

32 | 字节码生成：为什么Spring技术很强大？

2019-11-06 宫文学 来自北京

《编译原理之美》



Java 程序员几乎都了解 Spring。它的 IoC（依赖反转）和 AOP（面向切面编程）功能非常强大、易用。而它背后的字节码生成技术（在运行时，根据需要修改和生成 Java 字节码的技术）就是一项重要的支撑技术。

Java 字节码能够在 JVM（Java 虚拟机）上解释执行，或即时编译执行。其实，除了 Java，JVM 上的 Groovy、Kotlin、Closure、Scala 等很多语言，也都需要生成字节码。另外，playscript 也可以生成字节码，从而在 JVM 上高效地运行！

而且，字节码生成技术很有用。你可以用它将高级语言编译成字节码，还可以向原来的代码中注入新代码，来实现对性能的监测等功能。

目前，我就有一个实际项目的需求。我们的一个产品，需要一个规则引擎，解析自定义的 DSL，进行规则的计算。这个规则引擎处理的数据量比较大，所以它的性能越高越好。因此，如果把 DSL 编译成字节码就最理想了。

既然字节码生成技术有很强的实用价值，那么本节课，我就带你掌握它。

我会先带你了解 Java 的虚拟机和字节码的指令，然后借助 ASM 这个工具，生成字节码，最后，再实现从 AST 编译成字节码。通过这样一个过程，你会加深对 Java 虚拟机的了解，掌握字节码生成技术，从而更加了解 Spring 的运行机制，甚至有能力和编写这样的工具！

Java 虚拟机和字节码

字节码是一种二进制格式的中间代码，它不是物理机器的目标代码，而是运行在 Java 虚拟机上，可以被解释执行和即时编译执行。

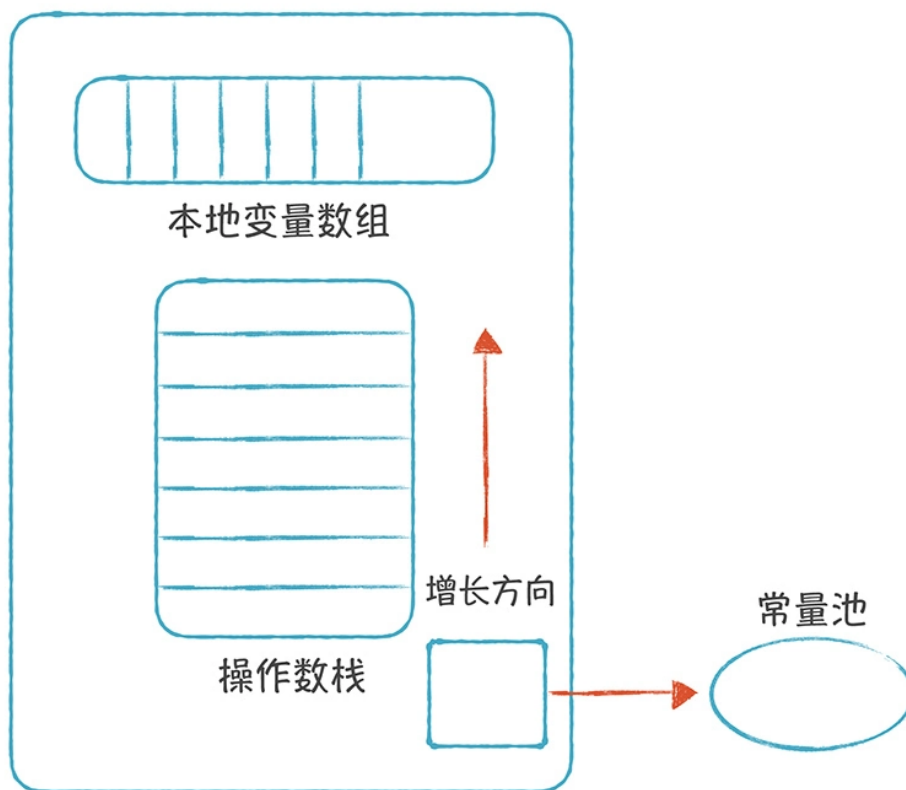
在讲后端技术时，我强调的都是，如何生成直接在计算机上运行的二进制代码，这比较符合 C、C++、Go 等静态编译型语言。但如果想要解释执行，除了直接解释执行 AST 以外，我没有讲其他解释执行技术。

而目前更常见的解释执行的语言，是采用虚拟机，其中最典型的的就是 JVM，它能够解释执行 Java 字节码。

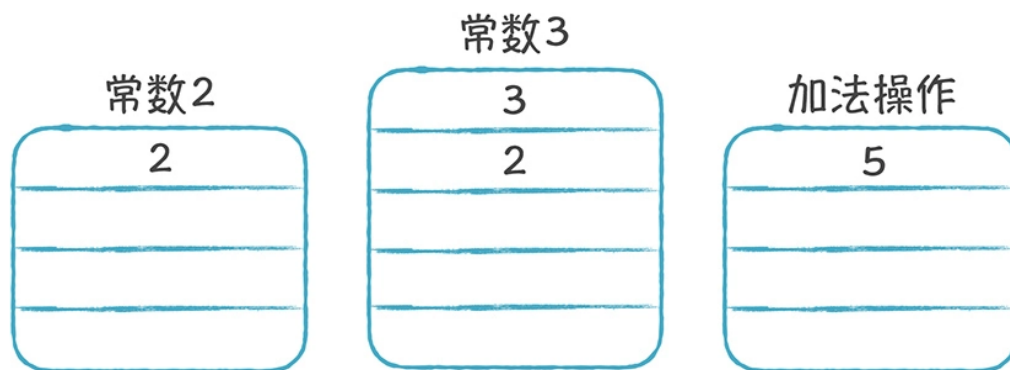
而虚拟机的设计又有两种技术：**一是基于栈的虚拟机；二是基于寄存器的虚拟机。**

标准的 JVM 是基于栈的虚拟机（后面简称“栈机”）。

每一个线程都有一个 JVM 栈，每次调用一个方法都会生成一个栈帧，来支持这个方法的运行。栈帧里面又包含了本地变量数组（包括方法的参数和本地变量）、操作数栈和这个方法所用到的常数。这种栈帧的设计跟之前我们学过 C 语言的栈帧的结构，其实有很大的相似性，你可以通过 [🔗21 讲](#)回顾一下。



栈机是基于操作数栈做计算的。以“2+3”的计算为例，只要把它转化成逆波兰表达式，“2 3 +”，然后按照顺序执行就可以了。**也就是：**先把 2 入栈，再把 3 入栈，再执行加法指令，这时，要从栈里弹出 2 个操作数做加法计算，再把结果压入栈。




你可以看出，栈机的加法指令，是不需要带操作数的，就是简单的“iadd”就行，**这跟你之前学过的 IR 都不一样。**为什么呢？因为操作数都在栈里，加法操作需要 2 个操作数，从栈里弹出 2 个元素就行了。

也就是说，指令的操作数是由栈确定的，我们不需要为每个操作数显式地指定存储位置，所以指令可以比较短，**这是栈机的一个优点。**


接下来，我们聊聊字节码的特点。

字节码是什么样子的呢？我编写了一个简单的类 `MyClass.java`，其中的 `foo()` 方法实现了一个简单的加法计算，你可以看看它对应的字节码是怎样的：

 复制代码


```
1 public class MyClass {
2     public int foo(int a){
3         return a + 3;
4     }
5 }
```

在命令行终端敲入下面两行命令，生成文本格式的字节码文件：

 复制代码

```
1 javac MyClass.java
2 javap -v MyClass > MyClass.bc
```

打开 `MyClass.bc` 文件，你会看到下面的内容片段：

 复制代码

```
1 public int foo(int);
2 Code:
3     0: iload_1      //把下标为1的本地变量入栈
4     1: iconst_3     //把常数3入栈
5     2: iadd         //执行加法操作
6     3: ireturn     //返回
```

其中，`foo()` 方法一共有四条指令，前三条指令是计算一个加法表达式 `a+3`。**这完全是按照逆波兰表达式的顺序来执行的：**先把一个本地变量入栈，再把常数 3 入栈，再执行加法运算。

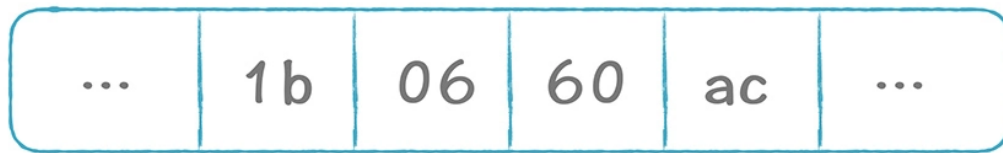
如果你细心的话，应该会发现：把参数 a 入栈的第一条指令，用的下标是 1，而不是 0。这是因为，每个方法的第一个参数（下标为 0）是当前对象实例的引用（this）。

我提供了字节码中，一些常用的指令，增加你对字节码特点的直观认识，完整的指令集可以参见 [JVM 的规格书](#)：

助记符	操作码 (16进制)	操作码 (2进制)	其他字节	描述
iload	15	0001 0101	1个字节： 变量索引	把本地变量入栈，操作数是下标
iload_0	1a	0001 1010		把下标为0的本地变量入栈
iload_1	1b	0001 1011		把下标为1的本地变量入栈
iload_2	1c	0001 1100		把下标为2的本地变量入栈
iload_3	1d	0001 1101		把下标为3的本地变量入栈
iconst_0	03	0000 0011		把常数0入栈
...				
iconst_5	08	0000 1000		把常数5入栈
bipush	10	0001 0000	1个字节： 8位整数	把一个8位整数入栈
sipush	11	0001 0001	2个字节： 16位整数	把一个16位整数入栈
ldc	12	0001 0010	1个字节： 常量的序号	把一个常数入栈，该常数可能是String, int, float, Class等
iadd	60	0110 0000		加法运算
imul	68	0110 1000		乘法运算
ireturn	ac	1010 1100		返回一个整数

其中，每个指令都是 8 位的，占一个字节，而且 iload_0、iconst_0 这种指令，甚至把操作数（变量的下标、常数的值）压缩进了操作码里，可以看出，字节码的设计很注重节省空间。

根据这些指令所对应的操作码的数值，MyClass.bc 文件中，你所看到的那四行代码，变成二进制格式，就是下面的样子：



你可以用 “`hexdump MyClass.class`” 显示字节码文件的内容，从中可以发现这个片段（就是橙色框里的内容）：

```
richard@mac java $ hexdump MyClass.class
00000000 ca fe ba be 00 00 00 34 00 0f 0a 00 03 00 0c 07
00000100 00 0d 07 00 0e 01 00 06 3c 69 6e 69 74 3e 01 00
00000200 03 28 29 56 01 00 04 43 6f 64 65 01 00 0f 4c 69
00000300 6e 65 4e 75 6d 62 65 72 54 61 62 6c 65 01 00 03
00000400 66 6f 6f 01 00 04 28 49 29 49 01 00 0a 53 6f 75
00000500 72 63 65 46 69 6c 65 01 00 0c 4d 79 43 6c 61 73
00000600 73 2e 6a 61 76 61 0c 00 04 00 05 01 00 07 4d 79
00000700 43 6c 61 73 73 01 00 10 6a 61 76 61 2f 6c 61 6e
00000800 67 2f 4f 62 6a 65 63 74 00 21 00 02 00 03 00 00
00000900 00 00 00 02 00 01 00 04 00 05 00 01 00 06 00 00
00000a00 00 1d 00 01 00 01 00 00 00 05 2a b7 00 01 b1 00
00000b00 00 00 01 00 07 00 00 00 06 00 01 00 00 00 01 00
00000c00 01 00 08 00 09 00 01 00 06 00 00 00 1c 00 02 00
00000d00 02 00 00 00 04 1b 06 60 ac 00 00 00 01 00 07 00
00000e00 00 00 06 00 01 00 00 00 03 00 01 00 0a 00 00 00
00000f00 02 00 0b
00000f3
```

现在，你已经初步了解了基于栈的虚拟机，**与此对应的是基于寄存器的虚拟机**。这类虚拟机的运行机制跟机器码的运行机制是差不多的，它的指令要显式地指出操作数的位置（寄存器或内存地址）。**它的优势是：**可以更充分地利用寄存器来保存中间值，从而可以进行更多的优化。

例如，当存在公共子表达式时，这个表达式的计算结果可以保存在某个寄存器中，另一个用到该公共子表达式的指令，就可以直接访问这个寄存器，不用再计算了。在栈机里是做不到这样的优化的，所以基于寄存器的虚拟机，性能可以更高。而它的典型代表，是 Google 公司为 Android 开发的 Dalvik 虚拟机和 Lua 语言的虚拟机。

这里你需要注意，栈机并不是不用寄存器，实际上，操作数栈是可以基于寄存器实现的，寄存器放不下的再溢出到内存里。只不过栈机的每条指令，只能操作栈顶部的几个操作数，所以也就没有办法访问其它寄存器，实现更多的优化。

现在，你应该对虚拟机以及字节码有了一定的了解了。那么，如何借助工具生成字节码呢？你可能会问了：为什么不纯手工生成字节码呢？当然可以，只不过借助工具会更快一些。

就像你生成 LLVM 的 IR 时，也曾获得了 LLVM 的 API 的帮助。所以，接下来我会带你认识 ASM 这个工具，并借助它为我们生成字节码。

字节码生成工具 ASM

其实，有很多工具会帮我们生成字节码，比如 Apache BCEL、Javassist 等，选择 ASM 是因为它的性能比较高，并且它还被 Spring 等著名软件所采用。

🔗 **ASM** 是一个开源的字节码生成工具。Groovy 语言就是用它来生成字节码的，它还能解析 Java 编译后生成的字节码，从而进行修改。

ASM 解析字节码的过程，有点像 XML 的解析器解析 XML 的过程：先解析类，再解析类的成员，比如类的成员变量（Field）、类的方法（Method）。在方法里，又可以解析出一行行的指令。

你需要掌握两个核心的类的用法：


🔗 **ClassReader**，用来解析字节码。

🔗 **ClassWriter**，用来生成字节码。

这两个类如果配合起来用，就可以一边读入，做一定修改后再写出，从而实现对原来代码的修改。

我们先试验一下，用 ClassWriter 生成字节码，看看能不能生成一个跟前面示例代码中的 MyClass 一样的类（我们可以称呼这个类为 MyClass2），里面也有一个一模一样的 foo 函

数。相关代码参考 [genMyClass2\(\)](#) 方法，这里只拿出其中一段看一下：

 复制代码

```
1  /////创建foo方法
2  MethodVisitor mv = cw.visitMethod(Opcodes.ACC_PUBLIC, "foo",
3      "(I)I",    //括号中的是参数类型，括号后面的是返回值类型
4      null, null);
5
6  //添加参数a
7  mv.visitParameter("a", Opcodes.ACC_PUBLIC);
8
9  mv.visitVarInsn(Opcodes.ILOAD, 1); //iload_1
10 mv.visitInsn(Opcodes.ICONST_3);    //iconst_3
11 mv.visitInsn(Opcodes.IADD);        //iadd
12 mv.visitInsn(Opcodes.IRETURN);     //ireturn
13
14 //设置操作数栈最大的帧数，以及最大的本地变量数
15 mv.visitMaxs(2,2);
16
17 //结束方法
18 mv.visitEnd();
```

从这个示例代码中，你会看到两个特点：

1. ClassWriter 有 visitClass、visitMethod 这样的方法，以及 ClassVisitor、MethodVisitor 这样的类。这是因为 ClassWriter 用了 visitor 模式来编程。你每一次调用 visitXXX 方法，就会创建相应的字节码对象，就像 LLVM 形成内存中的 IR 对象一样。
2. foo() 方法里的指令，跟我们前面看到的字节码指令是一样的。

执行这个程序，就会生成 MyClass2.class 文件。

把 MyClass2.class 变成可读的文本格式之后，你可以看到它跟 MyClass 的字节码内容几乎是一样的，只有类名称不同。当然了，你还可以写一个程序调用 MyClass2，验证一下它是否能够正常工作。

发现了吗？只要熟悉 Java 的字节码指令，在 ASM 的帮助下，你可以很方便地生成字节码！想了解更多 ASM 的用法，可以参考它的一个 [技术指南](#)。

既然你已经能生成字节码了，那么不如趁热打铁，把编译器前端生成的 AST 编译成字节码，在 JVM 上运行？因为这样，你就能从前端到后端，完整地实现一门基于 JVM 的语言了！

将 AST 编译成字节码

基于 AST 生成 JVM 的字节码的逻辑还是比较简单的，比生成针对物理机器的目标代码要简单得多，为什么这么说呢？**主要有以下几个原因：**

首先，你不用太关心指令选择的问题。针对 AST 中的每个运算，基本上都有唯一的字节码指令对应，你直白地翻译就可以了，不需要用到树覆盖这样的算法。


你也不需要关心寄存器的分配，因为 JVM 是使用操作数栈的；

指令重排序也不用考虑，因为指令的顺序是确定的，按照逆波兰表达式的顺序就可以了；

优化算法，你暂时也不用考虑。

按照这个思路，你可以在 playscript-java 中增加一个 [ByteCodeGen](#) 的类，针对少量的语言特性做一下字节码的生成。最后，我们再增加一点代码，能够加载并执行所生成的字节码。运行下面的命令，可以把 [bytecode.play](#) 示例代码编译并运行。

```
1 java play.PlayScript -bc bytecode.play
```

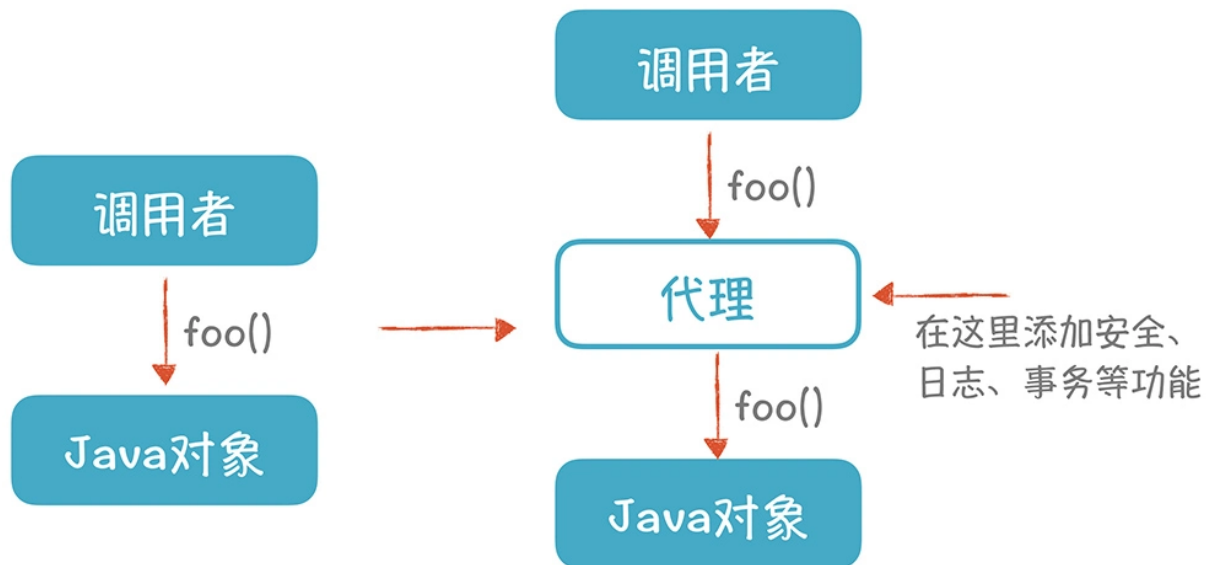
 复制代码

当然了，我们只实现了 playscript 的少量特性，不过，如果在这个基础上继续完善，你就可以逐步实现一门完整的，基于 JVM 的语言了。

Spring 与字节码生成技术

我在开篇提到，Java 程序员大部分都会使用 Spring。Spring 的 IoC（依赖反转）和 AOP（面向切面编程）特性几乎是 Java 程序员在面试时必被问到的问题，了解 Spring 和字节码生成技术的关系，能让你在面试时更轻松。

Spring 的 AOP 是基于代理（proxy）的机制实现的。在调用某个对象的方法之前，要先经过代理，在代理这儿，可以进行安全检查、记日志、支持事务等额外的功能。



Spring 采用的代理技术有两个：一个是 Java 的动态代理（dynamic proxy）技术；一个是采用 cglib 自动生成代理，cglib 采用了 asm 来生成字节码。



Java 的动态代理技术，只支持某个类所实现的接口中的方法。如果一个类不是某个接口的实现，那么 Spring 就必须用到 cglib，从而用到字节码生成技术来生成代理对象的字节码。

课程小结

本节课，我主要带你了解了字节码生成技术。字节码生成技术是 Java 程序员非常熟悉的 Spring 框架背后所依赖的核心技术之一。如果想要掌握这个技术，你需要对 Java 虚拟机的运行原理、字节码的格式，以及常见指令有所了解。**我想强调的重点如下：**

运行程序的虚拟机有两种设计：一个是基于栈的；一个是基于寄存器的。

基于栈的虚拟机不用显式地管理操作数的地址，因此指令会比较短，指令生成也比较容易。而基于寄存器的虚拟机，则能更好地利用寄存器资源，也能对代码进行更多的优化。

你要能够在脑中图形化地想象出栈机运行的过程，从而对它的原理理解得更清晰。

ASM 是一个字节码操纵框架，它能帮你修改和生成字节码，如果你有这方面的需求，可以采用这样的工具。

相信有了前几课的基础，你再接触一种新的后端技术时，学习速度会变得很快。学完这节课之后，你可能会觉得：字节码就是另一种 IR，而且比 LLVM 的 IR 简单多了。如果你有这个感受，那么你已经脑海里，建立了相关的知识体系，达到了举一反三的效果。

在这里，我也建议 Java 程序员，多多了解 JVM 的运行机制，和 Java 字节码，这样会更好地把握 Java 语言的底层机制，从而更利于自己职业生涯的发展。

一课一思

你是否想为自己写的语言生成字节码呢？或者生成字节码的技术，能否帮你解决现有项目中的难点问题呢？欢迎在留言区分享你的观点。

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。

示例代码链接，我放在文末，供你参考。

GenClass.java（用 asm 工具生成字节码）：[码云](#) [GitHub](#)

MyClass.java（一个简单的 java 类）：[码云](#) [GitHub](#)

MyClass.bc（文本格式的字节码）：[码云](#) [GitHub](#)

ByteCodeGen.java（基于 AST 生成字节码）：[码云](#) [GitHub](#)

bytecode.play（示例用的 playscript 脚本）：[码云](#) [GitHub](#)

精选留言 (8)



风

2019-11-08

老师能不能为我们展望一下量子计算机的面世和普及，会给编译器、操作系统、网络等传统计算机技术带来什么样的冲击？会不会完全是另外一套技术栈？

作者回复：答案是肯定的。因为编译器、操作系统，都是跟底层架构关系密切。我们目前用的编译器和操作系统的基本架构，跟50年前没有太大区别，原因就是计算机的基础架构没有改变。

你的问题是个好问题。我不一定能安排在正文里。但我记下来，有机会再发一篇文章，或者单独回复你！

共 3 条评论 >

👍 14



孤星可

2019-11-18

我正在写一个简单的 解释型 jvm 有兴趣欢迎共建 github mini-jvm

作者回复：喔，不错。极客范！

这种练习会极快地提升自己，值得提倡！

我先去关注一下，看到了：<https://github.com/guxingke/mini-jvm>



👍 10



sugar

2020-05-03

补充一点：基于寄存器的虚拟机，google的js虚拟机v8目前也是了（以前是栈机）。



👍 3



树袋熊

2020-06-26

老师，为什么把dsl编译成字节码会提高性能呢？和用java程序来解析dsl，然后用jvm运行两者有什么不同呢？dsl编译成字节码比较快是相对什么情况比较快？

作者回复: 这跟解释执行的语言速度慢, 而编译后的语言执行速度快, 是一样的道理。

以一个简单的加法为例, 比如执行“a+b”, 如果编译执行, 可以知道a和b是什么数据类型, 直接生成对应的目标代码。在Java字节码中, 处理整数加法和浮点数加法的指令是不一样的。

而如果你写个解释器执行, 就必须在运行时判断它们的数据类型, 然后执行针对某种数据类型的运算。实际发生的运算量, 要比编译的情况下大很多。



阿鼎

2021-08-20

像c++这种编译型语言, 如何做到AOP、IOC?



Geek_08d95a

2022-11-27 来自广东

老师 你好 你说的你们正在使用dsl这块做规则引擎 可以分享一下吗



dll

2022-07-27

栈机并不是不用寄存器, 实际上, 操作数栈是可以基于寄存器实现的, 寄存器放不下的再溢出到内存里。只不过栈机的每条指令, 只能操作栈顶部的几个操作数, 所以也就没有办法访问其它寄存器, 实现更多的优化

不太理解, jvm的指令只能操作栈顶的数据, 栈一定不在寄存器上, cpu是通过把这部分字节码的栈放到高速缓存里被快速读取到吗? 要是次次都从内存读不得慢死了吗?

但是好像栈用到对象引用地址, 对象都得从堆上取真正的对象数据, 那不是次次都得访问内存? jvm是自己内部的机制产生的指令才会用到寄存器? 专门操作字节码的指令就不用寄存器? 是这样吗



if...else...

2021-10-25

学习了, 字节码生成



