

# 词法分析

## (1. 词法分析器生成器 ANTLR v4)

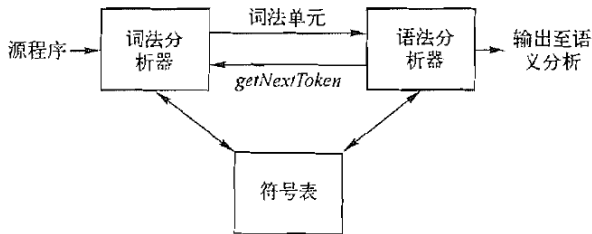
魏恒峰

hfwei@nju.edu.cn

2022 年 11 月 08 日 (周三)

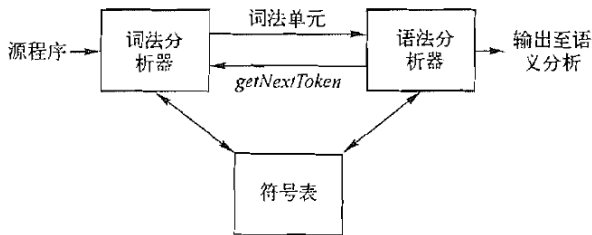


**输入:** 程序文本/字符串  $s$



**输出:** 词法单元流

**输入:** 程序文本/字符串  $s$  + **词法单元 (token) 的规约**



**输出:** 词法单元流

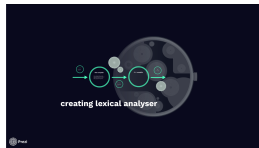
## 词法分析器的三种设计方法 (由易到难)



词法分析器生成器



手写词法分析器



自动化词法分析器

生产环境下的编译器 (如 gcc) 通常选择**手写词法分析器**



master

[gcc / gcc / c-family / c-lex.c](#)

**iains** Objective-C/C++ : Improve '@' keyword locations. ...

19 contributors +7

1435 lines (1278 sloc) | 38.8 KB

master

[gcc / libcpp / lex.c](#)

**urnathan** cpplib: EOF in pragmas ...

25 contributors +13

4364 lines (3825 sloc) | 119 KB



词法分析器生成器

输入: 词法单元的规约

antlr4 SimpleExpr.g4

**输入:** 词法单元的规约

antlr4 SimpleExpr.g4

**输出:** 词法分析器

- ▶ SimpleExpr.tokens
- ▶ SimpleExprLexer.java



**输入:** 词法单元的规约

antlr4 SimpleExpr.g4

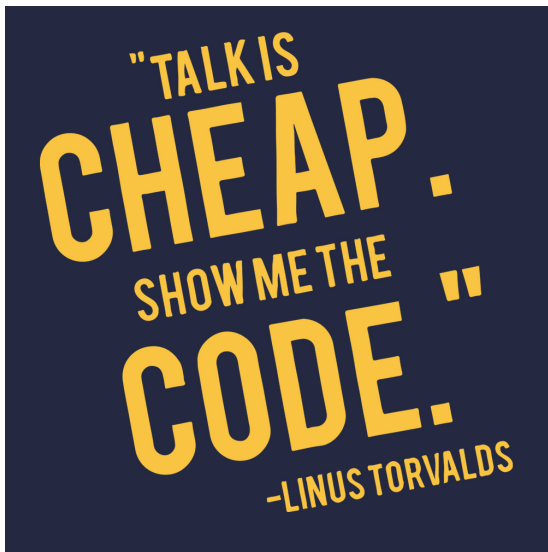
**输出:** 词法分析器

▶ SimpleExpr.tokens

▶ SimpleExprLexer.java

javac SimpleExpr\*.java

grun simpleexpr.SimpleExpr prog -tokens

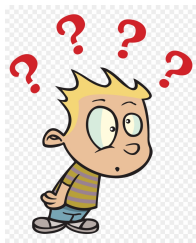


## ANTLR v4 中两大冲突解决规则

最前优先匹配: 关键字 *vs.* 标识符

最长优先匹配: `>=, ifhappy, thenext, 1.23`

## 词法单元的规约



词法单元	非正式描述	词素示例
if	字符 i, f	if
else	字符 e, l, s, e	else
comparison	< 或 > 或 <= 或 >= 或 == 或 !=	<=, !=
id	字母开头的字母 / 数字串	pi, score, D2
number	任何数字常量	3.14159, 0, 6.02e23
literal	在两个 "之间, 除" 以外的任何字符	"core dumped"

我们需要词法单元的**形式化**规约

id: 字母开头的字母/数字串

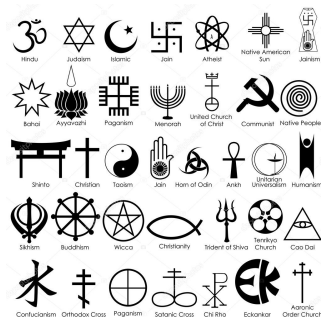
id 定义了一个集合, 我们称之为**语言 (Language)**

它使用了字母与数字等符号集合, 我们称之为**字母表 (Alphabet)**

该语言中的每个元素 (即, 标识符) 称为**串 (String)**

## Definition (字母表)

**字母表**  $\Sigma$  是一个有限的符号集合。



## Definition (串)

字母表  $\Sigma$  上的**串** ( $s$ ) 是由  $\Sigma$  中符号构成的一个**有穷**序列。

$\epsilon$

空串 :  $|\epsilon| = 0$

Definition (串上的“连接”运算)

$$x = \text{dog}, y = \text{house} \quad xy = \text{doghouse}$$

$$s\epsilon = \epsilon s = s$$



Definition (串上的“连接”运算)

$$x = \text{dog}, y = \text{house} \quad xy = \text{doghouse}$$

$$s\epsilon = \epsilon s = s$$

Definition (串上的“指数”运算)

$$s^0 \triangleq \epsilon$$

$$s^i \triangleq ss^{i-1}, i > 0$$

## Definition (语言)

**语言**是给定字母表  $\Sigma$  上一个任意的**可数的**串集合。

$$\emptyset$$
$$\{\epsilon\}$$

## Definition (语言)

**语言**是给定字母表  $\Sigma$  上一个任意的**可数的**串集合。

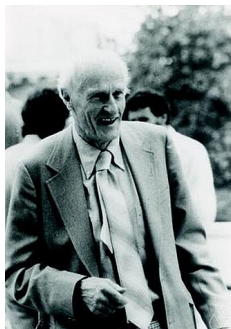
$$\emptyset$$
$$\{\epsilon\}$$
$$\text{id} : \{a, b, c, a1, a2, \dots\}$$
$$\text{ws} : \{\text{blank}, \text{tab}, \text{newline}\}$$
$$\text{if} : \{\text{if}\}$$

# 语言是串的集合

因此, 我们可以通过集合操作**构造**新的语言。

运算	定义和表示
$L$ 和 $M$ 的并	$L \cup M \doteq \{s \mid s \text{ 属于 } L \text{ 或者 } s \text{ 属于 } M\}$
$L$ 和 $M$ 的连接	$LM = \{st \mid s \text{ 属于 } L \text{ 且 } t \text{ 属于 } M\}$
$L$ 的 Kleene 闭包	$L^* = \bigcup_{i=0}^{\infty} L^i$
$L$ 的正闭包	$L^+ = \bigcup_{i=1}^{\infty} L^i$

$L^*$  ( $L^+$ ) 允许我们构造**无穷**集合



Stephen Kleene  
(1909 ~ 1994)

$$L = \{A, B, \dots, Z, a, b, \dots, z\}$$

$$D = \{0, 1, \dots, 9\}$$

运算	定义和表示
$L$ 和 $M$ 的并	$L \cup M = \{s \mid s \text{ 属于 } L \text{ 或者 } s \text{ 属于 } M\}$
$L$ 和 $M$ 的连接	$LM = \{st \mid s \text{ 属于 } L \text{ 且 } t \text{ 属于 } M\}$
$L$ 的Kleene 闭包	$L^* = \bigcup_{i=0}^{\infty} L^i$
$L$ 的正闭包	$L^+ = \bigcup_{i=1}^{\infty} L^i$

$$L = \{A, B, \dots, Z, a, b, \dots, z\}$$

$$D = \{0, 1, \dots, 9\}$$

运算	定义和表示
$L$ 和 $M$ 的并	$L \cup M = \{s \mid s \text{ 属于 } L \text{ 或者 } s \text{ 属于 } M\}$
$L$ 和 $M$ 的连接	$LM = \{st \mid s \text{ 属于 } L \text{ 且 } t \text{ 属于 } M\}$
$L$ 的Kleene 闭包	$L^* = \bigcup_{i=0}^{\infty} L^i$
$L$ 的正闭包	$L^+ = \bigcup_{i=1}^{\infty} L^i$

$$L \cup D \quad LD \quad L^4 \quad L^* \quad D^+ \quad L(L \cup D)^*$$

**id** :  $L(L \cup D)^*$

该如何告诉 ANTLR v4 : 这个集合就是 **id** 呢?



$\text{id} : L(L \cup D)^*$

该如何告诉 ANTLR v4 : 这个集合就是 **id** 呢?



下面向大家隆重介绍简洁、优雅、强大的**正则表达式**

每个正则表达式  $r$  对应一个正则语言  $L(r)$



正则表达式是**语法**, 正则语言是**语义**

## Definition (正则表达式)

给定字母表  $\Sigma$ ,  $\Sigma$  上的正则表达式由且仅由以下规则定义:

- (1)  $\epsilon$  是正则表达式;
- (2)  $\forall a \in \Sigma$ ,  $a$  是正则表达式;
- (3) 如果  $r$  是正则表达式, 则  $(r)$  是正则表达式;
- (4) 如果  $r$  与  $s$  是正则表达式, 则  $r|s$ ,  $rs$ ,  $r^*$  也是正则表达式。

运算优先级:  $() \succ * \succ \text{连接} \succ |$

$$(a)|((b)^*(c)) \equiv a|b^*c$$

每个正则表达式  $r$  对应一个正则语言  $L(r)$

Definition (正则表达式对应的正则语言)

$$L(\epsilon) = \{\epsilon\} \quad (1)$$

$$L(a) = \{a\}, \forall a \in \Sigma \quad (2)$$

$$L((r)) = L(r) \quad (3)$$

$$L(r|s) = L(r) \cup L(s) \quad L(rs) = L(r)L(s) \quad L(r^*) = (L(r))^* \quad (4)$$

$$\Sigma = \{a, b\}$$

$$L(a|b) = \{a, b\}$$

$$\Sigma = \{a, b\}$$

$$L(a|b) = \{a, b\}$$

$$L((a|b)(a|b))$$

$$\Sigma = \{a, b\}$$

$$L(a|b) = \{a, b\}$$

$$L((a|b)(a|b))$$

$$L(a^*)$$

$$\Sigma = \{a, b\}$$

$$L(a|b) = \{a, b\}$$

$$L((a|b)(a|b))$$

$$L(a^*)$$

$$L((a|b)^*)$$



$$\Sigma = \{a, b\}$$

$$L(a|b) = \{a, b\}$$

$$L((a|b)(a|b))$$

$$L(a^*)$$

$$L((a|b)^*)$$

$$L(a|a^*b)$$

So  
EASY

表达式	匹配	例子
$c$	单个非运算符字符 $c$	$a$
$\backslash c$	字符 $c$ 的字面值	$\backslash *$
$"s"$	串 $s$ 的字面值	$"**"$
$.$	除换行符以外的任何字符	$a.*b$
$^$	一行的开始	$^abc$
$\$$	行的结尾	$abc\$$
$[s]$	字符串 $s$ 中的任何一个字符	$[abc]$
$[^s]$	不在串 $s$ 中的任何一个字符	$[^abc]$
$r^*$	和 $r$ 匹配的零个或多个串连接成的串	$a^*$
$r^+$	和 $r$ 匹配的一个或多个串连接成的串	$a^+$
$r^?$	零个或一个 $r$	$a^?$
$r\{m,n\}$	最少 $m$ 个, 最多 $n$ 个 $r$ 的重复出现	$a\{1,5\}$
$r_1r_2$	$r_1$ 后加上 $r_2$	$ab$
$r_1   r_2$	$r_1$ 或 $r_2$	$a b$
$(r)$	与 $r$ 相同	$(a b)$
$r_1/r_2$	后面跟有 $r_2$ 时的 $r_1$	$abc/123$

表达式	匹配	例子
$c$	单个非运算符字符 $c$	$a$
$\backslash c$	字符 $c$ 的字面值	$\backslash *$
$"s"$	串 $s$ 的字面值	$"**"$
$.$	除换行符以外的任何字符	$a.*b$
$^$	一行的开始	$^abc$
$\$$	行的结尾	$abc\$$
$[s]$	字符串 $s$ 中的任何一个字符	$[abc]$
$[^s]$	不在串 $s$ 中的任何一个字符	$[^abc]$
$r^*$	和 $r$ 匹配的零个或多个串连接成的串	$a^*$
$r^+$	和 $r$ 匹配的一个或多个串连接成的串	$a^+$
$r^?$	零个或一个 $r$	$a^?$
$r\{m, n\}$	最少 $m$ 个, 最多 $n$ 个 $r$ 的重复出现	$a\{1, 5\}$
$r_1r_2$	$r_1$ 后加上 $r_2$	$ab$
$r_1 \mid r_2$	$r_1$ 或 $r_2$	$a \mid b$
$(r)$	与 $r$ 相同	$(a \mid b)$
$r_1/r_2$	后面跟有 $r_2$ 时的 $r_1$	$abc/123$

$[0 - 9] \quad [a - zA - Z]$

$^ \quad \$$

# 正则定义与简记法

Vim ↕	Java ↕	ASCII ↕	Description ↕
	\p{ASCII}	[\x00-\x7F]	ASCII characters
	\p{Alnum}	[A-Za-z0-9]	Alphanumeric characters
\w	\w	[A-Za-z0-9_]	Alphanumeric characters plus "_"
\W	\W	^[A-Za-z0-9_]	Non-word characters
\a	\p{Alpha}	[A-Za-z]	Alphabetic characters
\s	\p{Blank}	[ \t]	Space and tab
\< \>	\b	(?<=\W) (?=\w)   (?<=\w) (?=\W)	Word boundaries
	\B	(?<=\W) (?=\W)   (?<=\w) (?=\w)	Non-word boundaries
	\p{Cntrl}	[\x00-\x1F\x7F]	Control characters
\d	\p{Digit} or \d	[0-9]	Digits
\D	\D	^[0-9]	Non-digits
	\p{Graph}	[\x21-\x7E]	Visible characters
\l	\p{Lower}	[a-z]	Lowercase letters
\p	\p{Print}	[\x20-\x7E]	Visible characters and the space character
	\p{Punct}	[ ] [ ! " # \$ % & ' ( ) * + , . / : ; < = > ? @ \ ^ _ ` {   } ~ - ]	Punctuation characters
\s	\p{Space} or \s	[ \t\r\n\v\f]	Whitespace characters
\S	\S	^[ \t\r\n\v\f]	Non-whitespace characters
\u	\p{Upper}	[A-Z]	Uppercase letters
\x	\p{XDigit}	[A-Fa-f0-9]	Hexadecimal digits



$$(0|(1(01^*0)^*1))^*$$



<https://regex101.com/r/ED4qgC/1>

## REGULAR EXPRESSION v1

```
^((0|(1(01*0)*1))*$
```

## TEST STRING

0

1

10

11

100

101

110

111

1000

1001

1010

1011

1100

1101

1110

1111

10000

10001

10010

10011

10100

10101

10110

REGULAR EXPRESSION v1 ▾

/^(0|1(01\*0)\*1)\*\$/

TEST STRING

0

1

10

11

100

101

110

111

1000

1001

1010

1011

1100

1101

1110

1111

10000

10001

10010

10011

10100

10101

10110

3 的倍数 (二进制表示)



Thank  
You!



Office 926

hfwei@nju.edu.cn