高速动车组轴箱轴承早期故障识别研究

周开成,田 野,查 浩*

株洲中车时代电气股份有限公司,湖南 株洲

收稿日期: 2025年4月16日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

轴箱轴承作为列车走形部件中的重要部件之一,保证其在运用过程中的安全性,可以通过轴箱的振动信 号提取出轴承的故障特征对轴承的健康状态进行监测,然而实际运用过程中,我们很难捕捉到轴承处于 故障状态下的轴箱振动信号,且故障轴承不允许参与行车试验。本文将轴承部件引入到车辆-轨道耦合 模型之中,构造更为接近真实运用条件下的轴承动力学模型,并基于此模型,构造轴承早期缺陷模型, 仿真获得耦合作用下轴箱轴承的故障信号,并对信号进行Hilbert和FFT变换提取出轴承的故障特征。研 究结果表明,本文构造的轴承故障信号极其微弱,时域信号分析不易察觉,符合早期故障的特征;故障 特征最大幅值所对应的频率出现在以内圈转动频率乘以双列滚子数为中心的频率带内,靠近频率带中心; 在列车运行速度发生变化时,信号的包络时-频图依然能够清晰地反映轴承的故障特征,相比于直接对 信号进行FFT变换具有明显的优势;角域重采样技术和轴承故障特征因子能够使故障特征便于观察,本 文的信号处理分析处理方法能够对轴箱轴承进行实时故障检测。

关键词

动车组,轴箱轴承,包络时-频谱,角域重采样

Research on Axle Box Bearing Early Fault Identification of High-Speed EMU

Kaicheng Zhou, Ye Tian, Hao Zha*

Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou Hunan

Received: Apr. 16th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

Axle box bearing is one of the important parts of the train running parts to ensure its safety in the *通讯作者。

文章引用:周开成,田野,查浩.高速动车组轴箱轴承早期故障识别研究[J].人工智能与机器人研究,2025,14(3):799-809.DOI:10.12677/airr.2025.143076

operation process. The fault characteristics of the bearing can be extracted from the axle box vibration signal to monitor the health state of the bearing. However, in the actual application process, it is difficult for us to capture the axle box vibration signal when the bearing is in the fault state, and the fault bearing is not allowed to participate in the driving test. In this paper, the bearing components are introduced into the vehicle-track coupling model to construct a bearing dynamic model closer to the real application conditions. Based on this model, the early bearing defect model is constructed, the fault signal of axle box bearing under coupling is simulated, and the fault characteristics of bearing are extracted by Hilbert and FFT transforms. The results show that the bearing fault signal constructed in this paper is extremely weak and difficult to detect in time domain signal analysis, which is in line with the characteristics of early fault. The frequency corresponding to the maximum amplitude of fault characteristics appears in the frequency band centered on the inner ring rotation frequency multiplied by the number of double-row rollers, close to the center of the frequency band. When the train speed changes, the envelope time-frequency diagram of the signal can still clearly reflect the fault characteristics of the bearing, which has obvious advantages over the direct FFT transformation of the signal. Angle domain resampling technology and bearing fault feature factor can make fault features easy to observe. The signal processing method in this paper can detect the real-time fault of axle box bearing.

Keywords

EMU, Axle Box Bearing, Envelope Time-Frequency Spectrum, Angular Domain Resampling

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC ① Open Access

1. 引言

作为铁路车辆行走部件的关键构成要素,轴箱轴承在服役过程中若发生异常工况,不仅会触发轴温 报警系统引发列车非计划停运,导致线路运营中断并造成重大经济损失;更严重的是,当发生滚动体或 保持架断裂等致命性故障时,将直接威胁轮对定位稳定性,可能诱发列车脱轨等重大行车事故,危及轨 道交通系统的运行安全。目前对轴箱轴承的故障监测依靠轴温报警系统,但分解轴温报警的轴承,发现 轴承故障缺陷已发展严重,而采用对轴箱加速度信号进行监测和处理,在故障缺陷早期就发现轴承故障 情况对行车安全及列车运营经济效益具有重要意义。

列车在运行过程中,会有加速和减速的过程,轴承作为旋转部件,转速的变化会使采集到的振动信 号更加复杂,增加故障检测的难度。阶比分析技术[1]-[3]在变转速旋转机械领域应用最广且效果最好,其 本质是以等角间隔对时域非平稳信号进行重采样,再将其转换为角域平稳信号,然后再结合传统的旋转 机械诊断方法进行分析。常用的阶比跟踪方法有硬件阶比跟踪法、计算阶比跟踪法,以及基于瞬时频率 估计的阶比跟踪方法[4] [5]等。孙宜权等[6]利用提取阶比分量的能量与总能量的比值作为特征向量来识 别发动机的失火故障。Wu 等[7]提出了一种变步长的自适应阶比分量提取技术,并将其运用到旋转机械 的故障诊断中。滕伟等[8]通过 Gabor 阶比分析提取半速涡动成分,诊断油膜涡动故障。孙云嵩等[9]提出 了一种基于信号共振稀疏分解的阶比分析方法,采用共振稀疏分解方法将信号分解为高共振分量和低共 振分量,提取出故障冲击信号,诊断转速波动的齿轮故障。李修文等[10]提出了一种基于移频技术的短时 傅里叶变换阶比分析算法,通过傅里叶变换在频域的卷积性质对原始信号进行处理,以此来提高短时傅 故障特征阶比模板研究了变转速下滚动轴承的故障诊断。

鉴于轴箱轴承的服役环境具有显著的多物理场耦合特征,该部件通过内圈与轮对形成刚性连接,外 圈则通过轴承座或箱体结构与一系悬挂系统建立装配约束,轮轨接触产生的高频激扰通过上述传递路径 向轴承系统传播时,会加剧特征信号的混叠效应。此外,实际工况下难以有效获取轴承发生典型故障时 的轴箱振动样本数据,且故障轴承不允许参与行车试验。为此,本文在轴承 - 车辆 - 轨道模型的基础上, 引入轴承缺陷模型,研究耦合作用下轴承故障识别问题。

2. 模型的构建

2.1. 轴承 - 车辆 - 轨道动力学建模

本文采用包含轴承的车辆 - 轨道动力学模型[14], 各主要部件的运动和约束关系如图 1 所示。



图 1. 车辆 - 轨道耦合动力学模型

模型中,车辆系统包括车体、2个构架和4个轮对,其中车体和构架考虑浮沉、点头、侧滚、摇头和 横移等自由度,轮对考虑浮沉、侧滚、横移和摇头等自由度。车体与构架之间、构架与轴箱之间均简化 成弹簧-阻尼系统。 轨下部分采用板式无砟轨道模型,其中钢轨简化为两端简支的欧拉梁,轨下扣件约束简化为离散点 支撑刚度和阻尼,轨道板考虑成下部受连续分布线性弹簧与线性阻尼支撑的边界自由弹性板[16]。轮轨空 间几何接触关系采用轨迹法进行计算[17]。

轴箱轴承模型采用 6 自由度滚子和 6 自由度保持架模型,并将轴箱后端盖、轴箱前端盖、轴承外圈 当作一个整体,内圈与车轴当作一个整体。滚子与滚道间的相互作用、滚动体与保持架的相互作用、滚 子与内圈挡边的相互作用可参考文献[18] [19],则轴箱装置自由度如表 1 所示。

Table 1. Axle box device degrees of freedom 表 1. 轴箱装置自由度

	切向	横移	径向	侧滚	摇头	旋转
滚子(<i>i</i> =1,2; <i>j</i> =1~21)	arphirij	Yrij	Zrij	¢ rij	ψ_{rij}	eta_{rij}
	纵向	横移	浮沉	侧滚	摇头	旋转
保持架(i=1,2)	<i>x_{cagei}</i>	Ycagei	Zcagei	ϕ_{cagei}	ψ_{cagei}	eta_{cagei}
外圈	x_o	Уo	Z_{O}	与轮对一致		
轴箱箱体	χ_{ab}	Yab	Zab			

车辆模型选用 CRH2 型动车组参数,轴承部分参数如表 2 所示。

Table	2. Geometric parameters of bearing
表 2.	轴承的几何参数

参数	数值	
滚子平均直径/mm	23.0	
滚子组节圆直径/mm	180.5	
单列滚子数	21	
内圈接触角/°	7.75	
外圈接触角/°	10	
滚子有效长度/mm	45	

2.2. 轴承早期缺陷的模拟

由文献[20]获得已损坏的轴箱轴承外圈剥离尺寸为 60 mm×20 mm×0.5 mm,所以选取外圈剥离尺寸 4.5 mm×0.6 mm×0.1 mm ($\delta_{\kappa} \times \delta_{\tilde{\pi}} \times \delta_{\tilde{\pi}}$)作为轴箱轴承外圈早期故障条件,缺陷位于滚道顶部,即接触载 荷最大处。

3. 算法逻辑

① 利用耦合模型获取缺陷轴承的轴箱垂向加速度信号和车速信号。② 轨道激扰频率主要集中在 200 Hz 以下,滤波消除轴箱加速度信号中低频成分。③ 将车速信号转换成车轴的转频对原始滤波后的信号 进行等角度重采样,得到角域重采样信号。④ 对重采样信号进行包络解调,绘制包络时频图,引入故障 特征因子绘制时间-故障特征因子图对轴箱轴承进行实时监测。流程图如图 2 所示。



Figure 2. Algorithm flowchart 图 2. 算法流程图

4. 轴箱振动信号分析与处理

获取车速 300 km/h,轨道随机激扰采用实测的"京津谱"激扰,轴承无缺陷和早期缺陷下的轴箱垂向加速度如图 3 所示。由图 3 可知,无缺陷和早期缺陷下的轴箱垂向加速度几乎一样,无法通过轴箱振幅来判断轴承是否出现缺陷,说明构造的缺陷模型满足轴承早期缺陷的要求。两组信号频率特征如图 4 所示。由图 4 可知,轨道激扰会大幅提高低频振动能量,尤其在 200 Hz 以内的部分提升明显,轴承在 1000~1500 Hz 范围内有一个频率带,频率带中心频率为 1295.7 Hz,对应内圈转动频率 × 双列滚子数。无缺陷和早期缺陷模型频率区别主要集中在 1000 Hz 以上,本文构造外圈缺陷在 300 km/h 的特征频率为 282.2 Hz,图中尖峰为特征频率的倍频,尖峰最大值 1411.15 出现在靠近频率带中心位置。









对信号进行处理,滤去信号中轨道激扰的低频成分,再进行 Hilbert 变换获得时间 - 振幅的包络信号, 并绘制包络时 - 频图。绘制无缺陷和早期缺陷轴箱振动信号的包络时 - 频图,如图 5 所示。相较于无缺 陷轴箱振动信号的包络时 - 频图,早期缺陷下轴箱振动信号的包络时 - 频图中可以清晰地看到平行于时 间轴的条带,条带①、②、③分别为外圈特征频率 282.2 Hz 及其倍频。





Figure 5. Envelope time-frequency diagram of the axle box vibration signal 图 5. 轴箱振动信号包络时频图

列车在实际运行过程中,会出现加减速等工况,获取列车从 300 km/h,减速到 100 km/h 的轴箱垂向 加速度时间历程及频率特性,如图 6 和图 7 所示。对比图 4 和图 7 可以发现,由于列车运行速度的变化, 图 7 看不出外圈缺陷引起的特征频率。



Figure 6. Time history of vertical acceleration of axle box bearing during train deceleration 图 6. 列车减速时, 轴箱轴承垂向加速度时间历程



Figure 7. Frequency characteristics of vertical acceleration of axle box bearing during train deceleration 图 7. 列车减速时, 轴箱轴承垂向加速度频率特征

对信号进行高通滤波、Hilbert 变换绘制包络时 - 频图,如图 8 所示。由图 8 可以看出缺陷特征频率 所对应的倾斜条带,条带所对应频率的大小即为随着车速变化而改变的故障特征频率。



Figure 8. Envelope time-frequency diagram of the axle box vibration signal during train deceleration 图 8. 列车减速时, 轴箱振动信号包络时频图

倾斜的条带虽能反映故障特征频率变化,但不能直观地判定为哪种轴承故障,为此,采用"角域重 采样"对信号进行重采样,处理后的信号再绘制包络时 - 频图,如图 9 所示。对比图 8 和图 9 发现,重 采样处理过的包络时 - 频图中的条带相当于图 8 中的条带绕 0 时刻旋转至与时间轴平行,条带频率值为 0 时刻轴承所对应的故障特征频率。



Figure 9. Envelope time-frequency diagram of the axle box vibration signal after angular domain resampling 图 9. 角域重采样后轴箱振动信号包络时频图

为了消除车速对故障特征频率的影响,引入轴承故障特征因子,计算表达式如式(1)所示。式中, F_0 为外圈故障特征因子, f_0 为外圈故障频率, f_r 为内圈转动频率,d为滚子直径,D为滚道节圆直径, α 为接触角。由式(1)可知,故障特征因子仅与轴承自身参数有关,与转速无关的量。

$$F_0 = \frac{f_0}{f_r} = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \tag{1}$$

对图 9 进行处理,获得时间 - 故障特征因子图,如图 10 所示。图 10 中故障特征因子为 9.15 及其倍数,与理论计算值一致。实际运用过程中可以通过检测时间 - 故障特征因子图实现轴箱轴承故障检测。





5. 结论

 本文将轴箱轴承部件引入到车辆-轨道耦合模型之中并构建轴承早期故障,克服了实际运用工况 中故障信号难以捕捉等问题,获取了带有轴承故障信号的轴箱加速度信号,较为贴近轴承的真实服役情况,对高速列车轴承故障信号获取具有一定的指导意义。

2) 早期轴承故障信号极其微弱,时域信号分析不易察觉,以列车运行速度 300 km/h 为例,频域信号 中轨道激扰主要集中在 200 Hz 以下的低频区域,轴承故障特征主要表现在高频区域(1000 Hz 以上),故障 特征最大幅值所对应的频率出现在以内圈转动频率乘以双列滚子数为中心的频率带内,靠近频率带中心。

3) 在列车运行速度发生变化时,信号的包络时 - 频图依然能够清晰地反映轴承的故障特征,相比于 直接对信号进行 FFT 变换具有明显的优势。

4) 角域重采样技术和轴承故障特征因子能够使故障特征便于观察,本文的信号处理分析处理方法能够对轴箱轴承进行实时故障检测。

参考文献

- Bossley, K.M., Mckendrick, R.J., Harris, C.J. and Mercer, C. (1999) Hybrid Computed Order Tracking. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13, 627-641. <u>https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1225</u>
- [2] Saavedra, P.N. and Rodriguez, C.G. (2005) Accurate Assessment of Computed Order Tracking. Shock and Vibration, 13, 13-32. <u>https://doi.org/10.1155/2006/838097</u>
- [3] Cheng, W., Gao, R.X., Wang, J., Wang, T., Wen, W. and Li, J. (2014) Envelope Deformation in Computed Order Tracking and Error in Order Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 48, 92-102. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.03.004
- [4] Coats, M.D. and Randall, R.B. (2012) Compensating for Speed Variation by Order Tracking with and without a Tacho Signal. In: IMechE, Ed., 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, Elsevier, 727-738. <u>https://doi.org/10.1533/9780857094537.11.727</u>
- [5] 郭瑜, 秦树人, 汤宝平, 等. 基于瞬时频率估计的旋转机械阶比跟踪[J]. 机械工程学报, 2003, 39(3): 32-36.
- [6] 孙宜权, 张英堂, 李志宁, 等. 运用 Vold-Kalman 阶比跟踪的发动机失火故障在线诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(6): 1014-1018+1095.
- [7] Wu, J., Huang, C. and Chen, J. (2005) An Order-Tracking Technique for the Diagnosis of Faults in Rotating Machineries Using a Variable Step-Size Affine Projection Algorithm. NDT & E International, 38, 119-127. <u>https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.07.003</u>
- [8] 滕伟, 安宏文, 马志勇, 柳亦兵. 基于时频滤波的汽轮机半速涡动故障成分提取[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 178-182.
- [9] 孙云嵩,于德介,陈向民,李蓉.基于信号共振稀疏分解的阶比分析及其在齿轮故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2013, 32(16): 88-94.
- [10] 李修文, 阳建宏, 黎敏, 徐金梧. 基于移频技术的短时傅里叶变换阶比分析[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(10): 1190-1196.
- [11] 王天杨,李建勇,程卫东.基于瞬时故障特征频率趋势线和故障特征阶比模板的变转速滚动轴承故障诊断[J]. 振动工程学报,2015,28(6):1006-1014.
- [12] 王天杨,李建勇,程卫东.基于低次故障特征阶比系数的变转速滚动轴承等效转频估计算法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 121-128.
- [13] 王天杨,李建勇,程卫东.基于改进的自适应噪声消除和故障特征阶比谱的齿轮噪源干扰下变转速滚动轴承故 障诊断[J]. 振动与冲击,2014,33(18):7-13.
- [14] 查浩,任尊松,徐宁.高速动车组轴箱轴承振动特性[J]. 机械工程学报,2018,54(16):144-151.
- [15] Zunsong, R. (2019) An Investigation on Wheel/Rail Impact Dynamics with a Three-Dimensional Flat Model. Vehicle System Dynamics, 57, 369-388. <u>https://doi.org/10.1080/00423114.2018.1469774</u>
- [16] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [17] 王开文. 车轮接触点迹线及轮轨接触几何参数的计算[J]. 西南交通大学学报, 1984(1): 89-99.

- [18] Walters, C.T. (1971) The Dynamics of Ball Bearings. Journal of Lubrication Technology, 93, 1-10. <u>https://doi.org/10.1115/1.3451516</u>
- [19] Gupta, P.K. (1979) Dynamics of Rolling-Element Bearings—Part I: Cylindrical Roller Bearing Analysis. Journal of Lubrication Technology, 101, 293-302. <u>https://doi.org/10.1115/1.3453357</u>
- [20] 廖英英, 刘永强, 杨绍普, 梁帅. 铁道车辆滚动轴承外圈故障数值模拟与实验[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(3): 539-543+594.