

**本 科 毕 业 论 文（设计）**

**院 系** 软件学院

**题 目** 基于JavaScript的词法分析器自动生成工具的设计与实现

**学生姓名** 葛羽航 **学 号** 081251041

**年 级** 2012级 **专 业**  软件工程

**指导教师** 葛季栋 **职 称** 讲师

**论文提交日期**

# 摘 要

\*\*项目背景(为什么要做这个项目)。

\*\*技术简介(项目开发中使用了哪些技术，有何特点)。

\*\*项目组整体完成了项目中的哪些功能。

\*\*本人在项目中承担了哪些工作。

**关键词**：\*\*项目，\*\*技术(关键名词)1，\*\*技术(关键名词)2，…..

# Abstract

.

.

.

**Keywords**：, ,

**目 录**

[摘 要 I](#_Toc323148668)

[Abstract II](#_Toc323148669)

[图目录 IV](#_Toc323148670)

[表目录 V](#_Toc323148671)

[第一章 引言 1](#_Toc323148672)

[1.1 项目背景 1](#_Toc323148673)

[1.2 国内(外)工作流建模技术研究现状 2](#_Toc323148674)

[1.X可补充二级标题 2](#_Toc323148675)

[1.X.1 可补充三级标题 2](#_Toc323148676)

[1.X.2 可补充三级标题 2](#_Toc323148677)

[1.Z 论文的主要工作和组织结构 2](#_Toc323148678)

[第二章 \*\*技术概述 4](#_Toc323148680)

[2.1 \*\*技术 4](#_Toc323148681)

[2.1.1 \*\* 4](#_Toc323148682)

[2.1.2 \*\* 5](#_Toc323148683)

[2.2 \*\*技术 6](#_Toc323148684)

[2.X \*\*本章小结 6](#_Toc323148685)

[第三章 \*\*系统需求分析与概要设计 7](#_Toc323148686)

[3.1 \*\*项目整体概述 7](#_Toc323148687)

[3.1.1 \*\*可补充三级标题 **错误!未定义书签。**](#_Toc323148688)

[3.1.2 \*\*可补充三级标题 **错误!未定义书签。**](#_Toc323148689)

[3.2 \*\*系统的需求分析 7](#_Toc323148690)

[3.2.1 \*\*可补充三级标题 **错误!未定义书签。**](#_Toc323148691)

[3.2.2 \*\*可补充三级标题 **错误!未定义书签。**](#_Toc323148692)

[3.3 \*\*系统的概要设计 7](#_Toc323148693)

[3.3.1 \*\*可补充三级标题 7](#_Toc323148694)

[3.3.2 \*\*可补充三级标题 7](#_Toc323148695)

[3.X \*\*本章小结 **错误!未定义书签。**](#_Toc323148696)

[第四章 \*\*项目\*\*模块的详细设计与实现 8](#_Toc323148697)

[4.1 \*\*模块概述 8](#_Toc323148698)

[4.2\*\*模块的详细设计 9](#_Toc323148699)

[4.2.1 \*\*可补充三级标题 9](#_Toc323148700)

[4.2.2 \*\*可补充三级标题 10](#_Toc323148701)

[4.3 \*\*模块的实现 15](#_Toc323148702)

[4.3.1 \*\*可补充三级标题 16](#_Toc323148703)

[4.3.2 \*\*可补充三级标题 20](#_Toc323148704)

[4.X \*\*本章小结 **错误!未定义书签。**](#_Toc323148705)

[第五章 总结与展望 24](#_Toc323148706)

[5.1 总结 24](#_Toc323148707)

[5.2 展望 28](#_Toc323148708)

[参考文献 32](#_Toc323148709)

[致谢 33](#_Toc323148710)

# 图目录

[图2.1 \*\*图 **错误!未定义书签。**](#_Toc323067900)

[图2.2 \*\*图 **错误!未定义书签。**](#_Toc323067901)

[图4.1 MyWorkController类代码 **错误!未定义书签。**](#_Toc323067902)

# 

# 表目录

[表2.1 \*\*表 6](#_Toc323067881)

# 第一章 引言

## 1.1 项目背景

词法分析作为编译原理中的理论之一，在软件应用中有着广泛的应用：编译器中的scanner，网络游戏中的脚本引擎，文本编辑器中的自动纠错等等，都会用到词法分析作为语法分析或者词素检测的前趋工作。

词法分析器自动生成工具（传统称之为lex），则是为了满足不用应用场景下的词法分析需求而设计的用于生成特定语言平台的词法分析器源代码的工具。Lex工具通过解析词法规则说明书的要求来生成词法分析程序，从而简化了编写词法分析器的难度。

当前lex程序已经在得到广泛的使用，在各个语言平台中都有对应的lex程序。常见的lex程序包括：Flex[[1]](#footnote-1)、JFlex[[2]](#footnote-2)、PLY[[3]](#footnote-3)、CSFlex[[4]](#footnote-4)、RAA[[5]](#footnote-5)等，涵盖了主流的程序语言平台。但是目前在JavaScript语言上，却没有对应的lex程序。

随着web2.0的不断发展和进步，网络应用在日常生活和工业生产中的作用逐渐凸显，基于前端JavaScript语言的应用越来越多也越来越复杂。此外，随着Html5的普及和推进，包括微软windows 8在内的系统平台逐步以JavaScript脚本为核心的App开发模式做为主流，JavaScript语言的使用场景将会越来越丰富。可以预见，在以下web应用场景中都会使用到词法分析的相关技术：

1. Html5游戏（特别是WebGL推广后的大型网页3D游戏）中的游戏脚本引擎
2. 在线文档编辑工具（如Google Doc, 微软的在线Office）中的拼写检查
3. Window 8 系统中大量会使用到词法分析器的App
4. 云计算平台的在线IDE中的代码高亮
5. 其它各种会使用到编译原理的应用场景

所以，开发一个基于JavaScript的词法分析器自动生成工具越来越有着潜在的必要性的作用。基于这些背景和考虑，本项目完成了基于JavaScript的词法分析器自动生成工具。

## 1.2 国内(外)lex技术研究现状

词法分析器和词法分析器生成工具（lex）作为编译原理的重要应用，在生活生产中有着广泛的应用。对于lex相关技术，国内外也有着深入而成熟的研究。目前对于lex技术的研究主要集中在正则表达式、NFA和DFA、lex程序等方面。

### 1.2.1 正则表达式

正则表达式出现于理论计算机科学的自动控制理论和形式化语言理论中。在这些领域中有对计算（自动控制）的模型和对形式化语言描述与分类的研究。1940年代，Warren McCulloch与Walter Pitts将神经系统中的神经元描述成小而简单的自动控制元。在1950年代，数学家斯蒂芬·科尔·克莱尼利用称之为“正则集合”的数学符号来描述此模型。肯·汤普逊将此符号系统引入编辑器QED，然后是Unix上的编辑器ed，并最终引入grep。自此，正则表达式被广泛地使用于各种Unix或者类似Unix的工具，例如Perl。

### 1.2.2 NFA和DFA

有限状态机（英语：finite-state machine, FSM），又称有限状态自动机，简称状态机，是表示有限个状态以及在这些状态之间的转移和动作等行为的数学模型。非确定有限自动机(NFA)是对每个状态和输入符号对可以有多个可能的下一个状态的有限状态自动机，

### 1.2.3 Lex程序

在计算机科学里面，lex是一个产生词法分析器(lexical analyzer) ("扫描器"(scanners)或者"lexers")的程式。Lex常常与yacc 语法分析器产生程式(parser generator)一起使用。 Lex(最早是埃里克·施密特和Mike Lesk制作)是许多UNIX系统的标准词法分析器(lexical analyzer)产生程式，而且这个工具所作的行为被详列为POSIX标准的一部分。

传统的Lex程序读进一个代表词法分析器规则的输入字串流，然后输出以C语言实做的词法分析器源代码。

虽然传统上是商业软件，但是有些根据原本AT&T程式码这些版本的Lex可以以公开源代码的形式获得，并被视为某些系统的一部份，例如说OpenSolaris和贝尔实验室九号计划。 另一个有名的Lex公开源代码版本是flex，代表"快速的词法分析器"(fast lexical analyzer)。

此外在国际上，除了C语言平台之外，在包括JAVA、.NET、Ruby、Python等语言平台上都有对应的lex程序。

## 1.3 论文的主要工作和组织结构

本文介绍了词法分析和词法分析自动生成工具的相关理论知识，以及一个基于JavaScript的lex工具——AliceLex的设计和实现。主要是对词法分析相关的编译原理进行描述，同时描述一个基于JavaScript的Lex的设计和实现过程以及这个过程中出现的一些问题，论文主要工作包括：

1. 介绍了Web2.0的发展现状，阐述了编译原理，尤其是词法分析在JavaScript上面的应用前景。

2. 介绍了编译原理的相关理论知识，词法、文法的相关概念。包括正则表达式，NFA，DFA，以及相关的算法理论。

3. 介绍了词法分析器自动生成工具和其实现的难点要点，展现当前Lex工具的现状。

5. 详细介绍了基于JavaScript的词法分析自动生成工具AliceLex的设计与实现，展示了该工具的使用典示例。

本篇论文的组织结构如下：

第一章：概述和前言部分，主要介绍了项目背景，当前词法分析和词法分析自动生成工具的研究及现状 ，并描述了该论文的主要工作。

第二章：主要介绍基于JavaScript的词法分析器自动生成工具的开发和实现过程中用到的相关理论知识和理论研究，以及基于JavaScript的Lex工具与传统Lex工具相比较的特点和实现难点。

第三章：从需求分析和总体设计两个方面，描述基于JavaScript的Lex工具的提出背景和开发者信息，同时分析和总结出功能性和非功能性需求。

第四章：对AliceLex工具的详细设计和实现进行描述，重点包括Lex工具相关算法的设计和具休实现。

第五章：AliceLex工具的使用说明和相关示例，包括展示经典Lex示例在AliceLex上的实现，以及介绍了基于AliceLex核心的在线代码编辑器。

第六章：总结该项目已实现的功能，探讨项目的缺点和不足，并指出该项目未来的扩展和发展方向

# 第二章 AliceLex工具相关技术概述

## 2.1词法分析相关理论

词法分析是编译的第一阶段，其主要任务是读入源程序的输入字符、将它们组成词素，生成并输出一个词法单元序列，每个词法单元对应于一个词素。这个词法单元序列可以被输出到词法处理单元进行下一步的分析处理（典型的就是输出到语法分析器中进行语法分析）。

### 2.1.1 词法单元、模式和词素

词法分析中的三个关键术语：

* **词法单元**由一个单元名和一个可选的属性值组成。词法单元名是一个表示某种词法单位的抽象符号，比如一个特定的关键字，或者代表一个标识符的输入字符序列。
* **模式**描述了一个词法单元的词素可能具有的形式。当词法单元是一个关键字时，它的模式就是组成这个关键字的字符序列。对于标识符和其他词法单元，模式是一个更加复杂的结构，它可以很多符号串匹配。
* **词素**是源程序中的一个字符序列，它和某个词法单元的模式匹配，并被词法分析器识别为该词法单元的一个实例。

### 2.1.2 正则表达式

正则表达式是一种用来描述词素模式的重要表示方法，它可以高效地描述在处理词法单元时要用到的模式类型。Lex程序中对于词法规则的定义部分，正是使用正则表达式及其扩展来描述。下面给出相关的定义。

****定义2.1 正则表达式****

设是字母表。上的正则表达式（regular expressions）和正则表达式表示的语言递归定义如下：

1. 是一个正则表达式，表示空集；
2. 是一个正则表达式，表示{};
3. 是一个正则表达式，表示{}，这里；
4. 如果 和 分别表示语言*R*和*S*的正则表达式，那么：

(*r|s*) 是表示的正则表达式；

(*rs*) 是表示*RS*的正则表达式；

(*r\**) 是表示*R\** 的正则表达式。

****定义2.2 正则表达式扩展****

在lex的词法规则定义块中使用的正则表达式扩展表示法在词法分析的规约中有着普遍的使用，其典型的扩展表示定义如下：

1. 一个或多个实例。单目后缀运算符表示一个正则表达式及其语言的正闭包。即如果 *r* 是一个正则表达式，那么(*r*)+ 就表示语言(*L*(*r*))+，*r*+ = *r*\**r* = *rr*\*，*r*\* = *r*+|
2. 零个或一个实例。单目后缀运算符 ？ 表示零个或一个出现，r? = r|e，即L(r) = L(r) U {e}
3. 字符类。正则表达式a1|a2|…|an（其中ai是字母表中的各个符号）可以缩写成[a1a2…an]。当a1,a2,…,an形成一个逻辑上的连续的序列时，比如连续的大写字母，连续的小写字母时，可以表示成[a1-an]。如果在[]内第一个字符是^，表示排除[]内之后字符范围内的所有字符。
4. 重复。后续花括弧{}运算符表示重复之前的正则表达式。r{m,n}表示最少m个，最多n个r的重复出现。如果省略m，表示最少0个，省略n，表示最多不限制。
5. 预定义表示。转义符 \ 用来表示预定义的正则表达式。比如\d表示数字，相当于[0-9]。更多的预定符包括 \D, \s, \S, \w, \W[[6]](#footnote-6)

### 2.1.2 有穷自动机

词法分析器的工作核心是有穷自动机的状态转移变化，而lex程序的工作原理则是将词法规则分析转换成自动机并对自动机进行处理和优化，包括正则表达式转到不确定有穷自动机（NFA）、不确定有穷自动机（NFA）转到确定有穷自动机（DFA）、确定有穷自动机的压缩（DFA compression）等等。最后将自动机转换成数组表的表示形式。下面给出相关的定义：

****定义 2.3 不确定有穷自动机（NFA）****

一个不确定的有穷自动机（NFA）由以下几个部分组成：

1. 一个有穷的状态集合S。
2. 一个输入符号集合E，即输入字母表（input alphabet）。
3. 一个转换函数（transition function），它为每个状态和EU{e}中的每个符号给出了相应的后继状态（next state）的集合。
4. S中的一个状态s0被指定为开始状态或叫初始状态。
5. S中的一个子集F被指定为接受状态（或者叫终止状态）集合。

****定义 2.4 确定有穷自动机（DFA）****

设是一个不含-规则的有穷自动机。如果对每个和，有，则是一个确定有穷自动机（deterministic finite automaton）。

即确定有穷自动机（DFA）是不确定有穷自动机（NFA）的一个特例，没有输入之上的转换动作，对于每个状态s和每个输入符号a，有且只有一条标号为a的边离开。

## 2.2 lex技术

# 第三章 AliceLex工具需求分析与概要设计

AliceLex是JavaScript语言平台上的词法分析器自动生成工具，其本身使用JavaScript脚本编写，通过词法规则动作本文，生成JavaScript脚本的词法分析器源代码。

## 3.1 项目需求分析

### 3.1.1功能需求

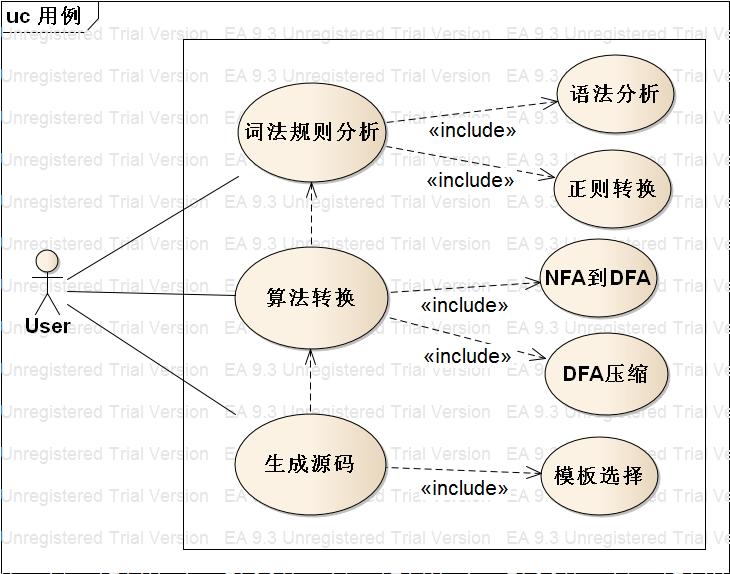
作为一个词法分析器自动生成工具，AliceLex工具拥有传统Lex程序的功能，包括以下主要方面：

1. 接受Lex词法规则文本，将其转换成规则对应的词法分析器的JavaScript源码。
2. 接受带状态的词法规则，规则中可以定义不同的状态，在不同状态下有规则动作；不同状态间通过内置函数yygoto进行跳转。
3. 生成的词法分析器是面向对象的，该对象名称可以由用户在词法规则文本中通过参数指定。
4. 支持通过参数指定大小写忽略，指定是否支持Unicode编码。
5. 支持词法分析器源码模板。

同时，AliceLex作为JavaScript语言平台上的Lex工具，还具有如下功能需求：

1. 可以在浏览器前端和服务器端nodejs两个平台上使用。
2. nodejs端包装成nodejs的扩展，可以通过npm安装。

该工具的用例相对简单，用例图如下：



### 3.1.2 非功能需求

目前，AliceLex工具需要符合以下约定：

1. 工具使用的语言和生成的源码都是JavaScript。
2. 工具可以在浏览器前端和nodejs两种平台上使用。
3. 工具接收的lex规则文本符合传统lex程序使用的规则文本的定义。

在此基础上，AliceLex工具的性能需求如下：

|  |  |
| --- | --- |
| 时间特性要求 | 工具解析词法规则文件的功能，要求解析1kb文本时间不超过0.5秒 |
| 工具对词法分析器的算法，要求运行时间不超过1.5秒 |
| 灵活性要求 | 本系统需要满足开源项目的要求，支持跨平台使用 |
| 本系统需要预留开发和扩展接口，以便后续开发 |
| 输入输出要求 | 输入文件格式为纯文本：txt文件或者直接的字符串 |
| 输出文件为JavaScript源代码 |
| 故障处理要求 | 编写异常类，提供异常处理功能，工具出现错误能友好的提醒 |
| 对于开发人员，提示错误发生的位置和原因，以便于修改和维护。 |

同时，作为一个开源项目，本项目使用如下开发平台和工具：

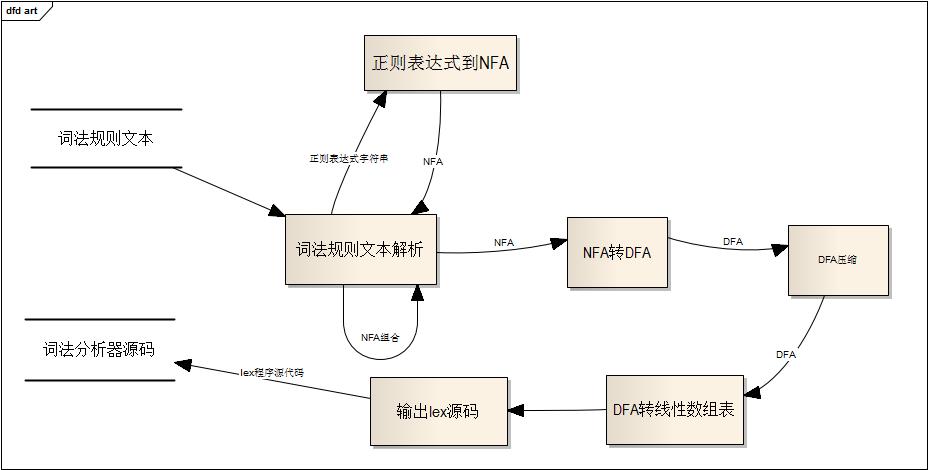
|  |  |
| --- | --- |
| 开发语言 | JavaScript |
| 开发工具 | Aptana 3.0 |
| 源代码管理 | Git |
| 操作系统 | 支持浏览器的所有操作系统平台 |
| 开源地址 | https://github.com/YuhangGe/alicelex |

## 3.2 项目概要设计

### 3.2.1 体系结构设计

AliceLex是JavaScript语言上的lex工具，跟传统lex工具一样，其核心流程包括：读取词法规则(lex)文本—>解析词法规则文本，构造规则文本对应的NFA—>将NFA转换成DFA—>DFA压缩（最小化）—>DFA转换成线性表—>将线性表生成词法分析器程序源码。

综合以上分析，AliceLex项目的体系结构使用管道过滤器风格，其体系结构图如下：



其整个过程是从词法规则文本，通过对文本进行语法分析，将其中的正则表达式规则转换成NFA，进一步转换成DFA，然后对DFA进行状态最小化（压缩），进行线性表生成，最后根据线性表生成规则文本对应的词法分析器源代码。整个过程的输入输出程流式结构，符合管道过滤器风格的特点。

### 3.2.2 模块划分及功能

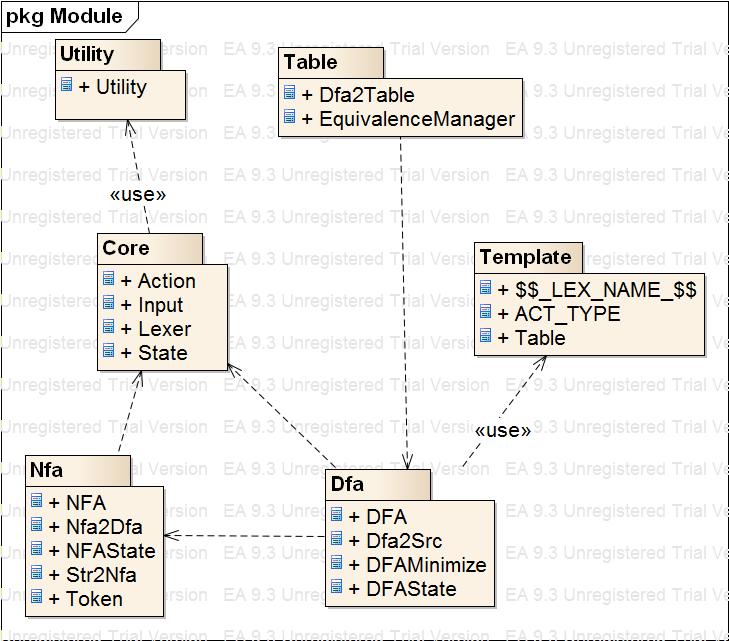
AliceLex项目的模块划分及其功能的描述如下：

1. 公共核心模块：包括了输入符类，有限状态机状态基类等，提供公共的核心数据结构。同时提供对外的接口。
2. Nfa处理模块：包括NFA状态类和NFA类，处理NFA及其相关算法，包括将正则表达式转换成NFA，将NFA转换成DFA等。
3. Dfa处理模块：包括DFA状态类和DFA类，处理DFA及其相关算法，包括对DFA进行状态最小化等。
4. 线性表和等价类管理模块：包括了将DFA生成线性表的类和等价类管理类，处理线性表的生成、压缩以及输入符的等价类管理。
5. 实用类模块：包括了一个实用类，封装了对数组操作，字符串处理和字符类型判断等常用的函数操作。
6. 源码模版模块：提供生成的词法分析器源代码的不同模板，以适应不同场合下的词法分析器的生成需求。

# 第四章 AliceLex工具的详细设计与实现

## 4.1 模块概述

AliceLex工具共由6个模块组成，分别是Core、Nfa、Dfa、Table、Utility、Template。模块之前的依赖关系图如下：



各模块的概述如下：

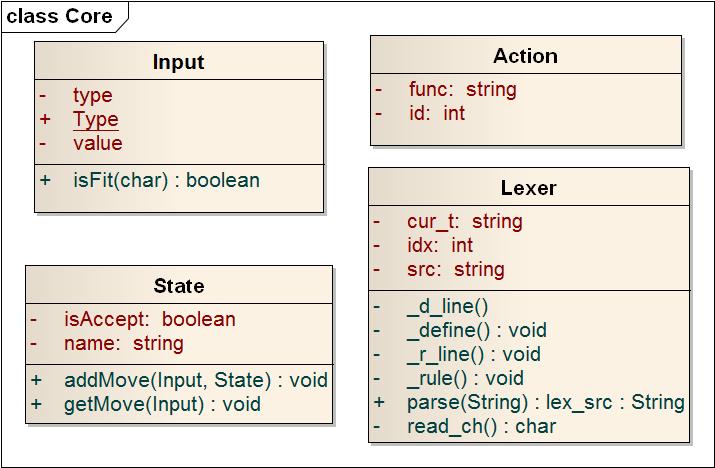
* Core公共核心模块，包含了核心的类——输入类Input，状态父类State，动作类Action，以及全局唯一的对外公开类Lexer。
* Nfa模块，包含了与NFA相关的处理类——NFA状态类NFAState，NFA类，实现NFA到DFA转换的类Nfa2Dfa，将正则表达式字符串转换成NFA的类Str2Nfa。
* Dfa模块，包含了与DFA相关的处理类——DFA状态类DFAState，DFA类，实现DFA状态最小化的类DFAMinimize，将DFA类最终输出成记法分析器源代码的类Dfa2Src
* Table模块，包含和表驱动相关的类——为DFA生成相应的线性数组表（即default, base, check, next, action表）的类Dfa2Table，在整个词法分析过程中对输入符进行等价类管理的类EquivalenceManager。
* Utility模块，包含了一个静态类——Utility。其作用是提供静态公共辅助函数。
* Template模块。该模块严格意义上不是工具的代码构成，只是需要生成的词法分析器的源代码的模版。

## 4.2模块的详细设计

### 4.2.1 公共核心模块—Core

**模块类图**

公共核心模块Core提供了工具各个模块都需要依赖的全局类Input, Action, State，以及工具全局唯一的对外接口类Lexer，模块的类图如下：



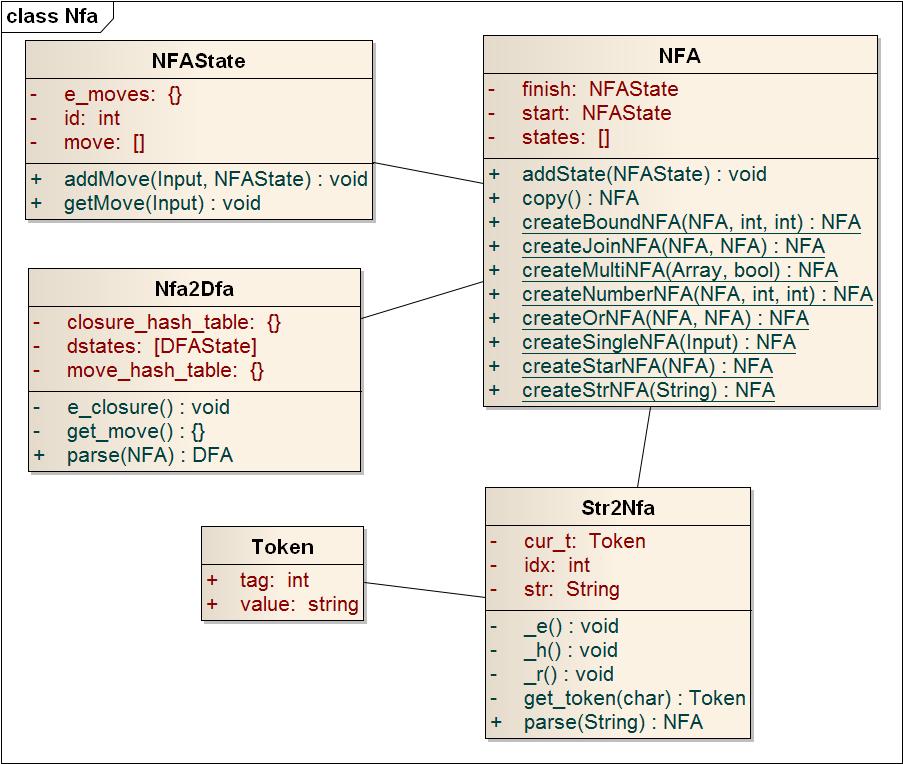
**模块类详细描述**

* Input类，输入类，用于包装NFAState和DFAState的状态转移的输入条件。Type是枚举类型，包括SINGLE, RANGE, EXCEPT, EMPTY，分别代表单字符的输入，某个范围的输入，排除某个范围的输入和空输入（特指状态转移中的ε输入）。函数isFit接收一个char，判断该char是否满足该输入。
* Action类，动作类，用于包装在词法规则代码中规则动作定义部分里定义的动作。其中id是其标识，func储存用户定义的动作代码。
* State类，状态基类。定义了有限状态机的状态，属性isAccept表明该状态是否是接受状态；name是该状态的名字（这只是个辅助属性，并没有实际作用）。函数addMove和getMove是抽像函数，声明了添加一个状态转移和得到某输入对应的转移状态的接口。State类的子类包括Nfa模块中的NFAState和Dfa模块中的DFAState。
* Lexer是AliceLex工具全局的唯一对外公开接口。其公开函数parse接收词法规则的文本，将其最终转换成该规则对应的词法分析器的JavaScript源代码。整个转换过程使用自顶向下的递归实现，类中定义的属性（src, cur\_t, idx）和私有函数（read\_ch, \_define, \_d\_line, \_rule, \_r\_line等）都是实现词法和语法分析的成员。

### 4.2.2 NFA模块—Nfa

**模块类图**

Nfa模块包括NFA的相关实现的类NFAState, NFA, Nfa2Dfa以及Str2Nfa，其类图如下：



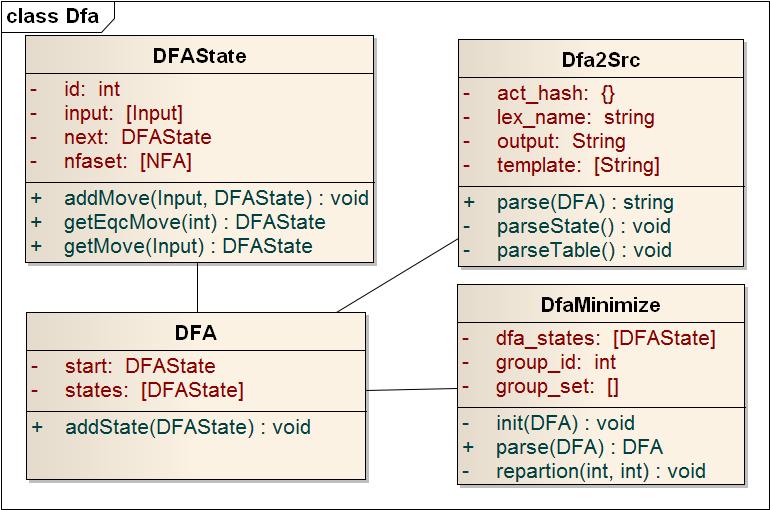
**模块类详细描述**

* NFAState类，继承自状态机状态基类State，实现了NFA状态的定义和相关函数成员。e\_moves专门为ε转移保存了转移规则，moves为其它输入保存了转移规则，addMove函数添加一个输入input对应的转移状态，getMove得到一个输入Input对应转移到的NFAState
* NFA是不确定有限状态机的抽像数据类型，其属性start和finish分别指向该NFA的开始和结束状态，states保存了状态机的所有状态。函数addState为NFA添加一个NFAState，copy会返回一个当前NFA的拷贝。除此之外，还有以create开头的静态公开成员函数，这些函数实现了NFA的相关计算，包括以一个输入生成基本NFA的createSingleNFA，将两个NFA进行连接运算的createJoinNFA，将两个NFA进行选择运算的createOrNFA，对NFA进行闭包运算的createStarNFA，从一个连续字符串生成NFA的createStrNFA，对NFA进行重复的createNumberNFA。
* Nfa2Dfa类，将NFA转换成DFA。唯一的公开函数parse接收一个NFA，将其转换成等价的DFA。
* Str2Nfa类，将正则表达式字符串转换成NFA。唯一的分开函数parse接收一个正则表达格式的字符串，使用自顶向下的递归进行语法分析，调用NFA类的静态计算函数，最终生成描述该正则表达式的NFA。

### 4.2.3 DFA模块—Dfa

**模块类图**

Dfa模块包括DFA相关的实现类DFAState, DFA, Dfa2Src, DfaMinimize，其类图如下：

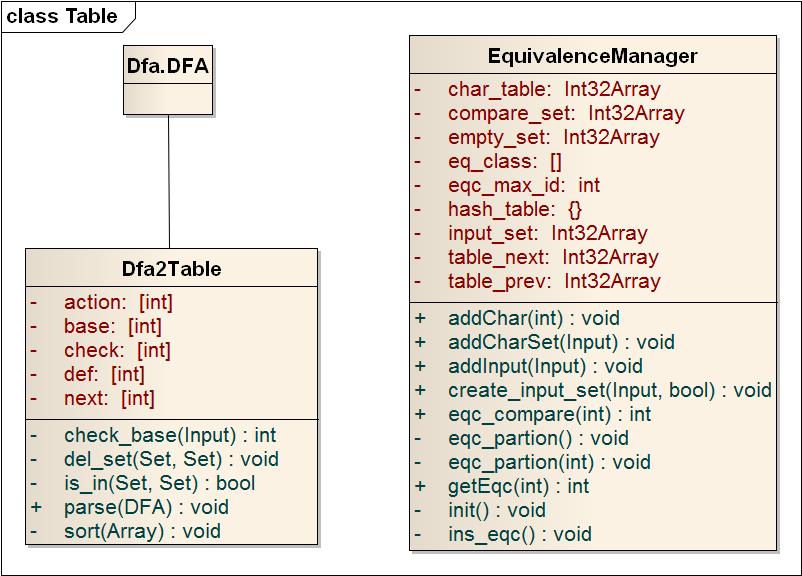


**模块类详细描述**

* DFAState类，继承自状态机状态基类State，实现了DFA的状态的定义和相关函数。input和next两个数组分别储存状态的输入和该输入对应的转移状态，nfaset保存在NFA转换成DFA过程中该DFA对应的NFA状态集。addMove函数添加一个输入input对应的转移状态，getMove得到一个输入Input对应转移到的NFAState，getEqcMove是DFAState特有的函数，通过一个输入字符的等价类值直接返回一个转移状态。
* DFA类，对确定的有限状态自动机的抽像数据结构，start指向该DFA的开始状态，states保存该DFA的所有状态集合。addState函数添加一个DFAState。
* DfaMinimize类，对DFA进行状态最小化。其唯一的公开函数接受一个DFA，将其状态数进行压缩以达到最小化，最后返回一个最小化状态后的新的DFA。
* Dfa2Src类，从DFA（已经经过压缩和转换成线性表）生成词法分析器源码。其唯一公开函数是parse，接受一个DFA，生成对应词法分析器源码的字符串。

### 4.2.4 线性表和等价类管理模块—Table模块

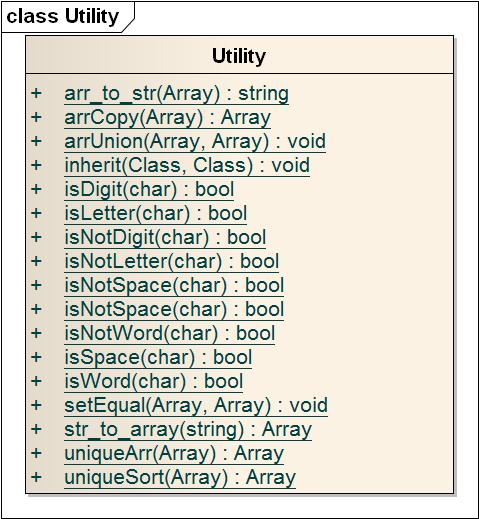
**模块类图**



### 4.2.5 实用集模块—Utility

**模块类图**

实用类模块包括一个辅助的实用类Utility，该类只包含公开的静态函数，全部是实现的函数，其类图如下：



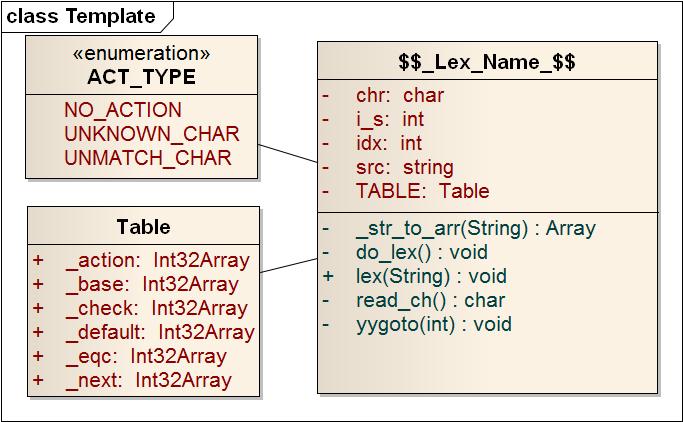
**模块类详细描述**

类Utility是辅助类，其只包含用于辅助作用的静态函数。包括集合相关的判断处理函数：setEqual（判断两个集合是否相等），arrUnion（对集合求并集），uniqueArr（将数组元素唯一化，即转换成集合），uniqueSort（对数组进行排序并移除重复元素）；数组常用函数：arrCopy（复制数组），arr\_to\_str（将整数数组压缩成字符串），str\_to\_array（将压缩的字符串还原成整娄数组）；以及常用的字符判断函数isDigit（是否是数字），isLetter（是否是字母）等等。

### 4.2.6 词法分析器源码模板模块—Template

**模块类图**

该模块的代码不是AliceLex的组成部分，而是AliceLex跟据词法规则生成的词法分析器源代码的模板。模块下的各个类，是使用在不同场景下的词法分析器的源代码的模板。其类图如下：



**模块类详细描述**

* ACT\_TYPE是枚举，指明当前词法分析到的位置的Action类型。NO\_ACTION表明当前没有定义动作，UNKNOWN\_CHAR表明遇到未知的字符，UNMATH\_CHAR表明当前字符不满足词法规则。如果当前Action是非三个枚举的其它值，则表明当前到达用户定义的动作，执行该值在action表中对应的动作。
* Table是一个辅助类，保存当前词法分析器的六张表。分别是default, base, check, next, action和eqc。其中eqc是保存的输入符对应的等价类。
* $$\_LEX\_NAME\_$$是由AliceLex生成的词法分析器类。该$$\_LEX\_NAME\_$$的实际值由用户在词法规则文件中定义，最终模板中的该符号会被替换。其唯一的公开接口是lex，接受一个待分析的文本，对其进行词法分析。yygoto是在当前状态中进行跳转，借此函数可以实现带状态的词法分析。

## 4.3 算法的详细设计和实现

AliceLex工具中使用了比较多的编译原理中词法分析相关的算法，并在JavaScript中得到完整实现，包括正则表达式字符串转换成NFA、NFA到DFA的转换、DFA状态最小化、DFA转换成线性表等。接下来会对这些关键算法进行描述，包括伪代码描述以及关键实现代码的展现。

### 4.3.1 正则表达式构造NFA

**伪码描述**

**算法主逻辑**：使用自顶向下递归对表达式字符串reg进行语法分析，分解出组成它的子表达式，在这个过程中使用两个规则将语法分析的子表达式构造成NFA。两个规则包括基本规则和归纳规则，基本规则处理不包含运算符的子表达式，而归纳规则根据一个给定表达式的直接子表达式的NFA构造出这个子表达式的NFA。

**基本规则**：对于表达式ε，构造下面的NFA。

i

f

start

ε

这里，i是一个新的状态，也是这个NFA的开始状态；f是另一个新的状态，也是这个NFA的接受状态。

对于字母表E中的子表达式a，构造下面的NFA。

i

f

a

start

同样，i和f是新状态，分别是这个NFA的开始和接受状态。在基本规则中，对于ε或某个a的作为reg的子表达式的每次出现，都使用新状态分别构造出一个独立的NFA。

**归纳规则**：

* 选择关系的运算，包括|运算符和[]运算符，比如r=s1|s2|…|sn或r=[s1-sn]，使用如下图示进行构造：

S1

S2

……

Sn

i

f

其中i和f是新状态，分别是这个NFA的开始和接受状态。从i到sk(k=1…n)的开始状态各有一个ε转换，从sk的接受状态到f各有一个ε转换。

* 连接关系的运算，比如r=s1s2…sn，使用如下图示进行构造：

S11

i

f

S2

Sn

……

其中i是第一个NFA即s1的开始状态，f是最后一个NFA即sn的接受状态。第k个NFA即sk的开始状态和第k+1个NFA即sk+1的接受状态合并为一个状态，合并后的状态拥有原来进入和离开合并前两个状态的全部转换。

* 闭包关系运算，即r=s\*，使用如下图示进行构造：

S

i

f

其中i和f是两个新状态，分别是新NFA的开始和接受状态。

* 对于其它扩展关系运算，包括+，？，{}等都转换成上面的3种运算构造。

**关键实现代码**

对正则表达式字符串的语法分析由Nfa模块中的Str2Nfa类完成，以下是其中的自顶向下递归中的部分关键代码：

|  |
| --- |
| //处理或运算，即 r=s|f  \_r : function() {  var nfa1, nfa2;  nfa1 = this.\_e();  while(true) {  if(this.cur\_t.tag === N.Tag['|']) {  //$.dprint('|')  this.read\_token();  nfa2 = this.\_e();  nfa1 = N.NFA.createOrNFA(nfa1, nfa2);  //$.dprint(nfa1);  } else  break;  }  //$.dprint(nfa1);  return nfa1;  },  //处理连接运算，即r = sf  \_e : function() {  var nfa1 = this.\_t();  var nf2;  while(true) {  if(this.cur\_t.tag !== N.Tag['|'] && this.cur\_t.tag !== N.Tag[')'] && this.cur\_t !== N.Token.EOF) {  nfa2 = this.\_t();  nfa1 = N.NFA.createJoinNFA(nfa1, nfa2);  //$.dprint(nfa1);  } else  break;  }  //$.dprint(nfa1);  return nfa1;  }, |

在以上代码中，只对正则字符串进行了语法分析和构造，更具体的生成NFA实例的职责交由Nfa模块中NFA类的静态函数实现，以下是其中两个函数的示例：

|  |
| --- |
| /\*\*  \* 将两个nfa进行并运算，返回一个新的nfa。  \* r=s|t  \*/  createOrNFA : function(nfa1, nfa2) {  var s = new N.NFAState();  var f = new N.NFAState(true);  s.addMove(C.Input.e, nfa1.start);  s.addMove(C.Input.e, nfa2.start);  nfa1.finish.isAccept = false;  nfa1.finish.addMove(C.Input.e, f);  nfa2.finish.isAccept = false;  nfa2.finish.addMove(C.Input.e, f);  var rtn = new N.NFA(s, f);  rtn.addState(nfa1.states);  rtn.addState(nfa2.states);  rtn.addState(s, f);  return rtn;  },  /\*\*  \* 将两个nfa进行连接运算，返回一个新的nfa。  \* r=st  \*/  createJoinNFA : function(nfa1, nfa2) {  // $.dprint('\*\*\*\*\*\*\*\*\*');  // $.dprint(nfa1);  // $.dprint(nfa2);  var rtn = new N.NFA(nfa1.start, nfa2.finish);  nfa1.finish.isAccept = false;  //合并nfa1的接受状态和nfa2的开始状态为同一个状态  if(nfa2.start.move)  nfa1.finish.addMove(nfa2.start.move[0], nfa2.start.move[1]);  for(var i = 0; i < nfa2.start.e\_moves.length; i++)  nfa1.finish.addMove(C.Input.e, nfa2.start.e\_moves[i]);  //将nfa1的状态和nfa2状态增加到新的nfa中，因为nfa1的开始态和nfa2开始态已经合并，  //不需要将nfa2的开始态添加。  rtn.addState(nfa1.states);  for(var i = 0; i < nfa2.states.length; i++) {  if(nfa2.states[i] !== nfa2.start)  rtn.addState(nfa2.states[i]);  }  // $.dprint(rtn);  // $.dprint('\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*');  return rtn;  }, |

### 4.3.2 NFA转换为DFA

**伪码描述**

算法主逻辑

|  |
| --- |
| 定义DFAStates， DFATran  一开始，e-closure(s0)是DFAStates中唯一状态，且它未加标记；  while(在DFAStates中有一个未标记的状态T){  给T加上标记；  for(每个输入符号a){  U=e-closure(move(T, a));  if(U不在DFAStates中){  将U加入到DFAStates中，且不加标记；  }  DFATran[T, a]=U;  }  }  返回状态集DFAStates和其上的转换函数DFATran，则是构造而成的DFA |

图。。。

主逻辑中使用到以下函数：

|  |  |
| --- | --- |
| 函数 | 描述 |
| e-closure(s) | 能够从NFA的状态s开始只通过ε转换到达的NFA状态集合 |
| e-closure(T) | 能够从状态集T中某个状态s开始只通过ε转换到达的NFA状态集合，即 |
| Move(T, a) | 能够从T中某个状态s出发通过标号为a的转换到达的NFA状态的集合 |

其中e-closure(s)和move(T, a)只需要使用简单的线性遍历可以得到，e-closure(T)使用如下描述算法得到：

|  |
| --- |
| 将T的所有状态压入栈stack中；  将e-closure(T)初始化为T；  while( stack )非空 {  将栈顶元素t弹出栈；  for (每个满足如下条件的u：从t出发有一个标号为ε的转换到达状态u)  {  if(u不在e-closure(T)中)  {  将u加入到e-closure(T)中;  将u压入到栈中；  }  }  } |

**关键实现代码**

|  |
| --- |
| while( S = this.get\_untag\_state()) {  S.tag = true;    for(var i = 0; i < eqc.length; i++) {    var mv = this.get\_move(S.nfaset, eqc[i]);  if(!mv)  continue;  //$.dprint(mv.move);  /\*  \* 计算move集合的e\_closure集合  \*/  var ec = this.e\_closure(mv);    /\*\*  \* 从已经存在的e\_closure集中查找该e\_closure对应的dfa状态，  \* 如果没有打到，说明该dfa状态还示存在，需要新建  \*/  var dfa\_state = this.closure\_hash\_table[ec.hash\_key];  if(!dfa\_state) {  dfa\_state = new D.DFAState(ec.is\_accept, U.\_n.get());  dfa\_state.nfaset = ec.closure;    this.add\_dfa\_state(dfa\_state, ec.hash\_key);  }    var eqc\_index = Alice.CharTable.getEqc(eqc[i]);  S.addMove(eqc\_index, dfa\_state);  }  } |

e-closure函数

|  |
| --- |
| if(this.move\_hash\_table[mv.hash\_key])  return this.move\_hash\_table[mv.hash\_key];  var T = mv.move, is\_accept = false, stack = [], e\_c = [], e\_id = [], new\_closure = null, hash\_key = "";  for(var i = 0; i < T.length; i++) {  stack.push(T[i]);  e\_c.push(T[i]);  e\_id.push(T[i].id);  /\*if(T[i].isAccept === true){  is\_accept = true;  }\*/  is\_accept |= T[i].isAccept;  }  while(stack.length > 0) {  var t = stack.pop();  //$.dprint(t);  var u = t.e\_moves;  //$.dprint(u);  for(var i = 0; i < u.length; i++) {  if(e\_id.indexOf(u[i].id) === -1) {  e\_c.push(u[i]);  stack.push(u[i]);  e\_id.push(u[i].id);  is\_accept |= u[i].isAccept;  }  }  }  /\*\*  \* 计算哈希值，同样是对集合中每个状态的id进行排序后连接成字符串  \*/  hash\_key = e\_id.sort(function(a, b) {  return a > b;  }).join(",");  is\_accept = is\_accept ? true : false;  new\_closure = {  hash\_key : hash\_key,  closure : e\_c,  is\_accept : is\_accept  };  return new\_closure;  }, |

### DFA状态最小化

**伪码描述**

DFA状态最小化算法的目的在于将任意DFA转化为等价的状态最少的DFA，其作用是使得最终生成的线性表尽可能小，从而提升生成的词法分析器程序的空间效率。对于输入的DFA（接下来用D表示），使用如下方法实现对其最小化：

1. 首先构造初始划分∏，构造原则是所有非接受状态为一组，其它所有接受状态各自为一组。
2. 应用如下过程来构造一个新的划分∏new。

|  |
| --- |
| 最初，令∏new=∏；  for(∏中的每个组G){  将G分划为更小的组，使得两个状态s和t在同一组中当且仅当对于所有的输入符号a，状态s和t在a上的转换都到达∏中的同一组；  在∏new中将G替换为对G进行分划得到的那些小组；  } |

1. 如果∏new=∏，令∏final=∏并接着执行步骤4；否则用∏new替换∏并重复步骤2。
2. 在分划∏final的每个组中选取一个状态作为该组的代表。这些代表构成了状态最小DFA的状态。该DFA（接下来用D’表示）的其它部分按如下步骤构建：
   1. D’的开始状态是包含了D的开始状态的组的代表；
   2. D’的接受状态是那些包含了D的接受状态的组的代表。
   3. 令s是∏final中某个组G的代表，并令D中在输入a上离开s的转换到达状态t。令r为t所在组H的代表，那么在D’中存在一个从s到r在输入a上的转换。

**关键实现代码**

### DFA转换为线性数组表

# 第五章 AliceLex的使用说明和示例

本章详细介绍了基于JavaScript的词法分析器自动生成工具AliceLex的使用说明，包括AliceLex项目的构建，引入和使用方法。同时会给出lex程序的经典示例在JavaScript上的实现，最后介绍基于AliceLex为核心的在线代码编辑器。

## 5.1 使用说明

### 5.1.1 项目配置

AliceLex项目作为开源项目，托管在GitHub[[7]](#footnote-7)上，使用如下方法配置AliceLex的最新代码：

安装和配置nodejs[[8]](#footnote-8)

1. 安装和配置github
2. 新建目录alicelex，在此目录上执行命令：
3. 执行git clone <https://github.com/YuhangGe/alicelex>
4. 执行node make.js

在alicelex目录的根下会生成两个文件，alicelex.js和alicelex-node.js，其中alicelex.js是浏览器使用的前端代码，alicelex-node.js是后端用于nodejs的代码。

### 5.1.2 使用方法

对于alicelex.js，在浏览器端使用如下方法使用：

1. 通过<script>标签引入alicelex.js
2. 这时候全局会有唯一的公开对象Alice，通过调用其唯一的公开接口doLex函数将词法规则文本转换成词法分析器的源代码。具体如下：

|  |
| --- |
| var js\_src = Alice.doLex(lex\_text) |

1. 其中lex\_text是需要转换的源始词法规则文本，更详细的规则说明参见5.1.3。返回值是string类型的字符串，是该规则对应生成的词法分析器的JavaScript源代码。
2. 使用eval函数执行js\_src，这样就会产生一个词法分析器可以直接使用。具体来说，如果lex\_text文本中通过参数$name定义的词法分析器的名字是 JSLexer，则可以使用如下代码执行分析过程：

|  |
| --- |
| var text = “这里是你要进行词法分析的文本”;  var lexer = new window.JSLexer();  lexer.lex(text); |

对于alicelex-node.js，相当于是本地的一个命令行软件，使用方法为：

1. 安装和配置nodejs
2. 使用命令node alicelex-node.js lex\_file output\_file

其中lex\_file是词法规则文件名，output\_file是需要输出的词法分析器源代码文件。然后你可以在html文件中引入该output\_file，使用生成的词法分析器。

### 5.1.3 词法规则

**基本框架**

AliceLex使用传统lex程序相似的基本框架来定义词法规则：

|  |
| --- |
| {参数声明}  {规则声明}  $$  {规则动作定义}  $$  {全局函数} |

在当前版本中有两点与传统lex软件不一样，一是使用美元符代替了百分号，二是规则文本中暂时还没有支持注释。

**参数声明**

AliceLex通过使用 ${参数名} {参数值} … 这样的格式来定义参数。目前已经实现的参数如下：

* $caseignore true/false

生成的词法分析器是否忽略大小写，默认为false

* $lexname name

生成的词法分析器的名称，默认是 Daisy。该名称是一个对像实例的名称，通过window.name可以得到该实例。

* $template normal/editor/…

生成的词法分析器的源代码模板，默认为normal，生成可以在浏览器出使用的源代码。指定editor参数则会为在线代码编辑器Daisy Editor[[9]](#footnote-9)的代码高亮部分生成核心代码。

* $unicode true/false

是否是unicode模式。Unicode模式可以处理包括中文在内的所有字符，但会占用更大的内存空间。默认是false，会把所有非ascii码字符交给错误处理函数处理。

**规则声明**

规则声明部分规则如下：

rule\_name expression

其中rule\_name是定义的规则名称，expression是该规则对应的正则表达式。正则表达式的规则跟JavaScript语言中的正则表达式[[10]](#footnote-10)含义一致，支持+\*[]?^等操作符。但有一些不同说明如下：

* 预定义的表达式：

\d 数字（0-9）

\D 非数字

\w 字符（a-z，A-Z和字符\_）

\W 非字符

\s 空白符（\n\t\v）

\S 非空白符

\a 字母（a-z，A-Z）

\A 非字母

\u 大写字母（A-Z）

\U 非大写字母

\l 小写字母（a-z）

\L 非小写字母

* 转义符：

除了上面指定的预定义表达式，其它“\”符号都理解成跟javascript语言中一致的转义 符，比如\n，\t等等。同时，" \ [ ] ^ - ? . \* + | ( ) / { } % < > 这些字符在正则表达式中 专门含义，如果需要作为字符串使用必须使用转义符。

* 字符串：

使用引号包含的部分，全部当作普通字符串处理。比如 \d“\d”这个正则规则代表一个数字后面紧跟着\d这个字符串。注意在引号包含的字符串不转义。

* 使用已定义的规则：

如果需要使用已经定义的规则，则在正则表达式中使用大括号｛｝将其包含。如果不使用｛｝包含，则会理解成字符串而不是已经定义的规则。比如如下两个规则声明：

DIGIT \d

NUMBER {DIGIT}+

其中的NUMBER会被理解成 \d+，即一个以上的数字。但如果写成如下：

DIGIT \d

NUMBER DIGIT+

则其中的NUMBER会被理解成“DIGI”T+，即一个字符串DIGI后面跟一个以上的字符T

* 不包含的规则：

在AliceLex的当前版本中，正则表达式不支持^和$符作为起始和结束的规则，不支持/字符回退规则。

**规则动作定义**

规则声明如下：

{rule\_name} {rule\_action}

其中rule\_name必须是在词法声明块定义过的规则名，rule\_action是对应的动作，即相应匹配的处理代码。Rule\_action的代码，如果是单行代码可以不用｛｝包含，如果是多行代码，必须使用｛｝包含。

在规则动作定义部分，动作处理代码中可以直接使用的变量包括：yylen和yytxt。这两个变量的名称借用了经典lex程序的变量名，其含义也跟经典lex程序一致，分别代表当前匹配的字符串长度和匹配的字符串。

**全局函数**

全局函数部分定义词法分析器的全局函数，包括词法分析开始，词法分析错误处理，词法分析结束。格式如下：

${func\_name} {function}

其中{func\_name}是函数名，目前支持以下函数：

* $construct

词法分析器的构造函数执行完成后调用此处代码。用来执行额外的构造函数任务，比如添加额外的成员变量。

* $start

词法分析器会在用户调用lex函数执行词法分析之前调用此处代码。

* $finish

词法分析器会在lex函数执行完，即词法分析结束之后调用。

* $error

当词法分析器分析到错误时会调用

{function}是对应的代码，和规则动作定义部分的action一致，如果是单行代码可以不用｛｝包含，如果是多行代码需要使用｛｝包含。

**歧义处理**

AliceLex对于歧义的处理同传统lex程序一致，即：

1. 首选最长的匹配。
2. 在匹配同样多字符的情况下，选择第一个给出的规则。

## 5.2 使用示例

### 5.2.1 lex程序经典示例[[11]](#footnote-11)

行数统计

|  |
| --- |
| $name Example1  NEW\_LINE \n  OTHER .  $$  NEW\_LINE { line\_number++; }  OTHER {}  $$  $start { line\_number = 0; }  $finish { alert(“line count is:” + line\_number);} |

带状态转移的词法分析

|  |
| --- |
| $name Example2  STR\_QUOTE \”  STR\_CHAR [^\”]\*  OTHER .  $$  STR\_QUOTE { yygoto(STR);}  <STR> STR\_CHAR { alert(“string is: “ + yytxt);}  <STR> STR\_QUOTE {yygoto(DEFAULT);}  OTHER {/\* do nothing \*/}  $$ |

### 5.2.2 Daisy Editor[[12]](#footnote-12)

Daisy Editor是一款基于HTML5的在线代码编辑工具，其使用Canvas绘制而不是像传统代码编辑器使用DOM元素构造，从而实现了海量代码文本时的流畅处理。同时，使用AliceLex作为其代码高亮部分词法分析器的生成工具，可以更灵活地支持更多语言的高亮，并且比传统在线代码编辑器具有更高的高亮渲染效率。以下是程序的示例截图：



(图… Daisy Editor编辑jQuery源代码)

Daisy Editor目前还处于原型阶段，还在进一步开发中。当前在网上还没有同类产品的出现，其使用场景主要在云计算平台中用作在线代码查看和编辑。这个项目的目的之一也是为了说明JavaScript语言平台上的词法分析器自动生成工具的使用场景和潜力。

为了说明AliceLex是如何提供高亮分析，展示如下JavaScript语言高亮的规则文本（限于篇幅，只处是部分代码）：

|  |
| --- |
| INT \d+  FLOAT \d\*\.\d+  NUM \-?({INT}|{FLOAT})  VALUE {NUM}|true|false|null|undefined  KEYWORD function|if|else|do|while|break|var|for|in|break|switch|case|return  ID [\w$][\w$\d]\*  THREE\_OPE "==="|">>>"  ONE\_OPE "+"|"-"|"\*"|"/"|"!"|"&"|"|"|"^"|"%"|"="  OPERATOR {THREE\_OPE}|{TWO\_OPE}|{ONE\_OPE}  LINE\_CMT\_B "//"  REG "/"[^\*/]([^\n/]|"\/")\*"/"g?i?m?  STR\_A\_B \"  OTHER [.\n]  $$  VALUE {this.yystyle="value";}  KEYWORD {this.yystyle="keyword";}  PARAM {this.yystyle="param";}  OBJECT {this.yystyle="object";}  ID {this.yystyle="id";}  OPERATOR {this.yystyle="operator";}  LINE\_CMT\_B {this.yystyle="comment";this.yydefault="comment";this.yygoto(LINE\_COMMENT);}  <LINE\_COMMENT> LINE\_CMT\_E{this.yystyle="comment";this.yydefault="default";this.yygoto(DEFAULT);}  <LINE\_COMMENT> LINE\_CMT\_C {this.yystyle="comment";}  REG {this.yystyle="regexp";}  STR\_A\_B {this.yystyle="string";this.yydefault="string";this.yygoto(STRING\_A);}  <STRING\_A> STR\_A\_C {this.yystyle="string";}  <STRING\_A> STR\_A\_D {this.yystyle="string";}  <STRING\_A> STR\_A\_E {this.yystyle="string";this.yydefault="default";this.yygoto(DEFAULT);}  STR\_B\_B {this.yystyle="string";this.yydefault="string";this.yygoto(STRING\_B);}  <STRING\_B> STR\_B\_C {this.yystyle="string";}  <STRING\_B> STR\_B\_D {this.yystyle="string";}  <STRING\_B> STR\_B\_E {this.yystyle="string";this.yydefault="default";this.yygoto(DEFAULT);}  OTHER {this.yystyle="default";}  $$ |

# 第六章 总结与展望

## 5.1 总结

## 5.2 展望

# 参考文献

[1] 作者,译者,书名(版本),出版地:出版社,出版时间,引用部分起止页。

[2] 作者,译者,文章题目,期刊名,年份,卷号(期数):引用部分起止页。

[3] 作者,学位论文名,本科/硕士/博士论文,大学/机构名,年份。

[4] 网页的主题,URL。

# 致谢

时光如白驹过隙，转眼间本科的时光已尽。在过去的四年里，感谢南京大学和南京大学软件学院的培养。四年的本科生涯，让我对软件工程有了系统的认识也具有了足够的实践经验。感谢软件学院给我提供的良好的软硬件条件，感谢软件学院勤劳善良的老师们的谆谆教导。

特别要感谢我的论文导师，南京大学软件学院的葛季栋老师，在论文开题和论文撰写的过程中对我的关心和指导。由于他的耐心提醒，让我很好的控制了项目实践和论文撰写的进度，并在理论研究上给了我很大帮助。感谢他在我修改论文的过程中，一次又一次细心认真的审阅。同时也感谢他在生活和学习中对我的帮助和指导。

在此要感谢郑涛老师在《软件构造》课程中讲述的编译原理对我起到的启蒙作用，使得我对编译原理产生了较浓兴趣，也才能自己去学习和体悟编译原理中的各种算法，并将其在毕业设计中一一实现。

感谢209宿舍的三个哥们，以及后来的211的众多舍友，是你们的关心支持和帮助，让我在大学四年里生活愉快而幸福，才能更好地投入到学习之中，才能专注地去研究和学习自己感兴趣的内容。

另外，衷心感谢一直以来默默支持关心我的家人和朋友们。

1. Flex是C/C++平台的lex工具，参见：http://flex.org [↑](#footnote-ref-1)
2. JFlex是Java平台的lex工具，参见：http://jflex.de [↑](#footnote-ref-2)
3. PLY是Python平台的lex工具，参见：http://www.dabeaz.com/ply/ [↑](#footnote-ref-3)
4. CSFlex是c#(.net)平台的lex工具，参见：http://ostatic.com/csflex [↑](#footnote-ref-4)
5. RAA是Ruby平台的lex工具，参见：http://raa.ruby-lang.org/project/ruby-lex/ [↑](#footnote-ref-5)
6. 更多的预定义符号及其含义，参见5.1.3节 [↑](#footnote-ref-6)
7. Github是目前使用广泛的开源托管平台，详情和配置方法参见：http://github.com [↑](#footnote-ref-7)
8. nodejs是本地的（而非浏览器）JavaScript脚本解析引擎，详情和配置方法参见：http://nodejs.org [↑](#footnote-ref-8)
9. 关于Daisy Editor的详情参见5.2.2节 [↑](#footnote-ref-9)
10. 关于JavaScript正则表达式的规则描述，参见：http:// [↑](#footnote-ref-10)
11. 在线演示的demo参见：http://lex.xiaoge.me [↑](#footnote-ref-11)
12. 在线的演示参见：http://editor.xiaoge.me [↑](#footnote-ref-12)