

学术论文

模糊灰色物元空间 (FHW) 理论与实践 ——宏观复杂大系统决策方法

谢砚青, 张江, 国强, 林华

(北方交通大学电信工程学院, 北京 100044)

[摘要] 模糊灰色物元空间 (FHW) 是针对宏观复杂大系统中的决策、预测问题进行决策支持的理论方法。它以 Delphi 法和模糊综合评判为基础, 融合了 BS 和 K.J 法的优点, 综合了模糊数学、灰色系统、物元分析与可拓学等多种理论, 以此理论为基础的决策支持系统已经在实际应用中取得了大量的成果。经过近 20 年的发展, 这套理论方法在综合人工智能、复杂系统、集合论等其他学科的基础上, 自身也有了长足的发展与进步。简要介绍了模糊、灰色、物元空间理论的理论体系、实际应用情况和近年来的发展和展望。

[关键词] 复杂系统; FHW; 决策支持; 应用; 展望

[中图分类号] TP18 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2002) 11-0057-10

1 前言

随着时代的不断进步, 当代社会已经进入了信息时代, 各种各样的信息呈爆炸性的增长。一方面, 人们面临的信息和数据越来越多, 另一方面人们可直接利用的信息和数据却越来越少。当面临一个决策问题时, 特别是针对宏观复杂大系统^[1]的决策问题时, 传统的决策方法已无能为力, 为此历史的发展召唤一种新型的能够综合各方面复杂信息的决策方法, FHW 决策系统正是在这样的背景下产生的。1984 年, 我国面临着三峡工程的重大决策, 当时存在着“180”、“170”等多个方案, 在选择方案时又要考虑到政治、经济、交通、环境等多种因素, 为了解决这个重大的决策问题, FHW 系统应运而生, 并为最后选择合理的方案进行了合理的决策支持。

FHW (模糊、灰色、物元空间) 是由贺仲雄教授创立的一套专家决策方法。该方法以 Delphi 法为基础, 融合了 BS 和 K.J 法的优点, 并采用了其他一些新兴学科的思路, 如模糊数学、可拓学、灰色系统理论等。FHW 特别适用于处理宏观复杂

大系统的预测、决策、论证、评估等问题, 尤其适用于意见不易集中的决策问题。

笔者对 FHW 理论做一个全方面的介绍作为其阶段性的总结。

2 理论摘要

FHW 模型结合模糊数学和灰色系统的特点, 并使之紧密融合在模糊灰色物元模型的体系中。FHW 模型是对决策问题的概括, 为定量描述决策相关问题提供了一条科学有效的道路。

2.1 FHW 理论介绍

2.1.1 物元模型^[2] 模糊灰色物元的基础结构是物元模型。物元分析是由蔡文教授创立的一套以现实世界中不相容问题为研究对象, 探讨处理不相容问题的规律和方法的一套理论。

一个物元可以表示为

$$\begin{pmatrix} M, & C_1, & V_1 \\ & C_2, & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n, & V_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中, M 是事物本身, C_i 为事物某一方面的特征,

[收稿日期] 2002-04-02; **修回日期** 2002-08-06

[基金项目] “八六三”高技术计划资助项目 (863-3062D06-03-6)

[作者简介] 谢砚青 (1978-), 男, 江西大余县人, 硕士, 北方交通大学博士生

V_i 为对应的特征的量值。在解决实际问题时，特别是解决决策问题时，必须考虑到与它有关联的那些事物的性质的量值。一个物元也可表示成

$$(M, (C_1, C_2, \dots, C_n), (V_1, V_2, \dots, V_n)) \quad (2)$$

2.1.2 灰色系统^[3] 为了更科学的描述事物的量值，必须把灰色概念引入物元。1982 年邓聚龙教授发表了第一篇灰色系统论文“灰色系统的控制问题”，标志着这门新学科的创立。所谓灰色系统，就是部分信息已知，部分信息未知的系统。它所研究的是外延分明、内涵不分明的事物。一个灰色概念可以表示为

$$X = \{(\alpha, \beta) \mid u \in U\}, \quad (3)$$

其中， U 表示 X 这个灰色概念的内涵所包含的所有层次的集合。 $u \in U$ 表示 U 的某层次， α 为 U 层次中的已知因素集， β 为 U 层次中的未知因素集。

2.1.3 模糊数学^[4] 模糊数学是应用数学方法研究和处理具有模糊性现象的数学。模糊数学的理论体系已比较完善，应用也非常广泛，其理论在很多书籍文献中都有介绍，在此不再赘述。

2.1.4 模糊灰色物元 如果在式 (2) 中做代换得

$$C_i \rightarrow (p_i, a_i), i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

其中， (p_i, a_i) 是灰色概念， p_i 表示 i 项指标明显的优点， a_i 表示此项指标的潜在优点，所以 (p_i, a_i) 被称为灰色优度。

同理，作代换得

$$V_i \rightarrow (q_i, b_i), i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

其中， (q_i, b_i) 称为灰色劣度， q_i 表示明显缺点， b_i 表示潜在缺点。

引入灰色优度和灰色劣度后，拓广的物元一般形式为

$$(M, ((p_1, a_1), (p_2, a_2), \dots, (p_n, a_n)), ((q_1, b_1), (q_2, b_2), \dots, (q_n, b_n))) \quad (6)$$

事物 M 可能是多因素、多目标的，它可以用模糊向量来表示，即 $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ 。于是，模糊灰色物元可以表示为

$$((\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n), ((p_1, a_1), (p_2, a_2), \dots, (p_n, a_n)), ((q_1, b_1), (q_2, b_2), \dots, (q_n, b_n))) \quad (7)$$

此时，物元已和原来物元的定义不完全相同而只保留物元的部分形式。

2.2 FHW 专家决策系统框图

以 FHW 模型为基础，FHW 专家决策支持系统总体上可以分成决策准备、专家评判、结果计算和最后决策四部分，如图 1 所示。

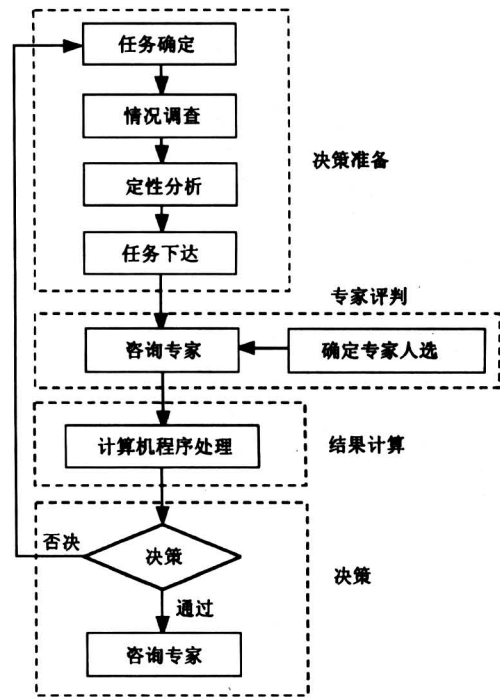


图 1 FHW 专家决策系统框图

Fig.1 FHW expert policy decision supporting system structure

3 决策准备

决策准备的任务是搜集决策需要用到的材料，明确决策目标及其指标体系，提出初步解决方案以供专家进行评判。决策准备分为任务确定、情况调查、定性分析和任务下达四个部分。

3.1 任务确定

确定准备实施的工程和要达到的指标。

3.2 情况调查

实事求是的调查与工程有关材料，如人力、物力、财力、技术力量、自然条件等。在可能的情况下建立数据表输入计算机，以供决策参考。另外，情况调查包括咨询决策数据库，了解以前是否作过相似决策及其经验教训。

3.3 定性分析

根据任务的特点、性质及具备的条件，分析任务的可行性和属性。

3.3.1 可能性分析 可能性分析可从工程的风险程度（风险因子）和投资（物资 6 元素）两方面分

析：

风险因子 根据情况调查取得的资料，分析完成该程序已具有的经验、技术知识和任务含有的新信息的成分。已有的知识与新信息（或称创新部分）比称为风险因子。风险因子的计算，可由专家分析给出，也可将调查情况的新信息和已有知识量化，由计算机算出来。一般选择风险因子为 15 % 较合适。

物资 6 元素 对工程投资的 6 元素（资金、人力、时间、技术知识、自然资源、工具）进行分析，估计投资与收益的关系。投资大于收益，一般应重新确定工程；投资等于收益应考虑是否有必要或可能改进工程；收益大于投资，是好的工程计划。这里应该注意，有时当前投资大于收益，但从长远角度看，收益却大于投资，这样的工程值得慎重考虑。

3.3.2 任务属性分析 在任务的可能性分析可行的情况下，定性分析工程属性：长远规划型、过渡型、创新型、慎重型等。根据工程属性来选择专家和决策方向。工程属性分析可通过咨询专家取得。

3.4 任务下达

根据定性分析结果，确定工程初步指标，交给专家作出正确的决策。

4 专家评判

专家评判是指从选择适当的专家到组织专家对已有方案进行填表打分的一系列过程，主要包括确定专家人选和咨询专家两部分。

4.1 确定专家人选

模糊、灰色、物元空间决策系统的依据是 FHW 咨询表。FHW 确定专家人选的方法是，把对专家的评价分成几个指标，分别设计不同的咨询表确定其得分，最后通过一套算法得出每个专家的权重，以权重的高低来决定专家人选的取舍。

4.1.1 专家指标的确定 专家人选的确定取决于专家质量的高低。专家质量以权威质量、熟悉度、谨慎度、智力激发度和知识广度 5 个指标来衡量。

1) 权威质量 (M) 专家的权威质量 (M) 包括行政职位、学衔、学术职称（包括学术团体的级别）、发表学术文章的数量和质量、从事有关工作的时间、参加学术会议或决策会议的次数和级别等。计算机根据专家填写的 M 咨询表，就可以按一定算法计算出各个专家的权威质量值。

2) 熟悉度 (S) 根据要决策问题所涉及的专业或学科，对每个专业或学科由专家选取若干测试题目，参加决策的专家在自己专业部分回答全部测试题其回答的得分与从事该专业的的时间通过加权和一定算法计算出专家的熟悉度。设 S_1, S_2, \dots, S_n 为与决策有关的 n 种专业，则专家的熟悉度可由下式计算：

$$S = \alpha_1 \sum_{i=1}^n f(S_i) \oplus \alpha_2 T. \quad (8)$$

其中 α_1, α_2 为加权系数， $f(S_i)$ 为专家对第 i 个专业测试的得分； T 为从事时间，一般来说从事专业时间长，其熟悉度也会相应增加； \oplus 为广义算子，是有界和，指和最大不超过 1 的加法，相加后超过 1 就按 1 计算。

3) 谨慎度 (G) 根据决策要求，设若干问题（可与决策有关也可无关），对每个问题设计若干方案，这些方案隐含着各种类型，如盲目冒险型、较盲目冒险型、较合理冒险型、合理型、较合理保守型及不合理保守型等等。这些方案归属类型的确定是根据经验和专家的意见（或 Fuzzy 数峰值）来确定。

当定出所需要各种方案类型后，再对每种方案分配得分值，也就是说，在某问题中各方案选择都有得分。专家通过对各个问题的方案选择，其得分的均值或与专家年龄值通过一定规则计算，便为该专家的谨慎度。

设 G_1, G_2, \dots, G_n 为 n 道问题； f_{ij} 为第 i 题的第 j 种方案，专家选择其一。一般来讲，谨慎度随年龄的升高逐渐提高。可用下式计算专家谨慎度

$$G = b_1 G' \oplus b_2 A, \quad (9)$$

其中 b_1, b_2 为加权系数； G' 为各问题得分均值或和， A 为专家年龄。

4) 智力激发度 (W^*) 智力激发度是对专家智商和想象力的评价，也可以说，是对思维能力的评价。因而，确定智力激发度比较困难，目前只能粗略的加以评定。 W^* 由年龄、知识广度、环境及智力和联想测试得分决定。

设 I_1, I_2, \dots, I_n 为 n 道智力测试题； P_{ij} 为第 i 道智力测试题的第 j 种选择答案； J_1, J_2, \dots, J_m 为 m 道联想测试题； J_{mi} 为专家对第 m 个联想题提出的联想方案，以此进行测试。专家的智力激发度根据智力测试得分和 (I)、按一定规则给专家对各联想题的回答判分的总得分 (J)、专家工作

环境的得分 (C)、年龄 (A) 通过加权按一定算法求出。另外，还可对专家近期新成绩 (如发明、学术论文) 给分 (K)，用以计算

$$W^* = \alpha_1 I \oplus \alpha_2 J \oplus \alpha_3 C \oplus \alpha_4 A \oplus \alpha_5 K. \tag{10}$$

其中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 为加权系数。

5) 知识广度 (E) 在对专家熟悉度的测试过程中，除该专家本身专业外，对其他各专业的得分的均值 (或采取其他算法计算得分) 为该专家的知识广度。但这里的知识广度是对某个决策问题而言。

应该指出，还有一个指标——意见偏离度 δ ，它表示某专家和集体意见的差距，但这个指标不用咨询，只要输入有关数据，即可由 FHW 程序自动生成。

4.1.2 专家权重的确定 当确定了专家指标后，根据决策问题的属性等对专家质量的要求，给出专家的各项指标加上适当加权系数 ($K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$)，通过以下算法即可计算出每个专家的决策权重 $W_i = f(\delta_i, M_i, S_i, E_i, G_i, W_i^*)$ ，若采用线性组合则

$$W_i = K_1 \delta_i \oplus K_2 M_i \oplus K_3 S_i \oplus K_4 E_i \oplus K_5 G_i \oplus K_6 W_i^*. \tag{11}$$

其中 W_i 表示第 i 个专家的权重。此外还有高次组合、指数组合^[5]等确定专家权重方案。

专家的权重还可以通过 WAS 权重分析系统^[6]来得出。WAS 系统是基于模糊数学、集值统计而建立的一套权重分析系统，他利用专家打分的方法来确定各个指标的权重。把上面得到的权威质量、熟悉度、谨慎度、智力激发度、知识广度的数据输入 WAS 系统，便可得到相应专家的权重。

4.1.3 决策专家的选取 当计算出所有专家权重后，便可得到专家权重分布曲线或分布函数 $F(W)$ ， $F(W)$ 表示具有 W 权重值的专家量。然后，根据实际需要 (问题的复杂程度和决策速度要求)，确定参加决策的人数的 W 临界值。

4.2 咨询专家

由选出的专家填写专门设计的 FHW 咨询表，为下一步的计算提供数据。

4.2.1 FHW 咨询表的设计 FHW 咨询表的设计以模糊灰色物元空间理论模型的数学表达式为基础。针对每个指标，专家需要对其总体评价、灰色优度、灰色劣度及其相关属性进行打分。

根据 FHW 咨询表的要求，对专家需要进行两次咨询，A 轮在讨论会前，以便使专家不受“马太效应”影响，充分发挥自己的意见；B 轮在讨论会后，讨论按 BS、K.J 方法进行，可以激发联想思维。A、B 两次咨询都不填写姓名，但每个专家都有一个代号。

由于两次咨询，每个数据都有 2 个数值，设 A 轮某个数为 μ ，B 轮为 μ' 。

$$\begin{aligned} \mu \wedge \mu' &\text{表示 } \min(\mu, \mu'), \\ \mu \vee \mu' &\text{表示 } \max(\mu, \mu'), \end{aligned} \tag{12}$$

则 $[\mu \wedge \mu', \mu \vee \mu']$ 组成一个区间，便可采用区间分析或模糊灰色区间数等运算法则进行运算。

4.2.2 评价指标权重的确定 FHW 决策支持系统每次决策都是针对一个指标体系。在一个指标体系中，每个指标的重要程度是不同的，也就是说，指标有其权重。指标的权重可以通过 WAS 权重分析系统来得出。

5 计算机程序处理

对专家的咨询结果进行分析，得出选择与决策所需要的依据。这些决策依据主要有白色优劣比、灰色优劣比、总灰度、总评价、远近效益比等。FHW 咨询表中的数据是一系列模糊、灰色物元：

$$\begin{aligned} &((\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n), ((p_1, a_1), \\ &(p_2, a_2), \dots, (p_n, a_n)), ((q_1, b_1), \\ &(q_2, b_2), \dots, (q_n, b_n))). \end{aligned} \tag{13}$$

对每个 $\mu_i, p_i, a_i, q_i, b_i$ 乘上填表专家的权重，并按专家权重加权平均方法处理，得到归纳结果，即用大写字母表示的物元：

$$\begin{aligned} &((M_1, M_2, \dots, M_n), ((P_1, A_1), \\ &(P_2, A_2), \dots, (P_n, A_n)), ((Q_1, B_1), \\ &(Q_2, B_2), \dots, (Q_n, B_n))), \end{aligned} \tag{14}$$

它表示专家意见的多级综合。

5.1 区间数处理

由于 FHW 咨询表有 A、B 两轮，并要求两轮数据尽可能不同。因此，每个项目都有 2 个数据，这 2 个数便组成一个闭区间。FHW 程序在运算中采用区间分析的方法，把这个闭区间作为一个灰色区间数来处理，但在最后排序时，区间数是无法比较大小的，所以必须把最后结果投影到一个点，这可以采用以下五种方法之一来实现。

1) 乐观原则 将区间数投影到最小值，即

$$[\mu \wedge \mu', \mu \vee \mu'] \rightarrow \mu \wedge \mu'. \tag{15}$$

2) 悲观原则 将区间数投影到最大值, 即

$$[\mu \wedge \mu', \mu \vee \mu'] \rightarrow \mu \vee \mu'. \quad (16)$$

3) 平均值准则 将区间数投影到中间值, 即区间两个端点的平均值,

$$[\mu \wedge \mu', \mu \vee \mu'] \rightarrow \frac{1}{2}(\mu + \mu'). \quad (17)$$

4) 灰色区间数法则 将各区间数作为灰色区间数来处理。

5) 模糊数法则 将各区间数作为模糊区间数来处理。

5.2 决策依据的生成

选用一种处理方式, 计算机将按下面的算法产生所需的决策依据。

5.2.1 白色优劣比和灰色优劣比 对灰色优度各项加权, 权重可按区间统计法给出

$$x_1, x_2, \dots, x_m, \quad \text{且要求 } \sum_{i=1}^m x_i = 1. \quad (18)$$

对灰色劣度各项加权, 权重按区间统计法给出

$$y_1, y_2, \dots, y_n, \quad \text{且 } \sum_{j=1}^n y_j = 1. \quad (19)$$

定义白色优劣比为

$$C = \sum_{i=1}^m x_i P_i / \sum_{j=1}^n y_j Q_j, \quad (C \geq 1). \quad (20)$$

C 的意义是一项工程方案或一项成果的明显效益和缺点之比必须大于 $C > 1$ 才有实际用处, 否则不予考虑。

定义灰色优劣比为

$$D = \sum_{i=1}^m x_i A_i / \sum_{j=1}^n x_j B_j, \quad (D \geq 1). \quad (21)$$

D 的意义是一项工程或一项成果的潜在效益和潜在缺点之比一般也要求大于 $D > 1$ 。

5.2.2 远近效益 首先引入政策系数 η , 和定义于 η 的远近效益 E_η , E_η 可根据需要给出, 如

$$E_\eta = \eta C / D \text{ 或 } E_\eta = \eta C + D. \quad (22)$$

当 $\eta > 1$ 时, 着重近期 (白色) 效益;

当 $\eta = 1$ 时, 近期效益与远期效益等同对待;

当 $\eta < 1$ 时, 着重于长远 (灰色) 效益。

5.2.3 总灰度

灰色优度

$$N_{\text{优}} = 1 - \left[0.5 + \frac{1}{2}(P^* - A^*) \right]. \quad (23)$$

其中:

$$P^* = \frac{P}{P + A}, \quad (24)$$

$$A^* = \frac{A}{P + A}, \quad (25)$$

$$P = \sum_{i=1}^m x_i p_i, \quad (26)$$

$$A = \sum_{i=1}^m x_i A_i. \quad (27)$$

灰色劣度

$$N_{\text{劣}} = 1 - \left[0.5 + \frac{1}{2}(Q^* - B^*) \right]. \quad (28)$$

其中:

$$Q^* = \frac{Q}{Q + B}, \quad (29)$$

$$B^* = \frac{B}{Q + B}, \quad (30)$$

$$Q = \sum_{j=1}^n y_j Q_j, \quad (31)$$

$$B = \sum_{j=1}^n y_j B_j. \quad (32)$$

总灰度按下式计算:

$$N = xN_{\text{优}} \oplus yN_{\text{劣}}, \quad x + y = 1, \quad (33)$$

其中 x, y 也是一种依赖政策而调整的系数。

5.2.4 总评价

$$M = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (34)$$

表示对此方案 (成果) 的总得分。

6 决策

对五个指标的综合处理有保守型决策和非保守型决策两种决策方法。

6.1 保守型决策

这类决策以总评价 $M = (M_1, M_2, \dots)$ 为决策目标, 可分为若干段处理, 并根据需要调整步长, 例如百分制中 10 分为一档。再以总灰度 N 、白色优劣比 C 、灰色优劣比 D 、依赖于 η 的远近效益比 E_η 为约束条件。应该声明这种决策依赖于 M 分段的步长, 步长越小越保守。用 ϵ 表示步长, 当 $\epsilon = 0$ 时, N, C, D, E_η 均不起作用, 此时 FHW 退化为模糊综合评判方法。这种决策方式适用于高校评价科技成果、分房子、调工资等。它基本上是无记名投票的科学化发展。总评价 M 起决定性作用。对于 N, C, D, E_η 等按多关键字排序后起一个调整、升降档次的作用。

6.2 非保守型决策

以总评价 M 和总灰度 N 为约束条件, 预先给定一个限度 M_0 和 N_0 , 并要求

$$M \geq M_0, \quad N \leq N_0.$$

然后求 C, D, E_η 线性组合的极大值。这种方法适用于工程方案的评价、方案选优、奖金发放和具

有创新思想的决策问题等等。

如果决策结果表明方案满足要求, 则可通过实行; 如果决策结果表明方案不能满足要求, 则重复第一个步骤, 直到拿出满意的解决方案。

7 应用

FHW 的应用主要有以下几个方面:

1) 用于各级评奖工作, 如国家科技进步奖、软科学奖审评, 铁道部科技进步奖审评, 四川南充地区 1988 年度科技进步奖软科学奖审评等, 各省市也都采用此方法。

2) 国民经济宏观决策, 如长江三峡大坝高度的决策, 天津市科委“技术引进—消化—创新评价”课题, 云南省科学学研究所的“五华高新技术开发区八五规划”和“云南省七五星火计划项目及七五科研计划项目执行完成情况评价”, 黑龙江省农垦科学院完成机械部课题“农机维修体制改革与专业化研究”, 农业部西北林业调查规划设计院“林产品加工业投资方向专家决策系统 (FHW 系统)”, 中国管理科学院能源经济研究所“石油工业 FHW 决策系统”, 中国社会调查所投资环境调查部“东莞市引进外资投资分析”等。

3) 医疗诊断与决策, 如白求恩国际和平医院“医疗科研选题诊断等决策”, 空军医学专科学校“航空卫生工作评估系统”, 兰州军区总医院“诊断、会诊与管理决策系统”等。

4) 其他, 如总参某部军代处决策应用

除在若干重大工程中应用外, FHW 方法也在军事决策领域得到了广泛的应用。总参某学院已将其编入教材并在 MIS 中应用。

实践证明, 不同的问题, 如属于软科学、预测、决策、评估、论证的范畴, 只要涉及宏观、复杂大系统, 应用 FHW 系统会使难以定量而无头绪的问题迎刃而解。应用 FHW 方法进行宏观决策的课题, 不少得到了国家级、省市级奖励。

8 FHW 进展与展望

FHW 自创立至今已有 10 多年的时间, 随着 FHW 应用的不断推广, 它本身也得到了长足的发展, 一方面体现在与现有各种理论的综合、交叉, 另一方面则体现在应用与形式的推广。

8.1 统一集^[7]

统一集论是由张江等人提出的一套综合了经典

集合、模糊集合、可拓集合、Vague 集合、粗糙集合、集对分析、FHW (模糊灰色物元)、FEEC (模糊可拓经济控制) 等多种理论的数学模型, 可用于模式识别、聚类分析、逻辑推理、机器学习、智能决策等多种人工智能领域。FHW 可以以统一集的形式描述出来。

一个统一集可以表示为

$$S = (A, B, F, J). \quad (35)$$

其中 A, B 是 2 个非空的经典集合, 分别构成统一集 S 的论域和描述域, F 是 A 到 B 的映射, A 中的任意 1 个元素通过 F 的作用都可以映射到 B 中的 1 个元素上。 J 是对整个问题构成约束, 它是 1 个界壳^[8], 可以表示成集合、谓词等形式。为了讨论问题的方便, J 也可以不看成 1 个独立的元素而放到 F 中, 构成对 F 的约束。

统一集定义了两种运算, 点乘“ \cdot ”和叉乘“ \otimes ”。

1) 点乘“ \cdot ”对 $\forall S_1 = (A_1, B_1, F_1), S_2 = (A_2, B_2, F_2)$, 如果 $B_1 = A_2 = B$, 则

$$S_1 \cdot S_2 = (A_1, B_2, F_1 \circ F_2), \quad (36)$$

$F_1 \circ F_2$ 表示映射的合成。

2) 叉乘“ \otimes ”对 $\forall S_1 = (A_1, B_1, F_1), S_2 = (A_2, B_2, F_2)$, 如果 $A_1 = A_2 = A$, 则

$$S_1 \otimes S_2 = (A, B_1 \times B_2, (F_1, F_2)), \quad (37)$$

$B_1 \times B_2$ 表示 2 个集合做直积。

模糊灰色物元空间可以写成统一集的形式:

$$S_{\text{FHW}} = (U, [0, 1]^5, (\mu, p, a, q, b), J). \quad (38)$$

其中 $A = U$ 是论域包含了所有的待评价的方案, F 是一个五元组, 其中任何一个元素都是 U 上的函数, $B = [0, 1]^5$ 是 1 个 5 维的单位超立方体, (μ, p, a, q, b) 分别表示 U 中元素的总体评价、当前的优度、潜在的优度、当前的劣度、潜在的劣度 (这些参数既反映了评价方案的当前的优劣度又反映了潜在的、未来的优劣, 因而它对方案的评价更加科学); 决策问题受到的约束为 J 。值得注意的是上述隶属度的获取仍是上面讨论的综合专家打分的结果。

有了统一集的形式, 就可以用一种全新的视角来审视 FHW 了。由统一集来分析 FHW, 可以把每个专家对所有待评项目的评价 (体现为咨询表的形式) 看成是一个统一集。设有 m 个专家参与决策, 这就构成了 m 个统一集, S_1, S_2, \dots, S_m 。最终的评判结果构成一个目标统一集 S_{aim} 。在统一

集理论中可以证明, S_{aim} 可以由 S_1, S_2, \dots, S_n 经过有限次点乘或叉乘后得到。这样, FHW 的决策过程就可以通过统一集的运算来实现, 证明略。

8.2 Vague 集^[9]的引入

Vague 集理论是由 Gau 和 Buehrer 于 1993 年提出的一个新的处理模糊信息的模糊理论。Vague 集与 Fuzzy 集一样, 给每个对象分配一个隶属度, 不同的是该隶属度是 $[0, 1]$ 的一个子区间, 这个子区间即给出了支持 $x \in X$ 的隶属度, 也给出了反对 $x \in X$ 的隶属度^[10]。例如, 令 $x = [t_x, 1 - y_x]$ 是一个 Vague 值, 它可以分为三部分: 真隶属值部分 (t_x), 它表示支持 $x \in X$ 的证据的必要程度; 假隶属值部分 (y_x), 它表示反对 $x \in X$ 的证据的必要程度; 不知道部分 ($1 - t_x - y_x$), 它表示不确定性的程度。

FHW 理论其实已经包含了真假隶属度的思想, 因此将 Vague 理论用于 FHW 将能有效的推动 FHW 的发展。在 FHW 的物元模型中, 事物 T 是由模糊向量 $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ 来描述的。为了更真实的体现 T 的全方面的信息, 对 μ_i 做如下代换:

$$\mu_i \rightarrow [t_i, 1 - f_i], \quad (39)$$

使模糊向量中的每个模糊数扩展成 1 个 Vague 值。这样, 使决策咨询表更真实的反映了专家对各个项目的看法, 既有专家的正面看法, 也包含了专家的负面看法。Vague 集有自己的一套运算规则, 它对 FHW 的算法有较大的影响 (略)。

8.3 Rough Set^[11]的引入

对于任意一个方案 M_i , FHW 咨询表综合各个专家的意见, 为他们在不同的指标上进行评分, 并最终得到了 5 个评价指标, 如果把这些每个指标的初始评分与最后的评价放到一起, 可以做成一个 CD 决策表^[12], 如表 1 所示。

表 1 FHW 系统的 CD 决策表

Table 1 CD decision table based FHW system

项目	μ_1	...	a_i	...	b	...	M	N	C	D	E_η
1											
2											
⋮											

表 1 中, M, N, C, D, E_η 是总评价、总灰度、白色优劣比、灰色优劣比和远近效益, 前面的 (μ_i, a_i, b_i, \dots) 是对方案各指标的初始评分。

这样, 每一个列都对方案论域进行了一种划分, 也就是定义了一个不可分辨关系。那么把式 (7) 的各项看成条件属性, 后面的 (M, N, C, D, E_η) 看成决策属性, 就构成了一个 CD 决策表, 利用粗集中的算法可以将表 1 进行化简, 从而去掉一些不必要的条件属性, 也就是简化方案的指标体系。另外, 由于每一个横行可看成一种决策, 因此, 化简了的 CD 表可以认为是一套推理规则。值得注意的是, 表 1 中的各项的量值都是一个区间数, 对这种区间数提供了五种映射算法。如果把区间数映射成模糊数, 就可以模糊数映射到模糊评语集合上, 它是传统 Rough 集合能够处理的。如果不对区间值进行映射处理, 则可以利用扩展了的 Rough 集学习方法^[17]进行处理。

8.4 集对分析^[13]与 FHW

集对分析 (set pair analysis, SPA) 是我国著名学者赵克勤提出的一种新的系统分析理论。彭飞、胡光正研究了 SPA 与 FHW 的关系, 并把 SPA 引入到 FHW 专家决策支持系统的应用中, 取得了一定的成果。关于 SPA 与 FHW 的详细分析请参考文献[14]。

8.5 FHW 专家评判的改进

在用 FHW 进行决策的时候, 都要先让专家填写咨询表, 而咨询表的条目繁多, 而且对专家也有很严格的要求。近年来人工智能技术得到了突飞猛进的发展, 一方面专家系统已经达到人类领域专家的水平, 另一方面神经网络、进化计算的产生又为在机器上实现人造的自适应系统创造了可能性, 如果能够用专家系统来代替人类专家对方案进行打分, 并用计算智能的方法学习一些参数, 并进行自适应的调节则会明显改进 FHW 的前处理过程。这样, 可以利用近年来热门的 Multi-agent 技术^[15]对 FHW 前处理过程改进, 如图 2 所示。

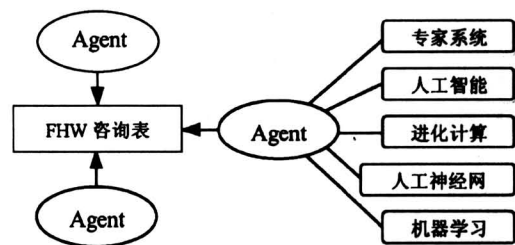


图 2 Multi-agent 技术对 FHW 的改进

Fig.2 Advanced FHW system based on multi-agent

8.6 FHW 算法的改进

FHW 系统主要为人们提供决策支持，决策的结果有可能达到人们满意的结果，也可能不能达到。当达到满意的结果时，应该让系统利用机器学习的方法学习决策规则，当不能达到满意的结果时，可以利用物元变换，对各个方案进行可拓分析。这样，FHW 系统从静态的决策支持系统变成了一个自适应的可变化的动态决策支持系统。

8.7 智能模糊灰色物元空间决策支持系统

将上面的各种改进进行实现，创造一套智能化、全自动化的决策支持系统。主要利用 Multi-agent 技术、AI 技术、数据仓库技术、知识挖掘技术^[16]等等，综合这些技术的新的 FHW 系统的结构如图 3 所示。

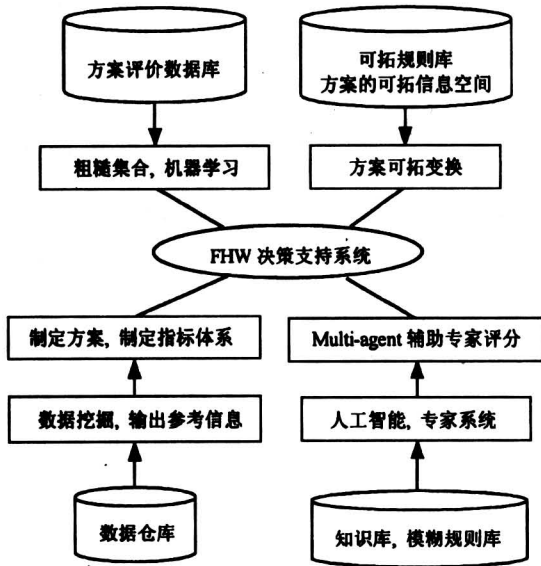


图 3 扩展智能模糊灰色物元决策支持系统结构示意图

Fig.3 Intelligent fuzzy gray matter-element space decision supporting system structure

8.8 FHW 专家系统网站系统的建立

利用 FHW 进行决策时，专家人选的确定、专家对各指标的评判等都需要填写大量的表格，表格填好以后还要有专人将这些数据填入计算机。对信息处理的核心算法是由计算机来处理的，而那些耗时费力的数据统计工作都要通过手工来完成，一方面工作效率不高，一方面由人工来处理，难免会出现错误。考虑到这些情况，我们尝试建立专门的 FHW 网站用于决策数据的采集以及决策结果的公布。这样，专家们足不出户便可实现对决策的支

持。FHW 网站的结构可以设计成图 4 所示的结构。

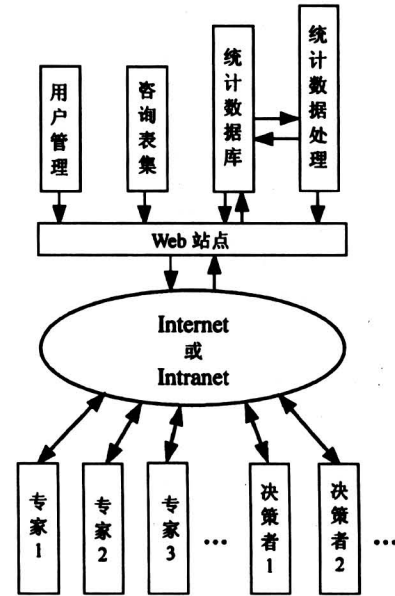


图 4 FHW 网站系统结构图

Fig.4 FHW web system structure

1) 用户管理 FHW 的用户可以分为两类，即专家和决策者。专家对需要决策的工程或项目通过填写决策表发表自己的意见，决策者通过专家的意见决策某项决策是否要进行。

2) 咨询表的设计 FHW 咨询表有两类。a. 用于决定专家人选的咨询表，以前述的对专家质量分析为基础，分别设计咨询表格确定专家的权威质量、熟悉度、谨慎度、智力激发度和知识广度。这类表格具有普遍性，一般不会有有什么变化。b. 专家决策时填写的咨询表。这类咨询表要考虑不同项目的不同指标体系，针对不同的决策应该分别设计，应该具体问题具体分析，参见 4.2.1 节。

咨询表设计出来后，把它们设计成相应的网页供专家通过网络浏览器进行浏览和填写。

3) 统计数据库 统计数据库用于统计数据和程序处理结果的保存。

4) 统计数据的处理 统计数据处理模块是 FHW 系统的核心部分。它负责把各个专家填写的表格数据通过相应算法计算出相应的结果以供决策者作为决策参考。提供给决策者作参考的有白色优劣比、灰色优劣比、远近效益、总灰度和总评价五项，其相应的算法见第 5 节。

以上四部分融合在一个 web 站点中综合管理。

决策专家通过互联网或局域网访问 FHW 站点, 每个专家在服务器上会有一个账号, 没有账号的专家或游客将无权进行决策。Web 站点将咨询表以网页的形式提供给专家浏览, 专家在网页上填写相应的表格提交到服务器。服务器把专家填写的数据保存在数据库。当专家书据统计完毕, 决策者或专门的网络管理员运行统计数据处理程序对结果进行分析得到决策参考数据, 并生成相应的网页以一定形式表现出来。

决策者也有自己的账号, 经过认证后他们有权对决策结果进行浏览并指导决策。

9 结语

模糊灰色物元空间系统 (FHW) 已较广泛应用于诸多领域的预测、决策、论证、评估的问题中, 并获得了良好的效果。近年来又有新进展, 日趋成熟。与传统的方法相比较有其特点:

1) FHW 法融合了 Delphi 法、BS (全称是“头脑风暴法”, 即开畅谈会, 各抒己见, 互相启发, 不作结论, 以利创新) 和 K. J 方法的优点而克服了他们的缺点, 并能定量处理联想思维, 且只需两次咨询即可处理, 节约时间。

2) FHW 法是建立在多级专家决策系统的基础上的, 可以全面的吸收从中央到地方的各级领导、专家的意见, 并对这些意见进行加权处理, 从而能够发挥专家的正确意见, 而舍弃那些不全面的意见。

3) FHW 咨询表对专家的咨询是一个模糊、灰色物元, 它既考虑了事物的本身, 又考虑了与它有联系的质和量, 并采用灰色系统处理方法, 对于目前还认识不清的事务的研究提供了数量化概念化计算步骤, 特别适合于宏观、大系统的预测、决策和评价问题。

4) FHW 法定义了灰色优度、灰色劣度、白色优劣比、灰色优劣比、政策系数等, 既反映了事物的全面性质, 又有依赖政策系数的灵活性。

随着科学技术的发展和社会需求, FHW 自身也需深入研究与创新。

参考文献

- [1] Zhang Wanjun, Wang Zhenyu, Zhao Yi, et al. On fuzzy extension decision system of the large-scale system [A]. WCICA2000 Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Heifei, china, July, 2000
- [2] 蔡文. 物元模型及其应用 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994
- [3] 邓聚龙. 灰色控制系统 [M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1987
- [4] 贺仲雄. 模糊数学及其应用 [M]. 天津: 天津出版社, 1983
- [5] 贺仲雄, 赵大勇, 李建文, 等. 模糊数学及其派生决策方法 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992
- [6] 阎皓, 贺仲雄. 权重分析系统 [J]. 系统工程与电子技术, 1992, (4): 41~45
- [7] 张江, 林华, 贺仲雄. 统一集论与人工智能 [J]. 中国工程科学, 2002, 4 (3): 40~47
- [8] 曹鸿兴. 系统周界的一般理论——界壳论 [M]. 北京: 气象出版社, 1997
- [9] Gau Wenlung, Danied J B. Vague sets [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23 (2): 610~614
- [10] 李凡, 徐章艳, 饶勇. Vague 集 [J]. 计算机科学, 2000, 27 (9): 12~14
- [11] Pawlak Z. Rough set [J]. Intl J of Information and Computer Science, 1982, (11): 341~365
- [12] 曾黄麟. 粗集理论及其应用——关于数据推理的新方法 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996
- [13] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000
- [14] 彭飞, 胡光正. SPA 在模糊灰色物元空间决策支持系统中的应用 [J]. 系统工程与电子技术, 1998, (11): 103~107
- [15] 史忠植. 高级人工智能 [M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [16] 陆汝铃. 世纪之交的知识工程与知识科学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001
- [17] 马志峰, 邢汉承, 郑晓妹. 不完整 Vague 决策表中的近似集合学习方法 [J]. 计算机研究与进展, 2000, (9): 1050~1057

Fuzzy Gray Matter-element Space Theory and Practical Application and Development—The Policy Decision Supporting System in Macro Complex System

Xie Yanqing, Zhang Jiang, Guo Qiang, Lin Hua

(School of Electronics and Information Engineering, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] The fuzzy gray matter-element space theory (FHW), founded in 1980s by Professor He Zhongxiong, is a theoretical method which is about soft science decision supporting to solve the problems of making decision and forecasting in the large scale complex systems. Based on Delphi method, it combines the BS and K.J methods together and synthesizes several theories including fuzzy mathematics, gray system and matter-element analysis. The soft science decision supporting system on the basis of the FHW theory has achieved a lot in the practical application. For nearly 20 years, this kind of theoretical method has got its own long-term development and improvement by the integration of other subjects such as artificial intelligence, complex system and set theory. This paper briefly introduces the FHW theory system, practical application and development in the recent years.

[Key words] complex system; fuzzy gray matter-element space theory (FHW); soft science decision supporting system; practical application; prospect

(上接第 49 页)

- [2] 秦裕琨, 王春刚, 朱群益, 等. 水平浓淡与上下浓淡煤粉燃烧方式气固混合特性的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2000, 21 (6): 750~754
- [3] 朱 彤. 直流燃烧器结构及运行参数对炉内空气动力场影响的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,

1997

- [4] Li Zhengqi, Sun Rui, Chen Lizhe, et al. Effect of primary air flow types on particle distribution in the near swirl burner region [J]. Fuel, 2002, 81 (6): 829~835
- [5] 王福元. 670 t/h 褐煤锅炉空气动力场的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998

Study on Bias Coal Combustion Technologies with Air-surrounding-fuel

Qin Yukun, Li Zhengqi, Sun Rui, Chen Lizhe, Sun Shaozeng,
Zhu Qunyi, Li Ruiyang, Gao Jihui, Wu Shaohua

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[Abstract] This paper reviews and analyses the major findings of research during the last 15 years in Harbin Institute of Technology, on bias coal combustion technologies. Five problems in China's coal combustion in boilers of power plant are given. The theory and characteristics of air-surrounding-fuel flow of bias coal combustion technologies are introduced and analysed. Industrial experiments tested the theory of air-surrounding-fuel. To greatly decrease the NO_x emission, the paper points out the development of these technologies in the future.

[Key words] boiler; burner; bias combustion; NO_x