

文章编号:1671-8879(2017)06-0092-07

# 高速公路波形梁护栏安全性评价

陈 涛<sup>1</sup>, 吴灵生<sup>2</sup>, 田东翔<sup>1</sup>, 魏 朗<sup>1</sup>

(1. 长安大学 汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 四川高速公路建设开发总公司, 四川 成都 610000)

**摘 要:**针对交通安全设施标准修订后的设计需求,为实现中国高速公路改扩建中护栏安全性的快速评价,开展了波形梁护栏碰撞安全性评价研究。分别建立板厚 4 mm 的新标准波形梁护栏有限元模型、板厚 3 mm 的旧标准波形梁护栏有限元模型、土壤与立柱的约束作用模型和雪佛兰 C2500 整车有限元模型,对车体与护栏碰撞过程中可能接触的区域进行网格局部细化,利用实车试验验证了汽车-道路-护栏有限元仿真模型的准确性;分析不同护栏设计标准的差异,提出在旧标准栏板厚度 3 mm 的波形梁护栏中增加中间立柱的改造方案;依据《高速公路护栏安全性能评价标准》(JTG/T F83-01—2004)进行碰撞仿真试验,采集有限元仿真中的护栏最大变形量、车身质心处加速度、车辆驶出角等参数,对比新、旧标准护栏和改造后护栏的安全性能,评价护栏改造方案的可行性。研究表明:仿真试验与实车试验的护栏最大动态变形量相对误差为 2.8%,驶出角误差为 1°,验证了所建立的汽车与护栏有限元模型的正确性;改造护栏模型碰撞后变形量为 436 mm,车体质心三向(X、Y、Z 向)加速度均小于 20g,且车辆驶出角小于 12°,均在标准规定范围内,说明该改造方案具有可行性;采用三维非线性有限元仿真方法能够快速评价高速公路波形梁护栏的安全状况,提高了交通工程安全设施的设计效率。

**关键词:**交通工程;波形梁护栏;碰撞仿真;安全性能;改造方案

**中图分类号:**U417.12

**文献标志码:**A

## Safety evaluation of W-beam guardrail on freeway

CHEN Tao<sup>1</sup>, WU Ling-sheng<sup>2</sup>, TIAN Dong-xiang<sup>1</sup>, WEI Lang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Automobile Transportation Safety Techniques of Ministry of Transport, Chang'an

University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Sichuan Expressway Construction

Development Corporation, Chengdu 610000, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to achieve rapid evaluation of guardrail safety in Chinese freeway reconstruction and expansion projects to meet the revised design requirements of traffic safety facilities standards, research on the W-beam guardrail collision safety evaluation was carried out. Finite element models with plate thickness of 4 mm for the new standard W-beam guardrail and the plate thickness of 3 mm for the old standard W-beam guardrail, the constraint model of soil and column, and the integrated finite element model of Chevrolet C2500 were established. Contact area in the collision of vehicle body and guardrail was locally refined by grid. The

收稿日期:2017-05-16

基金项目:交通运输部应用基础研究项目(2015319812200);陕西省自然科学基金研究计划项目(2016JM5013);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310822162018)

作者简介:陈 涛(1974-),男,陕西西安人,教授,工学博士,E-mail:chentao@chd.edu.cn。

accuracy of finite element models for vehicle-road-guardrail was verified by real vehicle test. The difference of design standard for different guardrails was analyzed, and the improvement program of adding middle column for the old standard guardrail with plate thickness of 3 mm was put forward. According to *the evaluation specification for highway safety barriers* (JTG/T F83-01—2004), the crash simulation test was conducted. The parameters of finite element simulation of the guardrail maximum deformation, accelerations of vehicle body centre of mass, the degree of vehicle driving-out were then acquired. The safety performance of the old and the new standard guardrail and revised guardrail was compared, and the feasibility of the improvement program was evaluated. The results show that the relative error of the maximum dynamic deformation is 2.8%, and the error of degree of vehicle driving-out is  $1^\circ$  by comparing simulation test and real vehicle test, which proves the accuracy of the established finite element model of vehicle and guardrail. The deformation of improved guardrail model after collision is 436 mm, the three-axis accelerations of vehicle body centre of mass are less than  $20g$ , and the degree of vehicle driving-out is less than  $12^\circ$ , which are all within the standard range. Therefore, the improved design of guardrail is feasible. The three-dimensional nonlinear finite element simulation method can rapidly evaluate the safety performance of W-beam guardrail and improve the design efficiency of freeway safety facilities. 8 tabs, 6 figs, 19 refs.

**Key words:** traffic engineering; W-beam guardrail; crash simulation; safety performance; reconstruction program

## 0 引言

2015年中国造成人员伤亡的道路交通事故中,汽车与固定物碰撞事故起数和死亡人数分别占其总数的4.05%和6.47%,研究汽车与护栏碰撞对提高公路安全性具有重要意义。为了更好地适应公路建设的需要,中国于2006年出台了《公路交通安全设施设计规范》(JTG/T D81—2006)(简称06型),对《高速公路交通安全设施设计及施工技术规范》(JTJ 074—94)(简称94型)中高速公路波形梁护栏结构进行了修改,栏板厚度从旧标准3 mm增加到新标准4 mm。然而在高速公路、一级公路的改扩建中,若将94型旧标准护栏全部更换为06型新标准护栏,会造成大量的浪费并增加改造成本<sup>[1]</sup>。因此,研究已有护栏的改造方法对于降低公路改扩建成本、实现节能减排具有重要意义。

护栏的防护性能包括防撞性能、乘员风险、车辆碰撞后的运动轨迹等<sup>[2-3]</sup>。目前,国内外主要通过碰撞试验和计算机仿真2种方法来评价护栏的安全性能<sup>[4]</sup>。碰撞试验包括足尺碰撞试验和缩尺模型试验。护栏设置评价方面代表性的研究成果有:1993年美国公路合作研究组织(NCHRP, National Co-operative Highway Research Program)350项目中提出的公路安全设施评价方法,该方法规定了

700C、820C、2000P这3种测试车辆,以及实车测试条件、所需采集数据等;1995年刘少源在实车碰撞试验的基础上,提出了汽车与护栏碰撞的柔性梁简化计算方法,该方法通过质点(车)在梁柱结构上滚动来模拟汽车与护栏的碰撞过程,可得到车辆碰撞过程的运动轨迹及护栏位移<sup>[5]</sup>;2009年美国公路合作研究组织638项目给出了公路护栏的实施方法,提出了护栏设置条件、类型选择、收益/成本评价等内容。在护栏研究计算机仿真方面代表性的成果有:雷正保等利用虚拟试验场(VPG)等有限元软件,建立完整的汽车-道路-护栏-乘员-座椅-安全带模型,研究轻型货车撞击三波护栏的安全性及重型货车撞击混凝土护栏的安全性,利用耐撞性拓扑优化方法,对双波护栏梁板设计域进行了不同工况下的拓扑优化,得出了中央分隔带护栏梁板拓扑构型<sup>[6-7]</sup>;张晶等对车辆与弯道混凝土护栏碰撞动态数值模拟结果和实车足尺碰撞试验结果进行对比分析,验证了动态数值模拟的准确性,并分析了弯道混凝土护栏曲线半径对乘员碰撞过程中所承受冲击加速度的影响,得到乘员风险的最不利护栏半径<sup>[8]</sup>;柳伟续等利用导波信号自动识别技术,实现了高速公路护栏立柱的埋深检测<sup>[9]</sup>;Reid等采用计算机仿真和5组实车足尺试验,研究不同外倾率对W形梁护栏安全性的影响,计算机仿真表明外倾率是护栏安

全性的重要影响因素<sup>[10]</sup>;Marzougui 等建立了汽车与波形梁护栏碰撞有限元模型,并将 LS-DYNA 有限元法模拟结果与实车碰撞试验数据进行对比,分析了梁板安装高度对波形梁护栏防护能力的影响<sup>[11]</sup>;Ren 等提出一种新型道路安全护栏的仿真方法,采用 LS-DYNA 有限元法建立三维道路护栏模型,进行非线性弹塑性分析,从冲击刚度和刚度、车辆乘员的安全性、碰撞能量吸收等方面评价护栏安全性<sup>[12]</sup>;Plaxico 等提出了三维有限元仿真模型,实现汽车与改进三波护栏的碰撞模拟,用以替代实际碰撞试验评价护栏的安全性<sup>[13]</sup>;Uddin 等提出了利用三维有限元模拟结果评价三波改进型护栏的方法,采用 820C 型汽车以 100.6 km/h 速度碰撞护栏模型,碰撞角 15°,还模拟了 C2500 型皮卡的碰撞,发现简化车辆模型可大大提高碰撞模拟计算效率<sup>[14]</sup>;Coon 等研究了多种类型纵向护栏末端的识别方法,提出利用动量守恒和能量守恒的再现技术确定车辆碰撞初始速度的方法,揭示护栏的破坏机理<sup>[15]</sup>;Noh 等通过有限元碰撞模拟,考虑桩柱加固的施工容差效应,研究了护栏立柱对开放式护栏系统的影响,其评价参数是不同模型的动态响应和碰撞模拟中的乘客安全指标<sup>[16]</sup>。上述研究为护栏的防护性能研究和改进设计提供了参考。

总体上看,实车足尺碰撞试验方法耗时长、费用高,难以作为日常护栏改进设计工作的主要技术手段。有限元仿真已成为护栏安全性研究的有效手段,非线性有限元方法是建立护栏、车辆仿真模型的主要技术手段。护栏模型、仿真、试验的研究一直是交通安全领域的难点。国内外关于车辆与半刚性护栏碰撞仿真的研究尚存在局限性,且多集中于车辆有限元建模、护栏拓扑优化、护栏与路基耦合建模等方面,对应用于交通安全设施改造的半刚性护栏快速评价研究不足。为此,本文针对 94 型旧标准护栏提出改造方案,利用 PAM-CRASH 软件分别建立栏板厚度为 3、4 mm 的 Grb-A-E(Grb 为有防阻块的波形梁护栏,A 为路侧护撞等级 A 级,E 为埋设在土中)波形梁护栏模型和汽车模型,通过仿真试验,从结构完整性、乘员风险、车辆运行轨迹 3 个方面评价改造护栏模型的安全性,旨在提出利用仿真试验评价改造护栏安全性的方法。

# 1 94 型旧标准护栏改造方案

本文提出的改造方案为:在 94 型旧标准建立的厚度为 3 mm 的波形梁钢护栏基础上,使用原有结构

形式立柱,不改变地基形式(土基、混凝土等),在原有两立柱间增加 1 根立柱,设置立柱间距为 2 000 mm,即增加了立柱数量,立柱间距缩小,使栏板所承受的冲击力分散到更多立柱,从而提高了护栏的防护能力。表 1 为 94 型旧标准半刚性护栏结构的改造方案。

表 1 旧标准半刚性护栏结构改造方案

项目	栏板尺寸			防阻块尺寸			立柱间距
	长	宽	厚	长	高	厚	
改造方案	310	85	3	178	200	3	2 000

## 2 有限元模型建立

### 2.1 护栏有限元模型

《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2006)中对 94 型高速公路波形梁护栏结构进行了修改,修改前后波形梁护栏结构参数如表 2 所示。参照《公路波形梁钢护栏》(JT/T 281—2007)标准,本文分别建立栏板厚度为 3、4 mm 的 Grb-A-E 波形梁护栏模型。

表 2 Grb-A-E 波形梁护栏结构参数

标准	栏板尺寸			立柱尺寸		防阻块尺寸		
	长	宽	厚	直径	壁厚	长	高	厚
旧标准	310	85	3	140	4.5	178	200	3.0
新标准	310	85	4	140	4.5	178	200	4.5

本文把护栏波形梁板各段等效成梁板结构来处理。使用 Solidworks 软件绘制波形梁板几何模型,将模型导入 Hypermesh 进行网格划分。壳单元采用 Belytschko\_Wong\_Chian 单元,材料模型采用 103 号弹塑性材料(ELASTIC\_PLASTIC\_ITERATIV\_HILL)。建立的护栏立柱模型长 1 850 mm,其中地上部分 750 mm。立柱材料采用与栏板相同的 103 号弹塑性材料。防阻块模型按照同样的方法建立,采用的材料与栏板相同,见表 3。

表 3 波形梁板与防阻块材料参数

Tab. 3 Material parameters of W-beam slab and prevention block	
材料类型	103 号弹塑性材料
单元类型	Shell
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 850
弹性模量/GPa	206
泊松比	0.3
屈服应力/MPa	210

土基对立柱的约束作用借鉴文献[17]中的研究结果,即碰撞过程中立柱最大弯矩发生在地表以下 400 mm 处,见下页图 1,在立柱最大弯矩处施加约束可以模拟土基对立柱的约束作用。

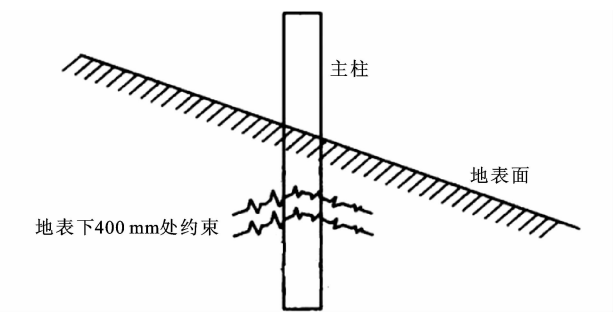


图 1 护栏立柱约束处理

Fig. 1 Treatment of constraints of guardrail post

护栏各组件之间采用高强度螺栓连接,所用连接螺栓、螺母、垫圈的材料为碳素结构钢,其拉伸力破坏极限为 67.6 kN,剪切力破坏极限为 39 kN。在失控车辆与护栏碰撞过程中可能会发生波形梁连接螺栓断裂失效的情况。为了更好模拟实际情况,在碰撞仿真中允许这些螺栓连接有运动和分离。在 PAM-CRASH 软件中简化刚体约束来模拟波形梁板、防阻块、立柱之间的连接失效特性,当焊点约束承受力达到失效准则时就会发生断裂。

2.2 汽车有限元模型

本文采用的整车模型是小型汽车模型,以雪佛兰 C2500 Pickup 为原型建立,模型共有 10 661 个节点,10 641 个单元,长 5 452 mm,宽 2 000 mm,高 1 825 mm。整车模型如图 2 所示。图 2 中: $X$  为碰撞过程中车辆行驶方向; $Y$  为碰撞过程中水平面上沿车辆行驶方向的垂直方向; $Z$  为碰撞过程中铅直方向。

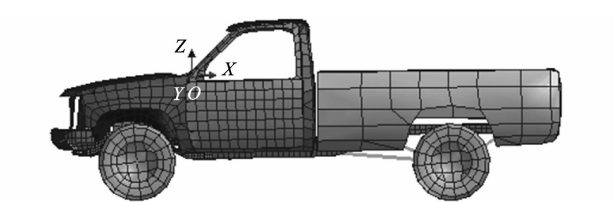


图 2 整车有限元模型

Fig. 2 Finite element model of vehicle

汽车有限元仿真模型中使用的材料模型有:101 号弹性材料(ELASTIC\_SHELL)、103 号弹塑性材料(ELASTIC\_PLASTIC\_ITERATIVE\_HILL)和 201 号材料(ELASTIC\_BEAM\_BAR)等。其中 103 号弹塑性材料使用的最多,包括前保险杠、车架纵梁、车架横梁、驾驶室、驾驶室底板、翼子板等。悬架弹簧用非线性弹簧表示,用刚性梁单元分别表示筒式减震器和活塞杆,筒体与活塞杆之间用铰链约束连接。轮胎橡胶用厚度 5 mm 的壳单元模拟,轮毂钢用厚度 0.05 mm 的壳单元模拟,通过设置轮胎内胎的压力曲线来模拟车轮内胎的压力。

本文对车体与护栏碰撞过程中可能接触的区域进行了网格局部细化。对该车模型的前翼子板、右边车门、右前轮胎以及右车门后侧与护栏可能接触的区域进行了网格重新划分。同时对整车模型进行质量配载,以满足整车质量 1 520 kg 的要求。

3 试验验证

有限元模型的正确性需要通过实车碰撞试验验证,主要根据《高速公路护栏安全性能评价标准》(JTG/T F83-01—2004)要求进行对比验证,见表 4。评价标准指出,在不具备安装假人条件时,以车体质心加速度作为乘员安全性能替代指标。本文使用文献[18]中提供的实车碰撞试验数据进行验证。由于汽车与护栏的碰撞条件不同,故汽车的响应以及护栏的变形亦有所不同。本文选用的仿真试验条件与文献[18]相同。

表 4 高速公路护栏安全性能评价标准

Tab. 4 Evaluation specification for highway guardrail safety

评价项目	评价内容	评价指标
护栏	护栏最大动能变形量/mm	$\leq 1\ 000$
	碰撞后护栏状况描述	损坏情况
乘员	假人头部性能指标	$\leq 1\ 000$
	假人胸部位移量/mm	$\leq 75$
	假人膝盖部受力/kN	$\leq 200$
汽车	碰撞后汽车状况描述	汽车损坏情况
	车身质心处加速度( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 向)	$\leq 20g$
	汽车的运行轨迹描述,驶出角/( $^{\circ}$ )	$\leq 12$ ,导向描述

设定 PAM-CRASH 中的求解参数为<sup>[19]</sup>:采用塑性沙漏控制;求解时间为 300 ms,输出控制中设置时间间隔为 0.1 ms,网格绘制时间间隔为 2 ms;整车自接触为 36 号自接触,摩擦因数设置为 0.15。

根据表 5 的试验参数,利用建立的汽车模型与护栏模型进行碰撞仿真,碰撞过程见下页图 3。

表 5 仿真试验与实车碰撞试验的参数对比

Tab. 5 Parameters comparison between simulation test and impact test

试验类型	汽车类型	汽车质量/kg	碰撞角度/( $^{\circ}$ )	碰撞速度/( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	碰撞位置
实车试验	丰田皇冠 3.0	1 520	20	100	两立柱中间
仿真试验	雪佛兰	1 520	20	100	两立柱中间

将图 3 中  $t$  为 300 ms 时的碰撞结果与实车碰撞结果对比,发现护栏变形形态基本相同,碰撞过程中都波及到 2 根立柱。

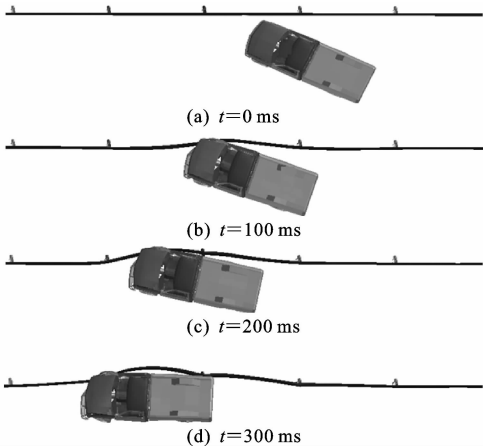


图 3 碰撞过程  
Fig. 3 Impact process

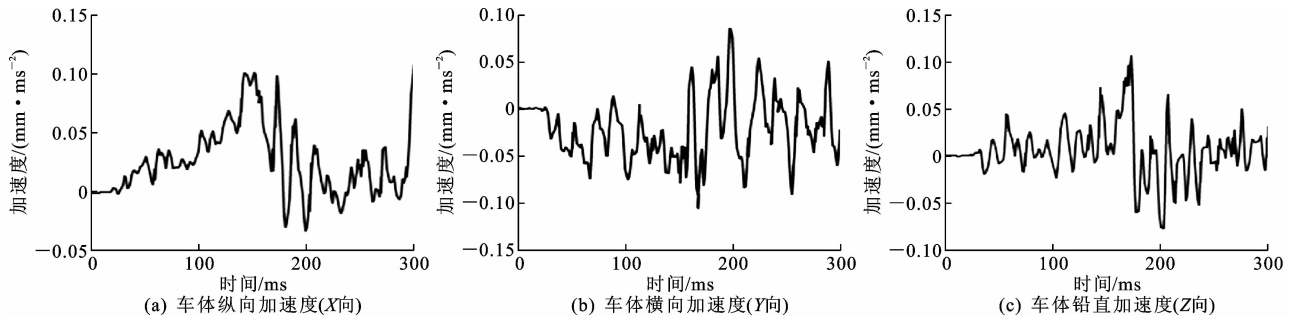


图 4 车体质心处加速度曲线  
Fig. 4 Acceleration curves on centroid of car body

表 6 仿真试验与实车试验结果对比

Tab. 6 Results comparison between simulation test and impact test				
参数	仿真 试验	实车 试验	标准 限值	相对 误差/%
护栏最大动态变形量/mm	738.0	760.0	≤1 000	2.8
车体质心加速度最大值	10.2g	8.8g	≤20g	15.9
车辆驶出角/(°)	3	4	≤12	25.0

表 7 汽车与护栏碰撞仿真试验方案

Tab. 7 Simulation programs on vehicle impact with guardrail					
护栏	车辆质 量/kg	碰撞车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	碰撞角 度/(°)	栏板 厚度/mm	立柱间 距/mm
S <sub>1</sub>	1 520	100	20	3	4 000
S <sub>2</sub>	1 520	100	20	4	4 000
S <sub>3</sub>	1 520	100	20	3	2 000

4 结果分析

本文建立了 3 个护栏模型进行碰撞仿真试验：依据 94 型旧标准建立的栏板厚度为 3 mm 的 S<sub>1</sub> 护栏模型、依据 06 型新标准建立的栏板厚度为 4 mm 的 S<sub>2</sub> 护栏模型、在 S<sub>1</sub> 护栏方案中增加中间立柱的 S<sub>3</sub> 护栏模型。碰撞仿真试验方案如表 7 所示。3 个护栏模型在同样碰撞条件下,使用 PAM-CRASH 软件进行仿真,结果如表 8 所示,t 为 300 ms 时的碰撞瞬间见下页图 5。

护栏的安全性能评价包括结构完整性、乘员风险和车辆运行轨迹 3 个方面。从表 8 和图 5 可知：S<sub>1</sub> 护栏变形较大,最大动态变形量为 1 790 mm,车

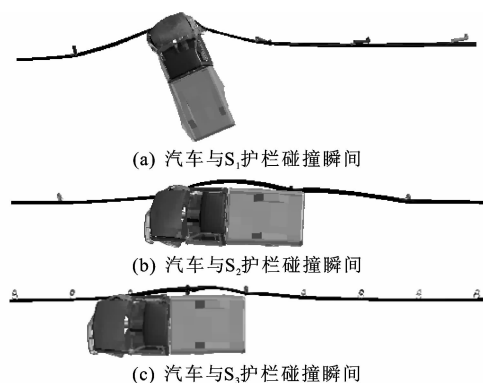
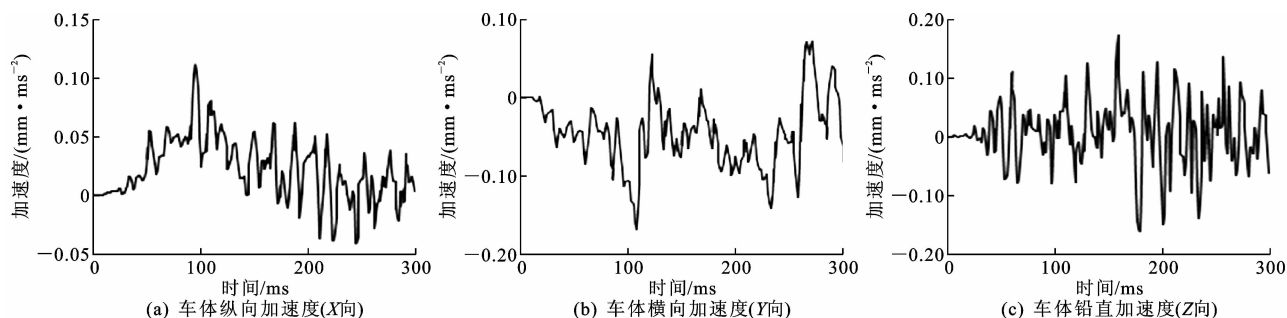
在碰撞过程中,车体质心的三向碰撞加速度如图 4 所示。碰撞过程中车体质心 X、Y、Z 向加速度均在 20g 以下。碰撞过程中当时间为 12 ms 时,保险杠与护栏开始接触,车体速度开始减小。150 ms 时,车辆右前轮到达立柱位置,与立柱接触,产生一个加速度峰值,此时车辆质心加速度较高。由图 4 可看到,X 向的加速度峰值变化较大,这与文献 [18] 中的情况相似。用该处 10 ms 间隔加速度平均值的最大值代表车体质心加速度最大值,经数据分析和处理可得车体质心加速度最大值为 10.2g。

表 6 给出了仿真试验与实车试验结果对比,仿真试验中护栏最大动态变形量与实车试验数据的相对误差为 2.9%,驶出角相对误差为 2.5%,表明本文模型能较好地反映实际碰撞情况。

表 8 碰撞仿真结果

Tab. 8 Simulation results of impact			
护栏	护栏最大变形/mm	质心加速度	车辆运行轨迹
S <sub>1</sub>	1 790	>20g	车体发生横转
S <sub>2</sub>	738	<20g	车辆驶出角小于 12°
S <sub>3</sub>	436	<20g	车辆驶出角小于 12°

体质心三向加速度瞬时值超过 20g,护栏对失控车辆导向作用欠佳;S<sub>2</sub> 护栏变形较小,最大动态变形量为 738 mm,车体质心三向加速度均在 20g 以下。从保险杠与护栏接触开始,车体中心线与波形梁板间的夹角不断减小,车辆驶出角小于 12°;S<sub>3</sub> 护栏最大动态变形量为 436 mm,护栏结构完整性较好,车辆驶出角小于 12°,导向作用良好。

图5 不同护栏模型碰撞对比( $t=300$  ms)Fig. 5 Comparison of impact with different guardrails ( $t=300$  ms)图6 车辆碰撞 $S_3$ 护栏车体质心处加速度曲线Fig. 6 Acceleration curves of centroid of car body on vehicle impact with guardrail  $S_3$ 

## 5 结 语

(1)建立了汽车-道路-护栏的有限元模型,利用PAM-CRASH软件进行仿真,采集护栏最大动态变形量、车体质心加速度、车体驶出角等信息,可以快速有效评价护栏的安全性,提高了护栏的设计和评价效率,提供了公路交通事故多发点路段安全防护性能的改善方法。

(2)对94型旧标准高速公路波形梁护栏经过适当的改进设计,通过仿真试验获得护栏安全评价数据,其性能指标满足06型新标准要求,改造方案具有可行性,结果对类似项目具有参考价值。

(3)在汽车碰撞护栏的仿真试验中,仿真模型与假人有限元模型的进一步结合是未来仿真应用的研究重点,护栏与地基的互相作用机理以及材料的非线性行为也有待进一步研究。

### 参考文献:

### References:

[1] 李慧珍. 高速公路旧有波形梁护栏改造方式探析[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 324-327.

LI Hui-zhen. Analysis on modification of old rail-

对比 $S_2$ 、 $S_3$ 护栏车体质心三向加速度,见图4、图6。由于 $S_3$ 护栏立柱间距缩小,使车辆右前轮到达立柱位置时间为100 ms左右。汽车与 $S_3$ 护栏碰撞呈缓慢收敛趋势,护栏充分吸收碰撞能量。在X向上,汽车与 $S_2$ 护栏碰撞的加速度峰值明显高于 $S_3$ 护栏。 $S_3$ 护栏立柱间距缩小,在300 ms时间内车辆右前轮可能到达第2根立柱位置,Y向加速度出现峰值。在Z向上,由于 $S_3$ 护栏刚度的增加,车体震荡较激烈,但护栏破坏性较小,乘员风险在安全范围之内。总之, $S_2$ 、 $S_3$ 护栏车体质心三向加速度(X、Y、Z向)峰值均小于 $20g$ ,满足规范要求。

shaped guardrail of freeway[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(5): 324-327.

[2] 杨少伟,潘兵宏,吴华金,等. 高速公路中间带型式及安全性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 39-44.

YANG Shao-wei, PAN Bing-hong, WU Hua-jin, et al. Median type and safety on freeway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 39-44.

[3] MARTIN J L, MINTSA-EYA C, GOUBEL C. Long-term analysis of the impact of longitudinal barriers on motorway safety[J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 59: 443-451.

[4] DANIELLO A, GABLER H C. Effect of barrier type on injury severity in motorcycle-to-barrier collisions in North Carolina, Texas, and New Jersey[J]. Transportation Research Record, 2011(2262): 144-151.

[5] 刘少源. 高速公路汽车与护栏碰撞的简化计算方法——柔性梁法[J]. 公路交通科技, 1995, 12(2): 26-34.

LIU Shao-yuan. A simple simulation method for highway vehicle-barrier crash—Flexible beam method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1995, 12(2): 26-34.

[6] 雷正保, 杨兆. 汽车-护栏碰撞系统的安全性研究

- [J]. 汽车工程, 2006, 28(2): 152-158, 180.
- LEI Zheng-bao, YANG Zhao. A study on the safety in vehicle-guardrail impact[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(2): 152-158, 180.
- [7] 雷正保, 阳彪, 肖林辉. 中央分隔带半刚性护栏的拓扑优化[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2015, 39(3): 459-462.
- LEI Zheng-bao, YANG Biao, XIAO Lin-hui. Topological optimization of central median semi-rigid guardrail[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2015, 39(3): 459-462.
- [8] 张晶, 白书锋, 石红星, 等. 车辆与弯道混凝土护栏碰撞的动态数值模拟及试验[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 102-106.
- ZHANG Jing, BAI Shu-feng, SHI Hong-xing, et al. Dynamic numerical simulation and experiment for vehicle and curved concrete barriers crash[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 102-106.
- [9] 柳伟续, 唐志峰, 吕福在, 等. 高速公路护栏立柱导波相位特性分析与试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(6): 223-228.
- LIU Wei-xu, TANG Zhi-feng, LU Fu-zai, et al. Phase characteristic analysis and experimental study on the guided wave reflected from expressway guardrail posts[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(6): 223-228.
- [10] REID J D, KUIPERS B D, SICKING D L, et al. Impact performance of W-beam guardrail installed at various flare rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(3): 476-485.
- [11] MARZOUGUI D, MOHAN P, KAN S. Evaluation of rail height effects on the safety performance of W-beam barriers[R]. Washington DC: FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center, 2007.
- [12] REN Z, VESENJAK M. Computational and experimental crash analysis of the road safety barrier[J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12(6): 963-973.
- [13] PLAXICO C A, HACKETT R M, UDDIN W. Simulation of a vehicle impacting a modified three-beam guardrail[J]. Transportation Research Record, 1997(1599): 1-10.
- [14] UDDIN W, HACKETT R M. Three-dimensional finite element modeling of vehicle crashes against roadside safety barriers[J]. International Journal of Crashworthiness, 1999, 4(4): 407-418.
- [15] COON B A, REID J D. Reconstruction techniques for energy-absorbing guardrail end terminals[J]. Accident Analysis and Prevention, 2006, 38(1): 1-13.
- [16] NOH M H, LEE S Y. Construction tolerance effects of reinforced posts on crash performances of an open-type guardrail system[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 120: 138-152.
- [17] PLAXICO C A, PATZNER G S, RAY M H. Finite element modeling of guardrail timber posts and the post-soil interaction[J]. Transportation Research Record, 1998(1647): 139-146.
- [18] 周炜, 张天侠, 乔希永, 等. 汽车与不同形式高速公路护栏碰撞的试验研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(7): 137-141.
- ZHOU Wei, ZHANG Tian-xia, QIAO Xi-yong, et al. Experiment on vehicle impact with different guardrails[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(7): 137-141.
- [19] 龚剑, 张金换, 黄世霖, 等. PAM-CRASH 碰撞模拟中主要控制参数影响的分析[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 18-20, 42.
- GONG Jian, ZHANG Jin-huang, HUANG Shi-ling, et al. Analysis of major parameters affection in PAM-CRASH simulation of vehicle crashes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(3): 18-20, 42.