

路面谱激励下的运营桥梁结构的响应分析

李炜明^{a,b}, 朱宏平^{a,b}, 涂 静^{a,b}, 夏 勇^{a,b}

(华中科技大学 a. 土木工程与力学学院; b. 控制结构湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 基于运营桥梁结构中不同路谱激励样本的差异, 分别计算了特定样本下, 车速变化时桥梁结构、运营车辆的位移、速度、加速响应。采用标准路面等级的功率谱密度, 运用余弦叠加方法, 模拟了不同样本的各等级路面谱激励; 采用直接积分的方法, 计算了加入路面随机激励后的车桥振动的微分方程, 分析了不同路面等级、不同车速下系统的响应。结果表明: 随机相位角、功率谱密度等级分别影响路面谱激励的样本形状和幅值大小, 不同随机样本具备相同统计特征; 对于系统的响应曲线, 路面平整度等级对幅值影响相对显著, 车速变化对形状影响相对显著; 根据算例中不同路面平整度等级的计算结果, 给出了相应的工程建议。

关键词: 随机样本; 桥梁结构; 路面谱激励; 系统响应

中图分类号: TU311.3; O313 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)01-0072-05

Operational Bridge Responses due to Road Surface Profile Spectral Excitations

LI Wei-ming^{a,b}, ZHU Hong-ping^{a,b}, TU Jing^{a,b}, XIA Yong^{a,b}

(a. School of Civil Engineering and Mechanics; b. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: Random spectrum excitation samples of a road surface profile are investigated. The displacements, velocities, accelerations of a vehicle and a bridge structure are discussed using certain samples. The road excitations are numerically simulated by the random phase cosine method of the power spectral density. The vehicle bridge system responses are obtained using the vehicle bridge differential equations for different road surface profiles. It is concluded that the random phase has critical effects on the road surface profile curve shape, and the power spectral density on the curve value. The random samples possesses the same statistical characteristics. The system response values are affected more by the road surface profiles, and the response shapes are affected more as the vehicle velocity varies. Some engineering advice is proposed based on the numerical calculation with the different random excitation inputs for their significant differential responses.

Key words: random samples; bridge structure; road surface profile spectral excitations; system response

路面谱激励是对结构(桥、路、基础等)、车、人(乘坐舒适度)的一个重要的激励源, 从 1973 年

Dods 在结构振动中将路面随机激励引入^[1], 一直受到国内外学者的关注^[2-3]。

收稿日期: 2008-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50608036 & 50778077); 华中科技大学研究生科技创新基金(HF-05-15)

作者简介: 李炜明(1976-), 男, 华中科技大学博士生, 主要从事结构振动分析及健康监测研究, (E-mail) lwm. hust@gmail.com。

朱宏平(联系人), 男, 华中科技大学教授, 博士生导师, (E-mail) hpzhu@mail. hust. edu. cn。

19 世纪以来,运营桥梁结构在理论、实践上受到学者、工程师的广泛关注,国内外已有一些公认的成果^[4]。

不少学者专注于路面谱激励的评价、分析及模拟^[5]。然而,作为随机过程的路面激励,不同样本个体之间的差异性,及其对运营结构的影响,暂未见相关文献阐述。

该文研究内容如下:

1)采用基于随机相位的余弦叠加的方法,模拟生成了不同的路面谱激励样本,并对其差异进行了分析。

2)取其中的特定样本,对运营状态下的桥梁、车辆的位移、速度和加速度响应分别进行了计算。

1 路面谱激励随机样本的差异性

1.1 路面谱激励

路面谱激励通常由结构构造、表层风化、使用磨损、不均匀沉降等原因产生,一般认为其为一平稳的、各态历经的随机过程。因此,即使是同一辆车在同一桥面上跑两次取得的响应样本,也会存在差异。

对于路面不平度,Dods 于 1973 年提出了基于功率谱密度(PSD)表达式模型,并被国际标准化组织采用^[6];Sayers 于 1982 年在世界银行资助下在巴西等国家进行路面平整度试验,并在此基础上提出了国际平整度指数(International roughness index, IRI)指标^[7]。

事实上,路面功率谱密度与 IRI 在一定前提下,可以换算^[5]。

1986 年,中国学者基于功率谱密度函数,制订了相应的国家标准:GB7031-86《车辆振动输入路面平度表示方法》。

1.2 随机相位的余弦方法

对于路面谱激励,Dods 在 1973 年,将路面平整度假设为一 0 均值的稳态高斯随机周期分布,表示成具有随机相位的余弦之和的方法,被广泛认同^[1]。

假设路面表面的函数可以描述为 $r(x)$,可有:

$$r(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cos(\omega_i t - \beta_i) \quad (1)$$

那么 $r(x)$ 的均值为:

$$E[r(t)] = \sum_{i=1}^N \alpha_i E[\cos(\omega_i t - \beta_i)] = 0$$

式中

$$E[\cos\beta_i] = \int_0^{2\pi} (\cos\beta_i) \left(\frac{1}{2\pi}\right) d\beta_i = 0$$

均方差可以表示为

$$E[r^2(t)] = E\left[\sum_{i=1}^N \alpha_i \cos(\omega_i t - \beta_i) \sum_{j=1}^N \alpha_j \cos(\omega_j t - \beta_j)\right]$$

将(2)代入式(1),即有

$$r(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{4S(\omega_i) \Delta\omega} \cos(\omega_i t - \beta_i) \quad (2)$$

其中, ω 为周期频率; β 为随机产生的幅角,在 $0 \sim 2\pi$ 的区间内独立、均匀分布。

因此,式(2)中可以通过功率谱密度 $S(\omega)$ 来求路面谱激励。

A_r 为路面不平度系数,根据国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)的规定, A_r 可取 5×10^{-6} 、 20×10^{-6} 、 80×10^{-6} 、 260×10^{-6} ,分别对应路面的四种状况:平顺、良好、一般、不平顺(very good, good, average, poor)^[6];分别以表示 A_{r1} 、 A_{r2} 、 A_{r3} 、 A_{r4} ,并以 A_{r0} 表示不考虑路面谱激励的情况。

1.3 数值模拟

按上节中的 A_r 等级取值,见表 1。

表 1 中(桥的)路面样本表面长度为 25 m,通过 2^8 (256)次运算的生成样本空间;第 1、第 2 列分别为样本 1、样本 2 的数据。

对于表 1 中第 1 行的基于相同随机相位的各等级路面平整度,横坐标的为样本的长度,纵坐标为路面的平整度(m)。

对于样本 1、样本 2,随功率谱密度(PSD)等级 $S(\gamma)$ 的增大, A_{r1} 、 A_{r2} 、 A_{r3} 、 A_{r4} 相对标准高程(0 m)偏离量增大;同时各由于基于同一随机分布的相位角,其曲线的趋势类似,不同样本间最大幅值存在差异。

因此,为了对不同平整度等级的系统响应进行比较,以下的计算基于同一随机样本的相位角(取样本 1)。

对表 1 进一步分析,可得第 2 行中的随机相位角在样本空间内值在 $[0, 2\pi]$ 区间的分布。

如果将随机相位角作为横坐标,将其分布的区间等分为 50 个子区间,对各子区间内的样本个体的出现次数进行统计,并以其为纵坐标,可得表 1 中第 3 行的相位角在幅值子区间内的出现频率;由样本 1、样本 2,有对不同样本相位角的随机性的比较。

表 1 中第 4 行,将路面平整度作为横坐标,对于子区间内的出现频率进行统计,可得到 A_{r1} (路面平顺)时,平整度幅值在各子区间内的出现频率。

如对二样本的均值、方差进行了计算于表 1 中最后 2 行;样本 1 的均值为各等级都为 10^{-3} 等级的负数,而样本 2 的为各等级都为 10^{-3} 等级的正数;样本 1、样本 2 的方差数值上接近。由此,可认为样本

1、样本 2 出自同一 0 均值稳态高斯随机分布,统计数字特征(均值、方差)相同。

样本 1、样本 2 由相位角的随机性,路面平整度的形状不同,最大幅值存在偏差;不同样本服从同一分布。

因此,相位角 β 的随机样本分布,决定了各等级路面谱激励的随机分布特征(路面曲线的形状);功率谱密度(PSD)等级 $S(\gamma)$ 决定了路面平整的幅值;基于不同随机相位角样本的各等级路平整度不同,但最大值接近,基本统计数值特征相同(均值、方差)。

2 车桥系统

采用广为接受^[8-10]的一个简化模型来模拟运营下的桥梁结构(图 4)。其中简支梁 $L=25\text{ m}$;弹性模量 $E=2.75 \times 10^{10}\text{ N/m}^2$;截面惯性距 $I=0.12\text{ m}^4$;截面横截面面积 $A=2.0\text{ m}^2$;梁每 m 长质量 $m=4800\text{ kg/m}$;小车质量为 $m_v=1.3 \times 10^4\text{ kg}$;其弹簧刚度为: $k_v=5 \times 10^5\text{ N/m}$;小车车速为 $v=10\text{ m/s}$ 。

对其的数学模型,著作^[5]中已有不考虑路面谱激励下的阐述;在此基础上加入了路面谱激励。

结构动力学中,具备粘滞阻尼的受迫振动微分方程,一般可写为:

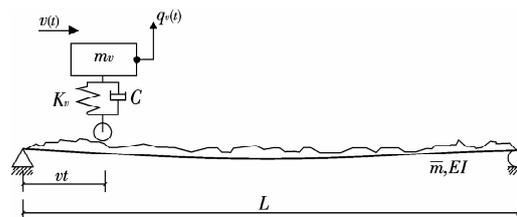


图 1 考虑路面不平的简化车桥模型

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = p(t) \quad (3)$$

由上节,有路面谱函数为 $r(x)$,那么车体的动力微分方程可写为:

$$m_v \ddot{q}_v + c_1(\dot{q}_v - \dot{q}_b - \dot{r}) + k_v(q_v - q_b - r) = 0 \quad (4)$$

对于 Bernoulli-Euler's 简支梁,假设其为梁刚度、质量、阻尼不随 x 变化,基于小变形理论、Hook's 定律、Navier 假设以及 Saint-Venant's 原理,即可得式(5):

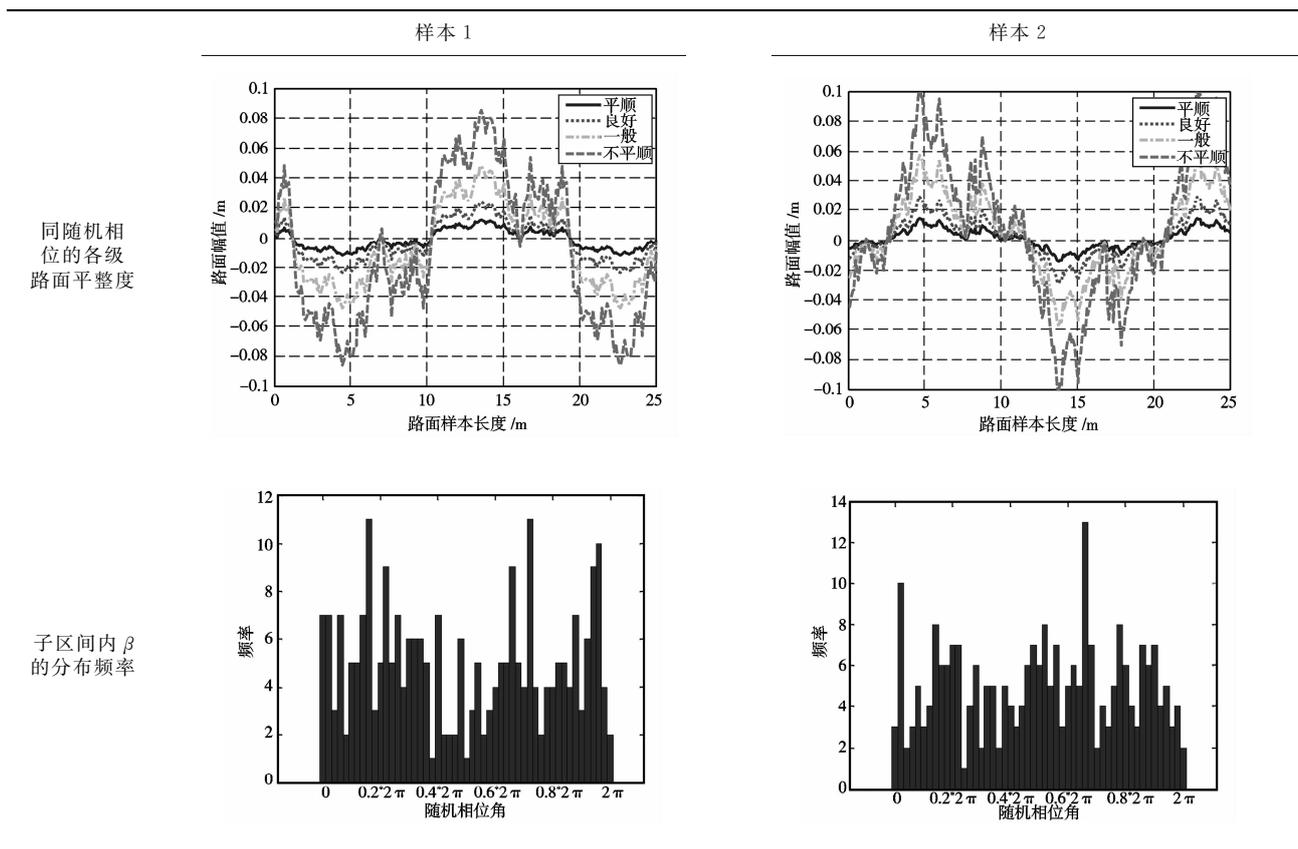
$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = \delta(x - vt)P(t) \quad (5)$$

其中

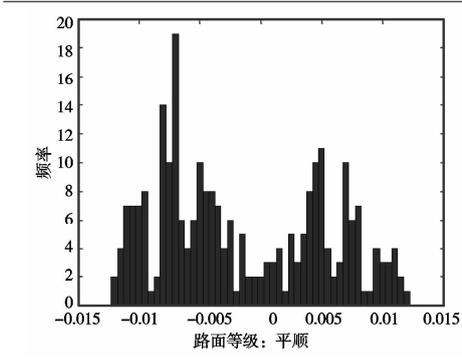
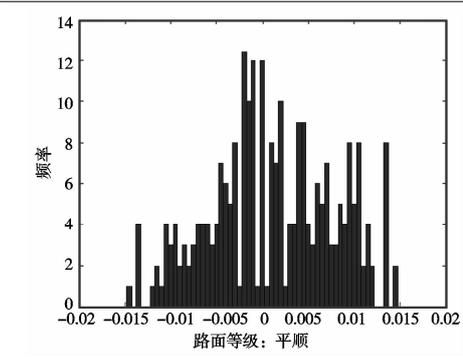
$$P(t) = m_v g + k_v(q_v - q_b - r) + c_1(\dot{q}_v - \dot{q}_b - \dot{r})$$

对式(4)、式(5)进行积分并化简,可以得到(6)、式(7):

表 1 各级路面平整度样本与相位角的样本



续表 1

	样本 1	样本 2
同级平整度子区向上的分布频率		
均值	$[-1.51 \quad -3.02 \quad -6.04 \quad -10.8] \times 10^{-3} \text{ m}$	$[1.12 \quad 2.25 \quad 4.50 \quad 8.04] \times 10^{-3} \text{ m}$
方差	$[0.458 \quad 1.83 \quad 7.34 \quad 23.5] \times 10^{-4}$	$[0.453 \quad 1.81 \quad 7.25 \quad 23.2] \times 10^{-4}$

$$m_v \ddot{q}_v + c_1 (\dot{q}_v - \dot{r}) + \omega_v^2 m_v (q_v - r) = m_v \omega_v^2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi v t}{L} q_{bn} + m_v \omega_v^2 \sin \frac{n\pi v t}{L} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\sin \frac{i\pi v t}{L} \dot{q}_{bi} \right] \quad (6)$$

$$\ddot{q}_{bn} + \left\{ 2\xi_n \omega_{bn} \dot{q}_{bn} + \frac{2c_1}{mL} \sin \frac{n\pi v t}{L} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\sin \frac{i\pi v t}{L} \dot{q}_{bi} \right] \right\} + \left\{ \omega_{bn}^2 q_{bn} + \frac{2\omega_v^2 m_v}{mL} \sin \frac{n\pi v t}{L} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\sin \frac{i\pi v t}{L} q_{bi} \right] \right\} - \frac{2q_v}{mL} [\omega_v^2 m_v q_v - \omega_v^2 m_v r + c_1 \dot{q}_v - c_1 \dot{r}] \sin \frac{n\pi v t}{L} = \frac{-2m_v g}{mL} \sin \frac{n\pi v t}{L} \quad (7)$$

其中,算例中未出现参数含义如下: ω_v 为简支梁的自振频率, k_v 为车的自振频率,简支梁的振动阻尼 $\xi = 0$, q_v 、 q_b 分别为车、桥的振动位移。对于梁的动力响应可以只计算其一阶振型,并能获得较好结果^[11-12];同时,可假设其外在阻尼为 0^[13];即有式

(6)、式(7)中 $n = 1, \xi = 0$ 。

3 系统的响应

3.1 响应计算

选用第 2 节中的样本 1,对 10 m/s、20 m/s、30 m/s、40 m/s、50 m/s 时,选取了路面平整度分别为 A_{r0} (不考虑路面平整度)、 A_{r1} 、 A_{r2} 时,对桥、车的位移、速度、加速度响应进行了计算,并选取其中车速分别为 10 m/s、20 m/s 时,得到图 2、图 3。

图 2、3 中,以 η 表示小车位于梁的相对位置,以 μ/m 表示结构、车辆的竖向位移,以 $v/m \cdot s^{-1}$ 表示竖向振动速度,以 $a/m \cdot s^{-2}$ 表示竖向振动加速度。

3.2 响应分析

对照图 2、3 及车速为 30 m/s、40 m/s、50 m/s 时的响应数据(已计算,未在该文中给出),可总结成表 2。

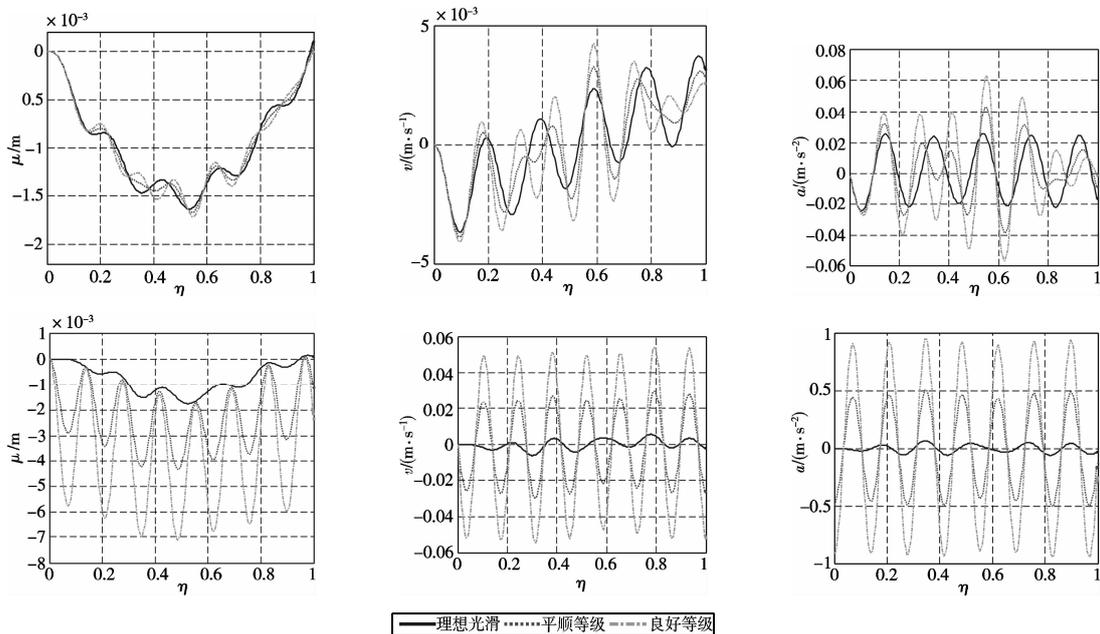


图 2 $v=10 \text{ m/s}$ 时系统的响应

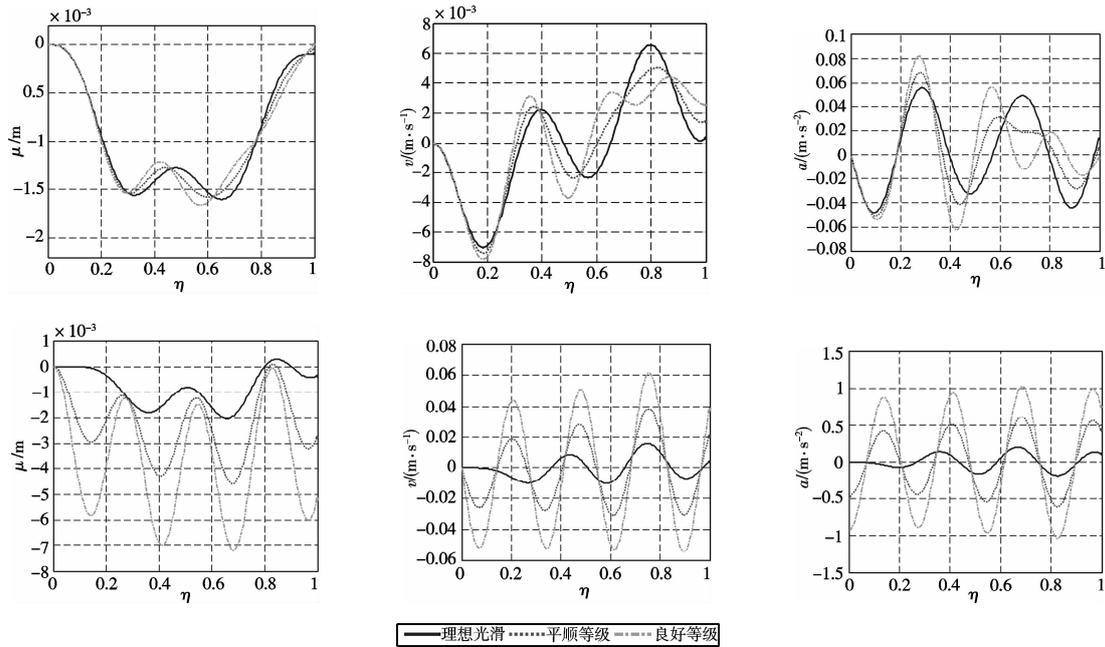
图 3 $v=20$ m/s 时系统的响应

表 2 路面平整度等级、车速变化时系统响应比较

桥中点响应	车速影响		路面平整度等级影响		车响应	车速影响		路面平整度等级影响	
	数值	曲线形状	数值	曲线形状		数值	曲线形状	数值	曲线形状
位移	>	!	>		位移	>	!	>	
速度	>	!	>		速度	>	!	>	
加速度	>	!	>		加速度	>	!	>	

总体增大:> ;总体减小:< ;总体大致不变:- ;影响相对显著:;! ;影响相对不显著:|

注:车速与响应非单调增长,只在一般实际速度区间内存在增长趋势,参见[14]。

4 结 论

对于运营桥梁结构中的路面谱激励,不同随机样本中,相位角 β 的分布,决定了各等级路面谱激励的随机分布特征(路面曲线的形状),功率谱密度(PSD)等级 $S(\gamma)$ 决定了路面平整的幅值;基于不同随机相位角样本的各等级路面平整度形状不同,但最大值接近,基本统计数值特征相同(均值、方差)。因此,对于运营桥梁结构的响应:相对车速,路面平整度等级对系统响应幅值的影响相对显著,其曲线形状基本类似;而车速的变化,对曲线形状影响相对显著,对幅值有影响,相对于路面谱激励的影响不显著。对于实际桥梁结构,为减小桥梁结构的动力响应,提高乘坐的舒适度,应该控制车速,采用较平顺的路面平整度等级,重视路面的维护。

参考文献:

[1] DODDS C J, ROBSON J D. The description of road

surface roughness[J]. Journal of Sound and Vibration, 1973, 31: 175-183.

- [2] WANG T L, SHAHAWY M, HUANG D Z. Dynamic response of highway trucks due to road surface roughness[J]. Computers & Structures, 1993, 49(6): 1055-1067.
- [3] LAW S S, ZHU X Q. Bridge dynamic responses due to road surface roughness and braking of vehicle[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 282(3-5): 805-830.
- [4] FRYBA L. Vibration of solids and structures under moving loads[M]. Groningen; Noordhoff International Publishing. 1972.
- [5] LU S. Simulation of pavement roughness and IRI based on power spectral density [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2003, 61(2): 77-88
- [6] DODDS C J. BSI proposals for generalized terrain dynamic inputs to vehicles [R]. ISO/TC/108/GW9. Document No. 5. International Organization for Standardization(ISO). 1972

(下转第 88 页)

- 影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):123-125.
- ZHANG ZHENG-QI, WANG YONG-CAI. Influence of asphalt mortar on hot mix asphalt performance at high and low temperature [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2006, 26(2):125.
- [12] TAREFDER R A, ZAMAN M, HOBASON K. A laboratory and statistical evaluation of factors affecting rutting [J]. The International Journal of Pavement Engineering, 2003, 4(1):59-68.
- [13] 刘丽,郝培文,肖庆一. 沥青胶浆高温性能及评价方法 [J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(5):30-34.
- LIU LI, HAO PEI-WEN, XIAO QING-YI. High temperature properties and evaluation method of asphalt mortar [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2007, 27(5):30-34.
- [14] 王鹏,曾凡奇,黄晓明. 沥青高温性能指标的灰色关联度分析 [J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3):32-36.
- WANG PENG, ZENG FAN-QI, HUANG XIAO-MING. Grey relation degree analysis of high-temperature performance indexes of asphalt [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3):32-36.
- [15] COLLOP A C, CEBON D, HARDY M S A. Viscoelastic approach to rutting in flexible pavements [J]. Journal of Transportation Engineering, 1995, 121(1):82-93.
- [16] 郭大智,任瑞波. 层状黏弹性体系力学 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2001.

(编辑 王秀玲)

(上接第 76 页)

- [7] SAYERS M W, GILLESPIE T D, QUEIROZ C A V. The international road roughness experiment. Establishing correlation and calibration standard for measurements [R]. Washington D C: WorBank Technical Paper, 1986.
- [8] YANG Y B, LIN C W. Vehicle bridge interaction dynamics and potential applications. Journal of Sound and Vibration [J], 2005, 282(1-2):205-226.
- [9] YANG Y B, LIN C W, YAU J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272(3):471-493.
- [10] YANG Y B, LIN C W. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification [J]. Engineering Structures, 2005, 27(13):1865-1878.
- [11] BIGGS J M. Introduction to Structural Dynamics [M]. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [12] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamic of structures [M]. 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1993.
- [13] MICHALTSOS G T. Dynamic behaviour of a single-span beam subjected to loads moving with variable speeds [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 258(2):359-372.
- [14] LI W M, ZHU H P, XIA Y. Vehicle velocity effect on dynamic effect factor to a vehicle bridge system [C]// 2nd International Conference on Structural Condition Assessment, Monitoring and Improvement, 19-21 November 2007, Changsha, China.

(编辑 胡玲)