier: None,
            host_tools: None,
            std: None,
        },
        pointer_width: 64,
        data_layout: "e-m:e-i8:8:32-i16:16:32-i64:64-i128:128-n32:64-S128".into(),
        arch: "aarch64".into(),

        options: TargetOptions {
            mcount: "\u{1}_mcount".into(),
            ..base
        },
    }
}
```

这段代码进行了如下定义：

- `max_atomic_width` 设置为 `Some(128)`，这表示最大支持的原子操作宽度为 128 位。

- `env` 设置为 `"gnu"`，表示目标环境是 GNU。
- `linker` 设置为 `Some("aarch64-linux-musleabi-gcc".into())`，指定链接器为 `aarch64-linux-musleabi-gcc`。
- `llvm_target` 设置为 `aarch64-unknown-linux-gnu`，指示编译器应针对 ARM 64-bit 架构进行代码生成。这是
- `pointer_width` 设置为 64 表明目标架构中指针宽度为 64 位
- `data_layout` 设置为 `"e-m:e-i8:8:32-i16:16:32-i64:64-i128:128-n32:64-S128"` 含义如下
 - `e`：小端序（little-endian），表示低字节存储在低地址。
 - `m:e`：描述地址模式的默认对齐。
 - `i8:8:32`：8 位整数对齐为 8 位，存储大小为 32 位。
 - `i16:16:32`：16 位整数对齐为 16 位，存储大小为 32 位。
 - `i64:64`：64 位整数对齐为 64 位。
 - `i128:128`：128 位整数对齐为 128 位。
 - `n32:64`：自然对齐为 32 位或 64 位。
 - `S128`：堆栈对齐为 128 位。
- `arch` 架构设置为 `aarch64`，表示 ARM 64-bit 架构，这是现代 ARM 处理器常用的 64 位指令集架构。

除此之外，在 option 中还有如下配置：

```
os: "rtsmart".into(),
dynamic_linking: true,
executables: true,
families: cvs!["unix"],
has_rpath: true,
pre_link_args: args,

// linker_flavor: LinkerFlavor::Ld,
// link_script: Some(LINKER_SCRIPT.to_string()),

crt_static_default: true,

panic_strategy: PanicStrategy::Abort,
disable_redzone: true,
emit_debug_gdb_scripts: false,
//eh_frame_header: false,

position_independent_executables: true,
relro_level: RelroLevel::Full,
// has_elf_tls: false,
crt_static_respected: true,
..Default::default()
```

这部分 option 用于定义以下配置：

- `os: "rtsmart".into()`：目标操作系统名称为 `"rtsmart"`
- `dynamic_linking: true`：表示目标平台支持动态链接库（如 `.so` 文件）。

- `executables: true`：表示目标平台支持生成可执行文件。
- `families: cvs!["unix"]`：指定目标平台所属的操作系统家族为UNIX 家族。这可以影响编译器对某些系统特性的假设。
-

等等一系列配置完成后，在 `spec/mod.rs` 中的第1705行增加模块定义

```
("aarch64-unknown-rtsmart", aarch64_unknown_rtsmart)
```

这样就创建了一个新的编译目标。

六、编写标准库

6.1 marco_main

由于在没有Rust标准库的支持下，也就是`no_std`模式下，是无法使用`main`函数的。于是就另辟蹊径，通过过程宏的方式对用户编写的代码进行重构，通过使用C ABI调用格式的`main`函数，就可以正常使用`main`函数作为程序的入口点。

为此，我们开发了一个叫做 `marco_main` 的属性宏

Cargo.toml

```
[package]
name = "marco_main"
version = "0.1.0"
edition = "2021"

[lib]
proc_macro = true

[dependencies]
quote = "1.0"
proc-macro2 = "1.0"
darling = "0.13.0"

[dependencies.syn]
version = "1.0"
features = ["extra-traits", "full"]
```

一个普通的过程宏项目的Cargo.toml文件中，在`lib`里标注`proc_macro = true`

同时需要用到`quote`、`proc-macro2`、`syn`等库。`darling`库用于自动将属性宏上的属性值转换到结构体对象上。

proc-macro2

`proc-macro2` 是对 `proc_macro` 的包装，根据其文档，它用于两个特定目的：

- 将类似与过程宏的功能带到其他上下文中，如 `build.rs` 和 `main.rs`
- 让过程宏可进行单元测试

由于 `proc_macro` 只能在 `proc-macro` 类型的库中使用，所以无法直接使用 `proc_macro` 库。

始终记住，`proc-macro2` 模仿 `proc_macro` 的 api，对后者进行包装，让后者的功能在非 `proc_macro` 类型的库中也能使用。

因此，建议基于 `proc-macro2` 来开发过程宏代码的库，而不是基于 `proc_macro` 构建，因为这将使这些库可以进行单元测试，这也是以下列出的库传入和返回 `proc-macro2::TokenStream` 的原因。

当需要 `proc_macro::TokenStream` 时，只需对 `proc-macro2::TokenStream` 进行 `.into()` 操作即可获得 `proc_macro` 的版本，反之亦然。

使用 `proc-macro2` 的过程宏通常会以别名的形式导入，比如使用 `use proc-macro2::TokenStream as TokenStream2` 来导入 `proc-macro2::TokenStream`。

quote

`quote` 主要公开了一个声明宏：`quote!`。

这个小小的宏让你轻松创建标记流，使用方法是将实际的源代码写出为 Rust 语法。

同时该宏还允许你将标记直接插入到编写的语法中：

1. 使用 `#local` 语法进行插值，其中 `local` 指的是当前作用域中的一个 local。
2. 使用 `##local` 来对实现了 `ToTokens` 的类型的迭代器进行插值，其工作原理类似于声明宏的反复，因为它们允许在反复中使用分隔符和额外的标记。

```
let name = /* 某个标识符 */;
let exprs = /* 某个对表达式标记流的迭代器 */;
let expanded = quote! {
    impl SomeTrait for #name { // #name 将插入上述的局部名称
        fn some_function(&self) -> usize {
            #( #exprs )+* // 通过迭代生成表达式
        }
    }
};
```

在准备输出时，`quote!` 是一个非常有用的工具，它避免了通过逐个插入标记来创建标记流。

syn

`syn` 是一个解析库，用于将 Rust 标记流解析为 Rust 源代码的语法树。

它是一个功能非常强大的库，使得解析过程宏输入变得非常容易，而 `proc_macro` 本身不公开任何类型的解析功能，只公开标记。

由于这个库可能是一个严重的编译依赖项，它大量使用 `feature` 控制来允许用户根据需要将其功能剪裁得尽可能小。

那么，它能提供什么呢？很多东西。

首先，当启用 `full` feature 时，它具有对所有标准 Rust 语法节点的定义和从而能够完全解析 Rust 语法。

在启用 `derive` feature（默认开启）之后，它还提供一个 `DeriveInput` 类型，该类型封装了传递给 `derive` 宏输入所有信息。

在启用 `parsing` 和 `proc-macro` feature（默认开启）之后，`DeriveInput` 可以直接与 `parse_macro_input!` 配合使用，以将标记流解析为所需的类型。

如果 Rust 语法不能解决你的问题，或者说你希望解析自定义的非 Rust 语法，那么这个库还提供了一个通用的[解析 API][parse]，主要是以 `Parse` trait 的形式（这需要 `parsing` feature，默认启用）。

除此之外，该库公开的类型保留了位置信息和 `Span`，这让过程宏发出详细的错误消息，指向关注点的宏输入。

由于这又是一个过程宏的库，它利用了 `proc-macro2` 的类型，因此可能需要转换成 `proc_macro` 的对应类型。

marco_main_use宏代码逻辑

首先在函数头上使用`#[proc_macro_attribute]`进行标注

同时接受两个参数

```
pub fn marco_main_use(args: TokenStream, input: TokenStream) -> TokenStream
```

- 第一个参数是属性名称后面的带分隔符的标记树，不包括它周围的分隔符。如果只有属性名称（其后不带标记树，比如 `#[attr]`），则这个参数的值为空。
- 第二个参数是添加了该过程宏属性的条目，但不包括该过程宏所定义的属性。因为这是一个 `active` 属性，在传递给过程宏之前，该属性将从条目中剥离出来。

接下来首先是使用`parse_macro_input!`宏通过Rust的代码标记流获取到源代码语法树，以及解析出过程宏上提供的`appname`和`desc`等属性

```
let f = parse_macro_input!(input as syn::ItemFn);
let raw_arg = parse_macro_input!(args as syn::AttributeArgs);
let parg = Args::from_list(&raw_arg).map_err(|e| e.write_errors());
let arg = match parg {
    Ok(x) => x,
    Err(e) => {
        return e.into();
    }
};
```

然后根据源代码语法树和args判断当前代码是否符合转换的条件

```
if arg.appname.is_none() {
    return parse::Error::new(
        Span::call_site(),
        "`#[marco_main_use]` macro must have attribute `appname`",
    )
    .to_compile_error()
    .into();
}

// check the function signature
let valid_signature = f.sig.constness.is_none()
    && f.sig.unsafety.is_none()
    && f.sig.asyncness.is_none()
    && f.vis == Visibility::Inherited
    && f.sig.abi.is_none()
    && f.sig.generics.params.is_empty()
    && f.sig.generics.where_clause.is_none()
    && f.sig.variadic.is_none()
```

```

    && match f.sig.output {
        ReturnType::Default => true,
        _ => false,
    };
    if !valid_signature {
        return parse::Error::new(
            f.span(),
            "`#[entry]` function must have signature `fn(arg: vec::IntoIter<&[u8]>)`",
        )
        .to_compile_error()
        .into();
    };

```

符合条件之后，就可以通过`quote!()`宏构造新的标记流，按照之前的设计，将用户编写的主函数转换为以C ABI 调用约定为基础的 `main` 函数，作为程序的入口点。通过以下方式直接转换然后返回

```

let content = f.block.into_token_stream();
let core = quote!(
    #[no_mangle]
    pub extern "C" fn main(_argc: isize, _argv: *const *const u8) -> usize {
        #content
        0
    }
);

quote!(
    #core
).into()

```

这种类型的主函数代码即可被成功 `aarch64-rtsmart-muslabi-gcc` 编译成可执行文件，既不违反rust在`no_std`模式下不能定义主函数的规定，又让编译器找到程序入口位置。

编写一个测试程序，观察其宏展开的状态

```

#![no_std]
#![no_main]

use marco_main::marco_main_use;
use rtsmart_std::println;

#[marco_main_use(appname = "rust_hello", desc = "Rust example2 app.")]
fn main() {
    println!("hello world");
}

```

首先我们可以观察一下宏展开后的代码是什么情况，因此我们下载`cargo-expand`工具

```
cargo install cargo-expand
```

然后通过如下命令观察宏展开后的Rust代码

```
cargo expand -Zbuild-std=core,alloc
```


运行后命令行窗口输出如下内容：

```
#![feature(prelude_import)]
#![no_std]
#![no_main]
#[prelude_import]
use core::prelude::rust_2021::*;
#[macro_use]
extern crate core;
extern crate compiler_builtins as _;
use marco_main::marco_main_use;
use rtsmart_std::println;
#[no_mangle]
pub extern "C" fn main(_argc: isize, _argv: *const *const u8) -> usize {
    {
        {
            ::rtsmart_std::out::_print(format_args!("hello world\n"));
        };
    }
    0
}
```

这是声明宏和过程宏同时展开后的结果，与我们之前编写的测试libc的应用程序代码相似，都是通过将用户编写的main函数转换为以 C ABI 调用约定为基础的 `main` 函数，作为程序的入口点，来进行编译运行的。

6.2 stdout库

标准输出库主要需要使用的api是libc中的printf函数

借助core库自带的fmt::Write这一trait，可以轻松做到rust中的模式匹配输出、debug模式输出等等功能，printf即可只用来输出单一字符。

```
struct StdOut;

impl fmt::Write for StdOut {
    fn write_str(&mut self, s: &str) -> fmt::Result {
        fn rtt_kputs(s: *const u8) {
            unsafe { printf(s as _); }
        }
        puts(s, rtt_kputs);
        Ok(())
    }
}

fn up_cast(a: usize, b: usize) -> usize {
    let r = a / b;
    return if a % b == 0 { r } else { r + 1 };
}

pub(crate) fn puts(str: &str, kp: fn(s: *const u8)) {
    let str = str.as_bytes();
    let mut buf = [0 as u8; 129];
    for i in 0..up_cast(str.len(), 128) {
```

```

        let end = min(128, str.len() - i * 128);
        for j in 0..end {
            buf[j] = str[(j + i * 128) as usize];
        }
        buf[end] = 0;
        kp(buf.as_ptr())
    }
}

```

通过设计一个缓冲数组buf，每次写入最多128个字节，然后循环写入，直到写入完毕即可。

```

pub fn _print(args: fmt::Arguments) {
    unsafe {
        StdOut.write_fmt(args).unwrap_unchecked();
    }
}

```

这里就借助了 `core` 库中的模式匹配功能进行输出

之后编写对应的声明宏，方便开发者调用输出函数即可

```

#[macro_export]
macro_rules! print {
    ($($arg:tt)*) => ({
        $crate::out::_print(format_args!($($arg)*));
    });
}

#[macro_export]
#[allow_internal_unstable(print_internals, format_args_nl)]
macro_rules! println {
    ($($arg:tt)*) => ({
        $crate::out::_print(format_args_nl!($($arg)*));
    });
}

```

这里的声明宏写法借鉴了Rust标准库源代码和宏小册中的例子

除此之外还编写了debug宏和log宏，可以自动将输出格式转换为debug模式和log模式

```

#[macro_export]
macro_rules! log {
    ($($arg:tt)*) => ({
        $crate::println!("[LOG][{}:{}] {}",
            $crate::out::file!(), $crate::out::line!(), format_args!($($arg)*));
    });
}

#[cfg(debug_assertions)]
#[macro_export]
macro_rules! dbg {
    () => {
        $crate::println!("[{}:{}] ", $crate::out::file!(), $crate::out::line!());
    };
    ($val:expr $(,)? ) => {

```

```

        match $val {
            tmp => {
                $crate::println!("[{}:{}] {} = {:#?}",
                    $crate::out::file!(), $crate::out::line!(),
                    $crate::out::stringify!($val), &tmp);
            }
        }
    };
    ($($val:expr),+ $(,)? ) => {
        ($($crate::dbg!($val)),+,)
    };
}

```

6.3 stdin库

标准输入库主要需要使用的 api 是 libc 中的 `getchar` 函数，不断读取字符，直到 EOF 或者遇到换行符为止（目前只是以简单功能考虑，未来如果全方位考虑的话可扩展到所有空白字符。同时 `getchar` 函数一个字符一个字符的读性能上也不高。未来如果有机会完善项目的话，我们会做这方面的考虑）。

```

struct Stdin;

impl Read for Stdin {
    fn read(&mut self, buf: &mut [u8]) -> Result<usize, RTTError> {
        let mut i = 0;
        unsafe {
            while i < buf.len() {
                let c = libc::getchar();
                if c == 0 || c == '\n' as i32 {
                    break;
                }
                buf[i] = c as u8;
                i += 1;
            }
        }
        Ok(i)
    }
}

```

再封装一个 `InputStream` 结构，用于读取一整行字符串，并将 C 风格的字符串转换成 Rust 中的 `String` 并返回

```

impl InputStream {
    pub fn new() -> InputStream {
        InputStream {
            stdin: Stdin
        }
    }

    pub fn read_line(&mut self) -> Result<String, RTTError> {
        let mut buf = [0u8; 1024];
        let mut s = String::new();
        loop {
            let n = self.stdin.read(&mut buf)?;
            if n == 0 {

```

```

        break;
    }
    s.push_str(&String::from_utf8_lossy(&buf[..n]));
    if n < buf.len() {
        break;
    } else {
        buf = [0u8; 1024];
    }
}
Ok(s)
}
}

```

这里使用到了 `core` 库中的 `String` 的处理函数 `String::from_utf8_lossy`，用于将字节切片（byte slice）转换为 `String`

这里也是每次用一个长度为1024的数组作为缓冲区去读取输入的字符。如果读取的字符少于1024，则说明遇到了换行符，则本次读取直接结束。否则就继续清空buf，再去读取，将新读取的输入拼接在原先的结果后面。然后返回结果。

6.4 thread库

标准输入库主要需要使用的 api 是 `libc` 中 RT-Thread 的 SDK 中关于线程相关操作的函数，主要参考了 RT-Thread 编程手册和 RT-Thread API 参考手册，以及 RT-Thread 源代码中的头文件 `rtthread.h`

```

/*
 * thread interface
 */
rt_err_t rt_thread_init(struct rt_thread *thread,
                        const char      *name,
                        void (*entry)(void *parameter),
                        void             *parameter,
                        void             *stack_start,
                        rt_uint32_t      stack_size,
                        rt_uint8_t       priority,
                        rt_uint32_t      tick);

rt_err_t rt_thread_detach(rt_thread_t thread);
rt_thread_t rt_thread_create(const char *name,
                             void (*entry)(void *parameter),
                             void      *parameter,
                             rt_uint32_t stack_size,
                             rt_uint8_t priority,
                             rt_uint32_t tick);

rt_thread_t rt_thread_self(void);
rt_thread_t rt_thread_find(char *name);
rt_err_t rt_thread_startup(rt_thread_t thread);
rt_err_t rt_thread_delete(rt_thread_t thread);

rt_err_t rt_thread_yield(void);
rt_err_t rt_thread_delay(rt_tick_t tick);
rt_err_t rt_thread_delay_until(rt_tick_t *tick, rt_tick_t inc_tick);
rt_err_t rt_thread_mdelay(rt_int32_t ms);
rt_err_t rt_thread_control(rt_thread_t thread, int cmd, void *arg);
rt_err_t rt_thread_suspend(rt_thread_t thread);
rt_err_t rt_thread_suspend_with_flag(rt_thread_t thread, int suspend_flag);

```

```
rt_err_t rt_thread_resume(rt_thread_t thread);
```

我们将其引入到libc中，改写为Rust风格的接口函数

```
// rtthread sdk
pub type rt_base_t = c_long;
pub type rt_err_t = rt_base_t;

pub type rt_uint32_t = ::c_uint;
pub type rt_int32_t = ::c_int;
pub type rt_uint8_t = ::c_uchar;

pub type rt_thread_t = *mut c_void;
pub type rt_tick_t = rt_uint32_t;
pub type rt_ubase_t = c_ulong;
pub type rt_size_t = rt_ubase_t;
pub fn rt_thread_create(
    name: *const ::c_char,
    entry: extern "C" fn(*mut ::c_void),
    paramter: *mut ::c_void,
    stack_size: rt_uint32_t,
    priority: rt_uint8_t,
    tick: rt_uint32_t
) -> rt_thread_t;

pub fn rt_thread_self() -> rt_thread_t;

pub fn rt_thread_startup(thread: rt_thread_t) -> rt_err_t;

pub fn rt_thread_delete(thread: rt_thread_t) -> rt_err_t;

pub fn rt_thread_yield() -> rt_err_t;

pub fn rt_thread_delay(tick: rt_tick_t) -> rt_err_t;

pub fn rt_thread_mdelay(ms :rt_uint32_t) -> rt_err_t;
```

在编译的时候，只要链接 `librtthread.a` 这一静态库，即可访问到这些函数

```
#[link(name = "rtthread", kind = "static",
cfg(target_feature = "crt-static"))]
```

ThreadBuilder

在使用 `thread::Thread::new()` 的时候，返回一个 `ThreadBuilder`，让编程者设置一些thread的参数，效果如下所示：

```
let run = || loop {
    time::sleep(Duration::new(1, 0));
    let mut sum = 0;
    for i in 0..10 {
        sum += i;
    }
    println!("sum: {}", sum);
}
```

```
};

let t = Thread::new()
    .name("thread 1")
    .stack_size(4096)
    .priority(0)
    .start(run.clone())
    .unwrap();
```

为此，定义如下ThreadBuilder:

```
pub struct ThreadBuilder {
    th_name: String,
    th_stack_size: u32,
    th_priority: u8,
    th_ticks: u32,
}

impl ThreadBuilder {
    pub fn name(&mut self, name: &str) -> &mut Self {
        self.th_name = name.into();
        self
    }

    pub fn stack_size(&mut self, stack_size: u32) -> &mut Self {
        self.th_stack_size = stack_size;
        self
    }

    pub fn priority(&mut self, priority: u8) -> &mut Self {
        self.th_priority = priority;
        self
    }

    pub fn ticks(&mut self, ticks: u32) -> &mut Self {
        self.th_ticks = ticks;
        self
    }

    pub fn start<F>(&self, func: F) -> RTResult<Thread>
        where
            F: FnOnce() -> (),
            F: Send + 'static,
    {
        Thread::spawn(
            self.th_name.clone(),
            self.th_stack_size,
            self.th_priority,
            self.th_ticks,
            func,
        )
    }
}
```

Thread

一个Thread对象对应一个 `rt_thread_t`，即一个线程控制块TCB，用于管理和标识一个线程。由于时间问题，`rt_thread_t` 内部过于复杂，我们暂时没有将它完整定义到rust的libc中，只是用 `*mut c_void` 代替

Thread最重要的创建功能如下：

```
unsafe fn spawn_inner(
    name: String,
    stack_size: u32,
    priority: u8,
    ticks: u32,
    func: Box<dyn FnOnce() -> () + Send + 'static>,
) -> RTResult<Thread> {
    let func = Box::new(func);
    let param = &*func as *const _ as *mut _;

    extern "C" fn thread_func(param: *mut c_void) {
        unsafe {
            let run = Box::from_raw(param as *mut Box<dyn FnOnce()>);
            run();
        }
    }

    let th_handle = thread_create(
        name.as_ref(),
        thread_func,
        param,
        stack_size,
        priority,
        ticks,
    )
    .ok_or(RTError::OutOfMemory)?;

    let ret = match Self::_startup(th_handle) {
        Ok(_) => {
            mem::forget(func);
            Ok(Thread(th_handle))
        }
        Err(e) => Err(e),
    };

    return ret;
}
```

较为关键的一步是将闭包转变为函数，使得参数类型能够成功对应，`rt_thread_create` 接受的参数类型是

```
extern "C" fn(parameter: *mut c_void);
```

为此我们定义了一个这样的函数，并将闭包以参数的方式通过指针传入，并在内部运行，完成相关的逻辑。

创建完成后需要启动，也就是startup方法

这与Unix环境下的线程使用有一定的差别，即Unix接口下的线程创建后可直接运行，而rt-thread的接口中需要调用 `rt_thread_startup` 使得线程运行

除此之外，还提供如下方法：

```
pub fn delete(&self) -> RTResult<()> {
    let ret = thread_delete(self.0);
    if ret == 0 {
        Ok(())
    } else {
        Err(ThreadStartupErr)
    }
}

pub fn delay(ms: i32) -> RTResult<()> {
    let ret = thread_m_delay(ms);
    if ret == 0 {
        Ok(())
    } else {
        Err(ThreadStartupErr)
    }
}
```

用于暂停和删除线程

6.5 mutex库

标准输入库主要需要使用的 api 是 `libc` 中RT-Thread的SDK中关于互斥量相关操作的函数，主要参考了RT-Thread编程手册和RT-Thread API参考手册，以及RT-Thread源代码中的头文件 `rtthread.h`

```
/*
 * mutex interface
 */

rt_err_t rt_mutex_init(rt_mutex_t mutex, const char *name, rt_uint8_t flag);
rt_err_t rt_mutex_detach(rt_mutex_t mutex);
rt_mutex_t rt_mutex_create(const char *name, rt_uint8_t flag);
rt_err_t rt_mutex_delete(rt_mutex_t mutex);

void rt_mutex_drop_thread(rt_mutex_t mutex, rt_thread_t thread);
rt_uint8_t rt_mutex_setprioceiling(rt_mutex_t mutex, rt_uint8_t priority);
rt_uint8_t rt_mutex_getprioceiling(rt_mutex_t mutex);

rt_err_t rt_mutex_take(rt_mutex_t mutex, rt_int32_t time);
rt_err_t rt_mutex_take_interruptible(rt_mutex_t mutex, rt_int32_t time);
rt_err_t rt_mutex_take_killable(rt_mutex_t mutex, rt_int32_t time);
rt_err_t rt_mutex_release(rt_mutex_t mutex);
rt_err_t rt_mutex_control(rt_mutex_t mutex, int cmd, void *arg);
```

我们将其引入到libc中，改写为Rust风格的接口函数

```
s!{
    pub struct rt_mutex {
        pub mtype: c_int,
        pub data: *mut c_void,
```

```

    }
}
pub type rt_mutex_t = *mut rt_mutex;
pub fn rt_mutex_create(
    name: *const ::c_char,
    flag: ::rt_uint8_t
) -> ::rt_mutex_t;

pub fn rt_mutex_init(
    mutex: *mut rt_mutex,
    name: *mut ::c_char,
    flag: ::rt_uint8_t,
) -> rt_err_t;
pub fn rt_mutex_delete(mutex: ::rt_mutex_t) -> rt_err_t;
pub fn rt_mutex_take(mutex: ::rt_mutex_t, time: ::rt_int32_t) -> rt_err_t;
pub fn rt_mutex_release(mutex: ::rt_mutex_t) -> rt_err_t;

```

Mutex

Mutex对象持有一个`rt_mutex_t`作为互斥量，同时还保存该互斥量所保存的共享资源data

```

pub struct Mutex<T: Sized> {
    mutex: rt_mutex_t,
    data: UnsafeCell<T>,
}

impl<T> Mutex<T> {
    pub fn new(t: T) -> Result<Self, RTTError> {
        Ok(Mutex {
            mutex: mutex_create("Unnamed").unwrap(),
            data: UnsafeCell::new(t),
        })
    }

    pub fn new_with_name(t: T, name: &str) -> Result<Self, RTTError> {
        Ok(Mutex {
            mutex: mutex_create(name).unwrap(),
            data: UnsafeCell::new(t),
        })
    }

    pub fn try_lock(&self) -> Result<MutexGuard<T>, RTTError> {
        let ret = unsafe { mutex_take(self.mutex, 0) };
        if ret != 0 {
            return Err(RTTError::MutexTakeTimeout);
        }
        Ok(MutexGuard {
            mutex: &self.mutex,
            data: &self.data,
        })
    }

    pub fn lock(&self) -> Result<MutexGuard<T>, RTTError> {
        let ret = unsafe { mutex_take(self.mutex, -1) };
        if ret != 0 {
            return Err(RTTError::MutexTakeTimeout);
        }
    }
}

```

```

    }
    Ok(MutexGuard {
        mutex: &self.mutex,
        data: &self.data,
    })
}
}

```

比较关键的是Mutex必须实现 `Send` 和 `Sync` 这两个trait，才能保证数据在多线程间访问是2不出错：

```

unsafe impl<T: Send> Send for Mutex<T> {}
unsafe impl<T: Send> Sync for Mutex<T> {}

```

MutexGuard

这是一个控制互斥量的智能指针，在Mutex对象上锁之后，返回一个MutexGuard智能指针，用于访问数据和管理锁的释放

```

pub struct MutexGuard<'a, T: Sized> {
    mutex: &'a rt_mutex_t,
    data: &'a UnsafeCell<T>,
}

```

由于所有权机制的限制，只能将引用传给MutexGuard，因此需要加上生命周期。

需要实现 `Deref` 和 `DerefMut` 这两个trait让指针能够通过解引用的方式访问和改变数据，同时需要实现 `Drop` 这一trait自动释放互斥量。如果忘记这个的话极易造成死锁。

```

impl <'a, T> Deref for MutexGuard<'a, T> {
    type Target = T;

    fn deref(&self) -> &Self::Target {
        unsafe { &*self.data.get() }
    }
}

impl <'a, T> Drop for MutexGuard<'a, T> {
    fn drop(&mut self) {
        let mutex = self.mutex as *const _ as *mut _;
        mutex_release(mutex);
    }
}

impl <'a, T> DerefMut for MutexGuard<'a, T> {
    fn deref_mut(&mut self) -> &mut Self::Target {
        unsafe { &mut *self.data.get() }
    }
}

```

6.6 fs库

标准输出库主要需要使用的 `api` 是 `libc` 中的C库里的文件相关操作函数

```
int open(const char *, int, ...);
int close(int);
ssize_t read(int, void *, size_t);
ssize_t write(int, const void *, size_t);
off_t lseek(int, off_t, int);
int fsync(int);
int ftruncate(int, off_t);
```

这些是rt-smart上支持的一些C语言库函数，可用于文件操作，将其转换为Rust风格的函数接口如下：

```
pub fn open(path: *const c_char, oflag: ::c_int, ...) -> ::c_int;
pub fn close(fd: ::c_int) -> ::c_int;
pub fn read(fd: ::c_int, buf: *mut ::c_void, count: ::size_t) -> ::ssize_t;
pub fn write(fd: ::c_int, buf: *const ::c_void, count: ::size_t) -> ::ssize_t;
pub fn lseek(fd: ::c_int, offset: off_t, whence: ::c_int) -> off_t;
pub fn fsync(fd: ::c_int) -> ::c_int;
pub fn ftruncate(fd: ::c_int, length: off_t) -> ::c_int;
```

基于这些库函数编写fs标准库

首先我们计划提供与 `ThreadBuilder` 类似的函数式调用配置方法来创建或打开文件，示例如下所示

```
let mut res_file = fs::OpenOptions::new()
    .read(true)
    .write(true)
    .create(true)
    .append(false)
    .open("test.txt");
```

可用来配置文件的读写、创建与否、是否追加等属性，通过这种方式提供接口，使得接口的使用变得更加简单。

因此，我们会先创建一个 `OpenOptions` 来打开文件

OpenOptions

```
pub struct OpenOptions {
    pub path: String,
    pub read: bool,
    pub write: bool,
    pub create: bool,
    pub append: bool,
}

impl OpenOptions {
    pub fn new() -> OpenOptions {
        OpenOptions {
            path: String::new(),
            read: false,
            write: false,
            create: false,
```

```

        append: false,
    }
}

pub fn read(&mut self, read: bool) -> &mut Self {
    self.read = read;
    self
}

pub fn write(&mut self, write: bool) -> &mut Self {
    self.write = write;
    self
}

pub fn create(&mut self, create: bool) -> &mut Self {
    self.create = create;
    self
}

pub fn append(&mut self, append: bool) -> &mut Self {
    self.append = append;
    self
}

pub fn open(&mut self, path: &str) -> RTResult<File> {
    self.path = path.to_string();
    let fd = unsafe {
        crate::fs::open(
            self.path.as_ptr(),
            self.read,
            self.write,
            self.create,
            self.append,
        )
    };
    if fd < 0 {
        Err(FileOpenErr)
    } else {
        Ok(File { fd })
    }
}
}

```

在最终open的时候再将配置信息一并传入用于打开文件

```

pub fn open(path: *const u8, read: bool, write: bool, create: bool, append: bool)
-> i32 {
    let flags = if read && write {
        libc::O_RDWR
    } else if write {
        libc::O_WRONLY
    } else {
        libc::O_RDONLY
    };
};

```

```

    let flags = if create {
        flags | libc::O_CREAT
    } else {
        flags
    };

    let flags = if append {
        flags | libc::O_APPEND
    } else {
        flags
    };
    unsafe { libc::open(path as *const c_char, flags) }
}

```

File

与Linux操作系统相同，rt-smart每个打开的文件都由一个文件描述符（file descriptor, FD）来标识。文件描述符是一个非负整数，用于指代一个已经打开的文件或其他类型的 I/O 资源（如管道、网络套接字等）。文件描述符与打开的文件之间的映射由内核管理。

因此，我们对File结构的定义如下：

```

pub struct File {
    pub fd: i32,
}

```

需对其实现Drop这一trait，使其在离开作用域后自动释放时，关闭文件

```

impl Drop for File {
    fn drop(&mut self) {
        unsafe {
            libc::close(self.fd);
        }
    }
}

```

读写功能

```

pub fn read(&self, buf: &mut [u8]) -> RTResult<usize> {
    let n = unsafe { libc::read(self.fd, buf.as_mut_ptr() as *mut c_void,
buf.len()) };
    if n < 0 {
        Err(FileReadErr)
    } else {
        Ok(n as usize)
    }
}

pub fn read_to_string(&self) -> RTResult<String> {
    let mut buf = [0; 128];
    let mut string = String::new();
    self.seek(0)?;
    loop {
        let n = self.read(&mut buf)?;
    }
}

```

```

        if n == 0 {
            break;
        }
        let substr = unsafe { String::from_utf8_unchecked(buf.to_vec()) };
        string.push_str(&substr);
    }
    Ok(string)
}

pub fn write(&self, buf: &[u8]) -> RTResult<usize> {
    let n = unsafe { libc::write(self.fd, buf.as_ptr() as *const c_void,
buf.len()) };
    if n < 0 {
        Err(FileWriteErr)
    } else {
        Ok(n as usize)
    }
}

pub fn write_all(&self, buf: &str) -> RTResult<()> {
    self.write(buf.as_bytes())?;
    Ok(())
}

```

读取的步骤与stdin的逻辑相似，用一个固定长度的buf进去读取内容，再不断的拼到String后面，最后再将结果String返回

其他功能

```

pub fn seek(&self, offset: i64) -> RTResult<i64> {
    let n = unsafe { libc::lseek(self.fd, offset, SEEK_SET) };
    if n < 0 {
        Err(FileSeekErr)
    } else {
        Ok(n)
    }
}

pub fn flush(&self) -> RTResult<()> {
    let n = unsafe { libc::fsync(self.fd) };
    if n < 0 {
        Err(FileFlushErr)
    } else {
        Ok(())
    }
}

pub fn set_len(&self, len: i64) -> RTResult<()> {
    let n = unsafe { libc::ftruncate(self.fd, len) };
    if n < 0 {
        Err(FileSetLengthErr)
    } else {
        Ok(())
    }
}

```



```
pub fn close(&self) -> RTResult<()> {
    let n = unsafe { libc::close(self.fd) };
    if n < 0 {
        Err(FileCloseErr)
    } else {
        Ok(())
    }
}
```

- `seek` 函数：将文件指针移动到文件中的指定位置。
- `flush` 函数：将文件的所有缓冲区数据刷新到磁盘上，确保数据持久化。
- `set_len` 函数：调整文件的长度。
- `close` 函数：关闭文件描述符，释放相关资源。

这些函数都是通过调用底层的 `libc` 库函数来操作文件描述符，提供了文件指针移动、缓冲区刷新、文件长度设置和文件关闭等基本功能。每个函数都使用 `RTResult` 类型来返回结果，处理可能的错误，并提供适当的错误处理机制。

七、标准库测试程序及测试结果

7.1 测试统一说明

```
# See more keys and their definitions at https://doc.rust-lang.org/cargo/reference/manifest.html
[dependencies]
marco_main = {path = "../marco_main"}
rtsmart-std = { path = "../rtsmart-std" }
```

需要引用原先编写的 `rtsmart-std` 和 `marco_main` 库作为依赖。

同时在 `.cargo` 文件夹中添加一个 `config.toml` 文件，在里面添加如下内容：

```
[build]
target = "aarch64-unknown-rtsmart"

[target.aarch64-unknown-rtsmart]
linker = "aarch64-linux-musleabi-gcc"
```

使用如下命令编译应用程序

```
cargo xbuild -Zbuild-std=core,alloc
```

编译成功后在 `target/aarch64-unknown-rtsmart/debug` 里能找到编译好的应用程序

测试代码仍需加上 `#![no_std]` 和 `#![no_main]` 标注，否则编译器会自动去寻找标准库，而我们并未对 Rust 编译器内的标准库添加 `aarch64-unknown-rtsmart` 平台的支持，因此必然会报错。

然后需要使用 `marco_main_use` 这一过程宏，将用户编写的 `main` 函数转换为以 C ABI 调用约定为基础的 `main` 函数，作为程序的入口点。

找到编译好的应用程序后通过挂载虚拟机的文件系统，将应用程序放入虚拟机存储中，以待运行

7.2 stdout库测试

测试代码如下:

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

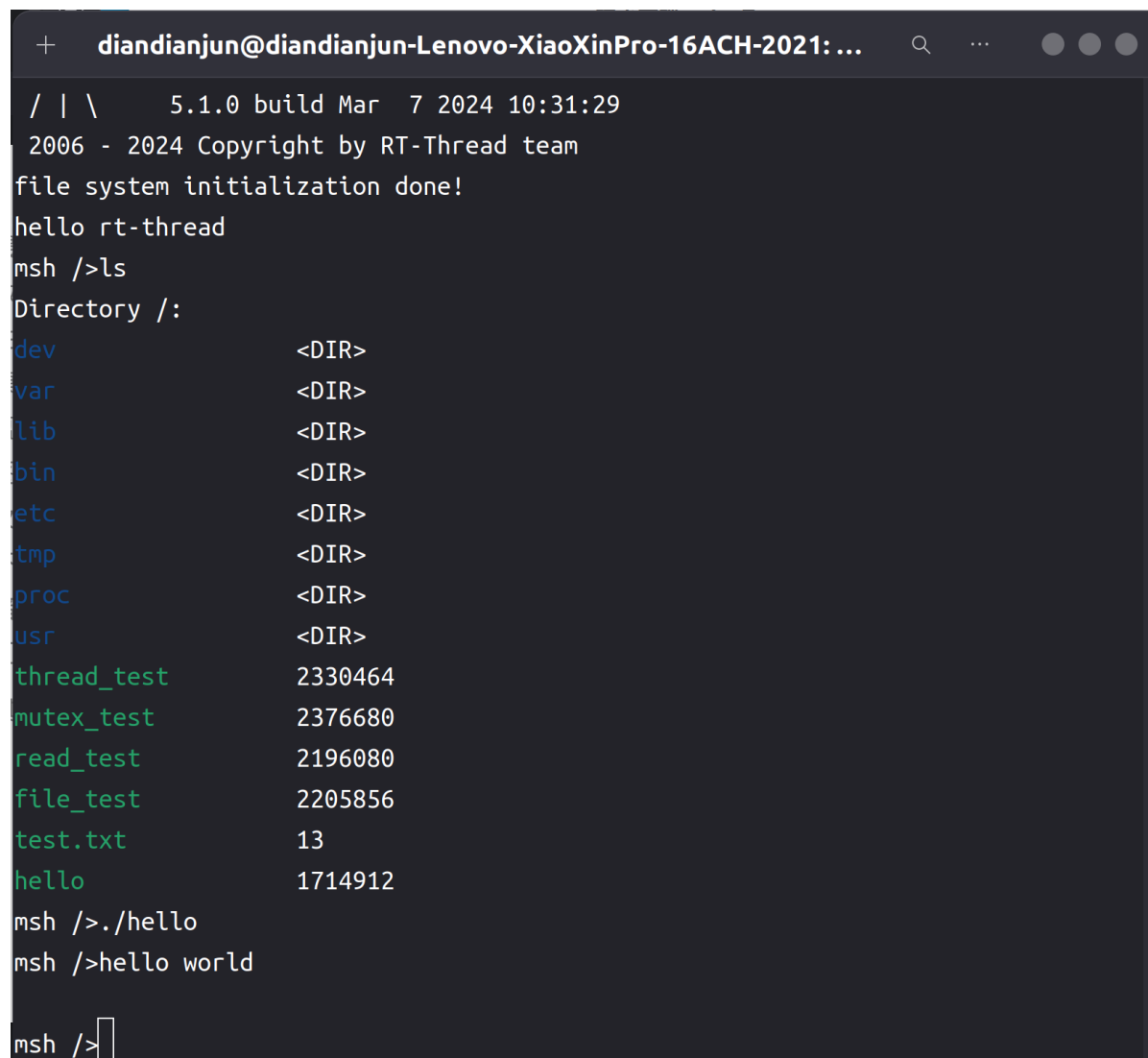
use marco_main::marco_main_use;
use rtsmart_std::println;

#[marco_main_use(appname = "rust_hello", desc = "Rust example2 app.")]
fn main(_param: Param) {
    println!("hello world");
}
```

编译结果:

```
Compiling hello v0.1.0 (/home/diandianjun/os-educg/project2210132-226009/examples
/example2/hello)
Finished `dev` profile [unoptimized + debuginfo] target(s) in 13.73s
```

运行结果:



```
+ diandianjun@diandianjun-Lenovo-XiaoXinPro-16ACH-2021: ...
/ | \ 5.1.0 build Mar 7 2024 10:31:29
2006 - 2024 Copyright by RT-Thread team
file system initialization done!
hello rt-thread
msh />ls
Directory /:
dev          <DIR>
var          <DIR>
lib          <DIR>
bin          <DIR>
etc          <DIR>
tmp          <DIR>
proc         <DIR>
usr          <DIR>
thread_test  2330464
mutex_test   2376680
read_test    2196080
file_test    2205856
test.txt     13
hello        1714912
msh />./hello
msh />hello world
msh />
```

7.3 stdin库测试

测试代码如下：

这个测试程序比较简单，就是创建一个InputStream，然后读取一行字符串，再将其输出即可

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

extern crate alloc;

use marco_main::marco_main_use;
use rtsmart_std::println;
use rtsmart_std::stdin::InputStream;

#[marco_main_use(appname = "rust_read_test", desc = "Rust example5 app.")]
fn main() {
    let mut input = InputStream::new();
    let line = input.read_line().unwrap();
    println!("{}", line);
}
```

编译结果：

```
Compiling read_test v0.1.0 (/home/diandianjun/os-educg/project2210132-226009/examples/example5/read_test)
Finished `dev` profile [unoptimized + debuginfo] target(s) in 13.66s
```

运行结果：

```
+ diandianjun@diandianjun-Lenovo-XiaoXinPro-16ACH-2021: ...
2006 - 2024 Copyright by RT-Thread team
file system initialization done!
hello rt-thread
msh />ls
Directory /:
dev                <DIR>
var                <DIR>
lib                <DIR>
bin                <DIR>
etc                <DIR>
tmp                <DIR>
proc               <DIR>
usr                <DIR>
thread_test        2330464
mutex_test         2376680
read_test          2196080
file_test          2205856
test.txt           13
hello              1714912
msh />./read_test
msh />abcde
abcde
msh />
```

7.4 thread库测试

测试代码如下：

测试代码选择使用两个线程，每隔特定的时间输出一些信息，用于标识它们正在运行

在线程运行完成后输出一句调试，用于表示线程正常结束

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

extern crate alloc;

use alloc::boxed::Box;
use core::time::Duration;
use marco_main::marco_main_use;
use rtsmart_std::{println, time};
use rtsmart_std::thread::Thread;

#[marco_main_use(appname = "rust_thread_test", desc = "Rust example3 app.")]
fn main() {
    println!("Hello world");
    let run1 = || loop {
        time::sleep(Duration::new(1, 0));
        let mut sum = 0;
        for i in 0..10 {
```

```

        sum += i;
    }
    println!("thread1: {}", sum);
};

let run2 = || loop {
    time::sleep(Duration::new(1, 0));
    let mut sum = 0;
    for i in 0..10 {
        sum += i;
    }
    println!("thread2: {}", sum);
};

let t1 = Thread::new()
    .name("thread 1")
    .stack_size(4096)
    .start(run1.clone());
let t2 = Thread::new()
    .name("thread 2")
    .stack_size(4096)
    .start(run2.clone());
let thread1 = t1.unwrap();
let thread2 = t2.unwrap();
time::sleep(Duration::new(5, 0));
thread1.delete().unwrap();
thread2.delete().unwrap();
println!("Thread1 and Thread2 are deleted");
}

```

编译结果:

```

Compiling thread_test v0.1.0 (/home/diandianjun/os-edu/g/project2210132-226009/examples/example3/thread_test)
Finished `dev` profile [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.22s

```

运行结果:

```
diandianjun@diandianjun-Lenovo-XiaoXinPro-16ACH-2021: ...
bin <DIR>
etc <DIR>
tmp <DIR>
proc <DIR>
usr <DIR>
thread_test 2330464
mutex_test 2376680
read_test 2196080
file_test 2205856
test.txt 13
hello 1714912
msh />./thread_test
msh />Hello world
thread2: 45
thread1: 45
thread2: 45
thread1: 45
thread2: 45
thread1: 45
thread2: 45
thread1: 45
Thread1 and Thread2 are deleted
msh />
```

7.5 mutex库测试

测试代码如下：

测试代码选择创建两个线程，一个共享资源，两个线程每隔一段时间对其进行修改，并输出修改的值

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

extern crate alloc;

use alloc::sync::Arc;
use core::time::Duration;

use marco_main::marco_main_use;
use rtsmart_std::{println, thread, time};
use rtsmart_std::mutex::Mutex;

#[marco_main_use(appname = "rust_mutex_test", desc = "Rust example4 app.")]
fn main() {
    let counter = Arc::new(Mutex::new(0).unwrap());
    let run = move || loop {
        time::sleep(Duration::new(1, 0));
        let mut c = counter.lock().unwrap();
        *c += 1;
        println!("c :{}", *c);
    };
}
```

```
};

let t1 = thread::Thread::new()
    .name("thread 1")
    .stack_size(4096)
    .start(run.clone()).unwrap();
let t2 = thread::Thread::new()
    .name("thread 2")
    .stack_size(4096)
    .start(run.clone()).unwrap();
time::sleep(Duration::new(5, 0));
t1.delete().unwrap();
t2.delete().unwrap();
println!("Thread1 and Thread2 are deleted");
}
```

编译结果:

```
Compiling mutex_test v0.1.0 (/home/diandianjun/os-edu/g/project2210132-226009/examples/example4/mutex_test)
Finished `dev` profile [unoptimized + debuginfo] target(s) in 13.71s
```

运行结果:

```
+ diandianjun@diandianjun-Lenovo-XiaoXinPro-16ACH-2021: ...
Directory /:
dev          <DIR>
var          <DIR>
lib          <DIR>
bin          <DIR>
etc          <DIR>
tmp          <DIR>
proc         <DIR>
usr          <DIR>
thread_test  2330464
mutex_test   2376680
read_test    2196080
file_test    2205856
test.txt     13
hello        1714912
msh />./mutex_test
msh />c :1
c :2
c :3
c :4
c :5
Thread1 and Thread2 are deleted
msh />
```


7.6 fs库测试

测试代码如下：

测试程序写的相对简单，使用 `OpenOptions` 打开一个文件，然后向里面写入一段字符串，再将其读出，输出到标准输出上，如果能正常创建文件、写入字符串、读出字符串，则说明fs库的功能正常。

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

extern crate alloc;

use alloc::string::String;
use marco_main::marco_main_use;
use rtsmart_std::{fs, println};

#[marco_main_use(appname = "rust_file_test", desc = "Rust example6 app.")]
fn main() {
    let mut res_file = fs::OpenOptions::new()
        .read(true)
        .write(true)
        .create(true)
        .append(false)
        .open("test.txt");
    if res_file.is_err() {
        println!("{:?}", res_file.err().unwrap());
    } else {
        let mut file = res_file.unwrap();
        let buf = "Hello, world!".as_bytes();
        file.write(buf).expect("write error");
        let string = file.read_to_string().unwrap();
        println!("{}", string);
        file.close().expect("close error");
    }
}
```

编译结果：

```
Compiling file_test v0.1.0 (/home/diandianjun/os-educg/project2210132-226009/examples/example6/file_test)
Finished `dev` profile [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.19s
```

运行结果：

```
+ diandianjun@diandianjun-Lenovo-XiaoXinPro-16ACH-2021: ...
/ | \      5.1.0 build Mar  7 2024 10:31:29
2006 - 2024 Copyright by RT-Thread team
file system initialization done!
hello rt-thread
msh />ls
Directory /:
dev          <DIR>
var          <DIR>
lib          <DIR>
bin          <DIR>
etc          <DIR>
tmp          <DIR>
proc         <DIR>
usr          <DIR>
thread_test  2330464
mutex_test   2376680
read_test    2196080
file_test    2205856
test.txt     13
hello        1714912
msh />./file_test
msh />Hello, world!

msh />
```

```
msh />ls
Directory /:
dev          <DIR>
var          <DIR>
lib          <DIR>
bin          <DIR>
etc          <DIR>
tmp          <DIR>
proc         <DIR>
usr          <DIR>
thread_test  2330464
mutex_test   2376680
read_test    2196080
file_test    2205856
test.txt     13
hello        1714912
msh />
```

```
(base) diandianjun@diandianjun-Lenovo-XiaoXinPro-16ACH-2021:~/os-educg/userapps/
apps/new_hello/fat$ cat test.txt
Hello, world!(base) diandianjun@diandianjun-Lenovo-XiaoXinPro-16ACH-2021:~/os-ed
ucg/userapps/apps/new_hello/fat$
```

八、项目总结与未来展望

我们的项目主要还是对在RT-Thread Smart上运行Rust语言编写的用户态应用程序做了一个探索和尝试，具体的标准库功能方面还不太完善，对于题目提出的三个目标，我们都已经一一达成

- Rust语言支持库：我们基于rt-smart上的musl-libc库函数与rt-thread的SDK等静态链接库，编写了Rust语言的外部函数接口库，向使用Rust语言的开发者提供系统级支持。
- 制作一个到rt-smart的Rust编译目标：我们在Rust编译器源代码中添加了 `aarch64-unknown-rtsmart` 平台的编译支持，使得我们新编译的Rust编译器能够支持编译出在该平台上运行的应用程序
- Rust生态中的rt-smart平台：我们基于libc中提供的系统功能API，编写了一些Rust生态中常用的标准库，提供给开发者使用，这些库底层得到了rtsmart系统上的musl-libc和rt-thread SDK的支持，完成了其所对应的功能

因此，我们的项目未来继续完善时，应当会考虑进一步完善标准库的编写，例如为fs库支持对目录的操作，为thread库提供诸如信号量、计时器之类的高级功能。我们也希望为Rust语言在嵌入式平台上的生态做一些贡献。

九、参赛体会

在参赛的过程中，我们一方面加深了对Rust语言的理解，比如 `rust_target`、`core` 库这些底层的建筑，或是声明宏、属性宏、生命周期、闭包等高级用法。另一方面，我们对Unix环境编程也有了更多的实践经验，例如我们在编写libc和标准库的过程中多次使用到了musl-libc中的库函数，让我们对Unix环境下这些系统库函数的使用更加熟练。除此之外，我们对rt-thread环境下的编程也了解了许多，比如线程和互斥量的使用，系统的一些底层功能等等。

在完成项目的过程中，我们查阅了许多资料，也遇到了很多难以解决的问题，比如地址访问错误，线程死锁，线程冲突等难以查明的错误，网上与本题相关的信息极少，只能通过自己的探索一步一步达成我们的目标，找出错误的原因。在这个过程中，也锻炼了我们定位bug，修复bug的能力。

更加重要的是，我们学习到了一个新的系统平台与一门新的编程语言是如何进行沟通的，通过我们的项目，成功使得Rust语言在 `aarch64-unknown-rtsmart` 平台上使用成为可能，我们非常荣幸能够成为Rust语言在嵌入式平台上的生态的贡献者。

十、参考资料

Rust FFI 编程: <https://cloud.tencent.com/developer/article/1620862>

rt-thread系统 API : <https://www.rt-thread.org/document/api/index.html>

Rust编译器支持的目标平台及其实现: <https://doc.rust-lang.org/nightly/rustc/platform-support.html>

Rust标准库源代码: <https://github.com/rust-lang/rust/tree/master/library/std>

Rust参考手册: <https://rustwiki.org/zh-CN/reference/procedural-macros.html>

Rust宏小册: <https://zjp-cn.github.io/tlborm/>

RT-Thread编程手册: <https://gitee.com/rtthread/rtthread-manual-doc>

Rust标准库: <https://rustwiki.org/zh-CN/std/thread/index.html>

UNIX环境高级编程 作者: [W.Richard Stevens](#) / [Stephen A.Rago](#) 出版社: [人民邮电出版社](#) ISBN: 9787115147318