

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.01.012

考虑汽车正面低速碰撞角度偏差的 吸能盒性能优化设计

熊勇刚, 熊凯旋, 彭未来, 田万鹏, 刘亚春

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 汽车发生正面低速碰撞时, 由于各种因素的影响, 不能达到百分之百的正面碰撞。因此, 运用非线性有限元 LS-DYNA 仿真软件对碰撞方向偏差 $\pm 6^\circ$ 的汽车正面低速碰撞进行了仿真模拟, 在确保吸能盒在正面碰撞过程中能够吸收一定能量的基础上, 当汽车的碰撞角度发生偏差时也能够使吸能盒具有良好的吸能效果, 保障车辆与乘员安全。并通过定义目标优化函数及仿真研究进行了吸能盒优化设计, 得到优化后吸能盒的碰撞吸能数值及碰撞角度变化时碰撞吸能的变化情况, 从而得出最佳吸能性能吸能盒的设计变量, 即吸能盒壁厚 1.5 mm、长 180 mm、边数为 6, 此结构下在碰撞角度偏差 $\pm 6^\circ$ 时, 其 T 值最小。

关键词: 汽车碰撞; 吸能盒; LS-DYNA; 角度偏差; 目标优化函数

中图分类号: U461.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)01-0065-05

An Optimized Design of Energy Absorption Performance of Automobiles Considering the Angle Deviation of Frontal Low-Speed Collision

XIONG Yonggang, XIONG Kaixuan, PENG Weilai, TIAN Wanpeng, LIU Yachun

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Due to various factors, a solid frontal collision can not be achieved for automobiles in the process of a frontal low-speed collision. Therefore, the non-linear finite element LS-DYNA simulation software has been used to simulate the frontal low-speed collision with ± 6 degrees of direction deviation. On the basis of ensuring that the energy-absorbing box can absorb some energy during the frontal collision, the collision angle deviation can also improve the energy absorption performance for the energy absorption box, thus helping to secure the safety of vehicles and occupants. By defining the objective optimization function, an optimized design of the energy-absorbing box has been carried out based on the simulation research, thus obtaining the numerical values of the impact energy absorption of the optimized energy absorption box and the change of collision energy absorption with changed collision angles, as well as working out the design variables of the energy absorbing box with the best energy absorption performance, namely, with the thickness of energy absorbing box wall being 1.5 mm, its length 180 mm and the number of edges 6. Under this structure, the T value of the energy absorbing box reaches its minimum when the angle deviation of the collision is ± 6 degrees.

Keywords: car crash; crash box; LS-DYNA; angle deviation; target optimization function

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2017JJ2065)

作者简介: 熊勇刚 (1968-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学教授, 主要从事机械设计及理论方面的教学与研究,

E-mail: xygyxj@163.com

1 研究背景

随着社会的进步,近年来人们对于交通事故导致的人员伤亡和财产损失问题越来越关注,普通消费者的安全观念日益增强。汽车安全问题的研究已成为当今汽车工程领域研发的热点之一。最先研究汽车碰撞问题的国家是美国^[1],至今已有一个多世纪的历史。研究初期采用的是实车碰撞试验,到20世纪中期发展为台车碰撞试验,随着计算机碰撞有限元理论技术的出现,20世纪80年代开始多通过计算机仿真模拟汽车碰撞。应用计算机仿真模拟汽车碰撞,不仅能大量缩减车型研发时间,且能节约大量研发成本,所以该技术得到了各大汽车生产厂家的应用,现今国内外大多数研究汽车碰撞问题的厂家采用该技术^[2-3]。

汽车在公路上低速行驶的过程中,当发生正面低速碰撞时,碰撞所产生的动能主要靠汽车的吸能盒吸收,以保护前纵梁及汽车发动机等主要部件不受损坏,减少维修成本,同时保护乘员安全。吸能盒是汽车保险杠系统中重要的吸能装置,通过螺栓联接在横梁与车架纵梁之间。吸能盒通过产生变形和压溃来吸收车辆碰撞时所产生的能量,而其螺栓联接的形式能够使其在发生变形后方便拆卸换新以重新保护车辆安全^[4]。吸能盒一般用作低速碰撞下的安全保护系统,其良好的结构能在很大程度上改进车辆的被动安全性,保护车辆与乘客安全。

国外的K. Yamazaki等通过计算机软件仿真模拟优化了圆形截面薄壁铝管的抗撞性能,同时采用实物试验方法在薄壁铝管的轴向施加冲击载荷对其进行分析,通过对试验结果与仿真结果的比对,验证了仿真结果的可行性^[5]。当汽车发生正面碰撞时,由于各因素及客观原因的影响,很大程度上不能达到正面碰撞^[6]。因此,本研究采用碰撞角度偏差 $\pm 6^\circ$ 的汽车正面低速碰撞仿真分析,在确保吸能盒正面碰撞过程中能吸收一定能量的基础上,当汽车的碰撞角度发生偏差时也能使吸能盒具有较好的吸能效果,能保障车辆与乘员的安全。并定义目标优化函数进行优化设计,通过对优化后的吸能盒碰撞吸能数值及碰撞角度变化时碰撞吸能变化的比较,得到最佳吸能性能的吸能盒,以期汽车厂家的吸能盒设计提供一定的参考。

2 碰撞问题仿真有限元理论

冲击载荷与接触在汽车碰撞过程中是一动态接触问题,影响着分析的全过程。汽车碰撞是瞬态复杂的物理过程,涉及大变形和大位移及冲击载荷,为非

线性动力学问题。本研究采用有限元软件LS-DYNA对吸能盒碰撞进行动态仿真分析,其求解碰撞问题利用中心差分法离散时间域。采用显式中心差分法,不用构造刚度矩阵即可求解节点的运动方程,能避免因非线性问题引起的收敛问题^[7]。

在有限元单元离散化碰撞中的接触系统中引入虚位移场,由一般动态接触问题的基本方程可得^[8]:

$$\mathbf{M}\mathbf{A}=\mathbf{F}+\mathbf{F}_j-\mathbf{F}_n \quad (1)$$

式中: \mathbf{F} 为外界作用力矢量; \mathbf{F}_j 、 \mathbf{F}_n 分别为接触力、内应力总节点力; \mathbf{A} 为总体加速度向量; \mathbf{M} 为质量矩阵。

用中心差分法求解方程组(1),在求系统加速度时,系统位移、内应力为已知量。中心差分法中用罚函数法计算接触力,因其为对角质量矩阵,故由式(1)组成一组互不相关的方程,省去建立求解联立方程组,得到所谓的显式算法。该方法求解方程组不要迭代,单次求解过程十分快速、简洁,因而在汽车碰撞分析中有广泛的应用。显式算法的缺点在于解的稳定性是有条件的,要满足Courant准则。中心差分法的有限元描述如下^[9]。

对于一个非线性结构的动力响应问题,其动力学微分方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{S}}+\mathbf{C}\dot{\mathbf{S}}+\mathbf{K}\mathbf{S}=\mathbf{F} \quad (2)$$

式中: \mathbf{C} 为结构的阻尼矩阵; \mathbf{K} 为结构的刚度矩阵; \mathbf{S} 为结构的位移矢量。

若 $0, t^1, t^2, \dots, t^n$ 其节点的速度、位移、加速度已知,则加速度、速度的导数用中心差分代替,可求解 $t^{n+1}(t+\Delta t)$ 时刻的结构响应,即:

$$\ddot{\mathbf{S}}=\frac{1}{\Delta t^2}(\mathbf{S}_{t-\Delta t}-2\mathbf{S}_t+\mathbf{S}_{t+\Delta t}), \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{S}}=\frac{1}{2\Delta t}(-\mathbf{S}_{t-\Delta t}+\mathbf{S}_{t+\Delta t}). \quad (4)$$

将式(3)和(4)代入式(2),可得:

$$\hat{\mathbf{M}}\mathbf{S}_{t+\Delta t}=\hat{\mathbf{R}}t \quad (5)$$

式中 $\hat{\mathbf{M}}$ 、 $\hat{\mathbf{R}}$ 分别为有效质量矩阵和有效载荷向量,且

$$\hat{\mathbf{M}}=\frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{M}+\frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C}, \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_t=\mathbf{F}_t-\left(\mathbf{K}-\frac{2}{\Delta t^2}\mathbf{M}\right)\mathbf{S}_t-\left(\frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{M}-\frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C}\right)\mathbf{S}_{t-\Delta t},$$

其中 \mathbf{F}_t 为结构载荷向量。

求解线性方程组(5),可得 $t+\Delta t$ 时刻的节点位置向量 $\mathbf{S}_{t+\Delta t}$ 。再将 $\mathbf{S}_{t+\Delta t}$ 代入弹性动力学基本平衡方程式(7)与式(8)中,可得 $t+\Delta t$ 是一个单元应力与应变。

$$\text{几何方程: } \varepsilon_{ij}=(u_{ij}+u_{ji})/2; \quad (7)$$

$$\text{物理方程: } \begin{cases} \delta_{ij}=\lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij}+2\mu\varepsilon_{ij}, \\ \sigma_{kk}=(3\lambda+2\mu)\varepsilon_{kk}=3K\varepsilon_{kk}. \end{cases} \quad (8)$$

式(7)(8)中: σ, ε, μ 为材料受力后的应力、应变与位移; λ 为材料压缩性系数; K 为材料体积弹性模量; δ_{ij} 为 Kronecher 符号。

通过迭代求解方程组, 直到满足条件结束。因其中心差分算法有稳定的条件, 时间步长必须小于由该问题求解方程性质所决定的时步临界值 $\Delta t_{cr}^{[10]}$,

$$\Delta t_{cr} = T_n / \pi,$$

式中 T_n 为系统最小固有振动周期。

因而只需求解系统最小单元的固有振动周期。为解决这一问题, 采用变时间步长法, 即每一时刻时步 Δt 由当前结构的稳定性条件控制^[11], 算法为计算每一个单元的极限时间步长 $\Delta t_{ei} = 1, 2, \dots$, 取 $\Delta t = \min(\Delta t_{ei})$ 为下一刻时间步长。

3 吸能盒设计优化评价因素

当汽车吸能盒发生正面低速碰撞时, 现实中汽车往往会因为各种不确定因素而出现一定的碰撞角度偏差, 而一般的汽车吸能盒碰撞仿真分析研究中没有考虑碰撞角度偏差因素对吸能盒吸能性能的影响, 从而在吸能盒的性能设计上存在一定的缺陷。故本文在前人的研究基础上, 考虑汽车吸能盒正面低速碰撞时会出现一定的角度偏差, 定义一个目标函数, 以使发生正面低速碰撞时吸能盒产生的形变大、吸收的能量多, 且当正面低速碰撞角度出现一定变化时也能保证其有一定的形变, 从而保证吸能盒具有良好的吸能效果。

本文考虑汽车吸能盒正面低速碰撞存在 $\pm 6^\circ$ 偏差角度时, 运用非线性有限元软件 LS-DYNA 对汽车吸能盒的正面低速碰撞进行仿真分析。选取 12 组吸能盒模型数据进行优化仿真分析, 各组模型数据取样点的吸能结果如表 1 所示。

表 1 各模型样本点吸能结果

Table 1 Energy absorption results for various types of sample points

样本点	-6°	0°	$+6^\circ$	平均值	标准差
1	$E_1^{(-6)}$	$E_1^{(0)}$	$E_1^{(6)}$	E_1	σ_1
2	$E_2^{(-6)}$	$E_2^{(0)}$	$E_2^{(6)}$	E_2	σ_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
12	$E_{12}^{(-6)}$	$E_{12}^{(0)}$	$E_{12}^{(6)}$	E_{12}	σ_{12}

其中吸能平均值和标准值计算公式如下:

$$E_i = \frac{1}{3} (E_i^{(-6)} + E_i^{(0)} + E_i^{(6)});$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{3} \left[(E_i^{(-6)} - E_i)^2 + (E_i^{(0)} - E_i)^2 + (E_i^{(6)} - E_i)^2 \right]}.$$

式中: $i=1, 2, \dots, 12$ 。 $E_i^{(-6)}$ 、 $E_i^{(0)}$ 、 $E_i^{(6)}$ 分别表示当正面低速碰撞角度偏差为 $-6, 0, +6^\circ$ 时吸能盒吸收的能

量; E_i 、 σ_i 分别表示正面低速碰撞角度偏差所有情况下吸能盒吸收的能量平均值和能量标准差。

对于碰撞角度偏差下吸能盒吸收能量的平均值 E_i , 其值越大, 说明吸能盒吸能的效果越好; 而对于标准差 σ_i 来说, 其值越小表明波动越小, 即吸能盒性能越稳定。基于以上分析与前人的设计经验, 提出以目标优化函数 $T = S_E(2 - E/E_A) + S_\sigma \sigma/\sigma_A$ 作为优化标准, 其中取 S_E 值为 2.5, S_σ 值为 1。对于 T 值, 其越小表明汽车吸能盒在考虑正面低速碰撞角度偏差时吸收能量的性能越好。

基于以上对汽车吸能盒的吸能性能进行优化设计时, 主要考虑以下 3 个值的大小: 一为汽车吸能盒压溃变形到原长 35% 时吸能盒吸收能量平均值的最大化; 二是汽车吸能盒压溃变形到原长 35% 时吸能盒吸收能量标准差的最小化; 三是使其目标优化函数 $T = 2.5(2 - E/E_A) + \sigma/\sigma_A$ 达最小化, 得到最优解。

目标优化函数出现的 E 为吸能盒在考虑各碰撞角度偏差的情况下所吸收能量的平均值, E_A 为吸能盒在考虑所有的碰撞角度偏差的情况下吸收能量的平均值, σ 为吸能盒在各个碰撞角度偏差的情况下吸收能量的标准差, σ_A 为吸能盒在考虑所有碰撞角度偏差的情况下吸收能量的标准差。

4 考虑碰撞角度偏差的汽车吸能盒设计优化

先选取某个模型样本的吸能盒, 其壁厚为 1.0 mm, 边数取 4, 每条边长取 20 mm, 整个吸能盒的长度为 180 mm, 在建模软件中对吸能盒建立简化的有限元模型, 如图 1 所示。其中, 吸能盒的有限元节点个数为 8 484, 单元数为 8 015, 在吸能盒右端施加固定约束, 在其左端施加正面碰撞载荷。

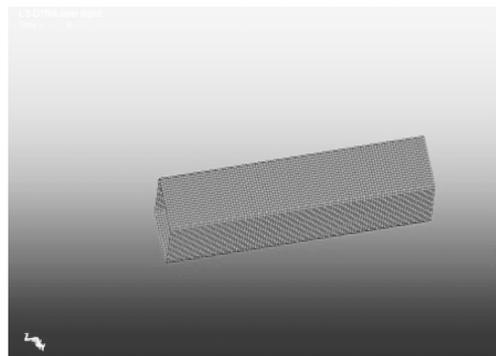


图 1 某型号吸能盒有限元分析模型

Figure 1 Finite element analysis model for certain type of energy absorption box

通过运用非线性有限元 LS-DYNA 分析软件, 对吸能盒碰撞的整个过程进行仿真模拟, 得到了不同

阶段的形变情况，如图2所示。

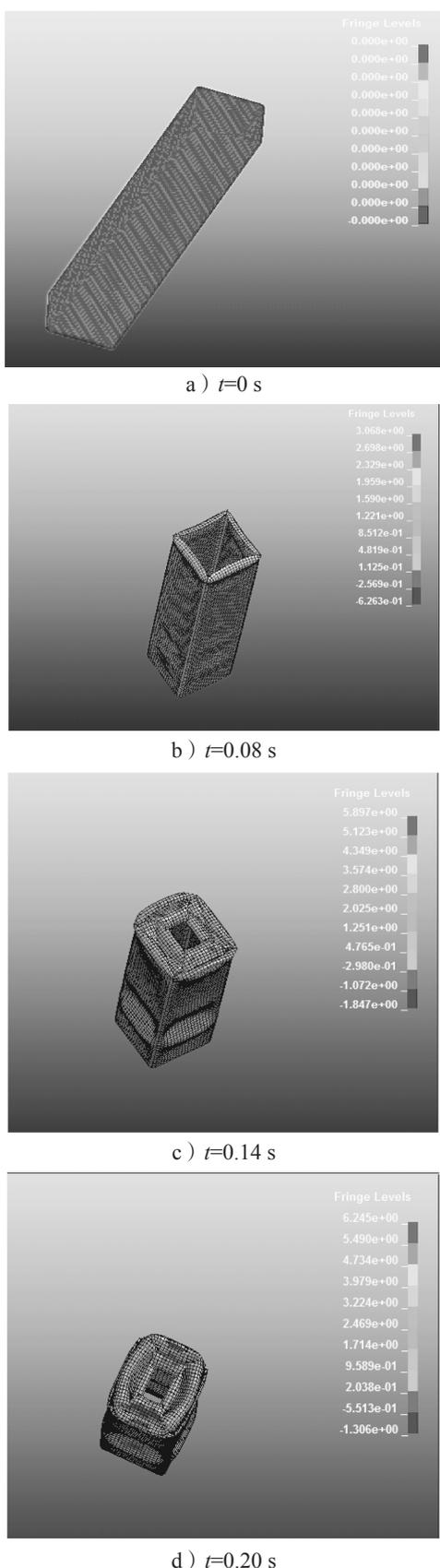


图2 吸能盒在不同时间段的变形仿真图

Fig. 2 Deformation simulation of energy absorption boxes at different periods of time

吸能盒碰撞时吸收的能量如图3所示。

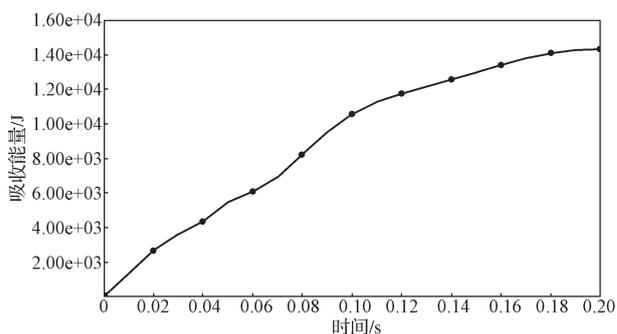


图3 吸能盒吸收内能曲线图

Fig. 3 Energy absorption curve of energy absorption boxes

由图3可知，从碰撞起始到0.05s之间，吸能盒吸收的总能量变化速率较大，这是因为在碰撞初期吸能盒的自身变形余量很大，故能吸收较多的能量；同时由于吸能盒的每一次变形与压溃，都需要吸收一定的碰撞能量，从图3中曲线可以看出，随着吸能盒碰撞时间的增加，吸能盒吸收的能量逐渐增加，但随着吸能盒的压实，变形量不断减少，吸能盒的吸能能力减弱，吸收的总能量随之平稳下来。

在优化设计前，根据汽车吸能盒的使用条件和提高碰撞性能的要求，将吸能盒变形至原长的35%处时的吸能量 E 作为评价指标之一，对目标函数 T ，为使其最小化 ($T=2.5(2-E/E_A)+\sigma/\sigma_A$)。参考以上论述及汽车设计经验，提出优化设计吸能盒壁厚、边数和总长度3个变量，分别对吸能盒壁厚取值1.0mm和1.5mm；吸能盒的边数取4, 6, 8；吸能盒的总长度取值150mm和180mm。通过LS-DYNA仿真软件分析这12组模型数据，可以得出当吸能盒壁厚为1.5mm、长度为180mm、边数为6时，在碰撞角度偏差 $\pm 6^\circ$ 时其 T 值最小，可以作为其最优结果。

最优型号与某型号吸能盒吸收能量的对比结果如图4所示。

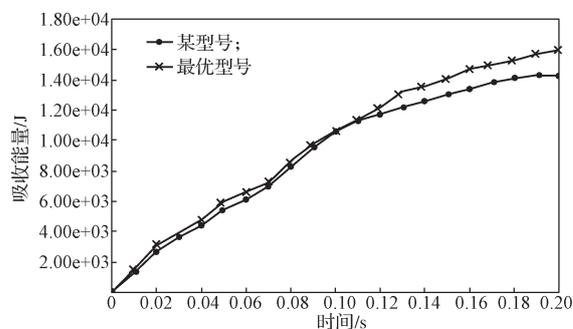


图4 最优型号与某型号吸能盒吸收能量对比曲线

Fig. 4 Absorb energy curves of the optimal model and a certain previous model

如图4所示，通过设定优化目标函数，找出最优解吸能盒，其在正面低速碰撞过程中吸收的能量相对

于其他型号吸能盒吸收的能量来说要大得多。在汽车碰撞过程中, 吸能盒能够在面对各种碰撞角度偏差的状态下吸收更多的碰撞能量, 意味着对汽车的保护作用更大, 更能够保障车辆与乘员的安全。

5 结语

本文对于汽车正面低速碰撞时考虑各种主客观因素引发的碰撞角度偏差问题, 利用非线性有限元软件 LS-DYNA, 对汽车吸能盒发生正面低速碰撞考虑到碰撞角度偏差 $\pm 6^\circ$ 时做了模拟仿真和设计优化, 对于吸能盒的不同设计参数, 定义出目标优化函数, 得到仿真优化后的吸能盒碰撞吸能数值及碰撞角度变化时碰撞吸能的变化比较, 从而得到最佳吸能性能的吸能盒, 本方法对汽车厂家吸能盒的设计有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 李平飞, 巢凯年. 轿车保险杠系统低速正面碰撞性能的仿真研究 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2005, 24(3): 26-28, 36.
LI Pingfei, CHAO Kainian. Simulation Study on the Frontal Collision Performance for the Bumper System of a Saloon Car at Low Speed[J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2005, 24(3): 26-28, 36.
- [2] 薛量, 姜正旭, 林忠钦. 轿车白车身碰撞性能的数字仿真 [J]. 上海汽车, 1999(11): 10-13.
XUE Liang, JIANG Zhengxu, LIN Zhongqin. Numerical Simulation of Collision Performance of Car Body[J]. Shanghai Automotive, 1999(11): 10-13.
- [3] 姚松, 田红旗, 高广军. 显式有限元法在车辆耐撞性研究中的应用 [J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(1): 13-16, 20.
YAO Song, TIAN Hongqi, GAO Guangjun. Explicit Finite Element Method for Vehicle Crash-Worthiness[D]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(1): 13-16, 20.
- [4] 何成. 薄壁金属结构耐撞性优化研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
HE Cheng. Optimum Design of Metal Thin-Walled Structure for Crashworthiness Analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [5] YAMAZAKI K, HAN J. Maximization of the Crushing Energy Absorption of Tubes[J]. Structural Optimization, 1998, 16: 37-46.
- [6] 吴广发. 基于 LS-DYNA 的汽车前纵梁碰撞吸能特性分析及其优化设计 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012.
WU Guangfa. Based on the LS-DYNA Optimum Design for Crash Energy Absorption Ability of Car Front Side Member[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2012.
- [7] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 46-58.
BAI Jinze. LS-DYNA3D Theoretical Basis and Case Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2005: 46-58.
- [8] 钟志华. 汽车耐撞性分析的有限元法 [J]. 汽车工程, 1994, 16(1): 1-6, 11.
ZHONG Zhihua. Finite Element Method in Crashworthiness Analysis of Automobiles[J]. Automotive Engineering, 1994, 16(1): 1-6, 11.
- [9] 王伟. 汽车车门轻量化及侧面碰撞安全性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
WANG Wei. A Study on the Car Door Light Weighting and the Safety of Side Crash Simulation[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [10] 王纯. 基于行人保护的某车型前部结构优化 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
WANG Chun. An Optimization of Vehicle Frontal Structure Design for Pedestrian[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [11] 刘海江, 张夏, 肖丽芳. 基于 LS-DYNA 的 7075 铝合金汽车保险杠碰撞仿真分析 [J]. 机械设计, 2011, 28(2): 18-23.
LIU Haijiang, ZHANG Xia, XIAO Lifang. Collision Simulation Analysis of 7075 Aluminum Alloy Car Bumper Based on LS-DYNA[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(2): 18-23.

(责任编辑: 廖友媛)