浙江大学

本科实验报告

课程名称：	编译原理
姓　　名：	刘一辰、黄海烽、周思颖
学　　院：	计算机科学与技术学院
系：	计算机系
专　　业：	计算机科学与技术
学　　号：	3180102886、3180102339、3180104714
指导教师：	李莹

目录

第一章 词法分析

词法分析是计算机科学中将字符序列转换为标记（token）序列的过程。标记经常使用正则表达式进行定义，像 Lex 一类的词法分析器生成器就支持使用正则表达式。语法分析器读取输入字符流、从中识别出语素、最后生成不同类型的标记。

1.1 Lex

一般而言，一个 Lex 源程序分为三部分，三部分之间以符号%%分隔。第一部分为定义段，第二部分为词法规则段，第三部分为辅助函数段。

1.2 具体实现

1.2.1 定义段

Sky 的 Lex 源程序在定义区导入了需要的头文件，包括：

- stdio.h（C 语言标准输入输出头文件）
- string（C++ std::string 头文件）
- nodeList.h（抽象语法树头文件）
- sky.tab.h（yacc 生成的词法分析器头文件），

然后声明了 lex 需要的 yywrap 函数。

```
%{

#include<stdio.h>
#include<string>
#include "nodeList.h"
#include "sky.tab.h"
extern "C" int yywrap() {return 1;}
using namespace std;

%}
```

1.2.2 词法规则段

首先，需要排除空格、水平制表符、回车换行、注释的干扰，方法是把他们解析为空格。

```
[ \t\n]                     {  }
"//"[^\n]*                  { }
```

然后解析关键字、运算符和分隔符，由于这些字符是固定的，所以正则表达式只需要也是固定字符。

```
"var"                       {return VAR;}
"let"                       {return LET;}
"new"                       {return NEW;}
"delete"                    {return DELETE;}
"func"                      {return FUNCTION;}
"return"                    {return JUMP_RETURN;}
"if"                        {return IF;}
"else"                      {return ELSE;}
"for"                       {return FOR;}
"while"                     {return WHILE;}
"in"                        {return IN;}
"continue"                  {return JUMP_CONTINUE;}
"break"                     {return JUMP_BREAK;}
"class"                     {return CLASS;}
"this"                      {return THIS;}          /*自身指针*/
"lambda"                    {return LAMBDA;}

"int"                       {return TYPE_INT;}
"int*"                      {return TYPE_INT_POINTER;}
"int64"                     {return TYPE_INT_64;}
"int64*"                    {return TYPE_INT_64_POINTER;}
"char"                      {return TYPE_CHAR;}
"char*"                     {return TYPE_CHAR_POINTER;}
"float"                     {return TYPE_FLOAT;}
"float*"                    {return TYPE_FLOAT_POINTER;}
"double"                    {return TYPE_DOUBLE;}
"double*"                   {return TYPE_DOUBLE_POINTER;}
"bool"                      {return TYPE_BOOL;}
"bool*"                     {return TYPE_BOOL_POINTER;}

"{"                         {return('{');}
"}"                         {return('}');}
"("                         {return('(');}
")"                         {return(')');}
"["                         {return('[');}
```

```
"]"                             {return(']');}
"."                             {return('.');}
","                             {return(',');}
":"                             {return(':');}
";"                             {return(';');}
"="                             {return('=');}        /*赋值*/
"+="                            {return ADD_ASSIGN;}
"-="                            {return SUB_ASSIGN;}
"*="                            {return MUL_ASSIGN;}
"/="                            {return DIV_ASSIGN;}
"%="                            {return MOD_ASSIGN;}
"&="                            {return AND_ASSIGN;}
"^="                            {return XOR_ASSIGN;}
"|="                            {return OR_ASSIGN;}
"!"                             {return OPER_NOT;}
"+"                             {return OPER_PLUS;}
"-"                             {return OPER_MINUS;}
"*"                             {return('*');}
"/"                             {return OPER_DIV;}
"%"                             {return OPER_MOD;}
">>"                            {return OPER_RIGHT;}
"<<"                            {return OPER_LEFT;}
"->"                            {return OPER_PTR;}
"&&"                            {return OPER_AND;}
"&"                             {return('&');}
"||"                            {return OPER_OR;}
"<"                             {return OPER_LT;}
"<="                            {return OPER_LE;}
">"                             {return OPER_GT;}
">="                            {return OPER_GE;}
"=="                            {return OPER_EQ;}
"!="                            {return OPER_NE;}
```

标识符是由字母或下划线开头，由字母、数字和下划线组成，并且不能是关键字的字符串。Sky 编译器在词法分析阶段只校验标识符是否符合规则，而不会校验其是否存在。不同于运算符，标识符需要额外保存字符串值。

```
[a-zA-Z_][a-zA-Z0-9_]*          {
                                  yylval.sVal = new char[yyleng+1];
                                  strcpy(yylval.sVal, yytext);
                                  //printf("%s\n", yytext);
                                  return IDENTIFIER;
                                }
```

其他需要额外保存值的单词：

- 在函数、类型等单词中，词法分析器需要记录字符串串值以使得语法分析器能区分是哪个函数或类型。

```
"true"|"false"                {
                                bool tmp;
                                sscanf(yytext, "%d", &tmp);
                                yylval.bVal = tmp;
                                return BOOLEAN;
                              }

"__init__"                    {
                                yylval.sVal = new char[yyleng+1];
                                strcpy(yylval.sVal, yytext);
                                return INIT;
                              }

"__del__"                     {
                                yylval.sVal = new char[yyleng+1];
                                strcpy(yylval.sVal, yytext);
                                return DEL;
                              }

"main"                        {
                                yylval.sVal = new char[yyleng+1];
                                strcpy(yylval.sVal, yytext);
                                //printf("%s\n", yytext);
                                return MAIN;
                              }
```

- 字符型使用以'开头结尾，中间为任意字符的正则表达式识别，将中间字符存储。

- 字符串型使用以 " 开头结尾，中间为 \ 开头或不包括 \ 和 " 的任意字符的正则表达式识别，将中间字符串存储。

```
\'.\'                         {
                                yylval.cVal = yytext[1];
                                return CHAR;
                              }

\'\\[nt0]\'                   {
                                if (yytext[2] == 'n') {
                                    yylval.cVal = '\n';
                                }
```

```
                                if (yytext[2] == 't') {
                                    yylval.cVal = '\t';
                                }
                                if (yytext[2] == '0') {
                                    yylval.cVal = '\0';
                                }
                                return CHAR;
                            }

\"(\\.|[^\\\"])*\"   {
                        yylval.sVal = new char[yyleng-1];
                        memcpy(yylval.sVal, yytext+1, strlen(yytext)-2);
                        yylval.sVal[yyleng-2] = '\0';
                        //printf("%s\n", yylval.sVal);
                        return STRING;
                    }
```

- 对于单精度浮点型、双精度浮点型和整型，在词法分析阶段使用 C 语言转换为对应类型存储。

```
[0-9]+\.[0-9]+               {
                                double tmp;
                                sscanf(yytext, "%lf", &tmp);
                                yylval.dVal = tmp;
                                return DOUBLE;
                            }

[0-9]+\.[0-9]+[fF]           {
                                float tmp;
                                sscanf(yytext, "%f[fF]", &tmp);
                                yylval.fVal = tmp;
                                return FLOAT;
                            }

[0-9]+                       {
                                int tmp;

                                sscanf(yytext, "%d", &tmp);
                                yylval.iVal = tmp;
                                return INTEGER;
                            }
```

第二章 语法分析

2.1 YACC

yacc（Yet Another Compiler Compiler），是 Unix/Linux 上一个用来生成编译器的编译器（编译器代码生成器）。yacc 生成的编译器主要是用 C 语言写成的语法解析器（Parser），需要与词法分析器 Lex 一起使用，再把两部分产生出来的 C 程序一并编译。

yacc 的输入是巴科斯范式(BNF)表达的语法规则以及语法规约的处理代码，输出的是基于表驱动的编译器，包含输入的语法规约的处理代码部分。

与 Lex 相似，yacc 的输入文件由以%%分割的三部分组成，分别是定义段、规则段和程序段。三部分的功能与 Lex 相似，不同的是规则段的正则表达式替换为 CFG，在定义段要提前声明好使用到的终结符以及非终结符的类型。

2.2 抽象语法树

2.2.1 ASTNode 类

ASTNode 类是一个抽象类，其意义为"抽象语法树的节点"，这是抽象语法树所有节点的共同祖先。该类拥有一个用于生成中间代码的纯虚函数 **convertToCode** 和一个默认析构函数**~ASTNode**。

```
class ASTNode{
public:
    virtual Value *convertToCode() = 0;
    virtual ~ASTNode() = default;
};
```

2.2.2 ExprNode 类和 StatNode 类

ExprNode 和 **StatNode** 是大部分实体类的父类。

- **ExprNode** 类是表达式类，它的子类的特征是可获得值或可更改值，也就是左值或者右值，比如二元表达式或变量。

```
// the node for expression
// expression has return value
class ExprNode: public ASTNode {
public:
    SkyTypes type;
};
```

- **StatNode** 类是语句类，它的子类的特征是该类会进行操作，比如赋值、比较、条件控制等。

```
// the node for statement
// statement doesn't have return value
class StatNode: public ASTNode {
public:
//    void forward();
    void backward();
//    BasicBlock *afterBB{};
};
```

2.2.3 Program 类

Program 类的意义是程序，该类是最顶层的实体类，包括全局区域 globalArea 和 main 函数对象 mainFunc。

```
// Program is split into GlobalArea and MainFunction
class Program: public StatNode {
public:
    Program(GlobalArea *globalArea, FuncDec *mainFunc): globalArea(glob
alArea), mainFunc(mainFunc) { }
    Value *convertToCode() override;
    GlobalArea* globalArea;
    FuncDec *mainFunc;
private:

};
```

2.2.4 ConstValue 类

ConstValue 类的意义是常量节点，由于常量的类型很多，所以 **ConstValue** 是一个抽象类，具体由 **SkyInt**、**SkyDouble**、**SkyFloat**、**SkyChar**、**SkyCharPointer**、**SkyBool** 六个子类完成，通过 **getType** 和 **getValue** 函数获得真实的值。

```
class ConstValue: public ExprNode{
public:
    virtual SkyVarType getType() = 0;
    virtual ConstValueUnion getValue() = 0;
    virtual ConstValue *operator-() = 0;
```

```
    Constant* create();
};
```

2.2.5 SkyArrayType 类

SkyArrayType 类的意义是处理各种数组的类型。

```
// Node for array type
// Example:
//      int[10]    =>   type = SKY_INT,  size = 10
class SkyArrayType: public StatNode {
public:
    SkyArrayType(SkyType *type, int size): type(type), size(size) { }
    Value *convertToCode() override;

    SkyType *type;
    int size;
};
```

2.2.6 SkyType 类

SkyType 类的意义是 Sky 支持的类型，包括数组、空类型、变量类型、函数类型和自动类型。

```
// all the types in Sky
// including:   SKY_ARRAY : array type   Example: int[10]
//              SKY_VAR : simple types (SKY_INT, SKY_FLOAT, ...)
//              SKY_VOID : now is only used in the function return type
, which means the function has no return value
//              SKY_FUNC : function type
//              SKY_AUTO : auto type (type inference)
class SkyType: public StatNode {
public:
    explicit SkyType(SkyArrayType *arrayType): arrayType(arrayType), ty
pe(SKY_ARRAY) { }
    explicit SkyType(SkyVarType *varType): varType(varType), type(SKY_V
AR) { }
    explicit SkyType(SkyFuncType *funcType): funcType(funcType), type(S
KY_FUNC) { }
    explicit SkyType(SkyAutoType *autoType): autoType(autoType), type(S
KY_AUTO) { }
```

```
    SkyType(): type(SKY_VOID) { }

    Value *convertToCode() override;

    Constant* Create();
    Type* toLLVMType();
//    Constant* initValue(ConstValue *v = nullptr);

    SkyArrayType *arrayType{};
    SkyVarType *varType{};
    SkyFuncType *funcType{};
    SkyAutoType *autoType{};
    SkyTypes type;
};
```

2.2.7 Identifier 类

Identifier 的意义是标识符，包括一个 name 字段。

```
// In human terms, it can be seen as the name of something(variable, fu
nction, class, const, ...)
class Identifier: public ExprNode {
public:
    explicit Identifier(char* name): name(name) { }

    Value *convertToCode() override;

    char* name;
};
```

2.2.8 VarDec 类

VarDec 类的意义是变量声明，由变量名 **Identifier**、变量类型 **SkyType** 和表达式 **ExprNode** 三部分构成。

```
// Node for variable declaration
// Example:
//      name = expression
//      name : type
class VarDec: public StatNode {
public:
```

```
    VarDec(Identifier *id, SkyType *type, ExprNode* expr): id(id), type
(type), expr(expr), global(false) { }
    VarDec(Identifier *id, SkyFuncType *funcType): id(id) {
        type = new SkyType(funcType);
    }
    bool isGlobal() const {
        return this->global;
    }
    void setGlobal() {
        this->global = true;
    }

    Value *convertToCode() override;

    Identifier *id;
    SkyType *type;      // if type == SKY_AUTO, need Type Inference
    ExprNode *expr{};     // when type == SKY_AUTO, calculate this expr
 to get the type
    bool global{};        // whether is the global variable
};
```

2.2.9 ConstDec 类

ConstDec 类的意义是常量声明，由常量名 **Identifier**、常量值 **ConstValue** 和常量类型 **SkyType** 三部分构成。

```
// Node for const declaration
// Example:
//      name = value
// The type of the value will be recognized in the parsing phase
class ConstDec: public StatNode {
public:
    ConstDec(Identifier *id, ConstValue *cv): id(id), value(cv), global
(false) {
        type = new SkyType(new SkyVarType(value->getType()));
    }
    Value *convertToCode() override;
    bool isGlobal() const {
        return this->global;
    }
    void setGlobal() {
        this->global = true;
```

```
    }

    Identifier *id;
    ConstValue *value;
    SkyType *type;
    bool global;        // whether is the global const
};
```

2.2.10 FuncDec 类

FuncDec 类的意义是函数声明，由函数名 **Identifier**、函数类型 **SkyFuncType** 两部分构成。

```
// Node for function declaration
// Example:
//      func func_name(paraList) compound_statement      (retType = SKY
_VOID)
//      func func_name(paraList) -> retType compound_statement
class FuncDec: public StatNode {
public:
    FuncDec(Identifier *name, SkyFuncType *funcType): id(name), funcTyp
e(funcType) { }
    Value *convertToCode() override;

private:
    Identifier *id;
    SkyFuncType *funcType;
};
```

2.2.11 ClassBody 类和 ClassDec 类

ClassBody 类的意义是类的主体，由构造函数 init、析构函数 del、函数声明列表 funcList 三部分构成。

```
// Node for class body
// Class body must contain init and del function
// Example:
//      func __init__(paraList) -> retType compound_statement
//      func __del__(paraList) -> retType compound_statement
//      funcDecList
class ClassBody: public StatNode {
```

```
public:
    ClassBody(FuncDec *init, FuncDec *del, FuncDecList *funcList): init
Func(init), delFunc(del), funcList(funcList) { }
    Value *convertToCode() override { return nullptr; }

private:
    FuncDec *initFunc, *delFunc;
    FuncDecList *funcList;
};
```

ClassDec 类的意义是类的声明，由类名 name、父类 father、类的主体 body 三部分构成。

```
// Node for class declaration
// Example:
//      class class_name { class_body }
//      class class_name : father { class_body }
class ClassDec: public StatNode {
public:
    ClassDec(Identifier *name, Identifier *father, ClassBody *body): na
me(name), father(father), body(body) { }
    Value *convertToCode() override { return nullptr; }

private:
    Identifier *name, *father; // father can be nullptr
    ClassBody *body;
};
```

2.2.12 BinaryExpr 类

BinaryExpr 类的意义是二元表达式，节点存储有左表达式、右表达式和操作符。

```
// Node for binary expression
// Example:
//      leftExpr op rightExpr
// The priority is solved in the parsing phase, so just do the operatio
n directly
class BinaryExpr: public ExprNode {
public:
    BinaryExpr(ExprNode *left, BinaryOperators op, ExprNode *right): le
ft(left), op(op), right(right) { }

    Value *convertToCode() override;
```

```
private:
    ExprNode *left, *right;
    BinaryOperators op;
};
```

2.2.13 CompoundStat 类

CompoundStat 类的意义是复合语句，即有一系列语句组成的语句列表，该类由 **StatList** 组成。

```
// Node for compound statement
// Example:
//      { statement_list }
class CompoundStat: public StatNode {
public:
    CompoundStat() {
        statList = new StatList();
    }
    explicit CompoundStat(StatList *statList): statList(statList) { }
    Value* convertToCode() override;
    StatList *statList;
};
```

2.2.14 ArrayReference 类和 ClassRef 类

ArrayReference 类的意义是数组成员的引用，**ClassRef** 类的意义是类成员的引用。

```
// Node for array element reference
// Example:
//      arrName[index]
// index is saved as an expression(ExprNode)
class ArrayReference: public ExprNode {
public:
    ArrayReference(Identifier *id, ExprNode *subInd): id(id), subInd(su
bInd) { }

    Value *convertToCode() override;
    Value* getValueI();

private:
    Identifier *id;
```

```
    ExprNode *subInd;
};

// Node for class member reference
// Example:
//      className.classMemberName
class ClassRef: public ExprNode {
public:
    ClassRef(Identifier *id, Identifier *childId): id(id), childId(chil
dId) { }
    Value *convertToCode() override { return nullptr; }

private:
    Identifier *id, *childId;   // id: className,  childId: classMember
Name
};
```

2.2.15 FuncCall 类

FuncCall 类的意义是函数调用，由函数名 `id` 和参数列表 `args` 两部分组成，该类同时继承自 **ExprNode** 类和 **StatNode** 类。

```
// Node for function call
// It can be an expression or a statement, so it is inherited from both
 ExprNode and StatNode
class FuncCall: public ExprNode, public StatNode {
public:
    FuncCall(Identifier *id, ExprList *args): id(id), args(args) { }

    Value *convertToCode() override;

    Value *callSysIO();

private:
    Identifier *id;     // the function name
    ExprList *args;     // the arguments of the function
};
```

2.2.16 PointerNode 类

PointerNode 类的意义是指针节点。

```
// Node for Pointer
// Example:
//      *(a+2)
//      *a
//      *a[10]
//      *func(1,2)
//      *a.b
// a+2, a, a[10], func(1,2), a.b above are all saved as an expression(E
xprNode)
// and the expression value should be calculated first, then use the '*
'
class PointerNode: public ExprNode {
public:
    explicit PointerNode(ExprNode *expr): expr(expr) { }

    Value *convertToCode() override;

    ExprNode *expr;
};
```

2.2.17 GlobalArea 类

GlobalArea 类的意义是全局区域，该类由常量声明 constDecList、变量声明 varDecList、函数声明 funcDecList、类声明 classDecList 四部分构成。

```
// GlobalArea can only do some definition
// including const, variable, function and class
// Especially, function and class can only be defined in the GlobalArea
class GlobalArea: public StatNode {
public:
    GlobalArea() {
        constDecList = new ConstDecList();
        varDecList = new VarDecList();
        funcDecList = new FuncDecList();
        classDecList = new ClassDecList();
    }
    void addConstDec(ConstDecList *cd) {
        for (auto & constDec : *cd) {
            constDec->setGlobal();
        }
```

```
        constDecList->insert(constDecList->end(), cd->begin(), cd->end(
));
    }
    void addVarDec(VarDecList *vd) {
        for (auto & varDec : *vd) {
            varDec->setGlobal();
        }
        varDecList->insert(varDecList->end(), vd->begin(), vd->end());
    }
    void addFuncDec(FuncDec *fd) {
        funcDecList->push_back(fd);
    }
    void addClassDec(ClassDec *cd) {
        classDecList->push_back(cd);
    }
    Value *convertToCode() override;

private:
    ConstDecList *constDecList{};       // list of const declaration
    VarDecList *varDecList{};           // list of variable declaration
    FuncDecList *funcDecList{};         // list of function declaration
    ClassDecList *classDecList{};       // list of class declaration
};
```

2.2.18 其他类

还有一些其他继承自 **StatNode** 类的语句类，如 **IfStat** 类、**ForStat** 类、**WhileStat** 类和 **JumpStat** 类等。

2.3 语法分析的具体实现

首先在定义段声明好终结符和非终结符类型。

```
%union {
    int iVal;
    float fVal;
    double dVal;
    char cVal;
    char* sVal;
    bool bVal;
```

```
    Program *program;
    GlobalArea *globalArea;
    ConstDec *constDec;
    ConstDecList *constDecList;
    ConstValue *constValue;
    VarDec *varDec;
    VarDecList *varDecList;
    SkyType *skyType;
    SkyVarType *skyVarType;
    SkyArrayType *skyArrayType;
    FuncDec *funcDec;
    CompoundStat *compoundStat;
    StatList *statList;
    IfStat *ifStat;
    JumpStat *jumpStat;
    ExprNode *expression;
    ExprList *exprList;
    AssignStat *assignStat;
    ClassDec *classDec;
    Identifier *identifier;
    ClassBody *classBody;
    FuncDecList *funcDecList;
    StatNode *statement;
    VarDecListNode *varDecListNode;
    ConstDecListNode *constDecListNode;
    SkyFuncType *skyFuncType;
}

%type<program>                  program
%type<globalArea>               global_area
%type<constDec>                 const_expr
%type<constDecList>             const_list
%type<constDecListNode>         const_declaration
%type<constValue>               const_value
%type<varDec>                   var_expr
%type<varDecList>               var_list para_list
%type<varDecListNode>           var_declaration
%type<skyType>                  type_declaration
%type<skyVarType>               var_type
%type<skyArrayType>             array_type_declaration
%type<funcDec>                  func_declaration main_func clas
s_init class_del
%type<compoundStat>             compound_statement
%type<statList>                 statement_list
```

```
%type<ifStat>                           branch_statement
%type<statement>                        for_statement statement
%type<jumpStat>                         jump_statement
%type<expression>                       expression expression_or expres
sion_and expr expr_shift term factor number
%type<exprList>                         expression_list
%type<assignStat>                       assign_statement
%type<classDec>                         class_declaration
%type<identifier>                       inherit_part name
%type<classBody>                        class_body
%type<funcDecList>                      func_declaration_list
%type<skyFuncType>                      func_type lambda_expression

%token<iVal> INTEGER
%token<fVal> FLOAT
%token<dVal> DOUBLE
%token<cVal> CHAR
%token<sVal> STRING IDENTIFIER MAIN INIT DEL
%token<bVal> BOOLEAN

%token  PRINT SCAN
        VAR LET NEW DELETE LAMBDA
        FUNCTION JUMP_BREAK JUMP_CONTINUE JUMP_RETURN
        IF ELSE FOR WHILE IN
        CLASS THIS
        TYPE_INT TYPE_INT_POINTER TYPE_INT_64 TYPE_INT_64_POINTER
        TYPE_CHAR TYPE_CHAR_POINTER
        TYPE_FLOAT TYPE_FLOAT_POINTER TYPE_DOUBLE TYPE_DOUBLE_POINTER
        TYPE_BOOL TYPE_BOOL_POINTER
        ADD_ASSIGN SUB_ASSIGN MUL_ASSIGN DIV_ASSIGN MOD_ASSIGN AND_ASSI
GN XOR_ASSIGN OR_ASSIGN
        OPER_PLUS OPER_MINUS OPER_DIV OPER_MOD OPER_RIGHT OPER_LEFT OPE
R_PTR OPER_AND OPER_OR OPER_NOT
        OPER_LT OPER_LE OPER_GT OPER_GE OPER_EQ OPER_NE
        LF
```

接着按从上往下的顺序构造语法树，文法详见 sky.y 文件。

第三章 语义分析

3.1 LLVM 概述

LLVM 是一套编译器基础设施项目，它以 C++写成，包含一系列模块化的编译器组件和工具链，用来开发编译器前端和后端。它是为了任意一种编程语言而写成的程序，利用虚拟技术创造出编译时期、链接时期、运行时期以及“闲置时期”的优化。

- 前端：LLVM 最初被用来取代 GCC 中的代码产生器，许多 GCC 的前端已经可以与其运行，LLVM 目前支持 Ada、C 语言、C++、D 语言、Fortran 等语言的编译。
- 中间端：LLVM 的核心是中间端表达式（Intermediate Representation，IR），一种类似汇编的底层语言。IR 是一种强类型的精简指令集，并对目标指令集进行了抽象。LLVM 支持三种表达形式：人类可读的汇编，在 C++中对象形式和序列化后的 bitcode 形式。
- 后端：LLVM 已经支持多种后端指令集，包括 ARM、Qualcomm Hexagon、MIPS、Nvidia 并行指令集等。

3.2 LLVM IR

LLVM IR 是 LLVM 的核心所在，通过将不同高级语言的前端变换成 LLVM IR 进行优化、链接后再传给不同目标的后端转换成为二进制代码，前端、优化、后端三个阶段互相解耦，这种模块化的设计使得 LLVM 优化不依赖于任何源码和目标机器。

3.2.1 IR 布局

LLVM IR 语言自上而下主要分为：module、function、block、instruction。其中。

- Module: 每个 IR 文件被称为一个 Module，其中包含了全局的符号信息（包括全局变量、function 的声明与定义）、对其他 module 的依赖信息以及目标代码的环境信息等。
- Function: 函数由传入参数和若干 block 构成。进入函数后会顺序执行 block，在 block 执行过程中可能会出现由 block 内 instruction 指定的跳转执行。函数是代码层面组织可执行语句的基本模块。
- Block: 由若干条 instruction 组成。
- Instruction：是操作的最小单元，每一个 instruction 是一个基本指令，包括：运算指令、逻辑指令、跳转指令、函数调用与返回执行、定义指令等。

3.2.2 IR 上下文环境

在 LLVM-IR 中，主要需要使用由 LLVM 提供的两个上下文环境：

1. LLVM::Context
2. LLVM:IRBuilder

其中的 Context 主要提供上下文环境,负责提供用户定义符号如:全局变量、局部变量、函数等的储存记录以及查询。并且提供其上下文环境。

其中的 IRBuilder 主要是负责创建相关语句、变量、函数等，即在 IR 中添加相应的 instruction。是构建 LLVM-IR 的十分重要的一个上下文环境。

3.3 IR 生成

3.3.1 运行环境设计

LLVM-IR 为我们提供了 IR 上下文环境,可以通过 LLVM::Context 来实现对于变量函数等变量的查询。但是为了简便以及对一些其他信息的维护，我们将 LLVM::Context 与 LLVM::IRBuilder 进行封装，然后额外维护一些信息，定义如下：

```
static LLVMContext context;
static IRBuilder<> builder(context);
class ConvertEngine{
private:
    Module *module;
private:
    Function *scan, *print;
private:
    Function *main;
    stack<Function*> funcList;
    vector<BasicBlock*> breakBlock;
    vector<BasicBlock*> continueBlock;
public:

    map<string, SkyArrayType*> arrayMap;
    bool flagIsReturn;
};
```

（类内的函数部分已被隐去，函数会在下文中被介绍）

接下来我们解释一下 ConvertEngine 内的成员变量的含义与用途：

- *module: 该 module 是由 LLVM 中所定义的 Module，与前文中提到的 LLVM 中的 Module 是同样的概念。
- *scan, *print: 语言所必要的就是对于数据的读取与输出，这两个指针分别指向输入函数和输出函数。在 Sky 语言中，我们数据读入函数和数据输出函数均设置为系统函数，由 ConvertEngine 在构造时直接自动生成。
- funcList: 在函数的递归调用时，函数的递归调用栈是十分重要的数据结构，是用以维护函数在递归时正确执行、正确返回、正确使用变量所非常重要的结构。在 LLVM 中没有提供的默认递归栈可供调用，所以为了维护栈上函数指针，在 ConvertEngine 中维护了函数递归调用栈，来保存栈上的所有指针。相应的，在进行函数递归调用以及退出时，也要操作该栈。
- breakBlock, continueBlock: 跳转逻辑是以块为单位进行的。在一个块中进行 continue 或者 break 时实质上是要进行跳转。这两个结构即保存当此时进行 continue 或者 break 指令时，实质是应该跳转到哪一个 block 中继续执行。
- arrayMap: 由于在 Sky 语言中没有指针，所以对于数组的组织是定义了一个单独的 array 类型，该类型是 LLVM 中并不默认支持的，所以在使用时实际上是将其转化为了指针，然后通过自行维护相关数组长度信息来实现的。所以对于该类变量，需要使用特殊的储存方式和获取方式。
- flagIsReturn: 该变量是一个简单的公用 flag，用于解决 block 内跳转语句后不应有语句的问题。当开始执行 Block 时，该变量会被置为 0,当执行到 return 语句或跳转语句时该变量会被置为 1。当执行非 return 或跳转语句时发现该变量为 1 时，会将该变量置 0 并直接退出当前 block。

3.3.2 类型系统

类型定义见抽象语树部分
相关类型的转化实现如下：

```
/*
 * TO LLVM type : this function is used to cast our type : SkyType to
LLVM type
 * */
Type * SkyType::toLLVMType() {
    if(type == SKY_VAR) {
        switch (*varType) {
            case SkyVarType::SKY_INT:
                return builder.getInt32Ty();
            case SkyVarType::SKY_INT_64:
                return builder.getInt64Ty();
            case SkyVarType::SKY_CHAR:
                return builder.getInt8Ty();
```

```
            case SkyVarType::SKY_FLOAT:
                return builder.getFloatTy();
            case SkyVarType::SKY_DOUBLE:
                return builder.getDoubleTy();
            case SkyVarType::SKY_BOOL:
                return builder.getInt1Ty();
                // TODO: pointers
            case SkyVarType::SKY_INT_POINTER:
                return llvm::Type::getInt32PtrTy(context);
            case SkyVarType::SKY_CHAR_POINTER:
                return llvm::Type::getInt8PtrTy(context);
            case SkyVarType::SKY_INT_64_POINTER:
                return llvm::Type::getInt64PtrTy(context);
            case SkyVarType::SKY_FLOAT_POINTER:
                return llvm::Type::getFloatPtrTy(context);
            case SkyVarType::SKY_DOUBLE_POINTER:
                return llvm::Type::getDoublePtrTy(context);
            case SkyVarType::SKY_BOOL_POINTER:
                return llvm::Type::getInt1PtrTy(context);
        }
    } else if (type == SKY_ARRAY) { // Array type is special
        return ArrayType::get(arrayType->type->toLLVMType(),
arrayType->size);
    } else return llvm::Type::getVoidTy(context);
}
```

3.3.3 变量的创建与获取

```
Value *VarDec::convertToCode() {
    if (type->type == SKY_AUTO && expr != nullptr) {
        type->type = expr->type;
        type->varType = &(expr->varType);
    }
    if (type->type == SKY_ARRAY) {
        engine.arrayMap[id->name] = type->arrayType;
    }
    auto varType = type->toLLVMType();
    Value * ret = nullptr;
    if(isGlobal()) { // Difference is that : we should not pass
initValue to it.
        ret = new GlobalVariable(*engine.getModule(), varType, false,
GlobalValue::ExternalLinkage, type->Create(), id->name);
    } else {
```

```
        ret = CreateEntryBlockAlloca(engine.nowFunction(), id->name,
varType);
    }
    auto assign = new AssignStat(id, expr);
    assign->convertToCode();
    delete assign;
    return ret;
}
```

变量的创建要分为两种情况：全局变量的创建、局部变量的创建。其不同之处是储存的空间不同，所以调用的 LLVM 接口不同。同时全局变量会进行默认初始化。

同时，在执行完变量定义后，需要执行赋值语句进行赋值。因为可能会出现定义与赋值连写的语法。

接下来我们来看一下变量的获取：

```
Value* ConvertEngine::findVarByName(string varName) {
    auto nowFunc = funcList.top();
    auto result = nowFunc->getValueSymbolTable()->lookup(varName);
    if(result != nullptr) return result;
    result = module->getGlobalVariable(varName);
    if(result == nullptr){
        throw VarNotFound(varName + " not found");
    }
    return result;
}
```

该函数是是现在 ConvertEngine 中的变量查找函数，实际上是对 LLVM 提供的函数查找接口进行了封装，首先通过函数调用栈获取当前所在达函数指针，然后在当前函数内部搜索是否存在当前名称的变量。如果没有找到变量则在全局范围内进行搜索，即局部变量可以屏蔽全局变量。

获取到正确的函数了之后会返回 Value*以进行调用。

3.3.4 函数的定义与调用

```
/*
 *  Function declaration : this function is used to declare function
 *  1. construct params
 *  2. convert body
 *  3. end
 * */
Value * FuncDec::convertToCode() {
    funcType->funcName = id->name;
```

```
    return funcType->convertToCode();
}

Value * SkyFuncType::convertToCode() {
    vector<Type*> args;
    if (paraList != nullptr) {
        for (auto &it: *paraList) {
            args.push_back(it->type->toLLVMType());
        }
    }
    // func (args) -> retType {}
    auto funcType = FunctionType::get(retType->toLLVMType(), args,
false);
    auto func = Function::Create(funcType, GlobalValue::ExternalLinkage,
funcName, engine.getModule());
    engine.enterFunction(func);
    BasicBlock *funcBlock = BasicBlock::Create(context, "function
begin", func, nullptr);
    builder.SetInsertPoint(funcBlock);

    // calc params
    auto iterToPara = func->arg_begin();
    if (paraList != nullptr) {
        for (auto &it: *paraList) {
            auto mem = CreateEntryBlockAlloca(func, it->id->name,
it->type->toLLVMType());
            builder.CreateStore(iterToPara++, mem);
        }
    }
    Value * ret = nullptr;
    if ( retType->type != SkyTypes::SKY_VOID ){
        ret = CreateEntryBlockAlloca(func, funcName,
retType->toLLVMType());
    }

    body->convertToCode();

    engine.exitFunction();
    // Maintain the function stack
    if (engine.funcStackSize()) {
        auto nowFunc = engine.nowFunction();
        builder.SetInsertPoint(&(nowFunc->getBasicBlockList().back()));
    }
    return func;
```

函数的定义需要对函数的具体参数进行具体的定义，即函数的定义需要处理：

1. 函数参数的定义（包括传入参数和返回参数）
2. 函数的实例：在声明过程中，需要通过 LLVM 接口创建 Function 实例。
3. 函数内的基本块：block 是必要的，为该函数创建 block 并且设定为函数入口点。
4. 对于函数具体语句内容的实现，调用 AST 树中子节点的 convert 函数来实现
5. 对于函数递归调用栈的维护，需要调用 ConvertEngine 中的相关函数进行函数递归调用栈的维护。

接下来我们来看一看如何进行函数的调用：

```
/*
 * Function Call: this function is used to call function
 * */
Value *FuncCall::convertToCode() {
    auto func = engine.getModule()->getFunction(id->name);
    if (func == nullptr) { // If this function is not implement
        throw FuncNotFound(*(new string(id->name)) + " not found");
    }

    // System function should have its own call function, because it
needs some special settings.
    if (strcmp(id->name, "printf") == 0 || strcmp(id->name, "scanf") ==
0) {
        return callSysIO();
    }

    // Get all params
    vector<Value*> inputArgs;
    auto funcNeed = func->arg_begin();
    if (args != nullptr) {
        for (auto &it : *args) {
            if (funcNeed->hasNonNullAttr()) {
                auto *addr = engine.findVarByName(dynamic_cast<Identifier
*>(it)->name);
                inputArgs.push_back(addr);
            } else {
                inputArgs.push_back(it->convertToCode());
            }
            funcNeed++;
        }
    }

    // Create Call sentences
```

```
    Value *ret = builder.CreateCall(func, inputArgs, "callFunc");
    return ret;
}
```

函数调用主要分为以下几部分：

1. 搜索函数名，查看是否定义/实现
2. 获取到对应的函数后，将传入参数与函数所需求的参数按顺序匹配并传入。此处使用到了 ConvertEngine 中对变量的查找。
3. 调用函数

3.3.5 二元运算的实现

```
/*
 * Binary operator function:
 * Support :
 *  add, sub, mul, div, equ, neq, LT, GT, LE, GE, and, or, xor, sl, rl
 *  Note: all params of binary operator need to be the same type
 * */
Value *calcOp(Value* left, Value* right, BinaryOperators op) {
    auto type1 = left->getType();
    auto type2 = right->getType();

    // check the float flag
    bool floatFlag = type1->isFloatTy() || type2->isFloatTy();
    bool doubleFlag = type1->isDoubleTy() || type2->isDoubleTy();
    switch (op) {
        case OP_PLUS:
            if (floatFlag || doubleFlag) {
                return builder.CreateFAdd(left, right, "addFloat");
            } else {
                return builder.CreateAdd(left, right, "addInt");
            }
        case OP_MINUS:
            if (floatFlag || doubleFlag) {
                return builder.CreateFSub(left, right, "subFloat");
            } else {
                return builder.CreateSub(left, right, "subInt");
            }
        case OP_MUL:
            if (floatFlag || doubleFlag) {
                return builder.CreateFMul(left, right, "mulFloat");
            } else {
```

```
                return builder.CreateMul(left, right, "mulInt");
            }
        case OP_DIV:
            if (floatFlag || doubleFlag) {
                return builder.CreateFDiv(left, right, "divSigned");
            } else {
                return builder.CreateSDiv(left, right, "divFloat");
            }
        case OP_EQ:
            return builder.CreateICmpEQ(left, right, "equal");
        case OP_NE:
            return builder.CreateICmpNE(left, right, "neq");
        case OP_GT:
            return builder.CreateICmpSGT(left, right, "gt");
        case OP_LT:
            return builder.CreateICmpSLT(left, right, "lt");
        case OP_GE:
            return builder.CreateICmpSGE(left, right, "ge");
        case OP_LE:
            return builder.CreateICmpSLE(left, right, "le");
        case OP_AND:
            return builder.CreateAnd(left, right, "and");
        case OP_OR:
            return builder.CreateOr(left, right, "or");
        case OP_XOR:
            return builder.CreateXor(left, right, "xor");
        case OP_MOD:
            return builder.CreateSRem(left, right, "mod");
        case OP_LEFT:
            return builder.CreateShl(left, right, "shl");
        case OP_RIGHT:
            return builder.CreateAShr(left, right, "shr");
        case OP_PTR:
            return nullptr;
    }
}
```

该模块主要是通过将我们所定义的运算与 LLVM 中默认提供的运算进行一一匹配。匹配之后直接通过 IRBuilder 来创建相关的语句。

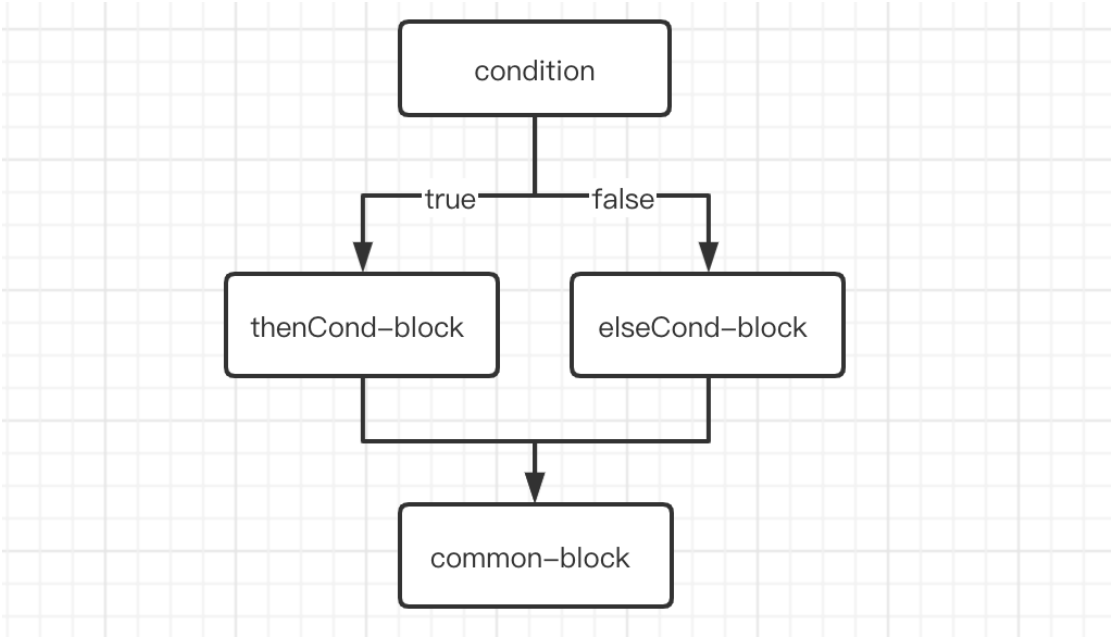
3.3.6 条件控制语句的实现

3.3.6.1 if 语句的实现

```
/*
 * If Status:
 *     if (condition) {
 *         -then-
 *     } else {
 *         -else-
 *     }
 *     -common-
 * condition -> then/else -> common
 * Note: LLVM do not permit any code after br or ret in the same basic
block,
 *       so we must check this condition.
 * */
Value *IfStat::convertToCode() {

    Value *condValue = condExpr->convertToCode();
    condValue = builder.CreateICmpNE(condValue,
ConstantInt::get(Type::getInt1Ty(context), 0, true), "if");

    auto func = engine.nowFunction();

    // Create 3 basic blocks to contain codes
    auto thenCond = BasicBlock::Create(context, "thenCond", func);
    auto elseCond = BasicBlock::Create(context, "elseCond", func);
    auto common = BasicBlock::Create(context, "common", func);

    // then
    auto branch = builder.CreateCondBr(condValue, thenCond, elseCond);
    builder.SetInsertPoint(thenCond);

    engine.flagIsReturn = false;
    thenStat->convertToCode();
    if (!engine.flagIsReturn) {// Do not create br, is jump is in body
        builder.CreateBr(common);
    }
    engine.flagIsReturn = false;
    thenCond = builder.GetInsertBlock();

    // else
```

```
    builder.SetInsertPoint(elseCond);

    engine.flagIsReturn = false;
    if (elseStat != nullptr) {
        elseStat->convertToCode();
    }
    if (!engine.flagIsReturn) { // Do not create br, is jump is in body
        builder.CreateBr(common);
    }
    engine.flagIsReturn = false;
    elseCond = builder.GetInsertBlock();

    builder.SetInsertPoint(common);
    return branch;
}
```

为了实现 If 的语句控制，我们需要定义 3 个 block 来进行处理。其执行关系如下：



其中的 common-block 是为了使两种不同的分支最后都合并到同一个 block 中所定义的空 block，只起到控制作用。剩余的 thenCond-block 与 elseCond-block 分别与 if 语句的两个代码块部分相对应。

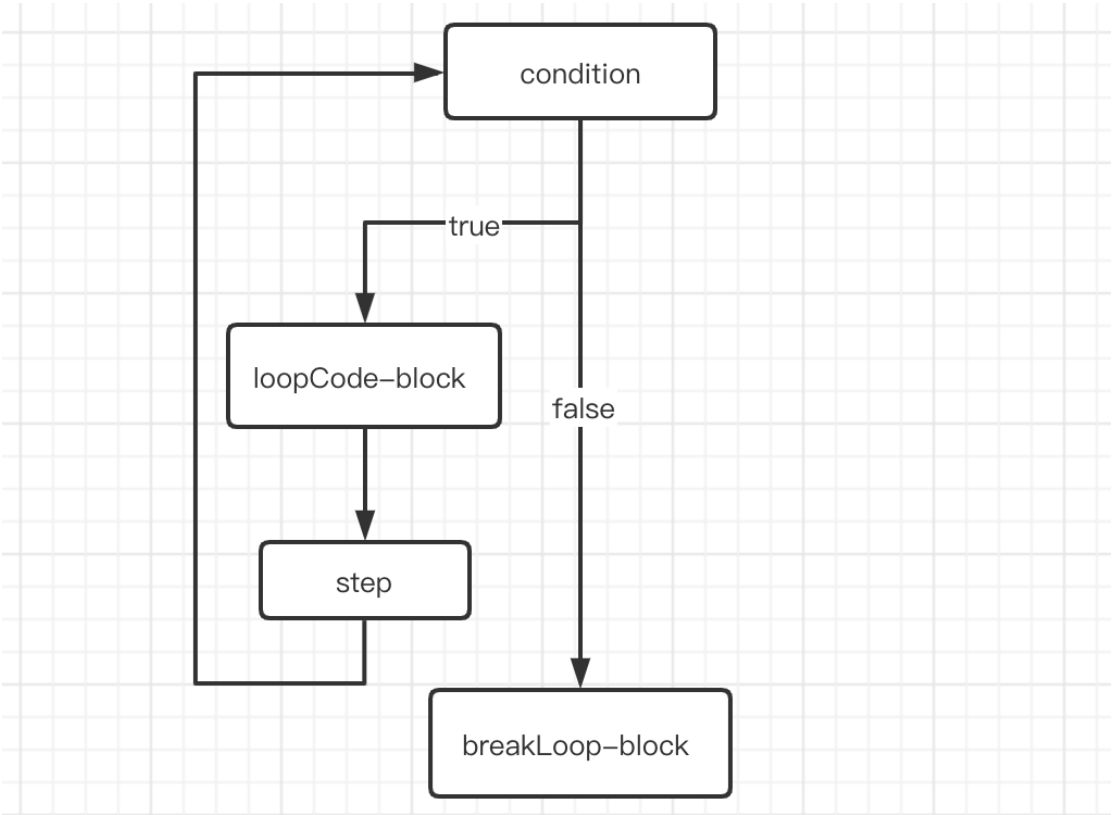
3.3.6.2 for 循环语句的实现

```
/*
 * for Status:
 *    for condition {
 *        -loop-
 *    }
 *    -breakBlock-
 * condition -> loop/breakkBlock, loop->condition
 * Note: LLVM do not permit any code after br or ret in the same basic
block,
 *      so we must check this condition.
 * */
Value *ForStat::convertToCode() {
    auto func = engine.nowFunction();

    Value * startValue = start->convertToCode();
    Value * endValue = end->convertToCode();
    Value * stepValue = step->convertToCode();

    Value * varValue = engine.findVarByName(forVar->name);
    builder.CreateStore(startValue, varValue);

    // Create 3 basic blocks to contain codes
    BasicBlock *condition = BasicBlock::Create(context, "condition",
func);
    BasicBlock *loop = BasicBlock::Create(context, "loopCode", func);
    BasicBlock *breakLoop = BasicBlock::Create(context, "breakLoop",
func);
    engine.enterLoop(breakLoop, condition);

    // condition
    builder.CreateBr(condition);
    builder.SetInsertPoint(condition);
    auto nowValue = forVar->convertToCode();
    auto condValue = builder.CreateICmpSLT(nowValue, endValue);
    condValue = builder.CreateICmpNE(condValue,
ConstantInt::get(Type::getInt1Ty(context), 0, true));
    auto branch = builder.CreateCondBr(condValue, loop, breakLoop);
    condition = builder.GetInsertBlock();

    // loop
    builder.SetInsertPoint(loop);
```

```
    engine.flagIsReturn = false;
    body->convertToCode();
    Value * newVarValue = builder.CreateAdd(nowValue, stepValue); // add
step
    builder.CreateStore(newVarValue, varValue);
    if (!engine.flagIsReturn) {
        builder.CreateBr(condition);
    }
    engine.flagIsReturn = false;
    loop = builder.GetInsertBlock();

    builder.SetInsertPoint(breakLoop);
    engine.exitLoop();
    return branch;
}
```

For 语句实际上需要 4 个 Block，但是为了更加简单，我们将下图中的 step block 直接添加在 loopCode-block 尾部来实现循环变量的修改。

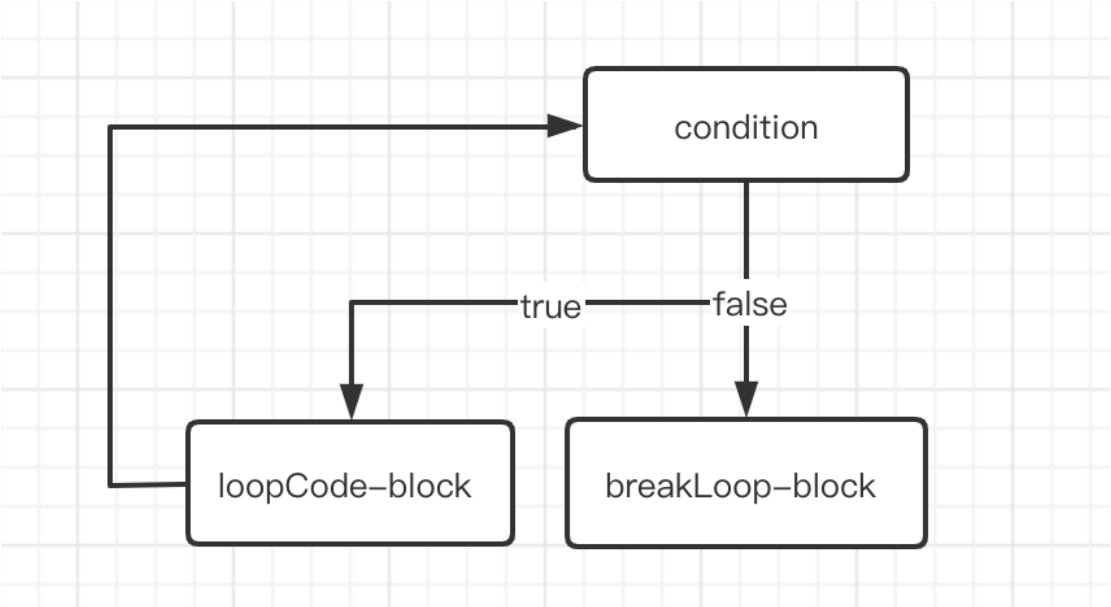
For 循环的 breakLoop-block 会被储存到 convertEngine 中的相关数据结构中用以进行 break 语句的处理。Continue 语句的处理就比较简单了，可以直接跳转到 condition 中来实现。



3.3.6.3 while 语句的实现

```
/*
 * While Status:
 *     while condition {
 *         -loop-
 *     }
 *     -breakBlock-
 * condition -> loop/breakkBlock, loop->condition
 * Note: LLVM do not permit any code after br or ret in the same basic
block,
 *       so we must check this condition.
 * */
Value *WhileStat::convertToCode() {
    auto func = engine.nowFunction();
    BasicBlock * condition = BasicBlock::Create(context, "condition",
func);
    BasicBlock * loop = BasicBlock::Create(context, "loop", func);
    BasicBlock * breakLoop = BasicBlock::Create(context, "breakLoop",
func);
    engine.enterLoop(breakLoop, condition);

    // condition
    builder.CreateBr(condition);
    builder.SetInsertPoint(condition);
    auto condValue = cond->convertToCode();
    condValue = builder.CreateICmpNE(condValue,
ConstantInt::get(Type::getInt1Ty(context), 0, true));
    auto branch = builder.CreateCondBr(condValue, loop, breakLoop);
    condition = builder.GetInsertBlock();

    // loop
    builder.SetInsertPoint(loop);
    engine.flagIsReturn = false;
    body->convertToCode();
    if (!engine.flagIsReturn) {
        builder.CreateBr(condition);
    }
    engine.flagIsReturn = false;
    builder.SetInsertPoint(breakLoop);
    engine.exitLoop();
    return branch;
}
```

While 语句的实现与 for 语句的实现是及其相似的，区别就在于 while 语句中不再处理 step，所以该部分实际上删去了 for 循环的 step 部分。



3.3.6.4 其他控制语句

```
/*
 * Jump Status: Control codes
 * - break : exit now loop
 * - continue : directly enter the condition part in current loop
 * - return : exit the function and return value
 * Note : No code is allowed to be write after JumpStat, so we used a
flag to pass a signal.
 * */
Value *JumpStat::convertToCode() {
    engine.flagIsReturn = true;
    switch ( type ) {
        case BREAK:
            return builder.CreateBr(engine.getCurBreakBlock());
        case CONTINUE:
            return builder.CreateBr(engine.getCurContinueBlock());
        case RETURN:
            if (retExpr != nullptr) {
                return builder.CreateRet(retExpr->convertToCode());
            } else {
                return builder.CreateRetVoid();
            }
    }
    return nullptr;
}
```

我们的语言支持其他三种控制指令：break, continue, return

其中 return 指令由于有 LLVM 的直接支持，所以可以直接调用 IRBuilder 来实现。剩余的两种控制指令则使用 ConvertEngine 中所记录的当前环境的 break 跳转点和 continue 跳转点，通过创建 Br 来进行实现。

3.3.7 赋值语句的实现

```
/*
 * AssignStart : This function is used to load value of right to left
identifier (arrayReference)
 * */
Value *AssignStat::convertToCode() {
    Value *res = nullptr;
    switch (type) {
        case ID_ASSIGN: // Identifier = value*
            return builder.CreateStore(expr->convertToCode(),
engine.findVarByName(id->name));
        case ARRAY_ASSIGN: // ArratReference = value*
            return builder.CreateStore(expr->convertToCode(),
arrayRef->getValueI());
        case LAMBDA_ASSIGN: // identifier = lambda
            int funcID = engine.pushNewFunction();
            dynamic_cast<SkyFuncType *>(expr)->funcName =
engine.getFuncNameByID(funcID);
            expr->convertToCode();
            return builder.CreateStore(builder.getInt32(funcID),
engine.findVarByName(id->name));
    }
    return nullptr;
}
```

直接通过 LLVM 中提供的 Store 接口来进行变量的赋值。

第四章 目标代码生成

由于我们使用了 LLVM 框架，所以可以直接调用 LLVM 的接口来输出 LLVM-IR 代码。

```
void ConvertEngine::compileToFile(string fileName) {
    error_code ErrInfo;
    raw_ostream *out = new raw_fd_ostream(fileName, ErrInfo,
sys::fs::CreationDisposition());
    module->print(*out , nullptr);
}
```

上面的函数就可以直接输出 LLVM-IR 语言的代码，但是这并不是可以直接运行的代码。所以为了生成目标代码，我们进行调用了 llc 来将 LLVM-IR 语言编译成 asm 文件，然后调用平台本地的 gcc 编译器编译汇编代码，最终就可以得到可以直接在目标平台上执行的代码。

我们将这个过程直接写在了 main 函数中，用户可以直接调用该编译器来将一份 sky 语言代码直接编译成可执行文件，编译过程主函数如下：

```
int main(int argc, char** argv){
    if (argc >= 2) {
        yyin = fopen(argv[1], "r");
    } else {
        puts("Invalid param.");
        return 0;
    }
    yyparse();
    if (root == nullptr) return -1;
    root->convertToCode();
    if (argc != 3) {
        engine.compileToFile("compileOut.ir");
        system("llc compileOut.ir");
        system("gcc compileOut.ir.s -o compileOut");
    } else {
        string fileName = string(argv[2]);
        engine.compileToFile(fileName+".ir");
        system(("llc " + fileName+".ir").c_str());
        system(("gcc " + fileName + ".ir.s" + " -o " +
fileName).c_str());
    }
    return 0;
}
```

第五章 优化以及进阶主题

5.1 一些优化

我们的编译器是比较简洁的编译器，所以具有很快的编译速度，可以快速对项目程序进行编译。

除了本身的简洁之外，我们还对一些细节进行了优化：

1. 尽量减少跳转语句的出现：一种更加简单的方法是将 for 循环的 step 部分作为单独的 block 来出现，但是这样无疑会凭空多出一次跳转指令性导致程序运行效率降低。所以我们将 step 部分直接附加在主循环体的尾部。
2. 强类型的要求。为了防止类型自动转化导致的用户使用错误的类型而导致的隐秘的难以调试的错误，我们在进行表达式计算时要求所有参与运算的数据必须是同一类型，如果类型不匹配需要进行手动转化。

5.2 进阶主题

我们实现了一个不是很进阶的主题：类型推断

类型推断是指在进行变量定义是可以不显式指定变量的类型只进行初始化赋值。当编译器发现被定义变量没有声明类型时，会去通过初始化的数值的类型来自动推断该变量的类型。

第六章 测试结果

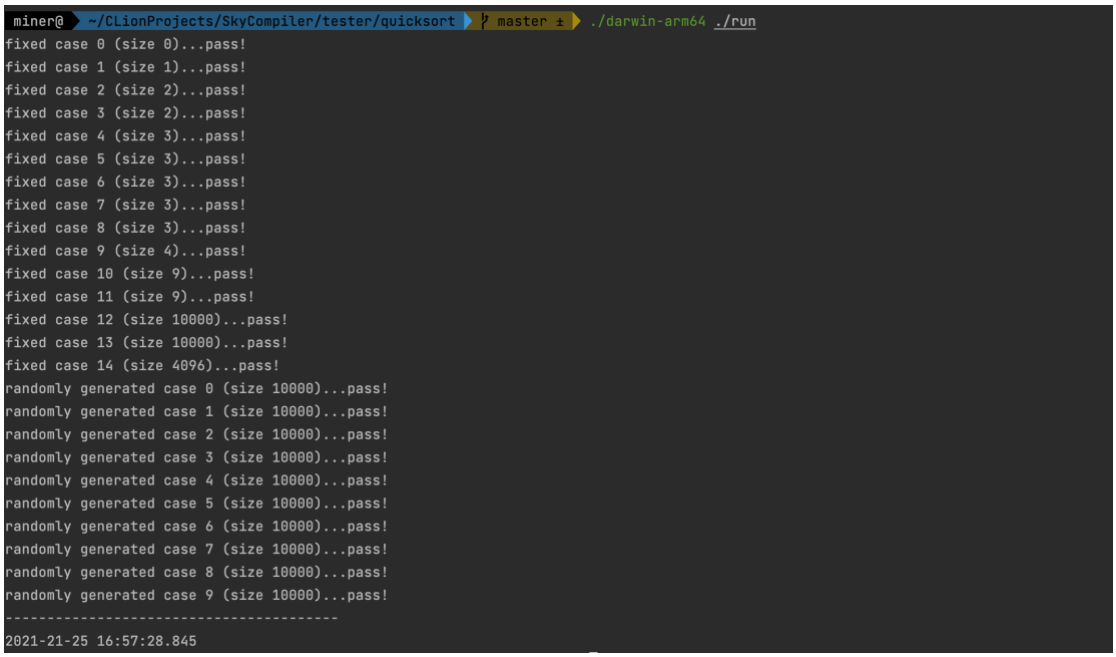
6.1 测试用例 1：快速排序

6.1.1 测试用例 1 代码

```
var a: int[10010];
var n: int;

func qsort(l : int, r : int) -> int {
	var i: int, j: int, mid: int, tmp: int;
	i = l;
	j = r;
	mid = a[(l + r) >> 1];
	while (i <= j) {
		while (a[i] < mid) { i = i + 1; }
		while (a[j] > mid) { j = j - 1; }
		if (i <= j) {
			tmp = a[i];
			a[i] = a[j];
			a[j] = tmp;
			i = i + 1;
			j = j - 1;
		}
	}
	//printf("%d %d %d %d@", l, r, i, j);
	//var k: int;
	//for k in [0, n, 1] {
	//	printf("%d ", a[k]);
	//}
	if (l < j) { qsort(l, j); }
	if (i < r) { qsort(i, r); }
	return 0;
}

func main() -> int {
	scanf("%d", &n);
	var i: int;
	for i in [0, n, 1] {
		scanf("%d", &a[i]);
	}
```

```
    qsort(0, n - 1);
    for i in [0, n, 1] {
        printf("%d@", a[i]);
    }
    return 0;
}
```

6.1.2 输入与输出



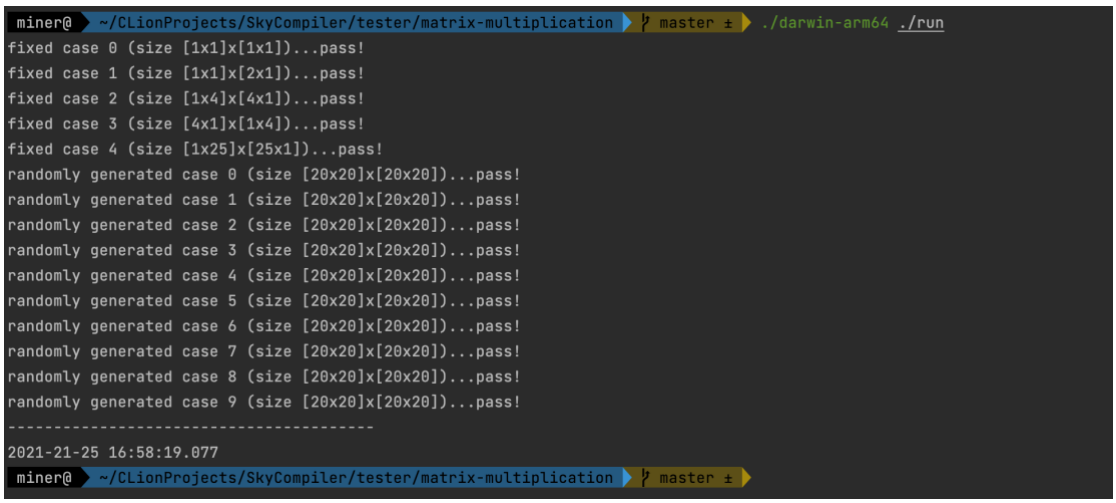
6.2 测试用例 2：矩阵乘法

6.2.1 测试用例 2 代码

```
var m_a: int, n_a: int;
var m_b: int, n_b: int;
var a: int[410], b: int[410];
var i: int, j: int, k: int;

func main() -> int {
    scanf("%d%d", &m_a, &n_a);
    for i in [0, m_a, 1] {
        for j in [0, n_a, 1] {
            scanf("%d", &a[i * n_a + j]);
```

```
            }
        }
        scanf("%d%d", &m_b, &n_b);
        for i in [0, m_b, 1] {
            for j in [0, n_b, 1] {
                scanf("%d", &b[i * n_b + j]);
            }
        }
        if (n_a != m_b) {
            printf("Incompatible Dimensions@");
            return 0;
        }
        var tmp: int;
        for i in [0, m_a, 1] {
            for j in [0, n_b, 1] {
                tmp = 0;
                for k in [0, n_a, 1] {
                    tmp = tmp + a[i * n_a + k] * b[k * n_b + j];
                }
                printf("%10d", tmp);
            }
            printf("@");
        }
        return 0;
}
```

6.2.2 输入与输出



6.3 测试用例 3：选课助手

6.3.1 测试用例 3 代码

```
var name: char[1000], pre: char[10000], grade: int, credit: int;
var sum_attempt: int, sum_complete: int, sum_remain: int, sum_grade: int;
var num_complete: int, num_remain: int;
var names_complete: char[10000], names_remain: char[10000];
var pres: char[100000];
var pre_name: char[1000];
var st_complete: int[10000], st_pres: int[10000], st_remain: int[10000];

func check(id: int) -> int {
    //printf("%d@", st);
    if (pres[st_pres[id]] == '\0') {
        return 1;
    }
    //printf("%d@", st);
    var tmp_len: int, top: int, orr: int, andd: int;
    var stack: int[5];
    tmp_len = 0;
    top = 0;
    orr = 0;
    andd = 0;
    var i: int, j: int, k: int;
    var flag: int;
    for i in [st_pres[id], st_pres[id+1], 1] {
        var ch: char;
        ch = pres[i];
        if (ch == ',' || ch == ';' || ch == '\0') {
            pre_name[tmp_len] = '\0';
            top = top + 1;
            stack[top] = 0;
            for j in [0, num_complete, 1] {
                flag = 1;
                for k in [st_complete[j], st_complete[j+1], 1] {
                    //printf("%c=?%c ", names_complete[k], pre_name[k -
st_complete[j]]);
                    if (names_complete[k] != pre_name[k - st_complete[j]]) {
                        flag = 0;
                        break;
                    }
                }
```

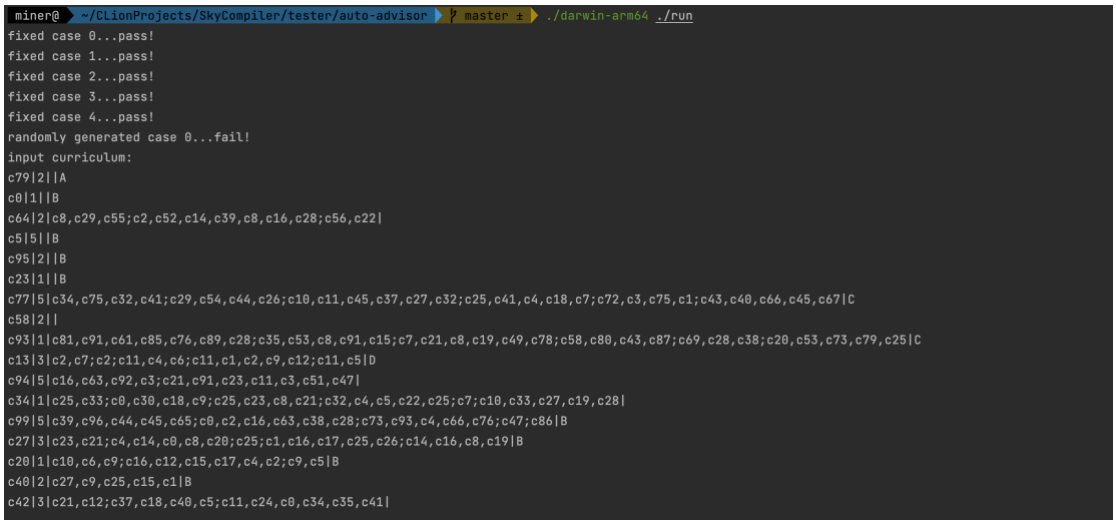
```
                //printf("%d@", flag);
                if (flag == 1) {
                    //printf("%d", j);
                    stack[top] = 1;
                    break;
                }
            }
            if (andd > 0) {
                if (stack[top - 1] == 1 && stack[top] == 1) {
                    stack[top - 1] = 1;
                } else {
                    stack[top - 1] = 0;
                }
                top = top - 1;
                andd = 0;
            }
            if (orr > 1) {
                if (stack[top - 1] == 1 || stack[top] == 1) {
                    stack[top - 1] = 1;
                } else {
                    stack[top - 1] = 0;
                }
                top = top - 1;
                orr = orr - 1;
            }
            if (ch == ',') {
                andd = andd + 1;
            }
            if (ch == ';') {
                orr = orr + 1;
            }
            if (ch == '\0') {
                if (orr > 0) {
                    if (stack[top - 1] == 1 || stack[top] == 1) {
                        stack[top - 1] = 1;
                    } else {
                        stack[top - 1] = 0;
                    }
                    top = top - 1;
                    orr = orr - 1;
                }
                break;
            }
            tmp_len = 0;
```

```
            } else {
                pre_name[tmp_len] = ch;
                tmp_len = tmp_len + 1;
            }
        }
        return stack[1];
}

func main() -> int {
        var i: int, j: int;
        while (1 > 0) {
            var len_name: int, len_pre: int, ch: char;
            var scanfRet:int, fuyi:int;
            scanfRet = scanf("%c", &ch);
            fuyi = -1;
            if (scanfRet == fuyi) { break; }
            var flag: int;
            flag = 1;
            while (ch == '\n') {
                scanfRet = scanf("%c", &ch);
                if (scanfRet == fuyi) { flag = 0; break; }
            }
            if (flag == 0) {
                break;
            }
            len_name = 0;
            while (ch != '|') {
                name[len_name] = ch;
                len_name = len_name + 1;
                scanf("%c", &ch);
            }
            name[len_name] = '\0';
            scanf("%d|", &credit);
            len_pre = 0;
            scanf("%c", &ch);
            while (ch != '|') {
                pre[len_pre] = ch;
                len_pre = len_pre + 1;
                scanf("%c", &ch);
            }
            pre[len_pre] = '\0';
            scanf("%c", &ch);
            grade = -1;
            if (ch == 'A') { grade = 4; }
```

```
        if (ch == 'B') { grade = 3; }
        if (ch == 'C') { grade = 2; }
        if (ch == 'D') { grade = 1; }
        if (ch == 'F') { grade = 0; }
        if (grade >= 0) {
            sum_grade = sum_grade + grade * credit;
            sum_attempt = sum_attempt + credit;
        }
        var st: int;
        if (grade > 0) {
            st = st_complete[num_complete];
            for i in [st, st+len_name+1, 1] {
                names_complete[i] = name[i - st];
            }
            sum_complete = sum_complete + credit;
            num_complete = num_complete + 1;
            st_complete[num_complete] = st + len_name + 1;
        } else {
            st = st_pres[num_remain];
            for i in [st, st+len_pre+1, 1] {
                pres[i] = pre[i - st];
            }
            st_pres[num_remain+1] = st+len_pre+1;
            st = st_remain[num_remain];
            for i in [st, st+len_name+1, 1] {
                names_remain[i] = name[i - st];
            }
            st_remain[num_remain+1] = st+len_name+1;
            sum_remain = sum_remain + credit;
            num_remain = num_remain + 1;
        }
    }
    var GPA: double;
    if (sum_attempt == 0) {
        printf("GPA: 0.0@");
    } else {
        var aa: int, bb: int, cc: int;
        aa = sum_grade / sum_attempt;
        bb = (sum_grade % sum_attempt) * 10 / sum_attempt;
        cc = (sum_grade % sum_attempt) * 100 / sum_attempt - bb * 10;
        //printf("%d %d %d %d %d@", aa, bb, cc, sum_grade, sum_attempt);
        if (cc >= 5) {
            bb = bb + 1;
            if (bb == 10) {
```

```
                    aa = aa + 1;
                    bb = 0;
                }
            }
            printf("GPA: %d.%d@", aa, bb);
        }
        printf("Hours Attempted: %d@", sum_attempt);
        printf("Hours Completed: %d@", sum_complete);
        printf("Credits Remaining: %d@", sum_remain);
        printf("@Possible Courses to Take Next@");
        var num: int;
        num = 0;
        for i in [0, num_remain, 1] {
            if (check(i) == 1) {
                num = num + 1;
                printf("    ");
                for j in [st_remain[i], st_remain[i+1]-1, 1] {
                    printf("%c", names_remain[j]);
                }
                printf("@");
            }
        }
        if (num == 0) {
            if (num_remain == 0) {
                printf("    None - Congratulations!@");
            } else {
            }
        }
        return 0;
}
```

6.3.2 输入与输出



注：因为助教提示该道题目的随机测试数据有问题，所以我们认为通过了前面 5 个 case 就是通过了这道题目。