

# 考虑路面摩擦性能的自动驾驶汽车安全制动策略

李峰<sup>1,2</sup>, 邓宇彤<sup>1,2</sup>, 刘亦心<sup>1,2</sup>, 周思齐<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 车路协同与安全控制北京市重点实验室, 北京 100191)

**摘要:** 针对现有自动驾驶研究大多忽略路面摩擦性能的问题, 制备了 5 种不同级配的沥青混合料车辙板试件, 基于 Persson 表面分形摩擦理论和轮胎-路面三维有限元模型, 求解沥青路面的动摩擦系数和附着系数, 表征其摩擦性能, 并使用 Matlab/Simulink 软件建立自动驾驶汽车的动力学控制模块, 根据车辆期望制动减速度和道路摩擦性能逆向反推求解轮缸的制动压力值, 实现自动驾驶汽车的制动过程。使用 CarSim 软件和 Matlab/Simulink 进行联合仿真, 设定了下坡制动和曲线制动工况, 分析了纵向坡度、弯道半径和道路超高等影响因素对自动驾驶车辆制动效能的影响。

**关键词:** 三维纹理; 沥青路面摩擦性能; 轮胎有限元模型; 自动驾驶车辆; 制动效能

中图分类号: V323.19

文献标志码: A

## Safety Braking Strategies for Autonomous Vehicles Considering Road Friction Performance

LI Feng<sup>1,2</sup>, DENG Yutong<sup>1,2</sup>, LIU Yixin<sup>1,2</sup>, ZHOU Siqi<sup>1,2</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Beijing Key Laboratory for Cooperative Vehicle Infrastructure Systems and Safety Control, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In view of the problem that most of the existing researches on automatic driving ignore the friction performance of pavement, five kinds of asphalt mixture rutting plate specimens were prepared in this paper. Based on Persson's surface fractal friction theory and the 3D tire-pavement finite element model, dynamic friction coefficient and adhesion coefficient of asphalt pavement were calculated to characterize the friction performance. Matlab/Simulink software was used to establish the dynamics control module of autonomous vehicles, and the braking pressure of the wheel cylinder was solved by reverse calculation based on the desired

braking speed and pavement friction performance of the vehicle to realize the braking process of the vehicle. Finally, CarSim and Matlab/Simulink were used for co-simulation, setting downhill braking and curve braking conditions, and analyzing the influence of factors such as longitudinal slope, curve radius, and pavement superelevation on the braking performance of autonomous vehicles.

**Keywords:** 3D textures; asphalt pavement friction performance; finite element models of tires; automated vehicles; braking performance

近年来,自动驾驶汽车产业发展势头迅猛,由自动驾驶引发的事故日益受到关注<sup>[1-2]</sup>。汽车制动性能是安全行驶的重要保障<sup>[3]</sup>,在行车速度较高或前后车距较小时,危险情形下车辆不能及时制动是导致交通事故的主要原因<sup>[4]</sup>。因此,对于自动驾驶车辆,掌握其制动效能并为系统决策提供依据是提高行驶安全性的重要手段。

众多科研团队已经开始关注并针对自动驾驶车辆的横纵向控制策略开展研究,以提高轨迹跟踪控制性能,进一步完善自动驾驶制动系统。蔡英凤等<sup>[5]</sup>利用可拓优度评价控制方法开发了两层横向轨迹跟踪控制系统,解决了复杂工况下的低精度和稳定性差的问题。谢辉等<sup>[6]</sup>提出了一种基于预测控制模型的横纵向一体化控制方法,以解决具有高非线性和强耦合性的无人驾驶汽车的控制问题。众所周知,道路交通的三要素为人、车、路<sup>[7]</sup>,然而现有的研究主要集中在自动控制领域和计算机领域,常常简化路面状况、忽略路面纹理特性,使得仿真结果与实际行车情况存在差距。正因为如此,有必要对自动驾驶汽车的制动系统以及其与路面摩擦特性的交互关系进行更深入的探究。

收稿日期: 2023-06-21

基金项目: 国家重点研发计划(20232604600);北京市政路桥股份有限公司技术创新项目(2022-03)

第一作者: 李峰,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为智能交通基础设施。E-mail: lifeng98@buaa.edu.cn

通信作者: 周思齐,博士后,主要研究方向为智能交通基础设施。E-mail: zsq47@buaa.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

对于轮胎与路面的摩擦关系,已有研究者进行了橡胶-路面摩擦机理的相关研究。Kummer<sup>[8]</sup>研究得出坚硬路面与橡胶之间的摩擦力受到黏附力和滞后力的综合影响;Grosch<sup>[9]</sup>认为在轮胎与路面的摩擦中,橡胶的滞后变形对轮胎的影响较大;Kluppel等<sup>[10]</sup>认为,摩擦力的产生主要是由于橡胶在粗糙表面上滑动造成了能量耗散;Persson<sup>[11-13]</sup>提出了橡胶与具有分形特征的硬基底表面之间的摩擦理论,在考虑了橡胶材料参数和基底表面纹理特征的基础上,深入解释了二者之间的摩擦机理;黄晓明等<sup>[14]</sup>建立了一种轮胎与路面摩擦接触的数值分析模型,探讨了车辆在自由滚动和紧急制动时,胎面、路表的变形及接触应力的分布状况。

对于路面摩擦特性对车辆制动性能的影响,也有学者进行了相关研究。邓刚<sup>[15]</sup>建立了基于道路摩擦特性的安全车距模型,并使用Carsim和Simulink软件在各种典型工况下对其进行联合仿真;黄晓明等<sup>[16]</sup>基于无人驾驶车辆制动原理与沥青路面附着特性,采用CarSim/Simulink联合仿真建立了无人驾驶车辆制动模型,提出无人驾驶车辆在不同制动工况下的安全制动限值。这些研究进一步表明,路表纹理特性对车辆制动安全性有较大的影响,故考虑轮胎与路面摩擦性能的协调作用是解决自动驾驶车辆安全制动的关键。

针对现有自动驾驶研究大多忽略路面摩擦性能的问题,本研究利用高精度三维轮廓扫描仪获取沥青路面的纹理信息,基于Persson表面分形摩擦理论求解沥青路面的摩擦系数,表征路面的摩擦性能;建立轮胎-路面模型,控制轮胎滑移率,调整轮胎运行速度,求解路面附着系数曲线;使用Matlab/Simulink建立自动驾驶汽车的动力学控制模块;最后使用CarSim和Matlab/Simulink软件进行联合仿真,分析了纵向坡度、弯道半径、道路超高等影响因素对自动驾驶车辆制动效能的影响,提出了自动驾驶汽车制动过程中的安全策略。

## 1 沥青路面三维纹理特征分析

### 1.1 沥青路面三维纹理数据获取

#### 1.1.1 沥青试件制备

本文使用沥青混合料自动拌和机、轮碾成型机和试件切割机等仪器设备,采用轮碾法制备了沥青混合料车辙板试件。一共选取了2种沥青混合料形式:密级配沥青混凝土混合料(AC)、沥青玛蹄脂碎

石混合料(SMA),分别制备了AC-5、AC-13、SMA-5、SMA-10、SMA-13这5种沥青混合料车辙板试件,试件尺寸均为300 mm×300 mm×50 mm。依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011)<sup>[17]</sup>,原材料选用70号基质沥青和SBS改性沥青,集料选用玄武岩、石灰岩,填料选用石灰岩矿粉,AC试件油石质量比为4%,SMA试件油石质量比为5%,沥青混合料具体材料组成见表1。各沥青混合料车辙板试件的级配设计如图1所示。

表1 沥青混合料材料组成

Tab.1 Material composition of asphalt mixture

混合料类型	沥青	集料	添加剂	油石质量比/%
AC-5	70号沥青	石灰岩	无	4
AC-13	70号沥青	石灰岩	无	4
SMA-5	SBS改性沥青	玄武岩	0.3%木质素纤维	5
SMA-10	SBS改性沥青	玄武岩	0.3%木质素纤维	5
SMA-13	SBS改性沥青	玄武岩	0.3%木质素纤维	5

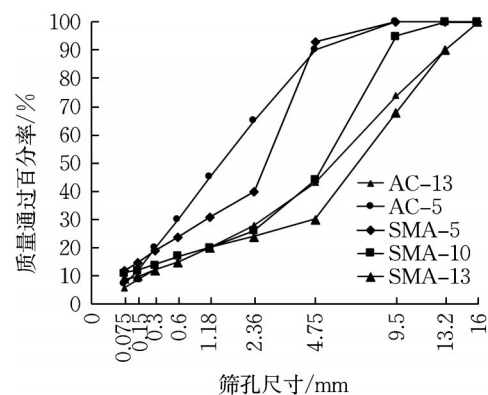


图1 沥青混合料级配曲线

Fig.1 Grading curve of asphalt mixture

为保证沥青试件扫描结果的有效性,并考虑到三维轮廓扫描仪的工作尺寸限制,将车辙板试件沿着碾压方向进行三等分切割,每块试件尺寸为100 mm×100 mm×50 mm,共计5组车辙板试件,每组3个试件。

#### 1.1.2 试件表面三维纹理数据采集

本文使用基恩士公司VR-3000三维轮廓测量仪,在室内实验室测量并分析沥青试件表面三维纹理点云数据。测量仪扫描倍率为12倍,其平面精度小于1.0 μm,垂直精度小于0.5 μm。设备的采样间隔为0.1 mm,扫描区域面积选择为45 mm×100 mm。扫描获得的是网格化的数据,网格的尺寸是0.1 mm×0.1 mm。扫描获得的样本数据是450×

1 000的二维矩阵,其中矩阵各点的 $x$ 、 $y$ 坐标表示该扫描点在试件扫描区域内的位置,相邻点之间的间隔是0.1 mm,扫描点的值代表该点的高度 $z$ 。为获得良好的实验数据,使用VR-3000 G2分析软件对测量数据进行预处理,主要进行基准面设置、去除干扰、无效区域设置等处理步骤。

### 1.2 沥青路面三维纹理结果分析

#### 1.2.1 沥青路面三维曲面模型

图2分别展示了使用三维轮廓扫描仪VR-3000获得的沥青试件表面真实图像、扫描后重建的三维曲面模型以及以试件中心线为基准线的轮廓剖面图,各试件图像面积大小均为45 mm×100 mm。从

试件表面真实图像及三维曲面模型中均可看出各试件粒径大小差异,相较SMA试件,AC试件集料更加密实均匀。AC-5试件的粒径尺寸最小,集料分布最为紧密匀称且集料间缝隙最小,AC-13和SMA-13粒径较大,SMA-13集料间缝隙最大。从三维曲面模型中可以看出,AC-5试件表面的高度差最小,为4.842 mm,其次为SMA-5试件,高度差为5.834 mm,SMA-10试件表面高度差为6.935 mm,AC-13和SMA-13试件表面高度差较大,分别为7.829、7.445 mm。从轮廓剖面图中可以看出,SMA试件相较AC试件,轮廓剖面曲线波动更大,SMA-13试件曲线波动最大。

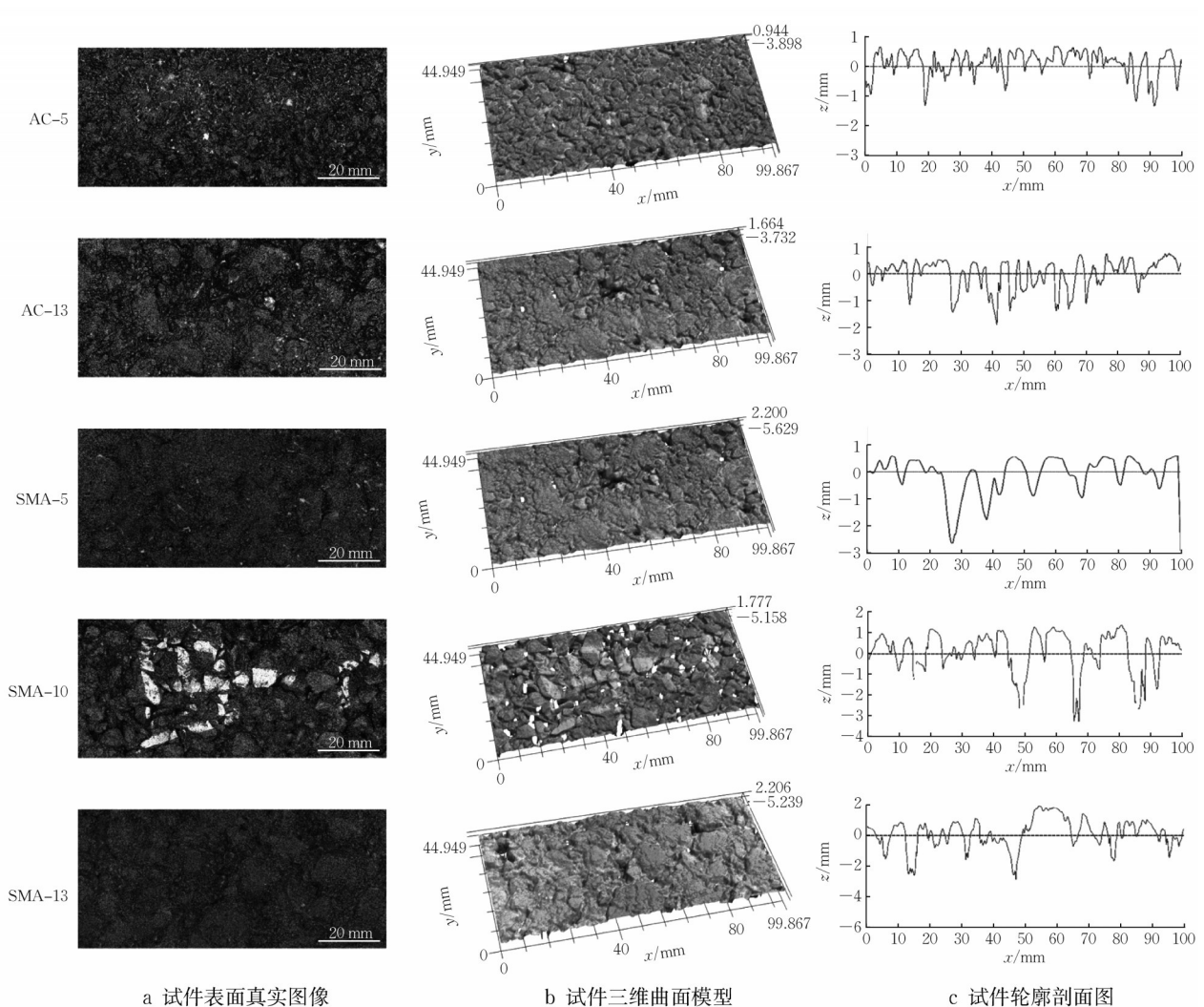


图2 三维扫描结果

Fig.2 3D scans

#### 1.2.2 沥青路面纹理构造参数

本文利用三维轮廓测量仪VR-3000的分析软件在试件的中心线处获取轮廓剖面图,计算路面纹

理构造常用的表征参数为平均构造深度(mean texture depth, MTD),用以描述表面纹理凹凸不平的程度。

传统的平均构造深度计算方法为铺砂法<sup>[18]</sup>,其工作原理是将已知体积的细砂铺在试验路面的测点处,根据量取的圆形直径求出面积值,则体积和面积的比值即为平均构造深度,但该方法在实际操作过程中受人为因素影响较大。

本文根据该测量原理(图3),使用轮廓剖面图进行计算,计算公式如下:

$$\text{MTD} = \frac{V_{\text{con}}}{S} \quad (1)$$

式中: $V_{\text{con}}$ 为表面纹理凹体积; $S$ 为扫描区域面积。

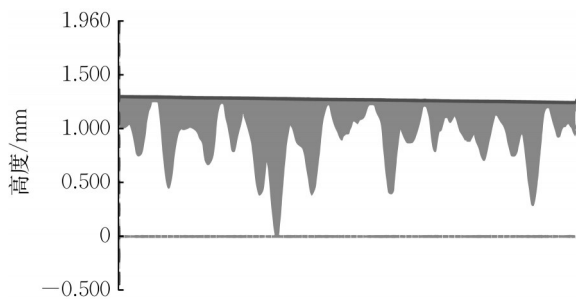


图3 平均构造深度计算原理

Fig.3 Calculation principle of MTD

在VR-3000分析软件中,选定试件表面最高点为高度阈值,则体积为测量对象的形状与所选高度阈值水平面围成的立体空间的体积,即 $V_{\text{con}}$ ;扫描区域的面积为用阈值横切试件表面的横截面积,即 $S$ ,然后利用公式(1)进行计算。

分析表2中的计算结果可知,不同级配混合料MTD数值的相对大小为SMA-13> SMA-10> AC-13> SMA-5> AC-5, SMA-13试件的平均构造深度最大,为1.455 mm, AC-5试件的平均构造深度最小,为0.692 mm。MTD数值与混合料最大公称粒径有关,最大粒径越大的混合料试件表面平均构造深度越大;MTD数值大小和混合料类型有关,具体表现为SMA> AC。

表2 平均构造深度计算结果

Tab.2 Calculation results of MTD

级配类型	$V_{\text{con}}/\text{mm}^3$	$S/\text{mm}^2$	MTD/mm
AC-5	3 101.162	4 481.110	0.692
AC-13	3 504.532	4 400.128	0.797
SMA-5	3 193.436	4 483.445	0.712
SMA-10	5 189.360	4 403.559	1.178
SMA-13	6 411.299	4 405.743	1.455

## 2 基于三维纹理的路面摩擦性能评价

### 2.1 表面分形摩擦理论

Persson<sup>[11]</sup>提出的表面分形摩擦理论(图4),被许多研究学者认为是目前建立的最全面的橡胶接触和摩擦模型。路面为车辆提供的摩擦性能实质上取决于轮胎橡胶与路面之间的摩擦机理,主要是指路面对胎面-路面相互作用的贡献。当橡胶块在粗糙的表面上(即轮胎在路面上)滑动时,摩擦力的产生主要来源于两种物理机制:黏附和滞后。

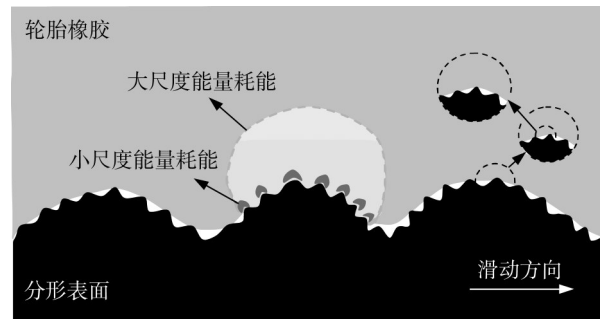


图4 表面分形摩擦理论

Fig.4 Surface fractal friction theory

Persson摩擦理论主要考虑到滞后力产生的摩擦效果,通过模拟橡胶变形机理来求解摩擦过程中由滞后引起的能量损失,进而预测沥青路表的橡胶摩擦性能,求解沥青路表的动摩擦系数。摩擦系数可根据路表二维功率谱密度以及轮胎橡胶复模量求出, Persson理论建立的计算公式如下:

$$\mu = \frac{1}{2} \int q^3 C(q) P(q) dq \int_0^{2\pi} \gamma \frac{E(qv \cos \phi)}{(1-v^2)\sigma_0} \cos \phi d\phi \quad (2)$$

$$P(q) \approx \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \exp[-x^2 G(q)] dx = [\pi G(q)]^{-1/2} \quad (3)$$

$$G(q) = \frac{1}{8} \int_{q_l}^q q^3 C(q) dq \int_0^{2\pi} \left| \frac{E(qv \cos \phi)}{(1-v^2)\sigma_0} \right|^2 d\phi \quad (4)$$

式(2)~(4)中: $\mu$ 为路表动摩擦系数; $q$ 为波矢; $q_l$ 为积分下限; $C(q)$ 为路面功率谱密度; $P(q)$ 为接触面积的比例系数; $G(q)$ 为表面粗糙度的相关函数; $\gamma$ 为材料的黏滞损耗因子; $E(qv \cos \phi)$ 为橡胶复模量,其中 $v$ 为橡胶块的滑移速度, $\phi$ 为 $v$ 与运动方向间的夹角; $v$ 为橡胶材料泊松比; $\sigma_0$ 为施加在橡胶块上竖直方向的力。

### 2.2 沥青路面二维功率谱密度

在Persson理论中,考虑粗糙的沥青路面为硬的自仿射分形表面,利用傅里叶变换,将粗糙表面的空间坐标分解为不同维度的波的叠加。粗糙表面的二维功率谱密度可由沥青路面的表面高程点信息等形貌数据进行二维快速傅里叶变换信号处理得到<sup>[19]</sup>,是表征粗糙表面纹理信息的重要参数,可用来描述表面粗糙度的相关统计特性。

$$C(q) = \frac{1}{2\pi^2} \int d^2x \langle h(x)h(0) \rangle e^{-iqx} \quad (5)$$

式中: $h(x)$ 为 $x=(x,y)$ 的高度坐标, $h(0)$ 为原点的高度坐标; $\langle \dots \rangle$ 表示集合平均运算。

使用前文获取的路表三维纹理信息数据(.csv文件),通过Matlab编程来进行功率谱密度 $C(q)$ 的求解。输入为高度值( $z$ )的矩阵( $M \times N$ ),以及空间分辨率(PixelWidth),空间分辨率可以通过将图像长度除以长度上的像素数得到,通过自定义程序运算,得到输出结果,包括波矢量 $q$ 、二维功率谱密度 $C(q)$ 以及研究所需的其他信息。

### 2.3 轮胎橡胶复模量

橡胶材料为黏弹性材料,常用多种不同的螺旋弹簧和阻尼器的组合进行表征<sup>[20]</sup>。在Persson的许多理论研究中,常采用标准线性模型的沃伊特形式(图5)模拟典型轮胎胎面化合物,本研究同样基于此模型及其典型参数求解橡胶的复模量曲线用于动摩擦系数的计算。橡胶复模量的求解公式为

$$E(\omega) = \frac{E_1(1 - i\omega\tau)}{1 + a - i\omega\tau} \quad (6)$$

$$E(qv \cos \phi) = \frac{E_2}{1+a} \frac{(1+a)^{-1} - iV}{1 - iV} \quad (7)$$

$$V = \frac{qv\tau}{1+a} \quad (8)$$

式(6)~(8)中: $E_1$ 、 $E_2$ 、 $\tau$ 为模型参数; $a = E_1/E_2$ ,在标准线性模型的沃伊特形式模型中, $E_1$ 为 $10^6$  Pa, $E_2$ 为 $10^9$  Pa, $\tau=0.001$  s。

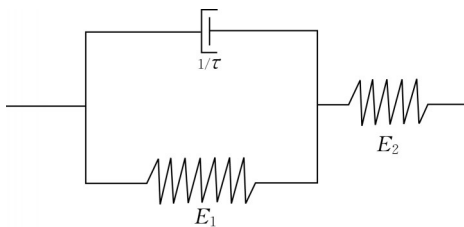


图5 标准线性模型(沃伊特形式)

Fig.5 Voigt form of standard linear model

使用Matlab编程求解出的橡胶复模量变化曲线如图6所示,横坐标为频率 $\omega$ ,纵坐标为模量 $E$ 。

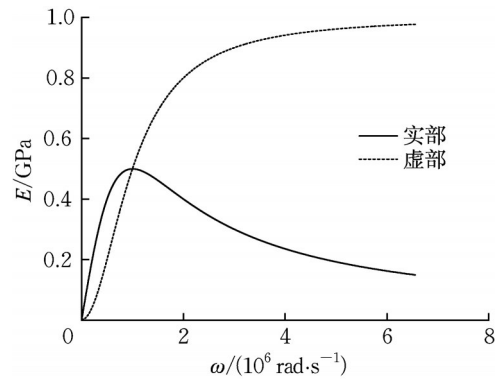


图6 橡胶复模量变化曲线

Fig.6 Complex viscoelastic modulus for rubber

### 2.4 沥青路面动摩擦系数

根据Persson表面分形摩擦理论,沥青路面的动摩擦系数可根据路表二维功率谱密度以及轮胎橡胶复模量求解。本文使用Matlab软件通过Persson表面分形摩擦理论求解沥青试件的动摩擦系数 $\mu$ 。不同级配的沥青试件的动摩擦系数随速度的变化规律基本一致,均为动摩擦系数随车速度的增加而减小,当速度较小时,曲线斜率的绝对值较大,即相同速度增量对应的动摩擦系数减小的幅度较大;随着速度的增大,曲线斜率的绝对值逐渐减小;当速度大于 $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,曲线趋于平缓,曲线斜率的绝对值趋近于0,即路面的动摩擦系数值趋于常值,此时轮胎和路面处于充分接触的状态。

对比分析5种不同级配的沥青试件的动摩擦系数(图7)。由图7可知,在相同的行车速度下,5种不同级配沥青试件的动摩擦系数表现出相同的规律,均为 $\text{SMA-13} > \text{SMA-10} > \text{AC-13} > \text{SMA-5} > \text{AC-5}$ 。对于同一种级配类型的沥青试件,集料的公称粒径越大,动摩擦系数越大,摩擦性能越好;在集料最大粒径相同的情况下,SMA试件的动摩擦系数大于AC试件,即SMA沥青路面的摩擦性能更好;其中比较特殊的一组动摩擦系数相对大小为 $\text{SMA-10} > \text{AC-13}$ ,尽管AC-13的集料最大公称粒径大于SMA-10,但SMA-10为间断级配,AC-13为连续级配,此时混合料的级配类型对动摩擦系数的影响大于集料最大公称粒径的影响。

将动摩擦系数计算结果与上文计算的MTD数值进行对比,发现二者表现出了相同的规律。二者

的相对大小均为 SMA-13> SMA-10> AC-13> SMA-5> AC-5,验证了本文使用 Persson 摩擦理论计算路面的动摩擦系数的可行性。相较于传统纹理指标只能用于路面摩擦性能评价的单一用途,动摩擦系数可以更好地应用于路车仿真实验。

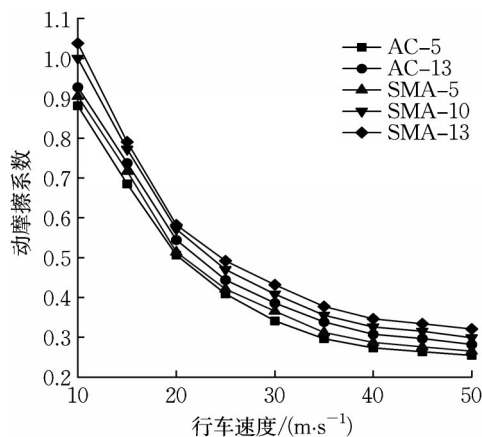


图7 动摩擦系数计算结果

Fig.7 Calculation result of dynamic friction coefficient

### 3 基于轮胎有限元模型的路面附着系数计算方法

#### 3.1 路面附着性能原理

路面的附着性能是指路面给行驶中的车辆提供附着力的能力。路面的附着系数一般被定义为轮胎制动时受到的水平附着力与轮胎竖向载荷的比值,计算公式为

$$\varphi = \frac{F_x}{F_z} \quad (9)$$

式中: $\varphi$ 为路面附着系数; $F_x$ 为水平附着力; $F_z$ 为轮胎的竖向载荷。

汽车制动时,车轮经历了纯滚动、边滚边滑、纯滑动的状态变化,在此过程中的任一瞬时状态下,将车轮的滑移成分所占的比例,即车轮的滑动速度与汽车行驶速度的比值定义为车轮的滑移率<sup>[21]</sup>,计算公式为

$$s = \frac{v - \omega r}{v} \times 100\% \quad (10)$$

式中: $s$ 为滑移率; $v$ 为汽车的行驶速度; $\omega$ 为车轮角速度; $r$ 为轮胎滚动半径。

#### 3.2 轮胎-路面附着系数计算方法

在轮胎建模过程中,本文使用了 Hpyermesh 软

件进行网格划分、单元类型设置等,编辑 ABAQUS 规范的计算输入文件,进行轮胎橡胶等部件的材料属性定义(图8)。仿真求解器使用 ABAQUS 软件,建立的轮胎型号为 225/60 R18。

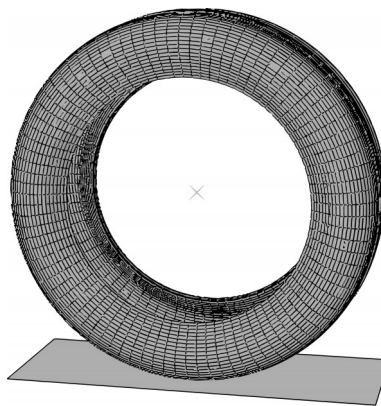


图8 三维轮胎-路面有限元模型

Fig.8 Finite element model of 3D tire-pavement

将轮胎竖向荷载设置为固定值,轮胎行驶速度为  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,路面参数选取前文的纹理分析结果,通过轮胎-路面有限元模型求解轮胎在不同滑移率下的水平附着力  $F_x$ ,利用路面附着系数计算公式求解附着系数(图9)。

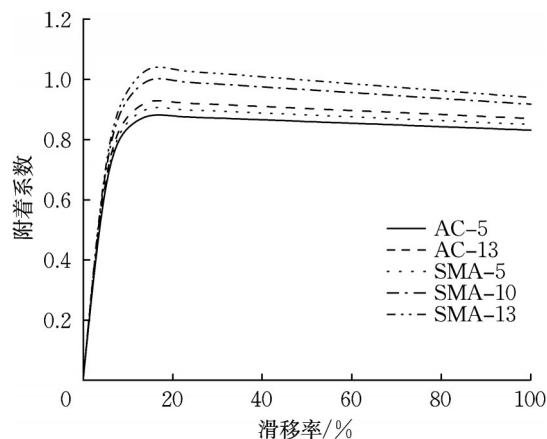


图9 附着系数随滑移率变化曲线

Fig.9 Adhesion coefficient versus slip rate

由图9可知,各级配沥青试件附着系数随滑移率的变化具有相同的规律。当滑移率为0~10%时,随着滑移率的增大,附着系数呈线性递增趋势。当滑移率增大到10%时,附着系数仍呈增加趋势,但增速逐渐变缓;当滑移率达到15%左右时,曲线处于顶点位置,附着系数达到最大值,代表在该滑移率下轮胎-路面的附着力达到最大,此时的附着系数被

称为峰值附着系数。在峰值附着系数下,车辆的制动性能最好,同时这也是汽车制动时,传统防抱死系统控制轮胎滑移率为15%的理论依据。当滑移率大于15%时,随着滑移率的增大,轮胎的附着系数呈线性递减趋势,但曲线斜率绝对值较小,附着系数值变化较小,趋于稳定。以上规律与目前轮胎学中的研究结论(公式(9)、(10))相符合,证明本文中轮胎-路面有限元模型的仿真结果合理可靠。

当滑移率为0~5%时,各级配沥青试件的附着系数基本相等;随着滑移率的增加,各级配试件的附着系数开始产生差异,各曲线斜率相对大小为SMA-13>SMA-10>AC-13>SMA-5>AC-5,表明SMA-13试件的附着系数增速最快,AC-5试件的附着系数增速最慢;在同一滑移率下,各试件附着系数相对大小为SMA-13>SMA-10>AC-13>SMA-5>AC-5,与前文路面动摩擦系数规律(图7)相同。

## 4 仿真结果分析

### 4.1 自动驾驶车辆制动算法的搭建

在自动驾驶车辆的制动算法设计中,可以根据车辆所需的减速度,通过逆向计算来确定轮缸所需施加的制动压力值 $P_{des}$ ,以此来控制车辆的制动过程<sup>[22]</sup>。车辆准备制动时,纵向受力图如图10所示,简化后,车辆运动方程变换为

$$a_{des} = \mu g \quad (11)$$

$$ma_{des} = -P_{des}K_b - \sum F_{(f+w)}(v) \quad (12)$$

$$\sum F_{(f+w)}(v) = \frac{1}{2}C_D A \rho v^2 + mgf \quad (13)$$

$$\frac{T_{bf} + T_{br}}{r} = K_b P_b \quad (14)$$

式(11)~(14)中: $a_{des}$ 为期望制动减速度; $\mu$ 为峰值附着系数; $g$ 为重力加速度, $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ;  $m$ 为整车质量; $P_{des}$ 为期望制动压力; $K_b$ 为制动器制动力矩和制动器油压之比; $\sum F_{(f+w)}(v)$ 为汽车滚动阻力和空气阻力的合阻力; $C_D$ 为空气阻力系数,轿车一般取0.28~0.40; $A$ 为车辆迎风面面积; $\rho$ 为空气密度,约为 $1.293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; $f$ 为滚动阻力系数; $T_{bf}$ 、 $T_{br}$ 分别为前、后车轮制动器制动力矩; $r$ 为车轮滚动半径; $P_b$ 为制动器实际制动油压。

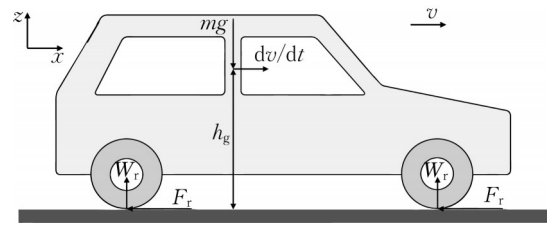


图10 车辆运动纵向受力示意图

Fig.10 Longitudinal force diagram of vehicle during running

### 4.2 基于CarSim的车辆制动仿真分析

#### 4.2.1 纵向坡度对车辆制动效能的影响

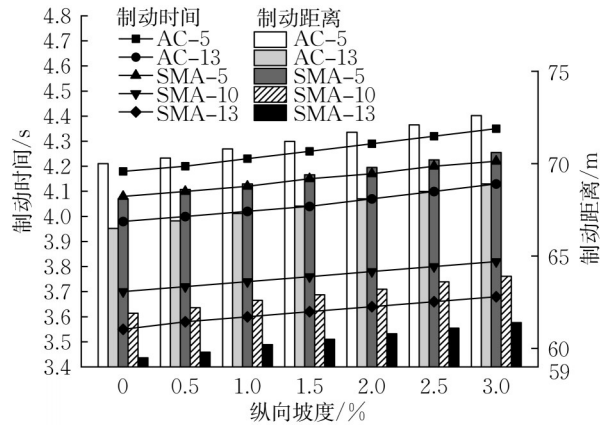
CarSim软件是一款汽车动力学仿真软件,可通过定义汽车各系统的详细参数、路面工况条件等,灵活全面地设置仿真环境、仿真条件及仿真全过程<sup>[23]</sup>。本文使用该软件对自动驾驶车辆制动工况进行仿真分析。选用CarSim软件中内置的C-class两厢车整车模型,车体参数包括弹簧、悬架等均采用其默认设定,迎风面积选定为 $2.2 \text{ m}^2$ ,空气密度取 $1.293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,轮胎型号选择225/60 R18。

《公路工程技术标准》(JTGB01—2003)<sup>[24]</sup>中规定,涉及到高速公路的计算时,一般选取 $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的计算行车速度,因此本节仿真选取行车制动初速度为 $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。根据《公路路线设计规范》(JTGD20—2006)<sup>[25]</sup>,对于设计速度为 $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高速公路,最大纵坡不应超过3%,因此本节设定道路纵向坡度分别为0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%,道路几何线性设置为直线,道路宽度设置为3.75 m,长度为500 m。

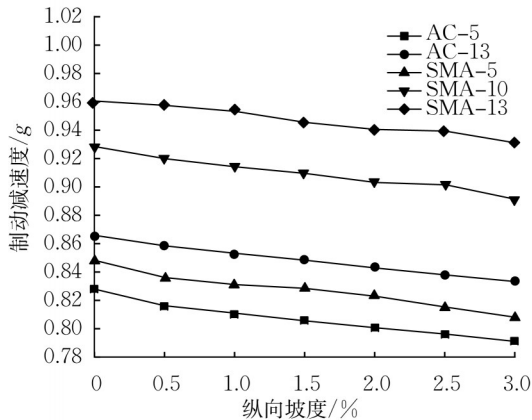
在纵下坡的坡度由0增加到3.0%的过程中,制动时间和制动距离呈线性递增趋势,制动减速度基本呈减小趋势(图11)。以目前新建路面应用较为广泛的AC-13级配路面为例进行分析,当纵下坡坡度达到规范最大限值3.0%时,相较无坡度路面,制动时间增加了0.15 s,增长率为3.8%,制动距离增加了2.4 m,增长率为3.6%,制动减速度减少了0.032g,增长率为-3.7%,制动效能有所降低。因此在设计道路坡度时,出于安全性考虑,道路坡度应严格按照限值进行设置,不宜过大。

对同一制动参数而言,5种级配的曲线斜率近似相等,表明不同级配路面在纵向坡度改变时引起的制动效能差异基本一致。此外,在坡度相同时,5种级配路面的制动时间、制动距离相对大小均为AC-

5> SMA-5> AC-13> SMA-10> SMA-13;制动减速度相对大小为 AC-5< SMA-5< AC-13< SMA-10< SMA-13。对于纵坡路况,AC-5级配的路面因其摩擦性能最差,制动效能最差;SMA-13级配的路面因其摩擦性能最好,制动效能最好,使用此种级配铺筑路面安全性最高。



a 制动时间和制动距离随纵向坡度的变化



b 制动减速度随纵向坡度的变化

图 11 不同纵向坡度的仿真结果

Fig.11 Simulation result of different longitudinal slopes

在纵下坡的坡度由0增加到3.0%的过程中,制动距离改变量较小,其中AC-5级配路面的改变量最大,为2.6 m。本文以上述仿真结果为依据,给出车辆在不同纵坡道路上行驶时的建议安全车距,为便于使用,统一以纵向坡度为3.0%的道路为准,取其值的1.2倍,如表3所示。

#### 4.2.2 弯道半径对车辆制动效能的影响

仿真设定弯道半径为650、700、750、800 m,道路几何线性设置为圆曲线。道路宽度设置为3.75 m。

随着弯道半径的增加,制动时间和制动距离变化较小,弯道半径从650 m增加到800 m的过程中,

表3 纵坡道路的建议安全车距

Tab.3 Recommended safe distance for longitudinal slope roads

纵向坡度/ %	安全车距/m				
	AC-5	AC-13	SMA-5	SMA-10	SMA-13
0~3.0	87.1	82.7	84.7	76.7	73.7

制动时间增量仅为0~0.02 s,制动距离增量平均值为0.14 m,对制动安全性影响较小。在弯道半径相同时,5种级配路面的制动时间和制动距离相对大小均为 AC-5> SMA-5> AC-13> SMA-10> SMA-13;自动驾驶车辆在AC-5路面上的制动效能最差,在SMA-13路面上的制动效能最好(图12)。

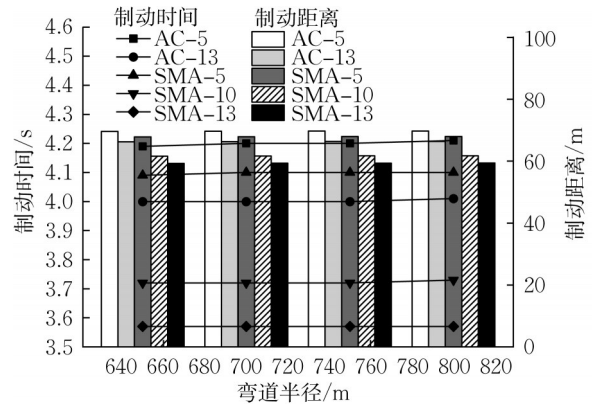


图 12 制动时间和制动距离随弯道半径的变化曲线

Fig.12 Braking time and braking distance versus curve radius

自动驾驶车辆沿圆曲线路径行驶并制动时,会产生距道路中线的侧向偏移。对于本节中4种弯道半径大小和5种沥青路面级配的搭配合,共有3种侧向偏移形式,如图13所示,各组合的侧向偏移形式分布如表4所示。

在侧向偏移形式1中,车辆在制动过程中先向弯道外侧偏移,并产生最大偏移距离,在制动结束前侧向偏移向弯道内侧有所回缩,但最后完成制动时的侧向偏移仍处于道路中线外侧。在侧向偏移形式2中,车辆在制动过程中先向弯道外侧偏移,并产生最大偏移距离,在制动结束前侧向偏移向弯道内侧有所回缩,回缩量较大,最后完成制动时的侧向偏移处于道路中线内侧。在侧向偏移形式3中,车辆在制动过程中先向弯道外侧偏移,然后向弯道内侧偏移,此时偏移量较大,最后完成制动时的侧向偏移处于道路中线内侧,最大偏移距离也产生在道路内侧。

根据表4中不同弯道半径下的侧向偏移形式分



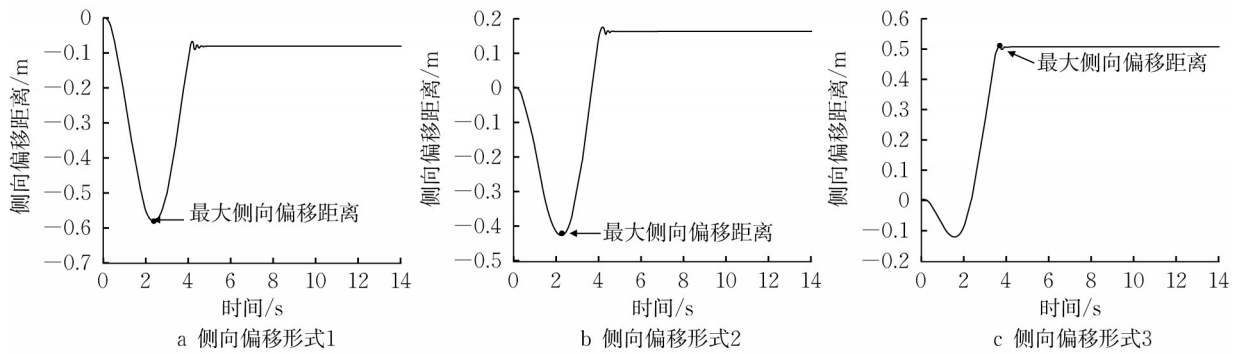


图13 侧向偏移形式

Fig.13 Lateral offset pattern

表4 不同弯道半径的侧向偏移形式分布

Tab.4 Lateral offset distribution of different curve radii

弯道半径/ m	侧向偏移形式				
	AC-5	AC-13	SMA-5	SMA-10	SMA-13
650	1	1	1	2	2
700	2	2	2	2	3
750	3	3	3	3	3
800	3	3	3	3	3

布可知:路面摩擦性能较好时,车辆制动结束前更易向道路内侧偏移;弯道半径越大,车辆制动结束前越易向道路内侧偏移。

由图14可知,随着弯道半径的增加,最大侧向偏移距离先减小再增加。AC-5、SMA-5和AC-13级配类型的偏移距离最小值出现在750 m, SMA-10和SMA-13级配类型的偏移距离最小值出现在700 m。侧向偏移越小,车辆在制动过程中越不易偏离原有车道,安全性显著增加。在弯道半径为750 m时,各级配类型的偏移距离比较接近,其他弯道半径工况下,偏移距离相对大小均为AC-5>SMA-5>AC-13>SMA-10>SMA-13,产生这种变化差异的原因是由于随着弯道半径的不同,车辆制动时的侧向偏移形式发生了改变。横摆角速度在车辆制动过程中产生波动,幅度逐渐减小,直至车辆制动完成。这里选择横摆角速度波动幅度最大处的数值进行对比。随着弯道半径的增加,在弯道半径由650 m增加到800 m的过程中,最大横摆角速度呈线性递减趋势,这表明在弯道半径较小时,汽车稳定性较差,车身整体的倾斜最大,汽车易发生侧滑或甩尾等危险工况。

综合考虑上述仿真结果,本文建议对于AC-5、SMA-5和AC-13级配路面,选择750 m弯道半径,

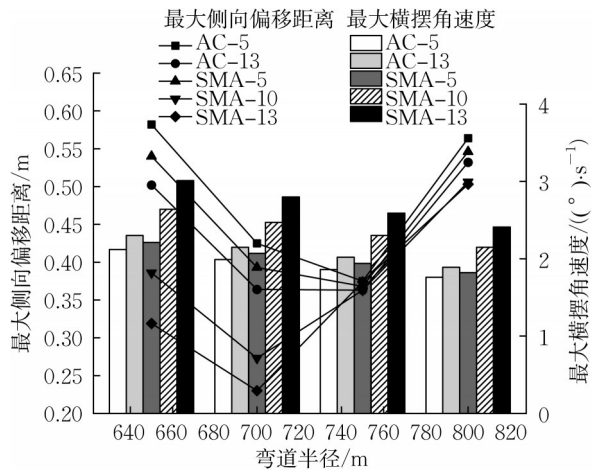


图14 最大侧向偏移距离和最大横摆角速度随弯道半径的变化曲线

Fig.14 Variation of maximum lateral offset distance and maximum yaw rate with curve radius

对于SMA-10和SMA-13级配路面,选择700 m弯道半径,表5给出车辆在建议弯道半径道路上行驶时的安全车距。

表5 不同弯道半径路面的建议安全车距

Tab.5 Recommended safe distance for different curve radii

弯道半径/ m	安全车距/m				
	AC-5	AC-13	SMA-5	SMA-10	SMA-13
700				74.0	71.2
750	83.7	79.6	81.5		

#### 4.2.3 道路超高对车辆制动效能的影响

选定弯道半径为650 m,道路超高分别设定为10%、8%、6%、4%、2%、0,道路几何线性设置为圆曲线,道路宽度设置为3.75 m。

随着道路超高的增加,制动时间呈缓慢增加趋势,制动距离呈先减小再增加的趋势(图15)。在道路超高从0增加到10%的过程中,制动距离增量范

围为 0.12~0.17 m,制动距离最小值一般出现在道路超高为 4% 或 6% 处,制动距离最大值一般出现在道路超高为 0 或 10% 处。当道路超高相同时,5 种级配路面的制动时间和制动距离相对大小均为 AC-5 > SMA-5 > AC-13 > SMA-10 > SMA-13。自动驾驶车辆在 AC-5 路面上的制动效能最差,在 SMA-13 路面上的制动效能最好。

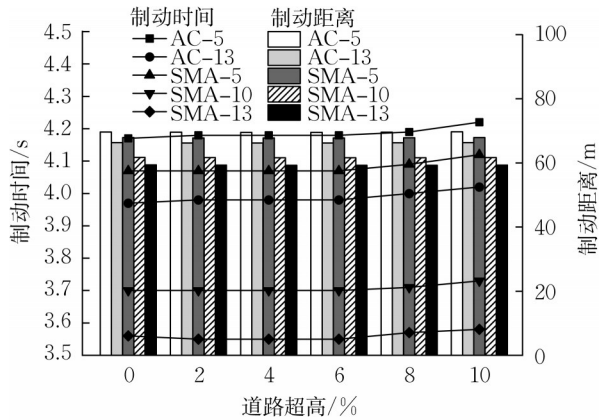


图 15 制动时间和制动距离随道路超高的变化曲线  
Fig.15 Variation of braking time and braking distance with pavement superelevation

自动驾驶车辆沿圆曲线路径行驶并制动时,会产生距道路中线的侧向偏移。各组合的侧向偏移形式分布如表 6 所示。

表 6 不同道路超高的侧向偏移形式分布

Tab.6 Lateral offset distribution of different pavement superelevation

道路超高/ %	侧向偏移形式				
	AC-5	AC-13	SMA-5	SMA-10	SMA-13
0	1	1	1	2	2
2	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1
8	1	1	1	2	2
10	3	3	3	3	3

根据图 16 中不同道路超高下的侧向偏移形式分布可知:路面摩擦性能较好时,车辆制动结束前更易向道路内侧偏移;道路超高越大,车辆制动结束前越易向道路内侧偏移。随着道路超高的增加,最大侧向偏移距离先减小再增加,各级配类型路面的偏移距离最小值均出现在道路超高为 8% 时,侧向偏移越小,车辆在制动过程中越不易偏离原有车道,安全性显著增加。在各道路超高工况下,偏移距离相

对大小均为 AC-5 > SMA-5 > AC-13 > SMA-10 > SMA-13,随着道路超高的不同,车辆制动时的侧向偏移形式发生了改变,但最大侧向偏移距离的相对大小并未发生改变。在道路超高由 0 增加到 10% 的过程中,SMA-13 级配路面上的最大横摆角速度呈先缓慢增加再减少的趋势,另外 4 种级配路面呈线性递增趋势,横摆角速度越大,汽车稳定性越差,车身整体的倾斜最大,汽车易发生侧滑或甩尾等危险工况。

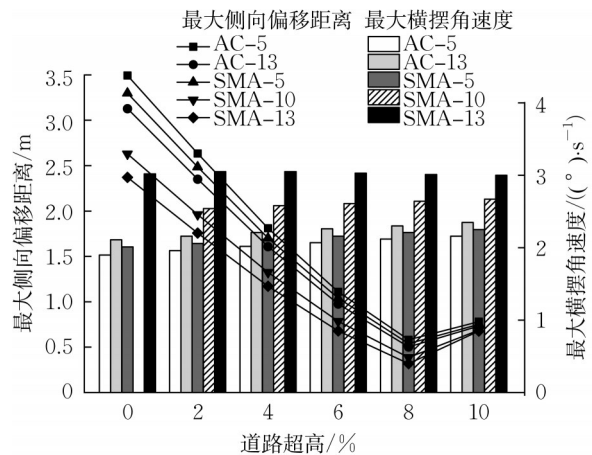


图 16 最大侧向偏移距离和最大横摆角速度随道路超高的变化曲线

Fig.16 Variation of maximum lateral offset distance and maximum yaw rate with pavement superelevation

综合考虑上述仿真结果,本文建议对于各级配类型的曲线道路,均选择 8% 的道路超高,表 7 给出车辆在建议超高的道路上行驶时的安全车距。

表 7 8% 超高路面的建议安全车距

Tab.7 Recommended safe distance for recommended pavement superelevation

安全车距/m				
AC-5	AC-13	SMA-5	SMA-10	SMA-13
83.5	79.5	81.4	73.9	71.1

## 5 结论

本文以考虑路面摩擦性能的自动驾驶车辆安全制动策略为研究目标,结合基于路面三维纹理信息的 Persson 表面分形摩擦理论和考虑路面摩擦性能的自动驾驶车辆制动算法开展研究。主要结论如下:

(1)探究了不同级配沥青路面的摩擦性能差异及其变化规律。沥青试件的动摩擦系数随车速度的增加而减小;对于级配相同的沥青试件,集料公称粒径越大,动摩擦系数越大,集料最大粒径相同时,SMA路面的摩擦性能更好。

(2)建立了轮胎-路面三维有限元模型求解沥青路面附着系数曲线。当滑移率为15%时,路面附着系数达到最大值,被称为峰值附着系数,此时车辆的制动性能最好。

(3)应用自动驾驶汽车制动算法进行CarSim/Simulink联合仿真,提出了自动驾驶汽车制动过程中的安全策略。给出了车辆在道路纵坡不同时的建议安全车距。建议对于AC-5、SMA-5和AC-13级配路面,选择750 m弯道半径,对于SMA-10和SMA-13级配路面,选择700 m弯道半径,并给出车辆在相应道路上行驶时的建议安全车距;建议对于各级配类型的曲线道路,均选择8%的道路超高,并给出车辆在此道路超高条件下行驶时的建议安全车距,可用于改进自动驾驶制动系统,提高自动驾驶车辆的制动安全性。

此外,在轮胎-路面有限元模型的深度利用、自动驾驶车辆制动算法的优化等方面仍可进行深入研究,进一步提高自动驾驶车辆的制动安全性。

#### 作者贡献声明:

李峰:具体程序设计与实现。

邓宇彤:试件制作与建模,摩擦系数算法验证。

刘亦心:轮胎模型搭建,数据分析。

周思齐:实验设计,研究方案制定。

#### 参考文献:

- [1] 余卓平,邢星宇,陈君毅.自动驾驶汽车测试技术与应用进展[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(4):540.  
YU Zhuoping, XING Xingyu, CHEN Junyi. Progress in autonomous vehicle testing technology and application [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(4): 540.
- [2] BANSAL P, KOCKELMAN K M. Forecasting Americans' long-term adoption of connected and autonomous vehicle technologies [J]. Transportation Research Part A Policy & Practice, 2017, 95:49.
- [3] 雷同飞.基于路面状况的汽车制动性能仿真研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.  
LEI Tongfei. Braking performance simulation of vehicles based on road surface condition [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [4] SHI W, ALAWIEH M B, LI X, *et al.* Algorithm and hardware implementation for visual perception system in autonomous vehicle: a survey[J]. Integration, 2017, 59: 148.
- [5] 蔡英凤,秦顺琪,臧勇,等.基于可拓优度评价的智能汽车横向轨迹跟踪控制方法[J].汽车工程,2019,41(10):1189.  
CAI Yingfeng, QIN Shunqi, ZANG Yong, *et al.* Lateral trajectory tracking control method for intelligent vehicles based on topable superiority evaluation [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(10): 1189.
- [6] 谢辉,刘爽爽.基于模型预测控制的无人驾驶汽车横纵向运动控制[J].汽车安全与节能学报,2019,10(3):326.  
XIE Hui, LIU Shuangshuang. Transverse and longitudinal motion control of driverless car based on model predictive control [J]. Journal of Automotive Safety and Energy Conservation, 2019, 10(3): 326.
- [7] 徐金旭.自动驾驶汽车法律监管研究[D].北京:北京交通大学,2019.  
XU Jinxu. Research on legal regulation of self-driving cars [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [8] KUMMER H W. Unified theory of rubber and tire friction [J]. Rubber, 1966, 6(1):98.
- [9] GROSCH K A. The relation between the friction and viscoelastic properties of rubber [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1963, 274(1356): 21.
- [10] KLUPPEL M, HEINRICH G. Rubber friction on self-affine road tracks [J]. Rubber Chemistry and Technology, 2000, 73(4):578.
- [11] PERSSON B N J. Theory of rubber friction and contact mechanics [J]. The Journal of Chemical Physics, 2001, 115(8): 3840.
- [12] PERSSON B N J. Contact mechanics for randomly rough surfaces [J]. Surface Science Reports, 2006, 61(4): 201.
- [13] PERSSON B N J. Contact mechanics for layered materials with randomly rough surfaces [J]. Journal of Physics-Condensed Matter, 2012, 24(9):095008.
- [14] 黄晓明,代琦,平克磊.轮胎胎面与柔性路面摩擦接触的数值分析[J].公路交通科技,2008(1):5.  
HUANG Xiaoming, DAI Qi, PING Kelei. Numerical analysis of frictional contact between tire tread and flexible pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008(1): 5.
- [15] 邓刚.基于路面摩擦特性的车辆避撞系统安全车距的研究与仿真[D].西安:长安大学,2015.  
DENG Gang. The research and simulation on safety distance of vehicle collision avoidance system based on roads friction properties[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [16] 黄晓明,蒋永茂,郑彬双,等.基于路表摩擦特性的无人驾驶车辆安全制动原理与方法[J].科学通报,2020,65(30):3328.  
HUANG Xiaoming, JIANG Yongmao, ZHENG Binshuang, *et al.* Theory and methodology on safety braking of autonomous

- vehicles based on the friction characteristic of road surface [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30): 3328.
- [17] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 交通运输部公路科学研究院, 2011.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: Research Institute of Highway Ministry of Transport, 2011.
- [18] CHINA S, JAMES D E. Comparison of laser-based and sand patch measurements of pavement surface macrotexture [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(2): 176.
- [19] FAN A D, SUN Q. Simultaneous calculation of DFT and IDFT of real two-dimensional sequences and its application in digital image watermark [C]// Proceedings of the 1st International Congress on Image and Signal Processing. Sanya: IEEE Xplore, 2008, 5: 730-733.
- [20] LORENZ B, OH Y R, NAM S K, *et al.* Rubber friction on road surfaces: experiment and theory for low sliding speeds [J]. Journal of Chemical Physics, 2015, 142(19): 194701.
- [21] LIU X, CAO Q, CHEN J, *et al.* Simulation of vehicle braking behavior on wet asphalt pavement based on tire hydroplaning and frictional energy dissipation [J]. Journal of Southeast University, 2018, 34(4): 500.
- [22] 陈嘉颖. 无人驾驶条件下沥青路面纹理识别和制动策略研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- CHEN Jiaying. Asphalt pavement texture recognition and braking method for autonomous vehicle [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [23] 王莉. 矿区道路线形参数对矿山运输车辆行驶稳定性的影响研究 [J]. 西安: 长安大学学报(自然科学版), 2015(S1): 7.
- WANG Li. The influence of road line parameter on driving stability of transport vehicles in mining area [J]. Xi'an: Journal of Chang'an University (Natural Science), 2015(S1): 7.
- [24] 中国工程建设标准化协会公路工程委员会. 公路工程技术标准: JTG B01—2004 [S]. 北京: 交通运输部公路局, 2004.
- Highway Branch of China Association for Engineering Construction Standardization. Highway engineering technique standard: JTG B01—2004 [S]. Beijing: Highway Bureau of the Ministry of Transport, 2004.
- [25] 中交第一公路勘察设计研究院. 公路路线设计规范: JTG D20—2017 [S]. 北京: 交通运输部公路局, 2017.
- CCCC first highway consultants Co., Ltd. Design specification for highway alignment: JTG D20—2017 [S]. Beijing: Highway Bureau of the Ministry of Transport, 2017.