

基于卷积神经网络的柴油机 DPF 状态辨识研究

程德新¹, 赵树恩¹, 张 军^{2,3}, 王欣伟^{2,3}, 胡超超¹

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074;

2. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261000;

3. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261000)

摘 要:针对柴油机颗粒捕集器功能失效的问题,应用 GT-SUITE 软件对柴油机颗粒捕集器进行仿真分析,研究颗粒捕集器温度、压降和碳烟浓度等与其状态的关联关系,并采用一维卷积神经网络对颗粒捕集器状态特征“自学习”,提高颗粒捕集器状态辨识的准确度。

关键词:柴油机; 颗粒捕集器; 故障特征; 状态辨识

中图分类号:TK421+.5

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2022)02-0036-05

Study on State Identification of Diesel Engine DPF Based on Convolutional Neural Network

CHENG Dexin¹, ZHAO Shu'en¹, ZHANG Jun^{2,3}, WANG Xinwei^{2,3}, HU Chaochao¹

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weifang 261000, China;

3. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261000, China)

Abstract: According to the failure problem of the diesel particulate filter function, the authors simulate and analyze the diesel engine DPF through GT-SUITE software and study the relationship between the DPF state with its temperature, pressure drop, and soot concentration. Then, they improve the accuracy of DPF state identification through applying the one-dimensional convolutional neural network self-learning the state features.

Key words: diesel engine; DPF; fault characteristics; state identification

面对更为严苛的国 VI^[1] 排放标准,仅通过机内燃烧技术很难满足要求。柴油机颗粒捕集器(DPF)作为后处理系统的关键部件,长期在较高的排气温度、机械振动、热冲击等恶劣环境下工作,容易发生烧熔、断裂和堵塞等故障,对发动机动力性、经济性和排放造成影响,严重时危害人体健康。针对 DPF 故障诊断问题,文献[2-8]各自提出了相应的方法,但这些方法还存在诊断模型复杂、鲁棒性差、传感器精度要求高等问题。本文提出一种基于卷积神经网络的状态辨识方法,对上述问题予以改善。

1 DPF 状态特征仿真分析

柴油机运行过程中,由于颗粒物不断累积、再生不完全或失败会导致后处理装置堵塞,出现燃烧变差、熄火和启动困难等现象,甚至会通过 ECU 降低发动机的峰值扭矩,限制车辆的行驶速度;另外,碳烟过多会使再生温度过高导致 DPF 载体基质烧融,温度梯度过大会导致载体烧裂,机械振动会导致载体结构破损,最终会造成部分废气未进行处理便直接排向大气;更为严重的是将 DPF 移除会对环境造成重大影响^[9-10]。因此,需要事先通过仿真分析 DPF 的不同

收稿日期:2021-11-29。

基金项目:内燃机可靠性国家重点实验室开放基金项目(SKLER-201912)。

第一作者:程德新(1995—),男,硕士研究生;主要从事柴油机后处理系统故障诊断研究工作。E-mail:156412991@qq.com。

状态与其特征参数之间的关系,为 DPF 状态辨识所需的神经网络训练参数的选择提供依据。

1.1 DPF 仿真模型及验证

根据所用发动机的试验数据,运用 GT-SUITE 软件搭建柴油机 DPF 的仿真模型,如图 1 所示。DPF 主要结构参数如下:长度 304.8 mm,直径 203.2 mm,壁厚 0.228 6 mm,目数 300,孔隙率 52%,进出口孔径比例 1.3,催化剂 3 g/cft。

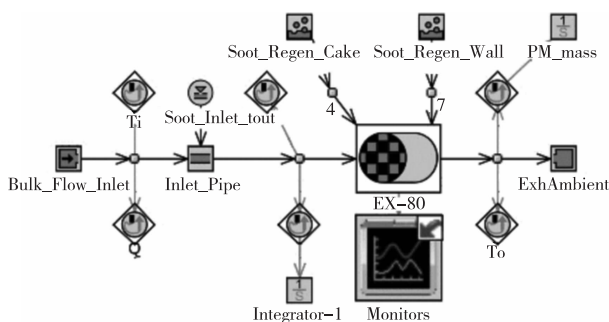


图1 DPF 仿真模型

为验证仿真模型的准确性,将仿真结果与试验结果进行比较。仿真入口参数为采集的试验数据,即 WHTC 工况下排气体积流量、DPF 上游温度和碳烟质量流量,出口初始环境为 1.05 bar、28 ℃。在 DPF 正常状态(即表 1 中“正常”)下仿真和试验得到的压差和出口温度曲线如图 2 和图 3 所示。

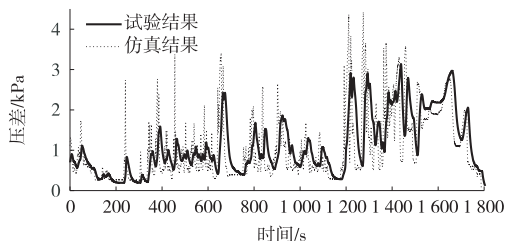


图2 DPF 压差随时间变化曲线

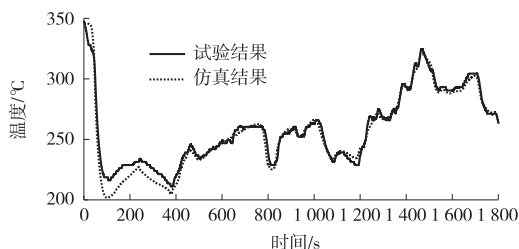


图3 DPF 出口温度随时间变化曲线

从图 2 和图 3 中可以看到,WHTC 工况下,仿真与试验结果趋势一致,但图 2 中脉冲峰值偏差较大,

主要原因是排气流量变化剧烈,压差传感器过于灵敏,使得高频信号载入后对其他信号造成影响,因此,需要对压降信号进行滤波处理。图 3 中出口温度相对偏差较小。因此,构建的仿真模型精度较高,可以用于 DPF 不同状态特征的模拟仿真。

1.2 DPF 不同状态特征仿真分析

通过破坏试验研究 DPF 不同状态特征的成本较高,故采用上节中经过验证的仿真模型调节 DPF 不同参数来模拟不同状态。根据国 VI 排放标准,主要对 DPF 载体堵塞、破损和移除三种典型状态的特征参数进行仿真分析。分别通过增加 DPF 的碳载量模拟载体堵塞、增大载体的渗透率和孔径模拟破损、用等尺寸直管等途径模拟 DPF 载体(即 DPF 滤芯)移除等典型状态,采用“故障回注”策略,分析 DPF 不同状态时其压降、出口温度、出口端碳烟浓度和碳烟累积排放量的变化情况。DPF 不同状态模拟输入参数见表 1,仿真结果分别如图 4~6 所示。

表1 DPF 不同状态模拟仿真参数

状态类型	碳载量/(g·L ⁻¹)	渗透率	孔径/μm
正常	0	6E-7	24.4
载体堵塞	4	6E-7	24.4
载体破损	0	1E-5	31.5

从图 4 中可以看出,当载体发生堵塞时,气流流动阻力增加,使得 DPF 前后压差较大;当载体发生破损时,部分气流不再流经过滤壁,而是直接从破损处流向出口通道,流动阻力减小,使得压差降低;当 DPF 载体被人为移除时,DPF 上的压差传感器检测到压力变化微小,其前后压降几乎为零。

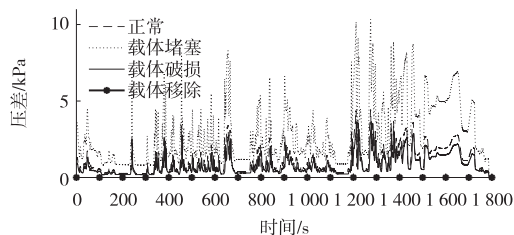


图4 DPF 不同状态压差变化曲线

从图 5 可知,堵塞和破损对 DPF 出口温度影响程度较小,但是将 DPF 载体拆除后,热流流速显著增加,温度沿程损失几乎为零,出口温度与入口温度几

乎相等,因此移除载体对DPF出口温度影响较大。整体趋势有如下规律:随着DPF堵塞程度增加,DPF出口温度时延特性增加;随着过滤器载体破损程度增加,DPF出口温度变化较正常状态更灵敏。

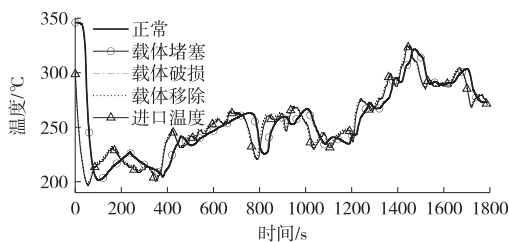
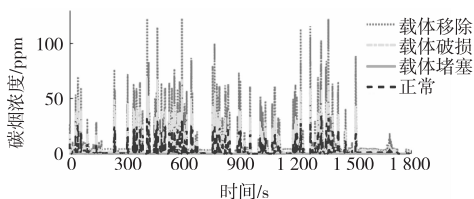
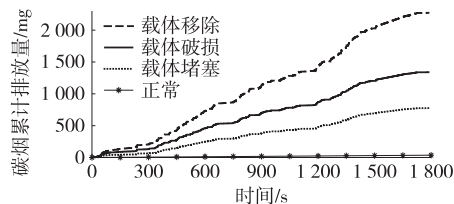


图5 DPF不同状态出口温度变化曲线



(a) DPF不同状态出口端碳烟浓度



(b) DPF不同状态出口端碳烟累计排放量变化

图6 DPF不同状态与出口碳烟之间的关系

图6为DPF状态与出口碳烟之间的关系,随着碳烟在通道不断累积,颗粒捕集器的渗透率会进一步减小,故出口碳烟累计排放量更少,仅占正常排放量的0.39%;当载体破损时,部分废气流直接从破损处流出,DPF的过滤效率降低,出口碳烟累积量明显增加,相比正常状态增加了76.22%;当载体移除后无法过滤排气中的颗粒物,故捕集效率为零,碳烟排放量显著增加,是DPF正常排放量的193.45%。

2 基于卷积神经网络DPF状态辨识

2.1 基于1D-CNN的DPF状态辨识模型构建

通过对DPF不同状态仿真研究发现,在瞬态工况下,DPF不同状态所引起的发动机排气压力降、温度和碳烟浓度等变化存在一定规律,但是难以通过精确的函数来拟合故障类型与它们之间的关联关系。因

此,运用卷积神经网络对DPF不同状态下发动机排气流量、转速、DPF进出口温度、压降和碳烟浓度等多元数据特征“自学习”,利用卷积网络非线性特性来实现DPF状态辨识是一种有效手段。本文采用一维卷积神经网络(1D-CNN)进行DPF状态辨识。

1D-CNN是处理二维图像卷积神经网络(2D-CNN)的一种变形,在处理一维信号方面具有明显优势,近年来广泛应用于疾病监测、结构损伤检测、轴承故障和电机故障监测等领域。DPF状态辨识模型的1D-CNN主要由输入层、卷积层、池化层、全连接层等组成,其中输入层为DPF工作相关的一维时间序列数据。本文搭建的1D-CNN主要结构如图7所示。

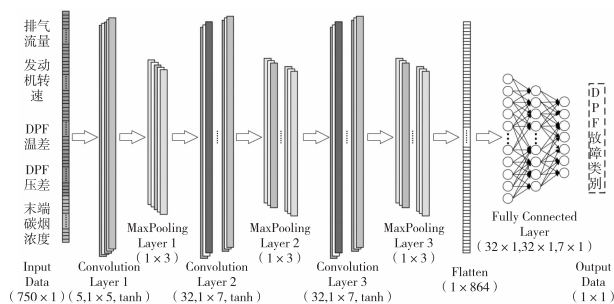


图7 一维卷积神经网络DPF状态辨识模型结构

2.2 卷积神经网络状态辨识模型样本数据

为解决试验数据样本量不足的问题,采用“故障回注”策略,仿真得到不同DPF状态下的特征参数,将试验数据和仿真数据共同作为样本库,即WHTC工况下的实测数据和基于GT-Suite仿真模型分别在0 g/L、1.2 g/L、2.5 g/L、3 g/L~5.75 g/L(其间间隔0.25 g/L)碳载量下的仿真数据,通过设置数据采样频率(10 Hz),获取包含排气体积流量、DPF入口温度、DPF出口温度、DPF压差、发动机转速和出口碳烟浓度6组相关数据,将获得的数据参考国VI标准^[1]以15 s为时间段进行切片操作,再进行数据拼接融合,并进行one-hot编码。完成数据构建后,最终得到2 520组(750,1)数据样本,并将70%(1 764组)的数据作为训练集,剩余30%的数据作为测试集,完成最终样本构建。

2.3 结果与分析

在1D-CNN模型训练过程中,训练损失函数选择交叉熵损失函数,优化算法选择Adam,学习率为

0.001, 迭代次数为 500 次, 训练批量设置为 128。为有效抑制网络过拟合现象, 在训练中适当加入了 Dropout 层来随机抑制部分神经元响应。模型训练的准确率和损失如图 8 所示。

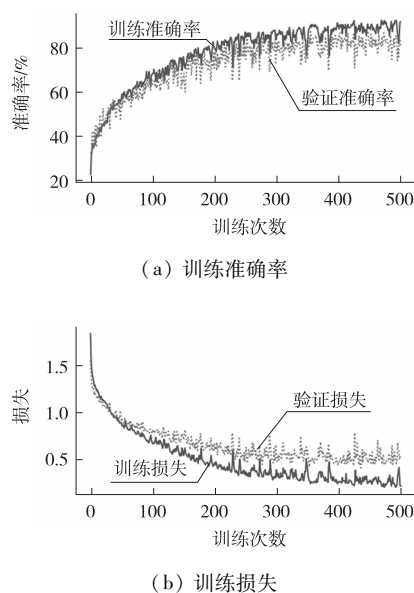


图 8 网络模型训练结果

通过对 1 764 组数据进行模型训练, 采取 10 折交叉验证, 得到模型的训练准确率和验证准确率分别为 91.43% 和 83.05%, 模型训练损失分别为 0.228 2 和 0.452 1。为了对比不同神经网络模型对 DPF 状态辨识的准确度, 本文还采用了反向传播神经网络 (BPNN) 和长短期记忆网络 (LSTM)。三种网络的应用结果见表 2。

表 2 不同辨识模型对比

辨识模型	测试准确率/%	训练时间/min
BPNN	19.76	1.33
LSTM	51.32	26.2
1D-CNN	85.71	4.10

通过表 2 可以发现, BPNN 和 LSTM 对 DPF 相关数据的特征提取较弱, 难以实现 DPF 状态辨识, 且 LSTM 在训练时间上相对更长。相反, 1D-CNN 以其特殊的卷积和池化层对数据特征提取能力较强, 模型测试精度较高, 训练时间较短, 计算复杂度较低。

应用 1D-CNN 进行 DPF 状态辨识的结果如图 9 所示。可以看到, 1D-CNN 对 DPF 载体正常、轻度堵塞、严重堵塞、破损的分类准确率在 90% 左右, 对

DPF 移除的分类准确率达到 100%, 但对中度堵塞 I 和 II 的分类准确率只有 70% 多。因此, 在实际应用中 1D-CNN 辨识并不能确保 100% 的准确率, 而可以通过计数统计的方式, 将一段时间内激活次数最多的状态作为最终辨识结果。

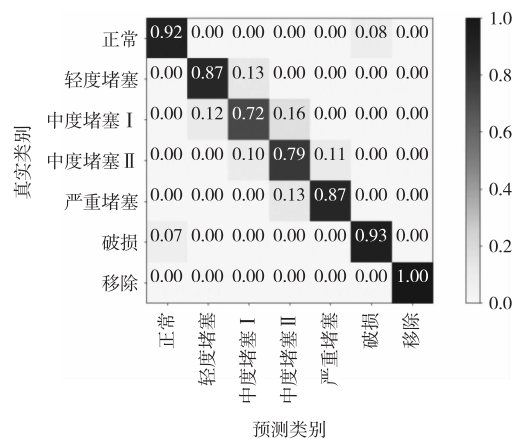


图 9 测试集识别结果

总体来说, 采用 1D-CNN 对 DPF 相关数据特征的“自学习”, 对 DPF 的工作状态的辨识具有较高的精度, 可以有效地尽早发现 DPF 故障信息, 便于提前采取措施, 有利于提高发动机性能和减少污染物排放。

3 结束语

通过研究 DPF 不同状态特征及其对排放的影响, 得出载体不同状态与特征参数的变化规律, 并提出利用卷积神经网络来“自学习”这种规律, 实现对 DPF 工作状态识别, 为设计开发国 VI 甚至更严格的 OBD 系统提供参考。

参考文献:

- [1] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段): GB 17691—2018 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2019: 221—222.
- [2] Gupta A, Franchek M, Grigoriadis K, et al. Model based Failure Detection of Diesel Particulate Filter [C] // American Control Conference. IEEE, 2011: 1567—1572.
- [3] ZHANG Bin, GONG Jinke, E Jiaqiang, et al. Failure Recognition of the Diesel Particulate Filter based on Catastrophe Theory [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering,

- 2016, 94(3):596-602.
- [4] 姚广涛,郭子荣. 基于压力信号谱分析的 DPF 故障诊断策略研究[J]. 汽车工程,2015(7):831-834.
- [5] 姚广涛,伍恒,张卫锋,等. 基于温度数据相关分析的 DPF 故障诊断策略[J]. 内燃机工程,2016(3):36-41.
- [6] LIU Shuangxi, LYU Ming. Fault Diagnosis of the Blocking Diesel Particulate Filter Based on Spectral Analysis [J]. Processes,2019,7(12):943.
- [7] KIM J,KIM C,CHOUNG Sukjin. Comparison Studies on Sintering Phenomenon of Diesel Oxidation Catalyst Depending upon Aging Conditions[J]. Catalysis Today, 2012, 185(1):296-301.
- [8] Rubino L,Thier D,Schumann T,et al. Fundamental Study of GPF Performance on Soot and Ash Accumulation over Artemis Urban and Motorway Cycles – Comparison of Engine Bench Results with GPF Durability Study on Road, September 4, 2017[C]. SAE International in SAE Technical Paper Series, 2017.
- [9] 张卫锋,伍恒,姚广涛,等. 基于正交最小二乘模型拟合的 DPF 故障诊断方法[J]. 内燃机工程,2017(1):18-23.
- [10] 戴金池,庞海龙,俞妍,等. 柴油车 DPF 系统的 OBD 故障诊断策略研究[J]. 车用发动机,2020(1):80-85.

招商车研承接的国内某大型企业纯电动乘用车底盘性能调校项目顺利通过验收

近日,由招商局检测车辆技术研究院有限公司(简称“招商车研”)承接的国内某大型企业纯电动乘用车底盘性能调校项目验收会成功召开,该企业相关领导、专家和招商车研底盘性能开发项目团队参加了会议。

会上,招商车研底盘性能开发项目团队就底盘调校工作及性能提升情况进行了详细介绍。该企业对调校后的样车性能表现高度认可,并对招商车研项目团队的工作能力和执行力表示高度赞扬。项目顺利通过了结题验收。

该项目历时三个月,项目团队通过 150 余组方案的匹配调校,包括性能仿真、主客观测试评价及性能调校等,大幅提升了该车型的操稳性能、乘坐舒适性能及转向性能,各项性能指标达到了国内先进水平。

底盘性能开发验证是招商车研战略转型升级的重要发展方向,招商车研将继续坚持“服务行业发展,成就社会价值”的企业宗旨,深耕技术革新,赋能产业发展。

(招商车研张红、祝阳供稿)