

A Safety Impact Benefit Assessment of Autonomous Emergency Braking Systems Based on Real Traffic Scenarios

He Jun¹, Guo Sasa², Miao Qiang², Wang Dayong², Wang Dazhi²

¹School of Automotive Studies in Tongji University, Shanghai, 201800,

²Technology Center of SAIC Motor, Shanghai, 201800

Email:hejun.tj@foxmail.com

Abstract: In this paper, a safety impact benefit assessment of Autonomous Emergency Braking Systems (AEB) based on real traffic scenarios in Shanghai is presented. Real driving scenarios in Shanghai were collected by video drive records (VDR) and analyzed to build AEB test scenarios. With traffic accident data, connections between the relative velocities of two cars in rear-end collisions and the risk of passengers to suffer certain kinds of injuries can be built. By comparing the relative velocities of cars in AEB test scenarios when the collision happened with and without AEB system, the injury reduction of a test owing to the AEB system was estimated. As with different weights of four test scenarios and different relative velocities in rear-end collisions, a total safety impact benefit of this AEB system was estimated as a total reduction of relevant injuries.

Keywords: Autonomous Emergency Braking Systems; Real traffic Scenarios; Safety impact; Test scenarios; rear-end collision

基于真实交通工况的自动紧急制动系统安全收益分析

何璠¹, 郭飒飒², 苗强², 王大勇², 王大志²

¹同济大学汽车学院, 上海, 201800

²上海汽车集团股份有限公司技术中心, 上海, 201800

Email:hejun.tj@foxmail.com

摘 要: 基于上海地区的真实交通工况, 建立了一种自动紧急制动系统 (Autonomous Emergency Braking System, AEB) 的安全收益评价方法。首先对上海地区真实交通中存在的追尾工况进行了采集和分析, 得到了符合上海地区道路交通特征的 AEB 测试场景。同时根据交通事故数据, 建立了追尾碰撞时两车相对速度与乘员相对受伤风险的关系。对四个 AEB 测试场景的多个试验进行建模, 分别计算车辆有无 AEB 系统的情况下, 发生追尾事故时的两车相对速度, 从而得到在该试验中 AEB 系统能够减少的受伤人数比例。最后根据不同相对碰撞速度以及场景出现的频率, 综合加权得到该 AEB 产品能够减少的对应伤害的受伤人数, 即为其总体安全收益。

关键词: 自动紧急制动系统; 真实交通工况; 安全收益; 测试场景; 追尾

6.11 引言

AEB 是一种先进辅助驾驶系统 (Advanced Driver Assistance System, ADAS), 属于汽车主动安全技术。AEB 系统采用雷达、摄像头等一个或多个传感器探测前方障碍物、实时获取交通环境信息, 并通过分析模块估计当前环境危险程度。当检测到危险时, 系统对驾驶员发出警告并提醒驾驶员采取回避措施, 当驾驶员没有及时对警告信息做出正确反应而情况变得危急时, 系统会通过自动制动的方式来主动介入以回避碰撞或是减轻碰撞程度^[1]。

Andras 等^[2]通过 GIDAS 等交通数据建立起相对碰撞速度与受伤人数的关系, 以 AEB 系统能够减少的相应伤害的受伤人数比例来评价其收益, 这种方法能够直观地得到 AEB 系统的安全收益。但是一来我国缺乏类似的

详尽的交通事故数据库，二来不同国家地区的交通环境不同、驾驶员的驾驶习惯也有所差异，不能直接应用其他国家的测试场景。本文首先对上海地区行驶工况进行采集和统计分析，并据此提出符合上海地区真实交通特征的 AEB 测试场景^[3]。根据交通事故数据，得到车辆碰撞速度与碰撞中两车乘员受伤风险的关系。再对测试场景进行建模，在测试车辆上加入 AEB 控制策略对其进行仿真计算，得到该 AEB 系统能够减少的 MAIS（Max Abbreviated Injury Scale，最大简明伤害等级）2 级以上的重伤和长期挥鞭伤的受伤人数，即为其安全收益。

6.2 2 建立测试场景

2.1 真实交通工况的采集

本文通过装载在出租车和警车上的 Horiba 行车记录仪（Video Drive Record，VDR）来采集上海市嘉定区的真实交通工况（图 1）。VDR 将通过内置摄像头记录车辆前方的交通状况，同时也会记录车辆速度、纵向加速度、侧向加速度等信息。当车辆的纵向加速度或侧向加速度大于 0.4g 时将触发 VDR 的记录功能，只保留触发前 15s 到出发后 5s 的数据。



Figure 1. Collecting real driving scenarios with VDRs
图 1. 通过 VDR 采集工况

2.2 AEB 测试场景的提出

总计采集了约 4000 例触发工况，通过人工筛选，剔除没有发生危险的工况后将剩余工况分为四个危险等级：0-危险预兆、1-轻微危险、2-一般危险、3-紧急危险。本文选取了危险等级为 2 与 3 的危险工况，总计 430 例。

按照 NHTSA 提出的 37 类预碰撞（Pre-Crash）场景分类方法^[4]对这 430 例危险工况进行分类，最典型的 6 类工况有 329 例（表 1），其中排名第二的“由于前车减速导致的危险工况”即为追尾工况，也就是 AEB 系统适用的工况，共有 87 例。

Table1.the first 6 dangerous situation in Shanghai
表 1. 上海地区前 6 类危险工况

分类	工况数量	百分比	排名
无预先车辆行为的二轮车冲突	91	21.2%	1
前车减速	87	20.2%	2
有预先车辆行为的二轮车冲突	61	14.2%	3
车辆在路口右转	38	8.8%	4
车辆同向变道	29	6.7%	5
前车偏离车道	23	5.3%	6

根据这 87 组危险工况，利用驾驶员反应时间来确定危险开始点，分析危险开始点的数据得到 AEB 测试场景的基本参数（本车速度、目标车速度、目标车加速度和测试开始时的两车距离等）。将得到的 AEB 测试场景

参数组合，按照目标车运动状态分类，提出了符合上海地区道路状况的四种测试场景（目标车静止、目标车匀速、目标车轻微制动和目标车紧急制动）。

Table2. Acquired AEB testing scene according to dangerous situation
表 2. 根据危险工况得到的 AEB 测试场景

工况类型	v(SV) [km/h]	v(TV) [km/h]	a(TV) [m/s ²]	D [m]
TV 静止	10	0	0	14
	20	0	0	28
TV 匀速	20	10	0	14
	30	10/20	0	28/14
	40	20/30	0	28/14
TV 轻微制动	10	10	-2	5
	20	10/20	-2	9/14
	30	10/20/30	-2	28/14/13
	40	20/30/40	-2	28/14/17
TV 紧急制动	10	10	-6	5
	20	10/20	-6	9/14
	30	10/20/30	-6	28/14/13
	40	20/30/40	-6	28/14/17

注：TV（Target Vehicle）：目标车、SV（Subject Vehicle）：本车、v：速度、a：加速度、D：初始距离。

通过聚类分析得到四个场景出现的比例关系（表 3）。

Table3.The rate of testing scenes
表 3. 各个测试场景的出现比例

工况类型	所占比例
TV 静止	30%
TV 匀速	10%
TV 轻微制动	50%
TV 紧急制动	10%

2.3 AEB 控制策略

本文中测试的 AEB 触发时刻如下，减速度大小为 1g，速度单位为 km/h:

$$\begin{cases} \text{TTC}=(V_0-V_1)/72, & V_0-V_1<30\text{km/h} \\ \text{TTC}=0.833-12.5/(V_0-V_1), & V_0-V_1\geq30\text{km/h} \end{cases} \quad (1)$$

其中 V_0 为本车速度， V_1 为目标车速度。

6.3 3 安全收益标准

AEB 系统的设计出发点就是为了减轻碰撞时乘员受到的伤害或是直接避免碰撞^[5]，因而本文将一个 AEB 系统能够减少的两车中的受伤人数的能力作为其安全收益水平。

追尾事故中乘客容易受到两类严重伤害：MAIS 2+的重伤（包括死亡），以及 AIS 虽为 1 级，却会对受伤者生活带来严重不便的超过一个月伤害症状的挥鞭伤。本文将分别评估追尾工况中，AEB 系统分别能够减少的两类伤害的受伤人数比例。

6.4 4 安全收益分析

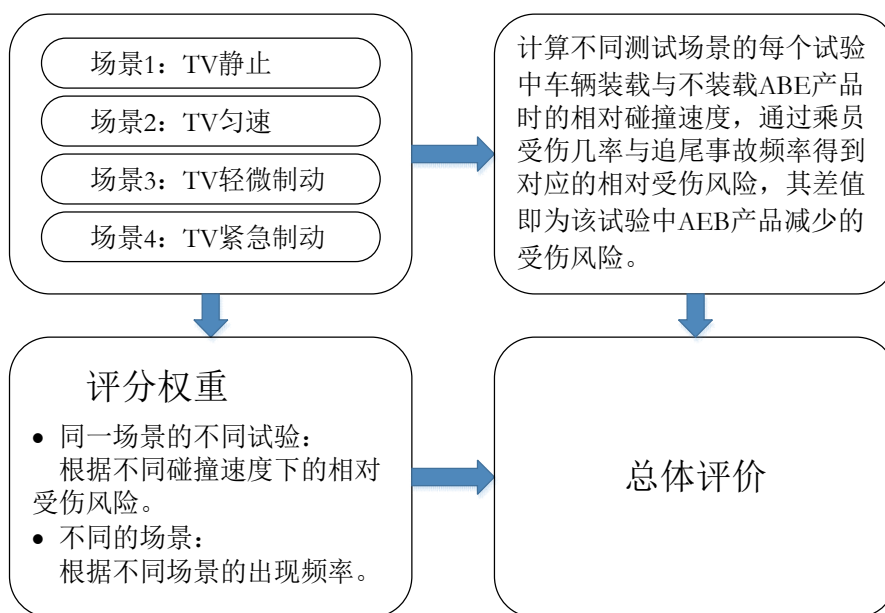


Figure 2. The analysis structure of the safety impact on certain injury
图 2.对于某种特定伤害的安全收益的评价方法结构

如图 2 所示，本文中评价 AEB 系统对于某种特定伤害的安全收益主要分为三个步骤：首先，根据交通事故数据得到乘员在不同相对碰撞速度区间下的相对受伤风险；其次，分别计算有无 AEB 系统的车辆在四个测试场景的多个试验中发生碰撞时的两车速度，并依据第一步的结果可以计算出有无 AEB 系统时乘员的相对受伤风险的差值，得到不同试验下 AEB 系统减少的受伤人数比例；最后，根据同一测试场景下不同试验中无 AEB 系统时的相对受伤风险作为权重，加权得到四个测试场景中 AEB 系统分别能够减少的受伤人数比例，再根据不同测试场景的出现频率作为权重，加权得到 AEB 系统总体能够减少的受伤人数比例。

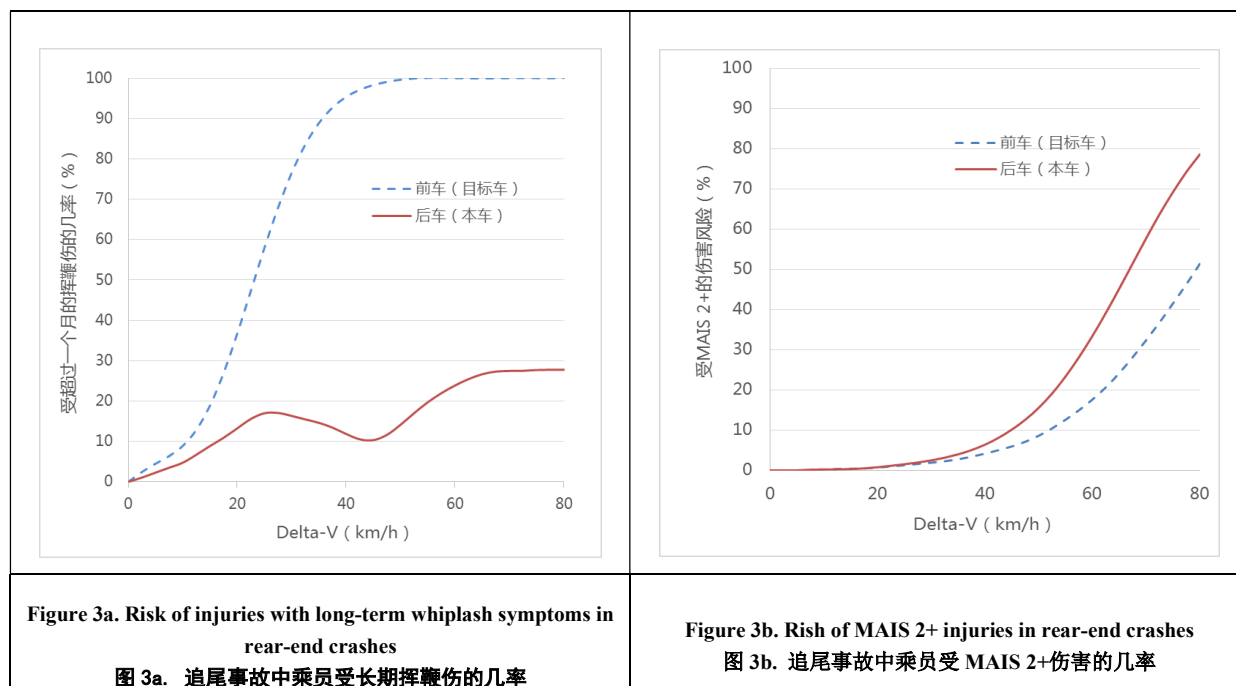
下面将详细说明整个分析过程。

4.1 交通事故数据

4.1.1 单次碰撞中乘员受伤几率

单次碰撞中乘员的受伤几率实际上是受到多种因素影响的（例如：乘员年龄、身高体重、车辆使用年数以及具体车辆的被动安全水平等等），但在统计上，可以只考虑一个变量——碰撞时车辆的速度变化量，本文中 will 用 ΔV 来表示。 ΔV 的大小代表了碰撞时乘员所受的冲击力大小，一般 ΔV 越大，乘员的受伤几率越大。

由于缺乏国内详尽的交通事故数据库，只能采用国外的数据。图 3a 为追尾事故中乘员受到长期挥鞭伤的几率随 ΔV 的分布，数据取自于 Folksam 保险公司的碰撞数据^[6]。其中本车中乘员受伤几率并非随 ΔV 单调递增的原因可以部分得由安全气囊的触发条件（ ΔV 约等于 25km/h 时）解释。图 3b 为追尾事故中乘员受 MAIS 2+ 的伤害的几率随 ΔV 的分布，数据取自于 NASS/CDS（National Automotive Sampling System/Crashworthiness Data System）^[7]。



4.1.2 事故频率

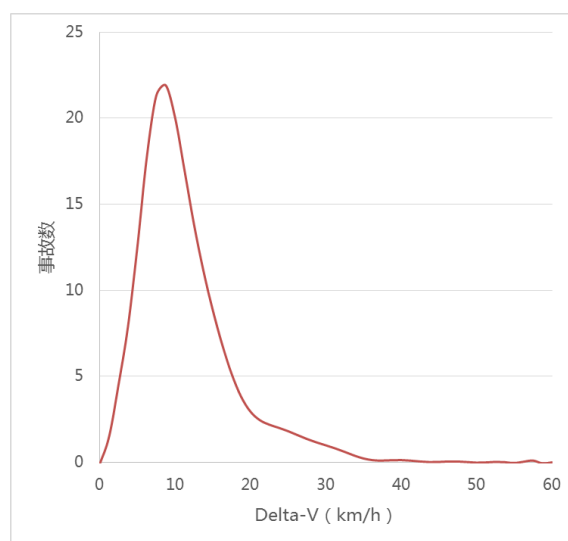
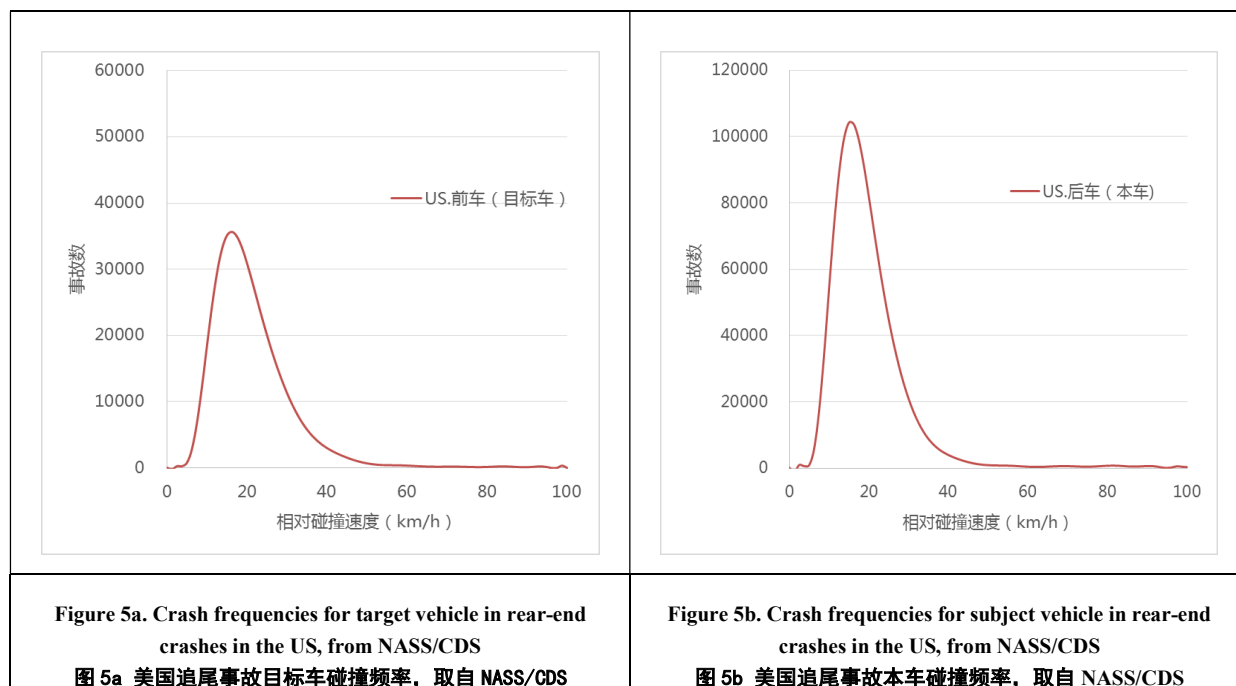


Figure 4. Crash frequency in rear-end crashes, derived from Folksam crash data
图 4. 追尾事故发生频率，取自 Folksam 保险公司数据

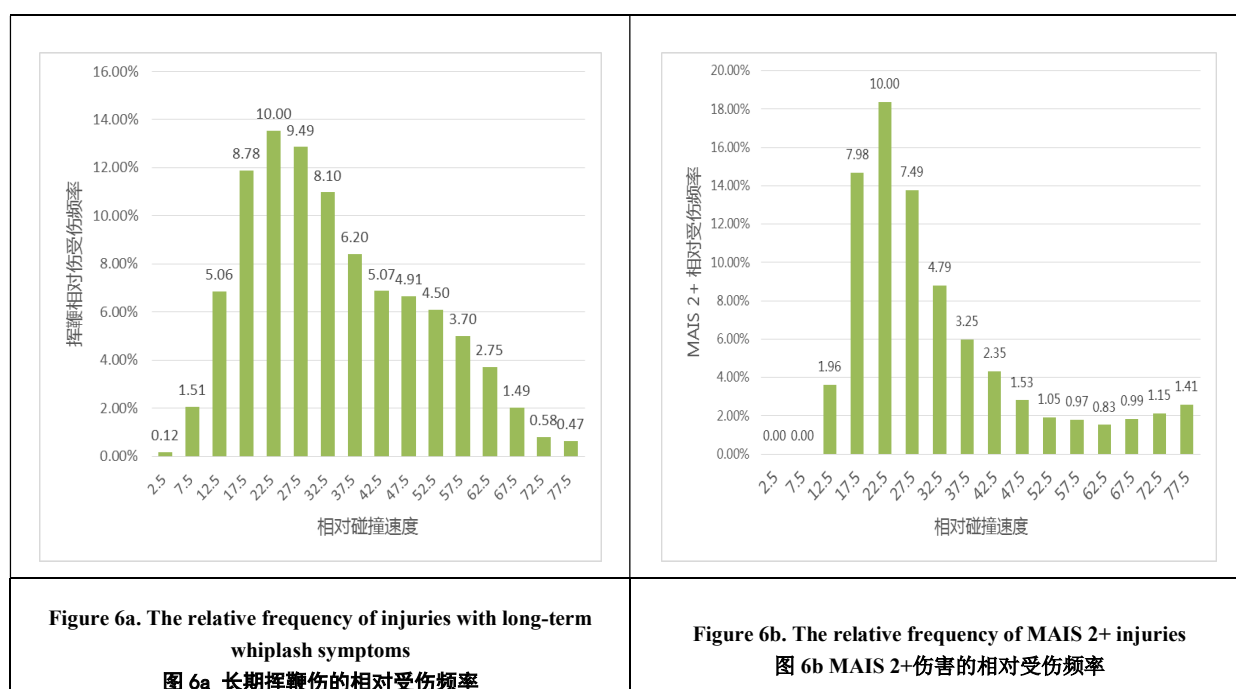
同样由于缺乏国内交通事故详尽数据，事故频率数据同样分别采用 Folksam 保险公司（图 5）与 NASS/CDS（图 6、图 7）的碰撞事故统计数据。

其中 Folksam 保险公司数据用于评价对于长期挥鞭伤的安全收益，NASS/CDS 的碰撞数据则用于评价对于 MAIS 2+伤害的安全收益。



4.2 乘员相对受伤频率

为简化起见，本文假设两车质量相等，发生的碰撞为 100%重叠，恢复系数为 0 的追尾碰撞。在这种条件下，两车的 Delta-V 都等于二分之一碰撞前刻的两车相对速度。



设 $C(\Delta V)$ 为车辆的碰撞频率， $I(\Delta V)$ 为单次碰撞中乘员的受伤几率，其中 ΔV 为两车相对碰撞速度。将相对碰撞速度从 0 到 80km/h 划分为 16 个大小为 5km/h 区间。对于 $(m, m+5]$ 速度区间来说，取：

$$C((m, m+5]) = C\left(\frac{2m+5}{2}\right) \quad (2)$$

$$I((m, m+5]) = I\left(\frac{2m+5}{2}\right) \quad (3)$$

那么该速度区间内的相对受伤频率为:

$$RI((m, m+5]) = C((m, m+5]) * I((m, m+5]) \quad (4)$$

图 6a 和图 6b 则分别为乘员在不同相对碰撞速度下受到长期挥鞭伤与受到 MAIS 2+伤害的相对受伤频率。相对受伤频率越高则说明该区间内可能被减少的受伤人数就越多, 对于 AEB 系统来说能够产生的安全收益就越大。因此我们将相对受伤频率最高的区间的安全收益权重设置为 10, 其他区间的安全收益权重则为该区间的相对受伤频率比上最大相对受伤频率乘以 10, 具体数值可见于图 6a 与图 6b。

4.3 单次试验中 AEB 系统减少的受伤人数

对于表 2 中的 AEB 测试场景的单项试验, 通过运动学方程计算得到碰撞前刻两车的相对速度。同样, 加入 AEB 控制策略后, 计算得到此时碰撞前的两车相对速度。

该试验中目标车的预计受伤人数为:

$$T_{wo} = \sum_{\Delta V_1} C_T(\Delta V_1) I_T(\Delta V_1) \quad (5)$$

其中, 为目标车碰撞频率、为目标车单次碰撞中乘员的受伤几率。

装载了 AEB 系统后的目标车受伤人数为:

$$T_w = \sum_{\Delta V_2} C_T(\Delta V_2) I_T(\Delta V_2) \quad (6)$$

同理, 可得到该试验中对应的本车没有 AEB 系统时的预计受伤人数与装载了 AEB 系统后的受伤人数。

该试验下, AEB 系统减少的受伤人数比例为:

$$R = 1 - \frac{T_w + S_w}{T_{wo} + S_{wo}} \quad (7)$$

4.4 单个场景中 AEB 系统减少的受伤人数

得到测试场景中每个试验中能够减少的受伤人数比例后, 根据 4.2 中不同相对碰撞速度时所具有的安全收益权重, 加权得到该测试场景下 AEB 系统能够减少的受伤人数比例, 如表 4 所示。

Table 4. The ability of 3 AEB systems to reduce injured person rate

表 4 3 种 AEB 系统能够减少的受伤人数比例

测试编号	测试速度		相对碰撞速度		挥鞭伤		MAIS 2+伤害	
	本车	前车	无 AEB	有 AEB	权重	减少比例	权重	减少比例
030101	10	10	10.00	0.00	5.06	100%	1.96	100%
030201	20	10	20.00	0.00	10.00	100%	10.00	100%
030202	20	20	20.00	4.36	10.00	89%	10.00	100%
030301	30	10	30.00	0.00	8.10	100%	4.79	100%
030302	30	20	28.74	12.30	9.49	65%	7.49	89%
030303	30	30	25.96	11.12	9.49	65%	7.49	89%
030401	40	20	40.00	12.76	5.07	85%	2.35	97%
030402	40	30	28.74	18.61	9.49	50%	7.49	59%
030403	40	40	29.69	19.23	9.49	50%	7.49	59%
总计					76.21	77%	59.04	87%

4.5 总体安全收益

如表 3 所示, 对应四个测试场景在真实危险工况中的出现比例, 加权得到该 AEB 系统分别能够减少 84%的长期挥鞭伤伤害与 93%的 MAIS 2+伤害, 即为其总体安全收益。

Table 5. The AEB system total safety earnings
表 5. 该 AEB 系统总体安全收益

测试场景	长期挥鞭伤	MAIS 2+伤害	场景比例
01TV 静止	86%	100%	30%
02TV 匀速	100%	100%	10%
03TV 轻微制动	77%	87%	50%
04TV 紧急制动	98%	99%	10%
总体	84%	93%	100%

6.5 5 总结

本文通过获取真实驾驶场景,根据其中的追尾危险工况总结出了 AEB 测试场景。分别计算了在测试场景中,车辆装载 AEB 系统与不装载 AEB 系统时的相对碰撞速度。根据交通事故统计中的单次碰撞乘员受伤几率与事故发生频率将追尾事故中的相对碰撞速度与乘员相对受伤风险联系起来。将得到的单次试验减少的受伤人数比例按照其相对碰撞速度下的相对受伤风险不同而加以不同的权重,得到单个测试场景中 AEB 系统能够减少的受伤人数比例。最后根据四个测试场景在真实工况下的出现比例,加权平均得到该 AEB 系统能够减少 84%的长期挥鞭伤害与 93%的 MAIS 2+伤害。

本文提出的 AEB 系统安全收益评估方法是根据我国上海地区危险工况中提取的 AEB 测试场景建立的,与我国城市道路工况相对应,对在中国上市的 AEB 系统的评估具有重要意义。同时本方法只需计算在测试场景中碰撞时的两车相对速度,对于具体的 AEB 控制策略并无要求,可适用于不同的 AEB 系统,具有普遍价值。

目前只能采用国外的交通事故数据库,未来需要更为详尽的上海地区交通事故统计以获得更为精确的结果。同时本文也没有考虑误报与漏报的影响,未来也需要加入相关系数,以对 AEB 系统进行更为全面的评价。

6.6 参考文献

- [1] Euro-NCAP, <http://www.euroncap.com/testsexplained/aeb.aspx>
- [2] András Bálint, Fagerlind H. *A test-based method for the assessment of pre-crash warning and braking systems*[J]. Accident Analysis and Prevention, 2013(59):192-199.
- [3] Jiang Junli, He Jingpeng, Liu weiguo .etc, *Research on the test scene automatic emergency brake system*[J]. vehicle technology, 2014, (1):39-43.
- [4] 江丽君, 贺锦鹏, 刘卫国等. *自动紧急制动系统测试场景研究*[J]. 汽车技术, 2014, (1):39-43.
- [5] NHTSA, *Pre-Crash Scenario Typology for Crash Avoidance Research*, April 2007.
- [6] Kusano, K.D.; Gabler, H.C., "Injury mitigation in the collision partners of pre-collision system equipped vehicles in rear-end collisions," *Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011 14th International IEEE Conference on, vol., no., pp.1846,1851, 5-7 Oct. 2011
- [7] Kullgren, A., Stigson, H., 2011. *Whiplash Injury Report 2011*. Internal Report or Folksam.
- [8] Kusano, K.D.; Gabler, H.C., "Injury mitigation in the collision partners of pre-collision system equipped vehicles in rear-end collisions," *Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011 14th International IEEE Conference on, vol., no., pp.1846,1851, 5-7 Oct. 2011
- [9] Yizhen Zhang; Antonsson, E.K.; Grote, K., "A new threat assessment measure for collision avoidance systems," *Intelligent Transportation Systems Conference*, 2006. ITSC '06. IEEE, vol., no., pp.968,975, 17-20 Sept. 2006
- [10] Searson, DJ, Anderson, etal. *Integrated assessment of pedestrian head impact protection in testing secondary safety and autonomous emergency braking*[J]. Accident Analysis and Prevention, 2014(63):1-8.