

归结原理

课件来源：刘咏梅老师课程助教团队

目录

1. 理论课内容回顾

1.1 基本概念

1.2 命题逻辑归结算法

1.3 MGU（最一般合一）算法

1.4 一阶逻辑的归结算法

2. 实验任务

用归结算法求解逻辑推理问题（如Aipine Club问题）

1.1 基本概念

□ 以Aipine Club问题为例

- Tony, Mike, and John belong to the Alpine Club.
- Every member of the Alpine Club who is not a skier is a mountain climber.
- Mountain climbers do not like rain, and anyone who does not like snow is not a skier.
- Mike dislikes whatever Tony likes, and likes whatever Tony dislikes.
- Tony likes rain and snow.
- Is there a member of the Alpine Club who is a mountain climber but not a skier?

1.1 基本概念

□ Aipine Club问题形式化为

■ 已知条件（知识库）

□ Facts

■ $A(\text{tony})$

■ $A(\text{mike})$

■ $A(\text{john})$

■ $L(\text{tony}, \text{rain})$

■ $L(\text{tony}, \text{snow})$

□ Rules

■ $\forall x(A(x) \wedge \neg S(x)) \rightarrow C(x)$

■ $\forall x(C(x) \rightarrow \neg L(x, \text{rain}))$

■ $\forall x(\neg L(x, \text{snow}) \rightarrow \neg S(x))$

■ $\forall x(L(\text{tony}, x) \rightarrow \neg L(\text{mike}, x))$

■ $\forall x(\neg L(\text{tony}, x) \rightarrow L(\text{mike}, x))$

■ 提问

□ $\exists x(A(x) \wedge C(x) \wedge \neg S(x))$ 是否成立

1.1 基本概念

□ 相关概念

■ 常量 (constant) : 任何类型的实体

□ 俱乐部成员: tony, mike, john

□ 天气类型: rain, snow

■ 变量 (variable) : 如x, y这类未知量

■ 项 (term) : 可以理解为谓词/变量的参数项, 由递归定义

□ 变量是项 (可以看成是0元函数)

□ $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 是项, f 是 n 元函数, 则 $f(t_1, t_2, \dots, t_n)$ 也是项

Tips: 一阶逻辑中谓词不是项, 即不能作为函数/谓词的参数, 也就是不存在 $f(P(x))$ 这种复合方式, 但是二阶逻辑中是可以的

1.1 基本概念

□ 相关概念

- 谓词 (predicate) : 谓词是用来刻画个体属性或者描述个体之间关系存在性的元素, 其值为真或为假
 - 零元谓词: 退化为命题
 - 单元谓词 (unary predicate) : 只有一个参数, 表示参数具备某种属性, 如 $A(x)$ 表示 x 属于Aipine俱乐部
 - 多元谓词: 有多个参数, 表示参数之间的关系, 如 $L(x,y)$ 表示 x 和 y 具有喜欢关系, 即 x 喜欢 y

1.1 基本概念

□ 相关概念

- 事实 (fact) : 谓词中变量实例化后得到事实

- $S(\text{tony})$: tony是skier

- $L(\text{tony}, \text{rain})$: tony喜欢下雨天

- 规则 (rule) : 也叫做公式, 通过递归定义

- $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 是项, P 是 n 元谓词, 则 $P(t_1, t_2, \dots, t_n)$ 是原子公式

- t_1, t_2 是项, 那么 $t_1 = t_2$ 是原子公式

- 如果 α 和 β 是公式, 那么 $\neg\alpha, \alpha \wedge \beta, \alpha \vee \beta, \exists \alpha, \forall \alpha$ 都是公式

Tips: 由于 $(\alpha \rightarrow \beta)$ 等价于 $(\neg\alpha \vee \beta)$, $(\alpha \leftrightarrow \beta)$ 等价于 $(\alpha \rightarrow \beta) \wedge (\beta \rightarrow \alpha)$, 所以在递归定义中我们没有加入 \rightarrow 和 \leftrightarrow , 它们可以被已有符号替代

1.1 基本概念

□ 相关概念

■ 可满足性：

- 以Aipine俱乐部为例， $\exists x(A(x) \wedge C(x) \wedge \neg S(x))$ 是否成立就是在问，是否存在一组实例化（一组赋值），使得 $A(x) \wedge C(x) \wedge \neg S(x)$ 成立，这就是一个可满足性问题。对于该可满足性问题，只要能够找到一组赋值（在这里对应 $\{x\}$ 的赋值），使得 $A(x) \wedge C(x) \wedge \neg S(x)$ 成立，那么“ $A(x) \wedge C(x) \wedge \neg S(x)$ ”是可满足的

■ 逻辑蕴含和逻辑推论：

- 逻辑蕴含 $S \models \alpha$ 指对于任意变量赋值，如果 S 正确，则 α 也正确
- 逻辑推论 $S \vdash \alpha$ 指存在一条推理路径，从 S 出发，推导证明 α

1.2 命题逻辑归结算法

□ 定理:

- $S \models ()$ 当且仅当 $S \models ()$, $S \models ()$ 当且仅当 S 是不可满足的
- 通过该定理, 我们可得 $KB \models \alpha$ 当且仅当 $KB \wedge \neg\alpha$ 不可满足, 于是可以通过反证法证明 $KB \models \alpha$

□ 归结算法:

- 将 α 取否定, 加入到KB当中
- 将更新的KB转换为clausal form得到S
- 反复调用单步归结
 - 如果得到空子句, 即 $S \models ()$, 说明 $KB \wedge \neg\alpha$ 不可满足, 算法终止, 可得 $KB \models \alpha$
 - 如果一直归结直到不产生新的子句, 在这个过程中没有得到空子句, 则 $KB \models \alpha$ 不成立

1.2 命题逻辑归结算法

□ 归结算法：

■ Clausal form (便于计算机处理的形式)

- 每一个子句对应一个元组，元组每一个元素是一个原子公式/原子公式的否定，元素之间的关系是析取关系，表示只要一个原子成立，该子句成立

- 如子句 $\neg\text{child} \vee \neg\text{male} \vee \text{boy}$ 对应数据结构 $(\neg\text{child}, \neg\text{male}, \text{boy})$ ，空子句 $()$ 对应False

- 元组的集合组成子句集S，子句集中每个句子之间是合取关系，表示每一个子句都应该被满足

- 由于本次实验重点是归结算法，所以问题输入是已经转换过的clausal form，关于具体转换方式感兴趣的同学可以参考课件

■ 单步归结

- 从两个子句中分别寻找相同的原子，及其对应的原子否定
- 去掉该原子并将两个子句合为一个，加入到S子句集合中
- 例如 $(\neg\text{child}, \neg\text{female}, \text{girl})$ 和 (child) 合并为 $(\neg\text{female}, \text{girl})$

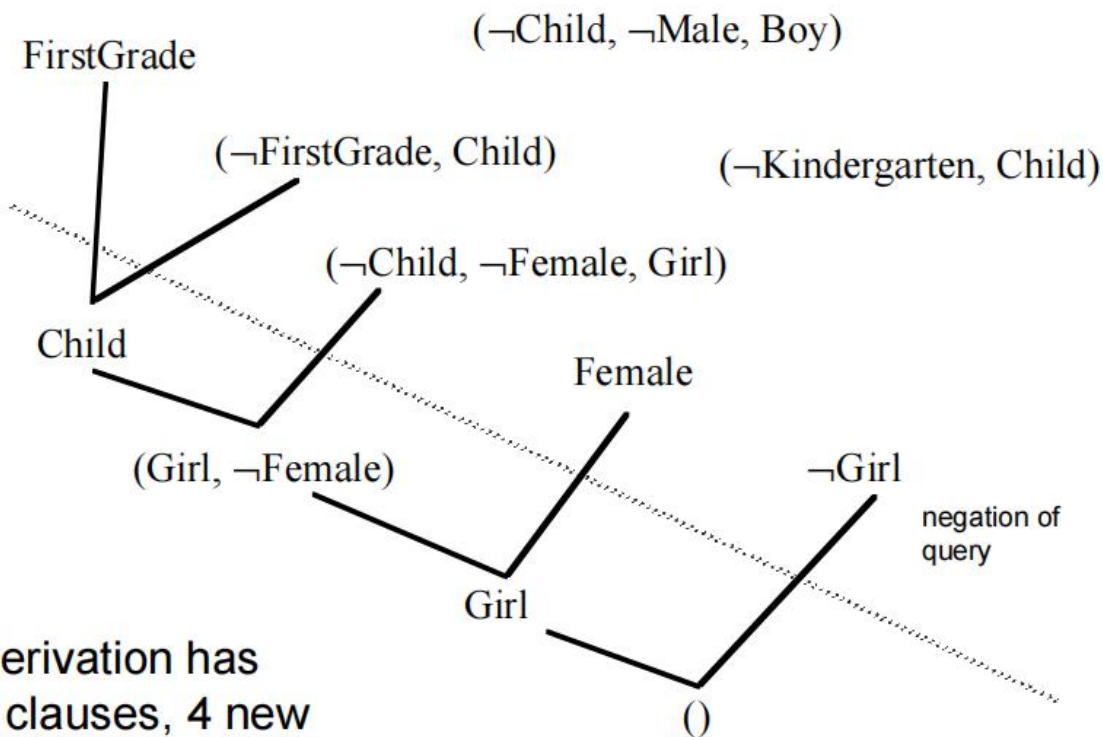
1.2 命题逻辑归结算法

□ 例子

KB

FirstGrade
FirstGrade \rightarrow Child
Child \wedge Male \rightarrow Boy
Kindergarten \rightarrow Child
Child \wedge Female \rightarrow Girl
Female

Show that $KB \models \text{Girl}$



Derivation has
9 clauses, 4 new

1.3 Most general unifier 算法

□ 最一般合一算法：

- 合一（unifier）：在谓词逻辑的归结过程中，寻找项之间合适的变量置换使表达式一致，这个过程称为合一。
 - 通过变量替换使得两个子句能够被归结（有相同的原子），所以合一也被定义为使得两个原子公式等价的一组变量替换/赋值
 - 由于一阶逻辑中存在变量，所以归结之前需要进行合一，如 $(P(\text{john}), Q(\text{fred}), R(x))$ 和 $(\neg P(y), R(\text{susan}), R(y))$ 两个子句中，我们无法找到一样的原子及其对应的否定，但是不代表它们不能够归结
 - 通过将 y 替换为 john ，我们得到了 $(P(\text{john}), Q(\text{fred}), R(x))$ 和 $(\neg P(\text{john}), R(\text{susan}), R(\text{john}))$ ，此时我们两个子句分别存在原子 $P(\text{john})$ 和它的否定 $\neg P(\text{john})$ ，可以进行归结
- 最一般合一：指使得两个原子公式等价，最简单的一组变量替换

1.3 Most general unifier算法

☐ 最一般合一算法:

- 输入：两个原子公式，它们具有相同的谓词，不同的参数项和 “ \neg ”
- 输出：一组变量替换/赋值
- 算法流程：
 - ☐ $k = 0; \sigma_0 = \{\}; S_0 = \{f, g\}$
 - ☐ 如果 S_k 中的公式等价，返回 σ_k 作为最一般合一的结果
 - 否则找出 S_k 中的不匹配项 $D_k = \{e_1, e_2\}$
 - ☐ 如果 $e_1 = V$ 是变量， $e_2 = t$ 是一个不包含变量 V 的项，将 “ $V = t$ ” 添加到赋值集合 $\sigma_{k+1} = \sigma_k \cup \{V = t\}$ ；并将 S_k 中的其它 V 变量也赋值为 t ，得到 S_{k+1} ；
 $k = k + 1$ ，转到第二步
 - 否则合一失败

Tips: 变量替换是从两个原子公式中找到的，但是最后要施加给整个子句的

1.3 Most general unifier 算法

□ 例子：

- $P(f(a), g(x))$ 和 $P(y, y)$ 无法合一
- $P(a, x, h(g(z)))$ 和 $P(z, h(y), h(y))$ 最一般合一为 $\{z=a, x=h(g(a)), y=g(a)\}$
- $P(x, x)$ 和 $P(y, f(y))$ 无法合一

1.4 一阶逻辑归结算法

□ 归结算法：

- 将 α 取否定，加入到KB当中
- 将更新的KB转换为clausal form得到S
- 反复调用单步归结
 - 如果得到空子句，即 $S|-()$ ，说明 $KB \wedge \neg\alpha$ 不可满足，算法终止，可得 $KB \models \alpha$
 - 如果一直归结直到不产生新的子句，在这个过程中没有得到空子句，则 $KB \models \alpha$ 不成立
- 单步归结
 - 使用MGU算法从两个子句中得到相同的原子，及其对应的原子否定
 - 去掉该原子并将两个子句合为一个，加入到S子句集合中
 - 例如 $(\neg\text{Student}(x), \text{HardWorker}(x))$ 和 $(\text{HardWorker}(\text{sue}))$ 合并为 $(\neg\text{Student}(\text{sue}))$

2. 实验任务

周次	课上	课下	重要时间节点
1	Python程序设计基础 I	实验1-1	
2	Python程序设计基础 II	实验1-2	
3	归结推理	实验2-1	实验1提交
4	知识图谱	实验2-2	
5	Prolog简介	实验2-3	
6	盲目搜索	实验3-1	实验2提交
7	启发式搜索	实验3-2	
8	博弈树搜索	实验4-1	实验3提交
9	高级搜索算法	实验4-2	
10	/		

这次板块有三节实验课，每个专题都有一个实验，大家三选一就行。

PS：Prolog由于内容未定，所以大家可以选从归结推理和知识图谱这两次实验课中选择完成一门实验。

2. 实验任务

□ 编写程序，实现一阶逻辑归结算法，并用于求解给出的三个逻辑推理问题，要求输出按照如下格式：

1. $(P(x), Q(g(x)))$

2. $(R(a), Q(z), \neg P(a))$

3. $R[1a, 2c]\{X=a\} (Q(g(a)), R(a), Q(z))$

... ..

“R”表示归结步骤.

“1a”表示第一个子句(1-th)中的第一个 (a-th)个原子公式，即 $P(x)$.

“2c”表示第二个子句(1-th)中的第三个 (c-th)个原子公式，即 $\neg P(a)$.

“1a”和“2c”是冲突的，所以应用最小合一 $\{X = a\}$.

2. 实验任务

□ Aipine Club

- $A(\text{tony})$
- $A(\text{mike})$
- $A(\text{john})$
- $L(\text{tony}, \text{rain})$
- $L(\text{tony}, \text{snow})$
- $(\neg A(x), S(x), C(x))$
- $(\neg C(y), \neg L(y, \text{rain}))$
- $(L(z, \text{snow}), \neg S(z))$
- $(\neg L(\text{tony}, u), \neg L(\text{mike}, u))$
- $(L(\text{tony}, v), L(\text{mike}, v))$
- $(\neg A(w), \neg C(w), S(w))$

```
[sysu_hpcedu_302@cpn238 ~/scc22/lsr/mp_linpack/resolution]$ python main.py
11
A(tony)
A(mike)
A(john)
L(tony, rain)
L(tony, snow)
( $\neg A(x)$ ,  $S(x)$ ,  $C(x)$ )
( $\neg C(y)$ ,  $\neg L(y, \text{rain})$ )
( $L(z, \text{snow})$ ,  $\neg S(z)$ )
( $\neg L(\text{tony}, u)$ ,  $\neg L(\text{mike}, u)$ )
( $L(\text{tony}, v)$ ,  $L(\text{mike}, v)$ )
( $\neg A(w)$ ,  $\neg C(w)$ ,  $S(w)$ )
R[2,11a](w=mike) =  $\neg C(\text{mike}), S(\text{mike})$ 
R[2,6a](x=mike) =  $S(\text{mike}), C(\text{mike})$ 
R[5,9a](u=snow) =  $\neg L(\text{mike}, \text{snow})$ 
R[12b,13a] =  $S(\text{mike})$ 
R[8a,14](z=mike) =  $\neg S(\text{mike})$ 
R[15,16] = []
```

2. 实验任务

□ Graduate Student

- GradStudent(sue)
- $(\neg \text{GradStudent}(x), \text{Student}(x))$
- $(\neg \text{Student}(x), \text{HardWorker}(x))$
- $\neg \text{HardWorker}(\text{sue})$

```
[sysu_hpcedu_302@cpn238 ~/scc22/lsr/mp_linpack/resolution]$ python main.py
4
GradStudent(sue)
( $\neg$ GradStudent(x), Student(x))
( $\neg$ Student(x), HardWorker(x))
 $\neg$ HardWorker(sue)
R[3b,4](x=sue) =  $\neg$ Student(sue)
R[1,2a](x=sue) = Student(sue)
R[5,6] = []
```

2. 实验任务

□ Block World

- $\text{On}(\text{aa}, \text{bb})$
- $\text{On}(\text{bb}, \text{cc})$
- $\text{Green}(\text{aa})$
- $\neg \text{Green}(\text{cc})$
- $(\neg \text{On}(x, y), \neg \text{Green}(x), \text{Green}(y))$

```
[sysu_hpcedu_302@cpn238 ~/scc22/lsr/mp_linpack/resolution]$ python main.py
5
On(aa,bb)
On(bb,cc)
Green(aa)
¬Green(cc)
(¬On(x,y), ¬Green(x), Green(y))
R[4,5c](y=cc) = ¬On(x,cc),¬Green(x)
R[3,5b](x=aa) = ¬On(aa,y),Green(y)
R[2,6a](x=bb) = ¬Green(bb)
R[1,7a](y=bb) = Green(bb)
R[8,9] = []
```

报告提交要求

- 提交到课程网站（超算习堂）中对应的课程作业
- 实验截止日期：2022年3月23日23:00
- 提交格式：提交一个命名为“CS/ICS_学号_姓名拼音.zip”的压缩包，压缩文件下包含：
 - 实验报告是pdf格式，命名为：学号_姓名拼音.pdf，“学号_姓名拼音” 样例：CS/ICS_20*****_wangxiaoming；
 - 计科同学写CS、信计同学写ICS
 - code文件夹：存放实验代码，一般有多个代码文件的话需要有readme

实验课要求补充

- 迟交：降一档，最多延迟一周
- 被抽中验收但未参与：降一档
- 后续课程中补验收通过：降半档

- 实验1请尽快补交，考虑到是第一次实验，会酌情减少扣分，迟交是扣分，不交是0分，每个实验在成绩中的占比都比较大，所以要想顺利通过课程，请尽快补交。

- 超算习堂有迟交判定功能，所以请不要压ddl做实验提交。

- 如果在ddl前提交了实验，但后续想继续完善实验，可以将完善后的版本发到助教邮箱，助教将结合两个版本综合评定成绩
 - 助教邮箱：linzhch26@mail2.sysu.edu.cn、leizhq5@mail2.sysu.edu.cn