

文章编号:1671-1637(2013)04-0051-05

车辆悬挂弹簧故障检测的能量传递特性比较法

丁建明, 林建辉, 赵 洁, 黄晨光

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:利用弹簧刚度对悬挂传递函数的频移特性,提出一种车辆悬挂弹簧故障动态检测的新方法。对悬挂弹簧安装处的车体和构架垂向振动加速度信号分别进行7层谐波小波包分解,计算了8个低尺度的能量,在同一尺度上,将车体和构架的加速度能量相除得到悬挂的尺度能量传递特性,提出相邻时段对应悬挂尺度能量传递特性的比较方法,进行悬挂弹簧的故障检测。检测结果表明:当悬挂弹簧刚度蜕变时,其传递特性向高尺度变化,与检测机理分析得出的传递特性向低频率变化的分析结论一致,同时能够检测刚度蜕变10%的悬挂故障,因此,该方法可靠性高,具有一定的工程适应性。

关键词:车辆工程;悬挂弹簧;弹簧故障;谐波小波包分解;尺度能量传递特性;动态检测

中图分类号:U279.3

文献标志码:A

Comparison method of energy transfer characteristics for fault detection of vehicle suspension spring

DING Jian-ming, LIN Jian-hui, ZHAO Jie, HUANG Chen-guang

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The frequency shift characteristics of suspension transfer function under different spring stiffnesses were analyzed, and a new dynamic detecting method of vehicle suspension spring fault was developed. The vertical vibration accelerations of car body and bogie at the locations installed with suspension springs were respectively decomposed by seven-layer harmonic wavelet packet, and the eight low scales energies were calculated. The suspension's scale energy transfer characteristics were got through the division of car body and frame acceleration energies in each scale. The comparison method of suspension's scale energy transfer characteristics in adjacent periods was constructed to achieve the failure detection of suspension spring. Detection result shows that suspension's energy transfer characteristic changes to high scale due to spring stiffness metamorphosis, which is consistent with the conclusion drawn from the detection mechanism analysis to low frequency change, and the method correctly detects suspension failure with 10% stiffness metamorphosis. Therefor, the method has high reliability and good engineering applicability. 9 figs, 14 refs.

Key words: vehicle engineering; suspension spring; spring fault; harmonic wavelet packet decomposition; scale energy transfer characteristics; dynamic detection

Author resume: DING Jian-ming(1981-), male, assistant researcher, PhD, +86-28-87600843, fdingjianming@126.com.

收稿日期:2013-03-25

基金项目:国家863计划项目(2011AA110501);国家自然科学基金项目(61134002);“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG12A01)

作者简介:丁建明(1981-),男,四川平昌人,西南交通大学助理研究员,工学博士,从事车辆的故障建模、非线性非平稳信号处理和故障诊断研究。

0 引 言

有关车辆动力学的大量研究表明^[1-3]:车辆悬挂参数的大小直接影响车辆的曲线通过性能、运行平稳性能、运行稳定性能、车体振动模态和脱轨系数,这足以说明悬挂参数直接关系到车辆运行的舒适性和安全性。然而,车辆在长期的运营过程中,悬挂空簧失气、钢簧裂纹、钢簧断裂、减振器泄露、减振器堵塞等故障现象时有发生^[4-5],引起悬挂的性能参数发生变化,使车辆运行的安全性和舒适性恶化,严重者将导致车毁人亡。为此,研究车辆悬挂故障的在途检测技术对确保车辆安全舒适运行具有重要的实际意义。

对此,国内外学者进行了大量的研究,取得了丰硕的研究成果:Kadirkamanathan 等将边缘粒子滤波与车辆动力学模型相结合,将参数增广为状态,应用动力学方程对状态进行一步更新,应用加速度信号对状态进行观测更新,实现参数估计,来检测悬挂的故障^[6];Hayashi 等在动力学模型中设置不同的刚度参数,将观测的加速度信号和不同参数模型对应的加速度信号进行相似比较,以相似度的大小来反映悬挂的工作状态^[7];Mei 等充分利用车辆悬挂的对称性,由对称性变化造成前后、左右加速度信号相关性的变化,通过相关性来检测悬挂故障的少模型方法^[8-9];Newland 基于信号时域、频域分析检测悬挂故障^[10]。

综上所述,关于悬挂故障检测的研究主要表现在三方面:一是基于模型的悬挂故障检测,直接估计悬挂参数,由参数的变化来诊断悬挂故障,也有利用多故障的车辆动力学模型的输出与观测信号的相似性来诊断悬挂故障,但是参数估计精度受到模型复杂性影响比较大,同时在参数估计中也常存在数值发散问题;再是基于少模型的故障诊断方法,利用车辆结构的对称性来检测悬挂故障,对早期故障检测不敏感;另外基于信号时域、频域分析的悬挂故障检测,由于轨道是一个随机输入,导致加速度的大小、峰值、峰值频率等特征值具有不确定性,这对悬挂故障的可靠检测带来了一定的局限。

为此,基于上述分析,本文综合考虑悬挂的对象特性和悬挂随机激励工作环境,在充分分析弹簧刚度对悬挂传递函数的频移特性这一故障检测的机理上,提出一种车辆悬挂弹簧故障动态检测的新方法。对悬挂弹簧安装处的车体和构架垂向振动加速度信号分别进行 7 层谐波小波包分解,

计算 8 个低尺度的能量。在同一尺度上,将车体和构架的加速度能量相除得到悬挂的尺度能量传递特性,建立相邻时段对应悬挂尺度能量传递特性的比较方法,实现悬挂弹簧的故障检测。应用弹簧不同故障程度下大量动力学仿真数据对方法的有效性进行了验证。

1 车辆悬挂的故障检测机理

为了反映车辆的垂向振动特性,将半车简化为图 1 的车体、构架、轮对、弹簧、减振器组成的振动系统,应用牛顿定律建立车体的垂向振动方程

$$M_c \ddot{z}_c - C_s \dot{z}_b + C_s \dot{z}_c - K_s z_b + K_s z_c = 0 \quad (1)$$

式中: M_c 为车体二分之一质量; C_s 为二系减振器阻尼; K_s 为二系弹簧的刚度; z_c 为车体垂向振动位移; z_b 为构架的垂向振动位移。

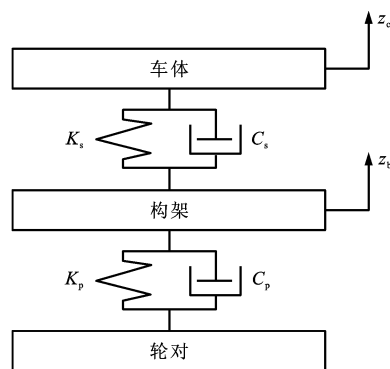


图 1 车辆振动模型

Fig. 1 Vibration model of vehicle

图 1 中: C_p 为一系减振器阻尼; K_p 为一系弹簧的刚度。

对方程(1)进行拉氏变换,为了提高分析的灵敏性,建立车体到构架的振动加速度传递函数,得到传递函数幅频特性的平方为

$$H = \frac{K_s^2 + \omega^2 C_s^2}{(K_s - \omega^2 M_c)^2 + \omega^2 C_s^2} \quad (2)$$

式中: ω 为角频率。

绘制不同弹簧刚度下车体到构架传递函数幅频特性平方的关系见图 2。悬挂刚度变化会引起传递函数发生频移现象,刚度变小,传递函数的峰值向左平移,且峰值变小,故可以直接用传递函数幅频特性的频移特性来检测故障。但是车辆振动为随机输入,易致车体、构架的振动频带不在传递函数幅频特性的峰值频率范围内,为此,本文针对这一情况,提出一种多尺度能量传递特性比较的方法来捕捉随机振动情况下的悬挂传递函数的频移特性以实现悬挂的故障检测。

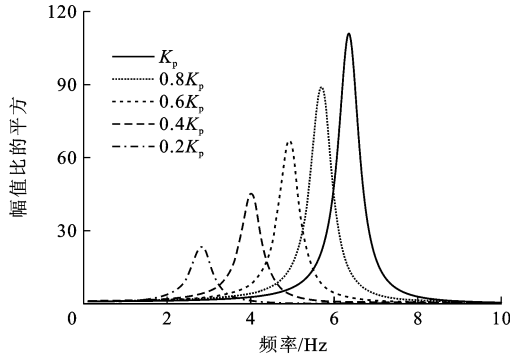


图2 悬挂传递特性

Fig. 2 Transfer characteristic of suspension

2 悬挂故障检测方法

2.1 谐波小波包分解理论

谐波小波^[11-14]频域紧支,具有合形特性,分解具有快速算法,能表征振动信号的时频特征,分解精度高,具有明确的数学表达式,因此,本文选用谐波小波来分解车体和构架的振动信号。谐波小波在频域的表达式为

$$W_{m,n}(\omega) = \begin{cases} 1/2\pi(n-m) & 2\pi m \leq \omega \leq 2\pi n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: n, m 为尺度参数。

对式(3)进行反傅立叶变换得到谐波小波的时域表达式为

$$W_{m,n}(t) = \frac{\exp(j2\pi nt) - \exp(j2\pi mt)}{j2\pi(n-m)t} \quad (4)$$

式中: j 为虚数单位; t 为时间。

给出谐波小波的平移步长 $\frac{k}{n-m}$, k 为平移参数,式(4)变为

$$W_{m,n}\left(t - \frac{k}{n-m}\right) = \frac{\exp\left\{j2\pi n\left[t - \frac{k}{(n-m)}\right]\right\} - \exp\left\{j2\pi m\left[t - \frac{k}{(n-m)}\right]\right\}}{j2\pi(n-m)\left[t - \frac{k}{(n-m)}\right]}$$

谐波小波的分解带宽为 $2\pi(n-m)$, $k/(n-m)$ 为分析中心的谐波小波一般表达式。

与其他小波分解类似,随着分解层数的增加,分解的频域变小,低频细化能力好,中、高频分辨力差,同时不能获取等频带信号的特征,因此,对故障信号进行谐波小波包分解。在任意分解层上,实现不同频段的等分辨率分解

$$m = lf_b$$

$$n = (l+1)f_b$$

$$f_b = \frac{f_h}{2^s}$$

式中: s 为谐波小波包的分解层数; f_h 为最高分析频率; f_b 为小波包分析带宽; l 为信号尺度。

谐波小波包分解的具体步骤为:将分析的信号进行傅立叶变换,根据分析的最高频率和小波分解层数划分节点,对2个节点之间的信号进行反傅立叶变换得到该频段的小波系数。

2.2 悬挂尺度能量传递特性

对车体、构架的垂向振动加速信号采用谐波小波包分解方法和流程进行7层分解,取较低8个尺度作为进一步分析的信号。原因是车体、构架振动的采样频率为512 Hz已足够,进行7层小波包分解,每包的频带为2 Hz,8个尺度所涉及的频率范围为0~16 Hz,由图2可知这能够满足悬挂故障检测的需要。对车体、构架振动加速度小波包分解后选取的8个低尺度信号分别为 $A_{l,r}$ 、 $B_{l,r}$ ($r=1, \dots, N$; $l=1, \dots, 8$; N 为信号长度),车体与构架振动加速度的尺度能量分别为

$$E_l = \sum_{r=1}^N A_{l,r}^2$$

$$F_l = \sum_{r=1}^N B_{l,r}^2$$

为此,定义悬挂的尺度能量传递特性的平均尺度为

$$H(l) = \frac{\sum_{l=1}^8 E_l l / \sum_{l=1}^8 E_l}{\sum_{l=1}^8 F_l l / \sum_{l=1}^8 F_l} \quad (5)$$

2.3 尺度能量传递特性的比较规则

设时段相邻的 z_1, z_2 的悬挂的尺度能量传递特性分别为 $H_1(l)$ 和 $H_2(l)$,其比较关系为

$$R(l) = \frac{H_2(l)}{H_1(l)}$$

$R(l) > R(v)$, $R(l) > 1$, $R(v) < 1$,则悬挂传递函数的峰值由 v 尺度移动到 l 尺度,悬挂刚度出现蜕变,依此为检测依据实现悬挂弹簧故障的动态检测。

3 故障动态检测结果分析

为了验证车辆悬挂弹簧故障检测方法的有效性,采用悬挂弹簧刚度逐级变小来模拟悬挂故障的车辆动力学仿真数据对方法进行验证。建立车辆轨道耦合动力学模型^[14],见图3,其中包括10自由度的车辆模型、90阶模态的轨道模型、悬挂刚度故障模拟模型与非线性赫兹接触轮轨耦合模型。

3.1 车辆动力学模型

车辆动力学模型包括车体、前后构架的沉浮、点

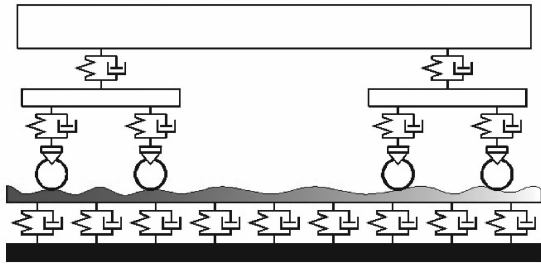


图3 车辆轨道耦合动力学模型

Fig.3 Dynamics model of vehicle-track coupling system

头运动与4个轮对的沉浮运动,其振动微分方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为质量、阻尼、刚度矩阵; \mathbf{F} 为载荷矢量; \mathbf{x} 为相关自由度的位移矢量^[13]。

3.2 轨道动力学模型

轨道模型采用连续支撑的欧拉梁力学模型,其振动的微分方程为

$$\ddot{q}_k(t) + \sum_{i=1}^{N_a} C_{pi} Y_k(x_i) \sum_{h=1}^M Y_h(x_i) \dot{q}_h(t) + \frac{EI}{m_r} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 q_k(t) + \sum_{i=1}^{N_a} K_{pi} Y_k(x_i) \cdot \sum_{h=1}^M Y_h(x_i) q_h(t) = \sum_{g=1}^4 p_g(t) Y_k(x_{wg}) \quad (6)$$

式中: $p_g(t)$ 为第 g 位轮对对应的轮轨接触力; C_{pi} 为扣件阻尼; K_{pi} 为扣件刚度; N_a 为离散支撑数量; M 为分析轨道模态的阶数; $q_h(t)$ 、 $q_k(t)$ 分别为 h 阶与 k 阶钢轨的正则振型坐标; $Y_h(x_i)$ 、 $Y_k(x_i)$ 分别为第 i 支撑处 x_i 的 h 阶与 k 阶钢轨振型; $Y_k(x_{wg})$ 为轮轨接触位置 x_{wg} 的钢轨振型; E 、 I 、 L 分别为轨道的弹性模量、截面转动惯量和分析轨道的长度; m_r 为钢轨的线密度。

轨道垂向振动位移为

$$Z_r(x, t) = \sum_{k=1}^M Y_k(x) q_k(t)$$

式中: $Y_k(x)$ 为钢轨任意纵向位置 x 处的振型。

3.3 悬挂刚度故障模拟模型

采用刚度参数逐级减小来模拟悬挂弹簧的故障,总共设定了3级,每级参数降低依次为30%、30%和40%。设总的仿真计算的时间为 ΔT ,则在不同时间段的模拟弹簧刚度变为

$$K = \begin{cases} K_s & 0 \leq t < 0.25\Delta T \\ 0.6K_s & 0.25\Delta T \leq t < 0.50\Delta T \\ 0.3K_s & 0.50\Delta T \leq t < 0.75\Delta T \\ 0.1K_s & 0.75\Delta T \leq t \leq \Delta T \end{cases} \quad (7)$$

采用不同时间段的刚度参数去改变车辆矩阵,

实现对悬挂弹簧故障的动态模拟。

3.4 轮轨非线性赫兹接触模型

第 g 位轮对的轮轨垂向压缩量 $L_g(x, t)$ 为

$$L_g(x, t) = Z_{wg}(t) - Z_{rg}(t) - z_0(x, t)$$

式中: $Z_{wg}(t)$ 为车轮的垂向位移; $Z_{rg}(t)$ 为轨道的垂向位移; $z_0(x, t)$ 为轨道不平顺输入。

应用 Hertz 非线性接触理论可以计算轮轨力,当 $L_g(x, t) > 0$ 时

$$p_g(t) = \left[\frac{1}{G} L_g(x, t) \right]^{1.5}$$

$$G = 3.86 \times 10^{-8} R^{-0.115}$$

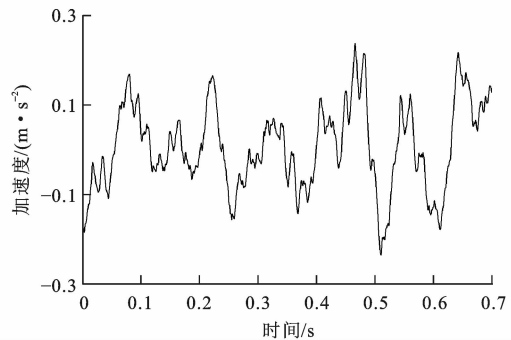
当 $L_g(x, t) \leq 0$ 时

$$p_g(t) = 0$$

式中: G 为轮轨接触参数; R 为车轮的名义滚动圆半径。

3.5 尺度能量传递特性的比较方法的测试与验证

采用德国低干扰高速轨道谱作为轨道激励进行动力学仿真,分别获得车体和构架的垂向振动加速度信号的时间历程。在运行速度为200、250 km·h⁻¹条件下,安装弹簧车体处的垂向振动加速度分别见图4、5,构架的垂向振动加速度分别见图6、7。分别对车体、构架的垂向振动加速度信号进行谐波小波包分解,得到信号的8个低尺度能量值,按照每2048个点为1个时间段统计信号平均传递尺度,具体分别见图8、9。

图4 车速为200 km·h⁻¹时车体垂向振动加速度时间历程Fig.4 Time history of car body vertical vibration acceleration at 200 km·h⁻¹

从图8、9中可看出,随着时段的增加能量平均传递尺度趋势不断增大。由悬挂刚度蜕变模拟式(7)可知,在4个时段中(第1时段,弹簧刚度不变,第2时段,刚度变为60%,第3时段,刚度变为30%,第4时段,刚度变为10%),刚度逐步变小,由检测机理分析中的图2可知,悬挂的传递特性向低频段移动,在对应平均传递尺度图上,悬挂的传递特性应该向高尺度方向发展。同时,图8、9呈现出随

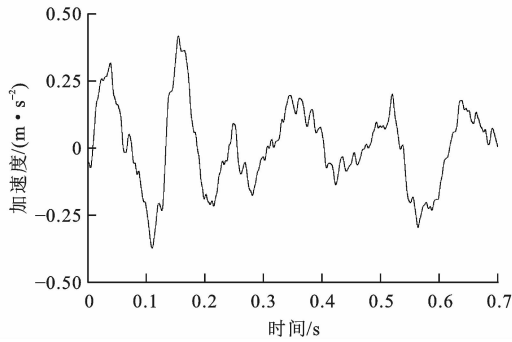
图5 车速为 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时车体垂向振动加速度时间历程

Fig. 5 Time history of car body vertical vibration acceleration at $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

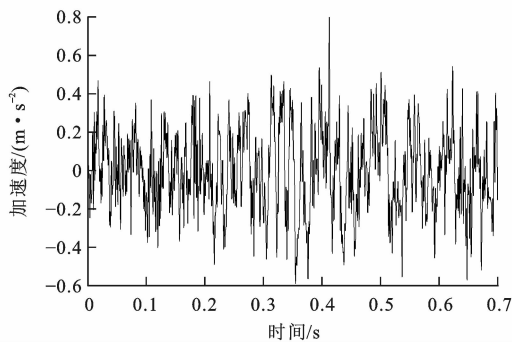
图6 车速为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时构架垂向振动加速度时间历程

Fig. 6 Time history of frame vertical vibration acceleration at $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

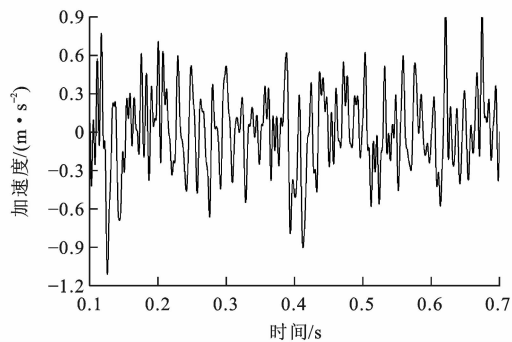
图7 车速为 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时构架垂向振动加速度时间历程

Fig. 7 Time history of frame vertical vibration acceleration at $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

刚度蜕变而传递尺度向高趋势发展的相同规律。可见,图8、9对悬挂的故障特性检测规律与图2中由悬挂故障引起的频移特性的变化规律一致,证明了本文提出的悬挂故障检测方法的有效性,能够实现刚度蜕变10%的悬挂故障检测,说明该方法确诊性好,可靠性高,具有一定的工程适应性。

4 结 语

(1)该方法在不同尺度条件下,建立了信号能量传递的比较基准,能够克服不同时间随机输入条件

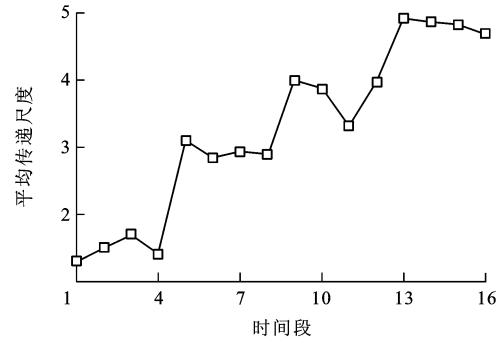
图8 车速为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时不同时段平均能量传递尺度

Fig. 8 Average energy transfer scales at different periods and $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

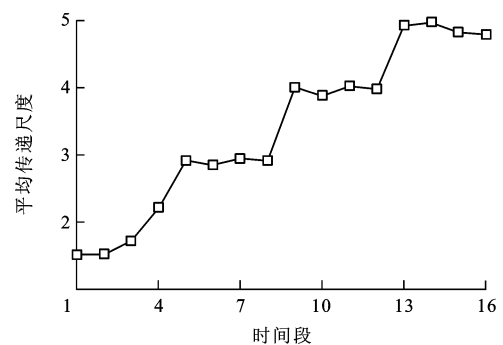
图9 车速为 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时不同时段平均能量传递尺度

Fig. 9 Average energy transfer scales at different periods and $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

下系统关键部件的状态判断。

(2)该方法与车辆的对象结构联系紧密,诊断概念明确,容易理解,可操作性强。

(3)该方法涉及系统与算法简单,系统快速性好,具有很好的工程适应性。

参考文献:

References:

- [1] 程海涛,丁旭杰. 装用SW-160型转向架客车动力学性能优化分析[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(2): 66-71.
CHENG Hai-tao, DING Xu-jie. Dynamics performance optimization analysis of passenger cars equipped with SW-160 bogie[J]. China Railway Science, 2004, 25(2): 66-71. (in Chinese)
- [2] 池茂儒,张卫华,曾 京,等. 高速客车转向架悬挂参数分析[J]. 大连交通大学学报, 2007, 28(3): 13-19.
CHI Mao-ru, ZHANG Wei-hua, ZENG Jing, et al. Study of suspension parameter of high speed passenger car bogies[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2007, 28(3): 13-19. (in Chinese)
- [3] 赵 娜,曹登庆. 铁道车辆含故障参数的非线性动力学模型[J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 122-125, 199.

(下转第62页)

- cross-wind[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215(4): 311-318.
- [7] STICKLAND M T, SCANLON T J, CRAIGHEAD I A, et al. An investigation into the mechanical damping characteristics of catenary contact wires and their effect on aerodynamic galloping instability[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2003, 217(2): 63-71.
- [8] 曹树森,柯 坚,邓 斌,等.强风地区接触网动力稳定性分析[J]. 中国铁道科学,2010,31(4):79-84.
- CAO Shu-sen, KE Jian, DENG Bin, et al. The dynamic stability analysis of the catenary systems in strong wind area[J]. China Railway Science, 2010, 31(4): 79-84. (in Chinese)
- [9] 赵 飞,刘志刚,韩志伟.随机风场对弓网系统动态性能影响研究[J]. 铁道学报,2012,34(10):36-42.
- ZHAO Fei, LIU Zhi-gang, HAN Zhi-wei. Simulation study on influence of stochastic wind field to dynamic behavior of pantograph-catenary system[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 36-42. (in Chinese)
- [10] 张希黔,葛 勇,严春风,等.脉动风场模拟技术的研究与进展[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(6):206-212.
- ZHANG Xi-qian, GE Yong, YAN Chun-feng, et al. Advances in research of simulation technology of fluctuation wind loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 206-212. (in Chinese)
- [11] 王之宏.风荷载的模拟研究[J]. 建筑结构学报,1994,15(1): 44-52.
- WANG Zhi-hong. Simulation of wind loading[J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(1): 44-52. (in Chinese)
- [12] 胡雪莲,李正良,晏致涛.大跨度桥梁结构风荷载模拟研究[J]. 重庆建筑大学学报,2005,27(3):63-67.
- HU Xue-lian, LI Zheng-liang, YAN Zhi-tao. Simulation of wind loading for large-span bridge structures[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(3): 63-67. (in Chinese)
- [13] 舒新玲,周 岱.风速时程 AR 模型及其快速实现[J]. 空间结构, 2003,9(4):27-32,46.
- SHU Xin-ling, ZHOU Dai. AR model of wind speed time series and its rapid implementation[J]. Spatial Structures, 2003, 9(4): 27-32, 46. (in Chinese)
- [14] 周 宁,张卫华.基于直接积分法的弓网耦合系统动态性能仿真分析[J]. 中国铁道科学,2008,29(6):71-76.
- ZHOU Ning, ZHANG Wei-hua. Dynamical performance simulation of the pantograph-catenary coupled system based on direct integration method[J]. China Railway Science, 2008, 29(6): 71-76. (in Chinese)
- [15] 刘 怡,张卫华,梅桂明.受电弓/接触网垂向耦合运动中接触网动应力研究[J]. 铁道学报,2003,25(4):23-26.
- LIU Yi, ZHANG Wei-hua, MEI Gui-ming. Study of dynamic stress of the catenary in the pantograph/catenary vertical coupling movement[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(4): 23-26. (in Chinese)
-
- (上接第 55 页)
- ZHAO Na, CAO Deng-qing. Nonlinear dynamical model with fault parameters for railway vehicles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(6): 122-125, 199. (in Chinese)
- [4] LI P, GOODALL R, KADIRKAMANATHAN V. Estimation of parameters in a linear state space model using a Rao-Blackwellised particle filter[J]. IEE Proceedings—Control Theory and Application, 2004, 151(6): 727-738.
- [5] LI P, GOODALL R, WESTON P, et al. Estimation of railway vehicle suspension parameters for condition monitoring[J]. Control Engineering Practice, 2006, 15(1): 43-55.
- [6] KADIRKAMANATHAN V, LI P, JAWARD M H, et al. Particle filtering-based fault detection in nonlinear stochastic systems[J]. International Journal of Systems Science, 2002, 33(4): 259-265.
- [7] HAYASHI Y, TSUNASHIMA H, MARUMO Y. Fault detection of railway vehicle suspension systems using multiple-model approach[J]. Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 2008, 1(1): 88-99.
- [8] MEI T X, DING X J. A model-less technique for the fault detection of rail vehicle suspensions[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(S): 277-287.
- [9] BRUNI S, GOODALL R, MEI T X, et al. Control and monitoring for railway vehicle dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(7/8): 743-779.
- [10] NEWLAND D E. Harmonic wavelet analysis[J]. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, 1993, 443(10): 203-225.
- [11] YAN R Q, GAO R X. An efficient approach to machine health diagnosis based on harmonic wavelet packet transform[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2005, 21(4/5): 291-301.
- [12] 丁建明,林建辉,任 愈,等.基于谐波小波能量熵的轴承故障实时诊断[J]. 机械强度,2011,33(4):483-487.
- DING Jian-ming, LIN Jian-hui, REN Yu, et al. Real-time diagnosis of bearing faults based on harmonic wavelet energy entropy[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(4): 483-487. (in Chinese)
- [13] 陈 果.一种改进的谐波小波及其在转子故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报,2011,47(1):8-16.
- CHEN Guo. An improved harmonic wavelet and its application to rotor faults diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 8-16. (in Chinese)
- [14] 翟婉明.车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理[J]. 铁道学报,1992,14(3):10-21.
- ZHAI Wan-ming. The vertical model of vehicle-track system and its coupling dynamics[J]. Journal of the China Railway Society, 1992, 14(3): 10-21. (in Chinese)