DOI: 10.3901/JME.2020.18.116

形态学滤波方法在车轮非圆化信号降噪中的应用*

陶功权 谢清林 刘晓龙 任德祥 温泽峰
(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 铁道车辆车轮踏面通常存在麻坑等缺陷, 在车轮非圆化测试信号中往往包含这些干扰信号, 其尺寸小于轮轨接触斑尺寸。采用形态学滤波方法对车轮非圆化信号进行降噪处理。研究不同尺度和不同形状结构元素对车轮非圆化信号的降噪效果。针对形态学滤波在信号“细节刻画”上较为粗糙的缺点, 构建形态学滤波+三次样条平滑的降噪方法, 并且对比新方法与传统车轮非圆化信号降噪方法的降噪效果。以不同降噪方法得到的车轮非圆化信号作为输入, 研究车轮非圆化对轮轨动力相互作用的影响。结果表明, 采用幅值为 1 mm 宽度为 4 mm 的三角形结构元素进行形态学滤波+三次样条平滑的降噪方法能更好地滤除车轮非圆化信号中的噪声信号, 滤波效果优于传统车轮非圆化信号处理方法, 并且能够保留原始信号特征。

关键词: 车轮非圆化; 数学形态学; 滤波; 降噪; 轮轨力

中图分类号: U211

Application of Morphology Filtering Method in the De-noising of Wheel Out-of-roundness Signals

TAO Gongquan XIE Qinglin LIU Xiaolong REN Dexiang WEN Zefeng
(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Wheel defects, such as pitting, generally occur on the tread of railway vehicle wheels. The measured wheel out-of-roundness (OOR) signals usually contain interference signals induced by pitting or other defects. The dimension of pitting is less than wheel-rail contact patch. The morphology filtering method is used to de-noise the wheel OOR signals. The influence of structure element's dimension and shape of morphology filter on the de-noising of wheel OOR signals is investigated. A new de-noising method combining morphology filtering with cubic spline smoothing is proposed to overcome the shortcoming of morphology filter. The results of wheel OOR signals processed using the new and ordinary methods are compared. Moreover, the influence of wheel OOR on wheel-rail dynamic interaction is also investigated by using wheel OOR signals from different de-noising methods. The results indicate that the morphology filter with triangular structure element, of which the amplitude and width are 1 mm and 4 mm, respectively, combined with cubic spline smoothing is more suitable in the de-noising of wheel OOR signals. The results of this method applied to process wheel OOR signals show that the signal-noise ratio of the processed signal is much higher than the ordinary method and can keep the main characteristics of the original signal.

Key words: wheel out-of-roundness; mathematical morphology; filter; de-noising; wheel-rail force

0 前言

车轮非圆化现象广泛存在于铁路运输现场^[1]。严重的车轮非圆化, 比如车轮多边形磨耗, 将会加剧轮轨动力相互作用, 产生较大的轮轨冲击噪声, 甚至会显著增加车内噪声^[2]。高阶车轮多边形磨耗

会导致高频轮轨力, 而目前的轮轨力测试技术很难连续测量得到高频的轮轨力, 往往需要通过车辆-轨道动力学仿真计算来实现。车轮非圆化信号作为研究其对轮轨系统动力相互作用和轮轨噪声的重要输入, 输入数据的准确性和合理性将直接影响仿真结果。目前车轮非圆化测量总体上可分为直接检测和间接检测两大类。间接检测主要有振动加速度法和冲击载荷法, 该类方法无法准确识别车轮非圆的长度和深度。直接检测法主要有机械接触式测量和激光非接触式测量等方法, 该方法虽然要求在列车静止时或车辆低速条件下完成, 但是其检测准确度

* 国家重点研发计划(2016YFB1200501-005)、国家自然科学基金(51875484)、四川省科技计划(2019YFH0053)、牵引动力国家重点实验室自主课题(2020TPL-T03、2020TPL-T12)和中央高校基本科研业务费专项资金(2682020CX52)资助项目。20190930 收到初稿, 20200330 收到修改稿

较高。对于直接检测, 由于测试设备位移传感器探头尺寸非常小, 测试得到的车轮非圆化信号中可能会包含一些由细小的车轮表面缺陷引起的干扰信号, 比如车轮表面的麻坑(图 1)。此外, 测试过程中接触式位移传感器探头与车轮表面局部缺陷的冲击会在测试数据中引入局部的干扰脉冲信号。车轮表面麻坑或由测试过程中引入的干扰信号其尺寸通常小于轮轨接触斑的尺寸, 在数据处理时对车轮非圆化信号进行降噪处理显得尤为重要。

图 1 机车车轮踏面形貌照片

在对信号进行降噪处理时需要尽可能地保持原始信号特征不变, 滤除干扰噪声。基于时域、频域或时频特征构建的传统数字滤波器在信号降噪方面得到广泛应用, 但这种数字滤波器存在时滞和相移等缺陷, 可能会导致原始信号失真。相比于传统数字滤波器, 基于数学形态学的滤波方法具有运算简单、计算速度快、鲁棒性好、物理意义明确等优点。近年来学者们通过构建具有针对性的形态学滤波器, 研究了形态学滤波方法在脑电信号^[3]、心电信号^[4]、CCD 信号^[5]、电力监测信号^[6]、旋转机械振动信号^[7-9]、抵肩力信号^[10]、碰摩声发射信号^[11]降噪中的应用, 表明形态学滤波方法在处理各种复杂信号时均能取得较好的效果。胡爱军等^[12]研究了形态学滤波器在处理振动信号时的频响特性, 为结构元素尺度的选取提供了重要的参考依据。形态学滤波已成功应用于不同信号的降噪中, 在利用形态学滤波时需要针对信号本身的特点和干扰噪声信号的特点设计合理的滤波器。

由于车轮非圆化测试信号中含有复杂的噪声信号, 而目前基于相关标准的车轮非圆化信号处理方法不能较好地处理车轮非圆化测试数据中的噪声信号。因此, 本文提出一种结合形态学滤波和三次样条平滑相结合的车轮非圆化信号降噪方法, 并且与目前已有的车轮非圆化数据处理方法进行对比, 研究采用不同方法处理的车轮非圆化信号对轮轨动态相互作用的影响。

1 车轮非圆化信号降噪方法

1.1 基于 EN15610 的车轮非圆化信号降噪方法

对于车轮非圆化信号的处理目前没有相应的标准, 通常参考钢轨粗糙度数据处理标准 EN15610^[13]。该标准中采用了两个步骤来对测试信号进行降噪处理, 分别是毛刺移除和曲率平滑。

1.1.1 毛刺移除

EN15610 标准中给出了钢轨粗糙度数据处理时毛刺移除技术。根据该标准的规定, 测试数据中的毛刺可以通过数据的二阶导数和一阶导数进行识别。当测试数据的二阶导数 $d^2r/dx^2 < -10^7 \mu\text{m}/\text{m}^2$, 并且一阶导数 dr/dx 的符号相反时, 即判定该点为奇异数据, 需要从测试数据中剔除, 其中 $r(x)$ 表示粗糙度数据。EN15610 标准中仅对上凸型的毛刺进行了处理, 而对下凹型的毛刺未做要求。因此, 在处理车轮数据时仅需要将毛刺数据识别准则更改为 $|d^2r/dx^2| > 10^7 \mu\text{m}/\text{m}^2$, 并且一阶导数 dr/dx 的符号相反, 即可同时识别上凸型和下凹型的毛刺。

毛刺的宽度由毛刺附近信号一阶导数的绝对值确定, $|dr/dx| < 5 \times 10^3 \mu\text{m}/\text{m}$ 。当毛刺的高度与跨度满足如下关系时通过线性插值将毛刺移除

$$h > w^2 / a \quad (1)$$

式中, h 为毛刺高度; w 为毛刺宽度, 常数 $a=3 \text{ m}$ 。

1.1.2 曲率平滑

在测试数据中可能会存在一些小的毛刺, 其还达不到第 1.1.1 节中毛刺剔除准则的要求。但毛刺两端数据的间隔比测试探针的尺寸还小, 显然这也是不真实的数据, 需要进行曲率平滑处理。

采用半径为 0.375 m , 宽度为 41 个数据点的圆弧形结构元素 $C(t)$ 对信号进行曲率平滑。圆弧的中心位于 x_i 处, 圆心在 $r(x)$ 上方, 将圆弧形结构元素沿粗糙度函数 $r(x)$ 移动, 通过式(2)即可得到曲率平滑后的粗糙度

$$r'(x_i) = \max(r(x) - C(t)) + r(x_i) \quad (2)$$

1.2 数学形态学滤波器的构造

数学形态学最基本的算子包括腐蚀、膨胀、开和闭^[14]。设原始信号 $r(n)$ 为定义在 $R=(0, 1, \dots, N-1)$ 上的离散函数, 定义结构元素 $g(n)$ 为 $G=(0, 1, \dots, M-1)$ 上的离散函数, 且 $N \geq M$, 则腐蚀和膨胀的定义如下

$$r \ominus g(n) = \min(r(n+m) - g(m)) \quad (3)$$

$$r \oplus g(n) = \min(r(n-m) + g(m)) \quad (4)$$

式中, 符号 $\ominus$ 和 $\oplus$ 分别表示腐蚀和膨胀。

开和闭为腐蚀和膨胀的不同组合, 定义如下

$$(r \circ g)(n) = (r \ominus g \oplus g)(n) \quad (5)$$

$$(r \bullet g)(n) = (r \oplus g \ominus g)(n) \quad (6)$$

式中, 符号 $\circ$ 和 $\bullet$ 分别表示开和闭。

通过将形态学四类基本算子进行不同组合, 可以得到不同的形态学算子。文献[15]中总结了形态学四类基本算子和由此衍生出来的另外 7 类算子的特性, 发现闭-开&开-闭平均算子具有最优的滤波效果, 其定义如下

$$r_{\text{CO}\&\text{OC}}(n) = \frac{r_{\text{CO}}(n) + r_{\text{OC}}(n)}{2} \quad (7)$$

式中, $r_{\text{CO}}(n)$ 和 $r_{\text{OC}}(n)$ 分别为闭-开和开-闭算子, 其定义分别如式(8)、(9)所示

$$r_{\text{CO}}(n) = (r \bullet g \circ g)(n) \quad (8)$$

$$r_{\text{OC}}(n) = (r \circ g \bullet g)(n) \quad (9)$$

2 车轮非圆化信号处理结果对比

采用第1节中介绍的 EN15610 标准中降噪方法和形态学滤波降噪方法对车轮非圆化信号进行处理, 详细对比两种不同方法的降噪效果。

2.1 仿真信号的生成

实测的车轮非圆化信号进行离散傅里叶变换, 可以得到车轮非圆化的窄带频谱。利用实测车轮周长除以窄带频谱中车轮非圆化的波长即可得到以阶次表示的车轮非圆化特征。图2给出了一个机车车轮非圆化阶次前 100 阶的测试结果。以该车轮前 100 阶非圆化作为输入, 生成后续仿真计算用的模拟信号。

图2 实测机车车轮非圆化阶次

假设车轮非圆化的模拟信号为车轮前 100 阶非圆化的叠加, 即 100 个具有不同幅值、不同频率和相位的正弦函数叠加, 具有如下形式

$$r(x) = \sum_{i=1}^{100} A_i \sin\left(\frac{i}{2\pi R} 2\pi x + \varphi_i\right) \quad (10)$$

式中, A_i 为第 i 阶非圆化的幅值; φ_i 为第 i 阶非圆化的相位, 通过随机生成得到; R 为车轮半径, 取 $R=625$ mm。

第 i 阶非圆化的幅值 A_i 通过图 2 中车轮非圆化阶次反求得到

$$A_i = \sqrt{2} \times 10^{L_i/20} \quad (11)$$

式中, L_i 为图 2 中第 i 阶车轮非圆化的粗糙度水平。

通过上述方法得到图 3 上图所示的模拟信号。

前 100 阶车轮非圆化最短波长为 39.25 mm, 不包含车轮表面麻坑等缺陷引起的干扰信号。将某一车轮表面麻坑严重的车轮非圆化实测信号采用 EN15610 方法进行处理, 利用原始信号减去处理后的信号, 得到噪声信号, 如图 3 中间图所示。将噪声信号叠加至模拟信号中, 得到如图 3 下图所示的含噪信号。所有信号的采样间隔为 1 mm。接下来将讨论采用不同方法处理含噪信号的降噪效果。

图3 车轮非圆化仿真信号

2.2 数学形态学滤波器中结构元素的选取

形态学滤波中结构元素的选取对降噪效果具有较大的影响。常用的结构元素包括扁平形、半圆形、正弦形和三角形等。对于扁平形结构元素, 其尺度仅由结构元素的宽度决定; 对于半圆形、正弦形和三角形结构元素, 其尺度由结构元素的宽度和幅值共同决定。

采用信噪比来评价不同结构元素的降噪效果, 信噪比定义如下

$$\lambda_{\text{SNR}} = 10 \lg(P_r / P_s) \quad (12)$$

式中, P_r 和 P_s 分别为原始信号的功率和滤波后信号的功率。

原始信号的功率 $P_r = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n r^2(n)$, 滤波后信号的

功率 $P_s = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n s^2(n)$, 式中 $r(n)$ 为原始信号, $s(n)$ 为滤波后信号。通常信噪比越高则表示去噪效果越好。

图 4 为不同宽度扁平形结构元素滤波效果信噪比。由图 4 可知, 随着结构元素宽度的增加降噪效

果逐渐降低, 结构元素宽度为 5 个数据点时(即 4 mm)取得最佳的滤波效果, 信噪比为 17.4 dB。

图 4 不同尺度扁平结构元素滤波结果的信噪比

图 5~7 依次为不同尺度的半圆形、正弦形和三角形结构元素滤波效果信噪比。图 5~7 中横坐标为结构元素宽度, 以数据点个数表示, 纵坐标为结构元素的幅值, 图中等值线即为信噪比。对于半圆形结构元素, 当结构元素宽度一定, 并大于 10 个数据点时, 信噪比随着幅值增大而逐渐增大, 最终趋于稳定; 当结构元素幅值一定时, 信噪比基本随着数据点数的增加而降低; 当结构元素宽度为 5 个数据点时(即 4 mm)取得最佳的滤波效果, 信噪比为 17.4 dB, 且基本不随结构元素幅值的变化而变化。对于正弦形和三角形结构元素, 结构元素尺度对信噪比的影响规律类似, 结构元素宽度对信噪比的影响更大, 在幅值一定时信噪比随着结构元素宽度的增加呈

图 5 不同尺度半圆形结构元素滤波结果的信噪比

图 6 不同尺度正弦形结构元素滤波结果的信噪比

图 7 不同尺度三角形结构元素滤波结果的信噪比

先增大后减小的变化趋势, 在宽度为 5 个数据点幅值较小时取得最高的信噪比, 最高信噪比约为 17.6 dB。

通过以上分析可以发现, 不管采用哪类结构元素, 当结构元素的宽度为 5 个数据点时均取得最高的信噪比, 这可能与噪声信号的特征有关。数据点较少时半圆形和正弦形结构元素形状均与三角形类似。图 8 给出了噪声信号的局部放大图。由图 8 可知, 由车轮踏面麻坑所引起的干扰噪声信号类似于三角形脉冲, 宽度基本在 4 mm 左右。当结构元素的形状与噪声信号的形状类似时形态学滤波能取得非常好的降噪效果。

图 8 噪声信号局部放大图

2.3 不同滤波方法车轮非圆化信号降噪效果对比

由第 2.2 节的分析可知, 当采用宽度为 5 个数据点, 幅值为 1 mm 的三角形结构元素对车轮非圆化信号进行处理时降噪效果最佳。图 9 给出了 EN15610 滤波方法与形态学滤波方法对图 3 中含噪信号的处理结果。两种方法均取得了较好的滤波效果, 处理后信号的波形特征与原始无噪声信号基本一致, EN15610 滤波方法与形态学滤波方法滤波后信噪比分别为 10.9 dB 和 17.6 dB。虽然形态学滤波取得了非常好的降噪效果, 但其在信号的“细节刻画”上并不太理想, 处理后的信号较为粗糙, 如图 10 中实线所示。考虑到三次样条平滑具有非常好的平滑作用, 提出采用形态学滤波+三次样条平滑相结合的降噪方法, 进一步对车轮非圆化含噪信号进行降噪处理, 处理后的信号如图 10 中虚线所示。由图 10 可知, 采用该方法处理后的信号既保证了信号波形特征不变, 同时在信号的细节处理上也更平滑,

信噪比进一步提升至 24.4 dB。

图9 不同方法车轮非圆化信号滤波结果

图10 形态学滤波+三次样条平滑处理结果局部放大图

通过对图3中模拟信号、图9中EN15610方法处理后信号和图10中形态学滤波+三次样条平滑处理后的信号进行离散傅里叶变换,得到车轮非圆化信号的窄带波长特性(图11)。同时按照EN15610标准提供的方法计算了车轮非圆化信号的1/3倍频程波长(图12)。由波长特性分析结果可知,当波长大于60 mm时两种滤波方法得到的车轮粗糙度水平

图11 不同滤波方法车轮非圆化信号窄带波长

图12 不同滤波方法车轮非圆化信号1/3倍频程波长

与模拟信号类似,波长更短时形态学滤波+三次样条平滑得到的车轮粗糙度水平与模拟信号更为接近。车轮非圆化作为轮轨系统重要的激励源,对轮轨动态相互作用具有重要影响,在第3节中将对不同方法滤波得到的车轮非圆化信号对轮轨动力作用的影响展开分析。

3 车轮非圆化对轮轨相互作用的影响

基于车辆-轨道耦合动力学理论^[16]建立了机车-轨道刚柔耦合动力学模型(图13)。

图13 机车-轨道刚柔耦合动力学模型

模型中轮对和构架采用有限元建模,详细考虑了其柔性,电机和车体考虑为刚体。钢轨采用铁木辛柯梁模拟,轨枕和道床考虑为刚性质量体。车辆悬挂元件和轨道各部件之间的连接采用三维弹簧-阻尼单元模拟。详细的动力学模型建模过程可参见文献[17]。采用Hertz非线性弹性接触理论求解机车-轨道耦合系统轮轨法向力,可表示为^[16]

$$P(t) = \begin{cases} \left(\frac{1}{G_H} \delta_i(t) \right)^{3/2} & \delta_i(t) > 0 \\ 0 & \delta_i(t) \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\delta_i(t)$ 为轮轨接触点处法向弹性压缩量, G_H 为Hertz接触常数,对于磨损型踏面^[16]

$$G_H = 3.86R^{-0.114} \times 10^{-8} (\text{m/N}^{2/3}) \quad (14)$$

式中, R 为车轮半径。

本文计算中没有考虑轨道不平顺的影响。轮轨接触点处法向压缩量可表示为

$$\delta_i(t) = Z_w(t) + Z_{w0}(t) - Z_r(t) \quad (15)$$

式中, $Z_w(t)$ 和 $Z_r(t)$ 分别为车轮和钢轨在接触点处的法向位移, $Z_{w0}(t)$ 为输入的车轮非圆化信号。

分别以图3中模拟信号、图9中EN15610方法处理后信号和图10中形态学滤波+三次样条平滑处

理后的信号作为车轮非圆化输入, 分析不同滤波方法得到的车轮非圆化对轮轨动力相互作用的影响。计算时假设机车的运行速度为 80 km/h。

图 14 给出了动态轮轨垂向力时域结果。由计算结果可知, 采用形态学滤波+三次样条平滑相结合的降噪方法处理得到的车轮非圆化信号作为输入, 计算得到的动态轮轨垂向力时域波形与模拟信号类似, 两者基本重合; 采用 EN15610 方法处理后的车轮非圆化信号作为输入, 计算得到的动态轮轨垂向力变化趋势与模拟信号类似, 但包含较多的高频冲击成分。以模拟信号、形态学滤波+三次样条平滑信号和 EN15610 方法处的信号作为输入, 计算得到的轮轨垂向动态力的方均根值分别为 8.83 kN、8.92 kN 和 11.93 kN。新提出的车轮非圆化信号降噪方法取得较好的降噪效果, 得到的动态轮轨垂向力也与模拟信号基本一致。

图 14 动态轮轨垂向力时域结果

由图 11 可知, 波长约大于 40 mm 时(80 km/h 时通过频率小于 555 Hz), EN15610 方法和形态学滤波+三次样条平滑方法处理得到的车轮非圆化信号的粗糙度水平与模拟信号基本一致; 波长在 10~40 mm 间(80 km/h 时通过频率在 555~2 220 Hz 之间), 形态学滤波+三次样条平滑方法得到车轮非圆化信号的粗糙度略高于模拟信号; EN15610 方法得到的车轮非圆信号在波长小于 40 mm 的粗糙度水平普遍高于模拟信号。图 15 给出了动态轮轨垂向力功率谱密度。仿真中仅考虑了车轮非圆化激励, 由式(13)~(15)可知, 轮轨力的波动主要由车轮非圆化引起。由于 EN15610 方法和形态学滤波+三次样条平滑方法得到的车轮粗糙度水平在短波范围内与模拟信号存在一定差异, 由图 15 可知, 在 550 Hz 以内三者的功率谱密度基本一致, 但在高频部分存在明显差异, 这与不同方法处理得到的车轮非圆化信号特征一致。EN15610 方法不能较好地滤除短波车轮非圆化信号, 导致高频部分的轮轨力显著高于形态学滤波+三次样条平滑方法。

图 15 动态轮轨垂向力功率谱密度

4 结论

针对传统车轮非圆化信号降噪方法降噪效果不理想的问题, 提出采用形态学滤波+三次样条平滑相结合的降噪方法。以不同降噪方法得到的车轮非圆化信号作为输入, 研究了车轮非圆化对轮轨动力相互作用的影响。得到以下结论。

- (1) 采用扁平形、半圆形、正弦形或三角形, 当结构元素的宽度为 4 mm(5 个数据点)时均取得最高的信噪比, 且信噪比相近。
- (2) 采用形态学滤波+三次样条平滑相结合的降噪方法能取得更好的降噪效果, 既保证了信号波形特征不变, 同时在信号的细节处理上也更平滑, 与传统降噪方法相比信噪比提高 13.5 dB。
- (3) 采用新方法处理后的非圆化信号作为输入, 计算得到的轮轨力更真实, 能显著降低由噪声信号引起的高频轮轨冲击。

参 考 文 献

- [1] 金学松, 吴越, 梁树林, 等. 车轮非圆化磨损问题研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(1): 1-14.
JIN Xuesong, WU Yue, LIANG Shulin, et al. Mechanisms and countermeasures of out-of-roundness wear on railway vehicle wheels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1): 1-14.
- [2] ZHANG J, HAN G, XIAO X, et al. Influence of wheel polygonal wear on interior noise of high-speed trains[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2014, 15(12): 1002-1018.
- [3] NISHIDA S, NAKAMURA M, IKEDA A, et al. Signal separation of background EEG and spike by using morphological filter[J]. Medical Engineering & Physics, 1999, 21: 601-608.

- [4] SUN Y, CHAN K L, KRISHNAN S M. ECG signal conditioning by morphological filtering[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2002, 32: 465-479.
- [5] 郭景峰, 申光亮, 郑绳植, 等. 数学形态学在数字滤波中的应用研究[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(10): 144-147.
- GUO Jingfeng, SHEN Guangxian, ZHENG Shengxuan, et al. Application of mathematical morphology in digital filter[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(10): 144-147.
- [6] 陈平, 李庆民. 基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(11): 60-65.
- CHEN Ping, LI Qingmin. Design and analysis of mathematical morphology-based digital filters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(11): 60-65.
- [7] 胡爱军, 唐贵基, 安连锁. 基于数学形态学的旋转机械振动信号降噪方法[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(4): 127-130.
- HU Aijun, TANG Guiji, AN Liansuo. De-noising technique for vibration signals of rotating machinery based on mathematical morphology filter[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(4): 127-130.
- [8] 沈路, 周晓军, 张文斌, 等. 广义数学形态滤波器的旋转机械振动信号降噪[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(9): 70-73.
- SHEN Lu, ZHOU Xiaojun, ZHANG Wenbin, et al. De-noising for vibration signals of a rotating machinery based on generalized mathematical morphological filter[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(9): 70-73.
- [9] 张文斌, 杨辰龙, 周晓军. 形态滤波方法在振动信号降噪中的应用[J]. *浙江大学学报*, 2009, 43(11): 2096-2099.
- ZHANG Wenbin, YANG Chenlong, ZHOU Xiaojun. Application of morphology filtering method in vibration signal de-noising[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2009, 43(11): 2096-2099.
- [10] 宫鹏涵, 周克栋, 赫雷, 等. 形态滤波方法在抵肩力信号降噪中的应用研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(7): 1416-1421.
- GONG Penghan, ZHOU Kedong, HE Lei, et al. Application of morphology filtering method in the de-noising of firearms' shoulder-force signals[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(7): 1416-1421.
- [11] 蒋章, 邓艾东, 蔡宾宏. 基于梯度法的自适应广义形态滤波在碰摩声发射信号降噪中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(8): 87-92.
- JIANG Zhang, DENG Aidong, CAI Binhong. Application of an adaptive generalized morphological filter based on the gradient method in rubbing acoustic emission signal de-noise[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(8): 87-92.
- [12] 胡爱军, 孙敬敬, 向玲. 振动信号处理中数学形态滤波器频率响应特性研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(1): 98-103.
- HU Aijun, SUN Jingjing, XIANG Ling. Analysis of morphological filter's frequency response characteristics in vibration signal processing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(1): 98-103.
- [13] European Committee for Standardization. EN 15610: 2009 Railway applications—Noise emission—Rail roughness measurement related to rolling noise generation[S]. London: British Standards Institution Publications, 2009.
- [14] SERRA J. Morphological filtering: An overview[J]. *Signal Processing*, 1994, 38(1): 3-11.
- [15] LI Y, LIANG X, LIU W, et al. Development of a morphological convolution operator for bearing fault detection[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 421: 220-233.
- [16] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2017.
- ZHAI Wanming. Vehicle-track coupling dynamics[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [17] 陶功权. 和谐型电力机车车轮多边形磨耗形成机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- TAO Gongquan. Investigation into the formation mechanism of the polygonal wear of HXD electric locomotive wheels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

作者简介: 陶功权, 男, 1989 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为轮轨关系。

E-mail: taogongquan@swjtu.edu.cn

温泽峰(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为轮轨关系和振动噪声。

E-mail: zfwen@home.swjtu.edu.cn