

复杂决策问题的多元化模型体系研究

于长锐, 罗艳, 徐福缘

(上海理工大学管理学院, 上海 200093)

摘要: 鉴于复杂决策问题的特点, 仅仅依靠定量模型难以描述和求解复杂决策问题. 从定性到定量综合集成角度出发, 认为复杂决策问题的求解过程需要多元化模型支持. 依据复杂决策问题的认知层次, 提出复杂决策问题的多元化模型体系中包含概念模型、结构模型和数学模型, 并对这三类模型进行了论述.

关键词: 复杂决策问题; 模型体系; 综合集成

中图分类号: C934

文献标识码: A

文章编号: 1007 - 9807(2004)02 - 0088 - 07

0 引言

随着科学技术和经济社会的巨大发展, 人们正面临着愈来愈复杂的决策问题. 复杂系统所具有的结构非线性、行为的多样性和信息的不完备性无疑给决策者带来很大困难. 因此, 复杂问题决策方法论的研究, 具有十分重要的意义^[1].

复杂问题的决策是以对复杂系统行为的认识和了解为基础的, 而复杂系统具有一些与普通线性系统不同的特点, 主要表现在: 结构的非线性. 复杂决策问题各组成单元之间的联系广泛而密切, 构成一个递阶的多层次结构, 每一单元的变化都会受到其他单元变化的影响, 并引起其它单元的变化. 因此, 在复杂决策问题求解过程中, 普通的线性叠加原理已不适用. 系统的动态性与开放性. 系统的动态性导致复杂决策问题在结构、参数和特性等方面的不确定性; 而系统的开放性使得复杂决策问题的求解过程与环境密切相关.

知识的不完备性. 由于复杂决策问题的非线性和环境的不确定因素的存在, 人们对复杂决策问题的认识和掌握的知识总是不完备的.

由于复杂决策问题具有以上特性, 仅仅依靠定量模型难以描述和求解复杂决策问题^[2], 主要

困难有以下几点:

主动性

决策是决策主体即决策者与决策客体即决策问题之间的相互作用过程, 因此在复杂问题决策过程中往往包含主动环节, 即决策者. 对于复杂决策问题的分析与综合, 决策者因素至关重要, 但是如何建立描述决策者的定量模型是一个难题.

不确定性

复杂决策问题中包含许多不确定性因素, 如模糊性和随机性. 由于这些因素的存在, 往往造成复杂决策问题在结构、参数和特性方面的不确定性, 难以用确定性定量模型描述和求解.

不确知性

复杂产生的原因是由于在现有知识下, 所涉及的对象在认识上较为复杂. 复杂性存在的原因是由于主体人对客观事物认识不足. 在信息不完备、数据不精确、知识不充分的情况下, 难以建立适用的、完整的数学模型对复杂决策问题进行分析、求解.

复杂决策问题通常是非线性、变结构、变参数的. 而定量模型对于这类问题的求解十分困难, 缺乏通用的、精确的解析方法, 往往采用的是对问题进行简化, 如线性化、定常化、降维法等等. 但是, 如

收稿日期: 2002 - 09 - 05; 修订日期: 2003 - 11 - 03.

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA414310); 山东省自然科学基金资助项目(Y2000G04).

作者简介: 于长锐(1974 -), 男, 黑龙江人, 博士.

此简化并不能保证定量模型的适用性. 即使利用简化了的数学模型可以方便地进行复杂决策问题的分析与综合, 然而所得到的结果却不能可靠地应用于现实世界. 正如文献[3]所指出的“决定性的方程并不一定能导致决定性的结果”.

1 从定性到定量的综合集成

决策问题是复杂的问题, 它与认知科学(或称思维科学)有密切的关系^[4]. 美国人工智能的先驱 H. A. Simon 提出通过人工智能和认知科学的研究, 形成用符号表示, 启发式编程, 逻辑推理方法, 对在求解复杂决策问题中思维过程的模拟^[5]. 20 世纪 90 年代以来, 模拟人类思维过程解决复杂决策问题这一构思与现代信息技术这一成就结合起来, 将人的智慧与高性能计算机有机结合起来, 从定性到定量相结合的综合集成研究方法应运而生. 钱学森等科学家积多年来在系统科学、思维科学和人工智能等学科的研究成果, 首先提出了开放的复杂巨系统的概念, 并从方法论高度系统化地阐述了这一新学科的目标和意义. 明确指出, 从定性到定量的综合集成方法 (metasynthesis) 是研究和处理开放的复杂巨系统问题的唯一可行且有效的方法^[6,7]. 戴汝为从人工智能和知识工程原理出发, 认为综合各种模型的知识系统可为从定性到定量的综合集成方法提供强有力的支持^[8].

层次结构的复杂性是复杂决策问题的基本特征, 复杂决策问题中包含的子问题不但种类繁多, 而且数量巨大. 并且, 在子问题之间, 各层次之间均存在着高度的非线性机制的作用, 复杂决策问题的处理过程包含着人类的意识活动等主动因素. 所以, 在复杂决策问题的求解过程中, 应当把专家群体的智慧、数据和各类信息与计算机技术有机结合起来, 把各学科的科学理论和人的知识结合起来, 发挥整体综合优势, 这正是从定性到定量综合集成方法的实质.

由于复杂决策问题各层次结构之间的高度非线性, 各子问题求解结果的简单线性叠加不能满足复杂决策问题的求解实质. 因此, 仅仅依靠传统的定量分析建模方法, 无法满足描述和求解复杂决策问题的要求. 另一方面, 由于系统的开放性, 同其周围环

境之间存在着物质、信息与能量的交换, 系统不同层面的动态行为常常表现出多元化的信息结构和形态, 不同的演化或发展阶段也具有不同的模式. 因此, 在复杂决策问题求解过程中, 应按照从定性到定量的综合集成原则, 将各种定性分析模型同定量求解模型有机地结合起来, 才能全面地把握系统的信息作用关系和动态行为.

综上所述, 处理复杂决策问题的过程是一个从定性到定量的综合集成过程, 行之有效的综合集成技术需要多元化的模型支持.

2 复杂决策问题的认知层次

从认识论的角度来看, 人类在刚接触复杂性决策问题时, 仅从感性上对其表面现象产生一种朦胧认识, 即认识处于“混沌”状态; 随着认识过程的发展, 对问题本身内部规律的掌握(概念理解), 将复杂问题分解成多个子问题, 这一过程并不是使复杂问题简单了, 而是对复杂问题的一种简化处理; 通过定性分析建立各个子问题之间的关系; 尽可能将子问题用数学逻辑来描述, 经过求解或模拟后得到定量的结论; 再对这些定量结论进行定性归纳、集成, 进而形成解决问题的方案与建议, 取得认识上的飞跃. 但是, 这仅仅是认识的一个循环, 将方案与建议作用于客观世界, 开始了第二个循环, 第三个循环……

从问题认知的深度和广度, 可将复杂决策问题的求解过程划分为三个层次, 即概念层、结构层和数学层, 相应地可建立概念模型、结构模型和数学模型, 如图 1 所示.

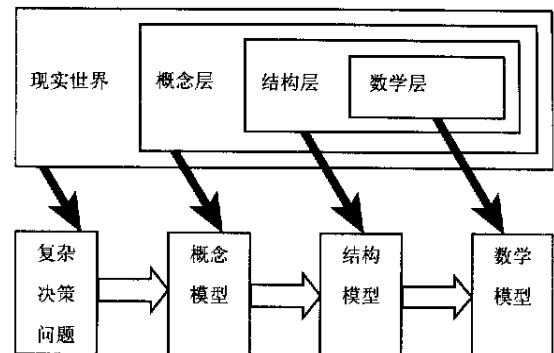


图 1 复杂决策问题的认知层次

Fig. 1 Cognition levels of complicated decision-making problems

概念模型是依靠人的知识和经验对复杂决策问题的简单抽象,是一种定性分析模型,它对问题的认识程度最广;数学模型是一种定量决策模型,它的综合化程度最高,能够深刻地反映问题的本质,但广度不够;结构模型是在概念模型的基础上对复杂决策问题的一种形式化划分,它是定性分析与定量决策之间相互联系的桥梁.对于复杂决策问题的理解,既要有一定深度又要有一定广度,这就需要综合运用上述三类模型.如果只限于概念化的定性分析,没有定量的支持,决策分析的深度将是不足的.反之,单纯追求数学模型的定量结果,忽视概念化的定性结果,决策分析将缺乏广度,甚至脱离实际.因此,对于复杂决策问题的求解必须将定性分析与定量求解结合起来.在这一认知层次的基础上,作者提出了复杂决策问题的多元化模型体系.

3 复杂决策问题的多元化模型体系

复杂决策问题的多元化模型体系是由概念模型、结构模型和数学模型相互结合的集成模型体系,如图2所示.

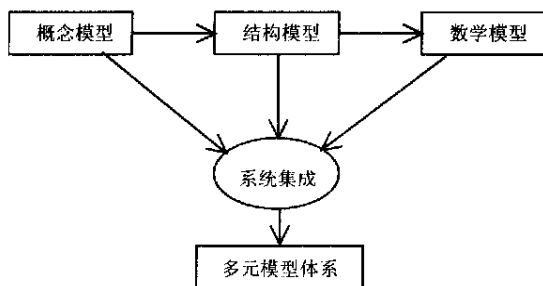


图2 复杂决策问题的多元化模型体系

Fig. 2 Multifaceted model system of complicated decision-making problem

3.1 复杂决策问题的概念模型体系

复杂决策问题的概念模型是对实际问题系统的理性加工的产物,是与问题有关的基本要素(变元、概念)在不同程度上分化并进行了客观的描述的结果.它区别于数学模型,主要是缺乏完整的数理逻辑关系,或仍然停留在定性描述.但它可以容纳实际问题中的一些社会与人文因素.

基本变量是从复杂决策问题中抽象出来的描述问题对象的属性集合,它是组成复杂决策问题概念模型的重要元素.复杂决策问题的概念模型

中的基本变量有状态变量、决策变量、输入变量、输出变量和干扰变量等.

状态变量是可以用来充分表征决策问题所涉及的系统及其环境特征状况的一组变量.依据表述的对象不同,状态变量分为系统状态变量与环境状态变量,它们分别表示为

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$$

和

$$x^e(t) = [x_1^e(t), x_2^e(t), \dots, x_n^e(t)]$$

决策变量用

$$u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]$$

表示,其中每一分量都描述决策者可采用的一种控制手段.

输入变量是从环境到系统的流通或影响,可能是环境对系统的主动作用,也可能是系统的主动吸收.后者是决策变量的一部分,称为可控输入.输入变量中的不可控与可控部分分别表示为

$$i(t) = [i_1(t), i_2(t), \dots, i_l(t)]$$

和

$$i^e(t) = [i_1^e(t), i_2^e(t), \dots, i_l^e(t)]$$

输出变量是系统到环境的流通或作用,表示为

$$o(t) = [o_1(t), o_2(t), \dots, o_g(t)]$$

干扰变量通常是指影响系统状态变化,决策者不可控制,甚至难以预测的系统内部或来自环境的随机干扰,分别表示为

$$w(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_r(t)]$$

和

$$v(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_r(t)]$$

除上述变量外,复杂决策问题的概念模型中还有目标和决策允许范围等基本概念.目标是决策行动的预期后果,是决策者主观目的的客观化,通常以期望的计划期末系统状态和决策实施期间 $[t_0, t_T]$ 系统的输出为主要内容.由于非可控因素的存在和状态演变的不确定性,目标通常是一个范围,称为目标空间或集合,用 OB 表示.决策允许范围反映决策变量取值的限制条件,是决策变量空间的一部分,用 U^c 表示.

复杂决策问题概念模型的功能在于为人们分析决策问题的结构、交流以统一认识提供工具.建立概念模型可以使决策者加深对问题的理解,理顺决策工作的思路,提高决策思维的科学性,为决

策研究工作的监控与审议提供规范化语言,便于不同决策者的意见沟通.同时,概念模型也是复杂决策问题结构化的基础.

3.2 复杂决策问题的结构模型体系

实际中,复杂决策问题往往由若干子问题相互联系而组成,而各子问题又由若干更小的子问题组成.在没有足够信息和求解知识的情况下,通过问题分解来求解复杂决策问题,是一条行之有效的途径^[9].在问题求解过程中,运用“问题归约方法”(problem reduction representation)^[10],将一个复杂的无结构决策问题分解成若干部分,并按照基本变量的关系,把这些部分分组形成递阶的层次结构,上一层次对相邻的下一层次的全部或某些元素起着支配作用,这样就形成了层次间自上而下的逐层支配关系.

复杂决策问题的概念模型是问题分解的基础,问题归约的主要对象是复杂决策问题的基本变量.在问题分解过程中,“粒度”(granularity)^[11]的概念至关重要.人们在分析和求解复杂问题时,能在不同的粒度空间对问题进行分解,以至解决.因此,在复杂决策问题的结构模型中,需要对不同粒度的问题加以描述,而这一描述要有助于决策者在问题求解时的“粒度”思维跳跃.

用一个三元组来描述一个问题

$$P = O, X, R$$

其中: O 表示问题元素集合; X 表示问题的基本变量集合(概念模型); R 表示问题各元素的关系集合.

分析或分解问题是指对问题的基本变量集合

(概念模型)进行分析、研究.假设问题 P 是较粗粒度问题,若对 P 进行分解,产生一个较细粒度的子问题集合 $[p = o, x, r]$,且 $o \subseteq O, x \subseteq X, r \subseteq R$,这样就把原问题 P 转变成新层次上的问题集.

为将上述不同粒度的问题联合起来,组成描述整个复杂决策问题的结构模型,需建立起各不同粒度问题之间的关系.在这些关系中,既有定性关系,也有定量关系;既有静态关系,也有动态关系;既有纵向关系,也有横向关系.例如纵向定性关系包括“合取”关系,上层问题空间的一些基本变量是下层问题空间某些基本变量的“合取”,即 $x = x_{,i} \wedge x_{,j} \wedge x_{,k}$;纵向定性关系还包括“析取”关系,上层问题空间的一些基本变量是下层问题空间某些基本变量的“析取”,即 $x = x_{,i} \vee x_{,j} \vee x_{,k}$.横向定性关系包括“条件”关系,同层问题空间的不同子问题的某些基本变量之间存在“条件”关系,即 $P_{,1}(x_m) \wedge P_{,2}(x_n)$,等等.不同的关系在复杂决策问题求解过程中,具有不同的作用.例如,定量关系是数学模型集成的依据,而定性关系是对定量结果做定性分析的基础.

复杂决策问题的结构模型中,可能是上述各种定性、定量、纵向、横向、静态、动态关系的某种组合,用以描述问题间的各种关系.利用这些关系,对各粒度子问题进行纵向与横向联合,可构成复杂决策问题的分层递阶结构模型,如图 3 所示.

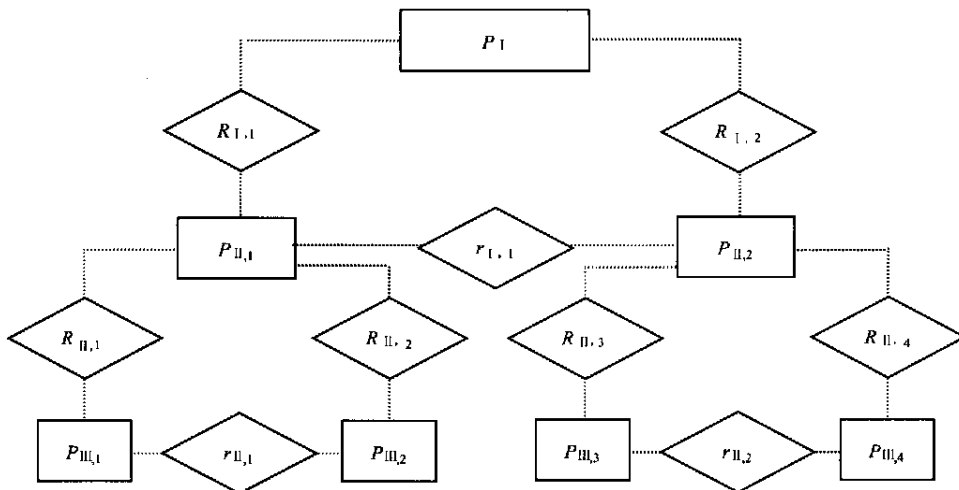


图 3 复杂决策问题的分层递阶结构模型

Fig. 3 Hierarchical structure model of complicated decision-making problem

图3中:

- P ——复杂决策问题的粗粒度描述(概念模型),即第 层粒度问题;
- $P_{.1}, P_{.2}$ ——问题 P 分解而得的两个子问题,是复杂决策问题较细粒度描述,即第 层粒度问题;
- $R_{.1}, R_{.2}$ ——联结问题 P 与其子问题 $P_{.1}, P_{.2}$ 的纵向关系;
- $r_{.1}$ ——联结同粒度问题 $P_{.1}, P_{.2}$ 的横向关系.

3.3 数学模型体系

通过建立复杂决策问题的分层递阶结构模型,达到了问题结构化的目的,对于结构模型的低层细粒度问题能够建立适当的数学模型进行定量分析.在子问题定量求解过程中,运用决策理论、运筹学及其它数学的方法和技术所建立的数学模型,主要用于定量地描述系统的有关动态过程与静态特性,对问题进行定量分析和数值计算.

模型是对客观事物的描述,人们通过对模型的认识来增强对复杂问题的理解和处理.数学模型可定义为遵循某种语法规则 G 描述的,能够对给定的输入 I 产生输出 O 的符号序列^[12],即

$$I \quad R, O \quad R, Model \quad I \xrightarrow{G} O$$

数学模型语法规则的构成可以根据不同的需求规定.一般来说,语法规则 G 的描述如下:

(1) 数学模型的基本元素集合由 V (变数集合)、 C (常数集合)和 (运算符集合)构成.

(2) 数学模型的基本构件是关联式,关联式的集合由基本元素的集合与关联符构成.关联式的形式如 $Lhs \ \& \ Rhs$.

其中:

$$Lhs = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad x_1, x_2, \dots, x_n \in V \quad C$$

$$Rhs = g(\quad, \quad, \dots, \quad), \quad \quad, \quad, \dots, \quad \in V \quad C$$

$$\& \quad \{ =, >, \quad, <, \quad, \quad \} \subseteq$$

建立复杂决策问题数学模型体系的关键在于设计一个比较完善的模型表示框架,利用这一框架来抽象和描述问题求解过程中所需的各类数学模型.从以上关于数学模型的定义和描述可以看出,数学模型的共有特点是:用某些特定方法对描述问题的一组特征数据进行处理,并给出有价值的处理结果,即将数学模型的基本元素(变量集

合、常数集合和运算符集合)看作属性,而将模型的语法规则 G 看作处理数据的方法.数学模型的这一特点具有对象特征,可以使用面向对象技术(object-oriented technology, OOT)建立模型的表示框架,抽象描述各类数学模型,形成模型类库,最终建立复杂决策问题的数学模型体系.

面向对象技术是利用“对象(object)、类(class)、消息(message)、继承(inheritance)”来实现对世界的描述.对象包括属性和方法,而且可以严格控制各种属性和操作的对外可见度.类是组织对象的设施,每一个对象都是其对应类的实例.由于对象所具有的信息隐蔽和数据抽象的能力,使各个对象之间具有了很高的独立性,还可以通过简单对象的“聚集”来生成更为复杂的对象,从而表示更为复杂的数学模型.

根据以上数学模型的定义和描述,将“数学模型”作为一个对象(类)抽取出来,将输入参数、输出参数、连接符以及关联式等关键数据作为对象的属性,再配上操作这些属性的方法函数.这样就可抽象出“一般数学模型”类的基本定义:

```

Class: General Mathematics Model
{
    Attribute:
        List of Input Parameter // 输入参数表
        List of Output Parameter // 输出参数表
        List of Link Symbol // 连接符表
        Left Hand Side of Equation(Lhs) // 关联式左边项(Lhs)
        Right Hand Side of Equation(Rhs) // 关联式右边项(Rhs)
    Method:
        Operation of Getting & Saving // 取出与存储操作
        Constructor & Destructor // 构造函数与析构函数
        Calculation Method of Model // 模型计算方法
}

```

继承是数学模型类库的组织方法,类与类之间可以通过继承来共享属性和方法,表示各类数学模型间各种分类、从属关系.同时,继承关系也是实现模型重用、知识重用的有力手段.因此,抽象出更高层次的类,同时设计合理的继承关系是建立复杂决策问题的数学模型体系的关键.通过对各类数学模型的抽象和分析,抽取其中的特征性元素及方法,构造模型类,并在保留各类数学模型的差异的同时,将类中相同的属性和方法抽取出来,向更高层次上添加更具一般性的父类数学

模型,形成一种共享相似性的高度抽象结构,以此来组织复杂决策问题的数学模型体系.本文给出

了一个相对完整的数学模型类库继承关系图,如图 4 所示.

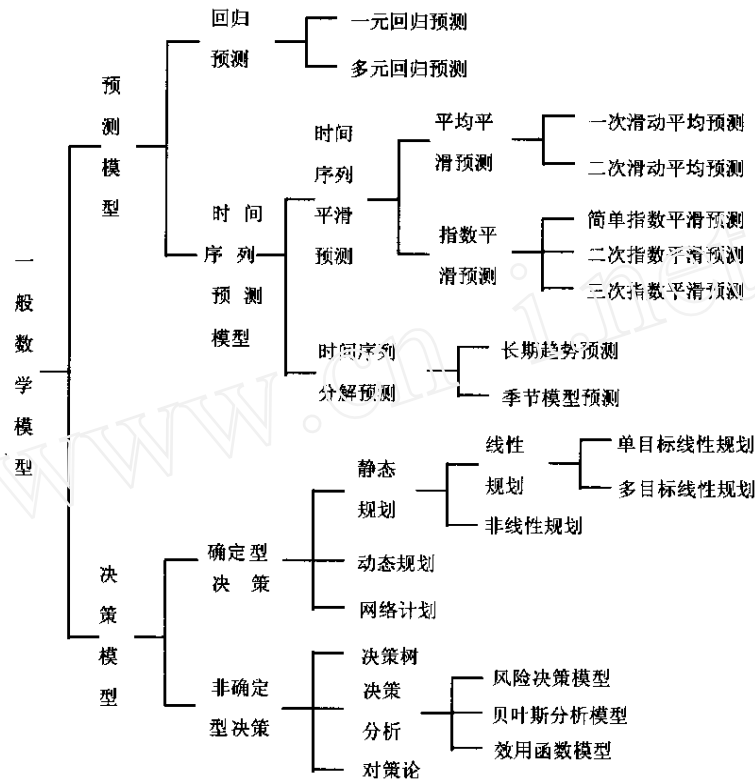


图 4 数学模型类库的继承关系

Fig. 4 Inheritance relationship among mathematic model classes

从图 4 中可以看出,数学模型类库继承关系的设计,不但符合决策者的思维习惯,而且可以使各类数学模型的层次结构清晰,充分发挥面向对象方法中继承关系的优势,大大增强各类模型的可重用性,为复杂决策问题的数学模型体系的建立以及模型类库的扩充创造了有利条件.

在数学模型体系建立过程中,类库改进过程是不断往复的,继承关系和类的设计会随着知识抽取工作的深入不断地发生变化,而面向对象方法提供了一种具有良好“抗变性”的系统设计风格.这正是面向对象方法特有的“进化式”的开发方法在设计和实现复杂系统中所具有的优势.

4 结束语

复杂决策问题的多元化模型体系是辅助决策思维的工具,是将与问题有关的各种因素联结在一起的知识框架.在这一体系中,各种不同模型(概念模型、结构模型、数学模型)可在计算机中相互集成,构成辅助决策的软件体系,从而更有效地支持从定性到定量的综合集成过程.利用复杂决策问题的多元化模型体系有利于对复杂决策问题的科学理解,并可以用来指导开发不同层次、各个领域及具体问题的决策模型.

参考文献:

[1]戴汝为. 21 世纪组织管理途径的探讨[J]. 管理科学学报, 1998, 1(3): 1—6.
 Dai Ruwei. The exploration of approach for management in 21st century[J]. Journal of Management Science in China, 1998, 1(3): 1—6(in Chinese).

[2]向 阳, 于长锐. 复杂决策问题求解的定性定量综合集成方法[J]. 管理科学学报, 2001, 3(2): 25—31.

- Xiang Yang, Yu Changrui. Metasynthesis of complicated decision-making problem solving[J]. Journal of Management Sciences in China, 2001, 3(2): 25—31. (in Chinese)
- [3] Zeigler B P. Multifaceted modeling methodology: Grappling with the irreducible complexity of systems[J]. Behavioral Science, 1984, 29: 169—178.
- [4] 钱学森. 关于思维的科学[M]. 上海:上海科技出版社, 1986.
Tsien H S. Thinking Science[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1986. (in Chinese)
- [5] Simon H A. 人工科学[M]. 北京:商务印书馆, 1987. 25—28.
Simon H A. Artificial Science[M]. Beijing: Business Publishing House, 1987. 25—28. (in Chinese)
- [6] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, 13(1): 3—40.
Tsien H S, Yu Jingyuan, Dai Ruwei. A new scientific domain—open complex giant systems and research methodology[J]. Journal of Nature, 1990, 13(1): 3—40. (in Chinese)
- [7] 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统[J]. 模式识别与人工智能, 1991, 14(1): 1—4.
Tsien H S. Further discussion on open complex giant systems[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1991, 14(1): 1—4. (in Chinese)
- [8] 戴汝为, 王珏, 田捷. 智能系统的综合集成[M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 1995. 1—23.
Dai Ruwei, Wang Jue, Tian Jie. Metasynthesis of Intelligent Systems[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1995. 1—23. (in Chinese)
- [9] 张钊, 张玲. 问题求解理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 1990. 5—14.
Zhang Bo, Zhang Ling. Theory and Application of Problem Solving[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990. 5—14. (in Chinese)
- [10] 向阳, 黄梯云, 于长锐. 基于问题结构分析的模型智能构造系统概念框架研究[J]. 系统工程理论与实践, 2000, (6): 15—19.
Xiang Yang, Huang Tiyun, Yu Changrui. Research on conceptual framework of intelligent modeling system based on problem structure analysis[J]. Theory and Practice of System Engineering, 2000, 6:15—19. (in Chinese)
- [11] Hobbs J R. Granularity[A]. Proc of IJCAI[C]. Los Angeles: 1985. 28—37.
- [12] 向阳, 于长锐. 基于知识的规划模型构造系统研究[J]. 系统工程学报, 2002, (2): 72—77.
Xiang Yang, Yu Changrui. Research on programming modeling system based on knowledge[J]. Journal of System Engineering, 2002, (2): 72—77. (in Chinese)

Research on multifaceted model system of complicated decision-making problem

YU Chang-rui, LUO Yan, XU Fu-yuan

College of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Because of the characteristics of complicated decision-making problems, it is very difficult to describe and solve complicated decision-making problems only by the means of quantitative models. From the viewpoint of Metasynthetic Engineering, the paper holds the opinion that the solving process of complicated decision-making problems requires the support of multifaceted model. According to the cognition levels of complicated decision-making problems, the paper puts forward that the multifaceted model system of complicated decision-making problems is composed of concept model, structure model and mathematics model and then elaborates the three kinds of models.

Key words: complicated decision-making problems; model system; metasynthesis