

基于车辆碰撞约束的换车道安全分析

蒋锐,郭忠印,孔令旗

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 20092)

摘要:车辆的行驶行为可分为自由行驶、跟车行驶和换车道行驶等三种不同行为。换车道行驶过程中,车辆容易发生侧刮、对向相撞、追尾等交通事故。根据车辆运动规律,提出了换车道过程中三个避免碰撞约束条件,选择运行速度和加速度为安全评价指标,通过二阶加法评价方法计算危险系数,确定了不同换车道危险系数的安全等级,并以某山区高速公路为例,阐述了换车道安全评价的分析与应用。

关键词:换车道;碰撞约束;安全评价

中图分类号:U491.2,U492.8

文献标识码:A

不同的驾驶员特性、车辆状况、道路条件和交通环境等因素影响下,车辆的行驶状态也不同,大致可分为自由行驶、跟驰行驶和换车道行驶等三种状态。通常,在变换车道过程中,车辆容易发生侧面相撞、对向相撞、同向刮擦、对向刮擦、尾随相撞等事故^[1]。在变换车道过程中,如果车辆间距(或车头时距)越小,运行车速越高,那么车辆发生追尾、侧刮、翻车等事故的可能性也就越大。换车道模型是研究微观车辆运行安全的重要理论依据。本文考虑了车辆侧向速度的影响因素,根据行车动力学原理,提出了三个避免车辆碰撞的约束条件,并建立了换车道的安全分析方法。

1 换车道安全分析

1.1 换车道的行为分析

在中等交通流密度状态时,车辆间存在着可变换车道的间距,高速行驶的车辆为摆脱慢速车辆的限制而变换车道,从而获得最大的驾驶满意程度(如保持期望车速)或达到一定的驾驶目的(如驶出或驶入匝道)等。根据车道变换要求,换车道行为可分为判断性换车道(discretionary lane changing)和强制性换车道(mandatory lane changing)两类^[2,3]。通常情况下,驾驶员都会选择一个大于临界车头时距(critical gap)的时机进行车道变换。只有当邻近车道的车头时距足够大时,驾驶员才会进行车道变换操作。然而在某些情况下,如行车道被慢速车长时间占用,快车处于低速跟车行驶状态,那么驾驶员处于情绪焦急烦躁时期,此时驾驶员不断寻找变道时机,并会冒险在小间距时进行车道变换。在这种情形下,驾驶员接受的车头间距通常比临界车头时距小20%,极易发生交通事故^[4,5]。

1.2 换车道的碰撞约束

通常,驾驶员在变换车道过程中,必须经过寻找相邻车道间隙、调整自身车速、执行换车道等三个过程。其中,相邻车道车间隙的大小选择对换车道安全的影响较大,当选择小间距进行变换车道时,驾驶员必须提高车速驶入目标车道。在这过程中存在着三个可能发生的危险情况:(1)换车道车辆与当前车道前车追尾;(2)换车道车辆与目标车道后车侧刮或相撞;(3)换车道车辆与目标车道前车追尾。因此,这三个危险情形构成了车辆安全变换车道的约束条件。只有同时满足这三个条件时,车辆才能安全地变换车道。

假设车辆行驶的方向为横向,与车道相垂直的方向为纵向,见图1。此时,引入车辆纵向速度的影响因子 V_y ,假定换车道车辆的横向位移 $L=3.75\text{ m}$ (以一个标准车道宽度为准),换车道执行过程的时间 Δt

收稿日期:2008-11-27

作者简介:蒋锐(1979-),男,福建大田人,博士研究生,主要研究方向为道路安全工程。

为:

$$\Delta t = L / V_y \quad (1)$$

式中: V_y ——车辆的纵向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

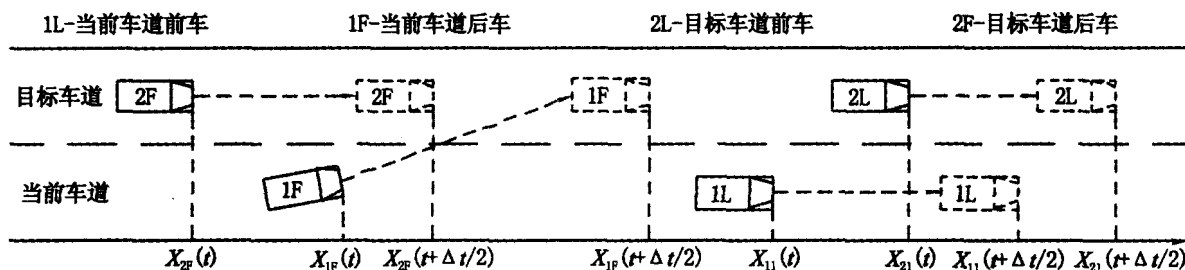


图1 车辆变换车道过程示意图

通常车辆的纵向速度 V_y 在 $1.0 \sim 1.5 \text{ m/s}$ ^[5], 则 Δt 的取值范围在 $2.5 \sim 3.75 \text{ s}$ 之间。假设车辆在当前车道和目标车道上行驶的时间相等, 即为 $1.25 \sim 1.875 \text{ s}$ 之间。在第一个 $\Delta t/2$ 内车辆所受安全约束较大; 第二个 $\Delta t/2$ 内, 车辆主要进行车速调整, 以适应新车道前后车的安全运行要求。因此, 只要换车道车辆满足这三个安全约束条件, 车辆就能安全完成换车道过程。

第一约束条件——避免换车道车辆 1F 与当前车道前车 1L 追尾。

当驾驶员决定要超车时, 车辆 1F 在当前车道上不断加速调整车速。假设在车道变换第一个 $\Delta t/2$ 内, 车辆以加速度 a 行驶, 安全距离为 L , 那么

$$V_{1F}(t + \Delta t/2) = V_{1F}(t) + a \cdot \Delta t/2 \quad (2)$$

在这过程中, 忽略后车 1F 对前车 1L 的影响, 假设前车保持原来车速行驶。此时, 后车与前车避免碰撞约束条件为式(3), 其中不等式左项为准备超车车辆的在 $\Delta t/2$ 时间段内行驶的距离, 右项为当前车道上前车在 $\Delta t/2$ 时间内行驶的距离和安全跟车距离 L 之和

$$X_{1F}(t) + V_{1F}(t) \cdot \Delta t/2 + a \Delta t^2/8 \leq X_{1L}(t) + V_{1L}(t) \cdot \Delta t/2 - L \quad (3)$$

第二约束条件——避免换车道车辆 1F 与目标车道后车 2F 相撞。

当换车道车辆驶入新车道之后, 对目标车道后车 2F 产生影响。目标车道上后车驾驶员发现邻近车道有车辆驶入时, 此时驾驶员考虑安全因素实施减速。但考虑最危险的情形, 即后车 2F 不减速。因此, 后车 2F 与换车道车辆 1F 不发生碰撞的约束条件为式(4), 其中不等式左项为目标车道上尾随车辆在第二个 $\Delta t/2$ 所行驶的距离, 右项为超车车辆在第二个 $\Delta t/2$ 内行驶的距离和安全距离 L 之差

$$X_{2F}(t) + V_{2F}(t) \Delta t/2 \leq X_{1F}(t) + V_{1F}(t) \cdot \Delta t/2 + a \cdot \Delta t^2/8 - L \quad (4)$$

第三约束条件——避免换车道车辆 1F 与目标车道前车 2L 追尾。

当换车道车辆进入目标车道时, 应避免换车道车辆 1F 与目标车道前车 2L 追尾, 见式(5), 不等式左项为换车道车辆 1F 在第二个 $\Delta t/2$ 内行驶的距离, 右项为目标车道上前车 2L 在第二个 $\Delta t/2$ 内行驶的距离和安全距离 L 之差。

(1) 当换车道车辆进入目标车道时, 应避免换车道车辆 1F 与目标车道前车 2L 追尾

$$X_{1F}(t) + V_{1F}(t) \cdot \Delta t/2 + a \cdot \Delta t^2/8 \leq X_{2L}(t) + V_{2L}(t) \cdot \Delta t/2 - L \quad (5)$$

(2) 进入目标车道以后, 在下一个 $\Delta t/2$ 时间内应避免换车道车辆 1F 与目标车道前车 2L 追尾

$$X_{1F}(t) + V_{1F}(t) \cdot \Delta t + a \cdot \Delta t^2/8 \leq X_{2L}(t) + V_{2L}(t) \cdot \Delta t - L \quad (6)$$

2 换车道安全评价

安全评价技术是公路交通安全评价的核心技术, 也是建立科学评价模型的基础。根据文献[6、7]研究, 速度和加速度是影响车辆安全运行的主要因素: 运行车速高, 紧急制动情况下所需的加速度越大, 行车

危险性也越高。因此,为了综合表征换车道的安全性,引入换车道危险系数概念,它包含以上两个评价指标。

2.1 二阶加法评价方法

细化运行速度和加速度两个评价指标的危险等级,采用了二阶加法评价方法计算换车道危险系数 S , 计算公式如下:

$$S = W_1 \times k_i \times F_{Vi} + W_2 \times k_j \times F_{aj} \quad (7)$$

式中: W_1 为运行速度的权重值; W_2 为安全制动减速度的权重值; k_i 为运行速度中第 i 等级危险程度权重系数; k_j 为加速度中第 j 等级危险程度权重系数; F_{Vi} 为不同运行车速下效用系数; F_{aj} 为不同制动减速度下效用系数。

2.2 参数指标的计算

1) 标准化处理参量

引入统计学中的效用系数概念,对运行速度和加速度进行规范化处理,其计算公式如下:

$$F_i = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (8)$$

式中: F_i 为目标值为 x_i 的效用系数; $x_{i\min}$ 为第 i 个目标的最低值; $x_{i\max}$ 为第 i 个目标的最大值;

2) 加速度危险系数计算

根据文献[8]的研究,紧急情况下车辆减速对车辆和驾乘人员的安全都有影响。车辆在正常工况情况下,加速度在 $2 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。而对于减速度大于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的情况,人体基本丧失驾驶操作能力,同时也超过多数车辆的制动能力范围,因此不纳入研究范围,所以本研究减速度范围在 $2 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之间。

(1) 利用公式(8)计算不同减速度的效用系数,具体结果见表1。

表1 不同制动减速度下效用系数 F_{aj}

加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	2	3	4	5	6	7	8
效用系数 F_j	0	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	1

(2) 根据不同减速度下对人体的伤害程度和车辆特性,采用1~9标度法确定权重 k_j ,见表2。

表2 不同制动减速度下权重系数 k_j

加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	≤ 2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8
权重系数 k_j	0	1	2	4	6	8	9

3) 运行速度危险系数计算

当运行车速与平均速度的差值越大,发生事故率越高^[7]。虽然高速公路对最低和最高车速都进行限制,但是考虑到实际道路上车辆的运行特征,确定研究车速范围在 $60 \sim 140 \text{ km/h}$ 之间。

(1) 利用公式(8)计算运行速度的效用系数 F_{Vi} ,具体结果见表3。

表3 不同运行车速下效用系数 F_{Vi}

运行车速 $V_i/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	60	70	80	90	100	110	120	130	140
效用系数 F_i	0	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1

(2) 根据不同运行速度的事故严重性等规律,确定不同运行速度的权重系数 k_i ,见表4。

表4 不同运行速度权重系数 k_i

运行车速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	≤ 60	60~70	70~80	80~90	90~100	100~110	110~120	120~130	130~140
权重系数 k_i	0	1	2	3	5	6	7	8	9

2.3 换车道危险系数的计算流程

首先,计算换车道三个约束条件的安全制动减速度 a_1 、 a_2 、 a_3 ,求得换车道安全制动减速度 $a = \min\{a_1, a_2, a_3\}$ (即为最大负值);其次,分别计算车辆运行速度和减速度的效用系数;再次,确定不同运行速度和减速度的权重系数,并求得车辆的换车道危险系数;最后,根据二阶加法评价计算单位检测时间内所有车辆的平均换车道风险。

3 应用实例分析

本文选取了某山区高速公路的一段实验路段,公路的设计车速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,试验路段长度约为 400 m ,路段为一个S型曲线。采用两台摄像机双向架空拍摄(高度约为 8 m),同时进行现场雷达测速,采用图像处理软件进行多目标物体跟踪,获取车辆的图像坐标,从而计算车辆的速度和相对位置等信息^[8]。

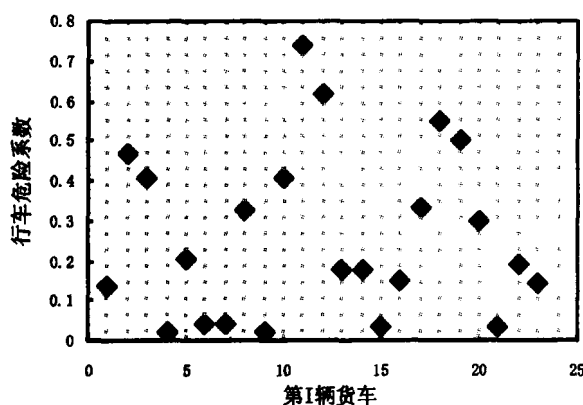


图2 路段货车的换车道危险系数

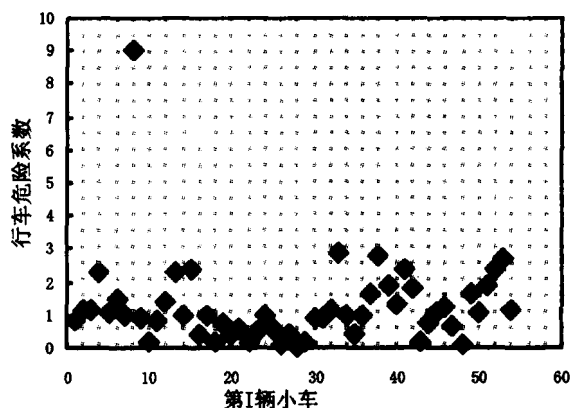


图3 路段小车的换车道危险系数

由上述实验数据可知:试验路段内,小车换车道危险约为货车换车道危险的5倍,主要由于货车行驶速度比小车低,换车道次数少;而小车换车道次数频繁,且行车速度高。检测时段内,出现了4次较危险冲突和1次危险冲突,其中危险冲突是小汽车与货车小间距换车道行驶情形。检测分析结果与实际道路交通运营事故资料反映的安全情形基本一致,即小汽车发生交通事故的概率大于货车。

4 结 语

车辆换车道是个复杂的动态非线性过程,通过分析车辆换车道过程中所遭遇的可能危险,提出安全约束条件;以行车速度和安全加速度为指标建立的二阶加法风险评价方法,能有效表征路段上车辆换车道的安全性。通过换车道车辆微观动态安全分析,便于有关管理部门根据路段车流的运动特征,科学合理地利用动态交通信息系统对道路上的交通流进行限速和车道使用限制等安全管理,提高道路运营的安全性,具有一定的实际运用价值。

参考文献:

- [1] 郭忠印,方守恩.道路安全工程[M].北京:人民交通出版社,2003.37-50.
- [2] Peter Hidas. Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation[J]. Transportation Research Part C, 2002, 10(5): 351-371.
- [3] W van Winsum, D de Waard, K A Brookhuis. Lane change manoeuvres and safety margins[J]. Transportations Research Part F, 1999, 2(3): 139-149.
- [4] Jorge A. Laval, Carlos F Daganzo. Lane-changing in traffic streams[R]. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 2004.
- [5] Hossein Jula, Elias B Kosmatopouls, Petros A Ioannou. Collision Avoidance Analysis for Lane Changing and Merging[J]. IEEE Transac-

tions on. Vehicular Technology, 2000, 49(6): 2295 – 2308.

- [6] Federal Highway Administration. Synthesis of safety research related to speed and speed limits[J]. Washington: Federal Highway Administration, 1999.
- [7] 高建平, 郭忠印. 基于运行车速的公路线形设计质量评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(7): 907 – 911.
- [8] 高建平, 张小东, 蒋 锐, 等. 基于图像处理的交通信息采集[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(1): 99 – 106.

Safety Analysis of Lane Changing Based on Vehicle-crashed Restrictions

JIANG Rui, GUO Zhong-yin, KONG Ling-qi

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Vehicle travel behavior can be classified as free operation, car-following operation and lane-changing operation. During vehicle lane-changing, there exist several traffic accidents, such as sideswipe, angle, rear-end and so on. Based on the theory of vehicle dynamics, the paper puts forward three vehicle-crashed restrictions by which vehicle can change lane safely. By selecting the operation speed and acceleration which can reflect the accident severity, an two-order audit method is introduced to calculate the lane-changing risk coefficient. By the lane-changing risk coefficient, different safety grade can be used to analyze the road safety. Finally, the method is used to estimate the lane-changing safety of a mountain freeway.

Key words: lane changing; vehicle-crashed restrictions; safety evaluation

(责任编辑:王全金)