

碳纤维电池包箱体的设计与铺层优化研究*

徐峰祥 毛锐

(武汉理工大学,现代汽车零部件技术湖北省重点实验室 汽车零部件技术湖北省协同创新中心,
武汉 430070)

【摘要】为实现电池包箱体的轻量化设计,采用碳纤维复合材料取代传统金属构建电池包箱体结构。首先对碳纤维电池包的动静态性能开展有限元分析,并基于性能要求对上盖板依次进行形貌优化和尺寸优化,对下箱体进行结构优化,使下箱体质量减轻31.1%,且一阶固有频率提升至50.63 Hz,然后,开展了箱体铺层优化分析,基于Isight平台对下箱体的质量和一阶固有频率进行多目标优化,利用熵-优劣解距离法(TOPSIS)确定最优铺层设计方案,并综合考虑层合板铺覆工艺对铺层顺序进行全面优化,优化分析结果表明,下箱体实现质量减轻58.9%,且各工况下的最大位移和最大应力均有所减小,电池包箱体动静态性能均得到提升。

关键词: 电池包箱体 碳纤维复合材料 铺层 多目标优化 轻量化设计

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20230439

Design and Layering Optimization of Carbon Fiber Battery Package Box

Xu Fengxiang, Mao Rui

(Hubei Key Laboratory of Modern Automotive Parts Technology, Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Parts Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

【Abstract】Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) were used to replace traditional metals to construct battery pack box to achieve lightweight design of battery pack box. Firstly, based on performance requirements, finite element analysis was conducted for the dynamic and static performance of carbon fiber battery pack, topography and size optimization was carried out on the upper cover plate, and structural optimization was made on the lower box body respectively, which increased the first-order natural frequency to 50.63 Hz and reduced weight of the lower box by 31.1%. Secondly, optimization analysis was made on the box layer, and based on the Isight platform, multi-objective optimization was conducted on the weight and first-order natural frequency of the lower box, meanwhile the entropy TOPSIS decision-making method was used to determine the optimal layer design scheme. Finally, the layer sequence was optimized by considering the lamination board laying process. The optimization analysis results show that lower box achieves a weight reduction of 58.9%, and both the maximum displacement and maximum stress under all operating conditions were reduced, and the dynamic and static performance of the battery pack box has been improved.

Key words: Battery pack box body, CFRP, Layering, Multi objective optimization, Lightweight design

【引用格式】 徐峰祥,毛锐.碳纤维电池包箱体的设计与铺层优化研究[J].汽车技术,2024(9):1-9.

XU F X, MAO R. Design and Layering Optimization of Carbon Fiber Battery Package Box[J]. Automobile Technology, 2024(9): 1-9.

1 前言

受当前电池技术的限制,续航能力成为制约电动汽车发展的主要瓶颈。在电动汽车各组成部分中,动力电池系统质量占比约30%,电池包箱体是动力电池系统中

除电芯外质量最大的部分,因此针对电池包箱体的轻量化设计成为近年来增加电动汽车续航里程的重点研究方向。Hartmann^[1]等对电池包箱体进行了形貌优化,在顶部和侧围布置相应加强筋,使得箱体静态强度和动态刚度均得到改善,同时箱体质量减轻约17%。Shui^[2]等

*基金项目:国家自然科学基金项目(51975438)。

采用第二代非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)对电池包箱体进行优化,在保证电池包机械性能的前提下实现了轻量化设计。熊玥^[3]等基于正交试验法,结合随机振动工况对电池包壳体进行轻量化设计,使模型质量减轻11.73%,并验证了优化后模型的可靠性。上述研究虽通过结构优化获得了一定的轻量化效果,但金属电池包箱体的质量仍然较大,进一步的轻量化需要借助新材料的应用^[4]。王庆^[5]等将碳纤维复合材料应用于汽车保险杠的轻量化设计,实现质量减轻36.4%。叶辉^[6]等将碳纤维复合材料应用于汽车覆盖件,实现发动机罩质量减轻51.2%。

本文采用性能优异的碳纤维复合材料(Carbon Fibre Reinforced Plastics, CFRP)^[7]取代传统金属材料,并对电池包箱体采用多种结构优化方法开展轻量化设计。对上盖板进行形貌优化和尺寸优化,对下盖板依次进行自由尺寸优化、尺寸优化、结合熵-优劣解距离法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)进行多目标优化以及铺层顺序优化,以期在结构动静态性能提升的同时实现轻量化。

2 复合材料电池包箱体有限元性能分析

2.1 复合材料电池包箱体模型建立

本文研究的电池包箱体结构总体外形尺寸为1 363 mm×1 152 mm×182 mm,建立三维模型后导入前处理软件HyperMesh中。电池包箱体结构主要由上盖板、下箱体及固定结构等组成。对一些微小的细节进行适当简化,如小圆角、小孔、凸台、凹槽等^[8],以提高计算精度和运算效率。电池包上盖板和下箱体采用碳纤维复合材料,其余结构采用Q235钢制材料,2种材料的具体参数如表1和表2所示。

表1 碳纤维复合材料参数

参数	数值
纵向弹性模量 E_1 /GPa	140
横向弹性模量 E_2 /GPa	8.4
泊松比	0.27
密度/kg·m ⁻³	1.8×10 ³
面内剪切模量 G_{12} /GPa	6.8
面内剪切模量 G_2 /GPa	5.4
纵向拉伸强度 X_t /MPa	1 520
纵向压缩强度 X_c /MPa	1 200
横向拉伸强度 Y_t /MPa	60
横向压缩强度 Y_c /MPa	193
面内剪切强度 S /MPa	75

表2 Q235钢材料参数

参数	取值	参数	取值
泊松比	0.3	密度/kg·m ⁻³	7.85×10 ³
弹性模量/GPa	210	屈服极限/MPa	235

综合考虑各部件的受力、连接及加工成本等^[9],各部件厚度如表3所示。

表3 电池包箱体不同组成部件的材料属性及厚度

部件	材料	厚度/mm
上盖板	CFRP	3.0
下箱体	CFRP	3.0
内部加强纵梁	Q235	1.5
内部加强横梁	Q235	1.5
侧围加强纵梁	Q235	1.5
侧围加强横梁	Q235	1.5
吊耳	Q235	2.0

对电池包下箱体和上盖板进行初始铺层设置,铺设0°、45°、-45°、90°4个角度,设置各角度的初始厚度为0.75 mm,设置完成后的复合材料电池包箱体的有限元模型如图1所示。

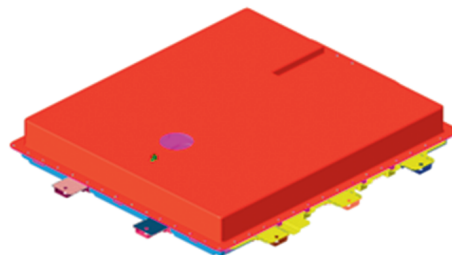


图1 复合材料电池包箱体有限元模型

2.2 静力学仿真分析

2.2.1 静态工况选取

电动汽车行驶过程中的载荷工况多样,为进行静力学分析,本文选取3种工况作为电动汽车典型工况进行分析^[10],各典型工况及相应载荷设置如表4所示。

表4 静态特性分析工况设置

工况	位移边界条件	载荷施加情况
颠簸路面急转弯	约束安装点位置X、Y、Z方向上的全部自由度	向下3 g,转弯方向0.8 g
颠簸路面紧急制动	约束安装点位置X、Y、Z方向上的全部自由度	向下3 g,前进方向1.0 g
颠簸路面急加速	约束安装点位置X、Y、Z方向上的全部自由度	向下3 g,倒车方向0.5 g

分析可知,电池模组对电池包箱体产生的冲击力主要集中在箱体的底部和侧围,为保证模拟结果可靠,将惯性加速度等效为静态力均匀施加在电池包箱体底部和侧围节点上^[11]。

2.2.2 静态工况分析结果

电池包箱体在各典型工况下的位移云图和应力云图如图2所示,电池包箱体静态工况分析结果如表5所示。3种工况下最大位移发生在颠簸路面紧急制动工况,为7.25 mm,位于下箱体中间区域;最大应力发生在颠簸路面急加速工况,为195.3 MPa,且各工况最大应力均位于吊耳处。后续的轻量化设计过程将以此为参考优化结构刚度和强度。

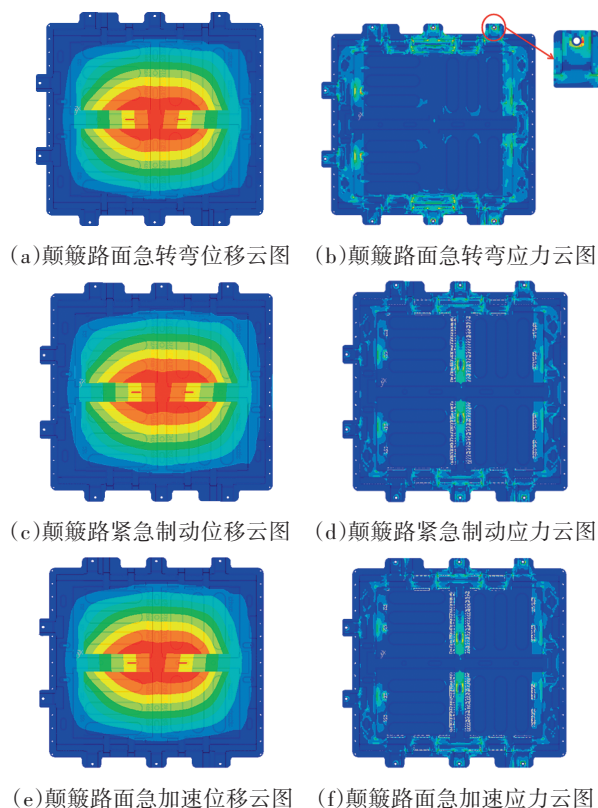


图2 各典型工况下的位移云图和应力云图

表5 电池包箱体静态工况分析结果

工况	最大位移/mm	最大应力/MPa
颠簸路面右转弯	7.23	191.0
颠簸路面紧急制动	7.25	188.8
颠簸路面急加速	7.22	195.3

2.3 动态特性仿真分析

为避免电动汽车运行时外界激励与电池包箱体固有频率相近而产生共振,需通过模态分析了解结构的动态特性。对电池包箱体结构进行模态分析时,约束吊耳安装位置X、Y、Z方向上的全部自由度,设置固有模态分析类型,利用模态卡片EIGRL提取电池包箱体结构前6阶固有频率及振型^[12],如表6、图3所示。

电动汽车在行驶过程中会受到来自不平路面和电机产生的激励,工作状态下电机振动的相应频率不超过25 Hz,而路面产生的激励则与路面平整度和车速有

关^[13],路面激振频率的计算公式为:

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

式中: f 为路面激振频率, V_{\max} 为最大车速, L_{\min} 为路面不平度的波长。

表6 电池包前6阶固有频率及相应振型特点

阶次	固有频率/Hz	振型描述
1	22.17	单峰谷上盖板中心处交替振动
2	39.91	2处峰谷上盖板前后交替振动
3	40.07	2处峰谷上盖板前后交替振动
4	47.60	2处峰谷上盖板左右交替振动
5	67.91	3处峰谷上盖板前后交替振动
6	71.86	4处峰谷上盖板交替振动

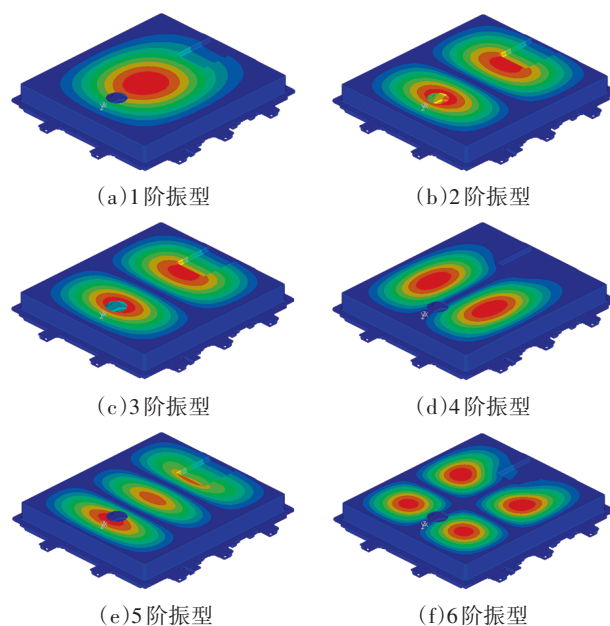


图3 电池包前6阶振型

常见的4种类型路面的不平度参数如表7所示。

表7 常见路面类型不平度参数 m

路面类型	平坦路面	搓板路面	碎石路面	未铺路面
波长	1.00~6.30	0.74~5.60	0.32~6.30	0.74~8.20

由于电动汽车主要行驶路面为城市平坦路面,故从平坦路面的波长范围中选取路面不平度,取路面波长为1 m,电动汽车在此路面上的最高车速设定为100 km/h,通过计算可得路面激振频率为27.78 Hz。因此,为避免结构发生共振,电池包箱体的一阶固有频率应大于28 Hz。一般要求电池包一阶固有频率大于30 Hz,只要满足此要求,GB 38031—2020《电动汽车用动力蓄电池安全要求》规定的振动疲劳测试中24 Hz定频激励下计算出的损伤值将接近0,电池包各点应力响应基本可控制在疲劳极限以下。本文所分析电池包的一阶固有频

率为 22.17 Hz,需要在后续优化过程中针对上盖板的一阶固有频率进行优化,以提高电池包的动态特性。

3 上盖板优化设计

3.1 上盖板形貌优化

根据模态分析结果,将上盖板的顶部设定为设计区域,上盖板侧围和底部连接部分为非设计区域,如图 4 所示。为模拟与下箱体的连接,固定上盖板底部的安装位置。在形貌优化过程中,设计变量为节点扰动的形状变量,包括起筋最小宽度 W 、起筋高度 H 和加强筋角度 θ ,如图 5 所示。

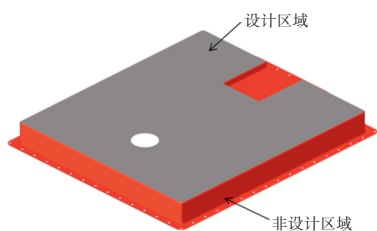


图4 设计区域选取

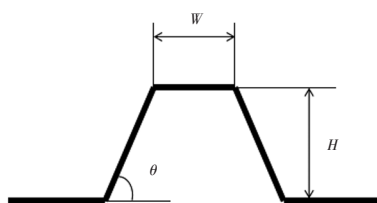


图5 形貌优化设计参数

在形貌优化中,为避免优化结果中的加强筋尺寸过小,设定最小起筋宽度为 30 mm;起筋角度一般推荐为 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$,本文起筋角度设定为 75° ;最大起筋高度设定为 10 mm。通过缓冲区域(Buffer Zone),可使设计区域与非设计区域之间过渡平滑^[14]。

在 OptiStruct 中完成参数设定后即可进行形貌优化分析,经过 18 次迭代更新后得到最优解,形貌优化结果如图 6 所示。

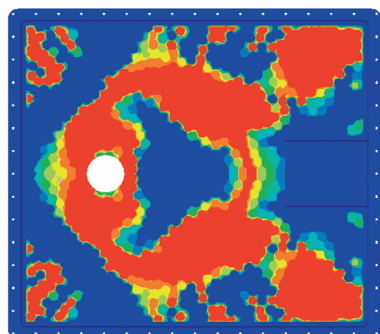


图6 形貌优化结果

形貌优化的求解结果并不能直接应用于加工,其主要提供概念指导作用,需对优化结果进行几何重构,在 CATIA 中进行重新建模,针对加强筋进行几何修整。重新建模后的上箱体结构如图 7 所示。

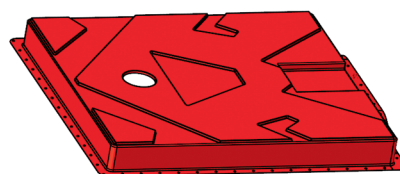


图7 重构后的上盖板结构

3.2 上盖板尺寸优化

上盖板在获得最佳结构特性后还需进行尺寸优化,在满足一阶模态频率要求的前提下实现轻量化设计。以上盖板的厚度为设计变量,一阶固有频率大于 30 Hz 作为约束,优化尺寸范围为 1~3 mm,其数学模型为:

$$\begin{aligned} \text{Objective: } & \text{Min } M \\ \text{Subject: } & \begin{cases} f_1 \geq 30 \text{ Hz} \\ 1 \text{ mm} \leq T \leq 3 \text{ mm} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: M 为上盖板质量, f_1 为上盖板一阶固有频率, T 为层合板厚度。

尺寸优化共经历 8 次迭代,结合加工制造性对优化结果进行圆整后取上盖板的厚度为 2 mm,优化后的上盖板实现质量减轻 31.1%。

4 下箱体结构优化

4.1 下箱体自由尺寸优化

将复合材料建模为几个超级层构成的层合板,优化后得到超级层的厚度分布^[15],如图 8 所示。

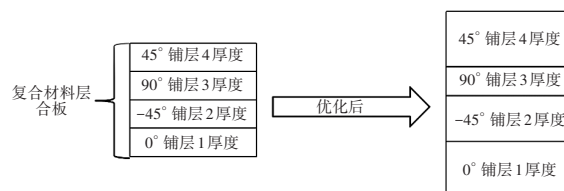


图8 复合材料单元超级层厚度变化

自由尺寸优化的目的是得到铺层的最佳厚度分布,优化目标为最小化加权应变能,即结构的加权柔度最小。优化过程需要考虑的约束条件如下:

- 为方便加工制造,应避免优化结果中出现太多过于细小的碎片化区域,设定最小裁剪尺寸为 30 mm;
- 层合板应遵循均衡原则,保证 45° 和 -45° 铺层比例相等,2 种角度的铺层应具有相同的厚度分布;
- 各方向铺层比例控制在 0.2~0.7 范围内;
- 下箱体的一阶固有频率应大于 30 Hz,保证结构的动态性能;
- 优化后结构体积分数应小于 40%,保证优化后结构的轻量化效果。

优化过程共经历 80 次迭代,其迭代曲线如图 9 所示,优化后下箱体厚度分布如图 10 所示。

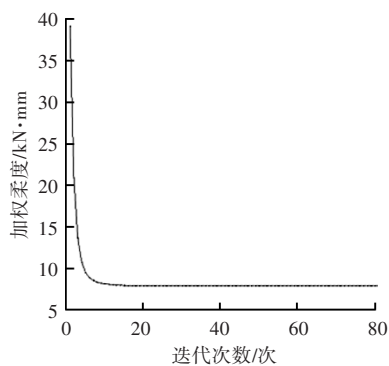


图9 加权柔度响应的迭代曲线

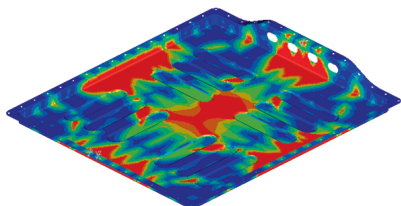
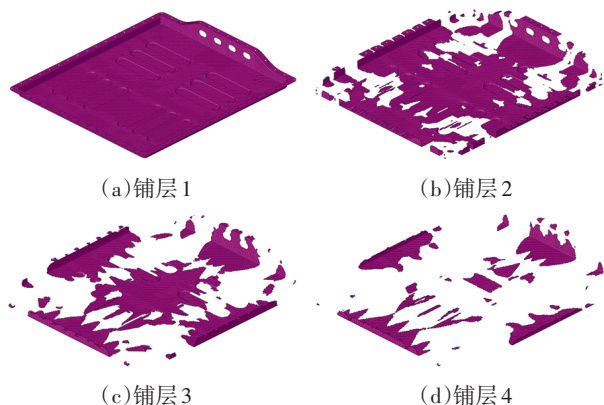


图10 自由尺寸优化后下箱体厚度分布

在自由尺寸优化的结果中,每个角度的铺层都会默认离散解析出4个具有各自独立的形状与厚度的铺层,层合板共有16个铺层。以 0° 铺层为例,离散出的4个铺层如图11所示。

图11 0° 铺层解析结果

复合材料结构在设计过程中需要考虑其可制造性,由自由尺寸优化结果可以看出,铺层形状并不规则,不利于复合材料的制造与加工,因此需要对铺层进行修整,以 0° 铺层为例,修整后的铺层如图12所示。

4.2 下箱体自由尺寸优化

尺寸优化是在自由尺寸优化的基础上进行进一步优化,通过尺寸优化可以获得离散出的各铺层的最佳厚度。尺寸优化的设计变量为各铺层的厚度,优化目标为下箱体质量最小,优化过程中的约束条件如下:

- 下箱体模态一阶固有频率应大于30 Hz;
- 复合材料的失效因子小于1;
- 单层离散铺层的厚度为0~1.5 mm。

在完成上述优化设置后进行求解,得到的铺层优化

厚度如表8所示。其中铺层编号数字中第1位表示结构铺层的角度,1、2、3、4分别对应 0° 、 45° 、 -45° 、 90° ,第2位数字表示同一铺层角度的不同形状。

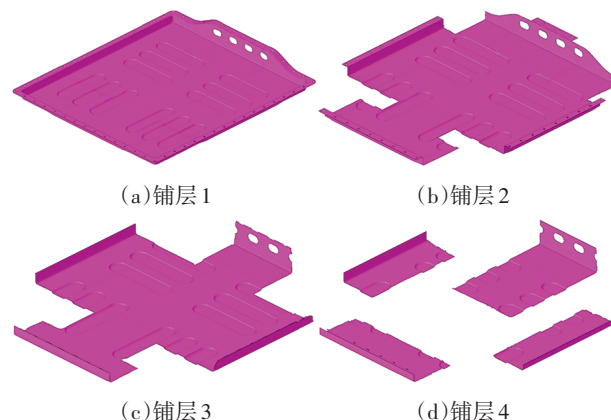
图12 修整后 0° 铺层

表8 尺寸优化后铺层厚度 mm

铺层编号	优化厚度	铺层编号	优化厚度
PLY1100	0.459 22	PLY3100	0.453 43
PLY1200	0.731 02	PLY3200	0.711 41
PLY1300	1.072 65	PLY3300	1.037 15
PLY1400	0.737 11	PLY3400	0.798 00
PLY2100	0.453 43	PLY4100	0.470 05
PLY2200	0.711 41	PLY4200	0.784 22
PLY2300	1.037 15	PLY4300	1.168 75
PLY2400	0.798 00	PLY4400	0.576 98

5 下箱体铺层多目标优化

为获得下箱体最佳复合材料方案,对下箱体铺层方案进行多目标优化,设计变量为所有单层的厚度,共16个。多目标优化中考虑的响应主要是4个工况下下箱体的最大应力和最大位移,为了提高电池系统的比能量和结构的动态性能,选择最小质量和最大一阶固有频率作为优化目标,对电池组下箱体进行多目标优化。

5.1 近似模型建立

近似模型的建立需要获取样本点,通过试验设计可以有效生成样本点,本文选取具有良好空间填充能力和非线性拟合能力的最优拉丁超立方设计方法生成样本点^[16-17]。共进行241次试验,由于试验次数较多,限于篇幅,整理前5组设计变量取值及响应结果如表9所示。

5.2 多目标优化结果

采用求解速度快且收敛性好的NSGA-II算法对近似模型进行多目标优化求解。所得到的帕累托(Pareto)解集如图13所示。

表9 前5组设计变量取值及响应结果

变量	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组
PLY1100厚度/mm	0.558 255	0.812 921	0.351 011	0.671 244	0.401 522
PLY1200厚度/mm	0.301 913	0.373 241	0.902 115	0.576 940	0.989 601
PLY1300厚度/mm	0.734 383	0.808 651	0.561 108	0.399 872	0.469 939
PLY1400厚度/mm	0.224 064	0.282 195	0.760 240	0.600 362	0.592 969
PLY2100厚度/mm	0.794 778	0.368 964	0.945 235	0.452 110	0.901 948
PLY2200厚度/mm	0.766 639	0.228 345	0.522 600	0.392 799	0.706 164
PLY2300厚度/mm	0.310 158	0.527 806	0.628 967	0.229 645	0.334 961
PLY2400厚度/mm	0.856 195	0.784 784	0.726 647	0.934 690	0.347 483
PLY3100厚度/mm	0.321 202	0.515 466	0.401 331	0.858 707	0.769 664
PLY3200厚度/mm	0.614 321	0.486 645	0.726 183	0.735 032	0.364 715
PLY3300厚度/mm	0.466 599	0.852 837	0.589 260	0.337 527	0.745 713
PLY3400厚度/mm	0.472 239	0.861 507	0.425 482	0.905 800	0.707 317
PLY4100厚度/mm	0.876 021	0.706 654	0.804 912	0.523 612	0.618 293
PLY4200厚度/mm	0.634 546	0.214 711	0.796 114	0.949 461	0.684 347
PLY4300厚度/mm	0.868 958	0.792 176	0.223 190	0.587 434	0.973 301
PLY4400厚度/mm	0.363 636	0.758 821	0.938 391	0.456 447	0.902 070
频率/Hz	61.564 06	61.449 26	66.990 53	63.867 95	69.557 85
质量/kg	19.911 3	18.987 8	21.679 0	20.016 5	22.183 0

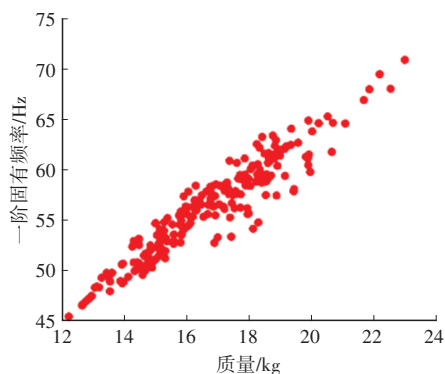


图13 多目标优化的帕累托解集

在帕累托解集中,任一备选解与其他备选解之间都构成支配或非占优关系。从图13中可知,下箱体的质量与下箱体的一阶固有频率无法同时达到最优解,下箱体的质量减小会导致下箱体一阶固有频率降低。在传统方法中,通常人为选取最优解,这种选取方法具有较强的主观性,使最优解的选择缺乏理论依据,本文采用熵-TOPSIS^[18-19]的多准则决策方法进行帕累托解集中最优解的选取,这种选取方法更加客观合理。

5.3 基于熵-TOPSIS方法确定最优解

首先通过公式对优化目标质量和一阶固有频率进行规范化处理,如表10所示,然后对规范化后的数据 r_{ij} 进行映射,基于信息熵理论,通过映射数据 p_{ij} 计算得到各响应的熵 e_j ,熵的大小反映响应的重要程度,根据熵计算求得优化目标下箱体质量和一阶固有频率的权重比。

表10 响应原始数据及规范化处理结果

原始响应数据		规范化后数据	
质量/kg	频率/Hz	质量/kg	频率/Hz
19.911 3	61.564 0	0.076 3	0.070 3
18.987 8	61.449 2	0.072 8	0.070 2
21.679 0	66.990 5	0.083 1	0.076 5
20.016 5	63.867 9	0.076 7	0.072 9
22.183 0	69.557 8	0.085 1	0.079 4
22.538 1	68.110 2	0.086 4	0.077 8
20.647 5	61.818 6	0.079 2	0.070 6
18.475 0	58.890 3	0.070 8	0.067 3
17.518 4	56.209 7	0.067 2	0.064 2
21.858 2	68.063 6	0.083 8	0.077 7
...
18.642 8	60.849 3	0.071 5	0.069 5

根据上述结果计算求得加权规范化矩阵,并进一步求得正、负理想解以及每个备选解与正、负理想解之间的欧式距离,根据欧式距离计算得到每个备选解的相对贴度并进行排序,排序第一的解即确定为帕累托解集中的最优解。TOPSIS分析法中各项数据如表11所示。

通过熵-TOPSIS多准则决策方法最终确定复合材料下箱体各铺层厚度如表12所示。

结合铺层可制造厚度为0.125 mm,整理帕累托解集中最优铺层厚度方案如表13所示。

表 11 TOPSIS 分析法数据表

原始矩阵加权规范化		与正理想解距离	与负理想解距离	相对贴近度	排序结果
质量	频率				
0.074 583 108	0.001 667 445	0.533	0.541	0.504	54
0.071 123 892	0.001 664 336	0.528	0.545	0.508	52
0.081 204 502	0.001 814 420	0.781	0.392	0.334	82
0.074 977 163	0.001 729 846	0.481	0.602	0.555	43
0.083 092 369	0.001 883 955	0.442	0.681	0.607	33
0.084 422 491	0.001 844 748	0.411	0.890	0.684	11
0.077 340 743	0.001 674 341	0.435	0.739	0.630	29
0.069 203 062	0.001 595 028	0.804	0.392	0.328	83
0.065 619 860	0.001 522 424	0.891	0.384	0.301	93
0.081 875 744	0.001 843 484	0.425	0.704	0.623	31
...
0.069 821 839	0.001 648 088	0.393	0.864	0.688	1

表 12 帕累托解集最优铺层厚度 mm

铺层编号	厚度	铺层编号	厚度
PLY1100	0.207 577	PLY3100	0.222 729
PLY1200	0.404 948	PLY3200	0.567 516
PLY1300	0.310 599	PLY3300	0.586 874
PLY1400	0.371 734	PLY3400	0.649 588
PLY2100	0.215 622	PLY4100	0.299 807
PLY2200	0.292 979	PLY4200	0.457 989
PLY2300	0.286 564	PLY4300	0.709 359
PLY2400	0.684 564	PLY4400	0.721 974

表 13 最优铺层厚度方案 mm

铺层编号	厚度	铺层编号	厚度
PLY1100	0.250	PLY3100	0.250
PLY1200	0.375	PLY3200	0.500
PLY1300	0.250	PLY3300	0.500
PLY1400	0.375	PLY3400	0.625
PLY2100	0.250	PLY4100	0.250
PLY2200	0.250	PLY4200	0.500
PLY2300	0.250	PLY4300	0.625
PLY2400	0.625	PLY4400	0.750

优化后复合材料下箱体相对金属材料电池包实现质量减轻 58.9%。

5.4 下箱体铺层顺序优化

在此前的优化过程中,层合板的顺序对结构的影响均未考虑,但在实际应用中,由于复合材料具有各向异性,复合材料层合板的铺层顺序对结构性能有较大影响,需对下箱体的铺层叠加顺序进行优化。在优化过程中添加 3 组约束:

- 45°与-45°层成对出现;
 - 结构外表面铺层为 45°层或-45°层;
 - 同一角度连续铺层数量不大于 2 层。
- 铺层顺序优化结果如表 14 所示。

表 14 铺层顺序优化结果

	迭代步数 0	迭代步数 1	迭代步数 2
0°	PLY1100	PLY2200	PLY2200
	PLY1200	PLY3200	PLY3200
	PLY1300	PLY1200	PLY1200
	PLY1400	PLY3300	PLY3300
-45°	PLY2100	PLY2400	PLY2400
	PLY2200	PLY3400	PLY3400
	PLY2300	PLY1100	PLY1100
	PLY2400	PLY4100	PLY4100
45°	PLY3100	PLY1200	PLY1200
	PLY3200	PLY4200	PLY4200
	PLY3300	PLY1300	PLY1300
	PLY3400	PLY4300	PLY4300
90°	PLY4100	PLY1400	PLY1400
	PLY4200	PLY4400	PLY4400
	PLY4300	PLY2100	PLY2100
	PLY4400	PLY3100	PLY3100

6 优化后电池包箱体性能验证

对优化后的上盖板和下箱体进行组合,如图 14 所示,对优化后的箱体模型在各工况下进行仿真分析,以验证优化结果的可靠性。

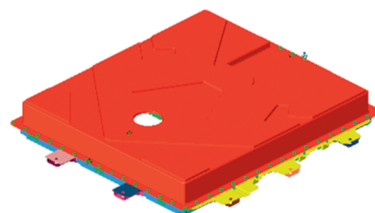


图 14 优化后电池包箱体模型

6.1 电池包箱体静强度分析

对优化后的电池包箱体进行静强度分析,结果如图 15 所示,优化前、后电池包箱体性能对比如表 15 所示。由分析结果可知,电池包箱体结构整体刚度增大,优化后最大位移小于优化前最大位移,优化后结构最大应力位置仍出现在吊耳位置,但远小于材料的屈服强度。分析结果表明,优化后结构满足静态工况下的强度要求。

6.2 电池包箱体模态分析

优化后电池包箱体的模态分析结果如图 16 和表 16 所示,根据优化结果可知,电池包的一阶固有频率由

22.17 Hz 提升至 50.63 Hz, 远大于路面激振频率 28 Hz, 可有效避免电池包箱体发生共振。

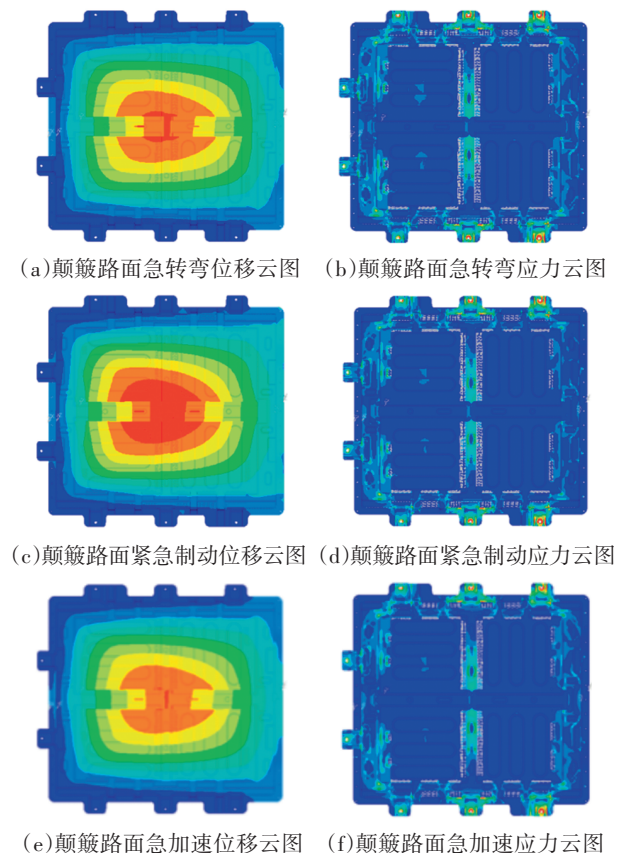


图 15 优化后电池包箱体各工况下的位移与应力云图

表 15 优化前、后电池包箱体性能

工况	原电池包箱体		优化后电池包箱体	
	最大位移/mm	最大应力/MPa	最大位移/mm	最大应力/MPa
颠簸路面急转弯	7.23	192.8	2.39	107.8
颠簸路面紧急制动	7.25	188.8	2.12	110.5
颠簸路面急加速	7.22	195.3	2.40	106.8

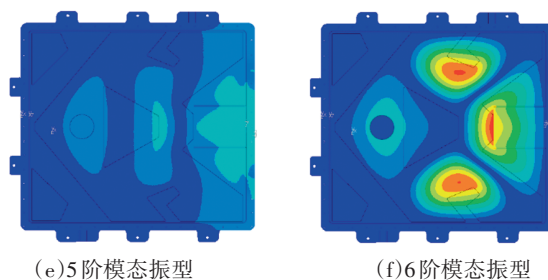
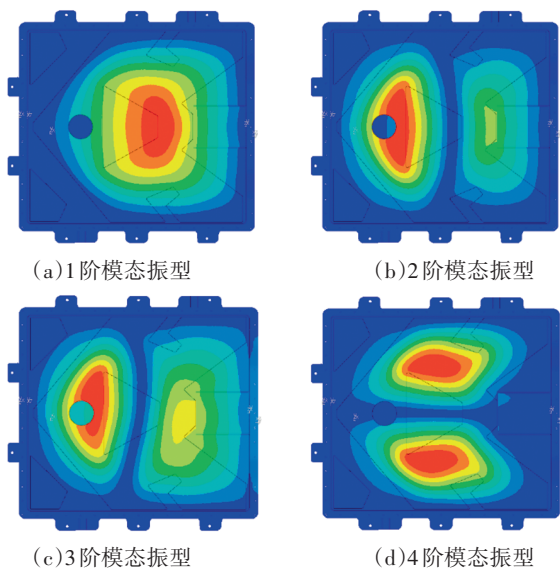


图 16 优化后箱体前 6 阶振型

表 16 优化前、后电池包箱体前 6 阶固有频率

阶次	优化前频率/Hz	优化后频率/Hz
1	22.17	50.63
2	39.91	74.21
3	40.07	82.52
4	47.60	121.46
5	67.91	128.34
6	71.86	145.66

7 结束语

本文采用复合材料取代传统金属材料建立电池包箱体模型并通过结构仿真分析获得动静态性能,提高了分析和优化的可靠性,对电池包箱体中的上盖板进行结构优化和尺寸优化,将上盖板的一阶固有频率提高至 50.63 Hz,并实现上盖板质量减轻约 31%,综合考虑性能和轻量化要求对下箱体进行优化设计,利用自由尺寸优化和尺寸优化确定了下箱体铺层形状与厚度,并引入多目标优化算法,以下箱体各铺层厚度为设计变量,质量最小和一阶固有频率最大作为多目标优化的优化目标,得到下箱体多目标优化的帕累托解集,基于熵-TOPSIS 决策方法确定最优解,优化后的下箱体实现质量减轻 58.9%,同时各典型工况下的最大位移和最大应力均有效减小。

参 考 文 献

- [1] HARTMANN M, ROSCHITZ M, KHALIL Z. Enhanced Battery Pack for Electric Vehicle: Noise Reduction and Increased Stiffness[J]. Materials Science Forum, 2013, 765: 818-822.
- [2] SHUI L, CHEN F Y, GARG A, et al. Design Optimization of Battery Pack Enclosure for Electric Vehicle[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(1): 331-347.
- [3] 熊明. 基于正交试验设计与二阶响应面模型的电动汽车电池包壳体轻量化[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- XIONG Y. Lightweight Design of Battery-Pack Enclosure Based on Orthogonal Experimental Design and Second-Order Response Surface Methodology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

- [4] 赵晓昱,张树仁. 电动车复合材料电池盒轻量化设计方法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(9): 1044-1049.
ZHAO X Y, ZHANG S R. Lightweight Design Method for Electric Vehicle Battery Boxes Made by Composite Materials[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(9): 1044-1049.
- [5] 王庆,卢家海,刘钊,等. 碳纤维增强复合材料汽车保险杠的轻量化设计[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(2): 136-141.
WANG Q, LU J H, LIU Z, et al. A Lightweight Design of Carbon Fiber Reinforced Plastic Auto Bumper[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(2): 136-141.
- [6] 叶辉,刘畅,闫康康. 纤维增强复合材料在汽车覆盖件中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(2): 417-425.
YE H, LIU C, YAN K K. Application of Fiber Reinforced Composite in Auto-Body Panel[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(2): 417-425.
- [7] 毛占稳,李炜,刘宇强. 复合材料在电动车辆电池包中的应用及分析[J]. 电源技术, 2016, 40(5): 977-978.
MAO Z W, LI W, LIU Y Q. Application and Analysis of Electric Vehicle Battery Pack Composite Materials[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(5): 977-978.
- [8] 王国旺. 复合材料电动汽车电池包轻量化设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
WANG G W. Research on Lightweight Design of Composite Battery Pack for Electric Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [9] 王品健. 纯电动汽车动力电池包箱体结构轻量化设计与优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
WANG P J. Lightweight Design and Optimization of Power Battery Pack Structure for Electric Vehicle[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [10] 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 L. Finite Element Analysis and Structural Optimization Study of Electric Vehicle Power Battery Box[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [11] 傅旭攀. 基于电动汽车安全性的复合材料电池箱轻量化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
FU X P. Research on the Lightweight of Composite Battery Box Based on the Safety of Electric Vehicles[D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [12] 陈静,彭博,王登峰,等. 碳纤维增强复合材料电池箱轻量化设计[J]. 汽车工程, 2020, 42(2): 257-263+277.
CHEN J, PENG B, WANG D F, et al. Lightweight Design of Carbon Fiber Reinforced Composite Battery Box[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(2): 257-263+277.
- [13] 兰凤崇,陈元,周云郊,等. 轻质多材料动力电池包箱体选材与优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(4): 1227-1234.
LAN F C, CHEN Y, ZHOU Y J, et al. Multi-Material Selection and Optimization of Lightweight Battery Pack Enclosure[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(4): 1227-1234.
- [14] 袁林,赵清海,张洪信. 纯电动汽车动力电池箱多目标形貌优化设计[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2018, 33(3): 98-103.
YUAN L, ZHAO Q H, ZHANG H X. Research on Topography Optimization of Pure Electric Vehicle Power Battery Box[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2018, 33(3): 98-103.
- [15] POLAVARAPU S, THOMPSON L L, GRUJICIC M. Topology and Free Size Optimization with Manufacturing Constraints for Light Weight Die Cast Automotive Backrest Frame[C]// ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Lake Buena Vista, Florida, USA: ASME, 2009: 641-655.
- [16] 王洪涛,刘玉田. 基于NSGA-II的多目标输电网架最优重构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 14-18.
WANG H T, LIU Y T. Multi-Objective Optimization of Power System Reconstruction Based on NSGA-II [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 14-18.
- [17] 王珑,王同光,吴江海,等. 基于改进NSGA-II算法的风力机叶片多目标优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(5): 672-676.
WANG L, WANG T G, WU J H, et al. Multi-Objective Optimization Design of Wind Turbine Blades Based on Improved NSGA-II [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(5): 672-676.
- [18] 冯维. 基于组合近似模型的商用车驾驶室轻量化与耐撞性多目标优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
FENG W. Multi-Objective Optimization of Lightweight and Crashworthiness of Commercial Vehicle Cab Based on Ensemble of Surrogate Models[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.
- [19] 雷鹏英. 动力电池包多目标优化设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
LEI P Y. Power Battery Pack Multi-Objective Optimization Design[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2022.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2023年7月18日。