



# 基于 SVD 差分谱去噪法分析地铁调车测试噪声

苏燕辰<sup>1</sup>, 王筱野<sup>1</sup>, 靳行<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:**在对地铁调车进行室内噪声测试时, 无法避免不确定因素对信号的干扰, 为得到机车室内室外的噪声值以及理想的频谱信息, 需要对地铁调车整体进行同步测试和信号去噪。在通过传声器同步测试地铁调车室内噪声后, 发现二位端司机室测点在发动机转速 750, 1 000, 1 200 r/min 3 个工况下噪声值为 75.6~80.1 dB(A), 满足国标限值; 在发动机转速 1 500, 1 800, 2 100 r/min 3 个工况下噪声值为 82.5~92 dB(A), 属于超标。室外噪声均满足国标限值。在使用奇异值分解差分谱法对二位端司机室测试信号去噪后, 得到较为理想的测试信号频谱, 同时通过分析频谱可知在 63 Hz 处出现异常, 并且以 630 Hz 为中心频率。分析结果可以作为后期车辆降噪工作整改参考。

**关键词:** 噪声; 同步测试; SVD; 去噪; 频谱

中图分类号: TB533

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)07-0042-04

## Analysis of subway shunting testing noise based on SVD differential spectrum denoising method

SU Yanchen<sup>1</sup>, WANG Xiaoye<sup>1</sup>, JIN Hang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State-Key Laboratory of Traction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** During the test of the subway shunting indoor noise, it is impossible to avoid the interference of uncertainty to the signal. In order to obtain the noise standard of the interior and exterior of the locomotive and the more satisfactory spectrum information, so it is necessary to synchronously test noise for subway shunting and denoise signal. After measuring synchronously the noise of the subway shunting indoors noise through the microphone, it is found that the noise value of the 'A' end of car driver's room test points were 75.6 to 80.1 dB (A) at 750, 1 000, 1 200 r/min, which was below the national standard limit value; but the result were 82.5 to 92 dB (A) at 1 500, 1 800, 2 100 r/min, which was exceeded the national standard limit value. Exterior noise reached the limit of national standard after using singular value decomposition differential spectrum method to denoise test signal, The ideal spectrum of test signal was obtained. At the same time, by analyzing their spectrum, there is an anomaly at 63 Hz, the main frequency was around 630 Hz. The analysis results can be used as a rectification reference for the noise reduction work of the later vehicle.

**Keywords:** noise; synchronous test; SVD; denoise; spectrum

## 0 引言

长时间在强噪声环境之中工作不仅会使人容易感到疲劳、注意力不集中、工作效率下降,还会影响人体中枢神经系统、心血管系统,严重者甚至导致噪声性耳聋<sup>[1]</sup>。对噪声的测试和控制显得尤为重要,邢淑梅等<sup>[2]</sup>对动车组运用多通道噪声测试方法,在车内多点同步测试了运行中的动车车内噪声,得出车内不同位置及不同运行速度时动车组车内噪声的现状和分布规律,确定了动车车内噪声的主频带。耿烽等<sup>[3]</sup>在铝合金地铁车内使用 5 个噪声测点测试,并用 Bark 谱分析了它们的声学特性,得出了车内噪声大致在第 5~9 Bark 频带对乘客有最大的主观听觉影响,约对应 500~1 100 Hz 中低频噪声。

这些测试中仅使用了少量传声器直接测试声压值 (SPL (A)), 所以不能对整车声场有较全面的了解,若使用多通道同步采集机车室内室外各位置噪声,不仅能准确反映噪声达标状况和分布规律,还能便于使用相关的理论和方法进一步分析声源对响应点的影响<sup>[4-6]</sup>。由于测试中难以避免干扰,本文使用奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 差分谱去噪法对测试信号去噪后,能得到更好的频谱分析结果。

## 1 奇异值分解差分谱去噪法

含有噪声的离散时间序列  $\mathbf{X}(N) = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$  可以构成  $m \times n$  阶的 Hankel 矩阵<sup>[7]</sup>, 为了达到较好的降噪效果, Hankel 矩阵的行列维数选择准则是尽量使其构成方阵<sup>[8-9]</sup>

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m & x_{m+1} & \cdots & x_N \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中,  $N=m+n-1$ 。对  $\mathbf{H}$  进行 SVD 得到:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}_{m \times n} \mathbf{\Sigma}_{n \times n} \mathbf{V}_{n \times n}^T \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{V}$  是正交矩阵,  $\mathbf{\Sigma}$  是非负对角阵, 由  $\mathbf{\Sigma}$  的对角线上的数值为  $\mathbf{H}$  矩阵的所有奇异值。

对信号的重构需要合理地选择有用的奇异值阶次, 而奇异值差分谱则是很好地表达了含噪信号的奇异值突变, 将所有 Hankel 矩阵的奇异值从大到小形成向量  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{S} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ , 其差分谱<sup>[10-11]</sup> 表示为

$$b_i = \sigma_i - \sigma_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3)$$

存在  $k$  使得  $b_k$  是最大峰值, 对于奇异值序列来

说最大峰值处表示了噪声与有用信号的分界, 当  $k=1$  时表示信号含有直流分量, 需要选择第 2 个最大峰值赋予  $k$ ; 当  $k>1$  时, 表示信号不含直流分量或者是直流分量小于交流分量。确定  $k$  值后, 将  $k$  以后的奇异值置零后进行 SVD 重构信号<sup>[12-16]</sup>, 在分析噪声测试结果中, 即可得到去干扰的辐射噪声声压信号。

## 2 实验安排

按照铁道机车和动车组司机室噪声限值及测量方法<sup>[16]</sup>和铁路车辆辐射噪声的测量<sup>[17]</sup>, 实验环境位于空旷场地内, 机车处于静置状态, 发动机在每个可能的设备或无载荷时应该运行; 辅助设备包括发动机冷却风扇, 应该在适合发动机速度的载荷下正常运行; 压缩机应该在无载荷条件下运行; 警示喇叭或警报器不应进行。在车内放置了 16 个传声器, 测点编号为测点 1~测点 16, 见图 1 测试点示意图, 均用三脚架支撑用扎带固定。一位端司机室测点 1、2, 二位端司机室测点 3、4、5、6, 高度为 1.5 m; 小柴油机室测点 7、8、9, 排气冷却室测点 10、11, 大柴油机室测点 12、13、14、15、16, 高度均为 0.5 m。其信号线均连接到丹麦 BBM 声学数据采集分析仪 ICP 接口上, 便于同步采集信号。使用声校准器对所有传声器进行校准后方可进行实验, 采样率设置为 32 768 Hz, 最终测试信号数字数据文件, 保存到计算机上的数据库中, 以供按前述方法完成分析。待室内测试完后, 同样的设置测试机车辐射噪声, 测点编号为测点 17~测点 28, 高度均为 1.5 m, 两侧测点距离轨道 7.5 m; 测点 17、23 分别距离车头和车尾正前方为 7.5 m; 两端车头前方左右 45° 方向各有一个测点, 距离车头中心点 7.5 m。图 2 红色矩形框内所示是车内测点 11 与车外测点 26 实物图。

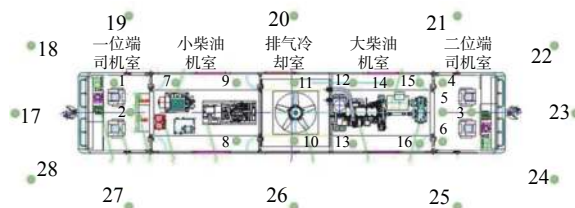


图 1 测试点示意图

在校准传声器后, 实验机车柴油机按照转速 750, 1 000, 1 200, 1 500, 1 800, 2 100 r/min 6 个工况运行, 每个工况测试 90 s。

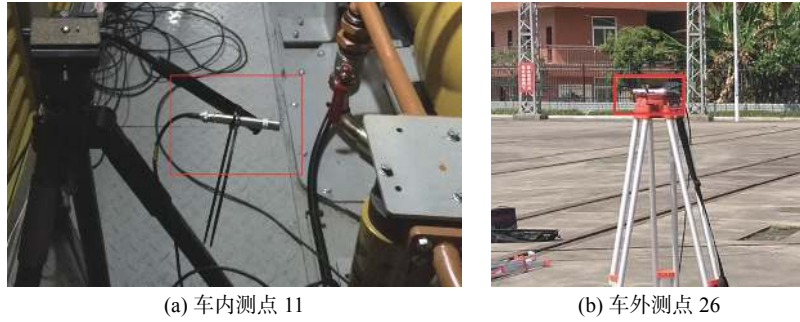


图2 部分测点图

### 3 结果处理与分析

使用BBM声学数据采集分析仪计算各个测点在各个工况90 s内的等效连续A声级,所有结果统计在表1和表2。

表1 车内各测点工况噪声声压级

测点	dB(A)					
	750 r/min	1 000 r/min	1 200 r/min	1 500 r/min	1 800 r/min	2 100 r/min
1	67.0	66.4	67.4	70.8	74.3	76.4
2	66.7	66.0	67.5	70.7	72.6	75.3
3	77.0	75.7	77.0	82.5	86.0	89.4
4	79.1	78.4	80.1	83.2	87.6	92.0
5	78.4	76.1	77.7	82.0	85.4	90.4
6	78.6	77.3	78.5	83.0	87.3	90.9
7	84.0	85.7	84.1	91.4	91.4	95.3
8	85.7	87.2	87.3	94.7	96.5	97.9
9	84.1	85.1	84.8	89.9	93.8	96.9
10	96.7	96.5	97.8	101.8	105.2	108.9
11	96.3	96.5	97.2	100.7	104.6	108.4
12	101.1	101.2	102.2	106.7	109.1	113.6
13	101.2	100.8	102.2	105.7	109.4	113.6
14	101.8	101.7	103.2	106.3	109.8	113.5
15	100.8	100.6	102.3	107.5	109.1	113.4
16	101.0	101.0	102.0	105.8	109.3	113.0

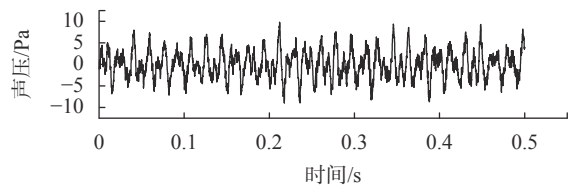
在6个工况下,以国标限制值78 dB(A)为标准<sup>[17]</sup>,一位端司机室噪声值在66~76.4 dB(A),均为达标;二位端司机室在750, 1 000, 1 200 r/min 3个工况下,噪声值为75.6~80.1 dB(A)属于达标,在1 500, 1 800, 2 100 r/min 3个工况下,噪声值为82.5~92 dB(A)属于超标。对于该车的辐射噪声,以国标限制值95 dB(A)为标准<sup>[18-19]</sup>,在6个工况下均为达标。

为后期降噪工作准备,将对2 100 r/min时超标的4个测点(即二位端司机室测点3至测点6)声压信号经过奇异值分解差分谱去噪法预处理,将实测

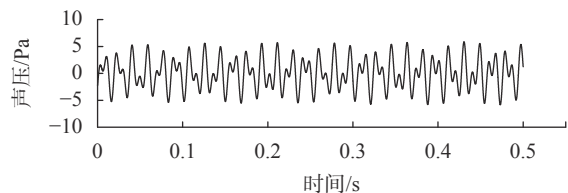
表2 机车外各测点工况噪声声压级

测点	dB(A)					
	750 r/min	1 000 r/min	1 200 r/min	1 500 r/min	1 800 r/min	2 100 r/min
17	74.0	72.5	78.1	86.1	81.4	85.2
18	75.2	74.9	79.0	86.0	86.4	88.1
19	78.9	79.2	81.6	85.4	88.7	91.1
20	78.5	79.1	80.8	85.8	87.0	89.9
21	78.0	77.3	80.2	85.0	86.5	88.5
22	75.0	74.3	74.4	83.3	81.9	87.8
23	71.3	69.7	74.2	81.7	78.9	78.7
24	76.8	76.9	78.5	85.4	86.5	88.2
25	79.3	78.8	82.6	88.7	89.2	90.5
26	80.2	79.7	84.4	90.4	89.5	93.1
27	75.6	77.4	82.3	86.8	86.4	88.2
28	81.4	81.0	86.8	92.8	94.6	95.7

信号的离散时间序列构建Hankel矩阵进行SVD差分谱去噪,测点3声压时域信号去噪对比如图3,可见SVD差分谱去噪法保留了原始信号比较真实的信息特征,尽可能地去除了信号波形的毛刺,波形



(a) 原始信号



(b) SVD差分谱去噪后信号

图3 测点3去噪对比图

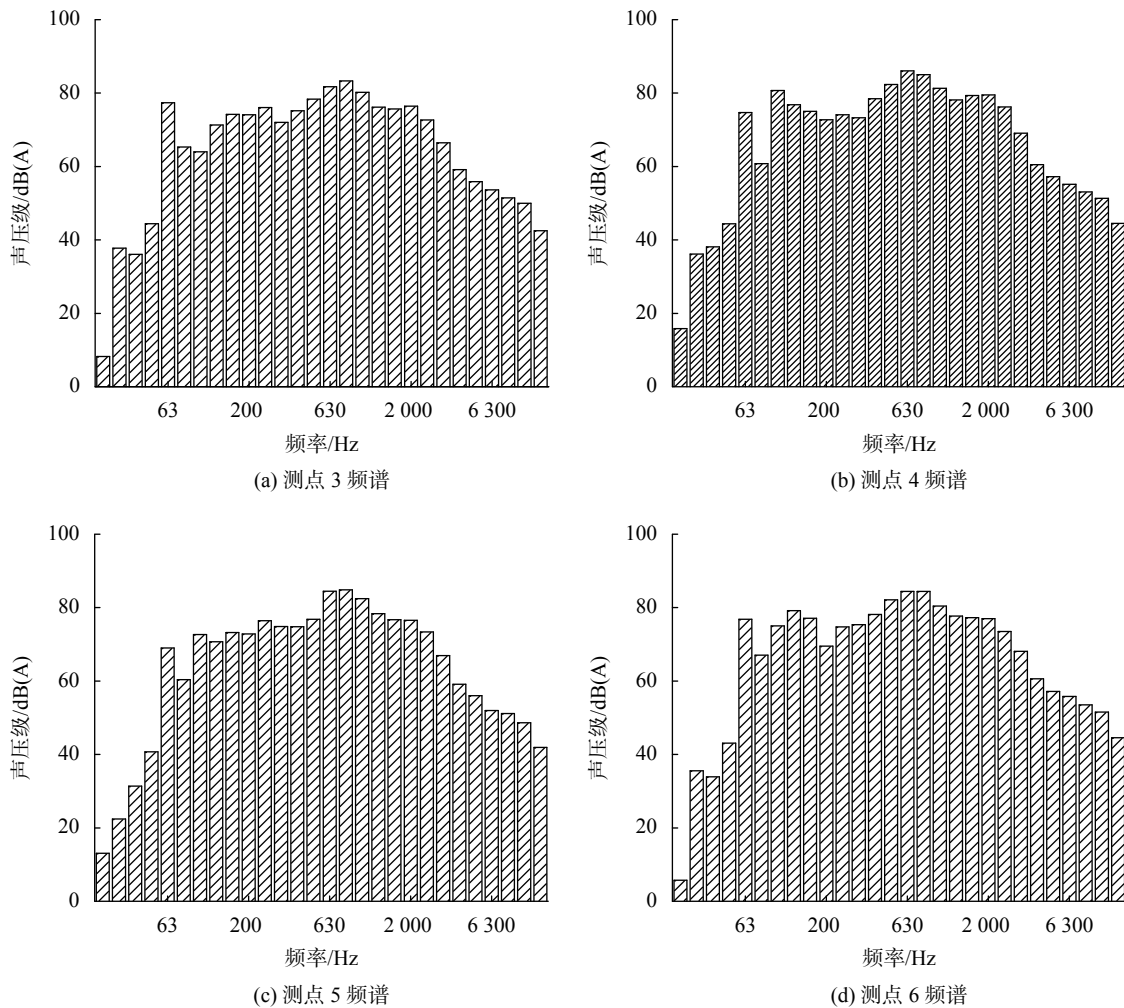


图 4 二位端司机室测点 1/3 倍频程频谱

在很大程度上得以恢复, 相位也并未发生偏移, 去噪效果较为满意。

2 100 r/min 时超标 4 个测点的 1/3 倍频程频谱如图 4, 4 个测点以 63 Hz 为中心频率的频带内声压级均出现异常, 已经超出两侧频带 5~10 dB(A), 且噪声主要分布在 63~2 000 Hz 的宽频带范围内, 其中最大声能量主要集中在 200~1 250 Hz 的中频段, 峰值均在 630 Hz 处, 该结果与张秀文等<sup>[20]</sup>, 王龙等<sup>[21]</sup>对内燃机车司机室内部噪声的测试结果相似, 噪声主要存在于中低频, 司机室内部均在低频 100~160 Hz 以及中频 1 250~2 000 Hz 两个频段出现峰值; 不同之处在于张秀文等所测试司机室噪声在 1 600 Hz 附近较明显, 而王龙等所测试司机室噪声 125 Hz 附近较明显。即是目前内燃机车司机室噪声主要存在于中低频, 在后期对本文测试的二位端司机室进行降噪时, 应着重考虑出现峰值的以 63 Hz 为中心频率的低频频带以及 200~1 250 Hz 的中频段。

#### 4 结束语

对地铁调车的室内噪声进行同步测试, 得到在 6 个工况下, 二位端司机室 4 个测点在 750, 1 000, 1 200 r/min 3 个工况下, 噪声值为 75.6~80.1 dB(A) 属于达标, 在 1 500, 1 800, 2 100 r/min 3 个工况下, 噪声值为 82.5~92 dB(A) 属于超标; 其他测点均达标。对于噪声值超标的测点信号使用奇异值分解差分谱去噪法预处理后分析其频谱, 发现在 1 200 r/min 下 63 Hz 频带内声压级出现异常, 且最大声能量主要集中在 200~1 250 Hz 的中频段, 分析结果可以作为后期车辆物理降噪工作的参考。

#### 参考文献

- [1] 李增光. 机械振动噪声设计入门 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [2] 邢淑梅, 刘岩, 张晓排. 高速铁路动车组噪声测试与分析 [J]. 噪声与振动控制, 2009, 29(3): 79-81.

(下转第 65 页)

- 讯, 2005, 16(6): 693-695.
- [4] SERBAN C M, MICHAEL F D. Analysis of quinic acid and of myo-Inositol in tobacco[J]. Contributions to Tobacco Research, 2012, 25(4): 499-506.
- [5] 周敏, 陈亚波, 杨彤. 微生物法测定维生素功能饮料中的肌醇含量[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(7): 2123-2015.
- [6] ANAB B, ROSA MJ, ROSAM A. Simultaneous determination of five 1, 4-dihydropyridine sinpharmaceutical for mutations by high-performance liquid chromatography amperometric detection[J]. J Chromatogr A, 2004, 1031(1-2): 275-280.
- [7] 刘珊珊, 吴琼珠. 高效液相色谱法测定赖氨酸肌醇维 B12 口服溶液中维生素 B12 及肌醇的含量[J]. 药学与临床研究, 2007, 15(5): 371-374.
- [8] 高树刚, 申书昌, 王文波, 等. 气相色谱法测定大豆磷脂中磷脂酰肌醇[J]. 理化检验-化学分册, 2007, 43(12): 1020-1021.
- [9] 食品安全国家标准食品中肌醇的测定: GB 5009.270-2016[S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.
- [10] JIN G, SHI YF, XU CB, et al. Data on the optimization of a GC-MS procedure for the determination of total plasma myo-inositol[J]. Data Brief, 2016(8): 1040-1043.
- [11] SUN S H, WANG H, XIE J P, et al. Simultaneous determination of rhamnose, xylitol, arabitol, fructose, glucose, inositol, sucrose, maltose in jujube(Zizyphus jujube Mill.) extract: comparison of HPLC-ELSD, LC-ESI-MS/MS and GC-MS[J]. Chem Cent J, 2016(10): 25.
- [12] PERELLO J, ISERN B, COSTA-BAUZA A, et al. Determination of myo-inositol in biological samples by liquid chromatography-mass spectrometry[J]. J Chromatogr B Anal Technol Biomed Lif Sci, 2004, 802(2): 367-370.
- [13] KIM J, HOPPEL CL. Comprehensive approach to the quantitative analysis of mitochondrial phospholipids by HPLC-MS[J]. J Chromatogr B-Anal Technol Biomed Lif Sci, 2013(912): 105-114.
- [14] JINHO S, JUNGMIN P, HAJUNG K, et al. Development of rapid analytical methods for inositol as a trace component by HPLC and LC-MS/MS in infant formula[J]. Korean J Food Sci, 2015, 35(4): 466-472.
- [15] 房子舒, 黄传峰. 食品中肌醇的检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(1): 14-18.
- [16] 刘泽春, 黄朝章, 邓其馨, 等. 烟用香精香料中奎尼酸的测定[J]. 香料香精化妆品, 2014, 10(4): 29-32.
- [17] 王有志, 罗奇志, 罗佳. 高效液相色谱-电喷雾串联四极杆质谱法测定双黄连粉针剂中奎尼酸的含量[J]. 南方医科大学学报, 2010, 30(2): 401-402.

(编辑:徐柳)

(上接第 45 页)

- [3] 耿烽, 王玉国, 左言言, 等. 铝合金地铁车内噪声测试及其响度分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(5): 1200-1204.
- [4] 马驰, 陈建峰, 叶永. 基于四元十字阵的分布式声源定位实验研究[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(11): 52-54.
- [5] 宋宫琨琨. 基于麦克风阵列的室内语音定位算法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [6] 陆灏铭, 陈玮, 刘寿宝. 基于麦克风阵列的声源定位系统设计[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(4): 79-81.
- [7] 王太勇, 王正英, 胥永刚, 等. 基于 SVD 降噪的经验模式分解及其工程应用[J]. 振动与冲击, 2005, 24(4): 96-98.
- [8] 高成文, 孙云鹏. 基于 Hankel 矩阵奇异值分解的速变参数去噪方法实现及仿真分析[J]. 遥测遥控, 2014, 35(1): 60-64.
- [9] 柴凯, 张梅军, 黄杰, 等. 基于奇异值分解(SVD)差分谱降噪和本征模函数(IMF)能量谱的改进 Hilbert-Huang 方法[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(9): 90-96.
- [10] 唐炬, 董玉林, 樊雷, 等. 基于 Hankel 矩阵的复小波-奇异值分解法提取局部放电特征信息[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1808-1817.
- [11] 赵学智, 叶邦彦, 陈统坚. 奇异值差分谱理论及其在机床主轴箱故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 100-108.
- [12] 王维, 张英堂, 徐章遂. 基于动态聚类的奇异值分解降噪方法研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(3): 304-308.
- [13] 张超, 陈建军, 徐亚兰. 基于 EMD 分解和奇异值差分谱理论的轴承故障诊断方法[J]. 机械强度, 2012, 34(2): 539-545.
- [14] 张前图, 房立清. 基于奇异值差分谱和对称极坐标法的轴承故障特征提取[J]. 机械设计与研究, 2015(5): 58-61.
- [15] 姚艳丽, 吴震, 饶金涛, 等. 基于 EMD 与奇异值差分谱的侧信道信号特征提取[J]. 网络与信息安全学报, 2016, 2(7): 69-75.
- [16] 邵克勇, 蔡苗苗, 李鑫. 基于小波分析及奇异值差分谱理论的滚动轴承故障诊断[J]. 制造业自动化, 2013, 35(8): 79-82.
- [17] 铁道机车和动车组司机室噪声限值及测量方法: GB/T 3450-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [18] 铁道部劳动卫生所起草. 铁路机车车辆辐射噪声测量: GB/T 5111-1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.
- [19] 铁道部劳动卫生所. 铁道机车辐射噪声限值: GB 13669-1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [20] 张秀文, 刘岩, 杨冰, 等. 内燃机车司机室内部噪声特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(6): 120-123.
- [21] 王龙. 内燃机车司机室噪声特性分析[J]. 机车车辆工艺, 2013(5): 8-9.

(编辑:刘杨)