

车载电池包壳体力学性能分析与轻量化设计

钱利勤^{1,2}, 伊亚辉², 杨彦博¹, 夏成宇², 石 虎², 冯 超², 马天才¹

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 长江大学机械工程学院, 荆州 434000)

摘要: 电池包壳体作为电动汽车的核心组成部分,起到支撑和保护电池包的作用,其整体结构的强度直接影响电动汽车的安全行驶。对电动汽车电池包壳体进行了静态、动态及模态分析。静态分析表明,电池包壳体的应力较小,远小于材料的屈服强度,电池包壳体箱底厚度设计过于保守。动态分析是在汽车极限工况下获得电池包壳体的应力和位移的分布,结果表明最大位移位于箱底。针对不同振动源下电池包壳体的振动响应特性进行态分析,结果表明针对不同路面和工况电池包壳体的前6阶模态主要表现为电池包壳体上箱盖的局部振动,频率在安全范围之内。在此基础上,对电池包壳体进行了结构优化,在电池包壳体满足强度和刚度的条件下,优化后的电池包壳体重量减少了25.54%,达到了轻量化的设计目的。

关键词: 电动汽车; 电池包壳体; 仿真分析; 轻量化设计

中图分类号: U469. 72

文献标志码: A

Mechanical Performance Analysis and Lightweight Design of Vehicle Battery Pack Shell

QIAN Liqin^{1,2}, YI Yahui², YANG Yanbo¹, XIA Chengyu², SHI Hu², FENG Chao², MA Tiancai¹

(1. School of Automotive Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434000, Hubei, China)

Abstract: As the core component of electric vehicles, the battery box plays a role in supporting and protecting the battery pack. The strength of the overall structure directly affects the safe driving of electric vehicles. In this paper, a static and dynamic analysis of the battery box of an electric vehicle is conducted. The static analysis results show that the stress of the battery box is relatively small, much smaller than the yield strength of the material, and the bottom thickness of the battery box is too

conservative. The dynamic analysis is obtained under the extreme operating conditions of the vehicle. The distribution of stress and displacement of the battery box show that the maximum displacement is located at the bottom of the box. A modal analysis is also performed to analyze the vibration response characteristics of the battery box under different vibration sources. The results show that the first 6 modes of the battery box for different roads are mainly manifested as the local vibration of the upper cover of the battery box. Within the safe range, according to the above analysis results, the structure of the battery box is optimized. Under the condition of the strength and rigidity of the battery box, the weight of the optimized battery box is reduced by 25.54%, achieving the design goal of lightweight.

Key words: electric vehicles; battery box; simulation analysis; lightweight design

如今地球不可再生资源逐渐枯竭,生存环境净化问题越来越严重,“更安全、更节能、更环保”成为现今世界汽车工业展开的重要技术方向。电动汽车作为国家“十五”规划以来的重点研发方向^[1],近些年来得到了业界的持续探索与广泛关注。电动汽车应用普及要克服的困难之一便是电动汽车的安全性问题。动力电池作为电动汽车的核心动力元件,储存了电动汽车行驶所需的能量,其使用性能对电动汽车至关重要,安全性问题也尤为突出。

动力电池包壳体作为动力电池的重要承载装置,对电池包的安全防护具有至关重要的作用,为保证动力电池的安全性,动力电池包壳体需要适应各种复杂工况,满足强度和刚度等需求。在电池技术没有得到重大突破之前,通过电动汽车的合理设计是节约能耗,增加续航有效途径之一。动力电池包

收稿日期: 2021-08-24

基金项目: 油气藏地质及开发工程重点实验室基金(PLN2020-7);湖北省重点研发计划(2021BAA053)

第一作者: 钱利勤(1982—),女,博士生,主要研究方向为锂离子动力电池。E-mail: lqqian2@foxmail.com

通信作者: 马天才(1979—),男,博士生导师,工学博士,主要研究方向为燃料电池系统控制与仿真,燃料电池发动机设计与开发,燃料电池发电装置。E-mail: matiancai@tongji.edu.cn

壳体是汽车上的重要结构部件,现存在强度刚度不够、设计过于保守、抗撞击性能不佳、散热性能不良、耐腐蚀性不优、造价过高等不足。当前业内对动力电池包壳体的研究以有限元仿真研究方式为主^[2-5]:包括分别采用碳纤维增强复合材料、高强度铝合金、碳纤维—玻璃纤维复合材料对电池包壳体进行了轻量化仿真设计^[6];使用计算流体力学仿真分析工具对保温型电池包壳体进行计算和设计;采用芳纶蜂窝状结构进行电池包壳体的仿真分析。

如在电池包壳体结构优化方面,国内外专家做了诸多相关研究。Yong Xia, Tomasz Wierzbicki 等人^[7]主要研究了电动汽车的锂离子电池包壳体的底部对地面的影响,研究了在力和位移的复合作用下,受到非常锋利的物体冲孔后电池包壳体底部的冲压变形,并提出了电池包壳体保护结构的改进设计;Hartmann 等人^[8-9]使用 Optistruct 软件分析并优化了电池包壳体的形状,改进后的壳体在远远超出谐振范围的动态刚性的同时,改善了电池包壳体的静态强度,实现了轻量化设计;上汽集团的张晓红等人^[10]使用新型碳纤维复合材料对动力电池包壳体进行轻量化设计,并通过有限元仿真分析对模态、机械冲击、结构疲劳进行验证,各种机械性能均满足要求;北京理工大学的赵红伟等人^[11]对电动汽车的动力电池壳体进行了拓扑优化,在保证强度要求的前提下,得到的新结构质量较优化前的质量有大幅度的减少,并且应力分布更均匀,有效地完成了等强度结构设计;湖南大学的吴长德等人^[12]基于焊点疲劳寿命预估理论,采用有限元法对某款电动汽车电池包壳体的焊点进行疲劳寿命计算,得出疲劳损伤区域与台架振动试验中的破坏情况一致,然后对焊点进行优化,提高了电池包壳体的疲劳寿命;大连交通大学的谷理想^[13]基于有限元理论及疲劳理论对电动汽车电池包进行了强度校核及疲劳寿命预测;北京理工大学的王文伟等人^[14]运用三区间法对某款电动汽车电池包壳体结构随机振动环境下进行频域疲劳响应分析,分析表明电池包结构满足随机振动试验要求。

这些研究的重点主要集中在新材料、新结构等方面,对于电池包壳体常用钢材的研究以及电池模組的处理还有进一步细化和精确度提升的空间。

1 电池包壳体方案布置及结构设计

1.1 方案布置

电池包布置方案考虑的因素有:重心匹配(载荷

分布的均匀性)、碰撞安全(防止电池包破损后短路起火爆炸)、地面间隙(电池容纳空间)、拆装性能(利于安装维护)、综合性能等多方面。通过表1对各布置方案进行多方位对比,最合理的布置是将电池包置于电动汽车地板底部,这样的布置方案使得电动汽车冲撞时具有较高的安全性,电池布置不受空间限制,散热好,容纳量多,车辆的车轴负载也更均匀,增强了电动汽车整体的机械强度。

以广汽 AION V 电动汽车为例,该车身下部有 2 根纵梁,横梁空间为 2000 mm×800 mm×500 mm。电池包壳体高 254 mm,与地面间距离 246 mm,但电动汽车主要在市区行驶,所以不会对车辆行驶产生影响。电池包壳体整体被车身框架包围,四周防护的结构,使车身有充分的缓冲空间和足够的结构强度,发生碰撞时较安全。该布置方案能实现电池组的迅速更换、组装和固定,如表 1 所示。

表 1 电池包壳体布置方案对比
Tab.1 Comparison of layout schemes of battery pack shell

参数	重心匹配	碰撞安全	地面间隙	拆装性能	综合性能
行李箱	★	★	★★★★	★	★
座椅下方	★★★★	★★★★	★	★	★★★★
前舱	★★★★★	★	★★★★	★	★★
地板底部	★★★★★	★★★★★	★	★★★★★	★★★★★

★ 越多表示方案越佳。

1.2 电池包壳体结构设计

设计要求:按照 QC/T840—2010《电动汽车用动力蓄电池产品规格尺寸》要求设计,达到电动汽车电池包壳体保护等级 IP67 的技术条件,电动汽车电池包壳体內的电池组按要求装配在汽车底部,布线合理、美观牢固可靠,材料为 Q235。设计确定后的电池包壳体最大尺寸为 1080 mm×489 mm×254 mm,如图 1 所示。

电池包壳体由底箱和箱盖组成。考虑电动汽车内部空间的有效利用,使电池包壳体能够实现在复杂的工况环境中运行,对底箱和箱盖进行初步设计,各项初步设计参数如表 2 所示。

底箱设计:采用框架结构,焊接成型,设置合理的沟壑和挡板结构,约束电池组模块 3 个轴方向的自由度,限制了电池模块的移动,设计结构如图 2a 所示。

箱盖设计:箱盖密封电池包的作用,由于箱盖受力非常小,可采用薄板冲压成型。设计应避免共振,减少振动和噪声。与底箱以螺栓连接,合理布置,防松动,设计结构如图 2b 所示。

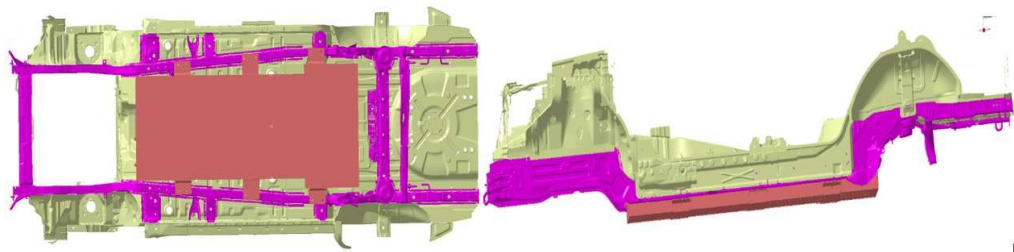


图1 电池包壳体底盘布置方案

Fig.1 Layout scheme of battery pack shell chassis

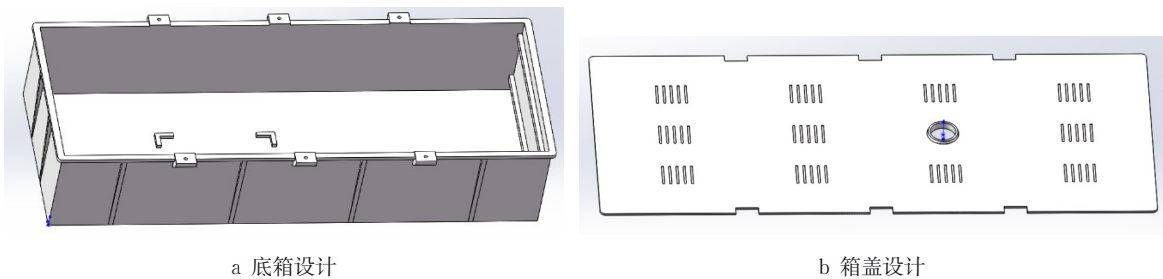


图2 电池包壳体初步设计模型

Fig.2 Preliminary design model of battery pack shell

表2 电池包壳体初步设计参数

Tab.2 Preliminary design parameters of battery pack shell

结构	尺寸/ (mm×mm×mm)	质量/kg	平均密度/ (kg·m ⁻³)
电池包壳体	1 080×489×254	67.4	7 850
电池模组	260×141×235	20.0	2 321
柱形电池单体	26×65	95.0	2 752
控制模组	240×121×235	5.0	732

表3 电池包壳体材料属性

Tab.3 Material properties of battery pack shell

材料	弹性模量	泊松比	密度	屈服极限	抗拉极限
Q235	2.1×10 ⁵ MPa	0.3	7.85 g/cm ³	235 MPa	380 MPa

2 电池包壳体静动态特性

2.1 模型建立和网格划分

为达到提高计算精度和速度的目的,需对电池包壳体的有限元分析及建模过程进行以下合理简化:在小于4 mm的范围内,将制作好的模型的孔填充,提高单元网格的整体质量;省略较小的倒角和圆型;无约束相邻边界的边缘融合,以保证有限元分析模型的各种网格之间的一致性和连接。

采用SolidWorks软件创建动力电池包壳体三维实体模型,将模型在ANSYS Workbench软件平台中打开,赋予材料属性(见表3)后运用其Mechanical模块进行网格划分,使用Sizing模块控制网格尺寸为0.5 mm,网格数量为11.2万个(见图3)。电池包壳体承载电池模组及控制部分的质量为243.1 kg。

2.2 静态分析

该电动汽车静止状态下,电池包壳体受到11个电池模组和中间控制部件的质量影响,约束6个吊

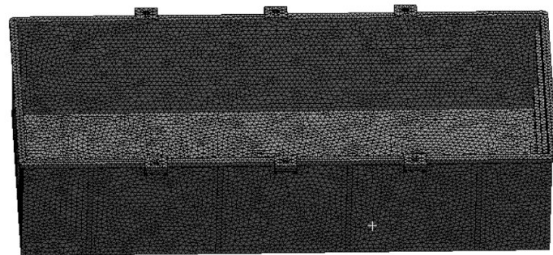


图3 电池包壳体初步设计模型网格划分

Fig.3 Meshing of preliminary design model for battery pack shell

耳的全部自由度,在底部施加电池模组和控制模组所受重力。静态分析应力变化云图如图4所示,图中可见初步设计的电池包壳体最大位移变化为0.292 34 mm,最大位移变化位于底部中间偏右处;应力分析如图5所示,图中可见最大应力为13.385 MPa,最大应力位于底部中间电池模组与控制模组之间。

2.3 动态特性分析

由于汽车驾驶路况非常复杂,不同路况下该电动汽车运动情况都采用静态分析不合理,因此采用两种比较典型的路况进行动态分析,即伴随急转弯

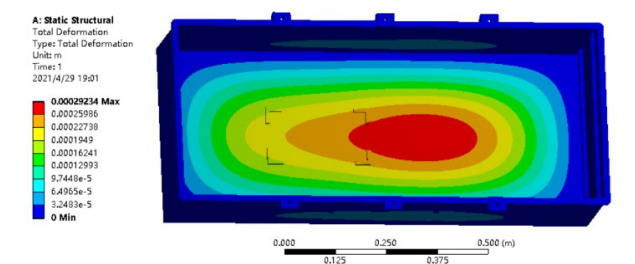


图4 初步设计位移变化云图

Fig.4 Displacement change nephogram of preliminary design

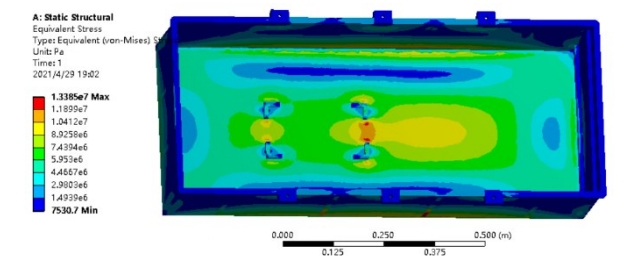


图5 初步设计应力变化云图

Fig.5 Stress change nephogram of preliminary design

的凹凸道路路况和伴随急刹车的凹凸道路路况。根据相关文献提供的资料^[15],电动汽车碰撞、急转弯和急刹车的极限加速度分别为2g、0.8g和1g(与前进方向相反),如表4所示。

电池包壳体在汽车急刹时的位移变化云图如图6所示,从图中可以看出,初步设计的电池包壳体急刹时最大位移变化为0.005 464 3 mm,最大位移变化位于箱体两侧中部。电池包壳体在汽车急转弯时的位移变化云图如图7所示,从图中可以看出,初步设计的电池包壳体急转弯时最大位移变化为0.130 1 mm,最大位移变化位于箱体底部。

表4 动态分析电池包壳体工况

Tab.4 Dynamic analysis of working condition of battery pack shell

工况	Y方向	X方向	Z方向
组合工况一	路面颠簸(2 g)	急转弯(0.8 g)	
组合工况二	路面颠簸(2 g)		急刹车(−1 g)

2.4 模态分析

为避免电池包壳体和车身的共振,需对电动汽车的电池包壳体的模态进行计算和分析,对不同振动源下电池包壳体的振动响应特性进行分析。电动汽车电池包壳体的结构模态计算里,较低频率的震动一般比高频率的震动更具有威胁性,所以使用Workbench软件中的模态分析方法分析了电动汽车电池包壳体的前六阶模态,如表5和图8—13所示。

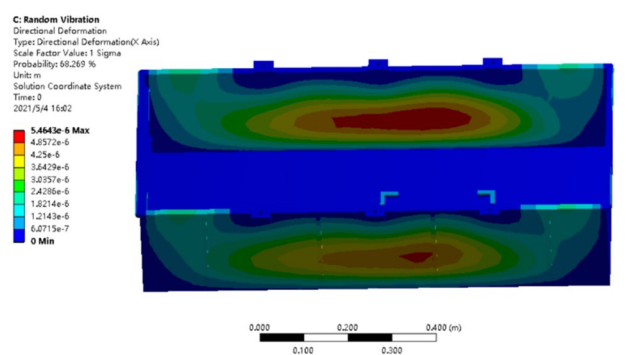


图6 初步设计组合工况一的位移变化云图

Fig.6 Nephogram of displacement change under combined working condition 1 of preliminary design

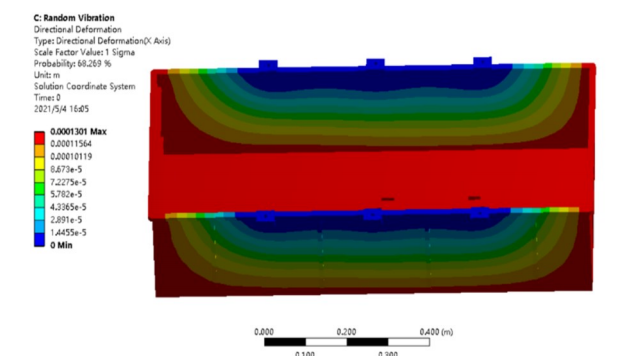


图7 初步设计组合工况二的位移变化云图

Fig.7 Nephogram of displacement change under combined working condition 2 of preliminary design

表5 电池包壳体初步设计前6阶模态振型参数

Tab.5 First 6 mode shape parameters of battery pack shell in preliminary design

阶数	频率/Hz	振型描述
1	174.51	箱盖左部一阶弯曲
2	302.17	箱盖左部横向二阶弯曲
3	399.07	箱盖左部纵向二阶弯曲
4	400.48	箱盖右部一阶弯曲
5	434.22	箱盖右部一阶弯曲
6	509.94	箱盖左部横向三阶弯曲

电动汽车振动的主要是因为驱动马达的振动、路面凹凸引起的振动及其他部件的振动所导致,振动主要由以下工况引起:车辆运转时,驱动电动机的励磁频率通常在25 Hz以下;汽车行驶时,路面上的激励频率和摩擦变大,路面凹凸的空间频率影响电动车行驶速度,激励频率计算如下:

$$f=\frac{V_{\max }}{L_{\min } \times 3.6} \quad (1)$$

式中: $V_{\max }$ 为电动车最高行驶速度; $L_{\min }$ 为路面的平整度波长,我国各种路面的平整度波长如表6

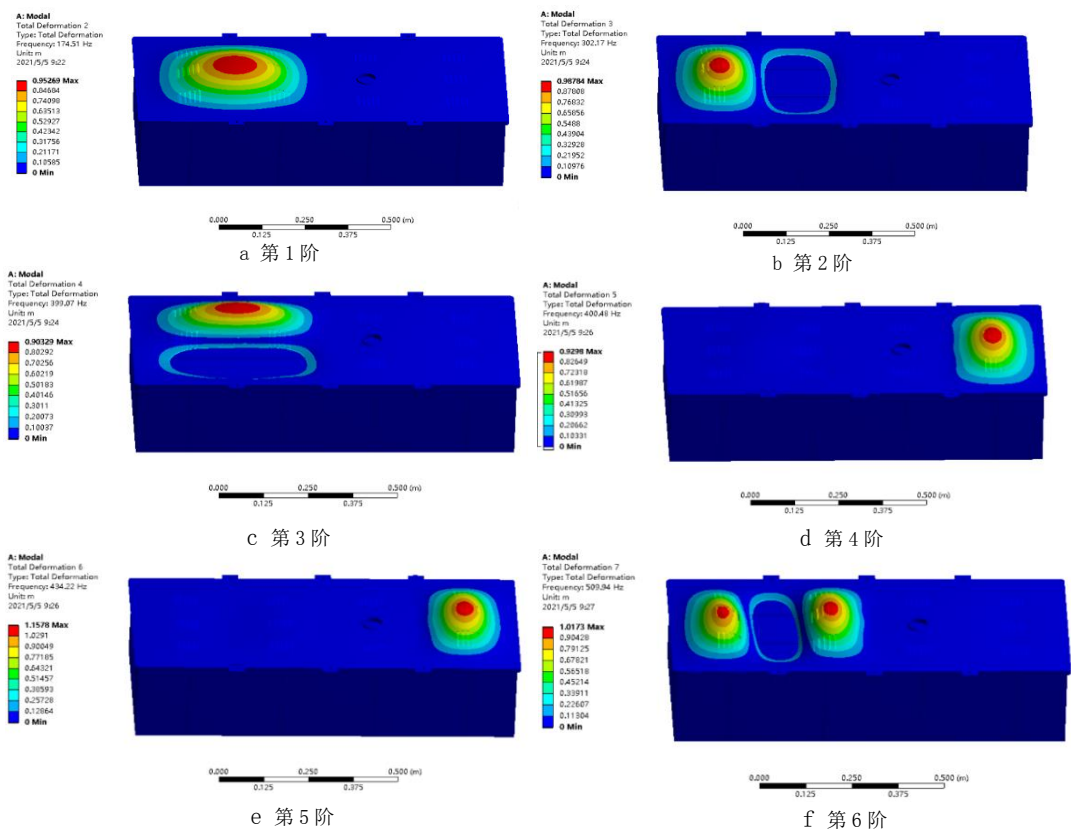


图 8 电池包壳体初步设计前 6 阶模态振型云图

Fig.8 Nephogram of first 6 modes of battery pack shell in preliminary design

所示。该汽车为纯电动汽车,主要行驶场所为市区,最高速度为 100 km/h,路面凹凸的波长为 1.0 m,则由路面凹凸引起的激励频率为:

$$f=\frac{V_{\max }}{L_{\min } \times 3.6}=27.78 \text { Hz} \quad (2)$$

从上述的分析中得出,电动汽车的激振频率小于 30 Hz,电动汽车的电池包壳体的模态分析结果均大于 174.51 Hz,因此不会发生共振。

表 6 我国各种路面的不平度波长

Tab.6 Roughness wavelength of various pavement in China

路面	平坦路面	未铺装路	碎石路	搓板路面
波长/m	1.0~6.3	0.77~2.5	0.32~6.3	0.74~5.6

3 考虑电池包壳体强度的轻量化设计

3.1 结构尺寸优化

通过对壳体的静力分析(见图 5),初步设计的电池包壳体最大应力为 13.385 MPa,远远小于材料的屈服极限,所以对箱体的厚度进行优化,将箱体厚度从 5 mm 减小到 3 mm。初步设计的电池包壳体最大

应力主要集中在底部中部控制模组限位处。根据应力的集中情况对其进行形貌优化,将两头的限位筋连接成一体,以此消除应力集中。优化前后形貌如图 9 所示。通过对电池包壳体整体的模态分析^[16](见图 8)可知,产生共振均在箱盖上方,所以箱盖厚度仍然为 4 mm,提高相对强度。

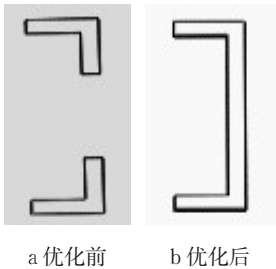


图 9 控制模组限位处优化前后

Fig.9 Limit position of control module before and after optimization

通过对壳体的静力分析(见图 4),初步设计的电池包壳体最大位移在底部右侧。为此,对壳体进行形貌优化设计,优化前后的箱底部分如图 10 所示。由图可见,通过在底部增加网状筋,可有效增加电池

包壳体底部的强度,将电池包壳体底部筋与侧边加强筋相连形成一个整体的加强结构,强度提升效果则更加显著。

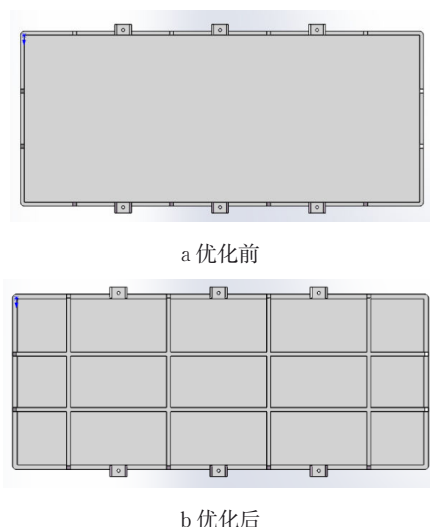


图 10 箱体底部优化前后

Fig.10 Box bottom before and after optimization

3.2 优化结果分析

优化前电池包壳体最大应力为 49.775 MPa,经过对箱体底部的形貌优化,应力集中的情况得到了很好的改善,如图 11 所示。电池包壳体位移变化云图如图 12 所示,从图中可以看出初步设计的电池包壳体最大位移变化为 0.292 34 mm,最大位移变化位于底部中间偏右处,优化后最大位移 0.943 39 mm。

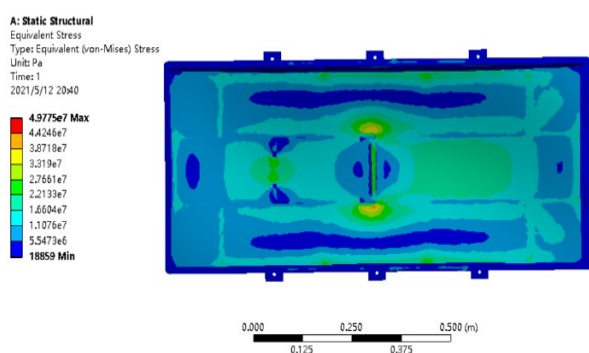


图 11 优化后应力变化云图

Fig.11 Stress variation nephogram after optimization

电池包壳体在汽车急刹时的位移变化云图如图 13 所示,从图中可以看出初步设计的电池包壳体急刹时最大位移变化为 0.512 57 mm,最大位移变化位于箱体两侧中部。电池包壳体在汽车急转弯时的位移变化云图如图 14 所示,从图中可以看出初步设

计的电池包壳体急转弯时最大位移变化为 1.324 5 mm,最大位移变化位于箱体底部。优化后的电池包壳体前 6 阶模态如表 7 和图 15 所示。

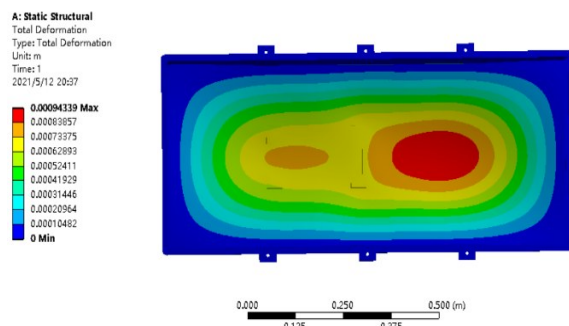


图 12 优化后位移变化云图

Fig.12 Nephogram of displacement after optimization

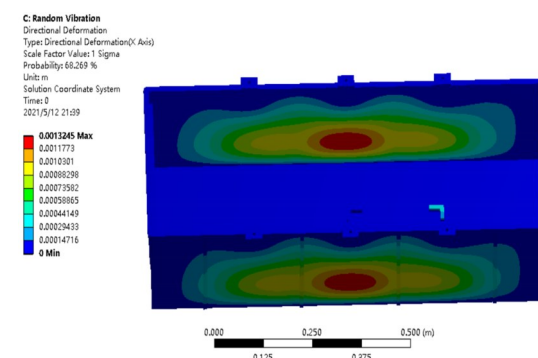


图 13 优化后组合工况一位移变化云图

Fig.13 Nephogram of displacement under combined working condition 1 after optimization

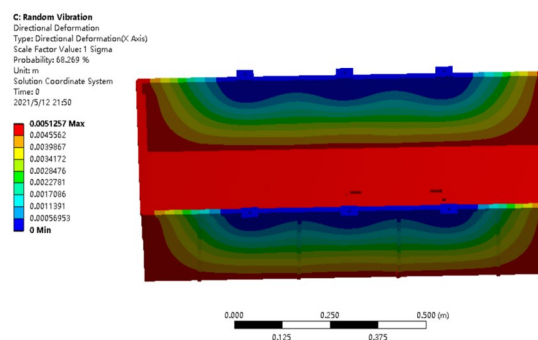


图 14 优化后组合工况二位移变化云图

Fig.14 Nephogram of displacement under combined working condition 2 after optimization

对初步设计的电池包壳体进行优化之后,电池包壳体的重量由 67.408 1 kg 变 50.191 9 kg,较之前减少了 17.216 2 kg,与优化前相比质量减少了 25.54%,达到了轻量化设计的目的。在保持轻量化设计的前提下,电池包壳体所受到的最大应力依旧

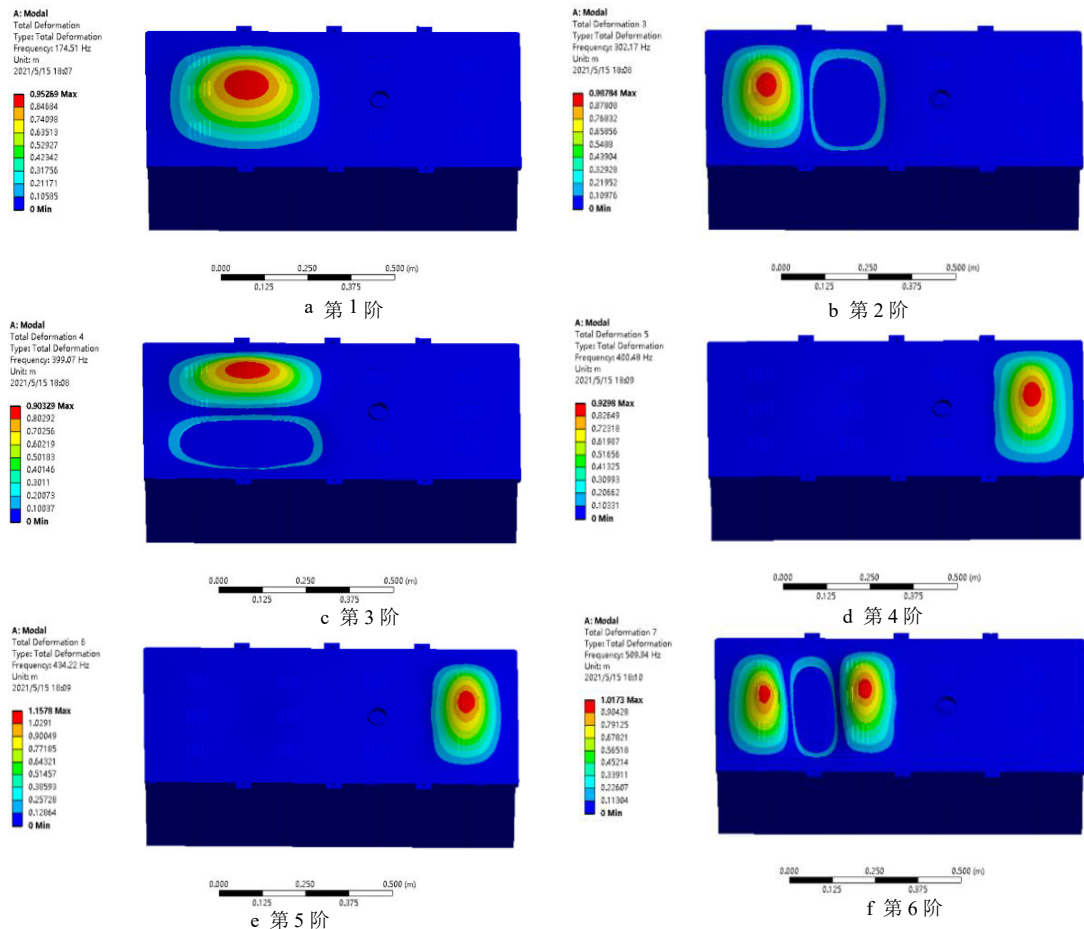


图 15 电池包壳体优化后的前 6 阶模态振型云图

Fig. 15 Nephogram of first 6 modes of optimized battery pack shell

小于其屈服强度,电池包壳体产生的形变也在允许范围之内。

表 7 电池包壳体优化后的前 6 阶模态振型参数

Tab.7 Parameters of first six mode shape of battery pack shell after optimization

阶数	频率/Hz	振型描述
1	174.51	箱盖左部一阶弯曲
2	302.17	箱盖左部横向二阶弯曲
3	399.07	箱盖左部纵向二阶弯曲
4	400.48	箱盖右部一阶弯曲
5	434.22	箱盖右部一阶弯曲
6	509.94	箱盖左部横向三阶弯曲

表 8 电池包壳体优化前后各项参数

Tab.8 Parameters of battery pack shell before and after optimization

参数	优化前	优化后
电池包壳体尺寸/mm	1080×489×254	不变
电池包壳体体积/ m ³	0.008 6	0.003 9
电池包壳体质量/kg	67.408 1	50.191 9
最大应力/MPa	13.385	49.775
最大形变/mm	0.292 34	0.943 39

4 结论

本文针对电池包壳体在电在静载和动载作用下结构的安全性问题,开展电池包壳体静力学和动力学建模并开展了结构优化,主要结论如下:

- (1) 按照 QC/T840—2010《电动汽车用动力蓄电池产品规格尺寸》设计,电池包壳体最大位移变化为 0.292 34 mm,最大应力为 13.385 MPa,固有频率大于 174.51 Hz,均满足要求。电池包壳体质量为 67.408 1 kg。
- (2) 根据电池包壳体仿真分析结构,对电池包壳体局部优化,电池包壳体质量由 67.408 1 kg 变为 50.191 9 kg,减少了 17.216 2 kg。优化后电池包壳体质量与优化前相比减少了 25.54%。

参考文献:

[1] 吴平. 电动汽车驶向何方? —对话中国工程院院士、总装备部防化研究院研究员杨裕生[J]. 中国高新技术企业, 2010 (14): 60.

- WU Ping. Where will electric vehicles go? — Dialogue with Yang Yusheng, academician of the Chinese Academy of Engineering and researcher of the Chemical Defense Research Institute of the General Armament Department[J]. High Tech Enterprises in China, 2010(14): 60.
- [2] 袁林. 电动汽车动力电池箱有限元分析及结构优化研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- YUAN Lin. Research on finite element analysis and structural optimization of power battery box for electric vehicles [D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [3] 姜高松. 某纯电动汽车电池包壳体结构设计分析及优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- JIANG Gaosong. Structural design analysis and optimization of a battery pack shell for a pure electric vehicle [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [4] 王开良, 陈鑫, 吴征, 等. Tesla Model S 气动特性仿真分析 [C]// 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会. 2017 汽车空气动力学分会学术年会论文集. 合肥: 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会, 2017: 30.
- WANG Qiliang, CHEN Xin, WU Zheng, *et al.* Simulation analysis of aerodynamic characteristics of Tesla models [C]// Automotive Aerodynamics Branch of Chinese Society of Automotive Engineering. Proceedings of 2017 Automotive Aerodynamics Branch of Academic Annual Conference. Hefei: Automotive Aerodynamics Branch of Chinese Society of Automotive Engineering, 2017: 40.
- [5] 刘春娜. 特斯拉汽车电池技术及策略[J]. 电源技术, 2014, 38(7): 1201.
- LIU Chunna. Tesla car battery technology and strategy [J]. Power Technology, 2014, 38(7): 1201.
- [6] 张宇, 曹友强, 洪贤军. 电动汽车电池包壳体轻量化研究 [J]. 现代制造工程, 2014(1): 38.
- ZHANG Yu, CAO Youqiang, HONG Xianjun. Research on the lightweight of electric vehicle battery pack shell [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014(1): 38.
- [7] XIA Y, WIERZBICKI T, SAHRAEI E, *et al.* Damage of cells and battery packs due to ground impact [J]. Journal of Power Sources, 2014, 267: 78.
- [8] HARTMANN M, ROSCHITZ M, KHALIL Z. Enhanced battery pack for electric vehicle: Noise reduction and increased stiffness[J]. Materials Science Forum, 2013, 765: 818.
- [9] YANG K, YANG L, SHI Y, *et al.* A single-point insulation fault locating scheme for power battery pack in electric vehicle [J]. Automotive Engineering, 2017(6): 75.
- [10] 张晓红, 周锋, 冯奇, 等. 车用动力电池碳纤维箱体的设计研究[J]. 上海汽车, 2014(9): 60.
- ZHANG Xiaohong, ZHOU Feng, FENG Qi, *et al.* Design and research of carbon fiber box for vehicle power battery [J]. Shanghai Automotive, 2014(9): 60.
- [11] 赵红伟, 陈潇凯, 林逸. 电动汽车动力电池仓拓扑优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(4): 846.
- ZHAO Hongwei, CHEN Xiaokai, LIN Yi. Topology optimization of electric vehicle power battery compartment [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(4): 846.
- [12] 吴长德, 戴江梁, 唐炜, 等. 基于某电动汽车电池箱焊点的疲劳寿命预测与优化[J]. 机械强度, 2013, 35(5): 663.
- WU Changde, DAI Jiangliang, TANG Wei, *et al.* Fatigue life prediction and optimization of welding spot based on battery pack shell of an electric vehicle [J]. Mechanical Strength, 2013, 35(5): 663.
- [13] 谷理想. 电动汽车电池包疲劳寿命预测关键技术研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2014.
- GU Ideal. Key technology research on fatigue life prediction of EV battery packs [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014.
- [14] 王文伟, 程雨婷, 姜卫远, 等. 电动汽车电池箱结构随机振动疲劳分析[J]. 汽车工程学报, 2016, 6(1): 10.
- WANG Wenwei, CHENG Yuting, JIANG Weiyuan, *et al.* Random vibration fatigue analysis of electric vehicle battery box [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2016, 6(1): 10.
- [15] 孙昱晗. 一种动力电池箱结构设计优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- SUN Yuhan. Design and optimization of a power battery box [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [16] HONG S K, EPUREANU B I, CASTANIER M P. Parametric reduced-order models of battery pack vibration including structural variation and prestress effects[J]. Journal of Power Sources, 2014, 261(1): 101.