

基于小波包分解的发动机机体振动信号影响规律

董一鸣¹, 胡玉平^{1*}, 田小青², 李萌³, 纪少波^{1,4}

1. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061; 2. 滨州职业学院, 山东 滨州 256603;
3. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250102; 4. 上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240

摘要:为了探明柴油机机体振动信号的频谱特性,利用试验方法及信号分析技术,改变柴油机转速、转矩、机油温度等运行状态参数和配缸间隙,实测缸内燃烧压力及机体振动加速度信号;通过小波包分解方法将机体振动加速度信号分解为16频段,得到各频带的能量,与缸内燃烧压力信号进行对比分析,研究不同因素作用下,小波包各频带能量的变化规律,确定对燃烧状态及活塞敲击状态敏感的频段。结果表明:随转速升高,活塞往复惯性力增大,当转速由1 000 r/min增大到1 600 r/min时,频段16能量增大3.55倍;随转矩增大,各频段的能量都呈增加的趋势;随机油温度升高,多数频段能量变化趋势不明显,但15、16频段的能量仍呈增加趋势;随配缸间隙增大,频段6、7、8、10、15、16的能量显著增加。

关键词:机体振动信号;小波包分解;运行工况;配缸间隙

中图分类号:TK427

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)05-0032-06

引用格式:董一鸣,胡玉平,田小青,等. 基于小波包分解的发动机机体振动信号影响规律[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(5): 32-37.

DONG Yiming, HU Yuping, TIAN Xiaoqing, et al. The influence laws of block vibration signal based on wavelet packet decomposition[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(5): 32-37.

0 引言

活塞二次运动导致活塞敲击缸套,敲击激励在机体表面产生振动响应信号。活塞敲击力不同,在发动机机体表面产生的振动状态不同^[1-2]。通过分析机体表面振动信号,可以对活塞敲击力进行分析^[3-4]。研究人员通过时域分析、频域分析和时频分析等不同的算法,从机体表面振动信号提取活塞敲击状态信息;Cavalli等^[5]试验结果表明,随活塞敲击力的增加,振动信号的均方根及峰值因子增大;王永坚等^[6]研究了振动信号峭度与活塞敲击力间的相关性;卫海桥等^[7]研究了活塞敲击激励响应信号的频带范围;Buzzoni等^[8]分析认为,机体表面振动信号主要由燃烧激励及活塞敲击激励产生;Moosavian等^[9]研究表明,活塞缸套异常磨损时,机体振动信号的频率为3.0~4.7 kHz的能量增强。

在压缩上止点附近,燃烧激励与活塞换向敲击激励同时存在,内燃机运行过程中,发动机的转速、输出转矩、机油温度以及活塞-缸套的配缸间隙都影响活塞的二次运动,进而对机体振动信号产生影响。在上述因素作用下,燃烧激励及活塞换向敲击激励的频带分布特性尚有待深入研究,该频带分布特性是利用振动信号频谱特征反映活塞敲击状态的基础。为此,本文中通过小波包分解方法分析机体表面振动信号的频谱特性,并提出对缸内燃烧激励及活塞敲击激励敏感的频带,为机体振动信号的应用提供参考。

收稿日期:2025-06-04

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:董一鸣(2001—),男,湖南怀化人,硕士研究生,主要研究方向为内燃机性能测试及分析方法研究,E-mail:202314504@mail.sdu.edu.cn。

*通信作者简介:胡玉平(1970—),男,山东济宁人,工学博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为发动机测控技术、现代设计技术,E-mail:huyup@sdu.edu.cn。

1 小波包分解理论

小波包分解(wavelet packet decomposition, WPD)将信号投影到小波包函数的空间中,将信号通过一系列中心频率不同但带宽相同的滤波器进行处理,得到各频段的成分^[10]。小波包分解将信号逐层进行分解,每一层都有对应的频段数量,每一个频段上又都包含独特的信息。原始信号 S 的小波包三层分解结构图如图 1 所示,在第三层中共 8 个频段^[11]。

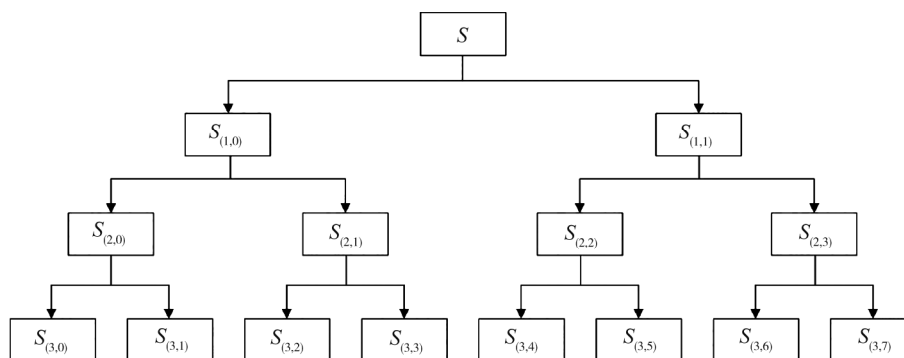


图 1 小波包分解示意图

小波包函数

$$\omega_{j,k}^m(t) = 2^{\frac{j}{2}} \omega^m(2^j t - k), \quad (1)$$

式中: j, k 分别为分解层数和每一层的节点数; m 为震荡次数; t 为每个采样点的时间。

通过小波包函数和原始信号 $x(t)$ 可得到小波包系数

$$u_j^m(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \omega_{j,k}^m(t) dt, \quad (2)$$

式中 $u_j^m(k)$ 表示在 j 层分解层数下第 k 个小波包系数。

实测振动加速度各频段的能量

$$E_{j,k} = \int |S_{j,k}(t)| dt = \sum_{k=1}^n |u_j^m(k)|^2, \quad (3)$$

式中: $S_{j,k}(t)$ 为每一层的重构信号, n 为最大分解层数。

小波包分解得到的每一层中各频带信号的能量总和与总能量 E_j 相等,即

$$E_j = \sum_k E_{j,k}. \quad (4)$$

小波包函数有多种类型,不同的小波包函数提取的振动信号特征信息存在差异,应选择正则性好、具有正交性、紧支撑性以及足够高的消失矩的小波包函数。小波包分解的层数越多,频谱分析结果越精细,但同时也带来计算量增大及特征提取困难的问题。

本文中采用香农熵(Shannon entropy, SE) $S_{E,jk}$ 确定适用于机体振动信号分析的小波包函数及分解层数,SE 又称信息熵,SE 越小,小波包分解的结果包含的信息越多,越适合用于被分析的信号。

$$S_{E,jk} = - \sum_{k=0}^{2^j-1} P_{jk} \ln P_{jk}, \quad (5)$$

式中: P_{jk} 为第 j 层第 k 个频段能量所占总能量的比, $P_{jk} = E_{jk}/E_j$ 。

通过各小波包函数对同一组机体振动加速度信号进行分析,并求取对应的香农熵,各小波包函数的分析结果如图 2 所示。由图 2 可知:Daubechies 小波包的 db10 可以得到最小的香农熵,这表明该小波包函数能够得到更多的有用信息。

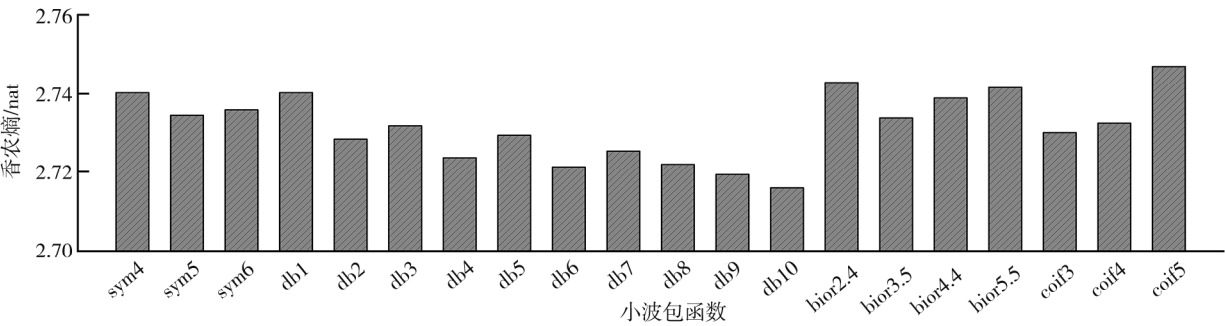


图2 不同小波包函数的 SE 对比结果

采用 db10 小波包函数对比不同分解层数的处理效果,结果如图 3 所示。由图 3 可知,当分解层数低于 4 层时,增加分解层数能够提高结果的信息性,但分解层数高于 4 层时,增加分解层数的效果不明显。为此,将分解层数设置为 4,小波包分解的最后一层共有 16 个频段。本文中振动信号的采样频率为 50 kHz,有效频率为 25 kHz,每个频段的频率步长都是 1 562.5 Hz。

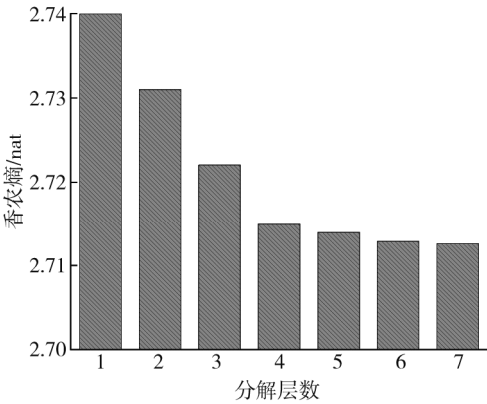


图3 不同分解层数的 SE 对比

2 试验台架

柴油机试验台架包括柴油机、测功系统及信号测试系统。信号测试系统包括稳态参数及瞬态参数测试系统,稳态参数测试系统主要用于采集机油、冷却水、测功机的温度和压力,保障试验条件的一致性。瞬态参数测试系统用于测试缸内的燃烧状态和机体表面的振动加速度,为了便于信号分析,同步测量曲轴相位信号。试验过程中改变转速、转矩及机油温度等柴油机的运行状态参数;并对活塞环槽深度进行加工,形成不同的配缸间隙,研究各因素对机体振动信号的影响规律。发动机的运行转速设置为 1 000、1 200、1 400、1 600 r/min,运行转矩为 10、20、30、40 N·m,机油温度为 20、30、40、50、60 ℃;在正常配缸间隙基础上,将活塞环槽分别加深 0.5、1.0 mm,模拟不同配缸间隙。试验用柴油机主要技术参数如表 1 所示,搭建的单缸柴油机试验台架示意图如图 4 所示。

表 1 发动机主要技术参数

型号	缸径/mm	行程/mm	排量/L	标定转速/(r·min ⁻¹)	额定功率/kW
LC1115	115	115	1.194	2 200	16.2

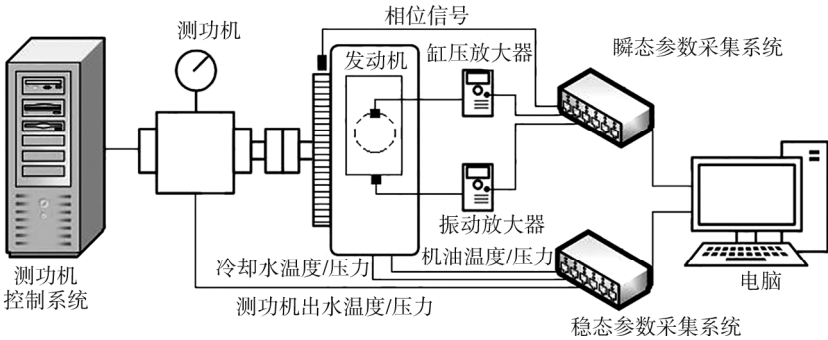


图4 单缸柴油机试验台架示意图

3 试验结果分析

3.1 转速对振动加速度的影响

发动机转矩为 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 、机油温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同转速下的缸内燃烧压力峰值与振动加速度信号小波包分解结果,如图 5 所示。

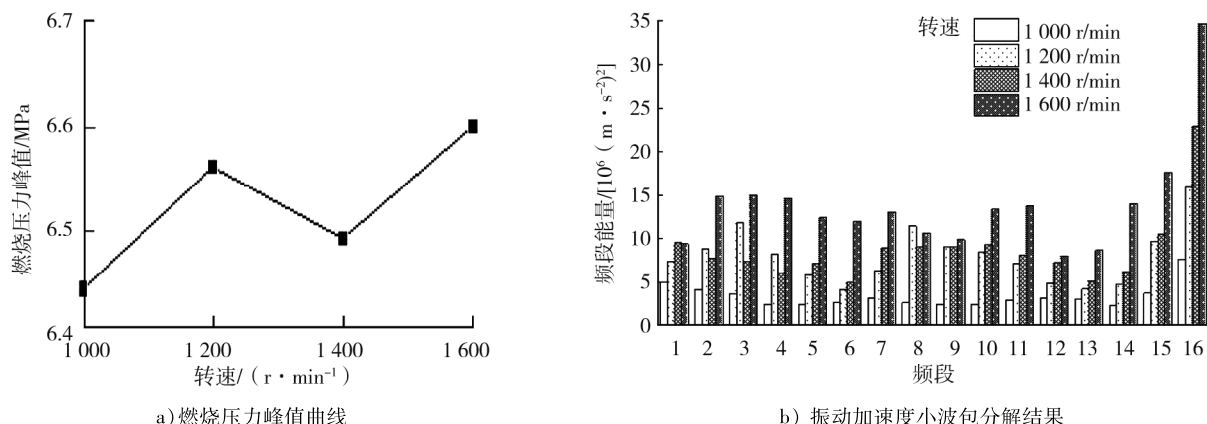


图5 转矩为 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 、机油温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同转速下的燃烧压力峰值与振动加速度小波包分解结果对比

由图 5 可知:燃烧压力峰值随转速的升高呈现一定的波动性;随转速增大,频段 5 及以上各振动信号的能量同样呈整体增大的趋势。转速由 1000 r/min 增大到 1600 r/min ,频段 16 的能量增大了 3.55 倍,这是由于活塞惯性力与转速正相关,随着转速升高,增大的活塞惯性力加剧活塞对缸套的撞击,导致高频振动成分的能量增加;频段 2~4 的能量在转速为 1400 r/min 时略有降低,这与燃烧压力峰值的变化趋势相同,表明上述频段与缸内燃烧过程密切相关。

3.2 转矩对振动加速度的影响

发动机转速为 1400 r/min 、机油温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同转矩下的燃烧压力峰值和振动加速度信号小波包分解结果如图 6 所示。

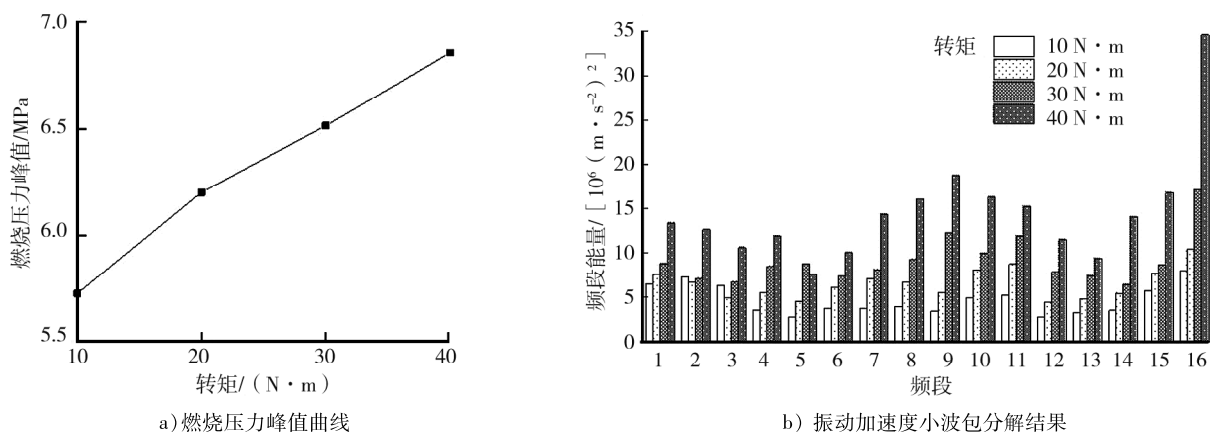


图6 发动机转速为 1400 r/min 、机油温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同转矩下的燃烧压力峰值与振动加速度小波包分解结果对比

由图 6 可知:燃烧压力峰值与转矩呈明显正相关,当转矩由 $10\text{ N}\cdot\text{m}$ 增加至 $40\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,燃烧压力峰值增加了 1.13 MPa 。这是因为当发动机的转矩增加,需要更多的混合气参与燃烧,使得燃烧压力峰值增加。小波包分解的各频段能量与发动机转矩呈正相关性,尤其是频段 16 的能量增长最明显,当转矩由 $10\text{ N}\cdot\text{m}$ 增大至 $40\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,频段能量由 $7.89\times 10^6(\text{m/s}^2)^2$ 增大至 $3.45\times 10^7(\text{m/s}^2)^2$ 。这是因为缸内燃烧压力峰值增大,使活塞所受的侧向力增加,对活塞敲击过程产生促进作用,机体振动信号增强。

3.3 机油温度对振动加速度的影响

发动机转速为 1 400 r/min、转矩为 30 N·m 时,不同机油温度下的燃烧压力峰值和机体表面振动加速度信号小波包分解结果如图 7 所示。

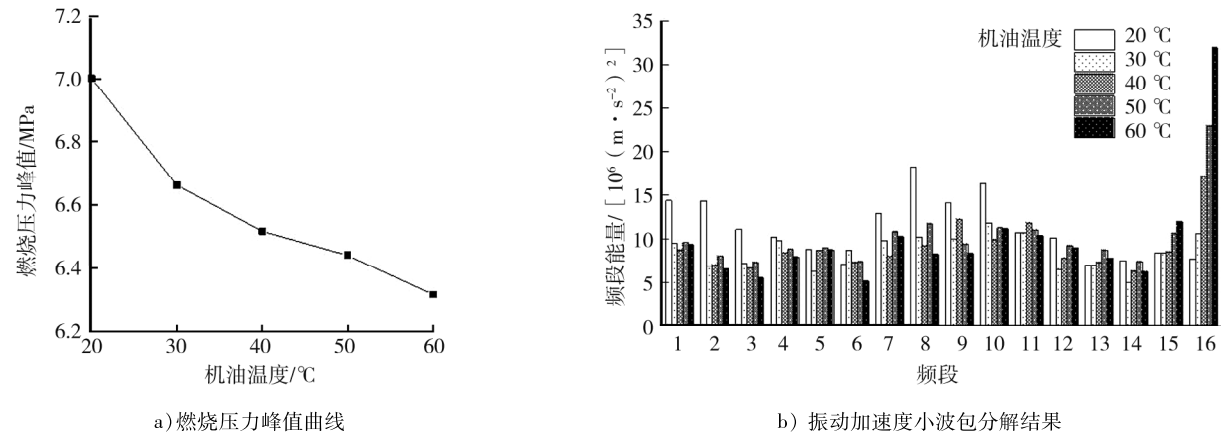


图 7 发动机转速为 1 400 r/min、转矩为 30 N·m 时,不同机油温度下的燃烧压力峰值与振动加速度小波包分解结果对比

由图 7 可知:燃烧压力峰值与机油温度呈明显的负相关性。这是因为随温度升高,机油黏度降低,使得活塞摩擦损失减小;适当减少循环供油量即可达到同样的输出转矩,燃烧放热量减少使得燃烧压力峰值降低。机油温度升高能够产生两方面影响:1)燃烧压力降低,活塞对缸套的冲击力减小,有助于减小机体振动;2)随机油温度升高,缸套表面润滑油膜的阻尼减小,有助于促进活塞敲击振动的传递。两种因素综合作用使得多数频段的能量变化趋势不明显;相对而言,频段 15、16 的能量与机油温度正相关,这两个频段的能量对油膜的阻尼更敏感。

3.4 配缸间隙对振动加速度的影响

发动机转速为 1 400 r/min、转矩为 40 N·m、机油温度为 60 °C 时,不同配缸间隙下的燃烧压力峰值和机体表面振动加速度信号小波包分解结果如图 8 所示。

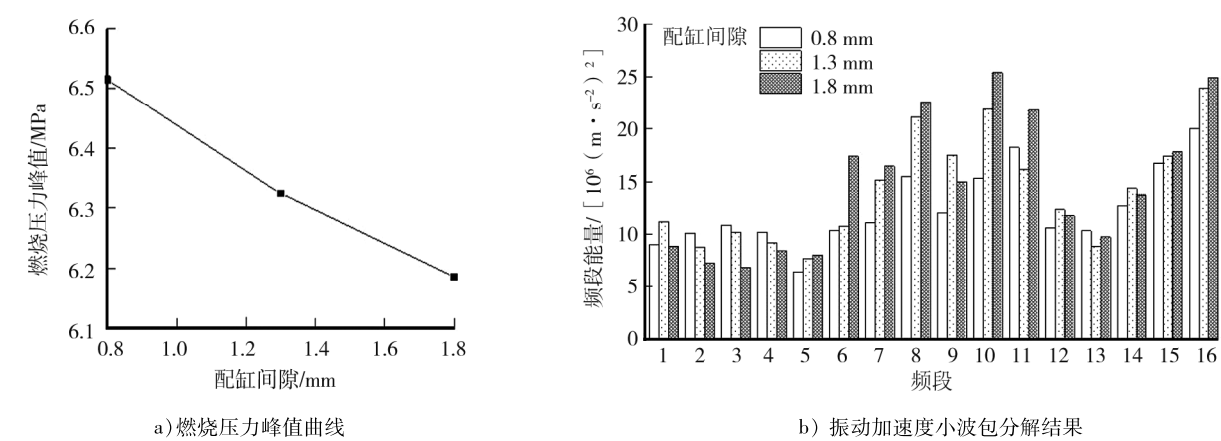


图 8 发动机转速为 1 400 r/min、转矩为 40 N·m、机油温度为 60 °C 时,不同配缸间隙下的燃烧压力峰值与振动加速度小波包分解结果对比

由图 8 可知:燃烧压力峰值与配缸间隙呈明显的负相关性,这是由于配缸间隙增大时,活塞-缸套的漏气量增加,进而影响燃烧状态;频段 2~4 的能量与燃烧压力峰值密切相关,可以认为这部分频段能量主要受缸内燃烧状态的影响;随着配缸间隙的增大,频段 6、7、8、10、15 和 16 的能量呈增大的趋势,这是由于装配间隙增大后,能够促进活塞的二次运动,增强了活塞敲击力对机体振动的影响,因此,这部分频段对活塞敲击力更为敏感。

4 结论

搭建了柴油机试验台架,基于小波包分解理论,将发动机机体振动信号分为16频段,研究了发动机转速、转矩、机油温度和配缸间隙对燃烧激励及活塞换向敲击激励对机体振动加速度信号的影响。

1)随着转速升高,活塞往复惯性力增大,使得振动信号各频段的能量总体上呈增大的趋势,其中频段16增长明显,转速由1 000 r/min增大到1 600 r/min,该频段能量增大了3.55倍。

2)随着转矩增大,燃烧压力峰值增加,活塞所受侧向力增大,促进了活塞的二次运动,使得机体振动加速度信号各频段的能量增大。

3)随着机油温度升高,燃烧压力峰值降低,缸套壁面油膜阻尼减小,这两个因素综合作用下,多数频段的能量变化趋势不明显;频段15、16的能量呈持续增加的趋势,这两个频段的能量主要受油膜阻尼的影响。

4)随着配缸间隙增大,频段6、7、8、10、15、16的能量呈增大的趋势,这些频段对活塞敲击力更敏感。

参考文献:

- [1] LIU D, LI G X, SUN N N, et al. Vibration-induced cavitation in cylinder liners caused by piston slaps[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 267: 109025.
- [2] 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.
- [3] DOLATABADI N, LITTLEFAIR B, DE LA CRUZ M, et al. A transient tribodynamic approach for the calculation of internal combustion engine piston slap noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 352: 192–209.
- [4] 魏敬宏, 纪少波, 胡琬渝, 等. 活塞-缸套摩擦副状态表征参数选取方法研究[J]. 内燃机工程, 2024, 45(2): 75–84.
- [5] CAVALLI M, LAVACCHIELLI G, TONELLI R, et al. Comparison of analytical and multibody dynamic approaches in the study of a V6 engine piston[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2017, 231(3): 420–438.
- [6] 王永坚, 吴怡婷, 魏旻, 等. 船用中高速柴油机缸套-活塞环智能故障诊断[J]. 船舶工程, 2022, 44(10): 71–79.
- [7] 卫海桥, 舒歌群. 内燃机活塞拍击表面振动与燃烧噪声的关系[J]. 内燃机学报, 2004(1): 27–32.
- [8] BUZZONI M, MUCCHI E, DALPIAZ G. A CWT-based methodology for piston slap experimental characterization[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86: 16–28.
- [9] MOOSAVIAN A, NAJAFI G, GHOBADIAN B, et al. The effect of piston scratching fault on the vibration behavior of an IC engine[J]. Applied Acoustics, 2017, 126: 91–100.
- [10] SUN J L, ZHANG X, TANG Q L, et al. Knock recognition of knock sensor signal based on wavelet transform and variational mode decomposition algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 287: 117062.
- [11] 李帅博, 尹发辉, 胡文帅, 等. 基于小波包的二甲醚发动机复合燃烧爆震能量分析[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(4): 1–6.

The influence laws of block vibration signal based on wavelet packet decomposition

DONG Yiming¹, HU Yuping^{1*}, TIAN Xiaoqing², LI Meng³, JI Shaobo^{1,4}

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

2. Binzhou Vocational College, Binzhou 256603, China; 3. Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250102, China;

4. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: To investigate the spectral characteristics of the vibration signals of a diesel engine block, the experimental

(下转第45页)

Effect of fuel injection rate on the performance of a gasoline/biodiesel RCCI engine during the starting process

LUO Yihao¹, TAN Yusong¹, CHEN Haifu¹, WANG Weifa², LI Jing^{3*}, YANG Wenming⁴

1. Guoneng (Qingyuan) Clean Energy Co., Ltd., Qingyuan 511500, China;

2. Shenzhen Yicheong Power Co., Ltd., Shenzhen 518109, China;

3. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

4. Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore

Abstract: Based on three-dimensional numerical simulations, the effects of injection rate shapes with different boot lengths and intake temperatures on the combustion and emission characteristics of a gasoline/biodiesel reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine during the starting process are investigated. The results indicate that increasing the boot length increases the late-stage injection rate promotes the atomization and mixing of biodiesel, thereby increases in-cylinder pressure, peak heat release rate, and indicates mean effective pressure while reduces CO emissions, which leads to increased NO emissions. Under the low intake temperature condition, employing a long boot length can improve combustion efficiency and prevent misfire. A higher intake temperature helps improve combustion stability, mitigates the influence of injection rate shape, and significantly reduces CO emission.

Keywords: gasoline; biodiesel; RCCI engine; injection rate shape; starting process

(责任编辑:刘丽君)

(上接第 37 页)

method and signal analysis technology are used. By changing the operating state parameters such as diesel engine speed, torque and oil temperature and the cylinder clearance, the combustion pressure in the cylinder and the vibration acceleration signal of the body are measured. The vibration acceleration signals are decomposed into 16 frequency bands using wavelet packet decomposition (WPD), and the energy distribution of each band is compared with the cylinder pressure signals. The study identifies the variation patterns of wavelet packet energy distribution under different influencing factors and determines the frequency bands sensitive to combustion state and piston slap. The results indicate that: As engine speed increases, the reciprocating inertia force of the piston rises. When the speed increases from 1 000 r/min to 1 600 r/min, the energy of frequency band 16 increases by 3.55 times. With increasing torque, the energy of all frequency bands shows an upward trend. As oil temperature rises, most frequency bands exhibit no significant energy variation, but bands 15 and 16 still demonstrate an increasing trend. With larger piston-to-cylinder clearance, the energy of bands 6, 7, 8, 10, 15, and 16 increases significantly.

Keywords: engine block vibration signal; wavelet packet decomposition; operating condition; piston-liner clearance

(责任编辑:刘丽君)