Liskov 替换原则，是面向对象设计五大原则SOLID的第三个原则。里氏替换原则（Liskov Substitution principle）是对[子类型](https://zh.wikipedia.org/wiki/%25E5%25AD%2590%25E7%25B1%25BB%25E5%259E%258B)的特别定义。它由[芭芭拉·利斯科夫](https://zh.wikipedia.org/wiki/%25E8%258A%25AD%25E8%258A%25AD%25E6%258B%2589%25C2%25B7%25E5%2588%25A9%25E6%2596%25AF%25E7%25A7%2591%25E5%25A4%25AB)（Barbara Liskov）在1987年在一次会议上名为“数据的抽象与层次”的演说中首先提出。

今天咱们结合里氏替换原则，来具体讨论一下其在Java，Scala这两大语言的泛型设计里面起到的举足轻重的作用。

**概念引入**

在此之前，有必要让我们重温一下几个概念，里氏替换原则(Liskov Substitution Principle)和变型(Variance).

里氏替换原则说，如果类型A是类型B的子类，这里我们用A <: B来表示, 那么基类B的对象可以被子类A的对象替换而不改变任何程序的期望特性。

变型(Variance)包含三个概念，协变(Covariance)，逆变(Contravariance)和不变(Invariance)

如果A <: B，也就是说A是B的子类, 而且类T[A] <: T[B]，那么类T就是协变的。譬如在Java中， Interger是Number 的子类，同时Integer[] 数组是Number[]数组的子类，所以Java中数组是协变的；而如果T[B] :< T[A], 那么类型T就是逆变的；如果T[A] 和 T[B] 没有关系，那么T就是不变的。

为了符合里氏替换原则，有几条规则在现代的面向对象编程语言设计必须遵守，这些规定分为两类，一类是合同原则，合同原则讨论了子类和父类之间必须遵守的合同和限制, 第二类，也是我们今天要讨论的，变型原则，此原则对于函数的签名上了三个要求：

1. 函数的输入参数是逆变的
2. 函数的返回参数是协变的
3. 函数的子类函数不可以抛出新的异常，除非被抛出的异常是基类函数抛出异常的子类

三个要求和我们的泛型编程有什么关系？那就先从Java泛型来进行分析。

**Java泛型**

之前提到，在Java语言里面数组Array是协变的，协变就意味着我们可以很好的利用面向对象的参数多态(parametric polymorphism), 但是同时我们发现，协变的Array会给我造成不少麻烦。譬如看如下程序：

Integer[] ints = {1,3,4,6,2};

Object[] objs = ints;

objs[0] = "1";

objs[1] = true;

objs[2] = new Object();

这段Java代码是完全可以编译成功，但是一旦这样代码进入运行阶段所能造成的问题是难以估量的。为什么，因为这样的协变数组是类型不安全的。

既然Java的Array已经是协变了，已经没有回头路了，我们怎么可以既可以使用参数化类型(parameterized types)，又能达到类型安全呢？于是Java 5 给了我们泛型Generics. 在引入泛型以后，Collection包里面的数据类型就都可以使用参数化类型，太好了，这样我们的写代码时候就不用担心会有人在List，Set，Queue，Map里面乱放东西了，从此高枕无忧。

但是，你是不是感觉少了点什么？少了什么呢？对的，就是多态，OOP最重要的是什么，是多态。由于Java参数化类型是不变的(Invariant)，就是说List<String> 和 List<Object>没有任何关系，即使String是Object的子类。这里所说的多态不是子类继承父类的多态，而是参数多态parametric polymorphism。在Java中有参数多态吗？有，参数多态是通过泛型的上下界和通配符来实现的。

**Java泛型的上下界和通配符**

上界通常我们使用关键词extends, 譬如

public void findNumber(List<? extends Number> numbers) …

假设我们有一个List<Integer> integers，由于Integer:<Number，这样我们就可以把integers这个list传给上述方法，也可以放List<Long>等，实现了参数多态。你会注意到，上界其实就是我们之前所提到的协变。

下界我们使用关键词super，譬如

public void addToIntegers(List<? super Integer> integers)…

在这里，我们可以把List<Number>做传参，因为Number :> Integer,这样我们同样实现了参数多态，同样我们可以看到定义下界给予了List逆变的功能。

这时候你可能会问，那这样，我们不就是会遇到和Array一样的类型安全问题了吗？其实不会，Java在编译阶段就会给予错误提示。譬如下面代码

public void findNumber(List<? extends Number> numbers) {

Integer i = 1;

numbers.add(i); // compilation error

numbers.add(null);

numbers.forEach(System.out::println);

}

第三行代码，当我们要numbers加一个i元素时，或者说，当我们要mutate这个List的时候，编译出错。因为编译器并不能确定，传入的List是什么具体类型，可以是Integer，可以是Number，也可以是Long。这样就防止类型安全问题发生。但是我们看到当我们插入null时，编译成功了，为什么？因为null类型在java的类型系统里面是最低的，null是任何类的子类。

同样，当我们使用super时，为了达到类型安全，编译器会给我们做什么限制呢，如下代码所示：

public void addToIntegers(List<? super Integer> integers){

Integer i = 1;

integers.add(i);

for(Object obj : integers) {...}

for(Integer obj : integers) {...} // compilation error

}

当我们想按照Integer取出元素的时候，编译错误。此时编译器并不确定传入的List是具体那个类型，所以会自动按照最安全类型去Cast，我们这边定义了下界，而没有定义上界，（Java里面不能同时定义上下界,Scala可以）所以编译器直接按照最高对象Object返回给我们，这就是为什么第五行不能编译通过。

总而言之，当我们定义上界的时候，我们只能从List里面取东西，也就是Get；当我们定义下界的时候，我们只能往List里面加东西，也就是put，当我们取的时候，我们获得的类型是Object。

这就是传说中的Get And Put Principle，这个原则在Java泛型编程的时候是必须要注意和遵守的。但是我认为这并不是一个原则，而是一个方法让我们去克服Java泛型设计上的缺陷。

仔细看一下，就会发现一些不够优雅的地方。其一，根据里氏替换原则，方法的传入参数应该是逆变的，而在第一个例子，我们看到，Java并不阻止我们把协变类型作为传入参数；其二，方法的返回参数应该是协变的，同样，Java也不会阻止我们把逆变类型作为方法的返回参数。

同样我们看一下当我们创建自己的泛型,把协变类型作为方法的传入参数时候，Java编译器同样也没有阻止我们。

class BirdContainer<T extends Bird> {

private T bird;

public T process(T bird){

//...

return bird;

}

}

**Scala 参数化类型**

上述提到的Java泛型的问题，在Scala的参数化类型中有了很好的提高。在此值得提一下，Scala中所谓的的参数化类型即Java中的泛型。

首先，数组在scala中是不变的(Invariant)，在编译阶段，Scala编译器会给出错误提示，如下代码所示：

scala> var ints = Array(1,2,3)

scala> var objs:Array[AnyVal] = ints

<console>:12: error: type mismatch;

found : Array[Int]

required: Array[AnyVal]

Note: Int <: AnyVal, but class Array is invariant in type T.

当我们尝试吧一个Int数据复制给一个AnyVal类型数据时候，编译器告诉我们说Int 是AnyVal的子类，但是Array类是不变的。所以我们的赋值是不能编译成功的。这样就避免我们在Java会遇到的问题。

而至于List，在Scala中是协变的covariant，又由于List是immutable不可变的，由此达到了类型安全。我们接下来来看一下，一个不可变的协变的List用例。

我们先创建一个Int类型的listInt， 然后在这个listInt插入一个char类型的，这时候注意到，插入操作和Java的List不同的这里返回一个新的List，而且这个list的类型因插入的数据类型变化而变化。譬如这里我们插入一个char类型，返回的是一个AnyVal的List，我们且命名listAnyVal。因为list是不可变的，所以，原来的那个listInt并没有被修改。很好的在协变的条件下有可以保证List的类型安全。我们继续在listAnyVal插入一个String类型的数据，同样这时候返回一个新的List，我们发现这个返回的List的数据类型是Any。

val listInt : List[Int] = List(1,2,3)

val listAnyVal : List[AnyVal] = listInt.::('a’)

val listAny : List[Any] = listAnyVal.::("string")

我们再仔细看一下每次插入操作后，list数据返回类型会发现，AnyVal是Int和Char类型共有的超类，而Any是Int，Char和String类型所共有的超类。那么Scala编译器是怎么来知道改怎么返回类型的呢？在深入了解之前，需要先了解一下Scala相对于Java所不同的的申明端变型(declaration-site variance)。

**Scala**申明端变型

这是Scala相对于Java的泛型有很大的提高之处。

Scala即支持Java一样的使用端变型(use-site variance)，只要把<? extends T> 改成 [\_ <: T]，Scala同时支持申明端变型。顾名思义，类型的协变特性，在类型的申明阶段就已经定义了。你只需要把+符放在类型参数前面，申明此类型是协变类型参数，或者使用-符合，申明是逆变类型参数；如果什么都不放，就和Java一样，是不变的类型化参数。

譬如如下的Scala的List

sealed abstract class List[+A] extends AbstractSeq[A] …

我们看到，这样，List就是协变了。

如果我们需要定义和使用自己的协变类型，可以先在定义阶段申明其协变类型，然后直接使用：

class CovariantFoo[+T] { ... }

val covariantFoo = new CovariantFoo[Int]()

而同样的操作在Java需要先定义其泛型，然后在使用的时候申明其协变特性：

public class Foo<T> { ... }

Foo<? extends Integer> covariantFoo = new Foo<Integer>();

那么差别在哪里？差别在于，申明端的协变把设计的任务给了API设计者的一边，而使用端的协变，把设计重任放到了API使用者的那边，当然如果使用者可以很好的理解变型，做很好的设计的话，两者一样好。

但是，就像Scala的创造者Martin Odersky在Programming in Scala书里说的：

This observation is also the main reason that Scala prefers declaration-site variance over use-site variance as it is found in Java's wildcards. With use-site variance, you are on your own designing a class. It will be the clients of the class that need to put in the wildcards, and if they get it wrong, some important instance methods will no longer be applicable. Variance being a tricky business, users usually get it wrong, and they come away thinking that wildcards and generics are overly complicated. With definition-side variance, you express your intent to the compiler, and the compiler will double check that the methods you want available will indeed be available.

简而言之，变型并不是一个简单的任务，使用者通常会用错，他们也通常会认为通配符和泛型太过于复杂。而申明式协变逆变的情况下，你把意图告诉给编译器，而编译器就会做很好的检查确认没有出错。

那么Scala编译器具体做了什么呢？Scala编译器基本就做了咱们文章一开始提到的三个原则，由于第三个原则在Java中也同样做到，而且不在我们讨论的范围之内。在此我们主要讨论前两个原则，即函数的输入参数是逆变的，函数的返回参数是协变的。

为了检查一下scala编译器到底是不是这么工作的，我们来看一下如下一段代码:

trait Container[+T] {

def isEmpty : Boolean

def head : T

def tail : Container[T]

def prepend (elem : T) : Container[T]

}

为了不和List混淆，我们且命名之为Container，其功能和List类似，我们使用+符号，把他定义为协变类型。他有四个方法，isEmpty检查是否为空，head为当前的T，tail为连在head上的Container，最后一个方法是插入一个T类型，返回一个Container。但是我们会看到，此时编译器报错了，错误为：Covariant type T occurs in the contra variant position in type T of value elem. 基本就是说，在类型T的elem位置上面，编译器期望是一个逆变类型，而当前T类型是协变的。

这就我们上述的第一原则，由于elem这个位置是方法的输入参数，输入参数必须是逆变的。同样道理，在一个方法的返回位置，你如果放一个逆变类型，编译器也会同样报错。

是的，Java编译器没有做到的，Scala编译器做到了。

那么我们怎么在Scala来实现这个prepend方法，由不失去协变特性呢？像Java一样，Scala也可以使用上下界。

trait Container[+T] {

def isEmpty : Boolean

def head : T

def tail : Container[T]

def prepend [U >: T] (elem : U) : Container[U]

}

在此，prepend方法接受一个参数化类型，这个类型是T的超类，也就是说我们定义了一个下限。而根据前面Java的例子我们知道，下限就是逆变，方法输入参数逆变是符合里氏替换原则的，所以编译通过。这时候此方法接受一个T类型的超类，而且返回超类的参数化类型，即Container[U]。

借此机会，结合List的定义和List的插入方法::的实现，我们来理解一下之前看到的，为什么返回类型都是原来List类型，和插入类型的共有超类，如下所示：

sealed abstract class List[+A] extends AbstractSeq[A] …

def ::[B >: A] (x: B): List[B] =

new scala.collection.immutable.::(x, this)

我们假设，我们有一个List[Int]，此时A就是Int类型，这是，我们对此List做一个插入操作，插入一个Char类型，注意，这个时候，Char并不足以替代B，因为插入方法申明说B必须是A的超类，也就是Int的超类，返回也是返回一个List[B]，那么这是编译器就会在类型系统中找到一个最低共有超类，那就是AnyVal。也就为什么，我们最终会得到一个List[AnyVal]，值得注意的是，返回的list同样是一个immutable的list。

至此，我们讨论的变型都是在面向对象范围内的。而Scala作为一个方程式编程语言，也是一个纯粹的面向对象语言，也就是说，在Scala，方程也是一个对象，既然是对象，就可以有超类和子类。那么接下来，我们来看一下变型在方程作为对象中的扩展。

**方程的子类与变型**

熟悉Java的Lambda编程的都知道，lambda只不过是一个对于Functional Interface的实现，是一个匿名的方程，类似的在scala里面也有lambda表达式，与Java不同的是Scala的lambda表达式用符号=>表示，每一个表达式是一个trait Function的实现，根据表达式的参数个数不同而不同；譬如方程类型Int => Int，用lambda表达式是 (x: Int) => x + 1， 其实是如下代码的缩写：

new Function1[Int, Int] {

def apply(x: Int): Int = x + 1

}

而Function1的定义如下：

trait Function1[-S, +T] extends scala.AnyRef { def apply(x: S): T }

可以看到Function1是一个参数化类型的trait，继承超类AnyRef，其定义最大化的遵守了里氏替换原则，为什么？他有两个参数，S和T，根据其符号，我们知道S是逆变，T是协变的。Function1只有一个抽象方法apply，apply传入参数是S，返回类型是T。

那么function1作为一个对象，其子类型在高阶函数的情况下是怎么一个行为呢？

假设我们有一个高阶函数func

scala> def func(f:Null => AnyRef) = 1

func: (f: Null => AnyRef)Int

此高阶函数传入参数是一个函数f，这个函数的类型是 Null => AnyRef，其返回一个Int类型。根据里氏替换原则，任何术语类型Null => AnyRef的子类型函数都可以传给高阶函数func。

譬如f1, 类型是 Null => List[Int]

scala> val f1 = (n:Null) => List(1)

f1: Null => List[Int] = $$Lambda$1142/943079062@35c95869

scala> var i1 = func(f1)

i1: Int = 1

为符合里氏替换原则，我们需要传入参数逆变，返回参数协变，对此我们对f1类型表达式左右参数相对于类型 Null => AnyRef分别做一下比较。

传入参数都是Null， Null可以是其本身的超类，所以传入参数逆变，符合规则；返回参数List是AnyRef的子类，即List:<AnyRef，所以返回参数协变，也符合规则，所以上述代码能编译通过。

按照同样的推理，f2: String => String也能被传给高阶方程：

scala> val f2 = (n:String) => "hello world"

f2: String => String = $$Lambda$1143/1534507153@611a91df

scala> val i2 = func(f2)

i2: Int = 1

但是，但尝试把函数f3:Int => String传给func的时候，编译出错：

scala> var f3 = (n:Int) => "hello world"

f3: Int => String = $$Lambda$1145/555754759@62878d7c

scala> val i3 = func(f3)

<console>:13: error: type mismatch;

found : Int => String

required: Null => AnyRef

val i3 = func(f3)

这里编译器报了类型匹配错误，因为在Scala类型系统里，Int并不是Null的超类型，传入参数逆变条件不符合，因此里氏替换原则不能达到，编译出错。这在很大程度上帮助开发人员能够在更早的阶段发现问题。