

# 工程建设中 智能辅助决策系统

国家自然科学基金重大项目  
(1989 年度论文汇编)

電子工業出版社

# 工程建设中智能辅助决策系统

国家自然科学基金重大项目  
(1989 年度论文汇编)

编委会名单:

刘西拉 邢向谦 刘锡荟 涂序彦

秦 权 张 清 卢 谦

责任编辑 王昌铭

电子工业出版社

## 出版说明

本项研究工作受国家自然科学基金委员会、国家教育委员会、建设部、国家地震局、铁道部、交通部、冶金部、国家环保局联合资助。

The Project is supported by National Natural Science Foundation of China , the State Education Commission, the Ministry of Construction, the State Seismological Bureau the Railway Ministry, the Transportation Ministry, the Ministry of Metallurgical Industry, the National Environmental Protection Agency .

工程建设中智能辅助决策系统

\*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

机电部科技情报所印刷

\*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:15.5 字数:406千字

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数:1000册 定价:20.00元

ISBN 7-5053-1232-4/TN·367

## 前 言

人工智能的研究在当今世界上受到广泛的重视。美国、西欧以及日本均制定了长期的研究规划,被列为最重要的研究领域之一。智能辅助决策系统(包括专家系统)作为人工智能研究的一个分支,近年来几乎渗透到了所有的工程科学领域。各项工程建设,包括城市规划、铁路交通、环境保护、建筑结构工程等等,既耗费巨大的人力和财力,同时又是国民经济发展的重要支柱之一。因而它的决策是否正确、科学,将是一件关系国民经济发展的重大事情。而这些决策又必须凭借专家的丰富经验,并且存在着大量的不确定性因素。工程建设问题的上述特点为智能决策系统的研制提供了广阔的天地和诱人的应用前景。

为了大力推动我国智能决策系统的研制和应用,国家自然科学基金委员会于1987年决定将“工程建设中智能辅助决策系统的应用研究”列为国家自然科学基金重大项目。国家教育委员会、建设部、国家地震局、铁道部、交通部、冶金部、国家环保局的科技司、局对此也十分关注并决定对其研究工作联合资助。

本项重大科学基金研究课题的研究队伍中荟集了我国建筑环境与结构工程、知识工程、系统工程、计算机应用等学科领域中的一些知名专家和学者,并且形成了以工程建设领域的专家为首的多学科交叉的联合攻关研究队伍。拟定解决的科学问题有工程领域中的知识库建设,包括工程知识表达式及不确定性因素处理和推理方法,适用于工程领域的专家系统开发环境和工具,并计划在5年研究工作之后,完成一批知识库的建设和智能决策原型系统,发表一批具有国际水准的研究论文。

这本论文集是在1989年12月“全国工程建设中智能辅助决策系统应用研究成果交流会”(自然科学基金重大项目1989年度检查会)会后编辑而成的。这里收集的20篇论文表明,在继1988年10月在大连举行的第一次交流检查会后,一年多来这项课题研究又取得了令人鼓舞的进展。这些进展已经引起了国内外学术界的关注。部份系统的研制已达到试运行的雏型阶段,其中少数系统已在工程建设中应用。更为可喜的是在本课题研究工作中涌现出大量的青年科学工作者,他们为本课题做出了重要的贡献。

国家自然科学基金委员会  
材料与工程科学部

## Preface

The research of Artificial Intelligence (AI) is one of the most important research fields. AI aided decision-making systems, including expert systems, as a branch of the research of AI, have been widely used in almost all civil engineering fields, such as city planning, railway transportation, environmental protection, and structural engineering etc. Civil engineering usually needs a great deal of manpower and financial resources, which is an important pillar of the national economic development. Therefore a correct decision-making is related with the development of the national economy indeed. On the other hand, decision-making, which deals with a great deal of uncertain factors, relies on the expertise. These characteristics in civil engineering construction supply the research of AI decision-making systems with wide fields and attractive prospect.

To push the research and application of the AI decision-making systems forward, the National Natural Science Foundation of China decided to put the "Research of the Application of the AI aided Decision-making Systems in Civil Engineering Construction" as a significant projects in 1987. The State Education Commission, the Ministry of Construction, the state Seismological Bureau, the Railway Ministry, the Transportation Ministry, the Ministry of Metallurgical Industry, the National Environmental Protection Agency also pay great attention to this project and have decided to support it.

Among the project research team are the famous experts and scholars of the branches, such as environment, structural engineering, knowledge engineering, system engineering, and computer application etc. A cooperation research team combining many researchers from different fields, which is under the leadership of the experts in civil engineering, has been established. The scientific problems to be solved are the building of knowledge bases, including the representation of engineering knowledge, the handling of uncertain factors, the reasoning methods, and the tools which is suitable for the development of the expert systems in civil engineering. It is planned that a series of knowledge bases and AI decision-making prototypes will be developed, and a lot of papers with world advanced level will be published in five years.

This proceedings is edited from the national conference on AI aided Decision-making Systems in Civil Engineering (1989, Dec., Beijing). The papers collected here show that, inspiring progress has been made since the first national conference held in Dalian, Oct., 1988. Such progress has won the attention from science and technology circle, even from abroad. Some prototypes have been developed. A few of them have been used in the engineering construction. Further more, a great number of young scientific researchers have emerged in the research field. They have important contribution to the present project.

The Department of Material and Engineering,  
The National Natural Science Foundation of China

# 目 录

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 城镇总体规划用地布局综合评价专家辅助决策系统——知识获取和知识库的建立 | (1)   |
| 城市规划管理专家系统的研究                       | (17)  |
| 大型专家系统设计理论的应用——冶金矿山建设智能决策系统         | (25)  |
| 建筑设计平面布局专家系统                        | (33)  |
| 地震危险度智能辅助评估系统 SHES                  | (41)  |
| 单线铁路技术改造决策专家系统                      | (48)  |
| 现有桥梁等级评估及对策专家系统的研制                  | (57)  |
| 铁路隧道围岩分类专家系统的推理机制和骨架系统的实现           | (63)  |
| 智能工程规范管理系统中多层知识表示和推理方法的研究           | (72)  |
| 公路选线专家系统——公路线形设计评判子系统(HLDCS)        | (80)  |
| 城市生态调控的智能决策支持系统                     | (88)  |
| 区域环境大气质量评价专家系统                      | (98)  |
| 城市道路交通噪声防治专家系统——CENCES-I 系统         | (106) |
| 城市污水处理厂设计专家系统                       | (115) |
| 水资源保护专家系统                           | (125) |
| 智能型杆系结构 CAD 图形交互系统 HIGHSYS(1.0)     | (133) |
| 国外建筑工程投标报价实用与教学专家系统 ESBOP           | (141) |
| 施工项目管理专家系统的领域原型                     | (151) |
| 人工神经网络的样本过滤方法及其应用                   | (160) |
| 基于神经网络的高层建筑结构初步设计的专家系统 HIDE-I       | (166) |
| 混凝土结构裂缝诊断与对策专家系统                    | (179) |
| 基于知识的复杂有限元模型化                       | (186) |
| 斜拉桥设计与施工专家系统 ICADC 的实用化研究           | (195) |
| 钢筋混凝土框架结构 CAD 中的设计规范表示与求解控制结构       | (203) |
| 带知识库的钢筋混凝土梁计算机辅助教学试验系统              | (213) |
| 面向土建工程的专家系统建造工具 C-ADVISOR 及其应用      | (220) |
| 不确定性处理通用知识库建造系统                     | (229) |
| 不确定性推理的组合公式与规则表示                    | (235) |

# 城镇总体规划用地布局综合评价专家辅助决策系统 ——知识获取和知识库的建立

钱兆裕 杨振山 沈清基 顾景文 潘海啸 (同济大学)  
廖俊平 (武汉城建学院)

“建立一个专家系统的复杂而艰巨的过程要经历多年的努力,其中大部分工作是知识获取。”

——美国人工智能专家 F·海斯罗斯

## 摘 要

城镇总体规划用地布局综合评价专家系统是以建立评价体系——构造评价模型——研制推理机——优化决策规划方案等项工作为基础的。

专家系统最为重要也最为困难的就是知识获取工作。文中对专家知识的获取,知识库的建立和维护,推理机制,以及模糊知识库 FKB 的维护算法作了初步探研工作。其中根据评价型专家系统设计了不同知识表达方式,采用了不同知识获取模块,包括评价层次模型知识、变权知识和模糊评价知识,以及相应的推理机制。最后又对模糊知识库的维护算法作了较详尽的说明。

## 一、专家知识的获取

1.1 专家系统强调人工智能活动是以知识为中心。知识工程的三个重要组成部分,即知识获取、知识表达和知识利用,其中最为重要也最为困难的就是知识获取。

1.2 知识获取首先是对论域问题的认识和概念化。课题的研究是建立评价型专家系统。我们初步试以系统的局部——道路系统规划布局进行优劣状态的评价为目标,知识的概念化是对解决某一问题有关的因素、知识加以整理的过程,从某种程度而言,是对有关知识的一种“编辑”过程,如对应于道路系统规划布局的评价,通过知识获取得出这样的概念。从高层次而言,应从路网形式、路网功能、节点负荷、出行可达、经济指标和景观效应等六个方面进行。只有进行准确的知识概念化,才能使评价具有意义和价值。

1.3 知识获取其次是知识的形式化。知识形式化是把有关某个问题的知识加以明确的概念表述,解决知识表示方法和求解方法的问题,是对有关知识的一个“再生”过程。通过对道路系统规划布局评价的论域认识和概念化,发现它们存在着层次体系,而且层次之间有着复杂的影响关系。因此,自然地想到利用层次分析法来建立系统模型,并作为主框架模型。运用层次分析法建立模型,大致可分为四个步骤,即建立递阶层次结构;构造两两比较判断矩阵;由判断矩阵计算被比较元素的相对权重,计算各层元素的组合权重,最终得到相对于总的目标各决策方案的优劣排序权重,并给出这一组合排序权重所依据的整个递阶层次结构所有判断的总的一致性指标,如下列表示例。

1.4 专家知识的实际获取,首先确定知识获取的专家集团的组成。城镇总体规划是一个涉及面较广的工作,与许多专业学科相关,若参予的专家有一个较广的范围,可使专家系统的

| 道路系统规划方案<br>经济指标评价因素 | 1 | 2 | 3 | 4  | 5 | 6  | 7  | 8  |
|----------------------|---|---|---|----|---|----|----|----|
| 1. 人均道路面积            |   | 1 | 1 | -2 | 3 | 2  | 1  | 1  |
| 2. 人均停车场面积           |   |   | 1 | -2 | 1 | -2 | 1  | -2 |
| 3. 道路用地%             |   |   |   | 1  | 1 | 1  | 2  | 1  |
| 4. 干道用地%             |   |   |   |    | 2 | 1  | -2 | -2 |
| 5. 干道用地/道路用地         |   |   |   |    |   | -2 | 2  | 1  |
| 6. 道路网密度             |   |   |   |    |   |    | 2  | 2  |
| 7. 干道网密度             |   |   |   |    |   |    |    | 2  |
| 8. 公安线路密度            |   |   |   |    |   |    |    |    |

知识包容量较大,经过多次研究相对于道路系统规划布局确定了有各有关专业、各层次的研究人员,管理人员,设计人员等共三十七名专家,而构成具有较广泛的代表性和较大包容性的专家集团。

| 姓 名 | 单 位          | 职 称         |
|-----|--------------|-------------|
| 朱俭松 | 中国城市规划设计研究院  | 教授级高工       |
| 潘云章 | 辽宁省城乡建设规划设计院 | 教授级高工       |
| 韩天青 | 新疆油田规划设计院    | 副院长、高工      |
| 徐吉谦 | 东南大学         | 副所长、教授      |
| 杨佩昆 | 同济大学         | 教授          |
| 陈兴华 | 昆明市规划设计研究院   | 院长、高工       |
| 费景文 | 广州市交通规划研究所   | 所长、高工       |
| 闵风奎 | 深圳市城市规划局     | 副局长、高级城市规划师 |
| 周家骧 | 上海市城市规划设计院   | 高工          |
| ... | .....        | .....       |

确定了专家集团的组成以后,我们采用了书面咨询专家知识的方式,具体内容分为两个部分:其一是对初步形式化的道路系统规划布局评价体系中所含多个层次的因素必要性程度判断,其二是对多个评价因素的重要性程度判断,以及相应地有关该方面专业知识,如下列表示例。

在对专家知识咨询和获取的过程中,如果专家知识取向的趋同性不明显,或分歧较大,则应进行多次反复,以求知识获取的趋同性,由于我们这次先在小范围专家内征询意见,然后再在较大范围内广泛开展咨询工作,准备工作较充分,所得意向较为一致,比较成功。

## 《城市总体规划道路系统规划评价体系指标》专家咨询表

1. 您是否同意从以下六大方面来评价总体规划道路系统规划方案(请在空格中打√), 并请判断它们的重要性程度(亦请打√)。

| 总体规划方案道路系统<br>规划评价的六方面因素 | 很<br>同意 | 基本<br>同意 | 不<br>同意 | 极<br>重要 | 很<br>重要 | 重要 | 比较<br>重要 | 次<br>重要 | 一般 |
|--------------------------|---------|----------|---------|---------|---------|----|----------|---------|----|
| 1、路网形式                   |         |          |         |         |         |    |          |         |    |
| 2、路网功能                   |         |          |         |         |         |    |          |         |    |
| 3、节点负荷                   |         |          |         |         |         |    |          |         |    |
| 4、出行可达                   |         |          |         |         |         |    |          |         |    |
| 5、经济指标                   |         |          |         |         |         |    |          |         |    |
| 6、景观效应                   |         |          |         |         |         |    |          |         |    |
| 您还有何看法和意见(包括您认为的评价因素)    |         |          |         |         |         |    |          |         |    |

2. 您是否同意道路系统规划方案“路网形式”评价可用如下三个因素来反映, 并请判断它们的重要性程度(请在空格中打√)。

| 道路系统规划方案路网形式评价因素      | 很<br>同意 | 基本<br>同意 | 不<br>同意 | 极<br>重要 | 重要 | 次<br>重要 |
|-----------------------|---------|----------|---------|---------|----|---------|
| 1、与原有道路网协调程度          |         |          |         |         |    |         |
| 2、与地形结合好坏             |         |          |         |         |    |         |
| 3、是否满足城市远期发展需要        |         |          |         |         |    |         |
| 您还有何看法和意见(包括您认为的评价因素) |         |          |         |         |    |         |

## 二、知识库的建立和维护

2.1 建立知识库的首要任务和核心的工作是选取适当的知识表达方式。同时,为了使知识库能不断完善,使知识库中的专家知识能不断扩充,需要建立知识库的维护系统。

2.2 知识表达既要准确表达专家的知识,又要适合推理过程的需要,根据评价型专家系统表达不同类型的专家知识及不同阶段的推理过程的需要,设计了下列知识表达方式。

2.2.1 评价的层次模型中的知识表达,主要是要表达层次模型中的每个节点的特性,对此采用了框架表达形式,每个节点对应一个框架,节点的特性反映在框架的槽值上。

形式为: <框架名>

<槽 1>

<槽值 1,槽值 2,……>

<槽 2>

<槽值 1,槽值 2,……>

...

... ..

<槽 n>

<槽值 1,槽值 2,……>

其中有些槽具有不止一个的侧面,例如下面的“对父节点排序权重”槽,其形式为:

<槽 k>

<侧面 1>            <槽值 1,槽值 2,……>

<侧面 2>            <槽值 1,槽值 2,……>

...

.....

<侧面 m>            <槽值 1,槽值 2,……>

举例如下:

<节点框架>

<节点代号>            “301”

<节点名称>            (略)

<父节点代号>          “201”,“202”

<相对权重>

<父节点代号>          “201”

<相关节点代号>        “302”(值 1)

<相对权重比值>        2

.....

...

<对父节点的排序权重>

<父节点代号>          “201”(值 1)

<排序权重>            0.105

<父节点代号>          “202”(值 2)

<排序权重>            0.233

2.2.2 变权的知识采用的是产生式规则形式 if A then B 的形式。变权知识在获取,运用和维护时,都以“组”的形式出现的,每组知识包括三个部分:

主题——即本组知识的主题内容。

选择项——即对应于该主题的不同背景情况。

行动项——即每个选择所对应的变权操作行动。

举例如下:

主题:城镇人口数量

选择项: I)大于 80 万人;

II)30—80 万人;

III)10—30 万人;

IV)小于 10 万人;

行动项: I)因素“205”权重加 1,因素“207”权重加 2;

II)不变

III)因素“202”权重加 1;

IV)因素“208”权重加 1。

可见,这一组变权知识实际上是四条具有相同主题知识的组合体,并且这四条知识的选择项是相互排斥的。

2.2.3 模糊评价的知识,采用模糊规则的形式,由带置信度的 Horn 子句组成,模糊事实、

规则和目标的表现形式如下:

模糊事实:说明有关对象及对象之间关系的事实。

形式为: $A \leftarrow [\mu(A)]$

表示事实 A 的置信度为  $\mu$  或真值为  $\mu$

模糊规则:定义一些对象之间相互关系的规则。

形式为: $R: A \leftarrow [\mu(R)] - B_1, B_2, \dots, B_n$

表示条件  $B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_n$  对结论 A 的蕴涵强度为  $\mu(R)$ , 即如果  $B_i$  的真值为  $\mu(B_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , 则条件的真值  $t = \min\{\mu(B_i) | i=1, 2, \dots, n\}$ , 进而结论的真值  $\mu(A) = \mu(R) \times t$ 。规则的左边为规则的“头”, 右边为规则的“体”。

模糊目标:提出对象与对象之间是否具有某种关系的问题。

形式为: $? [\mu] - A_1, A_2, \dots, A_n$

意为“当阈值为  $\mu$  时,  $A_1, A_2, \dots, A_n$  是否会为“真”。

举例如下:

模糊事实:路网形式合理性(方案 A)  $\leftarrow [0.85]$  表示方案 A 的路网形式选择合理这一事实的置信度为 0.85。

模糊规则:路网形式合理性( $\times$ )  $\leftarrow [0.9] -$  采用方格式路网( $\times$ ), 地形平整( $\times$ ), 地势平坦( $\times$ )。

表明若方案 A 采用方格式路网, 且采用方格式路网的区域地形规整, 地势平坦, 则方案 A 的路网形式选择合理, 且置信度为 0.9。

模糊目标: $? - [0.89] -$  地形规整(方案 A) 即提出当阈值为 0.89 时, 是否有“方案 A 的地形规整”?

**2.3 知识库的维护。**针对知识库中不同类型的知识和知识的不同表达形式, 采用了不同知识获取模块, 以协助专家和用户进行知识的获取和知识库的维护工作。

**2.3.1 节点框架知识的输入,**即 AHP 评价模型的建立, 这部分知识关系到评价结论的总体正确性, 内容结构严谨, 知识本身的相容性检查在输入之前完成, 一经建立, 就不可随意修改。

知识库由评价模型的总目标开始要求用户逐层输入分解子因素及子因素之间在上层准则下的相对权重, 系统自动将其转换为内部知识表达形式。

**2.3.2 变权知识的输入。**这类知识是经“组”的形式出现的, 因此在获取这类知识时也以组的方式进行。为此, 设计专门知识获取模板, 用户只要按模板规定的格式输入即可, 下面的转换工作由系统自动完成。这类知识比较灵活, 数量也大, 更改也是经常的, 在使用过程中可以进行调整。每条知识组与组之间的相容性检查如何进行, 是一个很复杂的问题, 应对其相容性机制作全面的探讨。

**2.3.3 模糊评价知识的输入。**它决定于模糊推理路径的多少, 应使这方面的知识尽可能地丰富, 专家和用户也可随时添加这方面的知识。

模糊知识库的维护主要是对新规则的插入操作。对一条新规则在将它插入知识库之前, 先要判定它是否已存在于知识库中, 或它是否与知识库互容, 或它独立于知识库。若新规则已在知识库中, 则不必作任何操作; 若与知识库有互容的关系, 在插入之前要删除导致互容的规则; 若独立于知识库, 则将新规则插入即可。

### 三、推理机制

3.1 方案的评价过程。该过程分为获取城市背景资料和变权,获取方案特征信息和求取方案得分两大部分。后一部分又分为 AHP 评价模型和模糊推理两个子系统,因此相应有三个子系统。总体上推理机制全局是正向的,但在获取背景资料和变权这一局部采用了反向推理策略,加之在底层因素的评价过程中采用了模糊评价方法。因此,上述三个子系统的推理机制各自有所不同。

3.2 AHP 推理机制。这一部分的推理主要是因素权重的分配和传递过程,其推理过程是反向的,其推理流程如图 1 所示。

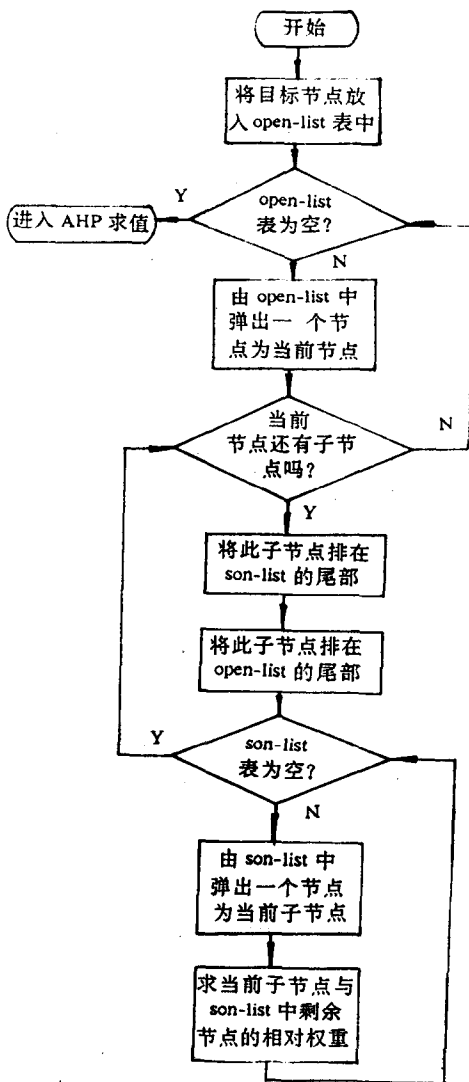


图 1

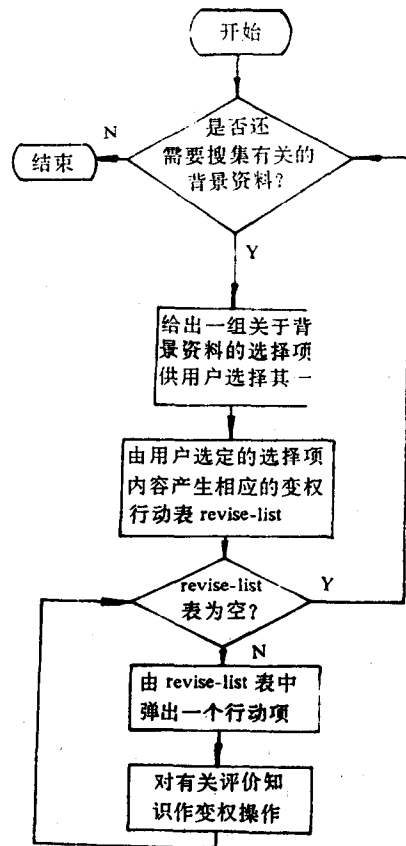
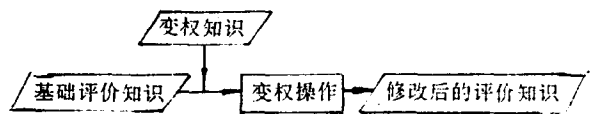


图 2

这部分推理主要由两个表即 Open-list 和 Son-list 控制。Open-list 表用来存放需要扩展的节点, Son-list 表用来存放当前扩展点的子节点, 没有子节点的节点为模型的底层结点, 即是本阶段推理过程的终止点, 同时又是下阶段模糊推理的目标节点。

3.3 变权子系统的推理机制。这是一个正向推理过程, 系统向用户获取有关城镇的背景资料, 并触发相应的变权规则, 产生变权操作, 修改 AHP 模型中的有关知识, 其过程和推理流程如图 2 所示。

3.4 模糊推理机制。这是一个反向推理过程。由 AHP 模型的底层因素与模糊规则的头匹配, 触发一条模糊规则, 由此规则驱动, 搜集有关的原始数据或是再触发另一条模糊规则, 直至得出原目标的一个模糊评分值, 并且继续试图匹配所有能够匹配的模糊规则, 从而求出该目标的最大分值。

在这个过程中采用了  $\alpha$ - $\beta$  剪枝技术, 其规则如下:

① 若一个与节点的  $\beta$  值小于或等于它的父节点的  $\alpha$  值, 则可终止对这个与节点以下的搜索, 这称为  $\alpha$  剪枝。

② 若一个或节点的  $\alpha$  值大于或等于它的父节点的  $\beta$  值, 则可终止对这个或节点以下的搜索, 这称为  $\beta$  剪枝。在反向推理过程中,  $\alpha$  和  $\beta$  的计算方法如下:

① 一个或节点的  $\alpha$  值等于其子节点当前的最大回溯值。

② 一个与节点的  $\beta$  值等于其子节点当前的最小回溯值。

3.5 评价推理的两个映射过程。AHP 和模糊推理是进行规划方案评价时的二个密切联系的过程, 它们各自对应了一个映射。通过这两个映射的合成, 完成了规划方案的原始数据集到评价总目标的映射, 即完成了全部推理过程。

前一个映射过程是 AHP 模型的底层评价因素集到评价总目标的映射, 如图 3 所示:

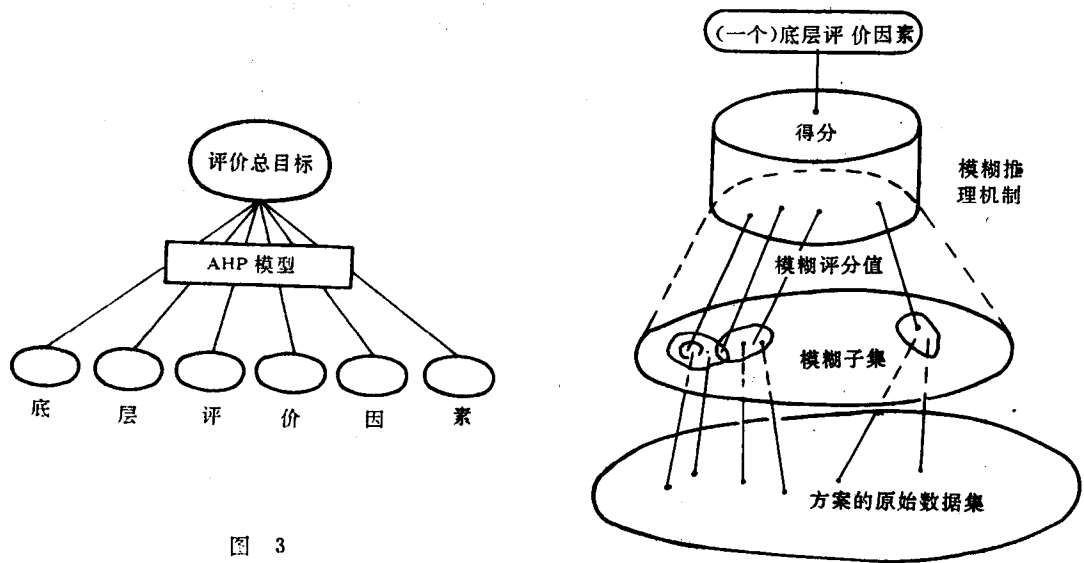


图 3

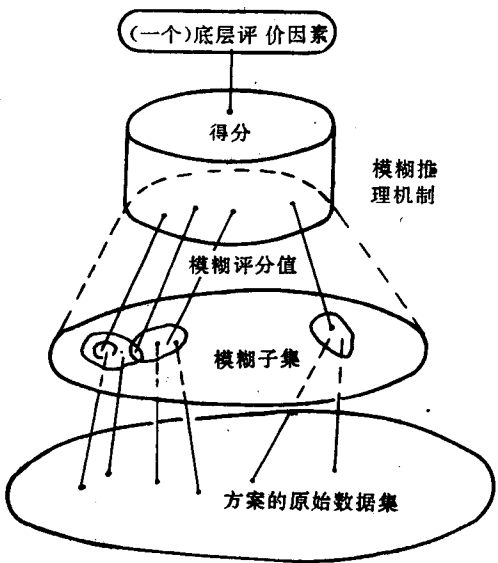


图 4

第二个映射过程是由原始数据集到 AHP 模型的底层评价因素集的映射。原始数据集通过与模糊子集的匹配, 触发模糊评价规则, 产生模糊评分, 再由此得出方案相对于 AHP 模型的底

层评价因素的得分,如图 4 所示。

## 四、模糊知识库 FKB 的维护算法

### 4.1 对 FKB 构造的基本描述

#### 4.1.1 关于 FKB 的总体说明。

模糊规则库 FKB 中的规则有以下形式:

'R' : 'A  $\leftarrow$  [ $\mu(R)$ ]  $-B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_n$ .'

A 代表规则的头,  $B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_n$  代表规则的体,  $\mu(R)$  表示条件 '  $B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_n$  ' 对结论 A 的蕴含强度, 简称该规则的强度。

FKB 中的全部规则可以构成一个推理网络。下面给出一个 FKB 的例子和它对应的推理网络(图 5)。

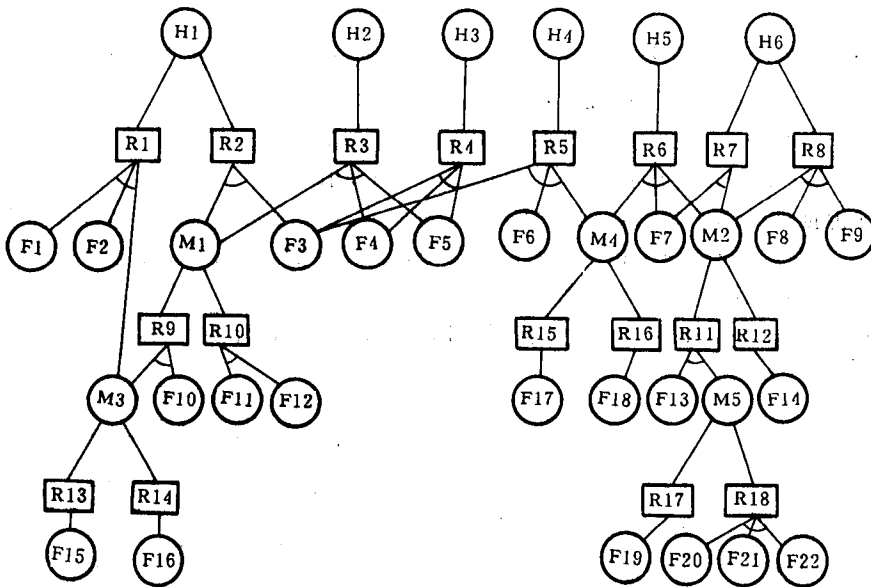


图 5

与或图中的○表示一个“因素”,为或节点,□表示一个“规则”,为与节点。

[例 4.1.1]FKB 的例子:

- 'R1' : 'H1  $\leftarrow$  [1.0]  $-F_1 \wedge F_2 \wedge M_3$ '
- 'R2' : 'H1  $\leftarrow$  [0.90]  $-F_3 \wedge M_1$ '
- 'R3' : 'H2  $\leftarrow$  [0.90]  $-F_4 \wedge F_5 \wedge M_1$ '
- 'R4' : 'H3  $\leftarrow$  [0.90]  $-F_3 \wedge F_4 \wedge M_5$ '
- 'R5' : 'H4  $\leftarrow$  [0.90]  $-F_3 \wedge F_6 \wedge M_4$ '
- 'R6' : 'H5  $\leftarrow$  [0.85]  $-F_7 \wedge M_2 \wedge M_4$ '
- 'R7' : 'H6  $\leftarrow$  [0.80]  $-F_7 \wedge M_2$ '
- 'R8' : 'H6  $\leftarrow$  [0.90]  $-F_8 \wedge F_0 \wedge M_2$ '
- 'R9' : 'M1  $\leftarrow$  [0.80]  $-F_{10} \wedge M_3$ '

'R10' : 'M1 $\leftarrow$ [0.85] $\rightarrow$ F11 $\wedge$ F12'  
 'R11' : 'M2 $\leftarrow$ [0.80] $\rightarrow$ F13 $\wedge$ M5'  
 'R12' : 'M2 $\leftarrow$ [0.75] $\rightarrow$ F4'  
 'R13' : 'M3 $\leftarrow$ [0.75] $\rightarrow$ F15'  
 'R14' : 'M3 $\leftarrow$ [0.70] $\rightarrow$ F16'  
 'R15' : 'M4 $\leftarrow$ [0.70] $\rightarrow$ F17'  
 'R16' : 'M4 $\leftarrow$ [0.75] $\rightarrow$ F18'  
 'R17' : 'M5 $\leftarrow$ [0.80] $\rightarrow$ F19'  
 'R18' : 'M5 $\leftarrow$ [0.90] $\rightarrow$ F20 $\wedge$ F21 $\wedge$ F22'

针对 FKB 维护算法的需要,对这类与或图提出以下定义:

[定义 4.1.1]与或图的叶节点为初始数据。

[定义 4.1.2]与或图的顶点为推理的最终结论。

[定义 4.1.3]与或图中既非顶点又非叶节点的或节点表示一个中间假说。

[定义 4.1.4]与或图中的与节点表示一条规则,它的父节点对应了它所表示的规则的头,而子节点则代表规则的体。

[定义 4.1.5]规则体中包含的初始事实和中间结论称为规则体的因素,规则体的全部因素之集合称之为规则的因素集,也称原始因素集(相对于标准因素集)。

[定义 4.1.6]初始事实 F 具有真值  $\mu(F)$ ,也称之为事实 F 的强度或原始强度。

[定义 4.1.7]与节点的强度值即为该与节点所代表的规则的强度值。

[定义 4.1.8]设有一非叶或节点 A(即 A 可以是中间结论或最终结论),和它的一个子节点 r, r 的强度值为  $\mu(r)$ ,又设 r 的所有子节点的最小强度值为 t,则称  $t \times \mu(r)$  为通过 r 所确定的 A 的一个伪强度值,记为  $\mu_r(A)$ 。A 的所有伪强度的最小值称为 A 的强度值,记为  $\mu(A)$ 。

例如:由前述 FKB 中的规则 'R1' 能求得:

$$\mu_{R1}(H1) = \min\{\mu(F1), \mu(F2), \mu(M3)\} \times \mu(R1),$$

而由 'R13' 得到:

$$\mu_{R13}(M3) = \mu(F15) \times \mu(R13)。$$

#### 4.1.2 对本文所用函数的说明

在以后对 FKB 及关于 FKB 的维护操作算法的描述中,采用了一些类似 LISP 语言中 S-表达式形式的函数,这些 S-表达式既表示一个过程,也表示由此过程求得的函数值。但它们并非与 LISP 的 S 表达式完全一样。例如其中的原子不全是由大写的字母组成,也有小写字母甚至数字。

对这些函数意义的说明如下:

|              |                     |
|--------------|---------------------|
| (CAR HA)     | } 作用分别与同名 LISP 函数一样 |
| (CDR HA)     |                     |
| (CONS S1 S2) |                     |
| (DELETE S L) |                     |
| (MEMBER S L) |                     |

(CMB\_STR SA1 SA2) 将后一自变量的串值拼到前一自变量的串值后

(STRING D) 将一数字变量的值转换为相应串值

(REMAIN L1 L2) 求 L2 中去掉 L1 中所包含的表元素后剩作元素组成的表。

(HEAD R) } 头部。  
(BODY R) } 求串原子所代表的规则之 } 体。  
(MIU R) } 强度值。

#### 4.2 FKB 维护操作的原理

FKB 规则库的维护主要是针对新规则的插入的操作而言的。

对于一条新规则  $r^*$ , 在将它插入 FKB 之前, 先要判定:

- ① 它是否存在于 FKB 中; 或
- ② 它是否与 FKB 互容, 即它是否包含了 FKB 中的规则, 或反之, FKB 中的规则是否包含了它; 或
- ③ 它独立于 FKB。

若  $r^*$  已在 FKB 中, 则不必作任何操作; 若  $r^*$  与 FKB 有互容的关系, 则在将  $r^*$  插入之前要删除 FKB 中导致了互容的规则; 若  $r^*$  独立于 FKB, 则将  $r^*$  独立于 FKB, 则将  $r^*$  插入 FKB 即可。

##### 4.2.1 复杂规则、简单规则与子规则。

###### 4.2.1.1 复杂规则与简单规则。

[定义 4.2.1] 若规则 R 的体全由初始事实组成, 则称 R 为简单规则。

[定义 4.2.2] 若规则 R 的体中既有初始事实, 又有中间结论, 则称 R 为复杂规则。为了研究复杂规则, 引入 M-置换的概念。

[定义 4.2.3] 对于复杂规则  $R^*$  的因素集中的某中间结论  $M^*$ , 任选一条以  $M^*$  为头的规则  $R'$ , 以  $R'$  的因素集置换  $R^*$  的因素集中的  $M^*$ , 称为经规则  $R'$  的单一 M-置换, 记为  $M\_R(R')$ , 上述  $R'$  的因素集称为 M-置换因集,  $M\_F(M^*, R')$ 。

[定义 4.2.4] 复杂规则  $R^*$  经过一系列单一 M-置换, 其原始因素集变为只含有初始事实, 这样的集合称为该规则的一个标准因素集, 记为  $SF(R^*)$ 。为了保证复杂规则能得到标准因素集, 可求 FKB 具有完备性和无环性。

[定义 4.2.5] 设 FKB 的最终结论集和中间结论集分别为 HS 和 MS, 若每个属于 HS 中的元素及每个属于 MS 中的元素都各自至少作为一条规则的头, 则 FKB 具有完备性。

[定义 4.2.6] 对 FKB 中的任一复杂规则进行一系列单一 M-置换, 每次置换所产生的 M-置换因素集中都不包含原复杂规则的头或体已有的因素, 则 FKB 具有无环性。

[例 4.2.1] 设有如下规则:

$r1' : H1 \leftarrow [\mu(r1)] - F1 \wedge M1'$

$r2' : M1 \leftarrow [\mu(r2)] - F1 \wedge F2'$

对  $r1$  的因素集  $\{F1, M1\}$  作 M-置换  $M\_R(r2)$ , 得到  $M\_F(M1, r2) = \{F1, F2\}$ , 可见  $H\_F(M1, r2)$  中包含了  $r1$  的原始因素集中的元素 'F1', 因此, 由  $r1, r2$  组成的规则库不具有无环性。

[例 4.2.2] 设有如下规则:

$r1' : M1 \leftarrow [\mu(r1)] - F1 \wedge M2'$

$r2' : M2 \leftarrow [\mu(r2)] - F2 \wedge M3'$

$r3' : M3 \leftarrow [\mu(r3)] - F3 \wedge M1'$

对  $r1$  作两次 M-置换:

$$\{F1, M2\} \xrightarrow[\{F2, M3\}]{M\_R(r2)} \{F1, F2, M3\} \xrightarrow[\{F3, M1\}]{M\_R(r3)} \{F1, F2, F3, M1\}$$

可见在  $M\_F\{M3, M1\} = \{F3, M1\}$  中包含了  $M1$ , 这是原规则的头, 这也违反了无环性规定。

[定理 4.2.1] 在一个具有完备性和无环性的 FKB 中, 任何一个复杂规则的因素集经过一系列有限次的单一 M-置换, 可得到一个标准因素集。

证明:

设 FKB 的中间结论集为 MS, 初始事实集为 FS, 它们都是有限集。不妨设 FKB 中有一复杂规则  $R^*$ , 其因素集为:

$$\{F1, F2, \dots, FK, M1, M2, \dots, Ml\}$$

对其中的每一个中间结论施行一次单一 M-置换, 得到的  $M\_F$  集的合集为:

$$\{B1, B2, \dots, Bn\}$$

$Bi(i \in [1, n])$  可全为 FS 中的元素, 也可为 MS 中的元素, 但由无环性假设,  $\{Bi | i \in [1, n]\}$  中包含的这些中间假说将不属于  $\{M1, M2, \dots, Ml\}$ 。由于 MS 是有限的, 而完备性假设又保证了 M-置换能继续进行, 故经过有限次 M-置换必可得到  $R^*$  的标准因素集:

$$SF(R^*) = \{F1, F2, \dots, FK, FK+1, \dots, FK+m\} \quad [\text{证毕}]$$

[定义 4.2.7] 将一个复杂规则  $R^*$  的初始因素集化为标准因素集所用的一系列 M-置换组成  $R^*$  的一个 M-置换系列, 记为:

$$MR\_S(R^*) = [M\_R(Ri1), M\_R(Ri2), \dots, M\_R(Rin)].$$

为了保证 M-置换系列的唯一性, 规定在对因素集进行 M-置换时, 由左至右选取中间结论进行置换。

最后, 引入后验强度系数和后验强度的概念。

[定义 4.2.8] 设复杂规则  $R^*$  的标准因素集为:

$$SF(R^*) = \{F1, F2, \dots, FK, FK+1, \dots, FK+m\}$$

其中  $\{Fj | j \in [K+1, K+m]\}$  是经过  $R^*$  的一个 M-置换系列  $MR\_S(R^*)$  得到的,  $MR\_S(R^*) = [M\_R(Ri1), \dots, M\_R(Rin)]$ 。

每个  $Fj(j \in [k+1, k+m])$  是经由  $MR\_S(R^*)$  的一个子系列得到的, 这个子系更是唯一的, 它对应了一个规则集:

$$\{Rit | t \in [1, n]\}$$

此规则集中每个规则的强度组成集合:

$$\{U(Rit) | t \in [1, n]\}$$

后一集合中所有元素的连乘积称为  $Fj$  的一个后验强度系数, 记为  $\alpha(Fj)$ 。

[定义 4.2.9]  $Fj$  的原始强度值  $U(Fj)$  与它的一个后验强度系数  $\alpha(Fj)$  之积称为  $Fj$  的一个后验强度值。

#### 4.2.1.2 复杂规则与子规则

在 4.2.1.1 中曾指出, 一个复杂规则的因素集经过一个 M-置换系列可得到一个标准因素集。因为以某一中间假说为头的规则可能不只一个, 每个这样的规则都对应了一个单一的 M-置换。考虑一个复杂规则中所有中间假说各自所对应的所有 M-置换, 就可以得到多个 M-置换系列。每个置换系列可得到原复杂规则的一个标准因素集。