

# 基于模糊动态 AHP 的水资源优化调配研究

潘俊<sup>1</sup> 骆阳<sup>2</sup> 唐英杰<sup>3</sup> 李超<sup>3</sup>

- (1. 中国科学院沈阳应用生态研究所 辽宁 沈阳 110016 ;
- 2. 辽宁省省直工程项目管理办公室 辽宁 沈阳 110016 ;
- 3. 沈阳市城市水资源管理办公室 辽宁 沈阳 110005 )

摘要 针对常规的水资源优化调度模型存在的缺陷,首先应用模糊动态 AHP 求解随时间变化的效益系数,然后应用区间数线性规划的方法求解水资源优化调配方案,提高了管理模型的仿真性与预测的可靠性,将其应用于沈阳浑南新区水资源优化调配中,收到了较为满意的效果,从而为水资源管理提供了新的思路与方法。

关键词 模糊动态 AHP 区间数线性规划 水资源模糊优化调配模型

中图分类号 :0641.8 文献标识码 :A 文章编号 :1004-693X(2004)02-0015-04

水资源系统的优化调配是当代水文水资源学与系统工程学交叉研究的一个核心内容,但目前常规的水资源优化调度模型仍存在如下缺陷:首先,目标函数中的效益系数是不随时间发生变化的定值,这反映不出效益系数随时间变化的客观事实;其次,它是一种“刚性”管理模型,这就忽略了水资源系统所具有的模糊性与随机性。如果在建立模型时充分考虑到这些模糊因素并给以适当处理,将会大大提高管理模型的仿真性与预测的可靠性。针对上述缺陷,本文首先应用模糊动态 AHP 求解随时间变化的效益系数(即权重),然后应用区间数线性规划的方法求解水资源的合理调控方案,从而为水资源的管理提供了新的思路与方法。

## 1 模糊动态 AHP

### 1.1 模糊动态判断矩阵的构建

模糊动态判断矩阵的构建仍可采用 T. L. Satty 给出的 1-9 标度法<sup>[1]</sup>。一般的,设  $A(t) = (a_{ijt})_{n \times n \times t}$  是模糊判断矩阵,这里  $a_{ijt} = (l_{ijt}, m_{ijt}, u_{ijt})$ ,它满足:

$$l_{ijt} = 1/u_{jit}, m_{ijt} = 1/m_{jit}, u_{ijt} = 1/l_{jit} \quad (1)$$

### 1.2 判断矩阵权重向量的计算

模糊动态判断矩阵(本次研究只针对中心值)仍需要满足一致性条件,目前已经出现了多种一致性改进的方法,并已取得了一定的效果,但有些方法比较复杂,有些方法缺乏一定的理论依据<sup>[2~4]</sup>。据现有资料,文献[5]中的改进方法是迄今为止比较有效

的一种方法。从理论上讲,任意一个判断矩阵应用该方法都可以近似改造成一个一致性矩阵,但对于一个判断矩阵,若经过许多次微调才满足一致性条件,说明判断矩阵构造有误,必须重新构造判断矩阵,因为判断矩阵一致性改进的一个核心原则是只能微调而不是彻底改动专家给出的判断矩阵。

假如应用上述方法得到满足一致性的动态判断矩阵  $A(t) = (a_{ijt})_{n \times n \times t}$ ,则可以通过求解下列 LLSM 正规方程组来求取权重<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} n \lg l_{it} - \sum_{j \neq i}^n \lg u_{jt} = \sum_{j \neq i}^n \lg l_{ijt} & i = 1, 2, \dots, n \\ n \lg m_{it} - \sum_{j \neq i}^n \lg m_{jt} = \sum_{j \neq i}^n \lg m_{ijt} & i = 1, 2, \dots, n \\ n \lg u_{it} - \sum_{j \neq i}^n \lg l_{jt} = \sum_{j \neq i}^n \lg u_{ijt} & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

求解上述方程组,可以得到各时段的权重(具体推导过程见文献[1])为:

$$w_{ijt} = \left( \frac{l_{it}}{\sum_{j=1}^n u_{jt}}, \frac{m_{it}}{\sum_{j=1}^n m_{jt}}, \frac{u_{it}}{\sum_{j=1}^n l_{jt}} \right) \quad (3)$$

## 2 区间数线性规划

区间数线性规划作为一种柔性数学规划和模糊决策方法,已有很多学者进行过研究<sup>[6]</sup>,文献[6]给出了区间数线性规划的有效解的计算方法,其基本过程如下。

作者简介 潘俊(1962—),男,辽宁大连人,教授级高级工程师,博士,从事水资源管理等研究。

a. 对于如下形式的区间数线性规划( I ):  
 目标函数

$$\max F(X) = \sum_{i=1}^n [\underline{c}_i, \overline{c}_i] x_i \quad (4)$$

约束条件

$$\sum_{i=1}^n [\underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}] x_i \leq [\underline{b}_j, \overline{b}_j] \quad \begin{cases} j = 1, 2, \dots, m \text{ (I)} \\ x_i \geq 0 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

b. 给定目标函数和约束条件的优化水平  $\alpha, \lambda$ , 则可以转化为如下形式的线性规划问题( II ):

目标函数

$$\max F(X) = \sum_{i=1}^n [\underline{c}_i + \alpha(\overline{c}_i - \underline{c}_i)] x_i \quad (6)$$

约束条件

$$(1 - \lambda) \sum_{i=1}^n \underline{a}_{ij} x_i + \lambda \sum_{i=1}^n \overline{a}_{ij} x_i \leq \lambda \underline{b}_j + (1 - \lambda) \overline{b}_j \quad \begin{cases} j = 1, 2, \dots, m \text{ (II)} \\ x_i \geq 0 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

优化水平  $\alpha, \lambda$  取不同的值, 代表着决策者不同的态度。若取  $\alpha = 1, \lambda = 0$ , 则表示决策者对决策采取一种极端乐观的态度; 若取  $\alpha = 0, \lambda = 1$ , 则表示决策者对决策采取一种极端悲观的态度;  $\alpha, \lambda$  取其他值表示决策者的态度介于极端乐观与极端悲观之间。决策者可以根据实际情况通过选择不同的优化水平  $\alpha, \lambda$  来制定决策方案。

### 3 应用实例

鉴于模糊动态 AHP 和区间数线性规划的上述优点, 在本次研究中, 将其应用到沈阳浑南新区水资源系统的优化调配中, 收到了较为满意的效果。应用的具体过程如下。

研究区内的主要用水户归结为: 生活用水、工业用水、农业用水、生态环境用水, 主要水源类型有地下水、客水(即东水西调的水源)、回用污水。本次研究就是要确定上述 4 种用水户与 3 个水源之间的最佳组合关系。

根据沈阳市国民经济中长期发展规划及建设部公布的用水标准, 可以预测出沈阳市在不同时期的需水量(见表 1)。根据沈阳市现有水源地供水量、东水西调工程的计划安排以及污水处理规划, 可以得到不同时期的供水量(见表 2)。

表 1 沈阳市浑南新区需水量 万  $\text{m}^3/\text{a}$

| 年份   | 工 业      | 农 业      | 生 活      | 生态环境      | 合 计       |
|------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 2005 | 1 043.90 | 1 320.00 | 1 642.50 | 4 071.00  | 8 077.40  |
| 2010 | 1 941.80 | 660.00   | 2 452.80 | 6 609.00  | 11 663.60 |
| 2020 | 5 358.20 | 0.00     | 5 475.00 | 10 649.00 | 21 482.20 |

表 2 沈阳市浑南新区各种水源可供水量 万  $\text{m}^3/\text{a}$

| 年份   | 地下水      | 客水       | 污水回用     | 合计        |
|------|----------|----------|----------|-----------|
| 2005 | 5 475.00 | 0.00     | 1 611.84 | 7 086.84  |
| 2010 | 5 475.00 | 3 650.00 | 3 076.22 | 12 201.22 |
| 2020 | 5 475.00 | 7 300.00 | 8 666.56 | 21 441.56 |

#### 3.1 效益系数的确定

根据浑南新区供水与需水的实际情况, 构造出的工业、农业、生活、生态环境用水的模糊动态判断矩阵分别为(限于页面宽度, 本文只列出了中心值判断矩阵, 而没有列出判断矩阵每一个元素的左右扩展。左右扩展的确定方法为: 当判断元素的中心值大于 1 时, 左扩展为中心值减去 1, 右扩展为中心值加上 1; 当判断元素的中心值小于 1 时, 左扩展为中心值减去 1 后的倒数, 右扩展为中心值加上 1 后的倒数):

a. 工业用水模糊动态判断矩阵:

$$A_{\text{工业}}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 5 - 1.73\ln t & 9 \\ \frac{1}{5 - 1.73\ln t} & 1 & 5 + 1.44\ln t \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{5 + 1.44\ln t} & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

b. 农业用水模糊动态判断矩阵:

$$A_{\text{农业}}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 0.2 - 0.032\ln t \\ \frac{1}{3} & 1 & 0.2 - 0.032\ln t \\ \frac{1}{0.2 - 0.032\ln t} & \frac{1}{0.2 - 0.032\ln t} & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

c. 生活用水模糊动态判断矩阵:

$$A_{\text{生活}}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0.33 - 0.05\ln t & 9 \\ \frac{1}{0.33 - 0.05\ln t} & 1 & 7 + 0.72\ln t \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{7 + 0.72\ln t} & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

d. 生态环境用水模糊动态判断矩阵:

$$A_{\text{生态环境}}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 5 - 0.72\ln t & 0.33 - 0.7\ln t \\ \frac{1}{5 - 0.72\ln t} & 1 & 0.2 - 0.032\ln t \\ \frac{1}{0.33 - 0.7\ln t} & \frac{1}{0.2 - 0.032\ln t} & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

应用本文 1.2 中的方法进行求解, 即可得出 3 种供水水源相对于 4 种用水户的效益系数(即权重), 具体计算结果见表 3。

表 3 效益系数(权重) $c_{ij}$ 表

| 项 目  | 工 业         |             |             | 农 业         |             |             | 生 活         |             |             | 生态环境        |             |             |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|      | 2005 年      | 2010 年      | 2020 年      | 2005 年      | 2010 年      | 2020 年      | 2005 年      | 2010 年      | 2020 年      | 2005 年      | 2010 年      | 2020 年      |
| 地下水  | (0.65 0.85) | (0.48 0.70) | (0.09 0.29) | (0.07 0.27) | (0.04 0.22) | (0.02 0.18) | (0.17 0.39) | (0.13 0.31) | (0.10 0.28) | (0.16 0.36) | (0.10 0.28) | (0.08 0.22) |
| 客 水  | (0.09 0.29) | (0.35 0.52) | (0.65 0.85) | (0.04 0.20) | (0.03 0.17) | (0.02 0.12) | (0.55 0.75) | (0.62 0.80) | (0.66 0.84) | (0.02 0.18) | (0.03 0.13) | (0.02 0.12) |
| 污水回用 | (0.05 0.09) | (0.04 0.07) | (0.05 0.09) | (0.62 0.80) | (0.71 0.89) | (0.70 0.93) | (0.02 0.12) | (0.02 0.12) | (0.02 0.12) | (0.55 0.72) | (0.64 0.81) | (0.60 0.88) |

由表 3 可以看出 ,本文给出的权重是一个区间值 ,而不是一个确定的值 ,将它作为效益系数带入模糊调度模型 ,可为决策者提供较为广阔的决策空间。

3.2 水资源优化调配模型的建立

水资源优化调配模型的目标函数为总供水效益最大 ,约束有 :需水量约束 ,即供水量应大于等于需水量 ;供水量约束 ,即供水量应小于等于可开采量 ;现状供水量约束 ,即目前的不合理供水现状由于供水设施建设周期长、经济承受能力、用水习惯等因素不能马上改变 ,现状供水量应逐步改变 ,并最终达到最佳状态 ;非负约束 ,即各变量应该大于等于 0。具体的调度模型(Ⅲ)如下。

目标函数

$$\max F(X,C)=\sum_{i=1}^4\sum_{j=1}^3[\frac{c_{ij}}{c_{ij0}}+\alpha(\overline{c_{ij}}-\frac{c_{ij}}{c_{ij0}})]x_{ij} \tag{12}$$

需水量约束

$$\sum_{i=1}^4[1,1]x_{ij}=\underline{d_j}+(1-\lambda)\overline{d_j} \quad j=1,2,3 \tag{13}$$

供水量约束

$$\sum_{j=1}^3[1,1]x_{ij}\leq\lambda \underline{s_i}+(1-\lambda)\overline{s_i} \quad i=1,2,\dots,A \tag{14}$$

现状供水约束

$$\begin{cases} [1,1]x_{ij}\geq 0.5\times\left(\frac{c_{ij}}{c_{ij0}}\right)^{\eta} s_{i0} & \frac{c_{ij}}{c_{ij0}}>1 \\ [1,1]x_{ij}\leq 2\times\left(\frac{c_{ij}}{c_{ij0}}\right)^{\eta} s_{i0} & \frac{c_{ij}}{c_{ij0}}<1 \end{cases} \quad i=1,\dots,A; \quad j=1,\dots,3 \tag{15}$$

非负约束

$$[1,1]x_{ij}\geq 0 \quad i=1,2,\dots,A; \quad j=1,2,3 \tag{16}$$

在调度模型(Ⅲ)中  $[\frac{c_{ij}}{c_{ij0}},\overline{c_{ij}}]$  为效益系数  $[\underline{d_j},\overline{d_j}]$  为需水量  $[\underline{s_i},\overline{s_i}]$  为供水量 ; $c_{ij0}$  为管理初期的效益系数 ,限于资料 ,本次研究取为 2005 年  $[x_{ij0},\overline{x_{ij0}}]$  为 2005 年需水量 ; $\eta$  为现状供水调整系数 ,假如各方面条件成熟 ,可以以较快的速度达到最优配水方案 , $\eta$  取值大些 ,反之 ,取值小些 ,本次研究将  $\eta$  取两个值

1 和 2 ; $x_{ij0}$  与  $\overline{x_{ij0}}$  分别为 2005 年需水量的 0.9 与 1.1 倍 ; $\overline{d_j}$  与  $\underline{d_j}$  分别为未来预测需水量的 1.1 与 0.9 倍 ; $\overline{s_i}$  与  $\underline{s_i}$  分别为未来可供水量的 1.1 与 0.9 倍 ; $\overline{s_{i0}}$  与  $\underline{s_{i0}}$  分别为未来可供水量的 1.1 与 0.9 倍(即假设水资源系统的模糊性为 10%)。

求解模型(Ⅲ) ,即可求出在不同时间的水资源最优调度方案(见表 4)。

由表 4 可以看出 ,沈阳市浑南新区工业用水以本地地下水、客水相结合方案最佳 ,随着工业用水量的增加 ,客水将提供越来越多的工业用水 ;生活用水以本地地下水、客水联合供水为最佳方案 ,随着东水西调工程的完工 ,引水量的逐步扩大 ,客水将在生活用水量中占绝对的支配地位 ;农业用水以本地地下水和污水回用联合供水为最佳方案 ,随着社会环境保护意识的加强 ,技术手段的进步 ,污水处理能力的提高 ,污水回用将成为农业用水的主要水源 ;生态环境用水在 2010 年前后以本地地下水、客水和污水回用联合方案为最佳 ,随着时间的延长 ,污水回用量逐渐扩大 ,其在生态环境用水中将占越来越重要的地位 ,而客水将逐渐淡出生态环境用水领域。

4 结 语

- a. 当今世界是一个时时刻刻在变动着的动态系统 ,系统内部以及系统与外界环境之间存在着复杂的物质、能量与信息的交换 ,因此人们对各因素之间关系重要性的认识和判断也是随时间变化的 ,模糊动态 AHP 是解决此类问题的有效工具。
- b. 常规的水资源管理模型多是在硬性约束下进行的“刚性”管理 ,忽略了水资源系统内部及其与环境之间存在着的大量的模糊性与随机性 ,因而也就影响了优化模型的可靠性 ,而模糊优化调度模型可以有效地解决这个问题。另外 ,本文应用的区间数线性规划可以大大提高管理模型的灵活性与实用性 ,对定值效益系数的管理模型是一个很大的改进。
- c. 模型中的 3 个参数  $\alpha,\lambda,\eta$  非常方便决策者根据本地的实际情况灵活选择 ,是一种典型的交互式管理模型 ,从而可以为决策者提供适合当地实际情况的决策方案。
- d. 限于资料 ,在建立优化调度模型过程中 ,没有将水质要素加到模型中 ,这在一定程度上影响了

表 4 沈阳浑南新区水资源优化调配

万 m<sup>3</sup>

| 项目                                                |       | 工业用水     |          |          | 农业用水     |        |        | 生活用水     |          |          | 生态环境     |          |           |
|---------------------------------------------------|-------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
|                                                   |       | 2005 年   | 2010 年   | 2020 年   | 2005 年   | 2010 年 | 2020 年 | 2005 年   | 2010 年   | 2020 年   | 2005 年   | 2010 年   | 2020 年    |
| $\alpha = 0$<br>$\lambda = 1$<br>$\gamma = 1$     | 本地地下水 | 939.51   | 1 147.62 | 1 449.88 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 1 478.25 | 0.00     | 1 000.00 | 3 042.00 | 2 630.77 | 1 784.20  |
|                                                   | 客水    | 0.00     | 600.00   | 3 372.50 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 0.00     | 2 206.8  | 3 927.50 | 0.00     | 1 142.74 | 0.00      |
|                                                   | 污水回用  | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 1 188.00 | 594.00 | 0.00   | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 261.90   | 2 174.59 | 7 799.90  |
|                                                   | 合计    | 939.51   | 1 747.62 | 4 822.38 | 1 188.00 | 594.00 | 0.00   | 1 478.25 | 2 206.8  | 4 927.50 | 3 303.90 | 5 948.10 | 9 584.10  |
| $\alpha = 0.5$<br>$\lambda = 0.5$<br>$\gamma = 1$ | 本地地下水 | 1 043.90 | 1 291.80 | 3 533.20 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 1 642.50 | 0.00     | 1 100.00 | 3 780.00 | 2 923.08 | 1 982.44  |
|                                                   | 客水    | 0.00     | 650.00   | 1 825.00 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 0.00     | 2 452.00 | 4 375.00 | 0.00     | 1 269.70 | 0.00      |
|                                                   | 污水回用  | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 1 320.00 | 660.00 | 0.00   | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 291.00   | 2 416.22 | 8 666.56  |
|                                                   | 合计    | 1 043.90 | 1 941.80 | 5 358.20 | 1 320.00 | 660.00 | 0.00   | 1 642.50 | 2 452.00 | 5 475.00 | 4 071.00 | 6 609.00 | 10 649.00 |
| $\alpha = 1$<br>$\lambda = 0$<br>$\gamma = 1$     | 本地地下水 | 1 148.28 | 1 435.98 | 2 433.20 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 1 806.75 | 413.87   | 1 200.00 | 4 158.00 | 3 215.39 | 2 180.68  |
|                                                   | 客水    | 0.00     | 700.00   | 2 925.00 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 0.00     | 2 283.33 | 4 822.50 | 0.00     | 1 396.67 | 0.00      |
|                                                   | 污水回用  | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 1 452.00 | 726.00 | 0.00   | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 320.10   | 2 657.84 | 9 533.22  |
|                                                   | 合计    | 1 148.28 | 2 135.98 | 5 358.20 | 1 452.00 | 726.00 | 0.00   | 1 806.75 | 2 697.20 | 6 022.50 | 4 478.10 | 7 269.90 | 11 713.90 |
| $\alpha = 0$<br>$\lambda = 1$<br>$\gamma = 2$     | 本地地下水 | 939.51   | 827.62   | 3 416.52 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 1 478.25 | 597.82   | 0.00     | 3 042.00 | 1 922.49 | 1 784.20  |
|                                                   | 客水    | 0.00     | 920.00   | 2 477.50 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 0.00     | 1 608.98 | 4 927.50 | 0.00     | 1 851.02 | 0.00      |
|                                                   | 污水回用  | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 1 188.00 | 594.00 | 0.00   | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 261.90   | 2 174.59 | 7 799.90  |
|                                                   | 合计    | 939.51   | 1 747.62 | 5 894.02 | 1 188.00 | 594.00 | 0.00   | 1 478.25 | 2 206.8  | 4 927.50 | 3 303.90 | 5 948.10 | 9 584.10  |
| $\alpha = 0.5$<br>$\lambda = 0.5$<br>$\gamma = 2$ | 本地地下水 | 1 043.90 | 919.58   | 3 533.20 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 1 642.50 | 1 150.91 | 0.00     | 3 780.00 | 2 136.10 | 1 982.44  |
|                                                   | 客水    | 0.00     | 1 022.22 | 1 825.00 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 0.00     | 1 301.09 | 5 475.00 | 0.00     | 2 056.69 | 0.00      |
|                                                   | 污水回用  | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 1 320.00 | 660.00 | 0.00   | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 291.00   | 2 416.22 | 8 666.56  |
|                                                   | 合计    | 1 043.90 | 1 941.80 | 5 358.20 | 1 320.00 | 660.00 | 0.00   | 1 642.50 | 2 452.00 | 5 475.00 | 4 071.00 | 6 609.01 | 10 649.00 |
| $\alpha = 1$<br>$\lambda = 0$<br>$\gamma = 2$     | 本地地下水 | 1 148.28 | 1 011.54 | 4 616.52 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 1 806.75 | 1 703.99 | 0.00     | 4 158.00 | 2 349.71 | 2 180.68  |
|                                                   | 客水    | 0.00     | 1 124.44 | 1 277.50 | 0.00     | 0.00   | 0.00   | 0.00     | 993.21   | 6 022.50 | 0.00     | 2 262.35 | 0.00      |
|                                                   | 污水回用  | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 1 452.00 | 726.00 | 0.00   | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 320.10   | 2 657.84 | 9 533.22  |
|                                                   | 合计    | 1 148.28 | 2 135.98 | 5 894.02 | 1 452.00 | 726.00 | 0.00   | 1 806.75 | 2 697.20 | 6 022.50 | 4 478.10 | 7 269.90 | 11 713.90 |

模型结果的实用性。但从模型结果看 ,沈阳市浑南新区的这种水资源分配方案很适合沈阳市浑南新区未来的供水结构 ,得到当地水利部门的肯定。

e. 必须指出的是 ,在东水西调工程完工后 ,研究区的供水结构将发生转变。新的水源结构可以提高城市的供水量和供水保证率 ,为城市的可持续发展创造良好的水源保障 ,但其前提是必须做到统一规划、合理分配、加强管理 ,否则就会导致供水市场的混乱和无序竞争 ,其后果很可能是重现其他建设远距离引水工程的城市曾经出现过的地下水继续超采、外引水售不出去、工程投资收不回来 ,运转不能维持的局面。

参考文献：

[ 1 ] 许树柏 .实用决策方法——层次分析法原理[ M ].天津：

天津大学出版社 ,1988.133 ~ 134.

[ 2 ] 陈宝谦 ,李淑冰 .正反矩阵的一个特征值问题[ J ].高校应用数学学报 ,1991 1( 1 ) 57 ~ 65.

[ 3 ] 刘万里 ,雷治军 .关于 AHP 中判断矩阵校正方法的研究[ J ].系统工程理论与实践 ,1997 17( 6 ) 30 ~ 39.

[ 4 ] Ma W. A practical approach to modifying pairwise comparison matrices and two criteria of modificatory effectiveness[ J ]. Journal of Systems Science & System Engineering ,1993 2( 4 ) 334 ~ 338.

[ 5 ] 李梅霞 .AHP 中判断矩阵一致性改进的一种新方法[ J ].系统工程理论与实践 ,2000 20( 2 ) :122 ~ 125.

[ 6 ] 达庆利 ,刘新旺 .区间数线性规划及其满意解[ J ].系统工程理论与实践 ,1999 19( 4 ) 3 ~ 7.

[ 7 ] 刘昌明 ,何希吾 .中国 21 世纪水问题方略[ M ].北京 :科学出版社 ,1998.33.

( 收稿日期 2003-06-10 编辑 胡新宇 )