

# 基于命题可满足性的经典最优规划方法

吕 帅 刘 磊 江 鸿 魏 唯

(吉林大学计算机科学与技术学院 长春 130012)

**摘 要** 基于 Graphplan 的编码方式是 2006 年国际规划竞赛中著名的最优规划系统 SATPLAN2006 采用的编码方式。首先给出与编码相关的概念与性质,在基于 Graphplan 的编码方式的基础上,设计一种新的编码方式:基于 FA 的编码方式,并从理论上证明该编码方式的有效性。设计并实现对应的规划系统 FA-SP,利用国际规划竞赛选用的 Benchmark 问题予以测试。实验结果表明,与 SATPLAN2006 相比,FA-SP 对于所测两类规划域编码规模均有所压缩,除个别问题外求解效率都有一定程度的提高;对于顺序规划域 Blocks World,编码规模平均压缩了 40%,求解效率平均提高了 2 倍;对于并发规划域 Logistics,带有小于 5% 的框架公理的 FA 编码规模平均压缩了 75%,求解效率也有不同程度的提高。

**关键词** 基于可满足性的规划,基于 Graphplan 的编码,编码,框架公理,规划系统

**中图法分类号** TP181 **文献标识码** A

## Classical Optimal Planning Method Based on Propositional Satisfiability

LU Shuai LIU Lei JIANG Hong WEI Wei

(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract** Graphplan-based encoding is a novel encoding adopted by SATPLAN2006, which is the state-of-the-art optimal planner of International Planning Competition in 2006. It firstly defined the concepts and characters about encoding. Based on Graphplan-based encoding, it proposed a new encoding, called FA-based encoding, by reducing the mutex axioms of actions and appending frame axioms. It justifies the soundness and completeness of the corresponding proposed encoding. We designed and implemented the corresponding planner called FA-SP, and tested it with benchmarks adopted by International Planning Competition, respectively. Comparing with SATPLAN2006, the results validate that for both all two domains tested, the scales of encodings of FA-SP are compacted and solver efficiencies of them are improved, and it is notes to see that for sequential planning problems Blocks World, the scales of encodings of FA-SP are compacted nearly 40% and solver efficiencies of them are improved nearly 2 times; for parallel planning problems Logistics, the scales of encodings of FA-SP are compacted more than 75%. The solver efficiencies of FA-SP are improved several times, and the scales of them are enlarged less than 5% for overwhelming majority problems.

**Keywords** Planning as satisfiability, Graphplan-based encoding, Encoding, Frame axiom, Planner

智能规划(Artificial intelligence planning)是人工智能的重要研究领域之一,已广泛应用于航空航天、机器人控制、工业化生产调度中,带来的成果是有目共睹的<sup>[1-3]</sup>。1998 年, Kautz 和 Selman 设计了倍受关注的基于可满足性(SAT, Satisfiability)和图规划方法的 Blackbox 规划系统,在第一届国际规划竞赛中(IPC, International Planning Competition)获得了 STRIPS 域的冠军<sup>[4]</sup>。

2004 年,改进的 SATPLAN 参加了 IPC-4,并获得了最优 STRIPS 域的冠军。Rintanen 等从逻辑上给出了 V-Step 语义、Process-Step 语义和  $\exists$ -Step 语义等 3 种并发规划解的严格定义和求解策略<sup>[5]</sup>。2006 年, Zhao Xing 等在 SATP-

LAN2004 的基础上设计了能够处理时态规划问题的 Maxplan 规划系统,与 Kautz 等设计的 SATPLAN2006<sup>[6]</sup>均参加了 IPC-5,并一起获得了 Optimal Planning(即 Propositional 域)的冠军。从 IPC-1 至今,基于 SAT 的规划方法一直是求解最优规划问题的主流策略,设计更加简洁高效的编码方式是该研究领域的重点。

智能规划一般定义为“对周围环境进行认识与分析,根据预定的实现目标,对若干可供选择的动作及所提供的资源限制施行推理,综合制定出实现目标的动作序列”<sup>[7]</sup>,按处理方式分为基于逻辑演绎的规划、基于 SAT 的规划、基于模型检测的规划、基于约束可满足的规划、基于线性规划的规划以及

到稿日期:2009-05-22 返修日期:2009-08-11 本文受国家自然科学基金(60603031,60773097,60873044)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20060183044,20070183057)资助。

吕 帅(1981-),男,博士生,主要研究领域为智能规划与自动推理;刘 磊(1960-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为软件形式化、语义网与本体工程;江 鸿(1985-),女,硕士生,主要研究领域为智能规划与自动推理;魏 唯(1984-),女,硕士生,主要研究领域为智能规划与自动推理。

基于状态空间启发式搜索的规划等<sup>[8-10]</sup>。

Kautz 等人于 1992 年首次提出了基于 SAT 的规划方法,并在 1996 年设计了基于 Graphplan 的编码方式和基于状态的编码方式,利用基于 Graphplan 的编码方式设计并实现了用于处理带有并发动作规划问题的 SATPLAN 规划系统<sup>[11-13]</sup>。该方法将规划问题编码为一系列 SAT 问题,同时调用 SAT 求解器对其可满足性予以判定,理论上保证了可满足的编码理论所对应的有效模型可以还原为一个有效的规划解。

基于 Graphplan 的编码方式是 SATPLAN2006 规划系统中采用的最主要的编码方式,在一定程度上决定了整个规划系统的性能。本文首先给出与编码相关的概念与性质,在基于 Graphplan 的编码方式的基础上,设计并实现了新的编码方式:基于 FA 的编码方式,从理论上证明了该编码方式的有效性,设计并实现了相应的规划系统 FA-SP,并利用 IPC 选用的标准测试问题 Blocks World 和 Logistics 规划问题域予以测试,验证了该处理方法的有效性。通过对比衡量编码优劣的评价参数,分析了不同编码方式对于不同类型规划问题的求解特性。

## 1 基于 Graphplan 的编码方式

基于 Graphplan 的编码方式是 SATPLAN2006 规划系统中采用的最主要的编码方式<sup>[6,11-13]</sup>。该编码方式利用了 Graphplan 规划系统<sup>[14]</sup>中的规划图构建方法,通过在规划图上的互斥传播策略,推导动作之间和命题之间的互斥关系。其原理是:首先构建一个时间步为  $N$  的规划图,并将该规划图自动转换为 CNF 公式(从目标层开始反向执行转换过程),调用 SAT 求解器进行可满足性判定。如果判定为可满足,则找到了规划解对应的模型,进而还原为对应的规划解,否则继续构建时间步为  $N+1$  的规划图。对应于上述的基于可满足性的规划系统框架,其在解析过程中,利用规划图结构间接地将规划问题转换为 SAT 问题。

基于 Graphplan 的编码,每次产生的对应于  $N$  层规划图的编码理论由如下公理组成:1)表示初始状态和目标条件的静态公理(初始状态与目标条件公理)。例如在 Logistics 域的某个问题定义的初始状态为包裹  $A$  在  $L$  地,则表示为  $at(A, L, 1)$ ;目标为包裹  $A$  在  $P$  地,则表示为  $at(A, P, N)$ 。2)每个事实蕴涵其前一层中以它为添加效果的操作的析取式,即每个事实蕴涵其支持动作的析取(后向链公理)。例如在 Logistics 域中的命题  $in(A, R, 3)$  对应了如下的后向链公理(注意:这里原子命题  $in(A, R)$  在不同的时间步被看作不同的原子命题): $in(A, R, 3) \rightarrow (load(A, R, L, 2) \vee load(A, R, P, 2) \vee maintain(in(A, R, 2)))$ 。3)动作蕴涵执行前提的动态公理(前提公理)。例如在 Logistics 域中动作  $load$  的前提公理: $\forall x, y, z, i. load(x, y, z, i) \rightarrow (at(x, z, i) \wedge at(y, z, i))$ 。4)断言在一个时间步互斥动作不能同时发生的公理(动作互斥公理)。这里的动作互斥关系包括经过规划图中的互斥传播策略得到的动作互斥关系。例如在 Logistics 域中同一个物体不能同时装载到两个不同的卡车上: $\forall x, y, y', z, i. y \neq y' \rightarrow (\neg load(x, y, z, i) \vee \neg load(x, y', z, i))$ 。

## 2 编码相关定义与性质

规划问题转换为其他类型的知识表示方式的转换过程称

为编码方式,转换得到的新的知识表示称为编码。编码可能是某种特定的存储结构、关系结构、公理或公理集等形式。本文涉及的基于可满足性的编码方式将规划问题转换为命题逻辑表示的编码。

**定义 1**(规划问题的命题可满足性编码<sup>[8]</sup>) 对于特定的一种编码方式,一个规划问题的命题可满足性编码是一个公理集,可通过完全实例化得到命题逻辑的公式集。该公理集能够刻画关于给定规划问题的如下特征:1)操作的前提,效果之间的内在关系;2)操作之间的关系;3)初始状态和目标条件;4)(可选)对动作和状态的约束。

一个编码方式优劣的衡量标准主要包括:编码规模与求解效率。前者考察编码所占用的存储空间,后者衡量一个编码的可满足性判定效率。

**定义 2**(基于可满足性的编码的编码规模<sup>[8]</sup>) 对于特定的一种基于可满足性的编码方式,一个规划问题的编码通过转换和完全实例化得到命题逻辑的子句集。该子句集占用的存储空间称为该编码的编码规模。

**定义 3**(基于可满足性的编码的求解时间) 对于特定的一种基于可满足性的编码方式,一个规划问题的编码通过转换和完全实例化得到命题逻辑的子句集。调用特定的 SAT 求解器的判定时间称为该编码的求解时间。

一般情况下,编码规模用变元数和子句数予以刻画。一个规划问题的基于可满足性的编码规模,通常用对应于规划解长度最小的可满足编码的子句集的变元数和子句数予以刻画。而考虑编码求解时间的同时,还需要考虑编码过程需要的编码时间。一个规划问题的基于可满足性的求解时间,通常用整个问题的求解时间予以刻画。除此之外,也可以考虑其他对子句关系等的刻画,如互补因子<sup>[15]</sup>等。

对于特定的一种编码方式,其对某个特定问题的编码规模是确定的,对于不同的 SAT 求解过程会表现出截然不同的性能;而对于特定的一个(类)SAT 求解器,不同的编码方式决定了其转换得到的编码的存储需求以及相应的求解效率<sup>[8,16,17]</sup>。目前,在实际的规划系统中很难设计对任意编码方式均表现优异的通用 SAT 求解器,因此设计更加有效的编码方式,是目前国内外学者研究的重点。

一种编码的可靠性和完全性决定着该种编码方式的采用与否,也决定着该编码在基于可满足性的规划方法中的作用。满足可靠性和完全性的编码方式,称为有效编码方式<sup>[8]</sup>。不同公理组合对应的有效编码方式保证编码的有效模型与有效规划解一一对应。

Kautz 等人提出的基于 Graphplan 的编码、基于状态的编码、基于动作的编码以及基于提升的因果编码等编码都是有效的<sup>[4,6,11-13]</sup>。它们的可靠、完全性也保证了如果找到规划解,则该规划解是最优的(根据最优定义,规划解的步骤最少,而不是动作数最少);如果存在最优规划解,则理论上一定能找到(而在实际的执行过程中,受到存储空间和程序自身能力的限制,有些问题在规定时间内难以找到有效的规划解)。

## 3 框架公理的作用和子句形式

框架问题是逻辑推理中必须面对和处理的问题,对框架公理的舍弃是基于 Graphplan 的编码方式的一个特色。在实际的编码过程中,大部分编码是最后形成二元子句的互斥公

理,而框架公理为多元子句,但仅占整个编码的一小部分,可以考虑通过添加框架公理对应的子句,以减少不必要的 SAT 求解分枝,提高求解效率。

### 3.1 作用分析

框架公理需要保证对于不发生改变的命题有效地保持下去,使得状态之间避免不合理的冲突。在基于 Graphplan 的编码方式中,框架公理由 2)型和 3)型公理隐含表示。在实际推理过程中,必然需要若干步的推理规则以得到有效的结论。例如,对于上例的  $maintain(in(A,R,2))$  动作,由 3)型公理得到  $maintain(in(A,R,2)) \rightarrow in(A,R,2)$ ,与 2)型公理演绎得到  $\neg in(A,R,2) \wedge in(A,R,3) \rightarrow (load(A,R,L,2) \vee load(A,R,P,2))$ ,这就是解释性框架公理对于命题  $in(A,R)$  的正框架公理形式。

虽然在基于 Graphplan 的编码方式中没有明显的生成框架公理,但是对于生成的编码理论,框架公理是其有效的语义后承。这保证了在缺少框架公理的情况下,基于 Graphplan 的编码仍然是有效的。

在不考虑编码规模的情况下,框架公理的添加与否与求解效率有直接关系。而在考虑编码规模的情况下,添加框架公理必然可能增加子句数,而增大编码规模,其添加与否取决于编码规模与求解效率。

### 3.2 子句形式

框架公理一般分为经典框架公理与解释性框架公理,二者在公理层面的表示形式上是截然不同的。在实际处理过程中,广泛采用解释性框架公理。

经典框架公理形式如下:

1)对于以  $f$  为删除效果的动作  $a_1, \dots, a_n$ ,有正框架公理:

$$f_i \wedge \neg a_1 \wedge \dots \wedge \neg a_n \rightarrow f_{i+1}$$

2)对于以  $f$  为添加效果的动作  $a_1', \dots, a_n'$ ,有负框架公理:

$$\neg f_i \wedge \neg a_1' \wedge \dots \wedge \neg a_n' \rightarrow \neg f_{i+1}$$

解释性框架公理形式如下:

1)对于以  $f$  为删除效果的动作  $a_1, \dots, a_n$ ,有正框架公理:

$$f_i \wedge \neg f_{i+1} \rightarrow a_1 \vee \dots \vee a_n$$

2)对于以  $f$  为添加效果的动作  $a_1', \dots, a_n'$ ,有负框架公理:

$$\neg f_i \wedge f_{i+1} \rightarrow a_1' \vee \dots \vee a_n'$$

二者所对应的子句形式都是  $\neg f_i \vee f_{i+1} \vee a_1 \vee \dots \vee a_n$  和  $f_i \vee \neg f_{i+1} \vee a_1' \vee \dots \vee a_n'$ ,所以添加框架公理只有一种实现形式。

## 4 基于 FA 的编码与有效性证明

框架公理可以直接对命题的改变与否予以判定,进一步约简与该变元相关的子句。在 Kautz 等人设计的线性编码中,没有使用框架公理。因为在该编码中明确限制了每个时间步只能执行一个动作,并且必须执行一个实际动作,而该动作的前提公理和效应公理等公理可以‘完美’地刻画当前状态和转移之后的状态。

基于此,考虑添加框架公理的如下编码策略,并初步认定在顺序规划问题域 Blocks World 中将不起作用。

**定义 4(基于 FA 的编码)** 基于 FA(Frame Axioms)的编码中对应于  $N$  层规划图的编码理论由如下公理组成:1)初始状态公理与目标条件公理;2)后向链公理;3)前提公理;4)动作互斥公理;5)框架公理。这里的动作互斥关系是经过规划图中的互斥传播策略得到的动作冲突关系,而不包含竞争需求。

采用归纳法对该编码方式的有效性予以证明。利用的基于 Graphplan 的编码方式的性质表述如下。

**引理 1(基于 Graphplan 的编码方式的有效性<sup>[21]</sup>)** 在不考虑人为添加约束的情况下,规划图层数最小的可满足的基于 Graphplan 的编码理论的有效模型与原规划问题的有效最优规划解一一对应。

**定理 1(基于 FA 的编码方式的有效性)** 在不考虑人为添加约束的情况下,规划图层数最小的可满足的基于 FA 的编码理论的有效模型与原规划问题的有效最优规划解一一对应。

**证明:**比较基于 FA 的编码方式与基于 Graphplan 的编码方式,其区别是动作互斥公理中竞争需求冲突的缺失和框架公理的添加与否。

首先证明竞争需求冲突的缺失对编码的有效性没有影响。比较前 4 类公理与基于 Graphplan 的编码方式,其最主要的区别是动作互斥公理的形成规则,前者只形成了基于 Graphplan 的编码方式中 4)型公理的一部分,这表明其约束限制更少,有可能引入非有效模型而得到完全非可靠编码。我们对规划图层数实施数学归纳法,证明这样的模型不存在。

(归纳基础)当规划图层数为 1 时(包含 0 层动作层和 1 层命题层),表示初始状态满足目标条件。显然,该编码中不需要产生动态公理,只需要产生关于初始状态和目标条件的静态公理,所以用 4')型公理代替 4)型公理不可能导致对应编码理论有效模型的增加。即二者的有效模型一一对应,结论成立。

(归纳过程)假定当规划图层数为  $N$  时,二者的有效模型一一对应,即没有产生完全非可靠模型,则当规划图层数为  $N+1$  时(包含  $N$  层动作层和  $N+1$  层命题层),如果对于第  $N$  层的动作  $a_N$  和  $b_N$ ,其除了竞争需求关系,满足所有的约束,不妨设  $p_N$  和  $q_N$  是这两个动作引起竞争需求的前提,则一定存在  $p_N$  和  $q_N$  的互斥关系。而根据归纳假设,上述互斥关系在层数为  $N$  的规划图的约束传播中是完全可判定的(即不考虑  $a_N$  和  $b_N$  实际的竞争需求,令  $a_N$  和  $b_N$  同时为真,则根据前提公理得到  $p_N$  和  $q_N$  为真,根据归纳假设,在层数为  $N$  的规划图中将得到不可满足,所以  $a_N$  和  $b_N$  不可能同时为真)。这就保证了动作  $a_N$  和  $b_N$  不可能同时在一个模型中成立。

综上所述,前者相对于基于 Graphplan 的编码方式没有引入非有效模型。

再证明框架公理的添加对编码的有效性没有影响。在基于 Graphplan 的编码方式中,只形成了 2)型公理和 3)型公理,没有明显地包含框架公理。而在基于 FA 的编码方式中,在原编码的基础上,显式地添加框架公理作为编码的一部分,这表明基于 FA 的编码理论的约束限制更多,有可能删除部分有效模型而得到可靠非完全编码。

由于前面的说明,解释性框架公理与经典框架公理在最

后的编码形式上是完全等价的。正框架公理由于采用后向链公理,而使得变元真值由正变负的情况不予考虑。下面证明负解释性框架公理得到的约束条件已经为基于 Graphplan 的编码所蕴涵。

对于负框架公理  $f_i \vee \neg f_{i+1} \vee a_1' \vee \dots \vee a_n'$ ,如果该公理能够通过约简而删除一个模型  $M$ ,则表明模型  $M$  必然满足  $\neg f_i \wedge f_{i+1} \wedge \neg a_1' \wedge \dots \wedge \neg a_n'$ 。而该模型一定不满足如下两个公理的组合:后向链公理  $f_{i+1} \rightarrow a_1' \vee \dots \vee a_n' \vee maintain(f_i)$ 和前提公理  $maintain(f_i) \rightarrow f_i$ 。因此,该模型不是有效模型。负框架公理没有删除任何有效模型。所以框架公理的约束为基于 Graphplan 的编码所蕴涵。

综上所述,基于 FA 的编码方式相对于基于 Graphplan 的编码方式没有删除部分有效模型,再由引理 1,结论成立,基于 FA 的编码方式是有效的。

## 5 规划系统 FA-SP 和实验结果

基于上述编码过程和预处理策略等,设计并实现了规划系统 FA-SP。此外还设计并实现了与之类似的未考虑框架公理的规划系统 PMA-SP。

### 5.1 规划系统框架

基于可满足性的规划系统虽然在编码方式上有着各种各样的处理方式,但是都有着统一的处理流程,其抽象的规划系统框架如图 1 所示。

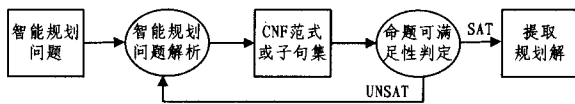


图 1 基于可满足性的规划系统框架

需要注意的是,每次构造长度为  $N$  的编码过程将采用基于 FA 的编码方式。为了实验结果的可比较,选用相同类型的 SAT 求解器 Siege,它是目前规划系统中最主流、最高效的求解系统。

首先,对给定的规划问题(包括域定义和问题定义)进行解析,构造长度为 1 的规划解需要满足的编码理论。将该编码理论转换为 CNF 范式或子句集形式,通过命题可满足性判定程序对其予以判定。如果不满足,则构造长度为 2 的规划解需要满足的编码理论。依次递增,一直得到可满足的编码理论。将第一个可满足的编码理论对应的有效模型还原为原规划问题的有效规划解。

在整个规划过程中,最主要的两个处理过程是:1)问题解析过程,即编码过程;2)命题可满足性判定过程,即求解过程。编码过程需要将规划问题转换为特定的编码表示,对于基于可满足性的规划方法,转换得到的编码理论对应了 SAT 问题的 CNF 范式或子句集形式。求解过程需要对转换得到的编码理论予以可满足性判定。二者通过一个子句集的方式相关联,前者得到的编码理论利用不同 SAT 求解程序判定,性能显著不同。

### 5.2 实验结果

为了测试编码的性能参数,分别测试国际规划竞赛中选用的 Logistics 和 Blocks World 的 STRIPS 问题域,比较改进的 FA-SP 相对于 SATPLAN2006 的规划性能。

Logistics 域问题在多个卡车和包裹之间选择最优的规划步骤,使得在尽可能短的时间步内将包裹从初始地点运送到

目标;Blocks World 域问题将一堆积木从初始状态通过机器人手臂的顺次移动,在尽可能短的时间步内搭建成目标形式。

选用上述两个规划域的原因是:1)两个规划域是许多规划系统选取的通用测试问题域;2)Blocks World 是典型的顺序规划问题域,Logistics 是典型的并行规划问题域,二者代表不同的问题类型。

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 FA-SP 与 SATPLAN2006 的对比实验结果如表 1 和表 2 所列。为了比较的充分,还添加了 PMA-SP 的实验结果。其中,Step 表示规划问题的最优解的时间步数  $N$ ,为一个确定值;Clause 和 Var 分别表示转换得到的编码理论(CNF 形式)的子句数和变元数;Time 表示该规划问题的求解时间;‘-’表示在 1800s 内无法得到最优规划解。

表 1 规划系统 FA-SP 与 SATPLAN2006 和 PMA-SP 的编码规模与求解效率对比(I)

Problem	Step;N	Var	Graphplan-based Encoding		PMA-based Encoding		FA-based Encoding	
			Clause	Time(s)	Clause	Time(s)	Clause	Time(s)
Logistics01	9	1297	15916	0.14	6070	0.36	6614	0.13
Logistics02	7	1623	47668	1.27	10120	0.39	10775	0.32
Logistics03	11	2822	49634	1.65	14252	0.38	15542	0.40
Logistics04	-	-	351271	57.24	-	-	-	-
Logistics05	10	6086	259788	3.46	47701	0.97	50124	1.11
Logistics06	13	3314	-	-	-	-	20288	4.33
Logistics07	11	6999	328743	8.74	59420	2.57	61944	6.57
Logistics08	10	6759	331536	5.06	57711	1.40	60118	1.57
Logistics09	12	8216	375120	68.79	64743	90.75	68097	52.23
Logistics10	11	5951	240129	9.43	45757	4.89	48131	1.20
Logistics11	11	8056	409807	243.3	70017	315.33	72955	28.17
Logistics12	-	-	-	-	-	-	-	-
Logistics13	12	6718	247739	8.25	49121	14.09	51892	25.00
Logistics14	13	8049	310863	78.75	59795	35.43	63165	10.52

表 2 规划系统 FA-SP 与 SATPLAN2006 和 PMA-SP 的编码规模与求解效率对比(II)

Problem	Step;N	Var	Graphplan-based Encoding		PMA-based Encoding		FA-based Encoding	
			Clause	Time(s)	Clause	Time(s)	Clause	Time(s)
BlocksWorld01	12	1581	45594	1.12	25896	0.56	25896	0.57
BlocksWorld02	12	2829	147904	7.82	84085	3.32	84085	3.29
BlocksWorld03	8	319	2779	0.03	1708	0.05	1708	0.04
BlocksWorld04	2	31	76	0.01	62	0.01	62	0.01
BlocksWorld05	6	231	1896	0.06	1156	0.03	1156	0.03
BlocksWorld06	6	421	6184	0.13	3548	0.09	3792	0.14
BlocksWorld07	6	371	4881	0.07	2822	0.05	3038	0.07
BlocksWorld08	10	909	17334	0.39	9916	0.22	10440	0.27
BlocksWorld09	12	1445	38780	1.13	21904	0.56	22720	0.71
BlocksWorld10	20	3347	114314	7.31	66633	3.71	68511	5.92
BlocksWorld11	30	7475	382016	50.12	228714	24.27	232826	46.14

实验结果表明:1)规划系统 FA-SP 的编码中变元数没有改变,这是因为框架公理必须作用在每层已经生成并编码的命题变元上,它本身不会增减编码中的变元数。2)FA-SP 所采用的基于 FA 的编码方式在不增减编码中变元数的情况下有效地降低了子句数,压缩了编码规模,相应地求解效率也有所提高。对于 Blocks World 问题域的改进程度趋于稳定,编码规则压缩了将近 40%,除了个别问题如 BlocksWorld03 之外,求解效率都有所提高。而对于 Logistics 问题域,大部分问题的编码规模压缩了将近 75%,求解效率也大幅度提高,最好的 Logistics11 提高了 8.6 倍,原编码需要 243.3s,而

FA-SP 仅需要 28.17s。3) 框架公理占编码规模的 5% 以下, 对于不同类型的规划问题表现截然不同。与 PMA-SP 相比, 对于顺序的 Blocks World 问题域, 单纯的添加框架公理几乎没有任何作用, 求解效率反而会不同程度地下降; 对于并发的 Logistics 问题域, 求解效率有的提高了 3~4 倍, 最好的问题 Logistics11 的提高则超过了一个数量级, 也有部分问题求解效率有所下降。4) 值得注意的是, 对于 Logistics06 问题, SATPLAN2006 和 PMA-SP 均显示超时, 但 FA-SP 却能在 4.33s 内得到最优解, 这表明框架公理有效地对 SAT 判定分支进行了剪枝。

基于 FA 的编码方式理论上的有效性表明, 添加符合逻辑的相关公理可能形成新的‘冗余’的有效编码方式, 其目的是通过增加新的约束形式约简状态空间, 减少不必要的 SAT 求解分支, 代价是编码规模一定程度的增大。规划系统 FA-SP 的实验结果表明, 相对于著名的 SATPLAN2006, 增加框架公理不太适用于 Blocks World 等顺序规划问题域中, 而对于 Logistics 等并行规划问题域则表现出了明显的优势。现实世界问题中, 并发规划问题占了绝大多数, 所以基于 FA 的编码方式是一种有效的值得采用的编码方式。

**结束语** 基于可满足性的规划方法自提出以来, 由于其求解的高效, 得到了研究人员的高度重视。在具体的编码过程中, 为了保证有效性, 不得不添加若干个无法证明可删除的公理。本文设计并实现了基于 FA 的编码方式, 理论上证明了该编码方式的有效性, 实现了相应的规划系统 FA-SP, 通过在 Benchmark 问题上的测试, 证明了上述规划方法的性能较著名的 SATPLAN2006 要高。

基于上述几种编码方式的实验结果分析, 对于占统治地位的并行规划问题, 不仅需要动作互斥的部分放松, 还需要适当地添加框架公理以便用编码规模的小幅度增加换取求解效率的提高。上述对比实验证明了上述结论。有的改进效率有所下降, 这与求解问题本身的性质有关。添加框架公理导致编码必然存在一定的‘冗余’, 冗余的框架公理能否实现其约简 SAT 判定空间的目的, 对于不同的规划域问题也表现出了不同的性能。各种动态公理的适用性是目前相关研究者普遍关心的重要问题。不论编码策略如何实施, 各种编码方式的编码规模与求解效率都是判定一个编码方式(或规划系统)优劣的重要标准。公理的添加、约简和组合是编码过程中需要考虑的重要问题, 对于非经典逻辑下的各种编码方法更是如此<sup>[18,19]</sup>。

### 参 考 文 献

[1] Laborie P. Algorithms for propagating resource constraints in AI planning and scheduling: Existing approaches and new results[J]. *Artificial Intelligence*, 2003, 143(2): 151-188

[2] Cross S E, Walker E. DART: Applying knowledge-based plan-

ning and scheduling to crisis action planning[M]. *Intelligent Scheduling*. San Mateo: Morgan-Kaufmann Publishers, 1994

[3] Muscettola N, Nayak P, Pell B, et al. Remote agent: To boldly go where no AI system has gone before[J]. *Artificial Intelligence*, 1998, 103(1/2): 5-47

[4] Kautz H, Selman B. Unifying SAT-based and graph-based planning[C]//Proc. of the 16th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence. Stockholm: Morgan Kaufmann Publishers, 1999: 318-325

[5] Rintanen J, Heljanko K, Niemelä I. Planning as satisfiability: Parallel plans and algorithms for plan search[J]. *Artificial Intelligence*, 2006, 170(12/13): 1031-1080

[6] Kautz H, Selman B, Hoffmann J. SatPlan: Planning as satisfiability[C]//The 5th International Planning Competition Booklet. 2006

[7] 姜云飞, 杨强, 凌应标, 等译. 自动规划: 理论和实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008

[8] 吕帅, 刘磊, 石莲, 等. 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

[9] 吴康恒, 姜云飞. 基于模型检测的领域约束规划[J]. *软件学报*, 2004, 15(11): 1629-1640

[10] Bonet B, Geffner H. Planning as heuristic search[J]. *Artificial Intelligence*, 2001, 129(1): 5-33

[11] Kautz H, Selman B. Planning as satisfiability[C]//Proc. of the 10th European Conf. on Artificial Intelligence. Vienna: John Wiley & Sons, 1992: 359-363

[12] Kautz H, Selman B. Pushing the envelope: Planning, propositional logic, and stochastic search[C]//Proc. of the 13th National Conf. on Artificial Intelligence. Portland: AAAI Press, 1996: 1194-1201

[13] Kautz H, McAllester D, Selman B. Encoding plans in propositional logic[C]//Proc. of the 5th Int'l Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Cambridge: Morgan Kaufmann Publishers, 1996: 374-384

[14] Blum A L, Furst M L. Fast planning through planning graph analysis[J]. *Artificial Intelligence*, 1997, 90(1/2): 281-300

[15] Lin H, Sun J G, Zhang Y M. Theorem proving based on extension rule[J]. *Journal of Automated Reasoning*, 2003, 31(1): 11-21

[16] 赖永, 欧阳丹彤, 蔡敦波, 等. 基于扩展规则的模型计数与智能规划方法[J]. *计算机研究与发展*, 2009, 46(3): 459-469

[17] 孙吉贵, 李莹, 朱兴军, 等. 一种新的基于扩展规则的定理证明算法[J]. *计算机研究与发展*, 2009, 46(1): 9-14

[18] 吕帅, 刘磊, 李莹, 等. 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

[19] Shi L, Sun J G, Lü S, et al. Flexible planning using fuzzy description logics: Theory and application[J]. *Journal of Applied Soft Computing*, 2009, 9(1): 142-148

(上接第 186 页)

[5] 苗传江. HNC 句类知识研究[D]. 北京: 中科院声学所, 2001

[6] 晋耀红. 基于 HNC 理论的句类分析系统的设计与实现[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 1998

[7] 晋耀红. 汉语理解处理中多动词难点的研究与实现[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2003

[8] 韦向峰. 基于 HNC 理论的扩展句类分析平台研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2005