



Introduction to Compilation Principle

赵帅

计算机学院
中山大学

The Module[课程介绍]



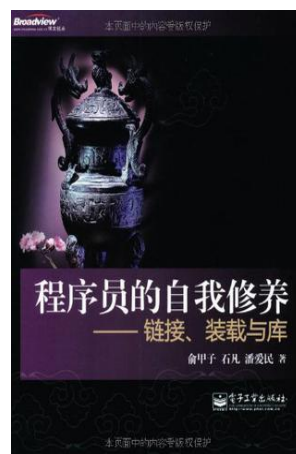
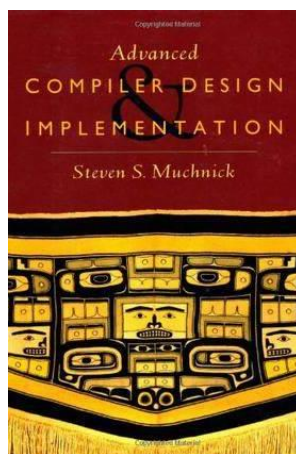
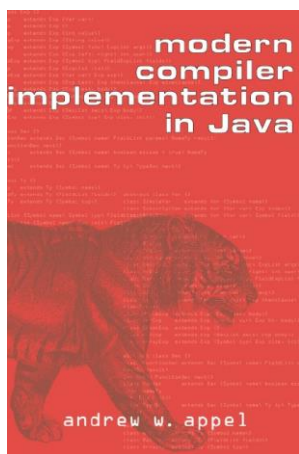
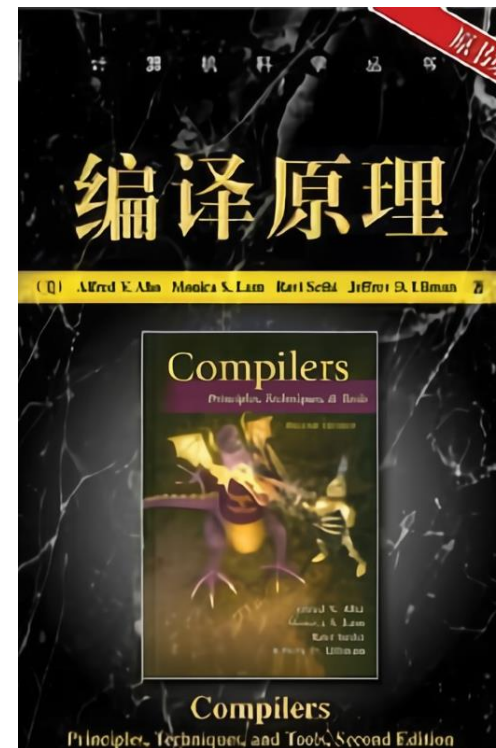
- 年级：
 - ◆ 大三年纪学生、第二学期
- 先修课程：
 - ◆ 计算机组成原理、汇编语言、数据结构、编程语言设计等
- 理论课：
 - ◆ 核心问题：一个高级语言编写的程序，最后如何在计算机上运行？
 - ◆ 讲解编译原理中的核心理论与技术方法
 - 词法分析、语法分析、语义分析、代码生成、代码优化等
- 实验课：
 - ◆ 独立课程、配合理论课协同进行
 - ◆ 应用编译原理中的技术方法
 - Java编程、语言处理、逆向工程工具等



Textbook & Materials[教材资料]



- 主要教材：
 - ◆ 《Compilers: Principles, Techniques, and Tools》, 第二版
 - ◆ 课程将覆盖章节1-6与附件A
- 其他参考材料：
 - ◆ 《Modern compiler implementation in Java》
 - ◆ 《Advanced Compiler Design and Implementation》
 - ◆ 《程序员的自我修养－链接、装载与库》等等



Module Time & Location[时间地点]



- 理论课

- ◆ 排课:

- 周二: 第 1-9 周
 - 周四: 第 1-18 周

- ◆ 时间:

- 第 5 节: 14:20 – 15:05
 - 第 6 节: 15:15 – 16:00

- ◆ 地点:

- 教学大楼东C305

- 实验课

- ◆ 排课:

- 周四: 第 1-18 周

- ◆ 时间:

- 第 7 节: 16:30 – 17:15
 - 第 8 节: 17:25 – 18:10

- ◆ 地点:

- 实验中心大楼B202



Schedule[进度安排]



周次	课程内容	周次	课程内容
第1周 (2.25 & 2.27)	周二：课程介绍、周四：词法分析	第10周 (5.8)	周四：中间代码
第2周 (3.4 & 3.6)	周二：词法分析、周四：词法分析	第11周 (5.15)	周四：中间代码
第3周 (3.11 & 3.13)	周二：词法分析、周四：语法分析	第12周 (5.22)	周四：代码优化
第4周 (3.18 & 3.20)	周二：语法分析、周四：语法分析	第13周 (5.29)	周四：代码优化
第5周 (4.1 & 4.3)	周二：语法分析、周四：语法分析	第14周 (6.5)	周四：代码优化
第6周 (4.8 & 4.10)	周二：语法分析、周四：语法分析	第15周 (6.12)	周四：目标代码生成
第7周 (4.15 & 4.17)	周二：语法分析、周四：语义分析	第16周 (6.19)	周四：目标代码生成
第8周 (4.22 & 4.24)	周二：语义分析、周四：语义分析	第17周 (6.26)	周四：课程复习
第9周 (4.29 & 5.1)	周二：语义分析、周四：中间代码	第18-19周	考试周

词法分析 (4)

语法分析 (8)

语义分析 (4)

中间代码 (3)

代码优化 (3)

代码生成 (2)

Subject to changes



Grading[成绩构成]



- 学分与学时：
 - ◆ 理论课：3学分、54学时
 - ◆ 实验课：1学分、36学时
- 理论课分数：
 - ◆ (40%) 课后作业
 - ◆ (60%) 闭卷考试
- 实验课分数：
 - ◆ (10%) 实验一：使用Java实现一个所得税计算器
 - ◆ (25%) 实验二：改进一个已有的语言处理程序
 - ◆ (30%) 实验三：实现一个基于表达式的计算器
 - ◆ (35%) 实验四：开发一个程序逆向工程工具



The Instructor[关于教师]



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

- 教育经历：
 - ◆ 2013.10 - 2018.08, 硕&博, 约克大学
 - ◆ 2008.09 – 2012.07, 本科, 西安工业大学
- 工作经历：
 - ◆ 2022.09 - 至今, 中山大学, 副教授
 - ◆ 2018.10 - 2022.09, 博士后, 约克大学
- 研究方向: 嵌入式与实时系统, 操作系统
 - ◆ 任务调度与分配
 - ◆ 系统资源管理
 - ◆ 软硬件协同设计
 - ◆ 安全关键编程
- 课程:
 - ◆ 本科《编译原理》、《编译器构造实验》
 - ◆ 研究生《嵌入式系统》



<https://www.tiempo-secure.com/blog/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Regulation_of_unmanned_aerial_vehicles

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20171023-1>

<https://web.uettaxila.edu.pk/cped/SwarmRoboticsLab.asp>



Teaching Assistants[助教]



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



24级硕士研究生
张美璇 (组长)



24级硕士研究生
姜婕妤



24级硕士研究生
介琛



24级硕士研究生
吴超文



24级硕士研究生
梁耀威



25级硕士研究生
聂湛尚



25级硕士研究生
赵文清



25级硕士研究生
林志扬



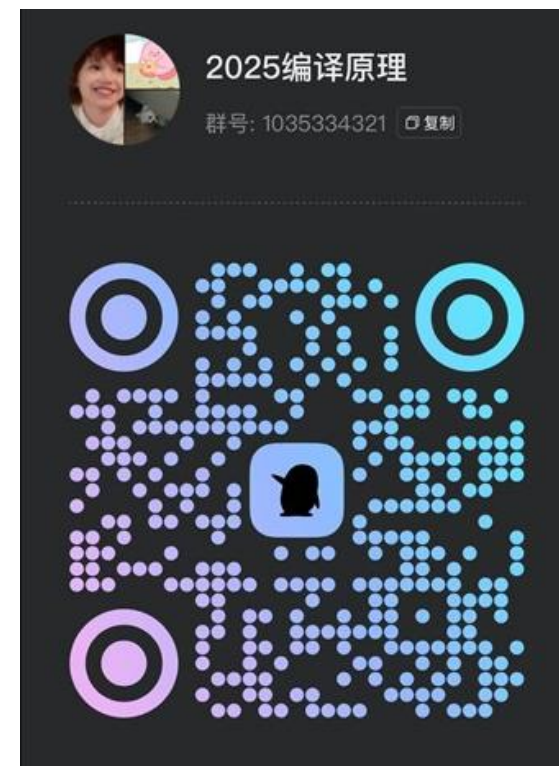
25级硕士研究生
程彤



Contacts[联系方式]



- 任课教师
 - ◆ 赵帅，计算机学院，无人系统研究所
- 课程主页：
 - ◆ <https://rtscompiler.github.io/dcs290/2025Spring/>
 - ◆ 教材，资料
 - ◆ 作业，公告
- 交流方式
 - ◆ 邮件： zhaosh56@mail.sysu.edu.cn
 - ◆ **QQ群： 103 533 4321**（进群更改名称： 学号+姓名）



The Laboratory[关于实验室]



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

- 常年招收硕/博士研究生（推荐大三暑假进组），也欢迎感兴趣的本科生加入
 - ◆ 研究招收方向：嵌入式与实时系统、操作系统关键技术、大语言模型调度、编程语言设计
- 课题
 - ◆ 复杂实时系统设计与分析：《高性能实时操作系统关键技术研究》
 - ◆ 系统资源共享与管理：《面向多核混合关键实时系统的高性能资源共享技术研究》
 - ◆ 共同感兴趣的研究题目
- 竞赛
 - ◆ 中国机器人及人工智能大赛 **[组队中]**
 - ◆ 全国大学生计算机系统能力大赛 — 操作系统设计赛 **[组队中]**
 - ◆ “挑战杯”大学生创业大赛 **[组队中]**
- 往届竞赛
 - ◆ 2023年中国计算机学会（CCF）移动机器人抓取和导航挑战赛
 - ◆ 2023年全国大学生计算机系统能力大赛操作系统功能挑战赛
 - ◆ 2024年粤港澳大湾区IT应用系统开发大赛



中国机器人及人工智能大赛(CRAIC)官方公众号



挑战杯

全国大学生课外学术科技作品竞赛

全国一等奖
全国二、三等奖
一等奖、技术创新先锋奖



What is a Compilation[什么是编译]



- 问题：大家写程序都用过什么语言？
 - ◆ 高级语言C、C++、Java、Python、Ruby等等
 - ◆ **系统工程师**可以理解、使用这些语言
 - ◆ 专注于程序功能，不过多考虑计算机底层运行细节
- 计算机理解这些高级编程语言吗？
 - ◆ **计算机**只懂得机器语言，即二进制码
 - ◆ 不能直接理解并执行高级语言
- 如何让计算机执行高级语言编写的程序？
 - ◆ 需要**将高级语言翻译为机器码**
 - ◆ 兼具查错功能、性能、移植性等

```
while (y<z){  
    int x = a + b;  
    y += x;  
}
```

HOW?

eb 06	jmp	L2
8b 55 f4	mov	edx, DWORD PTR [rbp-12]
8b 45 f0	mov	eax, DWORD PTR [rbp-16]
01 d0	add	eax, edx
89 45 ec	mov	DWORD PTR [rbp-20], eax
L3:8b 45 ec	mov	eax, DWORD PTR [rbp-20]
01 45 fc	add	DWORD PTR [rbp-4], eax
L2:8b 45 fc	mov	eax, DWORD PTR [rbp-4]
3b 45 f8	cmp	eax, DWORD PTR [rbp-8]
7c f2	j1	L3

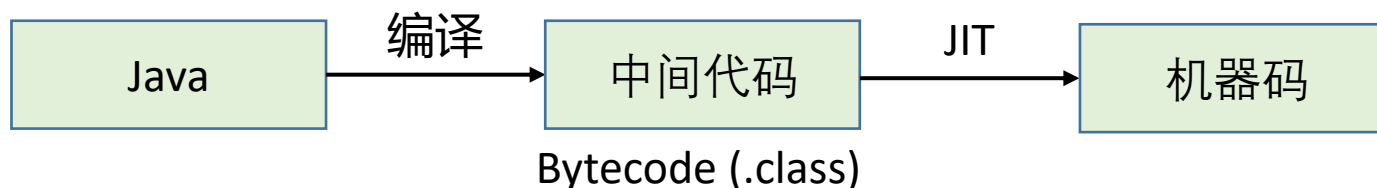
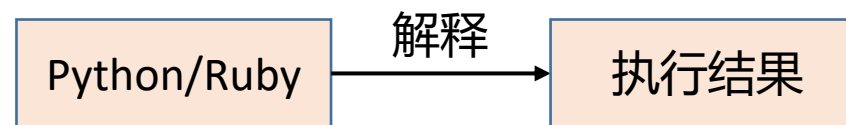
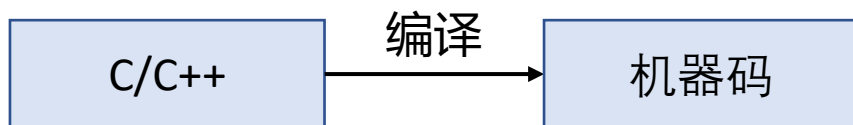
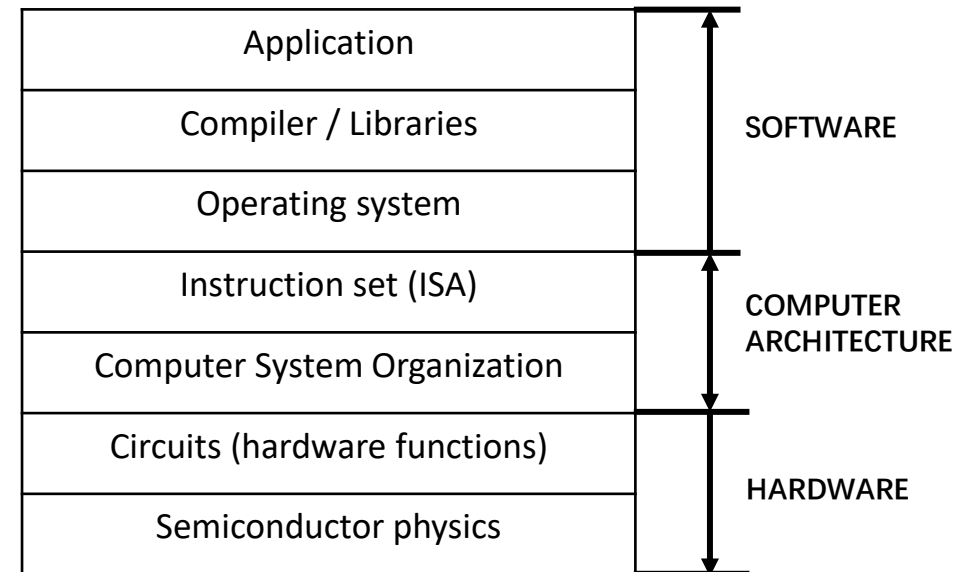


What is a Compilation[什么是编译]



- 不同编程语言有不同的翻译方式

- ◆ **编译**: 通常针对较为“底层”的语言
 - C、C++
 - 执行前全文翻译 (Ahead of Time, AOT)
- ◆ **解释**: 通常针对较更“上层”的语言
 - Python、Ruby
 - 边翻译边执行 (During Execution)
- ◆ **混合**: 编译 + 即时编译 (Just-In-Time, JIT)
 - Java

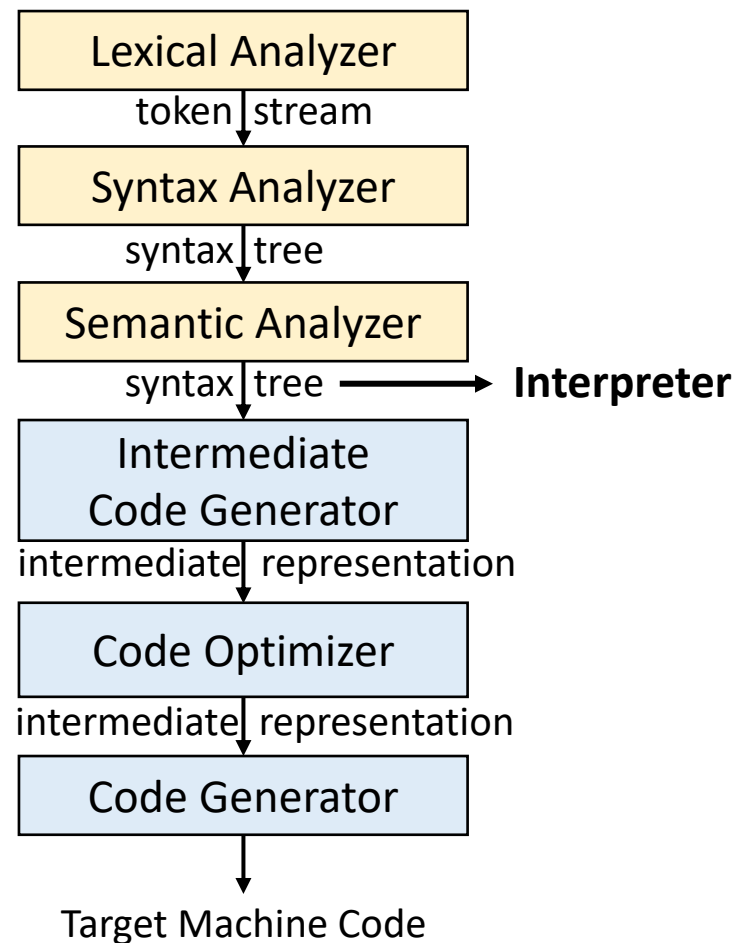


Interpret vs Compile[解释 vs. 编译]



- 编译：翻译成机器语言后方能运行
 - ◆ 目标程序独立于源程序（修改→再编译→运行）
 - ◆ 分析程序上下文，易于整体性优化
 - ◆ 性能更好（因此核心代码通常为C/C++）
- 解释：源程序作为输入，边解释边执行
 - ◆ 不生成目标程序，可迁移性高
 - ◆ 逐句执行，很难进行优化
 - ◆ 性能通常不会太好

Quiz: Java是解释型还是编译型语言？

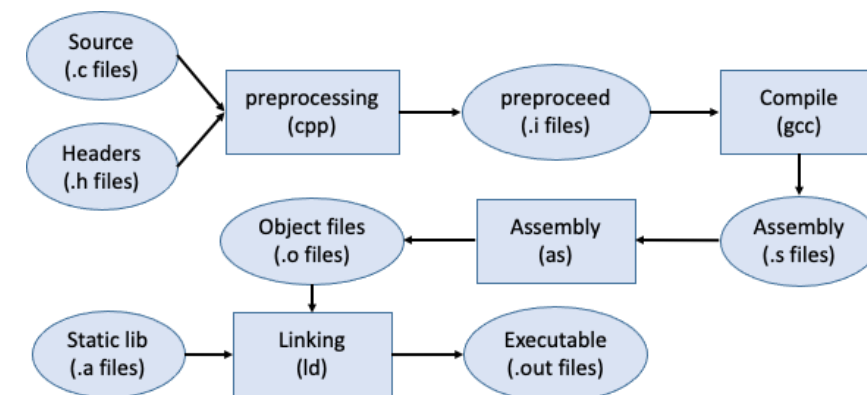


- 即时编译 (Just-In-Time Compiler): 运行时执行程序编译操作
 - ◆ 弥补解释执行的不足
 - 把翻译过的机器代码保存起来, 以备下次使用
 - ◆ 传统编译 (AOT, Ahead-Of-Time): 先编译后运行
- JIT vs. AOT
 - ◆ JIT具备解释器的灵活性
 - 只要有JIT编译器, 代码即可运行
 - ◆ 性能上基本和AOT等同
 - 运行时编译操作带来一些性能上的损失
 - 但可以利用程序运行特征进行动态优化

Compilation for C [C语言编译]

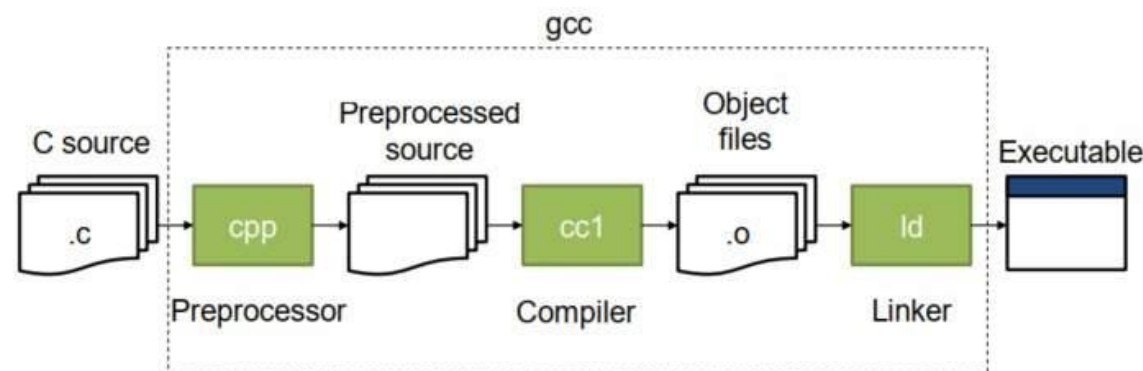


- 源程序 (source.c) → 可执行文件 (a.out)
 - ◆ 预处理 (preprocessing)
 - 汇合源程序, 展开宏定义, 生成.i文件
 - ◆ 编译 (compiling)
 - 将.i文件翻译为.s文件 (汇编代码, assembly)
 - ◆ 汇编 (assembling)
 - .s文件转换为.o文件 (可重定位对象, machine code)
 - ◆ 连接 (linking)
 - 连接库代码生成可执行文件 (机器码, machine code)



```
$ gcc source.c -o a.out  
$ ./a.out
```

```
#include <stdio.h>  
  
int main( )  
{  
    printf("Hello World!\n");  
    return 0;  
}
```



```
55  
48 89 e5  
Bf d0 05 40 00  
E8 d6 fe ff ff  
B8 00 00 00 00  
5d  
c3
```



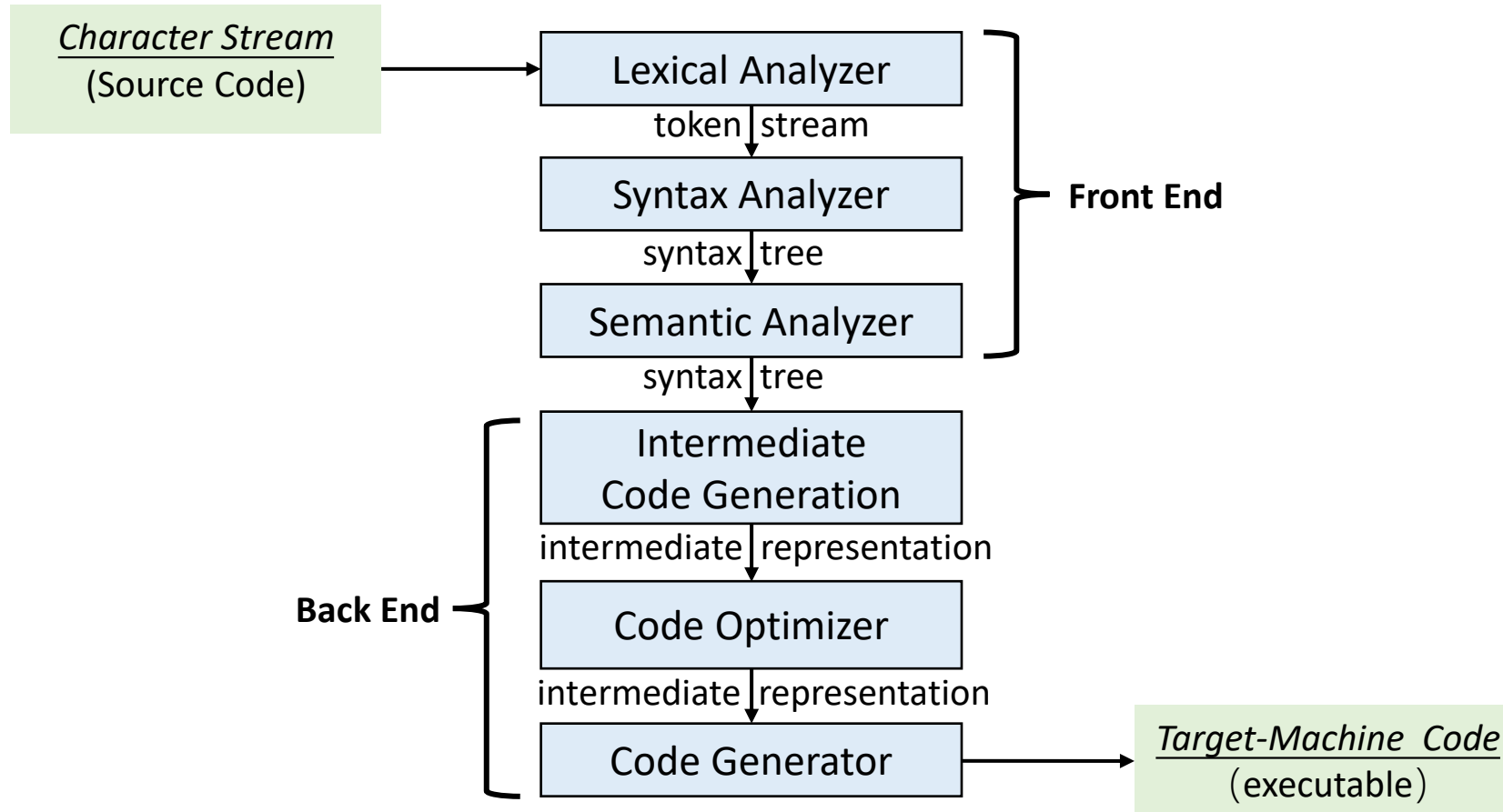
Why Compiler [为什么学编译原理]



- 为了更好的编程？
 - ◆ 有助于产出高质量代码
 - ◆ 大部分编程工作并不需要编译器知识
- 找到好工作？
 - ◆ 编译器研究员（华为）、游戏编译器工程师（腾讯）、编译器优化工程师（英特尔）等等
 - ◆ 大部分计算机相关工作并不要求编译器背景
- 包含计算机学科的**主要设计理念**:抽象, 自顶(底)向下(上)等
- 提供**理论方法与实践应用**的深度结合



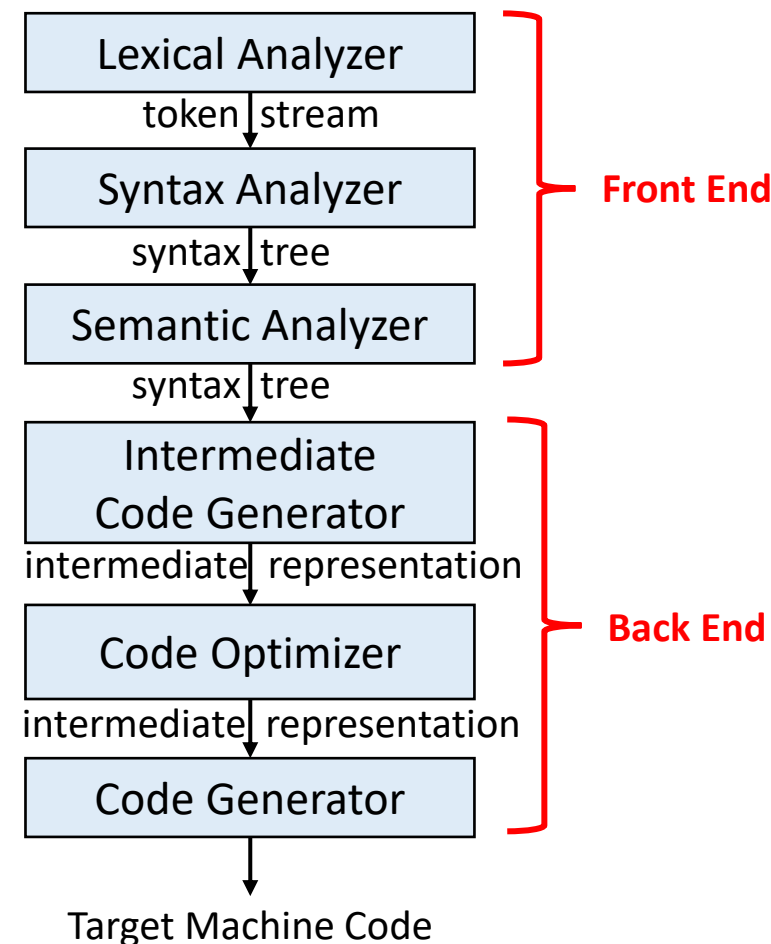
Overview of Compiler [编译结构总览]



Compilation Procedure[编译过程]



- 前端 (for Analysis): 对源程序, 识别语法结构信息, 理解语义信息, 反馈出错信息
 - ◆ 词法分析 (Lexical Analysis)
 - ◆ 语法分析 (Syntax Analysis)
 - ◆ 语义分析 (Semantic Analysis)
- 后端 (for Synthesis): 综合分析结果, 生成语义上等价于源程序的目标程序
 - ◆ 中间代码生成 (Intermediate Code Generation)
 - Intermediate Representation (IR)
 - ◆ 代码优化 (Code Optimizer)
 - ◆ 目标代码生成 (Code Generation)
 - Target Machine Code



Lexical Analysis[词法分析]



- 扫描源程序字符流，识别并分解出有词法意义的单词或符号 (token)

- ◆ 输入：源程序； 输出：token序列
- ◆ token表示： (类别, 属性值)
 - 关键字、标识符、常量、运算符等
- ◆ token是否符合语法规则?
 - 0var, \$num

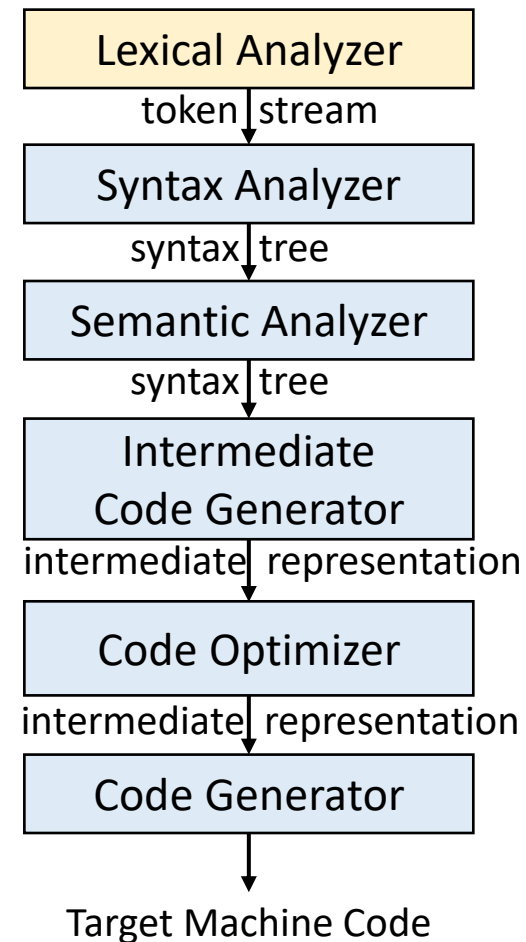
```
while (y<z){  
  int x = a + b;  
  y += x;  
}
```



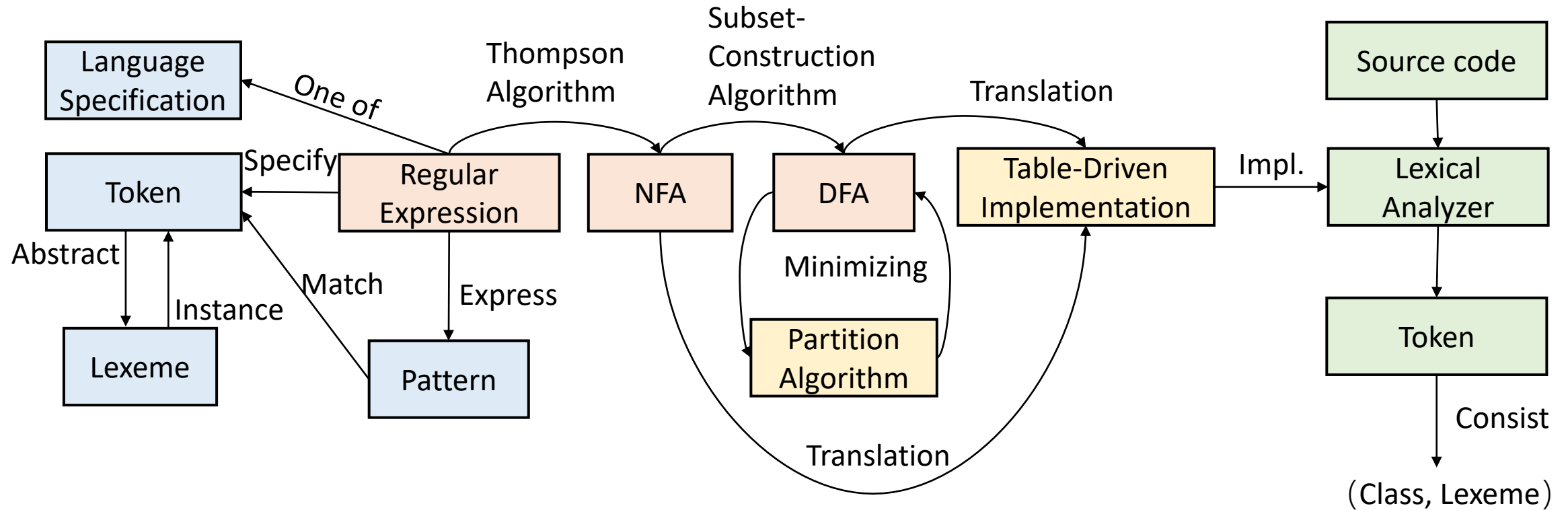
(keyword, while)	(id, b)
(id, y)	(sym, ;)
(sym, <)	(id, y)
(id, z)	(sym, +=)
(id, x)	(id, x)
(id, a)	(sym, ;)
(sym, +)	

Source Code

Token Stream



Lexical Analysis[词法分析]



Syntax Analysis[语法分析]

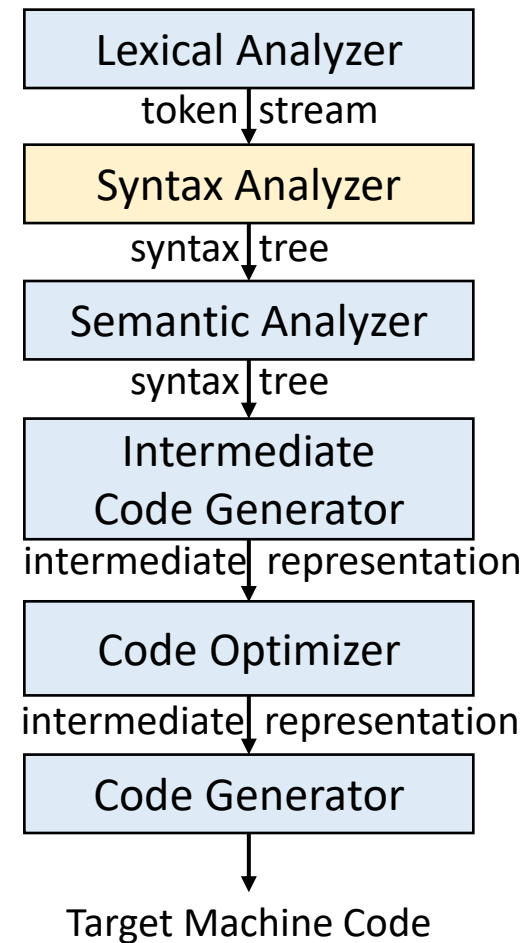
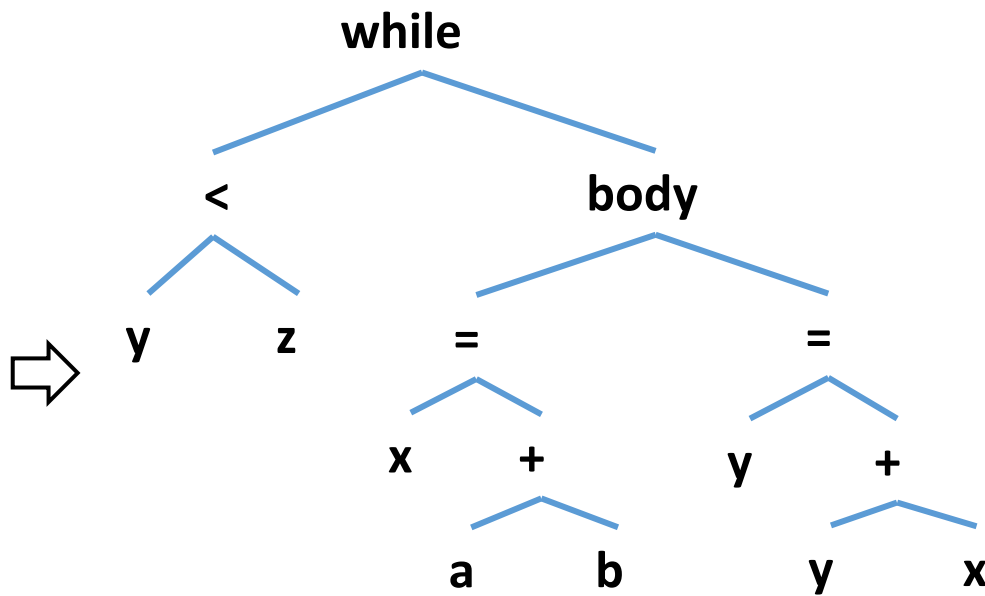


- 解析源程序对应的token序列, 生成语法分析结构 (syntax tree, 语法分析树)

- ◆ 输入: 单词流; 输出: 语法树
- ◆ 输入程序是否符合语法规则?

- $x * +$
- $a += 5;$

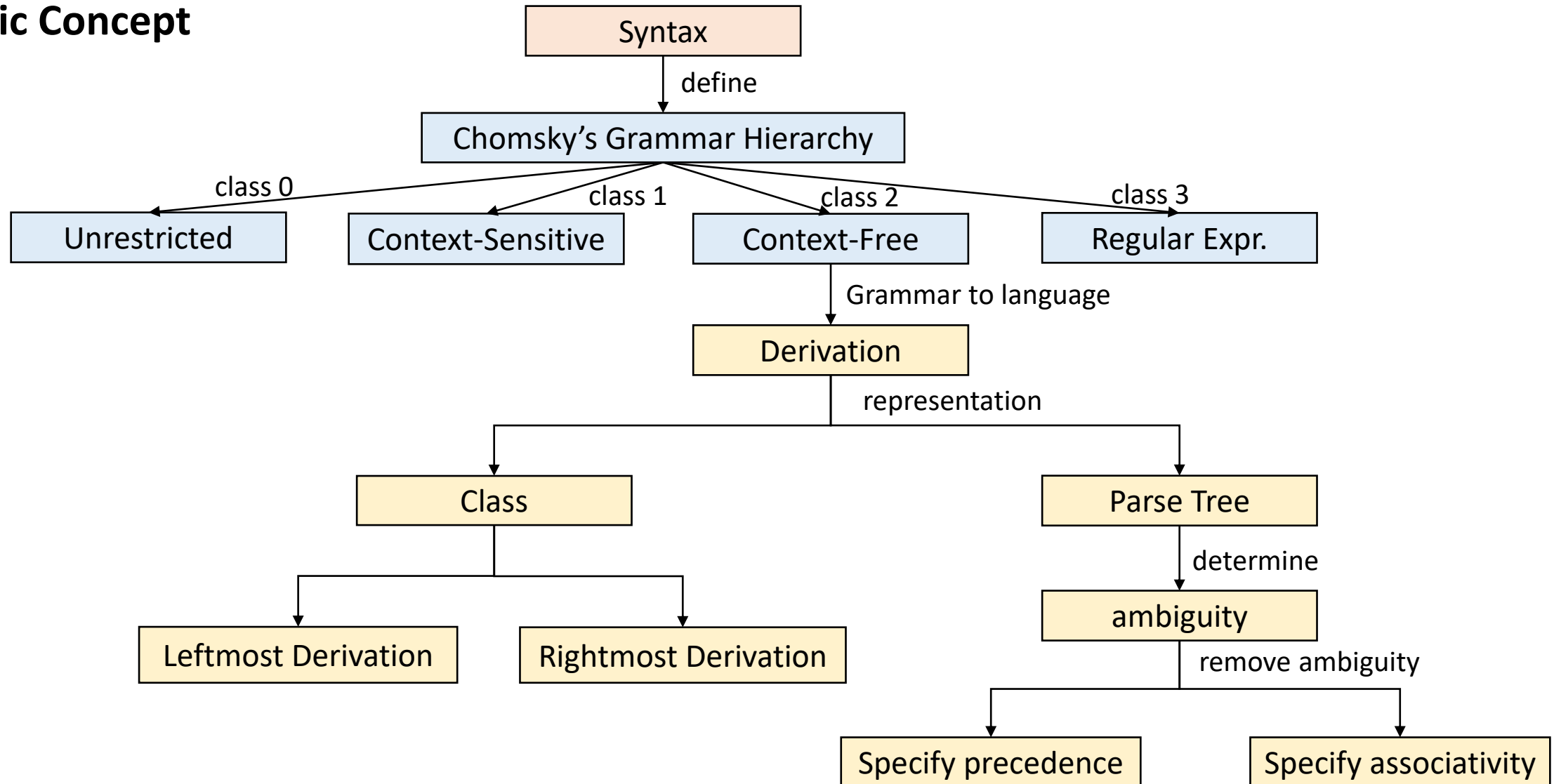
(keyword, while)	(id, b)
(id, y)	(sym, ;)
(sym, <)	(id, y)
(id, z)	(sym, +=)
(id, x)	(id, x)
(id, a)	(sym, ;)
(sym, +)	



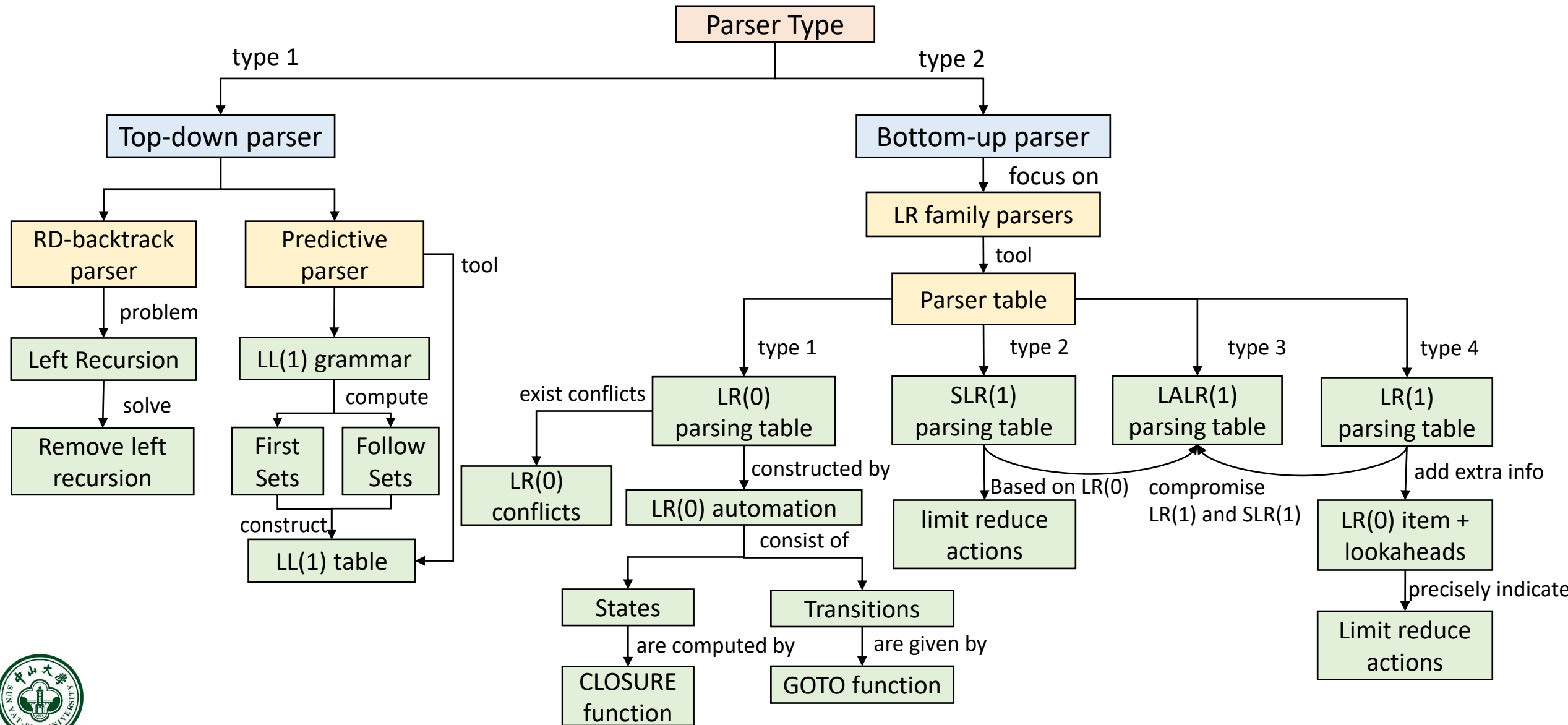
Syntax Analysis[语法分析]



Basic Concept



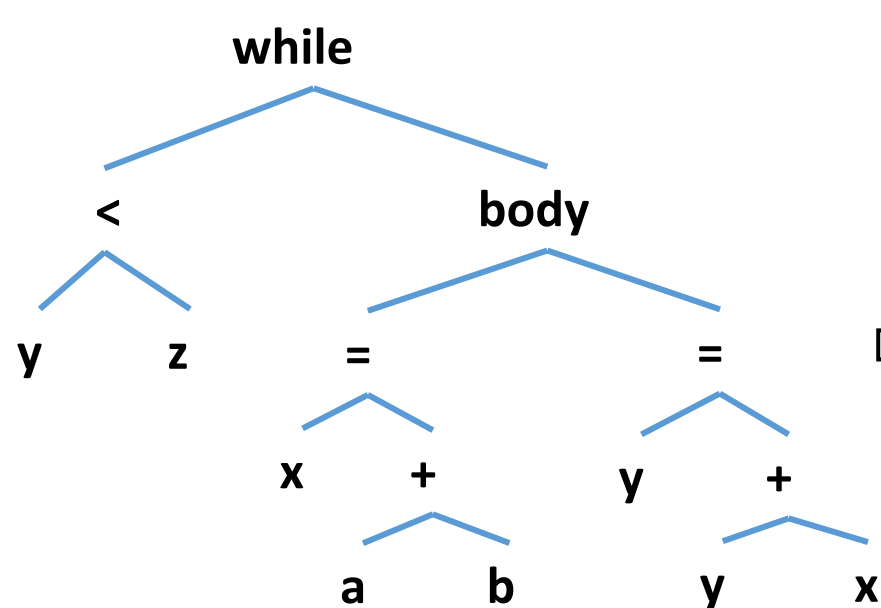
Syntax Analysis[语法分析]



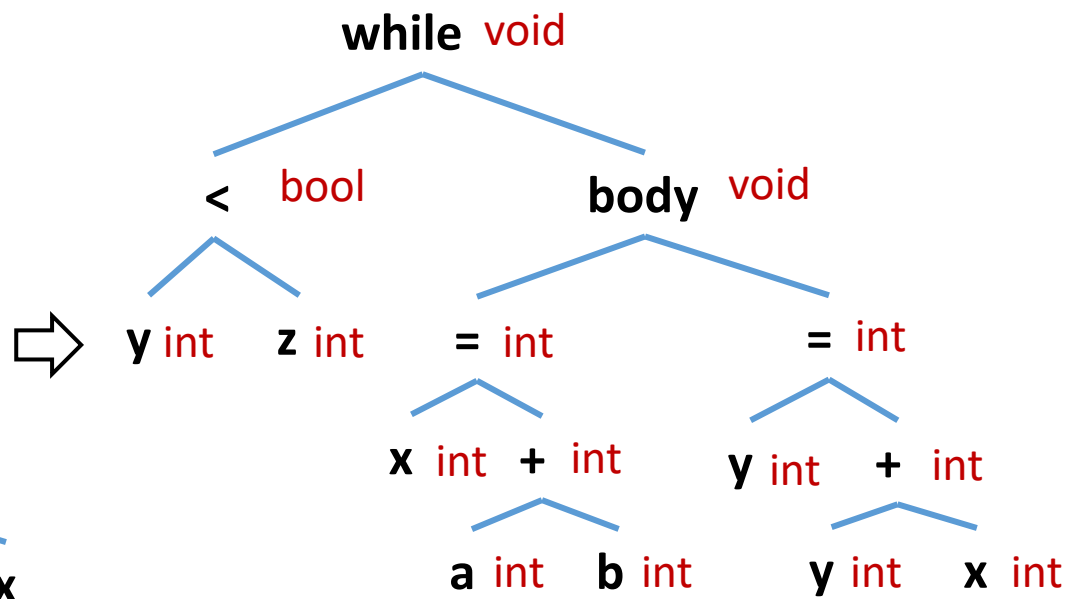
Semantic Analysis[语义分析]



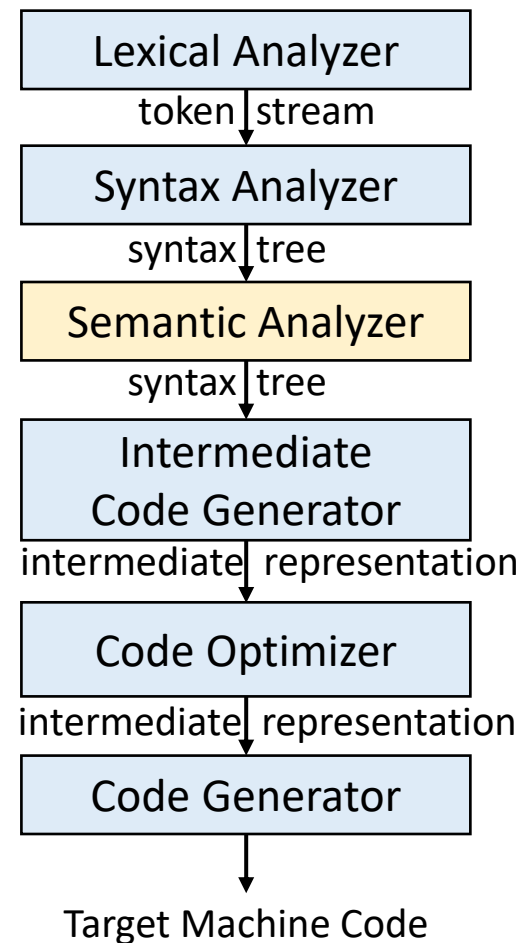
- 基于语法结果进一步分析语义
 - ◆ **输入**：语法树；**输出**：语法树+符号表
 - ◆ 收集标识符的属性信息（type, scope等）
 - ◆ 输入程序是否符合语义规则？
 - 变量未声明即使用，重复声明



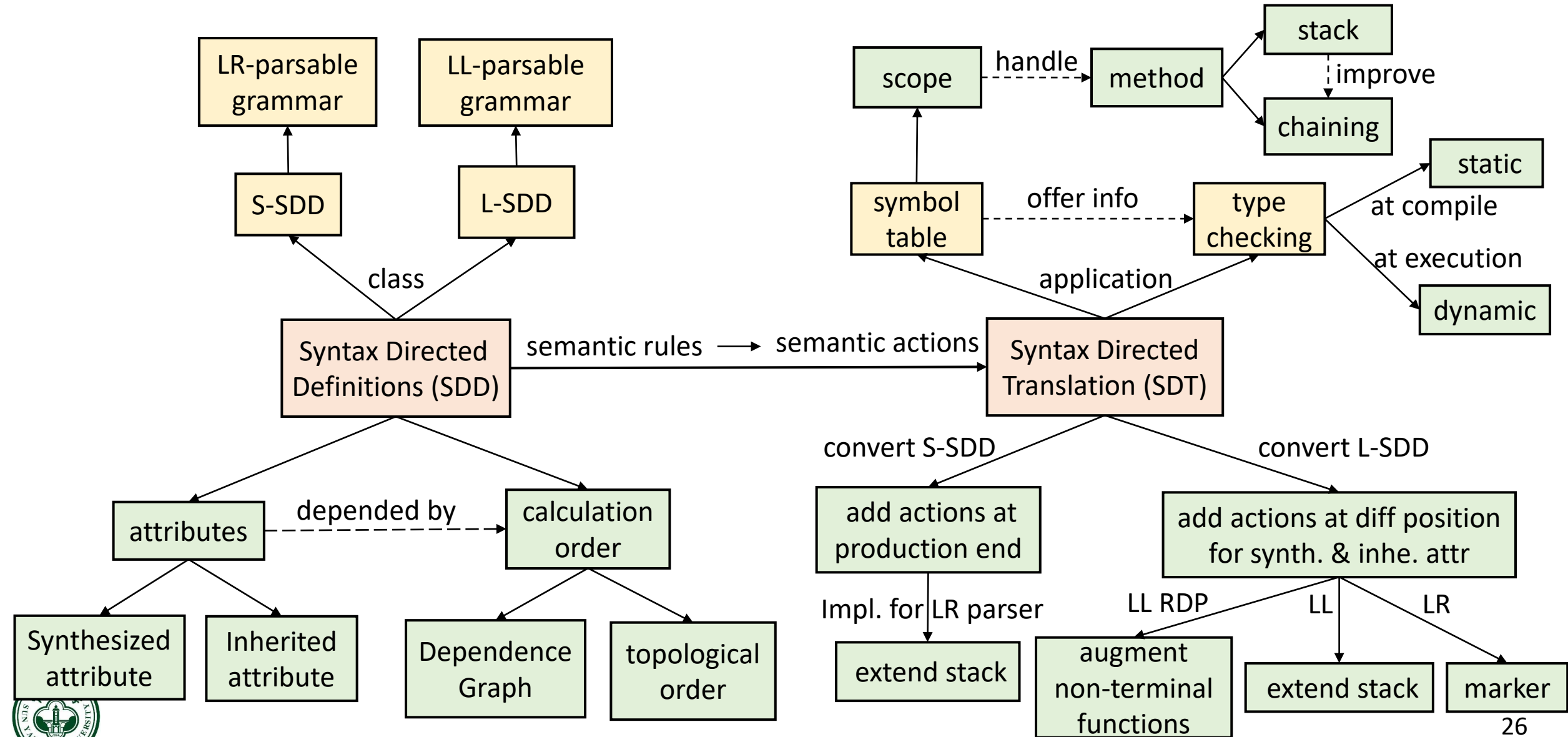
Abstract Syntax Tree (AST)
[抽象语法树]



Annotated AST/Decorated AST
[带标注的抽象语法树]



Semantic Analysis[语义分析]

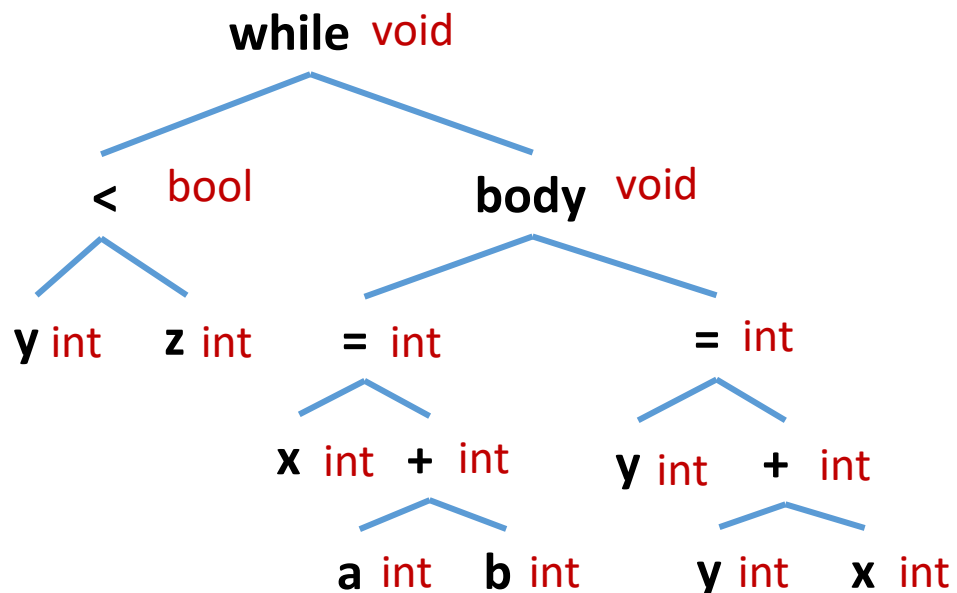


Intermediate Code[中间代码生成]

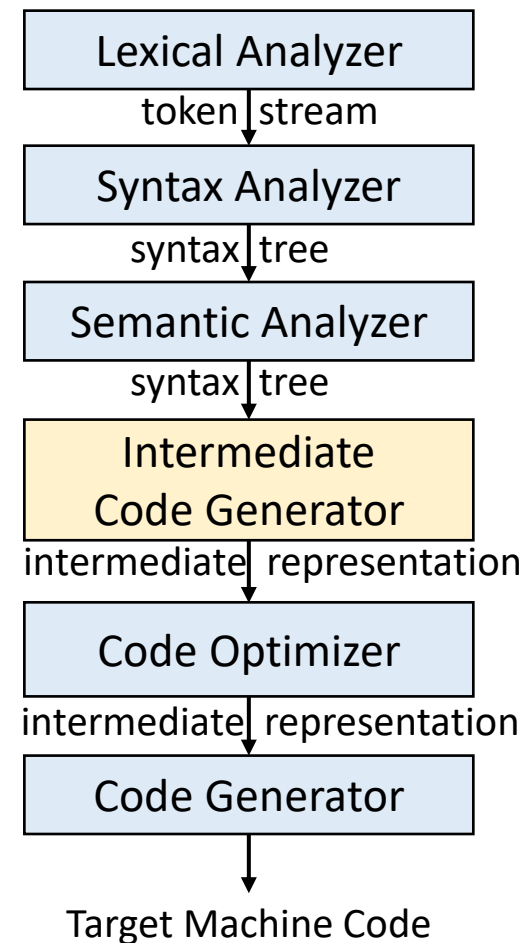


- 初步翻译，生成等价于源程序的中间表示（IR）：

- ◆ **输入**：语法树； **输出**：IR
- ◆ 建立源和目标语言的桥梁，易于翻译过程的实现，利于实现某些优化算法
- ◆ IR形式：例如三地址码（TAC, Three Address Code）



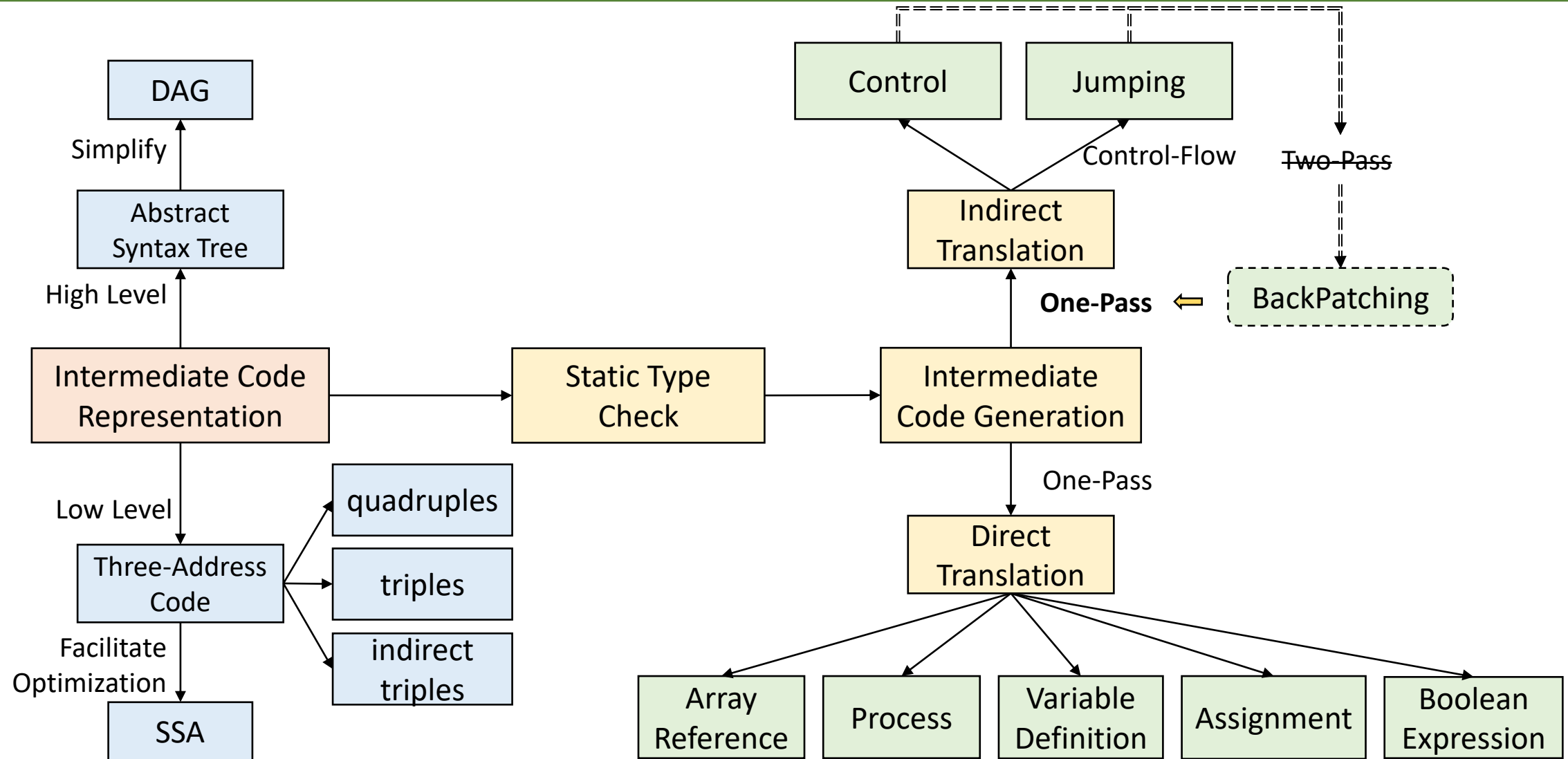
```
goto L1
L2:
    t1 := a + b
    x := t1
    t2 := y + x
    y := t2
L1:
    if y < z goto L2
```



Annotated AST/Decorated AST

Intermediate Representation

Intermediate Code[中间代码生成]



Code Optimization[代码优化]



- 加工变换中间代码使其更好（代码更短、性能更高、内存使用更少）
 - 输入：IR；输出：(优化的) IR
 - 机器无关 (machine independent)
 - 例如：重复运算识别；运算操作替换

```
goto L1
L2:
  t1 := a + b
  x := t1
  t2 := y + x
  y := t2
L1:
  if y < z goto L2
```

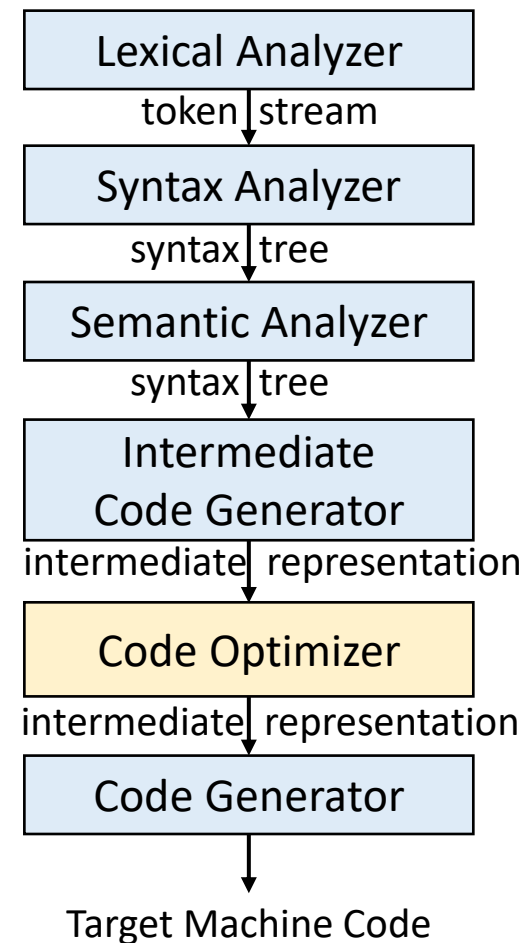
Intermediate Representation

Quiz: 这里做了
什么优化?

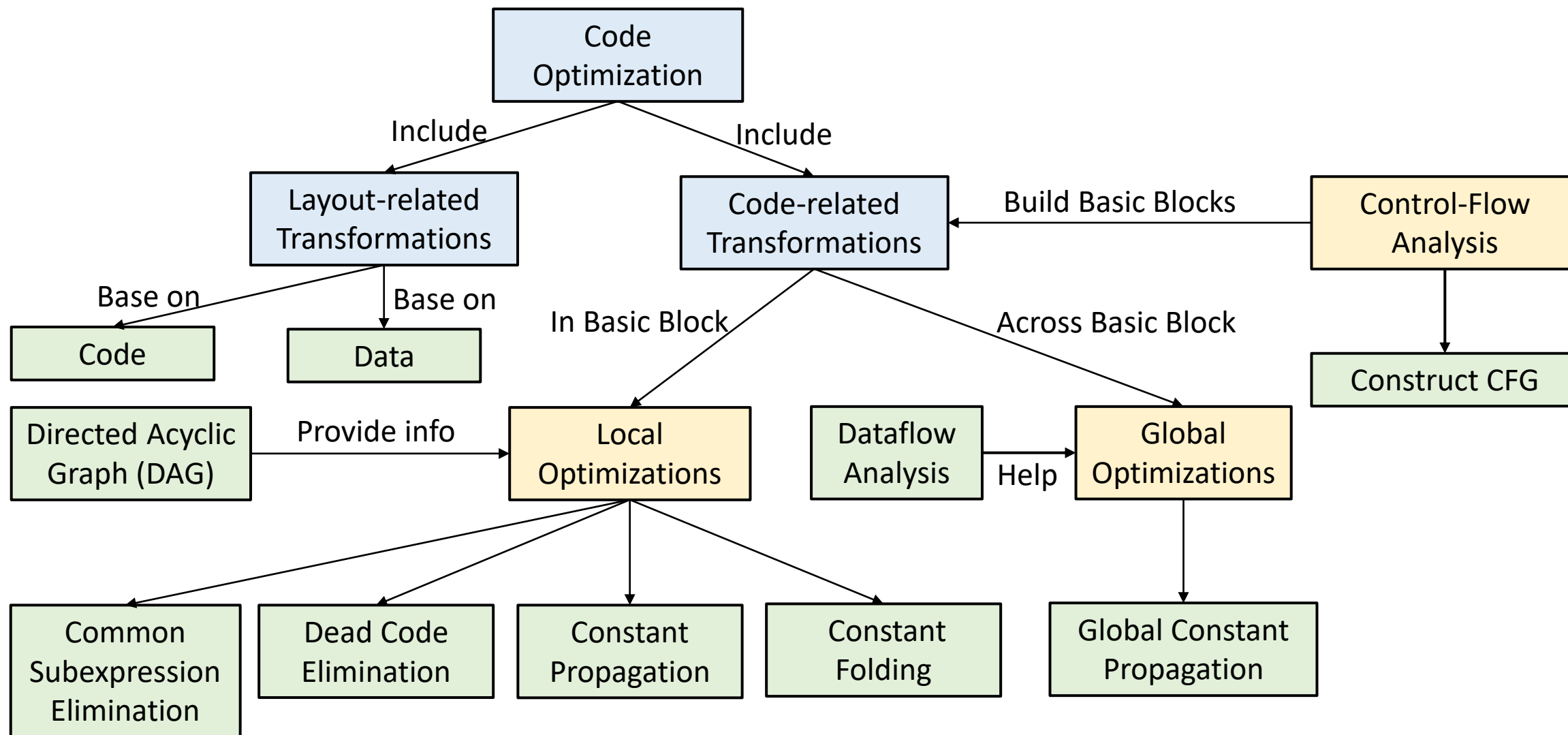


```
t1 = a + b
goto L1
L2:
  t2 := y + t1
  y := t2
L1:
  if y < z goto L2
```

Optimized Intermediate
Representation



Code Optimization[代码优化]



Target Code[目标代码生成]



- 为特定机器产生目标代码 (e.g., 汇编)

- ◆ **输入**: (优化的) IR; **输出**: 目标代码
- ◆ 寄存器分配: 放置频繁访问数据
- ◆ 指令选取: 确定机器指令实现IR操作
- ◆ 进一步的机器有关优化
 - 例如: 寄存器及访存优化

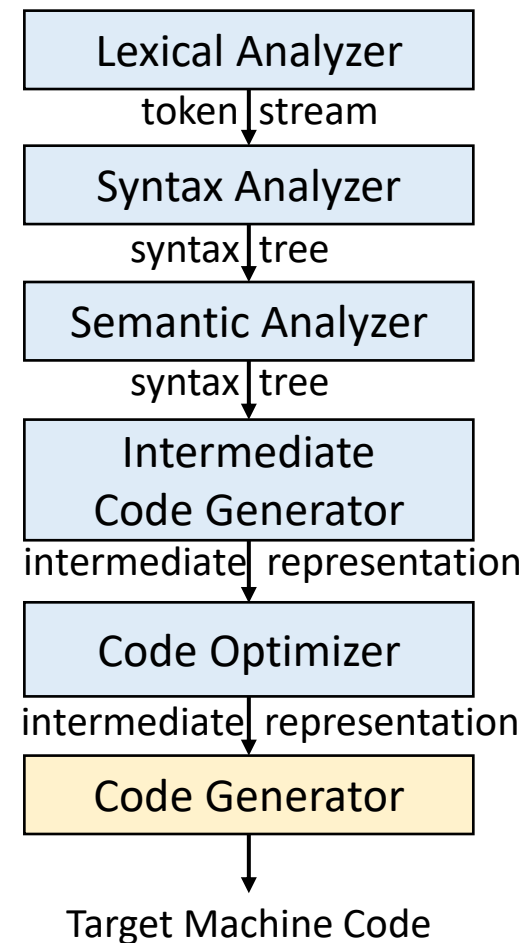
```
t1 = a + b
goto L1
L2:
    t2 := y + t1
    y := t2
L1:
    if y < z goto L2
```



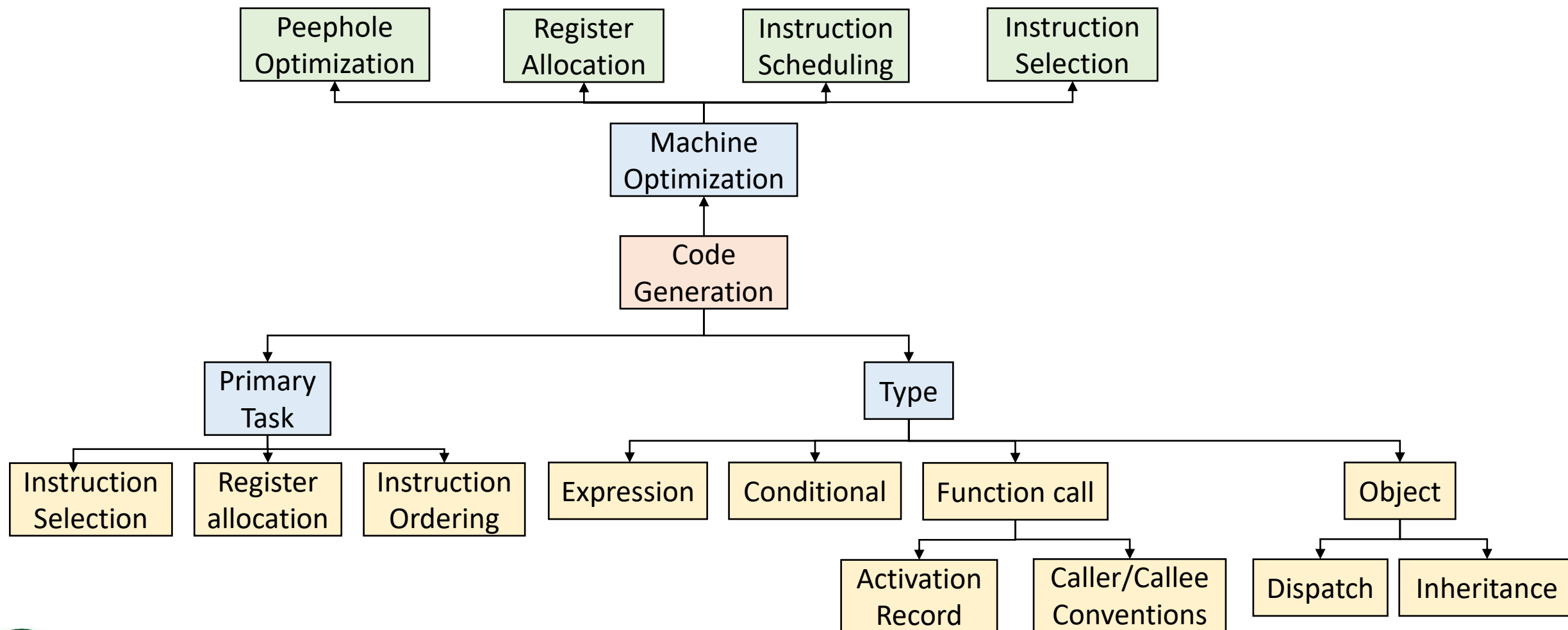
```
8b 55 f4    mov     edx, DWORD PTR [rbp-12]
8b 45 f0    mov     eax, DWORD PTR [rbp-16]
01 d0      add     eax, edx
89 45 ec    mov     DWORD PTR [rbp-20], eax
eb 06      jmp     L2
L3:8b 45 ec    mov     eax, DWORD PTR [rbp-20]
01 45 fc    add     DWORD PTR [rbp-4], eax
L2:8b 45 fc    mov     eax, DWORD PTR [rbp-4]
3b 45 f8    cmp     eax, DWORD PTR [rbp-8]
7c f2      j1      L3
```

Optimized Intermediate
Representation

Target Machine Code



Target Code[目标代码生成]



Enjoy the Journey!