

文章编号: 2095-2163(2022)12-0133-05

中图分类号: U463

文献标志码: A

电池箱的动静态特性研究与优化设计

汪金辉, 赵晓昱

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 为了满足电动汽车电池箱的高强度、刚度设计以及续航时间的要求,提高各工况下电池箱安全性。以电池箱的上箱盖和下箱体的厚度为设计变量,2种组合工况下的电池箱应力、位移以及箱体的第2阶模态作为约束条件,电池箱的质量最小为优化目标,建立数学模型。使用最优拉丁超立方方法来获得样本点和数据,使用 Design-Expert 创建近似模型,结合数学模型进行迭代求得最优解。结果对比表明:优化后的电池箱在2种组合工况下最大应力值、变形量都有所降低,箱体质量减少了11.3%,箱体的第1阶模态提高了24.9%。

关键词: 电池箱;轻量化;响应面模型;动静态特性分析

Research on dynamic and static characteristics of battery box and optimized design

WANG Jinhui, ZHAO Xiaoyu

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

[Abstract] In order to meet the requirements of high strength, stiffness design and battery life of electric vehicle battery boxes, the safety of battery boxes under various working conditions is improved. Taking the thickness of the upper cover and lower box of the battery box as the design variables, the stress and displacement of the battery box and the second-order mode of the box under the two combined working conditions are the constraints, and the minimum mass of the battery box is the optimization goal, a mathematical model is constructed. In the research, the optimal Latin hypercube method is used to obtain sample points and data, Design-Expert is used to create an approximate model, and the iteration is conducted with the mathematical model to obtain the optimal solution. The comparison of the results shows that the maximum stress and deformation of the optimized battery box are reduced under the two combined working conditions, the box mass is reduced by 11.3%, and the first-order mode of the box is increased by 24.9%.

[Key words] battery box; lightweight; response surface model; dynamic and static characteristics analysis

0 引言

电池箱有电池箱体和动力电池两部分,是汽车动力的核心来源,和汽车的动力系统有着密切关系。电池箱用作电动车动力电池的储存装置,不仅能够保障电池安全和正常的供能,也可发挥保障车上乘客安全的作用^[1]。而电池箱属于大质量的汽车零部件,续航问题引起了技术界的广泛关注。同时,在一些复杂的组合工况下,电动汽车的结构得满足必要的高强度要求。为此,如何设计出高强度、轻量化的电池箱体,对于提高续航能力以及保障整个电池箱的安全具有重要现实意义^[2]。响应面优化方法是使用数量化分析的方法^[3],主要是研究数据输入与输出之间的关系,过程中是通过合适的实验设计方法(DOE),得到些许相邻点的若干个试验或者仿真出来的响应值,多数情况下实验或仿真都会耗费

一定的经济及时间成本,而响应面模型使用高阶或者低阶的函数表达式来近似代替仿真或者实验模型,在足够接近点的区域,用近似模型进行计算来模拟实际模型,为后续的优化提供结果^[4]。本文将运用该方法,对电池箱的上箱盖和下箱体的厚度进行优化,从而为电池箱其他方面的后续设计和研究提供了数据积累及支撑。

1 电池箱的动静态特性分析

本文探讨研究的电池箱参考某企业实车尺寸进行建模,箱体总共分为4部分,分别是:上箱盖、加强梁、下箱体、电池单体(5排7列),其中考虑到仿真计算量,对原先电池箱进行处理,处理过后的简化模型如图1所示。电池箱的上箱盖、下箱体、加强梁的材料均为Q235材料,材料参数见表1。

作者简介: 汪金辉(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:电动汽车的安全性和轻量化研究;赵晓昱(1968-),女,副教授,主要研究方向:复合材料结构设计研究。

通讯作者: 赵晓昱 Email: zhaoxiaoyu@sues.edu.cn

收稿日期: 2022-03-05

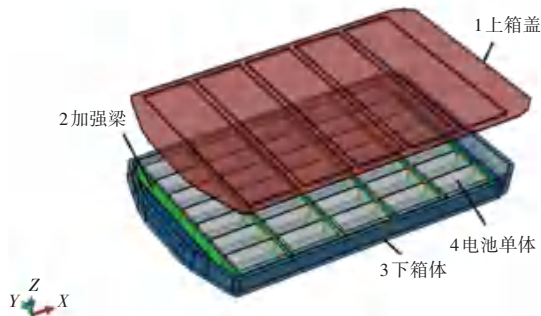


图1 电池箱的三维简化模型

Fig. 1 Geometric model of a battery box

表1 Q235材料参数

Tab. 1 Material specifications of Q235

材料	弹性模量/ GPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	屈服强度/ MPa
Q235	210	7 850	0.33	235

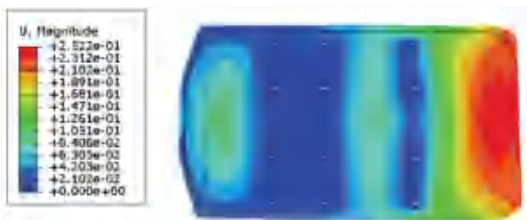
1.1 组合工况静强度和静刚度分析

参考文献[3],确定选取工况的方法,本文选取汽车行驶在颠簸路面上急刹车和急转弯(后续简称为组合工况1(gk1)、组合工况2(gk2)),作为对电池箱静态特性分析的工况见表2。颠簸路面急刹车工况电池箱(无上盖)的位移应力云图如图2所示。图2中,行驶方向为 X 负方向,汽车的右侧方向为 Y 的正方向。

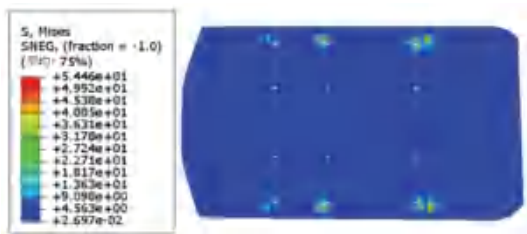
表2 电池包箱体典型工况与加载方式

Tab. 2 Typical working conditions and loading mode of battery cases

工况描述	加载方式
颠簸路面急刹车工况	行驶方向施加1 g,铅垂方向施加2 g
颠簸路面急转弯工况	横向方向施加0.6 g,铅垂方向施加2 g



(a) 位移云图



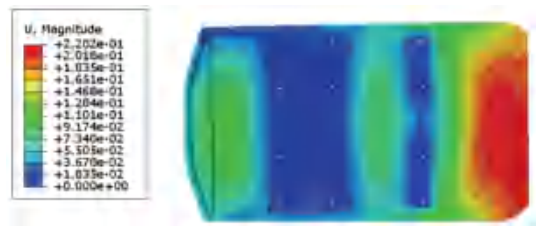
(b) 应力云图

图2 颠簸路面急刹车工况电池箱(无上盖)的位移应力云图

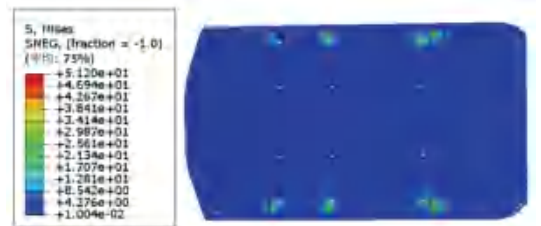
Fig. 2 Displacement stress cloud diagram of battery box (no cover) on bumpy road under sudden braking condition

由图2可以看出,颠簸路面急刹车工况下,电池箱的最大位移为0.252 mm,发生在下箱体的尾部位置。通常情况下,当颠簸路面产生的加速度为2 g的时候,最大位移不可以超过2 mm,所以位移满足要求。最大应力发生在电池箱底部的螺栓孔和加强梁处,其值为54.46 MPa,Q235材料的屈服强度远远大于该值,则材料利用率很低。

颠簸路面急转弯工况电池箱(无上盖)的位移应力云图如图3所示。通过图3可知,颠簸路面急转弯工况下,电池箱的最大位移为0.220 mm,发生的位置在下箱体的尾部。急刹车工况的最大位移和转弯工况的最大位移要求相同,所以位移满足要求。最大应力发生在电池箱底部的螺栓孔,其值为51.2 MPa,远小于Q235材料的屈服强度,电池箱的安全裕度过大。



(a) 位移云图



(b) 应力云图

图3 颠簸路面急转弯工况电池箱(无上盖)的位移应力云图

Fig. 3 Displacement stress cloud diagram of battery box (no cover) on bumpy road under sharp turn condition

1.2 模态分析

汽车行驶的过程中,时时刻刻都会接收到来自外界环境的不同的激励,激励通过汽车的车轮、车身、门槛梁等传递到电池箱。如果汽车的电池箱的固有频率和外界环境的激励相差不多,就会存在着共振的安全问题隐患^[5]。因为外界环境激励大多都是竖直方向的,为了解决电池箱可能会发生共振的这一安全问题,这里就需要使电池箱的一阶模态频率(约束)高于外界环境激励(研究中主要是来自路面不平度的激励)。按照电池箱体实际在车身上的安装情况施加边界约束条件,即将约束下箱体的12个螺栓孔的6个自由度,使用Abaqus来进行计算,分析结果提取了电池箱的前2阶模态,如图4所示。图4中,1阶模态为中心偏箱体尾部处,频率为28.299 Hz,2阶模态为中

心偏箱体头部处, 频率为 29.617 Hz。

2.2 数学模型与样本数据

通过前面对电池箱分析结果可知, 原方案虽然电池箱体安全性足够, 但是安全裕度过大, 材料利用率太低, 在设计上存在不足。为了使得电池箱在优化后能达到相应的要求, 这里的优化数学模型将以电池箱 2 种组合工况下的最大应力 σ_{\max} 、位移的最大值 d_{\max} 、第一阶约束模态 μ_f 、上箱盖和下箱体的总质量 $M(T)$ 为设计响应和约束条件, 则推导得到的表达式为:

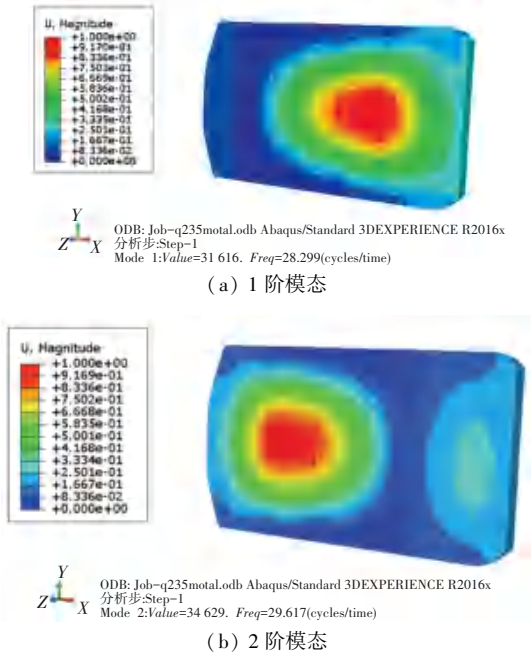


图 4 电池箱体约束模态振型

Fig. 4 The constrained mode shape of the battery box

电动汽车的激励主要是电机的振动以及路面的颠簸, 通常情况下电机的工作频率小于 25 Hz, 而路面的激励频率主要与路面不平度和汽车行驶的车速有关系^[6]。根据相关文献, 电池箱发生共振的频率最高为 35 Hz, 但是在外界激励经过车身、电池箱的安装零部件后, 会有所消耗、衰减, 所以在真实情况下到达电池箱的激励频率要小于研究得到的仿真结果。根据上述分析, 该电池包箱体的设计有发生共振的安全隐患, 对电池箱进行改进和优化是非常有必要的。

2 电池箱的轻量化设计

2.1 设计变量

多目标优化问题可以涵盖大多数工程中遇到的优化问题, 采用多目标优化设计能够得到更科学的解决方案。这里以电池箱的零部件(上箱盖、下箱体)为设计区域, T_1 为前者厚度, T_2 为后者厚度, 从前面对电池箱的性能分析了解到, 原电池箱的安全裕度过高, 材料利用率太低, 所以研究中的设计尺寸上限就是原电池箱的尺寸。同时考虑到最极端的情况, 取尺寸下限。见表 3。

表 3 电池箱的尺寸范围

Tab. 3 Size range of the battery box

设计变量	原始尺寸/mm	尺寸上限/mm	尺寸下限/mm
T_1	3	3	2.0
T_2	8	8	6.5

$$\begin{aligned}
 & \min M(T) \\
 & \text{s.t.} \begin{cases} \sigma_{\max} = \max(\sigma_{gk1}, \sigma_{gk2}) < [\sigma] \\ d_{\max} = \max(d_{gk1}, d_{gk2}) < [d] \\ \mu_f > [\mu] \\ T = (T_1, T_2) \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中, σ_{gk1} 、 d_{gk1} 、 σ_{gk2} 、 d_{gk2} 为在组合工况 1 和组合工况 2 下电池箱的应力、变形最大值; $[\sigma]$ 、 $[d]$ 为 Q235 材料(箱体材料)的应力许用值、位移极限值(取 2 mm); $[\mu]$ 为外界环境激励频率。

在使用实验设计方法时, 为了确保精度, 可得样本数的计算式: $1.1 * [(N + 1) * (N + 2) / 2]$ 。其中, N 是变量的个数, 这里本文的设计变量个数为 2, 通过算式计算得出样本个数最少为 14 组, 所以研究中在约束条件下得到 17 组样本, 样本数据和响应值见表 4。

表 4 样本数据统计结果

Tab. 4 Statistical results of samples data

序号	T_1 / mm	T_2 / mm	M / kg	σ_{\max} / MPa	d / mm	μ_f
1	1.500	6.500	150.3	63.35	0.421	30.345
2	1.500	7.250	162.4	55.32	0.283	38.322
3	3.000	7.250	169.1	54.10	0.263	38.346
4	1.500	8.000	177.5	55.82	0.284	30.435
5	1.875	6.875	156.2	57.42	0.338	37.526
6	3.000	6.500	155.0	60.72	0.356	33.343
7	2.250	7.250	165.6	54.27	0.247	40.674
8	2.625	6.875	159.0	57.23	0.303	37.513
9	2.250	8.000	180.7	54.23	0.278	32.751
10	2.625	7.250	167.3	54.32	0.255	39.721
11	3.000	8.000	183.8	54.46	0.252	29.617
12	2.250	6.875	157.6	57.32	0.321	38.231
13	1.875	7.250	164.0	54.35	0.262	39.344
14	2.250	7.625	173.4	54.23	0.300	38.243
15	2.625	7.625	175.0	54.07	0.289	37.111
16	2.250	6.500	152.7	61.23	0.375	31.321
17	1.875	7.625	171.9	54.32	0.274	37.237

注: T_1 、 T_2 为上箱盖、下箱体的厚度; M 为上箱盖和下箱体的质量和; σ_{\max} 为 2 种组合工况下箱体的最大应力值; d 为 2 种工况下箱体的最大位移值; μ_f 为箱体结构的 1 阶模态对应的频率

2.3 响应面模型建立

将以上的样本数据导入到 Design-expert 软件中构建响应面模型。对数据进行分析、最小二乘法估计和显著性检验^[7],即可得到各响应多项式函数的计算公式具体如下:

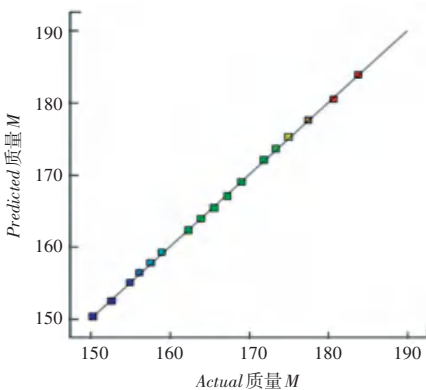
$$\begin{aligned}
 M(T) = & 2\,485.318\,98 - 69.616\,07 * T_1 - \\
 & 969.096\,46 * T_2 + 21.713\,08 * T_1 * T_2 - \\
 & 3.712\,74 * T_1^2 + 131.305\,42 * T_2^2 + \\
 & 7.293\,45E - 003 * T_1^2 * T_2 - \\
 & 1.451\,40 * T_1 * T_2^2 + 0.598\,87 * T_1^3 - \\
 & 5.799\,10T_2^3 \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\max} = & 54.32 + 0.081 * T_1 - 3.00 * T_2 - \\
 & 0.19 * T_1 * T_2 - 0.17 * T_1^2 - 0.17 * T_2^2 + \\
 & 0.049 * T_1^2 T_2 - 0.39 * T_1 T_2^2 - 0.69 * T_1^3 - \\
 & 0.50 * T_2^3 + 0.46 * T_1^2 T_2^2 + 0.50 * T_1^3 T_2 + \\
 & 0.56 * T_1^4 - 3.09 * T_2^4 \quad (3)
 \end{aligned}$$

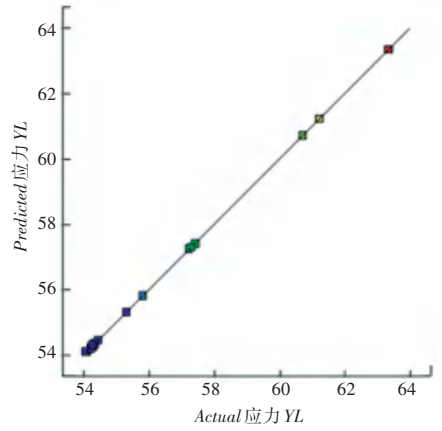
$$\begin{aligned}
 d_{\max} = & 0.255\,561 - 0.005\,5 * T_1 - 0.025\,222\,2 * T_2 + \\
 & 0.063\,916\,7 * T_1 * T_2 - 0.014\,581\,9 * T_1^2 + \\
 & 0.244\,918 * T_2^2 - 0.012\,676\,9 * T_1^2 * T_2 - \\
 & 0.014\,215\,4 * T_1 * T_2^2 - 0.004\,523\,08 * T_1^3 - \\
 & 0.022\,659\,8 * T_2^3 - 0.016\,402\,7 * T_1^2 * T_2^2 - \\
 & 0.055\,666\,7 * T_1^3 * T_2 + 0.032\,306\,6 * T_1^4 - \\
 & 0.173\,693 * T_2^4 \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mu_f = & 39.906\,2 - 0.016\,666\,7 * T_1 - 0.179\,222 * T_2 - \\
 & 0.904\,529 * T_1 T_2 - 1.438\,9 * T_1^2 - \\
 & 7.671\,26 * T_2^2 - 1.621\,02 * T_1^2 * T_2 + \\
 & 0.497\,323 * T_1 * T_2^2 + 0.052\,451\,3 * T_1^3 + \\
 & 0.892\,232 * T_2^3 \quad (5)
 \end{aligned}$$

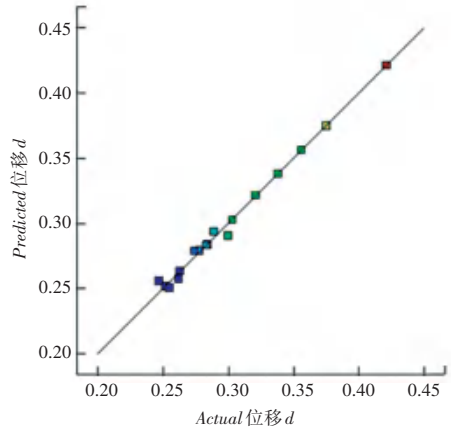
图5为各响应的近似模型预测值和实际值的对比结果,其中YL表示应力,MT表示模态。若是落在线上或者线的邻近地方点越多者,则表示所建立的响应面回归方程准确性越高。



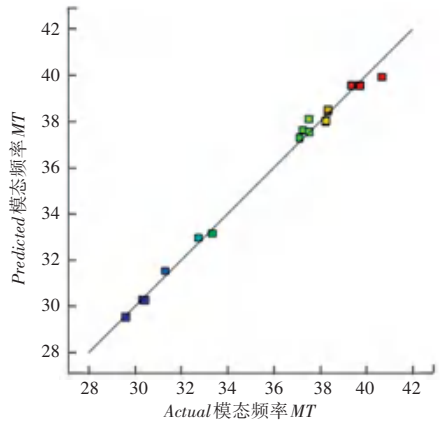
(a) 质量 M 对比结果



(b) 应力 YL 对比结果



(c) 位移 d 对比结果



(d) 模态频率 MT 对比结果

图5 各响应的近似模型预测值与实际值的对比图

Fig. 5 Comparison of actual design response and prediction response of the model

近似模型虽然可以代替实际仿真模型进行复杂的计算,但是也需要对近似模型的预测能力和精度进行评价。这里将引用统计学相关理论,对模型进行检验,检验指标主要包括 R^2 、 R_{adj}^2 、 MSE 等^[8-9],分别表示了复相关系数、修正复相关系数、均方差。各指标的计算表达式见如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (6)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^p (\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2(p-1)}{\sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y}_i)^2(p-1)} \quad (7)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^p (\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2}{p} \quad (8)$$

其中, p 为设计点个数; i 为自由度; y_i 为实测值; \bar{y}_i 为预测值; \bar{y}_i 为实测平均值。

研究可知, R^2 值一般在 $[0, 1]$ 范围内, 当 $1 - R^2$ 越接近 0 表示模型预测值的误差越小, 就表明回归方程精度越高; R^2_{adj} 是对 R^2 的缺陷修正, 在结果值上应该与 R^2 相差越小越好; MSE 越低, 则表明模型精度越高。研究中给出的模型精度与质量评价结果见表 5。

表 5 模型的精度与质量评价

Tab. 5 Accuracy and quality evaluation of the model

	P -value	显著性	R^2	R^2_{adj}	MSE
M	<0.000 1	significant	0.999 7	0.999 3	0.07
σ_{max}	<0.000 1	significant	0.999 9	0.999 6	3.016E-3
d	<0.007 2	significant	0.993 2	0.963 7	8.416E-5
μ_f	<0.000 1	significant	0.993 1	0.984 3	0.21

3 优化结果与验证

结合前文的电池箱的数学模型和响应面模型进行迭代, 求得最优解。运算得到最优解设计变量矩阵为 $(T_1, T_2) = (1.796 \text{ mm}, 7.226 \text{ mm})$ 。为了检测结果的准确性, 依据优化得到的设计变量矩阵, 使用 Abaqus 进行仿真验证, 结果见表 6。由表 6 可以看出, 优化过后的模型预测值与 Abaqus 的仿真结果很接近, 也说明此次优化的准确性高, 使箱体在 2 种组合工况下箱体的最大位移量、应力值降低, 质量比之前降低了 11.3%, 同时其第一阶模态频率提高了

24.894%。

表 6 优化结果与误差验证

Tab. 6 Optimization results and error verification

		响应			
		$M(T)/\text{kg}$	σ_{max}/MPa	d_{max}/mm	μ_f/Hz
优化结果	初始值	183.800	54.460 0	0.252 0	29.617
	有限元结果	163.030	54.150 0	0.250 7	36.990
	模型预测值	163.770	54.408 0	0.249 0	36.713
	相对误差/%	0.468	0.477 8	-0.682 0	2.228

4 结束语

本文以某电池箱作为研究对象, 对其进行了 2 种组合工况的仿真分析, 并讨论了电池箱的不足和存在的安全问题。在此基础上, 使用最优拉丁采样方法得到 17 组样本数据, 使用 Abaqus 进行样本数据的计算。随后在 Design-Expert 中进行响应面模型的建立和后续优化迭代。通过优化结果分析可知, 优化后的电池箱的最大等效应力、最大变形量有所降低, 质量较原电池箱减少了 11.3%, 第 1 阶模态频率较之前提高了 24.894%, 电池箱体的性能得到明显改善, 且轻量化效果显著。

参考文献

- [1] 陈伶俐. 电动汽车电池箱轻量化及抗冲击结构的研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2019.
- [2] 刘舒龙, 夏顺礼, 赵久志. 一种电动汽车电池组箱体轻量化设计[J]. 汽车实用技术, 2016(11): 10-12.
- [3] 王永菲, 王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2005, 14(03): 236-239.
- [4] 欧阳威, 王丽娟, 陈宗渝, 等. 基于响应面法的动力电池包箱体轻量化优化设计[J]. 机械设计与制造, 2021(02): 246-251.
- [5] 杨书建. 电动汽车电池箱动静态特性分析及其结构优化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [6] 彭博. 电动汽车碳纤维复合材料电池箱轻量化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [7] 方俊涛. 响应曲面方法中试验设计与模型估计的比较研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [8] 刘嘉楠, 徐宽, 张洪杰, 等. 自适应响应面法在电池包尺寸优化研究中的应用[J]. 设备管理与维修, 2020(05): 36-38.
- [9] 范文亮, 张春涛, 李正良, 等. 考虑交叉项的自适应响应面法[J]. 工程力学, 2013, 30(04): 68-72.

(上接第 132 页)

- [12] 晁拴社, 楚恒, 王兴. 高光谱图像数据的多尺度多核 SVM 分类[J]. 计算机与现代化, 2016(02): 11-14, 20.
- [13] HUWei, HUANG Yangyu, WEI Li, et al. Deep Convolutional Neural Networks for hyperspectral image classification[J]. Journal of Sensors, 2015, 2015: 258619.
- [14] LEE H, HEESUNG K. Contextual deep CNN based hyperspectral classification[C]// 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China: IEEE,

2016: 3322-3325.

- [15] HAMIDAA B, BENOIT A, LAMBERT P, et al. 3-D deep learning approach for remote sensing image classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(8): 4420-4434.
- [16] LI Rui, ZHENG Shunyi, DUAN Chenxi, et al. Classification of hyperspectral image based on double-branch dual-attention mechanism network[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 582-607.