



基于构件损伤诱因反演的高桩码头 服役寿命关键控制因素分析*

李荣庆¹, 贾振龙², 杨海成³, 张勤²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210024;
3. 中交四航工程研究院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: 针对高桩码头服役寿命关键控制因素识别不明确的问题, 研究主要构件损伤与相关影响因素之间的关系。基于灰色关联分析与BP神经网络方法, 以37座现役高桩码头为研究对象, 分析其主要构件损伤程度与时间、环境和材料3类控制因素之间的关系。结果表明: 在具体因素层面, 使用时间、年平均降水量、年平均气温和氯离子浓度的灰色关联度值均高于0.62, 表明其与构件损伤程度具有较强的相关性; 在整体因素层面, 环境因素对构件损伤的影响最为显著, 权重占比为66%, 其次为材料类因素和时间类因素, 分别占比22%和12%。

关键词: 高桩码头; 服役寿命; 构件损伤程度; 灰色关联法

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0055-09

Component damage cause inversion-based analysis of key control factors for service life of pile supported wharves

LI Rongqing¹, JIA Zhenlong², YANG Haicheng³, ZHANG Qin²

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

3. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute, Guangzhou 510230, China)

Abstract: To address the issue of unclear identification of key control factors affecting the service life of pile supported wharves, we systematically investigate the relationship between the damage of major components and relevant influencing factors. On the basis of grey relational analysis and the BP neural network method, we select 37 in-service pile supported wharves as research objects to analyze the induced relationships between component damage degree and three categories of control factors: time, environment, and materials. The results show that, at the specific factor level, the grey relational grades of service life, annual average precipitation, annual average temperature, and chloride ion concentration all exceed 0.62, indicating a strong correlation with component damage. At the overall factor level, environmental factors have the most significant impact on component damage, with a weight of 66%, followed by material factors (22%) and time factors (12%).

Keywords: pile supported wharf; service life; component damage degree; grey relational

随着社会经济的发展, 我国港口工程结构的延寿需求日益增加。为确保港工结构长期服役的安全性, 有必要对其服役状态及影响其服役寿命的关键因素进行有效控制与科学评估。高桩码头作为港工结构中的重要组成部分, 其长期服役的

安全性是不容忽视的问题。我国现役高桩码头多为钢筋混凝土结构, 在海洋环境下, 桩、梁、板等主要构件易因钢筋锈蚀和混凝土碳化等原因导致其受力性能退化, 进而影响整体结构服役寿命。研究表明^[1-3], 影响高桩码头服役寿命的控制因素

收稿日期: 2025-02-02

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2603000)

作者简介: 李荣庆(1982—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事工程结构设计、可靠度和抗震研究工作。

主要涵盖时间、环境、材料等方面。为有效应对高桩码头服役过程中的性能退化问题,保障其结构服役寿命和安全性,需要对影响其服役寿命的关键控制因素进行分析。

近年来,国内外学者针对影响高桩码头服役寿命的关键控制因素开展相关研究。Oudah等^[4]基于时变可靠性理论,系统探究氯化物侵蚀与冻融循环耦合作用对钢筋混凝土码头结构安全性的时变影响,结果表明,当冻融循环次数(NA)达到25次的阈值后,结构可靠性劣化速率显著提升;Liu等^[5]通过物理试验揭示时变相对湿度与弯曲荷载协同作用下混凝土碳化深度的演化规律,定量研究表明动态湿度环境下混凝土碳化深度较恒定湿度条件平均增加15%;Li等^[6]采用数值仿真与模型试验相结合的方法,深入揭示氯离子侵蚀与船舶靠泊动荷载协同作用下的高桩码头劣化机理,并建立横向承载性能退化定量预测模型;Mirzaeefard等^[7]结合气候变化情景分析,揭示海平面上升、温湿度增加对桩基码头结构耐久性的复合影响规律,预测结果显示50年后钢材腐蚀速率因气候效应将提高94%;李文静等^[8]基于三维有限元反演分析,揭示岸坡淤积量与淤积速率对高桩码头桩基应力重分布的影响机制,并且提出临界淤积速率的定量判定方法。

上述研究在揭示高桩码头服役寿命影响因素方面取得了重要进展,但仍存在一定的局限性:首先,对影响因素的考量相对较为单一,主要聚焦于氯离子浓度、冻融循环、湿度等环境因素,未能全面揭示复杂环境下的多因素耦合作用;其次,大多数研究基于理论分析及试验模拟数据,针对现役码头结构构件损伤程度及影响因素的实测数据的研究较少,未充分考虑试验理论与实际工程结果之间的差异,工程适用性和可靠性受限;最后,不同影响因素之间的相对重要性尚缺乏直观且量化的表征手段,需要进一步研究以提升分析精度和应用价值。本文引入灰色关联分析方法和BP神经网络模型对高桩码头构件损伤诱因进行反演,并基于130个码头泊位样本数据集,系统量化各影响因素与构件损伤程度之间的相关性,旨在为今后高桩码头预防性维护提供科学依据。

1 高桩码头结构与影响因素分析

1.1 高桩码头主体结构及主要影响因素

高桩码头桩基长期处于水下环境,其服役寿命主要受侵蚀性介质、海水pH值、湿度以及生物作用^[9-13]等外在因素的影响,同时碱-集料反应、水灰比^[14-16]和胶凝材料配比等内在因素也起到关键作用。码头横梁和纵梁作为上部结构的主要承载构件,由于位置接近且长期受浪溅作用,其服役寿命受潮汐变化^[17-18]、温度、温差、日照时间和年平均气温等^[19-20]外在因素的显著影响,内在因素则主要包括掺合料与混凝土强度等。面板则因长期受阳光直射和外部荷载直接作用,其外在影响因素主要为温度、温差和使用年限等,内在因素则集中于保护层厚度和混凝土强度的变化。

基于文献调研和案例研究,本文确定的影响因素共15项,见表1。其中,内在因素包括碱-集料反应、水灰比、胶凝材料配比、掺合料、混凝土强度和保护层厚度,共6项;外在因素包括表面氯离子浓度、海水pH值、湿度、生物作用、潮差、年平均气温、温差、日照时间和使用时间,共9项。

表1 影响高桩码头不同构件服役寿命的主要影响因素
Tab. 1 Key control factors affecting service life of components of pile supported wharves

构件	内在因素	外在因素
桩基	碱-集料反应,水灰比,胶凝材料配比	表面氯离子浓度,海水pH值,湿度,生物作用,潮差
横梁、纵梁	掺合料,混凝土强度	年平均气温,温差,日照时间,潮差
面板	保护层厚度,混凝土强度	年平均气温,温差,使用时间,日照时间

1.2 高桩码头服役寿命量化影响因素识别

对表1中15项影响因素进行分析,发现碱-集料反应、水灰比、胶凝材料配比及掺合料的共同作用可以通过混凝土强度的变化综合体现。相比单独分析这4项因素,混凝土强度作为综合性指标,具有更强的代表性,且其数据获取更为便捷,因此选取混凝土强度作为分析因素。同理,日照时间的影响主要通过温度变化间接体现,而温度作为直接影响混凝土性能的关键因素,更具代表性,因此予以保留。此外,由于生物作用缺乏量化分

析途径, 无法进行灰色关联分析, 故剔除该因素。最终确定的 9 项关键影响因素包括: 潮差、年平均气温、年平均降水、海水 pH 值、表面氯离子浓度、温差、使用时间、混凝土强度和保护层厚度。

2 基于灰色关联法识别影响高桩码头服役寿命的关键控制因素

2.1 数据选取与处理

为获取在役码头构件的损伤情况及前文所述

的 9 项关键量化影响因素数据, 本文收集相关检测数据, 构建构件损伤结果与影响因素对应量化关系, 见表 2。这些数据为在役 37 座混凝土高桩码头构件损伤检测结果与环境、材料及时间 3 个方面影响因素的对应量化关系; 鉴于某些地区拥有多个码头, 采取结合地理位置与数字序列的命名方式, 以区分并实现对各个码头的精准标识; 表中损害程度指损伤构件数量占总构件数量的综合损坏比例, 温差为年最高气温与年最低气温之差。

表 2 构件损伤结果与影响因素对应量化关系
Tab. 2 Quantitative correlation between damage and influencing factors of members

构件	码头位置	潮差/ m	年平均 降水量/mm	年平均 气温/°C	温差/ °C	pH 值	表面氯离子 浓度/%	保护层 厚度/mm	混凝土强 度/MPa	使用 时间/a	损害 程度/%
纵梁	丹东港码头	4.51	875.4	8.4	62.0	8.1	0.443	53.0	59.5	5	0
	黄骅港码头	2.30	501.0	12.2	56.8	8.0	0.651	93.1	51.8	2	0
	兴中 3#泊位	2.63	1 410.8	16.1	44.7	8.0	0.433	53.0	38.4	1	0
	连云港庙岭码头 1	3.54	852.8	14.2	41.2	8.1	0.444	61.0	37.9	16	30
	连云港庙岭码头 2	3.54	852.8	14.2	41.2	8.1	0.315	61.0	32.7	16	75
	宁波港码头 3#、4#泊位	1.82	1 364.0	16.0	38.9	7.3	0.474	52.0	41.7	26	75
	汕头码头	1.03	1 672.0	21.3	39.6	8.7	0.982	67.0	45.4	13	50
	东莞码头	1.60	1 766.0	22.0	38.7	6.8	0.364	54.6	58.6	12	40
	海洋石油码头	1.56	1 721.8	22.7	34.7	6.6	0.509	62.0	46.2	23	75
	湛江中海油码头	2.41	1 567.3	23.2	35.3	8.1	2.436	54.0	50.0	38	0
	海南省榆亚码头	1.51	1 728.5	23.8	36.1	7.9	2.252	34.0	25.6	15	90
	三亚南山码头	0.70	1 123.1	25.5	30.2	7.9	1.023	58.0	36.6	15	70
	黄骅港煤码头	2.30	501.0	12.2	56.8	8.0	0.632	93.1	51.8	2	0
	兴中泊位	2.63	1 410.8	16.1	44.7	8.0	0.433	53.0	38.4	11	50
横梁	连云港庙岭码头 1	3.54	852.8	14.2	41.2	8.1	0.444	61.0	37.5	16	20
	连云港庙岭码头 2	3.54	852.8	14.2	41.2	8.1	0.315	60.0	32.9	16	20
	宁波港码头 3#、4#泊位	1.82	1 364.0	16.0	38.9	7.3	0.688	49.0	38.9	26	75
	汕头码头	1.03	1 672.0	21.3	39.6	8.7	0.928	65.0	44.4	13	50
	东莞码头	1.60	1 766.0	22.0	38.7	6.8	0.435	71.2	58.0	12	90
	珠江码头	1.64	1 720.0	21.9	38.2	7.8	0.443	65.4	46.1	25	40
	海洋石油码头	1.56	1 721.8	22.7	34.7	6.6	0.509	62.0	46.2	23	50
	湛江码头中海油码头	2.41	1 567.3	23.2	35.3	8.1	2.436	54.0	50.0	38	0
	海南省榆亚码头	1.51	1 728.5	23.8	36.1	7.9	2.252	39.0	23.5	15	95
	三亚南山码头	0.70	1 123.1	25.5	30.2	7.9	1.023	58.0	36.6	15	70
	丹东港码头	4.51	875.4	8.4	62.0	8.1	0.443	53.0	59.5	5	1
	天津北疆码头 1#、2#、3#泊位	2.43	602.0	12.0	58.2	7.3	0.537	49.0	46.2	15	75
	蓬莱码头 1#泊位	1.03	664.0	11.7	53.7	8.0	0.500	53.0	38.7	3	0
	蓬莱码头 2#泊位	1.03	664.0	11.7	53.7	8.0	0.505	53.0	38.4	2	0
蓬莱码头 3#泊位	1.03	664.0	11.7	53.7	8.0	0.551	54.0	38.3	2	5	
宁波港码头 3#~6#泊位	1.82	1 364.0	16.0	38.9	7.3	0.460	71.0	31.1	16	75	
惠州石化码头	1.10	1 989.4	21.9	6.0	6.8	0.085	74.0	60.1	12	5	
深圳赤湾港 7#泊位	1.36	1 933.3	24.8	36.9	7.7	1.250	60.0	38.2	14	5	
珠海码头	0.40	2 015.0	22.4	36.0	8.1	0.503	69.0	43.7	15	3	
广西北海码头	2.49	1 392.0	22.9	32.5	8.0	0.744	55.0	32.4	36	1	
华能东方码头	1.51	1 728.5	23.8	36.1	7.9	0.587	63.0	53.9	12	20	

续表2

构件	码头位置	潮差/ m	年平均 降水量/mm	年平均 气温/℃	温差/ ℃	pH 值	表面氯离子 浓度/%	保护层 厚度/mm	混凝土强 度/MPa	使用 时间/a	损害 程度/%	
	丹东港码头	4.51	875.4	8.4	62.0	8.1	0.450	53.0	51.0	5	1	
	天津北疆码头 1#、2#泊位	2.43	602.0	12.0	58.2	7.3	0.540	56.0	39.4	15	5	
	天津北疆码头 3#泊位	2.43	602.0	12.0	58.2	7.3	0.540	56.0	40.8	15	5	
	黄骅港 1#码头	2.30	501.0	12.2	56.8	8.0	0.700	58.6	44.1	1	3	
	黄骅港 2#码头	2.30	501.0	12.2	56.8	8.0	0.620	58.6	47.5	2	2	
	黄骅港 3#码头	2.30	501.0	12.2	56.8	8.0	0.620	58.6	47.5	9	5	
	黄骅港 4#码头	2.30	501.0	12.2	56.8	8.0	0.620	58.6	47.5	2	0	
	兴中 1#泊位	2.63	1 410.8	16.1	44.7	8.0	0.030	73.0	39.7	15	10	
	兴中 2#泊位	2.63	1 410.8	16.1	44.7	8.0	0.040	72.0	39.7	13	10	
	兴中 3#泊位	2.63	1 410.8	16.1	44.7	8.0	0.030	54.0	39.7	1	6	
面板	连云港庙岭 1#码头	3.54	852.8	14.2	41.2	8.1	0.150	52.0	40.8	16	15	
	连云港庙岭 2#码头	3.54	852.8	14.2	41.2	8.1	0.070	61.0	40.8	16	0	
	东莞沙角	1.60	1 766.0	22.0	38.7	6.8	0.250	54.4	57.6	12	5	
	深圳港盐田港 1#码头	1.07	1 578.4	22.2	38.5	7.7	1.000	81.0	63.1	14	0	
	深圳赤湾港 1#码头	1.36	1 933.3	24.8	36.9	7.7	1.250	55.0	58.9	24	5	
	深圳赤湾港 2#码头	1.36	1 933.3	24.8	36.9	7.7	1.250	70.0	51.0	22	0	
	深圳赤湾港 3#码头	1.36	1 933.3	24.8	36.9	7.7	1.250	75.0	55.2	22	10	
	珠江电厂码头	1.64	1 720.0	21.9	38.2	7.8	0.230	51.7	36.4	25	75	
	海洋石油码头	1.56	1 721.8	22.7	34.7	6.6	0.510	57.0	39.9	23	5	
	湛江中海油码头	2.41	1 567.3	23.2	35.3	8.1	1.400	59.0	49.1	38	0	
	湛江电力码头	2.41	1 567.3	23.2	35.3	8.1	0.470	41.0	49.1	17	50	
	海南省榆亚码头	1.51	1 728.5	23.8	36.1	7.9	5.530	36.0	27.4	15	80	
	三亚南山码头	0.70	1 123.1	25.5	30.2	7.9	1.020	36.0	35.6	15	90	
	桩基	丹东大东港	4.51	875.4	8.4	62.0	8.1	0.458	78.0	49.0	5	5
		天津北疆码头 1#、2#、3#泊位	2.43	602.0	12.0	58.2	7.3	0.514	56.0	48.7	15	1
		兴中 3#泊位	2.63	1 410.8	16.1	44.7	8.0	0.238	54.0	45.4	1	0
连云港庙岭 1#码头		3.54	852.8	14.2	41.2	8.1	0.514	53.0	37.5	16	10	
连云港庙岭 2#码头		3.54	852.8	14.2	41.2	8.1	0.498	54.0	32.0	16	0	
宁波港北仑港码头		1.82	1 364.0	16.0	38.9	7.3	0.744	69.0	32.0	20	0	
惠州大亚湾码头		1.10	1 989.4	21.9	6.0	6.8	0.686	69.0	42.5	12	0	
东莞虎门港码头		1.60	1 766.0	22.0	38.7	6.8	1.371	51.0	44.5	10	2	
深圳赤湾港码头 7#泊位		1.36	1 933.3	24.8	36.9	7.7	1.250	73.0	34.0	14	3	
珠江电厂码头		1.64	1 720.0	21.9	38.2	7.8	0.510	60.0	47.3	25	70	
海洋石油码头		1.56	1 721.8	22.7	34.7	6.6	0.509	58.0	32.8	23	80	
湛江中海油码头		2.41	1 567.3	23.2	35.3	8.1	3.778	63.0	58.0	38	50	
湛江港霞山港码头		2.41	1 567.3	23.2	35.3	8.1	0.850	59.0	51.7	12	5	
广西北海码头		2.49	1 392.0	22.9	32.5	8.0	0.744	49.0	36.3	36	85	

2.2 基于灰色关联法的影响因素分析

采用灰色关联法对高桩码头控制因素进行分析,以潮差、年平均气温、年平均降水、海水 pH 值、氯离子浓度、温差、使用时间、混凝土强度和保护层厚度 9 项影响因素作为输入变量(比较序列),各构件的损伤程度作为输出变量(参考序列),通过计算输入变量与输出变量的灰色关联度,确定各输入变量对输出变量的影响程度。首

先计算各输入变量的灰色关联度系数,并对其取平均值得到最终的灰色关联度,灰色关联度系数计算公式为:

$$\gamma_{ij} = \frac{\min_j \min_i |x_0(i) - x_j(i)| + \rho \max_j \max_i |x_0(i) - x_j(i)|}{|x_0(i) - x_j(i)| + \rho \max_j \max_i |x_0(i) - x_j(i)|} \quad (1)$$

式中; γ_{ij} 为参考序列 x_0 与比较序列 x_j 在第 i 个构件的第 j 个影响因素下的灰色关联系数; $x_0(i)$ 为

参考序列中的数据值, 代表第 i 个构件的损伤程度; $x_j(i)$ 为第 i 个构件的第 j 个影响因素的观测值; ρ 为分辨系数, 取 $0.5^{[21]}$ 。

基于上述方法对表 2 中数据进行灰色关联度计算, 最终得到各影响因素的灰色关联度并对其进行排序。关键影响因素与构件损伤程度之间的关联度热力图见图 1。可以看出, 在 4 类构件中, 面板的灰色关联度均高于 0.7, 表明所选影响因素与面板损伤程度之间具有较高的相关性; 而桩基部分影响因素的灰色关联度低于 0.6, 表明这些因素对桩基损伤程度的影响相对较弱; 其余构件的影响因素灰色关联度均高于 0.6, 表明所选影响因素与构件损伤程度之间的相关性较高。

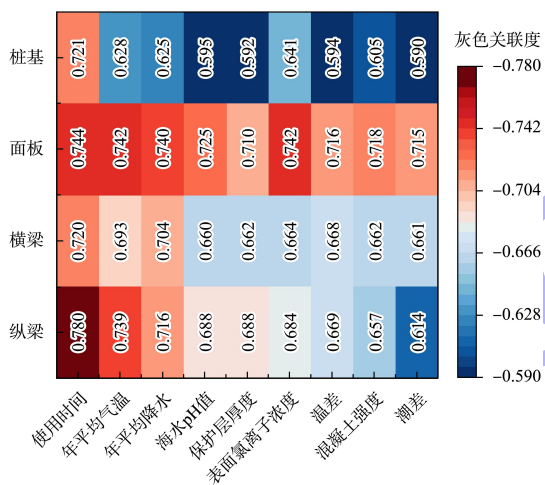


图 1 灰色关联度热力图

Fig. 1 Heatmap of grey correlation

进一步细化分析图 1 发现, 除使用时间这项最显著的影响因素外, 纵梁和横梁的损伤程度主要受年平均降水量和年平均气温的影响; 而面板和桩基则主要受到表面氯离子浓度和年平均气温的显著影响。此外, 潮差对纵梁和桩基的影响较为有限, 几乎不构成显著影响; 在横梁的分析中, 海水 pH 值同样表现出较低的相关性; 而面板的保护层厚度变化对其损伤的影响也较为有限。这些结果表明, 不同构件的损伤机理和对影响因素的敏感性存在显著差异, 需要结合具体构件特点制定针对性的保护和维修措施。

3 基于 BP 神经网络的结果验证

考虑到灰色关联分析结果受数据质量及非线性特征影响较大, 为进一步验证前文影响因素与码头构件损伤程度的灰色关联分析结果, 本文引入非线性映射能力且不受小样本数据影响的 BP 神经网络方法进行分析。本文通过构建 BP 神经网络模型, 对各影响因素与构件损伤程度之间的关系进行建模与验证, 以进一步评估灰色关联分析结果的可靠性。

BP 神经网络结构由输入层、隐藏层和输出层 3 个部分组成。其中, 输入层接受标准化后的多维检测数据, 通过隐藏层非线性激活函数提取特征并传递至输出层, 输出层据此预测构件损伤程度, 分析结构见图 2。为了扩大样本容量, 本文将全部构件的检测数据整合为统一样本集, 不再区分具体构件类别, 直接计算各影响因素对结构损伤程度的影响。

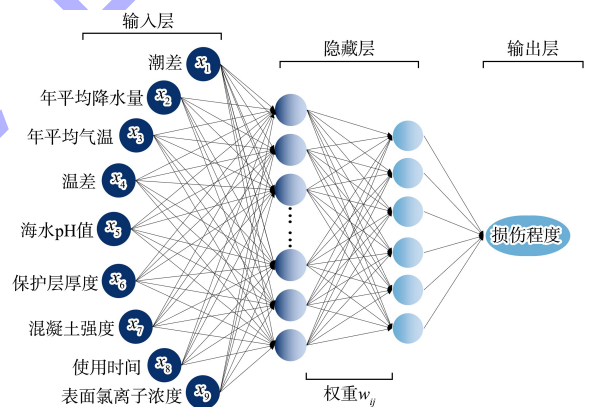


图 2 影响因素与码头损伤程度的 BP 神经网络分析结构
Fig. 2 BP Neural network structure of influencing factors and wharf damage degree

3.1 神经网络模型的构建与训练

选取码头主要构件损伤结果与影响因素对应关系作为数据集, 共整合 72 组数据样本。将整个数据集划分为训练集 (70%)、验证集 (15%) 和测试集 (15%) 3 个部分。将 9 项影响因素的不同实测数据作为 BP 神经网络的输入变量, 并选取混凝土高桩码头构件的损伤程度作为输出变量。在 MATLAB 软件中构建 BP 神经网络, 并设置相关训练参数: 最大迭代次数设为 100, 目标误差设为 0.01, 学习率为 0.02。采用 Sigmoid 函数作为隐藏层激活函

数，并基于 Levenberg-Marquardt (LM) 优化算法进行权值更新。本文采用试算法，设置 2 个隐含层，

第 1 个隐含层节点数为 19，第 2 个隐含层节点数为 11，BP 神经网络流程见图 3。

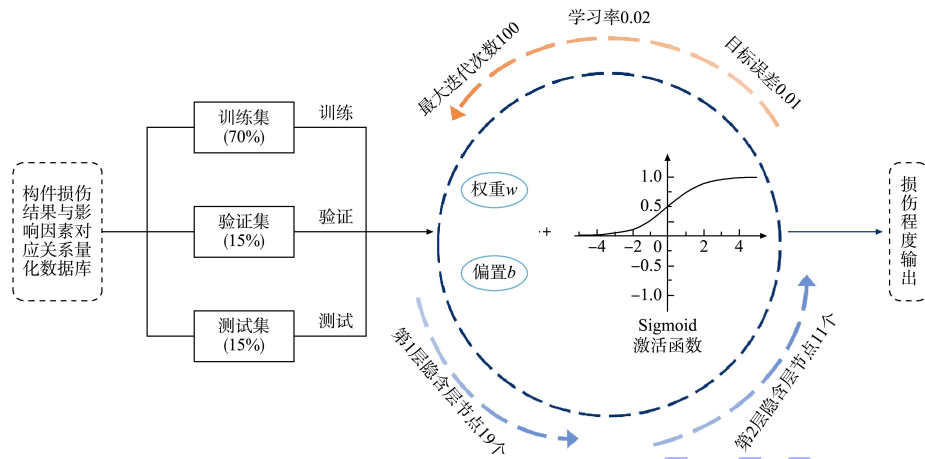


图 3 BP 神经网络训练细节流程

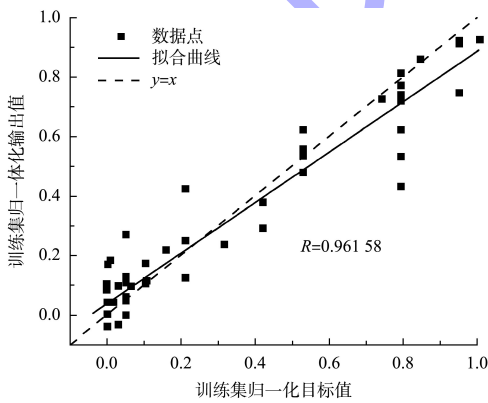
Fig. 3 BP neural network training process

对 BP 神经网络进行训练的步骤可以概括为：首先，对网络的权重和偏置进行初始化；其次，将训练数据输入网络，通过前向传播计算网络的输出结果；最后，根据输出值与期望目标之间的误差，利用反向传播算法调整网络中的权重和偏置，以减小误差。重复此过程，直至达到预设的训练次数或误差收敛到指定阈值，最终得到一个

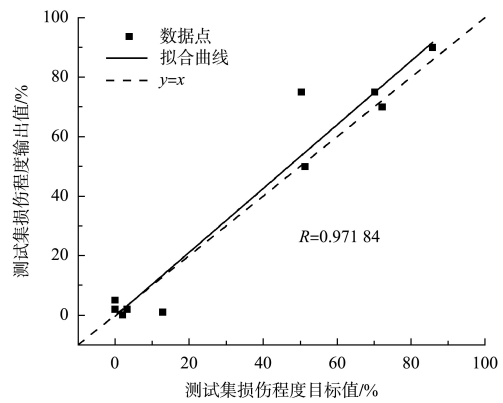
训练完备的网络模型。

3.2 验证结果的分析与比较

经过迭代训练，结果见图 4。可以看出，训练集和测试集相关性系数 R 均高于 0.96，这表明所建立的 BP 神经网络具有较高的拟合精度。因此，可基于该网络模型，评估各输入指标对输出结果的贡献程度，进而确定各输入指标的权重。



a) 训练集输出值与目标值拟合结果



b) 测试集预测输出与目标输出拟合结果

图 4 训练结果

Fig. 4 Training results

测试集预测输出与目标输出之间的绝对误差分布见图 5。除极个别数据误差较大外，预测值与目标值的绝对误差基本控制在 $\pm 5\%$ 以内。这表明，基

于 BP 神经网络构建的高桩码头结构损伤程度预测模型具有较高的预测精度，与实际检测值的拟合程度良好，进一步验证了模型的可靠性和准确性。

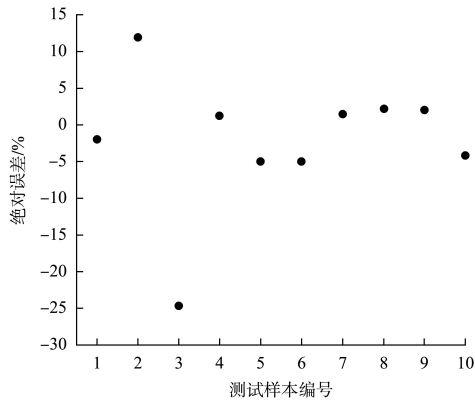


图 5 预测输出与目标输出之间的绝对误差
Fig. 5 Absolute error between predicted output and target output

最终权重计算结果见图 6。可以看出,保护层厚度、年平均气温和表面氯离子浓度的权重值位居前三,分别为 0.137、0.135 和 0.115;而混凝土强度权重值最低,仅为 0.094。

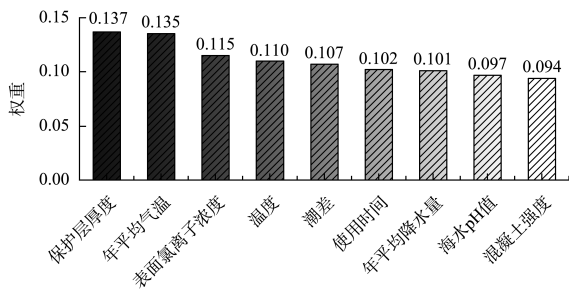


图 6 BP 神经网络输入指标权重分布
Fig. 6 BP neural network input feature weight distribution plot

4 不同分析方法比较

基于灰色关联分析和 BP 神经网络的计算结果,本文从具体影响因素层面以及时间、空间和环境 3 个层面对两者的分析结果进行比较。鉴于两种方法的计算方式不同,为了有效比较两者的结果,本文对灰色关联分析的关联度进行均值处理,以减少不同构件间的差异。

在具体影响因素的重要性方面,两种方法均表明年平均气温和氯离子浓度对构件服役寿命具有显著影响,但对于保护层厚度这个因素的排序存在一定差异。这种差异可能源于两种方法在处理因素间关系和权重分配机制上的不同:灰色关联分析注重因素间的整体关联性,而 BP 神经网络

则通过非线性映射更加敏感地捕捉因素间复杂的非线性关系。

为探究整体层面影响因素对高桩码头构件损伤的影响,本文进一步将 9 项影响因素归为时间、材料和环境 3 种类别进行分析,见图 7。首先,对前文中 4 类构件的灰色关联度结果进行归一化处理。然后,计算每类因素归一化值之和,得到每个类别影响因素在各构件中的占比分布,见图 8。可以看出,在所有构件中,环境因素的占比约为 66%,材料和时间类别其次,分别约为 22% 和 12%。

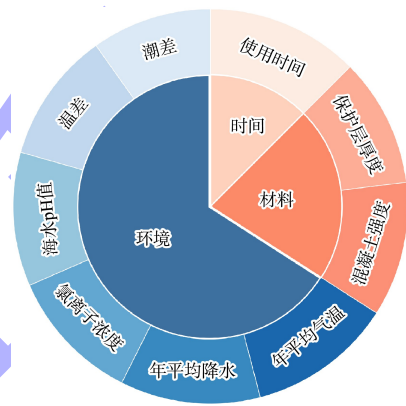


图 7 因素划分
Fig. 7 Influencing factor classification

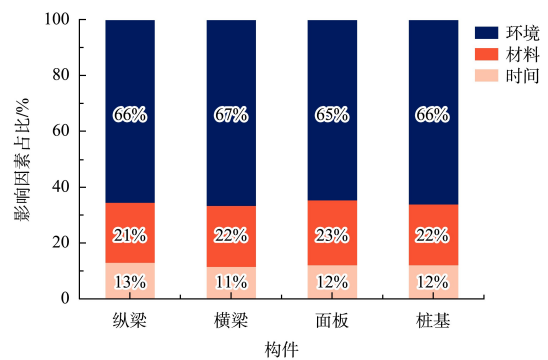


图 8 整体影响因素占比
Fig. 8 Overall influencing factor proportions

两种方法在整体层面的权重分布结果见图 9。可以看出,两种方法在整体层面的结论具有较高的一致性。其中,环境因素的权重占比最高,约为 66%,时间方面的权重占比最低,仅约为 10%。尽管在个别因素的权重计算上存在细微差异,但从整体层面看,时间、材料和环境 3 类因素对结构服役寿命的影响程度基本一致。

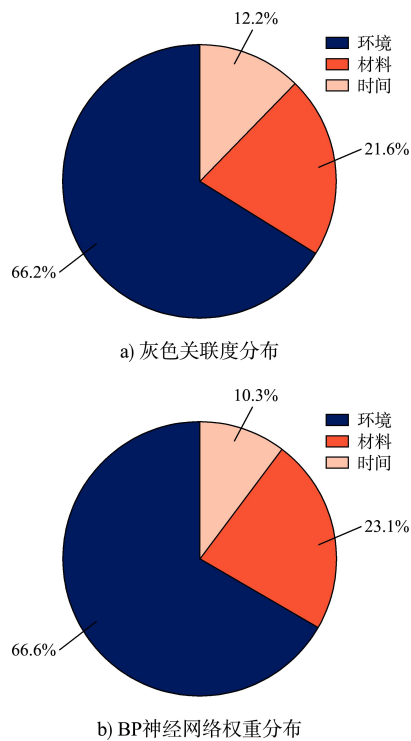


图9 两种方法在整体层面的权重分布结果

Fig. 9 Weight distribution results of two methods at overall level

5 结论

1) 基于对现役码头构件损伤与关键因素的检测结果分析, 码头结构的关键影响因素可归纳为环境、材料、时间 3 个方面, 主要包括潮差、年平均气温、年平均降水、海水 pH 值、表面氯离子浓度、温差、混凝土强度、保护层厚度和使用时间。

2) 基于高桩码头主要构件损伤程度与关键影响因素的相关性分析结果可知, 不同影响因素对构件损伤程度存在明显差异。其中, 保护层厚度(权重 0.137)、年平均气温(权重 0.135)、表面氯离子浓度(权重 0.115)对构件损伤的影响最为显著。

3) 基于灰色关联与 BP 神经网络的分析结果比较表明, 两者在具体指标层面上个别因素的权重存在差异, 但在整体层面, 两者的结果显示出较高的一致性。两种方法均表明, 环境因素对码头结构损伤的影响最为显著, 权重占比达 66%; 其次是材料因素, 占比 22%; 时间因素的影响相对较小, 仅占 12%。

参考文献:

- [1] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 南海海域珊瑚混凝土结构的耐久性影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 253-260.
DA B, YU H F, MA H Y, et al. Factors influencing durability of coral concrete structure in the South China Sea[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(2): 253-260.
- [2] 王振振, 张社荣. 近海复杂环境因素对闸墩混凝土裂缝的影响[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 92-97.
WANG Z Z, ZHANG S R. Impacts of offshore complex environment factors on cracks in concrete [J]. Hydro-science and engineering, 2017(6): 92-97.
- [3] OSMOLSKA M J, KANSTAD T, HENDRIKS M A N, et al. Durability of pretensioned concrete girders in coastal climate bridges: basis for better maintenance and future design[J]. Structural concrete, 2019, 20(6): 2256-2271.
- [4] OUDAH F. Time-dependent reliability-based charts to evaluate the structural safety of RC wharf decks exposed to corrosion and freeze-thaw effect [J]. Engineering structures, 2023, 283: 115887.
- [5] LIU M W, JU X L, WU L J, et al. Carbonation depth model for loaded reinforced concrete (RC) beams under time-dependent relative humidity conditions[J]. Journal of building engineering, 2023, 65: 105618.
- [6] LI P P, LI J P, LI L, et al. Overall structural degradation of a high-piled wharf under chloride invasion and the impact force of ship berthing [J]. Ocean engineering, 2024, 312: 119320.
- [7] MIRZAEEFARD H, HARIRI-ARDEBILI M A. The role of climate change and corrosion modeling strategy in dynamic response of pile-supported wharves[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2024, 186: 108922.
- [8] 李文静, 别社安, 武哲宇, 等. 岸坡淤积对高桩码头结构受力的影响及清淤防治措施[J]. 水利水运工程学报, 2024(5): 31-41.
LI W J, BIE S A, WU Z Y, et al. The impact of sediment accumulation on the structural stress of high-pile wharf and sediment removal measures [J]. Hydro-science and engineering, 2024(5): 31-41.

- [9] JU X L, WU L J, LIN C, et al. Prediction of chloride concentration with elevation in concrete exposed to cyclic drying-wetting conditions in marine environments [J]. *Construction and building materials*, 2021, 278: 122370.
- [10] WANG Y Z, GUO S, YAN B C, et al. Experimental and analytical investigation on chloride ions transport in concrete considering the effect of dry-exposure ratio under diurnal tidal environment [J]. *Construction and building materials*, 2022, 328: 127138.
- [11] 荣辉, 陈肖杰, 刘德娥, 等. 海洋环境下混凝土的宏观生物腐蚀研究进展 [J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50 (2): 503-511.
- RONG H, CHEN X J, LIU D E, et al. Research progress on macro biological corrosion of marine concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50 (2): 503-511.
- [12] 徐明磊, 索云飞, 陈洁. 硫酸盐还原菌对高桩码头抗震设计的影响 [J]. *水运工程*, 2020(8): 103-108.
- XU M L, SUO Y F, CHEN J. Impact of sulfate reducing bacteria on seismic design of suspended jetty structure [J]. *Port & waterway engineering*, 2020 (8): 103-108.
- [13] TOUIL B, GHOMARI F, KHELIDJ A, et al. Durability assessment of the oldest concrete structure in the Mediterranean coastline: the Ghazaouet harbour [J]. *Marine structures*, 2022, 81: 103121.
- [14] MAHMOOD W, AYUB T, KHAN A U R. Mechanical properties and corrosion resistance of recycled aggregate concrete exposed to accelerated and natural marine environment [J]. *Journal of building engineering*, 2023, 66: 105867.
- [15] ZHANG Y R, WU S Y, MA X F, et al. Effects of additives on water permeability and chloride diffusivity of concrete under marine tidal environment [J]. *Construction and building materials*, 2022, 320: 126217.
- [16] YOUNSI A. Long-term carbon dioxide sequestration by concretes with supplementary cementitious materials under indoor and outdoor exposure: assessment as per a standardized model [J]. *Journal of building engineering*, 2022, 51: 104306.
- [17] XIE Y, LI X. Influence of the coupling effect of ocean currents and waves on the durability of pier structure of cross-sea bridges [J]. *Journal of coastal research*, 2020, 110(S1): 87-90.
- [18] 解立波, 苏雷, 王建峰, 等. 波浪作用下高桩码头-海床系统动力响应特性研究 [J]. *水运工程*, 2025 (2): 27-35.
- XIE L B, SU L, WANG J F, et al. Dynamic response characteristics of pile-supported wharf-seabed system under wave action [J]. *Port & waterway engineering*, 2025(2): 27-35.
- [19] 杨海成, 杜安民, 范志宏, 等. 温度对混凝土氯离子扩散性能的影响 [J]. *水运工程*, 2015(10): 20-26.
- YANG H C, DU A M, FAN Z H, et al. Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concrete [J]. *Port & waterway engineering*, 2015(10): 20-26.
- [20] LIU H B, ZHANG B H, LIU H C, et al. Analysis of long-term durability monitoring data of high-piled wharf with anode-ladder sensors embedded in concrete [J]. *Frontiers in materials*, 2021, 8: 703347.
- [21] 周小龙, 袁燕超, 陈莉, 等. 基于灰色关联度的在役混凝土结构耐久性评估 [J]. *武汉工程大学学报*, 2017, 39(2): 169-174.
- ZHOU X L, YUAN Y C, CHEN L, et al. Durability evaluation of concrete structure based on grey relation degree [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2017, 39(2): 169-174.

(本文编辑 王璁)