

## 路面附着系数对汽车跟驰安全距离的影响研究

康成龙, 艾瑶

(华东交通大学 交通运输与物流学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 考虑路面附着系数对汽车跟驰安全距离的影响并建模, 通过 MATLAB 仿真平台进行仿真, 发现在路面附着系数较大(0.5~1.0)的情况下, 前后两车跟驰的安全距离随速度的变化缓慢增长, 且不同路面情况下的安全距离相差不大; 在路面附着系数较小(0~0.5)的情况下, 特别是在冰雪路面上, 车辆跟驰的安全距离随速度的增长变化最大。

**关键词:** 交通安全; 汽车制动距离; 路面附着系数; 跟驰安全距离

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)03-0045-03

近些年来, 随着机动车保有量的不断增加, 交通事故不断增加, 其中汽车追尾碰撞事故所占比例较大。为保证既不会发生交通追尾事故, 也不会影响道路通行能力, 车辆行驶时前后车之间必须保持合适的安全跟车距离(后车车头与前车车尾间的距离)。安全跟车距离主要由制动停车距离决定, 制动停车距离由反应距离和制动距离组成。反应距离是指前方车辆行驶状态发生变化时, 后方跟驰车辆驾驶人员从意识到情况变化到采取制动措施, 直到汽车制动系统产生制动力并开始制动的这段时间内所行驶的路程; 制动距离是指车辆在采取制动措施后从运动状态逐渐减速至停止状态的这段时间内所行驶的距离。

有资料显示, 60%~80%的道路交通事故由人的失误因素造成, 若驾驶员能准确操作, 就能从一定程度上减少道路交通事故的发生。但汽车制动距离的影响因素众多, 其中路面附着系数对汽车的制动过程有着重要影响。该文建立基于前车制动过程和路面附着系数的模型进行仿真, 分析不同路面情况(附着系数不同)下汽车的防撞距离, 为驾驶员在不同路面情况下安全驾驶车辆防止追尾提供参考, 并为更好地研究车辆跟驰安全距离模型提供新思路。

## 1 路面附着系数

路面附着系数表征路面与轮胎之间能产生的最大相互作用力和最大附着潜能。一般情况下, 干燥路面附着系数大, 潮湿路面附着系数小, 冰雪路面附着系数更小。另外, 随着速度的加大, 路面附着系数对车辆制动距离的影响增大。

汽车制动时, 制动系统所产生的制动力与路面

附着系数有关。当车轮处于半滑动半滚动状态时, 附着系数达到峰值, 即车辆的制动力达到很大, 车辆的侧向稳定性较好; 当车轮不滚动时, 路面附着力下降, 车辆的侧向稳定性极差。制动跑偏与侧滑, 特别是后轴侧滑是造成交通事故的主要原因。

车辆制动时, 制动减速度会受到路面附着系数的约束, 表达式为:

$$a \leq \mu g \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为路面附着系数;  $g$  为重力加速度。

## 2 安全距离模型

### 2.1 模型建立的理论基础

车辆制动的一般步骤: 驾驶员对前方交通状况作出判断, 若需采取制动措施, 则踩下刹车踏板使车辆制动直到车辆停止。安全距离模型为:

$$S = vt_d + v^2 / (2a_{\max}) + d_0 \quad (2)$$

式中:  $S$  为安全距离;  $t_d$  为制动迟滞时间, 其取值为 1.2~2.0 s;  $v$  为后车制动前速度;  $a_{\max}$  为后车最大减速度, 路面情况较好的情况下取 6~8 m/s<sup>2</sup>;  $d_0$  为后车与前车相对静止时保持的最小间距, 一般取 2~5 m。

### 2.2 改进的安全距离模型

假设相距  $S$  的前后两汽车在单车道上沿同一方向分别以  $v_1$ 、 $v_2$  速度行驶, 行驶距离分别为  $S_1$ 、 $S_2$ , 驾驶员反应时间与车辆制动器协调时间的和  $t_1$  为 0.8~1.0 s, 车辆减速度增长时间  $t_2$  为 0.1~0.2 s, 为便于计算, 将前后两车的最大减速度统一为  $a_{\max}$ 。  $d_0$  为后车与前车相对静止时保持的最小间距, 车速越高, 需保持的最小车距  $d_0$  越大, 同时最小车距与路面附着系数  $\mu$  成反比。因此, 定义最小车距为:

$$d_0 = (3v_2/k) / (\mu + b) \quad (3)$$

式中:  $v_2$  为后车速度;  $k$  为 22.5;  $b$  为 0.3。

### 2.2.1 后车速度比前车大时的安全距离模型

后车行驶速度高于前车是很危险的, 此时前车的制动距离见式(4)。前车采取制动措施后, 后车识别到前方车辆正在制动减速, 经过反应时间及制动器协调时间  $t_1$  后开始减速, 这段时间内行驶的路程见式(5)。此时后车与前车为保障安全行驶所应保持的安全距离见式(6)。

$$S_1 = v_1^2 / (2a_{\max}) + v_1 t_2 / 2 \quad (4)$$

$$S_2 = v_2 t_1 + v_2^2 / (2a_{\max}) + v_2 t_2 / 2 \quad (5)$$

$$S = v_2 t_1 + (v_2 - v_1) t_2 / 2 + (v_2^2 - v_1^2) / (2a_{\max}) + (3v_2/k) / (\mu + b) \quad (6)$$

### 2.2.2 后车速度与前车相等时的安全距离模型

前方车辆在采取制动措施后速度迅速下降至与后车行驶速度相等, 即  $v_1 = v_2$ , 两车的安全跟驰距离为:

$$S = v_2 t_1 + (3v_2/k) / (\mu + b) \quad (7)$$

### 2.2.3 后车速度比前车小时的安全距离模型

后车速度比前车小的情况比较安全, 但前车采取减速措施后, 其速度减到与后车速度相等时, 后车必须采取制动措施才能实现安全行驶, 否则会有追尾的危险。前车减速到与后车速度相等所需的时间见式(8), 在这段时间内后车保持原速度继续行驶, 行驶距离见式(9)。前车采取制动措施后速度降至与后车速度相等, 后车为保证行驶安全也采取减速操作, 该过程所行驶的距离见式(10), 则后车的总行驶路程见式(11)。前车制动减速不需考虑反应时间, 制动距离同前。此时两车的安全跟驰距离见式(12)。

$$t = t_2 + (v_1 - a_{\max} t_2 / 2 - v_2) / a_{\max} \quad (8)$$

$$S_2' = v_2 t_2 + v_2 (v_1 - a_{\max} t_2 / 2 - v_2) / a_{\max} \quad (9)$$

$$S_2'' = v_2 t_1 + v_2^2 / (2a_{\max}) + v_2 t_2 / 2 \quad (10)$$

$$S_2 = v_2 (t_1 + t_2) + (2v_1 v_2 - v_2^2) / (2a_{\max}) \quad (11)$$

$$S = v_2 (t_1 + t_2) + (2v_1 v_2 - v_1^2 - v_2^2) / (2a_{\max}) - v_1 t_2 / 2 + (3v_2/k) / (\mu + b) \quad (12)$$

## 3 安全距离模型仿真分析

利用 MATLAB 仿真平台, 分别在后车速度比前车大、后车速度与前车相等、后车速度比前车小 3 种运动状态下对传统的基于制动过程的安全距离模型即式(2)、基于前车制动过程和路面附着系数的改

进安全距离模型进行仿真分析。

模型参数如下: 对于式(2),  $t_d$  取 1.6 s,  $a_{\max}$  取  $7 \text{ m/s}^2$ ,  $d_0$  取 3.5 m。对于改进模型, 驾驶员反应时间与车辆制动器协调时间的和  $t_1$  取 0.90 s; 车辆减速度增长时间  $t_2$  取 0.15 s; 最大减速度  $a_{\max}$  主要由附着系数  $\mu$  决定, 在 MATLAB 编程时设置;  $d_0$  也不是定值, 在 MATLAB 编程时设置; 附着系数  $\mu$  设置范围为 0~1.0。在进行数据对比时, 安全距离模型中的最大减速度均取  $7 \text{ m/s}^2$ , 根据式(1), 对应的附着系数为 0.7。

### 3.1 后车速度比前车大

假设前车速度为 50 km/h, 后车速度始终大于前车, 仿真数据见表 1, 不同路面附着系数下车辆跟驰安全距离随速度的变化见图 1。

表 1 后车速度比前车大时的跟驰安全距离

车辆速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	跟驰安全距离/m		车辆速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	跟驰安全距离/m	
	传统 模型	改进 模型		传统 模型	改进 模型
55	44.62	18.78	70	61.62	33.74
60	50.00	23.49	75	67.84	39.27
65	55.67	28.48	80	74.33	45.08

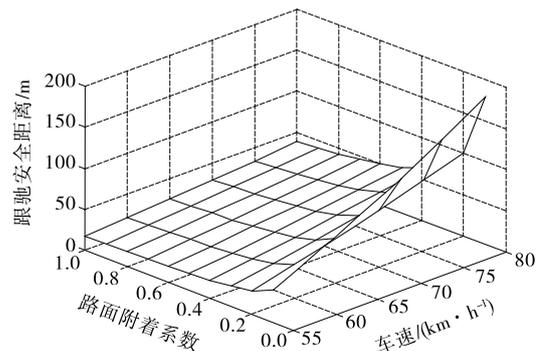


图 1 后车速度比前车大时不同路面附着系数下车辆跟驰安全距离随速度的变化

由表 1 可知: 后车速度比前车大时, 基于前车制动过程和路面附着系数的改进安全距离模型计算出的安全距离比传统模型的计算结果小, 在保障车辆跟驰安全的情况下能有效提高道路通行效率。

由图 1 可知: 后车速度比前车大时, 若路面附着系数较大(0.5~1.0), 车速越快, 前后两车之间的跟驰安全距离增长缓慢, 主要是由于车辆轮胎和路面能很好地接触, 如果汽车的制动系统正常, 则能取得良好的制动效果; 若路面附着系数较小(0~0.5), 即路面较滑, 轮胎与路面不能很好地接触, 摩擦力较小, 随着车速的加大, 前后两车保证安全的跟驰距离

呈现增长趋势,这种情况最危险,需小心驾驶,注意和前车保持合理的安全间距。

### 3.2 后车速度与前车相等

假设前车和后车的速度均为 50 km/h,仿真数据见表 2,不同路面附着系数下车辆跟驰安全距离随速度的变化见图 2。

表 2 后车速度与前车相等时的跟驰安全距离

车辆速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	跟驰安全距离/m		车辆速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	跟驰安全距离/m	
	传统 模型	改进 模型		传统 模型	改进 模型
50	39.50	14.35	65	55.67	18.66
55	44.62	15.79	70	61.62	20.09
60	50.00	17.22	75	67.84	21.53

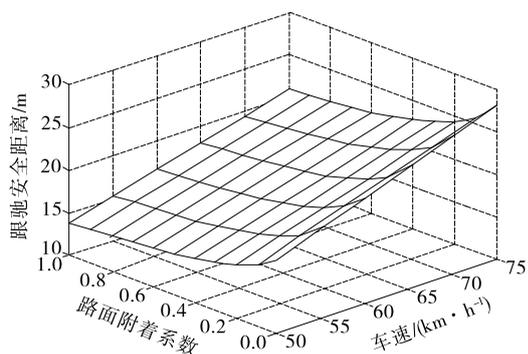


图 2 后车速度与前车相等时不同路面附着系数下车辆跟驰安全距离随速度的变化

由表 2 可知:后车速度与前车相等时,改进模型计算的安全距离小于传统模型的计算结果,改进模型在保障前后车安全行驶的情况下能提高道路通行效率。

前车驾驶员有准备地采取制动措施,后车驾驶员经过反应时间在识别到前车正在减速后采取制动措施,在后车驾驶员反应时间和后车制动器协调时间内前车速度已下降,直到速度降到与后车速度一样。由图 2 可知:在路面附着系数较大(0.5~1.0)的情况下,前后两车之间的跟驰安全距离随速度的变化缓慢增长,且不同路面情况下的安全距离相差不大;路面附着系数较小(0~0.5)的情况下,由于后车有时间采取制动措施,且在前车速度降至与后车速度相等时两车相对较安全,这种情况没有后车速度大于前车时危险,故所需跟驰安全距离没有那么大,但路面附着系数过小对车辆跟驰安全距离的影响依然存在。

### 3.3 后车速度比前车小

假设后车速度为 30 km/h,小于前车速度,仿真

数据见表 3,不同路面附着系数下车辆跟驰安全距离随速度的变化见图 3。

表 3 后车速度比前车小时的跟驰安全距离

车辆速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	跟驰安全距离/m		车辆速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	跟驰安全距离/m	
	传统 模型	改进 模型		传统 模型	改进 模型
35	25.81	14.47	55	44.62	15.15
40	30.10	15.05	60	50.00	14.63
45	34.66	15.36	65	55.67	13.84
50	39.50	15.39	70	61.62	12.77

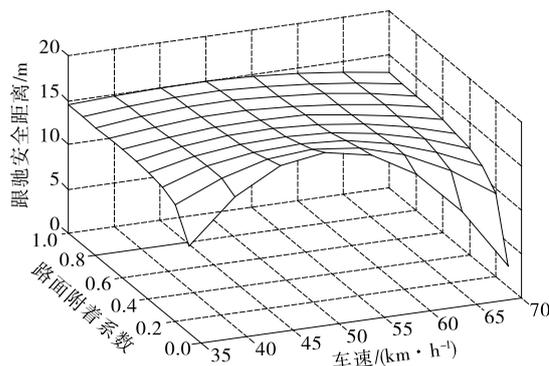


图 3 后车速度比前车小时不同路面附着系数下车辆跟驰安全距离随速度的变化

由表 3 可知:后车速度保持恒定且一直小于前车时,基于前车制动过程和路面附着系数的改进安全距离模型计算的安全距离呈先增大后减小的趋势,符合实际情况;而传统的基于制动过程的模型计算出的安全跟驰距离一直增大,不符合实际情况。改进模型的计算结果小于传统模型,在保证安全跟驰的情况下提高了道路通行效率。

后车速度不变且小于前车速度时情况比较安全。由图 3 可知:前车速度大于 30 km/h、低于 50 km/h 时,由于相对速度较低,若路面情况较理想(附着系数为 0.5~1.0),两车之间的跟驰安全距离随着相对速度的升高而增大,符合实际情况;当前车速度大于 50 km/h 时,前车速度越大,所需制动距离越小。路面附着系数过小(0~0.5)的情况下,后车速度不变,前车高速行驶,后车追尾前车的可能性很小,前后两车之间的安全跟驰距离随速度的增大下降最快。

## 4 结论

该文针对道路上前后两车纵向跟驰情况,在前

(下转第 50 页)

$$C = 1\ 654 - 677.64P_T \quad (3)$$

城市快速路改扩建施工期间应对原有道路交通进行详细调研,在明确施工区开放车道数、交通组成比例和交通量大小的同时,对开放车道的通行能力进行评估。当开放车道数不能满足原有交通量正常通行时,需采取分流措施控制货车通行比例。

#### 4 结论

该文利用 VISSIM 仿真软件对双向四车道城市快速路改扩建单向封闭一条车道施工进行模拟,发现货车比例变化对施工区最大通过交通量有直接影响;通过仿真控制输入交通量,得出双向四车道城市快速路改扩建施工区单向封闭一条车道时的最大通行能力为 1 654 pcu/h,可将其作为施工区基础通行能力;同时分析了货车比例变化对施工区通行能力的线性下降影响作用,并建立了施工区通行能力与货车比例间的关系模型,可为城市快速路改扩建施工期间交通组织和交通分流措施制定提供参考。

#### 参考文献:

[1] 陈尚恺.城市道路施工区域交通组织方法与评价[D].

(上接第 47 页)

车采取制动措施的前提下,考虑路面附着系数的影响,对前后两车 3 种速度关系下的安全跟驰距离模型进行分析,研究不同路面情况下随着车辆速度的变化车辆跟驰安全距离的变化情况,结论如下:

(1) 路面附着系数对车辆制动有很大影响,在路面附着系数较大(0.5~1.0)的情况下,前后两车跟驰的安全距离随速度的变化缓慢增长,且不同路面情况下的安全距离相差不大;在路面附着系数较小(0~0.5)的情况下,特别是在冰雪路面上,车辆跟驰的安全距离随速度的增长变化最大。

(2) 基于前车制动过程和路面附着系数的改进安全距离模型不仅能保证车辆安全跟驰,而且能提高道路通行效率。

#### 参考文献:

[1] 王文清,王武宏,钟永刚,等.基于模糊推理的跟驰安全距离控制算法及实现[J].交通运输工程学报,2003,3(1).  
 [2] 杨翠萍,官慧峰.高速公路汽车防撞系统的安全行车距

南京:东南大学,2009.  
 [2] 蔡晓萌,李嘉,王子浜.高速公路大型货车影响的改善措施[J].公路,2010(12).  
 [3] Garber N J, Liu Qun. Identifying the impact of truck-lane restriction strategies on safety using simulation [A]. TRB 2007 Annual Meeting[C]. 2007.  
 [4] 陈浩.城市内环快速路改建高速公路的设计技术研究[J].湖南交通科技,2017,43(3).  
 [5] 金起波,赵源.改扩建公路施工区速度控制策略有效性评价研究[J].公路与汽运,2013(6).  
 [6] T Kim, D J Lovell, M Hall, et al. A new methodology to estimate capacity for freeway work zones[A]. Transportation Research Board Annual Meeting[C]. 2001.  
 [7] HCM2010, Highway capacity manual 2010[S].  
 [8] 郝媛,徐天东,干宏程,等.城市快速路交通流特性研究[J].交通运输工程与信息学报,2006,4(4).  
 [9] 张靖.广州市内环高架路工程总体设计与反思[J].城市道桥与防洪,2003(1).  
 [10] GB 51038-2015,城市道路交通标志和标线设置规范[S].  
 [11] 陈雅,邵长桥.城市快速路施工区通行能力研究[J].道路交通与安全,2010,10(1).

收稿日期:2017-11-27

离研究[J].自动化仪表,2008,29(9).  
 [3] 王俊华,方守恩,刘硕.跟驰状态下驾驶人动态可靠性分析[J].中国公路,2011(22).  
 [4] 王博,卢萍萍,管欣,等.路面附着系数识别方法发展现状综述[J].汽车技术,2014(8).  
 [5] 任福田.交通工程学[M].第二版.北京:人民交通出版社,2008.  
 [6] 朱冰,朴奇,赵健,等.基于路面附着系数估计的汽车纵向碰撞预警策略[J].汽车工程,2016,38(4).  
 [7] 许伦辉,罗强,吴建伟,等.基于最小安全距离的车辆跟驰模型研究[J].公路交通科技,2010,27(10).  
 [8] 马骏.高速公路行车安全距离的分析与研究[J].西安公路交通大学学报,1998,18(4).  
 [9] Peter Seiler, Bongsob Song, J Karl Hedrick. Development of a collision avoidance system[R]. Society of Automotive Engineers, 1998.  
 [10] 潘勇,唐自强,龚贤武,等.基于行驶状态估计的车车协同纵向安全距离模型[J].公路交通科技,2016,33(7).

收稿日期:2017-12-10