

39-综合实现（二）：如何实现函数式编程？

你好，我是宫文学。

近些年，函数式编程正在复兴。除了一些纯函数式编程语言，比如Lisp、Clojure、Erlang等，众多的主流编程语言，如Python、JavaScript、Go甚至Java，它们都有对函数式编程的支持。

你应该会发现，现在人们对于函数式编程的讨论有很多，比如争论函数式编程和面向对象编程到底哪个更强，在语言里提供混合的编程模式到底对不对等等。

这些论战一时半会儿很难停息。不过我们的这一讲，不会涉及这些有争议的话题，而是试图从编译技术的角度，来探讨如何支持函数式编程，包括如何让函数作为一等公民、如何针对函数式编程的特点做优化、如何处理不变性，等等。通过函数式编程这个综合的主题，我们也再一次看看，如何在实现一门语言时综合运用编译原理的各种知识点，同时在这个探究的过程中，也会加深你对函数式编程语言的理解。

好，我们先来简单了解一下函数式编程的特点。

函数式编程的特点

我想，你心里可能多多少少都会有一点疑问，为什么函数式编程开始变得流行了呢？为什么我在开篇的时候，说函数式编程正在“复兴”，而没有说正在兴起？为什么围绕函数式编程会有那么多的争论？

要回答这几个问题，我会建议你先去了解一点历史。

我们都知道，计算机发展历史上有一个重要的人物是阿兰·图灵（Alan Turing）。他在1936年提出了一种叫做**图灵机**的抽象模型，用来表达所有的计算。图灵机有一个无限长的纸带，还有一个读写头，能够读写数据并根据规则左右移动。这种计算过程跟我们在现代的计算机中，用一条条指令驱动计算机运行的方式很相似。

不过，计算模型其实不仅仅可以用图灵机来表达。早在图灵机出现之前，阿隆佐·邱奇（Alonzo Church）就提出了一套Lambda演算的模型。并且，计算机科学领域中的很多人，其实都认为用Lambda演算来分析可计算性、计算复杂性，以及用来编程，会比采用图灵机模型更加简洁。而**Lambda演算，就是函数式编程的数学基础**。

补充：实际上，邱奇是图灵的导师。当年图灵发表他的论文的时候，编辑看不懂，所以找邱奇帮忙，并推荐图灵成为他的学生，图灵机这个词也是邱奇起的。所以师生二人，对计算机科学的发展都做出了很大的贡献。

因为有Lambda演算的数学背景，所以函数式编程范式的历史很早。上世纪50年代出现的Lisp语言，就是函数式编程语言。Lisp的发明人约翰·麦卡锡（John McCarthy）博士，是一位数学博士。所以你用Lisp语言和其他函数式编程语言的时候，都会感觉到有一种数学思维的味道。

也正因如此，与函数式编程有关的理论和术语其实是有点抽象的，比如函子（Functor）、单子（Monad）、柯里化（Currying）等。当然，对它们的深入研究不是我们这门课的任务。这里我想带你先绕过这些理论和术语，从我们日常的编程经验出发，来回顾一下函数式编程的特点，反倒更容易一些。

我前面也说过，目前流行的很多语言，虽然不是纯粹的函数式编程语言，但多多少少都提供了对函数式编程

的一些支持，比如JavaScript、Python和Go等。就连Java语言，也在Java8中加入了对函数式编程的支持，很多同学可能已经尝试过了。

我们使用函数式编程最多的场景，恐怕是对集合的处理了。举个例子，假设你有一个JavaScript的数组a，你想基于这个数组计算出另一个数组b，其中b的每个元素是a中对应元素的平方。如果用普通的方式写程序，你可能会用一个循环语句，遍历数组a，然后针对每个数组元素做处理：

```
var b = [];  
for (var i = 0; i < a.length; i++){ //遍历数组a  
    b.push(a[i]*a[i]);           //把计算结果加到数组b中  
}
```

不过你也可以采用更简单的实现方法。

这次我们使用了map方法，并给它传了一个回调函数。map方法会针对数组的每个元素执行这个回调函数，并把计算结果组合成一个新的数组。

```
function sq(item){           //计算平方值的函数  
    return item*item;  
}  
var b = a.map(sq);           //把函数作为参数传递
```

它还可以写成一种更简化的方式，也就是Lambda表达式的格式：

```
var b = a.map(item=>item*item);
```

通过这个简单的例子，我们可以体会出函数式编程的几个特点：

1.函数作为一等公民

也就是说，函数可以像一个数值一样，被赋给变量，也可以作为函数参数。如果一个函数能够接受其他函数作为参数，或者能够把一个函数作为返回值，那么它就是**高阶函数**。像示例程序中的map就是高阶函数。

那函数式编程语言的优势来自于哪里呢？就在于它可以像数学那样使用函数和变量，这会让软件的结构变得特别简单、清晰，运行结果可预测，不容易出错。

根据这个特点，我们先来看看函数式编程语言中的函数，跟其他编程语言中的函数有什么不同。

2.纯函数（Pure Function）

在函数式编程里面，有一个概念叫做纯函数。纯函数是这样一种函数，即**相同的输入，永远会得到相同的输出**。

其实你对纯函数应该并不陌生。你在中学时学到的函数，就是纯函数。比如对于 $f(x)=ax+b$ ，对于同样的 x ，所得到的函数值肯定是一样的。所以说，纯函数不应该算是个新概念，而是可以回归到你在学习计算机语言之前的那个旧概念。

在C语言、Java等语言当中，由于函数或方法里面可以引用外面的变量，比如全局变量、对象的成员变量，使得其返回值与这些变量有关。因此，如果有其他软件模块修改了这些变量的值，那么该函数或方法的返回值也会受到影响。这就会让多个模块之间基于共享的变量耦合在一起，这种耦合也使得软件模块的依赖关系变得复杂、隐秘，容易出错，牵一发而动全身。这也是像面向对象语言这些命令式编程语言最令人诟病的一点。

而对于纯函数来说，它不依赖外部的变量，这个叫做**引用透明（Reference Transparency）**。纯函数的这种“靠谱”、可预测的特征，就给我们的编程工作带来了很多的好处。

举个例子。既然函数的值只依赖输入，那么就跟调用时间无关了。假设有一个函数式 $g(f(x))$ ，如果按照传统的求值习惯，我们应该先把 $f(x)$ 的值求出来，再传递给 $g()$ 。但如果 $f(x)$ 是纯函数，那么早求值和晚求值其实是无所谓，所以我们可以**延迟求值（Lazy Evaluation）**。

延迟求值有很大的好处。比如，在下面的伪代码中，`unless`是一个函数， $f(x)$ 是传给它的一个参数。在函数式编程语言中，只有当`condition`为真时，才去实际对 $f(x)$ 求值。这实际上就降低了工作量。

```
//在满足条件时，执行f(x)
unless(condition, f(x));

//伪代码
int unless(bool condition, f(x)){
    if (condition)
        return f(x);
}
```

再回到纯函数。我说纯函数的输出仅依赖输入，有一点需要说明，就是函数只有返回值这一种输出，没有其他的输出。换句话说，**纯函数没有副作用（Side Effect）**。

什么是副作用呢？简单地说，就是函数在运行过程中影响了外界环境。比如，修改了一个全局变量或者是对象的属性、往文件里写入内容、往屏幕上打印一行字、往数据库插入一条记录、做了一次网络请求，等等。也就是说，纯函数要求程序除了计算，其他的事情都不要做。

如果函数有副作用的话，那么我们前面说的时间无关性就被破坏了。比如说，原来`a`函数是在屏幕上打印“欢迎：”，`b`函数是屏幕输出你的名字，最后形成“欢迎：XXX”。那么`a`和`b`的前后顺序就不能颠倒。

你可能会说，一个有用的程序，哪能没有副作用呀。你说得对。在函数式编程里，程序会尽量把产生副作用的函数放在调用的外层，而完成内部功能的大部分函数，都保持是纯函数。比如，最外层的函数接受网络请求，并对客户端返回结果，它是有副作用的。而程序所使用的其他函数，都没有副作用。

纯函数的功能是如此地简单纯粹，以至于它还能继续带来一些好处。比如说，像Erlang这样的语言，可以在运行时给某些函数升级，而不用重启整个系统。为什么呢？因为这些升级后的函数，针对相同的输入，程序得到的结果是一样的，那么对这个函数的使用者来说，就没有任何影响。这也是用Erlang写的系统会具有很

高的可靠性的原因之一。

不过，函数式编程语言里使用的也不全都是纯函数，比如有的函数要做一些IO操作。另外，闭包，是函数引用了词法作用域中的自由变量而引起的，所以也不是纯函数。

总结起来，在函数式编程中，会希望函数像数学中的函数那样纯粹，即**不依赖外部（引用透明），也不改变外部（无副作用），从而带来计算时间、运行时替换等灵活性的优势。**

好，说完了函数的不同，我们再来看看函数式编程语言里使用变量跟其他语言的不同。

3.不变性 (Immutability)

我们都知道，在数学里面，当我们用到x和y这样的变量的时候，它所代表的值在计算过程中是不变的。

没错，这也是函数式编程的一个重要原则，**不变性**。它的意思是，程序会根据需要来创建对象并使用它们，但不会去修改对象的状态。如果有需要修改对象状态的情况，那么去创建一个新对象就好了。

在前面的示例程序中，map函数返回了一个新的数组，而原来的数组保持不变。这就体现了不变性的特点。

不变性也会带来巨大的好处。比如说，由于函数不会修改对象的状态，所以就不存在并发程序中的竞争情况，进而也就不需要采用锁的机制。所以说，**函数式编程更适合编写并发程序**。这个优势，也是导致这几年函数式编程复兴的重要原因。

好，那么最后，我们再来注意一下函数式编程语言在编程风格上的不同。

4.声明式 (Declarative) 的编程风格

在计算机语言中，实现编程的方式主要有几种。

第一种实现方式，我们会一步步告诉计算机该去怎么做计算：循环访问a的元素，计算元素的平方值，并加到b中。这种编程风格叫做**命令式 (Imperative) 编程**，即命令计算机按照你要求的步骤去做。命令式编程风格植根于现代计算机的结构，因为机器指令本质上就是命令式的。这也是图灵机模型的特点。

而第二种实现方式叫做**声明式 (Declarative) 编程**。这种编程风格，会要求计算机给出你想要的结果，而不关心过程。比如在前面的示例程序中，你关心的是对数组中的每个元素计算出平方值。至于具体的处理步骤，是对数组a的元素顺序计算，还是倒序计算，你并不关心。

声明式编程风格的另一个体现，是递归函数的大量使用。这是因为我们描述一个计算逻辑的时候，用递归的方式表达通常会更简洁。

举个例子。你可能知道，斐波纳契 (Fibonacci) 数列中的每个数，是前两个数字的和。这个表达方式就是递归式的。写成公式就是： $Fibonacci(n) = Fibonacci(n-1) + Fibonacci(n-2)$ 。这个公式与我们用自然语言的表达完全同构，也更容易理解。

我把计算斐波纳契数列的程序用Erlang这种函数式语言来写一下，你可以进一步体会到声明式编程的那种简洁和直观的特点：

```
%% 计算斐波那契的第N个元素
fibo(1) -> 1;                %%第一个元素是1
fibo(2) -> 1;                %%第二个元素也是1
fibo(N) -> fibo(N-1) + fibo(N-2). %%递归
```

好了，现在我们已经了解了函数式编程的一些关键特征。它的总体思想呢，就是像数学那样去使用函数和值，使可变动部分最小化，让软件的结构变得简单、可预测，从而获得支持并发、更简洁的表达等优势。那么下面，我们就一起来看看如何结合编译原理的相关知识点，来实现函数式编程的这些特征。

函数式编程语言的编译和实现

为了实现函数式语言，我们在编译期和运行时都要做很多工作。比如，要在编译器前端做分析和各种语义的检查；要以合适的方式在程序内部表示一个函数；要针对函数式编程的特点做特别的优化，等等。接下来我们就从编译器的前端工作开始学起。

编译器前端的工作

函数式编程语言，在编译器的前端也一样要做很多的语法分析和语义分析工作。

你应该知道，语言的设计者，需要设计出**如何声明一个函数**。像是JavaScript语言会用function关键字，Go语言用func关键字，Rust语言用的是fn关键字，而C语言根本不需要一个关键字来标识一个函数的定义；另外，如何声明函数的参数和返回值也会使用不同的语法。编译器都要能够正确地识别出来。

语义分析的工作则更多，包括：

1. **符号表和引用消解**：当声明一个函数时，要把它加入到符号表。而当程序中用到某个函数的时候，要找到该函数的声明。
2. **类型检查和推导**：既然函数可以被当做一个值使用，那么它一定也是有类型的，也要进行类型检查和推导。比如，在程序的某个地方只能接受返回值为int，有一个参数为String的函数，那么就需要被使用的函数是否满足这个要求。关于函数的类型，一会儿我还会展开讲解。
3. **语法糖处理**：在函数式编程中经常会使用一些语法糖。最常见的语法糖就是Lambda表达式，Lambda表达式可以简化匿名函数的书写。比如，前面JavaScript的示例代码中，对数组元素求平方的函数可以写成一个Lambda表达式，从而把原来的代码简化成了一行：

```
var d = a.map(item=>item*item);    //括号中是一个lambda表达式
```

在这个示例程序中，=>左边的是匿名函数的参数，右边的是一个表达式，这个表达式的计算结果就是匿名函数的返回值。你看，通过一个Lambda表达式，代替了传统的函数声明，代码也变得更简洁了。

OK，因为在编译器前端还要对函数做类型分析，所以我们再来探究一下函数的类型是怎么一回事。

把函数纳入类型系统

这里我要先提一个问题，就是在函数式编程语言里，既然它能够把函数当做一个值一样去看待，那么也应该

有相应的类型吧？这就要求语言的类型系统能够把函数包含进来。因此函数式编程语言在编译的时候，也要进行**类型检查和类型推断**。

不过，我们在谈论类型时，比较熟悉的是值类型（如整型、浮点型、字符型），以及用户自定义的类型（如结构、类这些），如果函数也是一种类型，那跟它们是什么关系呢？如果由你来设计，那么你会怎么设计这个类型体系呢？

在不同的语言里，设计者们是以不同的方式来解决这个问题的。拿Python来说，Python中一切都是对象，函数也不例外。函数对象的ob_type字段也被设置了合适的类型对象。这里，你可以再次回味一下，

[Python的类型系统](#)设计得是如何精巧。

我们再看看Scala的类型系统。上一讲我提出过，Scala实现了一个很漂亮的类型系统，把值类型和引用类型（也就是自定义类）做了统一。它们都有一个共同的根，就是Any。由于Scala是基于JVM的，所以这些类型最后都是以Java的类来实现的。

那么函数也不例外。因为Scala的函数最多支持22个参数，所以Scala里有内置的Function1、Function2…Function22这些类，作为函数的类型，它们也都是Any的子类型。每个Scala函数实际上是这些类的实例。

另外，Swift语言的文档对类型的定义也比较清楚。它以产生式的方式列出了type的语法定义。根据该语法，类型可以是函数类型、数组类型、字典类型、元组类型等等，这些都是类型。

GRAMMAR OF A TYPE

```
type → function-type
type → array-type
type → dictionary-type
type → type-identifier
type → tuple-type
type → optional-type
type → implicitly-unwrapped-optional-type
type → protocol-composition-type
type → opaque-type
type → metatype-type
type → self-type
type → Any
type → ( type )
```

并且，它还把所有类型分成了两个大类别：命名类型（Named Type）和复合类型（Compound Type）。

- **命名类型**包括类、结构体、枚举等，它们都有一个名称，比如自定义类的类名就是类型名称。
- **复合类型**则没有名称，它是由多个其他类型组合而成的。函数和元组都属于复合类型。函数的类型是由参数的类型和返回值的类型组合而成的，它们都是编译器对函数类型进行计算的依据。

举例来说，假设一个函数有两个参数，分别是类型A和B，而返回值的类型是C，那么这个函数的类型可以计为(A, B)->C。这就是对函数的类型的形式化的表达。

那么进一步，我们**如何在编译期里针对函数的类型做类型分析呢**？它跟非复合的类型还真不太一样，因为编译器需要检查复合类型中的多个元素。

举个例子。在一个高阶函数g()里，能够接收一个函数类型的参数f(A,B)，要求其类型是(A, B)->C，而实际提供的函数f2的类型是(A1, B1)->C1，那么你在编译器里如何判断函数的类型是否合法呢？这里的算法要做多步的检查：

- 第一，f2也必须有两个参数，这点是符合的。
- 第二，检查参数的类型。A1和B1必须是跟A和B相同的类型，或者是它们的父类型，这样f1才能正确地给f2传递参数。
- 第三，检查返回值的类型。C1，则必须是C的子类型，这样f1才能接收f2的返回值。

好，说完了编译器的前端工作，我们再来看看函数在语言内部的实现。

函数的内部实现

在函数式编程里，所有一切都围绕着函数。但是在编译完毕以后，函数在运行时中是怎么表示的呢？

就像不同的面向对象的语言，在运行时是以不同的方式表示一个对象的，不同的函数式编程语言，在运行时中去实现一个函数的机制也是不太一样的。

- 在Python中，一切都是对象，所以函数也是一种对象，它是实现了Callable协议的对象，能够在后面加上一对括号去调用它。
- 在Scala和Java这种基于JVM的语言中，函数在JVM这个层次没有获得原生支持，因此函数被编译完毕以后，其实会变成JVM中的类。
- 在Julia、Swift、Go、Rust这样编译成机器码的语言中，函数基本上就是内存中代码段（或文本段）的一个地址。这个地址在编译后做链接的时候，会变成一个确定的地址值。在运行时，跳转到这个地址就可以执行函数的功能。

补充：再具体一点的话，**编译成机器码的函数有什么特点呢**？我们再来回顾一下。

首先，函数的调用者要根据调用约定，通过栈或者寄存器设置函数的参数，保护好自己负责保护的寄存器以及返回地址，然后调用函数。

在被调用者的函数体内，通常会分为三个部分。头尾两个部分叫做**序曲（prelude）和尾声（epilogue）**，分别做一些初始化工作和收尾工作。在序曲里会保存原来的栈指针，以及把自己应该保护的寄存器存到栈里、设置新的栈指针等，接着执行函数的主体逻辑。最后，到尾声部分，要根据调用约定把返回值设置到寄存器或栈，恢复所保护的寄存器的值和栈顶指针，接着跳转到返回地址。

返回到调用者以后，会有一些代码恢复被保护起来的寄存器，获取返回值，然后继续执行后面的代码。

这样，把上述整个过程的细节弄清楚了，你就知道如何为函数生成代码了。

最后，我们必须提到一种特殊情况，就是**闭包**。闭包是纯函数的对立面，它引用了上级作用域中的一些自由变量。闭包在运行时不仅是代码段中的一个函数地址，还必须保存自由变量的值。为了实现闭包的运行时功能，编译器需要生成相应的代码，以便在生成闭包的时候，可以在堆里申请内存来保存自由变量的值。而当该闭包不再被引用了，那么就会像不再被引用的对象一样，成为了内存垃圾，要被垃圾回收机制回收。

好了，到这里你可能会觉得，看上去函数的实现似乎跟命令式语言也没有什么不同。不过，接下来你就会看到不同点了，这就是延迟求值的实现。

延迟求值（Lazy Evaluation）

在命令式语言里，我们对表达式求值，是严格按照顺序对AST求值。但对于纯函数来说，由于在任何时候求值结果都是一样的，因此可以进行一定的优化，比如延迟求值（Lazy Evaluation），从而有可能减少计算工作量，或者实现像unless()那样的特别的控制结构。

那么针对这种情况，编译器需要做什么处理呢？

我举个例子，对于下面的示例程序（伪代码）：

```
g(condition, x){
  if (condition)
    return x;
  else return 0;
}
```

如果我们调用的时候，在x参数的位置传入的是另一个函数调用f(y)，也就是g(condition, f(y))，那么编译器就会把g()的函数体内用到x的地方，都转换成对f(y)的调用：

```
if (condition)
  return f(y);
else return 0;
```

这种把对参数的引用替换成对函数调用的技术，叫做**换名调用**。

不过换名调用有一个缺点，就是f(y)有可能会被多次调用，而且每次调用的结果都是一样的。这就产生了浪费。那么这时，编译器就要更聪明一点。

怎么办呢？那就是在第一次调用的时候，记录下它的值。如果下次再调用，则使用第一次调用的结果。这种方式叫做**按需调用**。

总而言之，纯函数的特征就导致了延迟求值在编译上的不同。而函数式编程另一个重要的特征，不变性，也

会对编译和运行过程造成影响。

不变性对编译和运行时的影响

在遵守不变性原则的情况下，对程序的编译也会有很大的不同。

第一，由于函数不会修改对象的状态，所以就不存在并发程序中的竞争情况，进而也就不需要采用锁的机制，编译器也不需要生成与锁有关的代码。Java、JavaScript等语言中关于参数逃逸的分析，也变得不必要了，因为反正别的线程获得了某个对象或结构体，也不会去修改它的状态。

第二，不变性就意味着，只可能是新的对象引用老的对象，老的对象不可能引用新的对象。这对于垃圾收集算法的意义很大。在分代收集的算法中，如果老对象被新对象引用，那必须等到新对象回收之后老对象才可能被回收，所以函数式编程的程序现在可以更容易做出决定，把老对象放到老一代的区域，从而节省垃圾收集算法的计算量；另外，由于对象不会被改变，因此更容易实现增量收集和并行收集；由于不可能存在循环引用，因此如果采用的是引用计数法的话，就没有必要进行循环引用的检测了。

第三，不变性还意味着，在程序运行过程中可能要产生更多的新对象。在命令式语言中，程序需要对原来的对象修改状态。而函数式编程，只能每次创建一个新对象。所以，垃圾收集算法需要能够尽快地收集掉新对象。

OK，了解了不变性，我们再来看看，针对函数式编程语言的优化算法。其中最重要的就是对递归函数的优化。

对递归函数的优化

虽然命令式的编程语言也会用到递归函数，但函数式编程里对递归函数的使用更加普遍，比如通常会用递归来代替循环。如果要对一个整型数组求和，命令式编程语言会做一个循环，而函数式编程语言则更习惯于用递归的方式表达： $\text{sum}(a, i) = a[i] + \text{sum}(a, i-1)$ 。

按照传统的函数调用的运行方式，对于每一次函数调用，程序都要增加一个栈帧。递归调用一千次，就要增加一千个栈帧。这样的话，程序的栈空间很快就会被耗尽。并且，函数调用的时候，每次都要有一些额外的开销，比如保护寄存器的值、保存返回地址、传递参数等等。

我在[第7讲](#)的优化算法里，提到过**尾调用优化**，也就是执行完递归函数后，马上用return语句返回的情况。

```
f(x){  
  ...  
  return g(...);  //尾调用  
}
```

在尾调用的场景下，上一级函数的栈帧已经没什么用了，程序可以直接复用。函数调用的过程，可以被优化成指令的跳转，不需要那些函数调用的开销。

不过对于递归调用的情况，往往还需要对递归函数返回值做进一步的计算。比如在下面的求阶乘的函数示例中，返回值是 $x * \text{fact}(x-1)$ 。

```
//fact.c 求阶乘
int fact(int x){
    if (x == 1)
        return 1;
    else
        return x*fact(x-1);    //对递归值要做进一步的计算
}
```

对于编译器来说，它可以经过分析，把这种情况转换成一个单纯的尾调用。具体地说，就是它相当于引入了一个临时的递归函数fact2()，并且用第一个参数acc来记录累计值：

```
int fact(x){
    if (x == 1)
        return 1;
    else
        return fact2(x, x-1);    //调用一个临时的递归函数
}

int fact2(int acc, int x){        //参数acc用来保存累计值
    if (x == 1){
        return acc;
    }
    else{
        return fact2(acc * x, x-1); //一个单纯的尾调用
    }
}
```

如果我们调用fact(5)，其实际执行过程就会在acc参数中连续地做乘法，从而实现阶乘：

```
->fact(5)
->fact2(5,4)
->fact2(5*4,3)
->fact2(5*4*3,2)
->fact2(5*4*3*2,1)
->5*4*3*2
```

你可以观察一下编译器实际生成的汇编程序，看看优化后的成果。如果用“clang -O1 -S -o fact.s fact.c”来编译fact函数，就会得到一个汇编代码文件。我对这段代码做了注释，你可以理解下它的逻辑。你可以发现，优化后的函数没有做任何一次递归调用。

```
_fact:                                ## @fact
    pushq   %rbp                    # 保存栈底指针
    movq    %rsp, %rbp             # 把原来的栈顶，设置为新栈帧的栈底
    movl    $1, %eax               # %eax是保存返回值的。这里先设置为1
    cmpl    $1, %edi               # %edi是fact函数的第一个参数，相当于if(x==1)
    je      LBB0_3                 # 如果相等，跳转到LBB0_3，就会直接返回1
    movl    $1, %eax               # 设置%eax为1，这里%eax会保存累计值
```

```
LBB0_2:
    imull    %edi, %eax # 把参数乘到%eax来
    decl     %edi       # x = x-1
    cmpl     $1, %edi   # x是否等于1?
    jne      LBB0_2     # 如果不等, 跳到LBB0_2, 做连乘
LBB0_3:
    popq     %rbp       # 回复原来的栈底指针
    retq     # 返回
```

要想完成这种转换，就要求编译器能够基于IR分析出其中的递归结构，然后进行代码的变换。

课程小结

这一讲，我们一起讨论了实现函数式编程特性的一些要点。我希望能记住这些关键知识点：

第一，函数式编程的理论根基，可以追溯到比图灵机更早的Lambda演算。要理解函数式编程的特点，你可以回想一下中学时代数学课中的内容。在函数式编程中，函数是一等公民。它通过强调纯函数和不变性，大大降低了程序的复杂度，使软件不容易出错，并且能够更好地支持并发编程。并且，由于采用声明式的编程风格，往往程序可以更简洁，表达性更好。

第二，不同的语言实现函数的机制是不同的。对于编译成机器码的语言来说，函数就是一个指向代码的指针。对于闭包，还需要像面向对象的语言那样，管理它在内存中的生存周期。

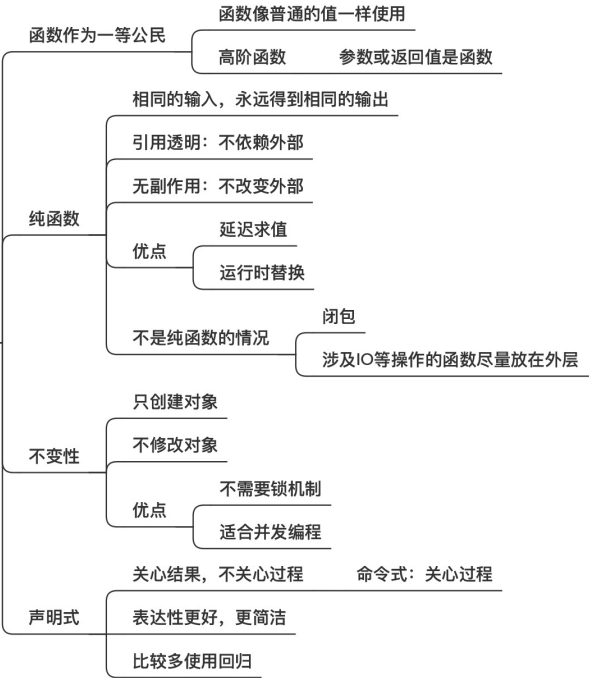
第三，函数仍然要纳入类型体系中，编译器要支持类型的检查和推断。

第四，针对函数式编程的特点，编译器可以做一些特别的优化，比如延迟求值、消除与锁有关的分析、对递归的优化等等。

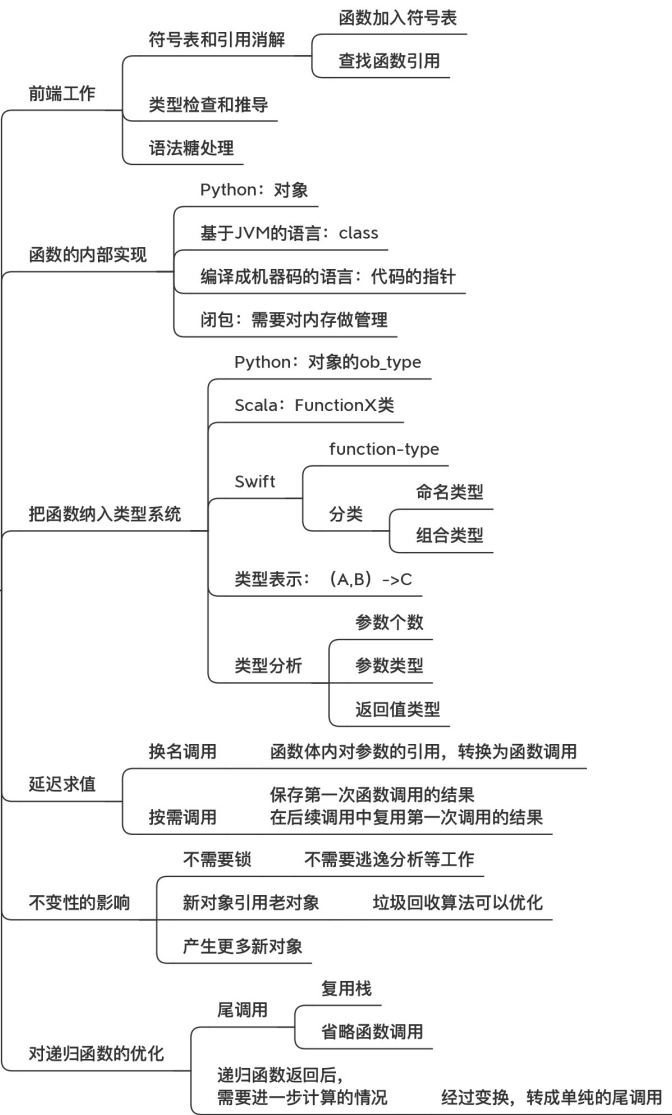
同样，我把这一讲的知识点梳理成了思维导图，供你参考：

编译技术与函数式编程

函数式编程的特点



编译和实现



一课一思

这节课中我提到，在很多情况下，用函数式编程表达一个计算逻辑会更简洁。那么，你能不能找到这样的一些例子？欢迎分享你的经验。

如果你身边也有对函数式编程感兴趣的朋友，那么也非常欢迎你把这节课分享给 TA。感谢你的阅读，下一讲我们会一起解析华为的方舟编译器，到时候再见！