

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.017

电动汽车动力电池箱模态分析及结构优化

季鑫盛, 刘宁宁, 杨超, 马西沛

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为解决某型电动汽车动力电池箱在行驶中发生共振的问题,课题组对该动力电池箱进行有限元建模与模态分析,求解出动力电池箱的模态频率和振型;求解结果与模态试验结果对比分析,验证了有限元模态仿真是准确的。为避免车轮不平衡激励而产生的共振,课题组提出了3种电池箱结构优化方案。仿真分析表明,更改底板材料和增加纵梁结构的方案既实现了结构轻量化,又避免了因路面不平度对动力电池箱产生的共振。该研究为动力电池箱结构的设计与结构优化提供了参考。

关键词:动力电池箱;模态仿真;模态测试;振型;轻量化;共振

中图分类号:U469.72 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)03-0083-05

Modal Analysis and Structure Optimization of Electric Vehicle Power Battery Box

Ji Xinseng, Liu Ningning, Yang Chao, Ma Xipei

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to solve the problem of common vibration of a certain type of electric vehicle battery box during driving, finite element modeling and modal analysis of the power battery box were carried out by the research group, and the modal frequency and vibration mode of the power battery box were obtained. The accuracy of the finite element mode simulation was verified by comparison between the solution results and the modal test results. In order to avoid the resonance of the power battery box due to the unbalanced excitation of the wheel, three structural optimization schemes were proposed. The simulation analysis shows that the scheme of changing the material of the bottom plate and increasing the structure of the longitudinal beam can not only achieve the weight reduction of the structure, but also avoid the resonance of the power battery box due to the unevenness of the road surface. This research provides a reference for the design and structural optimization of electric vehicle battery box structure.

Keywords: power battery box; modal simulation; modal test; vibration mode; light weight; resonance

随着全球能源危机与环境问题日益严重,国家对制造业把控也越来越严。无论是为了自身发展,还是为了顺应时代的要求,国内外车企愈来愈重视对电动汽车技术的研发。安全、节能和环保已成为当前汽车工业发展的三大趋势^[1]。动力电池作为电动汽车的核心部件,对电动汽车的性能安全产生很大的影响。而动力电池箱作为电池的保护和承载装置,是电动汽车的重要组成部分,因此动力电池箱的研发设计需要考虑安全性和使用寿命等诸多因素。

随着计算机技术的快速发展和数值计算理论的成熟,CAE仿真分析技术在汽车研发及产品开发过程得到了广泛的应用。路致远等使用Hyperworks和MSC.NASTRAN两款软件对快换电池箱进行了模态分析,对可能受到共振的各阶模态进行扫频仿真分析,找到导致故障的振型,并提出了快换电池箱的改进方案^[2]。国网电力科学研究所的桑林等对动力电池箱进行了模态分析和频率响应分析,并进行了振动模拟试验,为该电池箱的后续结构改进和设计优化指明了

收稿日期:2019-09-20;修回日期:2020-03-18

基金项目:国家自然科学基金(51675324);上海公共服务平台建设项目(18DZ2295900)。

第一作者简介:季鑫盛(1989),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车动力电池箱模态分析及结构优化。通信作者:刘宁宁(1987),男,山东金乡人,博士研究生,实验师,主要从事车辆NVH测控技术研究。E-mail: liuningn@163.com

方向^[3]。湖南大学杨书建分析了极端工况下电池箱的静强度及其模态特性和振动特性,给出了针对电池箱顶盖和底板上加强筋分布形状和尺寸的优化设计方案^[4]。中国电力科学研究院的储毅等研究了电动汽车快换电池箱的动态特性,得到其自由模态、约束模态振型与模态参数,并改进了该快换电池箱的相关结构^[5]。青岛理工大学的李夕亮等对列车上的蓄电池箱进行了有限元分析和实测研究,得出:蓄电池箱结构在任何方向均能承受 TB/T 3058—2002 中规定的加速度冲击而不产生破坏;最大应力均小于材料的许用应力,符合结构强度要求,蓄电池箱的安全可靠性得到保证^[6]。

课题组对某电动汽车动力电池箱建立了有限元模型,利用 ANSYS 对动力电池箱进行模态分析,将模态仿真结果与模态试验结果对比,验证了有限元模态仿真的准确性。采用更改底板材料和增加纵梁结构的方案,在实现结构轻量化的同时,避免了因路面不平度对动力电池箱产生的共振。该研究为电动汽车动力电池箱结构的设计与结构优化提供了参考。

1 动力电池箱有限元模型的建立

三维建模动力电池箱,如图 1 所示。动力电池箱外形尺寸为:长 2 537 mm,宽 1 555 mm,高 106 mm。箱体质量约为 120 kg,箱体下底盖材料为合金钢,其余部分均为铝合金,相应的材料参数如表 1 所示。采用六面体壳单元划分网格的方法离散模型,有限元模型壳单元共 91 626 个,节点 87 828 个,平均网格质量为 0.959 9,网格模型如图 2 所示。



图 1 动力电池箱三维模型

Figure 1 Three-dimensional model of power battery box

表 1 电池箱箱体材料的主要参数

Table 1 Main parameters of battery box material

材料名称	密度/ (kg · m ⁻³)	泊松比	弹性模量/GPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
铝合金	2 823	0.27	71.0	51.4	28.0
合金钢	7 900	0.31	193.0	169.0	73.7

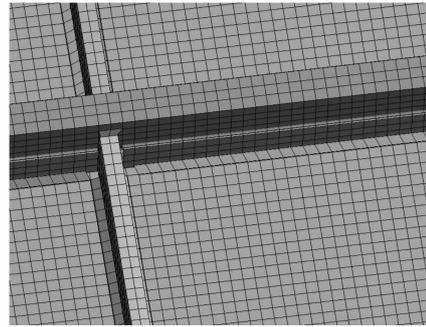


图 2 动力电池箱结构局部网格划分
Figure 2 Power grid box structure local grid division

2 有限元模态分析

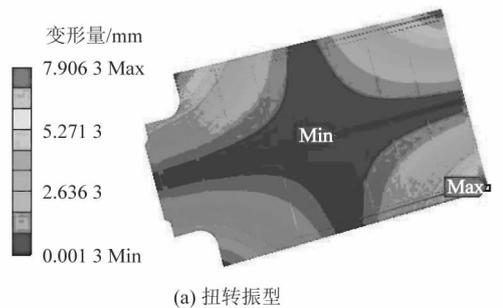
电动汽车实际行驶过程中,电池箱受到多种激励源的共同作用,其中主要激励源是路面载荷和电机振动载荷。当激励频率与电池箱固有频率接近时,电池箱会在激励作用下产生共振,长时间的共振会严重影响电池箱的内部构造,降低电池寿命,影响电池系统安全性。因此,识别电池箱的模态振动特性对于保证电池寿命和电池系统安全具有重大意义^[7]。

电池箱结构的低阶模态多表现为整体或局部的大规模振动,其特点是振型的节点少。结构的低阶模态如果与外界激励发生共振,车身结构会发生变化,结构也会产生变形,影响结构稳定性。所以模态分析主要计算结构的低阶模态。课题组基于 ANSYS Workbench 求解电池箱自由模态,电池箱前 3 阶固有频率如表 2 所示,对应的前 3 阶振型如图 3 所示。

表 2 动力电池箱前 3 阶固有频率

Table 2 First three orders natural frequency of power battery box

振动阶次	频率/Hz	振型描述
1	13.00	扭转振型
2	24.77	弯曲振型
3	43.83	沿 Y 轴弯曲



(a) 扭转振型

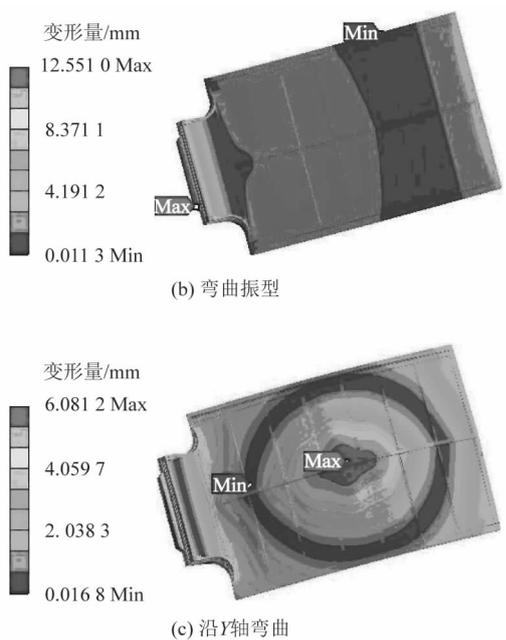


图3 动力电池箱前3阶振型
Figure 3 First three orders vibration mode of power battery box

3 试验模态验证分析

3.1 模态试验

为了验证计算模态分析的结果,对该动力电池进行模态测试。测试设备参数和连接设置如图4和表3所示。进行模态试验时,通过计算模态分析并结合实际经验来确定被试结构支撑点、激励点和响应点的位置。采用自由悬挂方式,在电池箱体上选取45个测点,具体分布如图5所示。

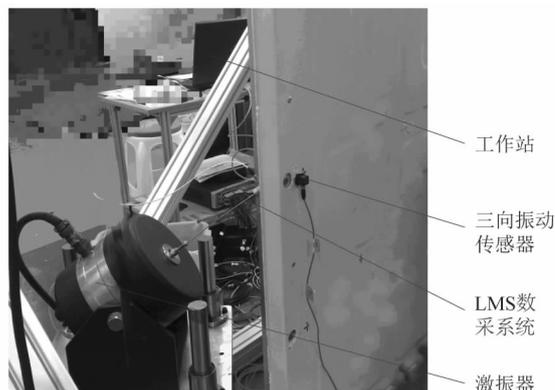


图4 测试设备连接设置
Figure 4 Test device connection settings

表3 测试设备信息

Table 3 Information of test equipment

序号	名称	描述	参数	数量/套
1	数据采集硬件	LMS SCADAMobile SCM05 数采系统	幅值精度为0.2%;分析带宽为40 kHz;最大采样率为204.8 kHz;信噪比大于110 dB	1
2	三向振动传感器	PCB 356A16	灵敏度为100 mV/g;测量范围为±490 m/s ² PK(米/秒 ² 每峰);频率范围为0.5~5 000.0 Hz	13
3	测试分析软件	LMS Test. Lab		1
4	激振器	HEV-200	最大振幅为±10 mm;最大激振力为200 N;频率范围为0.0~2.0 kHz	1
5	功率放大器	HEV-200C		1

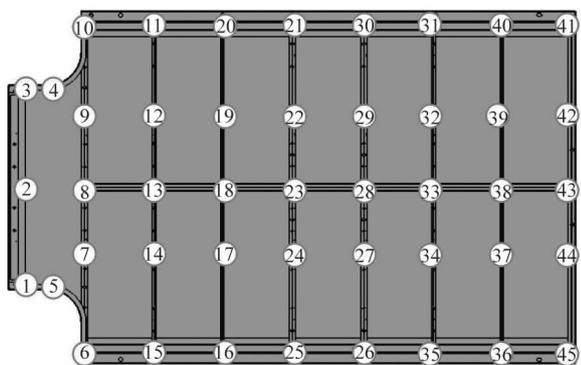


图5 动力电池箱传感器布点位置
Figure 5 Power battery box sensor location

试验时采用激振器激励的方式,激励信号为猝发随机信号,加 Hanning 窗以减少泄漏误差。对测点41实施激励,并对数据进行平均处理以减少测量的随机误差^[8]。前3阶模态频率如表4所示,图6所示为前3阶模态振型。

表4 动力电池箱前3阶固有频率

Table 4 First three orders natural frequency of power battery box

振动阶次	频率/Hz	阻尼比/%	振型描述
1	13.45	0.66	扭转振型
2	22.79	2.32	弯曲振型
3	45.76	1.64	沿Y轴弯曲

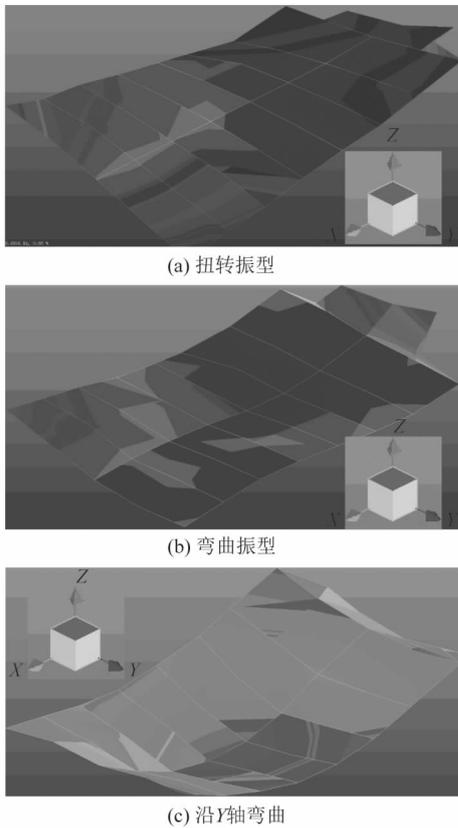


图 6 动力电池箱前 3 阶振型

Figure 6 First three orders vibration mode of power battery box

3.2 模态试验与数值模态对比

模态频率试验值与计算值如表 5 所示。从表中可以看出模态频率试验值与模态分析结果非常接近,最大误差为 7.99%,最小误差仅为 3.46%,各阶振型也基本保持一致,说明所建立的动力电池箱有限元模型和模态仿真较为准确。

表 5 动力电池箱前 3 阶固有频率仿真与试验结果对比

Table 5 Comparison of first three orders natural frequency simulation and test results of power battery box

振动阶次	频率/Hz		误差/%
	仿真结果	试验结果	
1	13.00	13.45	3.46
2	24.77	22.79	7.99
3	43.83	45.76	4.42

4 结构优化

电池箱箱体的结构设计影响车身的稳定性,该结构模态频率应避免载荷的激振频率^[9],才能在电动汽车行驶过程中,避免电池箱箱体受到的激励频率的影响。激励频率

$$f = \frac{V}{S} = \frac{V}{2\pi r_d} \quad (1)$$

式中: V 为电动汽车行驶速度; S 为轮带的周长; r_d 为轮胎的滚动半径^[10]。

考虑汽车行驶工况,当车速低于 130 km/h 时,车轮轮胎型号为 245/45 R19,可知其滚动半径为 0.34 m,将滚动半径数值代入式(1),计算可得 f 为 16.91 Hz。通常实际模态频率应与激励频率错开 2 Hz 以上,故电池箱的 1 阶频率应该控制在 18.91 Hz 以上。为了提高电池箱的 1 阶频率,提出 3 个结构优化方案,详见表 6。

表 6 动力电池箱结构优化方案

Table 6 Structure optimization of power battery box

优化方案	内容	优化后箱体质量/kg	质量减轻比例/%
I	底板材料更换为碳纤维	53.29	55.44
II	增加纵梁		
III	底板材料更换为碳纤维 与增加纵梁结合	59.93	50.06

对表 6 的 3 种方案进行有限元模态分析,从表 7 可以看出,方案 III 满足 1 阶频率大于 18.91 Hz 的要求,因此选用方案 III。动力电池箱优化后的模型如图 7 所示。方案 III 在满足 1 阶频率最大化的要求外,箱体质量与优化前比较,减轻比例达到质量 50.06%,这有助于降低汽车能耗,提高电动车经济性,满足环保的效果。

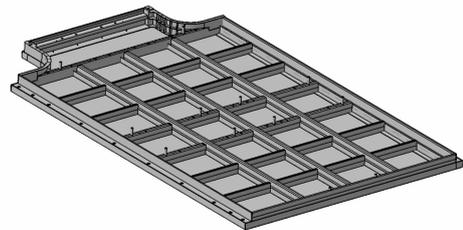


图 7 动力电池箱优化后的模型

Figure 7 Optimized model of power battery box

表 7 优化后动力电池箱前 3 阶固有频率
Table 7 First three orders natural frequency of power battery box after optimization

振动阶次	固有频率/Hz		
	方案 I	方案 II	方案 III
1	17.61	14.01	18.93
2	33.75	28.81	38.13
3	65.01	37.58	52.31

(下转第 91 页)