

文章编号:1671-8879(2008)02-0044-05

## 高速公路中间带护栏碰撞仿真实验

杨宏志,张胜平,杨少伟

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘要:**针对高速公路中间带护栏安全性难以评估及实车碰撞护栏存在危险性等问题,提出了基于计算机仿真的高速公路中间带护栏碰撞安全性评估方法。建立了汽车模型、护栏模型、路缘石模型和碰撞模型,进行了多角度、不同速度和有无路缘石情况下的汽车碰撞仿真实验,并对碰撞数据进行了分析。结果表明:通过仿真实验可获得各种情况下汽车碰撞护栏的实验数据,为进行护栏安全性评估提供了依据;该方法具有参数容易修改、数据表达直观、实验速度快和节省费用等优点。

**关键词:**道路工程;高速公路;中间带;护栏;碰撞;仿真模型

**中图分类号:**U491.59

**文献标志码:**A

### Simulation test on collision of vehicles on guard-rail of expressway median

YANG Hong-zhi, ZHANG Sheng-ping, YANG Shao-wei

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** It is difficult and hazardous to test the collision of vehicles on guard-rail of expressway median. This paper puts forward a safety evaluation method for testing the collision by computer simulation. With the construction of vehicle model, guard-rail model, curb model, and collision model, the multi-angle collisions in different velocities are simulated. Using the collision datum, the relationship between guard-rail and vehicle safety is found to evaluate the guard-rail safety. In this method, it is easy to adjust the model parameters, the datum can be expressed with visual display, the testing speed is very high, and the testing cost is very low. 6 figs, 11 refs.

**Key words:** road engineering; expressway; median; guard-rail; collision; simulation model

## 0 引言

随着中国高速公路的迅速发展,安全问题已经成为高速公路发展过程中的突出问题。高速公路事故的增长与其自身的交通安全设施有一定的关系,其中与中间带有关的交通事故在高速公路中一直占有较高的比例。统计资料表明,中国每年高速公路

与中间带有关的交通事故约占高速公路全部事故的30%,其中高速公路安全护栏的形式不合理是造成交通事故的主要原因<sup>[1]</sup>。

为了找到合适的高速公路中间带护栏形式,国内外在理论分析和模拟实验的基础上,通过实车足尺碰撞实验和公路上的应用实践分析了交通事故发生的原因,积累了大量的资料和丰富的经验。实车

收稿日期:2007-02-15

基金项目:陕西省交通科技项目(02-03K)

作者简介:杨宏志(1975-),男,山东昌邑人,副教授,博士,E-mail:hongzhiyang@vip.sina.com

足尺碰撞实验是目前国内外采用的主要研究方法。由于碰撞实验需要大型的实验场地以及成套的实验装置和数据采集系统,要花费大量的人力、物力,实验成本较高。

本文根据中国的现实情况,通过建立仿真模型,进行仿真实验,利用仿真手段研究汽车行驶状态与护栏形式之间的关系,为合理评估中间带护栏的安全性、确定中间带各要素的形式和尺寸提供依据。

## 1 国内外研究现状

发达国家对交通护栏的研究和大规模应用始于20世纪50年代。美国是开展交通护栏研究工作最早、最深入的国家,目前建有多处大型实车足尺碰撞实验场,配置有先进的测试仪器和设备,并对汽车与护栏的碰撞实验进行了系统的试验和研究,得出了适合国情的护栏形式。近几十年来,国外一些研究机构相继提出了一些由简单到复杂的有效的力学模型,并开发了相应的计算机软件。其中HVOSM系统将车辆模型化为由车身、悬架和轮胎组成的具有11个自由度的多体系统,能够模拟车辆与各类护栏碰撞的过程,给出碰撞过程中车辆承受的加速度和车辆在三维空间中的运动姿态。GUARD程序将车辆简化为具有6个自由度的空间运动体,采用三维有限元模型模拟各类护栏。虽然这些模拟方法都具有较大的局限性,但能反映护栏性能随其结构参数和碰撞条件变化的大致趋势。

中国在“七五”期间就开始对高速公路护栏进行研究。1992年前后,中国公路工程咨询监理总公司组织有关人员,对全国已通车的高速公路进行了调查,并完成了中国第一次实车足尺碰撞实验。随后,交通部公路科学研究院为了研究钢制波形梁护栏的防撞性能,编制相关部颁标准,在北京、海南做了两次共27台实车冲击钢制波形梁护栏的实验。实车足尺碰撞实验的成本较高,故此项研究一般都是在实验的基础上,建立相关的力学模型进行仿真实验。然而大部分仿真实验都是局部实验或将整车当作一个质点,虽然能说明一定的问题,但与真实情况相差较大。另外,中国有关单位通过缩尺模型实验对交通护栏碰撞进行了研究。但由于缩尺、材料等不同,结果并不可靠,因而被计算机仿真实验所取代<sup>[2]</sup>。

国内外的研究经验表明,计算机仿真实验不仅可以取代部分实车足尺碰撞实验,而且可以提供许多无法从实车碰撞中获取的信息,已成为汽车碰撞研究、护栏开发研制中最有力的工具。

## 2 仿真模型的建立

### 2.1 仿真策略与步骤

本文基于美国的ADAMS软件建立了系统仿真模型,对仿真模型进行了整合,应用于护栏碰撞安全评价中,仿真系统应用过程和策略如下:

(1)建造模型。①创建模型;②给模型施加约束和运动;③给模型施加各种作用力。护栏碰撞仿真需要创建的模型包括汽车模型、护栏模型、路缘石模型和碰撞模型。

(2)测试模型。通过确定测量值,对模型进行初步仿真,通过仿真结果检验模型中各个零件、约束及力是否正确。

(3)验证模型。导入实际实验测试数据,与虚拟仿真的结果进行比较。本文在验证时主要借助国内外的相关护栏碰撞试验资料。

(4)模型的重新描述。为方便设计,可以加入各种参数对模型进行描述,当用户对模型进行了更改,这些参数将自动发生变化,使相关改动自动执行。

(5)仿真结果的处理与评价。对护栏碰撞仿真得到的结果进行后处理,从而进行安全性评价<sup>[3-4]</sup>。

### 2.2 护栏力学模型的建立

从力学观点看,汽车与护栏碰撞的作用过程相当复杂。护栏是由多根支柱所支持的多跨结构,支柱的受力状态还关系到作为地基基础的土的作用;横梁部分的荷载不只是动态作用,其受力点还会随着汽车碰撞过程的延续而移动,并且它的变形不会停留在弹性域内。对于基础部分,荷载也是动态的,它的变形一般会超过永久性构造物在土力学处理的范围。因此,确定完整的护栏力学模型是比较困难的,中国普遍采用的是“点支撑的连续梁”和“局部变形”的力学模型。

“点支撑的连续梁”模型能在一定程度上反映碰撞过程和分析结果。但是该模型是在平面上的简化运动,不能反映碰撞三维运动结果,因而具有一定的局限性。“局部变形模型”中,汽车的各种运动被限定,只能按给定的方式运动,而且忽略了很多重要的影响因素,如护栏与车辆、车轮与地面的摩擦力,对碰撞及碰撞后汽车的运动姿态和受力影响很大,这些都是对护栏安全性能评估的重要条件,不能从整车、三维空间反映出碰撞特性。

本文利用ADAMS/View建立护栏力学模型:①建立护栏立柱和波形梁模型,设定材料参数;②将波形梁和立柱之间用固定约束连接,在ADAMS/View

的零件库中采用固定副约束,可限制 3 个方向的移动和转动,符合实际的约束;③立柱与大地之间的约束,根据护栏力学分析,立柱加固后能满足受力要求,加固后的地基和立柱的约束可以确定为固定约束。

### 2.3 汽车模型的建立

使用 ADAMS/View 创建汽车的整车模型,包括:汽车底盘模型、双横臂式前独立悬架模型和转向机构模型、斜置臂式后悬架模型、轮胎模型。其中底盘、悬架和转向机构模型采用 ADAMS 内置的标准模型,轮胎模型使用由美国 Arizona 大学的 Nikravesh 和 Gim 等人研制开发的 UA 轮胎解析模型。建立的汽车模型中共有 10 个自由度,包括车身的 6 个自由度、前悬架左右横臂的 2 个转动自由度和后悬架左右斜置臂的 2 个转动自由度<sup>[5-6]</sup>。建立的整车框架模型如图 1 所示。

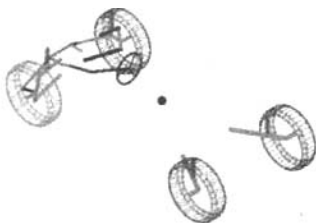


图 1 整车框架模型

### 2.4 路面模型和路缘石模型的建立

路面模型的建立要满足轮胎的要求:①路面谱的位置要处于轮胎的下方;②地面向上的方向要指向轮胎所处的一侧;③路面谱的大小要根据仿真的需要确定。三维的道路模型实际上是道路与轮胎接触计算模型,道路模型由一系列的三角块组成三角网,轮胎模型作为一套圆柱体,从而可以对道路与轮胎的接触产生响应,并计算结果。为了能更真实地反映情况,还必须设置路面的动静摩擦系数。同时,由于路面谱是通过三角网表述的空间曲面,因此,中间带路缘石的建立只需通过改变三角网的描述就可以实现。建立的有路缘石的路面模型如图 2 所示。

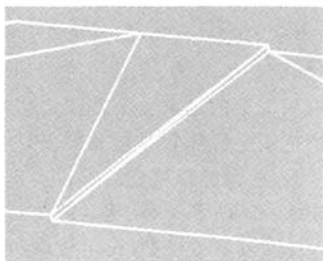


图 2 有路缘石的路面模型

### 2.5 碰撞模型的建立

碰撞模型的建立主要是确定碰撞角度和碰撞速度。车辆与护栏碰撞,碰撞角度是一个很重要的影响因素。中国规范<sup>[7]</sup>规定,小汽车的碰撞角度为  $20^\circ$ ,卡车的碰撞角度为  $15^\circ$ 。在一般情况下,公路上的车辆以平均运行速度行驶,平均运行速度可以按计算行车速度的 80% 计算。虽然,在车辆发生偏离车道等偶然事故时,驾驶人有可能采取制动、转向、松油门减速等紧急补救措施,但是,考虑到中国道路侧向余宽一般较小和车辆碰撞路侧护栏发生的时间极短,因此把平均运行速度近似为碰撞速度<sup>[8-11]</sup>。

## 3 碰撞仿真实验与安全评估

### 3.1 仿真实验条件

本文主要对小汽车与护栏碰撞的情况进行仿真实验。选用中国产桑塔纳轿车外型尺寸,汽车质量为 2 000 kg,不考虑平曲线和纵坡的因素,对不同速度、不同角度和有无路缘石的情况进行仿真。

仿真实验中,汽车模型为小汽车,考虑对碰撞影响的不同,故实验采用  $20.8^\circ$  和  $10.5^\circ$  的 2 个角度进行比较。中国高速公路设计车速为 60、80、100、120 km/h,所以在仿真实验中选取这些速度,在有、无路缘石的情况下进行实验。参考国外有关资料,在高速公路上汽车以 60 km/h 以上的速度行驶时,不应在护栏前设置路缘石,实验在有路缘石的情况下,碰撞实验选取的汽车行驶速度低于 60 km/h。

### 3.2 安全评估标准

安全评估标准是界定护栏性能优劣的依据,护栏安全性能的评估一般采用以下 3 个基本准则。

#### 3.2.1 结构完整性

护栏自身应具有足够的强度,以抵御失控车辆的冲击,并实施有效拦阻。从结构和力学角度衡量护栏本身是否具有合适的几何尺寸、足够的结构强度和良好的力学性能,如刚度、变形、屈服、断裂、能量的吸收和耗散能力等;是否能在事故中有效控制指定范围内各种型号肇事车辆的行为,回正车辆行驶方向;是否能够避免护栏及其零部件刺穿车体,危及乘员;是否能够防止车辆穿越护栏或倾覆于护栏上。

#### 3.2.2 乘员风险

乘员风险是指事故过程中车上人员受到的伤害程度,车辆与护栏相撞时产生的冲击加速度是判定护栏安全性的基本标准。冲击加速度的大小及影响取决于人在车辆上的固定方式和人的身体状况。实验结果表明,如冲击加速度的持续作用时间不超过

0.04 s,则不给乘员带来危害的纵向冲击加速度为  $(40\sim 50)g$ ;在作用时间较长时,冲击加速度应减小。由于汽车与护栏相互碰撞时的持续时间为  $0.5\sim 0.7$  s,故纵向加速度不应超过  $(12\sim 15)g$ (其中  $g$  为重力加速度)。

在研究护栏设施的安全结构时,采用的纵向冲击加速度不应大于  $10g$ ,而横向冲击加速度不应大于  $5g$ 。

3.2.3 车辆轨迹与运动姿态

车辆轨迹是衡量护栏能否有效控制肇事车辆行为的重要指标。在发生事故后,肇事车辆不侵入临近车道内,车辆离开护栏的角度应小于车辆入侵护栏角度的  $60\%$ ,这样,当汽车碰撞护栏后,可以校正轨迹,回到车道上来。车辆的运动姿态可以反映车辆的碰撞过程和碰撞状况,可根据姿态来判断出安全护栏对碰撞车辆的影响。本文在进行仿真实验时,对安全的评估采用乘员风险和车辆轨迹作为标准。

3.3 仿真实验与分析

在建立仿真模型和上述实验条件下,本文仅对碰撞角为  $20.8^\circ$ 、汽车以不同速度及有无路缘石的情况进行仿真和分析。

3.3.1 碰撞角为  $20.8^\circ$ 和有路缘石的仿真实验

分别对汽车在不同速度下、碰撞角为  $20.8^\circ$ 和有路缘石的情况进行了仿真,结果如图 3、图 4 所示(图中,汽车行驶方向为从右至左)。

分析结果:汽车碰撞速度为  $54$  km/h 时,基本可以校正汽车的行驶方向,车辆基本稳定,碰撞加速度不大,弹出角度小于入侵角度的  $60\%$ ,满足评价标准,符合控制要求;汽车碰撞速度为  $80$  km/h 时,车辆在碰撞过程中以路缘石为支点翻转(图 4 中虚线为正常轨迹线),已经处于危险状态。

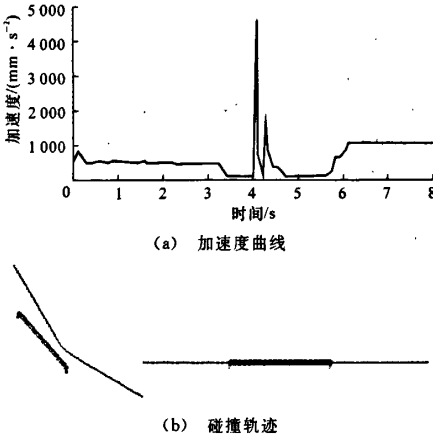


图 3 碰撞角为  $20.8^\circ$ 、汽车行驶速度为  $54$  km/h 和有路缘石的仿真结果

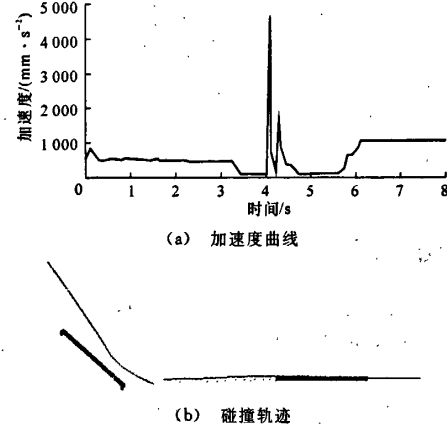


图 4 碰撞角为  $20.8^\circ$ 、汽车行驶速度为  $80$  km/h 和有路缘石的仿真结果

3.3.2 碰撞角为  $20.8^\circ$ 和无路缘石的仿真实验

分别对汽车在不同速度下、碰撞角为  $20.8^\circ$ 和无路缘石的情况进行了仿真,结果如图 5、图 6 所示(图中,汽车行驶方向为从右至左)。

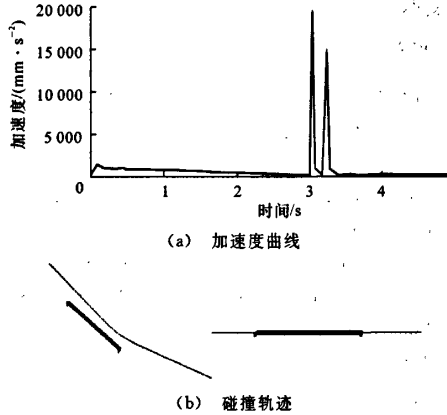


图 5 碰撞角为  $20.8^\circ$ 、汽车行驶速度为  $60$  km/h 和无路缘石的仿真结果

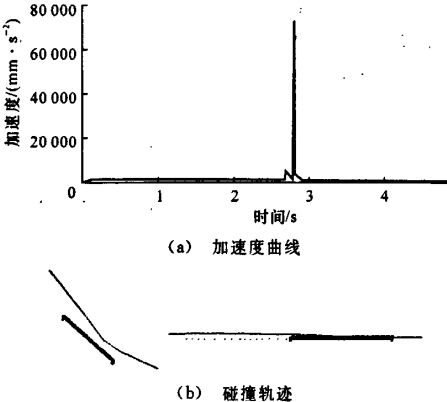


图 6 碰撞角为  $20.8^\circ$ 、汽车行驶速度为  $120$  km/h 和无路缘石的仿真结果

分析结果:汽车碰撞速度为 60~100 km/h 时,车辆在碰撞过程中,被校正行驶方向,碰撞加速度较小,碰撞轨迹正常,弹出角度小于入侵角度的 60%,符合评估标准;汽车碰撞速度为 120 km/h 时,车辆在碰撞过程中脱离地面,碰撞后甩出一定距离(图 6 中虚线为正常轨迹线),车辆翻滚。

#### 4 结 语

(1)通过建立护栏碰撞仿真模型,进行碰撞仿真实验,可以对护栏形式以及中间带路缘石设置方式的安全性进行评估。与实车足尺实验相比,仿真实验方法具有安全、经济和迅速的特点。

(2)本文采用的护栏模型为多刚体模型,而实际护栏碰撞为半刚性碰撞,因此护栏的半刚化是今后进一步研究的问题。

(3)仿真模型和仿真结果仍需要进一步做大量的实验来验证。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 黄红武,刘正恒,杨济匡. 基于计算机仿真的汽车与高速公路护栏碰撞事故的分析与研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2002, 29(6): 42-47.  
HUANG Hong-wu, LIU Zheng-heng, YANG Ji-kuang. Analysis and investigation on car impact with highway barrier based on computer simulation[J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2002, 29(6): 42-47.
- [2] 黄红武,莫劲翔,杨济匡,等. 影响护栏防护性能的相关因素研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2004, 31(2): 45-47.  
HUANG Hong-wu, MO Jin-xiang, YANG Ji-kuang, et al. Research on correlative factors of the protective performance of W-beam guardrail[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2004, 31(2): 45-47.
- [3] 杨宏志,许金良,李建士. 基于计算机仿真的公路线形设计评价[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 14-17.  
YANG Hong-zhi, XU Jin-liang, LI Jian-shi. Evaluation of highway route design based on computer simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 14-17.
- [4] 许金良,石飞荣,杨宏志,等. 基于计算机仿真的公路安全设计方法[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 1-5.  
XU Jin-liang, SHI Fei-rong, YANG Hong-zhi, et al. Method for highway safety design on computer simulation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 17(2): 1-5.
- [5] 杨少伟,石飞荣,慕 慧,等. 运行车速预测中的汽车换挡[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24(2): 34-36.  
YANG Shao-wei, SHI Fei-rong, MU Hui, et al. Shifting regulation of speed predicting vehicle speed [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 34-36.
- [6] 邹智军,杨东援. 道路交通仿真研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(2): 88-91.  
ZOU Zhi-jun, YANG Dong-yuan. A comprehensive review of road traffic simulation research[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(2): 88-91.
- [7] JTG D81-2006, 公路交通安全设施设计规范[S].
- [8] 许金良,杨宏志. 公路视景仿真模型[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24(2): 37-40.  
XU Jin-liang, YANG Hong-zhi. Highway scene simulation model[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 37-40.
- [9] 张胜平. 高速公路中央分隔带护栏碰撞仿真实验的研究与应用[D]. 西安:长安大学, 2004.
- [10] 陈 斌,魏 朗. 高速公路意外事件影响下的车辆跟驰模型[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 103-108.  
CHEN Bin, WEI Lang. Car-following model under influence of expressway accident [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 103-108.
- [11] Hilaire V, Koukam A, Gruer P. Multi-agent approach to modeling and simulation of urban transportation systems [C]//IEEE. Proceeding of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Tucson: IEEE Press, 2001: 319-356.