

基于 HHT 的柴油机气阀漏气振动诊断方法研究

郑 毅¹, 杨建国^{1,2}

(1. 武汉理工大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063;

2. 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 介绍了采用 Hilbert-Huang Transform (HHT) 信号分析方法提取柴油机缸盖振动信号中气阀漏气特征的试验研究。通过气阀漏气的故障模拟试验, 测量了柴油机气阀不同状态下的缸盖振动信号, 分析确定了缸盖振动信号的分析段; 运用 HHT 分析方法提取了气阀漏气时频域故障特征参数。研究发现: 当气阀处于正常状态时其振动信号能量主要集中于上止点附近; 当气阀处于漏气状态时能量向压缩冲程转移, 分布更为均匀。表明: 表征能量分布均匀程度的时频熵可以作为气阀漏气故障特征参数。

关键词: 柴油机; Hilbert-Huang 变换; 气阀; 漏气; 振动信号

中图分类号: TK423.4⁺3; TK428 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)02-0024-04

Study of Vibration Diagnostic Method of Valve Leakage Based on HHT Method for Diesel Engine

Zheng Yi¹, Yang Jianguo^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063;

2. Key Laboratory of Marine Power Engineering and Technology Granted by MOT, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: Using Hilbert-Huang Transform (HHT) analysis method, the experimental research on extracting the characteristics of valve leakage from the vibration signals of a diesel engine's cylinder head is present. The valve leakage faults were simulated, the vibration signals on the cylinder head in the different valve conditions were measured, the analysis sections of the vibration signals were identified, and the characteristic parameters of the valve leakage faults were extracted by using HHT analysis method in frequency domain. It is found that when the valves are in good condition, the vibration signal energies are concentrated in the vicinity of the top dead center (TDC); while in the leakage condition, the vibration signal energies are transferred to the compression stroke and the energy distribution is more equal. It is also found that the time-frequency entropy which characterizes the uniformity of the vibration energy distribution can be treated as the characteristic parameters to diagnose the fault of valve leakage.

Key words: diesel engine; Hilbert Huang transform; valve; leakage; vibration signal

0 引 言

柴油机气阀机构的工作条件恶劣, 气阀头部直接承受高温高压气体的作用; 且气阀落座频繁, 冲

击力大, 极易发生漏气故障。气阀漏气使柴油机燃烧室的密封性遭到破坏, 影响柴油机的换气过程, 导致燃烧恶化, 降低其整体性能, 且存在着很大的安全隐患^[1]。因此, 开展气阀漏气的监测与诊断

收稿日期: 2016-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51379169)。

作者简介: 郑毅(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柴油机监测、诊断与电子控制, E-mail: zhengxiaoyi623@sina.com。

对于提高柴油机的安全性与可靠性具有十分重要的意义。

振动分析法是诊断气阀漏气的有效方法之一，很多学者对此进行了大量的研究工作。研究表明：当柴油机发生漏气故障时，缸盖振动信号高频段内能量会有所增加^[2]。传统的研究方法是：提取柴油机准周期振动信号或燃烧段信号，进行频谱分析，在频域上提取特征参数，进行气阀漏气故障诊断。然而，柴油机缸盖振动信号是包含了众多激励的非平稳信号，仅采用传统的频谱分析方法对准周期或者燃烧段振动信号进行分析是不够的^[3]。本文通过分析柴油机配气相位图，提取不受其它缸振动激励干扰的信号分析段；将适用于处理复杂非稳态非线性信号的 HHT 分析方法引入柴油机缸盖振动信号分析中，以提取缸盖振动响应信号中所包含的气阀漏气特征。

1 试验系统及试验方案

以 4120SG 柴油机为试验对象，其额定转速为 1 500 (r · min⁻¹)，额定功率为 45 kW，发火顺序为 1-3-4-2。选择 1[#]缸进行气阀漏气的故障模拟试验。为了准确测取气阀漏气时产生的振动信号，加速度传感器安装在靠近排气阀处的 1[#]缸缸盖表面。传感器的布置和测试系统如图 1 所示，其中加速度传感器选用 B&K 公司的 4384 电荷型加速度传感器，其工作频率范围为 0.1 ~ 12 600 Hz，固有频率为 42 kHz，灵敏度为 10 (Pc · g⁻¹)。

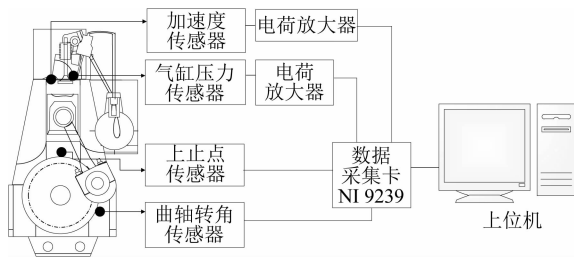


图 1 传感器布置及采集系统原理图

在柴油机 1 500 (r · min⁻¹)，0%、25%、50%、75% 负荷下，测取不同气阀状态的缸盖振动、上止点和气缸压力信号。由于柴油机缸盖振动、上止点和气缸压力信号均在 10 kHz 以下，根据采样定理，选定信号的采样频率为 30 kHz。气阀漏气的故障模拟试验方案如表 1 所示。

2 HHT 变换

HHT 是一种适用于处理非稳态非线性信号的分析方法，主要包括以下步骤：（1）运用经验模

态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 将复杂信号分解成一系列代表不同物理意义的本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)；（2）对每一个 IMF 进行 Hilbert 变换，求得瞬时频率和对应的幅值，然后汇总求得原始信号的时间-频率-幅值三维谱分布，即 Hilbert 谱^[4-6]。

表 1 气阀漏气的故障模拟试验方案

序号	状态	模拟方法
状态 1	正常	正常状态
状态 2	轻微漏气	在阀面边缘处开 1 道口 (1 mm × 4 mm)
状态 3	严重漏气	在阀面边缘处开 2 道口 (1 mm × 4 mm)

文中将 HHT 时频谱中时间-频率-幅值矩阵中坐标为 (i, j) 的幅值 $im(i, j)$ 以及频率进行归一化处理。

$$Im(i, j) = \frac{im(i, j)}{\max[im(i, j)]} \tag{1}$$

$$f_n = \frac{f}{f_s} \tag{2}$$

式中： $Im(i, j)$ 为归一化处理后的幅值， $\max[im(i, j)]$ 为 $im(i, j)$ 的最大值， f_n 为归一化处理后的频率。

由于缸盖振动信号在不同频域和时域上存在幅值相差过大的情况，这将导致能量较小的信号在时频图中不易观察，本文将归一化后的幅值 $Im(i, j)$ 用 dB 表示，使得小能量信号部分也可被观察。在此 dB 是一种纯计数方法，表示为：

$$H_{lm}(i, j) = 10\lg Im(i, j) \tag{3}$$

式中： $H_{lm}(i, j)$ 为用 dB 表示的归一化处理之后的 HHT 时频谱幅值。

3 信号分析段提取方法研究

振动信号分析段的提取主要有准周期信号提取和燃烧段信号提取两种方法。缸盖的准周期振动信号是柴油机一个工作周期的振动信号，此段信号不仅包括漏气激励响应信号，还包含了缸内燃烧以及气阀落座等激励的响应信号，且存在其它缸振动激励的响应干扰。燃烧段振动信号是指柴油机燃烧上止点附近某一区间的振动信号，此时进、排气阀同时关闭，缸盖振动信号主要包括缸内燃烧和气阀漏气的激励响应信号，但通过对柴油机配气相位图的分析可知，此段信号还会受到其它缸排气阀落座振动和燃烧激励的响应干扰。

图 2 为 4120SG 柴油机在 1 500 (r · min⁻¹)，0% 负荷、失火工况下，1[#]缸气阀处在正常状态时的准周期缸盖时域信号波形图。参考柴油机配气相

位(图3),可分析得出对应的缸盖信号激励源。

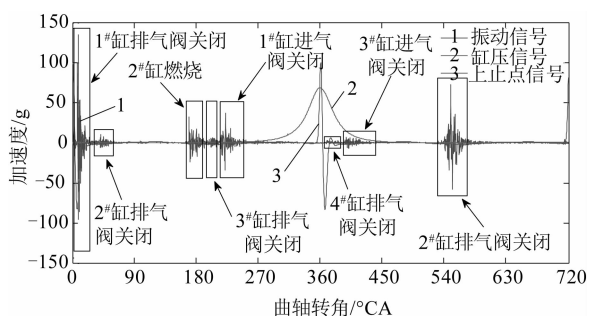


图2 4120SG型柴油机失火工况准周期振动信号时域波形

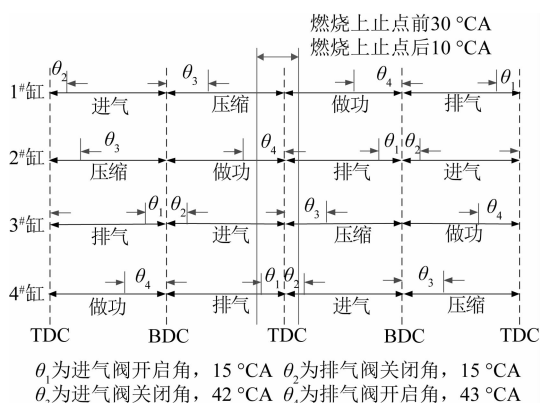


图3 4120SG型柴油机配气相位图

从图2可以看出,4120SG柴油机1#缸的振动信号明显受到相邻2#缸的干扰,甚至还受到相隔两个缸的4#缸的干扰。这主要是因为4120SG柴油机采用组合式缸盖(1#缸和2#缸共用一个气缸盖,3#缸和4#缸共用一个气缸盖),且其结构紧凑,进排气阀落座激励过大。因此,欲排除其它缸激励源干扰,应选取恰当的振动信号分析段。

结合柴油机配气相位图分析,若要使测量缸的信号不受其它缸的振动激励响应的干扰,信号分析段截取方法可如式(4)所示:

$$\begin{aligned} 1\# \text{缸}: \varphi 1\# &= [\theta_c - 180^\circ \text{CA} + \theta_3, \theta_c + \theta_2] \\ 2\# \text{缸}: \varphi 2\# &= [\theta_c - 180^\circ \text{CA} + \theta_3, \theta_c + \theta_2] \\ 3\# \text{缸}: \varphi 3\# &= [\theta_c - 180^\circ \text{CA} + \theta_3, \theta_c + \theta_2] \\ 4\# \text{缸}: \varphi 4\# &= [\theta_c - 180^\circ \text{CA} + \theta_3, \theta_c + \theta_2] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: φ 为截取的信号分析段; θ_c 为燃烧上止点角度; θ_3 为进气阀关闭角度; θ_2 为排气阀开启角度; 180°CA 为四冲程柴油机每个冲程对应的曲轴转角。

通过以上分析可以看出:4120SG柴油机各缸信号分析段相等,这是因为在工作过程中其4个缸的振动信号均存在相互干扰所致。取4个缸信号分析段的交集,如式(5)所示,结果如式(6)所示。

$$\varphi = \varphi 1\# \cap \varphi 2\# \cap \varphi 3\# \cap \varphi 4\# \quad (5)$$

$$\varphi = [\theta_c - 180^\circ \text{CA} + \theta_3, \theta_c + \theta_2] \quad (6)$$

对于4120SG柴油机, θ_2 为排气阀关闭角, 15°CA ; θ_3 为进气阀关闭角, 42°CA 。将数值代入式(6),可表示为:

$$\varphi = [\theta_c - 138^\circ \text{CA}, \theta_c + 15^\circ \text{CA}] \quad (7)$$

综上,4120SG柴油机可提取燃烧上止点前 30°CA 至燃烧上止点后 10°CA 作为振动信号分析段。此段信号区域内气缸处于密闭状态,且缸内压力较高,漏气引起的振动响应信号特征明显。选取燃烧上止点前 30°CA 作为信号分析段起始点是考虑:柴油机进入压缩冲程时压力相对较低,漏气不明显;选取燃烧上止点后 10°CA 作为信号分析段终止点是因为:排气阀关闭角 θ_2 为 15°CA ,且排气阀关闭是一个过程,提取信号分析段时留有一定的裕度。

4 试验数据分析

图4分别为柴油机 ($1500 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$, 25% 负荷) 不同气阀状态(正常、轻微故障、严重故障)下的时域波形。不同气阀状态的振动信号HHT时频图如图5所示。

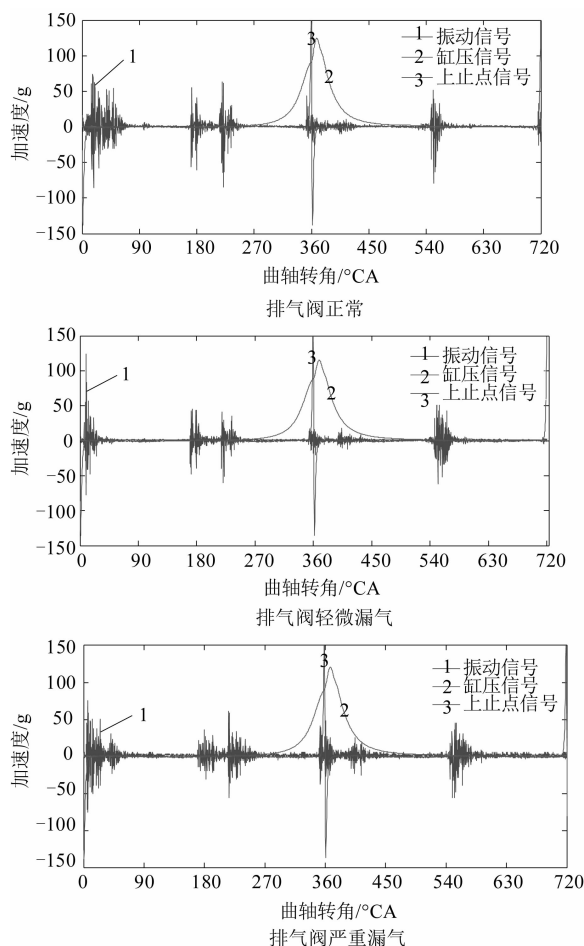


图4 柴油机不同气阀状态的信号时域波形

分析图 5 可知,当排气阀处于正常状态时,HHT 时频图中前一部分代表能量分布的点的数量较少且颜色较浅,说明振动信号分布在分析段前一部分(压缩冲程)的能量较少,红色的点主要分布在时频图后一部分,即能量主要分布在燃烧上止点附近,这是由缸内燃烧激励所产生的;当排气阀处于轻微漏气状态时,HHT 时频图前一部分代表能量分布的点的数量增加,红色的点也向前一部分转移;当排气阀处于严重漏气状态时,红色的点向前一部分转移得更加明显,此部分能量主要是由漏气激励产生的。通过对比排气阀处于正常状态与处于漏气状态的 HHT 时频图可以看出:排气阀处于漏气状态时,振动信号能量在信号分析段内分布得更加均匀,据此可诊断排气阀漏气故障。

为了反映振动信号能量在信号分析段内分布的均匀程度,本文引入时频熵的概念,其定义来源于用于度量信息源平均不定度的信息熵。时频熵的定义如下:首先将 HHT 时频图平面划分为 $n \times m$,共 $N = n \times m$ 块面积相等的时频块, n 代表将时间段划分为 n 段, m 代表将频率段划分为 m 段,设每个时频块内的能量为 $w_i(i = 1, 2, \cdots, N)$,时频图平面的总能量为 E ,对每个时频块进行能量归一化处理,得到:

$$q_i = \frac{w_i}{E}$$

(8)

易知:

$$\sum_{i=1}^N q_i = 1$$

(9)

则 HHT 的时频熵定义为:

$$s(q) = - \sum_{i=1}^N q_i \cdot \ln q_i$$

(10)

根据信息熵基本性质,信息源分布的均匀情况与其大小成正比;对于时频熵来说,当振动信号能量在信号分析段内分布越均匀,则时频熵越大,反之则越小。计算柴油机不同工况、不同气阀状态下的时频熵 $S(q)$ 以及时频熵增量与气阀正常时时频熵的比值 s_k ,如表 2 所示。由表 2 可知,柴油机不同工况下,随着气阀状态的改变时频熵呈现出一致的变化规律。排气阀处于正常状态时,时频熵较小,说明此时振动信号能量集中在上止点附近;当排气阀处于漏气状态时,时频熵较排气阀处于正常状态时的明显增大,说明此时 HHT 时频图中振动能量比较均匀。综合以上分析可知,HHT 时频熵对气阀漏气故障较敏感,可作为气阀漏气故障的特征参数。

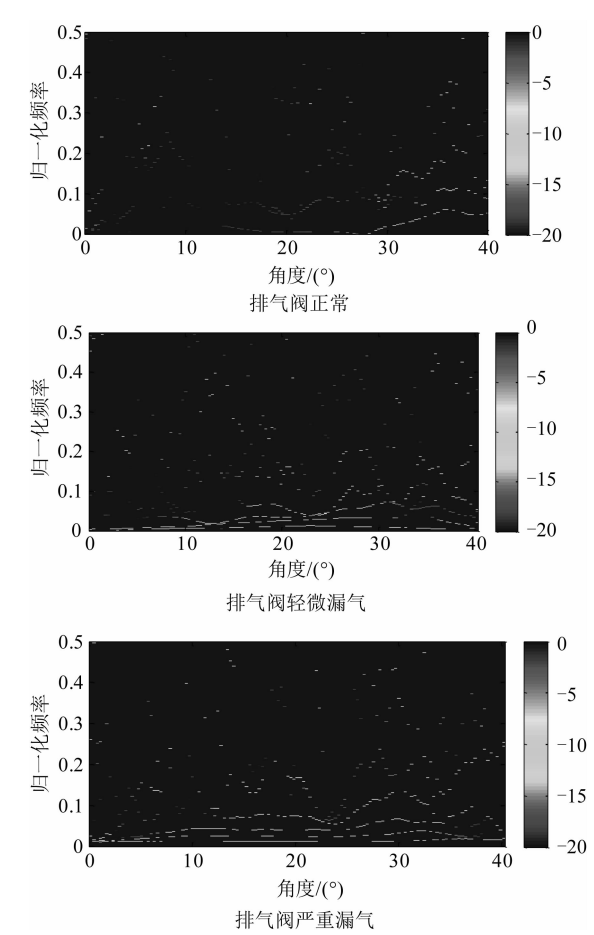


图 5 不同气阀状态的振动信号 HHT 时频图

表 2 不同工况、不同气阀状态下的参数对比

工况	排气阀正常	排气阀轻微漏气		排气阀严重漏气	
	$s(q)$	$s(q)$	s_k	$s(q)$	s_k
0% 负荷	2.82	3.19	13.12%	3.62	28.37%
25% 负荷	2.78	3.32	19.42%	3.58	28.78%
50% 负荷	2.67	3.18	19.10%	3.39	26.97%
75% 负荷	2.91	3.24	11.34%	3.72	27.84%

5 结 论

- (1) 柴油机缸盖振动信号激励源众多,选取信号分析段时应结合柴油机配气相位图,以避免其它缸激励响应的干扰。
- (2) 对原始信号经 HHT 分析后发现:气阀处于正常状态时,柴油机缸盖振动信号能量集中在上止点附近;当气阀处于漏气状态时,能量向压缩冲程转移,在时域和频域上分布较为均匀。
- (3) 时频熵可以表征信号能量在信号分析段内分布的均匀程度,且其随排气阀漏气的严重程度而增加,该特征参数可以用于气阀漏气故障状态的诊断。

(下转第 32 页)

动, 且各缸间的温差不大。表 3 为优化后算法某一区间数据的分析。

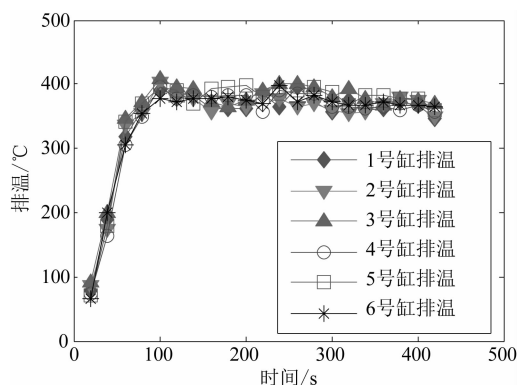


图 7 排温算法优化后排温曲线

表 3 优化后算法数据分析

时间/s	200
最高温度/℃	371.193 1
最低温度/℃	341.697 7
6 缸温差/℃	29.480 8
6 缸排温平均值/℃	355.695 4

由表 3 数据可知, 排温极大值 $T_{\max}$ 与排温极小值 $T_{\min}$ 温差为 29.4 ℃, 排温超差比 ε 为 4.4%, 满足柴油机对排温的要求, 柴油机工作过程柔和, 噪声小。

从排温修正算法优化前后的两次试验数据中可以看出: 算法修正优化后, 对各缸排温的调节更加迅速, 并且各缸排温温差明显缩小, 温差最大值从 90 ℃ 下降到 29.4 ℃, 排温超差比从 15.2% 降至 4% 左右。

4 结 论

本文提出一种排温自动修正算法, 且该算法并不局限于对排温极高和极低的气缸进行调节, 而是对每一缸的排温都进行自动修正, 从而使各缸在较短时间排温趋于一致, 可大大提高柴油机起动性能。

参考文献

- [1] 梁大龙, 赵俊豪, 黄连忠. 柴油机排温异常故障诊断流程 [J]. 航海技术, 2013 (4): 44-47.
- [2] 莫金飞. 浅谈四冲程柴油机排温过高的原因和解决方法 [J]. 中国水运月刊, 2014, 14 (2): 146-147.
- [3] 方式辉. 船用柴油机排温的调整 [J]. 内燃机, 1993 (3): 43-45.
- [4] 王帅, 吴志军, 邓俊, 等. 发动机排气温度的预测模型研究 [C]. 中国汽车工程学会年会论文集, 2011.

(上接第 27 页)

参考文献

- [1] 段福松, 杨建国, 厉成恩, 等. 高速柴油机气阀组件振动监测诊断技术试验研究 [J]. 柴油机, 2011, 33 (5): 31-35.
- [2] 蔡一杰. 柴油机气阀漏气故障振动诊断方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [3] 周平, 林瑞霖. 基于 Hilbert-Huang 变换的柴油机气门漏气故障诊断研究 [J]. 船海工程, 2007 (6): 52-55.
- [4] HUANG N E, WU M C, LONG S R, et al. A confi-

dence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert analysis [J]. Proceeding of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 459: 2317-2324.

- [5] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [J]. Proceeding: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-995.
- [6] 张浩敏, 王睿. 测试信号处理技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.