



# C-编译器源码结构和功能详细说明

## 编译器构造报告

专业： 软件工程

年级： 2023 级

班级： 软工 2 班

组员：  
陈添硕 (3023244225)  
李昊蓬 (3023244162)  
许英帅 (3023244221)  
谢雨航 (3023244222)

# 目录

## 目录

<b>1</b>	<b>词法分析器 . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>算法描述 . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>1.1.1</b>	<b>基于 NFA→DFA 转换的词法分析器 (SLRLexer) . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>输出格式说明 . . . . .</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>代码实现细节 . . . . .</b>	<b>2</b>
<b>1.3.1</b>	<b>Token 结构定义 . . . . .</b>	<b>2</b>
<b>1.3.2</b>	<b>关键字表初始化 . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>1.3.3</b>	<b>标识符扫描实现 . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>1.3.4</b>	<b>数字扫描实现 . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>1.3.5</b>	<b>注释处理实现 . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>1.4</b>	<b>源程序编译步骤 . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>语法分析器 . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>算法描述 . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>2.1.1</b>	<b>方法一： SLR 语法分析器 (SLRParser) . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2</b>	<b>方法二： 递归下降语法分析器 (Parser) . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>SLR 分析表结构 . . . . .</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>输出格式说明 . . . . .</b>	<b>9</b>
<b>2.4</b>	<b>代码实现细节 . . . . .</b>	<b>9</b>
<b>2.4.1</b>	<b>递归下降分析器核心实现 . . . . .</b>	<b>9</b>
<b>2.4.2</b>	<b>AST 节点创建示例 . . . . .</b>	<b>10</b>
<b>2.5</b>	<b>源程序编译步骤 . . . . .</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>语法树 (AST) . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>语法树存储结构 . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>3.1.1</b>	<b>AST 节点类定义 . . . . .</b>	<b>12</b>

<b>4</b>	<b>中间代码生成 (LLVM IR)</b>	<b>16</b>
4.1	IR 生成器整体架构	16
4.2	LLVM IR 指令类型	21
4.3	基本块和控制流图 (CFG)	23
4.4	符号表和作用域管理	24
4.5	全局变量和局部变量处理	25
4.6	函数定义和调用	27
4.7	类型系统和类型提升	29
4.8	常量折叠优化	29
4.9	短路求值实现	31
4.10	Phi 节点和 SSA 形式	33
4.11	IR 生成完整流程	33
4.12	IR 生成示例	36
4.13	代码实现细节	37
4.14	设计思想总结	38
4.15	符号表实现细节	39
4.15.1	符号表数据结构	39
4.16	IRBuilder 实现细节	40
4.16.1	IRBuilder 核心接口	40
4.17	源程序编译步骤 (完整流程)	42
<b>5</b>	<b>总结</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>小组成员分工与心得体会</b>	<b>44</b>
6.1	成员一：陈添硕（学号：3023244225）	44
6.2	成员二：李昊蓬（学号：3023244162）	44
6.3	成员三：许英帅（学号：3023244221）	44
6.4	成员四：谢雨航（学号：3023244222）	44

# 1 词法分析器

## 1.1 算法描述

### 1.1.1 基于 NFA→DFA 转换的词法分析器 (**SLRLexer**)

算法流程：

1. 构建 NFA (buildDFA() 函数):

- 为关键字、标识符、整数、浮点数、运算符、界符分别构建 NFA
- 使用 epsilon 转换合并所有 NFA 为一个组合 NFA
- 通过子集构造法 (Subset Construction) 将 NFA 转换为 DFA
- 使用 DFA 最小化算法优化 DFA

2. 最长匹配算法 (analyze() 函数):

初始化: currentState = dfa.start, startPos = pos

```
WHILE pos < source.length():
    跳过空白字符和注释

    currentState = dfa.start
    startPos = pos
    lastAcceptState = nullptr
    lastAcceptPos = -1
    currentPos = pos

    // 最长匹配
    WHILE currentPos < source.length():
        char c = sourceCode[currentPos]
        IF currentState有c的转换:
            currentState = currentState.transitions[c]
            currentPos++
            IF currentState是接受状态:
                lastAcceptState = currentState
                lastAcceptPos = currentPos
        ELSE:
            BREAK
    END WHILE

    IF lastAcceptState != nullptr AND lastAcceptPos > startPos:
        创建token: Token(lastAcceptState->acceptType,
                           sourceCode.substr(startPos, lastAcceptPos - startPos))
        pos = lastAcceptPos
    ELSE:
        创建ERROR token
```

```
    pos++  
END WHILE
```

添加EOF token

## 1.2 输出格式说明

**Token** 输出格式: [单词符号] TAB <[类型],[属性]>

类型分类:

- **KW** (关键字): int(1), void(2), return(3), const(4), float(6), if(7), else(8)
- **OP** (运算符): +(30), -(31), \*(32), /(33), %(34), =(35), >(36), <(37), ==(38), <=(39), >=(40), !=(41), &&(42), ||(43), !(44)
- **SE** (界符): ((50), )(51), {(52), }(53), ;(54), ,(55)
- **IDN** (标识符): <IDN, 标识符名称 >
- **INT** (整数): <INT, 整数值 >
- **FLOAT** (浮点数): <FLOAT, 浮点数值 >
- **EOF** (文件结束): \$

示例输出:

```
int <KW,1>  
main <IDN,main>  
( <SE,50>  
) <SE,51>  
{ <SE,52>  
return <KW,3>  
10 <INT,10>  
; <SE,54>  
} <SE,53>
```

## 1.3 代码实现细节

### 1.3.1 Token 结构定义

**Token** 结构体:

```
struct Token {  
    TokenType type; // Token类型  
    std::string value; // Token值  
    int line; // 行号
```

```
int column; // 列号

// 方法：获取类型字符串表示、输出格式化Token等
std::string getTypeString() const;
std::string toString() const;
};
```

### 1.3.2 关键字表初始化

功能：初始化关键字映射表，将关键字字符串映射到对应的 TokenType。

函数声明：

```
void Lexer::initKeywords();
```

功能说明：建立关键字（int, void, return, const, float, if, else）到 TokenType 的映射关系，关键字不区分大小写。

### 1.3.3 标识符扫描实现

功能：扫描标识符或关键字。

函数声明：

```
Token Lexer::scanIdentifier();
```

功能说明：扫描字母、数字和下划线组成的标识符，然后检查是否是关键字（不区分大小写），如果是关键字则返回对应的关键字 Token，否则返回标识符 Token。

### 1.3.4 数字扫描实现

功能：扫描整数或浮点数。

函数声明：

```
Token Lexer::scanNumber();
```

功能说明：扫描数字序列，如果遇到小数点且后面有数字，则识别为浮点数，否则识别为整数。

### 1.3.5 注释处理实现

功能：跳过行注释（//）或块注释（/\* \*/）。

函数声明：

```
bool Lexer::skipComment();
```

功能说明：检测并跳过注释。行注释跳过到行尾，块注释跳过到结束标记 \*/。如果块注释未闭合则报错。

## 1.4 源程序编译步骤

使用词法分析器的编译步骤：

1. 加载源文件：

```
Lexer lexer;
lexer.loadFromFile("source.sy");
```

2. 执行词法分析：

```
lexer.tokenize();
```

3. 获取 **Token** 序列：

```
const auto& tokens = lexer.getTokens();
```

4. 输出结果：

```
lexer.printTokens(); // 打印到标准输出
// 或
std::string tokenStr = lexer.getTokensString(); // 获取字符串
```

命令行使用：

```
./compiler -l source.sy      # 仅词法分析
```

## 2 语法分析器

### 2.1 算法描述

本项目实现了两种语法分析器：

#### 2.1.1 方法一：SLR 语法分析器 (**SLRParser**)

算法流程：

1. 初始化文法 (**initGrammar()**):

- 定义 81 个产生式规则
- 识别终结符和非终结符集合

2. 计算 **FIRST** 集 (**computeFirst()**):

FOR 每个终结符  $t$ :

$\text{FIRST}(t) = \{t\}$

WHILE **FIRST**集发生变化:

FOR 每个产生式  $A \rightarrow \alpha$ :

IF  $\alpha = \epsilon$ :

$\text{FIRST}(A) += \{\epsilon\}$

ELSE:

FOR 每个符号  $X$  in  $\alpha$ :

$\text{FIRST}(A) += \text{FIRST}(X) - \{\epsilon\}$

IF  $\epsilon$  NOT IN  $\text{FIRST}(X)$ :

BREAK

IF 到达  $\alpha$  的末尾:

$\text{FIRST}(A) += \{\epsilon\}$

END WHILE

3. 计算 **FOLLOW** 集 (**computeFollow()**):

$\text{FOLLOW}(\text{开始符号}) = \{\$\}$

WHILE **FOLLOW**集发生变化:

FOR 每个产生式  $A \rightarrow \alpha B \beta$ :

IF  $\beta$  存在:

$\text{FOLLOW}(B) += \text{FIRST}(\beta) - \{\epsilon\}$

IF  $\epsilon$  IN  $\text{FIRST}(\beta)$ :

$\text{FOLLOW}(B) += \text{FOLLOW}(A)$

ELSE:

$\text{FOLLOW}(B) += \text{FOLLOW}(A)$

END WHILE

#### 4. 构建 LR(0) 项目集族 (buildCollection()):

```
I0 = closure({S' -> • Program})
canonicalCollection = {I0}
```

WHILE 有新的项目集产生:

```
FOR 每个项目集 I:
    FOR 每个符号 X (终结符或非终结符):
        J = goto(I, X)
        IF J 非空 AND J 不在 canonicalCollection 中:
            将 J 添加到 canonicalCollection
            记录转换: (I, X) -> J
END WHILE
```

#### 5. 构建 SLR 分析表 (buildTable()):

```
FOR 每个项目集 Ii:
    FOR 每个项目 [A -> α • aβ] in Ii:
        J = goto(Ii, a)
        action[i, a] = shift j

    FOR 每个项目 [A -> α • ] in Ii:
        IF A != S':
            FOR 每个 a IN FOLLOW(A):
                action[i, a] = reduce A -> α
        ELSE:
            action[i, $] = accept

    FOR 每个非终结符 A:
        IF goto(Ii, A) = Ij:
            goto[i, A] = j
```

#### 6. SLR 分析算法 (parse()):

```
初始化: stateStack = [0], valueStack = []
ip = 0 // 输入指针
```

```
WHILE true:
    s = stateStack.top()
    a = tokens[ip] // 当前输入符号

    IF action[s, a] = shift t:
        stateStack.push(t)
        valueStack.push(语义值)
        ip++
```

```

ELSE IF action[s, a] = reduce A -> β:
    从栈中弹出|β|个状态和语义值
    t = stateStack.top()
    stateStack.push(goto[t, A])
    valueStack.push(reduce(产生式ID, 语义值列表))

ELSE IF action[s, a] = accept:
    RETURN success

ELSE:
    RETURN error

END WHILE

```

### 2.1.2 方法二：递归下降语法分析器 (Parser)

算法特点：

- 为每个非终结符编写一个递归函数
- 通过向前看 (lookahead) 解决选择冲突
- 自顶向下构建 AST

主要分析函数：

- `parseCompUnit()`: 解析编译单元
- `parseConstDecl()`: 解析常量声明
- `parseVarDecl()`: 解析变量声明
- `parseFuncDef()`: 解析函数定义
- `parseStmt()`: 解析语句
- `parseExp()`: 解析表达式 (通过 `parseAddExp()`)
- `parseCond()`: 解析条件表达式

算法流程示例 (`parseAddExp()`):

```

parseAddExp():
    left = parseMulExp()

    WHILE 当前token是 + 或 -:
        保存运算符op
        前进token
        right = parseMulExp()
        创建新的AddExpNode, left作为左子树, right作为右子树

```

```
left = 新节点  
END WHILE  
  
RETURN left
```

## 2.2 SLR 分析表结构

分析表包含两部分：

1. **ACTION 表**:  $\text{actionTable}[\text{state}, \text{terminal}] \rightarrow \text{Action}$

- SHIFT n: 移进，跳转到状态 n
- REDUCE m: 归约，使用产生式 m
- ACC: 接受
- ERR: 错误

2. **GOTO 表**:  $\text{gotoTable}[\text{state}, \text{nonTerminal}] \rightarrow \text{state}$

- 记录状态转换

冲突解决：

- 移进-归约冲突：优先移进（shift-reduce conflict resolution）

示例分析表片段：

State 0:

```
action[0, "int"] = shift 5  
action[0, "const"] = shift 6  
goto[0, "Program"] = 1  
goto[0, "compUnit"] = 2
```

State 5:

```
action[5, "Ident"] = shift 10  
goto[5, "bType"] = 7
```

State 10:

```
action[10, "="] = shift 15  
action[10, ";"] = reduce 19 // varDef -> Ident  
...
```

## 2.3 输出格式说明

递归下降分析器输出格式：

步骤号 TAB Token值 TAB 动作

```
1 int move
2 main move
3 ( move
4 ) move
5 { move
6 return move
7 10 move
8 ; move
9 Stmt reduction
10 Block reduction
11 FuncDef reduction
12 compUnit reduction
13 $$ accept
```

动作类型：

- **move**: 移进 (匹配终结符)
- **reduction**: 归约 (应用产生式)
- **accept**: 接受
- **error**: 错误

## 2.4 代码实现细节

### 2.4.1 递归下降分析器核心实现

**Token** 匹配和前进：

```
Token Parser::currentToken() const; // 获取当前Token
bool Parser::match(TokenType type); // 匹配并前进Token
bool Parser::expect(TokenType type, const std::string& msg); // 期望匹配Token, 失败则报错
```

功能说明：

- **currentToken()**: 返回当前待处理的 Token, 如果已到文件末尾则返回 EOF Token
- **match()**: 如果当前 Token 类型匹配, 则前进到下一个 Token 并返回 true, 否则返回 false
- **expect()**: 期望匹配指定类型的 Token, 如果失败则输出错误信息

编译单元解析：

```
std::shared_ptr<CompUnitNode> Parser::parseCompUnit();
```

功能说明：解析编译单元，循环处理全局声明和函数定义。通过向前看（lookahead）区分函数定义和变量声明。

表达式解析（左结合）：

```
std::shared_ptr<AddExpNode> Parser::parseAddExp();
```

功能说明：解析加法表达式，处理左结合的 + 和 - 运算符。先解析第一个 mulExp 作为左操作数，然后循环处理后续的运算符和右操作数，构建左结合的 AST。

#### 2.4.2 AST 节点创建示例

函数定义节点创建：

```
std::shared_ptr<FuncDefNode> Parser::parseFuncDef();
```

功能说明：解析函数定义，包括返回类型、函数名、参数列表和函数体。返回类型可以是 int、float 或 void。参数列表可能为空。

### 2.5 源程序编译步骤

使用语法分析器的编译步骤：

1. 词法分析：

```
SLRLexer lexer;  
auto tokens = lexer.analyze(sourceCode);
```

2. 语法分析：

```
SLRParser parser;  
bool success = parser.parse(tokens);
```

3. 获取 AST：

```
auto ast = parser.getAST();
```

命令行使用：

```
./compiler -p source.sy      # 词法+语法分析
```

### 3 语法树 (AST)

#### 3.1 语法树存储结构

AST 节点层次结构：

```
CompUnitNode (根节点)
├── decls: vector<DeclNode*>           // 全局声明列表
|   ├── ConstDeclNode
|   |   ├── bType: BType
|   |   └── constDefs: vector<ConstDefNode*>
|   |       └── ConstDefNode
|   |           ├── ident: string
|   |           └── initVal: ExpNode*
|   └── VarDeclNode
|       ├── bType: BType
|       └── varDefs: vector<VarDefNode*>
|           └── VarDefNode
|               ├── ident: string
|               └── initVal: ExpNode* (可选)
|
└── funcDefs: vector<FuncDefNode*>      // 函数定义列表
    └── FuncDefNode
        ├── returnType: BType
        ├── ident: string
        ├── params: vector<FuncFParamNode*>
        └── block: BlockNode*
            └── items: vector<BlockItemNode*>
                ├── decl: DeclNode* (可选)
                └── stmt: StmtNode* (可选)
                    ├── ASSIGN: lVal + exp
                    ├── EXP: exp (可选)
                    ├── BLOCK: block
                    ├── IF: cond + thenStmt + elseStmt (可选)
                    └── RETURN: exp (可选)
```

表达式节点层次：

```
ExpNode (基类)
├── AddExpNode
|   ├── left: AddExpNode* (可选)
|   └── op: BinaryOp (ADD/SUB)
```

```

    └── right: MulExpNode*

    └── MulExpNode
        ├── left: MulExpNode* (可选)
        ├── op: BinaryOp (MUL/DIV/MOD)
        └── right: UnaryExpNode

    └── UnaryExpNode
        ├── PRIMARY: primaryExp
        ├── FUNC_CALL: funcName + args
        └── UNARY_OP: unaryOp + unaryExp

    └── PrimaryExpNode
        ├── PAREN_EXP: exp
        ├── LVAL: lVal
        └── NUMBER: number

    └── LValNode
        └── ident: string

    └── NumberNode
        ├── isFloat: bool
        ├── intValue: int
        └── floatVal: float

```

存储方式:

- 使用 `std::shared_ptr` 智能指针管理节点生命周期
- 树形结构通过指针链接
- 列表使用 `std::vector<std::shared_ptr<Node>>`

### 3.1.1 AST 节点类定义

**AST** 节点基类:

```

class ASTNode {
public:
    virtual ~ASTNode() = default;
    std::string type; // 节点类型名称

    ASTNode() : type("ASTNode") {}
    explicit ASTNode(const std::string& t) : type(t) {}
}

```

```
};
```

编译单元节点：

```
class CompUnitNode : public ASTNode {
public:
    std::vector<std::shared_ptr<DeclNode>> decls; // 全局声明
    std::vector<std::shared_ptr<FuncDefNode>> funcDefs; // 函数定义

    CompUnitNode() : ASTNode("CompUnit") {}
};
```

声明节点：

```
class DeclNode : public ASTNode {
public:
    bool isConst = false;
    DeclNode() : ASTNode("Decl") {}
};

class ConstDeclNode : public DeclNode {
public:
    BType bType;
    std::vector<std::shared_ptr<ConstDefNode>> constDefs;
    ConstDeclNode() : DeclNode("ConstDecl") { isConst = true; }
};

class VarDeclNode : public DeclNode {
public:
    BType bType;
    std::vector<std::shared_ptr<VarDefNode>> varDefs;
    VarDeclNode() : DeclNode("VarDecl") { isConst = false; }
};
```

函数定义节点：

```
class FuncDefNode : public ASTNode {
public:
    BType returnType;
    std::string ident;
    std::vector<std::shared_ptr<FuncFParamNode>> params;
    std::shared_ptr<BlockNode> block;

    FuncDefNode() : ASTNode("FuncDef") {}
};
```

表达式节点层次：

```
// 表达式基类
```

```

class ExpNode : public ASTNode {
public:
    ExpNode() : ASTNode("Exp") {}
};

// 加法表达式（左结合）
class AddExpNode : public ExpNode {
public:
    std::shared_ptr<AddExpNode> left; // 左操作数（可选）
    BinaryOp op; // 运算符 (ADD, SUB)
    std::shared_ptr<MulExpNode> right; // 右操作数

    AddExpNode() : ExpNode("AddExp"), op(BinaryOp::ADD) {}
};

// 乘法表达式（左结合）
class MulExpNode : public ExpNode {
public:
    std::shared_ptr<MulExpNode> left; // 左操作数（可选）
    BinaryOp op; // 运算符 (MUL, DIV, MOD)
    std::shared_ptr<UnaryExpNode> right; // 右操作数

    MulExpNode() : ExpNode("MulExp"), op(BinaryOp::MUL) {}
};

// 一元表达式
class UnaryExpNode : public ExpNode {
public:
    enum class UnaryType {
        PRIMARY, // primaryExp
        FUNC_CALL, // Ident '(' funcRParams? ')'
        UNARY_OP // unaryOp unaryExp
    };

    UnaryType unaryType;
    std::shared_ptr<PrimaryExpNode> primaryExp; // PRIMARY
    std::string funcName; // FUNC_CALL
    std::vector<std::shared_ptr<ExpNode>> args; // FUNC_CALL
    UnaryOp unaryOp; // UNARY_OP
    std::shared_ptr<UnaryExpNode> unaryExp; // UNARY_OP

    UnaryExpNode() : ExpNode("UnaryExp"), unaryType(UnaryType::PRIMARY) {}
};

// 逻辑与表达式（短路求值）

```

```

class LAndExpNode : public ExpNode {
public:
    std::shared_ptr<LAndExpNode> left; // 左操作数 (可选)
    std::shared_ptr<EqExpNode> right; // 右操作数

    LAndExpNode() : ExpNode("LAndExp") {}
};

// 逻辑或表达式 (短路求值)
class LOrExpNode : public ExpNode {
public:
    std::shared_ptr<LOrExpNode> left; // 左操作数 (可选)
    std::shared_ptr<LAndExpNode> right; // 右操作数

    LOrExpNode() : ExpNode("LOrExp") {}
};

```

语句节点:

```

enum class StmtType {
    ASSIGN, // lVal '=' exp ;
    EXP, // (exp)? ;
    BLOCK, // bLock
    IF, // 'if' '(' cond ')' stmt ('else' stmt)?
    RETURN // 'return' (exp)? ;
};

class StmtNode : public ASTNode {
public:
    StmtType stmtType;

    // ASSIGN类型
    std::shared_ptr<LValNode> lVal;
    std::shared_ptr<ExpNode> exp;

    // BLOCK类型
    std::shared_ptr<BlockNode> block;

    // IF类型
    std::shared_ptr<CondNode> cond;
    std::shared_ptr<StmtNode> thenStmt;
    std::shared_ptr<StmtNode> elseStmt; // 可选

    // RETURN类型 - 使用exp字段
    StmtNode() : ASTNode("Stmt"), stmtType(StmtType::EXP) {}
};

```

## 4 中间代码生成 (LLVM IR)

### 4.1 IR 生成器整体架构

设计模式：访问者模式（Visitor Pattern） IR 生成器采用访问者模式遍历 AST 并生成 LLVM IR:

- 为每种 AST 节点类型定义专门的访问函数（如 `visitCompUnit`、`visitFuncDef` 等）
- 通过动态分发（`dynamic_cast`）识别节点类型并调用相应的访问函数
- 递归遍历 AST 树，自顶向下生成 IR

核心组件：

- `IRGenerator`: IR 生成器主类
- `IRBuilder`: IR 指令构建器，负责创建各种 IR 指令
- `SymbolTable`: 符号表，管理作用域和变量映射

访问者模式遍历 AST:

算法：`visitCompUnit(node)`

输入：`CompUnitNode* node`

输出：无

```
BEGIN
    // 先处理全局声明
    FOR EACH decl IN node->decls:
        visitDecl(decl)
    END FOR

    // 再处理函数定义
    FOR EACH funcDef IN node->funcDefs:
        visitFuncDef(funcDef)
    END FOR
END
```

算法：`visitDecl(node)`

输入：`DeclNode* node`

输出：无

```
BEGIN
    IF node 是 ConstDeclNode:
        visitConstDecl(node)
    ELSE IF node 是 VarDeclNode:
        visitVarDecl(node)
    END IF
END
```

```

算法: visitFuncDef(node)
输入: FuncDefNode* node
输出: 无

BEGIN
    // 创建函数
    retType = bTypeToLLVMType(node->returnType)
    paramTypes = []
    FOR EACH param IN node->params:
        paramTypes.append(bTypeToLLVMType(param->bType))
    END FOR

    func = Function::create(FunctionType::get(retType, paramTypes),
                           node->ident, module)

    // 创建入口基本块
    entryBB = BasicBlock::create(module, node->ident + "_ENTRY", func)
    builder->set_insert_point(entryBB)

    // 进入函数作用域
    symbolTable.enterScope()

    // 处理参数
    FOR EACH param IN node->params:
        alloca = createLocalVariable(param->ident, paramType)
        builder->create_store(arg, alloca)
        symbolTable.insert(param->ident, alloca, paramType, false)
    END FOR

    // 处理函数体
    visitBlock(node->block)

    // 如果基本块没有终结指令, 添加默认返回
    IF currentBB没有终结指令:
        IF retType是void:
            builder->create_void_ret()
        ELSE:
            builder->create_ret(ConstantInt::get(0, module))
        END IF
    END IF

    // 退出函数作用域
    symbolTable.exitScope()
END

```

算法: visitStmt(node)

输入: StmtNode\* node

输出: 无

BEGIN

```
SWITCH node->stmtType:  
    CASE ASSIGN:  
        addr = visitLVal(node->lVal, false) // 获取地址  
        val = visitExp(node->exp) // 计算值  
        builder->create_store(val, addr) // 存储  
    CASE EXP:  
        IF node->exp 存在:  
            visitExp(node->exp) // 计算表达式 (丢弃结果)  
        END IF  
    CASE BLOCK:  
        visitBlock(node->block)  
    CASE IF:  
        visitIfStmt(node)  
    CASE RETURN:  
        visitReturnStmt(node)  
    END SWITCH
```

END

算法: visitExp(node)

输入: ExpNode\* node

输出: Value\* (IR值)

BEGIN

```
IF node 是 AddExpNode:  
    RETURN visitAddExp(node)  
ELSE IF node 是 MulExpNode:  
    RETURN visitMulExp(node)  
ELSE IF node 是 UnaryExpNode:  
    RETURN visitUnaryExp(node)  
ELSE IF node 是 PrimaryExpNode:  
    RETURN visitPrimaryExp(node)  
ELSE IF node 是 LValNode:  
    RETURN visitLVal(node, true) // 加载值  
ELSE IF node 是 NumberNode:  
    RETURN visitNumber(node)  
END IF
```

END

算法: visitAddExp(node)

```

输入: AddExpNode* node
输出: Value*

BEGIN
    IF node->left == nullptr:
        // 只有右操作数
        RETURN visitMulExp(node->right)
    END IF

    // 递归计算左操作数
    left = visitAddExp(node->left)
    right = visitMulExp(node->right)

    // 类型提升
    IF left是float类型 OR right是float类型:
        IF left是int类型:
            left = builder->create_sitofp(left, floatType)
        END IF
        IF right是int类型:
            right = builder->create_sitofp(right, floatType)
        END IF
    END IF

    // 生成IR指令
    IF node->op == ADD:
        IF 是float类型:
            RETURN builder->create_fadd(left, right)
        ELSE:
            RETURN builder->create_iadd(left, right)
        END IF
    ELSE IF node->op == SUB:
        IF 是float类型:
            RETURN builder->create_fsub(left, right)
        ELSE:
            RETURN builder->create_isub(left, right)
        END IF
    END IF
END

```

算法: visitLVal(node, load)  
输入: LValNode\* node, bool load  
输出: Value\*

```

BEGIN
    info = symbolTable.lookup(node->ident)

```

```

IF info == nullptr:
    报错: 未定义的变量
    RETURN nullptr
END IF

addr = info->value

IF load == true:
    IF addr是Argument类型:
        RETURN addr // 参数直接返回值
    END IF
    // 加载值
    loadType = addr->get_type()->get_pointer_element_type()
    RETURN builder->create_load(loadType, addr)
ELSE:
    RETURN addr // 返回地址
END IF

END

```

算法: visitIfStmt(node)

输入: StmtNode\* node

输出: 无

```

BEGIN
    // 创建基本块
    thenBB = BasicBlock::create(module, "", currentFunction)
    IF node->elseStmt存在:
        elseBB = BasicBlock::create(module, "", currentFunction)
    ELSE:
        elseBB = nullptr
    END IF
    mergeBB = BasicBlock::create(module, "", currentFunction)

    // 计算条件
    condVal = visitCond(node->cond)
    condVal = ensureInt1(condVal) // 转换为i1类型

    // 条件跳转
    IF elseBB存在:
        builder->create_cond_br(condVal, thenBB, elseBB)
    ELSE:
        builder->create_cond_br(condVal, thenBB, mergeBB)
    END IF

    // 生成then分支

```

```

currentBB = thenBB
builder->set_insert_point(thenBB)
visitStmt(node->thenStmt)
IF currentBB没有终结指令:
    builder->create_br(mergeBB)
END IF

// 生成else分支
IF elseBB存在 AND node->elseStmt存在:
    currentBB = elseBB
    builder->set_insert_point(elseBB)
    visitStmt(node->elseStmt)
    IF currentBB没有终结指令:
        builder->create_br(mergeBB)
    END IF
END IF

// 设置当前基本块为merge
currentBB = mergeBB
builder->set_insert_point(mergeBB)

```

## 4.2 LLVM IR 指令类型

本编译器生成的 IR 指令类型包括:

### 1. 终结指令 (Terminator Instructions):

- **ret**: 返回指令
  - **ret i32 %val**: 返回值
  - **ret void**: 无返回值返回
- **br**: 跳转指令
  - **br label %bb**: 无条件跳转
  - **br i1 %cond, label %if\_true, label %if\_false**: 条件跳转

### 2. 二元运算指令 (Binary Instructions):

- 整数运算:
  - **add**: 加法 (**%result = add i32 %a, %b**)
  - **sub**: 减法 (**%result = sub i32 %a, %b**)
  - **mul**: 乘法 (**%result = mul i32 %a, %b**)
  - **sdiv**: 有符号除法 (**%result = sdiv i32 %a, %b**)

- `srem`: 有符号取模 (`%result = srem i32 %a, %b`)

- 浮点运算:

- `fadd`: 浮点加法 (`%result = fadd float %a, %b`)
- `fsub`: 浮点减法 (`%result = fsub float %a, %b`)
- `fmul`: 浮点乘法 (`%result = fmul float %a, %b`)
- `fdiv`: 浮点除法 (`%result = fdiv float %a, %b`)

### 3. 内存操作指令 (Memory Instructions):

- `alloca`: 栈分配 (`%ptr = alloca i32`)
- `load`: 加载值 (`%val = load i32, i32* %ptr`)
- `store`: 存储值 (`store i32 %val, i32* %ptr`)

### 4. 比较指令 (Comparison Instructions):

- 整数比较 (返回 i1 类型):

- `icmp eq`: 相等 (`%cmp = icmp eq i32 %a, %b`)
- `icmp ne`: 不等 (`%cmp = icmp ne i32 %a, %b`)
- `icmp sgt`: 有符号大于 (`%cmp = icmp sgt i32 %a, %b`)
- `icmp sge`: 有符号大于等于 (`%cmp = icmp sge i32 %a, %b`)
- `icmp slt`: 有符号小于 (`%cmp = icmp slt i32 %a, %b`)
- `icmp sle`: 有符号小于等于 (`%cmp = icmp sle i32 %a, %b`)

- 浮点比较 (返回 i1 类型):

- `fcmp oeq`: 有序相等 (`%cmp = fcmp oeq float %a, %b`)
- `fcmp one`: 有序不等 (`%cmp = fcmp one float %a, %b`)
- `fcmp ogt`: 有序大于 (`%cmp = fcmp ogt float %a, %b`)
- `fcmp oge`: 有序大于等于 (`%cmp = fcmp oge float %a, %b`)
- `fcmp olt`: 有序小于 (`%cmp = fcmp olt float %a, %b`)
- `fcmp ole`: 有序小于等于 (`%cmp = fcmp ole float %a, %b`)

### 5. 类型转换指令 (Conversion Instructions):

- `zext`: 零扩展 (`%ext = zext i1 %val to i32`)
- `sitofp`: 有符号整数转浮点 (`%fp = sitofp i32 %val to float`)
- `fptosi`: 浮点转有符号整数 (`%int = fptosi float %val to i32`)

## 6. 函数调用指令 (Call Instruction):

- call: 函数调用 (`%result = call i32 @func(i32 %arg)`)

## 7. Phi 指令 (Phi Instruction):

- phi: SSA 形式的 Phi 节点 (`%val = phi i32 [%a, %bb1], [%b, %bb2]`)

## 4.3 基本块和控制流图 (CFG)

基本块 (Basic Block) 概念:

- 基本块是最大化的线性指令序列，只有一个入口点和一个出口点
- 基本块以终结指令 (`ret` 或 `br`) 结束
- 基本块之间通过跳转指令连接，形成控制流图 (CFG)

基本块管理算法:

算法: 创建基本块

输入: 函数 `Function* func`, 基本块名称 `string name`

输出: `BasicBlock*`

```
BEGIN
    bb = BasicBlock::create(module, name, func)
    func->add_basic_block(bb)
    RETURN bb
END
```

算法: 设置当前基本块

输入: `BasicBlock* bb`

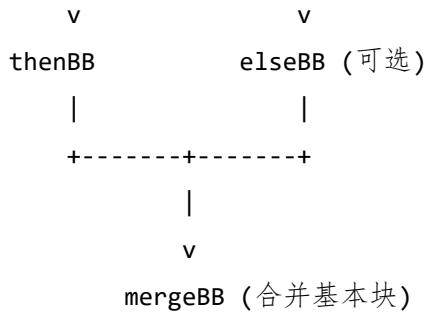
输出: 无

```
BEGIN
    currentBB = bb
    builder->set_insert_point(bb) // 设置IRBuilder的插入点
END
```

控制流处理示例 (if 语句):

IF语句的CFG结构:

```
entryBB (入口基本块)
    |
    | (条件跳转)
    v
+-----+-----+
|           |
```



#### 4.4 符号表和作用域管理

符号表结构：

```

SymbolTable
├── scopes: vector<Scope*> // 作用域栈
│   └── Scope
│       └── symbols: map<string, SymbolInfo>
│           └── SymbolInfo
│               ├── value: Value*      // IR 中的 Value 指针
│               ├── type: Type*      // 类型
│               ├── isConst: bool     // 是否为常量
│               └── isGlobal: bool     // 是否为全局变量

```

作用域管理算法：

算法：enterScope()

输出：无

```

BEGIN
    scopes.push_back(make_shared<Scope>())
END

```

算法：exitScope()

输出：无

```

BEGIN
    IF scopes.size() > 1: // 保留全局作用域
        scopes.pop_back()
    END IF
END

```

算法：lookup(name)

输入：string name

输出：SymbolInfo\*

BEGIN

```

// 从内层作用域向外查找
FOR i = scopes.size() - 1 TO 0:
    info = scopes[i]->lookup(name)
    IF info != nullptr:
        RETURN info
    END IF
END FOR
RETURN nullptr
END

```

算法: insert(name, value, type, isConst)  
输入: string name, Value\* value, Type\* type, bool isConst  
输出: bool (成功返回true)

```

BEGIN
IF scopes.empty():
    RETURN false
END IF

info = SymbolInfo(value, type, isConst, isGlobalScope())
RETURN scopes.back()->insert(name, info)
END

```

## 4.5 全局变量和局部变量处理

全局变量生成:

算法: visitConstDef (全局常量)  
输入: ConstDefNode\* node, BType bType  
输出: 无

```

BEGIN
IF symbolTable.isGlobalScope():
    type = bTypeToLLVMType(bType)

    // 计算常量初始值
    IF bType == INT:
        initVal = evalConstInt(node->initVal)
        init = ConstantInt::get(initVal, module)
    ELSE:
        initVal = evalConstFloat(node->initVal)
        init = ConstantFP::get(initVal, module)
    END IF

    // 创建全局变量
    gv = GlobalVariable::create(node->ident, module, type, true, init)

```

```

    symbolTable.insert(node->ident, gv, type, true)
END IF
END

```

局部变量生成 (SSA 形式):

算法: visitVarDef (局部变量)

输入: VarDefNode\* node, BType bType

输出: 无

BEGIN

```
IF NOT symbolTable.isGlobalScope():
```

```
    type = bTypeToLLVMType(bType)
```

```
// 创建alloca指令 (在栈上分配空间)
```

```
    alloca = builder->create_alloca(type)
```

```
// 如果有初始化值
```

```
IF node->initVal 存在:
```

```
    initVal = visitExp(node->initVal)
```

```
    builder->create_store(initVal, alloca)
```

```
END IF
```

```
symbolTable.insert(node->ident, alloca, type, false)
```

```
END IF
```

END

变量访问:

算法: visitLVal(node, load)

输入: LValNode\* node, bool load

输出: Value\*

BEGIN

```
info = symbolTable.lookup(node->ident)
```

```
IF info == nullptr:
```

报错: 未定义的变量

```
RETURN nullptr
```

```
END IF
```

```
addr = info->value
```

```
IF load == true:
```

// 需要加载值

```
IF addr 是 Argument 类型:
```

```
    RETURN addr // 函数参数直接返回值
```

```
ELSE:
```

```

// 生成load指令
loadType = addr->get_type()->get_pointer_element_type()
RETURN builder->create_load(loadType, addr)

END IF

ELSE:
    // 需要地址（用于赋值）
    RETURN addr

END IF

END

```

## 4.6 函数定义和调用

函数定义生成：

算法：visitFuncDef(node)

输入：FuncDefNode\* node

输出：无

```

BEGIN

// 1. 构建函数类型
retType = bTypeToLLVMTType(node->returnType)
paramTypes = []
FOR EACH param IN node->params:
    paramTypes.append(bTypeToLLVMTType(param->bType))
END FOR

funcType = FunctionType::get(retType, paramTypes)

// 2. 创建函数
func = Function::create(funcType, node->ident, module)
currentFunction = func
builder->set_curFunc(func)

// 3. 创建入口基本块
entryBB = BasicBlock::create(module, node->ident + "_ENTRY", func)
currentBB = entryBB
builder->set_insert_point(entryBB)

// 4. 进入函数作用域
symbolTable.enterScope()

// 5. 处理参数（为每个参数创建alloca并存储）
argIt = func->arg_begin()
FOR EACH param IN node->params:
    paramType = bTypeToLLVMTType(param->bType)
    alloca = createLocalVariable(param->ident, paramType)

```

```

builder->create_store(*argIt, alloca)
symbolTable.insert(param->ident, alloca, paramType, false)
argIt++
END FOR

// 6. 处理函数体
visitBlock(node->block)

// 7. 如果基本块没有终结指令，添加默认返回
IF currentBB没有终结指令：
    IF retType是void:
        builder->create_void_ret()
    ELSE:
        builder->create_ret(ConstantInt::get(0, module))
    END IF
END IF

// 8. 退出函数作用域
symbolTable.exitScope()
currentFunction = nullptr
END

```

函数调用生成：  
 算法：visitUnaryExp（函数调用）  
 输入：UnaryExpNode\* node (unaryType == FUNC\_CALL)  
 输出：Value\*

```

BEGIN
    // 1. 查找函数
    funcVal = symbolTable.getValue(node->funcName)
    IF funcVal == nullptr:
        报错：未定义的函数
        RETURN nullptr
    END IF

    // 2. 准备参数
    args = []
    FOR EACH arg IN node->args:
        argVal = visitExp(arg)
        args.append(argVal)
    END FOR

    // 3. 创建调用指令
    RETURN builder->create_call(funcVal, args)
END

```

## 4.7 类型系统和类型提升

类型映射：

BType -> LLVM Type:  
INT -> i32 (32位有符号整数)  
FLOAT -> float (32位浮点数)  
VOID -> void (无类型)

类型提升规则：

算法：类型提升（二元运算）

输入：Value\* left, Value\* right

输出：Value\* left, Value\* right (提升后的值)

```
BEGIN
    isFloat = left->get_type()->is_float_type() OR
              right->get_type()->is_float_type()

    IF isFloat:
        IF left是int32类型:
            left = builder->create_sitofp(left, floatType)
        END IF
        IF right是int32类型:
            right = builder->create_sitofp(right, floatType)
        END IF
    END IF

    RETURN left, right
END
```

类型转换指令生成：

- sitofp: 整数转浮点（用于混合类型运算）
- fptosi: 浮点转整数（用于赋值给整数变量）
- zext: 零扩展 (i1 转 i32, 用于条件判断)

## 4.8 常量折叠优化

常量求值算法：

算法：evalConstInt(node)

输入：ExpNode\* node

输出：int

```
BEGIN
    IF node是NumberNode:
```

```

RETURN node->intVal

ELSE IF node是AddExpNode:
    IF node->left == nullptr:
        RETURN evalConstInt(node->right)
    ELSE:
        left = evalConstInt(node->left)
        right = evalConstInt(node->right)
        IF node->op == ADD:
            RETURN left + right
        ELSE IF node->op == SUB:
            RETURN left - right
        END IF
    END IF

ELSE IF node是MulExpNode:
    IF node->left == nullptr:
        RETURN evalConstInt(node->right)
    ELSE:
        left = evalConstInt(node->left)
        right = evalConstInt(node->right)
        IF node->op == MUL:
            RETURN left * right
        ELSE IF node->op == DIV:
            RETURN left / right
        ELSE IF node->op == MOD:
            RETURN left % right
        END IF
    END IF

ELSE IF node是UnaryExpNode:
    IF node->unaryType == PRIMARY:
        RETURN evalConstInt(node->primaryExp)
    ELSE IF node->unaryType == UNARY_OP:
        val = evalConstInt(node->unaryExp)
        IF node->unaryOp == PLUS:
            RETURN val
        ELSE IF node->unaryOp == MINUS:
            RETURN -val
        ELSE IF node->unaryOp == NOT:
            RETURN (val == 0 ? 1 : 0)
        END IF
    END IF

ELSE IF node是PrimaryExpNode:

```

```

IF node->primaryType == NUMBER:
    RETURN node->number->intVal
ELSE IF node->primaryType == PAREN_EXP:
    RETURN evalConstInt(node->exp)
END IF

RETURN 0
END

```

常量折叠应用：

- 全局变量初始化时，如果初始值是常量表达式，直接计算并生成常量
- 避免生成不必要的运行时计算指令

## 4.9 短路求值实现

逻辑与 (**&&**) 短路求值：

算法：visitLAndExp(node)

输入：LAndExpNode\* node

输出：Value\* (i1类型)

```

BEGIN
    IF node->left == nullptr:
        // 只有右操作数（递归终止条件）
        RETURN visitEqExp(node->right)
    END IF

    // 创建基本块
    rhsBB = BasicBlock::create(module, "", currentFunction)
    mergeBB = BasicBlock::create(module, "", currentFunction)

    // 递归计算左操作数（左操作数也是LAndExp类型）
    leftVal = visitLAndExp(node->left)
    leftVal = ensureInt1(leftVal) // 转换为i1类型
    leftBB = currentBB

    // 短路：左边为真则计算右边，否则跳到merge（整体为假）
    builder->create_cond_br(leftVal, rhsBB, mergeBB)

    // 计算右操作数（右操作数是EqExp类型）
    currentBB = rhsBB
    builder->set_insert_point(rhsBB)
    rightVal = visitEqExp(node->right)
    rightVal = ensureInt1(rightVal)
    builder->create_br(mergeBB)

```

```

rightEndBB = currentBB

// merge基本块
currentBB = mergeBB
builder->set_insert_point(mergeBB)

// 创建phi节点: 左边为假则整体为假, 否则等于右边
phi = PhiInst::create_phi(module->get_int1_type(), mergeBB)
phi->add_phi_pair_operand(ConstantInt::get(false, module), leftBB)
phi->add_phi_pair_operand(rightVal, rightEndBB)

RETURN phi
END

```

逻辑或 (||) 短路求值:

算法: visitLOrExp(node)

输入: LOrExpNode\* node

输出: Value\* (i1类型)

BEGIN

```

IF node->left == nullptr:
    // 只有右操作数 (递归终止条件)
    RETURN visitLAndExp(node->right)
END IF

```

// 创建基本块

```

rhsBB = BasicBlock::create(module, "", currentFunction)
mergeBB = BasicBlock::create(module, "", currentFunction)

```

// 递归计算左操作数 (左操作数也是LAndExp类型)

```

leftVal = visitLOrExp(node->left)
leftVal = ensureInt1(leftVal)
leftBB = currentBB

```

// 短路: 左边为真则跳到merge (整体为真), 否则计算右边

```

builder->create_cond_br(leftVal, mergeBB, rhsBB)

```

// 计算右操作数 (右操作数是LAndExp类型)

```

currentBB = rhsBB
builder->set_insert_point(rhsBB)
rightVal = visitLAndExp(node->right)
rightVal = ensureInt1(rightVal)
builder->create_br(mergeBB)
rightEndBB = currentBB

```

```

// merge基本块
currentBB = mergeBB
builder->set_insert_point(mergeBB)

// 创建phi节点: 左边为真则整体为真, 否则等于右边
phi = PhiInst::create_phi(module->get_int1_type(), mergeBB)
phi->add_phi_pair_operand(ConstantInt::get(true, module), leftBB)
phi->add_phi_pair_operand(rightVal, rightEndBB)

RETURN phi
END

```

## 4.10 Phi 节点和 SSA 形式

**Phi** 节点的作用:

- Phi 节点用于 SSA (Static Single Assignment) 形式
- 当多个控制流路径汇合时, 使用 Phi 节点合并不同路径的值
- 格式: %val = phi i32 [%a, %bb1], [%b, %bb2]
  - 如果从%bb1 到达, 值为%a
  - 如果从%bb2 到达, 值为%b

**Phi** 节点生成示例 (短路求值):

```

; 逻辑与的CFG
entry:
%left = icmp ne i32 %x, 0
br i1 %left, label %rhs, label %merge

rhs:
%right = icmp ne i32 %y, 0
br label %merge

merge:
%result = phi i1 [false, %entry], [%right, %rhs]
; 如果从entry到达 (left为false) , result为false
; 如果从rhs到达 (left为true) , result为right的值

```

## 4.11 IR 生成完整流程

主生成流程：  
算法：generate(ast)

输入：CompUnitNode\* ast  
输出：无

BEGIN

// 1. 声明运行时库函数  
declareRuntimeFunctions()

// 2. 遍历AST，生成IR  
visitCompUnit(ast)

// 3. 设置打印名称（为所有Value分配名称）  
module->set\_print\_name()

END

算法：visitCompUnit(node)  
输入：CompUnitNode\* node  
输出：无

BEGIN

// 先处理全局声明（全局变量和常量）  
FOR EACH decl IN node->decls:  
    visitDecl(decl)  
END FOR

// 再处理函数定义  
FOR EACH funcDef IN node->funcDefs:  
    visitFuncDef(funcDef)  
END FOR

END

运行时库函数声明：

```
void IRGenerator::declareRuntimeFunctions() {  
    std::vector<Type*> emptyParams;  
    std::vector<Type*> intParam = {module->get_int32_type()};  
    std::vector<Type*> intPtrParam = {module->get_int32_ptr_type()};  
    std::vector<Type*> putArrayParams = {  
        module->get_int32_type(),  
        module->get_int32_ptr_type()  
    };  
  
    // int getint()  
    FunctionType* getintType = FunctionType::get(  
        module->get_int32_type(), emptyParams);
```

```

Function::create(getintType, "getint", module);

// int getch()
FunctionType* getchType = FunctionType::get(
    module->get_int32_type(), emptyParams);
Function::create(getchType, "getch", module);

// int getarray(int*)
FunctionType* getarrayType = FunctionType::get(
    module->get_int32_type(), intPtrParam);
Function::create(getarrayType, "getarray", module);

// void putint(int)
FunctionType* putintType = FunctionType::get(
    module->get_void_type(), paramInt);
Function::create(putintType, "putint", module);

// void putch(int)
FunctionType* putchType = FunctionType::get(
    module->get_void_type(), paramInt);
Function::create(putchType, "putch", module);

// void putarray(int, int*)
FunctionType* putarrayType = FunctionType::get(
    module->get_void_type(), putArrayParams);
Function::create(putarrayType, "putarray", module);

// void starttime()
FunctionType* starttimeType = FunctionType::get(
    module->get_void_type(), emptyParams);
Function::create(starttimeType, "starttime", module);

// void stoptime()
FunctionType* stoptimeType = FunctionType::get(
    module->get_void_type(), emptyParams);
Function::create(stoptimeType, "stoptime", module);

}

```

运行时库函数说明：

- **getint()**: 从标准输入读取一个整数
- **getch()**: 从标准输入读取一个字符
- **getarray(int\*)**: 从标准输入读取一个整数数组

- `putint(int)`: 向标准输出写入一个整数
- `putch(int)`: 向标准输出写入一个字符
- `putarray(int, int*)`: 向标准输出写入一个整数数组
- `starttime()`: 开始计时
- `stoptime()`: 停止计时

## 4.12 IR 生成示例

输入源代码:

```
int a = 10;

int main() {
    int b = 20;
    if (a > 5) {
        b = a + 10;
    }
    return b;
}
```

生成的 LLVM IR:

```
@a = global i32 10

define i32 @main() {
entry:
    %0 = alloca i32
    %1 = alloca i32
    store i32 20, i32* %1
    %2 = load i32, i32* @a
    %3 = icmp sgt i32 %2, 5
    br i1 %3, label %then, label %merge

then:
    %4 = load i32, i32* @a
    %5 = add i32 %4, 10
    store i32 %5, i32* %1
    br label %merge

merge:
    %6 = load i32, i32* %1
```

```
    ret i32 %6
}
```

**IR** 说明:

1. @a = global i32 10: 全局变量定义
2. %0 = alloca i32: 为局部变量分配栈空间 (未使用)
3. %1 = alloca i32: 为变量 b 分配栈空间
4. store i32 20, i32\* %1: 初始化 b = 20
5. %2 = load i32, i32\* @a: 加载全局变量 a
6. %3 = icmp sgt i32 %2, 5: 比较 a > 5
7. br i1 %3, label %then, label %merge: 条件跳转
8. then 基本块: 计算 b = a + 10
9. merge 基本块: 加载 b 并返回

#### 4.13 代码实现细节

**IRGenerator** 类核心成员:

```
class IRGenerator {
private:
    Module* module; // 当前模块
    IRBuilder* builder; // IR构建器
    SymbolTable symbolTable; // 符号表
    Function* currentFunction; // 当前函数
    BasicBlock* currentBB; // 当前基本块

    // 临时存储常量值 (用于常量折叠)
    int tmpIntVal;
    float tmpFloatVal;
    bool tmpIsFloat;
    bool isConstExpr;

    // 用于短路求值的基本块
    BasicBlock* trueBB;
    BasicBlock* falseBB;
};
```

构造函数和初始化:

```
IRGenerator::IRGenerator(const std::string& sourceFileName);
```

功能说明: 创建 IR 模块和 IRBuilder, 初始化成员变量, 声明运行时库函数。

类型转换辅助函数：

```
Type* IRGenerator::bTypeToLLVMTyp(BType bType); // BType 转换为 LLVM Type  
Value* IRGenerator::ensureInt1(Value* val); // 确保值为 i1 类型（布尔值）
```

功能说明：

- **bTypeToLLVMTyp()**: 将 BType(INT/FLOAT/VOID) 映射到对应的 LLVM 类型(i32/float/void)
- **ensureInt1()**: 如果值是 i32 类型，则与 0 比较转换为 i1 类型；如果已经是 i1 类型则直接返回

常量求值：

```
int IRGenerator::evalConstInt(std::shared_ptr<ExpNode> node);
```

功能说明：递归计算常量表达式的整数值，支持数字字面量、加法表达式、乘法表达式和一元表达式。用于常量折叠优化。

表达式访问（类型提升）：

```
Value* IRGenerator::visitAddExp(std::shared_ptr<AddExpNode> node);
```

功能说明：访问加法表达式节点，递归处理左操作数，处理类型提升（如果有一个操作数是 float，则将 int 转换为 float），生成对应的 IR 指令(fadd/iadd 或 fsub/isub)。

左值访问（加载/地址）：

```
Value* IRGenerator::visitLVal(std::shared_ptr<LValNode> node, bool load);
```

功能说明：访问左值节点。如果 **load=true**，则从符号表查找变量并生成 load 指令加载值（函数参数直接返回值）；如果 **load=false**，则返回变量的地址（用于赋值）。

**if** 语句实现（控制流）：

```
void IRGenerator::visitIfStmt(std::shared_ptr<StmtNode> node);
```

功能说明：生成 if 语句的 IR。创建 thenBB、elseBB（如果存在）和 mergeBB 基本块，计算条件值并生成条件跳转，分别生成 then 和 else 分支的 IR，最后设置当前基本块为 mergeBB。

## 4.14 设计思想总结

核心设计原则：

1. 访问者模式：为每种 AST 节点类型定义专门的访问函数，实现关注点分离
2. SSA 形式：使用 alloca/store/load 模式实现局部变量，符合 LLVM IR 的 SSA 要求
3. 基本块管理：每个函数有入口基本块，控制流语句创建新基本块，使用 Phi 节点合并控制流
4. 符号表作用域：使用作用域栈管理变量可见性，支持嵌套作用域
5. 类型系统：统一的类型映射和类型提升规则，确保类型安全
6. 常量折叠：编译时计算常量表达式，减少运行时开销
7. 短路求值：逻辑运算符使用控制流实现短路，提高效率
8. 错误处理：在 IR 生成过程中检查未定义变量、类型不匹配等错误

**IR** 生成示例： 输入 AST:

```
CompUnit
└─ VarDecl (int a = 10)
└─ FuncDef (int main() { return 0; })
```

生成的 LLVM IR:

```
@a = global i32 10
```

```
define i32 @main() {
```

```
entry:
```

```
    ret i32 0
```

```
}
```

## 4.15 符号表实现细节

### 4.15.1 符号表数据结构

**SymbolInfo** 结构:

```
struct SymbolInfo {
    Value* value; // IR中的Value指针
    Type* type; // 类型
    bool isConst; // 是否为常量
    bool isGlobal; // 是否为全局变量

    SymbolInfo() : value(nullptr), type(nullptr),
                  isConst(false), isGlobal(false) {}
    SymbolInfo(Value* v, Type* t, bool c, bool g)
        : value(v), type(t), isConst(c), isGlobal(g) {}
};
```

**Scope** 类实现:

```
class Scope {
public:
    std::map<std::string, SymbolInfo> symbols;

    SymbolInfo* lookup(const std::string& name); // 在当前作用域中查找符号
    bool insert(const std::string& name, const SymbolInfo& info); // 在当前作用域中插入符号
};
```

功能说明:

- **lookup()**: 在当前作用域中查找符号，找到返回 SymbolInfo 指针，否则返回 nullptr
- **insert()**: 在当前作用域中插入符号，如果符号已存在则返回 false (重复定义)，否则返回 true

**SymbolTable** 类实现:

```
class SymbolTable {  
private:  
    std::vector<std::shared_ptr<Scope>> scopes; // 作用域栈  
  
public:  
    SymbolTable(); // 构造函数, 创建全局作用域  
    void enterScope(); // 进入新的作用域  
    void exitScope(); // 退出当前作用域 (保留全局作用域)  
    bool isGlobalScope() const; // 判断当前是否在全局作用域  
    SymbolInfo* lookup(const std::string& name); // 从内层作用域向外查找符号  
    bool insert(const std::string& name, Value* value, Type* type, bool isConst); // 在当前作用域  
    // 中插入符号  
};
```

功能说明:

- `enterScope()`: 创建新的作用域并压入作用域栈
- `exitScope()`: 弹出当前作用域 (但保留全局作用域)
- `isGlobalScope()`: 判断当前作用域栈大小是否为 1 (即全局作用域)
- `lookup()`: 从内层作用域向外层查找符号, 实现作用域嵌套查找
- `insert()`: 在当前作用域 (栈顶) 中插入符号

## 4.16 IRBuilder 实现细节

### 4.16.1 IRBuilder 核心接口

**IRBuilder** 类结构:

```
class IRBuilder {  
private:  
    BasicBlock *BB_; // 当前基本块  
    Module *m_; // 模块  
    Function *curfunc; // 当前函数  
  
public:  
    IRBuilder(BasicBlock *bb, Module *m);  
  
    // 设置插入点  
    void set_insert_point(BasicBlock *bb);  
  
    // 整数运算指令  
    BinaryInst* create_iadd(Value *lhs, Value *rhs);  
    BinaryInst* create_isub(Value *lhs, Value *rhs);  
    BinaryInst* create_imul(Value *lhs, Value *rhs);
```

```

BinaryInst* create_isdiv(Value *lhs, Value *rhs);

// 浮点运算指令
BinaryInst* create_fadd(Value *lhs, Value *rhs);
BinaryInst* create_fsub(Value *lhs, Value *rhs);
BinaryInst* create_fmul(Value *lhs, Value *rhs);
BinaryInst* create_fdiv(Value *lhs, Value *rhs);

// 比较指令
CmpInst* create_icmp_eq(Value *lhs, Value *rhs);
CmpInst* create_icmp_ne(Value *lhs, Value *rhs);
CmpInst* create_icmp_sgt(Value *lhs, Value *rhs);
CmpInst* create_icmp_sge(Value *lhs, Value *rhs);
CmpInst* create_icmp_slt(Value *lhs, Value *rhs);
CmpInst* create_icmp_sle(Value *lhs, Value *rhs);
CmpInst* create_fcmp_oeq(Value *lhs, Value *rhs);
CmpInst* create_fcmp_ogt(Value *lhs, Value *rhs);
// ... 其他比较指令

// 内存操作指令
AllocaInst* create_alloca(Type *ty);
LoadInst* create_load(Type *ty, Value *ptr);
StoreInst* create_store(Value *val, Value *ptr);

// 控制流指令
BranchInst* create_br(BasicBlock *if_true);
BranchInst* create_cond_br(Value *cond, BasicBlock *if_true, BasicBlock *if_false);
ReturnInst* create_ret(Value *val);
ReturnInst* create_void_ret();

// 类型转换指令
ZextInst* create_zext(Value *val, Type *ty);
SiToFpInst* create_sitofp(Value *val, Type *ty);
FpToSiInst* create_fptosi(Value *val, Type *ty);

// 函数调用指令
CallInst* create_call(Value *func, std::vector<Value *> args);
};


```

功能说明：IRBuilder 提供创建各种 LLVM IR 指令的便捷接口，所有方法都在当前基本块 (BB\_) 中创建指令：

- 整数运算：create\_iadd, create\_isub, create\_imul, create\_isdiv 等
- 浮点运算：create\_fadd, create\_fsub, create\_fmul, create\_fdiv 等

- 比较指令: `create_icmp_*` (整数比较), `create_fcmp_*` (浮点比较)
- 内存操作: `create_alloca` (栈分配), `create_load` (加载), `create_store` (存储)
- 控制流: `create_br` (无条件跳转), `create_cond_br` (条件跳转), `create_ret` (返回)
- 类型转换: `create_zext` (零扩展), `create_sitofp` (整数转浮点), `create_fptosi` (浮点转整数)
- 函数调用: `create_call` (函数调用)

## 4.17 源程序编译步骤 (完整流程)

完整编译流程:

1. 词法分析:

```
SLRLexer lexer;
auto tokens = lexer.analyze(sourceCode);
```

2. 语法分析:

```
SLRParser parser;
bool success = parser.parse(tokens);
auto ast = parser.getAST();
```

3. IR 生成:

```
IRGenerator generator("source.sy");
generator.generate(ast);
std::string ir = generator.print();
```

命令行使用:

```
./compiler -i source.sy      # 完整编译 (生成 LLVM IR)
```

## 5 总结

本编译器实现了完整的编译流程：

1. 词法分析：将源代码转换为 Token 序列
2. 语法分析：将 Token 序列解析为 AST
3. **IR** 生成：遍历 AST 生成 LLVM IR 中间代码

关键特性：

- 支持两种词法分析器（DFA 状态机、NFA→DFA）
- 支持两种语法分析器（递归下降、SLR）
- 完整的 AST 节点体系
- 符号表作用域管理
- 类型系统和类型提升
- 常量折叠优化
- 短路求值
- 控制流图生成

## 6 小组成员分工与心得体会

### 6.1 成员一：陈添硕（学号：3023244225）

主要分工：语法分析器设计与实现

心得体会：在实现语法分析器的过程中，深入理解了自顶向下和自底向上两种分析方法的区别与联系。通过实现递归下降分析器，掌握了如何将语法规则转化为递归函数，理解了向前看（lookahead）在解决选择冲突中的重要作用。在构建 SLR 分析表时，通过计算 FIRST 集和 FOLLOW 集，深刻体会到了形式化方法在编译器设计中的严谨性。语法分析器的实现让我认识到，良好的设计需要充分考虑语法的特点和实际应用场景。

### 6.2 成员二：李昊蓬（学号：3023244162）

主要分工：IR 生成器设计和实现

心得体会：IR 生成是编译器中最核心也最复杂的部分。通过实现访问者模式遍历 AST 并生成 LLVM IR，深入理解了中间代码生成的过程。在处理类型提升、常量折叠、短路求值等特性时，深刻体会到了编译器优化的复杂性。符号表的作用域管理是一个重要挑战，通过实现作用域栈成功解决了变量可见性问题。控制流图的生成和 Phi 节点的使用让我理解了 SSA 形式的重要性。这次经历让我对编译器的后端有了更深入的认识。

### 6.3 成员三：许英帅（学号：3023244221）

主要分工：词法分析器设计和实现

心得体会：通过实现词法分析器，深入理解了词法分析的基本原理。在实现 DFA 状态机的过程中，掌握了如何将正则表达式转化为确定有限自动机，理解了状态转换表的设计方法。关键字识别、标识符扫描、数字解析和注释处理等细节的实现让我认识到词法分析的复杂性。通过实现 NFA 到 DFA 的转换，进一步理解了形式语言理论在实际应用中的价值。词法分析器作为编译器的第一道关卡，其正确性对整个编译过程至关重要。

### 6.4 成员四：谢雨航（学号：3023244222）

主要分工：测试与调试，文档编写

心得体会：在测试与调试过程中，学会了如何系统地验证编译器的正确性。通过设计测试用例覆盖各种边界情况，发现了许多隐藏的 bug。调试过程让我深刻理解了编译器各个模块之间的依赖关系，学会了如何定位问题所在。文档编写工作让我对整个编译器的架构有了全面的认识，通过整理和总结，不仅帮助了团队协作，也加深了自己对编译器原理的理解。这次经历让我认识到，测试和文档是软件开发中不可或缺的重要环节。