

文章编号:1002-0268 (2006) 07-0130-07

三波护栏的耐撞性研究

雷正保¹, 杨兆²

(1. 长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 公路工程教育部重点实验室, 湖南 长沙 410076)

摘要:通过建立完整的汽车-三波护栏-乘员-座椅-安全带系统模型,应用LS-DYNA研究了三波护栏在强力撞击下的耐撞性与吸能特性,得出了梁板是吸能主体、三波护栏对失控车辆具有很强的引导能力、室内乘员的安全性能能够满足要求等结论,指出了三波护栏在抵御强力撞击方面的主要问题是护栏的完整性不足,为三波护栏耐撞性能的提高指明了方向。

关键词:振动工程;交通工程;安全工程;护栏;耐撞性

中图分类号:U467.14

文献标识码:A

Study on Crashworthiness of Three-beam Guardrail Structure

LEI Zheng-bao¹, YANG Zhao²

(1. College of Automotive & Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Hunan Changsha 410076, China;

2. Key Laboratory for Highway Engineering of Ministry of Education, Hunan Changsha 410076, China)

Abstract: The crashworthiness and the energy-absorbing characteristic of the three-beam guardrail structure under mighty impact are studied using the LS-DYNA the integrated model of " automobile-three-beam guardrail structure-passenger-passenger seat-safety belt" is created. The results indicate that the beam is the main body for energy absorbing, the three-beam guardrail structure is better in guiding the automobile out of control for the safety of the passenger, and so on. The primary problem is the lack of the integrity of the three-beam guardrail structure to resist mighty impact, and the direction to improve the crashworthiness of the three-beam guardrail structure is shown.

Keywords: vibration engineering; traffic engineering; safety engineering; guardrail structure; crashworthiness

由于半刚性护栏具有易搬运、现场安装简便、适合大批量生产方式、碰撞过程中能产生弹塑性大变形吸收汽车的冲击动能,并能迫使失控车辆改变运动方向,引导其重新回到正常行驶方向,有利于保护车内乘员的人身安全,且可加工成复杂或空心的断面形状以满足工程实际的各种要求等独特的优点,在公路特别是高速公路及高等级公路上得到广泛应用^[1]。

由于汽车的冲击动能与其质量成正比,与其行驶速度的平方成正比,高速行驶的汽车一旦发生碰

撞事故,其冲击的剧烈程度会明显增加,从而对乘员造成更大的危险,此时设置与之相适应的半刚性护栏就更有意义了。于是,鉴借国际半刚性护栏设计技术,交通部于2000年及时编写发布了《公路三波形梁钢护栏》(JT/T457-2001)行业标准并于2001年开始推广应用,主要用于重型车、大型车比例高的路段和山区高速公路等地形不利之处。

但令人遗憾的是,受多种因素的制约,三波护栏的设计条件仍然沿用了W型护栏的设计条件,显然,对W型护栏的设计条件而言,三波护栏的耐撞

收稿日期:2005-03-07

基金项目:交通部优秀青年专业技术人才专项经费资助项目 ([2001] 162)

作者简介:雷正保 (1964-),男,湖南武冈人,博士,教授,博导,研究方向为汽车交通安全。(leizhengbao@csust.edu.cn)

性要高于 W 型护栏的耐撞性,但三波护栏在车辆强力撞击下的防撞性能究竟如何,即三波护栏是否具有足够的耐撞性以抵御当前营运车辆冲击水平的问题至今也没有明确的答案,因此,在三波护栏应用日趋广泛的今天,深入开展三波护栏在车辆强力撞击下的耐撞性研究,具有非常重要的现实意义。本文将利用 LS-DYNA 软件,对三波护栏在车辆强力撞击下(汽车正面撞击护栏的冲击动能在 W 型护栏设计标准的 2 倍以上)的行为进行分析,以获取三波护栏的耐撞性特性。

1 建模方法及其可靠性验证

1.1 仿真模型的建模方法

建模在 VPG^[5]中进行,为缩小模型规模,采用如下准则:壳单元的最小尺寸为 10 mm,单元翘曲角 $\leq 15^\circ$,单元内角 $\geq 25^\circ$,白车身单元尺寸在 25~50 mm 之间。所有薄壁构件均采用法向方向 3 点积分的 Belytschko-Tsay 壳单元建模^[3,4],发动机、变速器、后桥等刚硬部件则作刚体处理,传动轴与后桥采用 Belytschko-Schwer resultant beam (resultant) 梁单元模拟,并用 Resultant plasticity 材料模型,梁单元的最小长度为 20 mm。轮胎、悬架等 VPG 中已有的标准件则采用缺省设置。假人采用自重 108 kg 的 LSTC 50 百分位刚体假人并采用 VPG 中的缺省坐姿(图 1),虽然试算时发现 VPG 提供的免费 LSTC 假人都存在一定程度的问题,但主要为假人材料特性与 PART 定义间的矛盾、泡沫类软材料存在的负体积等问题,处理好后即可应用。

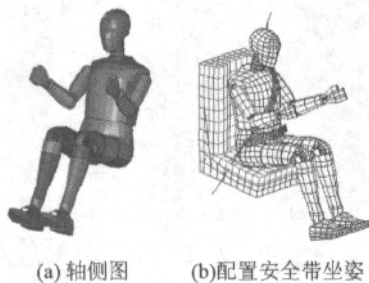


图 1 假人模型

Fig.1 Dummy model

安全带用厚度为 1.2 mm、法向方向 1 点积分的 Belytschko-Tsay 壳单元模拟,安全带与假人间的接触用 soft=1 的软接触方法处理,其余参数均采用 VPG 的缺省值。

为了正确模拟车辆与地面、假人与座椅之间的接触关系,利用 *LOAD_BODY_Z 给系统施加了重力载荷。

车辆的总重通过调整材料质量密度来控制。本文采用的材料特性如下:①除特别说明外均用 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 材料模型,质量密度 7 890 kg/m³、杨氏模量 210 GPa、泊松比 0.3、屈服应力 0.27 GPa;②钢化玻璃,质量密度 2 500 kg/m³、杨氏模量 76 GPa、泊松比 0.3、屈服应力 0.138 GPa;③车门、发动机罩,质量密度 7 890 kg/m³、杨氏模量 210 GPa、泊松比 0.3、屈服应力 0.35 GPa;④传动轴采用 *MAT_ELASTIC 材料模型,质量密度 12 670 kg/m³、杨氏模量 210 GPa、泊松比 0.3;⑤发动机、变速器、后桥采用 *MAT_RIGID 材料模型,质量密度 10 140 kg/m³、杨氏模量 210 GPa、泊松比 0.3;⑥其他材料如轮胎等则采用 VPG 自带参数。全部材料的塑性应力应变关系详见文献[1]。

接触:(1)用 *RIGIDWALL_PLANAR 定义护栏与路面间的接触;(2)用 *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 定义梁板、立柱、防阻块间的接触;(3)对每个轮胎分别用 *RIGIDWALL_PLANAR 定义与路面的接触;(4)用 *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 定义车辆自接触;(5)用 *CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE 定义车辆与护栏的接触。

1.2 建模方法的可靠性验证

虽然 LS-DYNA 的可靠性已为许多工程算例验证^[1,2,6,7],但在汽车撞击护栏这类复杂问题中的应用尚不多见,为此,本文将以文献[8]所给的汽车撞击半刚性护栏实验来验证建模方法的正确性。试验条件:汽车整备质量 1 500 kg、外观尺寸为 5 452 mm×2 000 mm×1 825 mm 的汽车,以 100 km/h 的速度、行驶方向与护栏纵向平面成 20°的角度撞击半刚性护栏。此时,汽车的正面冲击动能(相当于汽车正面撞击护栏时的动能,不是汽车的总动能)为

$$E_1 = 9\,810 \frac{1}{2g} m(v \sin \theta)^2 = 9\,810 \times \frac{1}{2 \times 9.81} \times$$

$$1\,500 \times (27.78 \sin 20^\circ)^2 = 67\,706\,305.3 \text{ J}$$

而 W 型护栏设计标准中规定的冲击动能为

$$E_0 = 9\,810 \frac{1}{2g} m(v \sin \theta)^2 = 9\,810 \times \frac{1}{2 \times 9.81} \times$$

$$2\,000 \times (22.22 \sin 20^\circ)^2 = 57\,755\,260 \text{ J}$$

可见, $E_1/E_0 = 67\,706\,305.3/57\,755\,260 = 1.172\,3$,基本上就是 W 型护栏设计标准中规定的冲击水平。

护栏跨度为 9 跨,梁板、防阻块、立柱之间的联接采用螺栓联接,并用点焊模拟,点焊的法向失效拉力 $f_{sn} = 70 \text{ kN}$,剪切屈服力 $f_{ss} = 45 \text{ kN}$ 。应用本文

的建模方法,可得 CAE 模型共计:69 199 个节点,66 389 个单元,8 个接触面,49 个梁单元,124 个点焊,65 000 个四边形单元,693 个三角形单元,437 个六面体单元,4 个弹簧单元,44 个质量单元,12 个 JOINT 单元,参见图 2。

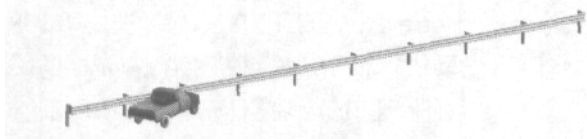


图2 建模方法的验证模型

Fig.2 Verification model of establishment model method

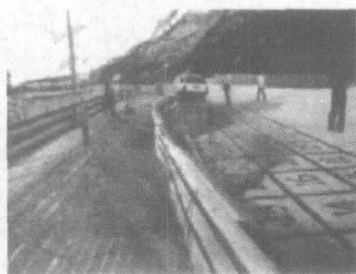


图3 实验照片

Fig.3 Test picture

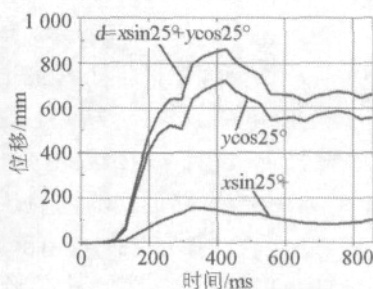


图4 护栏的最大横向位移

Fig.4 The maximal transverse displacement of guardrail structure

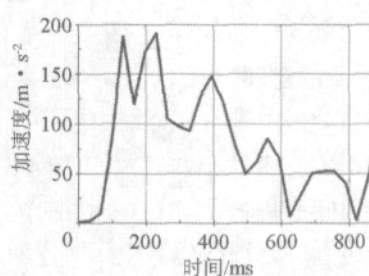


图5 车辆刚体合成加速度

Fig.5 The compound acceleration of rigid body of vehicle

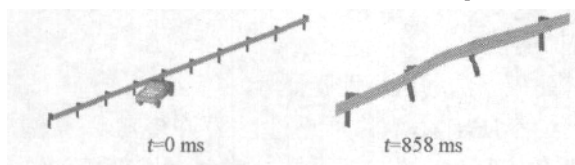


图6 护栏的变形情况

Fig.6 The deformation of guardrail structure

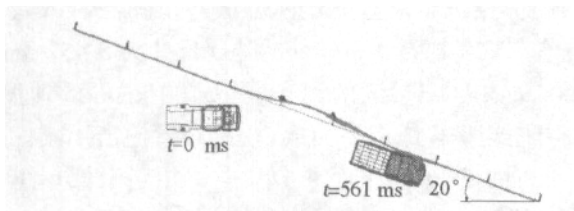


图7 失控车辆返回正确行驶方向

Fig.7 The lose control truck return to right direction

LS-DYNA 的分析结果与实验结果基本一致：碰撞结束后护栏的横向最大位移实验值为 630 mm (图 3)，CAE 结果在碰撞过程中曾达到 863 mm,但在弹性变形恢复后只有 661 mm (图 4)；车辆的整体最大减速度实验值为 17.5 g, CAE 结果为 19 g (图 5)。护栏变形的 CAE 结果见图 6。护栏对失控车辆的引导能力很强，当 $t=561$ ms 时，车辆就基本返回到正确行驶方向 (参见图 7) 且无拌阻现象发生。可见，本文的建模方法是可靠的。

的纵向与 x 轴成 25° 角度 (图 8)，而 LSTC/LSPRE-POSTD 后处理软件无法直接输出节点 279 977 的横向位移，为此，可分别输出节点 279 977 的 x 与 y 方向的位移曲线，然后按 $d=x\sin 25^\circ+y\cos 25^\circ$ 公式合成出节点 279 977 的横向位移，如图 9。

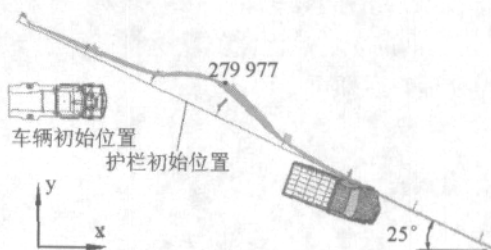


图8 护栏横向变形量

Fig.8 The transverse displacement

可见，节点 279 977 的横向最大位移达 1 870 mm，发生在 725 ms 左右，而在碰撞的初始阶段，由于撞击点不在 279 977 号节点处，还导致 279 977 号节点产生 -12.1 mm 的横向位移 (表示节点向内偏移)。

显然，车辆的最大冲入距离超过了许用值 (即 1 200 mm)，原因是本例中车辆的正面冲击动能比 W 型护栏设计标准中规定的正面冲击动能大得多，本例的正面冲击动能为

$$E_2 = 9\,810 \frac{1}{2g} m(v\sin\theta)^2 = 9\,810 \times \frac{1}{2 \times 9.81} \times$$

2 轻型货车强力撞击三波护栏的仿真分析

2.1 仿真模型

将汽车整备质量设为 1 840 kg、汽车行驶方向与护栏纵向平面间的角度设为 25° ，汽车与护栏模型其余地方都与第 1 节相同 (参见图 2)。

2.2 仿真结果分析

2.2.1 护栏结构的完整性

经反复比较，确定车辆的最大冲入距离即护栏梁板的最大横向变形发生在护栏梁板节点 279 977 附近，因建模时，车辆的纵向为 x 轴方向，而护栏

$$1\,840\times(27.78\sin20^\circ)^2=126\,808\,641.6\text{ J}$$
$$E_2/E_0=126\,808\,641.6/57\,755\,260=2.195\,6$$

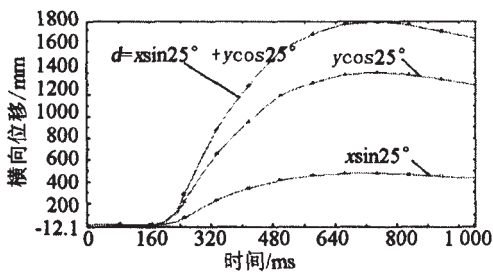


图 9 节点 279 977 的横向位移

Fig.9 The transverse displacement of the node 279 977 of the guardrail structure

可见，本例的冲击动能是护栏设计标准中冲击动能的 2.195 6 倍，符合分析要求。

仔细观察护栏的大变形过程（图 10）可知：护栏在 725 ms 左右才发生最大横向位移，而车辆的行驶方向在 297 ms 左右就基本达到了与护栏纵向方向一致的状态（图 11），在 297 ms 左右，护栏的最大横向位移仅 650 mm 左右。导致护栏产生最大横向位移的直接原因是车辆转向后并沿正确行驶方向前进的过程中，车辆与护栏继续保持着接触。而间接原因则是其中的一个防阻块的脱落（图 12），即防阻块的连接螺栓在 330 ms 左右就开始失效并在 363 ms 左右完全失效。此时，虽然车辆的行驶方向已基本与护栏纵向一致，但由于车辆仍然与护栏发生接触，导致接触部位的护栏仍有变形，这种变形，因为这



图 10 护栏大变形过程

Fig.10 The large deformation process of guardrail structure

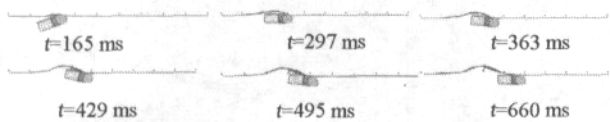


图 11 护栏对失控车辆的引导能力

Fig.11 The inducing ability of guardrail structure to the lose control truck

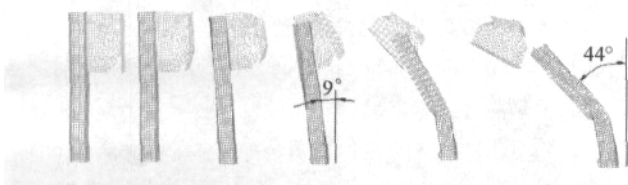


图 12 立柱的扭转及防阻块脱落过程

Fig.12 The process of the pillar twist and the block fall off

个防阻块的脱落使立柱对梁板变形的约束阻挡作用基本消失，导致护栏的横向位移被放大（图 13），当在立柱 A、B 之间存在立柱 C 时，梁板的横向位移被阻挡；当立柱 C 失去阻挡作用时，只要护栏梁板仍然在变形，则在立柱 A、B 之间，梁板的横向位移将被放大。可见，立柱、防阻块与护栏梁板之间的协调变形是多么重要。

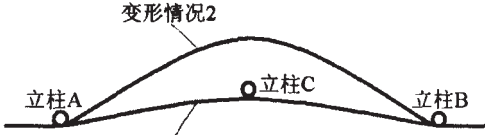


图 13 横向位移被放大

Fig.13 The transverse displacement is blowup

2.2.2 乘员风险指标

碰撞后，车辆有变形但变形量不大（图 14），变形后车辆的最大尺寸为 5 399 mm×2 045 mm×1 795 mm，长度比初始状态短 53 mm，宽度比初始状态增加 45 mm（包括轮胎拌阻后的变形量），高度比初始状态减少 30 mm。且车门无变形，玻璃完好，乘座室完整，乘员没有被侵入物伤害的可能。

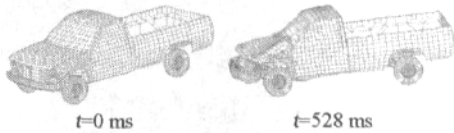


图 14 碰撞中汽车的变形情况

Fig.14 The deformation of truck during the impact

从能量吸收情况来看（图 15），车辆吸收的能量还不到总能量的 22%，总能量的 78% 以上由护栏吸收。作为能量吸收的主体，护栏内部的吸能情况也存在很大的区别，从图 16 可知，防阻块吸收的能量还不到护栏吸收总能量的 6.6%，立柱吸收的能量也只占护栏吸收总能量的 18.4%，梁板吸收的能量则超过护栏吸收总能量的 75%，表明防阻块与立柱在护栏中的主要作用不是为了吸能，而是为了将护栏支撑到合适的高度。事实上，变形量最大的立柱，其高度已经从初始状态的 1 397 mm 降低到 1 167 mm，降低了 230 mm，此时，立柱的最大后倾角度

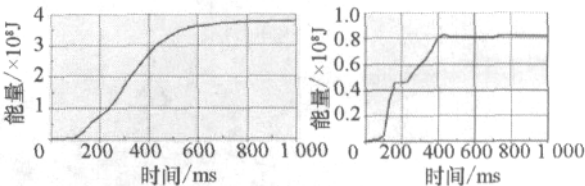


图 15 能量吸收情况

Fig.15 The instance of absorbing energy

达 44° (图 12), 立柱的后倾角虽然最大达 44°, 但车辆在 297 ms 时已基本返回到正确行驶轨道, 此时立柱的最大后倾角度仅 9°。

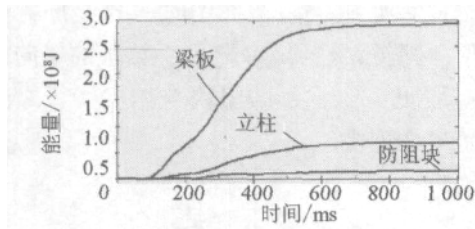


图 16 护栏内部吸能情况

Fig.16 The distributing instance of absorbing energy in guardrail structure

2.2.3 车辆轨迹

从图 11 可见, 最优护栏对失控车辆的引导能力很强, 但由于碰撞过程中, 失控车辆本身的变形, 导致了车轮被立柱拌阻现象的发生 (图 17), 当 $t=264$ ms 时, 车轮在立柱处出现拌阻, 但车轮通过自身的变形, 竟然顺利地克服了拌阻, 并返回到正确的行驶轨道。

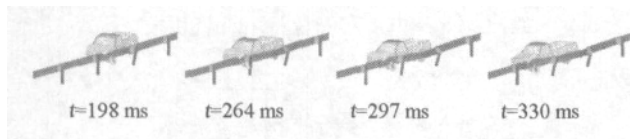


图 17 失控车辆的拌阻现象

Fig.17 The block phenomenon of the lose control automobiles

3 重型货车强力撞击半刚性护栏的仿真分析

总重 13 000 kg 的重型货车, 以 60 km/h 的速度、行驶方向与护栏纵向平面成 15° 的角度撞击高度自适应半刚性护栏, 为了充分计及汽车撞击半刚性护栏时护栏的波动效应对整个系统的影响, 护栏长度取为 80 m, 即护栏跨度为 20 跨, 每跨 4 m, 整个护栏由 21 个立柱、21 个防阻块、20 节三波型钢护栏梁板、21 个垫块构成, 梁板、防阻块、垫块、立柱之间的联接采用螺栓联接, 并用点焊模拟其联接作用。

汽车撞击护栏时的正面冲击动能为

$$E_3 = 9\,810 \frac{1}{2} m (v \sin \theta)^2 = 9\,810 \times \frac{1}{2 \times 9.81} \times$$

$$13\,000 \times (16.67 \sin 15^\circ)^2 = 120\,997\,672.8 \text{ J} \quad (2)$$

$$E_3/E_0 = 120\,997\,672.8 / 57\,755\,260 = 2.095$$

可见, 本例的冲击动能是 W 型护栏设计标准中冲击动能的 2.095 倍, 属于强力冲击, 比较式 (1) 与式 (2) 知, 两个算例的冲击强度基本相同。

3.1 仿真模型

图 18 为建立的仿真模型。整个模型包括: 118 755 个节点, 107 989 个单元, 19 个接触面, 210 个梁单元, 815 个点焊, 98 983 个四边形单元, 1 870 个三角形单元, 5 758 个六面体单元, 172 个五面体单元、17 个弹簧单元, 35 个质量单元, 47 个 JOINT 单元, 38 个安全带单元。

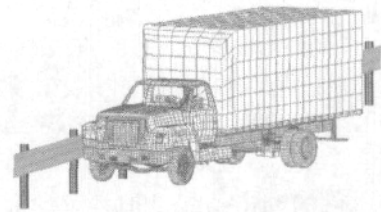


图 18 碰撞仿真模型

Fig.18 The crash simulation model

3.2 仿真结果分析

3.2.1 护栏结构的完整性

碰撞过程中, 护栏没有被车辆突破 (图 19 及图 20), 护栏的最大横向变形为 655 mm, 汽车终了位置与护栏初始位置的角度为 8°, 表明护栏具有良好的引导失控车辆返回正确行驶方向的能力。

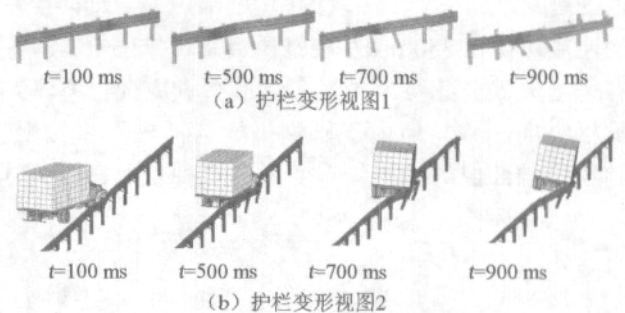


图 19 护栏变形图

Fig.19 The deformation of guardrail structure

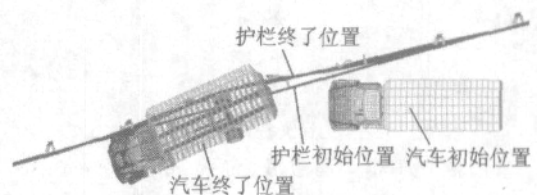


图 20 护栏的最大变形情况

Fig.20 The maximal deformation of guardrail structure

3.2.2 乘员风险指标

汽车的变形小 (图 21), 但汽车的侧翻趋势明显, 因为侧翻, 使侧翻侧的前轮胎变形越来越严重, 但车门没有明显变形, 玻璃完好, 乘坐室仍然完整, 乘员没有被外部侵入物伤害的可能。

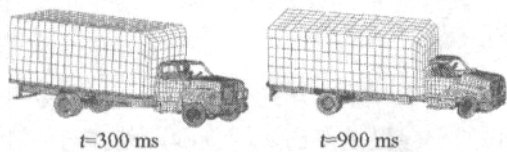


图 21 车辆的变形情况

Fig.21 The deformation of automobile

图 22 则表明,乘员在安全带的约束下,乘员的运动空间受到了较好的限制,乘员与车内物体发生

二次碰撞的可能性显著减少,乘员的安全性得以提高。

从假人的合成速度曲线 (图 23) 可知,假人头部与胸部的合成速度差别不大,说明假人头部与胸部之间的相对运动不大。

从假人的合成加速度曲线 (图 24) 可知,假人头部的 HIC_{15} 值为 377.9,远没有达到人体头部的耐冲击阈值 1 000,处于安全状态。

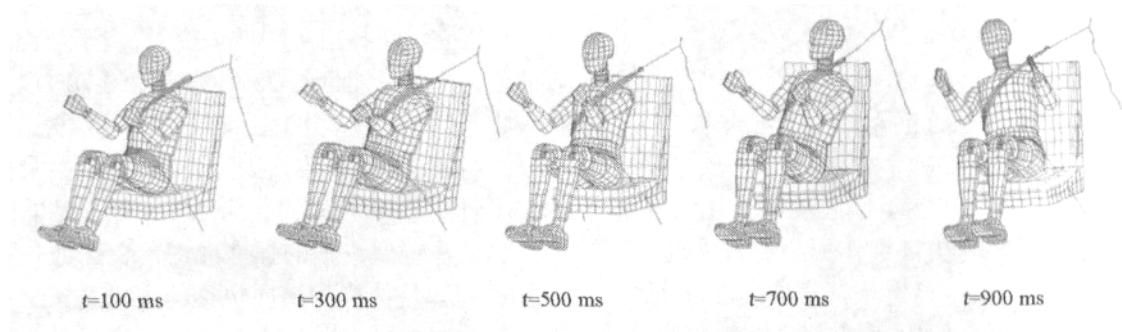


图 22 假人的运动过程

Fig.22 The moving process of the dummy

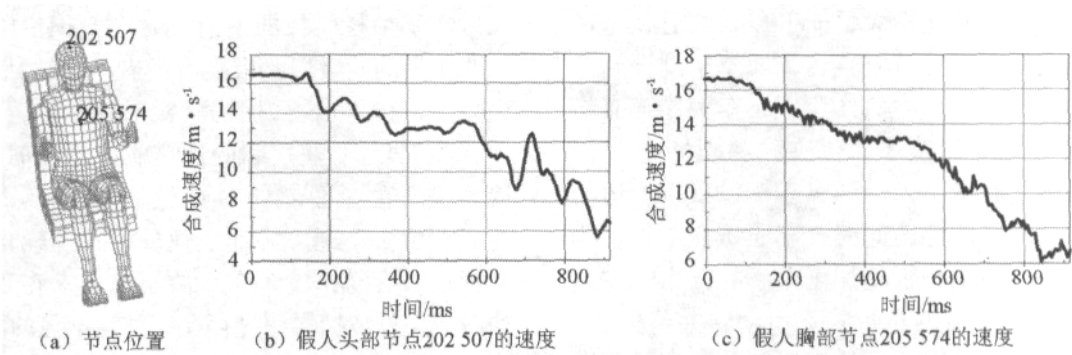


图 23 假人的合成速度情况

Fig.23 The compose velocity curves of the dummy

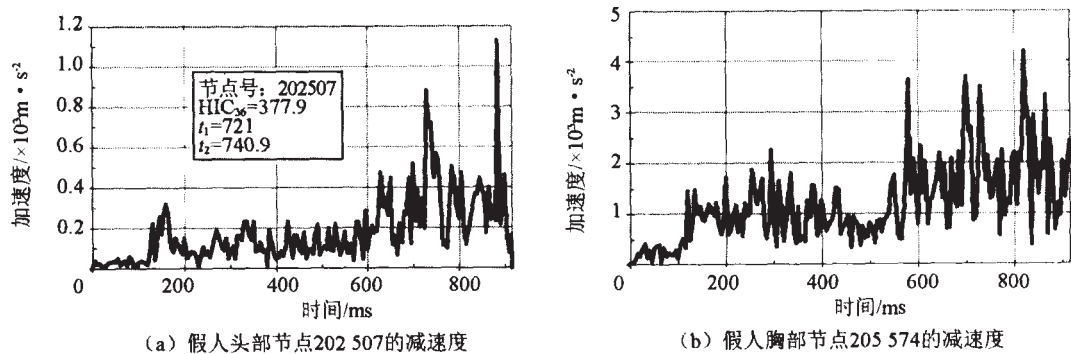


图 24 假人的合成加速度情况

Fig.24 The compose deceleration curves of the dummy

3.2.3 车辆轨迹

从图 25 可知,对重型车辆,护栏同样具有很好的导向能力,无拌阻现象发生,到 $t=600\text{ ms}$ 时车辆

就已基本返回正确行驶方向,但由于车辆重心高,在车辆转向离心力的作用下,车辆尾部贴向护栏并试图以护栏为支点整车外翻。

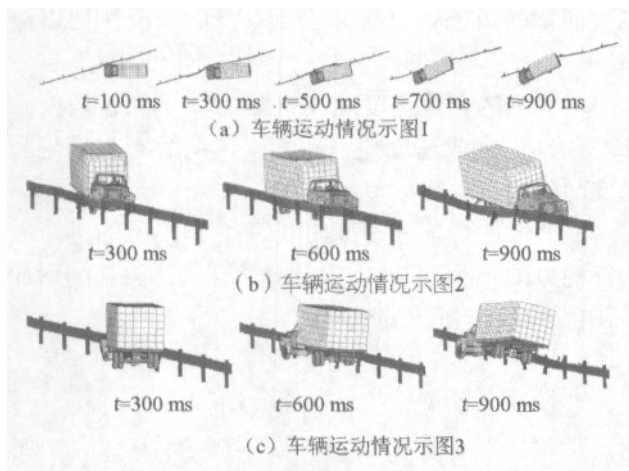


图25 车辆运动情况

Fig.25 The moving processes of vehicle

图26为碰撞过程中车辆重心高度的变化情况,在 $t=200\text{ ms}$ 之前,车辆在自重作用下,在与地面接触后再压缩轮胎,重心略有下降,在 $t=200\sim 600\text{ ms}$ 之间,车辆因其重心位置比撞击护栏时的撞击点高而使重心位置被抬高,但随后在自重作用下,车辆重心又下降。总体来看,在 $t=600\text{ ms}$ 之前,车辆重心位置高度变化不大, $t=600\text{ ms}$ 之后,车辆前轮已基本返回到正确行驶轨道,而车架刚开始与护栏梁板接触,在惯性力的作用下,车辆尾部有将护栏梁板向外推进的趋势,但在护栏梁板的阻挡下,由于车辆重心偏高,出现了车辆以梁板上边沿为支点向外翻滚的趋势,此时,车厢压在了护栏梁板的上沿上并给护栏梁板施加了向下的压力,在此压力作用下,护栏梁板开始向下运动,并将梁板、防阻块及立柱之间的连接螺栓逐渐剪断,使梁板逐渐脱离支撑,在此过程中,车辆因向外翻滚的支点位置不断下降而迅速外翻,车辆重心位置上升很快,当 $t=905\text{ ms}$ 时,车辆重心已上升 191.56 mm ,车辆侧倾角达 14° ,可见,半刚性护栏在重型车辆的重力作用下,将无可避免地被压溃,表现出护栏的完整性不足。

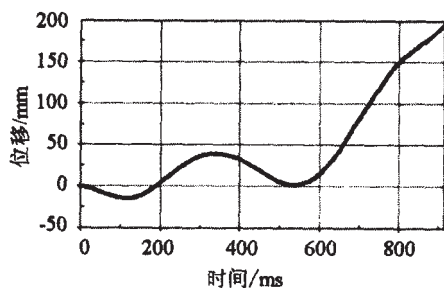


图26 车辆重心升高情况

Fig.26 The goes up process of vehicle center of gravity

4 结论

(1) 无论是轻型汽车还是重型汽车,三波护栏都具有很强的引导失控车辆返回正确行驶方向的能力。

(2) 在车辆对三波护栏的强力冲击过程中,车辆结构有变形,但车门没有明显变形,玻璃完好,乘座室完整,乘员没有被外部侵入物伤害的可能,且乘员的伤害指数远低于其耐冲击阈值,乘员处于安全状态。

(3) 在汽车撞击半刚性护栏时,汽车结构变形吸收的能量不到总能量的22%,总能量的78%以上由护栏吸收(其中的75%由护栏梁板吸收,18.4%由立柱吸收,6.6%由防阻块吸收),因此,在进行护栏吸能特性的初步研究时,将汽车简化为刚体来处理是可行的。

(4) 在轻型汽车的强力冲击下,三波护栏存在的主要问题是护栏的横向位移偏大,其深层次的原因则是防阻块的脱落使立柱对梁板变形的约束阻挡作用基本消失,从而放大了护栏的横向位移。在重型汽车的强力冲击下,由于车辆重心偏高,出现了车厢压在了护栏梁板的上沿上并在给护栏梁板施加向下的压力的同时以梁板上沿为支点的外翻现象,在此压力的持续作用下,护栏梁板开始向下运动,并将梁板、防阻块及立柱之间的连接螺栓逐渐剪断,使梁板逐渐脱离立柱的支撑,在此过程中,车辆因向外翻滚的支点位置不断下降而迅速外翻,车辆重心位置上升很快,容易诱发翻车事故。总之,在车辆的强力冲击下,三波护栏明显存在完整性不足的问题。

参考文献:

- [1] 雷正保, 谢玉洪, 李海侠, 著. 大变形结构的耐撞性[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005.
- [2] 雷正保, 钟志华, 等. 受冲薄壁结构动力效应的显式有限元分析[J]. 力学学报, 2000, 32(1): 70-77.
- [3] JOHN O HALLQUIST. LS-DYNA theoretical manual [R]. Livermore software technology corporation, 1998.
- [4] Livermore software technology corporation. LS-DYNA Keyword user's manual[R]. Version 970, 2003.
- [5] ETA-Engineering Technology Associates, Inc. VPG/Safety Tutorial: Process Guidance for Vehicle Impact and Safety Analysis Model Creation[R]. eta/VPG3.0, 2004.
- [6] 雷正保, 著. 汽车纵向碰撞控制结构设计的理论与方法[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2001.
- [7] 雷正保, 编著. 汽车覆盖件冲压成形CAE技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.
- [8] 王康臣, 张颖, 吕洪燕. 新型中央分隔带波形梁护栏研究[J]. 公路, 2003(8)(上): 40-45.