

40-44

## 基于模型的定性仿真的研究现状

Current Research Status of Model-based Qualitative Simulation

顾宇红 石纯一 张志海

(清华大学计算机系 北京100084)

**摘要** Model-based Qualitative Simulation (QS) is one of the most important research areas of qualitative reasoning (QR), it is considered as the foundation of most applications of QR. In this paper, the QS methods are generalized. Its originality, development and current research status are analyzed systematically. The issues that still exist in QS and the tendency of QS research are also discussed.

**关键词** Qualitative reasoning, Qualitative simulation

## 1 基本方法

定性推理是 AI 的重要分支。定性的含义是指推理中使用的信息和推理的结论都是定性的(本质上是离散的而非连续的)。定性推理的目的是对物理现象作解释且解释的粒度较粗,具有较高的知识层次,是对物理现象宏观行为的描绘<sup>[1]</sup>;它与实际物理系统的关系极为密切,从而可根据实际物理背景验证 AI 及定性推理理论和方法的正确性,便于实现可用的系统。在信息量巨大,数据繁多,系统结构复杂而难以描述的今天,定性推理作为人工智能的一个新的研究领域逐渐受到重视。

系统仿真根据被研究的真实系统的模型,利用计算机进行实验研究的一种方法。它是建立在系统科学、系统识别、控制理论、计算技术与控制工程技术基础上的一门综合性很强的实验技术,是分析、综合各类系统,特别是大系统的一种有效的研究方法和工具<sup>[2]</sup>。

随着计算机的发展,求解复杂系统数学模型的能力越来越强,对系统的数学模型进行实验研究的计算机仿真方法得到普遍应用。但计算机仿真仍存在着一些本质缺陷:(1)对于不确定知识束手无策;(2)数学运算复杂;(3)仿真过程及结果不易理解;(4)缺乏与人类思维相似的因果推理那样的分析和推理过程。

同时,人们注意到:(1)物理系统中经常存在不精确、不完全知识;(2)通常,代表系统物理参数的变

量的值域可划分为一些界标值和界标值区间,它们表示了变量值的重要的定性区别;(3)已知变量的变化方向,及其定性值,就足以确定其演变的定性性质;(4)为了确定系统的定性行为,只需两变量间的函数关系的单调性区间及与之对应的一对界标值。

依这种分析,基于模型的定性仿真作为一个新兴的研究领域应运而生。它从物理系统的结构模型(由定性约束方程等描述)推理出其行为描述。在此基础上运用适当的因果推理方法,在定性仿真的同时给出人们期望获得的相关变量间的因果决定关系,从而实现:有效地处理和利用不精确、不完备及经验的知识,减少计算复杂性,增加可理解性,实现似人推理及仿真方法。

定性仿真是定性诊断、定性监控以及定性功能推理等其它一些定性推理研究的基础,因此定性仿真一直是定性推理的一个主要分支。Kuipers 于1986年提出的 QSIM 算法<sup>[3]</sup>为定性仿真的发展奠定了基础。QSIM 直接用部件的参量做为状态变量,用 QDE(定性微分方程)来描述由物理定律得出的状态变量间的约束关系,从而构成物理系统的结构模型,并把状态变量随时间的变化视为定性状态序列。仿真算法是从初态出发,根据状态转换规则先生成所有可能的后继状态,再通过过滤来消除不可能出现的状态。重复此过程直到没有新状态出现。QSIM 的量空间是由界标点来描述的,参量在某一时刻的定性状态由其在该时刻的定性值和变化方向构成。

QSIM 方法预测结果包含系统的所有可能行

为,因此是完备的,但不是有效的,因为预测结果同时也包括与实际行为不相符合的虚假行为。Kuipers 认为 De Kleer 的 Envision 方法<sup>[4]</sup>与 Forbus 的 QPT 理论<sup>[5]</sup>都可用于 QDE 模型,从而可以应用 QSIM 进行推理,这也是 QSIM 得到广泛应用的原因之一。

下面介绍基于模型的定性仿真的研究现状,并讨论当前存在的问题及今后的发展趋势。

## 2 研究现状

目前定性仿真的研究主要集中在定性过滤、定性定量相结合等方面。

### 2.1 定性过滤

由于 QSIM 的这种非有效性,Kuipers 的定性仿真工作主要集中于开发一组全局定性过滤器。每一过滤器的目标为采用某些技术来发现并删除虚假行为及不相容行为,使定性描述的某些结果显化。

(1)高阶导数<sup>[6]</sup> 高阶导数代表了某一变量的变化方向。显然若能得到高阶导数值则必定可用在一定程度上删除虚假行为(例如某些振荡行为可以通过高阶导数的约束来删除),但一般不便使用这一技术,因为求导可能增加复杂性。

(2)基于轨迹的过滤器 早在1988年,W. W. Lee & B. J. Kuipers 利用定性相空间中轨线的不相交性的特点生成了一种全局过滤器,他们将微分方程的解看作相空间中的一条轨线,这些轨线在有限的时间内不可相交。

Giorgio Brajnik 和 D. J. Clancy 在此基础上引入了时态约束,提出了 TeQSIM (Temporally Constrained QSIM)<sup>[7]</sup>,将 QSIM 的仿真结果限制在满足由轨迹约束所说明的连续和非连续的行为需求。TeQSIM 使用三种信息来源来约束推理过程:(a)结构约束:与个体状态中的模型相关的一组方程;(b)连续性约束:限制了变量值随时间变化的关系以保证各个变量的连续性;(c)轨迹约束:限制了个体变量的行为及变量间的相互作用,由一个时态逻辑表达式组、非连续变化说明及外部事件说明三部分构成。

QSIM 只满足约束 a、b,而 TeQSIM 生成的结果满足 a、b、c 三类约束,并考虑了外部事件和非连续变化等因素。

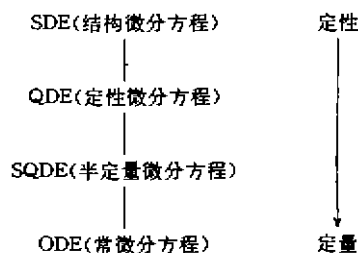
(3)基于能量的过滤器<sup>[8]</sup> 引入变量表示动能、势能,并应用能量守恒原理,在行为的任何阶段,能量的变化必须等于守恒和非守恒功之和。这一等式可消除一类虚假性。

(4)时间规模的抽象<sup>[9]</sup> 时间规模的抽象使我

们可把一个复杂的系统分解为由简单模型构成的层次,这些模型操作处在不同的时间规模上。这样中间层的一进程可把慢的进程看作恒定的,而把快的进程看作瞬时的。Kuipers 指出,如此一来,就可以准平衡的观点看一个快的进程,使许多复杂系统得以仿真。

### 2.2 定性定量相结合

由于定性约束提供了较弱的限制,而且定性值提供了较少的信息,导致了定性方法的不确定性,将定量信息加入定性行为的方法,既可充分利用可用知识,又可用于解释定量观察,并有效地减少了这种不确定性的发生。不精确知识系统可以表示为一个从定性到定量的多级模型:



其中 SQDE 是指加入了定量信息的定性方程,这些定量信息可以是数字区间、定性方程的上下界、模糊子集等。以此多级模型为基础,人们研究了多种推理方法。

#### (1)Q 代数

·Q2方法<sup>[10]</sup> 确定界标和单调函数的受限范围,QSIM 预测出的定性行为作为一个框架,可被定量信息所修饰。如用实区间注释界标值,用实值函数注释定性微分方程。这些定量受限范围还可通过约束传播以得到一个更紧的范围或发现矛盾滤掉某些行为。具体方法为在各时间点上,将参数的上下界标(区间)代入状态方程,并将计算所得的范围与 QSIM 推理的结果求交。利用中值定理,区间传播算法可以被扩展到时间区间。其缺点是区间代数固有的模糊性掩盖了变量间的关系,另外由于采用中值定理描述时间区间的变化,而时间区间可以任意长,因此所得结果可能极不精确。

·Q3方法<sup>[11]</sup> Q2所得预测的定量精度,在粗的定性行为粒度下极受限制。在 Q3方法中粒度可通过插入一些额外的定性状态而自适应地被调整。

(2)NSIM 方法<sup>[12]</sup> NSIM 利用合适于 SQDE 的数字特点的步长进行仿真,而不依赖于定性时间点间的距离。尽管它可以应用任意传统的数字仿真

方法,但其状态方程及初始状态均不是精确的常微分方程,而是通过对 QDE 方程变量求极大、极小值来从 QDE 中构造出极端情况下的 ODE 系统。NSIM 方法的虚假性来自区间表示的不确定性,忽略了 SQDE 中的相关性及变量间的相关性。

(3)SQSIM 方法<sup>[14]</sup> SQSIM 为一个基于不精确的 ODE 模型的仿真器,它为许多不确定的工程问题的表示和推理提供了一种通用语言,能为不精确模型产生一个与之相符的精确预测。其信息流程图如图1。

SQSIM 是在 SQDE 级上的定性推理,其中的 SQDE 组合方法包括动态范围相交、时间相交、降阶、重复仿真等方法。

上述 Q2、Q3、NSIM、SQSIM 方法都是在 QSIM 基础上利用定量信息而得到的定性推理方法。Q3 是对 Q2 的改进, SQSIM 是对 Q2 和 NSIM 的综合及扩展。尽管 SQSIM 在实际应用中已取得了较好的效果,但虚假性仍是无法避免的问题。

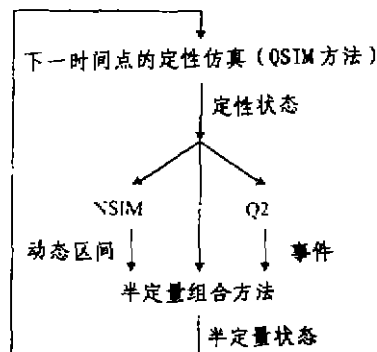


图1

(4)量级推理<sup>[14]</sup> 量级推理体现了对实空间的不同层次的划分,以便允许加入更多的定量信息来取得较为精确的结果。

(5)数字区间仿真方法(NIS)<sup>[15]</sup> Iwasaki 等人认为:由于缺少足够的知识,且系统参数随未知现象而不断变化,因此,难于精确定义复杂物理系统。而这类系统可以通过组合定性定量模型来表示。于是他们在1995年提出了数字区间仿真方法 NIS,特点是利用半定量模型(用数字区间来表示参数范围、用一组函数来提供不精确函数的上下界的组合定量、定性知识的模型),来对有非单调函数的系统做预测。NIS 的输入为半定量模型,输出为模型中每个状态变量轨迹的上下界。其中主要用到一些插值方法,如 Euler 方法,Runge-Kutta 方法。NIS 同 QSIM 一

样是完备的,但不是有效的。尽管如此,它在多数情况下仍是精确的。

(6)模糊定性仿真<sup>[16]</sup> 模糊理论和定性推理的发展有相似的动机:为了表示不精确知识和解决物理系统性质的推理过程的复杂性。因此 Qiang Shen 和 Roy Leitch 在1993年提出了“模糊定性仿真”,引入模糊集,使得定性仿真半定量。物理量用一个任意的,但是有限的、离散的量空间来表示;模糊量空间能够更细致地表示两个或多个变量间的函数关系。

### 2.3 其他定性仿真方法

定性过滤和定性定量相结合是定性仿真研究的两个主要研究方向,除此之外,还出现了许多针对不同应用背景的定性仿真方法。

(1)面向对象的定性仿真方法<sup>[17]</sup> C. Jack 等人认为 O-O 语言是设备的最自然的表示方法,并提出了一种面向对象的定性仿真方法,对复杂系统用面向对象的形式表示,易于表达设备间的关系,且易于理解,但该方法主要针对流体系统,如装满水的“U”形管等。

(2)自解释定性仿真方法<sup>[18,19]</sup> Forbus 等人于1990年研究的自解释定性仿真器是一个实用的智能教学系统。自解释定性仿真器综合定性、定量的知识来产生系统行为的详细描述和因果解释。SIMGEN (MK1)是他们研制的第一代自解释定性仿真器,其特点是能够根据系统定性领域模型、相应的数学模型库,不仅能象传统仿真器一样产生数字仿真行为,同时也可用定性术语描述行为并在仿真的任何时刻提供参数的因果解释。但是,由于 SIMGEN (MK1)的早期版本使用的是 ENVISION 方法,其复杂度为指数级,所以 Forbus 等人以减少自监控和解释能力为代价,先后开发了 SIGMEN (MK2), SIGMEN (MK3)。1995年 Forbus 提出大规模自解释仿真器 SIGMEN (MK3),改进了已有的算法,引入“前项概念具体化”、“符号计算”、“延迟错误检查”等方法将时间复杂度压缩至多项式时间。

(3)基于 CMOS 电路的多级混合模型的定性仿真方法<sup>[20]</sup> 集成电路的设计密度的增加及随之而来的仿真行为中的计算复杂性的增加使得多级仿真方法占尽优势。Neeraj Kaul, Gautam Biswas 等人以 CMOS 电路为背景,提出了基于多级混合模型的定性仿真方法。多级方法能在不同的粒度上为系统建模,而定性推理技术减少计算复杂性并增加可理解性。他们把电路划分为三个仿真级别:门级、开关级

和设备级,通过在高抽象层次对部分电路进行仿真以及层间信息流而获得效率。他们用C语言完成门级和开关级的CMOS电路分析,用QSIM完成设备级分析,该方法适用于类似电路等易于分级的系统。但目前尚不完善,QSIM所需的QDE模型还需用手工建立。

(4)电子和机械系统的定性仿真方法<sup>[32]</sup> Paul James和Chester Road以电子开关线路为例描述了电子和机械系统的定性仿真方法<sup>[32]</sup>。他们用Envision法建模,并在此基础上引入模糊规则和模糊算术,因此与上面提到的模糊定性仿真方法(基于Kuipers的QSIM算法)有所不同。

总之,定性仿真引起了AI界的广泛关注。《AI》、《IJCAI》、《AAAI》等杂志、会议上这方面的文章较多,一些文章以某一物理系统为背景进行了深入的研究,取得了许多新的成果。概括起来有以下特点:

(1)关于定性仿真的研究范围、概念进行了一定程度的推广,使定性仿真的领域变得宽广。

(2)Kuipers的QSIM方法仍是大多数方法的基础,研究更加深入。

(3)定性定量相结合的处理方法,在许多实际的物理系统中经常出现,应用前景广泛。

### 3 存在的问题和今后发展趋势

定性仿真有很强的物理背景,因而围绕各自的物理背景出现了很多定性仿真方法,但这种方法通用性差,建立起的复杂的理论工具重复的工作多、适应面很窄,说明该领域基础工作的脆弱。另外,新系统的不断出现,也造成定性仿真的混乱,到底什么是定性仿真,定性仿真的范围和作用变得模糊了。

建立一个基于明确领域模型的定性行为仿真系统有许多问题有待解决,主要包括:

(1)缺乏统一的形式框架

尽管有上述基本方法可供遵循,且定性仿真也已广泛地应用到各生产领域,但定性仿真发展时间较短,各种方法还不尽成熟,AI研究者们往往针对已有方法的某一问题提出各自的解决方案,缺乏统一的形式框架,导致适用范围受到限制。

(2)如何有效地结合定量与定性知识

定性是对定量不同层次的抽象,定性与定量是一对相对概念,因此在定性定量之间存在抽象的粒度,在推理过程中,若过多地使用粗粒度知识,则会导致推理的不确定性及虚假现象的生成,反之,若粒

度过细则导致不必要的复杂计算,失去定性推理的优越性。因此如何有效地结合定性定量知识是充分体现定性推理优越性的重要环节。

(3)定性仿真的有效性问题

定性仿真的有效性是指每一个预测行为必将是一个可能解。目前许多定性仿真算法(包括Kuipers的QSIM)都被证明并不是有效的。那么,如何找到足够有效的方法来检测和过滤虚假行为已成为人们关心的问题。

(4)定性仿真中的因果推理

Kuipers 1984年的文章虽名为“因果推理”,其实Kuipers的建模和仿真方法是基于约束的传播和满足。模型中的因果性只不过是外界观察者主观赋予的。如何描述和使用因果性推理是一个重要的待解问题,也正受到各方重视。但发现此问题是困难的,至少现有可能利用的工具难以使用。

近年来,定性推理由于其诸多的优越性已成为一个活跃的研究领域,MIT,Stanford等多所高校都成立了定性推理研究组,AI,AAAI,IJCAI等期刊及会议都收集了大量相关文章。定性推理的应用范围也从1984年的物理现象仿真到现在的生态、光电等多个领域。这些都标志着定性推理研究正趋向成熟。但无论定性推理如何发展,它始终应遵循如下目标:用于知识系统,改进知识表示和使用,提高知识系统的设计技术和水平。定性推理应以任务为中心,以是否获得满意的解释为评价标准。因此,以下几方面将是今后的研究的重点:

(1)建立通用的定性描述语言,

(2)统一的定性定量抽象层次框架,

(3)更加接近人类思维的因果推理形式。

(4)实现在计算复杂性与精确性上合理的折衷。

(5)进一步用来解决实际问题。

### 参考文献

- [1] Y. Iwasaki, Handbook of Artificial Intelligence, vol. 4 (1989)
- [2] 王惠刚等,“计算机仿真原理及应用”,国防科大出版社,1994
- [3] B. Kuipers, “Commonsense Reasoning about Causality: Deriving Behavior from Structure” Artificial Intelligence 24(1986)
- [4] J. De Kleer, et al., “A Qualitative Physics Based on Confluences” Artificial Intelligence 24(1984)
- [5] K. D. Forbus, “Qualitative Process Theory” Same to [4]

- [6] B. J. Kuipers, et al., Higher-order derivative constraints in qualitative simulation. *Artificial Intelligence* 51, 1991
- [7] Giorgio Brajnik et al., Temporal constraints on trajectories in qualitative simulation. In *Working Papers of the Tenth International Workshop on Qualitative Reasoning (QR-96)*, Fallen Leaf Lake, 1996
- [8] California, Pierre Fouché & Benjamin Kuipers, Reasoning about energy in qualitative simulation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 22 (1), 1992
- [9] B. J. Kuipers, Abstraction by time-scale in qualitative simulation. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87)*, Los Altos, CA: Morgan Kaufman, 1987
- [10] B. J. Kuipers et al., Using incomplete quantitative information in qualitative reasoning. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88)*, Los Altos, CA: Morgan Kaufman, 1988
- [11] D. Berleant et al., Qualitative-numeric simulation with Q3. In *Boi Faltings and Peter Struss (Eds.), Recent Advances in Qualitative Physics*, MIT Press, 1992
- [12] H. Kay, and B. Kuipers, "Numerical Behavior Envelopes for Qualitative Models" *AAAI-93*, 1993
- [13] H. Kay, "SQSIM: a simulator for imprecise ODE models" *University of Texas Artificial Intelligence Laboratory TR AI96-247*, March 1996
- [14] O. Raiman, "Order of magnitude Reasoning" *AAAI-86*, 1986
- [15] Marcos Vescovi, et al., "Numerical Interval Simulation: Combined Qualitative and Quantitative Simulation to Bound Behaviors of Nonmonotonic Systems" *IJCAI-95*, 1995
- [16] Shen, Qiang and Leitch, Roy "Fuzzy Qualitative Simulation" *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(4) 1993
- [17] C. Jack, Schryver "Object-Oriented Qualitative Simulation of Human Mental Models of Complex Systems" *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, 22(3) 1992
- [18] K. D. Forbus, et al., "Self-Explanatory Simulations: An Integration of Qualitative and Quantitative Knowledge" *AAAI-90*, 1990
- [19] K. D. Forbus, et al., "Scaling up Self-Explanatory Simulators: Polynomial-time Compilation" *AAAI-95*, 1995
- [20] Kaul Neeraj, et al., "An Artificial Intelligence Approach to Multi-level Mixed-mode Qualitative Simulation of CMOS Ics" *Computers Electronic Engineering*, 20(5), 1994
- [21] James Paul, et al., "Qualitative Simulation of Electrical and Mechanical Systems" *Simulation* 63(1), 1994

(上接第34页)

#### 程序段

```
TYPE TT = |T1|T2|T3;
VAR u1, u2, TT;
```

```
  t1: T1;
  t2: T2; ...
```

```
u1: T1 := t1
```

```
u2 := u1;
u2 := NIL;
```

```
...
TYPE u1 WITH uu OF
```

```
T1: uu := t1;
u1: T2 := t2
```

```
|T2: t2 := uu
```

```
ELSE
END
```

```
...
```

#### 函数应用

```
q0 := init(带参数 T1, T2, T3)
q1 := create(create(q0, "u1"), "u2")
```

```
q2 := set - value (set - type
(q1, "u1", T1), "u1",
value(t1))
```

```
q3 := share(q2, "u2", "u1")
q4 := set - type(q3, "u2", t0)
```

```
q5 := share(create(q4, "uu"), "u1")
```

```
if get - type(q5, "u1") = T1,
q6 := set - value(set - type(set
- value(q5, "uu", value
(t1)), "u1", value(t2)))
```

```
if get - type(q5, "u1") = T2,
q6 := q5(t2 = get - value(q5,
"uu"))
```

```
q6 := q5
```

```
q7 := set - type(q6, "uu", t0)
```

#### 参考文献

- [1] N. Wirth, *Design and Implementation of MODULA*, Software Practice and Experience, 7, 67~84, 1977
- [2] C. A. R. Hoare, An Axiomatic Basis of Computer Programming, *Comm. ACM* 12(10), 1960
- [3] 徐家福, 系统程序设计语言, 北京: 科学出版社, 1983
- [4] 周巢尘, 形式语义学引论, 长沙: 湖南科学技术出版社, 1985
- [5] B. Meyer, *Introduction to the Theory of Programming Language*, Prentice Hall, 1990