# 历史背景

Graal虚拟机以及Graal编译器仍在实验室中尚未商用，但未来其有望代替或成为HotSpot下一代技术基础。Graal编译器最初是在Maxine虚拟机中作为C1X编译器的下一代编译器而设计的，所以它理所当然地使用于Java语言来编写。2012年，Graal编译器从Maxine虚拟机项目中分离，成为一个独立发展的Java编译器项目，Oracle Labs希望它最终能够成为一款高编译效率、高输出质量、支持提前编译和即时编译，同时支持应用于包括HotSpot在内的不同虚拟机的编译器。

由于这个编译器使用Java编写，代码清晰，又继承了许多来自HotSpot的服务端编译器的高质量优化技术，所以无论是科技企业还是高校研究院，都愿意在它上面研究和开发新编译技术。HotSpot服务端编译器的创造者Cliff Click自己就对Graal编译器十分推崇，并且公开表示再也不会用C、C++去编写虚拟机和编译器了。Twitter的Java虚拟机团队也曾公开说过C2目前犹如一潭死水，亟待一个替代品，因为在它上面开发、改进实在太困难了。

可以从github克隆openjdk镜像：

|  |
| --- |
| $ git clone https://github.com/dmlloyd/openjdk.git |

C2代码位于openjdk/hotspot/src/share/vm/opto

Graal编译器在JDK 9时以Jaotc提前编译工具的形式首次加入到官方的JDK中，从JDK 10起，Graal编译器可以替换服务端编译器，成为HotSpot分层编译中最顶层的即时编译器。这种可替换的即时编译器架构的实现，得益于HotSpot编译器接口的出现。

早期的Graal曾经同C1及C2一样，与HotSpot的协作是紧耦合的，这意味着每次编译Graal均需重新编译整个HotSpot。JDK 9时发布的JEP 243：Java虚拟机编译器接口（Java-Level JVM Compiler Interface，JVMCI）使得Graal可以从HotSpot的代码中分离出来。JVMCI主要提供如下三种功能：

* 响应HotSpot的编译请求，并将该请求分发给Java实现的即时编译器。
* 允许编译器访问HotSpot中与即时编译相关的数据结构，包括类、字段、方法及其性能监控数据等，并提供了一组这些数据结构在Java语言层面的抽象表示。
* 提供HotSpot代码缓存（Code Cache）的Java端抽象表示，允许编译器部署编译完成的二进制机器码。

综合利用上述三项功能，我们就可以把一个在HotSpot虚拟机外部的、用Java语言实现的即时编译器（不局限于Graal）集成到HotSpot中，响应HotSpot发出的最顶层的编译请求，并将编译后的二进制代码部署到HotSpot的代码缓存中。

此外，单独使用上述第三项功能，又可以绕开HotSpot的即时编译系统，让该编译器直接为应用的类库编译出二进制机器码，将该编译器当作一个提前编译器去使用（如Jaotc）。

# 自己编译Graal编译器

由于Graal编译器要同时支持Graal VM下的各种子项目，如Truffle、Substrate VM、Sulong等，还要支持作为HotSpot和Maxine虚拟机的即时编译器，所以只用Maven或Gradle的话，配置管理过程会相当复杂。为了降低代码管理、依赖项管理、编译和测试等环节的复杂度，Graal团队专门用Python 2写了一个名为mx的小工具来自动化做好这些事情。我们要构建Graal的调试环境，第一步要先把构建工具mx安装好，这非常简单，进行如下操作即可：

|  |
| --- |
| $ git clone <https://github.com/graalvm/mx.git>  $ cd mx; git checkout 7353064  $ export PATH=`pwd`/mx:$PATH |

'mx vm'等同于'java'

mx需要python2：

|  |
| --- |
| apt-get install python2.7 |

既然Graal编译器是以Java代码编写的，那第二步自然是要找一个合适的JDK来编译。考虑到Graal VM项目是基于OpenJDK 8开发的，而JVMCI接口又在JDK 9以后才会提供，所以Graal团队提供了一个带有JVMCI功能的OpenJDK 8版本，我们可以选择这个版本的JDK 8来进行编译。

|  |
| --- |
| https://github.com/graalvm/openjdk8-jvmci-builder/releases  https://github.com/graalvm/graal-jvmci-8  $ export JAVA\_HOME=/development/oraclejdk1.8.0\_212-jvmci-20-b01 |

但是本次实验使用的是jdk9：

|  |
| --- |
| <https://www.oracle.com/java/technologies/javase/javase9-archive-downloads.html>  root@deng4j-virtual-machine:~# java -version  java version "9.0.4"  Java(TM) SE Runtime Environment (build 9.0.4+11)  Java HotSpot(TM) 64-Bit Server VM (build 9.0.4+11, mixed mode) |

graal使用的接口叫做jvmci，由JEP 243Java-Level JVM Compiler Interface提案加入到Java中。第一个实现提案的版本是java9

第三步是获取Graal编译器代码，编译器部分的代码是与整个Graal VM放在一块的，我们把Graal VM复制下来，大约有700MB，操作如下：

|  |
| --- |
| $ git clone https://github.com/graalvm/graal.git --branch vm-enterprise-0.28.2 |

其他目录中存放着Truffle、Substrate VM、Sulong等其他项目，这些在本次实战中不会涉及。进入compiler子目录，使用mx构建Graal编译器，操作如下：

|  |
| --- |
| $ cd graal/compiler  $ mx build |

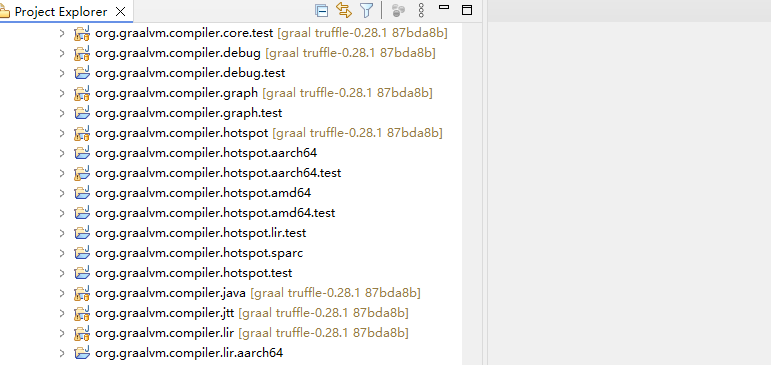
由于整个构建过程需要的依赖项都可以自动处理，需要手动处理的只有OpenJDK一个，所以编译一般不会出现什么问题，大概两三分钟编译即可完成。此时其实已经可以修改、调试Graal编译器了，但写Java代码不同于C、C++，应该没有人会直接用VIM去做Java开发调试，我们还是需要一个IDE来支持本次实战的。

mx工具能够支持Eclipse、Intellij IDEA和NetBeans三种主流的Java IDE项目的创建（Graal团队中使用Eclipse占多数，支持也最好），操作如下：

|  |
| --- |
| $ cd graal/compiler  # 生成指定编辑器的工程配置文件  $ mx eclipseinit  $ mx intellijinit  $ mx netbeansinit |

无论使用哪种IDE，都需要把IDE配置中使用的Java堆修改到2GB或以上，才能保证Graal在IDE中的编译构建能够顺利进行。譬如Eclipse默认配置（eclipse.ini文件）下的Java堆最大为1GB，在Eclipse中选择File->Open Projects from File System，再选择Graal项目的根目录，将

会导入整个Graal VM，导入的工程如图：



本次实验采用jdk9编译，记得在Eclipse中也必须将那个带有JVMCI功能的特殊JDK9用作Eclipse里面的环境配置（Windows -> Preferences -> Java -> Install JREs -> Execution Environments）。此外，还需要手工将以其他版本号结尾的工程关闭。

# JVMCI编译器接口

## 介绍

来思考一下，如果让您来设计JVMCI编译器接口，它应该是怎样的？既然JVMCI面向的是Java语言的编译器接口，那它至少在形式上是与我们已经见过无数次的Java接口是一样的。

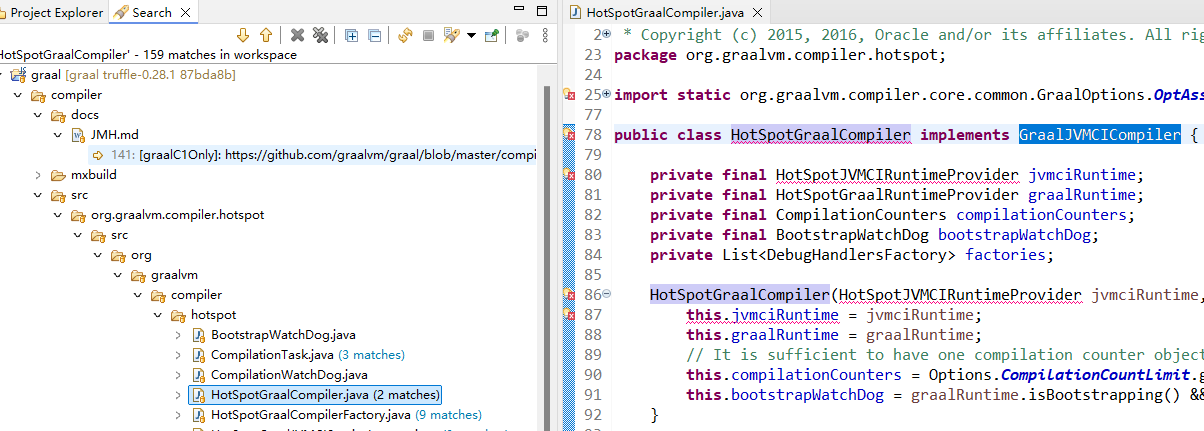
我们来考虑即时编译器的输入是什么。答案当然是要编译的方法的字节码。既然叫字节码，顾名思义它就应该是“用一个字节数组表示的代码”。那接下来它输出什么？这也很简单，即时编译器应该输出与方法对应的二进制机器码，二进制机器码也应该是“用一个字节数组表示的代码”。这样的话，JVMCI接口就应该看起来类似于下面这种样子：

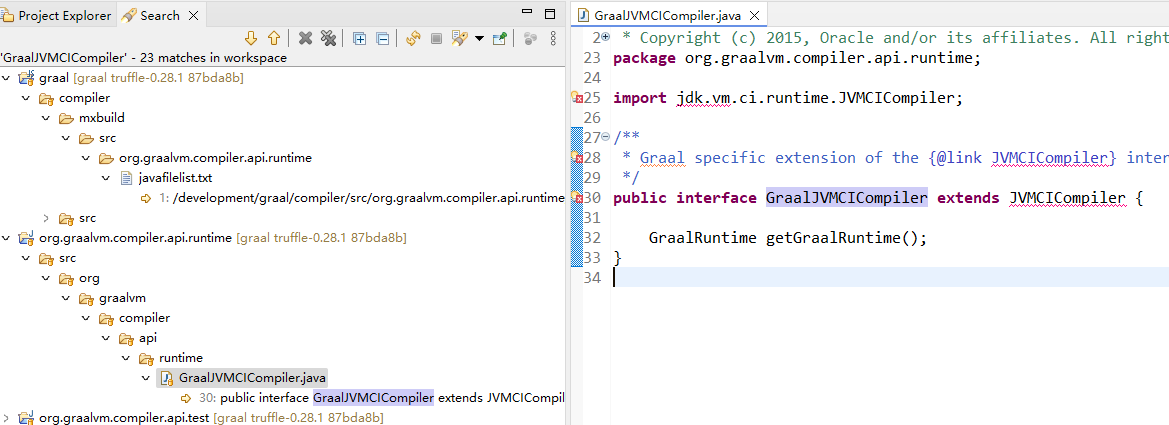
|  |
| --- |
| interface JVMCICompiler {  byte[] compileMethod(byte[] bytecode);  } |

事实上JVMCI接口只比上面这个稍微复杂一点点，因为其输入除了字节码外，HotSpot还会向编译器提供各种该方法的相关信息，譬如局部变量表中变量槽的个数、操作数栈的最大深度，还有分层编译在底层收集到的统计信息等。因此JVMCI接口的核心内容实际是：

|  |
| --- |
| interface JVMCICompiler {  void compileMethod(CompilationRequest request);  }  interface CompilationRequest {  JavaMethod getMethod();  }  interface JavaMethod {  byte[] getCode();  int getMaxLocals();  int getMaxStackSize();  ProfilingInfo getProfilingInfo();  ... // 省略其他方法  } |

在Eclipse中找到JVMCICompiler接口，通过继承关系分析，可以清楚地看到有一个实现类HotSpotGraalCompiler实现了JVMCI，这个就是我们要分析的代码的入口。



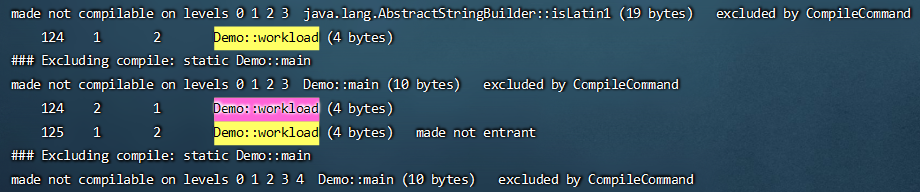


为了后续调试方便，我们先准备一段简单的代码，并让它触发HotSpot的即时编译，以便我们跟踪观察编译器是如何工作对的。

|  |
| --- |
| class Demo {  public static void main(String[] args) {  while (true) {  workload(14, 2);  }  }  private static int workload(int a, int b) {  return a + b;  }  } |

由于存在无限循环，workload()方法肯定很快就会被虚拟机发现是热点代码因而进行编译。实际上除了workload()方法以外，这段简单的代码还会导致相当多的其他方法的编译，因为一个最简单的Java类的加载和运行也会触发数百个类的加载。为了避免干扰信息太多，笔者加入了参数-XX: CompileOnly来限制只允许workload()方法被编译。

|  |
| --- |
| javac Demo.java  java -XX:+PrintCompilation -XX:CompileOnly=Demo::workload Demo |



上面显示wordload()方法确实被分层编译了多次，“made not entrant”的输出就表示了方法的某个已编译版本被丢弃过。从这段信息中清楚看到，分层编译机制及最顶层的服务端编译都已经正常工作了，下一步就是用我们在Eclipse中的Graal编译器代替HotSpot的服务端编译器。

## 使用自己编译的Graal编译器

为简单起见，加上-XX:-TieredCompilation关闭分层编译，让虚拟机只采用有一个JVMCI编译器而不是由客户端编译器和JVMCI混合分层。然后使用参数-XX:+EnableJVMCI、-XX:+UseJVMCICompiler来启用JVMCI接口和JVMCI编译器。

由于这些目前尚属实验阶段的功能，需要再使用-XX: +UnlockExperimentalVMOptions参数进行解锁。最后，也是最关键的一个问题，如何让HotSpot找到Graal编译器的位置呢？

如果采用带有jvmci的JDK8 ，那虚拟机将会自动去查找JAVA\_HOME/jre/lib/jvmci目录。假如这个目录不存在，那就会从-Djvmci.class.path.append参数中搜索。它查找的目标，即Graal编译器的JAR包。通过mx build命令成功编译出来后，在带有jvmci的JDK8下使用启动参数：

带有jvmci的JDK8的运行配置：

|  |
| --- |
| -Djvmci.class.path.append=~/graal/compiler/mxbuild/dists/jdk1.8/graal.jar:~/graal/sdk/mxbuild/dists/jdk1.8/graal  -XX:+UnlockExperimentalVMOptions  -XX:+EnableJVMCI  -XX:+UseJVMCICompiler  -XX:-TieredCompilation  -XX:+PrintCompilation  -XX:CompileOnly=Demo::workload |

如果采用JDK 9或以上版本，那原本的Graal编译器是实现在jdk.internal.vm.compiler模块中的，只要用--upgrade-module-path参数指定这个模块的升级包即可。

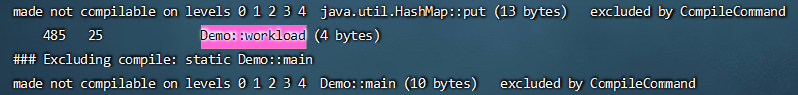
JDK9或以上版本的运行配置：

|  |
| --- |
| --module-path=~/graal/sdk/mxbuild/dists/jdk11/graal.jar  --upgrade-module-path=~graal/compiler/mxbuild/dists/jdk11/jdk.internal.vm.compiler.jar  -XX:+UnlockExperimentalVMOptions  -XX:+EnableJVMCI  -XX:+UseJVMCICompiler  -XX:-TieredCompilation  -XX:+PrintCompilation  -XX:CompileOnly=Demo::workloa |

通过上述参数，HotSpot就能顺利找到并应用Graal编译器了。

本次实验采用的jdk9，自己编译的graal编译器：

|  |
| --- |
| java \  --module-path=/development/graal/sdk/mxbuild/modules/org.graalvm.graal\_sdk.jar:/development/graal/truffle/mxbuild/modules/com.oracle.truffle.truffle\_api.jar \  --upgrade-module-path=/development/graal/compiler/mxbuild/modules/jdk.internal.vm.compiler.jar \  -XX:+UnlockExperimentalVMOptions \  -XX:+EnableJVMCI \  -XX:+UseJVMCICompiler \  -XX:-TieredCompilation \  -XX:+PrintCompilation \  -XX:CompileOnly=Demo::workload \  Demo |



对HotSpotGraalCompiler类的compileMethod()方法做一个简单改动，输出编译的方法名称和编译耗时：

|  |
| --- |
|  |