

文章编号: 0451-0712(2006)02-0111-06

中图分类号: U491.251; U495

文献标识码: A

基于三维数字模型的路面表面空间几何特征参数的初步研究

薛忠军, 马松林, 侯相深

(哈尔滨工业大学交通科学与工程学院 哈尔滨市 150090)

摘 要: 在路面表面三维可视化实现的基础上对其几何特征参数做了初步研究。通过研究轮胎与地面相互作用的关系, 在借鉴微观表面特性研究的基础上, 对路面表面特性在三维空间层面上做了探索性的研究。提出了表征路面表面空间几何特征的整体特征参数和局部特征参数。

关键词: 路面表面特性; 三维可视化; 几何特征参数

高速交通是交通运输现代化的最重要标志, 车辆高速运行的同时要求安全、舒适。路面表面特性是影响车辆高速、安全、舒适的主要道路因素之一, 这里所指的路面表面特性是路面本身所固有的特性, 主要指路面表面的轮廓特性、摩擦特性、环保特性、力学激励与响应特性等。道路的大多数病害最终几乎都要体现在路面表面几何形状的变化上。因此, 本文主要对路面表面轮廓特性即三维表面几何构造特性做了初步研究。路面表面空间存在的固有状态, 可

用 $f(x, y, z, t, a)$ 的数学形式来表示。其中 (x, y, z) 代表空间维, t 代表时间维, a 表示对象的属性维(属性不一定只有一个 a_1 , 还可能有 a_2, a_3, \dots, a_n 等多个属性)。目前对路面表面几何特征的评价指标主要为车辙深度、不平度等, 是分别对路面横断面和纵断面的一维评价指标, 二者之间没有必然的联系。而车辆所行驶的实际路面表面是三维空间状态, 所以车辙、不平度等评价指标无论对交通安全、对汽车行驶性能、对人体反应以及对环境保护的影响都难以做出

收稿日期: 2005-10-12

模量是静态回弹模量, 而 FWD 测出的回弹模量是动态的, 它们之间会有一定的偏差, 但是和用压实度和 CBR 值来相比已经具有相当大的优越性了。如果真正做到设计和施工的一致, 就要寻求动态的路基路面设计理论了, 因为从路面的实际受力情况来看, 动态回弹模量更符合实际。

3 结语

(1) 我国路基路面设计和施工控制中的参数不一致造成了设计与施工的分离, 只有使设计与施工统一起来才能有效做到以设计指导施工, 以施工反映设计。

(2) 以路基和路面材料的 CBR 值直接指导设计和进行施工控制, 由于 CBR 设计理论基础以及设计方法的经验性和试验方法的复杂性对于我国的半刚性基层沥青路面不可取。

(3) 以压实度控制施工质量不能做到设计和施工的一致, 而 FWD 或者 PFWD 能够测得路基路面的回弹模量, 并且操作简单, 省工省时, 可靠性好, 能够做到设计与施工控制相统一, 具有相当大的实用价值。

参考文献:

- [1] 邓学钧, 黄晓明. 路面设计原理与方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 朱照宏, 许志鸿. 柔性路面设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [3] 张奎鸿, 李俊, 王士林. 上海地区常用路堤材料 CBR 值研究[J]. 华东公路, 1999, (10).
- [4] 樊英华, 梅满潮, 荆冰寅. 土基回弹模量、回弹弯沉、现场 CBR 之间的关系[J]. 山西交通科技, 2001, (8).
- [5] 段丹军. 路基回弹模量的快速检测[D]. 长沙理工大学硕士学位论文, 2004.

符合实际的、综合的分析。因此,本文基于三维数字路面模型对其几何特征参数做了初步研究。

1 路面表面与轮胎相互作用的关系

1.1 轮胎与地面的接触

轮胎是连接汽车车身与道路的唯一部件,车辆的支承、导向和操纵要通过轮胎与路面之间的相互作用才能实现。在轮胎与路面的相互作用过程中,轮胎胎面与路面的接触状态决定了两者之间的载荷传递特性,并对车辆的乘坐和操纵特性、安全与效率以及轮胎的磨损与寿命,产生重要影响^[1]。文献^[2]认为转鼓试验机半径对轮胎接地特性有很大影响,与平面地面相比,轮胎与转鼓(半径为 0.5 m)接触界面上接触正应力分布更不均匀;在接触界面中心部位接触正应力明显偏高,最大正应力比平面地面时高出约 6.4% 左右。转鼓半径为 0.5 m 时,接触界面前后端切应力与平面路面时相反。随转鼓半径增大切应力分布趋于和平面路面相同。这个实验很好地模拟了路面有突起时的状态,间接说明路面不平整对轮胎与地面的接触有很大的影响。

1.2 路面表面空间特性对车辆行驶特性的影响

路面不平度是引起车辆振动的主要激励源,已经为众多学者达成共识。目前,大多数学者关注的主要是垂直方向振动,所制定的用来描述路面不平情况的指标——国际平整度指数 *IRI* 也是用来描述路面纵向不平度的,而对路面横向不平状态的研究相对较少,更没有什么评价指标。实际上,汽车在不平路面上时,乘员所感到的侧向振动强度可以达到与垂直振动相当的水平。如一辆货车单侧通过 6 cm 高、60 cm 长的不平凸块时,测得的车身侧向加速度的峰值可达垂直振动加速度峰值的 45%。因为人体对侧向振动的感受比垂直振动更为灵敏^[3,4]。当轮胎在水膜覆盖的路面上高速行驶时,由于流体的压力使轮胎上浮的现象称为“滑水现象”(Hydroplaning)。如果一旦发生滑水现象,轮胎就非常容易打滑,因此是很危险的。如图 1 所示。

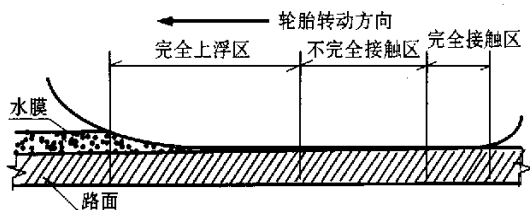


图 1 发生部分滑水现象的状态

图 1 表示发生部分滑水现象的状态,这里存在 3 个区域。第一个区域在接触前部为完全上浮区,在此区域内水的流体压力足以把胎面举起,并使之与路面完全脱离。第二个区域表示水大量流散,但仍然留有一层水膜为不完全接触区,胎面与路面未完全隔开。第三个区域在接触后部,为胎面与路面完全接触的区域。

影响滑水现象的因素是复杂的,路面表面性质、胎面花纹深度、车胎宽度、车胎直径、水深等各种因素都对滑水现象起了影响,综合滑水发生时的各种因素,不难发现其中相对水深和车胎内压起了决定性作用^[5]。路面的表面特性是导致路面绝对水深也就是路面积水过大的决定性因素。原因主要是:一是原来路面设计的排水系统有问题,积水不能及时地排除;二是原来的排水系统没有问题,经过一段时间的车辆荷载作用之后路面表面出现凸凹不平、车辙、坑槽等病害,致使在路面车辙内和路面低洼处积水。那么路面表面处于一个什么状态,如何评价,什么状态下需要维修。目前我们还没有对路面表面特性进行评价的参数。

1.3 路面表面特性与制动的关系

车辆在紧急情况时能停下来是车辆应具备的起码的功能,引起汽车制动性能变化的关键是轮胎和地面的影响。由于有路谱的影响,在制动过程中必引起汽车的振动,这是个非线性非平稳过程。只有能较真实地反映轮胎接地印迹长度瞬时变化的面接触轮胎模型才能从理论上进行制动过程规律的研究^[6,7]。在车轮不跳离地时和常用的路面频率($0.5 \text{ m}^{-1} \sim 8 \text{ m}^{-1}$)内,路面不平度(包括频率和幅值)增大,轮胎在路面上的附着能力减弱,车辆的制动距离增长。从另一个侧面反映出路表的真实状态将会影响到轮胎接地状态,进而影响汽车的制动效果。

1.4 小结

从以上的分析可以看出无论是轮胎与路面的接触、轮胎与地面的摩擦、制动,还是路面表面对行驶特性的影响,轮胎与路面的接触面积是影响它们作用方式和作用效果的共性问题。轮胎与地面的接触面积不同,作用方式和作用效果都会发生改变。路面表面空间几何特征的变化将导致接触面积发生变化。当轮胎和速度不变时,起决定作用的是路面的表面状态,以往简单地把路面假设为平面,实际上不能客观地表现路面表面三维状态。

因此我们需要对路面表面空间几何状态在三维

空间层面上做一个真实的描述,并给出具体的几何特征参数对其进行描述,才能客观地、深入地研究路面表面和轮胎之间的相互作用关系。

2 路面表面特性参数的提出

2.1 国内外研究现状

虽然,路面表面性能没有受到足够的重视,而微观表面测量技术、评定参数已经受到多年的重视,从1931年德国颁布了世界上第一个表面光洁度标准起,各国对表面特性进行了广泛而深入的研究。1954年,国际标准化组织“表面特性及其计量”技术委员会ISO/TC57,开始着手进行制订表面粗糙度国际标准的各项工作。为了统一认识、统一标准,1956年8月,国际标准化组织在前苏联列宁格勒召开了国际加工表面质量会议。1966年2月,ISO正式提出《ISO/R468—1966 表面粗糙度》国际推荐标准。各个国家根据这一推荐标准修改了本国的规范,并都采用了“表面粗糙度”这一术语,从而使各国标准基本上趋于一致。我国在这方面的研究及其标准的制订起步较晚。20世纪50年代一直参照苏联的标准。1983年才由国家标准局批准发布了以下3个新的国家标准:GB3505—83《表面粗糙度 术语 表面及其参数》;GB1031—83《表面粗糙度参数及其数值》;GB131—83《机械制图表面粗糙度代号及其注法》。

到目前为止,国家标准局共发布了十几项有关表面粗糙度的国家标准^[8],都是关于微观表面粗糙度的研究,对宏观的路面表面特征的研究相对较少。

我们可以借鉴其评价方法,正所谓他山之石可以攻玉,二者之间有一定的相关性,只是在尺度空间上有所差别。

2.2 路面表面三维特征参数

英国伯明翰大学在欧洲共同体科技开发项目的支持下,对三维表面特征做了初步的研究^[9],其研究成果主要用于机械加工零件表面的表面特性评价方面。本文在此基础上,根据路面表面特性的实际情况对原来的公式进行了修改,重新定义了基准面。提出了涵盖路面表面特性的幅值信息、水平信息、幅值水平混合信息及局部特性等4个方面的三维表面特征参数。

2.2.1 幅值参数

路面表面的幅值参数是用来描述路面相对于基准面凹凸不平程度的参数,幅值的大小直接关系到车辆在路面行驶的颠簸程度、车辆零件的磨损、能源的消耗等性能;还将关系到车辆与地面的接触摩擦,进而会影响到车辆行驶的安全特性。本文采用表面均方根偏差 σ_r 来表示路面表面的幅值特征:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \epsilon_{ij}^2} \quad (1)$$

式中: σ_r 为表面均方根偏差; m 为测量表面数据的行数; n 为测量表面数据的列数; i, j 为表示了表面第 i 行第 j 列数据的位置; ϵ_{ij} 为表示路面表面相对于基准面的峰值或者谷值,如图2所示。

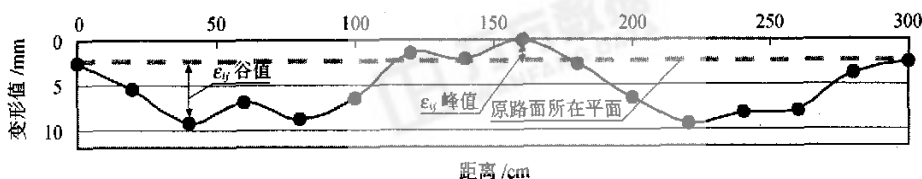


图2 基准平面、峰值及谷值示意

这里的基准面定义为原路面在施工后,半幅路面中未发生变形的部分路面所在的平面,这里强调半幅路面是因为路面有路拱,所以左路面和右半幅路面不在同一平面上。部分未发生变形的路面是指车辆很少作用的路面边缘所在平面,如图2所示。

从公式(1)中可以看出表面均方根偏差与传统路面不平度包含的物理含义有所差别:路面不平度只是道路纵向相对于理想平面偏离的累积;而表面均方根偏差不仅包含纵向的信息还包括路面横向的信

息。因此,表面均方根偏差更能反映路面表面状态。

2.2.2 水平参数

幅值参数只是描述了垂直方向的路面表面特征,没有对路面的水平方向进行描述。而水平方面的特性对于车辆侧倾、操纵稳定和横向的颠簸特性都有很大影响,采用表面峰值分布密度 σ_{di} 来描述路面表面的水平特性。

$$\sigma_{di} = \frac{\text{Max}[\text{表面峰值个数}, \text{谷值个数}]}{(m-1)(n-1)\Delta x \Delta y} \quad (2)$$

式中: σ_{ds} 是表面峰值个数与取样面积之比, 即单位面积上的峰值个数; $\Delta x, \Delta y$ 为取样数据横向和纵向的步长。

由于路面变形有沥青混合料流动性、压密性等变形, 相对于基准面有些情况峰值多, 有些情况谷值多。因此取表面峰值个数或者谷值个数二者最大值作为评定指标分子。表面峰值分布密度表征了路面水平方面凸凹的分布状态。

2.2.3 幅值与水平方向混合参数

仅用高度方向和水平方向的参数还不能足以说明路面表面的全部特性, 因为当两表面轮廓微观不平度的高度和横向间距完全相同时, 它们之间的功能特性显然也仍可以很不相同, 如图 3 所示。因此, 还需要有表征微观不平度形状特性的参数^[10, 11]。实际上行驶在路面上的车辆, 除了受垂直方向和水平方向的路面表面特性的影响之外, 还受到垂直方向和水平方向的综合作用。因此, 需要对这二者的混合作用进行描述, 本文采用表面均方根斜率来描述。

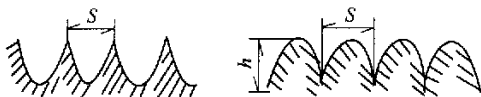


图 3 高度和间距相同表面特性不同

$$\sigma_{ds} = \sqrt{\frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} p_{ij}^2} \quad (3)$$

式中: σ_{ds} 为表面均方根斜率;

$$p_{ij} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{ij} - \epsilon_{(i-1)j}}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{ij} - \epsilon_{i(j-1)}}{\Delta y} \right)^2}$$

表面均方根斜率的实质是表征横向采样间距 Δx 和纵向采样间距 Δy 相邻两点高度的变化率, 以及二者之间的总和变化率。将上述公式通过 MATLAB 程序实现, 采用长平高速公路、哈双高速公路等实测路面表面三维数据, 计算了其中典型路段的表面三维特征参数如表 1, 并利用开发的可视化程序, 给出了这些典型路段的三维可视化图, 如图 4 所示。

2.2.4 表面 16 点平均偏差

由于车辙仪目前为 16 个测距传感器, 路面横向采集间距为 0.2 m, 道路纵向为 1 m 的连续采集间距。因此笔者从这 16 列数据中找出 8 个最大的峰值和 8 个最大的谷值来表征路面表面与原地面最大平均偏离情况, 定义为表面 16 点偏差公式:

表 1 实测典型路段路面表面特征参数

标号	σ_r	σ_{ds}	$\sigma_{\Delta r}$	$\sigma_{\Delta z}$
Cp1	14.958 6	3.843 8	0.295 45	37.257 1
Cp2	11.761 3	2.520 8	0.231 85	45.648 6
Cp3	10.520 1	1.447 9	0.571 57	43.212 4
Cp4	12.393 4	2.989 6	0.368 14	34.122 2
Cp5	9.861 6	2.260 4	0.518 01	32.402 4
Cp6	9.813 1	2.208 3	0.225 82	30.408 4
Cp7	4.335 7	2.000 0	0.212 76	13.260 7
Cp8	2.611 8	2.644 4	0.165 29	9.687 2
Cp9	16.513 4	3.010 4	0.301 59	41.406 4
Cp10	8.613 7	2.052 1	0.001 3	37.172 9
Celiang	9.500 0	0.770 0	0.001 422 4	16.566 3
Hs	3.362 9	1.947 9	0.258 66	8.750 0

注: Cp 为长春—四平高速公路; Celiang 为详细测量路段; Hs 为哈尔滨—双城高速公路。

$$\sigma_{\Delta z} = \frac{\sum_{i=1}^8 \epsilon_{pi} - \sum_{i=1}^8 \epsilon_{vi}}{8} \quad (4)$$

式中: $\epsilon_{pi}, \epsilon_{vi}$ 表示路面表面相对于基准面的前 8 个峰值和后 8 个谷值。

从图 4、图 5 中可以看出不同的路面状况具有不同的三维表现形式, 这一点可以从三维可视化图中直观地看出, 从表 1 中可以看出每一幅三维图具有不同的三维特征参数, 不同的特征参数反映出具有不同三维表面状况。如: 表面均方根偏差值最大的是 Cp9 段 $\sigma_{ds}=16.513 4$, 从三维图(i)图中也可以看出它的车辙深度最大, 尽管 Cp3 段的表面峰值分布密度 $\sigma_{ds}=1.447 9$ 最小, 但是其表面均方根偏差值比较大, 因此其表面状态从总体上来看并不是很好; 而 Cp8、Hs 段的表面均方根偏差, 表面峰值分布密度, 表面均方根斜率这 3 个指标都相对较小因此综合来看 Cp8、Hs 段的表面状况是较好的。这和现场实际测量、观察是吻合的。

从图中还可以看出路面表面有些局部特征没有包含在以上的表面特征参数里面。如最大的峰值和最深的谷值。因此, 还需要能反映最大峰值和谷值的特征参数。从表 1 中可以看出最大 16 点平均偏离程度为 Cp2 段, 从三维图中也可以大概地看出 Cp2 段凸凹差距比较明显。从表 1 中可以看出最大 16 点平均偏离程度为 Cp2 段, 从三维图中也可以大概地看出 Cp2 段凸凹差距比较明显。

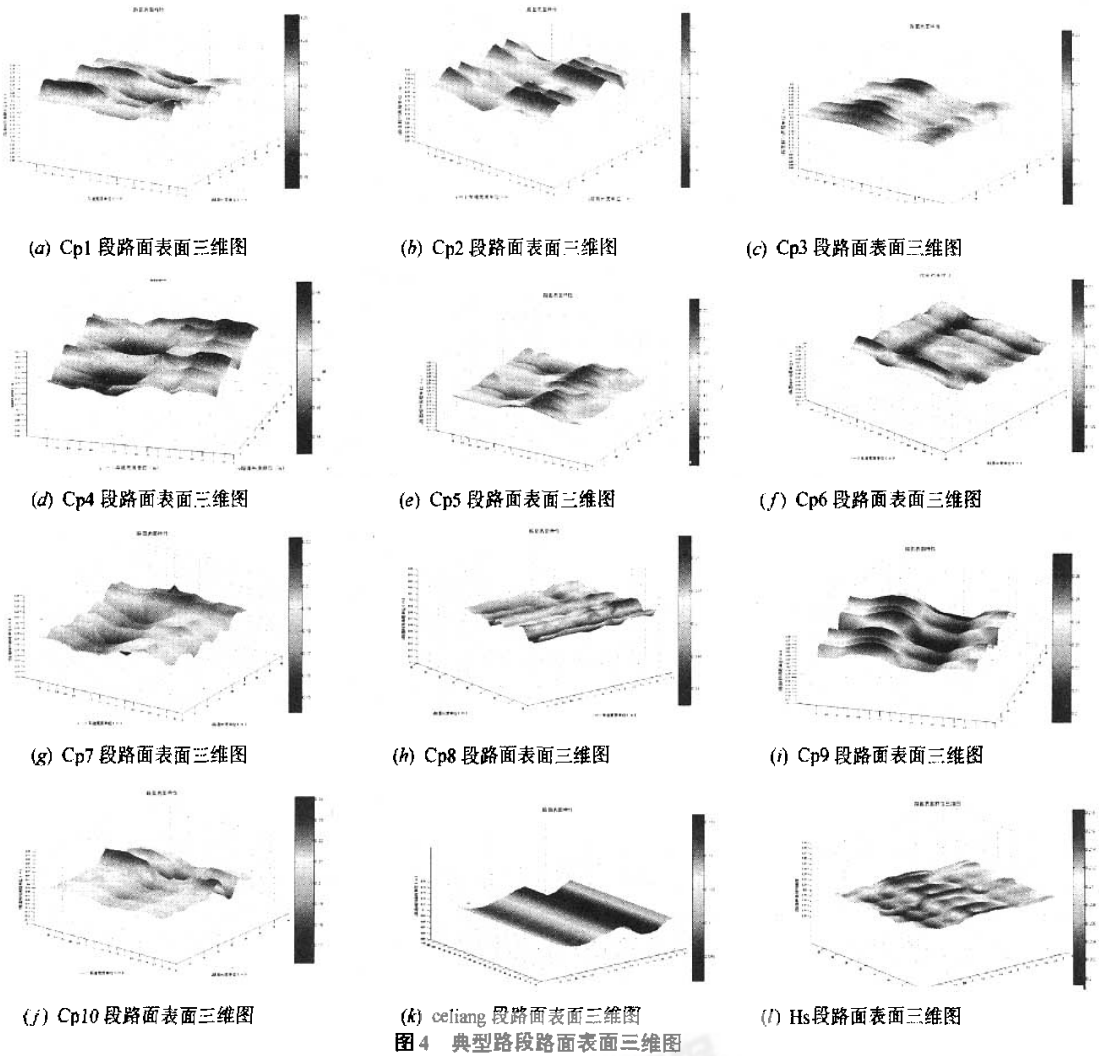


图4 典型路段路面表面三维图

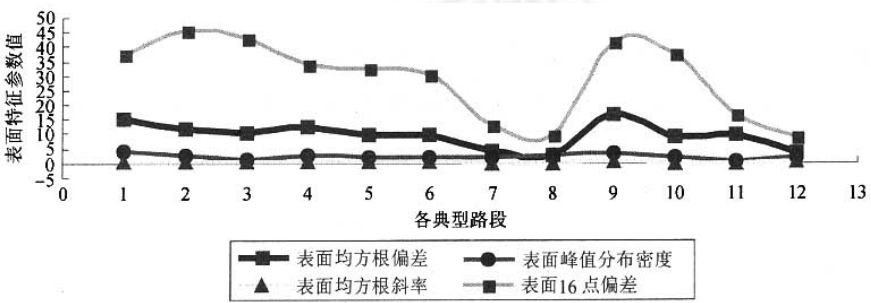


图5 各典型路段路面表面特征统计

3 结语

随着公路等级的提高、交通量的增加和行车速度的提高,与车辆和路面相互作用有密切关系的路面表面特性显得越来越重要,世界道路会议设有专门的技术委员会研究这类问题。目前关于路面表面

特性的研究主要为一维和二维空间层面,而汽车行驶的道路是三维空间的实体,因此,本文在借鉴微观表面特性研究的基础上,对路面表面特性在三维空间层面上做了探索性的研究。通过对长平高速公路、哈双高速公路等公路的现场检测,室内数据处理,以

及到现场的验证,取得了以下研究成果和结论。

(1)将路面表面横向和纵向几何特征联系在一起,形成了完整的路面表面几何曲面,为今后在三维空间层面分析路面问题奠定了基础。

(2)提出了表征路面表面整体表面特性的参数:表面均方根偏差 σ_r 、表面峰值分布密度 σ_{ds} 、表面均方根斜率和局部表面特性的参数——表面 16 点偏差 σ_{16} 。

(3)可以根据路面表面几何特征参数和三维图形的对应关系,建立路面表面特性三维图形数据库,为路面表面病害诊断奠定基础。

由于提出的路面表面特性参数是以真实三维路面为基础的,那么以路表三维特性数字化模型为基础建立的评价指标体系必将影响到新建高速公路路面有关舒适性、安全性、环保和经济性等方面的技术标准。

以上的结论是基于现有数据采集手段和 MATLAB 程序分析得到的结论,研究的过程中发现有些问题需要进一步研究:

(1)本文开发的三维可视化程序还是基于 MATLAB 的运行环境,应该开发独立的实现程序;

(2)目前的路面特征参数处于统计分析的层面上,还不能对路面做智能分析,需要探索能表征路面表面特性的确定函数,即能根据车辆行驶路线给出确定的函数,通过函数来判断路面表面所具有的特性,这样可以为汽车动态模拟提供更接近路面真实状态的激励函数。

参考文献:

- [1] 王吉忠,庄继德,李日春. 轮胎胎面橡胶块与刚性路面摩擦接触数值分析[J]. 农业工程学报,1998,14(2).
- [2] 苗常青,田振辉,杜星文. 轮胎与转鼓之间接触界面特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(8).
- [3] 郭孔辉,吴世杰,李承德. 汽车侧向振动模拟研究[J]. 汽车工程 1995,17(5).
- [4] 郭孔辉,卢荡. 轮胎稳态侧倾力学特性理论建模[J]. 中国机械工程,2001,12(5).
- [5] 王建民,吕海海,孔江生. 轮式车辆水滑现象的初始条件[J]. 公路交通科技,2003,20(10).
- [6] 左曙光,程悦荪. 路面不平度对车辆制动过程中轮胎动态性能影响的仿真分析[J]. 农业工程学报,2000,16(7).
- [7] 左曙光,张琦,吴小青. 不平路面上汽车制动过程建模与仿真分析[J]. 航空学报,1999,20(3).
- [8] 李亚非. 国内外表面粗糙度研究概况及趋向[J]. 长沙交通学院学报,1994,10(9).
- [9] 温秀云,赵艺兵. 三维表面粗糙度的研究[J]. 计测技术,2001,(6).
- [10] Jiang X Q, Blunt L. Advance in the Three-Dimensional Surface Metrology. f. fost. Mfech E, 1999,213.
- [11] William S. Warner Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35 mm vphotoizravhv Soil & Tillage Research 34,1995.

Initial Study on Spatial Geometric Feature Parameters of Road Surface Based on Three-dimensional Digital Model

XUE Zhong-jun¹, MA Song-lin, HOU Xiang-shen

(School of Communications Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Spatial geometric parameters of road surface are initially studied based on the realization of three-dimension visualization. The characteristic of road surface and its spacial geometric parameters are explored and studied at lay of three-dimensional space based on relation of raod surface and tyres and on microcosmic surface feature. The whole feature parameters and local feature of spacial geometric features of road surface are put forward.

Key words: characteristic of road surface; three-dimension visualization; geometry feature parameter