

Typical Test Cases' Establishment for Truck Rear-end Collision Avoidance System Based on Real Accident Data

Jiaqi FANG, Qi WANG

Tongji University, Shanghai, China, 201804

Email: 1632790@tongji.edu.cn.com

Abstract: With the continuous development of Chinese freight transportation system, truck rear-end accidents happen more and more frequently, making road traffic safety a major social problem, which is waiting for appropriate mitigation measures urgently. Based on the rear-end accidents data of heavy truck collected in Shanghai from 2006 to 2014, this paper analyzed the characteristics of the accident from many aspects and extracted four kinds of typical test conditions by cluster analysis. Compare the typical conditions with foreign AEB test conditions, studied the versatility of foreign standards in Chinese traffic situation and the particularity of Chinese conditions. Research of this paper may have reference value for the independent development of heavy trucks' AEB product in China.

Keywords: Rear-end collision, Feature analysis, Cluster analysis, AEB test cases

基于真实事故数据建立货车追尾避撞系统的典型测试工况

方嘉祺, 王 琦

同济大学, 上海, 中国, 201804

Email: 1632790@tongji.edu.cn.com

摘要: 随着我国的货运体系不断发展, 货车追尾事故发生得愈发频繁, 使得道路交通安全成为重大的社会问题, 亟待合适的缓解手段。本文采用在上海采集的 2006 年到 2014 年间重型货车追尾事故数据, 分析其特征; 确定了表征参数, 利用聚类分析提取了 4 类典型测试工况; 将其与国外 AEB 测试工况标准进行比对, 研究了国外测试标准在中国交通状况下的泛用性, 以及中国道路交通状况的特殊性。本文的研究对国外的 AEB 测试工况进行了补充, 对我国重型货车的 AEB 产品的自主研发可具有一定的参考价值。

关键词: 追尾碰撞; 特征分析; 聚类分析; AEB 测试工况

1 引言

经济社会的快速持续发展, 也使得物流行业发展迅猛, 公路货物运输在我国综合货物运输体系中占有十分重要的地位。重型货车具有运输量大、运输速度快且工作灵活等特点, 在公路货运中占有举足轻重的地位。2015 年, 中国营运性质的货车货运量为 315 亿吨, 同比增长 1.2%, 占全国货运总量的 75.4%。由于重型货车具有体积大、载重多的特点以及经常存在超载、超速等违法违规行为, 其造成的交通事故严重且特殊。根据 2015 年道路交通事故统计年报数据, 全国共发生交通事故 187781 起, 事故造成 58022 人死亡, 174235 人受伤, 事故死亡率为 31%, 事故致死率为 25%; 而其中重型货车事故共发生 16848 起, 事故造成 9639 人死亡, 14683 人受伤, 其事故死亡率为 57%, 事故致死率为 40%。与同期全国道路交通事故相比, 重型货车事故死亡率要高出 83.87%, 事故致死率要高出 60%^[1]。

追尾碰撞是涉及重型货车事故中的典型类型之一, 死亡率非常高^[2]。在进行追尾避撞系统控制策略开发以及

对追尾避撞系统进行实车测试时,需要制定合适的测试工况,以保证其功用。对测试工况的要求是一方面需要尽量简单以节省成本,从而缩短开发时间;另一方面,测试工况需要对该事故类型具有一定的代表性。

交通事故采集数据中包含的信息繁多且复杂。本文的研究基于上海联合道路交通事故安全科学研究中心(SHUFO)^[4]数据库中2006年至2014年以及CIDAS数据库中2011年至2014年的重型货车事故案例,对重型货车追尾事故进行了特征分析。在此基础上,通过聚类分析的算法,对货车追尾事故变量参数进行研究,得到典型的重型货车追尾事故工况,并将其与国外法规中的测试工况进行比较分析,以确定中国重型货车追尾避撞系统测试工况的参考标准。

2 国外追尾碰撞避让系统的测试工况

2015年10月,美国机动车工程师协会(Society of Automotive Engineers, SAE)发布了SAEJ3029,该标准针对总质量大于4535kg的商用车前向碰撞预警及避撞系统有效性评估的测试流程进行了规定^[3]。其中有三种测试工况,分别为前车静止、前车减速、前车匀速,如表1所示。

Table 1. AEB test conditions of SAE regulation
表 1. SAE 的 AEB 测试法规

测试工况	测试示意图	$V_{Sv}(\text{km/h})$	$V_{Tv}(\text{km/h})$	$a_{Tv}(\text{m/s}^2)$	D(m)
前车静止测试		40.2	0	0	91
前车减速测试		40.2	40.2	3	91.4
两车匀速测试		72.4	32.2	0	91.4

ECE在2013年出台了ECE R131法规^[3],对装备有气压或液压制动的8t以上的N₂、N₃以及M₃类车辆的AEB系统基本性能及测试工况进行了规定,其中的AEB系统的测试工况如表2所示。

Table 2. AEB test conditions of ECE regulation
表 2. ECE 的 AEB 测试法规

测试方式	测试示意图	$V_{Sv}(\text{km/h})$	$V_{Tv}(\text{km/h})$	$a_{Tv}(\text{m/s}^2)$	D(m)
前车静止测试		80	0	0	120
两车匀速测试		80	32	0	120

通过对比SAE与ECE的测试法规,可以看出两者都包含了前车静止和前车匀速的工况,最大的区别是ECE

中缺少了前车减速的工况。除此之外，在静止测试和匀速测试的工况中，ECE 法规中规定的后车车速都要高于 SAE 法规中的后车车速，相对应的，测试距离也被放大。

3 重型货车追尾事故特征分析

通过对 SHUFO 和 CIDAS 采集的事故数据进行筛选，得到 114 起重型货车追尾其他车辆的碰撞事故，其中两车事故共 95 起，三车及三车以上事故为 19 起；发生在高速公路上有 101 起，发生在普通道路上有 13 起；事故共造成 53 人死亡，124 人受伤。

3.1 事故特征统计分析

对于单独一起追尾交通事故，其发生过程具有一定的随机性，即道路交通事故具有很强的随机性和突发性^[5]。但是，通过对大量事故的深度调查以及统计分析，能够得到不同类型交通事故的特征和发生规律，从而为预防交通事故、提高车辆安全性和修订相关法律法规提供依据。

从事故严重程度和人员伤亡程度的视角考虑，本文主要对事故车辆、事故时间、事故车速与碰撞重叠率进行了特征分析。

事故车辆

事故参与方是事故发生的主体，是一件事故中最重要的变量因素，不同类型事故车辆由于体积、质量的差异可导致不同的事故后果。

从追尾车辆（后车）的车辆类型看，其中四轴重型货车共 35 辆，六轴货车共 79 辆。

从被追尾车辆（前车）的车辆类型看，被追尾车辆为重型货车的事故共 96 起，为乘用车的有 13 起，为中型、轻型货车的 5 起，如图 1 所示。这是因为货运车辆大部分聚集在非城市公路、高速公路等场景，且这类道路路口少，车辆大多保持直行，因而货车追尾的对象也大都是其他货车。

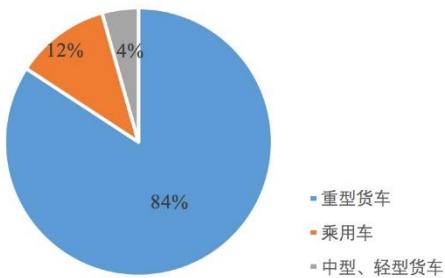


Figure 1. Front vehicles type distribution
图 1. 被追尾车辆类型分布

国内货车大多为平头驾驶室，因此货车的变形情况即驾驶室变形侵入情况，直接对舱内人员造成伤亡。因此在车辆方面，本文还对重型货车车辆变形情况进行了统计分析。

在 114 起追尾事故数据库中，后车有变形的共 98 起，变形情况分布如图 2 所示。其中车辆变形在 150cm 以上的占 45%，这样的变形深度，严重侵占了乘员的生存空间，是造成重型货车驾乘人员伤亡的最主要原因。

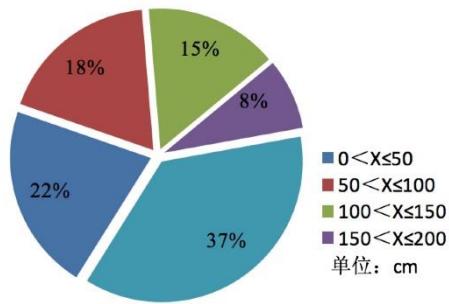


Figure 2. Deformation of Trucks(N=98)

图 2. 重型货车车辆变形情况 (N=98)

3.2 事故发生时间

货车作为生产工具，在公路上运行的时间远远超过乘用车，覆盖了白天到晚上的各个时段。货车夜间行驶时，由于驾驶员疲劳、能见度下降等原因，更加容易发生事故。因此，追尾事故的发生时间也是一个值得研究的因素。

从 24 小时事故数量分布看，重型货车追尾事故并没有明显的集中发生时段。根据美国学者 等人的研究^[6]，对重型货车事故时间划分为 5 个时段：0:00~5:00、5:00~10:00、10:00~16:00、16:00~20:00 和 20:00~24:00。经过对样本的统计，在每个时段内的事故数量、伤亡人数的分布情况如表 3 所示。

Table 3. Occurrence time of accidents

表 3. 事故发生时间统计结果

时间段	事故数量	死亡人数	受伤人数
总计	114	53	124
00:00~05:00	46	23	54
05:00~10:00	25	14	25
10:00~16:00	17	4	19
16:00~20:00	3	5	1
20:00~24:00	23	7	25

可见，发生在 00:00~5:00 的事故数量最多，主要存在以下两个方面的原因：首先，由于夜间光线较为昏暗，驾驶员视距受影响，不易识别紧急情况，从而不能及时采取合理有效的应急避撞措施；另外，由于夜间行驶的车辆相对较少，重型货车存在超速行驶的可能，这些行为对车辆驾驶的稳定性和驾驶员反映时间都存在很大的影响。

3.3 碰撞车速

碰撞时两车车速的大小直接关系到事故的严重程度，是一件事故中非常重要的影响因素^[7]。

在事故样本中，前车处于静止状态的事故有 24 起，约占事故总数的 21%，这些事故主要是发生在高速公路上，前车临时停车而被追尾。事故主要原因为前车或后车的驾驶员车未注意观察路况。通过统计可知，后车车速的平均值为 73km/h；不考虑前车处于静止状态的 24 起事故，前车车速的平均值为 38km/h。

后车的行驶速度与对应的事故数量、人员伤亡情况示于图 3。可见，后车的行驶速度相对较高，集中分布在 70km/h 至 90km/h 之间。当后车车速大于 90km/h 时，虽然事故数量较少，但是事故致死率最高，达 0.57。

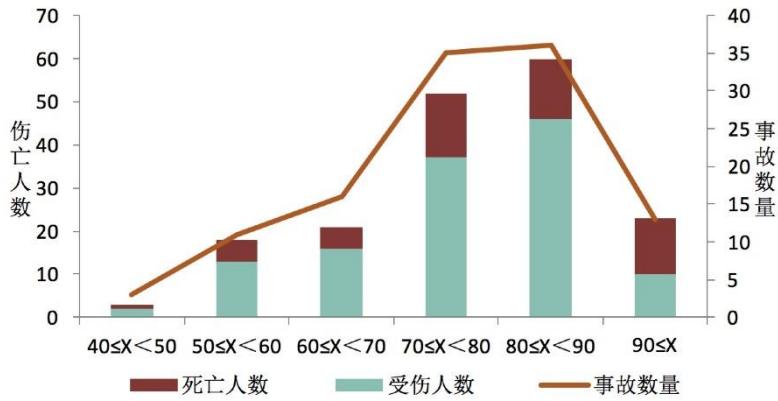


Figure 3. Rear vehicle speed distribution

图 3. 事故时后车车速

前车的行驶速度与对应的事故数量、人员伤亡情况示于图 4。前车的车速及伤亡人数分布均较为分散，说明事故的伤亡情况与前车在事发时的速度关联较小。

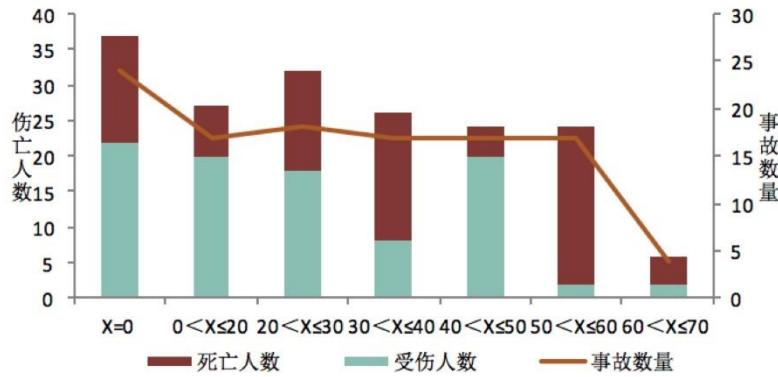


Figure 4. Front vehicle speed distribution

图 4. 事故时前车车速

两车相对速度与对应的事故数量、人员伤亡情况如图 5 所示。相对速度在 40km/h 至 50km/h 之间的事故数量最多，且造成的伤亡人数也最多。

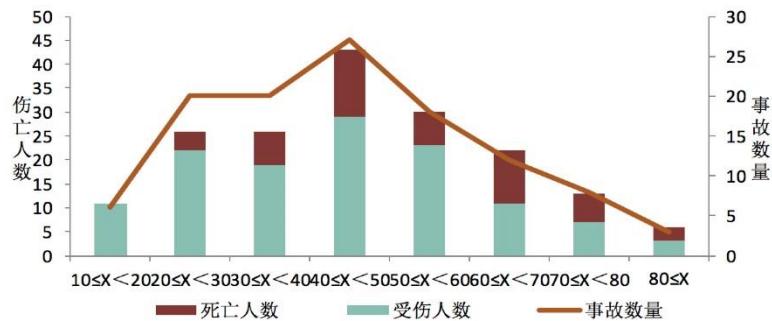


Figure 5. Relative speed distribution

图 5. 两车相对速度分布

3.4 碰撞重叠率

除了碰撞车速以外，碰撞重叠率是另一个影响人员伤亡情况的重要因素。碰撞重叠率越小，车头参与吸能的面积就越小，纵向形变的距离就越大，对车内人员生命安全的威胁就越高^[8]。

本文根据后车与前车碰撞重叠区域以及后车损坏区域的不同，重型货车的追尾事故可主要分为三类：“近 100% 重叠碰撞”、“近 50% 左偏置碰撞”以及“近 50% 右偏置碰撞”，如图 6 所示。

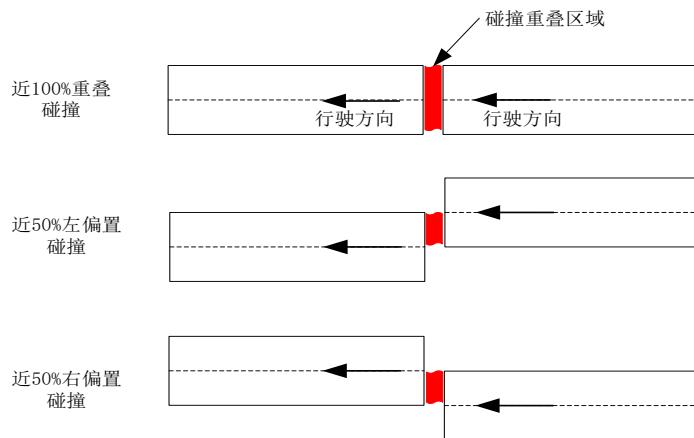


Figure 6. Collision overlap rate

图 6. 碰撞重叠率示意图

其中，近 100% 重叠碰撞的事故发生频次最高，占总数的 52.6%，其次是近 50% 右偏置碰撞，约占 36%，因此，在追尾避撞控制策略的开发中需要考虑到碰撞重叠率对于避撞效用的影响。具体的事故数量及死亡人数如表 4 所示。

Table 4. Collision overlap rate distribution

表 4. 碰撞重叠率统计结果

重叠率	事故数量			死亡人数	
	数量	占比	数量	占比	
近 100% 重叠碰撞	60	52.6%	31	58.5%	
近 50% 右偏置碰撞	41	36.0%	15	28.3%	
近 50% 左偏置碰撞	13	11.4%	7	13.2%	

4 追尾事故典型测试工况的建立

4.1 聚类参数筛选

交通事故数据采集的主要信息包括事故环境、事故车辆以及被撞物的信息、事故车辆位置以及事故前后车辆运动情况等。另外，通过交通事故深度研究以及事故重建，可以获得较为准确的碰撞过程中的速度、转向以及事故原因等多种信息。由于事故信息十分繁多，若事故参数全部用于聚类分析^[9]，会造成数据量庞大，且聚类结果可靠性不好等方面的问题，因此需要对事故数据信息进行筛选分析。参考 SAE 及 ECE 中重型货车 AEB 测试工况参数，以及刘颖^[10]、李霖^[11]等人在提取典型测试工况时所用的场景参数，在本文中初步筛选的用于典型追尾工况聚类分析的主要事故信息如下：

1、事故信息

事故编号：事故编号是样本的唯一代码，每一个事故编号是一起事故的 ID。

2、事故环境信息：

天气：晴、阴、雨、雪；

照明：事发时间、有路灯、无路灯；

道路：道路等级（高速公路、普通公路）、道路弯曲程度、路面干燥或潮湿。

3、车辆信息：

后车车速、前车车速；

前车减速度；

碰撞重叠率。

将事故样本记录的信息抽象为多个变量值的组合，对事故样本进行统计后发现某些变量类型中的某个值占样本总数的 60%以上，如图 7 所示。此类变量在聚类分析过程中不容易成为类别的突出特征^[12]，因此不用于本文中的聚类分析，但它们在重型货车典型场景的建立中可作为参考。

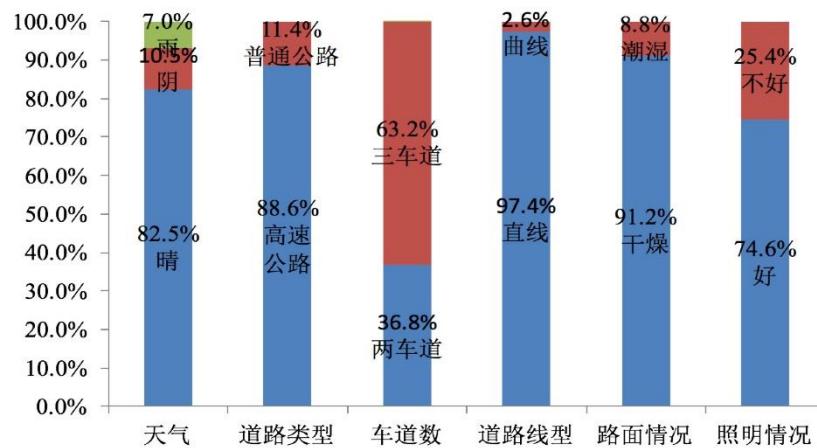


Figure 7. Environment parameters of accidents

图 7. 事故环境参数

在碰撞重叠率的统计中，偏置碰撞与全宽碰撞的事故数量大致相当，“近 50% 左偏置碰撞”的事故数量相对较少。因此，聚类分析时将碰撞重叠率归为“近 50% 重叠碰撞”和“近 100% 重叠碰撞” 两类，其中“近 50% 重叠碰撞”包含了左偏置和右偏置。

最终选取的用于聚类分析的参数为：碰撞重叠率、后车车速、前车车速以及前车减速度。MATLAB 在进行聚类分析程序运算时以数值形式的方式运算，因此，需要将各类输入变量转换成参数形式。在输入的参数中，碰撞重叠率属于名义尺度变量，它有两种变量值：“近 50% 重叠碰撞” 和 “近 100% 重叠碰撞”，分别用 ‘0’ 和 ‘1’ 表示；而后车车速、前车车速和前车减速度是属于连续变化的间隔尺度变量，进行 ‘0-1 标准化’ 处理^[13]，即对原始数据进行线性变换，使处理后的结果在 [0,1] 的区间内，其转换函数为：

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中 x^* 为标准化后的值， x 为进行处理的原值， x_{\min} 为样本中最小值， x_{\max} 为样本中最大值。通过对事故参数的分析，选择的用于聚类分析的变量及输入值如表 5 所示。

Table 5. Variables of cluster analysis

表 5. 聚类分析变量类型

变量类型	变量	变量值	数值变量
名义尺度	碰撞重叠率	近 50%重叠碰撞	0
		近 100%重叠碰撞	1
	后车车速 (km/h)	30 30~50 50~110	0 0~0.25 0.25~1
间隔尺度	前车车速 (km/h)	0~50	0~0.625
		50~80	0.625~1
	前车减速速度 (m/s ²)	0 0~3 3~6	0 0~0.4918 0.4918~1

4.2 聚类结果分析

本文选用欧式距离方法来计算样本之间的距离^[14]，采用最短距离法对样本进行聚类分析。在聚类分析中，通过不一致系数的变化，可以确定最终的分类个数。在聚类过程中，若某一种聚类结果所对应的不一致系数较上一次有较大增加，说明该次聚类的效果不好，而上一次的聚类效果较好。运行 MATLAB 聚类分析程序，不一致系数的变化情况如图 8 所示，在第 110 次到 111 次并类时不一致系数变化最大，此次聚类中所有样本被分为四类。因此，本文认为原始样本被分为 4 类时效果最好。

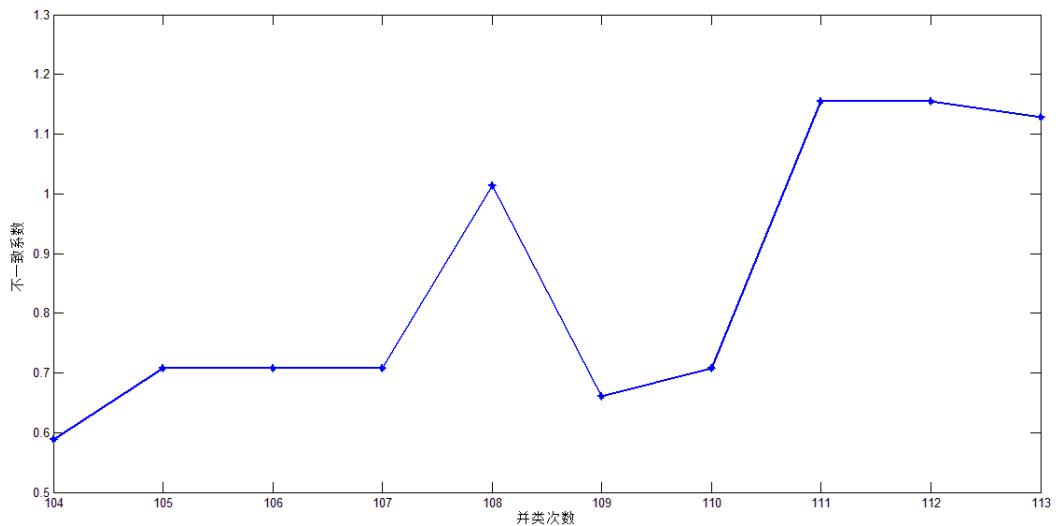


Figure 8. inconsistency coefficient of cluster analysis

图 8. 不一致系数变化情况

聚类结果如表 6 所示：

Table 6. Results of cluster analysis
表 6. 聚类分析结果

参数	类别	聚类结果			
		第一类	第二类	第三类	第四类
碰撞重叠率	近 50%重叠率 (事故个数)	26	28	0	0
	近 100%重叠率 (事故个数)	0	0	28	32
第 50 百分位后车车速(km/h)		80	70	80	70
第 50 百分位前车车速(km/h)		45.5	20	50.5	0
第 50 百分位前车减速度		3.4	0	4.2	0

以第一类为基本类, 对四种典型测试工况进行分析如下:

第一类: 碰撞重叠率为 50%, 后车以较高的车速追尾同样以较高车速且处于部分制动行驶的前车; 第 50 百分位的事故场景为: 后车速度为 80km/h, 追尾以 45.5km/h 行驶且以 3.4m/s^2 减速行驶的前车。

第二类: 碰撞重叠率为 50%, 后车以较高的车速追尾以较低车速行驶的前车; 与第一类相比, 最显著的不同点为这种情况下前车车速较低且没有采取制动; 第 50 百分位的事故场景为: 后车速度为 70km/h, 追尾以 20km/h 行驶的前车。

第三类: 碰撞重叠率为 100%, 后车以较高的车速追尾同样以较高的车速和较大制动减速度行驶的前车; 与第一类相比, 最显著的不同点是碰撞重叠率的不同; 第 50 百分位的事故场景为: 后车的速度为 80km/h, 追尾以 50.5km/h 行驶且以 4.2m/s^2 减速行驶的前车。

第四类: 碰撞重叠率为 100%, 后车以较高车速追尾静止的前车; 与第一类最显著的不同点是碰撞重叠率的不同以及前车车速、减速度的不同。第 50 百分位的事故场景为: 后车速度为 70km/h, 追尾静止的前车。

4.3 中外典型测试工况的对比分析

SAE、ECE 针对于商用车 AEB 测试工况的测试工况主要分为三类: 前车减速、前车匀速以及前车静止。测试工况对比如下:

1、本文本文提取的 4 类典型测试工况包含了近 100%重叠碰撞与近 50%偏置碰撞两种类型, 而 SAE 与 ECE 中仅考虑 100%重叠碰撞。

2、ECE 中没有针对于前车减速的测试工况。本文提取的第一类与第三类典型测试工况中后车车速较高, 而前车的行驶工况相似, 均为在相对较高的速度下减速行驶, 与 SAE 中减速测试工况较为相似。对比结果如表 8 所示。

Table 7. Comparison between deceleration cases
表 7. 减速工况对比结果

减速工况	后车车速(/)	前车车速(/)	前车减速度(/2)
第一类	40.2	40.2	0.3
	80	45.5	3.4
第三类	80	50.5	4.2

3、本文提取的第二类测试工况与 SAE 及 ECE 中的匀速测试工况较为相似。该测试工况所代表的事故类型为后车车速较高, 而前车车速相对较低, 对比结果如表 9 所示。

Table 8. Comparison between constant speed cases
表 8. 匀速工况对比结果

匀速工况	后车车速(/)	前车车速(/)	前车减速度(/2)
	72.4	32.2	0
	80	32	0
第二类	70	20	0

4、本文提取的第四类事故工况与 ECE 中的静止测试工况较为相似, 但与 SAE 相比, 后车的测试车速较高, 对比结果如表 10 所示。

Table 9. Comparison between still cases
表 9. 静止工况对比结果

静止工况	后车车速(/)	前车车速(/)	前车减速度(/2)
	40	0	0
	80	0	0
第四类	70	0	0

综上所述, 本文通过聚类分析算法提取的四种典型测试工况覆盖的场景更为全面, 能涵盖 SAE 及 ECE 中三种典型的测试工况, 又体现出了中国道路工况的特殊性。

5 结语

以中国道路交通环境下的 114 起重型货车追尾事故数据进行的特征分析表明: 重型货车的夜间追尾事故数量较多; 追尾车辆以四轴重型货车和六轴汽车列车(牵引车三轴、半挂车三轴)为主, 驾驶室的严重变形是造成人员伤亡的主要原因; 事故中后车车速相对较高, 集中分布在 70km/h 至 90km/h 之间; 从碰撞重叠率看, 近 100% 重叠碰撞与近 50% 偏置碰撞的事故数量各占一半。通过聚类分析提取出四种重型货车追尾避撞典型测试工况, 并与 SAE 及 ECE 的测试工况进行对比分析, 结果表明本文提出的四种典型测试工况更为丰富, 不仅能涵盖 SAE 及 ECE 的测试场景, 且具备中国道路交通独有的特点^[15]。

重型货车追尾避撞系统典型测试工况的建立, 为控制策略的研究与分析提供了基础, 对于系统评价具有十分重要的意义。

致 谢

本文的工作得到了导师王宏雁教授、王琦师兄和冯弟遥师兄的倾力指导和支持。在这里向各位老师和前辈尽心尽力的付出表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] National Bureau of Statistics of China. 2015. *National Data*. Retrieved from <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [2] Lao Y, Zhang G, Wang Y, et al. Generalized nonlinear models for rear-end crash risk analysis[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 62: 9-16.
- [3] Deng X. Research on Technology Development and Standard Regulation of Advanced Driver Assistance System[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2013, (19):40-41.
- [4] 邓湘鸿. 先进驾驶辅助系统技术发展与标准法规研究[J]. 科技创新与应用, 2013, (19):40-41.

- [5] Zhao M, Wang H, Chen J, et al. Method to Optimize Key Parameters and Effectiveness Evaluation of the AEB System Based on Rear-End Collision Accidents[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, 2017, 10(2017-01-0112): 310-317.
- [6] Bagdadi O. Assessing safety critical braking events in naturalistic driving studies[J]. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 2013, 16: 117-126.
- [7] Pahukula J, Hernandez S, Unnikrishnan A. A time of day analysis of crashes involving large trucks in urban areas[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 75C:155-163.
- [8] Sun X, Zhu X, Li L, et al. Study of causation mechanism and dynamic feature for typical rear end situations in China-FOT[J]. 2016.
- [9] Zhu X, Tan Q. Static Pressure Simulation Analysis of Heavy Truck Cab Structure Optimization[J]. Science and Technology and Engineering, 2010, 16: 4071-4074.
- [10] 朱秀娟,谭庆亮. 重卡驾驶室结构优化顶盖静压仿真分析[J]. 科学技术与工程,2010,16:4071-4074
- [11] Anderberg M R. Cluster analysis for applications[R]. Office of the Assistant for Study Support Kirtland AFB N MEX, 1973.
- [12] Liu Y. Pedestrian automatic emergency braking system test method [D]. Tongji University. 2014.
- [13] 刘颖. 行人自动紧急制动系统测试方法[D].同济大学. 2014.
- [14] Li L, Zhu X, Liu Y. Typical Traffic Hazard Scenes Related to Cyclists[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2014, 42(7): 1082-1087.
- [15] 李霖, 朱西产, 刘颖. 涉及骑车人的典型交通危险场景[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(7):1082-1087.
- [16] Park S, Kim S, Ha Y. Highway traffic accident prediction using VDS big data analysis[J]. The Journal of Supercomputing, 2016, 72(7): 2815-2831.
- [17] Jáčová J, Gardlo A, Friedecký D, et al. Sample-independent approach to normalize two-dimensional data for orthogonality evaluation using whole separation space scaling[J]. Journal of Chromatography A, 2017, 1511: 1-8.
- [18] Gu L, Zhang L, Zhao Y. An Euclidean Distance based on the Weighted Self-information Related Data Transformation for Nominal Data Clustering[C]//Proceedings of the 2017 ACM on Conference on Information and Knowledge Management. ACM, 2017: 2083-2086.
- [19] Xie S H, Wu Y S, Liu X J, et al. Mortality from road traffic accidents in a rapidly urbanizing Chinese city: A 20-year analysis in Shenzhen, 1994–2013[J]. Traffic injury prevention, 2016, 17(1): 39-43.