

大坝安全监控中定性指标的定量综合评价

徐波^{1,2,3}, 包腾飞^{1,2,3}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要:针对大坝安全监控中定性指标评价方法较少、评价体系不完善的问题,将区间评分法、集值统计理论、灰色理论和 Jusselme 距离函数引入大坝安全监控中,建立了一种定性指标的定量综合分析方法。该方法的具体步骤为:①利用区间评分法和集值统计理论确定定性指标的综合量化值;②利用灰色理论将指标的综合量化值进行评价等级量化,确定各指标对大坝安全影响的证据向量;③利用 Jusselme 距离函数确定各定性指标的权重;④对各定性指标的证据向量和权重进行融合得到定性指标对大坝安全的综合影响程度。实例分析结果表明,该方法可以对定性指标对大坝安全的影响程度作出合理的判断。

关键词: 大坝安全监控; 定性指标; 定量评价; 综合评价

中图分类号: TV698.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2011)05-0059-05

Quantitative and comprehensive evaluation of qualitative index in dam safety monitoring//XU Bo^{1,2,3}, BAO Teng-fei^{1,2,3}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With regard to few methods for evaluating the qualitative index and imperfect evaluation system in dam safety monitoring, a quantitative and comprehensive evaluation method for the qualitative index is established by introducing the interval marking method, the set-valued statistics, the grey theory and the Jusselme distance function. Firstly, the interval marking method and the set-valued statistics were employed to obtain the comprehensive quantitative value. Secondly, the evaluation level of the comprehensive quantitative value was quantified and the evidence vectors were obtained by means of the grey theory. Thirdly, the weights of all the qualitative indexes were obtained by use of the Jusselme distance function. Finally, the comprehensive influence of the qualitative indexes on the dam safety was determined by using the evidence vectors and weights. The case study indicates that the proposed method can be employed to rationally determine the influence of the qualitative index on the dam safety, and it is feasible.

Key words: dam safety monitoring; qualitative index; quantitative evaluation; comprehensive evaluation

大坝安全监控是确保大坝安全的重要手段^[1-2]。大坝安全监控中既要仪器监测所得的定量资料进行定量指标的分析评价,也要对巡视检查的定性资料进行定性指标的综合评价^[3]。定量指标的分析评价已经有较多的方法,也形成了比较完善的评价体系。许多学者对开发研制分析评价定量指标的监测系统进行了深入的研究^[1,4]。定性指标由于一般难以用某一具体的数值、函数或者方程进行表示,其评价方法还是较多地采用定性的模糊描述,而量化

的评价方法相对较少。

对定性指标进行定量化的评价,需要先将定性指标进行量化。目前比较常用的定性指标量化方法有专家区间评分法^[3]、正态分布法^[5]、二元比较法^[6]等。专家区间评分法以其操作简单、适用性强等特点,广泛应用于工程界定性指标的量化处理。集值统计理论^[7]是经典统计和模糊统计的一种推广,经典统计得到的是相空间中一个确定的点,而集值统计得到的是相空间中的一个模糊子集。利用集值统

计可以对多位专家的区间评分值进行融合处理,得到专家评分的综合量化值。由于定性指标具有模糊性以及灰色性等特点,灰色理论^[8]具有处理较少数据不确定性的能力,因此可以借助灰色理论对专家评分的综合量化值进行评价等级的量化。评价等级进行量化后仅能得到单个定性指标对大坝安全的影响情况,若要得到多个指标对大坝安全的综合影响情况,需要将各指标对大坝安全的影响值进行融合处理。为了便于融合处理并且使融合的结果更合理,需要给各影响值赋权。Jousselme 距离函数^[9]可以合理客观地确定各影响值的权重,在此借助 Jousselme 距离函数确定各定性指标影响值的权重。

笔者运用区间评分法、集值统计理论、灰色理论以及 Jousselme 距离函数对大坝安全的定性指标进行定量综合分析评价。

1 基本原理

1.1 区间评分法

假设选择了 n 位专家对大坝进行安全评价,将专家 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 根据定性监测资料对定性指标 j 的评分值记为 $[a_{ij}, b_{ij}]$ 。若定性监控指标的个数为 m , 则 $j = 1, 2, \dots, m$ 。综合 n 位专家的评分值则可以得到定性指标 j 的最终专家评分值 u_j 。采用区间评分法表示专家的意见,可以让专家的意见得到充分表达,同时还可以使评价结果更合理。但是专家在对定性指标进行评分时由于心理、经验等因素的影响,不同的专家给出的评分区间可能差异较大。为了减小专家评判中的误差,并尽可能多地综合各位专家的意见,在此采用集值统计理论对专家的区间评分值进行融合处理,得到最终的专家评分值 u_j 。

1.2 集值统计理论

n 位专家对定性指标 j 的区间评价结果为 $[a_{1j}, b_{1j}], [a_{2j}, b_{2j}], \dots, [a_{nj}, b_{nj}]$, 此区间评分序列为 1 个集值统计序列,称为随机集。将这 n 个区间叠加在一起则形成覆盖在评价轴 U 上的一种分布,可用公式表示为

$$\bar{X}(u) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X(u)_{[a_{ij}, b_{ij}]} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n X(u)_{[a_{ij}, b_{ij}]} = \begin{cases} 1 & a_{ij} < u < b_{ij} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\bar{X}(u)$ 为模糊覆盖频率样本落影的估计函数; $X(u)_{[a_{ij}, b_{ij}]}$ 为落影函数; u 为评价轴 U 上的变量。

根据集值统计理论得到

$$u_j = \frac{\int_{u_{\min}}^{u_{\max}} u \bar{X}(u) du}{\int_{u_{\min}}^{u_{\max}} \bar{X}(u) du} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (b_{ij}^2 - a_{ij}^2)}{\sum_{i=1}^n (b_{ij} - a_{ij})} \quad (3)$$

$$\text{其中 } u_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} \{b_{ij}\}, u_{\min} = \min_{1 \leq i \leq n} \{a_{ij}\}$$

式中: $u_{\max}, u_{\min}$ 分别为专家区间评分中定性指标 j 的最高和最低取值。

定义一个新的指标 g 来刻画专家意见的分歧程度,定性指标 j 的评分区间叠加后所形成的频率覆盖的落影离散程度称为专家意见的分歧度 g_j 。 g_j 计算公式为

$$g_j = \frac{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n [(b_{ij} - E(u))^3 - (a_{ij} - E(u))^3]}{\sum_{i=1}^n (b_{ij} - a_{ij})} \quad (4)$$

同时,可令 $E(u)$ 的置信度 θ_j 为专家判断的可靠程度的度量:

$$\theta_j = \frac{1}{1 + g_j} \quad (5)$$

g_j 值越大,专家的意见分歧就越大,专家评分的可靠度 θ_j 越小。当 θ_j 小于一个限定值 θ 时,需要重新征求专家意见,请专家给出新的区间评分。如此反复,直到 θ_j 大于或等于 θ 为止。 θ 是衡量专家意见可靠度的一个标准, θ 取值越大,各专家意见可靠度越高,评价结果越可信;反之亦然。 θ 可根据经验选取,只要满足衡量专家意见可靠度的要求即可,文中 θ 取为 0.7。

1.3 灰色理论

在求得定性指标专家评分的综合量化值后,为了比较准确地反映定性指标对大坝安全的影响程度,可以借助灰色理论的知识进行评价等级的量化。运用灰色理论的知识进行评价等级的量化最主要的是要确定评价灰类的等级数、各灰类的灰数和灰类的白化权函数^[10-11]。笔者将各定性指标对大坝安全的影响程度的灰类分为 5 个等级,即非常严重、严重、中等、一般、轻微。这 5 个等级是参照大坝安全评价等级数的确定进行划分的^[12]。同时参照大坝安全评价中评语集与隶属度的对应关系^[3]确定 5 个等级对应的评分区间分别为 $[5, 4], [4, 3], [3, 2], [2, 1], [1, 0]$ 。5 个等级对应的灰数和白化权函数如下:

a. 等级为非常严重,灰数 $\otimes \in [0, 5, 10]$,白化权函数 f_1 表达式为

$$f_1(u_j) = \begin{cases} 0 & u_j \notin [0, 10] \\ \frac{u_j}{5} & u_j \in [0, 5] \\ 1 & u_j \in [5, 10] \end{cases} \quad (6)$$

b. 等级为严重,灰数 $\otimes \in [0, 4, 8]$,白化权函数 f_2 表达式为

$$f_2(u_j) = \begin{cases} 0 & u_j \notin [0.8] \\ \frac{u_j}{4} & u_j \in [0.4] \\ \frac{8-u_j}{4} & u_j \in [4.8] \end{cases} \quad (7)$$

c. 等级为中等,灰数 $\otimes \in [0.3.6]$,白化权函数 f_3 表达式为

$$f_3(u_j) = \begin{cases} 0 & u_j \notin [0.6] \\ \frac{u_j}{3} & u_j \in [0.3] \\ \frac{6-u_j}{3} & u_j \in [3.6] \end{cases} \quad (8)$$

d. 等级为一般,灰数 $\otimes \in [0.2.4]$,白化权函数 f_4 表达式为

$$f_4(u_j) = \begin{cases} 0 & u_j \notin [0.4] \\ \frac{u_j}{2} & u_j \in [0.2] \\ \frac{4-u_j}{2} & u_j \in [2.4] \end{cases} \quad (9)$$

e. 等级为轻微,灰数 $\otimes \in [0.1.2]$,白化权函数 f_5 表达式为

$$f_5(u_j) = \begin{cases} 0 & u_j \notin [0.2] \\ u_j & u_j \in [0.1] \\ 2-u_j & u_j \in [1.2] \end{cases} \quad (10)$$

将专家对定性指标 j 的综合量化值 a_j 代入式 (6)~(10) 可以求得 j 对大坝安全的影响程度的向量 $m_j = (f_1(u_j), f_2(u_j), f_3(u_j), f_4(u_j), f_5(u_j))$, 该向量可称为指标 j 对大坝安全影响程度的证据。

一般情况下,不同的定性指标对大坝安全影响程度的证据向量是不同的,为了得到所有定性指标对大坝安全的影响程度,需要对各定性指标的证据进行融合。为了便于融合,并且使融合后的结果更合理地反映定性指标对大坝安全的影响程度,在此运用 Jousselme 距离函数对定性指标的各条证据进行赋权。

1.4 Jousselme 距离函数

各定性指标证据的权重可以借助可信度来反映,即:1 条证据被其他证据支持,则该证据的可信度较高,在证据融合过程中其权重也较大;反之,如果一条证据与其他证据冲突较大,则该证据的可信度较低,其权重也应该较小。在此,证据的权重值利用可信度值来代替,而证据的可信度可借助 Jousselme 距离函数求得。

设 Θ 为一包含 n 个两两不同命题的完备辨识框架, m_j 和 m_k 为辨识框架 Θ 上的 2 条证据,则 m_j 和 m_k 的距离可表示为

$$d(m_j, m_k) = \sqrt{\frac{1}{2} (m_j - m_k) D (m_j - m_k)} \quad (j, k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (11)$$

式中: D 为 1 个 $2^N \times 2^N$ 的矩阵,且矩阵中的元素为

$$D(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}, A, B \in P(\Theta)$$

若系统收集了 n 条证据,则可以利用式 (11) 计算 2 条证据 m_j 和 m_k 之间的距离,并将计算结果表示为一个距离矩阵:

$$D_M = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

进一步定义证据 m_j 和 m_k 的相似性测度 $\sin(m_j, m_k)$ 为

$$\sin(m_j, m_k) = 1 - d(m_j, m_k) \quad (j, k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (12)$$

相似性测度的结果可以用矩阵 S_M 表示:

$$S_M = \begin{pmatrix} 1 & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

由式 (11)、式 (12) 可以发现, $S_M = I - D_M$ (I 为单位矩阵),即 2 条证据之间的距离越小,它们的相似性测度就越大。

将证据 m_j 被其他证据支持的程度定义为支持度 $\sup(m_j)$,支持度可以通过式 (13) 求得:

$$\sup(m_j) = \sum_{k=1, k \neq j}^n \sin(m_j, m_k) \quad (j, k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (13)$$

在得到各条证据的支持度后,可以求得 m_j 的可信度 $\text{CRD}(m_j)$:

$$\text{CRD}(m_j) = \frac{\sup(m_j)}{\sum_{j=1}^n \sup(m_j)} \quad (14)$$

$\text{CRD}(m_i)$ 可作为证据 m_j 的权重 ω_j 。在获得各条证据的权重后,可对各定性指标的证据向量进行融合。

1.5 定性指标的综合评价

假定大坝安全分析中有 n 个定性指标,则由灰色理论可以得到 n 个定性指标对应的 n 条证据,将这些证据记为矩阵 B :

$$B = (m_1, m_2, \dots, m_n)^T \quad (15)$$

n 条证据对应的权重可记为矩阵 A :

$$A = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \quad (16)$$

在此采用模糊综合评价方法^[13]对各定性指标的证据进行融合,其融合公式为

$$Z = A \cdot B = (z_1, z_2, \dots, z_5) \quad (17)$$

式中: Z 为定性指标对大坝安全的综合影响程度; $z_1 \sim z_5$ 分别对应于 5 个评价等级: 非常严重、严重、中等、一般、轻微。

在计算出 Z 后, 定性指标对大坝安全影响程度的判别按照如下规则进行: 若 $z_1 \sim z_5$ 中的最大值为 z_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 则认为 z_i 对应的安全等级为各定性指标对大坝安全的综合影响程度。

2 实例分析

2.1 研究对象

选取某混凝土重力坝日常巡视检查的 4 项定性指标进行分析, 这 4 项定性指标分别为错动 a_1 、破损 a_2 、裂缝变化 a_3 、绕坝渗流 a_4 , 即定性指标为 a_j ($j = 1, 2, 3, 4$)。邀请 4 位专家 ($n = 4$) 对上述指标进行评分, 并按照本文的定量综合分析法对 4 项定性指标进行综合分析评价。

2.2 计算分析

2.2.1 专家区间评分

邀请 4 位专家对上述 4 项定性指标进行区间评分, 评分时按照如下规则进行: 定性指标对大坝安全的影响较大, 则评分较高; 定性指标对大坝的影响程度较小, 则评分较低。最高评分为 5, 代表该指标对大坝的影响最大; 最低评分为 0, 代表该指标对大坝几乎没有影响。评分结果如表 1 所示。

表 1 定性指标区间评分值

专家编号	a_1	a_2	a_3	a_4
1	[1.0, 2.5]	[2.5, 3.5]	[1.0, 2.0]	[1.5, 2.5]
2	[1.0, 2.0]	[2.0, 3.0]	[1.5, 2.5]	[1.0, 2.0]
3	[0.5, 1.5]	[2.5, 4.0]	[0.5, 2.5]	[2.0, 3.0]
4	[1.5, 2.5]	[1.5, 2.5]	[2.0, 3.0]	[1.0, 2.5]

2.2.2 区间评分的综合量化值

利用集值统计理论, 按照式 (1)~(5) 分别计算 4 个定性指标的综合量化值、专家意见的分歧度、专家评分的可靠度。计算结果见表 2。

表 2 定性指标综合量化值

定性指标	u_j	g_i	θ_i
a_1	1.58	0.243	0.8045
a_2	2.75	0.354	0.7386
a_3	1.75	0.396	0.7163
a_4	1.92	0.243	0.8045

由表 2 可以看出, 专家对 4 项定性指标可靠度的评分值分别为 0.8045, 0.7386, 0.7163, 0.8045, 均高于 0.7, 表明专家评分的可靠度较高, 所以不需要征询专家意见, 不必重新进行区间评分。

2.2.3 评价等级的量化

利用灰色理论, 根据式 (6)~(10) 对应的白化权

函数计算表 2 中 4 个定性指标的综合量化值所对应的向量 $m_j = (f_1(u_j), f_2(u_j), f_3(u_j), f_4(u_j), f_5(u_j))$, 将计算结果进行归一化处理, 并用矩阵 B 表示:

$$B = \begin{bmatrix} 0.1412 & 0.1765 & 0.2355 & 0.3530 & 0.0938 \\ 0.1979 & 0.2473 & 0.3299 & 0.2249 & 0.0000 \\ 0.1476 & 0.1846 & 0.2459 & 0.3691 & 0.0527 \\ 0.1534 & 0.1917 & 0.2556 & 0.3834 & 0.0160 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \end{bmatrix}$$

矩阵 B 中每行向量代表 1 个定性指标对大坝安全的影响程度, 即定性指标对大坝安全的影响程度证据。 B 中的 4 行向量代表 4 项指标的影响程度证据 $m_1 \sim m_4$ 。

2.2.4 确定权重

利用矩阵 B 的 4 条证据, 借助 Jousselme 距离函数可求得 4 条证据的距离矩阵、相似性测度矩阵, 并最终确定 4 项定性指标的权重值。4 条证据的距离矩阵和相似性程度矩阵分别为

$$D_M = \begin{bmatrix} 0 & 0.1455 & 0.0331 & 0.1245 \\ 0.1455 & 0 & 0.1363 & 0.1341 \\ 0.0331 & 0.1363 & 0 & 0.0294 \\ 0.1245 & 0.1341 & 0.0294 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_M = \begin{bmatrix} 1 & 0.8545 & 0.9669 & 0.8755 \\ 0.8545 & 1 & 0.8637 & 0.8659 \\ 0.9669 & 0.8637 & 1 & 0.9706 \\ 0.8755 & 0.8659 & 0.9706 & 1 \end{bmatrix}$$

4 项定性指标的权重值为

$$A = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4) = (0.2498, 0.2394, 0.2595, 0.2512)$$

2.2.5 综合评价

按照模糊综合评价方法对 4 项指标的影响程度进行融合, 融合结果为 Z 。

$$Z = A \cdot B = (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5) = (0.1520, 0.1994, 0.2658, 0.3341, 0.0411)$$

从融合结果可以看出 $\max\{z_i\} = z_4 = 0.3341$, 根据定性指标对大坝安全影响程度的判别规则可以确定 4 项定性指标对该混凝土重力坝的影响等级为一般。同时, 由于 z_3 的值与 z_4 接近, 可以认为 4 项定性指标对大坝安全的影响程度为一般且偏于中等。

由本文方法得到的各定性指标对大坝安全的影响程度是一个区间值, 而不是一个确定的数值, 而且该区间值是通过其对应的最大概率值确定的, 这种方法确定的定性指标对大坝安全的影响程度更具客观性, 也较合理。

3 结 语

笔者研究了专家区间评分法、集值统计理论、灰

色理论和 Jusselme 距离函数,并将这些理论引入大坝安全监控中,建立了大坝安全定性指标的定量综合分析方法。利用该方法对某混凝土重力坝的定性指标进行了分析评价,可以得到如下结论:①区间评分法和集值统计理论可以很好地将定性指标进行综合量化,量化的结果可靠度较高。②灰色理论可以将专家评分的综合量化值进行模糊化并使其模糊化的结果与评价等级相对应,即可以对综合量化值进行评价等级的量化。对综合量化值进行评价等级的量化可以使定性指标的综合评价更加合理。③Jusselme 距离函数可以从证据出发确定各证据的权重,从而确定各定性指标的权重,这种确定权重的方法降低了人为因素的影响,确定的权重相对较客观。④利用模糊综合评价方法对各定性指标的证据和权重值进行融合,并最终确定定性指标对某混凝土重力坝的影响程度为一般且偏于中等。

笔者提出的定性指标定量综合评价方法能够对定性指标对大坝安全的影响程度作出合理的判断,是可行的。该方法同样适用于大坝安全其他定性指标的分析评价,并为工程领域定性指标的评价提供参考。

参考文献:

[1] 肖泽云,田斌. 基于 GIS 平台的大坝安全监控系统研究与应用[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(5): 48-52.

(上接第 48 页)

防冲要求闸门控制运行方式所需要遵循的 5 个条件,并对低尾水降低护坦式消力池提出了最大池深的概念和计算方法,闸门控制运行曲线的制定和运用方法具有普遍意义,可直接运用于闸门运行或作为制定闸门控制运行操作规程的依据。

参考文献:

[1] 郑琪. 水闸运行风险对策探讨[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(6): 62-65.
[2] 李占松. 平原闸闸下水流状态研究[D]. 郑州: 郑州工学院, 1988.
[3] 李占松, 厉良辅. 空间水跃共轭水深公式综合分析[J]. 郑州工学院学报, 1990, 11(4): 54-59.
[4] 龚彦奎, 蔡报智. 平原多孔水闸少数孔开启的消能问题[J]. 海河水利, 1992(6): 17-21.
[5] 厉良辅, 李占松. 折冲水流的实验及理论分析[J]. 郑州工学院学报, 1992, 13(4): 33-38.

[2] 李永江. 土石坝安全监测技术及安全监控理论研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(5): 73-77.
[3] 何金平, 李珍照, 万福军. 大坝结构实测性态综合评价中定性指标分析方法[J]. 水电能源科学, 2000, 18(1): 5-8.
[4] 宋小刚, 李德仁, 华锡生, 等. 基于数据仓库技术的大坝资料分析与安全决策系统研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 280-284.
[5] 吴正佳, 杜义贤. 基于熵权的施工机械选型研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2006, 28(2): 137-140.
[6] 路振广, 曹祥华. 节水灌溉工程综合评价指标体系与定性指标量化方法[J]. 灌溉排水, 2001, 20(1): 55-59.
[7] 汪培庄. 模糊集与随机集落影集[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985: 39-72.
[8] 刘思峰, 郭天榜. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 111-143.
[9] 邓勇, 施文康, 朱振福. 一种有效处理冲突证据的组合方法[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(1): 27-32.
[10] 杜红兵. 建筑火灾风险评价中定性指标的模糊灰色评价方法研究[J]. 太原理工大学学报, 2007, 38(5): 441-444.
[11] 郭汉丁, 刘英宗, 郝海. 政府质量监督机构绩效考核灰色评价方法[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2005, 29(2): 288-291.
[12] 何金平, 李珍照, 施玉群. 大坝结构实测性态综合评价方法研究[J]. 水力发电学报, 2001(2): 36-42.
[13] 马福恒, 吴中如, 顾冲时, 等. 模糊综合评判法在大坝安全监控中的应用[J]. 水电能源科学, 2001, 19(1): 59-62.
(收稿日期: 2011-02-15 编辑: 高建群)

[6] 林建洪. 北溪水闸枢纽下游消能防冲设施除险加固研究[J]. 东北水利水电, 2011(1): 63-66.
[7] 黄智敏, 罗岸, 陈卓英, 等. 潮州供水枢纽东溪拦河闸消能工除险改造试验研究[J]. 广东水利水电, 2010(12): 1-3.
[8] 刘珊珊. 拦潮闸消能设计探讨与研究[J]. 广东水利水电, 2010(11): 81-82, 92.
[9] 施景裕. 水闸消能防冲设计探讨[J]. 浙江水利科技, 1999(3): 1-2.
[10] 朱春阳, 胡正福, 徐威. 修山水闸消能防冲试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(11): 104-106, 110.
[11] 胡海泓, 罗少彤. 关于如何有效防止水闸下游冲刷破坏的探讨[J]. 广东水利水电, 2007(5): 4-7.
[12] 文恒, 智泓, 牟献友. 水闸消能防冲条件的确定[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 17-20.
[13] 陈阳生, 兰跃东, 马万明, 等. 蓄水闸闸门突然开启时的下游消能问题[J]. 河北水利专科学校学报, 1991(1): 13-19.
(收稿日期: 2010-11-19 编辑: 高建群)