

摘 要

（概念设计时期，系统结构的信息是不充足、不完全的，不能或不需利用传统的数值分析工具进行分析求解。多数情况下，只需利用系统的各种原理，进行定性的分析和推理即可获得所需要的结果。定性推理是从系统结构的定性描述出发，导出行为描述，以便预测系统的行为并给出原因解释。

定性推理主要包括两部分：定性模型的建立和基于定性模型的推理。本文在深入研究各种定性推理方法的基础上，利用 De Kleer 的基于“流”的思想，建立了一类问题的定性模型，并在建模过程中结合该类问题的特点给出了一些建模假设，在此基础上给出了一个定性推理框架，着重讲述了推理中的因果关系和约束传播过程。因果关系是定性推理的一个重要方面，如何处理推理中的因果信息流动，需要根据不同问题采用不同方法。针对文中解决的特定问题，采用因果序方法建立系统全局因果关系图，可以很好地解决这个问题。（约束传播过程可以看作是求解约束满足问题的过程，一般约束满足问题是一个 NP 问题，利用系统的因果机制可以将这个问题简单化，传播过程中加入优先级排序方法有效地避免了使用错误假设并保证了按实际传播路径进行。）最后为了实现并验证上述定性推理的各项工作，设计了一个定性推理实验系统 QSB。

【关键词】 概念设计 定性推理 因果序 因果关系图 约束传播

Abstract

In conceptual design, the details of a structure are insufficient to warrant the use of numeric tools traditionally used in structure analysis. Mostly, in order to obtain the result, all kinds of principles of system for analyzing and reasoning are only needed. The basic task of qualitative reasoning is to derive behavior from a qualitative description of a system structure and explain the behavior of physical system.

Qualitative reasoning includes two parts: qualitative model generation and qualitative reasoning about the model. Based on researching deeply several reasoning methods available, a qualitative model is provided according to the conceptual of confluence introduced by De.Kleer. Some assumptions are given to generate the model for qualitative analysis and to carry out the constraint propagation. This paper presents a qualitative reasoning prototype system (QSB) and emphasizes constraint propagation, and the causal relationship between system's parameter. Causality is an important aspect. How to process the causality in system is a sophisticated problem. Aimed at the special problem in this paper, we employs a causal ordering mechanism to create a causal dependency network. Constraint propagation is a constraint satisfied problem (CSP). The solution of a CSP is generally very difficult to be got. It can be simplified to utilize the system's causal mechanism. The priority ordering developed by author is introduced to avoid efficiently performing wrong hypothesis and warrant the reasoning successfully. At last, an experiment system for the qualitative analysis about the center of gravity is proposed to verify the work in qualitative reasoning above.

【Key words】 Conceptual design Qualitative reasoning Causal ordering
Causal network Constraint propagation

声 明

创新性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

本人签名： 石莉

日期 2000.1.3

关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

本人签名： 石莉

日期 2000.1.3

导师签名： 赵克

日期 2000.1.3

第一章 绪论

1.1 课题的提出

二十一世纪的今天,科学技术飞速发展,新知识、新技术不断推陈出新,产品更新换代越来越快。如何缩短设计周期,降低成本,快速抢占市场先机已成为众商家立足市场的根本。随着工业生产的发展,设备和产品的功能与结构日趋复杂,产品设计在整个生命周期内占有越来越重要的位置。作为只占5%产品成本的设计活动往往决定占到70%-80%的产品成本。因此,深入研究产品设计过程和特点、掌握其规律便成为产品设计的主要研究课题。

由于对设计的内涵和设计的理论有不同的认识、不同的理解,产品设计过程被描述为不同的形式,主要有以下三种^[35]:一是 Pahl 和 Beitz 认为:机械设计分为明确任务、概念设计、技术设计和施工设计等四个阶段。二是 Koller 认为:机械设计分为产品规划、功能设计、定性设计和定量设计等四个阶段。三是邹慧君教授提出:机械设计分为产品规划、方案设计、详细设计和改进设计等四个阶段。在上述产品设计过程中,概括起来说,设计的主要步骤是两步:一是概念设计(Conceptual Design),另一是构型设计(Configuration Design)。其中概念设计是产品设计中的重要阶段,它是决定一个项目或系统投资多少诸多因素中的一个重要因素,是整个进程中最终决定产品技术经济效果的关键阶段。对于概念设计的本质、特点及其实现是当前智能 CAD 中研究的关键技术。

概念设计是设计的早期阶段,这一阶段的设计结果直接影响到最终的设计过程,关系到设计的质量和效率。

然而,概念设计时期所给出的信息通常是不完全、不精确的。采用传统的数值分析工具对系统构造精确的定量模型是十分困难或不可能的。而且很多时候,我们并不需要对所要解决的问题建立精确的数学模型,只需依靠对问题中所蕴含的原理的理解,进行定性分析即可得到结果。这种对问题的原理性理解的基础就是定性知识,这种定性知识在实际解决问题中往往是十分有效的。

同时,概念设计阶段不需要得到且也不可能得到详细的设计细节,只需给出系统的大致描述。此过程中,人们常常只对有关系统本质的定性知识感兴趣,庞杂繁冗的精确定量知识一般是不必要的。而且概念设计是一个设计—分析—再设计的螺旋式的反复过程,大量的重复设计是避免不了的,而利用设计初期阶段的知识对系统定性建模,定性给出系统的行为预测及大致的设计方向,可以有效地减少重复设计过程,提高设计效率,减小设计代价,降低设计成本。

随着设计理论和方法以及人工智能技术的发展,计算机辅助概念设计系统的研究已成为90年代设计自动化的一个重要研究领域。在计算机辅助设计中,对

于方案、流程、原理图的设计，由于其中含有大量不精确信息，故多采用专家系统方式实现。然而，在专家系统中^{〔30〕}，根据专家们的经验和判断所建立的知识是一种“浅层”知识，所谓“浅”是因为它们是直接从现实世界的观察中总结出来的，是一种经验性的“如果…就…”类型的知识，因此当外界条件发生变化碰到新情况或系统知识不完备时，系统往往不能做出正确的判断。基于规则的方法中，经验知识只是对现象和结论之间的相互关系的一种不完全的描述，它不能充分体现两者之间必然的因果联系。在研究与应用领域内，存在一些基本的规律和法则，它们能够描述现象与结果之间必然的关系，例如在数学上表示为方程或函数关系，这些知识我们称之为“深层”知识。如何利用这些“深层”知识来改善专家系统的性能呢？新的方法采用了因果联系，可以对系统的运行结果给出准确的解释。通过对物理学专家的因果推理机制的研究表明，定性地描述模型中的变量、它们的变化方向及作用在它们上面的约束是很重要的。定性推理方法提出了基于对这些“深层”知识建立定性模型的推理方法，使第一原理（即设计中所用到的各种物质世界的已有客观规律）和经验知识有机结合，改善了知识库的组织，使知识库便于管理和维护，系统性能增强。综上所述，由于设计的早期阶段知识的不完备和不精确，概念设计及详细设计分别需要不同的分析工具，使得定性推理在产品概念设计中的应用成为必然的趋势。

1.2 国内外相关技术的发展

1.2.1 概念设计的研究动态

目前，在构造实现支持概念设计的系统时，常采用以下四种方式 1) 基于模型的设计 (Model Based Design); 2) 基于原型的设计 (Prototype Based Design); 3) 基于事例的设计 (Case Based Design) 4) 人工神经网络方法 (ANN Method)。

● 基于模型的设计 (Model Based Design)

基于模型的设计方法是指从预先定义好的模型集合中选取满足设计需求模型，并将这些模型组合起来，实现整个产品的需求。基于模型的设计与规则表示有着很自然的联系，所以也称为基于第一原则 (first principle) 的设计。

基于模型的设计中最典型的研究当数 IMS (Intelligent Manufacturing System)。它是一个全球性的研究项目，目标是要在制造领域内为协同研究和协同发展项目提供一个全球性的框架。在 IMS 中，GNOSIS 系统用于支持产品的概念设计。它以知识库为支持，从产品的功能定义出发，以功能—行为—结构 (FBS) 为推理线索，以物理特征为基本元素来生成产品的功能模型，得到产品的设计方案。在 CNOSIS 中，设计人员首先对产品的功能做功能分解。在功能分解定义的最底层，通过物理特征将产品的功能行为和结构联系起来，得到一个功能分解图和一个行

为网络图。在此基础上,采用定性仿真技术对产品方案作分析,完善产品方案。IMS的方法在汽车和飞机等的功能可靠性设计中得到了应用,但对创新设计的研究还有许多工作要做。

● 基于原型的设计 (Prototype Based Design)

区别于基于模型的方法,当对一个或一类完整的设计建立模型,并能将这个模型用来支持新设计时,就得到了基于原型的设计方法。在相当多的文献中,也将这种方法称为基于模板的设计 (Template Based Design) 方法。这种方法的关键在于怎样刻画原型的各组成部分及其关系,使之能便于新设计任务的查询和完成设计原型的实例化。

这种设计方法对结构元素间耦合性很强的机械产品设计有较好的效果。但是,由于原型参数的取值空间多为离散空间,确定这些参数的值,使之能满足新设计或优化设计就成了基于原型设计方法中的一个重要问题。在大部分的商品化软件中,原型通常是以参数化的形式表示和应用的。

● 基于事例的设计 (Case Based Design)

基于事例的设计是将以往的设计记录作为事例,使用过去的设计结果来支持当前设计任务的方法。将事例方法用于产品早期设计过程,并形成了较为完善的理论和技术方法的研究不多见,相当多的工作集中于用事例方法对产品的结构模型做改进设计。澳大利亚的 Lena Qian 和 John S.Gero 等人在用事例方法支持产品的概念设计方面作了较多工作。他们的主要思路是从产品的功能行为层次以规则匹配的方法从事例中获取产品设计所需的信息,但是没有功能的形式化定义方法和方案评估的方法。同时,由于在事例的信息获取时没有考虑功能和行为的语义,使得功能匹配和行为匹配实际上是设计对象和事例分别在功能网络图和行为网络图的拓扑结构上的匹配。虽然这种匹配方法带来了得到完全创新设计的极大可能,但有时候也会得到让人啼笑皆非的设计方案。

● 人工神经网络方法 (ANN Method)

人工神经网络 (Artificial Neural Net, ANN) 是追求用机器实现人类智能的技术最早技术之一。它用有向弧联系的节点形成的网络来模拟神经系统的物理结构,用输入向量模拟神经系统的输入信号,用输出向量模拟神经系统的输出信号,用阈值函数控制网络的输出,用输入向量中各元素的加权和与阈值函数的值比较,得到网络的输出。一般来说,ANN方法对分类问题和与记忆相关的检索问题有较好效果。工程设计和产品设计中的ANN应用更多表现在设计问题分类和确定设计参数的最接近值两个方向。ANN方法应用在产品设计中的局限是设计必须由给定的属性确定,因此,所采用的推理是相当浅层次的。另外,应用ANN方法需要大量的训练数据集,而这在现实应用中是一个很大的负担。

1.2.2 定性推理的研究动态

1983年 XEROX 实验室的 Seely Brown 和 John de Kleer 发表有关定性推理的第一篇论文“A qualitative physics based on confluence”，产生了巨大反响，揭开了定性推理研究的序幕。1984年人工智能杂志第一次出版了关于定性问题的专集。此后定性问题的研究成为人工智能的一个热点，许多学者加入到这一研究领域中，产生了大量的研究成果。1991年，人工智能杂志又出版了定性推理的第二本专集，进一步促进了定性推理研究的发展。目前，定性推理基本上可分为三大理论派别，即模糊仿真方法、基于归纳学习的方法和朴素物理学方法^{〔30〕}。

由于模糊数学方法可以解决模型信息与测量数据的不确定性。所以在定性理论中一般用来作为一种描述手段。最初，系统的定性值是采用区间模糊数的行为来描述的，英国的 Qiang Shen 进一步将其发展到用凸模糊数来描述定性值，在数据表示上前进了一大步；此后，又有人在此基础上引用概率论。来度量生成的多个行为的可信度。当前的模糊定性理论，在模糊数表示方面都存在一个重大弱点，那就是系统真实值与模糊量空间的映射问题，即如何确定描述系统的模糊量。

基于归纳学习的方法中，最为典型的是 GPS 理论，即通用问题求解理论。这种方法要求输入尽可能多的行为，然后通过归纳学习的方式，构造系统的定性模型，进行仿真研究。这种方法需要采集大量的数据，并加以处理和维护；而且，由于现实条件的限制，不能保证归纳的完备性。

在理论和应用上发展得最成熟的是朴素物理方法，它兴起于一些人工智能专家对朴素物理系统的定性推理研究。根据建立系统定性模型的方法，又可分为很多派别，比较有影响的有：Seely Brown 和 John de Kleer 提出的基于“流”的概念的理论，K. D. Forbus 的定性过程理论，B. J. Kuipers 基于约束的用定性微分方程描述的定性仿真理论等。

定性推理是近十年来新发展的一门人工智能技术，对它的研究还处于初期阶段，尤其是在机械产品领域，其应用还很少见。目前，概念设计中的定性推理研究主要有以下几个方面：

(1) 定性推理与基于知识的系统的结合^{〔1〕}。在机械、建筑、电路等设计领域中，常常需要在早期设计阶段对系统结构进行预测，以检验设计方案的可行性。传统的结构分析方法主要采用数值分析方法。为了使用数值方法，必须给出结构和其组件的几何、载荷等信息的详细描述。然而，在初始设计阶段被分析的结构通常被描述成一个定性框架，没有足够详细的信息来保证数值分析工具的使用。但是，在实际工程中，有经验的工程师能够利用第一原理和经验知识进行推理，定性地给出结构的行为。研究人类工程师的思维方式，采用定性推理与基于规则的知识相结合的方法，对系统结构进行定性建模，定性知识和经验知识交互作用给出结构分析问题的定性描述，有效地指导了设计初期阶段的结构及其组件的选择，减

CNOSIS 中，设计人员首先对产品的功能做功能分解。在功能分解定义的取底/云，通过物理特征将产品的功能行为和结构联系起来。得到一个功能分解图和一个行

少了重复设计次数。

(2) 定性和定量的结合^[2]。概念设计过程是一个重复过程, 由于设计的复杂性, 初始设计很少能满足所有的设计要求及约束, 需要多次重复修改, 直到得到满意解。利用基于流的定性推理方法, 用定性微分方程描述系统的特征参数的变化, 通过对系统初始扰动的定性分析给出系统其他特征参数的变化方向, 从而在整体上对参数的调整进行全局控制。利用逐步增量和约束传播的方式对定量约束关系网进行推理, 局部调整参数。定性与定量的结合可以有效地缩小解空间, 快速得到满意解。

1.3 本文所作的工作及研究目的

本文的目的是研究定性推理在概念设计中的应用, 探讨定性推理的手段、方法及其过程, 并结合一类问题给出可行的定性描述模型和相应的定性推理框架, 说明其在概念设计中的实用性。

本文从概念设计的特点, 概念设计中所使用的知识, 及概念设计过程入手, 探讨了定性推理及定性知识在概念设计中的应用, 并结合一类问题给出了定性推理系统框架。

主要研究内容有:

深入探讨了产品早期设计的特点, 指出了在早期设计阶段, 知识和经验相混合, 设计要求通常都是定性的而不是定量的, 所得到的信息不完全、不精确等, 同时对设计过程进行了再认识, 分析了设计期间所使用的知识, 提出在设计知识中有相当一部分知识是定性知识, 这些定性知识有助于在初始设计时快速地从头脑中筛选出更有利于设计的原理, 方法等。结合作者对设计的理解, 对设计中所涉及的知识进行了新的分类。

结合定性推理在设计中的某一类应用, 提出了定性推理框架, 对定性推理框架中的一些基本概念给出定义, 建立了适合该类问题的定性模型, 提出了建模准则和假设, 并说明了该定性模型与其他描述模型的不同。

对其中的因果关系及约束传播进行了深入研究, 构造了适合特定问题的因果关系图, 提出了约束传播算法, 并与其他约束传播比较说明该算法的优势。

结合一合适背景, 实现了一定性分析和设计实验系统。

论文的主要结构如下:

第一章 绪论。介绍本课题的目的, 国内外相关技术的发展动态以及本文所作的工作。

第二章 概念设计与定性知识。探讨了概念设计阶段的特点、过程、所使用的各类知识及其作用, 说明了设计过程是综合运用经验知识、定性知识、定量知识的

过程。从知识的不同抽象层次重新对设计知识进行了分类，对设计过程进行了再认识，并特别指出定性知识、定性推理在概念设计中应用的必然性和必要性。

第三章 重心问题定性推理建模及系统框架。简要地介绍了定性推理研究的目的、观点和所采用的方法，结合特定问题创建了一个定性推理系统框架，对该系统中定性模型建立和推理过程中所要用到的概念进行了定义，描述了系统的大致框架，详细阐述了如何建立系统的定性模型及其中引入的假设，系统的知识表示及框架概述。

第四章 因果关系和约束传播。在定性推理系统框架中，推理由控制机和推理机两部分组成。在推理过程中，控制机的主要作用体现在因果关系图和因果模型的构造上，推理机则根据得到的因果模型利用定性演算和约束传播给出用户满意的结论。故本章主要介绍因果关系的含义、作用，因果关系图的构造及因果模型的表现，推理过程中的约束传播过程和算法，传播时采用优先级排序的好处和如何处理过分约束情况。

第五章 定性推理实验系统的设计与实现。结合重心问题说明定性推理系统框架的实现。详细介绍了框架中的主要数据结构和算法。

第六章 总结和展望。总结论文所做的主要工作，指出其中的不足及继续要研究的问题。

第二章 概念设计与定性知识

理解产品设计过程，尤其是对产品早期设计的过程、推理线索和特点有尽可能深入的理解是构造产品概念设计支持工具的出发点。本章对概念设计进行了较深入的分析，给出了此阶段设计的特点，过程，及其中所涉及到的知识和这些知识的作用，并特别指出了定性知识及定性推理在概念设计中的应用及其作用。

2.1 产品概念设计分析

2.1.1 概念设计的特点

概念设计阶段的直观特点很容易被精通或仅仅熟悉产品设计的人观察到，比如创造性等等。但是，这仅仅是外在的浅层次特点。要构造能够实现概念设计的支持工具，需要对产品早期设计深层次的特点有完整而确切的了解。

1. 原理性知识和经验混合，而且两者都是以不精确方式存在。

以下两个事实证明它们在产品早期设计中的重要作用：

1) 在产品设计的早期，设计人员往往是根据自己的设计经验，或者参考其他设计人员的设计经验来生成产品设计方案，然后依据自己的知识或经验评价设计方案。

2) 在设计知识（知识工程的一个关键实施步骤）获取时，设计人员往往是举例说明设计为什么是这样，而不是那样。对他们来说，要将蕴涵在这些例子中的经验用规则等知识的形式化方法表示出来，相当困难。

相当程度上，设计人员对以往设计经验的获取和使用处于较低的层次，可以称之为经验的直接引用。如：采用能实现某一功能的结构时，只是在参数或属性上做修改。所以，可以说，产品的方案设计是从设计人员所能获取的设计经验开始的。但是，这仅仅是产品设计低层次的描述。由于多种因素的限制，当设计人员所面临的产品需求所能得到的设计经验少到不足以直接产生一个设计方案时，设计人员更多地是对以往的设计经验进行再加工，如类比推理或者是根据自己的经验和知识，产生创造性的产品设计方案。在这种情况下，原理性知识和经验混合在一起，共同支持产品的方案设计。

2. 约束、对象和参数的模糊性。

在设计过程的早期，决策常常遇到模糊性。这种模糊性表现为：

- 1) 非确定性
- 2) 非精确性
- 3) 非完整性

非确定性是指设计的决策基于某种可能性分布。非精确性是指设计约束、设

设计对象的变量和设计参数等只具有语言上或者是相对更好的值，而不是精确的值，即通常所说的定性值。非完整性是指设计描述有不完整的约束和参数，忽略了某些细节。

3. 设计对象的高度抽象。

概念设计阶段所涉及的设计对象和设计概念不象详细设计阶段的对象和概念，相对更抽象。这种抽象表现在：

- 1) 产品的几何细节不重要，甚至可以被忽略。
- 2) 与功能和行为无关的其它属性被忽略。
- 3) 设计对象更多是词汇意义上的表示，其具体外延尚需确定。

4. 设计约束跨层次且覆盖面大。

在产品的早期设计阶段，从产品需求到设计方案，其中所涉及的约束既可以是与功能有关的约束，也可以是与其它因素，如行为，甚至是与某些产品细节相关的约束，如用户要求采用某种特定的材料等，远比单纯的几何约束涉及的范围广、因素多。这些约束由于模糊性等因素联系在一起，使得产品早期设计的约束定义、表示和使用成为一个难题。

5. 产品概念设计是一个病态结构问题。

病态结构问题需要在解决的过程中不断再定义问题是什么，问题需求空间随着问题的解决过程被逐步确定，问题的解也就随之被确定。与之相对应的是，传统的可以用问题求解方法或简单搜索方法解决的一类完整结构问题，问题需求空间在开始解决问题之前就已经被确定，且在解决问题的过程中，需求空间不会再变化。

2.1.2 产品概念设计过程

由于概念设计具有上述特点，使得计算机实现辅助概念设计十分困难。为了实现设计自动化，不同的人在设计方法、程式和规律等方面进行了大量的探索，发现智能 CAD 系统的发展及设计自动化的实现，从根本上讲取决于对设计过程本身的理解。

设计过程的模型国内外已有很多论述，但这些论述多是对产品设计全过程的研究，即从最初的明确任务到最后的详细设计。本文在综合各种设计过程模型的基础上，将精力主要放在概念设计阶段，通过对一般设计行为的研究，发现概念设计过程通常包括如图 2.1 所示的基本设计过程元素。

从图中可以看出，产品的设计过程是由一组设计说明开始的，也就是图中的要求域。对这些设计要求抽象化，目的是为了确定产品的总功能，抽象过程中，要抓住本质，突出重点，淘汰次要条件，将定量参数改为定性描述，对主要部分充分地扩展，只描述任务、不涉及具体解决办法。通过这样适度抽象化的过程，

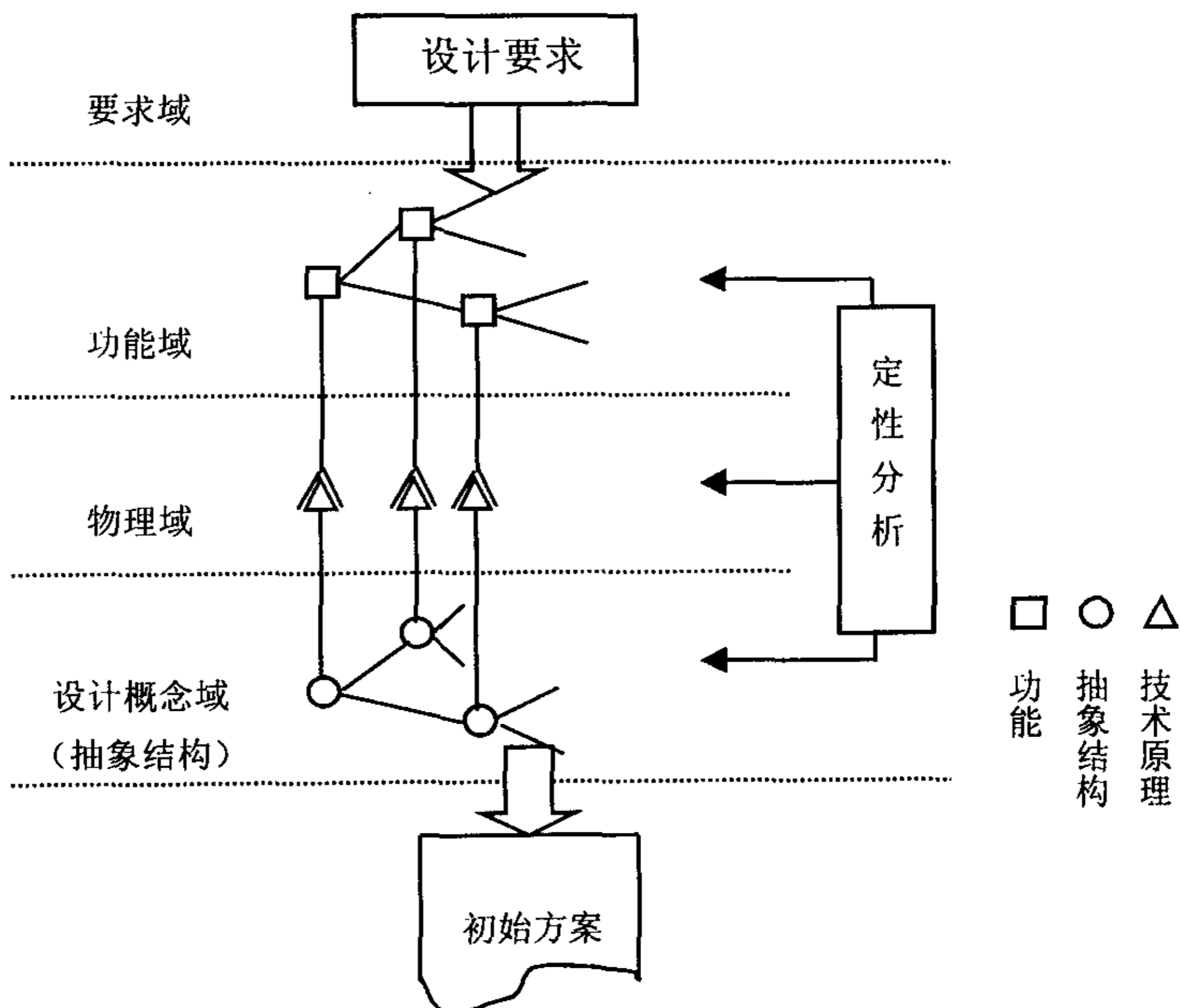


图 2.1 概念设计的一般过程

获得的功能定义扩大了解的范围。

然后，对总功能进行功能分解，从要求域到功能域的过程就是功能分解的过程，总功能被分解为各个子功能，形成图中的功能域。一般说来功能是抽象地描述输入和输出间的作用关系，如变换，放大等，对于这些抽象的功能描述在实现上可以找到不同的技术原理。

各种功能的实现都是在以自然科学原理为基础的技术效益的基础上实现的，因此，物理学、化学、生物学等客观规律就构成了设计中的物理域。功能域与物理域不是一一映射关系，同一种功能可以利用多种物理原理，而同一个原理又可以实现多种功能。因此如何根据功能选择原理要根据具体情况而定。

设计概念域，也就是通常所说的方案原理解。物理学中的原理是一种抽象的普遍的现象及规律。机械工程中主要利用的就是物理学原理，将物理学原理通过一定的结构方式在工程技术上加以利用，就是所谓的技术物理效应，也就是这里所说的设计概念域。这时得到的结构是抽象结构，没有具体的几何尺寸和装配关系。如要实现力平衡原理，可以使用杠杆。这里杠杆就是一个具有一定抽象层次的结构。

从功能到设计概念的转化过程中，定性分析整个贯穿其中。前文说过，概念设计过程的特点就是非精确性、非完整性及非确定性。因此利用精确的工具进行分析是不可行的也是不可能的，而实际上更多的时候是利用定性知识进行定性分析。对于定性知识及其作用，后面会详细阐述。

从上面几个步骤可以看出，产品设计是经过多次综合、分析、选择才从最初的设计说明最终得到设计概念（即方案原理解）的。

2.2 概念设计中的知识分类及其作用

2.2.1 设计知识的分类

从设计的特点、过程可以看出，设计过程是一个对各种知识进行综合运用过程，各类知识在设计中起着不同的作用。对于知识的分类，从不同角度有不同的分法，如：从知识的作用分类有描述性知识、判断性知识和过程性知识，从作用的层次来说可分为元知识、经验知识、原理知识和常识性知识等。作者认为设计过程是一个从抽象到具体，从模糊到精确的过程，从最初的模糊概念到最终的实现，需要利用不同抽象程度的知识，这些知识使设计概念逐步清晰化、明朗化。在此基础上，通过对设计特点和设计思维过程的研究，从知识的精确度入手，结合机械产品设计过程，将知识分为以下几类：

- (1) 经验性知识，这里所说的经验性知识指的是不能用数学模型描述的知识。举例来说，如鸟有翅膀，有羽毛等。这类知识是领域专家经过多次实践经验总结出来的知识，它很难以数学模型描述，但却涵盖了某种现象的规律性东西。在产品设计的早期，设计人员往往是根据自己的设计经验，或者参考其他设计人员的设计经验来生成产品设计方案，此期间经验的作用体现得尤为突出，设计人员的经验决定了其设计的质量与效率，设计的创新性很大程度上也与设计人员的经验有关。设计人员的经验很难用某种准确的模型描述出来，但却能使设计人员快速地解决问题，对于这类知识的利用多采用基于知识的系统（Knowledge-based system）来解决。
- (2) 定性知识，这类知识又包含两种。一种是对客观规律的定性描述，如有以下描述：在电阻一定的条件下，电压与电流成正比，另一种是对客观事物的模糊描述，如重心偏高，这些知识有助于人们简化问题。对于什么是定性？哪些知识是定性知识？目前还没有一个统一的说法。通常所说的定性是一个广泛意义上的概念，它包括各种对信息、知识等不精确的描述，甚至有些时候一些模糊描述也被包含在这种说法中。用定性推理处理所有这些定性知识是不可能的，因此在这里将定性知识分为了两类，定性推理能处理的就是基于某些能用数学形式给出描述的客观规律的定性知识。这类

知识的作用可以使设计人员快速有效地缩小解空间,提高设计效率。如:当设计人员被要求设计一种永动机时,他可以根据能量守恒定律很快地得出该方案不可行。这里设计人员没有进行精确的数值计算,只是根据蕴含了某种客观规律的知识定性地给出答案。这些客观规律使设计人员能判断出设计是否可行,能不能实现及大致的设计方向,提高了设计效率。

- (3) 定量知识,指的是在设计中所用到的精确的数值或数值分析及计算方法。这类知识在详细设计时是必不可少的。设计最终要以某种产品的形式得以体现,因此详细的几何尺寸,各种设计参数的取值及要满足的各种性能指标都需要精确的定量知识。

这些知识在设计的不同阶段起到了不同的作用,如何针对设计的不同阶段灵活使用不同抽象层次的知识是目前设计领域研究的主要内容。

从设计中可充分利用计算机的三个侧面来看,计算机处理的最好的部分就是利用具体的理论和数据进行科学计算,目前在这方面的技术已很成型,涌现出各种数值计算方法和设计软件。在经验方面,基于各种推理技术和知识库的知识系统也有不少。但是,在最有创造性的概念方面进行的研究还较少,较成熟的技术和方法也很少,尤其是在定性知识的研究上还很少见到有成型的产品。

2.3 定性知识在设计中的应用

设计过程是一个非常复杂的过程,它涉及到多种不同类型的知识的应用,包括经验性的、常识性的以及结构性的知识,一般需采用多层知识表达模式,将元知识、定性推理知识以及数学模型和方法等相结合,根据不同类型知识的特点采用相应的表达方式,在表达能力,推理效率与可维护性等方面进行综合考虑。根据上文对设计中知识的分类和认识,结合设计过程,从知识运用的角度给出如图 2.2 所示的框架。

框架中的第一原理指的是设计中需用到的各种自然科学原理,如物理学、化学、力学等原理,用这些原理可以进行定性分析也可以定量计算。

在这个框架中体现了定性知识在概念设计中的应用及作用,现详细说明如下:

- (1) 在最初提出设计要求后,对设计说明进行分析,以设计任务作为问题进行抽象,得出产品设计的功能总目标。此时,功能是以抽象的、定性的方式描述的。因此,在对其进行分解和设计时,需利用非精确的知识,如经验知识和定性知识,举例来说:如在某次设计中,需设计一种能实现标明时间的仪器,利用设计者的经验可以得出以下几种能实现此功能的原理,机械的、电子的、光学的,利用光学原理的如原子钟,因其设计成本高,不宜采用,机械方式如机械表一般精度不

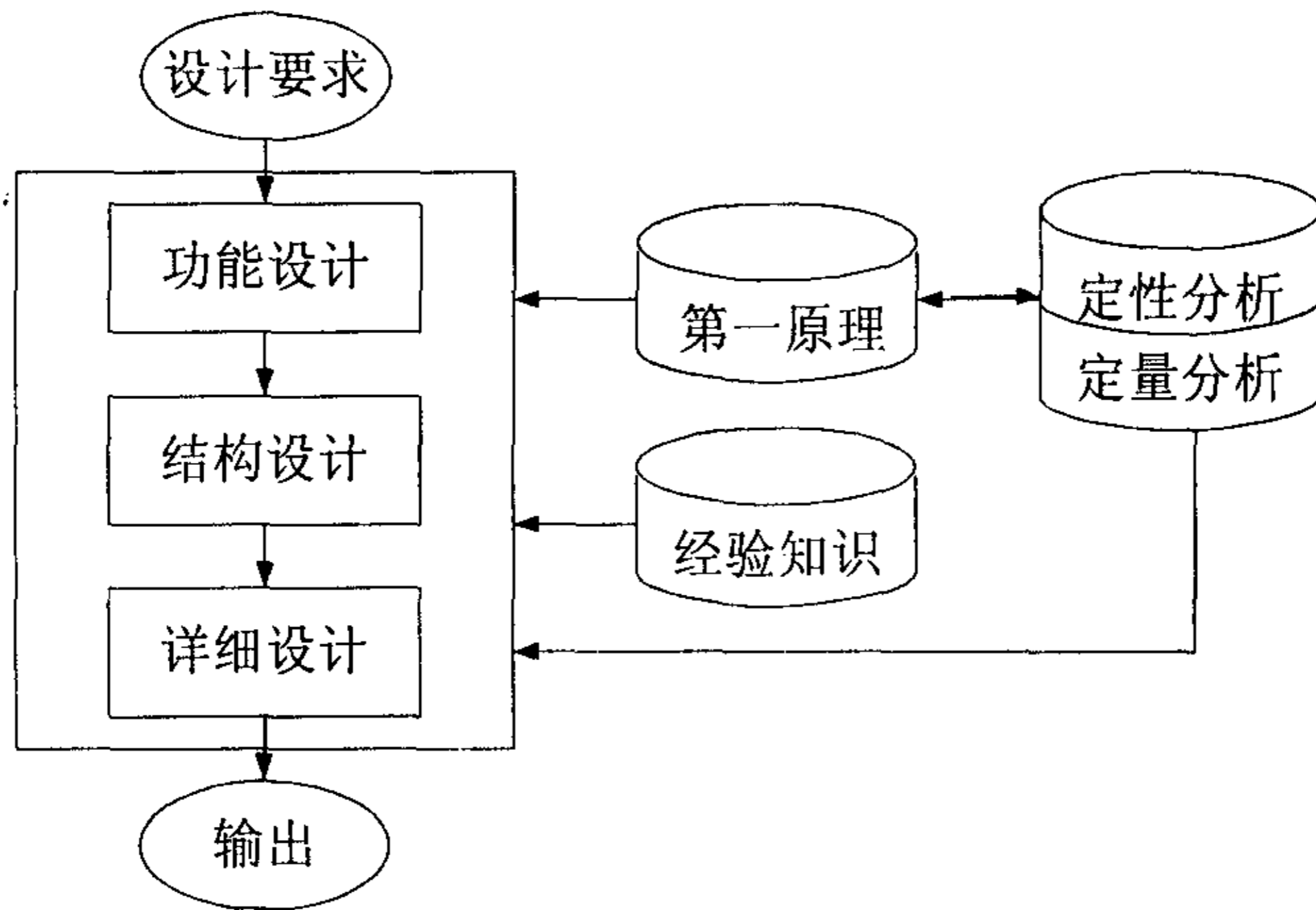


图 2.2 概念设计中的知识运用模型

高，故也被排除，最后采用电子钟。可以看出在这个过程中，从功能域到物理域的过程是设计者根据其经验而得到的，在方案选择时，一些定性知识如成本高等起了关键作用，减少了可替代方案，提高了效率。

(2) 从功能到结构的映射一直是个比较难解决的问题^[40]，在功能建立模块和结构建立模块的设计中会遇到功能“粒化问题”。具体地来讲，功能“粒化问题”在功能建立模块设计中就是功能的分解问题，而在结构建立模块中就是物件的功能属性。一般来说功能“粒化”的过细，则将导致由功能到结构形式映射算法和结果相当庞大，以致根本无法进行下去。反之，若“粒化”的过粗，则又可能失去一些真正具有创造性的设计概念。因此，在计算机辅助概念设计中，功能的“粒化”问题是关键问题之一。本文并没有在这方面进行深入的研究，在这里引述是想说明定性知识的运用，功能到结构的映射通常不是一一映射的关系，一种功能可能对应着几种结构，当功能分解完成后，将各子功能进行组合以实现总体功能时，会产生多种组合方案，在这些方案中会组合出一些新的结构形式，那么这些新的结构是否能实现所要求的功能呢？在此可以利用定性推理对结构进行检验，功能是通过行为实现的，定性推理的目的就是根据结构的描述及初始描述进行推理，得出结构的行为，通过检验行为可以判断功能是否实现。同时在分析各分结构的行为时，还可以根据行为是否匹配来去除不可能的组合。

(3) 在详细设计阶段，定性推理也起到很大作用，尤其是在参数设计时，给出初始设计后，其中的某个或某些参数不满足要求需进行调整，一般的方法是

进行试探，这种方法比较盲目、效率低。而采用定性推理，根据参数间的因果关系找到与不满足参数相关的参数，有针对性地进行调整，有助于快速得到所要求的设计结果。

从以上综述中可以看到，设计中要用到各种知识，这些知识分别起着不同的作用，这里特别强调了定性知识和定性推理的作用。一方面是因为在设计中尤其是在概念设计中存在着大量的不精确信息，充分利用这些信息可以提高设计的质量及效率，另一方面实际设计中，设计人员通常也确实是利用定性知识进行定性推理判断的，而在计算机实现时，往往容易当作经验性知识来处理。然而对于那些不包含客观规律的定性知识来说，这样处理比较妥当，但是对于基于客观规律的定性知识来说，很多时候并没有充分地利用其作用。举例来说，物体高度增加导致重心高度增加，如果将这条知识简单地认为是经验知识，那么在基于这条知识的推理时，由于它跳过了许多中间步骤，把问题与结果直接联系起来，在需要进一步知道为什么问题与结果间有这样的关系时，就不能得到满意的解释了。而实际上，这条知识蕴含着物体匀质时重心与形心重合，高度增加形心增加的客观规律，有了这样的定性知识就能更好地解释问题了。所以要特别强调定性知识，并对设计知识进行了这样的分类。

定性在系统设计中有许多用途，如它可以用来预测系统的特性，从而在众多的方案中选出较好的方案；可以分析故障的原因，从而在系统失效时进行诊断；可以从系统的部分特性推断其整体特性，从过去的行为推断其将来的表现等等。

综上所述，研究定性知识和定性推理在概念设计中的应用有其必要性和实用性。

第三章 重心问题定性推理建模及系统框架

定性推理是人工智能研究领域中的一个活跃的分枝。本章对定性推理进行了较为深入的探讨,讨论了定性推理的观点、目的及解决问题的方法,对定性推理中所涉及的一些概念给出了详细定义,并描述了基于一类问题的定性模型的建立方法和基于此模型的定性推理系统框架(以下简称 QSB),该框架结合第一原理和经验知识产生结构的定性因果模型,并在基于用户询问的基础上给出分析和建议。

3.1 定性推理简介

3.1.1 定性推理的概念

定性推理是人工智能领域中的一种推理方法,它使用定性信息,对系统的结构、行为和功能进行描述,并研究它们之间的关系和因果性,得出定性解释,以求模仿人类的定性常识推理。

定性推理方法模拟人类的思维方式,因而在对物理系统的行为求解的同时,要求对行为做出解释。这种解释不是根据物理系统的功能直接得出的,而是根据系统的结构知识和物理规律推理得出的。例如:在解释自来水为什么会从拧开的水龙头中流出来时^[5],不能只讲“因为水龙头具有放水和截水的功能“,而要用水龙头、水管、水塔和自来水组成的物理系统以及压强与水位的物理关系来进行解释。这种解释既是深层次的,又是符合人们的直觉的。

概括起来说,定性推理的理论可分为两个部分:定性模型的建立和基于定性模型的推理。定性推理的目标是寻求一种计算理论来模拟人类处理定性知识的自然过程,这种计算理论的一个主要特点是可以处理不完全的系统知识。其目的之一是提取和运用常识,充分利用定性及不完全、不精确的信息来推理系统定性行为,给出易于理解的行为描述和因果解释。

3.1.2 定性推理的观点

人类对物理世界的描述解释,常是以某种直观的定性方法进行的,很少使用微分方程及具体的数值描述。如人们在骑自行车时,为了避免摔倒和撞车,并不需要使用书本上的运动方程,而是针对几个主要参量的变化趋势给与粗略的、直观的,但大体上准确的描述,这就够了^[31]。

一般分析运动系统行为的标准过程可分为三个步骤:

- (1) 决定描述对象系统特征的量。
- (2) 用方程式表示量之间的相互关系。

(3) 分析方程式, 得到数值解。

这类运动系统行为的问题用计算机进行求解时, 将面临如下三个问题:

- (1) 步骤(1)(2)需要相当多的知识, 并且要有相应的算法。
- (2) 有的场合对象系统的性质很难用数学式子表示。
- (3) 步骤(3)得到了数值解, 但是对象系统的行为并不直观明了。

为了解决第二第三个问题, 定性推理一般采用下列分析步骤:

- (1) 结构认识: 将对象系统分解成部件的组合。
- (2) 因果分析: 当输入值变化时, 分析对象系统中怎样传播。
- (3) 行为推理: 输入值随着时间变化, 分析对象系统的内部状态怎样变化。
- (4) 功能说明: 行为推理的结果表明对象系统的行为, 由此可以说明对象系统的功能。

定性推理的观点大体上可这样来理解:

- 1 忽略被描述对象的次要因素, 掌握主要因素简化问题的描述。
- 2 将随时间 t 连续变化的参量 $x(t)$ 的值域离散化为定性值集合, 通常变量 x 的定性值 $[x]$ 定义为

$$[x] = \begin{cases} - & \text{当 } x < 0 \\ 0 & \text{当 } x = 0 \\ + & \text{当 } x > 0 \end{cases}$$

- 3 依物理规律将微分方程转换成定性(代数)方程, 或直接依物理规律建立定性模拟或给出定性进程描述。
- 4 最后给出定性解释。

总的来说, 定性推理是从物理系统、生命系统的结构描述出发, 导出行为描述, 以便预测系统的行为并给出原因解释。定性推理采用系统部件间的局部结构规则来解释系统行为, 即部件状态的变化行为只与直接相邻的部件有关。

3.2 定性推理系统框架中的基本概念

3.2.1 基本概念

本章的主要目的是介绍定性推理系统框架, 在该框架中会用到几个相关的概念, 在此先作详细介绍。在定性推理中, 很多变量的精确值是无法知道或者没有必要知道的。因此, 人们不得不忽略定量值或者故意忽略定量值, 以定性方法处理这些变量。这常常也是简化系统的重要手段, 还可以在在一定程度上提高系统的可处理性和系统的可靠程度(仔细想来, 会发现这正是人类处理问题的一种思维

方式)。现实世界的很多情况,如果穷追所有细节,那么很多系统将会复杂的难以置信,从而使人们无法把握和处理。忽略定量值,用定性方式处理也是简化系统和运用定性方法思考和处理问题的一个原因,因而也是大量运用定性知识的原因。

1. 定性知识是知识的一种描述方式,它使进一步展开定性推理过程中的各个步骤成为可能。定性知识来源于物理系统中所蕴含的客观规律,它比经验性知识更加可靠,比精确的函数关系表示的语义及范围更广泛。

系统的结构是由一个代表系统物理参数的符号集合和描述这些物理参数间相互关系的一个约束方程集合组成的。在进行定性推理前需对这些参数及方程定性化。在基于“流”的定性推理中,定性值的集合的元素是由对数轴的划分而得到的,通常最简单的办法是将 $(-\infty, \infty)$ 划分成 $(-\infty, 0)$, 0 , $(0, \infty)$ 三段,相应的定性值规定为 $-$, 0 , $+$ 。这时定性值集合就是 $\{-, 0, +\}$ 。而在其它的一些定性推理中,变量的定性值又有其它的划分方式,如将变量的变化表示为增加,不变,减小。根据上述情况,本文给出如下定义:

2. 定性值是对某一空间划分而得到的,通常其取值被限定在一定的区间内,具体语义视空间所表示的语义而定。

定性推理中常用到的两个概念是因果关系和约束传播,现给出如下定义:

3. 因果关系是对客观世界中的一种事物联系的描述方式,其语义来源于推理中的各种因果概念,通常由两部分组成,前件和后件,其中前件是原因,后件是结果,前件导致了后件。
4. 约束通常是指一个包含若干变量的关系表达式,用以表示这些变量所必须满足的条件。
5. 约束传播是当约束系统中的某些变量被赋予初值后,利用某种方式推出其余变量的过程。

3.2.2 定性模型

6. 模型是对所要研究的系统在某些特定方面的抽象,通过模型对原型(系统)进行研究,就能使其具有更深刻、更集中的特点。对于模型的理解主要有两种观点:一种是在系统仿真中,模型是系统本质方面的表达,它可以用数学的或物理的形式提供被研究系统的信息,并具有与系统相似的数学描述或物理属性;一种是在基于模型的推理中,模型是反映事物内部规律的客观世界的模型,这种理解中模型有多种,如表示系统各部件的部分/整体关系的结构模型,表示各部件因果关系的因果模型等等。

7. 定性模型以一种抽象的方式描述了系统性能,由系统参数和定性方程组

成, 定性方程用来描述参数之间的关系。

QSB 中的定性模型来源于 De Kleer^[1] 的定性模型方法, 但在参数与定性方程的具体定义上又有所不同, 同时还采用了因果模型来表示各变量间的因果关系。

根据数学中微分的定义及其几何意义, 将描述系统的物理方程看作是参数间的函数关系, 则方程的全微分表示了各参数间的变化关系, 所以在求定性微分方程时, 用参数的微分表示参数的变化。

在定性推理的三个经典理论中, 参数都由量空间来表示, 量空间是一个二元组 $\langle qval, qdir \rangle$ ^[8], $qval$ 表示参数的值, 在这里参数的值或是路标值或是一个区间值, 举例来说, 有某系统中的变量 A , 能标明其明显状态变化的值 (即路标值) 有三个 $MIN, 0, MAX$, 则 A 的取值或为这三个之中的一个或为 $\langle MIN, 0 \rangle, \langle 0, MAX \rangle$ 这两个区间值。 $qdir$ 表示参数的导数, 用导数的取值来表示参数的变化方向。QSB 模型不研究系统的动态行为, 故没有采用这种方式, 而是直接在参数定性化时, 对其直接赋予不同的语义来表示, 系统框架中的定性值集合仍为 $\{-, 0, +\}$, 但其语义根据每个变量而定, 如对于体积 V 来说, $-$ 表示减小, 0 表示不变, $+$ 表示增加, 对于重心位置的 X 坐标来说, $-$ 表示后移, 0 表示不动, $+$ 表示前移。在构造定性微分方程时, 仍采用对微分方程定性化的形式。

8. 机制和结构方程

机制指人们对系统的理解中相对独立、而在概念上又较清晰的部分, 包括描述物理过程的法则和遵循此法则运行的局部构成部分。机制所描述的构成部分在物理上可能是分开的, 也可能不是。但在模型描述中, 每个机制必须对应一个方程; 机制决定自身的变量, 而一部分变量借助机制影响另一部分变量, 变量对系统的影响正是由机制扩散开的。按机制方式描述系统, 对后面的因果关系图的构成和约束传播是极为重要的。这种描述机制的方程一般称为结构方程。在对系统定性建模时, 可以不给出具体的结构方程的形式, 但给出的定性方程必须符合物理机制。

3.3.3 定性演算

在定性推理中最常用到的数学工具就是定性演算^[27], 把普通演算中出现的具体的量抽象化, 归入有限的几个类, 就得到定性演算。通常定性演算将实数分成三类: $>0, =0$ 和 <0 , 分别用 $+1$ 表示 >0 , 0 表示 $=0$, -1 表示 <0 , 由于定性演算忽略了一些数量信息, 因此在运算过程中会出现不确定的情况, 将这种情况表示为 $?$ 。这样把 $Q = \{1, 0, -1, ?\}$ 看成一个代数结构的元素集, 可以在上面定义各种算术运算。相应于实数运算 $+, -, \times, =$ 等等, 可以分别定义定性运算 $\oplus, \otimes, \ominus, \Theta$ 等等, 这些演算的定义表示为图 3.1。

[x] \ [y]	+1	0	-1
+1	+1	+1	?
0	+1	0	-1
-1	?	-1	-1

(a) $[x] \oplus [y]$

[x] \ [y]	+1	0	-1
+1	?	-1	-1
0	+1	0	-1
-1	+1	+1	?

(b) $[x] \ominus [y]$

[x] \ [y]	+1	0	-1
+1	+1	0	-1
0	0	0	0
-1	-1	0	+1

(c) $[x] \otimes [y]$

[x]	$\ominus[x]$
+1	-1
0	0
-1	+1

(d) $\ominus[x]$

图 3.1 定性演算的定义

下面给出 \oplus 和 \otimes 的运算规则。设 e_1, e_2 是公式，则有

$$[0] \oplus [e_1] \Rightarrow [e_1]$$

$$[0] \otimes [e_1] \Rightarrow [0]$$

$$[+] \otimes [e_1] \Rightarrow [e_1]$$

$$[-] \otimes [e_1] \Rightarrow -[e_1]$$

使用下列规则，可将运算符 $+$ 、 \times 转换成 \oplus 、 \otimes ：

$$[e_1 + e_2] \Rightarrow [e_1] \oplus [e_2]$$

$$[e_1 \times e_2] \Rightarrow [e_1] \otimes [e_2]$$

3.3 定性模型的建立

实际系统抽象为模型是定性推理的基础。在定性推理的发展过程中，研究者们提出了一些建立系统定性模型的方法。大体上可分为三类：(1) 把系统看作许多典型的基本环节的组合，定性描述这些环节以及它们之间的关系。(2) 采用一种既可描述定性关系又可描述定量关系的集成代数理论。(3) 把系统划分为定性与定量两部分，采用不同的方法建模。几种方法都试图从系统的物理结构导出相应的约束来建立系统的定性模型，且多是对随时间变化的动态系统的建模。

以往定性推理的研究多集中于动态系统的行为预测和仿真，定性模型的建立都是将描述系统的参数进行离散化，并用参数对时间的导数来表示参数的变化方向，将参数对时间的导数方程化为定性微分方程。在这种变化表示中，时间是建

模中的一个重要因素，而对于静态的离散系统来说，不存在时间问题，因此，可以从另外的角度来进行定义。

要正确地抽出一类问题的定性模型，需要对此类问题有深刻的认识，要能找出事物的本质及与解决此类问题相关的主要因素。定性模型是以一种抽象的方式描述系统的，因此建立定性模型有一定的难度。对物理系统不同的结构描述，便提出不同的定性推理方法。如何建立适合一类问题的定性模型，是定性推理的关键。

在 QSB 框架中，定性模型的建立仍采用 De Kleer 的基于“流”（定性微分方程）的思想，但在具体应用上略有差别，因为我们想知道的信息是每个变量的变化方向，“流”被表示成变量的变化符号间的关系而不是变量间的关系，例如： $\partial X = -$ ， $\partial X = 0$ ， $\partial X = +$ 分别表示变量 X 的减小、不变、增加，如果变量 X 的变化方向不能确定，则表示成 $\partial X = ?$ 。定性微分方程是从实际方程的微分方程得到的，如有 $X=Y+Z$ ，则相应的“流”方程为 $\partial X = \partial Y \oplus \partial Z$ 。“流”方程表达的是变量 X、Y、Z 的变化方向间的关系，当 $\partial X = +$ 时，对于 Y、Z 只有三种可能的变化方向（ $\partial Y = +, \partial Z = +, \partial Y = 0, \partial Z = +, \partial Y = +, \partial Z = 0$ ），当 ∂Y 、 ∂Z 的值取相反的符号时，如 $\partial Y = +, \partial Z = -$ 或 $\partial Y = -, \partial Z = +$ ， ∂X 的值不确定。这是因为没有考虑 Y、Z 的实际变化量，所以这种情况下需加入定量信息以确定 X 的值。

定性模型的建立过程中有两种情况，一种是对方程定性化后，没有模糊性，所表示的物理意义很明确；另一种则在得到定性微分方程后，根据解决问题的方式不同而需要视具体情况而定。以重心问题中两长方体组成的系统为例，对这两种定性模型的建立分别予以介绍。

重心分析问题中，问题的焦点是各部件的材料属性、形状、体积、重心位置和重量与系统重心间的关系和影响，约束条件体现在这些参数间的关系上。系统由下列参数描述：

V	表示部件体积
G	表示部件的重量
a	表示部件的长度
b	表示部件的宽度
c	表示部件的高度
x_1, x_2	表示两部件的重心水平方向 x 坐标的位置
X	表示系统重心水平方向 x 坐标的位置

则根据物理学原理有

$$V = abc \quad (3-1)$$

$$X = \frac{x_1 G_1 + x_2 G_2}{G_1 + G_2} \quad (3-2)$$

求这两个方程微分方程, (在这里参数的微分表示参数的变化, 求方程的全微分是为了揭示各变量的变化趋势及各变量间的相互影响)

$$\partial V = bc\partial a + ac\partial b + ab\partial c \quad (3-3)$$

$$\partial \dot{X} = \left(\frac{G_1}{G_1 + G_2} \right) \partial x_1 + \frac{(x_1 - x_2)G_2}{(G_1 + G_2)^2} \partial G_1 + \left(\frac{G_2}{G_1 + G_2} \right) \partial x_2 + \frac{(x_2 - x_1)G_1}{(G_1 + G_2)^2} \partial G_2 \quad (3-4)$$

然后遵循以下原则将微分方程定性化, 一般遵循的原则是:

1. 把导数作为独立的定性变量。
2. 参数的取值遵循如下原则:

$$[x] = \begin{cases} - & \text{当 } x < 0 \\ 0 & \text{当 } x = 0 \\ + & \text{当 } x > 0 \end{cases}$$

3. 保留导数前的正负号。
4. 根据定性演算规则, 将原方程转化为定性方程。

依照这四个原则定性化后的定性微分方程为:

$$\partial V = [b][c]\partial a \oplus [a][c]\partial b \oplus [a][b]\partial c \quad (3-5)$$

$$\partial X = \left[\frac{G_1}{G_1 + G_2} \right] \partial x_1 \oplus \left[\frac{(x_1 - x_2)G_2}{(G_1 + G_2)^2} \right] \partial G_1 \oplus \left[\frac{G_2}{G_1 + G_2} \right] \partial x_2 \oplus \left[\frac{(x_2 - x_1)G_1}{(G_1 + G_2)^2} \right] \partial G_2 \quad (3-6)$$

在进行重心的定性分析时, 各部件的几何尺寸和重量都是大于零的数, 则可以将这些参数视作[+], 则将(5)(6)两方程进一步简化得到

$$\partial V = [+][+]\partial a \oplus [+][+]\partial b \oplus [+][+]\partial c \quad (3-7)$$

$$\partial X = [+]\partial x_1 \oplus [x_1 - x_2][+]\partial G_1 \oplus [+]\partial x_2 \oplus [x_2 - x_1][+]\partial G_2 \quad (3-8)$$

对于方程(7), 定性化后可以得到确定的定性方程

$$\partial V = \partial a \oplus \partial b \oplus \partial c \quad (3-9)$$

这个定性微分方程表示的意义是, 体积V的变化与其长、宽、高的变化相关, 变化的具体值需根据定性演算得到。

而对于方程(8), 定性化后得到

$$\partial X = \partial x_1 \oplus [x_1 - x_2]\partial G_1 \oplus \partial x_2 \oplus [x_2 - x_1]\partial G_2 \quad (3-10)$$

这时, 定性方程的进一步简化需要分三种情况 (在这里将 x_1, x_2 视作大于0的数):

当 $x_1 > x_2$ 时, $[x_1 - x_2]$ 可取作[+], $[x_2 - x_1]$ 取为[-]则得到

$$\partial X = \partial x_1 \oplus \partial G_1 \oplus \partial x_2 \oplus [-\partial G_2] \quad (3-11)$$

当 $x_1 < x_2$ 时, $[x_1 - x_2]$ 为[-], $[x_2 - x_1]$ 为[+], 则有

$$\partial X = \partial x_1 \oplus [-\partial G_1] \oplus \partial x_2 \oplus \partial G_2 \quad (3-12)$$

当 $x_1 = x_2$ 时

$$\partial X = \partial x_1 \oplus \partial x_2 \quad (3-13)$$

对于这三种情况，在物理意义上有很大差别：如两部件的位置分别如图 3.2 所示，在 (a) 中，当系统中所有的几何参数都不变而部件 1 的重量增加时，系统的整体重心位置的定性值为 $\partial X = \partial G_1 = +$ ，即重心右移，而在 (b) 中，系统重心为 $\partial X = [-\partial G_1] = -$ ，即系统重心左移，在 (c) 中，重心不变。

因此在定性模型的建立时，要忽略次要因素以简化问题，同时也要将问题中有明显不同的情况表示出来，以减少由于定性而带来的模糊性。

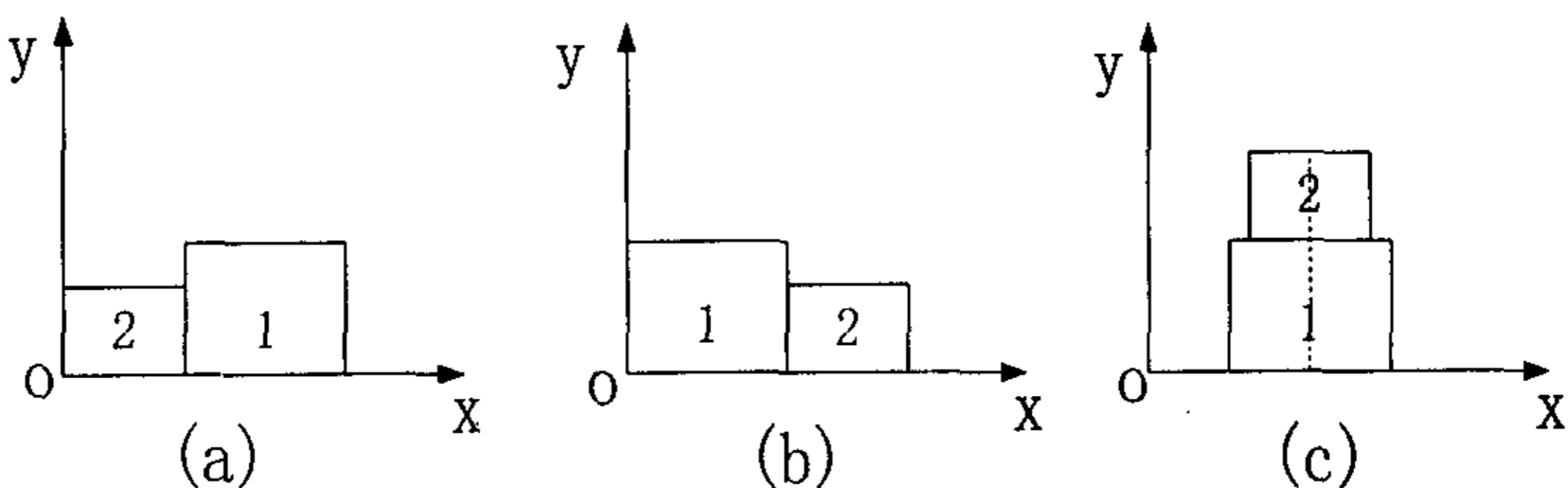


图 3.2 位置图

3.3 定性推理框架概述

在设计中常会遇到这样的问题，已知关于一个系统的领域知识，当用户提出询问后，如何在不具体求解的前提下进行适度推理，给出用户感到满意的结论。分析设计人员在解决这类问题时的思路，发现设计人员总是先对系统形成一个定性描述，然后利用领域知识（包括经验知识和第一原理）从问题出发进行定性推理给出问题的解。

因此，QSB 定性推理框架主要处理两个问题：定性模型的建立和基于此模型的推理，这两部分都需要作一些假设。

1. 假设

在定性推理中不可避免的会遇到假设问题，实际上，很多时候我们都用到了假设，物理学中许多理想模型的引入，就是在抓住事物的主要因素，而忽略次要因素的基础上，进行了某些假设而解决问题的。如在材料力学中，为分析构件的强度、刚度和稳定性时，对变形固体作了这样的假设：连续性假设、均匀性假设、各向同性假设。这些假设对建立构件的力学模型十分有用。定性模型是对系统的抽象描述，从某种意义上说，定性模型也是对所要解决问题的一种理想化。在上面定性模型的建立中，就已经用到了假设。如假设 x_1, x_2 都大于 0。引入假设有助于简化问题，同时也有利于求解问题。

在 QSB 框架中, 有两个地方用到了假设, 一个是在建模时, 另一个是在推理过程中, 这两个地方引入假设都是为了能够正确而又简便地解决问题。

在建模时采用了下面的假设:

- 1) 根据重心公式, 物体的重心位置是与坐标系的选取有关的。为了能进行定性分析, 假设系统中的所有部件都在三维空间中的第一卦限内, 即物体的重心位置的取值都为正。这样做的好处是在建立系统的定性微分方程时, 原微分方程中的系数可当作定性常量, 即值为 $[+]$, 根据 \otimes 的运算规则, $[+] \otimes [e_i] \Rightarrow [e_i]$, 故有效地简化了问题, 同时虽然物体实际的位置与具体坐标有关, 但其相对变化与坐标系的选取并没有关系。因此, 这样假设符合实际情况。
- 2) 所有部件均假设为匀质物体, 且为规则形体。假设部件为匀质物体, 则部件的重心就与其比重无关, 只与物体的几何形状有关, 对非匀质物体可细分为匀质的小部件。定性分析只是为了得到系统的变化趋势, 因此, 为了便于推理, 所有部件的几何形状均用规则形体来近似代替。
- 3) 系统由多个部件组成时, 由于参量及参量间的不确定因素太多, 在建立定性微分方程时, 变量间的约束关系无法确定, 因此, 做出如下假设: 系统重心水平方向的变化与部件的位置移动有关, 重心的高度变化与部件的高度变化和其垂直移动有关。
- 4) 在原有系统中, 加入或去掉某一部件, 认为是系统中某一部件的高度发生变化。

在推理中用到的假设:

- 1) 由于给出的信息不完全、不充足, 所以在推理过程中会发生停滞, 引入假设, 使推理可以进行下去。在约束传播时, 根据系统的因果信息流动, 扰动不能达到的地方, 则假设没有发生任何变化。举例来说, 在体积定性微分方程中, $\partial V = \partial a \oplus \partial b \oplus \partial c$, 如果给出的描述是高度增加, 即 $\partial c = +$, 体积如何变化还有赖于长度和宽度的变化, 这里默认假设这两个变量都没变化, 则可以得出体积增加, $\partial V = +$ 。
- 2) 推理中假设所有变化都遵循从原因到结果的流动方向, 即约束传播时只向后传播。
- 3) 匀质物体的重心即为形心, 规则几何体的形心位置与其形状有关, 当部件形状发生变化时, 在没有明确给出如何变化的情况下, 重心的位置变化与形状变化的关系不能确定, 故假设形状变化后, 其对称轴位置不变, 这样部件的水平方向变化时 (如对长方体来说, 其长度和宽度变化时), 认为其重心位置不变。

2. 定性推理系统框架

根据上面的建模规则和假设，结合定性推理技术可以给出如图 3.3 所示的定性推理框架。这个框架中主要包括四项：知识，询问，控制和推理，结论。框架的实现是基于规则和定性模型的系统，用规则表示启发性知识，定性知识采用面向对象的方法表示。

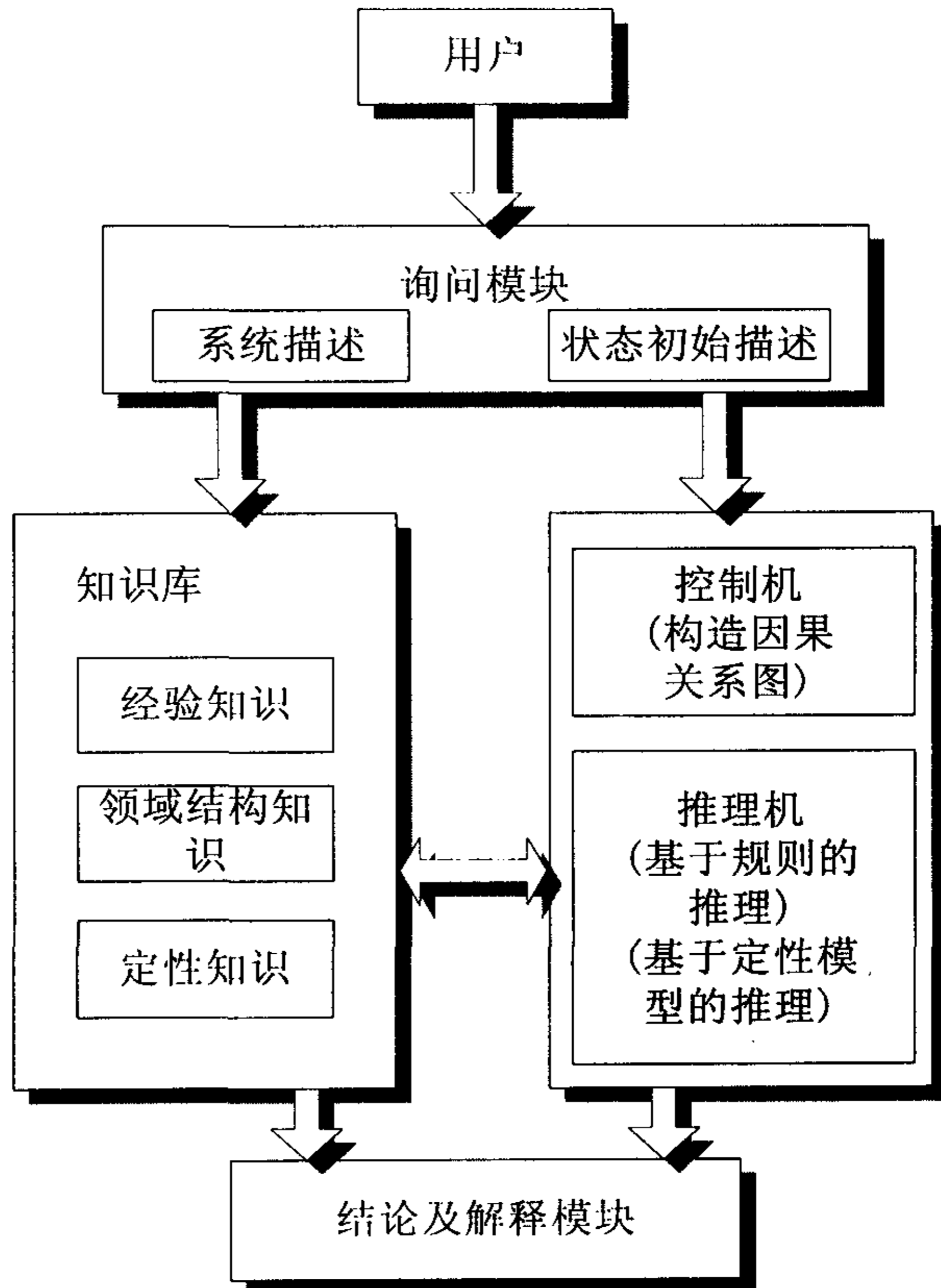


图 3.3 系统框架图

下面对这四个方面一一进行陈述。

1. 知识表示

问题求解的过程中所使用到的知识主要有：经验知识和第一原理，经验知识指的是各种假设和规定。第一原理指客观世界中所蕴含的一些客观规律。对于这些知识分别采用了不同的知识表示方式。

1) 启发式规则

定性推理主要思路是：忽略所描述问题的次要因素或忽略问题中可能出现的非精确性和不确定性，而借助于各种规范、准则和掌握其主要因素来简化对问题的描述。这些规范、准则可以被理解为是一种经验总结，表示为规则形式。框架中的规则有两类：建模规则、传播规则。

(1) 建模规则

这类规则主要是为了根据用户输入的系统描述和初始描述，利用前面所讲的定性模型的建立方法和假设，建立推理所需要的定性模型。

例如有下列规则：

关于定性微分方程的建立规则

前提：如果系统由两个长方体 1, 2 组成，且 1 在 2 上面

结论：则系统重心的定性微分方程为 $\partial Z = \partial z_1 \oplus \partial G_1 \oplus \partial z_2 \oplus [-\partial G_2]$

(说明 G_1, G_2 为两部件的重量， z_1, z_2 为两部件的重心高度)

关于系统部件数目变化的规则

前提：如果在原系统上再加一物体

结论：则认为原系统中的某一部件的高度增加

(2) 传播规则

这类规则在推理的约束传播过程中，用来控制传播的方向

如有下列规则：

关于体积变化的传播

前提：如果系统中某部件的体积增大

结论：则认为部件重量增大，重心位置不变

关于多部件系统中的传播规则：

前提：如果系统由多个部件组成，且其中一个左移

结论：则系统重心左移

2) 定性知识

第一原理即系统中所用的物理规律，这些物理规律以定性微分方程的方式表示，根据定性微分方程的建立过程，这些方程是单位系数的线性方程。QSB 框架中，主要有两个抽象部分：结构描述和推理，这两部分的类和对象间的关系如图 3.4 所示。

不论是采用何种技术，当面向实际应用时，都需要这个领域的专门知识。在定性推理中这些知识包括对系统的结构描述，对该系统机制的理解及系统中的约束关系等。结构描述是对所要解决的某一领域内问题的结构框架的描述。重心问题中，系统的结构是由各部件来描述的，每个不同形状的部件有不同的参量描述和约束条件（也就是定性微分方程）。部件的类型描述大致如下：

```
class entity
    name
    shape description
    volume
    weight
    qualitative function
```

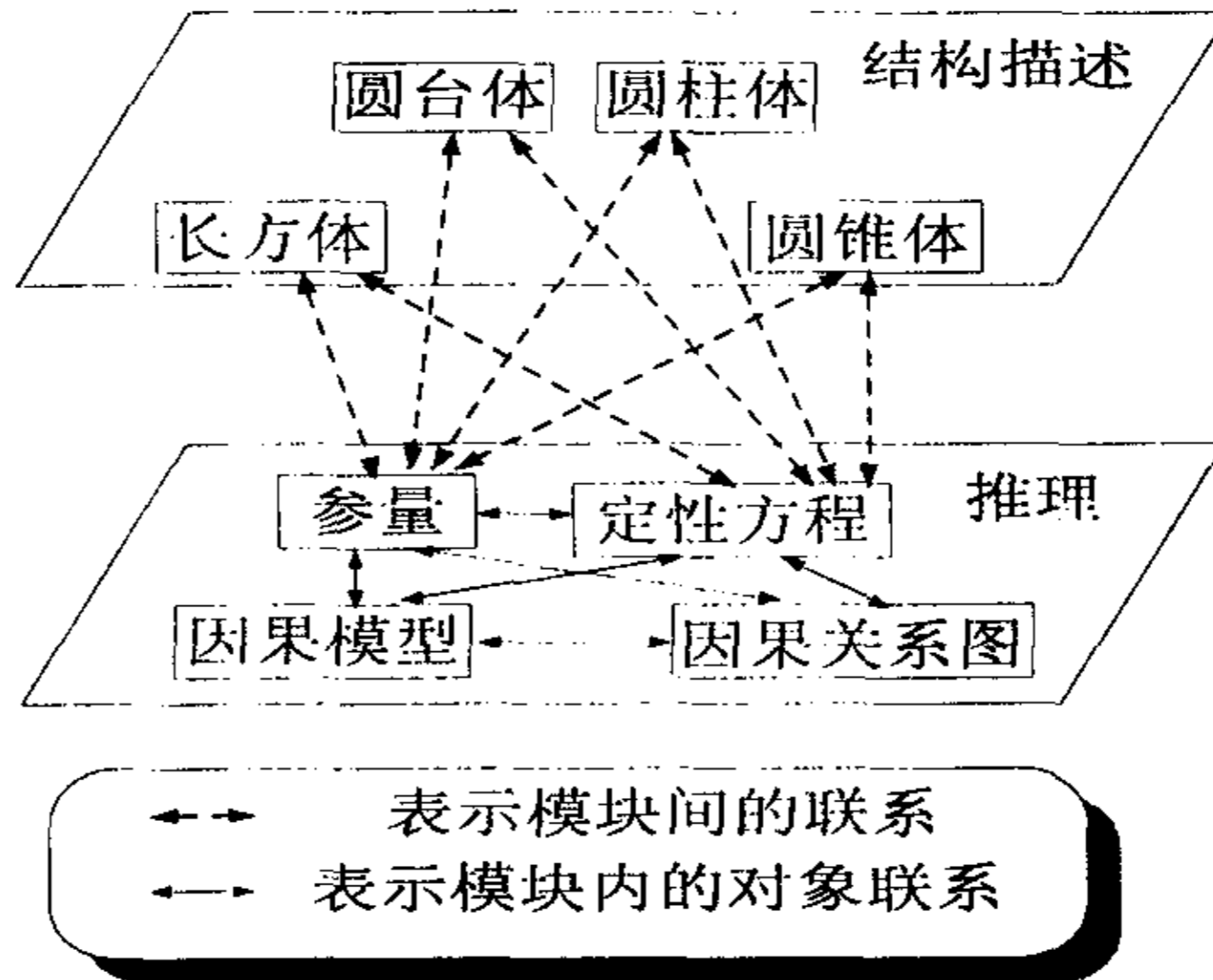


图 3.4 定性知识表示中对象间的关系

定性模型表示为参量、定性微分方程，因果关系图和因果模型表示构造的因果关系图。参量是一个表示各类参数的对象类，包括参数名，参数所属的实体，与此参数有关的方程等信息。定性微分方程包括方程所含的参数，参数间的因果关系模型，方程所属的实体等信息。因果关系图包括所有参数组成的因果关系，表示成邻接表的形式。因果关系模型是根据因果序构造因果关系图时保存因果关系的类，包括因果模型中原因变量、结果变量，相应的定性微分方程，对此模型的说明等信息。

QSB 框架中在构造因果关系图中，需将约束方程表示为因果模型的形式，因果模型的表示为以下形式：

```
class CausalityModel
    Precondition //前件集，亦即满足某方程的原因变量。
    Conclusion //后件，结果变量（通常在这里指的是单变量）
    Description //对该机制方程的语言描述
```

2. 询问模块

询问模块通常由“系统描述”、“初始描述”组成。“系统描述”描述的是系统中的物理对象、对象间联系以及对象的行为条件等内容。“初始描述”描述的

是系统中各变量的一个变化趋势及用户的具体需求,内容和形式可以是多种多样的,但关键的问题往往是用户感兴趣的某些重要变量,以及用户想得到怎样的结果等需求。系统描述是对系统的自然语言描述,描述系统各部件的组成及数目,各部件的类型,部件间的关系,如对于重心稳定问题来说,给出系统由几个几何形体组成,每个的形状等等。初始描述给出当前状态下,系统的一个定性描述,即给出系统中的某些变量的变化。如当某些变量变化后,对系统中其余变量有何影响,或是欲使某变量发生变化,该做怎样的调整等等。

在推理中,当用定性推理进行预测给出调整方向时,也需要与用户进行交互,以根据用户的具体要求给出可行的调整方案。如要降低系统的重心,根据因果关系图找到其所有的直接原因变量,此时,对用户询问这些原因变量中哪些可调哪些不可调,在用户回答的基础上进行选择调整。

3. 控制和推理模块

定性推理机制,由控制机和推理机两部分组成。控制机首先根据用户给出的询问,尤其是其中的系统描述利用建模规则得到系统的初始参数赋值和定性方程组。利用因果序理论建立系统总的因果关系图,并用因果模型将定性方程中的因果性表示出来。因果关系图中,节点表示系统的参数,边表示约束两节点的约束方程。控制机的工作主要体现在因果关系图的建造上,因果关系图是整个推理过程的基础。

推理机以控制机得到的因果关系图为基础,根据用户的询问寻找合适的求解路径。由于用户的需求是不同的,所以需要采用灵活的推理机制根据具体要求进行推理,在此过程中要用到定性演算及约束传播。推理过程就是一个约束传播过程,具体因果关系图的构造和约束传播算法在下一章详细介绍。

4. 结论及解释模块

定性推理有以下三个方面的作用:找出问题、预测并给出设计方向及系统不能解决的问题。结论及解释模块即是据此给出的相应描述。

如根据用户的初始描述,某一部件的高度增加了,给出的结论是系统的重心增加了。这是找出问题的过程,解释就是对约束传播过程中所用到的因果关系路径的描述,结合这个例子就是部件的高度增加导致其重心高度也相应增加,由系统重心约束方程知系统重心增高了。

在预测给出设计方向时,结论给出的是系统的调整方案。如要降低系统的重心,那么给出的调整方案是可以降低某个部件的重心,或可以减小某部件的高度等等。

当推理过程中,某个约束方程中出现约束冲突,或给出的信息太模糊不能推出系统的相应行为时,给出系统不能解决的答复。

第四章 因果关系及约束传播

在定性问题中，推理由控制机和推理机两部分组成。在推理过程中，控制机的主要作用体现在因果关系图和因果模型的构造上，推理机则根据得到的因果模型利用定性演算和约束传播给出用户满意的结论。故本章主要介绍因果关系的含义、作用，因果关系图的构造及因果模型的表示，推理过程中的约束传播过程。

4.1 因果关系简介

因果关系 (Causality) ^{〔30〕} 是人们思维中一个很重要的概念，它能用来对范围很广的知识进行描述和推理。既可描述常识性知识和经验性的知识，形式上一般是“如果…那么”；又可以描述比较精确的形式化的知识，比如谓词逻辑。定性推理中必然要用到因果关系，在模拟人类处理定性知识的过程，如何表明信息的流动就体现在因果关系的运用上。

直觉上，因果关系有两种表现：一方面，表现为事物个体之间的一种静态关系；另一方面，表现为事件之间的一种必然的联系，这是一种动态过程。从这种观点来看，该过程要发生，要求具备一定的条件，也就是“因”；并会产生一定的结果，即“果”。而且中间还要经历一定的过程，即体现因果关系是如何发生的。

目前对因果关系的研究正是从这两个方面进行的。一方面是分析系统组成之间的因果关系，得出系统组成部分之间的因果关系网络，然后对网络进行分析，获得系统有关的性质。其中组成部分主要是指系统的变量。这种方法所分析的对象是系统的静态结构，所以要求对系统有一个比较完整的描述。

另一方面是从系统行为角度进行分析。由于行为表现为一个动态的过程，为了描述某一特定时刻的系统，不少方法引入了“状态”一词。通过状态描述该时刻的整个系统，其中包括“因”，或者说是前提条件。于是，因果关系表现为状态转换，转换的过程是以系统的动作来描述的，此间，系统改变了性质，并对外表现出变化。转换的影响表现在结果中，即系统将处在新的状态中。

通常的系统是连续变化的，“状态”只是为了方便描述而人为地引入的一种概念，不同的目的要求描述不同抽象层次的状态，所使用的具体方法相应地也有所不同。

对应于上述两个研究方面，因果关系的描述方式也主要有这两种：一种是描述成变量间的关系，另一种是描述为一个过程。本文的研究侧重于静态结构的分析及设计，因此采用的描述方式为前一种。

为什么要特别研究因果关系呢？主要是由于因果关系描述了系统各部分之间是如何作用的，其在理论上和实际中都有广泛的用途，具体说：

- 因果关系描述了系统如何产生其行为，说明了系统部件间的作用，可以直接用于诊断设备设计等方面。

- 利用因果关系，可以揭示系统行为的更多信息，对于以反馈来调节系统行为的系统，只有通过因果关系才能认识系统。

- 因果关系作为一种系统理解的通用性模式，可以作为设计者与用户之间或师生之间的终结，来解释系统。

事实上，因果关系体现在任何一个完整的定性推理全过程（如相关知识的描述、可能行为的推理、结果行为的解释等）中，因此，因果关系在整个推理过程中占有非常重要的地位。

4.2 因果关系图的构造

4.2.1 因果序理论

因果序思想是：基于一组函数关系，利用一种计算机制，找出函数变量之间的因果关系。这一过程涉及到寻找一个变量子集，集内变量的值可以独立于集外变量来计算，这样就可以把系统结构简化为只含集外变量的方程组^{〔30〕}。

首先给出平衡结构的定义：

定义 4.2.1 自含平衡结构是具有以下性质的 n 个变量、 n 个方程组成的方程组：

1. 任何 k 个 ($0 < k < n$) 方程组成的方程组中，至少有一个方程中含有 k 个以上的非零系数变量。

2. 任何 k 个方程组成的方程组中，若出现 $m \geq k$ 个非零系数变量，取其中任意 $(m-k)$ 个变量的值，余下的 k 个变量之值可以通过解方程组来唯一确定。

条件 1 保证结构不会过分限定，否则求解变量时会产生矛盾；条件 2 保证变量之间不互相依赖，否则方程求解时，不能得出变量的唯一值。

平衡结构的因果序思想可大致表达如下：给定一个自含平衡系统 S ，若存在一个适当的子集 S' ， S' 自含且不再含自含真子集，称 S' 为极小全子集；设 S_0 是 S 的所有极小全子集的并集，称 S_0 为 0 阶全子集， S_0 必自含，其中的变量值一般可通过求解 S_0 中的方程组得出；将这些解出的变量之值代入 $(S - S_0)$ 中，得到一个新的自含结构，称为导出结构；设 S_1 是导出结构的极小全子集，称为是一阶全子集之集。重复这一过程，直至最高阶的导出结构不再包含自含子集。对 S 中的每一方程 E_i ，最后从结构中消除的变量称为是直接因果依赖于方程中所有其它的变量，依次类推。因果序理论针对的是自含结构，并不需要了解方程的具体形式，而只须知道哪些变量出现在哪些方程中，然后将这些知识转化为变量间的因果联系。

4.2.2 构造因果关系图

因果序理论描述了一种如何确定系统中参数间因果关系的方式，通常因果关系用“因果关系图”来表示。因果关系图是描述一个复杂系统内各属性之间因果关系的一种模型。通常是，将系统内各重要属性抽象为各自值域上的变量，将存在于各属性之间的因果关系抽象成变量之间的因果关系图。一般图中的节点由变量构成，节点之间的有向弧代表着变量之间的因果关系。QSB 框架中变量间的联系是通过约束方程联系在一起的，故在因果关系图中有向弧代表的是将两变量联系起来的约束方程。

根据用户的系统描述和初始描述，利用建模规则得到系统的定性模型，即所有变量和约束方程。利用因果序构造因果关系图，系统必须满足平衡结构的要求。下面以两个长方体组成的系统为例，说明因果关系图的构造过程。（这里没有用定性方程，而是直接利用原方程来构造，体现的思想是一样的。）

图 4.1 是由两个几何形体组合在一起的物体，两几何体之间无固定连接。当上面的几何体受到一个向右的力时，它有向右移动的趋势，即其重心有向右移的趋势，由于下面的几何体没有变化，所以整体重心将有向右移的趋势。

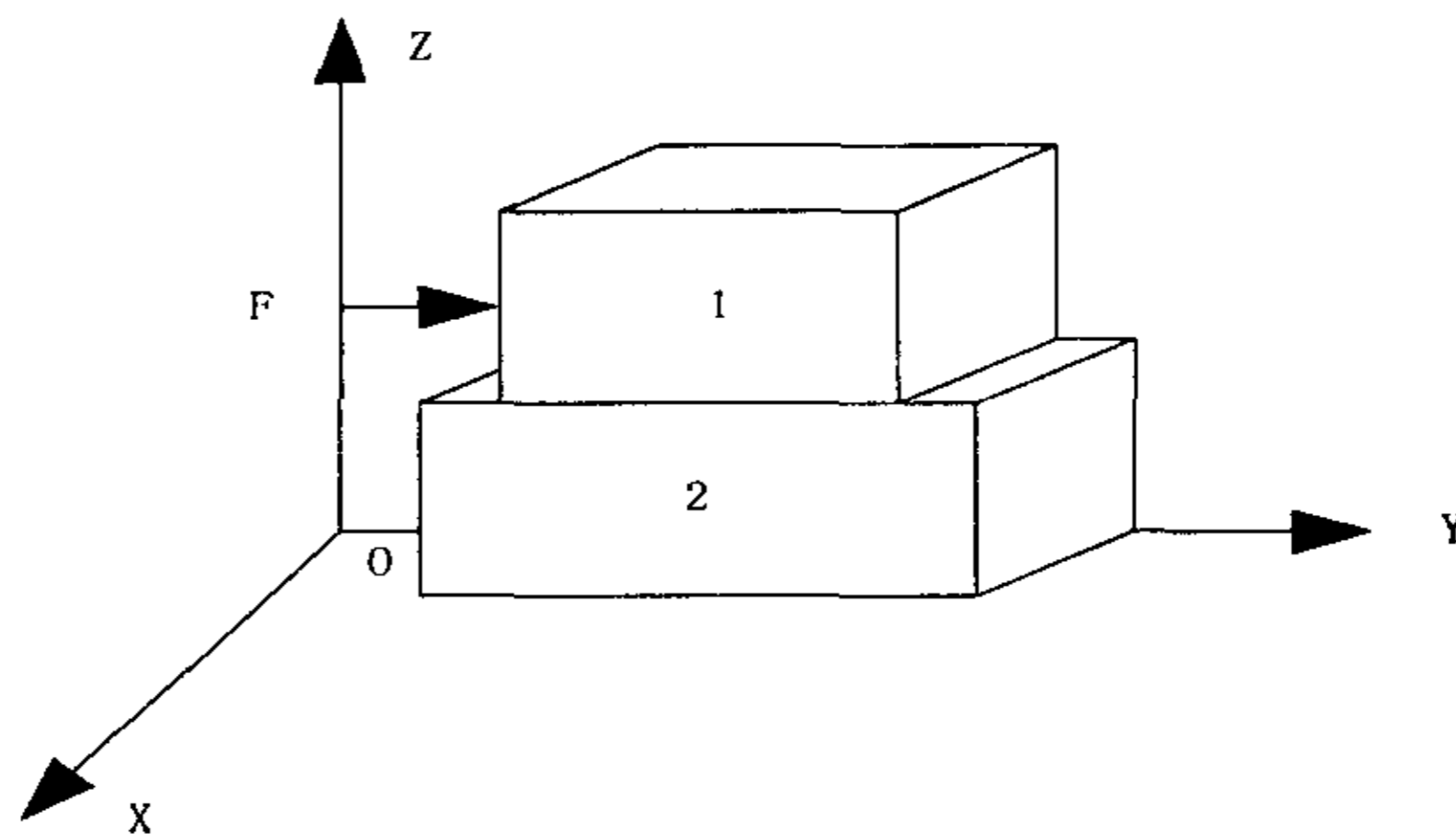


图 4.1 组合几何体

为了描述这一过程，先定义如下变量：分别用 A, B, C 表示几何体的尺寸描述—长、宽、高； V 表示形体的体积， G 表示形体的重量， y 表示重心位置的 y 向坐标。形体的质量密度 ρ 为常量，重力加速度 g 为常量。

可以列出如下方程：

形体体积与形体的几何尺寸成比例，于是有：

$$V_1 = A_1 B_1 C_1, \quad V_2 = A_2 B_2 C_2 \quad (4-1 \sim 4-2)$$

根据牛顿力学原理，物体的重量与其体积成比例：

$$G_1 = \rho g V_1, \quad G_2 = \rho g V_2 \quad (4-3 \sim 4-4)$$

根据牛顿定律和质心原理, 物体 1 的重心位置与力 F 之间存在函数关系 f

$$y_1 = f(F) \quad (4-5)$$

根据重心组合法, 整体重心与各形体的重心和重量有关

$$Y = \frac{y_1 G_1 + y_2 G_2}{G_1 + G_2} \quad (4-6)$$

方程式(4-1~4-6)并不是一个自洽结构, 因为六个方程十四个变量。加入八个方程使其自洽:

$$A_1 = c_1, \quad B_1 = c_2, \quad C_1 = c_3, \quad A_2 = c_4, \quad (4-7 \sim 4-10)$$

$$B_2 = c_5, \quad C_2 = c_6, \quad F = c_7, \quad y_2 = c_8 \quad (4-11 \sim 4-14)$$

($c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8$ 表示常量, 即外部给定值)

上述方程表明了这样一种假设: 变量 $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, y_2, F$ 由存在于系统之外的条件唯一确定。这种假设的一般形式是: 假定这些变量的值由被研究系统之外的因素决定。

加上新的方程, 整个结构表示在表 4.1 中。其中行代表方程, 列代表变量, i 行 j 列中为 1 的充要条件是第 j 个变量出现在第 i 个方程中, 且系数不为 0。

方程 (4-7~4-14) 只含一个变量, 均为极小全子集, 合并组成零阶极小全子集。通过把方程 (4-1~4-6) 中的 $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, y_2, F$ 代以值 $c_1 \sim c_8$, 所得到的一阶导出结构在表 4.2 中给出。导出结构的一阶极小子全子集为元素集 {4-1}, {4-2}, {4-5} 重复上一过程, 得到二阶和三阶的导出结构, 并表示在表 4.3, 4.4 中。

根据因果序理论得到的因果关系图可以用有向图的形式加以描述, 如图 4.2 所示。该有向图揭示了结构中各变量间的因果依赖关系, 这种因果关系图是后续的约束传播和定性演算的基础。

这里特别指出, 利用因果序理论构建因果依赖关系时, 所使用的方程必须是描述某种物理机制的结构方程, 机制指的是系统中具有一定功能的组成部分, 它们包括物理规律以及按规律运行的物理部件。只有这样才能保证据此因果关系得到的结果是符合要求的。

同时上面的导出过程中, 可以看到为了能系统成为自洽结构, 引入了假设, 也就是所谓的局外变量。一个变量被看成为局外变量, 意味着在研究任何有关该变量的机制时都将被排除在外, 不予考虑。局外变量的引入和结构方程的建立, 需要经验和形式化方法相结合, 因此利用因果序建造变量间的因果关系图需要很多经验, 这在一定程度上限定了其使用范围。

表 4.1 组合几何体的结构

方程	A_1	B_1	C_1	A_2	B_2	C_2	y_1	y_2	V_1	V_2	G_1	G_2	F	Y
(4-1)	1	1	1						1					
(4-2)				1	1	1				1				
(4-3)									1		1			
(4-4)										1		1		
(4-5)							1						1	
(4-6)							1	1			1	1		1
(4-7)	1													
(4-8)		1												
(4-9)			1											
(4-10)				1										
(4-11)					1									
(4-12)						1								
(4-13)								1						
(4-14)														1

零阶极小全子集: $\{(4-7)\}, \{(4-8)\}, \{(4-9)\}, \{(4-10)\}, \{(4-11)\}, \{(4-12)\},$
 $\{(4-13)\}, \{(4-14)\}$

极小全子集中的变量: $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, y_2, F$

说明: $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, y_2, F$ 是引入的局外变量, 从上面的方程可以看出, 如果不引入有关 $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, y_2, F$ 八个变量的假设, 实际上是无法建立各变量间的因果关系的。这些变量在 QSB 中作为默认的局外变量, 直接利用这些默认变量构造因果关系图

表 4.2 一阶导出结构

方程	y_1	V_1	V_2	G_1	G_2	Y
(4-1)		1				
(4-2)			1			
(4-3)		1		1		
(4-4)			1		1	
(4-5)	1					
(4-6)	1			1	1	1

一阶极小全子集: $\{(4-1)\}, \{(4-2)\}, \{(4-5)\}$

极小全子集中的变量: y_1, V_1, V_2

表 4.3 二阶导出结构

方程	G_1	G_2	Y
(4-3)	1		
(4-4)		1	
(4-6)	1	1	1

二阶极小全子集: {(4-3)}, {(4-4)}

极小全子集中的变量: G_1, G_2

表 4.1.4 三阶导出结构

方程	Y
(4-6)	1

三阶极小全子集: {(4-6)}

极小全子集中的变量: Y

经过上述过程得到如下图所示的因果关系有向图

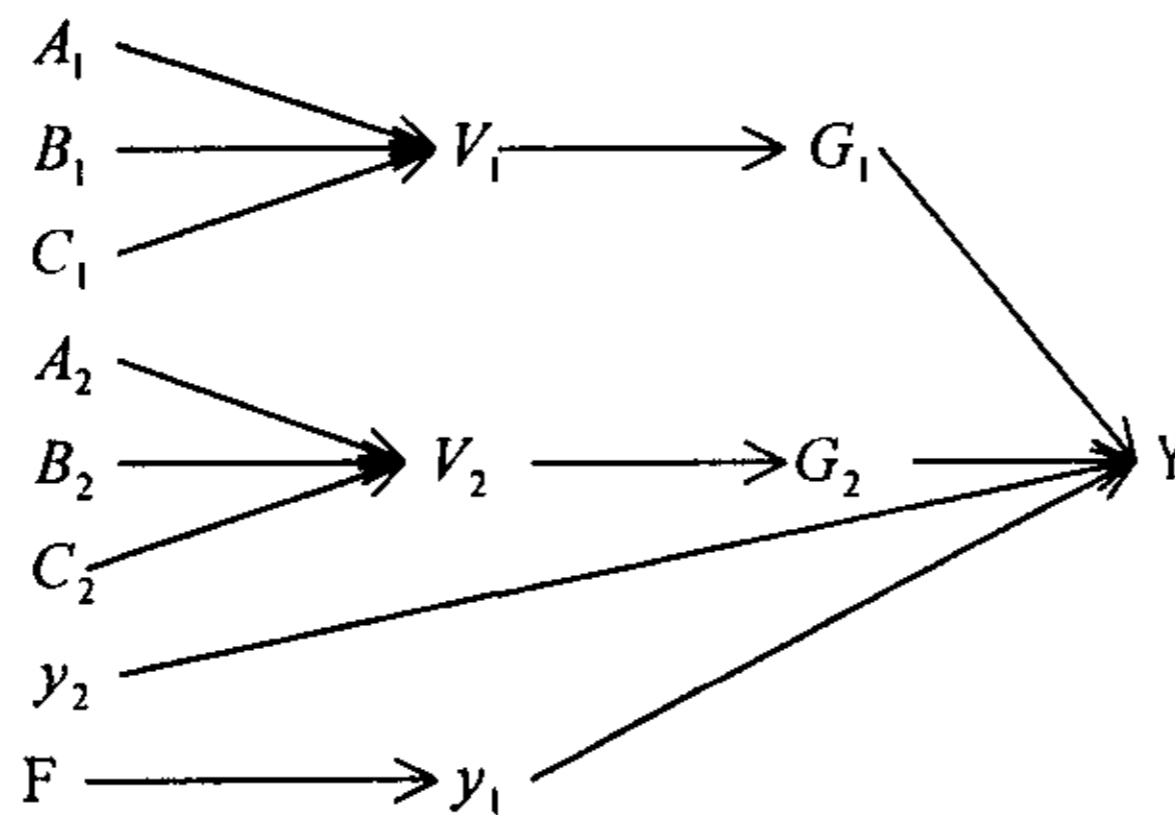


图 4.2 组合几何体的因果关系图

图 4.2 说明了系统整个的信息流动过程, 该有向图的文字解释如下: 两长方体的体积取决于其长度、高度和宽度, 其重量取决于体积 (这里质量密度为常数), 长方体 1 受到向右的力, 则其重心有向右移的趋势, 系统整体重心的变化取决于每个部件的重心变化和重量。

4.3 约束传播

人类工程师在分析问题时最大的特点就是根据不同的情况采用不同的推理步骤。为了实现这种特点, 需要采用灵活的推理机制, 根据用户具体的要求, 推理机选出构造求解问题所需要的知识, 并在此基础上进行相应的推理, 给出求解结果, 在 QSB 框架中表现为根据用户的不同要求确定相应的求解路径。

在得到因果关系图后，接下来的工作就是由图中路径将原因变量的行为传播到结果变量。原因变量指询问中发生变化的项，或者领域知识库中明确给出的外部项。结果变量指询问中给出的用户感兴趣的变量，变量的行为是指一个项的值。

本文的推理过程分为前向推理和后向推理，前向推理过程主要是约束传播过程，即根据已知变量推出未知变量的过程，这一过程采用贪婪深度优先法，而后向推理主要体现的是定性演算与验证。

约束传播过程就是一个求解约束满足问题的过程。约束满足问题包括一组变量和一组变量间的约束。其目标就是找到所有变量的一个（或多个）赋值，使所有约束都得到满足。

将系统看作是一个约束系统，表示为一个二元组 $CS = (V, C)$ 。其中 $V = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ，是约束系统所有变量的集合， $X_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 对应有一个论域 $dom(X_j)$ ； $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{|C|}\}$ 是系统部件约束集， $C_i (i = 1, 2, \dots, |C|)$ ，是定义在 V 的一个子集 $V(C_i) = \{X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,|V(C_i)|}\}$ 上的 $|V(C_i)|$ 元约束关系，是 $dom(X_{i,1}) \times dom(X_{i,2}) \times \dots \times dom(X_{i,|V(C_i)|})$ 的一个子集。求任一约束集合的解是一个 NP 问题，但对 QSB 框架中的约束系统来说，由于采用了因果机制，即根据物理机制建立结构方程，同时利用因果序理论建造系统变量间的因果关系，从而使求解问题简单化。

因果关系的最大特点就是因果关系具有有向性和非对称性。QSB 框架正是利用因果关系的这种特性来使问题简单化的，在约束传播中，只存在向后计算而不能向前计算。即利用已知的前件推出后件，且是单向传播，这样有效地避免了传播过程中计算那些对问题无关的变量，也在一定程度上减小了推理过程中出现的模糊性，提高了效率。

约束传播过程中的贪婪深度优先法的主要思想是：

- (1) 首先根据询问模块和控制模块得到系统中的所有已知的外部变量集，目标变量，已构造的因果模型。
- (2) 根据已知外部变量集及目标变量，从构造好的因果模型中选出所有相关的模型，并进行优先级排序
- (3) 从因果模型中找出等级最低、优先级最高的，即选择最迫切的任务。这样做是为了保证在传播中原因总在结果前发生。即在系统中由多个部件组成时，在推出系统变化前先确定所有部件的变化。
- (4) 执行任务。产生新任务。
- (5) 将新任务加到任务队列中，并对所有任务进行优先级排序。
- (6) 重新执行 (3)，直到所有任务的完成。

这个过程可以表示为图 4.3 的形式

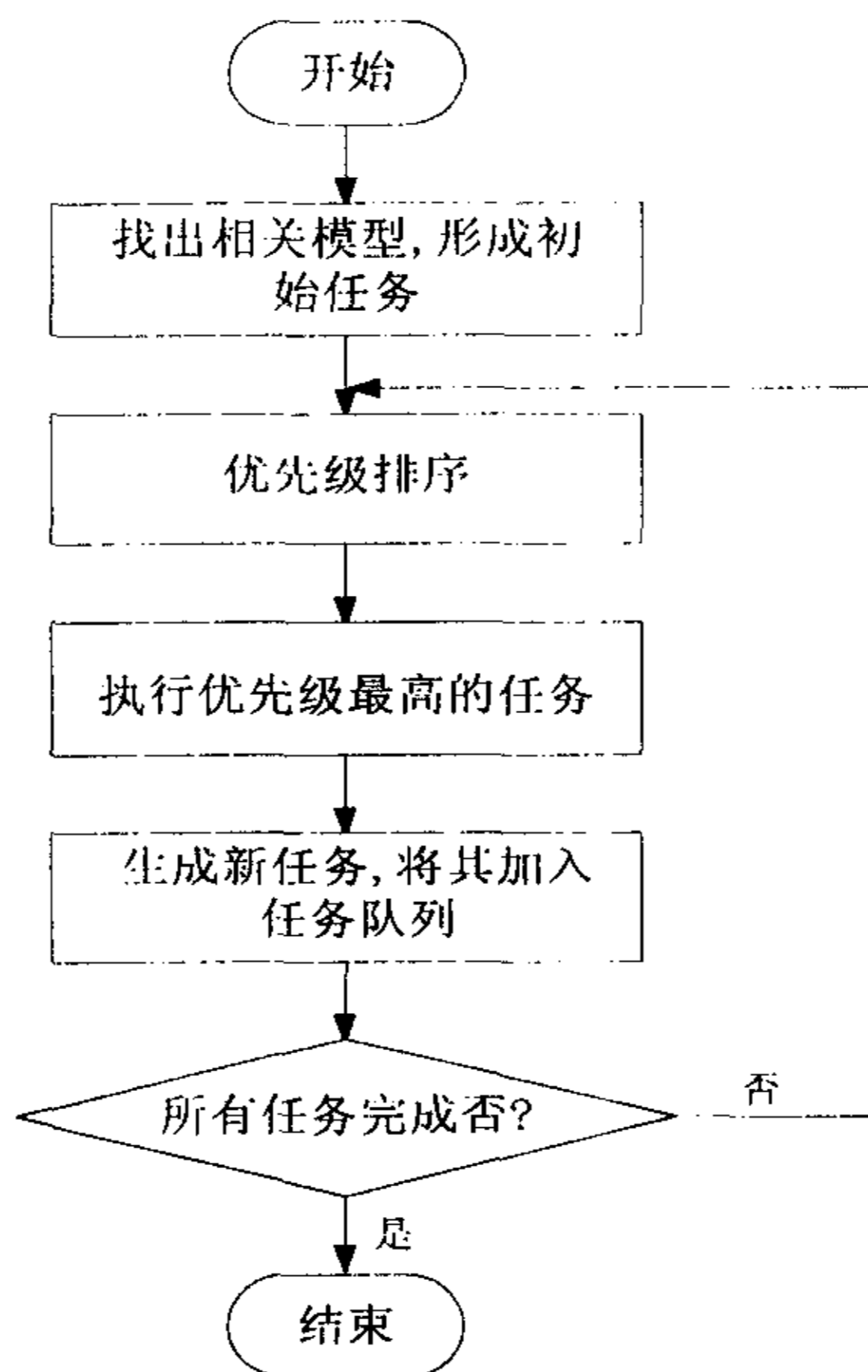


图 4.3 约束传播过程

实际上, 这一过程也体现了解决问题的真实情况。如当我们遇到这样一类问题“系统中部件 1 的高度增加、体积不变, 部件 2 的重量增大时, 系统重心如何变化”, 在回答这个问题之前, 我们会先确定系统已知的变化参量、所关心的问题等等, 然后从头脑中找出与此问题相关的原理、公式 (也就是第一、二步要做的工作)。两个部件都在变化, 推理该从何处开始, 变化怎样传播, 需要一个规定。这有点类似于基于规则的推理中, 当有多个规则被满足时, 规则的选择问题。这里利用以下两个原则对传播中要执行的任务进行优先级排序: 1) 同一部件中参数变化的传播, 根据部件中参量间的因果性进行; 2) 先得到各个部件的变化情况, 再计算对系统的影响。通过这样的设定, 约束传播可以有条不紊地进行下去, 直到得出结果。

下面仍以上节所述的简单例子来说明这一过程:

在上节的例子中有如下方程 (考虑不受力的情况, 式中各变量的含义与上节相同, z 表示重心的高度即 z 向坐标)

$$\partial V_1 = \partial A_1 \oplus \partial B_1 \oplus \partial C_1 \quad (4-15)$$

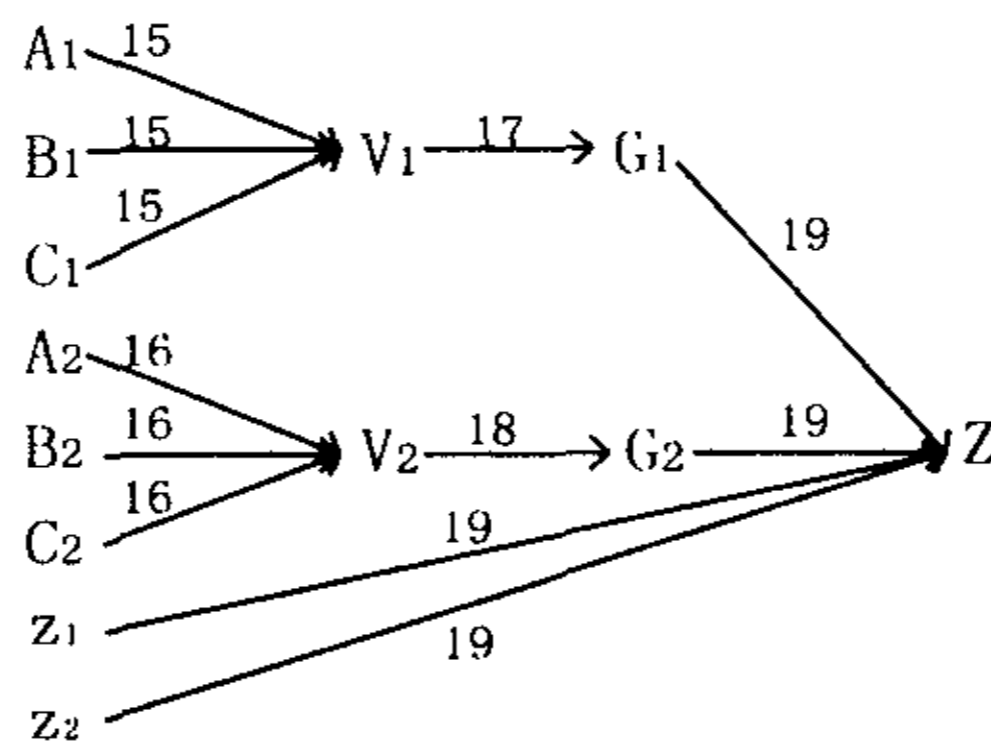
$$\partial V_2 = \partial A_2 \oplus \partial B_2 \oplus \partial C_2 \quad (4-16)$$

$$\partial G_1 = \partial V_1 \quad (4-17)$$

$$\partial G_2 = \partial V_2 \quad (4-18)$$

$$\partial Z = \partial z_1 \oplus \partial G_1 \oplus \partial z_2 \oplus [-\partial G_2] \quad (4-19)$$

构造出如下因果关系图：（图中边表示方程号，节点表示变量）



当有如下的初始条件时： $\partial A_1 = +$, $\partial z_2 = +$, $\partial V_2 = 0$ （1 的长度增大，2 的高度增加且体积不变），开始传播，遍历因果关系图，找到与初始条件相关的节点 A_1 、 z_2 、 V_2 ，前文说过，在约束传播中，假设信息只向后流动，故尽管 (4-16) 中也含有 V_2 ，但由于 V_2 在 (4-16) 中作为结果变量，所以不将其加入任务队列。根据图中边所表示的意义，取出方程 (4-15)、(4-18)、(4-19)。此时进行优先级排序，先计算式 (4-15) 得到 $\partial V_1 = +$ ，已知变量增加，引入新的方程 (4-17)，再进行排序，计算式 (4-18) 得到 $\partial G_2 = 0$ ，已知变量再次发生变化，但由于 (4-19) 已在任务队列中，故没有新任务生成，取优先级最高的执行，计算式 (4-17) 得到 $\partial G_1 = +$ ，最后计算 (4-19) 得到 $\partial Z = +$ ，传播停止，得出结论系统整体重心增加。

约束传播中会遇到以下几个问题：

1. 优先级排序及冲突消解

对于优先级排序，可以采用不同的方式来进行。QSB 框架中利用因果关系的有向性，采用拓扑排序法。控制机根据初始描述得到系统的因果关系图，由于因果序理论限制了过分约束的出现，所以在该有向图中没有回路。那么可以将该有向图视作 AOV 网 (Activity On Vertex network)，在网中如果有一条从 V_i 到 V_j 的路径，则称 V_i 为 V_j 的前趋， V_j 为 V_i 的后继；如果 $\langle V_i, V_j \rangle$ 为 AOV 网中的弧，则称 V_i 为 V_j 的直接前趋， V_j 为 V_i 的直接后继。

拓扑排序的基本思想是：首先找出所有没有前趋的顶点，将其优先级设为 0 级，并将这些点从 AOV 网中删除，重复此过程，优先级递加，直到所有的顶点都排出序为止。

对任务进行优先级排序是为了消解约束传播过程中出现的冲突现象，当根据初始描述确定了已知的变化变量后，利用因果关系图进行传播时，有时会有多个

约束方程被启动, 如果不采用一种策略来使任务按先后次序执行的话, 传播中会出现冲突现象, 以往的约束传播采用回溯法来调整, 这样作比较麻烦。QSB 框架中为了避免在传播中出现这种现象, 在传播时就进行了优先级排序, 使任务按因果关系的先后性来执行, 总是原因先发生而后是结果。如仍以上一节图 4.1 为例, 当 1 的体积增大, 2 的高度降低时, 即 $\partial V_1 = +$ 、 $\partial c_2 = -$, 根据约束传播的起始条件, 找到与初始变量相关的模型, 有如下的约束方程被找到:

$$\partial G_1 = \partial V_1 \oplus \partial \rho_1 \quad (4-15)$$

$$\partial V_2 = \partial a_2 \oplus \partial b_2 \oplus \partial c_2 \quad (4-16)$$

$$\partial z_2 = \partial c_2 \quad (4-17)$$

如果不进行优先级排序, 选择任意方程进行下去, 假设先执行 (4.1.15) 根据推理假设, 设 $\partial \rho_1 = 0$, 则 $\partial G_1 = +$, 此时, 有新的约束方程加入

$$\partial Z = \partial z_1 \oplus \partial G_1 \oplus \partial z_2 \oplus \partial G_2 \quad (4-18)$$

是继续利用假设对(4-18)进行推理, 还是选择其他方程传播。两种选择得到不同的结果, 如果是继续利用假设进行推理的话, 假设其余变量不变 $\partial z_1 = \partial z_2 = \partial G_2 = 0$, 则会得到系统重心增高, 即 $\partial Z = +$, 而如果选择其他方程传播, 如选择式(4-17), 得到 $\partial z_2 = -$, 再选择式(4-16)利用假设有 $\partial V_2 = -$, 生成新的约束方程,

$$\partial G_2 = \partial V_2 \quad (4-19)$$

根据此式有 $\partial G_2 = -$, 最后, 计算 (4-18) 因为 $\partial G_1 = +$ 、 $\partial z_2 = -$ 、 $\partial G_2 = -$, 根据定性演算规则, 系统重心的变化不确定, $\partial Z = ?$ 。由定性值的定义, ∂Z 的可能取值为 $\{+, 0, -\}$ 。与上述 $\partial Z = +$ 得出的结果不一致。本来定性推理的好处就是得出系统所有可能的行为, 在某些推理中这两个结果不冲突, 但对于重心问题来说, 得出不确定的答案和确定答案是冲突的。产生冲突的原因是因为在推理中在选择传播路径时, 不合理的使用了假设, 从而使可得到确定变化的量假设为不变化, 如 $\partial z_2 = -$, 在前一种传播中假设为不变。采用了优先级排序后, 可以很好地解决这个问题。

对任务进行优先级排序后的传播路径为: 由初始输入得到式 (4-15~4-17) 后, 对其进行排序。由因果关系图的拓扑排序得出优先级的顺序分别为: (4-15) 等级为 2, (4-16~4-17) 的等级均为 1, 则根据等级高、优先级低和高优先级先执行的原则, 传播先由(4-16)开始, 得出

$$\partial V_2 = -$$

由于有新的确定值加入, 相应地也加入了新的约束方程 (4-19), 此时推理机对所有任务重新进行优先级排序(4-19)的等级为 2, 现在(4-17)的优先级最高, 对其进行定性演算, 结果为

$$\partial z_2 = -$$

再次引入新的约束方程(4-18), (4-18)的等级为 3, 则执行 (4-15), 得

$$\partial G_1 = +$$

搜索因果关系模型没有找到新的模型，不再需优先级计算，选择当前最小等级的方程(4-19)执行，得

$$\partial G_2 = -$$

最后执行最高等级的(4-18)式，得出 $\partial Z = ?$ 的结果。这个事实与实际情况相符，推理过程中引用的假设也合理，因此，利用优先级排序即可以有顺序的按照事物发生的先后执行相应的任务，又可以减少由于引入假设而得到错误的结果。

2. “过分约束”与一致性验证

例：设根据部件物理机制知识，有函数关系 $E = f(A, B)$ ， $E = f(C, D)$ 成立。则根据对部件约束的推导，有如下因果关系（将因果关系表示为 C_x ）： $\{A, B\}C_x\{E\}$ ， $\{C, D\}C_x\{E\}$ 。表示成因果关系图如下：

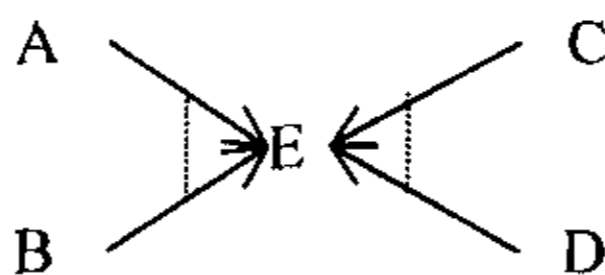


图 4.4 对应的因果关系图

从此图可以看出，例中成立 C_x 关系 $\{A, B\}C_x\{E\}$ ，还成立 C_x 关系 $\{C, D\}C_x\{E\}$ ，这样变量 E 的值可以被变量 A 、 B 的值唯一确定，同时又可以被变量 C 、 D 的值唯一确定。这种情况称之为“过分约束”，过分约束是一种常见现象，应该允许存在。然而这对于推理系统的一致性来说是不利的。当根据变量 A 、 B 的值确定的变量 E 的值与根据变量 C 、 D 的值确定的变量 E 的值不相等时，即发生所谓的“不一致”现象。因此当系统中存在过分约束时，一致性是否成立是必须加以验证的。而一致性验证问题是复杂的。因果序理论中不允许“过分约束”的存在，而系统中又会出现这种现象，本文通过采用下面的方式来对“过分约束”进行简化。

对于这种情况，首先分析 $\{A, B\}$ 与 $\{C, D\}$ 之间是否存在某种因果关系，如果存在，应该将前述 C_x 关系进一步简化（更新），使因果关系前后件之间关系更为直接、例如根据进一步知识，有： $\{A\}C'_x\{C\}$ ， $\{B\}C'_x\{D\}$ ，则可将 C_x 关系简化（更新）为 C'_x 关系： $\{A\}C'_x\{C\}$ ， $\{B\}C'_x\{D\}$ ， $\{C, D\}C'_x\{E\}$ 表示成因果关系图如下。

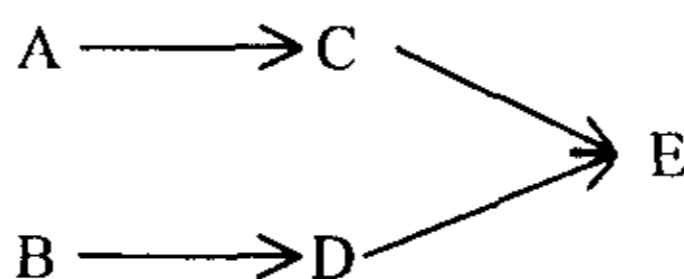


图 4.5 因果关系简化

此时过分约束现象消失，该与或图也成为最简形式。如果 $\{A,B\}$ 与 $\{C,D\}$ 之间并不存在任何形式的因果关系，（尽管从物理背景角度来说这是很少见的）。则可以考虑 $\{A,B\}C, \{E\}$ ， $\{C,D\}C, \{E\}$ 这两条知识是否在推理系统中均为必要。若有一条为不必要的，可以将其删除，因为从推理角度来说它是冗余知识。事实上，因果关系图是根据推理问题的需要而构造的，冗余知识无需加入到该图中去。

在应用中应该尽量将过分约束现象简化处理，这样回避了推理系统中的一致性检验。将该任务返回给知识本身的一致性检验问题。

第五章 定性推理实验系统的设计与实现

5.1 系统简介及结构

5.1.1 系统简介

定性推理实验系统(a Qualitative System for Barycenter 简称 QSB), 是为了实现并验证本文所提出的定性推理框架的一个实验系统。

设计 QSB 的主要目的有二:验证定性知识、定性推理对于概念设计阶段的分析和调整有比传统的数值分析更大的优越性, 在系统信息不充足、不精确的条件下, 定性推理是利用这些信息推出对系统设计有益知识的有力手段; 以往定性物理的主要研究目标是预测并解释一给定系统的行为, 在 QSB 框架中, 我们并不关心系统随时间变化的动态行为, 因此, QSB 主要研究 (1) 对物理系统建立定性模型的基本要素 (2) 建模准则 (3) 由这些系统处理的因果关系的作用方式, 也就是定性信息如何流动以推出系统所要得到的结果。

概念设计中并不是孤立地运用某一类知识, 是多种知识的综合运用过程。而且在设计初期很多时候是以经验做出判断的, 同时在定性物理中假设的引入也是一种经验总结, 因此, 需要经验知识和定性知识相结合。QSB 框架中这两类知识分别以规则和面向对象的方式表示的, 规则部分利用专家系统壳 DAOK 所编写, 其余部分用 JAVA 语言实现。

5.1.2 QSB 结构

QSB 主要是利用 JAVA 语言实现的, 采用面向对象的方法。系统任务是在已有的对某个重心系统的描述模型的前提下, 构造推理所需的定性模型和因果关系图, 利用该图进行推理和解释, 从而回答用户的询问。

图 5.1 给出的是 QSB 系统的主程序流程图, 系统首先根据系统描述和初始描述, 抽出所有参量、定性方程、已知变量和目标变量, 而后根据默认的局外变量和定性方程构造因果关系图, 并将因果关系图表示为因果模型集, 此后, 根据用户具体的要求判断是正向图搜索还是倒向图搜索, 如果是正向图搜索, 则进行约束传播, 如果是反向, 则进行交互式逐层分析。

QSB 系统的主要数据结构是定性模型的描述。具体地, 分别采用如下结构表示参数集、因果模型、因果关系图、定性微分方程

```
class Parameter{
    int belongToCom;           //参数所属部件
    String paraName;          //参数名称
    String paraValue;         //参数的值(定性值) }
```

图 5.2 参数集类型结构

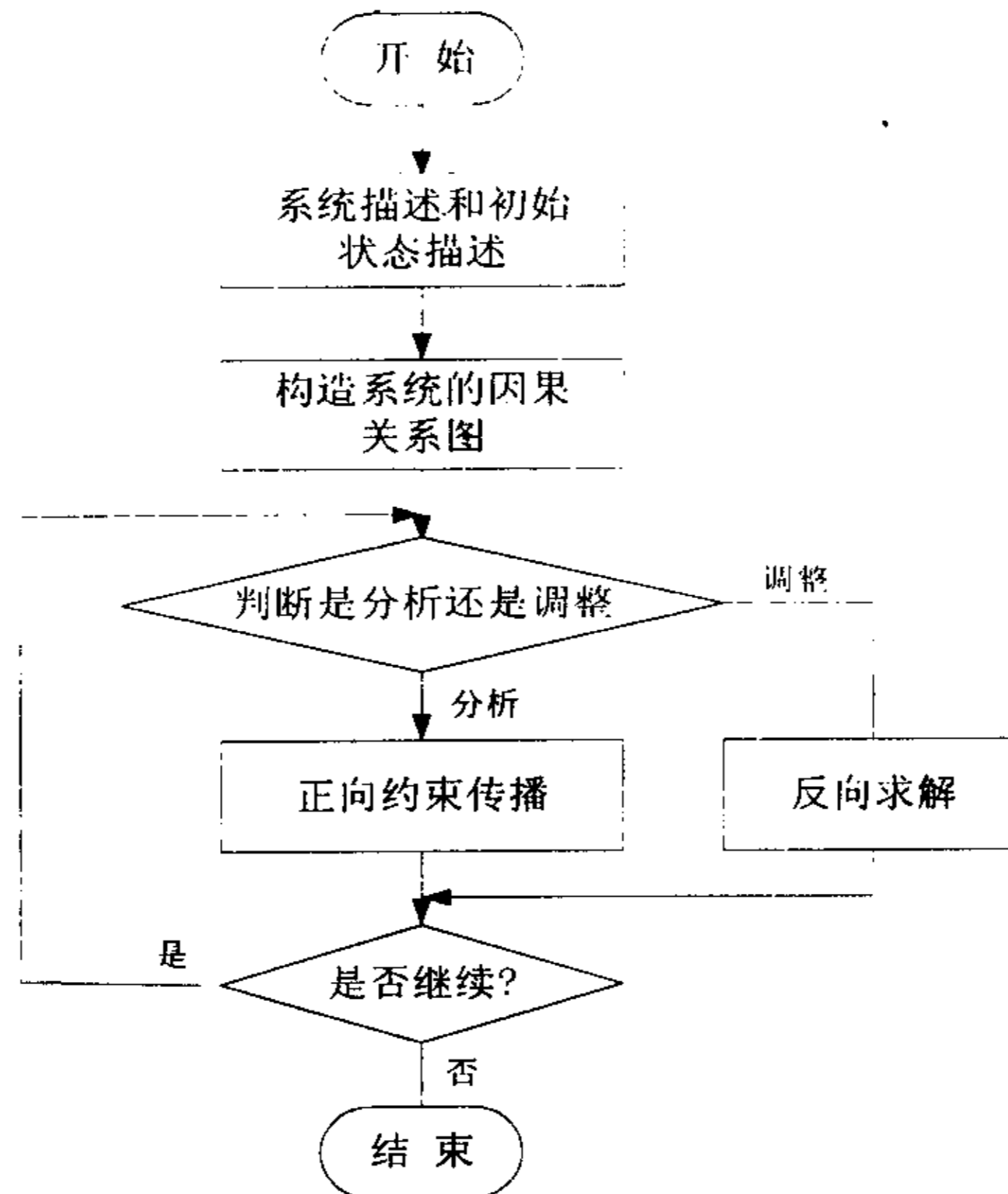


图 5.1 QSB 系统的主程序流程图

```

class flowEquation{
int number; //参数个数
Parameter[ ] paraSet; //方程中所含参数
String[ ] constraintSet; //约束关系集
String expression; //结构方程机制
}
  
```

图 5.3 定性方程类型结构

```

class causalityUnit{
Parameter[ ] causeVar; //前件集
Parameter resultVar; //后件
flowEquation equ; //指向系统结构方程的指针
String modelBasis; //因果模型建模依据
}
  
```

图 5.4 因果模型类型结构

QSB 框架中最重要的就是因果关系的构造和搜索, 该图由 causalGraph 类实现, 该类主要包括图的邻接表的建立, 拓扑排序, 优先级计算等方法。

5.2 系统的主要算法

该系统中主要有以下几个算法:

1. 根据系统描述构造因果关系图

(1) 已知: 外部变量集 V

约束方程集 EV

(2) 设定: 因果模型集 $CS = \Phi$

已确定变量集 $CV = V$

已确定约束集 $CE = \Phi$

(3) 形式化算法如下:

a. 从约束方程集 EV 中取出一个约束方程 e , 与已确定约束变量集求差集。如果对某一约束来说, 求得的差集变量个数为 1 (记为 v), 且该方程未加上标记, 则认为该约束可确定。

则 $\{ CV = CV + \{v\};$

$CS = CS + \{ \{e-v\}, v \};$

$CE = CE + e;$

}直到所有约束方程可确定。

b. 从已确定约束变量集中取一变量, 设此变量为邻接表的顶点, 查找因果模型集中前件集含有此变量的模型, 取出此模型中的结果变量, 加入此顶点的邻接表中, 继续查找因果模型集直到此变量的所有结果变量都加入到此变量的邻接表中为止。重复这一过程, 直到建立所有变量的邻接点与邻接表。此过程表示为图 5.5。

2. 约束传播算法

(1) 已知: 变化参量集 VS

因果关系图 CG

因果模型集 CM

(2) 设定: 已确定变量集 $CV = VS$

任务队列 $T = \Phi$

(3) 形式化算法如下:

a. 查找。从因果模型集 CM 中找出所有与变化参量 VS 相关的模型, 形成任务队列。则 $T = T + \{ M_1, M_2 \dots M_n \}$ 。(M_i 为因果模型)

b. 优先级排序。根据因果关系图的有向性, 顶点的所有直接前驱即为该顶点的入度, 求出相关因果模型中所有顶点的入度。根据模型中所有顶点的最大入度制定

优先级, 进行优先级排序。

c. 求解。选出优先级最高的任务 M_i 执行, 如果该约束中只有一个变量 v 未知, 则求解该约束。 $T=T-M_i$, $VS=VS+\{v\}$, $CM=CM-\{M_i\}$ 。

d. 变化参量集发生变化, 返回 a 重复执行上述过程, 直到任务队列为空。

约束传播算法过程如图 5.6

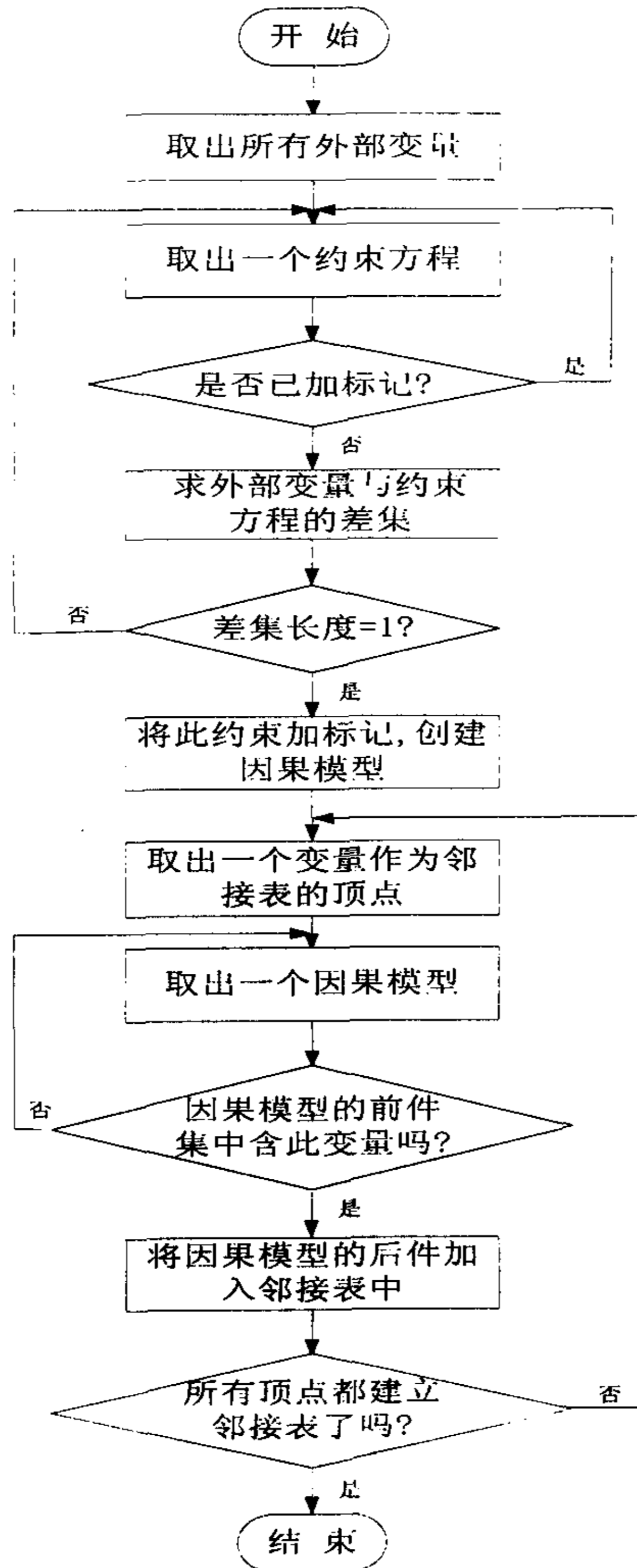


图 5.5 构造因果关系图的流程图

3. 优先级排序算法

(1)已知：因果关系图 CG

(2)形式化算法：

- a. 把邻接表中所有入度为零的顶点入队，设优先级为 0。
- b. 当队为非空时，作下列两件事：
 - A) 取出队头元素 V_i ，出队并输出。
 - B) 在邻接表中查找 V_i 的直接后继 V_j ，把 V_j 的入度减 1。如果 V_j 的入度为零则 V_j 入队。 V_j 的优先级为其直接前驱的优先级加 1。
- c. 重复执行此过程，直到所有顶点的优先级都已排序。

此过程表示为图 5.7 中

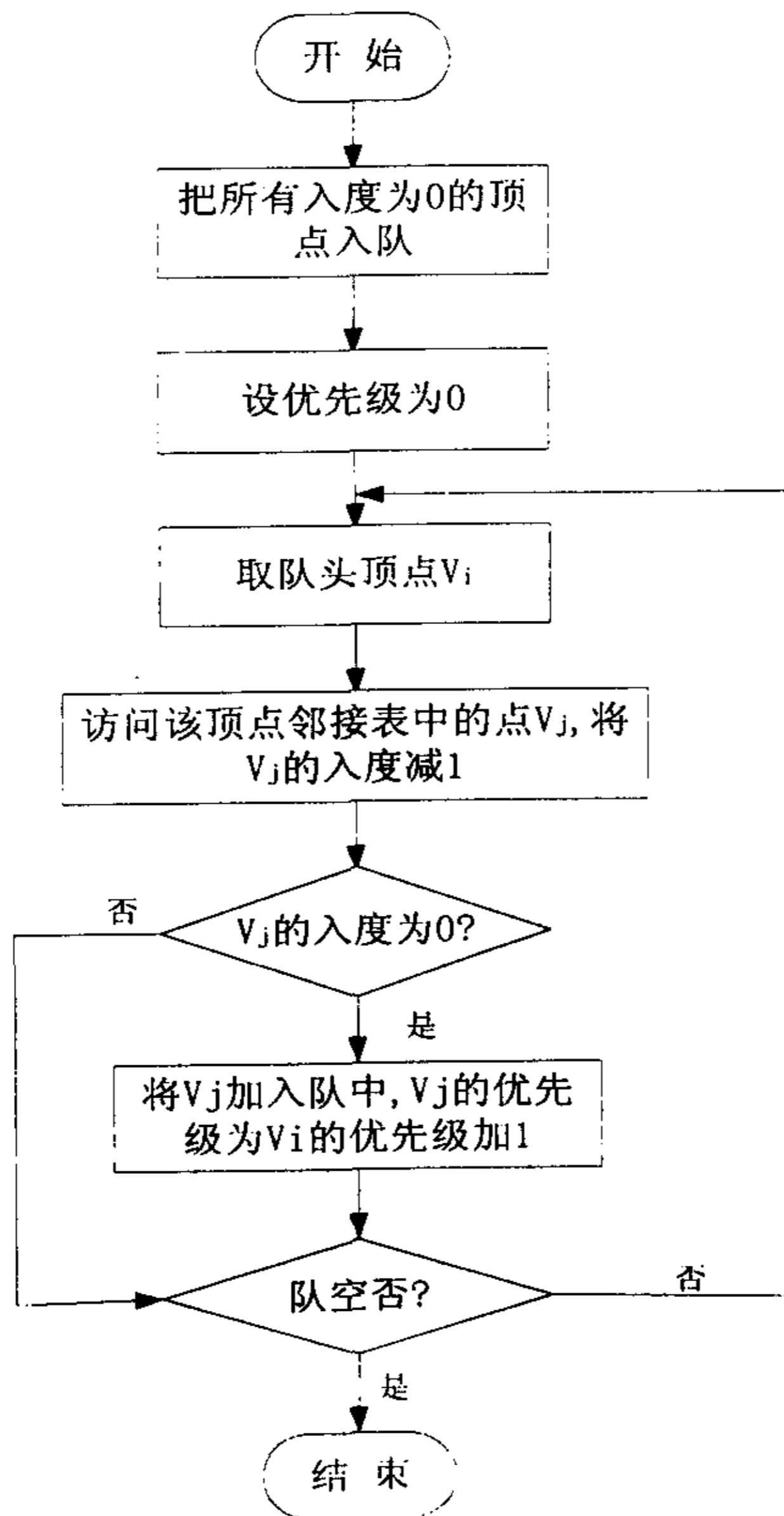


图 5.7 优先级排序流程图

第六章 总结与展望

6.1 全文总结

本文的主要目的在于研究定性知识及定性推理在概念设计中的应用, 探讨以计算机模拟人类处理定性知识的过程, 并最终重心分析为例, 建立了一个定性推理系统 QSB 的总体框架结构

本文所做的主要工作包括以下几部分:

1. 探讨了概念设计的特点、过程, 从定性知识运用的角度, 对设计中所涉及的知识进行了分类, 指出设计过程中要用到多种知识, 包括经验知识、定性知识、定量知识, 并特别指出定性知识在其中的作用, 这一点在以往的文献中很少被提到。在许多实际工作中, 人们更多的是依靠对系统的原理性的理解, 而这种理解的基础就是定性知识, 本文所研究的也是基于这些定性知识的推理。
2. 深入研究了定性推理理论及各种定性推理方法, 结合定性推理的观点和解决问题的手段, 给出了一类问题的定性模型描述。在建模过程中, 特别指出定性模型的建立要与具体问题的实际求解方式相吻合, 详细描述了 QSB 框架中不同情况下模型的建立和使用的假设。定义了框架中用到的一些概念。
3. 定性推理的过程要符合实际物理系统的机制, 因此, 在推理中必然要用到因果性, 因果关系的建立一直是定性推理中研究的一部分。QSB 框架中结合具体问题在因果序的基础上建立了因果关系图, 并根据用户的具体要求采用了灵活的推理机制。
4. 任何一个理论都是为了解决实际问题而提出的。以往的定性推理都是针对动态系统而提出, 其定性模型的建立和定性推理方法都是围绕着动态系统而进行的, 其关注焦点是动态行为的变迁和转移。而本文主要研究的是静态平衡系统中, 各参量间的因果关系和某一参量变化后, 变化在约束网中的传播, 因此约束传播是 QSB 框架中的主要问题。求任一约束集合的解是一个 NP 问题, 但对于某些约束系统, 通常是那些描述因果机制的系统, 构造解的方法就十分简单。QSB 框架在构造了因果关系图后, 针对该系统因果有向性的特点, 提出了一种适合该类问题的约束求解方法: 只要从输入端开始将中间结果向后传播直到输出端。这种直接的计算方式没有遇到一般约束求解问题的困难, 显示出因果预测内在的简单性。

6.2 展望

基于以上的研究工作，在以下几个方面还有待于进一步研究：

1. 在对客观世界中的一类问题求解时，如果对这类问题没有十分成熟的固定程式的话，不同的人会以不同的方式来处理问题。建立一个适用性强而又涵盖面较广的模型，需要深厚的理论知识、丰富的实践经验和一定的抽象能力，因此，通用模型的建立是一项难度很大的工作。QSB 框架中，模型只是根据作者对问题的理解及求解方式而建立的，今后还需进一步研究这类问题求解的规律，提出一个简练而又描述出问题本质特征的模型。
2. 物理系统的因果关系的确定是定性推理中的重要方面，本文采用了因果序理论来构造系统的因果关系图。因果序理论针对的是自容结构，并不需要了解方程的具体形式，而只需知道哪些变量出现在哪些方程中，然后将这些知识转化为变量间的因果联系。为取得自容的结构，因果序理论需要附加假设，将某些变量区分为独立于系统的局外变量，这里需要根据经验做出判断，而不能任意指定。因此，如何获得局外变量还需继续研究，另外，因果序是从全局角度分析入手的，对于一些不能从全局确定因果关系的系统，还需采用其它方式确定。QSB 中的约束传播也是基于因果关系的机制上进行的，还不能十分通用，这些问题都需进一步研究。
3. 定性推理由于采用定性信息表示系统，难免在推理中会遇到定性知识解决不了的模糊性问题，这就需要引入定量知识或其它方式如数量级推理等。将来还需在这些方面作更深入的探讨。
4. 不论是定性推理还是专家系统等其他技术，当面向实际应用时，都需要这个领域的专门知识。多种知识的综合运用和表达是构造一个实用系统的基础，QSB 框架中利用了领域内的经验知识和定性知识，而概念设计中涉及到经验知识、定性知识、定量知识，如何很好地表示与运用这些知识是构造概念设计支持系统的关键也是有待于将来继续解决的问题。

定性推理的应用研究在国内还很少见，希望本文能够抛砖引玉，对定性知识、定性推理的研究起到积极的促动作用，引起国内的相关研究。

致 谢

本论文是在导师赵克副教授的悉心关怀、指导下完成的。在此论文完成之际，作者谨向导师赵克副教授致以深深的谢意。导师知识渊博，诲人不倦，给作者在研究生期间的学习与工作以极大的帮助和细心的指导，导师严谨的治学态度，科学的研究方法，勤勉的工作作风和勇于开拓的精神是作者永远学习的榜样。在此，再次向赵克副教授致以最诚挚的谢意！

感谢冯斌、李久宏、刘军、范勇、赵雪峰、刘卫星等同学的帮助，尤其是冯斌、李久宏两位同学，在与他们的探讨中，本人受益非浅。这些帮助让作者感到了同学友情的弥足珍贵。

感谢国内外在人工智能、定性推理等方面的工作和研究人员，正是他们的勤奋工作，留下了许多珍贵的资料。作者在研究生期间从他们的专著和论文中得到了许多启发，在此向他们致以最崇高的敬意。

在 408 工作、学习的日子是让人难以忘怀的，老师们兢兢业业的工作精神是本人学习的榜样，同学间的珍贵友情是本人毕生最大的财富，在此，一并送上我对他们的祝福。

最后，对在研究生期间关心和帮助过作者的老师和同学们表示最衷心的感谢。

石莉

2001 年 1 月

西安电子科技大学

参考文献

- 【1】 Renate Fruchter, Kincho H.Law And Yumi Iwasaki. An Approach For Qualitative Structural Analysis. AIEDAM (1993)7(3),189-207。
- 【2】 Von-Wun Soo And Tse-Ching Wang.. Integration Of Qualitative And Quantitative Reasoning In Iterative Parametric Mechanical Design. AIEDAM (1992)6(2),95-109。
- 【3】 M.Hauser&R.J.Scherer. Application of intelligent CAD paradigms to preliminary structural design. Artificial Intelligence in Engineering 11(1997) 217-229。
- 【4】 Daniel G.Bobrow. Qualitative Reasoning about Physical Systems:An Introduction. Artificial Intelligence 24(1984) 7-83。
- 【5】 Katia P.Sycara and D.Navinchandra. Integrating Case-Based Reasoning and Qualitative Reasoning in Engineering Design. Artificial Intelligence in Design. 1990 232-250。
- 【6】 Jack hodes. Naive Mechanics: A Computational Model of Device Use and Function in Design Improvisation. IEEE EXPERT February 1992 15-26。
- 【7】 Kuipers,B. Qualitative simulation. Artificial Intelligence 1984 24,289-339。
- 【8】 Forbus,K.D. Qualitative process theory. Artificial Intelligence 1984 24,85-168.。
- 【9】 Thomas F.Stahovich, Randall Davis, Howard Shrobe. Qualitative rigid-body mechanics. Artificial Intelligence 119(2000)19-60。
- 【10】 Michael L.Mavrovouniotis. A belief framework for order-of-magnitude reasoning and other qualitative relations. Artificial Intelligence in Engineering 11(1997)121-134。
- 【11】 W.M.Kim Roddis and Jeffrey L.Martin. Qualitative Reasoning About Fatigue and Fracture in Steel Bridges. IEEE EXPERT August 1992 41—47。
- 【12】 De Kleer. Causality in Device Behavior . Artificial Intelligence 59(1993)
- 【13】 Kuipers,B.J. Reasoning with qualitative Models. Artificial Intelligence, Vol.59(1993),125-132。
- 【14】 V.Kumar,V. Algorithms for constraint satisfaction problem:a survey. AI magazine,13(1),32-44,1992。
- 【15】 Kusiak A,et al. An Intelligent System for Conceptual Design[J]. Expert Systems,1991,3:35-44。
- 【16】 B.Faltings. Qualitative kinematics in mechanisms. Artificial Intelligence 44(1990)89-119。
- 【17】 T.F.Stahovich,R.Davis,H.Shrobe. Generating multiple new from a sketch。

Artificial Intelligence 104(1998)211-264。

- 【18】 V.C.Moulianitis,A.J.Dentsoras and N.A.Aspragathos. A knowledge-based system for the conceptual design of grippers for handling fabrics. Artificial Intelligence for Engineering Design,Analysis and Manufacturing 1999,13,13-25。
- 【19】 Kuipers B J. Qualitative Simulation:Then and Now. Artificial Intelligence 1991 (59)。
- 【20】 Kuipers B J. Qualitative Simulation:Reasoning with Qualitative Models. Artificial Intelligence 1991(59)
- 【21】 Brian C. Williams.A theory of interactions: unifying qualitative and quantitative algebraic reasoning.Artificial Intelligence, 51 (1-3) (1991) 39-94
- 【22】 白方周 霍鑫 鲍忠贵. 动态系统的定性推理:定性模型的建立与定性仿真方法. 信息与控制. 1995 Vol.24,No.4,223-229。
- 【23】 白方周 陈源 鲍忠贵. 一个基于 QSIM 算法的定性仿真系统 GQSS. 信息与控制. 1996 Vol25,No.1,49-57。
- 【24】 Joseph Giarratano,Gary Riley 著 印鉴 刘星成 汤庸译. 专家系统原理与编程. 机械工业出版社 2000 年。
- 【25】 宋玉银 蔡复之 张伯鹏 童秉枢 范晓菊 鲍亦平 梁木养. 基于实例推理的产品概念设计系统. 清华大学学报. 1998 年第 38 卷第 8 期。
- 【26】 陆汝钤. 人工智能(下册). 科学出版社. 1996 年。
- 【27】 石纯一 黄昌宁等. 人工智能原理. 清华大学出版社. 1996 年。
- 【28】 F. 哈拉里 图论 上海科学技术出版社 1981 年。
- 【29】 左孝凌 刘永才等. 离散数学. 上海科学技术文献出版社. 1993 年。
- 【30】 白方舟 张雷. 定性仿真导论. 中国科学技术大学出版社. 1998 年。
- 【31】 史忠植. 高级人工智能. 科学出版社. 1988 年。
- 【32】 党锡淇 许庆余. 理论力学. 西安交通大学出版社. 1989 年。
- 【33】 雷永刚 彭颖红 阮雪输. 机械产品概念设计:综述与分析. 机械科学与技术. 2000 年第 19 卷第 1 期。
- 【34】 汪利 邹慧军 王石刚 亢金月. 机械产品概念设计—智能 CAD 中的关键技术. 机械设计. 1997 年第 6 期。
- 【35】 蔡逆水 邹慧军 王石刚 郭为中. 机械产品概念设计及其方法综述机械设计与研究. 1998 年第 2 期。
- 【36】 吴慧中 陈定方 万耀青. 机械设计专家系统研究与实践. 中国铁道出版社. 1994 年。
- 【37】 陈世福 陈兆乾. 人工智能与知识工程. 南京大学出版社. 1997 年。

- 【38】 何新贵. 人工智能新进展. 清华大学出版社. 1994。
- 【39】 王永庆. 人工智能原理与方法. 西安交通大学出版社. 1998 年。
- 【40】 谢进 陈永. 概念设计及功能“粒化”问题. 机械设计. 1998 年第 3 期。
- 【41】 叶军. 概念设计过程的分解、评价与综合. 机械设计. 1998 年第 4 期。
- 【42】 谢进, 丁剑飞, 陈永. 基于功能、约束和结构的机构概念设计. 机械设计与研究 1999 No. 2。
- 【43】 欧阳渺安. 智能设计集成推理技术的研究. 机械设计与研究 1999 No. 1。
- 【44】 张翰 张永清 周雄辉. 面向概念设计的产品信息建模. 机械科学与技术. 2000 年 Vol. 4 No. 1 P. 333~335。
- 【45】 张福炎. 程序员高级程序员级程序设计. 清华大学出版社. 1993 年。
- 【46】 Bill McCarty. 使用 JAVA 进行 SQL 数据库程序设计. 中国水利水电出版社. 1998 年。
- 【47】 姜刚 胡全星. JAVA 语言程序设计. 人民邮电出版社. 1998 年。
- 【48】 Patrick Chan, Rosanna Lee. JAVA 类库手册. 北京大学出版社. 1997 年。
- 【49】 蔡锡尧, 陈平. 面向对象技术. 西安电子科技大学出版社. 1993 年。
- 【50】 John Zukowski 著 邱仲潘 等译. Java 2 从入门到精通. 电子工业出版社 1999 年。
- 【51】 精通 JAVA 编程. 电子工业出版社. 1998 年。