

基于神经网络的天然气双燃料发动机性能预测*

陈晖¹ 虞彪² 卢嘉专¹

(1. 柳州职业技术学院, 柳州 545005; 2. 柳州五菱柳机动力有限公司, 柳州 545002)

【摘要】基于柴油/天然气双燃料发动机测试台架试验数据,以发动机扭矩、转速、喷油时刻、喷油压力和天然气替代率、过量空气系数为模型输入参数,以发动机燃油消耗率和CO、NO_x、总烃(THC)排放体积分数和碳烟排放量为模型输出,构建了基于逆向传播(BP)神经网络和遗传算法(GA)优化的GA-BP神经网络的预测模型,并将预测结果与试验值进行对比验证。研究表明:GA-BP神经网络模型相比BP神经网络模型具有更好的预测性能;GA-BP神经网络模型对5个输出参数预测的平均绝对百分比误差 M_{APE} 均小于6%,并且决定系数 R^2 均大于0.97,模型具有较高的预测精度和泛化能力。

关键词:双燃料发动机 性能预测 BP神经网络 遗传算法

中图分类号:U464.11*3 **文献标志码:**A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20220036

Performance Prediction of Natural Gas Dual-fuel Engine Based on Neural Network

Chen Hui¹, Yu Biao², Lu Jiazuan¹

(1. Liuzhou Vocational & Technical College, Liuzhou 545005; 2. Liuzhou Wuling Liuji Power Co., Ltd., Liuzhou 545002)

【Abstract】Based on the test data of diesel/natural gas dual-fuel engine, a prediction model of GA-BP neural network was established based on BP neural network and genetic algorithm optimization with engine torque, speed, fuel injection timing, fuel injection pressure, natural gas alternative fuel and excess air coefficient as input parameters, and the brake specific fuel consumption, CO, NO_x, THC emissions and soot emission as outputs, and the prediction results were compared with test values for verification. The research results show that GA-BP neural network model has better predictive performance than BP neural network model. The Mean Absolute Percentage Error (M_{APE}) predicted by the GA-BP neural network model for the five output parameters is less than 6%, and the coefficient of determination R^2 is greater than 0.97, and the model has high prediction accuracy and generalization ability.

Key words: Dual-fuels engine, Performance prediction, BP neural network, Genetic algorithm

【引用格式】陈晖, 虞彪, 卢嘉专. 基于神经网络的天然气双燃料发动机性能预测[J]. 汽车工程师, 2023(4): 20-25.

CHEN H, YU B, LU J Z. Performance Prediction of Natural Gas Dual-Fuel Engine Based on Neural Network[J]. Automotive Engineer, 2023(4): 20-25.

1 前言

天然气价格低、储量大、存储与运输设施完善,是我国目前使用规模最大的燃料。柴油/天然气双燃料发动机不仅能实现高效燃烧,还能降低碳烟和NO_x的排放体积分数,因此受到广泛关注^[1-3]。为了使双燃料发动机在不同工况下获得最佳性能,需要对发动机的运行参数进行标定,但标定试验过程复

杂、工作量大、成本高,相比于试验标定方法,基于模型的发动机标定方法可以有效提高标定效率,降低标定成本^[4-5]。

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)是一种类似于人脑的包含多个神经元结构和功能的信息处理系统,具有非线性映射能力、容错能力、自学习能力等特点,在科学和工程领域被广泛应用^[6]。Syed等^[7]采用少量试验数据训练人工

*基金项目:广西高校中青年教师基础能力提升项目(2021KY1043);柳州职业技术学院科研基金项目(2020KB07)。

神经网络,有效预测了氢气/柴油双燃料发动机的热效率、油耗以及污染物排放量;Cay等^[8]采用人工神经网络模型预测了甲醇/汽油双燃料发动机的平均有效压力、油耗、功率和排气温度,预测结果与样本数据的平均误差 $<3.8\%$,均方根(Root Mean Square, RMS) <0.0015 ;Ramalingam等^[9]采用人工神经网络针对5种不同比例的生物柴油/柴油混合燃料的性能和排放进行预测,预测结果的平均绝对百分比误差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)范围为 $0.98\% \sim 4.26\%$;Taghavi等^[10]利用遗传算法优化的人工神经网络预测了均质充量压燃(Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI)发动机燃烧始点;戴金池等^[11]采用长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)神经网络、反向传播(Back Propagation, BP)神经网络和支持向量机3种不同模型对柴油机 NO_x 排放量进行预测,结果表明LSTM神经网络预测性能最强。李昌庆等^[12]利用BP神经网络对大型客车的 CO_2 、 CO 和 NO_x 排放体积分数进行预测,预测结果的总体相关系数 R^2 为 0.9167 ,线性高度相关,该模型能较准确地预测大型客车尾气排放量。

目前,对双燃料发动机性能和排放的研究主要集中在试验和模拟研究方面,基于模型预测的研究还较少,本文以发动机扭矩、转速、过量空气系数、喷油时刻、喷油压力和天然气替代率作为模型输入参数,燃油消耗率、 CO 、 NO_x 和总烃(Total Hydrocarbons, THC)排放体积分数作为模型输出参数,通过训练试验数据,建立基于人工神经网络的天然气双燃料发动机性能预测模型。

2 预测模型的建立

影响双燃料发动机性能的参数很多,发动机性能和排放的预测属于多变量、多目标的非线性问题,而且目标函数无法用数学解析式给出。BP神经网络是一种多层前馈神经网络,按照误差逆向传播算法进行训练,具备处理参数之间复杂的非线性关系的能力,因此适用于多变量的变化函数建模,是目前应用最广泛的人工神经网络^[13]。BP神经网络的结构包含输入层、隐含层和输出层,每层中有若干节点,每个节点称为一个神经元,层与层之间的神经元全部相连,但同一层内的神经元不相连。BP神经网络训练包含了2个过程,分别是输入信号的正向传播和计算误差的反向传播。在正向传播过

程中,输入信号由输入层经过隐含层到达输出层,计算损失函数值;当损失函数值大于期望值时,训练进入误差反向传播过程,通过求损失函数对权值和阈值的偏导数调整网络的权值和阈值,使损失函数值不断减小,神经网络预测值不断逼近期望值;当网络输出的误差或学习次数达到设定值时,训练过程结束。本文采用BP神经网络构建双燃料发动机性能预测模型。

2.1 数据的选取与处理

将台架试验得到的260组数据按80%、10%、10%的比例随机分为训练样本、验证样本和测试样本3个部分。由于样本中数据的量纲和数值量级差异性大,如转速和过量空气系数的数值量级可以相差1000倍,因此需要通过对样本数据进行归一化处理,减小数据间的量纲和数值量级差异,提高求解速度和计算精度。常用的方法是按Min-Max标准化对数据进行线性变换,并映射到 $[0,1]$ 区间,即

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中, x' 为归一化后的样本数据; x 为归一化前的样本数据; x_{\min} 为数据样本中的最小值; x_{\max} 为数据样本中的最大值。

2.2 输入参数和输出参数的选择

模型输入参数和输出参数的选取是构建和训练神经网络的一个重要问题,对模型的预测精度有较大影响^[14]。首先选择过量空气系数和天然气替代率作为输入参数,这2个参数表示燃料与空气的比例情况,其次,发动机扭矩、转速、喷油时刻、喷油压力是影响双燃料发动机性能和排放的重要控制参数,也选作模型输入参数,预测模型共选择6个输入参数。模型输出参数为5个,选择燃油消耗率来表征发动机性能, CO 、 NO_x 、THC排放体积分数和碳烟排放量来表征发动机排放情况。

2.3 神经网络结构的确定

模型的输入参数和输出参数分别为6个和5个,因此模型的输入层和输出层的神经元数量确定为4个和2个。BP神经网络采用单隐含层时即可高精度地逼近任意非线性函数,在实际应用中具有很好的预测能力,使用BP神经网络模型进行预测要考虑如何避免模型预测出现过拟合现象。在训练数据样本量较小时,采用多层隐含层容易出现过拟合,因此本文预测模型采用单层隐含层结构。隐含层中神经元的数量是影响神经网络的

预测性能的一个重要参数,可以采用试错法确定,通过逐渐递增神经元数量,对比不同神经元数量条件下计算得到的模型误差,发现隐含层节点数量为18个时模型预测的误差最小,因此预测模型的结构最终确定为6-18-5,建立的BP神经网络模型拓扑结构如图1所示。模型隐含层选用Sigmoid为激活函数,输出层选用Purelin为激活函数。

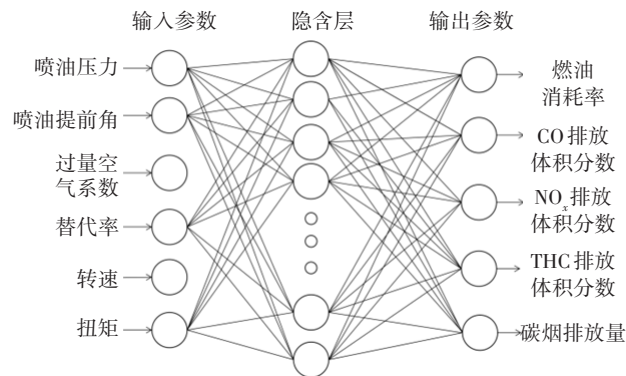


图1 BP神经网络拓扑结构

2.4 遗传算法优化

BP神经网络模型训练过程中,初始权重和阈值一般为随机赋值,对训练结果有较大影响,容易造成在训练过程中由于学习率过大或过小使得得到的结果不是全局最优解,预测结果误差较大。遗传算法是模仿生物遗传学和生物进化原理人工构造的一种优化算法,通过使个体进行选择、交叉、变异,进化出更优秀的个体,然后对个体的适应度进行比较,淘汰不适应环境的个体,从而在多个潜在解中找到最优解。为了解决BP神经网络初始权重和阈值随机赋值导致预测性能鲁棒性差的问题,通过遗传算法对初始权重和阈值进行优化,将优化后的权重和阈值带入BP神经网络进行训练。基于遗传算法优化的BP神经网络称为GA-BP神经网络,图2所示为基于遗传算法的BP神经网络模型优化流程。经过调试,在遗传算法中,种群规模设置为20个、进化次数为40次、交叉概率为0.3、变异概率为0.1时,模型预测精度高且收敛速度较快。

3 结果分析

模型建立后,需对模型的预测结果进行评价,本文选用决定系数 R^2 和平均绝对百分比误差 M_{APE} 作为评价指标,决定系数 R^2 越接近1,平均绝对百分比误差 M_{APE} 越小,表明模型预测性能越好:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

$$M_{APE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{t_i - o_i}{t_i} \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中, t_i 为第*i*个测试集中的试验值; o_i 为第*i*个模型预测值; \bar{t} 为测试集试验值平均值; n 为测试集中的样本数量。

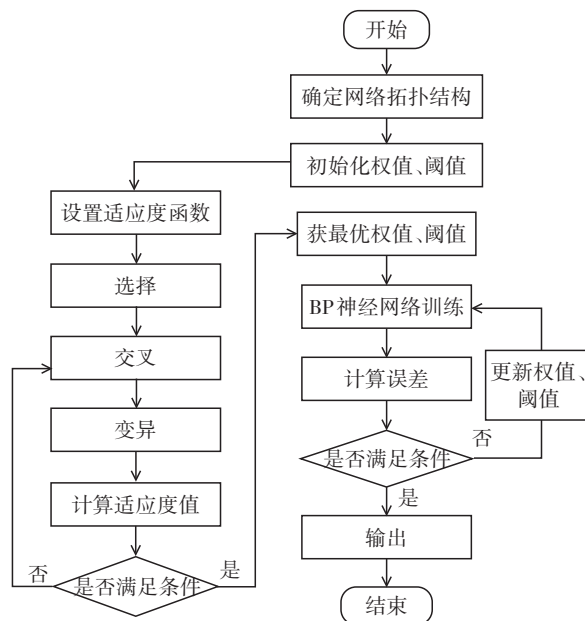


图2 GA-BP神经网络模型优化流程

表1和表2所示分别为BP神经网络和GA-BP神经网络的模型预测评价指标,对比表中数据可以看出,GA-BP神经网络的模型预测误差较BP神经网络小,说明通过遗传算法对BP神经网络初始权重和阈值的优化可提高模型的预测精度。GA-BP神经网络对4个输出参数预测的平均绝对百分比误差 M_{APE} 均小于6%,并且决定系数 R^2 均大于0.97,说明模型具有较高的预测精度和泛化能力。

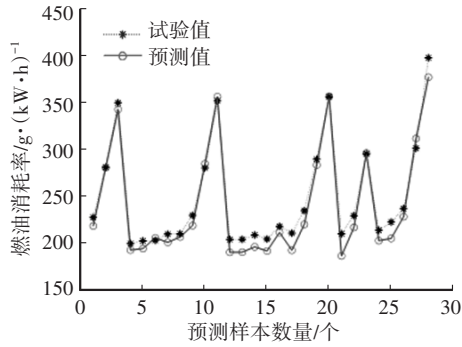
表1 BP神经网络的预测误差

参数	$M_{APE}/\%$	R^2
燃油消耗率	4.38	0.983 9
CO排放体积分数	6.73	0.974 4
NO _x 排放体积分数	10.14	0.982 3
THC排放体积分数	7.41	0.983 7
碳烟排放量	6.85	0.968 1

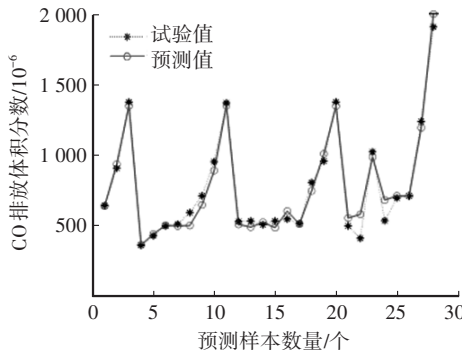
表2 GA-BP神经网络的预测误差

参数	$M_{APE}/\%$	R^2
燃油消耗率	4.18	0.987 4
CO排放体积分数	5.66	0.987 2
NO _x 排放体积分数	4.01	0.994 9
THC排放体积分数	5.77	0.988 4
碳烟排放量	5.28	0.976 1

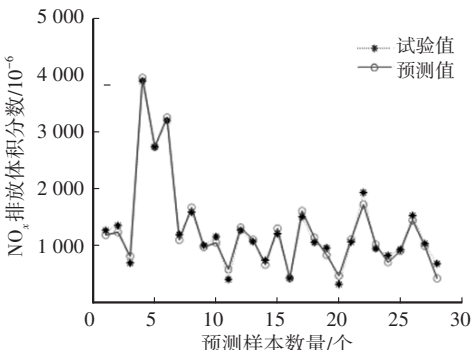
图3和图4所示分别为BP神经网络和GA-BP神经网络模型预测结果与试验结果的对比,BP神经网络和GA-BP神经网络模型的预测值的变化趋势与试验值基本一致,较好地反映了输出参数随输入参数的变化规律,GA-BP神经网络模型的预测值误差更小,具有更好的预测性能。



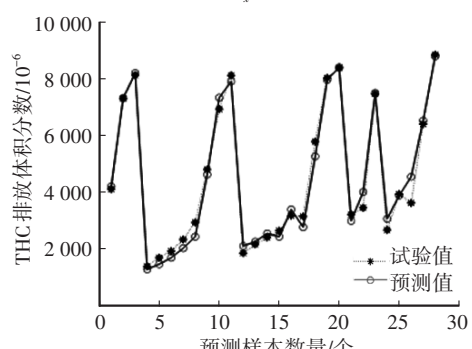
(a)燃油消耗率



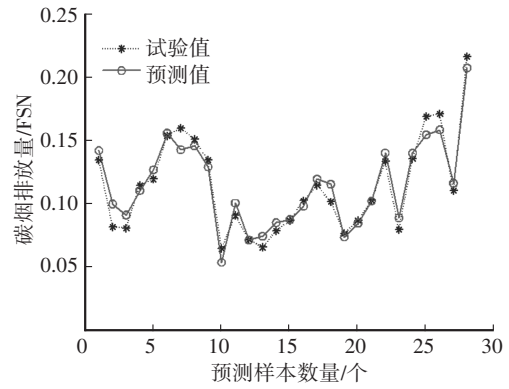
(b)CO排放量



(c)NO_x排放量

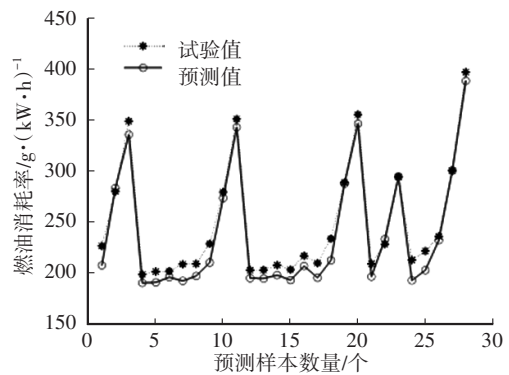


(d)THC排放量

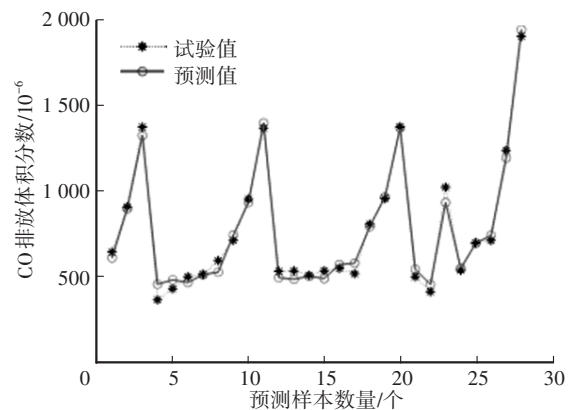


(e)碳烟排放量

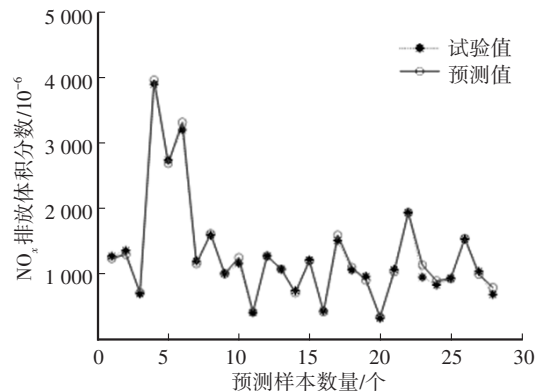
图3 BP神经网络模型预测值与试验值对比



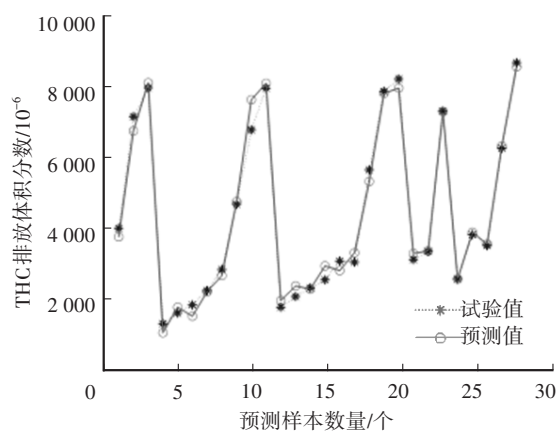
(a)燃油消耗率



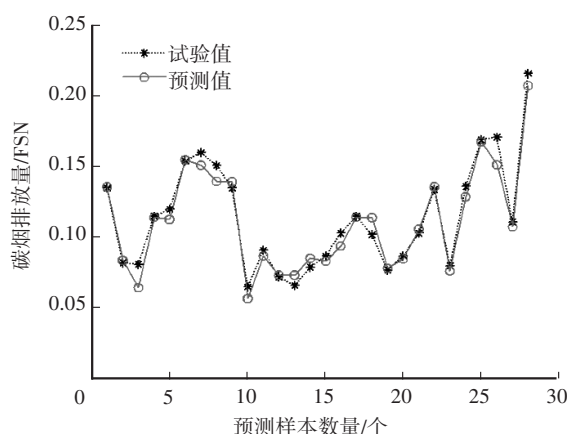
(b)CO排放量



(c)NO_x排放量



(d) THC 排放量



(e) 碳烟排放量

图4 GA-BP神经网络模型预测值与试验值对比

4 结束语

本文基于柴油/天然气双燃料发动机测试台架试验数据,以发动机扭矩、转速、喷油时刻、喷油压力和天然气替代率、过量空气系数为模型输入参数,以发动机燃油消耗率和 CO 、 NO_x 、THC排放体积分数和碳烟排放量为模型输出,构建了基于BP神经网络和基于遗传算法优化的GA-BP神经网络的预测模型。与BP神经网络模型相比,GA-BP神经网络模型的预测结果误差更小,具有更好的预测性能。GA-BP神经网络模型对5个输出参数预测的平均绝对百分比误差 M_{APE} 均小于6%,并且决定系数 R^2 均大于0.97,模型具有较高的预测精度和泛化能力。GA-BP神经网络预测模型可为天然气双燃料发动机运行参数的标定及优化提供参考。

参考文献

[1] OGUNLOWO O O, BRISTOW A L, SOHAIL M. Developing Compressed Natural Gas as an Automotive Fuel in Nigeria: Lessons from International Markets—ScienceDirect[J]. Energy

Policy, 2015, 76: 7–17.

[2] ZHENG J, WANG J, ZHAO Z, et al. Effect of Equivalence Ratio on Combustion and Emissions of a Dual-Fuel Natural Gas Engine Ignited with Diesel[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 738–751.

[3] CHEN H, HE J, ZHONG X. Engine Combustion and Emission Fuelled with Natural Gas: A Review[J]. Journal of the Energy, 2020(21): 71–72.

[4] 李志辉. 基于模型的电控发动机标定技术[J]. 内燃机与配件, 2020(21): 71–72.

Li Z H. Model-Based Electronic-Controlled Engine Calibration Technology[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(21): 71–72.

[5] 秦静, 郑德, 裴毅强, 等. 基于PSO-GPR的发动机性能与排放预测方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(7): 1489–1498.

QIN J, ZHENG D, PEI Y Q, et al. Prediction Method of Engine Performance and Emission Based on PSO-GPR[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(7): 1489–1498.

[6] DAVE V S, DUTTA K. Neural Network Based Models for Software Effort Estimation: A Review[J]. Artificial Intelligence Review, 2014, 42(2): 295–307.

[7] SYED J, BAIG R U, ALGARNI S, et al. Artificial Neural Network Modeling of a Hydrogen Dual Fueled Diesel Engine Characteristics: An Experiment Approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(21): 14750–14774.

[8] CAY Y, KORKMAZ I, CICEK A, et al. Prediction of Engine Performance and Exhaust Emissions for Gasoline and Methanol Using Artificial Neural Network[J]. Energy, 2013 (50): 177–186.

[9] RAMALINGAM K, KANDASAMY A, BALASUBRAMANIAN D, et al. Forecasting of an ANN Model for Predicting Behaviour of Diesel Engine Energised by a Combination of Two Low Viscous Biofuels[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(20): 24702–24722.

[10] TAGHAVI M, GHAREGHANI A, BAKHTIARI-NEJAD F, et al. Developing a Model to Predict the Start of Combustion in HCCI Engine Using ANN-GA Approach[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 57–69.

[11] 戴金池, 庞海龙, 俞妍, 等. 基于LSTM神经网络的柴油机 NO_x 排放预测[J]. 内燃机学报, 2020, 38(5): 457–463.

DAI J C, PANG H L, YU Y, et al. Prediction of Diesel Engine NO_x Emissions Based on Long-Short Term Memory Neural Network[J]. Transactions of CSICE, 2020, 38(5): 457–463.

[12] 李昌庆, 谢小平. 基于便携式排放测试系统与BP神经网络

- 络的大型客车排放预测[J]. 汽车技术, 2021(1): 57-62.
- LI C Q, XIE X P. Emission Prediction of Large Buses Based on Portable Emission Measurement Systems and BP Neural Network[J]. Automobile Technology, 2021(1): 57-62.
- [13] ABIODUN O I, JANTAN A, OMOLARA A E, et al. State-of-the-Art in Artificial Neural Network Applications: A Survey[J]. Heliyon, 2018, 4(11).
- [14] KAKATI D, ROY S, BANERJEE R. Development of an Artificial Neural Network Based Virtual Sensing Platform for the Simultaneous Prediction of Emission-Performance-Stability Parameters of a Diesel Engine Operating in Dual Fuel Mode with Port Injected Methanol[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 184: 488-509.
- (责任编辑 弦 歌)
- 修改稿收到日期为2022年11月7日。

《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》杂志创刊于1986年,是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车制造类月刊、中国汽车工程学会会刊,是全面报道汽车先进制造工艺与材料应用的专业性杂志。

《汽车工艺与材料》杂志始终致力于汽车制造新技术的开发(如汽车制造领域中的四大工艺)、新材料的研究应用、轻量化技术、智能制造、绿色制造技术、加工技术、生产装备、检测技术、数字化模拟技术及生产管理等方面的报道。努力为汽车及零部件生产中各门类的决策者及研究开发人员提供更好、更快、更节约成本的汽车行业发展动态信息,为其适应国内与国际激烈的汽车生产市场竞争提供有效的帮助。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商,及时报道汽车行业最新的设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目:

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求:

- (1)来稿须具有独创性并与实践相结合,文章字数最好控制在6000字以内。
- (2)来稿不能在国内、外公开杂志上发表过,严禁一稿多投,对同时一稿多投者,编辑部将视对本刊声誉、工作上造成的影响程度,采取相应处理措施。
- (3)来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。
- (4)来稿须包括以下项目:题名、作者姓名、作者单位、中文摘要(200字左右)、参考文献等。来稿采用word文档的格式。
- (5)来稿文章格式应符合一般科技论文格式,或参考近期本刊所刊登文章格式。
- (6)稿件图片请发清晰原图,图形尺寸应适中,并配上图名和图号,且文中要有相应体现(例如:如图1所示、见图2等)。图中英文需要翻译成中文。
- (7)计量单位必须采用(或换算成)中华人民共和国法定计量单位。文章中外文字母大小写、上下角标应书写正确,避免同一符号代表2种及以上物理量的情况出现。
- (8)文章必须附有公开发表的参考文献,且在文中应标注文献引用处。参考文献注册项目应齐全,包括作者姓名、题名、刊名(或书名,图书应注明出版地与出版社)、出版年、卷、期。
- (9)请在来稿时注明作者联系方式(包含手机、办公室电话、E-mail等)。
- (10)本刊投稿网址:<http://qcgycj.cbpt.cnki.net>,咨询电话:0431-82028069。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。