

11 | 语义分析（上）：如何建立一个完善的类型系统？

2019-09-06 宫文学 来自北京

《编译原理之美》



在做语法分析时我们可以得到一棵语法树，而基于这棵树能做什么，是语义的事情。比如，+ 号的含义是让两个数值相加，并且通常还能进行缺省的类型转换。所以，如果要区分不同语言的差异，不能光看语言的语法。比如 Java 语言和 JavaScript 在代码块的语法上是一样的，都是用花括号，但在语义上是不同的，一个有块作用域，一个没有。

这样看来，相比词法和语法的设计与处理，语义设计和分析似乎要复杂很多。虽然我们借作用域、生存期、函数等特性的实现涉猎了很多语义分析的场景，但离系统地掌握语义分析，还差一点儿火候。所以，为了帮你攻破语义分析这个阶段，我会用两节课的时间，再梳理一下语义分析中的重要知识，让你更好地建立起相关的知识脉络。

今天这节课，我们把注意力集中在**类型系统**这个话题上。

围绕类型系统产生过一些争论，有的程序员会拥护动态类型语言，有的会觉得静态类型语言好。要想探究这个问题，我们需要对类型系统有个清晰的了解，最直接的方式，就是建立一个

完善的类型系统。

那么什么是类型系统？我们又该怎样建立一个完善的类型系统呢？

其实，类型系统是一门语言所有的类型的集合，操作这些类型的规则，以及类型之间怎么相互作用的（比如一个类型能否转换成另一个类型）。如果要建立一个完善的类型系统，形成对类型系统比较完整的认知，需要从两个方面出发：

根据领域的需求，设计自己的类型系统的特征。

在编译器中支持类型检查、类型推导和类型转换。

先从第一个方面出发看一下。

设计类型系统的特征

在进入这个话题之前，我想先问你一个有意义的问题：类型到底是什么？我们说一个类型的时候，究竟在说什么？

要知道，在机器代码这个层面，其实是分不出什么数据类型的。在机器指令眼里，那就是0101，它并不对类型做任何要求，不需要知道哪儿是一个整数，哪儿代表着一个字符，哪儿又是内存地址。你让它做什么操作都可以，即使这个操作没有意义，比如把一个指针值跟一个字符相加。

那么高级语言为什么要增加类型这种机制呢？

对类型做定义很难，但大家公认的有一个说法：类型是针对一组数值，以及在这组数值之上的一组操作。比如，对于数字类型，你可以对它进行加减乘除算术运算，对于字符串就不行。

所以，类型是高级语言赋予的一种语义，有了类型这种机制，就相当于定了规矩，可以检查施加在数据上的操作是否合法。因此类型系统最大的好处，就是可以通过类型检查降低计算出错的概率。所以，现代计算机语言都会精心设计一个类型系统，而不是像汇编语言那样完全不区分类型。

不过，类型系统的设计有很多需要取舍和权衡的方面，比如：

面向对象的拥护者希望所有的类型都是对象，而重视数据计算性能的人认为应该支持非对象化的基础数据类型；

你想把字符串作为原生数据类型，还是像 Java 那样只是一个普通的类？

是静态类型语言好还是动态类型语言好？

.....

虽然类型系统的设计有很多需要取舍和权衡的方面，但它最需要考虑的是，是否符合这门语言想解决的问题，我们用静态类型语言和动态类型语言分析一下。

根据类型检查是在编译期还是在运行期进行的，我们可以把计算机语言分为两类：

静态类型语言（全部或者几乎全部的类型检查是在编译期进行的）。

动态类型语言（类型的检查是在运行期进行的）。

静态类型语言的拥护者说：

因为编译期做了类型检查，所以程序错误较少，运行期不用再检查类型，性能更高。像 C、Java 和 Go 语言，在编译时就对类型做很多处理，包括检查类型是否匹配，以及进行缺省的类型转换，大大降低了程序出错的可能性，还能让程序运行效率更高，因为不需要在运行时再去做类型检查和转换。

而动态类型语言的拥护者说：

静态语言太严格，还要一遍遍编译，编程效率低，用动态类型语言方便进行快速开发。JavaScript、Python、PHP 等都是动态类型的。

客观地讲，这些说法都有道理。目前的趋势是，某些动态类型语言在想办法增加一些机制，在编译期就能做类型检查，比如用 TypeScript 代替 JavaScript 编写程序，做完检查后再输出成

JavaScript。而某些静态语言呢，却又发明出一些办法，部分地绕过类型检查，从而提供动态类型语言的灵活性。

再延伸一下，跟静态类型和动态类型概念相关联的，还有强类型和弱类型。强类型语言中，变量的类型一旦声明就不能改变，弱类型语言中，变量类型在运行期时可以改变。二者的本质区别是，强类型语言不允许违法操作，因为能够被检查出来，弱类型语言则从机制上就无法禁止违法操作，所以是不安全的。比如你写了一个表达式 $a*b$ 。如果 a 和 b 这两个变量是数值，这个操作就没有问题，但如果 a 或 b 不是数值，那就没有意义了，弱类型语言可能就检查不出这类问题。

也就是，静态类型和动态类型说的是什么时候检查的问题，强类型和弱类型说的是就算检查，也检查不出来，或者没法检查的问题，**这两组概念经常会被搞混，所以我在这里带你了解一下。**

接着说回来。关于类型特征的取舍，是根据领域问题而定的。举例来说，很多人可能都觉得强类型更好，但对于儿童编程启蒙来说，他们最好尽可能地做各种尝试，如果必须遵守与类型有关的规则，程序总是跑不起来，可能会打击到他们。

对于 playscript 而言，因为目前是用来做教学演示的，所以我们尽可能地多涉及与类型处理有关的情况，供大家体会算法，或者在自己的工作中借鉴。

首先，playscript 是静态类型和强类型的，所以几乎要做各种类型检查，你可以参考看看这些都是怎么做的。

第二，我们既支持对象，也支持原生的基础数据类型。这两种类型的处理特点不一样，你也可以借鉴一下。后面面向对象的一讲，我会再讲与之相关的子类型（Subtyping）和运行时类型信息（Run Time Type Information, RTTI）的概念，这里就不展开了。


第三，我们还支持函数作为一等公民，也就是支持函数的类型。函数的类型是它的原型，包括返回值和参数，原型一样的函数，就看做是同样类型的，可以进行赋值。这样，你也就了解了实现函数式编程特性时，要处理哪些额外的类型问题。

接下来，我们来说一说如何做类型检查、类型推导和类型转换。

如何做类型检查、类型推导和类型转换

先来看一看，如果编写一个编译器，我们在做类型分析时会遇到哪些问题。以下面这个最简单的表达式为例，这个表达式在不同的情况下会有不同的运行结果：

```
1 a = b + 10
```

 复制代码

如果 b 是一个浮点型， $b+10$ 的结果也是浮点型。如果 b 是字符串型的，有些语言也是允许执行 $+$ 号运算的，实际的结果是字符串的连接。这个分析过程，就是**类型推导 (Type Inference)**。

当右边的值计算完，赋值给 a 的时候，要检查左右两边的类型是否匹配。这个过程，就是**类型检查 (Type Checking)**。


如果 a 的类型是浮点型，而右边传过来的是整型，那么一般就要进行缺省的**类型转换 (Type Conversion)**。

类型的检查、推导和转换是三个工作，可是采用的技术手段差不多，所以我们放在一起讲，**先来看看类型的推导。**

在早期的 playscript 的实现中，是假设运算符两边的类型都是整型的，并做了强制转换。

这在实际应用中，当然不够用，因为我们还需要用到其他的数据类型。那怎么办呢？在运行时再去判断和转换吗？当然可以，但我们还有更好的选择，就是在编译期先判断出表达式的类型来。比如下面这段代码，是在 `RefResolve.java` 中，推导表达式的类型：

```
1 case PlayScriptParser.ADD:
2     if (type1 == PrimitiveType.String ||
3         type2 == PrimitiveType.String){
4         type = PrimitiveType.String;
5     }
```

 复制代码

```

6     else if (type1 instanceof PrimitiveType &&
7             type2 instanceof PrimitiveType){
8         //类型“向上”对齐, 比如一个int和一个float, 取float
9         type = PrimitiveType.getUpperType(type1,type2);
10    }else{
11        at.log("operand should be PrimitiveType for additive operation", ctx);
12    }
13    break;

```

这段代码提到, 如果操作符号两边有一边数据类型是 String 类型的, 那整个表达式就是 String 类型的。如果是其他基础类型的, 就要按照一定的规则进行类型的转换, 并确定运算结果的类型。比如, + 号一边是 double 类型的, 另一边是 int 类型的, 那就要把 int 型的转换成 double 型的, 最后计算结果也是 double 类型的。

做了类型的推导以后, 我们就可以简化运行期的计算, 不需要在运行期做类型判断了:

 复制代码

```

1 private Object add(Object obj1, Object obj2, Type targetType) {
2     Object rtn = null;
3     if (targetType == PrimitiveType.String) {
4         rtn = String.valueOf(obj1) +
5             String.valueOf(obj2);
6     } else if (targetType == PrimitiveType.Integer) {
7         rtn = ((Number)obj1).intValue() +
8             ((Number)obj2).intValue();
9     } else if (targetType == PrimitiveType.Float) {
10        rtn = ((Number)obj1).floatValue()+
11            ((Number)obj2).floatValue();
12    }
13    ...
14    return rtn;
15 }


```

通过这个类型推导的例子, 我们又可以引出 **S 属性 (Synthesized Attribute)** 的知识点。如果一种属性能够从下级节点推导出来, 那么这种属性就叫做 S 属性, 字面意思是综合属性, 就是在 AST 中从下级的属性归纳、综合出本级的属性。更准确地说, 是通过下级节点和自身来确定的。

| 语法规则 | 语义规则 |
|--|---|
| <code>add : exp + exp</code> | 如果exp有一个是int型的，另一个是float型的，那么add的类型是float型的。 ... |
| <code>GT : exp > exp</code> | GT运算结果的类型是布尔型的。 |
| <code>integerLiteral :DECIMAL_LITERAL</code> | DECIMAL_LITERAL是终结符，类型由自身确定，是整型的。integerLiteral的类型能由DECIMAL_LITERAL推导出来，也是整型。 |

与 S 属性相对应的是 **I 属性 (Inherited Attribute)**，也就是继承属性，即 AST 中某个节点的属性是由上级节点、兄弟节点和它自身来决定的，比如：


```
1 int a;
```

 复制代码

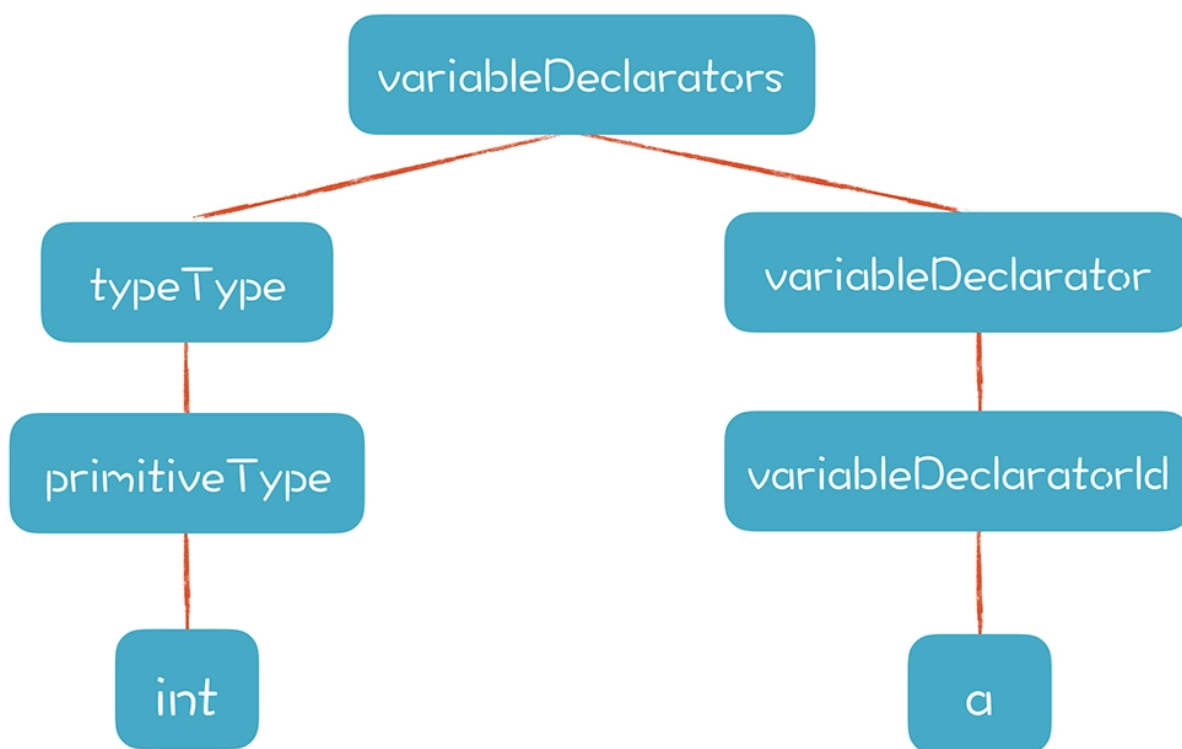
变量 a 的类型是 int，这个很直观，因为变量声明语句中已经指出了 a 的类型，但这个类型可不是从下级节点推导出来的，而是从兄弟节点推导出来的。

在 PlayScript.g4 中，变量声明的相关语法如下：

```
1 variableDeclarators
2     : typeType variableDeclarator (',' variableDeclarator)*
3     ;
4
5 variableDeclarator
6     : variableDeclaratorId ('=' variableInitializer)?
7     ;
8
9 variableDeclaratorId
10    : IDENTIFIER ('[' ' '])*
11    ;
12
13 typeType
14    : (classOrInterfaceType | functionType | primitiveType) ('[' ' ')*
```

 复制代码

把 `int a;` 这样一个简单的变量声明语句解析成 AST，就形成了一棵有两个分枝的树：



这棵树的左枝，可以从下向上推导类型，所以类型属性也就是 S 属性。而右枝则必须从根节点（也就是 `variableDeclarators`）往下继承类型属性，所以对于 `a` 这个节点来说，它的类型属性是 I 属性。

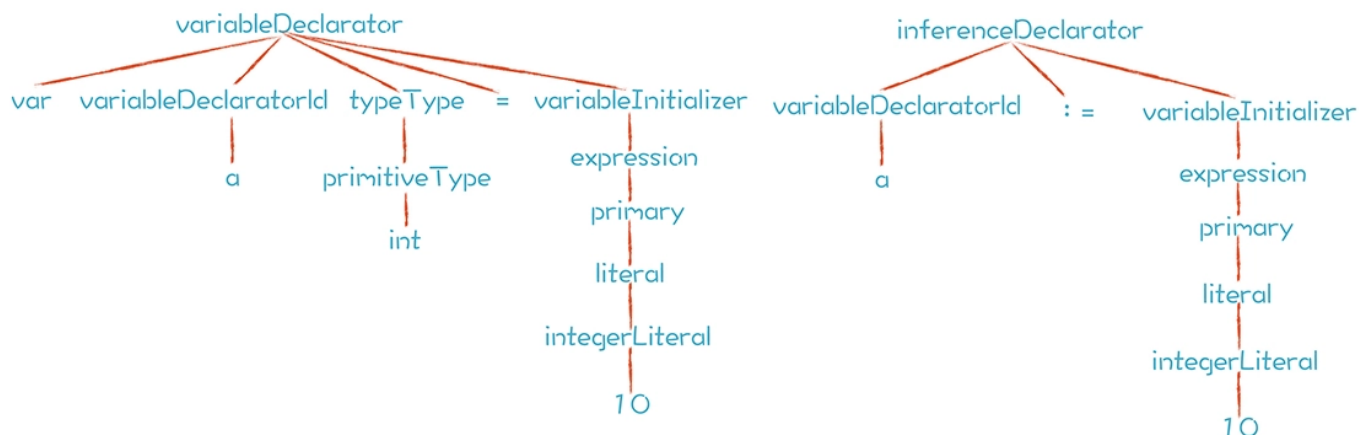
这里插一句，`RefResolver.java` 实现了 `PlayScriptListener` 接口。这样，我们可以用标准的方法遍历 AST。代码中的 `enterXXX()` 方法表示刚进入这个节点，`exitXXX()` 方法表示退出这个节点，这时所有的子节点都已经遍历过了。在计算 S 属性时，我一定是在 `exitXXX()` 方法中，因为可以利用下级节点的类型推导出自身节点的类型。

很多现代语言会支持自动类型推导，例如 Go 语言就有两种声明变量的方式：

```
1 var a int = 10 //第一种
```

 复制代码

第一种方式，a 的类型是显式声明的；第二种方式，a 的类型是由右边的表达式推导出来的。从生成的 AST 中，你能看到它们都是经历了从下到上的综合，再从上到下的继承的过程：



说完了类型推导，我们再看看类型检查。

类型检查主要出现在几个场景中：

赋值语句（检查赋值操作左边和右边的类型是否匹配）。

变量声明语句（因为变量声明语句中也会有初始化部分，所以也需要类型匹配）。


函数传参（调用函数的时候，传入的参数要符合形参的要求）。

函数返回值（从函数中返回一个值的时候，要符合函数返回值的規定）。

类型检查还有一个特点：以赋值语句为例，左边的类型，是 I 属性，是从声明中得到的；右边的类型是 S 属性，是自下而上综合出来的。当左右两边的类型相遇之后，就要检查二者是否匹配，被赋值的变量要满足左边的类型要求。

如果匹配，自然没有问题，如果不完全匹配，也不一定马上报错，而是要看看是否能进行类型转换。比如，一般的语言在处理整型和浮点型的混合运算时，都能进行自动的转换。像

JavaScript 和 SQL，甚至能够在算术运算时，自动将字符串转换成数字。在 MySQL 里，运行下面的语句，会得到 3，它自动将 '2' 转换成了数字：

 复制代码

```
1 select 1 + '2';
```

这个过程其实是有风险的，这就像在强类型的语言中开了一个后门，绕过或部分绕过了编译器的类型检查功能。把父类转成子类的场景中，编译器顶多能检查这两个类之间是否有继承关系，如果连继承关系都没有，这当然能检查出错误，制止这种转换。但一个基类的子类可能是很多的，具体这个转换对不对，只有到运行期才能检查出错误来。C 语言因为可以强制做各种转换，这个后门开的就更大了。不过这也是 C 语言要达到它的设计目的，必须具备的特性。

关于类型的处理，大家可以参考 playscript 的示例代码，里面有三个类可以看一看：

TypeResolver.java（做了自上而下的类型推导，也就是 l 属性的计算，包括变量 - 声明、类的继承声明、函数声明）。

RefResolver.java（有自下而上的类型推导的逻辑）。

TypeChecker.java（类型检查）。

课程小结

本节课我们重点探讨了语义分析和语言设计中的一个重要话题：类型系统。

理解类型系统，了解它的本质对我们学习语言会有很大的帮助。我希望在这个过程中，你不会再被静态类型和动态类型，强类型和弱类型这样的概念难倒，甚至可以质疑已有的一些观念。比如，如果你仔细研究，会发现静态类型和动态类型不是绝对的，静态类型的语言如 Java，也会在运行期去处理一些类型检查。强类型和弱类型可能也不是绝对的，就像 C 语言，你如果不允许做任何强制类型转换，不允许指针越界，那它也就完全变成强类型的了。

掌握对计算机语言更深一点儿的理解能力，将会是你学习编译原理的额外回报！

一课一思

针对今天讲的类型系统的知识，你所熟悉的语言是静态类型的，还是动态类型的？是强类型的，还是弱类型的？它的类型系统中有哪些你觉得有意思或者引起你困扰的设计？欢迎在留言区分享你的发现。

最后，感谢你的阅读，如果这篇文章让你有所收获，也欢迎你将它分享给更多的朋友。

本节课相关的示例代码放在文末，供你参考。

playscript-java（项目目录）：[码云](#) [GitHub](#)

PlayScript.g4（语法规则）：[码云](#) [GitHub](#)

TypeAndScopeScanner.java（类型和作用域扫描）：[码云](#) [GitHub](#)

TypeResolver.java（自上而下的类型推导）：[码云](#) [GitHub](#)

RefResolver.java（自下而上的类型推导）：[码云](#) [GitHub](#)

TypeChecker.java（类型检查）：[码云](#) [GitHub](#)

© 版权归极客邦科技所有，未经许可不得传播售卖。页面已增加防盗追踪，如有侵权极客邦将依法追究其法律责任。

精选留言 (12)



智晨

2019-10-10

想请教一下老师，类型论是干什么用的？跟类型系统有什么关系？

作者回复：我认为，如果想从根本上理解编程语言的类型系统，以及其他学科如社会学、生物学中的分类系统，应该都要理解类型论。因为数学是最底层的形式体系了。

对子类型的严格定义，也最好用数学方式表达。

如果有对理论追根究底的兴趣，还是可以研究一下类型论。对于想设计一套类型系统的人来说，本着严谨的态度，也有必要了解类型论。



janey

2019-09-10

C语言是静态类型语言，大部分变量是强类型，但指针是弱类型吧，查不出错啊。Go语言是静态类型语言，但interface 实现接口到运行时才报错又有动态的成份。请老师指正。

作者回复: 同意你的分析:-)

共 2 条评论 >



VVK

2019-09-08

老师讲的太好了，十几年没搞懂的概念终于理整明白了。

作者回复: 谢谢肯定:-)



墨灵

2020-09-14

`a = 1` # 变量初始化，假设类型推导成功

`a + 1` # 两个数值相加，正常执行

`a = '1'` # 如果允许在运行期改变a的类型，则是动态类型，否则是静态类型

`a + 1` # 如果定义char + int是没意义的，报错的是强类型，不报错是弱类型

JavaScript是动态类型，也是弱类型；python是动态类型，却是强类型。

共 2 条评论 >



Sudouble

2019-11-14

以类型系统实现的原理看已使用了良久的编程语言，有种莫名的亲切感。很好奇编程语言的发展史，以及特定的编程语言是为什么而诞生的，相互间又有什么异同之处。

作者回复: 研究技术到最后，一定会研究历史，以及推动历史发展的那些人。我在结束语中提了一些关键的人物。我们仔细研究语言的特性的话，会发现它们传承、发展的脉络，很有意思。

共 2 条评论 >





D

2019-09-09

Java中的封装类，提供了类型系统，好处就是方便使用，符合类型系统规范，坏处是性能损失。

作者回复: 是的:-)



👍 2



核桃

2022-06-06

我是学Rust的，Rust中特别强调生命周期，可变引用，不可变引用这些概念，一开始觉得好像和其他语言差不多，但是学着写了一些代码之后才发现，其实差异会很大，Rust是无gc的，但是又没有C/C++那种高度自由，所以做了很多折中和规矩，因此像Rust的编译原理，后面有机会也想深入了解一下。



hilltsui

2022-02-25

老师你好，请问老师你文中说运行程序时机械码不区分数据类型，但为什么cpu 存在整型运算和浮点运算单元的区别？常说的fpu 。

共 1 条评论 >



爱笑的布谷鸟

2021-11-21

宫老师，类型系统的目的，就是为了做类型检查，这样理解对吗？



if...else... 

2021-10-13

不错，对语言有了新的认识



放不下筷子的程序员

2020-04-26

老师您好，我对您第一遍扫描的代码存在一些疑问，就是您的代码中不再为函数创建一个额外的scope，那么类是不是也需要做相同的处理呢？还有就是您为for创建了一个scope，那么whi

le是否也需要创建一个scope呢?

共 1 条评论 >



dra

2020-04-02

老师竟然回复了上一位留言。还在维护👍期待老师下一个专栏

作者回复: 肯定要回复。最近时间宽裕了些, 希望可以回复更及时:)

