

道路交通碰撞事故致因建模与影响因素试验分析

杨京帅 任书杭 马志政 王浩 罗钊

(长安大学汽车学院,西安 710064)

摘要: 为了分析交通情境与驾驶人因素导致道路交通碰撞事故的原因,采用智能群体建模、鱼骨图方法与试验测试相结合的方式,剖析了道路交通碰撞事故的致因及影响因素的显著性.模型分析结果表明,碰撞事故的致因取决于驾驶人对于交通情境危险信息及时准确的感知以及个体间的相对运动速度.交通情境中的危险识别率和发现时间百分位与危险的类别、交通情境的特点以及驾驶人的经验密切相关.潜在危险与实际危险在识别率与发现时间百分位上存在显著差异;动态危险的发现时间百分位小于静态危险;相比非熟练驾驶人,熟练驾驶人能够发现更多的危险信息,更快速地发现危险,并且对于交通情境的演变预测与判别更准确,具有更高的自信程度.

关键词: 交通工程;道路交通事故;鱼骨图;方差分析;驾驶人;危险感知

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2015)05-1008-05

Modeling of road traffic collision accidents' causes and experimental analysis of influential factors

Yang Jingshuai Ren Shuhang Ma Zhizheng Wang Hao Luo Tian

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to study the causes of road traffic collision accidents by traffic situations and driver factors, the causes of collision accidents and the significance of the influential factors were analyzed by combining intelligent swarm behavior modeling, fishbone diagram method and experiment testing. The model analysis results indicate that the causes of collision accidents depend on the ability of driver perceiving hazardous information in traffic situations timely and accurately and the relative velocity between different individuals. The hazards recognition ratio and the detection time percentile are related to the hazard types, the characteristics of traffic situations and drivers' experiences. There is significant difference of the hazards recognition ratio and the detection time percentile between latent hazards and factual hazards. Dynamic hazards can be found faster than statistic hazards. Compared with novice drivers, experienced drivers can find more hazardous information and find hazards faster. Besides, for experienced divers, the accuracy of forecasting and judging traffic situations development as well as the confidence are higher.

Key words: traffic engineering; road traffic accident; fishbone diagram; analysis of variance; driver; hazard perception

碰撞是交通事故的一种常见形态.在研究道路交通碰撞事故时,需要进行事故再现,即通过提取车辆轨迹、刹车痕迹、散落的碰撞物等数据,利用模

拟仿真或数学建模的方式,再现事故发生时的速度、碰撞形态等事故场景^[1],以作为事故责任认定与事故发生过程分析的重要参考依据.此外,还需

收稿日期: 2015-04-13. 作者简介: 杨京帅(1978—),男,博士,副教授,yangjingshuai78@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108040,51208052)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(310822151022,2014G1221014).

引用本文: 杨京帅,任书杭,马志政,等.道路交通碰撞事故致因建模与影响因素试验分析[J].东南大学学报:自然科学版,2015,45(5): 1008-1012. [doi:10.3969/j.issn.1001-0505.2015.05.033]

要进行碰撞或模拟碰撞试验^[2],基于碰撞结果的分析,提出车辆被动安全技术设计、乘员保护的方法等.在进行碰撞事故致因分析时,主要从车辆制动减速度、不同天气与路面条件下路面附着系数、驾驶人的制动反应时间等方面,研究车辆的制动停车安全距离与安全跟车距离.碰撞事故的影响因素分析则大多基于道路与环境等客观条件、驾驶人年龄、驾驶经验、身心条件等因素导致事故率的差异,统计分析道路、环境与驾驶人的规律性特征^[3-4].虽然碰撞事故的致因分析有助于预防或减少事故,但鉴于人-车-路-环境相互作用机理研究的复杂性,尤其是驾驶人行为反应的深层次原因难以捕捉与模拟,交通情境与驾驶人相互作用对碰撞事故发生的影响一直是研究难点.

驾驶人是道路交通系统的信息处理者和决策者,也是人-车-路-环境系统处于安全状态的调节者和控制者.随着新技术在道路交通安全系统中的逐步应用,驾驶人将成为最不可靠的因素,驾驶人导致事故的比例将会进一步增大^[5].对于驾驶人的超速^[6]或其他交通违法行为^[7-8]导致的碰撞事故,主要采用演化博弈的分析方法,分析行为产生的原因,分析前提是驾驶人感知到有效信息并有意为之,忽略了驾驶人因为感知迟滞或感知失误导致的碰撞.本文将从驾驶人的角度出发,忽略驾驶人故意违法行为,借鉴智能群体建模与鱼骨图方法来分析碰撞事故致因影响因素,基于交通情境与驾驶人的相互作用进行试验设计,测试分析影响因素的显著性.

1 碰撞事故致因建模

假设 n 维空间中存在由 m 个交通参与者个体组成的群体,个体 i 的位置由 $x^i \in \mathbf{R}^n$ 表示.假定每个交通参与者个体(本文以驾驶人为研究对象)的感知能力正常,即个体 i 和个体 j 之间能够相互感知到对方的存在和所在位置. $S = \{1, 2, \dots, m\}$ 表示所有驾驶人个体的集合.个体 i 视线范围内的所有个体集合定义为

$$A_i = \{j: \|x^i - x^j\| \leq \varepsilon, \forall j \in S\} \tag{1}$$

式中, ε 为驾驶人个体所能感知到的空间距离; $\|x^i - x^j\|$ 表示 n 维空间中任意 2 个坐标点之间的距离.

驾驶人个体 i 的安全运动区域(不会发生碰撞的区域)定义为

$$R_i = \{j: \rho < \|x^i - x^j\| < r, \forall j \in S, j \neq i\} \tag{2}$$

式中, r 为个体间对驾驶行为有影响的距离; ρ

为个体间的最小安全距离.

由于每个驾驶人个体都能够感知辨识交通情境信息并作出预测和相应的决策,驾驶人群体体现出智能性与环境适应性,群体既是一个多个体系统,又是一个复杂适应系统.驾驶人群体与自然界中的鸟群或鱼群一样,存在 2 种平衡且相互对立的行为:① 行进过程中期望向邻近个体靠近;② 避免与相邻的个体发生碰撞^[9].

根据上述假设条件以及智能群体的特点,构建如下的驾驶人个体运动控制方程:

$$\begin{aligned} X^i(t) &= g_a(x^i(t) - \bar{x}_{i0}(t)) + g_r(\min_{j \in R^i} \|x^i(t) - x^j(t)\|) \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{3} \\ g_a(x^i(t) - \bar{x}_{i0}(t)) &= -a(x^i(t) - \bar{x}_{i0}(t)) \quad a > 0 \tag{4} \end{aligned}$$

$$g_r(x^i(t) - x^j(t)) = \begin{cases} b \frac{(r - \|x^i(t) - x^j(t)\|)}{\|x^i(t) - x^j(t)\| - \rho} (x^i(t) - x^j(t)) & \rho < \|x^i(t) - x^j(t)\| < r \\ 0 & r \leq \|x^i(t) - x^j(t)\| \\ \infty & \|x^i(t) - x^j(t)\| \leq \rho \end{cases} \tag{5}$$

式中, $X^i(t)$ 表示 t 时刻驾驶人个体 i 在向目标位置移动过程中的所在位置; $\bar{x}_{i0} \in \mathbf{R}^n$ 表示驾驶人个体 i 视线范围内的运动目标位置; a 表示驾驶人个体间的相对运动速度,且 $a \geq 0$; b 表示驾驶人个体的感知水平(即识别、预测和评估危险情境的能力,体现在感知速度与准确度的高低),且 $b > 0$ ^[10-11],感知水平影响个体 i 的安全运动区域.

如果在驾驶人个体 i 的安全运动区域内,距离其最近的个体 j 处在 x^i 指向运动目标位置 \bar{x}_{i0} 的线段上,即个体 j 处在个体 i 向运动目标位置移动的线段上,则个体 i 靠近个体 j 的过程中要保持安全运动状态,个体 i 信息感知处理的速度快于个体 i 与个体 j 的相对运动速度 a ,则

$$b \frac{(r - \|x^i(t) - x^j(t)\|)}{\|x^i(t) - x^j(t)\| - \rho} > a \tag{6}$$

由模型(6)可得

$$\|x^i(t) - x^j(t)\| \leq \frac{a\rho + br}{a + b} \tag{7}$$

由模型(7)可知,当 b 值不变时, $\lim_{a \rightarrow 0} [(a\rho + br)/(a + b)] = r$; 当 a 值不变时, $\lim_{b \rightarrow \infty} [(a\rho + br)/(a + b)] = r$, 个体 i 与个体 j 的距离都趋近于 r . 即驾驶人个体的感知水平(感知速度与准确度)越高,个体相对运动速度越慢,驾驶人与其邻近个体的安全距离越趋近于 r , 越不容易发生碰撞事故.

另一方面,当 b 值不变时, $\lim_{a \rightarrow \infty} [(ap + br)/(a + b)] = \rho$; 当 a 值不变时, $\lim_{b \rightarrow 0} [(ap + br)/(a + b)] = \rho$, 个体 i 与个体 j 的距离都趋近于 ρ . 即驾驶人个体的感知水平越低, 个体相对运动速度越快, 驾驶人与其邻近个体的安全距离越趋近于最小安全距离 ρ , 越容易发生碰撞事故.

相对运动速度 a 受驾驶人行为、车辆、道路与交通条件等因素的影响^[12]. 本文仅对驾驶人的感知水平 b 的影响因素进行分析.

2 危险感知影响因素鱼骨图分析

随着驾驶行为研究的深入开展,对于危险感知的研究日益引起关注. 文献[13]指出,在与驾驶相关的所有技能中,只有危险感知是与交通事故密切相关的. 相关统计资料表明,驾驶人危险感知错误导致的交通事故约占事故总数的 40% ~ 45%, 与

驾驶人感知错误和判断错误有关的交通事故占事故总数的 80% ~ 85%^[14]. 英国及澳大利亚因此将危险感知测试作为获取驾照的必考科目之一^[15]. 图 1 为驾驶人信息感知处理模式. 由图可知,影响驾驶人及时准确地感知危险并做出相应行为反应的因素可能来自于危险信息、交通情境、干扰因素、驾驶人 4 个方面. 采用鱼骨图方法,将这 4 个方面的影响因素进行分解,通过头脑风暴找出所有可能的主要影响因素,结果见图 2.

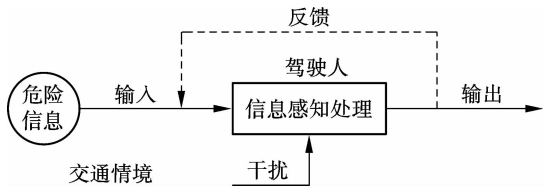


图 1 驾驶人信息感知处理模式

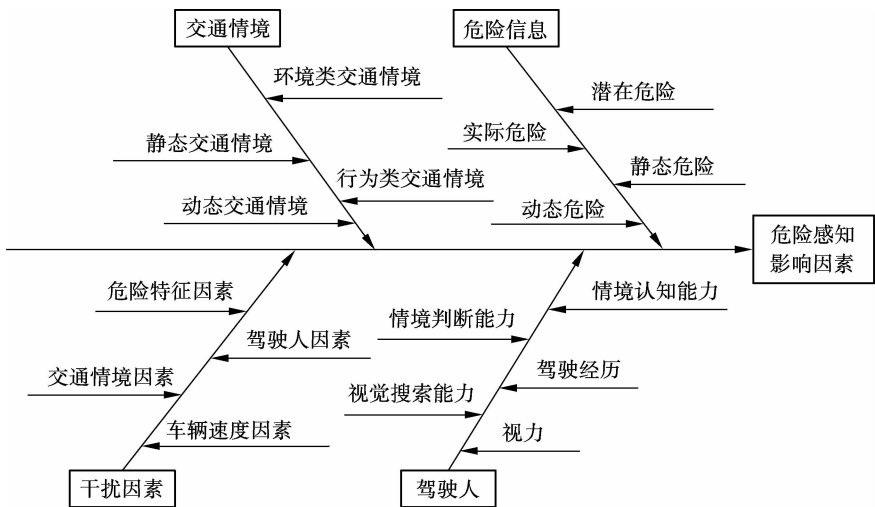


图 2 驾驶人危险感知影响因素鱼骨图

3 危险感知影响因素测试分析

基于鱼骨图分析结果,针对可能影响驾驶人危险感知的危险信息、交通情境、驾驶人与干扰因素进行试验设计,测试其是否对驾驶人危险感知有显著影响.

3.1 被试

试验选取 40 名被试驾驶人,所有被试驾驶人都视力正常或矫正视力正常. 考虑到驾驶经历、交通情境认知能力、交通情境判断能力等因素,将被试驾驶人分为 2 组,其中 20 名为熟练驾驶人,其驾驶里程超过 5×10^4 km,平均年龄 41.9 岁;另外 20 名为非熟练驾驶人,其驾驶里程小于 5×10^4 km,平均年龄 33.1 岁. 驾驶人的视觉行为通过佩戴眼

动仪进行测试.

3.2 试验场景设计

交通情境是从驾驶人视角截取的真实驾驶交通情境片段,本文共选取了 30 个交通情境进行测试. 交通情境划分为 2 类:① 静态环境类交通情境,例如路边停靠车辆后面可能走出的行人、前方支路可能出现的车辆等;② 动态行为类交通情境,例如路边启动的车辆、辅路驶入主路的车辆、换道和转弯车辆、行人穿越马路等. 危险目标物在交通情境中可能出现的区域被定义为潜在危险区域,危险目标物包括实际可能造成碰撞的车辆、行人等. 驾驶人注视到潜在危险区域并敲击空格键被认为感知到潜在危险,驾驶人注视到危险目标物并敲击回车键被认为感知到实际危险.

3.3 试验过程

试验采用 Eyelink II 型眼动仪,由眼动仪记录被试驾驶人注视眼动数据,采样频率为 250 Hz. 交通场景由戴尔 19 英寸(48.26 cm)纯平显示器呈现,被试驾驶人坐在距离显示器 70 cm 左右的位置处. 在正式测试之前,为每名驾驶人进行眼动仪佩戴测试,以便提取到眼动数据. 被试驾驶人的任务是观看交通情境,当发现交通情境中有潜在危险和实际危险时,分别敲击键盘的空格键和回车键. 潜在危险显示时间为潜在危险区域在画面开始出现到实际危险出现为止,实际危险显示时间为实际危险开始出现到车辆驶过实际危险为止.

正式测试之前,先进行 6 个交通情境的预测试. 正式测试完毕后,从测试的交通情境中选取 30 个画面,进行交通情境演变预测的问卷测评,让驾驶人对交通情境危险的可能演变趋势进行判断,对该判断是否正确的自信程度进行打分. 整个测试过程共计 50 min 左右,每个被试驾驶人生成一个数据文件. 试验结束后,用 Eyelink II 提供的数据分析软件将数据导出,然后对数据进行统计分析.

3.4 结果分析

对于敲击空格键的时间早于潜在危险区域被注视时间、敲击回车键的时间早于实际危险被注视时间或是危险点注视错误但是做出反应的数据进行了删除. 根据测试数据,进行了以下 2 项内容的分析:①不同驾驶人是否注视到潜在危险区域及危险目标物(即是否发现危险);②注视到潜在危险区域与危险目标物的快慢程度(即发现危险的速度).

用 2×2(熟练驾驶人与非熟练驾驶人,潜在危险与实际危险)对被试驾驶人是否发现危险以及发现危险的速度进行方差分析.

首先,对所有交通情境中的潜在危险区域与危险目标物是否被注视并做出反应进行统计,结果见表 1. 由表可知,驾驶人识别出实际危险的比例为 $(91.7\% + 69.4\% + 89.3\% + 80.6\%)/4 \approx 82.8\%$,识别出潜在危险的比例为 $(56.2\% + 58.4\% + 72.7\% + 41.1\%)/4 \approx 57.1\%$. 对潜在危险与实际危险识别率进行方差分析统计检验,组间与组内自由度分别为 1 和 38 的 F 检验统计量的值 $F(1,38) = 102.1$,对应的概率 $p < 0.01$,说明在 0.01 的显著性水平下,驾驶人对潜在危险与实际危险的识别率有显著差异,即驾驶人更容易发现看得见的危险. 相比非熟练驾驶人,熟练驾驶人发现了更多的潜在危险和实际危险,对熟练驾驶人与非

熟练驾驶人的危险识别率进行方差分析统计检验, $F(1,38) = 9.3, p < 0.01$,说明在 0.01 的显著性水平下,熟练驾驶人与非熟练驾驶人的危险识别率有显著差异,即熟练驾驶人显示出更高的危险感知水平.

表 1 驾驶人对潜在危险与实际危险的识别率 %

危险类别	静态环境类交通情境		动态行为类交通情境	
	熟练驾驶人	非熟练驾驶人	熟练驾驶人	非熟练驾驶人
潜在危险	56.2	58.4	72.7	41.1
实际危险	91.7	69.4	89.3	80.6

对驾驶人在静态环境类交通情境与动态行为类交通情境的危险发现时间百分位进行统计,结果见表 2. 驾驶人注视到潜在危险区域与危险目标物的快慢程度用驾驶人第 1 次注视到危险所需时间与该危险画面总持续时间的比值来表示. 显然,该比值越小,表明驾驶人越早注视到该危险. 由表 2 可知,驾驶人对动态行为类交通情境的危险发现时间百分位比静态环境类交通情境的危险发现时间百分位快,对 2 种交通情境的危险发现时间百分位进行方差分析统计检验, $F(1,38) = 21.1, p < 0.01$,说明在 0.01 的显著性水平下,不同交通情境的危险发现时间百分位有显著差异;驾驶人对实际危险的发现时间百分位 $((23.7\% + 48.2\% + 22.2\% + 41.8\%)/4 \approx 34.0\%)$ 比潜在危险的发现时间百分位 $((65.6\% + 73.3\% + 41.3\% + 74.4\%)/4 \approx 63.7\%)$ 快,潜在危险与实际危险的发现时间百分位方差分析统计检验结果表明 $F(1,38) = 189.3, p < 0.01$,说明在 0.01 的显著性水平下,驾驶人对潜在危险与实际危险的发现时间百分位有显著性差异;相比非熟练驾驶人,熟练驾驶人能够更快速地发现危险,熟练驾驶人的平均发现时间百分位为 $(65.6\% + 23.7\% + 41.3\% + 22.2\%)/4 \approx 38.2\%$. 对熟练驾驶人与非熟练驾驶人的危险发现时间百分位进行方差分析统计检验, $F(1,38) = 15.7, p < 0.01$,说明在 0.01 的显著性水平下,熟练驾驶人与非熟练驾驶人的危险发现时间百分位有显著性差异.

表 2 驾驶人在不同交通情境的危险发现时间百分位 %

驾驶人类别	静态环境类交通情境		动态行为类交通情境	
	潜在危险	实际危险	潜在危险	实际危险
熟练驾驶人	65.6	23.7	41.3	22.2
非熟练驾驶人	73.3	48.2	74.4	41.8

在驾驶人就交通情境演变预测的问卷测评中,对交通情境的演变预测完全正确为 10 分,熟练驾驶人与非熟练驾驶人的理解力分值分别为 8.87 和

7.85,对熟练驾驶人与非熟练驾驶人的理解力分值进行方差分析统计检验, $F(1,38) = 20.4, p < 0.01$,说明在0.01的显著性水平下,熟练驾驶人与非熟练驾驶人对交通情境的理解力有显著差异,熟练驾驶人显示了更好的交通情境阅读理解能力.对所回答问题是否正确的自信程度进行打分(满分为10分),熟练驾驶人与非熟练驾驶人的自信分值分别为7.96和7.07.对熟练驾驶人与非熟练驾驶人的自信分值进行方差分析统计检验, $F(1,38) = 14.1, p < 0.01$,说明在0.01的显著性水平下,熟练驾驶人与非熟练驾驶人的自信程度有显著差异,熟练驾驶人相比非熟练驾驶人的自信程度更高.

4 结论

1) 由碰撞事故致因模型可知,驾驶人维持安全驾驶状态取决于驾驶人的危险信息感知能力和个体间的相对运动速度.相对运动速度的大小是危险感知的行为体现,危险信息感知水平是安全驾驶状态的主要决定因素.

2) 熟练驾驶人与非熟练驾驶人均存在危险信息遗漏现象,熟练驾驶人相比非熟练驾驶人能够发现更多的危险信息,体现了熟练驾驶人具有更高的危险感知能力;交通情境中的潜在危险相比看得见的危险更不易被发现.在危险的发现时间百分位方面,驾驶人对于动态危险的发现时间百分位小于静态危险;对实际危险的发现时间百分位比潜在危险的发现时间百分位要快得多;熟练驾驶人比非熟练驾驶人能更快速地发现危险.此外,熟练驾驶人对于交通情境的演变预测与判别更准确,并具有更高的自信程度($p < 0.01$).

参考文献 (References)

- [1] 刘志强,汪澎,张建华,等.交通事故再现技术研究现状与发展趋势[J].中国安全科学学报,2007,17(4): 16-20.
Liu Zhiqiang, Wang Peng, Zhang Jianhua, et al. Review of traffic accident reproduction technology and its developing trend[J]. *China Safety Science Journal*, 2007, **17**(4): 16-20. (in Chinese)
- [2] 孙振东,刘玉光,朱西产.不同形式的汽车正面碰撞试验研究及分析[J].汽车工程,2006,28(7):652-655.
Sun Zhendong, Liu Yuguang, Zhu Xichan. A study on some typical vehicle frontal crash test programs[J]. *Automobile Engineering*, 2006, **28**(7): 652-655. (in Chinese)
- [3] Underwood G, Ngai A, Underwood J. Driving experience and situation awareness in hazard detection[J]. *Safety Science*, 2013, **56**(1): 29-35.
- [4] Borowsky A, Oron-Gilad T, Parmet Y. Age and skill differences in classifying hazardous traffic scenes[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2009, **12**(4): 277-287.
- [5] Hudoklin A, Rozman V. Human errors versus stress[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1992, **37**(3): 231-236.
- [6] 李振龙,张利国.超速驾驶行为的演化博弈[J].交通运输系统工程与信息,2010,10(4):137-142.
Li Zhenlong, Zhang Ligu. Evolutionary game of speeding driving behavior[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, **10**(4): 137-142. (in Chinese)
- [7] 余孝军,罗玲玲,王双.基于进化博弈的交通安全分析[J].西南师范大学学报:自然科学版,2013,38(6):35-41.
Yu Xiaojun, Luo Lingling, Wang Shuang. On analysis of traffic safety based on evolutionary game[J]. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition*, 2013, **38**(6): 35-41. (in Chinese)
- [8] Yang J S, Hu H, Hu D W, et al. Road traffic safety system stability based on driving behaviors double feedback control[J]. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 2013, **5**(8): 807-815.
- [9] 陈世明,方华京.大规模智能群体的建模及稳定性分析[J].控制与决策,2005,20(5):490-494.
Chen Shiming, Fang Huajing. Modeling and stability analysis of large-scale intelligent swarm[J]. *Control and Decision*, 2005, **20**(5): 490-494. (in Chinese)
- [10] Borowsky A, Oron-Gilad T, Meir A, et al. Drivers' perception of vulnerable road users; a hazard perception approach[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2012, **44**(1): 160-166.
- [11] Scialfa C T, Borkenhagen D, Lyon J, et al. A comparison of static and dynamic hazard perception tests[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2013, **51**: 268-273.
- [12] 李杨.高速公路可变速度控制方法研究[D].西安:长安大学公路学院,2011.
- [13] McKnight A J, McKnight A S. Young novice drivers: careless or clueless[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2003, **35**(6): 921-925.
- [14] 郑东鹏.驾驶人危险感知及影响因素研究[D].上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2013.
- [15] Scialfa C T, Deschênes M C, Ference J, et al. A hazard perception test for novice drivers[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2011, **43**(1): 204-208.