

文章编号:1005-0523(2021)02-0110-05

列车轴承声学信号中心时间获取及短周期校正方法研究

孙亚丽¹,李花²,赵兴²,费继友²

(大连交通大学 1.机械工程学院;2.机车车辆工程学院,辽宁 大连 116028)

摘要:轨边声学检测系统通常位于铁路两旁,这就使得列车和声学采集装置之间存在高速的相对运动,进而导致所采集到的声源信号受到严重的多普勒畸变干扰,给列车走行部件的声学检测带来了极大的挑战。针对这一问题,提出了一种声学信号中心时间获取及短周期多普勒校正方法。文章首先根据莫尔斯声学理论获得了声学信号中心时间处的畸变情况;进而通过匹配畸变信号和理论信号的时频曲线获得了最优中心时间;最后结合所得到的最优中心时间点对接收到的声学信号进行校正,并通过仿真和实验验证了该方法的有效性和正确性。

关键词:故障诊断;多普勒畸变;中心时间;声学信号

中图分类号:U279

文献标志码:A

本文引用格式:孙亚丽,李花,赵兴,等.列车轴承声学信号中心时间获取及短周期校正方法研究[J].华东交通大学学报,2021,38(2):110-114.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20210416.012

Short-Period Doppler Correction Method of Rolling Bearing Based on Center Time of Acoustic Signal

Sun Yali¹, Li Hua², Zhao Xing², Fei Jiyu²

(Dalian Jiaotong University 1. College of Mechanical Engineering; 2. College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian 116028, China)

Abstract: The trackside acoustic detection systems are usually located on the sides of the railway, which causes high speed motion between the train and the acoustic acquisition device relatively. As a result, the collected sound source signals are interfered by severe Doppler distortion, which brings great challenges to the acoustic detection of train running components. Aiming at this problem, a short-period Doppler correction method based on center time was proposed. First, the distortion at the center time of the acoustic signal was obtained according to the Morse acoustic theory. Then, the optimal center time was obtained by matching the time-frequency curve of the distortion signal and the original signal. Finally, the received acoustic signal was corrected based on the optimal center time point, and the effectiveness and correctness of the method were verified through simulation and experiment.

Key words: fault diagnosis; Doppler distortion; center time; acoustic signal

Citation format: SUN Y L, LI H, ZHAO X, et al. Short-period doppler correction method of rolling bearing based on center time of acoustic signal[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(2): 110-114.

收稿日期:2020-12-11

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(62001079)

作者简介:孙亚丽(1988—),女,博士研究生,研究方向为高速列车轴承故障诊断。E-mail:184977396@qq.com。

高速列车走行部件的良好运行直接关系到列车的行驶安全,尤其是滚动轴承的服役状态影响列车能否平稳运行^[1]。由于轴承零部件通常在高转速、高温等复杂工况下运行,极易出现不同形式且不同程度的损伤^[2]。该种损伤在早期往往难以发现,初始微小的损伤在极端工况下会在短时间内迅速扩大^[3-4]。列车声音检测系统(acoustic defective bearing detector, ADBD)通过轨边声音采集系统对列车运行发出的声音进行收集,并检测出轴承发出的声音频率,从而判断轴承的运行状态,其准确率达到97%^[5]。作为一种非接触式测量方法,列车声音检测系统具有可以发现早期故障、制造成本低等优势^[6]。在实际应用中,为了能够采用单一系统检测多辆列车,声学采集系统通常会放置于轨道两旁,这就使得所采集到的声学信号存在严重的多普勒畸变现象,且该种现象随着列车速度的提升而越发明显,给声音信号的分析带来了巨大的挑战^[7-10]。

目前国内外学者针对轨边声学信号多普勒畸变的消除进行了相关的研究工作,部分学者采用了短时傅里叶变换^[11-12],假设相关参数进行重采样^[13],以及伪时频分析^[14]等方法,为轨边声学多普勒校正的研究提供了有利的参考。然而在校正过程中时频幅值曲线的中心时间至关重要,目前现有的校正方法大多存在对中心时间精度获取不足导致校正后特征频率不明显的问题^[15-16]。基于上述问题,本文提出一种轴承多普勒信号中心时间获取及短周期校正方法,可以有效提高多普勒信号的校正精度和效率。

1 相关理论模型及原理分析

1.1 多普勒畸变效应及其产生原理

多普勒现象是指声源与观察者之间存在相对运动,两者在接近过程中接收到的声源频率会相对实际发射频率较高,而两者在远离过程中接收到的频率会相对声源发射频率降低。如果声源与观察者处于同一直线上,且声源直线运行速度恒定,则尽管观察者接收到的声源信号仍存在有频率上的变化,但是该变化量是恒定值,并不随着声源的移动

而发生变化。如果声源和观察者并未处于同一直线上,而是两者之间存在一定的距离,那么在这种情况下,即使声源依然是匀速直线运动,但是声源与观察者之间的直线距离 R_t 和相对速度 V 则是随着时间不断改变,且这种改变是一种非线性变化,进而造成复杂的非线性多普勒畸变,这种情况与轨边麦克风检测系统相类似,麦克风位于铁轨旁大约1 m左右的位置,其简化模型如图1所示,麦克风所接收到的声源信号具有明显的非线性多普勒畸变。图1中 S 代表声源位置, O 代表麦克风的位置,从图中可以看出,当声源 S 位于 S_3 时,其与麦克风在铁轨上的垂直投影在同一位置,这就是麦克风与声源距离最近的位置 l 。可以判断出此时麦克风接收到的声音信号的时间最短,假设列车做直线运动,则该时间点 t_c 也是麦克风所接收到的时频幅值曲线的中心时间。

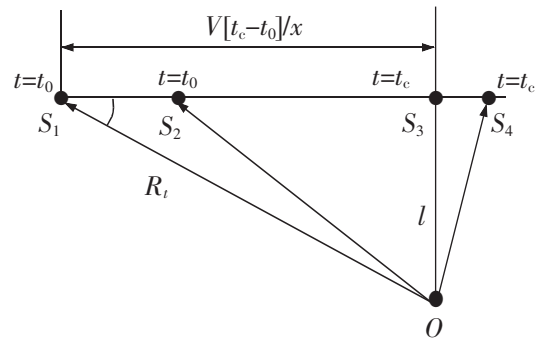


图1 轨边声学系统简化模型
Fig.1 Simplified geometric model of ADBD

1.2 中心时间畸变特征

根据图1所表示的声源与麦克风的相对运动系,假设为声源运动速度且为恒定值,代表总运动时间,表示为麦克风第一次接收到声源信号的时间,则为声源第一次发射的时间。代表声源运行到离麦克风最近位置的时间,代表两者最近时麦克风接收到的时间,麦克风与声源之间的距离长度为,最短距离为。为了有效的计算声源发生频率和幅值与麦克风接收到的频率和幅值间的关联关系,首先需要进行如下假设:①声源为单级点;②声源声速为亚声速;③声音在空气中传播并未产生任何能量损失。

首先对发射频率和接收频率进行分析,由图1可知,在初始时刻,接收时间 t_0 和发射时间 τ_0 之间存在如下关系

$$t_0 = \tau_0 + R_t / c \quad (1)$$

其中 c 为声速。对式(1)进行全微分,可以获得

$$dt_0 = (1 + V \cos\theta / c) d\tau_0 \quad (2)$$

其中 θ 为麦克风和声源之间最短路径与声源行进路径之间的夹角。进一步的根据瞬时频率定义,对式(2)进行转换,可以获得麦克风接收频率 f_i 与声源发射频率 f_r 之间的关系,如式(3)所示

$$f_i = \left(\frac{c}{c - V \cos\theta} \right) f_r \quad (3)$$

当声源对与麦克风正相对时,声音传播路径与声源行进路径之间的夹角为 0° ,即 $\cos\theta$ 为 0。此时根据式(3)可以发现,接收频率与发射频率相同,即可以判断出,在中心时间时,麦克风接收到的声源信号不存在频率畸变。

接下来对发射幅值和接收幅值进行分析,根据莫尔斯声学理论,可以获得麦克风接收到的声压信号 p 的表达式

$$p_r = \frac{q_r'}{4\pi R(1-M \cos\theta)^2} + \frac{q_r V(\cos\theta - M)}{4\pi R^2(1-M \cos\theta)^3} = A + B \quad (4)$$

式中: A 为振幅调制系数; B 为原信号声压; M 为马赫数。

进一步的可以得到发射信号幅值 S_r 与接收信号幅值 S_i 之间的关系

$$S_i = \left(\frac{l}{R(1-\cos\theta)^2} \right) S_r \quad (5)$$

根据式(5)可以发现当 $l=R$ 时,即表示声源正相对麦克风,此时 $\cos\theta=0$,在中心时间位置接收信号幅值和发射信号幅值相同。综上所述,根据式(3)和式(5)可以发现当声源与麦克风所垂直时,所接收到的信号为无畸变信号,此时的时频曲线与未畸变的原始时频曲线是相同,进而通过对比畸变时频曲线和原始时频曲线,其两者相差最小的位置即为麦克风接收时间轴的中心位置。

2 中心时间获取及短周期校正方法

2.1 中心时间获取方法

根据上述分析,可以发现中心时间处多普勒畸变最小,在该点处麦克风接收到的信号与原始声源信号相差最小。基于此,本文提出一种多普勒信号中心时间获取及短周期校正方法,其校正过程的流程图如图2所示。

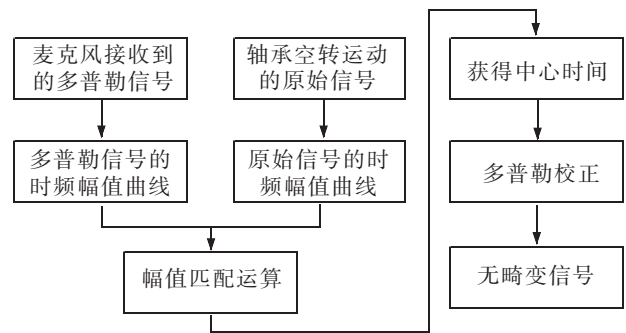


图2 多普勒信号校正流程
Fig.2 Flowchart of Doppler distortion removal

具体校正方法为,首先获取原始声音信号的在静止条件下的时频幅值曲线,并与接收到具有多普勒畸变信号的时频幅值曲线进行匹配分析,两者匹配后其误差的最小的点即为中心时间点,进而根据所获得最优的中心时间点对接收到的声学信号进行校正,以此来获得无畸变的信号,并对其进行检测。

2.2 仿真分析验证

为了验证上述方法的正确性,首先结合莫尔斯理论,对其进行仿真验证,所仿真的多普勒畸变信号具有3个不同的频率。无多普勒畸变的原始信号如下

$$p_r = \sin 2\pi f_{c1}\tau + \sin 2\pi f_{c2}\tau + \sin 2\pi f_{c3}\tau \quad (6)$$

式中: τ 为信号发射时间。信号预设了3个特征频率,为了使信号不能够简单地通过带通滤波器获得其中任何一个频率变化,3个特征频率相接近,分别为 $f_{c1}=1\ 000\ \text{Hz}$, $f_{c2}=1\ 100\ \text{Hz}$, $f_{c3}=1\ 200\ \text{Hz}$ 。并且设定基本参数为:麦克风采样频率 $6\ 000\ \text{Hz}$;麦克风距离铁轨距离: $2\ \text{m}$;列车运行速度为 $20\ \text{m/s}$;声音在空气中传播速度为 $340\ \text{m/s}$;仿真总时长为 $1.4\ \text{s}$ 。通过仿真软件并根据式(6)可以获得无多普勒畸变信号仿真曲线,如图3所示。

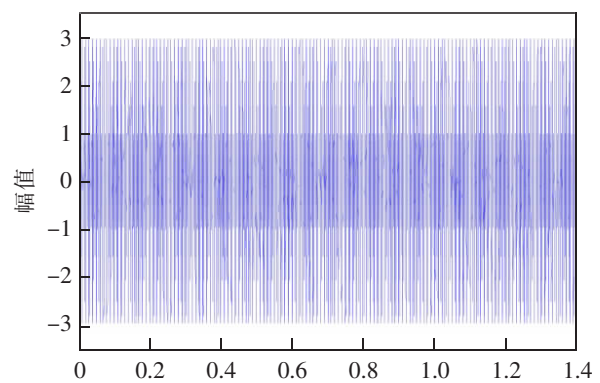


图3 无畸变信号仿真曲线
Fig.3 Simulation of original signal

基于上述分析,根据文献[1]中提出的公式,可以获得原始信号的多普勒畸变表达式,如式(7)所示

$$p = \frac{l}{R(1-M \cos\theta)^2} \times \cos(2\pi f_{c1}(t+R/c)) + \frac{l}{R(1-M \cos\theta)^2} \times \cos(2\pi f_{c2}(t+R/c)) - \frac{l}{R(1-M \cos\theta)^2} \times \sin(2\pi f_{c3}(t+R/c)) \quad (7)$$

式中:每一个乘积符号左侧部分决定了该信号的幅值大小,而右侧则是与信号的相位有关。进一步的对相位进行求导,即可得出频率随时间的变化

$$f = f_0 \frac{M(Vt_c - Vt) + \sqrt{(Vt_c - Vt)^2 + (1 - M^2)l^2}}{(1 - M^2)\sqrt{(Vt_c - Vt)^2 + (1 - M^2)l^2}} \quad (8)$$

基于上述分析可以获得式(6)的多普勒畸变信号及其频谱图,其中多普勒畸变的时频幅值曲线如图 4 所示。

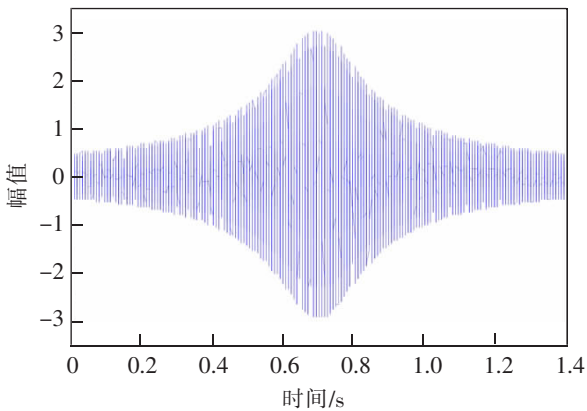


图 4 多普勒畸变信号时频曲线
Fig.4 Simulation of Doppler signal

进一步需要对图 4 和图 3 进行匹配运算,由于两条曲线具有对称性,仅选取曲线上半部分进行对比,通过参数模拟的时频幅值曲线与原始信号的时频幅值曲线进行幅值匹配运算,可以获得两条曲线之间的匹配误差曲线,如图 5 所示,相减后两条曲线差值最小的点即为中心时间点,可以发现匹配误差极小值出现在 $\tau = 0.7$ s 时,也就是 0.7 s 处为声音信号的中心时间点。

在获得中心时间后,可以根据改时间点进行多普勒畸变的消除。根据列车运行时车轮转动的特征可以发现,如果车轮任一位置出现缺陷,必定会中心时间处车轮滚动左右两周期内出现带有缺陷信号,通过还原这两周期内的信号就可以发现是否存在缺陷。通过列车行驶速度和车轮直径,求取了

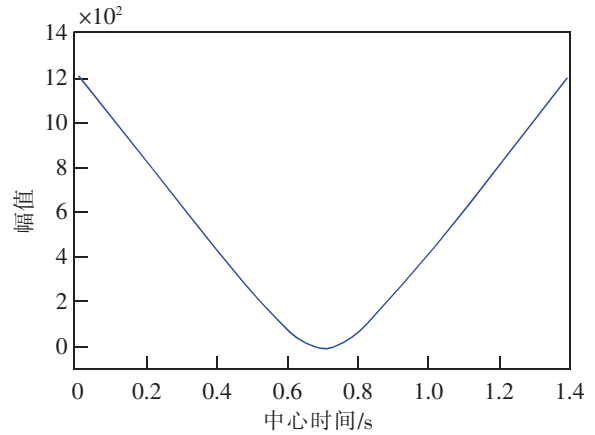


图 5 匹配误差曲线
Fig.5 Curve of matching error

车轮滚动两周期的时长,并对这一段时间内的畸变信号进行校正,由于两周期时间较短约为 0.314 s,因此仅存在较少数据组,在校正中不需要通过重插值的方法即可实现多普勒信号的校正,根据式(3)和式(4)对畸变信号进行反解,可以获得校正后的曲线。所提出的校正方法通过仿真计算与文献[2]相对比,计算效率提高了 15%左右,校正准确率提高了 10%左右。

3 实际信号处理

除了采用仿真分析的方法对上述理论分析进行验证外,还采用了实验的方法进行验证,自主设计了轴承运行实验平台,用于获得列车轴承静止及运动状态下的声学信号。实验中选用的车轮为我国高速列车常用的车轮,具体参数为车轮外直径 840 mm,轴承节径为 165 mm,滚子数为 16 个,滚子直径为 25 mm,采用 6 个麦克风同时测量,每个麦克风收声距离为 1.2 m,麦克风采样频率为 76 800 Hz,灵敏度为 316 V/Pa,模拟列车行驶速度为 25 m/s,实验中主轴转速为 1 400 r/min。结合轴承外圈与滚子之间的运动关系,可以获得理论上外圈故障频率为 158.38 Hz。

结合本文提出的短周期多普勒校正方法对轴承外圈故障信号进行多普勒消除并分析。原始外圈故障信号如图 6 所示,存在有一个较宽的频带模糊了故障频率,导致无法从图中直接有效的读取故障频率。通过提出的短周期校正方法所校正后的信号如图 7 所示,可以看出多普勒信号基本被消除,同时可以发现频带也被有效消除,能够清晰的读出外圈故障频率为

158.4 Hz。通过上述分析可以断定,所提出的方法可以有效的解决多普勒畸变问题,同时实验结果与理论结果相接近,外圈故障信号有效地得到了校正。

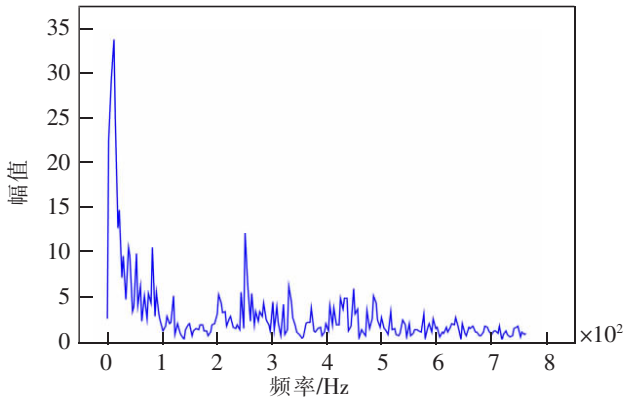


图6 原始外圈信号频谱图

Fig.6 Spectrum of bearing outer ring before removing Doppler distortion

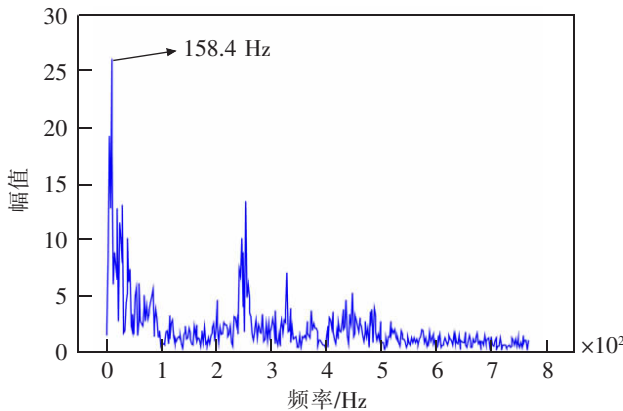


图7 校正后轴承外圈信号频谱图

Fig.7 Spectrum of bearing outer ring after removing Doppler distortion

4 结论

本文提出了一种轴承多普勒信号中心时间获取及短周期校正方法。

1) 考虑实际列车运行与麦克风采集系统的位置关系,对关键点采用了数学公式的表达方法,并根据摩尔斯声学理论获得了中心时间处多普勒畸变情况,通过匹配畸变信号和声源信号时频幅值曲线,以最小误差为匹配目标,获得了最优中心时间;

2) 根据最优中心时间获取该点处左右两周期的畸变信号并进行多普勒校正,进而反推出原始声源信号。通过对比仿真及实验结果,发现该方法可以有效的消除多普勒畸变现象,从而准确的判断缺陷。

参考文献:

- [1] 张尚斌. 列车轴承轨边声学诊断中故障声谱识别的时变阵列分析技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- [2] 张尚斌,张海滨,欧阳可赛,等.基于时频幅值匹配的列车轴承故障声学信号的多普勒校正方法[J]. 振动与冲击,2016,35(14):101-106.
- [3] 张翱. 列车轴承故障道旁声学诊断关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2014.
- [4] 涂文兵,陈超,项云鹏. 高速列车轴箱轴承滚动体打滑特性研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(5):107-114.
- [5] 朱军. 滚动轴承非平稳信号故障诊断若干方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
- [6] WANG J, HE Q, KONG F. A new synthetic detection technique for trackside acoustic identification of railroad roller bearing defects[J]. Applied Acoustics, 2014, 85: 69-81.
- [7] LU S, HE Q, ZHANG H, et al. Rotating machine fault diagnosis through enhanced stochastic resonance by full-wave signal construction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 85: 82-97.
- [8] ZHANG H, LU S, HE Q, et al. Multi-bearing defect detection with trackside acoustic signal based on a pseudo time-frequency analysis and Dopplerlet filter[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016(70/71): 176-200.
- [9] ZHANG H, XIONG W, ZHANG S, et al. Nonstationary weak signal detection based on normalization stochastic resonance with varying parameters[J]. Sādhanā, 2016, 41(6): 621-632.
- [10] ZHAO H, XU J, ZHANG H, et al. Research on subdivision system of sin-cos encoder based on zero phase bandpass filter[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3041.
- [11] ZHANG H, XIONG X, ZHU P, et al. Research of a new theoretical model of innovative design methodology[J]. Advanced Materials Research, 2013, 853: 565-570.
- [12] CHRISTOS Y, JEDRZEJ M, KONSTANTINOS R, et al. Multicomponent decomposition of a time-varying acoustic doppler signal generated by a passing railway vehicle using complex shifted morlet wavelets[J]. Transportation Research Part C, 2014, 44: 34-51.
- [13] DYBA A J, RADKOWSKI S. Reduction of doppler effect for the needs of wayside condition monitoring system of railway vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(1): 125-136.
- [14] LIU F, HE Q. A time domain correction method for Doppler-distortion signal from acoustic moving source[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2014(1): 32-41.
- [15] HE Q, WANG J, HU F, et al. Wayside acoustic diagnosis of defective train bearings based on signal resampling and information enhancement[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(21): 5635-5649.
- [16] ZHANG H, LU S, ZHANG S, et al. A data-collection and fault diagnosis system of train bearing based on the C# and multi-wireless-terminal[J]. Journal of Software, 2015, 10(2): 201-212.