

基于知识图谱和熵值优化的高桩码头模糊评估

张鹏, 周一恒, 崔春义, 季则舟, 周扬, 刘志新

Fuzzy evaluation of high-pile wharves based on knowledge graph and entropy optimization

ZHANG Peng, ZHOU Yiheng, CUI Chunyi, JI Zezhou, ZHOU Yang, LIU Zhixin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240123001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于改进层次分析法的航道生态性评价研究

Ecological evaluation of waterway based on improved analytic hierarchy process

水利水运工程学报. 2021(5): 33 <https://doi.org/10.12170/20210207001>

熵权模糊集对分析法在溪洛渡水库汛期分期中的应用

Application of fuzzy set pair analysis method based on entropy weight in flood season staging of Xiluodu Reservoir

水利水运工程学报. 2020(6): 16 <https://doi.org/10.12170/20191205001>

长江下游航道承载力指标与评价方法研究

Study on the indexes and evaluation method of carrying capacity of the navigation channel in the lower Yangtze River

水利水运工程学报. 2019(1): 85 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.011>

基于AHP-集对分析的矿井水资源利用风险评估

Risk assessment of mine water resource utilization based on analytic hierarchy process and set pair analysis

水利水运工程学报. 2021(3): 126 <https://doi.org/10.12170/0201120002>

特高拱坝动态安全风险系统研发及应用

Development and application of dynamic safety risk analysis system for super-high concrete arch dam

水利水运工程学报. 2020(1): 112 <https://doi.org/10.12170/20181201002>

基于位移的高桩码头地震易损性分析

Seismic vulnerability analysis of pile-supported wharves based on displacement

水利水运工程学报. 2019(3): 76 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.010>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240123001

张鹏, 周一恒, 崔春义, 等. 基于知识图谱和熵值优化的高桩码头模糊评估 [J]. 水利水运工程学报, 2024(5): 72-83. (ZHANG Peng, ZHOU Yiheng, CUI Chunyi, et al. Fuzzy evaluation of high-pile wharves based on knowledge graph and entropy optimization[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(5): 72-83. (in Chinese))

基于知识图谱和熵值优化的高桩码头模糊评估

张鹏¹, 周一恒¹, 崔春义¹, 季则舟², 周扬³, 刘志新⁴

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222; 3. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 4. 中国建筑一局(集团)有限公司, 北京 100161)

摘要: 高桩码头应用广泛, 在其服役期内可能受到超载、淤积、环境腐蚀等因素影响, 出现结构性能退化, 对其进行服役性态评估具有重要价值。基于已有行业规范与工程案例整理了中国常见码头结构形式的服役性态评估指标体系, 采用 Top-down 方式创建指标体系的知识图谱, 并利用 visNetwork 工具包编写指标体系内核代码与 BS 架构交互界面。结合 AHP-FCE 法与评估指标进行码头服役性态评估: 建立评语集与评估等级集进而得到模糊评估向量; 采用熵值法(EM)对层次分析(AHP)中的权值进行修正, 从而实现客观赋权。最后, 以中国东南沿海某海港高桩码头结构为例进行流程演示, 结合该工程特点从知识图谱中抽取安全评估指标并建立该工程分级评估系统, 分层计算模糊评估向量并得到码头整体安全等级为 A 级。该结果与工程检测机构评估结果一致, 验证了所建知识图谱的适用性与修正的 AHP-FCE 法的正确性, 说明该方法可推广应用于其他各类码头结构的运维评估。

关键词: 指标体系; 知识图谱; 层次分析法; 熵值法; 模糊综合评估; 服役性态

中图分类号: U657.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)05-0072-12

港口是联结水路运输与陆路运输的枢纽设施, 在现代物流系统中发挥着重要作用。高桩码头是中国沿海淤泥质海岸港口建设常用结构形式, 其在严峻的海洋环境下易出现裂缝、锈蚀、承载力退化等多种病害。对高桩码头结构服役性态的深入评估, 具有显著的工程价值和现实意义。

高桩码头结构是由面板、梁、桩、附属部件等构成的结构系统, 层次分析法适用于此类复杂结构系统的评估。在选取评估指标时, 已有研究根据不同的工程特点及评价目的选取不同的评价指标。例如, 钟小平等^[1]将结构性能指标分为风险、技术、材料三类; 丁国庆等^[2]主要依据承载力和承载状态建立了高桩码头技术评价模型; 程婷^[3]以结构、外观、承载力等要素并建立为评估体系; 苏静波等^[4]采用横向位移、桩顶转角和微观层面的桩身应变作为评估指标; 王德虎等^[5]从外观和承载能力两方面构建安全评估指标体系。综上, 评估指标选取主要依赖于工程师经验, 如能将已有的工程案例及规范所建议的评价指标进行归纳整理, 并采用知识图谱方式进行管理, 可为后续类似工程建立评价系统提供案例参考和筛选工具。

层次分析法本质上是一种主观评价方法, 其最终结果依赖专家主观打分提供的权值进行计算。为提升评价的客观性, 已有文献引入灰色关联度理论与模糊理论对层次分析法进行改进。刘轶华等^[6]结合层次分析法和灰色关联度法, 实现了码头能力损失评估; 吴锋等^[7]实现了高桩码头运营期耐久性模糊综合评估; 张松^[8]运用模糊数学层次分析法对高桩码头安全风险进行综合评估; 张露^[9]基于模糊神经网络对多种损伤状况下的码头结构安全进行评估。此外, 熵值法是一种基于信息熵的客观赋权方法, 主要用于多指标决策分

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2601102); 国家自然科学基金资助项目(51808092); 中央高校基本科研业务费专项资金(3132024171); 大连市科技创新基金资助项目(2022JJ12GX031)

作者简介: 张鹏(1984—), 男, 河北石家庄人, 副教授, 博士, 主要从事结构健康监测方向研究。

E-mail: peng.zhang47@dlnu.edu.cn 通信作者: 崔春义(E-mail: cuichunyi@dlnu.edu.cn)

析中确定指标的权重。将熵值法与层次分析法结合可以进一步增强评价的客观性。

综上, 现有的高桩码头状态评价多采用层次分析法, 所用评价指标尚未梳理整合, 权值确定主观性较强。对此, 本文提出一种基于知识图谱和熵值优化的高桩码头模糊评估方法: 采用自顶向下(Top-down)方式创建高桩码头服役性态评估知识图谱, 结合性态评估知识图谱和实际工程特点, 构建高桩码头评估指标体系; 基于评估指标体系和熵值(EM)优化的层次分析(AHP)权重, 采用模糊综合评估法(FCE)评估高桩码头服役性态。结合某高桩码头安全性评估工程案例, 以验证该方法在工程实例中的应用。

1 高桩码头服役性态评估知识图谱及指标体系构建

知识图谱(Knowledge Graph, KG)是一种结构化的语义知识库, 以知识网络的形式在互联网中呈现整体百科或特定领域的知识信息。知识图谱能够高效整合海量数据的有效信息^[10], 并以知识图谱中的结构化数据库为基础, 提供知识搜索、知识问答和知识决策等智慧服务^[11]。基于上述技术特征和应用方式, 知识图谱可以较好地满足高桩码头评估指标体系构建需求, 但当前涉及高桩码头服役性态评估领域的知识图谱尚处于起步阶段, 广泛的理论和应用空间有待探索。

本文构建高桩码头服役性态评估知识图谱, 应用于工程领域智能化的码头评估指标体系构建和信息检索, 实现高桩码头结构分类、性能指标、病害处理等健康监测领域关键概念和信息的融合, 提供可视化、结构化的领域知识体系; 在知识图谱的基础上, 可应用图谱智能化的信息关联和查询功能, 筛选出高桩码头服役性态评估指标, 经过层级展开, 得到高桩码头服役性态评估指标体系。高桩码头服役性态评估知识图谱及相关指标体系构建方法框架如图 1 所示。

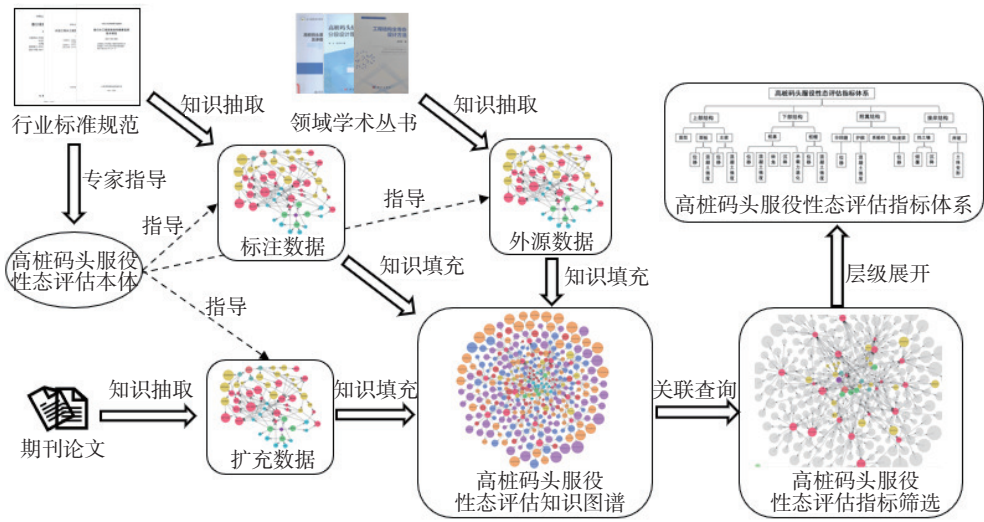


图 1 高桩码头服役性态评估知识图谱及指标体系构建方法框架

Fig. 1 Framework for constructing the knowledge graph and index system for service state evaluation of high-pile wharves

1.1 高桩码头服役性态评估知识图谱构建

知识图谱的构建方式包括自顶向下式(Top-down)和自底向上式(Bottom-up)。其中 Top-down 方式先从顶层概念构建本体, 然后细化概念和关系实体, 最后将从文献、规范、标准中抽取的知识实体匹配填充到知识图谱中。此方法适用于数据量较少的专业知识领域, 具有概念清晰、层次分明及数据准确的优点。

高桩码头性态评估领域的知识数据主要包含在行业标准、期刊文献等非结构化文本数据源中, 且该领域涉及较少的数据量和较完备的专家经验。Top-down 的构建方式和高桩码头性态评估领域的知识特征相

符,能够较好地确保知识图谱的清晰和准确性。因此,本文拟采用以人工为主,自顶向下的方式构建高桩码头性态评估知识图谱,并在杨玉基等^[12]总结的领域知识图谱构建方法指导下,对知识图谱构建方法进行调整。知识图谱构建流程如图 2 所示。

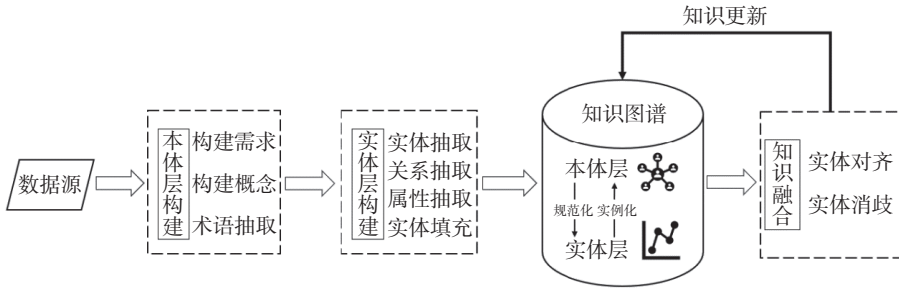


图 2 自顶向下的知识图谱构建流程

Fig. 2 Top-down knowledge graph construction process

基于 Top-down 的图谱构建方式,首先广泛收集已有评估指标体系及码头运维文献,总结码头评估指标体系和码头运维领域的实施流程、指标类型、指标逻辑关系等本体概念和术语,上述本体信息总结如图 3 所示;之后以本体信息为指导,以人工检索统计的方式,从规范及文献中抽取如码头评估指标、指标隶属关系、病害检测和处理措施等知识要素实体;最后以“实体-关系-实体”或“实体-属性-属性值”的三元组资源描述框架(Resource Description Framework, RDF)对本体信息和实体要素进行统计。由于 CSV 表格以纯文本形式存储,使用常见的文本编辑器即可打开和编辑,并具备可读性强、简单易用、兼容性较好的优点,适用于文本数据存储编辑和图谱绘制软件的读取。综上分析,本文将统计得到的 RDF 三元组存储为 CSV 格式。

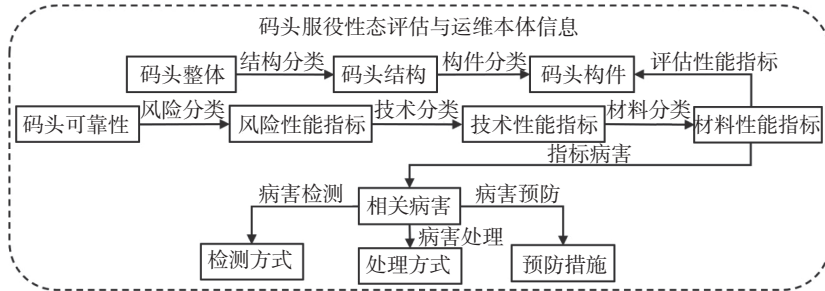


图 3 高桩码头服役性态评估与运维本体信息

Fig. 3 Service state evaluation and operation & maintenance ontology information of high-pile wharves

在常见的知识数据抽取过程中,可能出现缺失、错误等问题,为保障知识图谱数据的准确性,有必要对 RDF 三元组数据进行清洗。数据清洗的主要步骤包括格式规范化、缺失处理、错误处理等。格式规范化,即将不同来源的数据规范化为统一的格式,以确保数据格式一致性。缺失处理,是以填充默认值、插值或者丢弃等方式,处理缺失的数据。错误处理,即识别并修正错误的的数据,例如异常数值、不合理的关系等。常用的数据清洗方式包括人工勘误、OpenRefine、Python 及 Trifacta,其中人工勘误方式可最大程度保障数据的规范性、完整性和准确性。考虑到本文所用知识数据量较少,人工知识抽取准确性较高,且 CSV 格式下的知识数据具备直观可编辑的优点,本文采用人工方式对知识数据复核勘误。

为构建可视化、结构化的知识图谱,研究人员需借助图谱绘制工具对知识数据进行读取和表示。作为 R 语言下的特定绘图包,visNetwork 具备出色的制图功能,兼容包括 CSV 在内的多种数据格式,且能够绘制动态的交互式可视化知识网络,满足了本文可视化知识图谱的构建和交互应用。因此本文利用 R 语言中的 visNetwork 程序包读取 CSV 格式的 RDF 三元组,以节点(node)和边(edge)的可视化方式对实体和实体

关系进行知识表示, 通过 Web 网页的形式完成可视化知识图谱的初步构建。

在知识图谱初步构建成型后, 由于文本知识数据中仍存在难以识别的歧义或冗余, 有必要在可视化的图谱基础上进行知识融合^[13]。知识融合的核心步骤为实体对齐和实体消歧。实体对齐步骤是将来自不同数据源的同一个实体匹配起来, 以便统一查询和分析(图 4); 实体消歧步骤确定了每个实体名词指向的具体实体, 防止出现实体名词“一词多义”的状况(图 5)。常用的知识融合方法包括图谱推理和深度学习。本文基于上述可视化知识图谱, 采用人工方式完成图谱推理, 最大程度保障知识融合的完整性和全面性, 提升图谱的查询效率和应用性能。

在完成知识融合并更新图谱后, 通过图谱所在 Web 网页中的交互工具, 对图谱布局进行优化, 最终获得的高桩码头服役性态评估知识图谱如图 6 所示。最终构建的知识图谱共包含 11 类本体、344 个实体, 以及 10 类本体关系和 396 个实体关系。

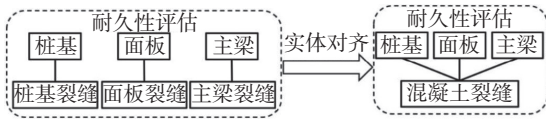


图 4 实体对齐示例

Fig. 4 Examples of entity alignment

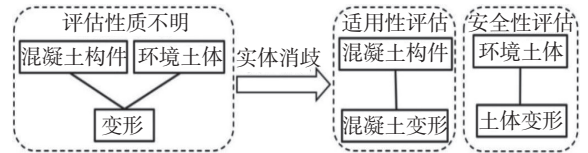


图 5 实体消歧示例

Fig. 5 Examples of entity disambiguation

1.2 高桩码头服役性态评估指标体系构建

作为被广泛应用的评估模型, 指标体系采用拆分的方式, 将抽象的难以直接评估的目标, 细分为具象化的可以直接评估的指标, 并以指标富集的方式实现对抽象目标的间接评估。基于上述理念, 专家学者在构建高桩码头评估指标体系时, 首先选取码头整体拆分后的基础部件指标; 之后根据《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304—2019)

所述维度(安全性、适用性或耐久性)下的码头工程评估需求, 选取适用于码头构件评估的性能指标; 最后将两类指标按隶属关系分层排序, 获得符合评估需求的高桩码头评估指标体系。

在上文构建的码头知识图谱中, 码头部件指标、评估性能指标及两类指标的隶属关系均以节点和连线的方式存储在图数据库中。鉴于此, 提出基于知识图谱的高桩码头服役性态评估指标体系构建方法, 总体构建流程如图 7 所示。该方法参考专家学者常用的高桩码头评估指标体系构建方法, 以实际工程评估需求为指导, 采用 visNetwork 工具包中 interaction 功能模块下的 selected by 过滤器, 以点选的方式从知识图谱中筛选目标节点和连线, 经梳理展开后即可获取满足评估维度需求的高桩码头服役性态评估指标体系。

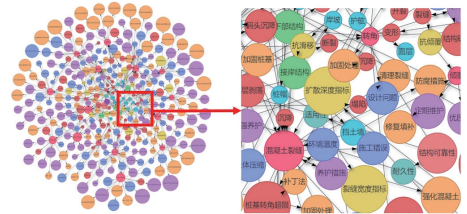


图 6 高桩码头服役性态评估知识图谱

Fig. 6 Knowledge graph for service state evaluation of high-pile wharves

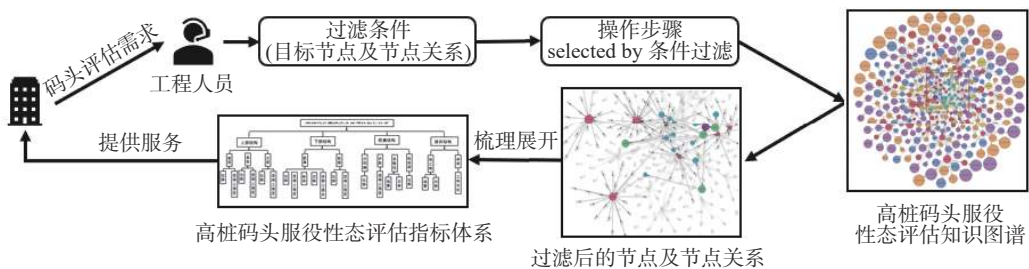


图 7 高桩码头服役性态评估指标体系构建流程

Fig. 7 Process of constructing the evaluation index system for the service performance of high-pile wharves

在上述方法的实际应用过程中,用户可按照图谱对码头部件的层级划分,首先过滤出反映码头部件隶属的码头整体、码头结构、码头构件等 3 种指标节点;之后参考码头评估维度需求,过滤如承载能力、混凝土强度、稳定性等用于码头构件评估的性能指标节点;最后利用上述节点和节点之间的连线重新构图,经人工梳理展开后,即可获得用于码头(安全性)评估的层级指标体系。

2 基于熵值优化的模糊层次评估

模糊层次评估法是层次分析和模糊综合评估相结合的评估方法,能以量化处理的方式,将评估过程中存在的主观、模糊、不确定的信息融入决策过程,使决策结果更加客观准确,具有可操作性强、逻辑清晰且精度较高的优势,并已多次在实际应用^[14-16]中得到了验证。考虑到本文基于知识图谱构建的高桩码头服役性态评估指标体系具有明显的多层次结构,以及专家指导意见的主观性和码头病害检测评估的模糊性,宜采用熵值优化的模糊层次评估法,以满足高桩码头服役性态评估工程实际需求,具体实施步骤如图 8 所示。

2.1 层次分析法计算权重及修正

利用层次分析法确定指标初始权重的过程,主要包括在专家指导下构造模糊判断矩阵、计算特征根及特征向量、一致性检验等步骤。

层次分析中的模糊判断矩阵 A 根据专家打分建立,存在主观不确定性,为了平衡初始权重中存在的主观不确定因素,本文引进了熵的概念。熵和不确定性之间具有密切的关系,当变量的不确定性越大时,其信息熵也越大;反之当变量的不确定性越小时,其信息熵也越小。因此本文采用熵值法^[17]对层次分析法确定的权重进行修正,具体过程如下。

(1)依次对模糊判断矩阵 A 中的元素 w_{ij} 进行标准化处理:

$$\bar{w}_{ij} = (w_{ij} - \min(w_j)) / (\max(w_j) - \min(w_j)) \quad (1)$$

(2)依次计算指标 i 对指标 j 的贡献度 P_{ij} :

$$P_{ij} = \bar{w}_{ij} / \sum_{i=1}^n \bar{w}_{ij} \quad (2)$$

(3)计算指标 j 的熵值 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (3)$$

(4)计算指标 j 的差异系数 d_j :

$$d_j = (1 - e_j) / \left(n - \sum_{j=1}^n e_j \right) \quad (4)$$

(5)计算指标 j 的信息权重 M_j :

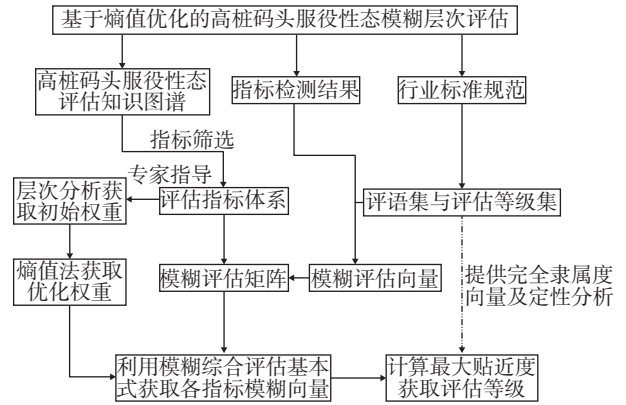


图 8 基于熵值优化的码头模糊层次评估方法

Fig. 8 Wharf fuzzy hierarchical evaluation method based on entropy value optimization

$$M_j = d_j / \sum_{j=1}^n d_j \tag{5}$$

(6)以指标 j 的信息权重 M_j 修正层次分析获得指标 j 的层次分析权重值 φ_j , 得到指标 j 的综合权重 S_j :

$$S_j = M_j \varphi_j / \sum_{j=1}^n (M_j \varphi_j) \tag{6}$$

将修正后的综合权重 S_j 作为指标 j 的权重参与模糊综合评估, 可最大限度地避免人为干预和主观性因素的影响, 使指标权重更为合理精确。

2.2 模糊综合评估

模糊综合评估的具体实施包括以下步骤: 首先建立评语集和评估等级集, 将码头实际检测结果对照评估等级集以获得模糊评估向量; 之后, 基于指标体系的层级划分, 将模糊评估向量组合为模糊评估矩阵; 最后结合修正后的指标权重及对应的模糊评估矩阵, 利用模糊综合评估基本式, 实现模糊评估结果在指标体系中的层级递推。

(1)构建评语集。参考《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304—2019)及文献所述评估规则^[18], 水运工程中水工建筑物的评估可划分为安全性、适用性及耐久性 3 个维度, 分别对应各自的分级标准和完全度隶属向量, 采用上述分级标准和完全度隶属向量作为评语集^[12], 以高桩码头安全性评估为例, 其分级标准和完全度隶属向量如表 1 所示。

表 1 高桩码头安全性评估评语集
Tab. 1 Evaluation comments collection for the safety assessment of high-pile wharves

等级	分级标准	完全隶属度向量
A	安全性符合国家有关标准要求, 具有足够的承载能力	$V_a=(1,0,0,0)$
B	安全性略低于国家有关标准要求, 尚不显著影响承载能力	$V_b=(0,1,0,0)$
C	安全性不符合国家有关标准要求, 显著影响承载能力	$V_c=(0,0,1,0)$
D	安全性严重不符合国家有关标准要求, 已严重影响承载能力	$V_d=(0,0,0,1)$

(2)构建评估等级集。在确定评语集后, 需建立评估等级集, 用于确定被评估指标隶属于评语集的分级标准。鉴于相关文献规范搜集到的信息, 高桩码头评估指标的分级标准包含定量分级和定性分级。参考以《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304—2019)为代表的标准规范, 及文献^[19-20]中的指标分级标准, 经整理归纳后得到评估等级集, 评估等级集中的部分分级标准示例如表 2 所示。

表 2 部分分级标准示例
Tab. 2 Examples of the grading standard

等级	钢混结构最大挠度	钢混结构最大缝宽	主要构件承载能力	面板缝宽	梁、桩及桩帽缝宽	混凝土构件钢筋锈蚀
A	$r \geq 1.00$	$r \geq 1.00$	$\frac{R_d}{\gamma_0 S_d} \geq 1.00$	无裂缝	无裂缝	无锈蚀
B	$0.95 \leq r < 1.00$	$0.95 \leq r < 1.00$	$0.95 \leq \frac{R_d}{\gamma_0 S_d} < 1.00$	局部出现微小锈蚀裂缝, 缝宽小于 0.3 mm	局部有微小锈蚀裂缝, 缝宽小于 0.3 mm	混凝土表面局部锈迹
C	$0.90 \leq r < 0.95$	$0.90 \leq r < 0.95$	$0.90 \leq \frac{R_d}{\gamma_0 S_d} < 0.95$	锈蚀裂缝较多或呈网状, 缝宽 0.3~1.0 mm	裂缝较多, 部分为顺筋连续裂缝缝宽 0.3~3.0 mm	锈迹较多, 钢筋锈蚀范围较广
D	$r < 0.90$	$r < 0.90$	$\frac{R_d}{\gamma_0 S_d} < 0.90$	大面积锈蚀裂缝呈网状, 缝宽大于 1.0 mm	大面积顺筋连接裂缝, 缝宽大于 3.0 mm	锈迹普遍, 钢筋表面部分或全部锈蚀, 截面面积明显减小

注: r 表示规范限值与实测值或验算值的比值; R_d 和 S_d 分别为结构构件的抗力和作用效应组合设计值; γ_0 为结构重要性系数, 根据结构安全等级取值依次为一级 $\gamma_0 = 1.1$ 、二级 $\gamma_0 = 1.0$ 、三级 $\gamma_0 = 0.9$ 。

(3)模糊综合评估。采用德尔菲法^[21] 获取模糊评估向量, 以高桩码头整体安全性评估为例, 按前述方法获取高桩码头安全性评估指标体系, 将码头构件检测结果比照评估等级集, 获得各构件所属安全性指标对

应模糊评估向量 $V_0 = (a, b, c, d)$, 元素 a 、 b 、 c 、 d 依次对应检测结果在评估等级集分级标准下的隶属度, 即 V_0 存在四类隶属度向量: $V_0 = (V_a, V_b, V_c, V_d)$ 。

组合指标体系中某构件指标所属 n 项安全性指标模糊评估向量 $V_1 \sim V_n$, 得到该构件指标符合检测结果的模糊评估矩阵 R :

$$R = (V_1, V_2, \dots, V_n)^T \quad (7)$$

经熵值修正步骤后, 得到上述 n 项安全性指标的权重值 $S_1 \sim S_n$, 则权重向量 S :

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (8)$$

利用模糊综合评估基本式, 令权重向量 S 与对应构件的模糊矩阵 R 相乘, 获得对应构件指标的模糊评估向量 V :

$$V = S \times R \quad (9)$$

按层级划分自下而上重复递推, 可获取体系中各指标的模糊评估向量, 结合评语集中的完全隶属度向量, 经贴适度^[22] 计算后可获取模糊评估向量在各评估等级下的贴适度, 最终将最大贴适度对应的评估等级作为码头安全等级。

3 案例分析

南方沿海某集装箱高桩码头平台于 2009 年建成, 总长 1 500 m, 整体为梁板式结构, 排架间距 10.5 m。高程采用 85 国家标准, 其中面板高程 5.20 m、前沿设计底高程为 -17.50 m、设计高水位为 1.66 m、设计低水位为 -1.22 m。面板为预制现浇叠合面板, 主梁分为预制横梁和纵梁, 主梁通过现浇桩帽与桩基连接。码头共分 4 个泊位、17 个结构分段, 结构之间采用分段缝连接, 每榀排架分布 12 根基桩, 并设 6 个节点, 轨道梁下的每个节点布置 3 根桩, 纵梁下的每个节点布置 1~2 根桩, 经工程检测单位实地检测后, 获得该集装箱高桩码头详细的构件检测报告如表 3 所示。

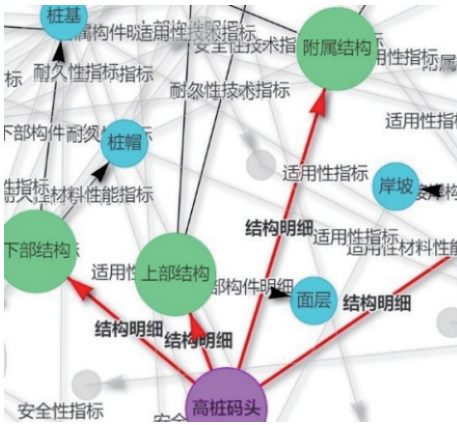
表 3 码头构件检测结果
Tab. 3 Inspection results of wharf components

构件	检测结果
面层	分布较多裂缝, 未出现大面积坑槽及缺失
面板	整体外观良好, 部分面板出现 20 mm 左右的错位偏移, 部分板底存在宽 0.20 mm 左右的裂缝, 混凝土未出现明显锈蚀及脱落现象, 经采样检测求得混凝土强度衰减率为 4.7%
主梁	部分主梁跨中出现结构性裂缝, 缝宽 0.10~0.15 mm, 个别梁体出现 8 mm 左右的错位偏移, 整体锈蚀不明显, 结构完整性较好, 经采样检测求得混凝土强度衰减率为 6.8%
护舷	整体未见破损脱落, 部分护舷顶端存在橡胶老化开裂现象, 经采样检测求得混凝土强度衰减率为 7.3%
系船柱	整体外观良好, 未见缺失或明显变形, 部分柱身存在小范围锈蚀现象
分段缝	存在小范围的混凝土刮蹭坑槽, 各分段缝存在 20~30 mm 的偏移
轨道梁	整体外观良好, 未出现明显偏移, 梁体存在零星锈蚀
桩基	桩基整体结构完整, 扭转及倾斜度满足设计及规范要求, 经采样检测求得混凝土强度衰减率为 3.3%; 部分桩身分布裂缝, 宽度为 0.42~2.49 mm; 桩基整体存在 9~12 mm 的沉降, 桩基抗裂应力及承载力均满足要求, 未出现破损、露筋, 与桩帽交接位置外观情况良好
桩帽	整体外观良好, 未见破损, 部分桩帽存在竖向及横向裂缝, 缝宽 0.10~0.25 mm, 采样检测求得混凝土强度衰减率为 1.8%, 未出现偏移现象
岸坡	码头前沿泥面的标高满足设计及规范要求, 桩周土体小部分冲空, 采用土体直剪快剪试验获得的破坏剪应力, 以及计算得到的岸坡稳定系数符合规范要求, 未发现整体失稳现象
挡土墙	墙身存在多处竖向裂缝, 裂缝宽度 0.10~0.15 mm; 经采样检测求得混凝土强度衰减率为 2.8%; 求得基底土体的抗滑移稳定安全系数符合规范要求, 墙体未出现明显位移和失稳现象

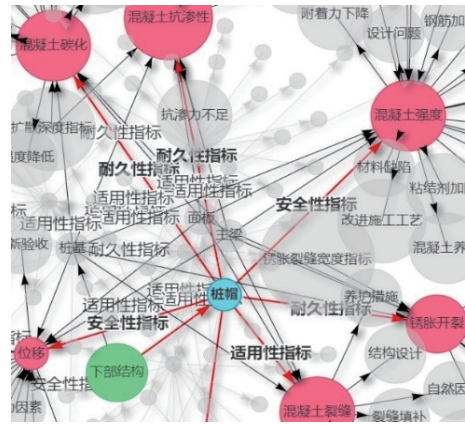
3.1 安全性评估指标体系构建

以该高桩码头安全性评估为例, 介绍如何利用知识图谱提取安全性评估指标并构建评估指标体系。

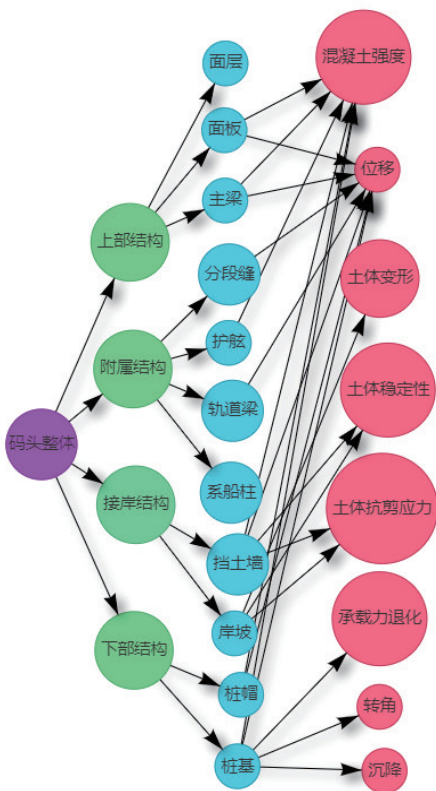
首先, 点选代表码头结构的“码头整体”“码头结构”“码头构件”三层级实体节点(图 9(a)所示)。其中高桩码头(紫色节点)由上部结构、下部结构、接岸结构、附属结构等 4 个子结构系统(绿色节点)构成, 而上部结构又由面层、面板、主梁等底层构件(蓝色节点)构成; 其次, 可依次点选“桩帽”等底层构件(图 9(b)所示), 进一步推理评价指标(红色节点)。得到用于底层构件评估的位移、混凝土强度、锈胀开裂、混凝土裂缝等指标。



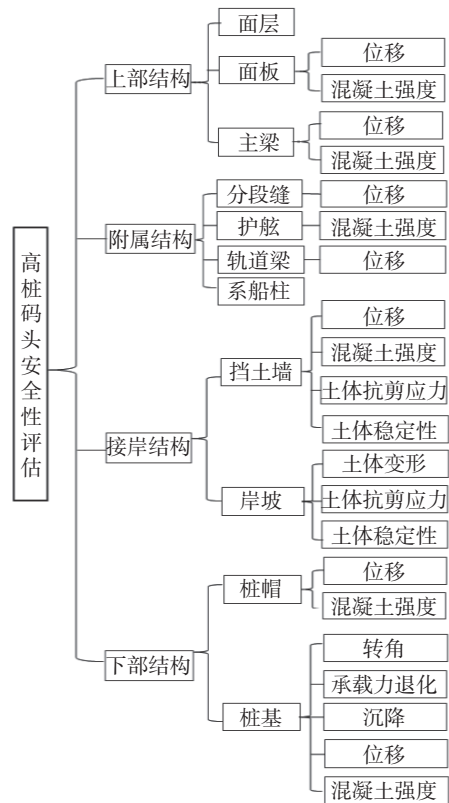
(a) 码头结构三级实体节点



(b) “桩帽”节点相关的评估指标



(c) 节点层级展开结果



(d) 高桩码头安全性评估指标体系

图 9 高桩码头安全性评估指标体系构建

Fig. 9 Construction of the safety assessment index system for high-pile wharves

以安全性评估为例,根据箭头标签定义的实体关系,位移和混凝土强度属于安全性评估相关的安全性指标,需要进行点选保留;而混凝土碳化、锈胀开裂、混凝土裂缝等指标属于适用性指标或耐久性指标,在指标选取中不予考虑。

完成对知识图谱的节点筛选后,按照节点筛选的先后顺序对节点(指标)层级展开(图 9(c))所示。其中高桩码头(紫色节点)作为整体目标层;上部结构、下部结构、接岸结构、附属结构等 4 个子结构系统作为目标层所属的指标层(绿色节点);面层、面板、主梁等底层构件作为指标层所属的一级指标层(蓝色节点);安全相关评估指标如位移、混凝土强度(红色节点)等作为一级指标层所属的二级指标层,至此完成四层级码头安全评估指标体系构建(图 9(d))所示。

在此层级结构中,高桩码头安全性评估为体系目标层,码头结构和码头构件分别作为指标层和一级指标层,安全性相关材料性能指标作为二级指标层。

3.2 模糊层次评估

以专家打分得到的模糊判断矩阵为基础,利用 Python 编译权重计算及优化过程,输入模糊判断矩阵,得到各级指标满足一致性检验的层次分析初始权重,以及熵值法优化后的权重。将码头构件检测报告对照评估等级集,得到构件隶属的安全材料性能指标对应各二级指标的模糊评估向量。体系指标权重及二级指标层模糊评估向量整理结果如表 4 所示。

表 4 指标权重及二级指标层评估结果
Tab. 4 Index weights and evaluation results of secondary index layer

目标层	指标层	权重	一级指标层	权重	二级指标层	权重	二级指标层评估结果	
高桩码头安全性评估	上部结构	0.358	面层	0.051		1.000	(1,0,0,0)	
			面板	0.267	位移	0.167	(0,1,0,0)	
					混凝土强度	0.833	(1,0,0,0)	
			主梁	0.682	位移	0.167	(0,1,0,0)	
					混凝土强度	0.833	(0,1,0,0)	
			下部结构	0.519	桩基	0.875	转角	0.025
	位移	0.050					(1,0,0,0)	
	沉降	0.185					(0,1,0,0)	
	桩帽	0.125			承载力退化	0.526	(1,0,0,0)	
					混凝土强度	0.214	(1,0,0,0)	
					位移	0.125	(1,0,0,0)	
	接岸结构	0.095	挡土墙	0.167	混凝土强度	0.875	(1,0,0,0)	
					位移	0.017	(1,0,0,0)	
					混凝土强度	0.121	(1,0,0,0)	
			岸坡	0.833	土体抗剪应力	0.121	(1,0,0,0)	
					土体稳定性	0.741	(1,0,0,0)	
					土体变形	0.049	(0,1,0,0)	
	附属结构	0.028			土体抗剪应力	0.147	(1,0,0,0)	
					土体稳定性	0.804	(1,0,0,0)	
					分段缝	0.089	位移	1.000
护舷					0.550	混凝土强度	1.000	(0,1,0,0)
系船柱					0.272		1.000	(1,0,0,0)
			轨道梁	0.089	位移	1.000	(1,0,0,0)	

采用模糊综合评估基本式 $V = S \times R$, 依次推算上层指标模糊评估向量, 获得一级指标层和指标层的模糊评估向量如表 5 所示。

表 5 一级指标层及指标层模糊评估结果
Tab. 5 Fuzzy evaluation results of primary index layer and index layer

目标层	指标层	权重	指标层评估结果	一级指标层	权重	一级指标层评估结果
高桩码头安全性评估	上部结构	0.358	(0.273,0.682,0.045,0)	面层	0.051	(1,0,0,0)
				面板	0.267	(0.833,0,0.167,0)
				主梁	0.682	(0,1,0,0)
	下部结构	0.519	(0.838,0.162,0,0)	桩基	0.875	(0.815,0.185,0,0)
				桩帽	0.125	(1,0,0,0)
	接岸结构	0.095	(0.951,0.049,0,0)	挡土墙	0.167	(1,0,0,0)
				岸坡	0.833	(0.951,0.049,0,0)
	附属结构	0.028	(0.361,0.639,0,0)	分段缝	0.089	(0,1,0,0)
				护舷	0.550	(0,1,0,0)
				系船柱	0.272	(1,0,0,0)
			轨道梁	0.089	(1,0,0,0)	

再次计算模糊综合评估基本式,得到目标层对应安全性评估模糊向量。

$$V = S \times R = (0.358, 0.519, 0.095, 0.028) \times \begin{pmatrix} 0.273 & 0.682 & 0.045 & 0 \\ 0.838 & 0.162 & 0 & 0 \\ 0.951 & 0.049 & 0 & 0 \\ 0.361 & 0.639 & 0 & 0 \end{pmatrix} = (0.633, 0.351, 0.016, 0)$$

将目标层及指标层的模糊评估向量对比表 1 中各等级标准下的完全隶属度向量,通过计算最大贴近度的方式获得上述层级各指标的安全性评估等级,等级评估结果如表 6 所示:上部结构安全等级为 B 类;下部结构安全等级为 A 类;接岸结构安全等级为 A 类;附属结构安全等级为 B 类;码头整体安全等级为 A 类,即码头安全性符合国家有关标准要求,并具有足够的承载能力。评估结果与实际工程检测机构评估结果一致。

表 6 目标层及指标层评估等级
Tab. 6 Evaluation grades of target layer and indicator layer

目标层	评估结果	评估结果	指标层	评估结果	评估结果
高桩码头安全性评估	(0.633,0.351,0.016,0)	A	上部结构	(0.273,0.682,0.045,0)	B
			下部结构	(0.838,0.162,0,0)	A
			接岸结构	(0.951,0.049,0,0)	A
			附属结构	(0.361,0.639,0,0)	B

4 结 语

针对高桩码头服役性态评估中的指标选取及权值确定问题,构建了服役性态指标体系并建立为知识图谱,采用熵值法对层次分析法中权重进行修正,进而实现对高桩码头结构服役安全性的模糊评估。主要研究结论如下:

- (1) 基于 Top-down 方式构建了高桩码头服役性态评估知识图谱。采用该方式能够确保知识图谱的规范性与一致性,适用于专业知识领域。
- (2) 采用 visNetwork 工具建立了知识图谱的图形交互界面。工程应用时可通过过滤、高亮等功能方便地查询图谱中的关键节点及其相关关系。
- (3) 基于评估指标体系和熵值优化后的层次分析权重,采用模糊综合评估法评估高桩码头服役性态,可合理且全面地获得高桩码头服役性态评估等级。
- (4) 以沿海某高桩码头安全性评估为例进行流程演示,评估结果与工程检测机构评估结果相一致,验证了本文所述高桩码头服役性态模糊评估方法在工程实例下的实用性和准确性。

参 考 文 献:

- [1] 钟小平, 金伟良. 混凝土结构全寿命设计指标体系研究[J]. 海洋工程, 2014, 32(3): 55-64. (ZHONG Xiaoping, JIN Weiliang. Index system for life-cycle design of concrete structure[J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(3): 55-64. (in Chinese))
- [2] 丁国庆, 吉同元, 徐亮, 等. 基于层次分析法与模糊综合评判法的高桩码头技术状态研究[J]. 港工技术, 2018, 55(6): 100-103,107. (DING Guoqing, JI Tongyuan, XU Liang, et al. Study on technical status of piled berth based on analytic hierarchy process and comprehensive fuzzy evaluation[J]. Port Engineering Technology, 2018, 55(6): 100-103,107. (in Chinese))
- [3] 程婷. 用模糊层次分析法评估海港梁板式高桩码头的安全性[J]. 交通科技, 2014(4): 145-147. (CHENG Ting. Evaluation of safety of beam-slab high-piled wharf in seaport by fuzzy analytic hierarchy process[J]. Transportation Science & Technology, 2014(4): 145-147. (in Chinese))
- [4] 苏静波, 陈东余, 林美鸿, 等. 高桩码头结构安全评价指标及其敏感性分析[J]. 水运工程, 2019(5): 48-53. (SU Jingbo, CHEN Dongyu, LIN Meihong, et al. Safety assessment indicators and sensitivity analysis of high-piled wharf structure[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(5): 48-53. (in Chinese))
- [5] 王德虎, 鲁子爱, 侯代云. 基于模糊层次分析法的高桩码头安全性评估[J]. 水运工程, 2013(1): 76-80. (WANG Dehu, LU Ziai, HOU Daiyun. Safety evaluation of high-piled wharf based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(1): 76-80. (in Chinese))
- [6] 刘轶华, 马利华, 苑洋. 基于灰色模糊的大桥对附近码头能力损失的研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(7): 108-113. (LIU Yihua, MA Lihua, YUAN Yang. Bridge to nearby wharf capacity loss based on grey fuzzy[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(7): 108-113. (in Chinese))
- [7] 吴锋, 庞丹丹, 张章. 高桩码头运营期耐久性模糊评估方法[J]. 水运工程, 2013(2): 62-67. (WU Feng, PANG Dandan, ZHANG Zhang. Fuzzy evaluation for durability of high-pile wharf in service[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(2): 62-67. (in Chinese))
- [8] 张松. 基于 FAHP 的船舶靠泊高桩码头安全性评估[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022. (ZHANG Song. Safety assessment of ship impact on piled wharf based on FAHP[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022. (in Chinese))
- [9] 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 Lu. Safety evaluation of In-service high-piled wharf based on fuzzy neural network[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [10] 张吉祥, 张祥森, 武长旭, 等. 知识图谱构建技术综述[J]. 计算机工程, 2022, 48(3): 23-37. (ZHANG Jixiang, ZHANG Xiangsen, WU Changxu, et al. Survey of knowledge graph construction techniques[J]. Computer Engineering, 2022, 48(3): 23-37. (in Chinese))
- [11] 杨小霞, 杨建喜, 李韧, 等. 桥梁检测领域知识图谱构建与知识问答方法[J]. 计算机应用, 2022, 42(增刊 1): 28-36. (YANG Xiaoxia, YANG Jianxi, LI Ren, et al. Knowledge graph construction and knowledge question answering method for bridge inspection domain[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(Suppl1): 28-36. (in Chinese))
- [12] 杨玉基, 许斌, 胡家威, 等. 一种准确而高效的领域知识图谱构建方法[J]. 软件学报, 2018, 29(10): 2931-2947. (YANG Yuji, XU Bin, HU Jiawei, et al. Accurate and efficient method for constructing domain knowledge graph[J]. Journal of Software, 2018, 29(10): 2931-2947. (in Chinese))
- [13] 谢庆, 蔡扬, 谢军, 等. 基于 ALBERT 的电力变压器运维知识图谱构建方法与应用研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 95-106. (XIE Qing, CAI Yang, XIE Jun, et al. Research on construction method and application of knowledge graph for power transformer operation and maintenance based on ALBERT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 95-106. (in Chinese))
- [14] 吴云星, 谷艳昌, 王士军, 等. 基于信息熵-变权模糊模型的土石坝震损评估[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 38-45. (WU Yunxing, GU Yanchang, WANG Shijun, et al. Assessment of seismic damage for earth-rockfill dam based on information entropy-variable weight fuzzy model[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 38-45. (in Chinese))
- [15] 刘鑫, 李之隆, 甘亮琴, 等. 基于 AHP-FCE 方法的气泡混合轻质土耐久性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 332-339. (LIU Xin, LI Zhilong, GAN Liangqin, et al. Durability assessment of foamed mixture lightweight soil based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation (AHP-FCE)[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4): 332-339. (in Chinese))
- [16] 岳强, 刘福胜, 刘仲秋. 基于模糊层次分析法的平原水库健康综合评价[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 62-68. (YUE

- Qiang, LIU Fusheng, LIU Zhongqiu. Comprehensive assessment of plain reservoir health based on fuzzy and hierarchy analyses[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(2): 62-68. (in Chinese))
- [17] 马荣国, 刘艳妮. 公路建设项目综合评价权重确定方法[J]. *交通运输工程学报*, 2005, 5(2): 110-112. (MA Rongguo, LIU Yanni. Weight value determination method of highway construction comprehensive evaluation[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2005, 5(2): 110-112. (in Chinese))
- [18] 崔志男. 基于模糊数学的钢筋混凝土结构可靠性与耐久性研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2018. (CUI Zhinan. Research on the reliability and durability of reinforced concrete structure based on fuzzy mathematics[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2018. (in Chinese))
- [19] 尹程. 三峡库区高桩码头前方平台病害检测及健康评级体系[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014. (YIN Cheng. Damage detection and health evaluate system research about high pile pier in the three gorges reservoir[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [20] 史青芬. 高桩码头结构安全性评估[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010. (SHI Qingfen. Study on safety evaluation of high-pile wharf structures[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [21] 刘伟涛, 顾鸿, 李春洪. 基于德尔菲法的专家评估方法[J]. *计算机工程*, 2011, 37(增刊 1): 189-191, 204. (LIU Weitao, GU Hong, LI Chunhong. Expert evaluation method based on Delphi method[J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(Suppl1): 189-191, 204. (in Chinese))
- [22] 于峰. 钢筋混凝土结构可靠性的模糊综合评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005. (YU Feng. Comprehensive evaluation of fuzzy reliability on reinforced concrete structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005. (in Chinese))

Fuzzy evaluation of high-pile wharves based on knowledge graph and entropy optimization

ZHANG Peng¹, ZHOU Yiheng¹, CUI Chunyi¹, JI Zezhou², ZHOU Yang³, LIU Zhixin⁴

(1. School of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 4. China Construction First Group Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: High-pile wharves are widely used and may experience structural performance degradation during their service life due to factors such as overloading, siltation, and environmental corrosion. Evaluating their service state is of significant importance. Based on existing industry standards and engineering cases, this study organizes a service state evaluation index system for common wharf structures in China. A top-down approach is used to create a knowledge graph of the index system, and the visNetwork toolkit is utilized to write the core code of the index system and the BS architecture interactive interface. The AHP-FCE method is combined with the evaluation indicators for the service state evaluation of wharves: establishing a set of comments and evaluation grade sets to obtain fuzzy evaluation vectors; the entropy method (EM) is used to correct the weights in the analytic hierarchy process (AHP) to achieve objective weighting. Finally, the process is demonstrated using a high-pile wharf structure at a seaport in southeastern China. Safety evaluation indicators are extracted from the knowledge graph based on the characteristics of the project, and a hierarchical evaluation system is established. The fuzzy evaluation vectors are calculated layer by layer, resulting in an overall safety grade of A for the wharf. This result is consistent with the evaluation results of engineering inspection agencies, verifying the applicability of the constructed knowledge graph and the correctness of the modified AHP-FCE method. This indicates that the method can be widely applied to the operation and maintenance evaluation of other types of wharf structures.

Key words: index system; knowledge graph; analytic hierarchy process; entropy method; fuzzy comprehensive evaluation; service state