

理论计算机科学导引

TCS - 毛宇尘老师班

shrike505

目录

一、 问题与编码	1
1.1 编码 (Encoding)	1
1.1.1 prefix-free 编码	2
1.1.2 编码与可数的关系	3
二、 计算模型	3
2.1 布尔电路 (Boolean Circuit)	3
2.1.1 NAND 电路 (NAND Circuit)	5
2.2 计算规模	6
2.2.1 优化效率	7
2.2.2 编码程序	8
2.2.3 更长的输入: Infinite!	9
三、 语言	9
3.1 DFA 与正则语言	9
3.2 NFA	11
3.3 正则表达式	12
3.3.1 Pumping Theorem	14
3.4 Pushdown Automaton	15
3.5 语法 (Grammar)	17
3.6 上下文无关语言 (Context-Free Language, CFL)	18
四、 图灵机 (Turing Machine)	19
4.1 图灵完备	21
4.1.1 NAND-TM	21
4.1.2 NAND-RAM	22

Reference:

- introtcs.org - 教材（电子书版）
- <https://fla.cuijiacai.com/> - 南京大学形式语言与自动机课程笔记

一、问题与编码

一言以蔽之，它（TCS）研究的是问题的上界与下界。

需要界定计算所需要解决的问题，以及计算所需要的设备（模型）。

这一节先规定前者。回顾一些经典的算法或数学上的问题：给定带权重的图 G ，求其中的最短路/其的最小生成树；提供矩阵 A, B ，求其乘积 AB 。这些问题都可以看作一个函数：给定输入，求输出。

与程序设计中的函数强调 implementation（即 How to compute the answer）相比，这里的函数更多具有数学意义，强调 specification（即 What should the answer be）。

接下来聚焦这些函数的输入，计算机无法理解图、矩阵这些概念，只能理解二进制串（binary string），也就是一串又一串的 0 和 1——于是要通过某些编码方式将这些元素编码为 01 串。先定义一个字符表（Alphabet）： $\Sigma = \{0, 1\}$ ，于是长度为 n 的二进制串的集合可表示为 $\Sigma^n = \Sigma \times \Sigma \times \dots \times \Sigma = \{(a_1, a_2, \dots, a_n) \mid a_i \in \Sigma\}$

特别规定 Σ^0 是长度为 0 的串的集合，这个串用 e 表示，即 $\Sigma^0 = \{e\}$

$\Sigma^* = \bigcup_{n \geq 0} \Sigma^n$ 即为所有长度的二进制串集合。

💡 前缀（Prefix）

$x = a_1 a_2 \dots a_n, y = b_1 b_2 \dots b_n$ 的拼接（Concatenation）为 $xy = a_1 a_2 \dots a_n b_1 b_2 \dots b_n$

x 是 y 的一个前缀（Prefix），当对于某些 $z \in \Sigma^*, y = xz$

类似的可以定义后缀（Suffix），不再赘述

可以将 Σ 中的 0 和 1 换成任意字符，例如 26 字母，方框三角圆，以此组建你自己的 Alphabet!

1.1 编码（Encoding）

有了最基础的元素（字符），将图、矩阵、等等等等计算函数的输入转化为字符串的过程，称为编码，即一个映射 $E: A \rightarrow \{0, 1\}^*$ 。

💡 编码性质

显然，这个映射需要是单射（injective，在下文中会频繁表示为 one-to-one），即不同元素的映射结果（得到的字符串）必须是不同的。



例子

- 自然数 $n \in N$ ($\text{parity}(n)$ 是 n 对 2 取余的结果): $NtS(n) = \begin{cases} 0 & \text{if } n=0 \\ 1 & \text{if } n=1 \\ NtS(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) \text{ parity}(n) & \text{if } n>1 \end{cases}$
 - 亦即 n 的二进制表示
- 自然数对 $(a, b) \in N \times N$, 自然的想法是 a 的编码拼接 b 的编码, 但是会出现编码重复, 并不是单射
 - 对于 1110, 可以解释为 (1, 6) 和 (3, 2), 这实质上是因为在计算机读取完前两个 1 时, 并不知道它代表 3 还是一个其他数的前缀

1.1.1 prefix-free 编码

在第二个例子的教训下, 我们需要找到的编码映射是 prefix-free 的, 即对于任何的 $x \neq x'$, $E(x)$ 都不是 $E(x')$ 的前缀。

接下来 myc 老师突然就这个 prefix-free 证明了两个寻找另一种编码的引理, 感觉很突兀。

引理 1.1.1

假设已经存在一个 prefix-free 的编码 $E: A \rightarrow \{0, 1\}^*$, 那么对于编码 $\bar{E}: A^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ ($A^* = \bigcup_{n \geq 0} A^n$, 我理解为一个由任意长待映射元素 ($a_i \in A$) 序列组成的集合, 接下来要找到对这些元素序列的编码), 命 $\bar{E}(a_1 a_2 \dots a_n) = \begin{cases} E(a_1)E(a_2) \dots E(a_n) & \text{if } n \geq 1 \\ \epsilon & \text{if } n=0 \end{cases}$, 那么 \bar{E} 是 one-to-one 的。

证明. 假设存在 $(a_1, a_2, \dots, a_n) \neq (b_1, b_2, \dots, b_m)$, 使得 $\bar{E}(a_1 a_2 \dots a_n) = \bar{E}(b_1 b_2 \dots b_m)$, 那么 $E(a_1)E(a_2) \dots E(a_n) = E(b_1)E(b_2) \dots E(b_m)$, 且 $\exists i, s.t. \forall j < i, a_j = b_j$, 且 $a_i \neq b_i$ (即在第 i 个字符前两个元素序列的每个元素都相同)

那么 $E(a_1)E(a_2) \dots E(a_{i-1}) = E(b_1)E(b_2) \dots E(b_{i-1})$, 则 $E(a_i) \dots E(a_n) = E(b_i) \dots E(b_m)$, 那么对于 $E(a_i)$ 和 $E(b_i)$, 要么前者是后者的前缀, 要么后者是前者的前缀, 又考虑到 $a_i \neq b_i$, 则 E 不是 prefix-free 的, 这与题设冲突。□

引理 1.1.2

如果存在 one-to-one 的 $E: A \rightarrow \{0, 1\}^*$, 那么存在 prefix-free 的 $E': A \rightarrow \{0, 1\}^*$, 且使得 $|E'(a)| \leq 2|E(a)| + 2, \forall a \in A$

证明. 将原编码中的 0 映射为 00, 1 映射为 11, 该元素再次编码结束后再添加一个 01, 例如对于 $E(a) = 010$, $E'(a) = 00110001$

这种编码显然有性质 0: 01 不会出现在任何编码的奇数-偶数位置, 即 $\forall k \in N, E'(a_{2k+1})E'(a_{2k+2}) \neq 01$

试证 prefix-free 性: 假设 $E'(a)$ 是 $E'(b)$ 的前缀, 由于 01 标识了 $E'(a)$ 和 $E'(b)$ 的结束, 且由于性质 0, 很明显有 $E'(a) = E'(b)$, 那么 $E(a) = E(b)$, 且 E 是单射, 则 $a = b$, 于是 prefix-free 得证。□

结合两个引理可以得到一个结论:



定理

如果存在 one-to-one 的 $E : A \rightarrow \{0,1\}^*$, 那么便存在 one-to-one 的 $E' : A^* \rightarrow \{0,1\}^*$

这是很重要的, 对于数学元素, 如果我们可以给数字做编码, 那么就可以编码向量, 再运用一次定理就能编码矩阵, 然后是更高维的张量。

1.1.2 编码与可数的关系



下面四条等价

1. A 是可数的
2. A 是有限的, 要么存在一个双射 $f : A \rightarrow N$
3. 存在单射 $g : A \rightarrow N$
4. 存在满射 $h : N \rightarrow A$

引理 1.1.3

$\{0,1\}^*$ 是可数的

证明. 对 $\{0,1\}^*$ 的元素进行这样的排序: e,0,1,00,01,10,11...

即先按长度排序, 内部再按二进制数大小排序。

那么定义从字符串映射到排序后序号的函数 $f : \{0,1\}^* \rightarrow N : \forall x \in \{0,1\}^*, f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x=e \\ 2^{|x|} + (x \text{ 对应的二进制数大小}) & \text{if } |x| \geq 1 \end{cases}$

可理解为组的序号+组内的序号, 这是一个单射, 于是可数。

□



这个引理也引导出一个定理, 即可数性和单射编码的关系:



定理

A 是可数的当且仅当存在单射 $E : A \rightarrow \{0,1\}^*$

编码的设定完备后, 我们面临的问题 (Problem) 就抽象为了一个从二进制串到二进制串的函数了 (即对输入和输出都做编码)

二、计算模型

2.1 布尔电路 (Boolean Circuit)

可以可以, 问题 (Problem) 的输入输出已经被我们编码, 可以投诸于计算了——那么, 计算的具体步骤, 或者说方法, 是什么呢?

这一节里探讨的一类问题/函数统称为有限函数 (Finite Function), 其输入输出均为固定长度的一个二进制串, 即 $f : \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^m$

一个很经典的有限函数计算模型即布尔电路 (Boolean Circuit, 我去, 计算机系统 1), 显然对于与门 (AND) 和或门 (OR) 而言, $n = 2, m = 1$, 非门的 n 为 1, 别的门电路可类比; 另一个例子是 MAJ 函数, 即对于 $n = 3$ 的输入的每一位, 如果 1 占多数, 则输出 1, 否则输出 0

一个『电路』还是太具体了, 不利于更本质的计算理解——将一个布尔电路 C 抽象为一个有向无环图 G , 它包含如下节点 (Nodes):

- n input nodes: 记为 $X[0], X[1], \dots, X[n-1]$, 均没有入度且出度至少为 1
- s gates: 即逻辑门, 根据种类有不同的度
 - 一个电路 C 的 size 定义为 $|C| = s$
- m output nodes: 记为 $Y[0], Y[1], \dots, Y[m-1]$

舒服了, 可以利用门电路模拟从输入到输出的计算过程了: 对于输入长为 n 的 $x \in \{0, 1\}^n$, 令其第 i 位即为 input nodes 中的 $X[i-1]$, 输出答案 $y \in \{0, 1\}^m$ 同理。

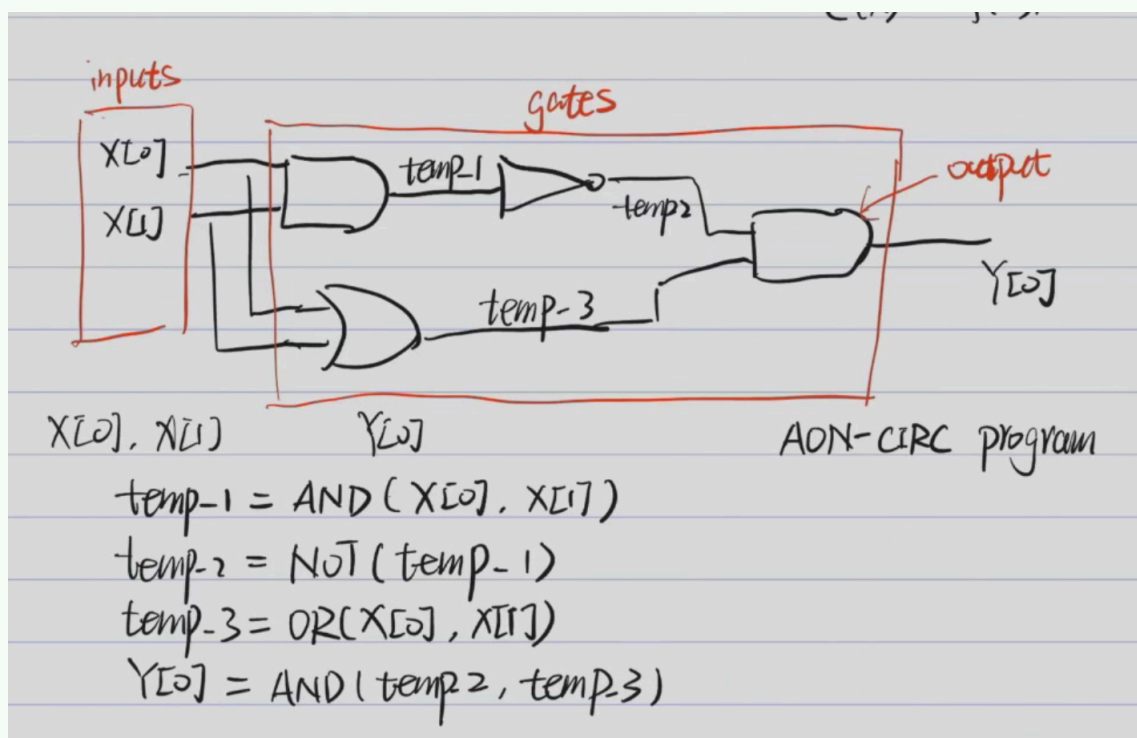
定义 2.1.1

记 $C(X) = (Y[0], Y[1], \dots, Y[m-1])$, 如果 $\forall x \in \{0, 1\}^n, C(x) = f(x)$, 则称电路 C 计算了函数 f .



现在还亟待一种对计算过程的书面化描述, 即, 这个电路的每一步, 信号 (或者说数据) 流过每一个门时得到了什么中间结果? 于是 [Anonjac](#) ~~Anon-Circ~~ AON-Circ (AND-OR-NOT Circuit) Program 登场了。

定义 2.1.2 (AND-OR-NOT Circuit Program)



对于图中的电路，将其每个中间逻辑门的输出保存为一个 temp 变量，便得到了下方的多行 (Lines)，这就是 AON-Circ Program

不难发现每一行对应一个逻辑门的计算过程，于是 Program 的行数与其对应电路中逻辑门的个数相同。此时 Program 的行数即为电路的 size

AON-C Program 计算了某个函数的定义与上方电路 C 计算函数类似，不再赘述。

实际上程序和电路这种对应关系就是等价的。

定理 2.1.3

一个函数可被一个有 s 个逻辑门的布尔电路计算，当且仅当它可以被 s 行的 AON-C Program 计算。

2.1.1 NAND 电路 (NAND Circuit)

接下来介绍一种门：NAND，即 NOT(AND)，易知 AON 三者都可以只用 NAND 实现，于是可以搭建一个仅由 NAND 门构成的电路。

NAND Circuit	\Leftrightarrow	AON Circuit
s gates	\rightarrow	$\leq 2s$ gates, for NAND decomposes to NOT(AND)
$\leq 3s$ gates, for $NAND(NAND(a,a), NAND(b,b))$	\equiv	s gates

相类似的，有 NAND-Circ Program，其每一行都形如 `foo = NAND(bar,blah)`。

定理 2.1.4

Boolean Circuit, AON-Circ Program, NAND-Circ Program, NAND Circuit 四者的转化只需要 s 的常数倍 (即 $\Theta(s)$)



定理 2.1.5

$\forall n, m, f : \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}^m$, 都存在一个布尔电路计算这个函数, 其含有 $O(m \cdot n \cdot 2^n)$ 个逻辑门。

证明. 对于输出的某一位 $Y[j]$, 其计算情况可枚举如下表:

$X[0]$	\cdots	$X[n-1]$	$Y[j]$
0	\cdots	0	some value
0	\cdots	1	some value
\cdots	\cdots	\cdots	\cdots
1	\cdots	1	some value

写出 $Y[j]$ 的具体计算式, 用析取范式表示: $Y[j] = (\dots \wedge \dots \wedge \dots) \vee (\dots \wedge \dots \wedge \dots) \vee \dots \vee (\dots \wedge \dots \wedge \dots)$, 其中共有 2^n 个括号, 对应上表中的 2^n 行, 每一行通过合取计算出一种情况下的 $Y[j]$, 再析取得到 $Y[j]$ 的具体表达; 每个括号中共有 n 项, 对应 $X[0]$ 到 $X[n-1]$ 本身或取反再进行合取, 于是得到 $n \cdot 2^n$

而 Y 的长度为 m , 于是得到 $O(m \cdot n \cdot 2^n)$

□



满足上述定理, 即可以计算任意函数的电路, 称为通用 (universal) 的; 要判断一个函数集合 (化成的电路) 是否是通用的, 只需要判断其是否能计算 NAND。

2.2 计算规模

可以可以, 已经可以用电路/程序计算某个函数/问题了, 那么对于某个函数, 我们需要多少个门的电路, 多少行的程序, 这是可以估量的吗? 由上面的定理似乎已经有了上界: $O(m \cdot n \cdot 2^n)$ (myc 剧透: 其实可以把数量打到 $O(\frac{m \cdot 2^n}{n})$)。我们来从 NAND 电路入手。



ADD Function

试设计电路程序，计算 $\text{ADD} : \{0, 1\}^{2n} \rightarrow \{0, 1\}^{n+1}$ ， $\text{ADD}(x_0, \dots, x_{2n-1}) = x_0 \dots x_{n-1} + x_n \dots x_{2n-1}$

解.

```
def ADD(X[0], ..., X[2n-1]):
    Result = [0] * (n+1)
    Carry = [0] * (n+1)
    for i in range(n):
        Result[i] = XOR(Carry[i], XOR(X[i], X[i+n]))
        Carry[i+1] = MAJ(Carry[i], X[i], X[i+n])
    Result[n] = Carry[n]
    return Result
```

XOR 和 MAJ 函数只需要常数行的 NAND-Circ Program 实现，经过 n 次循环，于是该加法函数的规模（行数）即为 $O(n)$

这是很好的，计算规模与输入串的长度成正比。



MUL Function

乘法基于加法，摆了。

规模可以不断优化： $O(n^2) \rightarrow O(n^{\log_2 3}) \rightarrow \text{even better}$.



LOOKUP Function

试设计电路程序，计算 $\text{LOOKUP} : \{0, 1\}^{2^k+k} \rightarrow \{0, 1\}$ ，具体而言，输入分为两段： 2^k 位作为表， k 位视作一个最大可表达 $2^k - 1$ 的二进制数 i ，输出为表中的第 i 位。

解. 利用归纳思想， $k = 1$ 时：

```
def LOOKUP_1(X[0], X[1], i[0]):
    if i[0] == 0:
        Y[0] = X[0]
    else:
        Y[0] = X[1]
```

对于 k 时的情形

```
def LOOKUP_k(X[0], X[1], ..., X[2^k-1], i[0], ..., i[k-1]):
    if i[0] == 0: # 根据剩下的 i 查 X 的前半段
        Y[0] = LOOKUP_(k-1)(X[0], ..., X[2^(k-1)-1], i[1], ..., i[k-1])
    else:
        Y[0] = LOOKUP_(k-1)(X[2^(k-1)], ..., X[2^k-1], i[1], ..., i[k-1])
```

于是有规模 $\begin{cases} L(k)=C+2L(k-1) \\ L(1)=O(1) \end{cases}$ ，解得 $O(2^k)$

2.2.1 优化效率

现在来探讨如何将某函数 (n input, m output) 计算的规模从 $O(m \cdot n \cdot 2^n)$ 优化至 $O(\frac{m \cdot 2^n}{n})$ 。

我们用上面介绍过的 LOOKUP 函数来理解，对于如下函数计算的过程真值表：

$X[0]$	\cdots	$X[n-1]$	$Y[j]$
0	\cdots	0	some value
0	\cdots	1	some value
\cdots	\cdots	\cdots	\cdots
1	\cdots	1	some value

进行计算时可以看作是将 $X[0] - X[n-1]$ 作为输入的二进制数索引 i ，原函数输出 Y 的某一位 $Y[j]$ 在所有情况的 X 下的输出列作为输入的表（有 2^n 个取值可能性，即上表中的 2^n 行），从而计算 $Y[j]$ 确定取得的值）

例如对如下函数 g 的真值表：

$X[0]$	$X[1]$	$Y[0]$
0	0	1
0	1	0
1	0	1
1	1	1

命 $G_0 = 1, G_1 = 0, G_2 = 1, G_3 = 1$ （即函数输出的 2^2 中情况），那么 $g(X[0], X[1]) = \text{LOOKUP}_2(G_0, G_1, G_2, G_3, X[0], X[1])$

接下来分析这种方法的效率：对于抽出输出的 2^n 种情况，每种 0 或 1 利用 ONE/ZERO 函数便可用常数行实现，于是共有 $O(2^n)$ 行；而 LOOKUP 函数的规模也为 $O(2^n)$ ，于是计算 $Y[j]$ 的规模为 $O(2^n)$ ；而 Y 有 m 位，于是总规模优化为 $O(m \cdot 2^n)$

⚠ Incomplete Section

接下来是如何将规模进一步优化到 $O(\frac{m \cdot 2^n}{n})$ ，但我没听咋懂 myc 的讲解，于是 skip 了

2.2.2 编码程序

现在考虑将 Circ-Program 编码为字符串形式：就一个有 s 行的 NAND-Circ Program 而言，其每一行都是 `foo = NAND(bar,blah)` 的形式，因此只需要考虑编码其中所有的变量（易知涉及的变量个数不超过 $3s$ 个），且每一行都可以看作是一个三元组 (triple)：(foo, bar, blah)，于是共得到 s 个三元组。

（以 $3s$ 个变量为例）将这些变量记作 $0, 1, 2, 3, \dots, n-1, n, \dots, n+m-1, \dots, 3s-1$ ，其中前 n 个为对应函数的 input 变量 ($X[0], X[1], \dots, X[n-1]$)，中间 m 个为 output 变量 ($Y[0], Y[1], \dots, Y[m-1]$)，其余为中间变量。

于是每一个变量都可以编码为一个长度为 $\lceil \log(3s) \rceil$ (hey where does this come from) 的二进制串，只需要按照程序顺序拼接每个三元组中变量的编码，便得到了一个长度为 $3s \cdot \lceil \log(3s) \rceil$ 的二进制串。

编码完成了——但是，为什么要做这件事，难道说？没错，有了字符串编码的程序，我们甚至能将这个程序作为另一个程序的输入 🐼，例如下面这个例子。



EVAL Function

函数 $\text{EVAL}_{s,m,n} : \{0,1\}^{3s \lceil \log(3s) \rceil + n} \rightarrow \{0,1\}^m$ 是对一个 NAND-Circ Program p (含 s 行, 计算 $f : \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^m$) 和一个输入 $x \in \{0,1\}^n$ 的计算 (或者说, 运行), 其输入的前 $3s \cdot \lceil \log(3s) \rceil$ 位为 p 的编码, 后 n 位为 input x , 输出为 $f(x)$.

定理 2.2.1 (EVAL 的规模)

$\forall s, n, m, \exists$ NAND-Circ Program $U_{s,n,m}$ 计算函数 $\text{EVAL}_{s,m,n}$, 且其规模为 $O(s^2 \cdot \log s)$



2.2.3 更长的输入: Infinite!

更一般的计算方法无疑是针对任意长度输入的函数 $f : \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^n$, 然而这是无法利用已经讲述过的布尔电路/程序来计算的 (回顾: 我们的方法是, 使用一个真值表, 记录每组输入 $X[0] - X[n-1]$ 下 $Y[m]$ 的取值)

定理 2.2.2

For every $F : \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^*$, $BF = \begin{cases} F(x)_i & \text{if } i < |F(x)|, b=0 \\ 1 & \text{if } i < |F(x)|, b=1 \\ 0 & \text{if } i \geq |F(x)| \end{cases}$

使用 BF 计算 F 只需要遍历 0 到 $|F(x)| - 1$ 即可, 反过来只需要取每一位



三、语言

3.1 DFA 与正则语言

显然一个布尔函数 $f : \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}$ 和这样一个集合对应: $A_f = \{x \in \{0,1\}^* \mid f(x) = 1\}$, 这个集合称为语言 (Language); 此时显然有 $f(x) = 1$ 当且仅当 $x \in A_f$

于是计算函数的值 $f(x) = ?$ 与判断 $x \in A_f$ 是等价的。

于是来研究语言的性质 (自己觉得突兀不 (流汗

考虑累加 x 的每一位再模二的 XOR 算法, 可得到以下流程图:

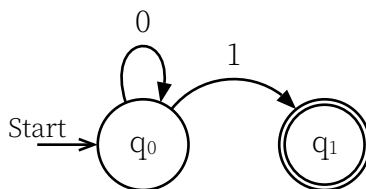


图 1 假设 q_1 为末态

定义 3.1.1

这被称作一个确定性有限自动机 (Deterministic Finite Automaton, DFA), 它可以看作一个四元组 (K, s, F, δ) , 其中:

- K - 一组状态的有限集合
- $s \in K$ - 初始状态
- $F \subseteq K$ - 末态 (接受状态) 的集合
- $\delta : K \times \{0, 1\} \rightarrow K$ - 状态转移函数



假设有输入字符串 $x_0x_1\dots x_{n-1}$, DFA 的计算过程为: $s_0 = s, s_1 = \delta(s_0, x_0), s_2 = \delta(s_1, x_1), \dots, s_n = \delta(s_{n-1}, x_{n-1})$, 然后判断 $s_n \in F$, 如果是则接受 (accept), 否则拒绝 (reject)。

定义 DFA 计算某个函数的方法: M computes f if M accepts x 当且仅当 $f_x = 1$

同时定义 DFA Decides 某个语言的方法: M decides A_f if M accepts x 当且仅当 $x \in A_f$

被 DFA 决定的语言称为正则语言 (Regular Language)。

定理 3.1.2

某台 DFA M 可判断的语言有且仅有一个, 即 $L(M) = \{x \in \{0, 1\}^* \mid M \text{ accepts } x\}$



练习. 证明空集, $\{0, 1\}^*$, $\{e\}$, $\{w \in \{0, 1\}^* \mid w \text{ 有一个字符串是 } 101 \text{ (何意味)}\}$ 是正则语言解.

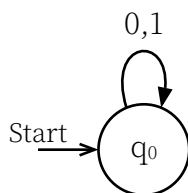


图 2 空集, 使可接受集为空即可

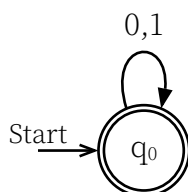


图 3 $\{0, 1\}^*$, 使所有状态均为可接受状态即可

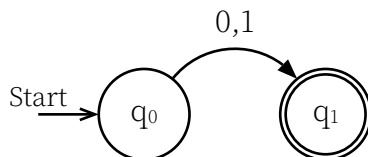


图 4 $\{e\}$, 使初始状态为唯一可接受状态即可

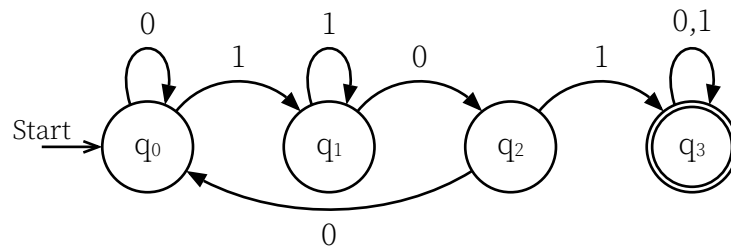


图 5 $\{w \in \{0,1\}^* \mid w \text{ 有一个字符串是 } 101\}$, 设计状态转移使得读到连续的 101 时进入可接受状态即可

定理 3.1.3

如果 A 和 B 都是正则的, 那么 $A \cup B$ 是正则的。(对新 DFA 的每一个成员进行探究即可)

3.2 NFA

定义 3.2.1

不确定性有限自动机 (Nondeterministic Finite Automaton, NFA), 如下是其与 DFA 的区别:

- 状态转移函数中, 下一个状态可以有多个
- 读入空串也可导致状态转移

可见是在状态转移时有所不同; 实际上这里的状态转移比“函数”要更一般, 即关系。

$$N = \{K, s, F, \Delta(\text{transition relation})\}, \Delta \subseteq K \times \{0, 1, e\} \times K$$

NFA 做计算的过程也比 DFA 宽松一些: 能读入字符串输入的全部并且“有一条路可以走通并走到可接收状态”(可理解为并行计算的)即可。

练习. 设计 NFA, 计算 $W = \{w \in \{0,1\}^* \mid w \text{ 的倒数第二位是 } 1\}$

解.

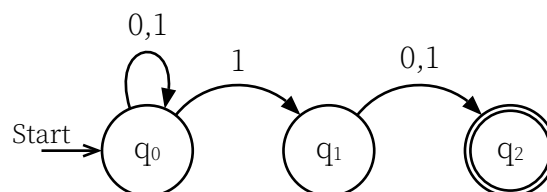


图 6 计算 $W = \{w \in \{0,1\}^* \mid w \text{ 的倒数第二位是 } 1\}$

NFA 看起来可以猜测出一条正确的路径, 似乎比 DFA 更强大一些, 但实际上两者是等价的。

定理 3.2.2

DFA 能判断一个语言等价于 NFA 也能判断这个语言。

证明. DFA 本身就是一台特殊的 NFA, 这个方向是显然的。

反过来的证明, 想法是让 DFA 模拟 NFA 的 tree-like 计算过程。下面先研究一个 NFA 的情况

对于 $p \in K$, 定义 $E(p) = \{p\} \cup \{q \mid (p, e, q) \in \Delta\}$ (即 p 和不读入 symbol 即可到达的状态组成的集合); 假设该 NFA 从某层 (tree-like arch) 状态集合 Q 接收一个 0 到达下一层 Q' , 那么 $Q' = \bigcup_{q \in Q} \bigcup_{p \in (q, 0, p)} E(p)$

接下来用 DFA 模拟这个过程。很明显其每个元素有如下表示:

- 状态集合 $K' = \{Q \mid Q \subseteq K\}$
- 初始状态 $s' = E(s)$
- accepting states $F' = \{Q \mid Q \subseteq K, Q \cap F \neq \emptyset\}$
- transition function $\delta(Q, a) = \bigcup_{q \in Q} \bigcup_{p \in (q, a, p)} E(p)$

□

因此正则语言也可以使用 NFA 来判断。



定理 3.2.3

如果 A 和 B 都是正则的, 那么 AB (拼接, Concatenation) 是正则的。(构造一个新 DFA, 其状态为原两个 DFA 状态的笛卡尔积, 且仅当两个状态均为可接受状态时新状态才为可接受状态)

证明. 总有一个 A 和 B 的交界处, 其前面的字符串用 NFA_A 判断, 后面的字符串用 NFA_B 判断。交界处由 NFA “猜测”, 通过 ϵ 切换。

□



定理 3.2.4

如果 A 是正则的, 那么 $A^* = \{a_1 a_2 \dots a_k : k \geq 0 \text{ and } a_i \in A\}$ (即从 A 中选取若干串做拼接) 是正则的。

证明. 对于 NFA_A , 每次跑完一个字符串后利用 “猜测” 功能返回其初态。

□



3.3 正则表达式

每种正则语言可以用正则表达式 (Regular Expression, RE) 表示:

定义 3.3.1

- Base Case: $0, 1, \emptyset$ are REs, 分别对应 $L(0) = \{0\}, L(1) = \{1\}, L(\emptyset) = \emptyset$
- 如果 R 和 S are REs, 那么以下也是 REs:
 - $(R \cup S)$, 对应 $L(R \cup S) = L(R) \cup L(S)$
 - (RS) , 对应 $L(RS) = L(R)L(S)$ (recall it is concatenation)
 - (R^*) , 对应 $L(R^*) = (L(R))^*$
 - 括号书写时很麻烦, 记录一个算数优先级 precedence: $* > \text{concatenation} > \cup$



例子

Language	RE
$\{e\}$	\emptyset^*
$\{w \in \{0,1\}^* : w \text{ starts with } 0 \text{ and culminates with } 1\}$	$0(0 \cup 1)^*1$
$\{w \in \{0,1\}^* : w \text{ 至少包含两个 } 0\}$	$(0 \cup 1)^*0(0 \cup 1)^*0(0 \cup 1)^*$

定理 3.3.2

语言是正则的当且仅当其可以被某个正则表达式表示。

练习. 画出 $(01 \cup 0)^*$ 对应的 NFA。

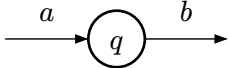
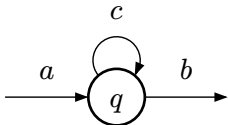
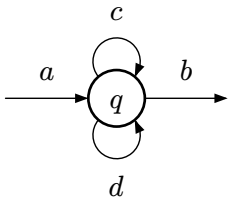
解.

RE	NFA
0	<pre> graph LR Start((Start)) -- 0 --> q1(((q1))) q0((q0)) </pre>
1	<pre> graph LR Start((Start)) -- 1 --> q1(((q1))) q0((q0)) </pre>
01	<pre> graph LR Start((Start)) -- 0 --> q1((q1)) q1 -- 1 --> q3(((q3))) q0((q0)) -- epsilon --> q2((q2)) q2 -- 1 --> q3 </pre>
$\{01 \cup 0\}^*$	<pre> graph LR Start((Start)) -- epsilon --> q1((q1)) q1 -- epsilon --> q2((q2)) q2 -- 0 --> q4(((q4))) q4 -- epsilon --> q1 q1 -- epsilon --> q4 </pre>

证明. 上面的练习可以总结出正则表达式向 NFA 的转化。从 NFA 向正则表达式的转化采用状态消除法 (State Elimination Method):

给定 NFA $N = (K, s, F, \Delta)$, 由以下步骤得到正则表达式 R :

- 将 N 转化为 N'
 - N' 中没有状态指向其的 initial state (新建一个初态, 通过 ϵ transition 指向原先的初态)
 - N' 的 accepting state 只有一个, 且该状态不指向任何状态 (新建一个 accepting state, 使原先的若干 accepting states 通过 ϵ transition 指向它)
- 删除 N' 中的非初态非末态状态, 直到只剩下初态和末态; 删除方法遵循下述规则 (q 为将被删除的状态):

NFA Component	RE (by State Elimination)
	ab
	ac^*b
	$a(c \cup d)^*b$

□

上述的状态删除法实质上是一个动态规划问题的求解。(我觉得不考)

3.3.1 Pumping Theorem

现在要证明某个语言是正则的, 可以利用 DFA/NFA/RE 三种等价的方法证明, 但要证明某个语言不是正则的, 就比较困难了 (需要说明所有的 FA/RE 都无法表示该语言?)。

于是介绍 Pumping Theorem, 其说明了正则语言的一个性质: 其中有些 Pattern 是可以重复的。

定义 3.3.3 (Pumping Theorem)

设 A 是一个正则语言, 那么存在一个整数 (Pumping length) $p \geq 1$, 使得对于任意字符串 $s \in A$ 且 $|s| \geq p$, 都可以将 s 分解为 $s = xyz$, 满足:

1. $\forall i \geq 0, xy^iz \in A$ (重复 Pattern y 任意次, 字符串仍在语言中)
2. $|y| \geq 1$ (可重复的 Pattern 非空)
3. $|xy| \leq p$ (可以在前 p 个字符中找到该 Pattern)

证明. 由于 A 正则, 于是存在 DFA M decides A , 令 $p = \text{number of states in } M$

对于 $w \in A, |w| \geq p$, 考虑其被 DFA 计算的过程: $q_0 \rightarrow q_1 \rightarrow \dots \rightarrow q_{n-1} \rightarrow q_n$, q_0, q_n 分别为初态和接受状态, 由于要处理 w 的至少 p 位, 必然有 $n \geq p$; 与此同时, 状态的总数只有 p 个, 于是一定存在 i, j , 使得 $0 \leq i < j \leq p$ 且 $q_i = q_j$ (Pigeonhole Principle)

于是在状态 q_0 到 q_j 部分处理的字符串记为 x , 在 q_i 到 q_j 部分处理的字符串记为 y , 在 q_j 到 q_n 部分处理的字符串记为 z , 则有 $s = xyz$.

由于 $q_i = q_j$, 也就是说处理 y 的状态转换部分可以重复无数次; 而 $|xy| = j \leq p$, 且 $|y| = j - i \geq 1$, 于是满足 Pumping Theorem 的要求。□

练习. 说明 $\{0^n 1^n : n \geq 0\}$ 不是正则的。

证明. 假设其是正则的, 则存在 pumping length p 。

考虑字符串 $w = 0^p 1^p$, 它应当可以被分为 $w = xyz$ 且满足三条性质。

由于 $|xy| \leq p$, 于是仅有可能 $xy = 0^k, k \leq p$, 且 y 不为空串, 那么 $y = 0^{k'}$

但这样一来, $xy^iz = 0^{k-k'+ik'} 1^p$, 显然对于某些 i , 新得到的字符串不在该语言中, 与第一条性质矛盾。□

3.4 Pushdown Automaton

我们已经介绍过 DFA, NFA, Regex 三种等价的计算模型, 现在做出的考虑是: 向其中添加一些新的 feature, 以计算更多的函数, 决定更多的语言。

比方说, 在 DFA/NFA 中, 状态切换时只是单纯地转移到下一个状态, 但并没有“记忆”已经处理过的信息; 如果除了 FA 的四元组外, 能有一个数据结构来存储一些信息, 或许能计算更多的函数。(这篇文章介绍了一个 PDA 在实际游戏开发中的例子: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/575664217>)

定义 3.4.1 (PDA)

Pushdown Automaton(PDA) = NFA + stack

PDA 是一个四元组 $P = (K, s, F, \Delta)$ 其中 K, s, F 和 NFA 中的定义一样, $\Delta \subseteq (K \times \{0, 1, e\} \times \{0, 1\}^*) \times (K \times \{0, 1\}^*)$ (其中第一部分的 $\{0, 1\}^*$ 表示栈顶将被 pop 出来的字符串, 第二部分的 $\{0, 1\}^*$ 表示将被 push 到栈内的字符串) (何意味?)

e.g. 对于 $(q, a, \gamma, p, \beta) \in \Delta$, 表示 PDA 在状态 q 下读入字符 a , 且栈顶为 γ 时, 可以转移到状态 p , 并将栈顶的 γ pop 出, push 入 β 。

似乎这么看来, 每次进行 transition 时, 都需要从栈里 pop 出一些东西, 再 push 入一些东西, 但实则可以用形如 $(q, a, \gamma, p, \beta\gamma)$ 的 relation 来表示 “只 push 入而不 pop 出” 的操作。



由此可以看出, PDA 中状态的转换通常还伴随着栈的操作, 而不仅仅只是先前两种 FA 那样的状态转换; 因此方便起见, 定义一个新的 “配置” (Configuration), PDA 通过 relation 在不同的配置之间进行转换, 这个配置也称为即时描述 (Instantaneous Description, ID)。

这个配置相当于一种新的 “状态”, 思考一下, 其与什么有关?

- 当前 PDA 所处的状态 $q \in K$
- 剩余未处理的输入字符串 $w \in \{0, 1\}^*$
- 栈内当前的字符串 $\alpha \in \{0, 1\}^*$, 栈顶在左侧

定义 3.4.2 (Configuration of PDA)

A Configuration ID $C \in K \times \{0, 1\}^* \times \{0, 1\}^*$, i.e. $C = (q, w, \alpha)$



如果一个 PDA P 从配置 C_1 只通过一步转移到配置 C_2 , 则记作 $C_1 \xrightarrow{P} C_2$; 对于不限制次数的转移, 记作 $C_1 \xrightarrow{P}^* C_2$ 。

定义 3.4.3 (Decision of PDA)

PDA P accepts string $w \in \{0, 1\}^*$ if $\exists q \in F$ such that $(s, w, e) \xrightarrow{P}^* (q, e, e)$, 即走到可接受态 & 栈空 & 输入处理完

$L(P) = \{w \in \{0, 1\}^* \mid P \text{ accepts } w\}$, P decides $L(P)$

$L(P)$ 称为上下文无关语言 (Context-Free Language, CFL)。





找出下面 CFL 的 PDA

1. $L = \{w \in \{0,1\}^* \mid \text{in } w, \text{ number of 0s is equal to number of 1s}\}$
 - $K = F = \{q\}$
 - $s = q$ (只有一个状态作为初态和可接受态)
 - $\Delta = \{$
 - $((q, 0, e), (q, 0)), \# \text{ push 0 onto empty stack when reading 0}$
 - $((q, 0, 0), (q, 00)), \# \text{ push another 0 onto stack when reading 0 and stack top is 0}$
 - $((q, 0, 1), (q, e)), \# \text{ pop 1 from stack when reading 0 and stack top is 1}$
 - $((q, 1, e), (q, 1)), \# \text{ push 1 onto empty stack when reading 1}$
 - $((q, 1, 1), (q, 11)), \# \text{ push another 1 onto stack when reading 1 and stack top is 1}$
 - $((q, 1, 0), (q, e)), \# \text{ pop 0 from stack when reading 1 and stack top is 0}$
 - 易知，每次在栈顶为 1/0 的情况下读到 0/1 就会抵消掉栈顶的 1/0，于是达成最终栈空的条件，必然需要 0 和 1 数量相等
2. $L = \{ww_{\text{Reversal}} \mid w \in \{0,1\}^*\}$
 - $K = \{l, r\}$, l 表示正在读取左半部分, r 表示正在读右半部分
 - $s = l$
 - $F = \{r\}$
 - $\Delta = \{$
 - $((l, 0, e), (l, 0)),$
 - $((l, 1, e), (l, 1)), \# \text{ Push whatever read while we are on the former half}$
 - $((l, e, e), (r, e)), \# \text{ NFA guess when we reach the middle and transit to latter}$
 - $((r, 0, 0), (r, e)),$
 - $((r, 1, 1), (r, e)), \# \text{ Pop out what's there, if we read the same on the latter half}$

3.5 语法 (Grammar)

接下来学习一个全新的概念：语法 (Grammar)。先前的三种 FA 都是用于判断某个字符串是否属于某个语言，而语法则用于生成 (generate) 某个语言中的字符串；主要介绍上下文无关语法 (Context-Free Grammar, CFG)。

定义 3.5.1 (CFG)

A CFG $G = \{V, S, R\}$, where:

- V is a finite set of symbols, including 0,1
- $S \in V - \{0,1\}$: start symbol
- $R \in (V - \{0,1\}) \times V^*$: rules (must be finite)
 - 为表示方便，一般将规则写作 $A \rightarrow \alpha$, 其中 $A \in V - \{0,1\}, \alpha \in V^*$



引述

为了推导出一个 CFG 所描述的语言中的字符串，我们从起始符号开始，不断地将变量 A 用它的某一个产生式的体来替代，从而得到所有的字符串。这里， A 的产生式指的是以 A 为头的产生式。

— https://fla.cuijiacai.com/04-cfg/#_4-1-2-%E5%BD%A2%E5%BC%8F%E5%8C%96%E5%AE%9A%E4%B9%89

为了解析 rules 的推导过程，定义推导 (Derivation)：

定义 3.5.2 (Derive)

if $A \rightarrow \alpha \in R$, then $\beta A \gamma \Rightarrow \beta \alpha \gamma$, 其中 $\beta, \gamma \in V^*$

对于若干次的推导，类似的，表示为 $\stackrel{*}{\Rightarrow}$

接下来就可以定义 CFG 生成语言的方法： G generates $w \in \{0,1\}^*$ if $S \stackrel{*}{\Rightarrow} w$ & $L(G) = \{w \in \{0,1\}^* \mid G \text{ generates } w\}$



Find CFG for these languages

1. $\{w \in \{0,1\}^* \mid w = w_{\text{Reversal}}\}$, 即回文句
 - 考虑到 $w = 0u0$ or $1u1$ where $u = u_{\text{Reversal}}$
 - $R: S \rightarrow e|1|0|1S1|0S0$

3.6 上下文无关语言 (Context-Free Language, CFL)

大的来了：上面两小部分讲述的 PDA 和 CFG 其实是等价的计算模型！即一个语言被某台 PDA 决定当且仅当它可以被某个 CFG 生成。

定理 3.6.1

$\text{CFG} \Leftrightarrow \text{PDA}$

证明.

1. 试证 $\text{CFG} \Rightarrow \text{PDA}$

- Given CFG $G = (V, S, R)$, 构造 PDA $P = (K, p, F, \Delta)$, where:
 - $K = \{p, q\}$
 - $F = \{q\}$
 - $\Delta = \{$
 - $((p, e, e), (q, S)), \#$ Push start symbol onto empty stack
 - $((q, e, A), (q, \alpha))$ for each $A \rightarrow \alpha \in R, \#$ Replace non-terminal A on top of stack with α
 - $((q, a, a), (q, e))$ for each $a \in \{0,1\}, \#$ Pop out what's on stack if it matches the read input
 - $\}$

2. 试证 $\text{PDA} \Rightarrow \text{CFG}$

- Given PDA $P = (K, s, F, \Delta)$, 先将其转化为 simple 的。

定义 3.6.2 (Simple PDA)

A PDA $P = (K, \Delta, s, F)$ is simple, if

- $|F| = 1$ (可接受态只有 1 个)
- $\forall ((p, a, \alpha), (q, \beta)) \in \Delta$, either $\alpha = e$ & $|\beta| = 1$, or $|\alpha| = 1$ & $\beta = e$ (每次 transition 要么只 push 一个 symbol, 要么只 pop 一个 symbol)

定理 3.6.3 (PDA \Rightarrow simple PDA)

这里介绍通过以下几个步骤如何将 PDA 转化为 simple PDA:

- 1) if $|F| > 1$, 回忆 小节 3.3 部分从 NFA 转为 RE 的 proof, 创建一个新的可接受态 f , $\forall q \in F$, 创建一个新的 transition $((q, e, e), (f, e))$, 然后令 $F = \{f\}$ 即可。
- 2) for $((p, a, \alpha), (q, \beta)) \in \Delta$,
 - if $|\alpha| \geq 1$ & $|\beta| \geq 1$, split the transition into two via adding a intermediate state r : $((p, a, \alpha), (r, \beta))$ and $((r, e, e), (q, e))$, then we go to next cases
 - if $|\alpha| > 1$ & $\beta = e$, split the pop operation into $|\alpha| - 1$ steps via adding intermediate states $r_1, r_2, \dots, r_{|\alpha|-1}$: $((p, a, \alpha[0]), (r_1, e))$, $((r_1, e, \alpha[1]), (r_2, e))$, \dots , $((r_{|\alpha|-1}, e, \alpha[|\alpha| - 1]), (q, e))$
 - if $\alpha = e$ & $|\beta| > 1$, split the push operation just like above
 - if $\alpha = \beta = e$, also split into 2 via adding an intermediate state r : $((p, a, 0), (r, e))$ and $((r, e, e), (q, 0))$ (push 0 再 pop 出来)



- 接下来把 simple PDA 转化为 CFG: Given simple PDA $P = (K, s, \{f\}, \Delta)$, 构造 CFG $G = (V, S, R)$
 - ▶ 先定义 V : symbol set, 由于期望中, G 要生成的语言就是 PDA 所决定的, 而 P 决定一个语言又是对其中所有的 $w \in \{0, 1\}^*$ 进行从初态到可接受态的转换, 因此 V 中需要包含所有可能的 state pairs: $(p, q) \in K \times K$, 由于 CFG 处理的是 symbol, 需要将这个 pair 表示为 symbol, 即 $V = \{0, 1\} \cup \{A_{pq} \mid (p, q) \in K \times K\}$
 - ▶ 接下来先不着急继续寻找其他两个元素的定义, 想一想我们的目标: 将这些符号 A_{pq} produce 出某些 $w \in \{0, 1\}^*$, 并且令其与“ w 也可通过 P 的判断得到”这个陈述是等价的。严谨阐述就是 $A_{pq} \xRightarrow{*} w$ for some $w \in \{0, 1\}^* \Leftrightarrow w \in \left\{ u \in \{0, 1\}^* \mid (p, u, e) \vdash_P (q, e, e) \right\}$
 - ▶ 显然我们会发现一个很特殊的 symbol A_{sf} , 它对应的语言正是 PDA P 决定的语言, 考虑到 CFG 做的本职工作就是把 S 阐释为一种语言, 因此使这两种语言相同, 令 $S = A_{sf}$ 即可。

□

四、图灵机 (Turing Machine)

” 合味道

我要提一个以著名计算机科学家名字命名的, 一个屈居于以初代校长为名的扫码学院下的神秘班级了。

尽管 PDA/CFG 已经比 FA 强大了不少，但它们仍然无法计算所有的函数/决定所有的语言，例如， $\{0^n 1^n 0^n \mid n \geq 0\}$ ，于是，隆重端出图灵机 (Turing Machine, TM)。

引述

The “granddaddy” of all models of computation is the Turing machine.

— introtcs.org

想象一根从一端开始无限长的纸带 (Tape)，上面划分为一个个方格 (Cell)，每个方格中可以写入一个 symbol；同时有一个读写头 (Head) 可以在纸带上左右移动，并且可以读出/写入当前所在方格的 symbol：Symbol 有四种：1, 0, \triangleright , \emptyset ，最后两种分别是纸带的开头和表示该 Cell 为空的字符

该纸带还附带一个状态控制器 (State Controller)，读写头每到一个 Cell 时，根据当前状态和该 Cell 中的 symbol，可以完成下面两个操作：

- Write a symbol to the current Cell
- Move the head one cell to the left or right/Stay/Halt

定义 4.1 (Turing Machine)

A Turing Machine $M = (K, \Sigma, s, \delta)$, where:

- K is a finite set of states
- $s \in K$ is the initial state
- Σ is a finite set of symbols, $\{0, 1, \triangleright, \emptyset\} \subseteq \Sigma$
- δ is “Transition Function”
 - $\delta: K \times \Sigma \rightarrow K \times \Sigma \times \{\text{MoveLeft}, \text{MoveRight}, \text{Stay}, \text{Halt}\}$ ，即根据当前状态和当前 Cell 中的 symbol，输出下一状态、写入的 symbol、读写头的操作。

直接来看该模型是怎么接收字符串的：对于 input $x = x_0 x_1 \dots x_{n-1}$ ，TM 先将纸带的前 n 个 Cell 写为 $\triangleright x_0 x_1 \dots x_{n-1}$ ($T[0] = \triangleright, T[1] = x_0, T[2] = x_1, \dots, T[n] = x_{n-1}$)，其余 Cell 均为 \emptyset ，接下来记初态 $s = 0$ ，且开始从 \triangleright 后的 $i = 0$ 位置开始读取字符串，重复以下几步：

- 根据当前 Cell 的内容和当前状态 q ，通过 $\delta(q, T[i]) = (q', a, \text{Direction})$ 得到下一状态 q' 、写入 symbol a 和读写头的操作。（对于开头的 \triangleright ，要求其唯一且不可覆盖，即 $a == \triangleright$ 当且仅当 $T[i] == \triangleright$ ）
- 写入 Symbol，转移状态： $T[i] = a, q = q'$
- switch Direction
 - if Direction = MoveRight, $i = i + 1$
 - if Direction = MoveLeft, $i = \max(0, i - 1)$
 - if Direction = Stay, $i = i$
 - if Direction = Halt, stop

停机后，TM 会输出一个东西： $M(x) = T[1]T[2]\dots T[i]$ where $T[i + 1]$ 是第一个 \emptyset 。

如果接受完了 input 还没有停机，则记 $M(x) = \perp$

定义 4.2 (Computation via TM)

TM M computes function $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ if $\forall x \in \{0, 1\}^*, M(x) = f(x)$

注意这要求了 TM 必须对所有输入停机；可被 TM 计算的函数称为可计算函数 (Computable Function)。



4.1 图灵完备

使用一些常见的编程语言都可以实现上面介绍的 TM 计算步骤，这些语言被称为图灵完备 (Turing Complete) 的语言，即其可以完成图灵机做的事情。

现在从另一个方向开展研究：图灵机可以做到这些个编程语言能完成的任务吗？

4.1.1 NAND-TM

就一种名叫 NAND-TM 的编程语言，其可以看作先前介绍的 NAND-CIRC 的扩展：允许使用数组 (Array) 存储任意长度的字符串，并且允许使用循环（循环次数与输入长度有关，不一定为常数的 Loop）来处理这些数组。

- NAND-TM 中有两种数据类型：
 - i : integer value
 - other: boolean value
- 有两种变量类型：
 - scalar: boolean variable
 - array: array of boolean variables (can be infinite long)
 - All arrays are accessed only and simultaneously by i
- 其输入 X 和 输出 Y 都是 array 类型的变量
- 程序最后一行是 MODANDJUMP(a, b) : modify i and jump back to the first line.
 - if $a = 1b = 1, i = i + 1$
 - if $a = 0b = 1, i = i - 1$
 - if $a = 1b = 0, i = i$
 - if $a = 0b = 0, \text{halt}$
- 所有变量（除输入 X 外）初始均为 0

于是在程序每轮执行中，对 $A[i], B[i] \dots$ 等进行 NAND 操作，并且通过 MODANDJUMP 来控制 i 的变化，进行循环处理。

定理 4.1.1 (TM & NAND-TM)

TM \Leftrightarrow NAND-TM, 并且其元素有如下对应关系

TM Element	NAND-TM Element
finite states	scalar variables
tape	array variables
head position	integer variable i

证明.

· 左推右:

- 假设有 TM $M = (K, \Sigma, s, \delta)$, 构造 NAND-TM 程序 P :
 - 使用 $\lceil \log_2(|K|) \rceil$ 个 scalar 变量来表示 TM 的状态; 使用 $\lceil \log_2(|\Sigma|) \rceil$ 个 array 变量来表示 TM 的 tape; 两个 scalar 变量表示读写头的四个操作 (可编码为 00, 01, 10, 11)
 - 那么 relation $\delta : K \times \Sigma \rightarrow K \times \Sigma \times \{\text{MoveLeft}, \text{MoveRight}, \text{Stay}, \text{Halt}\}$ 转化为了 function $\delta' : \{0, 1\}^{\lceil \log_2(|K|) \rceil + \lceil \log_2(|\Sigma|) \rceil + 2} \rightarrow \{0, 1\}^{\lceil \log_2(|K|) \rceil + \lceil \log_2(|\Sigma|) \rceil + 2}$, 这是一个有限函数, 也就是说, 可以被一个 NAND-CIRC program 计算。
 - 记其计算得到的结果最后两位为 a, b , 则在程序最后加上 `MODANDJUMP(a,b)`, 即得到与原 TM 对应的 NAND-TM。

· 右推左:

- 假设有 NAND-TM 程序 P , 构造 TM
- k 个 scalar 变量, 对应 TM 的 2^k 个状态
- l 个 array 变量, 那么字符集数量 $|\Sigma| = 2^l$
- 对于 $f : \{0, 1\}^{k+l} \rightarrow \{0, 1\}^{k+l}$ 的这个 NAND-TM Program, 可转化为 $g : \{0, 1\}^{k+l} \rightarrow \{0, 1\}^{k+l} \times \{\text{MoveLeft}, \text{MoveRight}, \text{Stay}, \text{Halt}\}$ 的 TM Transition Function

□



再加一点语法糖:

- GOTO 语句: `GOTO L`, 表示跳转到 line 为 L 的行继续执行。
- Multi-Indexing: 允许使用多个 index 来访问不同 array 的不同位置
- Multi-Dimensional Arrays: 允许使用多维数组

4.1.2 NAND-RAM

TM 可以再次进化为 RAM, 实际上现代编程语言一般都基于 RAM 模型。

纸带记为 Memory, 每个 Cell 可以存储一个整数而非一个字符, 并且有 k 个寄存器 (Register), 每个寄存器可以存储一个 integer value。

1. 可以 Write/Read Memory Cell, 并且是指哪就能访问哪, 不需要读写头
2. 可以对寄存器进行加减乘除等算术运算
3. 可以根据判断结果进行下一步操作

同样, RAM 也对应一种 NAND-RAM 编程语言, 其有 integer 变量 (有最大值) 和 index 访问的 array; 还有许多算术运算指令。

可以证明 NAND-TM \Leftrightarrow NAND-RAM