

动力电池包结构振动强度的仿真与优化

昂金凤 刘舒龙 陈康伟 王鹏显

安徽江淮汽车股份有限公司

摘要: 本文借助仿真软件在虚拟平台搭建电池包随机振动有限元模型, 对电池包施加国标规定的垂直于路面方向的功率谱密度, 计算电池包结构件的应力分布, 根据结果进行结构的优化和验证。

关键词: 模态分析; 随机振动; 电池包结构强度

0 前言

在双碳政策的影响下, 电动汽车在市场的份额逐年增高。随着电动汽车市场保有量的增加, 对电动汽车的安全性也提出了更高的要求。目前, 主流的电动汽车用动力电池包的成组方式为单体电池—模组—壳体—整包。电池包结构强度必须要满足安全性的要求。

本文以某圆柱铁锂电池为模型, 以标准 GB38031-2020 中对电池进行振动测试的载荷 PSD 功率谱为计算边界, 采用模态叠加法, 计算电池壳体结构的强度是否满足要求。

1 随机振动分析

随机振动是在一定的时间范围内, 振动信号的幅值和频率是不确定的、随机变化的。汽车在全寿命范围内行驶在不同的路况中, 车辆受到来自道路的作用力正是这种随时间变化的杂乱无章的载荷。随机振动的特点是无法通过确定性的数学模型来描述, 因此, 需要采用统计方法进行分析。

在求解随机振动载荷问题时, 一般有两种分析方法: 时域法和频域法。时域法中经典的雨流循环计数方法被认为是更准确的方法, 但工作量巨大, 不适合实际的工程应用; 在工程实践中, 通常使用频域的谱分析法对结构进行随机振动分析, 从应力功率谱密度出发, 得到应力幅值的概率密度函数, 进而进行随机振动疲劳分析。

功率谱密度是一种概率统计方法, 是对随机变量均方值的量度。一般用于随机振动分析, 功率谱密度是结构在随机动态载荷激励下响应的统计结果, 是一条功率谱密度值 - 频率值的关系曲线, 其中, 功率谱密度可以是位移功率谱密度、速度功率谱密度、加速

度功率谱密度或力功率谱密度等形式。数学上, 功率谱密度值 - 频率值的关系曲线下的面积就是方差, 即响应标准偏差的平方值。随机振动分析可以是单点也可以是多点的, 在单点随机振动分析时, 要求在结构的一个点集上指定一个功率谱密度; 在多点随机振动分析时, 则要求在模型的不同点集上指定不同的功率谱密度。本文采用单点随机振动分析。

2 电池包随机振动分析

2.1 有限元模型

为了节省计算资源, 有限元建模时对整包模型进行了必要的删减, 网格模型主要包括下壳体、上盖、等效模组、模组钣金件以及模组拉杆。电池包有限元模型采用 CTRIA3 (S3)、CQUAD4(S4)、HEX8(C3D8R) 单元, 网格基本尺寸为 2 mm; 模组采用简易模型, 进行配重; 焊缝采用壳单元与本体共节点, 材料属性为本体的 80%; 螺栓连接采用刚性连接。电池包网格模型如图 1 所示。

2.2 载荷与约束边界

随机振动分析建立在模态分析基础上, 因此, 分析设置两个载荷步: 一个是模态分析步, 一个是随机振动响应分析步。模态求解采用 Lanczos 法, 模态分析时对电池包与车体安装点进行全约束, 随机振动响应分析步在安装点上分别施加 Z/Y/X 方向的加速度功率谱密度。本文参照 GB38031-2020 中规定的功率谱密度 (PSD), 如表 1 所示。

2.3 分析结果

整车坐标系为: X 向是车辆前后端; Y 向是车辆左右端; Z 向是车辆与道路垂直接触端。对于电池包来说, Z 方向的道路载荷是引起电池包失效的关键因素, 因此,

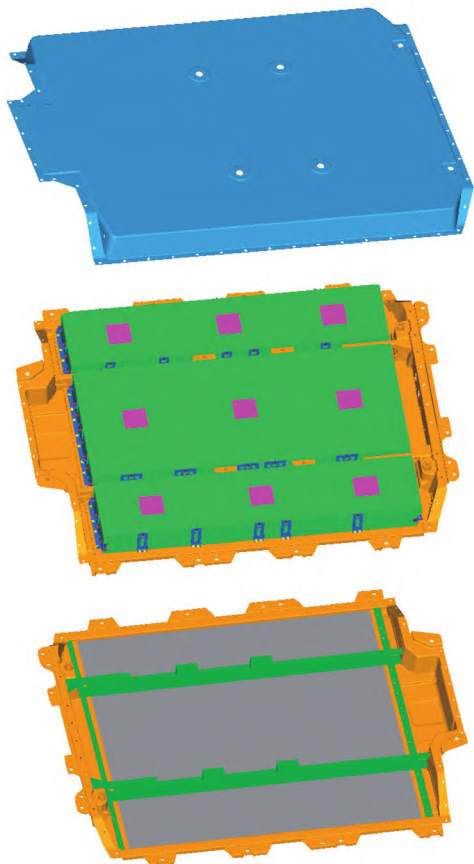


图 1 电池包有限元模型

表 1 加速度功率谱密度

频率 /Hz	加速度功率谱密度 (PSD) / (g^2/Hz)		
	Z 轴	Y 轴	X 轴
5	0.0150	0.00200	0.00600
10	-	0.00500	-
15	0.0150	-	-
20	-	0.00500	-
30	-	-	0.00600
65	0.0010	-	-
100	0.0010	-	-
200	0.0001	0.00015	0.00003

我们在计算时一般先进行Z方向的随机振动分析，如果Z方向结果通过，再进行其他两个方向的计算。如果Z方向不通过，则先优化改进，再重新计算。

电池包前 10 阶固有频率如表 2 所示。

结合结果中的质量参与系数和模态阵型可以得到前 10 阶模态中，前 6 阶均为局部模态，第 7 阶为我们关注的模组第一阶模态，其值为 29.6 Hz，如图 2 所示。

在随机振动分析中，我们主要关注电池包上盖、下壳体 and 模组钣金件的强度。Z 方向随机振动工况下，下壳体最大 Mises 应力为 130 MPa，钣金件最大 Mises

表 2 电池包前 10 阶固有频率

阶数	频率 /Hz
1	19.8
2	20.7
3	21.5
4	24.1
5	26.9
6	28.8
7	29.6
8	32.1
9	32.3
10	33.1

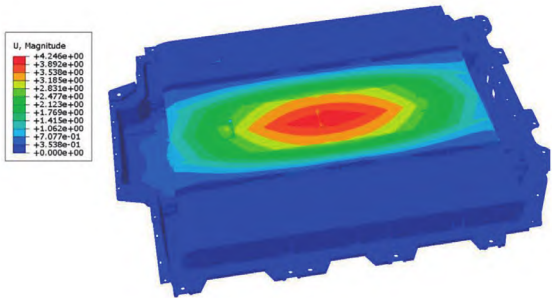


图 2 模组第一阶模态振型

应力为 118 MPa，均超出 9σ 评价准则规定的极限应力值，在全寿命周期内有失效风险。各部件的应力分布如图 3 所示。

3 刚度优化

根据设计和试验经验，一般要求乘用车用动力电池包第一阶模态频率要高于 35 Hz，本模型中模组的第一阶模态频率为 29.6 Hz，有可能会导导致低阶频率共振，需要对电池结构进行刚度提升。

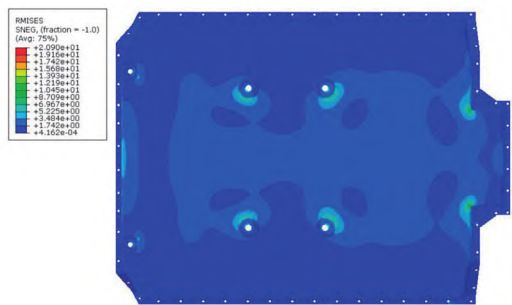
3.1 优化方案的确定

观察模组的第一阶模态振型，模组间的连接主要依靠 5 根拉杆，且拉杆相对于模组的位置偏上，导致模组整体刚度不够，因此，优化思路主要集中在提升模组的整体刚度上。环氧树脂板具有黏附力强、收缩力强的优点，因此，选择将模组下端胶粘在 0.5 mm 的环氧树脂板上，以达到提高模组刚度的目的，如图 4 所示。

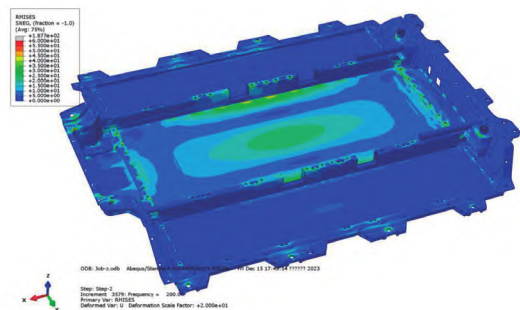
3.2 优化结果

优化后模组第一阶频率为 55 Hz，相较于之前的 29.6 Hz，频率显著提高，表明优化思路正确合理，如图 5 所示。

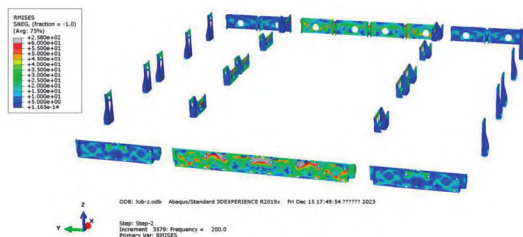
优化后 Z 方向随机振动工况下，下壳体和钣金件



a) 上盖



b) 下壳体



c) 钣金件

图3 电池包主要结构件应力分布

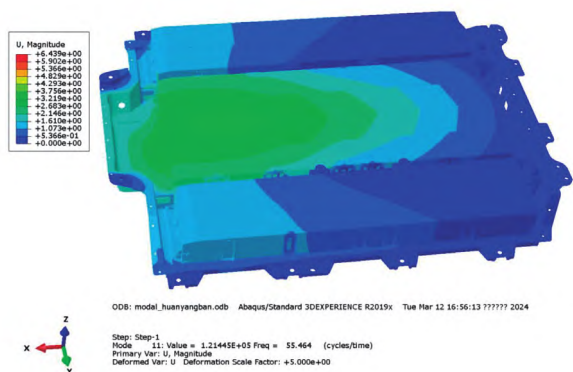


图5 优化后模组第一阶模态振型

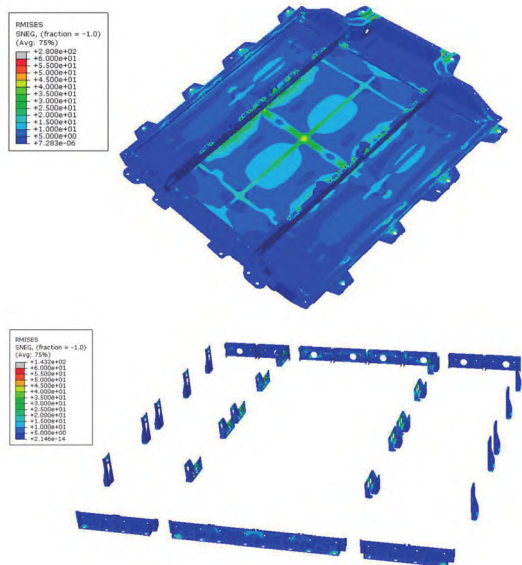


图6 优化后的下壳体和钣金件的应力分布

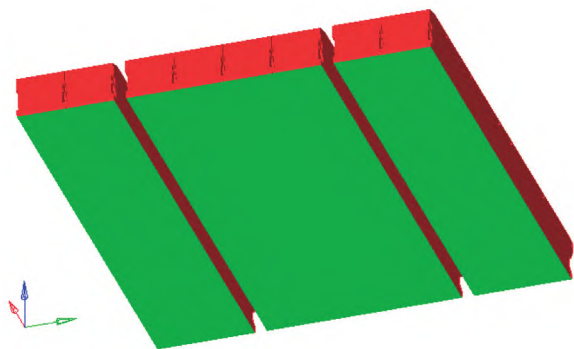


图4 在模组下端胶粘环氧树脂板

的应力显著下降，下壳体最大 Mises 应力为 49 MPa，钣金件最大 Mises 应力为 23 MPa，符合 9σ 评价准则，满足强度要求，应力分布如图 6 所示。

4 结语

本文对动力电池包进行模态分析和随机振动仿

真分析，在初始分析中，模组第一阶频率低，仅有 29.6 Hz，无法避开车架传递过来的外激励频率，存在低阶共振的危险。通过对模组第一阶模态振型的分析，找到提高模组下端整体性的优化思路，优化后模组第一阶频率显著提高至 55 Hz，下壳体和钣金件的应力也下降到极限值以下，说明优化思路正确，优化效果明显。

参考文献

[1] 黄晓婷. 多轴随机振动频域疲劳方法的研究与应用 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

[2] 谭祥军. 从这里学 NVH: 噪声、振动、模态分析的入门与进阶 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

[3] 国家市场监督管理总局, 国家标准化委员会. 电动汽车用动力蓄电池安全要求第 8 部分电池包或系统安全性试验方法: GB/38031-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.