

车辆荷载特性影响下的碰撞时间分布规律

王颖¹,方志纯²,简注清²,涂辉招^{*1},施能艺³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804; 2. 福建省交通规划设计院有限公司,福州 350000; 3. 香港理工大学 土木与环境工程系,香港 999077)

摘要: 受车辆荷载特性影响的碰撞时间(Time-To-Collision, TTC),被认为是车辆避撞系统中跟驰过程风险评估的有效指标。本文以车辆类型、超重和超速指标量化表征车辆荷载特性,分解前后车辆不同荷载特性组合的12类跟驰场景。基于动态称重技术获取融合荷载特性的交通流数据,分析车辆荷载特性对自由流交通状态下12类跟驰场景TTC分布的影响,利用KS检验对比TTC分布的显著性。结果表明:TTC累计频率分布服从指数模型,在5%置信度水平上,跟驰前后车的车辆类型对TTC分布无显著影响;前后车均为超重轻车显著增加了潜在冲突风险,超重增加了轻车跟驰重车,轻车跟驰轻车场景的潜在冲突风险;前后车不超速跟驰场景下,轻车跟驰重车的风险比例高于轻车跟驰轻车。

关键词: 交通工程;替代措施;数理统计;碰撞时间;车辆跟驰;荷载特性

Effects of Vehicle Load Characteristics on Distributions of Time-to-collision

WANG Ying¹, FANG Zhi-chun², JIAN Zhu-qing², TU Hui-zhao¹, SZE Nang-nagai³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Transportation Planning and Design Institute and Limited Company of Fujian Province, Fuzhou 350000, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hongkong 999077, China)

Abstract: Time-to-collision (TTC), which is affected by vehicle load characteristics, is considered as an effective index for the risk assessment of the car-following process in collision avoidance systems. This research uses vehicle type, overweight and speeding to quantify vehicle load characteristics. Twelve types of car-following scenarios under free-flow conditions were decomposed with different load characteristics of the leading and following vehicles. The weigh-in-Motion (WIM) technique is applied to obtain traffic flow data that combines the load characteristics. The influence of vehicle load characteristics on TTC distribution in the 12 types of car-following scenarios was analyzed. The significance of TTC distribution was compared using KS test. Results show that the distribution of TTC cumulative frequency fits an exponential distribution. At the 5% level of significance, vehicle class and speeding do not show a significant effect on TTC distribution. Overweight of light vehicles has significant effect on TTC distribution. And overweight increases the potential conflict risk in the scenarios of a light vehicle following a heavy/light vehicle. In the case that the leading and following vehicles are not speeding, the potential conflict risk in the scenario of a light vehicle following a heavy vehicle is higher than the scenario of a light vehicle following a light vehicle.

Keywords: traffic engineering; surrogate measure; mathematical statistics; time-to-collision; car-following; load

收稿日期:2020-04-23

修回日期:2020-07-27

录用日期:2020-08-03

基金项目:福建省交通运输科技项目/Transportation Technology Project of the Fujian Province, China(201907);山西重点研发计划/Major Research and Development (R&D) Project of Shanxi Province(19-JKKJ-1);香港政府研究资助/Research Grants Council of Hong Kong(25203717).

作者简介:王颖(1992-),女,山东威海人,博士生。

*通信作者:huizhaotu@tongji.edu.cn

characteristics

0 引言

碰撞时间(Time-To-Collision, TTC)是开发避撞系统常用的潜在冲突风险替代指标,指两车发生冲突时,两车保持原有速度差,从当前时刻至潜在冲突发生的时间段^[1]。TTC与跟驰场景下车辆类型、超速和超重等车辆荷载特性密切相关。跟驰行为能够描述在限制超车的单车道上行驶车队中相邻两车之间的相互作用^[2],Pipes^[3]率先引入车辆跟驰的概念,并将其定义为“驾驶员高效且安全跟驰前车的决策”。确定跟驰场景的指标和方法很多,其中,《美国道路通行能力手册》规定当车头时距小于等于5.00 s时,车辆处于跟驰状态^[4],得到广泛应用。

前后车车速^[5-6]、航向角^[7]、行驶工况^[8]、荷载特性^[8]等均会对TTC特性产生影响。张琼^[5]利用自然驾驶数据,进行换道时前后车车速影响下的TTC特性分析;王畅等^[6]进行前后车车速及车速差影响下的TTC特性研究;刘庆华等^[7]考虑前后车航向角、运行轨迹等要素对TTC特性进行研究;Chen等^[8]考虑车重、行驶工况、天气设计仿真算法,建立综合考虑TTC和安全制动距离的行车安全报警系统。传统交通监测技术多获取除荷载特性外的实时交通信息,如车辆通过监测断面时刻、速度等。关于车辆荷载影响下的TTC分布规律研究,有待实测数据驱动开展进一步研究。动态称重(Weigh-In-Motion, WIM)技术,是一组含有传感器和软件的电子仪器,不仅可以捕获车辆经过监测断面时刻、速度、轴重、轴数信息,还可以通过测量动态轮胎压力来估算行驶车的荷载特性信息。因此,WIM技术能够在不中断交通运行的情况下,获取特定地点融合荷载特性的交通流数据,为分析荷载特性对TTC分布的影响提供支撑。

通常采用1.50~10.00 s的TTC值进行潜在冲突风险评估研究,但TTC阈值^[9-10]及划分标准^[10-11]不完全统一。Nobukawa等^[9]选择10.00 s作为TTC阈值分析高速公路变道场景中大型卡车驾驶员的后向间隙接受特性。Hirst等^[10]选择10.00 s作为TTC

阈值,认为TTC在0.00~1.00 s内为高风险,1.00~3.00 s内为低风险。Pirinccioglu等^[11]将TTC值介于0.00~1.00 s定义为高风险,1.00~1.50 s定义为中等风险,1.50~2.00 s定义为低风险。本文将TTC在0.00~1.00 s划分为高风险,1.00~3.00 s划分为低风险。基于WIM获取特定地点融合荷载特性的交通流数据,分析车辆类型,车辆类型和超重,车辆类型和超速3种12类典型跟驰场景下TTC分布规律,利用Kolmogorov Smirnov(KS)检验对比不同跟驰场景下TTC分布的差异性,计算不同跟驰场景下TTC分布特征值,为车辆避撞系统风险评估指标的优化提供科学依据。

1 研究方法

1.1 跟驰场景分解

公安部、交通部联合公布的《车辆超限超载认定标准》^[12]基于车辆轴数将车辆分为5类,不同车辆类型限重如表1所示。基于车辆类型划分标准,将车辆类型分为四轴及以上车辆,三轴及以下车辆,并分别定义为重车、轻车。实际装载货物质量过高,使总车重或轴重超过规范要求的车辆定义为超重车辆。车辆荷载特性通过车辆类型结合超重和超速进行划分。

表1 不同车辆类型的限重

Table 1 Vehicle classification and gross vehicle weight limits

车辆类型	二轴	三轴	四轴	五轴	六轴
限重/t	20.00	30.00	40.00	50.00	55.00

将前后车车头时距介于0.00~5.00 s的场景定义为跟驰场景,选其中介于0.00~10.00 s的TTC值为研究对象,表2~表4为跟驰场景代码。其中,L代表前车的荷载特性,F代表后车的荷载特性;下标:h代表重车,1代表轻车,y代表超重,n代表不超重,s代表超速,w代表不超速。以车辆类型、超重和超速等指标量化表征车辆荷载特性,分解前后车辆不同荷载特性组合的12类跟驰场景,并选取样本量充足的跟驰场景进行分析。

表2 考虑车辆类型的跟驰场景代码

Table 2 Scenario code considering vehicle classes

前车	后车	
	重车	轻车
重车	$L_h - F_h$	$L_h - F_l$
轻车	$L_l - F_h$	$L_l - F_l$

表3 考虑超重的跟驰场景代码

Table 3 Scenario code considering overweight

前车	后车		
	超重	不超重	共计
超重	$L_y - F_y$	$L_y - F_n$	$L_y - F$
不超重	$L_n - F_y$	$L_n - F_n$	$L_n - F$
共计	$L - F_y$	$L - F_n$	-

表4 考虑超速的跟驰场景代码

Table 4 Scenario code considering speeding

前车	后车		
	超速	不超速	共计
超速	$L_s - F_s$	$L_s - F_w$	$L_s - F$
不超速	$L_w - F_s$	$L_w - F_w$	$L_w - F$
共计	$L - F_s$	$L - F_w$	-

1.2 数据分析方法

基于以下标准预处理WIM数据:

(1) 轴数介于2~6轴.

(2) 车辆总重不小于3.50 t.

(3) 单轴轴重介于0.20~30.00 t, 总车重为各轴轴重总和.

(4) 单轴轴距介于0.60~20.00 m, 车长为各轴轴长总和.

(5) 车速介于60 km/h至高速公路限速修正值 v_{\max} 之间. v_{\max} 计算公式为

$$v_{\max} = f \cdot v \quad (1)$$

式中: v_{\max} 为高速公路限速修正值; v 为高速公路限速值; f 为修正系数, 通常取值为1.30~1.50, 本文取值为1.40^[13].

分析荷载特性(包括车辆类型、超重、超速等)对TTC(介于0.00~10.00 s范围内的TTC值)的影响. 后车速度大于前车时, TTC计算公式为

$$E_{TTC,i} = \frac{x_i - x_{i-1} - l_{i-1}}{v_i - v_{i-1}} = \frac{v_i \cdot E_{ht,i} - l_{i-1}}{v_i - v_{i-1}}, \forall v_i > v_{i-1} \quad (2)$$

式中: $E_{TTC,i}$ 为车辆 i 的TTC值; $E_{ht,i}$ 为车辆 i 与车辆 $i-1$ 之间的车头时距; l_{i-1} 为车辆 $i-1$ 的长度; x_i 、 x_{i-1} 分别为车辆 i 、 $i-1$ 的位置; v_i 、 v_{i-1} 分别为车辆 i 、 $i-1$ 的速度.

利用KS测试研究前后车的车辆类型、超重和超速影响下的TTC分布的显著性差异, 建立不同跟驰场景下TTC统计分布的特征值(即高风险和低风险的比例). 本文将TTC值上界设定为10.00 s, TTC值在0.00~1.00 s定义为高风险, 1.00~3.00 s定义为低风险.

2 实证分析与结果讨论

2.1 WIM数据

表5为我国高速公路不同车辆类型的交通流和荷载特性WIM实测数据汇总情况.

表5 不同车辆类型的交通流和荷载特性汇总

Table 5 Summary of traffic count and vehicle load characteristics by vehicle classes

车辆类型	二轴	三轴	四轴	五轴	六轴
总车重均值/t	3.34	17.43	26.77	31.52	45.72
总车重标准差/t	4.66	10.22	14.19	20.96	21.24
WIM数据样本量	4 998 875	239 405	230 112	77 096	413 598
速度均值/(km/h)	98.03	69.67	68.15	61.01	65.82
速度标准差/(km/h)	4.06	4.66	4.75	4.58	4.89
R^2	0.96	0.94	0.99	0.97	0.96

(1) A高速公路在2009年为双向4车道, 2013年扩建为双向8车道, 限速均为120 km/h. WIM数据分别观测于2009年4月1~30日(30 d), 以及2013年7月24日~2014年1月6日(47 d). 2009年调查共记录了640 664 veh的WIM数据, 2013年调查共记录了1 875 504 veh的WIM数据. 其中, 2009年调

查共记录12 541组跟驰样本, 2013年调查共记录15 778组跟驰样本.

(2) B高速公路为双向8车道, 限速120 km/h. 于2013年10月14日~2014年10月20日进行了观察性调查. 为期190 d的调查中, 共记录3 490 153 veh的WIM数据, 共计20 238组跟驰样本.

(3) C 高速公路为双向 6 车道,限速 100 km/h.于 2013 年 1 月 1~30 日,进行为期 21 d 的调查,共记录 139 729 veh 的 WIM 数据,其中,有 988 组跟驰样本.

为排除缺失数据的影响,选择具有完整交通流特性的 WIM 数据,共有 5 959 086 条,有效率达 96.96%,其中,有 49 545 组跟驰样本.

表 6 和表 7 分别为考虑车辆类型,车辆类型、

超重和超速的跟驰场景样本量,表 8 和表 9 分别为考虑车辆类型和超重,考虑车辆类型和超速的跟驰场景 TTC 分布.

轻车跟驰轻车场景样本量为 35 526,比其他跟驰场景样本量大;不超重轻车跟驰不超重轻车场景,不超速轻车跟驰不超速轻车场景样本量分别为 34 244 和 32 921,远高于其他场景样本量.因此,利用 TTC 的累积频率分布消除样本量的干扰.

表 6 考虑车辆类型的跟驰场景样本量

Table 6 Number of observations considering vehicle classes

地点位置	$L_h - F_h$	$L_h - F_l$	$L_l - F_h$	$L_l - F_l$
A 高速公路	2009	23	5 323	10
	2013	48	1 805	21
B 高速公路	178	6 241	24	13 795
C 高速公路	6	307	33	642
共计	255	13 676	88	35 526

表 7 考虑车辆类型、超重和超速的跟驰场景样本量

Table 7 Sample sizes of scenarios considering vehicle classes, overweight and speeding

跟驰场景	$L_n - F_n$	$L_y - F_n$	$L_n - F_y$	$L_y - F_y$	$L_w - F_w$	$L_s - F_w$	$L_w - F_s$	$L_s - F_s$
$L_h - F_h$	92	45	64	54	247	8	0	0
$L_h - F_l$	10 794	2 619	113	150	13 494	180	0	2
$L_l - F_h$	57	3	22	6	81	7	0	0
$L_l - F_l$	34 244	788	337	157	32 921	2 598	2	5
共计	45 187	3 455	536	367	46 743	2 793	2	7

表 8 考虑车辆类型和超重的跟驰场景 TTC 样本数分布

Table 8 TTC distribution of scenarios considering vehicle classes and overweight

TTC/s	$L_h - F_l$	$L_l - F_l$	$L_h - F_l$				$L_l - F_l$			
			$L_n - F_n$	$L_y - F_n$	$L_n - F_y$	$L_y - F_y$	$L_n - F_n$	$L_y - F_n$	$L_n - F_y$	$L_y - F_y$
(0.00, 1.00]	33	177	17	15	1	0	135	27	8	7
(1.00, 2.00]	449	886	287	152	1	9	630	113	86	57
(2.00, 3.00]	1 067	1 141	767	277	9	14	1 008	62	53	18
(3.00, 4.00]	1 574	1 832	1 183	356	14	21	1 739	53	31	9
(4.00, 5.00]	1 791	2 767	1 357	397	14	23	2 663	72	22	10
(5.00, 6.00]	1 879	3 610	1 489	347	23	20	3 487	80	28	15
(6.00, 7.00]	1 832	4 619	1 509	299	10	14	4 483	89	31	16
(7.00, 8.00]	1 782	5 927	1 440	311	14	17	5 809	86	25	7
(8.00, 9.00]	1 699	6 846	1 420	247	12	20	6 723	84	28	11
(9.00, 10.00]	1 570	7 721	1 325	218	15	12	7 567	122	25	7

2.2 考虑车辆类型的 TTC 分布

$L_h - F_h$ 跟驰场景高风险样本量(0),低风险样本量(5,占比 1.96%), $L_l - F_h$ 跟驰场景样本量(88)较小,故选取样本量充足的 $L_h - F_l$ 、 $L_l - F_l$ 跟驰场景进行研究.图 1 为考虑车辆类型的跟驰场景的

TTC 分布.表 10 表明考虑车辆类型的 TTC 分布拟合模型服从指数分布,且拟合优度均大于 0.90.当后车为轻车时, $L_h - F_l$ 跟驰场景(即前车为重车)的 TTC 值低于 $L_l - F_l$ 跟驰场景(即前车为轻车), $L_h - F_l$ 跟驰场景潜在冲突风险更大.

表9 考虑车辆类型和超速的跟驰场景TTC样本数分布

Table 9 TTC distribution of scenarios considering vehicle classes and speeding

TTC/s	$L_h - F_1$	$L_l - F_1$	$L_w - F_w$			
			$L_h - F_h$	$L_h - F_1$	$L_l - F_h$	$L_l - F_1$
(0.00, 1.00]	33	177	0	33	1	168
(1.00, 2.00]	449	886	1	419	6	744
(2.00, 3.00]	1 067	1 141	4	1 021	3	858
(3.00, 4.00]	1 574	1 832	7	1 554	6	1 597
(4.00, 5.00]	1 791	2 767	12	1 773	7	2 524
(5.00, 6.00]	1 879	3 610	22	1 861	9	3 332
(6.00, 7.00]	1 832	4 619	26	1 818	5	4 354
(7.00, 8.00]	1 782	5 927	47	1 769	10	5 603
(8.00, 9.00]	1 699	6 846	61	1 689	15	6 446
(9.00, 10.00]	1 570	7 721	67	1 557	19	7 295

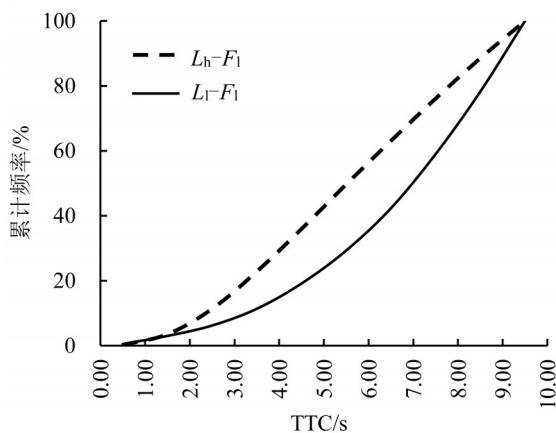


图1 考虑车辆类型的TTC分布

Fig. 1 TTC distributions with respect to vehicle classes

由表11可知,轻车跟驰重车TTC值为高风险与低风险的比例为0.24%和11.09%,高于轻车跟驰轻车的高风险与低风险的比例(分别为0.50%和5.71%). $L_h - F_1$ 跟驰场景的高风险与低风险场景的前后车平均速度差(分别为42.55和36.90)高于 $L_l - F_1$ 跟驰场景(分别为37.37和32.00).这表明,轻

车跟驰重车比轻车跟驰轻车的平均速度差与基于TTC的潜在冲突风险更大.另外,在5%置信度水平上,KS检验结果表明, $L_h - F_1$ 、 $L_l - F_1$ 不同车辆类型跟驰场景TTC的分布不存在显著差异性.

表10 考虑荷载特性的TTC分布模型

Table 10 Model of TTC distributions with respect to load characteristics

跟驰场景	累计频率分布拟合函数	R^2
$L_h - F_1$	$y = 0.1045 \exp(0.2485x)$	0.94
$L_l - F_1$	$y = 0.0452 \exp(0.3309x)$	0.99
$L_n - F_n \& L_h - F_1$	$y = 0.0957 \exp(0.2572x)$	0.94
$L_y - F_n \& L_h - F_1$	$y = 0.1406 \exp(0.2193x)$	0.91
$L_n - F_y \& L_h - F_1$	$y = 0.1052 \exp(0.2475x)$	0.93
$L_y - F_y \& L_h - F_1$	$y = 0.1323 \exp(0.225x)$	0.92
$L_n - F_n \& L_l - F_1$	$y = 0.0416 \exp(0.3396x)$	0.99
$L_y - F_n \& L_l - F_1$	$y = 0.1441 \exp(0.21x)$	0.95
$L_n - F_y \& L_l - F_1$	$y = 0.2388 \exp(0.1618x)$	0.85
$L_y - F_y \& L_l - F_1$	$y = 0.289 \exp(0.1436x)$	0.80
$L_w - F_w \& L_h - F_1$	$y = 0.103 \exp(0.25x)$	0.94
$L_w - F_w \& L_l - F_1$	$y = 0.0416 \exp(0.3395x)$	0.99

表11 考虑车辆类型的高风险与低风险比例

Table 11 Proportion of high risk and low risk considering vehicle classes

场景	高风险/%	低风险/%	高风险场景的平均速度差/(km/h)	低风险场景的平均速度差/(km/h)
$L_h - F_1$	0.24	11.09	42.55	36.90
$L_l - F_1$	0.50	5.71	37.37	32.00
$L_n - F_n \& L_h - F_1$	0.16	9.76	43.06	37.04
$L_y - F_n \& L_h - F_1$	0.57	16.38	41.80	36.36
$L_n - F_y \& L_h - F_1$	0.88	8.85	45.00	41.20
$L_y - F_y \& L_h - F_1$	0.00	15.33	-	38.83
$L_n - F_n \& L_l - F_1$	0.39	4.78	37.48	32.13
$L_y - F_n \& L_l - F_1$	3.43	22.21	36.70	30.85
$L_n - F_y \& L_l - F_1$	2.37	41.25	37.50	32.30
$L_y - F_y \& L_l - F_1$	4.46	47.77	37.71	31.12
$L_w - F_w \& L_h - F_1$	0.24	10.67	42.55	35.44
$L_w - F_w \& L_l - F_1$	0.51	4.87	36.96	30.55

注:高风险TTC为(0.00, 1.00] s,低风险TTC为(1.00, 3.00] s.

2.3 考虑超重的TTC分布

图2为考虑车辆类型和超重 $L_h - F_1$ 、 $L_l - F_1$ 跟驰场景的TTC分布。表10表明考虑车辆类型和超重的TTC分布拟合模型服从指数分布，且拟合优度均大于0.80。在5%置信度水平上，KS检验结果表明，当轻车跟驰轻车($L_l - F_1$)时， $L_y - F_1$ & $L_l - F_1$ 前后车均超重跟驰场景的TTC分布与 $L_l - F_1$ 跟驰场景TTC分布存在显著性差异，说明前后车为超重轻车显著增加潜在冲突风险；其他跟驰场景的TTC分布不存在显著性差异。

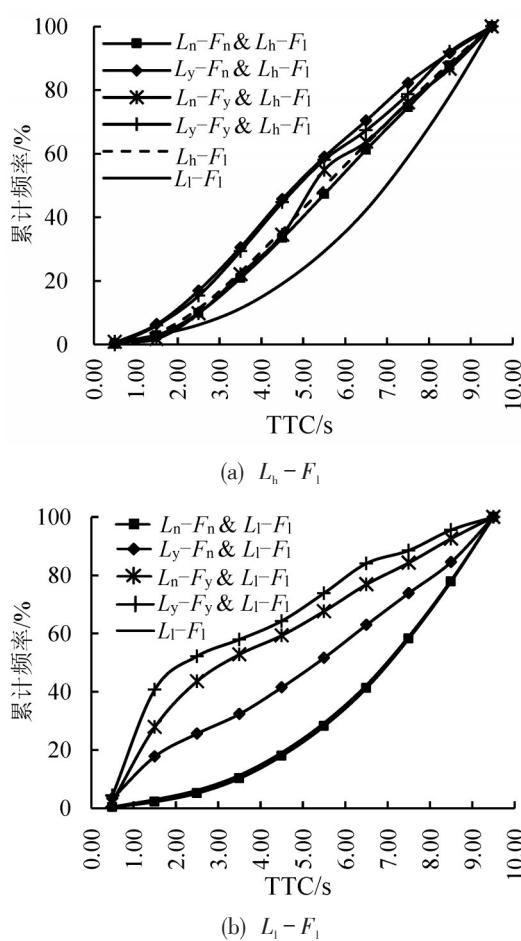


图2 考虑车辆类型与超重的TTC分布

Fig. 2 TTC distributions with respect to vehicle classes and overweight

表11表明，就轻车跟驰重车场景而言，仅前车重车超重场景 $L_y - F_n$ & $L_h - F_1$ 的高风险和低风险比例分别为0.57%和16.38%，远大于仅后车轻车超重场景 $L_n - F_n$ & $L_l - F_1$ 的高风险和低风险比例(分别为0.88%和8.85%)。就轻车跟驰轻车场景而言，前后车均超重场景 $L_y - F_y$ & $L_l - F_1$ 的高风险和

低风险比例分别为4.46%和47.77%，远大于前后车都不超重场景 $L_n - F_n$ & $L_l - F_1$ 的高风险和低风险比例(分别为0.39%和4.78%)。结果表明，车辆的超重增加轻车跟驰重车、轻车跟驰轻车场景的潜在冲突风险，超重车辆导致视距和加减速制动性能都变差。

2.4 考虑超速的TTC分布

$L_w - F_s$ 、 $L_s - F_s$ 跟驰场景样本量分别为2、7， $L_s - F_w$ & $L_h - F_h$ 、 $L_s - F_w$ & $L_h - F_1$ 、 $L_s - F_w$ & $L_l - F_h$ 、 $L_s - F_w$ & $L_l - F_1$ 跟驰场景高风险样本量分别为0、0、0、9，故选取样本量充足的轻车跟驰重车均不超速 $L_w - F_w$ & $L_h - F_1$ ，轻车跟驰重车均不超速 $L_w - F_w$ & $L_l - F_1$ 跟驰场景进行研究。图3为考虑车辆类型和超速 $L_h - F_1$ 、 $L_l - F_1$ 跟驰场景的TTC分布。KS检验结果表明，前后车均不超速对跟驰场景TTC分布不存在显著性影响。表10表明，考虑车辆类型和超速的TTC分布拟合模型服从指数分布，且拟合优度均大于0.90。

表11表明， $L_h - F_1$ 、 $L_l - F_1$ 跟驰场景高风险比例分别为0.24%和0.50%，不超速 $L_w - F_w$ 下 $L_h - F_1$ 、 $L_l - F_1$ 跟驰场景高风险比例分别为0.24%和0.51%，两者差别不大；但 $L_h - F_1$ 、 $L_l - F_1$ 跟驰场景低风险比例分别为11.09%和5.71%，不超速 $L_w - F_w$ 下 $L_h - F_1$ 、 $L_l - F_1$ 跟驰场景低风险比例分别为10.67%和4.87%。前后车不超速跟驰场景的低风险比例低于不考虑超速与否低风险比例。不超速场景下，轻车跟驰重车的风险比例高于轻车跟驰轻车。

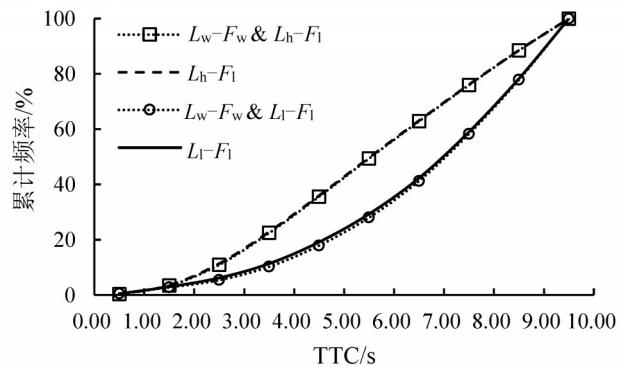


图3 考虑车辆类型和超速的TTC分布

Fig. 3 TTC distributions with respect to vehicle classes and speeding

3 结 论

本文基于 WIM 技术采集融合荷载特性的交通流数据,分析前后车辆不同荷载特性组合的自由流交通状态下 12 类跟驰场景 TTC 分布,结果表明:TTC 累计频率分布服从指数模型;在 5% 置信度水平上,KS 检验前后车车辆类型对 TTC 分布无显著影响,前后车为超重轻车显著增加潜在冲突风险;超重增加轻车跟驰重车、轻车跟驰轻车场景的潜在冲突风险;前后车不超速跟驰场景下,轻车跟驰重车的风险比例高于轻车跟驰轻车。不同车辆荷载特性跟驰场景,潜在冲突风险 TTC 阈值具有差异性,同时潜在冲突风险可将车辆荷载特性融入 TTC 值。分析结果仅限于自由流交通状态,后续研究可扩展到拥挤和堵塞交通流状态,不同服务水平条件下考虑荷载特性的 TTC 分布分析。

参考文献:

- [1] HAYWARD J. Near misses as a measure of safety at urban intersections[D]. Pennsylvania, US: Pennsylvania State University, 1971.
- [2] 王殿海,金盛. 车辆跟驰行为建模的回顾与展望[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 115–127. [WANG D H, JIN S. Review and outlook of modeling of car-following behavior[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 115–127.]
- [3] PIPES L A. An operational analysis of traffic dynamics [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(3): 274–281.
- [4] Transportation Research Board. Highway capacity manual third edition[R]. Washington D.C. : Transporation Reasearch Board, 1998.
- [5] 张琼. 基于驾驶人感知特性的换道预警阈值研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. [ZHANG Q. Research on lane change warning threshold based on driver's perception characteristics[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.]
- [6] 王畅, 付锐, 张琼, 等. 换道预警系统中参数 TTC 特性研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 91–100, 108. [WANG C, FU R, ZHANG Q, et al. Research on parameter TTC characteristics of lane change warning system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 91–100, 108.]
- [7] 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. [LIU Q H, QIU X L, XIE L M, et al. Anti-collision warning time algorithm based on driving speed of vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(12): 99–106.]
- [8] CHEN Y L, SHEN K Y, WANG S C. 2013 IEEE 8th conference on industrial electronics and applications (ICIEA), forward collision warning system considering both time-to-collision and safety braking distance[C]. Melbourne: VIC, 2013.
- [9] NOBUKAWA K, BARNES M, GOODSELL R, et al. Reconstruction of vehicle trajectories for intersection conflict analysis using vehicle-based sensors[C]. Stockholm, Sweden: International Association for Vehicle System Dynamics, 2009.
- [10] HIRST S, GRAHAM R. The format and presentation of collision warnings[M]. Leicestershire, UK: HUSAT Research Institute, 1997.
- [11] PIRINCCIOGLU F, LU J J, PERNIA J C. Safety evaluation of right turn followed by U-turn at a signalized intersection as an alternative to direct left turn from driveways[J]. Advances in Transportation Studies, 2006, 8(B): 71–79.
- [12] 中国交通运输部. 超限超载认定标准[S]. (2017-11-9) [2018-06-28]. <https://wenku.baidu.com/view/6065e81250e79b89680203d8ce2f0066f53364cf.html>. [Ministry of Transport of China. Identification standard for overload[S]. (2017-11-9) [2018-06-28]. <https://wenku.baidu.com/view/6065e81250e79b89680203d8ce2f0066f53364cf.html>.]
- [13] HE Q J, WANG Y, TU H Z, et al. Incorporating the WIM data into the analysis of road traffic risk[C]. China, Shanghai: The 17th COTA International Conference of Transportation Professionals, 2017.