

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.14.009

基于窄带物联网的海绵城市滤水养鱼智能监控系统设计

张 净¹, 崔建军¹, 蒋礼兵², 左庆源²

(1. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 镇江市给排水管理处, 江苏 镇江 212001)

摘要: 基于窄带物联网(NB-IoT)技术设计了海绵城市滤水养鱼智能监控系统,可实时监测和动态预测预警滤水养鱼水环境参数并自动调节水质,同时可根据动态预测预警信息提前调节水质。针对支持向量回归机(SVR)在对滤水养鱼水环境参数预测中存在精度低的问题,提出并采用了集合经验模态分解法(EEMD)、灰狼优化算法(GWO)和SVR组合的水质预测模型。结果表明,该模型具有较好的预测能力,能够满足海绵过滤水质在线预测的实际需求,为水质预警控制提供数据支持,在此基础上建立了水质预警模型。该系统取得了较好效果,可以满足海绵城市滤水养鱼的水质监控和预测预警的需求,为海绵城市的自动化、智能化建设提供技术参考。

关键词: 窄带物联网; 海绵城市; 滤水养鱼; 动态预测预警; 支持向量回归机

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)14-0061-05

Design of Intelligent Monitoring System for Fish Culture in Filtered Water of Sponge City Based on Narrow-band Internet of Things (NB-IoT)

ZHANG Jing¹, CUI Jian-jun¹, JIANG Li-bing², ZUO Qing-yuan²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Zhenjiang Water Supply and Drainage Development, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: Based on the narrow-band Internet of Things (NB-IoT) technology, the intelligent monitoring system for fish culture in filtered water of sponge city was designed, which could monitor, dynamically predict the environmental parameters of the filtered water and adjust the water quality automatically. At the same time, water quality could be adjusted in advance according to the dynamic prediction and early warning information. Aiming at the low precision of support vector regression (SVR) in predicting the environmental parameters of fish culture in filtered water, the prediction model of EEMD-GWO-SVR was presented and adopted in this paper. The results showed that the model had better predictive ability, could meet the actual demand of online prediction of sponge filtration water quality, and provided data support for water quality early warning control. Based on this, a water quality early warning model was established. The system had achieved good results and could meet the needs of water quality monitoring, forecasting and warning for fish culture in filtered water of sponge city, and could provide technical reference for the automation and intelligent construction of sponge city.

Key words: NB-IoT; sponge city; fish culture in filtered water; dynamically prediction and warn; SVR

基金项目: 住建部2017年科技项目计划(2017-S5-028)

如何充分利用海绵城市净化后的雨水资源,是当前海绵城市建设研究的热点。将海绵城市建设与滤水养鱼结合起来,共同涵养水资源,可助力城市生态环境建设^[1]。传统海绵城市建设中,采用人工采样分析的方式不仅效率低,且不能作出预警,难以保证水质安全。目前,物联网技术通常采用 ZigBee、Bluetooth、WiFi 以及有线等方式,但是这些技术都存在通信距离短、功耗大且限制终端连接数量,而窄带物联网(NB-IoT)技术因其具有低功耗、深覆盖和海量连接等优势正逐渐成为物联网技术发展的主流。基于窄带物联网(NB-IoT)技术设计了海绵城市滤水养鱼智能监控系统,实现了养殖过程中水温、溶解氧、pH 值、化学需氧量、总磷、氨氮等参数的实时监测和动态预测预警并自动调节水质,同时可根据动态预测预警信息提前调节水质,确保净水生物处在最佳的生长环境,从而达到建设、修复和维持生态水环境的目的,并针对滤水养鱼水环境参数采用了集合经验模态分解法、灰狼优化算法和支持向量机的组合水质预测预警模型,实现了养殖管理过程中水质的精确预测预警。

1 系统结构及工作原理

1.1 系统总体结构

基于窄带物联网的海绵城市滤水养鱼智能监控系统总体结构如图 1 所示,主要包括水质采集终端、控制终端和云端智能监控系统。

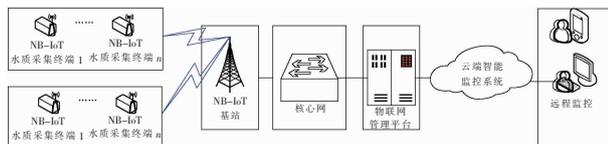


图 1 系统总体结构

Fig.1 Overall system structure

1.2 系统工作过程

水质采集终端采用 NB-IoT 通信传输方式,利用其广覆盖和海量连接的优势实现传感器数据直接到云端,简化了网络结构设计,可避免数据因多次转发而失真或丢失。水质采集终端采集现场水质数据,使用专用 APN 接入 NB-IoT 网络,与云服务器建立数据交互,利用云端智能监控系统对现场控制终端进行远程闭环控制。其主要由超低功耗 STM32L151RDT6 单片机芯片、SIM7020C NB-IoT 模组以及低功耗水质信息采集传感器构成,供电采用太阳能与市电相结合的方式。

控制终端采用可靠性高、抗干扰能力强的西门子 S7-200 PLC 对现场养殖水溶解氧进行阈值控制。在 STEP7-MicroWIN 编译环境下,PC 使用梯形图方法对 PLC 软件部分进行编写,调试成功后下载到 PLC 中。PLC 根据软件设计逻辑,通过预先设定的水质标准阈值对现场增氧机、循环水泵等执行设备进行自动控制。增氧机控制功能如下:当溶解氧参数低于下限时,自动开启增氧机,高于上限时则自动关闭增氧机。除此之外,控制终端还包括 NB-IoT 通信模块,通过 NB-IoT 网络与云端智能监控系统建立信息交互,接收云端传来的控制指令,及时反馈现场设备的执行状态。

云端智能监控系统主要包括防火墙、通信服务器、数据服务器和应用服务器。其中,通信服务器设定为固定 IP 地址。云端智能监控系统主要负责水质数据的处理、存储、分析、预测预警以及远程自动控制,其系统结构如图 2 所示。用户可以通过手机终端或 WEB 网页查看现场设备状态、水质数据以及预测预警信息,手动控制现场设备。同时,云端智能监控系统也会根据动态的预测预警信息及时调整现场执行设备的工作状态,达到精确控制和高效管理的目的^[2-3]。

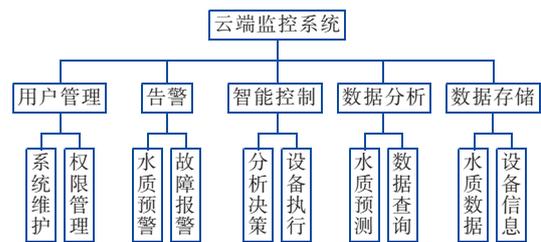


图 2 云端智能监控系统结构

Fig.2 Cloud intelligent monitoring system structure

2 水质预测模型

2.1 建模方法

支持向量机(SVM)算法是一种基于统计学习理论的机器学习方法。支持向量回归机(SVR)是 SVM 的重要应用分支,拥有成熟的理论体系,可对局部数据细化计算,也可对全局的数据进行处理,性能较好,是计算智能中的热门。采用 SVR 对海绵城市滤水养鱼水质进行预测分析,并选择精度较高、稳定性较好的径向基函数(RBF)作为 SVR 的核函数。针对 SVR 在滤水养鱼水环境参数预测中存在精度低的问题,提出并采用集合经验模态分解法(EEMD)、灰狼优化算法(GWO)和 SVR 的组合模型

预测方法,即 EEMD - GWO - SVR 水质预测报警模型。其中,EEMD 是一种新型噪声辅助数据分析算法^[4],GWO 是一种新型的群体智能优化算法^[4]。

2.2 模型设计

基于窄带物联网的海绵城市滤水养鱼 EEMD - GWO - SVR 水质预测模型预测流程如图 3 所示。

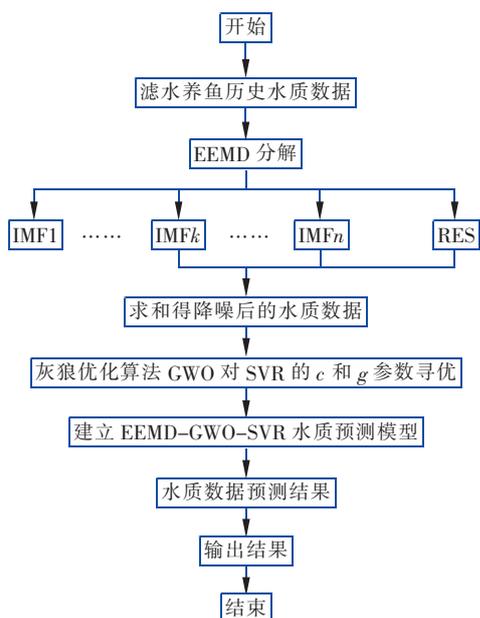


图 3 EEMD - GWO - SVR 滤水养鱼水质预测流程

Fig. 3 EEMD - GWO - SVR filtered water quality prediction process for fish culture

2.3 模型建立

2.3.1 EEMD 水质数据降噪

使用窄带物联网技术对江苏省镇江市海绵城市玉带河放养过程中的水温、溶解氧、pH 值、化学需氧量、总磷、氨氮等进行在线监测。系统于 2018 年 5 月 30 日—6 月 8 日内每隔 13 min 采集一次试验现场水质水样,共采集到 1 071 个水质样本数据,即 $1\ 071 \times 6$ 的矩阵。从水质传感器上获取的原始数据不可避免地会受到噪声干扰,严重影响数据分析和模型的精确性^[5]。为此采用 Matlab 2014a 编写算法程序并进行水质预测模型试验研究。根据 EEMD 提出者的建议和本研究的数据特征,设定增加的噪声标准差与原始信号的标准差比值为 0.4,分解次数取 100。

将原始溶解氧数据序列输入到 EEMD 算法中,一共分解成 8 个 IMF 分量和一个余量 RES。其中 IMF1 ~ IMF3 分量明显为噪声信号,故将 IMF1 ~ IMF3 分量去除,将 IMF4 ~ IMF8 分量和 RES 余量相

加,则得到去噪后的溶解氧数据。对原始溶解氧数据及降噪后的数据进行分析后发现,原始溶解氧数据经 EEMD 降噪处理后,数据波形明显变得平滑,并且保持原有数据信号的变化规律。

2.3.2 EEMD - SVR 回归模型建立

以降噪后的水质数据作为输入,建立 SVR 回归预测模型。在 1 071 个样本数据中,选取前 1 021 个样本数据作为训练集,后 50 个样本数据作为预测集,建立 EEMD - SVR 水质预测模型。其中,模型中的 c 和 g 参数为默认值。以溶解氧为例进行模型训练和回归预测,预测结果如图 4 所示。

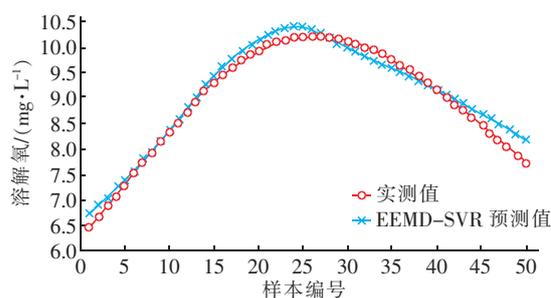


图 4 EEMD - SVR 模型预测结果

Fig. 4 EEMD - SVR model prediction results

从图 4 可以看出,建立的 EEMD - SVR 预测模型所预测的溶解氧结果与实测值仍存在一定的偏差,预测效果欠佳。对于 SVR 回归预测, c 和 g 参数的选取对模型的预测精度有至关重要的影响。因其 c 和 g 参数使用的是默认值,还存在全局最优的可能,说明其预测精度仍有很大的提高空间。

2.3.3 EEMD - GWO - SVR 回归模型建立

引入 GWO 算法对 EEMD - SVR 预测模型的 c 和 g 参数进行智能寻优。对于 GWO 算法中最大迭代次数 T 和狼群规模 N 的设置,通过反复试验,发现 T 和 N 逐渐增大,参数寻优过程中的全局搜索能力得到显著提高,但 T 和 N 增加到一定程度后对预测精度的提高已不再显著。因此,根据反复试验情况,设定 GWO 算法的最大迭代次数 T 为 100,狼群规模 N 为 20,建立 EEMD - GWO - SVR 水质预测模型,溶解氧预测结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,建立的 EEMD - GWO - SVR 预测模型对溶解氧的预测结果与实测值偏差很小,具有较好的预测效果,此时 GWO 算法优化的 SVR 惩罚因子 c 取值为 12.009 5,核函数参数 g 取值为 0.01。经过 GWO 算法优化后,水质预测模型的预测精度得到了显著

提升, EEMD - GWO - SVR 的均方根误差 (RMSE) 降低为 0.051 8, 平均绝对百分比误差 (MAPE) 降低为 0.005 1。

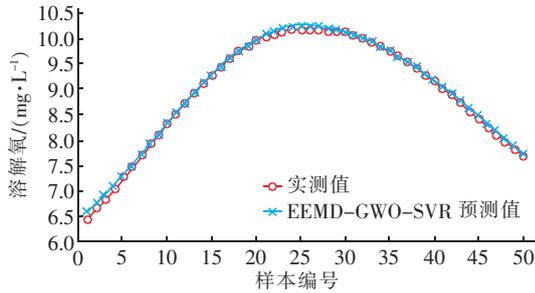


图 5 EEMD - GWO - SVR 模型预测结果

Fig. 5 EEMD - GWO - SVR model prediction results

3 水质预警模型

3.1 警级划分

水质预警是根据预测的水温、溶解氧、pH 值、化学需氧量、总磷、氨氮等参数值进行预警。掌握养殖生物适宜的水质环境, 并根据具体参数范围确定警情、划分警级进行水质预警^[6-7]。根据应用的实际需要, 将水质预警模型的警级划分为 4 个级别, 依次

表 2 水环境参数标准分析

Tab. 2 Analysis of water environment parameters

警级	等级	水温/ ℃	溶解氧/ (mg · L ⁻¹)	pH 值	化学需氧量/ (mg · L ⁻¹)	总磷/ (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)
无警	好	22 ~ 25	5 ~ 8	6.5 ~ 8.6	0 ~ 18	0 ~ 0.025	0 ~ 0.5
轻警	中	20 ~ 22	4 ~ 5	6.0 ~ 6.5	18 ~ 20	0.025 ~ 0.05	0.5 ~ 1.0
			8 ~ 12	8.6 ~ 9.0			
中警	差	15 ~ 20	3 ~ 4	4 ~ 6	20 ~ 30	0.05 ~ 0.1	1.0 ~ 1.5
			12 ~ 15	9 ~ 10			
重警	很差	- 10 ~ 15	0 ~ 3	0 ~ 4	30 ~ 40	0.1 ~ 2.0	1.5 ~ 50
		26 ~ 50	15 ~ 20	10 ~ 14			

3.3 警级判别

水质预警模型警级判别是对预测的水温、溶解氧、pH 值、化学需氧量、总磷、氨氮, 根据参数评价标准判定每个水环境参数的警级, 然后根据这 6 个参数判定的警级综合给出水质警级。具体步骤如下: ①输入预测的全部水环境参数, 根据参数评价标准分别判定每个环境参数的警级。②判断 6 个参数警级中是否有重警, 如果有, 则结束执行, 输出综合水质警级为重警, 否则继续执行。③计算达到中警的个数, 如果中警个数不少于 2 个, 则结束执行, 输出综合水质警级为中警, 否则继续执行。④若存在一个中警或不少于 3 个轻警, 则输出综合水质警级为

为无警、轻警、中警和重警, 如表 1 所示。

表 1 水质预警模型警级

Tab. 1 Warning level of water quality warning model

警级	描述
无警	蓄水池水质非常适宜渔业养殖活动
轻警	参数达到适宜上限或下限并持续一定时间, 但不足以影响水体生物的正常生存, 需引起关注
中警	参数超出渔业养殖的适宜值, 需要采取相应的处置措施, 否则会导致水质进一步恶化, 造成严重损失
重警	参数超出渔业养殖的极限值, 需要立即采取相应的处置措施, 否则会造成水体生物大规模死亡

3.2 水环境参数标准分析

根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)、《渔业水质标准》(GB 11607—89) 等相关规定, 严格遵循科学性、时效性、经济性等原则, 本系统结合滤水养鱼样本实例分析和相关文献参考构建水质预警标准, 采用渔业养殖的水温、溶解氧、pH 值、化学需氧量、总磷、氨氮 6 个关键水环境参数作为水质警级判定的依据, 具体参数分析见表 2。

轻警, 否则输出综合水质警级为无警。

4 系统测试

在系统软硬件各模块调试成功的基础上, 自 2018 年 7 月 2 日起, 在江苏省镇江市海绵城市玉带河放养试验现场对系统进行整体运行测试。测试现场的海绵工程建设有重力流湿地、雨水净化植物园等净化设施; 养殖池模拟了水域生物多样性, 人工放养了适当的净水生物。

该系统运行测试持续到 2018 年 9 月 30 日, 在这 3 个月内, 每天对现场水质进行一次人工抽样检测。水质采集终端正常采集水样, 稳定上传水质数据; 控制终端控制及时, 现场执行设备工作正常; 云

端智能监控系统的各类服务器运行稳定,实时处理、存储、分析、动态预测预警水环境参数和远程自动控制。用户通过手机终端或 WEB 页面可以实时查看水质数据、预测预警信息以及现场执行设备的状态,并能远程控制现场设备。

2018年7月16日,天气晴朗,气温为27~35℃。此前已连续3d是高温晴天,系统稳定运行,增氧机和循环水泵自动启动,试验现场鱼类活动正常,未出现异常情况,水体溶解氧浓度大部分时间保持在5.5 mg/L左右,全天最低为5 mg/L,中午13:00左右水体溶解氧浓度达到峰值,为7.6 mg/L。

水质预测预警模型稳定运行在云端智能监控系统上,对水环境参数进行实时动态预测预警。因恶劣天气影响,海绵城市滤水养鱼水质仍有突变风险,所以设定系统动态预测预警间隔为30 min。如果在未来30 min内预测到水质恶化,系统会提前发出控制指令来调节水质。

5 结论

基于窄带物联网的海绵城市滤水养鱼智能监控系统,能够实现滤水养鱼过程中水环境参数的实时监测和动态预测预警,同时可根据预测预警信息提前调节水质,达到建设、修复和维持生态水环境的目的。提出并采用的EEMD-GWO-SVR组合模型,实现了养殖管理过程中对水质的精确预测预警。该系统能够很好地满足滤水养鱼水质监控和预测预警的需求,促进海绵城市建设与滤水养鱼有效融合,共同涵养水资源,助力城市生态环境建设。

参考文献:

- [1] 杨莉,王红武,胡坚,等. 镇江市基于信息化技术的海绵城市智慧城市监管系统研究[J]. 中国给水排水, 2018,34(10):7-10.
Yang Li, Wang Hongwu, Hu Jian, *et al.* Design of intelligent monitoring and management system of sponge city based on information technology in Zhenjiang City [J]. *China Water & Wasterwater*, 2018, 34(10):7-10 (in Chinese).
- [2] 钟兴,刘永华,孙昌权. 基于物联网的水产养殖智能监控系统设计[J]. 中国农机化学报, 2018,39(3):70-73.
Zhong Xing, Liu Yonghua, Sun Changquan. Design of aquaculture intelligent monitoring system based on Internet of Things [J]. *Journal of Chinese Agricultural*

Mechanization, 2018, 39(3):70-73 (in Chinese).

- [3] 盛平,王英杰,倪冬玮. 基于实时水质参数的智能养殖装备设计[J]. 渔业现代化, 2017,44(1):1-5.
Sheng Ping, Wang Yingjie, Ni Dongwei. Design of intelligent aquaculture equipment based on real time water quality monitoring [J]. *Fishery Modernization*, 2017, 44(1):1-5 (in Chinese).
- [4] 白媛,陈京荣,展之婵. 改进灰狼优化算法的研究与分析[J]. 计算机科学与应用, 2017,7(6):562-571.
Bai Yuan, Chen Jingrong, Zhan Zhichan. Analysis and research of improved grey wolf optimization algorithm [J]. *Computer Science and Application*, 2017, 7(6):562-571 (in Chinese).
- [5] Rodrigues B D, Stevenson M J. Takeover prediction using forecast combinations [J]. *Int J Forecasting*, 2013, 29(4):628-641.
- [6] 张颖,李梅,高倩倩,等. 基于ELMR-SVMR的海水水质预警模型研究[J]. 大连理工大学学报, 2016,56(2):185-192.
Zhang Ying, Li Mei, Gao Qianqian, *et al.* Research on forewarning model of seawater quality based on ELMR-SVMR [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2016, 56(2):185-192 (in Chinese).
- [7] 张启宇,李兴佐,刘峰,等. 海产育苗水质预测预警系统的研究[J]. 江苏农业科学, 2018,46(2):166-169.
Zhang Qiyu, Li Xingzuo, Liu Feng, *et al.* Study on water quality prediction and early warning system for sea cucumber seedlings [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(2):166-169 (in Chinese).



作者简介:张净(1975-),女,江苏镇江人,博士,副教授,主要从事计算机应用研究。

E-mail:jszj08062000@163.com

收稿日期:2019-06-12