

道路表面特性突变对车辆安全性的影响仿真分析

韩丰兆¹, 杨绍普², 路永婕²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 河北省交通安全与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要:为了探究车辆在经过路面附着系数变化路段时的行驶安全性,基于ADAMS/CAR建立人-车-路仿真系统,仿真模拟车辆在经过路段积水区域与隧道出入口附着系数较低路段的行驶状况,依据车辆动力响应指标,分析车辆在经过附着系数变化路段时的车辆安全性,提出相应的安全驾驶对策。仿真结果显示:在大半径曲线路段,轮胎单侧或交替经过积水区域比经过全段积水区域时可能更安全些,驾驶员应及时向积水相反方向转动方向盘有利于驾驶安全;车辆在减速驶入隧道和加速驶出隧道时,车辆加速度与路面附着系数对车辆安全行驶状态影响较大。因此建议驾驶员在隧道出入口制动与加速不要过快,进入隧道时应该提前减速,出隧道时不要急于加速或者匀速驶出隧道。

关键词:人-车-路;积水路段;隧道出入口;附着系数;ADAMS/CAR;虚拟试验

中图分类号:U412.2+51 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)02-0037-09

0 引言

良好的路面条件为高速行驶的车辆提供轮胎与路面良好的附着性^[1],减少交通事故隐患。车辆与路面之间相互作用的关系是一个非常复杂的动态过程,它涉及到车辆动力学、路面结构力学、摩擦力学等领域的学科。轮胎与路面间的摩擦力是汽车驱动力、制动力的来源,是汽车操纵稳定性与行车安全的有效保障。轮胎与路面之间的附着系数是衡量路面抗滑性能的重要指标,路面的表面应具备足够的抗滑能力,以保证行车安全^[2]。美国运输安全委员会和美国联邦公路局NTSB(National Transportation Safety Board)研究指出:驾驶员误操作、路面设计不合理、轮胎与路面接触区域内缺乏足够摩擦力是导致交通事故的主要因素,而且13.5%的重大交通事故和18.8%的交通事故是在路面湿滑的情况下发生的^[3]。

对于车辆通过路面附着系数突变的路段,目前公认其会对行车产生不利影响,但是只是认为改善路面状况可以解决此问题,可实际中仍存在不少路面性能较差的路段,并没有为驾驶员和道路管理者提出很好的应对措施。雨天行车,经过有积水路段区域时,轮胎与路面之间水的存在改变了层间接触状态,当轮胎在积水覆盖的路面上高速行驶时,由于流体的压力使轮胎出现上浮的“滑水现象”,一旦发生滑水现象,引起抗滑性能的下降,就会带来很大的交通安全问题^[4-9]。何杰^[10]分别模拟了晴天、雨天、雪天和结冰条件下的路面状况,但是只是单一的改变路面附着系数来模拟不同的路面安全性;徐进^[11]分析了直线路段积水路面车辆事故的机理,其路面附着系数设置没有过度,不太符合实际积水情况。除了路面积水会降低路面的附着系数,隧道出入口处的附着系数也相对较低。车辆在接近隧道入口时,一般会减速,而当车辆驶离隧道时,又常常表现出加速过程^[12]。由于车辆在隧道出入口附近不断地加速和减速,导致隧道路面的附着系数系数比正常路段要低。调查分析显示,隧道临近洞口路面存在衰减现象,抗滑性能降低,沥青路面在临近洞口处大约29%路面存在衰减现象;水泥路面在隧道洞口附近路面大约25%存在衰减现象,有的路表构造深度已经衰减为了0.1mm,大大影响了车辆的行车安全性^[13-15]。在车辆驶入驶出隧道

收稿日期:2016-07-07 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.02.07

基金信息:国家自然科学基金(11172183,11472180,11572207);教育新世纪优秀人才计划(NCET-13-0913)

作者简介:韩丰兆(1991-),男,硕士研究生,主要从事车辆-路面相互作用动力学研究。E-mail:hanfengzhao@126.com

韩丰兆,杨绍普,路永婕.道路表面特性突变对车辆安全性的影响仿真分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(2):37-45.

加速或者制动的时候,车辆轮胎与路面之间的接触处于一个非线性、非稳态的动态作用过程,而且当路面的表面特性突然发生改变的时候,车辆的行驶安全性就遭到极大的威胁。因此,研究车辆在积水路段及隧道出入口路段路面特性突变对车辆安全性影响能具有重要意义。

基于此,利用 ADAMS/CAR,建立人-车-路仿真系统^[16],采用闭环控制模拟车辆在积水路段及隧道洞口附着系数变化的车辆行驶状况,依据仿真车辆的动力学指标,分析车辆在经过附着系数变化路段时的车辆安全性,并提出相应的安全驾驶对策。闭环控制在车辆发生不沿中线行驶时,会对车辆轨迹进行修正,车辆出现大的轨迹变动时,方向盘转动越剧烈,驾驶员越难以掌控,其侧向加速度与横摆角速度,也会发生大幅波动,因此采用方向盘转角与转速、侧向加速度、横摆加速度来描述车辆的安全情况。

1 人-车-路仿真模型

1.1 车辆动力学模型

从 ADAMS/CAR 的车辆模型数据库中选取乘用车作为试验车辆,如图 1 所示。汽车基本参数:质量 1 528 kg,前轮距 1 520 mm,后轮距 1 594 mm,轴距 2 590 mm。交通组成中乘用车占很大比例,而且此模型经过了汽车厂商的参数优化,具有很大的普遍性和代表性,用于仿真研究更加稳定可靠。轮胎模型为 PAC2002,此轮胎模型使用的是魔术公式,由提出者 H. B. Pacejka 教授命名,并根据其发布的年限命名。魔术公式是用三角函数的组合公式拟合轮胎试验数据,用一套形式相同的公式就可以完整地表达轮胎的纵向力 F_x 、侧向力 F_y 、回正力矩 M_z 、翻转力矩 M_x 、阻力矩 M_y 以及纵向力、侧向力的联合作用工况。式(1)为魔术公式的一般表达式

$$Y(x) = D \sin[C \arctan\{Bx - E(Bx - \arctan(Bx))\}] \quad (1)$$

式中, $Y(x)$ 可以是侧向力,回正力矩或者纵向力;自变量 X 可以在不同的情况下分别表示轮胎的侧偏角或纵向滑移率; B 表示刚度因子; C 表示形状因子; D 表示峰值因子; E 表示曲率因子。

1.2 道路模型

采用道路设计软件画出实际道路线形,并扩展成路面宽度,保存为*.dxf格式文件,在 ABAQUS 中进行三角形网格划分,得到其节点数据,导入到路面文件*.rdf中并修改相应数据,最终将路面模拟成一个个三角形拼接形式(也就是等效容积路面),如图 2 所示为路面模型的建立流程图。

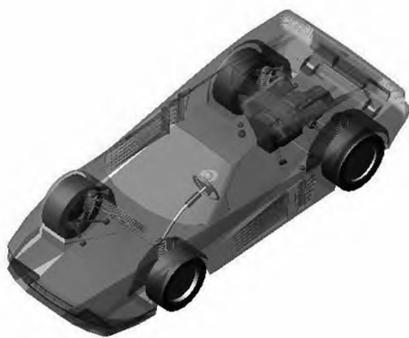


图 1 车辆多体动力学模型

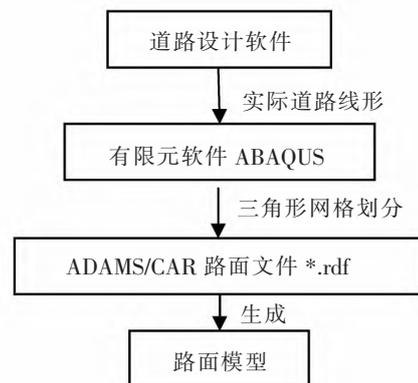


图 2 路面模型建立流程图

任意一个小三角形都可以改变其附着系数,可以模拟不同的路面状况。如图 3 所示为建立好的路面模型。采用宜宾至彝良高速公路标段 K11+404~K13+717 佛现山隧道实际线形,隧道起点位置为半径 1 000 m 的圆曲线,坡度为 0.5%;终点路段为 2 000 m 的圆曲线,坡度为-2.8%;中间为一段 840 m 的直线段。

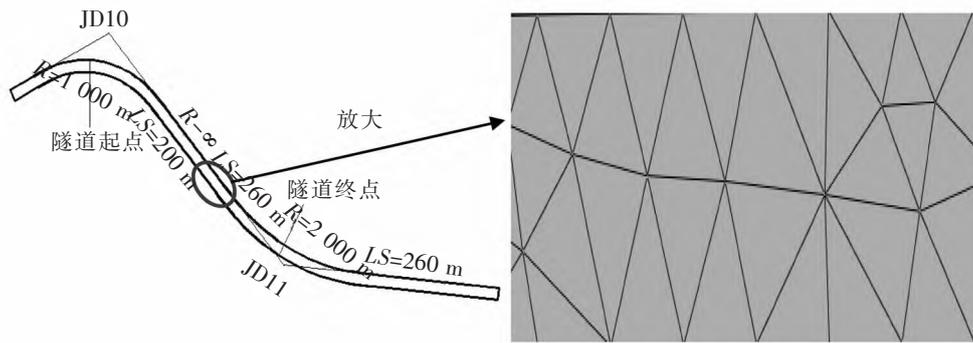


图 3 路面模型

1.3 驾驶员模型

ADAMS/CAR 通过控制方向盘转动指令、油门大小、制动踏板松紧等,来控制车辆在道路的行驶状态。由于采用实际线路仿真,因此控制模型采用闭环驾驶的控制策略,来模拟现实中驾驶员在行车时对车辆做出调整操作,并且不考虑驾驶员变换车道的行为。闭环控制就是预先设定车辆的运行轨迹及行驶速度,试图让车辆按轨迹路线和一定的速度运行,当不符合设定任务时,及时对车辆进行调整。图 4 为车辆在闭环控制下的车辆控制流程图,在闭环控制时,通过 ADAMS/CAR 输入界面获取驾驶员控制文件(. dcf)、数据模型文件(. adm)和命令文件(. asf),通过 ADAMS 求解器中的闭环控制算法进行求解仿真,得到计算结果文件,通过结果文件,分析车辆的运行状态,最终得想要的结果。

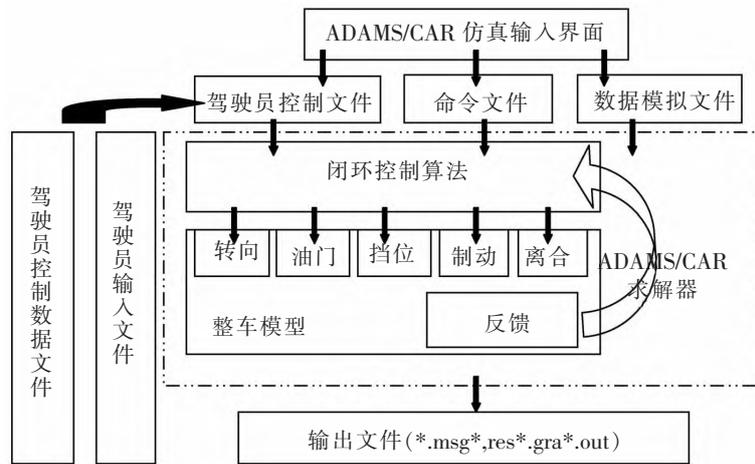


图 4 闭环控制下的车辆控制流程图

2 路面积水试验仿真

2.1 试验方案设计

车辆经过积水区域时,车辆非常容易出现滑水现象,导致路面的附着系数大大降低,附着系数的大小与轮胎-路面的接触面积、轮胎荷载和胎压有关,路面附着系数可能降到 0.1 左右^[17-18],因此采用附着系数为 0.1 来表示积水区域,正常路面为沥青路面,附着系数为 0.6,为了更真实模拟积水路面,在积水区与正常路面连接处,采用附着系数渐变,让附着系数从 0.6 逐渐过渡到 0.1,成倒梯形变化,然后再有设置一段附着系数为 0.1 的积水区域。由于路线太长,只在隧道入口处模拟积水状况,分别以恒速 80 km/h、100 km/h、120 km/h 沿道路中线通过积水区域,积水路段长为 70 m。模拟 3 种积水状况:(1)路段全段积水;(2)单侧轮胎经过积水段;(3)轮胎交替经过积水段。如图 5 为 3 种积水路面示意图。

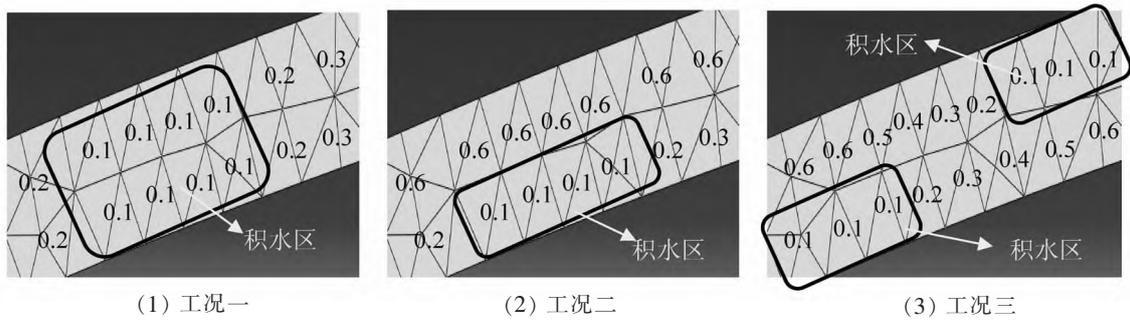


图 5 道路表面积水工况

2.2 仿真及结果分析

2.2.1 路段全段积水时仿真分析

(1) 不同速度对车辆通过积水路段驾驶操纵稳定性的影响。由于速度不同,因此通过积水区域的时间不同,80 km/h 速度下 41 s 时经过积水区、100 km/h 速度下 33 s 时经过积水区、120 km/h 速度下 28 s 时经过积水区。由图 6 可见,在 80 km/h 速度下方向盘峰值为 -13 deg ,100 km/h 速度下为 -22 deg ,方向盘转角增加不是很大,但是在 120 km/h 速度下方向盘转角峰值突变为 -255 deg ,从图 7 方向盘转速也可以发现突变的规律,驾驶员可能无法掌控方向盘而发生危险。由图 8 车辆的侧向加速度曲线及仿真动画,可知车辆在此发生了侧滑。因此,可以初步得出结论在车速低于一定速度下,通过积水区域时车辆安全性变化不大,当达到一定速度极限时,车辆会突然失稳,发生交通事故。因此,驾驶员通过全积水路段时应适当降低车速有利于行车安全。

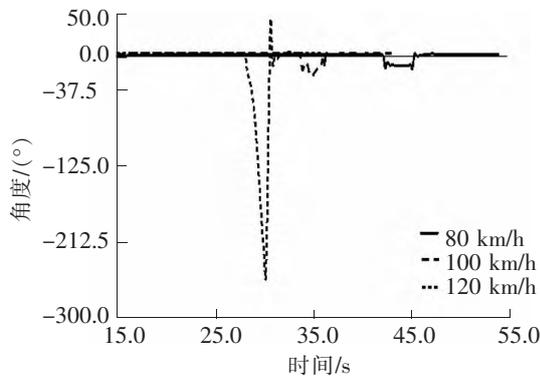


图 6 不同行驶速度下方向盘转角

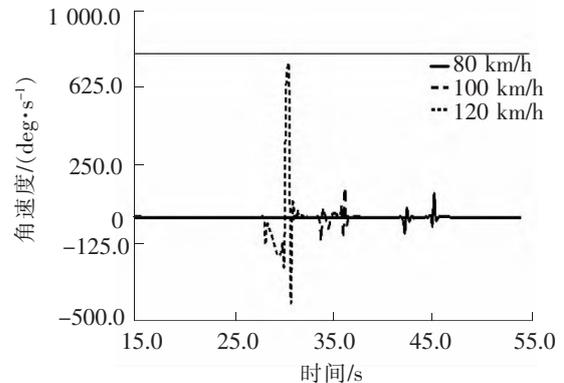


图 7 不同行驶速度下方向盘转速

(2) 附着系数对车辆通过积水路段操纵稳定性的影响。把积水区域路面附着系数降低为 0.08 和 0.05,与附着系数为 0.1 的在 80 km/h 速度下情况进行对比。如图 9、图 10 所示,当附着系数下降到 0.05 时,在积水区域仅 80 km/h 的速度下方向盘转角就突变为 -300 deg ,方向盘转速峰值也达到了 900 deg/s ,驾驶员已无法短时间完成如此超负荷的转弯操作。从图 11 侧向加速度曲线,得知车辆有一个突然的侧向加速,导致车辆发生侧滑。可以说路面附着系数对行车安全性影响很大。

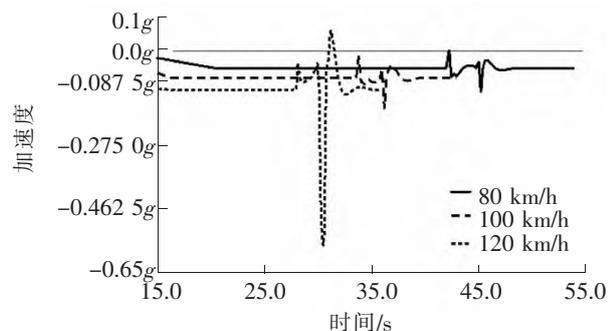


图 8 不同行驶速度下侧向加速度

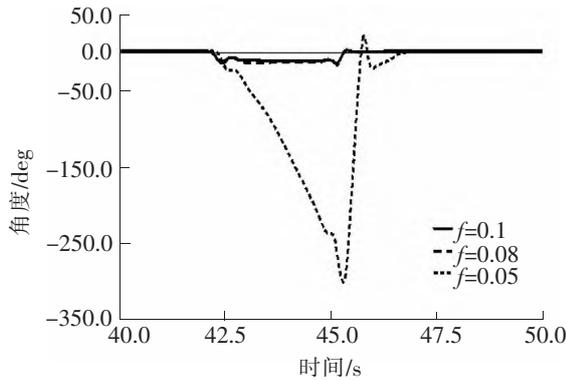


图 9 不同附着系数下方向盘转角

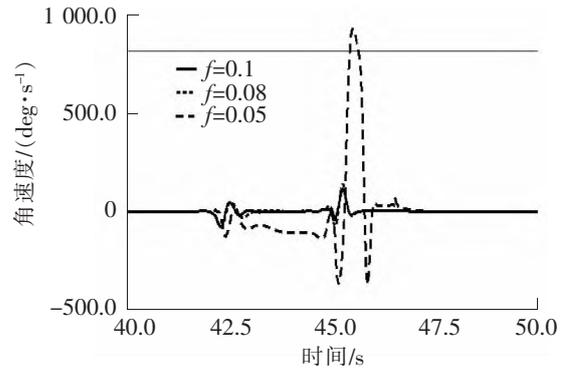


图 10 不同附着系数下方向盘转速

2.2.2 单侧轮胎经过积水段

由于积水出现在曲线路段,因此单侧轮胎通过积水区域时,积水区在曲线内外侧可能对行车安全产生不同的结果,仿真车辆在路段为向左转弯行驶,左为曲线内侧。分别模拟左侧与右侧轮胎单侧经过积水区域时不同速度下的行驶情况。如图 12 所示为各种工况下的方向盘转角。由于车辆在曲线行驶,所以车辆方向盘在开始有一段大约 4 deg 的转角,在分别经过单侧积水区域时,随着速度的增加,不论是左侧积水还是右侧积水,并没有像两侧轮胎同时经过积水区域时,方向盘转角有突长的情况,而是基本保持在 13 deg 左右不变。而且车辆在曲线路段左侧和右侧轮胎经过积水部分时对行车没有太大的影响,驾驶员可以平稳的完成转向任务。可以初步得出结论单侧轮胎经过积水比轮胎同时经过积水要安全。

从图中还可以看出在轮胎左侧积水时,方向盘向右转动;右侧轮胎经过积水时,方向盘向左转动。因此建议,驾驶员在单侧轮胎积水时,向相反方向转动方向盘有利于行车安全。

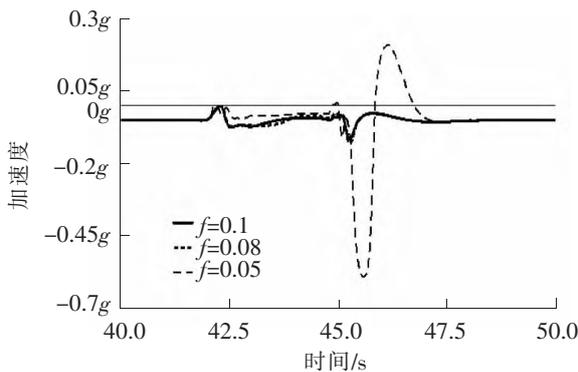


图 11 不同附着系数下侧向加速度

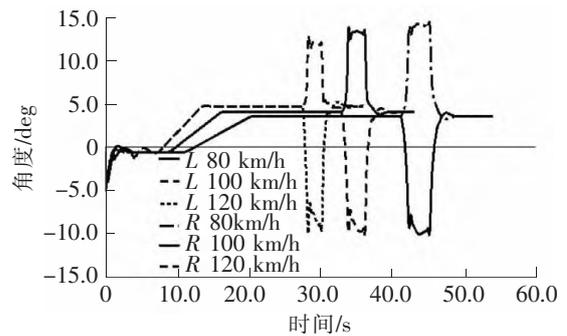


图 12 单侧轮胎经过积水段方向盘转角

2.2.3 轮胎交替经过积水段

从上面知道曲线内侧外侧积水对行车影响不大,因此只选取了先左侧轮胎经过积水区域,再右侧轮胎经过积水区域的情况。如图 13 所示,不同速度下方向盘转角没有很大的变动,同轮胎单侧经过积水得出的结论一样。但在车辆经过交替位置时,方向盘转角曲线出现上下波动,并在很短的时间内峰值出现了 2 倍的突变。而且图 14 车身的横摆角速度左右波动频繁,随着速度的增大车身横摆角峰值呈增大趋势。建议驾驶员在经过交替积水区域时应适当减低车速,经过积水交替位置时方向盘应及时调整,以保持车辆安全性。

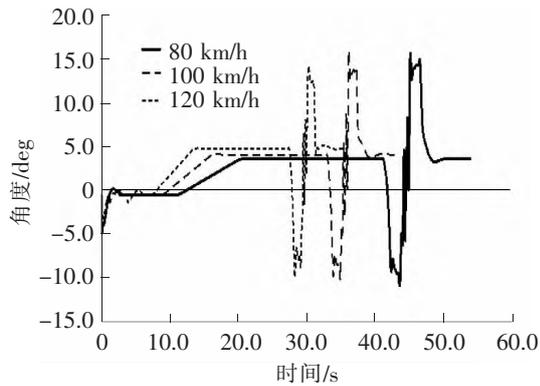


图 13 不同速度下的方向盘转角

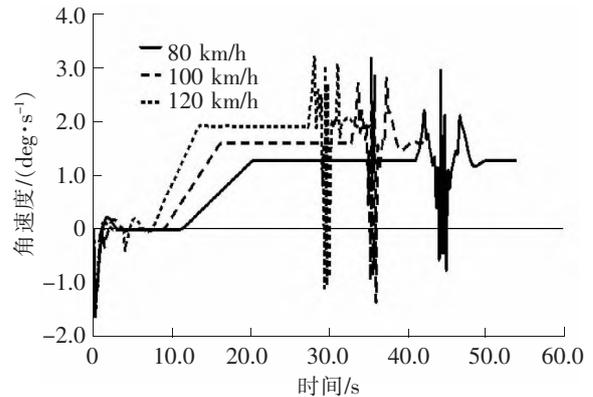


图 14 不同速度下的车身横摆角速度

3 隧道口路段的安全性仿真

由于驾驶员进隧道减速和出隧道时加速的驾驶行为,导致隧道入口和出口很长一段路面附着系数低于正常路面。因此研究隧道出入口路面抗滑性能的变化对行车安全的影响有很大意义。改变隧道出入口一段 70 m 区域附着系数为 0.2,其它路段保持不变,来模拟隧道洞口的路面附着系数低于其它路段的工况,如图 15 所示路段为整个佛顶山隧道。采用进洞减速,出洞加速的驾驶策略,真实地模拟隧道洞口的驾驶行为。

3.1 驶入隧道减速时的车辆安全性

3.1.1 不同制动强度对行车安全的影响

在隧道起点之前,以 100 km/h 的速度接近隧道入口,在进入隧道前开始减速制动。图 16 为不同制动强度下车身横摆角速度的变化曲线,从图 16 中可以看出,在曲线出现了两次峰值,分别是在附着系数变化的路段接口处。在制动减速度小于 2 m/s^2 时,随着制动强度的增加车身的横摆角速度成增加的趋势,但是增长比较小,当制动减速度达到 3 m/s^2 时横摆加速度突然增大到 42 m/s^2 ,增大了 14 倍之多。从图 17 侧向加速度曲线在 3 m/s^2 加速度下达到了 $0.35g$,突然增加 3 倍之多,车辆侧向位移突然增大,可知车辆突然发生了侧向滑移。

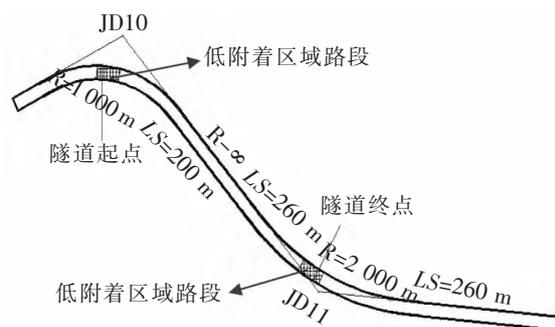


图 15 隧道出入口低附着路段示意图

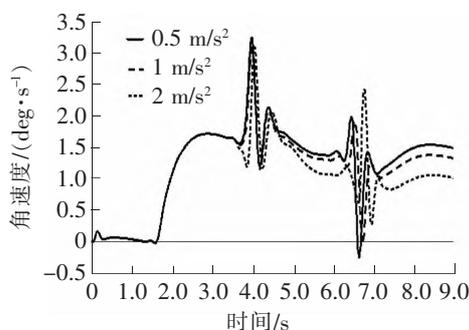
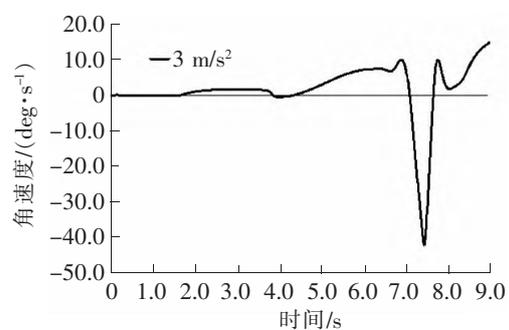
(a) 制动减速度小于 3 m/s^2 的变化曲线(b) 制动减速度为 3 m/s^2 的变化曲线

图 16 不同制动强度下的车身横摆角速度

因此认为制动强度大小与车辆经过低附着系数路面时的安全性有一定的相关性,当制动强度比较小时,制动强度的变化多,车辆影响很小,当制动强度达到一定的值时,车辆会突然失稳,发生危险。建议驾驶员在进入隧道时应缓慢减速,最好提前减速。

3.1.2 路面附着系数对行车安全的影响

将入口处的低附着路段附着系数改为 0.3,以不同制动强度驶过入口。发现在制动减速度为 1 m/s^2 时车身的横摆角速度幅值减少了一半。而在没有增加附着系数前,制动减速度为 3 m/s^2 时车辆侧滑下,增大路面附着系数为 0.3 后路面车身横摆角速度只有 2 deg/s ,车辆安全性得到很大改善,如图 18、图 19 所示。车辆在隧道洞口处的制动安全性与洞口处路面的光滑程度有很大联系,因此要及时改善隧道入口处的路面状况,提高路面抗滑性能。

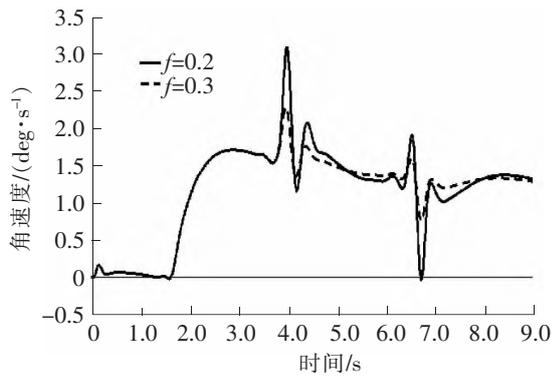


图 18 制动减速度为 1 m/s^2 时的横摆角速度

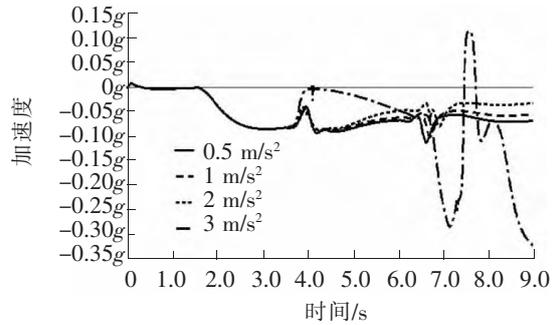


图 17 不同制动强度下的侧向加速度

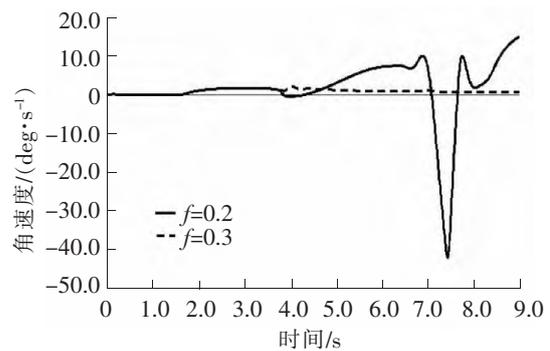


图 19 制动减速度为 3 m/s^2 时的横摆角速度

3.2 驶出隧道加速时的车辆安全性

3.2.1 不同加速强度对行车安全的影响

隧道出口处设置成和入口相似的工况,改变一段路面的附着系数为 0.2,由于速度限制,车辆在隧道中的速度比较低,因此以 60 km/h 的速度在出口处加速驶出隧道。如图 20 所示,为不同加速度下车体的横摆角速度,同减速进洞相似,图中也出现了两次峰值,并且与路面附着系数变化位置相对应。随着加速度的增加车辆的横摆角速度也在增加,但是由于数值比较小,因此车身的横摆也没有太大变化。当选用 80 km/h 的速度进行加速仿真,得出结果和 60 km/h 下曲线波动基本一致。车辆纵向速度虽然增加了 20 km/h ,但是其车身横摆角速度没有变化,可见车辆加速度的大小比速度对车辆驶出隧道影响更大。图 21 车辆的侧向加速度曲线,也保持在很小的范围波动,但是也在随着制动强度的增加而增加。因此建议驾驶员驶出隧道时不要加速过快,或者保持匀速驶出。

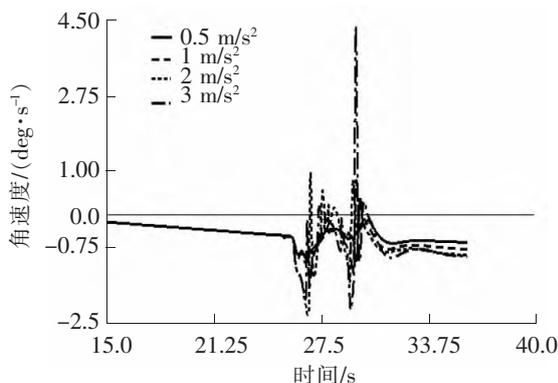


图 20 不同加速度下车体的横摆角速度

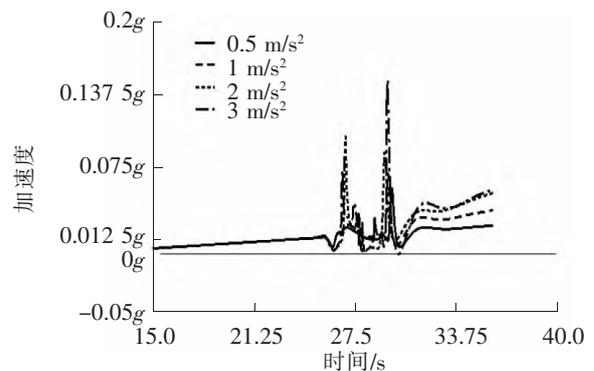


图 21 不同加速度下车体的侧向加速度

3.2.2 不同附着系数对行车安全的影响

把附着系数从 0.2 提升到 0.3,再进行仿真分析,以加速度 3 m/s^2 为例,得到其横摆角速度与 0.2 附着系数下的横摆角速度进行对比,如图 22、图 23 所示。横摆角速度峰值及车身的侧向加速度大大降低,路面附着系数的增加在车辆加速驶出隧道时大大提高了行驶的安全性。

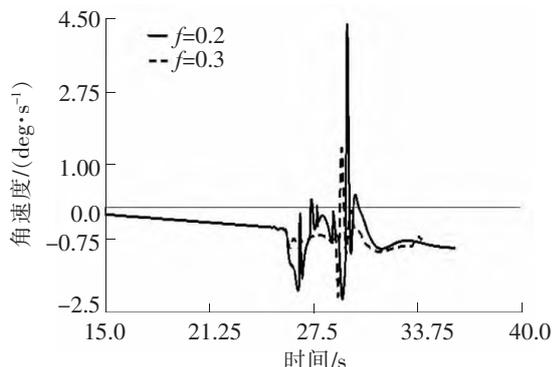


图 22 不同路面附着系数下的车身横摆角速度

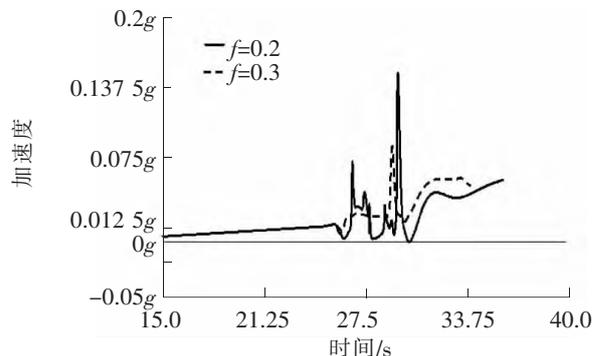


图 23 不同附着系数下车身的侧向加速度

4 结语

(1) 车辆在驶过积水路面时可能会出现滑水现象,造成路面附着系数的突变。仿真模拟车辆在驶过 3 种不同积水工况时的运行情况,通过分析车辆表现出的动力学响应,得出车辆在经积水过路段对行车产生的不利影响。路面附着系数突变和行驶速度对车辆的行驶安全性有很大影响,并且轮胎单侧或交替通过积水区域比经过全段积水要安全些。因此建议驾驶员在雨天行车时尽量保持较低速度行驶,并向积水相反方向转动方向盘有利于行车安全。

(2) 隧道出入口道路表面抗滑性低于正常路面,仿真车辆在减速驶入隧道和加速驶出隧道口的情况,结果表明车辆加速度和路面附着系数对行车安全性影响比较大,过大的制动强度和加速强度会导致车辆的横摆角速度和侧向加速度产生突变,造成交通事故的发生。因此建议驾驶员在隧道出入口应缓慢制动和加速。对于道路管理者,应及时改善隧道出入口处的路面的抗滑性,提升路面使用性能。

参 考 文 献

- [1] 刘长生. 汽车轮胎与公路路面附着系数的研究[J]. 公路, 2006(5):159-163.
- [2] Jay N. Meegoda, Shengyan Gao. Evaluation of pavement skid resistance using high speed texture measurement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition), 2015(6):382-390.
- [3] National Transportation Safety Board. Risk Factors Associated with Weather-Related General Aviation Accidents[R]. Washington:[s. n.] 2005.
- [4] 文斌,曹东伟. 高速公路路面抗滑力与交通事故的统计分析[J]. 公路交通科技, 2006(8):72-75.
- [5] 吕江毅,宋建桐,刘敏杰. 基于胎液路的汽车轮胎滑水速度计算方法研究[J]. 工业安全与环保, 2013(7):48-50+91.
- [6] 张驰,郭鑫鑫,崔卜心. 不均匀积水条件对路面行车安全的影响[J]. 公路交通科技, 2014(10):104-111.
- [7] 杨军,王昊鹏,吴琦. 潮湿沥青路面抗滑性能数值模拟[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2016,36(3):25-32.
- [8] Wang D, Chen X, Yin C, et al. Influence of different polishing conditions on the skid resistance development of asphalt surface[J]. Wear, 2013, 308(1/2):71-78.
- [9] Wang D, Chen X, Oeser M, et al. Study of micro-texture and skid resistance change of granite slabs during the polishing with the Aachen Polishing Machine[J]. Wear, 2014, 318(s1/2):1-11.
- [10] 何杰,刘霞,陈一锴,等. 恶劣天气路面条件对行车安全的影响[J]. 交通运输工程学报, 2011(1):58-63.
- [11] 徐进,彭其渊,邵毅明. 直线路段积水路面车辆事故发生机理分析[J]. 中国公路学报, 2009(1):97-103.
- [12] 杨轸,郭忠印. 隧道路面抗滑性能测定及其对行车安全影响分析[J]. 重庆交通学院学报, 2006,25(6):38-42.
- [13] 陈少幸. 高速公路隧道进出口路段路面抗滑性能与交通安全分析[J]. 广东公路交通, 2014(4):5-10.

- [14] 杨良,郭忠印,杨学良,等. 公路隧道路面工作环境调研与分析[J]. 公路,2004(3):148-152.
- [15] Ma Z L, Shao C F, Zhang S R. Characteristics of traffic accidents in Chinese freeway tunnels[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2009, 24(3):350-355.
- [16] 朱亮亮,李向国,李木松. 高速公路平竖曲线组合行车舒适性研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2010, 23(3):68-72.
- [17] 柯文豪,陈拴发,李祖仲. 潮湿状态下路面抗滑性能分析[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(2):66-70.
- [18] Fwa T F, Kumar S S, Ong G P, et al. Analytical Modeling of Effects of Rib Tires on Hydroplaning[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2068:109-118.

Simulation Analysis of the Influence of Road Surface Characteristics Mutation on Vehicle Safety

Han Fengzhao¹, Yang Shaopu², Lu Yongjie²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang TieDao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Traffic Safety and Control in Hebei, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to explore the driving safety of the vehicle when the road adhesion coefficient is changing, based on the human-vehicle-road simulation system established by ADAMS/CAR, the vehicle driving conditions are simulated for vehicle passing through the trapped water and the tunnel with a low adhesion coefficient entrance. According to vehicle dynamics response index, vehicle safety is analyzed when it passes through the period with changing adhesion coefficient and the corresponding safe driving strategies are put forward. Simulation results show that the vehicle tires when one side of the tires or both sides alternately pass through the trapped water may be safer than the vehicle pass through the whole trapped water in the large radius curve sections, thus the driver should turn the wheel in the opposite position of the trapped water in time, which is beneficial to driving safety. Vehicle acceleration and road adhesion coefficient has great influence on the safety of vehicles when the vehicle slows down to enter the tunnel and speeds up to leave the tunnel. So drivers are advised not to brake and accelerate too fast in the entrances and exits of the tunnel but to decelerate before entering the tunnel and keep uniform speed while driving out of the tunnel.

Key words: human-vehicle-road; surface gathered water; exit and entrance of highway tunnel; road adhesion coefficient; Adams/Car; virtual test