

# 路面不平度模型对车辆侧翻瞬态响应的影响分析

杨晨旭<sup>1</sup>, 路永婕<sup>2</sup>, 王美晨<sup>1</sup>, 郑露峰<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**精准的路面不平度模型可以提高车辆在瞬态响应的估算精度。结合国标中的标准路面谱和路面形貌自相似性特点,利用傅里叶逆变换法和正方形细分法分别建立平整路面、二维路面和三维路面模型。在双移线、鱼钩工况和角阶跃典型工况下,对比分析不同路面不同平度模型下横向载荷转移率(LTR)、侧向加速度、横摆角速度和侧倾角4个瞬态响应的区别。其中三维路面模型对各响应影响最大,车辆侧翻时其各响应的数值达到侧翻阈值。验证了多维度路面模型建立的可行性,为车辆侧翻瞬态响应研究提供了理论基础。

**关键词:**侧翻;瞬态响应;傅里叶逆变化法;正方形细分法;三维路面谱

**中图分类号:**U415 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2023)04-0088-07

车辆侧翻是车辆瞬态失稳的一种情况,侧翻引发的伤亡率很高,根据美国公路交通安全管理局统计<sup>[1]</sup>,2020年美国全年死于交通事故人数为38 824人,较2019年增长6.8%,其中由于车辆侧翻造成7 107人死亡,占总交通死亡人数的18.3%,较2019年增长13%。为了解决车辆的侧翻问题,学者们从道路线形优化、车辆结构设计和整车动力学等多个角度开展了研究工作。

金智林等<sup>[2-3]</sup>提出侧翻动态稳定因子的概念并在横向载荷转移率的基础上进行了关于侧翻2次预警研究;IMINE et al<sup>[4]</sup>考虑了车辆悬架的影响,建立了车辆侧翻模型;宋小文等<sup>[5]</sup>在考虑悬架和轮胎侧向变形的基础上改进了车辆的侧翻模型;朱天军等<sup>[6]</sup>在TTR算法基础上对侧翻预警进行改进,并验证了其可以有效地进行侧翻预警;石求军等<sup>[7]</sup>考虑车辆实际行驶时的挠动问题,提出了RBF-ADSMC算法,较传统SMC算法控制更能减少车辆侧倾角和侧向加速度的变化,提高车辆侧向稳定性。侧翻事故往往也与道路条件有关<sup>[8]</sup>,一些学者也研究了路面激励下车辆行驶稳定性的情况。ELNASHAR et al<sup>[9]</sup>建立了汽车-道路耦合系统的时域控制微分方程组,研究了车速、路面表面特性和车体自身结构对系统响应的影响;覃凌云等<sup>[10]</sup>在考虑路面不平度情况下,得出了随着速度的增大,车辆负重轮动载荷与动载荷系数呈近似线性增大的结论;张韡等<sup>[11]</sup>探究了减速带对车辆平顺性的影响;鲍卫宁等<sup>[12]</sup>提出了一种既考虑路面不平度同时又可研究侧翻的新模型,得出转向越慢,路面对车辆侧倾角影响越明显的结论。上述文献通过车辆侧翻动力学模型、侧翻指标和不同路面激励对车辆侧翻的影响对车辆的瞬态失稳行为进行了大量研究。但是,大部分的侧翻响应分析都是基于传统的平整路面或者二维随机路面谱模型下进行的,对于各种路面谱激励下,尤其是三维路面不平度激励下的车辆瞬态响应特征研究还不足,而车辆瞬态响应的高精度计算对于改善车辆侧翻的事故率具有重要的意义。

建立了平整路面、二维路面和三维路面等3种不同类型的路面谱模型,综合考虑了双移线工况、鱼钩试验工况和角阶跃工况共3种经典侧翻工况,选取车辆横向载荷转移率、侧向加速度、横摆角速度和侧倾角曲线的时域变化描述车辆在侧向运动中的响应特征,对比了在平整路面、二维路面和三维路面激励下,对车辆瞬态响应变化的影响规律。

收稿日期:2023-06-21 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230162

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12072204);河北省自然科学基金面上项目(A2020210039)

作者简介:杨晨旭(1999—),男,硕士研究生,研究方向为车辆动力学分析与控制。E-mail:1202202112@student.stdu.edu.cn

杨晨旭,路永婕,王美晨,等.路面不平度模型对车辆侧翻瞬态响应的影响分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(4):88-94.

## 1 二维路面谱的构建

### 1.1 路面不平度功率谱密度

路面不平度可由路面功率谱密度描述其特性,当车辆纵向速度为  $u$ , 车辆受到的激振频率为  $f$ , 路面不平度可表示为<sup>[11]</sup>

$$G_q(f) = n_0^2 G_q(n_0) u / f^2 \quad (1)$$

式中,  $n_0$  为空间频率参考值,  $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ ;  $G_q(n_0)$  为参考空间频率  $n_0$  下的功率谱密度值。

路面等级可分为 A~H 8 个等级, 选取常用的 B 级路面进行探究。根据文献[13], B 级路面特性参数  $G_q(n_0)$  几何平均值为  $6.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ,  $\sigma^2$  几何平均值为  $7.61 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

### 1.2 傅里叶逆变换法构建二维路面谱

基于傅里叶逆变换法构建二维路面谱基本过程为: 利用路面功率谱密度求得傅里叶变换模值、利用随机序列构造出频域信号、通过傅里叶逆变换得到路面不平度序列<sup>[14]</sup>。其基本流程如图 1 所示。

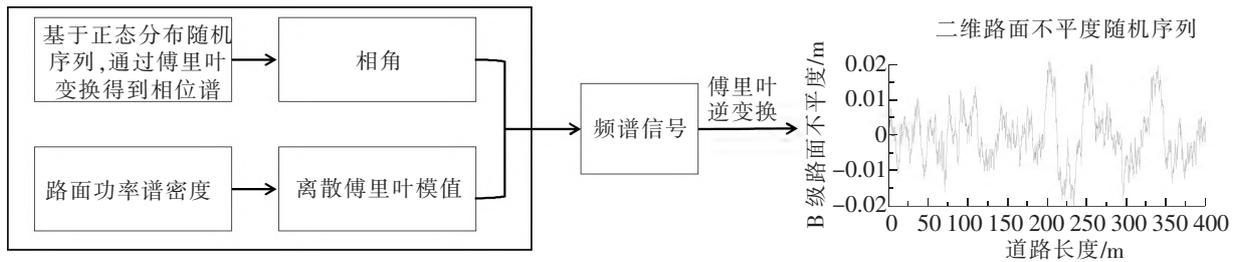


图 1 二维路面谱建立流程图

傅里叶变换模值

$$G_d(n_k) = \frac{2h}{N} |X(k)|^2 \quad (2)$$

式中,  $G_d(n_k)$  为路面功率谱;  $N$  为采样点数;  $h$  为采样间隔;  $|X(k)|$  为傅里叶变换模值。

$$|X(k)| = \sqrt{\frac{N}{2h} G_d(n_k)} \quad (3)$$

频域

$$|X(k)| = |X(k)| e^{j\varphi_k} \quad (4)$$

式中,  $\varphi_k$  为相位角,  $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

傅里叶变换

$$|X(k)| = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (5)$$

根据上述过程得到 B 级的二维路面随机激励曲线, 如图 2 所示。

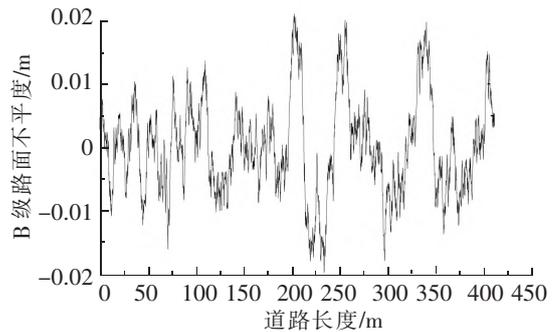


图 2 B 级二维路面不平度

## 2 三维路面谱的构建

二维路面不能反映路面细节特征, 仅能反映纵向上不平度激励, 缺乏横向上不平度激励的描述。为了更加贴合实际, 需要建立比较精确的三维路面谱。

### 2.1 基于结构函数法的分形维数确定

分形维数是分形理论中的一个重要参数。对于自相似图形来说, 可将自身分成大小相等的  $N$  份, 每一份的尺度为整体图形的  $1/r$ , 分形维数  $D$  的求取, 其相关表达式为<sup>[15]</sup>

$$D = \ln r / \ln(1/r) \quad (6)$$

结构函数法能够较好地求取二维路面的分形维数<sup>[16]</sup>, 可将路面不平度看作时间序列, 其相关公式为

$$S(r) = \langle [Z(x+n\Delta t) - Z(x)]^2 \rangle = \frac{1}{N-n} \sum_{i=0}^{N-n} (Z_{i+n} - Z_i)^2 \quad (7)$$

式中,  $r$  为两数值之间的间隔。

将  $S(r)$  与  $r$  用双对数坐标表示出来, 再对其进行线性回归, 斜率为幂指数  $W$ , 此时分形维数  $D$  为

$$D = 2 - \frac{W}{2} \tag{8}$$

利用 Matlab 编程得到 B 级路面标准偏差为 7.60, 分形维数为 1.51。

与国标中 B 级路面标准偏差进行对比, 其数值偏差较小, 体现构造二维路面的准确性较高。

### 2.2 基于正方形细分法的三维路面谱重构

因为二维路面的准确性较高, 都具有很强的自相似特性, 所以可进行三维路面谱的重构。

正方形细分法是在二维面上对正方形各节点进行高程差值, 最终形成一系列三维空间随机点的一种方法<sup>[15]</sup>。应用该方法生成三维路面不平度, 基本过程如图 3 所示。

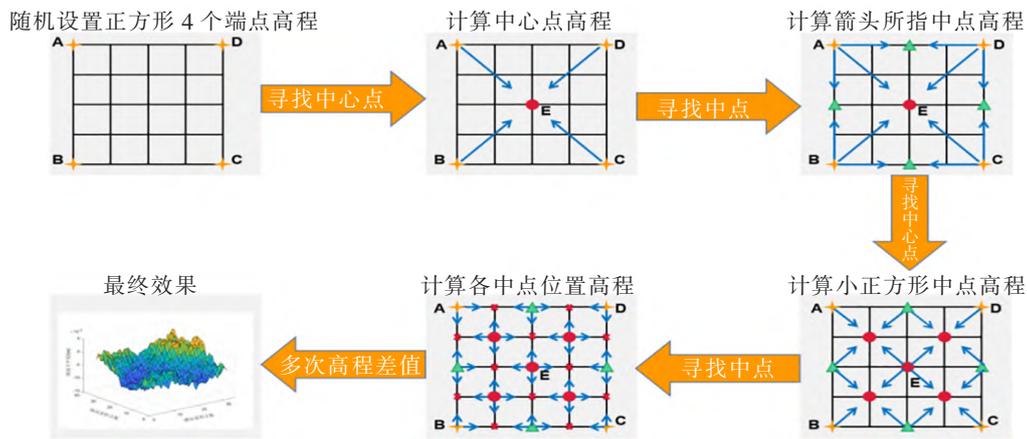


图 3 正方形细分法基本过程

图 3 中中心点高程为所在正方形端点平均值与一个随机值叠加, 中点高程为与其相邻两端点平均值与一个随机值的叠加。

其中, 随机值可确定为

$$\Delta i = d_i^H \sigma \sqrt{1 - 2^{2H-2}} \text{gauss} \tag{9}$$

式中,  $H$  为分形参数,  $H = 2 - D$ , 在此取分形维数  $D$  为 1.51; gauss 为符合正态分布的随机值;  $i$  为迭代次数;  $d_i$  为第  $i$  次相邻两点长度。

利用此方法可在二维路面模型基础上重构出 B 级三维路面, 结果如图 4 所示。

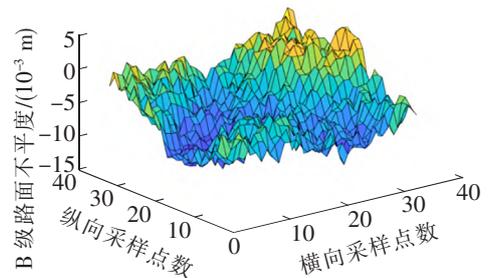


图 4 B 级路面三维路面图

### 2.3 三维路面重构结果的验证

因为重构的三维路面谱与实际路面是具有一些差别的, 所以需要频谱特性分析来验证路面谱的精确性。在 B 级三维路面上选取剖面二维曲线, 从而得到二维路面不平度曲线, 对二维路面谱进行频谱分析并与标准值进行对比, 如图 5 所示。

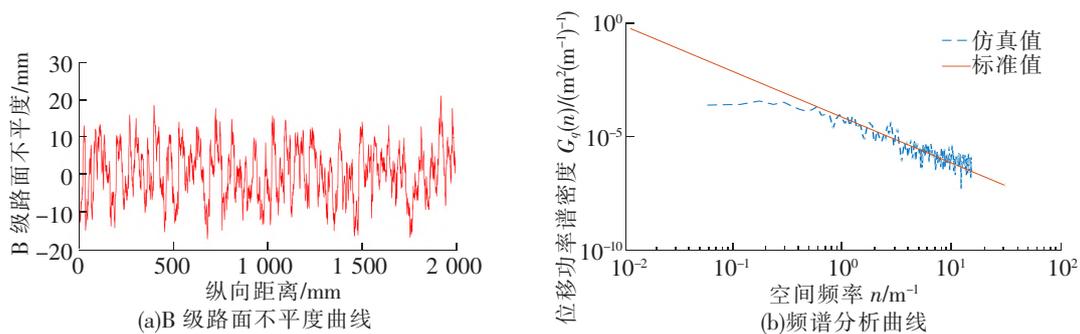


图 5 B 级路面不平度及频谱分析曲线

从图 5 可以看出,B 级二维路面不平度曲线功率谱密度取值范围在标准值附近,可以验证重构的三维路面谱具有较高的精确性。

### 3 不同路面模型下侧向瞬态响应区别

三维路面建立后,可将路面信息导入到多体动力学软件中进行,并且在双移线、鱼钩工况和角阶跃典型工况下,对比分析不同路面不同平度模型下横向载荷转移率(LTR)、侧向加速度、横摆角速度和侧倾角 4 个瞬态响应。LTR 表达式为

$$LTR = \frac{|\sum_{i=1}^n (F_{zli} - F_{zri})|}{\sum_{i=1}^n (F_{zli} + F_{zri})} \quad (10)$$

式中, $F_{zli}$  为左侧轮胎的垂向载荷; $F_{zri}$  为右侧轮胎的垂向载荷; $n$  为总车轴的数目。

由式(10)可知,由于路面是不平稳的, $[0\sim 1]$ 为 LTR 的范围;在其值为 0 时,左右两侧的垂向载荷之间的差值为 0,说明汽车在平稳路面上行驶;在其值为 1 时,其全部载荷施加在一侧轮胎上,而另一侧并不会分担任何载荷,车辆发生侧翻。

选用 B 级路面进行仿真分析。其选取的车辆参数见表 1。

表 1 车辆参数

名称	整车质量/kg	簧载质量/kg	车轮转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	质心高度/mm	轮距/mm	车轮滚动半径/mm
数值	5 025	4 455	14	1 175	2 030	510

#### 3.1 双移线工况

设置速度为 36 km/h 的双移线工况,不同路面模型激励时各响应的变化如图 6 所示。

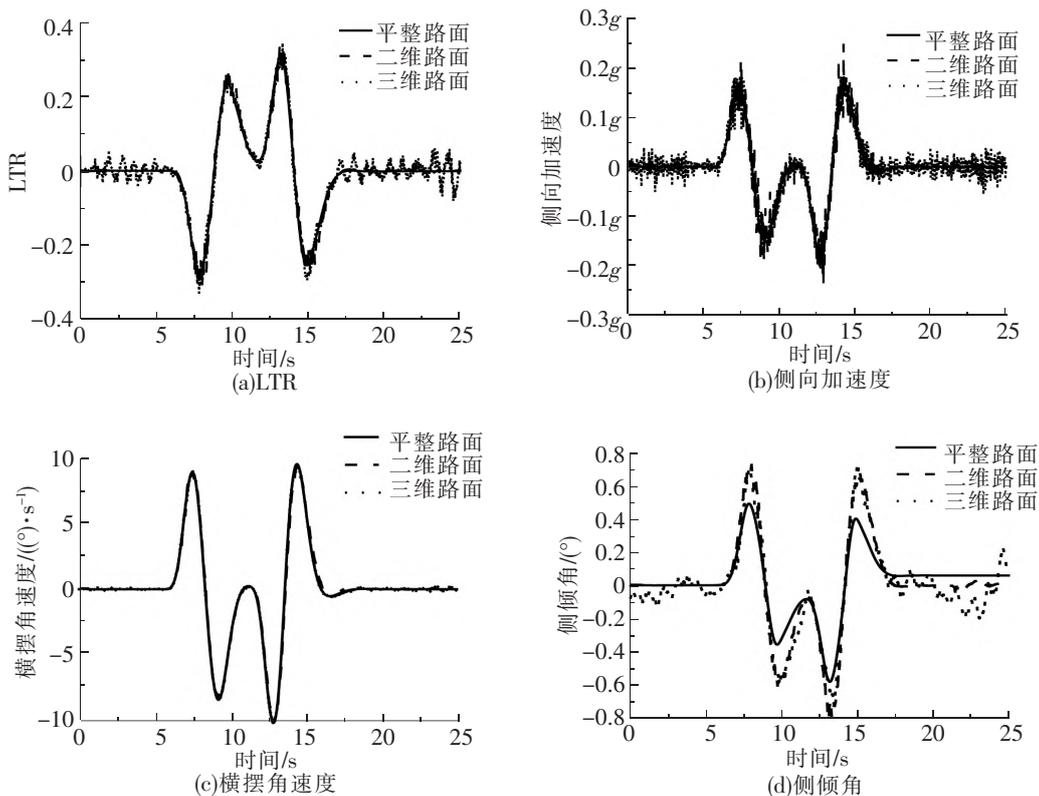


图 6 不同路面模型下瞬态响应对比(双移线)

由图 6(a)与图 6(b)可知,车辆全程未发生侧翻,且在 5 s 时车辆开始侧向移动,在 17 s 时完成超车动作;0~5 s 与 17~25 s 内,在三维路面下 LTR 在  $-0.0805 \sim 0.0270$  内波动,侧向加速度在  $-0.056g \sim 0.038g$  内波动,二维路面和平整路面下 LTR 与侧向加速度的曲线平缓无波动,5~17 s 内,三维与二维路面下车辆 LTR 与侧向加速度曲线都有波动,且三维路面与平整路面的 LTR 与侧向加速度波动最大差值分别为 2.32% 和  $0.019g$ 。由图 6(c)可知,3 种路面模型下,对横摆角速度变化的影响无明显区别。由图 6(d)可知,三维路面下,侧倾角最大为  $0.72^\circ$ ,最小为  $-0.68^\circ$ ,二维路面下最大值为  $0.73^\circ$ ,最小值为  $-0.68^\circ$ ,平整路面下其最大值为  $0.49^\circ$ ,最小值为  $-0.58^\circ$ 。与平整路面相比,二维路面与三维路面激励下,侧倾角最大值和最小值变化较大,且变化快。

### 3.2 鱼钩工况

设置鱼钩工况速度为 60 km/h,方向盘转角 1.3~1.7 s 内由  $0^\circ \sim 200^\circ$  变化,保持 0.3 s 后以同样速率降到  $-200^\circ$ ,不同路面模型激励时各参数的变化如图 7 所示。

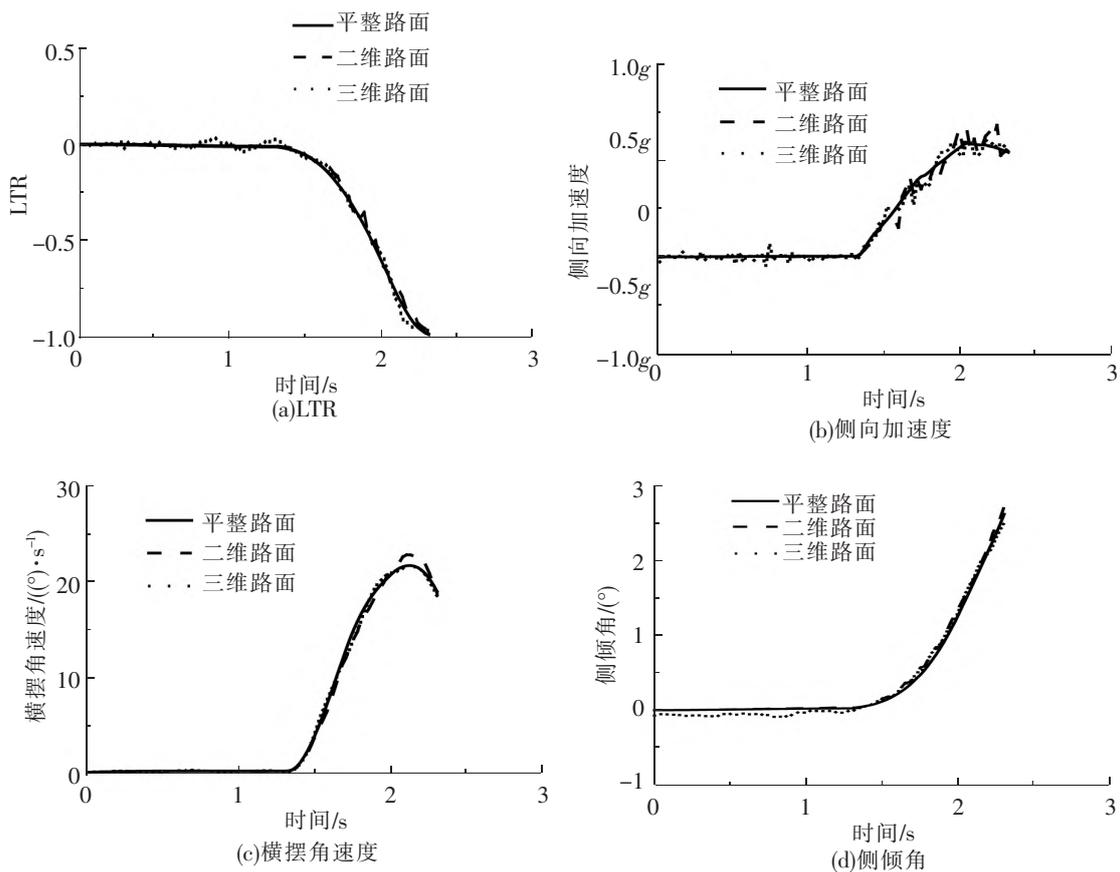


图 7 不同路面模型下瞬态相应对比(鱼钩)

由图 7(a)与图 7(b)可知,车辆在 1.5 s 时开始转向,由于在 2.3 s 时 LTR 绝对值为 1,故可判断车辆发生侧翻;0~1.5 s 时,在三维路面下车辆 LTR 在  $-0.0757 \sim 0.0321$  内波动,侧向加速度在  $-0.046g \sim 0.262g$  内波动,二维路面和平整路面下 LTR 与侧向加速度曲线平缓无波动;1.5~2.3 s 内三维与二维路面下车辆 LTR 与侧向加速度曲线都有波动,且三维路面下波动最大,三维路面与二维路面的 LTR 与侧向加速度波动最大差值分别为 0.1244 和  $0.118g$ 。由图 7(c)可知,3 种路面模型下,横摆角速度变化无明显区别;由图 7(d)可知,2.3 s 发生侧翻时,侧倾角无明显区别。

### 3.3 角阶跃工况

设置角阶跃工况的速度为 80 km/h,方向盘在 3 s 时开始转向,3.8 s 转到  $240^\circ$  后保持不变,不同路面模型激励时各参数的变化如图 8 所示。

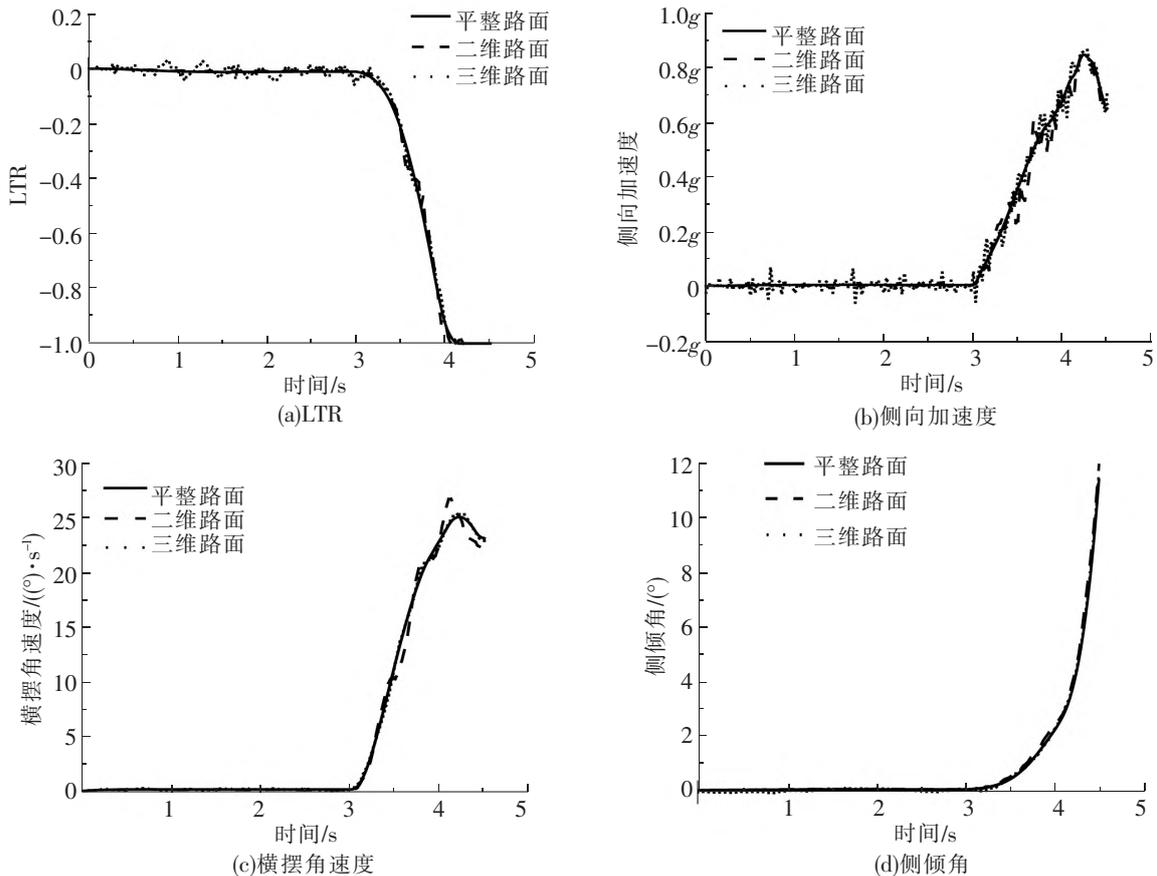


图8 不同路面模型下瞬态相应对比(角阶跃)

由图8(a)和图8(b)可知,车辆在3s时开始转向,由于在4.1s时LTR绝对值为1,故可判断车辆发生侧翻;0~3s内,在三维路面下车辆LTR在 $-0.0615 \sim 0.0287$ 内波动,侧向加速度在 $-0.046g \sim 0.069g$ 内波动,二维路面和平整路面下LTR与侧向加速度曲线平缓无波动;3~4.1s内三维路面下LTR与侧向加速度曲线波动最大,三维路面与平整路面的LTR与侧向加速度波动最大差值分别为0.0431和0.063g;由图8(c)与图8(d)可知,0~4.1s内横摆角速度与侧倾角变化无明显区别。

## 4 结论

建立了平整路面、二维路面和三维路面模型,考虑了双移线工况、鱼钩工况和角阶跃工况,分别分析了LTR、侧向加速度、横摆角速度和侧倾角曲线时域的变化。得到如下结论:

车辆未转向时,三维路面模型下LTR、侧向加速度和侧倾角变化波动最大,平整路面与二维路面下其曲线无明显波动。车辆转向且未侧翻时,二维与三维路面下车辆LTR、侧向加速度和侧倾角曲线都有波动,且三维路面下波动最大;3种路面模型对横摆角速度变化影响无明显区别。车辆达到侧翻状态时,不同路面模型下LTR、侧向加速度、横摆角速度和侧倾角数值均达到侧翻阈值。

## 参 考 文 献

- [1]National Highway Traffic Safety Administration. Overview of motor vehicle crashes in 2020: A compilation of motor vehicle crash data from the fatality analysis reporting system and the general estimates system[R]. Washington D C: US Department of Transportation, 2020.
- [2]金智林,严正华. 基于二次预测型横向载荷转移率的汽车侧翻预警研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(15): 1790-1795.
- [3]JIN Z L, WENG J S, HU H Y. Rollover stability of a vehicle during critical driving manoeuvres[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2007, 221(9): 1041-1049.

- [4] IMINE H, BENALLEGUE A, MADANI T, et al. Rollover risk prediction of heavy vehicle using high-order sliding-mode observer: Experimental results[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 63(6): 2533-2543.
- [5] 宋小文, 李杰, 王耘, 等. 一种改进的汽车侧翻模型及其应用研究[J]. 汽车工程, 2009(10): 971-975.
- [6] 朱天军, 宗长富, 吴炳胜, 等. 基于改进 TTR 算法的重型车辆侧翻预警系统[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 88-94.
- [7] 石求军, 李静. 基于非线性扰动估计的客车防侧翻控制[J]. 汽车工程, 2020, 42(9): 1224-1231.
- [8] 张金喜. 道路路面性能评价理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [9] ELNASHAR G, BHAT R B, SEDAGHATI R. Modeling and dynamic analysis of a vehicle-flexible pavement coupled system subjected to road surface excitation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(7): 3115-3125.
- [10] 覃凌云, 杨书仪, 陈哲吾, 等. 路面激励下的履带车辆负重轮动载荷研究[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(4): 652-659.
- [11] 张韡, 魏朗, 余强. 道路减速带对车辆平顺性和安全性的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(4): 95-98.
- [12] 鲍卫宁, 胡三宝. 考虑路面激励的车辆侧翻仿真分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 59-65.
- [13] 全国机械振动与冲击标准化技术委员会. 机械振动-道路路面谱测量数据报告: GB/T 7031—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [14] 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.
- [15] 郑文刚, 路永婕, 陈恩利, 等. 基于 ADAMS/MATLAB 联合仿真的 LuGre 动态轮胎模型研究[J]. 动力学与控制学报, 2016, 14(3): 247-252.
- [16] 石晓辉, 曾键, 蒋欣, 等. 轮胎模型动态特性及参数分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(1): 1-8.

## Analysis of the Influence of Road Roughness Model on the Transient Response of Vehicle Rollover

Yang Chenxu<sup>1</sup>, Lu Yongjie<sup>2</sup>, Wang Meichen<sup>1</sup>, Zheng Lufeng<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Behaviour and System Safety of

Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Accurate road roughness model can improve the estimation accuracy of vehicle transient response. In this paper, combined with the standard pavement spectrum and the self-similarity characteristics of pavement morphology in the national standard, the flat pavement, two-dimensional pavement and three-dimensional pavement models were established by using the inverse Fourier transform method and the square subdivision method. Under the typical working conditions of double lane change, fish-hook and angle step, the differences of four transient responses of lateral load transfer rate (LTR), lateral acceleration, yaw rate and roll angle under different pavement and different flatness models were compared and analyzed. Among them, the three-dimensional road surface model had the greatest influence on each response, and the value of each response reached the rollover threshold when the vehicle rolled over. This paper verified the feasibility of the establishment of multi-dimensional road model, and provided a theoretical basis for the study of vehicle rollover transient response.

**Key words:** rollover; transient response; Fourier inverse change method; square subdivision; three-dimensional road spectrum