

第四章 语法分析

自顶向下分析概述

哈尔滨工业大学 陈鄞



自顶向下的分析 (*Top-Down Parsing*)

- 从分析树的顶部（根节点）向底部（叶节点）方向构造分析树
- 可以看成是从文法开始符号 S 推导出词串 w 的过程

➤ 例

文法

① $E \rightarrow E + E$

② $E \rightarrow E * E$

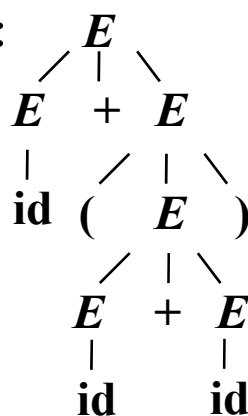
③ $E \rightarrow (E)$

④ $E \rightarrow \text{id}$

输入

$\text{id} + (\text{id} + \text{id})$

分析树:



推导过程: $E \Rightarrow E + E$

$\Rightarrow E + (E)$

$\Rightarrow E + (E + E)$

$\Rightarrow E + (\text{id} + E)$

$\Rightarrow \text{id} + (\text{id} + E)$

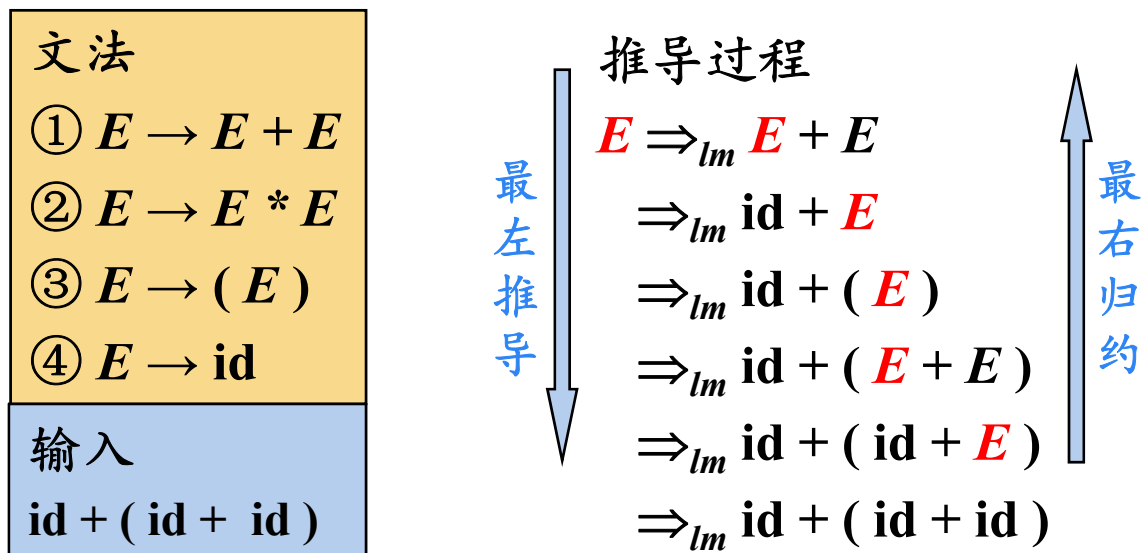
$\Rightarrow \text{id} + (\text{id} + \text{id})$

- 每一步推导中，都需要做两个选择
 - 替换当前句型中的哪个非终结符
 - 用该非终结符的哪个候选式进行替换

最左推导 (Left-most Derivation)

➤ 在**最左推导**中，总是选择每个句型的最左**非终结符**进行替换

➤ 例



➤ 如果 $S \Rightarrow_{lm}^* \alpha$ ，则称 α 是当前文法的最左句型 (left-sentential form)

最右推导 (Right-most Derivation)

- 在**最右推导**中，总是选择每个句型的最右**非终结符**进行替换

例

文法
① $E \rightarrow E + E$
② $E \rightarrow E * E$
③ $E \rightarrow (E)$
④ $E \rightarrow \text{id}$
输入
$\text{id} + (\text{id} + \text{id})$

推导过程

$$\begin{aligned} E &\Rightarrow_{rm} E + E \\ &\Rightarrow_{rm} E + (E) \\ &\Rightarrow_{rm} E + (E + E) \\ &\Rightarrow_{rm} E + (E + \text{id}) \\ &\Rightarrow_{rm} E + (\text{id} + \text{id}) \\ &\Rightarrow_{rm} \text{id} + (\text{id} + \text{id}) \end{aligned}$$

最右推导 (左箭头) 最左归约 (右箭头)

- 在自底向上的分析中，总是采用最左归约的方式，因此把**最左归约**称为**规范归约**，而**最右推导**相应地称为**规范推导**

最左推导和最右推导的唯一性

$$E \Rightarrow E + E$$

$$\Rightarrow E + (E)$$

$$\Rightarrow E + (E + E)$$

$$\Rightarrow E + (\text{id} + E)$$

$$\Rightarrow \text{id} + (\text{id} + E)$$

$$\Rightarrow \text{id} + (\text{id} + \text{id})$$

$$E \Rightarrow E + E$$

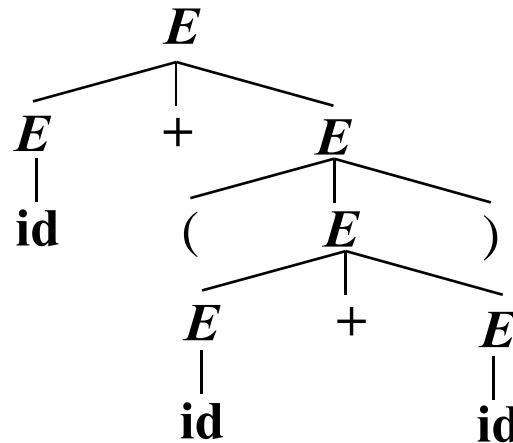
$$\Rightarrow \text{id} + E$$

$$\Rightarrow \text{id} + (E)$$

$$\Rightarrow \text{id} + (E + E)$$

$$\Rightarrow \text{id} + (E + \text{id})$$

$$\Rightarrow \text{id} + (\text{id} + \text{id})$$



$$E \Rightarrow_{lm} E + E$$

$$\Rightarrow_{lm} \text{id} + E$$

$$\Rightarrow_{lm} \text{id} + (E)$$

$$\Rightarrow_{lm} \text{id} + (E + E)$$

$$\Rightarrow_{lm} \text{id} + (\text{id} + E)$$

$$\Rightarrow_{lm} \text{id} + (\text{id} + \text{id})$$

$$E \Rightarrow_{rm} E + E$$

$$\Rightarrow_{rm} E + (E)$$

$$\Rightarrow_{rm} E + (E + E)$$

$$\Rightarrow_{rm} E + (E + \text{id})$$

$$\Rightarrow_{rm} E + (\text{id} + \text{id})$$

$$\Rightarrow_{rm} \text{id} + (\text{id} + \text{id})$$

自顶向下的语法分析采用最左推导方式

- 总是选择每个句型的最左非终结符进行替换
- 根据输入流中的下一个终结符，选择最左非终结符的一个候选式

例

➤ 文法

$$\textcircled{1} E \rightarrow T E'$$

$$\textcircled{2} E' \rightarrow + T E' \mid \varepsilon$$

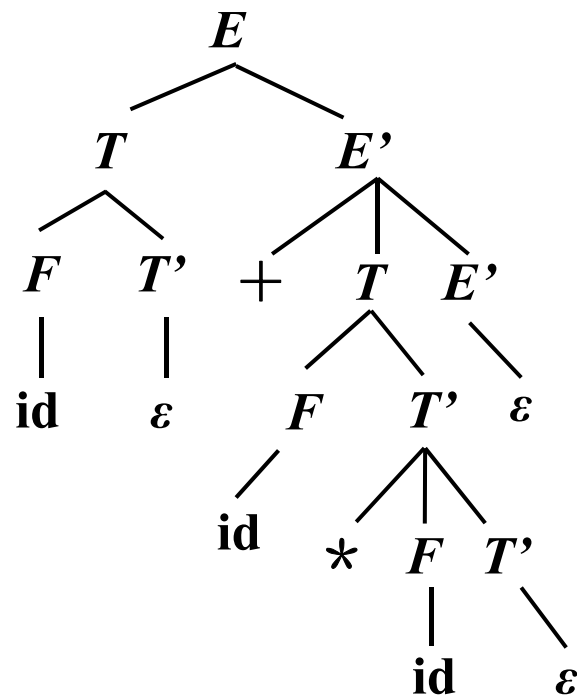
$$\textcircled{3} T \rightarrow F T'$$

$$\textcircled{4} T' \rightarrow * F T' \mid \varepsilon$$

$$\textcircled{5} F \rightarrow (E) \mid \text{id}$$

➤ 输入

id + id * id
↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑



自顶向下语法分析的通用形式

➤ 递归下降分析 (*Recursive-Descent Parsing*)


- 由一组过程组成，每个过程对应一个非终结符
- 从文法开始符号 S 对应的过程开始，其中递归调用文法中其它非终结符对应的过程。如果 S 对应的过程体恰好扫描了整个输入串，则成功完成语法分析

```
void A() {  
1)  选择一个 $A$ 产生式,  $A \rightarrow X_1 X_2 \dots X_k$  ;  
2)  for (  $i = 1$  to  $k$  ) {  
3)      if (  $X_i$  是一个非终结符号 )  
4)          调用过程  $X_i()$  ;  
5)      else if (  $X_i$  等于当前的输入符号  $a$  )  
6)          读入下一个输入符号 ;  
7)      else /* 发生了一个错误 */ ;  
    }  
}
```

可能需要回溯(*backtracking*),
导致效率较低

预测分析 (*Predictive Parsing*)

- 预测分析是递归下降分析技术的一个特例，通过在输入中向前看固定个数（通常是一个）符号来选择正确的 A -产生式。
- 可以对某些文法构造出向前看 k 个输入符号的预测分析器，该类文法有时也称为 $LL(k)$ 文法类
- 预测分析不需要回溯，是一种确定的自顶向下分析方法




第四章 语法分析

自顶向下分析概述

哈尔滨工业大学 陈鄞





第四章 语法分析

文法转换

哈尔滨工业大学 陈鄞



问题1

➤ 例

➤ 文法 G

$$S \rightarrow aAd \mid aBe$$

$$A \rightarrow c$$

$$B \rightarrow b$$

➤ 输入

$a \ b \ c$



同一非终结符的多个候选式存在
共同前缀，将导致回溯现象

问题2

➤ 例

➤ 文法 G

$$E \rightarrow E + T \mid E - T \mid T$$

$$T \rightarrow T * F \mid T / F \mid F$$

$$F \rightarrow (E) \mid \text{id}$$

$$E \Rightarrow E + T$$

$$\Rightarrow E + T + T$$

$$\Rightarrow E + T + T + T$$

$$\Rightarrow \dots$$

➤ 输入

id + id * id



左递归文法会使递归下降分析器陷入无限循环

含有 $A \rightarrow A\alpha$ 形式产生式的文法称为是直接左递归的 (immediate left recursive)

如果一个文法中有一个非终结符 A 使得对某个串 α 存在一个推导 $A \Rightarrow^+ A\alpha$ ，那么这个文法就是左递归的

经过两步或两步以上推导产生的左递归称为是间接左递归的

消除直接左递归

$$\begin{array}{l}
 A \rightarrow A\alpha \mid \beta (\alpha \neq \varepsilon, \beta \text{ 不以 } A \text{ 开头}) \\
 \downarrow \\
 A \rightarrow \beta A' \\
 A' \rightarrow \alpha A' \mid \varepsilon
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 r = \beta\alpha^* \\
 A \Rightarrow A\alpha \\
 \Rightarrow A\alpha\alpha \\
 \Rightarrow A\alpha\alpha\alpha \\
 \dots \\
 \Rightarrow A\alpha \dots \alpha \\
 \Rightarrow \beta \alpha \dots \alpha
 \end{array}$$

事实上，这种消除过程就是把左递归转换成了右递归

➤ 例

$$\begin{array}{l}
 E \rightarrow E + T \mid T \\
 T \rightarrow T * F \mid F \\
 F \rightarrow (E) \mid \text{id}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 E \rightarrow T E' \\
 E' \rightarrow + T E' \mid \varepsilon \\
 T \rightarrow F T' \\
 T' \rightarrow * F T' \mid \varepsilon \\
 F \rightarrow (E) \mid \text{id}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 A' \Rightarrow \alpha A' \\
 \Rightarrow \alpha\alpha A' \\
 \Rightarrow \alpha\alpha\alpha A' \\
 \dots \\
 \Rightarrow \alpha \dots \alpha A' \\
 \Rightarrow \alpha \dots \alpha
 \end{array}$$

消除直接左递归的一般形式

$$A \rightarrow A \alpha_1 \mid A \alpha_2 \mid \dots \mid A \alpha_n \mid \beta_1 \mid \beta_2 \mid \dots \mid \beta_m$$

$(\alpha_i \neq \varepsilon, \beta_j \text{ 不以 } A \text{ 开头})$



$$A \rightarrow \beta_1 A' \mid \beta_2 A' \mid \dots \mid \beta_m A'$$

$$A' \rightarrow \alpha_1 A' \mid \alpha_2 A' \mid \dots \mid \alpha_n A' \mid \varepsilon$$

消除左递归是要付出代价的——引进了一些非终结符和 ε 产生式

消除间接左递归

➤ 例

$$S \rightarrow A a \mid b$$

$$\begin{aligned} S &\Rightarrow Aa \\ &\Rightarrow Sda \end{aligned}$$

$$A \rightarrow A c \mid S d \mid \varepsilon$$

➤ 将 S 的定义代入 A -产生式，得：

$$A \rightarrow A c \mid A a d \mid b d \mid \varepsilon$$

➤ 消除 A -产生式的直接左递归，得：

$$A \rightarrow b d A' \mid A'$$

$$A' \rightarrow c A' \mid a d A' \mid \varepsilon$$

消除左递归算法

- 输入：不含循环推导（即形如 $A \Rightarrow^+ A$ 的推导）和 ε -产生式的文法 G
- 输出：等价的无左递归文法
- 方法：

- 1) 按照某个顺序将非终结符号排序为 A_1, A_2, \dots, A_n .
- 2) for (从1到n的每个 i) {
- 3) for (从1到 $i-1$ 的每个 j) {
- 4) 将每个形如 $A_i \rightarrow A_j \gamma$ 的产生式替换为产生式组 $A_i \rightarrow \delta_1 \gamma \mid \delta_2 \gamma \mid \dots \mid \delta_k \gamma$,
 其中 $A_j \rightarrow \delta_1 \mid \delta_2 \mid \dots \mid \delta_k$, 是所有的 A_j 产生式
- 5) }
- 6) 消除 A_i 产生式之间的立即左递归
- 7) }

提取左公因子 (*Left Factoring*)

➤ 例

➤ 文法 G

$$\text{➤ } S \rightarrow aAd \mid aBe$$

$$\text{➤ } A \rightarrow c$$

$$\text{➤ } B \rightarrow b$$



➤ 文法 G'

$$\text{➤ } S \rightarrow a S'$$

$$\text{➤ } S' \rightarrow Ad \mid Be$$

$$\text{➤ } A \rightarrow c$$

$$\text{➤ } B \rightarrow b$$

通过改写产生式来推迟决定，
等读入了足够多的输入，获得
足够信息后再做出正确的选择

提取左公因子算法

- 输入：文法 G
- 输出：等价的提取了左公因子的文法
- 方法：

对于每个非终结符 A ，找出它的两个或多个选项之间的最长公共前缀 α 。如果 $\alpha \neq \varepsilon$ ，即存在一个非平凡的 (*nontrivial*) 公共前缀，那么将所有 A -产生式


$$A \rightarrow \alpha \beta_1 | \alpha \beta_2 | \dots | \alpha \beta_n | \gamma_1 | \gamma_2 | \dots | \gamma_m$$

替换为

$$A \rightarrow \alpha A' | \gamma_1 | \gamma_2 | \dots | \gamma_m$$

$$A' \rightarrow \beta_1 | \beta_2 | \dots | \beta_n$$

其中， γ_i 表示所有不以 α 开头的产生式体； A' 是一个新的非终结符。不断应用这个转换，直到每个非终结符的任意两个产生式体都没有公共前缀为止




第四章 语法分析

文法转换

哈尔滨工业大学 陈鄞





第四章 语法分析

LL(1) 文法

哈尔滨工业大学 陈鄞



S_文法

假如允许S_文法包含 ϵ 产生式，
将会产生什么问题？

- 预测分析法的工作过程。
 - 从文法开始符号出发，在每一步推导过程中根据当前句型的最左非终结符 A 和当前输入符号 a ，选择正确的 A -产生式。为保证分析的确定性，选出的候选式必须是唯一的。
- S_文法（简单的确定性文法，*Korenjak & Hopcroft*, 1966）

每个产生式的右部都以终结符开始

同一非终结符的各个候选式的首终结符都不同

S_文法不含 ϵ 产生式

例

➤ 文法 <ul style="list-style-type: none"> ① $S \rightarrow aBC$ ② $B \rightarrow bC$ ③ $B \rightarrow dB$ ④ $B \rightarrow \varepsilon$ ⑤ $C \rightarrow c$ ⑥ $C \rightarrow a$ ⑦ $D \rightarrow e$ 	➤ 输入 $a \ d \ a$ $a \ d \ e$ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑
	➤ 推导 S S $\Rightarrow aBC$ $\Rightarrow aBC$ $\Rightarrow adBC$ $\Rightarrow adBC$ $\Rightarrow adC$ $\Rightarrow adC$ $\Rightarrow ada$

可以紧跟 B 后面出现的终结符: c 、 a

➤ 什么时候使用 ε 产生式?

➤ 如果当前某非终结符 A 与当前输入符 a 不匹配时, 若存在 $A \rightarrow \varepsilon$, 可以通过检查 a 是否可以出现在 A 的后面, 来决定是否使用产生式 $A \rightarrow \varepsilon$ (若文法中无 $A \rightarrow \varepsilon$, 则应报错)

非终结符的后继符号集

➤ 非终结符 A 的后继符号集

➤ 可能在某个句型中紧跟在 A 后边的终结符 a 的集合，记为 $FOLLOW(A)$

$$FOLLOW(A) = \{a \mid S \Rightarrow^* \alpha A a \beta, a \in V_T, \alpha, \beta \in (V_T \cup V_N)^*\}$$

例

(1) $S \rightarrow aBC$

(2) $B \rightarrow bC$ ← 输入 b

(3) $B \rightarrow dB$ ← d

(4) $B \rightarrow \varepsilon$ ← $\{a, c\}$

(5) $C \rightarrow c$

(6) $C \rightarrow a$

$$FOLLOW(B) = \{a, c\}$$

如果 A 是某个句型的的最右符号，
则将结束符“\$”添加到 $FOLLOW(A)$ 中

产生式的可选集

- 产生式 $A \rightarrow \beta$ 的可选集是指可以选用该产生式进行推导时对应的输入符号的集合，记为 $SELECT(A \rightarrow \beta)$
 - $SELECT(A \rightarrow a\beta) = \{a\}$
 - $SELECT(A \rightarrow \varepsilon) = FOLLOW(A)$
- q _文法
 - 每个产生式的右部或为 ε ，或以终结符开始
 - 具有相同左部的产生式有不相交的可选集

q _文法不含右部以非终结符打头的产生式

串首终结符集

➤ 串首终结符

- 串首第一个符号，并且是终结符。简称首终结符
- 给定一个文法符号串 α ， α 的串首终结符集 $FIRST(\alpha)$ 被定义为可以从 α 推导出的所有串首终结符构成的集合。如果 $\alpha \Rightarrow^* \varepsilon$ ，那么 ε 也在 $FIRST(\alpha)$ 中
 - 对于 $\forall \alpha \in (V_T \cup V_N)^+$, $FIRST(\alpha) = \{ a \mid \alpha \Rightarrow^* a\beta, a \in V_T, \beta \in (V_T \cup V_N)^* \}$;
 - 如果 $\alpha \Rightarrow^* \varepsilon$ ，那么 $\varepsilon \in FIRST(\alpha)$
- 产生式 $A \rightarrow \alpha$ 的可选集 $SELECT$
 - 如果 $\varepsilon \notin FIRST(\alpha)$ ，那么 $SELECT(A \rightarrow \alpha) = FIRST(\alpha)$
 - 如果 $\varepsilon \in FIRST(\alpha)$ ，那么 $SELECT(A \rightarrow \alpha) = (FIRST(\alpha) - \{\varepsilon\}) \cup FOLLOW(A)$

$LL(1)$ 文法

- 文法 G 是 $LL(1)$ 的，当且仅当 G 的任意两个具有相同左部的产生式 $A \rightarrow \alpha \mid \beta$ 满足下面的条件：
 - 如果 α 和 β 均不能推导出 ε ，则 $FIRST(\alpha) \cap FIRST(\beta) = \Phi$
 - α 和 β 至多有一个能推导出 ε
 - 如果 $\beta \Rightarrow^* \varepsilon$ ，则 $FIRST(\alpha) \cap FOLLOW(A) = \Phi$ ；
如果 $\alpha \Rightarrow^* \varepsilon$ ，则 $FIRST(\beta) \cap FOLLOW(A) = \Phi$ ；


同一非终结符的各个产生式的可选集互不相交

可以为 $LL(1)$ 文法构造预测分析器

LL(1)文法

- 文法 G 是 **LL(1)** 的，当且仅当 G 的任意两个具有相同左部的产生式 $A \rightarrow \alpha \mid \beta$ 满足下面的条件：
 - 如果 α 和 β 均不能推导出 ε ，则 $FIRST(\alpha) \cap FIRST(\beta) = \Phi$
 - α 和 β 至多有一个能推导出 ε
 - 如果 $\beta \Rightarrow^* \varepsilon$ ，则 $FIRST(\alpha) \cap FOLLOW(A) = \Phi$ ；
如果 $\alpha \Rightarrow^* \varepsilon$ ，则 $FIRST(\beta) \cap FOLLOW(A) = \Phi$ ；

- 第一个 “ L ” 表示从左向右扫描输入
- 第二个 “ L ” 表示产生最左推导
- “1” 表示在每一步中只需要向前看一个输入符号来决定语法分析动作



第四章 语法分析

LL(1) 文法

哈尔滨工业大学 陈鄞

