

# 依赖公理约简的经典规划方法

吕 帅<sup>1,2,3</sup>, 刘 磊<sup>1</sup>, 石 莲<sup>1,2</sup>, 魏 唯<sup>1,2</sup>, 杨 超<sup>1</sup>

(1. 吉林大学计算机科学与技术学院, 吉林长春 130012; 2. 吉林大学符号计算与知识工程教育部重点实验室, 吉林长春 130012;  
3. 吉林大学数学学院, 吉林长春 130012)

**摘 要:** 基于可满足性的规划方法通过将经典规划问题转换为一系列可满足性问题进行求解. 几乎所有基于可满足性的规划编码都存在着大量的重叠公理和冗余公理, 直接决定了编码理论的编码大小与求解难度. 通过分析基于 Graphplan 的编码方式, 分别提出了重叠公理的判定策略和冗余公理的删除策略. 在 SATPLAN2006 规划系统中实现相应的编码方式并与原系统进行比较, 实验结果表明: 该约简方法能够在不降低规划性能的前提下有效地压缩转换理论的编码大小. 通过分析基于状态的编码方式, 提出了重叠公理的判定策略. 重叠公理与冗余公理的约简容易实现, 且并未改变知识库的结构模式, 为进一步提高规划系统处理更大规模问题的能力提供了可能.

**关键词:** 智能规划; 基于可满足性的规划; 命题逻辑; 公理约简; 编码

**中图分类号:** TP181 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 02-0322-07

## Classical Planning Methods Based on Axioms Reduction

LÜ Shuai<sup>1,2,3</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>, SHI Lian<sup>1,2</sup>, WEI Wei<sup>1,2</sup>, YANG Chao<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;  
2. Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;  
3. College of Mathematics, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract:** Planning as satisfiability is a universal planning framework, which translates the classical planning problem to a series of satisfiability problems, and then solves them using different kinds of excellent SAT deciders. Almost all the existing propositional encoding methods based on planning as satisfiability include a mass of overlapped axioms and redundant axioms, which have a serious influence upon the magnitude of the corresponding encoding theories and the performance of corresponding planners. In this paper, by considering overlapped axioms via analyzing the Graphplan-based encoding, which are necessary but duplicate in the final encodings, we propose a deciding strategy to reduce them. By considering redundant axioms, which are useless in the final encodings, it proposes a deleting strategy to reduce them. The soundness and completeness of proposed strategies are justified. By implementing this reduction and comparing with SATPLAN2006 planner, the experimental results demonstrate that the above strategies can effectively reduce the magnitude of objective encodings without degrading the planning efficiency. Furthermore, a deciding strategy of overlapped axioms via analyzing the state-based encoding is proposed and its soundness and completeness are also justified. The above reduction strategies can also make it possible to improve the potential power of handling larger scale problems, easier to remove redundant axioms, rather than reshaping the whole knowledge base.

**Key words:** intelligent planning; planning as satisfiability; propositional logic; axiom reduction; encoding

## 1 引言

智能规划是人工智能研究的一个重要领域, 其在航空航天, 机器人控制, 后勤调度等领域的广泛应用展现了其巨大的应用前景<sup>[1]</sup>.

1992年, Kautz等人首次提出了基于可满足性的规划方法, 通过将规划问题直接转换为一系列命题逻辑编码并调用 SAT 求解器予以判定来求解原规划问题<sup>[2]</sup>. 该方法能够灵活添加对操作和状态变量的约束, 使其能够

得到满足用户特定需要的规划解.

1996年至今, Kautz等人陆续提出了基于 Graphplan 的编码和基于状态的编码等几种新的编码方式, 设计了 SATPLAN 系列规划系统, 其中, SATPLAN2004 和 SATPLAN2006 分别于 2004 和 2006 年获得了国际规划竞赛 (International Planning Competition, IPC) 最优规划域的冠军, 优势明显<sup>[3,4]</sup>.

SATPLAN 系列规划系统的成功表明: 对于最优规划域, 基于可满足性的规划方法处于绝对优势, 并且在规

划问题的逻辑表示,编码方式和求解能力上,基于可满足性的规划方法还有很大的发展空间。

国内,规划问题的编码方式研究还处于探索阶段,但公理的推演策略在智能规划中的利用已经为研究者所考虑.中山大学姜云飞教授的研究组对此做了许多深入有意义的研究.吴向军等人利用公理中的谓词关系等隐含信息提取相关的领域知识,并将该领域知识提取策略用于其设计的与领域无关的 StepByStep 规划系统中,取得了很好的结果<sup>[5,6]</sup>.该方法通过公理的分析,得到知识树和规划树结构,间接地利用了公理编码.蒋志华等人提出了对规则集的动态基化方法,很好地处理了带派生谓词的派生规划问题<sup>[7]</sup>,其对规则集的操作可以看成是公理的推演和约简过程.吉林大学的智能规划与自动推理研究组提出了基于自动推理技术的规划框架,详细描述了规划过程中不同类型的逻辑编码方式以及推理技术的作用,并利用模态逻辑和描述逻辑对非经典规划予以编码,取得了初步成果<sup>[8~10]</sup>.

编码方式的优劣不仅要考虑编码的求解效率,还要考虑编码规模.对于大规模规划问题,尤其是偏向于实际应用的规划调度问题,考虑全部公理是不现实的,系统资源决定了公理约简的必要性,在保证有效完全性的前提下,应该删除尽可能多的无用公理。

现有规划编码都或多或少存在着大量的重叠公理和冗余公理.重叠公理是多个公理组合在模型选择过程中具有相同的作用,删除其中的某些不会改变编码的可满足性和有效模型个数;而冗余公理是与模型无本质关系的公理,在原编码中删除冗余公理得到的约简编码的模型个数是原编码的部分模型.这些无用公理的存在,对各种推理方法的效率有着不同程度的影响.约简上述公理,并非将编码最小化,可以在易于实现的基础上,从本质上压缩编码规模,降低规划问题求解难度<sup>[11,12]</sup>.

本文主要考虑基于 Graphplan 的编码和基于状态的编码中重叠公理的判定策略和冗余公理的删除策略.通过这些约简策略的处理,使得目标编码的规模得到有效地压缩.重叠公理与冗余公理的约简也为进一步提高规划系统的处理能力提供了可能。

## 2 相关概念

智能规划的主要任务是在给定初始状态,可执行动作和目标条件的情况下,设计相应的规划系统,使得当前初始状态通过执行合适的动作序列到达满足目标条件的状态.研究者们对智能规划问题做了一定的限制,称为经典规划问题。

**定义 1**(经典规划问题)<sup>[8]</sup>. 一个经典规划问题  $P$  是

一个 3 元组  $(I, O, G)$ , 其中,  $I$  为初始状态,  $O$  为操作集,  $G$  为目标条件. 这里, 每个操作  $o \in O$  的前提和效果是确定的。

**例 1**(经典 Logistics 域问题). 包裹  $A$  和  $B$  在  $L$  地, 火箭  $R$  在  $L$  地, 通过装载  $load$ , 移动  $move$  和卸载  $unload$  等 3 个操作的有效执行, 使得包裹  $A$  和  $B$  被移动到  $P$  地.  $load$  操作定义如下:

$load(x, y, z)$

$precondition: at(x, z), at(y, z)$

$effects: in(x, y), \neg at(x, z)$

上述描述表示: 执行  $load(x, y, z)$  操作, 需要满足包裹  $x$  和火箭  $y$  都在  $z$  地等前提, 导致包裹  $x$  不在  $z$  地, 而在火箭  $y$  中等效果。

**定义 2**(经典规划)<sup>[8]</sup>. 经典规划问题  $P$  的一个经典规划是从初始状态  $I$  到达某个目标状态  $g \in G$  的动作序列(动作是操作的完全实例化)。

例 1 所描述的规划问题的有效动作序列为: 将包裹  $A$  和  $B$  分别执行动作  $load(A, R, L)$  和  $load(B, R, L)$  将其装载到火箭  $R$  中; 执行动作  $move(R, L, P)$  移动火箭到  $P$  地; 执行动作  $unload(A, R, P)$  和  $unload(B, R, P)$  使得包裹卸载到  $P$  地. 这 5 个动作就是例 1 的经典规划, 也称为规划解。

## 3 基于 Graphplan 的编码中重叠公理与冗余公理的约简

### 3.1 基于 Graphplan 的编码

基于 Graphplan 的编码首先构造  $N$  层的规划图, 从目标层开始反向考虑, 通过构造目标条件公理, 后向链公理, 前提公理, 互斥动作公理以及初始状态公理等形成一个公理集, 将其自动地转换为 CNF 范式的子句集, 并调用高效的 SAT 求解器进行判定. 如果不可满足, 则重新扩展  $N+1$  层的规划图, 其对应的有效模型即对应了该规划问题的规划解。

基于 Graphplan 的编码, 每次产生的是对应于  $N$  层规划图的编码由如下公理组成: (1) 初始状态公理与目标条件公理; (2) 每个事实蕴涵其支持动作的析取(后向链公理); (3) 前提公理; (4) 动作互斥公理。

### 3.2 重叠公理的判定

在基于 Graphplan 的编码方式中, 仅表示实际动作的互斥关系是不够的, 不能够避免互斥命题的同时成立. 这里的实际动作指经过操作实例化的动作, 而不包括规划图中引入的  $noop$  动作。

**引理 1** (实际动作互斥公理的不完全性). 仅添加实际动作的互斥公理, 不能有效删除依赖于命题互斥公理的失效模型。

**证明:** 给出一个反例, 证明该反例对于仅添加实际

动作的互斥公理的编码方式是有效的,但实际上是失效模型,可以通过添加必要的命题互斥公理予以删除.

例 1 对应一个 3 层规划图,有效规划解为  $\{\{load(A, R, L), load(B, R, L)\}, \{move(R, L, P)\}, \{unload(A, R, P), unload(B, R, P)\}\}$ . 第 3 个动作层的动作互斥关系包含 43 个互斥对.

假定仅包含实际动作的互斥关系,经过演绎得到:动作  $move(R, L, P)$  的添加效果  $at(R, P)$  和动作  $load(A, R, L)$  的前提  $at(R, L)$  同时成立,执行动作序列可以为  $\{\{move(R, L, P)\}, \{load(A, R, L), load(B, R, L)\}, \{unload(A, R, P), unload(B, R, P)\}\}$ ,表示先移动火箭再装载物体.实际动作的互斥关系无法判定上述两个命题的互斥关系,该模型被认为是有效的.实际上,  $load(A, R, L)$  的前提  $at(R, L)$  显然在第 2 个时间步不成立,这个动作序列不应该对应任何有效模型.综上,引理成立.

部分命题互斥公理通过  $noop$  动作之间以及  $noop$  动作与实际动作之间的互斥关系体现的.上述互斥公理都是二元 Horn 子句,利用得当将显著提高系统的约束传播效率.

在规划编码中,编码规模严重影响规划系统能够处理的问题复杂程度.在生成大量互斥关系前,就应该有选择地加以取舍.对于多个公理刻画同一事实的重叠公理,选择必要的公理予以刻画;对于与判定无关的冗余公理,应该直接予以删除,尽可能地压缩目标编码的大小,从本质上使得相同的规划系统能够处理更大规模的规划问题.

按照动作之间的互斥关系分类如下:

(1) 两个不同命题的  $noop$  动作之间的互斥关系可以通过命题互斥关系得到.  $noop$  动作之间的互斥关系与对应命题的互斥关系是完全一致的,二者只需要保留其一即可;

(2) 对于实际动作与  $noop$  动作,无法通过命题的互斥关系予以刻画;

(3) 对于实际动作之间的互斥不再探讨.

**定理 1** (动作互斥公理部分删除的可靠性与完全性). 选择  $noop$  动作之间的动作互斥公理和选择  $noop$  对应命题之间的命题互斥公理是等价的,  $noop$  动作之间的动作互斥公理是动作互斥公理的最大可删除集.

**证明:** (1) 根据规划图的构造规则,在生成下一命题层时,在命题层中不断地添加新产生命题,而并不删除已经存在的命题,则对于每个命题  $(S, i)$ ,在相邻的下一动作层中必然包含了一个  $noop$  动作  $noop(S, i)$ ,该命题  $(S, i)$  是产生的  $noop(S, i)$  动作的唯一前提.而  $noop(S, i)$  动作既作为该命题  $(S, i)$  触发的动作,也是下一命题层中  $(S, i+1)$  命题的支持动作.这样,如果两

个命题互斥,则其触发的  $noop$  动作之间也必然互斥(满足规划图的竞争需求条件).反过来,如果两个  $noop$  动作互斥,由于其没有任何删除效果,则其前提必然存在互斥关系,则二者的唯一前提彼此互斥.则  $noop$  动作之间的动作互斥公理和  $noop$  对应命题之间的命题互斥公理是等价的.

(2) 对于(1)中的等价公理,选择命题互斥公理,删除  $noop$  动作之间的动作互斥公理.

假定还存在非  $noop$  动作之间的动作互斥公理可以删除,则至少涉及一个实际的动作  $O$ ,如果另一个动作为一个实际动作,则二者之间的互斥关系不可以删除,因为其对对应了其它不同命题之间的互斥关系.如果另一个动作对应于一个  $noop$  动作,则根据引理 1,删除了这个互斥公理使得判定结果不再可靠.故  $noop$  动作之间的动作互斥公理为最大可删除集.  $\square$

定理 1 保证:将  $noop$  动作之间的互斥公理删除,虽然得到的 SAT 问题将与原来的规划图所对应的问题不再是同一问题,但其对应于规划解的有效模型是等价的.虽然没有对  $noop$  动作之间的互斥公理进行编码,但用 SAT 求解器进行推理时,会通过约束限制和分枝判定等使得可满足的规划编码在更短时间内得以有效判定,不可满足的规划编码也将在稍长的时间内得以有效判定,不会导致有些推理进行时所需要的信息不存在而产生推理线索中断.

命题互斥公理不足以刻画动作之间的互斥关系,主要原因是在基于 Graphplan 的编码中,效应公理被后向链公理所取代,而后者仅仅刻画了命题需要一个动作的支持,并没有考虑动作之间的互斥关系,以及支持该命题的动作对其它命题的删除作用.

基于定理 1 和上面的分析可得:  $noop$  动作互斥公理将予以删除,而选择相应的命题互斥公理予以替代,可以从本质上压缩动作互斥公理的个数和相应的命题编码规模.

### 3.3 冗余公理的删除

在基于 Graphplan 的编码中,不仅存在上述重叠公理,还有许多与判定无关的冗余动态公理.

对于规划图的最后一个命题层中,除了要求目标条件对应的命题之间没有互斥关系外,其它非目标条件的命题与目标条件的命题之间是无关的:既不需要考虑彼此之间的互斥关系,也不需要考虑非目标条件的命题之间的互斥关系.在实际的约束求解过程中,也印证了这一点,由于在其对应的后向链公理中,这些命题层都为前件,可以通过指派其真值为假而不予以考虑.

**定理 2** (冗余公理删除的可靠性与完全性). 对于标准规划图,根据拓扑结构,删除无出度的非目标结点

及其所有入边得到的化简后的规划图,其诱导的编码是可靠完全的.

**证明:**从最初规划的规划图出发,每次删除一个结点,可能是命题结点,也可能是动作结点.针对删除的两类结点分别予以考虑.

(1)预删除结点为命题结点 $(P, i)$ :

如果命题结点 $(P, i)$ 可以被删除,则其出度为 0,则在规划图的第  $i$  个动作层,不存在以其为前提的动作.

(a)与其相关的前提公理形如 $(O, i) \rightarrow (P, i) \wedge (P_1, i) \wedge \cdots \wedge (P_n, i)$ .其对应的动作结点 $(O, i)$ 未生成,或者已被删除,该公理也相应的被删除.类似地,相关的动作 $(noop(P), i)$ 未生成,或者已被删除.则当前编码中不存在涉及命题 $(P, i)$ 的前提公理,保证了其与任何动作 $(O, i)$ 不可能在同一公理中出现.

(b)与其对应的后向链公理形如 $(P, i) \rightarrow (O_1, i - 1) \vee \cdots \vee (O_n, i - 1)$ .可以通过指派其真值为假,使得以其为前件的后向链公理失效.

(c)与其对应的命题互斥公理形如 $\neg(P, i) \vee \neg(P', i)$ .如果存在,则其一定以负文字出现.同样,在其真值指派为假的情况下,使得任何涉及其的命题互斥公理失效.

除此之外,不存在任何与其相关的公理,则原编码的可满足性与经过部分指派(指派 $(P, i)$ 为假)的约简编码的可满足性是等价的.该结论类似于纯文字规则,不再赘述.

(2)预删除结点为动作结点 $(O, i)$ :

如果动作结点 $(O, i)$ 可以被删除,则其出度为 0,则在规划图的第  $i + 1$  个命题层,不存在以其为支持动作的命题.

(a)与其相关的后向链公理形如 $(P, i + 1) \rightarrow (O, i) \vee (O_1, i) \vee \cdots \vee (O_n, i)$ .其对应的命题结点 $(P, i + 1)$ 已被删除,该公理也相应的被删除.则当前编码中不存在涉及动作 $(O, i)$ 的后向链公理,保证了其与任何命题 $(P, i + 1)$ 都不可能在同一公理中出现.

(b)与其相关的前提公理形如 $(O, i) \rightarrow (P_1, i) \wedge \cdots \wedge (P_n, i)$ .可以通过指派其真值为假,使得以其为前件的前提公理失效.

(c)与其对应的动作互斥公理形如 $\neg(O, i) \vee \neg(O', i)$ .如果存在,则其一定以负文字出现.同样,在其真值指派为假的情况下,使得任何涉及其的动作互斥公理失效.

除此之外,不存在任何与其相关的公理,则原编码的可满足性与经过部分指派(指派 $(O, i)$ 为假)的约简编码的可满足性是等价的.该结论类似于纯文字规则,不再赘述.

综上所述,删除一个结点后的规划图与原规划图

从公理集(或子句集)角度上是等价的.这样依次删除冗余结点,也就对应的删除了与目标无关的冗余公理.最后得到的即为所求规划图和约简后的编码.  $\square$

显然,约简后的规划图中的边(对应于若干前提公理与后向链公理)远远少于原规划图中的边.由引理 1 中反例的原规划图转换得到的前提公理和后向链公理分别为 33 和 23 个,转换为 CNF 范式的子句数为 48 和 23 个,命题互斥公理 18 个,动作互斥公理 76 个;而对应的化简后的规划图得到的前提公理和后向链公理分别为 15 和 12 个,转换为 CNF 范式的子句数为 23 和 12 个,命题互斥公理 6 个,动作互斥公理 15 个,个数明显减少.

在此基础上,可以进一步考虑约简动作和命题的互斥公理,或者进行部分指派,这样可能得到更为简化的不完全的编码.鉴于许多问题求解算法都是在算法执行过程中嵌入不完全的简化问题的求解策略,以提高问题的平均求解效率.在基于 Graphplan 的编码方法中,也可以考虑在编码过程中嵌入不完全的编码以更快地找到有效模型,有效地提高规划方法求解效率.

3.4 实验结果

通过在 SATPLAN2006 上实现上述约简后的编码方式,实现了规划系统 PMA-SP,为了测试编码的性能,分别对 IPC 中选用的 Logistics 和 Blocks World 的 STRIPS 问题域测试,比较改进的 PMA-SP 相对于 SATPLAN2006 的规划性能.

实验条件如下:CPU P4 - 2.8GHz,内存 1G,操作系统 linux ubuntu,编程环境 linux GCC.

规划系统 PMA-SP 与 SATPLAN2006 的对比实验结果如表 1 和表 2 所示.其中,Clause 表示转换得到的编码理论的子句数,Time 表示该规划问题的求解时间,“—”表示在 1800 秒内无法得到最优规划解.

表 1 Logistics 域的实验结果

Prob	Graphplan-based Encoding		PMA-based Encoding	
	Clause	Time(s)	Clause	Time(s)
01	15916	0.14	6070	0.36
02	47668	1.27	10120	0.39
03	49634	1.65	14252	0.38
04	351271	57.24	—	—
05	259788	3.46	47701	0.97
06	—	—	—	—
07	328743	8.74	59420	2.57
08	331536	5.06	57711	1.40
09	375120	68.79	64743	90.75
10	240129	9.43	45757	4.89
11	409807	243.3	70017	315.33
12	—	—	—	—
13	247739	8.25	49121	14.09
14	310863	78.75	59795	35.43

实验结果表明:在不增减编码中变元数的情况下,有效降低了子句数,压缩了编码规模,相应的求解效率也有一定程度的提高.对于 Blocks World 问题域的改进程度趋于稳定,编码规模压缩了将近 40%,求解效率提高了 2 倍,而对于 Logistics 问题域,大部分问题的编码规模压缩了 80% 以上,求解效率上与原编码互有好坏.

表 2 Blocks World 域的实验结果

Prob	Graphplan-based Encoding		PMA-based Encoding	
	Clause	Time(s)	Clause	Time(s)
01	45594	1.12	25896	0.56
02	147904	7.82	84085	3.32
03	2779	0.03	1708	0.05
04	76	0.01	62	0.01
05	1896	0.06	1156	0.03
06	6184	0.13	3548	0.09
07	4881	0.07	2822	0.05
08	17334	0.39	9916	0.22
09	38780	1.13	21904	0.56
10	114314	7.31	66633	3.71
11	382016	50.12	228714	24.27

约简后的编码表现出了明显的优势,是一种值得采用的编码方式.在约简后的编码方式下,删除了大量的无用或冗余子句,使得约简后的编码的编码规模明显压缩,为大规模问题的处理奠定了基础.同时,其仅删除了部分子句,而没有改变子句结构,也使得其它基于规划图的启发式提取策略可以不加修改的得以实施,为其它基于规划图的启发式搜索规划系统的性能提高提供了可能.

## 4 基于状态的编码中重叠公理的判定

基于状态的编码通过用公理表示操作,初始状态和目标条件,并添加描述事实在状态之间如何改变真值的状态转移公理,构造相应的子句集,调用高效的 SAT 求解器进行判定.如果不可满足,则重新构造,直到子句集可满足,其对应的有效模型即对应了原规划问题的规划解.

基于状态的编码,依赖状态之间的转移关系构造相应的编码理论,其包含如下公理(1)初始状态公理与目标条件公理;(2)状态公理;(3)状态转移公理;(4)前提公理,效应公理和动作互斥公理.

在基于状态的编码中,动作互斥公理仅表示实际动作之间的互斥,不可能涉及 *noop* 动作,这也是与基于 Graphplan 的编码的不同之处.前提公理和效应公理已经保证了状态之间的转换有章可循,明确要求动作的执行需要一系列命题的配合,提供必要的前提,确实发生了必要的效果等.动作的互斥公理避免了动作之间的涉及前提与效果的冲突.

由定理 1 得出结论:如果状态公理能够避免互斥命

题的同时选择,也就避免了动作之间仅由前提引起的冲突;如果状态公理能够避免任意实际动作与其它互斥动作的并发执行,这就保证了其对应编码删除了全部失效模型,则其编码是可靠的.由于生成的每个公理都从规划问题的域定义和问题描述中得到,故其编码得到的模型一定是完全的.

对于动作互斥进行分析,由命题互斥引发的动作互斥仅有如下 5 种情形:

**情形 1** 前提冲突:如果动作  $O_1$  与  $O_2$  的前提互斥,则动作  $O_1$  与  $O_2$  互斥.由于命题的互斥关系可能由固有的状态公理刻画,也可能不为任何状态公理刻画,所以动作的互斥关系需要考虑如何刻画.

**情形 2** 添加效果冲突:如果动作  $O_1$  的添加效果与  $O_2$  的添加效果互斥,则动作  $O_1$  与  $O_2$  互斥.在基于 Graphplan 的编码中不需要考虑这种情况,是因为在效果互斥的前提下,相应动作不可能同时执行.而在基于状态的编码中,除了二者的互斥关系可能在状态公理中进行刻画的情况之外,还需要考虑其不被状态公理刻画的可能.

**情形 3** 线性化冲突(1)如果动作  $O_1$  删除了动作  $O_2$  执行的前提,则动作  $O_1$  与  $O_2$  互斥;(2)如果动作  $O_1$  添加了与动作  $O_2$  执行的前提冲突的效果,则动作  $O_1$  与  $O_2$  互斥.前者可以通过对域定义的分析明确刻画,后者则需要考虑命题互斥的其它因素.

**情形 4** 添加效果与删除效果冲突:如果动作  $O_1$  删除了动作  $O_2$  执行的添加效果,则  $O_1$  与  $O_2$  互斥.这种动作互斥公理也可以通过对域定义的分析明确刻画.

**情形 5** 删除效果违背客观事实:如果动作  $O_1$  的删除效果与  $O_2$  的删除效果互斥,则动作  $O_1$  与  $O_2$  不一定互斥.如果其互斥,则一定是删除了某个物体的所有可能的状态.但此时,其中的每个动作必然在删除一个状态  $S$  的同时添加另一个状态,以对现实进行精确的刻画,与新状态动作互斥而不能并发执行.该情形完全可以等同于情形 4 一样进行处理.

**例 2** 假定收集动作  $collect(r, x)$ , 存在 2 个负责收集工作的智能体:在  $A$  地的  $R_1$  和在  $B$  地的  $R_2$ . 假定物体  $O$  只有 3 个状态(在  $A$  或  $B$  地和被收集好),则动作可以描述为  $collect(r, x): at(r, x) \rightarrow \neg at(O, x)$ . 那么对于两个动作  $collect(R_1, A)$  和  $collect(R_2, B)$ , 其前提不互斥,删除效果  $at(O, A)$  与  $at(O, B)$  之间存在互斥关系,这在状态定理中已经得以刻画,效果与前提之间是对不同物体的刻画,也不互斥.这两个动作是不互斥的.

上面的分析表明:动作互斥无法决定命题互斥,进而用动作互斥定理不可能完全取代命题互斥定理.

如果这两个动作有一个是实际动作,另外一个为 *noop* 动作,则简化为如下 3 种情形:

情形 1 前提冲突.

情形 2 添加效果冲突.

情形 3 添加效果与删除效果冲突.

对于 *noop* 动作之间的互斥关系已经分析过,其与对应命题的互斥关系是等价的.这里不再赘述.

**定理 3** (状态公理与涉及删除效果的动作互斥公理的等价性).状态公理等价于涉及删除效果的动作互斥公理.在编码过程中,仅考虑状态公理的编码是完全不可靠的.

**证明:**(1)从上面的分析可以得出结论:对于前提互斥导致动作互斥的情形,当前提互斥不能由状态公理进行预先刻画时,无法衡量动作之间的互斥关系,进而可能使得本应互斥的动作在一个模型中并发出现,得到一个失效模型.所以仅仅涉及前提和添加效果互斥的动作互斥,不能完全用状态公理通过命题之间的互斥予以删除.对于涉及删除效果的动作互斥关系则可以在状态公理成立的条件下而有效地避免并发执行.故状态公理等价于涉及删除效果的动作互斥公理.

(2)由(1)我们可以立刻得出,仅考虑状态公理的编码方式不可靠.但对于最后的编码方式,由于动作互斥刻画的部分缺失,并没有删除任何有效模型,故该方法是完全的.  $\square$

基于定理 3 和动作互斥关系的分析,在编码过程中,需要考虑动作互斥公理,而涉及删除效果的动作互斥公理可以通过状态公理的编码刻画.

前面考虑了动作互斥公理的选择,现在考虑状态转移公理和状态公理的取舍.框架公理是最复杂的公理之一,其转换为命题 CNF 范式后为若干个析取式,每个析取式中存在多个命题变元,其对应的公式远比互斥公理对应的公式复杂.所以对其的约简是重要的化简过程.由于它与其它公理的互相作用,所以预先进行约简不可行.状态转移公理需要在处理过程中进行约简,这为我们考虑不完全算法提供了选择依据.对于状态公理,则有约简的余地.

**例 3** 一个物体不能执行两个不同 *move* 动作的状态公理表示为:

$$\forall x, y, y', z, z', i. y \neq y' \vee z \neq z' \rightarrow \neg move(x, y, z, i) \vee \neg move(x, y', z', i)$$

在实际执行过程中,  $move(x, y, z, i)$  需要前提  $at(x, y, i)$ ,而  $move(x, y', z', i)$  需要前提  $at(x, y', i)$  的成立,只要保证了其前提的互斥关系,则其互斥关系是隐含的存在的.这说明状态公理本省存在重叠公理,需要对其予以考虑.

基于上面的分析,可以考虑结合规划图和基于状

态的编码的一种半离线式的编码方法,利用规划图的扩张过程,在求解具体问题之前静态的考虑状态公理的构造,有效地分解具体问题的处理时间.本质上,这不属于编码约简过程,而是动态地分离编码构造时间,对于大规模相似问题能够得到很好的处理结果.

## 5 结束语

针对基于可满足性的规划方法中不同编码方式的不同程度的编码重叠和冗余等问题,本文分析并给出了对两种不同编码的重叠公理的判定策略以及冗余公理的删除策略.利用定理的结论可以对编码进行约简,得到在不降低系统效率的前提下显著压缩的编码理论.该类约简方法易于实现,未改变知识库的结构模式,为求解大规模复杂的规划问题奠定了基础.

对于公理的判定和约简策略将从理论上指导我们在构建实际的规划系统中对问题进行有效的最优编码.这也为我们进一步考虑约简动作和命题的互斥公理,结合规划图结构和基于状态的编码的优点设计半离线式的编码方式,使得编码过程部分与问题脱离,有效地分解具体问题的处理时间,以及设计更为简化的不完全的编码提供了可能.

## 参考文献:

- [1] 王桢珍,武小悦,刘忠.一种基于智能规划的信息安全风险过程建模方法[J].电子学报,2008,36(12A):76-80,70.  
Wang Zhenzhen, Wu Xiaoyue, Liu Zhong. A planning-based method of risk process modeling for information security[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12A): 76-80, 70. (in Chinese)
- [2] Kautz H, Selman B. Planning as satisfiability[A]. Neumann B. Proceedings of the 10th European Conference on Artificial Intelligence[C]. Vienna: John Wiley&Sons, 1992. 359-363.
- [3] Kautz H, Selman B. Pushing the envelope: Planning, propositional logic, and stochastic search[A]. Proceedings of the 13th National Conference on Artificial Intelligence[C]. Portland: AAAI Press, 1996. 1194-1201.
- [4] Kautz H, McAllester D, Selman B. Encoding plans in propositional logic[A]. Aiello L C, Doyle J, Shapiro S C. Proceedings of the 5th International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning[C]. Cambridge: Morgan Kaufmann Publishers, 1996. 374-384.
- [5] 吴向军,姜云飞,凌应标.基于 STRIPS 的领域知识提取策略[J].软件学报,2007,18(3):490-504.  
Wu Xiangjun, Jiang Yunfei, Ling Yingbiao. Strategy of extracting domain knowledge for STRIPS world[J]. Journal of Software, 2007, 18(3): 490-504. (in Chinese)

- [6] 吴向军,姜云飞,凌应标.智能规划器 StepByStep 的研究和开发[J].软件学报,2008,19(9):2243–2264.  
Wu Xiangjun, Jiang Yunfei, Ling Yingbiao. Research and development of StepByStep AI planner[J]. Journal of Software, 2008, 19(9): 2243–2264. (in Chinese)
- [7] 蒋志华,姜云飞.一种计算动作派生前提的激活集的改进方法[J].计算机学报,2007,30(12):2061–2073.  
Jiang Zhihua, Jiang Yunfei. An improved method for calculating activation sets of action derived preconditions[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(12): 2061–2073. (in Chinese)
- [8] 吕帅,刘磊,石莲,李莹.基于自动推理技术的智能规划方法[J].软件学报,2009,20(5):1226–1240.  
Lü Shuai, Liu Lei, Shi Lian, Li Ying. Artificial intelligence planning methods based on automated reasoning techniques[J]. Journal of Software, 2009, 20(5): 1226–1240. (in Chinese)
- [9] 吕帅,刘磊,李莹,石莲.基于模态逻辑 D 公理系统的 Conformant 规划方法[J].计算机研究与发展,2009,46(7):1160–1168.  
Lü Shuai, Liu Lei, Li Ying, Shi Lian. Conformant planning as modal logic axiomatic system D[J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(7): 1160–1168. (in Chinese)
- [10] Lian Shi, Jigui Sun, Shuai Lü, Minghao Yin. Flexible planning using fuzzy description logics: Theory and application[J]. Ap-

plied Soft Computing, 2009, 9(1): 142–148.

- [11] Liberatore P. Redundancy in logic I: CNF propositional formulae[J]. Artificial Intelligence, 2005, 163(2): 203–232.
- [12] Liberatore P. Redundancy in logic II: 2CNF and horn propositional formulae[J]. Artificial Intelligence, 2008, 172(2–3): 265–299.

#### 作者简介:



吕帅 男,1981 年生于吉林公主岭.吉林大学计算机科学与技术学院博士,讲师.研究方向为智能规划与自动推理.

E-mail: slu002@gmail.com



刘磊(通信作者) 男,1960 年生于吉林长春.吉林大学计算机科学与技术学院教授,博士生导师.研究方向为软件形式化,语义网与本体工程.

E-mail: liulei@jlu.edu.cn