

文章编号 1004-924X(2015)增-0313-07

## 基于异响信号的发动机故障成分提取

宁大勇, 弓永军\*, 孙长乐, 侯交叉, 张增猛

(大连海事大学 交通运输装备与海洋工程学院, 大连 辽宁 116026)

**摘要:**提出了基于异响信号的故障成分提取方法,以实现发动机异响故障的在线诊断。该方法分别利用错位叠加法、互相关函数、叠加段起始位置搜寻方法来提取异响信号成份。首先,根据异响信号局部极值出现的位置确定异响信号产生的起始位置,并确定各截取信号段的长度;将各截取的信号段进行线性相加,实现故障成分的提取。然后,对信号的误差进行分析,提出误差的影响因素。最后,利用互相关性分析判断截取信号的准确性。实验结果表明:通过错位叠加算法提取的多段异响信号故障成分相关性达到 75% 以上,可以用于故障诊断。根据错位叠加算法提取异响信号故障成分无需进行时频转换,方法简单易行,提取的故障成分的波形准确性高。

**关键词:**发动机;异响信号;故障提取;错位叠加;互相关

**中图分类号:**TM31 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0313

## Fault component extraction of engine based on abnormal sound

NING Da-yong, GONG Yong-jun\*, SUN Chang-le, HOU Jiao-yi, ZHANG Zeng-meng

(College of Transportation Equipment & Ocean Engineering,  
Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

\* Corresponding author, E-mail: sk/ofp@vip.sohu.com

**Abstract:** An approach of fault component extraction for abnormal sound was proposed to realize the online automatic diagnosis of engines. In the method, an overlap superimposed method was proposed for noise elimination, and the correlation analysis and the beginning position of dislocation superimposed interception signal searching method were used to establish the signal analysis system. Firstly, the local extreme value of abnormal sound was used to determine the beginning position of abnormal sound appearance and to calculate the length of interception signal according to the separation distance of the adjacent starting points. Then, these intercepted signals were linearly superposed together to acquire the fault component. Furthermore, the error of extracted signal was analyzed and the effect factors on the errors were obtained. Finally, the cross-correlation analysis method was adopted to identify the results. Experimental results indicate that the relevance among several extracted signals reaches to 75% by the dislocation method, which can be used for fault diagnosis. The method is no complicated time frequency conversion process in extracting fault components and has advantages in

**收稿日期:**2015-05-15; **修订日期:**2015-07-10.

**基金项目:**辽宁省自然科学基金资助项目(No. 2014025007);中央高校青年骨干教师基金资助项目(No. 3132015091, No. 3132014303);国家自然科学基金资助项目(No. 51275063);大连市科研基金资助项目(No. 2014A11GX023)

simple operation and high accuracy.

**Key words:** engine; abnormal sound; fault component extraction; overlap superimposing; cross correlation

## 1 引言

常见的发动机故障可以分成冲击和摩擦两种。发动机机拉缸和冲缸是常见的、危害性很大恶性故障。当发动机产生拉缸现象时<sup>[1-4]</sup>,气缸内壁与活塞、活塞环之间难以形成油膜,造成润滑不良,工作表面上将产生过度磨损、划痕、擦伤、裂纹或咬死等现象,拉缸产生的磨损量较大,为正常磨损量的几十甚至几百倍。而冲缸故障是由于缺少润滑油或活塞与汽缸筒内壁之间的机械润滑间隙过大造成的,当发生冲缸故障时活塞对缸体产生机械性冲击。若及时发现情况,排除故障,可以避免大零件遭受大的损坏。若故障逐步严重,拉缸会造成活塞与汽缸壁黏连,轻者损坏活塞和汽缸,重者咬死活塞,造成柴油机熄火,拉断活塞或连杆,冲缸则会造成缸体冲击损坏,造成重大事故。因此,对发动机进行实时在线监测,及时发现发动机的拉缸故障,对提高发动机的可靠性和延长使用寿命具有重要意义。

传统的拉缸、冲缸故障诊断方法主要有经验法、油液分析、尾气检测法、温度或压力检测等<sup>[5-6]</sup>,但都无法实现实时、准确、在线诊断。经验法取决于驾驶员或操作人员的素质和经验,一般驾驶员往往很难掌握;油液分析法需要离线检测判断;温度和压力检测一般在故障严重时有效。发动机发生拉缸故障时,尾气异常;并伴随着发动机尖锐的噪声,因此,可以对发动机声音信号进行实时在线分析,判断发动机是否发生拉缸故障<sup>[7-9]</sup>。目前关于发动机拉缸故障机理及离线拉缸故障诊断的研究较多,但是,缺少实用的在线发动机拉缸、冲缸故障诊断方法。本文通过分析比亚迪 F0 发动机正常声音信号和拉缸、冲缸异常响声信号,采用自相关函数法和错位叠加方法提取异响信号成分<sup>[10]</sup>,分析异响信号故障成分的波形变化规律,提取其特征<sup>[11]</sup>,为发动机故障实时在线诊断提供理论指导。

## 2 异响信号故障成分提取方法

### 2.1 随机减量技术概述

1971 年 Cole 等人提出了随机减量技术 (RDT),用于测定飞行器结构的频率和阻尼,随后这种技术得到了广泛的应用。随机减量技术的基本思想是建立在线性系统的叠加原理基础上的,利用测量的响应信号构造出表征结构自由振动的响应信号,即表征结构特性的一个自由衰减信号。在振动模态分析、结构损伤检测等领域中得到广泛的应用。RDT 方法的数学模型为:

$$x_{\text{rdt}}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i + \tau), \quad (1)$$

其中:  $L[x(t)] = f(t)$ ,  $x(t)$  为系统在随机激励下的响应信号,  $L$  为线性算子,  $f(t)$  为随机激励;  $\tau$  为自变量;  $x(t_i)$  为事先设定的阈值值,用于截取信号;  $t_i$  为信号截取位置。

当随机外激励  $f(t)$  为零均值的 Gauss 分布时,外激励在采样点序列上的统计平均值在一定条件下可近似为零。因此,可以实现自由衰减响应的提取。

### 2.2 错位叠加算法

#### 2.2.1 周期信号提取方法研究

错位叠加法是在复杂叠加信号中提取其中周期性信号的简易方法,算法仅用到了加法运算,因此计算效率高,提取的信号模型准确。其计算过程如图 1 所示。

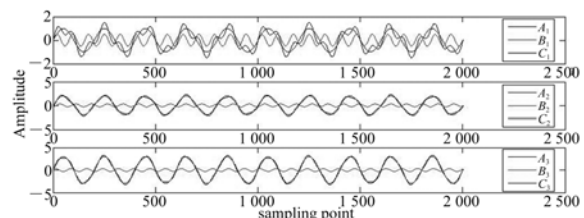


图 1 错位叠加计算模型

Fig. 1 Model of overlapping

图 1(1)中  $A_1$  和  $B_1$  为 2 个周期幅值不同的正弦信号,  $C_1$  为 2 个信号的线性叠加信号,其中

$A_1$  的周期为  $T$ 。假设  $A_1$  信号为关注的信号,为了从  $C_1$  中提取  $A_1$ ,可以采用牺牲  $B_2$  的方法,即将信号  $C_1$  整体向左移动  $A_1$  的周期距离( $T$ ),然后再与  $C_1$  进行叠加,这样可以得到  $C_2$ 。同理对上述过程进行多次操作,便可以提取得到信号  $A_1$ 。通过图 1 分析可知, $C_2$  的波形与  $A_1$  很接近,但是幅值放大了接近 1 倍,而红色成分  $B_2$  与  $B_1$  相比明显减弱,这就是错位相加法。计算公式为:

$$\tilde{C}_1[n] = \frac{1}{K+1} \sum_{k=0}^K C_1[n+kT], \quad (2)$$

其中: $K$  为叠加次数 ( $K=0,1,2,\dots,n$ );  $C_1(\cdot)$  为原始信号; $T$  为错位叠加步长。

此方法不但适用于两组正弦叠加信号,也适用于任何复杂信号与周期信号的叠加信号。

### 2.2.1 非周期性异响信号提取方法

采用错位叠加法对非周期性异响信号进行故障成分提取需要对式(2)进行改进:

$$s(j) = h(j) + g(j), \quad (3)$$

其中: $s(j)$  为异响故障声音信号; $h(j)$  为异响信号中的故障成分; $g(j)$  为异响信号中的噪声成分。

异响出现的起始位置为:

$$\omega_i = s_i(j) (j = k_i, k_{i+1}, \dots, k_{i+l}), \quad (4)$$

其中: $k_i$  为异响起始位置; $s_i(\cdot)$  为采集到的混叠信号; $\omega_i$  截取的信号。

截取的信号段的长度为:

$$\tilde{l} < \{l = \min_{1 \leq i \leq N-1} (k_{i+1} - k_i)\}. \quad (5)$$

将各截取的信号段进行线性相加得:

$$\tilde{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i(j), \quad (6)$$

将式(3)带入式(6)可得:

$$\begin{aligned} \tilde{s} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(j) + g_i(j) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(j) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i(j), \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(j)$  为多次故障成分平均值;

$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i(j)$  为背景噪声线性平均。

由于背景噪声属于高斯白噪声信号,因此当  $N$  足够大时,根据 RDT 理论,背景噪声的线性平均值趋于 0。然而,在实际应用中  $N$  不可能无限大,根据经验计算可得,当  $N$  大于 4 时,背景噪声能量平均值会降低到原噪声的  $1/4 \sim 1/6$ ,因此在

工程应用中  $N > 4$  即可。

## 2.3 异响起始位置搜寻方法

根据声学原理和人耳听觉掩蔽理论,当异响信号的能量达到背景噪声能量  $1/2$  以上时才能够被人耳听清楚。发动机拉缸故障信号在起始位置由于冲击的作用,其幅值较大,不容易被掩蔽,因此搜寻异响信号起始位置可以采用局部极值点作为参考位置,然后向前扩展 50 个采样点(采样信号频率为  $44\ 100$  Hz)作为起始位置。对于波形波动剧烈的信号,可以利用差分理论,计算信号的差分模型,根据差分模型的局部极值点确定信号的起始位置。

判断选择的起始位置的正确性可以采用相关性分析法,该方法是对 2 个或多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量 2 个变量因素的相关密切程度。信号的自相关性分析用来衡量一段信号某一时段与另一时段的相关密切程度。发动机拉缸故障成分属于刮擦类型的故障,其声音波形呈现出近似周期的性质,因此可以通过自相关函数求出活塞和气缸刮擦时刻声音信号的周期:

$$\begin{aligned} R_x[n] &= E\{X[k]X[k+n]\} = \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N x[k]x[k+n], \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $R_x[n]$  为信号的自相关函数; $E(\cdot)$  表示取均值; $N$  为信号序列的偏移时长。

利用自相关函数的定义,设时刻  $k$  和时刻  $k+n$  的 2 个值相乘积的均值作为新的评估函数,它是信号与延迟后信号之间相似性的度量。延迟时间为零时( $n=0$ ),则成为信号的均方值,此时它的值最大。具有周期性信号的自相关函数模型中,两个极大值之间的距离极为信号的周期,为了计算拉缸尖锐声音的周期,同时减少计算量,可以采用简化的自相关函数进行计算:

$$\tilde{R}_x[n] = \sum_{k=-N}^N x[k]x[k+n]. \quad (9)$$

在简化的自相关模型中,仅需要根据局部极值点的位置即可获得刮擦故障信号的周期。根据信号的周期判断信号是否属包含故障成分。

## 3 数据采集

### 3.1 实验设备和实验条件

拉缸故障声音异响信号采自一辆比亚迪 F0

轿车,其中 1 个气缸发生拉缸故障,发动机参数见表 1。声音信号传感器安装在 F0 轿车前保险杠上方的边沿上,如图 1 所示,传感器采样率为 44 100 Hz,信噪比 77 dB,频率 20~20 000 Hz,灵敏度为 28 mV/Pa。

表 1 发动机主要参数  
Tab.1 Engine specifications

参数名称	参数值
发动机型号	BYD371QA
排量	1 000 ml
汽缸数	3
每缸气门数	4
最大功率	50 kW
压缩比	10.5 : 1
最大扭矩	90 Nm



图 2 发动机及信号采集

Fig.2 Engine and signal acquired

### 3.2 数据采集

发动机声音信号采集分 3 步进行:(1)采集发动机怠速时的声音信号(800 r/min);(2)增大油门,采集发动机转速增速过程中的声音信号(从 800 r/min 增加到 3 000 r/min);(3)停踩油门,采集发动机转速降低过程中的声音信号(从 3 000 r/min 降低至 800 r/min)。当发动机处于怠速时,从发动机声音里无法听出异常响声,当发动机转速处于增速过程时,会听见明显刺耳尖锐的声音,在发动机转速降低过程中,尖锐的声音逐渐消失。各段过程的声音信号如图 3 所示。从声音信号中无法辨别出发动机是否发生故障。

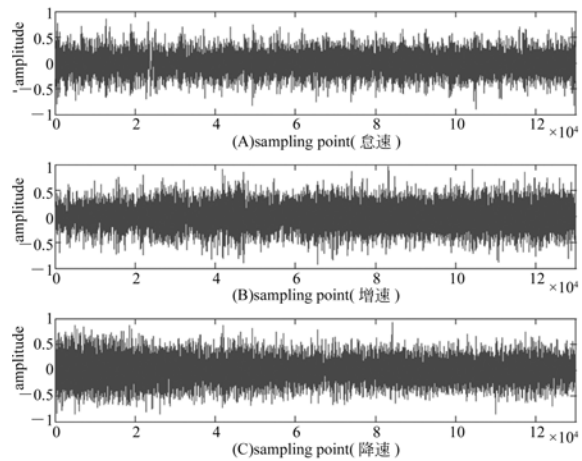


图 3 拉缸故障发动机在怠速、增速及降速运行过程中的声音信号

Fig.3 Faulty acoustical signal of scuffing engine in the process of idling, speed increasing and speed decreasing

## 4 数据处理

### 4.1 拉缸异响信号故障成分周期

发动机转速在 2 000 r/min 时,发生拉缸故障的气缸一次行程所需的时间约为 60 ms,采样点数为 2 600 点,因此当采样率为 44 100 Hz 时,计算拉缸尖锐声音自相关性所截取的信号不应大于 2 600 个采样点。因为金属刮擦声的频率较高,所以,取  $k=200$  即可满足要求。

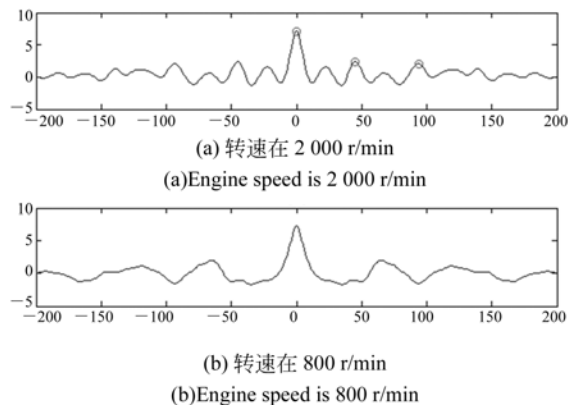


图 4 拉缸发动机自相关函数模型

Fig.4 Autocorrelation model of scuffing engine

图 4(b)为拉缸发动机转速在 800r/min 时,所截取的声音信号简化的自相关模型。

根据自相关模型的极值点分布(图 4(a))可以初步判断当发动机发生拉缸故障,转速在 2 000 r/min 时,尖锐声音信号呈现出明显的周期性,一个周期所包括的采样点大约在 45 个(图 4(a)2 个红色圆圈之间的采样点数量),因此计算信号的周期为 1.02 ms。当发动机转速在 800 r/min 时,信号的周期性不明显。

#### 4.2 故障成分错位叠加模型

分别截取发动机转速稳定在 800 r/min 和 2 000 r/min 时两段信号进行错位叠加,叠加步长  $T$  为 45 个采样点,叠加次数为  $K$  取 4 次。

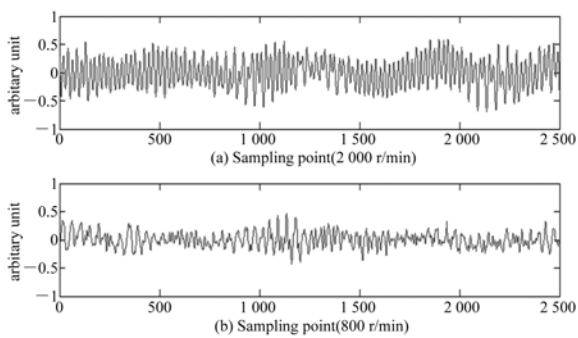


图 5 经过 3 次错位叠加的两段声音信号  
Fig. 5 Two section signals overlapped three times

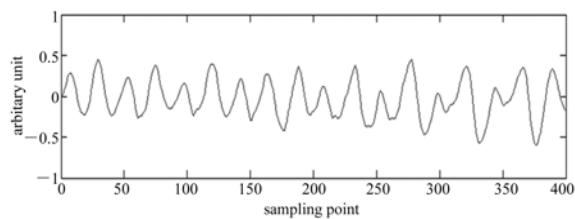


图 6 图 5(a)中采样点 100~500 局部放大图  
Fig. 6 Partial enlarged view of Fig. 5(a)

从图 5 可以明显看出有拉缸故障的发动机转速在 800 r/min 和 2 000 r/min 的区别,当转速在 2 000 r/min 时,从发动机的声音中可以明显听出尖锐的声音,经过 4 次错位叠加后声音信号中的噪声成分被明显减弱,刮擦成分得到有效的分离。截取 5 段叠加后的信号,取其中一段与另外 4 段分别进行相关性分析,可以发现相关性分别是 81.01%、80.59%、78.90%、83.29%。通过耳听可以发现,尖锐的声音更加明晰,说明提取的方法正确。通过局部放大图可以看出,刮擦声音的波形变化规律。

### 5 冲缸异响故障成分提取实验

为了验证算法的有效性,给出一组关于发动机冲缸异响故障成分的实验数据。

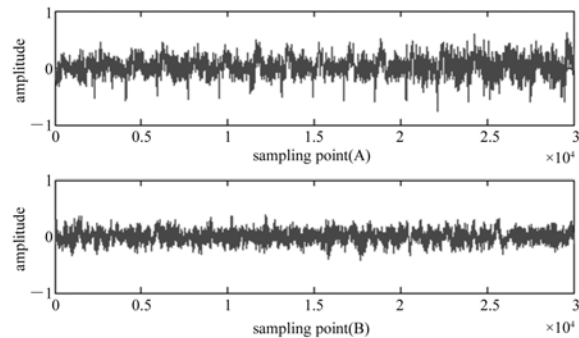


图 7 发动机转速在 1 500 转冲缸故障信号与正常信号  
Fig. 7 Fault and normal signal of cylinder gasket destroyed under 1 500 r/min

图 7 为采集到的发动机冲缸故障信号与正常信号,图 8 为经过 4 次错位叠加后提取的 2 组故障成分,两组叠加信号的相关度为 76.9%,由于发动机背景噪声信号属于近似高斯白噪声信号,所以可以将这两组信号认定为故障成分。

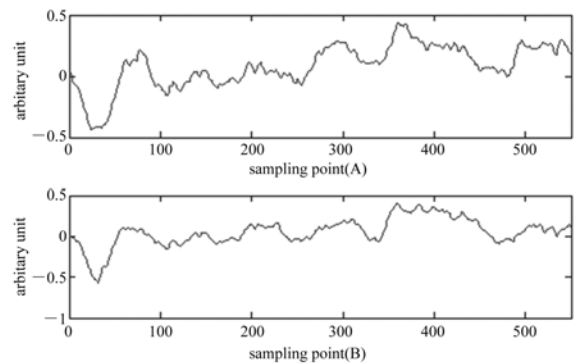


图 8 两组经过 4 次叠加的冲缸故障信号  
Fig. 8 Two signals of cylinder gasket destroyed under 4 overlapped times

利用小波变换或傅里叶变换等时频转换方法提取叠加信号的特征,并与样本信号的特征进行比对判断尖锐的异响信号是否源自拉缸故障。实现发动机拉缸故障的实时在线诊断<sup>[12]</sup>。

## 6 结 论

针对比亚迪 BYD371QA 发动机的拉缸和冲缸故障,基于自相关函数法和错位叠加法对发动机的声音信号进行了分析,分别提取得到了发动机转速在 2 000 r/min 时拉缸异响信号中的故障成分,以及发动机在 1 500 r/min 时冲缸异响信号中的故障成分,为基于声音信号的发动机拉缸故障自动诊断提供了一种便捷的方式。通过该方法

提取的多段信号的相关程度均在 75% 以上,由此可以将所提取的信号作为异响信号中的故障成分。在进行相关实验研究过程中需要注意:

(1) 刮擦声音信号属于物体的固有特性,不同类型发动机的拉缸、冲缸故障的声音信号不同。

(2) 提取发动机异响信号中的故障成分时,首先需要人耳能够辨识。

(3) 进行自相关性分析时,截取的信号长度不易过长(不要超过气缸活塞行程所需的时间),否则会得到错误的结论。

### 参考文献:

- [1] 蔡振雄,李寒林,林金表,等. 船舶柴油机拉缸故障振动诊断技术[J]. 上海海事大学学报,2007,28(1):84-88.  
CAI ZH X, LI H L, LIN J B, *et al.*. Marine diesel cylinder score fault diagnosis using vibration technology [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2007, 28(1): 84-88. (in Chinese)
- [2] 贾继德,葛同民,杨万成,等. 基于非平稳周期循环特征增强的柴油机失火故障诊断研究[J]. 内燃机工程,2013,34(1):67-70.  
JIA J D, GE T M, YANG W CH, *et al.*. Research on diagnosis of diesel engine misfire fault based on non-stationary cycle feature enhancement [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2013, 34(1): 67-70. (in Chinese)
- [3] 马文亮,吴汉涛,李慧军,等. 冬季发动机拉缸问题研究[J]. 内燃机,2012,4(8):54-56.  
MA W L, WU H T, LI H J, *et al.*. Research of scratching fault from engine in winter [J]. *Internal Combustion Engines*, 2012, 4(8): 54-59. (in Chinese)
- [4] 苏欣,王奇峰. 某四缸柴油机冲缸垫故障分析[J]. 内燃机,2014(2):5-7.  
SU X, WANG Q F. Trouble-shooting for Wrecked cylinder head Gasket in Certain Four-cylinder Diesel Engine [J]. *Internal Combustion Engines*, 2014, 2(1):5-7. (in Chinese)
- [5] 高红霞,吴丽璇,徐寒,等. 微焦点 X 射线图像乘性加性混合噪声的去除[J]. 光学精密工程,2014,22(11):3100-3113.  
GAO H X, WU L X, XU H, *et al.*. Denoising method of micro-focus X-ray images corrupted with mixed multiplicative and additive noise [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 3100-3113. (in Chinese)
- [6] 邢志娜,瞿军,王菊香. 重载车辆发动机油液的多技术监测方法[J]. 兵工自动化,2012,31(5):83-86.  
XING ZH N, QU J, WANG J X. Oil multi-technique monitoring methods of heavy-duty vehicle engine [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2012, 31(5): 83-86. (in Chinese)
- [7] 张梅军,陈江海,侯宝科. 发动机故障分形诊断中噪声信号的分析 and 处理[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2006,7(4):380-384.  
ZHANG M J, CHEN J H, HOU B K. Analysis and processing of noise in engine fault diagnosis by fractal method [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2006, 7(4): 380-384. (in Chinese)
- [8] 杨诚,黄金旺,杨振冬,等. 摩托车发动机异响在线检测系统开发[J]. 汽车工程学报,2013,3(5):374-379.  
YANG CH, HUANG J W, YANG ZH D, *et al.*. Development of online sound abnormality detection system of motorcycle engines [J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2013, 3(5): 374-379. (in Chinese)
- [9] 赵立荣,朱玮,曹永刚,等. 改进的加速鲁棒特征算法在特征匹配中的应用[J]. 光学精密工程,2013,21(12):3263-3271.  
ZHAO L R, ZHU W, CAO Y G, *et al.*. Application of improved SURF algorithm to feature matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3263-3271. (in Chinese)
- [10] 严新平,李志雄,张月雷,等. 船舶柴油机摩擦磨损监测与故障诊断关键技术研究进展[J]. 中国机械

工程,2013,24(10): 1413-1419.

YAN X P, LI ZH X, ZHANG Y L, *et al.*. Study on key techniques of wear monitoring and fault diagnosis for marine diesel engines a review [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(10): 1413-1419. (in Chinese)

- [11] 钱作勤,周祥军. 内燃机拉缸故障诊断型专家系统[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004,28(5):634-636.

Qian Z Q, ZHOU X J. A brief diagnosis expert system for cylinder scoring malfunction of internal

combustion engine [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2004, 28(5): 634-636. (in Chinese)

- [12] 崔园园,王伯雄,柳建楠,等. 数字超声波信号中有色噪声的自适应滤波[J]. 光学精密工程,2014, 22(12):3377-3383.

CUI Y Y, WANG B X, LIU J N, *et al.*. Adaptive filtering for colored noise in digital ultrasonic signals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3377-3383. (in Chinese)

#### 作者简介:



宁大勇(1981—),男,黑龙江青冈人,博士,讲师,2004年于吉林大学获得学士学位,2010年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要从事机械故障诊断及信号处理方面的研究。E-mail: ningdayongning@163.com



弓永军(1974—),男,山西长治人,博士,教授,2005于浙江大学获得博士学位,主要从事水液压元件设计及故障诊断等方面的研究。E-mail: sklofp@vip.sohu.com