

某 MPV 车型白车身多工况联合仿真分析与优化

张彪, 童宝锋, 袁侠义

(广州汽车集团股份有限公司, 广州 511434)

摘要:为实现汽车白车身的轻量化设计,本文提出一种基于多工况联合仿真的优化方法,并以某 MPV 车型为例进行仿真及验证。通过构建 Kriging 响应面模型,结合帕累托前沿曲线修正非线性误差,对白车身钣金料厚参数进行优化。优化结果显示,白车身质量减小 9.8 kg,各项性能指标均满足目标要求。仿真与试验验证表明,优化结果的误差控制在允许范围内,证明了该方法的有效性和工程适用性,从而为白车身结构优化提供了一种兼顾轻量化与多性能平衡的高效解决方案。

关键词:白车身;轻量化;联合仿真;Kriging 模型;帕累托前沿曲线;多工况优化

中图分类号:U463.82

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.02.006

Cosimulation Analysis and Optimization of an MPV Body-in-white Under Multiple Load Cases

ZHANG Biao, TONG Baofeng, YUAN Xiayi

(Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China)

Abstract: Automotive body-in-white, this paper proposes an optimization method based on multi-condition co-simulation. It conducts simulation and verification using a specific MPV model as an example. By constructing a Kriging response surface model and correcting nonlinear errors with the Pareto front curve, the study optimizes the sheet metal thickness parameters of the BIW. The optimization results show that the BIW successfully reduces weight by 9.8 kg, with all performance indicators meeting the target requirements. Simulation and experimental verification demonstrate that the error of the optimization results is controlled within an acceptable range, proving the method's effectiveness and engineering applicability. Thus, it provides an efficient solution for BIW structural optimization that balances lightweighting with multi-performance requirements.

Key words: body-in-white; lightweighting; co-simulation; Kriging model; Pareto frontier curve; multi-working condition optimization

白车身作为汽车关键部件,需满足多种性能目标,且其重量在整车中占比较高。为满足节能与环保要求,轻量化设计至关重要。除采用轻质材料和先进制造工艺外,结构优化也是实现轻量化的重要途径。随着仿真技术的进步与计算机算力的显著提升,多学科联合仿真优化方法已深度融入汽车开发流程,以往的经验式设计正快速向基于大规模仿真数据的全局优化转变^[1]。在此过程中,优化算法居于核心地位,而联合仿真计算所涵盖的工况也日趋广泛^[2]。因此,如何通过合理的样本量获得可靠的优化结果至关重要^[3]。

本文以轻量化设计为目标,基于三维仿真模型,对白车身进行多工况联合仿真分析,并以某 MPV 车型为例对优化结果进行验证。

1 仿真工况定义与建模

白车身结构的优化涉及多种工况下的多学科问题,通常需考虑其刚度、模态与耐撞性等性能指标^[4]。本文选取白车身静刚度、白车身模态、正面 100% 刚性墙碰撞、正面 40% 可变形壁障 (Offset Deformable Barrier, ODB) 偏置碰撞、侧面移动可变形壁障 (Moving Deformable Barrier, MDB) 碰撞作为设计工况。

收稿日期:2025-06-12。

第一作者:张彪(1996—),男,硕士,工程师,主要从事汽车结构仿真分析与优化工作。E-mail:zhangbiao20@gac.com.cn。

基于仿真工况的定义, 本文将分析对象分为 MPV 车型的白车身仿真模型和整车碰撞仿真模型。首先, 建立白车身的几何模型, 将其导入 HyperWorks 软件中进行前处理, 并采用壳单元进行网格划分。所建立的白车身仿真模型如图 1 所示, 该模型主要用于计算白车身的静刚度和模态性能参数。

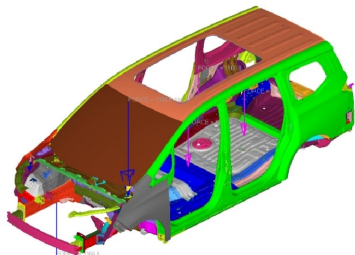
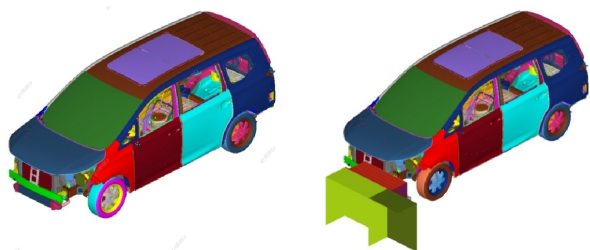


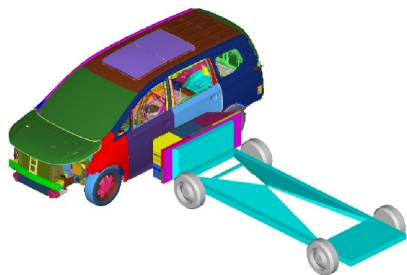
图 1 白车身仿真模型

在已建立的白车身模型基础上, 进一步搭建整车碰撞仿真模型。建模时, 需保持部件属性 ID 号不变, 以便提取白车身参数。整个建模过程遵循整车碰撞模型的建模规范: 导入动力总成、底盘、开闭件及电子电器等关键系统部件, 完成其网格划分与材料赋予; 同时对模型进行必要的简化和配重处理, 以确保模型的整备质量、质心位置、转动惯量等基础参数与实车一致。各设计工况对应的仿真模型如图 2 所示。



(a) 正面 100% 刚性墙碰撞

(b) 正面 40% ODB 偏置碰撞



(c) 侧面 MDB 碰撞

图 2 整车碰撞仿真模型

2 联合仿真优化准备

2.1 性能目标定义

本次优化将各设计工况下的关键性能指标及其

目标值作为约束条件^[5]。所选指标包括白车身静刚度、模态、碰撞侵入量、侵入速度、正面 100% 碰撞乘员负载指数 (Occupant Load Criterion, OLC) 等, 各指标的目标值见表 1。这些指标值根据本车型的开发需求设定, 并参考了既有车型的技术规范与工程经验。为避免过约束, 每个工况通常仅选取 1~2 项关键性能指标。此举可保证该工况的性能要求, 也有利于提升寻优过程的效率和效果。

表 1 设计工况性能目标定义

性能指标	目标值
白车身弯曲刚度/(N·m ⁻¹)	≥ 16 000
白车身扭转刚度/(N·m ⁻¹)	≥ 15 000
白车身弯曲模态/Hz	≥ 43
白车身扭转模态/Hz	≥ 34
100% 正碰 OLC/(m·s ⁻²)	≤ 294
100% 正碰油门侵入量/mm	≤ 120
40% 偏置碰油门侵入量/mm	≤ 180
B 柱 20~40 ms 平均侵入速度/(m·s ⁻¹)	≤ 8.5

性能指标中的白车身模态、侵入量、侵入速度、OLC 等参数可直接在后处理软件中读取。而白车身的弯曲刚度和扭转刚度需根据加载位置进行计算, 计算公式见式(1)和式(2)。

$$K_b = F_b / \bar{d}_z \quad (1)$$

式中: K_b 为弯曲刚度, N/m; F_b 为施加在座椅位置的力, N; \bar{d}_z 为弯曲载荷作用下左右门槛梁 Z 向最大位移, m。

$$K_t = \frac{F_t \cdot s}{\tan^{-1}(d_z/s)} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (2)$$

式中: K_t 为扭转刚度, N/m; F_t 为施加在前塔座中心的力, N; d_z 为力作用下左右前塔座中心的 Z 向相对位移, m; s 为前塔座中心点间的距离, m。

2.2 优化试验样本制作

2.2.1 设计变量选择

设计变量为仿真中的可优化项, 主要来源于各工况下对性能影响较大的零部件, 例如前碰工况的前纵梁加强板、侧碰工况的 B 柱加强板。首先, 将白车身刚度与模态、正面 100% 刚性墙碰撞和 40% ODB 偏置碰撞的设计变量合并。最终共选取设计变量 183 个, 包括白车身刚度与模态工况变量 103 个、正面碰撞工况变量 37 个、侧面碰撞工况变量 43 个。

本次优化以料厚参数为设计变量,旨在寻求一组最优的料厚组合,在满足各工况性能要求的同时,实现白车身的轻量化^[6]。

2.2.2 样本生成与计算

本文采用拉丁超立方抽样法生成样本。首先,设定各设计变量(料厚)的波动范围,通常基于原始值上下浮动30%~50%(可根据需求调整)。然后,在该可变范围内抽取样本,样本数量为设计变量总数的3倍,以此形成样本数据集^[7]。随后,将每个样本对应的料厚值分别赋予仿真模型,生成一系列对应的仿真算例。

白车身刚度与模态分析在 Nastran 软件中进行求解,求解方式分别选择静态和模态求解。整车碰撞模型则在 LS-DYNA 软件中求解,需预先设置传感器或弹簧单元,以提取关键点(如前围板、加速踏板、B柱等)的位移、速度、加速度等信息。

在 HyperWorks 软件中进行后处理。批量读取仿真数据后,提取白车身刚度与模态等性能参数,部分结果见表2。碰撞工况的结果也按此形式处理。

表2 部分样本计算结果

性能指标	样本1	样本2	样本3	样本4
弯曲刚度/(N·m ⁻¹)	24 576	19 352	19 091	22 950
扭转刚度/(N·m ⁻¹)	20 476	17 232	18 614	19 266
弯曲模态/Hz	43.68	42.67	42.94	43.17
扭转模态/Hz	34.72	34.29	34.47	34.55

合并所有工况的设计变量(111个)和样本(549个),并集成其对应的8项性能指标的仿真结果,以此形成用于多学科联合优化的矩阵,如图3所示。

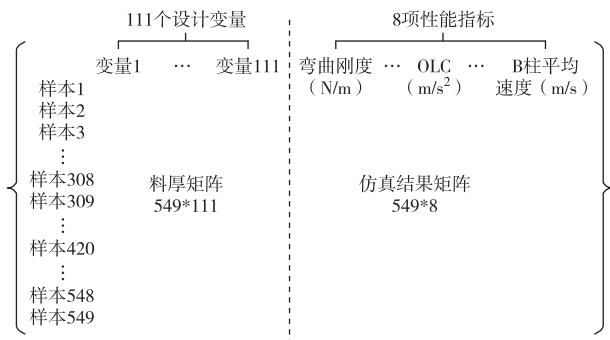


图3 联合优化矩阵示意图

2.3 优化求解控制

为实现白车身结构的轻量化,本文以白车身质量最小化为优化目标,并将各项关键性能指标作为约束

条件^[8]。在寻优过程中,算法会对约束条件进行适当松弛,迭代步长则根据性能目标的初始值进行设定。具体的约束条件设置见表3。

表3 约束条件设置

性能指标	目标值	步长
白车身弯曲刚度/(N·m ⁻¹)	≥ 16 000	1 000
白车身扭转刚度/(N·m ⁻¹)	≥ 15 000	1 000
白车身弯曲模态/Hz	≥ 43	0.15
白车身扭转模态/Hz	≥ 34	0.15
100%正碰 OLC/(m·s ⁻²)	≤ 294	0.98
100%正碰油门侵入量/mm	≤ 120	1
40%偏置碰油门侵入量/mm	≤ 180	2
B柱20~40 ms 平均侵入速度/(m·s ⁻¹)	≤ 8.5	0.2

该优化对应的标准数学模型如式(3)所示,本次优化设置约束条件均为不等式约束。

$$\min f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

Subject to:

$$g_j(x) \leq 0; j = 1, \dots, M$$

$$h_k(x) = 0; k = 1, \dots, L$$

式中: $f(x)$ 为目标函数, x 表示由 n 个设计变量 $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 组成的 n 维变量向量; $g(x)$ 为不等式约束,用于限定可行域的边界,共 M 个; $h(x)$ 为等式约束,表示变量需满足的精确等式关系,共 L 个。

2.4 优化方法

在输入联合优化矩阵、优化目标和约束条件后,该方法通过构建响应面来表达输入与输出的关系,进而生成优化解。该优化流程通过 Matlab 软件实现,优化算法被编写成函数脚本文件。本次优化涉及多个工况的仿真结果且包含非线性碰撞参数,故采用 Kriging 模型构建响应面^[9]。相较于传统多项式响应面,Kriging 模型能更好地捕捉复杂的非线性关系,尤其适用于高维、多模态问题。该模型基于样本点的空间相关性,即便在样本数量较少的情况下也能构建高精度的代理模型^[10]。Kriging 模型由全局趋势项和随机波动项构成,其数学模型如式(4)所示。

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \varphi_i(x) + z(x) \quad (4)$$

式中: $\sum_{i=1}^m \alpha_i \varphi_i(x)$ 为全局趋势项,低阶多项式基函数的线性组合; α_i 为待估系数; $\varphi_i(x)$ 为基函数,是预先选定的简单函数(如多项式、三角函数、高斯函数

等); $z(x)$ 为随机波动项, 是零均值的高斯随机过程, 其协方差 Cov 函数可表示为式(5)。

$$\text{Cov}[z(x_i), z(x_j)] = \sigma^2 \cdot \exp\left(-\sum_{k=1}^d \theta_k |x_{i,k} - x_{j,k}|^2\right) \quad (5)$$

式中: x_i, x_j 为高斯随机过程的两个输入样本点; σ^2 为过程方差, 用于控制协方差整体幅度; 指数部分 $\exp\left(-\sum_{k=1}^d \theta_k |x_{i,k} - x_{j,k}|^2\right)$ 描述随 x_i 和 x_j 差异增大后相关性衰减情况, 其中 d 为输入的维度, $|x_{i,k} - x_{j,k}|^2$ 表示输入在第 k 个维度上的平方差, $x_{i,k}$ 和 $x_{j,k}$ 表示输入在第 k 个维度上的取值。

由于样本数据呈现强烈的非线性特征, 初始构建的响应面模型精度不足。为此, 本文引入帕累托前沿 (Pareto Frontier, PF) 曲线来对模型进行修正^[11]。此方法的原理借鉴了多目标优化中 PF 的核心思想: 当多个目标相互冲突时, PF 曲线上的最优解表征了目标间无法兼得的权衡关系。本文构建 PF 曲线的主要目的在于利用这种权衡关系来修正响应面的误差, 而非执行传统的多目标优化以寻找特定约束下的最优解^[12]。

以 40% 偏置碰撞下的加速踏板最大侵入量为例, 该指标表现出较强的非线性特征。在保持其他约束条件不变的情况下, 按前期定义的 2 mm 步长, 计算不同侵入量对应的白车身减重优化结果, 进而建立侵入量与质量变化量之间的 PF 曲线, 如图 4 所示。

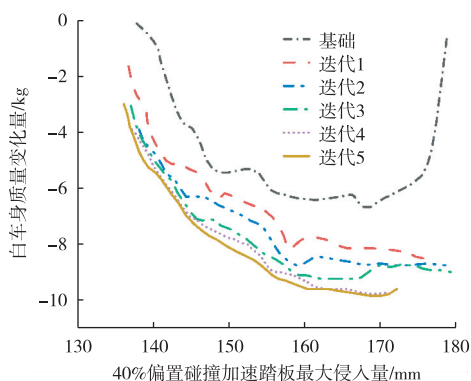


图4 PF 曲线收敛示意图

由图 4 可知, PF 曲线经过迭代后收敛, 初始解由设计变量的基准值生成, 后续每次迭代均以上一次迭代得到的结果为样本点。当相邻两次迭代结果的平均相对误差小于 5% 时, 则认定此次优化收敛。对于刚度、模态、OLC 等线性特征明显的性能指标, 其响应面的精度较高, 因此 PF 修正带来的提升相对有限。

3 优化结果分析

3.1 优化结果验证流程

优化算法将输出多个满足性能目标且重量较轻的解(称为“优化解”)。首先, 从优化解中筛选出 5~10 个代表性结果, 并根据预先定义的性能指标判断优化解是否达标。若某一指标不达标, 则认为本次优化无效, 需调整优化求解控制参数并重新进行优化。若优化解达标, 则将其对应的钣金料厚参数赋入仿真模型进行验证计算, 所得结果称为“验证解”。

随后, 评估优化解与验证解之间的误差是否在可接受范围内。通常建议白车身刚度、模态及 OLC 值的误差控制在 3% 以内, 碰撞侵入量与侵入速度指标的误差控制在 10% 以内。

若误差超出阈值, 则需收紧约束条件或剔除设计空间中的异常样本, 并重复优化流程, 直至获得误差可接受的最优解。

3.2 优化结果仿真验证

本文共进行两轮优化与仿真验证。第一轮优化设定了大量设计变量(共 183 个), 且料厚允许的浮动范围较大, 这虽会降低算法的寻优效率, 但其主要目的是探索料厚的合理分布区间。第二轮优化则基于首轮结果, 筛选出关键零部件作为设计变量(共 31 个), 并缩小变量浮动范围, 旨在提升寻优效果, 从而确定各零部件的最优料厚。

最终, 部分钣金件料厚得到优化, 料厚增加的部件主要包括前纵梁加强板、塔座、侧围前加强板、前地板纵梁加强板等; 料厚减少的部件主要有吸能盒、前纵梁外板、门槛梁前后加强板、B 柱加强板、后地板纵梁组件等。两轮优化分别使白车身质量减小 15.9 kg 和 9.8 kg(见图 5)。

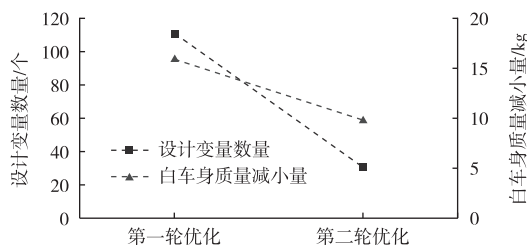


图5 白车身减重效果

对优化解进行仿真验证, 其关键性能指标与误差值见表 4。与表 1 中的性能要求对比, 所有指标均达标, 且优化解与验证解之间的误差较小, 这表明算法寻优效果较好, 满足工程应用要求。

表4 优化前后关键性能指标对比

性能指标	初始仿真值	优化模型		误差/%
		算法优化解	仿真验证解	
弯曲刚度/(N·m ⁻¹)	18 081	18 701	18 256	2.3
扭转刚度/(N·m ⁻¹)	15 729	17 040	16 811	1.3
弯曲模态/Hz	43	43.2	43.6	0.9
扭转模态/Hz	34	34.5	34.6	0.3
OLC/(m·s ⁻²)	298	282	285	1
正碰侵入量/mm	78.1	99	95.1	3.9
偏置碰侵入量/mm	131	136	125	8.1
B柱侵入速度/(m·s ⁻¹)	4.7	5.6	5.1	8.9

除约束指标外,还需评估白车身减重是否对设计工况的其他性能产生影响。为此,引入了额外的评估参数(详见表5),包括:100%正碰和40%偏置碰撞工况的加速度峰值、反弹时刻、仪表板横梁及前座椅安装点的位移;侧碰工况的B柱侵入量与生存空间、车门侵入量与生存空间等。

表5 性能指标仿真验证对比

工况	性能指标	目标值	初始仿真值	优化仿真值
正面 100% 刚性墙 碰撞	左侧加速度峰值/(m·s ⁻²)	≤441	458	436
	右侧加速度峰值/(m·s ⁻²)	≤441	490	408
	反弹时刻/ms	≥65	68.7	69.6
	仪表板横梁位移/mm	≤50	20.7	6.3
正面 40% ODB 偏置 碰撞	前座椅安装点位移/mm	≤50	72.3	48.2
	左侧加速度峰值/(m·s ⁻²)	≤392	427	382
	右侧加速度峰值/(m·s ⁻²)	≤392	391	353
	反弹时刻/ms	≥95	101.5	103.1
侧面 MDB 碰撞	仪表板横梁位移/mm	≤50	150.5	47.3
	前座椅安装点位移/mm	≤50	61.2	47.9
	B柱侵入量/mm	≤200	142.6	163.6
	B柱生存空间/mm	>180	219	196
正面 100% 碰撞	前门侵入速度/(m·s ⁻¹)	<11	8.1	8.6
	前门生存空间/mm	>190	235	221
	后门侵入速度/(m·s ⁻¹)	<11	11.2	10.8
	后门生存空间/mm	>190	274	285

对比初始值、优化值与目标值可知,优化模型在100%正碰和40%偏置碰撞工况下性能较初始模型有

所提升;在侧碰工况下部分性能指标略有下降,但均满足目标要求。具体而言,初始模型在正碰工况下存在部分指标未达标,而优化后满足目标要求;侧碰工况的设计余量较大,优化后结果逼近目标值,这表明优化结果体现了各性能指标之间的平衡。

综上所述,本文的优化方法在实现白车身有效减重的同时,成功保障并平衡了多工况下的综合性能。优化后的料厚参数需进行圆整,并验证材料牌号的有效性,最终更新至车型设计数据中。

3.3 优化结果试验验证

在实车验证阶段,开展了相应试验(见图6)以进一步验证上述性能指标。关键性能指标的试验值及设计目标值见表6。数据显示,减重后的白车身在各工况下的试验值均满足性能目标要求。这表明本文所提出的优化方法,在实现轻量化的同时,能可靠保障白车身的综合性能。



图6 白车身刚度测试

表6 关键性能指标试验验证

性能指标	目标值	优化仿真值	优化试验值
弯曲刚度/(N·m ⁻¹)	≥16 000	18 256	18 980
扭转刚度/(N·m ⁻¹)	≥15 000	16 811	16 236
弯曲模态/Hz	≥43	43.6	44.0
扭转模态/Hz	≥34	34.6	34.5
OLC/(m·s ⁻²)	≤294	285	289
正碰侵入量/mm	≤120	95.1	102
偏置碰侵入量/mm	≤180	125	114
B柱侵入速度/(m·s ⁻¹)	≤8.5	5.1	5.4

4 结束语

本文基于白车身轻量化的设计需求,集成多种工况性能目标约束条件,提出一种有效的联合优化仿真方法。采用常见的Kriging模型建立响应面,并创新性地导入PF曲线修正响应面,解决了非线性结果拟合精度差的问题。经验证,该方法可使白车身有效减

重,且优化结果满足工程要求。同时,通过在优化过程中同步权衡多工况约束,最终实现了轻量化与综合性能的良好平衡。然而,单次优化因样本数量多而导致计算成本较高,未来在增加仿真算力的同时,还需考虑简化仿真模型以提升计算效率。

参考文献:

- [1] 李长玉,林佳鹏,钱宇晨,等. 基于有限元分析的某轿车白车身轻量化设计[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9):144-149.
- [2] 李作轩,贾良跃,郝佳,等. 基于多工况关联的无人车辆车身结构轻量化优化设计[J]. 兵工学报, 2023, 44(11):3529-3542.
- [3] 段利斌,周华锦,杜展鹏,等. 基于SHCA-T算法的车身骨架多工况耐撞性优化设计[J]. 汽车工程, 2023, 45(2):304-312.
- [4] ZENG F, LI W, ZHENG H, et al. Applications of a DOE-based MDO in full vehicle crash safety and NVH design[R]. SAE International;Warrendale, 2021.
- [5] 于保君,何洪军,肖永富,等. 某小型客车车身骨架轻量化综合优化设计[J]. 客车技术与研究, 2021, 43(3):22-25.
- [6] 周伟,李敏,丘铭军,等. 基于改进遗传算法的车身板件厚度优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3):523-532.
- [7] 王立功,王超,邹益胜,等. 性能驱动的转向架构架结构设计方法[J]. 机械设计与制造, 2019(3):118-121.
- [8] 王平,郑松林,吴光强. 基于协同优化和多目标遗传算法的车身结构多学科优化设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2):102-108.
- [9] LI D H, TIAN J W, Shi S W, et al. Lightweight design of commercial vehicle cab based on fatigue durability[J]. Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2023, 136(1):421-445.
- [10] FANG J G, GAO Y K, SUN G Y, et al. Multiobjective robust design optimization of fatigue life for a truck cab[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015(135):1-8.
- [11] 王登峰,李慎华. 基于 Pareto 挖掘的白车身侧碰安全件轻量化优化设计[J]. 中国机械工程, 2021, 32(13):1584-1590.
- [12] OUYANG J, XIAO Y Y, SHU C, et al. The Correction scheme of enhanced response surface method to support full vehicle MDO design [R]. SAE International; Warrendale, 2021.
- [7] 李维,刘亮红,鹿政华,等. 某燃料电池储氢系统框架随机振动疲劳分析与优化[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(22):128-133.
- [8] 温小飞,陈泽滔,詹志刚,等. 质子交换膜燃料电池单电池振动响应分析[J]. 电源技术, 2022, 46(8):903-906.
- [9] 焦道宽,郝冬,王晓兵,等. 振动对燃料电池扩散层液态水传输行为探究[J]. 汽车工程, 2023, 45(3):402-408.
- [10] 裴冯来,欧阳云瀚. 强化道路振动谱影响下的燃料电池电性能与气密性衰减规律[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2):714-721.
- [11] 顾平林,姜于亮,谢庆诗. 振动对燃料电池电堆气密性的影响分析[J]. 时代汽车, 2022(2):154-157.
- [12] 全国氢能标准化技术委员会. 质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气;GB/T 37244—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018:1-7.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用动力蓄电池安全要求;GB 38031—2025[S]. 中国标准出版社, 2025:9.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 燃料电池发动机及关键部件耐久性试验方法;GB/Z 44116—2024[S]. 北京:中国标准出版社,2024:23-24.

(上接第15页)