

# 内涵时态逻辑的语义解释系统

陈玉泉 陈宣 陆汝占

上海交通大学计算机系, 上海, 200030

E-mail:yqchen@mail.sjtu.edu.cn

**摘要:** 语义的表示与解释是自然语言理解研究中的一个核心问题, 内涵逻辑和时态逻辑是目前广泛使用的形式化语义描述语言。本文借鉴 Cresswell 可能世界语义学的思想, 扩展了基本时态逻辑系统, 使之能够更有效地描述自然语言的语义。在此基础上, 设计与实现了一个时态逻辑自动语义解释系统。

**关键字:** 时态逻辑 内涵逻辑 语义解释 自然语言理解

## An Automatic Semantic Interpretation System Based on Intensional Temporal Logic

Chen Yuquan Chen Xuan Lu Ruzhan

Department of Computer Science and Engineering

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030

E-mail:yqchen@mail.sjtu.edu.cn

**Abstract:** Semantic description and interpretation is a kernel problem in the research on Natural Language Understanding. Intensional logic and temporal logic are kinds of formalized semantic description language. Based on the thought of Cresswell's possible world semantics, this paper extends basic temporal logic, makes it more efficient in natural language semantics description and develops an automatic semantic interpretation system.

**Key words:** Temporal Logic, Intensional Logic, Semantic Interpretation, Natural Language Understanding

### 1. 引言

语言所表达的意义包含两方面内容, 一方面是跟民族、社会密切相关的文化背景; 另一方面是逻辑语义, 表达了最基本的逻辑关系。理解语言的语义, 最基本的是理解语言的逻辑语义<sup>[1][2][3]</sup>, 这不仅是当前计算机理解自然语言的根本所在, 也是计算语言学中的带有根本性的理论基础和应用技术的关键。求解自然语言的逻辑语义分为两个步骤: 对于自然语言语句  $S$ , 首先求  $S$  对应的内涵逻辑表达式  $\Delta$ , 然后在具有可能世界的模型下对  $\Delta$  进行语义解释。

在描述自然语言语义的步骤中，需要使用一套合适的语义描述语言。这样的语义描述语言必须具有形式化、无歧义、描述能力强等特点。内涵逻辑和基本的时态、模态逻辑是目前最常用的语义描述语言，Montage 语法<sup>[4][5]</sup>、GPSG<sup>[6]</sup>等经典的语言理论都是在这样逻辑框架的基础上，建立了一套合适的语义描述体系。然而，基本的时态、模态逻辑在描述自然语言中带有复杂的时间指标的语句时，其能力仍显不足。本文借鉴 Cresswell 可能世界语义学<sup>[7]</sup>的思想，扩展了基本时态逻辑系统，使之能够更有效的描述自然语言的语义。

语义解释步骤的任务是解释逻辑公式 $\Delta$ 所表示的意义。根据模型论的观点，用  $M: \langle D, F \rangle$  表示模型，其中  $D$  表示个体论域， $F$  表示非逻辑常量的指派函数，用  $g$  表示变量赋值函数，用  $W$  表示可能世界集合（或用  $I$  表示时间指标集合），这样在给定  $M, g, W$  之后，即可求公式 $\Delta$ 的语义 $\|\Delta\|^{M,g}$ 。而根据内涵逻辑的模型论解释，给定  $M, g$  后，可将 $\Delta$ 的语义解释（记为  $V(\Delta)$ ）定义为使其值为真的可能世界的集合，即  $V(\Delta) = \{W \mid \|\Delta\|^{M,g} = \text{True}\}$ 。

## 2. 内涵时态逻辑及其扩展

### 2.1 基本时态逻辑描述能力的不足

时态逻辑是对一阶谓词逻辑的扩展，引入了时态算子  $F$ （将来算子）、 $P$ （过去算子）用于描述依赖于时态指标的自然语言语义。时态算子  $F$  与  $P$  的语义规则为：

- (1)  $t \models V(P\Delta)$  存在某个  $t'(t' < t)$ ，使得  $t' \models V(\Delta)$ ；
- (2)  $t \models V(F\Delta)$  存在某个  $t'(t' > t)$ ，使得  $t' \models V(\Delta)$ 。

$F, P$  通常称为无选择（unselective）时态算子，即 $\Delta$ 中所有原子公式原来在某一个时态指标下求值，作用  $F$  或  $P$  后，都将在新的时态指标下求值。在这一点上， $F, P$  算子与量词有明显的不同，量词有约束变元，因此是有选择的，而无选择的时态算子没有可供约束的变元。正是由于时态算子的这种无选择性，使得在描述某些自然语言语句时产生了困难，例如：

- (3) 会有那么一天，现存的一切不合理的东西都将消亡。

“都”表示共享。“一切不合理的东西都消亡”表示成  $S_1 \ S_2$ ，其中  $S_1 = \{\text{不合理的东西}\}$ ， $S_2 = \{\text{消亡的东西}\}$ ，因为  $S_1 \ S_2$  逻辑定义为： $x(x \ S_1 \circ x \ S_2)$ ，所以“一切不合理的东西都消亡”表示成  $x(\text{improper}(x) \circ \text{disappear}(x))$ 。

(3) 的特点是：时间短语“会有那么一天”的辖域处于全称量词的外面，如果用无选择的时态算子  $F$  来表示“将来”，得到公式 (4)：

- (4)  $F \ x(\text{improper}(x) \circ \text{disappear}(x))$

显然，这并不能表达 (3) 的意义。因为，算子  $F$  将谓词  $\text{improper}$  与  $\text{disappear}$  的时态计值指标都改为了将来某个时刻，然而，在 (3) 中， $\text{improper}$  对应的时态指标应该是“现在”。从而，在基本的时态逻辑框架中无法正确表述 (3) 的意义。

语句 (3) 涉及到两个时态指标：“现在”与“将来”。当然，也有更复杂的情况，例如：

- (5) 现存的一切不合理的东西有些将自行消亡，有些将被人民抛弃。

这里，“不合理”、“自行消亡”和“被人民抛弃”分别对应于三个不同的时态指标，同样由于

全称量词与时态算子作用域的关系，我们不能简单的在逻辑公式前加算子 F 来描述 (5) 的意义。

为了描述 (3) 与 (5) 之类语句的语义，必须对基本的时态逻辑进行扩展，考虑引入新的时态算子，用于将被无选择时态算子改变的时态指标改回原值。

## 2.2 基本时态逻辑的扩展 —— 引入时态算子 NOW 和 REF

F、P 算子描述能力的局限性的根源在于它们的无选择性，因此，我们可以考虑引入新的算子，用于“抵消”F、P 算子的作用。进一步考察语句 (3)，对 (3) 的分析需要依赖于两个时态指标：“现在”与“将来”，由此，可以考虑在时态指标的序偶  $\langle t_0, t_1 \rangle$  下解释该语句。 $t_0$  称为计值指标，表示将在该时刻对语句进行解释； $t_1$  是一个参照指标，实际上是供以后使用的储存信息。这时，F、P 等常规算子将仅对第一个时态指标，即计值指标起作用，而公式  $\Delta$  的语义解释也相应的变为时态指标序偶的集合：

$$(6) \langle t_0, t_1 \rangle \quad V(P\Delta) \quad \text{存在某个 } s < t_0, \text{ 使得 } \langle s, t_1 \rangle \quad V(\Delta);$$

$$(7) \langle t_0, t_1 \rangle \quad V(F\Delta) \quad \text{存在某个 } s > t_0, \text{ 使得 } \langle s, t_1 \rangle \quad V(\Delta)。$$

同时需要引入新的时态算子用于联系计值指标与参照指标：NOW 算子取参照指标的值作为新的计值指标；REF 算子正相反，将计值指标的值储存在参照指标的位置上。

$$(8) \langle t_0, t_1 \rangle \quad V(\text{NOW}\Delta) \quad \langle t_1, t_1 \rangle \quad V(\Delta);$$

$$(9) \langle t_0, t_1 \rangle \quad V(\text{REF}\Delta) \quad \langle t_0, t_0 \rangle \quad V(\Delta)。$$

下面通过例子来说明经扩展的时态逻辑的描述能力。对于语句 (3)，使用算子 NOW，翻译成公式 (10)：

$$(10) F \quad x (\text{NOW improper}(x) \circ \text{disappear}(x))$$

分析如下：先令计值点与参照点都是  $t_0$ ，则，

$$\langle t_0, t_0 \rangle \quad V(10)$$

$$\text{存在某个 } t_1 > t_0, \langle t_1, t_0 \rangle \quad V(x (\text{NOW improper}(x) \circ \text{disappear}(x)))$$

$$\text{对于个体域中每个 } x, \langle t_1, t_0 \rangle \quad V(\text{NOW improper}(x) \circ \text{disappear}(x))$$

$$\text{对于个体域中每个 } x, \text{若 } \langle t_1, t_0 \rangle \quad V(\text{NOW improper}(x)), \text{则 } \langle t_1, t_0 \rangle \quad V(\text{disappear}(x))$$

$$\text{对于个体域中每个 } x, \text{若 } \langle t_0, t_0 \rangle \quad V(\text{improper}(x)), \text{则 } \langle t_1, t_0 \rangle \quad V(\text{disappear}(x))$$

推演至此，可以发现，作用于原子公式  $\text{improper}(x)$  的算子 NOW 将被 F 算子改变为“将来  $t_1$ ”的时态指标改回到“现在  $t_0$ ”，由此，由于加上了算子 NOW，蕴涵式前后件的计值指标不同了，蕴涵前件计值指标为  $t_0$ ，蕴涵后件计值指标为  $t_1$ ，而这正是 (3) 的准确语义。

如果没有假定参照点与计值点相同，则需在 (10) 前面加上 REF 算子，保存初始计值点，即得到：

$$(11) \text{REF } F \quad x (\text{NOW improper}(x) \circ \text{disappear}(x))。$$

$$\langle t_0, t' \rangle \quad V(11) \quad \langle t_0, t_0 \rangle \quad V(10)$$

其后的推演同上。

### 2.3 基本时态逻辑的进一步扩展 —— 引入时态算子 $Then_k$ 和 $Ref_i$

第 2.1 节中指出, 实际的语句中还会出现更复杂的情况, 一条语句并不一定只涉及到两个时态指标, 如语句 (5), 如果仅使用 NOW 与 REF, 在描述上仍有困难。因此, 上述的逻辑系统仍然能够进一步地加以扩展, 可以将时间序偶扩展为  $n$  元时间序列

$$Y: \langle t_0, t_1, \dots, t_{n-1} \rangle$$

类似的, 在  $Y$  中, 只有第一个时态指标  $t_0$  是计值指标, 其余  $n-1$  个时态指标都是存储信息的参照指标,  $F$ 、 $P$  等常规算子也是只对计值指标起作用, 公式  $\Delta$  的语义解释也相应的变为  $n$  元时态指标序列的集合。同样, 需要引入联系  $n$  个时态指标的新的时态算子  $Then_k$  和  $Ref_i$ , 它们的语义规则定义如下:

(12)  $Y \models V(Then_k \Delta) \iff Y[k/0] \models V(\Delta)$ ,  $Y[k/0]$  表示在序列  $Y$  中, 用第  $k$  个分量替代第 0 个分量 (即用第  $k$  个存储信息替代计值指标);

(13)  $Y \models V(Ref_k \Delta) \iff Y[0/k] \models V(\Delta)$ ,  $Y[0/k]$  表示在序列  $Y$  中, 用第 0 个分量替代第  $k$  个分量 (即将计值指标存储在第  $k$  个存储位置上)。

显然,  $NOW = Then_1$ ,  $REF = Ref_1$ 。

于是 (5) 可以翻译为:

$$(14) F Ref_2 Then_3 F Ref_3 \neg_x (Then_1 improper(x) \vee (Then_2 disappear(x) \vee Then_3 discarded(x)))$$

(14) 成立 对任意的  $x$ , 如果  $x$  是在  $t_0$  时刻不合理的东西,

那么  $x$  或者在将来时刻  $t_1$  自行消亡, 或者在将来时刻  $t_2$  被人民抛弃。

这正是语句 (5) 所表示的含义。

至此, 通过引入新的算子, 解决了由于  $F$ 、 $P$  算子的无选择性造成的描述能力受限的问题, 而且, 这种扩展方法在形式上也比较简单。这样的扩展时态逻辑系统可以更有力的支持自然语言理解系统中的语义描述。

## 3. 自动语义解释系统的设计与实现

对于一个时态逻辑公式, 本文将通过机器自动推理, 求解一个公式在内涵时态逻辑模型下的语义解释, 特别是公式中的每个原子公式与计值时态指标的对应关系。

系统的结构设计采用分遍处理的思想, 整个系统分为公式语法分析与推理解释两个主要模块, 如图 1 所示。公式语法分析模块将逻辑公式转换成树结构的语法表示形式; 公式推理解释模块基于语法树递归地进行推理计算, 得到原子公式与计值时态指标的对应关系。

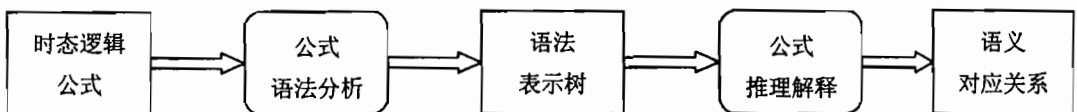


图 1 系统结构示意图

由一元、二元运算符和相应的操作数构成的数学表达式可以用二叉树的形式来表示，时态逻辑公式也可以作同样的处理。在逻辑公式中，将算子、逻辑联结词和量词作为运算符，原子公式作为操作数，用算符优先算法（见算法 1）可以将逻辑公式转换成二叉树的表示形式。图 2 是公式 (14)

$F \text{ Ref}_2 \text{ Then}_3 F \text{ Ref}_3 \ x(\text{Then}_1 \text{ improper}(x) \circ (\text{Then}_2 \text{ disappear}(x) \ \text{Then}_3 \text{ discarded}(x)))$   
的二叉树表示。

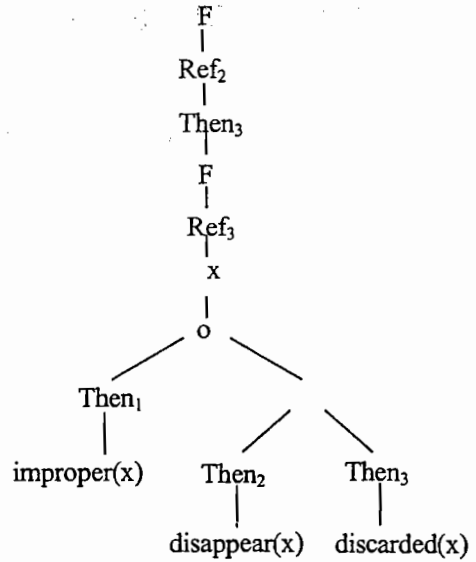


图 2 语法表示树示例

算法 1: 对逻辑表达式进行转换的算符优先算法  
设 OPTR 和 OPND 分别为运算符栈和操作数栈

- (1) 初始化两个工作栈，并将表达式起始符'#'压入 OPTR 栈底；
- (2) 从 S 中取一个符号 Sbl；
- (3) 若 Sbl 与 OPND 栈顶元素均为'#'，则算法结束，操作树栈顶即为所求的语法表示树的根结点指针；否则，若 Sbl 是原子公式，做 (4)；若 Sbl 是算符，做 (5)；
- (4) 建立新的叶节点，并将相应指针压 OPND 栈，转 (2)；
- (5) 若 OPTR 栈顶元素的优先级小于 Sbl，则将 Sbl 压入 OPTR；  
若 OPTR 栈顶元素的优先级等于 Sbl，则弹出栈顶元素（此时实际上是脱去括号）；  
若 OPTR 栈顶元素的优先级大于 Sbl，则弹出栈顶元素，根据 OPTR 栈顶算符的元数从 OPND 栈中弹出相应的子树指针构造新的子树，并将新子树指针压入 OPND 栈；
- (6) 转 (2)

公式推理解释模块的主要任务是求解原子公式与计值时态指标的对应关系，参见算法 2。

算法 2: 求解原子公式与计值时态指标的对应关系

设时态指标数组 T 用于保存时态指标序列  $\rho$ ，初始值均为  $t_0$ ；

Time\_Origin 为时态指标偏序集；

Pred\_Time 为原子公式与其相应计值时态指标的对应关系表，初始时空。

递归地对语法表示树中的每个节点进行处理：

- (1) 对于标记为时态算子 F、P 的节点，生成新的时态指标取代 T[0]，并在 Time\_Origin 表中添加记录；
- (2) 对于标记为时态算子 THEN<sub>i</sub>/REF<sub>i</sub> 的节点，相应地更新时态指标数组 T，即 T[0] = T[k] / T[k] = T[0]；
- (3) 对于标记为逻辑联结词和量词的节点，T、Time\_Origin、Pred\_Time 不变；
- (4) 对于标记为原子谓词公式的节点，根据 T[0] 在 Pred\_Time 表中添加相应的记录。

表 1 给出了对图 2 所示的语法表示树进行推理求解过程中时态指标数组和两张对应关系表的变化。

当前处理节点	时态指标数组 T	Time Origin 表	Pred Time 表
初始	$[t_0, t_0, t_0, t_0]$		
F	$[t_1, t_0, t_0, t_0]$	添加 $\langle t_0, t_1 \rangle$	
Ref <sub>2</sub>	$[t_1, t_0, t_1, t_0]$		
Then <sub>3</sub>	$[t_0, t_0, t_1, t_0]$		
F	$[t_2, t_0, t_1, t_0]$	添加 $\langle t_0, t_2 \rangle$	
Ref <sub>3</sub>	$[t_2, t_0, t_1, t_2]$		
x, o	$[t_2, t_0, t_1, t_2]$		
Then <sub>1</sub>	$[t_0, t_0, t_1, t_2]$		
improper(x)	$[t_0, t_0, t_1, t_2]$		添加 $\langle \text{improper}, t_0 \rangle$
	$[t_2, t_0, t_1, t_2]$		
Then <sub>2</sub>	$[t_1, t_0, t_1, t_2]$		
disappear(x)	$[t_1, t_0, t_1, t_2]$		添加 $\langle \text{disappear}, t_1 \rangle$
Then <sub>3</sub>	$[t_2, t_0, t_1, t_2]$		
discarded(x)	$[t_2, t_0, t_1, t_2]$		添加 $\langle \text{discarded}, t_2 \rangle$

表 1 公式推理演算实例

根据计算中构造出的对应关系表，可以得到：

improper 一在  $t_0$  计值；

disappear 一在  $t_1$  计值，  $t_0 < t_1$ ；

discarded 一在  $t_2$  计值，  $t_0 < t_2$ ；

根据此表，可得公式 (14) 的语义解释：对任意的 x，如果 x 是在  $t_0$  时刻不合理的东西，那么 x 或者在将来时刻  $t_1$  自行消亡，或者在将来时刻  $t_2$  被人民抛弃。这正是本文期望得到的。

## 参考文献

- [1] 陆汝占，动态逻辑语义理论 DLPW，ICCC'94，Singapore，1994。
- [2] 朱水林，逻辑语义学研究，上海教育出版社，1992。
- [3] 徐烈炯，语义学（修订本），语文出版社，1995。
- [4] Dowty.D.R，Introduction to Montague Semantics. D.Reidel, 1981.
- [5] 邹崇理，逻辑、语言和蒙太格语法，社会科学文献出版社，1995。
- [6] Gazdar.G，Generalized phrase Structure Grammar，Oxford:Basil Blackwell, 1985.
- [7] Cresswell.M.J，Entities and Indices，Kluwer Academic Publishers, 1990.