

模糊可变集合及其在防洪工程体系 综合风险评价中的应用

陈守煜, 郭瑜

(大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 基于立足全局的系统观, 提出防洪工程体系综合评判的模糊可变集合方法, 该方法能够科学、合理地确定与防洪工程体系相关的各个评价指标处于级别标准值区间的相对隶属函数, 并根据工程模糊集理论, 建立指标重要性二元比较与量化模型, 从而合理地确定各个指标的权重, 得出以流域为单元的防洪工程体系综合风险评价的级别特征值. 实例证明本文所提方法的科学性与合理性. 最后证明了可拓学(物元模型、物元分析)中基于“距”与“位值”概念为基础的关联函数基本公式的错误, 指出该公式不能应用于防洪工程体系综合风险评价.

关键词 模糊可变集合 防洪工程体系 综合风险 风险评价

中图分类号 TV87 30159 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2005)06-0004-05

Variable fuzzy sets and their application to comprehensive risk evaluation for flood-control engineering system//CHEN Shou-yu, GUO Yu (School of Civil & Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract From a global system view, a variable fuzzy set method was presented to develop a comprehensive evaluation model for flood-control engineering system. The method can scientifically and reasonably determine the relative membership functions of each evaluation index related to the flood-control system within different level intervals. The method can also determine the weight of each index by establishment of a two-factor quantitative comparison model for the significance of the indexes, and further obtain the characteristic value for comprehensive evaluation of risk degree for river basin flood control engineering system. Some examples were given to verify the scientificity and rationality of the present method. Moreover, the formulas for dependence functions based on the concepts of distance and displacement in extenics (matter-element analysis and matter-element model) were verified to be incorrect, and could not be used for comprehensive risk evaluation of flood-control engineering system.

Key words : variable fuzzy sets ; flood-control engineering system ; comprehensive risk ; risk evaluation

为了增强水患意识, 加大防洪工程整体建设的力度, 有必要对防洪工程体系综合风险进行分析^[1]. 风险分析的实质就是从系统工程的角度, 建立经济投入、系统安全与系统破坏可能带来的人员和经济损失之间的关系. 风险分析的目的在于评价现行系统的安全富余或系统可靠性是否可以接受, 或在系统失事概率和后果两者间选择风险的方案, 它包括 3 个相互联系的部分: 风险辨识、风险估算和风险评价. 风险可定义为生命与财产的损失或损伤. 本文根据笔者在文献[2]中建立的工程可变模糊集理论, 提出用模糊可变集合方法对防洪工程体系进行风险评价, 并就模糊概念及其重要性进行二元比较与量化, 从而合理地确定出各个指标的权重并建立防洪工程体系的综合评判模糊可变集合方法, 进而实现对防

洪工程体系的综合风险评价.

1 模糊可变集合的原理^[2]

1.1 模糊可变集合定义

设论域 U 上的一个模糊概念(事物、现象) A , 对 U 中的任意元素 $u (u \in U)$, 在相对隶属函数的连续统数轴任一点上, u 对表示吸引性质 A 的相对隶属度为 $\mu_A(u)$, 对表示排斥性质 $\tilde{A}$ 的相对隶属度为 $\mu_{\tilde{A}}(u)$, 设

$$D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{\tilde{A}}(u) \tag{1}$$

$D_A(u)$ 称为 u 对 A 的相对差异度. 这里 $0 \leq \mu_A(u) \leq 1$, $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(u) \leq 1$. 映射

$$\begin{aligned} D_A : D &\rightarrow [-1, 1] \\ u &\mapsto D_A(u) \in [-1, 1] \end{aligned} \tag{2}$$

称为 u 对 $\tilde{A}$ 的相对差异函数. 由于

$$\mu_{\tilde{A}}(u) + \mu_{\tilde{A}^c}(u) = 1 \tag{3}$$

则
$$D_{\tilde{A}}(u) = 2\mu_{\tilde{A}}(u) - 1 \tag{4}$$

或
$$\mu_{\tilde{A}}(u) = \frac{1 + D_{\tilde{A}}(u)}{2} \tag{5}$$

令
$$\tilde{V} = \left\{ (u, D) \mid u \in U, D_{\tilde{A}}(u) = \mu_{\tilde{A}}(u) - \mu_{\tilde{A}^c}(u), D \in [-1, 1] \right\} \tag{6}$$

$$A_+ = \left\{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) > \mu_{\tilde{A}^c}(u) \right\} \tag{7}$$

$$A_- = \left\{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) < \mu_{\tilde{A}^c}(u) \right\} \tag{8}$$

$$A_0 = \left\{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) = \mu_{\tilde{A}^c}(u) \right\} \tag{9}$$

$\tilde{V}$ 称为 U 的模糊可变集合; A_+, A_-, A_0 分别称为模糊可变集合 $\tilde{V}$ 的吸引(为主)域、排斥(为主)域和动态平衡界或渐变式质变界. 设 C 是 $\tilde{V}$ 的可变因子集,

$$C = \{C_A, C_B, C_C\} \tag{10}$$

式中: C_A 为模型可变集; C_B 为模型参数可变集; C_C 为除模型及其参数外的可变其他因子集.

将 A^+ 和 A^- 统一称为模糊可变集合 $\tilde{V}$ 关于可变因子集 C 的渐变式可变域, 将 $A^{(+)}$ 和 $A^{(-)}$ 统一称为模糊可变集合 $\tilde{V}$ 关于可变因子集 C 的量变域, 令

$$A^+ = C(A_-) = \left\{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) < \mu_{\tilde{A}^c}(u), \mu_{\tilde{A}}(C(u)) > \mu_{\tilde{A}^c}(C(u)) \right\} \tag{11}$$

$$A^- = C(A_+) = \left\{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) > \mu_{\tilde{A}^c}(u), \mu_{\tilde{A}}(C(u)) < \mu_{\tilde{A}^c}(C(u)) \right\} \tag{12}$$

$$A^{(+)} = C(A_{(+)}) = \left\{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) > \mu_{\tilde{A}^c}(u), \mu_{\tilde{A}}(C(u)) > \mu_{\tilde{A}^c}(C(u)) \right\} \tag{13}$$

$$A^{(-)} = C(A_{(-)}) = \left\{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) < \mu_{\tilde{A}^c}(u), \mu_{\tilde{A}}(C(u)) < \mu_{\tilde{A}^c}(C(u)) \right\} \tag{14}$$

模型可变集包括笔者在工程模糊集理论中提出的模糊优选模型、模糊模式识别模型、模糊聚类循环迭代模型以及模糊决策、识别与聚类的统一模型等^[1]. 模型参数可变集包括模型的指标权重、指标标准区间值、指标范围值等重要模型参数.

1.2 相对差异函数模型

设 $X_0 = [a, b]$ 为实轴上模糊可变集合 $\tilde{V}$ 的吸引域区间, 即 $\mu_{\tilde{A}}(u) > \mu_{\tilde{A}^c}(u)$ 区间, $X = [c, d]$ 为包含 $X_0 (X_0 \subset X)$ 的范围域区间, 如图 1 所示.

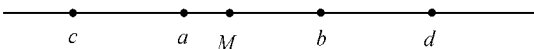


图 1 点 x 和 M 与区间 $[a, b]$ 和 $[c, d]$ 的位置关系

根据模糊可变集合定义可知 $[c, a]$ 与 $[b, d]$ 均为其排斥(为主)域区间, 即 $\mu_{\tilde{A}}(u) < \mu_{\tilde{A}^c}(u)$ 区间. 设 M 为吸引(为主)域区间 $[a, b]$ 中 $\mu_{\tilde{A}}(u) = 1$ 的点值, M 可根据实际问题确定, 不一定为区间 $[a, b]$ 的中点值. 设 x 为 X 区间内的任意点的量值, 则 x 落入 M 点左侧时的差异函数公式为

$$\begin{cases} D_{\tilde{A}}(u) = \frac{x - a}{M - a} & x \in [a, M] \\ D_{\tilde{A}}(u) = -\left(\frac{x - a}{c - a}\right) & x \in [c, a] \end{cases} \tag{15}$$

x 落入 M 点右侧时, 其差异函数公式为

$$\begin{cases} D_{\tilde{A}}(u) = \frac{x - b}{M - b} & x \in [M, b] \\ D_{\tilde{A}}(u) = -\left(\frac{x - b}{d - b}\right) & x \in [b, d] \end{cases} \tag{16}$$

当 $x \notin [c, d]$, $D_{\tilde{A}}(u) = -1$. 公式(15)和(16)满足:

- ①当 $x = a = b$ 时, $D_{\tilde{A}}(u) = 0$ 或 $\mu_{\tilde{A}}(u) = \mu_{\tilde{A}^c}(u) = 0.5$
- ②当 $x = M$ 时, $D_{\tilde{A}}(u) = 1$ 或 $\mu_{\tilde{A}}(u) = 1$
- ③当 $x = c = d$ 时, $D_{\tilde{A}}(u) = -1$ 或 $\mu_{\tilde{A}}(u) = 0$.

2 防洪工程风险指标的选取及风险分级

防洪工程系统主要由堤防、水库、蓄滞洪区和河道等组成. 每个防洪工程都是系统的一个单元, 这种单元本身也可能是一个子系统. 对于流域内的大洪水, 大部分防洪工程都会发挥作用, 它们之间相互关联. 全流域的防洪工程是一个整体, 各系统之间的相关性很强, 所以确定防洪工程的风险指标是很复杂和困难的. 本文引用文献[3]确定的防洪工程体系各组成部分的风险评价指标、风险指标值及防洪工程风险分级(微险、轻险、中险、重险和特险), 见表 1.

表 1 防洪工程风险指标及分级

防洪工程 风险分级	水库综合 风险率 R_0	堤防风 险度 P_f	分蓄洪区 风险度 K	湖泊洪灾 风险度 R	河道工程 风险度 K_h
微险	0.00 ~ 0.25	0.00 ~ 0.25	0.00 ~ 0.25	1 ~ 5	-0.070 ~ -0.045
轻险	0.25 ~ 0.50	0.25 ~ 0.50	0.25 ~ 0.50	5 ~ 7	-0.045 ~ -0.025
中险	0.50 ~ 0.75	0.50 ~ 0.75	0.50 ~ 0.75	7 ~ 9	-0.025 ~ 0.010
重险	0.75 ~ 0.90	0.75 ~ 0.90	0.75 ~ 0.90	9 ~ 10	0.010 ~ 0.045
特险	0.90 ~ 1.00	0.90 ~ 1.00	0.90 ~ 1.00	10 ~ 12	0.045 ~ 0.070

3 实例计算

以某流域的防洪工程体系综合评价为例,采用文献[3]中的数据,说明模糊可变集合方法在防洪工程体系评价中的应用过程.某流域中下游防洪工程体系主要由水库、分蓄洪区、堤防和天然湖泊组成,

$$[a,b] = \begin{bmatrix} [0.00,0.25] & [0.25,0.50] \\ [0.00,0.25] & [0.25,0.50] \\ [0.00,0.25] & [0.25,0.50] \\ [1,5] & [5,7] \\ [-0.07,-0.045] & [-0.045,-0.025] \end{bmatrix}$$
$$[c,d] = \begin{bmatrix} [0.00,0.50] \\ [0.00,0.50] \\ [0.00,0.50] \\ [1,7] \\ [-0.07,-0.025] \end{bmatrix} \quad h = 1; i = 1, \dots, 5$$
$$M = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.25 & 0.625 & 0.90 & 1.00 \\ 0.00 & 0.25 & 0.625 & 0.90 & 1.00 \\ 0.00 & 0.25 & 0.625 & 0.90 & 1.00 \\ 1 & 5 & 8 & 10 & 12 \\ -0.07 & -0.045 & -0.0075 & 0.045 & 0.07 \end{bmatrix}$$

根据矩阵 $[a,b]$, $[c,d]$ 与 M 判断评价指标 x 落入 M 点的左侧还是右侧,据此选用式(15)或式(16),以计算指标对等级标准区间值的差异函数 $D_{\tilde{A}}(u_{ih})$,这里 h 为等级数($h = 1, 2, 3, 4, 5$), i 为指标数($i = 1, 2, 3, 4, 5$).

根据实测计算的各防洪工程风险指标值,对于水库综合风险率 R_0 ,由吸引(为主)矩阵 $[a,b]$ 、范围域矩阵 $[c,d]$ 和点值矩阵 M 得 $i = 1$ 的吸引域区间向量、范围区间值向量与点值 M 向量分别为

$$[a,b] = ([0.0,0.25] \quad [0.25,0.5] \quad [0.5,0.75] \quad [0.75,0.9] \quad [0.9,1])$$
$$[c,d] = [0.0,0.50] \quad h = 1$$
$$M = (0.0 \quad 0.25 \quad 0.625 \quad 0.90 \quad 1)$$

当 $i = 1, h = 1$ 时,水库综合风险率 $R_0 = 0.189$,而 $c_{11} = 0.0, a_{11} = 0.0, b_{11} = 0.25, d_{11} = 0.50, M_{11} = 0.0$,由此可判断出风险率值 0.189 落在 M_{11} 的右侧,且属于区间 $[M_{11}, b_{11}]$,所以选用公式(16)中的

$$D_{\tilde{A}}(u_{11}) = \frac{x_{11} - b_{11}}{M_{11} - b_{11}}$$

计算.将有关数据代入该式可得 $D_{\tilde{A}}(u_{11}) = 0.244$,类似地可得到 $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 对级别 $h = 1, 2, 3, 4, 5$ 的各单指标差异函数矩阵为

$$D_{\tilde{A}}(u_{ih}) = \begin{bmatrix} 0.244 & -0.244 & -1 & -1 & -1 \\ -0.072 & 0.928 & -0.928 & -1 & -1 \\ -0.252 & 0.748 & -0.748 & -1 & -1 \\ -0.600 & 0.400 & -0.400 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -0.256 & 0.742 & -0.742 \end{bmatrix}$$

依据文献[3]计算出各防洪工程的风险指标值如下:水库综合风险率 $R_0 = 0.189$,堤防风险度 $P_f = 0.268$,分蓄洪区风险度 $K = 0.313$,湖泊洪灾风险度 $R = 6.2$,河道工程风险 $K_h = 0.019$.

根据表1并参考文献[2],构造计算模糊可变集合差异函数的各项参数 (a,b,c,d,M) 取值矩阵:

$$\begin{bmatrix} [0.50,0.75] & [0.75,0.90] & [0.90,1.00] \\ [0.50,0.75] & [0.75,0.90] & [0.90,1.00] \\ [0.50,0.75] & [0.75,0.90] & [0.90,1.00] \\ [7,9] & [9,10] & [10,12] \\ [-0.025,0.01] & [0.01,0.045] & [0.045,0.07] \end{bmatrix}$$

为了得到各指标的综合相对隶属度,应用笔者在文献[4]中提出的模糊可变识别模型(式(17))可得防洪工程评价体系各指标综合相对隶属度,再将之归一化即可得到归一化的各指标综合相对隶属度值.

$$u_{ih} = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [0.5w_i(1 - D_{\tilde{A}}(u_{ih}))]^p}{\sum_{i=1}^m [0.5w_i(1 + D_{\tilde{A}}(u_{ih}))]^p} \right\}^{\frac{\alpha}{p}}} \quad (17)$$

式中: w_i 为指标权重; m 为识别指标数; α 为模型优化准则参数, $\alpha = 1$ 为最小一乘方准则, $\alpha = 2$ 为最小二乘方准则; p 为距离参数, $p = 1$ 为海明距离, $p = 2$ 为欧氏距离.

为确定5个指标相对于5个级别的权值,应用文献[5]提出的确定指标权重重要性排序一致性定理,经认真考虑及工程实践,得到通过检验的5个指标重要性排序一致性指标矩阵:

					排序	
	0.5	0	0	0	1	(4)
	1	0.5	1	0	1	(2)
	1	0	0.5	0	1	(3)
	1	1	1	0.5	1	(1)
	0	0	0	0	0.5	(5)

$$F = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0.5 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0.5 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

按矩阵 F 关于重要性的排序,运用经验知识,以排序为(1)的指标(湖泊洪灾风险度)逐一地与排序为(2),(3),(4),(5)的指标做关于重要性程度的二元比较判断如下:排序为(1)的指标与排序为(2)的指标堤防相比,处于“稍稍”与“略为”之间;与排序为(3)分蓄洪区的指标相比,处于“较为”与“明显”之间;与排序为(4)水库的指标相比,处于“明显”与“显著”之间;与排序为(5)河道治理工程的指标相比,处于“极其”与“极端”之间(见表2).

由语气算子与相对隶属度之间的关系(表2)^[5]可得5项评价指标的权向量为

$$w' = (0.379 \quad 0.739 \quad 0.481 \quad 1 \quad 0.081) = (w'_i)$$

表2 语气算子与模糊标度及相对隶属度的对应关系

语气算子	模糊标度	相对隶属度	语气算子	模糊标度	相对隶属度
同样	0.500	1.000	十分	0.775	0.290
	0.525	0.905		0.800	0.250
稍微	0.550	0.818	非常	0.825	0.212
	0.575	0.729		0.850	0.176
略为	0.600	0.667	极其	0.875	0.143
	0.625	0.600		0.900	0.111
较为	0.650	0.538	极端	0.925	0.081
	0.675	0.481		0.950	0.053
明显	0.700	0.429	无可比拟	0.975	0.026
	0.725	0.379		1.000	0
显著	0.750	0.333			

则指标的归一化权重向量为

$$w=(0.1414\ 0.2757\ 0.1795\ 0.3731\ 0.0303)=(w_i)$$

此时就可应用模糊可变识别模型(式(17))计算防洪工程体系各指标综合相对隶属度,取模型优化准则参数 $\alpha=1$,距离参数 $p=1$,将相关数值代入模型(式(17)),解得综合相对隶属度为

$$u'=(0.358\ 0.738\ 0.156\ 0.026\ 0.004)$$

归一化后得

$$u=(0.279\ 0.576\ 0.122\ 0.020\ 0.003)$$

应用文献[4]的级别特征值公式,得到防洪工程体系风险评价的级别特征值为

$$H=(1\ 2\ 3\ 4\ 5) \cdot$$

$$(0.279\ 0.576\ 0.122\ 0.020\ 0.003)^T=1.892$$

对于评价指标的评分标准是5级的评价对象防洪工程体系来说,当 $1.0 \leq H \leq 1.5$ 时,风险等级属于微险(I级);当 $1.5 < H \leq 2.5$ 时,风险等级属于轻险(II级);当 $2.5 < H \leq 3.5$ 时,风险等级属于中险(III级);当 $3.5 < H \leq 4.5$ 时,风险等级属于重险(IV级);当 $4.5 < H \leq 5.0$ 时,风险等级属于特险(V级).故该流域的防洪工程体系综合风险评价为II级,属于轻险,整个防洪工程体系的综合风险不大,风险性一般.

4 可拓集合关联函数基本公式的错误

1999年蔡文在《科学通报》上发表了题为‘可拓论及其应用’的论文^[6,7],总结了1983年以来可拓学(物元模型)的主要研究成果^[8~10],由此可拓学受到了科学与技术界相关研究人员的关注.笔者在研究过程中,发现可拓学论著^[6~10]给出的以‘距’与‘位值’概念为基础的、实轴上点 x 的关联函数公式(式(18))是错误的,不能在防洪工程体系综合风险评价中应用.式中 $X_0=[a,b]$, $X=[c,d]$, $X \supset X_0$,且无公共端点.

$$K(x)=\frac{\rho(x,X_0)}{D(x,X_0,X)} \quad (18)$$

其中

$$\rho(x,X_0)=\left|x-\frac{a+b}{2}\right|-\frac{b-a}{2} \quad (19)$$

$$\rho(x,X)=\left|x-\frac{c+d}{2}\right|-\frac{d-c}{2} \quad (20)$$

$$D(x,X_0,X)=\begin{cases} \rho(x,X)-\rho(x,X_0) & x \notin X_0 \\ -1 & x \in X_0 \end{cases} \quad (21)$$

由于防洪工程体系中的上述5项风险评价指标均为递增系列,即 $c < a < b < d$,故本文给出递增系列情况下关联函数公式(18)有误的数学证明如下:

a. $x \notin X_0$ 的情况.按照文献^[6~10]建立给出的‘距’与‘位值’有关概念的规定,递增情况应有

$$\rho(x,X_0)=\begin{cases} a-x & x \notin X_0, x \in [c,a] \\ x-b & x \notin X_0, x \in [b,d] \end{cases} \quad (22)$$

$$\rho(x,X)=\begin{cases} -(x-c) & x \notin X_0, x \in [c,a], x < \frac{c+d}{2} \\ -(d-x) & x \notin X_0, x \in [b,d], x > \frac{c+d}{2} \end{cases} \quad (23)$$

实轴上点 x 落入区间 $[c,a]$ 或 $[b,d]$ 是一个不相容事件,当 $x \notin X_0$ 时,存在4种约束条件:① $x \in [c,a]$, $x < \frac{c+d}{2}$;② $x \in [c,a]$, $x > \frac{c+d}{2}$;③ $x \in [b,d]$, $x > \frac{c+d}{2}$;④ $x \in [b,d]$, $x < \frac{c+d}{2}$.式(18)可表示为

$$K(x)=\left(\frac{\rho(x,X)}{\rho(x,X_0)}-1\right)^{-1} \quad (24)$$

显然,该式只有当 $\rho(x,X)$ 与 $\rho(x,X_0)$ 在相同的区间约束条件下才是正确的.由公式(22)和(23)可见,关联函数式(24)只有在约束条件①和③下才有意义.即

$$K(x)=\begin{cases} -\frac{a-x}{(x-c)-(a-x)}=-\frac{a-x}{a-c} & x \notin X_0, x \in [c,a], x < \frac{c+d}{2} \\ -\frac{x-b}{(d-x)-(x-b)}=-\frac{x-b}{d-b} & x \notin X_0, x \in [b,d], x > \frac{c+d}{2} \end{cases} \quad (25)$$

当出现约束条件②和④时关联函数式(18)有误.

b. $x \in X_0$ 的情况.设 M 为图1实轴上 $[a,b]$ 区间上关联函数的最大点值.当 $x \in X_0$,且 $x \in [a,M]$,即 x 点落在 M 点的左侧时,建立区间 $[a,M]$ 上

的关联函数才有意义.此时要求满足 $x < \frac{a+b}{2}$, 则

$$\begin{aligned} K(x) &= -\rho(x, X_0) = x - a \\ x \in X_0, x \in [a, M], x &< \frac{a+b}{2} \end{aligned} \tag{26}$$

又当 $x \in X_0$, 且 $x \in [M, b]$ 时, 有意义的是建立 $[M, b]$ 区间上的关联函数. 此时, 要求满足约束条件 $x >$

$$\begin{aligned} \frac{a+b}{2}, \text{ 则} \\ K(x) &= -\rho(x, X_0) = b - x \\ x \in X_0, x \in [M, b], x &> \frac{a+b}{2} \end{aligned} \tag{27}$$

同样, 当 $x \in X_0$ 时实轴上点 x 落入 $[a, M]$ 或 $[M, b]$ 是不相容事件, 此时又有 4 种约束条件: ①' $x \in [a, M], x < \frac{a+b}{2}$; ②' $x \in [a, M], x > \frac{a+b}{2}$; ③' $x \in [M, b], x > \frac{a+b}{2}$; ④' $x \in [M, b], x < \frac{a+b}{2}$. 显然, 当出现②' 和④' 时关联函数式(18)有误.

在可拓学的一些论著^[9,10] 中, 当 $x \in X_0$ 时, 对关联函数式(18)作了归一化处理, 把 $\rho(x, X_0)$ 除以区间 $[a, b]$ 的长度, 即

$$K(x) = \frac{-\rho(x, X_0)}{b - a} \quad x \in X_0 \tag{28}$$

式(28)也有误, 应是

$$K(x) = \begin{cases} \frac{-\rho(x, X_0)}{M - a} & x \in X_0, x \in [a, M], x < \frac{a+b}{2} \\ \frac{-\rho(x, X_0)}{b - M} & x \in X_0, x \in [M, b], x > \frac{a+b}{2} \end{cases} \tag{29}$$

应该强调指出, 在实际防洪工程体系风险评价中, 将有点群 x_i 多次出现落入区间 $[c, a]$ 或 $[b, d]$ 以及 $[a, M]$ 或 $[M, b]$ 的约束条件①至④和①'至④', 当出现约束条件②, ④, ②' 与④', 应用关联函数公式(18)就有误. 因而总体来讲, 只要有一个点 x 遇到②, ④, ②' 以及④' 中的任何一种情况, 就使得防洪工程体系风险评价计算结果失去科学性, 甚至导致所得成果有误. 因此, 可拓学论著^[6~10] 建立给出的以'距'与'位值'概念为基础的关联函数公式(18)不能在实际防洪工程体系风险综合评价中应用.

5 结 语

a. 模糊可变集合是对客观事物运动发展变化、量变与质变及其转化的本质——吸引与排斥的一种描述, 符合自然辩证法原理, 其概念、理论与方法, 是工程模糊集相对隶属度可变理论的发展, 笔者提出的模糊可变概念、理论、模型与方法是在长期水利水电与水文水资源工程研究中提出的, 其基本原理与方法可广泛应用于工程领域.

b. 由于防洪工程体系是多维因素的综合体, 对其风险评价须经过从单因素的小综合到多因素的大综合, 这就决定了常规的单因素评价往往顾此失彼, 无法得出以流域(或区域)为单位的防洪工程体系的综合风险评价. 应用模糊可变集合, 能科学、合理地确定与防洪工程体系相关的各个研究对象(或指标)处于级别区间的隶属度, 并且运用人们的经验与知识, 反复就关于模糊概念及其重要性进行二元比较与量化, 合理地确定出各个指标(或研究对象)的权重, 从而实现对防洪工程体系从定性到定量的综合集成评价.

c. 文献^[6~10] 中关联函数基本公式(18)有误, 不能在防洪工程体系综合风险评价中应用, 也不能在其他工程领域中应用.

参考文献：

- [1] 陈守煜. 水利水电水资源系统的模糊、优化与数值计算[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989.
- [2] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型——模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 308—312.
- [3] 纪昌明, 李继清, 张玉山. 防洪工程体系综合风险评价的物元模型[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1): 86—90.
- [4] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2002.
- [5] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [6] 蔡文. 可拓论及其应用[J]. 科学通报, 1999, 44(7): 673—682.
- [7] Cai Wen. Extension theory and its application[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(17): 1538—1548.
- [8] 蔡文. 可拓集合和不相容问题[J]. 科学探索, 1983(10): 83—97.
- [9] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [10] 蔡文, 杨春燕, 林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

(收稿日期 2005-05-16 编辑 高建群)