



# 基于数字孪生的船闸安全智慧管理方法

李明伟<sup>1</sup>, 安小刚<sup>2</sup>, 潘士琦<sup>1</sup>, 耿敬<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** 船闸承担着防洪和通航等重大任务。传统的船闸安全管理方法实时性、直观性不足,且对于危险的响应速度存在明显的滞后现象,难以满足船闸现代化运维管理要求。基于数字孪生概念,提出利用大数据、人工智能等技术,构建船闸安全管理智慧解决方案。并在此基础上开发基于数字孪生的船闸安全智慧管理系统,旨在提高船闸安全管理的智慧化水平。

**关键词:** 智慧航道; 数字孪生; 人工智能; 有限元分析

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0212-06

## Smart management method for ship lock safety based on digital twin

LI Ming-wei<sup>1</sup>, AN Xiao-gang<sup>2</sup>, PAN Shi-qi<sup>1</sup>, GENG Jing<sup>1</sup>

(1. School of Naval Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The ship locks undertake major tasks such as flood control and navigation. Traditional ship lock safety management methods are insufficient in real-time and intuitiveness, and there is an obvious lag in response to danger. So it is difficult to meet the requirements of modern ship lock operation and maintenance management. Based on the concept of the digital twin, this paper proposes to use big data, artificial intelligence, and other technologies to build smart solutions for ship lock safety management. On this basis, a smart ship lock safety management system based on digital twins is developed to improve the smart level of ship lock safety management.

**Keywords:** smart waterway; digital twin; artificial intelligence; finite element analysis

船闸作为内河航道中的重要结点,对于防洪和航行交通都具有重要作用。近年来,随着水运事业的不断发展,水上运输量急剧增大,船闸的地位愈发重要。然而船闸在长时间使用过程中会出现不同程度的损伤,比如受到船舶撞击以及自身老化因素影响,使得船闸内部结构的稳定性受到一定破坏,从而带来安全隐患<sup>[1]</sup>。传统的安全管理方法主要包括人工检测和自动化监测方法。人工检测方法实时性较差,且存在漏检的可能;自动化监测方法直观性较差,且仅仅停留于数据获取阶段,无法就船闸内部可能出现的潜在风险予以预报预警,存在明显的滞后性<sup>[2-3]</sup>。

随着大数据、物联网、人工智能等技术的快速普及与应用,船闸动态数据的实时采集、存储、分析、预测等成为可能,探索智慧化的安全管理方法已成为船闸管理的必然趋势。为此,本文提出将数字孪生理念、3D建模技术、智能预报预警技术和结构仿真技术相结合,构建基于数字孪生的船闸安全智慧管理方法,对于提高船闸管理的信息化、智慧化、精细化水平具有重要的理论和现实意义。

### 1 数字孪生在船闸安全管理中的应用思考

#### 1.1 数字孪生的概念

德国政府提出的“工业4.0”战略及我国

2015 年提出的“中国制造 2025”已明确了智能制造在新一轮科技革命中的核心地位, 指明了制造业数字化、网络化、智能化的发展方向。利用数据馈送来映射物理实体的数字孪生技术, 正在对众多工业领域产生颠覆性影响。

数字孪生(digital twin)一词, 最早由美国密西根大学教授 Grieves 提出, NASA 在 2010 年对飞行器的真实运行活动进行镜像仿真。它试图在虚拟世界中, 尽可能模仿物理世界真实发生的一切。数字孪生是现实世界中物理实体的配对虚拟体(映射), 其概念的落地是用三维图形软件构建的模型去映射现实中的物体。这种映射通常是一个多维动态的数字映射, 它依赖安装在物体上的传感器或模拟数据来洞察和呈现物体的实时状态, 同时也将承载指令的数据回馈到物体, 最终导致状态变化。数字孪生是现实世界和数字虚拟世界沟通的桥梁, 是科学技术快速发展的产物。数字孪生可以是一个产品、一个生产线甚至是一个厂房, 同样港口、大坝、船闸也可以建立一个数字孪生体。

## 1.2 解决船闸安全管理问题的新途径

传统的船闸安全维护方法通常采用的是间隔性停航人工检修及 6 a 一周期的大修, 不仅影响航道运输, 而且人工检测无法做到实时监测且存在漏检的可能。对于布置有自动化监测设备的船闸, 往往也只停留于数据观测阶段, 无法给予及时有效的预报预警, 危险响应存在滞后性。

针对上述问题, 将数字孪生思想与船闸安全管理相结合, 基于人工智能、大数据、结构数值仿真、3D 虚拟建模等先进技术, 构建船闸智慧数字孪生体, 将物理空间中的船闸实体在虚拟信息空间进行全要素重建, 完成虚拟空间和物理空间的实时关联。可以预见, 具有实时感知、智能分析、行为预测等功能的船闸智慧数字孪生体的构建, 必将成为解决船闸安全管理问题的重要途径。

## 2 船闸安全智慧管理系统设计

### 2.1 系统目标

船闸安全智慧管理系统聚焦船闸运行维护阶段, 在虚拟空间为船闸实体建立一个数字复制品,

基于物理空间与虚拟空间的深度融合, 通过对物理空间位置、外部环境、质量状况、使用状况等物理状态和功能状态进行实时跟踪和监控, 获得船闸的实际状态、实时数据、使用和维护记录数据, 采用建模和仿真分析等手段, 模拟和反映对应物理船闸的状态和行为, 对船闸的健康状况进行预测、分析、评估与提前预警, 辅助实现船闸故障位置的快速定位。即在合适的时间、合适的场景, 做基于客观数据的、实时正确的决定, 完成对船闸系统的在线智能精细化管理。过去, 工程一旦交付使用, 就到了研发设计的截止点, 船闸成为孤儿; 而通过数字孪生系统, 可以从船闸实体获取营养和反馈, 然后成为研发、设计部门最为宝贵的优化参考资料。

### 2.2 系统组成

本系统是一个集成、多物理、多尺度的虚拟现实系统, 能够实时反映对应船闸的自身属性和功能属性状态。一方面, 孪生系统根据实体空间传来的数据进行自身的数据完善、融合和模型构建; 另一方面, 通过对实体船闸及其周围环境的模拟、展示、监控、统计、分析、预测与处理, 实现船闸系统的数据统计、状态监测和故障预警。

根据船闸安全智慧管理系统服务需求, 将系统分为三维场景模拟、实时数据监测、智能预报预警和结构仿真分析 4 个功能模块, 系统功能结构见图 1。

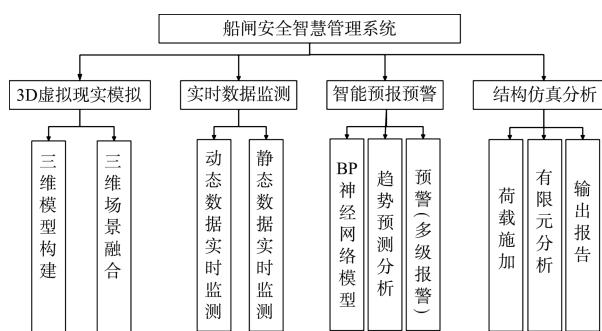


图 1 船闸安全智慧管理系统功能结构

### 2.3 系统架构设计

船闸安全智慧管理系统基于船闸真实场景、实体建模数据, 利用 3ds Max 和 GIS 技术构建船闸地形场景、实体、监测点三维模型; 采用有限元数值

模拟进行船闸结构仿真，并结合实时监测数据和神经网络预报值，构建船闸安全预警体系，系统由数

据感知层、数据管理层、数据处理层、应用层和用户层 5 部分构成。系统总体架构设计见图 2。

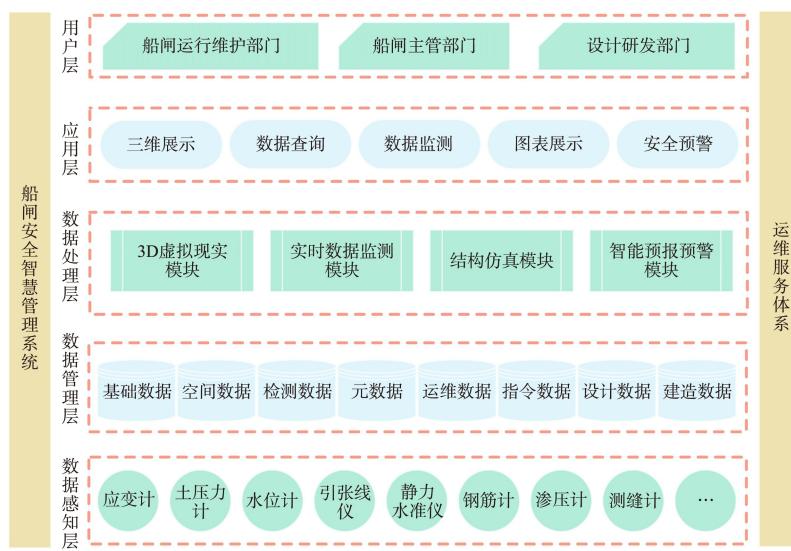


图 2 系统总体架构

### 3 船闸安全智慧管理系统关键技术

#### 3.1 三维建模技术

三维虚拟模型是虚拟空间表达的基础，模型的准确性对于数字孪生体的构建尤为重要。综合考虑建模效率和表达效果等因素后，选择使用 3ds Max 软件构建船闸三维模型。具体步骤如下：1) 获取 CAD 平面设计图作为模型的设计底图，根据所需要建立的三维模型情况，简化建模数据。2) 将设计底图导入 3ds Max 软件中，发现未闭合点，使用连接工具予以连接，然后将其放大、缩小至合适比例尺。3) 根据建筑物的底面边界，通过拉伸的方式构造船闸的简易模型，然后使用布尔运算进行细化，最终完成整个船闸的三维建模。

#### 3.2 三维场景融合技术

船闸的三维模型构建完成之后并不具有位置属性，须将其放入真实的地理空间之中。鉴于地理信息系统(GIS)对于地理空间实体的良好操作性，本文选择使用 ArcGIS Engine 对 GIS 组件库进行调用，使用 Arcmap 实现模型展示和监测点动态闪烁功能。主要步骤为：1) 下载船闸所在区域遥感影像并进行地形处理，将其作为地理场景的底图。2) 将 3ds Max 中建立的船闸三维模型以 .obj 格式导出。3) 将 .obj 格式文件导入 Arcmap 中进行

地理配准，并根据需求调整各图层相关属性。

4) 将修改后模型以 .sxd 格式保存，供 visual studio 平台接口调用。

#### 3.3 实时数据监测技术

实时监测即通过对实时数据进行采集、处理、更新、显示，实现虚拟空间与现实世界的虚实交互。实时数据是虚实交互思想实现的关键，也是数字孪生思想的核心之处。针对系统数据量大、数据交换较频繁的特点，选择 Oracle 大型数据库作为数据交换的载体。在 C/S 开发模式的基础上，调用 Echart.js 接口文件，在 .html 文件中书写具体需求，实现实时数据的动态响应及展示。具体的操作步骤为：1) 数据导入。将各监测点传感器采集的实时应力数据存入 Oracle 数据库中，同时将船闸的历史维护数据一并存入数据库中，该部分数据将用于后期的数据挖掘需要。2) 数据提取。将时间间隔设置为 1 s，Visual Studio 后台通过定时器持续不断地从数据库中提取各监测点应力数据，并将其写入所对应的 .html 文件中。3) 数据显示。使用 VS 中的 webbrowser 控件，在 Echart.js 接口文件的支持下，调用已更新数据的 .html 文件，将当前船闸的运行状况显示在实时监测界面中。

### 3.4 基于 BP 神经网络的智能预报技术

人工神经网络 ANN (artificial neural network), 简称神经网络, 具有复杂模式和进行联想、推理记忆的功能<sup>[4]</sup>。预测的基本目的是要根据事物自身的发展规律来揭示和推断它的未来, 神经网络因为其强大的非线性映射能力已成为非线性预测的主要方法之一<sup>[5]</sup>。

为解决船闸危险响应的滞后性问题, 引入 BP 神经网络实现对应力数据的智能预报。基于船闸应力历史数据, 进行神经网络训练与预报预警, 对于该网络的历史学习过程可以分为数据的正向传导过程以及层间权重的反向修正过程。1)历史数据在网络初始化后从输入层经过隐藏层流到输出层, 这个过程称之为历史数据的正向传导过程。2)通过计算输出的数据与期望值之间的误差与阈值进行比较, 若未达到允许值则根据该误差从后往前逐层、逐个传递修改各个神经元节点间的连接权值, 这一修改过程称之为反向修正过程。通过对已知的历史数据反复进行这两个过程的迭代, 直到输出的数据误差达到预期精度, 或者达到预定的学习次数, 停止该学习过程。根据训练好的预报模型对新得到的数据进行新的预测预报。

每次选取 20 个船闸应力历史数据作为神经网络的输入变量, 经过试验对比将隐藏层神经元数定为 10 个, 隐藏层数为 1 层, 输出神经元个数为 1 个。即采用前 20 个历史数据对第 21 个数据进行预测, 然后在第 2 轮训练中, 将 2~21 个数据作为输入变量进行训练, 以此类推。完成整个神经网络的训练与测试。

其中误差函数为:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^l (\hat{y}_j - y_j)^2 \quad (1)$$

式中:  $E$  为输出误差值;  $l$  为数据的维度或者称输出节点的个数;  $j$  为某一具体的输出节点;  $\hat{y}_j$  为输出单元的期望值;  $y_j$  为神经网络的实际输出值。

激活函数使用 sigmoid 函数, 用来完成数据的非线性变换, 增强神经网络的表达能力:

$$f(x) = \text{sigmoid}(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2)$$

式中:  $x$  为隐藏层与输出层间的中间变量。

通过误差反向传播和权值  $w$  的修正, 使误差  $E$  达到预期。记录所得权值  $w$ , 并使用测试集进行验证。训练完成后, 将监测模块获取的实时数据依次输入该神经网络中, 对未来的一段时间内的变形趋势进行预测, 并根据结构的许用应力值, 对当前应力进行安全判断与预警。

### 3.5 基于 Ansys 的结构仿真技术

考虑到实时数据监测模块与智能预报模块仅对各监测点的应力结果进行数据展示, 无法直观地了解当前船闸的应力分布和结构变形状况, 因此建立基于 Ansys 与 Visual Studio 软件的结构仿真模块。结构仿真即根据船闸所受到的实时荷载, 以 Ansys 为载体, 对结构进行有限元分析, 并利用对接接口, 将 Ansys 计算结果集成到 Visual Studio 平台中, 实现结果的可视化。主要步骤如下: 1) 获取船闸上各监测点压力数据, 然后与 Oracle 数据库建立连接, 进行数据的存储、检索和分类; 2) 在 Visual Studio 中读取压力数据, 通过 Ansys 的二次开发接口, 传递数据并调用 Ansys 进行结构静力学分析, 分析结果包括指定节点所受应力值、船闸所受最大应力值、最大应力值对应的节点编号以及等效应力云图; 3) Visual Studio 读取 Ansys 分析结果, 将等效应力云图呈现在系统界面, 实现对船闸应力分布情况的直观展示, 同时将应力数据写入数据库。

此外, 为方便查看分析结果, 增添自动生成分析报告功能, 报告包括有限元分析中的设计参数、指定节点的应力值、最大应力值、最大应力对应的节点编号及结构等效应力云图。

## 4 基于数字孪生的船闸安全智慧管理系统实现

本文基于 C/S 架构, 采用 C# 开发语言、Oracle 数据库, 在 Visual Studio2010 开发环境中调用 Arc engine 组件及 Ansys 接口, 完成系统的研

发。将整个系统分成 4 个程序模块，依次为 3D 虚拟现实模块、实时数据监测模块、智能预报预警模块和结构仿真分析模块。

#### 4.1 船闸三维场景构建

基于某船闸的设计资料，采用参数化建模技术，通过使用 3ds Max 建模工具创建三维模型，并将其融入 GIS 空间中，实现船闸三维场景的构建。具体实现效果见图 3。

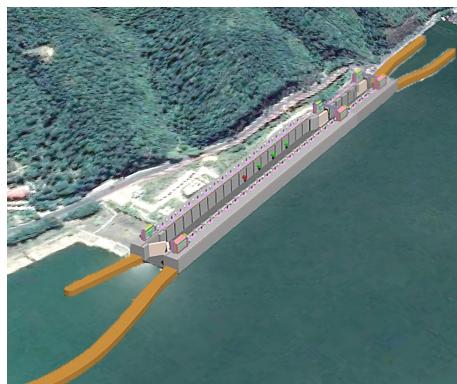


图 3 船闸三维场景

#### 4.2 基础数据实时监测

选取闸首、闸室、上航道、输水廊道作为监测点，根据传感器采集的实时数据，采用柱状图直观展示各点结构应力随时间动态变化情况。监测界面见图 4。

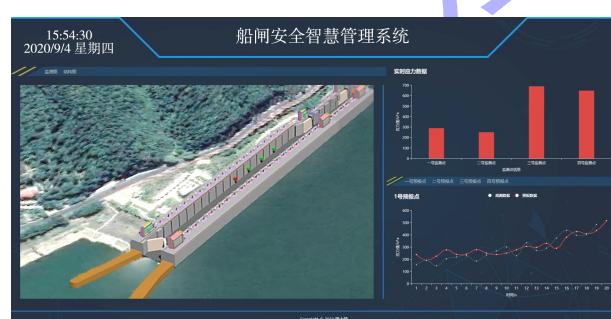


图 4 实时应力数据监测界面

#### 4.3 船闸智能预报

在获取船闸历史数据并完成对 BP 神经网络的训练后，导入当前一段时间内船闸的应力数据，对未来一段时间的应力变化趋势进行预测，将预测结果以曲线方式展示，并根据结构的许用应力值对当前应力进行判断，当存在潜在风险时，激发预警提示。监测点数据对比见图 5。

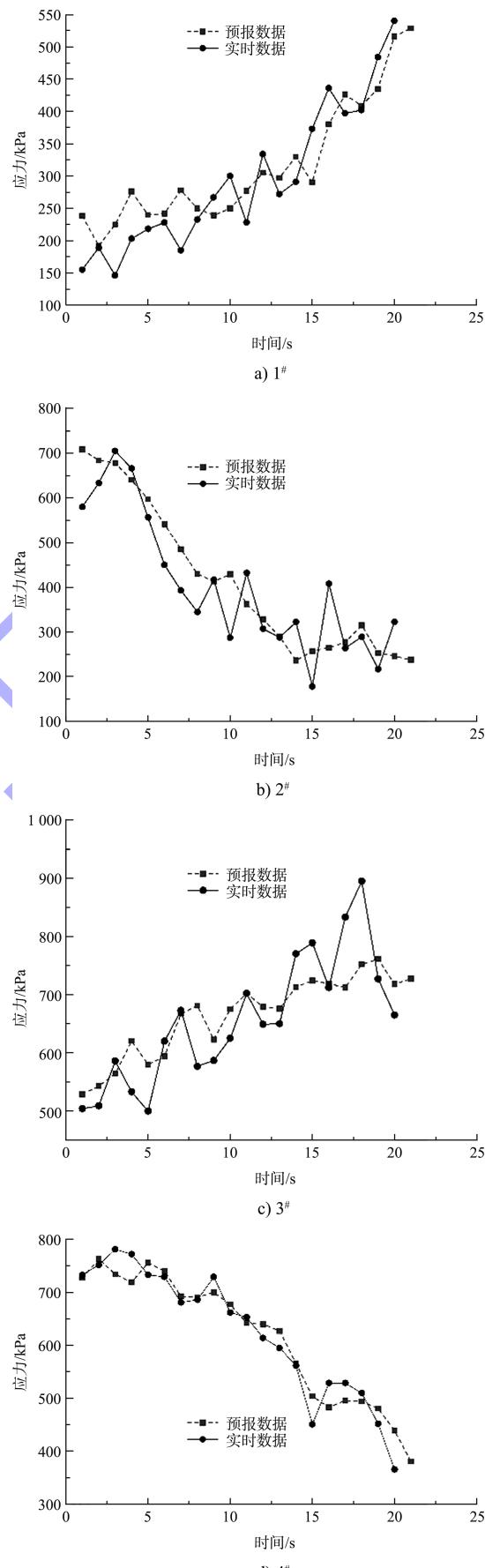


图 5 监测点数据对比

#### 4.4 船闸结构仿真

由于有限元分析需要一定的计算时间, 因此设置从数据库中提取数据进行结构分析的时间间隔为 90 s, 基于 Ansys 软件与 Oracle 空间数据库, 以 Visual Studio 为平台, 实现各软件之间的数据交互、存储与调用。利用 Ansys 与 Visual Studio 平台接口, 完成对船闸闸首的实时有限元分析与显示, 并输出相应分析报告, 辅助船闸运行维护部门进行安全管理。仿真界面见图 6。

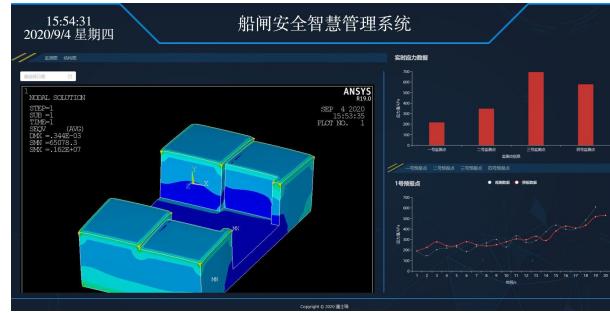


图 6 船闸闸首有限元分析效果

#### 5 结语

1) 为提高船闸管理的可视化水平和实时交互性, 引入数字孪生理念, 基于 GIS 技术、3ds max 建模技术、三维场景融合技术和实时数据监测技术, 构建了船闸数字孪生体, 实现物理实体与虚拟空间的虚实融合。

2) 针对船闸危险响应滞后性问题, 引入 BP 神经网络对未来一段时间内的变形趋势进行预测, 并根据结构的许用应力值实现对当前应力值的安全判断与预警。

(上接第 176 页)

- [13] 黄硕琳, 王四维. 长江流域濒危水生野生动物保护现状及展望 [J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(1): 128-138.
- [14] 葛玉双, 程起群. 环境 DNA 及其在水生生物多样性调查中的应用 [J]. 渔业信息与战略, 2020, 35(1): 55-62.
- [15] 陈娟, 李杰, 曹磊. 二维水流数学模型在码头工程防洪评价中的应用 [J]. 人民长江, 2010, 41(17): 62-64.
- [16] 崔河砚, 刘培荣. 基于 MIKE11 伊通河大桥防洪影响评价计算分析 [J]. 吉林水利, 2018(12): 17-19.
- [17] 郭金维, 蒲绪强, 高祥, 等. 一种改进的多目标决策指

3) 为了更好地了解船闸内部应力分布与结构变形情况, 辅助管理者制定船闸安全维护策略, 引入有限元分析方法, 建立了基于 Ansys 与 Visual Studio 平台融合结构仿真模块, 实现基于荷载数据的船闸实时结构仿真模拟。

4) 将数字孪生理念应用于船闸安全管理方法中, 提出一种船闸安全智慧管理方法。该方法增强了船闸安全管理的科学性和前瞻性, 提高管理者对船闸安全运维方案的决策能力, 具有良好的推广应用价值, 对于智慧航道的发展具有一定借鉴意义。

5) 数字孪生是集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程。本文仅就船闸的运维管理阶段进行了初步探索。在后续的研究中, 将在此基础之上, 基于数字孪生的思想, 深入研究基于数字孪生的船闸全生命周期运维管理方法。

#### 参考文献:

- [1] 陈勇涛. 船闸安全监测自动化系统实施中存在的问题研究 [J]. 居舍, 2019(36): 57.
- [2] 孙振锋, 刘传新, 万晓峰, 等. 富春江船闸安全监测技术及自动化建设 [J]. 浙江水利科技, 2017, 45(6): 83-85.
- [3] 徐亮, 方海东, 吉同元, 等. 船闸工程安全监测及自动化研究 [J]. 中国水运(下半月), 2011, 11(11): 88-89.
- [4] 胡伍生. 神经网络理论及其工程应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
- [5] 仲洁. 基于神经网络的地铁结构安全监测与分析 [D]. 南京: 东南大学, 2016.

(本文编辑 武亚庆)

标权重计算方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(6): 118-125.

- [18] 宋丹丹, 郭辉. 基于 AHP 和熵值法的新疆水资源承载力综合评价研究 [J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2014, 31(3): 57-64.
- [19] 吴英俊, 苏宜强, 成乐祥. 基于熵权法和专家打分法的企业节能减排效果评估方法 [J]. 电器与能效管理技术, 2015(16): 63-68.

(本文编辑 王璁)