

基于分形特征的交通运输车辆行走路面的三维重构

李晓勤^{1,2}, 鲁植雄^{1*}, 席鑫鑫¹, 赵苗苗¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 塔里木大学机电学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 为获得路面激励, 通过理论推导实现基于分形特征的交通运输车辆行走路面的三维重构。对国际与国家规定的标准路面谱进行逆傅里叶变换以产生随机路面样本, 用轮廓均方根法获得路面平均分形维数 (1.59); 结合二维路面的统计特征, 根据随机中点位移法和三角剖分法, 建立三维路面理论模型; 对各等级路面进行三维仿真, 其纵向任一截面可作为二维仿真路面。该建模理论适合行走路面的三维重构。

关键词: 分形, 仿真, 路面, 随机中点位移法, 三角网格剖分

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.02.012

中图分类号: TG156

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-02-0061-05

李晓勤, 鲁植雄, 席鑫鑫, 等. 基于分形特征的交通运输车辆行走路面的三维重构[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 61-65.

Li Xiaoqin, Lu Zhixiong, Xi Xinxin, et al. 3D reconstruction of transportation vehicles traveling pavement based on fractal characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 61-65. (in Chinese with English abstract)

0 引言

路面不平度是具有影响车辆动力性、行驶质量和路面动载荷三者的数值特征^[1-2]。随着对交通路面不平度精确性要求的提高, 以及计算水平和仿真建模能力的提高, 人们对路面不平度的二维研究逐步拓展到三维的仿真研究^[3-7], 种种研究表明, 分析路面不平度、对其进行合理的评价与分级、建立路面输入模型对车辆工程和道路工程领域均具有重要意义。本文参考国家与国际上提出的二维标准路面统计特征的分级指标, 结合国内外对路面特征研究的新方法^[8-11], 即考虑交通路面的分形特征, 基于此两项指标, 建立三维路面的分级模型, 为车辆与道路工程方面的研究提供可行性参考。

1 二维路面的统计特征

国际标准的 ISO/DIS 86 和国家标准 GB 7031-86 用路面功率谱密度的量度把路面不平度分为 8 级, 分级的频率指数为 $w=2$, 在双对数坐标中表现为谱密度的斜率。功率谱密度的拟合表达式为

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

式中, $G_q(n)$ 为功率谱密度, m^3 ; n 为空间频率, m^{-1} ; n_0 为参考空间频率, $n_0=0.1 m^{-1}$; $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数,

是路面谱密度在 n_0 处的值。

国际路面不平度分级标准见表 1 所示, 这种分级标准突出表现了不同等级路面之间, 表面高程起伏的标准偏差 σ 的差异, 是按照统计指标给予分级的。

表 1 路面不平度分级标准 ISO/TC108/SC 2N67
Table 1 Standard of road surface grade: ISO/TC108/SC 2N67

| 路面等级 | 不平度系数/(10 ⁻⁶ m ³) | | | 标准偏差/(10 ⁻³ m) | | |
|------|--|---------|---------|---------------------------|--------|--------|
| | 下限 | 几何平均值 | 上限 | 下限 | 几何平均值 | 上限 |
| A | 8 | 16 | 32 | 2.69 | 3.81 | 5.38 |
| B | 32 | 64 | 128 | 5.38 | 7.61 | 10.77 |
| C | 128 | 256 | 512 | 10.77 | 15.23 | 21.53 |
| D | 512 | 1 024 | 2 048 | 21.53 | 30.45 | 43.06 |
| E | 2 048 | 4 096 | 8 192 | 43.06 | 60.90 | 86.13 |
| F | 8 192 | 16 384 | 32 768 | 86.13 | 121.80 | 172.26 |
| G | 32 768 | 65 536 | 131 072 | 172.26 | 246.61 | 344.52 |
| H | 131 072 | 262 144 | 524 288 | 344.52 | 487.22 | 689.04 |

2 二维路面的分形特征

依据以上标准等级路面功率谱, 得到与其对应的一系列离散傅里叶变换的模值, 用一正态分布的随机序列经傅里叶变换后得到的相位谱作为相角输入, 造出频域信号, 再对其进行傅里叶逆变换^[12]生成随机路面。傅里叶逆变换方法生成的随机序列路面模型为:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(K) e^{j2\pi kn/N} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sqrt{\frac{N}{2h}} G_q(n) e^{j(2\pi kn/N + \phi_k)} \quad (n=0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (2)$$

其中 $x(n)$ 为具有 N 个数据点采样长度的离散时域采样序列, h 为采样间隔, 单位都为 m 。空间频率 n 对应的谱线序号为 K , ϕ_k 为相角。计算随机序列的分形维数,

收稿日期: 2011-05-17 修订日期: 2011-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51175269); 教育部博士点基金项目 (20100097110027)

作者简介: 李晓勤 (1972-), 女, 重庆人, 副教授, 博士生, 从事车辆-地面系统力学研究。南京 南京农业大学工学院, 210031。

Email: xiaoqinli2009bs@163.com

※通信作者: 鲁植雄 (1962-), 男, 南京农业大学工学院教授, 博士生导师, 主要从事车辆-地面系统力学方面的研究等。南京 南京农业大学工学院, 210031。Email: luzx@njau.edu.cn

轮廓均方根法^[13-14]在双对数坐标上的线性关系最好、无标准度区间最大,因此,采用轮廓均方根法做统计与分形分析。

根据表 2 的计算结果,不同等级路面的分形维数均无显著差异,表现出明显的自相似性,这是因为傅里叶逆变换法保证了模拟所得路面的功率谱密度在双对数坐标上的直线与标准情况重合,保留了路面不平度的相似性信息。但是,在车辆行走路面的实际测量中,标准偏差和分形维数都有所变化,标差小于该标准等级范围,而由于车辆的行驶,路面的磨损破坏,路面起伏趋于平缓,分形维数也逐步减少,这也就是除了路面的统计特征外,本文提出还需要研究分形特征的实际意义。

表 2 轮廓均方根法获得标准路面样本的分形维数和标准偏差
Table 2 Fractal dimension and standard deviation of standard pavement samples by Contour RMS method

| 路面等级 | A | B | C | D | E | F | G | H |
|-------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 标准偏差 (10^{-3} mm) | 3.523 | 7.046 | 14.092 | 28.185 | 56.371 | 112.743 | 225.487 | 450.974 |
| 分形维数 | 1.599 | 1.593 | 1.601 | 1.594 | 1.597 | 1.597 | 1.604 | 1.596 |

对于标准路面而言,采用轮廓均方根法获得的各等级路面的分形维数差别很小,均值约为 1.59,以此作为

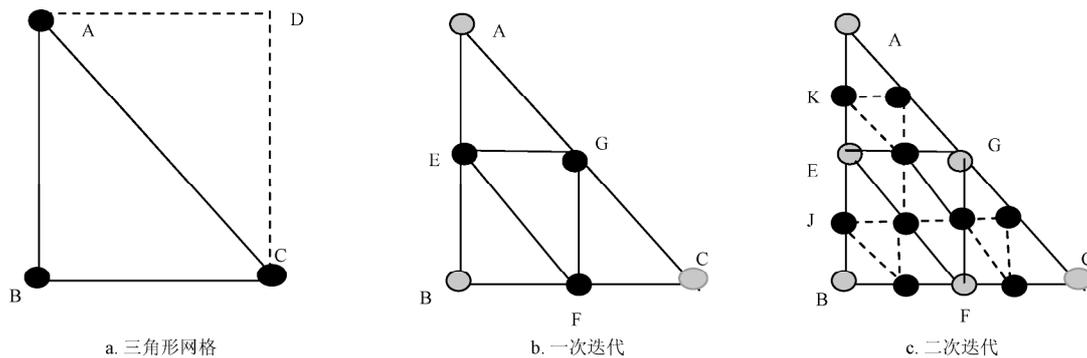


图 1 三角形网格上的随机中点位移法

Fig.1 Random midpoint displacement method on triangle mesh

式中, H 为 Hurst 指数, $H = 2 - D_{2d}$, $D_{2d} = 1.59$ 。根据随机分形的几何特性,上式可以写为

$$\text{Var}[z_2(r_2) - z_1(r_1)] = |\Delta r^2|^H \sigma^2 \quad (3)$$

σ 为该序列的标准偏差。按照图 1b 所示,第一次迭代生成的中点为 E, F, G, 以递推数据 $E(z_4(r_4))$ 为例,由于

$$z_4(r_4) = \frac{1}{2}[z_1(\phi_1) + z_2(\phi_2)] + \Delta_1 \quad (4)$$

其中, Δ_1 为第一次迭代数的随机偏移量。求解 Δ_1 过程为

$$\text{Var}[z_4 - z_2] = \text{Var}\left[\frac{1}{2}(z_1 - z_2) + \Delta_1\right]$$

省略 $r(x, y)$ 的下标,作为通式计算,根据 (3) 式则有

$$\left[\left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{2}\right)^2\right]^H \cdot \sigma^2 = \frac{1}{4}[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]^H \cdot \sigma^2 + \text{Var}(\Delta_1)$$

标准路面的分形特征指标。由轮廓均方根法获得的标准偏差在国际规定的标差范围内,以此作为路面分级的统计指标。由以上两项指标,作为建构三维标准路面的分级依据。

3 三维建模

建构三维路面,以三角形网格剖分作为生成数据的结构框架,采用随机中点位移法^[15-17](RMD)作为数据生成的递推规则,其基本原理如下(见图 1 所示)。

由一个矩形 ABCD,作为基点,分割成两个三角形 ABC 和 ACD,同步迭代,如图 1a;对于三角形 ABC 而言,取各边中点,根据随机中点位移法,构建 E、G、F 3 点,从而构成 4 个三角形,完成第一步迭代,如图 1b,以此类推,如图 1c 中生成的黑点,完成第二步迭代。

设已知基点坐标为

$$A(x_1, y_1, z_1), B(x_2, y_2, z_2), C(x_3, y_3, z_3)$$

在 xoy 平面内沿直线路径行走的梯度变化都是分数布朗运动^[18-20],设平面内行走的距离为 Δr ,则有

$$\Delta r^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$$

由分数布朗运动理论可知

$$\Delta z(r) \propto \Delta r^H$$

所以

$$\text{Var}(\Delta_1) = \left(\frac{1}{2}\right)^H \cdot [(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]^H \cdot (1 - 2^{2H-2}) \cdot \sigma^2$$

则第一次迭代的随机偏移增量为

$$\Delta_1 = \left(\frac{1}{2}\right)^H \cdot \sqrt{[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]^H} \cdot \sqrt{1 - 2^{2H-2}} \cdot \sigma \cdot \text{Gauss} \quad (5)$$

按照图 1c 所示,第二次迭代生成的中点 J, K... 由图中黑点所示,以生成递推数据 $J(z_5(r_5))$ 为例,由于:

$$z_5(r_5) = \frac{1}{2}[z_2(\phi_1) + z_4(\phi_2)] + \Delta_2$$

由以上方法可计算第二次迭代的随机偏移增量。

以此类推,经过 n 次迭代后的随机偏移量为

$$\Delta_n = \left(\frac{1}{2^n}\right)^H \cdot \sqrt{[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]^H} \cdot \sqrt{1 - 2^{2H-2}} \cdot \sigma \cdot \text{Gauss} \quad (6)$$

则逐次产生的迭代生成数为

$$z_n = (z_1 + z_2) / 2 + \sqrt{1 - 2^{2H-2}} \times \left(\frac{\Delta r}{2^n} \right)^H \times \delta \times Gauss \quad (7)$$

4 仿真结果与分析

4.1 仿真边界条件

根据三维标准路面的生成模型 (7) 式, 应用 matlab

软件, 对标准公路八级路面 A-F 做仿真, 图 2 是经过 5 次迭代后例举了 A-D 级路面的仿真结果。仿真初始边界图 1a 中 A,B,C 三点, 两两点在同一直线上, 取值来自标准路面功率谱经傅里叶逆变换后所得随机样本, 为简化分析, 认为路面沿 X 轴向, Y 轴向, 以及任何 xoy 平面内的线段, 都具有相同的分形特征, 因此在仿真中有相同的 Hurst 指数。

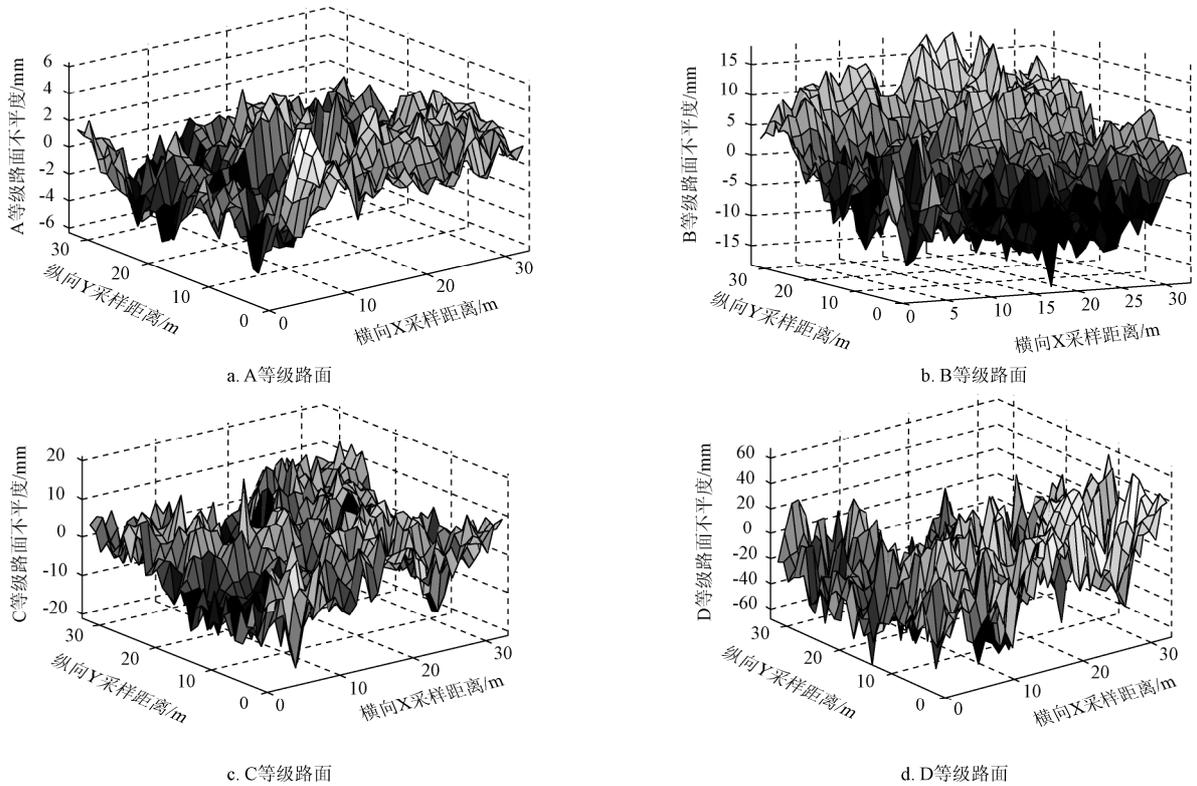


图 2 三维标准路面
Fig.2 3d standard road

4.2 三维结果分析

选择 B 级路面的三维仿真图形与二维仿真图形作对比分析, 见图 3 所示。图 3a 是俯仰角为 90°, 方位角为 0° 时俯视图, 表明三角形网格剖分完成了沿 x, y 等间隔划分, 图 3b 为俯仰角为 0°, 方位角为 90° 时的侧视图, 表现了在三维图上, 沿行驶方向的任意截面图, 都可以作为二维仿真路面图。将此截面图与 3c 图对比, 两者都一致满足该等级路面高程范围, 从 x, y 取点范围来看, 图 3b 可以视为图 3c 的局部放大, 都具有几何分布上的分形特征。

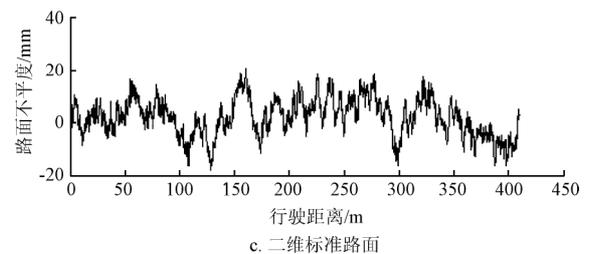
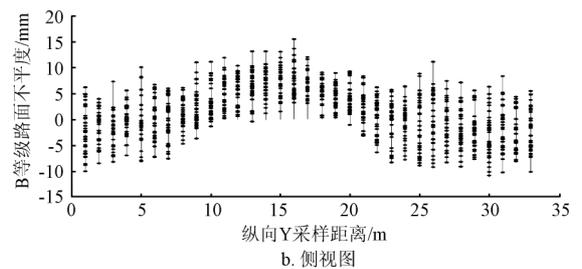
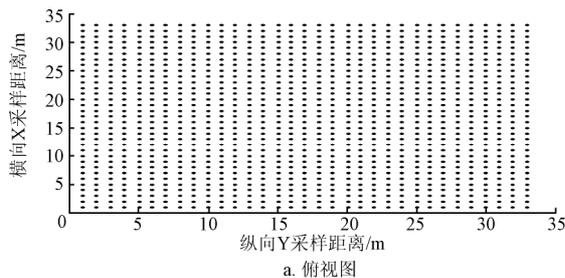


图 3 B 等级二维标准路面与三维标准路面的比较分析
Fig.3 Comparative analysis on 2d and 3d pavement on B grade standard pavement

5 结论与讨论

本文依据国际路面标准,采用轮廓均方根法对标准随机样本数据进行分形特征分析,获得标准路面的分形维数,取均值为1.59,以及各等级路面的标准偏差均值,它的分布在国际各等级路面标准偏差的范围内;选择随机中点位移法和三角形剖分法则,结合提取标准路面的分形特性和统计特性,建立沿纵向与横向等间隔的三维路面的分形模型;由仿真路面图可以看到,各级路面的起伏高程之间具有良好的阶梯分布特点,以及良好的分形特性。三维路面的任意纵向截面都包含了二维同向路面的统计特性与分形特性。由此实现三维标准路面的模型建立。

本文的工作实现了由运输车辆二维行走路面向三维行走路面的转换。在实际道路的测量中,我们发现路面起伏的统计特征和分形特征综合考虑能更全面的表达路面信息,这也就是建立包含分形特征和统计特征的三维路面重构模型的意义。由于车辆对路面的纵向行驶,其纵向分形维数与横向分形维数在路面的使用中会出现差异,而由此在构造路面的三维模型中,行驶纵向方向和横向方向具有不同的曲线分形维数,则更具有实际的应用价值,这些工作还需要在今后的实践基础上做更深入的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 赵济海,王哲人.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,2000:11-16.
- [2] 周晓青,孙立军,颜利.路面平整度评价发展及趋势[J].公路交通科技,2005,22(10):18-22.
Zhou Xiaoqin, Sun Lijun, Yan Li. Pavement roughness rating and the trend of development[J]. Highway traffic technology, 2005, 22(10): 18-22. (in Chinese with English abstract)
- [3] Oldrich Kropac, Peter Mucka. Be careful when using the international roughness index as an indicator of road unevenness[J]. Journal of sound and vibration, 2005, 287: 989-1003.
- [4] Lu Sun. Simulation of pavement roughness and IRI based on power spectral density[J]. Mathematics and computers in simulation, 2003, 61(2): 77-88.
- [5] 韩靖玉,侯占峰,冬梅.路面不平度的分形几何特征的图像分析方法[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2007,28(2):168-170.
Han Jingyu, Hou Zhanfeng, Dong Mei. Application of fractal theory to study on the image of road surface roughness[J]. Journal of inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2007, 28(2): 168-170. (in Chinese with English abstract)
- [6] Huang Y M, Chen Ching-Ju. 3D Fractal reconstruction of terrain profile data based on digital elevation model[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 40(4): 1741-1749.
- [7] Lai Fujou, Huang Y M. Probability and curve based Fractal reconstruction on 2D DEM terrain profile[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 41(2): 970-978.
- [8] Chen Chingju, Lee Tzong-Yeang, Huang Y M, et al. Extraction of characteristic points and its reconstruction for terrain profile data[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 39(4): 1732-1743.
- [9] Ngwangwa H M, Heyns P S, Labuschagne J J, et al. Reconstruction of road defects and road roughness classification using vehicle responses with artificial neural networks simulation[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(2): 97-111.
- [10] Phillip J Durst, George L Mason, Burney Mckinley, et al. Predicting RMS surface roughness using fractal dimension and PSD parameters[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(2): 105-111.
- [11] 赵兰英.基于分形理论的路面不平度分级与模拟研究[D].南京:南京农业大学,2009.
Zhao Lanying. Study of Road Surface Roughness Grade and Simulation Based on Fractal Theory[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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):122-126.
Liu Xiandong, Deng Zhidang, Gao Feng. Study of simulation of road roughness based on inverse transform[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 122-126. (in Chinese with English abstract)
- [13] Gadelmawla E S, Koura M M, Maksoud T M, et al. Roughness Parameters[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 123(1): 133-145.
- [14] 梁俊,蒋金龙,赵雪莲,等.随机中点位移法在三维地形插值显示的适用性分析[J].测绘科学,2007,32(3):44-46.
- [15] 陈辉,胡元中,王慧,等.粗糙表面分形特征的模拟及其表征[J].机械工程学报,2006,42(9):219-223.
Chen Hui, Hu Yuanzhong, Wang Hui et al. Simulation and characterization of fractal rough surfaces[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 219-223. (in Chinese with English abstract)
- [16] Shuyi Gan, Qing Zhou, Xiangdong Xu, et al. Study on the surface roughness of substrate with multi-fractal spectrum[J]. Microelectronic Engineering, 2007, 84(5/8): 1806-1809.
- [17] 张淼.基于布朗运动的地形构造算法及其真实感渲染[D].沈阳:沈阳理工大学,2008.
Zhang Miao. Terrain Constructing Algorithm Based on Brownian Motion and Realistic Rendering[D]. Shenyang Ligong University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [18] Brown J I, Hickman C A, Nowakowski R J. Fractal interpolation surfaces derived from fractal interpolation functions[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2007, 336(2): 919-936.
- [19] 粘萍萍.基于月面特征的真实感数字月面建模关键技术研究[D].哈尔滨:东北大学,2008.
Nian Pingping. Research on Realistic Digital Lunar Surface Modeling Based on Lunar Characteristics[D]. Harbin: Northeastern University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [20] 文环明,庄庆德,马晓红.测井曲线的分数布朗插值[J].测井技术,2005,29(5):435-438.

Wen Huanming, Zhuang Qingde, Ma Xiaohong. Fractal brown movement interpolation of logging curves[J]. Well

Logging Technology, 2005, 29(5): 435—438. (in Chinese with English abstract)

3D reconstruction of transportation vehicles traveling pavement based on fractal characteristics

Li Xiaoqin^{1,2}, Lu Zhixiong^{1*}, Xi Xinxin¹, Zhao Miaomiao¹

(1. Department of Agricultural Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China;

2. Institute of Mechanical and Electrical, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: To obtain the road excitation, 3D walking pavement of transportation vehicles was reconstructed based on fractal characteristics in theoretically. The random samples were generated by inverse Fourier transform of international and national standard pavement spectrum, the average fractal dimension (1.59) was calculated using the Contour RMS method; 3D pavement theoretical model was established according to the average fractal dimension and the statistical characteristics of 2D standard pavement by the Random mid-point displacement method and the Triangulations method; every grade pavement was simulated in 3D space, vertical section of which could be regard as 2D standard simulation pavement. This method is fit for 3D reconstruction of pavement.

Key words: fractals; computer simulation, pavements; random midpoint displacement method; triangle mesh dissection