

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2023.02.006

基于声发射技术的缸套-活塞环润滑状态监测

韩昊¹, 丁红元², 石昭宇¹, 王忠巍¹, 王伯群¹

(1. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001;
2. 武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430205)

摘要: 为实现对缸套-活塞环摩擦润滑状态的监测, 基于声发射技术对某小型四缸柴油机缸套-活塞环的润滑状态进行研究。采用小波阈值降噪法抑制阀门启闭和燃烧所引起的声发射信号, 分别提取每个冲程声发射信号均方根(root mean square, RMS), 选择RMS值作为评价缸内润滑状态的指标。研究表明: 进排气冲程RMS值可以很好地表征缸内的润滑状态; 受试验条件的限制, 贫油状态的RMS值整体上略低于正常状态的RMS值, 但差异性并不明显。

关键词: 柴油机; 声发射; 缸套-活塞环; 润滑状态; 小波降噪

中图分类号: TK421+.9 文献标志码: A 文章编号: 1001-4357(2023)02-0026-06

Lubrication State Monitoring of Cylinder Liner-Piston Ring Based on Acoustic Emission Technology

HAN Hao¹, DING Hongyuan², SHI Zhaoyu¹, WANG Zhongwei¹, WANG Boqun¹

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China)

Abstract: In order to realize the monitoring of the cylinder liner-piston ring friction lubrication status, the lubrication status of the cylinder liner-piston ring of a small four-cylinder diesel engine was studied based on the acoustic emission technology. The wavelet threshold noise reduction method was used to suppress the acoustic emission signals caused by valve opening and closing and combustion. The root mean square (RMS) of acoustic emission signals of each stroke was extracted, and the RMS value were selected as the index to evaluate the lubrication state in the cylinder. The research results show that the RMS value of the intake and exhaust strokes can well characterize the lubrication state in the cylinder, and due to the limitations of experimental conditions, the RMS value of the lean oil state is generally slightly lower than the RMS value of the normal state, but the difference is not significant.

Key words: diesel engine; acoustic emission; cylinder liner-piston ring; lubrication state; wavelet noise reduction

0 引言

柴油机因其热效率高、功率范围广等优点被广泛应用于生产生活中。缸套-活塞环作为柴油机

关键的摩擦副, 其摩擦润滑状态的好坏直接影响柴油机的运行状态, 进而影响柴油机的经济性、可靠性。研究^[1]表明, 摩擦耗能约占柴油机总耗能的6%, 缸套-活塞环因摩擦损失的功率占发动

机总损失功率的25%~50%。缸套-活塞环润滑不良将导致柴油机缸内异常磨损，甚至导致拉缸、抱轴等重大故障。因此，对柴油机缸套-活塞环的润滑状态研究具有重要意义。

缸套-活塞环长期工作在高温、高压的环境中，二者表面之间呈高速往复线性运动状态，缸内的摩擦润滑状态难以用常规手段进行监测。声发射技术 (acoustic emission, AE) 是一种动态无损的检测技术，具有应用范围广、灵敏度高等特点，逐渐被应用到柴油机状态监测等相关领域。文献 [2] 在柴油机转速恒定的情况下改变负载条件，研究声发射信号对负载的敏感性，并且用声发射信号均方根 (root mean square, RMS) 值成功识别出喷油器故障。文献 [3] 以小型四冲程柴油机和大型船用二冲程柴油机为研究对象，对缸套活塞环之间声发射信号产生的机理进行分析，并进行相关试验。试验结果表明：小型四冲程柴油机转速对声发射信号的影响较大；大型二冲程柴油机气缸内压力对声发射信号的影响较大。文献 [4] 研究不同燃料对内燃机摩擦学性能的影响，采用微凸体-微凸体碰撞和流体-微凸体剪切模型来解释缸套-活塞环摩擦副的声发射响应，试验结果表明该模型可以很好地解释不同的声发射响应。文献 [5-6] 利用声发射技术对柴油机的缸套-活塞环系统的润滑状态进行检测，采用小波分析、约束自适应阈值降噪等方法对采集到的信号进行降噪，并用声发射信号的RMS值来评价缸套-活塞环的润滑状态。文献 [7-8] 为诊断柴油机缸体表面的异常声发射信号，通过在单缸柴油机表面不同位置安装声发射传感器，对比不同位置的峰值信号，最终确定异常声发射信号的来源，证明声发射技术对柴油机故障诊断的有效性。

目前，针对缸套-活塞环润滑状态的研究大都在摩擦磨损试验机上进行，对缸套-活塞环之间的摩擦润滑过程做了大幅度简化，无法反映缸套-活塞环之间真实的润滑状态，具有一定的局限性。因此本文以四缸柴油机为研究对象对缸内摩擦润滑过程进行探究。

1 小波降噪

1.1 小波变换原理

小波变换是在傅里叶变换的基础上演化发展而来的，是目前应用最广泛的一种信号处理方法，对非平稳信号的分析更有效，已经广泛应用于信号去噪领域^[9-13]。

设 $x(t)$ 是平方可积函数，记作 $x(t) \in L^2(R)$ ， $\varphi(t)$ 为母小波函数，则 $x(t)$ 的小波变换为：

$$T_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \varphi^* \frac{t-b}{a} dt \quad (1)$$

式中： $T_x(a, b)$ 为小波变换函数； a 为尺度因子， $a > 0$ ； b 为平移因子，其值可正可负； $\varphi^* \frac{t-b}{a}$ 为 $\varphi \frac{t-b}{a}$ 的共轭复数。

$$\varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi \frac{t-b}{a} \quad (2)$$

$\varphi_{a,b}(t)$ 是 $x(t)$ 经伸缩平移后得到的一组小波基函数， t 、 a 、 b 均为连续变量，称为连续小波变换。

连续小波的逆变换为：

$$x(t) = C_\varphi^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{a,b}(t) T_x(a, b) db \frac{da}{|a|^2} \quad (3)$$

其中 C_φ 必须满足：

$$C_\varphi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\varphi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4)$$

1.2 多分辨率分析

多分辨率分析又称多尺度分析，是指从不同的尺度出发对信号进行局部分析，以4层小波分解为例对多分辨率分析进行解释。

图1为4层分解的小波分解树，其中，H表示高频部分，L表示低频部分。从图1可以看出，多分辨率分析仅对低频部分进行分解，对高频部分不做处理，并且分解层数越多所得到的频率分辨率越高。

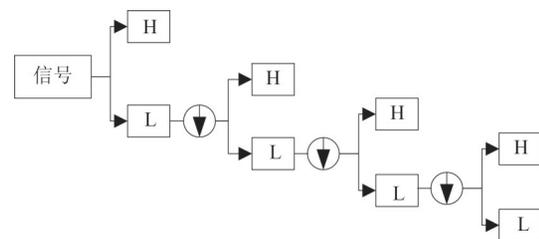


图1 4层小波分解树

1.3 小波阈值降噪

在通常情况下，采集的原始信号包含大量的噪声信号，须对信号进行降噪处理，一维的降噪模型如式 (5) 所示。

$$s(k) = f(k) + \varepsilon e(k), \quad k = 0, 1, \dots, n-1 \quad (5)$$

式中： $s(k)$ 为原始信号； $f(k)$ 为目标信号； $e(k)$ 为噪声信号； ε 为影响因子。

对声发射信号降噪的实质就是剔除噪声信号，

提取出有用的目标信号，再提取出特征值分析目标信号的特点。常见的小波降噪方法为相关性去噪法、平移不变量去噪法、模极大值检测法、小波阈值去噪法。由于小波阈值去噪法具有算法简单、计算效率高等特点，应用最为广泛，本文采用小波阈值去噪法。声发射信号小波阈值去噪的具体步骤^[14]如下。

(1) 选取合适的小波基函数，确定最佳分解层数，对含噪信号进行分解，获取不同尺度的分解系数。

(2) 根据分解后各层高频系数的情况选定合适的阈值，利用该阈值对高频系数进行处理。

(3) 对低频系数和处理后的各层高频系数进行逆变换重构，重构得到去噪后的信号。

提取去噪后声发射信号的均方根值作为特征参数来评价缸内润滑状态。

2 试验设备及方案

2.1 声发射采集系统

一套完整的声发射采集系统包括声发射传感器、前置放大器、声发射采集仪、计算机。本次试验采用北京声华兴业有限公司的声发射采集系统。采用W800型声发射传感器、PAS型前置放大器、SAEU3H集中式声发射检测仪（最大采样率为10 MHz，本次试验设置的采样率为1 MHz）。传感器和放大器的性能参数如表1所示。

表1 声发射传感器和前置放大器性能参数

参数	传感器	放大器
尺寸/mm	Φ19×15	110×65×37
使用温度/℃	-20~80	-20~60
接口类型	M5-KY	BNC
响应频率/kHz	50~800	1.3~1 200.0
灵敏度峰值/dB	>70	
增益/dB		20/40/60
输出范围/V		±10

注：空白代表“不适用”。

2.2 试验台架及方案

试验台包括湘仪动力测试有限公司的GW160电涡流测功机、FC2010测控仪、FC2110驱动仪以及上柴动力的D4114系列SC5D122D型柴油机。柴油机试验台架如图2所示。柴油机具体规格如表2所示。

声发射传感器的安装位置决定着信号的精确与否。声发射传感器应尽量靠近声发射源，缩短

声波在介质中的传播路径，减小信号的衰减。本文主要研究柴油机4#缸缸内的摩擦润滑状态，声发射传感器安装在柴油机4#缸缸体表面，该位置更靠近缸套-活塞环之间的摩擦源。传感器安装位置如图3所示。安装示意图如图4所示。



图2 柴油机试验台架

表2 柴油机主要技术规格

项目	参数
型号	SC5S122D
型式	直列四冲程、水冷、直接喷射
气缸数	4
气缸直径/mm	114
活塞行程/mm	130
活塞总排量/L	5.308
压缩比	17.3 : 1
标定功率/kW	90
标定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
发火顺序	1-3-4-2



图3 声发射传感器安装实物图

本次试验以柴油机的转速和负载为研究变量，通过控制台来改变转速和负载，具体测试工况如表3所示。

在上述工况下，每组工况采集两次，每次采样时间为30 s。

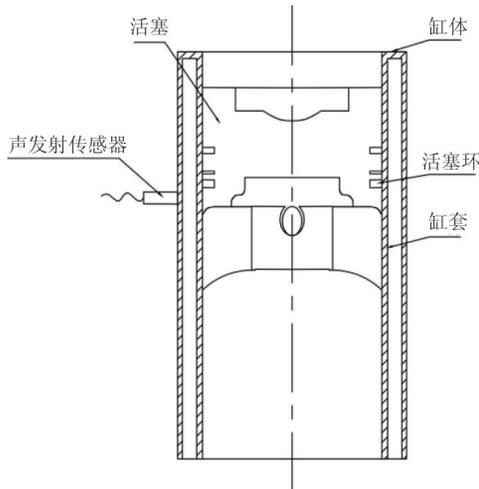


图4 声发射传感器安装示意图

表3 试验测试工况

柴油机转速/ (r·min ⁻¹)	负载/%
800	25
	50
	75
900	25
	50
	75
1 000	25
	50
	75
1 100	25
	50
	75
1 200	25
	50
	75
1 300	25
	50
	75

在柴油机实际工作过程中往往会出现润滑状态不良的情况，掌握柴油机在贫油状态下的缸内摩擦润滑特征对柴油机润滑不良的早期故障诊断具有重要意义。本文模拟在贫油状态时柴油机缸套-活塞环的润滑状态，探究在贫油状态下缸套-活塞环摩擦润滑的特征。柴油机润滑油量可以通过油尺测量得到，在模拟贫油状态时，通过油底壳放出润滑油，探究润滑油处于油尺下限和低于油尺下限两种工况下缸内的润滑状态。

3 结果分析

3.1 小波基的选取

结合柴油机声发射信号的特点，选择具有离散小波变换函数的小波基来减少小波系数的冗余信息量，降低计算量。为了减少信号的失真，所选取的小波基应具有对称性。结合以上分析选取Sym8小波基，分解层级为3级。对比不同阈值处理方式，最终采用无偏似然估计法作为选取阈值的准则，通过硬阈值法对信号进行处理。

3.2 声发射特征参数的提取

为了更好地分析一个循环内的声发射信号，减少气门启闭、缸内燃烧等过程对摩擦磨损部分声发射信号的影响，将时域信号转换成角度域进行处理。受进排气提前、迟闭角的影响，在进排气过程中没有气门的启闭，亦不受燃烧过程的影响，因此本文选择进排气冲程的声发射信号进行分析。

柴油机缸内声发射信号变化程度较大，导致幅值变化程度较大，如果用单一的幅度或者计数进行分析，可靠性较低。采用一段时间内信号电压的均方根值 U_{RMS} 对缸套-活塞环之间的声发射信号进行分析更准确可靠。本文选用 U_{RMS} 作为特征参数来评价缸内的润滑状态。 U_{RMS} 的计算公式如式(6)所示。

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (6)$$

式中： x_i 为*i*点处离散声发射信号电压的瞬时值；*N*为离散点总数。

3.3 缸内润滑状态的影响因素

德国学者Stribeck通过Stribeck曲线将摩擦润滑状态分为3种类型：边界润滑、混合润滑、流体润滑^[15]。结合实际因素，当缸套-活塞环系统的润滑状态处于边界润滑时，产生的油膜厚度远小于微凸体凸起的高度，此时缸套-活塞环之间几乎处于干摩擦状态，其磨损程度是正常磨损的几十倍，严重时将导致柴油机拉缸，造成活塞与气缸“咬死”的现象，使柴油机无法运行。在柴油机正常工作中，缸套-活塞环间均处于流体动压润滑状态，在极少数情况下会出现边界润滑状态。因此，本文只考虑流体润滑状态、混合润滑状态，不考虑边界润滑状态。

流体摩擦力如式(7)所示。

$$F_H = \iint_A (\tau_{H1} + \tau_{H2}) dx dy \quad (7)$$

式中： τ_{H1} 为流体间剪切应力； τ_{H2} 为流体作用于微凸体上的力。

$$\tau_{H1} = \frac{-\mu U}{h} \left[h \frac{1}{h_T} + \varphi_{fs} \right] + \varphi_{fp} \frac{h}{2} \frac{dP}{dx} \quad (8)$$

$$\tau_{H2} = V_{r2} \left[\left(h \varphi_{fp} - \bar{h}_T \frac{dP}{dx} \right) - \frac{\mu U}{h} \varphi_{fs} \right] \quad (9)$$

式中： $\frac{1}{h_T}$ 、 φ_{fs} 、 φ_{fp} 均为剪切应力因子； h 为油膜厚度； U 为两表面相对速度； μ 为缸套和活塞环之间的相对速度。

由式(7)、式(8)、式(9)可以看出流体摩擦力主要受润滑油黏度、两表面间相对运动速度、油膜厚度、缸内压力等因素的影响。

微凸体摩擦力如式(10)所示。

$$F_A = \tau_0 A_c + \alpha A_c P_A \quad (10)$$

式中： τ_0 为剪切应力常数， α 为比例系数，二者均取决于材料本身； P_A 为微凸体间接触压力； A_c 为接触面积。

微凸体摩擦力主要受微凸体本身的性质、接触面积、微凸体两表面之间压力的影响。

3.4 试验结果分析

图5和图6分别为柴油机在正常状态不同转速、负载下进排气冲程的声发射信号RMS值。从图5和图6可以看出：随转速的增大，RMS值呈增大趋势，这主要是由于活塞环速度增大，动压效果增强，促进缸套-活塞环之间油膜的形成，使油膜厚度增大，导致油膜间的黏滞摩擦力增大；在不同负载下3条曲线交织在一起，表明RMS值受负载的影响不大，负载只会影响缸内峰值压力，对缸内平均压力的影响不大，对缸内润滑状态的影响也不大。图5在1200~1300 r/min、高负载时RMS值有下降的趋势，此时缸内燃烧环境恶劣，润滑状态由流体动压润滑状态变成混合润滑状态。从图6也可以看出，在高转速时RMS值突变较大，此时缸内燃烧剧烈，滑油无法保证正常的润滑状态，导致润滑状态发生改变。

相比于图5来说，图6在75%负载时突变程度更大，可能的原因是受邻近气缸(3#缸)的影响，根据发火顺序，当4#缸处于排气冲程时，3#缸正处于做功冲程，所产生的声发射信号较大，为避免其对所测缸摩擦润滑信号的影响，在贫油状态时只选取进气冲程进行分析。

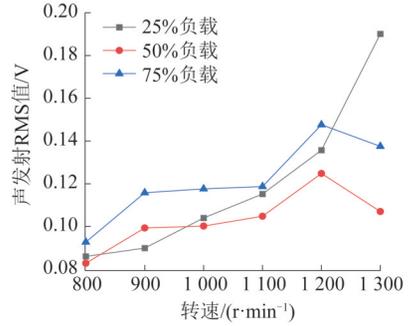


图5 进气冲程RMS值

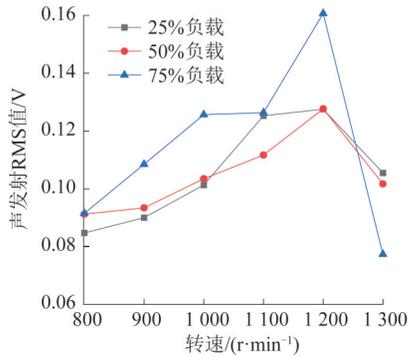


图6 排气冲程RMS值

图7和图8分别为在进气冲程25%负载和75%负载下RMS值随滑油量的变化图，可以看出RMS值随转速的增大而增大，这与正常状态下的结论相一致。在25%负载时，正常状态的RMS值大于贫油状态的RMS值，且随着滑油量的减少，RMS值呈下降趋势，这是因为随着油量的减小活塞在移动过程中动压润滑效果减弱，所形成的油膜厚度减小，使缸套-活塞环之间的黏滞摩擦力减小；但在75%负载下这种现象并不明显，并且在1200~1300 r/min时声发射吸纳后发生突变，主要是因为高转速、高负载情况下油量的减小使得油膜生成条件较差，生成的油膜厚度难以完全覆盖缸套-活塞环表面的微凸体，此时微凸体之间的碰撞在该速度下表现得更为明显，使缸套-活塞环的润滑状态发生改变。

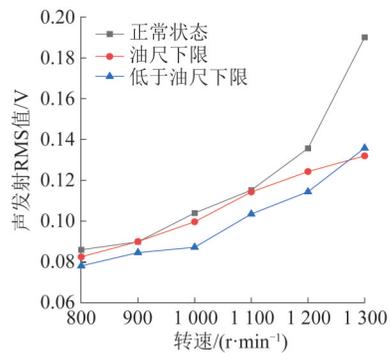


图7 在25%负载下进气冲程RMS值随油量的变化

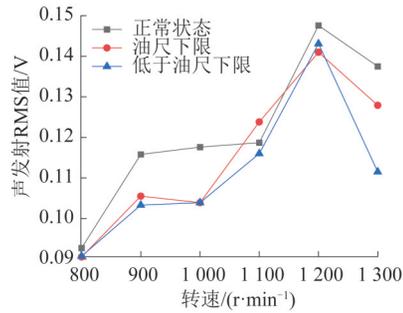


图8 在75%负载下进气冲程RMS值随油量的变化

4 结论

(1) 基于小波降噪的声发射特征值RMS与柴油机转速有关，RMS值随转速的增大呈增大趋势，受负载的影响不大。

(2) 在1200~1300 r/min高负载时声发射特征值RMS值呈下降趋势，表明在高转速、高负载时缸内摩擦润滑状态发生改变。

(3) 在模拟贫油状态时低负载下的RMS值随润滑油量的减小而减小，在高负载时效果不佳。整体而言RMS值随转速的增大呈增大趋势。

参考文献

- [1] HOLMBERG K, ANDERSSON P, ERDEMIR A. Global energy consumption due to friction in passenger cars [J]. Tribology International, 2012, 47: 221-234.
- [2] A B D, B J H. Acoustic emission characteristics of a single cylinder diesel generator at various loads and with a failing injector [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 93: 397-414.
- [3] DOUGLAS R M, STEEL J A, REUBEN R L. A study of the tribological behaviour of piston ring/cylinder liner interaction in diesel engines using acoustic emission [J]. Tribology International, 2006, 39 (12): 1634-1642.
- [4] WEI N, CHEN Z, XU Y, et al. The investigation into the tribological impact of alternative fuels on engines based on acoustic emission [J]. Energies, 2021, 14.
- [5] 史强, 谷丰收, 王铁. 基于声发射和小波分析的活塞环-缸套系统的摩擦润滑状态研究 [J]. 内燃机工程, 2017, 38 (4): 97-102.
- [6] 史强. 基于声发射和小波分析的活塞环-缸套摩擦行为的试验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [7] 王欢欢, 谷丰收, 王铁, 等. 基于单缸柴油机表面异常声发射信号的活塞组件摩擦磨损故障诊断与研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (30): 227-230, 242.
- [8] 张虎, 谷丰收, 王铁, 等. 基于异常声发射信号的柴油机早期故障诊断 [J]. 中国测试, 2018, 44 (3): 28-32.
- [9] BI F, TENG M, WANG X. Development of a novel knock characteristic detection method for gasoline engines based on wavelet-denoising and EMD decomposition [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 517-536.
- [10] WANG X L, DAI Y F. An improved denoising method based on stationary wavelet transform [C]//2018 International Symposium on Communication Engineering & Computer Science (CECS 2018). 2018.
- [11] 徐方素, 孙兴伟, 董祉序, 等. 基于新型小波阈值函数的降噪方法研究 [J]. 机械工程与自动化, 2021 (5): 23-24.
- [12] 樊高瞻, 周俊, 朱昆莉. 基于改进形态-小波阈值降噪的轴承复合故障声学诊断 [J]. 振动与冲击, 2020, 39 (12): 221-226, 288.
- [13] 王康, 贺敬良, 耿开贺, 等. 基于改进小波阈值-SVM的齿轮故障信号识别 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (22): 174-177.
- [14] 于金涛. 声发射信号处理算法研究 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [15] X LU, KHONSARI M M, GELINCK E R. The Stribeck curve: experimental results and theoretical prediction [J]. Journal of Tribology, 2006, 128 (4): 789-794.