

文章编号:1671-6833(2011)04-0034-04

基于周期图法的路面不平度随机过程数值分析

何锐¹, 陈拴发², 段冰³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061;
3. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 采用周期图法和时域内的采样原理, 根据路面高程随机过程的相位分布, 以频域路面功率谱密度为依据, 对不同等级路面不平度的时域数据进行数值模拟。针对模拟方法的准确性问题, 以仿真出的路面不平度时域和原始频域数据为输入得到车辆响应功率谱密度, 比较二者的差异, 验证了模拟方法的可靠性。通过对国际平整度指数与功率谱密度两个不平度指标进行比较, 利用模拟得到的路面不平度时域数据, 推导出二者的相关关系, 以路面实测不平度高程数据为基础的检验结果表明, 相关关系模型可靠。

关键词: 道路工程; 周期图法; 路面随机不平度; 功率谱密度; 国际平整度指数

中图分类号: U416.06 **文献标志码:** A

0 引言

路面不平度是指路面相对于理想平面的竖向偏差, 这种偏差不仅会引起车辆振动, 影响乘客的乘车舒适性, 而且会产生附加动荷载, 加剧车辆和路面结构的疲劳破坏^[1-2]。由于路面不平度问题的复杂性, 其测试方法和评价指标种类繁多。国际平整度指数 IRI (Internal Roughness Index) 由于具有时间稳定、可转移等一系列优点, 已成为国际上道路工程领域应用最为广泛的路面不平度评价指标。车辆工程领域在研究车辆振动特性、进行车辆优化设计时往往采用路面功率谱密度 PSD (Power Spectral Density) 来对路面不平度特性进行描述。PSD 表示路面高程随机过程的总能量在频率域内的分布情况, 它不仅能表示路面波的结构还能反映出路面的总体特征, 所以在车辆工程领域应用相当广泛^[2]。

为进行车辆动力学分析, 一些学者分别采用谐波叠加法、积分单位白噪声法、AR 模型法、AR-MA 模型法和傅里叶逆变换法对路面的时域数据进行了模拟^[3-4], 但是对模拟方法的准确性均未给出明确的验证。笔者采用周期图法和时域内的采样原理, 对数据信号的截断采样、补充和变换操

作进行了讨论, 以频域功率谱密度为依据模拟出路面的不平度时域数据, 并利用车辆的动态响应对模拟方法进行了验证。根据 IRI 的定义, 计算回归出 IRI 与 PSD 的关系模型, 为路面实测不平度数据应用于车辆分析并从车辆角度规范道路养护和管理系统提供参考依据。

1 路面功率谱密度

根据国际标准 ISO/TC108/SC2N67 和国标 GB/T7031-2005 对功率谱密度的规定, 路面状态按从好到坏的顺序依次划分为 A~H 8 个等级, 路面功率谱密度可采用式(1)进行拟合^[3,5]:

$$G_x(n) = G_x(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (1)$$

式中: n 为空间频率, 是波长 λ 的倒数 (m^{-1}); n_0 为参考空间频率, 取 $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; $G_x(n_0)$ 为路面不平度系数 (m^2/m^{-1}), 数据取决于路面等级; w 为频率指数, 是双对数坐标上斜线的斜率, 取 $w = 2$ 。

根据国际道路协会 (PIARC) 提出的路面构造分类^[6], 路面不平度的波长范围为 $0.5 \sim 50 \text{ m}$, 对应空间频率范围为 $0.02 \sim 2 \text{ m}^{-1}$, 则有效空间频率的上下限 n_c 和 n_l 分别为 2 m^{-1} 和 0.02 m^{-1} 。假

收稿日期: 2010-12-10; 修订日期: 2011-05-04

基金项目: 国家西部交通建设科技计划资助项目 (200731822301-4)。

作者简介: 何锐 (1984-), 男, 湖北襄樊人, 长安大学博士研究生, 主要研究领域为路面结构与材料, E-mail: heruia@

163.com.

设车辆的行驶速度为 v (m/s), 则车辆轮胎所受到的激振频率 $f = vn$ (Hz). 据此可分别求出有效频率下限 f_l 和 f_c 上限.

2 基于周期图法的路面不平度数值分析

设时间序列 $\{x_s\}$ ($s = 0, 1, \dots, N-1$), 根据 Blackman-Turkey 周期图法原理^[7]:

$$S_x(k) = \frac{1}{N^2} |DFT[x_s]|^2 = \frac{1}{N^2} [X^*(k)X(k)] \quad (2)$$

式中: $X(k)$ 为时间序列 $\{x_s\}$ 的频谱, $k = 0, 1, \dots, N-1$; $X^*(k)$ 为 $X(k)$ 的共轭复数.

由于路面功率谱密度为单边功率谱, 当 $f < 0$ 时没有意义, 所以需要根据 $S_x(f)$ 偶函数的性质把负频率范围内的谱密度折算到正频率范围内:

$$G_x(f) = \begin{cases} 2S_x(f) & f \geq 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases} \quad (3)$$

设时间序列总时间为 T , 采样时间间隔为 Δt , 则采样点数为 $N = T/\Delta t$, 频域采样间隔为 $\Delta f = 1/(N\Delta t)$, 频率 $f = k\Delta f$. 由式(2)和式(3)可求出序列 $\{x_s\}$ 的频谱 $X(k)$ 的模值为:

$$|X(k)| = N \sqrt{\frac{G_x(k)}{2}} = N \sqrt{\frac{G_x(f)\Delta f}{2}} \quad (4)$$

有效频率范围内的采样点数为 $N_e = (f_c - f_l)/\Delta f$, 令 $N_z = f_l/\Delta f$. 由于用周期图法估计出的功率谱具有周期性, 且为偶对称序列^[7], 则 $0 \sim (N_z - 1)$ 内的采样点值为 0. 如果 $(N_z + N_e) < N/2$, 则在 $N_z \sim (N_z + N_e - 1)$ 内的采样点可由谱密度求出, 在 $(N_z + Z_e) \sim N/2$ 内的采样点值为 0. 如果 $(N_z + N_e) \geq N/2$, 则可增大 T 或减小 Δt .

至此求出离散傅里叶变换的模值, 由于 $X(k)$ 是复数, 令随机相位角为 ϕ_k , 则有:

$$X(k) = |X(k)| \exp(i\phi_k) \quad (5)$$

由于 $X(k)$ 的实部关于 $N/2$ 偶对称, 虚部关于 $N/2$ 奇对称, 因此容易得到全部 $X(k)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$. 此时将得到的序列进行傅里叶逆变换即可得到不平度的时域离散信号 $x(m)$:

$$x(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp(im\phi_k) \quad (6)$$

3 随机相位角分布

根据文献[8], 路面高程 $x(t)$, $t \in [0, +\infty]$ 是零均值实平稳高斯随机过程. $x(t)$ 的赖斯表达式为^[9]:

$$x(t) = a(t) \cos \omega_0 t - b(t) \sin \omega_0 t \quad (7)$$

式中: ω_0 是常数; $a(t)$ 、 $b(t)$ 是两个低频随机过程, 它们的表达式为:

$$\begin{cases} a(t) = x(t) \cos \omega_0 t + \hat{x}(t) \sin \omega_0 t \\ b(t) = -x(t) \sin \omega_0 t + \hat{x}(t) \cos \omega_0 t \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\hat{x}(t)$ 是 $x(t)$ 的希尔伯特变换.

包络 $A(t)$ 和相位 $\phi(t)$ 的定义为^[9]:

$$\begin{cases} A(t) = \sqrt{a^2(t) + b^2(t)} \\ \phi(t) = \tan^{-1} [b(t)/a(t)] \end{cases} \quad (9)$$

根据随机过程理论, $a(t)$ 和 $b(t)$ 在任一相同时刻的取值 a_i 、 b_i 是相互独立的高斯变量, $A(t)$ 和 $\phi(t)$ 在同一时刻的取值 A_i 、 ϕ_i 的联合概率密度为:

$$f_{A,\phi}(A_i, \phi_i) = \frac{A_i}{2\pi} \exp\left[-\frac{A_i^2}{2\sigma^2}\right] \quad (10)$$

则 $\phi(t)$ 的概率密度为:

$$\begin{aligned} f_\phi(\phi_i) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} f_{A,\phi}(A_i, \phi_i) dA_i \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{+\infty} A_i \exp\left[-\frac{A_i^2}{2\sigma^2}\right] dA_i = \frac{1}{2\pi} \quad (11) \end{aligned}$$

以上结果表明, 相位角 $\phi(t)$ 在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布.

4 路面高程仿真实例

根据 $n = f/v$, 将式(1)中的空间频率功率谱密度转换为时域谱密度:

$$G_x(f) = G_x(n) \frac{dn}{df} = G_x(n_0) \frac{v \cdot n_0^2}{f^2} \quad (12)$$

将式(12)中的功率谱密度离散, 结合式(4)、(5)和(6), 对车速 $v = 80$ km/h 下的 A 级和 C 级路面进行模拟. A、C 两个等级对应的路面不平度系数 $G_x(n_0)$ 分别为 $16 \text{ mm}^2/\text{m}^{-1}$ 和 $256 \text{ mm}^2/\text{m}^{-1}$. f_l 和 f_c 分别取为 0.4 Hz 和 44.4 Hz , 包含了车辆的固有频率范围^[10]. 采用龙格-库塔方法, 进行仿真计算^[11], 模拟结果如图 1 和图 2 所示.

图 1 和图 2 中的横轴表示车辆沿道路纵向行驶的时间 (即沿道路走向的长度), 纵轴表示路面相对于基准平面的高度. 从图中可以看出, A 级路面的不平度高程要明显小于 C 级路面, 说明 A 级路面的路况优于 C 级路面.

为了检验该计算方法的合理性, 选用国际平整度指数简化车辆模型 (四分之一车辆模型) 进行计算分析, 具体车辆模型和参数见文献[8]. 在时域内以仿真出的 C 级路面不平度数据为输入, 分别求出簧载质量的速度和加速度时间历程数据, 然后对其进行傅里叶变换, 得到簧载质量的速度和加速度功率谱密度; 在频域内以相应的路面功率谱密度为输入, 分别得到簧载质量的速度和加速度功率谱密度. 模拟结果如图 3 和图 4 所示.

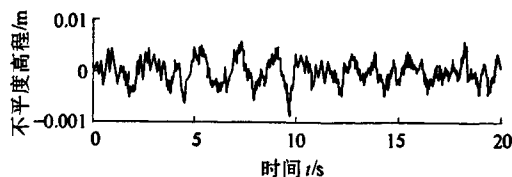


图1 A级路面不平度时间序列
Fig.1 Roughness time domain
figures of grade A pavement

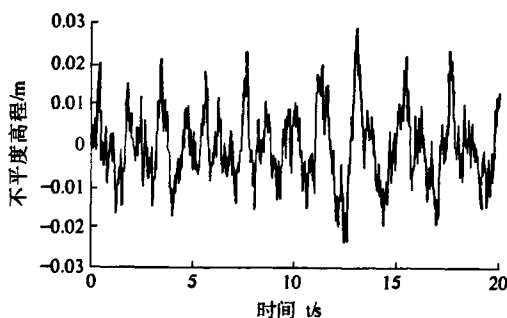


图2 C级路面不平度时间序列
Fig.2 Roughness time domain
figures of grade C pavement

从图3和图4可以看出,以仿真出的时域数据为输入计算出的车辆响应和以原始频域数据为输入计算出的车辆响应基本一致,该模拟方法可用于路面不平度分析与车辆动力学研究。

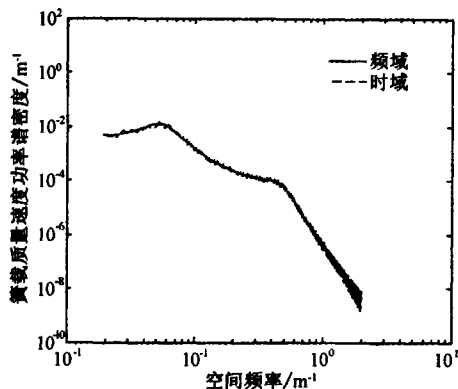


图3 时域和频域内的簧载质量速度功率谱
Fig.3 Velocity PSD of sprung mass in
time and frequency domain

5 IRI与PSD的相关关系推导

为了探讨IRI与PSD的联系,根据IRI的定义^[2],以数值分析得出的路面不平度时域数据为输入计算得出相应等级的IRI,如图5所示。从图5可以看出,IRI与路面不平度系数 $G_x(n_0)$ 呈曲线变化的关系。采用最小二乘法回归得出IRI与 $G_x(n_0)$ 的关系式为:

$$\text{IRI} = 0.52\sqrt{G_x(n_0)} \quad (13)$$

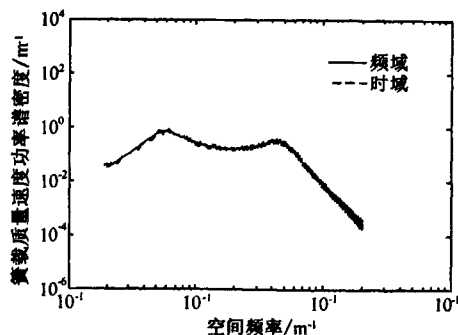


图4 时域和频域内的簧载质量加速度功率谱
Fig.4 Acceleration PSD of sprung mass in
time and frequency domain

式(13)的 R^2 为99.95%,这说明采用该式来描述IRI与PSD之间的相关关系可以满足精度要求。利用该式可以将实测IRI引入路面不平度的数值模拟,把路面实测不平度数据应用于车辆分析。

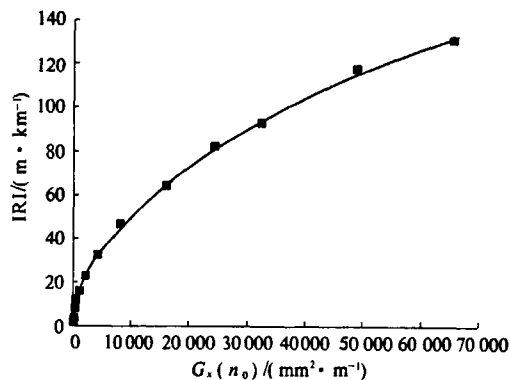


图5 IRI和 $G_x(n_0)$ 的相关关系
Fig.5 Relationship between IRI and $G_x(n_0)$

为了验证式(13)的正确性,采用福银高速公路(K91+117)~(K94+117)段的路面实测不平度高程数据进行分析。该数据采用激光道路检测车测于2009年,测点间距为16 cm,结果显示该路段的IRI值为2.16 m/km。将该IRI值代入式(13)得出 $G_x(n_0) = 17.25 \text{ mm}^2/\text{m}^{-1}$,将此路面不平度系数代入式(1)对路面PSD进行预估,预估结果和由路面实测数据计算得到的PSD见图6。

从图6可以看出,由式(13)预估的路面PSD与实测PSD的变化趋势一致,二者基本吻合,说明了式(13)的正确性。

6 结论

(1)采用周期图法,对数据信号的截断采样、补充和变换操作进行讨论,推导出路面高程随机过程的相位分布。利用时域内的采样原理,以频域功率谱密度为依据模拟出路不平度的时域数据。

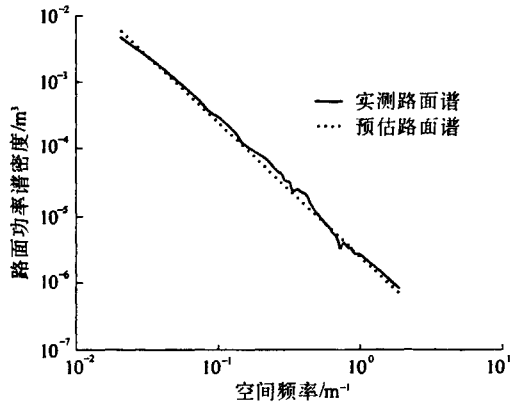


图6 预估路面谱和实测路面谱对比

Fig. 6 Comparison between predictive PSD and measured PSD

(2)分别以仿真出的时域数据为输入和以原始频域数据为输入得到了车辆簧载质量的响应功率谱密度,经过比较分析,进一步验证了所提模拟方法的可靠性。

(3)利用数值计算得到的路面不平度时域数据提出了IRI与PSD的相关关系式,并以路面实测不平度高程数据为基础,检验了该关系式的正确性。

参考文献:

- [1] 吴庆雄,陈宝春,奚灵智.路面平整度PSD和IRI评价方法比较[J].交通运输工程学报,2008,8(1):36-39.
- [2] SUN Lu, LUO Fei-quan. Nonstationary dynamic pavement loads generated by vehicles traveling at varying speed [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, (133): 252-263.
- [3] 郑仲浪,吕彭民.多轴大货车对路面的动作用力研究[J].郑州大学学报:工学版,2009,30(4):44-47.
- [4] 刘献栋,邓志党,高峰.基于逆变换的路面不平度仿真研究[J].中国公路学报,2005,18(1):122-124.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 7031—2005,机械振动道路路面谱测量数据报告[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [6] 陈果,翟婉明.铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J].西南交通大学学报,1999,34(2):139-140.
- [7] 赵济海,王哲人,关朝雳.路面不平度的测量、分析与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2000.
- [8] 王直民,张士乔,吴小刚.不平整路面上的车辆等效动载系数[J].浙江大学学报:工学版,2007,41(6):1007-1009.
- [9] 沈允春,罗天放,沈东旭.随机信号分析[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [10] 宋一凡,陈榕峰.基于路面不平整度的车辆振动响应分析方法[J].交通运输工程学报,2008,8(1):36-39.
- [11] 张德丰. MATLAB/Simulink 建模与仿真[M].北京:电子工业出版社,2009.

Numeral Analysis on Pavement Random Roughness Based on Periodogram

HE Rui¹, CHEN Shuan-fa², DUAN Bing³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Periodogram and sampling rule in the time domain were adopted to simulate time domain figures of different ranks of uneven roads on the bases of the phase distribution of random process about pavement random and frequency domain power spectral density. To cope with the problem of exactness about the simulation method, the response power spectral density of vehicles were gained by inputting the data of time domain and initial frequency domain separately. A comparison of them was made, and the result shows that the simulating method is reliable. The relational expression of power spectral density and internal roughness index was deduced with the help of simulated time domain figures of uneven road for the purpose of making a comparison between different roughness indicators. The reliability of this relational expression was checked by measured pavement roughness height data. The result indicates that correlation between the two indicators is reliable.

Key words: road engineering; periodogram; pavement random roughness; power spectral density; internal roughness index