

AEB Test Scenarios under Cut - in Dangerous Conditions

Lan XIA, Xichan ZHU, Zhixiong MA

School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai, China, 201804

Email: leo_xialan@tongji.edu.cn

Abstract: Based on the naturalistic driving data in the China Field Operational Test (China-FOT) database, 80 cases of cut-in dangerous conditions were selected and classified. Then, all 43 samples of the first type cut-in dangerous conditions, in which Autonomous Emergency Braking Systems (AEB) functioned, were analyzed using the multivariate statistical method of cluster analysis and 6 kinds of dangerous scenarios with typical characteristics were obtained. According to these typical scenes, 4 AEB test scenarios under cut-in dangerous conditions, which are more in line with China's traffic conditions, are established. At last, these 4 test scenarios are virtually modeled using PreScan.

Keywords: naturalistic driving; cut-in dangerous conditions; autonomous emergency braking system; cluster analysis; test scenarios

切入型危险工况下自动紧急制动系统的测试场景

夏 澜, 朱西产, 马志雄

同济大学 汽车学院, 上海, 中国, 201804

Email: leo_xialan@tongji.edu.cn

摘 要: 基于中国大型实车路试 (China-FOT) 数据库中的自然驾驶数据, 从中筛选出 80 例切入型危险工况样本并对其进行分类。然后利用聚类分析的多元统计学方法针对自动紧急制动系统 (AEB) 发挥作用的第 1 类切入型危险工况的 43 例样本进行分析, 得到了 6 类具有典型特征的危险场景。根据这些典型场景, 建立了 4 种更符合我国交通状况的切入型危险工况下自动紧急制动系统的测试场景。最后利用 PreScan 软件对这 4 种测试场景进行虚拟建模。

关键词: 自然驾驶; 切入型危险工况; 自动紧急制动系统; 聚类分析; 测试场景

1 引言

先进驾驶辅助系统 (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) 中的自动紧急制动系统是一种能够通过自动制动来避免碰撞或减轻碰撞的主动安全系统。AEB 的应用可以大大减少车辆与车辆和车辆与人碰撞的事故或减轻事故中人员的伤亡程度, 道路数据显示 AEB 可以减少约 27% 的事故。因此, 鉴于 AEB 的广泛应用及其对于减少交通事故的重大意义, AEB 的测试方法也逐渐受到各国研究人员的重视。

场地测试作为 AEB 的一种重要测试方法, 由三大要素组成: 测试场景、驾驶员模型和测试目标物^[1]。其中测试场景必须与真实交通环境中的危险工况相对应, 同时, 从试验成本和试验效率考虑, 测试场景的数量应当尽量少。

目前国外对 AEB 测试场景的研究相对全面, 内容主要包括涉及车与车的冲突以及车与行人的冲突的场景的研究^[2-3]。欧盟新车认证程序 (Euro NCAP) 在 2014 年发布的关于自动紧急制动系统的测试规范中就对城市 AEB, 城际 AEB 和行人 AEB 的场地测试方法进行了详细的规定^[4]。但是, 由于不同国家和地区的驾驶环境以及驾驶员的驾驶习惯存在差异, 所以国外的测试场景研究并不能完全适用于我国, 为此, 需要根据我国真实的交通环境和驾驶习

惯进行 AEB 测试场景的研究。而目前国内对 AEB 测试场景的研究主要集中于某些特定工况下的具体场景,如刘颖等人利用自然驾驶数据建立了行人 AEB 系统的典型测试场景^[5];李霖等人根据视频采集得到的自然行驶工况数据,通过聚类分析和卡方检验,获得了涉及骑车人的典型危险场景以及追尾工况的典型危险场景^[6-7]。

本文基于 China-FOT 数据库中的自然驾驶数据,旨在以 AEB 发挥作用的切入型危险工况为研究对象,通过聚类分析的多元统计学方法获得切入型危险工况的典型危险场景,根据这些典型场景建立了更符合我国交通状况的切入型危险工况下 AEB 的测试场景,并用 PreScan 软件对测试场景进行虚拟建模,为 AEB 的开发与测试提供一些理论依据和建议。

2 典型切入型危险工况获取

2.1 China-FOT 数据库介绍

China-FOT 是由中瑞交通安全研究中心 CTS (The China-Sweden Research Center for Traffic Safety) 组织,由沃尔沃汽车集团、奥托立夫、交通运输部公路科学研究院、查尔姆斯大学、同济大学主要负责的在中国进行的较大的 FOT 测试。项目旨在大量采集中国道路-驾驶员-车辆信息,了解中国本土的道路交通环境,驾驶员的驾驶习惯,建立中国驾驶数据库。China-FOT 数据库中的数据主要包括:车辆行驶参数,摄像头视频数据和驾驶员调查问卷数据。

2.2 切入型危险工况的筛选

对切入型危险工况的筛选分为两步,首先利用自动筛选方法从 China-FOT 数据库中提取出危险工况,再通过人工观看视频数据的方法最终筛选得到切入型危险工况。

2.2.1 危险工况的筛选

从 China-FOT 数据库中提取出危险工况的自动筛选方法主要分为三层^[8]:第一层筛选主要依据纵向加速度、横向加速度以及横摆角速度与速度关联下的偏离正常驾驶的特征分布来进行筛选以及危险程度分级;第二层筛选依据制动压力变化率以及 TTC 触发值的相关变量,结合车辆制动信号灯,转向信号灯信息,在第一层筛选的基础上进行再次筛选以及危险程度分级矫正;第三层筛选引入模糊综合评价法进行最终筛选以及危险程度的量化。而危险工况的危险程度划分则主要以 SeMiFOT^[9]中的分级标准为基础,主要关注其中的 2 级至 4 级危险(分别为 2.接近型干涉、3.碰撞相关干涉、4.近碰撞),并拓展相应表述范围,用等级 1 到等级 3,依次描述驾驶员“超过正常驾驶范畴”、“激烈驾驶”和“接近车辆动力学极限操作”下的危险工况。

筛选结果得到 780 例危险工况,最终的筛选准确率为 85.10%,其中 1 级危险工况 608 例,2 级危险工况 158 例,3 级危险工况 14 例。

2.2.2 切入型危险工况的筛选

对于 China-FOT 数据库中已经筛选出的 780 例危险工况而言,在此基础上,通过进一步观看这 780 例危险工况的视频数据,筛选出视频中包含车辆切入过程的危险工况作为本文所研究的切入型危险工况。

需要说明的是,由于切入型危险工况的参与主体为两部分,即切入车辆和被切入车辆,所以切入型危险工况总体上可以分为两大类,即目标车辆作为切入车辆的危险工况和目标车辆作为被切入车辆的危险工况。由于 China-FOT 数据库中只含有目标车辆的驾驶数据,对于其他车辆的驾驶行为和驾驶数据只能通过加装在目标车辆上的摄像头所拍摄的视频数据获得,所以在现有条件下,我们无法研究目标车辆作为切入车辆的危险工况;同时考虑到目标车辆作为切入车辆的危险工况与目标车辆在进行变道,超车,调头等操作时的危险工况相类似,故将本文所研究的切入型危险工况定义为目标车辆作为被切入车辆的危险工况。

一共筛选出 80 例本车作为被切入车辆的切入型危险工况,其中低危工况(危险等级为 1 级)的切入型危险工况 57 例,高位工况(危险等级为 2 级或 3 级)的切入型危险工况 23 例。

2.3 切入型危险工况的分类

参考 SHAP2 (STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM) [10-11] 分类标准, 根据切入车辆和被切入车辆行驶轨迹的不同组合, 将切入型危险工况分为 9 类 (具体分类结果见附录)。

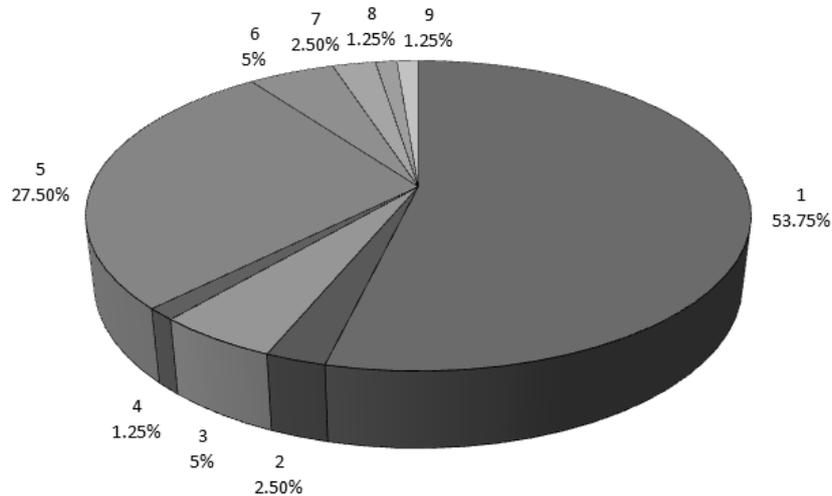


Figure 1. Statistical results of various types of cut-in dangerous conditions
图 1. 各类切入型危险工况的统计结果

如图 1 所示, 分别统计各类切入型危险工况的数量和占比发现, 第 1 类切入型危险工况 (被切入车辆因切入车辆变道切入车道采取制动避撞) 的数量最多, 占比最大, 共 43 例占总数 53.75%。这说明在自然驾驶中, 第 1 类切入型危险工况发生的概率最高, 且基本覆盖大部分切入型危险工况。

Table 1. Degree of danger for various types of cut-in dangerous conditions
表 1. 不同种类切入型危险工况的危险程度

| 分类编号 | 低危工况 | 高危工况 |
|------|------------|-----------|
| 1 | 35 (81.4%) | 8 (18.6%) |
| 2 | 1 (50%) | 1 (50%) |
| 3 | 2 (50%) | 2 (50%) |
| 4 | 1 (100%) | 0 (0%) |
| 5 | 13 (59%) | 9 (41%) |
| 6 | 2 (50%) | 2 (50%) |
| 7 | 1 (50%) | 1 (50%) |
| 8 | 1 (100%) | 0 (0%) |
| 9 | 1 (100%) | 0 (0%) |

表 1 中分别统计了各类切入型危险工况中低危工况和高危工况的数量和占比。考虑到其他各类切入型危险驾驶工况在 China-FOT 数据库中数据量较小, 对其危险程度特征的分析不一定准确, 这里重点关注第 1 类和第 5 类危险工况的危险程度特征。虽然相较于第 1 类切入型危险工况, 第 5 类切入型危险工况中高危工况的占比更高, 但如果比较高危工况的绝对数量, 两者相差不大。

所以第 1 类切入型危险工况无论从发生概率, 还是从危险程度上, 都是最典型的切入型危险工况, 故对第 1 类切入型危险工况的危险场景进行进一步分析, 以建立切入型危险工况下 AEB 的测试场景。

3 切入型危险工况下 AEB 的测试场景

3.1 聚类分析

聚类分析是根据“物以类聚”的道理，对样品或指标进行分类的一种多元统计分析方法。该方法将个体或对象分类，使得同一类中的对象之间的相似性比其他类的对象的相似性更强。与人工分类方法相比，聚类分析大大降低了主观意识对类别的影响，而且整个分类过程都是数学计算，可重复性高。

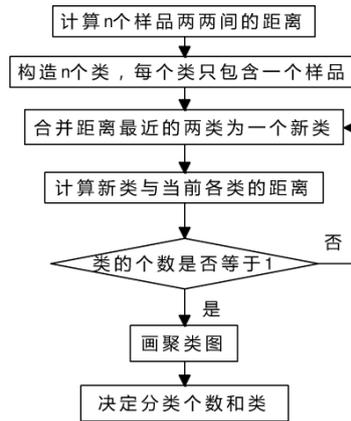


Figure 2. Process of cluster analysis
图 2. 聚类分析的流程

本文采用系统聚类法对切入型危险工况的场景进行研究。系统聚类法（也称层次聚类法）是实际工作中使用最多的一种方法，其聚类过程大致为：开始时每个样品各看成一类，如有 n 个样品就看成 n 类；然后，将距离最接近的两类合并成一个新类，得到 $n-1$ 类；重新计算新类与其他类的距离，再将距离最近的两类合并，得到 $n-2$ 类；再重新计算新类与其他类的距离……，这样一步步地进行下去，每一步减少一类，直至所有的样品都合并成一类为止；最后，整个聚类过程可绘成聚类树形图，并决定分类个数和每类有哪些样品，整个聚类分析的流程如图 2 所示。

聚类分析中距离的计算至关重要，在系统聚类法中距离的计算分为变量，样品和类三个层次。

变量之间的距离定义为变量数值表示差值的绝对值。可是，有些样品和变量因为量纲不同，直接使用原始数据就会突出那些绝对值大的变量的作用而削弱了那些绝对值小的变量的作用。因此，在计算之前通常需要对原始数据进行标准化处理。标准化处理的主要方法有标准差标准化和极差标准化，本文采用的是极差标准化。设所有样品（共 n 个样品，每行表示一个样品，每个样品有 p 个变量）表示为：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

则每个变量的极差表示为：

$$R_j = \max_{1 \leq i \leq n} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} x_{ij} \quad (2)$$

则经过极差标准化后的各变量为：

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} x_{ij}}{R_j} \quad (3)$$

标准化后的变量最小值为 0，最大值为 1，其余在区间[0,1]之间，极差为 1，无量纲。

得到不同样品变量之间的距离后，则可以计算不同样品之间的距离。本文采用欧式距离（Euclidean Distance）对样品之间的距离进行量化。设 x_{ik} 为第 i 个样品的第 k 个变量，每个样品测量了 p 个变量，则样品 x_i 与 x_j 之

间的欧式距离 D_{ij} 的定义为:

$$D_{ij}(q) = \left(\sum_{k=1}^p |x_{ik} - x_{jk}|^q \right)^{\frac{1}{q}} \quad (4)$$

其中, $q=2$ 。

然后, 根据样本之间的距离可以计算类与类之间的距离, 这里采用离差平方和法 (又称 Ward 法) 进行类与类之间距离的计算。设类 G_K 有 n_K 个元素 (即样品), 每个样品用向量 X_i ($i=1,2,\dots,m$) 表示, 类 G_L 有 n_L 个元素, 每个样品用向量 X_j ($j=1,2,\dots,1$) 表示, 则类 G_K 与 G_L 之间距离 D_{KL} 的定义为:

$$D_{KL} = \frac{\|\bar{X}_K - \bar{X}_L\|^2}{\frac{1}{n_K} + \frac{1}{n_L}} \quad (5)$$

其中, \bar{X}_K 表示类 G_K 中所有样品的均值向量, \bar{X}_L 表示类 G_L 中所有样品的均值向量, $\|x\|$ 表示欧氏距离。

聚类分析的结果最终得到一个聚类树, 可以把所有样品聚为一类。但在实际应用中, 到底应该把观测到的样品分为几类, 这是一个比较困难的问题。本文运用统计学方差分析的思想根据相关统计量随聚类水平的变化决定类数, 各统计量及其判断标准如表 2 所示。

Table 2. Each statistic and its judgment standard
表 2. 各统计量及其判断标准

| 统计量 | 判断标准 |
|-------------|---|
| R^2 统计量 | R^2 统计量越大, 说明分类结果越合适。但是, 分类越多, 每个类越小, R^2 越大, 所以我们只能取使得 R^2 足够大, 但分类 G 较少且 R^2 不再大幅增加的分类结果。 |
| 半偏相关 | 半偏 R^2 统计量越大, 说明这两个类越不应该合并, 所以如果由 G+1 类合并为 G 类时半偏相关很大就应该取 G+1 类。 |
| 伪 F 统计量 | 伪 F 统计量评价分为 G 个类的效果, 应该取伪 F 统计量较大而类数较小的聚类水平。 |
| 伪 t^2 统计量 | 伪 t^2 统计量评价合并类 G_K 和类 G_L 的效果, 该值大说明不应合并这两个类, 所以应该取合并前的聚类水平。 |

3.2 切入型危险工况的典型场景

3.2.1 切入型危险工况的描述变量

从 China-FOT 数据库中可以得到很多描述切入型危险工况的变量, 结合切入型危险工况的特征, 初步确定用于描述危险工况的变量包括:

- A. 基本信息
 - a. 编号: 样本的唯一代码
- B. 环境情况
 - a. 天气: 是晴或是雨, 可以通过雨刷的摆动和路面的干湿状况判断
 - b. 照明情况: 是否发生在夜间, 夜晚路灯的照明情况
 - c. 交通状况: 周围车辆的密集程度, 根据前方和侧面车辆的数量以及这些车辆与目标车辆的距离判断
 - d. 道路形状: 直行道路或转弯道路
- C. 目标车辆情况

开始切入时刻目标车辆速度
- D. 切入车辆情况
 - a. 切入车辆的类型: 小型车辆如轿车, 面包车等或大型车辆如客车, 卡车以及公交车等
 - b. 切入车辆的切入方向: 切入车辆从目标车辆左侧或右侧切入
 - c. 开始切入时刻切入车辆速度
- E. 两车相对运动情况

a. 开始切入时刻目标车辆与切入车辆之间的距离

3.2.2 聚类分析参数的选择

经初步统计后每个样本都被抽象为多个变量值的组合，各个变量值的统计分布如图 3 所示。

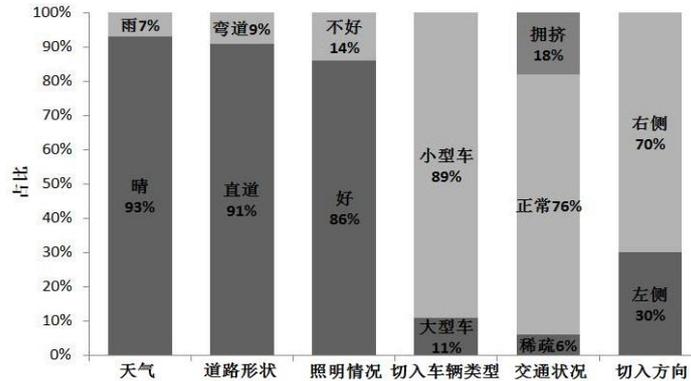


Figure 3. Specified variable distribution of cut - in dangerous conditions

图 3. 切入型危险工况的描述变量分布

经分析，初步选择的变量中有一些并不适用于聚类分析。图 3 中的前 4 个变量（“天气”，“道路形状”，“照明情况”和“切入车辆类型”）中某一个变量值（“晴”，“直道”“好”“小型车”）的分布达到总数的 85% 以上，而其他变量值的占比均没有超过 15%，不同变量值所占的比例差异性太大，此变量在聚类分析计算过程中不容易成为类别的突出特点；同时由于样本容量较小，因此这类变量不作为聚类分析采用的变量，但是在设计测试场景时可以应用所占比例较大的变量值作为测试参数。“交通状况”虽然不同变量值的分布比上述 4 个变量均匀，但是在测试时较难模拟测试车辆周围其他车辆的运动状态，需要的设备较多，成本偏大，而且数据显示，大部分切入型危险工况都是在正常的交通状况下发生的，说明交通状况对危险工况的影响不大，因此该变量也不用于聚类分析。

从初步选取的变量中除去不合适进行聚类分析的变量，最终确定用于聚类分析的变量包括：切入车辆切入方向，开始切入时刻切入车辆速度，目标车辆速度和两车距离。

3.2.3 聚类分析

表 3 为聚类分析中使用的变量的类型及各变量值对应的数值表示以及标准化后的结果。

Table 3. Cluster analysis participation variables of cut-in dangerous conditions
表 3. 切入型危险工况聚类分析参与变量

| 变量类型 | 变量 | 变量值 | 数值表示 | 标准化后的数值表示 |
|--------|---------------|-----------|------|-----------|
| 名义尺度变量 | 切入方向 | 左侧 | 0 | 0 |
| | | 右侧 | 1 | 1 |
| | | 21 (最小值) | 21 | 0 |
| 间隔尺度变量 | 开始切入时刻 | 34.8 | 34.8 | 0.2 |
| | 目标车辆速度 (km/h) | 76.2 | 76.2 | 0.8 |
| | 开始切入时刻 | 90 (最大值) | 90 | 1 |
| | | 4 (最小值) | 2 | 0 |
| | 两车距离 (m) | 104 (最大值) | 104 | 1 |
| | 切入车辆速度 (km/h) | 7 (最小值) | 7 | 0 |
| | 82 (最大值) | 82 | 1 | |

利用 SPSS 和 SAS 软件进行聚类分析的计算过程，同时考察半偏 R^2 统计量， R^2 统计量，伪 F 统计量和伪 t^2 统计量随聚类水平的变化。因为聚类水平太大时的信息没有多少用处，所以我们取聚类水平不超过 10 的各统计量的变化进行分析，以确定分类个数（图 4—图 7）。最终的聚类结果如图 8 所示，所有 43 例样本被分为 6 类，图中横轴是叶节点，每一个叶节点表示一个危险工况样本，叶节点编号和样本编号一致；纵轴是聚类距离。

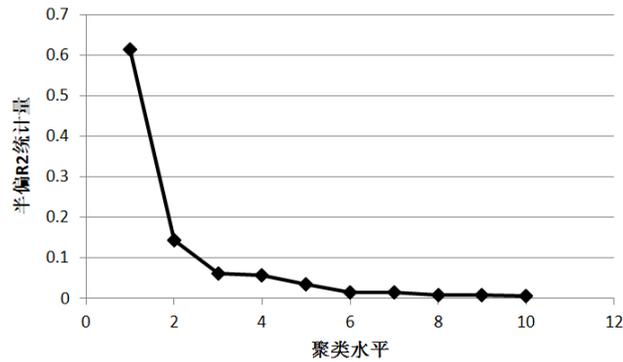


Figure 4. Change of statistic R^2 with cluster level
图 4. R^2 统计量随聚类水平的变化

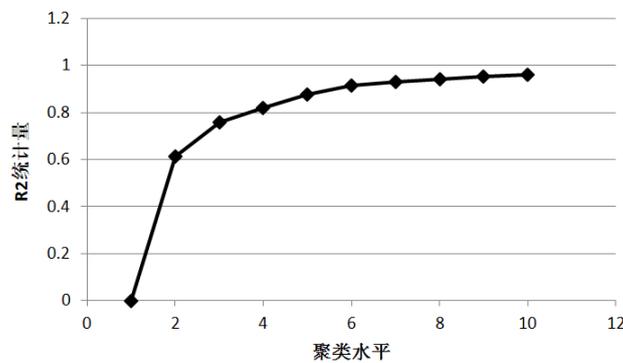


Figure 5. Change of statistic semi-partial R^2 with cluster level
图 5. 半偏 R^2 统计量随聚类水平的变化

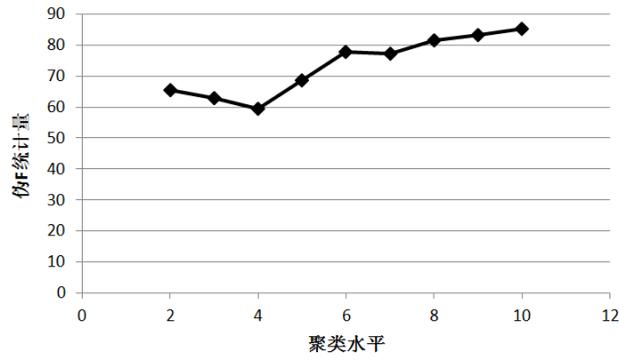


Figure 6. Change of statistic pseudo F with cluster level
图 6. 伪 F 统计量随聚类水平的变化

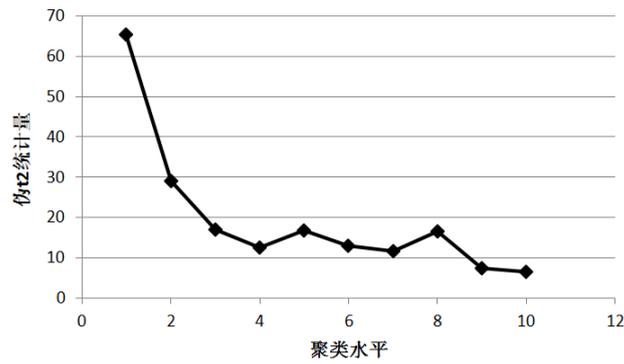


Figure 7. Change of statistic pseudo t^2 with cluster level
图 7. 伪 t^2 统计量随聚类水平的变化

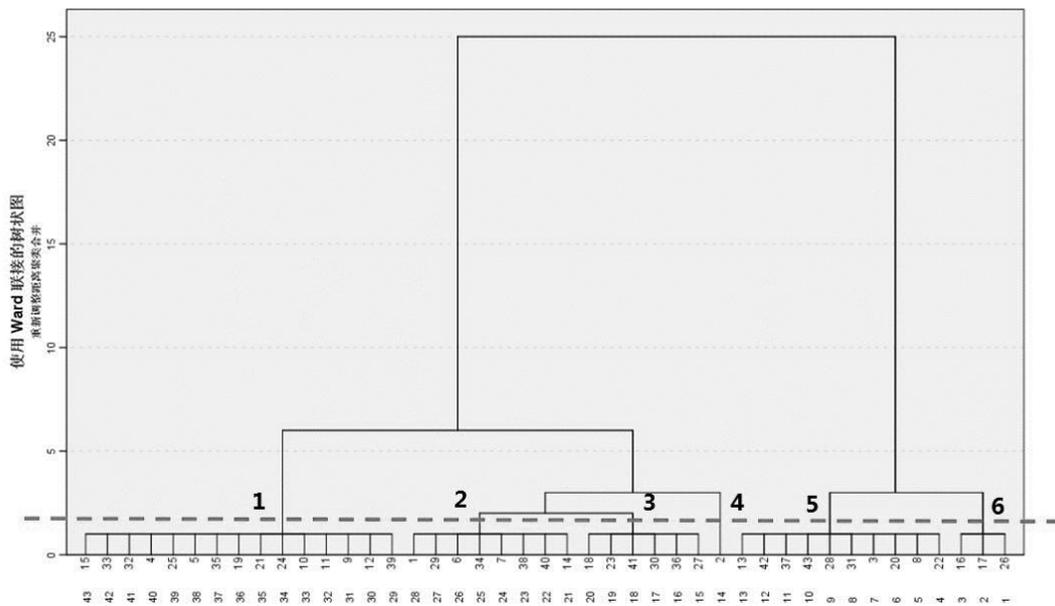


Figure 8. Result of cluster analysis for cut-in dangerous conditions
图 8. 切入型危险工况聚类分析结果

输出聚类结果并整理，最终得到的统计结果如表 4 所示。

Table 4. Result statistic of cluster analysis for cut-in dangerous conditions
表 4. 切入型危险工况聚类分析结果统计

| 变量 | 变量值 | 第一类 | | 第二类 | | 第三类 | | 第四类 | | 第五类 | | 第六类 | |
|---------|-----|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 切入方向 | 左侧 | 0 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% | 10 | 100% | 3 | 100% |
| | 右侧 | 15 | 100% | 8 | 100% | 6 | 100% | 1 | 100% | 0 | 0% | 0 | 0% |
| 被切入车辆速度 | 平均值 | 29.60 | | 58.83 | | 58.50 | | 56.72 | | 41.51 | | 68.32 | |
| 两车距离 | 平均值 | 15.42 | | 23.94 | | 6.27 | | 103.6 | | 15.12 | | 10.3 | |
| 目标车辆速度 | 平均值 | 13.33 | | 23.75 | | 68.33 | | 12.36 | | 15.00 | | 56.67 | |

注：表中速度的单位为km/h，距离的单位为m

3.2.4 切入型危险工况的典型场景

由图 3 可知，大部分切入型危险工况发生在“晴天”，“照明情况良好”，“直行道路”，“交通状况正常”的情况下，且切入车辆大部分为“小型车”。同时，对聚类分析结果中目标车辆速度，两车距离，切入车辆速度 3 个变量进行适当圆整，得到 6 类切入型危险工况的典型场景，如表 5 所示。

Table 5. Typical scenarios under cut-in dangerous conditions
表 5. 切入型危险工况的典型场景

| 场景 | 切入方向 | 目标车辆速度 (km/h) | 两车距离 (m) | 切入车辆速度 (km/h) | 备注 |
|----|------|---------------|----------|---------------|--|
| 1 | 右侧 | 30 | 15 | 15 | 晴天 照明情况良好 直行道路 交通状况正常 小型切入车辆 |
| 2 | 右侧 | 60 | 25 | 25 | |
| 3 | 右侧 | 60 | 5 | 70 | |
| 4 | 右侧 | 60 | 105 | 15 | |
| 5 | 左侧 | 40 | 15 | 15 | |
| 6 | 左侧 | 70 | 10 | 55 | |

3.3 测试场景

对聚类分析得到的切入型危险工况典型场景进行进一步分析，提取合适的场景作为 AEB 测试场景。各类场景覆盖真实危险的比例及危险程度特征统计如表 6 所示。

Table 6. Danger degree comparison of Typical scenarios under cut-in dangerous conditions
表 6. 切入型危险工况典型场景的危险程度比较

| 场景 | 覆盖真实危险比例 | 危险程度 | |
|----|-------------|------------|-------------|
| | | 高位工况占比 | 低危工况占比 |
| 1 | 15 (34.88%) | 4 (26.67%) | 11 (73.33%) |
| 2 | 8 (18.60%) | 2 (25.00%) | 6 (75.00%) |
| 3 | 6 (13.95%) | 3 (50.00%) | 3 (50.00%) |
| 4 | 1 (2.33%) | 0 (0.00%) | 1 (100.00%) |
| 5 | 10 (23.23%) | 4 (40.00%) | 6 (60.00%) |
| 6 | 3 (6.98%) | 0 (0.00%) | 3 (100.00%) |

场景 1 覆盖真实危险的比例最大（覆盖真实危险比例 34.88%，其中高危工况占比 26.67%），排在其之后的是场景 5（覆盖真实危险比例 23.23%，其中高危工况占比 40%）。场景 1 和场景 5 代表了两种最为典型的切入型危险场景，虽然危险程度相似（TTC 约为 1s），但两者切入方向不同。同样，场景 2 和场景 6 虽然与场景 1 和场景 5 的条件相似，但危险程度更高（TTC 约为 0.7s）。故选取场景 1,2,5,6 作为在切入型危险工况下 AEB 的测试场景。

虽然场景 3 覆盖真实危险比例 13.95%，其中高危工况占比 50%，但此场景下切入车辆的速度大于目标车辆速度，即两车的相对距离是逐渐变大的（TTC 为负值），因此理论上不存在碰撞的危险，既不会触发 AEB 工作，故不选取场景 3 作为 AEB 的测试场景。通过观察相关样本的视频数据发现，由于自然驾驶中驾驶员对危险的判断是主观的，当切入车辆在两车距离较近且两车车速都较高时采取切入动作，目标车辆的驾驶员会主观判断危险，采取较紧急的制动操作，从而使不存在碰撞风险的场景 3 被“误认为”切入型危险工况。

场景 4 覆盖真实危险的比例仅为 2.33%，且其中不含有高危工况，从试验成本及试验效率角度考虑也不选取场景 4 作为 AEB 的测试场景。同时通过观察相关样本的视频数据发现场景 4 描述的是由于目标车辆对切入车辆切入动作反应滞后所导致的危险工况。

最终，通过聚类分析得到的切入型危险工况下 AEB 的测试场景如表 7 所示。

Table 7. AEB test scenarios under cut-in dangerous conditions

表 7. 切入型危险工况下 AEB 的测试场景

| 场景 | 切入方向 | 目标车辆速度 (km/h) | 两车距离 (m) | 切入车辆速度 (km/h) | 备注 |
|----|------|---------------|----------|---------------|--------|
| 1 | 右侧 | 30 | 15 | 15 | 晴天 |
| 2 | 右侧 | 60 | 25 | 25 | 直行道路 |
| 3 | 左侧 | 40 | 15 | 15 | 照明情况良好 |
| 4 | 左侧 | 70 | 10 | 55 | 小型切入车辆 |

4 PreScan 虚拟测试场景建立

场地测试虽然具有许多优势，但由于其耗时较长，成本较高，测试条件要求较高，所以在主动安全系统开发的早期阶段，通常通过仿真测试对系统进行测试和改进，以加快开发进程，节约开发成本。PreScan 是荷兰 TNO 公司开发的一款专门用于先进驾驶辅助系统和主动安全系统开发验证的仿真工具，利用该软件可以迅速建立虚拟交通场景，添加传感器信息、定义车辆动力学模型等，并可与 Matlab/Simulink 等其他软件交互使用。

本文利用 PreScan 建立了切入型危险工况下 AEB 的虚拟测试场景，如图 9-10 所示（篇幅所限，仅列出测试场景 1 的 PreScan 模型示意图）。利用虚拟测试场景，可以在仿真环境下对 AEB 系统进行虚拟场地测试以及算法的开发和优化。

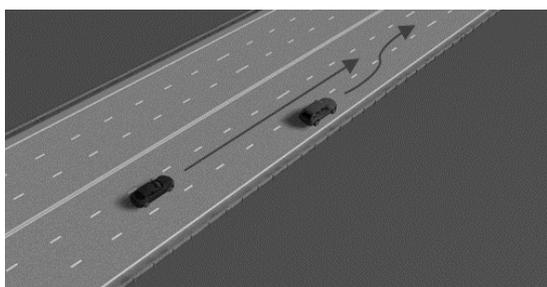


Figure 9. Two vehicles' movement state at the beginning of cut-in
图 9. 切入开始时刻两车运动状态

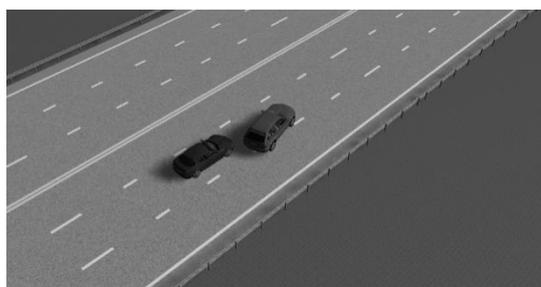


Figure 10. Two vehicles to collide during cut-in
图 10. 两车在切入过程中即将碰撞

测试场景 1 的 PreScan 模型中，切入开始时刻切入车辆车速 15km/h，目标车辆车速 30km/h，两车相距 15m（如图 9 所示），切入车辆从右侧切入，若两车保持该运动状态则将在切入过程中发生碰撞（如图 10 所示）。保持模型中其他条件不变，改变切入开始时刻切入车辆车速，目标车辆车速，两车相距以及切入方向便可以得到其余 3 种测试场景的 PreScan 模型。

5 结论

本文基于 China-FOT 数据库中的自然驾驶数据,首先从完整的自然驾驶数据中筛选出了 80 例切入型危险工况,并对这 80 例危险工况进行危险程度划分将其分为高位工况和低危工况;再根据车辆运动轨迹的不同组合将切入型危险工况分为 9 类;然后利用聚类分析方法对自动紧急制动系统发挥作用的第 1 类切入型危险工况的 43 例样本进行分析,得到了 6 类具有典型特征的危险场景;接着通过对这 6 类典型场景覆盖真实危险的比例和危险程度进行分析,兼顾试验成本和试验效率,建立了 4 种更符合我国交通状况的切入型危险工况下 AEB 的测试场景,对于我国 AEB 场地测试试验方法的开发具有重要参考意义。最后利用 PreScan 软件对这 4 种测试场景进行虚拟建模,以在 AEB 开发的早期阶段对算法进行仿真测试和验证,帮助缩短开发周期,节约开发成本。

致谢 (Acknowledgement)

本文是在朱西产老师的精心指导和大力支持下完成的。感谢朱西产老师,在完成论文的这几个月里,是您孜孜不倦的教导,总让我在困顿时又重新找到方向;是您营造的自由的学术氛围,让我们在最大的限度实现自己的想法;是您对科学研究的澎湃激情,不断激励着我前进。我相信,在以后的日子里,在严谨治学的朱老师的指导下,我一定会收获许多。

感谢马志雄老师,谢谢您在此期间在生活上和学习上的关心和指导,给予了我莫大的帮助。同样感谢各位老师师兄姐们在生活和学术上的帮助与开解,让我能够顺利完成论文。也要感谢孟哲、马雪寒、颜意林、曾宇凡同学在此期间给予的帮助以及陪伴,我们共同分享,共同学习,共同进步。

最后,再次对关心,帮助我的老师和同学表示衷心的感谢!

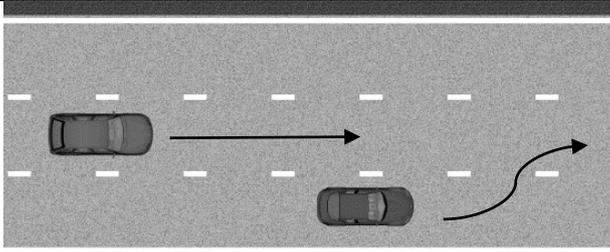
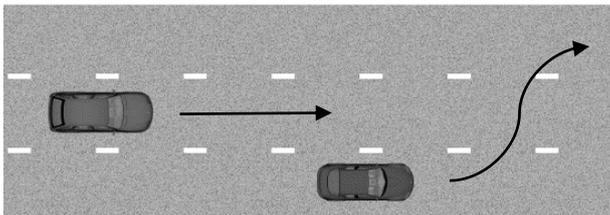
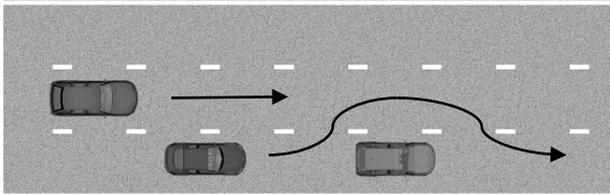
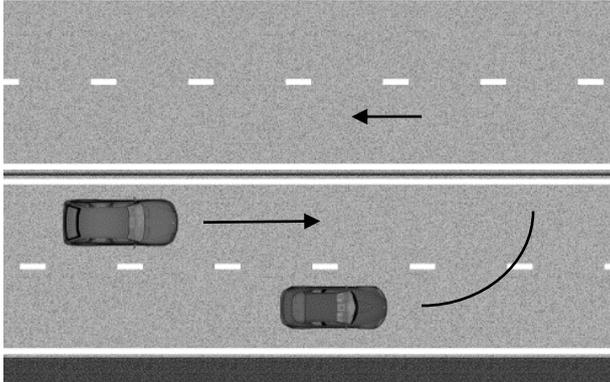
参考文献 (References)

- [34] Meyer G. Advanced microsystems for automotive applications [M]. Berlin: Springer, 2012.
- [35] Aparicio A, Boltshauser S, Lesemann M, et al. Status of test methods for active safety system[C]//SAE. So Paulo: SAE, 2012:2012-36-0214.
- [36] Lenard J, Danton R, Avery M, et al. Typical pedestrian accident scenarios for the testing of autonomous emergency braking systems[C]//The 22nd ESV Conference Proceedings. Washington D C: National Highway Traffic Safety Administration, 2011:1-9.
- [37] Euro NCAP. Autonomous Emergency Braking-AEB[G/OL]. [2014-01-12]. <http://www.euroncap.com/results/aeb.aspx>.
- [38] Liu Ying. Research on Test Scenarios for AEB Pedestrian System [D]. Shanghai: Tongji University, Institute of Automotive Studies, 2014. 刘颖. 行人自动紧急制动系统测试方法研究[D]. 上海: 同济大学汽车学院, 2014.
- [39] Li Lin, Zhu Xichan, Liu Ying, etc. Typical Traffic Risk Scenarios Related to Pedal Cyclists, Journal of Tongji University (Natural Science Edition), Volume 42 No. 7, 2014.7, pp1082-1087. 李霖, 朱西产, 刘颖等, 涉及骑车人的典型交通危险场景, 同济大学学报(自然科学版), 第 42 卷第 7 期, 2014 年 7 月, pp1082-1087.
- [40] Li Lin. Research of Braking and Steering Control in Automotive Collision Avoidance [D]. Shanghai: Tongji University, Institute of Automotive Studies, 2015. 李霖. 制动转向控制在事故回避中的应用研究[D]. 上海: 同济大学汽车学院, 2015.
- [41] Sun Xiaoyu. Research on the Causation and Incidents based on Naturalistic Driving Study [D]. Shanghai: Tongji University, Institute of Automotive Studies, 2017. 孙晓宇. 基于自然驾驶研究的危险场景及诱导因素研究[D]. 上海: 同济大学汽车学院, 2017.
- [42] Trent Victor, Fredrik Moeschlin, Magnus H. etc. Sweden-Michigan Naturalistic Field Operational Test (SeMiFOT) Phase 1, WP5 Evaluation of Methodology-Final Report, SAFER REPORT 2010:06 PROJECT C3 SeMiFOT
- [43] Characterizing Underground Utilities[J]. Shrp Report, 2009.
- [44] National Automotive Sampling System (NASS General Estimates System (GES) Analytical User's Manual 1988-2015. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2016.
- [45] Yuan Zhifa, Zhou Jingyu. Multivariate statistical analysis [M]. Science Press, 2002-10. 袁志发, 周静芋. 多元统计分析[M]. 科学出版社, 2002-10.
- [46] He Xiaoqun. Application of multivariate statistical analysis [M]. China Statistics Press, 2010-06. 何晓群. 应用多元统计分析[M]. 中国统计出版社, 2010-06.
- [47] Yu Chuanhua. SPSS and Statistical Analysis [M]. Electronic Industry Press, 2007-02. 宇传华. SPSS 与统计分析[M]. 电子工业出版社, 2007-02.
- [48] Liu Zhichao. Research on the characteristics of driver's emergency lane-change behavior for collision avoidance in the naturalistic driving [D]. Shanghai: Tongji University, Institute of Automotive Studies, 2016. 刘智超. 自然驾驶中驾驶员紧急变道避撞行为特征研究[D]. 上海: 同济大学汽车学院, 2016.
- [49] Hendriks F, Pelders R, Tideman M. Future testing of active safety systems[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, 2010, 3(2): 170.
- [50] He Yong, Wang Chunxiang, Dong Yongkun. Vehicle Autonomous Driving Simulation Based on PRESCAN [J]. Computer Knowledge and Technology: Academic Exchange, 2012 (11X): 8047-8049.

贺勇, 王春香, 董永坤. 基于 PRESCAN 的汽车自动驾驶仿真[J]. 电脑知识与技术:学术交流, 2012(11X):8047-8049.

附录 (Appendix)

Table 8. Classification of cut-in dangerous conditions
表 8. 切入型危险工况的分类

| 分类编号 | 数量 (占比) | 场景 | 说明 |
|------|-------------|--|--------------------------------------|
| 1 | 43 (53.75%) |  | 被切入车辆沿车道行驶，切入车辆因变道进入被切入车辆车道并沿该车道继续行驶 |
| 2 | 2 (2.5%) |  | 被切入车辆沿车道行驶，切入车辆因连续变道短暂进入被切入车辆车道 |
| 3 | 4 (5%) |  | 被切入车辆沿车道行驶，切入车辆因超车短暂进入被切入车辆车道 |
| 4 | 1 (1.25%) |  | 被切入车辆沿车道行驶，切入车辆因调头短暂进入被切入车辆车道 |

| 分类 编号 | 数量 (占比) | 场景 | 说明 |
|----------|---------------|----|--|
| 5 | 22 (27.5%) | | <p>被切入车辆沿车道行驶， 切入车辆本欲变道切入， 但受被切入车辆影响被迫 或主动放弃切入</p> |
| 6 | 4 (5%) | | <p>被切入车辆先沿车道行 驶，切入车辆变道切入， 被切入车辆与切入车辆同 方向变道躲避</p> |
| 7 | 2 (2.5%) | | <p>被切入车辆先沿车道行 驶，切入车辆变道切入， 被切入车辆与切入车辆反 方向变道躲避</p> |
| 8 | 1 (1.25%) | | <p>被切入车辆变道进入车 道的同时切入车辆也变道 切入该车道</p> |
| 9 | 1 (1.25%) | | <p>被切入车辆沿车道行 驶，切入车辆从被切入车 辆后方加速超车并变道切 入该车道</p> |