

文章编号:1671-8879(2014)06-0162-06

HEV 侧面碰撞安全性仿真和试验

周斯加¹, 符兴锋², 刘海洋¹, 王艳军¹, 龙江启¹

(1. 温州大学 机电工程学院, 浙江 温州 325035; 2. 广州汽车集团股份有限公司 汽车工程研究院, 广东 广州 510640)

摘要:针对混合动力电动汽车(HEV)的结构和特点,建立了车辆侧面碰撞有限元仿真模型,并对其侧面碰撞安全性进行了相关研究。以仿真分析结果为参考基础,以提高整车侧面碰撞安全性为优化目标,运用径向基函数神经网络技术建立了某款混合动力电动汽车的优化计算函数,对车辆侧面碰撞安全性能相关的结构参数和乘员约束系统进行优化计算和影响性分析;以优化计算的结果为指导,对该款混合动力电动汽车的安全结构设计方案进行了调整和优化,以全面提高侧面碰撞的被动安全性;将优化设计后的混合动力电动汽车进行实车侧面碰撞试验,并将实车碰撞试验结果与仿真侧面碰撞试验计算结果进行对比分析。研究表明:建立的混合动力电动汽车的仿真优化模型具有较高的计算精度,如非碰撞侧 B 柱实测碰撞加速度值与仿真分析值相差仅 2.2%,优化计算函数的仿真计算结果是可靠的,优化设计后的混合动力电动汽车侧面碰撞安全性明显提高。

关键词:汽车工程;混合动力电动汽车;侧面碰撞;碰撞试验;被动安全性

中图分类号:U461.91

文献标志码:A

Simulation and experiment on side crash safety of HEV

ZHOU Si-jia¹, FU Xing-feng², LIU Hai-yang¹, WANG Yan-jun¹, LONG Jiang-qi¹

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China;

2. Automotive Engineering Institute, Guangzhou Automobile Group Co Ltd, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: According to the structure and characteristics of the hybrid electric vehicle, one finite element model of HEV side collision safety protection has been constructed and analyzed. Based on the analysis results and the aim of improving the vehicle side collision safety, a RBF neural network technology was applied to establish an optimization calculation function to calculate the structure parameters related to the vehicle safety and optimize the occupant restraint system. Taking the results of calculation as a guide, this paper adjusted and optimized the design of HEV safety structure to improve the side impact passive safety. Finally, a real vehicle crash test was carried out and a comparison between the optimal simulative calculation results and the real vehicle crash test results of a hybrid electric vehicle side impact was made. The results show that established HEV simulation optimized model has high accuracy. For instance, the difference between the acceleration value of the non crash contact B pillar and simulation value is only 2.2%. Not only does

收稿日期:2014-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51202164);浙江省自然科学基金项目(LQ13E070003)

作者简介:周斯加(1981-),男,湖北云梦人,讲师,工学博士,E-mail:16122513@qq.com.

the comparison prove the accuracy of the simulation results, but also improve the hybrid electric vehicle side impact safety obviously. 2 tabs, 6 figs, 11 refs.

Key words: automobile engineering; HEV; side crash; crash test; passive safety

0 引言

汽车碰撞是汽车被动安全性研究的重要内容之一,也是世界汽车工业长期面临的一个重大难题。通过汽车碰撞模拟分析和试验可以提高汽车的被动安全性^[1]。据统计,中国各类碰撞事故总数的 30% 左右是侧面碰撞事故,在造成死亡等重大事故中,侧碰事故约占 35%,其致伤率居第 1 位,致死率仅次于正碰事故^[2-3]。因此研究汽车的侧面碰撞引起的被动安全问题是必要的。

近几年来,在汽车侧面碰撞的仿真研究方面,中国科研机构开展了较多的研究。2005 年,李发宗利用 Virtual Proving Ground 虚拟试验场软件对某轿车进行侧面碰撞虚拟试验,并与实车碰撞试验结果比较,得出虚拟试验结果与实车试验结果基本一致^[4];2008 年,施少波应用非线性有限元软件 ADINA 对某承载式客车进行了侧面碰撞模拟分析,通过改变客车骨架地板横梁和座椅下横梁的横截面厚度,在一定程度上增强了客车的侧面抗撞能力^[5]。

HEV 车辆是目前市场化程度最高的新能源汽车,也是未来汽车发展的重要方向之一,因此研究 HEV 的侧面碰撞安全性是非常有意义的。然而随着新能源汽车的快速发展,新能源汽车的安全性研究越来越引起人们的关注。但是由于新能源汽车的结构有别于传统汽车,新能源汽车的被动安全性也明显地有别于传统汽车。为此,本文在传统燃油车辆侧面碰撞仿真研究理论的基础上,针对中国某款新能源汽车的结构特点,以得到较好的中国新车评价规程(C-NCAP)为目标,运用有限元仿真技术,研究该车型的侧面碰撞被动安全性能,并优化其结构设计。最后以仿真分析研究和实车侧面碰撞试验研究相结合,来分析 HEV 车辆侧面碰撞的结构安全性问题。

1 HEV 的基本结构

本文研究的对象是由某款原型车基础上改造而成的混合动力电动汽车(HEV)。主要的结构变化是在发动机和离合器之间增加了前电机,而将前电机控制器和 DC/DC 都放置在行李舱位置,高压动力电池箱布置在后排座椅和后备胎之间的位置,并

保留了原型车约 40% 的行李箱空间。HEV 结构如图 1 所示。

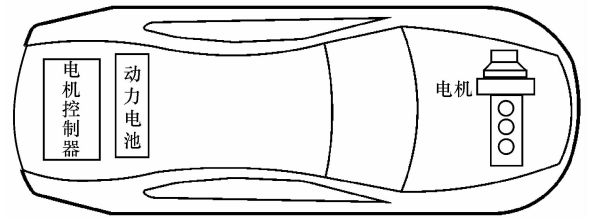


图 1 某款混合动力电动汽车基本结构

Fig. 1 Basic structure of HEV

相比原型车,该 HEV 新增加电机控制器、DC/DC 和高压动力电池并都布置在行李舱里面。此外,考虑到散热的要求,行李舱里面增加了相应的冷却风道和水管,整车质量和后轴载荷都有明显增加,整车侧面布置有高压线束等元器件,这些新增高压元器件使得 HEV 的侧面碰撞安全性存在一定的新增安全风险,因此对该 HEV 的侧面碰撞被动安全性能进行研究是非常必要的。

2 HEV 侧面碰撞安全性要求及仿真建模分析

2.1 HEV 侧面碰撞安全性要求

C-NCAP 评价体系是评价汽车安全技术水平和给消费者提供汽车产品安全性能准确详细信息的重要指标。通过汽车乘员约束系统的研究来努力降低 C-NCAP 的得分值,是目前汽车碰撞被动安全性研究的重要内容之一。在中国标准侧面碰撞试验中,被撞车体受到的最大侧向碰撞力约为 150 kN。侧碰结构设计的大原则是:在发生侧面碰撞时尽量减少两侧 B 柱间的相对速度。一般来说较好的结构可以使得两侧相对速度低于 6 m/s,差的设计结构可能使得两侧相对速度高于 10 m/s。

此外,在汽车设计阶段就需要根据汽车的碰撞特点,对于汽车的乘员约束系统的各个设计参数进行优化配置,使得匹配的汽车乘员约束系统能够为汽车内部的驾乘人员提供最优的保护;反之,如果汽车乘员约束系统参数设计不当,则有可能在汽车的碰撞过程中,增加驾乘人员的受伤风险。汽车乘员约束系统的各个设计参数之间存在着相互制约的关系,而且参数的设置对于汽车乘员约束系统对驾乘

人员的保护效果呈现明显的非线性变化关系,因此需要选用一种新的设计方法来对汽车的乘员约束系统设计进行全局最优的匹配设计,缩短设计计算时间,提高设计效率,对于提高汽车在碰撞情况下驾乘人员的安全防护性能是非常重要的。

本文按照 C-NCAP 可变形移动屏障侧面碰撞测试的建模要求,利用原型车的车架模型建立车辆侧碰有限元模型,分析在不变更原基本结构的条件下,加载新设计的 HEV 新增负荷,以考查其能否通过法规测试并取得较好的侧碰评价分数。将整车车架模型处理后导入有限元软件,利用 LS-DYNA 作为求解器进行计算。

2.2 侧面碰撞下 HEV 门槛变形量仿真分析

按照 C-NCAP 可变形移动壁障侧碰试验要求,将试验车辆上通过碰撞侧的前排座椅乘坐基准点的横断垂面与壁障的纵向中垂面对准,碰撞速度设置为 50 km/h,将构建好的侧面碰撞有限元模型,提交 LS-DYNA 求解器计算。

由仿真计算结果可知,HEV 整车侧面碰撞结果的变化趋势和原型车类似,门槛没有发生大的变形,但是左前门的内板和 B 柱的上端均发生了较为明显弯折变形,可能会影响到左前门的开启,见图 2(a)中的圆圈所示位置。

由图 2(b)所示,B 柱下部的最大侵入量增加较多,相比原型车增大了约 30 mm,上部最大侵入量相比原型车增加了约 16 mm。B 柱的最大变形量发生在 B 柱中间位置(图 2(b)圆圈),B 柱上部的变形量最小。B 柱变形量的增加有可能使得假人的伤害值增加,影响到 C-NCAP 的得分。

从综合仿真计算的结果来看,HEV 侧面碰撞试验应该可以满足中国侧面碰撞法规的要求,但是假人的伤害值并不是全部在高性能值以下,如果要取得较好的 C-NCAP 评价分数,还需要对 HEV 整车结构作针对性的优化设计。

2.3 RBF 神经网络优化 HEV 侧面碰撞结构设计

径向基函数(RBF)神经网络控制方法是一种 3 层前向网络,输入到输出的映射是非线性的,而隐层空间到输出空间的映射是线性的。RBF 网络是局部逼近的神经网络,可以避免局部极小问题,可以有效地减少、控制目标函数响应的波动,进而快速地计算得到目标函数优化计算的结果,非常适合设计目标函数的优化设计计算要求。

RBF 网络逼近的性能指标函数为



(a) B柱上部变形



(b) B柱中部变形

图 2 HEV 侧面碰撞 B 柱变形结果

Fig. 2 Aberration of HEV B upper and middle segment

$$E(k)=\frac{1}{2}[y(k)-y_m(k)]^2 \tag{1}$$

式中: $E(k)$ 为性能指标函数; $y_m(k)=w_1h_1+w_2h_2+\cdots+w_mh_m$,为网络输出量变量。

根据梯度下降法,输出权、节点基宽参数及节点中心矢量的迭代算法为

$$\begin{aligned}w_j(k)&=w_j(k-1)+\eta[y(k)-y_m(k)]h_j+\\&a[w_j(k-1)-w_j(k-2)]\end{aligned} \tag{2}$$

式中:网络权向量为 $\mathbf{W}=[w_1,w_2,\cdots,w_m]^T$; $\mathbf{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_n]^T$ 为网络输入向量;径向基向量 $\mathbf{H}=[h_1,h_2,\cdots,h_n]^T$; h_j 为高斯基函数, $h_j=e^{-\frac{|\mathbf{x}-\mathbf{c}_j|^2}{2b_j^2}}$ ($j=1,2,\cdots,m$);网络第 j 个节点的中心向量 $\mathbf{C}_j=[c_{j1},c_{j2},\cdots,c_{jn}]^T$ ($j=1,2,\cdots,n$);网络的基宽向量 $\mathbf{B}=[b_1,b_2,\cdots,b_m]^T$; b_j 为节点 j 大于 0 的基宽参数; η 为学习速率; a 为动量因子。

对象输出对输入的敏感度为

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}\approx\sum_jw_j\frac{\partial h_j}{\partial u(k)}=\sum_jw_jh_j\frac{c(1,j)-x_1}{b_j^2} \tag{3}$$

式中: $u(k)$ 为 RBF 网络的第 1 个输入量,即 $x_1=u(k)$ 。

RBF 神经网络权值调整过程为

$$\begin{aligned}W(k)&=W(k-1)+\Delta W(k)+\\&a[W(k-1)-W(k-2)]\end{aligned} \tag{4}$$

式中: $W(k)$ 为进行迭代计算的神经网络权值。

汽车侧面碰撞对于假人伤害影响最大的因素为车门的最大侵入量和最大侵入速度。参考该 HEV

原型车的侧面碰撞试验结果,将原型车车门最大侵入量和最大侵入速度所在位置的侵入量和侵入速度作为 HEV 侧面碰撞安全性能车身评价标准。侵入量与侵入速度值越小,则 HEV 侧面碰撞安全性越高。

参考该 HEV 原型车的侧面碰撞试验结果,对于汽车侧碰的关键位置零部件进行针对性加强,增大车身的侧向刚度,从而改善侧碰安全性。选取 HEV 原型车 5 个对于增加侧向刚度有较大影响的零件作为 RBF 神经网络优化设计对象,构建优化目标函数。优化目标函数为

$$F(x)=k_1F_1(d_i)+k_2F_2(v_j)$$

(5)

式中: F_1 为与碰撞位移相关的影响函数; F_2 为与碰撞侵入速度相关的影响函数; d_i 为车门最大侵入量, $d_i\leqslant0.2\text{ m}$, $i=1,\cdots,n$; v_j 为车门最大侵入速度, $v_j\leqslant8\text{ m/s}$, $j=1,\cdots,n$, n 取 7; k_1 、 k_2 为影响调整系数。

在进行 HEV 乘员约束系统的优化时,为了评价约束系统的整体性能,引入 1 个评价函数。可以采用加权伤害准则 (weighted injury criterion, WIC)来全面评价乘员约束系统的保护性能。

定义的约束系统评价函数为

$$F=0.6H_{\text{HIC}_{36}}/1\,000+0.35C_{\text{comp}}/75+0.05(F_{\text{left}}+F_{\text{right}})/20$$

(6)

式中: $H_{\text{HIC}_{36}}$ 是头部伤害指标; C_{comp} 是胸部压缩量 (mm); F_{left} 为左大腿骨最大轴向力 (kN); F_{right} 为右大腿骨最大轴向力 (kN)。

首先通过原型车的侧面碰撞试验获得足够的样本点,然后基于这些样本点获得数学模型和拟合曲线,最后通过 RBF 神经网络优化算法计算得到优化目标值。

3 侧面碰撞仿真及优化结构改进

根据 RBF 神经网络优化计算的结果,将车身体板的横梁结构材料加以强化,B 柱加强板焊接部位强化,后地板前横梁加厚至 3 mm,可以明显地减少车门位置的侵入量,图 3、图 4 为 HEV 侧面碰撞变形结果。

从图 3 和图 4 的分析计算结果可以知道,优化设计后的 HEV 车身结构侧面碰撞结果与原型车相比非常接近,假人的骨盆碰撞力最大值波形曲线、腹部力曲线、上中下 3 个位置的肋骨变形量最大值波形和头部加速度最大值与最小值时刻波形非常接近,最大最小值在 60 ms 后有部分增大,但是离假人

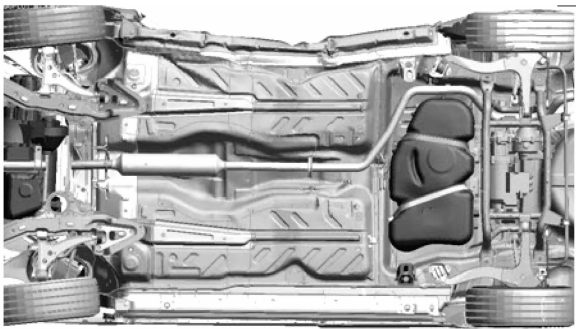


图 3 HEV 侧面碰撞门槛变形结果
Fig. 3 Side crash aberration of HEV door and bodywork segment



图 4 HEV 侧面碰撞侧面变形结果
Fig. 4 Side crash aberration of HEV bodywork

伤害值低性能指标还有较大的距离,因此对于假人的伤害值应该不会有太大的影响,优化改进结构设计后的 HEV 仍然具有良好的侧面碰撞安全性能。

由表 1 中的仿真计算结果可知,主要的乘员伤害指标,大部分都偏离了高性能值的要求,这样即使能够通过侧面碰撞试验要求,C-NCAP 的得分也不会很高,因此需要进行针对性的优化设计,以提高 C-NCAP 的得分。

对于侧面碰撞仿真试验中车身零部件溃缩量较大的部位,选用高强度钢或者采用更改结构设计的方式,增强该部位的屈服强度和抗扭刚度,以减小侧面碰撞B柱的变形侵入量,以此来提高HEV车身

表 1 主要损伤指标仿真结果和性能要求值对比

Tab. 1 Calculation and target requirement of main injury criterion		
损伤指标	仿真计算结果	高性能值要求
驾驶人侧头部 H_{HIC}	676.1	$\leqslant 600$
驾驶人侧颈部伸张弯矩/(N·m)	57	$\leqslant 42$
驾驶人侧胸部加速度/ g	44	$\leqslant 38$
驾驶人侧胸部压缩量/mm	22.5	$\leqslant 22$
左大腿力/kN	1.3	$\leqslant 3.8$
右大腿力/kN	1.4	$\leqslant 3.8$

结构方面的侧面碰撞安全性。

通过 RBF 神经网络优化计算,可以得到各个设计影响因素对于损伤指标的影响程度和影响趋势。HEV 乘员约束系统因此也可以参考影响因素的贡献率大小,对于 HEV 整车结构和原有的乘员约束系统进行针对性的调整和重新标定,得到最优的设计方案和最好的乘员保护效果。

启动计算程序,开始 RBF 神经网络优化算法的迭代计算,将迭代计算的结果导入式(6)中进行优化计算,求解函数的最优解。在迭代 47 次时就找到了最优值。最终确定的气袋织物透气率参数为原型车的 93%,护膝板刚度为原型车的 102%,安全带织带刚度为原型车的 91%,座椅面料摩擦因数为原型车的 90%。优化后的仿真计算结果表明, H_{HIC} 值由 676.1 迅速降低到了 120,胸部最大压缩量由 44.9 mm 降低到了 22.4 mm,优化目标 F 值很快降低后,在很小的范围内波动,最后在迭代 19 次后,达到最优值,稳定的最小值为 0.402 9 不再变化,优化后的伤害指数大大降低,优化效果明显。

接下来以仿真分析的计算结果为指导,对于 HEV 原车的车身部分进行针对性的修改和加强,并优化设计乘员约束系统后,重新进行优化设计后的实车碰撞试验,以验证优化设计后的结果。

4 优化设计后的实车侧面碰撞试验

按照仿真分析的结果,对 HEV 车辆的结构和设计方案进行针对性的调整和控制得到最优的设计方案。并进行实车侧面碰撞试验验证,得到表 2 所示的试验结果。

图 5 是 HEV 侧面碰撞 B 柱非碰撞侧加速度仿真与测试曲线。从图中可以看出,仿真计算的加速度曲线和实车测试结果趋势一致,仿真计算加速度最大值为 13.3g,实车测试值为 13.6g,仿真计算值比实车测试值小 2.2%,结果是可信的。

由表 2 的结果,按照《汽车侧面碰撞的乘员保护》(GB 20071—2006)、《混合动力电动汽车安全要求》(GB/T 19751—2005)和 C-NCAP 管理规则(2009 版)的要求,优化设计后的汽车乘员约束系统性能得到了明显的改善,C-NCAP 试验总评分接近 47 分,这是一个相当好的测试结果。

下页图 6 是实车侧面碰撞的试验结果。由试验可知,HEV 侧面碰撞试验后,左边前后门不能打开,

表 2 实车侧面碰撞试验结果
Tab. 2 Test results of main injury criterion

评价指标		高性能值	低性能值	试验值
头部伤害	H_{HIC36} 头部伤害指数	650	1 000	110
	3 ms 合成加速度值(3 ms)/g	72.0	88.0	37.8
胸部	肋骨变形量上部/mm	22.0	42.0	21.2
	肋骨变形量中部/mm	22.0	42.0	21.6
	肋骨变形量下部/mm	22.0	42.0	24.3
	胸部肋骨上部变形量/mm	0.320	1.000	0.172
	胸部肋骨中部变形量/mm	0.320	1.000	0.174
	胸部肋骨下部变形量/mm	2.000	1.000	0.186
	T12 力 F_y /kN	1.50	2.00	0.96
	T12 负载扭矩/Nm	150.0	200.0	78.6
腹部	腹部力/kN	1.00	2.50	1.22

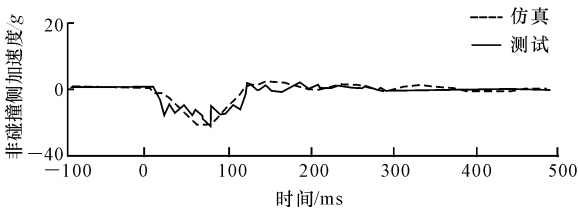


图 5 HEV 侧面碰撞 B 柱非碰撞侧加速度仿真与测试曲线
Fig. 5 CAE and test acceleration curves of the HEV B pillar

右边的前后门均可以打开,乘员舱内部部件脱落后未产生锋利突出物或锯齿边,假人可以不使用工具就能从约束系统中解脱出来,高压线束和接插件完好,碰撞保护开关触发,高压系统被切断,动力电池箱未甩入乘员舱,电池没有起火、爆炸和漏液,绝缘电阻测试结果仍然满足绝缘要求。HEV 侧面碰撞测试结果完全满足《汽车侧面碰撞的成员防护》(GB 20071—2006)和《混合动力电动汽车安全要求》(GB/T 19751—2005)的规定。由仿真计算和试验结果可知,不仅实车碰撞测试的结果和仿真分析的趋势基本一致,而且试验值和仿真分析的计算结果也非常接近。证明了仿真分析计算结果的合理性和准确性。

5 结 语

- (1)针对该款混合动力汽车的结构和特点,建立了 HEV 车辆侧面碰撞有限元仿真模型。
- (2)利用 RBF 神经网络优化 HEV 侧面碰撞结构设计分析和优化车辆安全性能方案。
- (3)建立了 HEV 乘员约束系统的优化函数,对影响 HEV 侧面碰撞安全性的影响因素进行了分析和计算,得到了优化计算后的最优函数值和优化设



图6 HEV 侧面碰撞试验变形结果

Fig. 6 Side crash test aberration of HEV bodywork

计参数。

(4)以优化计算的结果为指导,重新设计优化了HEV 车身结构和乘员约束系统参数,通过仿真计算和实车碰撞试验,验证了改进设计安全结构方案的效果。

(5)仿真和试验结果表明,利用有限元软件优化和改进车辆结构设计方案和采用优化设计理论来优化汽车乘员约束系统,以此来改进汽车侧面碰撞被动安全性研究具有较好的准确性和应用前景。经过优化设计后的 HEV 车辆同样可以拥有不差于传统燃油汽车的侧面碰撞被动安全性。本文的研究内容对于改进新能源汽车侧面碰撞被动安全性的研究具有一定的指导意义和应用前景。

参考文献:

References:

- [1] 陈晓东,苏清祖,程 勇,等. 汽车侧碰移动变形壁障有限元模型的开发[J]. 汽车工程,2003,25(3):260-263,290.
CHEN Xiao-dong, SU Qing-zu, CHENG Yong, et al. The finite element modeling of moving deformable barrier for vehicle side impact[J]. Automotive Engineering, 2003, 25(3): 260-263, 290. (in Chinese)
- [2] 公安部交通管理局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2000-2005.
Transport Administration of Public Security Ministry. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000-2005. (in Chinese)
- [3] Pei Y L, Fu C Y. Investigating crash injury severity at

unsignalized intersections in Hei Longjiang Province, China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(4): 272-279.

- [4] 李发宗. 汽车侧面碰撞虚拟试验技术的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
LI Fa-zong. A study on the virtual test technique of automobile side impact[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [5] 施少波. 客车侧碰有限元仿真分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
SHI Shao-bo. Automobile side crashworthiness analysis[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese).
- [6] GB 20071—2006, 汽车侧面碰撞的乘员防护[S].
GB 20071—2006, The protection of the occupants in the event of a lateral collision[S]. (in Chinese)
- [7] GB/T 19751—2005, 混合动力电动汽车安全要求[S].
GB/T 19751—2005, Hybrid electric vehicles safety specification[S]. (in Chinese)
- [8] GB/T 18384.1—2001, 电动汽车安全要求第1部分: 车载储能装置[S].
GB/T 18384.1—2001, Electric vehicles-Safety specification-part 1: On-board energy storage[S]. (in Chinese)
- [9] GB/T 18384.2—2001, 电动汽车安全要求第2部分: 功能安全和故障防护[S].
GB/T 18384.2—2001, Electric vehicles-safety specification-part 2: functional means and protection against failures[S]. (in Chinese)
- [10] GB/T 18384.3—2001, 电动汽车安全要求第3部分: 人员触电防护[S].
GB/T 18384.3—2001, Electric vehicles-Safety specification-part 3: protection of persons against electric hazards[S]. (in Chinese)
- [11] 彭金栓, 付 锐, 邵毅明. 道路交通安全系统透析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 72-75.
PENG Jin-shuan, FU Rui, SHAO Yi-ming. Systematic analysis of road traffic safety[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 72-75. (in Chinese)