

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.019

基于 GA - BP 神经网络的池塘养殖水温短期预测系统

陈英义^{1,2} 程倩倩^{1,3} 成艳君^{1,3} 于辉辉^{1,3} 张超¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083;
3. 北京农业物联网工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 为解决传统的水温小样本非实时预测方法预测精度低、鲁棒性差等问题, 基于物联网实时数据, 提出了遗传算法(GA)优化BP神经网络的池塘养殖水温短期预测方法, 并在此基础上设计开发了池塘养殖水温预测系统, 首先采用主成分分析法筛选出影响池塘水温的关键影响因子, 减少输入元素; 然后使用遗传算法对初始权重和阈值进行优化, 获取最优参数并构建了基于BP神经网络的水温预测模型; 最后采用Java语言开发了基于B/S体系结构的预测系统。该系统在江苏省宜兴市河蟹养殖池塘进行了预测验证。结果表明: 该系统在短期的水温预测中具有准确的预测效果, 与传统的BP神经网络算法相比, 研究内容评价指标平均绝对误差(MAE)、平均绝对百分误差(MAPE)和误差均方根(MSE)分别为0.1968、0.0079和0.0592, 均优于单一BP神经网络预测, 可满足实际的养殖池塘水温管理需要。

关键词: 水产养殖; 水温预测系统; 主成分分析; 遗传算法; BP神经网络

中图分类号: TP391; S95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)08-0172-07

Short-term Prediction System of Water Temperature in Pond Aquaculture Based on GA - BP Neural Network

CHEN Yingyi^{1,2} CHENG Qianqian^{1,3} CHENG Yanjun^{1,3} YU Huihui^{1,3} ZHANG Chao¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China

3. Beijing Engineering and Technology Research Center for Internet of Things in Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: The pond water temperature is one of the most important parameters which directly affect the feeding, growth, livability and reproduction of aquaculture animals. Thus it is significant to grasp the pond water temperature change for the healthy aquaculture. In order to solve the problems of low precision and poor robustness of traditional forecasting methods, a short-term prediction model of water temperature in aquaculture pond was proposed based on BP neural network optimized by genetic algorithm, and pond aquaculture water temperature prediction system was designed and developed. Firstly, the principal component analysis (PCA) was used to ensure the factors that influenced the water temperature in aquaculture pond. Secondly, the genetic algorithm and BP neural network were integrated to optimize initial weights and threshold. The method not only can get optimal parameter, but also can reduce the errors generated by random initialization. Thirdly, the short-term prediction system was developed by using Java language based on B/S architecture. Finally, the system was applied in Yixing City, Jiangsu Province. Results showed that the mean absolute error (MAE), mean absolute percentage error (MAPE) and root mean square error (RMSE) from GA - BP neural network method were 0.1968, 0.0079 and 0.0592, respectively. It was clear that GA - BP neural network was better than BP neural network algorithm. The research result met the practical needs of the pond water temperature management.

Key words: aquaculture; water temperature prediction system; principal component analysis; genetic algorithm; BP neural network

收稿日期: 2016-12-04 修回日期: 2016-12-30

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2015GGX101041)、上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字(2014)第4-6-2号)和广东省海大集团基于物联网技术的智慧水产养殖系统院士工作站(2012B090500008)

作者简介: 陈英义(1980—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业模型和信息处理技术研究, E-mail: chenyingyi@cau.edu.cn

通信作者: 张超(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事遥感技术及其农业与土地应用研究, E-mail: 05022@cau.edu.cn

引言

我国是世界上最大的水产养殖大国,水产品产量约占全世界的 70%^[1],水温是影响养殖水产品健康生长的关键因素之一。温度的突变会使鱼类抵抗力下降,诱发疾病甚至死亡,同时会引起溶解氧^[2]、氨氮^[3]等水质因子含量的变化,导致水产品出现缺氧、中毒等现象^[4]。

水温预测研究主要集中于海洋、湖泊^[5]大型流动水体^[6]和池塘育苗^[7]。其中,GELEGENIS 等^[8]基于热力学原理对池塘水温进行预测研究,模拟了开放式养殖池塘的热行为。张德林等^[9]使用逐步回归法通过当地气温对鱼塘水温进行预测,说明了室外水池散热的主要方式。杜尧东等^[10]采用气温因子建立了水温与气温的分布滞后模型,并将该模型应用在广州地区冬季鱼塘水温的预测中。随着物联网等现代化信息技术^[11]的快速发展,在水温预测模型中引入人工智能算法从而实现水温精确的预测已逐渐成为当前预测模型构建的重要方向之一^[12-14]。目前关于养殖池塘水温预测的研究较少。由文献^[15]也不难看出,传统的水温预测主要采用数值计算和经验公式,存在预测精度低、适用性差等缺陷。

因此,为解决传统的水温小样本非实时预测方法精度低、鲁棒性差等问题。本研究提出遗传算法优化 BP 神经网络的池塘养殖水温短期预测模型,设计基于水温预测方法的预测系统。同时为验证预测方法及系统的性能,对江苏省宜兴市河蟹养殖池塘的水质参数进行预测。

1 数据获取

1.1 实验区域

本研究选取江苏省宜兴市高塍镇溇湖养殖区,作为数据获取的实验区域。溇湖位于武进西南部和宜兴东北部之间,在当地因盛产大闸蟹而出名。在该养殖区内选取长 270 m、宽 76 m、水深约 1.2 m 的池塘作为实验池塘,在池塘同一深度即距池底 30 cm 处设有水温传感器,并采用曝气增氧机和滚轮增氧机进行增氧。

1.2 数据采集

实验数据的采集主要利用基于物联网的集约化水产养殖生态环境远程监控系统,对降水量、风速、太阳辐射、空气温度、空气相对湿度、大气压强、水温等水产养殖生态环境数据在线采集。并选用宜兴市高塍镇水产养殖物联网应用示范基地河蟹养殖池塘水温作为研究对象,其中传感器等信息采集设备如

图 1 所示。池塘里布设 6 个温度传感器,岸边搭建小型气象站,位置如图 2 所示。选取 2014 年 9 月 12 日—16 日在线采集的 718 个样本数据作为数据源,其中 600 个样本作为训练集,118 个样本作为测试集,分别用来训练和验证水温预测模型性能。表 1 为采集到的部分原始数据。



图 1 信息采集设备

Fig. 1 Information collection device

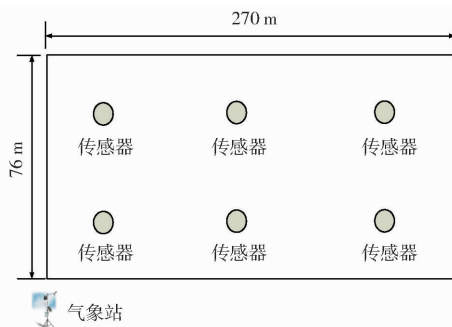


图 2 传感器布设图

Fig. 2 Sensor layout diagram

2 水产养殖水温关键影响因子筛选

水温预测需输入多种生态环境因子,而采集到的数据具有多重共线性,所以本文采用主成分分析法^[16]对采集到的生态环境数据进行处理,从而提取影响养殖池塘水温的关键因子。主要步骤为:

(1) 对高塍镇池塘养殖环境的原始数据 x 进行数据预处理^[17],包含对丢失数据的修复、异常值的剔除以及数据的归一化处理。

(2) 根据标准化后的池塘养殖气象数据指标计

表1 实验基地部分原始数据

Tab.1 Part of experimental original data

采集时间	降水量/mm	风速/ (m·s ⁻¹)	风向/(°)	太阳辐射/ (W·m ²)	空气温度/ ℃	空气相对 湿度/%	大气压强/ hPa	水温/ ℃
2014-9-12 0:20	0	2.525 776	101.053 7	6.135 247	24.337 5	78.435 09	113.049 7	25.01
2014-9-12 0:30	0	1.385 824	75.406 65	6.204 998	24.225 0	80.147 61	113.049 7	24.99
2014-9-12 0:40	0	1.765 808	68.995 52	6.149 196	24.077 5	80.444 35	113.048 3	24.98
2014-9-12 0:50	0	1.989 328	78.067 15	6.163 146	23.965 0	81.563 03	113.026 6	24.98
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2014-9-14 20:00	0.2	1.944 624	80.675 56	6.204 996	23.797 5	76.821 26	113.009 1	24.88
2014-9-14 20:10	0	2.302 256	82.256 77	6.163 146	23.810 0	76.839 29	113.009 1	24.88
2014-9-14 20:20	0.4	1.855 216	78.482 52	6.149 196	23.757 5	78.913 10	112.995 5	24.85
2014-9-14 20:30	0	1.318 768	86.996 86	6.163 147	23.712 5	80.452 36	112.995 5	24.84
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2014-9-16 23:30	0	1.631 696	80.643 62	6.149 197	23.765 0	80.450 31	113.007 7	24.84
2014-9-16 23:40	0	1.698 752	71.390 46	6.163 146	23.677 5	82.264 31	112.996 9	24.83
2014-9-16 23:50	0	1.832 864	75.662 75	6.135 246	23.675 0	83.187 04	112.998 2	24.81

算相关系数矩阵。相关系数计算式为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (1)$$

式中 r_{ij} ——变量之间的相关系数

\bar{x}_i ——养殖池塘第 i 个环境变量的平均值

\bar{x}_j ——第 j 个环境变量的平均值

(3) 计算相关系数矩阵特征值及相应特征向量。

(4) 贡献率和累计贡献率计算。

(5) 计算主成分载荷矩阵, 筛选温度关键影响因子。

使用 SPSS 统计分析软件对关键影响因子进行筛选, 计算各个主成分的特征值和贡献率, 如表 2 所示。鉴于累计方差贡献率在 80% ~ 85% 之间可以作为提取主成分的原则, 由表 2 可看出, 前 4 个因子的累计方差贡献率已达到了 83.664%, 因此选择前 4 个因子代替原变量。

表2 解释的总方差

Tab.2 Total variance explained

成份	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累计/%	合计	方差/%	累计/%	合计	方差/%	累计/%
空气温度	3.158	39.475	39.475	3.158	39.475	39.475	2.242	28.023	28.023
大气压强	1.649	20.614	60.089	1.649	20.614	60.089	1.769	22.114	50.137
水温	0.977	12.218	72.306	0.977	12.218	72.306	1.671	20.892	71.029
降水量	0.909	11.358	83.664	0.909	11.358	83.664	1.011	12.635	83.664
风速	0.597	7.465	91.130						
风向	0.480	6.003	97.133						
太阳辐射	0.192	2.395	99.528						
空气相对湿度	0.038	0.472	100						

采用方差极大斜交旋转得到各个环境因子对不同主因子的因子载荷, 结果如表 3 所示, 对第 1 因子贡献最大的有空气相对湿度、空气温度、太阳辐射; 第 2 因子贡献较大的是大气压强, 风速和水温对第 3 因子贡献较大, 对第 4 因子贡献较大的是降水量。因此本文选用水温、太阳辐射、空气温度、空气相对湿度、降水量、风速作为主要成分指标, 也与养殖领域专家通过经验选择温度的关键影响因子基本一致, 并选取上述指标作为温度预测模型的输入指标。通过主成分分析法筛选 6 个环境因子作为模型的输入变量, 简化了网络, 提高了网络收敛性。

表3 成分矩阵

Tab.3 Component matrix

因子	主因子 1	主因子 2	主因子 3	主因子 4
降水量	-0.208	0.164	-0.046	0.962
风速	-0.022	0.402	-0.554	-0.074
风向	-0.300	0.703	0.110	-0.098
太阳辐射	0.757	0.242	-0.059	0.095
空气温度	0.821	0.307	0.075	-0.003
空气相对湿度	-0.902	0.023	0.075	-0.082
大气压强	0.206	-0.806	-0.111	0.102
水温	0.101	0.063	0.833	0.045

3 池塘养殖水温短期预测模型构建

3.1 遗传算法

Holland 于 1969 年首次提出遗传算法 (Genetic algorithm, GA)^[18-19], 通过模拟自然界存在的自然选择和变异现象, 基于种群考虑, 执行选择、交叉和变异等操作, 不断地进化, 最终获得最佳群体。遗传算法的基本流程^[20]:

- (1) 均匀地产生 N 个数据, 一个数据代表着 1 个个体, 构成初始群体。
- (2) 选取合适的适应度函数, 计算群体中每个个体的适应度。
- (3) 根据适应度从群体中选择合适个体, 进行交叉和变异操作, 计算所获取的新个体适应。
- (4) 判断是否满足结束条件, 若满足则停止操作, 否则, 重复步骤(3)。

3.2 BP 神经网络

BP 神经网络^[21]通过对原始数据进行训练, 使得训练后的整个网络具有学习能力和预测能力^[22], 具体流程如下:

(1) 初始化网络。首先确定输入、输出和隐含层的节点数, 其中隐含层节点数一般由经验值或通过实验确定。其次确定输入层与隐含层、隐含层与输出层之间的权值, 初始化隐含层阈值 a_j , 输出层阈值 b_k , 给定学习速率和神经元激励函数。

(2) 隐含层输出。已知输入层和隐含层之间变量, 计算隐含层输出变量 H_j 为

$$H_j = f\left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij}x_i - a_j\right) \quad (j = 1, 2, \dots, l) \quad (2)$$

其中 $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ (3)

式中 x ——输入变量

ω_{ij} ——输入层和隐含层之间的连接权值

a_j ——隐含层阈值

l ——隐含层节点数

f ——隐含层激励函数

(3) 输出层输出。通过隐含层和输出层之间的变量计算。

$$O_k = \sum_{j=1}^l H_j \omega_{jk} - b_k \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中 b_k ——隐含层和输出层之间的阈值

O_k ——输出变量 ω_{jk} ——权值

(4) 误差计算。预测误差 e_k 由预测值 O_k 和实际值 Y_k 所确定。

$$e_k = Y_k - O_k \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

(5) 权值更新。根据差值 e_k 重新计算连接权值

ω_{ij} 、 ω_{jk} , 即

$$\omega_{ij} = \omega_{ij} + \eta H_i (1 - H_j) x(i) \sum_{k=1}^m \omega_{jk} e_k \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, l) \quad (6)$$

$$\omega_{jk} = \omega_{jk} + \eta H_j e_k \quad (j = 1, 2, \dots, l; k = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

式中 η ——学习速率

(6) 阈值更新。根据差值 e_k 更新节点阈值 a_j 、 b_k 。

(7) 根据差值 e_k 判断是否达到模型允许范围或者计算次数, 如达到计算结束, 若没有达到, 执行步骤(2)。

3.3 基于 GA - BP 神经网络的池塘养殖水温预测模型

由于传统的 BP 神经网络存在易陷入局部极值、收敛速度慢等缺点^[23], 而遗传算法擅于解决非线性和多维空间寻优问题^[24], 本文将 2 种算法相结合, 提出基于 GA - BP 神经网络的池塘养殖水温预测模型。

遗传算法优化 BP 神经网络 (GA - BP 神经网络) 主要采用 GA 优化 BP 神经网络初始权值和阈值, 通过选择、交叉和变异等操作获取最优的参数, 将获取的参数对 BP 神经网络进行赋值和训练, 最终输出基于 GA - BP 神经网络的预测模型最优解, 其算法流程如图 3 所示。

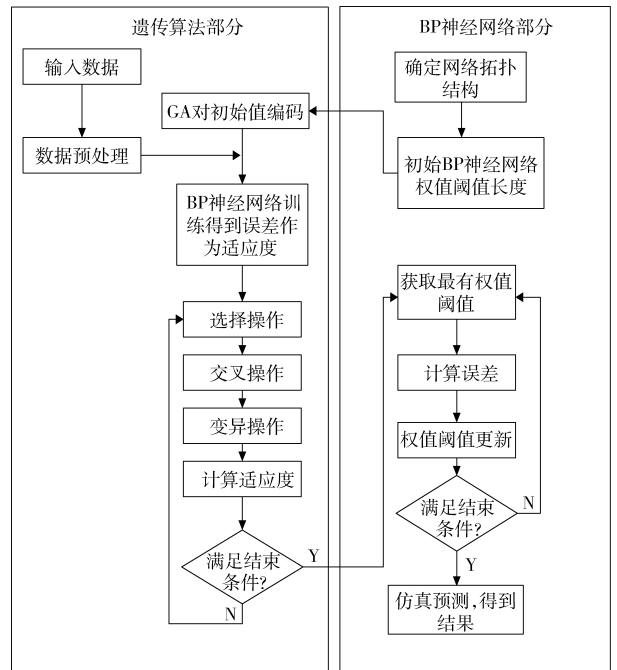


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

将采集到的河蟹养殖池塘水温等环境因子作为原始数据集。通过归一化处理获取基于 GA - BP 神经网络的养殖池塘水温预测模型的样本集, 该预测

模型步骤如下:

(1) 将采集到的池塘环境因子如降水量、水温、风速、空气温度、空气相对湿度、太阳辐射、大气压强数据作为原始数据集。

(2) 采用归一化方法对数据预处理, 利用主成分分析法筛选出水产养殖关键影响因子。选取其中80%的数据作为训练样本集, 剩余的数据作为测试样本集。

(3) 计算种群适应度, 选取最优个体。使用遗传算法进行选择、交叉和变异操作, 获取新个体。

(4) 根据进化条件判断遗传算法是否结束, 若没有达到条件, 返回上一步操作。

(5) 通过获取的最优参数对已确定网络结构的BP神经网络进行赋值和预测, 确定BP神经网络的隐含层节点数为

$$m = \begin{cases} \sqrt{n+l} + \alpha \\ \text{lb}n \\ \sqrt{nl} \end{cases} \quad (8)$$

式中 m ——隐含层节点数

n ——输入层节点数

α ——常数, 取1~10

本次实验隐含层的确定通过式(8)的第3种方法, 最佳层数由第1种方法确定即 $m=5$ 。

(6) 更新权值和阈值, 计算输出值和实际值的误差, 判断误差是否达到允许范围之内或达到计算次数。

(7) 如果达到结束条件, 算法结束, 输出养殖池塘水温预测值。否则返回步骤(6)。

3.4 模型评价指标

为了能够全面准确地评价水温预测模型性能, 本文选用平均绝对误差(MAE)、平均绝对百分误差(MAPE)和均方根误差(MSE)作为评价指标, 各评价指标表达式为

$$M_{AE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (9)$$

$$M_{APE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (10)$$

$$M_{SE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (11)$$

式中 y_i ——真实值 \hat{y}_i ——预测值

N ——测试样本集数量

4 系统实现

采用Java语言开发, SQL Server2000管理数据, 基于WEB的B/S体系架构, 建立了池塘养殖水温预测系统。

图4为溶解氧、水温、盐度和pH值的实时数据采集界面。点击界面上方“曲线分析”, 选择温度通道, 确定起始时间, 分析历史水温曲线如图5所示。图6为水温模型预测界面, 红色方框一栏表示不同时刻的养殖池塘水温预测值。



图4 数据实时监控界面

Fig.4 Data real-time monitoring interface



图5 历史水温曲线界面

Fig.5 Historical water temperature curve interface



图6 水温模型预测界面

Fig.6 Water temperature model predictive interface

5 实验

5.1 实验数据

测试选取的实验数据, 为2014年9月12日—16日的河蟹养殖池塘数据, 包括风量、风向、风速、太阳辐射等。实验输入数据为降水量、风速、太阳辐射、空气湿度、空气温度, 输出数据为水温。

5.2 算法参数设置

在系统中, 将GA算法参数设置为: 种群规模为10, 迭代次数为20, 交叉概率和变异概率分别为0.4和0.2。BP网络的参数设置为: 输入参数为6, 隐含层节点数为5, 输出节点数为1。使用训练集对模型进行优化训练, 测试集对模型进行验证, 选取MAE、MAPE和MSE作为模型性能的评价指标。

5.3 预测结果分析

适应度函数变化如图 7 所示。当迭代次数为 20 时, 平均适应度和最佳适应前期均处于下降趋势, 随着迭代次数的增加逐渐趋于平缓, 后期虽有波动, 但起伏不大, 可以得出迭代次数取 20 是合理的。

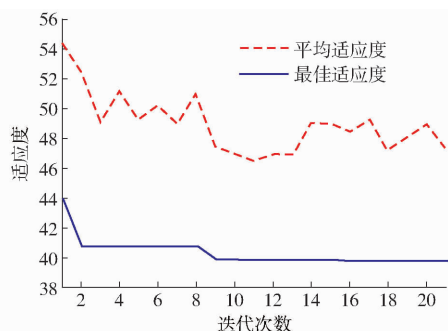


图 7 适应度曲线

Fig. 7 Fitness graphs

图 8 表示单一的 BP 算法和 GA-BP 神经网络算法的预测值与实际值的比较, 可以直观地看出, GA-BP 神经网络算法和单一 BP 算法的水温预测值变化趋势与实际值变化趋势整体上是—致的, 但经 GA 优化的 BP 神经网络预测效果更加明显, 预测结果相比单一 BP 算法更接近实际值, 准确性更高。图 9 为 BP 算法与 GA-BP 神经网络 2 种算法的水温预测结果与实际值的差值比较, 从图 9 可以看出 GA-BP 神经网络的预测曲线被分为两部分, 样本数量为 30 之前即预测前 5 h, 预测结果与实际水温的差值几乎为 0, 可以精确地预测下一时刻温度; 当样本数量超过 30 时, 误差曲线出现波动, 与 BP 神经网络预测误差的变化趋势以及误差基本一致, 预测结果和实际值存在误差, 预测结果不理想。

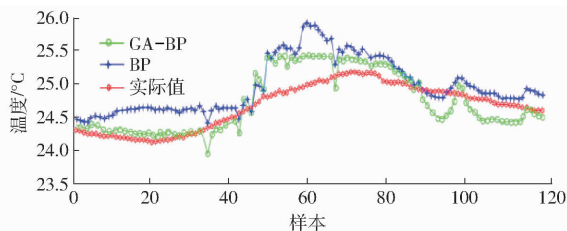


图 8 BP 与 GA-BP 结果比较

Fig. 8 Results comparison of BP and GA-BP

由于模型的训练样本有限, 网络结构相对简单, 当样本数小于 30 时, 提出的模型能够很好地拟合这些数据, 预测结果接近真实值。当样本数超过 30 时, 模型出现过拟合现象, 导致预测值和实际值出现

误差。所以提出的模型适应于短期的水温预测。

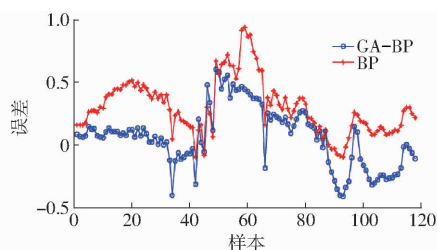


图 9 BP 与 GA-BP 误差比较

Fig. 9 Error comparison of BP and GA-BP

由表 4 可知, 遗传优化 BP 算法比单一 BP 算法在预测精度上有明显的提高, 普通 BP 准确率为 98.75%, 而遗传优化后的 BP 准确率达到 99.21%。GA-BP 模型的 MAE、MAPE 和 MSE 分别为 0.196 8、0.007 9 和 0.059 2, 与传统的 BP 神经网络相比, MAE、MAPE 和 MSE 分别提高了 36.2%、36.8% 和 57.2%。由此可见, 预测前 5 h, GA-BP 算法预测精度比 BP 神经网络预测精度高, 预测值与实际值误差基本为零, 能够很好地预测养殖池塘温度, 随着时间的增加, 从预测结果比较可以看出, 预测值与实际值均出现较大波动的现象, 预测结果和实际值存在一定的误差, 预测结果不理想。

表 4 BP 与 GA-BP 算法评价指标

Tab. 4 Evaluation index of BP and GA-BP

算法	MAE	MAPE	MSE
BP	0.308 9	0.012 5	0.138 6
GA-BP	0.196 8	0.007 9	0.059 2

6 结束语

针对传统水温预测方法存在预测精度低、鲁棒性差等问题, 提出了基于 GA-BP 神经网络的池塘养殖水温短期预测模型, 通过 GA 优化 BP 网络, 得到最优权值和阈值, 解决了 BP 神经网络易陷入局部极值问题, 提高了模型的收敛速度和预测精度。并设计了养殖池塘水温预测系统, 实现了池塘水温的在线预测功能。结果表明, 本文方法在短期水温预测方面具有很好的预测性能和泛化能力。基于 GA-BP 神经网络的池塘养殖水温预测模型提高了预测精度, 水温预测系统可提前 5 h 准确预测水温的变化, 基本满足实际生产需要, 具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- 1 杜永贵. 基于机器学习的跨平台水产精准养殖管理系统设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
DU Yonggui. Design of cross platform aquaculture management system based on machine learning[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- 2 ALI S, MISHRA P K, ISLAM A, et al. Simulation of water temperature in a small pond using parametric statistical models: implications of climate warming[J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 142(3): 040150853.

- 3 HUESEMANN M, CROWE B, WALLER P, et al. A validated model to predict microalgae growth in outdoor pond cultures subjected to fluctuating light intensities and water temperatures[J]. *Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts*, 2016,13: 195 – 206.
- 4 倪玉红, 孙擎, 王学林, 等. 盱眙龙虾池塘夏季水温与溶解氧变化特征及预报模型研究[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(32):33 – 39.
NI Yuhong, SUN Qing, WANG Xuelin, et al. Changing characteristics and prediction model of water temperature and dissolved oxygen in xuyi lobster pond in summer[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(32):33 – 39. (in Chinese)
- 5 张玉超, 钱新, 钱瑜, 等. 太湖水温分层现象的监测与分析[J]. *环境科学与管理*, 2008, 33(6):117 – 121
ZHANG Yuchao, QIAN Xin, QIAN Yu, et al. Field measurement and analysis on diurnal stratification in taihu lake [J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(6):117 – 121. (in Chinese)
- 6 陈永灿, 张宝旭, 李玉梁. 密云水库垂向水温预测模型研究[J]. *水利学报*, 1998, 29(9):14 – 20.
CHEN Yongcan, ZHANG Baoxu, LI Yuliang. Study on model for vertical distribution of water temperature in Miyun Reservoir[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 29(9):14 – 20. (in Chinese)
- 7 徐龙琴, 张军, 李乾川, 等. 基于 EMD 和 ELM 的工厂化育苗水温组合预测模型[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 265 – 271. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160435&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.035.
- 8 XU Longqin, ZHANG Jun, LI Qianchuan, et al. Combined prediction model of water temperature in industrialized cultivation based on empirical mode decomposition and extreme learning machine[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4):265 – 271. (in Chinese)
- 9 GELEGENIS J, DALABAKIS P, ILIAS A. Heating of a fish wintering pond using low-temperature geothermal fluids, Porto Lagos, Greece[J]. *Geothermics*, 2006, 35(1): 87 – 103.
- 10 张德林, 李军, 薛正平, 等. 设施鱼塘冬春季水温日变化特点及其外界气温的统计模式[J]. *上海农业学报*, 2010, 26(1): 60 – 64.
- 11 ZHANG Delin, LI Jun, XUE Zhengping, et al. Characteristics of daily temperature change in protected fish pond in winter and spring and its statistical models with environmental air temperature[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2010, 26(1): 60 – 64. (in Chinese)
- 12 杜尧东, 刘锦鑫, 何健, 等. 广东地区冬季鱼塘水温特征及其预测预报[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(4):52 – 56.
DU Yaodong, LIU Jinluan, HE Jian, et al. Characteristics of water temperature of fishing pond and its forecast in winter in Guangzhou area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4):52 – 56. (in Chinese)
- 13 王丹枫. 现代信息技术推进我国农业现代化研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2015.
WEN Danfeng. The modern information technology to promote the status and countermeasures of agricultural modernization in China[D]. Wuhan:Central China Normal University, 2015. (in Chinese)
- 14 宋益春. 智能算法在水产养殖水质预测中的应用研究[D]. 无锡:江南大学, 2015.
SONG Yichun. Application research of intelligent algorithm in the prediction of water quality in aquaculture[D]. Wuxi:Jiangnan University, 2005. (in Chinese)
- 15 SUN M, CHEN J, LI D. Water temperature prediction in sea cucumber aquaculture ponds by RBF neural network model[J]. *IFIP Advances in Information & Communication Technology*, 2013, 392:425 – 436.
- 16 徐大明, 周超, 孙传恒, 等. 基于粒子群优化 BP 神经网络的水产养殖水温及 pH 预测模型[J]. *渔业现代化*, 2016, 43(1):24 – 29.
XU Daming, ZHOU Chao, SUN Chuanheng, et al. Prediction model of aquaculture water temperature and pH based on BP neural network optimized by particle swarm algorithm[J]. *Fisher Modernization*, 2016, 43(1):24 – 29. (in Chinese)
- 17 岑伯明, 陈汉春, 郑晓静, 等. 淡水养殖池塘水温预测预报模型的应用与检验[J]. *浙江海洋学院学报:自然科学版*, 2013(6):561 – 563.
CEN Boming, CHEN Hanchun, ZHENG Xiaojing, et al. The application and inspection of prediction model for water temperature in freshwater aquaculture pond[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University:Natural Science*, 2013(6):561 – 563. (in Chinese)
- 18 梁娜. 基于神经网络与主成分分析的组预测研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
LIANG Na. The study of combinational forecasting based on network and principal component analysis[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 19 刘双印, 徐龙琴, 李振波, 等. 基于 PCA – MCAFA – LSSVM 的养殖水质 pH 值预测模型[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(5):239 – 246. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140537&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.037.
- 20 LIU Shuangyin, XU Longqin, LI Zhenbo, et al. Forecasting model for ph value of aquaculture water quality based on PCA – MCAFA – LSSVM[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5):239 – 246. (in Chinese)
- 21 GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search optimization and machine learning[M]. Boston:Addison-Wesley Longnan Press, 1989.
- 22 WU L, REN H, BI W. Review of the genetic algorithm for nonlinear equations[J]. *Electronic Science and Technology*, 2014, 27(4):173 – 178.
- 23 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2008(10):2911 – 2916.
GE Jike, QIU Yuhui, WU Chunming, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. *Application Research of Computers*, 2008(10):2911 – 2916. (in Chinese)
- 24 隋惠惠. 基于 BP 神经网络的短期电力负荷预测的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
SUI Huihui. Research on short-term electric load forecasting based on BP neural network[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- 25 CHEN Y, XU J, YU H, et al. Three-dimensional short-term prediction model of dissolved oxygen content based on PSO-BPANN algorithm coupled with Kriging interpolation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016(2016):Article ID 6564202.
- 26 田凯, 孙永泰, 高慧, 等. 贝叶斯算法 BP 神经网络缺陷量化研究[J]. *中国测试*, 2014, 40(3):93 – 97.
TIAN Kai, SUN Yongtai, GAO Hui, et al. Quantification of slowly varying defect using BP neural network based on Bayesian algorithm[J]. *China Measurement & Test*, 2014, 40(3):93 – 97. (in Chinese)
- 27 马晓敏, 王新. 基于遗传算法的 BP 神经网络改进[J]. *云南大学学报:自然科学版*, 2013, 35(增刊 2):34 – 38.
MA Xiaomin, WANG Xin. An improved BP neural network algorithm based on genetic algorithm[J]. *Journal of Yunnan University:Natural Science Edition*, 2013, 35(Supp. 2):34 – 38. (in Chinese)