

# 基于灰色模型(GM)预测和Logistic回归模型的二河闸安全预警评价分析

王 俊<sup>1</sup>,周 威<sup>2</sup>,杨雨峤<sup>2</sup>,赵 倩<sup>2</sup>,朱 洪<sup>2</sup>

(1. 江苏省通榆河蔷薇河送清水工程管理处,江苏 淮安 223001;2. 江苏省淮沭新河管理处,江苏 淮安 223001)

**摘要:**研究以二河闸工程为例,通过GM预测和Logistic回归模型应用原理,提出集2种方法于一体的综合型水闸安全预警评价方案,利用预警模型进行二河闸安全预警,评价水闸安全性,结合实际安全监测数据检验研究方法的可靠性。结果表明,基于本研究方法的水闸运行状态和趋势预测结果较准确,可作为水闸安全管理的依据。本研究对水闸安全预警评价有指导意义。

**关键词:**GM; Logistic回归; 预警; 预测; 安全; 二河闸

中图分类号:TV66

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2025)01-0014-0007

## Analysis of safety warning and evaluation of Erhe Sluice based on GM prediction and Logistic regression model

WANG Jun<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>2</sup>, YANG Yuqiao<sup>2</sup>, ZHAO Qian<sup>2</sup>, ZHU Hong<sup>2</sup>

(1. Tongyu River and Qiangwei River Water Supply Project Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China; 2. Huaishu NewRiver Management Division of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China)

**Abstract:** Taking the Erhe Sluice Project as an example, this study proposes a comprehensive water gate safety warning and evaluation scheme that integrates two methods through the application principles of GM prediction and Logistic regression models. The early warning model is used for the safety warning of Erhe Sluice and to evaluate its safety. The reliability of the research method is verified by combining actual safety monitoring data. The results indicate that the operation status and trend prediction of the water gate based on this research method are relatively accurate and can serve as a basis for water gate safety management. This study has guiding significance for the safety warning evaluation of water gates.

**Key words:** GM; Logistic regression; warning; prediction; safety; Erhe Sluice

## 1 概 述

水闸安全预警是及时发现水闸运行安全隐患的重要途径,相关单位根据预警结果及时采取管理措施,保障水闸运行安全。以人工巡查、常规监测设备为主的传统水闸安全监测方法在预警全面性、准确性、高效性等方面存在不足,难以满足日益提高的水闸安全预警工作要求,需探索综合应用效果

更好的水闸安全预警方法<sup>[1]</sup>。灰色模型(GM)预测水闸运行数据变化趋势的能力较强,适用于不确定性系统和小样本处理;Logistic回归模型的预测精度较高,得益于其优异的分类能力,成为水闸安全预警的常用方法。鉴于以上2种方法的应用优势,提出结合GM和Logistic回归模型的应用方案,建立综合预警系统,准确、高效地进行水闸安全预警,确保复杂水闸工程的预警结果可靠性高,为水闸安全管

收稿日期:2024-10-09

作者简介:王俊(1979—),男,高级工程师,本科,主要从事水利工程运行管理工作。E-mail:ewogo4@163.com

理提供指导。

## 2 工程概况

二河闸每孔净宽 10 m,共 35 孔,总宽 401.8 m,为大(1)型水工建筑物。诸多因素均会影响二河闸运行安全性,涉及的安全指标较多,安全预警具有复杂性。全面考虑各类影响二河闸的因素能够提升安全预警结果可靠性,但由于影响因素多、影响程度各异,需要重点辨识关键影响因素。本文对水闸安全性进行定量分析,设计包含数据预处理、预警分析、安全评价 3 个部分的预警模型,确定安全指标的预测值,将基于模型的预测结果与水闸实际运行资料对比,构建可靠的预警模型。

## 3 研究模型

### 3.1 灰色预测模型

灰色 GM(1,N)模型预测方式运算简单,易于检验<sup>[2]</sup>,可用于解决序列完整性差、历史数据体小等问题,是一种适用性良好、预测结果较可靠的预测方法。因此,本文对二河闸的安全评价采用灰色 GM(1,N)模型。

实时安全指标数据采用渗透压力扬压力,数据选取时段为 2023 年 9 月 1 日至 10 月 20 日,将数据代入灰色 GM(1,N)模型:

$$x_1^{(0)}(k) + aZ_1^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^N b_i x_i^{(0)}(k) \quad (1)$$

式中: $x_1^{(0)}(k)$ 为第  $k$  个时间点的原始观测值; $Z_1^{(1)}(k)$ 为紧邻均值序列; $a$ 为发展系数; $b_i$ 为驱动系数; $b_i x_i^{(0)}(k)$ 为驱动项。 $a$ 、 $b_i$ 两项系数的取值经过 MatLab 对预测模型训练后产生, $a$ 为 2, $b_i$ 为 0.24、0.23、0.26、0.4、-0.03、0.29、0.43、0.14,仿真结果如图 2 所示。

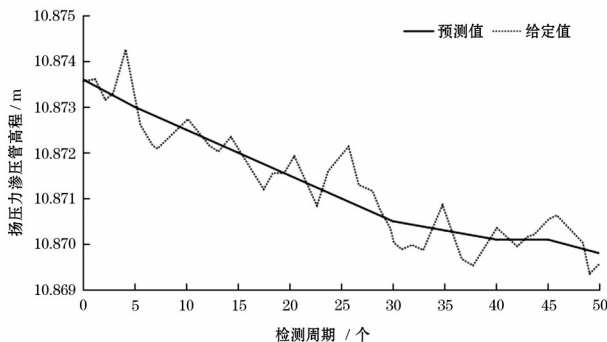


图2 预测数据仿真结果

检验灰色 GM(1,N)预测模型的可行性,判断其是否适用于水闸安全预警评价。建模精度评价指

标为后验差  $C$  和小误差概率  $P$ <sup>[3]</sup>,按照两项指标取值的不同划分为 4 个等级,如表 1 所示。

表1 预测等级精度划分

预测等级精度	$P$	$C$
优	$>0.98$	$<0.35$
合格	$>0.8$	$<0.5$
勉强	$>0.7$	$<0.45$
不合格	$<0.7$	$>0.65$

$P=0.94$ 、 $C=0.39$ ,参照表 1,将本文建立的灰色 GM(1,N)预测模型的精度等级判断为“合格”,模型具有可用性,适用于数据预测。在此基础上,引入相对残差  $\varphi_n$  和平均相对残差  $\bar{\phi}$  两项指标,用于综合反映模型预测精度,等级类型及划分依据如表 2 所示。

表2 预测精度划分依据

预测等级精度	$\varphi_n$	$\bar{\phi}$
优	$<0.01$	$<0.01$
合格	$0.01 \sim 0.05$	$0.01 \sim 0.05$
勉强合格	$0.05 \sim 0.10$	$0.05 \sim 0.10$
不合格	$>0.10$	$>0.10$

$\varphi_n=0.0008$ 、 $\bar{\phi}=0.00012$ ,两项指标取值均小于 0.01,参照表 2 划分依据,将灰色 GM(1,N)模型的预测等级精度评价为“优”,因此模型适用于水闸安全预警评价。

### 3.2 回归分析模型

二河闸测点丰富,安全预警评价分析的自变量多,针对此情况,采用多元线性回归模型对训练集数据样本进行训练。通过测试集数据样本进行模型可行性分析<sup>[4]</sup>。本次关于二河闸安全预警评价的多元回归模型如下:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7 + \beta_8 x_8 + \beta_9 x_9 \quad (2)$$

式中, $x_n$ 为自变量; $\hat{y}$ 为因变量; $\beta_n$ 为回归系数。

基于 MatLab 对多元线性回归模型进行训练,仿真结果如图 3 所示。

$\beta_n$ 取值均在置信区间内,相关系数  $R=0.993$ ,表明多元线性回归模型的相关性显著,基于模型的预测结果误差小,适用于预测精度要求较高的水闸安

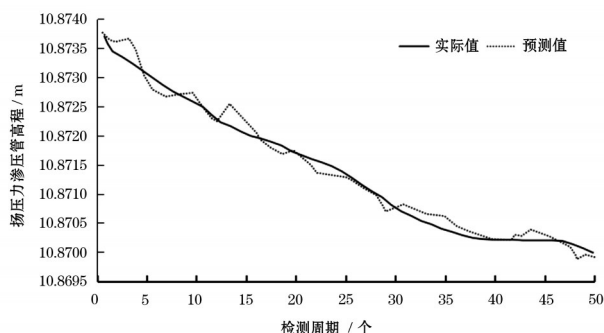


图3 模型仿真结果

全预警评价,可以作为安全预测工具进行使用。

## 4 数据预处理

二河闸运行条件复杂,受外界环境因素影响,数据采集难度高,耗时长,采集的数据可能与实际情况不一致,异常值以“毛刺”的形式出现在数据曲线上,数据利用价值低,甚至由于数据异常导致水闸安全预警评价结果严重偏离实际情况,因此需要预处理数据,为后续安全评价打好基础。通过数据处理技术对初步采集的水闸数据进行预处理,还原具有利用价值的真实数据。本次研究引入卡尔曼滤波模型,选取原因在于此类模型方便计算机编程,降低操作难度,同时数据更新能力强,可以及时获取最新数据。滤波流程,如下:

(1)引入式(3)的预测方程,由上一时刻状态预测当前状态:

$$x(k, k-1) = A \times x(k-1, k-1) + B \times U(k) \quad (3)$$

式中,  $A$  为转移矩阵;  $B$  为状态控制量参数;  $U(k)$  为当前状态控制量;  $x(k-1, k-1)$ 、 $x(k, k-1)$  分别为上一状态最优结果及基于该状态预测的结果。

(2)计算预测方差  $p(k, k-1)$ :

$$p(k, k-1) = A \times p(k-1, k-1) \times A^T + Q \quad (4)$$

式中,  $p(k-1, k-1)$  为上一状态最优方差;  $A^T$  为转移矩阵  $A$  的转置矩阵;  $Q$  为协方差。

(3)计算最优估算值  $x(k, k)$ :

$$x(k, k) = x(k, k-1) + Kg(k) \times [Z(k) - H \times x(k, k-1)] \quad (5)$$

式中,  $Z(k)$  为  $k$  时刻的测量值;  $H$  为测量矩阵;  $Kg(k)$  为卡尔曼滤波增益。

(4)计算卡尔曼滤波增益  $Kg(k)$ :

$$Kg(k) = p(k, k-1) \times H^T \times [H \times p(k, k-1) \times H^T + R]^{-1} \quad (6)$$

式中,  $H^T$  为测量矩阵  $H$  的转置矩阵;  $R$  为观测噪声协方差矩阵。

(5)为保证滤波器持续运行,利用如下公式计

算滤波协方差  $p(k, k)$ :

$$p(k, k) = [I - Kg(k) \times H] \times p(k, k-1) \quad (7)$$

式中,  $I$  为单位矩阵。

通过以上对卡尔曼滤波应用流程的了解,选取连续半年的扬压力数据进行滤波处理,结果如图4所示。通过对滤波值和实际值的对比分析可知,滤波效果良好,因此卡尔曼滤波模型适用于水闸安全预警分析的数据预处理环节。

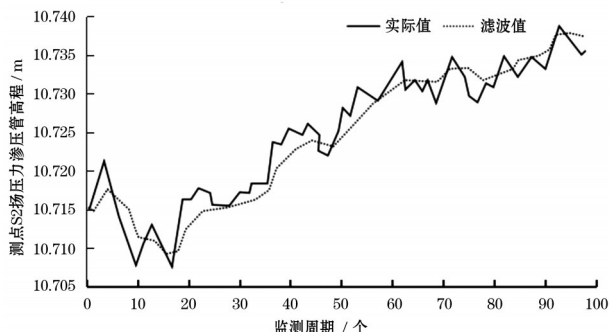


图4 卡尔曼滤波值与实际值对比

## 5 预测结果

### 5.1 单监测点低级指标预警

水闸安全预警的重点指标包含水平位移、渗压和沉陷,具体包含若干细分指标,通过一系列指标综合反映水闸安全状况,如图5所示。

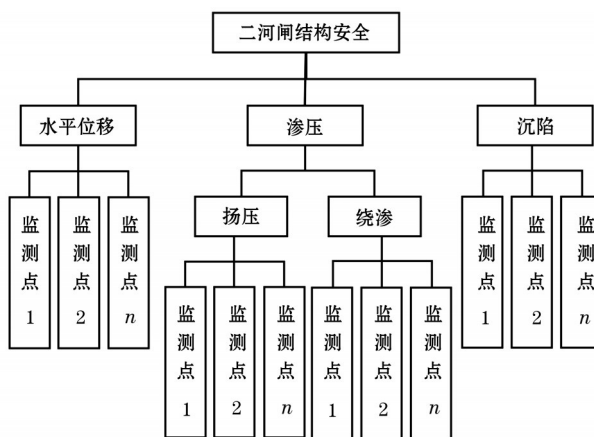


图5 水闸预警指标体系

若干单一监测点构成水闸安全预警低级指标,不同监测点所处位置、所受干扰因素均存在差异,因此发展趋势不尽相同。由于同类监测点构成高级预警指标,因此需要单独预测各监测点发展趋势,在此基础上获得相对准确的高级指标趋势预测结果。

在基于灰色预测法的监测点发展趋势预测中,取 2023-09-01 至 2023-09-30, 2023-10-01 至

2023-10-09时段的各监测点水平距离分别作为训练数据、测试数据,进行数据训练和预测。以1号监测点为例,灰色模型曲线如图6所示。

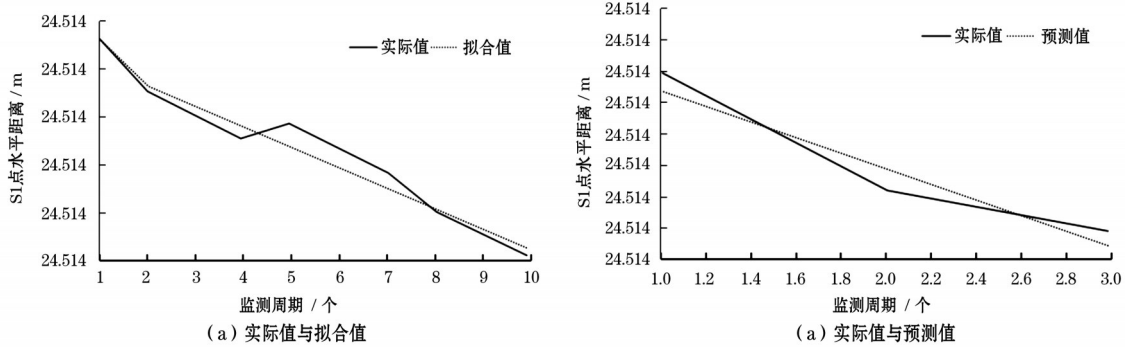


图6 灰色模型曲线

## 5.2 高级指标预警

首先利用灰色预测法对各单独的监测点进行预测,再进行整体预测和指标分析。按照以上思路,确定多元线性回归模型预测流程:建立数学模型,用于反映安全指标与监测点的线性关系,得到不同回归系数的估计值及置信区间数据统计结果,如表3所示;预测各影响因素的未来值,根据预测结果确定最终预测值。

表3 回归预测模型系数

回归系数	回归系数估计值	回归系数置信区间
$\beta_0$	-20.700	$[-71.28, 29.87]$
$\beta_1$	1.120	$[-0.15, 2.388]$
$\beta_2$	-0.054	$[-0.412, 0.306]$
$\beta_3$	-0.041	$[-0.444, 0.363]$
$\beta_4$	0.060	$[-0.2360, 0.3558]$
$\beta_5$	0.779	$[-0.8448, 2.4100]$

建立预测模型 $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5$ , 检验水平位移指标与监测点的线性关系,由于相关

通过与实际值的对比分析可知,基于灰色模型的拟合值和预测值均与各自的实际值有良好拟合效果,可以获得较准确的低级指标预测结果。

系数的平方 $R^2$ 为0.9137, $P$ 值检验低于显著水平0.05,认为两者具有显著线性关系。

训练数据和测试数据的选取时段与单监测点低级指标预警研究中训练数据和测试数据的选取时段保持一致,选择可用于研究的水平距离数据后,预测水平位移监测指标发展趋势,预测模型如图7所示。

## 5.3 高级指标发展趋势原因分析

表征闸体及其基础系统观测资料的水闸结构安全指标在时域的变化受外界环境干扰,干扰因素多,干扰机制复杂。本次水闸安全预警分析仅考虑的是某种自变量对结构安全指标的影响。通过对水闸运行状况的了解,将水平位移量作为目标函数,与输入属性建立一元线性回归模型,例如温度、水位高度、蓄水时间,结合水闸运行情况,将水位高度分为上游和下游两部分。在分析各类因素对水平位移量的影响程度时,根据输入属性与目标函数的相关程度即可从中确定关键影响因素。

目标函数与各类输入属性的散点图,如图8所示。

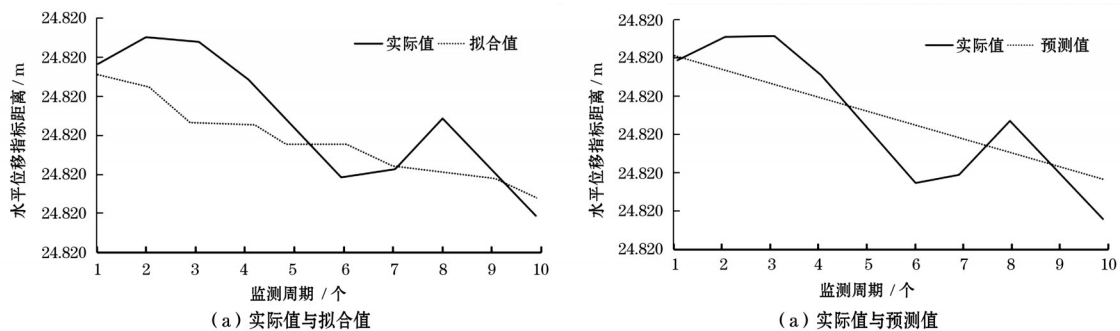


图7 回归模型曲线



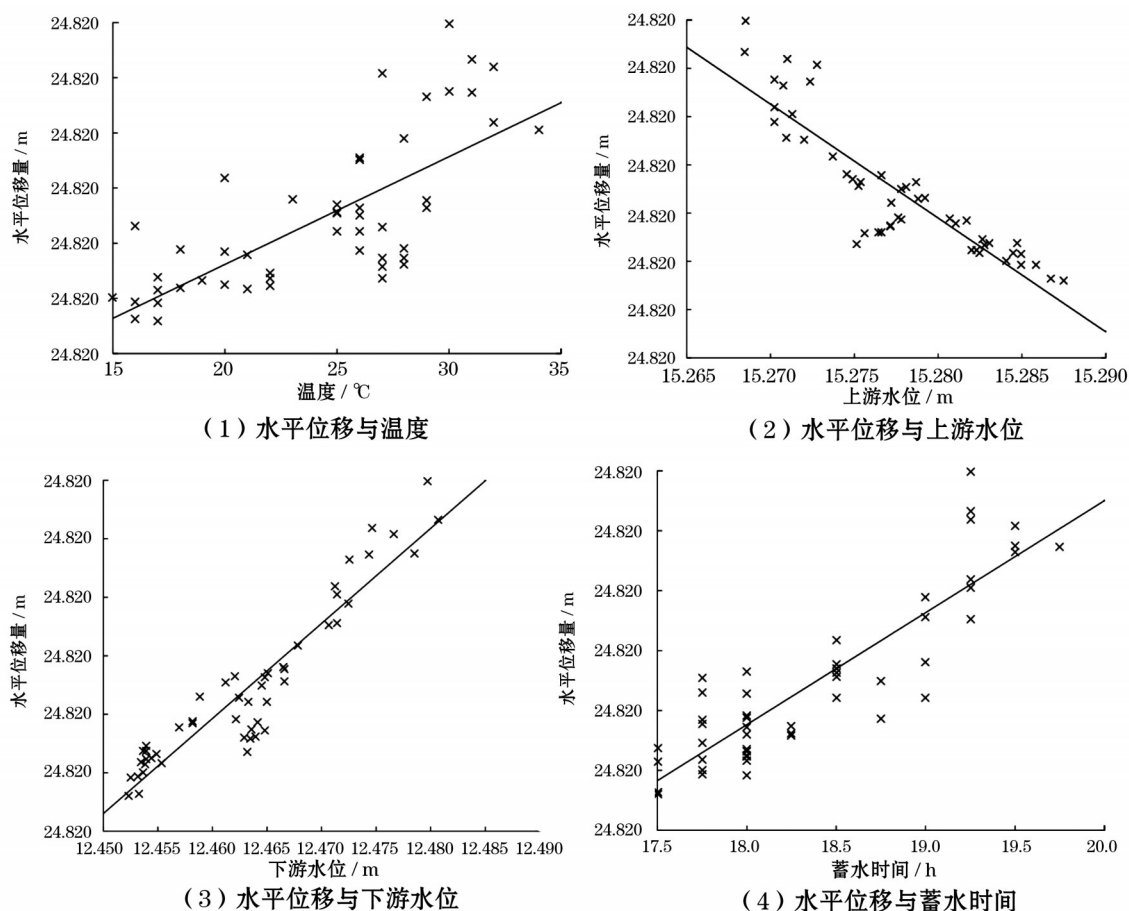


图8 水平位移与输入属性关系

根据图8可知,绝大部分点均集中分布在一条直线周边,仅有少量点分散分布,结合该散点图特点,假设回归模型为 $y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$ ,分别计算目标函数与不同输入属性的相关性指标,通过计算结果直观判断彼此间的相关性,如表4所示。

表4 相关性指标计算结果

自变量与因变量	回归系数 $\beta_0$	回归系数 $\beta_1$	相关系数
温度/水平位移	24.82015	$3.91 \times 10^{-6}$	0.71820
上游水位/水平位移	24.89233	-0.004718023	-0.88776
下游水位/水平位移	24.77971	0.003252569	0.93867
蓄水时间/水平位移	24.81956	$3.74 \times 10^{-5}$	0.88283

相关性系数 $r$ 是反映自变量与因变量相关性强弱的重要指标, $r$ 值越接近1,相关性越强。结合表4,对比分析水平位移量各影响因素的 $r$ 值,按照由大到小顺序排序依次为下游水位、上游水位、蓄水时间、温度,该排序可以用于反映不同因素对水闸结构安全指标水平位移的影响程度,即影响最微弱的因素是温度,最显著的是下游水位,其他两项影响因素介于中间,说明在4项影响因素中,下游水

位对水平位移的影响最显著。

## 6 水闸安全评价

从单一因素入手进行水闸结构安全性评价,经过单独分析后汇总,确定最终评价结果,判断水闸安全状况。

### 6.1 确定指标权重

基于变异系数法确定二河闸的水平位移一级评价权重,各指标计算结果如表5所示。

表5 水平位移一级评价指标权重

一级指标	平均值 $\bar{x}_i$	标准差 $S_i$	变异系数 $\delta_i$	权重 $\omega_i$
监测点1	24.51492	$5.54747 \times 10^{-5}$	$2.2629 \times 10^{-6}$	0.121732
监测点2	24.93719	0.000111172	$4.45809 \times 10^{-6}$	0.239822
监测点3	25.02363	0.000219608	$8.77603 \times 10^{-6}$	0.472105
监测点4	24.89982	$3.85251 \times 10^{-5}$	$1.54721 \times 10^{-6}$	0.083232
监测点5	24.41675	$3.77226 \times 10^{-5}$	$1.54495 \times 10^{-6}$	0.083110

指标变异系数由标准差和平均值求取,即,

$$\delta_i = \frac{S_i}{\bar{x}_i} \quad (8)$$

再通过变异系数求取指标权重,即,

$$\omega_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^m \delta_i} \quad (9)$$

## 6.2 确定评价集

通过  $v_i$  表示评价对象可能出现的评价结果,建立评价集  $V=(v_1, v_2, v_3, v_4)$ , 用于综合反映总评价结果。按照水闸水平位移结构安全程度的不同,将评价集定义为  $V=\{\text{安全}(v_1), \text{基本安全}(v_2), \text{安全性低}(v_3), \text{不安全}(v_4)\}$ , 评价结果可能是4种元素中的某一种。

## 6.3 单因素模糊评价

为判断评价对象对评价级元素的隶属程度,单独对影响因素进行评价。随着观测次数的增加,观测数据对隶属度函数  $\mu(x)$  具有近似正态性的关系,同时引入过渡参数  $b$ , 公式如下:

$$\mu(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2\right] \quad (10)$$

$$b = \frac{x_1 - x_2}{1.665} \quad (11)$$

式中:  $x_1, x_2$  分别为区段指标上界、下界;  $a$  为区间平均值。

单因素指标如表6所示;不同监测点的  $a$  和  $b$  两项参数取值,如表7所示。

结合前文所述的隶属度函数公式和表7的  $a$  和  $b$  取值,代入一级指标,确定单因素模糊集  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$ , 汇总,形成单因素评价矩阵  $R$  (模糊矩阵), 具体如下:

$$R = \begin{bmatrix} 0.9855 & 0.0921 & 0.0000 & 0.5280 \\ 0.6160 & 0.4443 & 0.0014 & 0.4998 \\ 0.9632 & 0.2653 & 0.0004 & 0.4998 \\ 0.9767 & 0.0366 & 0.0000 & 0.4985 \\ 0.0127 & 0.9593 & 0.0304 & 0.5525 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

## 6.4 模糊综合评价

单因素模糊评价反映的是各类影响因素中某单一因素产生的影响,而水闸水平位移是多因素共同作用的结果,因此进行模糊综合分析,考虑各类因素对水闸水平位移产生的影响。根据各指标权重  $W$  和模糊矩阵  $R$ , 确定合成算子,实现对水闸水平位移各影响因素的综合评价,最终获得相对客观的水闸安全评价结果,关系式如下:

$$B = W \cdot R \quad (13)$$

最终模糊评价集  $B=[0.8048 \ 0.3258 \ 0.0030 \ 0.5075]$ , 充分保留各类具有利用价值的信息,以获得可靠的综合评价结果,同时该评价集适应各因素影响。根据最大隶属度原则进行水闸安全模糊综合评价,最

表6 水平位移单因素指标

指标	安全	基本安全	安全性低	不安全
监测点1	24.514~24.516	24.512~24.514	24.510~24.512	0~24.510
监测点2	24.936~24.937	24~934~24.936	24.932~24.934	0~24.932
监测点3	25.025~25.024	25.021~25.023	25.019~25.021	0~25.019
监测点4	24.899~24.901	24.901~24.903	24.903~24.905	24.905~30
监测点5	24.415~24.416	24.416~24.418	24.418~24.20	24.20~30

表7 水平位移指标隶属函数的参数

指标		$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$
监测点1	$a$	24.5150	24.5130	24.5110	12.7500
	$b$	0.0012	0.0012	0.0012	14.7207
监测点2	$a$	24.9365	24.9350	24.9330	12.4660
	$b$	0.0006	0.0012	0.0012	14.9742
监测点3	$a$	25.0235	25.0220	25.0200	12.5095
	$b$	0.0006	0.0012	0.0012	15.0264
监测点4	$a$	24.9000	24.9020	24.9040	27.4530
	$b$	0.0012	0.0012	0.0012	3.0601
监测点5	$a$	24.4155	24.4170	24.4190	27.1000
	$b$	0.0006	0.0012	0.0012	3.4835

终确定评价结果为向量  $v_i$ , 对照前文提出的水平位移评价集  $V$ , 二河闸水平位移安全指标总体评价结果为“安全”。

## 7 结 语

本文考虑到二河闸安全预警评价的复杂性,提出 GM 预测与 Logistic 回归模型相结合的综合评价方法,经过理论研究和实例验证,得到如下结论:(1)GM 模型对水闸运行状态变化趋势的预测结果较准确,Logistic 回归模型在水闸安全预警中具有分类性能可靠的优势,融合两种方法的综合方案可以获得可靠的水闸安全评价结果。(2)相比实际值,拟合曲线、预测曲线虽然与之存在偏差但不显著,总

体趋势大体相同;基于高级指标的水闸安全评价结果表明,各类影响因素中对水闸安全造成显著影响的是下游水位,影响最小的因素是温度。(3)综合评价结果为向量 $v_i$ ,结合水闸水平位移评价集 $V$ 可知水闸评价等级为“安全”。本文方法适用于水闸安全预警,通过可靠的预警信息反馈水闸安全运行状况,为水闸维护管理提供依据,及时排除安全隐患,保障水闸安全运行。

#### 参考文献:

[1] 俞扬峰,马福恒,娄本星,等. 基于BIM+GIS的区域水闸

安全监测分析预警系统研发[J/OL]. 水利水运工程学报,1-13[2024-12-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1613.TV.20240716.1859.006.html>.

[2] 毛战亮,吕辉. 多闸段病险水闸安全综合评价[J]. 水利技术监督,2024(9):288-291.

[3] 冯露,张今阳. 基于改进CRITIC-FAHP理论的大型水闸安全运行多级模糊综合评价[J]. 吉林水利,2024(8):16-21.

[4] 沈昊,王铁力,吴东伟,等. 基于SVM的水闸安全综合评价模型及其应用[J]. 水利技术监督,2023(9):258-262.

(上接第13页)

#### 参考文献:

[1] 李铭华,严彬,朱相丞,等. 复杂流态下长江深槽岸坡沙袋防护设计与施工[J]. 水运工程,2020(10):198-202.

[2] 熊勇子,李大峰. 南京幕燕滨江路沿江岸坡水下抛石护岸施工探讨[J]. 科技与企业,2012(14):252-253.

[3] 朱昊,王茂枚,娄丹,等. 袋装沙枕水下抛投漂移距现场试验研究[J]. 水运工程,2022(2):191-196.

[4] 季骏,徐文婕,鲍中秋. 河道整治工程中袋装砂土枕试

验方案的分析[J]. 大众标准化,2022(18):101-103.

[5] 邓传贵,甘磊,庄雪飞. 南京八卦洲袋装砂抛枕防护施工技术的研究与应用[J]. 人民长江,2021,52(11):150-154,174.

[6] 金毅,杨梅萍,曹茜茜,等. 浅谈吹填技术在温州东围堤工程中的应用[J]. 大坝与安全,2011(2):57-62.

[7] 林宏,尹必岭. 在围堤龙口封堵工程中的退堤施工[J]. 中国水运,2010(6):48-49.