

文章编号 :1006 - 2106(2006)08 - 0030 - 04

轨道不平顺导致的车桥耦合振动分析^{*}

王贵春¹ 潘家英^{2**}

(1. 郑州大学 , 郑州 450001 ; 2. 铁道部科学研究院 , 北京 100081)

摘要 研究目的 轨道不平顺常常是激起车桥系统耦合振动的主要因素之一 ,通过研究轨道不平顺导致的车桥耦合振动规律 ,为铁路桥梁精确设计提供理论依据。

研究方法 以 H. Hamid 等人提出的轨道不平顺功率谱密度为例 ,构造了时域内的轨道随机不平顺函数。以轨道不平顺样本函数为激励源 ,通过求解车桥系统耦合振动微分方程 ,分析铁路桥梁在列车荷载作用下的动力响应规律。

研究结果 计算了广西红水河铁路斜拉桥在列车通过时的动力响应 ,给出了不同车速及不同不平顺样本函数情况下桥梁主跨中点横向位移时程曲线。

研究结论 桥梁结构动力响应主要随车速及不平顺样本函数的不同而变化 ,且有较大的随机性。对于广西红水河铁路斜拉桥 ,桥梁主跨中点的最大横向位移一般在车速为 75 ~ 95 km/h 时达到最大。

关键词 铁路 ; 桥梁 ; 轨道不平顺 ; 功率谱密度 ; 车桥耦合振动

中图分类号 :U448.13 文献标识码 :A

Analysis of Vehicle – bridge Coupled Vibration due to Track Irregularities

WANG Gui – chun¹ , PAN Jia – ying²

(1. Zhengzhou University , Zhengzhou , Henan 450001 , China ; 2. Railway Building Institute , China Academy of Railway Science , Beijing 100081 , China)

Abstract **Research purposes** :Track irregularity is usually one of the most important factors that induce vehicle – bridge coupled vibration. Studying the laws of vehicle – bridge coupled vibration due to track irregularity can better provide theoretical basis for precise design of railway bridges.

Research methods :Track random irregularity functions in time domain are established on the basis of H. Hamid 's Power Spectrum Density(PSD) functions of track irregularities. The track irregularity sample functions are taken as exciting source to solve vibration differential equations of vehicle – bridge coupled vibration. This paper also studies the dynamic characteristics of railway bridges under moving vehicles.

Research results :The Hongshui River railway cable – stayed bridge in Guangxi is taken as example to calculate the dynamic response of the bridge under train passage ,and the curves of time history of displacement at midpoint of bridge main span for different vehicle velocities and irregularity samples.

Research conclusions :The dynamic response of the bridge due to passing trains is related to the speed of train and the change of track irregularity samples ,and it is of random characteristics. For the Hongshui River railway cable – stayed bridge ,the speed at which the largest lateral displacements occur falls between 75 km/h and 95 km/h.

Key words :railway bridge ; track irregularity ; power spectral density ; vehicle – bridge coupled vibration

* 收稿日期 2006 - 06 - 19

** 作者简介 :王贵春 ,1962 年出生 ,男 ,副教授 ;潘家英 ,1942 年出生 ,女 ,研究员。

列车过桥时,车桥系统会发生耦合振动。导致车桥耦合振动的因素是多方面的,其中轨道不平顺是主要因素之一。轨道不平顺是指列车通过时,钢轨走行面业已存在的或同时发生的各种不平顺。它是一个复杂的空间随机过程,包括沿轨道全长的近似的各态历经过程和反映轨道局部特征的非平稳过程,可分别称为一般不平顺和特殊不平顺。对于桥梁轨道,反映局部特征的特殊不平顺是不可忽视的。发生在桥梁轨道上的特殊不平顺主要包括轨道折角及形状弯曲等。目前在车桥系统动力相互作用的研究中,各国学者几乎均考虑了轨道一般不平顺的影响^[1-3],而关于桥梁轨道特殊不平顺的影响涉及不多。关于轨道的一般不平顺 J. C. Corbin 和 A. Hamid 等较早进行了系统的研究^[1-2],其研究表明,世界各地不同地区轨道不平顺的功率谱密度(PSD)函数具有基本一致的形式,且 PSD 函数可以以一条幂函数直线段做模拟。不同地区的 PSD 模型是非连续的,故应设法寻求一个平顺的拟合函数。J. C. Corbin 等在 20 世纪 70 年代提出了美国铁路轨道不平顺的功率谱密度函数,其后 A. Hamid 等又在 80 年代对 J. C. Corbin 等提出的功率谱密度函数进行了修正,提出了新的功率谱密度函数。我国长沙铁道学院、铁道部科学研究院等单位实测了我国一些线路的轨道不平顺情况并给出轨道不平顺功率谱密度的拟合曲线。关于桥梁轨道特殊不平顺的研究,日本开展得较早,而德国提出的 PSD 函数为欧洲国家普遍采用。我国铁道部科学研究院曾进行了桥梁轨道折角对车桥耦合振动影响的试验研究和理论分析^[3]。限于篇幅,本文主要分析轨道随机不平顺引起的车桥耦合振动。

各种扰动因素导致桥梁结构发生振动,同时桥梁结构的振动又影响车辆的运动,继而发生彼此的动力相互作用,即车桥耦合振动。车桥振动的耦合效应是由桥面钢轨和列车轮对的相互作用来传递的。通过模拟轨道不平顺,求解车桥系统振动微分方程,从而可以进行因轨道不平顺而引起的车桥系统耦合振动分析。

1 车桥耦合振动分析模型

1.1 轨道随机不平顺的数学描述

1.1.1 A. Hamid 等人的数学描述

稳态随机过程的轨道不平顺可以分为高低、左右轨高差、方向和轨距不平顺。A. Hamid 等人的研究结果表明不平顺的 PSD 可用数学形式表示为

$$\hat{S}_i(\varphi) = \begin{cases} \frac{A_1 \varphi_a^2}{\varphi^4}, & \text{当 } 3.28 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \leq \varphi \leq \varphi_a \text{ 时} \\ \frac{A_1}{\varphi^2}, & \text{当 } \varphi_a \leq \varphi \leq \varphi_b \text{ 时} \\ \frac{A_1 \varphi_b}{\varphi^4}, & \text{当 } \varphi_a \leq \varphi \leq 0.656 \text{ m}^{-1} \text{ 时} \end{cases}$$

式中 φ ——空间频率,即单位长度上波的个数(m^{-1});
 λ ——波长 $\lambda = 1/\varphi$;
 A_1 ——粗糙度参数;
 φ_a 和 φ_b ——断点频率。

美国联邦铁路局于 20 世纪 80 年代在式(1)的基础上提出了新的轨道不平顺 PSD 函数。其中高低和方向不平顺为

$$\mathcal{S}(\varphi) = \frac{A \varphi_a^2 (\varphi^2 + \varphi_a^2)}{\varphi^4 (\varphi^2 + \varphi_b^2)} \tag{2a}$$

左右轨高差和轨距不平顺为

$$\mathcal{S}(\varphi) = \frac{A \varphi_b^2}{(\varphi^2 + \varphi_a^2)(\varphi^2 + \varphi_b^2)} \tag{2b}$$

式中 $\mathcal{S}(\varphi)$ ——PSD 函数(m^2/m^{-1});
 A ——粗糙度参数 φ_a 和 φ_b 同前。

断点频率不受轨道等级的影响,而仅随轨道不平顺类型而变化。表 1 为式(2)中断点波长和频率的值。

表 1 断点波长及频率

不平顺类型	λ_a/m	λ_b/m	$\varphi_a/(\text{m}^{-1})$	$\varphi_b/(\text{m}^{-1})$
高低	42.67	7.62	0.023 4	0.131
左右轨高差	42.67	7.62	0.023 4	0.131
方向	30.48	5.49	0.032 8	0.182
轨距	34.14	4.27	0.029 3	0.234

粗糙度参数受线路等级的影响很大。表 2 列出了不同等级道路的粗糙度参数。

表 2 不同等级线路的粗糙度参数 $A(10^{-7} \text{ m}^2/\text{m})$

线路等级	6	5	4	3	2	1
高低不平顺	0.95	1.67	2.96	5.29	9.53	16.72
左右轨高差	0.72	1.06	1.57	2.33	3.39	4.87
方向不平顺	0.59	1.06	1.88	3.39	5.93	10.58
轨距不平顺	0.59	1.06	1.88	3.39	5.93	10.58

1.1.2 本文采用的数学描述

本文在分析轨道不平顺引起的车桥耦合振动响应时,以式(2)为基础构造时域内的轨道不平顺函数。采用二次滤波法,实际上是通过 2 次变换来完成的。其具体步骤为:

1.1.2.1 用乘同余法产生均布于 0~1 之间的伪随机数列,它的递推公式为

$$\begin{cases} y_i = ax_i & (3a) \\ x_{i+1} = y_i \pmod{M} & (3b) \\ u_{i+1} = x_{i+1}/M & (3c) \end{cases}$$

式中 $i = 0, 1, 2, \dots, n$ $y_i \pmod{M}$ 表示 y_i 被 M 除后所得的余数。这样, 即可得到均布于 $0 \sim 1$ 之间的随机数列 u_1, u_2, \dots, u_n 。

1.1.2.2 将模拟的线路长度 L 分成 n 等份, 则每段长度 $\delta_L = L/n$ 。将随机数列 u_1, u_2, \dots, u_n 每两个一组转换成服从高斯分布(均值为 0, 标准差为 σ)的随机变量序列 z_1, z_2, \dots, z_n 。

$$z_i = \sigma \sqrt{-2 \ln u_i} \cos(2\pi u_{i+1}) \quad (4)$$

$$z_{i+1} = \sigma \sqrt{-2 \ln u_i} \sin(2\pi u_{i+1}) \quad (5)$$

式中 $i = 1, 3, 5, \dots, n-1$; σ 的取值稍后讨论, 则 z_1, z_2, \dots, z_n 具有近似白噪声的性质, 其功率谱密度函数为

$$S(\varphi) = \sigma^2 \delta_L / \pi \quad (6)$$

1.1.2.3 采用二阶滤波器, 将 $x(0, \sigma)$ 转化为谱密度具有式(2)所示形式的随机函数 ξ_v 和 ξ_c 。当滤波器具有如下形式^[4]时, 即

$$\xi_i = (\alpha + \beta) \xi_{i-1} - \alpha \beta \xi_{i-2} + g(z_i) \quad (7)$$

则其传递函数为

$$H(f) = \frac{G(f)}{(1 - \alpha e^{-j2\pi f \delta_L})(1 - \beta e^{-j\pi f \delta_L})} \quad (8)$$

式中 $j = \sqrt{-1}$, $G(f)$ 为 $g(z)$ 的傅立叶变换函数。当 z_i 为连续的白噪声输入时, 则系统输出功率谱密度函数为

$$S_x(f) = |H(f)|^2 S_0(f) \quad (9)$$

这样, 适当选取 α, β 和 $g(z_i)$ 便可得到具有所要求的谱密度形式的滤波公式。模拟轨道高低和方向不平顺 ξ_v 的公式为

$$\xi_{vi} = \xi_{v1,i} + \xi_{v2,i} \quad (10)$$

其中

$$\xi_{v1,i} = (1 + e^{-\delta_L \varphi_b}) \xi_{v1,i-1} - e^{-\delta_L \varphi_b} \xi_{v1,i-2} + (1 - e^{-\delta_L \sqrt{\varphi_b^2 - \varphi_a^2}}) z_i \quad (11a)$$

$$\xi_{v2,i} = 2\xi_{v2,i-1} - \xi_{v2,i-2} + (1 - e^{-\delta_L \varphi_a}) z_i \quad (11b)$$

其功率谱密度为

$$S_x(\varphi) = \frac{S_0 \varphi_b^2 (\varphi^2 + \varphi_a^2)}{\varphi^4 (\varphi^2 + \varphi_b^2) \delta_L^2} \quad (12)$$

模拟左右轨高差及轨距不平顺的滤波公式为

$$\xi_{ci} = (e^{-\delta_L \varphi_a} + e^{-\delta_L \varphi_b}) \xi_{ci,i-1} - e^{-\delta_L (\varphi_a + \varphi_b)} \xi_{ci,i-2} + (1 - e^{-\delta_L \varphi_b}) z_i \quad (13)$$

其谱密度函数为

$$S_x(\varphi) = \frac{S_0 \varphi_b^2}{\varphi^4 (\varphi^2 + \varphi_a^2) (\varphi^2 + \varphi_b^2) \delta_L^2} \quad (14)$$

比较式(12)、(14)与式(2)可知

$$\delta_L^2 A = S_0 = \sigma^2 \delta_L / \pi$$

$$\text{所以 } \sigma = \sqrt{\pi A \delta_L} \quad (15)$$

各式中的 φ_a, φ_b 和 A 见表 1 和表 2。将 σ 应用于式(4)和(5), 则产生随机变量序列 z_1, z_2, \dots, z_n 。

以 $\xi_v, 2\xi_c, \xi_a$ 和 $2\xi_g$ 分别代表轨道的高低、左右轨高差、方向和轨距不平顺, 则时域内的轨道不平顺可表示如下:

$$\left. \begin{aligned} U_{zl} &= \xi_v - \xi_c \\ U_{zr} &= \xi_v + \xi_c \\ U_{yl} &= \xi_a - \xi_g \\ U_{yr} &= \xi_a + \xi_g \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中 $i = z$ 或 $y, j = l$ 或 r

U_{ij} ——轨道的初始位移;

y 和 z ——横向和竖向;

l 和 r ——左轨和右轨。

若不考虑轮对的侧滚运动时, 可认为 $U_z = \xi_v, U_y = \xi_a$, 而不再区分左右轨。

研究结果^[2]表明, 轨道接头处的特性与其它部位相差很大, 轨道接头处的随机不平顺是周期性变化过程。对轨道几何形状数据进行分析的结果表明, 接头处钢轨的高低或方向变化是尖弯形状, 其数学表达式为

$$\eta(x) = ce^{-k|x|} \quad (17)$$

式中 x ——沿钢轨的长度;

c ——接头处的弯曲幅值;

k ——沿 x 轴的衰减率, 并假定其值在某段为常数。

因此, 接头的形状是由其幅值及其衰减率确定的。大量实测结果表明, 接头幅值是一个稳态随机过程, 该过程受非零平均分布值控制。表 3 给出了大量实测结果按回归分析得出的接头弯曲平均幅值和衰减率 k 的值。

表 3 接头弯曲平均幅值 \bar{c} 和衰减率 k

线路等级		6	5	4	3	2	1
高低	\bar{c}/cm	0.28	0.36	0.48	0.64	0.84	1.14
	$k/(\text{m}^{-1})$	0.64	0.51	0.38	0.36	0.33	0.33
方向	\bar{c}/cm	0.20	0.28	0.38	0.51	0.69	0.89
	$k/(\text{m}^{-1})$	1.45	1.17	0.89	0.51	0.38	0.30

1.2 车桥耦合振动方程及求解方法

把车桥振动微分方程分成 2 个部分, 即车辆振动方程和桥梁振动方程。通过它们之间力和位移的协调条件使二者耦合起来。这同时又使得方程中矩阵的阶数减少, 便于计算分析。车辆的振动方程为

$$[M_V]\{\ddot{X}_V\}+[C_V]\{\dot{X}_V\}+[K_V]\{X_V\}=\{F_V\}$$

(18)

式中 V ——车辆；
 $\{X_V\}$ ——车辆位移向量,含有 23 个分量(4 轴车辆)或 27 个分量(6 轴车辆)；
 $[M_V]$ ——车辆系统的质量；
 $[C_V]$ ——车辆系统的阻尼；
 $[K_V]$ ——车辆系统的刚度矩阵；
 $\{F_V\}$ ——车辆所受外力向量。

桥梁的振动方程为

$$[M_B]\{\ddot{X}_B\}+[C_B]\{\dot{X}_B\}+[K_B]\{X_B\}=\{F_B\}$$

(19)

式中 $\{X_B\}$ ——桥梁节点位移向量；
 $[M_B]$ ——桥梁结构的质量；
 $[C_B]$ ——桥梁结构的阻尼；
 $[K_B]$ ——桥梁结构的刚度矩阵；
 $\{F_B\}$ ——桥梁所受等效节点力向量,其中下角标 B 表示桥梁。

车桥系统动力响应计算的关键步骤之一是求解振动微分方程。鉴于车桥系统振动微分方程系数矩阵的时变特征,利用逐步积分法,可以在一系列的时间增量点上求得系统的动力响应。针对车桥系统动力相互作用的特点,建立了解决这一特殊问题的平衡迭代数值计算方法。

2 算例

图 1 为广西红水河铁路斜桥结构示意图,主跨 96 m,是一座双塔双索面 3 跨预应力混凝土斜拉桥,主梁截面为单箱双室,缆索呈竖琴形布置。以东风 4 型内燃机车为例,利用本文建立的方法,模拟桥梁轨道不平顺样本的变化,借助于车桥耦合振动分析程序,进行了车桥系统振动分析。图 2 为在不同车速时桥梁结构主跨中点横向振动位移时程曲线。图 3 是车速为 72 km/h 时,在不同轨道不平顺样本函数时,桥梁主跨中点的横向位移时程曲线。

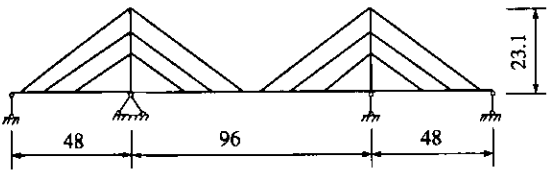


图 1 红水河铁路斜拉桥结构简图(单位:m)

由图 2 及图 3 的位移时程曲线可知,随着车辆由跨端向中间行驶,桥梁结构动力响应逐渐增大。当车

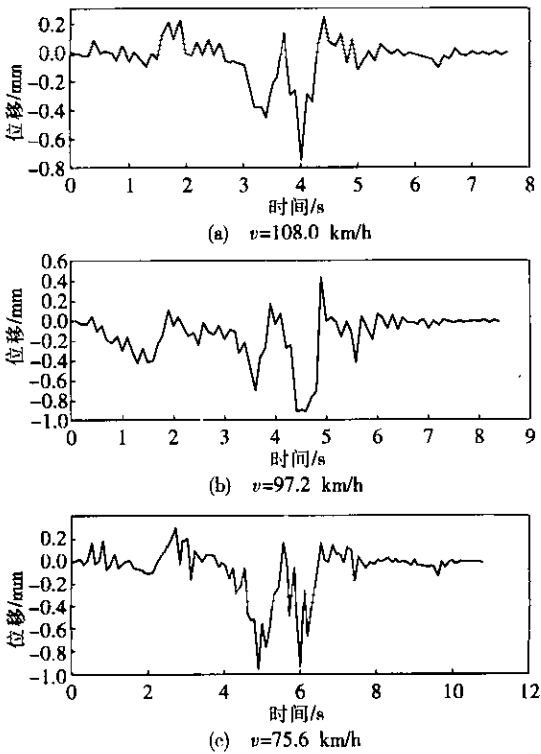


图 2 主跨中点横向位移历时曲线

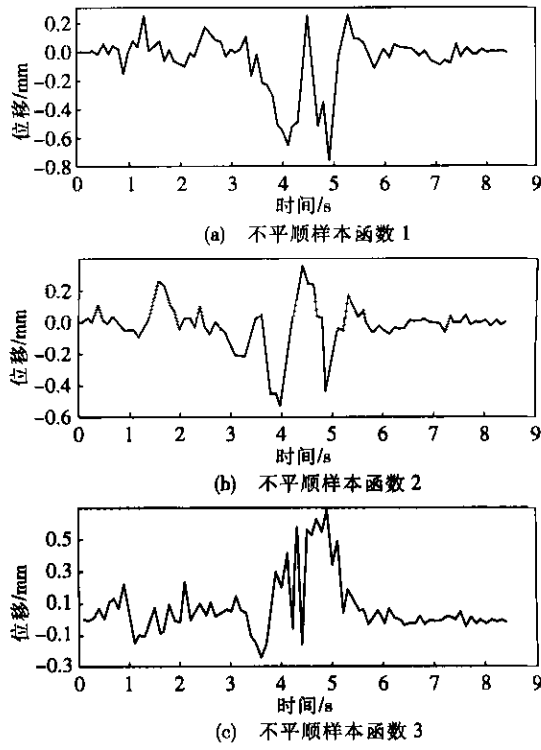


图 3 不同不平顺样本函数时主跨中点横向位移历时曲线
($v=72\text{ km/h}$)

辆行驶到跨中附近时,其响应达到最大值。图 2 表明,桥梁结构的动力响应随车速的变化而变化。一般情况下,对于某具体桥梁,存在一个车速范围,使响应达到

(下转第 57 页)

效果更好的防火涂料等增大钢梁的临界初始挠度。

4 结束语

(1) 适当选取计算参数和模型,采用本文方法可以对钢框架组合结构的冲击坍塌破坏进行很好的仿真分析,分析结果与试验结果吻合较好。采用相同方法对 96 组结构的冲击倒塌进行了模拟分析,回归出了结构倒塌的临界挠度简化计算公式,用此可以判断结构是否坍塌。

(2) 冲击荷载作用位置的不同,结构坍塌破坏的机理是不同的。当冲击作用在结构上部时,结构不会直接倒塌,但冲击爆炸引起的火灾会降低构件的承载力,这样结构就有可能倒塌。增大构件自身强度或者加大防火材料的厚度可提高构件的抗火承载力,有效防止上部结构坍塌。当冲击荷载作用在结构下部时,结构极有可能直接坍塌。在钢梁底部增设钢绞线可以提供可供选择的传力路线,可防止结构坍塌。

(3) 结构在冲击荷载作用下的破坏机理是相当复杂的,模型化难度大,如何简化计算模型并考虑多种破坏效应、防止结构倒塌的措施,仍需进一步研究。

参考文献:

[1] 赵振东,钟江荣,余世舟. 钢混结构物受外来飞射体撞击

的破坏效应研究[J]. 地震工程与工程振动,2003,23(5):88-94.

[2] B. M. Luccioni, R. D. Ambrosini, R. F. Danesi. Analysis of building collapse under blast loads[J]. Engineering Structures, 2004(26):63-71.

[3] H. X. Yu, J. Y. Richard Liew. Steel framed structures subjected to the combined effects of blast and fire - part 1: state-of-the-art review[J]. International Journal of Advanced Steel Construction, 2005,1(1):67-84.

[4] H. X. Yu, J. Y. Richard Liew. Steel framed structures subjected to the combined effects of blast and fire - part 2: case study[J]. International Journal of Advanced Steel Construction, 2005,1(1):67-84.

[5] Samuel Tan. Cable-based retrofit of steel building floors to prevent progressive collapse[Z]. Master paper of University of California in Berkeley, 2003.

[6] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. 14th International Symposium on Ballistics, 1993(14):591-600.

[7] T. T. Lie. Fire resistance of rectangular steel columns filled with bar-reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1995,121(5):797-805.

(编辑 慕成娟)

(上接第 33 页)

峰值。图 3 表明,在相同车速下,桥梁结构的动力响应随时间的变化规律是相似的,但其最大位移随轨道不平顺样本函数的不同而变化。

3 结论

从上述实例计算和结果分析可得出如下一些结论:

(1) 车桥系统耦合振动,除了受桥梁结构和车辆本身特性影响之外,还取决于车速及轨道不平顺样本函数等其它因素。

(2) 桥梁结构的车激动力响应随车速的变化而变化。对于具体的车桥系统,存在某一车速,使得桥梁结构的动力响应最大。对于红水河铁路斜拉桥,其值在 75~95 km/h 之间。

(3) 桥梁结构的动力响应随轨道不平顺样本函数的不同而变化。较大的不平顺通常激起较大的振动。

(4) 轨道不平顺是引起车桥系统耦合振动的主要因素之一。由于轨道不平顺是一个空间随机过程,因此,轨道不平顺导致的车桥耦合振动有较大的离散性和随机性。

参考文献:

[1] Corbin J C, Cauffman W M. Classifying Track by Power Spectral Density[J]. Mechanics of Transportation Suspension Systems, 1975,15(1):1-20.


[2] 美国运输部,联邦铁路局. 轨道几何形状变化的分析说明[R]. 铁道部科学研究院,译. 北京:铁道部科学研究院,1983.

[3] 王贵春. 大跨度铁路斜拉桥车激空间振动线性及非线性分析[D]. 北京:铁道部科学研究院,1996.

[4] Otnes R K, Enochson L. Digital Time Series Analysis[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1972.

(编辑 慕成娟)

轨道不平顺导致的车桥耦合振动分析

作者: [王贵春](#), [潘家英](#), [WANG Gui-chun](#), [PAN Jia-ying](#)
作者单位: [王贵春, WANG Gui-chun\(郑州大学, 郑州, 450001\)](#), [潘家英, PAN Jia-ying\(铁道部科学研究院, 北京, 100081\)](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2006(8)
被引用次数: 4次

参考文献(4条)

1. [Corbin J C;Caufman W M](#) [Classifying Track by Power Spectral Density](#) 1975(01)
2. [美国运输部;联邦铁路局;铁道部科学研究院](#) [轨道几何形状变化的分析说明](#) 1983
3. [王贵春](#) [大跨度铁路斜拉桥车激空间振动线性及非线性分析](#)[学位论文] 1996
4. [Otnes R K;Enochson L](#) [Digital Time Series Analysis](#) 1972

本文读者也读过(8条)

1. [陈秀方](#). [金守华](#). [曾华亮](#). [Chen Xiufang](#). [Jin Shouhua](#). [Zeng Hualiang](#) [客运专线轨道不平顺功率谱分析](#)[期刊论文]-[中国工程科学](#)2008, 10(4)
2. [张昕](#). [蒋通](#) [考虑轨道不平顺的车-桥动力分析](#)[期刊论文]-[力学季刊](#)2003, 24(1)
3. [张钧博](#). [高芳清](#). [Zhang Junbo](#). [Gao Fangqing](#) [公路桥梁车桥耦合振动的随机响应分析](#)[期刊论文]-[路基工程](#)2008(3)
4. [曾华亮](#). [金守华](#). [陈秀方](#). [ZENG Hua-liang](#). [JIN Shou-hua](#). [CHEN Xiu-fang](#) [客运专线新建线路轨道不平顺功率谱分析](#)[期刊论文]-[铁道科学与工程学报](#)2005, 2(4)
5. [陈宪麦](#). [王澜](#). [陶夏新](#). [崔高航](#). [CHEN Xian-mai](#). [WANG Lan](#). [TAO Xia-xin](#). [CUI Gao-hang](#) [基于小波分析理论的轨道不平顺分析](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#)2008, 25(1)
6. [李军强](#). [刘宏昭](#). [何钦象](#). [方同](#) [车-桥系统耦合振动响应的简便计算](#)[期刊论文]-[应用力学学报](#)2004, 21(2)
7. [王解军](#) [运行列车作用下桥梁的动力反应](#)[学位论文]2000
8. [王贵春](#). [潘家英](#). [张欣](#). [Wang Guichun](#). [Pan Jiaying](#). [Zhang Xin](#) [大跨度铁路斜拉桥车桥耦合振动非线性分析](#)[期刊论文]-[应用力学学报](#)2008, 25(3)

引证文献(4条)

1. [王贵春](#) [桥上轨道折角引起的车桥系统振动分析](#)[期刊论文]-[铁道建筑](#) 2013(10)
2. [杨仕若](#). [曾庆元](#) [列车通过钢桁梁桥时动力响应分析](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2010(7)
3. [孙俊岭](#) [框架结构体系在上海虹桥站正线桥的应用研究](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2010(8)
4. [李明华](#). [李立林](#). [何晓源](#) [高速铁路轨道不平顺幅值控制研究](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2009(9)

引用本文格式: [王贵春](#). [潘家英](#). [WANG Gui-chun](#). [PAN Jia-ying](#) [轨道不平顺导致的车桥耦合振动分析](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2006(8)