

应用 EMD 和倒包络谱分析的故障提取方法*

孙伟, 李新民, 金小强, 黄建萍, 张先辉

(中国直升机设计研究所直升机旋翼动力学重点实验室 景德镇, 333001)

摘要 针对倒频谱分析方法难以提取滚动轴承早期微弱故障的问题,提出了一种利用最小熵反褶积(minimum entropy deconvolution,简称 MED)和倒包络谱分析的故障特征提取方法,并应用于滚动轴承诊断中。首先,采用 MED 方法对故障信号进行降噪处理,同时增强信号中的周期成分;然后,计算降噪后信号的包络,再对包络信号进行倒频谱分析;最后,得到倒包络谱,提取故障特征。试验结果表明,所提出的方法优于传统的倒频谱分析,能够有效提取强背景噪声下的滚动轴承早期故障特征频率信息。

关键词 滚动轴承;故障诊断;倒频谱;最小熵反褶积;包络信号

中图分类号 TN911.7;TH165.3

引言

滚动轴承是机械设备中应用最为广泛的零部件之一,机械故障大多数是由轴承引起,因此对滚动轴承的故障诊断方法研究具有重大意义。若滚动轴承工作在复杂状况下,当出现故障时,易出现振动信号调制现象,通常采用的快速傅里叶变换方法难以有效识别。倒频谱分析是一种有效的轴承振动信号监测诊断方法,其优点是对分离和提取难以识别的调制性成分非常有效^[1]。若滚动轴承故障发生在早期,引起的振动信号调制现象非常微弱,所形成的周期性边频带分量幅值很小^[2],且受到随机噪声的干扰,容易被掩盖,导致故障不易识别^[3],因此单一使用倒频谱方法很难提取强背景噪声下滚动轴承早期故障特征。

为了解决上述问题,将 MED 和倒包络谱分析相结合,提出了一种基于 MED 与倒包络谱分析的故障特征提取方法。MED 方法是由 Wiggins 提出的一种新的信号预处理方法,能够对振动信号进行降噪,同时增强信号中的冲击特征^[4],包络谱分析方法可通过希尔伯特变换对信号进行进一步降噪^[5],因此,先对信号进行 MED 降噪处理,然后计算包络信号,再对包络信号进行倒频谱分析,能够更有效地提取出故障特征信息。

1 MED 方法

MED 方法原理是利用最小熵能增强尖锐脉冲特征的特性来设计最优滤波器,具体原理如下^[6-7]。

滚动轴承振动信号为

$$y(i) = h(i) * x(i) + \alpha(i) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

其中: $y(i)$ 为振动信号; $h(i)$ 为传递函数; $x(i)$ 为冲击特征信号; $\alpha(i)$ 为噪声信号。

设计逆滤波器 $f(i)$,使得经过 $f(i)$ 滤波后的 $y(i)$ 能够恢复 $x(i)$ 的冲击特征,即使熵值最小。

$$x(i) = f(i)y(i) = \sum_{l=1}^L f(l)y(i-l) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

其中: L 为 $f(i)$ 的长度。

解反褶积,利用 $f(i)$ 使 $y(i)$ 恢复原有相关信息,使熵值最小,即

$$Q_2^4(f(i)) = \frac{\sum_{j=1}^N x^4(j)}{[\sum_{j=1}^N x^2(j)]^2} \quad (i = 1, 2, \dots, L) \quad (3)$$

求最小熵反褶积,求 $f(i)$ 的最优值,使 $Q_2^4(f(i))$ 最大,因此,使其一阶导数为零

$$\partial Q_2^4(f(i)) / \partial f(i) = 0 \quad (4)$$

联合式(2)可得

* 航空科学基金资助项目(2017ZD02007)
收稿日期:2017-11-14;修回日期:2018-03-26

$$\frac{\sum_{j=1}^N x^2(j)}{\sum_{j=1}^N x^4(j)} \sum_{i=1}^N x(i)y(i-l) = \sum_{p=1}^L f(p) \sum_{m=1}^N y(i-l)y(i-p) \quad (5)$$

式(5)也可表示为

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{f} \quad (6)$$

其中: \mathbf{A} 为振动信号 $y(i)$ 的 $L \times L$ 自相关矩阵。

\mathbf{b} 表示为

$$\mathbf{b} = (\mathbf{b}(l))^T = a \sum_{i=1}^N x^3(i)y(i-l) \quad (7)$$

其中

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N x^2(i)}{\sum_{i=1}^N x^4(i)} \quad (8)$$

式(5)经迭代可以得到逆滤波器矩阵为

$$\mathbf{f} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b} \quad (9)$$

2 倒包络谱分析

2.1 倒频谱分析

倒频谱能将信号频谱图上成簇的边频带谱线简化为单根的谱线,易于观察。

倒频谱分析主要有两种方法:复倒谱分析和实倒谱分析。倒频谱分析定义^[8-9]如下。

给定的信号为 $x(t)$, 其功率谱函数为 $S_x(f)$, 用 $C_p(\tau)$ 来表示功率谱 $S_x(f)$ 的倒频谱,有

$$C_p(\tau) = F^{-1}\{\lg[S_y(f)]\} \quad (10)$$

倒频谱 $C_a(\tau)$ 为

$$C_a(\tau) = |F^{-1}\{\lg[S_y(f)]\}| \quad (11)$$

其中: $F^{-1}\{\}$ 为傅里叶逆变换; τ 为倒谱时间变量。

2.2 倒包络谱分析

包络信号的核心是对信号进行 Hilbert 变换,相当于对信号进行了一次滤波处理^[10],可以有效提高信噪比。对包络信号进行倒频谱运算,求得倒包络谱,可以减少噪声对倒频谱分析方法的影响。

对信号进行倒包络谱分析的步骤如下。

1) 对信号 $x(t)$ 进行 Hilbert 变换,即

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (12)$$

2) 构造解析信号 $z(t)$, 即

$$z(t) = x(t) + jH[x(t)] \quad (13)$$

3) 解析信号 $z(t)$ 求模,即得信号的包络 $B(t)$

$$B(t) = \sqrt{x(t) + H^2[x(t)]} \quad (14)$$

4) 对包络信号 $B(t)$ 作倒频谱分析即可得到倒包络谱。

3 基于 MED 和倒包络谱分析的故障提取

滚动轴承工作在复杂状况下,易产生振动信号调制现象,而且调制现象易受到噪声的干扰,严重影响故障特征提取,基于 MED 和倒包络谱分析的故障特征提取方法,具体步骤如下。

1) 对故障信号进行 MED 预处理,在降噪的同时,增强信号中的冲击成分;

2) 利用 Hilbert 包络对降噪后的信号进行解调,得到包络信号,进行进一步降噪;

3) 对包络信号做倒频谱分析,得到 MED 降噪后的倒包络谱;

4) 将轴承故障特征频率理论值的倒数与倒包络谱中峰值谱线进行对比,最终判断故障类型。

采用洛阳轴承厂滚动轴承试验台进行试验,如图 1 所示。试验台主要由轴承疲劳加载试验机和加速度传感器等组成,滚动轴承结构参数如表 1 所示。试验过程中,为了模拟局部故障,采用电火花单点对轴承进行不同程度的刻蚀,形成内圈故障、外圈故障和滚珠故障,故障深度为 0.4 mm,宽为 1.2 mm。



图 1 轴承故障诊断试验系统

Fig. 1 Fault diagnosis test system of bearing

表 1 轴承结构参数表

Tab. 1 The structural parameters of bearing

参 数	数 值
滚球直径 d / mm	9.525
滚珠中心距 D / mm	374.326
滚珠数 N	95
滚珠接触角 α / ($^\circ$)	30
轴转速 n / ($r \cdot \min^{-1}$)	219

转速及各故障频率计算公式如下^[11]。

转速频率

$$f_r = n/60 \quad (15)$$

内圈故障频率

$$f_b = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right) f_r \quad (16)$$

外圈故障频率

$$f_o = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right) f_r \quad (17)$$

滚珠故障频率

$$f_i = \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos^2(\alpha)\right) f_r \quad (18)$$

采样频率为 5 kHz,根据式(15~18),计算转轴基频 $f_r = 3.65$ Hz,内圈故障频率为 $f_b \approx 177.20$ Hz(对应倒频谱上时间点为 5.6 ms),外圈故障频率为 $f_o \approx 169.55$ Hz(对应倒频谱上时间点为 5.9 ms),滚珠故障频率 $f_i \approx 71.69$ Hz(对应倒频谱上时间点为 14 ms)。

3.1 内圈故障

内圈故障信号频谱见图 2,从图 2 上可以看出在内圈故障频率 177.20 Hz 处幅值已完全被噪声掩盖,无法提取故障特征频率。

采用本方法对内圈故障信号进行分析,首先采用 MED 方法对内圈故障数据进行预处理,如图 3 所示。与图 2 相比,图 3 中故障频率 177.20 Hz 处的幅值有所增强,但并不突出,而且仍然含有大量噪声。

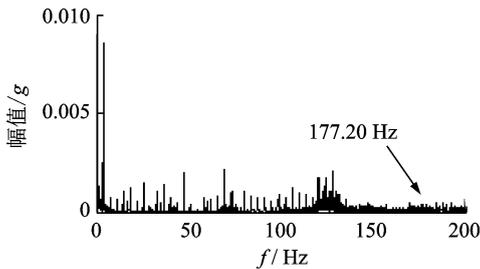


图 2 内圈故障信号频谱

Fig. 2 The spectrum of inner race fault signals

再对 MED 降噪后的数据进行包络计算得到包络信号,为了观察效果,对包络信号进行频谱分析得到包络谱,如图 4 所示。与图 3 相比,图 4 中 177.20 Hz 处出现了清晰可见的边频带,而且噪声得到了很好的消除。

为了进一步消除边频带的影响,对包络信号进行倒频谱分析,可以将包络谱图上的边频带简化为倒频谱上单根谱线,如图 5 所示。从图 5 上很容易

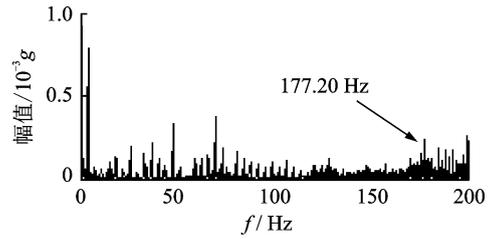


图 3 内圈故障信号 MED 降噪后的频谱

Fig. 3 The spectrum of MED de-nosed inner race fault signals

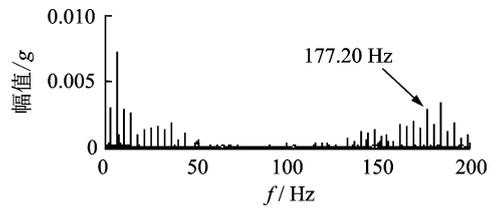


图 4 内圈故障信号 MED 降噪后包络谱

Fig. 4 The envelope spectrum of MED de-nosed inner race fault signals

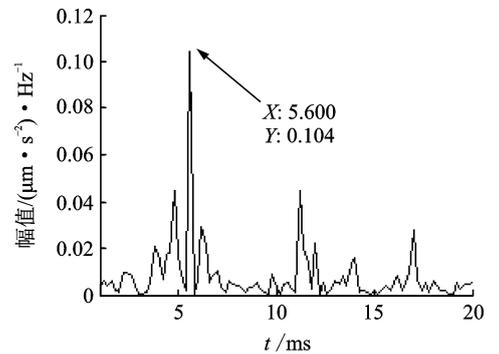


图 5 内圈故障信号 MED 降噪后倒包络谱

Fig. 5 The envelope cepstrum of MED de-nosed inner race fault signals

发现,在 5.6 ms 处有非常明显的凸峰,对应内圈故障频率 177.20 Hz 的倒数,由此可以判断内圈出现了故障。

3.2 外圈故障

将外圈故障信号作频谱分析见图 6 所示,外圈故障频率 169.55 Hz 处的幅值完全被噪声掩盖,不能提取故障特征频率。采用本方法对外圈故障数据进行分析,首先采用 MED 方法对外故障信号进行预处理,结果为图 7 所示。与图 6 相比,图 7 中 169.55 Hz 处的幅值有所增强,但并不突出,而且仍然含有大量噪声。

对图 7 中的数据进行包络计算,同样,对包络信

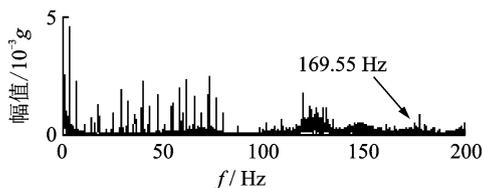


图 6 外圈故障信号频谱

Fig. 6 The spectrum of outer race fault signals

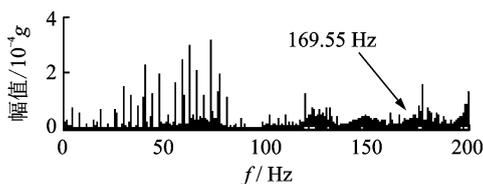


图 7 外圈故障信号 MED 降噪后频谱

Fig. 7 The spectrum of MED de-noised outer race fault signals

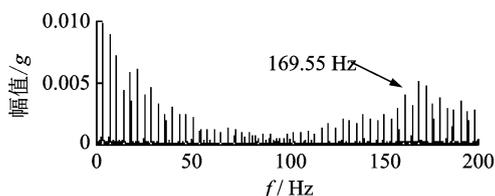


图 8 外圈故障信号 MED 降噪后包络谱

Fig. 8 The envelope spectrum of MED de-noised outer race fault signals

号进行频谱分析得到包络谱如图 8 所示,与图 7 相比,图 8 上出现了清晰可见的边频带。

为了消除边频带的影响,对包络信号进行倒频谱分析如图 9 所示,从图 9 上很容易发现在 6 ms 处有较凸出的幅值,与外圈故障频率的 169.55 Hz 倒数相接近(采样率引起的误差),同样此时可以判断外圈出现了故障。

3.3 滚珠故障

将滚珠故障信号做频谱分析如图 10 所示,在滚珠故障频率 71.69 Hz 处无明显幅值,无法提取故障特征频率。

采用本方法对滚珠故障数据进行分析,首先采用 MED 方法对滚珠故障信号进行预处理,结果如图 11 所示。

与图 10 相比,图 11 在滚珠故障频率和其 2 倍频附近的幅值得到了很大增强,但无法直接提取,仍然含有大量噪声;再对图 11 中的数据进行 Hilbert 包络计算,同样,对包络信号进行频谱分析得到包络谱如图 12 所示。

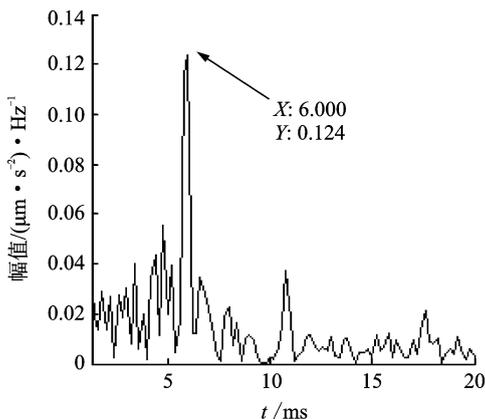


图 9 外圈故障信号 MED 降噪后的倒包络谱

Fig. 9 The envelope cepstrum of MED de-noised outer race fault signals

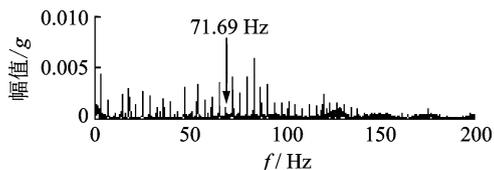


图 10 滚珠故障故障信号频谱

Fig. 10 The Spectrum of ball fault signals

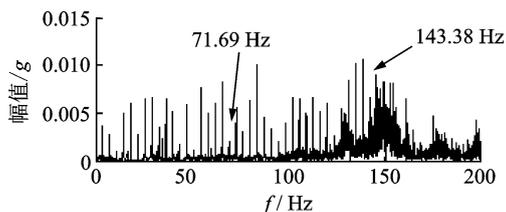


图 11 滚珠故障信号 MED 降噪后频谱

Fig. 11 The spectrum of MED de-noised ball fault signals

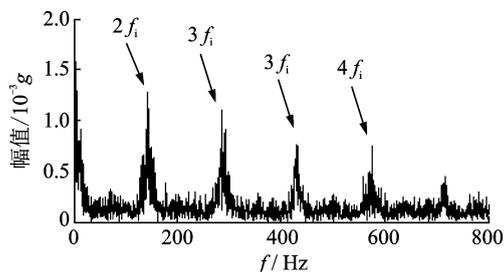


图 12 滚珠故障信号 MED 降噪后包络谱

Fig. 12 The envelope spectrum of MED de-noised ball fault signals

与图 11 相比,图 12 上在滚珠故障频率倍频附近出现了清晰可见的边频带,但是此时还无法定量分析。再对包络信号进行倒频谱分析如图 13 所示,从图 13 上可以看出,在 7 和 14 ms 处有明显

的幅值,对应滚珠故障频率 71.69 Hz 和其两倍频 143.38 Hz 的倒数,由此可以判断滚珠出现了故障。

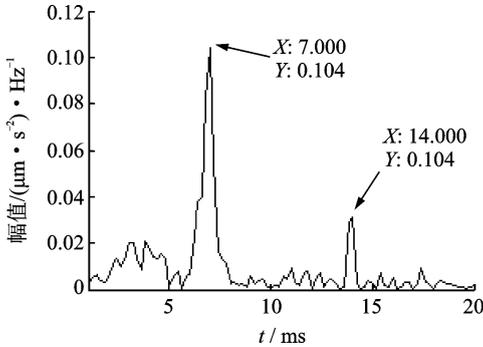


图 13 滚珠故障信号倒包络谱

Fig. 13 The envelope cepstrum of ball fault signals

4 本方法与传统方法比较

采用传统的倒频谱方法分别对外圈、内圈和滚珠故障数据进行分析,结果如图 14~16 所示。虽然从传统的倒频谱上可以发现故障频率对应的位置,但是受到噪声的影响,幅值并不突出,而且周围的干扰谱线较多,诊断效果不理想。传统的倒频谱方法在提取滚动轴承早期故障特征时存在着明显不足。因此,本方法可以有效地去除噪声对倒频谱的影响,谱线更清晰,故障特征信息更突出,这为滚动轴承的故障诊断提供了一种新的方法。

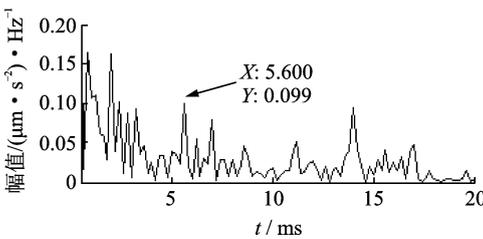


图 14 内圈故障信号倒频谱

Fig. 14 The cepstrum of inner race fault signals

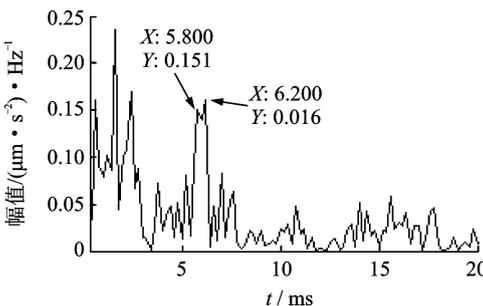


图 15 外圈故障信号倒频谱

Fig. 15 The cepstrum of outer race fault signals

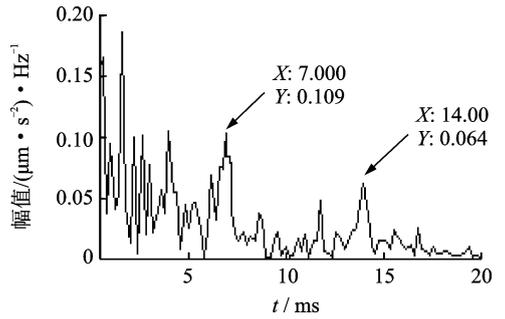


图 16 滚珠故障信号倒频谱

Fig. 16 The cepstrum of ball fault signals

5 结束语

利用 MED 方法对信号进行降噪处理,同时增强信号中的冲击成分,再计算降噪后信号的包络,并对包络信号进行倒频谱分析,能够有效地提取滚动轴承外圈、内圈和滚珠故障特征频率。同时将本方法与传统的倒频谱分析方法进行对比,表明本方法能更有效地提取强噪声背景下的机械故障特征信息。

参 考 文 献

[1] 罗毅,甄立敬. 基于小波包与倒频谱分析的风电机组齿轮箱齿轮裂纹诊断方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 210-214.

Luo Yi, Zhen Lijing. Diagnosis method of turbine gearbox gearcrack based on wavelet packet and cepstrum analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(3): 210-214. (in Chinese)

[2] 张西宁,李兵,雷威. 一种改进的局部倒频谱分析方法[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(8): 1-5.

Zhang Xining, Li Bing, Lei Wei. An improved local cepstrum analysis method [J], Journal of Xi'an Jiao Tong University. 2016, 50(8): 1-5. (in Chinese)

[3] 李辉,郑海起,唐力伟. 基于倒双谱分析的轴承故障诊断研究[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 352-356.

Li Hui, Zheng Haiqi, Tang Liwei. Application of bi-cepstrum technique to bearing fault detection [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4): 352-356. (in Chinese)

[4] 张龙,胡俊峰,熊国良. 基于 MED 和 SK 的滚动轴承循

- 环冲击特征增强[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(1): 97-101.
- Zhang Long, Hu Junfeng, Xiong Guoliang. Cyclic shock enhancement by the combination of minimum entropy deconvolution and spectral kurtosis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(1):97-101. (in Chinese)
- [5] 申戡林, 王灵梅, 郭东杰, 等. 基于改进小波包与包络谱的风电机组传动系统的故障诊断方法研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(9): 1772-1777.
- Shen Jianlin, Wang Lingmei, Guo Dongjie, et al. Research on fault diagnosis method based on improved wavelet packet envelop spectrum of wind turbine transmission system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(9): 1772-1777. (in Chinese)
- [6] 陈海周, 王家序, 汤宝平, 等. 基于最小熵卷积和 Teager 能量算子直升机滚动轴承复合故障诊断研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(9): 45-50.
- Cheng Haizhou, Wang Jiayu, Tang Baoping, et al. Research on helicopter rolling bearing hybrid faults diagnosis using minimum entropy deconvolution and teager energy operator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(9): 45-50. (in Chinese)
- [7] 余博, 田福庆, 梁伟阁. 基于 MED 和 EEMD 的滚动轴承故障诊断方法[J]. 海军工程大学学报, 2017, 29(1): 107-112.
- She Bo, Tian Fuqing, Liang Weige. Fault diagnosis of rolling element bearing based on MED and EEMD[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2017, 29(1): 107-112. (in Chinese)
- [8] 陈果, 于明月, 刘永泉, 等. 基于倒频谱分析的航空发动机转静碰摩部位识别[J]. 机械工程学报, 2010, 30(4): 352-356.
- Chen Gu, Yu Mingyue, Liu Yongquan, et al. Identifying rotor-stator rubbing positions using the cepstrum analysis technique[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 30(4): 352-356. (in Chinese)
- [9] 代士超, 郭瑜, 伍星. 基于同步平均与倒频谱编辑的齿轮箱滚动轴承故障特征量提取[J]. 振动与冲击, 2015, 34(21): 205-209.
- Dai Shichao, Guo Yu, Wu Xing. Gearbox rolling bearings fault features extraction based on cepstrum editing and time domain synchronous average[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(21): 205-209. (in Chinese)
- [10] 唐宏宾, 吴运新, 滑广军, 等. 基于 EMD 包络谱分析的液压泵故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(9): 44-48.
- Tang Hongbin, Wu Yunxin, Hua Guangjun, et al. Fault diagnosis of pump using EMD and envelope spectrum analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(9): 44-48. (in Chinese)
- [11] 王宏超, 陈进, 董广明. 基于谱相关密度组合切片能量的滚动轴承故障诊断研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 114-117.
- Wang Hongchao, Chen Jin, Dong Guangming. Fault diagnosis of rolling bearings based on slice energy spectral correlation density[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(3): 114-117. (in Chinese)



第一作者简介: 孙伟, 男, 1987 年 12 月生, 硕士、工程师。主要研究方向为直升机健康监测。曾发表《小波包降噪与 LMD 相结合的滚动轴承故障诊断方法》《振动与冲击》2012 年第 31 卷第 18 期) 等论文。

E-mail: sw18708133@avic.com