# 31-运行时（一）：从0到语言级的虚拟化

你好，我是宫文学。今天，我会带你去考察现代语言设计中的运行时特性，并讨论一下与标准库有关的话题。

你可能要问了，咱们这门课是要讲编译原理啊，为什么要学运行时呢。其实，对于一门语言来说，除了要提供编译器外，还必须提供运行时功能和标准库：一是，编译器生成的目标代码，需要运行时的帮助才能顺利运行；二是，我们写代码的时候，有一些标准的功能，像是读写文件的功能，自己实现起来太麻烦，或者根本不可能用这门语言本身来实现，这时就需要标准库的支持。

其实，我们也经常会接触到运行时和库，但可能只是停留在使用层面上，并不太会关注它们的原理等。如果真要细究起来、真要对编译原理有更透彻的理解的话，你可能就会有下面这些问题了：

- 到底什么是运行时？任何语言都有运行时吗？运行时和编译器是什么关系？
- 什么是标准库？标准库和运行时库又是什么关系？库一般都包含什么功能？

今天，我们就来探讨一下这些与运行时和标准库有关的话题。这样，你能更加充分地理解设计一门语言要完成哪些工作，以及这些工作跟编译技术又有什么关系，也就能对编译原理有更深一层的理解。

首先，我们来了解一下运行时，以及它和编译技术的关系。

## 什么是运行时（Runtime）？

我们在第5讲说过，每种语言都有一个特定的执行模型（Execution Model）。而这个执行模型就需要运行时系统（Runtime System）的支持。我们把这种可以支撑程序运行的运行时系统，简称为运行时。

那运行时都包含什么功能呢？通常，我们最关心的是三方面的功能：程序运行机制、内存管理机制和并发机制。接下来，我就分别以Java、Python以及C、C++、Go语言的运行时机制为例，做一下运行时的分析，因为它们的使用者比较多，并且体现了一些有代表性的运行时特征。

### Java的运行时

我们先看看Java语言的运行时系统，也就是JVM。

其实，JVM不仅为Java提供了运行时环境，还为其他所有基于JVM的语言提供了支撑，包括Scala、Clojure、Groovy等。我们可以通过JVM的规范来学习一下它的主要特点。

第一，**JVM规定了一套程序的运行机制**。JVM支持基于字节码的解释执行机制，还包括了即时编译成机器码并执行的机制。

针对基于字节码的解释执行机制，JVM规范定义下面这些内容：

- 定义了一套字节码来运行程序。这些字节码能支持一些基本的运算。超出这些基本运算逻辑的，就要自己去实现。比如，idiv指令用于做整数的除法，当除数为零的时候，虚拟缺省的操作是抛出异常。如果你自己的语言是专注于数学计算的，想让整数除以零的结果为无穷大，那么你需要自己去实现这个逻辑。
- 规定了一套类型系统，包括基础数据类型、数组、引用类型等。所以说，任何运行在JVM上的语言，不管它设计的类型系统是什么样子，编译以后都会变成字节码规定的基础类型。

- 定义了class文件的结构。class文件规定了把某个类的符号表放在哪里、把字节码放在哪里，所以写编译器的时候要遵守这个规范才能生成正确的class文件。JVM在运行时会加载class文件并执行。
- 提供了一个基于栈的解释器，来解释执行字节码。编译器要根据这个执行模型来生成正确的字节码。

除了解释执行字节码的机制，JVM还支持即时编译成机器码并执行的机制。它可以调度多个编译器，生成不同优化级别的机器码，这就是分层编译机制。在需要的时候，还可以做逆优化，在不同版本的机器码以及解释执行模式之间做切换。

最后，Java程序之间的互相调用，需要遵循一定的调用约定或二进制标准，包括如何传参数等等。这也是运行机制的一部分。

总体来说，JVM代表了一种比较复杂的运行机制，既可以解释执行，又可以编译成机器码执行。V8的运行时机制也跟JVM也很类似。

第二，**JVM对内存做了统一的管理**。它把内存划分为程序计数器、虚拟机栈、堆、方法区、运行时常量池和本地方法栈等不同的区域。

对于栈来说，它的栈桢既可以服务于解释执行，又可以用于执行机器码，并且还可以在两种模式之间转换。在解释执行的时候，栈桢里会有一个操作数栈，服务于解释器。我们提到过OSR，也就是在运行一个方法的时候，把这个方法做即时编译，并且把它的栈桢从解释执行的状态切换成运行机器码的状态。而如果遇到逆优化的场景，栈桢又会从运行机器码的状态，切换成解释执行的状态。

对于堆来说，Java提供了垃圾收集器帮助进行内存的自动管理。减少整体的停顿时间，是垃圾收集器设计的重要目标。

第三，**JVM封装了操作系统的线程模型，为应用程序提供了并发处理的机制**。我会在讲并发机制的时候再展开。

以上就是JVM为运行在其上的任何程序提供的支撑了。在提供这些支撑的同时，运行时系统也给程序运行带来了一些限制。

第一，JVM实际上提供了一个基础的对象模型，JVM上的各种语言必须遵守。所以，虽然Clojure是一个函数式编程语言，但它在底层却不得不使用JVM规定的对象模型。

第二，基于JVM的语言程序要去调用C语言等生成的机器码的库，会比较难。不过，对于同样基于JVM的语言，则很容易实现相互之间的调用，因为它们底层都是类和字节码。

第三，在内存管理上，程序不能直接访问内存地址，也不能手动释放内存。

第四，在并发方面，JVM只提供了线程机制。如果你要使用其他并发模型，比如我们会在34讲中讲到的协程模型和35讲中的Actor模型，需要语言的实现者绕着弯去做，增加一些自己的运行时机制（我会在第34讲来具体介绍）。

好了，以上就是我要通过JVM的例子带你学习的Java的运行时，以及其编译器的影响了。我们再来看看Python的运行时。

## Python的运行时

在解析Python语言的时候，已经讲了Python的字节码和解释器，以及Python对象模型和程序调用的机制。这里，我再从程序运行机制、内存管理机制、并发机制这三个方面，给你梳理下。

第一，Python也提供了一套字节码，以及运行该字节码的解释器。这套字节码，也是跟Python的类型体系互相配合的。字节码中操作的那些标识符，都是Python的对象引用。

第二，在内存管理方面，Python也提供了自己的机制，包括对栈和堆的管理。

首先，我们看看栈。Python运行程序的时候，有些时候是运行机器码，比如内置函数，而有些时候是解释执行字节码。

运行机器码的时候，栈帧跟C语言程序的栈帧是没啥区别的。而在解释执行字节码的时候，栈帧里会包含一个操作数栈，这点跟JVM的栈机是一样的。如果你再进一步，去看看操作数栈的实现，会发现解释器本身主要就是一个C语言实现的函数，而操作数栈就是这个函数里用到的本地变量。因此操作数栈也会像其他本地变量一样，被优化成尽量使用物理寄存器，从而提高运行效率。这个知识点你要掌握，也就是说，**栈帧中的操作数栈，其实是有可能基于物理寄存器的**。

然后，Python还提供了对堆的管理机制。程序从堆里申请内存的时候，不是直接从操作系统申请，而是通过Python提供的一个Arena机制，使得内存的申请和释放更加高效、灵活。Python还提供了基于引用的垃圾收集机制（我会在下一讲为你总结垃圾收集机制）。

第三，是并发机制。Python把操作系统的线程进行了封装，让Python程序能支持基于线程的并发。同时，它也实现了协程机制（我会在34讲详细展开）。

好了，我们再继续看看第三类语言，也就是C、C++、Go这样的直接编译成二进制文件执行的语言的运行时。

## C、C++、Go的运行时

一个有意思的问题是，C语言有没有运行时呢？我们对C语言的印象，是一旦编译完成以后，就是一段完全可以自主运行的二进制代码了，你也可以看到输出的完整的汇编代码。除此之外没有其他，C语言似乎不需要运行时的支持。

所以，**C语言最主要的运行时，实际上就是操作系统**。C语言和现代的各种操作系统可以说是伴生关系，就像Java和JVM是伴生关系一样。所以，如果我们要深入使用C语言，某种意义上就是要深入了解操作系统的运行机制。

在程序执行机制方面，C语言编译完毕的程序是完全按照操作系统的运行机制来执行的。

在内存管理方面，C语言使用了操作系统提供的线程栈，操作系统能够自动帮助程序管理内存。程序也可以从堆里申请内存，但必须自己负责释放，没有自动内存管理机制。

在并发机制方面，当然也是直接用操作系统提供的线程机制。因为操作系统没有提供协程和Actor机制，所以C语言也没有提供这种并发机制。

**不过有一个程序crt0.o，有时被称作是C语言的运行时**。它是一段汇编代码（crt0.s），由链接器自动插入到程序里面，主要功能是在调用main函数之前做一些初始化工作，比如设置main函数的参数（argc和argv）、环境变量的地址、调用main函数、设置一些中断向量用于处理程序异常等。所以，这个所谓的运行时所做的工作也特别简单。

不同系统的crt0.s会不太一样，因为CPU架构和ABI是不同的。下面是一个crt0.s的示例代码：

```
.text
.globl _start
_start: # _start是链接器需要用到的入口
    xor %ebp, %ebp             # 让ebp置为0，标记栈帧的底部
    mov (%rsp), %edi           # 从栈里获得argc的值
    lea 8(%rsp), %rsi          # 从栈里获得argv的地址
    lea 16(%rsp,%rdi,8), %rdx # 从栈里获得envp的地址
    xor %eax, %eax             # 按照ABI的要求把eax置为0，并与icc兼容
    call main                  # 调用main函数，%edi, %rsi, %rdx是传给main函数的三个参数

    mov %eax, %edi    # 把main函数的返回值提供给_exit作为第一个参数
    xor %eax, %eax    # 按照ABI的要求把eax置为0，并与icc兼容
    call _exit        # 终止程序
```

可以说，C语言的运行时是一个极端，提供了最少的功能。反过来呢，这也就是给了程序员最大的自由度。C++语言的跟C是类似的，我就不再展开了。总的来说，它们都没有Java和Python那种意义上的运行时。

不过，**Go语言虽然也是编译成二进制的可执行文件，但它的运行时要复杂得多**。比如，它有垃圾收集器；再比如，Go语言最显著的特点是提供了自己的并发机制，也就是goroutine。对goroutine的运行管理，也是go的运行时的一部分。

无独有偶，在Android平台上，你可以把Java程序以AOT的方式编译成可执行文件。但这个可执行文件其实仍然包含了一个运行时，比如垃圾收集功能，所以与C语言编译形成的可执行文件，也是不一样的。

总结起来，运行时系统提供了程序的运行机制、内存管理机制、并行机制等功能。运行时和编译器的关系就是，编译器要跟这些运行时做配合，生成符合运行时要求的目标代码。

接下来，我们再看看语言的另一个重要组成部分，也就是标准库，并看看它跟编译器的关系。

## 库和标准库

我们知道，任何一门编程语言，要想很好地投入实际应用，必须有良好的库来支撑。这些库的作用就是封装了常用的、标准的功能，让开发者可以直接使用。

根据库的使用场景和与编译器的关系，这些库可以分为**标准库、运行时库和内置函数**三类。

第一，标准库，供用户的程序调用。我们在写一段C语言程序的时候，总要在源代码一开头的部分include几个库进来，比如stdio.h、stdlib.h等等。C++的STL库和标准库让程序员拥有比C语言里面更多的工具，比如各种标准的容器类。Java刚面世的时候，就在JDK里打包了很多标准库。正是因为这些丰富又好用的库，使得Java能够被迅速接受。当然了，这些库也成了JDK标准的组成部分。而Python语言声称是“自带电池”的，也就是说有很多库的支持，可以迅速上手做很多事情。

第二类，运行时库，它们不是由用户直接调用的，而是运行时的组成部分。比如，Python实现整数运算的功能很强大，支持任意长度整数的加减乘除。这些功能是由一些库函数实现的，并由Python的解释器来调用，实现Python程序中的加减乘除操作。

第三类，是一些叫做Built-in或者Intrincics的内置函数，它们是用来辅助生成机器码的。它们往往由汇编代码实现，也有的是用编译器的LIR实现的，在编译的时候直接内联进去。这些函数有时开发者也可以调用，比如在C语言中，可以像调用普通函数一样，调用CPU厂家提供的与SIMD指令有关的Intrincics。但这些函数会直接生成汇编码，不像C语言编写的程序那样需要经过优化和代码生成的过程。

好了，我们了解了库的三种分类，也就是标准库、运行时库和内置函数。不过我要提醒你的是，这些分类有时候是模糊的，比如有的语言（比如微软的C和C++语言）谈到运行时库的时候，实际上就包括了标准库。

接下来，我们主要看看与标准库相关的几个问题。

### 标准库的特殊性

与普通程序相比，标准库主要有以下三个方面的不同。

第一，有的库可以用本语言来实现，而有的库必须要用其他语言来实现，因为用本语言实现有困难。这就要求库的编写者要具备更高的技能，能够掌握更加底层的语言。

比如，Java有少量库（比如网络通讯模块）就需要用C语言来编写，而Python、PHP、Node.js等语言的大量库都是用C语言编写的。甚至，标准库中的某些底层功能会采用汇编语言来写。

第二，标准库的接口不可以经常变化，甚至是要保持一直不变。因此，标准库的设计一定要慎重，这就要求设计者有更高的规划和设计能力。因为几乎每个程序都会用到标准库的功能，库的接口如果变化的话，就会影响到所有已经写好的程序。

第三，标准库往往集中体现了一门语言的核心特点。同样的功能，面向对象编程语言、函数式编程语言、基于Actor的语言，会采用各自的方式来实现。库的编写者要写出教科书级的代码，充分发挥这门语言的优势。这样的话，编程人员使用这些标准库的过程，实际上就是潜移默化地学习这门语言的编程思想的过程。

好了，看来编写一个好的标准库确实是有挑战的事情。但是标准库一般需要包含哪些内容呢？

### 标准库需要包含什么功能？

第一，包含IO功能，包括文件IO、网络IO等。

还记得吧，我们学习每一门新语言的时候，都会在终端上打印出一个“Hello World!”，这似乎已经成了一种具有仪式感的行为。可是你注意到没有，你在打印输出到终端的时候，通常就是调用了一个标准的IO库。因为终端本身就相当于一个文件，这实际上是用了文件IO功能。

除了文件IO，网络IO也必不可少，这样的话手机上的App程序才能够跟服务端的程序通讯。

第二，支持内置的数据类型。

首先是针对整型、浮点型等基础数据类型做运算的功能。比如有的数学库的数学计算功能支持任意长度的整

数的运算，并支持准确的小数运算（计算机内置的浮点数计算功能是不精确的）。此外数据类型转换、对字符串操作等，也是必不可少的。

像Java、Python这样的语言，提供了一些标准的内置类型，比如String等。像Scala这种纯面向对象语言，连整型、浮点型等基础数据类型，也是通过标准库来提供的。

第三，支持各种容器型的数据结构。

有的语言（比如Go），会在语法层面提供map等容器型的数据结构，并通过运行时库做支持；还有些语言（比如Java、C++），是在标准库里提供这些数据结构。

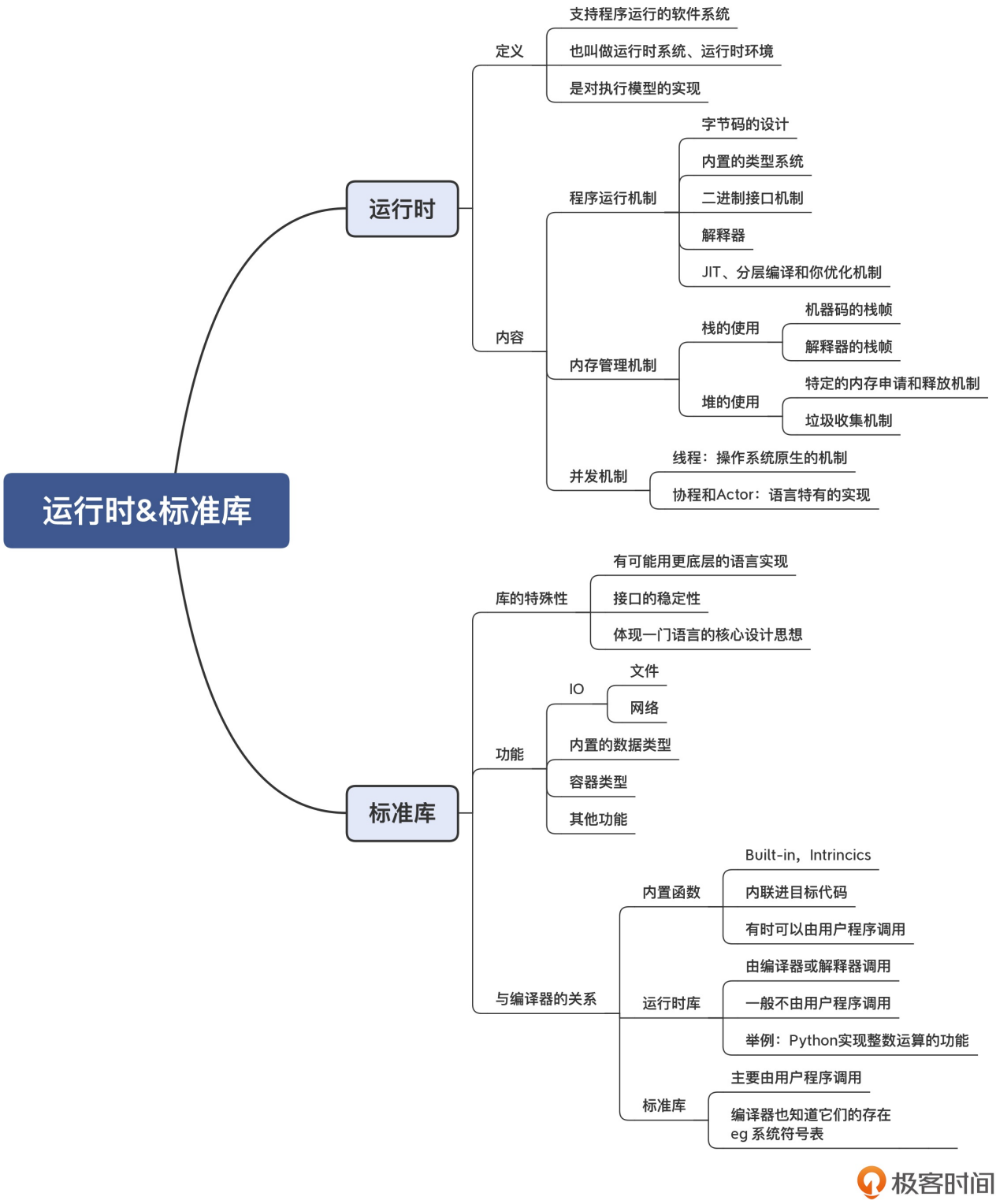
此外，标准库还要包含一些其他功能，比如对日期、图形界面等各种不同的功能支持。

## 课程小结

今天，我们一起学习了一门语言除编译器之外的一些重要组成部分，包括运行时和各种库。编译器拥有运行时和库的知识，并根据这些知识作出正确的编译。当你设计一门语言的时候，应该首先要把它的运行机制设计清楚，然后才能设计出正确的语法、语义，并实现出相应的编译器。

所以，我们这一讲的目标，就是帮你从一个更高的维度来理解编译技术的使用环境，从而更加全面地理解和使用编译技术。

我把今天的知识点也整理成了思维导图，供你参考：




## 一课一思

挑你熟悉的一门语言，分享一下它的运行时和标准库的设计特征，以及对编译器的影响。

欢迎你在留言区表达自己的见解，也非常欢迎你把今天的内容分享给更多的朋友。感谢阅读，我们下一讲再见。