

程序设计训练之 Rust 编程语言

第七讲：输入输出与异步编程

韩文弢

清华大学计算机科学与技术系

2024 年 7 月

1

输入输出

输入输出需要考虑的问题

- 输入输出要完成什么工作？
 - 在计算机内部（CPU 和内存）和外部（屏幕、键盘、磁盘、网络等）之间传输数据。
- 输入输出的工作对象是什么？
 - 磁盘文件、控制台（标准输入输出）、内存、网络……
- 输入输出的方式有哪些？
 - 顺序读写/随机读写、二进制数据读写/文本读写

编程语言对输入输出的抽象

- Unix 系统中，一切皆文件，文件是字节序列（流）。
 - 标准输入输出、文件、设备、网络连接等都可以用文件描述符来表示。
 - 系统提供 `open/close`、`read/write` 等系统调用来操作文件描述符。
- C 语言提供了 `stdio` 库，对文件描述符进行了封装。
 - 用 `FILE` 结构体代表文件，用 `fopen/fclose`、`fread/fwrite`、`fscanf/fprintf` 等函数操作文件。
- C++ 语言提供了 `iostream` 库，对文件进行了封装。
 - 用 `std::cin/std::cout`、`std::ifstream/std::ofstream` 等类和对象操作文件。
- Rust 语言如何设计输入输出接口？

用于输入输出的特型

```
pub trait Read {  
    fn read(&mut self, buf: &mut [u8]) -> Result<usize>;  
    // Other methods implemented in terms of read().  
}
```

```
pub trait Write {  
    fn write(&mut self, buf: &[u8]) -> Result<usize>;  
    fn flush(&mut self) -> Result<()>;  
    // Other methods implemented in terms of write() and flush().  
}
```

- 很多类型实现了标准 IO 特型：
 - File、TcpStream、Vec<T>、&[u8]
- 注意：返回类型是 `std::io::Result`，而不是 `std::Result`。
 - `type Result<T> = Result<T, std::io::Error>;`

std::io::Read

```
use std::io;
use std::io::prelude::*;
use std::fs::File;

let mut f = File::open("foo.txt"?);
let mut buffer = [0; 10];

// read up to 10 bytes
f.read(&mut buffer)?;
```

- `buffer` 是一个数组，因此可以读取的最大长度包含在类型信息中。
- `read` 成功时返回读取的字节数，失败时返回表示错误原因的 `Err`。
 - 返回值 `Ok(n)` 保证 `n <= buf.len()`。
 - 如果读取的来源空了，返回值可能为 `Ok(0)`。

读取方式

```
/// Required.
```

```
fn read(&mut self, buf: &mut [u8]) -> Result<usize>;
```

```
/// Reads to end of the Read object.
```

```
fn read_to_end(&mut self, buf: &mut Vec<u8>) -> Result<usize>;
```

```
/// Reads to end of the Read object into a String.
```

```
fn read_to_string(&mut self, buf: &mut String) -> Result<usize>;
```

```
/// Reads exactly the length of the buffer, or throws an error.
```

```
fn read_exact(&mut self, buf: &mut [u8]) -> Result<()>;
```

- Read 提供了读取内容到不同缓冲区的方法。
 - 其他方法提供了调用 read 的默认实现。
- 注意不同的类型签名。

读取迭代器

```
fn bytes(self) -> Bytes<Self> where Self: Sized
```

- `bytes` 方法将 `Read` 按逐字节的方式转换成迭代器。
- 关联的 `Item` 是 `Result<u8>`。
 - 调用 `next()` 返回的是 `Option<Result<u8>>`。
 - 遇到 EOF 时会返回 `None`。

迭代器适配器

```
fn chain<R: Read>(self, next: R) -> Chain<Self, R>
    where Self: Sized
```

- `chain` 以第二个读取对象作为输入，返回的迭代器先迭代 `self`，再迭代 `next`。

```
fn take<R: Read>(self, limit: u64) -> Take<Self>
    where Self: Sized
```

- `take` 创建的迭代器的迭代范围是读取对象的前 `limit` 个字节。

std::io::Write

```
pub trait Write {  
    fn write(&mut self, buf: &[u8]) -> Result<usize>;  
    fn flush(&mut self) -> Result<()>;  
    // Other methods omitted.  
}
```

- `Write` 特型有两个必须实现的方法 `write()` 和 `flush()`。
 - 其他方法有依赖于这两个方法的默认实现。
- `write` (试图) 将 `buf` 里的内容写入到对象中, 并返回写入 (或加入队列) 的字节数。
- `flush` 确保所有写入的数据都已经到达目标。
 - 写入可以用队列来优化行为。
 - 如果排队的数据没有全部写入成功, 会返回 `Err`。

写入操作

```
let mut buffer = File::create("foo.txt");
```

```
buffer.write("Hello, Ferris!");
```

- 写入方法

```
/// Attempts to write entire buffer into self.
```

```
fn write_all(&mut self, buf: &[u8]) -> Result<()> { ... }
```

```
/// Writes a formatted string into self.
```

```
/// Don't call this directly, use `write!` instead.
```

```
fn write_fmt(&mut self, fmt: Arguments) -> Result<()> { ... }
```

write!

- 在程序中直接使用写入对象不太方便，尤其是对输出内容有格式要求时。
- `write!` 宏提供了在 `write_fmt` 之上用字符串格式化的输出方式。
 - 返回 `Result`。

```
let mut buf = File::create("foo.txt");
```

```
write!(buf, "Hello {}!", "Ferris").unwrap();
```

IO 的速度问题

- 对比于处理器和内存，IO 操作非常慢。
- 处理器内的操作一般是几个时钟周期，纳秒级别。
- 内存操作一般是几百个时钟周期，百纳秒级别。
- IO 操作的延迟（从发出 IO 指令到收到数据）：
 - 机械硬盘是十毫秒级别。
 - 固态硬盘是百微秒级别。
- IO 操作与处理器和内存有 3-7 个数量级的差距。

IO 缓冲机制

- 应用程序在操作系统下执行时是受限的。
- 对磁盘的读取操作由操作系统完成（通过系统调用）。
 - 此时，需要将运行状态切换至内核态，由操作系统去处理读取操作，并返回给应用程序。
 - 相比普通的内存访问，这个过程非常慢。
- 如果频繁读取时每次都这样操作会导致性能非常差。
 - 使用缓冲机制来提高性能。
 - 每次将一大块内容读到缓冲区里，然后应用程序根据需要进行访问。
- 写入的时候情况类似。

BufReader

```
fn new(inner: R) -> BufReader<R>;  
  
let mut f = File::open("foo.txt"?);  
let buffered_reader = BufReader::new(f);
```

- BufReader 可以给任意的读取对象添加缓冲机制。
- BufReader 实现了 Read 特型，因此可以透明地使用。

BufReader

- BufReader 还实现了一个新的特型 BufRead。

```
pub trait BufRead: Read {  
    fn fill_buf(&mut self) -> Result<&[u8]>;  
    fn consume(&mut self, amt: usize);  
  
    // Other optional methods omitted.  
}
```


BufReader

- 由于 BufReader 提前读取了更多的数据，可以做一些有用的事情。
- 它定义了两个新的读取方法，可以一直读到遇到某个特定的字节。

```
fn read_until(&mut self, byte: u8, buf: &mut Vec<u8>)
    -> Result<usize> { ... }
fn read_line(&mut self, buf: &mut String)
    -> Result<usize> { ... }
```

BufReader

- 还定义了两种迭代器。

```
fn split(self, byte: u8)
    -> Split<Self> where Self: Sized { ... }
fn lines(self)
    -> Lines<Self> where Self: Sized { ... }
```

BufWriter

- BufWriter 包裹了写入对象。

```
let f = File::create("foo.txt"?);  
let mut writer = BufWriter::new(f);  
buffer.write(b"Hello world"?);
```

- BufWriter 没有像 BufReader 那样实现新的特型。
- 它直接缓存所有的写入数据，在失效前把所有缓存的数据写出。

Stdin

```
let mut buffer = String::new();
```

```
io::stdin().read_line(&mut buffer)?;
```

- 这是一个典型的从标准输入（终端输入）读取数据的方法。
- `io::stdin()` 返回类型是 `Stdin` 结构体的值。
- `stdin` 直接实现了 `read_line` 方法，没有实现 `BufRead` 特型。

StdinLock

- 多个线程从标准输入读取数据是一个数据共享问题，需要加锁。
- 所有的 `read` 方法会在内部调用 `self.lock()`。
- 也可以创建 `StdinLock` 并显式调用 `lock()` 方法。

```
let lock: io::StdinLock = io::stdin().lock();
```

StdinLock

```
use std::io::{self, BufRead};

fn main() -> io::Result<()> {
    let mut buffer = String::new();
    let stdin = io::stdin(); // We get `Stdin` here.
    {
        let mut handle = stdin.lock(); // We get `StdinLock` here.
        handle.read_line(&mut buffer)?;
    } // `StdinLock` is dropped here.
    Ok(())
}
```

Stdout

- `Stdout` 是标准输出的接口。
- 实现了 `Write` 特型。
- 一般来说不会直接使用 `stdout`，而是用 `print!` 和 `println!`。
- 也可以通过 `Stdout::lock()` 来获得标准输出的锁。

特殊 IO 构件

- `repeat(byte: u8)`: 无限产生某个指定字节的读取对象。
 - 总是会充满缓冲区。
- `sink()`: 将数据丢弃的写入对象。
- `empty()`: 读取操作时总是返回 `Ok(0)` 的读取对象。
- `copy(reader: &mut R, writer: &mut W) -> Result<u64>`
 - 将所有字节从读取对象拷贝到写入对象。

2

异步编程的概念

为什么要异步执行？

- 程序任务的两种类型：
 - CPU 密集型 (CPU-bound) 任务：文件压缩、视频编码、图形处理等
 - IO 密集型 (IO-bound) 任务：文件读写、网络请求处理等
- CPU 密集型任务可以利用多核（甚至是多 CPU、多机）来获得整体性能。
- IO 密集型任务中如何提高 CPU 的使用率？
 - 希望程序在发出 IO 请求后，在等待 IO 动作完成的过程中，能够利用 CPU 做其他任务。

同步和多线程执行的例子

- 假设有三个任务要执行：任务 1、任务 2、任务 3
 - 其中，任务 1 中有长时间的 IO 操作。

同步方式

- 使用一个线程，依次执行：
 - ① 任务 1（中间会阻塞一段时间）
 - ② 任务 2
 - ③ 任务 3

多线程方式

- 使用两个线程，其中线程 1 执行：
 - ① 任务 1（中间会阻塞一段时间）
- 同时，线程 2 执行：
 - ① 任务 2
 - ② 任务 3

异步执行的例子

- 同样是之前的例子，使用异步方式来执行：

异步方式

- 使用一个线程，执行：
 - ① 任务 1（发出 IO 指令）
 - ② 任务 2（同时任务 1 的 IO 操作正在执行）
 - ③ 任务 1（获得 IO 结果并处理）
 - ④ 任务 3

Web 服务器的例子

- 同步实现的缺点：同一时刻只能处理一个请求。
- 多线程实现：针对每个请求，开启一个新的线程来处理。
 - 优点：提高性能，可同时处理多个请求。
 - 缺点：引入各种开销和并发的问题。
 - 开新线程代价高（用线程池）。
 - CPU 在处理 IO 时会处于空闲状态。
 - 执行顺序无法预测。
 - 对于全局状态会有共享和竞争的问题。
 - 死锁……

异步 Web 服务器

- 异步 Web 服务器给每个请求建立一个任务。
- 由异步运行时来调度任务，把当前可以执行的任务放到可用的 CPU 上执行。
- 优点：
 - 减小开销。
 - 充分利用 CPU 资源。
- 缺点：
 - 逻辑上不容易理解。
 - 编程复杂。
- 能否完全解决并发的问题？
 - 根据异步运行时的调度方式决定，是否使用多个 CPU 核。

3

Rust 的异步基础

异步编程的编程支持

- 实现异步编程需要编程语言能够支持：
 - 把一段代码变成异步任务。
 - 调度异步任务的执行。
- 上述两项工作，从语言设计的角度如何划分？

异步代码

- 使用 `async` 语法来创建异步代码：

```
async fn do_something() { /* ... */ }
```

- `async fn` 返回的结果是一个 `Future` 对象。
- 需要用执行器 (executor) 来执行 `Future` 对象。

执行异步代码

```
use futures::executor::block_on;

async fn hello_world() {
    println!("Hello, world!");
}

fn main() {
    let future = hello_world(); // Nothing is printed
    block_on(future); // `future` is run and "Hello, world!" is printed
}
```

异步调用的可能性

```
async fn learn_song() -> Song { /* ... */ }
async fn sing_song(song: Song) { /* ... */ }
async fn dance() { /* ... */ }
```

```
fn main() {
    let song = block_on(learn_song());
    block_on(sing_song(song));
    block_on(dance());
}
```

- 以上代码仍然是同步执行的。
- 需要一种手段，在异步代码中调用其他异步代码时，可以选择性地调度任务。

异步调用

```
async fn learn_and_sing() {  
    let song = learn_song().await;  
    sing_song(song).await;  
}
```

```
async fn async_main() {  
    let f1 = learn_and_sing();  
    let f2 = dance();  
  
    futures::join!(f1, f2);  
}
```

```
fn main() {  
    block_on(async_main());  
}
```

异步调用的机制

- 在异步代码中，可以使用 `.await` 来等待另外一个 `Future` 对象完成。
- 不同于 `block_on`，`.await` 是异步等待，不阻塞当前线程，此时可以调度其他异步任务。
- 上述代码中，
 - `learn_song()` 和 `sing_song()` 必须按顺序发生。
 - 而 `dance()` 可以和 `learn_and_sing()` 同时发生。

async 和 .await

```
// `foo()` returns a type that implements `Future<Output = u8>`.  
// `foo().await` will result in a value of type `u8`.  
async fn foo() -> u8 { 5 }
```

```
fn bar() -> impl Future<Output = u8> {  
    // This `async` block results in a type that implements  
    // `Future<Output = u8>`.  
    async {  
        let x: u8 = foo().await;  
        x + 5  
    }  
}
```

async

- `async` 有两种语法：
 - `async fn` 将一个函数转换为异步函数，返回 `Future` 对象。
 - `async` 放在代码段前面，将代码段转换为异步任务，也返回 `Future` 对象。
- 需要注意与 `async` 相关的所有权和生命周期的问题。

Future

```
trait Future {
    type Output;

    fn poll(self: Pin<&mut Self>, cx: &mut Context<'_>)
        -> Poll<Self::Output>;
}

enum Poll<T> {
    Ready(T),
    Pending,
}
```

- `Future` 特型是 Rust 异步编程的核心。
- `Future` 对象是一项异步计算任务，能够返回一个结果。

Future 的基本原理

```
trait SimpleFuture {
    type Output;
    fn poll(&mut self, wake: fn()) -> Poll<Self::Output>;
}
```

- 以简化版的 `SimpleFuture` 为例，可以通过调用 `poll()` 方法来驱动任务前进。
 - 如果任务完成，则返回 `Poll::Ready(result)`。
 - 如果还无法完成，则返回 `Poll::Pending`，同时安排在取得进展时调用 `wake()` 函数。
- `wake()` 函数被调用时，执行器会再次 `poll()` 这个 `Future` 对象。
- 如果没有 `wake()` 函数这个机制，执行器只能盲目地轮询所有正在执行的 `Future` 对象。

执行器的视角

- 执行器维护一组顶级的 **Future** 对象，当它们有进展时，调用 `poll()` 方法来推动运行。
- 通常是维护一个队列，表示当前正在运行的 **Future** 对象。
 - 当 **Future** 对象运行返回 **Pending** 状态时，将它移出队列。
 - 当 **Future** 对象相关的 `wake()` 方法被调用时，将可以继续运行的 **Future** 对象放回队列。

多线程执行异步任务

- 当使用多线程执行器时，**Future** 对象可能会在线程之间转移。
 - 因此 `async` 中用到的变量必须是 **Send** 的。
- `std::sync::Mutex` 可能会引起死锁。
 - 使用 `futures::lock::Mutex`。

4

Rust 的异步生态

库的支持

- Rust 中，
 - `async` 和 `.await` 是语言支持的。
 - `Future` 在标准库中。
- 没有对异步任务进行调度执行的支持。

异步运行时

- Rust 将异步运行时交给第三方库来提供。
- 一般来说，异步运行时会包含：
 - 一个反应器 (reactor)，提供对外部事件的监听机制（如 IO、过程间通信、计时器等）。
 - 一个或多个执行器，处理任务的调度和执行。
- 运行时需要做事情包括：
 - 维护当前正在运行和挂起的任务。
 - 查询任务的进展。
 - 唤醒任务，推动任务执行。

futures 箱

- futures 箱提供编写异步代码需要的特型和函数：
 - `Stream`、`Sink`、`AsyncRead`、`AsyncWrite` 等
- 最终可能会成为标准库的组成部分。
- 有执行器，但没有反应器，无法应对外部事件。

常用的异步运行时

- Tokio: 一个比较流行的异步框架, 支持 HTTP、gRPC 等。
- async-std: 提供标准库中一些组件的异步实现版本。
- smol: 一个轻量级的异步运行时, 提供 `Async` 包裹特型来实现异步功能。
- fuchsia-async: Fuchsia OS 所使用的执行器。

Tokio 库

Tokio 是一个 Rust 的异步运行时，适合来写网络服务端代码，提供：

- 执行异步代码的多线程运行时。
- 标准库的异步版本。
- 由很多相关库组成的生态系统。

看一个用 Tokio 实现简化版键值数据库的例子。

Tokio: 基本用法

```
use mini_redis::{client, Result};

#[tokio::main]
async fn main() -> Result<()> {
    // Open a connection to the mini-redis address.
    let mut client = client::connect("127.0.0.1:6379").await?;
    // Set the key "hello" with value "world"
    client.set("hello", "world".into()).await?;
    // Get key "hello"
    let result = client.get("hello").await?;
    println!("got value from the server; result={:?}", result);
    Ok(())
}
```

Tokio: 产生任务

```
#[tokio::main]
async fn main() {
    // Bind the listener to the address
    let listener = TcpListener::bind("127.0.0.1:6379").await.unwrap();

    loop {
        // The second item contains the IP and port of the new connection.
        let (socket, _) = listener.accept().await.unwrap();
        tokio::spawn(async move {
            process(socket).await;
        });
    }
}
```

Tokio: 实现任务

```
async fn process(socket: TcpStream) {  
    // The `Connection` lets us read/write redis **frames** instead of  
    // byte streams. The `Connection` type is defined by mini-redis.  
    let mut connection = Connection::new(socket);  
  
    if let Some(frame) = connection.read_frame().await.unwrap() {  
        println!("GOT: {:?}", frame);  
  
        // Respond with an error  
        let response = Frame::Error("unimplemented".to_string());  
        connection.write_frame(&response).await.unwrap();  
    }  
}
```

Tokio: 共享状态

```
use bytes::Bytes;
use std::collections::HashMap;
use std::sync::{Arc, Mutex};

type Db = Arc<Mutex<HashMap<String, Bytes>>>>;
```

Tokio: 创建共享状态

```
use tokio::net::TcpListener;
use std::collections::HashMap;
use std::sync::{Arc, Mutex};

#[tokio::main]
async fn main() {
    let listener = TcpListener::bind("127.0.0.1:6379").await.unwrap();

    println!("Listening");

    let db = Arc::new(Mutex::new(HashMap::new()));

    loop {
        let (socket, _) = listener.accept().await.unwrap();
        // Clone the handle to the hash map.
        let db = db.clone();

        println!("Accepted");
        tokio::spawn(async move {
            process(socket, db).await;
        });
    }
}
```

Tokio: 传递共享状态

```
use tokio::net::TcpStream;
use mini_redis::{Connection, Frame};

async fn process(socket: TcpStream, db: Db) {
    use mini_redis::Command::{self, Get, Set};

    // Connection, provided by `mini-redis`, handles parsing frames from
    // the socket
    let mut connection = Connection::new(socket);

    while let Some(frame) = connection.read_frame().await.unwrap() {
        // Process...

        // Write the response to the client
        connection.write_frame(&response).await.unwrap();
    }
}
```

Tokio: 使用共享状态

```
let response = match Command::from_frame(frame).unwrap() {
    Set(cmd) => {
        let mut db = db.lock().unwrap();
        db.insert(cmd.key().to_string(), cmd.value().clone());
        Frame::Simple("OK".to_string())
    }
    Get(cmd) => {
        let db = db.lock().unwrap();
        if let Some(value) = db.get(cmd.key()) {
            Frame::Bulk(value.clone())
        } else {
            Frame::Null
        }
    }
};
cmd => panic!("unimplemented {:?}", cmd),
};
```


Tokio 中的通道

- mpsc: 多生产者、单消费者通道, 可以发送多个值。
- oneshot: 单生产者、单消费者通道, 只能发送单个值。
- broadcast: 多生产者、多消费者通道, 可以发送多个值, 每个接收方都能收到每个值。
- watch: 单生产者、多消费者通道, 可以发送多个值, 但是不保留历史, 接收方只能看到最新发送的值。

Tokio: 使用通道

```
use tokio::sync::mpsc;

#[tokio::main]
async fn main() {
    let (tx, mut rx) = mpsc::channel(32);
    let tx2 = tx.clone();

    tokio::spawn(async move {
        tx.send("sending from first handle").await;
    });

    tokio::spawn(async move {
        tx2.send("sending from second handle").await;
    });

    while let Some(message) = rx.recv().await {
        println!("GOT = {}", message);
    }
}
```

Tokio: 异步 IO

```
use tokio::fs::File;
use tokio::io::{self, AsyncReadExt};

#[tokio::main]
async fn main() -> io::Result<()> {
    let mut f = File::open("foo.txt").await?;
    let mut buffer = [0; 10];

    // read up to 10 bytes
    let n = f.read(&mut buffer[..]).await?;

    println!("The bytes: {:?}", &buffer[..n]);
    Ok(())
}
```

使用异步的场景与得失

- 任务的类型
- 编程的难度

5

小结

本讲小结

- 输入输出
- 异步编程基础
- Rust 的异步基础
- Rust 的异步生态