程序设计训练（Rust 语言）

第 4 讲：泛型、特型与生命周期

韩文弢

清华大学

2024–2025 学年度夏季学期

本讲内容

4.1 泛型

4.1.1 一般化类型的需求

- 对于结构化数据和函数，有支持一般化类型的需求：
  - 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。

4.1.2 C++ 中的模板

- 在 C++ 中，一般通过模板来实现泛型需求

```cpp
template <typename T> T max(T x, T y) {
    return x > y ? x : y;
}
template <typename T> struct Array {
    T *begin;
    T *end;
    T *end_of_storage;
};
```

- Rust 中也有类似的机制提供泛型

4.1.3 泛型

- 将类型作为参数，可以定义**泛型**类型。
- 例如，将 `Point` 结构体类型泛型化，得到泛型结构体类型：

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

- 其中，`T` 是泛型类型（类型参数），使用时可以用 `i32`、`f64` 等代入。

4.1.4 泛型枚举类型

枚举类型也可以泛型化，例如：

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

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

4.1.5 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：

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

4.1.6 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：

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

- `<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“对于任意类型 `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`”。

4.1.7 常量泛型参数

- 可以使用常量作为泛型参数：

```rust
struct Array<T, const N: usize> {
    a: [T; N],
}
```

- 常量泛型参数不能参与常量运算：

```rust
struct Array2D<T, const N: usize, const M: usize>
{
    // Compile error: a: [T; N * M],
    a: [[T; N]; M],
}
```

4.2 特型

4.2.1 类型共性的需求

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

Rust

```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
    }
}
```

4.2.2 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。
  - 一般来说方法只列出方法的签名，不包含定义。
  - 与 `impl` 代码段不同。

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

4.2.3 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。

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

4.2.4 泛型编程对类型参数的约束要求

- 在使用泛型的场景中，有时需要对泛型的类型参数做一定的约束。
  - 例如，要求类型包含某个字段、支持某种方法，或者带有某种关联类型。
  - C++ 在 C++20 之前没有对泛型的类型参数进行约束的机制，编译时产生的错误信息非常冗杂。
  - C++20 引入了**概念**（concept）的机制，可以对泛型的类型参数进行约束。

4.2.5 C++ 使用概念约束类型参数示例

C++

```cpp
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());
}
```

4.2.6 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
  operands to binary expression ('std::__list_iterator<int, void *>'
  and 'std::__list_iterator<int, void *>')
    difference_type __n = __last - __first;
                          ~~~~~~ ^ ~~~~~~~
.../usr/include/c++/v1/__algorithm/partial_sort.h:35:12: note: in
  instantiation of function template specialization
  'std::__make_heap<std::__less<int> &, std::__list_iterator<int, void *>>'
  requested here
   ...
__wrap_iter<_Iter1> operator+(...) _NOEXCEPT
                    ^
11 errors generated.
```

4.2.7 新版本的编译错误信息

16 行：

```
1  my_sort.cpp:13:3: error: no matching function for call to 'my_sort'
2    my_sort(a.begin(), a.end());
3    ^~~~~~~
4  my_sort.cpp:7:6: note: candidate template ignored: constraints not
5    satisfied [with It = std::__list_iterator<int, void *>]
6  void my_sort(It first, It last) {
7       ^
8  my_sort.cpp:6:16: note: because 'std::__list_iterator<int, void *>'
9    does not satisfy 'random_access_iterator'
10 template <std::random_access_iterator It>
11                ^
12   ...
13 1 error generated.
```

4.2.8 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函数和类型，指定对类型参数的要求。
- 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。

```rust
fn clone_pair_1<T: Clone>(t: T) -> (T, T) {
    (t.clone(), t.clone())
}
fn clone_pair_2<T>(t: T) -> (T, T) where T: Clone {
    (t.clone(), t.clone())
}
```

4.2.9 多个特型约束

- 使用形如 `T: Trait1 + Trait2` 的方式来指定多个特型约束。

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

4.2.10 特型约束的泛型类型

- 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。
- 可以在定义类型时就指定特型约束，或者只在 `impl` 代码段中指定特型约束。
  - 如果在类型定义时指定特型约束，则无法使用不满足特型约束的泛型参数创建该类型。
  - 如果在类型定义时不指定特型约束，只在 `impl` 代码段指定，则可以使用不满足该特型约束的泛型参数，但这样创建出来的类型就不能使用该 `impl` 代码段中实现的方法。
  - 可以写多个 `impl` 代码段，分别指定不同的特型约束。

4.2.11 示例：特型约束的泛型类型

Rust

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

4.2.12 示例：相等关系

```rust
enum MyResult<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 MyResult<T, E> {
    fn equals(&self, other: &Self) -> bool {
        match (self, other) {
            (MyResult::Ok(t1), MyResult::Ok(t2)) => t1.equals(t2),
            (MyResult::Err(e1), MyResult::Err(e2)) => e1.equals(e2),
            _ => false,
        }
    }
}
```

Self 是一种特殊的类型，表示当前实现的类型（也就是 self 的类型）。

4.2.13 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。

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

4.2.14 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。

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

    fn ne(&self, other: &Rhs) -> bool {
        !self.eq(other)
    }
}
trait Eq: PartialEq<Self> {}
```

4.2.15 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。

4.2.16 特型的自动获得

- 一些特型实现起来比较机械，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。

```rust
#[derive(Debug, Eq, PartialEq, /* ... */)]
enum MyResult<T, E> {
    Ok(T),
    Err(E),
}
```

4.2.17 特型自动获得的限制

- Rust 语言支持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。

4.2.18 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`

4.2.19 Clone 特型

```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。

4.2.20 Clone 示例

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

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

4.2.21 Copy 特型

```rust
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。

4.2.22 Debug 特型

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

- 定义使用 `{:?}` 格式选项或 `dbg!()` 宏进行输出的内容。
- 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。

4.2.23 Debug 示例

Rust

```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 }
```

4.2.24 Default 特型

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

- 为一种类型定义一个默认值。

4.2.25 Eq 与 PartialEq 特型

```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。

4.2.26 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。

4.2.27 Hash 特型

```rust
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，需要满足如下性质：

  `k1 == k2 → hash(k1) == hash(k2)`

4.2.28 PartialOrd 特型

```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。

4.2.29 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。

4.2.30 Ord 特型

```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。
- 此特型可以保证该类型的值能够被排序。

4.2.31 特型的兜底实现

- 可以通过泛型来为符合特型约束的类型定义兜底实现（blanket implementation）：

```rust
impl<T> ToString for T
where T: Display + ?Sized,
{ /* ... */ }
```

- 如果既有兜底实现，又有特定类型单独的实现，则特定的实现会覆盖兜底实现。
- 为避免冲突，同一个特型只能有一个兜底实现（即使有不同的特型约束也会冲突）。

4.2.32 关联类型的需求

- 考虑如下的 Graph 特型：

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

- 这里，N 和 E 是泛型类型参数，它们和 Graph 之间没有额外的联系。
  - 换句话说，使用 Graph 时可以指定任意的 N 和 E。

4.2.33 关联类型的需求（续）

- 如果有函数要使用 Graph 时，它必须也是 N 和 E 的泛型。

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

- 逻辑：Graph 需要支持用任意类型 N 和 E 作为元素，还是每个该特型的实现者有关联于自己的特定的元素类型?

4.2.34 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。

```rust
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> { /* ... */ }
}
```

4.2.35 示例：关联类型

```Rust
// 泛型特型
trait Graph<N, E> {
    fn edges(&self, node: &N) -> Vec<E>;
}
fn distance<N, E, G: Graph<N,E>>(graph: &G, start: &N, end: &N)
    -> u32 { /* ... */ }
```

```Rust
// 带关联类型的特型
trait Graph {
  type N;
  type E;
  fn edges(&self, &Self::N) -> Vec<Self::E>;
}
fn distance<Graph>(graph: &G, start: &G::N, end: &G::N)
    -> u32 { /* ... */ }
```

4.2.36 关联类型的应用

- 在标准库中，迭代器特型 `Iterator` 具有表示元素类型的关联类型 `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。

4.2.37 关联类型的特型约束

- 可以直接指定具体的关联类型：`T: Iterator<Item = i32>`
- 也可以对关联类型添加特型约束，有多种写法：
  - 可以分开写，使用 `where` 子句：`where T: Iterator, T::Item: Clone`
  - 或者添加一个泛型参数：`T: Iterator<Item = U>, U: Clone`
  - 也可以合并写，更加紧凑：`T: Iterator<Item: Clone>`

4.2.38 特型的作用域

- 如果在代码中定义了某特型 Foo，则可以在任何类型上实现这种特型，哪怕不是你写的类型。

```rust
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。

4.2.39 特型的作用域规则

实现特型的作用域规则如下：

- 想要使用由特型定义的方法，需要在使用前 use 该特型（已经有对类型的访问权限是不够的）。
- 想要为类型实现特型，要么这个类型是你自己写的，要么这个特型是你自己写的。
  - “自己写的”具体来说指的是，特型的实现（`impl Trait for Type`）要么和类型的定义（`struct/enum Type`）在同一个 crate，要么和特型的定义（`trait Trait`）在同一个 crate。这里说的箱（crate）是 Rust 代码组织的一个层次，下一讲中会详细介绍。

4.2.40 特型的作用域规则示例：Display

```rust
use std::fmt::Display;

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

println!("{}", Point { x: 3, y: 4 });
```

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

4.2.41 特型的作用域规则示例：rand::seq::SliceRandom

Rust

```rust
use rand::seq::SliceRandom;

let mut rng = rand::thread_rng();
let mut bytes = "Hello, random!".to_string().into_bytes();
// 等价于 SliceRandom::shuffle(&bytes, &mut rng);
bytes.shuffle(&mut rng);
let str = String::from_utf8(bytes).unwrap();
println!("{}", str);
```

4.2.42 特型方法消岐

Rust

```rust
trait Flyable { fn go(&self); }
trait Walkable { fn go(&self); }
struct Bird;
impl Flyable for Bird { /* ... */ }
impl Walkable for Bird { /* ... */ }

let bird = Bird;
// Compile error: bird.go();
Flyable::go(&bird);
Walkable::go(&bird);
```

4.2.43 Drop 特型

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

- 表示可销毁的特型（所有类型都要实现）。
- 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。
- 可以使用 std::mem::drop 函数来调用 drop 方法。

4.2.44 Drop 特型的说明

- 一般情况下，不需要实现 Drop。
  - 默认的实现可以正常工作。
- 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。

4.2.45 Sized 和 ?Sized 特型

- 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。

4.3 特型对象

4.3.1 特型对象的引入

- 考虑以下特型和实现的代码片段，并思考特型的使用场景和对应的实现：

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

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

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

4.3.2 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类型生成 `bar` 对应的特化版本。
  - 对于实现 `Foo` 特型的每种类型，在被调用的情况下都会生成对应的函数。

4.3.3 静态分发示例

Rust

```rust
fn blah<T: Foo>(x: T) {
    x.bar()
}

fn main() {
    let s = "Foo".to_string();
    let u = 12;
    blah(s);
    blah(u);
}
```

4.3.4 动态分发

- 但是，如果在编译时不知道 `T` 的具体类型，就无法使用静态分发。
- 例如，希望把 `Shape` 特型的对象（`Rectangle`、`Circle` 等）放进一个向量里，然后进行统一的处理。
- Rust 可以通过**特型对象**（trait object）进行**动态分发**（dynamic dispatching）。
- 特型对象要用像 `Box<dyn Shape>` 或 `&dyn Shape` 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 `Shape` 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。
  - 可以手动添加一个方法来获取类型相关信息。

4.3.5 特型对象示例

Rust

```rust
trait Shape {
    fn area(&self) -> f64;
}
struct Rectangle { width: f64, height: f64 }
struct Circle { radius: f64 }
impl Shape for Rectangle {
    fn area(&self) -> f64 { self.width * self.height }
}
impl Shape for Circle {
    fn area(&self) -> f64 { std::f64::consts::PI * self.radius * self.radius }
}
let shapes: Vec<Box<dyn Shape>> = vec![
    Box::new(Rectangle { width: 3.0, height: 4.0 }),
    Box::new(Circle { radius: 2.0 }),
];
let area_sum = shapes.iter().map(|s| s.area()).sum::<f64>();
```

4.3.6 错误使用特型对象的示例

```rust
// 接上一页的特型和类型定义
fn draw(shape: &dyn Shape) {
    match *shape {
        Rectangle { .. } => println!("This is a rectangle"),
        Circle { .. } => println!("This is a circle"),
    }
}
```

这里，`&dyn Shape` 在编译时已经丢失具体的类型信息，无法进行基于类型的模式匹配。

4.3.7 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。

4.3.8 动态兼容性

- 能够进行动态分发的特型称为**动态兼容**（dyn compatible）的[1]。
- 特型是动态兼容的，需要满足以下条件[2]：
  - 所有超特型也都是动态兼容的。
  - 不能以 `Sized` 为超特型。
  - 没有带泛型的关联类型。
  - 所有关联函数能够从特型对象进行分发。
- 原则：①不能依赖具体的类型；②能够让特型对象加入 vtable 表格指针。

[1]老版本称为对象安全（object safety）

[2]完整的动态兼容性的描述见参考手册。

4.4 生命周期

4.4.1 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。

4.4.2 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：

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

- 在必要的时候，也可以显式指定生命周期：

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

4.4.3 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。

4.4.4 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。

```rust
fn print(s: &str);                  // 省略
fn print<'a>(s: &'a str);           // 展开
fn debug(lvl: usize, s: &str);          // 省略
fn debug<'a>(lvl: usize, s: &'a str);   // 展开
fn substr(s: &str, until: usize) -> &str;             // 省略
fn substr<'a>(s: &'a str, until: usize) -> &'a str;   // 展开
fn get_str() -> &str;                 // 非法
fn frob(s: &str, t: &str) -> &str;    // 非法
```

4.4.5 多个生命周期参数

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

- 在函数 borrow_x_or_y 中，所有输入和输出的引用有着同样的生命周期。
  - 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。
  - 只要返回的引用还存在，那么引用 x 和 y 也必须还存在。

```rust
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。

4.4.6 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。

```rust
struct Pizza;
struct PizzaSlice<'a> {
    pizza: &'a Pizza,  // 复合类型中的引用必须显式声明生命周期
    index: usize,
}

let p1 = Pizza;
{
    let s1 = PizzaSlice { pizza: &p1, index: 2 }; // 可行
}
```

4.4.7 结构体相关的生命周期（续）

Rust

```rust
struct Pizza;
struct PizzaSlice<'a> {
    pizza: &'a Pizza,  // 复合类型中的引用必须显式声明生命周期
    index: usize,
}

let s2;
{
    let p2 = Pizza;
    s2 = PizzaSlice { pizza: &p2, index: 2 };
}
drop(s2);  // 在 p2 的生命周期外尝试访问 s2，会出错，为什么？
```

4.4.8 结构体生命周期的应用

- 结构体生命周期容易带来麻烦，尤其是对于初学者来说，一般建议避免使用。
- 一个典型应用场景是进行数据处理时避免不必要的数据复制，例如 JSON 解析时可以用 `&str` 代替 `String` 直接引用 JSON 字符串中的片段：

4.4.9 结构体生命周期的应用（续）

```rust
struct OwnedUser { username: String, password: String }
struct BorrowedUser<'a> { username: &'a str, password: &'a str }
let json = "{\"username\":\"john\",\"password\":\"123456\"}";
let owned_user = OwnedUser {
    username: json[13..17].to_owned(), // 会进行数据复制
    password: json[31..37].to_owned(),
};
let borrowed_user = BorrowedUser {
    username: &json[13..17], // 直接引用 JSON 字符串的片段
    password: &json[31..37],
};
```

4.4.10 生命周期之间的关系

- 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）。
- 与特型约束对比：`T: U` 意味着需要 `U` 的地方可以用 `T`，而 `'b: 'a` 意味着需要 `'a` 的地方可以用 `'b`。

4.4.11 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。

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

4.4.12 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。

4.5 小结

4.5.1 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：在必要的时候显式描述值的存活时间

下一讲：项目管理与常用库