

考虑驾驶员行为的车辆防撞系统仿真评价

李聪颖¹, 蔡光林², 朱彤²

1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055

2. 长安大学汽车学院, 西安 710064

摘要 为评价车辆防撞警告算法的有效性,建立了以有效警告率、误警率等为主要评价指标的评价体系。根据实际道路交通情况,设计仿真场景,根据有无防撞警告系统条件设计实验组与对照组。采用 Visual Basic 2005 对微观交通仿真软件 VISSIM 进行二次开发,实现了警告算法仿真评价平台,实现了 VB 端参数输入、仿真结果输出以及指标自动统计等功能。实验中考虑了驾驶员反应时间与车辆减速度不同带来的影响。在仿真平台上,以 Honda 与 PATH 两种警告算法为例,进行仿真评价分析与比较。实验结果表明,前者有效警告率较低,而后者有效警告率较高,但同时误警率也较高。上述结论与相关研究一致,表明该评价方法能够对各种警告算法进行有效而低成本的定量分析评价。

关键词 车辆防撞警告系统;警告算法;评价方法;评价指标;仿真

中图分类号 U491

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.18.006

Simulated Evaluation of Vehicle Collision Warning System Taking Account of Driver's Behavior

LI Congying¹, CAI Guanglin², ZHU Tong²

1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract In order to evaluate vehicle collision avoidance systems, and to optimize the warning algorithm, this paper proposes a serial of indexes, including the effective warning rate and the wrong warning rate. According to the actual road conditions, simulation scenarios and experimental procedures are designed, for the experimental group and the control group, with and without warning system. A simulation evaluation method is used to obtain the corresponding indexes. According to the method, a platform for the warning algorithm simulation evaluation is built by the secondary development of the microscopic traffic simulation software VISSIM based on Visual Basic 2005. Various functions are implemented, including the parameter input, the result output at the VB port, the simulation process control, and the automatic statistical analysis. Honda and PATH algorithms are evaluated on the platform. It is shown that the latter algorithm has a higher effective warning rate and lower wrong warning rate as compared with the former one. The evaluation results are consistent with other related studies, which shows that the method is an effective quantitative analysis evaluation method with a low cost for warning algorithms.

Keywords vehicle collision avoidance system; warning algorithm; evaluating method; evaluating index; simulation

0 引言

车辆防撞警告系统通过信息技术感知外界环境,能够在碰撞发生前对驾驶员做出警告,从而有效缓解事故乃至避免事故的发生。

近年来,关于防撞警告系统的研究日渐增多,日本 ASV (Advanced Driver Assistance System), 美国 CAS (Crash

Avoidance System)、IVI (Intelligent Vehicle Initiative) 与 IVBSS (Integatered Vehicle-Based Safety System) 研究计划等在该领域不断推进^[1]。国内亦进行了探索研究,包括清华大学汽车安全与节能国家重点实验室的主动避撞智能车、同济大学的智能车路系统平台,交通运输部公路科学研究院、长安大学、吉林大学也进行了相关研究。各种系统分别基于试验数据或运

收稿日期: 2010-04-01;修回日期: 2011-05-30

基金项目: 西安建筑科技大学青年科技基金项目(QN1114);西安建筑科技大学学科重点培育计划人才培养专项(XK201101)

作者简介: 李聪颖,讲师,研究方向为交通安全、交通规划,电子邮箱: zhutongecho@tom.com

动学分析建立了各种警告算法^[2-4]。如何对这些算法进行评价、比选,成为重要研究内容。

现有的评价方法中主要包括原型系统道路测试法、驾驶模拟器评价方法与仿真评价方法。原型系统测试实施成本高,宜在产业化阶段之前实施;驾驶模型器设备昂贵,也难以实现。如直接采用系统仿真技术,可降低研究成本但难以考虑驾驶员行为带来的影响。

据此,本文提出了基于微观交通仿真的低成本定量评价方法,设计了一系列仿真评价指标,通过对常用的微观交通仿真软件二次开发建立平台,且在仿真中纳入了以往研究中没有考虑过的反应时间和车辆减速的分布特性,使之与现实道路交通运行更为相符。最后,以 PATH(California Partners for Advanced Transit and Highways)和 Honda 两种跟车警告算法为实例进行评价并与相关研究结论进行比较分析。

1 车辆防撞警告系统工作原理

各种类型的警告系统在信息采集方式、算法逻辑和警告形式设计方面存在差异,但工作原理具有一定的共性。

以跟车警告系统为例,工作原理可归纳为:通过各种传感器,以一定时间间隔实时采集跟随车辆与前方车辆速度、位置信息,并处理成相对速度、跟车距离等参数,输入防撞警告处理器,警告处理器通过其加载的警告算法,实时检测并评价潜在危险程度。若检测到危险,则启动语音、图像警告,提醒驾驶员即时采取相关措施,为驾驶员获得更加充分的反应时间,从而减缓、避免事故的发生。

其中,处理器中运行的警告算法,是系统的核心部分。警告算法的质量直接影响到警告系统的效果。警告系统的一般工作原理如图 1 所示。

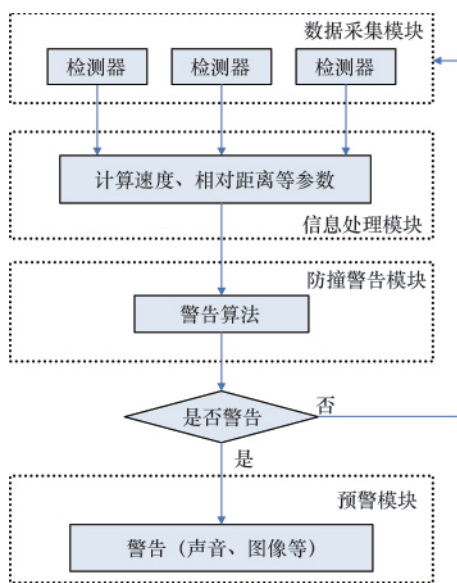


图 1 警告系统工作原理
Fig. 1 Principle of warning system

2 评价方法

2.1 实验组与对照组设计

在仿真试验中,将两辆车的物理距离为 0 的情况定义为碰撞。在交通场景中重新设置仿真软件参数,使仿真中的车辆有发生碰撞的可能。为了评价警告系统的效果,在仿真中设置了实验组与对照组,并进行比较分析。其中,对照组没有采用警告系统,车辆的运动根据仿真软件自身的跟车模型进行,当两辆车之间的物理距离为 0 时,输出“true”,表明发生碰撞。否则,输出“未碰撞”;实验组采用与对照组相同的道路条件以及其他初始交通条件与仿真环境,当满足一定条件时发出警告,此后接到警告的跟随车驾驶员在经过反应时间后,采取相应的避险行为,即以一定的加速度减速,反应时间和车辆减速度值均为服从经验分布的随机值,实验组将输出“警告”以及碰撞的详细信息。

每一次在仿真平台中运行对照组或实验组,得到的仿真结果数据称为单次仿真实验结果。表 1 给出了实验组某次仿真实验结果,包括基本实验参数、警告信息输出和碰撞信息输出 3 部分,对照组只有基本实验参数而没有警告信息。

表 1 单次仿真实验结果
Table 1 Result of single simulation

数据类型	数据名称	实验结果
基本实验参数	仿真编号	254
	仿真种子	1
	其对照组是否碰撞	true
	引导车初始速度/(m·s ⁻¹)	7.20381
	跟随车初始速度/(m·s ⁻¹)	154.7269
	初始跟车距离/m	200
	驾驶员反应时间/s	2.0
警告信息输出	跟随车最大加速度/(m·s ⁻²)	5.9215
	是否警告	true
	警告时仿真时间	0.3
	警告时引导车速/(m·s ⁻¹)	2.014
	警告时跟随车速/(m·s ⁻¹)	42.9997
碰撞信息输出	警告时跟车距离/m	195.9018
	是否碰撞	true
	碰撞时仿真时间/s	6.4
	碰撞时引导车速/(m·s ⁻¹)	2.6519
	碰撞时跟随车速/(m·s ⁻¹)	5.9014

2.2 评价指标

本研究以正确警告率、有效警告率、漏警率、误警率 4 项指标评价警告系统的优劣^[9]。定义如下。

正确警告率 P_R (probability of right alert),是指系统在车辆将会发生碰撞的情况下,碰撞之前发出警告的概率。正确警告率越大,系统性能越好。其计算公式为

$$P_R = E_{GW} / C_{GC} \quad (1)$$

其中, E_{GW1} 为对照组碰撞情况下实验组发出过警告的实验次数, C_{GC} 为对照组碰撞的实验次数。

有效警告率 P_E (probability of effective alert), 是指系统在车辆将会发生碰撞的情况下, 碰撞之前发出警告, 并且警告后碰撞得到避免的概率。有效警告率是最重要的评价指标, 其值越大, 系统性能越好。显然, 有效警告率小于等于正确警告率。有效警告率的计算公式为

$$P_E = E_{NWC} / C_{GC} \quad (2)$$

其中, E_{NWC} 为对照组碰撞情况下, 实验组未碰撞的实验次数。

漏警率 P_M (probability of miss alert), 是指系统在碰撞发生前, 没有发出警告的概率。漏警率越大, 系统性能越差。可知漏警率与正确警告率之和为 1。漏警率的计算公式为

$$P_M = E_{GNW1} / C_{GC} \quad (3)$$

其中, E_{GNW1} 为对照组碰撞情况下, 实验组未警告的实验次数。

误警率 P_W (probability of wrong alert), 定义为系统在不会发生碰撞的情况下, 发生警告的概率。误警对驾驶员造成干扰, 降低驾驶质量, 影响系统性能。误警率的计算公式为

$$P_W = E_{GNW2} / C_{GNC} \quad (4)$$

其中, E_{GNW2} 为对照组未碰撞情况下, 实验组未碰撞的实验次数; C_{GNC} 为对照组未碰撞的实验次数。

各指标关系如表 2 括号中所示。

表 2 评价指标之间的关系
Table 2 Relationship between evaluation indexes

仿真次数	对照组情况	实验组警告情况	实验组碰撞情况
总次数 T_s	对照组碰撞次数 C_{GC}	实验组警告次数 E_{GW1}	实验组未碰撞次数 E_{NWC} (有效警告率 $P_E = E_{NWC} / C_{GC}$)
		实验组未警告次数 E_{GNW1}	(漏警率 $P_M = E_{GNW1} / C_{GC}$)
	对照组未碰撞次数 C_{GNC}	实验组警告次数 E_{GW2}	实验组未警告次数 E_{GNW2}
			(误警率 $P_W = E_{GNW2} / C_{GNC}$)

4 项主要评价指标全面反映了警告系统的性能质量, 正确警告率反映了系统对风险的判断水平, 有效警告率不仅反映了风险判断水平, 还反映了算法触发警告的时机是否合适, 误警率则考查警告是否过于频繁。

2.3 评价流程

本文提出的评价流程如图 2 所示。

步骤 1 设定模拟场景。主要包括道路模型、车辆模型交通条件以及环境条件的设置。

步骤 2 参数设定。通过仿真参数的重新设定, 如更改跟车模型中的可视距离参数等, 模拟各种危险的驾驶情形。

步骤 3 运行仿真。对照组仿真输出没有加载警告算法情形下车辆是否碰撞的结果。实验组仿真输出是否警告、是否碰撞以及警告、碰撞时刻的详细信息。

步骤 4 累计评价指标。根据各次仿真运行的实验结果, 计算正确警告率、有效警告率、漏警率和误警率 4 项评价指标。

步骤 5 若达到仿真次数, 输出统计、分析评价指标以及其他数据信息, 否则转步骤 3。

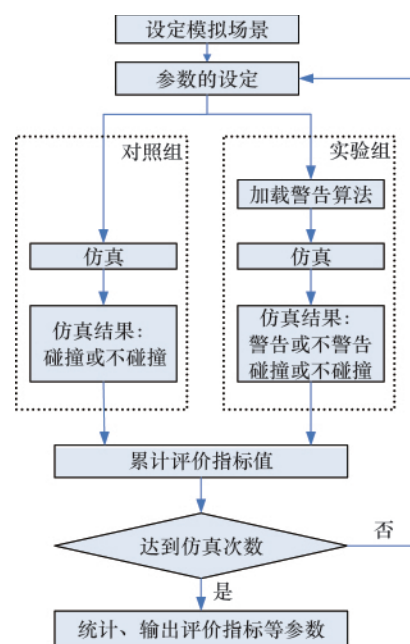


图 2 算法流程

Fig. 2 Flowchart of the algorithm

3 仿真平台的设计与实现

3.1 开发软件选择

VISSIM 是德国 PTV 公司开发的交通微观仿真软件, 该软件基于时间步长和驾驶员行为, 采用了德国 Karlsruhe 大学 Wiedemann 教授的“生理-心理”跟车模型, 在交通领域得到广泛应用。仿真模型中默认的参数, 容许高级用户根据需要对其修改。通过改变跟车模型参数, 可以模拟各种危险驾驶的情景, 如本研究将可视距离由默认值 250m 更改为 40m, 以模拟烟雾天气造成能见度降低引起的危险驾驶^[6-8]。

另一方面, VISSIM 模型提供了供外部程序调用的接口 VISSIM_COM, 使得外部程序语言实时调用 VISSIM 程序以及模型里的各类子模型, 从而使实现对 VISSIM 的二次开发成为可能。

3.2 平台工作原理

仿真平台工作原理示意如图 3 所示, 仿真平台共包括 VISSIM 与 VB 两部分。

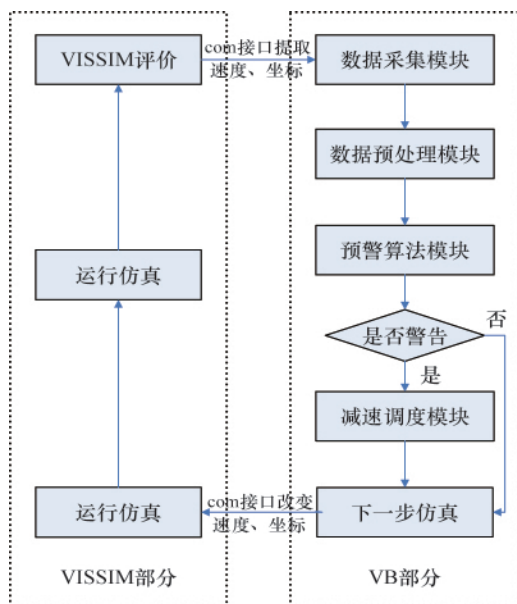


图3 仿真平台工作原理示意

Fig. 3 Principle diagram of simulation platform

VISSIM 部分的主要任务是根据其自身的“生理-心理”跟车模型模拟城市道路上车辆的运行。

VB 部分主要实现对警告算法的模拟。在 VB 部分,利用 VISSIM 提供的 VISSIM_COM 接口对其进行二次开发,实现对其中车辆信息(速度、坐标)的实时提取,以模拟警告系统中的数据采集。信息预处理模块对坐标等信息进行计算,得到实时速度、跟车距离等参数,并可模拟各参数的精度。处理后的信息送入警告算法模块判断是否警告。警告算法模块中加载待评价的算法。若算法判断不需要警告,则进入下一步仿真步长仿真;若算法判断需要警告,则系统调用减速调度模块,模拟驾驶员接到警告后的减速行为:驾驶员接到警告以后,首先经历反应时间,然后以一定的加速度减速。减速过程通过 VB 实时改变车辆的速度与坐标实现:每一时刻的速度、加速度由 VB 自行计算,将计算结果(速度、加速度)直接写回 VISSIM 中,直接调度车辆实现。因此,接到警告以后的车辆运动行为,没有采用 VISSIM 的跟驰模型,而由 VB 实现。通过 VISSIM 与 VB 的“软件在环”,模拟警告系统的工作过程。

3.3 软件功能实现

通过 `V_lead=vissim.vehicle.getvehiclenemberby(1)` 等代码实现对 VISSIM 模型中速度、加速度等信息的提取;通过 `vissim.vehicle.getvehiclenemberby(2).("SPEED")=v_follow` 等代码实现对 VISSIM 模型中车辆的实时调度。通过编程实现从 VB 端进行参数输入,控制仿真进行,仿真结果输出以及指标自动统计等功能。

4 实例评价

4.1 评价算法简介

已有的警告算法主要分为两类,一类通过提取实验数据

获得,另一类基于运动学分析获得。本文从两类警告算法中,各取一种典型代表作为待评价算法,日本本田汽车公司(Honda)研制的警告算法(以下简称算法 A)和美国加州大学伯克利分校 PATH 项目研制的算法(以下简称算法 B),分别进行仿真测试评价与比较。

算法 A 基于实验数据,得出关键跟车距离为

$$d_w = 2.2v_{rel} + 6.2 \quad (5)$$

其中, v_{rel} 为跟随车与引导车的速度差(m/s)。

车辆之间的关键距离由式(5)计算,当检测到的两车间的距离小于关键跟车距离时,系统启动警告。

算法 B 基于运动学理论分析,得出关键距离的计算公式为

$$d_w = \frac{1}{2} \left[\frac{v^2}{\alpha} - \frac{(v-v_{rel})^2}{\alpha} \right] + v\tau + d_0 \quad (6)$$

其中, d_0 为车头间距偏差, v 为跟随车的速度(m/s), v_{rel} 为跟随车与引导车之间的速度差(m/s), α 为跟随车的最大加速度(m/s²), τ 为驾驶员和系统总延迟(s)。

算法 B 提出以警告值 w 为指标判断是否警告。 w 的计算公式为

$$w = \frac{d - d_w}{d_w - d_{lr}} \quad (7)$$

其中, d_{lr} 为关键制动距离,由下式计算:

$$d_{lr} = v_{rel}\tau + \frac{1}{2}\alpha\tau^2 \quad (8)$$

w 越小,则碰撞风险越大。 $w > 1$ 意味着车辆处于安全状态。当 w 小于某一阈值(本实验参考文献[5],设定阈值为 0.2)时,系统启动警告。

4.2 实验设计

4.2.1 实验场景设计

在城市道路上,前方可视距离为 40m,行驶着引导车与跟随车。各以其期望速度(初始速度)行驶。跟随车在与引导车的距离小于可视距离时,方进入跟车状态。此场景的设置通过对 VISSIM 中跟车模型的可视距离参数的重新标定完成。实验场景参数包括:引导车初始速度在 5—10m/s 区间内随机取值,跟随车初始速度在 60—140m/s 内均匀取值,初始跟车距离为 200m。

4.2.2 实验次数确定

实验次数由所需要达到的精度决定。仿真次数越大,指标精度越大,但是仿真需要花费的时间也越长,因此需要平衡考虑。本研究每仿真一次,统计一次各指标值,得到各指标值随仿真次数增加的波动情况如图 4 所示。

从图中明显看出:在仿真次数较小时,指标值的波动较大,随着仿真次数的增加,指标值渐渐趋于平稳,当仿真次数达到 700 时,各指标基本趋于平稳,精度达到要求。因此,以后的仿真测试实验中,对于每一种算法的仿真测试,其仿真次数初步确定为 700 次。

4.2.3 其他参数设定

跟随车在收到警告以后,需要经过反应时间才会采取减速措施。此反应时间由驾驶员的疲劳程度、性别、年龄等诸多

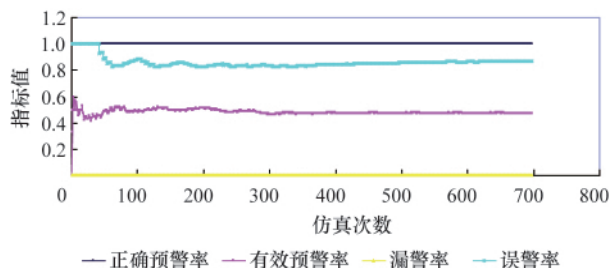


图4 指标精度与仿真次数的关系

Fig. 4 Relationship between the index accuracy and the number of simulation times

因素影响。本实验采用反应时间分布^[9]描述这种差异,如图5所示。

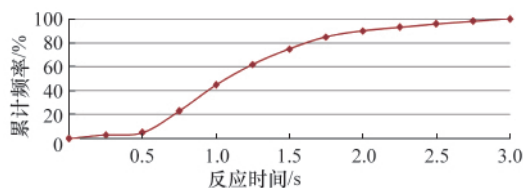


图5 反应时间分布

Fig. 5 Distribution of reaction time

跟随车的最大加速度值取均匀分布 $R(0.5g, 0.8g)^{[9]}$, 其中 g 为重力加速度, 取 9.8m/s^2 。

4.3 评价结果及分析

4.3.1 指标值的分析

依次对两个待评价算法进行仿真测试评价, 得到评价指标如图6所示。

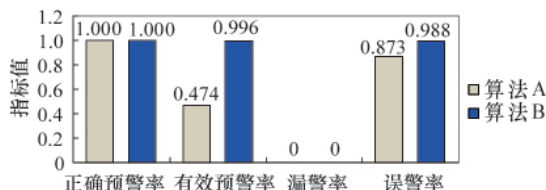


图6 评价指标的比较

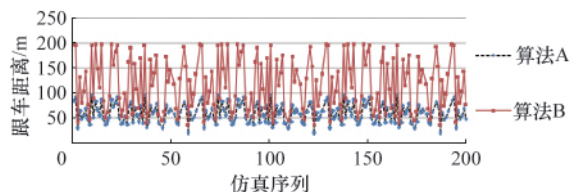
Fig. 6 Comparison of evaluation index

图6表明, 算法A与算法B的正确警告率都为1.0, 漏警率都为0。算法A的有效警告率明显低于算法B (0.474与0.996), 从这一角度分析, 算法B明显优于算法A。从误警率指标来看, 算法A的误警率小于算法B (0.873与0.987), 算法A略优于算法B。综合分析, 算法A太过于冒险, 有效警告率过低; 而算法B比较保守, 有效警告率较高, 但是误警率也较高。综合分析, 算法B比算法A更保守。这与文献[5]的研究结论是一致的, 也表明了评价方法的有效性。而文献[5]是通过实车测试获得结论, 其成本显然高于本文提出的仿真方法。

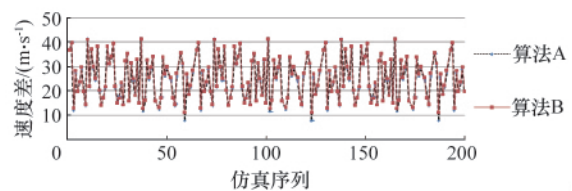
4.3.2 产生警告时的情况

各次警告发生时, 跟车距离和前后车速度差如图7所

示。结果表明, 在警告时, 算法A的跟车距离一般小于算法B, 且波动较小; 算法A与算法B警告时速度差较一致。算法A在跟车距离较小的情况下才警告, 表明其为冒进型算法, 警告过晚导致其有效警告率较低。算法B警告时跟车距离波动较大, 一个可能原因是它能够进一步考虑速度因素, 这也是其有效警告率较高的一个可能原因。



(a)



(b)

图7 评价结果: 跟车距离(a)与速度差(b)

Fig. 7 Evaluation results: Car-following distance (a) and velocity difference (b)

表3列出两种算法的各项平均值, 可以看出, 算法A在警告时, 平均跟车距离远小于算法B, 而前后两车的速度以及速度差都略大于算法B。

表3 警告时相关评价参数平均值比较

Table 3 Evaluation parameters related to the average warning time

算法	跟车距离/m	跟随车车速 $/(m \cdot s^{-1})$	引导车车速 $/(m \cdot s^{-1})$	速度差 $/(m \cdot s^{-1})$
算法A	61.273	28.022	2.436	25.586
算法B	116.538	27.391	2.281	25.104

4.3.3 产生碰撞时情况

警告后依然可能发生碰撞。其碰撞时刻的速度差, 直接决定了事故的严重程度。各次仿真测试实验中, 不同警告算法下的碰撞时刻速度差如图8和表4所示。可以看出, 算法A

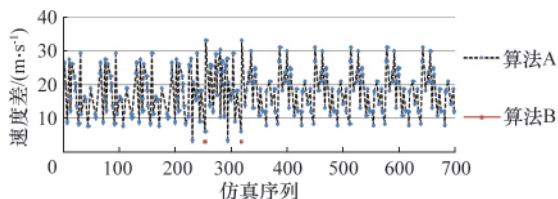


图8 碰撞时速度差比较

Fig. 8 Velocity difference at collision time

