



中国计算机学会  
学术著作丛书

# 定性推理方法

石纯一 廖士中

清华大学出版社



中国计算机学会学术著作丛书

# 定性推理方法

石纯一 廖士中

清华大学出版社

**(京)新登字 158 号**

## **内 容 简 介**

定性推理是人工智能学科的一种推理方法,是通过对(物理)系统的结构、行为、功能及它们之间的因果性关系进行研究,以探索人类常识(定性)推理机制为目的,从而有效地完成各项求解任务的一种跨领域的推理方法体系。本书详细而系统地介绍了定性推理的发展历史及当前的主要研究方向,讨论了定性推理的基本方法,阐述了有关定性代数、定性仿真方法,定性因果推理和定性空间推理等,最后给出了几个应用实例。

本书可以作为大专院校计算机及信息技术等专业研究生的教材,也可供从事人工智能、机器学习、数据挖掘等领域的研究工作的科研人员参考。

**版权所有,翻印必究。**

**本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。**

## **图书在版编目(CIP)数据**

定性推理方法/石纯一等编著. —北京:清华大学出版社,2002  
(中国计算机学会学术著作丛书)

ISBN 7-302-05637-4

I. 定… II. 石… III. 人工智能—推理 IV. TP181

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 045425 号

**出 版 者:** 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

**责任编辑:** 薛慧

**印 刷 者:** 北京市清华园胶印厂

**发 行 者:** 新华书店总店北京发行所

**开 本:** 787×1092 1/16 **印张:** 13.25 **字数:** 299 千字

**版 次:** 2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

**书 号:** ISBN 7-302-05637-4/TP·3323

**印 数:** 0001~4000

**定 价:** 20.00 元

清华大学出版社计算机学术著作出版基金

评 审 委 员 会

名誉主任委员：张效祥

主 任 委 员：唐泽圣

副主任委员：陆汝钤

委 员：（按姓氏笔划为序）

王 珊 李晓明 吕 建

林惠民 罗军舟 郑纬民

施伯乐 焦金生 谭铁牛

## 序

第一台电子计算机诞生于 20 世纪 40 年代。到目前为止,计算机的发展已远远超出了其创始者的想象。计算机的处理能力越来越强,应用面越来越广,应用领域也从单纯的科学计算渗透到社会生活的方方面面:从工业、国防、医疗、教育、娱乐直至人们的日常生活,计算机的影响可谓无处不在。

计算机之所以能取得上述地位并成为全球最具活力的产业,原因在于其高速的计算能力、庞大的存储能力以及友好灵活的用户界面。而这些新技术及其应用有赖研究人员多年不懈的努力。学术研究是应用研究的基础,也是技术发展的动力。

自 1992 年起,清华大学出版社与广西科学技术出版社为促进我国计算机科学技术与产业的发展,推动计算机科技著作的出版,设立了“计算机学术著作出版基金”,并将资助出版的著作列为中国计算机学会的学术著作丛书。时至今日,本套丛书已出版学术专著近 50 种,产生了很好的社会影响,有的专著具有很高的学术水平,有的则奠定了一类学术研究的基础。中国计算机学会一直将学术著作的出版作为学会的一项主要工作。本届理事会将秉承这一传统,继续大力支持本套丛书的出版,鼓励科技工作者写出更多的优秀学术著作,多出好书,多出精品,为提高我国的知识创新和技术创新能力,促进计算机科学技术的发展和进步做出更大的贡献。

中国计算机学会  
2002 年 6 月 14 日

## 前 言

定性推理(qualitative reasoning)是人工智能学科的一种推理方法,源于对物理系统的行为进行定性(或定性定量相结合)推理,所以也称为定性物理。这种方法也属于常识推理范畴,常常能给出物理过程的简化描述和令人满意的解释,已得到人工智能界的重视。

1977年,Reiter发表了第一篇定性推理的论文。1984年,《Artificial Intelligence》杂志出版了定性推理的专辑(一),刊载了de Kleer, Forbus和Kuipers等人关于定性推理奠基性的文章。1991年,该杂志又出版了定性推理专辑(二),标志着定性推理分支走向了成熟。

在这样的背景下,著者从1989年起,在国内开展了定性推理方法的研究,在拓扑定性推理、定性代数、定性仿真和因果推理方面做出了一定的成绩。本书是集体研究成果的汇集,是我们研究工作的总结。参与研究工作的有廖士中、巩昌平和顾宇红博士,以及李孝光、陈见、蔡勇、赵永、王锵、毛军和薛冬白等硕士。本书由李毅博士整理出初稿,后由廖士中博士整理完稿。

在我国计算机学术界著名学者陆汝钐先生的支持下,本书获得清华大学出版社计算机学术著作出版基金的资助,在此向陆汝钐先生和清华大学出版社深表谢意。

书中一些观点和见解定会有不少不准确甚至不当之处,请读者批评指正。

石统一

2001.12 于清华园

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第一章 定性推理概述                 | 1  |
| 1.1 什么是定性推理                | 1  |
| 1.1.1 定性推理的出现              | 2  |
| 1.1.2 定性推理的定义              | 3  |
| 1.1.3 定性和定量的关系             | 4  |
| 1.2 定性推理的系统构成、基本要素和任务      | 5  |
| 1.2.1 定性系统的构成              | 5  |
| 1.2.2 定性推理的基本要素            | 6  |
| 1.2.3 定性推理的任务              | 7  |
| 1.3 定性推理的分类及主要工作           | 8  |
| 1.3.1 按论域是否连续划分            | 8  |
| 1.3.2 按定性变化的时空特性划分         | 8  |
| 1.4 当前发展趋向                 | 11 |
| 1.4.1 对定性推理的错误认识           | 11 |
| 1.4.2 发展趋向                 | 12 |
| 1.5 最新进展                   | 13 |
| 1.5.1 基本理论进展               | 13 |
| 1.5.2 应用进展                 | 18 |
| 1.5.3 进一步研究工作              | 19 |
| 第二章 定性推理的基本方法              | 20 |
| 2.1 de Kleer 的 Envision 方法 | 20 |
| 2.1.1 量空间和定性演算             | 20 |
| 2.1.2 用定性演算进行推理            | 23 |
| 2.1.3 系统表示                 | 25 |
| 2.1.4 行为预测                 | 27 |
| 2.2 Forbus 的定性进程理论         | 28 |
| 2.2.1 对象和进程的表示             | 29 |
| 2.2.2 量空间                  | 30 |
| 2.2.3 行为预测                 | 31 |
| 2.2.4 定量定性知识结合             | 32 |
| 2.2.5 动作处理                 | 33 |
| 2.3 Kuipers 的 QSIM         | 35 |

|            |                              |           |
|------------|------------------------------|-----------|
| 2.3.1      | 量空间和状态转换 .....               | 35        |
| 2.3.2      | QSIM 算法 .....                | 37        |
| 2.3.3      | 上抛球运动的定性模拟例 .....            | 37        |
| 2.3.4      | QPC .....                    | 38        |
| 2.4        | Iwasaki 和 Simon 的因果顺序法 ..... | 41        |
| 2.4.1      | 因果顺序方法的提出 .....              | 41        |
| 2.4.2      | 因果顺序方法是基本方法 .....            | 41        |
| 2.4.3      | 当前进展和进一步研究工作 .....           | 42        |
| <b>第三章</b> | <b>定性代数 .....</b>            | <b>43</b> |
| 3.1        | 定性代数方法 .....                 | 43        |
| 3.1.1      | 量级推理代数 .....                 | 43        |
| 3.1.2      | Williams 的混合定性代数 .....       | 44        |
| 3.1.3      | Wong 和 Yao 的优先关系方法 .....     | 44        |
| 3.2        | 一种定性代数的形式框架 .....            | 45        |
| 3.2.1      | 形式框架 FAQA .....              | 46        |
| 3.2.2      | 定性混合结构 .....                 | 48        |
| 3.2.3      | 举例 .....                     | 49        |
| 3.2.4      | 小结 .....                     | 51        |
| 3.3        | 基于代数的定性推理方法 .....            | 51        |
| 3.3.1      | 定性化方法 .....                  | 51        |
| 3.3.2      | 定性代数空间 .....                 | 52        |
| 3.3.3      | 定性关系空间 .....                 | 58        |
| 3.3.4      | 定性关系代数空间 .....               | 59        |
| 3.3.5      | 定性模空间 .....                  | 61        |
| 3.4        | 基于范畴的定性模型 .....              | 62        |
| 3.4.1      | 定性范畴 .....                   | 62        |
| 3.4.2      | 定性建模方法 .....                 | 64        |
| 3.4.3      | 定量到定性的变换方法 .....             | 65        |
| 3.4.4      | 定性代数范畴与建模 .....              | 70        |
| 3.4.5      | 定性联系范畴与建模 .....              | 71        |
| 3.4.6      | 定性与定量结合范畴与建模 .....           | 72        |
| <b>第四章</b> | <b>定性仿真方法 .....</b>          | <b>76</b> |
| 4.1        | 基本方法 .....                   | 76        |
| 4.1.1      | 定性过滤 .....                   | 76        |
| 4.1.2      | 定性定量相结合 .....                | 77        |
| 4.1.3      | 其他定性仿真方法 .....               | 79        |

|            |                    |           |
|------------|--------------------|-----------|
| 4.2        | 基于比较的一种定性仿真方法      | 80        |
| 4.2.1      | 概念定义               | 80        |
| 4.2.2      | 比较仿真               | 82        |
| 4.2.3      | CQSIM 工作流程         | 86        |
| 4.2.4      | 小结                 | 87        |
| 4.3        | 定性仿真的一种归并方法        | 87        |
| 4.3.1      | 多个推理分支以及虚假行为的产生    | 87        |
| 4.3.2      | 问题的提出              | 88        |
| 4.3.3      | 归并方法               | 89        |
| 4.3.4      | 小结                 | 94        |
| <b>第五章</b> | <b>定性因果推理</b>      | <b>95</b> |
| 5.1        | 基本方法               | 95        |
| 5.2        | 因果语义结构表示法          | 95        |
| 5.2.1      | 有限表因果分析法           | 96        |
| 5.2.2      | 因果语义结构             | 99        |
| 5.3        | 因果关系中的冲突处理         | 100       |
| 5.3.1      | 问题描述               | 101       |
| 5.3.2      | 因果关系图              | 101       |
| 5.3.3      | 因果推理               | 103       |
| 5.3.4      | 动态增量分析             | 105       |
| 5.4        | 因果推理的一种形式框架        | 105       |
| 5.4.1      | 确定性因果关系            | 105       |
| 5.4.2      | 因果推理               | 109       |
| 5.4.3      | 因果推理系统 CRSC        | 109       |
| 5.5        | 随机环境下的因果推理         | 111       |
| 5.5.1      | 静态结构因果分析           | 111       |
| 5.5.2      | 平衡结构因果顺序分析         | 112       |
| 5.5.3      | 因果网络推理举例           | 115       |
| 5.5.4      | 平衡结构下因果效用分析        | 117       |
| 5.5.5      | 动态系统下因果分析          | 119       |
| 5.6        | 基于分层因果关系的定性推理方法    | 121       |
| 5.6.1      | 因果关系的获取            | 121       |
| 5.6.2      | 一种因果决定关系图的构造方法     | 125       |
| 5.6.3      | 因果决定关系图的转换方法       | 129       |
| 5.6.4      | 分层因果关系上的定性推理(LCQR) | 129       |
| 5.6.5      | 小结                 | 133       |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| <b>第六章 拓扑与形状</b>       | 134 |
| 6.1 基本方法               | 134 |
| 6.1.1 公理化方法            | 134 |
| 6.1.2 代数方法             | 135 |
| 6.1.3 几何约束满足方法         | 135 |
| 6.1.4 基于模型的推理方法        | 136 |
| 6.2 分层逼近方法             | 136 |
| 6.2.1 基本原则             | 136 |
| 6.2.2 定性表示             | 137 |
| 6.2.3 推理方法             | 138 |
| 6.3 拓扑推理               | 140 |
| 6.3.1 拓扑关系的闭球模型        | 140 |
| 6.3.2 拓扑推理的分层逼近方法      | 147 |
| 6.3.3 小结               | 152 |
| 6.4 形状                 | 153 |
| 6.4.1 准分形形状的定性表示       | 153 |
| 6.4.2 自然准分形的形状建模       | 156 |
| 6.4.3 讨论               | 162 |
| 6.4.4 小结               | 162 |
| 6.5 Voronoi 图式         | 163 |
| 6.5.1 基本 Voronoi 图式    | 163 |
| 6.5.2 广义 Voronoi 图式    | 164 |
| 6.6 平面形状的定性表示          | 166 |
| 6.6.1 关于定性表示           | 166 |
| 6.6.2 基本概念             | 167 |
| 6.7 层次 Voronoi 骨架构造算法  | 170 |
| 6.8 定性 Voronoi 骨架      | 171 |
| 6.9 平面形状的定性逼近          | 172 |
| 6.9.1 定性 Voronoi 骨架的化简 | 172 |
| 6.9.2 定性 Voronoi 骨架的标识 | 173 |
| 6.10 布置的定性表示和处理        | 175 |
| <b>第七章 应用</b>          | 176 |
| 7.1 基于示例的定性定量混合系统      | 176 |
| 7.1.1 引言               | 176 |
| 7.1.2 定量和定性建模          | 176 |
| 7.1.3 基于示例的定性推理        | 177 |
| 7.1.4 定性与定量相结合与建模      | 178 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 7.1.5 经济分析预测示例.....          | 180 |
| 7.2 CQSIM 方法的应用.....         | 181 |
| 7.2.1 选择观察标准,实现一致部分的比较 ..... | 181 |
| 7.2.2 多个偏差共同作用的比较仿真.....     | 181 |
| 7.2.3 行为拓扑变化.....            | 182 |
| 7.3 归并方法举例 .....             | 183 |
| 参考文献.....                    | 188 |

# 第一章 定性推理概述

从人工智能(artificial intelligence,简称 AI)这一概念提出以来,专家系统作为 AI 的最主要成果得到迅猛的发展,但在研制过程中遇到的一系列困难严重阻碍了它的实际应用,甚至可以毫不夸张地说,基于 MYCIN 的第一代专家系统已经没有发展的余地。这一代专家系统的问题主要表现在:

- (1) 知识获取:特别是基于经验的知识获取,几乎没有取得什么值得注意的成果;
- (2) 知识表示模型:主要采用一阶谓词逻辑,由此导致系统描述方法单一,应用中造成不便。

AI 专家们注意到:利用定性物理(qualitative physics)的部分概念和建模方法,利用定性推理(qualitative reasoning)获取、表示和使用专家的常识知识,能在一定程度上解决这些问题。由此导致定性推理成为 AI 研究的又一活跃领域。当然,定性推理的提出还有许多其他的原因及背景。

AI 中的定性推理理论源于对物理现象的研究,早期的工作常常是在特定的论域中,比如针对动力学问题、流体力学问题和热流等问题进行讨论。1977 年,Reiter 发表了第一篇定性推理方面的论文。1984 年,《Artificial Intelligence》杂志出版了定性推理专辑,刊载了 de Kleer、Forbus 和 Kuipers 等人关于定性推理的奠基性文章,标志着定性推理开始走向成熟。AAAI-88 论文集中有十多篇定性推理方面的文章,IJCAI-89、AAAI-90、AAAI-91 和 IJCAI-91 论文集中也各自收录了 10 篇左右关于定性推理的文章,说明了 AI 界对定性推理的高度重视。1991 年,《Artificial Intelligence》杂志出版了定性推理专辑(二),标志着定性推理又进入了一个重要阶段。

需要提到的一点是,由于定性推理源于物理现象研究这一特殊历史事实,所以,常常把定性推理和定性物理看作同一概念,尽管二者是有区别的(定性物理是广义一些的概念,它是关于定性建模和定性推理的理论)。下面我们仍沿这一习惯,对这两个术语不做严格区分。

## 1.1 什么是定性推理

定性物理是对物理系统(包括自然系统和人造系统)的行为进行定性推理的一个 AI 研究领域,它不同于对物理系统行为的数字仿真,后者是在不同时间点变量的数字值集合的层次上进行行为推理,而定性推理则在行为的定性特征这一更抽象层次上进行,目标是弄清楚定性行为推理需要的知识类型,给出这种知识表示的一般框架,从而有效地对物理系统行为进行定性推理。

### 1.1.1 定性推理的出现

首先,分析一下定性推理的起源及诱发定性推理研究的一些原因。

#### 1. 现实世界的常识推理

常识的使用与表示一直是 AI 中未解决的难题,常识的特点是可以利用,但不一定可解释,而且不精确、不完备,但很多情况下却极为有效。常识大致可分为两类:

- 定性知识

这类知识有明确的结构,但不必精确描述各个环节的精确值,而只能或只需陈述其变化趋势。也就是说,不使用数量来描述系统所表现的行为。

- 基于经验的知识

这类知识大多不能清楚地陈述出它的结构,但却是人类思维活动中最有效的知识。

刻画定性知识是促成定性推理研究的最主要因素之一。人们在日常生活中可以轻而易举地完成常识推理。比如向空中抛一个小球,可以预测小球首先继续向上运动,而速率逐渐减小至零,其后以逐渐增大的速率向下运动直至撞到地面。当然,也可以建立数学方程求解小球的运动轨迹来得出同样的结论,然而人们在进行常识推理中既不需要数学知识也无须知道精确的物理定律,这就促使定性推理去研究这种常识推理的知识类型以及人们是如何运用它的。

#### 2. 特定领域的定性推理

人们不仅进行定性常识推理,在特定知识领域也常常进行定性推理。在复杂的情况下这往往很有好处。有时只有关于行为的定性知识,而关于变量及其关系的精确信息都不可能获得,在这种情况下就需要做出定性分析与预测。比如,在生态学中进行狐狸和野兔间数量关系的研究时,可以知道狐狸数量的增加(减少)将导致野兔数量的减少(增加),而野兔数量的减少会导致狐狸数量的减少,这时,不可能确切地知道两者数量之间的数学关系。另外,在有些情况下(比如只需要定性行为描述),详细精确的定量信息也是不必要的。

#### 3. 从第一原则出发的基于模型的推理

专家系统成功的一个主要因素在于大量地运用启发式知识,这种依赖于领域的浅层知识能够非常有效地缩小搜索空间,但在超越它们狭窄的问题领域之后,即使是面对非常简单的问题也束手无策。另外在进行不同人物之间的知识转换时,即使是同一形式的知识也不知如何是好。造成这种现象的主要原因在于,目前的专家系统缺乏领域的基础知识,这就引发了从第一原则(first principles)出发建构系统的思想。所谓第一原则指的是使用深层(基础)知识而不是浅层(启发式)知识来建模和推理。如何表示和使用这种深层知识也是定性推理研究的一个重要课题。

#### 4. 动态特性与时态推理

许多情况下需要了解系统的动态特性以及场景(situation)如何随时间变化,而目前的专家系统大多只能进行静态分析推理,缺乏时间的良好表示以及时态推理机制。数字仿真虽然能对随时间变化的行为进行推理,但需要大量繁琐的数字计算。定性推理研究的目的,就是弄清楚如何进行定性行为时态推理以及如何有效地表示相应的知识以利于

问题求解。

## 5. 因果推理

因果推理是人类推理的一种主要形式,因果性在人类认识世界的过程中占有举足轻重的地位,“ $A$  引起  $B$ ”这种形式在日常生活中司空见惯。但是,传统的启发式推理系统都不能很好地做出因果解释,因为人类专家能够用一些基本的因果机制来解释他的结论,而推理系统只能用一些启发式规则做出解释,但因果性早已在推理过程中被知识与规则的组合和使用所湮灭了。数字仿真能很好地描述系统的行为,但因果性仍需要人们进行分析以做出解释。因此,因果推理作为定性推理的一个分支,不仅需对系统的行为做出定性分析预测,而且要能够给出系统行为的因果解释。

以上 5 点是促成定性推理研究的主要原因。

### 1.1.2 定性推理的定义

要给出定性推理的定义,必须首先弄清楚定性的背景与含义。

(1) 钱学森在关于处理开放复杂巨系统中使用从定性到定量的综合集成技术时提到:处理复杂行为系统的定量方法学是科学理论、经验和专家判断力的结合,这种定量方法学是半经验、半理论的。提出经验性假设(猜想或判断)是建立复杂行为系统数学模型的出发点,这些经验性假设不能用严谨的科学方式证明,但需要经验性数据对其确定性进行检验,从经验性假设出发通过定量方法途径获得结论。当人们寻求用定量方法处理复杂行为系统时,容易注意数学模型的逻辑处理,而忽视数学模型微妙的经验含义或解释。要知道,这样的数学模型“理论性”看似很强,其实不免牵强附会,从而脱离真实。与其如此,不如从建模一开始就老实地承认理论的不足,而求助于经验性判断,把定性方法和定量方法结合起来。这里对定性方法从一般方法论的角度给予了必要性解释。

对人工智能,钱学森是这样定义的:“人工智能”是一门对各种定性模型(物理的、感知的、认识的和社会系统的模型)的获取、表示和综合使用的计算方法进行研究的学问。这里,对定性模型和方法在人工智能中的意义和地位给予了高度评价。

(2) 可以从常识处理的简单、直观情形出发来理解定性推理的基本观点:

- 忽略被描述对象的次要因素,掌握主要因素来简化问题的描述,用离散的、符号的方式来描述连续的现实世界;
- 把随时间  $t$  连续变化的参量  $x(t)$  的值域离散化为定性值集合;
- 依据物理规律建立定性方程,或直接把描述物理系统的微分方程转换为参量之间的定性约束关系,或对物理现象的变化过程给出进程描述等;
- 最后给出行为的定性预测或定性解释。

(3) 1989 年 Iwasaki 在《人工智能手册》第 4 卷的“定性物理”部分中是这样论述定性推理的:定性的含义包括推理使用的信息是定性的和推理得出的结论是定性的这两个方面。推理中使用的定性信息可以是量值的不精确信息(可以有各种不同的形式,如区间、函数、关系等)以及非量值信息(如因果性、稳定性等)。进一步地,Iwasaki 指出定性推理实际上是一个包括 AI、经济学、生态学、社会学和应用数学等在内的跨领域研究课题。

(4) 1991 年 Williams 和 de Kleer 在《Artificial Intelligence》杂志的定性推理专辑

(二) 的前言中是这样论述定性推理研究的: 定性推理的中心任务是研究构成工程师、科学家和常人在对物理机制假设、测试、预测、创新、优化、诊断和查错时运用的核心技术的计算理论。这里强调了面向应用和任务的定性观点。

(5) 1989 年王珏在对定性模型进行分析之后认为, 由于涉及的问题不同, 研究的重点不同, 会有许多定性推理的推理模型, 但本质上具有共性: (定性推理主要是) 研究系统结构、行为和功能的描述以及它们之间的关系。

(6) 1991 年编者给出了一个定性推理的定义: 定性推理是从物理系统的结构描述出发, 导出行为描述, 预测物理系统的行为, 并给出因果关系的解释。它采用系统部件间的局部传播规则来解释系统的行为, 即认为部件状态的变化只与直接相邻的部件有关。

综合上面这些观点, 可以给出定性推理的一个定义: 定性推理是通过对(物理)系统的结构、行为、功能以及它们之间的关系和因果性进行研究, 以探索人类常识(定性)推理机制为目的, 从而有效地完成各项求解任务的一种跨领域的推理方法体系。

### 1.1.3 定性和定量的关系

人类对客观世界的认识往往是从定性的认识上升到定量的认识。对某些实际物理系统或系统中的某些环节, 由于条件的限制也只能得到它们的定性描述。在这种情形下通过定性推理也能得到系统的某些性质和结论。这种定性方法不同于传统的定量方法, 它们是两种不同的方法体系, 其主要区别为:

(1) 物理量度量尺度不同。这是两种方法体系的本质区别。在传统的定量方法中, 物理量的度量尺度是无限稠密和均匀的, 物理量用精确的数值表示。而在定性方法中, 物理量的度量尺度是被界标点(landmark)离散化的实空间, 不再具有无限稠密、均匀和精确的性质。

(2) 物理模型不同。传统定量方法中使用的是定量物理模型, 物理量之间的关系用代数方程、微分方程等精确描述, 系统的因果关系必须在模型外由人来给出。而定性方法中使用的是定性物理模型, 物理量之间的关系用定性约束、定性进程等描述, 系统的因果关系体现在模型之中。

(3) 仿真过程和仿真结果不同。在传统的定量方法中, 仿真的过程就是求解代数方程或者微分方程的过程, 仿真的结果是精确的物理量数值。而在定性方法中, 仿真是通过局部传播实现的, 仿真的结果是系统的行为描述, 能完成系统的行为预测与行为解释。

(4) 推理能力不同。在传统的定量方法中, 物理量及物理量之间的关系都是精确描述的, 模型本身不具备推理能力, 物理量之间的因果关系湮没在精确的数值之中, 系统的行为分析和因果解释必须由人来完成。而在定性方法中, 物理量之间的因果关系直接反映在系统的结构描述中, 通过局部传播就能实现系统的行为预测和行为解释。

图 1.1 描述了定性方法和定量方法之间的关系。

定性方法和定量方法虽然在本质上有不同, 但都是对实际物理系统的结构和行为进行描述与分析。传统的定量方法能给出实际物理系统的精确描述, 但不具备推理能力; 定性方法具备推理能力, 能表达实际物理系统中的因果关系, 能在较高层次上给出系统的宏观描述, 但在要求精确描述物理量时则显得无能为力, 它是以放弃对物理量描述的精确

性为代价换取了对实际物理系统的推理能力。这两种方法在一定程度上具有互相补充的性质。

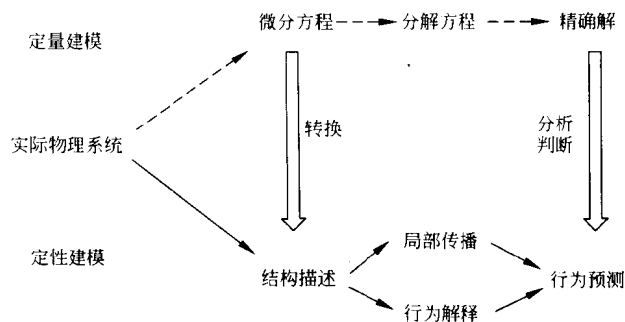


图 1.1 定性方法和定量方法关系图

## 1.2 定性推理的系统构成、基本要素和任务

本节通过对目前定性推理研究工作的分析和总结，讨论定性系统的构成、定性推理的基本要素和目前定性推理所完成的任务。

### 1.2.1 定性系统的构成

对任何系统的描述事实上都有三个部分：对系统结构的描述；对系统所表现行为的描述和从结构描述到行为描述的转换过程（对定性系统成为定性仿真）。

例如，对一个液体管道系统，可以用微分方程  $dQ_R/dt = k(P_L - P_R)$  来描述系统结构，其中， $P_L$  和  $P_R$  分别是管道左、右两端的液压， $Q_R$  是流向管道右端的液体流量， $k$  为常数。其行为描述就是这个微分方程的解，转换过程就是利用数学工具求解微分方程的过程。

定性系统所表达的方式与上述（定量）方法的区别主要在于讨论的值域和定义域不同，即定性系统只关心定性的趋势，如增、减、不变等，这种结构描述和行为描述的不同将导致完全不同的转换过程。

定性系统对实际物理系统的描述由三部分构成：结构描述、行为描述和功能描述。结构描述是用定性的形式表示实际物理系统的结构，并体现实际物理系统的物理量及其相互作用关系。结构是确定定性推理模型的关键，研究者们往往根据描述对象的不同采用不同的结构模型。行为是实际物理系统的定性状态及其变化过程，行为描述是用定性的形式表示实际物理系统中的物理量及其相互作用构成的网络的整体行为（aggregate behavior）。不同的结构描述模型将导致完全不同的行为描述。功能描述是用定性的形式表示实际物理系统的行为表现与使用者目标的一致性，这往往是针对人造系统而言的。功能描述是较行为描述更高层次的描述，它是对实际物理系统行为表现的一种理解，在系统设计中，如果两个系统的功能相同，无论它们的结构是否一致，它们在功能上都是可以替代的。

定性物理首先建立实际物理系统的结构描述,在此基础上通过定性预测得到实际物理系统的行为描述,这个过程就是从结构描述到行为描述的转换过程,最后通过分析系统的整体行为表现,得到实际物理系统的功能描述。

### 1.2.2 定性推理的基本要素

#### 1. 量空间

从定性推理研究的论域出发,可以区分两类不同的定性推理:一类论域中的变量是连续变化的,另一类论域中的变量是离散变化的。

比如,诊断和验证讨论的都是数字化问题,属于离散型的定性推理研究,而其他大部分工作都属于第一类研究范畴。

对于第一类定性推理研究,必须把连续的论域定性量化为一个离散的符号集,使得选择在同一个开域内的值表现出定性一致的行为性质,而边界值则反映出发生重要转化的位置。沿用 Hayes 在“Naive Physics Manifesto”一文中的习惯,一个连续空间的离散化表示称为“量空间”(quantity space)。最简单的量空间是  $S = \{+, 0, -\}$ , 分别表示正数、零和负数。关于量空间的选择、抽取和转换已有大量研究工作。

#### 2. 本体基元

定性推理模型必须有效地表示结构知识和行为知识。结构描述是以本体基元(ontological primitives)为基础的,基元是实际物理系统结构中具有独立功能的最小单元,不同基元的选择确定不同的结构描述,不同的结构描述确定不同的定性模型。

de Kleer 和 Brown 在 Envision 中把管子、阀门等装置的拓扑结构(子部件)作为基元,Forbus 在 QPT 中把进程(process)作为建模基元,而 Kuipers 的 QSIM 中的基元则是系统状态变量之间的定性约束。本体基元的选择一般应满足两个条件:

- 是表示有意义常识的最小单元;
- 能够描述所有的物理过程。

#### 3. 建模原则

从实际物理系统建立定性模型必须遵循以下 3 个原则:

- 可合成性(compositionality)

要求系统的行为描述必须从系统的结构中得出。在建立物理系统的结构描述时,通常把它分解为子部件(component),然后建立每个部件的结构描述及部件之间相互作用的描述,这样,系统结构就由部件、部件行为和部件间的联系组成。每个部件都表现出一定的行为,部件行为之间存在相互作用,实际物理系统的整体行为能通过一定的方法从部件行为及它们之间的相互作用推导出来。

- 局部传播性(locality)

在定性物理中,两个位置之间是否存在局部性是由它们之间是否存在直接的物理连接来定义的。定性推理要求影响(effect)只能通过特殊的物理连接局部传播,也就是部件的行为和状态变化只与直接相邻或直接相关的部件有关。对这种局部传播规则的解释即是所谓的因果性(causality)。