程序设计训练之 Rust 编程语言

第四讲：泛型、特型与生命周期

韩文弢

清华大学计算机科学与技术系

2023 年 7 月 3 日

1

泛型

一般化类型的需求

- 对于结构化数据和函数，有针对一般化类型的需求：
  - 容器：向量、哈希表等
  - 算法：排序、查找、求最值等
- 需要提供一般化的机制，避免编写重复的代码。

泛型

- 将类型作为参数，变成泛型枚举类型。
  - 考虑以下类似标准库的枚举类型 `Result<T, E>`：

```
enum Result<T, E> {
    Ok(T),
    Err(E),
}
```

- `T` 和 `E` 是泛型类型。

泛型结构体

- 考虑以下泛型结构体：

```
struct Point<T> {
    x: T,
    y: T,
}

enum List<T> {
    Nil,
    Cons(T, Box<List<T>>),
}
```

泛型实现

- 为泛型结构体或枚举类型定义实现时，在 `impl` 代码段的开头声明泛型类型：

```
impl<T, E> Result<T, E> {
    fn is_ok(&self) -> bool {
        match *self {
            Ok(_) => true,
            Err(_) => false,
        }
    }
}
```

泛型函数

- 也可以定义泛型函数，将函数调用的相关类型改为泛型：
- `<T, U>` 声明了 `foo` 函数的类型参数。
  - `x: T, y: U` 使用了声明的类型参数。
- 可以读作“对于所有类型 `T` 和 `U`，`foo` 函数有两个参数，分别是 `T` 类型的 `x` 和 `U` 类型的 `y`”。

```
fn foo<T, U>(x: T, y: U) {
    // ...
}
```

2

特型

类型共性的需求

- 一些类型具有共性，例如，支持美观打印、判断相等、比较大小等功能。
- 针对每种类型进行实现是可行的，但是缺乏结构性。

```rust
struct Point {
    x: i32,
    y: i32,
}
impl Point {
    fn format(&self) -> String {
        format!("({}, {})", self.x, self.y)
    }
    fn equals(&self, other: Point) -> bool {
        self.x == other.x && self.y == other.y
    }
}
```

解决方案：特型

- 为了抽象类型共性机制，Rust 使用**特型** (trait) 的概念。
- 使用 `trait` 代码段来定义特型，列出特型所需的方法。
  - 与 `impl` 代码段不同。
  - 大多数方法只列出方法的签名，不包含定义。

```
trait PrettyPrint {
    fn format(&self) -> String;
}
```

实现特型

- 使用 `impl Trait for Type` 代码段来实现特型。
  - 所有特型所指定的方法都必须实现。
- 对于一种类型实现一种特型，要匹配一个相应的 `impl` 代码段。
- 在特型的 `impl` 代码段中，同样可以使用 `self`/`&self` 参数。

```
struct Point {
    x: i32,
    y: i32,
}

impl PrettyPrint for Point {
    fn format(&self) -> String {
        format!("({}, {})", self.x, self.y)
    }
}
```

泛型编程对类型参数的约束要求

- 在使用泛型的场景中，有时候需要对泛型的类型参数做一定的约束（也就是满足一定的条件）。
  - 回忆之前提到的 C++ 在 C++20 之前由于没有对泛型的类型参数进行约束而产生的编译时问题。

```
template <typename It>
// template <std::random_access_iterator It> from C++20
void my_sort(It first, It last) {
  std::sort(first, last);
}

int main() {
  std::list<int> a {3, 1, 4, 1, 5, 9};
  my_sort(a.begin(), a.end());
}
```

老版本的编译错误信息

309 行：

```
In file included from my_sort.cpp:1:
In file included from .../usr/include/c++/v1/algorithm:701:
.../usr/include/c++/v1/__algorithm/make_heap.h:32:34: error: invalid operar
    difference_type __n = __last - __first;
                          ~~~~~~ ^ ~~~~~~~
.../usr/include/c++/v1/__algorithm/partial_sort.h:35:12: note: in instantia
   ...
__wrap_iter<_Iter1> operator+(typename __wrap_iter<_Iter1>::difference_type
                    ^
11 errors generated.
```

新版本的编译错误信息

16 行：

```
my_sort.cpp:13:3: error: no matching function for call to 'my_sort'
  my_sort(a.begin(), a.end());
  ^~~~~~~
my_sort.cpp:7:6: note: candidate template ignored: constraints not satisfi
void my_sort(It first, It last) {
     ^
my_sort.cpp:6:16: note: because 'std::__list_iterator<int, void *>' does n
template <std::random_access_iterator It>
               ^
   ...
1 error generated.
```

使用特型约束的泛型

- 可以使用特型对泛型的类型参数进行约束。
- 能够更加准确地描述泛型类型和函数。
- 泛型中的特型约束可以直接在类型参数的地方用 `T: SomeTrait` 或者用单独的子句 `where T: SomeTrait` 来指定。

```
fn cloning_machine<T: Clone>(t: T) -> (T, T) {
    (t.clone(), t.clone())
}

fn cloning_machine_2<T>(t: T) -> (T, T)
        where T: Clone {
    (t.clone(), t.clone())
}
```

多种特型约束

- 使用形如 `T: Clone + Ord` 的方式来指定多种特型约束。
- 目前还不能指定反向特型约束。
  - 例如，不能指定一种类型 `T` 不支持 `Clone` 特型。

```
fn clone_and_compare<T: Clone + Ord>(t1: T, t2: T) -> bool {
    t1.clone() > t2.clone()
}
```

特型约束的泛型结构化数据类型

- 同样可以定义具有特型约束的泛型结构体或枚举类型。
- 需要在定义结构体或枚举类型的代码段头部和 `impl` 代码段头部都声明泛型类型。
- 只有 `impl` 代码段的特型约束是必须指定的。
  - 可以对同一泛型类型实现不同特型约束的 `impl` 代码段。

特型约束的泛型类型示例

```rust
enum Result<T, E> {
    Ok(T),
    Err(E),
}
trait PrettyPrint {
    fn format(&self) -> String;
}
impl<T: PrettyPrint, E: PrettyPrint> PrettyPrint for Result<T, E> {
    fn format(&self) -> String {
        match *self {
            Ok(t) => format!("Ok({})", t.format()),
            Err(e) => format!("Err({})", e.format()),
        }
    }
}
```

示例：相等关系

```rust
enum Result<T, E> { Ok(T), Err(E), }
// This is not the trait Rust actually uses for equality
trait Equals {
    fn equals(&self, other: &Self) -> bool;
}
impl<T: Equals, E: Equals> Equals for Result<T, E> {
    fn equals(&self, other: &Self) -> bool {
        match (*self, *other) {
            Ok(t1), Ok(t2) => t1.equals(t2),
            Err(e1), Err(e2) => e1.equals(e2),
            _ => false
        }
    }
}
```

继承

- 特型之间存在逻辑上的先后关系。
  - 例如，Eq 需要先实现 PartialEq，Copy 需要先实现 Clone。
- 下面的代码表示实现 Child 特型要先实现 Parent 特型。

```
trait Parent {
    fn foo(&self) {
        // ...
    }
}
trait Child: Parent {
    fn bar(&self) {
        self.foo();
        // ...
    }
}
```

默认方法

- 特型可以指定默认的方法实现。
  - 用于避免重复实现那些具有一般意义下常见实现方式的方法。
- 当某个方法在特型中提供默认实现时，特型的实现中就不用再定义这个方法。
- 定义默认实现的方式是在 `trait` 代码段写出方法的实现。

```
trait PartialEq<Rhs: ?Sized = Self> {
    fn eq(&self, other: &Rhs) -> bool;

    fn ne(&self, other: &Rhs) -> bool {
        !self.eq(other)
    }
}

trait Eq: PartialEq<Self> {}
```

默认方法的改写

- 实现特型时可以改写默认方法的实现。
- 但是一定要想好有充分的理由这样来做。
  - 例如，重新定义 `ne` 导致违反了 `eq` 和 `ne` 之间的逻辑关系，类似这样的事情一定不要做。

特型的自动获得

- 一些特型实现起来比较直观，编译器可以自动完成。
- 使用 `#[derive(...)]` 属性让编译器完成相应特型的自动实现。
- 这样做可以避免重复手动实现诸如 `Clone` 这样的特型。

```
#[derive(Eq, PartialEq, Debug)]
enum Result<T, E> {
    Ok(T),
    Err(E)
}
```

特型自动获得的限制

- 只能自动获得下列核心特型：
  - `Clone`, `Copy`, `Debug`, `Default`, `Eq`,
  - `Hash`, `Ord`, `PartialEq`, `PartialOrd`.
- 可以使用宏来完成自定义特型的自动获得。
- 注意：特型的自动获得需要满足下列条件：
  - 类型的所有成员都能自动获得指定的特型。
  - 例如，`Eq` 不能在包含 `f32` 的结构体类型上自动获得，因为 `f32` 不是 `Eq` 的。

核心特型

- 有必要了解下列 Rust 的核心特型：
  - `Clone`, `Copy`
  - `Debug`
  - `Default`
  - `Eq`, `PartialEq`
  - `Hash`
  - `Ord`, `PartialOrd`

Clone

```rust
pub trait Clone: Sized {
    fn clone(&self) -> Self;

    fn clone_from(&mut self, source: &Self) { ... }
}
```

- Clone 特型定义了如何复制 T 类型的一个值。
- 解决所有权问题的另一种方法。
  - 克隆一个对象，而不是获得所有权或者借用所有权。

Clone 示例

```rust
#[derive(Clone)]  // without this, Bar cannot derive Clone.
struct Foo {
    x: i32,
}

#[derive(Clone)]
struct Bar {
    x: Foo,
}
```

Copy

```
pub trait Copy: Clone { }
```

- Copy 特型表示一种类型是**拷贝语义**，而不是 Rust 默认的**移动语义**。
- 类型必须可以通过位拷贝来进行拷贝 (相当于 C 语言中的 memcpy)。
  - 包含可变引用的类型不能实现 Copy 特型 (不可变引用可以)。
- 标记特型：没有实现任何方法，只是标记行为。
- 一般来说，如果一种类型可以拷贝，就应该实现 Copy 特型。

Debug

```rust
pub trait Debug {
    fn fmt(&self, &mut Formatter) -> Result;
}
```

- 定义能够使用 `{:?}` 格式选项进行输出。
- 产生的是用于调试的输出信息，不是美观的输出格式。
- 一般来说，Debug 特型应该通过自动获得的方式实现。

Debug 示例

```rust
#[derive(Debug)]
struct Point {
    x: i32,
    y: i32,
}

let origin = Point { x: 0, y: 0 };
println!("The origin is: {:?}", origin);
// The origin is: Point { x: 0, y: 0 }
```

Default

```rust
pub trait Default: Sized {
    fn default() -> Self;
}
```

- 为一种类型定义一个默认值。

Eq 与 PartialEq

```rust
pub trait PartialEq<Rhs: ?Sized = Self> {
    fn eq(&self, other: &Rhs) -> bool;

    fn ne(&self, other: &Rhs) -> bool { ... }
}

pub trait Eq: PartialEq<Self> {}
```

- 定义通过 == 操作符判断相等关系的特型。

Eq 与 PartialEq 的解释

- `PartialEq` 表示**部分等价关系** (partial equivalence relation)。
  - 对称性：若 `a == b`，则 `b == a`
  - 传递性：若 `a == b` 且 `b == c`，则 `a == c`
- `ne` 具有使用 `eq` 的默认实现。
- `Eq` 表示**等价关系** (equivalence relation)。
  - 除对称性和传递性外，还需要满足**自反性**。
  - 自反性：`a == a`
- `Eq` 没有定义更多的方法，也是一种标记特型。

Hash

```
pub trait Hash {
    fn hash<H: Hasher>(&self, state: &mut H);

    fn hash_slice<H: Hasher>(data: &[Self], state: &mut H)
        where Self: Sized { ... }
}
```

- 表示可哈希的类型。
- H 类型参数是抽象的哈希状态，用于计算哈希值。
- 如果同时实现了 Eq 特型，需要满足如下重要性质：

```
k1 == k2 -> hash(k1) == hash(k2)
```

PartialOrd

```rust
pub trait PartialOrd<Rhs: ?Sized = Self>: PartialEq<Rhs> {
    // Ordering is one of Less, Equal, Greater
    fn partial_cmp(&self, other: &Rhs) -> Option<Ordering>;

    fn lt(&self, other: &Rhs) -> bool { ... }
    fn le(&self, other: &Rhs) -> bool { ... }
    fn gt(&self, other: &Rhs) -> bool { ... }
    fn ge(&self, other: &Rhs) -> bool { ... }
}
```

- 表示（可能）可以进行比较的特型。

PartialOrd 的解释

- 对所有的 a、b、c，比较操作必须满足：
  - 反对称性：若 a < b，则 !(a > b)；若 a > b，则 !(a < b)。
  - 传递性：若 a < b 且 b < c，则 a < c；对 == 和 > 同样成立。
- lt、le、gt、ge 具有基于 partial_cmp 的默认实现。

Ord

```rust
pub trait Ord: Eq + PartialOrd<Self> {
    fn cmp(&self, other: &Self) -> Ordering;
}
```

- 实现该特型的类型形成全序关系 (total order)。
- 全序关系需要满足的性质除反对称性和传递性外，还需要满足完全性：
  - 对所有的 `a` 和 `b`，有 `a <= b` 或 `b <= a` 成立。
- 此特型可以保证类型的值能够按字典序排列。

关联类型的需求

- 考虑如下的 Graph 特型：

```
trait Graph<N, E> {
    fn edges(&self, node: &N) -> Vec<E>;
    // etc
}
```

- 这里，N 和 E 是泛型类型参数，但是它们和 Graph 之间的联系不明确。
- 如果有函数要使用 Graph 时，它必须也是 N 和 E 的泛型。

```
fn distance<N, E, G: Graph<N,E>>(graph: &G, start: &N, end: &N)
    -> u32 { /*...*/ }
```

关联类型

- 使用关联类型来反映这种设计上的逻辑。
- 使用特型代码段里的 `type` 定义来表示特型关联的泛型类型。
- 特型在实现时来指定关联类型实际指代的类型。

```
trait Graph {
  type N;
  type E;
  fn edges(&self, &Self::N) -> Vec<Self::E>;
}
impl Graph for MyGraph {
  type N = MyNode;
  type E = MyEdge;
  fn edges(&self, n: &MyNode) -> Vec<MyEdge> { /*...*/ }
}
```

关联类型的应用

- 例如，在标准库中，迭代器特型 `Iterator` 具有表示项目类型的关联类型 `Item`。
- 诸如 `Iterator::next` 这样的特型方法会返回 `Option<Self::Item>` 类型的值。
  - 可以方便地指定迭代容器时所获得的值的类型。
- 关联类型可以在实现特型时指定某些特定的相关联的类型，而不是全部作为泛型的类型参数。

特型的作用域

- 假设在程序中定义了某特型 Foo。
- 在 Rust 中，可以在任何类型上实现这种特型，哪怕不是你写的类型。

```
trait Foo {
    fn bar(&self) -> bool;
}

impl Foo for i32 {
    fn bar(&self) -> bool {
        true
    }
}
```

- 这样做是否合理，要慎重考虑。

特型的作用域规则

- 实现特型的作用域规则如下：
  - 需要 `use` 要用的特型来访问类型中由这种特型定义的方法，即使已经有对类型的访问权限也还是不够的。
  - 为了写一个特型实现的 `impl` 代码段，需要要么拥有（也就是通过自己的代码来定义）该特型，要么拥有该类型，两者至少其一。

特型的作用域规则示例：Display

```rust
pub trait Display {
    fn fmt(&self, &mut Formatter) -> Result<(), Error>;
}

impl Display for Point {
    fn fmt(&self, f: &mut fmt::Formatter) -> fmt::Result {
        write!(f, "Point ({}, {})", self.x, self.y)
    }
}
```

- 定义 `{}` 格式化选项的输出行为。
- 用于美观打印，不能自动获得。
- 可以用 `write!` 宏来做具体的实现。

Drop

```rust
pub trait Drop {
    fn drop(&mut self);
}
```

- 表示可销毁的特型（实际上是所有类型）。
- `Drop` 特型提供 `drop` 方法，用于将对象销毁，会由编译器自动生成，不能显式调用。

Drop 的特点

- 一般情况下，不需要实现 Drop。
  - 默认的实现可以正常工作。
  - 也不需要用自动获得功能去产生。
- 什么时候需要手动实现?
  - 如果在对象销毁时有特殊行为。
  - 例如，Rust 的引用计数指针类型 Rc<T> 就有特殊的 Drop 规则：当引用计数大于 1 时，drop 只是对计数器减 1；但是当减 1 之后引用计数降为 0 时，要真的删除这个 Rc 对象。

Sized 和 ?Sized

- `Sized` 表示一种类型在编译时就可以知道是固定的大小。
- 而 `?Sized` 表示一种类型的大小可能是不固定的。
- 默认情况下，所有类型都是 `Sized`，而指定 `?Sized` 可以撤销这一规定。
  - 例如，像 `[T]` 和 `str`（没有 `&`）都是 `?Sized` 的。
- 一般来说，跟指针相关的泛型的类型参数里的特型约束会出现 `?Sized`，例如 `Box<T>` 就有 `T: ?Sized`。
- 很少直接使用这两种特型，一般都是在特型约束中出现的。

3

特型对象

特型对象的引入

- 考虑以下特型和实现：

```
trait Foo { fn bar(&self); }

impl Foo for String {
    fn bar(&self) { /*...*/ }
}

impl Foo for usize {
    fn bar(&self) { /*...*/  }
}
```

静态分发

- 可以通过**静态分发** (static dispatching) 的方式在满足约束 `T: Foo` 的任意类型上调用 `bar` 的不同版本。
- 代码编译时，编译器会给每个不同的 `bar` 生成对应的特化版本。
  - 对于实现 `Foo` 特型的每种类型，都会生成对应的函数。

```
fn blah(x: T) where T: Foo {
    x.bar()
}
fn main() {
    let s = "Foo".to_string();
    let u = 12;

    blah(s);
    blah(u);
}
```

动态分发

- Rust 也可以通过**特型对象** (trait objects) 进行**动态分发** (dynamic dispatching)。
- 特型对象要用像 `Box<dyn Foo>` 或 `&dyn Foo` 的形式来使用（相当于 C++ 中的对象指针）。
- 背后的数据类型要实现 `Foo` 特型。
- 当使用动态分发时，特型背后的具体的数据类型被抹去，无法获得。

错误使用特型对象的示例

```rust
trait Foo { /*...*/ }
impl Foo for char { /*...*/ }
impl Foo for i32  { /*...*/ }
fn use_foo(f: &dyn Foo) {
    // No way to figure out if we got a `char` or an `i32`
    // or anything else!
    match *f {
        // What type do we have? I dunno...
        // error: mismatched types: expected `Foo`, found `_`
        198 => println!("i32"),
        'c' => println!("char"),
        _ => println!("Something else..."),
    }
}
```

特型对象的实现机制

- 使用特型对象时，只能在运行时进行方法的分发。
  - 编译器不知道特型引用背后的实际类型，类型信息已经抹去。
- 这样做会带来一定的运行时开销，但是在处理一些情况时会有用（例如动态大小的类型）。
  - 实际上特型对象只能通过指针的方式来使用，会增加指向方法的 vtable。

对象安全性

- 不是所有的特型都可以以特型对象的形式安全地使用。
- 例如，创建 `&dyn Clone` 会引起编译错误，因为 `Clone` 不是**对象安全**的。
- 特型是对象安全的，需要满足以下条件（不完整，具体见参考手册）:
  - 所有超特型也都是对象安全的。
  - 不能以 `Sized` 为超特型。
  - 所有关联函数能够从特型对象进行分发:
    - 不带任何类型参数。
    - 方法除接收方 (receiver) 外，其他地方不能使用 `Self` 类型。
    - 接收方是引用或者某种指针形式的类型，如 `&Self`、`&mut Self`、`Box<Self>` 等。
    - 没有 `where Self: Sized` 子句。

4

生命周期

生命周期的意义

- 考虑以下情况：
  1. 甲方获取了一项资源。
  2. 乙方通过引用借用了甲方的这项资源。
  3. 甲方对这项资源使用完毕，对它进行释放。
  4. 乙方还保留着对这项资源的引用，并开始使用它。
  5. 乙方挂了……
- 之前提到过以上的场景在 Rust 中是不允许出现的。
- 需要有机制保证第 3 步不会发生在第 4 步之前。

生命周期的显式表示

- 通常情况下，引用具有隐式的生命周期，不需要额外关注：

```
fn foo(x: &i32) {
    // ...
}
```

- 在必要的时候，也可以显式指定生命周期：

```
fn bar<'a>(x: &'a i32) {
    // ...
}
```

显式生命周期的含义

```rust
fn bar<'a>(x: &'a i32) {
    // ...
}
```

- `'a`（注意是单引号那个撇，可以读作“撇 a”或者“生命周期 a”）是一个**命名的**生命周期参数。
  - `<'a>` 在泛型参数中声明生命周期参数。
  - `&'a i32` 类型是一个 `i32` 的引用，它的生命周期至少有 `'a` 那么长。

生命周期的用处

- 一般情况下，编译器可以推断生命周期，不需要显式声明。
- 在涉及多个引用或者要返回引用的场景时，可能需要显式指定生命周期。
  - 来看几个例子：

多个生命周期参数

```
fn borrow_x_or_y<'a>(x: &'a str, y: &'a str) -> &'a str;
```

- 在 `borrow_x_or_y` 函数中，所有输入和输出的引用有着同样的生命周期。
  - 也就是说，引用 `x` 和 `y` 的生命周期至少会和返回的引用的生命周期一样长。
  - 换句话说，只要返回的引用还存在，那么引用 `x` 和 `y` 也必须还存在。

```
fn borrow_p<'a, 'b>(p: &'a str, q: &'b str) -> &'a str;
```

- 在 `borrow_p` 函数中，返回的引用的生命周期和 `p` 一样长。
  - `q` 的生命周期是独立的，跟 `p` 没有关系。
  - `p` 的借用至少要在返回引用存在期间持续。

结构体相关的生命周期

- 结构体和结构体成员也可以具有生命周期参数。

```
struct Pizza(Vec<i32>);
struct PizzaSlice<'a> {
    pizza: &'a Pizza,  // <- references in structs must
    index: u32,        //    ALWAYS have explicit lifetimes
}

let p1 = Pizza(vec![1, 2, 3, 4]);
{
    let s1 = PizzaSlice { pizza: &p1, index: 2 }; // this is okay
}
```

结构体相关的生命周期（续）

```
struct Pizza(Vec<i32>);
struct PizzaSlice<'a> {
    pizza: &'a Pizza,  // <- references in structs must
    index: u32,        //    ALWAYS have explicit lifetimes
}

let s2;
{
    let p2 = Pizza(vec![1, 2, 3, 4]);
    s2 = PizzaSlice { pizza: &p2, index: 2 };
    // no good - why?
}
drop(s2);  // to undo NLL
```

生命周期之间的关系

- 如果结构体或枚举类型的成员是引用，则必须显式指定生命周期。

```
struct Foo<'a, 'b> {
  v: &'a Vec<i32>,
  s: &'b str,
}
```

- 可以指定生命周期之间的关系（“活得比你久”）。
  - 语法与泛型中的特型约束相同：`<'b: 'a>`（`'b` 生命周期要涵盖 `'a` 生命周期）。

impl 代码段中的生命周期

- 接上面的例子，在实现 Foo 结构体的方法时也需要指定生命周期。
- 下面的代码可以视为“用到生命周期 'a 和 'b 的 Foo 结构体的实现同样要用到生命周期 'a 和 'b”。

```
impl<'a, 'b> Foo<'a, 'b> {
  fn new(v: &'a Vec<i32>, s: &'b str) -> Foo<'a, 'b> {
    Foo {
      v: v,
      s: s,
    }
  }
}
```

静态生命周期 'static

- 'static 表示整个程序的生命周期，拥有 'static 生命周期的引用在整个程序运行过程中都有效。
  - 也就是说，这样的数据在程序中永远不会失效。
- 所有的 &str 字面值是 'static 生命周期的。

```
let s1: &str = "Hello";
let s2: &'static str = "World";
```

生命周期的解释

- 如何理解显式的生命周期?
  - 如果引用 `r` 具有生命周期 `'a`，首先会确保 `r` 不会比它所引用的数据（也就是 `*r`）的所有者活得更久。
  - 其次，对于其他也拥有生命周期 `'a` 的对象，能够确保它们至少和 `r` 活得一样久。
- 生命周期的概念比较抽象，需要在实践中体会和理解。

5

小结

本讲小结

- 泛型：同一份代码作用于不同的类型
- 特型：提取类型之间的共性
- 特型对象：Rust 中动态分发的实现机制
- 生命周期：比比谁活得久

下一讲：项目管理与常用库