

动力电池作为电动汽车的核心零部件，研究其安全性与轻量化问题具有重要意义。本文选取典型乘用车项目动力电池系统结构进行详细说明，涵盖了动力电池产品开发中的有限元建模、仿真分析及轻量化优化等重要环节，在满足动力电池系统结构安全性能的前提下，进行轻量化优化设计。

□ 桑顿新能源科技有限公司 周莎

动力电池结构仿真分析及轻量化优化

随着汽车科技的不断发展，采用动力电池的纯电动汽车呈现出蓬勃发展的趋势。目前，各大主流汽车厂商及科研机构投入巨额资金，支持纯电动汽车产品的开发。发展电动汽车产业，是推动汽车产业可持续发展的重要举措。

动力电池作为电动汽车动力来源，是车辆最重要的零部件，其设计好坏直接关系整车性能。同时动力电池系统结构也是汽车电池的主要承载结构，因此进行动力电池结构的安全性研究相当重要。多数动力电池包结构复杂，箱体结构厚重，极大地增加了电动汽车的重量，因此需要利用仿真技术对电动汽车动力电池箱的整体结构进行优化分析，在满足结构强度安全可靠性的前提下，进行轻量化优化设计，是需要重点关注的问题。

与电动汽车其他零部件一样，动力电池在性能方面满足要求的前提下，安全性和使用寿命也必须达到相关要求和标准，这也是整个动力电池系统设计开发的重点关注部分。国家对于动力电池结构安全方面提出了相应的国家标准作为依据，在 GB/T31467.3-2015 标准中对电池模组和动力电池整包在极端情况下的安全提出了具体要求，主要会出现结构风险的极端情况有随机振动、机械冲击、跌落翻滚、模拟碰撞和挤压工况等。其中，随机振动工

况为最重要的工况，也是难通过的工况之一，本文基于电池包的这项性能进行了研究分析。

动力电池包结构振动仿真分析

本文针对一种应用于纯电动新能源乘用车的动力电池包，为评估动力电池结构振动强度风险，对其结构强度进行模态分析和随机振动强度分析，进行结构强度风险预判，研究该电池包结构能否满足国标强度要求，并根据仿真结果对该电池包进行优化设计。

1. 动力电池的振动安全性要求

本文研究的动力电池包布置在电动汽车乘员舱下部，在汽车行驶过程中，时刻受到路面激励带来的颠簸振动，需考核电池包的振动耐久性，具体振动强度要求按照 GB/T31467.3—2015 电动汽车用锂离子动力蓄电池包和系统第 3 部分：安全性要求与测试方法。随机振动是一种无规律的随机振动形式，一般用 PSD 谱来考量，PSD 即功率谱密度，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，动力电池随机振动 PSD 载荷谱见表 1。

动力电池包的振动测试在 Z 轴、Y 轴和 X 轴 3 个方向上依次进行，其中 X 轴是行车方向，Z 轴是

表 1 随机振动载荷

Z 方向	频率 (Hz)	功率谱密度 (g^2/Hz)	Y 方向	频率 (Hz)	功率谱密度 (g^2/Hz)	X 方向	频率 (Hz)	功率谱密度 (g^2/Hz)
	5	0.05		5	0.01		5	0.0125
	10	0.06		10	0.015		10	0.03
	20	0.06		20	0.015		20	0.03
	/	/		50	0.01		/	/
	200	0.0008		200	0.0004		200	0.00025

垂直于地面方向。该动力电池包布置在汽车地板下，动力电池包还需要满足电动汽车使用的强度和刚度设计要求，此外，还需满足 IP67 的防护等级要求。

2. 电池包有限元模型的建立
该动力电池包结构三维数模是使用 CATIA 建立，如图 1 所示；其长 × 宽 × 高尺寸为 1 780 mm × 1 135 mm × 253 mm，由下箱体、箱盖、模组和电气装置组成，动力电池整包总重量为 320 kg，下箱体结构质量为 52 kg。

对动力电池包结构 3D 数模进行有限元建模，计算软件采用 Abaqus。电池箱体结构主要采用壳单元，单元尺寸为 3mm，箱盖与箱体蒙皮采用螺栓连接，模组通过长螺栓固定在箱体底梁，电池箱底梁与箱体蒙皮之间采用焊缝连接；其中长螺栓采用实体单元进行模拟，焊点采用 acm 和 Reb3 两种连接方式进行模拟，焊缝采用 seam 单元进行模拟，焊接位置和实际焊接位置一致。

动力电池结构的各零部件赋予材料属性见表 2，完成有限元模型的前处理设置。

3. 电池包模态及随机振动分析

模态分析是研究结构动力特性的一种重要方法，查看结构的固有振动特性，能够预测初期结构的设计是否合理，尽可能地避免结构初期的设计缺陷，如系统的共振，为结构优化提供指导方案，这样可以大幅度缩短产品开发的周期，节省开发成本。

动力电池模态分析可以获得电池系统结构的固有频率及振

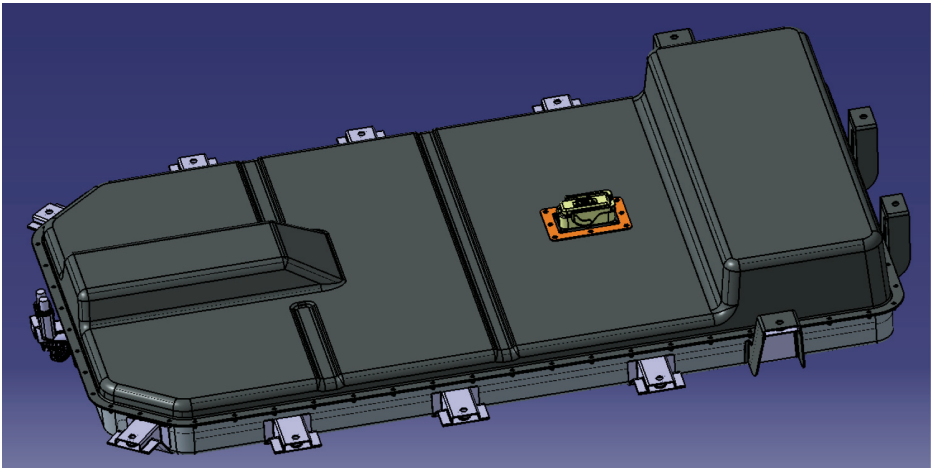


图 1 动力电池包 3D 数模

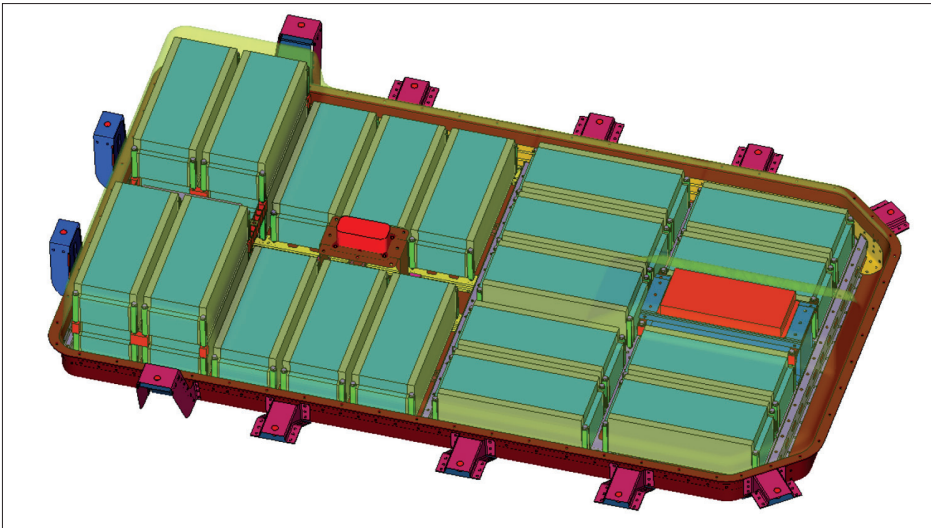


图 2 动力电池有限元模型

表 2 主要零部件材料性能参数

名称	材料	密度 / (g/cm ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服强度 /MPa
上盖	DC01	7.85	210	0.3	170
箱体	DC01	7.85	210	0.3	170
内梁	Q345	7.85	210	0.3	345

型，初步评估电池系统整体结构特性，并改进结构动态响应；路面对汽车及动力电池的随机振动激励载荷频率一般较低，在 35 Hz 以内，从 GB/T31467.3-2015 中随机振动载荷 PSD 谱中就可以明显看出，较大激励载荷频率在 20 Hz 左右；主频越大，对应的振动激励载荷越低，为避免动力电池的共振，提高刚度，需尽量提高电池主频，应大于

35 Hz，避免共振带来的结构失效风险，随机振动失效的风险就会降低。

将所建立的动力电池有限元模型导入 Abaqus 软件，按相应标准进行模态分析和 3 个方向随机振动强度分析，见表 3；结果显示得出电池包每个方向的主频，其中 Z 向主频较低，28.6 Hz，如图 3 所示，存在失效风险；得出动力电池包 Z

向振动的最大 1 Sigma 应力为 120.5 MPa, 3 Sigma 应力大于材料屈服强度, 如图 4 所示, 有失效风险, 需优化电池包结构。

电池包结构轻量化优化分析及测试验证

由初步仿真分析结果得出, 电池包结构强度较弱, 有结构失效风险, 需进行结构优化。从增强动力电池包结构刚度、提高电池包主频的角度出发, 提高结构紧凑性, 可在两两模组端板之间加压条连接, 使电池包内部所有模组结构连成一个整体, 同时一起振动, 有效提高动力电池整体刚度, 提高电池包主频。在受力较大有失效风险部位, 应局部加强, 例如锁模组大梁孔位处, 螺栓拧紧固定受力较大, 此处可在大梁下加背板进行局部加强。

轻量化优化设计, 是在满足结构安全性能的前提下, 尽可能减小结构质量, 提高电池包能量密度, 增强电动汽车的经济性, 相应降低环境污染, 因此电池包轻量化优化具有重要意义。轻量化遵循的原则: 合适部件应用合适强度材料, 并匹配合适尺寸。参考上述动力电池结构仿真分析结果, 分析结构件受力情况, 受力大的部位就局部加强, 受力小的部位就进行减薄并开孔; 受力很小的部位就根据实际受力情况, 合理去除多余零部件; 同时进行焊接优化, 在受力较小的位置, 可适当减弱稀释焊接, 受力较大位置, 就适当加强焊接, 优化焊点布局, 使动力电池结构整体受力合理。

同时除了结构优化外, 结合轻量化材料和先进制造工艺进

行优化设计, 全面进行动力电池系统结构轻量化优化; 轻量化材料可采用高强度钢和低密度轻质材料, 如铝、镁合金和复合材料等, 能有效降低结构质量; 对于

一些关键受力部位, 可以通过结构胶和激光拼焊板等先进工艺, 来辅助进行局部结构加强, 不用通过整体加厚结构去提高结构强度, 从而能达到更高效的轻量化

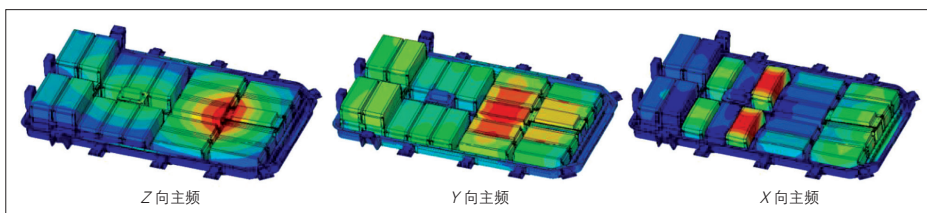


图 3 动力电池三方向主频

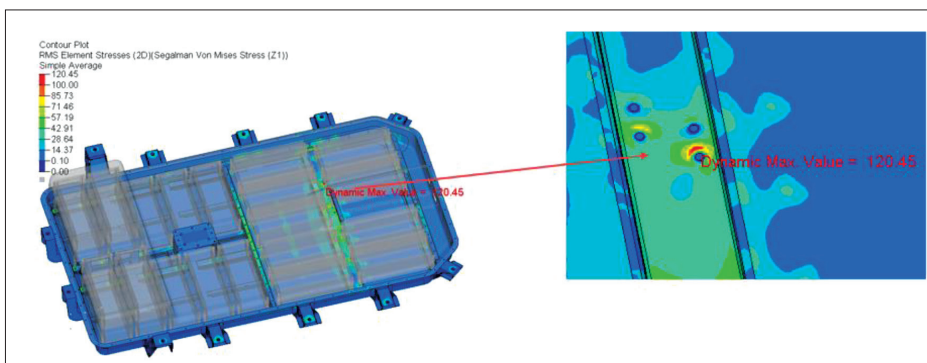


图 4 动力电池最大应力

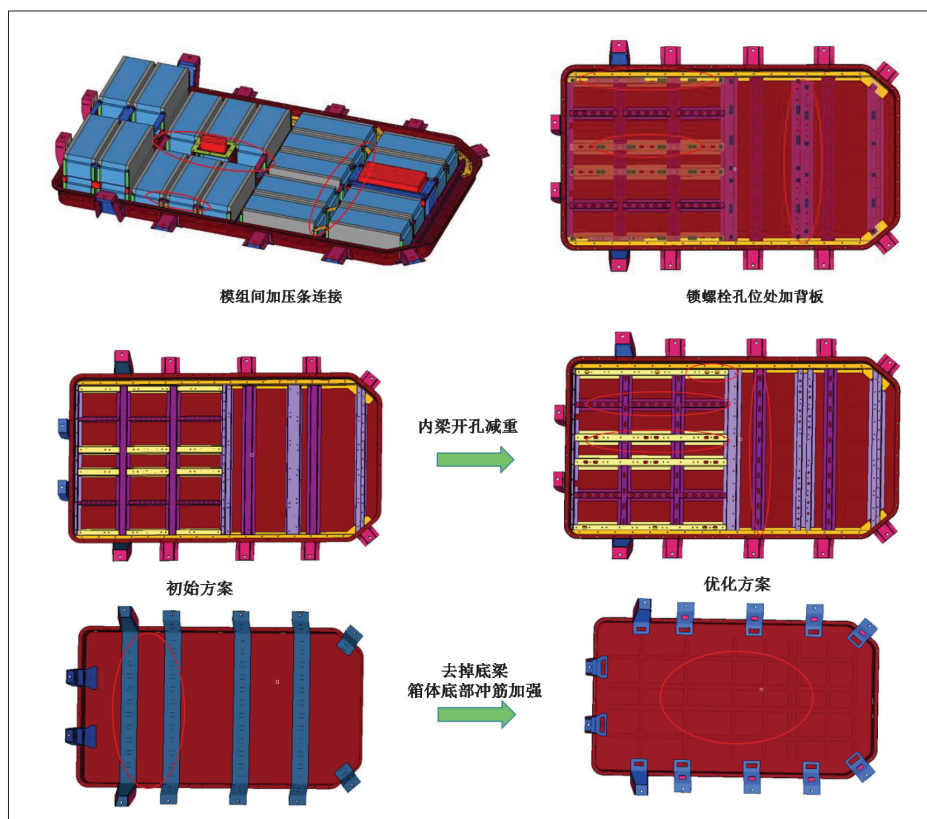


图 5 优化方案

表 3 振动仿真模态及应力结果

项目	参数	要求	判定	备注
Z 向一阶主频	28.6 Hz	< 35HZ	不通过	
Y 向一阶主频	52.3 Hz	> 35HZ	通过	
X 向一阶主频	63.3 Hz	> 35HZ	通过	
Z 向最大应力	120.5 MPa	> 115MPa	不通过	3 Sigma 应力>屈服强度
Y 向最大应力	39.2 MPa	< 115MPa	通过	3 Sigma 应力<屈服强度
Y 向最大应力	76.7 MPa	< 115MPa	通过	3 Sigma 应力<屈服强度

表 4 优化后振动仿真模态及应力结果

项目	参数	要求	判定	备注
Z 向一阶主频	35.7 Hz	> 35 Hz	通过	
Y 向一阶主频	57.3 Hz	> 35 Hz	通过	
X 向一阶主频	66.3 Hz	> 35 Hz	通过	
Z 向最大应力	84.2 MPa	< 115 MPa	通过	3 Sigma 应力<屈服强度
Y 向最大应力	35.1 MPa	< 115 MPa	通过	3 Sigma 应力<屈服强度
Y 向最大应力	63.6 MPa	< 115 MPa	通过	3 Sigma 应力<屈服强度

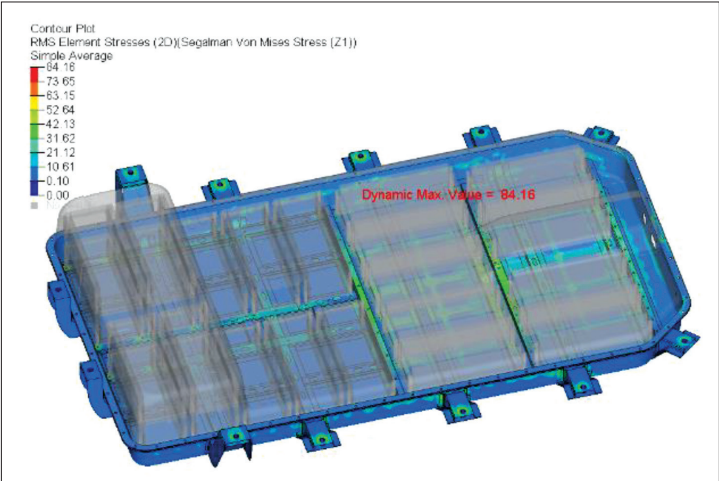


图 6 优化后动力电池最大应力



图 7 动力电池包振动测试

目的。
通过对比初始方案模型，参
考仿真分析结果，结合实际情

况，根据上述结构优化方案，合
理布局结构受力；此次动力电池
结构的具体优化方案如图 5 所

示；该优化方案相应地进行结构
轻量化优化，箱体结构总共减重
3.8 kg，在满足电池包结构安全
性能的前提下，减小结构质量。

将优化后的动力电池结构有
限元模型导入 Abaqus 软件进行
模态分析和随机振动强度分析，
结果显示得出动力电池包每个方
向的主频均大于 35 Hz，满足模
态要求，见表 4。得出动力电池
包结构的最大振动 1 Sigma 应力
为 84.2 Mpa，3 Sigma 应力小于
材料屈服强度，如图 6 所示，满
足结构强度要求。

参考动力电池结构振动仿
真结果，将动力电池包安装在振
动测试台上，按相应标准开展振
动测试进行验证，依据国标 GB/
T31467.3-2015 的测试要求，按
Z、Y 和 X 方向的振动顺序依次
进行随机振动测试，如图 7 所示，
最终顺利安全通过测试。在满足
结构安全要求的前提下，质更小，
结构更优。

结论

本文主要说明了动力电池
包仿真分析及轻量化优化设计要
点，具体如下：

- 1) 分析了动力电池振动安全
性要求，进行了动力电池结构
模态分析和随机振动强度分析。
- 2) 根据仿真结果进行了动力
电池结构轻量化优化分析，轻
量化效果显著，并且结构更优，
最终顺利安全完成振动测试，缩
短项目开发周期，降低项目开发
成本。A