

柴油机机体振动信号时域特征值分析

潘驰¹, 盖永田^{2,3}, 安国^{2,3}, 马鑫^{2,3}, 王金勇^{2,3}, 纪少波^{1*}

1. 山东大学核科学与能源动力工程学院, 山东 济南 250061; 2. 济南汽车检测中心有限公司, 山东 济南 250013;
3. 中国重型汽车集团有限公司, 山东 济南 250102

摘要:为研究内燃机运行状态及主轴承间隙对机体表面振动信号的影响,搭建某六缸柴油机试验台架,以机体表面振动加速度的峰峰值、整流平均值、方差、标准差及方根幅值为时域特征值,分析在发动机不同转速、输出转矩、机油温度及主轴承间隙条件下对振动信号时域特征值及柴油机最大燃烧压力的影响。试验结果表明:时域特征值及最大燃烧压力随着发动机转速、输出转矩及主轴承间隙增加而增大,并随着机油温度的升高而减小。

关键词:曲轴主轴承;异常磨损;机体振动;时域分析

中图分类号:TK427

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)02-0038-07

引用格式:潘驰,盖永田,安国,等.柴油机机体振动信号时域特征值分析[J].内燃机与动力装置,2025,42(2):38-44.

PAN Chi, GAI Yongtian, AN Guo, et al. Analysis of time-domain characteristic for the block vibration signal of diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(2):38-44.

0 引言

曲轴-主轴承是内燃机的关键摩擦副,其可靠性直接影响发动机性能和寿命。在发动机工作过程中,曲轴-主轴承承受周期性变化的燃烧压力和惯性力,高频循环应力会引发轴承表面变形,导致轴承座孔膨胀间隙增大,轴承润滑性能降低,严重时造成曲轴或主轴承失效^[1]。随着曲轴与主轴承间的磨损加剧,主轴承传递的径向力增大,发动机机体表面振动加剧^[2]。

发动机表面振动信号测试具备无损性、实时性、连续性等优势,可在不拆解机体的前提下,实时监测和诊断内燃机的运行状态^[3]。研究表明,机体表面振动信号受转速、转矩、机油温度等因素共同影响,反映了发动机的工作状态。Chen等^[4]仿真分析了低速柴油机主轴承的润滑与磨损特性,发现油膜厚度受发动机转速和载荷的影响。Zhao等^[5]仿真分析了不同激励下机体振动信号,结果表明:当转速变化时,往复惯性力对机体振动产生明显影响;当转矩变化时,往复惯性力对机体振动的影响较小。机油黏度直接影响主轴承润滑性能及油膜厚度,进而影响发动机机体表面振动。李涵^[6]分析了主轴承润滑特性与机油黏度间的关联,发现随着机油黏度增加,峰值油膜压力及摩擦损失总功均增大。

时域特征值是评估振动信号特征的关键指标之一,可反映机体异常磨损信息。马荣泽^[7]通过提取机体表面振动信号,以时域分析结果作为诊断模型的输入,构建的支持向量机(support vector machine, SVM)模型可较准确诊断活塞-缸套磨损状态。Okhionkpanwonyi等^[8]提取了发动机机体表面振动信号中的峰值、均方根等时域特征值进行分析,发现机油黏度和温度影响发动机曲轴振动。Yu等^[9]通过分析主

收稿日期:2025-02-18

基金项目:山东省重点研发计划项目(2024TSGC0440);动力机械与工程教育部重点实验室开放课题(202302)

第一作者简介:潘驰(2001—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要研究方向为自动驾驶技术,E-mail:742726722@qq.com。

*通信作者简介:纪少波(1979—),男,山东烟台人,教授,主要研究方向为新能源车辆测控技术,E-mail:jjobo@sdu.edu.cn。

轴承的激励源和振动特性,发现机体振动信号的峰峰值、频域总振动能量及低频段特征频率的功率谱密度可用于诊断主轴承异常磨损状态。王健松^[10]提取信号中振动加速度的峰度、均方根、最大值、最小值等时域特征值及信号的功率谱密度、频率、能量等频域特征值,分析了不同载荷下主轴承振动信号的变化规律,用于表征主轴承磨损状态。

综上所述,机体表面振动受发动机运行工况、机油温度、主轴承间隙等多种因素共同影响,目前大多数研究集中分析单一因素对机体振动信号的影响,由于某些因素间存在耦合作用,为准确提取振动信号时域特征值,需进一步分析多因素对机体振动信号的影响。本文中搭建柴油机试验台架,分析不同转速、转矩、机油温度及主轴承间隙下,振动信号时域特征值及柴油机燃烧峰值压力的变化,为曲轴-主轴承异常磨损状态识别提供参考。

1 试验设备与方案

1.1 试验设备

试验对象为某六缸、直列、四冲程、水冷、进气增压柴油机,柴油机机油型号为 15W-40,柴油机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 柴油机主要技术参数

型号	点火顺序	额定转速/(r·min ⁻¹)	缸径/mm	行程/mm	排量/L	输出功率/kW
WP6G125E22	1—5—3—6—2—4	2 200	105	130	6.75	92

试验台架包括柴油机、电涡流测功机、测控系统、稳态信号(温度、压力等)传感器、瞬态信号(缸压、加速度等)传感器、稳态参数采集系统、瞬态参数采集系统等,柴油机试验台架示意图如图 1 所示。

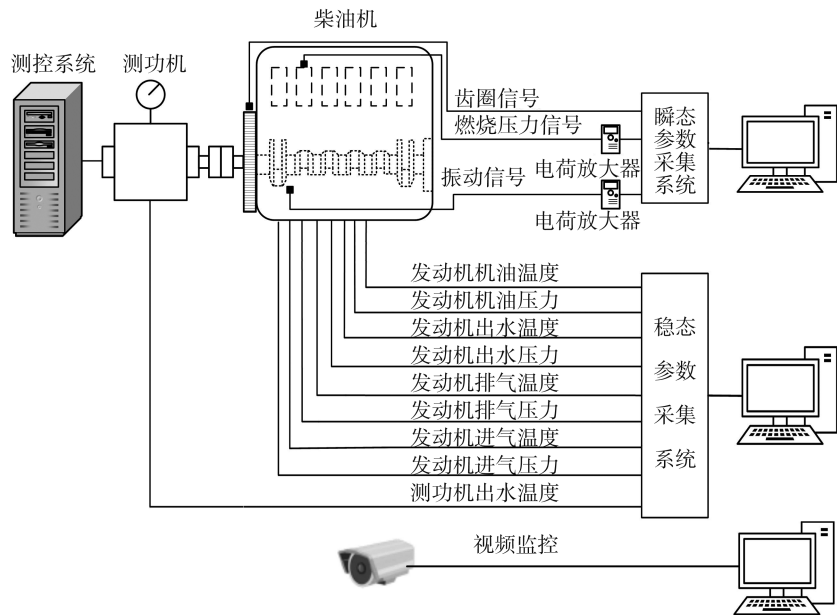


图 1 柴油机试验台架示意图

转速、转矩、燃烧压力均影响机体表面振动信号,在缸盖上加工压力测试通道与燃烧室连通,安装缸压传感器测量燃烧压力;在飞轮齿圈处安装磁电传感器采集曲轴转角信号;通过测功机控制柜调节柴油机转速和转矩;瞬态参数采集系统采集燃烧压力信号、发动机机体表面振动加速度信号、飞轮端齿圈信号等;稳态参数采集系统采集冷却液温度、机油温度、机油压力、进气压力、排气压力、测功机出水温度等传感器信号,通过对采集信号实时监控保障试验过程安全可靠。

1.2 试验设置

调节柴油机转速、转矩、机油温度及主轴承间隙,设置柴油机标准状态(转速为 1 200 r/min,机油温度为 70 ℃,转矩为 60 N·m,第六道主轴承间隙为 0.05 mm),调节柴油机转速分别为 1 000、1 200、1 400 r/min,转矩分别为 30、60、90、120 N·m,机油温度分别为 30、40、50、60、70 ℃,通过加工第六道主轴承轴瓦内表面使第六道主轴承间隙分别为 0.03、0.05、0.10 mm,分析各因素对机体表面振动信号的影响规律。为准确提取各因素信号特征,采用单变量控制模式:其中一个因素变化时,其余因素保持在标准状态。由于发动机表面横向振动更能体现振动信号变化^[11],在机体上靠近第六道主轴承位置布置振动加速度传感器,测试发动机横向振动信号,振动加速度传感器安装位置如图 2 所示。

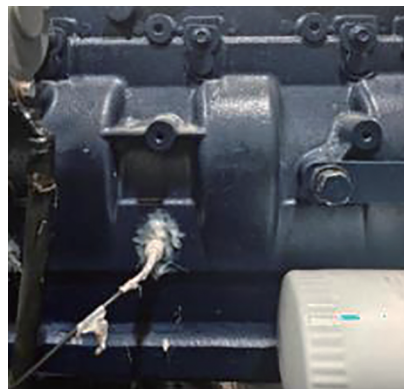


图 2 振动加速度传感器安装位置

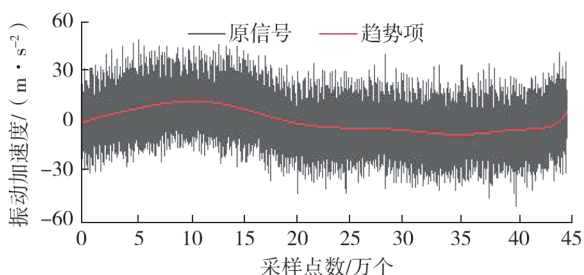
柴油机额定转速为 2 200 r/min,当主轴承间隙为 0.10 mm、发动机转速为 1 400 r/min 时即可听到发动机明显异响。为了保证试验正常进行,试验设置发动机最高转速为 1 400 r/min,最大主轴承间隙为 0.10 mm。试验中的转速、转矩、机油温度及主轴承间隙设置如表 2 所示。

表 2 试验中的工况参数

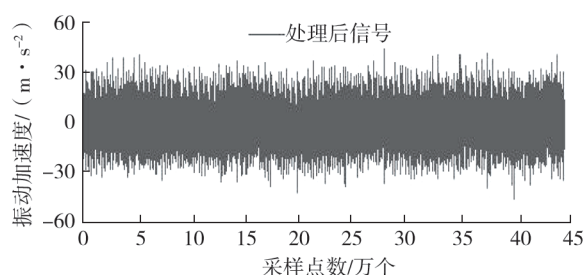
转速/(r·min ⁻¹)	转矩/(N·m)	机油温度/℃	第六道主轴承间隙/mm
1 000, 1 200, 1 400	30, 60, 90, 120	30, 40, 50, 60, 70	0.03, 0.05, 0.10

1.3 数据分析前预处理

采集振动信号时,由于信号偏离零点及信号偏移可能存在时变的特点,会产生干扰信号,该信号也被称为趋势项。趋势项影响分析时域波形及频域能量,本文中采用多项式拟合方法进行趋势项去除处理,处理前、后振动信号对比曲线如图 3 所示。图 3 结果显示:该方法可以有效去除信号趋势项的影响。



a) 原信号及趋势项



b) 去除趋势项后信号

图 3 原始信号与去除趋势项后信号对比

试验过程中,为保证分析结果的一致性和有效性,数据采集时采用双重措施:试验时每种工况均在不同时间段进行 2 次重复试验,消除环境条件对分析结果的影响;每个工况点进行多次采样,采用多循环平均法分析特征值以减小随机误差。

1.4 时域特征值

为全面描述主轴承异常磨损状态,应选择信息性强的振动信号表征参数,本文中结合前期研究,选取峰峰值 a_{pp} 、整流平均值 a_{avr} 、方差 D_x 、标准差 a_{st} 及方根幅值 a_r 5 个时域特征值进行分析。

峰峰值衡量振动信号振动加速度的极限幅度,描述振动波形从最高点到最低点的变化,机械故障导致振动信号峰峰值变化,如轴承损坏导致振动信号峰峰值增大^[12],计算式为:

$$a_{pp} = a_{\max} - a_{\min}, \quad (1)$$

式中: $a_{\min}$ 为采样数据序列中最小振动加速度, $a_{\max}$ 为采样数据序列中最大振动加速度。

整流平均值为所有信号振动加速度绝对值的平均值,其对机械设备的圆周磨损、擦伤和剥离等表面损伤类故障较为敏感,计算式为:

$$a_{\text{arv}} = \left(\sum_{i=1}^N |a_i| \right) / N, \quad (2)$$

式中: a_i 为单个数据点对应的振动加速度, $i=1, 2, \dots, N$, 其中 N 为数据采样点数。

方差用于统计数据对数学期望的离散程度,可以用于衡量振动信号的冲击分量,通常正常工况下方差保持在稳定范围,如果方差突然增大意味着系统受到了某种干扰或发生了故障,计算式为:

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2, \quad (3)$$

式中 $\bar{a}$ 为采样数据序列平均振动加速度。

标准差是方差的算术平方根,反映数据集的离散程度,标准差增大,表明设备内部存在故障或不平衡,导致振动不规则或更加剧烈,计算式为:

$$a_{\text{st}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2}. \quad (4)$$

方根幅值指振动信号振动加速度的均方根平均值,反映振动信号的振动强度,计算式为:

$$a_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2}. \quad (5)$$

为了便于比较不同工况下各特征值的变化趋势,采用归一化处理,使各特征值均在 $[0, 1]$, 归一化后各时域特征值参数

$$m_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}), \quad (6)$$

式中: x_i 、 $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 分别为单个数据点对应的时域特征值参数、最小时域特征值参数、最大时域特征值参数。

2 结果分析

转速分别为 1 000、1 200、1 400 r/min 时,时域特征值和燃烧峰值压力的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知:随着转速增大,各时域特征值及燃烧峰值压力增大。分析原因为:转速增大导致往复惯性力增大,往复惯性力通过轴承座传递至机体引发强烈的横向振动;最大燃烧压力增大,使机体横分力增加、机体振动加剧,曲轴-主轴承间油膜厚度降低,削弱了机油对机械振动的阻尼效应。综上分析,主轴动态载荷增大,振动信号各时域特征参数增大。

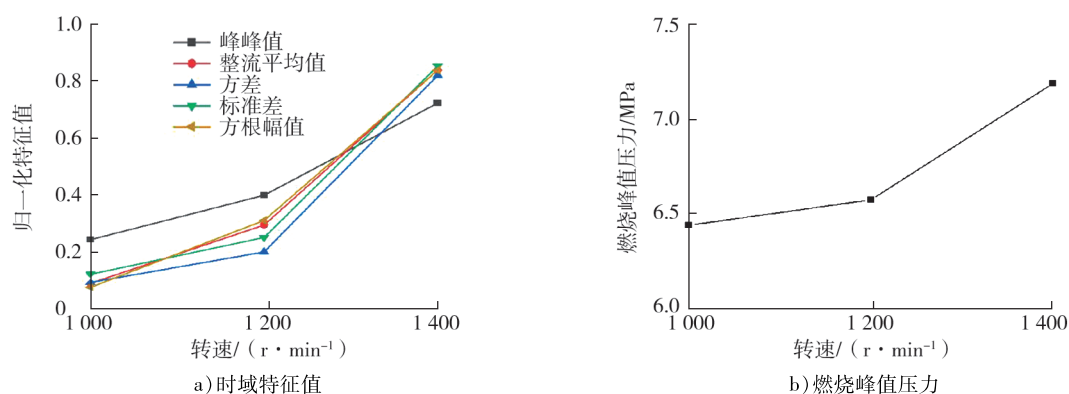


图4 不同转速下时域特征值与燃烧峰值压力的变化曲线

不同转矩下,时域特征值和燃烧峰值压力的变化曲线如图 5 所示。由图 5a)可知:随着转矩增大,各时域特征值增大。由图 5b)可知:当转矩从 30 N·m 增加到 120 N·m 时,燃烧峰值压力从 6.24 MPa 增大到 7.20 MPa。分析原因为:发动机转矩增加,循环供油量增大,使燃烧峰值压力增大,燃烧压力在机体的

横向分力增大,主轴承所受横向载荷增大,导致机体振动信号的时域特征值总体呈增大趋势。

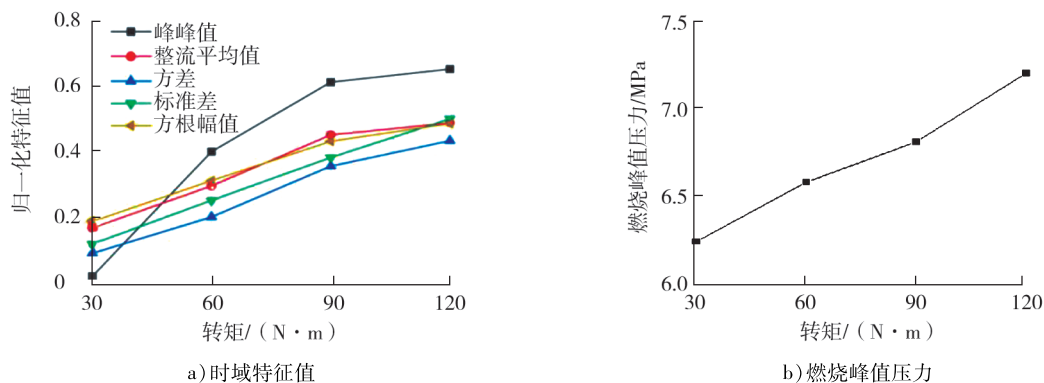


图5 不同转矩下时域特征值与燃烧峰值压力的变化曲线

不同机油温度下,各时域特征值和燃烧峰值压力的变化曲线如图6所示。由图6可知:随着机油温度升高,各时域特征值及燃烧峰值压力减小。分析原因为:随着机油温度升高,机油黏度降低,曲柄连杆机构运行时的机械摩擦损失降低。相同转矩负载时,可减少循环供油量,使燃烧峰值压力减小,主轴承所承受的横向载荷减小,机体表面振动减小;曲轴-主轴承间油膜厚度减小,促进振动能量向机体表面的传递,但机体表面整体振动信号时域特征值减小,表明燃烧压力对时域特征值振动的影响大于机油温度对时域特征值振动的影响。

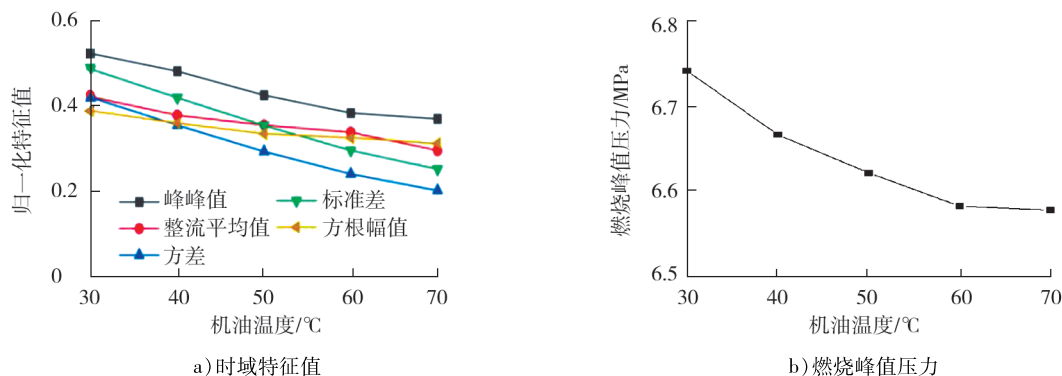


图6 不同机油温度下时域特征值与燃烧峰值压力的变化曲线

不同主轴承间隙下,时域特征值和燃烧峰值压力的变化曲线如图7所示。由图7a)可知:随着主轴承间隙增加,各时域特征值增大。由图7b)可知:主轴承间隙从0.03 mm增大至0.10 mm时,燃烧峰值压力从6.57 MPa增大到7.01 MPa。分析原因为:主轴承间隙增大,曲轴-主轴承间油膜厚度减小,对曲轴的支撑约束作用减弱,曲轴-主轴承间可能存在冲击或接触磨损,使机体表面振动加剧;曲轴转动时摩擦损失增加,相同转矩下燃烧压力增大,主轴承所受横向载荷增大,使机体表面振动信号时域特征值增大。

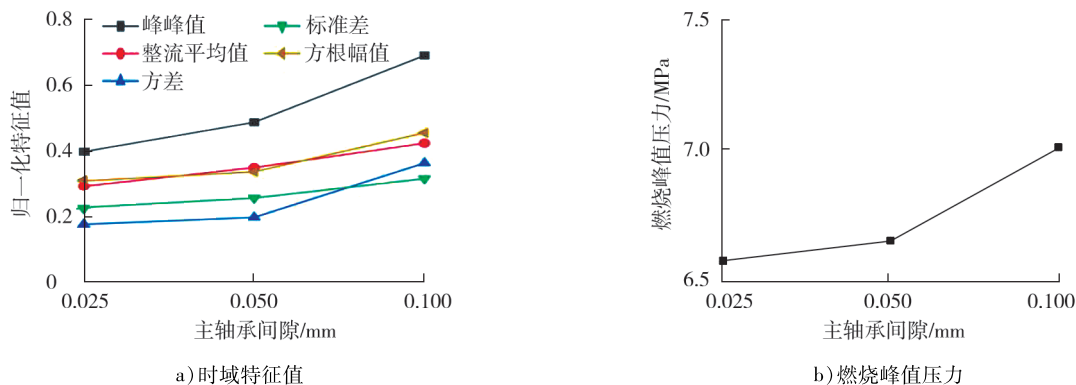


图7 不同主轴承间隙下时域特征值与燃烧峰值压力的变化曲线

3 结论

本文中搭建了某六缸柴油机试验台,研究了转速、转矩、机油温度及主轴承间隙对机体表面振动信号振动加速度时域特征值的影响规律。

1)选取峰峰值、整流平均值、方差、标准差及方根幅值作为振动信号振动加速度时域特征值并进行归一化处理,以减少不同工况对试验结果的影响。

2)机体表面横向振动主要受燃烧压力、往复惯性力及曲轴径向冲击因素影响,随着转速、转矩及主轴承间隙增大,燃烧峰值压力增大,各时域特征值增大;随着机油温度升高,燃烧峰值压力减小,时域特征值减小。

3)相同的转速、转矩及机油温度下,随主轴承间隙增大导致时域特征值增大,该现象可用于主轴承间隙异常状态的判断依据。

参考文献:

- [1] 王国强,纪少波,李卫,等.运行工况及轴承间隙对主轴承润滑参数的影响[J].内燃机与动力装置,2024,41(3):37-45.
- [2] 于存银.多缸柴油机曲轴振动与轴承润滑及机体变形耦合特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [3] JI S B, JIANG Y, WANG G Q, et al. Study on the correlation between combustion status and block vibration induced by piston slap[J]. Applied Acoustics, 2022, 199: 109006.
- [4] CHEN R, ZHAO B, HE T, et al. Study on coupling transient mixed lubrication and time-varying wear of main bearing in actual operation of low-speed diesel engine[J]. Tribology International, 2024, 191: 109159.
- [5] ZHAO X L, YANG Z Y, PAN B X, et al. Analysis of excitation source characteristics and their contribution in a 2-cylinder diesel engine[J]. Measurement, 2021, 176: 109195.
- [6] 李涵.大功率柴油机主轴承弹性流体动压润滑特性研究[D].太原:中北大学,2019.
- [7] 马荣泽.基于机体振动信号的活塞-缸套磨损状态诊断研究[D].济南:山东大学,2022.
- [8] OKHIONKPAMWONYI S, OTUYEMI F, SHI D W, et al. Experimental investigation of vibration signals from an on-rotor sensing for diesel engine crankshaft lubrication monitoring[C]//Proceedings of TEPEN 2022: International Conference on the Efficiency and Performance Engineering Network. Berlin, Germany: Springer, 2023: 138-150.
- [9] YU Y H, YANG J G. Vibration diagnosis of main journal bearings for diesel engines[J]. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, 2005, 1(3/4): 265-286.
- [10] 王健松.柴油机机身及主轴承振动特性分析[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [11] 郑康,朱明敏,宋森楠,等.发动机各主轴承间隙配合对其振动特性的影响[J].机械制造与自动化,2023,52(3): 58-61.
- [12] 李正文,赵俊生,李涵,等.柴油机曲轴润滑与弯曲振动耦合影响研究[J].润滑与密封,2020,45(1): 129-134.

Analysis of time-domain characteristic for the block vibration signal of diesel engine

PAN Chi¹, GAI Yongtian^{2,3}, AN Guo^{2,3}, MA Xin^{2,3}, WANG Jinyong^{2,3}, JI Shaobo^{1*}

1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Jinan Automotive Testing Center Co., Ltd., Jinan 250013, China;

3. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan 250102, China

Abstract: In order to study the influence of the operation state of the internal combustion engine and the clearance of the main bearing on the vibration signal of block surface, a test bench of a certain six-cylinder diesel engine is established. The peak-to-peak value, rectified average value, variance, standard deviation root mean square value of the vibration acceleration of the block surface vibration signal are taken as the time-domain

characteristic values, and the influence of different engine operation speeds, output torque, oil temperatures and main bearing clearances on each time-domain characteristic value are analyzed. The experimental results show that the time-domain characteristic and the peak value of combustion pressure increases with the increase of engine speed, torque and main bearing clearance increases, the time-domain characteristic and the peak value of combustion pressure decreases with the rise of oil temperature.

Keywords: crankshaft main bearing; abnormal wear; block vibration; time-domain analysis

(责任编辑:胡晓燕)

(上接第 37 页)

Composite power energy management strategy for electric vehicle based on optimized fuzzy controller of genetic algorithm

ZHU Feng¹, WANG Pengbo², LIU Yonghui^{1*}

1. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Flight Control Information Technology Co., Ltd., Jinan 250013, China

Abstract: In order to allocate the actual output power of electric vehicle power batteries and supercapacitors reasonably and extend the life of batteries, MATLAB/Simulink software is used to simulate and compare the composite energy management system and vehicle driving performance under the logic threshold control strategy, fuzzy control strategy, and genetic algorithm (GA) optimized fuzzy control strategy under the new European driving cycle (NEDC) operating conditions. The simulation results show that the GA optimized fuzzy control strategy effectively reduces the rate of decrease in the state of charge of the power battery and the rate of temperature rise of the power battery, and improves the driving range of the vehicle. Compared with the fuzzy control strategy, the optimized electric vehicle has an increased driving range of 12.1 km, improved maximum climbing performance by 0.3%, and increased maximum speed by 0.2 km/h. Compared with the logic threshold control strategy, the driving range of electric vehicles is increased by 18.8 km, the maximum climbing slope is increased by 0.6% and maximum speed is increased by 0.6 km/h.

Keywords: pure electric vehicle; composite power supply; genetic algorithm; fuzzy control

(责任编辑:胡晓燕)