

基于概率计算的车辆碰撞风险模型研究

朱彤, 谢陈江, 王抢

长安大学汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室, 西安 710064

摘要 为研究面向车辆防撞系统的碰撞风险模型, 分析了车辆碰撞风险的概率内涵, 根据运动学理论并考虑车辆运行特征, 建立了基于概率计算的侧向碰撞风险模型, 运用 Vissim 微观交通仿真等方法模拟常见的车辆运行场景, 利用输出数据离线计算风险值, 并对仿真结果进行评价。将追尾碰撞发生的过程分为前车减速与前车减速条件下的碰撞两起事件, 运用条件概率的思想求出追尾事故发生的概率来表征跟车风险。从安全的本质出发提出了跟车风险的表述方法, 建立密度函数模型。在分析前车减速条件下追尾碰撞条件时, 从汽车地面力学理论的角度补充考虑了制动系统作用时间、附着系数等影响因素, 使模型更接近实际状况, 并且将判断的标准由停车距离扩展到了制动全过程的位移。通过与其他风险模型产生的计算结果进行比较分析, 发现基于概率计算的碰撞风险模型, 能够更好地反映实际交通安全状态, 更适用于车辆防撞系统。

关键词 交通安全; 车辆防撞系统; 风险模型; 概率计算; 仿真

中图分类号 U491

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.22.005

Modeling of Vehicle Collision Risk Based on Probability Analysis

ZHU Tong, XIE Chenjiang, WANG Qiang

Key Laboratory of Automotive Transportation Safety Technology, Changan University, Xi'an 710064, China

Abstract A vehicle collision risk model is proposed for the vehicle collision avoidance system in this paper. The probabilities of the collision risk and vehicle kinematical parameters are analyzed at first. Then the risk models based on the probability analysis of the angle collision are established. Simulations are carried out for some common scenarios with the micro simulation tool of Vissim. The process of collision for car-following is divided into two stages: the leading vehicle decelerates and the following vehicle can not avoid the collision under this condition. The probability of the rear-end collision used to express the risk of car-following is calculated using the method of the total probability. Then, a deceleration probability density function model is developed. In the analysis of the condition for the collision to occur while the leading vehicle is decelerating, the brake system response time and the sticking coefficient are taken into account and this makes the model robust in reflecting the real traffic situation. To evaluate the performance of the new method, the risk is calculated as a function of the data generated from Vissim. Simulation results indicate that the new approach reflects better the safety situation and is more suitable for the intersection collision avoidance system.

Keywords traffic safety; collision avoidance system; risk model; probability computation; simulation

0 引言

随着车路协同与高精度 GPS 技术的发展, 车辆防撞系统 (collision avoidance system) 得到了更有力的技术支持, 也获得了更广泛的关注。目前, 对于该系统的研究主要集中于以下两方面: 一是实时信息采集与处理研究。主要针对车辆如何利用自身传感器、路侧传感设备或其他车辆的车载传感设备采集信息, 再利用通信设备传输信息并加以融合的过程;

二是研究风险模型。主要针对如何适当地表征风险以适用于所有可能产生碰撞的场景。此外, 车辆运行受到多种因素的影响, 体现出很强的随机性^[1], 导致车辆运行中的车辆碰撞动态风险难以估计。

本文主要针对后者展开研究, 分析了车辆碰撞问题, 从安全学概念出发, 以追尾碰撞与交叉口侧向碰撞为例, 提出了基于概率计算的动态风险估计方法。还提出了运用微观交

收稿日期: 2012-04-15; 修回日期: 2012-07-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51108036), 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (CHD2010JC085)

作者简介: 朱彤, 讲师, 研究方向为交通安全、智能交通系统, 电子邮箱: zhutong@chd.edu.cn

通仿真软件模拟常见的车辆运行场景,利用输出数据仿真计算风险值并进行评价。

1 侧向碰撞风险模型

1.1 侧向碰撞风险分析

道路交叉口是交通事故多发的地点^[1-4]。根据车辆运动的方向,可将出现在交叉口冲突点的车辆碰撞分为以下几类,包括:(1)直行碰撞;(2)直行与逆向左转碰撞;(3)直行与左侧左转碰撞;(4)直行与右侧左转碰撞;(5)直行与右侧右转碰撞;(6)左转与右侧左转碰撞;(7)直行与对向右转碰撞。上述碰撞可能发生在无信号交叉口,也有可能发生在信号交叉口的非保护相位下,还有可能是一方或多方车辆违章闯红灯造成的。各类碰撞之间存在相似性,文章以直行碰撞为例提出风险模型。

以往提出的交叉口车辆碰撞风险估计方法包括到达时间差值 (time different)、到达时间交叠范围 (overlapping interval)、到达时间上下限差值 (difference in minimum and maxims speed)等^[1-3]。这些方法选用的风险指标与风险的概率内涵存在差异。

对于交叉口侧向碰撞,如一方或多方驾驶员在驾驶过程出现认知、判断与操纵错误均可直接导致交通事故^[4]。此外,即使驾驶员不出现上述错误,车辆的失控也能够造成交通事故的发生。上述因素可称为导致事故的直接原因。I 代表车辆之间存在时空上的交汇 (intersection),R 代表驾驶员错误认知 (recognize),J 代表错误判断 (judgment),M 代表错误操控 (manipulation),V 代表车辆失控 (vehicle),C 代表车辆碰撞 (collision)。除直接因素之外,还有诸多的间接因素,通过对直接因素影响碰撞发生的可能性。根据安全学概念,碰撞事故风险发生是碰撞事件的概率,据此,发生碰撞的概率可表示为

$$P(C)=P(I) \cdot P(R \cup J \cup M \cup V) \quad (1)$$

在驾驶员认知、判断、控制水平等均难以实时测定的情况下,将 $P(R \cup J \cup M \cup V)$ 取为最大值 1,此时, $P(C)=P(I)$,代表车辆碰撞风险上限。

1.2 侧向碰撞风险模型

以直行碰撞为例计算 $P(I)$,如图 1 所示,车辆分别称为 A 车与 B 车。交叉口内部的冲突区域(阴影区域)面积等于两车宽度的乘积 $W_A W_B$ 。

上述情景下,可将车辆的交汇界定为车辆同时占据了冲突区域的全部或一部分。从上述界定出发,A 与 B 之间不发生交汇的条件为 A 到冲突区域时 B 已通过,或者 A 离开冲突区域时 B 还未到。只要满足上述条件之一,则不会发生碰撞,如果两不等式均不被满足,则将发生事故。

$$P(I)=1-P\left[\left(\frac{X_B+L_B+W_A}{V_B}<\frac{X_A}{V_A}\right) \cup \left(\frac{X_B}{V_B}>\frac{X_A+L_A+W_B}{V_A}\right)\right] \quad (2)$$

其中, X 为车距离冲突区域边缘的距离(m); L 为车辆长度(m); W 为车辆宽度(m); V 为车辆由检测点到达冲突区域的平均速度(m/s), V 为随机变量。

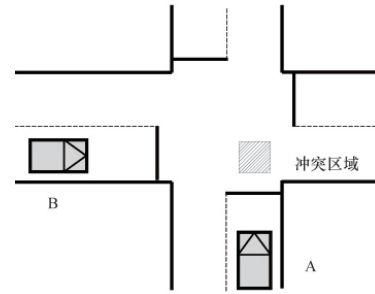


图 1 直行车辆碰撞

Fig.1 Straight crossing path collision

以往的研究中,常常将 V_A, V_B 视为常数,即认为车辆始终按照匀速运动。而实际运行中,车辆接近交叉口时,速度通常是变化的,且具有明显的随机性。缓慢靠近交叉口的车辆有可能加速,原来高速的车辆很可能会减速。无论按照匀速、匀变速运动来判断车辆碰撞风险都存在明显的不合理性。

记 $\frac{X_B+L_B+W_A}{V_B}<\frac{X_A}{V_A}$ 为事件 $E, \frac{X_B}{V_B}>\frac{X_A+L_A+W_B}{V_A}$ 为事件 F ,则式(2)可化为

$$P(I)=1-P(E \cup F) \quad (3)$$

由于 E, F 两事件不可能同时发生,即存在互斥关系,因此,式(3)又可化为

$$P(I)=1-P(E)-P(F) \quad (4)$$

其中,

$$P(E)=P\left(\frac{X_B+L_B+W_A}{V_B}<\frac{X_A}{V_A}\right)=P(V_A<k_1 V_B), k_1=\frac{X_A}{X_B+L_B+W_A} \quad (5)$$

且

$$P(V_A<k_1 V_B)=P\{(V_A, V_B) \in G\}=\int_G f(V_A, V_B) dx dy \quad (6)$$

如设 V_A, V_B 为均匀分布,则

$$f(V_A)=\begin{cases} 1/(V_{Amax}-V_{Amin}) & V_{Amin} \leq V_A \leq V_{Amax} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$f(V_B)=\begin{cases} 1/(V_{Bmax}-V_{Bmin}) & V_{Bmin} \leq V_B \leq V_{Bmax} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$\int_G f(V_A, k_1 V_B) dx dy = S_G \cdot f(V_A) \cdot \frac{1}{k} \cdot g(V_B) \quad (9)$$

其中, $f(V_A), g(V_B)$ 分别为 V_A, V_B 的密度函数,在变量相互独立的条件下, G 为 V_A, V_B 构成的坐标系中满足 $V_A<k_1 V_B$ 及各自变化范围的区域, S_G 则为该范围的面积,如图 2 所示。

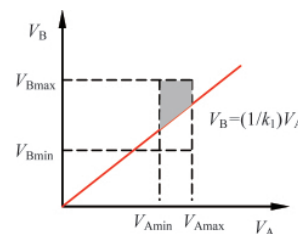


图 2 S_G 的计算

Fig. 2 Calculation Method of S_G

V_A, V_B 分布范围受到当前速度下最大加速度和减速度的影响,同时与位置 X_A, X_B 相关。对于 A 车,加到最大速度的距离为

$$X_{Aacc} = (v_{Amax}^2 - v_{A0}^2) / 2a_{Amax} \quad (10)$$

如 $X_{acc} > X_A$, 则只存在加速过程; 如 $X_{acc} \leq X_A$, 则存在加速和匀速两个过程, 时长分别为 $t_{A1} = (v_{Amax} - v_{A0}) / a_{Amax}, t_{A2} = (X_A - X_{Aacc}) / v_{Amax}$ 。则有

$$V_{Amax} = \begin{cases} (\sqrt{v_{A0}^2 + 2a_{Amax}X_A} + v_{A0}) / 2 & X_{Aacc} > X_A \\ \int_{t_0}^{t_{A1} + t_{A2}} v_A dt / (t_{A1} + t_{A2}) = \left[\frac{1}{2} (v_{Amax} + v_{A0}) \cdot t_{A1} + v_{Amax} \cdot t_{A2} \right] / (t_{A1} + t_{A2}) & X_{Aacc} \leq X_A \end{cases} \quad (11)$$

与上述过程相似, 减至最低速度的距离为

$$X_{Aslow} = (v_{A0}^2 - v_{Amin}^2) / 2j_{Amax} \quad (12)$$

如 $X_{slow} > X_A$, 则只存在减速过程; 如 $X_{slow} \leq X_A$, 则存在减速和匀速两个过程, $t'_{A1} = (v_{A0} - v_{Amin}) / j_{Amax}, t'_{A2} = (X_A - X_{Aslow}) / v_{Amin}$ 。有

$$V_{Amin} = \begin{cases} \sqrt{v_{A0}^2 + 2j_{max}X_A} / 2 & X_{Aslow} > X_A \\ \int_{t_0}^{t'_{A1} + t'_{A2}} v_A dt / (t'_{A1} + t'_{A2}) = \left[\frac{1}{2} (v_{Amin} + v_{A0}) \cdot t'_{A1} + v_{Amin} \cdot t'_{A2} \right] / (t'_{A1} + t'_{A2}) & X_{Aslow} \leq X_A \end{cases} \quad (13)$$

其中, a_{Amax} 为 A 车的最大加速度, v_{Amax} 为最大速度; v_{Amin} 为最低速度, j_{Amax} 为最大减速度, v_{A0} 为 A 车的初速度。

同理, 可计算 $f(V_B)$ 与 $P(F)$, 因此, 可通过式 (4) 获得 $P(I)$ 的值。

1.3 仿真情景分析

以往常用仿真手段模拟交通流特征, 对于如何评价交叉

口车辆碰撞风险估计方法缺乏研究^[3], 本文采用微观交通仿真软件 Vissim 模拟道路交叉口车辆运行场景, 生成车辆运行参数, 再运用本文提出的风险估计方法计算风险值, 与其他文献提出的风险估计方法进行比较。

相关文献提出了几种风险估计方法或设想^[1-3], 包括: (1) 到达时间差值, 用两车当前位置距冲突区域距离与当前速度的比值之差来表征风险程度, 即 $|X_A/V_{A0} - X_B/V_{B0}|$ 越大则风险越大; (2) 到达时间交叠范围, 先求出车辆达到冲突区域时间范围并进一步获得交叠的范围, 如图 3 所示, 交叠范围越大则风险越大; (3) 到达时间上下限差值, 即车辆达到冲突区域时间上限之差和下限之差, 差值越小风险越大。图 3 中 $T_{Amax}, T_{Amin}, T_{Bmax}, T_{Bmin}$ 分别表示 A 车、B 车到达冲突区域的时间上限和下限。

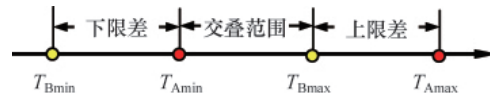


图 3 交叠时间示意图

Fig. 3 Overlapping Interval

将 Vissim 运行中车辆同时通过相同地点视为车辆由于视线受阻或判断错误而碰撞, 通过实时车辆数据可计算交叉口发生碰撞的车辆风险值, 得到风险值变化曲线如图 4 所示。图中横坐标为仿真时间, 右侧是时间起始点, 左侧是车辆通过冲突区域的时间点; 纵坐标分别为到达时间差; 到达时间交叠范围; 到达时间上下限差值以及 $P(I)$ 。

如图 4(a) 所示, 到达时间差随着时间变化存在上下波动

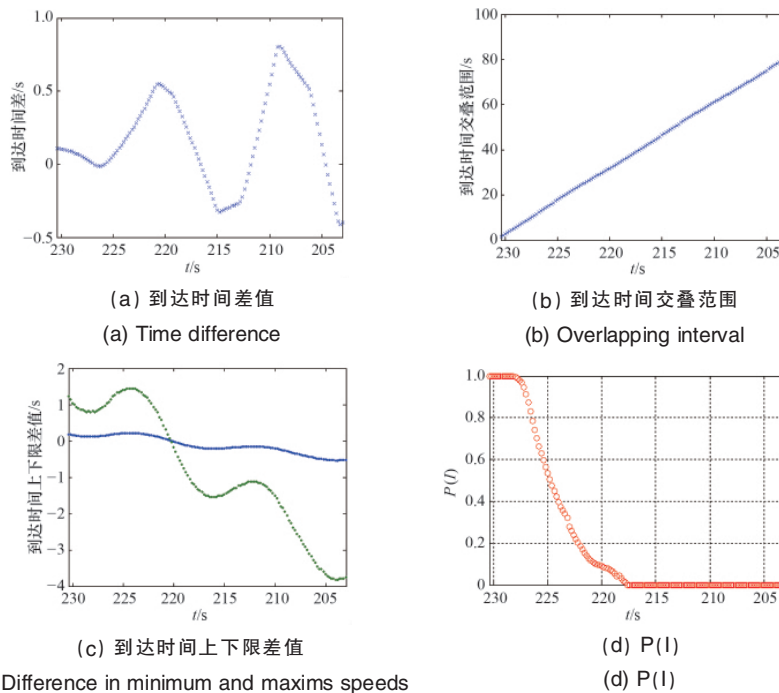


图 4 碰撞车辆动态风险变化趋势比较

Fig. 4 Risk index variation trend before collision

随着接近碰撞时间而逐渐增加,而碰撞时风险值不大,无法为碰撞警告系统确定报警阈值;到达时间交叠范围则一直下降,更加无法确定警告阈值,如图4(b)所示;同样从图4(c)中可以发现,到达时间上下限差值指标也存在类似问题。而 $P(I)$ 值与距碰撞时间具有良好的正相关性,当车辆在距离冲突点很远的地方,风险为0;随着即将碰撞的车辆逐渐接近冲突区域,风险持续增加,碰撞前3s风险为1,如图4(d)所示。

2 追尾碰撞风险模型

2.1 追尾碰撞风险分析

追尾碰撞是事故的主要形态之一^[5-6]。正常跟车状态下,驾驶员会根据前车运行状态调整自身车辆的状态,追尾事故仅发生在前车减速的情况下。可认为事故的发生分为两阶段,第一阶段前车减速,第二阶段在前车减速的情况下,后车无法避险,发生追尾事故。因此, A 表示发生追尾事故事件,用 S 表示前车制动事件, $P(A)$ 表示事故发生的概率,运用全概率计算的思想即可获得事故发生的概率 $P(A)$ 。

$$P(A) = P(A | S_1) \cdot P(S_1) + P(A | S_2) \cdot P(S_2) + \dots + P(A | S_n) \cdot P(S_n) \quad (14)$$

其中,用 $P(S)$ 表示前车以某种减速度变速的概率,用条件概率 $P(A | S)$ 表示前车制动情况下发生追尾事故的概率。 $U = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 构成全集。

由于事件 S 的随机变量 ξ 在其定义域内是连续变化的,概率密度函数为 $\phi(x)$,因此,采用连续型全概率计算。

$$P(A) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\eta | \xi = x) \cdot \phi(x) dx \quad (15)$$

当反应时间等参数为定值时,条件概率 $P(A | S_i)$ 仅有是否碰撞两种可能性,其随机变量为0-1分布,若存在碰撞可能的区间为 (a_d, a_u) ,则上式可化为

$$P(A) = \int_{a_d}^{a_u} \phi(x) dx \quad (16)$$

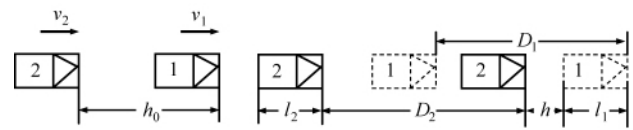
综上所述,求出前车以某种减速度减速的概率密度函数,再求出可能产生碰撞的减速度区间,在该区间内对式(16)进行积分即可获得某两辆车之间的追尾事故概率。

2.2 追尾碰撞风险模型

在车辆运行的过程中,可能采取不同的减速度 j 减速,因此需要考虑的不仅是有没有减速的可能,还要考虑 j 的大小和方向。应从地点车辆与该车辆自身运行特征采集减速度样本,确定对随机变量的分布形式,并进一步求出前车减速的概率密度函数 $\phi(x)$,在正态分布的情况下,有

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (17)$$

如图5所示,设前车为1车,后车为2车。前后车辆的车速分别为 v_1, v_2 ,加速度为 a_1, a_2 ,两车车头间距为 h_0 。需要说明的是,由于本文关注的是在车辆正常运行中的跟车状态,不考虑启动状态。



(a) 运行时两车位置 (b) 前车减速后位置
(a) Position when running (b) Position after front vehicle deceleration

图5 减速状态示意图

Fig. 5 Deceleration state diagram

设跟车车辆(following vehicle)的制动过程如图6所示。图中纵坐标为减速度,横坐标为时间。驾驶员在0时刻接到危险信息开始制动至车辆停下分为3个阶段:驾驶员反应时间 t_r (reacting time);机动车制动系的协调时间 t_b (brake system response time),其中包括了制动力传递时间 t_b 与制动力增长时间 t'_b ;持续制动时间 t_c 。在反应时间与制动力传递时间内,机动车按原速度行驶,经过短暂的制动力增长时间后,机动车按一定的减速度减速。

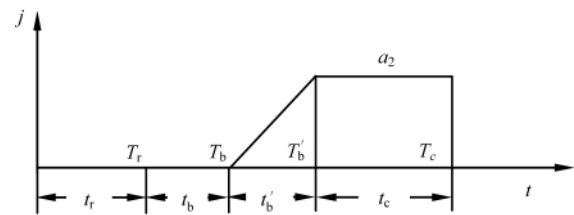


图6 制动减速过程

Fig. 6 Deceleration process diagram

当前车(Leading vehicle)以 a_1 的减速度减速时, t 时刻的位移为 D_1

$$D_1 = v_1 t + \frac{1}{2} a_1 t^2 \quad (18)$$

设机动车制动力线性增长,其停车距离为 D_2 , D_2 具有明显的阶段特征

$$D_2 = \begin{cases} v_2 t & 0 < t < t_b \\ v_2 t_r + v_2 t_b + \frac{1}{2} v_2 (t - T_b) & t_r + t_b \leq t < t_r + t_b + t'_b \\ v_2 t_r + v_2 t_b + \frac{1}{2} v_2 t'_b + v_2 (t - T_b) + \frac{1}{2} a_2 (t - T_b)^2 & t_r + t_b + t'_b \leq t \leq t_c \end{cases} \quad (19)$$

D_1 与 D_2 应满足式(20),否则两车发生追尾碰撞,

$$D_1 + h_0 - l_1 > D_2 \quad t \in (0, T_c) \quad (20)$$

综上所述,求出 $(0, T_c)$ 时刻内满足不等式(20)的 a_1 取值范围 (a_d, a_u) ,即可确定式(16)的积分范围,并求出两车之间发生追尾事故的概率。

2.3 仿真情景分析

根据实测数据,某地点车辆减速度数据均值与方差为

$$\mu = \bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} = 1.5815 \text{m/s}^2 \quad (21)$$

$$\sigma^2 = S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n-1} = 45.8267 \quad (22)$$

同时,根据实测数据获得 $v_1, v_2, l_1; t_r$ 根据 AASHTO^[7]给出的保守值取 2.5s; t_b 取 0.6s, t'_b 取 0.9s; a_2 等于 $\varphi g, \varphi$ 是路面附着系数, 根据当时路面情况可查表获取, g 为重力加速度; 车头间距 h_0 可用车头时距 t_0 来计算。

在上述参数取值条件下, 可能的 D_2 曲线如图 7 所示, 共分为 3 个阶段。如 a_1 为 -8m/s^2 时, D_1 曲线亦可见图 7。不满足不等式 (20), 因此会产生追尾事故, 两条曲线产生交叉。

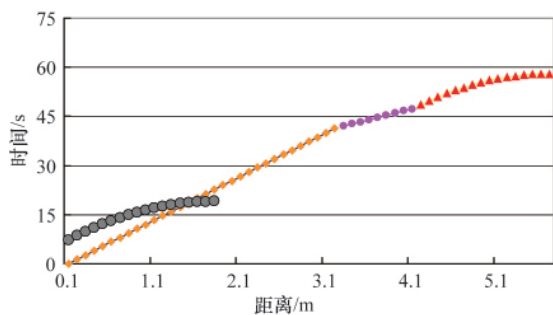


图 7 前车减速时的 D_1 与 D_2 曲线

Fig. 7 D_1 and D_2 in the deceleration process of front vehicle

当 a_1 未确定时, 通过标准正态分布表可以获得 $P(A)$, 即碰撞概率, 仿真获得碰撞概率为 0.32, 不同 a_1 取值下 D_1 曲线可见图 8。此外, 以往研究通常根据制动距离确定风险^[8-10], 从前述仿真分析可以看出, 由于后车发现前车制动需要一定时间。因此, 即使后车有很大的制动减速度, 依然有可能在减速初期发生与前车的追尾事故, 本文提出的模型通过 D_1, D_2 的比较, 能够避免该问题的出现。

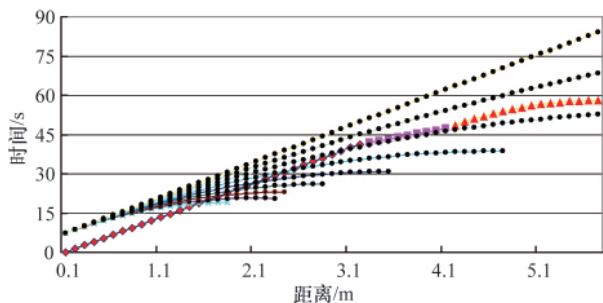


图 8 不同减速度下的 D_1 与 D_2 曲线

Fig. 8 D_1 and D_2 in deferent deceleration process

3 结论

文章在分析车辆碰撞问题的基础上, 以风险的概率内涵为依据, 提出了基于概率计算的车辆侧向、追尾碰撞风险模

型, 利用 Vissim 微观交通仿真软件或实测数据模拟了各类场景下的计算情况, 仿真获得主要结论如下。

(1) 面向车辆防撞系统的风险模型具有明显的概率特征, 应根据概率理论结合车辆运动学理论, 实现模型构建。

(2) 侧向风险模型计算得到的风险值与实际趋势相符, 更易于确定碰撞警告阈值, 适用于道路交叉口车辆防撞系统。

(3) 以往研究通常根据制动距离来确定追尾风险, 从仿真结果可以看出, 由于后车发现前车制动需要一定时间, 因此, 即使后车将有很大的制动减速度, 依然有可能在减速初期发生与前车的追尾事故。应考虑从前车开始减速之后的全过程。

(4) 应用微观仿真技术, 可计算车辆防撞系统在各类实际交通场景下的计算结果与差异性, 可作为碰撞风险建模的有效工具。

参考文献 (References)

- [1] Kwon Oje, Lee Sang-Hyun, Kim Joon-Seok, *et al.* Collision prediction at intersection in sensor network environment [C]. ITSC 2006, Toronto, Canada, September 17-20. 2006: 982-987.
- [2] Mussone Lorenzo, Sala Gianguido. An analysis of lateral support systems to increase safety at crossroad [C]. Intelligent Vehicles Symposium, Torino, Italy, June 9-11. 2003: 383-388.
- [3] Eidehall Andreas, Petersson Lars. Threat assessment for general road scenes using Monte Carlo sampling [C]. ITSC 2006, Toronto, Canada, September 17-20. 2006: 1173-1178.
- [4] Zhu Tong, Zhao Yong-hong, Bai Yu, *et al.* Modeling real-time car-following risk based on probability computation [C]. IEEE 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China, October 20-22, 2008. 2: 268-272.
- [5] McLaughlin H B, Hankey J M, Dingus T A. A method for evaluation collision avoidance systems using naturalistic driving data [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2008, 40: 8-16.
- [6] Oh Jun-Seok, Oh Cheol, Stephen G, *et al.* Real-time estimation of accident likelihood for safety enhancement [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2005, 5: 358-363.
- [7] AASHTO. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets[S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- [8] Oh Cheol, Park Seri, Ritchie S G. A method for identifying rear-end collision risks using inductive loop detector [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2006, 38: 295-301.
- [9] Kahtja Vogle. A comparison of headway and time to collision as safety indicators[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2003, 35: 427-433.
- [10] 徐杰, 杜文, 孙宏. 跟车安全距离的分析 [J]. *交通运输工程学报*, 2002(1): 101-104.
Xu Jie, Du Wen, Sun Hong. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2002(1): 101-104.

(责任编辑 胡少卿, 朱宇)