

# 基于谱峭度与时频分析的接触线不平顺检测

陈小强<sup>1</sup>, 沈彦龙<sup>1</sup>, 王英<sup>1</sup>, 张玺<sup>1</sup>, 曹丽<sup>1</sup>, 母秀清<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院 兰州, 730070) (2. 西南交通大学电气工程学院 成都, 610031)

**摘要** 为了解决实际运营中高速铁路接触线不平顺定位困难的问题,提出了一种基于 Choi-Williams 谱峭度(Choi-Williams spectral kurtosis, 简称 CW-SK)与二次时频分析相结合的方法。利用 CW-SK 对突变信号高度敏感的特性,在识别弓网接触压力不平顺成分的基础上,对不平顺时域重构信号进行二次时频分析,确定接触线上不同波长对应的空间位置。测试结果表明,该方法可准确识别并定位接触线中的不平顺病害,且时频图中无其他干扰成分,抗噪性能优异,满足高速铁路实际运营需求,可为现场接触线不平顺的状态评估及接触网的后期维护提供参考。

**关键词** 高速铁路; 谱峭度; 时频分析; 弓网接触压力; 接触线不平顺

**中图分类号** U255.3; TP391.9

## 引言

随着高速铁路的飞速发展,列车运行速度不断提高,弓网耦合关系日趋复杂<sup>[1]</sup>,表征列车受流质量的弓网接触压力波动更为剧烈。受流质量不仅取决于弓网结构参数<sup>[2]</sup>,还受到接触线垂向不平顺的影响<sup>[3]</sup>。

国内外针对接触线不平顺展开了研究。文献[4]定义了接触线不平顺,研究了接触线弛度及波状不平顺对接触压力统计量的影响。文献[5]以最嫡谱法对接触线实测不平顺进行了功率谱估计,提出一种兼具高拟合优度与高普适性的谱模型。文献[6]分析了实测不平顺弓网接触压力统计量,揭示了接触线垂向不平顺对弓网受流的影响规律。文献[7]采用经验模态分解法实现了弓网接触压力结构波长的提取,并提出以时频分析方法检测接触线不平顺。上述研究多为对不平顺弓网接触压力性能指标的评价及线谱的分析,对接触线不平顺检测、定位方面的研究相对较少。

笔者提出了一种基于 CW-SK 与二次时频分析相结合的高速铁路接触线垂向不平顺检测定位方法。该方法具有定位准确、结果图中干扰成分少及抗噪能力强的优点。

## 1 弓网耦合模型及接触线垂向不平顺

### 1.1 弓网动态耦合数学描述

笔者以京-津高速铁路弓网耦合系统为研究对象。图 1 为接触网及三质量块受电弓数学模型。其中: $d_{F(x,t)}$ 为单位长度线索所受外力; $Q, M$ 为微分段截面剪切应力及弯矩; $\varphi$ 为张力与水平面的夹角。如图 1 所示,将该线路简单链型接触网以欧拉梁来等效<sup>[8]</sup>,受电弓用三质量块模型进行模拟<sup>[7]</sup>。

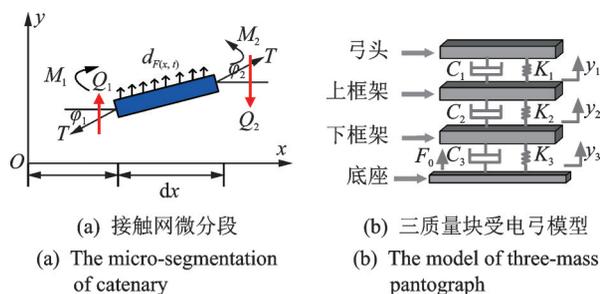


图 1 接触网及三质量块受电弓数学模型

Fig.1 Mathematical model of catenary and three mass pantograph

在接触网上任取微分段  $dx$  进行研究,对其受力分析可得

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} +$$

中国铁路总公司科技研究开发计划重点资助项目(2017J012-A);国家自然科学基金资助项目(51767013);甘肃省科技厅自然科学基金资助项目(18JR3RA111)

收稿日期:2019-09-23;修回日期:2019-11-22

$$C \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = F_c(x, t) \quad (1)$$

其中:  $y(x, t)$  为接触网垂向位移;  $F_c(x, t)$  为单位长度受电弓抬升力;  $\rho$  和  $EI$  分别为微分段线密度及抗弯刚度;  $T$  和  $C$  为接触网张力及系统阻尼。

采用分离变量法求解式(1), 得到简单链型接触网承力索/接触线的振动微分方程分别为

$$\begin{aligned} \frac{d^2 q_{an}(t)}{dt^2} + \frac{C_a}{\rho_a} \frac{dq_{an}(t)}{dt} + \omega_{an}^2 q_{an}(t) = \\ \frac{2}{\rho_b L} \left[ \sum_{r=1}^p F_{b1}(x, t) \sin \frac{n\pi x}{L} + \right. \\ \left. \sum_{r=1}^q F_{b2}(x, t) \sin \frac{n\pi x}{L} \right] \quad (2) \\ \frac{d^2 q_{bn}(t)}{dt^2} + \frac{C_b}{\rho_b} \frac{dq_{bn}(t)}{dt} + \omega_{bn}^2 q_{bn}(t) = \\ \frac{2}{\rho_b L} \left[ \sum_{r=1}^p F_{b1}(x, t) \sin \frac{n\pi x}{L} + \right. \\ \left. \sum_{r=1}^s F_{b2}(x, t) \sin \frac{n\pi x}{L} + F_c(x, t) \sin \frac{n\pi x}{L} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

其中:  $F_{a1}(x, t)$ ,  $F_{b1}(x, t)$  为吊弦的集中作用力;  $F_{a2}(x, t)$ ,  $F_{b2}(x, t)$  为定位器和支撑杆的集中作用力;  $p, q, s$  分别为对应锚段内吊弦、支撑杆及定位器的个数;  $\omega_{an}$  和  $\omega_{bn}$  为承力索/接触线的自振角频率;  $q_{an}$  和  $q_{bn}$  为承力索/接触线的各阶振幅;  $C_a$  和  $C_b$  为接触网悬挂的阻尼系数。

三质量块受电弓模型如图1(b)所示, 该受电弓垂向振动方程为

$$\begin{cases} M_1 \ddot{y}_1 + C_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + K_1(y_1 - y_2) = \\ \quad -F_c(x, t) \\ M_2 \ddot{y}_2 + C_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + C_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_3) + \\ \quad K_1(y_2 - y_1) + K_2(y_2 - y_3) = 0 \\ M_3 \ddot{y}_3 + C_2(\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + C_3 \dot{y}_3 + \\ \quad K_2(y_3 - y_2) + K_3 y_3 = F_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $M_i, C_i, K_i$  和  $y_i (i=1, 2, 3)$  分别为受电弓的等效质量、阻尼系数、弹簧刚度以及振动位移;  $F_0$  为静态升弓力。

以罚函数法来模拟弓网间的动态接触过程<sup>[1,9]</sup>, 则弓网动态耦合接触压力可表示为

$$F_c(x, t) = K_s \left( y_1 - \sum_{n=1}^{\infty} q_{bn} \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (5)$$

其中:  $K_s$  为接触刚度。

采用 EN 50318 标准中的建模参数来验证模型有效性<sup>[10]</sup>, 分别在 250 km/h 和 300 km/h 速度下对弓网耦合模型进行动力学仿真, 取 3-8 跨弓网接触压力统计计算结果与 EN 50318 标准进行对比, 如

表 1 所示。可见, 仿真测试结果各项参数均符合 EN 50318 标准, 此模型较为可靠。

表 1 弓网模型与 EN 50318 标准模型测试对比结果

Tab.1 Test comparison results of pantograph-catenary model and EN50318 standard model

统计指标	EN 50318 标准		仿真结果	
速度/(km·h <sup>-1</sup> )	250	300	250	300
接触压力平均值/N	110~120	110~120	119.008	119.961
接触压力标准差/N	26~31	32~40	26.667	30.034
接触压力最大值/N	175~210	190~225	177.424	204.234
接触压力最小值/N	50~75	30~55	51.809	47.034
离线率/%	0	0	0	0

## 1.2 接触线垂向不平顺数学描述

接触网架设过程中的工程误差及运营过程中的磨损、形变会造成接触线不平顺。为检测及定位线路中的不平顺成分, 在弓网耦合系统建模过程中引入文献[4]中的接触线表面不平顺余弦公式

$$y_r(x_1, x_2, \dots, x_M) = \frac{A}{2} \left[ 1 - \sum_{k=1}^M \cos \left( \frac{2\pi x_k}{\lambda_k} \right) \right] \quad (6)$$

其中:  $A$  为不平顺幅值;  $\lambda_k$  为线路中第  $k$  个不平顺波长成分;  $x$  为不平顺波长的空间位置。

改变式(6)中的幅值、波长以及不平顺持续里程, 即可模拟铁路沿线中存在的各种随机不平顺。

弓网耦合系统引入接触线垂向不平顺时, 弓网接触压力  $F_c(x, t)$  变换为

$$F_c(x, t) = K_s \left[ y_1 - \sum_{n=1}^{\infty} q_{bn} \sin \frac{n\pi x}{L} - y_r \right] \quad (7)$$

由式(7)可知, 接触线垂向不平顺可反映在弓网耦合过程中。因此, 可用弓网接触压力进行接触线垂向不平顺的分析与检测。

京-津高速铁路简单链型接触网参数如表 2 所示。DSA380 型受电弓参数如表 3 所示。

当列车速度为 250 km/h 时进行动力学仿真。为保证仿真数据的有效性, 分别选取正常及不平顺状态下弓网接触压力进行分析, 如图 2 所示。

图 3 为正常状态下弓网接触压力频谱图。图中红蓝虚线标注的波长成分分别为接触网结构参数及受电弓高频振动。若仅对弓网接触压力数据进行简单的滤波处理, 受电弓高频振动成分会干扰不平顺波长的提取。因此, 提出一种对随机突变成分识别度高且简单易行的方法来检测铁路沿线中可能存在的不平顺。

表2 京-津高速铁路简单链型接触网参数

Tab.2 Simple chain catenary parameters of Beijing - Tianjin high-speed railway

参数	数值
承力索弹性模量 $EI_A/(N \cdot m^2)$	310
接触线弹性模量 $EI_B/(N \cdot m^2)$	400
承力索张力 $S_A/kN$	21
接触线张力 $S_B/kN$	27
跨距/m	48
仿真跨数	10
每跨吊弦个数	5
吊弦间距/m	5,9.5

表3 DSA380型受电弓参数

Tab.3 Parameters of DSA380 pantograph

参数	弓头	上框架	下框架
质量/kg	7.12	6.0	6.8
刚度/( $N \cdot m^{-1}$ )	9 340	14 100	0.1
阻尼/( $N \cdot s \cdot m^{-1}$ )	0	0	70

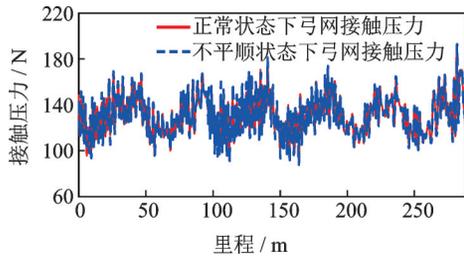


图2 正常及不平顺状态下弓网接触压力

Fig.2 Contact force of pantograph and catenary under normal and irregular conditions

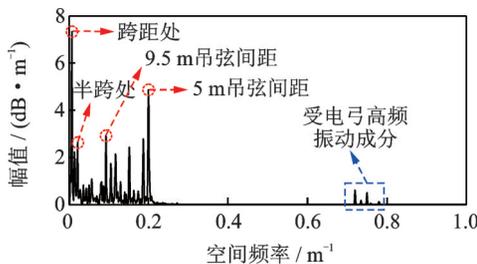


图3 正常状态下的弓网接触压力频谱

Fig.3 Spectrum of contact force of pantograph and catenary under normal condition

## 2 谱峭度理论介绍及不平顺检测步骤

### 2.1 谱峭度理论

谱峭度 (spectral kurtosis, 简称 SK) 用于检测非平稳信号中的非高斯成分, 对随机干扰信号敏感度较高。目前, SK 检测分析方法<sup>[11-12]</sup>主要有短时傅里叶谱峭度及类 Cohen 谱峭度。笔者选用 CW-SK 进

行分析。Choi-Williams (简称 CW) 分布函数可表示为

$$C_x(t, f) = \iint \sqrt{\frac{\sigma}{4\pi\tau^2}} \exp\left(-\frac{\sigma t^2}{4\tau^2}\right) x\left(\mu + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(\mu - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f t} d\mu d\tau \quad (8)$$

其中:  $\tau$  为时移参数;  $\mu$  为局部时间;  $x^*$  为  $x$  的卷积;  $f$  为频率;  $t$  为时间。

根据 CW 分布可求得信号  $x(t)$  的二阶瞬时谱矩  $S_{2x}(f)$  和四阶瞬时谱矩  $S_{4x}(f)$  分别为

$$S_{2x}(f) = E\left\{\left|C_x(t, f)\right|^2\right\}_h \quad (9)$$

$$S_{4x}(f) = E\left\{\left|C_x(t, f)\right|^4\right\}_h \quad (10)$$

其中:  $E\{\cdot\}_h$  为  $h$  阶平均值。

根据谱峭度定义<sup>[12-13]</sup>, 得到基于 CW 分布的谱峭度为

$$k_x(f) = \frac{S_{4x}(f)}{S_{2x}^2(f)} - 2 \quad (f \neq 0) \quad (11)$$

由式(11)可知, 谱峭度随频率的变化而变化, 对应谱线谱幅值越大, 则该频率处能量突变程度越大, 接触压力中存在不平顺成分的可能性越大。

### 2.2 接触线不平顺检测步骤

不同待测信号的谱线突变程度不同, 可通过对比正常及不平顺 SK 谱幅值差异, 得到 SK 不平顺检测阈值, 进而对不平顺弓网接触压力信号进行滤波及时频分析, 具体检测步骤如下:

- 1) 输入原始接触压力信号, 并进行数据去均值预处理, 以消除零频率对 SK 迭代计算的影响;
- 2) 计算正常接触压力信号 SK, 找到其最大值并以此作为接触线不平顺 SK 检测阈值 (detection threshold of spectral kurtosis, 简称  $SK_T$ );
- 3) 计算不平顺状态下接触压力信号 SK, 找出其全部极大值点, 以  $SK_T$  为阈值筛选出数值大于  $SK_T$  的  $i$  个极大值点  $SKP_i (i \in N^+)$ ;
- 4) 对不平顺接触压力信号分别在  $SKP_i$  附近进行带通滤波, 并对各滤波信号进行时域重构, 得到不平顺滤波重构信号;
- 5) 对不平顺重构信号进行 CW 时频分析, 输出时频谱图, 定位接触线中存在的不平顺成分。

## 3 测试分析

根据已有研究及实测不平顺幅值<sup>[4,6,9]</sup>, 取不平

幅值为1 mm来验证小幅值不平顺情况下接触线不平顺检测方法的有效性。

由于高速铁路接触线不平顺波长一般小于吊弦间距,设波长为2,3和4 m的复合不平顺,其持续里程分别为[0 m, 24 m], [96 m, 130 m], [96 m, 192 m]。正常及不平顺状态下弓网接触压力SK分布如图4所示。由图4可知,空间频率为 $0\sim 0.2/\text{m}^{-1}$ 时,表征接触网结构参数的SK曲线在正常和不平顺状态下幅值较小且基本重合,这表明CW-SK方法可有效识别待测信号中的正常及不平顺谱线。绿色水平线对应的SK幅值为接触线不平顺检测阈值 $SK_T$ ,该阈值用于后续不平顺SK极值点的筛选。

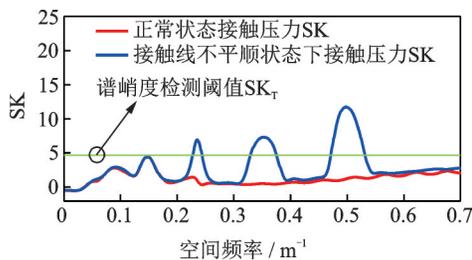


图4 正常及不平顺状态下弓网接触压力SK

Fig.4 SK of pantograph-catenary contact force under normal and irregular conditions

图5,6分别为设置阈值前后不平顺弓网接触压力SK极值点分布图。设置阈值前,不平顺谱峭度曲线中存在9个极大值点。经阈值筛选后,有效SK极大值点( $SKP_i$ )减少为3个,这与前面预设的不平顺波长数目相符。提取出有效SK极大值点后,对不平顺接触压力信号在 $SKP_i$ (这里 $i=3$ )处循环带通滤波,即可得到对应的 $i$ 个接触线不平顺时域信号。

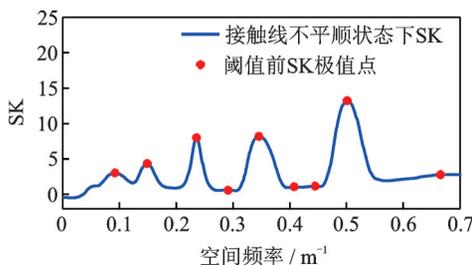


图5 设置阈值前不平顺接触压力SK极值点分布

Fig.5 SK extremum point distribution of irregular contact force before setting threshold

图7为图6红色虚线部分的局部放大。以图7为例,对滤波参数的设置进行说明,滤波通带和阻带以第 $i$ 个有效极值点 $SKP_i$ 为中心进行选取,分别为 $[0.97SKP_i, 1.03SKP_i]$ 和 $[0.95SKP_i, 1.05SKP_i]$ 。

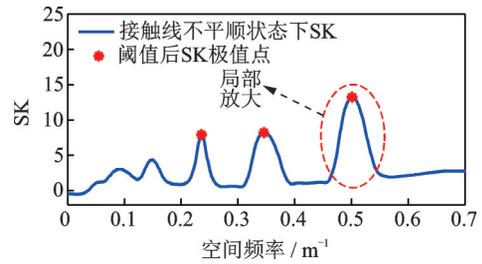


图6 设置阈值后不平顺接触压力SK极值点分布

Fig.6 SK extremum point distribution of irregular contact force after setting threshold

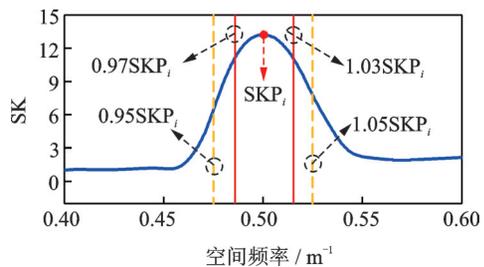


图7 不平顺SK局部放大图

Fig.7 Local magnification of SK irregularity

工程实践中,滤波带宽的选取根据具体情况适当调整,为防止最终提取到的滤波信号包含其他干扰成分,滤波带宽的设置应尽量较窄。将 $i(i=3)$ 个滤波时域信号进行叠加,得到不平顺滤波重构信号,如图8所示,该信号中包含待测信号中可能存在的全部不平顺成分。

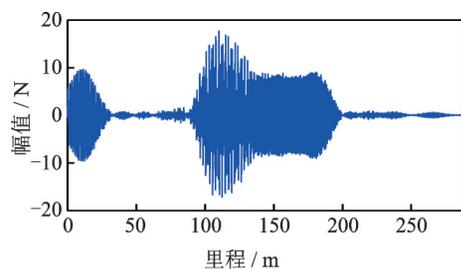


图8 不平顺滤波重构信号

Fig.8 Reconstructed signal after irregularity filtering

图9为对该不平顺滤波重构信号进行时频分析<sup>[13]</sup>,图中横坐标为高速列车运行里程,纵坐标为不平顺成分对应的空间频率。由图9可知,预设不平顺波长成分可清晰表征在时频图中,且与文献[9]结果相比,无其他干扰成分,可靠性更高。

表4为不平顺偏差率。如表4所示,虽然滤波过程中产生的滤波偏差及时频分析不可避免地交叉,使不平顺实际持续里程与预设值间略有偏差,但偏差率均在2%之内。可见,基于CW-SK与二次时频分析相结合的不平顺波长检测定位方法是可行的。

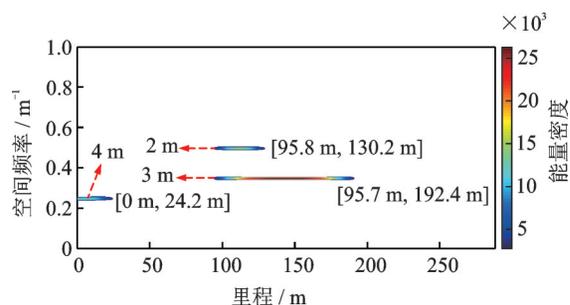


图 9 接触线不平顺波长时频分析

Fig.9 Time-frequency detection and analysis of contact wire irregularity wavelength

表 4 不平顺偏差率

Tab.4 The deviation rate of irregularity

不平顺波长/m	偏差率/%
2	1.18
3	0.73
4	0.83

#### 4 检测方法抗噪性校验

铁路沿线的环境噪声会对弓网接触压力中接触线不平顺成分的提取造成干扰。为验证检测方法的抗噪性能,引入相似度函数来描述噪声对 CW 谱峭度的影响,定义为

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^n [k_s(f) - \bar{k}_s(f)][k_x(f) - \bar{k}_x(f)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [k_s(f) - \bar{k}_s(f)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n [k_x(f) - \bar{k}_x(f)]^2}} \quad (12)$$

其中: $k_s(f)$ 为原始信号的 CW-SK; $k_x(f)$ 为加噪信号的 CW-SK; $\epsilon$ 为信号相似度, $\epsilon \in [0, 1]$ , $\epsilon$ 越大,噪声对信号的干扰程度越小,信号的抗噪能力越强。

不同信噪比的 SK 相似度曲线如图 10 所示。信噪比(signal to noise ratio,简称 SNR)为 15 dB 时,信号相似度为 0.964,随着 SNR 的增大, $\epsilon$ 值逐渐趋近于 1,噪声对待测信号 SK 谱线的分布将不产生影响。

对信噪比为 1~15 dB 时的情况进行具体分析,向不平顺接触压力信号中分别注入信噪比为 1,5,10 和 15 dB 的高斯白噪声,研究其对 CW-SK 的影响。图 11 为不同信噪比 SK 分布。由图 11 可知,1 dB 和 5 dB 加噪信号的 SK 谱线与无噪 SK 谱线相比差异较大,不能用于不平顺波长成分的检测。

SNR 为 15 dB 时,其 SK 曲线与无噪 SK 曲线几乎完全重合,故  $\text{SNR} \geq 15 \text{ dB}$  时,噪声对接触线不平顺成分的提取不会造成干扰。

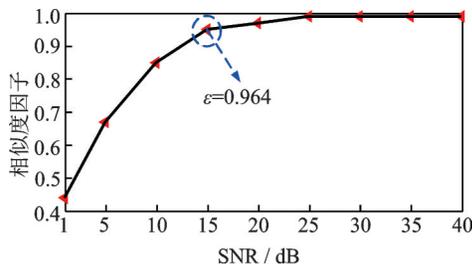


图 10 不同信噪比的 SK 相似度曲线

Fig.10 SK similarity of different SNR

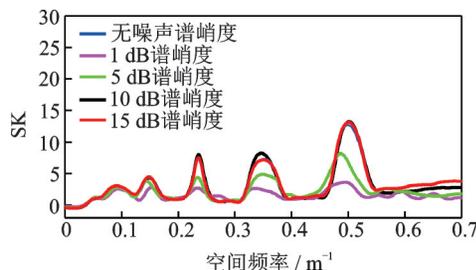


图 11 不同信噪比 SK 分布

Fig.11 SK distribution of different SNR

由我国铁路环境噪声排放标准<sup>[14]</sup>可知,铁路沿线噪声一般在 60 dB 以上。因此,笔者提出的方法在现场实际应用中能满足抗噪性要求,无需对待测信号进行额外的降噪处理。

#### 5 结论

- 1) 弓网接触压力中包含接触线中的不平顺成分,且 CW-SK 对随机不平顺成分敏感,因此 CW-SK 能精确识别接触线中的随机不平顺。
- 2) CW-SK 与二次时频分析相结合的接触线不平顺检测定位方法的检测结果清晰,最终的时频图中只包含接触线不平顺波长,没有其他干扰成分,定位准确。
- 3) 该方法抗噪性能良好,能避免铁路沿线环境噪声对结果的影响,可靠性较高。

#### 参 考 文 献

[1] WANG Y, LIU Z G, MU X Q, et al. An extended habedank's equation-based EMTP model of pantograph arcing considering PAC interactions and train speeds [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):1186-1194.

[2] SONG D L, ZHANG W H, HE P, et al. Reliability

- analysis of TSG19-type pantograph based on time-dependent parameters[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 35(15): 153-163.
- [3] LIU Z G, WANG H R, ROLF D. Detection of contact wire irregularities using a quadratic time-frequency representation of the pantograph-catenary contact force [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(6):1385-1397.
- [4] 张卫华, 梅桂明, 陈良麒. 接触线弛度及表面不平顺对接触受流的影响分析[J]. *铁道学报*, 2000, 22(6): 50-54.  
ZHANG Weihua, MEI Guiming, CHEN Lianglin. Analysis of the influence of catenary's sag and irregularity upon the quality of current-feeding[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2000, 22(6): 50-54. (in Chinese)
- [5] 江亚男, 张卫华, 宋冬利. 高速铁路接触线不平顺线谱研究[J]. *铁道学报*, 2015, 37(2): 34-38.  
JIANG Yanan, ZHANG Weihua, SONG Dongli. Study on the contact wire unevenness of high-speed railway [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(2): 34-38. (in Chinese)
- [6] 宦荣华, 焦京海, 苏光辉, 等. 计及接触线垂向不平顺的弓网耦合动力学分析[J]. *铁道学报*, 2012, 34(7): 24-29.  
HUAN Ronghua, JIAO Jinghai, SU Guanghui, et al. Dynamics of pantograph-catenary coupled system with contact wire vertical irregularities[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(7): 24-29. (in Chinese)
- [7] WANG H R, LIU Z G. Ensemble EMD-based automatic extraction of the catenary structure wavelength from the pantograph-catenary contact force [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(10): 2272-2283.
- [8] POMBO J, AMBROSIO J. Multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains [J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2012, 7(4):1-7.
- [9] 汪宏睿, 刘志刚, 宋洋. 基于ZAMD的高速铁路弓网接触压力及接触线不平顺时频分析[J]. *铁道学报*, 2016, 38(1):41-47.  
WANG Hongrui, LIU Zhigang, SONG Yang. Time-frequency analysis of pantograph-catenary contact force and contact wire irregularity in high-speed railway based on ZAMD [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(1):41-47. (in Chinese)
- [10] European Electro Technical Standardization Committee. EN 50318 Railway applications-current collection systems-validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line [S]. [S. l.]: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2002.
- [11] 马新娜, 杨绍普. 典型谱峭图在共振解调方法中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(6): 1140-1144.  
MA Xinna, YANG Shaopu. Study and application of demodulated resonance based on typi-kurtogram [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(6):1140-1144. (in Chinese)
- [12] 张龙, 胡俊锋, 熊国良. 基于MED和SK的滚动轴承循环冲击特征增强[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(1):97-101.  
ZHANG Long, HU Junfeng, XIONG Guoliang. Cyclic shock enhancement by the combination of minimum entropy deconvolution and spectral kurtosis[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(1): 97-101. (in Chinese)
- [13] LIU Y J, XIAO P, WU H C, et al. LPI radar signal detection based on radial integration of Choi-Williams time-frequency image [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 26(5): 973-981.
- [14] GB 12525—90 铁路边界噪声限值及其测量方法修改方案[S]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2019.



**第一作者简介:**陈小强,男,1966年7月生,教授。主要研究方向为计算电磁学、多脉波整流、高速铁路接触网状态评估及数据挖掘。曾发表《基于逆投影修正和眼睛凝视修正的列车驾驶员疲劳检测方法》(《铁道学报》2018年第40卷第4期)等论文。

E-mail:1785459578@qq.com

**通信作者简介:**沈彦龙,男,1992年9月生,硕士生。主要研究方向为高速铁路弓网耦合状态分析及数据挖掘。

E-mail:623084675@qq.com