

Finite Element Analysis of Injury Risk in Vehicle-Roadside Barrier Crashes Based on Flail Space

Bo Liu¹, Xiaoyong Chen¹, Meigang Liu¹, Zhengbao Lei¹

¹School of automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China.

Email: xiaoboifeifang@163.com

Abstract: Guardrail systems widely used in vehicle collision accident in the roadside, and greatly reduce the severity of the damage to passengers. This paper analyzes the research achievements of roadside guardrail in recent years, combined with the 2013 edition of "highway guardrail safety performance evaluation standard" regulations, only in the center of gravity of the vehicle acceleration as evaluation of roadside barrier protection capability standard cannot fully reflect the safety of the vehicle's occupant injury risk; The paper, through the application of finite element method and LS-DYNA software, establish the finite element model of three-dimensional "auto - Road - complete flexible guardrail, and the vehicle occupant - cockpit is simplified as the flail space model which the occupant is defined as a head point quality without constraints; the impact velocity and ride-down acceleration of quality point is treated as a comprehensive evaluation of occupant safety standards, Studying on the safety of the vehicle's occupant when vehicle crashes with flexible guardrail. Besides, the three-dimensional modeling of "Vehicle-Roadside guardrail" Based on flail space, is adopted to simplify the complex modeling of occupant compartment. It improves the efficiency of simulation calculation, has more intuitive effect on improving the safety design level of guardrail, and is of great significance to further improve the evaluation standard of guardrail.

Keywords: Flail space; occupant injury risk; flexible guardrail; finite element model;

基于连枷空间的车辆-护栏碰撞损伤风险有限元分析

刘博¹, 陈小勇¹, 刘美刚¹, 雷正保¹

¹长沙理工大学汽车与机械工程学院, 长沙, 中国, 410114

Email: xiaoboifeifang@163.com

摘要: 护栏系统广泛使用在车辆路边碰撞事故中, 且大大减少了乘员受到伤害的严重程度。本文分析了近年来路侧防撞护栏的研究成果, 结合 2013 版《公路护栏安全性能评价标准》法规, 仅以车辆重心加速度作为路侧护栏防护能力的评价标准不能全面反映车辆护栏碰撞时乘员损伤的安全性; 本文应用有限元和 LS-Dyna 软件, 建立完整的三维“汽车-道路-柔性护栏”有限元模型, 并将车辆乘员—驾驶舱简化为无约束的头部点质量的连枷空间模型, 将质量点的冲击速度和缓冲加速度作为乘员安全性的综合评价标准, 研究了车辆与柔性护栏碰撞时车内乘员的安全性。同时采用基于连枷空间的“汽车-道路-护栏”三维建模, 简化了乘员-乘员舱的复杂建模, 提高了仿真计算效率; 对提高护栏的安全性设计水平有更直观的效果, 对护栏评价标准的进一步完善也有重要意义。

关键字: 连枷空间; 乘员损伤; 柔性护栏; 有限元模型;

引言

路侧安全防护设施的功能是在尽量减少乘员伤害的情况下发挥作用, 因此乘员风险标准对评估这些设备至关重要[9]。在全面的车辆耐撞性测试中, 对于乘员风险的测定, 碰撞试验假人是专门用来模拟正面碰撞和侧面碰撞时的人体反应。然而, 路边的硬件碰撞有更大的倾斜冲击角倾向。迄今为止, 还没有开发出能够在这种碰撞模式下准确再现人类反应的碰撞试验假人。相反, 已开发并实施了连枷空间模型, 可以用来评估路侧安全硬件碰撞试验中乘员的危险性[10]。

本文研究的目的是利用连枷空间模型及其评价标准来开发和验证一种弱柱柔性护栏系统。目前, 大多数柔性护栏的研究均基于 2004 版的高速公路护栏安全性能评价标准, 该标准以车辆质心三个方向的加速度的单项值作为车辆路侧碰撞乘员安全性的主要评价指标, 评估防护设施的缓冲功能; 当车辆质心加速度小于或等于 20g 时, 即认为该护栏缓冲功能符合保护乘员安全的要求。基于 2013 版法规《公路护栏安全性能评价标准》^[1], 根

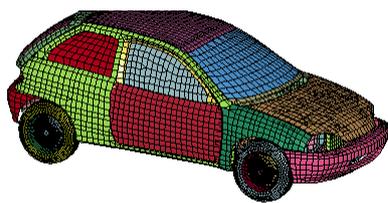
据已有的实车足尺碰撞实验和乘员碰撞速度和碰撞后加速度计算结果，两者具有不确定性，不能相互替代。因此在评价公路护栏缓冲功能时必须采用乘员碰撞速度和碰撞后加速度两项指标进行评价。此外，护栏安全性能评价标准还要求护栏能够有效地阻挡车辆并对车辆进行导向，禁止车辆任何形式的穿越、翻越、骑跨护栏，最大横向偏移量小于等于 1200mm。

本文研究的主要目的是根据连枷空间假设理论，在有限元仿真的基础上^[2]，运用该模型来对道路安全防护设施的设计和优化进行乘员损伤安全性评价；考虑到路安全侧防设施的多样性，本文采用柔性护栏进行有限元仿真建模，二来也用连枷空间来验证该柔性护栏的防护能力能否达到法规要求，为日后柔性护栏的开发设计奠定基础；最后通过完整的三维建模“汽车-道路-护栏”和连枷空间模型的结合，简化了乘员舱内要安装假人模型复杂建模过程，提高了仿真计算效率，也对日后护栏评价标准的进一步完善也有重要意义^[3,4]。

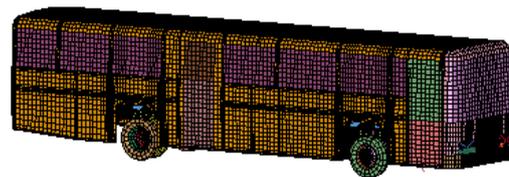
材料与方法

2.1 护栏仿真模型

本研究将利用 UG 软件所建立的客车、汽车三维实体模型导进 CAE 前处理软件，并经网格划分、材料分配、模型调整等步骤，则获得客车有限元模型。图 1 所示为仿真试验用 1.5t 汽车、SR6970H1 上饶 10.0t 客车有限元模型。由于试验客车结构主要为薄壁金属构件，为缩减建模规模及控制网格质量，单元属性主要采用大变形结构常用法向 3 点积分的 Belytschkohko-Wong- Chiang 单元，单元最小尺寸控制为 15mm，单元翘曲角度、最大角分别 $\leq 15^\circ$ 、 135° 。此外，为确保模型仿真稳定性，应严格将模型中三角形网格数目控制在 5%范围内。采用焊点及铰接用以模拟车身各个部件间的连接^[6]。



a. Finite element model of small car



b. Finite element model of medium bus

Fig. 1 finite element model of cars and buses

图 1. 1.5t 汽车和 10.0t 客车的有限元模型

本文仿真模型主要根据最新版的公路安全法规进行建模，护栏总长共是 200m。护栏缆索采用四索交叉缠绕式的布置形式，立柱采用矩形钢，矩形钢上直接开钢索卡槽，四根钢索的总体布局高度为 490mm-615mm-740mm-990mm。所有的立柱、壳体都是用四边形壳单元建模的，其材料选用弹塑性材料 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 定义。护栏钢索采用 Shell-Beam 模型进行模拟，该模型的有效性通过仿真实验的实车足尺碰撞实验验证【】。地基以下立柱部分直接模拟刚性地基，本文采用 SPC 约束进行固定。护栏两端采用 SPC 进行约束。仿真建立如下图 2 所示，车辆模型的初始速度和碰撞护栏的初始角度按照如下表 1 进行设置。车和护栏系统之间的接触设置定义为 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE，护栏系统和车系统内部的接触定义为 *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE^[7]。

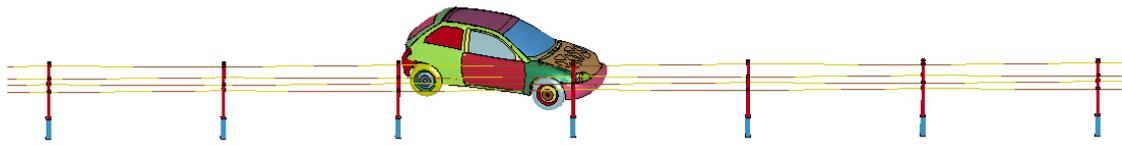


Fig. 2 simulation model of vehicle-road-guardrail system

图 2. 车辆-道路-护栏系统仿真模型

根据 2013 版《公路护栏安全性能评价标准》法规，车辆与路侧防护设施的碰撞实验条件如下表 1 所示。

Table 1. Vehicle crash test conditions

表 1. 车辆碰撞试验条件

车型	碰撞速度 (km/h)	碰撞角度 (°)	车辆质量 (t)
轿车	100	20	1.5
货车	60	20	10

2.2 连枷空间乘员伤害模型

连枷空间模型作为评价乘员伤害风险的评价模型，主要通过测量没有约束的乘员撞击车辆内侧时的冲击速度和乘员缓冲加速度作为评价指标^[10]。该模型假设乘员伤害严重度是乘员撞击内部和随后加速力的速度的函数，Michie 认为乘员是一个无拘无束的质量点，作为“自由导弹”乘员舱内部在发生碰撞。允许“连枷”内乘员在撞击汽车内部之前，纵向为 0.6 米（平行于车辆行驶的典型方向）和横向方向为 0.3 米的移动距离。测量的车辆运动学被用来计算在乘员到达横向 0.3 米或纵向 0.6 米的瞬间，乘员和乘员舱之间的速度差异。为了便于计算，车辆的偏航和俯仰运动被忽略，所有的运动被假定为在水平面，横向和纵向运动被假定为独立的。在乘员撞击的瞬间，最大速度差（横向和纵向方向独立处理）被称为乘员撞击速度 (v_i)。一旦与车辆内部发生碰撞，乘员被假定保持与内部一直接触，随后受到的加速度等同于车辆加速度。平均每 10 毫秒的最大加速度称为乘员缓冲加速度。再次，横向和纵向方向分开处理产生的两最大乘员缓冲加速度。无论是乘员撞击速度 (v_i) 和随后的乘员缓冲加速都要和确立的阈值相比较，以确保设备碰撞车辆的乘员不会产生毁灭风险[12,13]。其假设简化模型如图 3。

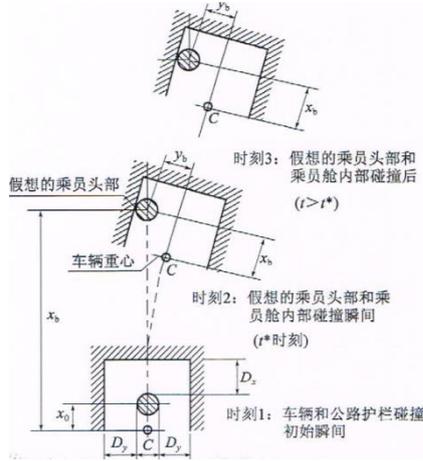


Fig. 3 flail space model

图3 连枷空间模型

连枷空间模型中通过三个特征时刻将小型客车碰撞公路护栏过程中不被约束的假想的乘员头部的运动状态分为两个阶段。在第一阶段，车辆碰撞公路护栏后减速，而假想的乘员头部由于惯性保持向前运动的状态，与乘员舱产生相对速度与相对位移，直至与乘员舱内部碰撞；在第二阶段，假想的乘员头部与乘员舱内部碰撞后。其运动状态即速度和加速度与车辆完全同步。

2.3 受伤机理及评价指标

连枷空间损伤风险模型假定乘员可以在纵向 0.6 米和横向 0.3 米的车厢内行驶。乘员到与车辆内部发生接触的时间 (t^*) 是由车辆加速度的二重积分决定的。

$$X, Y = \int_0^{t^*} \int_0^{t^*} a_{x,y} dt^2$$

其 $a_{x,y}$ 中是在纵向或横向方向的车辆加速度， $X=0.6\text{ m}$ 和 $Y=0.3\text{ m}$ 。在纵向方向上的加速度被积分两次，以找到时间的值，即 t_x^* ，此时二重积分等于 0.6 m 。横向加速度在时间上被积分两次，以得出其时间值 t_y^* ，此时二重积分等于 0.3 m 。时间 t^* 等于时间 t_x^* 、 t_y^* 中的较小值。相应的，乘员的冲击速度方程：

$$V_{i_{x,y}} = \int_0^{t^*} a_{x,y} dt$$

其中 $V_{i_{x,y}}$ 是车内乘员在纵向或横向的冲击速度[11]。

对乘员的缓冲加速度(ORA)，以 10 毫秒的任意时间作为时间基准计算乘员风险评估平均加速度。时间 t^* 后，通过在纵向和横向方向，寻找最高的 10 毫秒的平均车辆加速度得到 ORA 值。乘员缓冲加速度用如下公式测量：

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt = a \leq (a)_{\text{limit}}$$

其中： a 表示乘员加速度， t_1 表示冲击开始时刻， t_2 表示冲击结束时刻；

乘员与车辆的相对冲击速度:

$$|v_b - v_c| = v_i \leq (\Delta v)_{limit}$$

其中: v_b 表示乘员速度, v_c 车辆质心速度; v_i 代表身体冲击速度的变化, 这个暗含了乘员受伤的潜力。

基于志愿者、动物及假人的碰撞试验和事故统计等大量的关于人体耐冲击特性的研究, 各种损伤的风险参数的两极限被给出, 如表 2; 计算的乘员冲击速度和乘员缓冲加速度与规范值进行比较, 计算值低于“首选”界限是可取的, 建议计算值低于“最大”值。应该指出的是, 建议的极限阈值是绝对值^[14,15]。

Table 2. flail space model occupant injury evaluation index

评价指标		评价指标限值				
		OIV 限值			ORA 限值	
乘员冲击速度 OIV	分量	允许值	最大值	分量	允许值	最大值
乘员缓冲加速度 ORA	纵向	9 m/s	12 m/s	纵向	15 g	20 g
	横向	9 m/s	12 m/s	横向	15 g	20 g

仿真模拟分析

通过比较 1.5t 汽车和 10.0t 客车撞击柔性护栏产生的偏移量, 车辆驶出速度, 角度和乘员冲击速度以及缓冲加速度, 见表 2。通过提取车辆重心位置的这些数据来评价乘员损伤。对于汽车: 纵向的乘员冲击速度发生在 0.214 s 时, 此时的冲击速度是 6.0 m/s; 随后平均每 0.01 秒的纵向方向的最大缓冲加速度为 12.57 m/s²; 在横向方向, 乘员冲击速度在 0.168s 时, 此时冲击速度为 7.0 m/s, 平均每 0.01 秒的最大缓冲加速度为 13.53 m/s²。对于 10.0t 客车: 纵向的乘员冲击速度发生在 0.506s 时, 此时的冲击速度是 2.18 m/s, 随后平均每 0.01 秒的纵向方向的最大缓冲加速度为 3.57 m/s²; 在横向方向, 乘员冲击速度在 0.387s 时, 此时冲击速度为 2.0 m/s, 平均每 0.01 秒的最大缓冲加速度为 4.5 m/s²。

Table 3. Comparisons of maximum dynamic guardrail deflection

表 3. 最大动态偏移量比较

	汽车 1.5t	客车 10.0t	允许值
最大动态偏移量	620 mm	978 mm	1200 mm

Table 4. Comparisons of vehicle exit velocity and angle.

表 4. 车辆驶出速度和角度比较

	汽车 1.5t	客车 10.0t
车辆驶出速度	70.9 km/h	48.96 km/h
车辆驶出角度	7.4°	3.8°

Table 5. Comparisons of occupant impact velocity and ridedown acceleration

表 5. 乘员冲击速度和缓冲加速度比较

	汽车 1.5t	客车 10.0t	允许值	最大值
纵向 OIV	6.0 m/s	2.18 m/s	9 m/s	12 m/s
横向 OIV	7.0 m/s	2.3 m/s	9 m/s	12 m/s
纵向 ORA	12.57 m/s ²	3.57 m/s ²	15 m/s ²	20 m/s ²

横向 ORA	13.53 m/s ²	4.5 m/s ²	15 m/s ²	20 m/s ²
--------	------------------------	----------------------	---------------------	---------------------

从仿真中提取汽车的俯视视角图片进行分析（图4），我们可以全面的观察到车辆的动力学特征。车辆冲击柔性护栏模型，没有发生下钻和骑跨，能顺利导向，1.5t小型汽车大约在0.5s后驶离护栏；从仿真中提取驶出车的驶出速度为70.9km/h，驶出角度大约是7.4°；提取车辆质心X、Y向加速度曲线曲线（图5），分析可知车辆质心出加速度小于15g，没有超过其允许值，该护栏的防护能力比较符合要求；

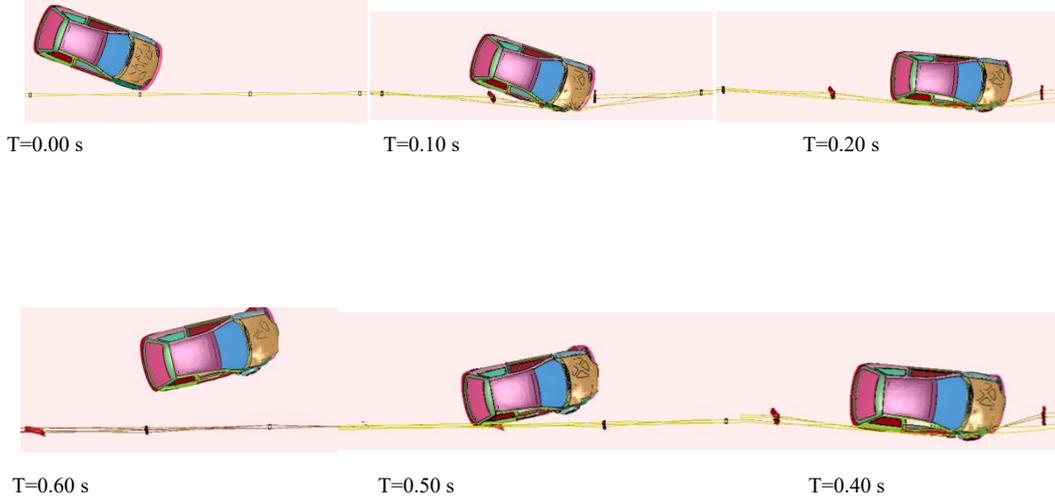


Fig 4. Top view photos of 1.5t car simulation experiment

图4 1.5t 汽车仿真实验俯视图照片

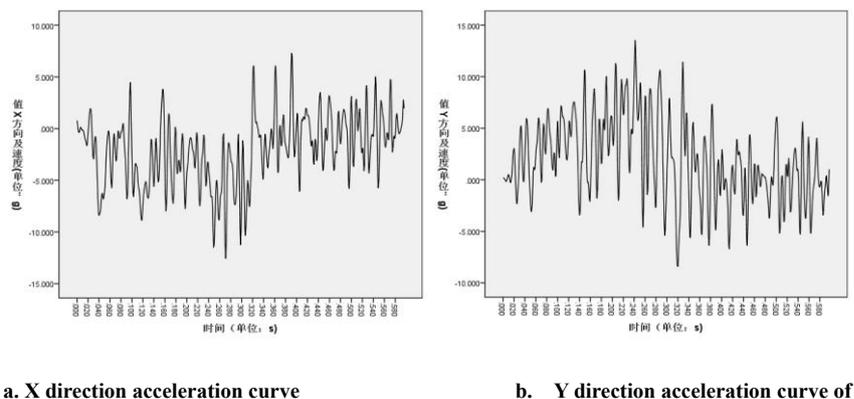


Fig 5. 1.5t vehicle collision acceleration curve

图5 1.5t 汽车碰撞加速度曲线

从仿真中提取汽车的俯视视角图片进行分析（图6），我们可以全面的观察到客车的动力学特征。客车冲击柔性护栏模型，没有发生下钻和骑跨，能顺利导向，10.0t客车大约在1.2s时刻驶离柔性护栏，从仿真中提取客车的驶出速度为48.96 km/h，驶出角度为3.8°；提取客车的最大偏移量曲线（图7），最大偏移量符合法规要求。

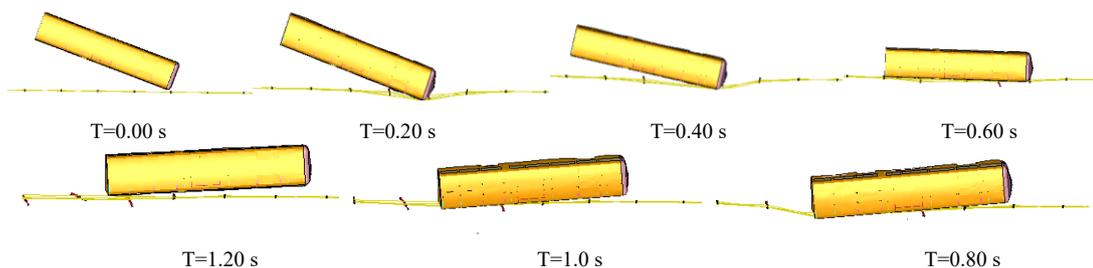


Fig 6. Top view photos of 10.0t bus simulation experiment

图 6 10.0t 客车仿真实验俯视图照片

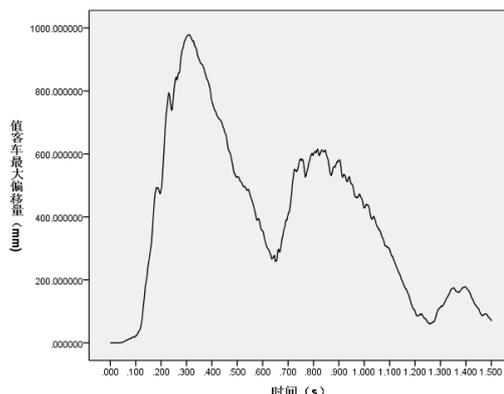


Fig 7. Dynamic deflection curve of bus impact guardrail

图 7 客车冲击护栏偏移量曲线

结论与建议

根据 2013 版《公路护栏安全性能评价标准》法规，本文利用连枷空间模型对目前路侧防护设施乘员伤害风险能力进行安全性评价；由于路侧防护设施包括护栏、防撞垫、避险车道等，本文主要通过连枷空间模型对四索交叉缠绕式的柔性护栏的损伤风险进行仿真实验分析。实验主要利用 LS DYNA 模拟 1.5t 的汽车和 10.0t 的客车分别以 100km/h 的速度、 20° 的角度，和 60km/h 的速度、 20° 的角度撞击柔性护栏。碰撞过程中，乘员损伤风险程度通过计算乘员冲击车辆内测时的冲击速度和乘员缓冲加速度进行得到。从仿真计算中，提取小型汽车和大客车的加速度曲线，计算其纵向和横向的冲击速度（OIV），其值均小于允许值；通过比较车辆质心的纵向和横向缓冲加速度（ORA），也均小于法规要求的允许值；实验结果表明该柔性护栏有限元模型具有良好的导向和乘员防护性能。

参考文献

- [1] 单位北京深华达交通工程检测有限公司. 公路护栏安全性能评价标准[M]. 人民交通出版社, 2013.
- [2] 雷正保, 唐波, 刘兰等. 车一路一护栏系统的碰撞安全性[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2009.
- [3] 雷正保, 杨兆. 汽车撞击护栏时乘员的安全性研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(2):5-11.
- [4] Lei Zheng-bao, Yang zhao. STUDY ON THE PASSENGER SAFETY DURING THE IMPACT PROCESS OF AUTOMOBILE AGAINST

- FENCE[J]. JOURNAL OF VIBRATION AND SHOCK, 2006, 25(2):5-11.
- [5] 雷正保, 李丽红, 雷沐羲等. 新型柔性护栏碰撞安全性仿真分析及实车验证[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22):28-31.
- [6] LEI Zheng-bao, LI Li-hong, LEI Mu-xi, etc. Simulation analysis and real car validation for crashworthiness of a new flexible safe fence[J]. JOURNAL OF VIBRATION AND SHOCK, 2013, 32(22):28-31.
- [7] 闫书明. 有限元仿真方法评价护栏安全性能的可行性[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1):152-156.
- [8] YAN Shu-ming, Feasibility analysis of barrier safety evaluation with finite element simulation method[J]. JOURNAL OF VIBRATION AND SHOCK, 2011, 30(1):152-156.
- [9] 雷正保, 廖卓, 刘助春. 4 索交叉缠绕式 A 级柔性护栏优化设计[J]. 交通科技, 2016(3):177-179.
- [10] 雷正保, 廖卓, 刘助春. 交叉缠绕式柔性护栏端部锚固优化设计[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(3):93-98.
- [11] LEI Zhengbao, LIAO Zhuo, LIU Zhuchun. Optimized design of cross-wound cable barrier end anchorage[J]. JOURNAL OF SHANDONG UNIVERSITY (ENGINEERING SCIENCE), 2016, 46(3):93-98.
- [12] 雷正保, 阳彪, 宁寒. 新型柔性护栏矩形截面立柱优化[J]. 中外公路, 2015, 35(3):323-327.
- [13] Vandiver W, Anderson R, Ikram I, et al. Analysis of Crash Data from a 2012 Kia Soul Event Data Recorder[M]// Survey on the main trends of inquiry in the field of the natural sciences. UNESCO, 2015:1-15.
- [14] Michie J D. COLLISION RISK ASSESSMENT BASED ON OCCUPANT FLAIL-SPACE MODEL[M]. 1981.
- [15] Wang Q, Gabler H C. Validation of finite element models of injury risk in vehicle roadside barrier crashes [J]. Biomedical Sciences Instrumentation, 2008, 44:298.
- [16] Tan T C, Grzebieta R H, McIntosh A S. Review of flail-space's lateral impact velocity criterion for thoracic impacts[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2017:00-00.
- [17] Gabauer D J, Gabler H C. Comparison of roadside and vehicle crash test injury criteria in frontal crash tests[J]. International Journal of Vehicle Safety, 2008, 3(1):1-13(13).
- [18] Roque C, Cardoso J L. Observations on the relationship between European standards for safety barrier impact severity and the degree of injury sustained[J]. Iatss Research, 2013, 37(1):21-29.
- [19] Shashi Kuppaa. INJURY CRITERIA FOR SIDE IMPACT DUMMIES[M]. National Highway Traffic Safety Administration. November, 2014.