模糊综合评判法在水库洪水调度方案评价中的应用*

韩宇平，解建仓
（西安理工大学 水电学院，陕西 西安 710048）

［摘　要］　引入模糊综合评判的概念，并选取对洪水预报和洪水调度质量评价影响较大的 8 个因素，通过层次分析法获得各评价指标的权重，在对洪水预报和洪水调度两方面分别进行单因素综合评判的基础上，对调度方案整体进行了多因素综合评判。该评价模型对水库洪水调度软件的设计和运用具有重要的实用价值。

［关键词］　水库；洪水调度；模糊综合评判；层次分析法（AHP）
［中图分类号］　TV 213.9　　［文献标识码］　A　　［文章编号］　1671-9387（2002）06-0198-04

模糊评判方法已经逐步得到广泛的应用，目的是为了解决所研究课题在影响因素十分复杂的条件下，进行最优方案的选取和对方案进行优越性排序，或者对方案进行客观的评价。在洪水调度系统中，调度方案的管理和评价尤为重要。对一次洪水调度方案的客观评价有利于在洪水调度中起到借鉴作用，所以一场完整的洪水调度应包括后期的调度方案管理和评价，而在一般的洪水调度软件设计中这方面的工作并没有得到足够的重视[1]。因此，本研究在洪水调度软件包中设计洪水调度方案评价功能，并和洪水调度方案管理功能一起构成一个相应的模块。由于洪水现象极端复杂，各个因素之间互相关联，且对不同的洪水过程，各因素的影响程度也不尽相同，在一次洪水调度方案评价中包括洪水预报评价和洪水调度评价两个方面，为此本文引入模糊综合评判的概念对洪水调度方案进行评价。

1　综合评判单因素模型[2]

设给定 2 个有限论域 $U=\{u_1, u_2, u_3, \cdots\cdots, u_m\}$ 和 $V=\{v_1, v_2, v_3, \cdots\cdots, v_n\}$，其中，$U$ 代表综合评判的因素所组成的集合，V 代表评语所组成的集合，则模糊综合评判即表示模糊变换 $B=A\circ R$，式中 A 为 U 上的模糊子集，而评判结果 B 是 V 上的模糊子集，并且可表示为 $A=(a_1, a_2, \cdots\cdots, a_m)$，$0\leq a_i\leq 1$；$B=(b_1, b_2, \cdots\cdots, b_n)$，$0\leq b_j\leq 1$。其中，$a_i$ 是单因素 u_i 在总评定因素中所起作用大小的变量，也在一定程度上代表根据单因素 u_i 评定等级的能力，b_j 则为等级 v_j 对综合评定所得模糊子集 B 的隶属度，它表示综合评判的结果。关系矩阵 R 可表示为

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}。$$

式中，r_{ij} 表示因素 u_i 的评价对等级 v_j 的隶属度，因而矩阵 R 中第 i 行 $R_i=(r_{i1}, r_{i2}, \cdots\cdots, r_{in})$ 即为对第 i 个因素 u_i 的单因素评判结果。在评价计算中 $A=(a_1, a_2, \cdots\cdots, a_m)$，代表各个因素对综合评判重要性的权系数，因此满足 $\sum a_i=1$，$(i=1, 2, \cdots\cdots, m)$；同时，模糊变换 $A\circ R$ 也退化为普通矩阵计算，即 $b_j=\min(1, \sum c_i\cdot r_{ij})$，$i=1, 2, \cdots\cdots, m$；$j=1, 2, \cdots\cdots, n$。上述权系数的确定可用层次分析法得到。

2　综合评判的多因素模型

对于洪水调度方案，在洪水预报中选取对洪水预报质量影响最大的洪峰流量误差、洪水总量误差、峰现时间误差和洪水过程误差 4 个因素作为基本因素，在洪水调度中选取次洪水起涨水位指数、次洪水最高水位指数、次洪水最大下泄流量指数和预泄调度指数作为基本因素。对于洪水预报和洪水调度具有同样的评语集 $V=\{好, 一般, 差\}$。洪水调度

* ［收稿日期］　2001-12-25
［基金项目］　国家自然科学基金重点项目（79830040）；科技部社会公益研究专项资金项目“首都圈水资源保障研究”；水利部科技创新项目（SCX2001-08）
［作者简介］　韩宇平（1975-　），男，宁夏彭阳人，在读博士，主要从事水资源系统工程方面的研究。E-mail: hanyup118@163.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

方案综合评价模型是一多因素 Fuzzy 综合决策模型, 其多层次模型的建立步骤如下。

(1) 将因素集 $U = \{u_1, u_2, \cdots\cdots, u_n\}$ 按某些属性分成 s 个子集,

$U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \cdots\cdots, u_{in}\}$, $i = 1, 2, \cdots\cdots, s$ 满足条件

(a) $\sum_{i=1}^{s} n_i = N$, (b) $\bigcup_{i=1}^{s} u_i = U$,

(c) $U_i \cap U_j = \varphi$, $i \neq j$。

(2) 对每一子因素集 U_i 分别做出综合评判。若 R_i 为单因素矩阵, 则得一级的评判向量

$B_i = A_i \circ R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \cdots\cdots, b_{im})$, $i = 1, 2, \cdots\cdots, s$。

(3) 将每个 U_i 视为一个因素, 记

$\Omega = \{U_1, U_2, \cdots\cdots, U_s\}$, 于是 Ω 又是个因素集。Ω 的单因素决策矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \cdots \\ B_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{s1} & b_{s2} & \cdots & b_{sm} \end{bmatrix}。$$

每个 U_i 作为 U 的一部分, 反映了 U 的某种属性, 可以按它们的重要性给出权数分配 $A = (a_1, a_2, \cdots\cdots, a_s)$, 于是得到二级的评判向量

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, \cdots\cdots, b_m)。$$

在洪水调度方案评价中, $s = 2$, $U_1 =$ 洪水预报子集, $U_2 =$ 洪水调度子集。$U_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}\}$, 其中, u_{11} 为洪峰流量误差, u_{12} 为洪水总量误差, u_{13} 为峰现时间误差, u_{14} 为洪水过程误差; $U_2 = \{u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}\}$, 其中 u_{21} 为次洪水起涨水位指数, u_{22} 为次洪水最高水位指数, u_{23} 为次洪水最大下泄流量指数, u_{24} 为预泄调度指数。

通过层次分析法 (AHP) 可得到 U_1, U_2 各自的权重分配为

$A_1 = (0.316\,4, 0.430\,5, 0.126\,6, 0.126\,6)$,

$A_2 = (0.156\,3, 0.382\,8, 0.382\,8, 0.078\,1)$。

3　因素评判矩阵的获得

3.1　洪水预报的因素评判矩阵

(1) 对应于洪峰流量误差的目标函数为

$$\varphi_{11} = \frac{|Q_{预} - Q_{实}|}{Q_{实}}, \tag{1}$$

式中, $Q_{预}$ 为预报洪峰流量, m^3/s; $Q_{实}$ 为实际洪峰流量, m^3/s。

(2) 洪水总量预报误差的目标函数为

$$\varphi_{12} = \frac{|W_{预} - W_{实}|}{W_{实}}, \tag{2}$$

式中, $W_{预}$ 为预报洪水总量, m^3; $W_{实}$ 为实际洪水总量, m^3。

(3) 峰现时间预报误差的目标函数为

$$\varphi_{13} = \frac{|t_{预} - t_{实}|}{\Delta t}, \tag{3}$$

式中, $t_{预}$ 为从预报发布至预报洪峰出现的时间, h; $t_{实}$ 为从预报发布至实际洪峰出现的时间, h; Δt 为编制洪水预报方案所采用的计算时段, h。

(4) 洪水过程预报误差的目标函数为

$$\varphi_{14} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{|Q_{i预} - Q_{i实}|}{Q_{i实}}, \tag{4}$$

式中, N 为预报洪水过程中实际 (测) 流量次数; $Q_{i预}$ 为某一时刻预报流量, m^3/s; $Q_{i实}$ 为某一时刻实际 (测) 流量, m^3/s。

对一次洪水预报而言, 由上述方法可得到目标函数向量为 $(\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14})^T$。

3.2　洪水调度的因素评判矩阵

(1) 次洪水起涨水位指数的目标函数为

$$\varphi_{21} = (V_{起} - V_{防限}) / V_{防调}, \tag{5}$$

式中, $V_{防限}$ 为防洪限制水位相应的库容或经过批准的浮动防限水位相应库容, m^3; $V_{起}$ 为洪水起涨水位相应库容, m^3; $V_{防调}$ 为有防洪库容水库的防洪库容, 或无防洪库容水库的调洪库容, m^3。

(2) 次洪水最高水位指数的目标函数为

$$\varphi_{22} = (V_{实} - V_{相应}) / V_{防调}, \tag{6}$$

式中, $V_{实}$ 为实际次洪水最高水位相应库容值, m^3; $V_{相应}$ 为次洪水相应洪水频率或按调洪规则计算的最高水位相应库容值, m^3。

(3) 次洪水最大下泄流量指数的目标函数为

$$\varphi_{23} = Q_{实} / Q_{设}, \tag{7}$$

式中, $Q_{实}$ 为次洪水实际最大下泄流量或水库下游防洪控制点的流量, m^3/s; $Q_{设}$ 为根据批准的调洪规则, 计算最大下泄流量或水库下游防洪控制点的流量, m^3/s。

(4) 预泄调度指数的目标函数为

$$\varphi_{24} = V_{预} / V_{防调}, \tag{8}$$

式中, $V_{预}$ 为预泄所腾出的库容, m^3。

对一次洪水调度而言, 由上述方法可得到目标函数向量为 $(\varphi_{21}, \varphi_{22}, \varphi_{23}, \varphi_{24})^T$。

4　模糊关系矩阵的推求计算

由上述分析看出, 评价因素集 $U = \{u_1, u_2, u_3,$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

……，u_m}，对应评语集 $V=\{v_1, v_2, v_3, \cdots\cdots, v_n\}$，而评判矩阵中 r_{ij} 即为某因素 u_i 对应等级 v_j 的隶属度，其值可根据各评价因素的实际数值对照各因素的分级指标推求。为了消除各等级之间数值相差不大，即评价等级相差一级的现象，使隶属函数在各级之间能平滑过渡，将其进行模糊化处理[3]。对 v_1，v_3 两侧区间，则令距临界值越远属两侧区间的隶属度越大，在临界值上则属两侧等级的隶属度为 0.5，按上述设想构造了各评价等级的隶属函数的计算式。现令各评价因素的 v_1 和 v_2 等级的临界值为 a_{i1}，v_2 和 v_3 等级的临界值为 a_{i3}，v_2 等级区间中点值为 a_{i2}，$a_{i2}=(a_{i1}+a_{i2})/2$。各评价因素分级指标见表 1。

表 1 各评价因素分级指标

Table 1 Grade index of each evaluation factor

洪水预报 Flood forecast	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	洪水调度 Flood dispatching	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}
V_1（好）Better	<0.10	<0.10	<1.0	<0.15	V_1（好）Better	<0	<0	<1.0	>0.05
V_2（一般）Good	0.10～0.20	0.10～0.20	1.0～2.0	0.15～0.30	V_2（一般）Good	0～0.02	0～0.02	1.0～1.10	0.01～0.05
V_3（差）Bad	>0.20	>0.20	>2.0	>0.30	V_3（差）Bad	>0.02	>0.02	>1.10	<0.01

对于 u_{11}，u_{12}，u_{13}，u_{14}，u_{21}，u_{22}，u_{23}，各评语级构造隶属函数如下：

$$\mu_{v_1}(\varphi)=\begin{cases}1, & \varphi\le a_{i1}\\ \dfrac{a_{i2}-\varphi}{a_{i2}-a_{i1}}, & a_{i1}<\varphi\le a_{i2}\\ 0, & a_{i2}<\varphi\end{cases}$$

$$\mu_{v_2}(\varphi)=\begin{cases}\dfrac{\varphi}{a_{i1}}, & \varphi\le a_{i1}\\ 1, & a_{i1}<\varphi\le a_{i2}\\ \dfrac{a_{i3}-\varphi}{a_{i3}-a_{i2}}, & a_{i2}<\varphi\le a_{i3}\\ 0, & a_{i3}<\varphi\end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(\varphi)=\begin{cases}\dfrac{\varphi}{a_{i2}}, & \varphi\le a_{i2}\\ \dfrac{a_{i3}-\varphi}{a_{i3}-a_{i2}}, & a_{i2}<\varphi\le a_{i3}\\ 0, & a_{i3}<\varphi\end{cases}$$

对于 u_{24} 各评语级构造隶属函数如下：

$$\mu_{v_1}(\varphi)=\begin{cases}1, & \varphi\ge a_{i1}\\ \dfrac{a_{i2}-\varphi}{a_{i2}-a_{i1}}, & a_{i1}>\varphi\ge a_{i2}\\ 0, & \varphi<a_{i2}\end{cases}$$

$$\mu_{v_2}(\varphi)=\begin{cases}\dfrac{a_{i1}}{\varphi}, & \varphi\ge a_{i1}\\ 1, & a_{i1}>\varphi\ge a_{i2}\\ \dfrac{a_{i3}-\varphi}{a_{i3}-a_{i2}}, & a_{i2}>\varphi\ge a_{i3}\\ 0, & \varphi<a_{i3}\end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(\varphi)=\begin{cases}0, & \varphi\ge a_{i1}\\ \dfrac{a_{i2}}{\varphi}, & \varphi\ge a_{i2}\\ \dfrac{a_{i3}-\varphi}{a_{i3}-a_{i2}}, & a_{i2}>\varphi\ge a_{i3}\\ 1, & \varphi<a_{i3}\end{cases}$$

对于水库洪水调度方案评价而言，每一次洪水预报及调度过程都可作为一个待评判对象 $u\in U$，对因素集 U_1 而言，对应一个测定指标向量 $Y=(\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14})$；对因素集 U_2 而言，对应一个测定指标向量 $Y=(\varphi_{21}, \varphi_{22}, \varphi_{23}, \varphi_{24})$。其中，$\varphi_{ij}$ 是 U_i 相对于 u_{ij} 的测定值。这样 $\mu_{v_i}(\varphi_{ij})$ 便表示每一次洪水调度方案相对于因素 μ_i 而言属于 v_i 的程度。对于因素集 U_1，便有下面的模糊关系矩阵：

$$R_{U_1}=\begin{bmatrix}\mu_{v_1}(\varphi_{11}) & \mu_{v_2}(\varphi_{11}) & \mu_{v_3}(\varphi_{11})\\ \mu_{v_1}(\varphi_{12}) & \mu_{v_2}(\varphi_{12}) & \mu_{v_3}(\varphi_{12})\\ \mu_{v_1}(\varphi_{13}) & \mu_{v_2}(\varphi_{13}) & \mu_{v_3}(\varphi_{13})\\ \mu_{v_1}(\varphi_{14}) & \mu_{v_2}(\varphi_{14}) & \mu_{v_3}(\varphi_{14})\end{bmatrix}。$$

对于因素集 U_2，有下面的模糊关系矩阵：

$$R_{U_2}=\begin{bmatrix}\mu_{v_1}(\varphi_{21}) & \mu_{v_2}(\varphi_{21}) & \mu_{v_3}(\varphi_{21})\\ \mu_{v_1}(\varphi_{22}) & \mu_{v_2}(\varphi_{22}) & \mu_{v_3}(\varphi_{22})\\ \mu_{v_1}(\varphi_{23}) & \mu_{v_2}(\varphi_{23}) & \mu_{v_3}(\varphi_{23})\\ \mu_{v_1}(\varphi_{24}) & \mu_{v_2}(\varphi_{24}) & \mu_{v_3}(\varphi_{24})\end{bmatrix}。$$

5 洪水调度方案的模糊综合评判

5.1 洪水预报单因素评判

在洪水预报单因素评判中，各因素的权重向量为

$A_1=(W_{u_{11}}, W_{u_{12}}, W_{u_{13}}, W_{u_{14}})=(0.316\,4, 0.$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

430 5, 0. 126 6, 0. 126 6)。选取模糊综合评判模型为 $M(\vee, \wedge)$, 于是可算出综合评判向量:

$$B_1 = A_1 \circ R_{U_1} = (W_{u_{11}}, W_{u_{12}}, W_{u_{13}}, W_{u_{14}}) \cdot \begin{bmatrix} \mu_{v_1}(\varphi_{11}) & \mu_{v_2}(\varphi_{11}) & \mu_{v_3}(\varphi_{11}) \\ \mu_{v_1}(\varphi_{12}) & \mu_{v_2}(\varphi_{12}) & \mu_{v_3}(\varphi_{12}) \\ \mu_{v_1}(\varphi_{13}) & \mu_{v_2}(\varphi_{13}) & \mu_{v_3}(\varphi_{13}) \\ \mu_{v_1}(\varphi_{14}) & \mu_{v_2}(\varphi_{14}) & \mu_{v_3}(\varphi_{14}) \end{bmatrix},$$

即 $b_{ij} = \bigvee_{i=1}^{4} (W_{u_{1i}} \wedge \mu_{vj}(\varphi_{1i}))$。

选取与 $\max\{b_{ij}\}$ 对应的评语为该次洪水预报的分析评判结果。

5. 2　洪水调度单因素评判

在洪水调度单因素评判中, 各因素的权重向量为

$A_2 = (W_{u_{21}}, W_{u_{22}}, W_{u_{23}}, W_{u_{24}}) = (0.156\,3, 0.382\,8, 0.382\,8, 0.078\,1)$。选取模糊综合评判模型为 $M(\vee, \wedge)$, 于是可算出综合评判向量:

$$B_2 = A_2 \circ R_{U_2} = (W_{u_{21}}, W_{u_{22}}, W_{u_{23}}, W_{u_{24}}) \cdot \begin{bmatrix} \mu_{v_1}(\varphi_{21}) & \mu_{v_2}(\varphi_{21}) & \mu_{v_3}(\varphi_{21}) \\ \mu_{v_1}(\varphi_{22}) & \mu_{v_2}(\varphi_{22}) & \mu_{v_3}(\varphi_{22}) \\ \mu_{v_1}(\varphi_{23}) & \mu_{v_2}(\varphi_{23}) & \mu_{v_3}(\varphi_{23}) \\ \mu_{v_1}(\varphi_{24}) & \mu_{v_2}(\varphi_{24}) & \mu_{v_3}(\varphi_{24}) \end{bmatrix},$$

即 $b_{ij} = \bigvee_{i=1}^{4} (W_{u_{2i}} \wedge \mu_{vj}(\varphi_{2i}))$。

选取与 $\max\{b_{ij}\}$ 对应的评语为该次洪水调度的分析评判结果。

5. 3　洪水调度方案综合评判

由单因素综合评判向量 B_1 和 B_2 组成一个总的决策矩阵 $R = \{B_1, B_2\}^T$, 对于整个洪水调度方案, 对因素集 U_1 和 U_2 有一个权数分配 $A = (0.266\,3, 0.733\,7)$, 于是得到二级评判向量:

$B = A \cdot R = (b_1, b_2, b_3)$。

选取与 $\max\{b_i\}$ 对应的评语为该次洪水调度方案总的评判结果。

6　结　论

对水库洪水调度方案进行综合评判是必要的而且是可行的, 模糊综合评判方法在这种综合评判中能够发挥它独到的作用, 其结论也是可信的。通过对洪水调度方案中的洪水预报和洪水调度结果的模糊综合评判, 不仅能够客观地反映洪水调度的效果, 而且还能够为下一阶段的洪水调度发挥其应有的指导作用。本文提出的评价模型对一般水库洪水调度方案的评价是适用的, 在洪水调度软件的设计中应包括相应的模块, 使得软件的功能更完整、更强大。

[参考文献]

[1]　畅建霞, 王义民, 梁　柱, 等. 安康水库洪水调度软件设计与开发 [J]. 人民长江, 1999, 30 (增刊): 56- 57.
[2]　胡继才, 万福钧, 吴珍权, 等. 应用模糊数学 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998. 224- 245.
[3]　贾　嵘, 沈　冰, 蒋晓辉, 等. 区域水资源潜力综合评判 [J]. 西北农业大学学报, 1999, 27 (5): 44- 49.

The application of fuzzy judge method on flood dispatching project in reservoir

HAN Yu-ping, XIE Jian-cang
(*College of Hydraulics Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Abstract: In order to evaluate the result of flood forecast and the project of flood dispatching, the fuzzy judge model was applied in this paper. 8 factors, which have great influence on flood forecast and the project of flood dispatching, were considered for the selecting of assess index, and their weight can be obtained through AHP method. Primarily, the comprehensive judgment which based on the single factor was carried out to forecast flood and flood dispatching respectively, then, the multi-factor comprehensive judgment was carried out to the whole dispatching project. In this paper, the fuzzy judge model has important application values to the designing and application of flood dispatching software.

Key words: reservoir; flood dispatching; fuzzy judge; AHP method

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net