

6-1-2020

Modeling and Simulation of Mooring Force Prediction Based on Improved GA-BP Network

Shifeng Li

1. Mechanical Engineering Inst, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;;

Zhanzhi Qiu

1. Mechanical Engineering Inst, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;;2. Software Technology Inst, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Mooring Force Prediction Based on Improved GA-BP Network

Abstract

Abstract: According to the mooring security and early warning control requirement of the large open sea terminal, *a ship mooring force prediction model based on genetic algorithm and BP network was studied.* Environmental dynamic factors were considered and *a model structure was determined by a weight statistics method; the learning method was improved by individual parent information and contemporary individual local gradient information;* according to the improved model, *a ship mooring force prediction method of the open sea terminal was proposed.* The simulation results show that the performance of the prediction model has improved in the iteration number, the largest fitness and prediction accuracy. The average error is less than 10% which satisfies the actual demand well.

Keywords

mooring force prediction, BP network, genetic algorithm, modeling and simulation

Recommended Citation

Li Shifeng, Qiu Zhanzhi. Modeling and Simulation of Mooring Force Prediction Based on Improved GA-BP Network[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(7): 1457-1463.

基于改进 GA-BP 网络的系泊缆力预测建模与仿真

李世峰¹, 邱占芝^{1,2}

(1. 大连交通大学机械工程学院, 大连 116028; 2. 大连交通大学软件学院, 大连 116028)

摘要: 针对大型开敞式码头系靠泊安全保障和预警控制需求, 研究了一类基于遗传算法和 BP 网络的系泊船舶缆力预测模型。考虑影响系泊缆力的环境动力因素, 使用权值统计法确定了预测模型的结构; 利用个体父代信息和当代个体的局部梯度信息对预测模型的学习方法进行了改进; 基于改进的预测模型, 提出了大型开敞式码头系泊船舶缆力预测方法。仿真结果表明: 改进后的系泊船舶缆力预测模型在进化代数、最大适应度和预测精度等方面的性能均有所提高, 且预测误差均值低于 10%, 满足实际需求。

关键词: 系泊缆力预测; BP 网络; 遗传算法; 建模与仿真

中图分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 07-1457-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201707009

Modeling and Simulation of Mooring Force Prediction Based on Improved GA-BP Network

Li Shifeng¹, Qiu Zhanzhi^{1,2}

(1. Mechanical Engineering Inst, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. Software Technology Inst, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: According to the mooring security and early warning control requirement of the large open sea terminal, a ship mooring force prediction model based on genetic algorithm and BP network was studied. Environmental dynamic factors were considered and a model structure was determined by a weight statistics method; the learning method was improved by individual parent information and contemporary individual local gradient information; according to the improved model, a ship mooring force prediction method of the open sea terminal was proposed. The simulation results show that the performance of the prediction model has improved in the iteration number, the largest fitness and prediction accuracy. The average error is less than 10% which satisfies the actual demand well.

Keywords: mooring force prediction; BP network; genetic algorithm; modeling and simulation

引言

随着国民经济的快速发展, 海岸线资源逐渐枯竭, 大型泊位越来越多的建设在外海开敞水域。由于外海开敞式码头气象环境较为恶劣, 且无防波堤

掩护, 系泊缆力值受风、浪、流等因素影响较大, 这就对码头和船舶的安全提出了考验。因此在整个系泊过程中都需要对缆力值进行监测和预测, 以便及时发现问题并对其进行分析处理。

近年来, 针对系泊力的研究取得较大进展。文献[1]使用带约束的差值模型对浮动式储油罐的系泊力进行了预测, 并使用预测结果与物理模型的测试结果进行了对比; 文献[2]提出大型无动力船舶防台浮筒的系泊力计算模型, 并使用模型计算结果与实测数据进行了对比; 文献[3]以海洋中的浮式



收稿日期: 2015-09-06 修回日期: 2015-12-01;
基金项目: 国家自然科学基金(61074029), 大连市计划(2014A11GX006);
作者简介: 李世峰(1987-), 男, 河北唐山, 博士生, 研究方向为智能算法及其应用; 邱占芝(1960-), 女, 辽宁朝阳, 博士, 教授, 博导, 研究方向为网络控制与智能系统。

<http://www.china-simulation.com>

• 1457 •

储油卸油装置的软刚臂为研究对象,对其系泊力的测量方法进行了讨论,并对测量的精度及准确性进行了分析;文献[4]基于波浪作用下船舶系缆力的实验资料,提出了船舶的缆力计算公式,并使用物理模型的测试结果与公式计算结果进行了对比;文献[5]使用准静态方法对多种系泊方式下的缆绳系泊力进行了研究;文献[6]通过研究系泊船舶缆力随波高、周期、波浪入射角度等要素变化的规律,得出了系泊船舶缆力计算的经验公式;文献[7]基于 Hydro-star 软件和 Ariane 软件在风、浪、流作用下对开敞式码头中的系泊系统进行模拟,求得开敞式码头系泊系统在多种工况下的系缆力;文献[8]对海洋中水下网箱的系泊力进行了研究,并根据对模型的研究提出了系泊力计算的经验公式;文献[9]以某海域油田工程为例,对两点系泊系统的缆绳系泊力和缆绳长度进行了研究,并进行了优化设计。由于影响系泊力的因素较多,上述研究均设置了较多的前提条件,且目前针对系泊船舶缆力值进行预测的研究鲜见报道。

BP 神经网络具有较好的非线性映射能力^[10],使得这类复杂问题在摆脱假设、简化、工程类比和经验系数的情况下也能够得到较合理的解答。但典型的 BP 网络容易收敛到局部最小值^[11],需要反复进行测试。遗传算法(Genetic Algorithm, GA)具有简单通用和全局搜索等优点,融合了二者优点的 GA-BP 网络非常适合于建立预测模型。但典型 GA 仍在一定程度上存在过早收敛等问题,为了有效发挥 GA 的优势,对算法进行了适度改进。在大型开敞式码头环境中,由于影响系泊船舶缆力的因素较多,而且这些因素之间的内在联系以及影响很难用数学方法来描述。因此,本文使用改进的 GA-BP 网络建立了预测模型,进而提出了系泊船舶缆力的预测方法。

1 系泊缆力预测模型

1.1 缆力影响因素分析

在大型开敞式码头环境下,影响系泊船舶缆力的因素可分为 3 类:

- (1) 船舶因素。包括船舶吨级、船舶载量等。
- (2) 缆绳因素。包括缆绳布置方式、缆绳数量等。
- (3) 海洋环境动力因素。包括波浪高度、风速等。

在上述船舶因素和缆绳因素所包含的属性中,多数属性需要人工设置,即每个模型的训练数据是在船舶型号、布缆方式等属性一定的情况下产生的,同时采用船舶吃水来表征船舶的重量变化,而对于环境动力因素,使用算法对其进行了筛选。

在开敞式码头环境下,可能与缆力预测相关的动力因素包括:风向、风力、浪高、潮位、流向、流速、水温、气温、湿度及其各自的变化量共 18 个属性。鉴于每个属性对于输出的影响程度不同,为了简化算法,使用 BP 网络对其进行筛选^[12]。依据平均影响值的大小以及高度相关变量二选其一原则,最终选用风向、风力、浪高、潮位、流向和流速 6 个属性再加上船舶吃水共 7 个属性作为神经网络输入,对 12 条缆绳的缆力值进行预测。

即便在上述因素确定的情况下,由于多种因素的影响,缆力值也会在一定范围内变化。而本算法应用的目标是为码头系泊船舶提供预报和预警,因此选用每根缆绳在整点时刻及后 15 s 内出现的最大缆力值作为网络输出。

1.2 预测模型确定

典型的 BP 网络是 3 层前馈网络,即包含输入层、隐含层和输出层^[13]。BP 网络工作过程由正向传播和反向传播两部分组成,在正向传播过程中,输入信息由输入层经隐含层逐层处理,传向输出层,如果在输出层不能得到期望的输出,则转入反传过程,误差信号沿原来的连接通路返回,逐层修正权值,使误差信号最小^[14]。

已经证明:具有偏差和至少一个 S 型隐含层加上一个线性输出层的网络,能够逼近任何有理函数。因此,系泊船舶缆力预测模型采用单隐含层结构。

BP 网络隐节点数量合适与否,直接影响着 BP 网络的工作性能,然而如何确定隐含层节点数目前尚无理论上的指导^[15],一般是依靠经验公式法和

反复测试法确定。具体流程为先通过经验公式计算出隐含层节点数的上限和下限, 常见的经验公式有:

$$l < n - 1 \tag{1}$$

$$l < \sqrt{(m + n)} + a \tag{2}$$

$$l = \log_2 n \tag{3}$$

式中: l 为隐含层节点数; n 为输入层节点数; m 为输出层节点数; a 为 0~10 之间的常数。

通过反复测试的方法对范围内的隐含层节点数进行逐个测试。

标准的反复测试法使用 10 次 10 折交叉验证, 消耗大量时间。作者在针对多个小样本数据集的测试中发现, 多数 BP 网络的权值会随着隐含层节点数的增加而减小, 且隐含层节点数在达最优时绝大多数的权值都集中在一个较小的范围内(见表 1)。

表 1 部分小型数据集权值信息统计

Tab. 1 The weight information statistics of some small datasets

隐节点数	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
鸢尾花/%	86	84	84	87	88	92	95	90	95	93
红酒/%	77	78	81	83	78	85	72	81	74	79
Internet 时延/%	71	55	85	82	77	87	78	89	97	95
系泊船舶缆力/%	71	74	75	73	74	75	76	79	81	81

表 1 中的数据为 10 次随机抽样放回试验下在 [-3, 3] 内权值数量占权值总数的百分比。

在对不同数据集进行研究的基础上, 设计了一种针对小样本数据集的 BP 网络隐含层节点数求取方法。该方法从隐节点数为 2 时开始逐个测试隐含层节点数, 采用 10 次随机抽样放回取累计值的方式, 当连续两个隐含层节点在 [-3, 3] 内的权值数量占权值总数的比例的均值超过 80% 时, 算法停止。认为这时的隐含层节点数为最佳隐含层节点数, 且求得的隐含层节点数满足公式(4)。

$$l_{\max} < 4\sqrt{(m + n)} \tag{4}$$

式中: l_{\max} 为隐含层节点数最大值; n 为输入层节点数; m 为输出层节点数。

该算法不依赖于正确率或误差, 受到特殊样本的干扰较小, 因此没有采用 10 次 10 折交叉验证, 而是采用 10 次随机抽样放回的方式, 从而大大的

节省了时间。典型方法与权值统计法的实验结果对比见表 2。

表 2 权值统计法与典型方法对比

Tab. 2 The comparison of weight statistics algorithm and traditional method

数据集	任务	隐节点数	求取时间/s	分类正确率/%	预测误差百分比/%
鸢尾花	分类	7/6	323/24	94.5/95.0	—
红酒	分类	10/8	438/32	96.0/94.0	—
Internet 时延	预测	6/8	565/34	—	22.3/22.7
系泊船舶缆力	预测	14/15	1 314/295	—	11.4/11.2

其中, “/”前为经验公式法加反复测试法的实验结果, “/”后为权值统计法的实验结果。

由表 2 可知, 权值统计法与典型方法求得的结果有一定差别, 但测试精度相差不大, 且权值统计法在运算时间上具有绝对优势。

在系泊船舶缆力预测模型中, 求得的网络结构为 7-15-12。

2 系泊船舶缆力预测方法

2.1 一种基于梯度加权的 GA

众所周知, GA 擅长解决全局最优问题, 但是在高维情况下, 仍然在一定程度上存在局部最优问题, 这也是 GA 最难处理的关键问题。在全局寻优过程中, 引入梯度信息用以防止局部最优现象是合理的。而且 BP 网络激发函数全局可导, 特别适合融入梯度信息。

本改进方案主要针对寻优前期, 用于在防止算法陷入局部最优的同时提高运行效率。

在 GA 的选择操作前, 使用个体父代信息和当代个体的局部梯度信息对适应度进行了加权, 再使用加权后的适应度来进行选择操作, 加权公式为:

$$fit' = fit \times \left(1 + w_1 \left| \frac{fa - fa_{\min}}{fa_{\max} - fa_{\min}} \right| + w_2 \left| \frac{\nabla f - \nabla f_{\min}}{\nabla f_{\max} - \nabla f_{\min}} \right| \right) \tag{5}$$

式中： fit' 为经加权后的适应度(注：该适应度仅用于选择操作)； fit 为原适应度； w_1, w_2 为加权系数，在本案例中， w_1 选为 0.3， w_2 选为 0.6， fa 为代差，即当代个体适应度与其对应的父代个体适应度的差值； fa_{max}, fa_{min} 为 fa 的最大值、最小值； ∇f 为局部梯度； $\nabla f_{max}, \nabla f_{min}$ 为 ∇f 的最大值、最小值。

$$fa = fit - fatherfit \quad (6)$$

式中： $fatherfit$ 为与 fit 对应的父代个体的适应度。

$$\nabla f = d_1 + d_2 \quad (7)$$

$$d_1 = \text{sum}(\mathbf{E}) / n_1 \quad (8)$$

$$d_2 = \text{sum}[\mathbf{H}(\mathbf{I} - \mathbf{H})\mathbf{W}\mathbf{E}] / n_2 \quad (9)$$

式中： d_1 为 BP 网络隐含层到输出层的局部梯度平均值； d_2 为输入层到隐含层的局部梯度平均值； sum 为对矩阵中所有元素进行累加求和； \mathbf{E} 为网络输出的误差矩阵； n_1 和 n_2 为矩阵中元素个数； \mathbf{H} 为隐含层输出矩阵； \mathbf{I} 为单位矩阵； \mathbf{W} 为隐含层到输出层的权值矩阵。

2.2 基于改进 GA 的混合学习方法

本文使用改进后的 GA 和 LM (Levenberg-Marquardt) 算法代替梯度下降法对 BP 网络的权值和阈值进行了优化，算法流程如图 1 所示。

数据归一化是数据处理的一项基础工作。不同评价指标往往具有不同的量纲，这会影响数据分析的结果，为了消除指标之间的量纲影响，在使用 BP 网络前需要对数据进行归一化处理，使数据落入一个较小的特定区间，便于不同量纲的属性能够进行比较和加权。本文采用 Min-max 方法对数据进行归一化，计算公式为：

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (10)$$

式中： x 为原始个体； x' 是归一化后的个体； x_{\max}, x_{\min} 分别为 x 的最大值、最小值。

本文选用实数编码方案，主要考虑实数编码方案较二进制编码方案具有更高的精度，其次实数编码方案避免了编码、解码的过程，使算法更加简洁。选择方案为轮盘赌法。交叉方案为实数交叉方案，其公式为：

$$\begin{cases} x'_1 = ax_1 + (1-a)x_2 \\ x'_2 = ax_2 + (1-a)x_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中： x_1, x_2 为原始个体； x'_1, x'_2 为交叉运算后的新个体； a 为[0, 1]间的随机数。

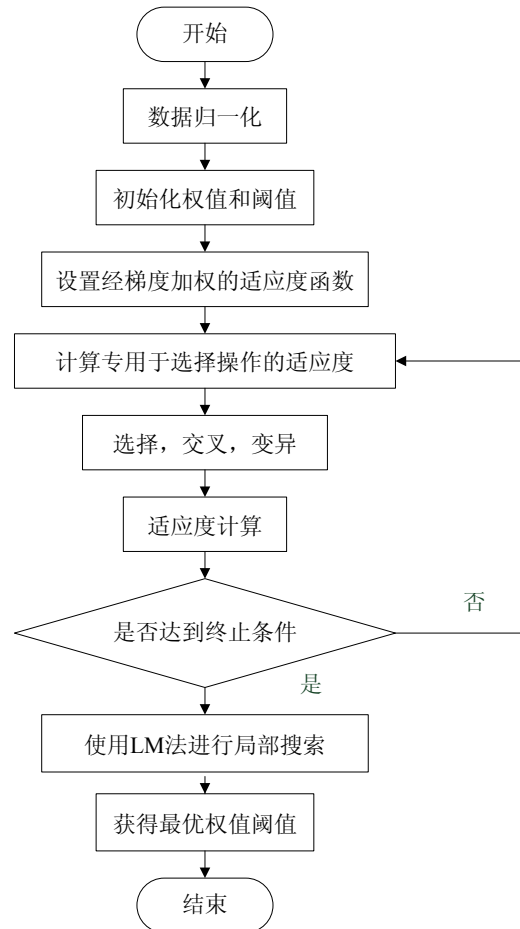


图 1 算法流程图

Fig. 1 The algorithm flowchart

变异在 GA 中的主要作用为保存种群多样性和防止出现局部最优现象。本文使用改进后的非均匀变异^[16]方案，其公式为

$$\begin{cases} x' = x + \frac{2}{3}|x_{\max} - x|(1 - \frac{g}{g_{\max}})^3 & r \geq xx \\ x' = x - \frac{2}{3}|x - x_{\min}|(1 - \frac{g}{g_{\max}})^3 & r < xx \end{cases} \quad (12)$$

式中： x' 为变异后的个体； x 为变异前的个体； r 为[0, 1]之间的随机数； x_{\max}, x_{\min} 分别为个体的上界、下界； g 为当前迭代次数； g_{\max} 为最大迭代次数； xx 为经 Min-max 方法归一化后的 x 。

2.3 预测方法的实现

系泊船舶缆力预测流程如图 2 所示。

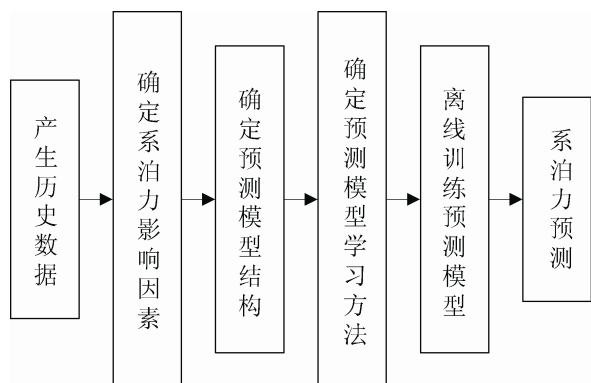


图 2 系泊船舶缆力预测流程图

Fig. 2 The flowchart of mooring force prediction

具体流程如下:

(1) 产生历史数据。在每天的整点时刻对风向、风力、浪高、潮位、流向、流速、水温、气温、湿度及缆力数据进行采集。

(2) 对系泊船舶缆力的影响因素进行分析, 对预测模型的输入属性进行筛选。

(3) 系泊船舶缆力预测模型采用了单隐含层结构, 隐含层节点数由权值统计法求得。隐含层节点的激活函数为双曲正切函数, 输出层为线性激活函数。

(4) 系泊船舶缆力预测模型的学习方法为基于改进 GA 和 LM 算法的混合学习方法。该改进算法的基本思想来源于过程控制中的 PID 控制。P, I, D 分别对应比例、积分、微分, 即控制现在的误差、平衡过去的误差、预调将来的误差, 公式(5) 括号中的三个算子分别表征了当前样本适应度、针对其父代样本变化的加权系数和针对其将来变化趋势的加权系数。

(5) 使用样本输出实际值和预测值之差的绝对值倒数的累计值作为混合算法的适应度对预测模型进行离线训练。GA 中的初始个体即为 BP 网络的权值和阈值。

(6) 使用训练好的预测模型对系泊船舶缆力值进行预测。

3 缆力预测及仿真

使用大型开敞式码头船舶系靠泊安全保障和预警系统产生的数据作为训练数据(共 409 组), 来预测未来一天内整点时刻(共 24 组)的系泊船舶缆力的最大值, 进而为工作人员提供与预报、预警相关的参考信息。其中, 船舶类型为 20 万吨级油轮, 当天的环境动力信息(输入信息)为已知, 来源于该系统的预测计算模块, 而船舶吃水使用了训练数据中同一时刻出现最多次数数字进行了近似替代。

同时采用典型 BP 网络、典型 GA-BP 网络和改进后的 GA-BP 网络对系泊船舶缆力进行了预测。3 种算法的参数设置一致: 网络结构为 7-15-12, 初始种群数为 40, 上限进化次数为 20, 交叉概率为 0.4, 变异概率为 0.1, 学习率为 0.1, 上限迭代次数为 50。在 GA 结束后选取整个进化过程中出现的最大适应度个体作为最优个体, 再使用 LM 算法对其进行局部搜索。

典型 GA 与改进后的 GA matlab 进化图如图 3 所示。

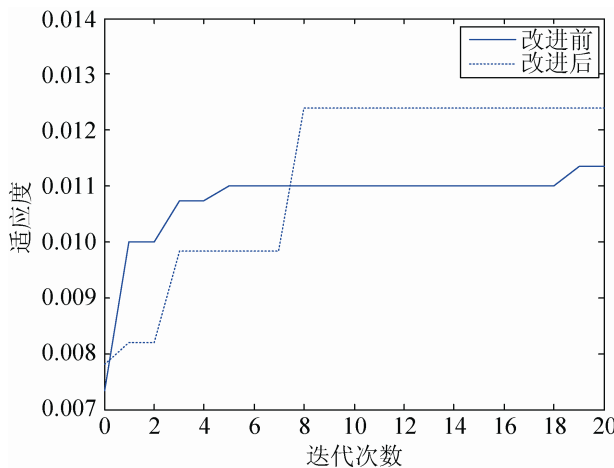


图 3 两种 GA 的进化曲线对比

Fig. 3 The comparison of evolutionary curves of genetic algorithms

由图 3 可以看出, 典型 GA 在第 19 次迭代中适应度达到了最大值, 改进后的 GA 为 8 次, 而且搜寻到的最优个体适应度要高于前者。

不同模型所获得的首缆 1 号缆绳缆力预测值

及实际值对比如图 4 所示。

为了验证预测模型的泛化能力,在网络训练完成后,选用多组(共 120 组)不同的预测输入信息作为网络输入,进行预测。求得预测结果后与实际值进行对比,如表 3 所示。

由表 3 可知,改进后的 GA-BP 网络预测误差低于 10%,满足实际需求。

由图 3~4、表 3 可以看出,改进后 GA-BP 网络较典型算法所需的进化代数更少,适应度更高且预测误差更小。

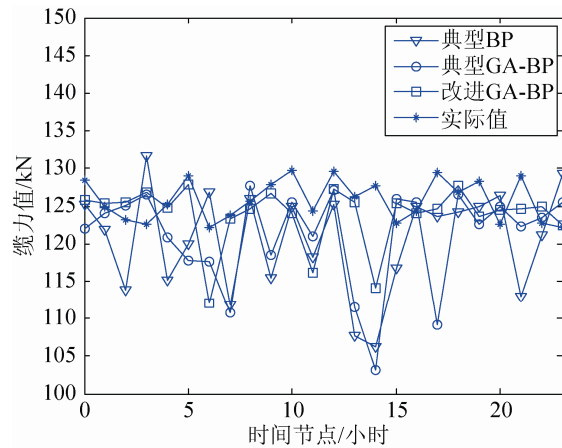


图 4 首缆 1 号缆绳缆力预测值与实际值对比
Fig. 4 The comparison of the predicted and actual mooring force of No.1 cable

表 3 不同模型的误差对比

Tab. 3 The errors comparison of different Models

缆绳编号	典型 BP 误差均值(kN)	典型 BP 误差百分比/%	典型 GA-BP 误差均值/kN	典型 GA-BP 误差百分比	改进 GA-BP 误差均值/kN	改进 GA-BP 误差百分比/%
1	9.44	10.30	7.93	8.65%	6.52	7.11
2	9.71	10.80	7.47	8.31%	6.40	7.12
3	32.77	12.17	27.63	10.26%	23.05	8.56
4	33.20	12.09	31.11	11.33%	23.09	8.41
5	21.87	10.07	20.61	9.49%	18.80	8.66
6	20.73	9.62	21.01	9.75%	16.89	7.84
7	28.94	11.44	24.99	9.88%	21.05	8.32
8	33.29	13.06	24.12	9.46%	24.24	9.51
9	40.13	11.32	36.09	10.18%	27.97	7.89
10	37.48	10.31	35.81	9.85%	27.81	7.65
11	17.31	11.25	14.71	9.56%	11.43	7.43
12	18.25	11.81	14.11	9.13%	12.13	7.85

4 结论

本文对在开敞式码头中与系泊船舶缆力相关的因素进行了分析,确定了输入、输出属性,使用权值统计法求取了隐含层节点数进而确定了预测模型的结构。对典型的系泊缆力预测模型进行了研究和改进。改进后的算法较典型算法在进化代数、最大适应度和预测精度方面的性能有所提高。使用改进后的系泊船舶缆力预测模型进行了预测,预测精度满足实际需求。

参考文献:

[1] Chu X J, Dong S, Zhao X Z. Prediction of the Mooring

Force of a 2-D Floating Oil Storage Tank [J]. Oceanic and Coastal Sea Research (S1672-5182), 2014, 13(6): 901-910.

[2] 包雄关, 李松. 大型无动力船舶防台浮筒系泊力数学模型研究 [J]. 船舶工程, 2014, 36(2): 37-40. ((Bao Xionguan, Li Song. Research on Anti-typhoon Buoy Mooring Force Mathematical Modeling of Large Non-powered Ships [J]. Ship Engineering, 2014, 36(2): 37-40.)

[3] 樊哲良, 岳前进, 武文华, 等. 软刚臂系泊系统水平系泊力原型测量方法 [J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(4): 475-481. ((Fan Zheliang, Yue Qianjin, Wu Wenhua, et al. Prototype Measurement Methods for Horizontal Mooring Force of Soft Yoke Mooring System [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(4): 475-481.)

[4] 孟祥玮, 高学平, 张文忠, 等. 波浪作用下船舶系缆力

- 的计算方法 [J]. 天津大学学报, 2011, 44(7): 593-596. (Meng Xiangwei, Gao Xueping, Zhang Wenzhong, et al. A Calculation Method of Mooring Force Induced by Waves [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(7): 593-596.)
- [5] Ahmed M O, Yenduri A, Kurian V J. Investigation on the Dynamic Responses of a Truss Spar Platform for Different Mooring Line Groups [J]. Journal of Marine Science & Application (S1671-9433), 2015, 14: 189-195.
- [6] 刘必劲, 张亦飞, 徐伟. 波浪作用下大型开敞式码头系泊船舶系缆力研究 [J]. 中国水运, 2010, 10(11): 5-7. (Liu Bijin, Zhang Yifei, Xu Wei. Study on Mooring Force in Large Open Terminal under Wave [J]. China Water Transport, 2010, 10(11): 5-7.)
- [7] 王翔, 孙克俐, 王东凯. 开敞式码头船舶系缆力数值分析 [J]. 港工技术, 2012, 49(4): 16-18. (Wang Xiang, Sun Keli, Wang Dongkai. Numerical Analysis of Ship Mooring Force for Open Terminal [J]. Port Engineering Technology, 2012, 49(4): 16-18.)
- [8] Ito S, Kinoshia T, Bao W G. Hydrodynamic behaviors of an elastic net structure [J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2014, 92: 188-197.
- [9] 梅华东, 尹汉军, 蔡元浪, 等. 两点系泊系统系泊力影响因素分析 [J]. 中国海上油气, 2011, 23(6): 411-414. (Meng Huadong, Yin Hanjun, Cai Yuanlang, et al. Analysis on Affecting Factors to Mooring Force of Two Points Mooring System [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(6): 411-414.)
- [10] 刘凤华, 谢乃明. 小样本、贫信息下民用飞机费用估算模型及算法 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(3): 687-691. (Liu Fenghua, Xie Naiming. Civilian Aircraft Cost Estimation Model and Algorithm Based on Small Sample and Poor Information [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(3): 687-691.)
- [11] 任伟建, 陶琳. 基于粒子群算法的抽油机故障诊断研究 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(2): 482-487. ((Ren Weijian, Tao Lin. Research on Pump-jack Fault Diagnosis Method Based on Particle Swarm Optimization [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2012, 24(2): 482-487.)
- [12] 史峰, 王小川, 郁磊, 等. MATLAB 神经网络 30 个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 183-184. (Shi Feng, Wang Xiaochuan, Yu Lei, et al. MATLAB Neural Network 30 Cases Analysis [M]. Beijing, China: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010: 183-184.)
- [13] Duan B F, Li J M, Zhang M. BP neural network model on the forecast for blasting vibrating parameters in the course of hole-by-hole detonation [J]. Journal of Coal Science & Engineering (S1006-9097), 2010, 16(3): 249-255.
- [14] Liu X S, Deng Z, Wang T L. Real estate appraisal system based on GIS and BP neural network [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (S1003-6326), 2011, 21(S3): 626-630.
- [15] Pizzileo B, Li K, Irwin G W, et al. Improved Structure Optimization for Fuzzy-Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems (S1063-6706), 2012, 20(6): 1076-1089.
- [16] Zhao X, Gao X S, Hu Z C. Evolutionary programming based on non-uniform mutation [J]. Applied Mathematics and Computation (S0096-3003), 2007, 192(1): 1-11.

(上接第 1456 页)

- [12] 高俊杰. 混沌时间序列预测研究及应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 15-20. (Gao Junjie. Study and Application of Chaotic Time Series Prediction [D]. Shanghai, China: Shanghai Jiaotong University, 2013: 15-20.)
- [13] Packard N H, Crutchfield J P, Farmer J D, et al. Geometry from a Time Series [J]. Physical Review Letters (S1079-7114), 1980, 45(9): 712-716.
- [14] Takens F. Dynamical Systems and Turbulence: Detecting strange attractors in turbulence [M]. Warwick, UK: Springer, 1981: 366-381.