

CTL 的语法和语义

## 基于遗忘的反应式系统最弱充分条件研究

### 二〇二二年六月

姓名: 冯仁艳

导师: 王以松

联合导师: Erman Acar<sup>1</sup>

研究方向: 软件工程技术与人工智能

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>LIACS, Leiden University, The Netherlands



# 目录

基于遗忘的反》 式系统最弱充分 条件研究

绪论

研究背景和i

CT L II and the

研究目标

研究内容及拟解决的5 科学问题

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算

论

ル:演算造立理论

p-演界選与理论 專者:**p-込**布 后 由 コ

简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算方

基于归结的遗忘计算力 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验

总结与股票总结

展型

参考文献

- 1 绪论
  - 研究背景和意义
  - 国内外研究现状
  - 研究目标
  - 研究内容及拟解决的关键科学问题
- 2 背景知识
  - Kripke 结构
  - CTL 的语法和语义
  - μ-演算
- G CTL 和 μ-演算遗忘理论
  - CTL 遗忘理论
  - μ-演算遗忘理论
- 4 遗忘理论在反应式系统中的应用
  - 简介
  - 最弱充分条件
  - 知识更新
- 5 CTL 遗忘计算方法
  - 简介
  - 基于模型的有界 CTL 遗忘计算
  - 基于归结的遗忘计算方法
  - 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验
- 6 总结与展望



## 研究背景和意义——系统正确对国防、太空勘测和交通运输至关重要

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

研究背景和

国内外研究现状

研究目标 研究内容及拟解决的:

背景知识

Kainka 45 th

CTL 的语法和语义

11-流質

CTL 和 μ-演算遗忘

论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式

简介

最弱充分条件知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTI 忘计算 基本自结的遗忘计算

基于归结的遗忘计算 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结

展望

参考文献







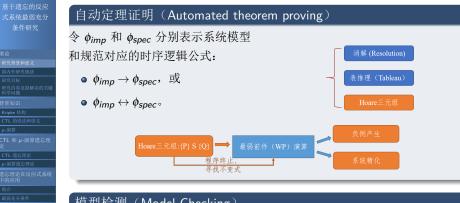
图 1: 系统故障引起的系列灾难现场

表 1: 由系统故障引起的重大事件概览

时间	事故原因	损失
1991 年	美国爱国者导弹系统舍入错误	28 名士兵死亡、100 人受伤等
1996年	阿丽亚娜 5 火箭代码重用	火箭与其它卫星毁灭
1999 年	火星探测器用错度量单位	探测器坠毁并造成了 3.27 亿美元的损失
2011年	温州 7.23 动车 <u>信号设备</u> 在设计	动车脱节脱轨、多人失去生命
	上存在严重的缺陷	

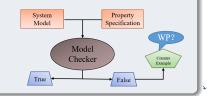


# 研究背景和意义:形式化验证为系统的正确提供了有力依据



### 模型检测(Model Checking)

- $\mathcal{M} \models^? \phi_{spec}$ .
- 反应式系统 (reactive system): 是 指与环境有着持续不断交互的系统。
- 如何计算反应式系统的 WP?





## 研究背景和意义: 简单的例子

### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

### 绪论

研究背景和意

国内外研究现状

明九日粉 研究内容及拟解决的3

背景知识

H JE ALL

TL 的语法和语义

μ-iii ii

CTL 和 μ-演算遗 论

CTI STERRIG

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式系 中的应用

向介 最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算力 基于归结的算法

总结与展望 <sup>总结</sup>

参考文献

## 例 1 (汽车制造企业模型)

一个汽车制造企业能够生产两种汽车:小轿车 (se) 和跑车 (sp)。每隔一段时间,该企业都会做一个生产决策 (d),即:合理的生产计划。刚开始的时候,该企业做出了具有三个选择 (s) 的方案:

- 先生产足够的 se, 然后在再生产 sp;
- (2) 先生产足够的 sp, 然后再生产 se;
- (3) 同时生产 se 和 sp。

这一过程可以由图 2中的 Kripke 结构(带标签的状态转换图) $\mathcal{M} = (S, R, L)$  形式化地展现出来,其中:

- V={d,s,se,sp} 为该工厂所需要考虑的原子命 题集;
- S = {s<sub>0</sub>, s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub>, s<sub>3</sub>, s<sub>4</sub>} 为状态空间;
- $R = \{(s_0, s_1), (s_1, s_2), (s_1, s_3), (s_1, s_4), (s_2, s_0), (s_3, s_0), (s_4, s_0)\}$  为状态转换关系集;
- $L: S \to 2^V$  为标签函数,具体地: $L(s_0) = \{a\}$ 、 $L(s_1) = \{s\}$ 、 $L(s_2) = \{se\}$ 、 $L(s_3) = \{sp\}$  和  $L(s_4) = \{se, sp\}$ 。

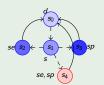


图 2: 汽车制造企业模型

假定,由于经济危机或者战略调整,导致该企业不能再生产跑车。这意味着所有规范和 Kripke 结构都不再需要考虑 sp 的,因此应该"移除"。



# 研究背景和意义:知识表示与推理(KR)中的SNC和WSC

#### 基十遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论 研究背景和意义

研究目标 研究内容及拟解决的关

背景知识 Kripke 结构

CTL 的语法和语义 μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘理 论

CTL 遗忘理论 μ-演算遗忘理论

中的应用 简介 最弱充分条件

知识更新 CTI 遗忘计算方

基于模型的有界 CTL i 忘计算 基于归结的遗忘计算方

总结与展望 <sup>总结</sup>

参考文献

## 最强必要条件(SNC)和最弱充分条件(WSC)

SNC 和 WSC 分别用于描述给定理论下的最一般的结果(consequence)和最一般的诱因(abduction)[4]。满足下面两个条件的  $\varphi$  称为 q 在理论  $\Sigma$  下的 SNC:

- (1)  $\Sigma \models q \rightarrow \varphi$ ;
- (2) 对任意  $\varphi'$  且  $\Sigma \models q \rightarrow \varphi'$ , 有  $\Sigma \models \varphi \rightarrow \varphi'$ 。

满足下面两个条件的  $\psi$  称为 q 在理论  $\Sigma$  下的 (WSC):

- (1)  $\Sigma \models \psi \rightarrow q$ ;
- (2) 对任意  $\psi'$  且  $\Sigma \models \psi' \rightarrow q$ ,有  $\Sigma \models \psi' \rightarrow \psi$ 。

### 遗忘理论(Forgetting)

遗忘是一种从理论中抽取知识的技术 [5],被用于规划[2,3] 和知识更新 中 [9]。非形式化地,对于逻辑语言 L 中的任意公式和原子集合,如果从该公式中遗忘掉该原子集合后得到的结果仍然在 L 中,则称遗忘存在,同时也称该公式和原子集合的遗忘存在。





# 研究背景和意义: 知识表示与推理(KR)中的 SNC 和 WSC

- 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究
- 绪论
- 国内外研究现状
- 研究目标 研究内容及拟解决的: 科学问题
- 背景知识
- Kripke 结构 CTL 的语法和语义
- μ-10,37 CTI 30 ... NO 207 18 σ\*\*
- 论 μ-*μ-μη*-με-
- μ-演算遺忘理论
- 中的应用 简介
- 最弱充分条件 知识更新
- CTL 遗忘计算方法
- 基于模型的有界 CTL 1 忘计算 基于归结的遗忘计算方 其工归结的意法
- **总结与展望** 总结
- 参考文献

- CTL(Computation tree logic): 计算树逻辑,是一种分支时序逻辑
  - 其模型检测(MC)问题能在多项时间内完成;
  - 能很好的表达系统要求的各种属性:
    - 安全属性(Safety properties): something bad never happens. (AG $\neg \phi$ )
    - 活性属性 (Liveness properties): something good will eventually happen.
       (AGAFφ)
    - 持续属性(Persistence properties): eventually for ever a certain proposition holds. (AFAG $\phi$ )
    - ◆ 公平属性(Fairness properties): does, under certain conditions, an event occur repeatedly? (一种约束: 在约束 fair = GFa 下 AG(a → AFb) 是否成立?)
- μ-演算(μ-calculus): 是其他形式体系的机械基础
  - LTL、CTL、L<sub>w</sub> 等时态逻辑都能用 μ-演算表示;
  - S1S 表达能力严格不如 μ-演算;
  - $\mu$ -演算与 S2S 有相同的表达能力;
  - .....

形成时序逻辑系统遗忘理论的框架,架起形式化验证(verification)和知识表示与推理(KR)



# 国内外研究现状

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论 研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标 研究目标 研究内容及拟解决的关 科学问题

Kripke 结构
CTL 的语法和语义

CTL 和 μ-演算遗忘

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式 中的应用

简介 最弱充分条件

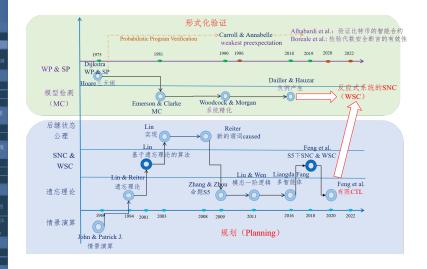
CTL 遗忘计算方法

基于供生的有非 CTE: 忘计算 基于归结的遗忘计算方 基于归结的算法

总结与展

总结 展塑

参考文献



绪论 研究背景和意义

研究目标 研究内容及拟解决的

科学问题

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘

化 CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应 中的应用

向介 最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算力 基于归结的算法

总结与展 <sup>总结</sup>

总结 展型

参考文献



通过人工智能的知识表示与推理 (KR) 技术,从遗忘理论出发,研究反应式系统(在某个符号集上)SNC 和 WSC 的表示与计算,提高反应式系统的可靠性 (或辅助证明反应式系统的正确性)。



### 研究内容

- 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究
- 绪论 研究背景和意义 国内外研究现状
- 研究目标 研究内容及拟解决的
- 背景知识
- Kripke 结构 CTL 的语法和语义
- μ-演算
- μ-演算 CTI 和 μ 演算演
- 论
- CTL 遗忘理论
- 遺忘理论在反应:
- 中的应用 简介
- 最弱充分条件知识更新
- CTL 遗忘计算方法 简介
- 忘计算 基于归结的遗忘计算 基于归结的遗忘计算
- 总结与展望
- 展望

- $\bullet$  CTL 和  $\mu$ -演算的遗忘理论
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
- 计算 CTL 遗忘的计算方法

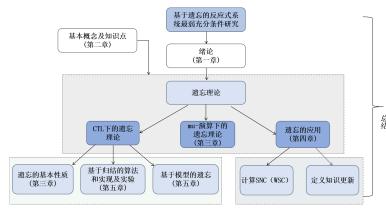


图 3: 文章组织结构示意图



CTL 的语法和语义

# 拟解决的关键科学问题

### 拟解决的关键科学问题

- CTL 的遗忘什么情形下存在?(CTL 不具有均匀插值(uniform interpolation)性质)
- 遗忘理论与反应式系统的 SNC 和 WSC 的关系
  - 反应式系统不终止
  - 遗忘理论的作用对象是公式
- CTL 和 μ-演算的遗忘在推理问题上的复杂性



# 目录

表 加志的及 式系统最弱充 条件研究

绪论

研究背景和

91761336103

研究目标

研究内容及拟解决的 科学问题

背景知识

Krinka ž

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗ε
论

CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论

简介

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算力

基于归结的遗忘计算力 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验

总结与股票总结

展型

参考文献

- 錯论
  - 研究背景和意义
  - 国内外研究现状
  - 研究目标
  - 研究内容及拟解决的关键科学问题
- 2 背景知识 ● Kripke 结构
  - CTL 的语法和语义
  - μ-演算
  - μ-演昇
- CTL 和 μ-演算遗忘理论
  - CTL 遗忘理论
  - μ-演算遗忘理论
- 4 遗忘理论在反应式系统中的应用
  - 简介
  - 最弱充分条
  - 知识更新
- 5 CTL 遗忘计算方法
  - 简介
  - 基于模型的有界 CTL 遗忘计算
  - 基于归结的遗忘计算方法 ● 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验
  - 6 总结与展望



# Kripke 结构

CTL 的语法和语义

## 定义 2 (初始 Ind-Kripke 结构)

一个初始 Ind-Kripke 结构是一个五元组  $\mathcal{M} = (S, R, L, [\_], s_0)$ , 其中:

- S 是状态的非空集合, so 是 ℳ 的初始状态 (参见下文);
- $R \subseteq S \times S$  是状态转换函数,且对任意  $s \in S$ ,存在  $s' \in S$  使得  $(s,s') \in R$ ;
- 1 · S → 2<sup>A</sup> 是一个标签函数。
- [\_]:  $\operatorname{Ind} \to 2^{S \times S}$  是一个函数,其使得对任意  $\operatorname{ind} \in \operatorname{Ind}$ ,若  $s \in S$ ,则存在唯一一个  $s \in S$ 使得  $(s,s') \in [ind] \cap R$ 。

### 相关概念

- (Ind-) 结构: 初始 (Ind-)Kripke 结构 *M* 和是 *M* 中的状态 *s* 构成的二元组  $\mathcal{K} = (\mathcal{M}, s);$
- 初始 (Ind-) 结构: (Ind-) 结构  $\mathcal{K} = (\mathcal{M}, s)$  中 s 为初始状态的情形。



# CTL 的语法

### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论

研究背景和意义

国内外研究现状 研究目标

カロか 究内容及拟解决的 学问題

背景知识

Kripke 指构

μ-演算

CTL 和 μ-演算i

论

μ-演算遺忘理论満定理论在反应式:

简介 品或安分条件

知识更新

CTL 遗忘计算方

基于归结的算法 CTL-forget 实现》 总结与展望

总结 展型

参考文献

### CTL 的语言符号

- 原子命题集 Ø; 可数无限索引集合 Ind; 命题常量 start;
- 常量符号: ⊤和 ⊥,分别表示"真"和"假";
- 联结符号: ∨和 ¬,分别表示"析取"和"否定";
- 路径量词: A、E 和 E<sub>ind</sub>, 分别表示"所有"、"存在"和"存在索引为 ind∈ Ind"的路径;
- 时序操作符: X、F、G、U 和 W, 分别表示"下一个状态"、"将来某一个状态"、"将来 所有状态"、"直到"和"除非";
- 标点符号: "("和")"。

### 定义 3 (带索引的 CTL)

带索引的 CTL 公式的<u>存在范式 (existential normal form, ENF)</u>可以用巴科斯范式递归定义如下:

 $\phi ::= \mathbf{start} \mid \bot \mid \rho \mid \neg \phi \mid \phi \lor \phi \mid \mathsf{EX}\phi \mid \mathsf{EG}\phi \mid \mathsf{E}(\phi \ \mathsf{U} \ \phi) \mid \mathsf{E}_{\langle \mathit{ind} \rangle} \mathsf{X}\phi \mid \mathsf{E}_{\langle \mathit{ind} \rangle} \mathsf{G}\phi \mid \mathsf{E}_{\langle \mathit{ind} \rangle} (\phi \ \mathsf{U}\phi)$ 

其中,  $p \in \mathcal{A}$ ,  $ind \in Ind$ 。

没有索引和 start 的公式称为 CTL 公式。



# CTL 的语义

绪论

研究背景和

9176133610

研究目标

77九日砂 肝究内容及拟解决的: 1895日間

45 H In 10

16.1.1

CTL 的语法和

μ-30,57.

论

CTL 遗忘理论

遗忘理论在反应式列

简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

简介

忘计算 基于归结的遗忘计算

基于归结的算法 CTL-forget 实现及9

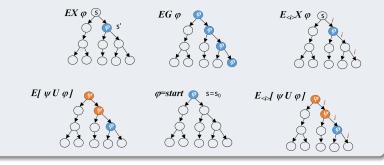
息结与展

展望

参考文献

# 定义 4 (带索引的 CTL 的语义)

给定公式  $\varphi$ ,初始 Ind-Kripke 结构  $\mathcal{M}=(S,R,L,[\_],s_0)$  和状态  $s\in S$ 。 $(\mathcal{M},s)$  与  $\varphi$  之间的可满足关系  $(\mathcal{M},s)$  ⊨  $\varphi$  定义如下:



#### 小贴士

- Φ 模型: 满足公式 φ 的初始 Ind-结构称为 φ 的一个模型: Mod( φ): 公式 φ 的所有模型构成的集合:
- $IR(\varphi, V)$ : 如果存在一个公式  $\psi$  使得  $Var(\psi) \cap V = \emptyset$  且  $\varphi = \psi$ , 则说  $\varphi$  与 V 中的原子命題无关,简称为V 无关;  $Var(\varphi)$ : 出现在  $\varphi$  中的原子命題集;
- 可满足、逻辑蕴涵、逻辑等值、文字、子句等跟经典命题情形中的定义一样。

# CTL 的标准形式

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

研究育京和意义 国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的关

背景知识

CTI 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗ε
论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式系 中的应用

最弱充分条件知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算7 基于归结的遗忘计算7

总结与展 总结

秋<del>玄</del> 古計

# SNFg<sub>CTL</sub> 子句

具有下面几种形式的公式称为 CTL 全局子句分离范式(separated normal form with global clauses for CTL, $SNF_{CTL}^g$  子句)[8, 7]:

AG(start  $\rightarrow \bigvee_{j=1}^{k} m_j$ ) (初始句,initial clause)
AG( $\top \rightarrow \bigvee_{j=1}^{k} m_j$ ) (全局子句,global clause)
AG( $\bigwedge_{i=1}^{n} l_i \rightarrow AX \bigvee_{j=1}^{k} m_j$ ) (A-步子句,A-step clause)
AG( $\bigwedge_{i=1}^{n} l_i \rightarrow E_{(ind)} X \bigvee_{j=1}^{k} m_j$ ) (E-步子句,E-step clause)
AG( $\bigwedge_{i=1}^{n} l_i \rightarrow AF l$ ) (A-某时子句,A-sometime clause)
AG( $\bigwedge_{i=1}^{n} l_i \rightarrow E_{(ind)} F l$ ) (E-某时子句,E-sometime clause)

其中 k 和 n 都是大于 0 的常量, $l_i$   $(1 \le i \le n)$ 、 $m_j$   $(1 \le j \le k)$  和 l 都是文字且  $ind \in Ind$ 。



# CTL 的标准形式

### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

### 绪论

```
研究背景和意
```

国内外研究现状 研究目标

研究内容及拟解决的关 科学问题

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗
论

CTL 遗忘理论

遗忘理论在反应式

简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

差于模型的有非 CT 忘计算 基于归结的遗忘计算

基于归结的遗忘计算 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结与展

总结 展塑

参考文献

### 转换规则

一个 CTL 公式  $\varphi$  可以通过下表中的规则转换为一个  $\mathrm{SNF}_{\mathrm{CTL}}^{\mathrm{g}}$  子句集,记为  $T_{\varphi}$ 。

### 表 2: 转换规则

$$\begin{aligned} & \operatorname{Trans}(1) \frac{q \to \operatorname{E}/\phi}{q \to \operatorname{E}/(ind)} \operatorname{Tp}: & \operatorname{Trans}(2) \frac{q \to \operatorname{E}/\phi_1 \cup \phi_2)}{q \to \operatorname{E}/(ind)} (\phi_1 \cup \phi_2) : & \operatorname{Trans}(3) \frac{q \to \phi_1 \wedge \phi_2}{q \to \phi_1 \wedge \phi_2} : \\ & \operatorname{Trans}(4) \frac{q \to \phi_1 \vee \phi_2}{q \to \phi_1 \vee \phi_2} (\underline{\operatorname{MR}} \ \phi_2 \ \pi \underline{\mathbb{R}} \underline{\mathcal{F}} \underline{\mathcal{F}}) : & \operatorname{Trans}(5) \frac{q \to D}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(7) \frac{q \to D}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(7) \frac{q \to D}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(7) \frac{q \to D}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(7) \frac{q \to D}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(7) \frac{q \to D}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(7) \frac{q \to D}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(7) \frac{q \to D}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(8) \frac{q \to Q(\phi_1 \cup \phi_1) \to \phi_2}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(10) \frac{q \to Q(\phi_1 \cup \phi_1) \to \phi_2}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(10) \frac{q \to Q(\phi_1 \cup \phi_1) \to Q(\phi_1 \cup \phi_1) \to \phi_2}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(10) \frac{q \to D}{1 \to -q \vee D} : & \operatorname{Trans}(10)$$

其中, $T \in \{X,G,F\}$ ,ind 是规则中引入的新索引且  $Q \in \{A,E_{(ind)}\}$ ; q 是一个原子命题,I 是一个文字,D 是文字的析取(即子句),p 是新的原子命题; $\varphi$ , $\varphi_1$ ,和  $\varphi_2$  都是 CTL 公式。



# CTL 的标准形式

展翅

### 例 5

 $\phi \varphi = \neg AF p \land AF (p \land \top)$ , 下面给出将  $\varphi$  转换为  $SNF_{CFI}^g$  子句集的详细步骤。

- (1) 将公式 φ 转换为其 NNF 形式: EG¬p∧AF(p∧⊤); (2) 化简 (1) 中的公式为: EG¬p∧AFp;
- (3) 使用转换规则转换 {AG(start → z),AG(z → (EG¬p ∧ AFp))}, 详细步骤如下:

1. start  $\rightarrow z$ 

2.  $z \rightarrow \text{EG} \neg p \land \text{AF} p$ 

3.  $z \rightarrow EG \neg p$ 

4.  $z \rightarrow AFp$ 

5.  $z \rightarrow E_{\langle 1 \rangle} G \neg p$ 

6.  $z \rightarrow x$ 

7. x → ¬I

8.  $x \to E_{(1)}Gx$ 

9.  $\top \rightarrow \neg z \lor x$ 

10.  $\top \rightarrow \neg x \lor \neg p$ 

因此, 得到的  $\varphi$  对应的  $SNF_{CTL}^g$  子句集为:

1. start  $\rightarrow z$ 2.  $z \rightarrow AFp$  3.  $x \to E_{\langle 1 \rangle} Gx$ 

4.  $\top \rightarrow \neg z \lor x$ 

(2, Trans(3)) (2, Trans(3))

(3, Trans(1))

(5, Trans(10))

(5, Trans(10))

(5, Trans(10))

(6, Trans(5))

(7, Trans(5))

5.  $\top \rightarrow \neg x \lor \neg p$ .



# μ-演算的语法和语义

不动点符号:  $\mu$  和  $\nu$ : 变元符号的可数集。

## 定义 6 (μ-演算公式)

μ-演算公式(简称为 μ-公式或公式)递归定义如下:

$$\varphi ::= \rho \mid X \mid \neg \varphi \mid \varphi \lor \varphi \mid AX\varphi \mid \nu X.\varphi$$

其中  $p \in \mathcal{A}$  且  $X \in \mathcal{V}$ 。

### 定义 7

给定  $\mu$ -演算公式  $\varphi$ 、Kripke 结构  $\mathcal{M} = (S, R, L, r)$ 和一个从  $\mathcal{V}$  中的变量到  $\mathcal{M}$  中状态的赋值函 数  $v: \mathcal{V} \to 2^{S}$ 。公式在 *M* 和 v 上的解释是 S 的一个子集  $\| \varphi \|_{\mathcal{M}}^{\mathcal{M}}$  (如果在上下文中 *M* 是明确 的,则可以省去上标):

$$\|p\|_{v}^{\mathscr{M}} = \{s \mid p \in L(s)\},\$$

$$||X||_{v}^{\mathscr{M}}=v(X),$$

$$\|\varphi_1 \vee \varphi_2\|_{V}^{\mathscr{M}} = \|\varphi_1\|_{V}^{\mathscr{M}} \cup \|\varphi_2\|_{V}^{\mathscr{M}},$$

$$\|\mathrm{AX}\phi\|_{v}^{\mathscr{M}} = \{s \mid \forall s'.(s,s') \in R \Rightarrow s' \in \|\phi\|_{v}^{\mathscr{M}}\},\$$

$$\|vX.\varphi\|_{v}^{\mathscr{M}} = \bigcup \{S' \subseteq S \mid S' \subseteq \|\varphi\|_{v[X:=S']}^{\mathscr{M}} \}.$$

其中,v[X:=S'] 是一个赋值函数,它除了 v[X:=S'](X)=S' 之外,和 v 完全相同。

- 赋值: (ℳ,s,v), (ℳ,v);
- 若 s∈ ||φ||<sub>V</sub>, 则称 s "满足" φ, 记为 (ℳ,s,v) |= φ;
- 这里的 Kripke 结构不要求其二元关系是完全的:
- 当公式 φ 为 μ-句子时,可以将赋值函数 ν 省略:
- 范式: 析取 μ-公式。



# 目录

CTL 的语法和语义

总结

展翅

- - 研究背景和意义
  - 国内外研究现状
  - 研究目标
  - 研究内容及拟解决的关键科学问题
- - Kripke 结构
  - CTL 的语法和语义
  - μ-演算
- CTL 和 μ-演算遗忘理论
  - CTL 遗忘理论
  - μ-演算遗忘理论
- - 简介

  - 知识更新
- - 简介
  - 基于模型的有界 CTL 遗忘计算
  - 基于归结的遗忘计算方法
  - 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验



# CTL 和 $\mu$ 遗忘理论——eta体框架

CTL 的语法和语义

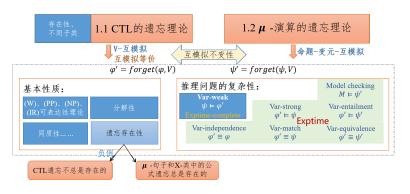


图 4: CTL 和 μ-演算遗忘理论



# CTL 遗忘理论——<sub>互模拟</sub>

### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论

研究背景和

CI L II and the

研究日标

研究内容及拟解决的 (利亞问题)

alia tet Amiter

百余知1

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘

论

CTL 遗忘埋论

遗忘理论在反应式系统 中的应用

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

简介

忘计算 基于归结的遗忘计算力 基于归结的遗忘计算力

总结与原

展型

参考文献

# 定义 8 (V-互模拟)

给定原子命题集  $V\subseteq \mathcal{A}$ 、索引集合  $I\subseteq \mathrm{Ind}$  和初始  $\mathrm{Ind}$ -结构  $\mathcal{M}_i=(S_i,R_i,L_i,\bigsqcup_j,s_0^i)$  (i=1,2)。  $\mathcal{B}_V\subseteq S_1\times S_2$  为二元关系,对任意  $s_1\in S_1$  和  $s_2\in S_2$ ,若  $(s_1,s_2)\in \mathcal{B}_V$ ,则:

### (i) $L_1(s_1) - V = L_2(s_2) - V$ ;

(ii)  $\forall r_1 \in S_1$ ,  $\ddot{A}$   $(s_1, r_1) \in R_1$ ,  $y_1 \exists r_2 \in S_2$   $\dot{C}$   $\ddot{C}$   $(s_2, r_2) \in R_2$   $\ddot{R}$   $(r_1, r_2) \in \mathscr{B}_V$ ;

(III)  $\forall r_2 \in \mathsf{S}_2$ ,有  $(\mathsf{S}_2, r_2) \in \mathsf{K}_2$ ,则  $\exists r_1 \in \mathsf{S}_1$  使付  $(\mathsf{S}_1, r_1) \in \mathsf{K}_1$  和  $(r_1, r_2) \in \mathscr{B}_{V^\circ}$ 

那么,称  $\mathcal{B}_V$  是  $\mathcal{M}_1$  和  $\mathcal{M}_2$  之间的一个 V-互模拟关系。

- 结构互模拟: 若 ℳ₁ 和 ℳ₂ 之间存在一个 V-互 模拟关系 ℛャ 使得 (s₁, s₂) ∈ ℛャ, 则称两个 Ind-结构 ℋ₁ = (ℳ₁, s₁) 和 ℋ₂ = (ℳ₂, s₂) 是 V-互模拟的, 记为 ℋ₁ ↔ャ ℋ;
- 路径互模拟: 令  $i \in \{1,2\}$ ,  $\pi_i = (s_{i,1}, s_{i,2},...)$  为  $\mathcal{M}_i$  上的路径,若对任意  $j \ge 1$  都有  $\mathcal{X}_{1,j} \leftrightarrow_V \mathcal{X}_{2,j}$ ,则称这两条路径是 V-互模拟的,记为  $\pi_1 \leftrightarrow_V \pi_2$ ,其中  $\mathcal{X}_{i,j} = (\mathcal{M}_i, s_{i,j})$ 。

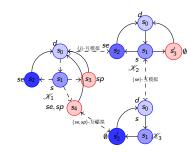


图 5: 汽车制造企业模型



### CTL 遗忘理论——互模拟

### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论

研究背景和i

Fig. 45 At all Fig.

研究目标

研光内容及似群状的 科学问题

背景知识

Krinke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算

C I L 和 μ-演界遮忘 论

CTI 请完理论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式系 中的应用

最弱充分条件知识更新

CTL 遗忘计算方法

简介

忘计算 基于归结的遗忘计算力 基于归结的效法

总结与原

尼祖 展望

参考文献

# 定义 8 (V-互模拟)

给定原子命题集  $V\subseteq \mathcal{A}$ 、索引集合  $I\subseteq \mathrm{Ind}$  和初始  $\mathrm{Ind}$ -结构  $\mathcal{M}_i=(S_i,R_i,L_i,\bigsqcup_j,s_0^i)$  (i=1,2)。  $\mathcal{B}_V\subseteq S_1\times S_2$  为二元关系,对任意  $s_1\in S_1$  和  $s_2\in S_2$ ,若  $(s_1,s_2)\in \mathcal{B}_V$ ,则:

- (i)  $L_1(s_1) V = L_2(s_2) V$ ;
- (ii)  $\forall r_1 \in S_1$ ,  $\ddot{H}(s_1, r_1) \in R_1$ ,  $M \exists r_2 \in S_2 \notin (s_2, r_2) \in R_2 \Rightarrow (r_1, r_2) \in \mathcal{B}_V$ :

(iii)  $\forall r_2 \in S_2$ ,  $\ddot{A}$  ( $s_2, r_2$ ) ∈  $R_2$ ,  $\mathcal{M}$   $\exists r_1 \in S_1$  使得 ( $s_1, r_1$ ) ∈  $R_1$  和 ( $r_1, r_2$ ) ∈  $\mathcal{B}_{V^\circ}$ 

那么,称  $\mathcal{B}_V$  是  $\mathcal{M}_1$  和  $\mathcal{M}_2$  之间的一个 V-互模拟关系。

- 结构互模拟: 若 ℳ<sub>1</sub> 和 ℳ<sub>2</sub> 之间存在一个 V互 模拟关系 ℬ<sub>V</sub> 使得 (s<sub>1</sub>,s<sub>2</sub>) ∈ ℬ<sub>V</sub>, 则称两个 Ind-结构 ℋ<sub>1</sub> = (ℳ<sub>1</sub>,s<sub>1</sub>) 和 ℋ<sub>2</sub> = (ℳ<sub>2</sub>,s<sub>2</sub>) 是 V-互模拟的, 记为 ℋ<sub>1</sub> ↔<sub>V</sub> ℋ<sub>2</sub>;
- 路径互模拟: 令  $i \in \{1,2\}$ ,  $\pi_i = (s_{i,1}, s_{i,2},...)$  为  $\mathcal{M}_i$  上的路径,若对任意  $j \ge 1$  都有  $\mathcal{X}_{1,j} \leftrightarrow_V \mathcal{X}_{2,j}$ ,则称这两条路径是 V-互模拟的,记为  $\pi_1 \leftrightarrow_V \pi_2$ ,其中  $\mathcal{X}_{i,j} = (\mathcal{M}_i, s_{i,j})$ 。

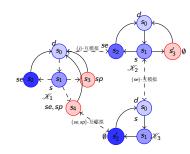


图 5: 汽车制造企业模型



### CTL 遗忘理论——互模拟

### 基于 题 忌 的 反 应 式 系 统 最 弱 充 分 条 件 研 究

#### 绪论

研究背景和通

Fig. 45 At all Fig.

研究目标

充内容及拟解决的; 学问题

背景知识

19.200,7411

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL #

CTL 和 μ-演算遗忘 论

论

CTL 遗忘理论

遗忘理论在反应式系

简介 最弱充分条件

知识更新

CIL 遊忘计界方法

至于模型的有非 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算方

基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结与)

展型

参考文献

# 定义 8 (V-互模拟)

给定原子命题集  $V\subseteq \mathcal{A}$ 、索引集合  $I\subseteq \mathrm{Ind}$  和初始  $\mathrm{Ind}$ -结构  $\mathcal{M}_i=(S_i,R_i,L_i,\bigsqcup_j,s_0^i)$  (i=1,2)。  $\mathcal{B}_V\subseteq S_1\times S_2$  为二元关系,对任意  $s_1\in S_1$  和  $s_2\in S_2$ ,若  $(s_1,s_2)\in \mathcal{B}_V$ ,则:

- (i)  $L_1(s_1) V = L_2(s_2) V$ ;
- (ii)  $\forall r_1 \in S_1$ ,  $\ddot{\pi}(s_1, r_1) \in R_1$ ,  $y \exists r_2 \in S_2 \notin (s_2, r_2) \in R_2 \Rightarrow (r_1, r_2) \in \mathscr{B}_V$ ;
- (iii)  $\forall r_2 \in S_2$ ,若  $(s_2, r_2) \in R_2$ ,则  $\exists r_1 \in S_1$  使得  $(s_1, r_1) \in R_1$  和  $(r_1, r_2) \in \mathcal{B}_{V^{\circ}}$

那么,称  $\mathcal{B}_V$  是  $\mathcal{M}_1$  和  $\mathcal{M}_2$  之间的一个 V-互模拟关系。

- 结构互模拟: 若 ℳ<sub>1</sub> 和 ℳ<sub>2</sub> 之间存在一个 V互 模拟关系 ℬ<sub>V</sub> 使得 (s<sub>1</sub>,s<sub>2</sub>) ∈ ℬ<sub>V</sub>, 则称两个 Ind-结构 ℋ<sub>1</sub> = (ℳ<sub>1</sub>,s<sub>1</sub>) 和 ℋ<sub>2</sub> = (ℳ<sub>2</sub>,s<sub>2</sub>) 是 V-互模拟的,记为 ℋ<sub>1</sub> ↔<sub>V</sub> ℋ<sub>3</sub>:
- 路径互模拟: 令  $i \in \{1,2\}$ ,  $\pi_i = (s_{i,1}, s_{i,2},...)$  为  $\mathcal{M}_i$  上的路径,若对任意  $j \ge 1$  都有  $\mathcal{X}_{1,j} \leftrightarrow_V \mathcal{X}_{2,j}$ ,则称这两条路径是 V-互模拟的,记为  $\pi_1 \leftrightarrow_V \pi_2$ ,其中  $\mathcal{X}_{i,j} = (\mathcal{M}_i, s_{i,j})$ 。

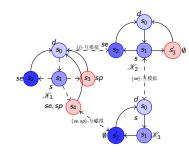


图 5: 汽车制造企业模型



### CTL 遗忘理论——互模拟等

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

研究背景和

国内外研究现

研究内容及拟解决的

州光内谷及拟解决的 斗学问题

背景知识

日原和日

Kripke 箔构

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗

CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式系统

简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

CIL 运芯计外刀位

施丁恢至的行亦 CTI 忘计算 基于自结的遗忘计算

基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结与展

展型

分平方面

# 定义 9 (互模拟等价,bisimilar equivalence)

给定原子命题集  $V\subseteq \mathscr{A}$ , 公式  $\varphi$  和  $\psi$ 。若对任意  $\mathscr{K}\models \varphi$ ,都存在一个  $\mathscr{K}'\models \psi$ ,使得  $\mathscr{K}\leftrightarrow_{V}\mathscr{K}'$ : 且对任意  $\mathscr{K}'\models \psi$ ,都存在一个  $\mathscr{K}\models \varphi$ ,使得  $\mathscr{K}\leftrightarrow_{V}\mathscr{K}'$ ,则称公式  $\varphi$  和  $\psi$  是V-互模拟等价的(bisimilar equivalence),记为  $\varphi\equiv_{V}\psi$ 。

### 命题 ]

令  $\varphi$  为一个 CTL 公式。则  $\varphi \equiv_U T_{\varphi}$ ,其中  $T_{\varphi} = \mathrm{SNF}_{\mathrm{CTL}}^g(\varphi)$  和  $U = Var(T_{\varphi}) - Var(\varphi)$ 



## CTL 遗忘理论——互模拟等价

式系统最弱充 条件研究

绪论

研究背景和

国内外研究现 研究目标

开究内容及拟解决自 3世问题

科学问题

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗む

CTL 遗忘理论

μ-演算遺志理论

中的应用

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

CTL 返忘日界力位

差十模型的特別 忘计算 基于归结的遗忘计算

基于归结的算法 CTL-forget 实现及3

总结与展

展型

参考文献

### 定义 9 (互模拟等价,bisimilar equivalence)

给定原子命题集  $V\subseteq \mathscr{A}$ , 公式  $\varphi$  和  $\psi$ 。若对任意  $\mathscr{K}\models\varphi$ ,都存在一个  $\mathscr{K}'\models\psi$ ,使得  $\mathscr{K}\leftrightarrow_{V}\mathscr{K}'$ ; 且对任意  $\mathscr{K}'\models\psi$ ,都存在一个  $\mathscr{K}\models\varphi$ ,使得  $\mathscr{K}\leftrightarrow_{V}\mathscr{K}'$ ,则称公式  $\varphi$  和  $\psi$  是V-互模拟等价的 (bisimilar equivalence) ,记为  $\varphi\equiv_{V}\psi$ 。

### 命题1

令  $\varphi$  为一个 CTL 公式。则  $\varphi \equiv_U T_{\varphi}$ ,其中  $T_{\varphi} = \mathrm{SNF}_{\mathrm{CTL}}^{\mathsf{g}}(\varphi)$  和  $U = \mathit{Var}(T_{\varphi}) - \mathit{Var}(\varphi)$ 。



# CTL 遗忘理论——定义

#### 至了 题志的及 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论

研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标

研究内容及拟解决E 科学问题

育意知识

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗》

论

CTL 遗忘理论

μ-演算遗忘理论

遗忘理论在反应式系 中的应用

简介 最弱充分条件

知识更新

简介

忘计算 基于归结的遗忘计算力 基于归结的算法

基于归结的算法 ETL-forget 实现及实

总结

展型 公本立計

# 定义 10 (遗忘,forgetting)

令 V 是  $\varnothing$  的子集,  $\Phi$  是公式。如果公式  $\psi$  满足下面条件:

- ψ 与 V 中的原子命题无关(即: IR(ψ, V));
- $Mod(\psi) = \{ \mathcal{K} \mid \mathcal{K}$ 是一个初始 Ind-结构, $\exists \mathcal{K}' \in Mod(\phi)$  使得  $\mathcal{K}' \leftrightarrow_{V} \mathcal{K} \}$ 。

那么,称  $\psi$  为从  $\Phi$  中遗忘 V 后得到的结果,记为  $F_{CTL}(\phi, V)$ 。

### 遗忘理论公设

给定 CTL 公式  $\varphi$ 、 $\varphi' = F_{CTL}(\varphi, V)$ 、原子命题集  $V \subseteq \mathscr{A}$  和  $\varphi' = F_{CTL}(\varphi, V)$ ,CTL 下遗忘理论公设如下:

- (W) 削弱: φ |= φ';
- (PP) 正支持: 对任意与 V 无关的公式  $\eta$ , 若  $\varphi \models \eta$  则  $\varphi' \models \eta$ ;
- (NP) 负支持:对任意与 V 无关的公式  $\eta$ , 若  $\varphi \not\models \eta$  则  $\varphi' \not\models \eta$ ;
  - (IR) 无关性:  $IR(\varphi', V)$ 。

### CTL 遗忘理论——相关性质

CTL 的语法和语义

展翅

# 定理 11 (表达性定理,Representation Theorem)

给定 CTL 公式  $\varphi$  和  $\varphi'$ ,  $V \subseteq \mathscr{A}$  为原子命题集。下面的陈述是等价的:

- (i)  $\varphi' \equiv F_{CTL}(\varphi, V)$ ,
- (ii)  $\varphi' \equiv \{ \phi \mid \varphi \models \phi \neq \pi IR(\phi, V) \},$
- (iii) 若 φ、φ' 和 V 与 (i) 和 (ii) 中提到的符号相同,则公设 (W)、(PP)、(NP) 和 (IR) 成 立。

### CTL 遗忘理论——相关性质

#### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

### 绪论

```
研究背景和意义
国内外研究现状
研究目标
```

研究目标 研究内容及拟解决的 科學问题

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-10,53

CIL 和 μ-演界適志; 论

### CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论

中的应用 简介

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

简介

忘计算 基于归结的遗忘计算

基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结与股

展型

参考文献

### 例 11

令 p 和 x 为两个不同的原子命题, $\varphi(p,x)$ <sup>3</sup>为下面公式合取 [6]:

$$AG(\neg x \land \neg AGp \to \neg AX \neg x), \qquad AG(\neg AX \neg x \to AXx),$$

$$\mathrm{AG}\big(\mathrm{AX} x \to \neg x \wedge \neg \mathrm{AG} \boldsymbol{p}\big), \qquad \mathrm{AG}\big(x \to \neg \mathrm{AG} \boldsymbol{p}\big), \qquad \mathrm{AG}\big(\mathrm{AFAG} \boldsymbol{p}\big).$$

Maksimova 证明了  $\varphi(p,x) \land \varphi(p,y) \models x \leftrightarrow y$ ,且不存在 CTL 公式  $\psi$  使得  $Var(\psi) = \{p\}$  且  $\varphi(p,x) \models x \leftrightarrow \psi$ ,即 CTL 不具有 Beth 性质。

 $^{a}\varphi(p,x)$  表示具有原子命题集  $Var(\varphi) = \{p,x\}$  的公式。

### 命题 2

 $F_{CTL}(x \land \varphi(p,x), \{x\})$  在 CTL 中是不可表示的。

### 定理 12

给定一个命题公式  $\phi$  和原子命题集  $V \subset \mathscr{A}$  则下面逻辑等式成立。

$$F_{CTL}(\varphi, V) \equiv Forget(\varphi, V).$$

### CTL 遗忘理论——相关性质

CTL 的语法和语义

### 命题 2 (分解性, Decomposition)

对于给定的公式  $\varphi$ , 原子命题集 V, 和原子命题  $p(p \notin V)$ , 下面的结论成立:

- $F_{CTL}(\varphi, \{p\} \cup V) \equiv F_{CTL}(F_{CTL}(\varphi, p), V);$
- $F_{CTL}(\varphi, V_1 \cup V_2) \equiv F_{CTL}(F_{CTL}(\varphi, V_1), V_2)$ .

### 命题 3 (同质性)

令  $\mathcal{I} \in \{X,F,G\}$ 、 $\mathcal{I} \in \{A,E\}$ ,  $\emptyset$  为 CTL 公式, 且  $\mathcal{I} \subseteq \mathcal{I}$  为原子命题集,则:

$$\mathbf{F}_{\text{\tiny CTL}}(\mathcal{PT}\phi,P) \equiv \mathcal{PT}\mathbf{F}_{\text{\tiny CTL}}(\phi,P).$$

### μ-演算遗忘理论——变元 -命题 -互模拟

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

研究育景和意义 国内外研究现状 研究目标

研光日标 研究内容及拟解决的 科学问题

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗:

论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式。 中的应用

最弱充分条件

CTI 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算:

基于归结的遗忘计算: 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结

**公老**文献

### 定义 11 (V-互模拟)

给定原子命题集  $V\subseteq \mathcal{M}$  和两个 Kripke 结构  $\mathcal{M}_1$  和  $\mathcal{M}_2$ ,其中  $\mathcal{M}_i=(S_i,R_i,L_i,r_i)$  (i=1,2)。若  $\mathcal{B}\subseteq S_1\times S_2$  满足下面几个条件:

- $\bullet$   $r_1 \mathcal{B} r_2$ ,
- 对任意  $s \in S_1$  和  $t \in S_2$ ,若  $s\mathcal{B}t$ ,则对任意  $p \in \mathcal{A} V$ ,有  $p \in L_1(s)$  当且仅当  $p \in L_2(t)$ ,
- 若  $(s,s') \in R_1$  和  $s\mathcal{B}t$ ,则存在一个 t',使得  $s'\mathcal{B}t'$  和  $(t,t') \in R_2$ ,且
- 若  $s\mathcal{B}t$  和  $(t,t') \in R_2$ ,则存在一个 s',使得  $(s,s') \in R_1$  和  $t'\mathcal{B}s'$ 。

则称  $\mathcal{B}$  是  $\mathcal{M}_1$  和  $\mathcal{M}_2$  的 V-互模拟关系。

 $\mathcal{M}_1 \leftrightarrow_V \mathcal{M}_2$ 、 $(\mathcal{M}_1, r_1) \leftrightarrow_V (\mathcal{M}_2, r_2)$ : 如果  $\mathcal{M}_1$  和  $\mathcal{M}_2$  之间存在一个 V-互模拟关系。

#### μ-演算遗忘理论-----变元 -命题 -互模拟

CTL 的语法和语义

# 例 11 (不变性反例)

令  $\varphi = AX \neg X \lor AXX$ , $(\mathcal{M}, v)$  和  $(\mathcal{M}', v')$  为赋值,其中  $\mathcal{M} = (S, r, R, L)$ 、 $\mathcal{M}' = (S', r', R', L')$  且

$$S = \{r, r_1\}, R = \{(r, r_1)\}, L(r) = L(r_1) = \emptyset, v(X) = \{r_1\},$$

$$S' = \{r', r'_1, r'_2\}, R' = \{(r', r'_1), (r', r'_2)\}, L(r') = L(r'_1) = L(r'_2) = \emptyset, v'(X) = \{r'_1\}.$$

 $\mathcal{B} = \{(r,r'), (r_1,r_1'), (r_1,r_2')\}$  是  $\mathcal{M}$  和  $\mathcal{M}'$  之间的一个 0-互模拟。

但是, $(M, v) \models \varphi$  而  $(M', v) \not\models \varphi$ 。





### μ-演算遗忘理论——变元 -命题 -互模拟

至了 应忘的及应 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论

**研光育京和**思

国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的:

科学问题

Krinke 结

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗

论

CTL 遗忘理论

遗忘理论在反应式

**中的应用** 简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

忘计算 基于归结的遗忘计算:

基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结

参考文献

### 定义 11 (变元 -命题 -互模拟)

给定  $V \subseteq \mathscr{A}$ 、 $\mathscr{V}_1 \subseteq \mathscr{V}$ 、 $\mathscr{M}_i = (S_i, r_i, R_i, L_i)$  为 Kripke 结构、 $s_i \in S_i \perp v_i : \mathscr{V} \to 2^{S_i}$ ,其中  $i \in \{1, 2\}$ 。若关系  $\mathscr{B} \subseteq S_1 \times S_2$  满足:

- 38 是 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 之间的 V-互模拟, 且
- 对任意  $(t_1,t_2) \in \mathcal{B}$  和  $X \in \mathcal{V} \mathcal{V}_1$ ,  $t_2 \in v_2(X)$  当且仅当  $t_1 \in v_1(X)$ 。

则称  $\mathscr{B}$  是  $(\mathscr{M}_1, s_1, v_1)$  和  $(\mathscr{M}_2, s_2, v_2)$  之间的一个 $\langle \mathscr{V}_1, V \rangle$ -互模拟。

### 命题 4 (不变性)

令  $\phi$  为  $\mu$ -公式、 $\mathscr{V}_1 \subseteq \mathscr{V}$  且  $V \subseteq \mathscr{A}$ 。若  $(\mathscr{M},s,v) \leftrightarrow_{(\mathscr{V}_1,V)} (\mathscr{M}',s',v')$  且  $\mathrm{IR}(\phi,V \cup \mathscr{V}_1)$ ,则  $(\mathscr{M},s,v) \models \phi$  当且权当  $(\mathscr{M}',s',v') \models \phi$ 。



# μ-演算遗忘理论——定义及相关性质

# 定义 12 (μ-演算遗忘)

令  $V\subseteq M$  和  $\varphi$  为  $\mu$ -公式。若  $Var(\psi)\cap V=\emptyset$  且下面等式成立,则称  $\psi$  是从  $\varphi$  中遗忘 V 后得到的结果:

 $Mod(\psi) = \{(\mathcal{M}, v) \mid \exists (\mathcal{M}', v') \in Mod(\varphi) \ \bot (\mathcal{M}', v') \leftrightarrow_{V} (\mathcal{M}, v)\}.$ 

### 与 CTL 共同性质

表达性定理、分解性、同质性等。

### 定理 13 (存在性

给定原子命題  $q\in\mathscr{A}$  和  $\mu$ -句子  $\varphi$ ,則存在一个  $\mu$ -句子  $\psi$  使得  $Var(\psi)\cap\{q\}=\emptyset$  上  $\psi\equiv F_{\mu}(\varphi,\{q\})$ 。

### 命题 5 (同质性)

给定原子命题集  $V \subset \mathscr{A}$  和  $\mu$ -公式  $\phi$ , 则

- (iii) 如果  $vX.\varphi$  为  $\mu$ -句子,  $F_{\mu}(vX.\varphi, V) \equiv vX.F_{\mu}(\varphi, V)$
- (iv) 如果  $\mu X.\phi$  为  $\mu$ -句子,  $F_{\mu}(\mu X.\phi, V) \equiv \mu X.F_{\mu}(\phi, V)$ 。

#### 绪论

研究背景和测

国内外研究现

研究目标

研究内容及拟解决的 科学问题

背景知识

Kripke 结构 CTL 的语法和语义

μ-10,53

论

μ-演算遗忘理论

遗忘理论在反应式 中的应用

简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 遗忘计算

基于归结的算法 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结与展望

忌窃 展想

参考文献



# $\mu$ -演算遗忘理论——定义及相关性质

# |定义 12 (μ-演算<u>遗忘)</u>

令  $V \subseteq \mathcal{M}$  和  $\varphi$  为  $\mu$ -公式。若  $Var(\psi) \cap V = \emptyset$  且下面等式成立,则称  $\psi$  是从  $\varphi$  中遗忘 V 后 得到的结果:

 $Mod(\psi) = \{(\mathcal{M}, v) \mid \exists (\mathcal{M}', v') \in Mod(\varphi) \ \exists (\mathcal{M}', v') \leftrightarrow_{V} (\mathcal{M}, v) \}.$ 

### 与 CTL 共同性质

表达性定理、分解性、同质性等。

### 定理 13 (存在性)

给定原子命题  $q \in \mathcal{A}$  和  $\mu$ -句子  $\varphi$ , 则存在一个  $\mu$ -句子  $\psi$  使得  $Var(\psi) \cap \{q\} = \emptyset$  且  $\psi \equiv F_{\mu}(\varphi, \{q\}).$ 

### 命题 5 (同质性)

给定原子命题集  $V \subseteq \mathcal{A}$  和  $\mu$ -公式  $\varphi$ , 则:

- (iii) 如果  $vX.\varphi$  为  $\mu$ -句子,  $F_{\mu}(vX.\varphi, V) \equiv vX.F_{\mu}(\varphi, V)$ ;
  - (iv) 如果  $\mu X.\phi$  为  $\mu$ -句子,  $F_{\mu}(\mu X.\phi, V) \equiv \mu X.F_{\mu}(\phi, V)$ 。

CTL 的语法和语义

### **μ-演算遗忘理论**——¬含不动点算子的子类

CTL 的语法和语义

### x-类

不含有不定点操作的  $\mu$ -公式集,记为x-类。通过等值式:

- $AX\phi_1 \wedge AX\phi_2 \equiv AX(\phi_1 \wedge \phi_2); \exists 1$
- $\text{EX} \varphi_1 \vee \text{EX} \varphi_2 \equiv \text{EX} (\varphi_1 \vee \varphi_2);$

可以将 x-类中的任意公式转换为具有下面形式的公式的析取:

$$\varphi_0 \wedge AX \varphi_1 \wedge EX \varphi_2 \wedge \cdots \wedge EX \varphi_n$$
,

(1)

其中  $\varphi_0$  是不含有时序算子的 x-类中的公式,  $\varphi_i$   $(1 \le i \le n)$  为 x-类中的公式, 且任意  $\varphi_i$  $(0 \le i \le n)$  都有可能缺失。

### 命题 6

若  $V \subseteq \mathcal{A}$  为原子命题集、 $\varphi$  为 X-类中的公式,则存在 X-类中的公式  $\psi$  使得  $\psi \equiv F_{\mu}(\varphi, V)$ 。

# μ-演算遗忘理论——<sub>复杂性结果</sub>

本了 应忘的及应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

研究背景和:

国内外研究现状

究内容及拟解决的

科字问题

有隶知识

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTI 和 u-演

论

CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论 遗忘理论在反应式

中的应用

最弱充分条件

知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算

基于归结的遗忘计算力 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结与肢

展型

参考文献

## 命题7(模型检测)

给定一个有限的 Kripke 结构 M、一个  $\mu$ -句子  $\varphi$  和原子命题集  $V \subseteq \mathscr{A}$ 。有:

- (i) 判定  $\mathcal{M} \models^{?} F_{\mu}(\varphi, V)$  在 EXPTIME 中;
- (ii) 若  $\varphi$  是一个析取  $\mu$ -公式,则判定  $\mathcal{M} \models$ ?  $F_{\mu}(\varphi, V)$  在 NP $\cap$ co-NP 中。

### 定理 14 (Entailment)

给定  $\mu$ -句子  $\varphi$  和  $\psi$ , V 为原子命题集, 则:

- (i) 判定  $F_{\mu}(\varphi, V) \models^? \psi$  是 EXPTIME-完全的,
- (ii) 判定 ψ |= <sup>?</sup> F<sub>μ</sub>(φ, V) 在 EXPTIME 里,
- (iii) 判定  $F_{\mu}(\varphi, V) \models^{?} F_{\mu}(\psi, V)$  在 EXPTIME 里。



# 目录

CTL 的语法和语义

总结 展望

- - 研究背景和意义
  - 国内外研究现状
  - 研究目标
  - 研究内容及拟解决的关键科学问题
- - Kripke 结构
  - CTL 的语法和语义
  - μ-演算
- - CTL 遗忘理论
  - μ-演算遗忘理论
- 遗忘理论在反应式系统中的应用
  - 简介

  - 知识更新
- - 简介
  - 基于模型的有界 CTL 遗忘计算
  - 基于归结的遗忘计算方法
  - 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验

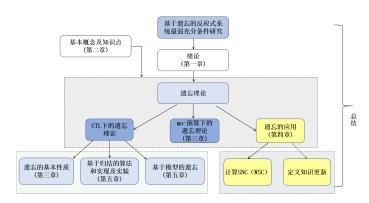
# 简介

CTL 的语法和语义

- 反应式系统被表示成 Kripke 结构;
- 初始 Kripke 结构的特征公式看作 CTL 公式;



图 6: 进程的三种基本状态及其转换





#### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分

# 条件研究

#### 绪论

研究背景和意义 国内外研究现状

研究目标 研究内容及拟解决的:

背景知识

Kripke 结构

μ-演算

CTL 和 μ-演算還Σ 论

CTL 遗忘理论 μ-演算遗忘理论

遗忘理论在反应式系 中的应用

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算

基于归结的遗忘计算 基于归结的算法 CTL-forget 实现及9

总结与展

展型

参考文献

# 最弱充分条件——定义

## 定义 15 (充分和必要条件)

给定两个公式  $\varphi$  和  $\psi$ ,  $V \subseteq Var(\varphi)$ ,  $q \in Var(\varphi) - V$  和  $Var(\psi) \subseteq V$ 。

- 若  $\varphi \models q \rightarrow \psi$ ,则称  $\psi$  是 q 在 V 和  $\varphi$  上的<u>必要条件(necessary condition,NC)</u>;
- 若  $\phi \models \psi \rightarrow q$ , 则称  $\psi \neq q$  在 V 和  $\phi \perp$  的 <u>充分条件</u> (sufficient condition, SC);
- 若 ψ 是 q 在 V 和 φ 上的必要条件,且对于任意 q 在 V 和 φ 上的必要条件 ψ',都有 φ ⊨ ψ → ψ',则称 ψ 是 q 在 V 和 φ 上的最强必要条件 (strongest necessary condition, SNC);
- 若 ψ 是 q 在 V 和 φ 上的充分条件,且对于任意 q 在 V 和 φ 上的充分条件 ψ',都有 φ ⊨ ψ' → ψ,则称 ψ 是 q 在 V 和 φ 上的<u>最弱充分条件(weakest sufficient condition,WSC)</u>。

#### 小贴士

- WSC 和 SNC 是一对对偶概念:
- 任意公式的 WSC (SNC) 能转换成原子命题的 WSC (SNC) 来计算。



# 最弱充分条件——相关性质

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

研究背景和测

国内外研究现状 研究目标

研光日标 研究内容及拟解决的 利學问题

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘

化 CTI 排定理论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式 中的应用

简介

知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTI 忘计算 基于自结的遗忘计算

基于归结的遗忘计算 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结与展

展望

参考文献

#### 定理 16

给定公式 φ、原子命题集  $V \subseteq Var(φ)$  和原子命题  $q \in Var(φ) - V$ 。

- (i) F<sub>CTL</sub>(φ∧q, (Var(φ)∪{q}) V) 是 q 在 V 和 φ 上的 SNC;
- (ii)  $\neg F_{CTL}(\phi \land \neg q, (Var(\phi) \cup \{q\}) V)$  是 q 在 V 和  $\phi$  上的 WSC。

## 例 17 (例 1的延续)

令  $\mathscr{A} = \{d, se, sp, s\}$  和  $V = \{d, se\}$ ,求 s 在 V 和初始结构  $\mathscr{K} = (\mathscr{M}, s_0)$  上的 WSC,其中  $\mathscr{M}$  为例 1中初始状态为  $s_0$  的汽车制造企业模型结构。

由上面的定理可知,s 在 V 和初始结构  $\mathcal{K} = (\mathcal{M}, s_0)$  上的 WSC 为 ¬ $F_{CTL}(\mathscr{F}_{\mathscr{A}}(\mathcal{K}) \land \neg s, \{s\} \cup \{sp\})$ 。

由于涉及到后文中遗忘的计算方法,本例的详细计算过程放到后面。

#### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论

研究背景和意

国内外研究现状 研究目标

研究内容及拟解决的5 科学问题

背景知识

Kripke 结构

VY AV

μ-演選

CTL 和 μ-演算遗忘 论

CTI 溃忘理论

μ-演算遺忘理论

中的<del>应用</del> 简介

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

简介

忘计算 基于归结的遗忘计1

基于归结的遗忘计算 基于归结的算法 CTL-forget 实现及3

总结与展望

展塑

参考文献

## 约定

- 本小节假设所有初始结构都是有限的,即:状态来源于有限状态空间且 ⋈ 为有限原子命题集;
- 任意 ☑ 上的有限初始结构 ℳ (为了简化符号,用初始 Kripke 结构 ℳ 代替初始结构 (ℳ,s<sub>0</sub>)) 都能用一个 CTL 公式——特征公式 ℱℴ/(ℳ) 来表示;
- 给定公式  $\varphi$  和  $\psi$ ,  $V_{min} \subseteq \mathscr{A}$  为使得  $F_{CTL}(\varphi, V_{min}) \wedge \psi$  可满足的极小子集。
- 记

$$\bigcup_{V_{min}\subseteq\mathscr{A}} \mathit{Mod}(\mathrm{F}_{\scriptscriptstyle\mathrm{CTL}}(\mathscr{F}_{\mathscr{A}}(\mathscr{M}),V_{min})\wedge\psi)$$

为所有  $F_{CTL}(\mathscr{F}_{\mathscr{A}}(\mathscr{M}), V_{min}) \wedge \psi$  的模型集合的并集。

#### 定义 18

给定公式 Γ 和 φ。知识更新操作 ◇CTL 定义如下:

$$\mathit{Mod}(\Gamma \diamond_{\mathrm{CTL}} \varphi) = \bigcup_{\mathscr{M} \in \mathit{Mod}(\Gamma)} \bigcup_{V_{\mathit{min}} \subseteq \mathscr{A}} \mathit{Mod}(\mathrm{F}_{\scriptscriptstyle{\mathrm{CTL}}}(\mathscr{F}_{\mathscr{A}}(\mathscr{M}), V_{\mathit{min}}) \wedge \varphi),$$

其中, $\mathscr{S}_{\mathscr{A}}(\mathscr{M})$  是  $\mathscr{M}$  在  $\mathscr{A}$  上的特征公式, $V_{min}\subseteq\mathscr{A}$  是使得  $\mathrm{F}_{\mathrm{CTL}}(\mathscr{S}_{\mathscr{A}}(\mathscr{M}),V_{min})$  可满足的 极小子集。



CTL 的语法和语义

## 定义 19

给定三个有限初始结构 M、 $M_1$  和  $M_2$ , $M_1$  比  $M_2$  更接近 M (记为  $M_1 \leq_M M_2$ ),当且仅 当对任意  $V_2\subseteq \mathscr{A}$ ,若  $\mathscr{M}_2\leftrightarrow_{V_2}\mathscr{M}$ ,则存在  $V_1\subseteq V_2$  使得  $\mathscr{M}_1\leftrightarrow_{V_1}\mathscr{M}$ 。  $\mathscr{M}_1<_{\mathscr{M}}\mathscr{M}_2$  当且仅 当 M<sub>1</sub> < M M<sub>2</sub> 且 M<sub>2</sub> ≠ M M<sub>1</sub>。

#### 例 20

如图 7中的三个初始结构。

可以检查  $\mathcal{M} \leftrightarrow_{\{j\}} \mathcal{M}_1$ ,  $\mathcal{M} \leftrightarrow_{\{i,ch\}} \mathcal{M}_2$ , $\{j\} \subseteq \{j,ch\}$ ,且对任意原子命题集  $\mathbf{V} \subset \{j\}$ (或  $V \subset \{j, ch\}$ ), 有  $\mathcal{M} \not\hookrightarrow_{V} \mathcal{M}_{1}$  (或  $\mathcal{M} \not\hookrightarrow_{V} \mathcal{M}_{2}$ )。因此,  $\mathcal{M}_{1} \leq_{\mathcal{M}} \mathcal{M}_{2}$ 。

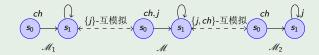


图 7: 初始结构间的 < //>
《 关系。



基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状

研究目标 研究内容及拟解决的关 科学问题

背景知识

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘

CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论 遺忘理论在反应式

简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL: 忘计算

基于归结的遗忘计算 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结与展

总结 展望

参考文献

## 定义 19

给定三个有限初始结构 M、 $M_1$  和  $M_2$ ,  $M_1$  比  $M_2$  更接近 M (记为  $M_1 \leq_M M_2$ ),当且仅 当对任意  $V_2 \subseteq \mathcal{A}$ ,若  $M_2 \leftrightarrow_{V_2} M$ ,则存在  $V_1 \subseteq V_2$  使得  $M_1 \leftrightarrow_{V_1} M$ 。 $M_1 <_M M_2$  当且仅 当  $M_1 \leq_M M_2$  且  $M_2 \not\leq_M M_1$ 。

### 定理 20

给定 μ-句子 Γ 和 φ, 则:

$$Mod(\Gamma \diamond_{\mathrm{CTL}} \varphi) = \bigcup_{\mathscr{M} \in Mod(\Gamma)} Min(Mod(\varphi), \leq_{\mathscr{M}}).$$

其中,  $Min(Mod(φ), \leq_{\mathscr{M}})$  是 φ 的关于偏序关系  $\leq_{\mathscr{M}}$  的极小模型集。

#### 定理 21

知识更新操作 ◇CTL 满足 Katsuno 和 Mendelzon 提出的基本条件 (U1)-(U8)。



# 知识更新——例

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论

研究背景和道

国内外研究现状 研究目标

研究内容及拟解决的 科学问题

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语:

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘

论

μ-演算遗忘理论

遗忘理论在反应式 中的应用

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方

简介

忘计算 基于归结的遗忘计算 基于归结的遗忘计算

总结与展

展型

参考文献

# 例 22

令  $\mathscr{A} = \{ch, j\}$ 、 $\varphi = vX. j \land ch \land \text{EXEX} X$ 、 $\psi = vX. \neg j \land ch \land \text{EXEX} X$  且 Kripke 结构的状态空间为  $\{s_0, s_1\}$ ,则用  $\psi$  更新  $\varphi$  计算如下:

$$Mod(\varphi) = \{((1), r = s_0, L(s_0) = \{ch, j\}, L(s_1) = \{ch, j\}),$$

$$((2),r\!=\!s_1,L(s_1)\!=\!\{ch,j\},L(s_0)\!=\!\{ch,j\}),$$

$$((3), r = s_0, L(s_0) = \{ch, j\}, L(s_1) = \mathcal{C}),$$

$$((4),r=s_1,L(s_1)=\{ch,j\},L(s_0)=\mathcal{C}),$$

$$((5), r = s_0, L(s_0) = \{ch, j\}, L(s_1) = \mathscr{C}),$$

$$((6), r = s_1, L(s_1) = \{ch, j\}, L(s_0) = \mathscr{C}), \dots \}$$

$$Mod(\psi) = \{((1), r = s_0, L(s_0) = \{ch\}, L(s_1) = \{ch\}\},\$$

$$-(((1), i - 3), 2(30) - (2i), 2(31) - (2i))$$

$$((2),r=s_1,L(s_1)=\{ch\},L(s_0)=\{ch\}),$$

$$((3), r = s_0, L(s_0) = \{ch\}, L(s_1) = \mathscr{C}),$$

$$((4), r = s_1, L(s_1) = \{ch\}, L(s_0) = \mathscr{C}),$$

$$((5), r = s_0, L(s_0) = \{ch\}, L(s_1) = \mathscr{C}),$$

$$((6), r = s_1, L(s_1) = \{ch\}, L(s_0) = \mathcal{C}), \dots\}$$

其中, 四元组  $((f), r=s_k, L(s_0)=V_1, L(s_1)=V_1)$  表示 Kripke 结构 (S, r, R, L), 其中  $S=\{s_0, s_1\}$ ,  $r=s_k$   $(r\in \{0, 1\})$ 、转換关系如图 7中的 (i)  $(i\in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\})$ 、 $s_0$  和  $s_1$  分別被  $V_1\subseteq \{ch, j\}$  和  $V_2\subseteq \{ch, j\}$  标记且  $V\in (0, \{j\}, \{ch\}, \{j, ch\}\}$ 。



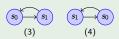




图 7: 状态空间为 {s<sub>0</sub>,s<sub>1</sub>} 的六个 Kripke 结构示意图<sup>a</sup>

<sup>a</sup>这里只列出部分转换关系,其余转换关系可以容易地枚举出

 $Mod(\varphi \circ \mu \psi) = \bigcup_{\mathscr{M} \in Mod(\varphi)} Min(Mod(\psi), \leq_{\mathscr{M}})$ ,根据定义 19容易检查  $Mod(\varphi \circ \mu \psi) = Mod(\psi)$ 。直观地说,由于在  $\psi \neq j$  在偶数状态不再为真、ch 保持为真且  $\psi$  和  $\varphi$  都不知道模型偶数状态的信息,因而用  $\psi$  更新  $\varphi$  得到的结果为  $\psi$  自身。



# 目录

CTL 的语法和语义

总结

展望

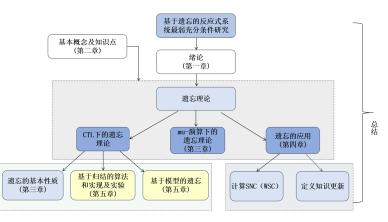
- - 研究背景和意义
  - 国内外研究现状
  - 研究目标
  - 研究内容及拟解决的关键科学问题
- - Kripke 结构
  - CTL 的语法和语义
  - μ-演算
- - CTL 遗忘理论
  - μ-演算遗忘理论
- - 简介

  - 知识更新
- CTL 遗忘计算方法
  - 简介
  - 基于模型的有界 CTL 遗忘计算
  - 基于归结的遗忘计算方法
  - 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验

# 简介

CTL 的语法和语义

- 基于模型的计算方法:
- 基于归结的计算方法 (CTL-forget 算法);
- 基于 Prolog 的 CTL-forget 算法实现。





# 基于模型的计算方法总体框架

#### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

```
绪论
研究背景和意义
国内外研究现状
```

研究目标 研究内容及拟解决的关 科学问题

有象知识 Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算 CTL 和

论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应

简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

忘计算 基于归结的遗忘计算 基工归结的遗忘计算

总结与展望

总结 展望

参考文献

# 基于模型的有界 CTL 计算方法

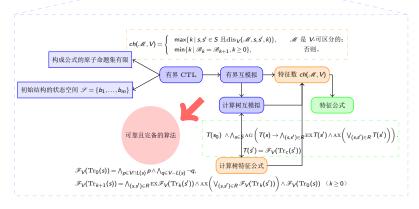


图 8: 基于模型的有界 CTL 遗忘方法



# 基于模型的有界 CTL 遗忘计算——描述初始结构: 有界 V-互模拟

# $\mathscr{B}_{\mathbf{p}}^{V}$

令  $V \subseteq \mathcal{A}$  是原子命题集, $i \in \{1,2\}$ , $\mathcal{M}_i = (S_i, R_i, L_i, s_i')$  是初始 Kripke 结构, $\mathcal{K}_i = (\mathcal{M}_i, s_i)$  是 结构。 $\mathcal{B}_{n}^{V}$  递归定义如下:

- **●** 若  $L_1(s_1) V = L_2(s_2)$ , 则  $(\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2) \in \mathcal{B}_0^V$ ;
- 对任意 n≥0,若满足下面几个条件(光1,光2)∈ BN 成立:
  - $(\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2) \in \mathcal{B}_0^V$ ;
  - 对任意  $(s_1, s_1') \in R_1$ ,存在  $(s_2, s_2') \in R_2$ ,使得 $(\mathcal{K}_1', \mathcal{K}_2') \in \mathcal{B}_n^V$ ;
  - 对任意 (s<sub>2</sub>, s<sub>2</sub>) ∈ R<sub>2</sub>,存在 (s<sub>1</sub>, s<sub>1</sub>) ∈ R<sub>1</sub>,使得(ℋ<sub>1</sub>,ℋ<sub>2</sub>) ∈ ℬ<sup>V</sup><sub>n</sub>。

其中  $\mathcal{K}'_i = (\mathcal{M}_i, s'_i)$ 。

## 定义 23 (有界 V-互模拟)

令 V 是  $\mathscr{A}$  的一个子集,  $i \in \{1,2\}$ ,  $\mathscr{K}_1$  和  $\mathscr{K}_2$  是结构。

- $\mathcal{K}_1$  和  $\mathcal{K}_2$  是有界 V-互模拟的, 当且仅当对所有  $n \ge 0$ , 都有  $(\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2) \in \mathcal{B}_n$ 。若  $\mathcal{K}_1$  和  $\mathcal{X}_{0}$  是有界 V-互模拟的,则记为  $\mathcal{X}_{1} \stackrel{\beta}{\mapsto}_{V} \mathcal{X}_{0}$ 。
- 对  $\mathcal{M}_i$  上的路径  $\pi_i = (s_{i,1}, s_{i,2}, \dots)$ ,若对于任意  $j \in \mathbb{N}_{>1}^a$ ,都有  $\mathcal{K}_{1,i} \stackrel{\beta}{\mapsto}_V \mathcal{K}_{2,i}$ ,则  $\pi_1 \stackrel{B}{\leftrightarrow}_V \pi_2$ .  $\sharp \Psi \mathscr{K}_{i,i} = (\mathscr{M}_i, s_{i,i})$ .

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>N 为整数集, N>1 是大于等于 1 的整数集。

## 基于模型的有界 CTL 遗忘计算——描述初始结构: 有界 V-互模拟

基于 题 忘 的 反 凡 式 系 统 最 弱 充 分 条 件 研 究

#### 绪论

研究背景和建

国内外研究现状

研究月标 研究内容及拟解决的 科学问题

背景知识

Kripke 结构

μ-演算

μ-500

CIL 和 μ-演界週志 论

CTL 遗忘理论

μ-演算遗忘理论

遗忘理论在反应式

简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算方

基于归结的遗忘计算 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结与展型

**公老**文献

# $\mathscr{B}^V_n$

令  $V\subseteq \mathscr{A}$  是原子命题集, $i\in\{1,2\}$ , $\mathscr{M}_i=(S_i,R_i,L_i,s_0')$  是初始 Kripke 结构, $\mathscr{K}_i=(\mathscr{M}_i,s_i)$  是结构。 $\mathscr{B}_n^V$  递归定义如下:

- 若  $L_1(s_1) V = L_2(s_2)$ , 则  $(\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2) \in \mathcal{B}_0^V$ ;
- 对任意  $n \ge 0$ ,若满足下面几个条件 $(\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2) \in \mathcal{B}_{n+1}^V$ 成立:
  - $(\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2) \in \mathcal{B}_0^V$ ;
  - 对任意  $(s_1,s_1') \in R_1$ ,存在  $(s_2,s_2') \in R_2$ ,使得 $(\mathcal{K}_1',\mathcal{K}_2') \in \mathcal{B}_n^V$ ;
  - 对任意  $(s_2, s_2') \in R_2$ ,存在  $(s_1, s_1') \in R_1$ ,使得 $(\mathcal{K}_1', \mathcal{K}_2') \in \mathcal{B}_n^V$ 。

其中  $\mathcal{K}'_i = (\mathcal{M}_i, s'_i)$ 。

#### 定理 23

令  $V\subseteq\mathcal{A}$  和  $\mathcal{X}_i=(\mathcal{M}_i,s_i)$   $(i\in\{1,2\})$ 。若  $\mathcal{M}_i=(S_i,R_i,L_i,s_0^i)$  是有限的初始 Kripke 结构,则  $s_1$  和  $s_2$  是有界 V-互模拟的,当且仅当  $s_1\leftrightarrow_V s_2$ 。



## 基于模型的有界 CTL 遗忘计算——描述初始结构: 计算树

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

研究背景和道

国内外研究现状

研究目标 研究内容及拟解决的关

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘

论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式

简介

知识更新

CTL 遗忘计算方法

忘计算 基于归结的遗忘计算

基于归结的算法 CTL-forget 实现及9

总结与展

展翅

参考文献

### 计算树

给定一个初始 Kripke 结构  $\mathcal{M} = (S, R, L, s_0)$  和一个状态  $s \in S$ , $\mathcal{M}$  上以 s 为根节点、深度为 n  $(n \ge 0)$  的<u>计算树</u>Tr $^{\mathcal{M}}_{n}(s)$  递归定义如下 [1]:

- $\operatorname{Tr}_0^{\mathscr{M}}(s)$  是只有一个节点 s (其标签为 L(s)) 的树。
- Tr<sup>n</sup><sub>n+1</sub>(s) 是以 s 为根节点(标签为 L(s))的树,并且若(s,s')∈ R,则 s 有一棵子树 Tr<sup>n</sup><sub>n</sub>(s')。

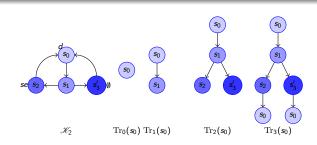


图 9: 初始结构 兆 及其计算树示意图

#### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论

研究背景和意义 国内外研究现状

国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的:

背景知识

Kripke 结构

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘

CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论 遗忘理论在反应

简介 最弱充分条件

知识更新 CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 过 忘计算 基于归结的遗忘计算方法

基于归结的算法 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结

参考文献

# 定义 24

给定原子命题集  $V\subseteq \mathscr{A}$ 、初始 Kripke 结构  $\mathscr{M}=(S,R,L,s_0)$  和状态  $s\in S$ 。定义在 V 上的计算 树  $\mathrm{Tr}_n(s)$  的特征公式(记为  $\mathscr{F}_V(\mathrm{Tr}_n(s)),\ n\geq 0$ )递归定义如下:

$$\mathscr{F}_{V}(\operatorname{Tr}_{0}(s)) = \bigwedge_{p \in V \cap L(s)} p \wedge \bigwedge_{q \in V - L(s)} \neg q,$$

$$\mathscr{F}_V(\operatorname{Tr}_{k+1}(s)) = \bigwedge_{(s,s') \in R} \operatorname{Ex} \mathscr{F}_V(\operatorname{Tr}_k(s')) \wedge \operatorname{Ax} \left( \bigvee_{(s,s') \in R} \mathscr{F}_V(\operatorname{Tr}_k(s')) \right) \wedge \mathscr{F}_V(\operatorname{Tr}_0(s)) \quad (k \ge 0) \ .$$

#### 含义

由定义24可知,计算树的特征公式从三个方面展示了计算树的信息:

- (1) 只考虑 V 中的原子命题;
- (2) 突出了树节点的内容,即:对于任意原子命题  $p \in V$ ,若 p 在节点的标签中,则其正出现在特征公式中,否则负出现在特征公式中:
- (3) 公式中的时序算子表示了状态之间的转换关系。



素于 题 忌 的 及 应 式 系统 最 弱 充 分 条件 研 究

#### 绪论

研究背景和意

研究目标 研究内容及拟解决的

背景知识

Kripke 结构 CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗 论

CTL 遗忘理论 u-演算资定理论

遗忘理论在反应式系 中的应用

最弱充分条件

简介 基于模型的有界 CTL i

忘计算 基于归结的遗忘计算:

基于归结的算法 基于归结的算法 CTL-forget 实现及

总结与展! 总结

参考文献

## 计算树互模拟

给定原子命题集  $V\subseteq \mathscr{A}$  和初始 Kripke 结构  $\mathscr{M}_i$  (i=1,2)。如果下面条件同时满足:

- $L_1(s_1) V = L_2(s_2) V,$
- 对  $\operatorname{Tr}_n(s_1)$  的任意子树  $\operatorname{Tr}_{n-1}(s_1')$ ,都存在  $\operatorname{Tr}_n(s_2)$  的子树  $\operatorname{Tr}_{n-1}(s_2')$ ,使得  $\operatorname{Tr}_{n-1}(s_1') \leftrightarrow_V \operatorname{Tr}_{n-1}(s_2')$ ,且
- 对任意  $\operatorname{Tr}_n(s_2)$  的子树  $\operatorname{Tr}_{n-1}(s_2')$ ,都存在  $\operatorname{Tr}_n(s_1)$  的子树  $\operatorname{Tr}_{n-1}(s_1')$ ,使得  $\operatorname{Tr}_{n-1}(s_1') \leftrightarrow_V \operatorname{Tr}_{n-1}(s_2')$ ;

则称  $M_1$  的计算树  $\operatorname{Tr}_n(s_1)$  和  $M_2$  的计算树  $\operatorname{Tr}_n(s_2)$  是 V-互模拟的(记为  $(M_1,\operatorname{Tr}_n(s_1))\leftrightarrow_V(M_2,\operatorname{Tr}_n(s_2))$ ,简写为  $\operatorname{Tr}_n(s_1)\leftrightarrow_V\operatorname{Tr}_n(s_2)$ )。

#### 命题 8

给定原子命题集  $V\subseteq \mathscr{A}$ 、初始 Kripke 结构  $\mathscr{M}$  和两个状态  $s,s'\in S$ 。若  $s\not\mapsto_V s'$ ,则存在一个最小整数 k,使得  $\mathrm{Tr}_k(s')$  和  $\mathrm{Tr}_k(s')$  不是 V-互模拟的。

式系统最弱充 条件研究

绪论

研究背景和道

国内外研究现状 研究目标

研究内容及拟解决的 科学问题

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘

论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式

筒介

敏弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 遗忘计算

基于归销的应忘订算 基于归结的算法 CTL-forget 实现及3

总结与展

展塑

参考文献

## V-可区分

若初始 Kripke 结构  $\mathscr{M}$  的两个状态 s 和 s' 不是  $\overline{V}$ -互模拟的(即: $s \nleftrightarrow_{\overline{V}} s'$ ),则称 s 和 s' 是  $\overline{V}$ -可区分的。用  $\mathrm{dis}_V(\mathscr{M},s,s',k)$  表示状态 s 和 s' 在命题8中所说的最小数 k 下是 V-可区分的。

#### 特征数

 $\mathcal{M}$  关于原子命题集 V 的<u>特征数</u>,记为  $ch(\mathcal{M},V)$  定义如下:

$$\mathit{ch}(\mathscr{M}, \mathit{V}) = \left\{ \begin{array}{ll} \max\{k \, | \, \mathit{s}, \mathit{s}' \in \mathit{S} \, \, \mathrm{Edis}_{\mathit{V}}(\mathscr{M}, \mathit{s}, \mathit{s}', \mathit{k})\}, & \mathscr{M} \, \not \to \, \mathit{V}\text{-} \, \mathrm{可区分的}; \\ \min\{k \, | \, \mathscr{B}_k = \mathscr{B}_{k+1}, k \geq 0\}, & \text{否则} \, . \end{array} \right.$$



#### 基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论

研究背景和

GLA H TENT

研究目标

研究内容及拟解决的 科學问题

科学问题

背景知i

Kripke 结构

CTL 的语法和语》

11-演算

μ-演〔

CTL 和 μ-演算遗忘

CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论

#-被界理怎定定 #-世界:2000年前

简介

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL i 忘计算

基于归结的算法 CTL-forget 实现及9

总结与展

总结 展想

参考文献

# 定义 25 (特征公式)

给定原子命题集  $V\subseteq \mathcal{M}$  和初始结构  $\mathscr{K}=(\mathscr{M},s_0)$ ,其中  $c=ch(\mathscr{M},V)$ 。对任意  $\mathscr{M}$  上的状态  $s'\in S$ ,记  $T(s')=\mathscr{F}_V(\mathrm{Tr}_c(s'))$ 。  $\mathscr{K}$  关于 V 的<u>特征公式</u>  $\mathscr{F}_V(\mathscr{K})$  定义为:

$$T(s_0) \ \land \bigwedge_{s \in S} \operatorname{AG} \left( T(s) \to \bigwedge_{(s,s') \in R} \operatorname{EX} T(s') \land \operatorname{AX} \left( \bigvee_{(s,s') \in R} T(s') \right) \right).$$

#### 定理 26

 $\diamondsuit$   $V \subseteq \mathscr{A}$ 、 $\mathscr{M} = (S, R, L, s_0)$  且  $\mathscr{M}' = (S', R', L', s'_0)$ , 则:

- (i)  $(\mathcal{M}', s'_0) \models \mathscr{F}_V(\mathcal{M}, s_0)$  当且仅当 $(\mathcal{M}, s_0) \leftrightarrow_{\overline{V}} (\mathcal{M}', s'_0)$ ;
- (ii) 若  $s_0 \leftrightarrow_{\overline{V}} s_0'$  则  $\mathscr{F}_V(\mathscr{M}, s_0) \equiv \mathscr{F}_V(\mathscr{M}', s_0')$ 。

相互互模拟的结构的特征公式等价。



至于题志的及应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

研究背景和意

国内外研究现状 研究目标

科学问题

背景知识

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘 论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式; 中的应用

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算方

基于归结的算法 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结

参考文献

## 例 25

考虑右下图中左边的初始结构  $\mathscr{X}_2 = (\mathscr{M}, s_0)$ 。左边的为  $\mathscr{M}$  上的四棵计算树: 从左到右表示以  $s_0$  为根、深度分别为 0、1、2 和 3 的计算树 ' 为简化图,计算树的标签没有给出,但是每个树节点的标签可从  $\mathscr{X}_2$  找到)。令  $V = \{d\}$ ,则  $\overline{V} = \{s,se\}$ 。因为  $L(s_1) - \overline{V} = L(s_2) - \overline{V}$ ,所以有  $\operatorname{Tr}_0(s_1) \leftrightarrow_{\overline{V}} \operatorname{Tr}_0(s_2)$ 。由于存在  $(s_1,s_2) \in R$ ,使得对任意  $(s_2,s') \in R$ 。都有  $L(s_2) - \overline{V} \neq L(s') - \overline{V}$ ,所以, $\operatorname{Tr}_1(s_1) \nleftrightarrow_{\overline{V}} \operatorname{Tr}_1(s_2)$ 。由此可知, $s_1$  和  $s_2$   $\mathbb{R}$  V-可区分的,且  $\operatorname{dis}_V(\mathscr{M}, s_1, s_2, 1)$ 。同理可得, $\operatorname{dis}_V(\mathscr{M}, s_0, s_1, 0)$ , $\operatorname{dis}_V(\mathscr{M}, s_1, s_2, 1)$ ,可以计算  $\mathscr{M}$  关于 V 的特征数为:

$$ch(\mathcal{M}, V) = \max\{k \mid s, s' \in S \perp \text{dis}_{V}(\mathcal{M}, s, s', k)\} = 1.$$

所以,可以由以下步骤计算  $\mathcal{X}_2$  关于 V 的特征公式:

 $\mathcal{F}_V(\mathrm{Tr}_0(s_0)) = d, \qquad \quad \mathcal{F}_V(\mathrm{Tr}_0(s_1)) = \neg d,$ 

 $\mathcal{F}_V(\mathrm{Tr}_0(s_2)) = \neg d, \qquad \mathcal{F}_V(\mathrm{Tr}_0(s_3')) = \neg d,$ 

 $\mathscr{F}_V(\mathrm{Tr}_1(s_0)) = \mathrm{EX} \neg d \wedge \mathrm{AX} \neg d \wedge d \equiv \mathrm{AX} \neg d \wedge d,$ 

 $\mathscr{F}_V(\mathrm{Tr}_1(s_1)) = \mathrm{EX} \neg d \wedge \mathrm{EX} \neg d \wedge \mathrm{AX}(\neg d \vee \neg d) \wedge \neg d \equiv \mathrm{AX} \neg d \wedge \neg d,$ 

 $\mathscr{F}_V(\mathrm{Tr}_1(s_2)) = \mathrm{EX} d \wedge \mathrm{AX} d \wedge \neg d \equiv \mathrm{AX} d \wedge \neg d,$ 

 $\mathscr{F}_V(\mathrm{Tr}_1(\mathfrak{s}_3'))\equiv \mathscr{F}_V(\mathrm{Tr}_1(\mathfrak{s}_2)),$ 

 $\mathscr{F}_V(\mathscr{M}, s_0) \equiv \operatorname{AX} \neg d \wedge d \wedge$ 

 $AG(AX \neg d \land d \rightarrow AX(AX \neg d \land \neg d)) \land$ 

 $\operatorname{AG} \big( \operatorname{AX} \neg d \wedge \neg d \to \operatorname{AX} \big( \operatorname{AX} d \wedge \neg d \big) \big) \wedge$ 

 $AG(AXd \land \neg d \rightarrow AX(AX \neg d \land d)).$ 

se 59 — 51 — 5, 0





 $\operatorname{Tr}_0(s_0)\operatorname{Tr}_1(s_0)$   $\operatorname{Tr}_2(s_0)$ 

图 10: 初始结构 光2 及其计算树示意图



# 基于模型的有界 CTL 遗忘计算——计算 wsc

至了 题志的及应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

国内外研究现状 研究目标

研究内容及拟解决的关 科学问题

背景知识

Kripke 结构 CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘

CTI SECURIA

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式 中的应用

间介 最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL i 忘计算 基于归结的遗忘计算方

基于归结的遗忘计算 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实

总结

参考文献

# 例 26 (例 17的延续)

令  $\mathscr{A}=\{d,se,sp,s\}$  和  $V=\{d,se\}$ ,求 s 在 V 和初始结构  $\mathscr{K}=(\mathscr{M},s_0)$  上的 WSC,其中  $\mathscr{M}$  为例 1中初始状态为  $s_0$  的汽车制造企业模型结构。

 $\neg F_{CTL}(\mathscr{F}_{V \cup \{s\}}(\mathscr{K}) \land \neg s, \{s\})$ 

s 在 V 和初始结构  $\mathcal{K}=(\mathcal{M},s_0)$  上的 WSC 为  $\neg F_{\text{CTL}}(\mathcal{F}_{sl}(\mathcal{K}) \land \neg s,\{s\} \cup \{sp\})$ 。

$$\begin{split} & F_{\mathrm{CTL}}(\mathscr{F}_{\mathscr{A}}(\mathscr{K}) \wedge \neg s, \{s\} \cup \{sp\}) \\ & \equiv F_{\mathrm{CTL}}(F_{\mathrm{CTL}}(\mathscr{F}_{\mathscr{A}}(\mathscr{K}) \wedge \neg s, \{sp\}), \{s\}) \\ & \equiv F_{\mathrm{CTL}}(F_{\mathrm{CTL}}(\mathscr{F}_{\mathscr{A}}(\mathscr{K}), \{sp\}) \wedge \neg s, \{s\}). \end{split}$$

FCTL( $\mathscr{G}_{\mathscr{A}}(\mathscr{K}), \{sp\}$ ) =  $\mathscr{F}_{V \cup \{s\}}(\mathscr{K})$ 所以要计算 ¬FCTL( $\mathscr{F}_{\mathscr{A}}(\mathscr{K}) \wedge \neg s, \{s\} \cup \{sp\}$ ), 只需计算 ¬FCTL( $\mathscr{F}_{V \cup \{s\}}(\mathscr{K}) \wedge \neg s, \{s\}$ )。

则  $V' = \{sp\}$ 。

$$\begin{split} &\equiv \neg F_{CTL}(\mathscr{F}_{\mathcal{N} \cup \{s\}}(\mathscr{X}), \{s\}) \\ &\equiv \neg F_{CTL}(\psi \land AG(\phi_1 \land \phi_2 \land \phi_3 \land \phi_4), \{s\}) \\ &\equiv \neg (F_{CTL}(\psi \land \phi_1 \land \phi_2 \land \phi_3 \land \phi_4, \{s\}) \land AGF_{CTL}(\phi_1 \land \phi_2 \land \phi_3 \land \phi_4, \{s\})) \\ &\equiv \neg \left( \left( d \lor ((d \lor se) \land AX(d \land \neg se)) \lor ((d \lor se \lor AX \neg d) \land eX(\neg d \land se) \land eX(\neg d \land \neg se)) \lor ((d \lor \neg se) \land eX(\neg d \land \neg se)) \land eX(\neg d \land \neg se) \lor (AX \neg d \land eX(\neg d \land se) \land eX(\neg d \land \neg se)) \lor (AX \neg d \land \neg se) \lor (AX \neg d \land \neg se) \land eX(\neg d \land \neg se) \lor (AX \neg d \land \neg se)) \lor (AX \neg d \land \neg se) \lor eX(\neg d \land \neg se) \lor (AX \neg d \land \neg se)) \lor (AX \neg d \land \neg se) \lor eX(\neg d \land \neg$$

# 遗忘封闭性

CTL 的语法和语义

基于模型的有界 CTL 遗 忘计算

展望

### 引理 27

给定 CTL 公式 φ, 下面等式成立:

$$\varphi \equiv \bigvee_{(\mathscr{M}, s_0) \in Mod(\varphi)} \mathscr{F}_{\mathscr{A}}(\mathscr{M}, s_0).$$

### 遗忘封闭性

从  $\varphi$  中遗忘 V 中的元素得到的结果为:

$$\bigvee_{\mathcal{K} \in \{\mathcal{K}' | \exists \mathcal{K}'' \in \mathsf{Mod}(\phi), \ \mathcal{K}'' \leftrightarrow_{\mathbf{V}} \mathcal{K}'\}} \mathcal{F}_{\overline{\mathcal{V}}}(\mathcal{K}).$$

# 基于模型的遗忘算法

```
基于遗忘的反应
式系统最弱充分
条件研究
```

```
绪论
研究背景和道
```

```
国内外研究现状
研究目标
研究内容及超解冲的)
```

F究内容及拟解决的: 科学问题

背景知识

Kripke 结构 CTL 的语法和语义

μ-演算

CTI #0

论

CTL 遗忘理论 μ-演算遗忘理论

μ-演界辺を埋泥 遺忘理论在反应計

中的应用 简介

最弱充分条件 知识更新

简介 基于模型的有界 CTL 追忘计算

基于归结的遗忘计算方 基于归结的算法

总结与展生 总结 展型

do de de de da

```
算法 5.1 基于模型的CTL遗忘过程
```

Input: CTL公式φ和原子命题集V

**Output**:  $F_{CTL}(\boldsymbol{\varphi}, V)$ 

 $\psi \leftarrow \bot$  for each  $\mathscr{A}$  和  $\mathscr{S}$  上的 初始 结构  $\mathscr{K}$  do

if  $\mathscr{K} \not\models \varphi$  then continue

foreach 满足 $\mathcal{K} \leftrightarrow_{\mathcal{V}} \mathcal{K}'$ 的初始结构 $\mathcal{K}'$  do  $\psi \leftarrow \psi \lor \mathcal{F}_{\nabla}(\mathcal{K}')$ 

end

end

return ψ

## 命题 8

令  $\varphi$  为 CTL 公式, $V \subseteq \omega$  为原子命题集,状态空间大小为  $|\mathscr{S}| = m$ ,  $|\omega| = n$ , |V| = x。使用算法 5.1 计算从  $\varphi$  中遗忘 V 中原子的空间复杂度为  $O((n-x)m^{2(m+2)}2^{nm}\log m)$ ,且时间复杂性至少与空间复杂性相同。



# 遗忘复杂性

CTLAF: 表示 CTL 公式只包含时序算子 AF 的子类。

# 命题 9 (模型检测)

给定一个结构  $(\mathcal{M}, s_0)$ 、原子命题集  $V \subseteq \mathcal{A}$  和公式  $\varphi \in \mathrm{CTL}_{\mathrm{AF}}$ , 判定  $(\mathcal{M}, s_0)$  是否为  $F_{CTL}(\varphi, V)$  的模型是 NP-完全的。

#### 定理 28 (Entailment)

 $\phi$  の 和  $\psi$  为 CTL<sub>N</sub> 中的两个公式、V 为原子命题集。则:

- (i) 判定  $F_{CTL}(\varphi, V) \models^? \psi$  是 co-NP-完全的,
- (ii) 判定  $\psi \models^{?} F_{CTL}(\varphi, V)$  是  $\Pi_{2}^{P}$ -完全的,
- (iii) 判定  $F_{CTL}(\varphi, V) \models^{?} F_{CTL}(\psi, V)$  是  $\Pi_{2}^{P}$ -完全的。

### 推论 29

令  $\phi$  和  $\psi$  为  $CTL_{AF}$  中的两个公式, V 原子公式集。则

- (i) 判定  $\psi \equiv F_{CTL}(\varphi, V)$  是  $\Pi_2^P$ -完全的,
- (ii) 判定  $F_{CTL}(\varphi, V) \equiv \varphi$  是 co-NP-完全的,
- (iii) 判定  $F_{CTL}(\varphi, V) \equiv {}^{?} F_{CTL}(\psi, V)$  是  $\Pi_{2}^{P}$ -完全的。



# 基于归结的算法 CTL-forget——总体框架

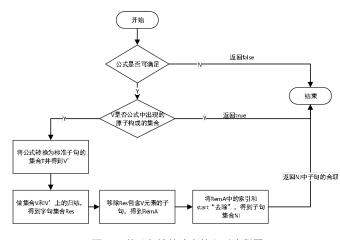


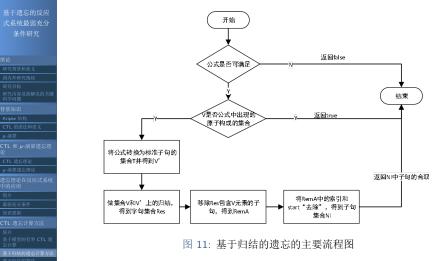
图 11: 基于归结的遗忘的主要流程图

- 如何表示 CTL 公式和带索引的 CTL 公式之间的关系
- 如何"移除"无关的原子命题(包括需要遗忘的原子命题和转换过程中引入的新的原子 ◆ 顯 〉 以 及 如 每 " 鸿 吟 " 泰 引 ?

CTL 的语法和语义



# 基于归结的算法 CTL-forget——总体框架



- 如何表示 CTL 公式和带索引的 CTL 公式之间的关系?
- 如何"移除"无关的原子命题(包括需要遗忘的原子命题和转换过程中引入的新的原子 命题),以及如何"消除"索引?

# 基于归结的算法 CTL-forget——CTL 归结 UF

式系统最弱充分 条件研究

研究背景和意义

関内外研究現状 研究目标 研究内容及拟解决的対

背景知识 Kripke 结构

CTL 的语法和语义 μ-演算

CTL 和 μ-演算遗录 论

CTL 遗忘理论 μ-演算遗忘理论

μ-減界理忘理化 遺忘理论在反应式

简介 最弱充分条件

知识更新

CTL 遗忘计算方法

忘计算 基于归结的遗忘计算力

基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验 总结与展望

总结 展望 表 3:  $R_{\text{CTL}}^{\triangleright,S}$  归结系统

$$\begin{aligned} & (\mathsf{SRES1}) \frac{P \to \mathsf{AX}(\mathsf{C} \lor I), Q \to \mathsf{AX}(D \lor \neg I)}{P \land Q \to \mathsf{AX}(C \lor D)}; & (\mathsf{SRES2}) \frac{P \to \mathsf{E}_{(ind)} \mathsf{X}(\mathsf{C} \lor I), Q \to \mathsf{AX}(D \lor \neg I)}{P \land Q \to \mathsf{E}_{(ind)} \mathsf{X}(\mathsf{C} \lor D)}; \\ & (\mathsf{SRES3}) \frac{P \to \mathsf{E}_{(ind)} \mathsf{X}(\mathsf{C} \lor I), Q \to \mathsf{E}_{(ind)} \mathsf{X}(\mathsf{D} \lor \neg I)}{P \land Q \to \mathsf{E}_{(ind)} \mathsf{X}(\mathsf{C} \lor D)}; & (\mathsf{SRES4}) \frac{\mathsf{start} \to \mathsf{C} \lor I, \mathsf{start} \to \mathsf{D} \lor \neg I}{\mathsf{start} \to \mathsf{C} \lor D}; \\ & (\mathsf{SRES5}) \frac{T \to \mathsf{C} \lor I, \mathsf{start} \to \mathsf{D} \lor \neg I}{\mathsf{start} \to \mathsf{C} \lor D}; & (\mathsf{SRES6}) \frac{T \to \mathsf{C} \lor I, Q \to \mathsf{AX}(\mathsf{D} \lor \neg I)}{Q \to \mathsf{AX}(\mathsf{C} \lor D)}; \\ & (\mathsf{SRES7}) \frac{T \to \mathsf{C} \lor I, Q \to \mathsf{E}_{(ind)} \mathsf{X}(\mathsf{D} \lor \neg I)}{Q \to \mathsf{E}_{(ind)} \mathsf{X}(\mathsf{C} \lor D)}; & (\mathsf{SRES8}) \frac{T \to \mathsf{C} \lor I, \mathsf{T} \to \mathsf{D} \lor \neg I}{T \to \mathsf{C} \lor \mathsf{D}}; \\ & (\mathsf{RW1}) \frac{\Lambda_{i=1}^n m_i \to \mathsf{AX} \bot}{T \to \mathsf{V}_{i=1}^n \neg m}; & (\mathsf{RW2}) \frac{\Lambda_{i=1}^n m_i \to \mathsf{E}_{(ind)} \mathsf{X} \bot}{T \to \mathsf{V}_{i=1}^n \neg m}; \\ & (\mathsf{ERES1}) \frac{\Lambda \to \mathsf{E}_{\mathsf{E}\mathsf{E}\mathsf{G}}I, Q \to \mathsf{A}\mathsf{F} - I}{Q \to \mathsf{A}(\neg \mathsf{A} \lor \neg I)}; & (\mathsf{ERES2}) \frac{\Lambda \to \mathsf{E}_{(ind)} \mathsf{X} \sqcup \mathsf{C}_{(ind)} \mathsf{C}_{\mathsf{I}}I, Q \to \mathsf{E}_{(ind)} \mathsf{C}_{\mathsf{I}}I, Q}{Q \to \mathsf{E}_{(ind)}(\neg \mathsf{A} \lor \neg I)}. \end{aligned}$$

其中 P 和 Q 是文字的合取,C 和 D 是文字的析取,I 是一个文字,称每条规则横线下面的公式为横线上面的公式关于文字 I 的归结结果。此外, $\Lambda = \bigvee_{i=1}^n \bigwedge_{i=1}^{m_i} P_j^i$ 、 $P_j^i$  是文字的析取,其中 1 < i < m。

# 基于归结的算法 CTL-forget——CTL 归结 UF

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论

国内外研究现状

研究目标 研究内容及拟解决的5 科学问题

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗む

CTI 涉忘理论

μ-演算遺忘理论 遺忘理论在反应式

中的应用

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方

忘计算 基于归结的遗忘计算方法

基于归结的遗忘计算人 基于归结的算法 CTL-forget 字型及字母

总结与展生

展型

参考文献

### 记号

• 令 T为  $SNF_{cr..}^g$  子句集,p 为原子命题。T 在 p 上的 $\overline{RT}$  (记为 uF(T,p)) 是集合 T 和如下集合的并集:

 $\{\alpha \mid \alpha \$  是 T 中的公式关于文字  $I \in \{p, \neg p\}$  的归结结果 $\}$ .

- $\bullet \ \operatorname{uf}(T,\emptyset) = T \perp \operatorname{uf}(T,\{\rho\} \cup V) = \operatorname{uf}(\operatorname{uf}(T,\rho),V);$
- $\bullet \ \underline{\textit{ERes}}(\phi, V) = \{\alpha \in \text{UF}(T_{\phi}, V) \mid \textit{Var}(\alpha) \cap V = \emptyset\}.$

### 命题 10

令  $\varphi$  为一个 CTL 公式,  $V \subseteq \mathcal{A}$  为原子命題集。則  $T_{\varphi} \equiv_{U} \underline{ERes}(\varphi, V)$ , 其中  $U = Var(\mathrm{UF}(T_{\varphi}, V)) - (Var(\varphi) - V)$ 。



# 基于归结的算法 CTL-forget——CTL 归结 UF

#### 至了 返忘的及应 式系统最弱充分 条件研究

#### 绪论 研究背景和意

国内外研究现状

研究内容及拟解决的: 科学问题

背景知识

Kripke 结构 CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗

CTL 遗忘理论

中的应用

最弱充分条件

CTL 遗忘计算方

CTL 遺忘计算方法

基于归结的遗忘计算; 基于归结的算法

总结与展

心珀 展塑

参考文献

# 例 30

 $\varphi = A((p \land q)U(f \lor m)) \land r, \ V = \{p,r\}, \ M \ UF(T_{\varphi}, V \cup \{x,y,z\}) \ 除了 \ T_{\varphi} \ 中的子句,$ 

1: start  $\rightarrow z$ , 2 5:  $\top \rightarrow p \lor \neg y$ , 6

 $2: \top \to \neg z \lor r,$  $6: \top \to \neg v \lor q,$ 

 $3: \top \rightarrow \neg x \lor f \lor m$ ,  $7: z \rightarrow AFx$ ,  $4: \top \to y \lor x \lor \neg z,$  $8: y \to AX(y \lor x).$ 

/:z-

 $z \rightarrow AFx$ ,  $8: y \rightarrow AFx$ 

#### 还包含如下子句:

(1) start  $\rightarrow r$ 

(3)  $\top \rightarrow \neg z \lor y \lor f \lor m$ 

(5)  $\top \rightarrow \neg z \lor x \lor p$ 

(11) start  $\rightarrow x \lor q$ 

(1,2,SRES5)

(3,4,SRES8) (4,5,SRES8)

(2) start  $\rightarrow x \lor y$ (4)  $y \rightarrow AX(f \lor m \lor y)$  (1,4,SRES5) (3,8,SRES6)

(6)  $\top \rightarrow \neg z \lor x \lor q$ (8)  $y \rightarrow AX(x \lor q)$  (4,6,SRES8) (6,8,SRES6)

(7)  $y \rightarrow AX(x \lor p)$  (5,8,SRES6) (9)  $start \rightarrow f \lor m \lor y$  (3,(2),SRES5

(3,(2),SRES5) (6,(2),SRES5) (10) start  $\rightarrow x \lor p$ (12)  $\top \rightarrow p \lor \neg z \lor f \lor m$  (5,(2), SRES5) (5,(3), SRES8)

(13)  $\top \rightarrow q \lor \neg z \lor f \lor m$ (15)  $y \rightarrow AX(q \lor f \lor m)$  (6,(3),SRES8) (6,(4),SRES6) (14)  $y \rightarrow AX(p \lor f \lor m)$ (16) start  $\rightarrow f \lor m \lor p$  (5,(4),SRES6) (5,(9),SRES5)

(17) start  $\rightarrow f \lor m \lor q$  (6,(9),SRES5)

在从  $\operatorname{uf}(T_{\varphi},V\cup\{x,y,z\})$  中移除包含 V 中元素的子句后,得到  $\underline{\mathit{ERes}}(\varphi,V)$ ,其包含如下子句:

 $\mathbf{start} \to z, \quad \mathbf{start} \to f \vee m \vee q, \quad \mathbf{start} \to x \vee y, \quad \mathbf{start} \to q \vee x, \quad \mathbf{start} \to f \vee m \vee y,$ 

 $\top \to \mathit{f} \lor \mathit{m} \lor \neg \mathit{x}, \quad \top \to \mathit{q} \lor \mathit{f} \lor \mathit{m} \lor \neg \mathit{z}, \quad \top \to \mathit{f} \lor \mathit{m} \lor \neg \mathit{z} \lor \mathit{y},$ 

 $\top \to q \lor x \lor \neg z, \quad \top \to x \lor y \lor \neg z, \quad \top \to q \lor \neg y, \quad z \to \text{Afx},$ 

 $y \to \mathrm{AX}\big(q \vee f \vee m\big), \quad y \to \mathrm{AX}\big(x \vee q\big), \quad y \to \mathrm{AX}\big(x \vee y\big), \quad y \to \mathrm{AX}\big(f \vee m \vee y\big).$ 

可以看出,尽管  $ERes(\varphi, V)$  中不包含具有索引的公式,但有的子句包含出现在  $T_{\varphi}$  中的新原子命题。

# 基于归结的算法 CTL-forget——转子句为 CTL 公式

CTL 的语法和语义

# 两个主要过程

- 消除索引:
- 移除新引入的原子命题。

#### 引理 31

如果  $j \in \mathcal{I}$ ,  $\psi_i, \varphi_i$   $(1 \le i \le n)$  为 CTL 公式, 那么:

- (i)  $\{\psi_i \to \mathbb{E}_{(\hat{I})} \times \varphi_i \mid 1 \leq i \leq n\} \equiv \{(\bigwedge_{i \in S} \psi_i) \to \mathbb{E}_{(\hat{I})} \times (\bigwedge_{i \in S} \varphi_i) \mid S \subseteq \{1, \dots, n\}\},$
- (ii)  $\{\psi_i \to \mathbb{E}_{(i)} \times \varphi_i \mid 1 \le i \le n\} \equiv_{\emptyset} \{(\bigwedge_{i \in S} \psi_i) \to \mathbb{E}_{(i)} \times \{1, \dots, n\}\},$
- (iii)  $\{(\psi_1 \to \mathrm{E}_{\langle j \rangle} \mathrm{F} \varphi_1), (\psi_2 \to \mathrm{E}_{\langle j \rangle} \mathrm{X} \varphi_2)\} \equiv_{\emptyset}$

 $(\psi_1 \to \varphi_1 \lor \mathsf{EXEF} \varphi_1) \land (\psi_2 \to \mathsf{EX} \varphi_2) \land (\psi_1 \land \psi_2 \to ((\varphi_1 \land \mathsf{EX} \varphi_2) \lor \mathsf{EX} (\varphi_2 \land \mathsf{EF} \varphi_1))).$ 



# 基于归结的算法 CTL-forget——转子句为 CTL 公式

#### 算法 5.2 RM-index( $\Sigma$ )

Input: 有限SNF<sup>g</sup><sub>CTL</sub>子句集Σ

Output: CTL公式集

foreach  $\Sigma$ 中拥有相同索引 $\langle i \rangle$ 的E-子句构成的极大子集 $\Delta$  do

if 存在索引为 $\langle i \rangle$ 的E-某时子句 $\alpha \in \Sigma$  then **foreach**  $\beta \in rei(\Delta)$  **do**  $\Sigma \leftarrow \Sigma \cup rfi(\alpha, \beta)$   $\Sigma \leftarrow \Sigma - \{\alpha\}$ 

end

 $\Sigma \leftarrow \Sigma - \Delta \cup rxi(\Delta)$ end

return Σ

#### 推论 31

如果  $\varphi$  为一个 CTL 公式、 $U = Var(T_{\varphi}) - Var(\varphi)$ ,  $V \subseteq \mathscr{A}$  为原子命题集、  $\Sigma = ERes(UF(\varphi, V \cup U), V)$ , 那么 RM-index(Σ)  $\equiv_{\emptyset} \Sigma$ .

# 引理 32 (一般化的 Ackermann 引理)

令 x 为一个原子命题、 $\Delta = \{AG(\top \rightarrow \neg x \lor C_1), ...,$ 

 $AG(T \to \neg x \lor C_n), AG(x \to B_1), \dots, AG(x \to B_m)$  为只包含一个 x 的 CTL 公式集  $(n, m \ge 1)$ 、  $\Gamma$  为 x 正出现在其中的有限个 CTL 公式集。下面式子成立:

$$\Gamma \cup \Delta \equiv_{\{x\}} \Gamma \left[ x / \bigwedge \left( \{ C_i \mid 1 \le i \le n \} \cup \{ B_i \mid 1 \le i \le m \} \right) \right].$$

$$rxi(\{\alpha_i \mid 1 \leq i \leq n\})$$
、 $rfi(\{\beta_1, \alpha_2\})$  分别表示引理 30 中 (i)、(ii)、(iii) 等号  $\equiv_*$ 

$$(* \in { \text{ 空字符串, 0}})$$
 的右边, 
$$\alpha_i = \psi_i \to \mathbf{E}_{(j)} \times \varphi_i \ (1 \le i \le n) \text{ 且}$$

$$\beta_1 = \psi_1 \to \mathbb{E}_{\langle j \rangle} \times \psi_i \ (1 \le i \le n) \ 1$$
$$\beta_1 = \psi_1 \to \mathbb{E}_{\langle j \rangle} \times \varphi_1 \ .$$

$$p_1 = \psi_1 \quad \text{if } \langle j \rangle^{\text{r}} \psi_1 \circ$$

 $rei({\alpha_i | 1 \le i \le n}),$ 

(2)

# 基于归结的算法 CTL-forget——转子句为 CTL 公式

基于题志的及应 式系统最弱充分 条件研究

绪论

国内外研究现状 研究目标 研究由容易如解决的:

研究内容及拟解决的 科学问题

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-ιστοι CTI 和 μ-油筑遗

论 CTL attachers

μ-演算遺忘理论

遊忘埋论在反应式; 中的应用

简介 最弱充分条件

CTL 遗忘计算方

基于归结的遗忘计算7 基于归结的算法 CTL-forget 字型及字

总结与展望

展塑

参考文献

## 例 31 (例 30 的延续)

首先考虑原子命题 x、 $\Delta = \{ T \to f \lor m \lor \neg x \}$  和  $\Gamma = \underline{ERes}(\varphi, V) - \Delta$ 。 $\Gamma$  中包含 x 的公式关于 x 都为正的,因此  $\Gamma[x/(f \lor m)]$  包含如下公式:

 $\mathbf{start} \to \mathbf{z}, \quad \mathbf{start} \to \mathbf{f} \vee \mathbf{m} \vee \mathbf{q}, \quad \mathbf{start} \to \mathbf{f} \vee \mathbf{m} \vee \mathbf{y},$ 

 $\top \to q \lor f \lor m \lor \neg z, \quad \top \to f \lor m \lor y \lor \neg z, \quad \top \to q \lor \neg y, \quad z \to \mathsf{AF} \big( f \lor m \big),$ 

 $y \to AX(q \lor f \lor m), \quad y \to AX(f \lor m \lor y).$ 

第二步考虑原子命题z、 $\Delta' = \{ T \rightarrow q \lor f \lor m \lor \neg z, T \rightarrow f \lor m \lor y \lor \neg z, z \rightarrow AF(f \lor m) \}$  和  $\Gamma' = \Gamma[x/(f \lor m)] - \Delta'$ ,其中 z 正出现在  $\Gamma'$  中。因此,

 $\Gamma'' = \Gamma'[z/(q \lor f \lor m) \land (f \lor m \lor y) \land AF(f \lor m)]$ 包含如下公式:

 $\mathsf{start} \to \big( \mathit{q} \lor \mathit{f} \lor \mathit{m} \big) \land \big( \mathit{f} \lor \mathit{m} \lor \mathit{y} \big) \land \mathsf{AF} \big( \mathit{f} \lor \mathit{m} \big), \quad \mathsf{start} \to \mathit{f} \lor \mathit{m} \lor \mathit{q}, \quad \mathsf{start} \to \mathit{f} \lor \mathit{m} \lor \mathit{y},$ 

 $\top \to q \lor \neg y, \quad y \to AX(q \lor f \lor m), \quad y \to AX(f \lor m \lor y).$ 

不难证明  $ERes(\phi, V) \equiv_{\{x,z\}} \Gamma''$ 。因为  $\Gamma''$  包含一个公式,其关于 y 既不是正的也不是负的。因此,这里不能对  $\Gamma''$  和 y 使用上述过程。



# 基于归结的算法 CTL-forget 及其复杂性

CTL 的语法和语义

基于归结的遗忘计算方法

展望

```
算法 5.3 CTL-forget(\varphi, V)
```

```
Input: CTL公式φ和原子命题集V
```

Output: 公式集

if  $\varphi \equiv \bot$  then return  $\bot$  : if  $V = Var(\varphi)$  then return  $\top$ ;

 $T_{\varphi} \leftarrow \text{SNF}_{\text{CTI}}^{g}(\varphi)$ ;  $\Sigma \leftarrow \text{UF}(T_{\varphi}, V \cup U), \quad \text{$\not\equiv \text{$\vdash$} U = Var(T_{\varphi}) - Var(\varphi)$;}$ 

 $\Sigma \leftarrow ERes(\Sigma, V)$ ;  $\Sigma \leftarrow RM\text{-index}(\Sigma)$ :

 $\Sigma \leftarrow \text{GAL}(\Sigma, Var(\Sigma) - Var(\varphi))$ ;

用 $\phi$ 替换Σ中的初始子句 "AG(start  $\rightarrow \phi$ )":

return  $\Sigma$ 

// 若公式不可满足,则遗忘结果为丄 // 若遗忘所有原子命题,则结果为T

// 将φ转换为SNFg 子句 // 移除包含V中元素的子句

// 从Σ移除索引 // 移除留存的新的原子命题

// 去除start

## 定理 32 (可靠性)

```
若 φ 为一个 CTL 公式、V⊂ Ϥ、Σ =CTL-forget(φ, V) 且 U = Var(Σ) – Var(φ),则:
```

- (i)  $\Sigma \equiv_{V \cup U} \varphi$ ,
- (ii) 若  $U=\emptyset$ , 则  $\Sigma \equiv F_{CTL}(\varphi, V)$ 。

#### 命题 10

给定 CTL 公式  $\varphi$  和原子命题集  $V \subseteq \mathscr{A}$ 。算法 5.3 的时间和空间复杂性为 $O((m+1)2^{4(n+n')})$ , 其中  $n = |Var(\varphi)|$ 、n' = |V| 为新引入的原子命题的个数、m 为引入的索引个数。



# 基于归结的算法 CTL-forget 及其复杂性

```
基于 题 忘 的 反 应
式 系 统 最 弱 充 分
条 件 研 究
```

#### 绪论

```
国内外研究现状
研究目标
```

研究内容及拟解决的 科学问题

背景知识

Kripke 结构 CTL 的语法和语义

μ-演算

μ-10,53. CTI ₹0

CIL 和 μ-演界巡忘;论

CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论 遺忘理论在反应:

中的应用 简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方

忘计算 基于归结的遗忘计算力

基于归结的算法 CTL-forget 实现及实现

总结与被

**糸老文献** 

# 例 32 (例 31 的延续)

容易看出 CTL-forget( $\varphi$ , {p,r}) 包含下面的公式

 $(q \lor f \lor m) \land (f \lor m \lor y) \land AF(f \lor m), \quad AG(\top \to q \lor \neg y),$ 

 $AG(y \to AX(q \lor f \lor m)), AG(y \to AX(f \lor m \lor y)).$ 

### 命题 10 (遗忘存在的子类)

给定 CTL 公式  $\varphi$ , 若  $\varphi$  满足下面约束: (1)  $\varphi$  中不包括操作符  $Pt\mathscr{T}$  (其中  $Pt\in\{A,E\}$  且  $\mathscr{T}\in\{U,G\}$ ); (2) 对于任意原子命题  $p\in V$ , 若 p 和  $\neg p$  出现在同一时序算子的范围内。那 么, $CTL-forget(\varphi,V)\equiv F_{CTL}(\varphi,V)$ 。



# 基于归结的算法 CTL-forget 实现

素于 题 忌 的 及 应 式 系统 最 弱 充 分 条件 研 究

绪论

研究育京和意义 国内外研究现状

研究目标 研究内容及拟解决的 科學问题

科学问题

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算 CTI 30 ... 22/27/28-7

CTL 和 μ-演算遗忘 论

CTL 遗忘理论

遗忘理论在反应式系

简介 最弱充分条件

CTI 请专计管方法

简介 基于模型的有界 CTI

忘计算 基于归结的遗忘计算方

总结与展生

总结

参考文献

## 系统主要模块

此系统主要包括五个模块\*:

- 转换模块 (transCTL2SNF/6):
- 归结模块 (两个过程: step\_resolution/3 和 temp\_resolution/8)
- "移除"原子命题模块(removeAtom/3)
- "移除"索引(pro6/3)
- "移除"新引入的原子命题(ackerM/3)

 $<sup>{\</sup>it ^a} https://github.com/fengrenyan/forgetting-in-CTL/tree/main/Appendix}$ 



# 基于归结的算法 CTL-forget 实验——实验 1: 计算遗忘

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论 研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的关 科学问题

Kripke 结构
CTL 的语法和语义

μ-演算 CTL 和 μ-演算遗忘 论

CTL 遗忘理论

μ-演算遗忘理论

潜言理论在反应。

简介 最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于归结的遗忘计算方法 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验

总结

参考文献

(1) 标准数据集来源于 CTL-RP: https://sourceforge.net/projects/ctlrp/

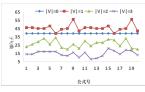
表 5.1: 计算CTL-forget( $\varphi$ ,V)所使用的CPU时间(单位: 秒(s))

φ  V	1	2	3	4
s001	0.0505	0.1053	0.2259	0.3680
s002	0.3645	1.0416	5.6372	10.0184
s003	97.5341	71.5396	190.1157	423.5793
s004	77.5086	77.4246	101.1284	118.7461
s001-3	681.2883	613.1859	1617.047	2356.949

(2) 计算 CTL-forget( $\varphi$ , V) 使用的时间和在"移除原子命题"步骤后 SNF $_{\text{CTL}}^g$  子句的个数,其中  $\varphi = \varphi_1 \land AX\varphi_2 \land EX\varphi_3$ , $\varphi_i = 12$  (i = 1, 2, 3)。



(a) 计算遗忘需要的 CUP 时间



(b) SNFg 子句的个数

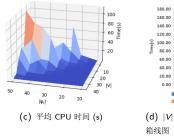


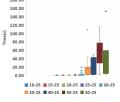
CTL 的语法和语义

### 基于归结的算法 CTL-forget 实验——实验 2: 计算 SNC

计算 q 在 V 和  $\phi \land q$  上的 SNC  $(F_{CTL}(\phi \land q, Var(\phi) - V \cup \{q\}))$ ,其中  $V \subseteq Var(\phi)$ 、  $q \in Var(\phi \land q) - V$ 。

(1) 随机 3-CNF,  $|\mathscr{A}| = 50$ , 每组 20 个公式。





(d) |V| = 25 时所使用 CPU 时间 箱线图

图 12: 计算 3-CNF 公式 SNC 的 CPU 时间

总结:基于归结的算法大多数情况下能计算出 SNC (WSC),且当需要遗忘的原子个数很少或 公式长度较小时计算效率较高。



### 基于归结的算法 CTL-forget 实验——实验 2: 计算 SNC

基于遗忘的反应 式系统最弱充分 条件研究

绪论 研究提供和音

国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的关

背景知识

Kripke 结构 CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘 论

μ-演算遺忘理论

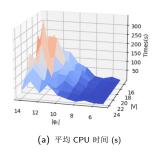
最弱充分条件

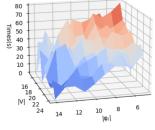
CTL 遗忘计算方法 简介

基于归结的遗忘计算方 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验

CTL-forget 实现及实验 总结与展望 总结 展望 计算 q 在 V 和  $\varphi \land q$  上的 SNC  $(F_{CTL}(\varphi \land q, Var(\varphi) - V \cup \{q\}))$ ,其中  $V \subseteq Var(\varphi)$ 、  $q \in Var(\varphi \land q) - V_\circ$ 

(2) CTL 公式  $\varphi = \varphi_1 \land AX \varphi_2 \land EX \varphi_3$ , $\varphi_i = 12$  (i = 1, 2, 3) 为  $|\mathscr{A}| = 50$  上的 3-CNF 且  $|\varphi_1| = |\varphi_2| = |\varphi_3|$ ,每组 40 个公式。





(b) 存在 SNC 的公式占比 (%)

图 12: 计算 CTLSNC 的平均时间和存在 SNC 的公式占比

总结:基于归结的算法大多数情况下能计算出 SNC (WSC),且当需要遗忘的原子个数很少或公式长度较小时计算效率较高。



### 目录

CTL 的语法和语义

展翅

- - 研究背景和意义
  - 国内外研究现状
  - 研究目标
  - 研究内容及拟解决的关键科学问题
- - Kripke 结构
  - CTL 的语法和语义
  - μ-演算
- - CTL 遗忘理论
  - μ-演算遗忘理论
- - 简介

  - 知识更新
- - 简介
  - 基于模型的有界 CTL 遗忘计算
  - 基于归结的遗忘计算方法
  - 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验
  - 总结与展望

基于短芯的区 式系统最弱充 条件研究

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状

研究目标 研究内容及拟解决的:

科学问题

背景知识

Kripke 结构

CTL 的语法和语义

μ-10(3).

CTL 和 μ-演算遺忘:

CTL 遗忘理论

μ-演算遗忘理论

遗忘埋论在反应式; 中的应用

简介 最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

简介 基于模型的有界 CTL 遗忘计算 基于归结的遗忘计算方法

总结与展生

展型

**公坐**立計

### • CTL 和 $\mu$ -演算的遗忘理论

- CTL 的遗忘理论:基本性质(表达性理论、代数属性和封闭性等)
- μ-演算的遗忘理论:基本性质、复杂性和互模拟不变性等
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
  - 计算 WSC 和 SNC: 定义、基本性质和基于遗忘的计算方法等
  - 定义知识更新: 两种知识更新定义和基本性质
- 计算 CTL 遗忘的算法
  - 基于模型的计算方法:有界互模拟、特征值、特征公式、封闭性、复杂性和管注等
  - 基于消解(resolution)的计算方法: 算法及其可靠性、遗忘存在的子类
  - 实现与实验分析

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标

元口77 究内容及拟解决的 些问题

科字问题 #F#J/m10

育家知识 Krinka 结构

CTL 的语法和语义

μ-演算 CTI - #1 ... 2020年ませ

化 CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论

中的应用

向介 最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL: 忘计算 基于归结的遗忘计算方 基于归结的遗忘计算方

基于归结的算法 CTL-forget 实现及

总结 展望

公坐守証

### • CTL 和 $\mu$ -演算的遗忘理论

- CTL 的遗忘理论:基本性质(表达性理论、代数属性和封闭性等)
- μ-演算的遗忘理论:基本性质、复杂性和互模拟不变性等
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
  - 。 计算 WSC 和 SNC; 定义、基本性质和基于遗忘的计算方法等 。 定义知识更新; 两种知识更新定义和基本性质
- 计算 CTL 遗忘的算法
  - 基于模型的计算方法:有界互模拟、特征值、特征公式、封闭性、复杂性和管注等
  - 基于消解(resolution)的计算方法: 算法及其可靠性、遗忘存在的子类
  - 实现与实验分析

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标 研究内容及知解出的

科学问题

有象知识 Krinka 结构

Kripke 结构 CTL 的语法和语义

μ-演算

论 CTI 涉忘理论

μ-演算遺忘理论

遗忘理论在反应式系中的应用

简介 最弱充分条件

CTL 遗忘计算方

简介 基于模型的有界 CTL 退忘计算 基于归结的遗忘计算方法

基于归结的遗忘计算方 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验

总结 展望

公坐立計

- CTL 和  $\mu$ -演算的遗忘理论
  - CTL 的遗忘理论:基本性质(表达性理论、代数属性和封闭性等)
  - μ-演算的遗忘理论:基本性质、复杂性和互模拟不变性等
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
  - 计算 WSC 和 SNC: 定义、基本性质和基于遗忘的计算方法等定义知识更新: 两种知识更新定义和基本性质
- 计算 CTL 遗忘的算法
  - 基于模型的计算方法:有界互模拟、特征值、特征公式、封闭性、复杂性和包法等
  - 。基于消解 (resolution) 的计算方法: 算法及其可靠性、遗忘存在的子类。 实现与实验分析

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标 研究内容及超解法的

科学问题

Kripke 结构

CTL 的语法和语》

μ-演算 CTL 和 μ-演算遗**ε** 

CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论 遗忘理论在反应式系

简介 最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

简介 非工器型的存录 CTI

基于归结的遗忘计算方 基于归结的算法 CTI forget 字现及字形

总结与展 总结

/RCM

参考文献

- CTL 和  $\mu$ -演算的遗忘理论
  - CTL 的遗忘理论:基本性质(表达性理论、代数属性和封闭性等)
  - μ-演算的遗忘理论:基本性质、复杂性和互模拟不变性等
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
  - 计算 WSC 和 SNC: 定义、基本性质和基于遗忘的计算方法等
  - 定义知识更新: 两种知识更新定义和基本性质
- 计算 CTL 遗忘的算法
  - 基于模型的计算方法:有界互模拟、特征值、特征公式、封闭性、复杂性和算法等
  - 基于消解(resolution)的计算方法: 算法及其可靠性、遗忘存在的子类
  - 实现与实验分析

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的

背景知识

Kripke 结构

μ-演算

CIL 和 μ-演界巡战 论

CTL 遗忘理论 μ-演算遗忘理论

μ-演算還忘理论 遗忘理论在反应:

简介 最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算方 基于归结的算法

总结与展 总结

**分本**字母

- CTL 和  $\mu$ -演算的遗忘理论
  - CTL 的遗忘理论:基本性质(表达性理论、代数属性和封闭性等)
  - μ-演算的遗忘理论:基本性质、复杂性和互模拟不变性等
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
  - 计算 WSC 和 SNC: 定义、基本性质和基于遗忘的计算方法等
  - 定义知识更新: 两种知识更新定义和基本性质
- 计算 CTL 遗忘的算法
  - 基于模型的计算方法:有界互模拟、特征值、特征公式、封闭性、复杂性和算法等
  - 基于消解(resolution)的计算方法:算法及其可靠性、遗忘存在的子类 常用与实验公析。
  - 实现与实验分析

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的

背景知识

Kripke 结构 CTL 的语法和语

μ-<sub>(0,3</sub>,μ CTL 和 *u*-)消算溃疡

CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论 遗忘理论在反应式

简介 最弱充分条件

CTL 遗忘计算方

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算力 基于归结的篡法

总结与展 总结 展望

参考文献

- CTL 和  $\mu$ -演算的遗忘理论
  - CTL 的遗忘理论:基本性质(表达性理论、代数属性和封闭性等)
  - μ-演算的遗忘理论:基本性质、复杂性和互模拟不变性等
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
  - 计算 WSC 和 SNC: 定义、基本性质和基于遗忘的计算方法等
  - 定义知识更新: 两种知识更新定义和基本性质
- 计算 CTL 遗忘的算法
  - 基于模型的计算方法:有界互模拟、特征值、特征公式、封闭性、复杂 性和質法等
    - 。基于消解 (resolution) 的计算方法: 算法及其可靠性、遗忘存在的子类。 实现与实验分析

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的5

背景知识 Kripke 结构

Kripke 结构 CTL 的语法和语分

CTL 和 μ-演算遗忘

CTL 遗忘理论 μ-演算遗忘理论

中的应用 简介 最弱充分条件

CTI 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 近 忘计算 基于归结的遗忘计算方; 基于归结的意法

总结与展生 总结

 松坐守計

- CTL 和  $\mu$ -演算的遗忘理论
  - CTL 的遗忘理论:基本性质(表达性理论、代数属性和封闭性等)
  - μ-演算的遗忘理论:基本性质、复杂性和互模拟不变性等
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
  - 计算 WSC 和 SNC: 定义、基本性质和基于遗忘的计算方法等
  - 定义知识更新: 两种知识更新定义和基本性质
- 计算 CTL 遗忘的算法
  - 基于模型的计算方法:有界互模拟、特征值、特征公式、封闭性、复杂性和算法等
  - 基于消解(resolution)的计算方法: 算法及其可靠性、遗忘存在的子类
  - 实现与实验分析

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的5

背景知识 Kripke 结构

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘 论
CTI 涉忘理论

CTL 速忘理论 μ-演算遺忘理论 港立理论本 反应式

行的应用 简介 最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 适忘计算 基于归结的遗忘计算方法 基于归结的遗忘计算方法 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验

总结与展生 总结 展型

<sup>辰型</sup> 参**岩**文献

- CTL 和  $\mu$ -演算的遗忘理论
  - CTL 的遗忘理论:基本性质(表达性理论、代数属性和封闭性等)
  - μ-演算的遗忘理论:基本性质、复杂性和互模拟不变性等
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
  - 计算 WSC 和 SNC: 定义、基本性质和基于遗忘的计算方法等
  - 定义知识更新: 两种知识更新定义和基本性质
- 计算 CTL 遗忘的算法
  - 基于模型的计算方法:有界互模拟、特征值、特征公式、封闭性、复杂性和算法等
  - 基于消解(resolution)的计算方法: 算法及其可靠性、遗忘存在的子类
  - 实现与实验分析

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的关

背景知识 Kripke 结构 CTL 的语法和语》

μ-演算 **CTI 和 ... 海質漂**克

论 CTL 遗忘理论

μ-演算遺忘理论 遺忘理论在反应式 中的应用

简介 最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL i 忘计算 基于归结的遗忘计算方 基于归结的算法 CTL formet 本理及金融

总结与展望 总结 展型

展望 参孝文献

- CTL 和 μ-演算的遗忘理论
  - CTL 的遗忘理论:基本性质(表达性理论、代数属性和封闭性等)
  - μ-演算的遗忘理论:基本性质、复杂性和互模拟不变性等
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
  - 计算 WSC 和 SNC: 定义、基本性质和基于遗忘的计算方法等
  - 定义知识更新: 两种知识更新定义和基本性质
- 计算 CTL 遗忘的算法
  - 基于模型的计算方法:有界互模拟、特征值、特征公式、封闭性、复杂性和算法等
  - 基于消解(resolution)的计算方法: 算法及其可靠性、遗忘存在的子类
  - 实现与实验分析

绪论

研究背景和意义 国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的关

背景知识 Kripke 结构

CTL 和 μ-演算還定 论
CTL 清宗理论

μ-演算遺忘理论 遺忘理论在反应式。

简介 最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 遗忘计算 基于归结的遗忘计算方剂 基于归结的遗忘计算方剂 基于归结的算法 CTI forget 字现及字验

总结与展望 总结 展望

展型

- CTL 和  $\mu$ -演算的遗忘理论
  - CTL 的遗忘理论:基本性质(表达性理论、代数属性和封闭性等)
  - μ-演算的遗忘理论:基本性质、复杂性和互模拟不变性等
- 遗忘理论在反应式系统的形式化验证和知识更新中的应用
  - 计算 WSC 和 SNC: 定义、基本性质和基于遗忘的计算方法等
  - 定义知识更新: 两种知识更新定义和基本性质
- 计算 CTL 遗忘的算法
  - 基于模型的计算方法:有界互模拟、特征值、特征公式、封闭性、复杂性和算法等
  - 基于消解(resolution)的计算方法: 算法及其可靠性、遗忘存在的子类
  - 实现与实验分析

CTL 的语法和语义

- CTL 和 -演算的遗忘
  - 遗忘结果总是存在的子类;
  - 遗忘相关问题复杂性分析;
  - CTL 和 μ-演算遗忘之间的关系。
- "CTL 和 μ-演算公式的遗忘结果是否分别是 CTL 和 -演算可表示" 这一问题的可判定性研究
- 遗忘与 WSC (SNC) 之间的相互关系与应用

## 参与项目及成果

作者在攻读博士学位期间参与项目及成果

- 发表了一篇 CCF B 类会议
- 两篇 SCI 论文在审
- 参加国家自然科学基金 3 项

背景知识 Kripka 结构

Kripke 结构 CTL 的语法和语义

μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘: 论

CTL 遗忘理论 μ-演算遗忘理论

中的应用 简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 忘计算 基于归结的遗忘计算》 基于归结的遗忘计算》

总结与展

总结 展塑

参考文献



Kripke 结构

CTL 的语

μ-演導

CTL 和 μ-演算

论

CTL 遗忘理论

μ-演算遗忘理论

遗忘理论在反应式

简介

最弱充分条件 知识更新

CTL 遗忘计算方法

#A

志计算 基于自结的遗存计算

基于归结的算法 CTL-forget 实现及9

总结与展

总结

公坐立部

# 敬请各位老师批评指正

谢谢!

### 绪论 研究背景和意义 国内外研究现状

国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的关 科学问题 背景知识

背景知识 Kripke 结构 CTL 的语法和语义 μ-演算

CTL 和 μ-演算遗忘理 论 CTL 遗忘理论 μ-演算遗忘理论

中的应用 简介 最弱充分条件

CTL 遗忘计算方法 简介 基于模型的有界 CTL : 忘计算 基于归结的遗忘计算方 基于归结的遗忘计算方 基于归结的算法 CTL-forget 实现及实验

基于归结的算法 CTL-forget 实现及实 总结与展望 总结 展望

- [1] Michael C. Browne, Edmund M. Clarke, and Orna Grümberg.

  "Characterizing finite Kripke structures in propositional temporal logic". In: <a href="Theoretical Computer Science">Theoretical Computer Science</a> 59.1-2 (1988), pp. 115–131.
- [2] Patrick Doherty, Witold Lukaszewicz, and Andrzej Szalas. "Computing Strongest Necessary and Weakest Sufficient Conditions of First-Order Formulas". In: <u>Proceedings of IJCAI'01</u>. Ed. by Bernhard Nebel. Morgan Kaufmann, 2001, pp. 145–154. ISBN: 1-55860-777-3.
- [3] Fangzhen Lin. "Compiling causal theories to successor state axioms and STRIPS-like systems". In: Journal of Artificial Intelligence Research 19 (2003), pp. 279–314.

[4] Fangzhen Lin. "On strongest necessary and weakest sufficient conditions". In: <u>Artificial Intelligence</u> 128.1-2 (2001), pp. 143–159. DOI: 10.1016/S0004-3702(01)00070-4. URL: https://doi.org/10.1016/S0004-3702(01)00070-4.

- [5] Fangzhen Lin and Ray Reiter. "Forget It!" In: In Proceedings of the AAAI Fall Symposium on Relevance. New Orleans, US, 1994, pp. 154–159.
- [6] Larisa Maksimova. "Temporal logics of "the next" do not have the beth property". In: <u>Journal of Applied Non-Classical Logics</u> 1 (1991), pp. 73–76.
- [7] Lan Zhang, Ullrich Hustadt, and Clare Dixon. "A resolution calculus for the branching-time temporal logic CTL". In: <u>ACM Transactions on Computational Logic (TOCL)</u> 15.1 (2014), pp. 1–38.

# **绪论**研究背景和意义

国内外研究现状 研究目标 研究内容及拟解决的关 科学问题

#### 背景知识 Kripke 结构

CTL 的语法和语义 μ-演算

CTL 和 μ-演算遗址 论

论 CTL 遗忘理论

μ-迪等遼志理论 遗忘理论在反应式系 中的应用

简介 最弱充分条件 知识更新

## CTL 遗忘计算方法

基于模型的有界 CTL 退忘计算 基于归结的遗忘计算方法 基于归结的算法

总结与展望 <sup>总结</sup>

总结 展塑 [8] Lan Zhang, Ullrich Hustadt, and Clare Dixon.
<u>First-order Resolution for CTL</u>. Tech. rep. Technical Report ULCS-08-010, Department of Computer Science, University of Liverpool, 2008.

[9] Yan Zhang and Yi Zhou. "Knowledge forgetting: Properties and applications". In: <u>Artificial Intelligence</u> 173.16-17 (2009), pp. 1525–1537.