

模型集成^①

唐锡晋

(中国科学院数学与系统科学研究院系统科学研究所, 北京 100080)

摘要: 简述了模型集成有关的问题, 首先讨论什么是模型集成, 模型是对现实的简化的表达和抽象, 模型集成的研究始于模型管理, 但前者扩展了后者的范围, 特别是在对复杂的社会经济或环境问题建模时, 模型集成服务于系统建模, 怎样实现模型集成? 本文总结了 3 种方法, 并例举目前比较常用的模型集成平台和一些典型的模型集成的例子。

关键词: 模型; 系统建模; 模型集成

中图分类号: N945

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2001)05-0322-08

Model integration

TANG Xi-jin

(Institute of Systems Science, Academy of Mathematics and Systems
Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper, model integration is reviewed. We focus those models which are simplified representation or abstraction of reality, and are used for decision support. In the field of model-based decision support system, model integration initially origins from model management, while the former extends the scope of the latter, especially in practice as a result of increasing complexities which had been continually perplexed people along the socioeconomic and environmental development. How to implement model integration? Three kinds of approaches or strategies are addressed. Several languages or tools for model integration are also depicted.

Key words: model; system modeling; model integration

0 引言

关于模型的定义字典里有多种, 如模型指有关一个系统、理论或现象的一个概要性的描述, 阐明已知或可推出的性征以用于深入的研究。这个定义较广, 这样模型可以是一个原子、一个经济模型甚至一个生成语法的模型。在分析问题时, 常需要创建一个或多个模型, 特别是对于复杂的问题。简单而言, 多个模型的组织是模型集成所考虑的

问题。但模型集成并不仅仅囿于单纯地建立模型
的连接, 它与系统建模过程紧密联系。关于模型集成的研究因领域人员对模型的理解而有所不同, 尤其体现在运筹/管理科学和计算机应用领域人员对此问题的认识上。本文试图对模型集成从其产生、发展和演化作一个全面的概述, 它源于考虑这样的问题: 面对新问题没有现成模型时, 系统建模者如何利用已有资源(模型和经验)? 这里所讨论的模型更多的是指决策支持系统中广泛讨论的

^① 收稿日期: 2001-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助重大项目(79990580).

各种模型.下面先说明一些概念.

系统是一些对象或部件如人、资源、概念或者过程的集合,以完成某些功能或者达到某个目标.文[1]对系统,特别是系统的分类有详细的论述.系统与其存在环境的界限是系统的边界.即使分析开放复杂巨系统,系统建模时仍需要明确这个边界,即分清环境因素和系统因素.系统的评价分析主要有两个指标:效率(efficiency)和有效性(effectiveness).二者的本质区别可用 Drucker 的一个非常简明的表述:efficiency is doing the thing right and effectiveness is doing the right thing^[2].

关于知识与模型.从知识工程来看,知识可定义为一种模式(pattern),而模型是一种特殊形式的模式.知识表达可以是专家系统知识库中的逻辑形式,亦可以是各种分析形式的表达.从其他领域,特别是运筹与管理领域,则持相反的观点,模式是一种特殊形式的模型.“模型表达了知识而没有知识是完全的”^[1].

关于知识与模型的争论始终持续着,这也反映在决策支持系统的发展上,特别是对模型集成或者模型管理的理解和实现.关于模型管理的一些代表性的综述,较早的有 Elam 和 Lee 主编的 1986 年在 Decision Support Systems(DSS)第 2 卷第 1 期对过去 6、7 年研究的思考和今后研究的展望,之后有 Shetty, Bhargava 和 Krishnan 等主编的 Annals of Operations Research 1992 年的一期专集^[5],Blanning 主编的 1993 年 Decision Support

Systems 的一期专集^[6],正是 6、7 年前展望的一些成果.最新的一篇综述由 Krishnan 和 Chari 所著,2000 年在网络杂志 Interactive Transactions of ORMS 上发表^[3].下面首先讨论模型管理.

1 模型管理

DSS 最初是基于模型的,有优化模型、仿真模型、启发式模型、其它的描述型模型、预测模型等.模型的增多,就有一个管理以提高效率的问题.

1.1 借鉴数据管理的模型管理

20 世纪 70 年代中期以来数据库技术发展开始成熟,人们认为可以借鉴数据管理上的方法实现模型管理,这样模型管理意味着存储和处理一批抽象模型. DSS 中的模型管理系统包括模型库、库管理系统、模型语言、模型字典和模型操纵.模型操纵包含模型集成;后者指将所需模型的操作链接起来.由于数学模型的结构不能显性表达,所以在一些备案(documentation)、验证(verification)与验实(validation)等方面有许多问题,直接的模型链接操作受到影响,特别当这些链接与模型的内部结构相关时.简单套用数据管理的方法实现模型管理有很大的局限,因为模型发展本身是复杂的、迭代的过程.于是发展了支持建模过程的模型管理.

1.2 基于建模过程支持的模型管理

表 1 列出模型发展过程中一些建模任务^[3].

表 1 建模生命周期中的任务

任 务	目 标	机 理
问题的识别	对问题清晰、精确的陈述	研讨过程
模型的创建	对问题陈述的数学表达	模型描述、模型集成(integration)、模型选择和修正、模型合成(composition)
模型的实现	模型的计算机表达	专门编制程序、运用高级专门语言、运用专门生成器
模型的验实	运用模型的反馈	有关属性如维数和单位的符号分析
模型的求解	查看从求解器(或运算器)而来的反馈	模型求解方法的绑定和运行、模型求解过程和控制脚本的确认
模型的解释	理解模型的运算结果、调试模型、模型结构分析	结构分析、灵敏度分析
模型的维护	修改问题的陈述以反映变化	结构变化的符号变化
模型的版本和安全	更新模型版本	为模型定制版本
	确保模型的授权	模型获取手段的控制

表 1 中的建模任务大体可归为求解前、求解

和求解后三个阶段的工作.支持建模过程即提供

相应的工具,这些工具备有任务表达的语言并能执行完成任务的操作.下面以模型创建任务中的实现手段“模型集成”为例做一个分析.

这里的模型集成与模型合成一样针对已有模型,不同的是模型需要修改,所以模型合成是最简单的模型集成方式.模型集成有两类广泛的议题,即结构(scheme)集成和过程(process)或求解器的集成^[8].结构集成指合并两个模型的体系以创立一个新模型.过程集成指求解过程的连接;简单地可理解为一个模型的输入是另一个模型的输出.问题是求解过程的组织序列是否可以推理出来.这里值得研究的问题很多,如化解冲突、模型表达、求解控制等.这时模型不再被视为黑盒子,而是玻璃盒子.可以访问模型的全部结构的设计是极为复杂的.目前有关研究主要在化解冲突和模型表达上.类型(type)的采用被视为一种识别冲突的办法.模型语言 ASCEND 使用类型和类型推理实现冲突化解^[9].给定模型结构变化的范围,人们怎样才能判定集成的模型是有效的?在这方面最著名的工作是 Geoffrion 的结构建模(structured modeling)^[10];文[8]则是过程集成方面的先驱性的工作.

1993-1994 年间涌现出一大批有关模型管理的文献,体现了该领域的丰富成果.而模型集成逐渐不再视为模型管理的一支,考虑模型的实现;它已经涵盖模型创建任务中的所有问题.但自那以后直到 2000 年的 6、7 年间很少有深刻或全面的文章,模型管理的高潮似乎结束.实际上,在低潮的表面下,深入的研究走向将理论研究成果应用于现实的复杂性,涌现了一批面向特定领域或问题的建模支持软件.另一方面,互联网技术自 90 年代以来的迅猛发展为模型管理带来了新的机遇和挑战,如分布式技术.

下面集中讨论模型集成.

2 模型集成与集成式建模环境

自 1988 年以来夏威夷国际系统科学会议知识与决策支持系统主题中就有集成建模环境(integrated modeling environment, IME)分主题.选择 IME 是为了包括模型管理方面所有的论题并围绕决策支持建模有关的不同的理论与实践问

题.

2.1 模型表达

在过去的十几年间模型管理的主要成就体现在模型表达,有三个主要流派:结构建模、逻辑建模和图建模.结构建模是一种基于图论的标准的描述型模板,它扩充了数据库技术中的语义数据模型以描述数学模型中的复杂性.结构建模允许用户在不同的抽象层面上以图形、文本或代数形式察看模型.逻辑建模是人工智能和数学规划的一种结合,主要是应用一阶逻辑表达模型知识^[11].图建模(graph grammars)将模型比喻为图,从而提供了一种形象化的模型表达方式^[12].这种描述和操纵模型的方式在使用可视化程序设计技术时特别有利于模型的实现.这三种模型表达方式相互借鉴,相互融合也是模型表达重要的研究领域^[13,14].

2.2 集成方式

前面谈到模型集成有结构集成和过程集成,这是从技术角度根据传统的程序设计语言考虑的.文[8]也讨论了从组织视角和实现视角等方面的考察.当组织有模型集成的动机时一般立足于战略性建模,因为有效的战略规划需要集成有关特定功能和操作的各种模型,如后勤管理系统中的复杂操作.而实现视角则关注于面向对象的集成式建模环境.不过目前大多数的理论研究集中于技术角度.

Geoffrion 从结构建模的角度对应于结构/过程集成对模型集成方式作了一种划分:纵深(deep)集成和功能(functional)集成^[15].纵深集成合成两个以上的模型以创建一个新的模型;新模型采用同样的表达方式.功能集成并不产生同样表达方式的新模型.通过叠加一个计算议程而协调模型的运算.典型的如指定某些已有模型的输出是另外一些模型的输入但需要明确模型运算的顺序.其中议程规定了如何实现功能集成,它又被称为模型互接语言或模型描述语言^[15,16].

区分这两种集成很重要,更重要的是辨明什么需要集成. Geofrion 解释了四种层次的模型抽象:模型实例(instance),模型类(class),模型或问题模板(paradigm)和模型领域(tradition)^[17].如一个传统的运输模型可视为 Hitchcock-Koopmans 运输模型类的一个实例,后者又是运筹/管理领域

的网络流建模问题;其它一些相关的建模领域可能包括数据库管理和人工智能。

以下为10种可能的集成类型(其中两个指两个或两个以上):

- (1)两个建模领域的接合;
- (2)一个建模领域中两个问题的接合;
- (3)不同建模领域中两个问题的接合;
- (4)同一领域同一问题的两个模型类的接合;
- (5)同一领域不同问题的两个模型类的接合;
- (6)不同领域和问题的两个模型类的接合;
- (7)同一领域同一问题同一模型类的两个模型实例的接合;
- (8)同一领域同一问题不同模型类的两个模型实例的接合;
- (9)同一领域不同问题的不同模型类的两个模型实例的接合;
- (10)不同领域的不同问题的不同模型类的两个模型实例的接合;

其中类型(1)-(3)的集成由于涉及建模领域和问题的混杂属于病态结构问题,只有当其它类型的集成讨论清楚后才好深入讨论。显然, $4 < 5 < 6$ 和 $7 < 8 < 9 < 10$; 这里“ $<$ ”表示更容易研究。这样的偏序关系用于指导研究投入的分配是很谨慎的,因为功能集成不必像纵深集成那样协调不同的模型类或实例。它更适合处理更难研究的集成类型,所以功能集成比纵深集成更实际些。类型(8)-(10)可能没有多少意义,因为多数基于模型的工作更多地关注模型的类。在这样的前提下,Geoffrion认为应当更关注类型(4)-(7)。如果类型(4)-(5)的研究没有显著的进展时,类型(6)的研究也是很难深入的。文[18]给出了各种类型的例子。

2.3 集成建模环境(IME)

IME可加快模型集成过程,主要用于模型集成的快速实现。在模型实现过程中需要考虑4个原则:(1)模型数据的独立性;(2)模型求解器的独立性;(3)模型模板的独立性;(4)元表达和元推理。

电子数据表和计划系统是受人喜欢的模型实现工具;但它们不支持模型数据的独立性,因为每个电子数据表模型是一个模型实例。这在理解、验证和维护方面限制了模型的规模。不过电子数据

表保证求解器的独立。如这些工具有优化模型、回归模型,它们互有联系。

此外建模语言及其支持环境也是一种IME。代数建模语言是一种提高建模效率的工具,较有名的有GAMS^[19]和AMPL^[20]。GAMS支持求解器独立,但不支持模型数据或模板独立。AMPL支持模型数据和求解器独立,但不支持模板独立。没有一种代数建模语言支持元表达或推理。

关系型建模语言则根据一些数学规划模型扩展了数据库中常用SQL语言。这种方式最显著的优点是采用数据字典获得一些元信息,以支持元推理。

还有基于三种模型表达而发展的模型语言如结构建模语言有SML,逻辑建模语言TEFA^[21]和图建模语言NETWORKS^[12]。它们的设计发展也努力遵循模型实现的四原则。

模型集成支持工具的发展紧随技术进步,如软件集成提高了支持模板集成的建模环境的可行程度,互联网技术特别是分布式计算触发了新一代的模板集成,还有软件工程领域基于面向对象的分析与设计的统一建模语言(unified modeling language, UML)等等。

智能体(agent)技术为建模和IME的发展提供了新的契机。马里兰大学开发的集成建模工具箱(integrating modeling toolkit, IMT)是一个功能全面可扩展的集成建模环境,其中可定义并能共同使用模型组件,建模者可创建由IMT智能体组成的IMT世界,这些智能体在建模过程中完成各自的任务。IMT智能体的核心集合可以描述一般性的、模块化的、分布式的模型组件,它们分别完成诸如简单计算、仿真、优化、GIS分析和高级的统计分析,这些智能体很容易与上一层的仿真粘和起来,从而集成了不同的模型模板和工具集(<http://ima.umces.edu/>)。这些巨大的进步反映了人们对模型集成视角的变化。国内也有一些基于智能体技术的专用IME。下面讨论如何实现模型集成。

3 模型集成实现策略

目前技术研究中,模型集成通常有两种策略:自上而下(top-down)和自下而上(bottom-up)。

自上而下指一个对象被分解为基本的部件或模块,并能够按功能汇聚起来.采用该策略,需要对问题有一个全面综合的模型,以便对问题进行有效的分解.该策略反映了一种对问题分而治之的集中机制.这时综合的模型最为重要,决定集成的成败或者集成后系统的性能.以企业集成为背景,多伦多虚拟企业 TOVE (TOnto Virtual Enterprise) 就是一个试图包括企业集成众多议题的一个项目^[32],它讨论了:是否存在一个通用企业模型(generic enterprise model)?它能否准确定义?所有的知识都可以明确表达吗?如何判别好的企业模型?组织会接受它们吗?TOVE 的可重用表达是关于工业概念的本体化工程.在 TOVE 中有关于活动、状态、时间、资源、库存、定货需求和部件等的本体,有关本体的知识视为原子知识,可用于演绎推理时回答常识问题.显然即使有模型集成工具,一个 GEM 的生成是极为费时的.

自下而上体现系统建模和模型集成实现上的分布式或分散性的活动.这种方法克服了因难于获得一个标准的系统架构而带来的模型集成上的限制.分布式模型集成可能会有两种不同的形式:分布的建模者对集中的资源,和分步的建模者对分布的资源.分散式指建模者之间的协调不是中央控制的.互联网具备这两种特色.在最近的一项研究中,Dolk 的分布式集成建模思路是将一个包含决策矩阵的数据仓库、包含结构化的决策模型的模型仓库和运用 UML 和基于组件的插件等相结合,以增强包括优化、统计和其它建模模板的模型求解器的交叉表分析功能^[33].

文[24]总结了自上而下方法在企业集成遇到的问题,并推荐了自底向上的集成方法.分布式人工智能和多智能体技术为自底向上的策略提供了技术支持.然而后者仍然需要对问题有一个概念模型.这指的是对问题本身需要系统地思考.在整个建模过程中,有 4 类问题需要解决:1)理解在建模生命周期中建模者的活动—认知(cognitive)问题;2)模型及与模型相关的信息表达和利用这些信息进行推理—语言(language)问题;3)模型系统的设计和实现—系统(system)问题;4)在实际中模型管理系统的操作影响—经验(empirical)问题^[35].有关问题(1)和(4)超出了目前模型集成方法研究的范畴.这些问题不是一下子可以解决,需

要经过一个边学习边思考循序渐进的过程,这正是系统思考流派的学者所倡导的.在他们看来,重要的是弄清模型集成的目的,即所要分析的系统,需要对问题或系统的更深入和更广泛的了解.正如著名系统科学家 Ackoff 所讲:“形成问题,解决问题,采取行动是同时进行的三个交互过程”^[45].

系统思考即不再仅以还原论的观点分析问题,而是采用系统的观点.软化的趋势越来越显著;人、群体、他们的世界观、文化等越来越成为系统建模中需要着重分析的因素.而东方的传统思维有独特之处.详细请参阅文[27-29].而技术上的进步特别是分布式人工智能领域的成果支持了这方面的深入.下面列举几个有代表性的模型集成的工具.

4 一些模型集成的工具及应用实践

4.1 DOME (distributed object-based modeling and evaluation)

DOME 是 MIT 计算机辅助设计(CAD)实验室自 1995 年开始的 David 教授主持的最早由美国国家科学基金和福特公司资助的一个项目,它提供了一个分布式建模环境,其中包括异质数据库、模型和工具,注册用户可从中获得或提供与其领域相关的仿真资源,进行协同工作、评价不同方案^[36].

采用 DOME 建模,主要以自上而下的策略.DOME 目前的应用有福特公司、美国海军和一个全球可持续发展的项目.

4.2 支持复杂系统分析的多智能体平台

这里的多智能体平台主要用于研究复杂系统行为的模拟分析,如 Santa Fe 研究所的 SWARM,Brooking 研究所的 Ascape 和芝加哥大学经济系的 RePast 等等.其中 RePast 吸收了前两者的一些特点.有关详情可浏览相关的网站.这些工具广泛应用于社会和经济问题分析,如 SWARM 曾用于生态系统仿真^[31].这类平台为自底向上策略的实施提供了便利.

4.3 DecisionNet

DecisionNet 是一个 4 年(1995-1999)的研究项目,由美国海军研究生院的 Bhargava,卡内基-

梅隆大学的 Krishnan 和德国 Humboldt 大学的 Muller 合作进行。该项目旨在利用互联网技术的优势增进决策技术的可用性、可重用性和相互可操作性^[33]。它得到美国陆军研究办、陆军人工智能研究中心和 DAPRA (Defense Advanced Research Projects Agency, 美国国防先进研究项目局)的资助。图 1 为 DecisionNet 的架构。

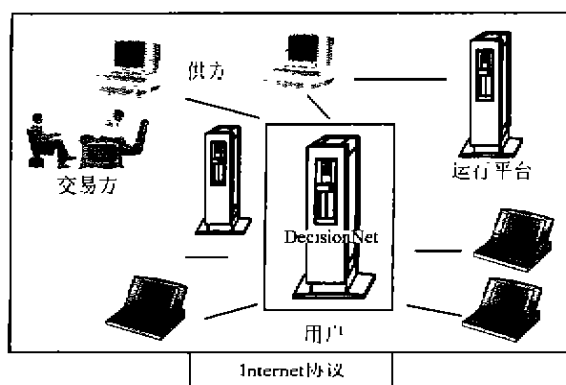


图 1 DecisionNet 的架构

在 DecisionNet 中有多种决策技术如数据集、模型实例、模型模板、算法、求解器、模型语言、建模系统和环境。供方主要提供两类技术：独立技术和独占技术。独立技术主要是供方开发的基于 web 的应用，它们亦可以独立于 DecisionNet 运行。独占技术是 DecisionNet 智能体提供的界面和动态控制等技术。

Bhargava 等实现了分别以 AMPL 和 GAMS 建模环境的两类智能体，包括了有关供方与用户间谈判的不同设计^[33]。敏捷的 AMPL 智能体可为双方提供重要的知识和推理的需求，GAMS 智能体封装了 GAMS 语言和建模环境协调供方注册模型并为用户创建一个运行界面。

DecisionNet 的一个应用例子是在美国海军研究生院实现的关于作战模拟的 NPSNet。

以上仅仅介绍 3 个模型集成的使用工具，还有其它一些应用于企业界的，如企业集成 (Enterprise Integration)、企业信息门户 (Enterprise Information Portal) 等，因篇幅有限，在此不一一叙述了。

模型集成类型的应用领域是复杂问题集中的经济与可持续发展^[34]、水资源与环境管理^[35-38]、

军事系统分析等领域^[39]等。位于奥地利的国际应用系统分析研究所 (IIASA) 一直在前两类问题进行密集的研究，而国内已有大量的研究，如目前正在进行的国家自然科学基金重大项目“支持宏观经济决策的人机结合的综合研讨厅体系研究”。

5 结束语

建模是一项几乎遍布于任何领域的活动。在模型管理研究中发现的潜在重要性超出了运筹管理和其它以模型为主的领域。作为 DSS 核心的模型管理的扩展，模型集成的研究因信息技术的进步和人们探索复杂问题的深入而演化得更丰富多彩，成为名副其实的活跃交叉研究领域。本文对模型集成作了简要的综述。类似于数据管理，在模型集成的理论研究和集成建模环境长期充斥着数据管理的思想，这体现在模型集成在上个世纪 80 年代到 90 年代初期迅速发展期中。但这很快变成瓶颈，因为关系型模型表达和操纵机制上的精巧遮掩了系统建模的复杂的领域背景，而后者正是系统建模的主要关注点。

在过去的 20 多年间，模型集成的主要成就在模型表达。出现了三个有代表性的学派，以 Geofrion 为代表的结构建模，以 Jones 为代表的图建模和以 Kimbrough 等为代表的逻辑建模。这三种表达在发展中互相融合，也反映了运筹管理与计算机科学研究的合作态势。模型集成的实现一般采用自上而下或自下而上，而系统方法的导入更体现对问题本身的全面思考有助与综合系统建模，特别是越来越多地关注于社会组织等因素。

信息技术的进步对近期模型集成的发展起到了加速的作用，但复杂系统建模仍然需要新的视角。模型集成不仅仅局限于类型 (4) 或 (5)，类型 (6) 和 (3) 的问题需要有处理的办法。而模型并不是为集成而拼凑在一起，它伴随着系统建模。而对复杂问题的认识是一个学习渐进的过程，这样对敏捷的模型集成的要求越高了。

后记：本文是作者 2000 年 10 月—12 月在日本高等科技研究院访问期间在富士通复杂科学研究讲座资助下完成的一篇模型集成研究报告的浓缩。有些地方叙述不详，可参见原始报告。

参考文献:

- [1] Qian X S, Yu J Y, Dai R W. A new discipline of science; the study of open complex giant system and its methodology[J]. Chinese Journal of Systems Engineering and Electronics, 1993, 4(2): 2-12
- [2] Drucker P F. Management; tasks, responsibilities, practices[M]. New York; Harper and Row, 1974
- [3] Wierzbicki A P. Megatrends of information society of the emergence of knowledge science[C]. Proceedings of International Symposium on Knowledge and System Sciences; Challenges to Complexity (Shimemura E et al. eds.), Ishikawa, Japan, 2000. 26-33
- [4] Elam J J, Lee R M. Guest editors' introduction[J]. Decision Support Systems, 1986, 2(1): 1-2
- [5] Shetty B, Bhargava H K, Krishnan R. (eds.) Model management in operations research[J]. Annals of Operations Research, 1992, 38, Special Issue
- [6] Blanning R W. Model management systems; an overview[J]. Decision Support Systems, 1993, 9(1): 9-18
- [7] Krishnan R, Chari K. Model management; survey, future directions and a bibliography[J]. Interactive Transactions of ORMS, 2000, 3(1):
- [8] Dolk D R, Kottemann J E. Model integration and a theory of models[J]. Decision Support Systems, 1993, 9(1): 51-63
- [9] Krishnan R, Piela P, Westerberg A. Reusing mathematical models in ASCEND[A]. Recent Developments in Decision Support Systems [C](Holsapple C, Whinston A eds.), NATO ASI Series, New York; Springer-Verlag, 1993. 275-294
- [10] Geoffrion A M. An introduction to structured modeling[J]. Management Science, 1987, 33(5): 547-588
- [11] Kimbrough S O, Lee R M. Logic modeling; a tool for management science[J]. Decision Support Systems, 1988, 4(1): 3-16
- [12] Jones C V. Developments in graph-based modeling for decision support[J]. Decision Support Systems, 1995, 13(1): 61-74
- [13] Jones C V. Attributed graphs, graph-grammars, and structured modeling[J]. Annals of Operations Research, 1992, 38: 281-324
- [14] Chari K, Sen T K. An implementation of a graph-based modeling system for structured modeling (GBMS/SM)[J]. Decision Support Systems, 1998, 22(2): 103-120
- [15] Geoffrion A M. Structured modeling; survey and future research directions[J]. Interactive Transactions of ORMS, 1996, 1(3)
- [16] Mubanna W A. An object-oriented framework for model management and DSS development[J]. Decision Support Systems, 1993, 9: 217-229
- [17] Geoffrion A M. Integrated modeling systems[J]. Computer Science in Economics and Management, 1989, 2(1): 3-15
- [18] Geoffrion A M. Reusing structured models via model integration[C]. Current Research in Decision Support Technology (Blanning, R. W., D. R. King eds.), Los Alamitos; IEEE Computer Society, 1992, 25-55
- [19] Bishop J, Meeraus A. On the development of a general algebraic modeling system in a strategic planning environment[J]. Mathematical Programming Study, 1982, 20(1): 1-29
- [20] Fourer R, Gay D M, Kernighan B W. A modeling language for mathematical programming[J]. Management Science, 1990, 36: 519-554
- [21] Bhargava H K, Kimbrough S. Model management; an embedded languages approach[J]. Decision Support Systems, 1993, 10: 277-299
- [22] Fox M S. Issues in enterprise modeling[C]. Information and Collaboration Models of Integration (Nof S Y ed.), NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, 1994. 219-234
- [23] Dolk D R. Integrated model management in the data warehouse era[J]. European Journal of Operational Research,

- 2000, 122(2); 199-218
- [24] Polito J, Jones A, Grant H. Enterprise integration: a tool's perspective[C]. Information and Collaboration Models of Integration (Nof S Y ed.), NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, 1994. 149-167
- [25] Bhargava H K, Krishnan R. Computer-aided model construction[J]. Decision Support Systems, 1993, 9(1): 91-111
- [26] Ackoff R L. From information to control[C]. The Human Side of Information Processing (N. Bjorn-Anderson ed.), North-Holland, 1980. 215-225
- [27] Tomlinson R, Kiss I. Rethinking the process of operational research and systems analysis[M]. Pergamon Press, 1984
- [28] Nakamori Y, Sawaragi Y. Complex system analysis and environmental modeling[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 122(2); 178-189
- [29] 顾基发, 唐锡晋. 软系统工程方法论与软运筹学[C]. 系统研究(许国志主编), 杭州: 浙江教育出版社, 1996. 170-178
- [30] Pahng F, Senin N, Wallace D. Distributed objected-oriented modeling and evaluation design problems[J]. Computer-aided Design, 1998, 30(6); 411-423
- [31] Villa F, Costanza R. Design of multi-paradigm integrating modeling tools for ecological research[J]. Environmental Modeling and Software, 2000, 15; 169-177
- [32] Bhargava H K, Krishnan R, Muller R. Decision support on demand: emerging electronic markets for decision technologies[J]. Decision Support Systems, 1997, 19(3); 193-214
- [33] Bhargava H K, et al. Model management in electronic markets for decision technologies: a software agent approach [C]. Proceedings of the 30th Hawaii International Conference on Systems Science, Maui, 1997
- [34] Chen J, Sun G Z. An integrated economic model for macro forecasting and its modeling system[C]. Proceedings of International Symposium on Knowledge and System Sciences: Challenges to Complexity (Shimemura E et al. eds.), Ishikawa, Japan, 2000. 65-70
- [35] Loucks D P. Water resources systems models: their role in planning[J]. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, 1992, 118(3); 214-223
- [36] Simonovic S P, Fahmy H. A new modeling approach for water resources policy analysis[J]. Water Resources Research, 1998, 35(1); 295-304
- [37] Nakamori Y, Sawaragi Y. Complex system analysis and environmental modeling[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 122(2); 178-189
- [38] Makowski M. Knowledge integration in model-based decision support[C]. Proceedings of International Symposium on Knowledge and Systems Sciences: Challenges to Complexity (Shimemura E et al. eds.), Ishikawa, Japan, 2000. 43-56
- [39] Tang X J. WSR approach to the development of computerized support tools for weapon system evaluation[C]. Proceedings of 5th International Conference of The International Society for Decision Support Systems (ISDSS99), Melbourne, Australia, 1999

作者简介:

唐锡晋(1967-),女,博士,副研究员,研究领域:综合集成与决策支持.