基于云模型的高桩码头构件服役性能评估

李晓琛，孙克俐
（天津大学，水利工程智能建设与运维全国重点实验室，天津 300354）

摘要：随着国内航运业发展，大批量高桩码头亟需维修，建立科学合理的高桩码头构件性能评估方法是准确判断其维修需求的前提。为找到能够全面评估高桩码头构件各方面维修需求的方法，针对高桩码头构件的服役性能展开深入研究，提出高桩码头构件服役性能指标体系，使用改进的层次分析法确定各指标权重，在此基础上从高桩码头构件服役性能评估中的模糊性与随机性出发，建立基于云模型的高桩码头构件服役性能评估方法，结合工程实例，对天津市某集装箱码头进行结构评估，根据其 29~30 段面板评估结果确定服役性能状态，给出面板维修建议，为高桩码头维修决策提供了依据。

关键词：云模型；高桩码头；服役性能；权重；性能评估
中图分类号：U657　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)04-0057-07

Service performance evaluation of high-pile wharf components based on cloud model

LI Xiaochen, SUN Keli
(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: With the development of the domestic shipping industry, a large number of high-pile wharf urgently require maintenance. Establishing a scientific and reasonable performance evaluation method for high-pile wharf components is the prerequisite for accurately determining their maintenance needs. In order to find a method that can comprehensively evaluate the maintenance requirements of high-pile wharf components in all aspects, this paper conducts an in-depth study on the service performance of high-pile wharf components. It proposes a performance indicator system for high-pile wharf components and uses an improved analytic hierarchy process (AHP) to determine the weights of each indicator. Based on the fuzziness and randomness in the performance evaluation of high-pile wharf components, a performance evaluation method based on a cloud model is established. This method is applied to a structural evaluation of a container terminal in Tianjin, using the evaluation results of panels from section 29 to section 30 to determine the service performance status and provide repair recommendations for the panel. This approach offers a basis for maintenance decision-making of high-pile wharf.

Keywords: cloud model; high-pile wharf ; service performance; weight; performance evaluation

港口行业是交通运输行业重要的组成部分，截至 2018 年底，中国港口货物吞吐量达到 143.51 亿 t，共计生产用码头泊位 2.289 3 万个[1]，然而许多码头出现结构损伤，高桩码头的维修工作成为港口工程领域的重点，对高桩码头构件进行服役性能评估，为维修决策提供依据意义重大。竺存宏等[2]应用模糊数学理论，对高桩码头构件进行等级划分；徐秀娟等[3]使用层次分析法和熵理论确定高桩码头构件权重，并采用灰色关联度法实现高桩码头耐久性的系统评估；孟静等[4]建立高桩码头多层评估模型，采用模糊综合评估法得出状态评估结果；张露[5]应用模糊神经网络理论，结合整体性因素，对高桩码头安全性进行评估。当前的高桩码头性能评估研究集中在安全性上，对服役性能

收稿日期：2024-06-19
作者简介：李晓琛（1999—），女，硕士，从事港口工程研究。

的其他方面研究较少，对构件及整体维修需求的反映不够详尽，评估指标相对单一，且对过程中的随机性与模糊性考虑不足。本文充分考虑随机性与模糊性，提出基于云模型的高桩码头构件服役性能评估方法，旨在为后续的维修决策研究提供思路。

1　云模型法

李德毅院士提出的云模型法可以实现定性与定量的互相转化，解决了兼顾模糊性和随机性的问题[6]，具体内容为：设 U 是一个用精确数值表示的论域，对应定性概念 A，对于论域中的任意一个元素 x_i，都存在一个有稳定倾向的随机数 $y_i=\mu_A(x_i)$，y_i 为 x_i 对 A 的隶属度，y 在论域 U 上的分布称为云，x_i 称为云滴。云滴对该概念计算出的隶属度越小，表示该云滴越不能体现该概念。

对高桩码头构件服役性能进行评估是一个充满模糊性与随机性的过程，而云模型法能够清晰地分析过程中的模糊性与随机性，因此选取云模型法作为高桩码头构件服役性能评估方法。

1.1　云模型相关概念

1.1.1　云的数字特征

在确定数字特征时，一般采用有双边约束的区间[$C_{\min}$，$C_{\max}$]进行计算，计算公式为：

$$\begin{cases} E_x=\dfrac{C_{\min}+C_{\max}}{2} \\ E_n=\dfrac{C_{\max}-C_{\min}}{2} \\ H_e=k \end{cases} \tag{1}$$

式中：E_x 为期望，表示云滴在论域中分布的中间位置，反映云对某定性概念的确定度；E_n 为熵，表示云的宽度，体现云对于某定性概念的模糊度；H_e 为超熵，是熵的熵，表示熵的不确定性；$C_{\max}$ 为等级阈值最大值，$C_{\min}$ 为等级阈值最小值；k 为根据评语本身设定的常数。

1.1.2　云发生器

云的生成算法称为云发生器，包括正向云发生器、逆向云发生器和条件云发生器。

正向云发生器将定性描述转换为定量数值，输入数字特征（E_x、E_n、H_e），输出 N 个云滴（x_i,μ_i）；逆向云发生器将数值转化为定性描述，输入 N 个云滴（x_i,μ_i），输出（E_x、E_n、H_e），如图 1 所示。

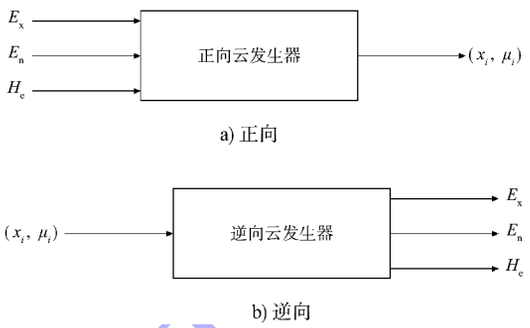

图 1　不同方向云发生器

Fig. 1　Cloud generators in different directions

云发生器在给定不同条件时，能够生成不同的云，在给定 E_x、E_n、H_e 和数值论域 X 的条件下，称为 X 条件云发生器；在给定 E_x、E_n、H_e 和隶属度 μ 的条件下，称为 Y 条件云发生器，如图 2 所示。

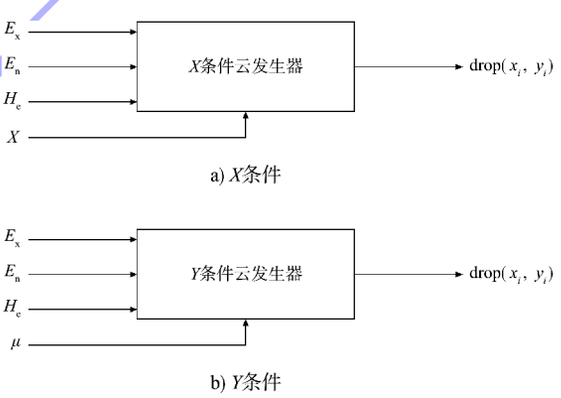

图 2　不同条件下云发生器

Fig. 2　Cloud generators under different conditions

条件云发生器是利用云模型进行不确定性推理的基础，一条定性规则描述为“if A then B”，A 和 B 均为定性概念，被称为推理规则的前件和后件，结合各种云发生器可以实现定性概念与定量数值的转换。

2　高桩码头构件服役性能指标

服役性能指工程结构在服役期内，在内部因素和外部影响的共同作用之下，在安全状态下完

成既定功能的能力[7]。高桩码头作为一种特殊的工程结构，根据 JTS 304—2019《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》[8]，其构件服役性能分为安全性、耐久性和适用性，本文将其作为构件服役性能一级指标，遵循系统性、可操作性、定量与定性相结合、互斥与有机相结合原则选取二级指标。

2.1　安全性

安全性表示高桩码头构件抵御各种荷载作用，防止结构垮塌，保护人员生命财产的能力。高桩码头构件在预定服役年限内，应当能够承受正常施工及运营情况下出现的各种荷载作用，考虑构件外观、构件承载能力、构件连接节点状况与位移对于安全性的影响。其中 1）构件外观指构件外观的完整程度；2）构件承载能力指检测后构件现有承载力与容许值的比值；3）构件连接节点状况指构件的构造与连接状况，在评估该指标时主要检查结构、构件的构造、连接方式是否符合现行规范要求，有无断裂或错位等缺陷；4）考虑到高桩码头构件受力的复杂性，大多数情况下难以考虑附加位移作用下的内力计算，因此在计算困难时以位移限值为基础，取实际位移与位移限值的比值作为评估值。

2.2　耐久性

耐久性反映高桩码头构件在外部环境与作用荷载的共同影响下，在预定服役年限内抵御材料劣化的能力。实践表明，构件的耐久性是保障其安全性与适用性的关键，在较多情况下，高桩码头构件使用寿命的结束不是由于承载能力不足，而是耐久性不足导致的。影响高桩码头构件耐久性的常见因素包括保护层状况、钢筋锈蚀率、混凝土冻融破坏状况等。

1）保护层状况：保护层承担着延长结构使用寿命的作用，一旦保护层开裂，氯离子会加速扩散到混凝土构件内部，造成耐久性快速下降，因此将保护层的完整性及厚度作为评定构件耐久性的指标之一。

2）钢筋锈蚀率：钢筋锈蚀会导致钢筋截面积变小，使其力学性能下降，同时导致混凝土与钢筋之间不能有效结合，钢筋的拉伸强度不能传递给混凝土，因此钢筋锈蚀率对构件耐久性影响显著。

3）混凝土冻融破坏状况：混凝土冻融破坏是指在干湿交替和冻融循环作用下从表面开始的层层剥蚀破坏，导致混凝土抵抗外部荷载的能力下降，评估混凝土构件冻融破坏状况是评估其耐久性的重要内容。

2.3　适用性

适用性指高桩码头构件在正常使用阶段满足规定要求的能力，要求结构能够满足船舶的正常停泊、乘客上下及货物的装卸要求，即构件在设计使用寿命周期内不出现过大的变形和过宽的裂缝，完成规定工作任务，考虑裂缝情况、最大裂缝宽度、最大挠度和使用功能完善程度对于耐久性的影响。

1）裂缝情况。大面积的裂缝会导致码头构件无法满足要求，需要考量构件的裂缝数量及分布面积。

2）最大裂缝宽度。规范中要求最大裂缝宽度不能超过适用性限值。

3）最大挠度。规范中要求构件最大挠度不能超过适用性限值。

4）使用功能完善程度。指码头构件在规定使用年限内能够保持正常使用状态，从而满足工作需求的功能，如轨道梁能否正常承担装卸荷载、靠船构件是否能减少船舶靠泊时的冲击力和作用力等。

3　高桩码头构件服役性能指标权重

确定各指标的权重可以表现其对高桩码头构件服役性能的影响，选取改进的层次分析法[9]确定权重，该方法采用 1~9 标度法[10]对各指标之间的重要性进行两两比较，从而构建判断矩阵，然后计算各级指标的权重。将矩阵 $\boldsymbol{A}=[a_{ij}]$ 作为确定指标权重的判断矩阵：

$$\boldsymbol{A}_i=\begin{bmatrix} 1 & \cdots & & \cdots & & \cdots & 1/a_{il} & \cdots & \cdots \\ \vdots & \ddots & & & & & & \vdots & \vdots \\ & & 1 & \cdots & a_{kl}^{(i)} & \cdots & a_{ik} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & \cdots & 1/a_{kl}^{(i)} & \cdots & 1 & \cdots & 1/a_{il} & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{il} & \cdots & a_{ik} & \cdots & a_{il} & \cdots & 1 & \cdots & a_{in} \\ \vdots & & & & & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & & & \cdots & \cdots & 1/a_{in} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

判断矩阵的阶数为 n，可以构建相同数量的一致性判断矩阵，针对这些矩阵，采用最大特征值法计算权重向量 $\boldsymbol{W}_i=(\boldsymbol{W}_{i1},\boldsymbol{W}_{i2},\cdots,\boldsymbol{W}_{in})^{\mathrm{T}}$，进一步结合各一致性判断矩阵的权重向量，计算得到各指标的权重：

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{W}_{11} & \boldsymbol{W}_{12} & \cdots & \boldsymbol{W}_{14} \\ \boldsymbol{W}_{21} & \boldsymbol{W}_{22} & \cdots & \boldsymbol{W}_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{W}_{n1} & \boldsymbol{W}_{n2} & \cdots & \boldsymbol{W}_{nn} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1/n \\ 1/n \\ \vdots \\ 1/n \end{bmatrix}=(\boldsymbol{W}_1,\boldsymbol{W}_2,\cdots,\boldsymbol{W}_n)^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

结合专家意见，对高桩码头构件服役性能的一级指标进行九标度判断，可以得到判断矩阵为：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

基于判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的各行向量构建新的一致性矩阵，计算得到对应特征向量，确定指标权重如表 1 所示。

表 1　高桩码头构件服役性能指标权重

Tab. 1　Weights of service performance indicators for high-pile wharf components

一级指标	权重	二级指标	权重
安全性	0. 608 1	构件外观	0. 078 9
		构件承载力	0. 518 0
		构件连接节点状况	0. 127 6
		位移	0. 275 5
耐久性	0. 243 5	保护层状况	0. 163 8
		钢筋锈蚀率	0. 539 0
		混凝土冻融破坏状况	0. 297 2
适用性	0. 148 4	裂缝情况	0. 164 4
		最大裂缝宽度	0. 272 5
		最大挠度	0. 063 3
		使用功能完善程度	0. 498 8

4　评估指标取值及等级划分

在对高桩码头构件服役性能的评估指标进行等级划分时，要考虑指标性质，参照《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》，将高桩码头构件服役性能划分为 A、B、C、D 4 个等级，如表 2 所示。

表 2　高桩码头构件服役性能等级

Tab. 2　Service performance levels of high-pile wharf components

服役性能等级	服役性能状态
A	性能完好
B	性能轻微劣化，不影响正常使用
C	性能中度劣化，影响正常使用
D	性能严重劣化，无法正常使用

对于定量指标，直接通过测量或实验获取数值，对于难以量化的定性指标，邀请行业专家利用语言类模糊数（很差或很小，较差或较小，较好或较大，较大或较大）赋值，对各指标量化取值和等级划分。

4.1　定量指标的取值及等级划分

1）构件承载力。以指标 $R_{\mathrm{d}}/\gamma_0 S_{\mathrm{d}}$ 作为构件承载力的评估指标，R_{d} 和 S_{d} 分别为结构构件抗力和荷载作用效应，γ_0 为结构重要性系数。

2）位移及挠度。对构件变位或变形的评估以其位移值/沉降值或实测挠度与规范限值的比值 γ 评定。

3）裂缝宽度。以实测最大裂缝宽度与规范限值的比值 γ 作为评估指标。

4）钢筋锈蚀率。以锈蚀钢筋断面损失作为评估指标。

依据规范，高桩码头构件服役性能定量指标的划分区间及标准如表 3 所示。

表 3　定量指标划分区间及标准

Tab. 3　Division intervals and standards for quantitative indicators

定量指标	构件承载力	位移	钢筋锈蚀率/%	裂缝宽度	挠度
A	[1, +∞]	[−∞ , 0. 90)	(0, 3]	[−∞ , 0. 90)	[−∞ , 0. 90)
B	[0. 95, 1)	[0. 90, 0. 95)	[3, 5. 8)	[0. 90, 0. 95)	[0. 90, 0. 95)
C	[0. 90, 0. 95)	[0. 95, 1)	[5. 8, 10)	[0. 95, 1)	[0. 95, 1)
D	[−∞ , 0. 90)	[1, +∞]	[10, +∞)	[1, +∞]	[1, +∞]

水运工程

4.2　定性指标的取值及等级划分

邀请行业专家依据构件状态对其定性指标进行评价，确定其语言模糊数与对应区间。将语言模糊数进行转换，计算其数字特征，结果如表 4 所示。

表 4　语言类模糊数、区间数及云模型数的转换关系
Tab. 4　Conversion relationships among linguistic fuzzy number，interval number and cloud model number

语言模糊数	区间数	云模型数字特征
很差或很小	[0, 2. 5]	(1. 25,5/12,0. 005)
较差或较小	[2. 5, 5]	(3. 75,5/12,0. 005)
较好或较大	[5, 7. 5]	(6. 25,5/12,0. 005)
很好或很大	[7. 5, 10]	(8. 75,5/12,0. 005)

以构件连接节点状况为例，若其语言模糊描述为“较好”，对应的云模型描述为(6. 25，5/12，0. 005)。

根据云的单规则不确定性推理机制，采用百分制对定性指标进行量化，结果如表 5 所示。

表 5　百分制云模型数
Tab. 5　Cloud model number on percentage

语言模糊数	区间数	云模型数字特征
很差或很小	[0, 25]	(12. 5,25/6,0. 005)
较差或较小	[25, 50]	(37. 5,25/6,0. 005)
较好或较大	[50, 75]	(62. 5,25/6,0. 005)
很好或很大	[75, 100]	(87. 5,25/6,0. 005)

利用各类云发生器将定性指标转换为具体分值。运用正向云发生器生成一组随机量化数，将该组随机量化数及平均值输入到 X 条件云发生器中，产生相应的指标隶属度，选择最大隶属度及对应的百分制云模型描述输入至 Y 条件云发生器中，计算出定性指标最终得分，整个转换过程的具体步骤如图 3 所示。

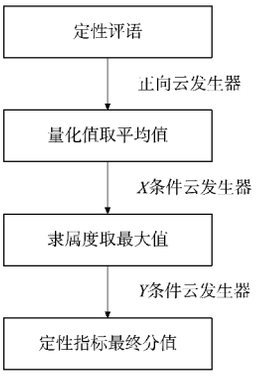

图 3　定性指标转换过程
Fig. 3　Conversion process of qualitative indicators

得出最终分值后，即可得出定性指标对于各等级的隶属度，将定性指标也划分为 A、B、C、D 4 个等级，其划分标准及区间如表 6 所示。

表 6　定性指标划分区间及标准
Tab. 6　Division intervals and standards for qualitative indicators

定性指标	构件外观	构件连接节点状况	保护层状况	混凝土冻融破坏状况	裂缝情况	使用功能完善程度
A	[75, 100]	[75, 100]	[75, 100]	[75, 100]	[75, 100]	[75, 100]
B	[50, 75)	[50, 75)	[50, 75)	[50, 75)	[50, 75)	[50, 75)
C	[25, 50)	[25, 50)	[25, 50)	[25, 50)	[25, 50)	[25, 50)
D	[0, 25)	[0, 25)	[0, 25)	[0, 25)	[0, 25)	[0, 25)

5　评估步骤

使用云模型方法对高桩码头构件服役性能进行评估时，需要建立指标集、权重集与评语集，步骤包括：

1）确定评价指标集 $A=\{A_1,A_2,\cdots,A_m\}$，将影响服役性能的各因素整合成一级指标和二级指标。

2）确定指标权重集 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_m\}$，用定量数值表达各指标的重要程度。

3）建立评语集 $W=\{w_1,w_2,\cdots,w_m\}$，将最终评估结果分为 4 个区间，不同区间对应不同评语云。

4）计算隶属度，运用云发生器计算各项指标对应不同等级的隶属度。用 MATLAB 软件，循环计算 1 000 次，求均值得各指标对应不同等级的最终隶属度。

$$\mu_i=\exp\left[-(x_i-E_x)^2/(2E_{ni}^2)\right] \tag{4}$$

式中：x_i 为正态分布随机数，E_x 为期望，E_{ni}^2 为方差。

5）计算综合隶属度。将不同服役性能等级对应的隶属度与其权重相乘后求和，得各评估等级对应的综合隶属度，根据最大隶属度原则，确定评估等级。

$$C_{mi}=\sum_i^n \mu_{mi}w_i \tag{5}$$

式中：w_i 为第 i 个指标的权重，μ_{mi} 为第 i 个指标对应评估等级 m 的隶属度，C_{mi} 为综合隶属度。

水运工程

6　工程实例

选取天津某集装箱码头，对其构件开展性能评估工作，目的是查明码头构件目前的服役状况，并为维修决策提供依据。

码头竣工于 1985 年，前方承台采用连续梁板式高桩结构，后方承台采用简支梁板式高桩结构，岸坡采用抛石棱体的重力式挡土墙接岸结构，其 29~30 段面板出现了较为严重的破损，前承台整体现浇板下方保护层大面积剥落，内部主筋裸露在外开始出现锈蚀，如图 4 所示。

图 4　29~30 段面板

Fig. 4　Panels from section 29 to section 30

对其开展服役性能评估，根据实测的定量及对定性指标的语言描述，可以计算出各评估指标对应的隶属度，以二级指标钢筋锈蚀率为例，测得该面板的钢筋锈蚀率为 7.4%，其数字特征可以根据公式计算，以钢筋锈蚀率为例，其云分布如图 5 所示。

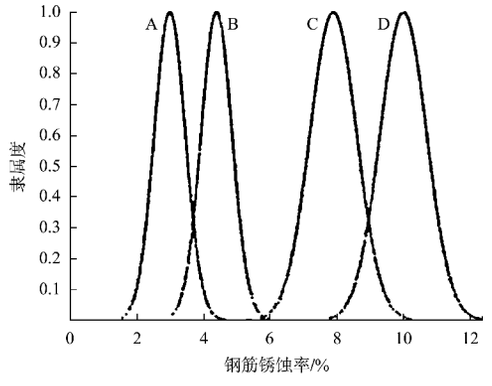

图 5　钢筋锈蚀率云图

Fig. 5　Cloud diagram of rebar corrosion rate

实测得到构件钢筋锈蚀率的具体数值后，可清晰地得出各等级的隶属度，以此类推，29~30 段面板的各指标对于各等级的隶属度及服役性能评估结果如表 7、8 所示。

表 7　29~30 段面板各服役性能指标对各等级的隶属度

Tab. 7　Subordination degree of each service performance index of panels from section 29 to section 30 to each level

	指标	A	B	C	D
一级	安全性	0.202 5	0.533 0	0.086 1	0
	耐久性	0.000 0	0.015 9	0.578 9	0
	适用性	0.203 5	0.368 5	0.000 3	0
二级	构件外观	0.004 8	0.036 2	0.361 6	0
	构件承载力	0.000 0	0.668 1	0.111 2	0
	构件连接节点状况	0.539 5	0.000 0	0.000 0	0
	位移	0.483 9	0.668 1	0.000 0	0
	保护层状况	0.000 0	0.097 2	0.004 8	0
	钢筋锈蚀率	0.000 0	0.000 0	0.585 6	0
	混凝土冻融破坏状况	0.000 0	0.000 0	0.883 1	0
	裂缝情况	0.007 5	0.027 8	0.000 0	0
	最大裂缝宽度	0.323 3	0.465 7	0.000 0	0
	最大挠度	0.054 8	0.834 1	0.004 4	0
	使用功能完善程度	0.221 5	0.000 0	0.000 0	0

表 8　29~30 段面板服役性能评估结果

Tab. 8　Service assessment results of panels from section 29 to section 30

服役性能	A	B	C	D
隶属度	0.153 3	0.638 2	0.193 3	0.000 0

根据最大隶属度原则，得出 29~30 段面板的服役性能评估结果为 B，其中安全性评级为 B，耐久性评级为 C，适用性评价为 B，在对面板制定维修方案时，应当重点关注维修方案对于面板耐久性的提升情况，且重视面板的混凝土冻融破坏情况。

7　结论

1）针对高桩码头构件服役性能的主要影响因素，建立了由两级指标组成的高桩码头构件服役性能评估指标体系，确定构件服役性能指标的权

重、取值方法及等级划分标准。在明确待评估构件服役性能各指标值后，可以判定其评估等级，确认维修需求，为未来制定维修方案提供依据。

2）将云模型理论引入到高桩码头构件性能评估中，该方法可有效解决传统性能评估中模糊性与随机性的问题，利用云发生器实现定性指标与定量指标的转换，从而提高评估结果的科学性与准确性。

3）基于云模型的高桩码头构件服役性能评估方法，对天津港某集装箱码头进行结果评估，根据 29~30 段面板的评估结果，得出该段面板的服役性能等级及维修需求。因其耐久性较差，混凝土冻融破坏状况严重，在后续维修设计中，应关注维修方案对其耐久性的提升情况，这也证明了基于云模型的高桩码头构件服役性能评估方法具有一定的可行性，可以为高桩码头维修决策提供参考。

参考文献：

[1] 陈英明. 中国港口现状及未来走势[J]. 中国水运, 2019(6): 7.
CHEN Y M. Current situation and future trend of Chinese ports[J]. China water transport, 2019(6): 7.

[2] 竺存宏, 韩玉, 刘卫民. 海港高桩码头结构可靠度的模糊数学评估[J]. 水道港口, 1992(4): 1-11.
ZHU C H, HAN Y, LIU W M. Fuzzy mathematical evaluation for the reliability of the structure of wharf in seaport[J]. Journal of waterway and harbor, 1992(4): 1-11.

[3] 徐秀娟, 栾曙光. 在役高桩码头耐久性等级的灰色综合评估[J]. 水运工程, 2009(2): 97-101.
XU X J, LUAN S G. Grey multi-hierarchical comprehensive evaluation on existing pile wharf's durability grade[J]. Port & waterway engineering, 2009(2): 97-101.

[4] 孟静, 刘现鹏, 王崇宇. 高桩码头完好状态的模糊综合评估[J]. 水道港口, 2009, 30(5): 369-375.
MENG J, LIU X P, WANG C Y. Fuzzy comprehensive assessment on intact status of high-pile wharf[J]. Journal of waterway and harbor, 2009, 30(5): 369-375.

[5] 张露. 基于模糊神经网络的在役高桩码头安全度评价[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
ZHANG L. Safety evaluation of in-service high-piled wharf based on fuzzy neural network[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.

[6] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
LI D Y, MENG H J, SHI X M. Membership clouds and Membership cloud generators[J]. Journal of computer research and development, 1995, 32(6): 15-20.

[7] 刘涛. 既有盾构隧道结构性能评价研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
LIU T. Evaluation of existing shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.

[8] 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范: JTS 304—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Technical specification for detection and assessment of water transport engineering hydraulic structure: JTS 304-2019[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

[9] 范春彦, 韩晓明, 汤伟华. AHP 中专家判断信息的提取及指标权重的综合确定法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(1): 65-67.
FAN C Y, HAN X M, TANG W H. The extraction of expert judging information and the integral method of target scaling in AHP[J]. Journal of Air Force Engineering University (natural science edition), 2003, 4(1): 65-67.

[10] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
XU J P, WU W. Multiple attribute decision making theory and methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

（本文编辑　赵娟）

水运工程