基于路表摩擦特性的无人驾驶车辆安全制动原理与方法

黄晓明*, 蒋永茂, 郑彬双, 赵润民

东南大学交通学院, 南京 211189

* 联系人, E-mail: huangxm@seu.edu.cn

2020-01-10 收稿, 2020-02-28 修回, 2020-03-03 接受, 2020-03-04 网络版发表

国家自然科学基金(51778139)和江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX18_0146)资助

摘要 作为与轮胎直接接触的沥青路面, 其抗滑性能是影响无人驾驶车辆制动安全性的直接因素. 路面抗滑性能主要取决于路表纹理特征, 建立考虑路表摩擦特性的无人驾驶制动模型是提高无人驾驶车辆制动安全性的有效方法. 为了研究基于路表摩擦特性的无人驾驶车辆安全制动方法, 考虑路表纹理抗滑贡献率计算了不同路面状态下峰值附着系数. 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, 分析了直线正常制动、紧急制动及转弯行驶时无无人驾驶车辆的制动特点, 提出无人驾驶车辆在不同制动工况下安全制动限值. 研究表明, 不同行车速度下路面峰值附着系数呈凸型抛物线分布, 随速度提高峰值附着系数逐渐减小. 正常制动时, 考虑乘客舒适性保持较小制动减速度; 紧急制动时, 雨天情况下制动距离比晴天平均增加45%左右, 车距较大时建议以4~6 MPa制动力进行制动. 无人驾驶车辆在潮湿或者干燥路面行驶过程应满足一定的安全车距, 取晴天、雨天仿真安全制动距离平均值的1.1~1.2倍. 随着弯道半径不断增大, 不同路面状态下加速度干扰值基本上均减小, 半径 ≥ 100 m时加速度干扰值下降率更为显著, 为提高车辆制动舒适性弯道半径应控制在100 m以上. 本研究提出了考虑路表纹理特性的无人驾驶车辆安全制动策略, 可为无人驾驶车辆制动系统的理论设计及制动安全性评估提供参考.

关键词 无人驾驶车辆, 沥青路面, 路表摩擦特性, 峰值附着系数, 制动安全性

随着智能技术的不断发展, 无人驾驶汽车的应用逐渐得到推广, 成为当今智慧城市建设中的热点话题^[1]. 无人驾驶技术作为未来车辆发展的先进技术, 相比传统有人驾驶车辆具有减少交通事故、缓解交通压力等优点, 但其车辆制动模式与传统有人驾驶相比存在差异^[2]. 然而, 处于发展阶段的无人驾驶汽车制动过程中交通事故仍然存在, 道路行驶环境感知盲区的存在、路面抗滑性较低等外界因素导致无人驾驶车辆制动距离长、紧急制动时发生侧滑等现象, 可能引发重大交通事故^[3].

近年来, 为了进一步完善智能驾驶制动系统并体现无人驾驶车辆优势, 国内外学者不断致力于无人驾驶车辆安全制动行为的测试与研究^[4-6]. 目前, 关于无人驾驶车辆制动设计方法的研究较为成熟, 如Onieva等人^[7]基于迭代遗传算法设计了一种无人调整模糊控制器进行车轮转向调节. Ni和Hu^[8]提出了一种新型动力学控制器, 使得无人驾驶汽车能够达到最大制动力且保持设定路径行驶, 在横向控制器设计中考虑了轮胎刚度以提高控制器的鲁棒性. Lv等人^[9]通过创新混合机器学习方法对不同情景下驾驶员采用的制动强度

引用格式: 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. 科学通报, 2020, 65: 3328–3340

Huang X M, Jiang Y M, Zheng B S, et al. Theory and methodology on safety braking of autonomous vehicles based on the friction characteristic of road surface (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3328–3340, doi: [10.1360/TB-2020-0029](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0029)

进行了分类,为无人驾驶车辆实现全自动制动策略提供参考。Ji等人^[10]提出了一种新的横向运动控制策略,在保证车辆横向运动稳定性的同时,最大限度地减小行驶条件下的横向轨迹跟踪偏差。国内关于无人驾驶车辆制动安全性的研究主要集中于制动系统的改进,如郑小冬^[11]考虑道路结构与交通状况的影响,基于模糊控制理论实现了对无人驾驶汽车的横向控制。尹小庆等人^[12]建立了考虑路面附着系数的向前碰撞预警时间,为无人驾驶车辆制动预警提供参考。

但是,已有研究大多从车辆自身制动控制器或信号传感器等角度提出相应的制动策略,忽略了车辆制动能力的根本来源为车辆与路面之间的摩擦^[13-16]。研究表明,路表纹理特性对车辆制动安全性具有较大影响^[17],故考虑车轮与路表特性的协调作用是解决无人驾驶车辆安全制动的关键。目前,领域内许多专家也开始关注路面特性对车辆制动稳定性的影响,如许洪国等人^[18]从路表分形理论与摩擦能量耗散着手建立了改进的滑动摩擦因数模型。朱遥等人^[19]采用拖车法测试得到沥青路面峰值附着系数与整车制动效能的相关性。但是,以上研究未涉及路表特性对无人驾驶车辆的制动性能的影响及安全制动感应需求。

鉴于此,本研究基于无人驾驶车辆制动原理及车辆动力学的强非线性,利用已搭建的沥青路面表面纹理识别系统获取沥青路面纹理信息。潮湿条件下,沥青路表由于水膜隔阻存在部分纹理抗滑无贡献区域,传统的机械摩擦机理不适用于具有分形特征的沥青路面与花纹轮胎之间的摩擦作用。因此,首先,采用考虑路面分形特征及能量耗散的黏滞摩擦理论,得到路面动摩擦系数曲线;然后,在已建立的轮胎-流体-路面耦合模型中通过轮胎力学特征仿真计算轮胎在不同路面状态下峰值附着系数。在基于CarSim/Simulink联合仿真建立的无人驾驶制动模型中,引入沥青路面峰值附着系数,仿真分析不同制动工况下无人驾驶车辆的制动特点,提出基于路表摩擦特性的无人驾驶车辆制动策略,为无人驾驶车辆安全制动提供理论指导。

1 无人驾驶车辆制动原理

无人驾驶车辆没有了驾驶员的概念,也就不具备方向盘和制动踏板,原本传统车辆由驾驶员施加控制的踏板压力不复存在,最终施加在从轮缸上的期望制动压力是由车辆电子控制单元(electronic control unit, ECU)根据感知系统对周围环境参数的实时识别结果

并通过制动踏板模拟计算器实时计算出的,然后由制动执行机构向无人驾驶车辆发送命令进行控制车辆的制动过程,从而保证无人驾驶车辆安全行驶。其中,期望制动压力值 P_{des} 根据期望加速度与实时车速计算得到。

使用不同路面附着特性下实时识别的路面峰值附着系数来获得期望的制动加速度,然后通过反制动系统模型将期望制动减速度转化为期望制动压力阈值(图S1)。无人驾驶车辆ECU在控制系统通过制动踏板模拟器计算得到制动压力,由制动执行机构判断当前车辆所处的制动场景,并发出制动信号给压力控制器,通过快速响应使得车轮上制动器实时输出实际制动力作用到轮胎上,实现车辆的自动制动过程。

当出现紧急制动时,无人驾驶车辆ECU根据当前路面状态判断所需制动力是否大于期望制动压力阈值。如果车辆的所需制动压力大于阈值,则压力控制器直接控制阀门开度以保持制动轮缸压力与阈值一致,实现基于路面实时附着特性的最大制动力防抱死制动,以此体现无人驾驶车辆自动避撞的显著优势。无人驾驶条件下,实时感知当前路面附着特性及周围车辆相对状态需要满足车辆紧急制动状态的极限值,即最短制动距离、最大制动减速度及车辆制动稳定性。

2 沥青路面路表摩擦特性获取

2.1 基于ACRP系统纹理路面模型建立

路面的纹理特性,尤其是宏观纹理和微观纹理与路面抗滑性能存在直接联系,良好的路面抗滑性能可以为高速行驶的车辆提供充足的摩擦力,保证车辆行驶过程中的安全性、舒适性和稳定性。相较于传统路面抗滑评价,基于路面纹理评判路面抗滑性能更加真实可靠,受湿度影响的测量误差也较小。

传统的路表纹理测量方法与表征参数是对路表纹理水平的均衡化,无法体现粗糙沥青路表纹理的分形特性,测量效率较低且存在不可控的纹理信息损失的情况。基于近景摄影测量技术,课题组开发了自动化近景摄影测量系统(automatic close-range photogrammetry system, ACRP系统),实现自动化沥青路面表面纹理图像实时采集。为了验证ACRP系统的可靠性^[20],分别运用近景摄影测量技术(图1(a))、激光测量法(图1(b))及铺砂法(图1(c))现场采集路面纹理参数。选取平均构造深度值(mean texture depth, MTD)作为沥青路面表面抗

图 1 (网络版彩色)现场实验。(a) 测量范围; (b) 激光测量; (c) 铺砂法
Figure 1 (Color online) Field experiments. (a) Measuring range; (b) laser measurement; (c) sand patch testing method

滑性能的评价指标来验证ACRP系统的可靠性。将激光测量法(ZGScan)所获取的路面纹理参数与ACRP系统采集结果进行对比,如表1所示。

表1中数据表明,分别以铺砂法和ZGScan所获取的MTD值为基准,ACRP系统测量结果的绝对误差均小于0.031,相对误差均在 $\pm 5\%$ 以内,表明提出的ACRP系统能够采集高精度的沥青路面纹理。

然后,基于VisualSFM开源框架进一步编程实现沥青路面表面纹理形貌的逆向重建。运用MATLAB/Python混合编程完成ACRP系统软件模块,并利用GeoMagic、MeshLab等构建表征纹理的沥青路面三维有限元模型,具体流程见图2。

2.2 沥青路面纹理特征参数计算

根据ACRP系统获取沥青路表的三维坐标点高程数据,并导出*.asc格式的高程数据文件,然后利用纹理

软件模块对沥青路面表面形貌可视化,见图3。潮湿情况下的行车过程中,胎/路之间由于积水阻隔和水膜托举作用,存在未接触区域^[21],这些区域即为“抗滑无贡献区域”。

根据Persson摩擦理论中路表分形维数功率谱密度(spectral power distribution, PSD)计算模型,采用MATLAB编写PSD求解程序。通过编程扣除“抗滑无贡献区域”对车辆抗滑的作用,计算出不同纹理高程百分比情况下的纹理功率谱。由于分形路表随机变量是离散点,在求解功率谱时需要进一步对坐标信息的滤波、加窗以及采样窗补偿^[22],计算得到正常干燥、潮湿条件下的路面PSD曲线(图S2)。

2.3 沥青路面摩擦系数曲线

结合Persson黏滞摩擦系数公式,采用室内动态剪切流变仪测试得到的橡胶复模量曲线^[23]计算沥青路面

表 1 沥青路面纹理参数统计指标MTD计算结果^{a)}

Table 1 Calculation results of statistical index MTD of asphalt pavement texture parameters

测量 路段	MTD			统计参数			
	基准I	基准II	验证				
	铺砂法	ZGScan	ACRP系统	AE(mm)(I)	RE(%) (I)	AE(mm)(II)	RE(%) (II)
1	0.94	0.9310	0.9265	1.6×10^{-2}	1.72	4.5×10^{-3}	0.48
2	0.75	0.7675	0.7691	-1.7×10^{-2}	-2.29	-1.6×10^{-3}	-0.21
3	0.88	0.8611	0.8670	1.5×10^{-2}	1.67	-5.9×10^{-3}	-0.69
4	0.55	0.5350	0.5420	4.9×10^{-3}	0.90	-7.0×10^{-3}	-1.31
5	0.67	0.6710	0.6648	9.6×10^{-3}	1.42	6.2×10^{-3}	0.92
6	0.64	0.6129	0.6051	3.1×10^{-2}	4.83	7.8×10^{-3}	1.27
7	0.49	0.4790	0.4811	8.4×10^{-3}	1.72	-2.1×10^{-3}	-0.44
8	0.45	0.4403	0.4446	8.7×10^{-3}	1.91	-4.3×10^{-3}	-0.98

a) AE为绝对误差; RE表示相对误差

图2 (网络版彩色)沥青路面3D纹理模型生成过程。(a)点云;(b)网格;(c)路面3D模型;(d)表征纹理的路面模型

Figure 2 (Color online) Generating process of 3D asphalt pavement texture model. (a) Point cloud; (b) grid; (c) 3D pavement model; (d) textured pavement model

图3 (网络版彩色)沥青路面表面纹理可视化。(a)潮湿状态胎/路接触示意图;(b)路表纹理3D数据格式;(c)干燥路面;(d)潮湿路面;(e)抗滑无贡献区

Figure 3 (Color online) Visualization of asphalt pavement texture. (a) Schematic diagram of tire-road contact on wet road; (b) 3D data format for pavement texture; (c) dry pavement; (d) wet pavement; (e) non-contribution zone of skid resistance

动摩擦系数, 如图4(a)所示。

由动摩擦系数曲线可知, 不同路面条件下(干燥和潮湿)摩擦系数曲线变化趋势基本一致, 均随相对滑动速度的增加而显著减小, 速度超过40 km/h时曲线趋于平缓, 表明较高速度下胎/路实际接触面积达到最充分状态。潮湿路面的摩擦系数值均低于干燥状态, 且速度越大, 两种状态下摩擦系数差值越大。

2.4 沥青路面附着系数计算

基于文献[24], 轮胎模型采用175-70-R15型子午线轮胎, 采用已建立的轮胎滑水模型并控制轮胎滑移率

在最佳范围内(15%左右), 导入不同路面状态下轮胎与路面间的动摩擦系数曲线, 调整轮胎荷载, 其他参数保持不变。针对相同的轮胎模型得到不同路面状态下路面峰值附着系数曲线, 见图4(b)~(c)。

由不同沥青路面的峰值附着系数曲线可知, 相同速度下3种沥青路面峰值附着系数大小为干燥AC>干燥SMA>干燥OGFC>潮湿AC>潮湿SMA>潮湿OGFC; 不同行车速度下, 路面峰值附着系数呈“凸型”抛物线分布, 随速度提高峰值附着系数逐渐减小。这是因为较高速度下轮胎滚动半径变大, 胎/路接触面积减小, 路面提供的附着力减小, 故峰值附着系数变小。

图4 (网络版彩色)沥青路面摩擦特性曲线。(a)路面动摩擦系数曲线;(b)干燥路面峰值附着系数曲线;(c)潮湿路面峰值附着系数曲线

Figure 4 (Color online) Friction characteristics curves of asphalt pavement. (a) Dynamic friction coefficient curves of pavement; (b) peak adhesion coefficient curves on dry road; (c) peak adhesion coefficient curves on wet road

显然,潮湿路面峰值附着系数略低于干燥路面,主要由路面纹理的贡献率决定。

3 无人驾驶车辆动力学模型

无人驾驶车辆没有方向盘和制动踏板,依靠高精度地图、雷达和摄像头来感知车辆周围环境,配合路面纹理识别感知路面抗滑性能。此外,主控制计算机控制诸如车辆的加速、减速和车道变换等操作。无人驾驶车辆的制动模型主要是需要实现安全制动情况下轮缸制动力计算,即轮缸的制动压力值 P_{des} 的计算。考虑在良好的路面上进行直线行驶,以建立前向制动动力学的数学模型。

3.1 无人驾驶车辆制动算法搭建

利用近景摄影测量和激光测量从路面获取的纹理高程数据计算功率谱密度,再利用Persson摩擦理论计算出路面峰值附着系数 μ_{max} ,可得到期望制动减速度:

$$a_{des} = \mu_{max} g. \quad (1)$$

根据牛顿第二定律及车辆行驶过程中阻力,可得无人驾驶车辆制动的逆向反推模型公式:

$$P_{des} = \left| ma_{des} + \frac{1}{2} C_D A \rho v^2 + mgf \right| / K_b, \quad (2)$$

$$T_{bf} + T_{br} = K_b P_{br} r_r, \quad (3)$$

式中, C_D 为车辆的空气阻力系数(风阻系数),轿车取0.28左右, SUV一般在0.32左右^[25]; ρ 为流体密度,即在标准条件下(0°C, 1个标准大气压(1 atm))的空气密度,约为1.293 kg/m³; A 为汽车迎风面积,即汽车正面投影面积, m²; v 为合成气流相对速度, m/s; K_b 为制动力与制动压力之间的比值; T_{bf} 和 T_{br} 分别为前后轮制动力矩; r_r

为轮胎滚动半径; P_b 为制动压力; m 为整车质量, kg; g 为重力加速度,取9.8 m/s²; α 为车辆行驶道路的坡道角度,平路行驶时 α 为0°; f 为滚动阻力系数,根据经验公式计算。

在MATLAB/Simulink中建立无人驾驶车辆制动的逆向反推模型的单元模块,如图5(a)所示。导入当前车速 v 以及上文获得的路面峰值附着系数 μ_{max} ,在安全制动的情况下,可以实时计算所需轮缸的制动压力值 P_{des} ,将所创建的无人驾驶车辆制动模型导入到CarSim中,替换原有的传统车辆制动模型。

3.2 制动模型准确性验证

基于建立的无人驾驶汽车制动系统,在Simulink中搭建算法模型与CarSim联合仿真,采用该无人驾驶制动系统与传统制动防抱死系统(antilock braking system, ABS)制动进行对比。两种工况均采用良好路面状态,取AC-13型沥青路面干燥状态下的峰值附着系数0.8065,制动开始时行车初速度均设为120 km/h,节气门开度均设置为0,仿真时长为20 s。

为了体现车辆最大制动效能,给予传统ABS制动车辆恒定制动压力为10 MPa,无人驾驶车辆基于路面附着性能采用自适应制动控制系统以期望制动压力使车辆进行制动减速行驶。根据仿真结果得到两种工况下车辆的制动性能曲线,如图5(b), (c)所示。可知,无人驾驶制动系统性能优于传统ABS系统,制动时间缩短了10.95%,相应的制动距离减小了10.92%。对比分析两种工况下车辆侧向加速度-时间历程变化曲线(图5(d)),可知传统ABS车辆存在波动的侧向加速度,而无人驾驶车辆制动时几乎不存在侧向加速度。

由于传统ABS车辆在制动过程中频繁切换电磁阀以便控制轮胎滑移率在最佳的10%~20%范围内,轮胎

图 5 (网络版彩色)无人驾驶车辆制动性能分析。(a) 基于MATLAB/Simulink制动算法;(b) 制动过程速度-时间曲线;(c) 制动距离-时间曲线;(d) 侧向加速度曲线

Figure 5 (Color online) Braking performance analysis for autonomous vehicle. (a) Brake algorithm based on MATLAB/Simulink; (b) speed-time curve during braking process; (c) braking distance-time curve; (d) lateral acceleration curve

滑移率波动频率较大, 缺乏对路面特性的考虑, 具有极差的制动性能及乘客体验感。无人驾驶制动系统根据路面附着特性计算实时位置处期望制动压力施加于轮胎, 使得车辆以最佳的制动减速度进行减速行驶, 滑移率基本保持在12.0%左右, 且波动幅度很小。

鉴于此, 无人驾驶车辆制动系统考虑了实际轮胎与路面接触特性, 更能体现车辆制动稳定性需求。显然, 无人驾驶制动系统性能优于传统ABS制动。研究表明, 该制动系统适用于无人驾驶车辆制动行为控制, 且具有较高的有效性。

4 基于路表特性车辆制动性能分析

基于建立的无人驾驶车辆制动模型, 在CarSim中针对不同制动工况进行仿真分析。整车模型选择较为普遍的SUV型为研究对象, 同时将前文创建的无人驾驶车辆制动模型导入CarSim中, 考虑的工况包括城市拥堵路况的舒适性制动、突发状况的紧急制动及弯道

转向制动。在CarSim的路面属性模块里, 通过调整路面附着系数仿真路面干燥、潮湿状态, 用以分析路表摩擦特性对无人驾驶汽车制动控制作用的影响。

4.1 直线正常制动

仿真工况建立一条1000 m长的直线道路, 设置仿真时长为60 s, 仿真道路两侧设有限速标志、安全提示标志、变道标志, 道路尽头交通拥堵车流停滞。仿真车辆以90 km/h的初速度匀速行驶, 同时给车辆添加道路标志识别模块、长距雷达、摄影机等传感器, 配合传感器车辆能够动态识别行车过程中道路环境状况, 如图6所示。

拥堵情况下车辆“温和制动”过程各项状态指标随时间变化如图6(b)所示, 全过程分为两个阶段: 正常行驶状态、关闭节气门刹车。首先, 车辆以90 km/h的初速度匀速行驶, 第16.30 s道路标志识别模块识别到限速60 km/h标识。制动系统得到反馈, 车辆发动机关闭节

图6 (网络版彩色)无人驾驶车辆正常制动。(a) 仿真环境; (b) 状态指标-时间曲线

Figure 6 (Color online) Normal braking for autonomous vehicle. (a) Simulation environment; (b) state indicators-time curve

气门, 制动系统开始工作, 并且车辆以 0.336 m/s^2 制动减速度开始缓慢减速, 至第41.11 s车辆速度降至60 km/h。同时, 车辆识别到前方拥堵, 制动系统提高制动百分比, 保持 3.117 m/s^2 的制动减速度减速, 至第45.21 s制动系统降低制动百分比, 将制动减速度降低至 1.308 m/s^2 , 直至第49.12 s在拥堵处安全停车。

针对前方拥堵路段选用“温和制动”策略, 即长距离制动时, 充分考虑乘客舒适性, 保持较小制动减速度, 避免过大制动力导致乘客前倾。整个制动过程中, 应避免制动减速度大幅度突变, 减少乘客前倾后摇幅度和次数。

4.2 直线紧急制动

在紧急制动情况下, 只考虑安全性, 而不考虑乘客舒适性, 在仿真过程中建立了一条500 m长的直线道路。导入雨天“抗滑无贡献区域”PSD功率谱密度计算的路表摩擦系数曲线, 设置仿真工况在第4 s检测到前方障碍物, 并开始紧急制动; 测试制动压力分别选取10, 8, 6, 4, 2, 1和0.5 MPa。考虑到无人驾驶车辆快速、安全及智能的行车优势, 未来无人驾驶车辆行驶速度安全限值有所提升, 故仿真研究中主要以高速公路的速度限值120 km/h为研究对象。

以潮湿路面为例, 当制动压力为10 MPa时, 车轮垂直力随时间变化曲线如图7(a)所示。整个制动过程分为4个部分: 正常行驶、紧急制动、前后轮垂直压力重新分配及制动结束。

仿真分析不同制动压力下车轮垂直力随时间变化曲线可知, 10, 8及6 MPa的曲线基本相同, 紧急制动阶段曲线震动剧烈, 而4 MPa情况下的曲线震荡较高制动压力情况稀疏。这是由于过大的制动压力瞬间施加会使轮胎迅速抱死, 车辆ABS防抱死装置不得不在更短的时间间隔内反复启动。由此可见, 4 MPa情况下能

减少ABS启动次数, 可以延长车辆制动系统的使用寿命; 而2 MPa情况下的曲线制动时间明显增长(起伏区间增长), 1, 0.5 MPa的曲线在超出仿真时长后车辆仍没有停止, 均视为发生碰撞危险。

通过分析速度-时间变化曲线(图7(b))可知, 三角形底边长即各初始速度情况下制动力为10 MPa时的制动时间 ΔT_i , 三角形的面积即对应初始速度下的制动距离 S_i 。同样地, 得到干燥与潮湿路面上不同制动压力下制动特性评价参数, 详见图7(c)~(f)。对比分析可知, 无人驾驶车辆制动系统需根据前方情况控制制动力大小。晴天时, 当施加6~10 MPa制动力时, 车辆的制动距离基本不变; 雨天时, 当施加4~10 MPa制动力时, 车辆的制动距离基本不变。

雨天条件下, 水膜存在使得路表纹理贡献率极大降低, 路面提供的摩擦力急剧下降, 相对干燥路面车辆制动距离均较大, 对比分析结果见表2。

根据表2可知, 雨天情况下制动距离比晴天时的制动距离平均增加45%左右, 故雨天情况下应降低车速, 以降低事故风险。即先控制车速, 在车距较大的情况下识别到危险需要紧急制动时, 建议先以中间档制动力(4~6 MPa)进行制动, 该制动力下轮胎不至于瞬间抱死, 减少了车辆ABS防抱死装置在短时间间隔内的反复启动, 能有效降低车辆侧翻的危险性。

控制车距能够有效避免碰撞事故的发生, 无人驾驶车辆在潮湿路面或者干燥路面行驶过程中不同行驶速度下应满足以下安全车距(取晴天、雨天仿真安全制动距离平均值的1.1~1.2倍)。参考路线设计规范可知不同设计速度下的停车视距, 剔除驾驶员反应距离, 计算得到不同速度下高速公路上无人驾驶汽车制动距离限值, 具体见表3。与规范阈值相比, 不同行驶速度下仿真安全制动距离均略小于规范阈值, 主要是由于自动驾驶环境中车辆的行驶路径优化及驾驶环境实时监测效率可以

图 7 (网络版彩色)无人驾驶车辆制动过程。(a) 潮湿状态制动力10 MPa时轮胎垂直压力曲线; (b) 潮湿状态制动力10 MPa时速度-时间曲线; (c) 干燥路面制动时间; (d) 潮湿路面制动时间; (e) 干燥路面制动距离; (f) 潮湿路面制动距离
Figure 7 (Color online) Braking process for autonomous vehicle. (a) Time-varied curve of tire vertical force with $P_{des}=10$ MPa on wet pavement; (b) speed-time curve with $P_{des}=10$ MPa on wet pavement; (c) braking time on dry pavement; (d) braking time on wet pavement; (e) braking distance on dry pavement; (f) braking distance on wet pavement

表 2 不同制动压力和初始车速下雨天对比晴天制动距离增长率

Table 2 Increasing rate of braking distance on wet pavement compared with dry pavement under different braking pressures and initial speeds

制动压力 (MPa)	制动距离增长(%)						
	120 km/h	100 km/h	80 km/h	60 km/h	40 km/h	30 km/h	20 km/h
10	44.4	45.2	45.5	45.8	46.3	46.6	47.3
8	43.5	44.3	44.6	45.0	45.6	45.9	46.7
6	42.5	43.7	44.1	44.4	44.9	45.2	45.9
4	19.2	19.7	19.3	18.5	16.8	14.3	10.8

表 3 干燥与潮湿路面上安全制动车距

Table 3 Safety braking distance between vehicles on dry and wet pavement

行驶速度(km/h)	基于规范的制动距离阈值(m)	仿真安全车距(m)		是否满足规范阈值
		潮湿路面	干燥路面	
120	130	122.8	90.0	满足
100	95	85.2	62.1	满足
80	55	54.7	39.9	满足
60	35	30.9	22.5	满足
40	15	13.8	10.1	满足
30	10	7.8	5.7	满足
20	6.5	3.5	2.6	满足

一定程度上缩短制动器协调时间,即在较短距离内可达到安全制动效果,提高整体交通系统运行效率。

4.3 曲线转向制动

无人驾驶车辆在转弯过程中,其安全性受道路线形、路面附着特性、交通环境等多因素影响,车辆行驶形态(横向加速度、车厢侧倾角及整车侧向偏移距离等)处于时刻变化中,行驶速度在一定范围内波动,故车辆转弯行驶时需要实时监测轮胎垂直力变化特点从而判断车辆整体的行驶稳定性。

在CarSim中路面板块里,仿真建立一条500 m长的曲线道路,弯道曲线半径 R 分别为10, 15, 20, 30, 50, 150及200 m,设置仿真时长为30 s,仿真道路两侧设有限速标志、安全提示标志、转弯标志及安全制动视距。通过传感器识别道路线性,以自适应最佳过弯行驶速度为前提,采取自动控制实时调整轮缸压力,同时确保横向加速度不大于0.35 g以保持车辆转弯时平稳性。以半径 R 为10 m,且路面处于干燥状态为例,仿真无人驾驶车辆在转弯过程中的轮胎力学特性,其他参数保持不变。

根据仿真结果绘制速度(路程)-时间关系图,如图8所示。可知无人驾驶车辆在通过弯道时其行驶轨迹分为6个阶段:正常行驶阶段;匀减速至弯道附近;自动

控制实时调整轮缸压力,变减速至曲线中心位置;变加速驶离曲线路段;匀加速恢复至初速度;以初速度继续匀速行驶。

基于车辆转向过程中的速度变化曲线,计算每个时间间隔($\Delta t=0.025$ s)的离散加速度,不同半径下加速度极值见表4。可知随着弯道半径增大,汽车行驶加速度振荡频率变小且波动持续时间逐渐变短;驶出弯道后,车辆加速度波动趋于稳定且半径越大波动幅度越小。在保证转向安全的前提下,干燥路面上车辆获得的最大加速度或减速度均大于潮湿路面,表明良好的附着性能有助于提高车辆行驶稳定性及行驶极限速度,进一步在短时间内完成制动过程。

关于弯道路段行驶安全性问题,参考Herman提出的加速度干扰 σ 概念定量评价车辆转向行驶的稳定性^[26]。加速度干扰描述了车辆行驶速度的波动特点,即计算加速度对平均加速度的标准差,计算公式为

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [a(t) - \bar{a}]^2 dt \right\}^{1/2}$$

$$= \sqrt{\frac{\sum [a(t)_i - \bar{a}]^2}{n}}, \quad (i = 1, \dots, n-1, n), \quad (4)$$

$$\bar{a} = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt,$$

图8 (网络版彩色)半径为10 m时潮湿状态下速度-时间曲线

Figure 8 (Color online) Speed-time curve with radius of 10 m on wet road

表4 弯道上车辆制动加速度极值

Table 4 Limiting value of braking acceleration on curved section

弯道半径(m)	干燥路面加速度 $a(\text{m/s}^2)$		潮湿路面加速度 $a(\text{m/s}^2)$		相对变化率(%)	
	$a_{\min}$	$a_{\max}$	$a_{\min}$	$a_{\max}$	$a_{\min}$	$a_{\max}$
10	-3.1506	4.0361	-3.0894	3.9307	1.94	2.61
15	-3.2925	3.8944	-3.2917	3.8352	0.02	1.52
20	-3.2884	3.8933	-3.2879	3.8354	0.02	1.49
30	-3.2382	3.8541	-3.2360	3.8415	0.07	0.33
50	-3.1876	3.7943	-3.1872	3.7412	0.01	1.40
100	-3.6311	3.7568	-3.3308	3.5282	8.27	6.08
200	-1.3235	2.4822	-1.3107	2.4809	0.97	0.05

式中, $\bar{a}$ 为加速度算术平均值, m/s^2 ; T 为车辆驶过曲线路段的总时间, s; $a(t)$ 为汽车在 t 时刻的加速度值, m/s^2 ; n 为车辆转向过程中离散加速度数, $n=T/\Delta t$ 。

根据加速度干扰大小评价不同半径下车辆行驶稳定性, 评价结果见表5。由表5可知, 不同半径下干燥状态加速度干扰值均小于潮湿状态, 表明良好附着特性有助于提高车辆转向稳定性; 相比干燥路面, 半径100 m时潮湿路面上加速度干扰变化率最大, 约17.42%。随着弯道半径不断增大, 不同路面状态下加速度干扰值基本上均减小, 半径大于等于100 m时加速度干扰值下降率更为显著。综上所述, 半径为100 m时车辆转向舒适性、环保性更突出。

5 结论

基于沥青路面纹理特性及无人驾驶车辆的制动原

理, 提出了一种基于路表摩擦特性的无人驾驶车辆安全制动的方法, 采用CarSim/Simulink联合仿真分析了不同制动工况下无人驾驶车辆的制动性能, 提出无人驾驶车辆在不同制动条件下制动安全性指标。主要结论如下:

(1) 基于近景摄影测量技术获取沥青路表纹理信息, 扣除潮湿路面存在“抗滑无贡献区域”, 得到干燥、潮湿条件下的沥青路面功率谱密度曲线, 并采用黏滞摩擦理论计算得到路面动摩擦系数曲线。随着滑动速度增大摩擦系数不断减小, 当速度超过40 km/h时曲线趋于稳定, 表明较高速度下胎/路实际接触面积达到最小。

(2) 相同行驶速度下, 沥青路面峰值附着系数大小为干燥AC>干燥SMA>干燥OGF>潮湿AC>潮湿SMA>潮湿OGF; 不同行车速度下路面峰值附着系数呈凸型

表 5 不同半径下车辆转向稳定性评价

Table 5 Evaluation of vehicle steering stability with different radius

弯道半径(m)	加速度干扰 $\sigma(\text{m/s}^2)$		相对变化率(%)	转向制动稳定性	
	干燥路面	潮湿路面		干燥路面	潮湿路面
10	0.8191	0.9479	15.72	一般	一般
15	0.9046	0.9090	0.49	一般	一般
20	0.9411	1.0297	9.41	一般	一般
30	0.9092	0.9890	8.78	一般	一般
50	0.7455	0.7464	0.12	一般	一般
100	0.5711	0.6706	17.42	良好	良好
200	0.2015	0.2019	0.20	良好	良好

抛物线分布, 随速度提高峰值附着系数逐渐减小; 在一定行驶速度下, 潮湿路面峰值附着系数均略低于干燥路面。

(3) 直线道路上长距离制动时, 充分考虑乘客舒适性, 保持较小制动减速度, 避免过大制动力导致乘客前倾; 紧急制动时, 雨天情况下制动距离比晴天平均增加 45% 左右, 在车距较大的情况下建议先以中间档制动力 (4~6 MPa) 进行制动, 随着行驶速度提高, 车辆制动距离限值显著增大。

(4) 随着弯道半径不断增大, 不同路面状态下加速度干扰值基本上均减小, 半径大于等于 100 m 时加速度

干扰值下降率更为显著。相比干燥路面, 半径 100 m 时潮湿路面上加速度干扰变化率最大, 约 17.42%; 干燥路面上车辆获得的最大加速度或减速度均大于潮湿路面。

本研究车辆模型选择典型的 SUV 车, 总体仿真方法适用于不同轮胎类型与不同车型。但是, 由于不同的轮胎类型 (光胎、纵向花纹、纵横向花纹和越野花纹等) 与沥青路表之间的接触力学特点存在差异, 且不同无人驾驶车辆类型 (客车、载重货车等) 的制动原理也不同, 故针对无人驾驶条件下不同轮胎类型、不同载重车型的具体制动策略也存在差异, 后续将进一步分别仿真研究。

参考文献

- Chen S, Jian Z, Huang Y, et al. Autonomous driving: Cognitive construction and situation understanding. *Sci China Inf Sci*, 2019, 62: 081101
- Guo J H, Li K Q, Luo Y G. Review on the research of motion control for intelligent vehicles (in Chinese). *J Automot Safety Energy*, 2016, 7: 151–159 [郭景华, 李克强, 罗禹贡. 智能车辆运动控制研究综述. *汽车安全与节能学报*, 2016, 7: 151–159]
- Shi W, Alawieh M B, Li X, et al. Algorithm and hardware implementation for visual perception system in autonomous vehicle: A survey. *Integration*, 2017, 59: 148–156
- Guo J, Hu P, Li L, et al. Design of automatic steering controller for trajectory tracking of unmanned vehicles using genetic algorithms. *IEEE Trans Veh Technol*, 2012, 61: 2913–2924
- Guo J, Hu P, Wang R. Nonlinear coordinated steering and braking control of vision-based autonomous vehicles in emergency obstacle avoidance. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2016, 17: 3230–3240
- Zhu J J, Wang Z P, Zhang L, et al. Braking/steering coordination control for in-wheel motor drive electric vehicles based on nonlinear model predictive control. *Mech Mach Theory*, 2019, 142: 1–20
- Onieva E, Naranjo J E, Milanés V, et al. Automatic lateral control for unmanned vehicles via genetic algorithms. *Appl Soft Comput*, 2011, 11: 1303–1309
- Ni J, Hu J. Dynamics control of autonomous vehicle at driving limits and experiment on an autonomous formula racing car. *Mech Syst Signal Process*, 2017, 90: 154–174
- Lv C, Xing Y, Lu C, et al. Hybrid-learning-based classification and quantitative inference of driver braking intensity of an electrified vehicle. *IEEE Trans Veh Technol*, 2018, 99: 1
- Ji X, He X, Lv C, et al. Adaptive-neural-network-based robust lateral motion control for autonomous vehicle at driving limits. *Control Eng Pract*, 2018, 76: 41–53
- Zheng X D. Research on intelligent driving automatic control strategy under special roads (in Chinese). Master Dissertation. Chongqing:

- Chongqing Jiaotong University, 2018 [郑小冬. 特殊道路下智能汽车自动驾驶控制策略的研究. 硕士学位论文. 重庆: 重庆交通大学, 2018]
- 12 Yin X Q, Wang H, Mo Y D, et al. Optimized algorithm for vehicle forward collision pre-warning time considering road adhesion coefficient (in Chinese). *J Automot Safety Energy*, 2019, 10: 178–183 [尹小庆, 汪浩, 莫宇迪, 等. 考虑路面附着因数的车辆向前碰撞预警时间的优化算法. *汽车安全与节能学报*, 2019, 10: 178–183]
 - 13 He X. Study of following method of autonomous vehicle in dynamic urban road situation (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016 [何潇. 自动驾驶车辆动态城市道路工况跟驰方法研究. 硕士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2016]
 - 14 Mao J T. Research on coordinated control of vehicle friction and electromagnetic integrated braking system (in Chinese). Master Dissertation. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019 [冒金堂. 车辆摩擦与电磁集成制动系统制动协调控制方法研究. 硕士学位论文. 镇江: 江苏大学, 2019]
 - 15 Wang T. Research on intelligent control of unmanned vehicle based on sensor occluded scenes (in Chinese). Master Dissertation. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019 [王桐. 基于传感器感知盲区的无人驾驶汽车智能控制研究. 硕士学位论文. 镇江: 江苏大学, 2019]
 - 16 Long M H. Deceleration and wheel slip control for intelligent vehicle (in Chinese). Master Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 [龙沫涵. 智能汽车减速度与车轮滑移率控制方法研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019]
 - 17 Dehnad M H, Khodaii A. Effects of asphalt pavement texture on hydroplaning threshold speed. *J Cent South Univ*, 2019, 26: 256–264
 - 18 Xu H G, Ma B, Xu Y. Analysis of the vehicle braking stability considering the tire and pavement features (in Chinese). *J Harbin Eng Univ*, 2013, 34: 1287–1293 [许洪国, 马彬, 许言. 考虑轮胎和路面特性的车辆制动稳定性分析. *哈尔滨工程大学学报*, 2013, 34: 1287–1293]
 - 19 Zhu Y, Chen Z Q, Yang Z. Test of grip coefficient-slip ratio characteristics of passenger car tire and its correlation with vehicle braking efficiency (in Chinese). *China Rubber Ind*, 2019, 66: 785–789 [朱遥, 陈志强, 杨振. 轿车轮胎附着因数-滑移率特性的测试及其与整车制动效能的相关性研究. *橡胶工业*, 2019, 66: 785–789]
 - 20 Chen J Y, Huang X M, Zheng B S, et al. Real-time identification system of asphalt pavement texture based on the close-range photogrammetry (in Chinese). *J Southeast Univ (Nat Sci Ed)*, 2019, 49: 973–980 [陈嘉颖, 黄晓明, 郑彬双, 等. 基于近景摄影测量技术的沥青路面纹理实时识别系统. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49: 973–980]
 - 21 Liu X Y, Cao Q Q, Chen J Y, et al. Simulation of vehicle braking behavior on wet asphalt pavement based on tire hydroplaning and frictional energy dissipation. *J Southeast Univ*, 2018, 34: 500–507
 - 22 Johansson P, Rychlik I. Laplace processes for describing road profiles. *Procedia Eng*, 2013, 66: 464–473
 - 23 Huang X M, Cao Q Q, Liu X Y, et al. Simulation of vehicle braking performance on rainy days based on pavement surface fractal friction theory (in Chinese). *J Jilin Univ (Eng Technol Ed)*, 2019, 49: 757–765 [黄晓明, 曹青青, 刘修宇, 等. 基于路表分形摩擦理论的整车雨天制动性能模拟. *吉林大学学报(工学版)*, 2019, 49: 757–765]
 - 24 Zheng B S, Zhu S Z, Cheng Y Z, et al. Influence factors analysis of adhesion characteristic on tire-asphalt pavement based on tire hydroplaning model (in Chinese). *J Southeast Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 48: 719–725 [郑彬双, 朱晟泽, 程永振, 等. 基于轮胎滑水模型的轮胎-沥青路面附着特性影响因素分析. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48: 719–725]
 - 25 Shen K. Study of aerodynamic drag feature on automobile with non-smooth surface (in Chinese). Master Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 [湛可. 非光滑车表汽车的空气阻力特性研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2012]
 - 26 Xu L H, Huang B S. Lateral acceleration interference model of vehicle driving on curved road (in Chinese). *J Chongqing Jiaotong Univ (Nat Sci Ed)*, 2019, 38: 92–97 [许伦辉, 黄宝山. 车辆弯道行驶横向加速度干扰模型的研究. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38: 92–97]

补充材料

图S1 无人驾驶制动控制系统

图S2 路面纹理表面功率谱密度曲线

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “基于路表摩擦特性的无人驾驶车辆安全制动原理与方法”

Theory and methodology on safety braking of autonomous vehicles based on the friction characteristic of road surface

Xiaoming Huang^{*}, Yongmao Jiang, Binshuang Zheng & Runmin Zhao

School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China

^{*} Corresponding author, E-mail: huangxm@seu.edu.cn

Because of the direct contact between the tire and pavement, the skid resistance of asphalt pavement is a basic factor affecting the braking safety of autonomous vehicles. The road skid resistance mainly depends on the texture characteristics of the road surface. Considering the pavement friction characteristics, building a braking model of autonomous vehicles is an effective method to improve the braking safety of autonomous vehicles. In order to develop the safety braking method for autonomous vehicles based on the road surface friction characteristic, an automatic close-range photogrammetry system (ACRP system) was proposed and built based on the circle arranged three cameras close-range photogrammetry (CRP) technology to obtain the asphalt pavement surface texture accurately in real time. Automatic image acquisition and 3D reconstruction were achieved by the ACRP system. Sand patch testing method and laser scanning method (ZGScan) were applied to collect the on-site asphalt pavement texture comparing with the results of ACRP system. It shows the texture data obtained by ACRP system have relatively high accuracy and efficiency with recognition accuracy close to 0.02 mm. Then, the peak adhesion coefficients under different road conditions were calculated by considering the skid resistance contribution of the road surface texture. Based on CarSim/Simulink joint simulation, a braking model for autonomous vehicles was established. The characteristics of the autonomous vehicles during straight normal braking, emergency braking and driving on curved sections were analyzed. Then, the safety braking distance under different conditions was put forward. The research shows that the variation trends of friction coefficient curves under different pavement conditions (dry and wet pavement) are basically the same, which both decrease significantly with the increase of relative slipping ratio. When the speed exceeds 40 km/h, the curve tends to be gentle, indicating that the actual contact area of the tire-road comes to a stable status when the speed is relatively high. Based on the tire hydroplaning model built by ABAQUS, the peak adhesion coefficient curves for different pavement conditions were obtained. It can be seen that the peak adhesion coefficient of the road surface is convex parabolic distribution at different driving speeds. Moreover, the peak adhesion coefficient gradually decreases as the speed increases. During normal braking, the vehicle should keep relatively low braking deceleration considering passenger comfort. As for emergency braking, autonomous vehicle should be equipped with professional short-range radar, long-range radar and high-definition camera to detect the environment surrounding the vehicle. On rainy days, the braking distance is averagely increased by about 45% compared to sunny days. When the braking distance between vehicles is large enough, it is recommended to brake with a braking force of 4–6 MPa. Autonomous vehicles should keep a certain safe distance, which requires 1.1–1.2 times of the simulated average value of safety braking distance during the driving process on dry or wet pavement. As the radius of curved sections increases, the acceleration interference values under different road conditions basically reduce. When the radius is greater than or equal to 100 m, the decrease rate of the acceleration interference value is more significant. In order to improve the braking comfort of the vehicles, the radius of the curved road should be controlled above 100 m. In this paper, the safety strategies for autonomous vehicles considering pavement surface texture characteristics can provide references for the theoretical design of braking system and braking safety evaluation for autonomous vehicles.

autonomous vehicles, asphalt pavement, road surface friction characteristic, peak adhesion coefficient, braking safety

doi: [10.1360/TB-2020-0029](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0029)