高级语言源程序格式处理工具实验指导

一、词法分析说明：

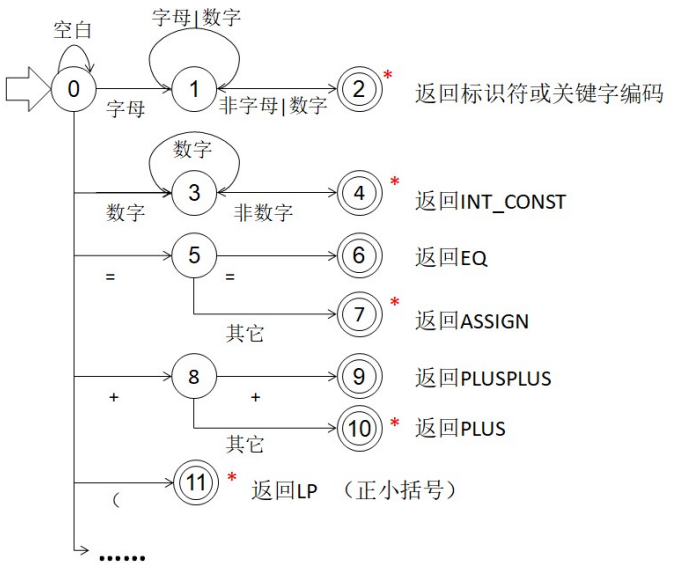
词法分析需要识别出五类单词，标识符、关键字、常量、运算符和定界符，词法分析每识别出一个单词，就可返回单词的编码。为唯一确定各单词的种类编码，可通过枚举类型定义各类单词的种类编号：

enum token_kind {ERROR_TOKEN, IDENT, INT_CONST,　FLOAT_CONST, CHAR_CONST, INT ,FLOAT,CHAR,IF,ELSE,.....EQ,ASSIGN, ...,LP,RP,.....　SEMI，COMMA，.....}

其中枚举常量 IDENT 是标识符符的种类编码，表示识别出来的单词是标识符，如识别出单词 abc，def 等标识符，就会返回 IDENT；枚举常量 INT_CONST 表示识别出来的是各种形式的整型常数，如 123；INT 表示识别出来的是关键字 int；.... ;LP,RP 分别表示左右括号，SEMI 表示分号，COMMA 表示逗号等等。通过这个枚举类型的定义，使用不同的枚举常量，即使用一个整数值表唯一地表示一个单词。

另外对有些单词，仅有种类编码是不够的，如标识符 abc，词法分析返回 IDENT，但标识符的字符串值 abc 需要保存在一个字符数组中 token_text，称为单词的自身值，token_text 是一个全局变量；同样 123，词法分析返回 INT_CONST，数字字符串 123 要保存在 token_text 中，以备后续处理。

词法分析的单词识别流程的过程状态转换图如下：



每次从状态 0 开始，从源程序文件中读取一个字符，可以到达下一个状态，当到达环形的状态（结束状态）时，表示成功的读取到了一个单词，返回单词的编码，单词自身值保存

在全局变量 token_text 中。结束状态上标有星号的，表示从源程序文件中多读取了一个字符，这个字符可能是下一个单词的一部分，需要退回到文件的输入缓冲区中。根据这个状态转换图，可以设计出如下词法分析的函数。每调用一次得到一个单词的种类码和自身值。

```
int   gettoken(源文件指针：fp)  {   // fp 也可以作为全局变量，该函数不使用参数
 初始化单词自身值 token_text 为空;
 while ((c=fgetc(fp))为空白符);     //过滤掉空白符号，如果考虑报错位置，对回车需要单独
                                    //处理，每次回车，设置一个行数计数器加 1
 if (c 是字母) {
      do { token_text+c➔token_text}while ((c=fgetc(fp))是字母或数字)     //拼标识符串
         ungetc(c,fp);     退回多读的字符到文件输入缓冲区
         标识符可能是关键字，需要判定并返回对应种类码，符号串在 token_text 中
         可以将所有关键字做成一个查找表，当标识符和某个关键字相等时，返回
         关键字的种类编码，否则返回 IDENT
         }
 if (c 是数字) {
         do {token_text+c➔token_text}while ((c=fgetc(fp))是数字)     //拼数字串
         ungetc(c,fp);     退回多读的字符
         数字串在 token_text 中，返回 INT_CONST。
         }
 switch （c）{
       case  '=':   c=fgetc(fp));
                    if (c=='=')   返回相等运算符编码 EQ;
                    ungetc(c,fp);
                    返回赋值运算符编码 ASSIGN;
                    …….
      default:   if (feof(fp))     return EOF;
                 else return ERROR_TOKEN; \\报错；错误符号
      }
 }
```

实验时，为验证词法分析的正确性，每调用一次该函数，显示一个单词的信息，直到返回值

为 EOF 为止。例如给定代码段：

int a；

a=10；

词法分析可显示单词信息：

单词类别 单词值

关键字 int

标识符 a

分号 ；

标识符 a

赋值号 =

整型常量 10

分号 ；

二、相关语法分析

语法分析，需要根据高级语言的语法规则分析程序的语法是否正确，如果正确，生成源程序的抽象语法树 AST。

语法分析过程中，需要逐个读取源程序中的单词，具体实现时，可以使用 2 种方式，一种是一次性的读取源程序文件的所有单词，得到一个单词的线性表，每个数据元素保存单词的种类码和自身值。单词的线性表即可采用顺序表，也可以用链表方式，这样语法分析需要单词时，直接从线性表中取单词；第二种方式是语法分析时，需要单词时，调用一次词法分析的函数，读取一个单词。后续的有关说明是按第二种方式进行介绍。

设 w 为全局变量，存放当前读入的单词种类编码，token_text 保存单词的自身值。errors 表示错误标记，一旦有错，释放抽象语法树全部结点的空间。

首先要清楚高级语言按巴克斯（BNF）范式定义的语法规则，下面定义了一个很简单的语法规则，实验时各位同学自行进行扩展语言定义，尽可能地接近 C 语言（或你感兴趣的某种高级语言）的语法规则：

<程序> ::=<外部定义序列>

<外部定义序列>::=<外部定义> <外部定义序列> | <外部定义>

<外部定义>::=<外部变量定义>| <函数定义>

<外部变量定义>::=<类型说明符> <变量序列> ;

<类型说明符>::= int | float | char

<变量序列>::=<变量> , <变量序列> | <变量>

<函数定义>::=<类型说明符> <函数名>（<形式参数序列>）<复合语句>

<形式参数序列>::=<形式参数> , <形式参数序列> | <空>

<形式参数>::=<类型说明符> 标识符

<复合语句>::={ <局部变量定义序列> <语句序列> }

<局部变量定义序列>::=<局部变量定义> <局部变量定义序列> | <空>

<局部变量定义>::=<类型说明符> <变量序列> ;

<语句序列>::=<语句><语句序列> | <空>

<语句>::= <表达式>; | return <表达式>;

| if （<表达式>）<语句>

| if （<表达式>）<语句> else <语句>

<表达式>::=<表达式> + <表达式> | <表达式> - <表达式> |<表达式> * <表达式>

|<表达式> / <表达式> | INT_CONST | IDENT | IDENT(<实参序列>)

|<表达式> == <表达式> |<表达式> != <表达式> |<表达式> > <表达式>

|<表达式> > <表达式> |<表达式> >= <表达式> |<表达式> < <表达式>

|<表达式> <= <表达式> | 标识符=<表达式>

<实参序列>::=<表达式> <实参序列> | <空>

根据这个语言的语法规则定义，给出了下面的测试程序样例,通过这个例子解析语法器的处理流程的设计,理解语法分析器所要完成的任务。

```
int i,j;
int fun(int a, float b)
{
int m;
if (a>b) m=a;
else m=b;
return m;
}
float x,y;
```

实验中使用的语法分析算法，在编译技术中称为递归下降分析法，大量的使用了递归算法的设计，一般情况下，每一个语法单位（尖括号括起的部分）对应一个子程序，实验时可灵活处理。例如<程序>、<外部定义序列>、<外部定义>、<外部变量说明>，<函数定义>，<语句>，<表达式>等等。

每个子程序根据其语法规则完成相应处理，例如对语句的语法规则：

<语句>::= <表达式>；　| return　<表达式>；
　　| if　（<表达式>）<语句>
　　| if　（<表达式>）<语句> else <语句>

语法单位<语句>对应的子程序，调用此子程序时，语句的第一个单词已经读入到了 w 中。由于有多种形式的语句，根据读入单词 w 的值，确定下一步处理什么样的语句，当读入的单词是 RETURN 时，处理返回语句，读入的单词是 IF 时，处理条件语句语句，其它情况表达式语句。

当处理返回语句时，接着调用语法单位<表达式>处理子程序，返回后，如当前读到的单词 w 是分号，则完成了返回语句的处理。其它条件语句，表达式语句类似处理。

下面就上述定义的语言的各个语法单位的处理程序进行说明。

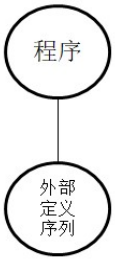
1. 语法单位<程序>的子程序

对于一个程序，按其语法定义：　　<程序> ::=<外部定义序列>

语法单位<程序>的子程序如下，完成的功能是生成一棵语法树，根指针指向的是一个外部定义序列的结点。

```
program(){
    w=gettoken();
    if ( ExtDefList() )  {程序语法正确，返回的语法树根结点指针，可遍历显示}
    else   有语法错误
}
```

该子程序执行后，得到的 AST 如下，程序结点的子树是一个外部定义序列。



……

2. 语法单位<外部定义序列>的子程序

语法单位<外部定义序列>的定义：

<外部定义序列>::=<外部定义> <外部定义序列> | <外部定义>

这是一个递归定义，该子程序处理一系列的外部定义，每个外部定义序列的结点，其第一个子树对应一个外部定义，第二棵子树对应后续的外部定义。

在一个源程序中，每次成功处理完一个外部定义后，如果遇到文件结束标记，则语法分析结束。调用此子程序，已经读入了一个外部定义的第一个单词到 w 中。

```
ExtDefList(){//处理外部定义序列，正确时，返回子树根结点指针，否则错误处理
    if (w==EOF) return NULL;
    生成一个外部定义序列结点 root
    ExtDef();      //处理一个外部定义，得到一棵子树，作为 root 的第一棵子树
    ExtDefList();  //得到的子树，作为 root 的第二棵子树
    return root;
}
```

3. 语法单位<外部定义>的子程序

此子程序完成一个外部定义的处理，调用此子程序时，已经读入了一个外部定义的第一个单词到 w 中。该子程序处理完后，刚好处理到外部定义的最后一个符号，后续单词还没读入。

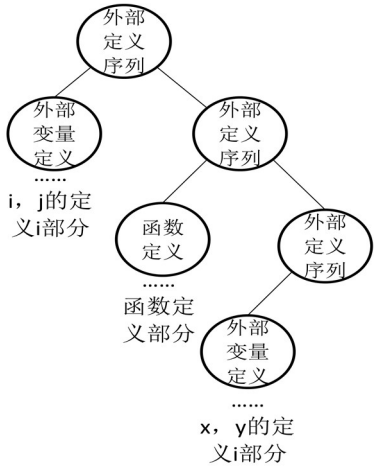
不管是外部变量定义，还是函数定义，第一个单词必须是类型关键字，第二个一定是标识符，只有读入第三个才可能区分，如果是小括号，就是函数的定义与声明，调用函数定义子程序，否则按外部变量的形式来处理，调用外部变量定义子程序。

语法树逻辑上是一棵多叉树，其物理结构，既可简单直观地采用孩子表示法，也可以采用孩子兄弟表示法等，实验时自行确定。一棵语法树中有各种类型的结点，为统一管理所有结点，定义结点类型时，需要使用共用体的概念，通过一个标记说明该结点包含的信息（类似广义表的结点类型），明确每个孩子或子树的含义。处理外部定义（函数或外部变量）的

处理流程可参考如下，这里 ASTTree 为抽象语法树结点指针类型：

```
ExtDef() {   //处理外部定义序列，正确时，返回子树根结点指针，否则返回 NULL
    if (w 不是类型关键字)   报错并返回 NULL
    保存类型说明符
    w=gettoken();
    if (w!=IDENT )  报错并返回 NULL
    strcpy(tokenText0,tokenText);   //  保存第一个变量名或函数名到 tokenText0
    w=gettoken();
    if (w!=LP) p=ExtVar();            //调用外部变量定义子程序
    else          p=FuncDef();          //调用函数定义子程序
    如果返回值 p 非空，表示成功完成一个外部定义的处理，返回 p
    }
```

对测试用例进行语法分析，当外部定义序列，外部定义(包括外部变量、函数定义)都处理完后，得到的抽象语法树的逻辑结构如下图显示，可见包含一系列的外部定义序列的结点，每个结点的第一棵子树分别对应一个外部变量的定义或函数定义。外部变量的定义或函数定义的处理在后面介绍。



4. 语法单位<外部变量定义>子程序

调用此子程序时，**外部变量类型**和**第一个变量名**的单词已经读入，变量名保存在 tokenText0 中，这时外部变量定义的处理流程可参考如下。

```
status   ExtVarDef() {
```

root=生成外部变量定义结点；

根据已读入的外部变量的类型，生成外部变量类型结点，作为 root 的第一个孩子

p=生成外部变量序列结点，p 作为 root 的第二个孩子，每个外部变量序列结点会对应一个变量名

由保存在 tokenText0 的第一个变量名生成一个变量名结点，作为 p 的第一个孩子；

w=gettoken();　　//开始识别后续的变量名

while（1） { //每个外部变量序列结点的第一个孩子对应一个变量

if （w！='，'||w！='；'） 报错，释放 root 为根的全部结点，返回空指针

if （ w==';'）{

w=gettoken();

返回根结点 root；

}

w=gettoken();

if （ w 不是标识符）报错，释放 root 为根的全部结点，返回空指针

生成外部变量序列结点，根指针为 q，作为 p 的第二个孩子，插入到树中。

p=q；

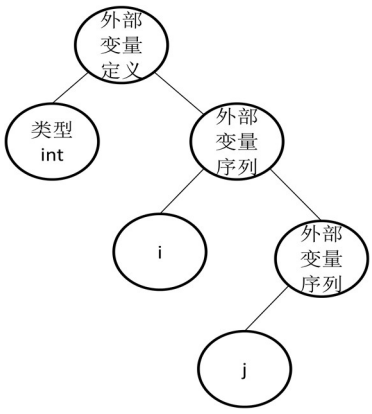
根据 tokenText 的变量名生成一个变量结点，作为 p 的第一个孩子；

w=gettoken();

}

}

对测试用例的第一行，得到的子树如下图。



实现时也可以按照语法规则的定义，将<变量序列>这个语法成分单独编制一个子程序 ExtVarList。这时算法流程如下：

ExtVarList(){　　// 初始时，tokenText0 保存了第一个变量名

root=生成外部变量序列结点

由保存在 tokenText0 的第一个变量名生成一个变量名结点，作为 root 的第一个孩子；

w=gettoken();　　//开始识别后续的变量名

if （w！='，'||w！='；'） 报错，释放 root 为根的全部结点，返回空指针

if （ w==';'）{

w=gettoken();

返回根结点 root；

}

w=gettoken();

if （ w 不是标识符）报错，释放 root 为根的全部结点，返回空指针

将变量名 w 保存在 tokenText0 中；

调用 ExtVarList，得到的子树作为 root 的第二棵字数，返回 root；

}

ExtVarDef() {

root=生成一个外部变量定义结点；

根据已读入的外部变量的类型，生成外部变量类型结点，作为 root 的第一个孩子

调用 ExtVarList，得到的子树根作为 root 的第二个子树

返回 root；

}

5. 语法单位<函数定义>子程序

调用此子程序时，函数返回值类型和函数名，正小括号的单词已经读入，函数名保存在 tokenText0 中，这时函数定义的处理流程可参考如下：

funcDef（） {

生成函数定义结点 root；

生成返回值类型结点，作为 root 的第一个孩子

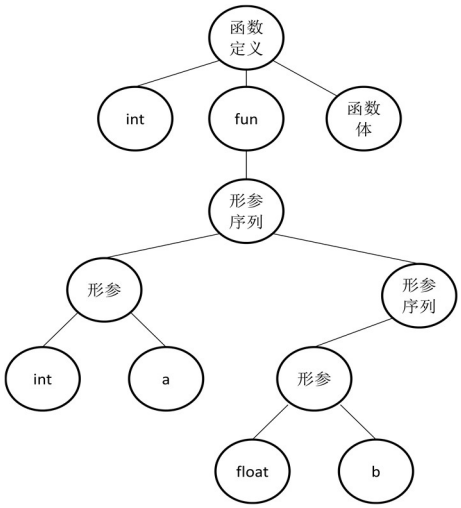
处理参数部分到反小括号结束，调用形参子程序，得到参数部分的子树根指针，无参函数得到 NULL，该子树作为 root 的第二棵子树；

读入符号，如果分号，就是函数原型声明，函数体子树为空；正大括号，则调用函数体（复合语句）子程序，得到函数体子树根指针，其它符号表示有错。得到的函数体子树作为 root 的第三棵子树

返回 root；

}

对形参的处理，可参照外部变量的定义子程序。对测试用例处理完函数后，得到抽象语法树的子树如下图。



6. 语法单位<复合语句>子程序

调用此子程序时，已经读入了单词{，继续处理时，遇到遇到}，结束复合语句，算法流程如下：

root=生成复合语句结点；注意其中局部变量说明和语句序列都可以为空

w=gettoken();

if （w 是类型关键字）{ 调用处理局部变量说明序列子程序，

得到返回的子树根结点作为 root 的第一个孩子}

else { 无局部变量说明，root 的第一个孩子设置为空指针}

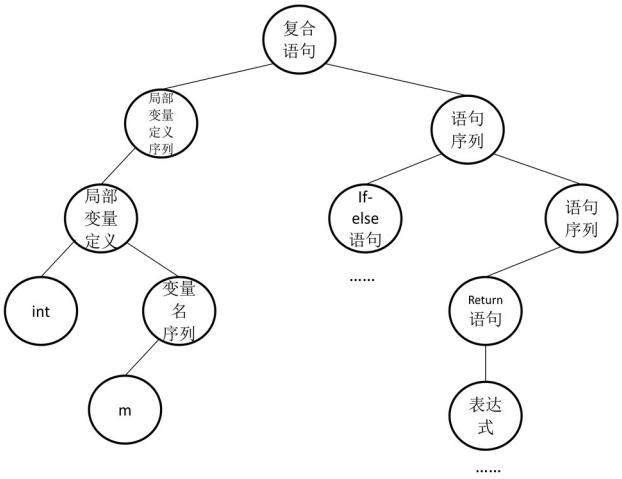
调用处理语句序列子程序，返回子树根结点指针，作为 root 的第 2 个孩子

if （w 不是反大括号} ）返回空指针，报错并释放结点

w=gettoken();

返回复合语句的子树根指针。

对测试用例处理完函数体后，得到抽象语法树的子树如下图。



7. 语法单位<语句序列>子程序

要考虑语句序列为空的情况

初始化子树，根指针 root=NULL；

调用处理一条语句的子程序；返回其子树根指针 r1；

if （r1==NULL）//没有分析到 1 条语句，errors>0 时处理错误，

否则表示语句序列已结束

返回 NULL

else { 生成语句序列的结点 root

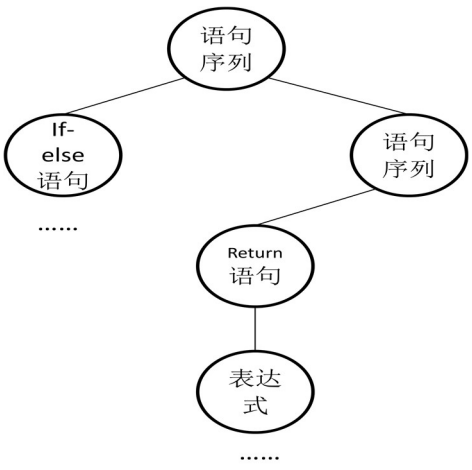
root->第 1 孩子=r1;

root->第 2 孩子=递归调用处理语句序列子程序后的返回值；

返回 root；

}

对测试用例处理完函数体复合语句的语句序列，得到的抽象语法树的子树如下图。



8　语法单位<语句>的子程序

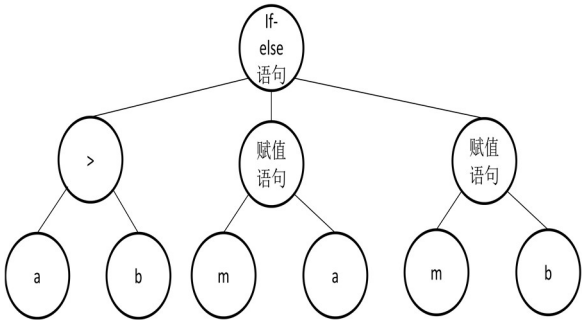
调用此子程序时，语句的第一个单词已经读入，处理一条语句时，根据这条语句的第一个单词，确定处理什么类型的语句。如遇到关键字 if，则处理条件语句，首先处理 if （表达式） 语句 1，完成后，再读入下一个单词，如果是 else，则表示是 if-then-else 语句，否则就是 if-then 语句，注意体会是否能正确处理条件语句嵌套的二义性问题。

此子程序调用结束时，会读入下一条语句的第一个单词到 w 中，以便后续处理。

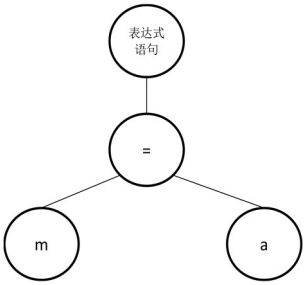
```
statement（）{
    switch （w）{
        case  IF：//分析条件语句
                w=gettoken();
                if (w 不是左小括号） 报错并返回空
                调用处理表达式的子程序（结束符号为反小括号），正确时得到条件表达
                式子树结点指针
                调用处理一条语句的子程序，得到 IF 子句的子树根指针。
               if（w==ELSE）{调用处理一条语句的子程序，得到 IF 子句的子树根指针。
                                生成 IF-ELSE 结点，下挂条件、IF 子句、ELSE 子句 3 棵子树}
               else 生成 IF 结点，下挂条件、IF 子句 2 棵子树
        case  { ：调用处理复合语句子程序,返回得到的子树根指针
        case  WHILE：.....
        case  (：          //各种表达式语句，含赋值等，形式为表达式以分号结束
        case  标识符：
        case  常数：
                调用表达式处理子程序（结束符号为分号）；
                正确时，w=gettoken();  返回表达式语句子树的根结点指针
        case  }: //语句序列结束符号，如果语言支持 switch 语句，
                                        结束符号还会有 case 和 default
                w=gettoken();
                return NULL；
        default:  errors+=1，报错并返回 NULL；
        }
```

}

测试用例中条件语句的抽象语法树形式如下图所示。



其中赋值语句部分也可以采用如下形式，具体采用哪一种，可自行选择。



9. 语法单位<表达式>子程序

考虑表达式结束符号，处理表达式语句时以分号结束、，作为条件表达式时，反小括号）结束。该子程序处理完后，有 2 种情况，一是表达式有语法错误，这是，可终止语法分析程序的运行并报错，二是正确时刚好处理到表达式结束符号，后续单词还没读入。

一个正确的表达式连接上一个结束符号肯定不是正确的表达式，如：1+2）或 1+2；。这样当分析一个表达式遇到错误时，如果刚读入的符号正好和结束符号相同，且前面分析的部分正好也是一个完整表达式，就表示表达式语法正确，否则表达式是真正意义上的语法错误。

表达式的语法处理，可借鉴与数据结构第 3 章的表达式求值，注意体会运算符优先关系表中的运算符的优先关系和结合性。增加了赋值、关系运算符后的运算符的优先关系表如下。剩下没有列出的运算符，如逻辑与，逻辑或，可以在理解这张表的基础上，自行增加上去。

	+	-	*	/	(	)	=赋值	大小于	==和！=	#
+	>	>	<	<	<	>		>	>	>
-	>	>	<	<	<	>		>	>	>

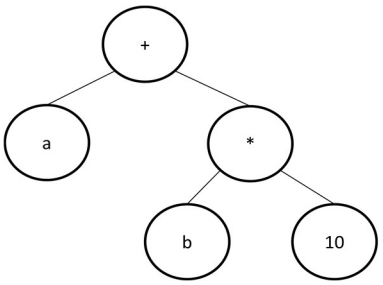
*	>	>	>	>	<	>		>	>	>
/	>	>	>	>	<	>		>	>	>
(	<	<	<	<	<	=		>	>	>
)	>	>	>	>	>			>	>	>
=赋值	<	<	<	<	<		<	<	<	>
大小于	<	<	<	<	<	>		>	>	>
==和！=	<	<	<	<	<	>		<	>	>
#	<	<	<	<	<		<	<	<	=

每当遇到一个操作数，生成一个结点，将结点指针进操作数栈，每当需要处理一个运算符，生成运算符的结点，把操作数的结点作为该结点的孩子。算法流程可参考如下：

```
结点指针类型   exp(int endsym)    //表达式结束符号 endsym 可以是分号，如表达式语句，
                                  //可以是反小括号，作为条件时使用
{   //调用该算法时，在调用者已经读入了第一个单词在 w 中
定义运算符栈  op;并初始化，将起止符#入栈
定义操作数栈 opn，元素是结点的指针
错误标记 error 设置为 0
while ( (w!=# || gettop(op)!=#) && !error )   //当运算符栈栈顶不是起止符号，并没有错误时
{
    if (w 是标识符或常数等操作数时)
            {   根据 w 生成一个结点，结点指针进栈 opn,   w=gettoken();}
    else   if (w 是运算符)
            switch (precede[gettop(op)][w]) {
                case '<': push(op,w);w=gettoken();break;
                case '=':if (!pop(op,t)) error++; w=gettoken();break;     //去括号
                case '>':if (!pop(opn,t2)) error++;
                          if (!pop(opn,t1)) error++;
                          if (!pop(op,t)) error++;
                         根据运算符栈退栈得到的运算符 t 和操作数的结点指针 t1 和 t2，
```

```
                    完成建立生成一个运算符的结点，结点指针进栈 opn
                    break;
                default: if (w==endsym) w=BEGIN_END; //遇到结束标记），w 被替换成#
                     else error=1;
            }
          else if (w==endsym) w=BEGIN_END；//遇到结束标记分号，w 被替换成#
               else error=1;
}
if (操作数栈只有一个结点指针&& gettop(op)==# &&  无错误)
          return 操作数栈唯一的这个结点指针;      //成功返回表达式语法树的根结点指针
else    return NULL;                          //表达式分析有错
}
```

例如表达式语句 a+b*10；其表达式部分的抽象语法树如下图所示。作为表达式语句，可以考虑再增加一个类型为表达式语句的结点，其孩子指针指向该子树根结点。如前面**语法单位<语句>的子程序**部分所述。



抽象语法树逻辑上是一棵多叉树，树中各种类型的结点混合在一起，为了区分各结点类型，正确访问各结点的属性，在定义树结点时，需要同时采用共用体与结构类型，来定义树结点的类型。

三、语法树的显示与程序的格式化处理

综上所述，可构造出一个源程序的抽象语法树，采用先根遍历的次序，显示抽象语法树，要求能很清晰的体现源程序个语法单位和抽象语法树的对应关系，能由抽象语法树方便地还原出源程序，抽象语法树的显示可参考下图。

同时通过对抽象语法树的遍历，生成风格统一的格式化缩进编排的源程序文件，具体格式可上网查阅相关资料，自行认定一种规范，参考如下。

```
int i,j;
int fun(int a, float b)
{
    int m;
    if (a>b)
        m=a;
    else
        m=b;
    return m;
}
float x,y;
```

参考文献

[1] 王生原，董渊，张素琴，吕映芝等. 编译原理（第 3 版）. 北京：清华大学出版社. 前 4 章

[2] 严蔚敏等. 数据结构(C 语言版). 清华大学出版社