

撰稿论文格式

基于振动仿真的柴油机喷油器故障诊断机理研究

李宝月¹, 余永华^{1,2,3}, 曹炳鑫¹, 尧阳烽¹, 徐德峰¹

(1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 船舶动力工程技术交通运输行业重点实验室, 武汉 430063; 3. 武汉理工大学 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 武汉 430063)

Mechanism study of diesel injector fault diagnosis based on vibration simulation

Li Baoyue¹, Yu Yonghua^{1,2,3}, Cao Bingxin¹, Yao Yangfeng¹, Xu Defeng¹

(1 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China, 2 Key Laboratory of Marine Power Engineering and Technology Under Ministry of Transport of People's Republic of China, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China, 3 National Engineering Laboratory of Ship and Marine Engineering Power Systems, Wuhan 430063, China)

Abstract: How to obtain sufficient and usable labeled data has become a major obstacle to restrict the data-driven fault identification method, and simulation is a good data acquisition method. Therefore, based on AMESIM, we constructed a high-pressure common rail system model, AVL-fire in-cylinder combustion model, AVL-excite machine vibration simulation model, combined with bench experiments to complete the calibration of the simulation model, generated the cylinder head vibration simulation data under different fault states of the injector, and used the Support Vector Machine (SVM) to carry out the fault identification on the vibration simulation data, with an accuracy rate of 100%.

摘要: 如何获取足量、可用的有标签数据成为了制约基于数据驱动的故障识别方法一大阻碍, 仿真是一种不错的数据获取方法。因此, 基于 AMESIM 构建高压共轨系统模型、AVL-fire 缸内燃烧模型、AVL-excite 整机振动仿真模型, 结合台架实验完成对仿真模型的标定, 生成喷油器不同故障状态下的缸盖振动仿真数据, 并用支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 对振动仿真数据进行故障识别, 准确率达到 100%。

关键词: 故障诊断; 喷油器; 仿真; 振动

Key words: fault diagnosis; injector; simulation; vibration

中图分类号: TK422

文献标识码: A

0 概述

电控高压共轨燃油喷射系统可在柴油机全工况范围内对燃烧性能进行优化, 有效提高了柴油机的热效率、降低了有害物质的排放[1]。然而长期处于缸内高温、高压的恶劣工作环境, 长时间高负荷的工作, 喷油器这个电控高压共轨燃油喷射系统的核心部件难免会发生各种故障[2,3], 从而影响柴油机

的正常工作, 因此开展喷油器的故障诊断技术研究具有十分重要的意义。

目前在喷油器故障诊断方面国内外学者开展了相关研究。Zabihi 等分析了进气歧管和气缸盖的振动信号的时域、频域及时频特征, 对柴油机异常喷射故障的诊断正确率达 98.34%[4], Zhang 等将 BP 算法和 ANN 应用于柴油机燃油喷射系统故障诊断,

收稿日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (船用中速柴油机油气协同自主控制策略研究), 项目号: 52271328

作者简介: 李宝月 (1994-), 男, 博士生, 主要研究方向为柴油机故障诊断, E-mail:2997617439@qq.com; ;

余永华 (通讯作者), E-mail: yyhua@whut.edu.cn。

建立了柴油机燃油喷射系统使用 BP 神经网络方法的故障诊断模型[5]。余永华等[6]采用声发射技术、迁移学习方法实现了喷油器喷孔堵塞的跨机型、跨工况故障诊断。此外,金江善、李良钰、秦慈伟等[7-10]人也对高压共轨系统相关部件进行了故障诊断研究工作。

上述基于数据驱动的故障诊断方法在训练模型过程中需要大量实验数据,随着机器学习和深度学习技术不断的发展和成熟,数据驱动故障诊断方法得到更加广泛的应用,但高精度的学习模型通常需要足量的标签数据样本来训练,然而柴油机运行载荷跨度大、工况复杂多变,难以获取准确、完备的故障信息,故障数据稀缺的问题造成难以独立学习到可用的故障诊断模型,足量典型故障数据不足的问题制约了故障预测与健康管理的深入研究。柴油机运行载荷跨度大、工况复杂多变,难以获取准确、完备的故障信息,故障数据稀缺的问题造成难以独立学习到可用的故障诊断模型,足量典型故障数据不足的问题制约了故障预测与健康管理的深入研究。

仿真是一种不错的数据获取方法,可有效降低实验成本,另一方面生成的仿真数据天然具有标记信息,减轻了数据标记的工作量。因此,本文以 MAN16/24 型改进柴油机为研究对象,基于 AMESIM 构建该机型的高压共轨系统并实现喷油器的 4 种常见故障模拟,随后以对应故障条件下的喷油量、喷油规律为输入,仿真各故障状态下的缸压,将缸压作为柴油机整机振动仿真的输入,仿真喷油器故障条件下的缸盖振动数据,最后基于仿真的振动数据实现对喷油器的故障识别。

1 喷油器故障及故障条件下缸压仿真

1.1 喷油器仿真模型

本文基于 AMESIM 平台构建高压共轨仿真模型,其中喷油器子模型如图 1 所示。依据台架试验结果对仿真模型进行标定,实验台架可调整喷油器的喷油压力与喷油正时,可对喷射出柴油的体积进行测量,图 2 为高压共轨实验台架,1600bar 轨压下不同喷油正时的仿真喷油量与实测喷油量如图 3 所示,仿真结果和试验台架测试结果一致性较高,二者之间的小范围误差合理,证明了 AMEIM 仿真模型的准确性,表明建立的仿真模型可用于喷油器故障仿真研究。

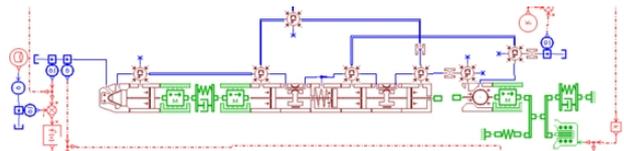


图 1 喷油器 AMESIM 子模型



图 2 高压共轨实验台架

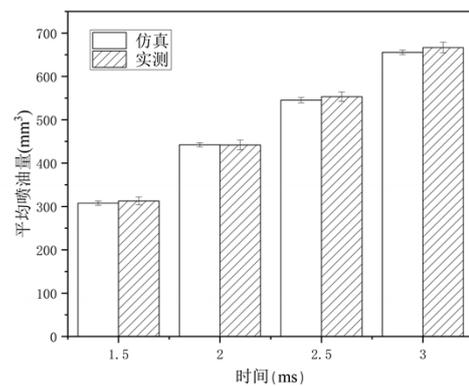


图 3 1600bar 轨压不同喷油脉宽下实验与仿真喷油量对比

1.2 喷油器故障分析及仿真

本文仿真了喷油器四种常见故障。

(1) 堵孔

柴油在燃烧不充分的情况下会形成积碳,容易积累在喷孔周围,导致喷孔堵塞。另外船用柴油机出于经济成本燃烧的重油内含有较多的杂质,这使得船用发动机更容易发生喷油器堵孔故障。在仿真时通过更改喷油器喷孔数量实现对该故障的仿真。堵孔故障下喷油规律曲线如图 4 所示。

(2) 起阀压力降低

喷油长期使用过程中,调压弹簧刚度会随着使用时长而逐渐缩小,最终导致预紧力减小,启阀压力降低,使得喷油提前,喷油量增加,燃油雾化质量变低,出现冒黑烟、排放恶化等现象。在 AMESIM 中通过修改弹簧刚度系数实现该故障的仿真。弹簧刚度降低故障下的喷油规律曲线如图 4 所示。

(3) 滴漏

喷油器工作时,针阀要高频地反复冲击针阀体锥面,二者接触面不断冲击,导致接触面密闭效果不好,另一方面,燃油油中的杂质不断对针阀体

锥面的冲刷、磨损，也会导致接触面密封效果降低，从而出现喷油器滴漏故障。在 AMESIM 中通过修针阀与锥面的间隙实现该故障的仿真。喷油器滴漏故障下的喷油规律曲线如图 4 所示。

(4) 针阀卡滞

在使用过程中，燃油内部难免混有颗粒杂质，长期积累在针阀体内，杂质堆积在针阀体内壁，最终造成针阀卡死，最终导致喷油量减少，喷雾质量下降，燃烧效率降低。在 AMESIM 中通过限制针阀的位移大小来实现针阀卡滞故障的仿真。针阀卡滞故障下的喷油规律曲线如图 4 所示。

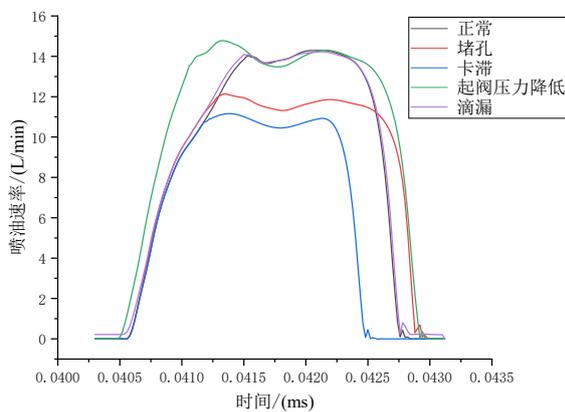


图 4 喷油器四种故障与正常工况下喷油速率

1.3 缸压仿真

本文采用 AVL-fire 进行缸压仿真，其中网格大小设定为 1mm，其中在 0° CA 上止点的网格数量为 4114，在 180° 下止点的网格数量为 19271。缸内计算过程中所采用的 fire 相关模型如表 1 所示。此外对燃烧模型的控制参数及缸内涡流比等参数用实验进行标定。fire 仿真 50% 负典型工况下缸压与实测缸压对比如图 5 所示，可以看出仿真与实测缸压具有较高的一致性，证明了 fire 仿真模型的准确性。fire 仿真的缸压可用于振动计算。

表 1 fire 仿真部分参数

喷孔数	9
喷孔直径	0.24
喷孔角度	143°
喷射起始角	710° CA
燃烧模型	Eddy Breakup Model
着火模型	Shell Model
湍流模型	k-zeta-f
喷雾液滴破碎子模型	KHRT

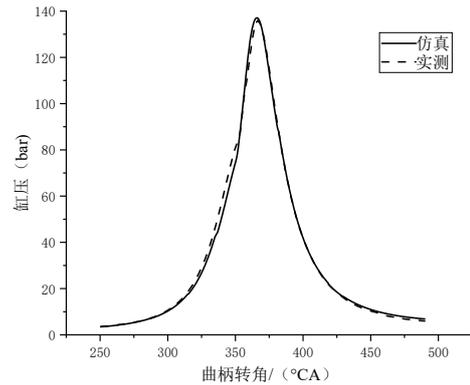


图 5 柴油机 50% 负荷下缸压仿真结果与实测对比

2 柴油机振动仿真

2.1 柴油机三维模型前处理

本文采用 AVL-excite 仿真柴油机的整机振动。先依据实际发动机参数进行三维模型建模，采用 hypermesh 进行三维模型前处理，处理后各部分网格数量及材料属性如表 2 所示，整机有限元模型如图 6 所示。

表 2 柴油机网格、节点数量及材料属性

部件	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 /MPa	泊松比	节点数	网格数
曲轴	7850	21000	0.3	404474	2035198
主轴瓦	7870	210000	0.286	30625	87000
缸盖	7800	141000	0.3	329599	1526042
油底壳	7850	200000	0.26	69435	237921
机体	7000	150000	0.27	288775	1287336
缸套	7270	122500	0.3	64128	300027

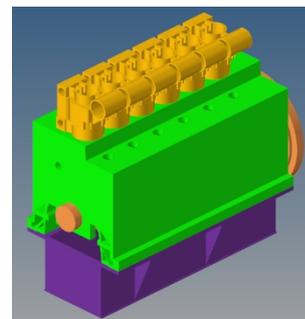


图 6 整机有限元模型

2.2 柴油机振动仿真

在 AVL-Excite PU 软件中对柴油机整机振动进行仿真计算, 图 7(a)为整机多体动力学二维模型。在计算过程中为降低有限元模型自由度数量, 提高计算效率, 对有限元模型进行模态缩减, 缩减后的主节点的柴油机模型如图 7(b)所示。在振动仿真过程中由于主要考虑喷油器故障对缸盖振动的影响, 因此在振动仿真过程中主要考虑运动件惯性力、缸内气体压力对缸盖振动的影响。图 8 为 50%负荷下 4 号缸盖仿真振动及频谱图, 图 9 为 50%负荷下实测缸盖振动及频谱图, 图 8、图 9 相对比可以发现 AVL-excite 仿真的振动结果与实测相接近, 证明了仿真模型的正确性。

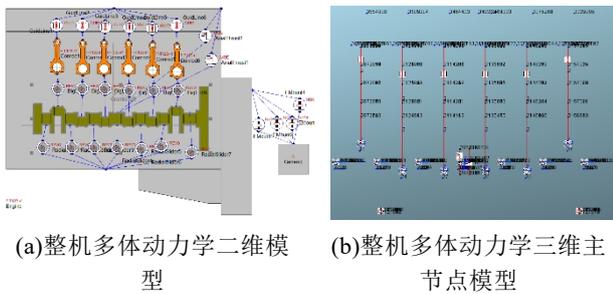
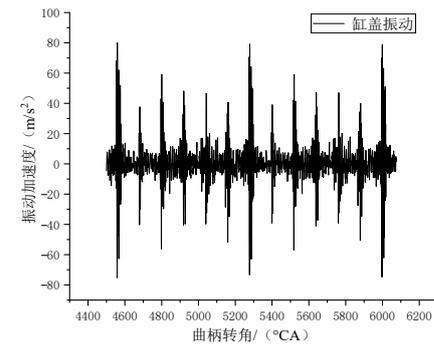
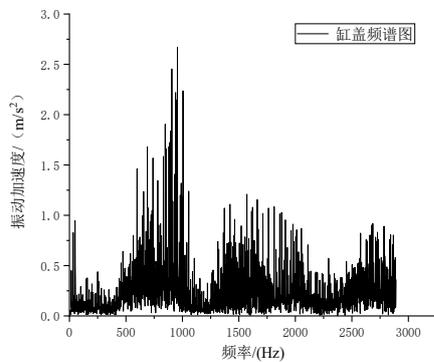


图 7 发动机 AVL Excite 模型图

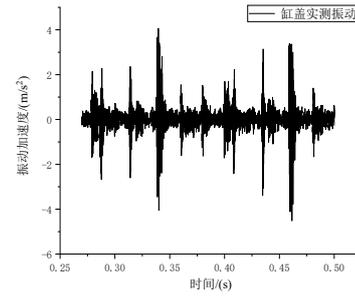


(a) 缸盖仿真振动

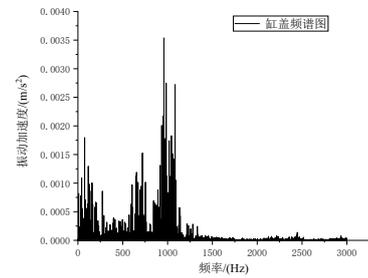


(b) 仿真频谱图

图 8 50%负荷下缸盖仿真振动及频谱图



(a) 缸盖实测振动

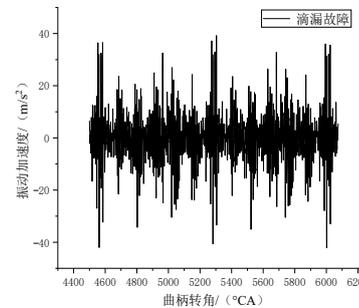


(b) 实测频谱图

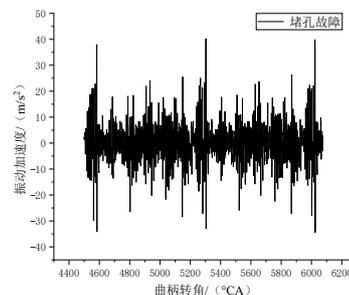
图 9 50%负荷下实测缸盖振动及频谱图

2.3 喷油器故障下的振动仿真

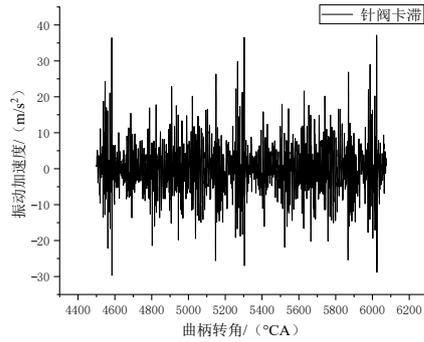
喷油器在发生故障后会导致喷油量、喷油规律的变化, 导致缸内燃烧压力的变化, 发动机的振动响应随之变化, 图 10 为 50%负荷下喷油器四种故障下发动机的缸盖振动仿真。



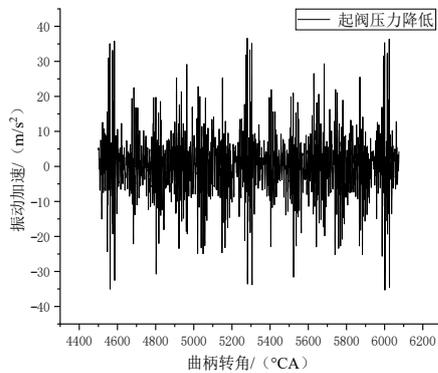
(a) 喷油器滴漏故障仿真振动



(b) 喷油器堵孔故障仿真振动



(c) 喷油器针阀卡滞故障仿真振动



(d) 喷油器起阀压力降低故障仿真振动

图 10 喷油器故障下发动机振动

3 基于振动的发动机喷油器故障诊断

3.1 数据集构建

因喷油器主要对燃烧段的振动造成影响，且振动仿真过程中未仿真进排气阀的激励，因此截取燃烧段的数据作为诊断数据，截取的数据长度为 1024，共有五种模式（含正常状态），每种故障模式有 50 个样本，将数据集按 4:1 的比例划分成训练集、测试集。数据集详细信息如表 3 所示。

表 3 仿真数据集信息

故障类型	数据标签	样本数量
滴漏	1	50
堵孔	2	50
针阀卡滞	3	50
起阀压力降低	4	50
正常	5	50

3.2 基于 SVM 的故障诊断

基于 SVM 的故障诊断需要划分数据集、特征参数提取以及构建故障诊断模型等步骤。首先对划分好的数据进行信号分析与处理，用以提取其特征参数。在发生故障时，数据的幅值、分布等时域特征可能会发生变化，另外频谱的分布也有可能发生变化，产生不同的频率分量，因此本文选取了应用范围较广泛的 12 个时域特征，8 个频域特征。部分公式如表 4 所示。

表 4 时、频域公式

公式名	公式
峰峰值	$p_1 = \max(x(n)) - \min(x(n))$
均值	$p_2 = \frac{\sum_{n=1}^N x(n)}{N}$
方差	$p_3 = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - p_2)^2}{N - 1}$
标准差	$p_4 = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - p_2)^2}{N - 1}}$
均方根值	$p_5 = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n))^2}{N}}$
方根幅值	$p_6 = \left(\frac{\sum_{n=1}^N \sqrt{ x(n) }}{N} \right)^2$
偏度	$p_7 = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - p_2)^3}{(N - 1)p_4^3}$
峭度	$p_8 = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - p_2)^4}{(N - 1)p_4^4}$
波形因子	$p_9 = \frac{\max x(n) }{p_5}$
峰值因子	$p_{10} = \frac{p_5}{ p_2 }$
脉冲因子	$p_{11} = \frac{\max x(n) }{ p_2 }$
裕度因子	$p_{12} = \frac{\max x(n) }{p_6}$
频域平均能量	$p_{13} = \frac{\sum_{k=1}^K s(k)}{K}$
重心频率	$p_{14} = \frac{\sum_{k=1}^K f_k s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}$

将从数据集中提取出的特征，组成特征数据集，输入到 SVM 故障诊断模型中。数据集由原来的 125×1024 （样本数 \times 数据点数）的维度，降低到了 125×20 （样本数 \times 特征数）的维度，并将特征数据进行归一化，从而降低训练时间，还可以更快地迭代模型，同时提取的特征相较于原始信号有更好的可解释性。

SVM 是一种经典的、用于二分类、多分类以及回归的监督学习模型，适用于大数据量、高维数据，并且具有较高的分类准确率。本文采用 SVM 的方法对特征数据集进行分类识别。最终基于 SVM 方法训练集准确率为 100%，测试集准确率 100%，混淆矩阵如图 11 所示。

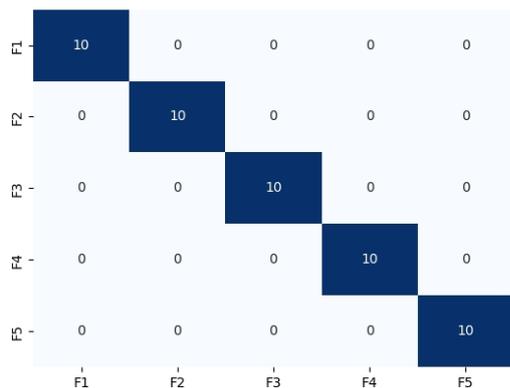


图 11 SVM 分类混淆矩阵图

4 结论

(1) 本文针对故障诊断过程中故障样本数据缺乏的问题，通过构建船用柴油机高压共轨系统、缸内燃烧过程和整机缸盖振动响应仿真模型，经实验标定和验证后，形成具有故障仿真功能的模型，通过注入故障方式获取喷油器故障条件下缸盖振动响应数据，为开展喷油器故障诊断机理研究提供了数据支撑。

(2) 针对喷油器五种不同状态下的振动数据，通过提取振动数据特征值并将其归一化，最终实现了基于 SVM 方法的喷油器不同状态的识别分类，由于仿真信号过于理想化，信噪比过高，故障识别率达到了 100%。

未来考虑在仿真信号中添加噪声等方法，减少仿真样本与实测样本之间的领域差异，进一步提高仿真数据的真实性、可用性。

参考文献:

- [1] 杨强,杨建国. 船用中速柴油机高压共轨系统的现状与发展趋势[J].船海工程,2019,48(03):142-146.
- [2] 郑涛. 高压共轨系统喷油器故障诊断与健康评估研究[D].哈尔滨工程大学,2021.
- [3] 李瑞良. 电控燃油系统异常喷射故障诊断方法研究[D].哈尔滨工程大学,2020.
- [4] Zabihi-Hesari A, Ansari-Rad S, Shirazi F A, et al. Fault detection and diagnosis of a 12-cylinder trainset diesel engine based on vibration signature analysis and neural network[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(6): 1910-1923.
- [5] Zhang B, Yan J, Tian C. Study on fault diagnosis system of diesel engine fuel injection system based on BP neural network[C]//2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. IEEE, 2008, 2: 108-112.
- [6] 余永华,贾海超,胡嘉等. 柴油机喷油器喷孔堵塞声发射诊断技术研究[J].内燃机学报,2022.
- [7] 金江善. 基于在线测试技术的船用大功率柴油机电控共轨系统故障诊断研究[D].中国舰船研究院,2017.
- [8] 李良钰,苏铁熊,马富康等. 基于集合经验模态分解-支持向量机的高压共轨系统故障诊断方法[J].兵工学报,2022,43(05):992-1001.
- [9] 金江善,董晓露,秦慈伟,桑晓琳. 基于概率神经网络的船用柴油机共轨系统限流阀故障诊断研究[J].内燃机工程,2018,39(03):81-87.
- [10] 秦慈伟,金江善,董晓露,桑晓琳,汪冰吉. 基于压力信号的船用柴油机共轨系统高压油泵典型故障诊断研究[J].柴油机,2019,41(03):16-21.