

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106202

考虑自车速度因素的动态前撞预警模型研究*

林睿¹ 田顺¹ 马浩越² 刘晶郁¹

(1.长安大学汽车学院 西安 710064; 2.上海汽车集团股份有限公司乘用车公司 上海 201804)

摘要:为了解决传统固定碰撞时间(TTC)阈值预警模型在较高车速工况下容易出现预警不及时等问题,提出一种考虑自车速度因素的前撞预警系统。在传统碰撞时间预警模型的基础上,引入速度因子对模型进行优化,形成动态TTC预警模型;利用PreScan/Simulink联合仿真数据对速度因子进行曲线拟合;最后针对前车紧急制动工况,利用PreScan/Simulink软件对传统预警模型与动态TTC预警模型进行对比仿真实验。结果表明,固定TTC阈值预警模型预警成功率为80.28%,而动态TTC预警模型成功率为96.94%,验证了该方法的有效性。

关键词:防撞预警;模型优化;速度因子;PreScan;Simulink

中图分类号: U461.91 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.2010

Research on dynamic front collision early warning model considering self-vehicle speed

Lin Rui¹ Tian Shun¹ Ma Haoyue² Liu Jingyu¹

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Shanghai Automotive Group Co., Ltd. Passenger Vehicle Company, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional fixed time to collision (TTC) threshold early warning model is prone to early warning under higher speed conditions, proposes a forward collision warning system that considers the speed of the vehicle. On the basis of the traditional collision time warning model, the speed factor is introduced to optimize the model to form a dynamic TTC warning model, use PreScan/Simulink co-simulation data to curve the speed factor. Finally, for the emergency braking condition of the preceding vehicle, use the PreScan/Simulink software performs comparative simulation experiments on the traditional early warning model and the dynamic TTC early warning model. The results show that the early warning success rate of the fixed TTC threshold early warning model is 80.28%, and the success rate of the dynamic TTC early warning model is 96.94%, which verifies the effectiveness of the method.

Keywords: model of forward collision; model optimization; speed factor; PreScan; Simulink

0 引言

随着中国民用车辆保有量逐年增加,道路交通状况日益复杂化,导致交通事故频发。《中华人民共和国2019年国民经济和社会发展统计公报》指出2019年道路交通事故万车死亡人数1.80人。在全部交通事故中,追尾交通事故占比高达35%,造成了巨大的生命财产损失^[1]。美国高速公路安全管理局研究表明,提前1s的预警提示能减少50%~90%的追尾和交叉碰撞事故^[2]。因此,减少追尾交通事故发生成为了严峻的现实问题,前碰撞预警(forward collision warning, FCW)系统应运而生,并发挥着重要作用^[3-4]。

FCW系统预警成功的关键在于预警模型的准确性与实时性^[5]。碰撞时间(time to collision, TTC)是衡量交通事故严重程度以及区分驾驶员行为的有效手段之一,同时出现了一系列以TTC为基础的预警模型。唐敏等^[6]提出了一种融合碰撞时间和冲突概率的主动安全预测算法,用以评估换道时自车是否会与前车发生碰撞;杨炜等^[7]提出了一种考虑前车驾驶员行为的汽车主动安全预警系统,仿真结果表明在中高速跟车工况下预警时刻提前了0.53s;裴晓飞等^[8]以碰撞时间倒数的评价指标,提出了一种分级报警与主动制动的安全距离模型;朱冰等^[9]提出了一种考虑路面附着系数的自适应汽车纵向碰撞预警策略,能够在

收稿日期:2021-03-29

* 基金项目:中央高校基本科研业务费(300102220106)资助

不同工况下有效提高预警准确性和道路空间利用率。然而这类固定 TTC 阈值的预警系统存在一定的局限性,当两车存在相对加速度时需对 TTC 进行修正,尤其是当前车紧急制动时,容易发生严重追尾事故^[10-11]。

鉴于此,本文对固定阈值预警模型进行分析,并从其局限性入手,针对前车紧急制动工况,引入速度适应因子适应车速变化,形成动态预警模型,以达到提高预警成功率的目的。

1 固定 TTC 阈值预警模型分析

传统 TTC 预警模型是固定 TTC 阈值,其数学模型为:

$$TTC = \frac{d}{v_h - v_f} \quad (1)$$

式中:TTC 为碰撞时间; d 为两车距离; v_h 为自车车速; v_f 为前车车速。

当 $3 < TTC \leq 5$ 时,预警系统预警,告知驾驶员需要减速保持车距;当 $TTC \leq 3$ 时,制动预警,告知驾驶员需要采取紧急措施^[12-13]。

从数学模型可知,系统的输入为两车车距和相对车速。若 TTC 预警时间固定,当相对车速一定时,则预警时两车距离 d 与自车车速无关, d 为定值。而实际情况应为车速较低时两车跟车距离较小,车速高时跟车距离较大。此外,若 TTC 预警时间固定,当两车车速接近时,则根据式(1)计算出的预警时两车距离 d 较小,即使驾驶员按照预警提示操作汽车,也很容易发生追尾碰撞交通事故。所以传统模型存在一定的局限性,而且这种局限性与自车车速有关。

为了进一步分析传统模型的局限性,利用仿真软件对其传统 TTC 模型进行仿真试验。

1.1 仿真平台搭建

国内外研究学者验证防撞预警模型的工况一般情况为:前车静止、前车低速以及前车紧急制动。传统 TTC 预警模型已被证明在前车静止以及低速情况有较好的预警效果,而面对前车紧急制动预警时常不及时,容易造成追尾交通事故。所以本文利用 PreScan 和 MATLAB/Simulink 联合仿真前车紧急制动工况。传统 FCW 系统利用传感器技术获取前车行驶信息。考虑到汽车已从传统交通工具逐渐转变为高新技术的载体,车辆的网联化和智能化已成为必然趋势,在车辆网领域中采用车用无线通信技术(vehicle to everything, V2X),主要包括车车(vehicle to vehicle, V2V)通信技术和车辆与基础设施(vehicle to infrastructure, V2I)通信技术^[14-15],所以在 FCW 系统中使用 V2V 通信技术代替传统方式,两车利用 V2V 通信技术传送车速、制动液压等车辆状态信息,FCW 系统基于这些车辆载体信息判断前车运行状态。

在软件 PreScan 中搭建仿真试验场景试验场景为两车在高速公路同车道跟车行驶软件 PreScan 各部分设置如下:

1)道路设置:1 000 m 的单向三车道,道路宽度为 3.5 m,路面类型为干燥沥青路面,车辆行驶轨迹设置为中间车道;

2)环境设置:高速公路背景,在车道两旁设置树木、路灯、指示牌等高速公路环境元素;

3)车辆设置:选用宝马 X5 车型,选用软件自带的 2D Simple 车辆动力学模型以控制制动压力和节气门开度。此外,前车设置一个 V2X 无线信号发送器,本车设置一个 V2X 无线信号接收器以及一个目标摄像机传感器^[10]。表 1 所示为传感器主要参数。

表 1 传感器参数

传感器	设置项目	内容
目标摄像机	水平分辨率	480 pixel
	垂直分辨率	640 pixel
	帧频	20 Hz
	最大可检测物体数	5 个
V2X 无线通信设备	通信模型	有效范围
	有效范围	150 m
	活动消息类型	泛型

驾驶员模型设置为 Path Follower,并开启 Collision Detection 检测两车是否发生碰撞。在 Simulink 中搭建相机感知模块、V2X 无线通信模块、Path Follower 模块以及 Collision Detection 模块。联合防撞中模型图如图 1 所示。

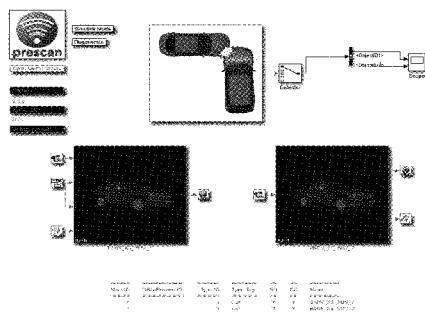


图 1 总模型

1.2 仿真试验及模型分析

试验设置:1)将车速分为 3 个速度区间:低速区(10~40 km/h)、中速区(40~70 km/h)和高速区(70~100 km/h);2)自车车速从每个速度区各均取 6 个速度点;3)针对每个自车车速,前车分别以相对速度 1、2、3、4、5、6 m/s 行驶(前车车速低于自车车速);4)两车初始距离为 5 s 安全阈值对应的距离值。

试验内容:两车正常行驶,2 s 后前车紧急制动,自车在 1.25 s 后开始持续制动,使用延时模块实现 1.25 s 时间延时,延迟的时间主要用来等效驾驶员反应滞后时间、动作滞后时间以及车车通信时间延迟的时间总和。记录两车是否碰撞、自车车速、两车车距、相对速度等数据。

为了横向比较各个统计数据,将试验结果整理成一个图,试验结果如图2所示。

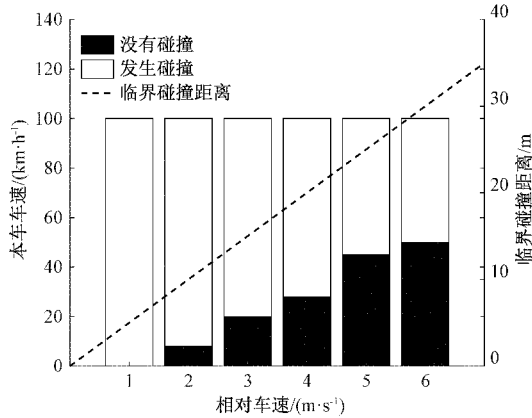


图2 试验结果

分析试验结果:1)临界碰撞距离与相对车速成正比关系,相对车速越大,则临界碰撞距离越大;2)相对车速越大,两车发生碰撞的临界车速也越大。这是因为在固定TTC阈值下,相对车速越大则其对于预警安全距离也越大;3)若两车保持临界碰撞距离行驶,当自车车速较高时前车紧急制动,自车即使按照防撞预警系统预警提示开始制动,大量追尾事故仍不可避免。这是因为在固定TTC阈值下,临界安全距离仅与相对车速成正比,与自车车速无关。当自车车速比较高时,临界安全距离不足以避免追尾事故。

仿真试验再次证明了固定TTC阈值的传统防撞预警模型在前车紧急制动工况下有一定的局限性,与前文对其数学模型分析结论一致。固定TTC阈值的预警模型局限性主要来自模型对自车的车速适应性差。为解决这种局限性,需将模型优化成考虑自车车速因素的动态模型。

2 TTC模型优化

2.1 建立防撞优化模型

在模型优化前,分析在前车紧急制动工况下安全预警时间阈值成分:

FCW系统在判断前车为紧急制动后,向驾驶员发出碰撞警告。从驾驶员接收到预警提示至制动系统起作用存在一段滞后时间。滞后时间包括驾驶员反应时间、制动器起作用时间以及V2X无线通信发送和接收时间。驾驶员反应时间 τ_1 分为时间 τ_1' 和 τ_1'' 。 τ_1' 是驾驶员从接收预警信号到有制动意识所耗费的时间, τ_1'' 是脚从自由状态到接触制动踏板所耗费的时间, τ_1 一般为0.3~1.0s,为保障预警系统对各类人群普遍适应,本文选取1s计算。制动器作用时间 τ_2 取决于踩制动踏板的速度和制动系统结构, τ_2 一般在0.2~0.9s,由于车辆仿真模型的制动系统为液压制动系统,液压制动系统滞后时间较短,所以 τ_2 选取0.2s计算^[7]。两车无线通信需耗费时间为 τ_3 , τ_3 选取0.05s。

当前车紧急制动时,在预警模型中引入速度调节系数

K ,形成动态预警模型。则安全预警时间阈值 T_a 计算公式如下:

$$T_a = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + K \quad (2)$$

2.2 速度调节系数曲线拟合

利用PreScan和Simulink联合仿真来获得速度调节系数 K 的数据,并根据数据拟合速度调节系数 K 曲线。首先对试验进行设置:

1)将车速分为3个速度区间:低速区(10~40 km/h)、中速区(40~70 km/h)和高速区(70~100 km/h);

2)针对每个自车车速,前车以相对速度0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6 m/s的速度行驶(自车车速高于前车);

3)每次试验前调整初始位置,以0.5 m间隔调整两车的相对位置,多次调整至找到当前车速和相对车速条件下的临界安全距离;

试验内容:两车正常行驶,2 s后前车紧急制动,自车在延时模块延时1.25 s后开始持续制动。记录两车是否碰撞、自车车速、两车车距、相对速度等、临界安全距离。取各速区最高车速测得的安全距离为各区间临界安全跟车距离,最高车速分别为40、70、100 km/h,并根据式(1)和(2)计算速度调节系数 K 。速度调节系数 K 与相对车速散点分布图如图3所示。

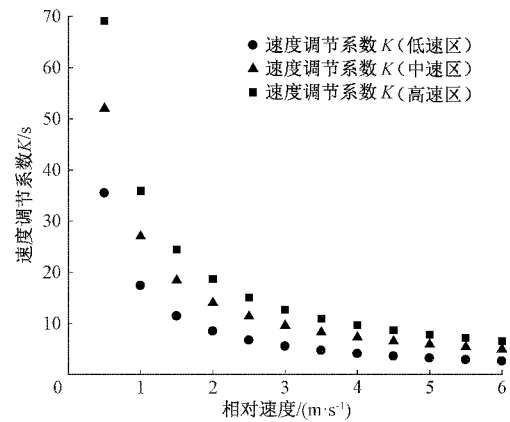


图3 速度调节系数 K 散点图

为了准确描述速度调节系数 K 在各速区的变化规律,采用分段(低速区、中速区、高速区)函数的形式表示速度调节系数 K 。从速度调节系数 K 散点图可以看出,速度调节系数 K 在各速区均与相对车速存在某种数学关系。本文分别选用六次多项式、以 e 为底的指数函数以及幂函数拟合速度调节系数 K 。函数原型如下。

六次多项式:

$$f(x) = \sum_{i=0}^5 a_i x^i \quad (3)$$

以 e 为底的指数函数:

$$f(x) = a e^{bx} + c e^{dx} \quad (4)$$

幂函数:

$$f(x) = ax^b + c \tag{5}$$

曲线拟合方法选用最小二乘法。最小二乘法通过最小误差平方和来匹配最佳函数。MATLAB 的 cftool 工具箱正是基于最小二乘法思想,所以使用 cftool 工具对速度调节系数 K 曲线进行拟合。在 cftool 工具箱中,X data 设置相对速度数据,Y data 依次设置为低速区、中速区、高速区的速度调节系数 K。函数原型依次设置为 Exponential(2 terms),Power(2 terms),Polynomial(6 degrees)。

曲线拟合结果为:

1)以 e 为底的指数函数

低速:

$$f(x) = 69.53e^{-2.522x} + 12.28e^{-0.3117x} \tag{6}$$

中速:

$$f(x) = 90.28e^{-2.454x} + 18.39e^{-0.2745x} \tag{7}$$

高速:

$$f(x) = 107.7e^{2.166x} + 21.78e^{0.2425x} \tag{8}$$

2)幂函数

低速:

$$f(x) = 17.6x^{-1.02} - 0.226 \tag{9}$$

中速:

$$f(x) = 27.06x^{-0.9441} - 0.04997 \tag{10}$$

高速:

$$f(x) = 35.96x^{-0.9441} - 0.04997 \tag{11}$$

3)六次多项式

低速:

$$f(x) = 0.03795x^6 - 0.8482x^5 + 7.625x^4 - 35.26x^3 + 89.03x^2 - 119.9x + 77.35 \tag{12}$$

中速:

$$f(x) = 0.05426x^6 - 1.204x^5 + 7.1073x^4 - 49.15x^3 + 123.1x^2 - 165.4x + 110.1 \tag{13}$$

高速:

$$f(x) = 0.05922x^6 - 1.319x^5 + 11.82x^4 - 54.76x^3 + 139.7x^2 - 194x + 136.8 \tag{14}$$

拟合曲线的统计量如表 2 所示,由表 2 可以看出,幂函数拟合曲线在各个速度区的和方差 SSE 以及拟合标准差 RMSE 均低于以 e 为底的指数函数和六次多项式拟合的曲线,这说明 3 种拟合结果中幂函数拟合的曲线波动程度最小。此外,幂函数拟合的曲线 R-square 值在各速度区间均高于指数函数和六次多项式拟合曲线的 R-square 值,数值上更加接近于 1,这说明幂函数拟合的曲线解释能力更强,拟合效果更加好。为了能够准确地描述速度调节系数的变化规律,所以最终选择以幂函数拟合速度调节系数 K 曲线。

综上,优化后的动态防撞预警模型为:

$$TTC = \frac{d}{v_r} \tag{15}$$

式中: v_r 为相对车速; d 为两车车距; TTC 为碰撞时间。

表 2 拟合曲线统计量

函数类型	速区	SSE	R-square	RMSE
指数函数	低速	0.2916	0.9997	0.1909
	中速	1.2450	0.9994	0.3945
	高速	0.9993	0.999	0.5502
幂函数	低速	0.0361	1.0000	0.06097
	中速	0.1045	0.9999	0.1078
	高速	0.6017	0.9998	0.2586
六次多项式	低速	0.3406	0.9997	0.2610
	中速	0.9360	0.9995	0.4327
	高速	1.7250	0.9995	0.5873

当前车无紧急制动时,一级预警时间阈值 T_a 为 3 s,二级预警时间阈值 T_a 为 5 s。

当系统判断出前车紧急制动时:

$$T_a = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + K \tag{16}$$

式中: τ_1 为驾驶员反应时间,取 1 s; τ_2 为制动器起作用时间,取 0.2 s; τ_3 为车车通信耗费时间,取 0.05 s; T_a 为预警时间阈值; K 为速度修正系数,取值如下:

$$K = \begin{cases} 17.6v_r^{1.02} - 0.226, & v_r \in [10,40] \\ 27.06v_r^{0.9441} + 0.04997, & v_r \in [40,70] \\ 35.96v_r^{0.9132} + 0.4811, & v_r \in [70,100] \end{cases} \tag{17}$$

3 防撞预警模型验证

优化的目的是为了改善传统防撞预警模型应对前车紧急制动工况时预警不及时问题,所以本节验证优化后的动态模型在前车紧急制动工况时的表现。在 Simulink 中搭建防撞预警模型。

试验设计:1)试验分两组,一组为传统模型仿真试验,另一组为优化后的动态预警模型仿真试验;2)车速分为 3 个速度区间:低速区(10~40 km/h)、中速区(40~70 km/h)和高速区(70~100 km/h);3)两组试验均在每个速度区进行 120 次试验;4)两车相对速度小于 6 m/s(前车车速高于前车)。

试验内容:两车正常行驶,2 s 后前车紧急制动,前车在延时模块延时 1.25 s 后开始持续制动。记录两车是否碰撞,统计各速区的碰撞次数和未碰撞次数。

试验统计结果如表 3 所示,试验结果显示:传统防撞预警模型因为模型自身局限性,仿真试验的追尾碰撞次数随车速升高而增加,整体碰撞次数较多。而优化后的动态预警模型,在各速区碰撞次数均少于传统模型,在低速区能够完全避免追尾碰撞发生,在中速区和高速区仅有少量碰撞发生,这是因为速度调节系数 K 曲线在中高速时存在一定误差。优化后的动态防撞预警模型整体成功率 80.28% 提升至 96.94%,这说明动态模型相较于传统模型能够有效减少追尾交通事故。

表3 试验统计结果

速度区间	相对速度	车距	动态模型		传统模型	
			碰撞次数	未碰撞次数	碰撞次数	未碰撞次数
低速区	$0 < v_r \leq 2$	$17 < d \leq 20$	40	0	34	6
	$2 < v_r \leq 4$	$20 < d \leq 22.5$	40	0	35	5
	$4 < v_r \leq 6$	$22.5 < d \leq 24.5$	40	0	37	3
中速区	$0 < v_r \leq 2$	$25 < d \leq 32$	38	2	31	9
	$2 < v_r \leq 4$	$32 < d \leq 37$	39	1	33	7
	$4 < v_r \leq 6$	$37 < d \leq 41$	40	0	35	5
高速区	$0 < v_r \leq 2$	$31.5 < d \leq 43$	36	4	24	16
	$2 < v_r \leq 4$	$43 < d \leq 50$	38	2	29	11
	$4 < v_r \leq 6$	$50 < d \leq 57$	38	2	31	9
成功率(未碰撞次数/试验总次数)			96.94%		80.28%	
误报率(碰撞次数/试验总次数)			3.06%		19.72%	

4 结 论

本文从传统固定 TTC 阈值预警模型的局限性入手,将模型根据工况分段,当前车无紧急制动时,采用传统 TTC 预警模型,两次预警,预警时间阈值均为固定值;当前车为紧急制动时,采用动态 TTC 阈值预警模型,在预警时间阈值中引入速度调节系数,使得预警时间阈值随自车车速变化而变化。为验证模型,利用 PreScan/Simulink 软件联合仿真前车紧急制动工况,进行了多个速度段模型优化前后对比试验,试验结果表明:1)面对前车紧急制动时,相较于传统固定 TTC 阈值预警模型,优化后的动态模型整体成功率由 80.28% 提升至 96.94%;2)动态 TTC 预警模型在各速度区域预警成功率均高于传统模型。所以本文设计的动态防撞预警模型能够有效减少追尾事故发生。

参考文献

- [1] 宋翔,李旭,张为公.高速公路汽车追尾碰撞预警关键参数估计[J].哈尔滨工程大学学报,2014,35(9):1142-1148.
- [2] 王芳,陈哲.汽车防撞系统研究现状分析[J].农业装备与车辆工程,2018,56(5):28-31.
- [3] 吴一全,刘莉.基于视觉的车道线检测方法研究进展[J].仪器仪表学报,2019,40(12):92-109.
- [4] 李占旗,高继东,彭凯,等.基于 PnP 算法的前方车辆测距方法[J].国外电子测量技术,2020,39(12):104-108.
- [5] 臧利国,滕飞,彭志洋,等.改进 Berkeley 模型的汽车防撞预警算法[J].机械科学与技术,2018,37(7):1082-1088.
- [6] 唐敏,王东强,曾鑫钰.汽车碰撞预警主动安全预测方法[J].计算机科学,2020,47(4):318-322.

- [7] 杨炜,刘佳俊,张志威,等.结合前车驾驶意图辨识的汽车主动防撞预警系统[J].中国科技论文,2020,15(2):174-179.
- [8] 裴晓飞,刘昭度,马国成,等.汽车主动避撞系统的安全距离模型和目标检测算法[J].汽车安全与节能学报,2012,3(1):26-33.
- [9] 朱冰,朴奇,赵健,等.基于路面附着系数估计的汽车纵向碰撞预警策略[J].汽车工程,2016,38(4):446-452.
- [10] 朱龙,周旋,孟祥虎.汽车前碰撞预警系统测试法规的对比解析[J].汽车电器,2020(2):56-58.
- [11] 甘顺.基于 AEB 追尾碰撞的主被动安全一体化仿真分析[D].重庆:重庆理工大学,2018.
- [12] 刘庆华,邱修林,谢礼猛,等.基于行驶车速的车辆防撞时间预警算法[J].农业工程学报,2017,33(12):99-106.
- [13] 胡三根.面向驾驶辅助系统的车辆行驶安全预警模型研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [14] 孙子杰,姜国凯,丁一夫,等.偏心修正智能网联车辆天线性能测量方法研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(12):41-49.
- [15] 张爱平,李德敏,张光林,等.基于碰撞点时间估计的车辆碰撞预警算法[J].计算机工程,2019,45(2):53-57,63.

作者简介

林睿,硕士,主要研究方向为汽车主动安全技术、汽车电子控制技术等。

E-mail: 240658499@qq.com

刘晶郁(通信作者),教授,主要研究方向为汽车 CAE 仿真、汽车电子控制技术等。

E-mail: liujy1@126.com