

基于缸盖振动信号包络线相关分析的柴油机故障预警方法研究

范正天¹ 王 磊² 赵志超² 夏 敏² 刘小波² 茆志伟^{1*}

(1. 北京化工大学 机电工程学院 高端机械装备健康监控与自愈化北京市重点实验室, 北京 100029;

2. 中石化重庆天然气管道有限责任公司, 重庆 408000)

摘 要: 针对柴油机故障特征易受到环境、载荷等因素的干扰, 从而导致许多传统意义上的故障特征参数不再敏感的问题, 提出了一种基于缸盖振动信号包络线相关分析的柴油机故障预警方法, 对一台 6 缸柴油机的缸盖振动信号对比了希尔伯特变换和 n 阶极值插值两种方法的包络线提取效果, 并对其包络线进行相关分析, 得到了相似系数、距离标准差以及余弦相似度等相关分析结果。研究结果表明: 在传统特征参数不敏感的情况下, 相关分析可以更好地反映机组的故障状态。本文研究结果可为实现柴油机故障的早期预警奠定基础。

关键词: 柴油机; 包络线; 相关分析; 故障预警

中图分类号: TK421 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2018.04.014

引 言

柴油机作为一种典型的往复动力机械, 复杂的结构和恶劣的运行环境会导致其故障频发且多样, 而且其工作条件、载荷状态及传感器精度等不确定性因素, 会影响柴油机故障预警诊断的准确率^[1]。提取能够敏感反映机组运行状态的特征参数是柴油机故障预警诊断的前提和基础, 否则就会出现故障误诊、漏诊。目前对柴油机故障预警诊断一般是针对柴油机单一载荷下的某种故障提出几个时域、频域或量纲参数作为故障敏感参数^[2]。由于柴油机故障在不同的载荷下所表现出的信号特征不尽相同, 某种载荷下的敏感参数往往在另一种载荷下变得不再敏感, 所以这种传统意义上的敏感参数不再适合作为柴油机故障预警和诊断的特征参数^[3]。

柴油机缸盖振动信号波形较为复杂, 不易直接对比故障信息, 振动信号包络线的简明特性可以很好地弥补振动信号波形杂乱的缺陷, 并能准确反映

信号的变化趋势。根据信号包络线在气阀^[4]、轴承^[5]的故障诊断中的成功应用经验, 利用振动信号包络线可以更好地识别柴油机的故障状态, 并依此对柴油机故障进行预警。相关分析是一种聚类分析方法, 能够避免柴油机载荷变化导致特征参数不敏感的问题。对同一种载荷下的柴油机振动信号进行相关分析, 如果分析结果较差, 则表明机组发生故障。针对如何将相关分析应用到故障预警诊断当中, 国内外学者们作了大量研究。相关分析方法除了已成功应用于机械设备^[6]、感应电机定子^[7]、齿轮箱^[8]的故障诊断外, 还用于检测柴油机工作的均匀性和监测柴油机的工作状态^[9]。另外, 文献[10-12]验证了相关分析方法中余弦相似度这一指标具有零不变性、交叉性等优点。

基于上述相关分析方法的优点, 针对传统预警特征参数不敏感的问题, 本文提出了一种基于缸盖振动信号包络线相关分析的柴油机故障预警新方法, 通过对提取的振动信号包络线进行相关分析, 从而得到新的预警敏感特征参数, 并通过实验验证了文中所提方法的可行性。

1 相关分析理论

相关分析用于研究两个信号之间的关联性及其相互间的密切程度。对于两个遍历随机过程 x 和 y , x 在 t 时刻的值与 y 在 $(t + \tau)$ 时刻的值之间的关系可用如式(1)的相关函数来描述

收稿日期: 2018-03-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0203305); 中央高校基本科研业务费(JD1815)

第一作者: 男, 1992年生, 硕士生

* 通信联系人

E-mail: maozw1990@126.com

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t x(t)y(t+\tau)dt \quad (1)$$

式(1)表示两个信号波形相差时间 τ 时的相似程度。设柴油机某缸两个时间段内各自的缸盖振动信号分别为 x 和 y , 则 $R_{xy}(\tau)$ 表示此缸在两个工作时间内缸盖振动信号的相似程度^[13]。

相似系数的表达式如式(2)

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x$ 和 $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y$ 分别为 x 和 y 的算术平均值。

相似系数 r 的取值范围为 $(0, 1)$ 。由文献[2]可知, $|r| \leq 0.3$ 时, x, y 不相关; $0.3 < |r| \leq 0.5$ 时, x, y 低相关; $0.5 < |r| \leq 0.8$ 时, x, y 显著相关; $|r| > 0.8$ 时, x, y 高度相关。

另一表示样品近似程度的常用统计量为距离指标, 设 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_p)^T$ 是所关心的 p 个待处理原始样本, 对其作 n 次观测得到 n 组数据, 有

$$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})^T, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

则称这 n 组观测数据为 n 个样品点, 每个样品可看成是 p 维空间中的 1 个点, n 个样品构成 p 维空间中的 n 个点。显然, 可用各点之间的距离来衡量各样品之间的接近程度^[14], 以距离的方差或标准差为度量指标, 方差或标准差越小, 距离越靠近。

余弦相似度通过计算两个向量之间的夹角余弦值来度量两个变量之间的相似性, 具有零不变性、交叉性等优点。缸盖振动信号自变量 x 与 y 之间的余弦相似度计算公式为

$$\cos \langle x, y \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (4)$$

式中, x_i, y_i 分别表示 x 和 y 的第 i 个元素值。夹角余弦取值范围为 $[-1, 1]$, 其值越大则两个向量的夹角越小, 相似程度越高; 反之亦然。由文献[10]可知, $|\cos \langle x, y \rangle| \leq 0.4$ 时, 变量之间不存在相关性; $0.4 < |\cos \langle x, y \rangle| \leq 0.8$ 时, 变量之间低度相关; $|\cos \langle x, y \rangle| > 0.8$ 时, 变量之间高度相关。

综合以上分析, 本文采用相似系数、距离标准差以及余弦相似度这 3 项参数作为相关分析的衡量指标。

2 缸盖振动信号包络线提取

加速度传感器采集得到的缸盖振动信号波形较为复杂, 直接对其进行相关分析的效果较差, 而振动信号包络线不仅可以准确反映信号的变化规律和趋势, 利用包络线也能简化相关分析的计算复杂程度, 得到更好的相关分析结果。常用的包络线提取方法有希尔伯特变换、小波变换^[15]以及 n 阶极值插值法^[13]等方法。

2.1 希尔伯特变换提取包络线

由公式(4)对信号 $x(t)$ 进行希尔伯特变换^[15]

$$\hat{x}(t) = x(t) \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

此时 $x(t)$ 的解析信号为

$$g(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (6)$$

$g(t)$ 的幅值 $A(t)$ 即为 $x(t)$ 的包络

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \quad (7)$$

利用希尔伯特变换对柴油机缸盖振动信号提取上包络线(图 1)。由图 1 可以看出, 由于存在随机干扰, 希尔伯特变换得到的包络线不能准确地反映出缸盖振动信号的每一组冲击, 包络精度得不到保证。

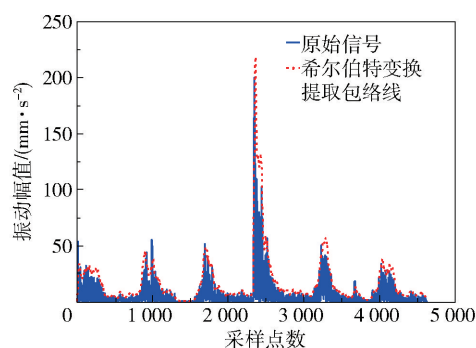


图 1 希尔伯特变换提取包络线

Fig. 1 Use of the Hilbert transform method to extract the envelope

2.2 n 阶极值插值法提取包络线

首先, 找出柴油机缸盖振动信号中的所有极大值点, 称为一阶极值点; 再在一阶极值点中找出所有极大值点, 称为二阶极值点; 以此类推, 在 n 阶极值点中找出所有极大值点, 称为 $n+1$ 阶极值点, 直至得到的相邻两极值点所构成直线的斜率基本相等为止(即包络特征点基本在一条直线上), 此时 $n+1$ 阶极值点即为需要连接的包络点。

由于包络点是原信号的 $n+1$ 阶极值, 其均值产

生了漂移,所以随后需对提取的包络点进行去均值处理。设某阶特征点序列为 x_0, x_1, \dots, x_m , 则去均值计算公式为

$$x'_i = x_i - \frac{1}{m+1} \sum_{i=0}^m x_i \tag{8}$$

最后,由于包络点之间间距较大且不相等,直接画图则结果为各段长度不一的折线,故需要对包络点进行插值处理;为了避免三次样条插值极值点振荡严重的问题,本文采用 Hermite 插值。至此,利用 n 阶极值方法拟合出原始振动信号的包络线如图 2,将希尔伯特变换和 n 阶极值插值法的包络线提取结果进行直观对比如图 3 所示。可以看出, n 阶极值插值法得到的包络线能够准确地将原始振动信号的冲击包络起来,而希尔伯特变换在某些波峰会出现包络不准确的情况。因此,两种方法相比, n 阶极值插值法具有更高的包络精度。

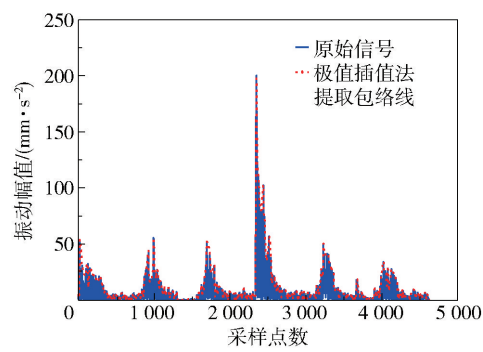


图 2 n 阶极值插值法提取包络线

Fig. 2 Use of the n -order extremum interpolation method to extract the envelope

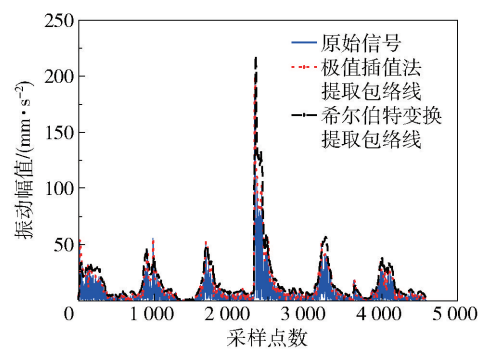


图 3 两种包络线提取方法结果对比

Fig. 3 Comparison of two envelope extraction methods

3 实验验证

3.1 柴油机故障模拟实验台

以 WP10 型柴油机为主体搭建柴油机故障模拟实验台,针对 6[#]缸开展故障模拟实验,在缸盖上安

装振动传感器,采集柴油机故障信号。实验台主要由柴油机、涡轮增压器、水力测功器及其附属设备组成,主要参数见表 1。

表 1 WP10 型柴油机主要参数
Table 1 Main parameters of WP10 diesel engine

参数名称	参数值
功率/kW	250
气缸数	6
发火顺序	1-5-3-6-2-4
冲程数	4
缸体排列形式	直列式
增压形式	涡轮增压
压缩比	17:1

3.2 缸盖振动信号采集系统

为得到缸体振动信号,本文搭建一个具备软硬件配置的数据采集处理系统,具体配置如表 2 所示。实验台及传感器布置如图 4 所示。在柴油机每个缸的缸盖上方安装一个加速度传感器来测量振动信号,结合由键相信号标记的起始缸活塞上止点位置以及柴油机的点火顺序即可得到振动冲击信号。

表 2 机组信号采集配置表
Table 2 Unit signal collection configuration

机组信号采集硬件	品牌	数量
电涡流传感器	BENTLY	1
加速度传感器	PCB	8
键相传感器	P + F	1
数据采集器	BHXX	1
数据应用管理器	BHXX	1
显示器	DELL	1
数据采集软件	BH5000	1

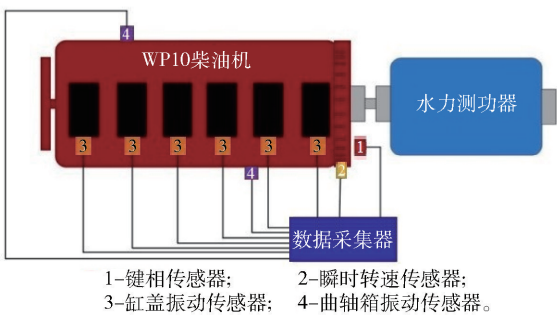


图 4 机组传感器测点布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the unit sensor layout

3.3 故障模拟实验及结果分析

3.3.1 振动信号包络线提取方法对比

在机组空载的工况下,分别进行正常状态、失火

故障、撞缸故障以及小头瓦磨损故障的模拟实验,得到不同状态下的缸盖振动信号。采用 n 阶极值插值法得到了不同时刻 3 种故障振动信号的 4 组上包络线,并用两种方法提取 3 种故障振动信号包络线,结

果如图 5 所示。对比图 5 中两种方法提取的 3 种不同故障包络线,得到与正常状态下相同的结论,即相比希尔伯特变换方法,极值插值法能更准确地提取包络线,具有更高的包络精度。

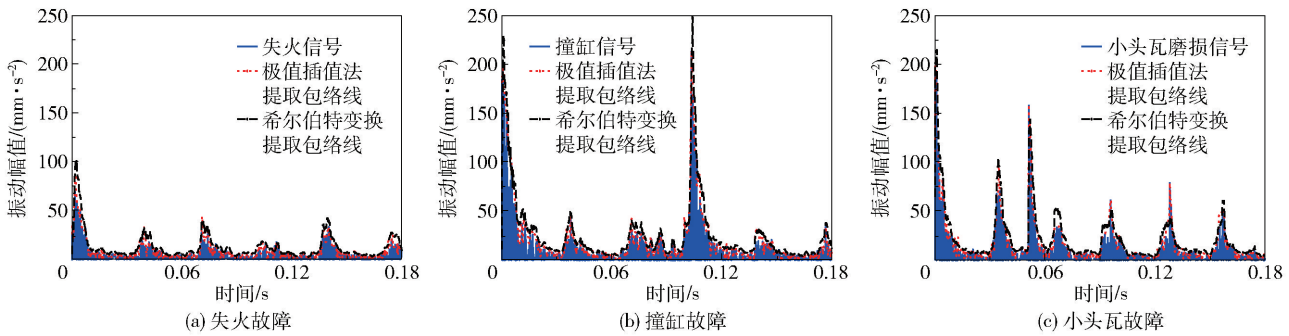


图 5 两种方法提取振动信号包络线结果对比

Fig. 5 Comparison of envelope extraction methods for vibration signals

3.3.2 相关分析结果对比

将 1 组柴油机正常振动信号包络线作为标准包络线,并分别采用两种包络线提取方法对 49 组(1~49)正常信号和 34 组(50~83)失火故障信号、30 组(84~113)撞缸故障信号以及 28 组(114~141)小头瓦磨损故

障信号进行包络线的提取,将提取到的两种包络线与标准包络线进行相关分析计算,得到了相似系数、距离标准差和余弦相似度 3 项指标的分析结果,部分结果见表 3。将所有极值插值法得到的包络线及其原始信号的相关分析结果绘制成散点图,如图 6。

表 3 不同工况的数据相关分析部分结果
Table 3 Partial data correlation analysis results

运行状态	相似系数		距离标准差		余弦相似度	
	极值插值法	希尔伯特变换	极值插值法	希尔伯特变换	极值插值法	希尔伯特变换
正常状态	0.940	0.819	7.057	13.003	0.959	0.889
正常状态	0.931	0.807	7.360	14.050	0.953	0.881
正常状态	0.940	0.854	7.170	12.094	0.958	0.910
失火故障	0.284	0.339	21.021	22.096	0.562	0.662
失火故障	0.244	0.297	21.307	23.410	0.541	0.638
失火故障	0.187	0.388	22.466	23.553	0.504	0.681
撞缸故障	0.014	0.155	38.651	35.392	0.297	0.476
撞缸故障	0.034	0.178	36.260	33.306	0.275	0.502
撞缸故障	0.115	0.135	36.131	33.941	0.292	0.469
小头瓦磨损故障	0.156	0.273	28.755	26.271	0.425	0.576
小头瓦磨损故障	0.161	0.260	27.478	26.837	0.429	0.549
小头瓦磨损故障	0.119	0.271	28.389	27.106	0.395	0.558

由表 3 及图 6 可以看出,正常状态下的相似系数均大于 0.80,表示正常状态下的振动信号包络线与标准包络线存在高度相关性,而 3 种故障下的相似系数均小于 0.40,说明故障包络线与正常状态下不存在明显相关性;正常状态下的距离标准差均小于 15.0,故障状态下的距离标准差均在 20.0 以上,两种状态下的距离标准差相差明显;此外,正常状态下的振动信号包络线的余弦相似度也均在 0.80 以

上,与标准包络线之间存在很高的相关性;故障状态下的余弦相似度在 0.70 以下,与标准包络线间的相关性较低,或不存在显著相关性。

另外由图 6 还可以看出,对于原始振动信号直接进行相关分析,得到的 3 种相关分析指标在正常和故障两种状态下均发生了混叠,相关分析结果掺杂在一起,无法对机组状态进行判别及故障预警,这是由于原始振动信号复杂的波形使分析过程中产生

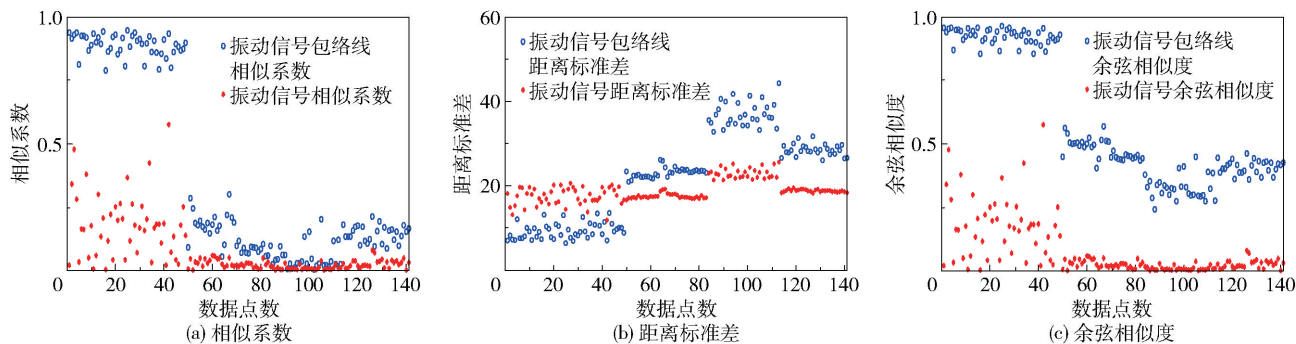


图6 不同工况下原始振动信号及其 n 阶极值插值法包络线相关分析结果

Fig.6 Correlation analysis results of the vibration signal and its envelopes with n -order extremum interpolation method in four states

了误差。
综上所述,振动信号包络线在故障状态下的相似系数、距离标准差以及余弦相似度均与正常状态有较大差距,表明相关分析结果可以作为柴油机故障识别的敏感特征参数,用于机组故障的及时预警。这一结论验证了第1节中相关分析用于柴油机故障预警的理论分析结果。

4 结论

(1)通过对比希尔伯特变换和 n 阶极值插值法两种方法提取的柴油机振动信号包络线可知, n 阶极值插值法得到的包络线更加准确,包络精度更高。

(2)对缸盖振动信号直接进行相关分析,得到的相关分析结果对于故障特征不敏感,不能准确反映柴油机的运行状态,这是由于原始振动波形杂乱导致相关分析计算过程中产生了较大的误差。

(3)基于振动信号包络线的相关分析能够通过相似系数、距离标准差以及余弦相似度反映出柴油机的工作状态,故障状态下的振动信号包络线与正常状态的振动信号包络线相似度极低,可以作为柴油机故障预警诊断的敏感特征参数。

参考文献:

- [1] 严莉. 基于多源信息融合的发动机故障诊断研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.
YAN L. Study on engine fault diagnosis based on multi-information fusion [D]. Taiyuan: North University of China, 2010. (in Chinese)
- [2] 张宇飞, 么子云, 唐松林, 等. 一种基于主成分分析和支持向量机的发动机故障诊断方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(24): 3307-3311.
ZHANG Y F, YAO Z Y, TANG S L, et al. An engine fault diagnosis method based on PCL and SVM[J]. Chi-

- na Mechanical Engineering, 2016, 27(24): 3307-3311. (in Chinese)
- [3] 别锋锋, 刘杨, 裴峻峰, 等. EEMD 近似熵和 SVM 在柴油机传动系统中的故障诊断研究[J]. 机械设计与制造, 2015(3): 24-27, 31.
BIE F F, LIU Y, PEI J F, et al. Fault diagnosis of diesel engine drive system based on EEMD approximate entropy and SVM[J]. Machinery Design and Manufacture, 2015(3): 24-27, 31. (in Chinese)
- [4] 陈敬龙, 张来斌, 段礼祥. 基于改进 Mallat 算法及包络线的气阀故障诊断[J]. 石油机械, 2011, 39(5): 56-59.
CHEN J L, ZHANG L B, DUAN L X. The fault diagnosis of the air valve on the basis of improved Mallat algorithm and envelope curve[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(5): 56-59. (in Chinese)
- [5] 时培明, 王敬, 温江涛, 等. 基于包络线算法改进 EMD 的旋转机械故障诊断方法研究[J]. 计量学报, 2016, 37(1): 62-66.
SHI P M, WANG J, WEN J T, et al. Study on rotating machinery fault diagnosis method based on envelopes fitting algorithms EMD[J]. Acta Metrologica Sinica, 2016, 37(1): 62-66. (in Chinese)
- [6] 熊武勇, 丁光明. 机械振动诊断中信号的相关分析与故障定位[J]. 江西电力职业技术学院学报, 2003, 16(2): 21-22, 28.
XIONG W Y, DING G M. Signal correlation analysis and fault location in mechanical vibration diagnosis[J]. Journal of Jiangxi Electric Vocational and Technical College, 2003, 16(2): 21-22, 28. (in Chinese)
- [7] 侯新国, 吴正国, 夏立, 等. 基于相关分析的感应电机定子故障诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 83-86.
HOU X G, WU Z G, XIA L, et al. Stator winging fault diagnosis method of induction motor based on coherence analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2):

- 83-86. (in Chinese)
- [8] 袁佳胜, 冯志华. 基于相关分析与小波变换的齿轮箱故障诊断[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 120-123.
YUAN J S, FENG Z H. Fault diagnosis research based on correlation and wavelet for gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 120-123. (in Chinese)
- [9] 林瑞霖, 孙云岭. 基于瞬时转速相关分析的柴油机工作均匀性检测[J]. 内燃机, 2006(4): 18-20.
LIN R L, SUN Y L. Uniformity-detecting of engine working processe based on correlation analysis and transient [J]. Speed Internal Combustion Engines, 2006(4): 18-20. (in Chinese)
- [10] 耿志强, 胡海霞, 韩永明. 基于余弦相似度的复杂网络故障检测方法及应用[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 81-86.
GENG Z Q, HU H X, HAN Y M. A complex network fault detection method based on cosine similarity and its application[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2017, 44(2): 81-86. (in Chinese)
- [11] LEE Y K, KIM W Y, CAI Y D, et al. CoMine: efficient mining of correlated patterns[C]//IEEE International Conference on Data Mining. Melbourne, 2003: 581-584.
- [12] XIONG H, TAN P N, KUMAR V. Hyperclique pattern discovery[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2006, 13(2): 219-242.
- [13] 杨金才, 梁川, 盛兆顺, 等. 数字信号的包络分析方法[J]. 郑州工业大学学报, 2001, 22(3): 59-61.
YANG J C, LIANG C, SHENG Z S, et al. Envelope analysis method of digital signal[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 2001, 22(3): 59-61. (in Chinese)
- [14] 周林, 赵杰, 冯广飞. 装备故障预测与健康管理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
ZHOU L, ZHAO J, FENG G F. Equipment fault prediction and health management technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [15] 张绪省, 朱贻盛, 成晓雄, 等. 信号包络提取方法——从希尔伯特变换到小波变换[J]. 电子科学学报, 1997, 19(1): 120-123.
ZHANG X S, ZHU Y S, CHENG X X, et al. The methods of extracting signal envelope—from Hilbert transform to wavelet transform[J]. Journal of Electronics, 1997, 19(1): 120-123. (in Chinese)

A diesel engine fault early warning method based on correlation analysis of the cylinder head vibration signal envelope line

FAN ZhengTian¹ WANG Lei² ZHAO ZhiChao² XIA Min² LIU XiaoBo² MAO ZhiWei^{1*}

(1. Beijing Key Laboratory of Health Monitoring Control and Fault Self-Recovery for High-end Machinery, College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;
2. Sinopec Chongqing Natural Gas Pipeline Co. Ltd., Chongqing 408000, China)

Abstract: The fault characteristics of diesel engines are easily affected by factors such as environment and load, resulting in many traditional fault feature parameters being no longer sensitive. In this work, a diesel engine fault warning method based on correlation analysis is proposed which focuses on the cylinder head vibration signal envelope line. Two different methods of extracting the vibration signal envelope lines of the cylinder head in a 6-cylinder diesel engine—Hilbert transform and n -order extremum interpolation—are compared. Based on the analysis of the envelope lines, the correlation coefficients, distance standard deviation and cosine similarity are obtained. The results show that the fault state of the diesel engine can be better illustrated by correlation analysis in the case when the traditional characteristic parameters are not sensitive. The correlation analysis thus lays a foundation for an early warning system for diesel engine faults.

Key words: diesel engine; envelope line; correlation analysis; fault early warning