

The Simulation and Analysis on Electric Vehicle'S Front Impact

CUI Shujuan¹·CHEN Keming¹·CAO youqiang²·DONG hongliang²

(1. Vehicle Safety Technology and Research Center, China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd, Chongqing 400039, China

2. NVH Research Center China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd, Chongqing 400039, China)

Abstract: The purpose of this article is to study an electric vehicle crash performance by using finite element vehicle model which is modified from traditional fuel vehicle. It was found that the modified vehicle model has worse vehicle acceleration and more firewall intrusions than those of an original fuel vehicle. The integrity of cells may not be maintained for the modified electrical vehicle. Then the optimal design scheme is reached by three rounds' optimization and design. Crash safety of the electric car can be improved significantly by adding structure between the bumper and battery and applying hot forming material to bumper frame instead of ordinary steel. By calculating, these optimizations can strengthen the crashworthiness of the vehicle effectively.

Key words: electric vehicle; crash worthiness; buffer

某电动车正面耐撞性优化分析

崔淑娟¹, 陈可明¹, 曹友强², 董红亮²

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司 汽车安全技术研究中心, 重庆 400039, 中国

2. 中国汽车工程研究院股份有限公司 NVH 技术研究中心 重庆 400039, 中国)

摘要: 本文研究的是基于传统燃油车改装的一款纯电动汽车, 需要其正碰性能满足国标法规。采用有限元分析研究方法研究得知, 改装后的基础电动车在正面碰撞过程中, B 柱加速度和防火墙侵入量过大, 电池的完整性差。从结构和材料两方面出发, 经过三轮优化, 最终确定优化设计, 即在前防撞梁和前置电池之间增设缓冲吸能装置, 最大程度地降低了 B 柱加速度和防火墙的侵入量, 从而提高了该电动汽车的碰撞安全性。

关键字: 电动汽车; 碰撞安全性; 缓冲吸能

1 概述

为了应对能源短缺、环境污染等问题, 从节能环保角度出发, 对电动汽车的研究和应用越来越广泛和迫切。作为面向大众的消费品, 其安全性是汽车制造商必须要面对的现实问题^[1]。通常来说电动汽车的质量比传统燃油车大很多, 并且储能电池等大质量块的质量要占到整车质量的 20% 以上, 这些大质量块通常都是刚性不易变形体, 在碰撞发生时, 对乘员的伤害很大。除此以外, 电池前置的电动汽车在正碰中, 电池很容易受到直接撞击、挤压, 从而产生严重变形, 导致电池壳体破裂、电池漏液甚至爆炸等问题^[2]。因此, 在研发电动汽车时, 碰撞安全分析是非常重要的。

本文研究的电动汽车是基于传统燃油车改装的，由于加装电池组使得车辆自身重量增加，在碰撞中的能量增加，所以改装成电动汽车后其碰撞安全性需要验证^[3]。本文所分析的改进后的纯电动汽车正碰性能应满足国标《GB11551-2003 乘用车正面碰撞的乘员保护》相关要求。

2 有限元模型

2.1 基础车有限元模型有效性验证

基于等效性原则，首先对原燃油基础车的有限元模型进行 50km/h 工况下正面刚性壁障碰撞仿真分析，将仿真碰撞结果与 sssss 实车正面刚性碰撞试验结果进行对比，以验证本文模型的有效性。使用 Hypermesh 软件进行前处理，LS-DYNA 软件进行求解分析。

从整车变形来看，翼子板和发动机罩变形模式和程度接近，左侧 A 柱车门均无明显变形。对于关键吸能零部件变形对比，以左前纵梁为例，前纵梁前端均充分压溃，中段折弯部位一致，变形模式相同，如图 1 所示。另外，从图 2 的左侧 B 柱加速度值对比来看，二者趋势一致，峰值误差在一定范围内，所以认为该有限元模型真实有效，可以用于后续分析。

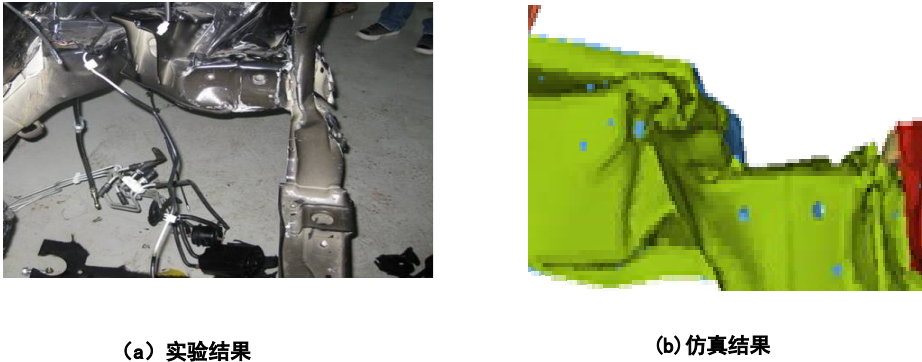


图 1 正面碰撞整车前纵梁变形

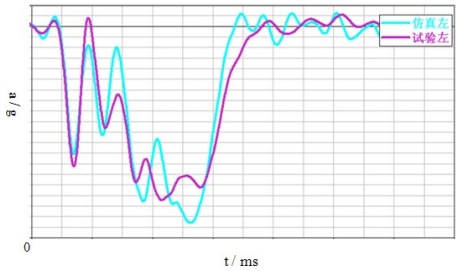
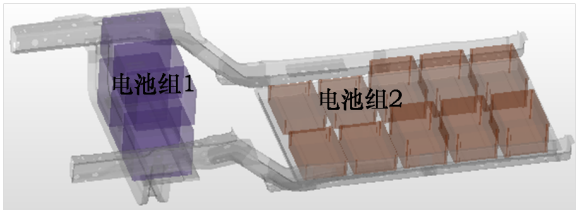


图 2 正面碰撞左侧 B 柱加速度试验仿真对比

2.2 电动汽车有限元模型建立

本文搭建了一款以轮毂电机为驱动系统的底盘平台，通过控制驱动电机的转速来控制车速，采用独立整体框架结构方式固定电池组。为充分利用车辆空间，改装后的电动汽车的动力电池分为前后两箱，分别安置在原发动机位置和车身底板下方（行李舱的位置），如图 3 所示。新增的电池在前舱占据了大量的可变形吸能空间。

模型总质量共计 1380kg，包括车辆整备质量、两个前排 50 百分位假人及燃油质量。模型以 50km/h 的速度正面碰撞刚性墙。模型中点焊采用 Beam 单元，缝焊、CO₂保护焊、铆接、螺栓连接以及铰接采用刚性连接，不考虑失效。模型中重力场的施加采用*loadbody 关键字^[4]。



汽车碰撞过程表征了一个能量守恒、动量交换的瞬态过程，只有小部分动能以热能等其他能量形式耗散掉，因而碰撞过程中的总能量是基本保持不变的，大致应等于总内能和总动能之和。沙漏能、滑移能、质量增加均在 5% 以内^[5]。如图 4 所示，该仿真模型能量变化均在有效范围之内

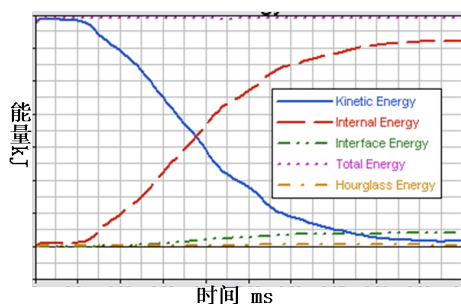


图 4 能量曲线

2.3 电动汽车仿真分析结果

电动汽车的电池组安装位置较原车发动机沿轴向靠后，与防火墙之间的距离减小，如图 5 所示。在发生碰撞后，由于电池包安装支架较弱，与前纵梁和前围板的连接都不稳定，造成电池包后端安装支架与防火墙直接接触，而电池包整体受压，向后推动防火墙，引起接触部位发生较大变形。电动车的防火墙仿真最大侵入量相较于原车有所增加，防火墙挤压变形产生褶皱，防火墙的变形将直接影响乘员舱生存空间。

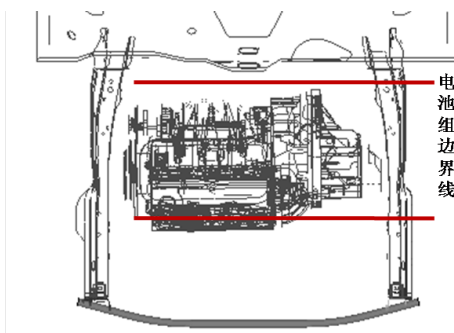


图 5 电池组在前机舱位置示意图

前纵梁变形严重，前端呈现压溃的变形模式，后端纵梁发生弯折变形，左右前纵梁变形形式基本一致，如图 6 所示。

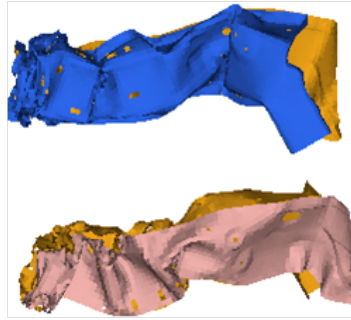


图 6 电动车前纵梁变形图

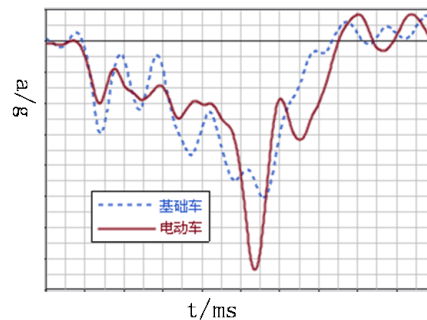


图 7 基础车与电动车左侧 B 柱加速度曲线

B 柱加速度是整车碰撞试验过程中的一个重要测试参数，它对假人头部的损伤值(HPC)

具有非常重要的参考作用，是车辆耐碰撞性能的一个重要参数。纯电动车左右两侧 B 柱加速度最大值明显增大，峰值出现时刻大致和基础车相同，而且左右侧基本同时出现峰值，较原车偏大了很多，对乘员造成的伤害极大。针对加速度峰值偏大，而波形前段加速度整体偏小，表明车身前段结构吸能不足，加强车身前段结构吸能能力是下一步优化方案重点考虑的内容，降低加速度峰值是目标优化重点。

3 电动汽车设计优化仿真

3.1 设计优化方案

当电动车辆发生正面碰撞时，为保护车内乘员及电池组的安全，根据汽车碰撞损伤机理可知碰撞车辆应满足以下条件：

- 1) 要保证乘员足够的生存空间，即乘员舱不应发生过大的碰撞变形（包括电机、变速器等刚性部件不得侵入驾驶室）。
- 2) 除乘员舱以外的车体结构部分应尽可能多的变形，以尽可能的吸收撞击能量，使得作用于乘员身体上的力和加速度值不超过人体的耐受极限。
- 3) 电动汽车质量与同类型的燃油汽车相比一般要大，这就决定了在同样的碰撞速度下，电动汽车的吸能装置需要吸收更多的动能，从而对电动汽车的吸能装置和部件提出了更高的要求。

传统车正面碰撞的传力路径分为上中下 3 层，防撞梁、吸能盒、前纵梁、发动机舱上边梁(shotgun)、副车架为主要吸能部件。并依次向后将力分散传递至 A 柱、车门防撞梁、门槛梁，如图 8 所示。在正面碰撞中，这些部件基本可以吸收 50%的能量。

碰撞过程中，将各部分吸能区域进行划分：

$$E_0 = \frac{1}{2}mv_0^2 = E_1 + E_2 + E_3,$$

$$E_i = \frac{1}{2}K_i\Delta D_i^2,$$

其中：\$E_0\$为初始动能；\$E_1\$、\$E_2\$、\$E_3\$分别为前部结构、乘员舱和可变形壁障的变形量；\$m\$为汽车质量；\$v_0\$为初始速度；\$\Delta D_i\$ (\$i=1, 2, 3\$)分别为前部吸能部件平均挤压变形，乘员舱平均挤压变形，可变形壁障挤压变形；\$K_i\$ (\$i=1, 2, 3\$)分别为3者等效纵向刚度^[6]。

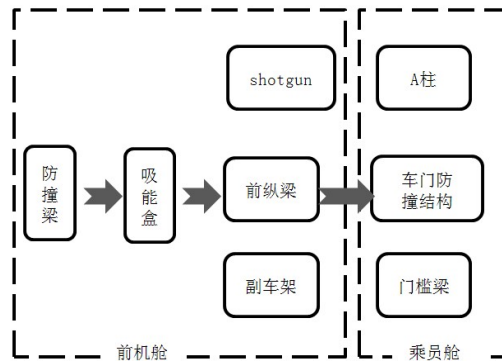


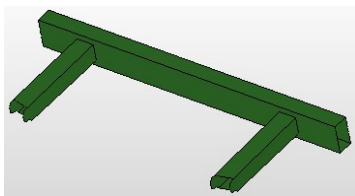
图8 传统正面碰撞传力途径

从本文研究车体自身结构出发，并结合工程实际，通过分析可知防撞梁吸收能量较少，防撞梁和纵梁之间空间紧凑，没有安装吸能盒，对于在燃油车基础上改装的电动车对其内部空间结构的调整受限较多，而对于关键吸能零件前纵梁不能做结构改动，只能考虑在其内部增加加强件，然而，通过前期仿真验证，其对碰撞吸能效果改进不佳。所以从以下三个方向做具体修改。

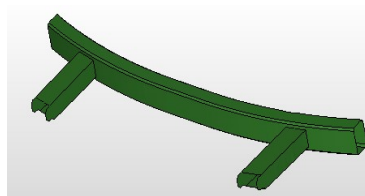
- 原车前防撞梁结构单薄，仅有上下两根圆管承担受力，其对纵向受力吸能效果不佳，修改前防撞梁结构，截面采用常见的口字形结构，并提高其材料的屈服强度。
- 在修改后前防撞梁结构和前纵梁之间安装吸能盒。
- 前机舱结构紧凑，通过替换原燃油车水箱散热器部分结构，在前防撞梁和电池组之间预留一部分空间以增加吸能通道（安装时需合理避让已有零件）。增加的吸能管在压溃变形过程中吸收的能量可以通过载荷-位移历程曲线的积分得到：

$$E = \int_{S_i}^{S_b} FdS = F_{mean}(S_b - S_i) = F_{mean}\Delta l$$

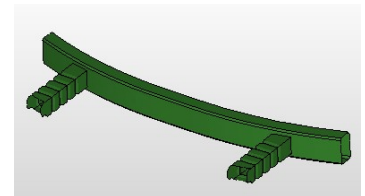
式中：\$S_b\$、\$S_i\$分别为吸能管的最终破坏点和起始破坏点；\$F_{mean}\$为平均载荷；\$\Delta l\$为有效压缩长度^[7]。



方案1



方案2



方案3

图9 吸能结构设计优化过程

优化方案的参数对比见表1

表 1 吸能结构材料参数优化过程

		方案 1	方案 2	方案 3
吸能管	厚度	1.6mm	1mm	0.7mm
	材料屈服	198MPa	198 MPa	129MPa
	强度			
横梁	厚度	1.6mm	1.6mm	1.6mm
	材料屈服	198 MPa	534 MPa	534 MPa
	强度			

如图 9 所示，进行了 3 轮优化。方案 1 的结构设计致使其在吸能纵向容易失稳，因此方案 2 在方案 1 的基础上将横梁改成曲面，并修改材料屈服，改变吸能管厚度，这样首先保证了横梁结构变形的稳定性，其次保证了整个吸能部件在碰撞过程中的承载力和变形次序。然而，方案 2 的结构设计中吸能管在碰撞前期发生折弯，并没有起到充分吸能的作用，因此方案 3 进一步在方案 2 的基础上在吸能管上沿碰撞方向加压溃槽，起到了很好的导向作用，并修改其材料及厚度。

3.2 仿真优化结果

通过三轮优化仿真分析，确定方案 3 为最终优化方案。该方案的主要吸能部件吸能比例之和比原电动车主要吸能部件吸能之和增加约 8.5%。增加的吸能部件有效且安全的吸收了更多的能量，如图 10 所示。

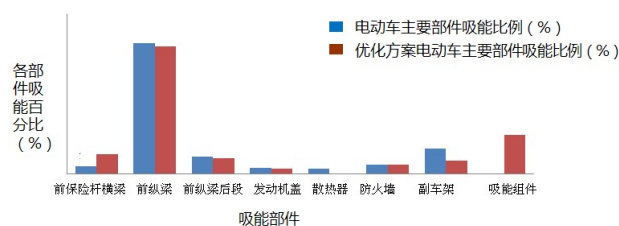


图 10 优化方案与原电动车吸收能量对比

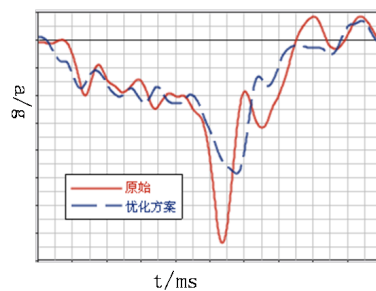


图 11 优化方案 B 柱加速度曲线

从图 11 可看出，设计优化重点目标左侧 B 柱加速度值相较于原电动车明显降低，对应乘员头部的损伤得到保护。前纵梁及吸能部件变形模式良好，充分压溃，电池组整体在碰撞纵向受到挤压，但变形量小于原电动车，车体的防火墙侵入量及 A 柱、转向管柱、踏板变形均在目标设定范围内，满足国标要求。

4 结论

本文首先根据试验结果和仿真结果的对比情况验证了仿真模型的有效性。其次分析了改装后的电动车的正面耐撞性,相比于基础燃油车,B柱加速度,防火墙侵入量均明显增大,并且安装在前机舱的电池组发生严重挤压。根据车型结构特点,规划载荷路径分配,从结构和材料两方面出发,经过三轮优化设计,得出最优的设计方案:在防撞梁和电池之间增设吸能结构,并修改前防撞梁结构,使用热成型高强度钢材料,最大程度地降低了电池自身的加速度和防火墙的侵入量,纵梁的变形模式稳定,电池变形很小^[8]。仿真计算结果表明,该方案提高了该电动汽车的碰撞安全性。

参考文献

- [1] Brown S.Pyke D.Steenhof P.*Electric vehicle:the role and importance of standards in an emerging market*[J]. Energy Policy,2010,38:3797-3806.
- [2] WANG Dazhi, YU Chengxiang. Frontal crashworthiness structure design of mini electric passenger cars [J]. *JAutomotive Safety and Energy*, 2010, **1**(1): 49-52. (in Chinese)
王大志, 于成祥. 微型电动汽车正面碰撞结构耐撞性设计[J]. 汽车安全与节能学报, 2010, **1**(1): 49-52.
- [3] WANG Kai, LI Xiangrong, BAI Peng, Electrical safety of electrical vehicles in crash tests [J]. *J Automotive Safety and Energy*, 2012, **3**(1): 34-37. (in Chinese)
王凯, 李向荣, 白鹏. 电动汽车在碰撞试验中的电气安全[J]. 汽车安全与节能学报, 2012, **3**(1): 34-37.
- [4] HU Yuanzhi, ZENG Biqiang, XIE Shugang. *Based on LS-DYNA and HyperWorks simulation and analysis of automotive safety* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)
胡远志, 曾必强, 谢书港. 基于LS-DYNA和HyperWorks的汽车安全仿真与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [5] JIANG Zhaojuan. *The research on several key technologies of electric vehicles crash safety*[D].Dalian university of technology, 2012.5 (in Chinese)
姜兆娟. 电动汽车碰撞安全性若干关键技术研究[D]. 硕士学位论文: 大连理工大学, 2012. 5
- [6] CUI Shujuan, CHEN Keming. *Simulation and structure optimal analysis for small-overlap frontal-impact of a vehicle* [J]. *J Automotive Safety and Energy*, 2014, **5**(2): 139-144. (in Chinese)
崔淑娟, 陈可明. 某车型小重叠碰撞仿真及车体结构优化[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, **5**(2): 139-144
- [7] JIAN Xiaochun, WANG Xiao.*Simulation of crashworthiness during front impact and offset impact and vehicle body structure improvement* [J]. *J Automotive Safety and Energy*, 2011, **2**(3): 212-216. (in Chinese)
简晓春, 王笑. 正面和偏置碰撞的耐撞性仿真与车身结构改进[J]. 汽车安全与节能学报, 2011, **2**(3): 212-216.
- [8] HOU Yongkang. *Research in simulation of electric vehicle's front collision based on ls-dyna*[D].Hefei universityof technology, 2012.5 (in Chinese)
侯永康. 基于LS-DYNA的电动汽车正面碰撞仿真研究[D]. 硕士学位论文: 合肥工业大学, 2012. 4