

缸套-活塞间隙与振动信号关联维数的关系评价

郭立新, 李正守

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 利用发动机气缸套振动信号特征评价气缸套-活塞组件磨损状态,建立了发动机气缸套、活塞、曲柄和连杆机构的动力学模型并进行了动力学仿真.然后又进行了气缸套表面振动分析,并对所得到的振动模拟信号进行了基于关联维数的信号特征评价.结果表明,随气缸套-活塞组件磨损间隙的增加,振动信号幅值增大,气缸套表面振动加速度信号的自相关程度变大,气缸套表面振动信号的关联维数有下降的趋势,这些关联性可以作为发动机气缸套-活塞组件磨损状态评价的特征量.

关 键 词: 发动机; 振动信号; 磨损间隙; 关联维数; 特征分析

中图分类号: TH 133; TH 165

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)08-1160-04

Evaluation of Correlation Dimensions of Engine Cylinder-Piston Clearance and Vibration Signal

GUO Li-xin, LI Zheng-shou

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: GUO Li-xin, professor, E-mail: lxguo@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to evaluate the wear status of cylinder liner-piston components by using engine cylinder liners' vibration signal features, this study established a dynamic model of cylinder liner, piston, crank and connecting rod of the engine and carried out its dynamic simulation. Then the vibration analysis of the cylinder liner surfaces was conducted, and the correlation dimension-based signal features of the simulated vibration signals were evaluated. The analytical results showed that when the cylinder-piston wear clearance increases, the vibration signal amplitude increases, the self-correlation degree also increases, and the correlation dimension of the cylinder liner surfaces' vibration signal decreases. These correlation dimensions can serve as feature indexes to evaluate the wear status of engine cylinder liner-piston components.

Key words: engine; vibration signal; wear clearance; correlation dimension; feature analysis

发动机故障诊断和状态监测是汽车管理及维修的重点,选择合理的诊断理论和方法是解决发动机故障诊断问题的关键.发动机工作过程中的表面振动信号蕴含了丰富的发动机技术状态信息及工作状态信息,是有效地诊断发动机工作状态的表征量^[1-3].利用振动信号诊断发动机工作状态的表征量分析.目前,分形理论在振动信号分析中的应用受到了机械振动故障诊断研究者的日益关注.传统的时域特征值方法和频谱分析方法,由于忽略了发动机振动系统的非线性因素,难以准确地反映发动机振动系统的

实际状态,而分形理论在研究非线性机械振动系统方面具有独特的优势.发动机振动信号具有分形特征,振动信号的分形维数可以反映实际系统的动态特性^[4-5],尤其是借助于关联维数差别对发动机故障信号的诊断方法较为有效;振动信号的关联维数是发动机健康状态估计的主要参数^[6].研究表明,根据G-P算法,振动信号关联维数随工作状态的改变变化明显,可作为发动机工作状态监测和故障诊断的表征量.

本文利用发动机气缸套表面振动信号特征评价气缸套-活塞组件磨损状态.以直径96 mm的

收稿日期: 2014-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275082);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130403009).

作者简介: 郭立新(1968-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师.

某个小型高速内燃机的气缸套-活塞-连杆-曲轴机构为例,模拟了随气缸套-活塞组件磨损变化的气缸套表面振动,对得到的振动模拟信号进行了 G-P 算法的关联维数计算。

1 气缸套-活塞磨损间隙对气缸套表面振动的影响

本文用发动机专用软件 AVL_EXCITE Piston&Rings 进行活塞动力学仿真,获得了在活塞与气缸套接触区域的活塞表面每个节点的接触压力。根据表面磨损与其受到的接触压力成比例的磨损近似评价方法^[7],估计活塞表面磨损。把得到的活塞表面型线输入活塞动力学模型中进行仿真,获得了相应变化后型线的活塞表面接触压力。如此重复上述活塞动力学仿真,可以预测出活塞型线变化过程及活塞与气缸套之间的间隙变化。活塞裙部中间纵向型线的变化过程如图 1 所示。

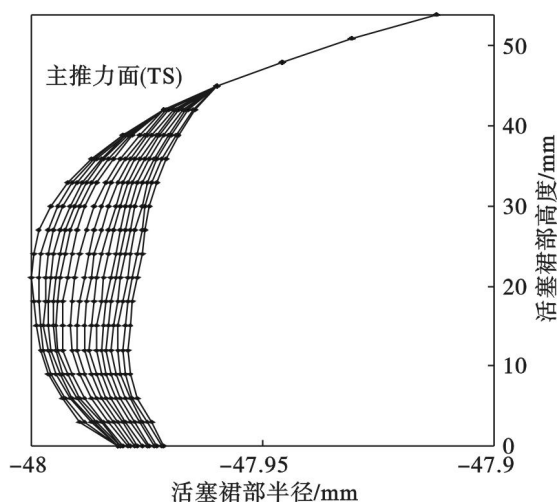


图 1 活塞裙部型线变化过程

Fig. 1 Variation of piston skirt configuration

由于汽车散热器用复合箔在工作状态下要承受 600 °C 高温,因此需要具有良好的抗下垂性能。参照日本低温焊接委员会的抗下垂性试验方法测试复合箔的抗下垂性^[5]。

用发动机专用软件 AVL_EXCITE PoweUnit 模块进行了气缸套-活塞碰撞动力学仿真,获得了气缸套与活塞接触区域内,气缸套内部表面的每个节点的碰撞力,而且对每个不同的活塞型线进行了碰撞动力学仿真。对于无磨损、保持原始型线的活塞,气缸套的中上部接触区域中某一节点的碰撞力的动态响应如图 2 所示。通过上述气缸套-活塞碰撞动力学仿真分析,可以获得气缸套

内部表面各节点的碰撞力结果。

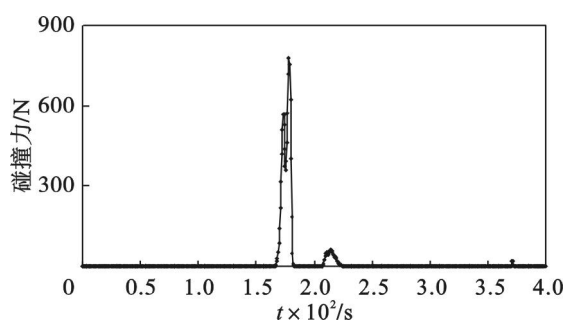


图 2 气缸套内部表面某一节点的碰撞力

Fig. 2 Contact force of a node on the internal cylinder surface

针对活塞无磨损原始型线和有磨损型线变化的情况,利用有限元分析软件 ABAQUS 对气缸套进行振动分析,如图 3 所示。结果表明,活塞磨损型线变化后,气缸的振动幅值明显增加,而且在时域上的振动分布也有明显变化。

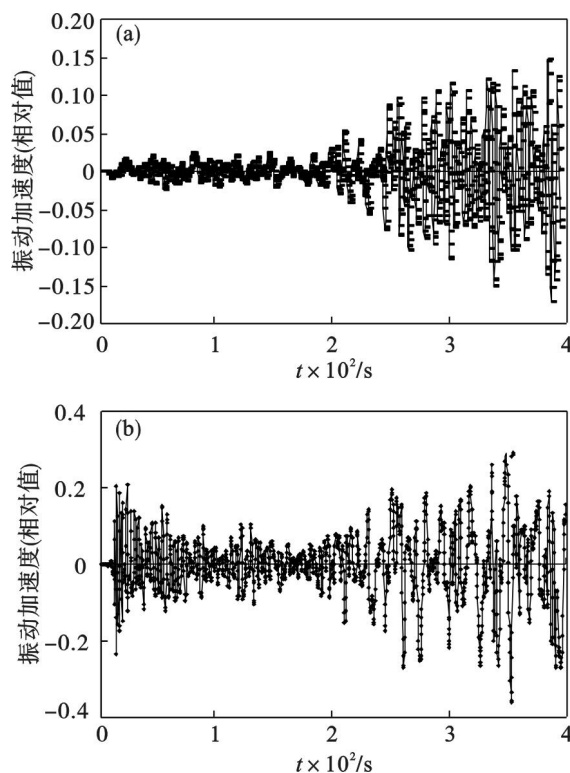


图 3 气缸套某一节点的振动加速度

Fig. 3 Vibration acceleration of a node on the cylinder
(a)—原始型线; (b)—变化型线。

2 气缸套表面振动的关联维数计算

目前,对于机械振动信号的一维时间序列问题,可采用基于 G-P 算法的关联维数计算方法。G-P 算法采用基于 Grassberger 和 Procaccia 的相空间重构直接计算相应动力系统吸引子关联维数。

设 $\{X_i\} (i=1, 2, \dots, N)$ 是测量得到的时间序列, 对该时间序列进行相空间重构, 将其代入到 m 维欧氏空间 \mathbf{R}^m 中. 重构结果为

$$X_n(m, \tau) = (x_n, x_{n+\tau}, \dots, x_{n+(m-1)\tau});$$

$$n = 1, 2, \dots, N_m; N_m = N - m + 1.$$

式中: m 为重构相空间的维数; $\tau = k \Delta t$ 为时间延迟, Δt 为数据采样时间间隔, k 为任意整数.

m 维相空间中任意点对 $(X_i, X_j) (i \neq j)$ 的距离为

$$r_{i,j} = d(X_i, X_j) = \|X_i - X_j\| =$$

$$\left[\frac{1}{m} \sum_{a=0}^{m-1} (x_{i+a\tau} - x_{j+a\tau})^2 \right]^{1/2}.$$

给定一个临界距离 ε (ε 为一小数), 考察距离小于 ε 的点对组 $(X_i, X_j) (i \neq j)$. 距离小于或等于 ε 的点对数为 $Z_1(\varepsilon) = \{r_{i,j} \leq \varepsilon \text{ 的点对数}\}$, 距离大于 ε 的点对数为 $Z_2(\varepsilon) = \{r_{i,j} > \varepsilon \text{ 的点对数}\}$, 总的点对数为 $Z = Z_1(\varepsilon) + Z_2(\varepsilon)$. 距离小于 ε 的点对在所有点对中所占比例为

$$C(\varepsilon, m) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} H(\varepsilon -$$

$$\|X_i - X_j\|), i \neq j.$$

式中 H 为阶跃函数:

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

适当选取 ε , 在无标度区内存在如下关系:

$$C(\varepsilon, m) = \varepsilon^{D_2(m)}, D_2(m) = \frac{\ln C(\varepsilon, m)}{\ln \varepsilon}.$$

式中 $D_2(m)$ 即为关联维数.

本文根据嵌入定理 $m \geq 2D_2(m) + 1$, 确定嵌入维数. 选取适当的拟合点数并计算各拟合点组的相关系数, 相关系数最大的一组处于无标度区内. 同时采用自相关函数法求取延迟时间, 取自相关函数第一次为 0 时, 相应的时间延迟为相空间重构的延迟时间 $\tau_{\text{重构}}$ (见图 4).

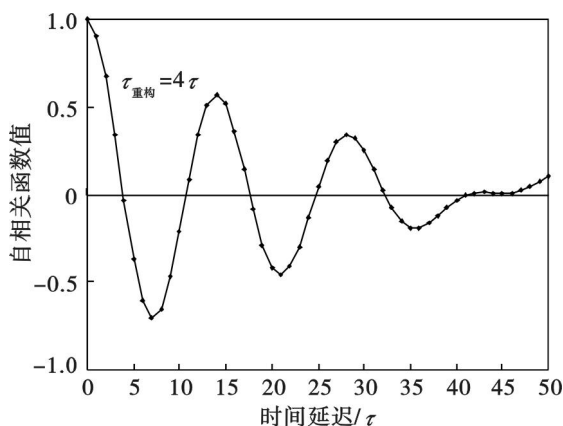


图 4 自相关函数曲线

Fig. 4 Self-correlation function curve

然后, 对模拟得到的气缸套表面振动加速度进行关联维数计算. 根据嵌入定理, 把嵌入维数 m 从 15 增加到 30. 针对活塞无磨损原始型线的情况, 对气缸套表面振动加速度进行关联维数计算, 其对应的双对数曲线 $\ln C(\varepsilon, m) - \ln \varepsilon$ 如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 每个嵌入维数的双对数曲线中无标度区在 $-2.25 \sim -0.85$ 区间, 计算得出的关联维数结果如表 1 所示. 嵌入维数 27 以上的双对数曲线倾斜率误差在 0.7% 左右, 因此, 可以认为这次气缸套表面振动加速度的关联维数为嵌入维数 $m=27$ 时的计算值.

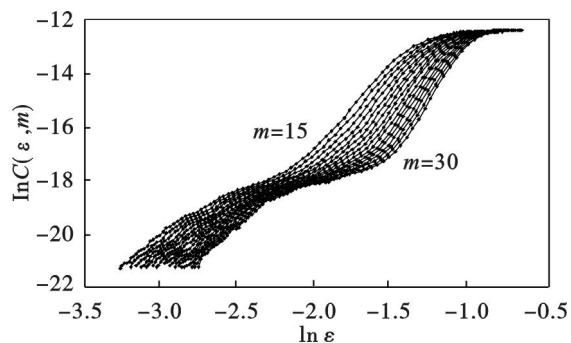


图 5 双对数曲线

Fig. 5 Double logarithmic curves

表 1 表面节点上的关联维数

嵌入维数	15	16	17	18	19	20
关联维数	6.585 0	6.798 8	7.006 8	7.161 0	7.395 6	7.410 1
嵌入维数	21	22	23	24	25	26
关联维数	7.701 9	7.722 4	7.943 4	8.005 1	8.119 6	8.528 9
嵌入维数	27	28	29	30		
关联维数	8.646 5	8.701 9	8.751 5	9.047 1		

3 气缸套 - 活塞磨损间隙的关联维数

3.1 计算结果

根据图 1 中活塞型线变化过程, 即气缸套与活塞间的磨损间隙增大过程, 分析了气缸套表面振动模拟信号的关联维数的变化过程 (见图 6). 随气缸套 - 活塞磨损间隙变化的信号数据相空间重构的延迟时间变化如图 7 所示.

3.2 结果分析

从图 6 和图 7 可以看出, 随着气缸套 - 活塞间隙变大, 模拟信号的关联维数呈现出变小的趋势, 延迟时间呈现出变大的趋势. 虽然有一些不规则的计算点, 但这些不规则点的数量很少, 用多次的模拟计算结果可以确定这些点的具体位置. 图

7的结果表明:气缸套-活塞间隙从 $10.2576\text{ }\mu\text{m}$ 到 $58.9253\text{ }\mu\text{m}$ 区间的延迟时间是 4τ (τ 为采样时间间隔),从 $62.3455\text{ }\mu\text{m}$ 到 $124.632\text{ }\mu\text{m}$ 区间的延迟时间是 5τ ,从 $127.365\text{ }\mu\text{m}$ 到 $189.3425\text{ }\mu\text{m}$ 区间的延迟时间是 6τ , $193.293\text{ }\mu\text{m}$ 以后区间的延迟时间是 7τ .在有不同延迟时间的间隙区间,关联维数的平均值不同;在延迟时间为 4τ 和 6τ 的间隙区间,关联维数的变化趋势是一致的.延迟时间变大意味着信号的自相关程度增大,自相关程度增大引起关联维数下降.本文仿真计算结果的变化趋势跟文献[8]中的实验测试分析结果的变化趋势相同.

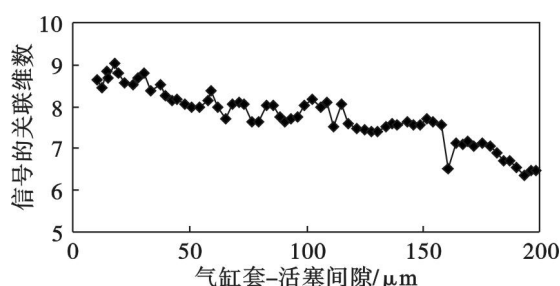


图6 关联维数与间隙的关系

Fig. 6 Relationship of correlation dimension and clearance

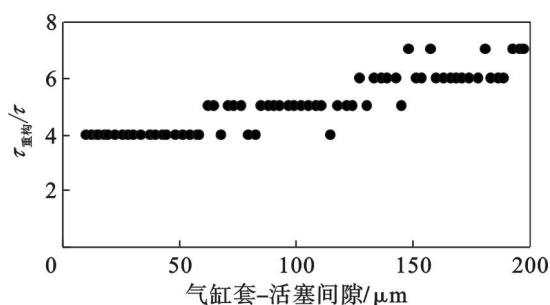


图7 延迟时间与间隙的关系

Fig. 7 Relationship of delay time and clearance

上述研究结果利用仿真手段从理论上再次证明,气缸套表面振动信号的关联维数可以用来评价气缸套-活塞间的磨损情况.

4 结 论

1) 气缸套表面振动在吸气冲程中随磨损增大而变化明显,信号的相对幅值随磨损变大也增大.

2) 随气缸套-活塞磨损增大,气缸套表面振动加速度信号的自相关程度变大.

3) 随气缸套-活塞磨损增大,气缸套表面振动信号的关联维数有下降趋势.虽然没有明确的线性关系,但可以把气缸套-活塞组件磨损状态振动信号的关联维数与延迟时间相结合,来评价其磨损间隙的变化范围.

参考文献:

- [1] de Botton G, Ben-Ari J, Sher E. Vibration monitoring as a predictive maintenance tool for reciprocating engine [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering*, 2000, 214 (D8): 895-903.
- [2] Demas N G, Erck R A, Fenske G R. Tribological evaluation of piston skirt/cylinder liner contact interfaces under boundary lubrication conditions [J]. *Lubrication Science*, 2010, 22(3): 73-87.
- [3] Li L, Li J, Chen B J. Wavelet packet and support vector machine for engine fault diagnosis [J]. *Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology*, 2011, 230/231/232: 1-6.
- [4] Tang L W, Feng H Y, Wang W, et al. Fractal application in analyzing vibration signal of engine [C]//Third International Conference on Wavelet Analysis and Its Applications. Chongqing, 2003: 871-886.
- [5] 秦海勤, 徐可君, 江龙平. 分形理论应用中无标度区自动识别方法[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(12): 106-109.
(Qin Hai-qin, Xu Ke-jun, Jiang Long-ping. Fractal scaleless band automatic identification for fractal theory application [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(12): 106-109.)
- [6] 杨文平, 陈国定, 石博强, 等. 基于分形理论的斯太尔汽车发动机故障诊断的研究[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(2): 49-52.
(Yang Wen-ping, Chen Guo-ding, Shi Bo-qiang. Based on fractal theory for Steyr diesel engines diagnose [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(2): 49-52.)
- [7] 郑启福. 内燃机动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
(Zheng Qi-fu. Dynamics of internal combustion engine [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1988.)
- [8] 田建明. 基于分形理论的柴油机缸套-活塞环磨合期摩擦磨损特性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
(Tian Jian-ming. Study on friction and wear characteristics of engine cylinder-piston based on fractal theory [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2006.)