

利用改进BP网络的船舶尾气检测精度提升方法

严 实

(重庆川仪分析仪器有限公司 重庆 400060)

摘 要: 船舶实际工况环境中的尾气浓度排放是排放因子设定的关键因素,是船舶污染监测以及排放清单计算等重要基础。由于受到燃油品质、水含量以及氧气饱和度、燃油实际燃烧情况、柴油机组以及净化设备实际工况等影响,其尾气排放波动较大。采用数据融合思想引入改进BP神经网络对检测结果进行校正,以弥补检测环境中存在多种不确定因素对检测精度的影响。用内河航道船舶实际工况氮氧化物排放数据进行计算机仿真实验及分析,说明了该方法的有效性。

关键词: 尾气检测;精度;干扰;神经网络

中图分类号: TP212.2; TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Application of improved BP neural network in the detection of Ship tail gas

Yan Shi

(Chongqing Chuanyi Analyzer Co. Ltd., Chongqing 400060, China)

Abstract: Ship tail gas detection precision is an important basis for emission factors and ship pollution detection. Due to the influence of fuel quality, water content and oxygen saturation, fuel combustion, diesel engine unit and the actual operating conditions of the purification equipment, the emission of the exhaust gas fluctuates greatly. In order to make up for all kinds of Interference factor of the detection accuracy, an improved BP neural network which in data fusion algorithms be accepted. On the basis of real data which NO_x emission under actual working conditions of inland waterway ships, the computer simulation and analysis show that this method can improve the accuracy effectively.

Keywords: ship tail gas; detection accuracy; interferes; neural network

0 引 言

船舶尾气排放是全球空气污染的主要来源之一^[1-2],船舶柴油机重油燃烧主要产生 CO 、 CO_2 、 NO_x (氮氧化物,如 NO 、 NO_2 等)、 SO_2 、碳氢化合物(HC)等污染气体以及碳粒、重碳氢化合物、硫酸盐、油气、水汽及灰分等颗粒物,船用柴油机尾气中的各类物质会对人类生存环境造成很大的污染与破坏。

IMO 要求 2016 年 1 月 1 日及以后建造的船舶在排放控制区内,高速柴油机排放应低于 $2.0 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$,低速柴油机排放量应低于 $3.4 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$ ^[2],我国于 2009 年 9 月公布《防止船舶污染海洋环境管理条例》要求 2010 年 3 月 1 日起船舶排放必须符合国际条约及相关标准的要求。要求中均以排放限值($\text{g}/(\text{kw} \cdot \text{h})$)为单位计算船用柴油机排气污染物,以确定合理的排放因子并计算排放清单^[3-4]。

根据(在线)便携式排放测试系统(portable emission measurement system, PEMS)对船舶实际工况下的排放特

性进行跟踪评估,并以此为依据计算排放因子是目前最主流的发展方向,在此基础上利用船舶自动识别系统 AIS 采集船舶航行时间、传输等实时数据还可以进一步得到更为准确合理的排放清单。因此船舶在实际工况下的排放浓度检测的精度是船污染监测及排放清单计算等重要基础。

近年来,在微量气体浓度传感器研究领域传感数据融合^[5]在很多应用领域取得了不错的成果^[6-8]。其核心思想是依据传感器在不同时间或者空间上的冗余互补信息,利用粒子群、遗传算法、神经网络及深度学习等机制对数据进行分析、支配和使用,以获得比当前单一数据更为充分的信息。针对于船舶尾气检测这些研究在干扰因素分析和选取、数据样本归一化以及算法选取上仍然有很大研究空间。

本文从影响船舶尾气排放诸多因素出发,选取合理干扰因素,利用神经网络机制,建立改进的BP神经网络模型,并对模型主要建立过程进行说明,用我国内河航道船只实际工况下的 NO_x 尾气排放数据进行性仿真实验及有效性分析。

1 实际工况分析及模型提出

1.1 实际工况分析

目前船舶尾气排放控制主要通过抑制柴油机尾气中有害物质生成(机内控制)以及采用相应技术对已经生成的颗粒物及有害气体进行进化(尾气净化)两种方式^[9]。由于受到燃油品质、水含量以及氧气饱和度、柴油机组以及净化设备实际工况等影响,其尾气排放波动较大,影响尾气排放检测精度的主要干扰因素可简述如下。

硬件实际工作状态波动影响:主要为柴油机使用年限、油嘴喷射角度、实际燃烧时燃油喷雾雾粒粒度以及进排气压力差等^[10]。

燃油实际工况下的燃烧情况:船舶重油在使用前都需要采取沉淀、添加化学剂等方式对燃料进行预先处理;在燃烧时需要采取气缸喷水法或者进气加湿法等方式控制燃烧条件,以保证尽可能地减少尾气污染物排放,不同燃油由于乳化剂含量及含水量不同,经燃烧后排放的尾气污染物含量不同,经研究在同船同发动机同环境下重油和柴油的

NO_x 排放量最大可相差 50% 以上^[11]。

废气再循环系统(exhaust gas recirculation, EGR)^[12]是目前比较先进的机内控制技术被广泛采用,已经证明在瞬时工况时利用计算机控制 EGR 阀门从而得到合理的 EGR 率是优化该系统的最佳方案,其中对废气的精确测量非常重要。

船舶现实环境影响:船舶当时所在位置的大气含水量以及氧气含量对尾气检测有影响。

保持高持氧浓度是燃料充分燃烧的前提,但过高不利于 NTP 技术脱硫^[13],因此氧气浓度的波动将对气体浓度排放产生较大影响。

船舶在进(离)港以及巡航状况下,操作人员操作习惯以及现实发动机组状态不同,发动机是转速以及功率各不相同,尾气及颗粒物排放差别较大,有研究表明对于内河航运离港、进港、巡航时使用船用石化柴油(B0)以及生物柴油—柴油混合燃料(B10,生物柴油体积比为 10%)颗粒物变化如图 1 所示^[14],NO_x 排放因子变化如图 2 所示。

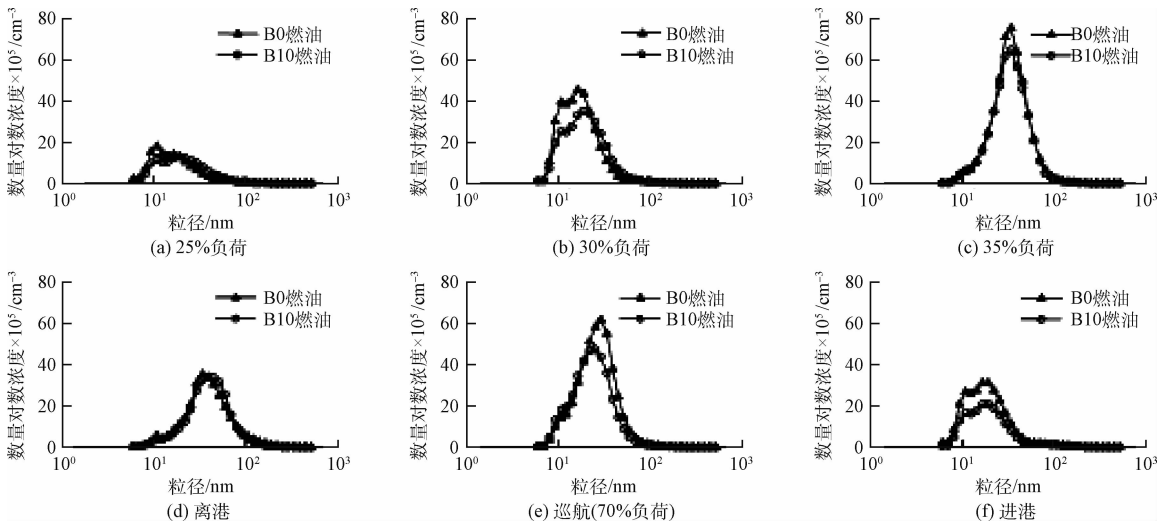


图 1 不同燃油不同工况下颗粒物排放对比

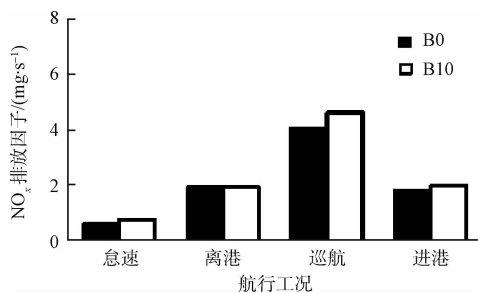


图 2 不同工况下 NO_x 排放因子对比

目前船舶尾气检测多数基于非分光红外线(non-dispersive infrared, NDIR)以及电化学原理,如日本

HORIBA 公司的 OBS-2200 车载气态排放物检测设备。该设备可用于船舶柴油机尾气排放中的 CO、CO₂、NO_x 以及 HC 浓度检测。这些设备通常在高温环境下工作(直接位于经净化后船舶尾气排放烟道),存在多组气体相互干扰造成的主成分特征丢失或者退化、水分峰值连续吸收对待测微量气体浓度影响、以及电子原器件自身噪音以及光学设备老化、信号线性化误差等诸多干扰因素。

1.2 解决方案提出及意义

因此现实工况环境种船舶尾气浓度检测值 C 以及基于此的排放因子确定都体现出明显多元、非线性以及动态特性,即与船载负荷 L、含水量 W、含氧量 O、温度 T 以及电器噪音 N 等参量相关的多元函数,如式(1)所示。

$$C = F(L, W, O, T, N, \dots) \quad (1)$$

对船舶尾气检测精度提升的关键思路为在现有传感器检测数据的基础上,充分利用前期检测数据以及其他因素条件,建立合理算法进行校正和补偿以达到提高检测精度目的。已证明只要浅层神经元个数足够或者神经网络深度足够,就一定可以找到一个神经网络以指定任意精度逼近任意非线性映射^[15-16]。因此本文关键在于设置合适神经网络并验证其对船舶尾气检测的有效性。

2 仿真实验及训练

2.1 实验数据说明

以内河航运常用额定功率 3 600 kW, 额定转速 1 000 r/min 船用废气涡轮增压中冷柴油机, 柴油机负荷为 100% (满负荷)、75% (多为进出港时)、50% (多为巡航时)、25% (多为空载时) 分别使用重油 (硫含量 1.02% (m/m), 含水量 0.12 V/V) 和柴油 (硫含量 0.308% (m/m), 含水量 0) 后排放的 NO_x 浓度区间^[10] 作为实验区间。在实际工况环境下干扰因素很多, 且也没有条件安装高性能传感器用于高精度检测, 检测数据并不精确 (现行船用尾气浓度传感器误差为 1%~2%)。因此采用在此区间内随机生成 200 组网络训练数据。并采取同样方法在同等区间内生成 40 组测试数据测试。训练和测试数据样本如表 1 所示。

表 1 样本数据说明

| 种类 | 温度 / ^o C | 负荷 /% | 氧含量 /% | NO _x 排放浓度 (×10 ⁻⁶) |
|----|---------------------|-------|---------|---|
| 重油 | | 100 | | 1800~1850 |
| 柴油 | 200~35 | 75 | 3.6~3.4 | 1700~1750 |
| 重油 | 0 | 50 | | 1480~1520 |
| 柴油 | | 25 | | 820~850 |

2.2 网络结构及设计

在众多神经网络结构中 BP 神经网络自学习能力强, 实现相对容易且在传感器中应用广泛^[17-18], 但其网络结构及各项参数选取很大程度上依赖于经验, 算法学习容易陷入“局部最优”; RBF (radial basis function) 为全局收敛前馈网络, 收敛速度快但需要事先确定中心函数、宽度等结构。

出于后续硬件化成本考虑本文首先尽可能设计一结构简单的 RBF 网络, 并将训练样本经过训练好的 RBF 网络的结果作为二层 BP 网络的输入再次进行 BP 网络训练, 得到稳定的 BP 网络。以同样测试样本对单一 RBF 网络以及改进后的 RBF-BP 网络进行计算机仿真和实验效果分析。

2.3 网络结构

单一 RBF 网络可简要描述如下。

网络结构为一个输入层, 一个隐含层以及一个输出

层。其中根据表一输入层维数为 5, 依次为温度、工作负荷、硫含量 (重油或柴油含硫量)、水含量以及氧气含量。输出层维数为 1。

测试数据进入 RBF 训练前使用 premmx() 以及 trammmx() 函数对数据进行归一化处理, 归一化后的数据空间为 [-1, 1], 测试结果采用 postmmx() 函数进行反归一化处理。

不进行阈值自适应调整。

以神经网络常用均方误差 (mean square error, MSE) 为误差容限单位, 初始设置为 1×10⁻³。

扩散因子设置为 22。

隐含层神经元个数设置为 100。

采用批处理方式训练。

BP 网络设计可简要描述为。

该 BP 网络输入是经过上述 RBF 网络训练后的输出数据, 因此输入层为 1, 输出层为 1。

同样采用 MSE 为误差容限单位, 设置为 1×10⁻⁸。

为了加快收敛速度, 在传统最小均方误差算法 (least mean square algorithm, LMS) 算法基础上采用如式 (2) 所示的动量因子 α ($0 < \alpha < 1$), 并规定如果前后两次计算梯度方向相同, $-f(1-\alpha)\nabla e(n)$ 则与上一次的权值更新相加, 从而加快收敛速度; 反之则会减少震动, 以避免来回震荡。

$$\Delta\omega(n) = -f(1-\alpha)\nabla e(n) + \alpha\Delta\omega(n-1) \quad (2)$$

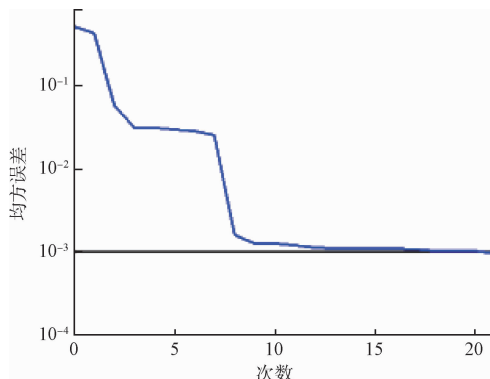
增加隐含层可以明显减少网络规模, 设定 BP 网络隐含层为 10。

3 实验过程及分析

当单一 RBF 网络设置误差容限分别为 1×10⁻³, 并将测试结果送入后续 BP 神经网络, BP 误差容限分别为 1×10⁻⁸, RBF 及 RBF-BP 网络迭代收敛效果如图 3 所示。

当单一 RBF 网络设置误差容限分别为 1×10⁻⁵, BP 误差容限为 1×10⁻⁸ 不变时, RBF 及 RBF-BP 收敛效果如图 4 所示。

当 RBF 网络误差容限为 1×10⁻⁸, BP 网络的误差容限不变时, RBF 及 RBF-BP 网络迭代收敛情况如图 4 所示。



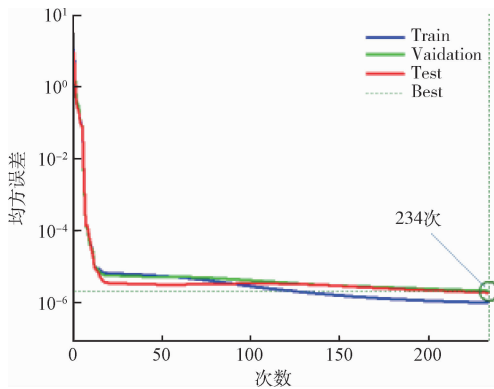


图 3 RBF 及 RBF-BP 网络误差性能曲线

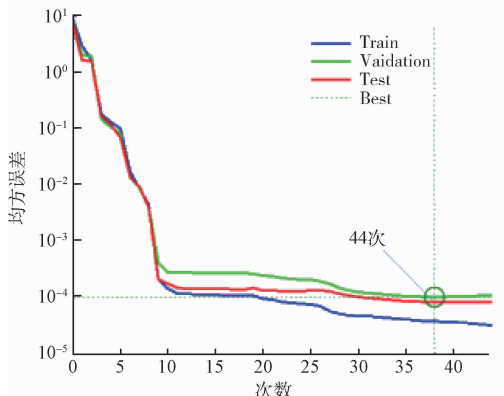
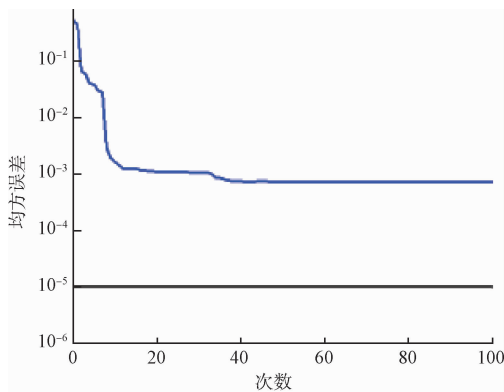


图 4 RBF 及 RBF-BP 网络迭代收敛效果

可见在 BP 网络之前引入 RBF 网络可以明显加快 BP 网络收敛速度。有利于网络结构稳定。另外单一 RBF 网络的误差容限设置为 1×10^{-3} 时,网络加速性能明显,收敛速度很快,迭代到 21 次达到误差容限,但若仅单一提升误差容限,系统除明显增加迭代次数,加重系统运行性负担之外,并没有对数据精度提升起到明显作用。从而说明了在 BP 网络之前设置简单 RBF 网络对加速数据收敛是有效的。

误差方面,选定前述 RBF 网络设置误差容限分别为 1×10^{-3} ,后续 BP 误差容限为 1×10^{-8} 为稳定网络结构,RBF-BP 网络输出与测试值误差对比如图 8 所示。可见

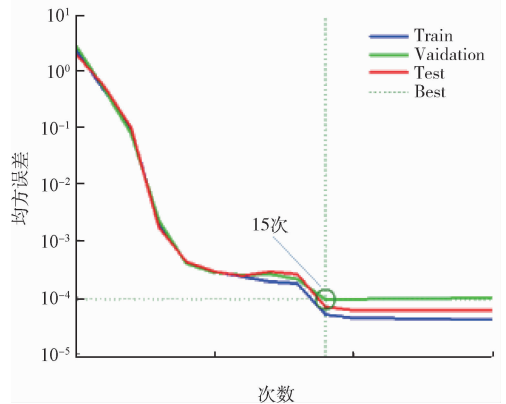
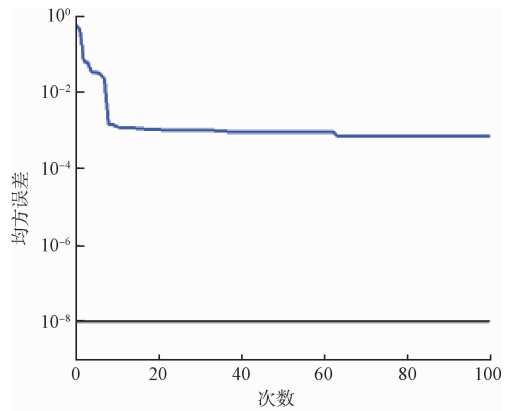


图 5 RBF 及 RBF-BP 网络迭代收敛效果

RBF-BP 网络输出具有较好的数据拟合效果,测试平均相对误差((网络实际输出-期望输出)/期望输出)为 0.82%,高于现行传感器 1% 误差精度水平,说明了该网络数据校正的有效性。

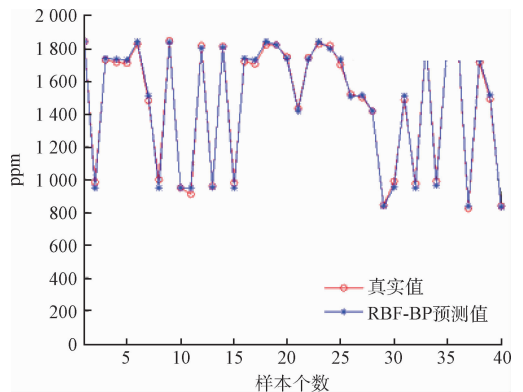


图 6 RBF 网络输出与真实值

5 结 论

影响船舶尾气排放检测精度的多种干扰因素具有明显非线性以及多维性特征,利用神经网络机制,采用 BP 与 RBF 相结合的方法,在提高泛化性能、克服非标准训练样本集的错误引导的同时加快了网络收敛速度,计算机仿真

实验证明了对检测数据校正的有效性,在基于尾气排放的排放因子精确计算以及专用船舶尾气检测仪硬件化实现上具有一定价值。

参考文献

- [1] BLASCO J, DURÁN-GRADOS V, HAMPEL M, et al. Towards an integrated environmental risk assessment of emissions from ships' propulsion systems [J]. *Environment International*, 2014, 66(3): 44-47.
- [2] MARPOL. 附则 VI 2008 修正案[S]. 2008.
- [3] 张礼俊,郑君瑜,尹沙沙,等. 珠江三角洲非道路移动源排放清单开发[J]. *环境科学*, 2010, 3(4): 886-891.
- [4] GB 20891—2014. 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ,Ⅳ阶段)[S]. 2014.
- [5] 周观民,李荣会. 基于神经网络的传感器网络数据融合技术研究[J]. *计算机仿真*, 2011, 28(10): 118-120.
- [6] 严玥,江赟,严实. 利用 RBF 网络的火电厂氮氧化物浓度检测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(1): 45-50.
- [7] 庞鸿铎,罗飞路,陈棣湘,等. 磁力仪温度误差的径向基神经网络补偿模型[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(3): 695-700.
- [8] 谢宇,韩保红,段云龙,等. 基于神经网络 PID 控制的颗粒物料称量系统[J]. *国外电子测量技术*, 2013, 32(9): 15-17.
- [9] 王斌,陈红香. 船用柴油机尾气控制与净化措施研究[J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(1): 72-75.
- [10] 聂俊,船用高速柴油机燃用重油排放研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [11] 宋亚楠,内河和近海船舶排放特性及排放清单研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
- [12] LEVENDIS Y A, PAVATOS L. Control of diesel soot, hydrocarbon and NO_x emissions with a particulate trap and EGR[R]. SAE 940460.
- [13] MCADMSR, BEECH P, SHAWC ROSS J T. Low temperature plasma assisted catalytic reduction of NO_x in simulated marine diesel exhaust[J]. *Plasma Chem Plasma Process*, 2008, 28(2): 159-171.
- [14] 楼狄明,施利华,胡志远,等. 基于不同燃油品质的内河船舶排放特性试验研究[J]. *船舶工程*. 2016, 38(7): 49-53.
- [15] 孙志军,薛磊,许阳明,等. 深度学习研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(8): 2806-2810.
- [16] 江华丽. 神经网络混合算法的应用研究[J]. *电子测量技术*, 2014, 37(10): 59-61.
- [17] TANG Y, SALAKHUTDINOV R, HINTON G. Robust boltzmann machines for recognition and denoising[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2012: 2264-2271.
- [18] 洪磊,龚雪飞,孙寿通,等. Adaboost 集成 BP 神经网络在传感器阵列检测系统中的应用,传感器与微系统, 2015, 34(4): 148-154.

作者简介

严实, 1978 年出生, 高级工程师, 主要从事分析仪器仪表设计与研发。

E-mail: yanshicq@sina.com