

# 基于本体的智能规划方法研究及应用

雍 兮<sup>1,2</sup> 曹存根<sup>1</sup> 白埃民<sup>3</sup>

(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)<sup>1</sup> (中国科学院研究生院 北京 100049)<sup>2</sup>

(钢铁研究总院结构材料所 北京 100081)<sup>3</sup>

**摘 要** 针对经典智能规划方法在利用领域知识方面存在的不足,将先进的知识工程方法与通用智能规划算法相结合,提出了一种新型的基于本体的智能规划技术,它能够综合利用本体知识库中的领域知识对特定领域问题进行合理高效的规划求解,同时给出了一套构建用于支持这类规划过程的领域知识本体库的实用方法。实验结果表明,该方法能够有效地解决复杂的实际应用问题,使由此建立的规划系统真正达到实用水平。

**关键词** 智能规划,领域本体,领域通用规划器,领域约束,目标偏好

## Research and Application of Ontology-based Intelligent Planning Method

YONG Xi<sup>1,2</sup> CAO Cun-gen<sup>1</sup> BAI Ai-ming<sup>3</sup>

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)<sup>1</sup>

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)<sup>2</sup>

(Institute for Structural Materials, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)<sup>3</sup>

**Abstract** In order to deal with the shortcomings of classical intelligent planning methods with respect to the utilization of domain knowledge, this paper proposed an ontology-based intelligent planning approach by combining advanced knowledge engineering technology with general-purpose planning algorithm, which could make full use of domain knowledge in ontology-based knowledge base to efficiently resolve planning problems in the domain. The practical method to establish the domain ontology-based knowledge base supporting the planning process was also presented. The experiment results indicated that the approach could effectively solve complex application problems and make the planning system actually reach the practical level.

**Keywords** Intelligent planning, Domain ontology, Domain-general planner, Domain constraint, Goal preference

知识工程方法与智能规划技术结合应用,是近年来一个研究热点。有研究者指出,新一代智能规划器应该是基于知识的,开发基于知识的规划系统是一项有意义的工作<sup>[1]</sup>。近年来,虽然与领域无关的规划系统取得了较大的突破,但在实际应用中,由于没有考虑到利用领域知识来提高规划系统的能力,其效率往往都不尽如人意,对于复杂一些的问题很容易因为空间被耗尽或时间太长而无法得出结果<sup>[2]</sup>。为了解决这个问题,本文根据规划领域知识的特点和经典智能规划方法在利用领域知识方面存在的不足之处,提出了一种基于本体的智能规划方法,通过把本体知识库中的领域知识引入到通用的智能规划系统中,有效提高了现有规划系统的表达能力和求解效率,开辟了一条新的知识化智能规划途径。

本文首先给出了基于本体的智能规划系统的整体框架,然后重点讨论了其中两个主要功能模块——领域通用规划器和领域本体知识库的设计思路和具体实现方法,最后通过初步实现的系统原型在钢铁研究总院一类齿轮钢产品的优化设计过程中的实际应用效果说明了该方法的合理性和有效性。

## 1 基于本体的智能规划系统整体框架

智能规划是人工智能研究中应用性很强的一个研究领域,广泛应用于工厂作业调度规划、机械加工规划和制造过程规划等实际问题的解决中。人工智能专家 McDermott 曾经指出:“智能规划调度问题大量地出现在工业领域,规划质量的改进,哪怕是一点小小的改进,都会节约大量的时间,带来上百万美元的效益<sup>[3]</sup>”。本文正是结合具体工业应用问题,在利用领域知识提高规划系统的能力方面进行的有益探索。

对于具体应用来说,运用特定的领域知识设计出高效的规划器,是系统开发者的设计目标;而对智能规划的研究来说,开发出高效的、与领域无关的通用规划器,则是研究者们追求的首要目标。为了把这两者有机地协调起来,首先必须提供一种规范统一的领域知识表示模型,把规划过程所需的应用领域知识合理地组织起来,同时对现有的通用智能规划系统进行一定的扩展,使其能够有效地利用这些知识进行规划求解,才能从根本上解决这个理论与应用之间的固有矛盾。

到稿日期:2010-03-19 返修日期:2010-06-07 本文受国家自然科学基金项目(60496326,60273019),973 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB630805)资助。

雍 兮(1980—),女,博士生,主要研究方向为人工智能和知识处理等,Email:yongxi@ict.ac.cn;曹存根(1964—),男,研究员,主要研究方向为人工智能和知识处理等;白埃民(1950—),男,教授,主要研究方向为钢铁材料理论设计等。

同时,由于应用领域的很多知识都可以用来有效地帮助软件设计人员提高规划系统的效率,因此这种做法也将大大提高规划系统的描述能力和求解效率。

根据该研究思路,本文主要从以下两个方面入手来设计和实现基于本体的智能规划系统:

- 一方面引入本体的思想对规划领域知识进行系统的建模、获取和组织,构建一个其组成内容和表示能力都尽量符合规划过程需要的本体知识库,使其能够自然地支持规划系统的求解过程,以利于提高系统效率;

- 另一方面对目前先进的通用智能规划技术进行适当的扩展,既充分发挥现有技术的长处,又使其能够合理有效地利用所建立的本体知识库进行规划求解。领域知识的引入相当于对规划问题增加了若干有用的约束,使问题的解空间变得较小,从而提高了规划问题求解的速度和求解结果的质量,使系统能够达到或接近实用水平。

由此出发,我们设计了如图 1 所示的基于本体的智能规划系统的整体框架。其主要功能模块如下所述。

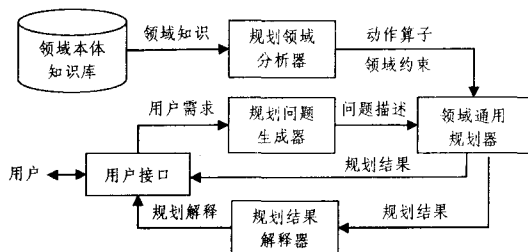


图 1 基于本体的智能规划系统整体框架

- 用户接口:用户和系统之间进行信息交互的可视化界面,它将用户的输入信息翻译成系统可以接受的形式,同时把系统向用户输出的信息转换为人们易于理解的形式;

- 规划问题生成器:用于根据用户需求自动生成作为规划器输入的形式化规划问题描述;

- 规划领域分析器:它是领域本体知识库和规划器之间的接口部件,主要用于从知识库中提取出规划过程所需的各类领域知识,并转换为规划器可以直接使用的结构形式;

- 领域通用规划器:它是系统实现整个规划过程的核心部件,其功能为根据规划问题描述、可用动作算子集和必须满足的领域约束进行规划求解,产生出一个最符合用户要求的规划解,并通过用户接口反馈给用户。这里的“领域通用”指的是该规划器具有对不同规划领域的灵活适应能力,只要提供了包含其所需内容的特定领域本体知识库,即可将其用于该领域的问题求解过程;

- 规划结果解释器:负责回答用户对系统规划结果可能提出的各种疑问,主要是针对系统求解过程或当前求解状态进行说明,是让用户理解规划过程、实现系统透明性的主要部件;

- 领域本体知识库:它提供了系统进行特定领域问题求解所需的各类领域知识。与传统的领域相关规划系统不同的是,这里的领域本体知识库是独立于各领域通用的规划系统的,并且集数据库、知识库和推理机功能于一体。通过给数据赋予明确的语义(即知识化),该知识库便能支持来自不同应用系统和不同层次(如信息查询和知识问答等)的功能需求,并且能够支持知识共享与知识重用。

在我们的系统中明确区分了需要由用户给出的规划问题(主要包括问题的初始状态、目标状态和所属的规划领域等)和对用户透明、由领域本体知识库直接生成的规划领域(主要包括规划领域名、领域对象、领域动作和领域约束等),并且通过专门的处理模块分别对它们进行管理和操作。这不仅为规划器提供了合理有序的预处理机制,同时免除了用户提供领域描述的负担,显著提高了系统的实用性和方便性。

## 2 领域通用规划器的设计和实现

领域知识是提高规划器效率的关键所在。我们设计的领域通用规划器的最大特点就在于它能够对本体知识库中的领域知识进行有效的利用,通过领域知识对搜索过程的指导和限制来保证问题求解的合理性并有效提高其求解效率,从而较好地解决复杂的实际应用问题。同时,由于它并不依赖于特定的领域知识库,因此也保证了系统的通用性和可扩展性。

经典规划问题的目标状态一般是一个命题的集合,如果系统找不到任何可以同时满足其中所有命题的解,就失败终止。而在实际的工业应用问题中,用户有时很难事先确定所提出的各项预期目标能否确实达到,因而希望系统在无法同时满足所有目标命题时不是简单地返回失败信息,而是给出一个最符合用户要求的可行解,以便依据其进行下一步的决策或对原目标做出修改。

因此,为了更好地满足用户的需要,我们在系统中引入了目标偏好的概念,用来定义用户对各个目标命题成立的不同希望程度,即各个目标命题对用户的相对重要性,并采用 TCP(Tradeoff-enhanced Conditional Preference)网络表示法对其进行表示。TCP 网络是一种用于说明给定变量之间的定性偏好顺序的图形表示形式<sup>[4]</sup>,它是建立用户偏好的一种直观工具,并且支持高效的最优化求解过程。在此基础上,我们把目标状态和目标偏好二者统称为目标需求,并把生成尽可能满足用户目标需求的最优规划解作为系统新的规划目标。

在规划器的算法设计中,我们选择了近年来在智能规划领域影响较大、在确定性规划问题中具有明显优势的图规划方法(Graphplan)<sup>[5]</sup>作为基本规划策略,通过把领域知识引入到扩展的图规划系统中,利用领域约束来指导规划图的扩展和搜索过程,并在解提取阶段以生成用户偏好程度最高的最优规划解为目标对原有算法进行了必要的改进。

同时,为了提高规划图的后向搜索效率,我们在规划图生成之后不是直接对其进行求解,而是首先把它转化为一个动态约束可满足问题(Dynamic Constraint Satisfaction Problem, DCSP),再利用已有的先进 DCSP 求解技术来完成规划解提取任务。实践证明,这种方法可以显著缩短图规划算法的求解时间<sup>[6]</sup>,对我们的算法显然也有同样的作用。

根据以上思路,我们设计了一个如图 2 所示的三层结构的领域通用规划器:其中最上层是规划图生成器,负责根据规划问题描述和领域知识建立起对应的规划图结构;中间层是 DCSP 生成器,其作用是把所生成的规划图翻译为对应的 DCSP 问题描述;最下层是规划解提取器,它采用一种面向目标偏好的改进 DCSP 求解算法在 DCSP 结构中根据规划目标进行反向搜索,从中提取出问题的解。

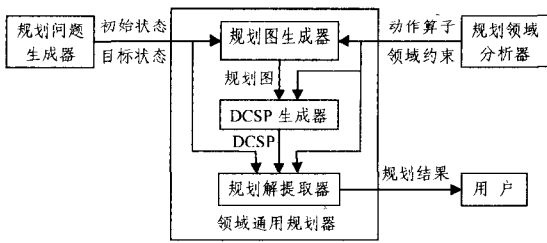


图2 三层结构的领域通用规划器

由此出发,规划器的实现算法也相应由以下3部分构成。

1)基于领域约束的规划图生成算法:算法对经典规划图生成算法的主要改进是在规划图生成过程中每考查一个动作实例是否可以扩展时,都要检查所有与其相关的领域约束是否满足,只有全部满足时才对其进行扩展;同时在判定规划图各层节点之间的互斥关系时也要根据领域约束检查每对节点之间是否存在互斥关系,以补充根据应用领域专业知识可以推出的那些互斥关系;

2)规划图对应DCSP生成算法:其主要思路是把规划图各层的命题分别对应于不同的DCSP变量,支持各个命题成立的动作集合分别对应于相应DCSP变量的值域,并在此基础上把规划图节点之间存在的各类关系翻译为对应的DCSP约束和活动约束;

3)基于目标偏好的规划解提取算法:算法对传统DCSP求解算法的主要改进是把DCSP问题的求解过程修改为基于TCP网络的最优化求解。其关键在于对DCSP变量的赋值过程加上一个与表示目标偏好的TCP网络一致的启发式次序,根据各个变量之间的偏好顺序决定它们赋值的先后次序,优先为最重要的变量进行赋值。

由于篇幅所限,上述算法的具体组成步骤这里不再给出,有兴趣的读者可以参见文献[7]。

### 3 面向智能规划的领域本体知识库的构建

#### 3.1 领域本体的定义和内容

本体的概念来源于哲学,但在计算机科学领域经过不断的发展和深化后,本体已经形成了自己特有的含义,对共享的(shared)概念化(conceptualization)的形式的(formal)和显式的(explicit)规范说明<sup>[8]</sup>。一般来说,本体提供一组术语和概念来描述某个领域,而知识库则使用这些术语来表达该领域的事实。目前,本体已经成为知识工程中的一种重要工具,在领域知识的获取、表示、分析和应用等方面都起到了重要的作用。

领域本体指的是在一个特定的领域中可以重用的本体,它提供该特定领域的概念定义和概念之间的关系,提供该领域中发生的活动以及该领域的主要理论和基本原理等。我们引进本体论的目的就是想从学科领域的概念和关系、属性集出发,建立一个便于分析和使用的领域知识结构,使领域知识库具有最大的可操作性、可共享性以及可重用性,从而为领域问题的规划求解提供有力的知识支持。

从客观的意义上说,本体的描述是和特定的任务和目的无关的,但由于我们总是在一定的任务背景下使用和建立本体,因此对所描述的知识的选择是任务相关的。考虑到规划过程的需要,系统可用的本体知识库中应该包含以下内容:

- 定义规划过程中涉及的各类领域对象及其属性(包括

某些属性的缺省取值)的静态知识部分;

- 定义规划过程中可以使用的所有动作算子及其使用前提和作用效果的动态知识部分,其中包括对动作参数取值范围进行限定的领域约束,以防止规划结果中出现实际条件下无法实现的操作;

- 说明规划过程中必须满足的各类对象和对象属性之间的关系(包括互斥关系)的公理知识部分。

#### 3.2 领域本体表示语言的设计

我们在描述领域本体时主要借鉴的是NKI本体语言<sup>[9]</sup>,在其基础上根据规划系统的需要进行了必要的改进。NKI本体语言是一种面向汉语自然语言的框架表示形式,它从共性和个性两个方面考虑对象的性质,并且把本体表示与知识表示有机地结合在一起,符合事物的一般描述规律,便于本体的建立和知识的获取。

领域本体中最主要的内容是类的定义,类定义的核心内容则是槽和类公理。其中槽代表了本体的属性以及概念相关的知识,每个槽都形成了本体知识库中的一条上下文无关的知识或知识格式;而类公理则是类概念知识之上的元知识,是对类中槽及槽间关系的一种约束。在此基础上,实例的定义首先要说明实例所属的类,以便使用其中定义过的属性和关系,而实例知识则类似地也是通过槽和槽值进行描述的。图3给出了由此设计的领域本体描述语言的主要文法。

```

<领域本体描述> ::= <类定义> | <公理定义> | <实例定义>
<类定义> ::= <概念类定义头> | <槽类定义头> <类定义体>
<概念类定义头> ::= (defcategory/defprivatecategory) <类名> [实现 <相关类>]
<槽类定义头> ::= <槽类名> {, 和 <槽类名>}
<槽类定义头> ::= defslotcategory <槽类名>
<类定义体> ::=
    ' {
        { <槽定义> }
        { <体内知识> }
        { <体内公理定义> }
    } '
<体内知识> ::= <槽名> : <槽值>
<体内公理定义> ::= 公理: <公理定义>
<实例定义> ::= <实例定义头> <实例定义体>
<实例定义头> ::= defframe <实例名> : <类名>
<实例名> ::= <字符串>
<实例定义体> ::=
    ' {
        { <体内知识> }
        { <体内公理定义> }
    } '

```

图3 领域本体描述语言主要文法

#### 3.3 领域本体知识库的构建方法

目前比较成熟的本体开发方法包括Enterprise Ontology法、METHONTOLOGY法、TOVE法、本体生命周期法等<sup>[10]</sup>,这些方法体系各有其优缺点,分别有它们适合的领域和用途。在综合借鉴其中有益思想的基础上,结合我们建立材料设计领域本体的实际经验,给出了一套构建面向智能规划的领域本体知识库的有效方法。该方法主要包括以下6个步骤。

- 1)需求分析:明确领域本体建设的目的和用途以及需要解决的问题的类型和范围;
- 2)知识收集及获取:根据领域专家的意见选择相对权威的一个或者多个知识源,综合考虑领域知识结构和应用目的进行所需知识的收集和整理;
- 3)领域分析:根据本体设计的目的提炼出领域中的重要概念和主要关系,并通过准确的自然语言表达出来,在此基础上

上通过不断向上抽象和向下细化逐步建立起初始的领域本体体系;

4) 本体表示: 使用所设计的领域本体描述语言正式编写本体知识库的具体内容;

5) 本体分析与评价: 当本体构建到一定规模后, 需要对其整体的正确性、一致性、无冗余性、完备性和可扩展性等进行检测和评价;

6) 本体进化: 本步包括前面的所有步骤, 只是所有工作有了一个共同的基础: 已有的原型本体。因此总的来看, 整个本体构建过程是循环进化的。

### 3.4 领域本体知识库在规划过程中的应用

根据以上方法建立的领域本体知识库可以很方便地用于我们系统的规划过程。根据本文 3.1 节介绍的该知识库的组成内容, 其中各部分知识在规划过程中的具体用途分别为:

- 静态知识主要用于补充规划问题描述中未说明但缺省成立的问题初始条件。由于关于领域中所有对象所有属性缺省取值的知识数量可能会非常庞大, 并且包含大量与规划过程无关的内容, 因此规划领域分析器还要根据领域中的可用动作算子集进行过滤, 只有出现在某个动作算子前提条件中的命题才能加入问题初始状态;

- 动态知识主要用于生成规划问题中的可用动作算子集。为了便于实现领域动态概念到动作算子的转化过程, 我们在本体动态部分的根类——“过程”类中对作为动作算子需要具备的各个属性进行了统一定义, 并且在构建知识库时对这部分内容进行了重点获取, 因此规划领域分析器直接提取问题所属领域中的相应内容即可形成可用动作算子集;

- 公理知识主要用于生成辅助规划过程的领域约束。规划领域分析器直接根据问题所属领域中的所有公理形成领域约束集, 在规划过程中用于剪除规划图中的不合理节点以及节点互斥关系的判定, 具体用法体现在基于领域约束的规划图生成算法中。

## 4 实验与分析

根据实际应用需要, 我们在领域专家的协助下建立了一个材料设计领域本体知识库, 并在其基础上利用初步实现的系统原型对钢铁研究总院的一类齿轮钢产品 (20CrMnTi 钢) 进行了设计规划实验。用户希望通过对 20CrMnTi 钢材成分及其配套生产工艺的优化设计, 达到在保证基体晶粒不发生粗化的前提下完全消除液析氮化钛的目的, 从而使设计钢种的使用性能特别是接触疲劳性能得到明显改善。

根据用户对钢材的性能要求及其现有生产技术条件, 容易确定规划问题的初始状态和目标状态, 再根据问题所属规划领域从本体知识库中自动提取出所有可用动作算子和相关领域约束后, 就形成了作为系统输入的规划问题描述。其中一个典型例子如图 4 所示。

系统对该问题进行求解得出的规划结果为:  $\langle \{ \text{加入钛元素}(\text{steel1}, 0.02(\%)), \text{加入氮元素}(\text{steel1}, 0.004(\%)) \}, \text{加热固溶三元第二相}(\text{steel1}, 15(\text{C})), 1547(\text{C})), \text{碳氮化钛}, 0.02(\%), 0.2(\%), 0.004(\%), \text{棒材锻造}(\text{steel1}, 1547(\text{C})), 900(\text{C})), 25(\text{mm}), \dots, \text{冷却}(\text{steel1}, 180(\text{C})), 15(\text{C})) \rangle$ 。这一结果与领域专家的设想一致, 也表明可以在目前工业生产的 20CrMnTi 钢化学成分的基础上进一步降低其中的钛、氮含

量, 并由前两个动作给出了理论最佳的钛、氮含量, 其余动作序列则构成了相应的配套生产工艺流程。

```

初始状态 S0: 基体状态 (s001, 冶炼钢料) ∧ 所处温度 (s001, 15) ∧ 选用三元第二相 (s001, 碳氮化钛) ∧ 有化学成分含量 (s001, 碳, 0.2) ∧ ...
目标状态 Sg: 基体状态 (s001, 钢材成品) ∧ 所处温度 (s001, 15) ∧ 晶粒尺寸 (s001, {20, 28, 40}) ∧ 液析状态 (s001, 无液析) ∧ ...
动作算子集 A: {加入钛元素 (X: 钢材; a: 百分比数值), 加入氮元素 (X: 钢材; a: 百分比数值), 棒材锻造 (X: 钢材; T1, T2: 温度值; d: 长度单位), 加热固溶三元第二相 (X: 钢材; T1, T2: 温度值; S: 三元化合物名; a1, a2, a3: 百分比数值), 冷却 (X: 钢材; T1, T2: 温度值), ...}
defcategory 加入钛元素
{
    是子类: 齿轮钢工艺
    参数: X
        : 类型 钢材
        : 注释 “加入钛元素的对象”
    参数: a
        : 类型 百分比数值
        : 注释 “所加入钛元素在 X 中的质量分数”
    前提条件: 基体状态 (X, 冶炼钢料) ∧ 第二相类型 (X, S) ∧ 有化学成分 (S, 钛)
    添加表: 有化学成分含量 (X, 钛, a)
    领域约束: a > 0 ∧ a < 0.01
}
领域约束集 C:
∇ (X, Y: 实物) 有化学成分含量 (X, Y, a) → 有化学成分 (X, Y)
∇ (X: 实物) 互斥动作 (加入钛元素 (X, a), 棒材锻造 (X, T1, T2, d))
∇ (X: 实物) ∇ (T1, T2: 温度值) T1 ≠ T2 → 互斥命题 (所处温度 (X, T1), 所处温度 (X, T2)) ...
    
```

图 4 20CrMnTi 钢设计规划问题描述示例

在此基础上, 钢铁研究总院特殊钢厂根据我们给出的建议成分和工艺流程进行了优化后的试验钢冶炼及其一系列关键性能的测试分析。试验结果表明根据系统规划结果制定的材料加工方案是切实可行的, 所制备的钢材性能完全符合用户的各项要求, 特别是在接触疲劳寿命方面, 比现有工业 20CrMnTi 钢大致提高了一个数量级 (见表 1)。这在工业生产中是非常可观的, 充分证明了系统的合理性和有效性。

表 1 接触疲劳寿命试验结果

钢材	额定寿命		中值寿命	
	×10 <sup>7</sup>	对比	×10 <sup>8</sup>	对比
试验钢	5.59	23.10	3.52	23.01
工业对比钢	0.242	1	0.153	1

**结束语** 根据智能规划技术发展对先进知识工程方法的迫切需要, 提出了一种能够综合利用本体知识库中的领域知识对特定领域问题进行合理高效的规划求解的基于本体的智能规划技术, 给出了构建用于支持该系统运行的领域知识本体库的一套有效方法, 并在此基础上通过对一类齿轮钢产品的优化设计规划来对系统的实际使用效果进行了检验。

本方法将先进的智能规划算法与领域知识模型相结合, 充分发挥了它们各自在规划过程中的作用和优势。通过提供更加专业化、智能化以及人性化的决策支持功能, 系统可以辅助专业研究人员解决复杂的领域规划问题, 并且对用户认知负担的要求比较小——用户只需关注自己需要解决的问题是什么, 而无需具有广泛的领域知识和强大的计算能力。

## 参考文献

- [1] 谷文祥, 徐丽, 张新梅. 图规划框架下智能规划的研究与发展[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 19(4): 27-34
- [2] 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

表 3 列举了同样非线性强度情况下实验 2 的数据。

表 1 对实验 1 进行记忆深度辨识的数据  
(格式为均值±标准差)

MND	m	$\bar{c}_{ky}(0, m)$	$[-\bar{c}_{ky}(0, m)]^{m+1}$	$C_c$ 的奇异值
60dB	0	2.5266±0.1874	2.5266±0.1874	4.0808±0.0899
	1	2.0914±0.1267	4.3898±0.5329	2.1532±0.0476
	2	-0.4524±0.0649	-0.0982±0.0412	0.7213±0.0368
	3	-1.4744±0.0982	4.8515±1.3160	0.5971±0.0460
	4	-0.0061±0.0622	0.0000±0.0000	0.0130±0.0117
	5	-0.0033±0.0730	0.0000±0.0000	0.0029±0.0032
26dB	0	2.6703±0.1773	2.6703±0.1773	4.0597±0.2187
	1	2.2092±0.1107	4.8925±0.4901	2.1555±0.1068
	2	-0.4831±0.0777	-0.1214±0.0560	0.7181±0.0571
	3	-1.5508±0.0944	5.9139±1.4789	0.6125±0.0829
	4	0.0013±0.0573	0.0000±0.0000	0.0051±0.0066
	5	-0.0095±0.0577	0.0000±0.0000	0.0020±0.0032
	6	-0.0093±0.0631	0.0000±0.0000	0.0002±0.0005

表 2 对实验 1 进行参数提取的数据  
(格式为均值±标准差)

MND	真实系数	直接算法	算法 1	算法 2
60dB	h(1)=0.9	0.8903±0.0047	0.8998±0.0074	0.9347±0.005
	h(2)=0.385	0.3796±0.0047	0.3986±0.0066	0.3991±0.0014
	h(3)=-0.771	-0.7708±0.0083	-0.762±0.0081	-7.7899±0.0014
26dB	h(1)=0.9	0.9266±0.004	0.9205±0.0111	0.9051±0.003
	h(2)=0.385	0.3993±0.0057	0.4354±0.0141	0.3598±0.002
	h(3)=-0.771	-0.7643±0.0121	-0.8135±0.0127	-0.7648±0.0008

表 3 对实验 2 进行参数提取的数据  
(格式为均值±标准差)

MND	真实系数	直接算法	算法 1	算法 2
60dB	h(1)=-2.33	-2.594±0.5316	-2.3233±0.0697	-2.714±0.8045
	h(2)=0.75	0.8732±0.131	0.8011±0.1349	1.0244±0.497
	h(3)=0.5	0.5905±0.0834	0.4665±0.0704	0.5728±0.108
	h(4)=0.3	0.34601±0.048	0.3618±0.0147	0.3703±0.2302
	h(5)=-1.4	-1.626±0.392	-1.4653±0.0490	-1.678±0.738
26dB	h(1)=-2.33	-2.7548±0.5933	-2.4235±0.12053	-2.4095±0.1071
	h(2)=0.75	0.95157±0.429	0.8754±0.12131	0.7783±0.1027
	h(3)=0.5	0.6066±0.11854	0.49135±0.0423	0.4956±0.0453
	h(4)=0.3	0.29231±0.0295	0.32538±0.0372	0.33565±0.1522
	h(5)=-1.4	-1.6346±0.8586	-1.4914±0.1355	-1.4933±0.120

通过对表 1 分析可知,当  $m$  由 3 变为 4 时,3 种方法得到的数据的均值都趋于 0,因此可以判断 Hammerstein 记忆深度  $M=4-1$ ;而当  $m>3$  时,  $[-\bar{c}_{ky}(0, m)]^{m+1}$  (NPODE 方法的数据)比其余两类方法的数据更加接近于 0,由此可以得出,就鲁棒性而言,NPODE 方法是最优的。

由表 2 可知,当 Hammerstein 模型的记忆深度为 3 时,算法 1 和算法 2 得到的数据中,总有一组数据的均值比直接计

算方法更加接近真实系数的均值,且具有更小的方差,但是这样的差异表现并不十分明显。从表 3 的数据可知,当记忆深度增加至 5 时,算法 1 或者算法 2 得到的数据较直接计算方法具有明显的优势(均值比直接计算方法更加接近真实值,方差更接近 0)。此结果表明,当记忆深度逐渐增加时,本文提出的方法比直接计算方法的鲁棒性更强。

**结束语** 本文研究了在加性高斯噪声存在的情况下,利用高阶统计量对 Hammerstein 模型的记忆效应进行辨识的方法。在输入信号统计量和无记忆非线性效应未知的情况下,仅仅利用 Hammerstein 模型输出信号的高阶累积量,建立两种线性方程组;理论证明,两种线性方程组均具有唯一解,可以组合使用以提取线性记忆模块的系数,并且系数提取过程不受 Hammerstein 模型的无记忆非线性模块影响。最后的仿真结果表明,在高斯(有色或无色)噪声存在情况下,此类辨识方法比直接提取参数法具有更好的数值鲁棒性。

### 参考文献

- [1] Koukoulas P, Kalouptsidis N. Blind identification of second order Hammerstein series [J]. Signal Processing, 2003, 83(1): 213-234
- [2] 邱天爽, 张旭秀, 李小兵. 统计信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 79
- [3] Giannakis G B, Mendel J M. Identification of nonminimum phase systems using higher order statistics[J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, Signal Processing, 1989, 37: 360-377
- [4] Friedland B, Porat B. Adaptive IIR algorithms based on high order statistics[J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, Signal Processing, 1989, 37: 485-485
- [5] Tugnait. New results on FIR system identification using higher-order statistics[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1991, 39: 2216-2221
- [6] Zhang X D, Zhang Y S. FIR system identification using higher order cumulants alone[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1994, 42(10): 2854-2858
- [7] Kalouptsidis N, Koukoulas P. Blind Identification of Volterra-Hammerstein Systems [J]. IEEE trans on signal processing, 2005, 53: 2777-2787
- [8] 张贤达. 时间序列分析-高阶统计量方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 281
- [9] Giannakis G B, Mendel J M. Cumulant-based order determination of non-Gaussian ARMA models[J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, Signal Processing, 1990, 38: 1411-1422
- [10] 王少水, 戴永寿. 参数化地震子波估计模型定阶方法研究综述[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(4): 1405-1410

(上接第 178 页)

- [3] McDermott D, Hendler J. Planning: What it is, what it could be, an introduction to the special issue on planning and scheduling [J]. Journal of Artificial Intelligence, 1995, 76: 1-16
- [4] Boutilier C, Brafman R, Domshlak C, et al. Preference-based constrained optimization with CP-Nets[J]. Journal of Computational Intelligence, 2004, 20(2): 137-157
- [5] Blum A L, Furst M L. Fast planning through planning graph analysis[J]. Journal of Artificial Intelligence, 1997, 90: 281-300
- [6] Do MB, Kambhampati S. Solving planning-graph by compiling it into CSP[C]//Proceedings of the 5th International Conference

- on Artificial Intelligence Planning and Scheduling(AIPS). 2000: 82-91
- [7] 雍兮. 基于知识的钢铁材料智能设计系统开发和应用[D]. 北京: 中国科学院计算技术研究所, 2009
- [8] Gruber T R. Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 1993, 43: 907-928
- [9] Cao Cun-gen, Feng Qiang-ze, Gao Yin, et al. Progress in the development of national knowledge infrastructure[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2002, 17(5): 1-16
- [10] 顾芳. 多学科领域本体的设计方法研究[D]. 北京: 中国科学院计算技术研究所, 2005