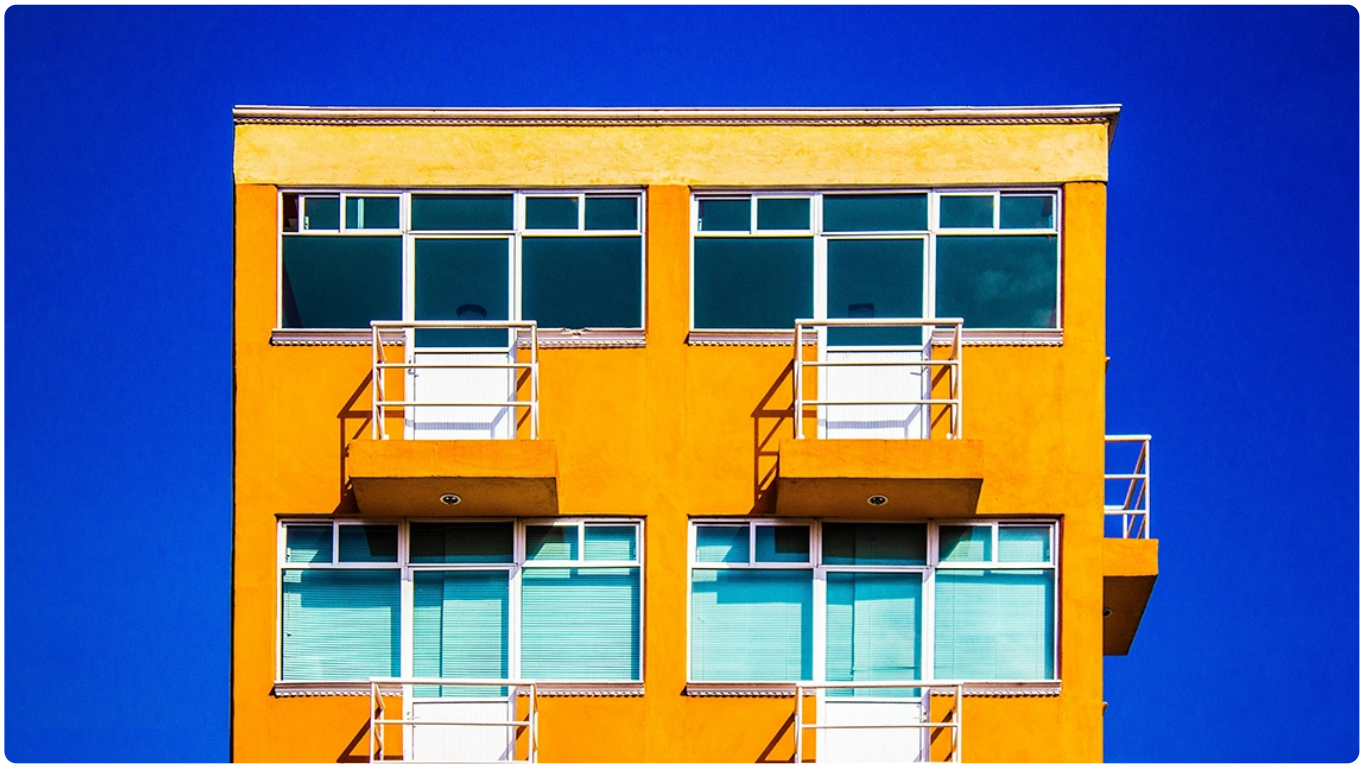
24 | 类型系统：如何在实战中使用 Trait Object？

2021-10-20 陈天

《陈天 · Rust 编程第一课》 课程介绍 >



讲述：陈天
时长 11:43 大小 10.74M

你好，我是陈天。

今天我们来看看 trait object 是如何在实战中使用的。

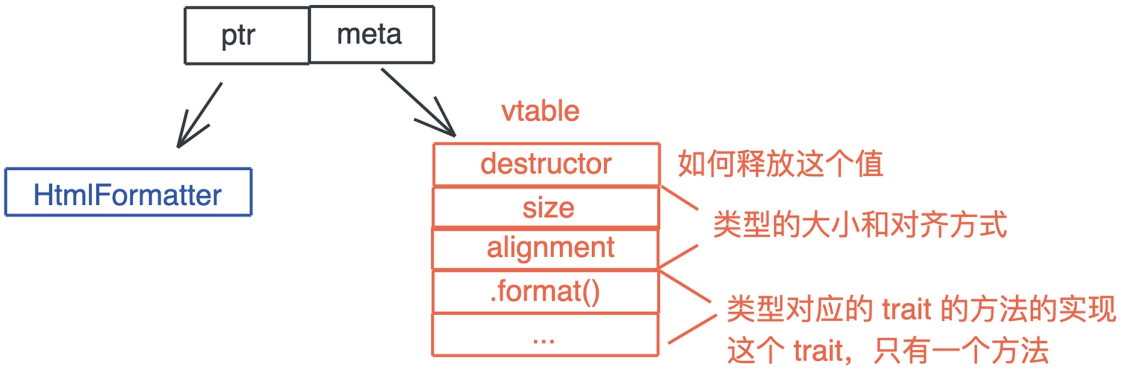
照例先来回顾一下 trait object。当我们在运行时想让某个具体类型，只表现出某个 trait 的行为，可以通过将其赋值给一个 dyn T，无论是 &dyn T，还是 Box<dyn T>，还是 Arc<dyn T>，都可以，这里，T 是当前数据类型实现的某个 trait。此时，原有的类型被抹去，Rust 会创建一个 trait object，并为其分配满足该 trait 的 vtable。

你可以再阅读一下第 13 讲的这个图，来回顾 trait object 是怎么回事：

```
let mut text = "Hello world!".to_string();

let formatter: &dyn Formatter = &HtmlFormatter;  // 使用 &HtmlFormatter 赋值给
                                                 &Formatter 创建一个 trait object

formatter.format(&mut text);  // 调用 trait 的方法
```



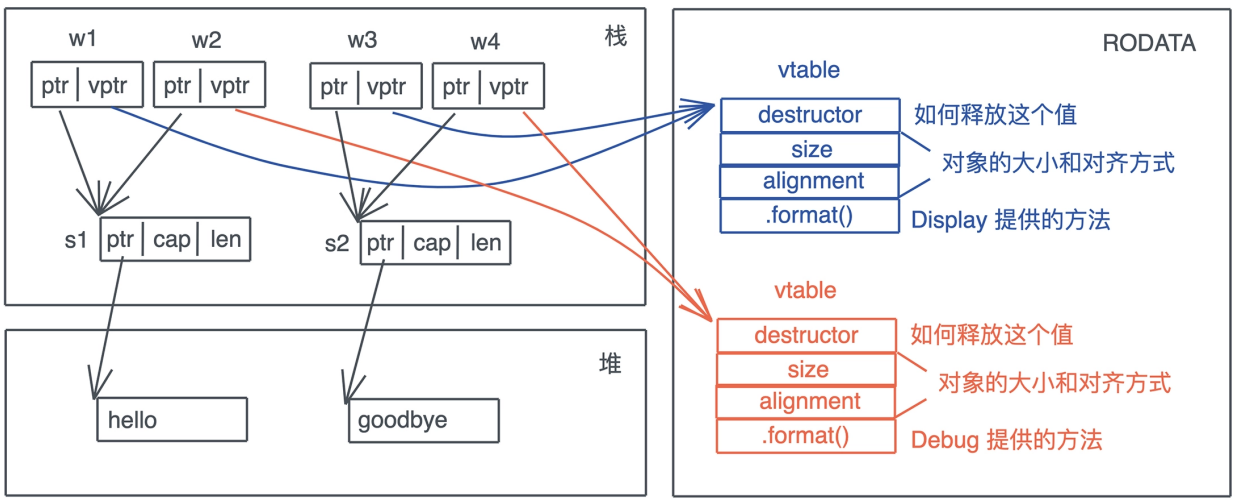
极客时间

在编译 dyn T 时，Rust 会为使用了 trait object 类型的 trait 实现，生成相应的 vtable，放在可执行文件中（一般在 TEXT 或 RODATA 段）：

```
let s1 = String::from("hello");
let s2 = String::from("goodbye");

// Display / Debug trait object for s1
let w1: &dyn Display = &s1;
let w2: &dyn Debug = &s1;

// Display / Debug trait object for s2
let w3: &dyn Display = &s2;
let w4: &dyn Debug = &s2;
```



极客时间

这样，当 trait object 调用 trait 的方法时，它会先从 vptr 中找到对应的 vtable，进而找到对应的方法来执行。

使用 trait object 的好处是，**当在某个上下文中需要满足某个 trait 的类型，且这样的类型可能有很多，当前上下文无法确定会得到哪一个类型时，我们可以用 trait object 来统一处理行为**。和泛型参数一样，trait object 也是一种延迟绑定，它让决策可以延迟到运行时，从而得到最大的灵活性。

当然，有得必有失。trait object 把决策延迟到运行时，带来的后果是执行效率的打折。在 Rust 里，函数或者方法的执行就是一次跳转指令，而 trait object 方法的执行还多一步，它涉及额外的内存访问，才能得到要跳转的位置再进行跳转，执行的效率要低一些。

此外，如果要把 trait object 作为返回值返回，或者要在线程间传递 trait object，都免不了使用 Box<dyn T> 或者 Arc<dyn T>，会带来额外的堆分配的开销。

好，对 trait object 的回顾就到这里，如果你对它还一知半解，请复习 13 讲，并且阅读 Rust book 里的：Using Trait Objects that allow for values of different types。接下来我们讲讲实战中 trait object 的主要使用场景。

在函数中使用 trait object

我们可以在函数的参数或者返回值中使用 trait object。

先来看在参数中使用 trait object。下面的代码构建了一个 Executor trait，并对比做静态分发的 impl Executor、做动态分发的 &dyn Executor 和 Box<dyn Executor> 这几种不同的参数的使用：

复制代码

```
use std::{error::Error, process::Command};

pub type BoxedError = Box<dyn Error + Send + Sync>;

pub trait Executor {
    fn run(&self) -> Result<Option<i32>, BoxedError>;
}

pub struct Shell<'a, 'b> {
    cmd: &'a str,
```

```
    args: &'b [&'a str],
}

impl<'a, 'b> Shell<'a, 'b> {
    pub fn new(cmd: &'a str, args: &'b [&'a str]) -> Self {
        Self { cmd, args }
    }
}

impl<'a, 'b> Executor for Shell<'a, 'b> {
    fn run(&self) -> Result<Option<i32>, BoxedError> {
        let output = Command::new(self.cmd).args(self.args).output()?;
        Ok(output.status.code())
    }
}

/// 使用泛型参数
pub fn execute_generics(cmd: &impl Executor) -> Result<Option<i32>, BoxedError
    cmd.run()
}

/// 使用 trait object: &dyn T
pub fn execute_trait_object(cmd: &dyn Executor) -> Result<Option<i32>, BoxedEr
    cmd.run()
}

/// 使用 trait object: Box<dyn T>
pub fn execute_boxed_trait_object(cmd: Box<dyn Executor>) -> Result<Option<i32
    cmd.run()
}

#[cfg(test)]
mod tests {
    use super::*;

    #[test]
    fn shell_shall_work() {
        let cmd = Shell::new("ls", &[]);
        let result = cmd.run().unwrap();
        assert_eq!(result, Some(0));
    }

    #[test]
    fn execute_shall_work() {
        let cmd = Shell::new("ls", &[]);

        let result = execute_generics(&cmd).unwrap();
        assert_eq!(result, Some(0));
        let result = execute_trait_object(&cmd).unwrap();
        assert_eq!(result, Some(0));
        let boxed = Box::new(cmd);
        let result = execute_boxed_trait_object(boxed).unwrap();
```

```
63          assert_eq!(result, Some(0));
64      }
65  }
```

其中，impl Executor 使用的是泛型参数的简化版本，而 &dyn Executor 和 Box<dyn Executor> 是 trait object，前者在栈上，后者分配在堆上。值得注意的是，分配在堆上的 trait object 也可以作为返回值返回，比如示例中的 Result<Option<i32>, BoxedError> 里使用了 trait object。

这里为了简化代码，我使用了 type 关键字创建了一个 **BoxedError 类型，是 Box<dyn Error + Send + Sync + 'static> 的别名，它是 Error trait 的 trait object**，除了要求类型实现了 Error trait 外，它还有额外的约束：类型必须满足 Send / Sync 这两个 trait。

在参数中使用 trait object 比较简单，再来看一个实战中的例子巩固一下：

复制代码

```
pub trait CookieStore: Send + Sync {
    fn set_cookies(
        &self,
        cookie_headers: &mut dyn Iterator<Item = &HeaderValue>,
        url: &Url
    );
    fn cookies(&self, url: &Url) -> Option<HeaderValue>;
}
```

这是我们之前使用过的 reqwest 库中的一个处理 CookieStore 的 trait。在 set_cookies 方法中使用了 &mut dyn Iterator 这样一个 trait object。

在函数返回值中使用

好，相信你对在参数中如何使用 trait object 已经没有什么问题了，我们再看返回值中使用 trait object，这是 trait object 使用频率比较高的场景。

之前已经出现过很多次了。比如上一讲已经详细介绍的，为何 KV server 里的 Storage trait 不能使用泛型参数来处理返回的 iterator，只能用 Box<dyn Iterator>：

复制代码

```
pub trait Storage: Send + Sync + 'static {
```

```
    ...
    /// 遍历 HashTable，返回 kv pair 的 Iterator
    fn get_iter(&self, table: &str) -> Result<Box<dyn Iterator<Item = Kvpair>>
}
```

再来看一些实战中会遇到的例子。

首先是 async_trait。它是一种特殊的 trait，方法中包含 async fn。目前 Rust 并不支持 trait 中使用 async fn，一个变通的方法是使用 async_trait 宏。

在 get hands dirty 系列中，我们就使用过 async trait。下面是第 6 讲SQL 查询工具数据源的获取中定义的 Fetch trait：

复制代码

```
// Rust 的 async trait 还没有稳定，可以用 async_trait 宏
#[async_trait]
pub trait Fetch {
    type Error;
    async fn fetch(&self) -> Result<String, Self::Error>;
}
```

这里宏展开后，类似于：

复制代码

```
pub trait Fetch {
    type Error;
    fn fetch<'a>(&'a self) ->
        Result<Pin<Box<dyn Future<Output = String> + Send + 'a>>, Self::Error>
}
```

它使用了 trait object 作为返回值。这样，不管 fetch() 的实现，返回什么样的 Future 类型，都可以被 trait object 统一起来，调用者只需要按照正常 Future 的接口使用即可。

我们再看一个 snow 下的 CryptoResolver 的例子：

复制代码

```
/// An object that resolves the providers of Noise crypto choices
```

```
pub trait CryptoResolver {
    /// Provide an implementation of the Random trait or None if none availabl
    fn resolve_rng(&self) -> Option<Box<dyn Random>>;

    /// Provide an implementation of the Dh trait for the given DHChoice or No
    fn resolve_dh(&self, choice: &DHChoice) -> Option<Box<dyn Dh>>;

    /// Provide an implementation of the Hash trait for the given HashChoice o
    fn resolve_hash(&self, choice: &HashChoice) -> Option<Box<dyn Hash>>;

    /// Provide an implementation of the Cipher trait for the given CipherChoi
    fn resolve_cipher(&self, choice: &CipherChoice) -> Option<Box<dyn Cipher>>

    /// Provide an implementation of the Kem trait for the given KemChoice or
    #[cfg(feature = "hfs")]
    fn resolve_kem(&self, _choice: &KemChoice) -> Option<Box<dyn Kem>> {
        None
    }
}
```

这是一个处理 Noise Protocol 使用何种加密算法的一个 trait。这个 trait 的每个方法，都返回一个 trait object，每个 trait object 都提供加密算法中所需要的不同的能力，比如随机数生成算法（Random）、DH 算法（Dh）、哈希算法（Hash）、对称加密算法（Cipher）和密钥封装算法（Kem）。

所有这些，都有一系列的具体的算法实现，通过 CryptoResolver trait，可以得到当前使用的某个具体算法的 trait object，**这样，在处理业务逻辑时，我们不用关心当前究竟使用了什么算法，就能根据这些 trait object 构筑相应的实现**，比如下面的 generate_keypair：

复制代码

```
pub fn generate_keypair(&self) -> Result<Keypair, Error> {
    // 拿到当前的随机数生成算法
    let mut rng = self.resolver.resolve_rng().ok_or(InitStage::GetRngImpl)?;
    // 拿到当前的 DH 算法
    let mut dh = self.resolver.resolve_dh(&self.params.dh).ok_or(InitStage::Ge
    let mut private = vec![0u8; dh.priv_len()];
    let mut public = vec![0u8; dh.pub_len()];
    // 使用随机数生成器 和 DH 生成密钥对
    dh.generate(&mut *rng);

    private.copy_from_slice(dh.privkey());
    public.copy_from_slice(dh.pubkey());

    Ok(Keypair { private, public })
}
```

说句题外话，如果你想更好地学习 trait 和 trait object 的使用，snow 是一个很好的学习资料。你可以顺着 CryptoResolver 梳理它用到的这几个主要的加密算法相关的 trait，看看别人是怎么定义 trait、如何把各个 trait 关联起来，以及最终如何把 trait 和核心数据结构联系起来的（小提示：Builder 以及 HandshakeState）。

在数据结构中使用 trait object

了解了在函数中是如何使用 trait object 的，接下来我们再看看在数据结构中，如何使用 trait object。

继续以 snow 的代码为例，看 HandshakeState 这个用于处理 Noise Protocol 握手协议的数据结构，用到了哪些 trait object（代码）：

复制代码

```
pub struct HandshakeState {
    pub(crate) rng:              Box<dyn Random>,
    pub(crate) symmetricstate:   SymmetricState,
    pub(crate) cipherstates:     CipherStates,
    pub(crate) s:                Toggle<Box<dyn Dh>>,
    pub(crate) e:                Toggle<Box<dyn Dh>>,
    pub(crate) fixed_ephemeral:  bool,
    pub(crate) rs:               Toggle<[u8; MAXDHLEN]>,
    pub(crate) re:               Toggle<[u8; MAXDHLEN]>,
    pub(crate) initiator:        bool,
    pub(crate) params:           NoiseParams,
    pub(crate) psks:             [Option<[u8; PSKLEN]>; 10],
    #[cfg(feature = "hfs")]
    pub(crate) kem:              Option<Box<dyn Kem>>,
    #[cfg(feature = "hfs")]
    pub(crate) kem_re:           Option<[u8; MAXKEMPUBLEN]>,
    pub(crate) my_turn:          bool,
    pub(crate) message_patterns: MessagePatterns,
    pub(crate) pattern_position: usize,
}
```

你不需要了解 Noise protocol，也能够大概可以明白这里 Random、Dh 以及 Kem 三个 trait object 的作用：它们为握手期间使用的加密协议提供最大的灵活性。

想想看，如果这里不用 trait object，这个数据结构该怎么处理？

可以用泛型参数，也就是说：

复制代码

```
pub struct HandshakeState<R, D, K>
where
    R: Random,
    D: Dh,
    K: Kem
{
  ...
}
```

这是我们大部分时候处理这样的数据结构的选择。但是，过多的泛型参数会带来两个问题：首先，代码实现过程中，所有涉及的接口都变得非常臃肿，你在使用 HandshakeState<R, D, K> 的任何地方，都必须带着这几个泛型参数以及它们的约束。其次，这些参数所有被使用到的情况，组合起来，会生成大量的代码。

而使用 trait object，我们在牺牲一点性能的前提下，消除了这些泛型参数，实现的代码更干净清爽，且代码只会有一份实现。

在数据结构中使用 trait object 还有一种很典型的场景是，**闭包**。

因为在 Rust 中，闭包都是以匿名类型的方式出现，我们无法直接在数据结构中使用其类型，只能用泛型参数。而对闭包使用泛型参数后，如果捕获的数据太大，可能造成数据结构本身太大；但有时，我们并不在意一点点性能损失，更愿意让代码处理起来更方便。

比如用于做 RBAC 的库 oso 里的 AttributeGetter，它包含了一个 Fn：

复制代码

```
#[derive(Clone)]
pub struct AttributeGetter(
    Arc<dyn Fn(&Instance, &mut Host) -> crate::Result<PolarValue> + Send + Syn
);
```

如果你对在 Rust 中如何实现 Python 的 getattr 感兴趣，可以看看 oso 的代码。

再比如做交互式 CLI 的 dialoguer 的 Input，它的 validator 就是一个 FnMut：

复制代码

```
pub struct Input<'a, T> {
    prompt: String,
    default: Option<T>,
    show_default: bool,
    initial_text: Option<String>,
    theme: &'a dyn Theme,
    permit_empty: bool,
    validator: Option<Box<dyn FnMut(&T) -> Option<String> + 'a>>,
    #[cfg(feature = "history")]
    history: Option<&'a mut dyn History<T>>,
}
```

用 trait object 处理 KV server 的 Service 结构

好，到这里用 trait object 做动态分发的几个场景我们就介绍完啦，来写段代码练习一下。

就用之前写的 KV server 的 Service 结构来趁热打铁，我们尝试对它做个处理，使其内部使用 trait object。

其实对于 KV server 而言，使用泛型是更好的选择，因为此处泛型并不会造成太多的复杂性，我们也不希望丢掉哪怕一点点性能。然而，出于学习的目的，我们可以看看如果 store 使用 trait object，代码会变成什么样子。你自己可以先尝试一下，再来看下面的示例（代码）：

复制代码

```
use std::{error::Error, sync::Arc};

// 定义类型，让 KV server 里的 trait 可以被编译通过
pub type KvError = Box<dyn Error + Send + Sync>;
pub struct Value(i32);
pub struct Kvpair(i32, i32);

/// 对存储的抽象，我们不关心数据存在哪儿，但需要定义外界如何和存储打交道
pub trait Storage: Send + Sync + 'static {
    fn get(&self, table: &str, key: &str) -> Result<Option<Value>, KvError>;
    fn set(&self, table: &str, key: String, value: Value) -> Result<Option<Val
    fn contains(&self, table: &str, key: &str) -> Result<bool, KvError>;
    fn del(&self, table: &str, key: &str) -> Result<Option<Value>, KvError>;
    fn get_all(&self, table: &str) -> Result<Vec<Kvpair>, KvError>;
```

```
    fn get_iter(&self, table: &str) -> Result<Box<dyn Iterator<Item = Kvpair>>
}

// 使用 trait object，不需要泛型参数，也不需要 ServiceInner 了
pub struct Service {
    pub store: Arc<dyn Storage>,
}

// impl 的代码略微简单一些
impl Service {
    pub fn new<S: Storage>(store: S) -> Self {
        Self {
            store: Arc::new(store),
        }
    }
}

// 实现 trait 时也不需要带着泛型参数
impl Clone for Service {
    fn clone(&self) -> Self {
        Self {
            store: Arc::clone(&self.store),
        }
    }
}
```

从这段代码中可以看到，通过牺牲一点性能，我们让代码整体撰写和使用起来方便了不少。

小结

无论是上一讲的泛型参数，还是今天的 trait object，都是 Rust 处理多态的手段。当系统需要使用多态来解决复杂多变的需求，让同一个接口可以展现不同的行为时，我们要决定究竟是编译时的静态分发更好，还是运行时的动态分发更好。

一般情况下，作为 Rust 开发者，我们不介意泛型参数带来的稍微复杂的代码结构，愿意用开发时的额外付出，换取运行时的高效；但**有时候，当泛型参数过多，导致代码出现了可读性问题，或者运行效率并不是主要矛盾的时候，我们可以通过使用 trait object 做动态分发，来降低代码的复杂度**。

具体看，在有些情况，我们不太容易使用泛型参数，比如希望函数返回某个 trait 的实现，或者数据结构中某些参数在运行时的组合过于复杂，比如上文提到的 HandshakeState，此时，使用 trait object 是更好的选择。

思考题

期中测试中我给出的 rgrep 的代码，如果把 StrategyFn 的接口改成使用 trait object：

复制代码

```
/// 定义类型，这样，在使用时可以简化复杂类型的书写
pub type StrategyFn = fn(&Path, &mut dyn BufRead, &Regex, &mut dyn Write) -> R
```

你能把实现部分修改，使测试通过么？对比修改前后的代码，你觉得对 rgrep，哪种实现更好？为什么？

今天你完成了 Rust 学习的第 24 次打卡。如果你觉得有收获，也欢迎分享给你身边的朋友，邀他一起讨论。我们下节课见。

延伸阅读

我们总说 trait object 性能会差一些，因为需要从 vtable 中额外加载对应的方法的地址，才能跳转执行。那么这个性能差异究竟有多大呢？网上有人说调用 trait object 的方法，性能会比直接调用类型的方法差一个数量级，真的么？

我用 criterion 做了一个简单的测试，测试的 trait 使用的就是我们这一讲使用的 Executor trait。测试代码如下（你可以访问 GitHub repo 中这一讲的代码）：

复制代码

```
use advanced_trait_objects::{
    execute_boxed_trait_object, execute_generics, execute_trait_object, Shell,
};
use criterion::{black_box, criterion_group, criterion_main, Criterion};

pub fn generics_benchmark(c: &mut Criterion) {
    c.bench_function("generics", |b| {
        b.iter(|| {
            let cmd = Shell::new("ls", &[]);
            execute_generics(black_box(&cmd)).unwrap();
        })
    });
}

pub fn trait_object_benchmark(c: &mut Criterion) {
    c.bench_function("trait object", |b| {
        b.iter(|| {
```

```
            let cmd = Shell::new("ls", &[]);
            execute_trait_object(black_box(&cmd)).unwrap();
        })
    });
}

pub fn boxed_object_benchmark(c: &mut Criterion) {
    c.bench_function("boxed object", |b| {
        b.iter(|| {
            let cmd = Box::new(Shell::new("ls", &[]));
            execute_boxed_trait_object(black_box(cmd)).unwrap();
        })
    });
}

criterion_group!(
    benches,
    generics_benchmark,
    trait_object_benchmark,
    boxed_object_benchmark
);
criterion_main!(benches);
```

为了不让实现本身干扰接口调用的速度，我们在 trait 的方法中什么也不做，直接返回：

复制代码

```
impl<'a, 'b> Executor for Shell<'a, 'b> {
    fn run(&self) -> Result<Option<i32>, BoxedError> {
        // let output = Command::new(self.cmd).args(self.args).output()?;
        // Ok(output.status.code())
        Ok(Some(0))
    }
}
```

测试结果如下：

复制代码

```
generics                time:   [3.0995 ns 3.1549 ns 3.2172 ns]
                        change: [-96.890% -96.810% -96.732%] (p = 0.00 < 0.05)
                        Performance has improved.
Found 5 outliers among 100 measurements (5.00%)
  4 (4.00%) high mild
  1 (1.00%) high severe

trait object            time:   [4.0348 ns 4.0934 ns 4.1552 ns]
```

```
                        change: [-96.024% -95.893% -95.753%] (p = 0.00 < 0.05)
                        Performance has improved.
Found 8 outliers among 100 measurements (8.00%)
  3 (3.00%) high mild
  5 (5.00%) high severe

boxed object            time:   [65.240 ns 66.473 ns 67.777 ns]
                        change: [-67.403% -66.462% -65.530%] (p = 0.00 < 0.05)
                        Performance has improved.
Found 2 outliers among 100 measurements (2.00%)
```

可以看到，使用泛型做静态分发最快，平均 3.15ns；使用 &dyn Executor 平均速度 4.09ns，要慢 30%；而使用 Box<dyn Executor> 平均速度 66.47ns，慢了足足 20 倍。可见，额外的内存访问并不是 trait object 的效率杀手，有些场景下为了使用 trait object 不得不做的额外的堆内存分配，才是主要的效率杀手。

那么，这个性能差异重要么？

在回答这个问题之前，我们把 run() 方法改回来：

复制代码

```
impl<'a, 'b> Executor for Shell<'a, 'b> {
    fn run(&self) -> Result<Option<i32>, BoxedError> {
        let output = Command::new(self.cmd).args(self.args).output()?;
        Ok(output.status.code())
    }
}
```

我们知道 Command 的执行速度比较慢，但是想再看看，对于执行效率低的方法，这个性能差异是否重要。

新的测试结果不出所料：

复制代码

```
generics                time:   [4.6901 ms 4.7267 ms 4.7678 ms]
                        change: [+145694872% +148496855% +151187366%] (p = 0.0
                        Performance has regressed.
Found 7 outliers among 100 measurements (7.00%)
  3 (3.00%) high mild
  4 (4.00%) high severe

```

```
trait object            time:   [4.7452 ms 4.7912 ms 4.8438 ms]
                        change: [+109643581% +113478268% +116908330%] (p = 0.0
                        Performance has regressed.
Found 7 outliers among 100 measurements (7.00%)
  4 (4.00%) high mild
  3 (3.00%) high severe

boxed object            time:   [4.7867 ms 4.8336 ms 4.8874 ms]
                        change: [+6935303% +7085465% +7238819%] (p = 0.00 < 0.
                        Performance has regressed.
Found 8 outliers among 100 measurements (8.00%)
  4 (4.00%) high mild
  4 (4.00%) high severe
```

因为执行一个 Shell 命令的效率实在太低，到毫秒的量级，虽然 generics 依然最快，但使用 &dyn Executor 和 Box<dyn executor> 也不过只比它慢了 1% 和 2%。

所以，如果是那种执行效率在数百纳秒以内的函数，是否使用 trait object，尤其是 boxed trait object，性能差别会比较明显；但当函数本身的执行需要数微秒到数百微秒时，性能差别就很小了；到了毫秒的量级，性能的差别几乎无关紧要。

总的来说，大部分情况，我们在撰写代码的时候，不必太在意 trait object 的性能问题。如果你实在在意关键路径上 trait object 的性能，那么先尝试看能不能不要做额外的堆内存分配。

上一篇 23 | 类型系统：如何在实战中使用泛型编程？

下一篇 25 | 类型系统：如何围绕 Trait 来设计和架构系统？

精选留言 (3)

写留言

Marvichov
2021-10-23

我自己的机器, 用一个unit type来排除struct initialization带来的cost:

```
struct Dummy();
...
```

展开

作者回复: 有意思，可能 box 还是没有被完全优化掉？在 ns 的量级，多几条指令可能都会有很大影响。

罗杰
2021-10-21

最近在优化 Go 写的即时对战服务，的确堆内存的分配是消耗性能的一大杀手，泛型的消耗相比堆内存的消耗，应该是可以忽略的。但在高频次的调用上，如果可以优化掉不使用泛型，代码理解与维护上没有问题，也还是尽可能避免使用泛型吧。

展开

作者回复: 我的建议是库的代码，尤其是处在核心路径上的库，只要泛型不是太过于干扰可读性，能省内存，能节约 CPU cycle 就尽量节约；应用的代码可以写的省心一些。

D. D

2021-10-20

实现部分需要修改的并不多，把StrategyFn的泛型参数去掉，把reader声明为可变，并在调用函数时传入BufReader的可变引用即可。
我个人觉得修改之后没有带来什么好处，之前的泛型参数并不复杂，而且反而觉得实现时的 Read Write trait bounds让代码读起来很清晰 😂

展开

作者回复: 嗯，是的。