编译原理

第六章 LR语法分析技术（1）

方徽星

扬州大学 信息工程学院(505)

fanghuixing@yzu.edu.cn

2018年春季学期

本章主要内容

一. 自下向上语法分析

二. LR分析

- SLR
- LR(1)
- LALR

三. 使用二义性文法

四. Yacc

第一节　自下向上语法分析

1.1 归约

- 为输入串构造分析树：
  - 从叶子结点开始，朝着根结点方向逆序前进
  - 即把输入串**归约**成文法的**开始符号**
- 每步归约：当**子串**和某**产生式体**匹配就可用该产生式头代替子串

1.1 归约

- 例：考虑文法
  - $S \rightarrow aABe$
  - $A \rightarrow Abc \mid b$
  - $B \rightarrow d$

  把句子$abbcde$进行归约

1.1 归约

- 例：考虑文法
  - $S \rightarrow aABe$
  - $A \rightarrow Abc \mid b$
  - $B \rightarrow d$

  把句子$abbcde$进行归约

$$a\boldsymbol{b}bcde \xrightarrow[\text{归约}]{\boldsymbol{A \rightarrow b}} a\boldsymbol{A}bcde$$

1.1 归约

- 例：考虑文法
  - $S \rightarrow aABe$
  - $A \rightarrow Abc \mid b$
  - $B \rightarrow d$

  把句子$abbcde$进行归约

$$a\boldsymbol{Abc}de \xrightarrow[\text{归约}]{\boldsymbol{A \rightarrow Abc}} a\boldsymbol{A}de$$

1.1 归约

- 例：考虑文法
  - $S \rightarrow aABe$
  - $A \rightarrow Abc \mid b$
  - $B \rightarrow d$

  把句子$abbcde$进行归约

$$aA\boldsymbol{d}e \xrightarrow[\text{归约}]{\boldsymbol{B \rightarrow d}} aA\boldsymbol{B}e$$

1.1 归约

- 例：考虑文法
  - $S \rightarrow aABe$
  - $A \rightarrow Abc \mid b$
  - $B \rightarrow d$

  把句子$abbcde$进行归约

$$\boldsymbol{aABe} \xrightarrow[\text{归约}]{\boldsymbol{S \rightarrow aABe}} \boldsymbol{S}$$

1.1 归约

- 例：考虑文法
  - $S \to aABe$
  - $A \to Abc \mid b$
  - $B \to d$

$abbcde$的最左归约：

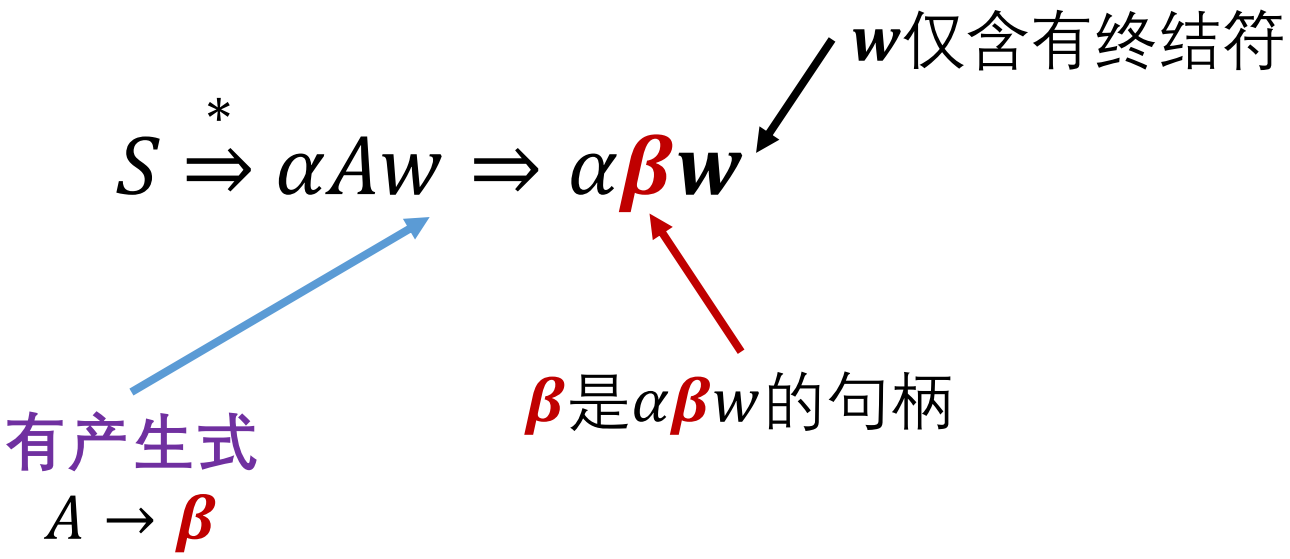
$$abbcde \dashrightarrow aAbcde \dashrightarrow aAde \dashrightarrow aABe \dashrightarrow S$$

$abbcde$的最右推导：

$$S \Rightarrow aABe \Rightarrow aAde \Rightarrow aAbcde \Rightarrow abbcde$$

1.2 句柄

- 考虑右句型（最右推导可得到的句型）



1.2 句柄

- 考虑文法
  - $E \to E + E$
  - $E \to E * E$
  - $E \to (E)$
  - $E \to \mathbf{id}$

最右推导：$E \Rightarrow \underline{E * E}$

$\Rightarrow E * \underline{E + E}$

$\Rightarrow E * E + \underline{\mathbf{id}}$

$\Rightarrow E * \underline{\mathbf{id}} + \mathbf{id}$

$\Rightarrow \underline{\mathbf{id}} * \mathbf{id} + \mathbf{id}$

每个右句型的句柄使用下划线标记

句柄右边的串仅含终结符

1.2 用栈实现分析

- 用**栈保存文法符号**，用输入缓冲区保存要分析的串w，用$标记栈底和输入串的右端

- 初始：栈仅含符号$，串$w$在输入中

栈	输入
$	$w$$

1.2 用栈实现分析

- 然后：**移动**若干个(可以0个)输入符号**入栈**，直到**句柄**β出现在栈顶，把β**归约**成恰当的产生式左部
- 重复上述过程，直到发现错误或者栈中只含有开始符号且输入串为空

栈	输入
$$\$S$$	$

分析成功

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	移进
$id	*** id + id$**	

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	移进
$id	*** id + id$**	按$E \rightarrow$ **id**归约
$$E$$	*** id + id$**	

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	移进
$id	*** id + id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E$$	*** id + id$**	移进
$$E$$ *	**id + id$**	

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	移进
$id	*** id + id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E$$	*** id + id$**	移进
$$E$$ *	**id + id$**	移进
$$E$$ * **id**	**+id$**	

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	移进
$id	*** id + id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E$$	*** id + id$**	移进
$$E *$$	**id + id$**	移进
$$E *$$ **id**	**+id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E * E$$	**+id$**	

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	移进
$id	*** id + id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E$$	*** id + id$**	移进
$$E *$$	**id + id$**	移进
$$E * $$**id**	**+id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E * E$$	**+id$**	移进
$$E * E +$$	**id$**	

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	移进
$id	*** id + id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E$$	*** id + id$**	移进
$$E *$$	**id + id$**	移进
$$E *$$ **id**	**+id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E * E$$	**+id$**	移进
$$E * E +$$	**id$**	移进
$$E * E +$$ **id**	**$**	

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	移进
$id	*** id + id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E$$	*** id + id$**	移进
$$E *$$	**id + id$**	移进
$$E *$$ **id**	**+id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E * E$$	**+id$**	移进
$$E * E +$$	**id$**	移进
$$E * E +$$ **id**	$	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E * E + E$$	$	

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	移进
$id	*** id + id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E$$	*** id + id$**	移进
$$E *$$	**id + id$**	移进
$$E * $$**id**	**+id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E * E$$	**+id$**	移进
$$E * E +$$	**id$**	移进
$$E * E +$$ **id**	$	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E * E + E$$	$	按$E \rightarrow E + E$**归约**
$$E * E$$	$	

1.2 用栈实现分析

- 例：分析输入串**id * id + id**

栈	输入	动作
$	**id * id + id$**	**移进**
$**id**	*** id + id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E$$	*** id + id$**	**移进**
$$E$$ *	**id + id$**	**移进**
$$E$$ * **id**	**+id$**	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E$$ * $$E$$	**+id$**	**移进**
$$E$$ * $$E$$ +	**id$**	**移进**
$$E$$ * $$E$$ + **id**	$	按$E \rightarrow$ **id归约**
$$E$$ * $$E$$ + $$E$$	$	按$E \rightarrow E + E$归约
$$E$$ * $$E$$	$	按$E \rightarrow E * E$归约
$$E$$	$	**接受**

1.3 移进-归约分析的冲突

- 有些上下文无关文法不能使用移进-归约分析
- 例：考虑如下文法

$$stmt \rightarrow \textbf{if } expr \textbf{ then } stmt$$
$$\mid \textbf{if } expr \textbf{ then } stmt \textbf{ else } stmt$$
$$\mid \textbf{other}$$

如果移进-归约分析过程中出现下面的情况：

栈	输入
...**if** *expr* **then** *stmt*	**else** ...$

无法知道if *expr* then *stmt*是否为句柄，产生移进-归约冲突

1.3 移进-归约分析的冲突

- 例：考虑如下文法
  - $stmt \rightarrow \mathbf{id}(p\_list) \mid expr = expr$
  - $p\_list \rightarrow p\_list, para \mid para$
  - $para \rightarrow \mathbf{id}$
  - $expr \rightarrow \mathbf{id}(expr\_list) \mid \mathbf{id}$
  - $expr\_list \rightarrow expr\_list, expr \mid expr$

若$\boldsymbol{p}(\boldsymbol{i},\boldsymbol{j})$经过词法分析变为序列：$\mathbf{id}(\mathbf{id},\mathbf{id})$，然后交给语法分析器
移进前三个词法单元进栈后，栈顶**id**必须归约：

栈	输入
...**id(id**	**, id)** ...

- 如果$\boldsymbol{p}$是过程则按照$para \rightarrow \mathbf{id}$进行归约
- 如果$\boldsymbol{p}$是表达式，则按照$expr \rightarrow \mathbf{id}$进行归约

第二节　LR分析

2 LR分析

- **LR(k)分析技术**
  - L：从左向右(**Left to right**)扫描输入
  - R：反向构造最右推导(**Rightmost Derivation**)序列
  - k：决定分析动作时向前看k个输入符号

- **三种LR分析表构造技术**
  - 简单LR(**Simple LR**)：容易实现，功能最弱
  - 规范LR(**Canonical LR**)：功能最强，代价最大
  - 向前搜索的LR(**Look-Ahead LR**)：介于二者之间

2.1 项和LR(0)自动机

一个移进-归约语法分析器如何确定

何时移进，何时归约？

2.1 项和LR(0)自动机

- LR语法分析器通过维护一些**状态**，用这些状态来**表明**我们在语法分析过程中**所处的位置**，从而做出移进-归约决定；状态是**“项”**的集合
- 文法G的一个LR(0)**项**：G的一个产生式P再加上一个位于P的体中某处的点D
- 例：产生式$\boldsymbol{A \rightarrow XYZ}$产生了四个项：
  1. $\boldsymbol{A \rightarrow \bullet XYZ}$
  2. $\boldsymbol{A \rightarrow X \bullet YZ}$
  3. $\boldsymbol{A \rightarrow XY \bullet Z}$
  4. $\boldsymbol{A \rightarrow XYZ \bullet}$

2.1 项和LR(0)自动机

- **项**指明了在语法分析过程中，我们**已经**看到了一个**产生式**的**哪些部分**
- 例：
  1. 项$A \rightarrow \bullet XYZ$表明**希望**接下来在**输入**中看到一个从$XYZ$推导得到的串
  2. 项$A \rightarrow X \bullet YZ$说明刚刚(**已经**)在输入中看到了一个可以由$X$推导得到的串，且**希望**接下来看到一个能从$YZ$推导得到的串
  3. 项$A \rightarrow XYZ \bullet$表示我们**已经**看到了产生式体$XYZ$，已经是时候把$XYZ$**归约**为$A$了

2.1 项和LR(0)自动机

- 基于一组**项集**可以构造一个**确定的有限自动机**，用于做出语法分析**决定**
  - 项集：**规范LR(0)项集族**(Canonical LR(0) Collection)
  - 确定的有限自动机：**LR(0)自动机**
  - LR(0)自动机的每个**状态**代表了规范LR(0)项集族中的一个**项集**
- 构造文法的规范LR(0)项集族，需要定义
  - 增广文法(Augmented Grammar)
  - CLOSURE函数：**项集闭包**
  - GOTO函数：**转移**

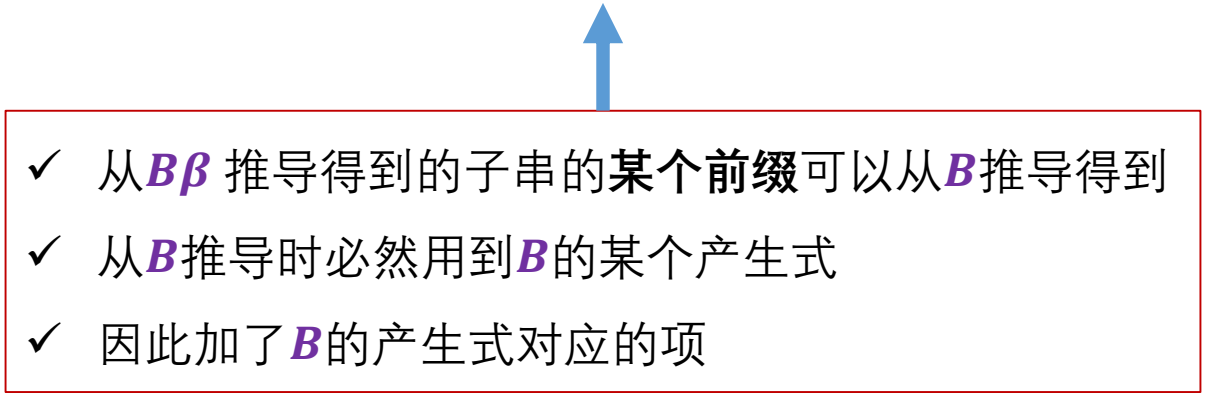
2.1 项和LR(0)自动机

- 文法G(其中S为开始符号)的**增广文法**G'：
  - 在G中加上新开始符号S'和产生式$S' \to S$
  - 引入S'后：

输入符号串被接受 **iff** **要使用规则$S' \to S$进行归约**

2.1 项和LR(0)自动机

- 项集闭包：如果I是文法G的一个项集，那么$\boldsymbol{CLOSURE(I)}$可由如下规则构建
  1. 一开始，将I中的各个项加入到$CLOSURE(I)$中
  2. 如果项$\boldsymbol{A \to \alpha \bullet B\beta} \in CLOSURE(I)$，有$\boldsymbol{B \to \gamma}$且$\boldsymbol{B \to \bullet\gamma} \notin CLOSURE(I)$，则将项$\boldsymbol{B \to \bullet\gamma}$放入$CLOSURE(I)$



2.1 项和LR(0)自动机

- 例：考虑增广的表达式文法
  1. $E' \to E$
  2. $E \to E + T \mid T$
  3. $T \to T * F \mid F$
  4. $F \to (E) \mid \mathbf{id}$

  如果$i = \{[\boldsymbol{E' \to \bullet E}]\}$，则$CLOSURE(i) =$ **?**

2.1 项和LR(0)自动机

- 例：考虑增广的表达式文法

  1. $E' \to E$
  2. $E \to E + T \mid T$
  3. $T \to T * F \mid F$
  4. $F \to (E) \mid \mathbf{id}$

  如果$i = \{[\boldsymbol{E' \to \bullet E}]\}$，则$CLOSURE(i) =$ **?**

  - 因为$\boldsymbol{E' \to \bullet E} \in i$，由规则1，

    $$\boldsymbol{E' \to \bullet E} \in CLOSURE(i)$$

2.1 项和LR(0)自动机

- 例：考虑增广的表达式文法

  1. $E' \to E$
  2. $E \to E + T \mid T$
  3. $T \to T * F \mid F$
  4. $F \to (E) \mid \mathbf{id}$

  如果$i = \{[\boldsymbol{E' \to \bullet E}]\}$，则$CLOSURE(i) =$ **?**

  - 再由规则2，及$E \to E + T \mid T$

    $$\boldsymbol{E \to \bullet E + T} \in CLOSURE(i)$$

    $$\boldsymbol{E \to \bullet T} \in CLOSURE(i)$$

2.1 项和LR(0)自动机

- 例：考虑增广的表达式文法

  1. $E' \to E$
  2. $E \to E + T \mid T$
  3. $T \to T * F \mid F$
  4. $F \to (E) \mid \mathbf{id}$

  如果$i = \{[\boldsymbol{E' \to \bullet E}]\}$，则$CLOSURE(i) =$ **?**

  - 再由规则2，及$T \to T * F \mid F$

$$\boldsymbol{T \to \bullet T * F} \in CLOSURE(i)$$

$$\boldsymbol{T \to \bullet F} \in CLOSURE(i)$$

2.1 项和LR(0)自动机

- 例：考虑增广的表达式文法

  1. $E' \to E$
  2. $E \to E + T \mid T$
  3. $T \to T * F \mid F$
  4. $F \to (E) \mid \mathbf{id}$

  如果$i = \{[\boldsymbol{E' \to \bullet E}]\}$，则$CLOSURE(i) =$ **?**

  - 再由规则2，及$F \to (E) \mid \mathbf{id}$

    $$\boldsymbol{F \to \bullet(E)} \in CLOSURE(i)$$

    $$\boldsymbol{F \to \bullet \mathbf{id}} \in CLOSURE(i)$$

结束！

2.1 项和LR(0)自动机

- 例：考虑增广的表达式文法

  1. $E' \to E$
  2. $E \to E + T \mid T$
  3. $T \to T * F \mid F$
  4. $F \to (E) \mid \mathbf{id}$

  如果$i = \{[\boldsymbol{E' \to \bullet E}]\}$，则

  $CLOSURE(i) =$

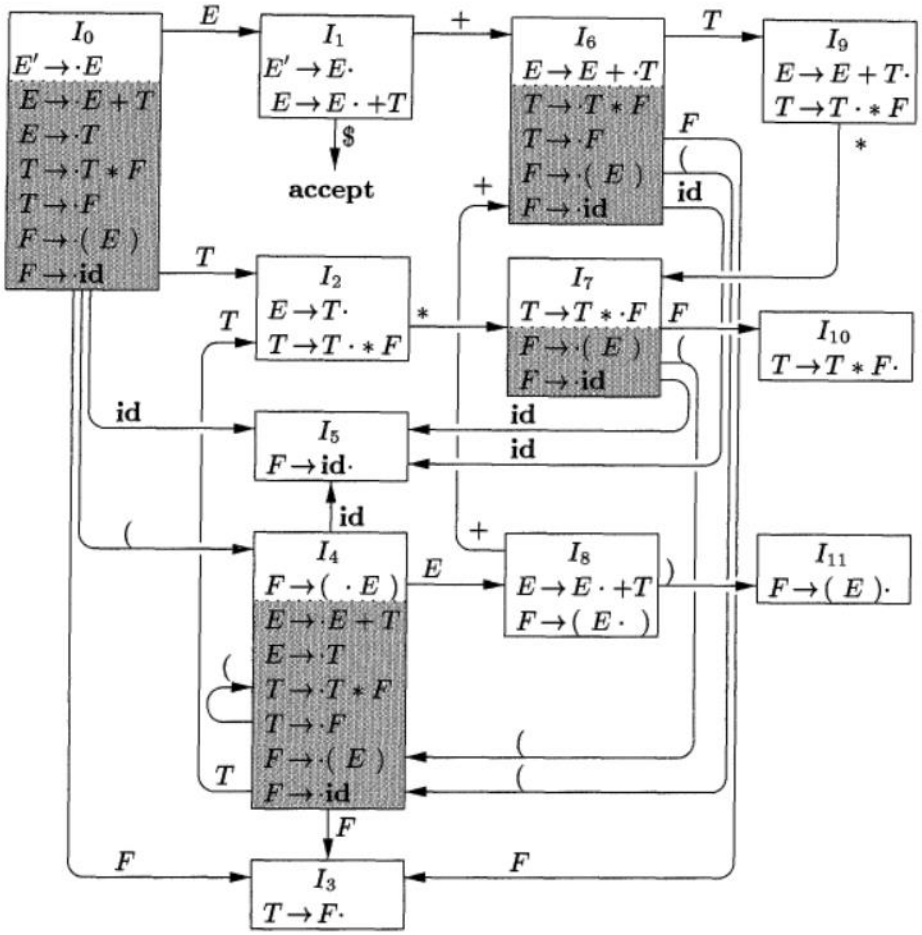
  $\{ [\boldsymbol{E' \to \bullet E}], [\boldsymbol{E \to \bullet E + T}],$
  $[\boldsymbol{E \to \bullet T}], [\boldsymbol{T \to \bullet T * F}],$
  $[\boldsymbol{T \to \bullet F}], [\boldsymbol{F \to \bullet (E)}],$
  $[\boldsymbol{F \to \bullet \mathbf{id}}] \}$

2.1 项和LR(0)自动机

- 项的分类
  - **内核项：**初始项$S' \to \bullet S$以及**点不在最左端**的所有项
  - **非内核项：**除了$S' \to \bullet S$之外的**点在最左端**的所有项
- 感兴趣的每个项集都是某个内核项集合的闭包**(?)**
- 计算闭包时加入的项不是内核项，可以省略所有非内核项以减少内存(因为可以计算出来)

2.1 项和LR(0)自动机

表达式文法的LR(0)自动机



阴影部分表示
非内核项

2.1 项和LR(0)自动机

- **GOTO函数：**

项集 ↓ I　　文法符号 ↓ X

$$GOTO(\ I\ ,\ X\ )$$

定义LR(0)自动机的一个转换：

当输入为X时，从I对应的状态出发的转换

如果有形如$[A \to \alpha \bullet X\beta] \in I$，则

$$GOTO(I, X) \overset{\text{def}}{=} \text{K的闭包}$$

其中K $\overset{\text{def}}{=}$所有形如$[A \to \alpha X \bullet \beta]$的项组成的项集

2.1 项和LR(0)自动机

- 例：令$\boldsymbol{i} = \{[\boldsymbol{E'} \to \boldsymbol{E}\bullet], [\boldsymbol{E} \to \boldsymbol{E}\bullet + \boldsymbol{T}]\}$，
  求$\boldsymbol{GOTO}(\boldsymbol{i}, +)$

2.1 项和LR(0)自动机

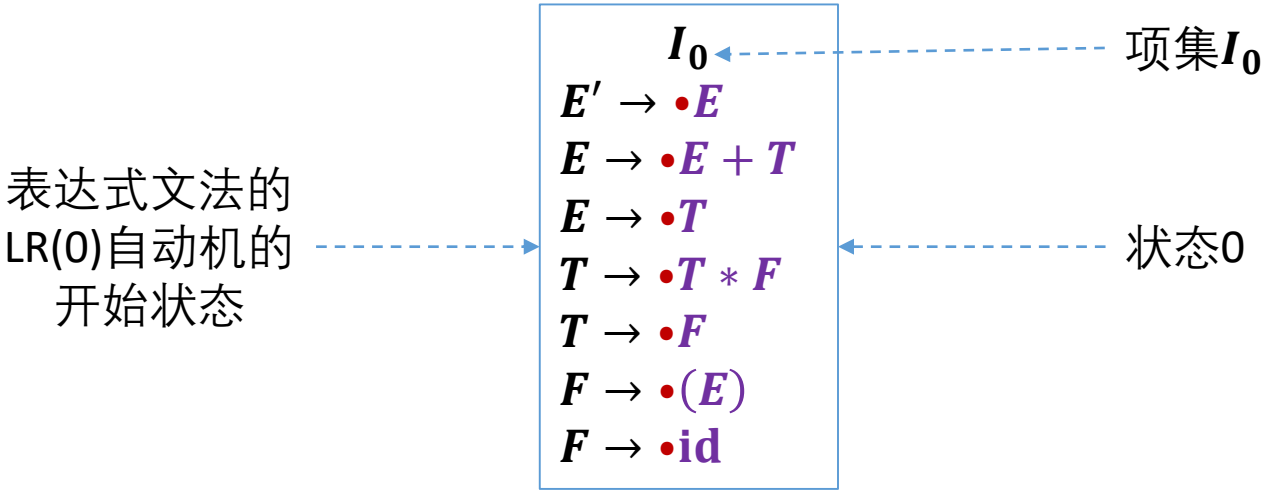
- 有了CLOSURE和GOTO之后，就可以计算项集族

```
void items(G') {
    C = {CLOSURE({[S' → •S]})} ;
    repeat
        for (C中的每个项集i) {
            for (每个文法符号X) {
                if (GOTO(i, X) ≠ ∅∧GOTO(i, X) ∉ C) {
                    C = C∪{GOTO(i, X)} ;
                }//if
            }//inner-for
        }//outer-for
    until 在某轮循环中没有新的项被加入C中 ;
}
```

规范LR(0)项集族的计算

2.1 项和LR(0)自动机

- SLR分析技术的中心思想是根据文法构造出LR(0)自动机
  - 自动机的状态是规范LR(0)项集族中的元素
  - 自动机的转换由GOTO函数给出



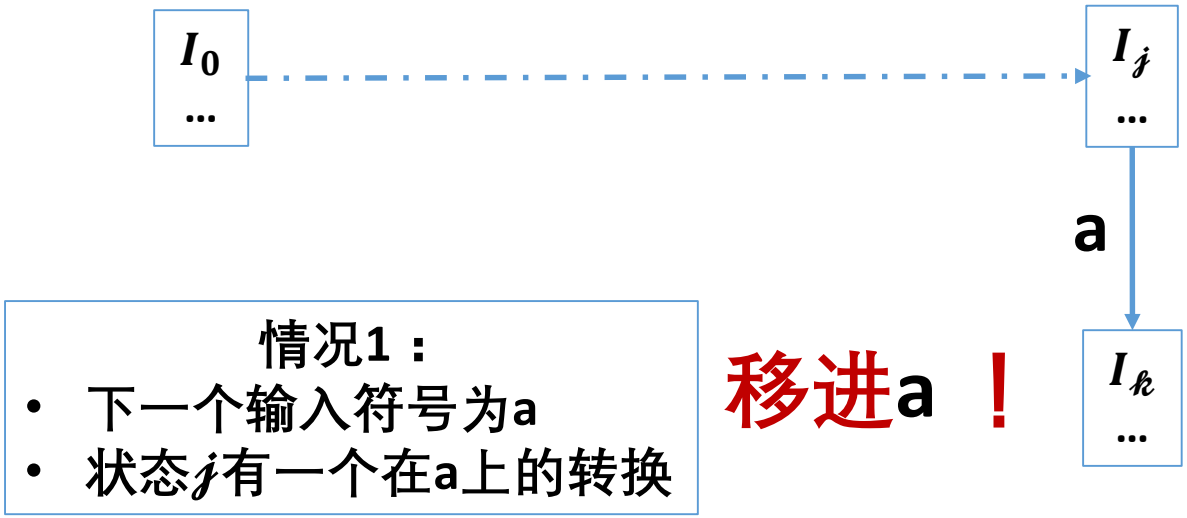
LR(0)自动机如何帮助做出移进-归约决定的呢?

2.1 项和LR(0)自动机

- 移进-归约决定可以按照如下方式做出
  - 假设文法符号串γ使LR(0)自动机从开始状态0运行到某个状态j

2.1 项和LR(0)自动机

- 移进-归约决定可以按照如下方式做出
  - 假设文法符号串γ使LR(0)自动机从开始状态0运行到某个状态j



2.1 项和LR(0)自动机

- 移进-归约决定可以按照如下方式做出
  - 假设文法符号串γ使LR(0)自动机从开始状态0运行到某个状态j

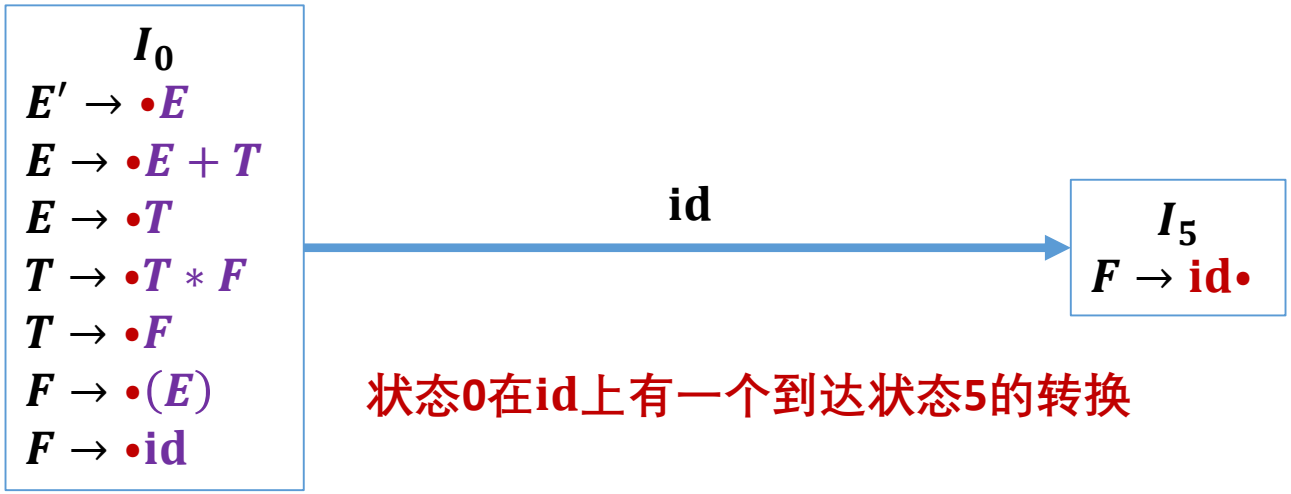
情况2：
- **不满足情况1的条件时**
- **状态j的项将告诉我们使用哪个产生式进行归约**

归约！

2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 **id * id**

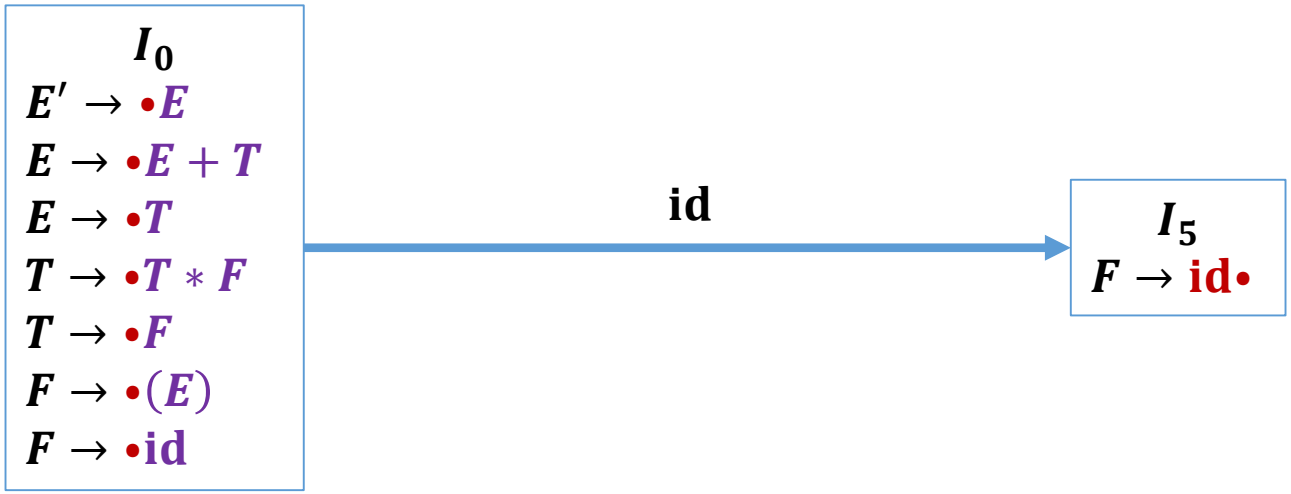
行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	id * id$	



2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 **id * id**

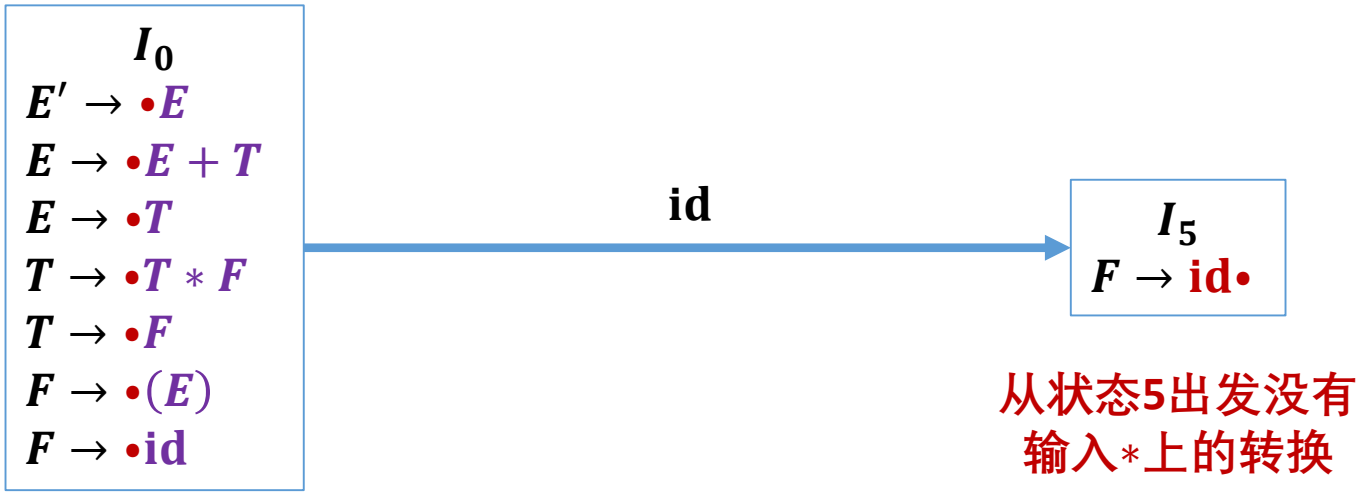
行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	id * id$	移进到5
(2)	0 5	$id	* id$	



2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 **id * id**

行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	id * id$	移进到5
(2)	0 5	$id	* id$	按照$F \rightarrow$ id归约



2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 **id * id**

行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	**id * id$**	移进到5
(2)	0 5	**$id**	*** id$**	按照$F \rightarrow$ **id**归约

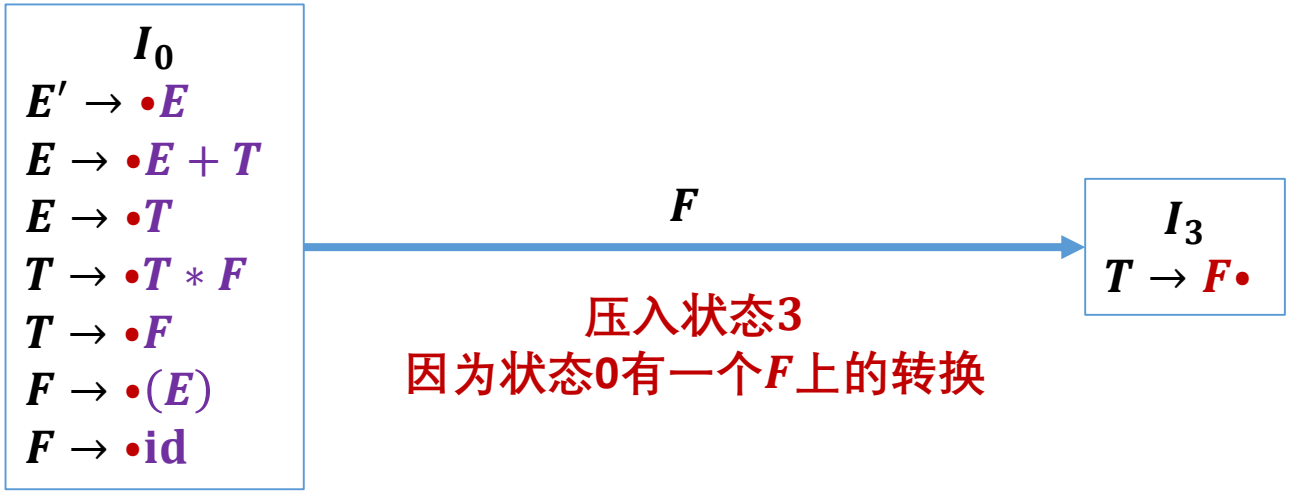
弹出id
对应的状态5

弹出产生式体id
压入产生式头*F*

2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 **id * id**

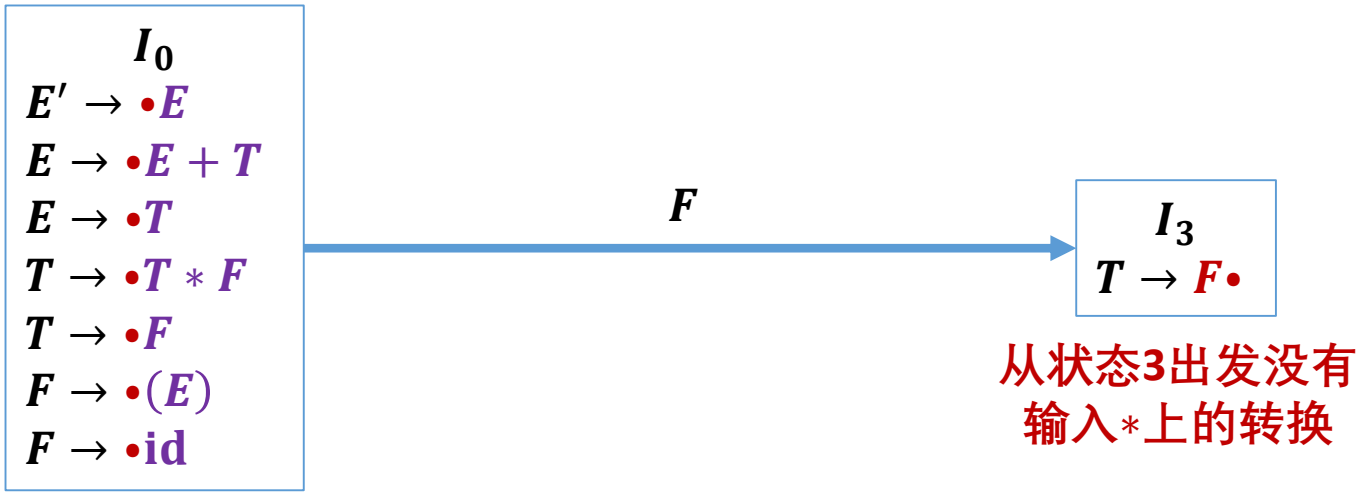
行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	**id * id$**	移进到5
(2)	0 5	$**id**	***id$**	按照$F \rightarrow$ **id**归约
(3)	0	$$F$	***id$**	



2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 **id * id**

行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	id * id$	移进到5
(2)	0 5	$id	* id$	按照$F \rightarrow$ id归约
(3)	0 3	$$F$	* id$	按照$T \rightarrow F$归约



2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 **id * id**

行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	**id * id$**	移进到5
(2)	0 5	$**id**	***id$**	按照$F \rightarrow$ **id**归约
(3)	0 3	$$F$$	***id$**	按照$T \rightarrow F$归约

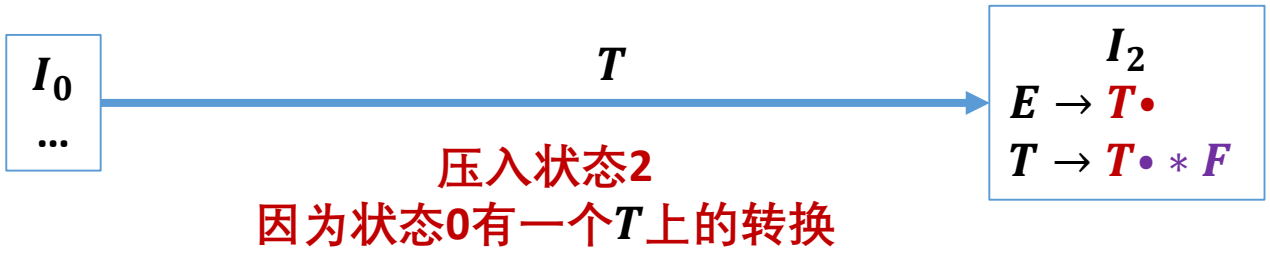
弹出F
对应的状态3

弹出产生式体F
压入产生式头T

2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 $\mathbf{id} * \mathbf{id}$

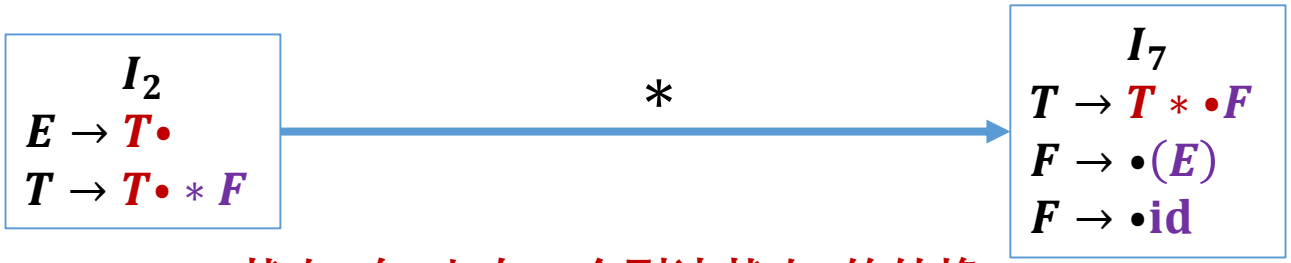
行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	$\mathbf{id} * \mathbf{id}\$$	移进到5
(2)	0 5	$\$\mathbf{id}$	$* \mathbf{id}\$$	按照$F \rightarrow \mathbf{id}$归约
(3)	0 3	$\$F$	$* \mathbf{id}\$$	按照$T \rightarrow F$归约
(4)	0	$\$T$	$* \mathbf{id}\$$	



2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 **id * id**

行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	id * id$	移进到5
(2)	0 5	$id	* id$	按照$F \rightarrow$ id归约
(3)	0 3	$$F$	* id$	按照$T \rightarrow F$归约
(4)	0 2	$$T$	* id$	

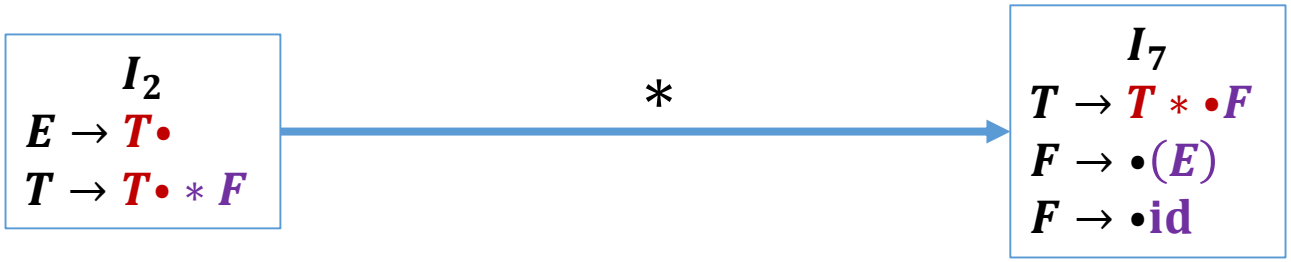


状态2在*上有一个到达状态7的转换

2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 **id * id**

行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	**id * id$**	移进到5
(2)	0 5	**$id**	***id$**	按照$F \rightarrow$ **id**归约
(3)	0 3	$$F$$	***id$**	按照$T \rightarrow F$归约
(4)	0 2	$$T$$	***id$**	移进到7



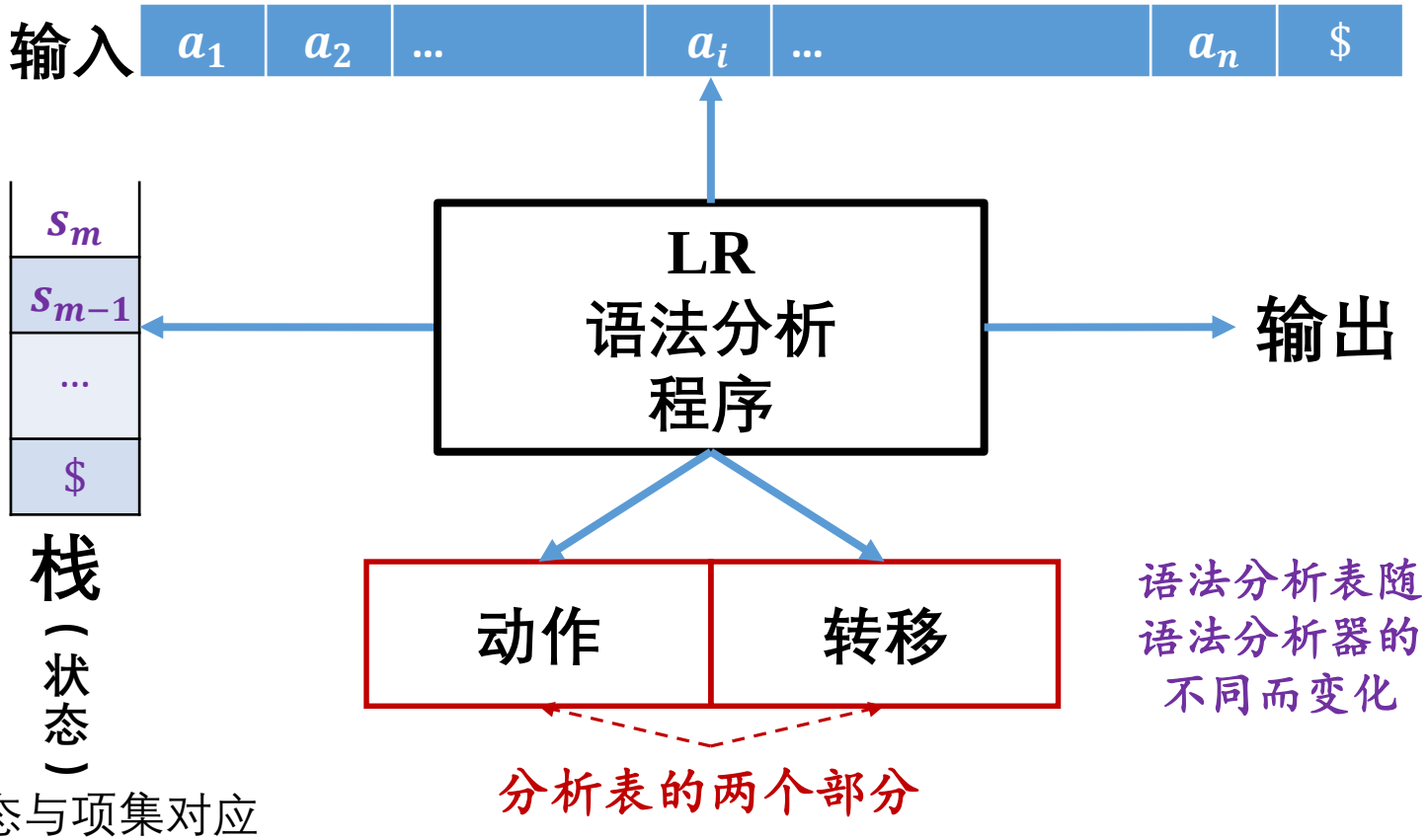
2.1 项和LR(0)自动机

- 例：使用表达式文法的LR(0)自动机分析输入串 $\mathbf{id} * \mathbf{id}$

行号	栈(状态)	符号	输入	动作
(1)	0	$	$\mathbf{id} * \mathbf{id}\$$	移进到5
(2)	0 5	$\$\mathbf{id}$	$* \mathbf{id}\$$	按照$\boldsymbol{F} \rightarrow \mathbf{id}$归约
(3)	0 3	$\$\boldsymbol{F}$	$* \mathbf{id}\$$	按照$\boldsymbol{T} \rightarrow \boldsymbol{F}$归约
(4)	0 2	$\$\boldsymbol{T}$	$* \mathbf{id}\$$	移进到7
(5)	0 2 7	$\$\boldsymbol{T} *$	$\mathbf{id}\$$	…
…	…	…	…	…
	0 1	$\$E$	$	接受

2.2 LR分析算法

一个LR语法分析器的模型：



状态与项集对应

2.2 LR分析算法

- LR语法分析表的结构：

  动作函数(ACTION)　+　转换函数(GOTO)

  ACTION有两个参数：
  1. 状态i
  2. 终结符号a(或输入结束标记)

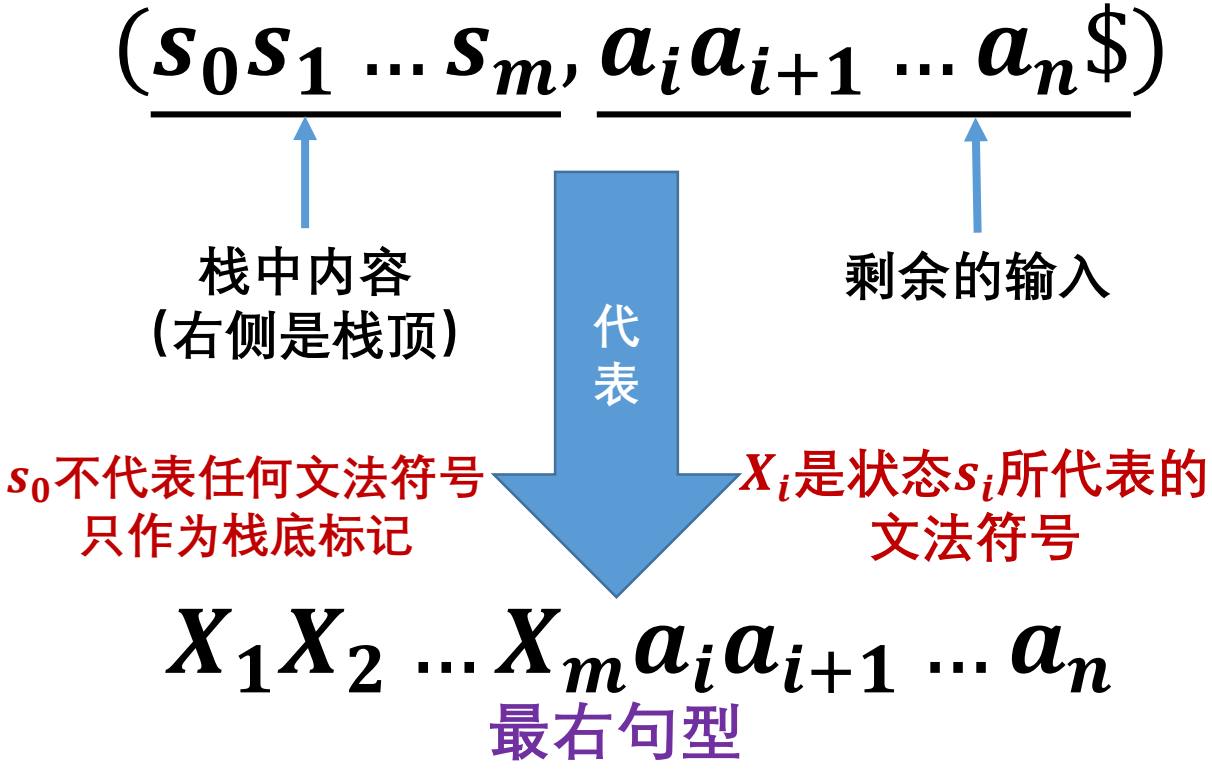
  $ACTION[i,a]$的取值可能有：

  1. 移进状态j，将输入符号a移进栈，使用状态j代表a
  2. 归约$A \to \beta$，将栈顶β归约为产生式头A
  3. 接受，接受输入完成语法分析过程
  4. 报错，发现错误并执行纠正动作

  $GOTO$：如果$GOTO[I_i, A] = I_j$，则$GOTO$也把状态i和一个非终结符A映射到状态j

2.2 LR分析算法

- LR语法分析器的格局(Configuration)



2.2 LR分析算法

- **LR语法分析器的行为：**读入当前输入符号a_i和栈顶的状态s_m，然后在分析动作表中查询条目$ACTION[s_m, a_i]$

Step-1. 如果$ACTION[s_m, a_i]$=**移进**状态s，则语法分析器执行一次**移进**动作；它将下一个状态s移进栈中，进入格局：

$$(\underline{s_0 s_1 \dots s_m s}, \underline{a_{i+1} \dots a_n \$})$$

当前的输入符号是a_{i+1}

2.2 LR分析算法

Step-2. 如果$\boldsymbol{ACTION}[\boldsymbol{s_m}, \boldsymbol{a_i}]$=归约$\boldsymbol{A} \rightarrow \beta$，则语法分析器执 行一次归约动作，进入格局：

$$\left(\underline{\boldsymbol{s_0 s_1 \ldots s_{m-r} s}}, \underline{\boldsymbol{a_i a_{i+1} \ldots a_n \$}}\right)$$

其中$\boldsymbol{r} = |\beta|$，$\boldsymbol{s} = GOTO[\boldsymbol{s_{m-r}}, \boldsymbol{A}]$

- 语法分析器首先将$\boldsymbol{r}$**个状态**符号**弹出**栈，使状态$\boldsymbol{s_{m-r}}$位于栈顶，然后将$\boldsymbol{s}$**压入**栈
- 在一个归约动作中，**当前输入符号不变**
- 出栈状态的文法符号序列$\boldsymbol{X_{m-r+1} \ldots X_m} = \beta$

2.2 LR分析算法

Step-3. 如果$\boldsymbol{ACTION}[\boldsymbol{s_m}, \boldsymbol{a_i}]$=接受，则分析过程完成

Step-4.如果$\boldsymbol{ACTION}[\boldsymbol{s_m}, \boldsymbol{a_i}]$=报错，则说明分析器发现了一个语法错误，并调用一个错误恢复例程

- 所有LR语法分析器均按照上述方式(Step-1~4)执行
- 分析器间唯一区别在于ACTION表项和GOTO表项中包含的信息不同

2.2 LR分析算法

LR**语法分析算法**

输入：一个**输入串**$\boldsymbol{w}$和文法G的一个LR**语法分析表**

输出：如果w在$L(G)$中，则输出w的自下向上语法分析过程中的**归约步骤**；否则给出一个**错误提示**

方法：最初，语法分析器栈中的内容为**初始状态**$\boldsymbol{s_0}$，输入缓冲区中的内容为$\boldsymbol{w}\$$，然后执行程序(右图)

令a为$w\$$的第一个符号；
while(1){
    令s是栈顶的状态；
    if ($\boldsymbol{ACTION}[\boldsymbol{s},\boldsymbol{a}]=$ 移**进**$\boldsymbol{t}$){
        将t压入栈中；
        令a为下一个输入符号；
    }
    else if ($\boldsymbol{ACTION}[\boldsymbol{s},\boldsymbol{a}]=$**归约**$\boldsymbol{A\rightarrow\beta}$){
        从栈中弹出$|\beta|$个符号；
        令t为当前的栈顶状态；
        将$GOTO[t,A]$压入栈中；
        输出产生式$A\rightarrow\beta$;
    }
    else if ($\boldsymbol{ACTION}[\boldsymbol{s},\boldsymbol{a}]=$ 接受) **break**;
    else 调用错误恢复例程；
}

2.2 LR分析算法

- 例：表达式文法
  1. $E \rightarrow E + T$
  2. $E \rightarrow T$
  3. $T \rightarrow T * F$
  4. $T \rightarrow F$
  5. $F \rightarrow (E)$
  6. $F \rightarrow \mathbf{id}$

  - s：shift
  - r：reduce
  - acc：accept

状态	ACTION						GOTO		
	id	+	*	(	)	$	E	T	F
0	s5			s4			1	2	3
1		s6				acc			
2		r2	s7		r2	r2			
3		r4	r4		r4	r4			
4	s5			s4			8	2	3
5		r6	r6		r6	r6			
6	s5			s4				9	3
7	s5			s4					10
8		s6			s11				
9		r1	s7		r1	r1			
10		r3	r3		r3	r3			
11		r5	r5		r5	r5			

2.2 LR分析算法

- 例：表达式文法
  1. $E \rightarrow E + T$
  2. $E \rightarrow T$
  3. $T \rightarrow T * F$
  4. $T \rightarrow F$
  5. $F \rightarrow (E)$
  6. $F \rightarrow \mathbf{id}$

状态	ACTION					
	id	+	*	(	)	$
0	**s5**			**s4**		

	栈	符号	输入	动作
(1)	0		**id * id+id$**	移进

2.2 LR分析算法

- 例：表达式文法
  1. $E \rightarrow E + T$
  2. $E \rightarrow T$
  3. $T \rightarrow T * F$
  4. $T \rightarrow F$
  5. $F \rightarrow (E)$
  6. $F \rightarrow \mathbf{id}$

状态	ACTION					
	id	+	*	(	)	$
5		**r6**	**r6**		**r6**	**r6**

需从栈中弹出|id|个符号

	栈	符号	输入	动作
(1)	0		**id** * **id+id$**	移进
(2)	0 5	**id**	* **id+id$**	根据$F \rightarrow$ **id**归约

2.2 LR分析算法

- 例：表达式文法
  1. $E \rightarrow E + T$
  2. $E \rightarrow T$
  3. $T \rightarrow T * F$
  4. $T \rightarrow F$
  5. $F \rightarrow (E)$
  6. $F \rightarrow \mathbf{id}$

状态	GOTO		
	E	T	F
0	1	2	3

需将$GOTO[0, F]$压入栈

	栈	符号	输入	动作
(1)	0		$\mathbf{id} * \mathbf{id}+\mathbf{id}\$$	移进
(2)	0 5	$\mathbf{id}$	$* \mathbf{id}+\mathbf{id}\$$	根据$F \rightarrow \mathbf{id}$归约
(3)	0	F	$* \mathbf{id}+\mathbf{id}\$$	

2.2 LR分析算法

- 例：表达式文法

1. $E \rightarrow E + T$
2. $E \rightarrow T$
3. $T \rightarrow T * F$
4. $T \rightarrow F$
5. $F \rightarrow (E)$
6. $F \rightarrow \mathbf{id}$

状态	ACTION					
	id	+	*	(	)	$
3		**r4**	**r4**		**r4**	**r4**

	栈	符号	输入	动作
(1)	0		**id** * **id+id$**	移进
(2)	0 5	**id**	* **id+id$**	根据$F \rightarrow$ **id**归约
(3)	0 3	F	* **id+id$**	根据$T \rightarrow F$归约

2.2 LR分析算法

- 例：表达式文法

1. $E \rightarrow E + T$
2. $E \rightarrow T$
3. $T \rightarrow T * F$
4. $T \rightarrow F$
5. $F \rightarrow (E)$
6. $F \rightarrow \mathbf{id}$

	栈	符号	输入	动作
(1)	0		**id** $*$ **id+id\$**	移进
(2)	0 5	**id**	$*$ **id+id\$**	根据$F \rightarrow$ **id**归约
(3)	0 3	F	$*$ **id+id\$**	根据$T \rightarrow F$归约
…	…	…	…	…
	0 1	E	\$	**接受**

状态	ACTION					
	id	+	*	(	)	\$
1		**s6**				**acc**