

基于 GA-WNN 的桥梁基础结构局部冲刷风险模糊评估方法

Fuzzy Evaluation Method of Local Scour Risk of Bridge Infrastructure based on GA-WNN

戴隆强

(江西中煤建设集团有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要: 针对难以获取冲刷灾害危险性指数、冲刷风险评估精度较低、桥梁基础结构突发坍塌风险较大的问题, 提出了基于 GA-WNN 的冲刷风险模糊评估方法。在分析桥梁基础结构局部冲刷机理后, 采用 GA-WNN 网络构建冲刷风险评估指标体系, 通过冲刷风险评估指标数据的无量纲化处理, 计算模糊评估指标权值; 采用冲刷灾害危险性指数来反映冲刷风险的程度, 结合 GA-WNN 网络, 校验矩阵的最大特征根, 计算随机一致性比率, 实现了冲刷风险模糊评估算法设计。结果表明: 文中方法在评估冲刷风险时, 可以将相对误差控制在 2% 以内, 大幅度提高了评估精度。

关键词: GA-WNN 网络; 模糊评估; 局部冲刷; 桥梁基础结构; 风险评估; 冲刷机理

中图分类号: U443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0145-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.025

DAI Longqiang

(Zhongmei Engineering Group Ltd., Nanchang 330000, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to obtain the risk index of scouring disaster, the low accuracy of scouring risk assessment and the high risk of sudden collapse of bridge infrastructure, a fuzzy evaluation method of scouring risk based on GA-WNN is proposed. The local scouring mechanism of bridge infrastructure is analyzed, and the scouring risk evaluation index system is constructed by using GA-WNN network. Through the dimensionless processing of scouring risk evaluation index data, the weight of fuzzy evaluation index is calculated; The scour risk index is used to reflect the degree of scour risk. Combined with GA-WNN network, the maximum characteristic root of the check matrix is used to calculate the random consistency ratio, and the fuzzy evaluation algorithm of scour risk is designed. The results of example analysis show that the relative error can be controlled within 2% when evaluating the scouring risk, and the evaluation accuracy is greatly improved.

Keywords: GA-WNN network; fuzzy evaluation; local scouring; bridge infrastructure; risk assessment; scouring mechanism

0 引言

桥梁是一种跨水的交通运输载体^[1-2], 它对人类的社会经济发展有着重要的影响, 为人们的生产生活提供了便捷的条件, 桥梁一旦遭到损坏, 不但会

造成重大的经济财产损失, 还要面临长时间的修复和改建, 不仅耗时, 还影响地方经济的发展^[3]。

解刚等^[4]根据黄土河谷的地貌特性, 结合支护结构桩的基础特性, 提出了一种基于边坡因子的桥梁冲刷深度的计算方法, 应用 FLAC 3D 三维软件对桥梁冲刷深度进行数值模拟, 从而获取桥梁可以承载的极限压力值。在此基础上, 采用回归方程进行拟合, 得出区域冲刷影响的黄土沟谷面积的计算方法, 在计算桩基础承载力时, 土体各因子与相应土

作者简介: 戴隆强 (1983—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 道桥工程。

收稿日期: 2023-10-20

道桥技术

体之间存在着明显的耦合关系,而土体的部分冲刷和坡度则对土体的摩擦阻力有很小的影响,桩基础垂直荷载的最大值与水流对桥梁的冲刷深度呈负值关系;张晓栋等^[5]根据桥梁结构的基础特性,对火灾风险进行危害性分析,建立了一种由汽车着火后的危险系数估算的数学模型,并根据汽车的火灾情况,运用最大熵理论对其进行了概率分布的估算,并根据 RSM-MCS 理论,对桥梁的结构体系和构件之间的相关性进行研究,分析火灾发生时对桥梁结构造成的伤害,并根据模拟实验构建危险系数评估模型,通过对桥梁体系的破坏判别标准进行深入探讨,得出了桥梁抗火性能的有效评估分析方法。

基于以上研究背景,本文利用 GA-WNN 网络针对冲刷风险,设计一种模糊评估方法。采用 GA-WNN 网络构建了桥梁基础冲刷风险评估体系,通过无量纲化处理,计算模糊评估指标的权值,并结合冲刷灾害危险性指数,实现对桥梁基础冲刷风险的模糊评估算法设计。这一方法能够更有效地评估桥梁基础的冲刷风险,为桥梁的安全运营提供有力支持。

1 冲刷风险模糊评估方法

1.1 局部冲刷机理

1.1.1 桥墩局部冲刷过程模拟

在跨江大桥建成后,由于桥墩周围的水流及淤积物流动,往往会在桥墩周围产生涡流流动^[6]。这种绕流系统结构比较复杂,很可能导致桥头周边的泥沙发生较大的移动,导致了桥头附近的河堤发生一定程度的变形。这个过程即桥墩局部冲刷的机理,桥墩局部冲刷示意图如图 1 所示。

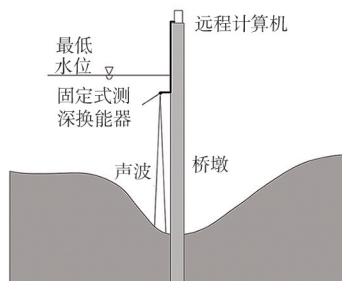


图 1 桥墩局部冲刷过程
Fig.1 Local scouring process of bridge pier

图 1 中,桥梁下方的水被桥墩拦住,导致了周围的水流发生了剧烈的改变,并在靠近河底的地方产

生了一个旋涡。这些旋涡会不断地冲击着桥下的桥墩,将周围的淤泥带到河底,靠近岸边的地方就会被水流带走,从而产生一个局部的冲刷坑^[7]。

在冲刷坑深度加大的情况下,坑底部水流速度减慢,而在冲刷桥墩坑底部的沉积物也会越来越粗,坑底的粗糙度也会增加,从而增加了防冲刷性能。在桥墩局部冲刷过程中,由于冲积和淤积的阻力达到了均衡,冲刷随之结束。

1.1.2 桥台局部冲刷过程模拟

桥台局部冲刷由三个主要区域构成,分别是主流区、上游滞流区、下游流区。桥台局部冲刷原理如图 2 所示。

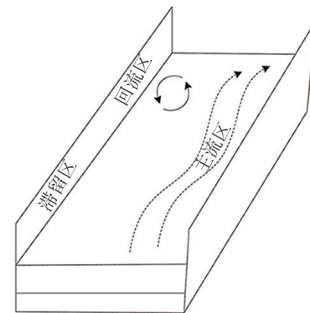


图 2 桥台局部冲刷示意图
Fig.2 Schematic diagram of the local erosion of the abutment

图 2 中,湍急的水流在桥台的上游边沿与岩壁层分开,形成一个强大的垂直涡旋系统,并继续向下游延伸,最终形成了一个返回带^[8]。在没有旋涡作用的情况下,在桥台上,由于在淤泥远离旋涡的地方,压力降低,旋涡的中央产生了一个负压,将河床表面的淤泥吸到了下游的回流区域,从而在桥台的前端产生了一个局部的冲刷坑。

1.2 风险模糊评估指标权值计算

为了确定最适合于桥面局部冲刷风险的主要影响因子^[9],基于桥梁基础结构的局部冲刷过程模拟结果,分析其危害性的因素,包括:桥梁基础因素、水流条件因素、河道条件因素等,而在不同条件下,各种因素造成的风险评估结果不同。

本文采用 GA-WNN 方法,计算冲刷风险模糊评估指标权值,以达到评估的层次性和系统性,见表 1。

根据表 1 的风险评估指标体系,利用 GA-WNN 网络对初始的桥梁基础结构局部冲刷数据进行分析和处理^[10],计算出风险模糊评估指标权值,具体过程如下:

表 1 局部冲刷风险评估指标体系
Table 1 Local scour risk assessment index system

目标层	一级指标	二级指标
冲刷风险评估	桥梁基础因素	水流交角
		桥墩宽度
	水流条件因素	桥梁基础形状
		洪水历时
		水深
		水流速度
	河床条件因素	级配不均匀性
		河床中值粒径
		河床土体类型

假设，在冲刷风险信息 (U, D, Q, f) 中， U 代表冲刷风险的评估指标集合，并用 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 表示，将冲刷风险模糊关系用 R 表示， D 代表局部冲刷风险的各个评估模块， Q 代表属性权值， Q_{ij} 代表在第 i 个对象下第 j 条件的指标属性值， $f: U \times D \rightarrow Q$ 代表信息函数，则利用下式表示 R 的模糊关系：

$$u_s R u_t = \left\{ (u_s, u_t) \in U \times U \mid \sum_{i=1}^n |Q'_{sj} - Q'_{tj}| \leq \alpha \right\} \quad (1)$$

式中： α 为 u_s 与 u_t 之间的关联关系， $u_s \leq u_t$ ； Q'_{sj} 为冲刷风险的属性值。

假设 $R \subseteq D$ ， Y 代表冲刷风险模糊评估指标的属性， D 代表划分标准，那么利用下式表示局部冲刷风险的分类结果：

$$\gamma_R(Y) = \sum_{i=1}^1 \frac{u_s R u_t}{|\Phi|} \quad (2)$$

式中： $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_t\}$ ； Φ 为冲刷风险模糊评估指标，结合上式，利用下式定义冲刷风险模糊评估指标的隶属度函数：

$$\text{sig}(D_i) = 1 - \gamma_{D-\{D_i\}}(Y) \quad (3)$$

式中： $D = \{D_1, D_2, \dots, D_i\}$ ，则得到冲刷风险模糊评估指标 D_i 的权重表示为：

$$w(D_i) = \frac{\text{sig}(D_i)}{\sum_{i=1}^n \text{sig}(D_i)} \quad (4)$$

结合 GA-WNN 网络获取桥梁基础结构冲刷风险模糊评估指标的权重信息^[11]，利用各个评估指标之间的关联关系，得到冲刷风险模糊评估指标权值：

$$w = \beta w_1 + (1 - \beta) w_2 \quad (5)$$

式中： w_1 为冲刷风险评估指标的主要权重信息； w_2 为客观权值； β 为实际取值。

通过冲刷风险评估指标数据的无量纲化处理，计算出冲刷风险模糊评估指标权值。

1.3 构建冲刷风险模糊评估模型

结合 GA-WNN 网络和模糊评估方法，实现对冲刷风险评估，其具体的过程是：利用结合 GA-WNN 网络构建风险体系结构^[12]，然后构造判断矩阵，确定冲刷风险评估指标，最后利用隶属度函数构建冲刷风险模糊评估模型，利用模型对冲刷风险进行相应的评估。具体的流程图如图 3 所示。

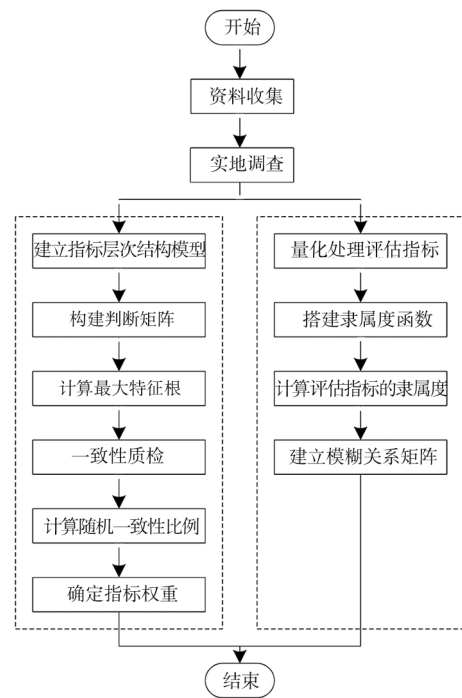


图 3 局部冲刷风险评估流程图

Fig. 3 Flow chart of local scour risk assessment

从图 3 的评估流程图中可以看出，确定各个等级风险模糊指标权值，并将同一等级的风险因子进行对比，去除评估信息中的冗余信息^[13]，提高风险模糊评估模型的准确性。如果冗余信息 i 和 j 的对比结果是 a_{ij} ，那么得到指标权重判断表达式为：

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (6)$$

权重信息是对冲刷风险模糊评估指标的量化，利用 GA-WNN 网络对权重信息进行排序，计算完成后对结果进行校验^[14]，完成冲刷风险模糊评估模型的构建，基本步骤如下：

Step1: 计算冲刷风险模糊评估矩阵的最大特征根：
 $\beta A = \lambda_{\max} A \quad (7)$

道桥技术

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\beta A)_i}{w_i} \quad (8)$$

式中: λ_{\max} 为模糊评价指标; A 为风险因子特征向量; n 为风险指标数量; w_i 为风险指标的权值。

Step2: 计算冲刷风险模糊评估的一致性指标:

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (9)$$

Step3: 计算冲刷风险模糊评估随机一致性比率:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

式中: RI 为冲刷风险模糊评估指标的权重。

采用桥梁基础结构局部冲刷的危险指标来反映风险的严重程度, 危险指标越高, 说明发生冲刷风险的可能性越大^[15]。冲刷风险模糊评估数学模型如下式:

$$\chi = \sum_{i=1}^n W(j) \cdot S(i, j) \quad (11)$$

式中: χ 为局部冲刷的危险性指数; $S(i, j)$ 为各个冲刷风险指数的量化结果; n 为风险评估指数的数据量; $W(j)$ 为各个评估指数的权值。

基于冲刷风险模糊评估流程, 采用冲刷灾害危险性指数来反映冲刷风险的程度; 通过构建冲刷风险模糊评估模型, 实现了冲刷风险的模糊评估。

2 实例分析

2.1 数据收集

如图4所示, 对桥梁基础结构局部冲刷现象是肉眼可见的, 获取冲刷风险数据比较容易。为了准确评估桥梁基础结构的冲刷风险, 选择桥梁2018年~2021年冲刷风险评估的指标数据作为实例分析数据。通过收集和分析数据, 确定该桥梁基础结构冲刷风险数据的输出值, 见表2。



图4 实验桥梁的冲刷现状
Fig.4 Current status of experimental bridge

表2 桥梁2018年~2021年冲刷风险评估的指标数据
Table 2 Indicator data of scour risk assessment of a bridge from 2018 to 2021

一级指标	二级指标	2018年	2019年	2020年	2021年
桥梁基础因素	水流交角/°	13.6	14.2	14.6	14.8
	桥墩宽度/m	2.20	2.19	2.17	2.16
	桥梁基础形状	0.76	0.78	0.83	0.87
水流条件因素	洪水历时/s	67	70	75	78
	水深/m	1.78	1.64	1.25	1.18
	水流速度/(m/s)	4.3	4.1	3.9	3.7
河床条件因素	级配不均匀性	0.38	0.44	0.54	0.59
	河床中值粒径/m	0.72	0.78	0.84	0.87
	河床土体类型	0.75	0.82	0.81	0.97

2.2 训练冲刷风险评估体系

基于某桥梁2018年~2021年冲刷风险模糊评估的指标数据, 一共选择60组冲刷风险指标数据作为实例分析的样本数据, 其中测试样本数据为20组, 训练样本数据为40组, 为了保证基于GA-WNN的冲刷风险模糊评估方法在训练过程中的精度, 对40组样本数据进行了训练, 结果如图5所示。

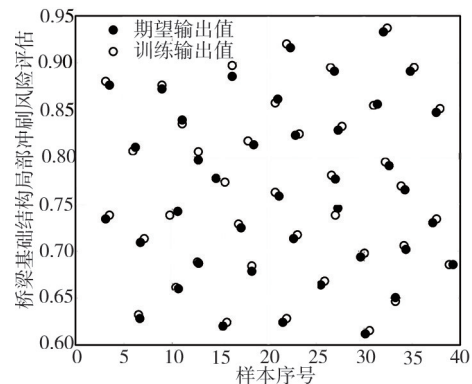


图5 冲刷风险评估体系训练结果
Fig.5 Training Results of the scouring risk assessment system

从图5的评估体系训练结果可以看出, 随着训练过程的进行, 评估体系的精度逐渐提高, 最终达到了一个稳定的水平。这表明该评估体系能够有效地学习和识别冲刷风险指标数据中的模式, 并对其进行评估。

2.3 结果分析

在评估冲刷风险之前, 利用遥感技术获取大范围的地表信息, 结合GIS系统进行空间分析, 识别桥梁周边区域的冲刷情况, 结果如图6所示。通过观察图6, 可以清晰地看到桥梁基础结构冲刷的具体情况, 为后续的冲刷风险评估提供参考依据。

根据冲刷程度的识别结果, 将20组冲刷风险指标的测试样本数据带入到基于GA-WNN的冲刷风险模糊



图 6 冲刷程度识别结果

Fig. 6 Identification results of scouring out

评估模型中，将各个指标的数值带入到模型中，得到的输出结果即冲刷风险的最终评估结果，具体见表 3。

表 3 冲刷风险评估结果

Table 3 Results of the scour risk assessment

样本序号	期望输出值	测试输出值	相对误差/%
1	0.525	0.517	-1.524
2	0.693	0.689	-0.577
3	0.698	0.704	0.859
4	0.787	0.786	-0.127
5	0.428	0.422	-1.402
6	0.826	0.819	-0.847
7	0.778	0.786	1.028
8	0.715	0.711	-0.559
9	0.628	0.622	-0.955
10	0.536	0.528	-1.493
11	0.867	0.873	0.692
12	0.497	0.491	-1.207
13	0.526	0.534	1.521
14	0.625	0.634	1.440
15	0.587	0.596	1.533
16	0.796	0.789	-0.879
17	0.759	0.751	-1.054
18	0.778	0.785	0.899
19	0.678	0.689	1.622
20	0.639	0.634	-0.782

根据表 3 的结果可知，采用基于 GA-WNN 的冲刷风险模糊评估方法时，得到的测试输出值与期望输出值非常接近，经计算相对误差值也比较小，最大的相对误差为 1.622%，最小的相对误差为-0.127%，每一组冲刷风险指标测试数据的相对误差波动较小，因此说明文中方法在评估某桥梁 2018 年~2021 年冲刷风险时可以将相对误差控制在 2% 以内，具有更高的评估精度，适用于各大冲刷风险的评估。

3 结论

本文提出了基于 GA-WNN 的冲刷风险模糊评估方法研究，通过冲刷风险评估指标数据的无量纲化处理，反复定义冲刷风险模糊评估指标的隶属度函

数，计算风险模糊评估指标权值，分析局部冲刷的危险性指数，结合冲刷风险模糊评估的一致性指标，保证在评估冲刷风险时，具有更高的评估精度，清晰地识别到桥梁基础结构冲刷的程度，将相对误差控制在 2% 以内。

参 考 文 献

- [1] 熊文, 魏乐永, 张学峰, 等. 大跨度缆索支承桥梁基础冲刷动力识别方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51 (3): 92-98.
- [2] 李岩, 钟以琛, 蔡春声, 等. 基于车激动力响应互相关指标的桥梁基础冲刷诊断方法 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (11): 60-71.
- [3] 周敕, 赵威, 石雄伟, 等. 高烈度软土地基桥梁地震与冲刷联合作用效应研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39 (8): 88-98.
- [4] 解刚, 刘海鹏, 赵宝俊, 等. 考虑冲刷效应的黄土沟壑区桥梁桩基极限承载力计算方法 [J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37 (4): 108-115.
- [5] 张晓栋, 马如进, 陈艾荣. 车辆火灾作用下桥梁风险概率评估方法 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2019, 47 (6): 108-118.
- [6] 王飞球, 黄健陵, 符竞, 等. 基于 BP 神经网络的跨既有线高速铁路桥梁施工安全风险评估 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16 (5): 1129-1136.
- [7] 陈述. 东海大桥桥墩基础冲刷防护方案研究 [J]. 世界桥梁, 2019, 47 (4): 17-21.
- [8] 王晨, 林杰. 基于多波束测试系统对桥梁水下基础, 河床检测方法研究 [J]. 公路, 2019, 64 (4): 172-174.
- [9] 彭鑫. 薄覆盖层河床钢栈桥钢管桩的锚固方法探索与实践 [J]. 中外公路, 2020, 40 (3): 154-157.
- [10] 韩悦, 周晗旭, 袁刚烈, 等. 基于水下声波映像法的桥梁基础抛石防护检测与评估 [J]. 振动与冲击, 2021, 40 (20): 100-107.
- [11] 孙天霖, 王树鹏, 潘军宁, 等. 考虑局部冲刷的跨海桥梁桩基基础波流力 [J]. 水科学进展, 2019, 30 (6): 863-871.
- [12] 闻云呈, 王晓航, 夏云峰, 等. 深水桥梁台阶式沉井基础局部冲刷特性研究 [J]. 海洋工程, 2021, 39 (2): 62-69.
- [13] 李大龙, 齐洋, 杨竟. 河流冲刷下桥梁桩基稳定性三维仿真 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (21): 9102-9107.
- [14] 黄显彬, 侯松, 刘晨阳, 等. 考虑冲刷深度变化的桩基小型振动台试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 (3): 734-740, 748.
- [15] 梁发云, 梁轩, 张浩. 局部冲刷场地桩基桥梁地震响应简化分析及离心振动台验证 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (10): 1771-1780, 1957.