

Analysis on the Collision Correlation Characteristics of Electric Vehicles

Weijie MA¹, Peng BAI¹, Zhixin LIU¹, Chun LI¹

¹China Automotive Technology and Research Center, Tianjin, China, 300300

Email: maweijie@catarc.ac.cn

Abstract: In order to study the passive safety performance of electric vehicles, in this paper, it was established the electric vehicle collision database and carried on the analysis research basis on total of 596 electric vehicle crash tests in the past two years. Firstly, statistical analysis is carried out from the aspects of vehicle design, battery type, power battery layout and restraint system configuration. Secondly, due to the A0 and A-class vehicles accounted for 95% of the database, and the average calculating method was adopted to obtain the average acceleration curve of the two models, and analyzed the difference of energy absorption characteristics during the collision. Finally, the front-end mechanical properties of several representative vehicles were collected by using the load cell wall, and the characteristics of force-displacement and stiffness of A0 and A-class vehicles were obtained. The results showed that: 64% of electric vehicle power batteries were the MnNiCo ternary batteries, and most of them were arranged at the bottom of the car. A0-class and N1 vehicles belts and airbags assembly rate is lower, resulting in the dummy head and neck injury ratio is higher. The acceleration change rate of A0-class vehicles is higher than that of A-class vehicles, but the duration of collision is shorter. The A0-class car collision force is growth faster than A-class, and the vehicle stiffness to be proportional to the quality. Through the study of the collision data of electric vehicles, it provides theoretical support for the development of new electric vehicles and the improvement of existing models, and has a positive effect on the passive safety performance of electric vehicles in China.

Keywords: vehicle passive safety; electric vehicle; impact test; load cell wall

电动汽车碰撞相关特性分析

马伟杰¹, 白鹏¹, 刘志新¹, 李春¹

¹ 中国汽车技术研究中心, 天津, 中国, 300300

Email: maweijie@catarc.ac.cn

摘 要: 为了研究电动汽车被动安全性能, 本文结合近两年内共计 596 次电动汽车碰撞试验, 建立了电动车碰撞数据库并在基础上进行了分析研究。首先, 从车型设计、电池类型、动力电池布置方式和约束系统配置情况等方面进行统计分析。其次, A0 级和 A 级车在数据库占比 95%, 因此采用平均计算方法获得两种车型的平均加速度波形, 分析其在碰撞过程中吸能特性的差异。最后, 运用测力墙采集了几款具有代表性车辆的前端力学特性, 并获得了 A0 级和 A 级车前端力-位移曲线特性和刚度特性。结果表明: 有 64% 的电动汽车动力电池为三元锂电池, 且大多布置在汽车底部。A0 级与 N1 车辆安全带与气囊配置率较低, 导致其假人头部和颈部超标比例较高; A0 级比 A 级车在碰撞初期加速度变化率高, 但是碰撞持续时间较短; A0 比 A 级车碰撞初期撞击力增长较快, 车辆刚度来与质量成正比。通过电动车碰撞数据的研究, 为新型电动汽车的开发和现有车型的改进提供了理论支持, 对中国电动汽车被动安全性能的提升有积极作用。

关键词: 汽车被动安全; 电动汽车; 碰撞试验; 测力墙

1 引言

随着中国汽车工业的不断进步, 电动汽车在近两年的发展十分迅猛。2015 年电动汽车销量为 33.1 万辆, 2016 年比 2015 年增加了 53%, 销量达 50.7 万辆, 预计今后几年还将保持 40% 的年平均增速^[1]。电动车辆作为道路交通的参数者在发生交通事故时, 其所造成的损害风险较燃料车辆增多了电安全以及相关衍生问题。因此, 在产品研发过程中, 如何合理的布置动力电池的位置、采用何种安全稳固的固定方式以及高压配线位置的合理布置等问题值得

高度重视^{[2][3]}。

在新能源汽车领域，电动汽车以其高能量利用率和优异的排放性能，成为了新能源汽车的主力。这里所指的电动不是指全新的能源，而是指汽车所用的能源区别于传统的燃油汽车。新能源汽车主要是指以车载电源（或其他能源）为动力，用电动机驱动车轮行驶，符合道路交通、安全法规各项要求的车辆^[4]。与传统汽车相比，电动汽车不仅要满足乘员保护和车身结构的要求，还必须满足电气安全方面的要求，可以说对整车安全性的要求高于传统汽车。如何对电动汽车整车安全性能进行全面考核，是我们要面临的问题；如何解决相应的设计不足，也是厂商亟待解决的问题。

本研究共计统计了近两年内 596 次不同形式的电动车碰撞试验，所涉及车辆生产厂家涵盖了目前绝大部分具有电动车生产能力的主机厂。这些试验数据形成了一个较为有代表性的数据库，基本上能够说明目前国内电动汽车的发展现状和水平。具体演技内容分为以下几个方面：首先，分别研究了电动车辆的具体参数分布特性、电动车辆约束系统的匹配情况和结合国标来分析假人损伤值的符合性，通过该发面研究可以大致了解目前国内电动车辆的发展现状；其次，在该数据库中选取部分具有代表性的车型，获得辆电动车辆正碰试验中车辆 B 柱的加速度波形，并通过测力墙采集了几个车型的代表车型前端力学性能曲线，以便于分析该数据库车型的刚度特性。这对今后电动车的设计和相关法律法规的制定具有重要意义。

2 电动车车辆特征分析

2.1 车辆参数分析

从电动车辆的设计开发角度来划分，主要分为两大种类：一类是直接传统燃油车辆的基础上进行改装，另一类为针对电驱动动力模式进行全新设计的车型^[5]。如下图 1 所示，依据不同级别车辆划分，统计了近 2 年试验中汽油车改装为电动车和原装电动车所占比例关系。

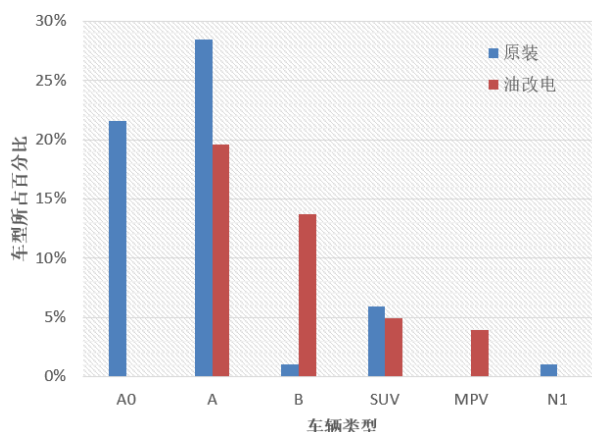


Figure 1. Percentage of vehicles of different kinds

图 1. 不同种类车辆所占百分比

本研究样本 A0 级和 N1 类车辆原装设计占绝大多数，A 级车辆原装电动车和油改电车型都较多，但原装电动车还是比油改电车多 9%，B 级车和 MPV 基本上以油改电为主，而 SUV 两种类型基本相当，但所占比例较低。不考虑车型分类的话，油改电车辆占总样本的 42%，原装设计的电动车占 58%。

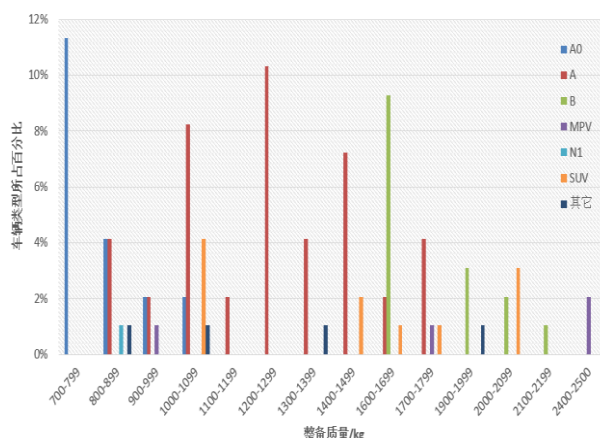


Figure 2. Distribution of different kinds of vehicle's kerb mass

图 2. 不同种类车辆整备质量分布

据统计表明,国外汽车自身质量同过去相比减轻了 20%-26%,预计在未来 10 年内,驾车自身质量还将继续减轻 20%,因此,塑料、高强度钢、金属泡沫材料等轻量化材料在电动车车身上的应用就有重要意义^[6]。本研究涉及车辆整备质量分布如上图 2 所示。电动汽车在整车布置、质量分布、储能系统等与常规动力车型有较大差异,储能电池等部件的质量一般都占整车质量的 20%以上^{[7][8][9]}。A0 级车辆的整备质量主要分布在 1100kg 以下,其中 800kg 最多,占总比例的 11.34%;A 级车整备质量主要分布于 1000-1500kg 之间,占总比例的 31.96%,其中在 1200-1299kg 分布最多,占总比例的 10.31%;MPV 和 SUV 整备质量分布较为离散,这说明在电动汽车中不同等级的 MPV 和 SUV 均有涉及,但所占比例均不高;N1 类车辆所占比例也较小,仅为 1.03%,且分布在整备质量为 1000kg 以下的小型车辆。

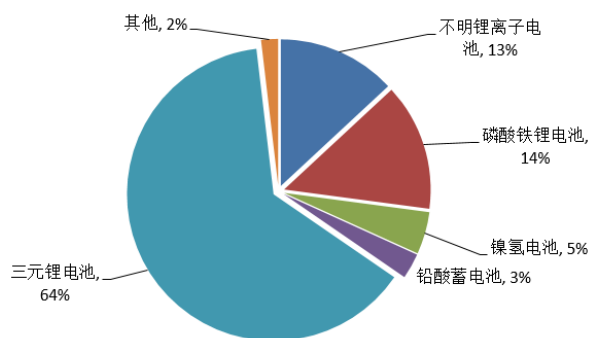


Figure 3. Electric vehicle battery type statistics

图 3. 电动汽车电池种类统计

上图 3 所示为电动车动力电池种类以及其所占比例。锂电池作为动力电池来使用目前还存在较大风险,且对其研究还处于初级阶段^[10]。Kukreja 等人对不同形式电动进行了碰撞分析研究,并评估了电池的耐撞性能^[11]。在本研究中三元锂电池所占比例最高,为 64%。其次是磷酸铁锂电池和不明锂离子电池,分别各占 14%和 13%。剩余部分主要有镍氢电池和铅酸蓄电池等小众化的储能电池。三元锂电池全称为镍钴锰酸锂三元正极材料的锂电池,由于其具有能量密度高的特点,被广泛应用于电动汽车动力电池。但是也存在明显的缺陷,其安全性和耐高温性能较磷酸铁锂电池差。

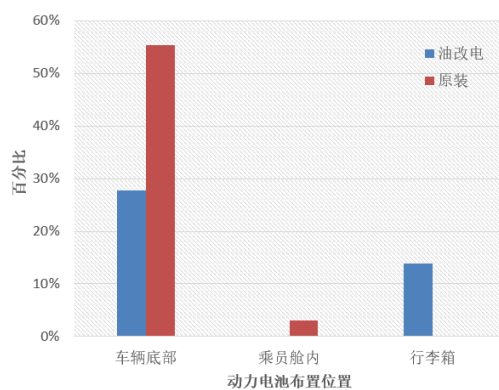


Figure 4. Layout of power Battery

图 4. 动力电池的布置

由上图4可知,油改电型电动汽车动力电池一般都布置在车辆底部和行李箱中,所占比例分别为27.7%和13.9%。这更多的是考虑到了合理利用车辆现有的空间,进行较为合理的布置。原装设计为电动汽车的动力电池绝大多数布置在车辆的底部,仅有很少一部分布置在了乘员舱内,这更多的标准法规的相关要求及空间的合理利用。

2.2 假人损伤指标分析

就目前电动汽车来说,大多开发目标为符合国标的被动安全性能要求,因此,在约束系统的安装和匹配方面相较传统燃油车要低一些。

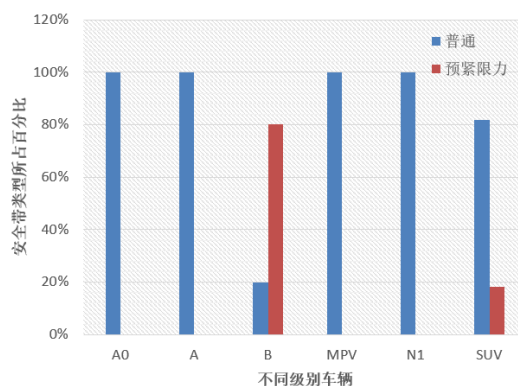


Figure 5. Seat belt assembly situation

图 5. 安全带装配情况

电动汽车带有预张紧式安全带装配率非常低,A0级、A级、MPV和N1类车辆全部装配为普通式安全带,B级车装配预张紧式安全带比例最高,比同级别车辆未装配该型安全带的车辆多了60%,在SUV中也有18.2%的装配率(如图5)。

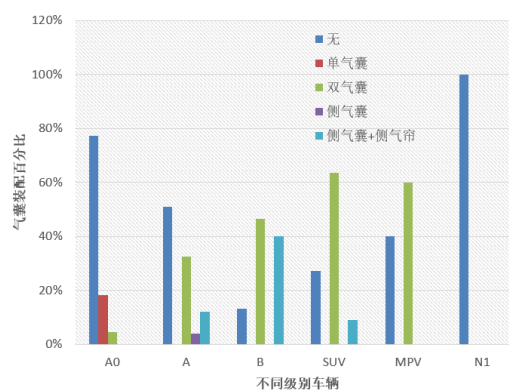


Figure 6. Aribag assembly situation

图 6. 安全气囊装配情况

安全气囊模块由于受到成本的影响，N1 类车辆全部没有配置在模块，A0 级和 A 级车辆未匹配气囊模块的比例也较高，分别占各自比例的 77.2%和 51%。双前碰撞气囊模块配置率在 A 级、B 级 SUV 和 MPV 中比例都比较高，分别占各自比例的 32.7%、46.7%、63.6%和 60%。同时装配有侧气囊和侧气帘的车型比例最高的为 B 级车，占 40%。

汽车的被动安全性能很大部分是通过假人的损伤指标来体现的，而约束系统的存在就是为了尽可能的降低车内乘员损伤的风险。因此，约束系统的配置率以及相互间匹配的好坏也是直接影响假人性能指标的。从上述安全带和安全气囊的装配率上也能够较为客观的评估不同级别车型的被动安全性能。

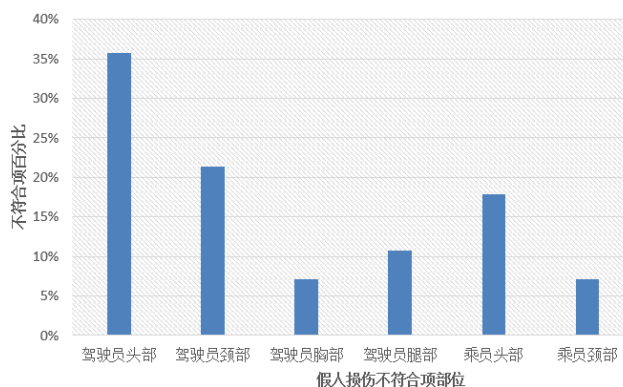


Figure 7. Dummy injury indicators do not meet the GB items distribution

图 7. 假人损伤指标不符合国标项分布

图 7 位正碰 GB11551-2014 法规中假人损伤的不符合要求的分布情况，出现问题最多的是驾驶员头部损伤指标，所占不符合项比例为 35.7%。驾驶员颈部指标超标的比例为 21.4%，排在不符合标准要求的第二位，这与上文所提到安全气囊配置率第有直接的关系。其次是乘员侧假人头部指标和驾驶员侧的腿部指标超标的比例较高，分别为 17.9%和 10.7%。

本文以出现不符合项最多的假人头部指标进行展开分析。假人头部评价指标分为 HIC36 小于 1000 和累计 3ms 小于 80g，如下图 8、9 所示。

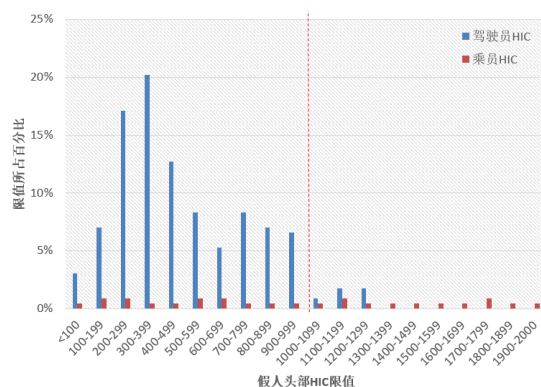


Figure 8. The distribution of dummy head HIC36

图 8. 假人头部 HIC36 限值分布

头部 HIC36 驾驶员侧分布在 300-399 之间最多，占 20.18%。驾驶员侧满足试验要求的占总体数量的 95.62%，不满足法规要求的占 4.38%，且都集中在 1300 以内。

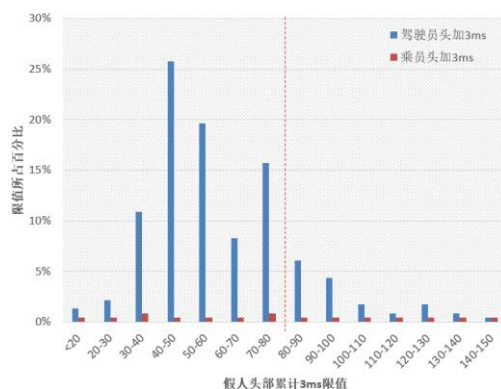


Figure 9. The distribution of dummy head cum 3ms

图 9. 假人头部累计 3ms 限值分布

头部累积 3ms 驾驶员侧分布在 40-50g 的最多，占总数的 25.76%。不满足法规要求的占 16.16%，且分布较为离散，不过在 80-100g 之间较多，为 10.48%。

3 电动车辆正面碰撞分析

3.1 碰撞特征曲线分析

电动车碰撞数据库中共包含了 224 次 100%正面刚性壁障碰撞试验，依据试验数据库中按照车辆级别划分，图 10 所示，所有参与试验的车辆中 A0 级和 A 级车占到了正面碰撞试验总量的 95%，因此，本研究着重于分析 A0 级和 A 级车型的车身特性曲线。

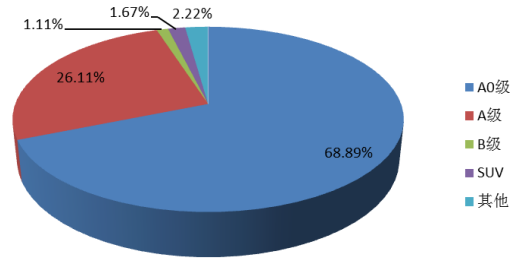


Figure 10. Percentage of vehicles at different levels

图 10. 不同级别车辆所占比例

对于 A0 级和 A 级车辆，分别选取了 15 个具有代表性的车型，在对有效样本进行分析后，得到了 A0 级和 A 级车型正面碰撞波形的分布，并计算出了其平均冲击波形，如图 11 所示。

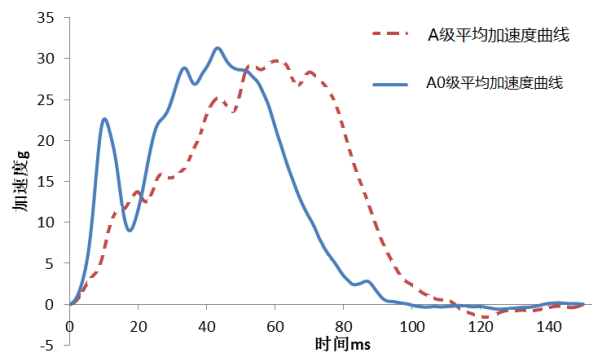


Figure 11. The average acceleration curve of the B-pillar

图 11. 正碰 B 柱平均加速度曲线

由上图可知，A0 级车辆 B 柱平均加速度曲线的最大加速度在 32g 左右，整个时间历程为 90ms 左右；A 级车 B 柱平均加速度曲线为单峰加速度波形，峰值约为 30g，持续时间约为 110ms。由于受车型尺寸的制约，A0 级车前端纵向空间有限，吸能结构相对简单，碰撞初期加速度明显大于 A 级车，且 A0 级车的峰值加速度产生的时刻要早于 A 级车。对于 A 级车而言，电动车通常有传统的原型车，车型结构设计较为成熟，有纵梁、副车架等部件可以有有效的吸能，因此其碰撞初期加速度较小，加速度曲线相对平缓，峰值加速度到来的时刻也相对晚一些。

3.2 碰撞刚度分析

结合以上对车型碰撞特性曲线和前端吸能机构的分析，随后 A0 级和 A 级车中各选取不同车型运用测力墙进行车辆前端力学特性采集。从车型开发角度来说，通过对车辆结构的优化设计从而改善车辆的碰撞力-位移特性，使得车辆具有更加优秀的耐撞性^[12]。对于车辆前端刚度特性，常用评价指标为 Kw400 来衡量^[13]。其方法是汽车前端 400mm 结构简化为理想的线性弹簧，在 25-400mm 变形范围内的变形能就等于压缩该弹簧所做的功，Kw400 值越大表示汽车前端刚度越高。NTHSA 通过研究指出乘员损伤风险较低的车辆 Kw400 值一般在 1300 N/mm-1700 N/mm^[14]。Kw400 的计算方法如公式 1 所示：

$$Kw400 = \frac{2 \int_{25}^{400} F dx}{400^2 - 25^2} \quad (1)$$

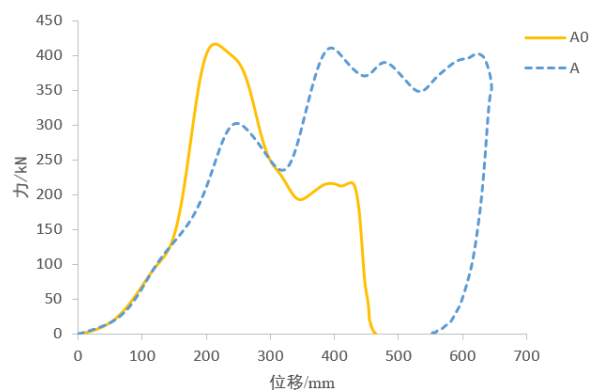


Figure 12. Comparison of A0 and A-class Vehicle force- Displacement

图 12. A0 级与 A 级车力-位移曲线对比

图 12 为 A0 与 A 级车的力-位移特性曲线对比。A0 级车试验质量 960kg, Kw400 值为 988 N/mm; 而对应 A 级车试验质量 1520kg, Kw400 值为 845 N/mm。A0 级车在变形量为 140mm 时碰撞力迅速增加, 这说明该车前端吸能空间较小, 碰撞力的迅速增大直接会影响到车内乘员的损伤指标。A 级电动车车身结构都是比较成熟的车型, 前机舱空间相对于 A0 级车较为充裕, 能够更为合理的布置电机风控制模块和碰撞吸能结构, 因此, 变形量在 400mm 之前, 碰撞力变化较为平缓。

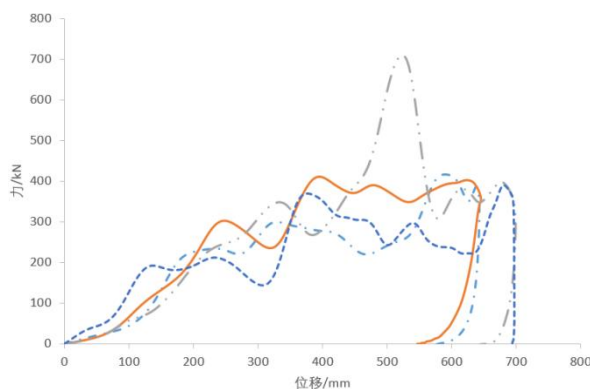


Figure 13. A-class vehicle force-displacement curves

图 13. A 级车力-位移曲线

Table 1. Stiffness results of A-class vehicles

表 1. A 级车辆刚度结果		
	试验质量 / kg	Kw400 / N/mm
1	1823	861
2	1520	845
3	1900	929
4	1860	860

图 13 所示为 4 中 A 级车的力-位移曲线, 并在此基础上, 通过公式 1 计算出这些车型的前端刚度 Kw400。4 台 A 级样车都是由燃油车辆改装为电动车, 前端结构设计较为合理, 并且随着质量的增加, Kw400 也随着增大。从碰撞兼容性角度来说, 该样车组与质量跟大的车辆发生碰撞时, 对车内乘员产生损伤的风险更高。

4 总结 (Conclusion)

本研究主要目标是就目前市场较为有代表性的电动车辆进行分析,从电动车辆的设计思路,动力电池的型号以及布置方式等方面进行了比较分析;随后在分析了约束系统的安装与匹配问题,主要从假人损伤指标角度进行统计分析;随后选取了所占比例多的 A0 级和 A 级车分析了车辆 B 柱的加速度特征曲线;最后,运用测力墙采集了并分析了几个具有代表车型前端的碰撞力学特性,结果表明:

1. A0 级和 A 级车为原装设计为电动汽车的方案较多,采用三元锂电池作为动力电池的比例较高,约为 64%,并且动力电池大多安装在汽车底部;
2. 由于受到成本得影响 A0 级和 N1 车辆安全带和安全气囊的配置率较低,而 B 级车配置率最高,这就导致假人头部和颈部损伤指标超标的试验较多;
3. 获得了 A0 级和 A 级具有代表性车型的 B 柱平均加速度曲线,分析了由于两种车辆前端结构上的差异所导致的车辆变形吸能过程的差异;
4. A0 级车前端吸能空间较小,导致在碰撞初期撞击力迅速增大;A 级车随着质量的增加,Kw400 值也随之增大。

参考文献 (References)

- [1] DENG guokai. Analysis on the status quo, challenges and prospects of new energy vehicle industry in China[J]. Automobile applied technology[J], 2017. (7):p. 1-12.
- [2] 邓国开. 我国电动汽车产业发展现状、挑战与展望分析[J]. 汽车实用技术, 2017. (7): 1-12.
- [3] WANG kai, LI xiangrong, BAI peng. Electrical safety of electrical vehicles in crash tests[J]. Journal of automotive safety and energy, 2012.3(1):p. 34-37.
- [4] 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.
- [5] SUN zhendong, LIU guibin, ZHAO chunming, YU xiumin. A research on full frontal crash test technology for electric vehicle[J]. Automotive engineering, 2007. 29(10): p. 833-837.
- [6] 孙振东, 刘桂彬, 赵春明, 于秀敏. 电动汽车正面碰撞试验技术研究与分析[J]. 汽车工程, 2007. 29(10): 833-837.
- [7] WANG fang, XIA jun. Safety analysis and design of battery pack for electric vehicle[M]. Beijing: Science press, 2016: 12-20.
- [8] 王芳, 夏军. 电动汽车动力电池系统安全分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2016:12-20.
- [9] ZHU xichan. Crashworthiness and safety design of electric vehicle[J]. World auto, 1998. (4):9-11.
- [10] 朱西产. 电动汽车的碰撞性能和安全性设计[J]. 世界汽车, 1998. (4):9-11.
- [11] LI xiufen, HUANG miaohua. Application and development of light weight automotive body material in electric vehicle[J]. Automobile technology and material, 2006.(7) : p.7-8.
- [12] 李秀芬, 黄妙华. 轻型车身材料在电动汽车上的应用于发展[J]. 汽车工艺与材料, 2006.(7):7-8.
- [13] PAN fan, ZHU xichan, WANG dazhi, SU xing. A simulation study on the crashworthiness of fuel cell vehicle[J]. Automotive engineering, 2008. 30(11): p.1013-1017.
- [14] 潘璠, 朱西产, 王大志, 苏醒. 燃料电池轿车碰撞安全性仿真研究[J]. 汽车工程, 2008. 30(11): 1013-1017.
- [15] WANG dazhi, YU chengxiang. Frontal crashworthiness structuure design of mini electric passenger cars[J]. Journal of automotive safety and energy, 2010. 1(1): p.49-52.
- [16] 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.
- [17] Recommended practice for electric and hybrid electric vehicle battery systems crash integrity testing[S]. 2005-J1766.
- [18] Parker D, Mikolajczak C, Lange R. Considerations regarding electric and hybrid vehicle safety[C]. The 22th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Washington D.C: NHTSA, 2011: Paper No. 11-0117.
- [19] Kukreja J, Nguyen T, Siegmund T, Chen W. Crash analysis of a conceptual electric vehicle with a damage tolerant battery pack[J]. Extreme mechanics letters, 2016. (9): p.371-378.
- [20] CUI chongzhen. The study on collaborative optimization of vehicle frontal impact safety in multiple typical situatons[D]. Changsha: hunan university, 2014.
- [21] 崔崇桢. 多种典型工况下的汽车正面碰撞性能协同优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [22] Hirayama S, Watanate T, Obayashi K, Okabe T. Second report of research on stiffness matching between vehicles for frontal impact compatibility[C]. The 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Lyon: NHTSA, 2007: Paper No. 07-0261.
- [23] Mohan, Pradeep K.. Development of objective metrics to improve vehicle compatibility in frontal collisions[M]. Washington D.C: Proquest dissertations publishing, 2008: 25-26.