

文章编号: 1671-251X(2023)12-0147-05

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18176

# 煤机设备轴承故障诊断方法

杨春才, 李向磊, 吕晓伟

(国能包头能源有限责任公司 万利一矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017099)

**摘要:** 煤机设备滚动轴承早期故障特征微弱, 且易受载荷、工况等因素的影响而被噪声淹没, 导致轴承故障诊断困难。现有研究大多采用单一算法处理轴承故障信号, 故障特征提取精度和故障诊断准确性有待进一步提高。提出了一种融合局部特征尺度分解(LCD)和奇异值分解(SVD)的煤机设备轴承故障诊断方法: 采用 LCD 方法将煤机设备轴承振动信号分解为若干个内禀尺度分量(ISC), 实现信号初步降噪; 计算各 ISC 的香农熵, 选择香农熵最小的 ISC 进行 SVD, 并构建 SVD 信号的奇异值差分谱, 针对最大突变分量进行信号重构, 实现信号增强去噪; 对重构信号进行 Hilbert 包络解调, 得到轴承故障特征频率, 进而判断轴承故障。采用现场实测数据对基于 LCD-SVD 的煤机设备轴承故障诊断方法进行验证, 结果表明, 该方法可准确提取出轴承故障特征频率, 从而实现煤机设备轴承早期故障诊断。

**关键词:** 煤机设备; 轴承故障诊断; 故障特征提取; 局部特征尺度分解; 奇异值分解; 香农熵

中图分类号: TD67

文献标志码: A

## Diagnosis method for bearing faults in coal mining equipment

YANG Chuncai, LI Xianglei, LYU Xiaowei

(Wanli No.1 Mine, CHN Baotou Energy Co., Ltd., Ordos 017099, China)

**Abstract:** The early fault characteristics of rolling bearings in coal mining equipment are weak, and they are easily affected by factors such as load and working conditions. The characteristics can be submerged by noise, making bearing fault diagnosis difficult. Most existing research uses a single algorithm to process bearing fault signals, and the accuracy of fault characteristic extraction and fault diagnosis needs to be further improved. A fault diagnosis method for coal mining equipment bearings is proposed, which combines local characteristic-scale decomposition (LCD) and singular value decomposition (SVD). The LCD method is used to decompose the vibration signal of coal mining equipment bearings into several intrinsic scale components (ISC), achieving preliminary signal denoising. The method calculates the Shannon entropy of each ISC, selects the ISC with the smallest Shannon entropy for SVD. The method constructs the singular value difference spectrum of the SVD signal. The method reconstructs the signal for the maximum abrupt component to achieve signal enhancement and denoising. The method performs Hilbert envelope demodulation on the reconstructed signal to obtain the characteristic frequency of bearing faults, and then determine the bearing faults. The on-site measured data is used to validate the bearing fault diagnosis method of coal mining equipment based on LCD-SVD. The results show that this method can accurately extract the characteristic frequency of bearing faults, thereby achieving early fault diagnosis of coal mining equipment bearings.

**Key words:** coal mining equipment; bearing fault diagnosis; fault characteristic extraction; local characteristic scale decomposition; singular value decomposition; Shannon entropy

收稿日期: 2023-06-11; 修回日期: 2023-12-15; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家能源集团 2020 年第二批科技项目(GJNY-20-238)。

作者简介: 杨春才(1976—), 男, 内蒙古包头人, 助理工程师, 主要从事煤矿智能化技术应用工作, E-mail: 11515410@chnenergy.com.cn。

引用格式: 杨春才, 李向磊, 吕晓伟. 煤机设备轴承故障诊断方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(12): 147-151.

YANG Chuncai, LI Xianglei, LYU Xiaowei. Diagnosis method for bearing faults in coal mining equipment[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(12): 147-151.



扫码移动阅读

## 0 引言

滚动轴承是煤机设备的基础零部件,也是煤机设备最易损的零部件之一。在煤矿应用场景下,煤机设备滚动轴承早期故障特征非常微弱,且易受载荷、工况等因素的影响,常淹没在背景噪声中,给轴承故障诊断造成一定难度<sup>[1-2]</sup>。

众多学者就如何提取煤机设备轴承故障特征,进而实现故障诊断进行了深入研究。文献[3]针对采煤机截割滚筒滚动轴承故障诊断问题,提出了基于人工蚁群-模拟退火优化算法的时变滤波经验模态分解法,并进行了测试验证。文献[4]针对煤机设备故障特征提取受变工况、变载荷等因素制约的问题,构建了差分振子检测器,实现了多故障特征频率的检测。文献[5]将局部特征尺度分解(Local Characteristic-scale Decomposition, LCD)方法应用于通风机轴承故障诊断中,取得了良好效果。文献[6]针对煤机设备工作环境噪声大、轴承早期故障特征微弱导致难以提取的问题,提出一种阶次分析与自适应随机共振相结合的故障信号提取方法。文献[7]针对矿用通风机轴承故障诊断精度不高的问题,利用小波方法进行信号降噪,采用核主元分析进行特征筛选,之后输入深度置信网络进行故障识别。

奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)因具有较强的降噪能力而广泛应用于故障诊断领域<sup>[8-15]</sup>,如文献[16]提出了基于SVD的掘进机振动信号特征提取方法,取得了较好的现场应用效果。但现有研究大多采用单一算法处理煤机设备轴承故障信号,故障特征提取精度和故障诊断准确性有待进一步提高。

本文将LCD和SVD融合,提出了一种煤机设备轴承故障诊断方法。其先采用LCD对煤机设备轴承振动信号进行初步滤波降噪处理,再利用SVD对信号进行增强降噪,采用Hilbert包络解调对轴承故障特征进行提取,进而实现故障诊断。

## 1 轴承振动信号 LCD 原理

煤机设备轴承振动信号 LCD 原理如图 1 所示<sup>[17-18]</sup>。该过程循环操作,可将振动信号分解为若干个内禀尺度分量(Intrinsic Scale Component, ISC)之和。

如何快速、准确地选择合适的 ISC 是 LCD 方法的关键。香农熵在故障诊断领域常被用来描述信号中信息的聚敛程度,香农熵越小,表示信息越聚敛,反之越分散。香农熵在选择分解分量方面表现出

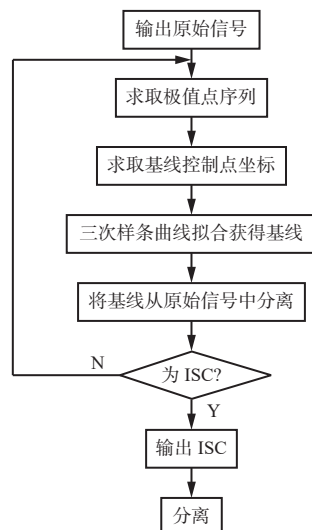


图 1 煤机设备轴承振动信号 LCD 原理

Fig. 1 Local characteristic-scale decomposition(LCD) principle of vibration signal of coal machine bearing

色,在工程领域应用广泛<sup>[19-21]</sup>,因此,采用香农熵作为 ISC 筛选标准,即分别计算分解出的 ISC 香农熵,以香农熵最小的 ISC 作为有效分量进行进一步分析。

## 2 轴承振动信号 SVD 原理

对煤机设备轴承振动信号 ISC 进行等时间间隔采样,得到  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N]$ ,  $x_n$  为第  $n$  个采样点信号,  $N$  为采样点数。构造 Hankel 矩阵  $A$  (也称重构吸引子矩阵),每行有  $n$  个采样点信号,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为  $A$  第 1 行元素,  $x_2, x_3, \dots, x_{n+1}$  为  $A$  第 2 行元素,以此连续取  $m$  行,  $m \geq 2$  且  $m+n-1=N$ , 得

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{n+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_m & x_{m+1} & \cdots & x_{m+n-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

SVD 定义: 对于实矩阵  $A \in \mathbf{R}^{m \times n}$ , 存在一对正交矩阵  $U$  和  $V$ , 使得

$$A = USV^T \quad (2)$$

$$S = \begin{cases} [\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q), \mathbf{0}] & m \leq n \\ [\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q), \mathbf{0}]^T & m > n \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $S \in \mathbf{R}^{m \times n}$ ;  $\sigma_i$  为矩阵  $A$  的奇异值,  $i=1, 2, \dots, q$ ,  $q = \min(m, n)$ ,  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_q \geq 0$ 。

奇异值的大小表征其对应分量蕴含的信息量,奇异值越大,表明其对应分量蕴含的信息越多。因此,可通过去除较小奇异值对应的分量,实现信号降噪处理。

为表征奇异值之间的差异,构建奇异值差分谱。将所有奇异值按从大到小的顺序排列,计算相

邻2个奇异值之间的差值:

$$b_i = \sigma_i - \sigma_{i+1} \quad i = 1, 2, \dots, q-1 \quad (4)$$

$b_i$ 组成的序列  $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_{q-1}]$  称为奇异值差分谱。若相邻2个奇异值变化梯度较大,则在差分谱中产生1个峰值  $b_k$ ,表明奇异值序列在  $k$  处存在最大突变。

### 3 基于 LCD-SVD 的轴承故障诊断方法

基于 LCD-SVD 的煤机设备轴承故障诊断流程如图2所示,具体步骤如下。

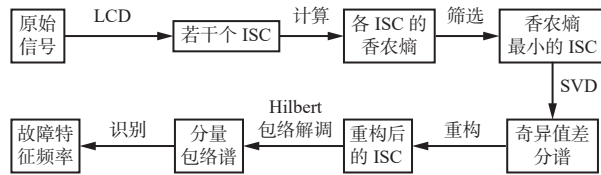


图2 基于 LCD-SVD 的煤机设备轴承故障诊断流程

Fig. 2 Fault diagnosis flow of coal machine bearing based on LCD and singular value decomposition (SVD)

- 1) 利用 LCD 方法对煤机设备轴承振动信号进行分解,得到有限个数的 ISC。
- 2) 计算各 ISC 的香农熵,找到熵值最小的 ISC。
- 3) 使用 SVD 方法对熵值最小的 ISC 进行分解。
- 4) 构建 SVD 信号的奇异值差分谱,得到最大突变分量,进行信号重构。
- 5) 利用 Hilbert 包络解调法对重构信号进行处理,得到信号解调谱。
- 6) 提取故障特征频率,判断轴承故障。

### 4 工程应用

某煤矿提升机在运行过程中,其减速机有异响。采用在线监测系统采集该减速机运行状态数据。在线监测系统由振动加速度传感器、转速传感器、数据采集仪、服务器等组成,如图3所示。传感器和数据采集仪布置在提升机运行现场,采集信号通过工业环网传至值班室服务器进行处理与分析。

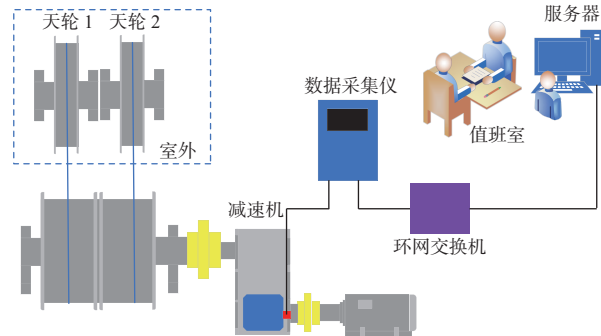


图3 提升机在线监测系统组成

Fig. 3 Composition of on-line hoist monitoring system

减速机输入轴轴承型号为 162250D, 采样频率为 4 000 Hz, 采样点个数为 2 048。系统采集的振动信号如图4所示,信号对应的转速为 1 075 r/min。

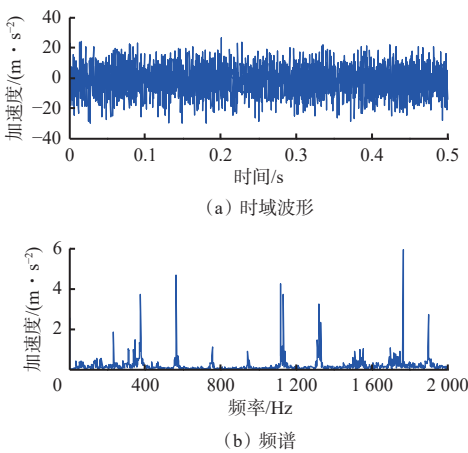


图4 减速机轴承振动信号时域波形及其幅值谱

Fig. 4 Temporal waveform and amplitude spectrum of vibration signal of reducer bearing

为分析该减速机异响原因,采用 LCD 方法对原始振动信号进行分解,去掉残余分量,取前 6 个 ISC (ISC1—ISC6),如图5所示。

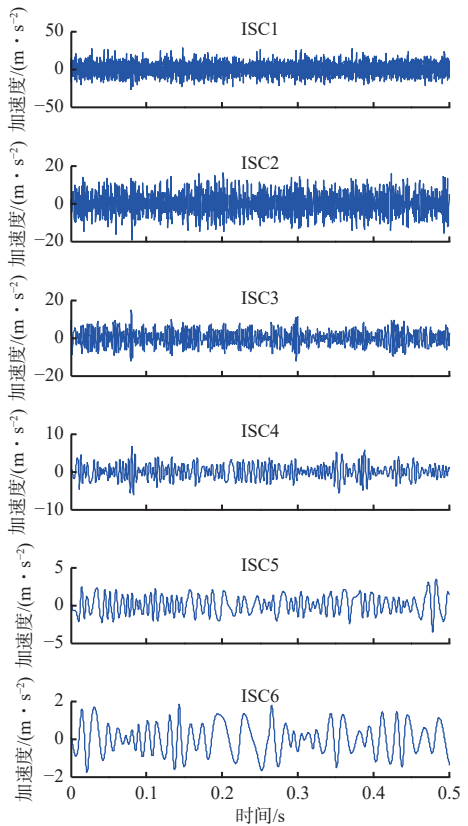


图5 轴承振动信号 LCD 结果

Fig. 5 LCD results of vibration signal of bearing

计算 ISC1—ISC6 的香农熵,见表1。

根据香农熵最小原则,选择 ISC1 进行 SVD,得到相应的奇异值和差分谱,如图6所示。

表 1 ISC1—ISC6 香农熵  
Table 1 The Shannon entropy of ISC1-ISC6

| ISC | ISC1    | ISC2    | ISC3    | ISC5    | ISC6    |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 香农熵 | 4.386 4 | 5.708 3 | 5.480 8 | 5.652 9 | 5.504 0 |

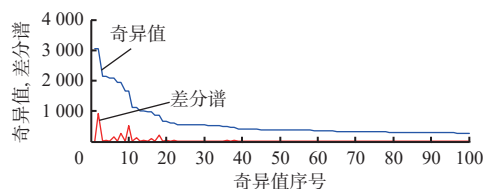


图 6 ISC1 的 SVD 信号奇异值及其差分谱(前 100 个点)

Fig. 6 Singular value and its difference spectrum of SVD signal of ISC1 (former 100 points)

从图 6 可看出,在第 2 个和第 10 个奇异值处有突变,形成局部最大值。因此,将前 10 个分量进行重构,最大限度地保留信号中的有用信息。重构的 ISC1 时域波形如图 7 所示。

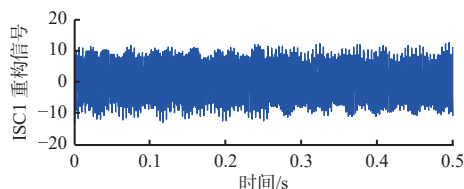


图 7 重构的 ISC1 时域波形

Fig. 7 Temporal waveform of reconstructed ISC1

对重构信号进行 Hilbert 包络解调,包络谱如图 8 所示。从图中可清晰地看出故障特征频率(445.3 Hz)及其倍频,其与该减速机轴承外圈故障特征频率(466 Hz)一致,即可判断该减速机轴承存在外圈故障。

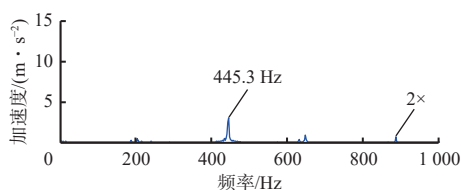


图 8 重构的 ISC1 包络谱

Fig. 8 Envelope spectrum of reconstructed ISC1

为便于对比,对 ISC1 直接进行 Hilbert 包络解调,包络谱如图 9 所示。与图 8 相比,图 9 中的 Hilbert 包络谱没有显著的特征频率信息。

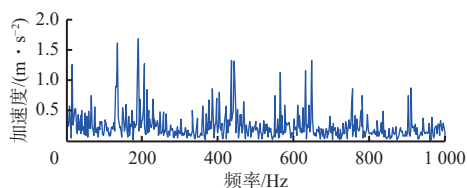


图 9 ISC1 包络谱

Fig. 9 Envelope spectrum of ISC1

矿方在定期检修中,发现该减速机轴承外圈断裂,如图 10 所示,验证了分析结果的准确性。



图 10 故障轴承

Fig. 10 Faulty bearing

## 5 结论

1) 提出的煤机设备轴承故障诊断方法采用 LCD 和 SVD 融合方法对煤机设备轴承振动信号进行降噪,以增大信号信噪比,再用 Hilbert 包络解调提取轴承故障特征,提高了故障诊断准确性。

2) 工程应用表明,该方法能够准确提取出轴承故障特征频率,帮助煤矿企业判断煤机设备轴承故障,进而开展设备检修工作。

## 参考文献(References):

- [1] 马海龙,李臻,朱益军,等.基于差分振子的带式输送机故障诊断方法[J].工矿自动化,2013,39(10):24-27.  
MA Hailong, LI Zhen, ZHU Yijun, et al. Fault diagnosis method of belt conveyor based on differential resonator[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(10): 24-27.
- [2] 马海龙.基于多信息融合的刮板输送机减速机模糊故障诊断专家系统[J].煤矿机械,2019,40(9):174-176.  
MA Hailong. Fault diagnosis fuzzy expert system of scraper conveyer reducer based on multi-information fusion[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(9): 174-176.
- [3] 焦玉冰,李杰,马喜宏,等.一种采煤机截割部滚动轴承故障诊断方法[J].计算机测量与控制,2023,31(5):73-79.  
JIAO Yubing, LI Jie, MA Xihong, et al. A fault diagnosis method for rolling bearing of shearer cutting section[J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(5): 73-79.
- [4] 郭军.基于差分振子的煤机设备故障诊断方法研究[J].煤矿机械,2023,44(4):188-192.  
GUO Jun. Research on fault diagnosis method of coal machinery equipment based on differential resonator[J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(4): 188-192.
- [5] 班冬冬.基于数据驱动的矿井通风机轴承故障诊断研究[D].西安:西安科技大学,2020.  
BAN Dongdong. Research on fault diagnosis of mine ventilator bearing based on data drive[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [6] 宫涛,杨建华,单振,等.强噪声背景与变转速工况条



- 件下滚动轴承故障诊断研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(7): 63-71.
- GONG Tao, YANG Jianhua, SHAN Zhen, et al. Research on rolling bearing fault diagnosis under strong noise background and variable speed working condition[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(7): 63-71.
- [7] 郭秀才, 吴妮, 曹鑫. 基于特征融合与 DBN 的矿用通风机滚动轴承故障诊断[J]. 工矿自动化, 2021, 47(10): 14-20, 26.
- GUO Xiucan, WU Ni, CAO Xin. Fault diagnosis of rolling bearing of mine ventilator based on characteristic fusion and DBN[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(10): 14-20, 26.
- [8] 崔玲丽, 刘银行, 王鑫. 基于改进奇异值分解的滚动轴承微弱故障特征提取方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(17): 156-169.
- CUI Lingli, LIU Yinhang, WANG Xin. Feature extraction of weak fault for rolling bearing based on improved singular value decomposition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(17): 156-169.
- [9] 胥永刚, 杨苗蕊, 马朝永. 基于改进延伸奇异值分解包的滚动轴承故障诊断[J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(7): 729-736.
- XU Yonggang, YANG Miaorui, MA Chaoyong. Improved extended singular value decomposition packet and its application in fault diagnosis of rolling bearings[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2023, 49(7): 729-736.
- [10] 苏紫娜, 马军, 王晓东, 等. 改进 SVD 算法的转子系统轴心轨迹快速提纯研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(10): 144-154.
- SU Zina, MA Jun, WANG Xiaodong, et al. Rapid purification of rotor system axis trajectory based on improved SVD algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(10): 144-154.
- [11] 李华, 刘韬, 伍星, 等. 相关奇异值比的 SVD 在轴承故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21): 138-149.
- LI Hua, LIU Tao, WU Xing, et al. Application of SVD based on correlated singular value ratio in bearing fault diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21): 138-149.
- [12] 陈雪俊, 贝绍轶, 李波, 等. 基于组合降噪的卷积神经网络轴承故障诊断方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(2): 96-104.
- CHEN Xuejun, BEI Shaoyi, LI Bo, et al. Fault diagnosis of bearing based on convolutional neural network with combined noise reduction[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2021, 35(2): 96-104.
- [13] 刘湘楠, 赵学智, 上官文斌. 强背景噪声振动信号中滚动轴承故障冲击特征提取[J]. 振动工程学报, 2021, 34(1): 202-210.
- LIU Xiangnan, ZHAO Xuezhi, SHANGGUAN Wenbin. The impact features extraction of rolling bearing under strong background noise[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(1): 202-210.
- [14] 陈剑, 阚东, 孙太华, 等. 基于 SVD-VMD 和 SVM 滚动轴承故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 220-226.
- CHEN Jian, KAN Dong, SUN Taihua, et al. Rolling bearing fault diagnosis method based on SVD-VMD and SVM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 220-226.
- [15] 常妍, 蔡改改, 胡耀阳. 加权 firm 阈值奇异值分解及其旋转机械故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(5): 135-141, 187.
- CHANG Yan, CAI Gaigai, HU Yaoyang. Weighted firm threshold singular value decomposition and rotating machinery fault diagnosis[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(5): 135-141, 187.
- [16] 张林锋, 田慕琴, 宋建成, 等. 基于奇异值分解的掘进机振动信号特征量提取[J]. 工矿自动化, 2019, 45(1): 28-34.
- ZHANG Linfeng, TIAN Muqin, SONG Jiancheng, et al. Feature extraction of vibration signal of roadheader based on singular value decomposition[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(1): 28-34.
- [17] 田再克, 李洪儒, 谷宏强, 等. 基于局部特征尺度分解和 JRD 距离的液压泵性能退化状态识别方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(20): 54-59.
- TIAN Zaike, LI Hongru, GU Hongqiang, et al. Degradation status identification of a hydraulic pump based on local characteristic-scale decomposition and JRD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(20): 54-59.
- [18] 杨宇, 曾鸣, 程军圣. 局部特征尺度分解方法及其分量判据研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 195-201, 208.
- YANG Yu, ZENG Ming, CHENG Junsheng. Research on local characteristic-scale decomposition and its stopping criteria[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(2): 195-201, 208.
- [19] 丁雷, 曾锐利, 沈虹, 等. 基于香农熵特征的发动机故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(21): 233-239.
- DING Lei, ZENG Ruili, SHEN Hong, et al. An engine fault diagnosis method based on Shannon entropy features[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(21): 233-239.
- [20] 鲍杰, 景博, 焦晓璇, 等. 基于 CEEMD 香农熵和 GAPSO-SVM 的机载燃油泵故障诊断方法[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 781-787.
- BAO Jie, JING Bo, JIAO Xiaoxuan, et al. Fault diagnosis method of airborne fuel pump based on CEEMD Shannon entropy and GAPSO-SVM[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 781-787.
- [21] 李贵红, 赵丽丽, 杜昕, 等. 基于 EMD 和香农熵的刀具磨损故障诊断系统开发[J]. 工业仪表与自动化装置, 2019(2): 114-117.
- LI Guihong, ZHAO Lili, DU Xin, et al. Development of tools wearing fault diagnosis system based on EMD and Shannon[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2019(2): 114-117.