

# 重大护栏交通事故中加固护栏对事故后果的影响研究<sup>\*</sup>

诸忠孝<sup>1</sup>, 程宇峰<sup>2</sup>, 刘朱紫<sup>1,2</sup>, 邹铁方<sup>2</sup>

(1.长沙民政职业技术学院, 湖南 长沙 410004; 2.长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 为了解护栏加固对事故后果的影响,从网络上收集 2010—2019 年发生一次死亡 10 人及以上涉及护栏的重大事故报告 58 份,统计分析发现事故中有 6 类典型车辆运动轨迹且穿越护栏的占比高达 91.4%,表明可通过阻止车辆穿越护栏来降低事故后果;通过事故再现仿真对其中 1 例真实事故案例进行分析,验证“加固护栏可降低不幸卷入事故中驾乘人员伤害”的假设,仿真结果显示加固护栏可阻止车辆穿越并有效降低事故伤害,能将人体头部损伤降低 40% 以上,降低不幸卷入事故中驾乘人员伤害。

**关键词:** 交通工程; 护栏; 交通事故; 人体头部损伤; 事故再现

**中图分类号:** U491.31

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2023)05-0040-04

道路交通安全受人、车、路、环境及管理因素的综合影响,在一连串错误的综合作用下导致事故发生,只要破坏“人—车—路—环—管”这一链条中任意一环<sup>[1]</sup>,均可避免或至少降低事故后果。根据中华人民共和国国务院令 第 493 号《生产安全事故报告和调查处理条例》,一次造成 10 人以上死亡或 50 人以上重伤或 5 000 万元以上直接经济损失的事故即为重大事故<sup>[2]</sup>。近年来,中国重大事故数量整体呈波动下降趋势<sup>[3]</sup>,但相比于一般道路交通事故,重大事故除具备事故常有的潜伏性、偶然性、突变性和因果关联性等基本特征外,还具备高危害性这一最显著的特征<sup>[4-5]</sup>,涉及护栏的事故尤为严重<sup>[6-7]</sup>,常造成严重人员伤亡和巨额财产损失并产生恶劣的社会影响。护栏类事故后果严重的原因在于车辆穿越护栏后与对向车道内车辆碰撞或坠落导致乘员受到严重冲击。护栏属于道路因素,破坏该因素链后能否避免或降低事故后果有待研究。本文先分析近年来护栏类重大事故的相关特征,引出这类事故的防护启示,进而再现典型事故,分析护栏加固对事故后果特别是人体损伤的影响。

## 1 重大护栏交通事故中道路相关因素统计

从中国应急管理局官网、中国安全生产网、安全

管理网等网站获得 2010—2019 年发生一次死亡 10 人及以上涉及护栏的重大事故调查报告 58 份,其中东北地区 3 份、华北地区 6 份、西北地区 8 份、西南地区 13 份、华中地区 13 份、华东地区 11 份、华南地区 4 份。根据调查报告,55.17% 的事故发生在高速公路上;普通公路上事故发生比例从大到小依次为省道、国道、县乡村道,占比分别为 17.24%、15.52%、12.07%;43.10%、37.93% 的事故发生在下坡路段和转弯路段;37.93% 的事故与路面湿滑有关;31.03%、18.97% 的事故与道路基础设施不完善和护栏不符合安全要求相关。高速公路事故死亡率低于受伤率,普通公路则相反,从国道、省道到县乡村道,死亡率都大于受伤率,且依次上升,分别为 54.16%、59.73%、62.71%。

进一步统计车辆在碰撞后的运动轨迹,结果见图 1、图 2,其中 VT1~VT4 类型为高速公路事故,VT5、VT6 类型为普通公路事故。VT1 类型中车辆先碰撞并穿越中央护栏驶向对向车道,之后碰撞并穿越对向路侧护栏驶出路外;VT2 类型中车辆碰撞并穿越中央护栏驶向对向车道停止;VT3 类型中车辆碰撞中央护栏或路侧护栏后停于本车道内;VT4 类型中车辆碰撞并穿越道路右侧护栏驶出路外;VT5 类型中车辆越过中心线在对向车道碰撞路侧

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775056);长沙市自然科学基金资助项目(kq2208225);湖南省教育厅重点项目(22A0236)

护栏驶出路外;VT6 类型中车辆碰撞本车道路侧护栏驶出路外。58 例护栏类事故中,VT1、VT2、VT3、VT4、VT5、VT6 分别有 1 例、16 例、5 例、10 例、12 例、14 例,其中碰撞并穿越护栏的案例占比高达 91.4%。

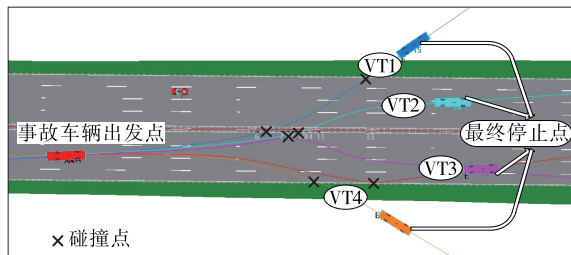


图 1 高速公路中车辆运动轨迹分布

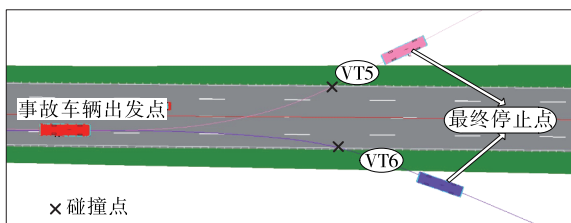


图 2 普通公路中车辆运动轨迹分布

车辆一旦穿越护栏,常伴随坠落等严重事故形态,其占比最高(达 39.65%)、致死率亦最高(达 60.07%),说明必须将事故车辆控制在车道内。将车辆控制在车道上的方法很多,如加固护栏使护栏足够坚固,阻止车辆穿越;在车辆上安装破坏性保护装置,在车辆即将穿越护栏时该装置工作,强力阻止车辆穿越<sup>[8]</sup>。下面通过 1 例真实事故对“加固护栏可降低不幸卷入事故中驾乘人员伤害”的假设进行验证,证明通过改善道路设施可以有效保护不幸卷入事故中的人们。

## 2 重大护栏交通事故案例再现

### 2.1 案例概况

2018 年 6 月 29 日,某高速公路上发生一起大型普通客车穿越中央护栏与对向车道内重型罐车相撞的事故,导致当场死亡 10 人(其中客车死亡 9 人,货车死亡 1 人)、送医救治 10 人、12 人受伤,最终造成 18 人死亡、14 人受伤。

### 2.2 事故再现软件

PC-Crash 是事故再现常用软件,它包含现实生活中绝大部分事故参与者模型,可以帮助实现快速建模,具有较高的再现精度<sup>[9-10]</sup>,且能根据人、车等事故参与者最终停止位置进行优化<sup>[11]</sup>,反推事故发

生时各事故参与方的运动状态,以可视化方式输出仿真结果<sup>[12]</sup>。基于 PC-Crash 的事故再现流程主要有事故现场再现、事故参与者建模、事故再现仿真及再现结果分析<sup>[13-14]</sup>。

### 2.3 事故再现

#### 2.3.1 事故现场再现

依据事故调查报告和事故现场示意图建立事故路段二维/三维模型。调查报告显示,大客车在高速公路中先刮擦右侧护栏,接着碰撞并穿越中央护栏,碰撞重型罐车后停止。按照 1:1 的比例利用 PC-Crash 软件中 Dynamics-Define Road Slope 生成一条封闭式双向六车道高速公路(见图 3)。

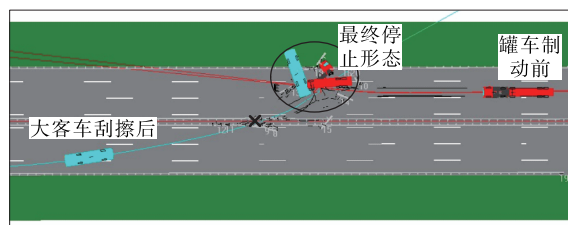


图 3 再现的事故现场

#### 2.3.2 事故参与者建模

(1) 建立车辆模型。依据调查报告中车辆品牌型号,在 PC-Crash 软件自带车辆库中调取相应型号车辆。若无相同型号车型,则调取类似型号,再对车型参数进行微调,使仿真车辆与真实事故车辆高度吻合。事故客车型号为 ZK6118HQY8Y,技术参数见表 1。事故客车、重型罐车模型见图 4、图 5。

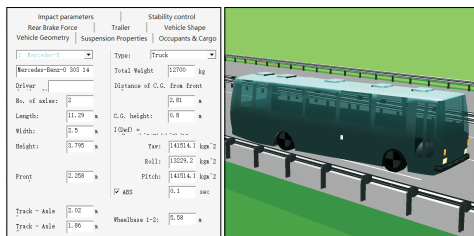
表 1 事故客车的技术参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
车身长度/mm	11 290	轴数	2
车身宽度/mm	2 500	轴距/mm	5 580
车身高度/mm	3 795,3 840	轴荷/kg	6 150/11 500
整备质量/kg	12 700,13 200	前轮距/mm	2 020,2 048,2 148
总质量/kg	17 650	后轮距/mm	1 860,1 832
前悬后悬/mm	2 390/3 320	接近离去角/(°)	10/9
轮胎数/个	6	轮胎规格	295/80R22.5

(2) 建立人体模型。重大交通事故中常伴随群死群伤现象,但多个人体模型会急剧降低仿真效率,故仅建立大客车乘员模型。从 PC-Crash 中调取合适的假人模型,依照实际情况修改假人身高、体质、形态等参数。该案例中,乘员身高 170 cm,体质量 60 kg。考虑到不同乘员之间的伤害差异,搭建邻近的两人四座位模型(见图 6)。



(a) 事故客车



(b) 技术参数及仿真模型

图4 事故客车仿真模型



(a) 事故重型罐车及挂车



(b) 仿真模型

图5 事故重型罐车仿真模型

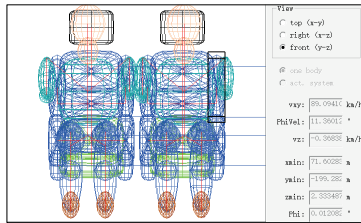
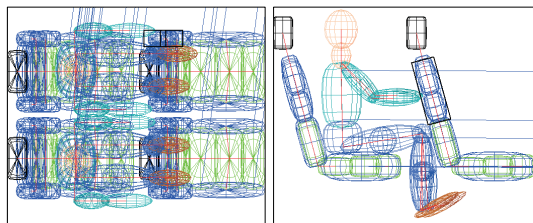


图6 事故车辆乘员三维模型

(3) 建立护栏模型。根据调查报告,道路中央分隔带波形梁钢护栏的立柱壁厚、护栏板壁厚符合 JT/T 281—2007《公路波形梁钢护栏》的要求。通过 PC-Crash 软件自带护栏模型调取相应波形梁钢护栏,并依据高速公路波形梁钢护栏规则设置相应参数。考虑到事故参与者模型越多仿真效率越低,

未参与事故的护栏不建模。

### 2.3.3 事故再现仿真

事故现场、参与者模型及各项参数初步设置完成后,进行事故仿真。仿真时不断调整初始速度、制动力等参数,以获得与事故现场遗留痕迹一致的仿真结果。图7为车辆运动轨迹仿真结果,图8~10为仿真结果与真实案例中相关痕迹的对比。从图7~10可以看出:车辆运动轨迹、车辆碰撞角度与形态、车辆最终停止位置、护栏损坏位置等信息均与实际情况吻合,表明仿真中车辆的运动学响应与实际情况较接近。

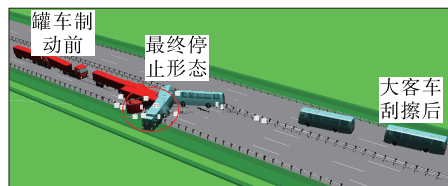


图7 仿真中车辆运动轨迹三维示意图



(a) 现场



(b) 仿真结果

图8 事故客车碰撞角度与形态



(a) 现场

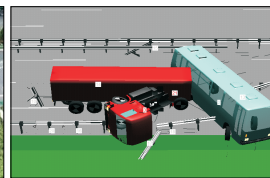


(b) 仿真结果

图9 事故客车最终停止位置



(a) 现场



(b) 仿真结果

图10 事故重型罐车最终停止位置

### 2.3.4 事故再现结果分析

为进一步提升仿真结果的可靠性,对车内乘员损伤情况进行验证。导入人体模型进行仿真,为提高可靠性,依次导入客车乘员进行不同方位的仿真计算,图11为客车中间乘员方位分布。以中间乘员为轴中心建立三维坐标,X轴正方向上为前排乘

员、负方向上为后排乘员;在乘员 Z 轴高度统一的情况下,Y 轴正方向上为左侧乘员、负方向上为右侧乘员。依次仿真计算 9 种不同方位乘员损伤值,取平均值确定前、中、后不同位置乘员的损伤程度。

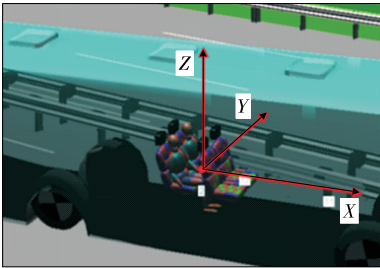


图 11 客车中间乘员方位分布

调查报告显示,部分乘员未系安全带。为反映这一现象,仿真中将乘员分为系安全带与未系安全带两类,仿真结果见表 2。从表 2 可以看出:前排乘员无论是否系安全带,人体头部损伤指标  $I_{HIC,36}$  大多在 2 000 以上,远远超过人体头部损伤的耐受极限值 1 000,生还概率低;中间乘员相对碰撞点位置的缓冲距离短, $I_{HIC,36}$  在 1 200 左右,死亡风险高;后排乘员相对碰撞点位置有较多缓冲空间,相对最安全, $I_{HIC,36}$  低于人体头部损伤耐受极限值。事故调查报告显示,重伤抢救无效死亡的多为中间乘员,后排乘员普遍轻伤,很好地印证了上述分析结果,表明再现仿真很好地反映了事故真实情况,仿真结果可信度高。

表 2 事故中不同位置乘员的人体头部损伤指标  $I_{HIC,36}$

乘员是否系安全带	乘员位置	不同位置乘员的人体头部损伤指标 $I_{HIC,36}$			
		左侧	中间	右侧	平均值
系安全带	前排乘客	1 873.60	1 658.80	2 714.40	2 082.27
	中间乘员	1 020.90	1 279.00	1 359.10	1 219.67
	后排乘员	686.98	661.62	645.90	664.83
未系安全带	前排乘客	2 877.20	2 374.90	2 748.30	2 666.80
	中间乘员	1 261.10	1 228.80	1 391.80	1 293.90
	后排乘员	834.83	723.34	634.42	730.86

3 护栏加固对事故后果的影响

为证明“加固护栏可降低不幸卷入事故中驾乘人员伤害”的设想,对中央分隔带护栏进行加固以防止客车穿越。仿真中仅加固护栏,其余事故现场、人体模型、客车模型等参数均不变。加固护栏后客车的运动轨迹见图 12,乘员的人体头部损伤指标  $I_{HIC,36}$  见表 3。

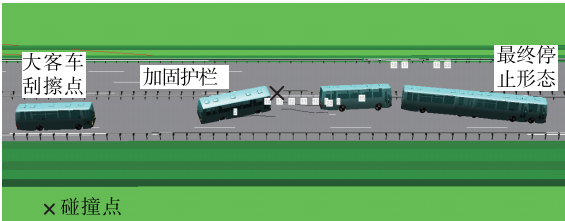


图 12 护栏加固后客车运动轨迹三维示意图

表 3 护栏加固后不同位置乘员的人体头部损伤指标  $I_{HIC,36}$

乘员是否系安全带	乘员位置	不同位置乘员的人体头部损伤指标 $I_{HIC,36}$				$I_{HIC,36}$ 降低比例/%
		左侧	中间	右侧	平均值	
系安全带	前排乘客	1 071.00	769.65	825.30	888.65	57.3
	中间乘员	706.30	684.25	573.13	654.56	46.3
	后排乘员	428.86	312.55	400.43	380.61	42.8
未系安全带	前排乘客	1 104.70	928.27	897.63	976.87	63.4
	中间乘员	796.00	835.69	691.35	774.35	40.2
	后排乘员	357.23	387.07	301.47	348.59	52.3

对比表 2 和表 3 可以看出:加固护栏后人体头部损伤指标  $I_{HIC,36}$  明显降低,平均值降低 40%。如乘客系了安全带,则乘员致死概率不高;未系安全带乘客受到的伤害虽然高于系安全带乘客,但  $I_{HIC,36}$  未超过人体损伤耐受极限,表明加固护栏可显著降低事故后果。

4 结论

(1) 近年来发生的涉及护栏的重大交通事故中,91.4%的事故车辆穿越护栏,发生大量车辆坠落事故(占比高达 39.65%)。

(下转第 52 页)



## 参考文献:

- [1] CHOUBANE B, SEVEARANCE J, LEE H S, et al. Repeatability and reproducibility of mobile retroreflectivity units for measurement of pavement markings[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2337: 74—82.
- [2] BABIĆ D, FIOLIĆ M, ŽILIONIENE D, et al. Evaluation of static and dynamic method for measuring retro-reflection of road markings[J]. Gradevinar, 2017, 69(10): 907—914.
- [3] BOYLE A. The introduction and implementation of mobile retroreflectivity measurement of pavement markings in Ireland[C]//Civil Engineering Research in Ireland 2016. National University of Ireland Galway, 2016: 115—120.
- [4] 李春东, 张澄. 移动式标线检测仪在沪宁高速公路上应用实践[J]. 科技创新与应用, 2020(30): 167—168.
- [5] 何华阳, 苏文英, 王蕊. 路面平整度对标线逆反射测试的静态影响[J]. 中国公路学报, 2022, 35(5): 211—220.
- [6] 王露婉, 韩晓坤, 何华阳, 等. 道路交通标线动静态测量比对研究[J]. 公路与汽运, 2021(2): 43—46.
- [7] FLETCHER J, PHILPOTT A, CHOUBANE B, et al. Characterization and mitigation of temperature sensitivity within mobile retroreflectometer unit[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2015: 91—102.
- [8] 魏君, 韩颖, 苏畅, 等. 基于方差分析的轮毂造型特征显著性研究[J]. 包装工程, 2022, 43(10): 115—120.
- [9] 郑昊敏, 温忠麟, 吴艳. 心理学常用效应量的选用与分析[J]. 心理科学进展, 2011, 19(12): 1868—1878.

收稿日期: 2022—12—05

(上接第 43 页)

(2) 提出“加固护栏可降低不幸卷入事故中驾乘人员伤害”的假设, 并通过再现 1 例真实事故探讨护栏加固对事故后果的影响。结果显示, 加固护栏可阻止车辆穿越且有效降低事故伤害, 能将人体头部损伤指标  $I_{HIC,36}$  降低 40% 以上。

## 参考文献:

- [1] 朱芳琪, 邱泽航, 张泽旭. 基于 GIS 的高速公路交通事故时空分析系统[J]. 公路与汽运, 2023(2): 25—31+39.
- [2] 中华人民共和国国务院. 生产安全事故报告和调查处理条例: 中华人民共和国国务院令 439 号[A]. 北京: 中国法制出版社, 2007.
- [3] 焦宇, 李显, 刘琦, 等. 2005—2019 年我国重特大安全生产事故特征分析[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2875—2882.
- [4] 丁雨蕾. 重特大交通事故特征及影响因素分析[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [5] GOPALAKRISHNAN S. A public health perspective of road traffic accidents[J]. Journal of Family Medicine and Primary Care, 2012, 1(2): 144—150.
- [6] YANG J, XU G J, CAI C, et al. Crash performance evaluation of a new movable median guardrail on highways[J]. Engineering Structures, 2019, 182: 459—472.
- [7] 涂晓威, 雷正保. 护栏立柱性能测试智能虚拟仪器系统的实现方法[J]. 公路与汽运, 2023(1): 37—41.
- [8] 邹铁方, 程宇峰, 刘期, 等. 一种防止车辆穿越护栏的破坏性保险装置: CN111114513A[P]. 2021—06—18.
- [9] ZOU T F, YI L, CAI M, et al. Injury source and correlation analysis of riders in car-electric bicycle accidents[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2018, 2018: 3674858—3674872.
- [10] ZHAO Y Q, ITO D, MIZUNO K. AEB effectiveness evaluation based on car-to-cyclist accident reconstructions using video of drive recorder[J]. Traffic Injury Prevention, 2019, 20(1): 100—106.
- [11] ZOU T F, CAI M, SHU X. Response surface methodology and improved interval analysis method: For analyzing uncertainty in accident reconstruction[J]. Forensic Science International, 2012, 222(1—3): 306—312.
- [12] 邹铁方, 余志, 蔡铭, 等. 基于 PC-Crash 的车—人事故再现[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 215—219.
- [13] 邹铁方, 张勇刚, 陈元新. 基于 PC-Crash 的车辆侧滑事故再现方法[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(1): 77—82.
- [14] 邹铁方, 余志, 蔡铭. 基于 PC-Crash 软件的人—车碰撞事故仿真规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(2): 54—58+177.

收稿日期: 2023—04—17