

基于实测信息的海堤 PHM 系统框架及关键技术研究

蓝祝光¹, 黄铭^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443000)

摘要: [目的] 解决海堤传统维修方式存在维修保障能力差、易造成重大损失的问题, 建立科学的海堤健康管理信息系统。[方法] 将先进的故障预测与健康管理系统 (prognostic and health management, PHM) 技术应用于海堤工程中, 研究建立海堤 PHM 系统, 并深入探讨海堤 PHM 系统的预测和健康评估方法。结合海堤特点及海量、高频的实测信息, 提出将具有强大寻优能力的水循环算法与神经网络相结合, 形成海堤状态预测模型; 并综合考量海堤健康影响因素, 基于模糊数学建立系统健康评估模型。[结果] 实例分析表明, 所建立的海堤 PHM 系统预测模型和健康评估模型可有效预测海堤状态, 并对海堤现阶段和未来一定时段的健康状况进行准确的实时评估和预评估。[结论] 形成了适应海堤工程特点的海堤 PHM 系统框架, 所建立的预测模型和健康评估模型科学有效。

关键词: 海堤 PHM 系统; 实测信息; 预测; 健康评估

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)03-0307-07

中图分类号: TV698.1

文献参数: 蓝祝光, 黄铭. 基于实测信息的海堤 PHM 系统框架及关键技术研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):307-313. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.053; Lan Zhuguang, Huang Ming. Framework and key technologies of seawall prognostic and health management system based on measured information[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3):307-313. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.053

Framework and Key Technologies of Seawall Prognostic and Health Management System Based on Measured Information

LAN Zhuguang¹, HUANG Ming^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, China Three Gorges University, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443000, China)

Abstract: [Objective] To solve the problems of maintenance support inability and easily causing significant loss in the traditional maintenance mode of seawall, in order to establish a scientific health management system of seawall. [Methods] The advanced prognostic and health management (PHM) technology was applied to the seawall project. The PHM system of seawall was set up, and the prediction model and health assessment model of seawall PHM system were studied. Combining with the characteristics of seawall and the massive high frequency-measured information, the prediction model of seawall state was put forward based on the water cycle algorithm with strong searching ability combined with the neural network. On the premise of the seawall health factors were considered comprehensively, the system health assessment model was set up based on fuzzy mathematics. [Results] The example analysis showed that the prediction model could predict seawall condition effectively and the health assessment model could assess seawall health in real-time and can pre-estimate seawall health accurately for present and future. [Conclusion] The seawall PHM system framework established meet the characteristics of seawall project. The prediction model and health assessment model are scientific and effective.

Keywords: seawall PHM system; measured information; prediction; health assessment

收稿日期: 2016-11-04

修回日期: 2016-11-19

资助项目: 水利部公益性行业专项“皖江城市带长江河势变化与洲滩综合利用研究”(201401063-02); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放研究基金“库区边坡安全监测 PHM 系统关键技术研究”(2015KDZ03); 安徽省科技攻关计划项目(1604a0802106)

第一作者: 蓝祝光(1990—), 男(瑶族), 广西壮族自治区南宁市人, 博士研究生, 研究方向为水利建筑结构。E-mail: lanzhuguang163@163.com。

通讯作者: 黄铭(1972—), 男(汉族), 江西省乐平市人, 博士, 教授, 主要从事水利工程、岩土工程安全监测研究。E-mail: Lsxhuangm@hotmail.com。

海堤的安全从古至今备受重视^[1-4],但由于设计施工能力所限,许多堤身年代久远,且海堤长期抵抗潮水侵蚀、暴雨冲刷、台风侵害,自然灾害突发性强、破坏力大,海堤安全事故较为频繁。鉴于海堤的重要性和安全隐患易发性,借助先进的信息技术和自动化技术,建立有效的海堤健康管理系统,实现海堤科学化、信息化管理显得尤为重要。

针对海堤传统维修方式存在维修保障能力差、无法预测未来健康状态进而采取相应维修措施、经济可承受性差等不足,以及建立科学、有效的海堤健康管理系统的迫切需要,根据海堤运行特点,结合海堤安全监测,将近期快速发展的系统诊断预测决策研究热点——故障预测与健康管理的(prognostics and health management, PHM)技术应用于海堤工程,研究建立海堤 PHM 系统,对海堤运行状况进行预测和健康管理,预知海堤存在的故障隐患或可能发生的险情,及时下达相应预警及维修决策指令,避免海堤过度维修或维修不足的问题,实现海堤视情维修、科学管理、降低维修保障费用、确保海堤安全运行的目的。

目前,PHM 技术已在航空航天、国防、工业以及机械、核电站、电子等领域逐步得到应用,正显露出其巨大的发展潜力和应用前景^[5-10]。温祥西等^[5]总结了目前网络 PHM 关键技术存在的问题,提出了基于移动代理的分层分布式 PHM 体系结构和综合型 PHM 管理框架;黄赞武^[6]针对轨道电路故障,采用 PHM 开放式分层体系,构建了轨道电路 PHM 体系结构,并研制了轨道电路特征参数采集及信息处理设备;JOUIN M 等^[7]将 PHM 技术运用于燃料电池系统(FC)中,增加了燃料电池系统的使用寿命;莫固良等^[9]阐述了 PHM 系统的含义,对当前飞机 PHM 系统的应用状态进行了全面的概述,并分析了 PHM 系统设计的主要关键技术。

本文拟以实时监测信息为基础,结合海堤结构力学特性、工作环境特点,研究建立基于先进故障预测与健康管理的海堤 PHM 系统,构建系统整体结构。重点研究海堤 PHM 系统的关键技术——预测方法和健康评估模型。提出具有强大寻优能力的新型算法——水循环算法与神经网络相结合,形成水循环神经网络预测模型;综合考量海堤健康影响因素,结合实测信息和预报信息,基于模糊数学建立海堤健康评估模型;实现海堤 PHM 系统对海堤进行状态预测、健康实时评估和预判评估等功能。并通过实例验证海堤 PHM 系统预测功能和健康评估功能的有效性。

1 PHM 技术及海堤 PHM 系统框架结构

随着信息技术和自动化技术的快速发展,各种大型系统的集成度和复杂度越来越高,系统的运行维修保障问题日益突出,寻求一种既便捷可靠又经济高效的保障方式成为相关领域专家研究的热点^[11]。故障预测与健康管理的(PHM)就是在这种背景下,综合利用现代信息技术、人工智能技术的最新研究成果而提出的一种全新的管理系统健康状态的解决方案。

PHM 是指利用先进传感器采集系统的各类数据信息,借助各种智能模型和先进算法来监控、评估、预测和管理系统自身的健康状态,在系统故障发生前对其故障进行预测,并结合各种可利用的资源信息提供一系列的维修保障措施以实现系统的视情维修,是一种故障检测、故障预测、健康评估及维护决策相融合的综合技术^[12]。PHM 技术使得原来以事件为主导的事后维修或与时间相关的计划维修被基于状态的视情维修所取代。

通常情况下,PHM 的体系结构主要由以下部分构成:数据采集模块、数据处理模块、状态监测模块、健康评估模块、故障预测模块、决策支持模块。依照具体研究对象可形成不同组合及不同应用的 PHM 系统,各模块间相互联系、有机融合^[13]。本文依据海堤特点和实际需要,以海堤高频、海量实测信息为基础,针对 PHM 基本结构和海堤实际安全运行管理需要,构建海堤 PHM 系统框架结构(图 1)。

(1) 数据采集管理模块。利用先进传感器采集海堤 PHM 系统所需各类信息,建立数据库对各类信息进行分类管理,并运用数理统计等方法对海堤高频率、大数量、多种类的环境量、状态量、工程信息进行信息融合、特征提取等处理。

(2) 海堤状态监测分析模块。接受来自数据采集管理模块处理后的各类信息,进行阈值判断和监测分析。

(3) 海堤状态预测模块。接受海堤状态监测分析模块的分析结果,借助神经网络、水循环算法等方法建立海堤状态预测模型,实现海堤状态预测分析功能,并将预测结果传送至健康评估模块,为海堤 PHM 系统实现预判未来一定时段的海堤健康状况提供依据。

(4) 健康评估模块。接受海堤状态监测分析模块和海堤状态预测模块的数据,结合模糊数学、层次分析法等健康评估算法,形成海堤 PHM 系统健康评估模型,对海堤现阶段和未来一定时段的健康状态进行健康评估。并将评估结果传送至预警及维修决策模块。

(5) 预警及维修决策模块。依据海堤工程特点

和实际需求,建立海堤 PHM 系统安全预警级别、预警模式、维修及统筹决策机制,依据健康评估模块得出的海堤当前与未来时段的健康评估结果,及时预警,并统筹可利用资源及协调各相关部门采取科学有效的维修保障措施。

PHM 的显著特征是具有预测能力,有效预测系

统的各指标状态并依此进行健康预判是进行预警和视情维修的基础。健康评估模块主要进行实时评估和预判系统的健康状况,是整个系统的核心环节之一。本文在构建合理有效的海堤 PHM 系统框架的同时,重点研究海堤 PHM 系统关键技术——预测模型和健康评估模型的构建方法。

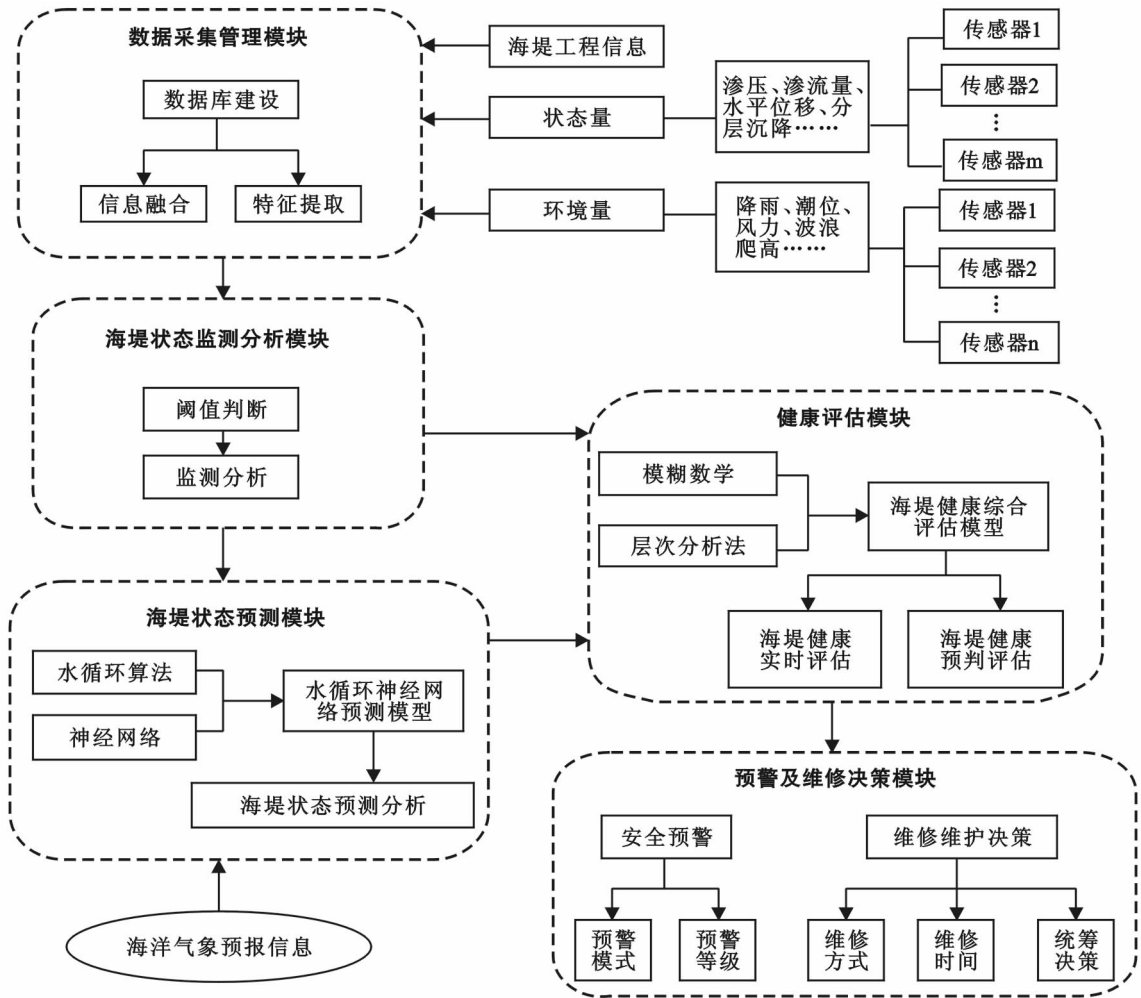


图1 海堤 PHM 系统框架结构

2 海堤 PHM 系统关键技术

海堤 PHM 系统的关键技术主要包括:信息融合方法、状态监测分析手段、海堤状态预测模型、海堤健康评估模型及预警维修决策模型等。因篇幅所限,结合目前研究成果,本文主要对海堤 PHM 系统的预测模型和健康评估模型进行阐述。预测方法与健康评估手段作为海堤 PHM 系统得以实现的关键技术之一,建立科学有效的海堤状态预测模型和健康评估模型是本文的研究重点。在充分研究海堤状态量与快速变化潮位、暴雨、时效等重要环境量间的因果关系条件下,将水循环算法与神经网络相结合,建立准确性高、有效合理反映多因素因果关系的海堤状态预测

模型;并综合考量海堤健康影响因素,结合预测信息与海洋气象预报信息,采用广泛运用于复杂系统综合安全评判的模糊数学方法,建立符合海堤健康管理需求的综合评判结构,构建健康等级体系,形成海堤 PHM 系统健康评估模型,实现海堤健康实时评估和预判评估。

2.1 基于水循环神经网络的海堤 PHM 系统状态预测模型

渗压作为反映海堤健康状态的重要指标,对其实测数据进行预测分析,是构建海堤 PHM 系统状态预测模型的重要环节。本文以海堤渗压为分析对象,详细介绍海堤 PHM 系统状态预测模型的构建方法。

在充分考虑周期性快速变化的潮位、降雨、时效

对渗压的影响,以及渗压与其影响因素间具有明显的非线性与不确定性关系的条件下,采用于 2012 年 HadiEskandar^[14] 等人提出的具有强大寻优能力、鲁棒性和快速收敛特性的新型智能优化算法——水循环算法^[15-16] (water cycle algorithm, WCA) 与 BP 神经网络相结合,以潮位、降雨、时效作为模型输入层,渗压作为模型输出层,利用水循环算法取代 BP 神经网络的误差反向计算来求解模型权值,建立基于水循环神经网络的海堤 PHM 系统渗压预测模型。BP 神经网络的原理详见文献^[17-18]。

2.1.1 水循环算法具体过程

(1) 基本参数。在 N 维变量问题中,由 m 个雨滴层 (raindrops) 形成种群 $X = [X_1, X_2, \dots, X_m]$, 其中第 i 个雨滴层的位置是大小为 $1 \times N$ 的一组向量 $X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N}]$, 每个雨滴层的位置 X_i 代表所求问题的一个潜在解。每个雨滴层的代价函数表示为:

$$\text{cost}_i = f(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N}) \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

比较每个雨滴层代价函数的大小,定义雨滴层种群中最优雨滴层 (即该雨滴层的代价函数最小) 作为大海,定义 $N_{\text{河}}$ 个较好的雨滴层 (即雨滴层的代价函数相对较小) 作为河流,剩余雨滴层作为溪流。

$$N_{\text{sr}} = N_{\text{河}} + 1 \quad (2)$$

$$N_{\text{溪}} = m - N_{\text{sr}} \quad (3)$$

式中: $N_{\text{河}}$ ——河流个数; N_{sr} ——河流和大海个数总和; $N_{\text{溪}}$ ——溪流个数。

每条河流和大海都有不同数量的溪流直接汇入,通过公式 (4) 确定 NS_n 的值:

$$NS_n = \text{round} \left\{ \left| \frac{\text{cost}_n}{\sum_{i=1}^{N_{\text{sr}}} \text{cost}_i} \right| \times N_{\text{溪}} \right\} \quad (n=1, 2, \dots, N_{\text{sr}}) \quad (4)$$

式中: NS_n ——流向指定河流和大海的溪流个数; $\text{round}\{f\}$ ——取 f 四舍五入后的整数值。

(2) 汇流过程。初始时刻,溪流与河流的位置有一定的距离,随着汇流作用,溪流逐渐向河流靠近,并达到新的位置,对比此时溪流与河流的代价函数,若溪流的代价函数较河流的小,则溪流与河流互换位置。类似的,经过汇流作用后,若河流的代价函数较大海的小,则河流与大海互换位置。汇流公式如下:

$$X_{\text{溪}}^{j+1} = X_{\text{溪}}^j + \text{rand} \times C \times (X_{\text{河}}^j - X_{\text{溪}}^j) \quad (5)$$

$$X_{\text{溪}}^{j+1} = X_{\text{溪}}^j + \text{rand} \times C \times (X_{\text{海}}^j - X_{\text{溪}}^j) \quad (6)$$

$$X_{\text{河}}^{j+1} = X_{\text{河}}^j + \text{rand} \times C \times (X_{\text{海}}^j - X_{\text{河}}^j) \quad (7)$$

式中: rand ——介于 (0, 1) 的随机数; C ——介于 (1, 2) 的参数,通常取 2; $X_{\text{溪}}^j, X_{\text{河}}^j, X_{\text{海}}^j$ ——在第 j 次迭代中溪流、河流、大海的位置。

(3) 蒸发与降雨。在水循环算法中,蒸发是能够防止该算法因快速收敛而陷入局部最优的重要措施。蒸发条件为:

$$\| X_{\text{海}}^j - X_{\text{河},h}^j \| < d_{\text{max}} \quad (8)$$

式中: $X_{\text{河},h}^j$ ——在第 j 次迭代中第 h 条河流的位置, $h = 1, 2, \dots, N_{\text{河}}$; $\| X_{\text{海}}^j - X_{\text{河},h}^j \|$ ——大海和河流之间的距离; d_{max} ——一个接近于 0 的极小值。

较大的 d_{max} 可以防止算法陷入局部极小值,较小的 d_{max} 可以提高算法搜索精度。因此,采用逐渐递减的方式进行计算:

$$d_{\text{max}}^{j+1} = d_{\text{max}}^j - d_{\text{max}}^j / k_{\text{max}} \quad (9)$$

式中: k_{max} ——最大迭代次数。

当满足蒸发条件后,进入降雨过程,即第 h 条河流和流入该河流的溪流蒸发消失,随机形成与消失河流、溪流数量相同的雨滴层,计算其代价函数,选择其中最好的雨滴层为第 h 条河流,其余为流入该河流的溪流,并进入汇流过程。

(4) 收敛准则。当达到最大迭代次数或最小误差要求时,终止迭代;否则返回汇流、蒸发与降雨过程继续迭代。最终得出的大海位置 $X_{\text{海}} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ 即为问题最优解。

2.1.2 海堤渗压水循环神经网络预测模型实现步骤

(1) 海堤 PHM 系统预测模块的渗压预测模型采用 3 层网络结构,输入层分别为经过处理的潮位因子、降雨因子和时效因子^[19],输出层为渗压,根据经验公式^[20]取隐含层节点数为 5。

(2) 设定水循环算法控制参数:雨滴层总数 m ; 河流个数 $N_{\text{河}}$; 极小值 d_{max} ; 最大迭代次数。

(3) 随机形成 m 个雨滴层,每个雨滴层的位置 $X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N}]$ 代表模型中所有的权值,根据每一组权值和 BP 神经网络前向计算,对 q 组潮位、降雨、时效输入样本进行训练,求得 q 组模型渗压输出值,则每个雨滴层的代价函数可表示为:

$$\text{cost}_i = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (10)$$

式中: y_k ——渗压实测值; \hat{y}_k ——模型计算的渗压值; q ——样本数。

(4) 比较每个雨滴层代价函数的大小,选择最小的 cost 对应的雨滴层作为大海,选择 $N_{\text{河}}$ 个次小的 cost 对应的雨滴层作为河流。并按公式 (4) 确定流向指定河流和大海的溪流个数。

(5) 依据公式 (5) — (7) 进行汇流,溪流和河流的位置发生改变,根据新的权值,对 q 组潮位、降雨、时效输入样本进行训练,得出 q 组新的网络输出值 \hat{y}_k , 并按公式 (10) 计算出此时溪流和河流对应的代价函

数。若溪流的代价函数小于河流的代价函数,则溪流与河流互换位置;若河流的代价函数小于大海的代价函数,则互换河流与大海的位置。

(6) 根据公式(8)检查是否满足蒸发条件。若不满足,则返回步骤(5);若满足,则进入降雨过程。并通过公式(9)计算 d_{\max}^{i+1} 。

(7) 当达到最大迭代次数或最小误差要求时,结束计算;否则返回步骤(5)继续计算。最终的大海位置 $X_{\text{海}} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ 即为神经网络权值。

(8) 模型依据最终的权值,对预测样本进行计算,即可预测出渗压。

2.2 基于模糊数学的海堤 PHM 系统健康评估模型

建立科学有效的健康评估模型是海堤 PHM 系统对海堤健康进行实时评估和预判评估的基础,也是系统进行预警、视情维修的前提。以上海浦东海堤为研究对象,基于模糊数学建立海堤健康评估模型,实现海堤 PHM 系统健康实时评估和预判评估。

2.2.1 评判指标 海堤的健康影响因素包括渗压、位移、潮位、降雨量、波浪爬高、堤身内部隐患、堤前滩地变化、护坡条件、堤基隐患等。影响海堤健康的因素众多,建立海堤 PHM 系统健康评估模型时,应筛选主要影响因素作为评判指标。考虑到渗压是反映海堤安全状态的重要效应量,潮位和降雨是影响海堤安全的主要环境量,且上海浦东海堤监测资料主要收

集了大量、高频的渗压、潮位、降雨量信息。因此,以渗压、潮位、降雨量作为浦东海堤健康评判指标,构建海堤 PHM 系统健康评估框架如图 2 所示。

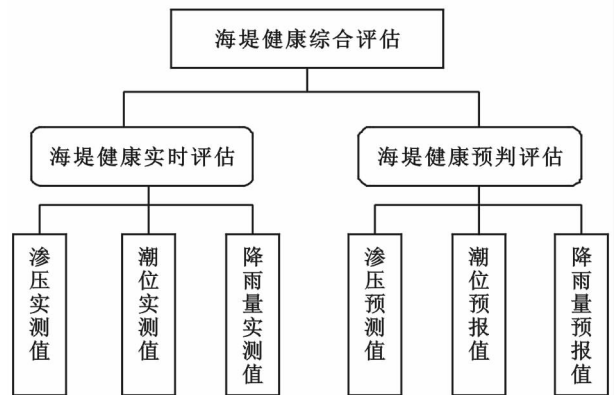


图 2 海堤 PHM 系统健康评估框架

2.2.2 评判集划分 参照堤防工程对安全等级的定义^[21],将海堤安全分为 4 个等级:安全、较安全、不安全、很不安全。即: $v = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{安全, 较安全, 不安全, 很不安全}\}$ 。海堤 PHM 系统健康评价指标中,潮位和降雨量可根据其相应特征值进行安全等级划分。而渗压可采用数理统计和概率论方法对其安全等级进行划分。具体划分原理和方法详见参考文献^[22]。渗压、潮位、降雨量的评判集具体划分如表 1 所示。

表 1 评判集划分

安全等级	渗压/m	潮位/m	降雨/[mm · (24 h) ⁻¹]
安全	$\mu - k_1\sigma < y_{\text{渗压}} < \mu + k_1\sigma$	最低潮位—平均低潮位	小雨(<10)
较安全	$\mu - k_2\sigma < y_{\text{渗压}} < \mu - k_1\sigma$ $\mu + k_1\sigma < y_{\text{渗压}} < \mu + k_2\sigma$	平均低潮位—平均潮位	中雨(10~25)
不安全	$\mu - k_3\sigma < y_{\text{渗压}} < \mu - k_2\sigma$ $\mu + k_2\sigma < y_{\text{渗压}} < \mu + k_3\sigma$	平均潮位—平均高潮位	大雨(25~50)
很不安全	$\mu + k_3\sigma < y_{\text{渗压}}, y_{\text{渗压}} < \mu - k_3\sigma$	平均高潮位—最高潮位	暴雨及以上(>50)

注: μ 为均值; σ 为标准差; $y_{\text{渗压}}$ 为渗压值; k_i 的取值与置信水平有关,本文选取置信水平 0.84, 0.93, 0.99 为各评判等级的分界线,则相应的 $k_1=1, k_2=1.5, k_3=2$ 。

2.2.3 评判指标隶属度计算 采用模糊统计法计算潮位和降雨量的隶属度;以隶属函数法计算渗压的隶属度。模糊统计法的定义是评判指标 y 对评判等级 v_i 的隶属度 r_i 由下式确定:

$$r_i = n_i / n \quad (11)$$

式中: n_i ——评判指标属于评判等级 v_i 的次数。

针对海堤渗压的特性,采用正态分布函数来计算渗压的隶属度。渗压隶属函数为:

$$r_i = e^{-\left(\frac{y - a_i}{\sigma}\right)^2} \quad (12)$$

式中: y ——评判指标值; σ ——评判指标标准差; $a_i (i = 1, 2, 3, 4)$ ——对应评判集 v_i 在该区域的中间值。

2.2.4 权重计算及综合评价 评判指标权重计算是否合理,直接关系到海堤 PHM 系统健康评估的效果。本文采用应用广泛且有效的层次分析法来计算各评判指标的权重。层次分析法的原理详见参考文献^[23]。

计算出各评判指标的隶属度和权重后,采用加法合成法得到海堤综合健康评判矩阵,并根据最大隶属度原则得出海堤健康评估结果。

$$B = W \circ R \quad (13)$$

式中: B ——海堤综合健康评判矩阵; W ——评判指标权重矩阵; R ——评判指标隶属度矩阵。

根据建立的预测模型和健康评估模型,可实现海堤 PHM 系统状态预测、健康实时评估及预判评估的功能,为海堤 PHM 系统进行预警及维修决策提供可靠依据。

3 实例分析

以浦东海堤某年 9 月 30 日至 10 月 7 日的渗压、潮位、降雨量实测数据,验证所建立的海堤 PHM 系统预测模型及健康评估模型的有效性。

3.1 预测模型验证分析

将 9 月 30 日至 10 月 6 日的潮位、降雨量、时间、渗压的实测数据作为训练样本,依据前文所建立的水循环神经网络渗压预测模型,将潮位、降雨量、时间作为模型输入层,渗压作为模型输出层,按 2.1.2 节模型实现步骤进行训练。以下式计算平均相对误差和平均绝对误差:

$$e_1 = \left(\frac{1}{q} \sum_{k=1}^q \left| \frac{y_k - \hat{y}_k}{y_k} \right| \right) \times 100\%,$$

$$e_2 = \left(\frac{1}{q} \sum_{k=1}^q |y_k - \hat{y}_k| \right) \quad (14)$$

式中: e_1 ——平均相对误差; e_2 ——平均绝对误差; y_k ——渗压实测值; \hat{y}_k ——模型计算的渗压值; q ——样本数。

训练结果如图 3 所示,模型训练平均相对误差为 0.433%,平均绝对误差为 0.013 m。可见水循环神经网络模型能很好地描述、跟踪渗压的主导规律及整体变化趋势,训练效果显著。将训练后的预测模型对 10 月 7 日的渗压值进行预测,模型预测结果如图 4 所示。模型预测平均相对误差为 0.326%,平均绝对误差为 0.009 m。由此可知,水循环神经网络预测模型在整个预测期都取得很好的预测效果,具有很高的预测精度。表明建立的预测模型可有效预测海堤渗压,实现海堤 PHM 系统状态预测的功能,为海堤 PHM 系统健康预判评估提供可靠依据。

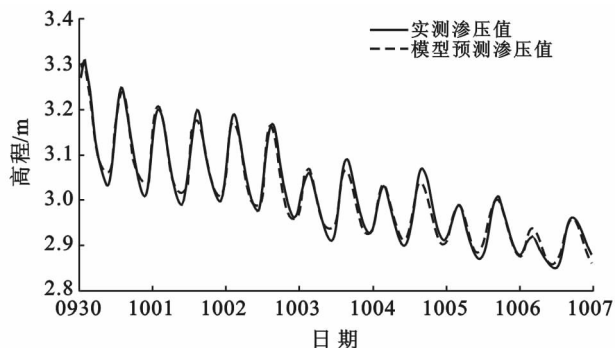


图 3 水循环神经网络预测模型训练结果

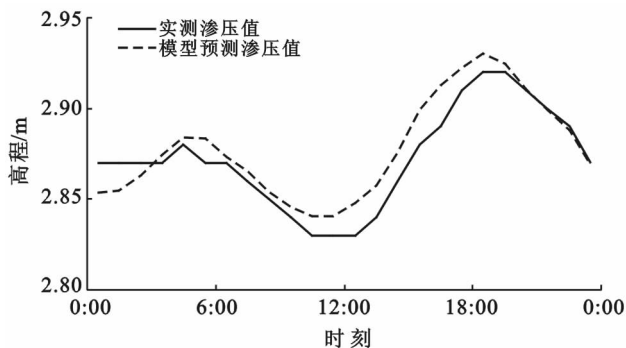


图 4 水循环神经网络预测模型预测结果

3.2 健康评估模型验证分析

3.2.1 海堤健康实时评估 以 9 月 30 日至 10 月 6 日为健康实时评估时段,对该时段内的渗压、潮位、降雨量实测值进行健康评估计算。依据 2.2 节健康评估模型构建过程,计算出潮位隶属度为(0.016 0.755 0.229 0),降雨量隶属度为(1 0 0 0),渗压隶属度为(0.398 0.336 0.209 0.057)。汇总可得到评判指标隶属度矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0.016 & 0.755 & 0.229 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.398 & 0.336 & 0.209 & 0.057 \end{bmatrix}$$

以层次分析法计算得到潮位、降雨量、渗压的权重向量为 $W = (0.23 \ 0.122 \ 0.648)$ 。依公式(13)可求解得海堤综合健康评估矩阵 $B = (0.383 \ 0.392 \ 0.188 \ 0.037)$ 。按最大隶属度原则,可判断出 9 月 30 日至 10 月 6 日时间段内,海堤处于较安全的健康状态。

3.2.2 海堤健康预判评估 健康预判评估体现了海堤 PHM 系统的先进性。以 10 月 7 日作为健康预判评估时段,依据前文建立的海堤 PHM 系统中海堤状态预测模块的预测模型,预测该时段的渗压预测值,结合海洋预报信息得到 10 月 7 日的潮位预报值和降雨量预报值,采用前文健康评判步骤,可求得 10 月 7 日潮位隶属度为(0.042 0.875 0.083 0),降雨量隶属度为(1 0 0 0),渗压隶属度为(0.185 0.365 0.328 0.122),评判指标隶属度矩阵 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.042 & 0.875 & 0.083 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.185 & 0.365 & 0.328 & 0.122 \end{bmatrix}$$

评判指标权重向量不变,可得预测时段的海堤综合健康评估矩阵为 $B = (0.251 \ 0.438 \ 0.232 \ 0.079)$ 。按最大隶属度原则,可预判出 10 月 7 日海堤处于较安全的健康状态。

由此可见,所建立的海堤 PHM 系统健康评估模型可有效的对现阶段和未来一定时段的海堤健康状

态进行评估和预判,为海堤 PHM 系统实现安全预警、视情维修及统筹决策等功能提供重要保障。

上述海堤 PHM 系统健康评估计算表明,在 9 月 30 日至 10 月 7 日这一时间段内,海堤均处于较安全的健康状态,可不进行预警,不采取故障维护措施。若得出的健康结果为不安全或很不安全,海堤 PHM 系统可下达相应预警指令和维修决策。

4 结论

(1) 形成了适应海堤工程特点的海堤 PHM 系统框架,为后期进一步形成系统性、完善性、高效性的海堤故障预测与健康管理系统打下坚实基础。

(2) 将具有强大寻优能力和快速收敛特性的水循环算法与神经网络相结合,建立适用于海堤状态预测模块的水循环神经网络预测模型,实现海堤 PHM 系统的预测功能。通过实例分析可知,该预测模型可有效预测海堤渗压,具有很高的预测能力和预测精度。

(3) 充分考量海堤健康的影响因素,基于模糊数学形成海堤 PHM 系统健康评估模型,依据实时信息对海堤健康进行实时评估。并结合海堤状态预测模块的预测模型的预测结果和海洋预报信息,对未来一定时段的海堤进行健康预判评估,实现健康预判功能,也为后续的海堤 PHM 系统进行预警、维修决策提供依据。实例分析表明,健康评估模型可有效对海堤现阶段和未来一定时段进行健康评估和预评估。

(4) 海堤 PHM 系统的最终目的是依据海堤当前与未来健康状况,及时预警、制定维修决策,减少损失、实现海堤安全运行。本文对海堤 PHM 系统的预警和维修决策机制探讨较少,后续将深入研究该方面的内容,实现海堤 PHM 系统各结构模块的有机融合和科学有效的运行。

[参 考 文 献]

[1] Gambolati G, Teatini P. GIS simulations of the inundation risk in the coastal lowlands of the Northern Adriatic Sea[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2002, 35(9):963-972.

[2] 谢婕,龚政,陈永平.海堤安全评价指标体系的构建及应用[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(2):59-63.

[3] Huang Ming, Liu Jun. Monitoring and analysis of Shanghai Pudong seawall performance[J]. *Journal of Performance of Constructed facilities*, 2009, 23(6):399-405.

[4] 黄铭.数学模型与工程安全监测[M].上海:上海交通大学出版社,2008.

[5] 温祥西,孟相如,李明迅.网络故障预测与健康管

术综述[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(1):146-154.

- [6] 黄赞武.轨道电路故障预测与健康管
- [7] Jouin M, Gouriveau R, Hissel D, et al. Prognostics and Health Management of PEMFC: State of the art and remaining challenges[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(35):15307-15317.
- [8] Dong Ming, Peng Ying. Equipment PHM using non-stationary segmental hidden semi-Markov model[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(3):581-590.
- [9] 莫固良,汪慧云,李兴旺,等.飞机健康监测与预测系统的发展及展望[J]. *振动测试与诊断*, 2013, 33(6):925-930,1089.
- [10] 刘大同,周建宝,郭力萌,等.锂离子电池健康评估和寿命预测综述[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(1):1-16.
- [11] 孙博,康锐,谢劲松.故障预测与健康管
- [12] 刘志伟,刘锐,徐劲松,等.复杂系统故障预测与健康管
- [13] 张叔农,谢劲松,康锐.电子产品健康监控和故障预测技术框架[J]. *测控技术*, 2007, 26(2):12-16,18.
- [14] Eskandar H, Sadollah A, Bahreininejad A, et al. Water cycle algorithm: A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems[J]. *Computers & Structures*, 2012, 110:151-166.
- [15] Sadollah A, Eskandar H, Bahreininejad A, et al. Water cycle algorithm for solving multi-objective optimization problems[J]. *Soft Computing*, 2015, 19(9):2587-2603.
- [16] 章纯,刘峰,廖国维,等.基于 WCA 优化算法的空间桁架结构优化设计[J]. *建筑钢结构进展*, 2014, 16(1):34-40.
- [17] 宋安,王世杰,卢海.基于 BP 神经网络的流凌开河日期预报模型应用[J]. *天津大学学报*, 2008, 41(6):731-735.
- [18] 周娟,黄铭.基于改进 BP 神经网络的海堤渗压监测模型研究[J]. *人民长江*, 2014, 45(3):90-93.
- [19] 黄铭,刘俊.海堤渗压监测因果模型基本结构和因子选择[J]. *上海交通大学学报*, 2008, 42(11):1931-1934.
- [20] 王德明,王莉,张广明.基于遗传 BP 神经网络的短期风速预测模型[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2012, 46(5):837-841.
- [21] 汪自力,顾冲时,陈红.堤防工程安全评估中几个问题的探讨[J]. *地球物理进展*, 2003, 18(3):391-394.
- [22] 吴德娟.海塘安全监测的模糊综合评判研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [23] 骆正清,杨善林.层次分析法中几种标度的比较[J]. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(9):51-60.