

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.12.022

高速公路施工作业区追尾风险及其突出影响因素识别

孟祥海, 徐汉清, 史永义

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 针对高速公路施工作业区的追尾风险及其突出影响因素识别问题开展了研究。首先, 采集和分析了处于高速公路半幅封闭施工区和单向超车道封闭施工区合流段和施工区段的车型、车速、车头时距等基于车辆个体的交通参数数据, 然后引入了避免追尾碰撞减速率(a_D)的概念并提出了基于 a_D 的追尾风险度计算方法, 进而归纳总结了追尾风险的影响因素并构建了4个用于描述追尾风险度与影响因素之间关系的模型。基于关系模型提出了应用灵敏度分析识别突出影响因素的方法。最后, 针对典型半幅封闭施工作业区及单向超车道封闭施工作业区的合流区和施工区段, 应用上述方法进行了案例分析, 验证了方法的可行性和可用性。

关键词: 交通工程; 追尾风险; 灵敏度分析; 施工作业区; 高速公路; 避免碰撞减速率

中图分类号: U491.2⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2012)12-0133-06

Identification of Rear-end Collision Risk on Freeway Work Zone and Its Prominent Influencing Factors

MENG Xianghai, XU Hanqing, SHI Yongyi

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China)

Abstract: This paper focused on analyzing the rear-end collision risk in work zone on freeway and identifying the prominent influencing factors. First, the traffic data of vehicles through the merging area and working area of the closed one-way work zone and closed passing-lane work zone were collected and analyzed. These data include vehicle type, speed, time headway and other traffic parameters which can characterize each individual vehicle. Second, the concept of deceleration rate to avoid crash (a_D) was introduced, and a methodology to calculate rear-end collision risk based on a_D was presented. Furthermore, the possible factors that will cause the rear-end collision risk were summarized, and 4 models to describe the relation between rear-end collision risk and influencing factors were calibrated. Based on these models, a sensitivity analysis methodology to identify the over-representative causal factors is put forward. Lastly, a case study is provided to verify the applicability and feasibility of the methodology, based on the merging area and work zone of the typical closed one-way work zone and closed passing lane work zone.

Key words: traffic engineering; rear-end collision risk, sensitivity analysis; work zone; freeway; a_D

0 引言

不中断交通的高速公路施工作业区普遍存在车

辆运行速度降低、通行能力下降以及行车难度增加等交通问题, 从而使作业区成为交通瓶颈路段, 交通拥堵现象及交通事故时有发生。尽管施工作业区

收稿日期: 2012-07-04

基金项目: 黑龙江省交通运输厅科技项目(2011-2012)

作者简介: 孟祥海(1969-), 男, 黑龙江海伦人, 教授, 博士生导师, 工学博士。(mengxianghai100@126.com)

的交通安全隐患较大,但由于施工作业一般持续时间不长,积累的事故数据并不充分,难于开展基于事故数据的统计分析工作。因此,利用事故替代技术及其相应的数据从另一侧面分析和评价作业区的交通安全状况是一种现实的和值得采用的方法,本研究内容即属于这一范畴。

目前,国内外已普遍接受的相对成熟的事故替代技术是交通冲突技术,即利用车辆之间或车辆与其他物体之间的时、空接近度来度量发生交通事故的可能性,或通过调查驾驶员所采取的规避行为来描述交通事故发生的可能性^[1-2],也有部分学者利用车辆的轨迹并结合视频检测进行冲突分析^[3]。其中以时间接近度作为交通冲突指标方面最为突出的就是碰撞时间 TTC (Time to Collision)^[4]及其改进指标^[5]的应用。这些交通冲突技术已在施工作业区的交通安全评价上得到了一定应用^[6],其中也包括施工作业区追尾冲突技术的应用^[7]。本研究的追尾风险是在时间接近度基础上引入车辆减速率性能后拓展出的另一种追尾冲突度量方法。至于施工作业区追尾事故的影响因素识别问题,国内外亦有一些相关研究成果,如利用多重条件的逻辑回归^[8]及利用条件推理随机森林的方法等^[9],这对本文开展的追尾风险突出影响因素识别研究具有一定借鉴意义。

1 施工作业区及其追尾冲突的类型

1.1 施工作业区概况

我国高速公路的施工作业区主要有路肩封闭施工作业区、单向部分车道封闭施工作业区、半幅封闭施工作业区以及双向全封闭便道绕行施工作业区等。根据现场调查和资料收集情况,本文对单向超车道封闭施工作业区和半幅封闭施工作业区开展了相关研究,重点是作业区合流段和施工区段的交通冲突问题。结合黑龙江省哈阿高速公路大修工程及哈尔滨市机场高速公路路面维修工程,选取了典型施工作业区作为调查研究对象。

(1) 哈阿高速公路施工作业区:位于哈阿高速公路亚沟至哈尔滨段 K21 至 K23 处,是一个典型的半幅封闭施工作业区,通车半幅路采用了禁止超车的双车道双向交通组织方式,施工区段及上游过渡区段均限速 20 km/h,警告区由近及远分别限速 40 km/h 和 60 km/h。

(2) 哈尔滨市机场高速公路施工作业区:位于机场高速公路 K11 至 K13 处,市区至机场方向超车道封闭施工,行车道以单车道方式正常通车。该作

业区没有设置限速,但该条高速公路全程限速 110 km/h。

上述 2 处作业区均位于纵坡不大的直线路段,作业区的实况见图 1。

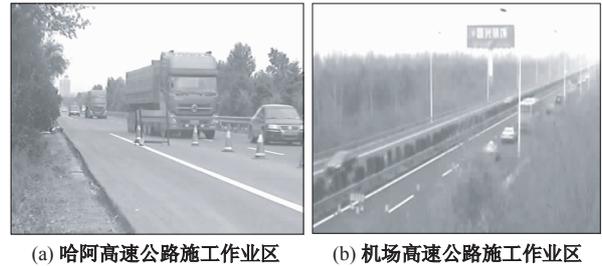


图 1 作业区现场实况

Fig. 1 Work zone conditions

1.2 施工作业区追尾冲突类型

在施工作业区段,车辆往往需要逐次减速行驶,部分车辆还要采取变道合流(或分流)的驾驶行为,这就显著增加了发生交通冲突甚至是交通事故的风险。施工作业区的交通冲突主要有追尾冲突和变道(或分合流)处的侧向冲突。对于合流区和施工区段而言,可将追尾冲突归纳为以下 3 种类型:合流区超车道上的追尾冲突(类型 I);合流区行车道上的追尾冲突(类型 II);施工区段上的追尾冲突(类型 III)。上述 3 种追尾冲突及其所发生的地点见图 2。

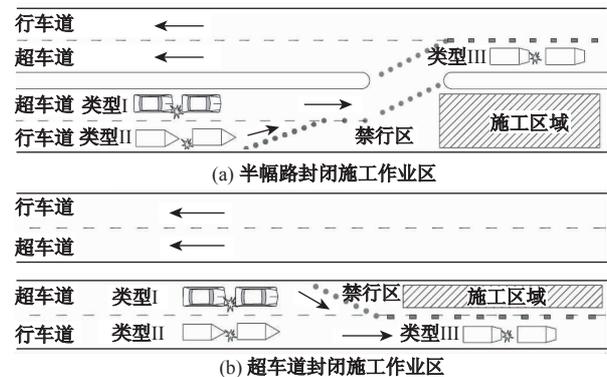


图 2 追尾冲突的类型及其发生地点

Fig. 2 Types of rear-end collision and sites of occurrence

2 交通调查及追尾冲突数据采集

2.1 交通调查与数据提取

采用录像法在施工作业区的合流段和施工区段实施交通调查,获得了哈阿高速公路施工作业区 2010 年 8 月 6 日全天的交通实况视频资料以及机场高速公路施工作业区 2011 年 10 月 27 日 12:00—17:00 的现场录像资料。

使用 Adobe Premier Pro CS3 视频处理软件从交通

实况录像中提取每辆过往车辆的基本交通信息, 内容包括车辆到达和通过指定断面的时刻、速度、车型、车长等车辆参数。采用 50 帧/s 的视频格式将时间精确到 0.02 s。这样通过逐帧播放, 可较准确地记录车辆到达指定断面的时刻, 然后利用车辆通过连续 2 个断面的时间差及断面间距来计算地点车速, 并进一步利用到达同一断面的时间差求得车辆间的车头时距。

2.2 数据描述及追尾冲突数据的获取

在上述 2 处施工作业区共收集到了 11 359 veh 车 (哈阿高速公路 6 130 veh, 机场高速公路 522 veh) 的详细交通信息, 作业区上合流段及施工区段的交通组成及其车速特性等统计汇总结果见表 1。

追尾冲突发生的基本条件是跟驰行驶的车辆中后车车速要大于前车。为此, 首先从 11 359 veh 车中找出跟驰行驶的车辆组数, 以连续 2 veh 车为 1 组, 若存在车辆既与前车构成跟驰行驶、又与后车构成跟驰行驶的情况, 记为 2 组。然后进一步筛选出后车车速大于前车车速的车辆组数, 这些数据就是分析和计算追尾冲突的基本样本数据。按照上述方法共得到了 5 230 组用来计算追尾冲突的样本数据, 其中哈阿高速公路施工作业区 2 786 组, 机场高速公路施工作业区 2 444 组, 见表 1。

表 1 追尾冲突样本数据及相关交通数据汇总表

Tab. 1 Summary of rear-end collision data and related traffic data

交通数据	哈阿高速施工作业区		机场高速施工作业区		
	合流段	施工区段	合流段	施工区段	
追尾冲突样本/组	1 568	1 218	1 250	1 194	
交通组成	小型车比例/%	75.49		92.76	
	中型车比例/%	11.96		6.69	
	大型车比例/%	12.55		0.55	
车速特性	平均速度/ (km · h ⁻¹)	52.75	44.86	94.54	94.09
	标准差	15.56	15.02	16.22	16.85

3 施工作业区追尾风险度计算方法及其应用

3.1 基本原理

跟驰行驶的前后 2 辆车, 若后车速度大于前车速度且车间距较小时, 后车为了避免追尾前车需要减速, 此时的减速率可理解为避免追尾碰撞的减速率 (Deceleration Rate to Avoid Crash, 简称 D), 记为 a_D , 单位为 m/s^2 (追尾发生过程见图 3)。显然, 碰撞减速率的大小可用来度量发生追尾事故的风险度,

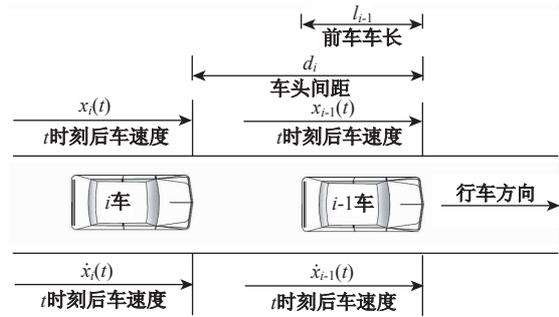


图 3 追尾冲突示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rear-end collision

若计算出的碰撞减速率超过了车辆本身可利用的最大减速率, 发生追尾事故是在所难免的。碰撞减速率可由前后 2 车的速度差 (Δv) 和时间差 (Δt) 来计算确定, 即:

$$a_{D_i} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i-1}(t))}{\Delta t}, \quad \forall \dot{x}_i(t) > \dot{x}_{i-1}(t), \quad (1)$$

式中, a_{D_i} 为第 i 辆车为避免追尾前车 (第 $i-1$ 辆车) 所需采取的减速率值; $\dot{x}_{i-1}(t)$ 和 $\dot{x}_i(t)$ 分别为 t 时刻前车和后车的速度。

Δt 可由车头间距 d_i 、相对速度以及前车长度 l_{i-1} 求得, 即:

$$\Delta t = \frac{d_i - l_{i-1}}{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i-1}(t)}, \quad \forall \dot{x}_i(t) > \dot{x}_{i-1}(t), \quad (2)$$

则:

$$a_{D_i} = \frac{[\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i-1}(t)]^2}{d_i - l_{i-1}}, \quad \forall \dot{x}_i(t) > \dot{x}_{i-1}(t). \quad (3)$$

3.2 改进的 a_D 算法

由于现场采集的交通流数据中只有车头时距 h_i 而没有车头间距 d_i , 因此, 需要确定 h_i 与 d_i 的关系, 从而对基本的 a_D 计算公式进行改进。车头间距 d_i 与车头时距 h_i 的关系可以描述为:

$$d_i = x_{i-1}(t) - x_i(t) = \dot{x}_i(t) \cdot h_i, \quad (4)$$

式中, $x_{i-1}(t)$ 和 $x_i(t)$ 分别为 t 时刻前车和后车在道路上的位置坐标。

此时改进的 a_D 计算公式为:

$$a_{D_i} = \frac{[\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i-1}(t)]^2}{\dot{x}_i(t)h_i - l_{i-1}}, \quad \forall \dot{x}_i(t) > \dot{x}_{i-1}(t). \quad (5)$$

3.3 基于 a_D 的追尾风险度计算方法

若前后 2 车保持原行驶状态不变, 当后车的 a_{D_i} 大于本身可用的最大减速率 a_M (Maximum Available Deceleration Rate, 简称 MADR) 时就会追尾前车。

a_M 是服从截断正态分布的随机变量, 此时后车追尾前车的风险度即为概率 $P(a_{M_i} < a_{D_i})$ 。由于第 i 辆车的后车(即第 $i+1$ 辆车)也可能与其发生追尾, 所以第 i 辆车发生追尾的风险度 R_i 为:

$$R_i = P(a_{M_i} < a_{D_i}) + P(a_{M_{i+1}} < a_{D_{i+1}})。 \quad (6)$$

若车辆 i 以合流方式插入前车 $j-1$ 和后车 j 之间, 此时 i 车发生追尾的风险即为车辆 i 追尾车辆 $j-1$ 的概率 $P(a_{M_i} < a_{D_i}^{j-1})$ 与车辆 j 追尾车辆 i 的概率 $P(a_{M_j} < a_{D_i}^j)$ 之和, 即:

$$R_i = P(a_{M_i} < a_{D_i}^{j-1}) + P(a_{M_j} < a_{D_i}^j), \quad (7)$$

式中, $a_{D_i}^{j-1}$ 和 $a_{D_i}^j$ 分别为 i 车避免追尾 $j-1$ 车和 j 车避免追尾插入车辆 i 的碰撞减速率。

引入运行状态变量 m_i 后 (m_i 取 0 或 1, 当 i 车为合流时, $m_i=0$; 当 i 车为跟驰等行驶状态时, $m_i=1$), 追尾风险度 R_i 可统一表示为:

$$R_i = m_i [P(a_{M_i} < a_{D_i}) + P(a_{M_{i-1}} < a_{D_{i+1}})] + (1 - m_i) [P(a_{M_i} < a_{D_i}^{j-1}) + P(a_{M_j} < a_{D_i}^j)]。 \quad (8)$$

3.4 应用 a_D 确定的施工作业区追尾风险度

应用改进的 a_D 计算公式(即式(5)), 逐一计算调查地点满足发生追尾条件的所有车辆的碰撞减速率值, 结果见图4。

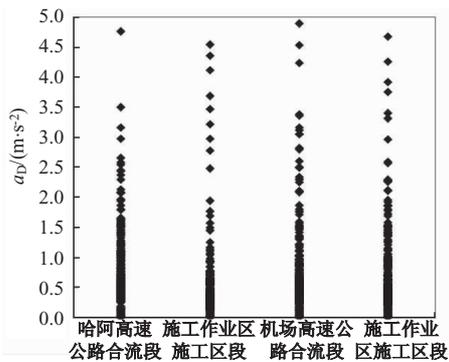


图4 调查地点 a_D 计算结果

Fig. 4 Calculation result of a_D at different survey sites

然后, 应用式(8)计算每辆车的追尾风险度值 R_i 。由于调查期间天气状况良好且路面干燥无冰雪, 参照 AASHTO 2004 的指南^[10]及 Cunto 等人的研究结果^[11], 该条件下 a_M 的概率分布见图5。对小型车、大型车及全部车型的追尾风险度值进行统计分析, 得到了相应风险度值的均值和方差, 结果见表2。

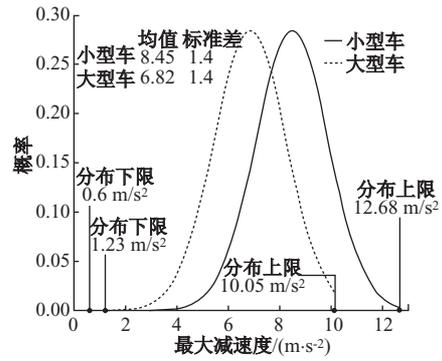


图5 大型车与小车型可用最大减速率的概率分布图

Fig. 5 Probability distribution of a_M for cars and trucks

表2 基于 a_D 的追尾风险统计结果

Tab. 2 Statistical result of rear-end collision risk based on a_D

车型	哈阿高速施工作业区		机场高速施工作业区		
	合流段	施工区段	合流段	施工区段	
小型车	均值	1.76E-06	1.24E-06	2.22E-04	7.85E-05
	标准差	8.21E-05	4.04E-05	1.03E-02	3.71E-03
大型车	均值	8.67E-07	1.23E-04	2.11E-05	7.59E-07
	标准差	9.27E-06	2.31E-03	1.83E-04	7.24E-06
全部车型	均值	1.54E-06	3.10E-05	2.06E-04	7.31E-05
	标准差	7.15E-05	1.15E-03	9.93E-03	3.58E-03

4 施工作业区追尾风险的突出影响因素识别

在确定了施工作业区追尾风险度的基础上, 需要进一步查明追尾风险的突出影响因素, 以便提出有针对性的安全对策来规避风险。

4.1 追尾风险的影响因素

本研究将追尾风险的可能影响因素归纳总结为2类11个具体指标, 2类是指宏观因素和微观因素。

(1) 宏观因素

指与施工作业区的类型、区段类型以及交通条件有关的因素, 具体包括以下5个指标:

- ① 施工作业区各区段的交通流量 Q ;
- ② 施工作业区各区段的平均速度 V ;
- ③ 大型车混入率 P_{hv} ;
- ④ 施工作业区段类型 L (施工区段 $L=1$, 合流段 $L=2$);
- ⑤ 施工作业区类型 T (单向超车道封闭施工作业区 $T=1$, 半幅路封闭施工作业区 $T=2$)。

(2) 微观因素

指与车辆个体有关的因素, 包括以下6个指标:

- ① 与前车的间距 $d_{前}$;

- ② 与后车的间距 $d_{后}$;
- ③ 前车的速度 $v_{前}$;
- ④ 本身车辆的速度 v ;
- ⑤ 后车的速度 v ;

⑥ 车辆本身的运行状态 m (取 0 或 1 的值, 合流时 $m=0$, 跟驰或其他状态时 $m=1$)。

4.2 追尾风险度与影响因素的关系模型研究

为了从不同侧面反映宏观影响因素或微观影响因素与追尾风险度的关系, 需建立以下 4 个关系模型。

模型 I: 半幅路封闭施工作业区宏观因素与追尾风险度关系模型; 模型 II: 单向超车道封闭施工作业区的宏观因素与追尾风险度关系模型; 模型 III: 引入施工作业区类型变量的宏观因素与追尾风险度关系模型; 模型 IV: 施工作业区微观影响因素与追尾风险度关系模型。

前 2 个模型用来标定流量 Q 、速度 V 、大型车混入率 P_{lv} 及作业区区段类型 L 与追尾风险之间的关系, 第 3 个模型在前 2 个模型的基础上又引入了施工作业区类型变量 T , 第 4 个模型用来标定 6 个微观因素与追尾风险度之间的关系。由于风险度的数值较小, 不利于模型标定和模型使用, 此处输出变量全部采用风险度的对数值, 即 $\ln R$ 。

4 个关系模型均可表示为风险度对数值与输入变量之间的线性组合, 即:

$$\ln R = \sum_{i=1}^N a_i x_i + b + \varepsilon, \quad (9)$$

式中, R 为追尾风险度; x_i 是第 i 个输入变量; a_i 、 b 为待标定系数和常数项; N 为变量总数; ε 为随机误差。

由于影响因素可能以 3 种状态影响追尾风险值, 即影响因素本身、影响因素的倒数及影响因素的对数, 因此每个影响因素将形成 3 个输入变量。就模型 I 和 II 而言, 影响因素是 4 个, 但输入量为 12 个, 分别是 Q 、 $1/Q$ 、 $\ln Q$ 、 V 、 $1/V$ 、 $\ln V$ 、 P_{lv} 、 $1/P_{lv}$ 、 $\ln P_{lv}$ 、 L 、 $1/L$ 、 $\ln L$ 。模型 III 影响因素为 5 个, 输入变量为 15 个。模型 IV 影响因素 6 个, 输入变量为 16 个 (这是因为车辆运行状态 m 不存在倒数和对数形式)。这样建模的好处是能明确影响因素以何种方式作用于追尾风险, 缺点是需较大的样本量。

模型的标定采用多元回归分析方法, 具体可应用 SPSS 等统计分析软件来实现。

4.3 基于灵敏度分析的突出影响因素识别方法

确定了影响因素与追尾风险度的关系后, 可通

过灵敏度分析来进一步确定追尾风险的突出影响因素。具体过程是: 针对某一关系模型, 通过组织一系列试验改变其中 1 个或多个变量值而其他变量不变进行试验来分析每个或组合变量对追尾风险的影响程度, 从而找出该关系中的突出变量, 进而确定突出影响因素。

4.4 突出影响因素识别案例分析

应用前述哈阿高速公路施工作业区和机场高速公路施工作业区追尾风险度的计算结果及其相关影响因素数据, 进行了突出影响因素识别案例分析。标定出的 4 个关系模型见式 (10)~(13), 模型检验结果见表 3。

表 3 关系模型相关检验参数表
Tab. 3 Related test parameters of relation models

		系数	标准误差	T	sig
模型 I	b	168.361	88.806	1.896	0.082
	P_{lv}	25.574	27.780	0.921	0.375
	$\ln L$	-9.021	2.639	-3.418	0.005
	Q	-0.199	0.093	-2.138	0.054
	$1/Q$	-43 720.585	20 594.570	-2.123	0.055
模型 II	b	3 846.183	1 554.607	2.474	0.090
	$\ln L$	5.648	1.739	3.248	0.048
	V	-20.515	8.280	-2.478	0.089
	$1/V$	-181 538.581	73 165.264	-2.481	0.089
	P_{lv}	8.186	55.243	0.148	0.892
模型 III	b	-2.419	67.197	-0.563	0.579
	$1/V$	900.265	0.481	2.930	0.008
	T	-21.081	989.962	-3.224	0.004
	L	-0.282	13.736	-0.180	0.859
	P_{lv}	37.545	1.600	1.369	0.185
模型 IV	b	-7.941	2.908	-2.731	0.010
	$d_{前}$	-0.081	0.013	-6.199	0.000
	$d_{后}$	-0.002	0.002	-1.057	0.298
	$v_{前}$	-0.354	0.042	-8.338	0.000
	v	0.288	0.041	7.016	0.000
	$v_{后}$	-0.037	0.028	-1.332	0.192
	m	-1.362	0.778	-1.751	0.089

模型 I:

$$\ln R = 168.361 - 0.199Q - 43 720.585/Q - 9.021 \ln L + 25.524 P_{lv}。 \quad (10)$$

$$\text{模型 II: } \ln R = 3 846.183 - 20.515V - 181 538.581/V + 5.648 \ln L + 8.186 P_{lv}。 \quad (11)$$

$$\text{模型 III: } \ln R = -2.419 + 900.265/V - 21.081T - 0.282 \ln L + 37.545 P_{lv}。 \quad (12)$$

模型 IV: $\ln R = -7.941 - 0.081d_{前} - 0.002d_{后} - 354v_{前} + 0.288v - 0.037v_{后} - 1.362$ 。(13)

基于上述4个关系模型,开展了一系列灵敏度分析工作,现将其中的主要成果汇总如下:

(1) 半幅封闭施工作业区的施工区段比合流区具有更大的追尾风险,因为当其他因素不变,只改变作业区段类型变量 L 时,施工区段的追尾风险高达合流段的 519.51 倍。

(2) 半幅封闭施工作业区的交通流率是一个突出影响因素,且当该流率为 470 veh/h 时追尾风险最高,由灵敏度分析确定的风险对数值与流率的关系见图 6 (a)。

(3) 单向超车道封闭施工作业区的合流区比施工区段具有更大的追尾风险,因为当其他因素不变只改变作业区段类型变量 L 时,合流区的追尾风险高达施工区段的 48 倍。

(4) 单向超车道封闭施工作业区的平均速度是一个突出影响因素,且平均车速在 94.07 km/h 时追尾风险最高,由灵敏度分析确定的平均车速与追尾风险对数值的关系见图 6 (b)。

(5) 半幅封闭施工作业区的追尾风险要略低于单向超车道封闭施工作业区。

(6) 用微观影响因素与追尾风险度关系模型进行的灵敏度分析发现,车辆运行状态是一个突出影响因素,每增加 1 次合流都会使追尾风险增大 3.9 倍。

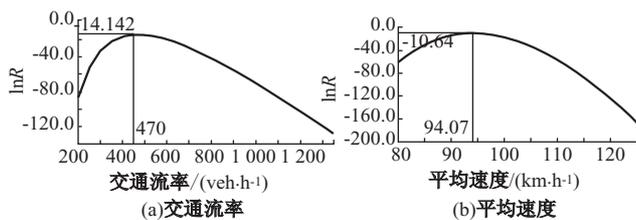


图 6 追尾风险与交流流率和平均速度的关系

Fig. 6 Relation between rear-end collision risk and traffic flow or mean speed

5 结论

改进的避免碰撞减速率计算公式及基于该减速率的追尾风险度计算方法可用于量化评估施工作业区的追尾风险。追尾风险度与追尾影响因素间的相关关系模型能直观地表达影响因素对追尾风险的作用方式,而基于这些相关关系模型所开展的系列灵敏度分析工作则能识别突出影响因素或查明各种组合因素对追尾风险的综合影响。

参考文献:

References:

- [1] SVENSSON A, HYDÉ C. Estimating the Severity of Safety Related Behavior [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2006, 38 (2): 379 - 385.
- [2] 罗石贵, 周伟. 路段交通冲突的调查技术 [J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2003, 23 (1): 71 - 75. LUO Shigui, ZHOU Wei. Survey Way of Road-traffic-conflict Technique [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2003, 23 (1): 71 - 75.
- [3] 蒋新春, 刘小明. 基于视频检测的高速公路车辆交通行为安全状态分析 [J]. *公路交通科技*, 2010, 27 (1): 122 - 125. JIANG Xinchun, LIU Xiaoming. Analysis of Vehicle Behavioral Safety on Freeway Based on Video Detection [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27 (1): 122 - 125.
- [4] VOGEL K. A Comparison of Headway and Time to Collision as Safety Indicators [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2003, 35 (3): 427 - 433.
- [5] MINDERHOUD M M, BOVY P H L. Extended Time-to-collision Measures for Road Traffic Safety Assessment [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2001, 33: 89 - 97.
- [6] MENG Qiang, WENG Jinxian, QU Xiaobo. A Probabilistic Quantitative Risk Assessment Model for the Long-term Work Zone Crashes [J]. *Accident Analysis and Prevention*. 2010, 42 (6): 1866 - 1877.
- [7] OH C, PARK S, RITCHIE S G. A Method for Identifying Rear-end Collision Risks Using Inductive Loop Detectors [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2006, 38 (2): 295 - 301.
- [8] HARB R, RADWAN E, YAN X, et al. Freeway Workzone Crash Analysis and Risk Identification Using Multiple and Conditional Logistic Regression [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2008, 134 (5): 203 - 214.
- [9] DAS A, ABDEL-ATY M, PANDE A. Using Conditional Inference Forests to Identify the Factors Affecting Crash Severity on Arterial Corridors [J]. *Journal of Safety Research*, 2009, 40 (4): 317 - 327.
- [10] American Association of State Highway and Transportation officials (AASHTO). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* [M]. Washington D. C.: AASHTO, 2004: 109 - 115.
- [11] CUNTO F, SACCOMANNO F F. Calibration and Validation of Simulated Vehicle Safety Performance at Signalized Intersections [J]. *Accident Analysis and Prevention*. 2008, 40 (3): 1171 - 1179.