



《编译原理》课程简介

Course Introduction



基本信息

◎ 课程网页

- ❖ 北京大学教学网 (<https://course.pku.edu.cn/>)

◎ 主讲教师：张路、刘先华、王迪

- ❖ Office: 燕园大厦 520 室
- ❖ Tel: 13882266228
- ❖ Email: wangdi95@pku.edu.cn

◎ 助教

- ❖ 李天驰、张钊

◎ 交流：微信群



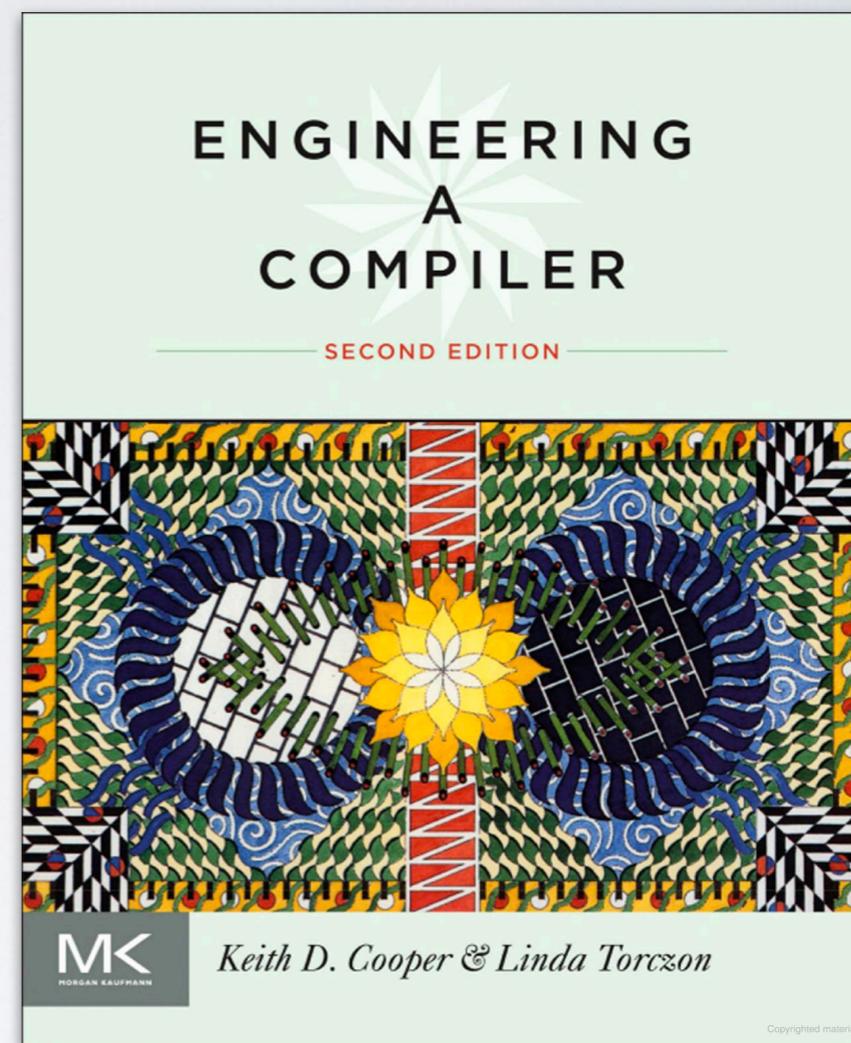
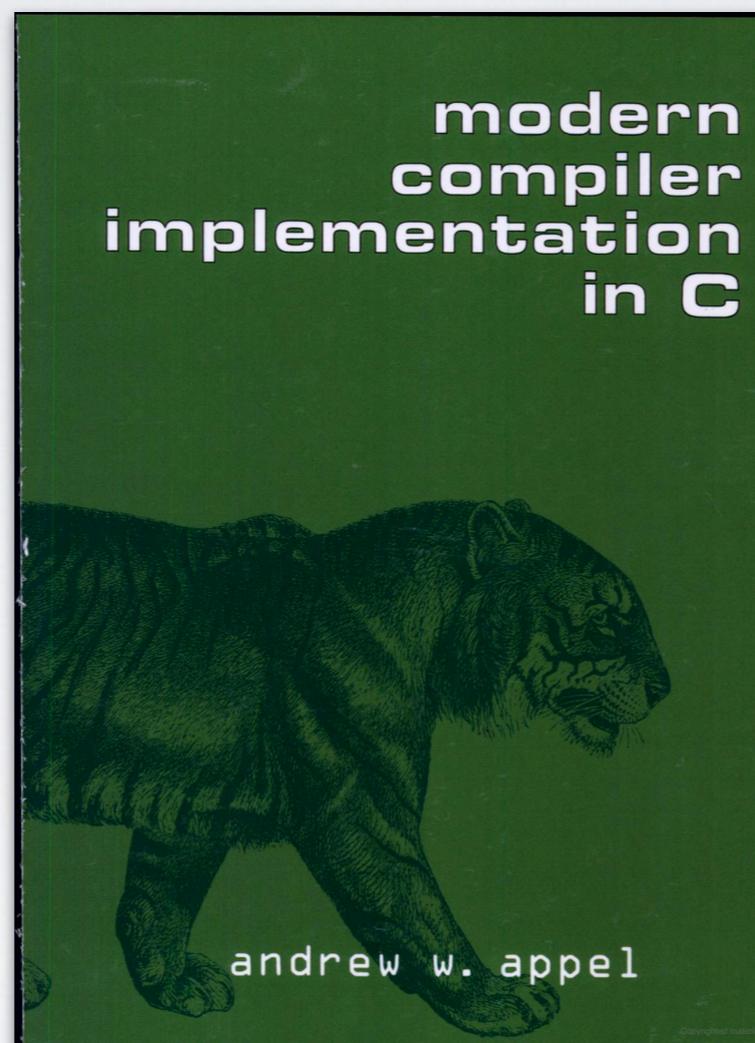
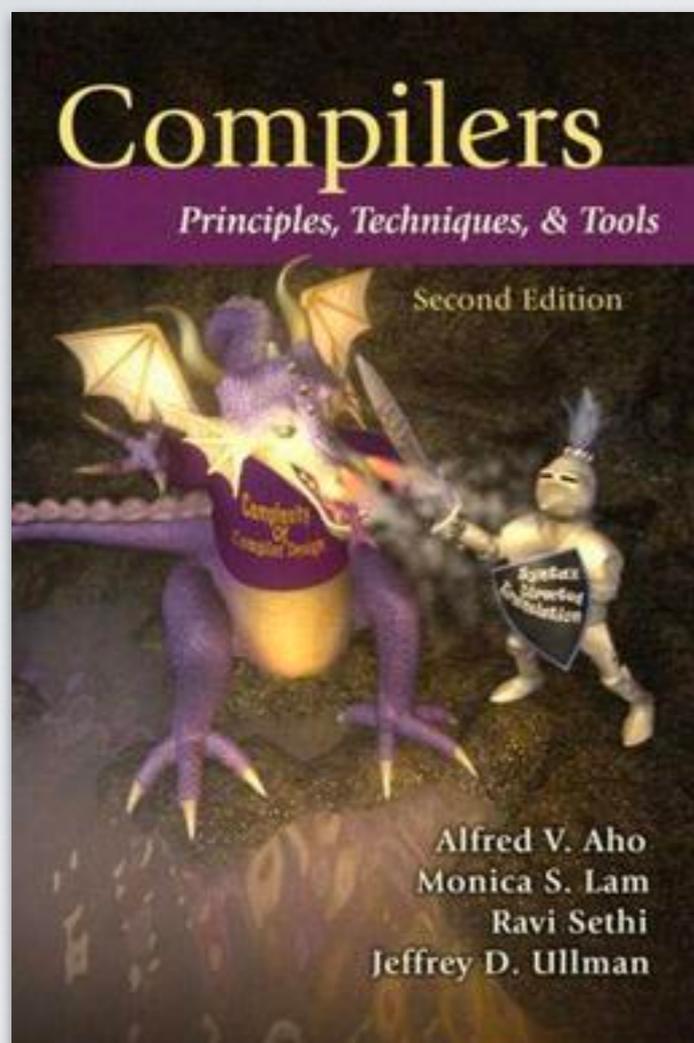
教材及参考书

◎ 教材：「龙书」

- ❖ Alfred V. Aho, Monica S. Lam, Ravi Sethi, and Jeffrey D. Ullman. **Compilers: Principles, Techniques, and Tools** (Second Edition). Addison-Wesley, 2007.
- ❖ **中文翻译版或本科教学版**：《编译原理(第2版)》，赵建华、郑滔、戴新宇译，机械工业出版社，2009.

◎ 参考书

- ❖ 「虎书」：Andrew W. Appel and Maia Ginsburg. **Modern Compiler Implementation in C**. Cambridge University Press, 1998.
- ❖ Keith D. Cooper and Linda Torczon. **Engineering a Compiler** (Second Edition). Morgan Kaufmann, 2011.
 - ❖ 中文翻译版：《编译器设计(第2版)》，郭旭译，人民邮电出版社，2013.





评分标准

- 期中考试(20%)
- 期末考试(30%)
- 课程实践(40%)
 - ❖ 实现 SysY 语言(C 语言的子集)到 RISC-V 汇编的编译器
- 书面作业(10%)
- 注:成绩比例可能按需调整



课程要求

◎ 课堂

- ❖ 有问题请随时打断老师
- ❖ 积极参与随堂小测
 - ❖ 在第2节课末尾, 通过教学网进行

◎ 考试: 鼓励知识的灵活运用, 不提倡死记硬背

◎ 实践: 工作量大, 建议早做规划, 遇到问题及时反馈

- ❖ 在线文档: <https://pku-minic.github.io/online-doc/>

◎ 其它

- ❖ 如果课堂、考试需要请假, 需提前向老师提出, 事后请假无效
- ❖ 重修、旁听、留学生或有特殊情况的同学请课间与我交流一下



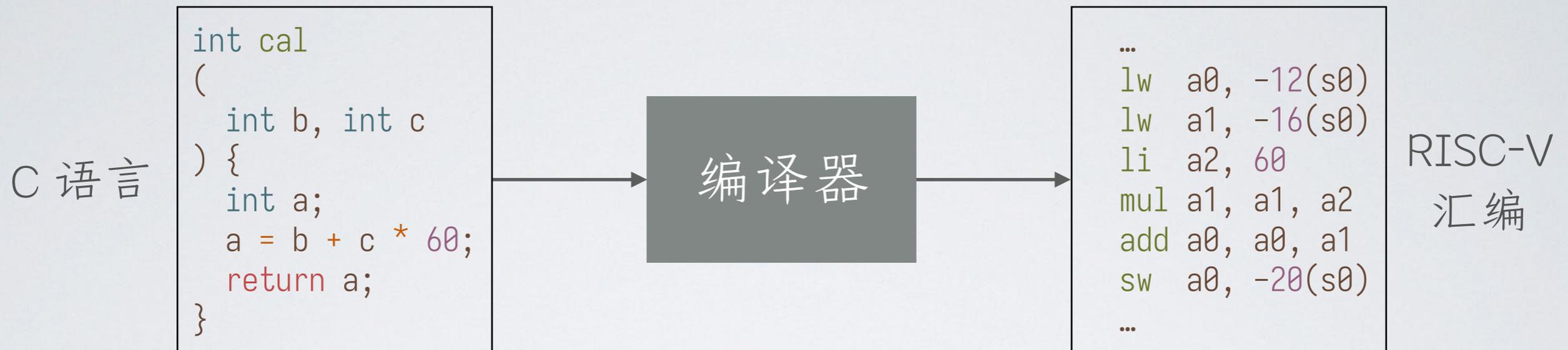
为什么要学编译原理？

除了用来满足专业核心课学分之外？



编译技术有什么应用？

应用1：实现编译器



- 编译器是一个程序，它的功能是**翻译**别的程序
 - ❖ **源程序** (source program): 通常使用一个**编程语言**来编写
 - ❖ **目标程序** (target program): 通常表示为一个处理器的**指令集**
- 从「方便程序员表达的」翻译为「方便机器运行的」
- 从「做什么」翻译为「怎么做」

应用2：实现语言间的翻译



- ◎ 高级编程语言可以先翻译到 C 语言，再调用 C 的编译器
- ◎ 二进制翻译：不同指令集上的程序之间的转换
 - ❖ **苹果的 Rosetta**：在 ARM 芯片上运行基于 x86 的软件
- ◎ 排版程序：把「描述排版的语言」翻译为「描述图像的语言」
 - ❖ **LaTeX**：先翻译到 DVI，再进一步翻译到 PostScript
- ◎ 硬件合成：把硬件描述翻译为门电路，再进一步翻译为物理布局
 - ❖ **芯片设计涉及的 EDA 软件中的重要部分**

应用3：实现解释器

描述一类特定的
计算问题

源程序

解释器

结果

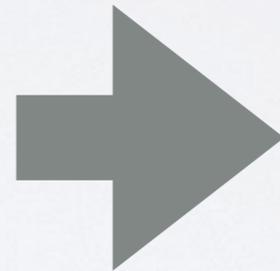
- 解释器是一个程序，它的功能是**计算源程序的执行结果**
- 很多语言采取解释器实现，如 Python、Ruby、JavaScript 等
- PostScript 程序转换为图片像素的过程是一个解释器
- 数据库对查询语言(如 SQL)的处理是通过解释进行的
- **一个解释器为一类特定的计算问题提供了解决方案**

应用4：实现领域特定语言

- ◎ **HTML 和 CSS**: 描述网页的结构和样式的语言
 - ❖ 通过浏览器进行解释, 渲染页面

```
1 <!DOCTYPE html>
2 <html>
3 <head>
4   <link rel="stylesheet" type="text/css" href="css_sample_file.css">
5   <!-- The value of 'href' should be a file path to your chosen css file -->
6 </head>
7 <body>
8   <h1>Hey there! I'm a header!</h1>
9   <button class="button"> I'm a button! </button>
10 </body>
11 </html>
```

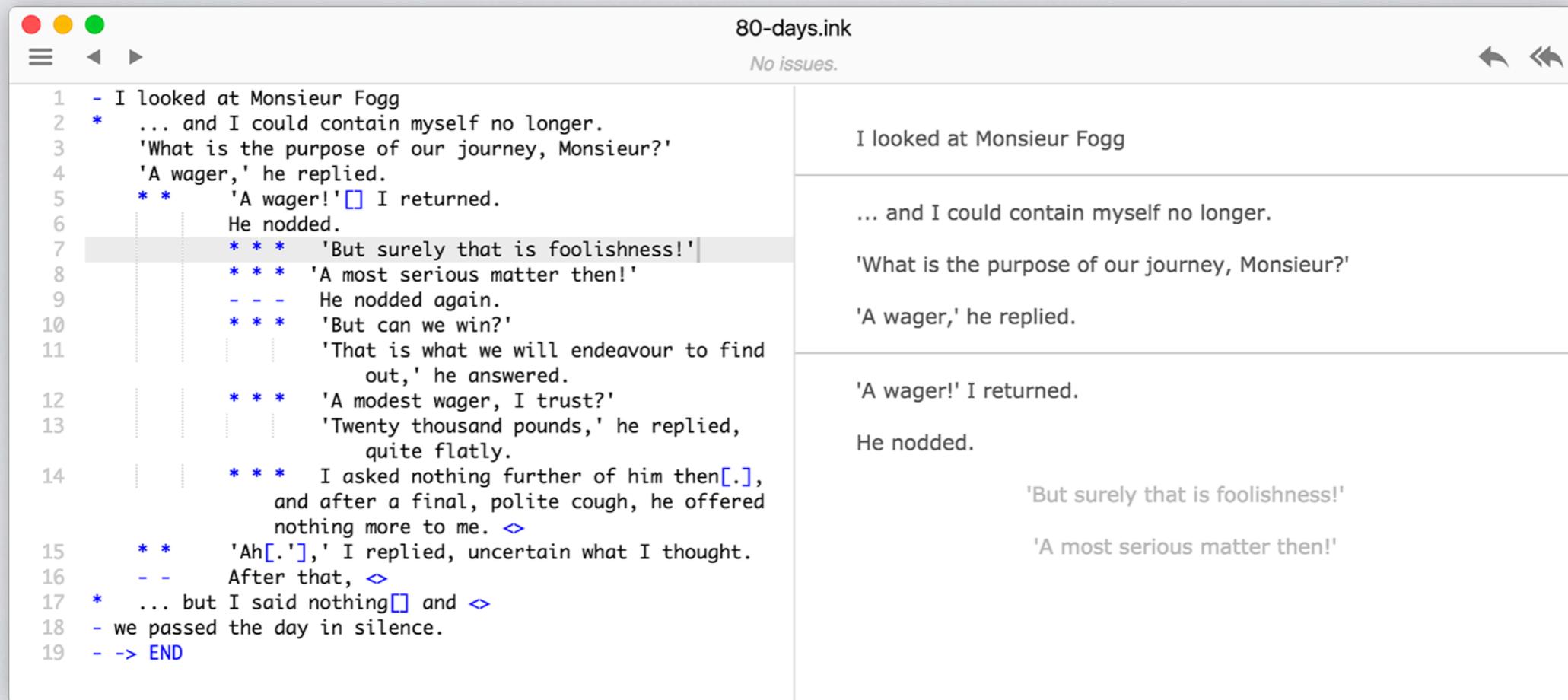
```
11 button {
12   background-color: #e30074;
13   font-family: 'Fredoka One';
14   font-size: 20px;
15   color: white;
16   height: 300px;
17   width: 300px;
18   box-shadow: none;
19   border-width: 4px;
20   border-color: white;
21   border-radius: 150px;
22 }
```



应用4：实现领域特定语言

◎ ink: 用于交互式故事和剧情设计的语言

- ❖ 用于简化游戏开发, 可通过插件在 Unity 游戏引擎中使用
- ❖ 支持丰富的控制逻辑, 包括条件分支和循环



The screenshot shows the ink editor interface for a file named "80-days.ink". The interface is split into two panes. The left pane contains the source code, which is a script for a story. The right pane shows the rendered output of the script, which is a sequence of text blocks. The code in the left pane is as follows:

```
1 - I looked at Monsieur Fogg
2 * ... and I could contain myself no longer.
3   'What is the purpose of our journey, Monsieur?'
4   'A wager,' he replied.
5   * *   'A wager!' I returned.
6         He nodded.
7   * * * 'But surely that is foolishness!'
8   * * * 'A most serious matter then!'
9   - - - He nodded again.
10  * * * 'But can we win?'
11         'That is what we will endeavour to find
12         out,' he answered.
13   * * * 'A modest wager, I trust?'
14         'Twenty thousand pounds,' he replied,
15         quite flatly.
16   * * * I asked nothing further of him then[.],
17         and after a final, polite cough, he offered
18         nothing more to me. <
19   * *   'Ah[.'],' I replied, uncertain what I thought.
20   - -   After that, <
21   *     ... but I said nothing and <
22   -     we passed the day in silence.
23   - -> END
```

The rendered output in the right pane is as follows:

```
I looked at Monsieur Fogg
... and I could contain myself no longer.
'What is the purpose of our journey, Monsieur?'
'A wager,' he replied.
'A wager!' I returned.
He nodded.
'But surely that is foolishness!'
'A most serious matter then!'
```

图片来源: <https://www.inklestudios.com/ink/>.

应用4：实现领域特定语言

- ◎ GraphQL: 图状数据查询语言
 - ❖ 定义数据关联的语言 + 嵌套查询语言
 - ❖ 可以与不同的数据库后端对接
 - ❖ 通过解释从数据图中查询信息

Describe your data

```
type Project {  
  name: String  
  tagline: String  
  contributors: [User]  
}
```

Ask for what you want

```
{  
  project(name: "GraphQL") {  
    tagline  
  }  
}
```

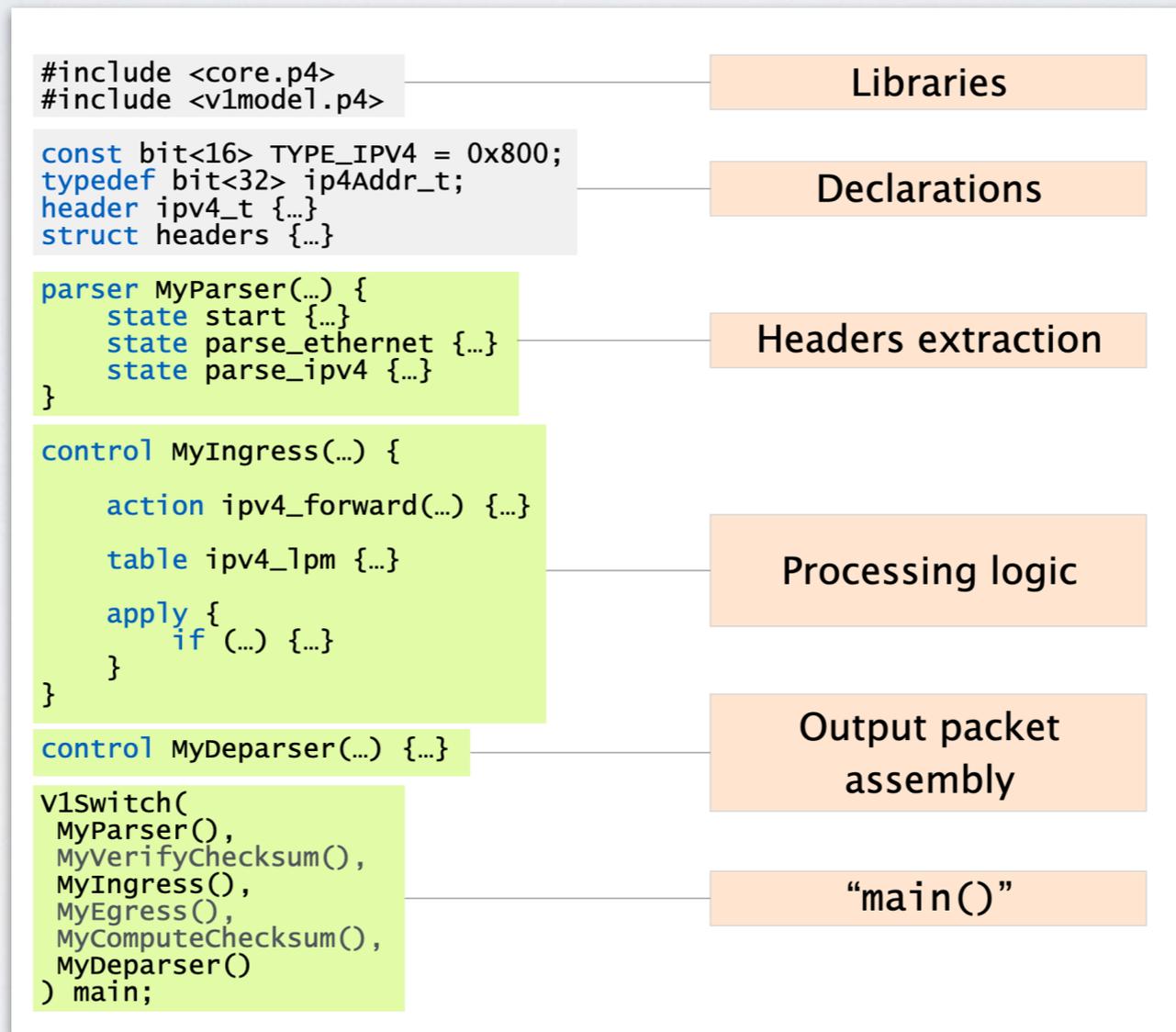
Get predictable results

```
{  
  "project": {  
    "tagline": "A query language for APIs"  
  }  
}
```

应用4：实现领域特定语言

◎ P4: 针对网络设备的编程语言

- ❖ 可以编译到不同的硬件(如 FPGA)或软件目标

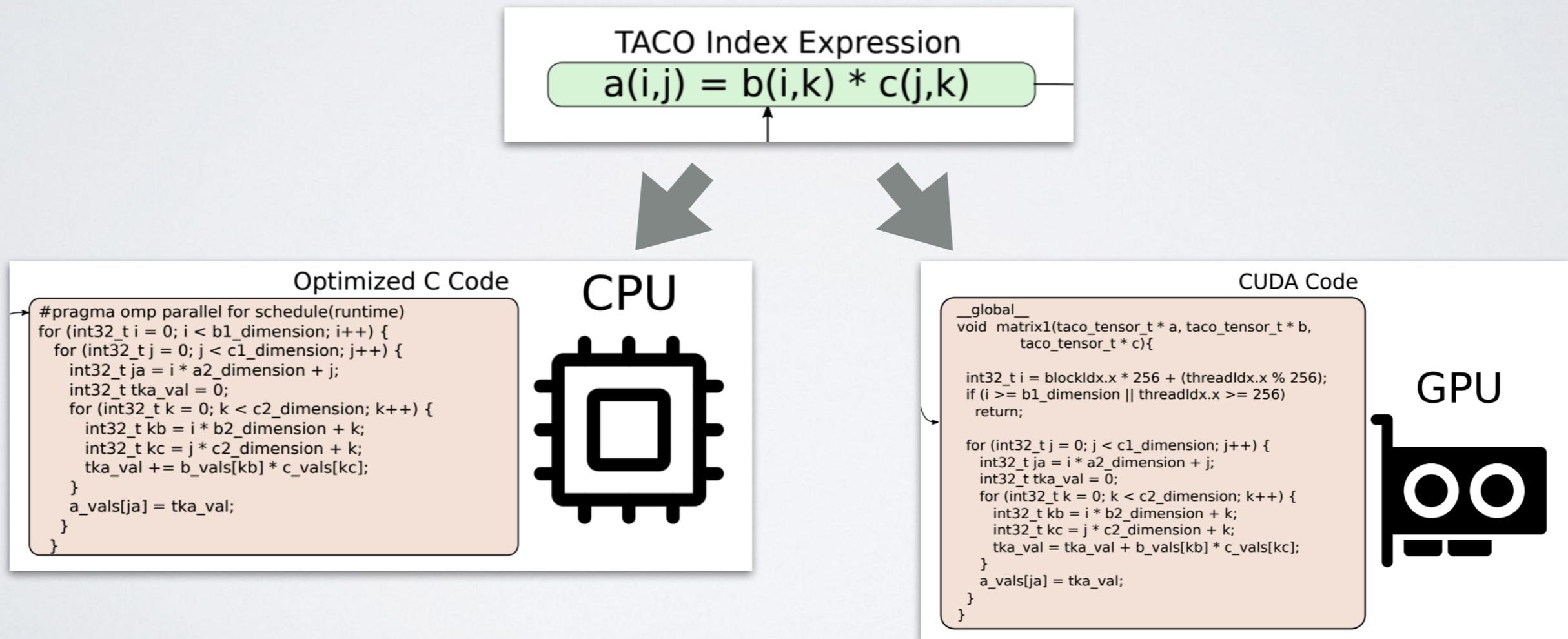


图片来源: <https://adv-net.ethz.ch/2022/>, Lecture 1.

应用4：实现领域特定语言

◎ TACO: 针对稀疏张量计算的编译器

- ❖ 从张量计算的式子编译为高效的 CPU/GPU 代码
- ❖ 应用于数据分析、科学计算、机器学习等领域



应用4：实现领域特定语言

◎ Taichi: 高性能并行计算语言

- ❖ 最初是面向图形学领域设计的
- ❖ 嵌入在 Python 中并在编译为 CPU/GPU 代码时实现了大量优化

```
import taichi as ti

ti.init(arch=ti.gpu) # Run on GPU by default

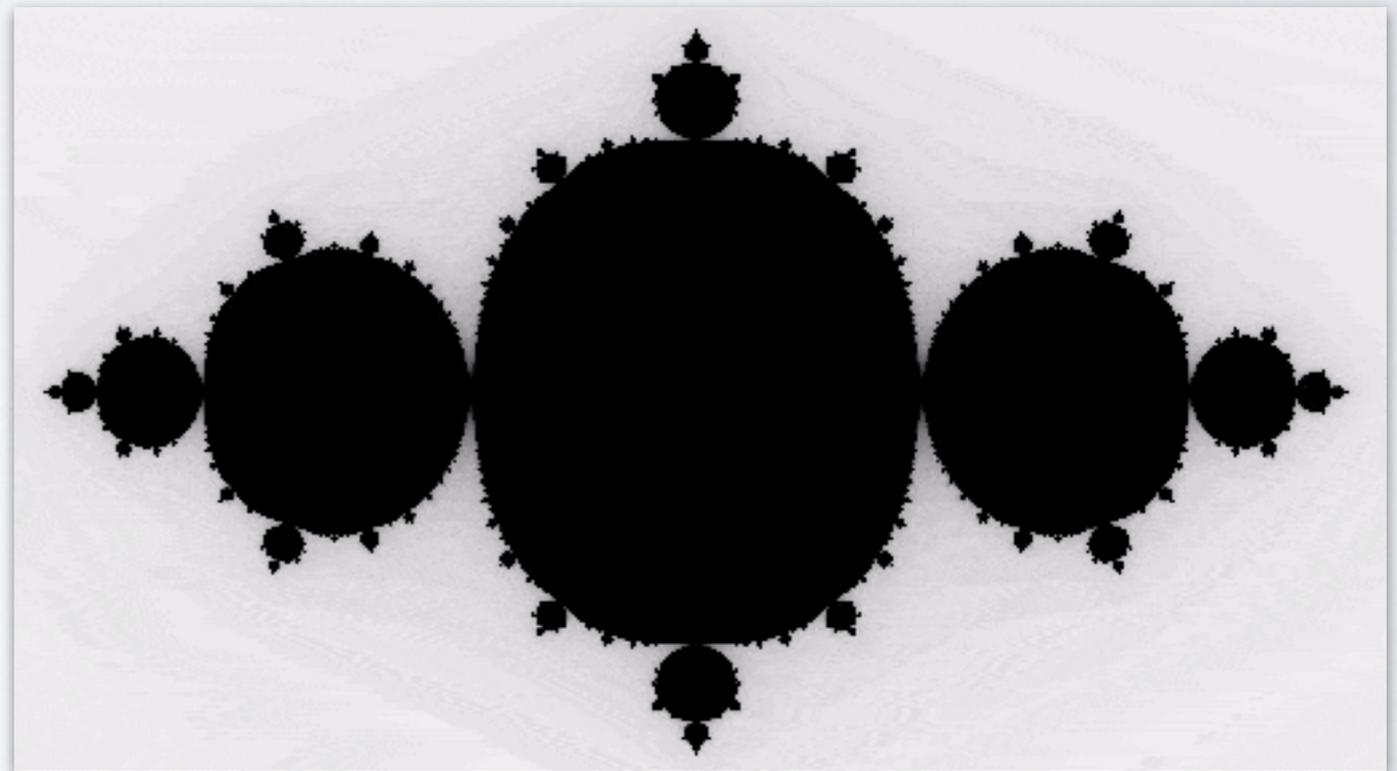
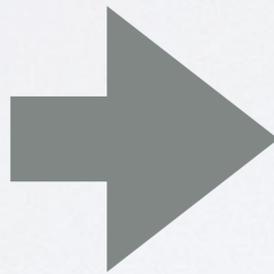
n = 320
pixels = ti.field(dtype=float, shape=(n * 2, n))

@ti.func
def complex_sqr(z):
    return ti.Vector([z[0]**2 - z[1]**2, z[1] * z[0] * 2])

@ti.kernel
def paint(t: float):
    for i, j in pixels: # Parallized over all pixels
        c = ti.Vector([-0.8, ti.cos(t) * 0.2])
        z = ti.Vector([i / n - 1, j / n - 0.5]) * 2
        iterations = 0
        while z.norm() < 20 and iterations < 50:
            z = complex_sqr(z) + c
            iterations += 1
        pixels[i, j] = 1 - iterations * 0.02

gui = ti.GUI("Julia Set", res=(n * 2, n))

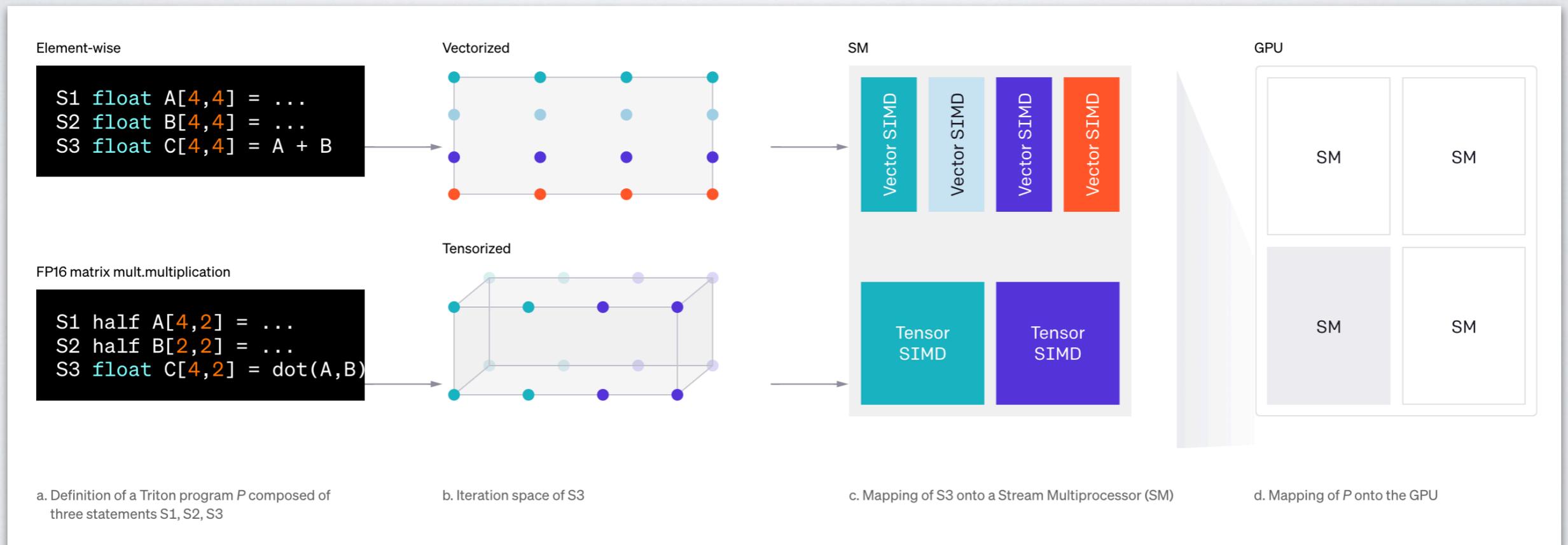
for i in range(1000000):
    paint(i * 0.03)
    gui.set_image(pixels)
    gui.show()
```



图片来源: <https://github.com/taichi-dev/taichi>.

应用4：实现领域特定语言

- **Triton**: 为神经网络设计的面向 GPU 的语言
 - ❖ 在编译过程中实现了大量针对神经网络的优化
 - ❖ 在 PyTorch 2.0 的默认深度学习编译器中使用



图片来源: <https://openai.com/research/triton>.

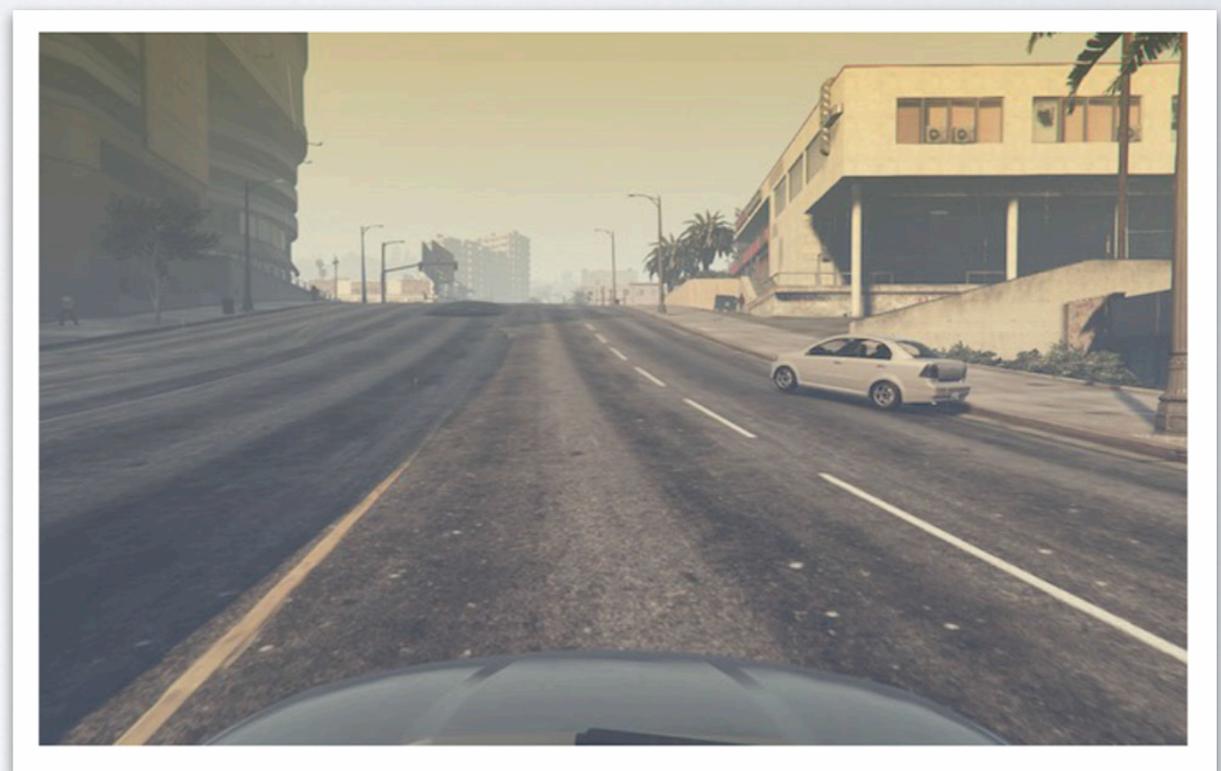
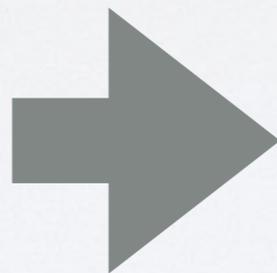
信息来源: <https://pytorch.org/docs/stable/torch.compiler.html>.

应用4：实现领域特定语言

◎ Scenic: 自动驾驶场景建模语言

- ❖ 描述带有不确定性的驾驶场景
- ❖ 通过解释执行采样, 再通过其它工具(如 GTA 游戏)进行渲染

```
spot = OrientedPoint on visible curb
badAngle = Uniform(1.0, -1.0) *
           Range(10, 20) deg
Car left of spot by 0.5,
facing badAngle relative to
           roadDirection
```



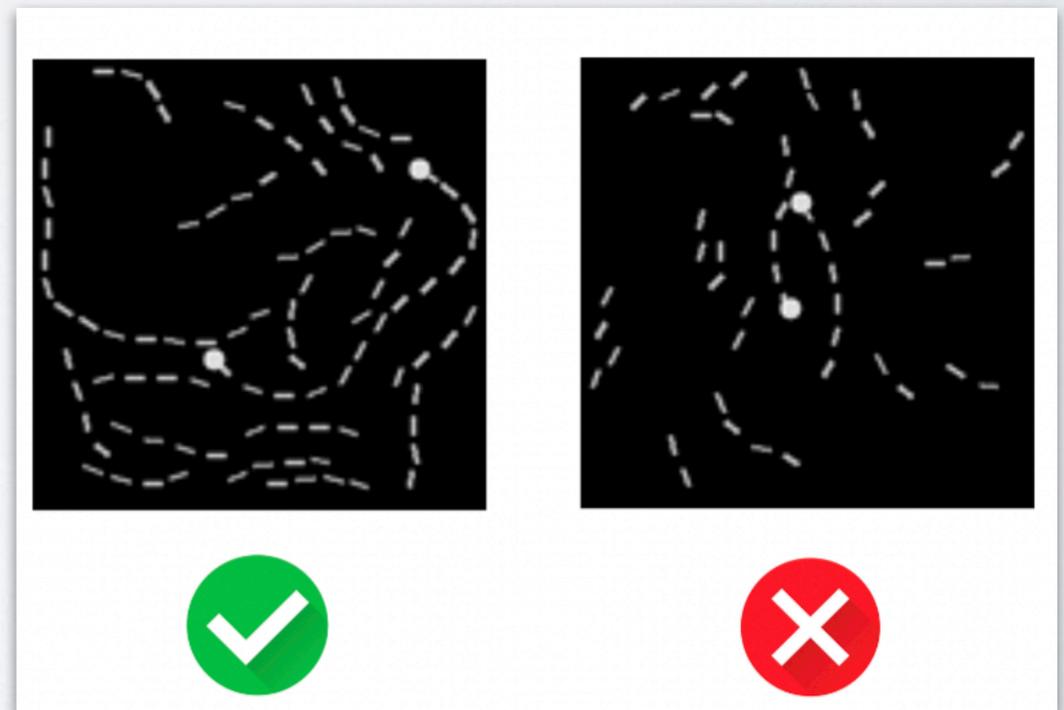
应用4：实现领域特定语言

◎ Scallop: 声明式神经符号编程语言

- ❖ 描述人工智能任务中的符号或逻辑规则
- ❖ 通过解释执行与机器学习模块协同工作

```
rel path(x, y) = dash(x, y)
rel path(x, y) = path(x, z), dash(z, y)
rel is_connected() = dot(x), dot(y), path(x, y), x != y
```

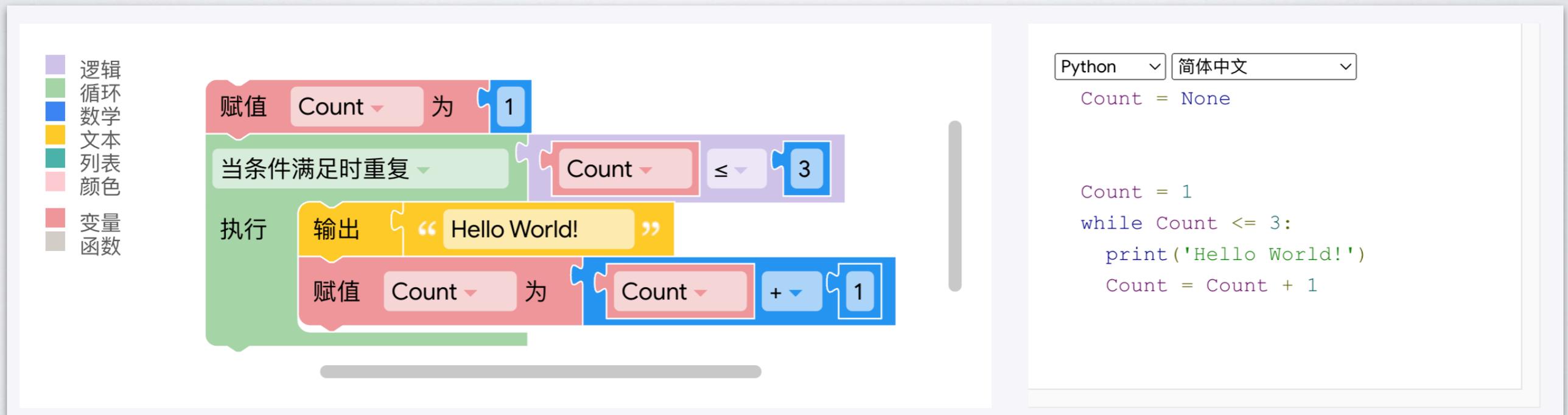
通过神经网络识别
图片中的线和点



应用4：实现领域特定语言

◎ Blockly: 可视化编程工具

- ❖ 源程序: 可视化、图形化的程序
- ❖ 目标程序: 某种编程语言(如 Python)的程序



The image shows the Blockly visual programming interface. On the left, a legend identifies block colors: purple for logic, green for loops, blue for math, yellow for text, teal for lists, pink for colors, and red for variables. The main workspace contains a script with the following blocks: a 'set' block (赋值) for 'Count' (Count) to 1, a 'when condition is met, repeat' block (当条件满足时重复) with the condition 'Count <= 3', and an 'execute' block (执行) containing an 'output' block (输出) for 'Hello World!' and another 'set' block for 'Count' to 'Count + 1'. On the right, the generated Python code is displayed in a text area with a language dropdown set to 'Python' and a font dropdown set to '简体中文'. The code is:

```
Count = None

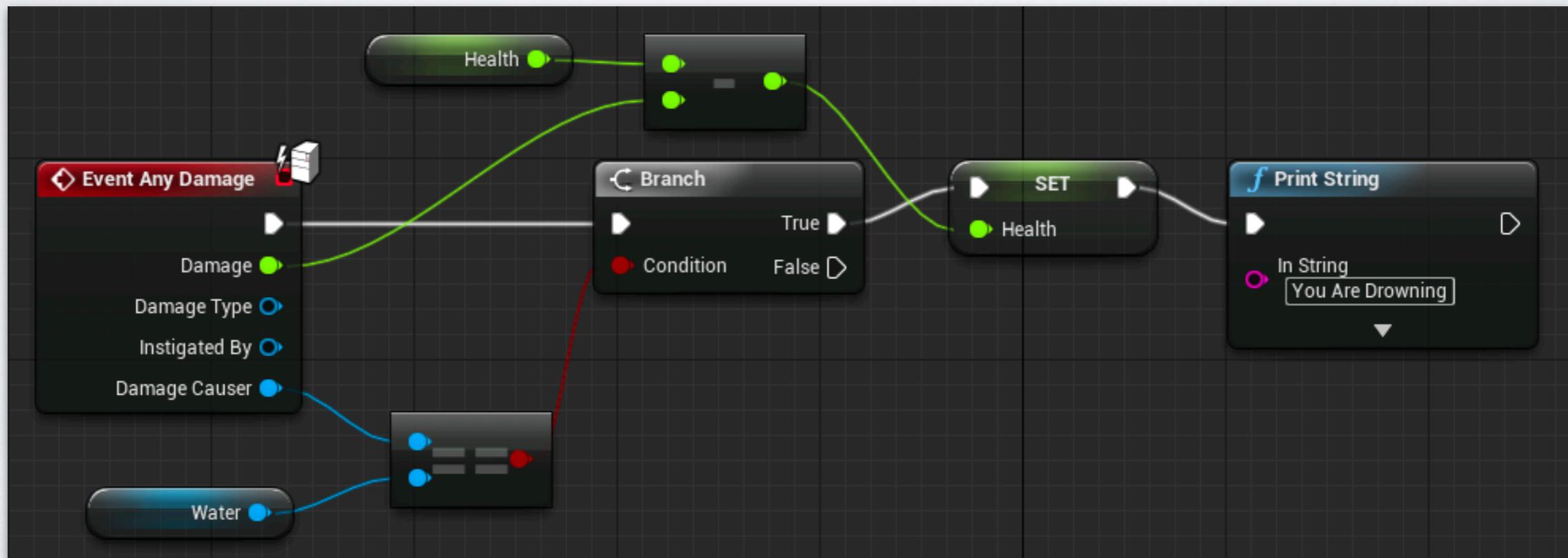
Count = 1
while Count <= 3:
    print('Hello World!')
    Count = Count + 1
```

图片来源: <https://developers.google.com/blockly>.

应用4：实现领域特定语言

◎ Blueprint: 可视化游戏编程系统

- ❖ 来自虚幻引擎, 用于描述游戏中的逻辑和行为
- ❖ 编译为 C++ 代码或者虚幻引擎支持的代码形式
- ❖ 支持丰富的控制逻辑, 包括条件分支和循环

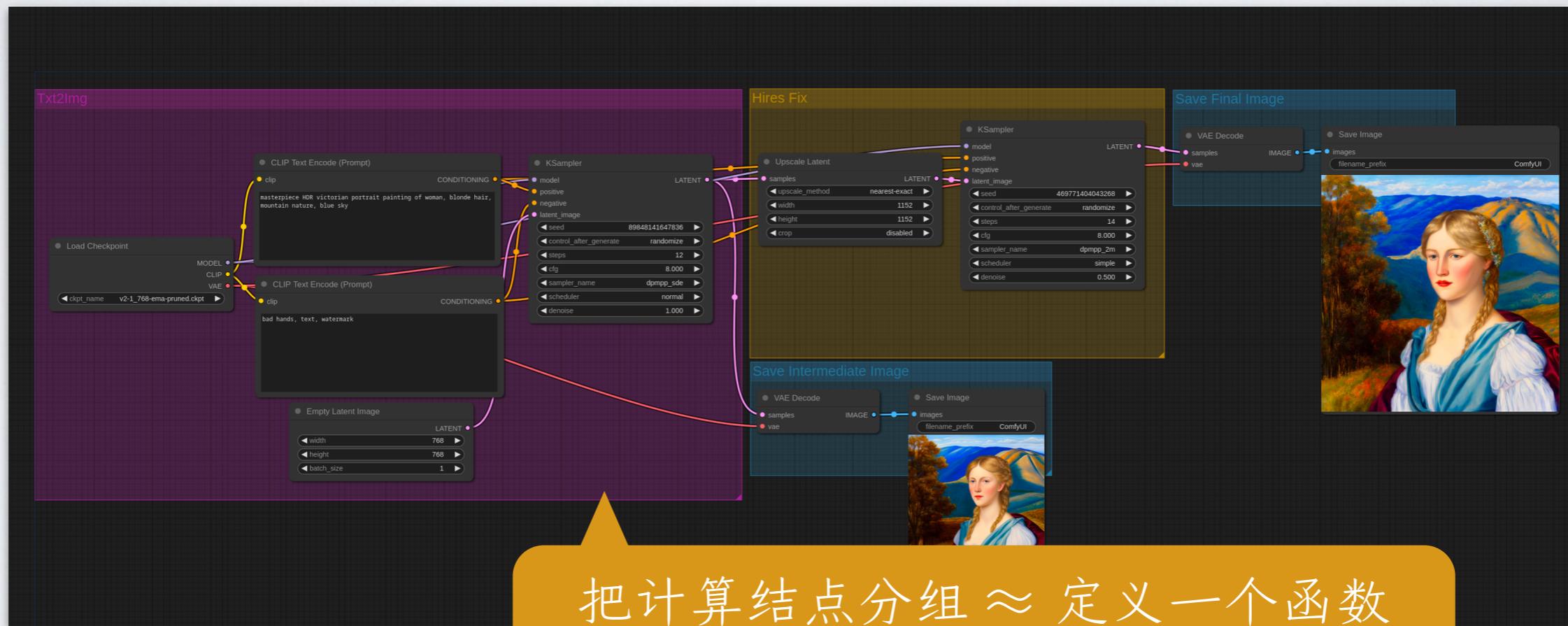


图片来源: <https://docs.unrealengine.com/5.0/en-US/events-in-unreal-engine/>.

应用4：实现领域特定语言

ComfyUI: 针对 AI 绘画的流图式界面

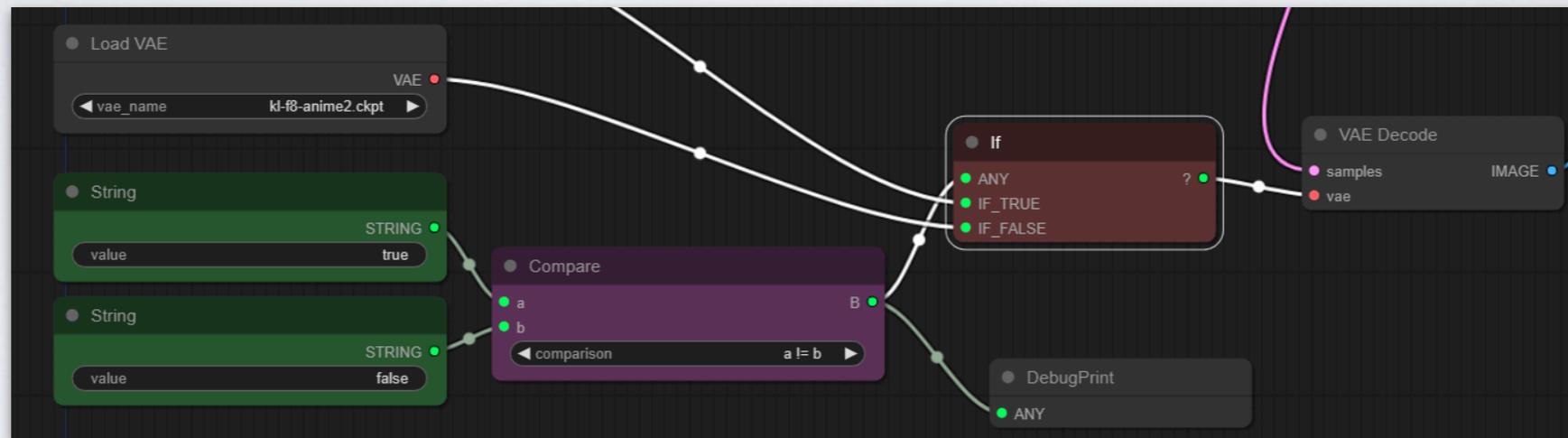
对可视化编辑的流程进行「解释」, 计算结果为图片



但这真的算编程吗? 哪里用到了编译技术?

图片来源: https://comfyanonymous.github.io/ComfyUI_examples/2_pass_txt2img/.

- 人们希望给 ComfyUI 添加更多的**控制逻辑**



- 人们希望把 ComfyUI 中的工作流**翻译**为 Python 代码

ComfyUI-to-Python-Extension

The `ComfyUI-to-Python-Extension` is a powerful tool that translates [ComfyUI](#) workflows into executable Python code. Designed to bridge the gap between ComfyUI's visual interface and Python's programming environment,

图片来源: <https://github.com/theUpsider/ComfyUI-Logic>.

图片来源: <https://github.com/pydn/ComfyUI-to-Python-Extension>.

应用4：实现领域特定语言

- ◎ Domain-Specific Language, DSL
- ◎ 用程序来描述领域特定问题
 - ❖ 可以是图形化的程序!
- ◎ 通过编译技术, **自动**进行:
 - ❖ **编译**到 CPU/GPU/FPGA 等硬件平台
 - ❖ **翻译**到其它编程语言的程序
 - ❖ 直接通过**解释**执行, 计算出结果
 - ❖ 结果可以是图片、网页等形式!
- ◎ **面向语言的程序设计**
 - ❖ **Language-Oriented Programming, LOP**

应用5：新计算机体系结构的设计

- ◎ 编译器在处理器设计阶段就进行开发
 - ❖ 利用编译的效果来评价体系结构特征
- ◎ **Reduced Instruction-Set Computer, RISC**
 - ❖ RISC 之前，指令集的设计目标是让汇编编程更容易
 - ❖ 编译器优化常常能够消除复杂指令
 - ❖ RISC 体系结构中，编译器要能够有效地使用简单指令
 - ❖ 使用简单指令集使得硬件也更容易优化
 - ❖ **但是，代价是什么呢？**
- ◎ RISC 体系结构对编译器的要求更高
- ◎ **挑战与机遇并存！**

应用6：提高软件开发效率的工具

- ◎ 源于编译优化技术的**程序分析**一直在改进软件开发效率
 - ❖ 典型应用：**Language Servers**
- ◎ 类型检查
 - ❖ 捕捉程序中的前后不一致
- ◎ 边界检查
 - ❖ 数据流分析技术可用来定位缓冲区溢出
- ◎ 内存管理工具
 - ❖ 动态地捕捉内存管理错误
- ◎ 软件测试工具
 - ❖ 自动生成高覆盖率的测试用例

当前是学习编译技术的好时代

- ◎ 人们希望用计算机解决越来越广泛的问题
 - ❖ 领域特定语言
- ◎ 硬件体系结构正在多样化和异构化
 - ❖ CPU, GPU, TPU, FPGA, ……
 - ❖ 国产处理器的需求也催生了国产编译器的需求
- ◎ 编译器/解释器的设计目标也变得**多元**
 - ❖ 以前基本是追求运行速度
 - ❖ 现在: 代码大小, 能耗高低, 产生的缺页异常多少, ……



为什么要学编译原理?

如果编译器是程序员的「武器」，
那么编译原理将告诉你「如何打造武器」



编译原理中的科学

- ◎ 一个好的编译器是计算机科学的一个**缩影**
 - ❖ 贪心算法(寄存器分配)
 - ❖ 启发式搜索(指令排序)
 - ❖ 图算法(死代码消除)
 - ❖ 动态规划(指令选择)
 - ❖ 文法和自动机(词法分析、语法分析)
 - ❖ 不动点算法(数据流分析)
 - ❖
- ◎ 编译是把理论应用到实际问题的**范例**
- ◎ 编译领域仍有很多**开放性问题**
 - ❖ 一些问题本身就是 NP 难, 甚至图灵不可判定的!



实践是检验真理的唯一标准

- ◎ 编译器是个不错的练习软件工程的实践项目
 - ❖ 编译器是庞大而复杂的程序
 - ❖ 实现编译器需要对相关算法的掌握、良好的工程能力以及项目规划
- ◎ 编译实践能帮助你提高编程技能
 - ❖ 理解计算机的底层原理
 - ❖ 理解编程语言、编译器、操作系统间的交互
 - ❖ 理解编译器如何优化代码,从而编写更容易被优化的代码
 - ❖ 使得学习新的编程语言更加容易
- ◎ 纸上得来终觉浅,绝知此事要躬行

WA

You

为什么不学编译原理？

**ChatGPT**

不学习编译原理可能有多种原因，这取决于个人的兴趣、目标、时间、能力等因素。以下是一些可能的原因：

1. **兴趣和目标不匹配：** 某些人可能对编译原理不感兴趣，或者他们的职业目标与编译原理无关。如果一个人更喜欢其他领域，如Web开发、数据科学、人工智能等，他可能会选择投入时间学习这些领域而不是编译原理。
2. **专注于实用技能：** 有些人可能更倾向于学习那些可以直接应用于实际工作中的技能，而编译原理可能被认为是一种较为理论性的学科，他们可能更愿意学习与实际项目更直接相关的技能。
3. **时间和精力限制：** 学习编译原理需要大量的时间和精力，包括理论学习、实践编程、实验和项目等。如果一个人的时间和精力有限，他可能会选择投入到其他更紧迫或更感兴趣的事务中。
4. **其他重要技能优先：** 在某些情况下，个人可能认为其他技能对他们的职业发展更为重要，因此他们会选择优先学习这些技能，而将编译原理放在次要位置。

总的来说，不学习编译原理可能是基于个人的兴趣、目标和优先级考虑。虽然学习编译原理具有其独特的好处，但并不是每个人都需要或愿意投入时间和精力来学习这个领域。



课程目标

- ◎ 掌握编译的**基本理论**
 - ❖ 强调**形式化**描述技术和**自动**生成技术
- ◎ 掌握常用的**编译技术**
 - ❖ 不过于偏向任何源语言或目标机器
 - ❖ 侧重命令式编程语言和 RISC 体系结构
 - ❖ 不过于强调算法细节
- ◎ 掌握编译器的**构造技术**
 - ❖ 通过实践来达成
- ◎ 进一步培养**计算机思维能力**



第一讲 编译概述

Introduction to Compilation



主要内容

- ◎ 编译的基本概念和原则
- ◎ 编译器的结构
- ◎ 翻译过程示例

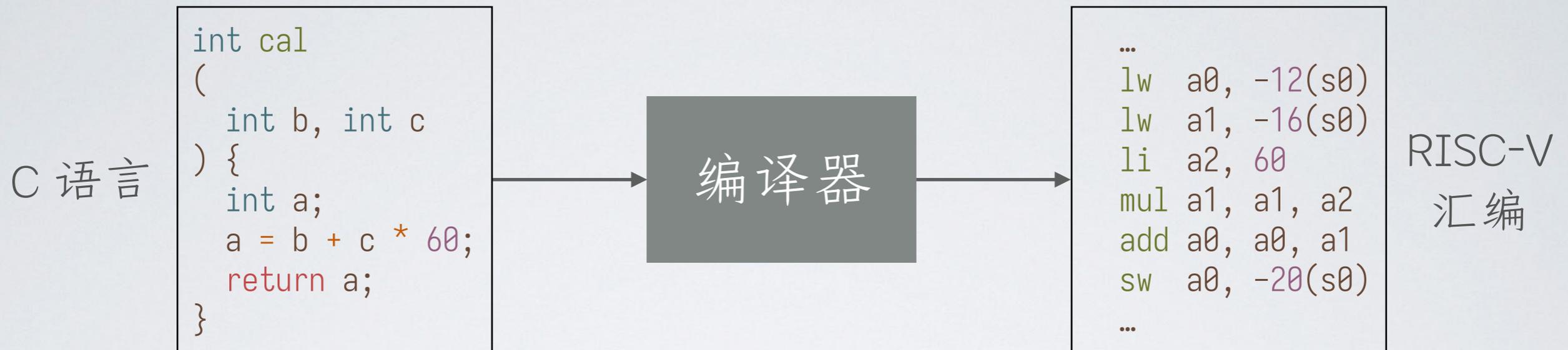
- ◎ 对应章节：第 1 章、第 2 章



主要内容

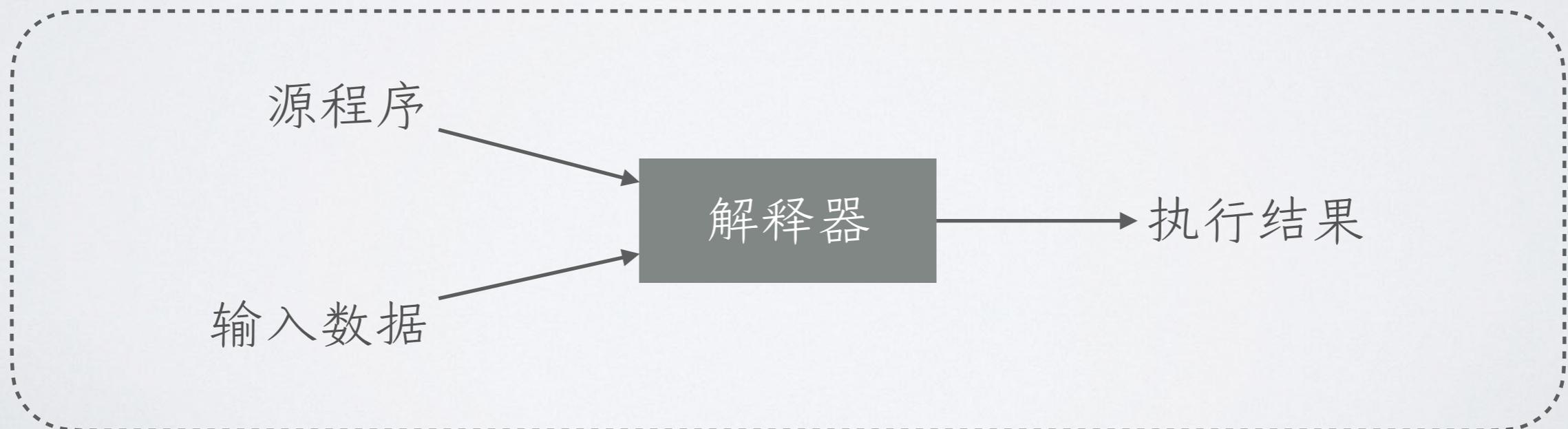
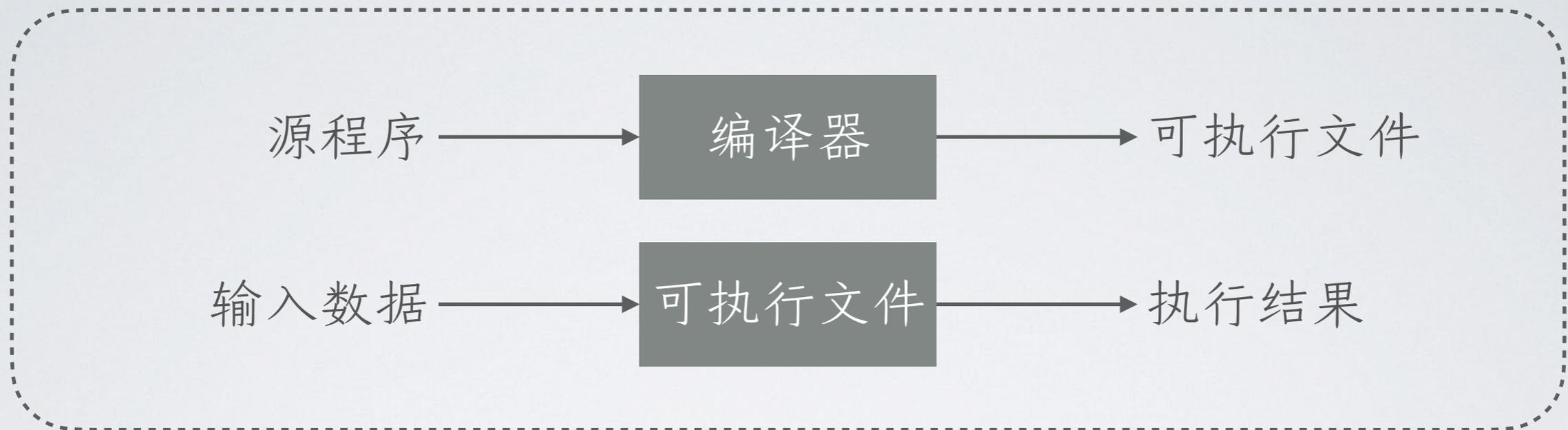
- ◎ 编译的基本概念和原则
- ◎ 编译器的结构
- ◎ 翻译过程示例

基本概念



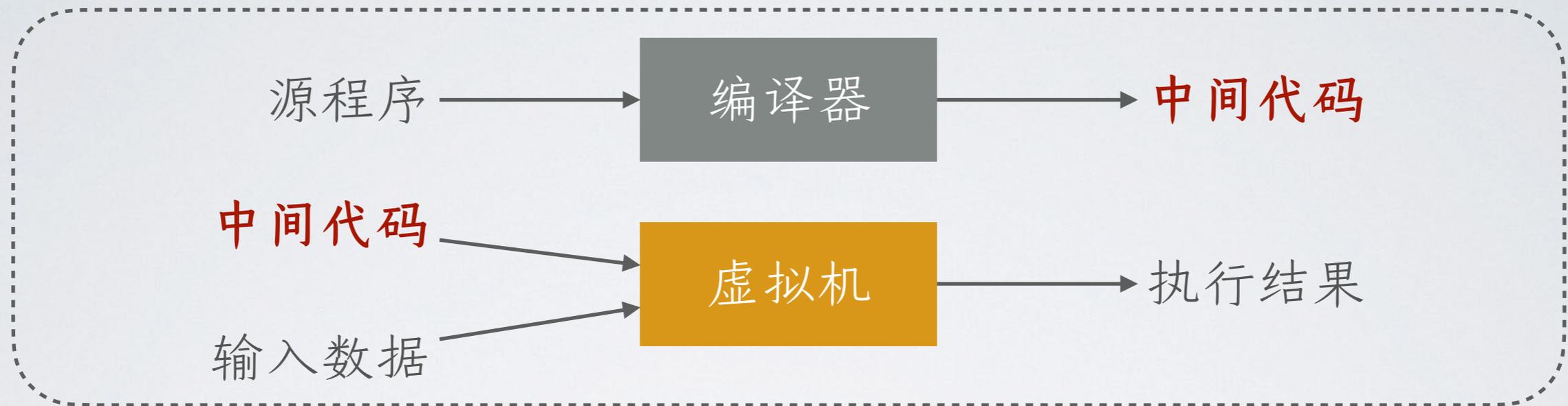
- ◎ 编译器是一个程序，它的功能是**翻译**别的程序
 - ❖ **源程序** (source program): 通常使用一个**编程语言**来编写
 - ❖ **目标程序** (target program): 通常表示为一个处理器的**指令集**
- ◎ 目标程序可以是另一个编程语言的程序
- ◎ **解释器**不生成目标程序，而是直接计算源程序的**执行结果**

编译器与解释器



编译器与解释器

- 实现编程语言时，两者没有明确的边界，可以混合起来



- 虚拟机**：中间代码的**解释器**

- ❖ 虚拟机接受的中间代码通常为**字节码**(bytecode)形式

- 例子：

- ❖ Java 的虚拟机(如 JVM)、JavaScript 的虚拟机(如 V8)

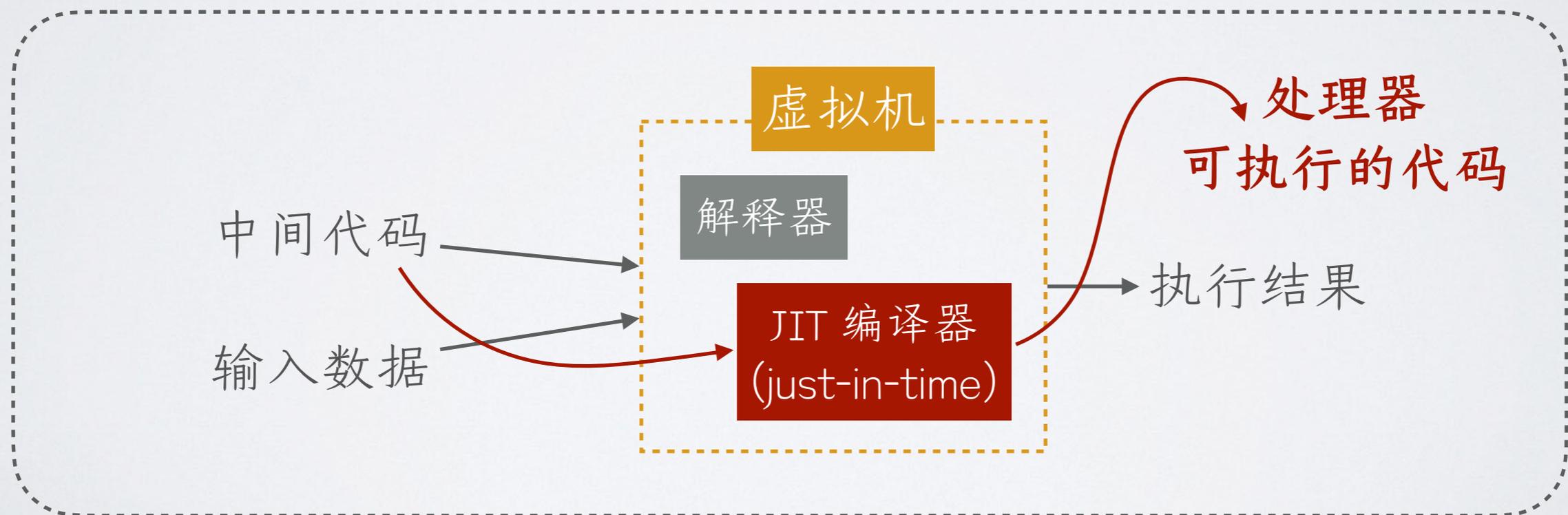
- ❖ WebAssembly(Wasm)是目前流行的面向浏览器的中间代码形式

编译器与解释器

◎ 编译和解释两种方案各自有什么优缺点？

- ❖ 编译后程序的执行速度快；运行时环境不需要有编译器
- ❖ 解释器的开发流程快捷；解释执行的程序易于调试

◎ 虚拟机方案还可以怎么改进？



基本原则

- ◎ 编译器必须保证目标程序和源程序有**等价的语义**
 - ❖ **等价**: 针对相同的输入数据, 给出相同的执行结果

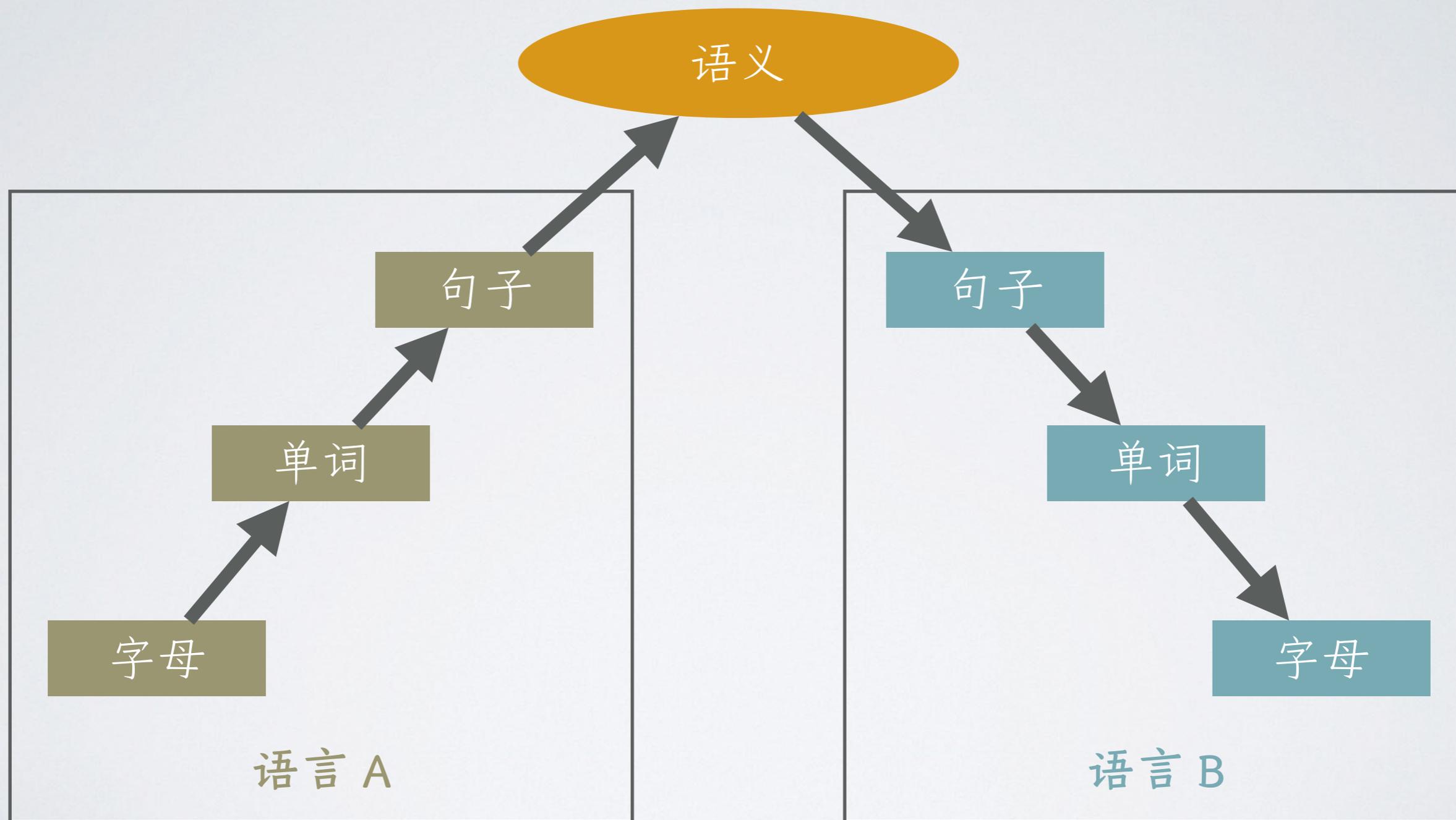
- ◎ 编译器必须以某种合理的方式**改进源程序**
 - ❖ 传统编译器: 翻译为可以在机器上直接执行的程序
 - ❖ 其它语言到 C 语言的编译器: C 有成熟的编译器、可移植性高
 - ❖ LaTeX: 从排版的描述生成可阅读、打印的文档
 - ❖ 同一语言上的转换器: 通过各种优化生成更好的代码
 - ❖



主要内容

- ◎ 编译的基本概念和原则
- ◎ **编译器的结构**
- ◎ 翻译过程示例

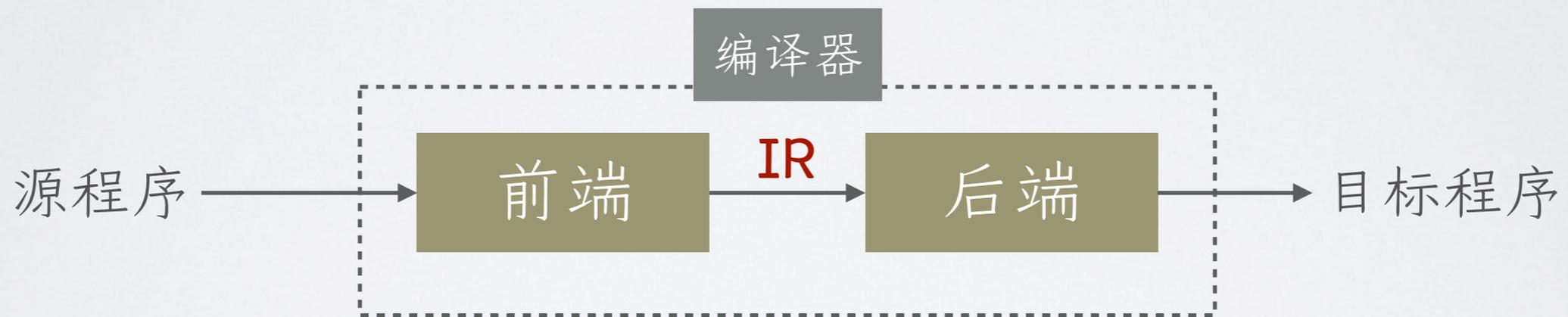
翻译



基本结构



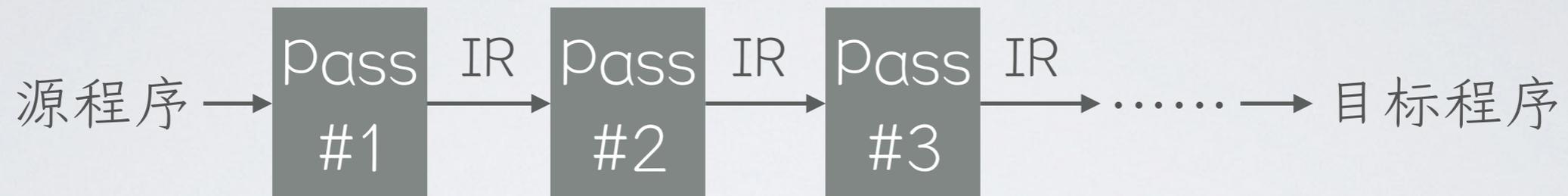
- 翻译过程要求编译器既要理解源程序，也要理解目标机器
- 两个不同的任务驱动了基于**前端**和**后端**的设计



- ❖ **前端**: 理解源程序，得到语义
- ❖ **后端**: 把语义翻译为目标程序
- ❖ **中间表示** (intermediate representation, IR): 编译器对语义的表示形式

多趟处理

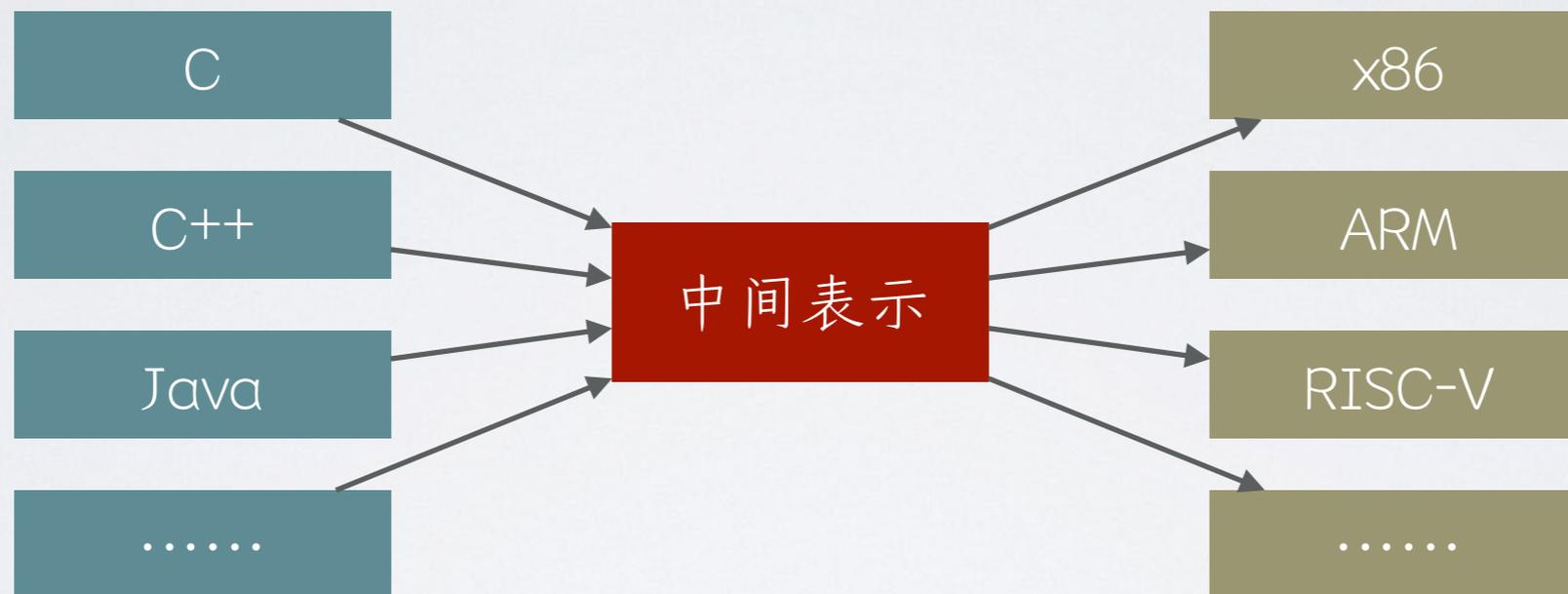
- ◎ 一趟 (pass) 通常指对程序从头到尾扫描一次



- ◎ 编译过程中可以使用**不同的中间表示**(IR)
- ◎ 后面的趟可以利用前面的趟分析程序得出的信息
 - ❖ 多趟处理可能**生成更好的代码**
- ◎ 每一趟可以只做一些简单的任务
 - ❖ 多趟处理**更好实现和维护**

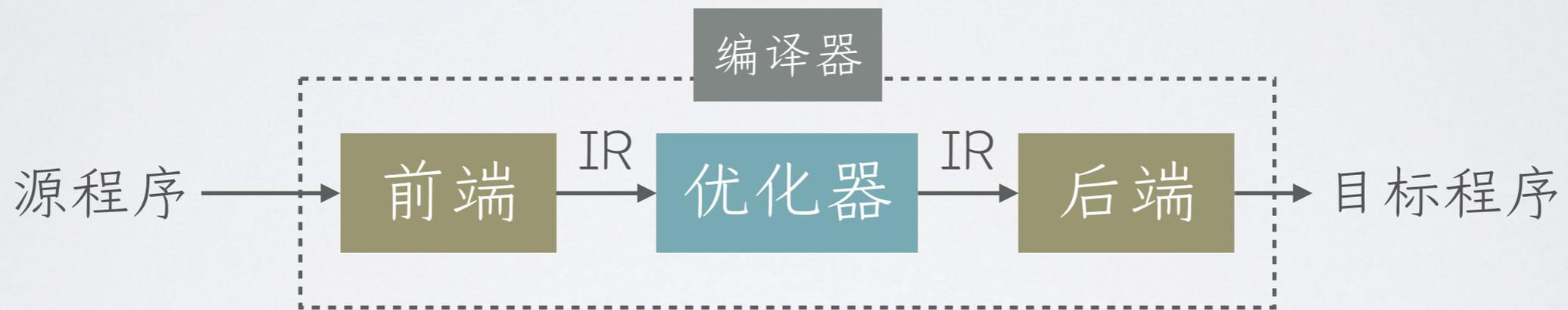
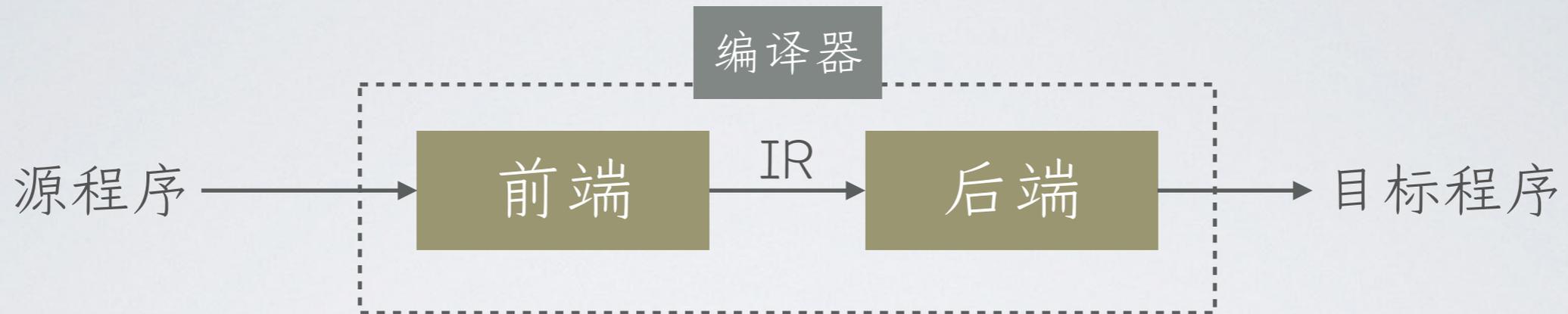
重定目标 (Retargeting)

- 重定目标一般指改变编译器使得其为别的处理器生成代码
- 现代编译器构造同时面对**多种源语言**和**多种目标机器**



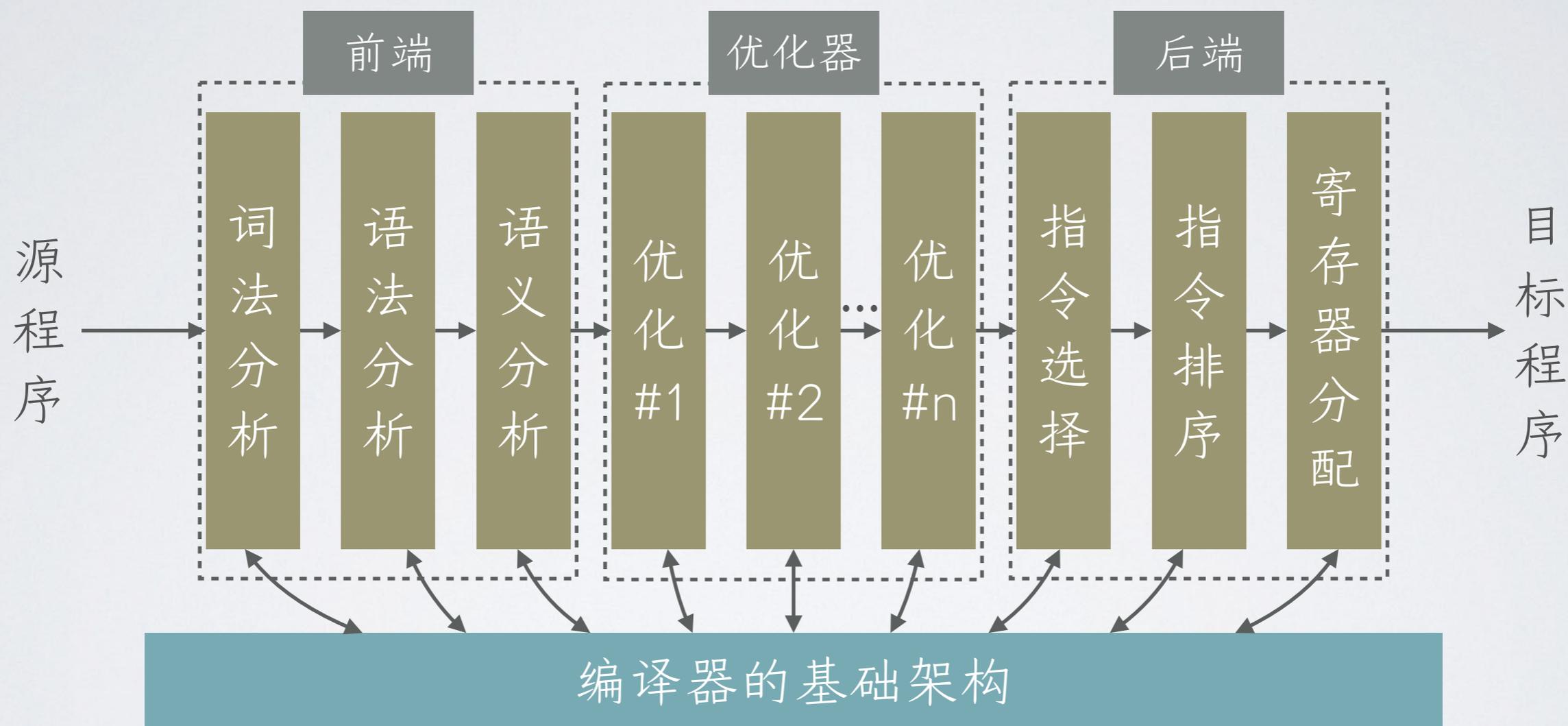
- 通过引入中间表示(IR), 可以在不同的编译器间复用代码
- **LLVM**: 一种流行的编译器中间表示形式

从两阶段到三阶段



- **优化器**: 负责分析、改进、转换中间表示(IR)
- 现代编译器中, 优化是至关重要的阶段

典型编译器的结构





主要内容

- ◎ 编译的基本概念和原则
- ◎ 编译器的结构
- ◎ 翻译过程示例

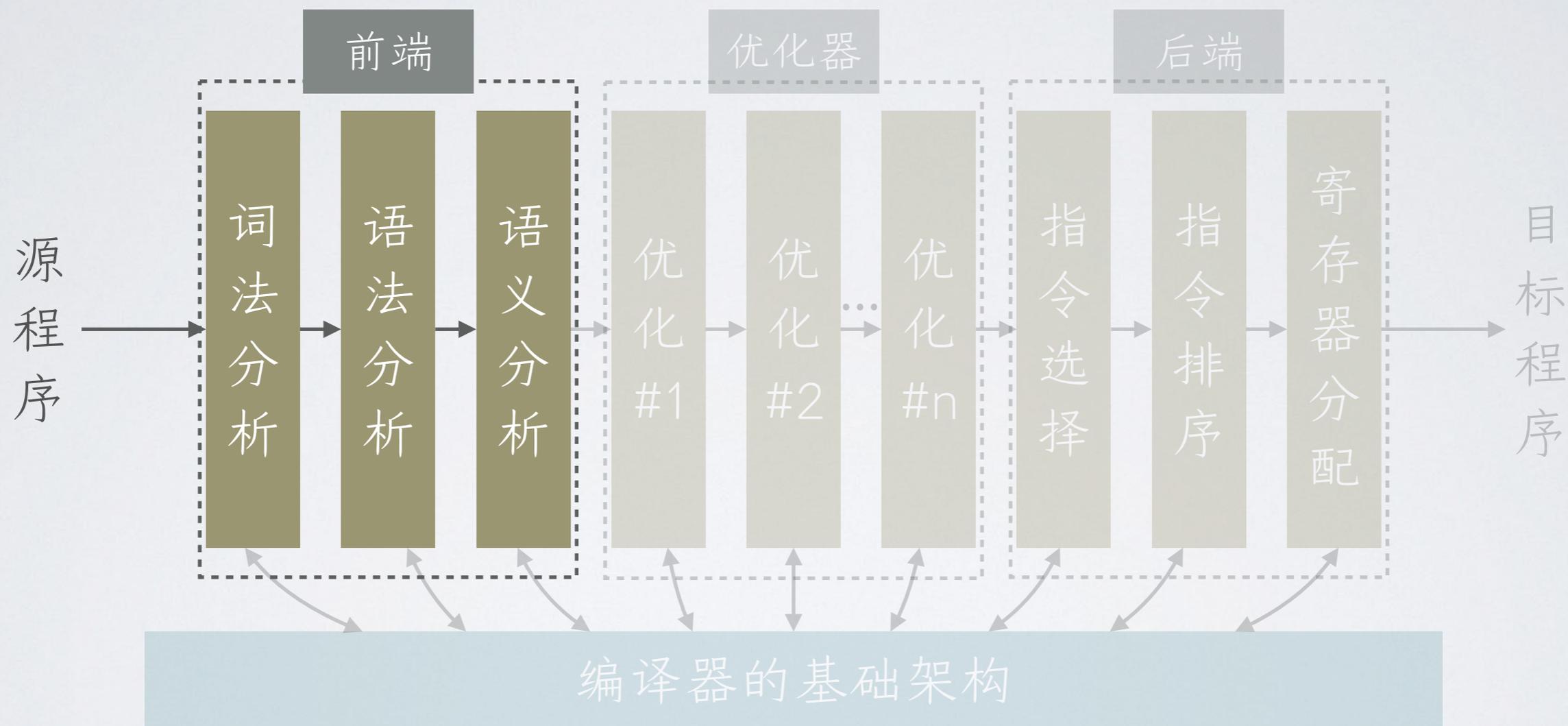
翻译过程示例

- 考虑如下这个赋值语句：

```
a = a * 2 * b * c * d;
```

- 我们将看到把它翻译为如下类 RISC 汇编代码的过程：

```
LD  R1, a           // 加载变量 a 到寄存器 R1
LD  R2, b           // 加载变量 b 到寄存器 R2
LD  R3, c           // 加载变量 c 到寄存器 R3
ADD R1, R1, R1      // R1 ← a * 2
MUL R1, R1, R2      // R1 ← (a * 2) * b
LD  R2, d           // 加载变量 d 到寄存器 R2
MUL R1, R1, R3      // R1 ← (a * 2 * b) * c
MUL R1, R1, R2      // R1 ← (a * 2 * b * c) * d
ST  a, R1           // 保存寄存器 R1 到变量 a
```



词法分析

- 把「字母」组合成「单词」
- 从程序中提取的「单词」被称为**词法单元**(token)



```
a = a * 2 * b * c * d;
```

- <ID, “a”> <EQ, “=”> <ID, “a”> <MUL, “*”> <NUMBER, “2”> <MUL, “*”>
<ID, “b”> <MUL, “*”> <ID, “c”> <MUL, “*”> <ID, “d”> <SEMI, “;”>

语法分析

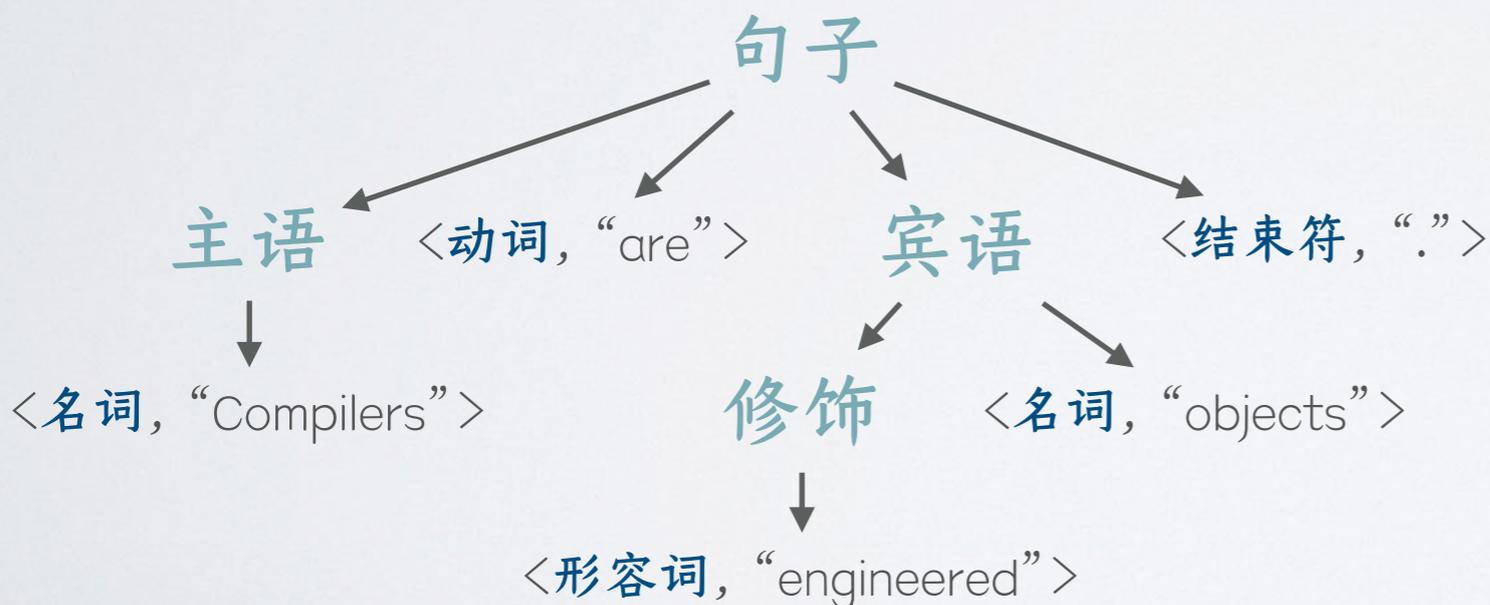
- 把「单词」组合成「句子」
- 组合的过程形成了**语法分析树**

Compilers are engineered objects.

「可以具有如下形式」
「推导」

语法变量

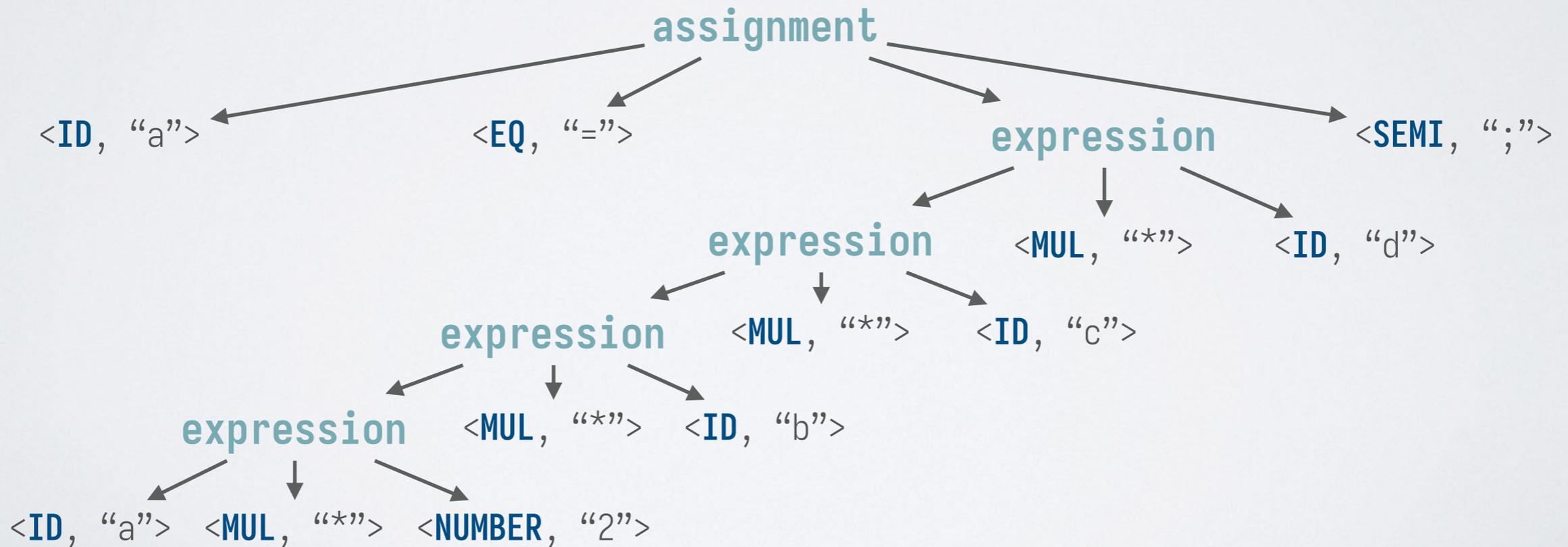
句子	→	主语 动词 宾语 结束符
主语	→	名词
宾语	→	名词
宾语	→	修饰 名词
修饰	→	形容词
.....		



语法分析

- 把「单词」组合成「句子」
- 组合的过程形成了**语法分析树**

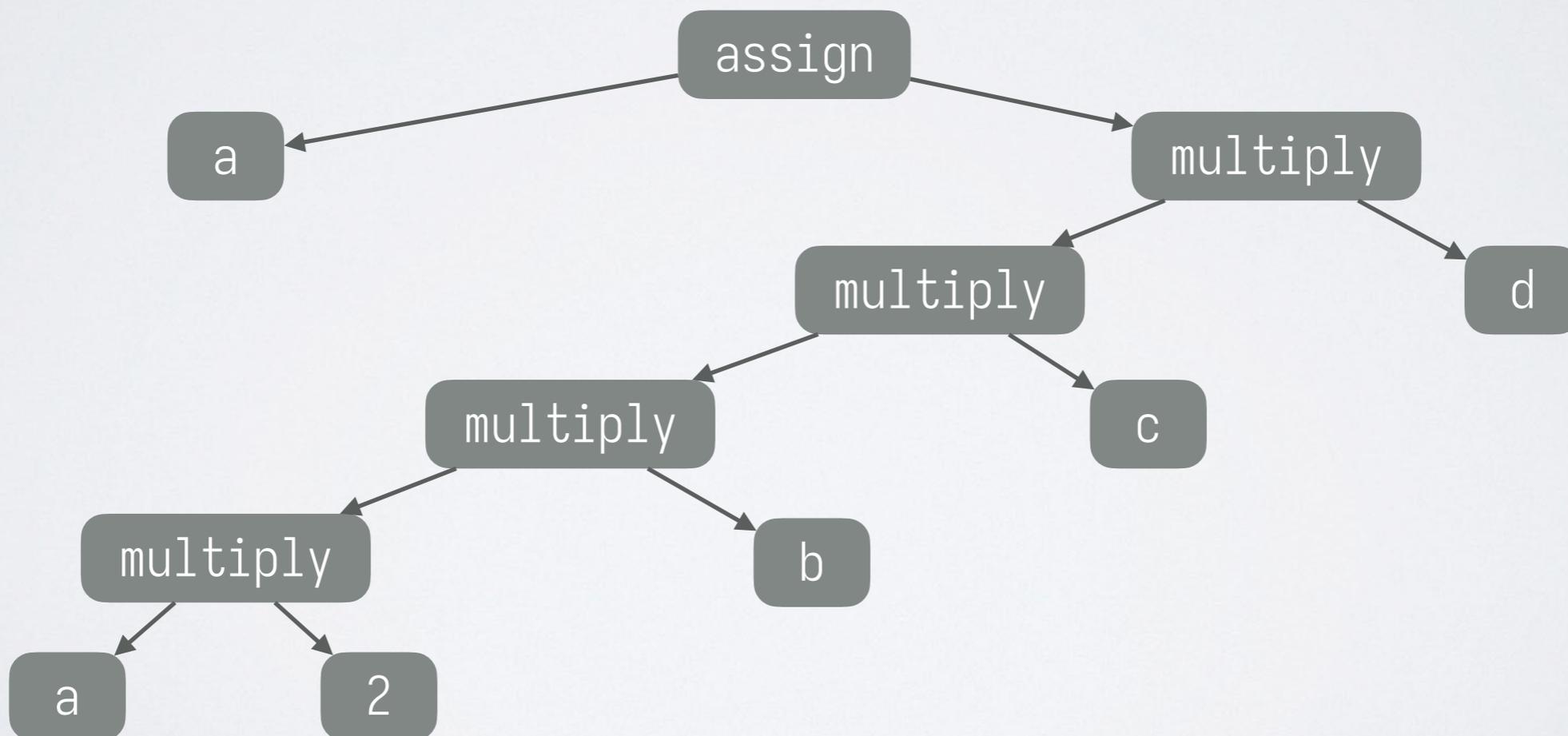
a = a * 2 * b * c * d ;



语义分析

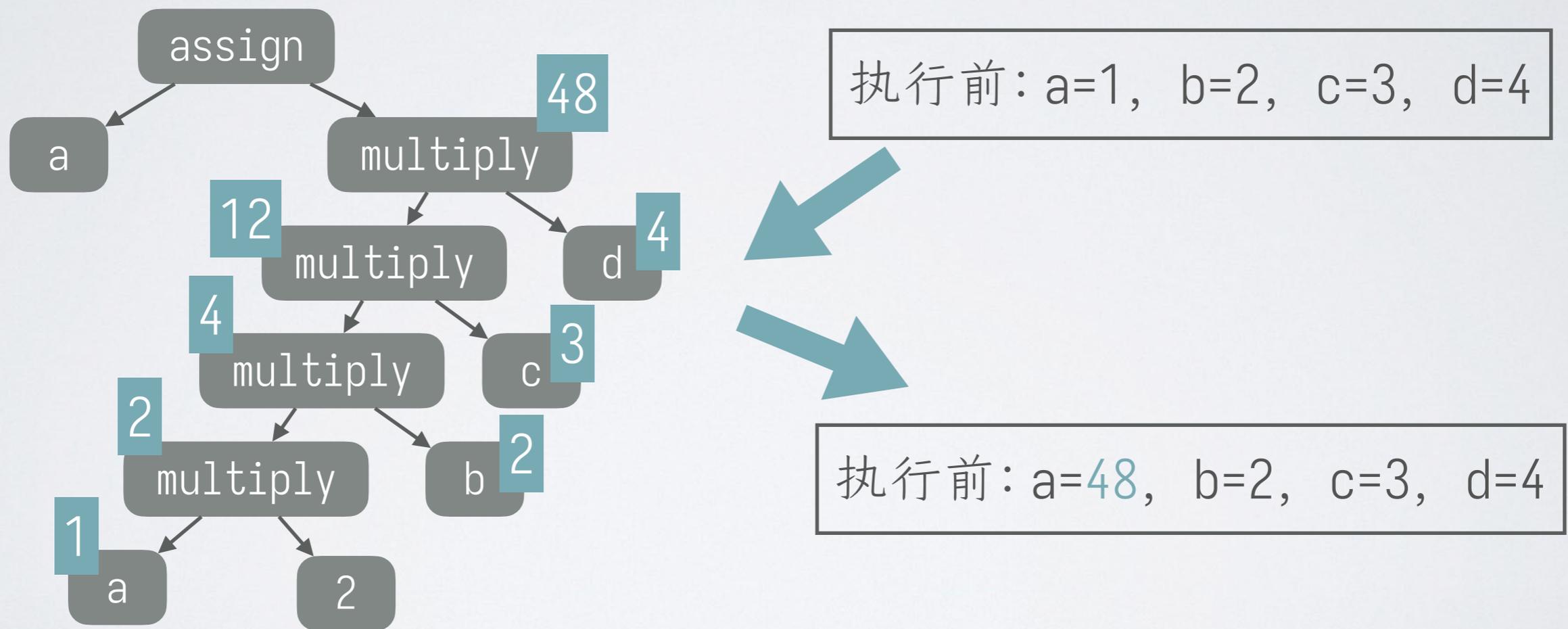
- ◎ 语义分析可以为程序构造**抽象语法树**
 - ❖ 与语法分析树相比,记录了语义相关的核心信息

```
a = a * 2 * b * c * d;
```



解释器

- 解释器可以在**抽象语法树**上进行解释执行
 - 解释器与编译器都需要的技术：词法分析，语法分析，语义分析



语义分析

◎ 并非所有满足语法的「句子」都有合理的「语义」

❖ “Rocks are green vegetables.”

❖ “PKU eats THU.”

句子 → 主语 动词 宾语 结束符

◎ 语义分析检查程序是否合理

❖ 编程语言的语义模型比自然语言简单

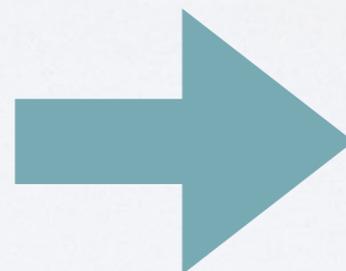
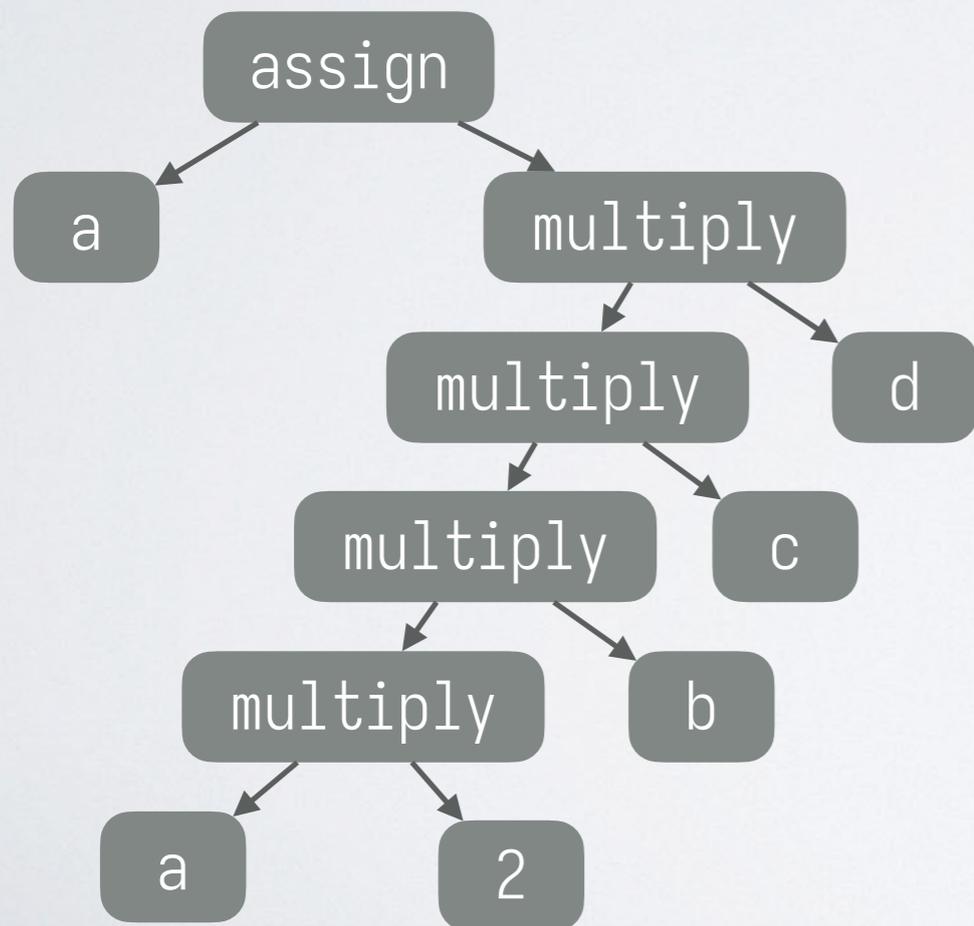
◎ **类型检查**: 检查程序中前后的类型使用是否一致

`a = a * 2 * b * c * d;`

变量具有数值类型

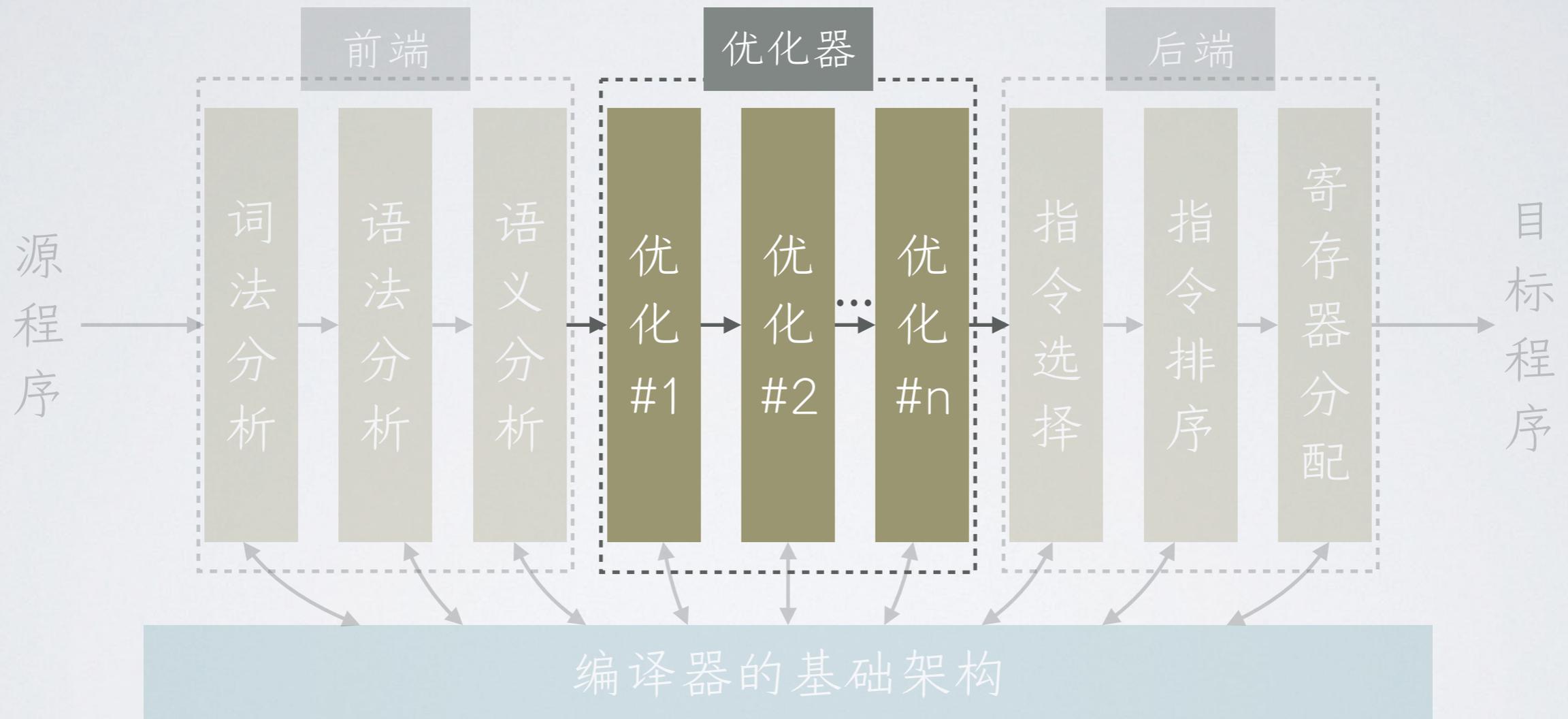
中间表示

- ◎ 编译器可以使用各种不同形式的中间表示(IR)
 - ❖ **图状 IR**: 用树、图等结构表示
 - ❖ 抽象语法树
 - ❖ **线性 IR**: 类似汇编的列表形式



```
t0 = a * 2
t1 = t0 * b
t2 = t1 * c
t3 = t2 * d
a = t3
```

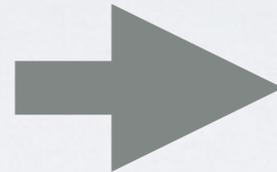
优化器



机器无关优化

- 中间表示通常与具体目标机器无关, 适合进行通用的优化
- 优化的目标通常是提高代码的执行效率

```
t0 = a * 2
```

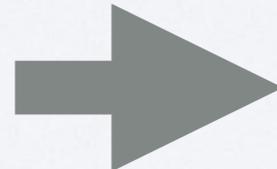


```
t0 = a + a
```

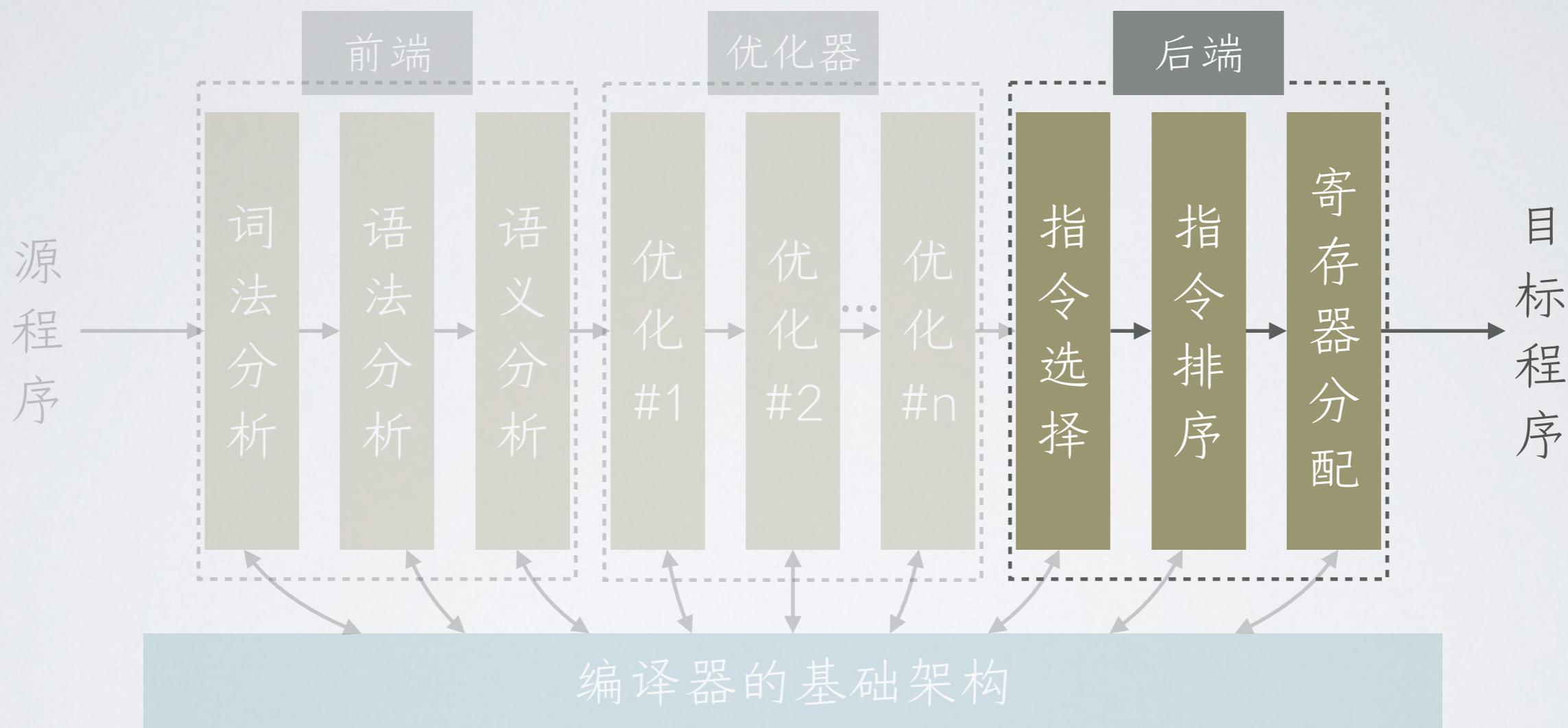
- 优化通常包括**分析**和**转换**两个部分

```
L: d = input()  
t0 = a + a  
t1 = t0 * b  
t2 = t1 * c  
t3 = t2 * d  
a = t3  
goto L
```

b 和 c 的值在
循环中不变



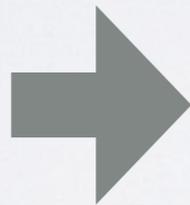
```
t4 = b * c  
L: d = input()  
t0 = a + a  
t2 = t0 * t4  
t3 = t2 * d  
a = t3  
goto L
```



指令选择

- 把中间代码重写为目标机器上的指令
- 一条中间代码语句被转换为一个或多个目标机操作

```
t0 = a + a
t1 = t0 * b
t2 = t1 * c
t3 = t2 * d
a = t3
```

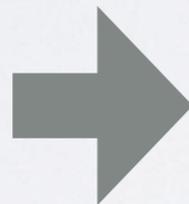


```
LD R1, a // 加载变量 a 到寄存器 R1
LD R2, b // 加载变量 b 到寄存器 R2
LD R3, c // 加载变量 c 到寄存器 R3
LD R4, d // 加载变量 d 到寄存器 R4
ADD R1, R1, R1 // R1 ← a * 2
MUL R1, R1, R2 // R1 ← (a * 2) * b
MUL R1, R1, R3 // R1 ← (a * 2 * b) * c
MUL R1, R1, R4 // R1 ← (a * 2 * b * c) * d
ST a, R1 // 保存寄存器 R1 到变量 a
```

寄存器分配

- 在指令选择期间，编译器通常不考虑**寄存器数目有限**的现实
- 寄存器分配算法需要决定在每个时刻，哪些值存于寄存器中

```
LD R1, a
LD R2, b
LD R3, c
LD R4, d
ADD R1, R1, R1
MUL R1, R1, R2
MUL R1, R1, R3
MUL R1, R1, R4
ST a, R1
```



```
LD R1, a // 加载变量 a 到寄存器 R1
ADD R1, R1, R1 // R1 ← a * 2
LD R2, b // 加载变量 b 到寄存器 R2
MUL R1, R1, R2 // R1 ← (a * 2) * b
LD R2, c // 加载变量 c 到寄存器 R2
MUL R1, R1, R2 // R1 ← (a * 2 * b) * c
LD R2, d // 加载变量 d 到寄存器 R2
MUL R1, R1, R2 // R1 ← (a * 2 * b * c) * d
ST a, R1 // 保存寄存器 R1 到变量 a
```

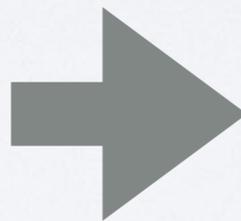
4 个寄存器

2 个寄存器

指令排序

- 指令排序是一种**机器有关优化**，将目标机特性纳入考量
 - ❖ 不同操作的执行时间(时钟周期数)不同
 - ❖ 很多处理器支持在长延迟操作执行期间开始下一个操作
- 假设 LD、ST 要 3 个周期，MUL 要 2 个周期，ADD 要 1 个周期

```
LD R1, a // 开始: 1, 结束: 3
ADD R1, R1, R1 // 开始: 4, 结束: 4
LD R2, b // 开始: 5, 结束: 7
MUL R1, R1, R2 // 开始: 8, 结束: 9
LD R2, c // 开始: 9, 结束: 11
MUL R1, R1, R2 // 开始: 12, 结束: 13
LD R2, d // 开始: 13, 结束: 15
MUL R1, R1, R2 // 开始: 16, 结束: 17
ST a, R1 // 开始: 18, 结束: 20
```

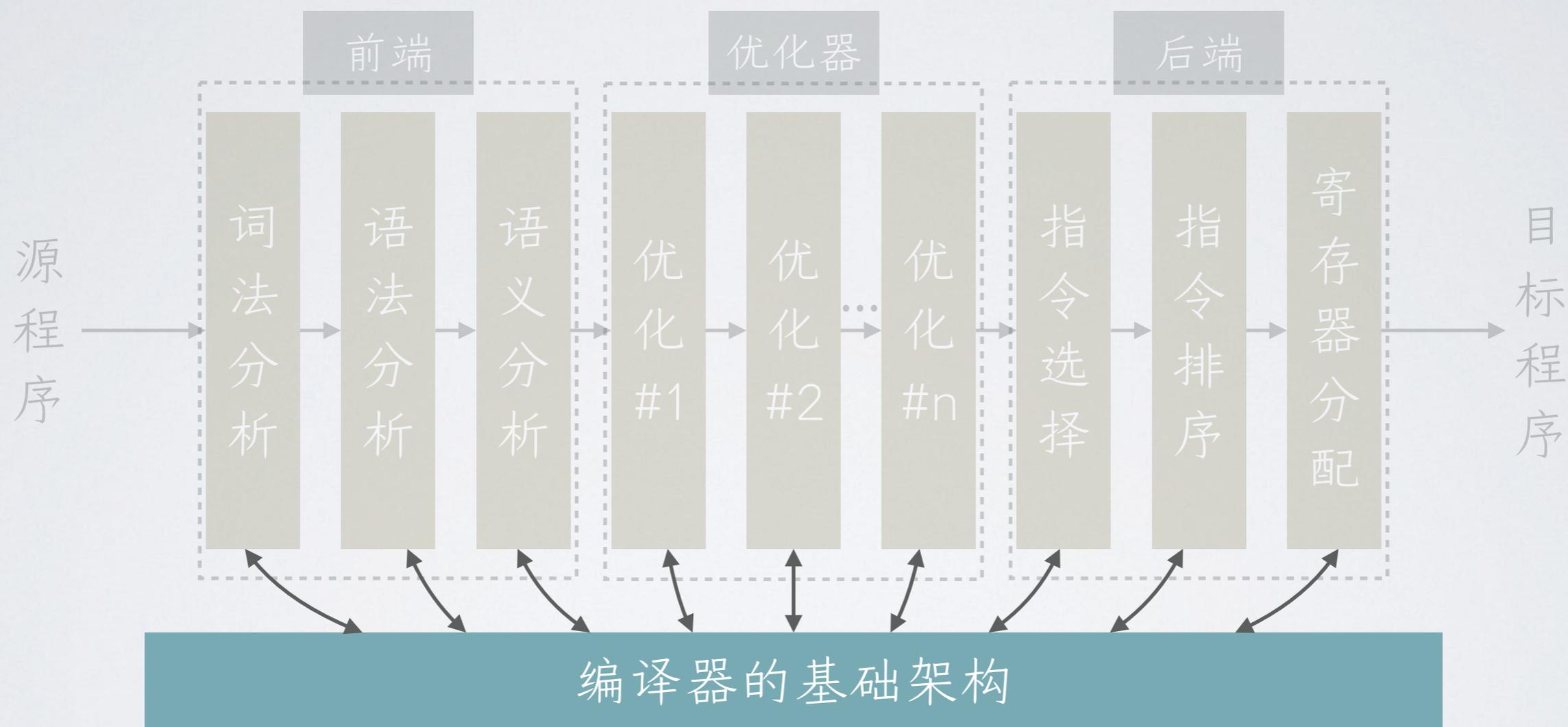


```
LD R1, a // 开始: 1, 结束: 3
LD R2, b // 开始: 2, 结束: 4
LD R3, c // 开始: 3, 结束: 5
ADD R1, R1, R1 // 开始: 4, 结束: 4
MUL R1, R1, R2 // 开始: 5, 结束: 6
LD R2, d // 开始: 6, 结束: 8
MUL R1, R1, R3 // 开始: 7, 结束: 8
MUL R1, R1, R2 // 开始: 9, 结束: 10
ST a, R1 // 开始: 11, 结束: 13
```

20 个时钟周期

13 个时钟周期

编译器的基础架构



符号表

- 编译器架构中最常见的一种数据结构
- 进行类型检查时，**怎么知道每个变量的类型？**
- 怎么记录不同的分析得出的关于程序的信息？**
- 通过全局的**符号表(symbol table)**来汇总不同名字的信息

名字	种类	类型	其它信息
a	变量	int	
b	变量	int	
c	变量	int	
d	变量	int	
printf	函数		
.....			

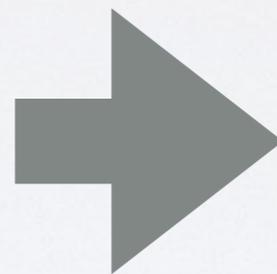
翻译过程示例

◎ 再来看从一个语言到另一个语言的翻译过程示例

文言 / wenyang-lang

吾有一術。名之曰「階乘」。
欲行是術。必先得一數。曰「甲」。
乃行是術曰。
若「甲」等於一者。
乃得「甲」。
若非。
減「甲」以一。名之曰「乙」。
施「階乘」於「乙」。名之曰「丙」。
乘「丙」以「甲」。名之曰「丁」。
乃得「丁」
也。
是謂「階乘」之術也。

施「階乘」於五。書之。



JavaScript

```
var 階乘 = _ => {}  
階乘 = 甲 => {  
  if (甲 == 1) {  
    return 甲  
  } else {  
    const _ans1 = 甲 - 1  
    var 乙 = _ans1  
    const _ans2 = 階乘(乙)  
    var 丙 = _ans2  
    const _ans3 = 丙 * 甲  
    var 丁 = _ans3  
    return 丁  
  }  
}  
const _ans4 = 階乘(5)  
console.log(_ans4)
```

词法分析

句号视作空格

吾有一術。名之曰「階乘」。
欲行是術。必先得一數。曰「甲」。
乃行是術曰。
若「甲」等於一者。
乃得「甲」。
若非。
減「甲」以一。名之曰「乙」。
施「階乘」於「乙」。名之曰「丙」。
乘「丙」以「甲」。名之曰「丁」。
乃得「丁」
也。
是謂「階乘」之術也。

施「階乘」於五。書之。

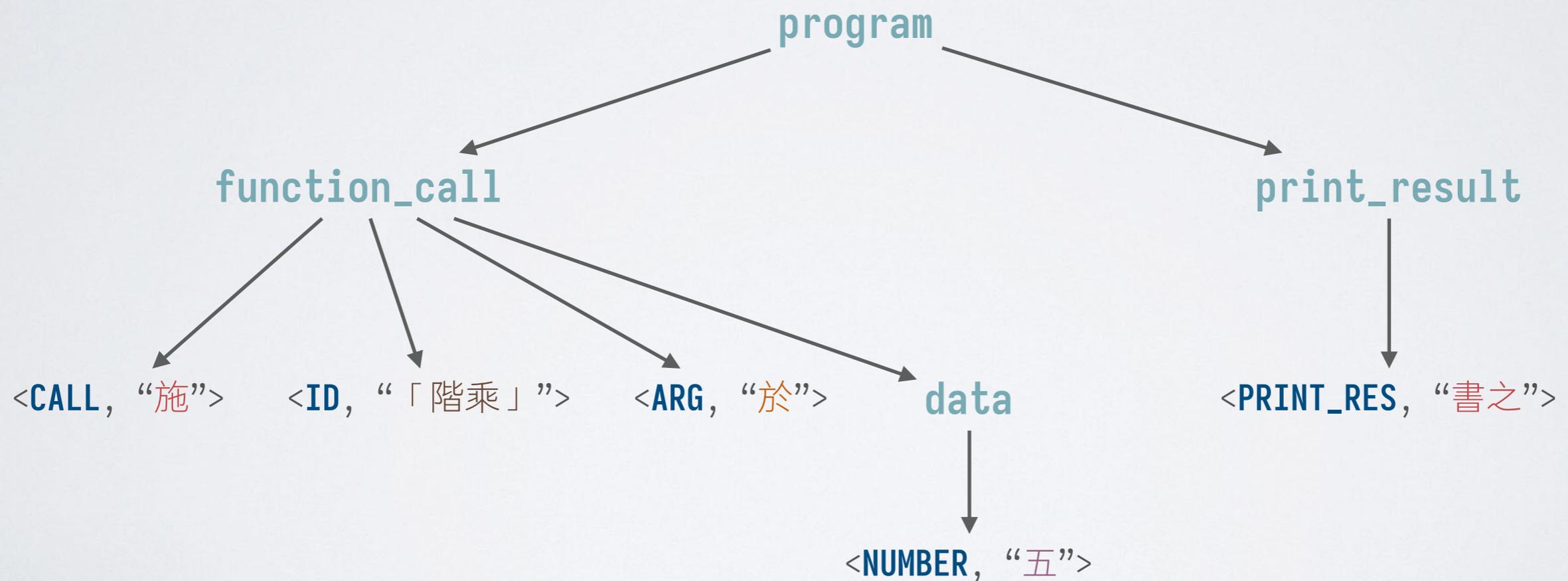
<DEFN, “吾有”> <NUMBER, “一”> <FUNC, “術”>
<NAME, “名之”> <IS, “曰”> <ID, “「階乘」”>
<NEED, “欲行是術”> <PARAM, “必先得”> <NUMBER, “一”>
<NUMBER_TYPE, “數”> <IS, “曰”> <ID, “「甲」”>
<BEGIN, “乃行是術曰”> <IF, “若”> <ID, “「甲」”>
.....
<END, “是謂”> <ID, “「階乘」”> <END_DEFN, “之術也”>

<CALL, “施”> <ID, “「階乘」”> <ARG, “於”>
<NUMBER, “五”> <PRINT_RES, “書之”>

语法分析

施「階乘」於五。書之。

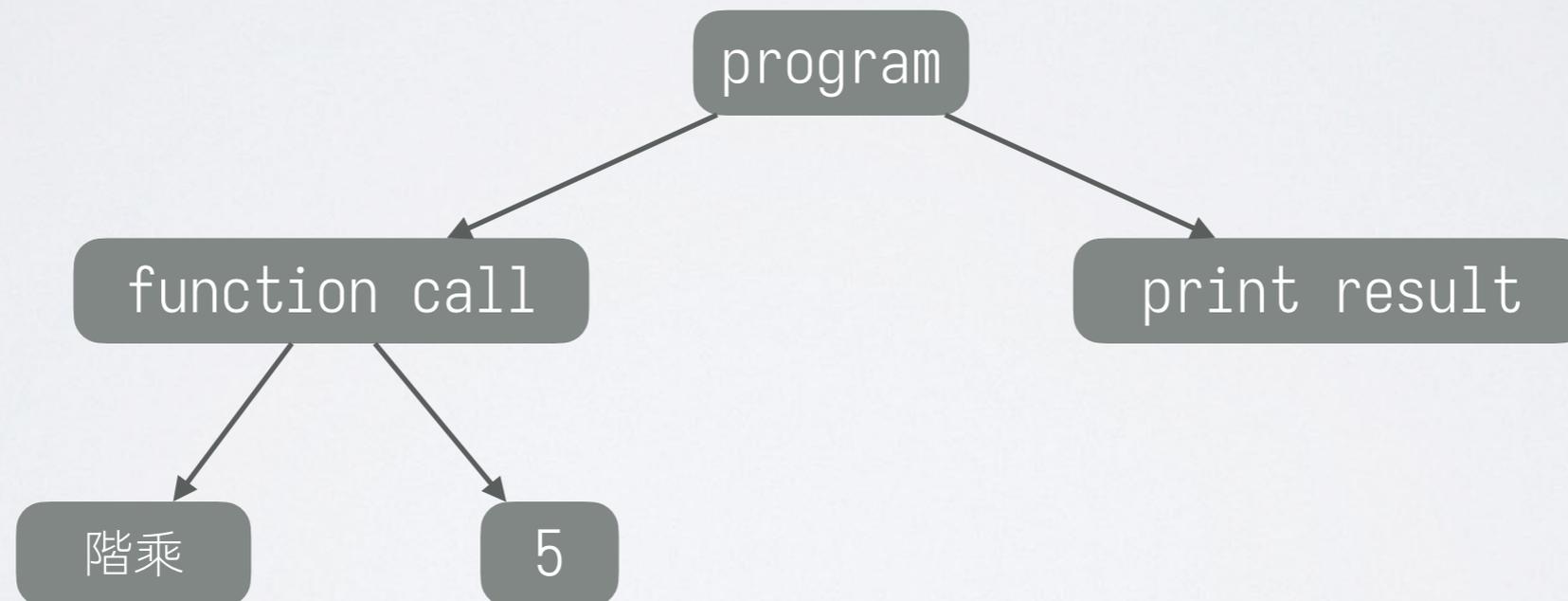
<CALL, “施”> <ID, “「階乘」”> <ARG, “於”>
<NUMBER, “五”> <PRINT_RES, “書之”>



语义分析

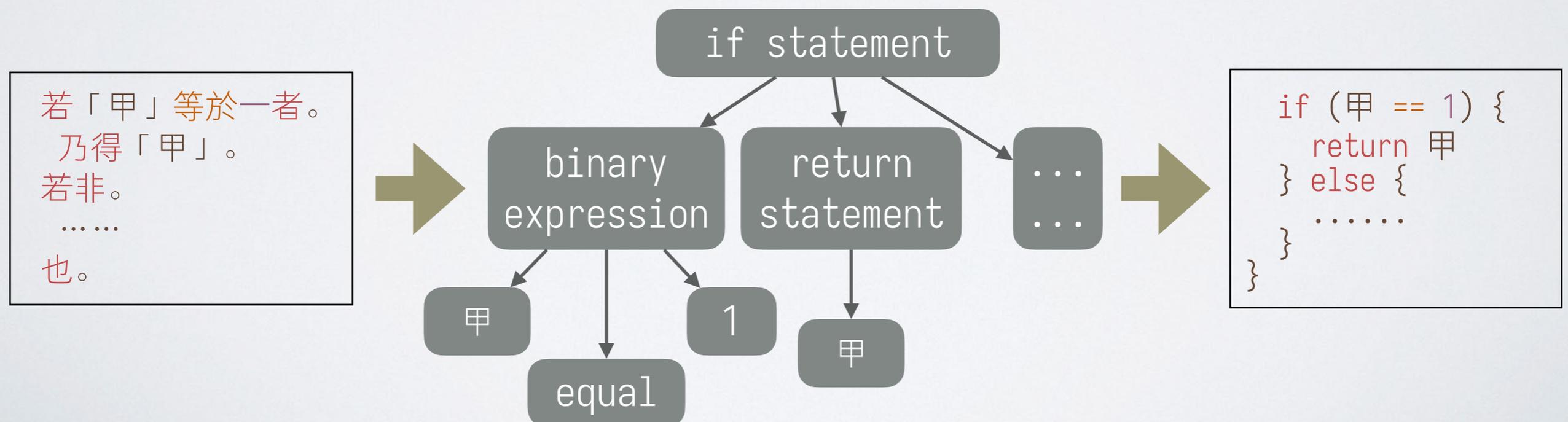
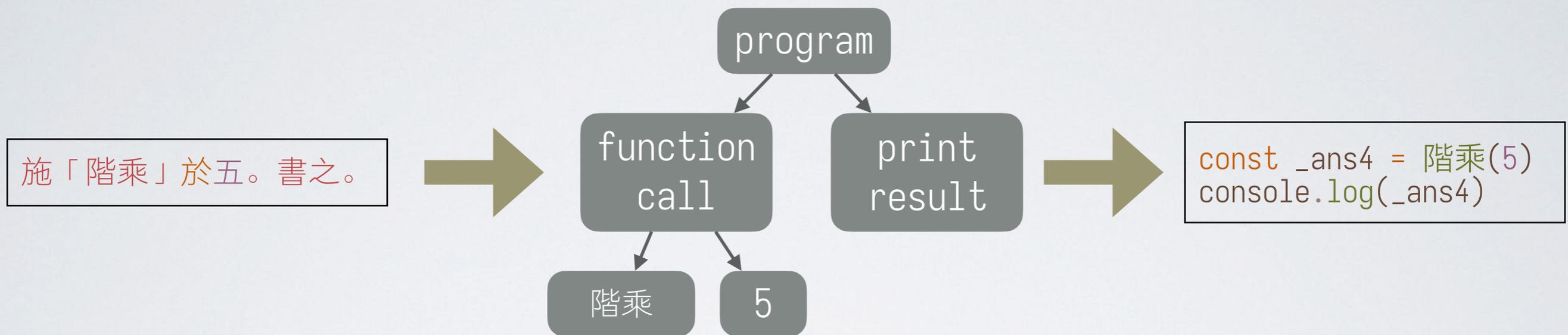
施「階乘」於五。書之。

- ◎ 检查程序的合法性，如書之必须在计算了值的语句后面
- ◎ 生成抽象语法树



目标代码生成

- 因为是从文言到 JavaScript 的翻译，所以输出 JavaScript 代码



本讲小结

- ◎ 编译是把源程序翻译为目标程序的过程
 - ❖ 编译器与解释器的区别和联系
- ◎ 编译器具有良好的结构, 是很好的软件工程实践项目
 - ❖ 编译器的阶段划分
 - ❖ 前端、优化器、后端
 - ❖ 多趟处理
- ◎ 编译技术涉及了计算机科学不同领域的理论和算法
- ◎ 编译技术在多种领域有着广泛的应用