

程序设计训练之 Rust 编程语言

第五讲：项目管理与常用库

韩文弢

清华大学计算机科学与技术系

2024 年 7 月

1

项目管理

项目管理的需求

- 随着项目变大，参与者变多，组织代码的方式会越来越重要。
- 封装可以隐藏实现细节，使用户更好地复用代码。
- 名字的作用域管理是需要支持的核心功能。

Rust 的模块系统

- 包 (packages): Cargo 的一项功能, 可以让用户构建、测试、分享箱。
- 箱 (crates): 也叫单元包, 是由模块构成的一棵树, 能够产生一个库或者可执行文件。
- 模块 (modules): 与 `use` 配合, 控制路径的组织结构、作用域和访问权限。
- 路径 (paths): 命名项目的方式, 这里的项目可以指结构体、函数、模块等。

```
my_package/           # 包
+-- Cargo.toml        # 包的元数据
+-- src/
|   +-- main.rs       # 二进制箱
+-- lib/
|   +-- lib.rs        # 库箱
+-- examples/
    +-- example.rs    # 示例二进制箱
```

模块

- Rust 中所有项目的作用域都是基于模块的。
 - 如果不是 `pub`，那么只能在同一模块中访问。
 - 如果是 `pub`，那么可以在其他模块中访问。
- 可以在同一源代码文件中定义多个模块：

```
mod english {  
    pub mod greetings { /* ... */ }  
    pub mod farewells { /* ... */ }  
}
```

```
mod chinese {  
    pub mod greetings { /* ... */ }  
    pub mod farewells { /* ... */ }  
}
```

写成文件的模块

```
mod english {  
    pub mod greetings { /* ... */ }  
}
```

- 可以把模块写成单独的文件：

- lib.rs:

```
mod english;
```

- english.rs:

```
pub mod greetings { /* ... */ }
```

写成目录的模块

```
mod english {  
    pub mod greetings { /* ... */ }  
}
```

- 也可以用目录来组织模块：

- lib.rs:

```
mod english;
```

- english/

- mod.rs:

```
pub mod greetings;
```

- greetings.rs:

```
/* ... */
```

名字空间机制：相对

- 当访问模块的成员时，默认的名字空间相对于当前模块：

```
mod one {  
    mod two { pub fn foo() {} }  
    fn bar() {  
        two::foo()  
    }  
}
```


名字空间机制：绝对

- 可以使用前导 `::` 操作符来指定绝对的名字空间：

```
mod one {  
    mod two { pub fn foo() {} }  
    fn bar() {  
        ::one::two::foo()  
    }  
}
```

通过 use 使用模块

- `use` 的规则与模块中的名字空间规则相反。
- 默认情况下，`use` 命令后面跟着的名字是绝对的。

```
use english::greetings;
```

- 可以使用 `self` 或 `super` 来指定相对于当前模块的名字：

```
// english/mod.rs  
use self::greetings;  
use super::chinese;
```

重新导出

- 可以使用 `pub use` 来重新导出其他模块中的项目：

```
// default_language.rs
```

```
#[cfg(english)]
```

```
pub use english::*;
```

```
#[cfg(chinese)]
```

```
pub use chinese::*;
```

创建自己的箱

- 对于一个库箱 (library crate) 来说, 在顶层模块 (root module) 中导出的项目是该箱对外暴露的内容。
- 也就是在 `lib.rs` 中有 `pub` 标注的项目。

```
pub mod english;
```

使用自己写的箱

- 可以在 Cargo 中使用自己写的箱：

```
[dependencies]
```

```
myfoo = { git = "https://github.com/me/foo-rs" }
```

```
mybar = { path = "../rust-bar" }
```

- 或者：

```
[dependencies.myfoo]
```

```
git = "https://github.com/me/foo-rs"
```

- 然后就可以使用了：

```
use myfoo::english;
```

Cargo: 生成多个可执行文件

- 一个包里可以同时包含库箱 (lib crate) 和二进制 (可执行文件) 箱 (bin crate)。
- 一般来说, 库箱会包含导出项目, 而二进制箱不会。
- (以下路径均相对于包所在的目录)
- Cargo 允许一个包里同时出现 `src/lib.rs` 和 `src/main.rs`。
 - Cargo 还会构建 `src/bin/*.rs`, 作为可执行文件。
- 示例代码放在 `examples/*.rs`。
 - 会在 `cargo test` 的时候构建, 保证示例代码可以通过编译。
 - 可以用 `cargo run --example foo` 来运行。
- 集成测试 (非单元测试) 放在 `tests/*.rs`, 用来测试正确性。
- 基准测试程序 (benchmarks) 放在 `benches/*.rs`, 用来测试性能。

Cargo: 特性

- 箱的特性 (features) 可以在构建时做选择性的开关。
 - `cargo build --features using-html9`

```
# [package] ...
[features]
# Enable default dependencies: require web-vortal *feature*
default = ["web-vortal"]
# Extra feature; now we can use #[cfg(feature = "web-vortal")]
web-vortal = []
# Also require h9rbs-js *crate* with its commodore64 feature.
using-html9 = ["h9rbs-js/commodore64"]
[dependencies]
# Optional dependency can be enabled by either:
# (a) feature dependencies or (b) extern crate h9rbs_js.
h9rbs-js = { optional = "true" }
```

Cargo: 构建脚本

- 如果遇到超过 Cargo 所提供的功能的特殊需求，可以通过构建脚本 (build scripts) 来实现。
 - 构建脚本也是用 Rust 语言编写的。

```
[package]
```

```
build = "build.rs"
```

- 之后，cargo build 会先编译并运行 build.rs。

Cargo: 更多功能

- `cargo clippy` 用于运行 Clippy 静态分析工具。
- `cargo fmt` 用于格式化代码。
- `cargo doc` 用于生成文档。
- `cargo install` 从 Crates.io 上安装二进制文件。
- 把自己写的软件包发布到 Crates.io 上。
- 创建工作空间 (workspaces), 组织多个包协同开发。
- 通过 `cargo-<command>` 来扩展功能。
- Cargo 提供了很多有用的功能, 详见 The Cargo Book。

2

语法补充

属性

- 属性 (attributes) 是 Rust 代码给编译器传递信息的机制。
- `#[test]` 属性用于将函数标注为测试用例。
- `#[test]` 标注下一个代码段, `#![test]` 标注所在的代码段。

```
#[test]
fn midterm1() {
    // ...
}

fn midterm2() {
    #[test]
    // ...
}
```

常见属性

- 常见属性有：
 - `#![no_std]` 禁用标准库。
 - `#[derive(Debug)]` 自动获得特型。
 - `#[inline(always)]` 提示编译器的内联优化行为。
 - `#[allow(missing_docs)]` 屏蔽编译器的某些警告。
 - `#![crate_type = "lib"]` 提供箱的元数据。
 - `#![feature(box_syntax)]` 启用不稳定版本的语法。
 - `#[cfg(target_os = "linux")]` 定义条件编译。
- 还有很多，见参考手册。

操作符

- 操作符的优先级顺序如下：
 - 单目操作符：! - * & &mut
 - 类型转换：as
 - 乘法类：* / %
 - 加法类：+ -
 - 位移类：<< >>
 - 按位与：&
 - 按位异或：^
 - 按位或：|
 - 比较类：== != < > <= >=
 - 逻辑与：&&
 - 逻辑或：||
 - 赋值与范围：= ..
- 此外还有函数调用 () 和下标索引 []。

操作符重载

- Rust 使用特型来重载操作符，定义在 `std::ops` 下。
 - Neg, Not, Deref, DerefMut
 - Mul, Div, Mod
 - Add, Sub
 - Shl, Shr
 - BitAnd
 - BitXor
 - BitOr
 - Eq, PartialEq, Ord, PartialOrd
 - And
 - Or
- 此外还有: Fn, FnMut, FnOnce, Index, IndexMut

类型转换

- `as` 操作符不能重载。
- 使用 `From` 和 `Into` 实现自定义类型转换。
 - `trait From<T> { fn from(T) -> Self; }`, 调用形式为 `Y::from(x)`。
 - `trait Into<T> { fn into(self) -> T; }`, 调用形式为 `x.into()`。
- 如果实现了 `From`, 则 `Into` 会自动实现。建议优先实现 `From`。
 - 也就是说, `From<T> for U` 蕴含 `Into<U> for T`。
- 此外, 还有 `TryFrom` 和 `TryInto`, 用于可能失败的转换。

```
struct A(Vec<i32>);
impl From<Vec<i32>> for A {
    fn from(v: Vec<i32>) -> Self {
        A(v)
    }
}
```

命名规范

- Rust 对标识符的命名规范：
 - CamelCase: 类型、特型
 - snake_case: 箱、模块、函数、方法、变量
 - SCREAMING_SNAKE_CASE: 常量和静态变量
 - T (单个大写字母): 类型参数
 - 'a (撇 + 短的小写名字): 生命周期参数
- 构造函数和转换函数的命名规范：
 - new, new_with_stuff: 构造函数
 - from_foo: 转换构造函数
 - as_foo: 低开销非消耗性转换
 - to_foo: 高开销非消耗性转换
 - into_foo: 消耗性转换

3

智能指针

&T 和 &mut T

- 基本的、经济型的引用
- 无运行时开销，所有检查在编译时完成。
- 具有固定的生命周期，没有灵活性。
- 如果可以的话，尽量使用引用。

Box<T>

- Box<T> 用于在堆上分配空间存放数据。
- Box<T> 拥有 T 类型的对象，它的指针是唯一的（类似 C++ 的 `std::unique_ptr`），不能创建别名（可以借用）。
- 当 Box<T> 超过作用域时，对象自动释放。
- 使用方法和不加 Box<T> 的一般类型差不多，主要区别是动态分配。
- 通过 `Box::new()` 来创建。

```
let boxed_five = Box::new(5);
```

Box<T> 的特点

- 优点：
 - 是使用堆的最简单的办法。
 - 是动态分配的零开销抽象。
 - 借用和移动语义同样适用。
 - 自动销毁。
- 缺点：
 - Box 严格拥有里面的 T 类型的对象，是唯一的所有者。
 - 如果有引用的话，Box 本身必须存活到所有引用失效之后。

Box::leak() 函数

`Box::leak()` 函数可以将 `Box<T>` 转换为 `&'static mut T` 类型，是的数据可以在程序余下的整个生命周期中使用。

```
let boxed_five = Box::new(5);  
let static_five: &'static _ = Box::leak(boxed_five);
```

可用于全局变量的初始化，例如程序的配置信息。

std::rc::Rc<T>

- Rc<T> 是共享所有权的指针类型，相当于 C++ 中的 std::shared_ptr。
- 是“Reference Counted”的缩写，记录指针的别名个数。
- 调用 Rc 的 clone() 方法来获得新的引用。
 - 会增加引用计数。
 - 不会拷贝数据。
- 当引用计数降为 0 时，会释放对象。
- T 的值只有在引用计数为 1 时才能修改，与 Rust 的借用规则一致。

```
let mut shared = Rc::new(6);
println!("{:?}", Rc::get_mut(&mut shared)); // ==> Some(6)
let mut cloned = shared.clone(); // ==> Another reference to same data
println!("{:?}", Rc::get_mut(&mut shared)); // ==> None
println!("{:?}", Rc::get_mut(&mut cloned)); // ==> None
```

std::rc::Weak<T>

- 当有环时，引用计数会发生问题，例如：
 - A 有一个 B 的 Rc，B 也有一个 A 的 Rc，两者的引用计数都是 1。
 - 由于构成了环，两个对象都不会被释放，从而引起内存泄露。
- 可以通过引入弱引用来避免。
 - 弱引用不会增加强引用的计数。
 - 这也表示弱引用不一定总是有效的。
- Rc 可以通过 Rc::downgrade() 降级成 Weak。
 - 需要访问时，使用 weak.upgrade() -> Option<Rc<T>> 再升级回 Rc。
 - 除此之外，Weak 干不了别的事情，通过升级步骤避免使用无效状态。

强引用和弱引用

- 一般情况下，使用的时候需要通过 **Rc** 获得强引用。
- 如果应用场景中需要访问数据而没有所有权，就需要用到 **Weak**。
 - **Weak** 升级时可能会得到 **None**，需要应对这种情况。
- 引用成环的情况也需要用 **Weak** 来避免内存泄露。
 - 由于可变性规则，**Rc** 的环在 **Rust** 中很难形成。
- 考虑图的情况，保存顶点和边的时候哪里用 **Rc**，哪里用 **Weak**？

`std::rc::Rc<T>` 的特点

- 优点：
 - 允许共享数据的所有权。
- 缺点：
 - 有一定的运行时开销。
 - 维护两个引用计数（强和弱）。
 - 需要动态更新和检查引用计数。
 - 引用成环会造成内存泄露。

Cell 和 RefCell

- 允许内部可变性的机制。
- 通过不可变引用实现修改所含值的操作。
- 有两种常用的类型：Cell<T> 和 RefCell<T>。
- 此外，还有 OnceCell<T>。

```
struct Foo {  
    x: Cell<i32>,  
    y: RefCell<u32>,  
}
```

std::cell::Cell<T>

- 为 Copy 类型提供内部可变性的格子类型。
- 用 `get()` 从 `Cell` 中取值。
- 用 `set()` 更新 `Cell` 中的值。
 - 不能修改 `T` 的值，只能整个替换。
- 作用比较受限，但是安全、低开销。

```
let c = Cell::new(10);  
c.set(20);  
println!("{}", c.get()); // 20
```

std::cell::Cell<T> 的特点

- 优点：
 - 实现内部可变性。
 - 没有运行时开销。
 - 额外空间开销较小。
- 缺点：
 - 较为受限，只能用于 Copy 类型。

std::cell::RefCell<T>

- 可以为任意类型提供内部可变性的格子类型。
- 使用动态借用检查规则，在运行时进行。
 - 有可能会引起运行时的恐慌。
- 通过 `borrow()` 或 `borrow_mut()` 来借用内部数据。
 - 如果 `RefCell` 已经被借用，可能会引起恐慌。

```
use std::cell::RefCell;
```

```
let refc = RefCell::new(vec![12]);
let mut inner = refc.borrow_mut();
inner.push(24);
println!("{:?}", *inner); // [12, 24]
```

```
let inner2 = refc.borrow();
// ==> Panics since refc is already borrow_mut'd!
```

`std::cell::RefCell<T>` 的常见用法

- `RefCell` 的常见用法是把它放在 `Rc` 里，这样可以允许共享的可变性。
- 这样做不是线程安全的，`borrow()` 等方法不能防止数据竞争。
- 可以使用 `try_borrow()` 等方法来检查借用是否成功。

`std::cell::RefCell<T>` 的特点

- 优点：
 - 为任意类型提供内部可变性
- 缺点：
 - 要保存额外的借用状态。
 - 要在借用时检查状态。
 - 有可能会引起恐慌。
 - 不是线程安全的。

std::cell::Ref<T> 和 RefMut<T>

- 当 borrow() 一个 RefCell<T> 时，得到的是 Ref<T>，而不是 &T。
 - 同样的，borrow_mut() 返回 RefMut<T>。
- Ref 和 RefMut 包装了普通的引用，提供一些额外的方法。

*const T 和 *mut T

- 像 C 语言一样的裸指针，只是指向内存中的某个地址。
- 没有所有权规则，没有生命周期规则。
- 零抽象代价，因为没有抽象。
- 解引用时需要 **unsafe**，可能会引起不安全的后果。
- 可以在编写底层代码时使用（例如维护 `Vec<T>` 的内部状态），一般不用。
 - 使用得当可以避免运行时代价。

自动解引用

- Rust 在大多数情况下会对变量做自动解引用操作。
 - 在对一个引用进行方法调用的时候。
 - 将引用作为函数参数进行传递的时候。

```
/// `length` only needs `vector` temporarily, so it is borrowed.
fn length(vec_ref: &&Vec<i32>) -> usize {
    // vec_ref is auto-dereferenced when you call methods on it.
    vec_ref.len()
}

fn main() {
    let vector = vec![];
    length(&&&&&&&&&&&&vector);
}
```

Deref 自动转换

- Rust 的自动解引用行为也可以在类型之间工作。

```
pub trait Deref {  
    type Target: ?Sized;  
    fn deref(&self) -> &Self::Target;  
}
```

- 因为 `String` 实现了 `Deref<Target=str>`，所以 `&String` 的值在需要的时候会自动解引用成 `&str`。

制造引用

- Borrow/BorrowMut: 用来借用数据的特型。

```
trait Borrow<Borrowed> { fn borrow(&self) -> &Borrowed; }
```

- AsRef/AsMut: 轻量级的引用到引用的转换。

```
trait AsRef<T> { fn as_ref(&self) -> &T; }
```

- 它们的作用一样吗?

不同制造引用方法的区别

- `Borrow` 会有更多的附加含义：
 - 如果实现 `Borrow` 且 `Self` 和 `Borrowed` 都实现了 `Hash`、`Eq`/`Ord`，则这些功能的结果必须是一致的。
- `Borrow` 有兜底实现 `impl<T> Borrow<T> for T`，使得从可以从 `T` 转换成 `&T`。
- `AsRef` 也有兜底实现 `impl<'a, T, U> AsRef<U> for &'a T where T: AsRef<U>`。
 - 对于所有 `T`，如果 `T` 实现了 `AsRef`，那么 `&T` 也实现了 `AsRef`。
- 如果要制造引用，通常应该实现 `AsRef`。

4

常用库

常用第三方库

- 正则表达式: `regex`
- 日志: `log`
- 日期: `chrono`
- HTTP 客户端: `reqwest`
- 增强错误处理: `thiserror`、`anyhow`
- 数据库: `rusqlite`、`r2d2`

错误处理的烦恼

- 考虑如下场景：想要开发一个库发布给别人使用。
- 代码里可能会出现一些需要报告错误的场景，此时通常需要自定义一个错误类型：

```
enum MyError {  
    MyCustomError,  
    MyCustomError2(String),  
}
```

```
impl std::error::Error for MyError { }
```

- 但是实现起来比较烦琐：需要根据错误类型，进行模式匹配，然后格式化为适合用户阅读的错误信息。

thiserror

利用 `thiserror` 可以方便地自定义一个新的错误类型：

```
use thiserror::Error;
#[derive(Error, Debug)]
pub enum DataStoreError {
    #[error("data store disconnected")]
    Disconnect(#[from] io::Error),
    #[error("the data for key `{0}` is not available")]
    Redaction(String),
    #[error("invalid header (expected {expected:?}, found {found:?})")]
    InvalidHeader {
        expected: String,
        found: String,
    },
}
```

anyhow

- 如果你编写的是应用程序，可能需要处理来自不同库的错误，这些错误的类型不同
- 可以用 `anyhow` 简化代码：

```
use anyhow::Result;

fn get_cluster_info() -> Result<ClusterMap> {
    let config = std::fs::read_to_string("cluster.json"?);
    let map: ClusterMap = serde_json::from_str(&config)?;
    Ok(map)
}
```

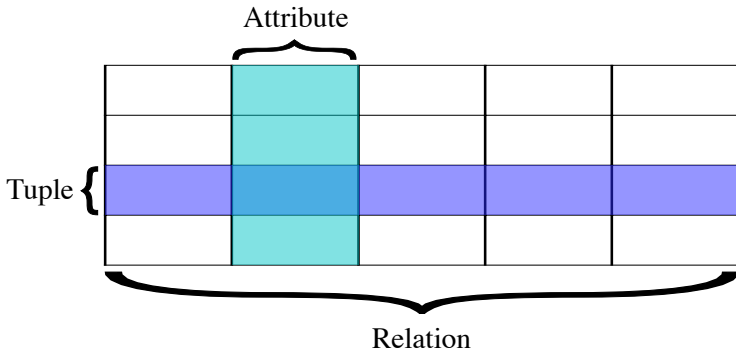
- 自动把不同类型的错误转换为 `anyhow::Error`

数据库

- 数据库 (database) 是以一定方式储存在一起、能予多个用户共享、具有尽可能小的冗余度、与应用程序彼此独立的数据集合。
- 用户可以对集合中的数据执行新增、截取、更新、删除等操作。
- 数据库的分类：
 - 关系数据库 (relational database):
 - Oracle
 - PostgreSQL
 - MySQL
 - SQLite
 - 非关系型数据库 (NoSQL):
 - 文档数据库 (document DB), 如 MongoDB。
 - 键值数据库 (key-value DB), 如 LevelDB。
 -

关系数据库

- 关系数据库是创建在关系模型基础上的数据库，借助于集合代数等数学概念和方法来处理数据库中的数据。



关系数据库的操作

- 数据查询
 - 选择
 - 投影
 - 连接
 - 并、交、差……
- 数据操作
 - 新增
 - 删除
 - 修改
 - 查询
- 数据库查询语言 SQL (Structured Query Language, 读作 sequel)

SQL 简介

- 常用命令
 - 创建表格 (关系): CREATE TABLE
 - 查询数据: SELECT
 - 插入数据: INSERT
 - 更新数据: UPDATE
 - 删除数据: DELETE
 - 删除表格: DROP TABLE

创建表格

```
CREATE TABLE Persons (  
    PersonID int,  
    LastName varchar(255),  
    FirstName varchar(255),  
    Address varchar(255),  
    City varchar(255)  
);
```

```
CREATE TABLE PhoneNumbers (  
    RecordID int,  
    PhoneNumber varchar(11),  
    PersonID int  
);
```

查询数据

```
SELECT * FROM Persons;
```

```
SELECT LastName, FirstName, Address FROM Persons  
WHERE City = 'Beijing';
```

```
SELECT LastName, FirstName, PhoneNumber FROM Persons, PhoneNumbers  
WHERE Persons.PersonID = PhoneNumbers.PersonID  
ORDER BY PhoneNumber;
```


插入数据

```
INSERT INTO Persons VALUES (  
    1,  
    'Han',  
    'Wentao',  
    'Tsinghua University',  
    'Beijing'  
);
```

更新数据

```
UPDATE Persons SET Address = 'Unknown'
WHERE City = 'Utopia';
```

删除数据

```
DELETE FROM Persons WHERE Address = '';
```

```
DELETE FROM Persons;
```

删除表格

```
DROP TABLE Persons;
```

在 Rust 中使用 SQL

软件包 rusqlite:

```
fn main() -> Result<()> {
    let conn = Connection::open_in_memory()?;

    conn.execute(
        "CREATE TABLE person (
            id    INTEGER PRIMARY KEY,
            name TEXT NOT NULL,
            data BLOB
        )",
        (), // empty list of parameters.
    )?;
}
```

与 Web 框架联合使用

- 创建数据库连接池 (r2d2, r2d2-sqlite)。
- 将连接池作为 `Data<T>` 传给请求处理代码。
- 详见 `Actix` 文档。

5

小结

本讲小结

- 模块、箱和包
- Cargo 高级用法
- 智能指针
- 常用第三方库