

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.008

基于动态权重-云模型的大型渡槽安全综合评价

王媛^{1,2}, 张志慧^{1,2}, 任杰¹, 王佟童^{1,2}, 刘佳豪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. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对传统渡槽安全评价方法忽略了评价指标权重的动态变化, 不能实时反映危险因子对渡槽实际运行状态的影响等缺陷, 提出了一种基于动态权重-云模型的渡槽安全综合评价方法, 引入动态权重模型为评价指标动态赋权, 并利用云模型获取评价指标隶属度。将该方法应用于南水北调中线干线工程 M 河渡槽安全评价并与静态权重模型评价结果进行了对比, 结果表明, 动态权重-云模型实现了评价指标层权重计算结果随工程运行状态的实时变化, 同时对危险因子的识别敏感性更高, 提高了评价方法对复杂运行环境下渡槽安全综合评价的适用性和准确性。

关键词: 渡槽; 动态安全综合评价; 动态权重; 云模型

中图分类号: TV672⁺.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2023)02-0056-08

Comprehensive evaluation of large-scale aqueduct safety based on dynamic weight-cloud model

WANG Yuan^{1,2}, ZHANG Zhihui^{1,2}, REN Jie¹, WANG Tongtong^{1,2}, LIU Jiahao³

(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. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In view of the defect that the traditional safety evaluation method of aqueduct ignores the dynamic change of index weight and cannot reflect the impact of danger factors on the actual operating state of aqueduct in real time, a comprehensive evaluation method of aqueduct safety based on the dynamic weight-cloud model is proposed, in which the dynamic weight model is introduced to dynamically weight the evaluation index, and the cloud model is used to obtain the membership degree of evaluation index. This method was applied to the safety evaluation of the M River aqueduct in the middle line of the South-to-North Water Diversion Project and compared with the research results of static weight model. The results showed that the dynamic weight model realized that the calculation result of the weight of evaluation index layer changed in real time with the project operation state, and at the same time had a higher sensitivity to the identification of risk factors, which improved the applicability and accuracy of the evaluation method for the comprehensive evaluation of aqueduct safety under complex operating environments.

Key words: aqueduct; comprehensive evaluation of dynamic safety; dynamic weight; cloud model

南水北调是解决我国北方地区水资源紧缺、优化水资源配置的一项重要战略措施。南水北调中线总干渠共建设 27 座大型渡槽^[1]。渡槽作为长距离调水工程常用的建筑物类型, 是线性调水工程的重要节点建筑物, 其安全状态关乎整个调水工程的正常运行^[2]。渡槽建成后面临结构老化和外力损伤等安全风险, 其综合性能会随着时间的推移而降低。如何准确地对渡槽安全进行综合评价, 及时诊断渡槽的安全状态是工程中亟须解决的问题。

现阶段渡槽安全评价的方法有两类: 一是将工程资料与数学建模相结合, 采用有限元方法对渡槽安全状态进行分析。例如: 尚峰等^[3]运用有限元软件模拟渡槽在各工况下静、动力状态, 对钢筋混凝土渡槽局部与

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0406906)

作者简介: 王媛(1969—), 女, 教授, 博士, 主要从事岩土渗流与地下工程、智慧水利等研究。E-mail: wangyuanhhu@163.com

通信作者: 任杰(1991—), 男, 讲师, 博士, 主要从事智慧水利与智能减灾研究。E-mail: rj@hhu.edu.cn

引用本文: 王媛, 张志慧, 任杰, 等. 基于动态权重-云模型的大型渡槽安全综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 56-63.

WANG Yuan, ZHANG Zhihui, REN Jie, et al. Comprehensive evaluation of large-scale aqueduct safety based on dynamic weight-cloud model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 56-63.

整体的安全稳定性进行了评价;甘磊等^[4]应用有限元模型计算了不同工况下红旗渠南古洞渡槽的应力应变分布,并对渡槽安全性进行了复核。但有限元方法计算结果误差大,对模型与计算参数选取的精度依赖性强,且容易忽略渡槽工程受水文地质、周围环境及极端气候等因素的影响。二是把渡槽看作一个不确定力学模型,应用模糊理论对渡槽工程进行安全综合评价。例如:张志雄等^[5]以连续多跨渡槽复杂结构拆除爆破为研究对象,基于模糊层次分析法构建渡槽安全评价模型,分析得出渡槽安全等级;罗日洪等^[6]针对渡槽安全评价中指标赋权和模糊综合评价法算子优化的问题,提出了基于自然指数标度的层次分析法对渡槽进行模糊综合评价。以上研究运用传统赋权法进行评价指标权重分配,只考虑了渡槽工程某一时刻的安全状态,评价体系中指标的权重固定不变,忽略了指的动态变化,导致评价结果与工程实际运行状态有一定的偏差。

动态权重法能够实现评价指标权重的动态更新,具体体现在两方面:一是工程层面,不同工程由于所处地理环境不同,所以评价指标权重不完全一致;二是时间地点层面,工程运行过程中不同技术获取的评价指标信息是不同的,所以评价指标权重随着指标信息变化而改变。姜彤等^[7]通过改进传统的多指标评判方法,建立了动态权重灰色归类模型进行岩爆预测,并与有限元法对比得出动态权重灰色归类模型精度更高的结论。李聪等^[8]考虑评价指标变化特征,通过将简单关联函数与层次分析法相结合,计算了影响库岸边坡稳定性的各项评价指标的动态权重。但上述研究在计算隶属度时尚未充分根据监测和检测数据实时更新评价指标隶属度值,评价结论滞后。

本文将动态权重法与云模型相结合,提出了一种新型综合评价方法对复杂运行环境下渡槽工程的安全状态进行综合评价,并通过南水北调中线干线 M 河渡槽工程实例安全综合评价,验证了该方法的合理性和可行性。

1 基于动态权重-云模型的渡槽安全综合评价方法

基于动态权重-云模型的安全综合评价流程主要包含三个部分:评价指标动态权重的计算、评价指标隶属度的确定和动态安全综合评价结果的求解。基于动态权重模型对定量指标和定性指标进行标准化处理,确定各个评价指标动态权重;基于云模型由评价指标的实测值求解该指标相应于各安全等级的从属关系即隶属度;基于模糊理论的基本原理,将动态权重与动态隶属度进行融合计算得到综合评价结果,从而实现工程安全多指标综合评价。具体的安全评价流程如图 1 所示。

1.1 渡槽动态权重模型

动态权重法是一种根据特定工程特点和动态信息反馈,及时调整评价指标对工程安全影响强弱程度的方法。本文构建的渡槽动态权重模型包含 3 个部分:以普适标准权重反映渡槽工程的历史信息;以工程标准权重反映一般环境下的渡槽工程特殊性;结合实时熵权反映渡槽运行过程中指标权重的动态变化。渡槽动态权重模型评价指标动态权重计算流程如图 2 所示。

a. 确定普适标准权重。调研历史上渡槽工程破坏事故发生的原因,统计渡槽安全影响因素及评价指标频数,计算每个评价指标的百分比,最后进行归一化处理获得评价指标的普适标准权重。

b. 确定工程标准权重。引入工程标准权重反映不同地理环境下渡槽工程特殊性。本文采用层次分析法(AHP)来确定渡槽安全评价指标权重取值,以保证特定渡槽安全评价指标体系中各指标重要程度得到有效区分。运用 AHP 确定各评价指标的初始权重^[9],结合普适标准权重计算工程标准权重,即

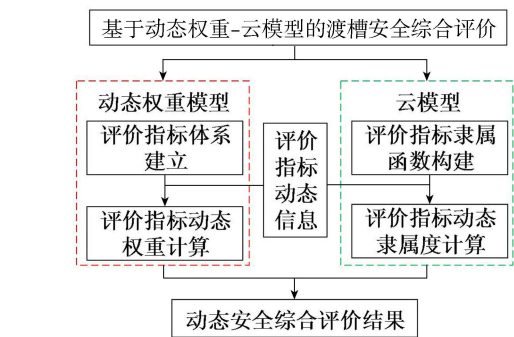


图 1 基于动态权重-云模型的渡槽安全综合评价流程
Fig.1 Flow of aqueduct safety comprehensive evaluation method based on the dynamic weight-cloud model

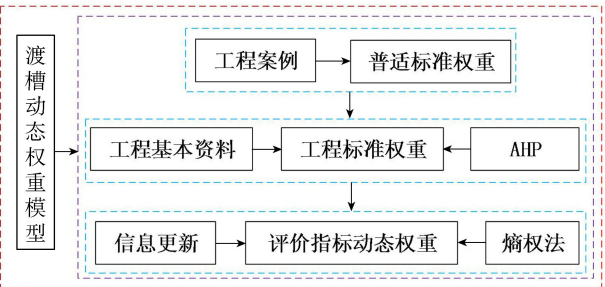


图 2 渡槽动态权重模型评价指标动态权重计算流程
Fig.2 Flowchart of aqueduct dynamic weight model realizing the weight calculation of evaluation index

$$w_{g,i} = \frac{w_{0,i}w_{p,i}}{\sum_{i=1}^m w_{0,i}w_{p,i}} \tag{1}$$

式中: $w_{g,i}$ 为评价指标*i*工程标准权重; $w_{0,i}$ 为评价指标*i*采用 AHP 计算的初始权重; $w_{p,i}$ 为评价指标*i* 普适标准权重; m 为评价指标总数。

c. 确定指标动态权重。评价指标权重是指标对渡槽安全影响程度的一个定量化表征,在渡槽运行过程中,其随着指标值的变化而变化。熵权法^[10-11]作为一种客观赋权法,可反映指标信息的波动性,根据各指标传递给决策者的信息量大小来确定其权重,能准确反映渡槽安全评价指标所含的信息量。本文采用熵权法来解决渡槽安全评价指标信息量大、量化难的问题,实现评价过程中评价指标权重的动态化。

$$w_{ij} = \frac{w_{s,ij}w_{g,i}}{\sum_{i=1}^m w_{s,ij}w_{g,i}} \tag{2}$$

式中: w_{ij} 为评价指标*i*第*j*次更新后的动态权重; $w_{s,ij}$ 为评价指标*i*第*j*次更新的熵权;*j* 为动态权重更新次数。

1.2 渡槽隶属云模型

隶属函数是安全评价体系的基础,选取恰当的隶属函数可以保证评价结果合理可靠。传统模糊集理论在采用精确的数学函数表示隶属函数时会对评价指标数据进行筛选和剔除,削弱了渡槽工程运行状态的复杂性和随机性^[12]。云模型是一种将定性概念与其定量数值表示之间的不确定性进行转换的模型,它可以解决渡槽安全综合评价过程中的模糊性和随机性问题,能够进行比较客观有效的评价,具有普遍的适用性^[13-14]。因此选用云模型代替数学函数进行评价指标隶属函数计算。

1.2.1 云模型

云数字特征和云发生器为云模型理论的两个核心内容。云模型通过期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 3 个数字特征整体表征一个概念,其中期望 E_x 是这一概念在其论域中的中心值,是最能表达这一概念的数值;熵 E_n 为概念不确定程度的度量,熵越大,概念相对越模糊;超熵 H_e 为熵的不确定程度的度量,即熵的熵,表现为云的离散程度。评价指标对某一渡槽安全等级的云数字特征可表示为^[15]

$$E_x = (B_{\max} + B_{\min})/2 \tag{3}$$

$$E_n = (B_{\max} - B_{\min})/3 \tag{4}$$

$$H_e = l \tag{5}$$

式中: $B_{\max}$ 、 $B_{\min}$ 分别为某一等级标准的最大与最小边界值; l 为常数^[16]。

云发生器 (cloud generator, CG) 有正向云发生器与逆向云发生器之分,可分别实现定性与定量的转换和其反向过程^[17]。

1.2.2 评价指标隶属度的计算

通过确定各安全等级的云模型数字特征 (E_x, E_n, H_e), 可以构建出渡槽安全综合评价的正态云模型,根据下式求评价指标实测值 x_i 对各安全等级的隶属度 $\mu(x)$:

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E_n^2}\right] \tag{6}$$

1.3 渡槽动态安全综合评价

根据式(2)与式(6)计算得到评价指标动态权重和隶属度,利用下式计算得到渡槽动态安全评价结果:

$$Q_j = \sum_{i=1}^m w_{ij}\mu_{ij} \tag{7}$$

式中: Q_j 为第*j*次更新后的渡槽安全综合评价结果; μ_{ij} 为评价指标*i*第*j*次更新后的隶属度。

2 工程应用

2.1 工程概况

M 河渡槽(图 3)是南水北调中线工程总干渠的一座大型河渠交叉建筑物,为三槽一联钢筋混凝土矩形

槽,总长 829 m,其中跨河渡槽长 640 m,共 16 跨。渡槽设计流量 $230\text{ m}^3/\text{s}$,加大流量 $250\text{ m}^3/\text{s}$,设计水深 5.66 m,加大水深 6.06 m,地震基本烈度为 7 度。对该渡槽工程质量检测结果表明,存在槽身竖墙裂缝、槽身空鼓裂缝、局部积水、初设采用的桩基础不能满足单桩设计承载力的要求等问题。

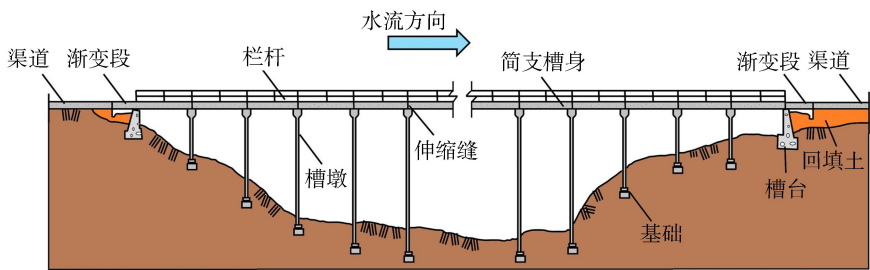


图 3 M 河渡槽工程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the M River aqueduct project

2.2 渡槽安全综合评价指标体系构建

依据渡槽工程破坏机理,以 T/CHES 22—2018《渡槽安全评价导则》为基准,结合 M 河渡槽工程实际全寿命周期的运行状态,构建包括目标层、子目标层和评价指标层的渡槽安全综合评价指标体系如图 4 所示,子目标层包括安全性、耐久性和适用性 3 个方面^[6],评价指标层由槽身变形、混凝土应变、钢筋应力等监测信息和止水结构破损、混凝土强度、混凝土表面剥蚀等检测信息及抗震安全、地基承载能力等工程设计信息共 15 个因素组成。

根据 T/CHES 22—2018《渡槽安全评价导则》,将渡槽安全评价等级划分为基本安全(Ⅰ级)、较安全(Ⅱ级)、轻度危险(Ⅲ级)和危险(Ⅳ级)4 级,安全程度递减,评定标准如下:Ⅰ级为评价指标能满足设计和标准要求,基本无影响正常运行的缺陷;Ⅱ级为评价指标基本满足设计和标准要求,工程存在一定损坏或缺陷;Ⅲ级为评价指标不满足设计和标准要求,存在影响工程正常运行的缺陷;Ⅳ级为评价指标无法满足设计和标准要求,工程存在严重安全问题。

2.3 渡槽动态安全综合评价

2.3.1 基于动态权重模型的评价指标权重计算

依据顾培英等^[18]收集到的国内部分渡槽破坏实例数据,计算每个评价指标的普适标准权重。考虑 M 河渡槽工程的实际运行管理情况,选择 M 河渡槽施工和运行阶段的实际监测检测数据进行统计分析,根据建立的动态权重模型计算渡槽施工期和运行期的评价指标动态权重,结果见表 1。

表 1 M 河渡槽评价指标权重

Table 1 Evaluation index weight of the M river aqueduct

评价指标	普适标准权重	工程标准权重	熵权		动态权重		评价指标	普适标准权重	工程标准权重	熵权		动态权重	
			施工期	运行期	施工期	运行期				施工期	运行期	施工期	运行期
A	0.330	0.597	0.326	0.574	0.587	0.776	B ₃	0.029	0.145	0.120	0.236	0.066	0.141
A ₁	0.087	0.222	0.251	0.259	0.331	0.304	B ₄	0.029	0.143	0.275	0.254	0.141	0.141
A ₂	0.087	0.317	0.110	0.063	0.210	0.108	C	0.450	0.259	0.348	0.327	0.272	0.192
A ₃	0.029	0.040	0.251	0.259	0.060	0.055	C ₁	0.097	0.189	0.112	0.095	0.109	0.089
A ₄	0.049	0.124	0.280	0.144	0.201	0.092	C ₂	0.117	0.227	0.113	0.224	0.133	0.255
A ₅	0.078	0.297	0.110	0.275	0.197	0.440	C ₃	0.049	0.094	0.090	0.110	0.041	0.049
B	0.220	0.144	0.326	0.099	0.141	0.032	C ₄	0.039	0.139	0.206	0.101	0.148	0.070
B ₁	0.117	0.572	0.307	0.254	0.640	0.575	C ₅	0.078	0.278	0.369	0.360	0.529	0.499
B ₂	0.049	0.140	0.298	0.256	0.153	0.143	C ₆	0.068	0.073	0.112	0.110	0.040	0.038

由表 1 可以看出,评价指标体系中 15 个评价指标的权重随渡槽施工的实际数据发生变化,表现出指标权重在不同时期的动态特性。在渡槽安全性、适用性、耐久性 3 个子目标中,安全性 A 的权重由施工期

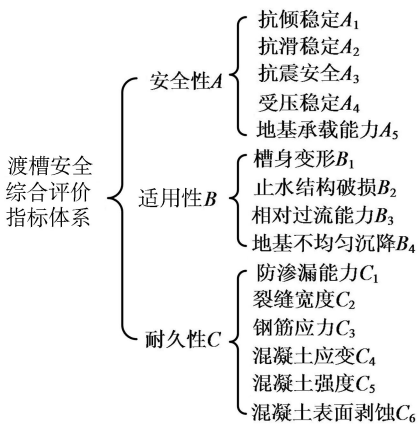


图 4 渡槽安全综合评价指标体系

Fig. 4 Diagram of comprehensive evaluation system for the safety of aqueduct project

0.587变为运行期0.776,适用性 B 和耐久性 C 的权重则有下降趋势,对照M河渡槽工程实际运行情况可知,这是因为施工期出现部分基础设计不满足要求、槽身空鼓裂缝、局部积水等现象,导致评价指标集中的相应指标实时监测与检测数据变化幅度在施工期大于运行期,而动态权重模型正确合理地调整了各评价指标的权重,所以适用性和耐久性的权重在施工期更高。因此,动态权重模型可以及时准确地反映出渡槽运行过程中不利事件对工程安全的动态影响。

2.3.2 基于云模型的指标隶属度计算

依据SL191—2008《水工混凝土结构设计规范》、DB44/T2041—2017《渡槽安全鉴定规程》、DL/T5251—2010《水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程》等规范、规程和相关文献^[2,19],考虑影响渡槽安全的各方面因素,制定评价指标隶属度分级标准,并采用现有的安全等级划分方式,设置I级(绿色)、II级(蓝色)、III级(紫色)、IV级(红色)4个等级,安全程度递减,划分标准如表2所示。

表2 评价指标隶属度分级标准

Table 2 Grading standard of evaluation index membership						
等级	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	B_1/mm B_2
I级	≥ 1.05	≥ 1.05	≥ 1.2	≥ 1.05	≥ 1.0	无明显变形 止水结构基本完好,无漏水
II级	$0.95 \sim <1.05$	$0.95 \sim <1.05$	$1.0 \sim <1.2$	$0.95 \sim <1.05$	$0.95 \sim <1.0$	≤ 20 止水结构轻微破损,无漏水
III级	$0.85 \sim <0.95$	$0.85 \sim <0.95$	$0.8 \sim <1.0$	$0.85 \sim <0.95$	$0.9 \sim <0.95$	$>20 \sim 50$ 止水结构较大破损,有轻微漏水
IV级	<0.85	<0.85	<0.8	<0.85	<0.9	>50 止水结构破损严重,严重漏水
等级	B_3	B_4	C_1	C_2/mm	C_5	C_6
I级	≥ 1.0	无明显沉降,地基沉降停止	无明显渗漏	≤ 0.15	≥ 1.0	局部起皮
II级	$0.95 \sim <1.0$	轻微沉降,连续2月沉降速度小于2 mm/月	轻微渗漏	$>0.15 \sim 0.25$	$0.9 \sim <1.0$	脱壳、起皮面积大于1/4总面积
III级	$0.9 \sim <0.95$	中度沉降,连续2月沉降速度大于2 mm/月	中度渗漏	$>0.25 \sim 0.35$	$0.8 \sim <0.9$	脱壳、起皮面积大于1/3总面积
IV级	<0.9	严重沉降	严重渗漏	>0.35	<0.8	脱壳、起皮面积大于1/2总面积

注:钢筋应力 C_3 和混凝土应变 C_4 以具体测点位置受力特点为依据。

基于逆向云发生器计算不同等级评价指标的云模型特征值,基于正向云发生器生成评价指标隶属云图,即为云模型评价结果。图5为裂缝宽度 C_2 和混凝土强度 C_5 的隶属云图。以评价指标地基承载力 A_5 为例,将其数据代入云模型,得到运行期该评价指标对应安全等级隶属度 $\mu=(0.604,0.396,0,0)$,同理可得到其他评价指标不同时期对应不同等级的隶属度,结果见表3。

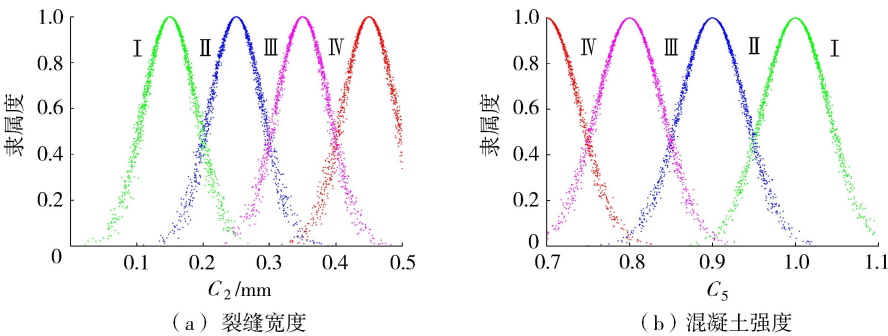


图5 评价指标隶属云图

Fig. 5 Cloud map of evaluation index membership

2.3.3 动态安全评价结果

结合已得到的评价指标动态权重及隶属度,根据式(7)计算得到渡槽动态安全评价结果如表3所示。分析表3可知,M河渡槽工作环境条件复杂,槽身变形、裂缝宽度、地基承载力等评价指标隶属度随渡槽工程实际运行产生较大波动,使得安全性、适用性和耐久性3个子目标对各安全等级隶属度由施工期的(0.749,0.245,0.006,0)、(0.957,0.043,0,0)、(0.949,0.051,0,0)变为运行期的(0.680,0.317,0.003,0)、(0.531,0.431,0.038,0)、(0.731,0.264,0.005,0)。按最大隶属度来看,渡槽运行期安全性、适用性和耐久性3个子目标安全等级均为I级,但属于II级的可能性分别高达31.7%、43.1%和26.4%。建议在渡槽运行期特别注意其适用性问题,即渡槽正常使用性能,发现病害情况要及时进行维修加固,确保工程安全稳定运行。

表 3 评价指标隶属度计算结果

Table 3 Calculation result of evaluation index membership degree

评价指标	施工期				运行期			
	I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级
A	0.749	0.245	0.006	0	0.680	0.317	0.003	0
A ₁	0.978	0.022	0	0	0.968	0.032	0	0
A ₂	0.406	0.580	0.014	0	0.332	0.654	0.014	0
A ₃	1.000	0	0	0	0.965	0.035	0	0
A ₄	0.406	0.580	0.014	0	0.332	0.654	0.014	0
A ₅	1.000	0	0	0	0.604	0.396	0	0
B	0.957	0.043	0	0	0.531	0.431	0.038	0
B ₁	1.000	0	0	0	0.301	0.633	0.066	0
B ₂	0.713	0.287	0	0	0.815	0.185	0	0
B ₃	1.000	0	0	0	0.910	0.090	0	0
B ₄	1.000	0	0	0	0.823	0.177	0	0
C	0.949	0.051	0	0	0.731	0.264	0.005	0
C ₁	0.726	0.274	0	0	0.827	0.173	0	0
C ₂	0.982	0.018	0	0	0.089	0.890	0.021	0
C ₃	0.990	0.010	0	0	0.956	0.044	0	0
C ₄	0.954	0.046	0	0	0.815	0.185	0	0
C ₅	1.000	0	0	0	0.994	0.006	0	0
C ₆	0.721	0.279	0	0	0.804	0.196	0	0
Q	0.833	0.164	0.003	0	0.685	0.310	0.005	0

根据最大隶属度原则,选取隶属度最大值对应的等级作为最终渡槽安全综合评价等级。M 河渡槽工程在施工期和运行期两阶段安全等级均属于 I 级,工程整体处于安全状态,与工程实际运行状态相符。但目标层对 I 级隶属度施工期为 0.833,运行期为 0.685,降幅较大,使得工程安全等级趋向于Ⅱ级,说明渡槽工程有较大可能存在安全隐患。因此,若不对槽身变形、裂缝宽度、地基承载力等评价指标进行重点关注,将无法及时获取影响渡槽安全运行的因素,造成安全管理及治理的滞后状态,将会影响整个水利工程的服役状态。

2.3.4 对比及分析

为了验证动态权重-云模型的优势,将传统静态权重模型的评价结果与本文动态权重-云模型评价结果进行对比,结果如表 4 所示。由表 4 可知,运用静态权重模型进行权重计算时,安全性、适用性和耐久性 3 个子目标权重保持不变,而基于动态权重-云模型的权重计算结果随渡槽实际运行状态变化。从评价结果可知,静态权重模型评价结果施工期为(0.846,0.151,0.002,0),运行期为(0.704,0.289,0.007,0),而动态权重-云模型评价结果施工期为(0.833,0.164,0.003,0),运行期为(0.685,0.310,0.005,0),动态权重-云模型的评价结果波动幅度更大,安全等级偏向Ⅱ级的程度高,工程危险性增加。与静态权重模型相比,利用动态权重-云模型进行渡槽安全综合评价时,评价过程中充分考虑了不同时期渡槽各评价指标数据实时变化过程,符合渡槽工程运行特点。同时,因动态权重-云模型包含指标信息量丰富,使得评价结果变动幅度较大,对危险因子的识别敏感程度高,从而能及早将渡槽危险警情表现出来,有助于发挥渡槽安全综合评价对工程风险预测的作用。

表 4 评价结果对比

Table 4 Comparison of evaluation results

评价时期	静态权重模型				动态权重-云模型			
	安全性权重	适用性权重	耐久性权重	评价结果	安全性权重	适用性权重	耐久性权重	评价结果
施工期	0.330	0.260	0.410	(0.846,0.151,0.002,0)	0.590	0.141	0.273	(0.833,0.164,0.003,0)
运行期	0.330	0.260	0.410	(0.704,0.289,0.007,0)	0.776	0.032	0.192	(0.685,0.310,0.005,0)

3 结 语

本文根据渡槽实时运行状态构建了渡槽安全综合评价指标体系,引入动态权重-云模型对评价指标进行动态赋值,对 M 河渡槽工程施工期和运行期的安全状态进行了评价,并与静态权重模型进行对比分析,验证

了动态权重-云模型的合理性与优越性。基于动态权重-云模型的安全综合评价方法能够根据工程实际运行状态及时调整评价指标权重,并同步更新渡槽安全综合评价结果,使得评价结果更具合理性,同时可根据波动较大的评价指标采取针对性的除险加固措施以确保工程安全运行,从而实现中长期尺度下对渡槽安全运行状态的动态预测。与传统静态权重模型相比,动态权重-云模型包含指标信息量丰富,对危险因子的识别敏感性高,更能反映渡槽安全状态的真实情况,从而有效发挥安全综合评价对工程风险预测的作用,可为实际渡槽工程的安全综合评价与管理提供借鉴。

参考文献:

[1] 王松涛. 南水北调中线工程大型渡槽水位波动机理及控制措施研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2021.

[2] 张锋. 宁夏引黄灌区输水渡槽安全鉴定与评价研究[J]. 人民黄河,2016,38(7):134-137. (ZHANG Feng. Study on the appraisal and evaluation of aqueduct security in the irrigation area of Ningxia[J]. Yellow River,2016,38(7):134-137. (in Chinese))

[3] 尚峰,祝彦知,纠永志. 在役钢筋混凝土渡槽安全评价与病害处理[J]. 水利水电技术,2018,49(12):208-214. (SHANG Feng,ZHU Yanzhi,JIU Yongzhi. Safety evaluation and disease treatment of reinforced concrete aqueduct in service[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2018,49(12):208-214. (in Chinese))

[4] 甘磊,马洪影,马泽锴,等. 红旗渠南古洞渡槽应力变形及稳定性分析[J]. 水利水电科技进展,2020,40(5):70-75. (GAN Lei,MA Hongying,MA Zekai,et al. Stress deformation and stability analysis of Nangudong aqueduct in Hongqi Canal[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(5):70-75. (in Chinese))

[5] 张志雄,叶雪云,殷志强,等. 基于FAHP法的连续多跨渡槽拆除爆破安全评价[J]. 中国安全科学学报,2020,30(11):67-74. (ZHANG Zhixiong,YE Xueyun,YIN Zhiqiang,et al. Safety evaluation of continuous multi-span aqueduct's demolition blasting based on FAHP method[J]. China Safety Science Journal,2020,30(11):67-74. (in Chinese))

[6] 罗日洪,黄锦林,李兆恒. 基于改进FCE的渡槽安全综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):162-169. (LUO Rihong,HUANG Jinlin,LI Zhaozheng. Comprehensive safety evaluation of aqueduct based on improved FCE method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(2):162-169. (in Chinese))

[7] 姜彤,黄志全,赵彦彦. 动态权重灰色归类模型在南水北调西线工程岩爆风险评估中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(7):1104-1108. (JIANG Tong,HUANG Zhiquan,ZHAO Yanyan. Dynamically weighted grey optimization model for rockburst risk forecasting and its application to Western Route of South-North Water Transfer Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(7):1104-1108. (in Chinese))

[8] 李聪,申思然,刘江,等. 基于动态权重的土质岸坡稳定性模糊评价方法[J]. 长江科学院院报,2013,30(1):15-20. (LI Cong,SHEN Siran,LIU Jiang,et al. Method of evaluating reservoir bank stability by multi-level variable fuzzy sets based on dynamic weight[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2013,30(1):15-20. (in Chinese))

[9] 李少朋,赵衡,王富强,等. 基于AHP-TOPSIS模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2021,37(3):20-25. (LI Shaopeng,ZHAO Heng,WANG Fuqiang,et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):20-25. (in Chinese))

[10] 杜现增,袁榆梁,孟钰,等. 基于复合模糊物元-熵权组合模型的淮干主流健康综合评价[J]. 水资源保护,2021,37(3):145-151. (DU Xianzeng,YUAN Yuliang,MENG Yu,et al. Comprehensive health evaluation of Huaihe River mainstream based on compound fuzzy matter element-entropy weight combination model[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):145-151. (in Chinese))

[11] 贾艳红,赵军,南忠仁,等. 基于熵权法的草原生态安全评价:以甘肃牧区为例[J]. 生态学杂志,2006,25(8):1003-1008. (JIA Yanhong,ZHAO Jun,NAN Zhongren,et al. Ecological safety assessment of Grassland based on entropy-right method:a case study of Gansu pastoral area[J]. Chinese Journal of Ecology,2006,25(8):1003-1008. (in Chinese))

[12] 王媛,刘佳豪,郝泽嘉,等. 基于AHP-云模型的大型输水倒虹吸安全综合评价[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):79-84. (WANG Yuan,LIU Jiahao,HAO Zejia,et al. Comprehensive safety evaluation of large water conveyance inverted siphon based on AHP-cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(2):79-84. (in Chinese))

[13] 李德毅,刘常昱,杜鹄,等. 不确定性人工智能[J]. 软件学报,2004,15(11):1583-1594. (LI Deyi,LIU Changyu,DU Yi,et al. Artificial intelligence with uncertainty[J]. Journal of Software,2004,15(11):1583-1594. (in Chinese))

[14] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学,2004,6(8):28-34. (LI Deyi,LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. Engineering Science,2004,6(8):28-34. (in Chinese))

[15] 李晓超,钟登华,任炳昱,等. 基于模糊RES-云模型的坝基岩体可灌性评价研究[J]. 水利学报,2017,48(11):1311-1323.

(LI Xiaochao,ZHONG Denghua,REN Bingyu,et al. Study on evaluation of rock mass groutability of dam foundation based on fuzzy RES-cloud model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(11):1311-1323. (in Chinese))

[16] 周雪,左忠义,程伟. 基于组合赋权云模型的铁路旅客运输安全评价[J]. 中国安全科学学报,2020,30(增刊1):158-164. (ZHOU Xue,ZUO Zhongyi,CHENG Wei. Safety evaluation of railway passenger transportation based on combined weighting cloud model[J]. China Safety Science Journal,2020,30(Sup1):158-164. (in Chinese))

[17] 高玉琴,陈鸿玉,刘云苹. 基于云模型的自然灾害灾情等级评估[J]. 水利水电科技进展,2018,38(6):38-43. (GAO Yuqin,CHEN Hongyu,LIU Yunping. Study of grade assessment of natural disaster situation based on cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(6):38-43. (in Chinese))

[18] 顾培英,王岚岚,邓昌,等. 我国渡槽结构典型破坏特征研究综述[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):1-8. (GU Peiying,WANG Lanlan,DENG Chang,et al. Review of typical failure characteristics of aqueduct structures in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(5):1-8. (in Chinese))

[19] 邓成发,余军军,来晟,等. 大塘口空腹式双曲拱渡槽安全评价分析[J]. 水电能源科学,2019,37(7):70-73. (DENG Chengfa,YU Junjun,LAI Sheng,et al. Safety evaluation analysis of Datangkou hollow-type double curved arch aqueduct[J]. Water Resources and Power,2019,37(7):70-73. (in Chinese))

(收稿日期:2022-07-02 编辑:熊水斌)

(上接第 7 页)

[19] 温庆志,孙鹏,张强,等. 非平稳性条件下淮河流域极端气温时空演变特征及遥相关、环流特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(10):2513-2526. (WEN Qingzhi,SUN Peng,ZHANG Qiang,et al. Non-stationary characteristic of extreme temperature and climate-related impacts,circulation character in the Huai River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(10):2513-2526. (in Chinese))

[20] WANG M,JIANG S,REN L,et al. The development of a nonstationary standardised streamflow index using climate and reservoir indices as covariates[J]. Water Resources Management,2022,36:1377-1392.

[21] 张文浩,瞿思敏,徐瑶,等. 泼水水库对黄河径流过程及水文情势的影响[J]. 水资源保护,2021,37(3):61-65. (ZHANG Wenhao,QU Simin,XU Yao,et al. Influence of Pohe Reservoir on runoff process and hydrological regime of Huanghe River[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):61-65. (in Chinese))

[22] 赵贵章,徐远志,王莉莉,等. 黄河上游青铜峡水利枢纽对河川基流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):195-201. (ZHAO Guizhang,XU Yuanzhi,WANG Lili,et al. Effect of Qingtongxia Hydraulic Project in upstream of Yellow River on river baseflow[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2020,48(3):195-201. (in Chinese))

[23] KENDALL M. A new measure of rank correlation[J]. Biometrika,1938,30(1-2):81-93.

[24] MARES C,MARES I,STANCIU A. Extreme value analysis in the Danube lower basin discharge time series in the twentieth century[J]. Theoretical and Applied Climatology,2009,95(3-4):223-233.

[25] NASRI B,ADLOUNI S E,OUARDA T B M J. Bayesian estimation for GEV-B-Spline model[J]. Open Journal of Statistics,2013,3(2):118-128.

[26] MANTON M J,DELLA-MARTA P M,HAYLOCK M R,et al. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific:1961—1998[J]. International Journal of Climatology,2001,21(3):269-284.

[27] TYRALIS H,LANGOUSIS A. Estimation of intensity-duration-frequency curves using max-stable processes[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2019,33(1):239-252.

[28] SMITH R L. Maximum likelihood estimation in a class of nonregular cases[J]. Biometrika,1985,72(1):67-90.

[29] WANG Yi, DUAN L, LIU Tao, et al. A non-stationary standardized streamflow index for hydrological drought using climate and human-induced indices as covariates[J]. Science of the Total Environment, 2020, 699: 134278.

[30] SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model[J]. The Annals of Statistics, 1978,6(2): 461-464.

(收稿日期:2022-04-18 编辑:胡新宇)