HZ BOOKS
华章科技

自己动手写Java虚拟机

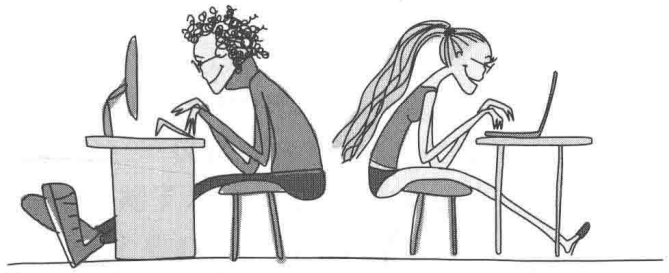
张秀宏 著

Write Your Own Java Virtual Machine

机械工业出版社
China Machine Press

自己动手写Java虚拟机

张秀宏 著



Write Your Own Java Virtual Machine

机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目（CIP）数据

自己动手写 Java 虚拟机 / 张秀宏著 . —北京：机械工业出版社，2016.4
（Java 核心技术系列）

ISBN 978-7-111-53413-6

Ⅰ. 自… Ⅱ. 张… Ⅲ. JAVA 语言 – 程序设计 Ⅳ. TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 066610 号

自己动手写 Java 虚拟机

出版发行：机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037）
责任编辑：李 艺 责任校对：殷 虹
印 刷：三河市宏图印务有限公司 版 次：2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷
开 本：186mm × 240mm 1/16 印 张：17.5
书 号：ISBN 978-7-111-53413-6 定 价：69.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
客服热线：（010）88379426 88361066 投稿热线：（010）88379604
购书热线：（010）68326294 88379649 68995259 读者信箱：hzit@hzbook.com

华章科技
HZBOOKS | Science & Technology

Preface 前　言

为什么编写本书

Java语言于1995年首次公开发布，很快便取得了巨大的成功，成为使用最为广泛的编程语言之一。到现在，Java已经经历了20多个年头。在这期间，无论是Java语言本身还是Java虚拟机技术，都取得了长足的进步。现如今，Java依然长期占据TIOBE㊀网站的编程语言排行榜首。最近更是被TIOBE选为2015年度编程语言㊁，风采可谓不减当年。

众所周知，Java早已不仅仅是一个单纯的语言，而是一个开放的平台。活跃在这个平台之上的编程语言除了Java之外，还有Groovy㊂、Scala㊃、Clojure㊄、Jython㊅和JRuby㊆等。Java虚拟机则是支持这个平台的基石。

市面上教授Java语言的书籍种类繁多，相比之下，介绍Java虚拟机的书籍却是凤毛麟角。这足以说明Java作为一门高级语言是多么成功（让程序员远离底层），但并不代表Java虚拟机技术不重要。恰恰相反，当Java语言掌握到一定程度时，Java虚拟机原理自然就会成为必须越过的一道鸿沟。

近几年，国内涌现出了一些讨论Java虚拟机技术的优秀书籍，这些书籍主要以分析OpenJDK或Oracle JDK为主。本书另辟蹊径，带领读者自己动手从零开始用Go语言编写Java虚拟机。这样做好处颇多，弥补了OpenJDK等虚拟机的不足。

首先，OpenJDK等虚拟机实现非常复杂。对于初学者而言，很容易陷入代码的海洋

㊀ http://www.tiobe.com/。

㊁ Java曾被TIOBE选为2005年度编程语言。

㊂ http://www.groovy-lang.org/。

㊃ http://www.scala-lang.org/。

㊄ http://clojure.org/。

㊅ http://www.jython.org/。

㊆ http://jruby.org/。

和不必要的细节之中。其次，OpenJDK 等虚拟机大多用 C++ 语言编写。C++ 语言非常复杂，理解起来难度很大。最后，单纯阅读代码比较乏味，缺少乐趣，而脱离代码又很难透彻讨论技术。通过自己动手编写代码，很好地避免了上述问题。看着自己实现的 Java 虚拟机功能逐渐增强，看到可以运行的 Java 程序越来越复杂，成就感非常强。总之，通过实践的方式，相信读者可以更深刻地领悟 Java 虚拟机的工作原理。

Go 是 Google 公司于 2012 年推出的系统编程语言。从到硬件的距离来看，Go 语言介于 C 和 Java 之间。Go 的语法和 C 类似，但更加简洁，因此很容易学习。Go 语言内置了丰富的基本数据类型，并且支持结构体，所以很适合用来实现 Java 虚拟机。Go 支持指针，但并不支持指针运算，因此用 Go 编写的代码要比 C 代码更加安全。此外，Go 还支持垃圾回收和接口等 Java 类语言中才有的功能，大大降低了实现 Java 虚拟机的难度。

以上是本书采用 Go 语言编写 Java 虚拟机的原因，希望读者在学习本书的过程中，可以喜欢上 Go 这门还很年轻的语言。

本书主要内容

全书一共分为 11 章，各章内容安排如下：

第 1 章：安装开发环境，讨论 java 命令，并编写一个类似 Java 的命令行程序。

第 2 章：讨论 Java 虚拟机如何搜索 class 文件，实现类路径。

第 3 章：讨论 class 文件结构，实现 class 文件解析。

第 4 章：讨论运行时数据区，实现线程私有的运行时数据区，包括线程、Java 虚拟机栈、栈帧、操作数栈和局部变量表等。

第 5 章：讨论 Java 虚拟机指令集和解释器，实现解释器和 150 余条指令。

第 6 章：讨论类、对象以及线程共享的运行时数据区，实现类加载器、方法区以及部分引用类指令。

第 7 章：讨论方法调用和返回，实现方法调用和返回指令。

第 8 章：讨论数组和字符串，实现数组相关指令和字符串池。

第 9 章：讨论本地方法调用，实现 Object.hashCode() 等本地方法。

第 10 章：讨论异常处理机制，实现 athrow 指令。

第 11 章：讨论 System 类的初始化过程和 System.out.println() 的工作原理等，并对全书进行总结。

本书面向读者

本书主要面向有一定经验的 Java 程序员，但任何对 Java 虚拟机工作原理感兴趣的读者都可以从本书获益。如前所述，本书将使用 Go 语言实现 Java 虚拟机。书中会简要介绍 Go 语言的部分语法以及与 Java 语言的区别，但不会深入讨论。由于 Go 语言相对比较简单，相信任何有 C 系列语言（如 C、C++、C#、Objective-C、Java 等）经验的读者都可以轻松读懂书中的源代码。

如何阅读本书

本书代码经过精心调整，每一章（第 1 章除外）都建立在前一章的基础上，但每一章又都可以单独编译和运行。本书内容主要围绕代码对 Java 虚拟机展开讨论。读者可以从第 1 章开始，按顺序阅读本书并运行每一章的源代码，也可以直接跳到感兴趣的章节阅读，必要时再阅读其他章节。

参考资料

本书主要参考了下面这些资料：

- 《Java 虚拟机规范》第 8 版
- 《Java 语言规范》第 8 版
- 《深入 Java 虚拟机》(原书第 2 版) ⊖

其中《Java 虚拟机规范》主要参考了第 8 版，但同时也参考了第 7 版和更老的版本。《Java 语言规范》则主要参考了第 8 版。读者可以从 http://docs.oracle.com/javase/specs/index.html 获取各个版本的《Java 虚拟机规范》和《Java 语言规范》。

笔者早在十年前还在上学时就读过由 Bill Venners 著，曹晓钢等翻译的《深入 Java 虚拟机（原书第 2 版）》。但是由于当时水平有限，理解得并不是很深入。时隔十年，重读此书还是颇有收获。较之《Java 虚拟机规范》的严谨和刻板，该书更加通俗易懂。原书作者已经将部分章节放于网上，网址是 http://www.artima.com/insidejvm/ed2/，读者可以免费阅读。

以上是 Java 方面的资料。Go 语言方面主要参考了 Go 官网上的各种资料，包括《如

⊖ 原书名为《Inside the Java Virtual Machine，Second Edition》。

何编写 Go 程序》[㊀]《 Effective Go 》[㊁]《 Go 语言规范 》[㊂]以及 Go 标准库文档[㊃]等。另外，在本书的写作过程中，笔者还通过搜索引擎查阅了遍布于网络上（特别是 StackOverflow [㊄]和 Wikipedia [㊅]）的各种资料，这里就不一一罗列了。

下载本书源代码

本书源代码可以从 https://github.com/zxh0/jvmgo-book 获取。代码分为 Go 和 Java 两部分，目录结构如下：

```
https://github.com/zxh0/jvmgo-book/v1/code/
  |-go
    |-src
      |-jvmgo
  |-java
    |-example
```

Go 语言部分是 Java 虚拟机代码，每章为一个子目录，可以独立编译和运行。Java 语言部分是 Java 示例代码，每章为一个包。Java 代码按照 Gradle [㊆]工程标准目录结构组织，可以用 Gradle 编译整个工程，也可以用 javac 分别编译每个文件。

勘误和支持

《 Java 虚拟机规范 》对 Java 虚拟机的工作机制有十分严谨的描述。但是由于笔者水平和表达能力有限，本书一定存在表述不精确、不准确，甚至不正确的地方。另外，由于时间有限，书中也难免会有一些疏漏之处，还请读者谅解。

本书的勘误将通过 https://github.com/zxh0/jvmgo-book/blob/master/v1/errata.md 发布和更新。如果读者发现书中的错误、有改进意见，或者有任何问题需要讨论，都可以在本书的 Github 项目上创建 Issue。此外也可以加入 QQ 群（ 470333113 ）与读者交流。

㊀ https://golang.org/doc/code.html。

㊁ https://golang.org/doc/effective_go.html。

㊂ https://golang.org/ref/spec。

㊃ https://golang.org/pkg/。

㊄ http://stackoverflow.com/。

㊅ https://en.wikipedia.org/。

㊆ http://gradle.org/。

致谢

首先要感谢我的家人和朋友，没有你们的鼓励、支持和帮助，本书不可能面世。这里特别感谢我的妻子，在我陷入低谷的时候，叮嘱我继续努力不要放弃。还有我的朋友范森，每章开头的可爱鼹鼠就是出自他手，希望这些鼹鼠能给枯燥的文字增添一些色彩。

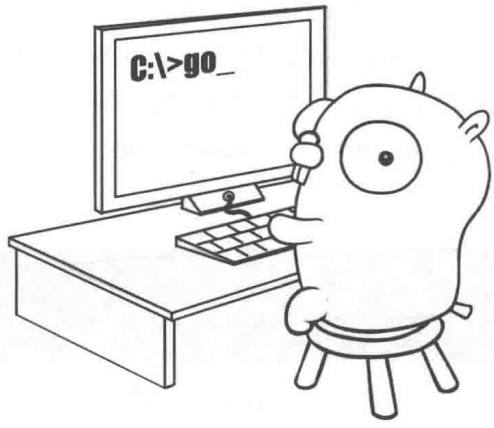
其次感谢我所在的公司乐元素[⊖]，它为我提供了舒适和愉悦的工作环境，使我在工作之余可以全心投入本书的写作之中。

代码被我放到了 Github 上，地址是 https://github.com/zxh0/jvm.go。不过由于能力和时间有限，这个虚拟机离完整实现《 Java 虚拟机规范》还相距甚远。2015 年 4 月份，我停止了 jvm.go 的编写，同时开始改造代码，酝酿本书。感谢所有关注过 jvm.go 项目的人，没有你们的帮助就没有 jvm.go，也就没有本书。

最后，感谢机械工业出版社华章分社的编辑，本书能够顺利出版离不开他们的敬业精神和一丝不苟的工作态度。

⊖ http://www.happyelements.cn/。

目　录 *Contents*



第 1 章　命令行工具

Java 虚拟机非常复杂，要想真正理解它的工作原理，最好的方式就是自己动手写一个。本书的目的就是带领读者按照 Java 虚拟机规范[⊖]，从零开始，一步一步用 Go 语言实现一个功能逐步增强的 Java 虚拟机。第 1 章将编写一个类似 java [⊖]的命令行工具，用它来启动我们自己的虚拟机。在开始编写代码之前，需要先准备好开发环境。

本书假定读者使用的是 Windows 操作系统，因此书中出现的命令和路径等都是 Windows 形式的。如果读者使用的是其他操作系统（如 Mac OS X、Linux 等），需要根据自己的情况做出相应调整。由于 Go 和 Java 都是跨平台语言，所以本书代码在常见的操作系统中都可以正常编译和运行。

1.1　准备工作

1.1.1　安装 JDK

我们都知道，要想运行 Java 程序，只有 Java 虚拟机是不够的，还需要有 Java 类库。

⊖ 如无特殊说明，本书中出现的“Java 虚拟机规范”均指《Java 虚拟机规范第 8 版》，网址为 http://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se8/html/index.html。

⊖ 后文中，首字母小写的 java 特指 java 命令行工具。

Java 虚拟机和 Java 类库一起，构成了 Java 运行时环境。本书编写的 Java 虚拟机依赖于 JDK 类库，另外，编译本书中的 Java 示例代码也需要 JDK。从 Oracle 网站[⊖]上下载最新版本（写作本章时是 8u66）的 JDK 安装文件，双击运行即可。安装完毕之后，打开命令行窗口执行 java -version 命令，如果看到类似图 1-1 所示的输出，就证明安装成功了。

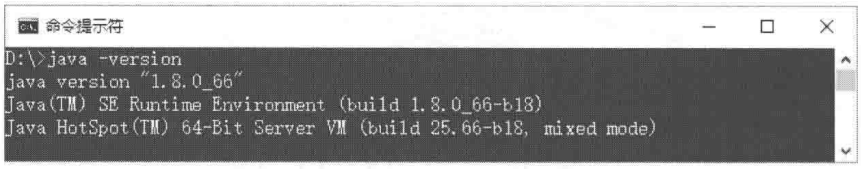


图 1-1 java -version 命令输出

1.1.2 安装 Go

从 Go 语言官网[⊜]下载最新版本（写作本章时是 1.5.1）的 Go 安装文件，双击运行即可。安装完毕之后，打开命令行窗口执行 go version 命令，如果看到类似图 1-2 所示的输出，就证明安装成功了。

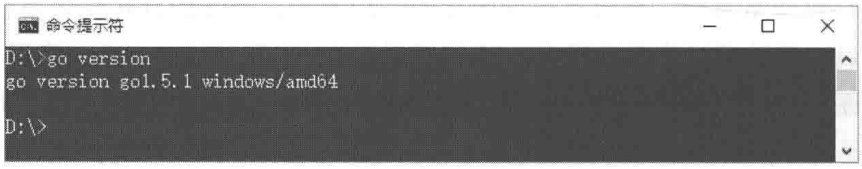


图 1-2 go version 命令输出

go [⊜]命令是 Go 语言提供的命令行工具，用来管理 Go 源代码。go 命令就像瑞士军刀，里面包含了各种小工具。用 Go 语言编写程序，基本上只需要 go 命令就可以了。go 命令里的小工具是各种子命令，version 是其中之一。其他常用的子命令包括 help、fmt、install 和 test 等。

go 命令行工具希望所有的 Go 源代码被都放在一个工作空间中。所谓工作空间，实际上就是一个目录结构，这个目录结构包含三个子目录。

- src 目录中是 Go 语言源代码。
- pkg 目录中是编译好的包对象文件。

⊖ http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/index.html。

⊜ https://golang.org/dl/（如果 Go 官网无法访问，可以从 http://golangtc.com/download）下载。

⊜ 后文中，首字母小写的 go 特指 go 命令行工具。

❑ bin 目录中是链接好的可执行文件。

实际上只有 src 目录是必须要有的，go 会自动创建 pkg 和 bin 目录。工作空间可以位于任何地方，本书使用 D:\go\workspace 作为工作空间。那么 go 如何知道工作空间在哪里呢？答案是通过 GOPATH 环境变量。在桌面上右键单击“我的电脑”图标，在弹出的菜单中单击“属性”，然后单击“高级系统设置”；在“系统属性”对话框中单击“环境变量”按钮，然后添加 GOPATH 变量即可，如图 1-3 所示。

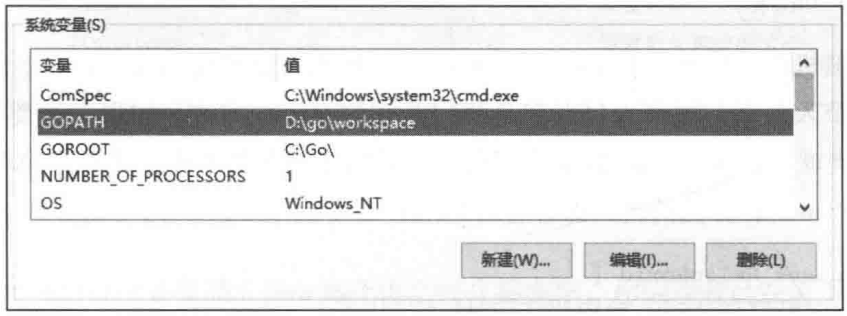


图 1-3　设置 GOPATH 环境变量

打开命令行窗口，执行 go env 命令，如果看到类似图 1-4 所示的输出，GOPATH 环境变量就设置成功了。

图 1-4　使用 go env 命令查看 GOPATH 环境变量

1.1.3　创建目录结构

Go 语言以包为单位组织源代码，包可以嵌套，形成层次关系。本书编写的 Go 源文件全部放在 jvmgo 包中，其中每一章的源文件又分别放在自己的子包中。包层次和目录结构有一个简单的对应关系，比如，第 1 章的代码在 jvmgo\ch01 目录下。除第 1 章以外，每一章都是先复制前一章代码，然后进行修改和完善。每一章的代码都是独立的，可以单独编译为一个可执行文件。下面创建第 1 章的目录结构。

在 D:\go\workspace\src（也就是 %GOPATH%\src）目录下创建 jvmgo 目录，在 jvmgo 目录下创建 ch01 目录。现在，工作空间的目录结构如下：

```
D:\go\workspace\src
  |-jvmgo
    |-ch01
```

1.2 java 命令

Java 虚拟机的工作是运行 Java 应用程序。和其他类型的应用程序一样，Java 应用程序也需要一个入口点，这个入口点就是我们熟知的 main() 方法。如果一个类包含 main() 方法，这个类就可以用来启动 Java 应用程序，我们把这个类叫作主类。最简单的 Java 程序是只有一个 main() 方法的类，如著名的 HelloWorld 程序。

```
public class HelloWorld {
   public static void main(String[] args) {
      System.out.println("Hello, world!");
   }
}
```

那么 Java 虚拟机如何知道我们要从哪个类启动应用程序呢？对此，Java 虚拟机规范没有明确规定。也就是说，是由虚拟机实现自行决定的。比如 Oracle 的 Java 虚拟机实现是通过 java 命令来启动的，主类名由命令行参数指定。java 命令有如下 4 种形式：

```
java [-options] class [args]
java [-options] -jar jarfile [args]
javaw [-options] class [args]
javaw [-options] -jar jarfile [args]
```

可以向 java 命令传递三组参数：选项、主类名（或者 JAR 文件名）和 main() 方法参数。选项由减号（-）开头。通常，第一个非选项参数给出主类的完全限定名（fully qualified class name）。但是如果用户提供了 -jar 选项，则第一个非选项参数表示 JAR 文件名，java 命令必须从这个 JAR 文件中寻找主类。javaw 命令和 java 命令几乎一样，唯一的差别在于，javaw 命令不显示命令行窗口，因此特别适合用于启动 GUI（图形用户界面）应用程序。

选项可以分为两类：标准选项和非标准选项。标准选项比较稳定，不会轻易变动。非标准选项以 -X 开头，很有可能会在未来的版本中变化。非标准选项中有一部分是高级选