

# 基于吸能分配的平头货车驾驶室耐撞性研究\*

王善坡<sup>1,2</sup> 万鑫铭<sup>3</sup> 罗家元<sup>3</sup> 李阳<sup>3</sup>

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 中国重型汽车集团有限公司, 济南 250002;

3. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 400039)

**【摘要】** 针对平头货车驾驶室无专用吸能区间和吸能元件的情况, 由理论分析提出通过驾驶室各部件吸能量重新分配来改进驾驶室耐撞性的方法。参照 ECE R29 法规, 以有限元法仿真某款实车驾驶室的摆锤碰撞过程, 通过改变驾驶室部件的厚度尺寸来分配部件吸能量, 评比碰撞后驾驶室生存空间, 研究驾驶室生存空间与主要部件吸能量之间的关系, 并依据分析结果提出切实可行的改进方案, 进行实验验证。研究结果表明, 适当增加或减少各部件的吸能量, 达到吸能量的合理分配, 可有效改进驾驶室耐撞性。

**关键词:** 平头货车 驾驶室 耐撞性 吸能

**中图分类号:** U467.1<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0019-06

## Crashworthiness of Flat Truck Cab Based on Power Dissipation Allocating

Wang Shanpo<sup>1,2</sup> Wan Xinming<sup>3</sup> Luo Jiayuan<sup>3</sup> Li Yang<sup>3</sup>

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Ji'nan 250002, China

3. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400039, China)

### Abstract

Aiming at the lack of specific energy absorption area and components for flat truck cab, a method for improving the cab's crashworthiness was proposed, which was realized by reallocating the power dissipation of each component. Referring to rule ECE R29, finite element method was used to simulate the pendulum collision process of some real vehicle to distribute the power dissipation by changing the thickness of components of cab. Living space of the cab after collision was evaluated to analyze the relationship between it and power dissipation, and experiment was carried out based on the analysis result to give some reasonable instruction. The analysis result showed that an appropriate increasing or decreasing of power dissipation of each component could optimize the crashworthiness of cab effectively.

**Key words** Flat truck, Driving cab, Crashworthiness, Power dissipation

### 引言

平头货车不具备长头货车和轿车所拥有的吸能元件和吸能空间, 一旦发生碰撞, 大量的碰撞能量主要由驾驶室的变形来吸收<sup>[1]</sup>。而驾驶室内部空间有限, 驾驶室的过度变形将直接伤害车内乘员。针对平头货车驾驶室的碰撞安全性问题, 国内外学者开展了大量研究。国内学者针对货车的保险杠进行

了多种结构和材料上的改进<sup>[2-3]</sup>, 取得了一定效果。国外研究者则开发了实车碰撞、台车碰撞以及零部件碰撞等大量实验技术和装置, 建立了实验标准和规范, 并将安全气囊、安全带等装备应用到货车上, 大大提高了其安全性。国内货车在安全实验研究以及安全装备的投入使用上落后于国外, 货车碰撞安全性的研究有待深入开展。

对于商用车的结构安全性, 国内暂时还没有强

收稿日期: 2011-11-01 修回日期: 2011-12-31

\* 国家高新技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA110105)

作者简介: 王善坡, 博士生, 中国重型汽车集团有限公司研究员, 主要从事汽车开发研究, E-mail: wangshanpo@cnhtc.cn

制性的法规出台。目前欧洲实施的商用车驾驶室乘员保护相关法规主要是 ECE R29 法规<sup>[4]</sup>,包括前碰、顶盖静压和后围强度 3 项实验检测。其中,前碰实验是为了检验正面碰撞所引起的驾驶室变形是否对乘员造成伤害。本文参照 ECE R29 法规中的前碰实验标准,利用有限元法对某款重型平头货车驾驶室进行碰撞实验仿真分析,评比分析驾驶室生存空间与主要部件吸能量之间的关系,探究提高平头货车驾驶室耐撞性的方法,并进行实验验证。

## 1 碰撞过程中的吸能与变形

汽车的碰撞吸能过程实质上是一个将碰撞能量转换为变形能及其他形式能量的过程<sup>[5]</sup>,碰撞过程中变形做功满足

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n \int_0^t F_i(t) ds_i \quad (1)$$

式中  $W$ ——初始碰撞能量

$n$ ——吸能部件数

$W_i$ ——单个部件的吸能量

$\int ds_i$ ——部件变形量

$F_i(t)$ ——瞬时冲击载荷

保证碰撞过程中乘员的生存空间,即要求驾驶室不发生过大的碰撞变形。假设碰撞前初始动能  $W$  一定,减小驾驶室的碰撞变形,最直接的就是减少与驾驶室变形关联较大的部件变形量  $\int ds_i$ ,则冲击载荷  $F_i(t)$  会相应增加,变形量与冲击载荷的变化共同体现为部件吸能量  $W_i$  的变化。在初始碰撞能量  $W$  一定的情况下,各部件吸能量  $W_i$  的变化必然出现增大或减小,相当于各部件的吸能量进行重新分配。

由以上分析可知,通过改变平头货车驾驶室各部件的吸能量,即将各部件吸能量进行重新分配,可达到有效控制驾驶室变形的目的,从而提高碰撞过程中乘员的生存空间。

## 2 碰撞过程仿真

参照 ECE R29 法规中的前碰实验标准,以有限元法仿真某款重型平头货车驾驶室的摆锤碰撞过程。

### 2.1 碰撞模型

ECE R29 的考核对象是驾驶室,建立碰撞有限元模型时,对驾驶室各关键部件在准确描述其几何形状的同时进行高质量网格划分,严格控制雅可比、翘曲度、最小边长、边长比等参数;对驾驶室以外未直接参与碰撞的总成部件进行简化,如排气系统、发

动机、油箱、电瓶箱、变速箱等均简化为集中质量点,在保证计算结果精度的同时,提高计算经济性。

碰撞所用摆锤设置为刚体,摆锤的撞击面为平整的矩形,撞击面尺寸为 2 500 mm × 800 mm。摆锤质量为 1 500 kg,该平头货车的最大允许载量大于 7 000 kg,因此摆锤初始碰撞能量需要 45 kJ。为了节约仿真计算时间,忽略摆锤的下摆过程,以摆锤处于竖直位置作为碰撞前的初始状态,给摆锤施加 1.936 rad/s 的初始角速度以达到初始能量为 45 kJ 的要求。摆锤碰撞仿真模型如图 1 所示。

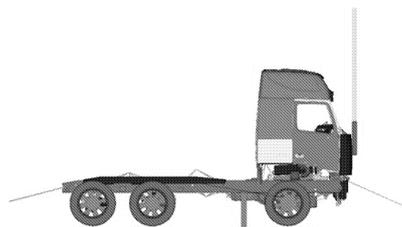


图 1 摆锤碰撞仿真模型

Fig. 1 Crash simulation model of pendulum

### 2.2 碰撞模型的验证

汽车碰撞过程中,碰撞能量的转换与汽车质量分布直接相关<sup>[6]</sup>。故模型验证主要为实车各总成质量的模型值与实际值对比评价,模型中驾驶室质量为 507.4 kg,实车驾驶室各总成质量为 490 kg,两者误差为 3.55%,在工程建模误差的允许范围之内。

### 2.3 碰撞过程仿真计算

汽车碰撞过程是一个瞬态过程,具有很强的非线性特征,其物理本质决定该过程的仿真只能采用足够小的时间步长,否则就会带来收敛性问题或过大的计算误差<sup>[7]</sup>,因此平头货车摆锤碰撞仿真采用显式仿真算法。经过一系列试运算,确定碰撞仿真时间为 0.3 s,以确保碰撞过程全部完毕。

## 3 结果分析及优化

### 3.1 驾驶室生存空间

依照 ECE R29 法规的相关条款,摆锤碰撞后以变形假人来评判驾驶室生存空间,当座椅处于中间位置时,人体模型不应与车辆的非弹性部件发生接触,驾驶室空间能够按要求容纳 50 百分位标准假人<sup>[4,8]</sup>。图 2 展示了摆锤碰撞后放入标准假人的驾驶室生存空间。

驾驶室生存空间的量化评价标准主要有 3 个特征尺寸<sup>[9]</sup>:转向柱与座垫前端的水平距离  $a$ 、方向盘与座椅靠背之间水平距离  $b$ 、方向盘与座垫之间垂直距离  $c$ 。摆锤碰撞后驾驶室生存空间的 3 个特征尺寸数据如表 1 所示。

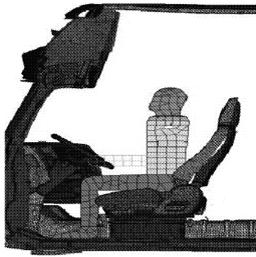


图 2 驾驶室假人生存空间示意图

Fig. 2 Schematic diagram of some fake people's living space in driving cab

表 1 驾驶室生存空间特征尺寸

Tab. 1 Characteristic size of living space in driving cab

工况	特征尺寸/mm		
	a	b	c
碰撞前	313	386	236
碰撞后	261	291	215
变化值	52	95	21

### 3.2 驾驶室部件吸能

摆锤碰撞后,驾驶室多个部件产生变形而吸收碰撞能量。其中吸能量较多的主要有 5 个部件,其具体吸能量见表 2,其余部件吸能量均在 1 kJ 左右。

表 2 部件吸收能量

Tab. 2 Power dissipation list of each component

部件	吸能量/kJ	厚度/mm
地板纵梁	4.004	2.0
车架	5.823	8.0
前围板纵梁	3.353	3.0
下前围板	2.651	1.5
发动机盖板	2.337	1.5

### 3.3 吸能分配与生存空间优化

部件吸能必然伴随着该部件的变形,而驾驶室各部件在实车中的空间位置不同,其变形量对驾驶室生存空间特征尺寸的影响也不尽相同,对变形量加以控制则可实现对驾驶室生存空间的优化。碰撞过程中,各部件变形量在三维空间中的展现比较复杂,难以统一评比,而由式(1)可知,变形量与吸能量密切相关,可通过控制各部件吸能量来优化驾驶室生存空间。

部件吸能量较大说明该部件对驾驶室耐撞性的影响较大,考虑到这几个部件(表 2)的薄壁几何结构,对其进行厚度的适量增加来实现碰撞过程中吸能量的分配。表 2 中车架部件其厚度已达 8 mm,再增加厚度对于工艺和轻量化都会产生较大负面影响,车架每增加 1 mm,质量就会增加 28.5 kg,故仅对表 2 中其余 4 个部件的厚度进行改进。

以各部件原有厚度为基准,将仿真模型中相应部件的厚度增加 20%,分别进行摆锤碰撞过程的有限元仿真。厚度变化前、后各部件的吸能对照结果如图 3 所示,表 3 列出了各部件厚度增加后驾驶室生存空间特征尺寸。

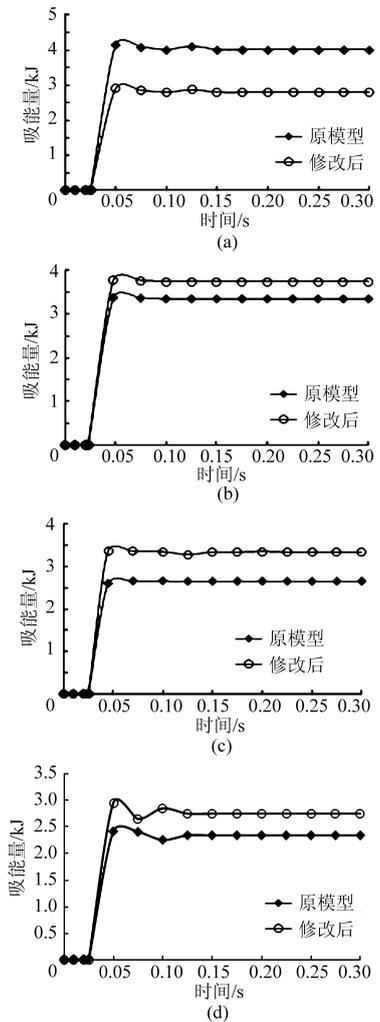


图 3 吸能量随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of power dissipation

(a) 地板纵梁 (b) 前围板纵梁 (c) 下前围板 (d) 发动机盖板

结合图 3 和表 3 可看出:

(1)地板纵梁厚度增加后该部件吸能量降低,驾驶室生存空间增加。考虑到该部件在实车中的结构位置,在碰撞过程中该部件作为碰撞冲击载荷的一个主要传递路径,厚度增加导致弯曲变形减小,使冲击载荷的传递更加顺畅,有利于其他部件的吸能。

(2)前围板纵梁厚度增加后,其吸能量以及驾驶室生存空间均增加。该部件吸能的增加减少了其附近部件的变形,特别是降低了地板的变形量,从而提高生存空间。

(3)下前围板厚度增加后,尽管吸能量增加,驾驶室生存空间却得到了削弱。究其原因,摆锤撞击的部位位于该部件的中间,可推测出该部件的变形

表3 厚度变化后驾驶室生存空间特征尺寸

Tab.3 Characteristic size of living space in driving cab after thickness changed

增加厚度对象		特征尺寸/mm		
		a	b	c
初始模型	初始值	313	386	236
	碰撞后	261	291	215
	变化值	52	95	21
地板纵梁	碰撞后	285	315	228
	变化值	28	71	8
前围板纵梁	碰撞后	278	304	221
	变化值	35	82	15
下前围板	碰撞后	259	285	208
	变化值	54	101	28
发动机盖板	碰撞后	280	308	222
	变化值	33	78	14

主要是以弯曲为主,弯曲变形过大直接导致地板的变形过大,从而影响生存空间,这也说明该部件不可分担过大的吸能量。

(4)发动机盖板厚度增加后,其吸能量以及驾驶室生存空间均增加。

综上所述,控制分配驾驶室各部件对碰撞能量的吸收比例,可优化驾驶室生存空间,从而改进驾驶室的耐撞性。为了增加驾驶室生存空间,并不是所有部件的吸能量越大越好,应结合各部件在实际结构中的安装位置以及碰撞过程中承受冲击载荷的情况,适当增加或减少各部件的吸能量,达到吸能量的合理分配,才能使各部件对提高驾驶室耐撞性具有更积极的贡献。

### 3.4 驾驶室耐撞性改进方案

通过上述驾驶室各部件的厚度变化、吸能量分配以及驾驶室生存空间的对比分析,确定该驾驶室耐撞性改进方案。尽管增加地板纵梁、前围板纵梁以及发动机盖板这3个部件的厚度尺寸均会提升驾驶室生存空间,但考虑到生产工艺、生产成本以及汽车轻量化的需求趋势<sup>[10-11]</sup>,对该款平头货车的耐撞性改进方案具体为:仅设计了加强件与发动机盖板进行焊接,以达到该部件碰撞吸能量的改变,如图4所示。

对改进后的驾驶室摆锤撞击仿真分析,按照ECE R29的要求,驾驶室安装在车架上,车架通过承受一定预载荷的固定链A、B、C连接,限制车架在纵向和横向方向的移动,固定链的强度、角度均以法规为准,同时通过木块D对车架进行阻碍,如图5所示。

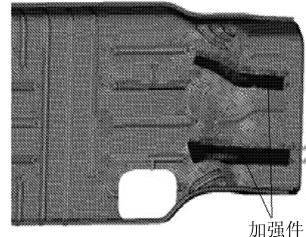


图4 加强件焊接示意图

Fig.4 Welding schematic diagram of reinforcement part

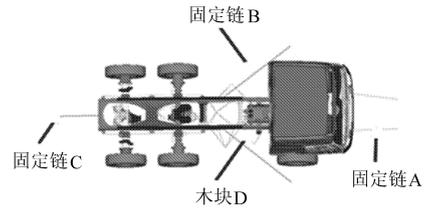


图5 约束条件

Fig.5 Boundary constraints

仿真分析改进后驾驶室摆锤碰撞后的生存空间特征尺寸如表4所示。

表4 改进后驾驶室生存空间特征尺寸

Tab.4 Characteristic size of living space in driving cab after improvement

工况	特征尺寸/mm		
	a	b	c
原模型	261	291	215
改进后	276	303	221
变化值	15	12	6

从表4可以看出,在发动机盖板上焊接加强件后,驾驶室生存空间的3个特征尺寸均得到提高,验证了改进方案的有效性。

## 4 摆锤碰撞实验

对改进后的驾驶室摆锤撞击实验。驾驶室安装在车架上,车架的固定方式与碰撞仿真分析时一致,均与ECE R29的要求一致,如图6所示。摆锤为钢制且质量均匀分布,由刚性固定在其上的两根梁自由悬吊,调整摆锤高度以确保摆锤撞击能量为45 kJ,



图6 车辆固定

Fig.6 Fixed truck

如图 7 所示。



图 7 摆锤

Fig. 7 Pendulum

经过摆锤撞击之后, 驾驶室的方向盘、仪表盘、前围板等部位均产生了变形, 如图 8 所示。驾驶室生存空间特征尺寸的测量值见表 5。



图 8 碰撞后的驾驶室

Fig. 8 Driving cab after collision

经过实验值与仿真值的对比, 两者吻合较好, 相

对误差在 10% 左右。由于在建立仿真模型时, 对相关零部件结构及边界条件等进行了简化, 同时实车制造过程中的成型、加工等工艺造成实车状态与数学模型存在一定的差别, 所以有一定误差。总体而言, 实验结果验证了有限元仿真结果的准确性, 证明通过控制驾驶室部件的吸能量, 可以达到提升驾驶室生存空间的目的, 从而改进驾驶室的耐撞性。

表 5 驾驶室生存空间测试结果

Tab. 5 Experiment results of living space in driving cab

项目	特征尺寸/mm		
	a	b	c
测试值	272	288	217
仿真值	276	303	221
误差/%	8.5	11.8	10.6

## 5 结论

(1) 理论分析、有限元仿真以及实验结果均显示, 合理改变驾驶室部件的碰撞吸能特性, 使碰撞能量在各部件的变形吸能过程中得以优化分配, 可有效改进驾驶室耐撞性。

(2) 为了提升驾驶室生存空间, 碰撞过程中驾驶室各部件的吸能量不是越大越好, 因各部件安装位置和受力情况不同, 有些需要增大吸能量, 有些需要减小吸能量, 才能有效提高驾驶室耐撞性。

(3) 改进方法提高驾驶室生存空间达 10% 以上, 实验也验证了改进效果, 该方法对提高驾驶室耐撞性具有实质效果。

## 参 考 文 献

- 朱秀娟, 谭庆亮. 重卡驾驶室结构优化顶盖静压仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(16): 4 071 ~ 4 074.  
Zhu Xiujuan, Tan Qingliang. Simulation study on cab roof hydrostatic of structural optimization heavy truck cab [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(16): 4 071 ~ 4 074. (in Chinese)
- 王晓峰, 王健. 轻型货车碰撞安全性改进设计[J]. 汽车技术, 2008(7): 31 ~ 34.  
Wang Xiaofeng, Wang Jian. The structure improvement of light-duty truck crash safety [J]. Automobile Technology, 2008(7): 31 ~ 34. (in Chinese)
- 曹立波, 宋晓琳, 钟志华. 平头货车的碰撞安全性及乘员伤害防护初探[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2001, 28(3): 79 ~ 81.  
Cao Libo, Song Xiaolin, Zhong Zhihua. A preliminary study on crash safety and occupant injury prevention for cab-over truck [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2001, 28(3): 79 ~ 81. (in Chinese)
- Julian N T, Castro I J, Bipoliand R R, et al. Computational simulation of the ECE R-29 safety test[C]. SAE Paper 2000-01-3524, 2000.
- 葛如海, 刘星荣, 朱茂桃, 等. 轻型汽车前部偏置碰撞吸收能量研究[J]. 江苏理工大学学报: 自然科学版, 2001, 22(3): 26 ~ 28.  
Ge Ruhai, Liu Xingrong, Zhu Maotao, et al. A preliminary study on energy distribution in automobile offset frontal impact [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2001, 22(3): 26 ~ 28. (in Chinese)

## 参 考 文 献

- 1 Piyabongkarn D, Rajamani R, Grogg J A, et al. Development and experimental evaluation of a slip angle estimator for vehicle stability control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009,17(1): 78 ~ 88.
- 2 Jo J S, You S H, Joeng J Y, et al. Vehicle stability control system for enhancing steerability, lateral stability, and roll stability[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008,9(5): 571 ~ 576.
- 3 Anwar S. Predictive yaw stability control of a brake-by-wire equipped vehicle via eddy current braking[C] // Proceedings of the American Control Conference, 2007: 2 308 ~ 2 313.
- 4 王德平,侯国政,高树林. 汽车操纵稳定性的中间位置转向试验[J]. 汽车技术,2003(11):21 ~ 23.  
Wang Deping, Hou Guozheng, Gao Shulin. Central steering test of vehicle handling and stability [J]. Automobile Technology, 2003(11):21 ~ 23. (in Chinese)
- 5 王乐,赵又群,虞明. 基于 GPS 的汽车操纵稳定性试验[J]. 农业机械学报,2007,38(12):199 ~ 200.
- 6 张小龙,李亮,李红志,等. 汽车稳定性控制系统侧偏角道路试验测试系统[J]. 农业机械学报,2010,41(10):1 ~ 5.  
Zhang Xiaolong, Li Liang, Li Hongzhi, et al. Sideslip angle roadway test system for vehicle stability control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(10):1 ~ 5. (in Chinese)
- 7 张小龙,李亮,宋健,等. 汽车稳定性控制系统性能试验与数据处理方法[J]. 农业机械学报,2011,42(5):1 ~ 7.  
Zhang Xiaolong, Li Liang, Song Jian, et al. Performance test and data processing method for vehicle electronic stability control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(5):1 ~ 7. (in Chinese)
- 8 喻凡,林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005:235 ~ 248.
- 9 《汽车工程手册》编辑委员会. 汽车工程手册:基础篇[M]. 北京:人民交通出版社,2001:258 ~ 274.
- 10 郭孔辉,丁海涛. 轮胎附着极限下差动制动对汽车横摆力矩的影响[J]. 汽车工程,2002, 24(2):101 ~ 104.  
Guo Konghui, Ding Haitao. The effect of yaw moment through differential braking under tire adhesion limit[J]. Automotive Engineering, 2002, 24(2):101 ~ 104. (in Chinese)
- 11 郭孔辉,付皓,胡进,等. 车辆电子稳定性控制试验与评价方法的仿真应用[J]. 汽车技术,2008(10):1 ~ 15.  
Guo Konghui, Fu Hao, Hu Jin, et al. Simulation application of test and evaluation methods on electronic stability control [J]. Automobile Technology, 2008(10):1 ~ 15. (in Chinese)
- 12 郭天太. 基于虚拟现实的汽车操纵稳定性试验技术[J]. 机械工程师,2003(8):31 ~ 33.  
Guo Tiantai. VR-based vehicle handling and stability experiment technology[J]. Mechanical Engineer, 2003(8):31 ~ 33. (in Chinese)

(上接第 23 页)

- 6 Paul M A Slaats, Peter de Co. Safety restraint systems in heavy truck rollover scenarios[C]. SAE Paper 2003-01-3424, 2003.
- 7 Cheng Z Q, Thacker J G, Pilkey W D, et al. Experiences in reverse-engineering of a finite element automobile crash model [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001,37(11): 843 ~ 860.
- 8 谢庆喜,赵幼平,郭友利,等. 重型货车驾驶室顶压强度研究[J]. 汽车工程, 2009, 31(12): 1 181 ~ 1 184.  
Xie Qingxi, Zhao Youping, Guo Youli, et al. A study on the roof crush strength of a heavy truck cab [J]. Automotvie Engineering, 2009, 31(12): 1 181 ~ 1 184. (in Chinese)
- 9 赵幼平,刘道勇,郭友利,等. 卡车正面固定障碍壁碰撞的计算机仿真分析[J]. 汽车科技, 2007(4): 49 ~ 52.  
Zhao Youping, Liu Daoyong, Guo Youli, et al. Computer simulation of normal crash of truck [J]. Automobile Science & Technology, 2007(4): 49 ~ 52. (in Chinese)
- 10 叶爱凤,徐彪. 东风商用车轻量化开发[J]. 汽车工艺与材料, 2010(2): 7 ~ 11.  
Ye Aifeng, Xu Biao. Lightweight development of Dongfeng [J]. Automobile Technology & Material, 2010(2): 7 ~ 11. (in Chinese)
- 11 赵韩,钱德猛. 基于 ANSYS 的汽车结构轻量化设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 12 ~ 15.  
Zhao Han, Qian Demeng. Research on lightweight design of automobile structure based on ANSYS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 12 ~ 15. (in Chinese)