

# 海洋环境中平台钢腐蚀速率的三层 BP 神经网络预测

兰志刚<sup>1,2,3</sup>, 侯保荣<sup>1</sup>, 白刚<sup>4</sup>, 宋积文<sup>2</sup>, 陈胜利<sup>2</sup>, 谭震<sup>2</sup>, 张杰<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中海油能源发展股份有限公司北京分公司, 北京 100027; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 4. 中海油有限公司工程建设部, 北京 100010)

**摘要:** 利用三层 BP 神经网络预测海洋环境因素对材料的腐蚀速率的影响。结合实测的 pH 值、温度、溶解氧、盐度、生物附着等影响因素, 分析了上述环境因素对平台钢腐蚀的影响, 建立环境因素与腐蚀速率之间的映射关系, 预测了平台钢在海洋环境中的腐蚀速率。结果表明, 全浸区腐蚀速率预测误差为 6.95%, 潮差带腐蚀速率预测误差为 4.2%, 预测精度较高。说明利用三层 BP 神经网络预测钢在海水中腐蚀速率技术可行, 具有较高的预测精度和应用价值。

**关键词:** 腐蚀因素; 腐蚀速率预测; BP 神经网络; 海洋环境腐蚀预测

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)12-0075-03

腐蚀预测一直是腐蚀领域中重要的研究内容<sup>[1]</sup>。在海洋环境中, 金属的腐蚀受到各种环境因素如海水温度、溶解氧含量、盐度、pH 值、生物活性等的影响。其中三层 BP(back propagation, 反向传播)神经网络预测腐蚀速率作为一项新的技术被广泛研究。崔大林等<sup>[2]</sup>研究了应用人工神经网络预测有色金属海水腐蚀的长期行为。孔德英等<sup>[3]</sup>, 根据金属海水腐蚀的特征, 用人工神经网络技术分析碳钢、低合金钢海水腐蚀数据, 建立了碳钢、低合金钢的腐蚀速率与合金成分及海水间的神经网络模型, 可用于预测新钢种在其他海域中的腐蚀速率, 并用所建模型分析了合金元素对腐蚀速率的影响。杨晓明等<sup>[4]</sup>利用各种腐蚀因素对海水中钢的腐蚀行为进行预测和分析。神经网络具有大规模并行、分布式存储和处理、自组织、自适应和自学习能力, 具有传统函数算法无法比拟的优点。特别是处理需要同时考虑许多因素和条件的、不精确和模糊的信息处理问题, 神经网络预测方法具有优势<sup>[5]</sup>。使用神经网络来预测海水环境对材料的腐蚀速率是将环境因素与材料腐蚀率之间的关系视为黑箱, 进而通过试验数据学习, 建立输入(环境因素)与输出(材料腐蚀率)之间的作用关系, 从而预测材料在特定海水环境条件下的腐蚀速率。

## 1 腐蚀速率的神经网络预测

利用 A3 钢在青岛、舟山、厦门、榆林和湛江 5 个海区全浸带和潮差带的腐蚀挂片试验结果, 构建三层 BP 人工神经网络模型, 建立海水温度、溶解氧含量、盐度、pH 值、生物附着等主要环境因子和腐

蚀速率之间的映射关系, 进而通过上述环境因子特征, 预测 A3 钢的腐蚀速率。并分析其预测误差, 确认三层 BP 人工神经网络模型的可行性。

## 2 腐蚀预测的技术路线

建立三层 BP 神经网络预测模型时, 需要将测量数据分成几个部分, 分别用于训练、验证和测试神经网络。本研究用于建立预测神经网络的实测数据见表 1。

由于数据量有限, 本研究利用青岛、舟山、厦门、榆林 4 个海区的实测数据作为神经网络的训练样本, 用湛江的实测结果作为验证样本。

预测模型采用三层前馈型 BP 网络模型。第一层为输入层, 中间为隐含层, 神经元传递函数为正切 S 型传递函数。第三层为输出层, 神经元传递函数线性传递函数。各层次间的神经元之间形成全互连接, 各层次内的神经元之间没有连接。输入层的节点数为输入向量的分量数, 这里为 5 个, 即海水温度、溶解氧含量、盐度、pH 值、生物附着; 输出层的节点数为输出向量的分量数, 这里为 1 个, 即平均腐蚀率。采用 Levenberg-Marquardt 法训练函数。网络结构如图 1 所示。

收稿日期: 2010-05-04; 修回日期: 2010-10-18

基金项目: 海洋石油总公司综合科研项目

作者简介: 兰志刚(1963-), 男, 山东青岛人, 高级工程师, 中国科学院海洋研究所在读博士, 从事海洋工程环境和海洋工程防腐工作, E-mail: lanzhg@cnooc.com.cn; 侯保荣, 通信作者, 中国工程院院士, 电话: 0532-82898731, E-mail: baoronghou@qdio.ac.cn

表 1 建立预测神经网络的实测数据

Tab. 1 *In situ* measurements

海域	环境因素(子因素)					全浸带平均腐蚀率(mm/a)	潮差带平均腐蚀率(mm/a)
	pH	温度(°C)	溶解氧(mL/L)	盐度	生物附着物(%)		
青岛	8.60	13.6	5.60	32.0	50	0.19	0.22
舟山	8.14	17.4	5.62	24.5	80	0.19	0.29
厦门	8.17	20.9	5.30	27.0	100	0.20	0.22
榆林	8.30	26.7	4.50	34.0	100	0.10	0.16
湛江	8.00	23.0	5.10	25.5	100	0.19	0.23

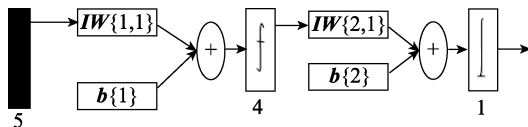


图 1 网络结构

Fig. 1 Structure of the neural network

### 3 全浸带腐蚀速度预测

图 2 是全浸带的三层 BP 神经网络预测曲线, 神经网络的训练曲线经 8 次迭代后收敛。

神经网络的权值和阈值分别为:

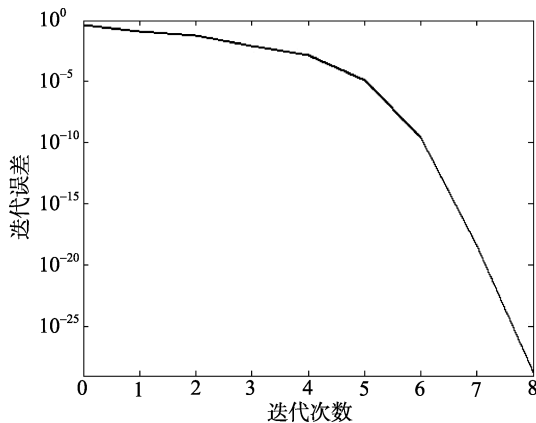


图 2 全浸带神经网络的训练曲线

Fig. 2 Training of the neural network for the submerged zone

表 2 全浸带腐蚀速率预测结果

Tab. 2 Predicted corrosion rates in the submerged zones

海域	环境因素(子因素)					全浸带平均腐蚀率(mm/a)	
	pH	温度(°C)	溶解氧(mL/L)	盐度	生物附着物(%)	实测	预测
青岛	8.60	13.6	32.0	5.60	50	0.19	-
舟山	8.14	17.4	24.5	5.62	80	0.19	-
厦门	8.17	20.9	27.0	5.30	100	0.20	-
榆林	8.30	26.7	34.0	4.50	100	0.10	-
湛江	8.00	23.0	25.5	5.10	100	0.19	0.2032

注: -表示无腐蚀预测结果

$IW\{1,1\}=[4.6716-0.090308 \ 0.22605-0.54173 \ 0.21905;$   
 $-0.36072 \ 0.20405 \ 0.012535 \ 1.0074-0.23002;$   
 $-0.3645-0.34594-0.12827-2.3721 \ 0.020312;$   
 $-2.7745-0.19523-0.10076 \ 1.4445 \ 0.097722;$   
 $-5.1855-0.079056-0.19611 \ 2.2604-0.09855;$   
 $-2.6321 \ 0.122 \ -0.20156 \ 0.98853 \ 0.19938]$

$IW\{2,1\}=[$

$0.13292 \ 0.093653 \ 0.73027 \ 0.3206 \ 0.17718 \ 0.17227]$

$b\{1\}=[$

$-45.0633; -5.248; 22.7082; 25.5792; 34.3703; 17.6857]$

$b\{2\}=[0.5266]$

利用该神经网络模型, 把湛江海区环境参数作为输入, 预测得出湛江海区的腐蚀率, 结果如表 2 所示。

从计算结果可以求得全浸区预测误差为:  
 $(0.2032 - 0.19)/0.19=6.95\%$ 。

### 4 潮差带腐蚀速度预测

图 3 是潮差带的三层 BP 神经网络预测曲线, 神经网络的训练曲线经 15 次迭代后收敛神经网络的权值和阈值分别为:

$IW\{1,1\}=[$

$-1.4508-0.25926-0.045185-1.7276-0.048691;$

$4.6049-0.13616-0.047939-2.1919-0.061945;$

$5.9879-0.074364-0.072911 \ 2.0211 \ 0.0031065;$

$3.2819 \ 0.22554-0.087399 \ 1.0778 \ 0.056179;$

$-2.0392 \ 0.027288 \ 0.28012 \ 2.6155-0.019875;$

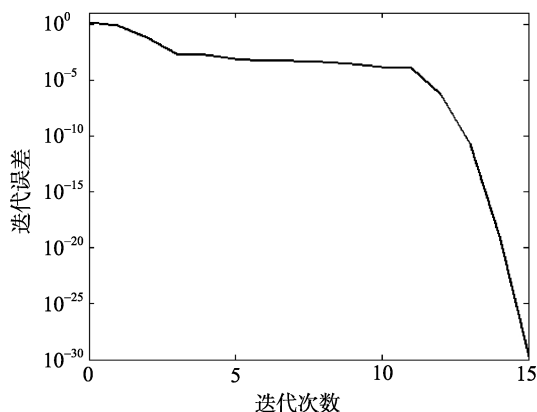


图3 潮差带神经网络的训练曲线

Fig. 3 Training of the neural network for the tidal zone

-3.4799 0.11571-0.24943 0.22532 - 0.045675]

$IW\{2,1\}=[-0.16709 \quad 0.49546 \quad 0.57078 \quad 0.85528$   
 $0.67188-0.27407]$

$b\{1\}=[30.521; -22.9796; -59.8129; -37.6416; -3.7415;$

34.4732]

$b\{2\}=[0.2514]$

利用该神经网络模型,把湛江海区环境参数作为输入,预测得出湛江海区的腐蚀率,结果如表3所示。

由预测结果可以看出,潮差带预测误差为  $(0.2203 - 0.23)/0.23=4.2\%$

## 5 结论

本文利用实测的 pH 值、温度、溶解氧、盐度、生物附着等环境因子,分析了上述环境影响因子对海洋平台钢腐蚀的影响,建立三层 BP 神经网络模型预测了平台钢在海水环境中的腐蚀速率。由计算结果可以求得全浸区预测误差为 6.95%,潮差带预测误差为 4.2%,预测精度较高,表明利用三层 BP 神经网络预测钢在海水中腐蚀速率技术可行,具有较高的预测精度和应用价值。

表3 潮差带腐蚀速率预测结果

Tab. 3 Predicted corrosion rates in the tidal zones

海域	环境因素(子因素)					潮差带平均腐蚀率(mm/a)	
	pH	温度(°C)	溶解氧(mL/L)	盐度	生物附着物(%)	实测	预测
青岛	8.60	13.6	32.0	5.60	50	0.22	-
舟山	8.14	17.4	24.5	5.62	80	0.29	-
厦门	8.17	20.9	27.0	5.30	100	0.22	-
榆林	8.30	26.7	34.0	4.50	100	0.16	-
湛江	8.00	23.0	25.5	5.10	100	0.23	0.2203

注: - 表示无腐蚀预测结果

### 参考文献:

[1] Cottis R A, Turega M. Neural Network Applications in Corrosion Engineering [M]. Chicago: Engineering Books Inc., 1993. 201-204.  
 [2] 崔大为, 林乐耘, 赵月红. 应用人工神经网络预测有色金属海水腐蚀的长期行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,

2004, 24(1): 29-32.  
 [3] 孔德英, 宋诗哲. 人工神经网络技术探讨碳钢、低合金钢的实海腐蚀规律[J]. 腐蚀与防护, 1998, 18(4): 18-20.  
 [4] 杨晓明, 陈明文. 海水对金属腐蚀因素的分析及预测[J]. 北京科技大学学报, 2000, 3: 26-28.  
 [5] 闻新, 周露, 王丹力. MatLab 神经网络应用设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 35-47.

(下转第 101 页)