

文章编号: 1003-1995(2016)07-0001-05

# 轨道周期性几何不平顺诊断和评价方法

刘金朝

(中国铁道科学研究院 基础设施检测研究所, 北京 100081)

**摘要** 结合描述转向架蛇行失稳的连续多波和广义能量方法,提出一种轨道周期性几何不平顺的诊断和评价方法。首先利用过零点的连续区段轨道几何不平顺极大值和极小值诊断周期性几何不平顺,并采用高通滤波方法对几何不平顺信号进行处理,避免偏移或趋势项对诊断结果的影响。然后引入敏感波长反映周期性几何不平顺的基波,提出利用广义能量指数评价周期性几何不平顺的状态。计算广义能量指数需要用到的关键参数——能量权系数由同步模型和线性回归分析联合产生的放大系数归一化后得到。与传统的评价轨道几何不平顺的标准差指标相比,广义能量指数与车辆动态响应标准差之间具有更强的相关性,避免了在波长非敏感条件下出现车辆动态响应与输入系统的轨道不平顺能量大小不对应的现象。利用某线预设不平顺试验实测的轨道不平顺和车体加速度数据对模型和方法进行验证,结果表明新的诊断方法能准确有效地找出分布在随机信号中的周期性几何不平顺,同时能较好地评价周期性几何不平顺状态,并反映其对车辆动态响应的影响随速度变化而变化的特性。

**关键词** 轨道周期性几何不平顺; 广义能量指数; 轨道质量指数; 能量权系数; 敏感频率

**中图分类号** U211.5 **文献标识码** A **DOI**: 10.3969/j.issn.1003-1995.2016.07.01

作为轮轨系统的激励源,轨道几何不平顺是引发机车车辆振动和产生轮轨作用力的主要原因。其对车辆和轨道部件的寿命、列车运行的安全性、平稳性、舒适性以及环境噪声等均有重要影响。目前国内外对轨道几何不平顺的管理主要采用幅值管理和轨道质量指数(*TQI*)管理<sup>[1-4]</sup>;有些国家还利用车辆动态响应,包括车体加速度和(或)轮轨作用力辅助评判轨道平顺性状态。从发展趋势看,结合轨道几何不平顺和车辆动态响应评判轨道状态越来越受到重视<sup>[5-8]</sup>。

按照轨道几何不平顺的谐波特征,可将其分为周期性不平顺和非周期性不平顺2种。周期性不平顺的特征是多波连续,基波的波长相同,幅值具有随机性。非周期性不平顺的波长各不相同,无明显的基波。等跨度多跨桥梁挠曲变形、有缝线路低接头、无缝线路焊缝不平引起的高低不平顺均具有幅值随机变化均值不为0的周期性不平顺特征。轨道几何周期性不平顺的基波在功率谱图中显示为突出的尖峰。

利用轨道几何不平顺幅值和*TQI*已开展了大量评价轨道随机几何不平顺并指导养护维修的研究<sup>[9-10]</sup>,

但是如何描述轨道几何周期性不平顺的特征并定量分析其对轨道-车辆系统动力学性能的影响的报道还非常少。黎国清等<sup>[11]</sup>通过对简支梁徐变上拱成因及其引起的轨面高低不平顺变化特性的分析,发现在开通运营后的前2年桥上高低不平顺幅值年均变化量较大而后期逐渐缩小。杨飞等<sup>[12]</sup>结合统计方法和动力学仿真技术对成灌城际铁路桥上周期性不平顺的成因和发展规律进行了分析,发现混凝土的收缩、徐变以及桥梁刚度偏弱是产生桥上周期性高低不平顺的主要原因。

相比于轨道随机几何不平顺,对于周期性几何不平顺的评价,除了要考虑幅值的大小外,还需要考虑轨道几何不平顺的波形结构特征。由波长、速度和频率的换算关系可计算得到周期性轨道几何不平顺的特征频率,当其与车辆的敏感频率相等时将导致机车车辆产生较剧烈的周期性振动。文献[13-14]借鉴能量集中率的思想,提出综合评价轨道-车辆系统动态特性的广义能量指数(*GEI*),并引入能量权系数表征不平顺的敏感波长成分对轨道-车辆系统动力学性能的影响,并成功应用于钢轨波浪弯曲不平顺分析和车辆异常振动原因诊断。

本文借鉴转向架蛇行稳定性的评判方法<sup>[15]</sup>,给出一种周期性几何不平顺的自动诊断方法。然后引入*GEI*定量评价周期性几何不平顺对轨道-车辆系统动力学性能的影响。最后,利用某线预设不平顺试验高

收稿日期: 2016-03-10; 修回日期: 2016-05-10

基金项目: 国家国际科技合作专项(2015DFA81780); 中国铁路总公司科技研究开发计划(2015T003-B); 中国铁道科学研究院基金(2014YJ056)

作者简介: 刘金朝(1971—),男,研究员,博士。

速综合检测列车实测的轨道几何不平顺和车体加速度数据,对周期性几何不平顺的自动诊断和评判方法的有效性进行验证。

## 1 周期性轨道几何不平顺的自动诊断方法

文献[15]中,若经过 10 Hz 低通滤波的构架横向加速度出现连续 6 个波峰或波谷  $\geq 0.8 \text{ m/s}^2$ ,则认为车辆将出现蛇行失稳。借鉴车辆稳定性的诊断方法,对于经过高通滤波后的轨道几何不平顺,定义若出现连续  $N$  个波峰或波谷大于阈值,则判定为周期性几何不平顺, $N$  一般取 3。详细的诊断步骤为:①对轨道几何不平顺进行高通滤波,滤除趋势项,记滤波后的轨道几何不平顺信号为  $W_x$ ;②找出信号  $W_x$  的零点;③找出信号  $W_x$  的区段极大值点,若 2 个相邻零点之间的最大值  $> 0$  则记为区段极大值点;④若连续  $N$  个区段极大值大于阈值,且相邻零点的间隔差的绝对值小于阈值,则判定为周期性几何不平顺;⑤找出信号  $W_x$  的区段极小值点,若 2 个相邻零点之间的最小值  $< 0$  则记为区段极小值点;⑥若连续  $N$  个区段极小值的绝对值大于阈值,且相邻零点的间隔差的绝对值小于阈值,则判定为周期性几何不平顺。

利用上述诊断方法自动查找某线预设不平顺试验实测数据中的周期性高低不平顺,并通过与预设的多波高低不平顺比较验证方法的正确性和实用性。实测的右高低不平顺沿程分布见图 1,在 C1(K729+250)和 C2(K743+367)2 处预设了连续高低不平顺,在 R1~R12 处预设了单波不平顺。利用上述方法自动找出 2 处周期性高低不平顺,其中 K729+250 处的波形和功率谱见图 2。

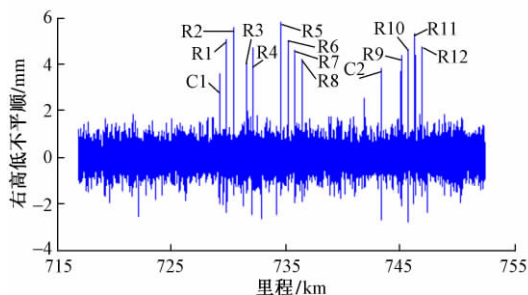


图 1 实测右高低不平顺沿程分布

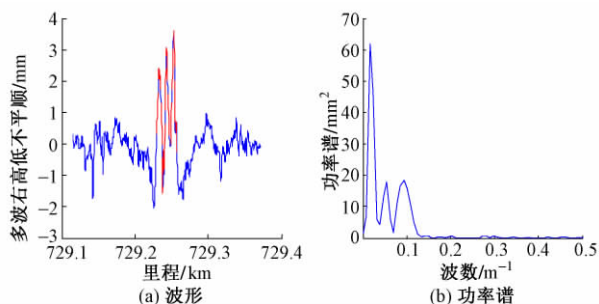


图 2 K729+250 处连续多波右高低不平顺

连续 3 波极大值点的最小幅值统计见图 3,根据统计特性,周期性几何不平顺的评判阈值取为 1.5 mm。利用上述方法诊断左高低不平顺的周期波,可以得到类似的结果。由此可见,新的诊断方法能准确地找出预设的周期性高低不平顺。

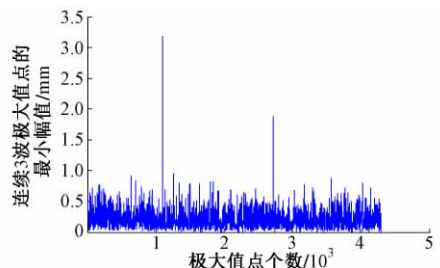


图 3 连续 3 波极大值点的最小幅值统计

## 2 基于 GEI 的周期性几何不平顺评价方法

GEI 可以看成 TQI 的发展,其定量地将 TQI 和几何不平顺的波长结构有机结合在一起。引入 GEI 评判周期性几何不平顺对轨道-车辆系统动力学性能的影响,区分不同波长成分不平顺对输入能量的贡献。由文献[13-14]可知,GEI 可表示为

$$GEI = \sum_{i=1}^M \alpha_i \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} w_i(f_j) E_i(f_j)} \quad (1)$$

式中: $M$  表示几何不平顺的个数,包括左右高低、左右轨向、轨距、水平、三角坑共 7 项; $E_i(f_j)$  为第  $i$  项几何不平顺对应波长  $f_j$  的能量; $w_i(f_j)$  为对应波长  $f_j$  的能量权系数, $w(f_j)$  满足如下归一化条件:

$$\sum_{j=0}^{n-1} w_i(f_j) = 1 \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (2)$$

利用 GEI 评价周期性几何不平顺的详细步骤为:

①采集不同速度下轨道几何不平顺和车体加速度数据;②对数据进行预处理,包括有效性检查、里程精调、滤除冲击性噪声、去趋势项;③利用同步模型计算得到随速度变化的由轨道几何不平顺到车体加速度的放大系数;④通过对放大系数曲线归一化,得到不同速度的能量权系数曲面;⑤利用第 2 节的自动诊断方法,找出周期性几何不平顺所在的区段,若区段长度  $< 256 \text{ m}$ ,则两边对称延长至 256 m;⑥利用傅里叶变换计算周期性几何不平顺的幅值谱;⑦结合能量权系数曲面,利用式(1)计算 GEI;⑧若 GEI 不小于预先设定的阈值,则该区段的周期性几何不平顺状态评价为不良。

## 3 基于同步模型的能量权系数计算方法

在广义能量指数的计算中,能量权系数是关键因

素,直接决定轨道状态对轨道-车辆系统动力学特性的影响。能量权系数曲线的物理意义就是车辆动力学响应对轨道不平顺的放大系数平方的归一化曲线。下面给出基于同步模型的能量权系数计算方法。

根据振动理论,单一正弦波的振幅  $A$  与其有效值  $RMS$  满足如下线性关系

$$RMS = \sqrt{2}A/2 \tag{3}$$

窄带滤波后的轨道几何不平顺与车体动力学响应的有效值之比为放大系数  $C$ ,即

$$C_j = \frac{A_{jv}}{A_{jt}} = \frac{RMS_{jv}}{RMS_{jt}} \quad j = 0, 1, 2, \dots, n - 1 \tag{4}$$

式中:  $A_{jv}$ ,  $RMS_{jv}$  分别表示车体加速度第  $j$  个波长段的平均振幅和有效值;  $A_{jt}$ ,  $RMS_{jt}$  分别表示轨道几何不平顺的第  $j$  个波长段的平均振幅和有效值。

基于同步模型的能量权系数的计算流程为:①对轨道几何不平顺和车辆动力学响应分别进行带通滤波;②利用同步模型消除车辆动力学响应相位延迟;③计算轨道几何不平顺的移动有效值;④计算车辆动力学响应的移动有效值;⑤对轨道几何不平顺的移动有效值和车辆动力学响应的移动有效值的数据进行线性回归,回归直线的斜率即是该波段的放大系数;⑥通过对放大系数的平方进行归一化得到能量权系数。

利用同步模型计算得到综合检测列车正向运行时,车体垂向加速度与高低不平顺波形之间的能量权系数曲面,见图4。可知,不同波长的能量权系数不相等,最大和最小的能量权系数相差可达10倍,说明不同波长的轨道不平顺对输入能量的贡献不同。相同速度(280 km/h)条件下,综合检测列车正向运行2次得到的车体垂向加速度与高低不平顺之间的能量权系数曲线的比较见图5。可知,相同工况下得到的能量权系数曲线基本重合,说明上述能量权系数计算方法稳定。

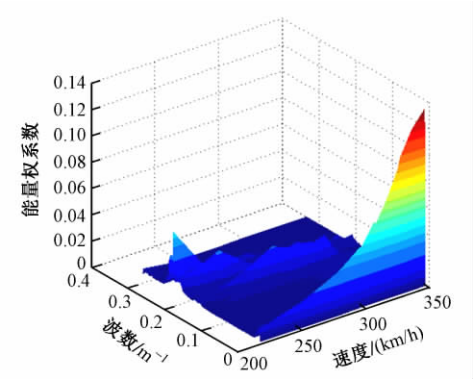


图4 车体垂向加速度与高低不平顺之间能量权系数曲面

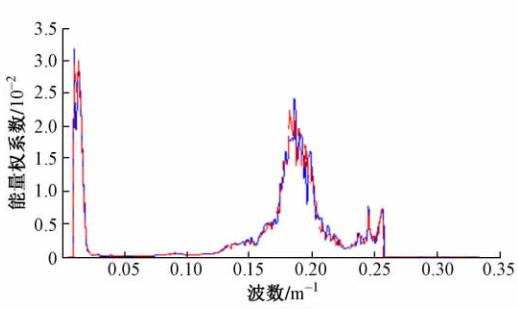


图5 2次车体垂向加速度与高低不平顺之间能量权系数曲线的比较

4 数值试验

利用某线预设不平顺试验高速综合检测列车实测的轨道不平顺和车体加速度数据对模型和方法进行验证。计算  $GEI$  时,仅考虑周期性高低几何不平顺对轨道-车辆系统动力学性能的影响,即式(1)中的  $M$  取2。将轨道划分成200 m的单元,分别计算不同速度级下各单元的高低几何不平顺的标准差和  $GEI$ ,二者与车体垂向加速度标准差的相关系数见表1。相关系数  $C_R$  计算式为

$$C_R = \frac{\sum (G_i - \bar{G}) \cdot (\sigma_{vi} - \bar{\sigma}_v)}{\sqrt{\sum (G_i - \bar{G})^2} \cdot \sqrt{\sum (\sigma_{vi} - \bar{\sigma}_v)^2}} \tag{5}$$

式中:  $G_i$  表示高低不平顺的标准差或  $GEI$ ,  $\bar{G}$  表示其平均值;  $\sigma_{vi}$ ,  $\bar{\sigma}_v$  分别表示车体垂向加速度标准差及其平均值。

表1 高低不平顺标准差和  $GEI$  与车体垂向加速度标准差的相关系数

速度/ (km/h)	与车体垂向加速度标准差的相关系数	
	高低不平顺标准差	高低不平顺 $GEI$
250	0.54	0.86
280	0.70	0.82
300	0.67	0.76
310	0.66	0.81
320	0.55	0.75
330	0.60	0.73
340	0.66	0.76
350	0.66	0.73

当相关系数在0.7~0.8时为线性相关;当相关系数>0.8时,为强线性相关。由表1可知,高低不平顺  $GEI$  与车体垂向加速度标准差的相关系数一般>0.75,最高时达到了0.86,表明二者具有较强的线性相关性。高低不平顺标准差与车体垂向加速度标准差的相关系数一般<0.67,有时甚至<0.55,说明二者

的线性相关性较差。由此可见,当几何不平顺的能量集中在非敏感波长上时,标准差较大的轨道几何不平顺不一定产生大的动力学响应。因此,在评价周期性轨道几何不平顺对轨道-系统动力学的影响时,除了要考虑幅值的大小外,还需要考虑轨道几何不平顺的波形结构特征。广义能量方法的能量权系数定量反映了敏感频率的特性,因此,利用  $GEI$  能很好地评价周期性轨道几何不平顺的状态。

$GEI$  近似满足正态分布,于是采用其 3 倍标准差来确定养护维修的阈值。记  $GEI$  的均值、标准差分别为  $m_{GEI}$ 、 $\sigma_{GEI}$ ,则其 3 倍标准差指标可写为

$$\sigma_{3,GEI} = m_{GEI} + 3\sigma_{GEI} \quad (6)$$

类似可得到高低几何不平顺和车体垂向加速度标准差的 3 倍标准差指标。

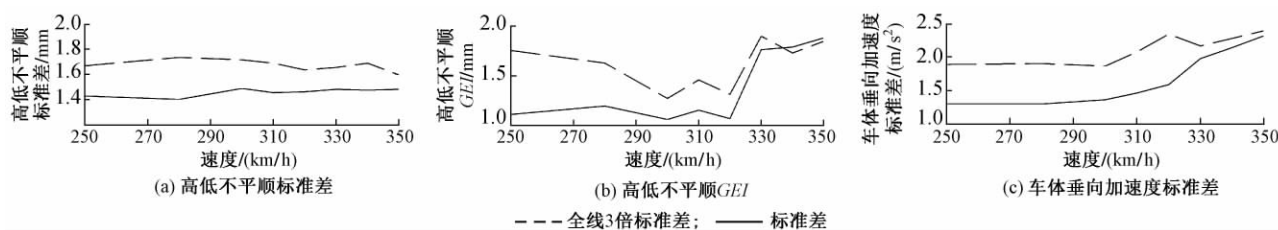


图6 3种指标的标准差及其3倍标准差与速度关系曲线

## 5 结论

现有轨道不平顺管理办法包括幅值管理和轨道质量指数管理,主要关注几何不平顺幅值的大小,没有考虑几何不平顺的波形结构特征,不能直接用于评价周期性几何不平顺对轨道-车辆系统动力学性能的影响。本文引入敏感波长反映周期性几何不平顺的基波,利用  $GEI$  实现对周期性几何不平顺的定量评价,并利用某线预设不平顺试验高速综合检测列车实测的轨道不平顺和车体加速度数据对模型和方法进行了验证。主要结论如下:

1) 由于引入了反映敏感波长的能量权系数,与轨道几何不平顺的标准差相比,显著提高了  $GEI$  与车辆动态响应标准差之间的相关性,避免了在波长非敏感条件下出现车辆动态响应与输入系统的轨道不平顺能量大小不对应的现象。此外,能量权系数与速度相关,新的评价指标  $GEI$  能更好地体现周期性几何不平顺对车辆动态响应的影响随速度变化而变化的特性,维修决策也要根据运行速度动态决定。这是传统的单纯考虑几何不平顺幅值大小的评判指标不能达到的功能。

2) 借鉴评价转向架蛇行失稳用到的连续多波的方法,提出利用过零点的连续区段轨道几何不平顺极大值或极小值诊断周期性几何不平顺。利用小波或其

包含  $K729+250$  的 3 波不平顺区段的高低不平顺标准差、 $GEI$  和车体垂向加速度标准差与速度关系曲线见图 6 的实线,图中虚线表示全线的 3 倍标准差指标与速度的关系曲线。由图 6(a)、图 6(c) 可见, $K729+250$  的 3 波不平顺区段的高低不平顺标准差远远小于其 3 倍标准差指标,二者之间的相对变化趋势不随速度变化,与对应区段车体垂向加速度标准差的变化趋势不一致。由图 6(b)、图 6(c) 可见,当速度较低时高低不平顺  $GEI$  远小于 3 倍标准差指标,随着速度提高二者接近,当速度高于 330 km/h 时,高低不平顺  $GEI$  逐渐接近并超过 3 倍标准差指标。其变化趋势与对应区段车体垂向加速度标准差的变化趋势吻合。利用  $GEI$  评判  $K729+250$  处周期性高低不平顺的状态,若运行速度  $>330$  km/h,则该处状态不良,需要维修。

他高通滤波方法实现对几何不平顺信号滤波处理,避免偏移或趋势项对诊断结果的影响。对某线预设不平顺试验的数据分析表明,新的诊断方法能准确有效地找出分布在随机信号中的局部周期性几何不平顺。

3) 提出了一种基于同步模型的能量权系数计算方法,解决了  $GEI$  计算中的关键因素——能量权系数如何获取的问题。与其他方法如传递函数方法相比,该方法速度要慢些,但精度更高。相同条件下多次计算得到的能量权系数曲线基本重合,说明该计算方法稳定可靠。

本文只给出了车体垂向加速度与高低不平顺的能量权系数,以及利用  $GEI$  诊断和评价高低不平顺对轨道-车辆系统动力学性能影响的方法。上述方法可类推到轨向不平顺和水平不平顺的分析中。目前能量权系数和  $GEI$  的计算模型已经集成到轨道几何检测数据分析软件中,可以对全路的检测数据进行批量分析。下一步将利用更多检测数据对模型和方法进行验证。

## 参 考 文 献

- [1] ESVELD C. Modern Railway Track [M]. Duisburg, Germany: MRT-Productions, 1989.
- [2] BS EN 13848-5: 2008 Railway Applications—Track-Track Geometry Quality—Part 5: Geometric Quality Levels [S]. Brussels: CEN, 2005.

- [3] BS EN 13231-1: 2006 Railway Applications—Track—Acceptance of Works—Part 1: Works on Track—Plain Line [S]. Brussels: CEN, 2006.
- [4] 周正, 赵国堂. 轨道质量指数计算问题的探讨 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24(3): 64-68.
- [5] LI D, MEDDAH A, HASS K, et al. Relating Track Geometry to Vehicle Performance Using Neural Network Approach [J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2006, 220(3): 273-281.
- [6] LI D, MORGART D, HARBUCK R, et al. BNSF Experience: Track Geometry Inspection Taking into Account Vehicle Performance [J]. Railway Track Structure, 2005, 101(9): 19-23.
- [7] BERGGREN E G, LI M X D, SPANNAR J. A New Approach to the Analysis and Presentation of Vertical Track Geometry Quality and Rail Roughness [J]. Wear, 2008, 265(9/10): 1488-1496.
- [8] LI M X D, BERGGREN E G, BERG M. Assessing Track Geometry Quality Based on Wavelength Spectra and Track-vehicle Dynamic Interaction [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(S): 261-276.
- [9] WESTON P, ROBERTS C, YEO G, et al. Perspectives on Railway Track Geometry Condition Monitoring from in-service Railway Vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(7): 1063-1091.
- [10] MADEJSKI J. Autonomous Track Geometry Diagnostics System [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157(51): 194-202.
- [11] 黎国清, 刘秀波, 杨飞, 等. 高速铁路简支梁徐变上拱引起的高低不平顺变化规律及其对行车动力性能的影响 [J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(7): 786-792.
- [12] 杨飞, 宋国华, 黎国清. 成灌城际铁路桥上周期性高低不平顺分析 [J]. 铁道工程学报, 2011(5): 51-55.
- [13] 王卫东, 刘金朝, 梁志明. 综合评价车辆/轨道系统动态特性的广义能量法 [J]. 中国铁道科学, 2009, 33(4): 22-27.
- [14] WANG Weidong, LIU Jinzhao, LIANG Zhiming, et al. Generalized Energy Index( GEI) for Evaluating Railway Track Segment Quality in a Systematic Manner [C] // 9th International Railway Engineering Conference, London, 2009.
- [15] TRUE H. Recent Advances in the Fundamental Understanding of Railway Vehicle Dynamics [J]. International Journal of Vehicle Design, 2006, 40(1): 251-264.

## Diagnosis and Evaluation Method of Track Periodic Geometric Irregularity

LIU Jinzhao

(Infrastructure Inspection Center of China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** Combining with continuous multi-wave for describing bogie hunting instability and generalized energy method, some new diagnosis and evaluation methods were proposed for track periodic geometric irregularities. The maximum values and the minimum values of continuous intervals through zero points were used to diagnose periodic geometric irregularities and the high pass filter( HPF) was applied to conduct the filter processing of geometric irregularity signals for preventing the effect of deviations and tendencies on diagnosis results, the sensitive wavelength was introduced to reflect the fundamental waves of periodic geometric irregularities and the generalized energy index was proposed to evaluate periodic geometric irregularity status, and the energy weight coefficients are key parameters in calculating the generalized energy index and could be acquired after the normalization of the amplification coefficients produced by both a simultaneous model and linear regression model. Compared to the traditional standard deviation index of track geometric irregularity, the new generalized energy index has a stronger correlation with standard deviation of vehicle dynamic response and avoids the scale mismatches between vehicle dynamic response and track irregularity energy of input systems under non-sensitive wavelengths, the models and methods were verified by measured track irregularities data and vehicle acceleration data of irregularity experiments preinstalled in Beijing-Shanghai high speed railway line. The results showed that the new diagnosis methods can accurately and effectively detect periodic geometric irregularities distributed in random signals, well evaluate the periodic geometry irregularity status and reflect that influences of the new diagnosis methods on vehicle dynamic responses changes with speed.

**Key words** Track periodic geometric irregularity; Generalized energy index; Track quality index; Energy weight coefficient; Sensitive frequency

(责任编辑 李付军)