

# Vibration Monitoring and Failure Analysis of the Axle Box Bearings for High-Speed EMU

Hui Li<sup>1</sup>, Weixing Cai<sup>1</sup>, Ning Han<sup>1</sup>, Li Ma<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

<sup>2</sup>HUST-Wuxi Research Institute, Wuxi Jiangsu

Email: mali@hust-wuxi.com

Received: Dec. 11<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 24<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2019

---

## Abstract

The axle-box bearings are the key components of high-speed EMU train, whose performance and fault directly affect the operating safety. Therefore, it is of great significance to monitor the motion state of bearings and to accurately analyze and predict their faults. In order to monitor the vibration and analyze fault of axle-box bearing, the software and hardware systems of vibration monitoring are designed and used to test vibration experiments. Then, the fault bearing can be effectively diagnosed by time-frequency domain analysis based on the collected data. The vibration monitoring systems of axle-box bearing can provide technical support and ensure safety of the high-speed EMU trains.

## Keywords

High-Speed EMU, Bearing Vibration, Testing System, Envelope Spectrum, Fault Analysis

---

# 高速动车组列车轴箱轴承振动监测与故障分析

李辉<sup>1</sup>, 蔡卫星<sup>1</sup>, 韩宁<sup>1</sup>, 马力<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

<sup>2</sup>华中科技大学无锡研究院, 江苏 无锡

Email: mali@hust-wuxi.com

收稿日期: 2019年12月11日; 录用日期: 2019年12月24日; 发布日期: 2019年12月31日

---

## 摘要

轴箱轴承作为高速动车组列车的关键零部件, 其性能以及其故障的发生直接影响着列车的运行安全, 因此对高速动车组列车轴箱轴承的运行状态监测, 并对其发生的故障进行准确分析和预测具有重要意义。

文章引用: 李辉, 蔡卫星, 韩宁, 马力. 高速动车组列车轴箱轴承振动监测与故障分析[J]. 动力系统与控制, 2020, 9(1): 40-49. DOI: 10.12677/dsc.2020.91004

本文针对高速动车组列车轴箱轴承振动监测与故障分析需求,设计搭建轴承振动监测系统,并在高速动车组列车试验台上进行轴承振动测试实验,并采用时频域对振动数据分析,有效诊断出故障轴承,本文所搭建的列车轴箱轴承振动监测系统为在高速动车组列车的装车提供技术支撑,为列车安全运行提供重要保证。

## 关键词

高速动车组列车, 轴承振动, 测试系统, 包络谱, 故障分析

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,我国的动车事业发展迅速,动车组速度的不断提升,轴箱轴承作为动车组列车的关键零部件,其性能以及其故障的发生直接影响着高速动车组列车的运行安全,甚至导致严重的交通事故,危机旅客生命财产安全,造成重大社会财产损失,因此研发高速动车组列车轴箱轴承的状态监测,并对其可能存在的故障进行准确分析和预测具有重要意义。

国内外学者针对轴承振动测试与故障分析, Li 等[1]提出适用于滚动轴承复合故障提取的聚类算法。林京等[2]提出“小波熵”,用于滚动轴承故障诊断。吴春光等[3]提出了一种基于零空间追踪算法(NSP)的滚动轴承故障诊断方法。陶洁[4]提出了一种基于零空间追踪算法(NSP)的滚动轴承故障诊断方法等,提高了滚动轴承诊断准确率。张琛等[5]通过变分模态分解与奇异值熵融合技术,对滚动轴承早期微弱故障进行辨识。江志农等[6]针对早期故障非平稳及微弱特征,提出阶次跟踪能量算子(OTEO)与奇异值分解(SVD)结合轴承故障诊断方法。

由于高速列车运行环境复杂多变,轴承信号易受背景噪声及其他零部件的干扰,传统频谱分析方法可能不能有效地提取轴承故障特征。因此针对高速动车组列车轴承诊断方面,尚万峰等[7]提出了基于三阶累积量最小二乘及最小均方误差自适应算法的列车轴承故障诊断方法,有效地降低了强背景噪声干扰并提高了故障特征信号分离准确率。刘方等[8]研究了基于时域多普勒校正和 EEMD 的列车轴承声信号故障诊断,有效地提取了轴承内外圈局部故障特征。王靖等[9]研究了基于数据插值重采样技术的诊断方法,利用整周期采样技术、角度重采样技术以及特征谱提取技术等联合分析方法准确识别了列车轴承频带变化类非线性故障振动信号。Lei 等[10]提出了改进的基于小波包变换的谱峭度算法,从而提高了轴承微弱故障特征提取的准确性。除此之外,铁道科学研究院机辆所 20 世纪 90 年代初开发的 JSC-206 机车车辆轴承诊断仪,提取峭度系数、均方根值等多个特征参数,并具有共振解调分析功能,已有多台服务于铁路机务段[11]。虽然国内外学者针对高速动车组列车轴箱轴承振动测试和故障分析开展一些研究,但多数没有进行列车装车测试,实际振动测试以及故障诊断效果有待验证,迫切需要在真实列车上进行高速动车组列车轴箱轴承振动监测与故障分析。

本文针对动车组列车轴承在线状态检测的迫切需求,以 CRH380 动车组列车轴箱轴承为研究对象,利用搭建的高速动车组列车轴箱轴承振动监测软硬件系统,在列车上安装布置振动加速度传感器,对安装正常轴承与故障轴承的高速动车组列车在列车试验台上进行振动测试实验,利用包络谱算法等频域算法进行动车组列车轴承的故障诊断。

## 2. 高速动车组列车轴箱轴承振动系统搭建

### 2.1. 硬件系统搭建

高速动车组列车单列具有 8 个轴箱轴承, 为了实现动车组轴箱轴承的振动信号采集, 采集卡选用 NI 的 9234, 4 通道信号同步采集, 采样频率最高 51.2 kHz, 内置抗混叠滤波器, 可以测量来自集成电子压电(IEPE)和非 IEPE 传感器的信号, 例如加速度计、转速计和接近式探针。

### 2.2. 软件系统设计

采用 LABVIEW 软件编制高速动车组列车轴箱轴承振动采集软件, 具体如图 1 所示。

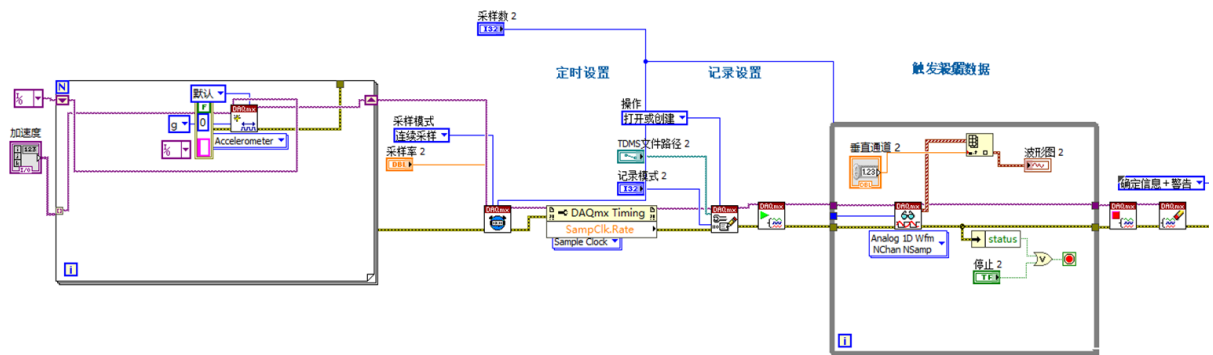


Figure 1. The data collect software of the axle box bearings for high-speed EMU

图 1. 高速动车组列车轴箱轴承采集软件

### 2.3. 包络谱

原始信号中包含了从高到低不同频率段的成分, 对每个成分进行包络谱分析步骤如下  
对原始信号作 Hilbert 变换, 即

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

构建解析信号在  $z(t)$ , 即

$$z(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)] \quad (2)$$

解析信号在  $z(t)$  求模即可得到包络信号  $B(t)$

$$B(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2[c_i(t)]} \quad (3)$$

对包络信号进行分析可得到包络谱。

## 3. 高速动车组列车试验台及传感器布置

### 3.1. 高速动车组列车试验台

考核实验在如图 2 所示的国家高速动车组总成工程技术研究中心设计搭建的高速动车组列车试验台上开展, 试验台可以进行 400 km/h 的高速动车组列车试验台的台架试车实验, 实验考核对象为 CRH380 高速动车组列车。该试验台可测试内容十分全面, 主要包括列车的动力学性能、制动性能、牵引性能、弓网受流性能等。通过将前文所述的振动信号采集系统搭载在试验台上待测车辆指定位置处, 实现振动状态的监测与故障分析。



Figure 2. The test-bed of high-speed EMU  
图 2. 高速动车组列车试验台

### 3.2. 振动传感器布置

动车组列车上布置 8 个加速度传感器，均为双向传感器，其安装位置如图 3 所示。选用厦门乃尔电子有限公司的高频振动传感器型号 CA2ZD320-10，具体参数如表 1 所示。

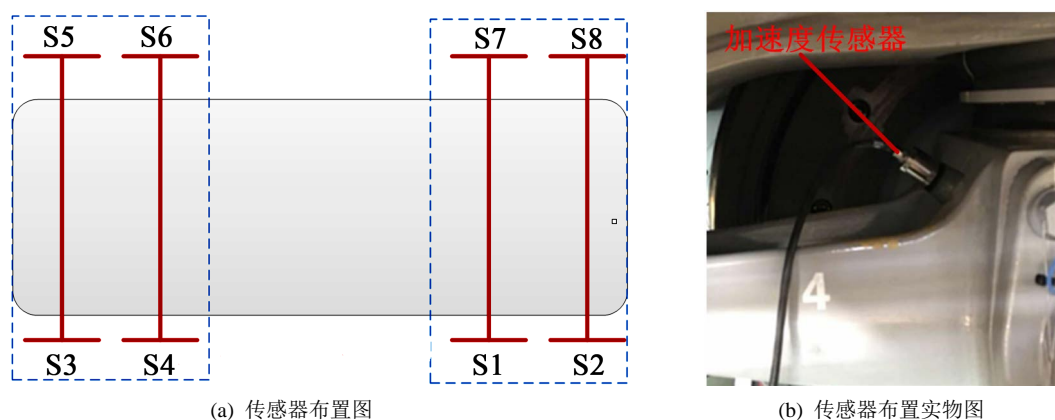


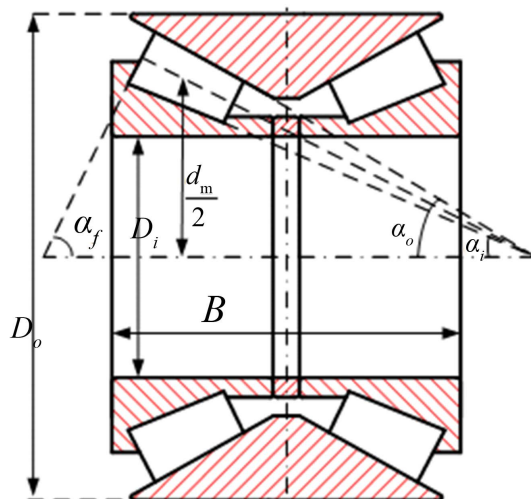
Figure 3. The sensors' layout of the axle box bearings for high-speed EMU  
图 3. 高速动车组列车轴箱轴承传感器布置

Table 1. The parameters of acceleration sensor  
表 1. 加速度传感器性能参数

指标	数值	指标	数值
灵敏度	10 mV/g	测量范围	$\pm 500$ g
频响	>10 kHz	温度范围	$-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$

### 3.3. 轴箱轴承

高速动车组列车轴箱轴承的型号为 CRI-2692，为双列圆锥滚子轴承，具体结构如图 4 所示。图中，圆锥滚子轴承的接触角分为内滚道接触角  $\alpha_i$ 、外滚道接触角  $\alpha_o$  和滚子大端面与挡边接触角  $\alpha_f$ ，其结构参数如表 2 所示。



**Figure 4.** The structure of double row tapered roller bearing  
**图 4.** 双列圆锥滚子轴承结构

**Table 2.** The structure parameters of the axle box bearings for high-speed EMU

**表 2.** 高速动车组列车轴箱轴承结构参数

参数	数值	单位
外圈内径	230	mm
内圈内径	130	mm
节圆直径	183.929	mm
初始接触角	10	°
滚动体直径	26	mm
滚动体个数	19	个

双列圆锥滚子轴承特征频率采用如下公式计算。

外圈通过特征频率(BPFO)

$$f_o = Zf_r (1 - d \cos \alpha / d_m) / 2 \quad (4)$$

内圈通过特征频率(BPFI)

$$f_i = Zf_r (1 + d \cos \alpha / d_m) / 2 \quad (5)$$

滚子通过特征频率(BSF)

$$f_b = Df_r \left( 1 - (d/d_m)^2 \cos^2 \alpha \right) / 2d \quad (6)$$

保持架通过特征频率为(FTF)

$$f_c = f_r (1 - d/d_m \cos \alpha) / 2 \quad (7)$$

式中,  $f_r$  为轴承内圈转动频率,  $f_r = n/60$ ,  $n$  为内圈转速;  $d$  为滚动体直径;  $d_m$  为轴承节径;  $\alpha$  为轴承接触角,  $\alpha = (\alpha_i + \alpha_o) / 2$ ;  $Z$  为每列滚子个数。

### 3.4. 试验工况

动车组列车分别在 100、200、250、300、350 km/h 转速条件下进行测试试验, 对应轴承的转速分别为 624、1248、1561、1872、2185 r/min。几种转速条件下的轴承的特征频率如表 3 所示。

**Table 3.** The Characteristic frequency of CRI-2692 bearing failure  
**表 3.** CRI-2692 轴承故障特征频率

速度 Km/h	转速 r/min	BPFO Hz	BPFI Hz	2BSF Hz	FTF Hz
100	624	85.0	112.5	72.18	4.47
200	1248	170.1	225.0	144.3	8.94
250	1561	212.8	281.5	180.5	11.19
300	1872	255.2	337.5	216.5	13.42
350	2185	297.8	394.1	252.6	15.67

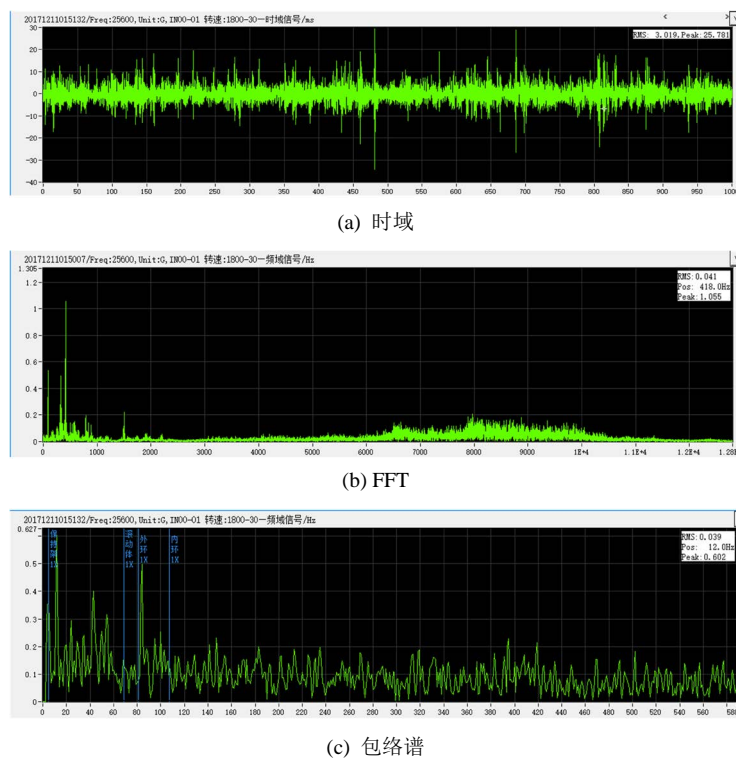
注：车轮直径 850 mm。

#### 4. 高速动车组列车轴箱轴承故障诊断

采用时域波形、FFT 以及包络谱对比分析不同转速条件下动车组列车轴箱正常和故障轴承振动测试数据。

##### 4.1. 正常轴承振动分析

不同转速条件下 S1 测点的时频域信号如图 5~7 所示。由图可以看出，频域信号中未见明显轴承特征频率，表明为正常轴承。



**Figure 5.** Vibration test signal of normal bearing S1 test point (100 km/h)

**图 5.** 正常轴承 S1 测点振动测试信号(100 km/h)



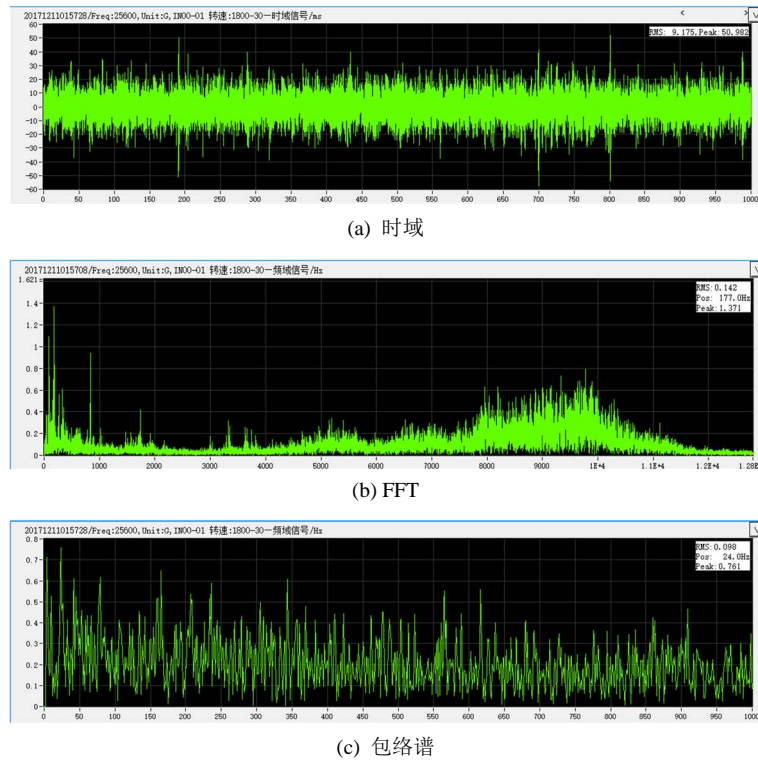


Figure 6. Vibration test signal of normal bearing S1 test point (200 km/h)  
图 6. 正常轴承 S1 测点振动测试信号(200 km/h)

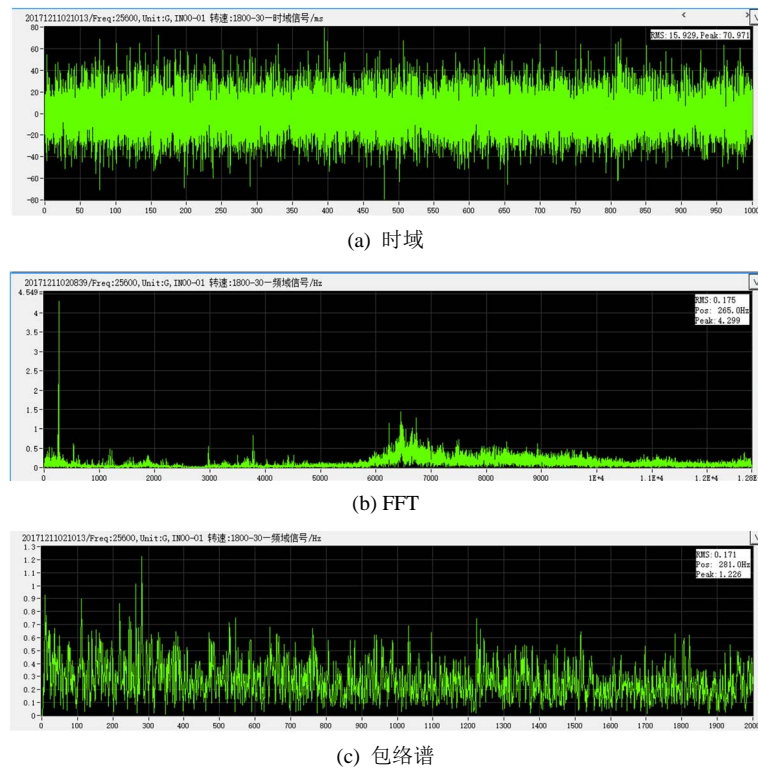
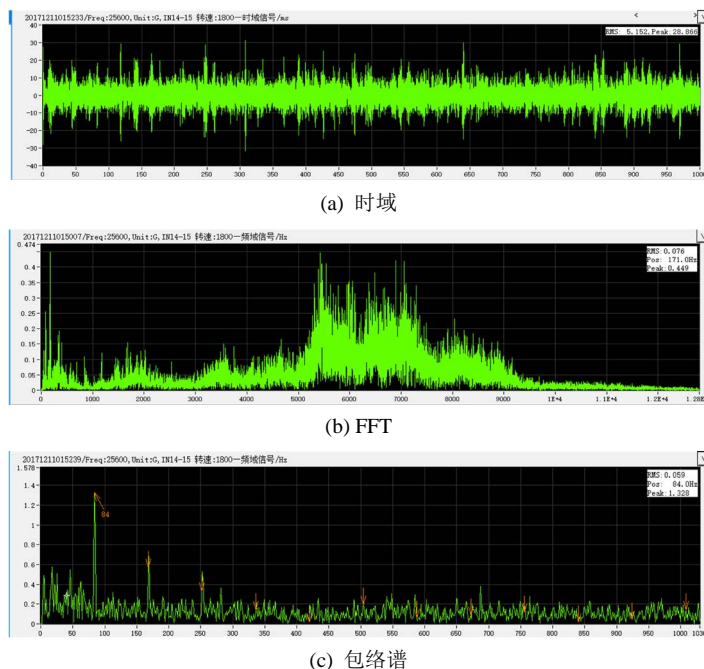


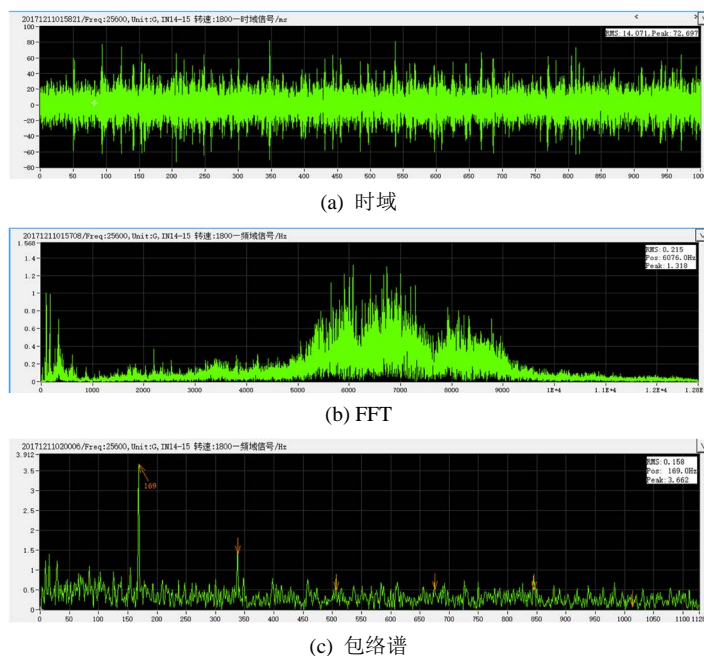
Figure 7. Vibration test signal of normal bearing S1 test point (300 km/h)  
图 7. 正常轴承 S1 测点振动测试信号(300 km/h)

## 4.2. 故障轴承振动分析

不同转速条件下 S8 测点的时频域信号如图 8~10 所示。由图可以看出，轴箱轴承振动包络谱表现出有明显外圈故障频率，外圈具有故障，轴承拆解照片如图 11 所示，由图可以看出，外圈存在明显故障，验证了振动监测系统与故障分析算法的有效性。

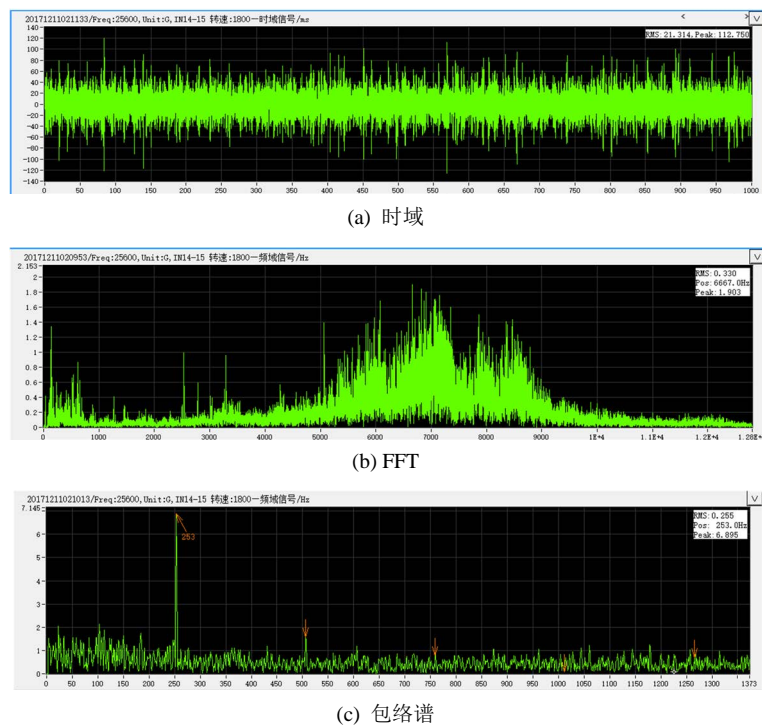


**Figure 8.** Vibration test signal of failed bearing S8 test point (100 km/h)  
**图 8.** 故障轴承 S8 测点振动测试信号(100 km/h)



**Figure 9.** Vibration test signal of failed bearing S8 test point (200 km/h)  
**图 9.** 故障轴承 S8 测点振动测试信号(200 km/h)





**Figure 10.** Vibration test signal of failed bearing S8 test point (300 km/h)  
**图 10.** 故障轴承 S8 测点振动测试信号(300 km/h)



**Figure 11.** The picture of failed bearing  
**图 11.** 故障轴承照片

## 5. 结论

本文设计搭建高速动车组列车轴箱轴承振动监测系统,以 CRH380 动车组列车轴箱轴承为研究对象,采用时频域分析典型工况条件下轴承振动,得出如下结论:

- 1) 本文设计搭建的高速动车组列车轴箱轴承振动监测系统可以有效测试轴箱轴承的振动信号;
- 2) 采用包络谱等频域算法分析高速动车组列车轴箱轴承振动,并轴承实物进行对比表明,有效诊断出故障轴承。

## 基金项目

《高速动车组关键零部件智能制造新模式应用》项目。

## 参考文献

- [1] Li, C., Oliveira, de Oliveira, J.V., Cerrada, M., *et al.* (2016) Observer-Biased Bearing Condition Monitoring: From Fault Detection to Multi-Fault Classification. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **50**, 287-301. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.01.038>
- [2] 林京, 屈梁生. 基于连续小波变换的信号检测技术与故障诊断[J]. 机械工程学报, 2000, 36(12): 95-100.
- [3] 吴春光, 房晓华, 化麒. 基于零空间追踪算法的滚动轴承故障诊断[J]. 航空维修与工程, 2016(10): 79-82.
- [4] 陶洁, 刘义伦, 杨大炼, 宾光富. 基于细菌觅食决策和深度置信网络的滚动轴承故障诊断[J]. 振动与冲击, 2017, 36(23): 68-74.
- [5] 张琛, 赵荣珍, 邓林峰. 基于变分模态分解奇异值熵的滚动轴承微弱故障辨识方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(21): 87-91+107.
- [6] 江志农, 胡明辉, 冯坤, 贺雅. 阶次跟踪能量算子与奇异值分解结合的滚动轴承故障诊断[J]. 轴承, 2018(11): 52-56.
- [7] 尚万峰, 赵升吨, 韩捷. 基于高阶累积量自适应算法的列车轴承的故障诊断[J]. 振动工程学报, 2006, 19(2): 234-237.
- [8] 刘方, 沈长青, 何清波, 等. 基于时域多普勒校正和 EEMD 的列车轴承道旁声音监测故障诊断方法研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(24): 104-109.
- [9] 王靖, 陈特放, 黄采伦, 等. 列车轴承频带变化类故障的诊断方法[J]. 北京工业大学学报, 2012(5): 678-682.
- [10] Lei, Y., Lin, J., He, Z., *et al.* (2011) Application of an Improved Kurtogram Method for Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **25**, 1738-1749. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.12.011>
- [11] 张涛. 机车轴承故障诊断系统的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2005.