



## 考虑后车不同初始状态的安全距离模型

李清清, 简晓春, 吴胜利

引用本文:

李清清, 简晓春, 吴胜利. 考虑后车不同初始状态的安全距离模型[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(3): 69–76.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

**Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)**

### 安全距离-时间模型的汽车紧急制动分层控制策略研究

Research on the hierarchical control strategy of automobile emergency braking system based on safety distance-time model

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(1): 31–38 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.01.004)

### 无人驾驶重型汽车 AEB控制算法及仿真

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(6): 72–80 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.06.009)

### 车辆纵向跟车舒适性模型预测控制算法研究

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(12): 9–17 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.12.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.12.002)

### 考虑舒适性的AEB避撞算法及仿真验证

Simulation Verification of AEB Collision Avoidance Algorithm in Consideration of Comfort

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(4): 39–48 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.04.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.04.006)

### 基于分层式控制器的纯电动汽车车距控制研究

Research on Vehicle Distance Control of Pure Electric Vehicle Based on Hierarchical Structure Controller

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(1): 31–40 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.01.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.01.005)



# 考虑后车不同初始状态的安全距离模型

李清清, 简晓春, 吴胜利, 高晨莹

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

**摘 要:**传统安全距离模型主要依靠车辆间运动学关系建立,且后车接收预警信号时的初始状态常被视为匀速行驶,导致模型精度不高、普适性差,影响前向碰撞预警系统可靠性。针对以上问题,考虑了后车不同初始状态,结合运动学与动力学方法综合分析车辆制动过程,进行纵向动力学建模,根据前车运动状态建立安全距离模型,通过仿真试验得出后车不同初始状态下预警安全距离的差异及变化规律。仿真结果表明:后车初始加/减速状态和初始匀速状态的预警安全距离存在差异,差异大小与后车初始加/减速度值、行驶速度有关,且前车处于制动工况时差异尤为显著,预警安全距离的差值最大可达 18.69 m,相对变化率达到 49.53%。考虑后车不同初始状态的安全距离模型更加符合实际情况,可有效提高预警系统对车辆安全状态判断的准确性。

**关键词:**前向预警系统;安全距离模型;初始状态;动力学建模

中图分类号:U461

文献标识码:A

文章编号:1674-8425(2023)03-0069-08

## 0 引言

车辆跟驰行驶是交通环境中最常见的驾驶工况之一,通常表现为同一车道上相邻车辆间的相互影响与制约。相关研究表明,超过 65% 的交通事故是由跟车行驶过程中车辆发生追尾而致<sup>[1]</sup>。因而,追尾碰撞被认为是影响道路交通安全的主要因素<sup>[2]</sup>。为了减少追尾事故的发生,汽车前向碰撞预警系统(forward collision warning system, FCWS)开始得到广泛关注,并成为主动安全研究领域的重要部分<sup>[3-6]</sup>。碰撞预警系统可根据传感器信息判断行车安全状态,并在紧急情况下为驾

驶员或主动避撞控制系统提供危险示警<sup>[7-8]</sup>。因此,前向碰撞预警系统的关键技术之一是获得合理的安全距离阈值,以保持与前车的安全车距。

经典安全距离模型,如 Mazda 模型、Honda 模型等,可直观地反映出两车之间的位置关系<sup>[9]</sup>,但只能在某种特定条件下获得较好的预警效果,无法实现不同工况的动态自适应。针对此问题,国内外学者提出了多种改进模型。如为适应复杂路面条件,在安全距离模型建模时引入道路附着系数以反应路面条件的变化<sup>[10]</sup>;分析城市拥堵工况、郊区工况、高速工况等不同工况对安全距离的影响,结合工况识别算法完成对模型的优化<sup>[11]</sup>;

收稿日期:2022-07-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51705052)

作者简介:李清清,女,硕士研究生,主要从事汽车主动安全研究,E-mail:2402939066@qq.com;通信作者 简晓春,男,硕士,教授,主要从事汽车主动安全研究,E-mail:jianli@cqjtu.edu.cn。

本文引用格式:李清清,简晓春,吴胜利,等.考虑后车不同初始状态的安全距离模型[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(3):69-76.

Citation format:LI Qingqing, JIAN Xiaochun, WU Shengli, et al. Research on the safety distance model considering different initial states of rear vehicles[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(3): 69-76.

就不同驾驶员特性差异化问题,通过实验分析得出不同类型驾驶员特性与车间距离的关系<sup>[12-15]</sup>;分析前后车相对速度对安全间距的影响,引入间距系数来改进安全距离模型<sup>[16]</sup>。

驾驶员接收到预警信号时的车辆状态为车辆初始状态,初始状态的车辆可能以当前速度匀速行驶、加速行驶或减速行驶。现有研究在安全距离建模中,后车初始状态常被定义为匀速行驶,与实际情况不符;此外,由于车辆制动过程中受力情况复杂,影响因素多,若仅从运动学角度对制动距离进行分析,会降低模型精度,从而影响预警系统可靠性,因此,还需对后车制动过程进行详细动力学分析。本文基于后车不同初始状态,结合运动学与动力学方法综合分析车辆制动过程,进行车辆纵向动力学建模,开展考虑后车不同初始状态的安全距离模型研究。

## 1 安全距离分析

前后两车对应位置关系如图 1 所示,当后车检测到与前车存在碰撞可能,经过预设反应时间后采取制动措施避免碰撞发生,预警安全距离  $D$  即指两车在此过程中不发生碰撞所需要的安全车间距离。

$$D = S_{r1} + S_{r2} + S_{rp} + S_{rb} - S_f + d \quad (1)$$

式中:后车在制动全过程中的行驶距离  $S_r$  主要包括驾驶员反应阶段距离  $S_{r1}$ 、制动协调阶段距离  $S_{r2}$ 、压力增长阶段距离  $S_{rp}$  以及持续制动距离  $S_{rb}$ ;  $S_f$  为前车行驶距离;  $d$  为缓冲距离,一般设为 2 ~ 5 m。

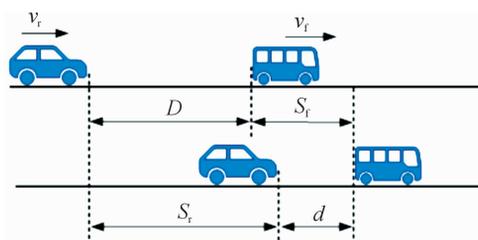


图 1 安全距离示意图

## 2 纵向动力学分析与建模

车辆制动过程动力学建模中忽略车辆所受横向力,将车辆分为前后轴,左右两轮简化为一轮,

建立两轮模型,受力分析如图 2 所示。

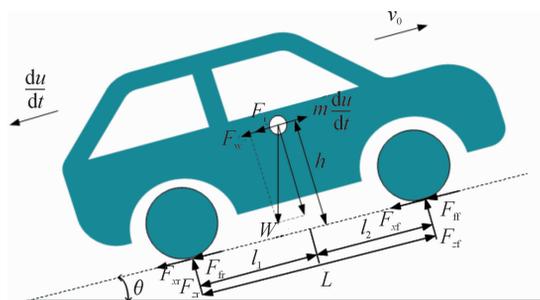


图 2 车辆制动受力分析图

车辆制动行驶方程式为:

$$m \frac{du}{dt} = F_{xf} + F_{xr} \pm F_i + F_w + F_f \quad (2)$$

式中:  $F_{xf}$ 、 $F_{xr}$  分别为前、后轮胎所受地面制动力;  $F_i$  为坡道阻力;  $F_f$  为滚动阻力;  $F_w$  为空气阻力。

前后轮胎所受垂直荷载可表示为:

$$\begin{cases} F_{xf} = \frac{1}{L} \left[ Wl_2 \cos\theta + h \left( m \frac{du}{dt} - \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 \pm W \sin\theta \right) \right] \\ F_{xr} = \frac{1}{L} \left[ Wl_1 \cos\theta - h \left( m \frac{du}{dt} - \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 \pm W \sin\theta \right) \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $m$  为汽车质量;  $\theta$  为道路坡度;  $W$  为车辆重力;  $\rho$  为空气密度;  $C_D$  为空阻系数;  $A$  为迎风面积;  $v$  为行驶速度;  $f$  为滚阻系数;  $l_1$ 、 $l_2$  分别为车辆重心至前后轴距。

车辆制动过程中,地面制动力随着制动压力逐渐增大直至达到附着力,但由于实际过程复杂,地面制动力的变化难以直接表达。地面制动力与垂直荷载的比值被定义为制动力系数,通过制动力系数与垂直荷载的关系得到地面制动力的方式被广泛认可。制动力系数与车轮在路面上的运动状态有关,制动过程中,车轮与地面间的相对运动存在一个由纯滚动到抱死拖滑的渐变过程,通常用滑移率  $s$  来表示滑动成分所占比例。相关试验与理论研究均表明,随着滑移率变化,轮胎与地面间的制动力系数也随之变化,且二者之间的变化曲线呈现一种相似的规律,但由于曲线的具体形状和相关参数值与诸多因素有关,无法用精确的表达式进行描述。

经典的几种轮胎模型在表述制动力系数与滑移率之间的函数关系时较为精细,但涉及参数多,模型复杂。文献[17]在采用与魔术公式相似的正

弦函数形式基础上提出一种无侧滑工况下简化的制动力系数与滑移率函数关系模型为:

$$\mu_x = D \sin(C \arctan(Bs)) \quad (4)$$

式中,  $D$ 、 $C$ 、 $B$  分别为峰值因子、形状因子和刚度因子, 确定方法为:

$$\begin{cases} D = 0.92 \times 0.1304^\sigma + 0.002 \times \\ e(64 - v) - 0.0426\sqrt{\gamma} \\ B = -0.2^\sigma + 1.5 - 0.002(40 - v) \\ C = \tan(C\pi/2) \times (0.1532\sigma^3 - 0.47801\sigma^2 + \\ 0.256\sigma + 0.1693 + 0.1051 \log(64/v))^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\gamma$  为车轮载荷系数, 可表示为  $\gamma = F_z/F_s$ ,  $F_s$  为轮胎标定载荷;  $\sigma$  为路面特征因子, 常见路面特征因子值如表 1 所示。

表 1 常见路面特征因子值

路面状况	干沥青	沥青(湿)	土路(湿)	雪(松散)
$\sigma$ 值	0.000	0.134	0.253	0.600
路面状况	雪(压实)	冰(干燥)	积水路面	
$\sigma$ 值	0.750	1.000	1.200	

基于此模型, 前后轴制动力系数分别为:

$$\begin{cases} \mu_{xf} = \frac{F_{xf}}{F_{zf}} = D_f \sin(C \arctan(Bs_f)) \\ \mu_{xr} = \frac{F_{xr}}{F_{zr}} = D_r \sin(C \arctan(Bs_r)) \end{cases} \quad (6)$$

综合式(3)和式(6)可得到地面制动力:

$$F_x = F_{xf} + F_{xr} = \mu_{xf} F_{zf} + \mu_{xr} F_{zr} = \frac{W \cos \theta [\mu_{xf}(l_2 + fh) + \mu_{xr}(l_1 - fh)]}{L - h(\mu_{xf} - \mu_{xr})} \quad (7)$$

当地面制动力达到附着力的时, 轮胎处于抱死临界状态, 此时对应的滑移率被称为最佳滑移率<sup>[18-19]</sup>。由于滑移率在 ABS 控制范围内不断波动, 轮胎与地面间的制动力系数也在变化, 轮胎与地面的附着力也会处于波动状态<sup>[20]</sup>。因而, 在此过程中, 附着力若被视为定值则会使制动距离计算误差增大。此时, 滑移率与时间的关系可表示为:

$$s = \eta \cos(\phi t + \kappa) + s_0 \quad (8)$$

式中:  $\eta$  为滑移率波动振幅;  $\phi/2\pi$  为滑移率波动频率, 表示 ABS 工作时的点刹频率;  $\kappa$  为前后轴轮

胎到达抱死临界状态的时间间隔;  $s_0$  为滑移率在波动范围内平均值。

此阶段, 前后轴制动力系数分别为:

$$\begin{cases} \mu_{xpf} = \frac{F_{\varphi f}}{F_{zf}} = \\ D_f \sin(C \arctan(B(\eta \cos(\phi t + \kappa_f) + s_0))) \\ \mu_{xpr} = \frac{F_{\varphi r}}{F_{zr}} = \\ D_r \sin(C \arctan(B(\eta \cos(\phi t + \kappa_r) + s_0))) \end{cases} \quad (9)$$

综合式(3)和式(9)得到轮胎与地面间的附着力, 可表示为:

$$F_\varphi = F_{\varphi f} + F_{\varphi r} = \mu_{xpf} F_{zf} + \mu_{xpr} F_{zr} = \frac{W \cos \theta [\mu_{xpf}(l_2 + fh) + \mu_{xpr}(l_1 - fh)]}{L - h(\mu_{xpf} - \mu_{xpr})} \quad (10)$$

### 3 基于运动学的制动过程分析

进行运动学分析前, 先做如下假设: 驾驶员松开油门踏板并踩下制动踏板瞬间, 驱动力会减小至 0, 由于这一过程时间很短, 假设松开油门踏板的瞬间汽车驱动力即变为 0。

基于此假设, 后车不同初始状态的制动减速度变化如图 3 所示。当  $t_{i0} \leq t \leq t_{i1}$  时, 为驾驶员反应阶段, 即从预警系统发出警告到驾驶员踩下制动踏板的阶段, 此阶段的时间主要与驾驶员生理、心理因素有关。图 3(a) 中减速度为 0, 表示后车初始状态为匀速行驶; 图 3(b) 减速度为负值, 表示后车此阶段正以大小为  $a_{r1}$  的加速度加速行驶; 图 3(c) 减速度为正值, 表示后车初始状态减速行驶, 减速度为  $a_{r1}$ 。

当  $t_{r1} \leq t \leq t_{r2}$  时, 为车辆制动协调时间, 是指从施加制动踏板力到制动系统起作用的阶段, 此阶段的时间主要与汽车制动系统有关。图 3(a) 中, 施加踏板力瞬间制动系统还未起作用, 车辆因受外力会由初始匀速行驶状态变成以大小为  $a_{r2}$  的减速度行驶; 图 3(b) 中, 基于上述假设, 松开油门和施加踏板力的瞬间, 车辆会由初始匀加速行驶状态变成减速行驶, 减速度为  $a_{r2}$ ; 图 3(c) 中, 由于车辆本身初始状态为减速行驶, 故不存在制动协调时间。

当  $t_{r2} \leq t \leq t_{rp}$  时, 为制动压力增长阶段, 此阶段

的时间主要与汽车制动系统有关。减速度会从当前值逐渐增加到最大值。

当  $t_{rp} \leq t \leq t_{rb}$  时,为持续制动阶段,此阶段的时

间取决于车辆制动的目标速度,车辆会以最大制动减速度进行制动。

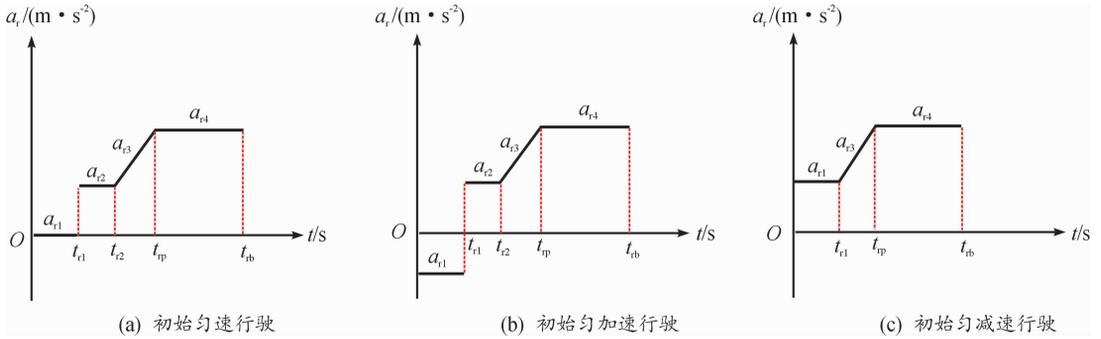


图3 后车不同初始状态制动减速度阶段变化曲线

## 4 安全距离模型

根据以上分析内容,后车不同初始状态下制动全过程减速度变化不同,使得制动距离不同,随之预警安全距离也会不同。因此,本文将根据分阶段制动减速度模型计算后车不同初始状态下分阶段制动距离,再根据前车运动状态,建立安全距离模型。

### 4.1 后车不同初始状态的制动距离模型

综合以上分析内容,可得到后车不同初始状态制动全过程中各阶段的减速度模型,可表示为:

$$a_r = \begin{cases} a_{r1} & 0 \leq t \leq t_{r1} \\ a_{r2} = \begin{cases} \frac{F_i + F_w + F_f}{m}, & a_{r1} \leq 0 \\ \text{不存在}, & a_{r1} > 0 \end{cases} & t_{r1} \leq t \leq t_{r2} \\ a_{r3} = \begin{cases} \frac{F_i + F_w + F_f}{m} + \tau t, & a_{r1} \leq 0 \\ a_{r1} + \tau' t, & a_{r1} > 0 \end{cases} & t_{r2} \leq t \leq t_{rp} \\ a_{r4} = \frac{F_i + F_w + F_f + F_\varphi}{m} & t_{rp} \leq t \leq t_{rb} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\tau$ ,  $\tau'$  分别为后车初始匀速、匀加和初始匀减的压力建立阶段的减速度变化率,表示为:

$$\begin{cases} \tau = \frac{a_{r4}|_{t=0} - a_{r2}}{t_{rp} - t_{r2}} \\ \tau' = \frac{a_{r4}|_{t=0} - a_{r1}}{t_{rp} - t_{r1}} \end{cases} \quad (12)$$

各个阶段的速度模型为:

$$v_r = \begin{cases} v_{r1} = v_{r0} - a_{r1} t_{r1} \\ v_{r2} = \begin{cases} v_{r1} - a_{r2} (t_{r2} - t_{r1}), & a_{r1} \leq 0 \\ \text{不存在}, & a_{r1} > 0 \end{cases} \\ v_{r3} = \begin{cases} v_{r2} - \int_{t_{r2}}^{t_{rp}} a_{r3}(t) dt, & a_{r1} \leq 0 \\ v_{r1} - \int_{t_{r1}}^{t_{rp}} a_{r3}(t) dt, & a_{r1} > 0 \end{cases} \\ v_{r4} = v_{r3} - \int_{t_{rp}}^{t_{rb}} a_{r4}(t) dt \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $v_{r0}$  为车辆接收预警信号时的行驶速度;  $v_{r1}$ 、 $v_{r2}$ 、 $v_{r3}$ 、 $v_{r4}$  分别为各阶段末速度,可得到各个阶段的制动距离:

$$S_r = \begin{cases} S_{r1} = v_{r0} t_{r1} - \frac{1}{2} a_{r1} t_{r1}^2 \\ S_{r2} = \begin{cases} v_{r1} (t_{r2} - t_{r1}) - \frac{1}{2} a_{r2} (t_{r2}^2 - t_{r1}^2), & a_{r1} \leq 0 \\ \text{不存在}, & a_{r1} > 0 \end{cases} \\ S_{r3} = \begin{cases} v_{r2} (t_{rp} - t_{r2}) - \frac{1}{2} a_{r2} (t_{rp}^2 - t_{r2}^2) - \frac{1}{6} \tau (t_{rp}^3 - t_{r2}^3), & a_{r1} \leq 0 \\ v_{r1} (t_{rp} - t_{r1}) - \frac{1}{2} a_{r1} (t_{rp}^2 - t_{r1}^2) - \frac{1}{6} \tau' (t_{rp}^3 - t_{r1}^3), & a_{r1} > 0 \end{cases} \\ S_{r4} = v_{r3} (t_{rb} - t_{rp}) - \int_{t_{rb}}^{t_{rp}} \int_{t_{rp}} a_{r4}(t) dt dt \end{cases} \quad (14)$$

### 4.2 后车不同初始状态的安全距离模型

1) 当检测到前车处于静止状态时,后车的最终速度应等于 0 才能避免碰撞,此种情况下预警

安全距离为:

$$D = \begin{cases} S_{r1} + S_{r2} + S_{r3} + S_{r4} + d & a_{r1} \leq 0 \\ S_{r1} + S_{r3} + S_{r4} + d & a_{r1} > 0 \end{cases} \quad (15)$$

2) 当检测到前车处于减速状态或是由于突发状况紧急制动,考虑到安全因素,后车的最终速度也应等于0。此种情况下预警安全距离为:

$$D = \begin{cases} S_{r1} + S_{r2} + S_{r3} + S_{r4} - v_f t_{rb} + \frac{1}{2} a_f t_{rb}^2 + d & a_{r1} \leq 0 \\ S_{r1} + S_{r3} + S_{r4} - v_f t_{rb} + \frac{1}{2} a_f t_{rb}^2 + d & a_{r1} > 0 \end{cases} \quad (16)$$

3) 当检测到前车处于加速或匀速行驶时,若后车当前行驶速度小于或等于前车速度时,则处于安全状态;若后车当前行驶速度大于前车速度时,则后车制动后的末速度应等于前车速度。此种情况下预警安全距离为

$$D = \begin{cases} S_{r1} + S_{r2} + S_{r3} + S_{r4} - v_f t_{rb} - \frac{1}{2} a_f t_{rb}^2 + d & a_{r1} \leq 0 \\ S_{r1} + S_{r3} + S_{r4} - v_f t_{rb} - \frac{1}{2} a_f t_{rb}^2 + d & a_{r1} > 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $v_f$  为前车初速度; $a_f$  为前车加速度。

## 5 仿真结果与分析

为进一步直观反映后车不同初始状态所产生的预警安全距离差异情况,基于以上建立的安全距离模型,利用 Matlab/Simulink 进行仿真试验,模拟道路上典型的前向碰撞预警情况,在前车匀速行驶、紧急制动、加速行驶3种情况下,分析比较后车初始加速、减速与初始匀速所产生的预警安全距离差值及差值随后车初始加/减速度值、后车行驶速度的变化趋势。为便于分析比较,设后车初始加速与初始匀速行驶产生预警安全距离之差为  $d_1$ 、初始减速与初始匀速行驶产生的预警安全距离之差为  $d_2$ 。

驾驶员反应时间一般为 0.3 ~ 1 s,仿真中设为 0.5 s,制动协调时间设为 0.3 s,制动压力增长时间设为 0.55 s。前车速度设为 20 m/s,分别做匀速运动、紧急制动(减速度为 6 m/s<sup>2</sup>)和加速运动(加速度为 2 m/s<sup>2</sup>)。整车动力学参数如表 2 所示。

表 2 整车动力学参数

仿真参数	数值
整车质量/kg	1 520
质心至前轴距离/m	1.082
质心至后轴距离/m	1.623
轴距/m	2.705
轮胎标定荷载/N	2 060
质心高度/m	0.523
空气阻力系数	0.3
迎风面积/m <sup>2</sup>	1.8
路面特征因子	0
道路坡度	0.01
滑移率波动振幅	0.15 ~ 0.2
滑移率波动频率/(次·s <sup>-1</sup> )	60
前后轴抱死时间间隔/s	0.5

选定后车接收到预警信号时的行驶速度为 25 m/s,探究不同前车运动状态下,预警安全距离差值及相对增加/减少率随后车初始加/减速度的变化,仿真结果如图 4 所示。

柱状图表示后车初始加/减速与初始匀速的预警安全距离差值,折线图表示初始加/减速相对于初始匀速的预警安全距离增加/减少率。图 4(a)中后车初始状态为加速,加速度由 1 m/s<sup>2</sup> 依次增加到 4 m/s<sup>2</sup>,预警距离差值随之增加,当前车处于加速工况,差值最大为 2.2 m,增长率为 32.32%;当前车处于紧急制动工况,属于碰撞风险极高工况,差值最大 9.97 m,增长率达到 26.42%。图 4(b)中后车初始状态为减速,减速度由 1 m/s<sup>2</sup> 依次增加到 4 m/s<sup>2</sup>,当前车处于加速工况,差值最大 2.01 m,减小率为 29.61%;当前车处于紧急制动工况,差值最大 18.69 m,减小率增加到 49.53%。

从上述分析不难看出,随着后车初始加/减速度值增大,后车初始加/减速与初始匀速的预警安全距离差值也增大,且当前车为紧急制动工况时的差值更加显著。值得一提的是,图 4(a)与图 4(b)相比来看,后车初始减速时的预警安全距离差值均大于初始加速的预警安全距离差值,故碰撞

危险程度越高时,由于后车初始状态不同而产生的预警距离差异越明显。

选定后车初始加/减速度为  $2 \text{ m/s}^2$ , 探究 3 种前车运动状态下, 预警安全距离差值及相对增加/减少率随后车行驶速度的变化, 仿真结果如图 5 所示。图 5(a) 中后车初始状态为加速, 行驶速度从  $25 \text{ m/s}$  增大到  $30 \text{ m/s}$ , 当前车处于加速工况, 差值由  $1.05 \text{ m}$  增加到  $1.57 \text{ m}$ , 相对增加率由  $15.41\%$  变为  $10.98\%$ ; 当前车处于制动工况, 差值由  $4.85 \text{ m}$  增加到  $6.31 \text{ m}$ , 相对增加率由  $12.85\%$

变为  $9.64\%$ 。图 5(b) 中后车初始状态为减速, 行驶速度从  $25 \text{ m/s}$  增大到  $30 \text{ m/s}$ , 当前车加速工况, 差值由  $1.37 \text{ m}$  增加为  $3.11 \text{ m}$ , 减少率由  $19.99\%$  变为  $21.65\%$ , 当前车制动工况, 差值由  $2.82 \text{ m}$  增加为  $5.39 \text{ m}$ , 减少率由  $34.62\%$  变为  $24.71\%$ 。

由此看出, 预警安全距离差值随后车行驶速度增大而增大, 但相对增加/减少率随之降低。同样, 前车为制动工况时的差值更大, 对比图 5(a)、图 5(b) 来看, 后车初始减速时的预警距离差值大于初始加速的预警距离差值。

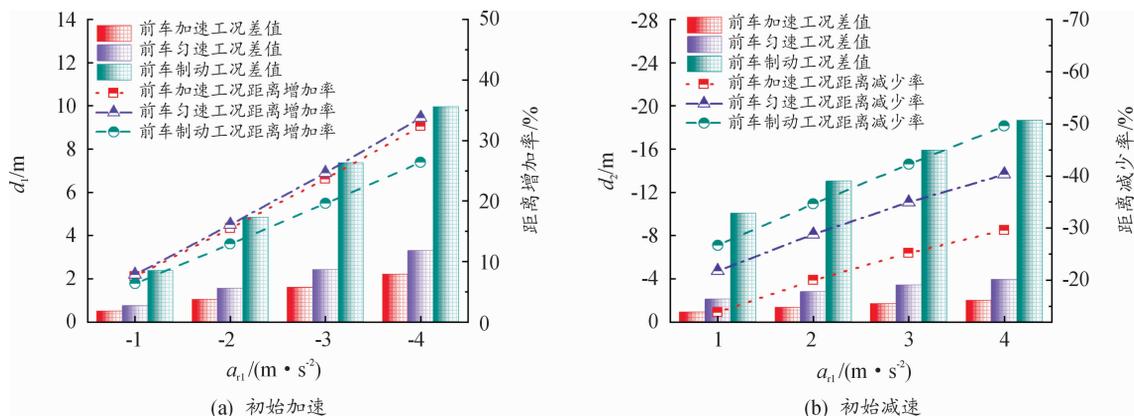


图 4 后车不同初始加/减速度的预警距离差值

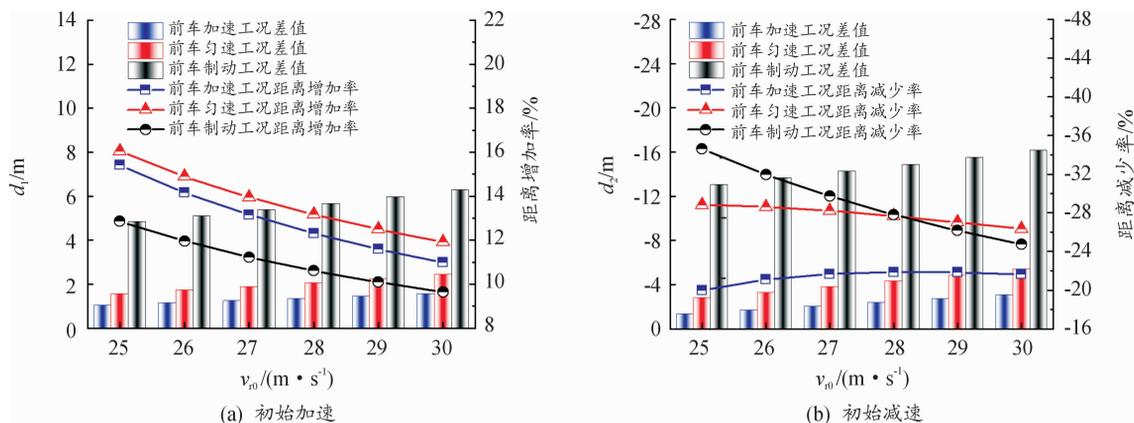


图 5 后车不同行驶速度的预警距离差值

## 6 结论

1) 后车不同初始状态所产生的预警安全距离差异随后车初始加/减速度值的增大而增大, 且前车处于制动工况的差异尤为显著, 其中当后车初始加速状态时, 预警安全距离相较于初始匀速

状态增长率最大可达  $33.72\%$ , 当后车初始减速状态时, 预警安全距离相较于初始匀速状态减少率可达  $49.53\%$ 。

2) 后车行驶速度变高, 不论何种初始状态, 预警安全距离都随之变大, 预警安全距离差值会随行驶速度增大而增大, 但相较于初始匀速状态,

初始加/减速状态的预警安全距离增加/减少率随之减少。当后车达到较高行驶速度时,不同初始状态对预警安全距离的影响不显著。

3) 考虑后车不同初始状态,结合运动学和动力学方法对安全距离模型进行多因素融合建模,可以更加准确地判断车辆安全状态,降低预警系统虚警率,提高驾驶员对预警系统的信任与认可。

## 参考文献:

- [1] 黎健侃,李泽炜,华文雯,等.城市道路交通事故统计分析[J].科技创新与应用,2021,11(21):74-76.
- [2] RAJU N, ARKATKAR S S, EASA S, et al. Investigating performance of a novel safety measure for assessing potential rear-end collisions: an insight representing a scenario in developing nation[J]. IATSS Research, 2022, 46(1):138-146.
- [3] RAKHA H A, FITCH G M, ARAFEH M, et al. Evaluation of safety benefits from a heavy-vehicle forward collision warning system [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2194(1):44-54.
- [4] MARKOVNINA A I, TSYGANOV N D, PAPUNIN A V, et al. The choice of rational complex of active safety systems for smart cars [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2061(1):012128.
- [5] YU R J, ZHANG R C, AI H A, et al. Personalized driving assistance algorithms: Case study of federated learning based forward collision warning[J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 168:106609.
- [6] 袁朝春,孙彦军.基于可拓控制的智能车换道避撞系统研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(9):29-38.
- [7] 袁朝春,李道宇,吴飞,等.汽车纵向主动避撞 DRV 安全距离模型建模研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2015,29(10):29-33.
- [8] 刘存星,魏民祥,顾亮.车辆紧急变道避撞安全距离建模与仿真研究[J].机械设计与制造,2016(2):17-20.
- [9] GUO C, WANG X L, SU L L, et al. Safety distance model for longitudinal collision avoidance of logistics vehicles considering slope and road adhesion coefficient[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D[J]. Journal of Automobile Engineering, 2021, 235(2/3):498-512.
- [10] 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):446-452.
- [11] 刘庄,朱茂桃,徐晓明,等.基于工况识别的安全距离模型[J].科学技术与工程,2020,20(32):13431-13438.
- [12] 唐阳山,夏道华.不同驾驶员反应时间对汽车防撞安全距离的影响研究[J].科学技术与工程,2016,16(1):250-254.
- [13] WANG C, SUN Q Y, LI Z, et al. A forward collision warning system based on self-learning algorithm of driver characteristics [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, 2020, 38(2):1519-1530.
- [14] PUENTE G P, GOHL I. Forward collision warning based on a driver model to increase drivers' acceptance[J]. Traffic Injury Prevention, 2019, 20:S21-S26.
- [15] 李霖,朱西产,陈海林.驾驶员制动和转向避撞极限[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(11):1743-1748.
- [16] 赵林峰,张丁之,王慧然,等.基于改进安全距离模型的人机协同纵向避撞研究[J].汽车工程,2021,43(4):588-600.
- [17] 边明远.用于纵向道路附着系数评估的简化轮胎模型[J].重庆理工大学学报(自然科学),2012,26(1):1-5.
- [18] SOLTANI A, AZADI S, JAZAR R N. Integrated control of braking and steering systems to improve vehicle stability based on optimal wheel slip ratio estimation[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44(3):102.
- [19] SHEN Y N, MAO J F, WU A H, et al. Optimal slip ratio tracking integral sliding mode control for an EMB system based on convolutional neural network online road surface identification[J]. Electronics, 2022, 11(12):1826.
- [20] CHEN T, LIU K, WANG Z Y, et al. Vehicle forward collision warning algorithm based on road friction[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 66:49-57.

## Research on the safety distance model considering different initial states of rear vehicles

LI Qingqing, JIAN Xiaochun, WU Shengli, GAO Chenying

(College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Summary:** Establishing an accurate and reasonable evaluation model of driving safety status is one of the key technologies of the forward collision warning system. As the most classical evaluation model of driving safety status, safe distance has the advantages of universality and robustness. However, traditional safety distance models often assume the initial state of the rear car receiving the warning signal as uniform motion and rely solely on the analysis of vehicle kinematics to determine the safety distance. Due to the complex force situation and multiple influencing factors during vehicle braking, analyzing braking distance only from a kinematic perspective may reduce the accuracy of the model and thus affect the reliability of the warning system.

To address these issues, this paper considers three different motion states of the rear car, including initial uniform motion, acceleration, and deceleration. Combining kinematics and dynamics methods, the force situation of a vehicle during each stage of the braking process is comprehensively analyzed for different initial states of the rear car. Longitudinal dynamic modeling is then conducted to establish safety distance models based on the front car's stationary state, uniform or accelerated motion state, and emergency braking state. Simulation experiments are carried out to obtain the differences and variation patterns of the warning safety distance under different initial states of the rear car.

The simulation results show that there are differences in the warning safety distance for the following vehicle's initial acceleration/deceleration state and initial uniform motion state, and the difference size is related to the initial acceleration/deceleration value and driving speed of the following vehicle. The difference in the warning safety distance generated by different initial states of the following vehicle increases with an increase in the initial acceleration/deceleration value, with a distance difference of the front vehicle's braking condition being the most significant of up to 18.69 m. When the following vehicle initially decelerates, the reduction rate of the warning safety distance can reach a maximum of 49.53% compared with the initial uniform motion state. Regardless of the initial state, when the following vehicle's driving speed increases, the warning safety distance also increases. The difference in the warning safety distance still increases with an increase in the driving speed, but the relative increase/decrease rate of the warning safety distance in the initial acceleration/deceleration state decreases compared with the initial uniform motion state. When the following vehicle reaches a relatively high driving speed, the impact of different initial states on the warning safety distance becomes less significant.

In summary, the following vehicle's initial state is an important factor affecting the safety distance. By analyzing the different initial states of the following vehicle and combining kinematic and dynamic methods to model the safety distance with multiple factors, it is possible to more accurately determine the driving safety status, reduce the false alarm rate of the warning system, and improve the accuracy and coordination adaptability of the forward collision warning system.

**Key words:** forward warning system; safety distance model; initial state; dynamic modeling