

基于 ITC 的自动驾驶卡车编队跟驰安全性评价

陈 丰^{1,2}, 涂志敏¹, 陈 涛²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 长安大学 汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了在卡车编队技术大规模应用时控制编队跟驰冲突风险和减少追尾事故的发生,在传统的交通冲突评价方法上进行了改进,对自动驾驶卡车编队的跟驰安全性进行了分析和评价。考虑路面阻力和协同控制,对智能驾驶人模型(intelligent driver model, IDM)进行了改进,建立了考虑路面阻力的跟驰模型(IDM+)、融合协同控制策略(cooperative adaptive cruise control, CACC)跟驰模型 2 种适用于自动驾驶卡车的编队跟驰模型。然后以跟驰模型作为编队控制的基础,不考虑车辆控制的个体差异,通过 MATLAB 数值模拟试验,得到编队跟驰状态时变曲线,分析编队跟驰模型特征和稳定性。分别以距离碰撞时间(time-to-collision, TTC)和距离碰撞时间倒数(the inverse time-to-collision, ITC)2 种碰撞时间函数作为评价指标,得到安全指标时变曲线,并比较 2 种指标的优缺点。基于数值模拟试验结果和 ITC 安全性判别准则对卡车编队跟驰安全进行了定性分析,以 IDM+和 CACC 跟驰模型下的 3 辆卡车组成的编队为例进行了仿真试验。试验结果表明:CACC 协同控制策略能提高卡车编队跟驰过程的稳定性,降低追尾风险;随着卡车编队中前后车的速度差增加,车辆追尾的风险呈现不断增大的趋势;ITC 与前后车速度差成近似线性关系。该研究结果可用于卡车编队投入运营前以及运营过程中,对编队跟驰安全性进行评价和风险预警,防范追尾事故的发生。

关键词:交通工程;风险评价;距碰撞时间;卡车编队;追尾冲突;智能驾驶人模型

中图分类号:U491.3

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.05.011

Evaluation based on ITC of rear-end collision safety of automated truck platoons

CHEN Feng^{1,2}, TU Zhi-min¹, CHEN Tao²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory for Automotive Transportation Safety Technology of the Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To control collision risk and reduce the occurrence of rear-end collision accidents during the large-scale application of truck platoons, the traditional traffic conflict evaluation method was improved, and the safety of the self-driving truck platoons was analyzed and evaluated. Considering the road surface resistance and coordinated control, the intelligent driver model (IDM) was improved, and two car-following models suitable for self-driving truck were

established, the car-following model considering the road resistance (IDM+) and the car-following model with cooperative adaptive cruise control (CACC). The car-following model was then applied as the basis for platoon control. Regardless of the individual types of vehicle control, the MATLAB numerical simulation experiment was used to obtain the time-varying curve of the platoons and the state of the car-following model. Two kinds of collision-time functions, time-to-collision (TTC) and the inverse time-to-collision (ITC) were used as evaluation indicators to obtain time-varying curves of safety indicators, and the advantages and disadvantages of the two indicators were compared. Based on the numerical simulation experimental results, and the ITC safety discriminant criteria, the qualitative analysis of truck racing follow-up safety was performed. Platoons of three trucks under the IDM+ and CACC car-following models were included in simulation experiments. The results show that CACC can improve the stability of the truck racing follow-up process and reduce the risk of rear-end collision. Also, with the speed difference between the front and rear vehicles increasing, the risk of vehicle rear-end collision tends to increase. There is an approximate linear relationship between the ITC and the speed difference between the front and rear vehicles. The results of the study can be used to evaluate the safety of truck platoons and provide risk warnings during planning of truck platoons and the operation process, to prevent the occurrence of rear-end conflict accidents. 3 tabs, 10 figs, 30 refs.

Key words: traffic engineering; risk assessment; time-to-collision; truck platoon; rear-end conflict; intelligent driver model

0 引 言

卡车编队是可持续发展交通系统中一项具有广阔前景的技术。随着自动驾驶的发展,学者们对车辆编队行驶的各种情况,如正常行驶、硬件故障、自动驾驶与手动驾驶车辆混行等进行了深入研究^[1-3]。这些研究为车辆编队的实际运营提供了理论支撑,但是关于卡车编队跟驰安全风险方面的研究还很少,主要体现在2个方面:①国际上对自动驾驶的研究主要集中在小汽车上面,卡车与小汽车相比,载重大,体积大,车辆动力性能有所不同,这些因素都可能导致自动驾驶卡车的表现区别于自动驾驶小汽车;②目前国内外对于自动驾驶卡车编队技术的研究主要集中于自动驾驶技术层面,比如传感器、无线通信等。对于自动驾驶卡车编队的安全风险认识还不够深入。卡车编队可以提高道路通行能力,减少燃油消耗,但这都是以编队能够安全地运行为前提的。卡车的安全事故后果往往比小汽车更严重,对人的生命财产安全的危害也更大,因此在卡车编队投入应用前以及在运营过程中,对自动驾驶卡车编队跟驰风险进行评价至关重要。

编队跟驰风险主要表现为后车跟驰情形下的追尾碰撞风险。国内外关于追尾风险的研究主要集中在车辆安全跟驰距离和车辆追尾概率预测模型上。

在车辆安全跟驰距离方面,许伦辉等在基于车头时距和基于制动过程的安全距离模型研究基础上,建立了单车道跟驰状态下跟驰车与前导车不发生追尾碰撞的最小安全距离模型,该模型充分考虑了车辆制动过程中减速度渐变增长的过程,并通过 MATLAB 进行仿真,从理论上验证了改进模型能够很好地解决传统模型计算的安全距离存在较大偏差问题^[4]。邱小平等在 NaSch 模型上引入 Gipps 安全距离规则,提出了基于安全距离的自动驾驶元胞自动机交通流模型,利用数值模拟的方法研究了自动驾驶车辆对道路交通流的影响,其研究表明,自动驾驶车辆的比例达到 80% 时对道路通行能力和改善拥堵具有显著效益^[5]。Reich 针对卡车编队基于安全距离碰撞问题的解决方案进行系统建构,对避撞系统失效情形进行理论模型推导和分析,并通过 Simulink 建立驾驶人、卡车、环境和编队系统综合仿真模型^[6]。从车辆追尾概率(频率)预测的角度上,姜能惠等建立了一种径向基函数(RBF)神经网络防追尾模型,并运用 MATLAB 软件编程进行训练和仿真,对车辆追尾进行预测^[7]。胡满江等提出了一种基于遗传算法优化支持向量机(GA-SVM)的汽车追尾预测方法,该方法选取了行车间距、后车车速、前后车速差、汽车制动时间、制动减速度等 5 个因素作为预测模型的输入指标,选取追尾概率作

为输出向量^[8]。陆斯文等利用追尾碰撞运动原理,研究了高速公路追尾碰撞的 4 种情形,推理出追尾风险量化指标,采用蒙特卡罗方法计算出高速公路跟驰追尾风险值,并利用模糊聚类方法确定了追尾风险评价等级的阈值范围^[9]。Meng 等提出了一个能估计隧道追尾碰撞频率的方法,通过分析公路隧道的距离碰撞时间(TTC)数据,得出了反高斯分布时 TTC 数据的最佳拟合分布,由此建立了一个逆高斯回归模型来表达 TTC 与其影响因素之间的关系^[10]。

车辆安全距离不能描述前后车之间的碰撞可能性,基于距离和速度的追尾概率模型在一定程度上可以表达追尾风险,但是概率模型往往基于大样本统计分析,不能在即时反馈场景和小样本情形下进行风险预判和评价。对于传统的交通流追尾事故风险评价,也有人提出基于模糊数学和层次分析法的综合评价方法^[11]。这种方法对于目前尚未普及的自动驾驶编队而言,使用局限性较大。对于自动驾驶系统,危害分析与风险评价方法(hazard analysis and risk assessment, HARA)是一种较为常用的分析系统功能有效性及稳定性的手段^[12],但是对卡车编队来说,行驶过程中车辆之间的碰撞风险更为直接,而 HARA 方法偏向于自动控制技术风险层面,与交通工程所探讨的角度并不相同。

交通工程中,为了评估追尾事故的风险,常采用一些安全指标来确定风险和跟驰行为之间的关系。在以往的研究中,提出了许多有效的指标^[13-14]。距离碰撞时间和基于每 5~10 min 的线圈流量数据的度量指标^[15]相比,可知 TTC 可以估计秒级时间内的安全性,经常用来描述前后车发生碰撞的紧急程度(或碰撞风险)^[16-17],而 TTC 在前后车速度相等时数值为 0,且无法体现此时前后车的间距是否满足安全条件。Balas 等提出了距碰撞时间倒数 ITC 的概念,作为碰撞时间的函数指导跟驰行为^[18]。跟驰行为与跟驰安全性密不可分,ITC 作为跟驰安全性的评价指标具有广泛应用价值。

鉴于以上研究现状,在卡车编队的跟驰安全风险评价方面,与 TTC 安全指标有所不同,本文结合 TTC 倒数 ITC 的概念,以 ITC 作为风险评价指标对编队跟驰安全性进行分析和评价。该评价指标与方法可为自动驾驶卡车编队的跟驰风险研究提供新的思路,为卡车编队技术的应用提供安全支撑。

1 卡车编队跟驰风险分析

传统交通流理论中,车辆在跟驰过程中,表现

出制约、延迟和传递等特性。一旦前车制动减速,后车因为跟车速度过大或者跟车距离较小而不足以对危险情形做出及时反应时,追尾事故便可能会发生。也就是说,从安全的角度来看,车速条件和间距条件是分析跟驰状态及追尾风险的 2 个基本条件。

1.1 车速条件

在一般的跟驰状态下,跟驰车辆的车速应该保持与前车车速相近,以维持跟驰状态的稳定和安全。在实际行驶的过程中,驾驶人或者自动驾驶系统在某些因素影响之下对前车速度感知出现偏差或延迟,导致跟驰车辆未能及时调整自身速度时,跟驰车辆长时间以超过前车车速的速度行驶最终将会导致后车追尾。

1.2 车距条件

在跟驰过程中,同向行驶的前后车应保持足够的车辆间距,以便后车有足够的时间对前车紧急制动等危险情况做出反应。对于手动驾驶而言,安全车距的判断主要依靠驾驶人对行驶状态的感知能力。而对于自动驾驶系统而言,其危险感知能力更为理性合理,但系统也存在一定的判断误差和故障问题。总之,跟驰车辆在安全距离判断上的偏差和操作延迟都将使间距约束条件遭到破坏,从而诱发追尾事故。

2 跟驰安全性评价指标

2.1 TTC 的概念及应用

距碰撞时间是指某一时刻前后车不改变行驶速度的情况下,后车继续行驶与前车发生碰撞所需的时间,等于跟驰距离与相对速度的比值

$$T_{TCn}(t) = \begin{cases} +\infty & v_n(t) \leq v_{n-1}(t) \\ \frac{X_{n-1}(t) - X_n(t) - l_{n-1}}{v_n(t) - v_{n-1}(t)} & v_n(t) > v_{n-1}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_{TCn}(t)$ 为车辆 n (车辆 $n-1$ 的后车)在 t 时刻的 TTC 值; $X_n(t)$ 为车辆 n 在 t 时刻的位置(认为车头位置为车辆位置); l_n 为车辆 n 的车身全长; $v_n(t)$ 为车辆 n 的速度。

2.2 ITC 的定义

从数学形式来看, T_{TC}^{-1} 是前后车速度差的连续函数。方便起见, T_{TC}^{-1} 被表示为 I_{TC} ,其计算如下

$$I_{TCn}(t) = \frac{1}{T_{TCn}(t)} = \frac{v_n(t) - v_{n-1}(t)}{X_{n-1}(t) - X_n(t) - l_{n-1}} \quad (2)$$

式中: $I_{TCn}(t)$ 为 $T_{TCn}(t)$ 的倒数。

3 卡车编队跟驰安全性评价

3.1 卡车编队跟驰模型

3.1.1 智能驾驶人模型(IDM)

IDM(intelligent driver model)模型是一种非线性跟驰模型,最早是由 Treiber 等^[19]提出。该模型的优点在于通过数值模拟得到的结果与实测数据一致。IDM 模型的基本形式为

$$a_n(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_0 + v_n \Delta T + \frac{v_n \Delta v_n}{2 \sqrt{ab}} \quad (4)$$

$$s_n = x_{n-1} - x_n - l_{n-1} \quad (5)$$

$$\Delta v_n = v_n - v_{n-1} \quad (6)$$

式中: $a_n(t)$ 为由 IDM 模型计算的车辆 n 的加速度; v_0 为车辆编队的期望速度; s_n 为相邻车辆的车辆间距; s_0 为静止安全距离参数; $s^*(v_n, \Delta v_n)$ 为期望跟车距离; a 为车辆最大加速度; b 为车辆舒适制动减速度; T 为安全车头时距; δ 为加速度指数。

IDM 模型中,期望跟车距离 $s^*(v_n, \Delta v_n)$ 需要做出一定限制避免其出现负值^[20]。故 $s^*(v_n, \Delta v_n)$ 的计算修改为

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_0 + \max \left(0, v_n T + \frac{v_n \Delta v_n}{2 \sqrt{ab}} \right) \quad (7)$$

3.1.2 考虑道路条件的 IDM 跟驰模型(IDM+)

IDM 模型被普遍用于仿真自动驾驶情况下的交通流。但是,用于跟驰控制时,该模型并没有考虑实际行驶情形下道路条件对车辆跟驰状况的影响。车辆跟驰水平的关键影响因素在于车辆动力性的变化。确定车辆动力性需要掌握行驶方向上作用于汽车的各种作用力,即驱动力与行驶阻力。如图 1 卡车行驶受力示意所示,一般车辆的动力模型如下

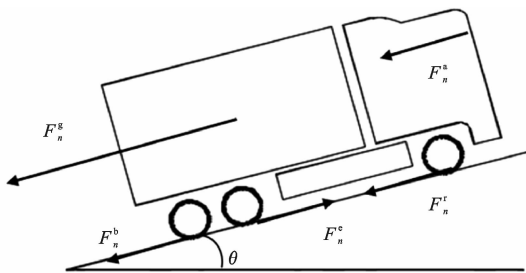


图 1 单辆卡车在直线坡道上行驶时的受力示意

Fig. 1 Schematic of force of a single truck while driving on a straight ramp

$$W a_n(t) = F_n^e - F_n^b - F_n^a - F_n^r - F_n^g \quad (8)$$

式中: W 为车辆总质量或总载质量; F_n^e 为汽车的发

动机动力; F_n^b 为汽车制动系统提供的制动力; F_n^a 为汽车行驶中所受到的空气阻力; F_n^r 为汽车行驶中所受到的滚动阻力; F_n^g 为因汽车重力而产生的行驶阻力或助力,与道路纵坡有关。

为了简化模型,仅从道路纵坡和滚动阻力 2 个方面对模型进行改进。空气阻力等的影响较为复杂,会受到车辆间距和气候环境的影响,故本模型中暂不考虑空气阻力。

IDM 模型中计算的单车加速度指的是车辆控制系统(提供车辆动力与制动力)应产生的加速度,结合牛顿第二定律,可以得出

$$W a_{\text{improved}} = F_n^e - F_n^b - F_n^r - F_n^g \quad (9)$$

$$W a_n(t) = F_n^e - F_n^b \quad (10)$$

式中: a_{improved} 为考虑其他行驶阻力(滚动阻力、因重力而产生的坡度阻力)的加速度。

(1) 考虑滚动阻力

影响滚动阻力大小的因素很多,如行驶速度、轮胎类型、道路状况等。其简化计算如下

$$F_n^r = W f \quad (11)$$

式中: f 为滚动阻力系数。

(2) 考虑道路纵坡

图 1 为单辆卡车在坡角为 θ 的坡道上行驶的受力示意。 F_n^g 表达式为

$$\begin{cases} F_n^g = W g \sin(\theta) \\ \sin(\theta) \approx \tan(\theta) = \frac{i}{100} \quad \theta \text{ 较小时} \end{cases} \quad (12)$$

式中: i 为道路纵坡坡度(%); g 为重力加速度。

故坡度阻力的计算式为

$$F_n^g = W g \frac{i}{100} \quad (13)$$

综合前文对于 IDM 模型的改进,本文最终使用的 IDM 模型具体形式如下

$$a_{n, \text{IDM}+}(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right] - f - g \frac{i}{100} \quad (14)$$

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_0 + \max \left(0, v_n T + \frac{v_n \Delta v_n}{2 \sqrt{ab}} \right) \quad (15)$$

式中: $a_{n, \text{IDM}+}$ 为 IDM+模型计算的车辆 n 的加速度。

3.1.3 CACC 跟驰策略

按照 Shladover 等^[21]对于融合协同控制策略(CACC)的定义,CACC 系统的关键是提供了相邻车辆的信息,包括速度、位置以及加减速情况。其控制策略可表示为

$$F_n(t) = f_n(t) + \lambda_1 F_1 + \lambda_{n-1} F_{n-1} \quad (16)$$

式中: $F_n(t)$ 为第 n 辆 CACC 卡车的跟驰加速度; $f_n(t)$ 为由 IDM+跟驰控制器计算出来的 CACC 卡车 n 的跟驰加速度; F_1 、 F_{n-1} 分别为引导车和第 $n-1$ 辆 CACC 卡车(即第 n 辆车的前车)的加速度(无线通信获取); λ_1 、 λ_{n-1} 为权重系数。

3.2 卡车编队跟驰数值模拟

对于 CACC 的研究方法主要有仿真模拟、实车试验。一些车辆模型和控制器正是基于实车试验数据而提出来的^[22-23]。然而实车试验也有一些不能避免的缺点:①试验的高成本,尤其是具备无线通信系统的车辆;②试验的危险性,尤其是在高速公路上;③实车试验数据推导出来的模型或控制器的形式往往十分复杂,有一些参数不具备具体物理意义。因此,基于现有交通流研究中的跟驰模型,运用数值模拟的手段建立 CACC 模型是必要的。运用 MATLAB 软件可以实现跟驰模型和编队跟驰场景的建立。

3.2.1 头车工况

头车(leader truck)的速度变化设定为:0 时刻初速度值为 50 km/h(即 13.9 m/s),车头位移值设定为 0 m。仿真 0~15 s 时,加速度为 0,卡车匀速行驶;15~30 s 时,卡车速度从 50 km/h 增加至 60 km/h;30~55 s 时,卡车匀速行驶;55~85 s 时,速度从 60 km/h 增加至 70 km/h;85~115 s 时,卡车匀速;115~145 s 时,卡车由 70 km/h 减速至 60 km/h;145~170 s 时,卡车匀速行驶;170~185 s,速度从 60 km/h 降至 50 km/h;185~200 s 时,卡车匀速行驶。整个仿真阶段时长共计 200 s。

3.2.2 编队长度的选择

本文中暂不讨论编队长度对于跟驰安全性的影响,为了简化条件,设定编队形式为 3 辆同类型卡车的小编队。编队内卡车按照顺序从头到尾依次标记为 1、2、3,卡车 1 即为头车。



图 2 卡车编队示意
Fig. 2 Schematic of truck platoon

3.2.3 数值模拟模型参数设定

前文提出了简单易用的 CACC 模型。进行数值模拟的关键是设定模型参数。模型涉及到的参数取值参考现有的文献,具体参考来源见表 1。

3.2.4 编队跟驰工况

共设计 4 组工况,初始时刻各车之间的净距为 15 m,车身长度设定为 10 m。跟驰模型具体变量控

表 1 IDM 和 CACC 模型参数值
Tab. 1 IDM and CACC model parameter values

参数	参数值	来源文献
λ_1	0.3	文献[24]
λ_{n-1}	0.3	文献[25]
T/s	1	文献[26]
$a/(m \cdot s^{-2})$	0.7	文献[27]
$b/(m \cdot s^{-2})$	2	文献[27]
$v_0/(km \cdot h^{-1})$	85	文献[27]
s_0/m	2	文献[27]
δ	4	文献[27]
$g/(m \cdot s^{-2})$	9.8	

制如表 2 所示。如图 3~图 6 所示,卡车编队跟驰状态在不同的工况条件下略有不同。从 4 种工况的跟驰状态来看,编队跟驰工况处于合理水平,并未出现明显的离队状况。从图 3~图 6 的跟驰距离变化的对比,即比较卡车 3 和卡车 2 的跟驰(卡车 3-2)距离变化曲线的重合程度,即可知,CACC 模型下卡车 3 的跟驰距离和卡车 2 的跟驰距离越来越同步。这在一定程度上,体现了 CACC 编队跟驰策略的协同水平。

表 2 卡车编队跟驰工况控制变量
Tab. 2 Control variables for truck platoons following operating conditions

工况序号	跟驰模型	道路纵坡 i	滚动阻力系数 f	协同控制
1	IDM+	0	0.01	无
2	CACC	0	0.01	有
3	IDM+	0	服从正态分布	无
4	CACC	0	服从正态分布	有

注:数值模拟过程中假设阻力系数 f 服从 $N(0.01,0.001)$ 的正态分布^[28-30]。

3.3 编队跟驰安全性分析与评价

编队车辆速度、位置信息的获取存在不连续性,所以 TTC 及 ITC 的计算也并不连续,数据采集周期为 0.1 s。TTC 及 ITC 随时间的变化如图 7~图 10 所示。表 3 为 ITC 安全性判别准则。从图 3~图 10 可得如下结论。

(1)ITC 指标较 TTC 取值变化范围小、连续性好。

(2)在数值模拟的这 200 s 内,编队中的跟驰车——卡车 2 和卡车 3 在前 100 s 内跟驰状态较为安全,仅在前 20 s 存在碰撞风险;而后 100 s 内跟驰安全性较差,出现 2 段各长约 20 s 的危险期,然而从对应的跟车距离变化来看,这 2 段危险期的跟车距离较初始状态下降并不多。由此说明,ITC 指标比起安全跟车距离更能直接反映跟驰风险的大小

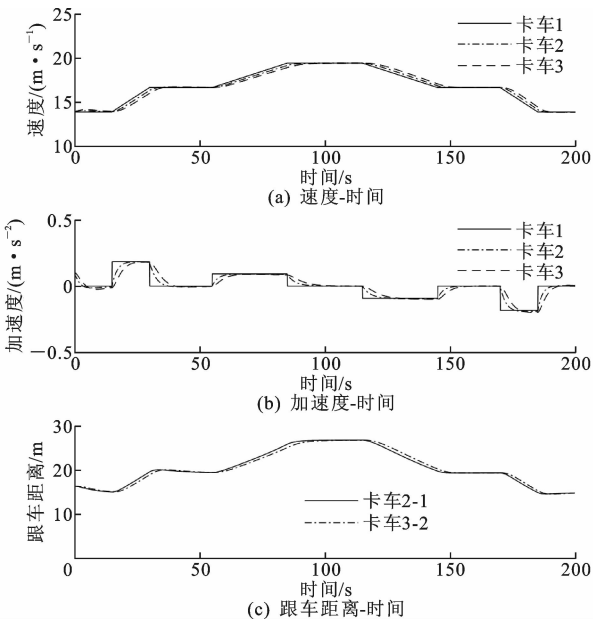


图3 IDM+跟驰模型控制下跟驰状态变化($f=0.01$)
Fig. 3 Truck-following state changes under control of
IDM+ car-following model ($f=0.01$)

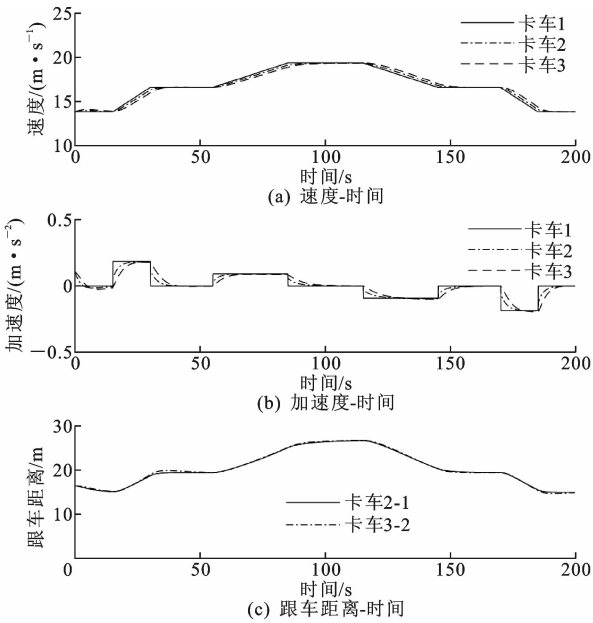


图4 CACC跟驰模型控制下跟驰状态变化($f=0.01$)
Fig. 4 Truck-following state changes under control of
CACC car-following model ($f=0.01$)

差异。

(3)CACC模型的2条ITC曲线重合程度更高,其代表的风险值也存在多处峰值降低的情况。说明采取CACC协同控制策略有助于提高卡车编队的跟驰安全性。

(4)卡车编队中每个跟驰单元(即1组相邻前后车)的ITC与速度差之间的联系。按照ITC指标的风险判定准则,见表3,当ITC大于0时,碰撞

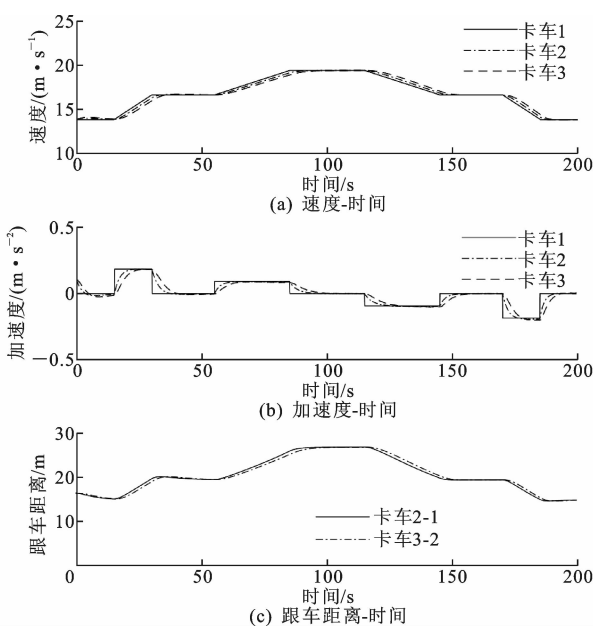


图5 IDM+跟驰模型控制下跟驰状态变化
(f 服从正态分布,随机变化)
Fig. 5 Truck-following state changes under control of
IDM+ car-following model (f obeys a normal
distribution and changes randomly)

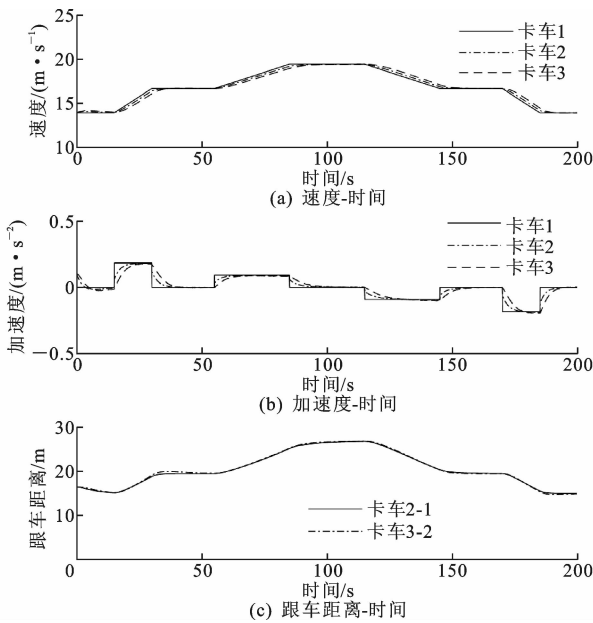


图6 CACC跟驰模型控制下跟驰状态变化
(f 服从正态分布,随机变化)
Fig. 6 Truck-following state changes under control of
CACC car-following model (f obeys a normal
distribution and changes randomly)

风险随ITC值的增大而增大。所以,ITC与速度差的变化趋势表明,编队跟驰风险随着前后车速度差的增大而增大。ITC与前后车速度差成近似线性关系。

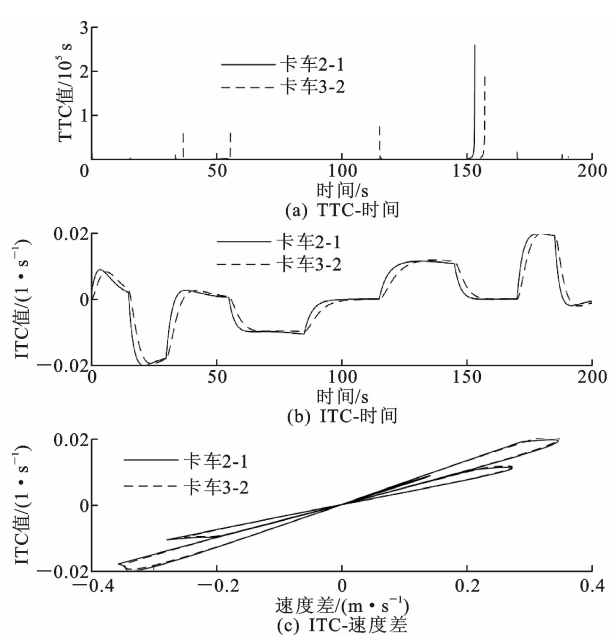


图 7 IDM+跟驰模型下的 TTC、ITC 值变化($f=0.01$)

Fig. 7 TTC, ITC value changes under control of IDM+ car-following model ($f=0.01$)

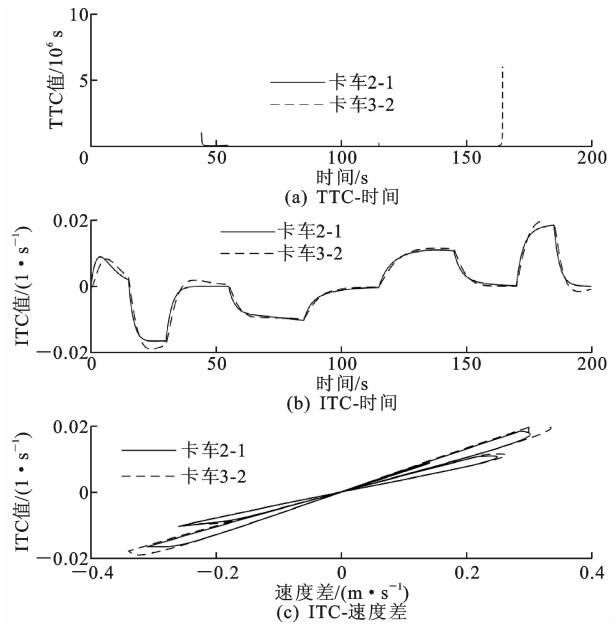


图 8 CACC 跟驰模型下的 TTC、ITC 值变化($f=0.01$)

Fig. 8 TTC, ITC value changes under control of CACC car-following model ($f=0.01$)

表 3 ITC 安全性判别准则

Tab. 3 ITC security discrimination guidelines	
ITC 值	安全性评价
不大于 0	无碰撞风险
大于 0	有碰撞风险,且风险随 ITC 的值增大而增大

4 结 语

(1)ITC 作为一个新的安全性评价指标,弥补了

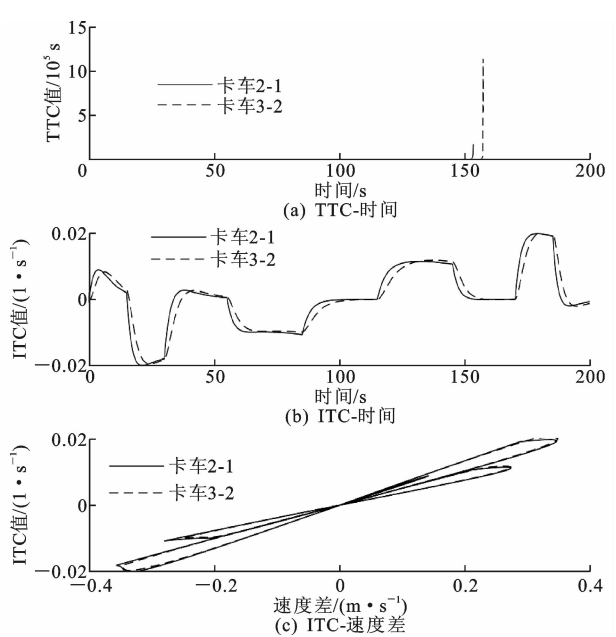


图 9 IDM+跟驰模型下的 TTC、ITC 值变化
(f 服从正态分布,随机变化)

Fig. 9 TTC, ITC value changes under control of IDM+ car-following model (f obeys a normal distribution and changes randomly)

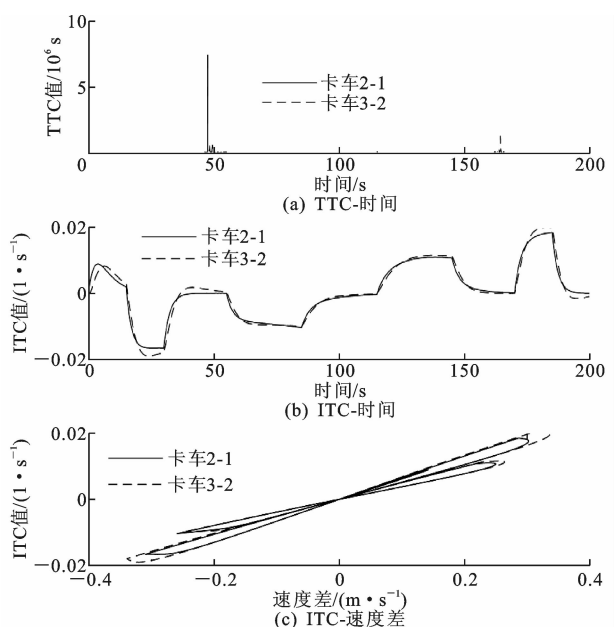


图 10 CACC 跟驰模型下的 TTC、ITC 值变化
(f 服从正态分布,随机变化)

Fig. 10 TTC, ITC value changes under control of CACC car-following model (f obeys a normal distribution and changes randomly)

TTC 在前后车同速时无法表示的缺陷。ITC 指标的安全性判定规则简单明了,该指标可应用于自动驾驶技术安全控制决策系统之中。

(2)CACC 策略提高了卡车编队跟驰过程的稳

定性,且在一定程度上降低了追尾风险。

(3)编队模拟试验结果表明,无论跟驰模型是 IDM+还是 CACC,随着编队中前后车的速度差增加,其车辆追尾的风险也随之增大。

(4)卡车编队跟驰安全是一个多因素参与且相互影响的复杂研究。本文对于卡车编队跟驰风险的评价方法仍然存在局限性,如没有对不同安全条件下的 ITC 值进行确定、对表征跟驰风险的 ITC 值定量分析不足等。下一步将开展实车跟驰试验,通过实车与模拟相互结合与验证的手段对编队跟驰安全性评价指标进行深入研究和完善。

参考文献:

References:

- [1] ALAM A, GATTAMI A, JOHANSSON K H, et al. Guaranteeing safety for heavy duty vehicle platooning: Safe set computations and experimental evaluations [J]. Control Engineering Practice, 2014, 24: 33-41.
- [2] 董龙飞. 车路协同中的智能车编队设计与实现[D]. 北京:北京工业大学, 2015.
DONG Long-fei. Design and implementation of smart car formation in vehicle road coordination [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [3] LIU X, MA K, KUMAR P R. Towards provably safe mixed transportation systems with human-driven and automated vehicles [C]//IEEE. Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control. New-York: IEEE, 2015: 4688-4694.
- [4] 许伦辉, 罗强, 吴建伟, 等. 基于最小安全距离的车辆跟驰模型研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(10): 95-100.
XU Lun-hui, LUO Qiang, WU Jian-wei, et al. Research on vehicle following model based on minimum safety distance [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(10): 95-100.
- [5] 邱小平, 马丽娜, 周小霞, 等. 基于安全距离的手动-自动驾驶混合交通流研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(4): 101-108.
QIU Xiao-ping, MA Li-na, ZHOU Xiao-xia, et al. Research on manual-automatic driving mixed traffic flow based on safety distance [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information, 2016, 16(4): 101-108.
- [6] REICH J. Systematic engineering of safe open adaptive systems shown for truck platooning [D]. Kaiserslautern: Technische University Kaiserslautern, 2016.
- [7] 姜能惠, 于建国. 基于 RBF 神经网络的高速公路防追尾模型研究[J]. 森林工程, 2010, 26(5): 60-62.
JIANG Neng-hui, YU Jian-guo. Study on rear-end avoidance model of highway based on RBF neural network [J]. Forest Engineering, 2010, 26(5): 60-62.
- [8] 胡满江, 葛如海, 苏清祖. 基于 GA-SVM 的汽车追尾预测方法研究[J]. 汽车技术, 2012(11): 24-26.
HU Man-jiang, GE Ru-hai, SU Qing-zu. Research on GA-SVM-based rear-end collision prediction approach [J]. Automobile Technology, 2012(11): 24-26.
- [9] 陆斯文, 张兰芳, 方守恩. 高速公路追尾机理概率分析及风险评价[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(8): 1150-1154.
LU Si-wen, ZHANG Lan-fang, FANG Shou-en. Probability analysis and risk assessment of highway rear-end mechanism [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(8): 1150-1154.
- [10] MENG Q, QU X. Estimation of rear-end vehicle crash frequencies in urban road tunnels [J]. Accident Analysis & Prevention, 2012, 48: 254-263.
- [11] 张吉光. 高速公路汽车连环追尾风险研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
ZHANG Ji-guang. Research on the risk of rear-end collision of expressway cars [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2012.
- [12] KHASTHIR S, BIRRELL S, DHADYALLA G, et al. Towards increased reliability by objectification of hazard analysis and risk assessment (HARA) of automated automotive systems [J]. Safety Science, 2017, 99: 166-177.
- [13] LI Z, AHN S, CHUNG K, et al. Surrogate safety measure for evaluating rear-end collision risk related to kinematic waves near freeway recurrent bottlenecks [J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 64: 52-61.
- [14] LI Z, LI Y, LIU P, et al. Development of a variable speed limit strategy to reduce secondary collision risks during inclement weathers [J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 72: 134-145.
- [15] XU C, TARKO A P, WANG W, et al. Predicting crash likelihood and severity on freeways with real-time loop detector data [J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 57: 30-39.
- [16] 陆建, 张文珺, 杨海飞, 等. 基于碰撞时间的追尾风险分析[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(5): 58-64.
LU Jian, ZHANG Wen-jun, YANG Hai-fei, et al. Risk analysis of rear-end attack based on collision time [J]. Journal of Traffic Information and Safety, 2014, 32(5): 58-64.

- [17] 李 耘,张生瑞,茹澍博.高速公路施工区车流跟驰追尾冲突风险[J].长安大学学报:自然科学版,2017,37(2):81-88.
LI Yun, ZHANG Sheng-rui, RU Mian-bo. Risk of car-following conflicts in expressway construction areas[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37(2): 81-88.
- [18] BALAS V E, BALAS M M. Driver assisting by inverse time to collision[C]//IEEE. Proceedings of World Automation Congress. New York: IEEE, 2006: 1-6.
- [19] TREIBER M, HENNECKE A, HELBING D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical Review E, 2000, 62(2): 1-45.
- [20] NISHINARI K. Traffic flow dynamics: Data, models and simulation [J]. Physics Today, 2014, 67(3): 54-54.
- [21] SHLADOVER S E, NOWAKOWSKI C, LU X Y, et al. Cooperative adaptive cruise control: Definitions and operating concepts[J]. Transportation Research Record, 2015(2489): 145-152.
- [22] MILANES V, SHLADOVER S E. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J]. Transportation Research Part C, 2014, 48: 285-300.
- [23] MILANES V, SHLADOVER S E, SPRING J, et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 15(1): 296-305.
- [24] CHEN X, LI R, XIE W, et al. Stabilization of traffic flow based on multi-anticipative intelligent driver model[C]//IEEE. Proceedings of the 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2009: 1-6.
- [25] LI Z, LI W, XU S, et al. Stability analysis of an extended intelligent driver model and its simulations under open boundary condition[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2015, 419: 526-536.
- [26] ALAM A. Fuel-efficient heavy-duty vehicle platooning[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2014.
- [27] KESTING A, TREIBER M, SCHONHOF M, et al. Adaptive cruise control design for active congestion avoidance[J]. Transportation Research Part C, 2008, 16(6): 668-683.
- [28] 蔡团结. 汽车燃油经济性不解体检测关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
CAI Tuan-jie. Research on key technologies of automobile fuel economy non-disintegration detection[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [29] 刘 锴, 贾 洁, 刘 超, 等. 车路协同环境下道路无信号交叉口防碰撞系统警示效果(双语出版)[J]. 中国公路学报, 2018, 31(4): 222-230.
LIU Kai, JIA Jie, LIU Chao, et al. Warning effectiveness of vehicle-to-infrastructure cooperative crossing collision prevention system at non-signal controlled intersection (in English)[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 222-230.
- [30] CHEN F, CHEN S. Reliability-based assessment of vehicle safety in adverse driving conditions[J]. Transportation Research Part C, 2011, 19(1): 156-168.