

半挂车撞击公路护栏时的等效模型

甘新众¹, 甘有为², 刘群艳¹, 李闯民³

(1.宜春市公路管理局, 江西 宜春 336000; 2.江西省交通设计研究院有限责任公司; 3.长沙理工大学 交通运输工程学院)

摘要:为解决使用整体车碰撞能量计算公式,计算半挂车撞击护栏时的碰撞能量误差太大的问题,对半挂车撞击护栏时的等效模型进行研究。运用有限元分析软件 LS-DYNA 建立车辆—护栏碰撞分析模型,结合正交试验方法对整体车与半挂车撞击护栏时的运动特性及碰撞评价指标进行分析,通过将各碰撞评价指标与碰撞能量分别进行数值拟合,确定碰撞能量的等效评价指标。再以该等效指标为优化目标进行正交试验,通过对试验结果进行极差和方差分析确定半挂车的等效整体车模型。

关键词: 半挂车; 碰撞能量; 等效模型; 有限元分析软件 LS-DYNA; 正交试验

1 引言

半挂车具有运输量大、成本低、高效和经济的优势,在货物运输中得到广泛应用,但由于载重量重,尺寸大,质心高,且牵引车和半挂车之间相互耦合,其事故发生率很高。2015年9月25日在沪昆高速公路K1 075+423路段发生了一起重大交通事故,一辆半挂车由于车辆失控越过高速公路中央护栏,与对向车道正常行驶的大客车相撞,该事故引发半挂车和大客车起火燃烧,造成多人伤亡,4辆车及部分道路设施受损。根据事故鉴定报告提供的事故数据,对此次事故进行试验分析发现,由于半挂车与整体车碰撞护栏时运动姿态的明显不同,导致直接采用整体车碰撞能量计算公式,算得的半挂车碰撞能量误差很大。虽然在护栏设计时,由于碰撞条件为法规规定的少量几个固定条件,可以直接采用半挂车进行碰撞分析,但在司法鉴定中,碰撞车速、碰撞角度等通常是待鉴定量,那种直接采用半挂车进行碰撞分析的做法并不适用。事实上,文献[13]通过对半挂车与整体车进行试验对比分析,得出半挂车与整体车碰撞护栏时有着明显不同的特性,但文中没有进一步对这些不同特性在碰撞过程中产生的影响进行分析,也没有提出半挂车碰撞能量计算误差的问题。文献[14]针对半挂车—护栏碰撞试验进行了分析研究,文中对碰撞过程中车辆运动规律、

损伤情况、能量转换等进行了详细分析。但文中仅仅分析了碰撞过程中动能与系统内能的转换,没有考虑到车辆的初始碰撞能量与其运动特性之间的联系。

为此,该文提出一种半挂车撞击公路护栏的等效模型的确定方法,为半挂车撞击公路护栏事故的司法鉴定提供理论依据。

2 半挂车与整体车撞击护栏过程对比分析

分别选用质量同为33 t的半挂车与整体货车,以相同的碰撞速度65 km/h和相同的碰撞角度20°,进行仿真试验,分析其不同特性。整体货车有限元模型如图1所示,半挂车有限元模型如图2所示,试验护栏为洞庭湖二桥 HA 级半刚性桥梁护栏,防护能量760 kJ,护栏有限元模型如图3所示。

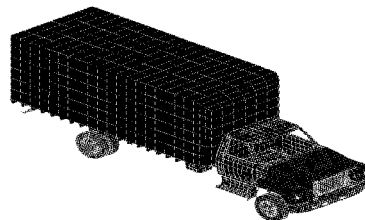


图1 整体车模型

整体车与护栏碰撞运动过程如图4所示,其车头和货箱尾部分别与护栏发生碰撞,半挂车与护栏碰撞

收稿日期:2018-10-12

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(编号:2019JJ40312);湖南省教育厅科研项目(编号:18A117)

作者简介:甘新众,男,硕士,高级工程师.E-mail:1085697916@qq.com

运动过程如图 5 所示,其车头首先与护栏发生撞击,由于牵引车与后面半挂车之间可以相对转动,在牵引车车头撞击护栏后很快完成偏转,紧接着货箱前部与护栏发生撞击,最后是货箱尾部与护栏撞击。

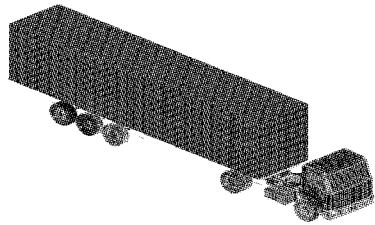


图 2 半挂车模型

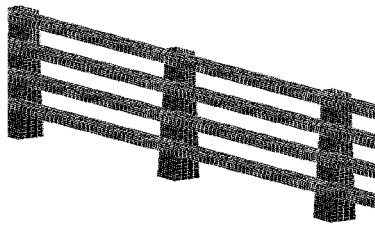


图 3 护栏模型

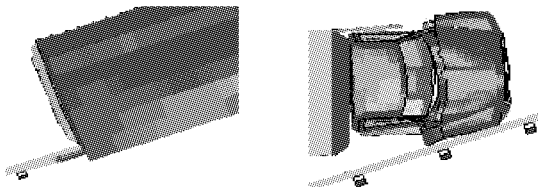


图 4 整体车撞击护栏过程

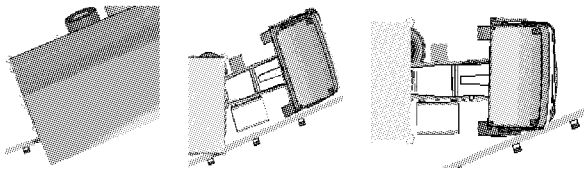


图 5 半挂车撞击护栏过程

护栏横向最大动态偏移点的位移时程曲线对比如图 6 所示,可以看出:整体车碰撞护栏的最大偏移量为 192 mm,半挂车碰撞护栏最大偏移量为 89 mm。其碰撞力时程曲线如图 7 所示,整体货车碰撞过程中碰撞力出现两次峰值,最大碰撞力为 1 246 kN,半挂车碰撞过程出现三次峰值,最大碰撞力为 852 kN。

3 碰撞能量计算公式的适用性分析

中国护栏安全评价标准 JTG/T F83—01—2013《高速公路护栏安全性能评价指标》(后文简称《评价指标》)中给出了整体车辆碰撞护栏时的碰撞能量计算公

式(1),人们习惯性认为该公式也适用于半挂车车型。但由于半挂车的特殊结构,在与护栏发生碰撞时其运动特性与整体车之间存在明显差别,也因此导致惯用的整体车辆碰撞能量计算公式并不适用于半挂车。

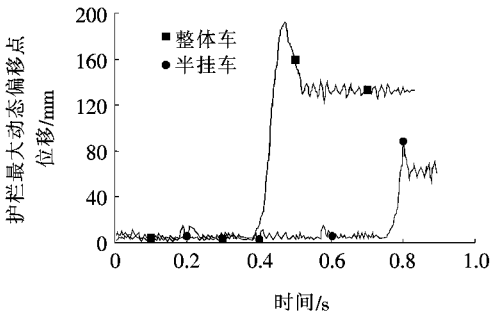


图 6 护栏位移时程曲线

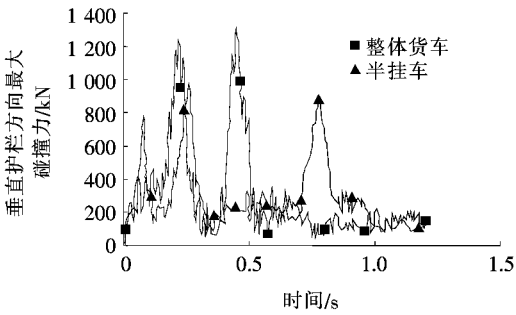


图 7 护栏碰撞力时程曲线

$$E = \frac{1}{2} m (v \sin \theta)^2 \tag{1}$$

式中: E 为碰撞能量; m 为车辆总质量; v 为碰撞速度; θ 为碰撞角度。

3.1 正交试验设计

基于正交试验方法,按照中国护栏安全评价标准《评价指标》中规定的整体货车试验参数设计试验,通过对得到的试验数据进行分析,确定碰撞能量的等效评价指标,试验因素分别为: A 为整体货车质量, B 为碰撞速度, C 为碰撞角度,具体因素水平如表 1 所示。

表 1 试验因素水平

| 水平 | A/t | $B/(km \cdot h^{-1})$ | $C/(^{\circ})$ |
|----|-------|-----------------------|----------------|
| 1 | 6 | 40 | 6 |
| 2 | 10 | 50 | 9 |
| 3 | 18 | 55 | 12 |
| 4 | 25 | 60 | 15 |
| 5 | 33 | 65 | 18 |
| 6 | 40 | 80 | 20 |

根据表 1 所示的各因素优化区间值,选用 $L_{49}(3^6)$ 的正交表进行 49 组仿真试验,试验结果如表 2 所示。

表 2 整体货车的正交试验结果

| 试验号 | A/t | B/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) | C/ ($^{\circ}$) | 车辆最 大加速 度/($\times g$) | 护栏横向 最大动态 偏移量/mm | 垂直护栏方 向最大碰 撞力/kN | 碰撞能 量/kJ |
|-----|-----|---|----------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|-------------|
| 1 | 40 | 60 | 15 | 15.48 | 138.98 | 1 084.0 | 372.15 |
| 2 | 33 | 80 | 18 | 15.00 | 157.26 | 1 246.0 | 778.08 |
| 3 | 18 | 40 | 12 | 6.76 | 39.26 | 552.5 | 48.03 |
| 4 | 40 | 40 | 6 | 10.32 | 23.72 | 407.0 | 26.98 |
| 5 | 18 | 65 | 18 | 11.76 | 127.28 | 1 010.0 | 280.17 |
| 6 | 6 | 80 | 12 | 10.88 | 17.09 | 477.2 | 64.04 |
| 7 | 33 | 55 | 6 | 8.76 | 35.92 | 576.9 | 42.08 |
| 8 | 33 | 40 | 12 | 8.19 | 57.08 | 711.1 | 88.06 |
| 9 | 10 | 65 | 6 | 7.14 | 24.63 | 323.1 | 17.81 |
| 10 | 10 | 50 | 15 | 8.78 | 29.96 | 524.7 | 64.61 |
| 11 | 6 | 60 | 6 | 5.19 | 10.43 | 223.7 | 9.11 |
| 12 | 18 | 60 | 20 | 12.42 | 128.17 | 1 088.0 | 292.44 |
| 13 | 25 | 80 | 6 | 6.68 | 53.25 | 874.3 | 67.45 |
| 14 | 25 | 65 | 9 | 8.25 | 59.63 | 1 019.0 | 99.72 |
| 15 | 10 | 40 | 18 | 8.95 | 16.95 | 568.3 | 58.95 |
| 16 | 25 | 50 | 18 | 10.56 | 108.81 | 890.0 | 230.26 |
| 17 | 10 | 60 | 9 | 9.65 | 32.35 | 751.9 | 33.99 |
| 18 | 6 | 55 | 20 | 8.66 | 31.15 | 529.6 | 81.91 |
| 19 | 18 | 40 | 9 | 5.58 | 29.86 | 389.8 | 27.19 |
| 20 | 33 | 40 | 15 | 12.5 | 74.15 | 776.1 | 136.46 |
| 21 | 6 | 40 | 9 | 4.02 | 7.19 | 129.3 | 9.06 |
| 22 | 33 | 65 | 20 | 16.06 | 182.44 | 1 218.0 | 629.23 |
| 23 | 6 | 40 | 15 | 6.16 | 14.26 | 197.3 | 24.81 |
| 24 | 6 | 80 | 20 | 14.47 | 35.13 | 639.3 | 173.30 |
| 25 | 6 | 65 | 6 | 4.74 | 8.86 | 216.1 | 10.69 |
| 26 | 40 | 80 | 9 | 14.88 | 100.68 | 1 211.0 | 241.70 |
| 27 | 25 | 55 | 15 | 10.86 | 99.86 | 889.9 | 195.44 |
| 28 | 33 | 60 | 6 | 6.92 | 31.20 | 844.5 | 50.08 |
| 29 | 25 | 40 | 20 | 10.59 | 64.31 | 676.7 | 180.52 |
| 30 | 6 | 50 | 12 | 6.06 | 10.79 | 262.9 | 25.02 |
| 31 | 18 | 80 | 15 | 19.13 | 104.68 | 1 221.7 | 297.72 |
| 32 | 25 | 40 | 6 | 6.03 | 18.81 | 196.3 | 16.86 |
| 33 | 6 | 50 | 6 | 4.69 | 8.75 | 120.8 | 6.32 |
| 34 | 40 | 50 | 9 | 8.67 | 42.39 | 1 134.0 | 94.41 |
| 35 | 6 | 40 | 18 | 6.75 | 17.71 | 137.8 | 35.37 |
| 36 | 33 | 50 | 9 | 8.43 | 51.37 | 892.9 | 77.89 |
| 37 | 6 | 40 | 18 | 6.75 | 17.71 | 137.9 | 35.37 |
| 38 | 40 | 40 | 6 | 10.32 | 23.72 | 307.0 | 26.98 |
| 39 | 40 | 55 | 18 | 14.86 | 147.89 | 1 148.7 | 445.77 |
| 40 | 10 | 55 | 12 | 11.26 | 35.49 | 742.7 | 50.45 |
| 41 | 18 | 55 | 6 | 6.86 | 28.24 | 390.6 | 22.95 |

续表 2

| 试验号 | A/t | B/ (km · h ⁻¹) | C/ (°) | 车辆最 大加速 度/(×g) | 护栏横向 最大动态 偏移量/mm | 垂直护栏方 向最大碰 撞力/kN | 碰撞能 量/kJ |
|-----|-----|-------------------------------|-----------|----------------------|------------------------|------------------------|-------------|
| 42 | 18 | 50 | 6 | 6.26 | 24.26 | 355.8 | 18.97 |
| 43 | 10 | 80 | 6 | 7.56 | 33.11 | 362.6 | 26.98 |
| 44 | 6 | 55 | 9 | 4.80 | 16.27 | 262.9 | 17.14 |
| 45 | 25 | 60 | 12 | 13.28 | 74.99 | 750.6 | 150.09 |
| 46 | 10 | 40 | 20 | 6.13 | 22.60 | 396.9 | 72.21 |
| 47 | 6 | 65 | 15 | 10.00 | 27.38 | 641.8 | 65.51 |
| 48 | 40 | 65 | 12 | 15.78 | 111.35 | 1 167.0 | 281.84 |
| 49 | 6 | 60 | 18 | 7.57 | 31.21 | 468.9 | 79.58 |

3.2 碰撞能量等效评价指标

基于表 2 的试验数据,将各评价指标与碰撞能量进行拟合分析如图 8 所示,该图直观地呈现了各个指标与碰撞能量之间的相关程度,但还不能准确得知相关程度的大小,因此借助 SPSS 软件的 Pearson 相关性分析功能进行相关性分析,得到结果如图 9 所示。车辆最大加速度、护栏最大横向动态偏移量及垂直护栏方向最大碰撞力与碰撞能量之间的 Pearson 相关性分别为 0.009、0.947 和 0.969。这 3 个评价指标中,护栏最大横向动态偏移量与垂直护栏方向最大碰撞力这两个参数都与碰撞能量具有很强的相关性,即都具有显著相关性,由于垂直护栏方向的最大碰撞力在事故后已经消失了,它本质上是一个无法用于司法鉴定的参数,显然,在司法鉴定中,采用护栏最大横向动态偏移量作为碰撞能量的等效评价指标具有可操作性,因此,该文拟将护栏最大横向动态偏移量作为碰撞能量的等效评价指标。

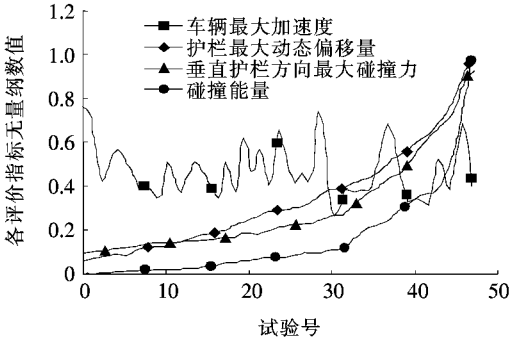


图 8 各评价指标与碰撞能量相关性分析图

4 等效模型的建立方法

前文正交试验设计表,是根据中国护栏安全评价

标准《评价指标》中规定的整体车试验参数进行试验设计得到的等效模型表,该表包含全部试验 216 组,可计算碰撞能量范围 4~1 805 kJ。等效模型的确定方法如下:

- (1) 根据事故现场,测量出护栏最大横向动态偏移量 D 。
- (2) 再将 D 代入该数据表中的护栏最大横向动态偏移量列,与之前整体车的 D' 相减得到一个差值 ΔD ,然后以 $|\Delta D|$ 为优化指标,结合正交设计表对其进行极差与方差分析,分析结果中使 $|\Delta D|$ 最优的整体车试验组即为该半挂车的等效模型。

5 结论

- (1) 建立车—护栏有限元碰撞分析模型,从车辆运动姿态、护栏横向最大动态偏移量、垂直护栏方向最大碰撞力等方面进行了对比分析研究。结果表明:半挂车撞击护栏时车辆与护栏之间发生 3 次碰撞,整体车则只与护栏发生两次碰撞,且其护栏横向最大动态偏移量和垂直护栏方向最大碰撞力都明显小于整体车。
- (2) 护栏最大横向动态偏移量与垂直护栏方向最大碰撞力这两个参数都与碰撞能量具有很强的相关性,但垂直护栏方向的最大碰撞力在事故后已经消失,无法用于司法鉴定,因此,将护栏最大横向动态偏移量作为碰撞能量的等效评价指标是合适的。
- (3) 研究了等效模型建立方法,即以半挂车与整体车碰撞护栏时护栏最大横向动态偏移量之差 $|\Delta D|$ 为优化目标,结合正交设计表对其进行极差与方差分析,使 $|\Delta D|$ 最优的整体车试验组即为该半挂车的等效模型。

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.053

互通式立交出口匝道运行速度过渡段长度研究

白浩晨, 柳银芳

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 为确定车辆在互通式立交出口匝道满足安全行驶需求的运行速度过渡段最小长度, 分别建立了满足超高过渡、变速行驶、3 s 行程时间及横向加速度变化率适中等要求的运行速度过渡段长度计算模型。采用 UMRR 链式开普勒雷达测速仪, 实测不同主线设计速度下立交出口匝道分流鼻运行速度, 结合 SPSS 软件分析, 得到分流鼻运行速度。基于运行速度过渡段长度计算模型和典型参数的分析论证, 得到了满足不同需求下的运行速度过渡段长度。结果表明: 匝道设计速度为 30~40 km/h 时, 车辆变速行驶需求为运行速度过渡段长度的主要控制因素; 匝道设计速度为 50~80 km/h 时, 超高过渡、3 s 行程时间为运行速度过渡段长度的主要控制因素; 基于安全行驶需求, 提出了互通式立交出口匝道运行速度过渡段长度最小建议值及纵坡修正系数。

关键词: 互通式立交; 运行速度过渡段; 理论分析; 分流鼻运行速度

1 前言

互通式立交作为高速公路的重要组成部分, 主要呈现为喇叭形、梨形、苜蓿叶形、枢纽形等主要形式, 其中, 以单喇叭互通式立交为主, 约占所有互通式立交的

68%。相关数据表明: 发生在高速公路立交分流区及其影响范围内的事故占总事故的比例超过 30%。由于互通式立交各出口匝道设计速度较主线设计速度低, 出口匝道线形存在高低指标相互衔接的情况, 存在较大安全隐患; 此外, 车辆到达减速车道分流鼻位置时的运行速度远远大于出口匝道限速值, 仍处于高速分

参考文献:

- [1] 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.
- [2] VAN DE MOLENGRAFF LUIJTEN M F J, BESSELINK I J M, VERSCHUREN M A F, et al. Analysis of the Lateral Dynamic Behavior of Articulated Commercial Vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50 (S1): 169-189.
- [3] CHENG Cai-zhen. Enhancing Safety of Actively Steered Articulated Vehicles [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2009.
- [4] American Association of State Highway and Transportation offices. Manual for Accessing Safety Hardware [S]. 2009: 1-88.
- [5] JTG/T F83-01-2013 高速公路护栏安全性能评价指标 [S].
- [6] 高云凯, 彭和东, 张荣荣. 集装箱汽车列车与桥梁护栏碰撞分析 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2005 (1).
- [7] 邵永刚. 组合式桥梁护栏防撞性能仿真与试验 [J]. 交通运输工程学报, 2010 (1).
- [8] 韩海峰, 皮振新, 李新伟. 新型梁柱式钢护栏研发与防撞性能试验研究 [J]. 中外公路, 2016 (5).
- [9] 刘爽. 高速公路临时防护栏安全性分析及试验研究 [J]. 公路, 2018 (1).
- [10] 肖顺. 高速公路路侧护栏设计优化探究 [J]. 大科技, 2017 (32).
- [11] 崔砚东. 路侧护栏设计优化 [J]. 工程建设与设计, 2017 (12).
- [12] 陈晖, 姜超, 丁旭东, 等. 波形梁钢护栏升级改造技术研究 [J]. 中外公路, 2016 (2).
- [13] 闫书明, 包琦玮, 惠斌. 整体货车和拖头货车碰撞护栏分析 [J]. 特种结构, 2011 (1).
- [14] 赖跃. 重型车辆与半刚性护栏碰撞的有限元分析 [D]. 同济大学硕士学位论文, 2006.
- [15] 雷正保, 刘漫雪, 岳阳洞庭湖二桥钢护栏优化设计 [J]. 长沙理工大学学报, 2015 (2).

收稿日期: 2019-06-14

作者简介: 白浩晨, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: 37698212@qq.com