

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.004

铸造铝合金车门“材料-结构-工艺”一体化设计

谷先广¹, 梁文宇¹, 施永祥²

(1. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 蔚来汽车科技(安徽)有限公司, 安徽 合肥 230061)

摘要:为实现轻量化目标,文章针对某款电动汽车后门进行“材料-结构-工艺”的一体化设计。首先进行车门4种常见工况下的多目标拓扑优化,分析出设计空间;然后结合精密铸造工艺和ZL205A铜铝合金材料特性对车门进行详细设计;最后进行新型车门模态及刚度性能分析,以验证结构的合理性。对满足设计要求的车门进行试制和性能测试试验,结果表明,新型铸铝车门在满足各性能指标的同时,质量减轻13.66%,达成轻量化设计目标。

关键词:车门性能;精密铸造;轻量化;一体化设计;变权拓扑优化

中图分类号:U463.834 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)06-0737-00

Material-structure-process integrated design for cast aluminum alloy door

GU Xianguang¹, LIANG Wenyu¹, SHI Yongxiang²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. NIO Automotive Technology(Anhui) Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: In order to achieve the goal of lightweight, this paper presents a material-structure-process integrated design for the rear door of an electric vehicle. Firstly, the multi-objective topology optimization under four common working conditions of the door is carried out, and the design space is analyzed. Secondly, the detailed design of the door is performed by combining the precision casting process and the material characteristics of ZL205A copper and aluminum alloy. Finally, the modal and stiffness performance analysis of the new door is conducted to verify the rationality of the structure. The trial production and performance testing experiments of the doors that meet the design requirements show that the new cast aluminum alloy doors meet the performance indicators while reducing the mass by 13.66%, achieving the lightweight design goal.

Key words: door performance; precision casting; lightweight; integrated design; variable-weight topology optimization

0 引言

电动汽车轻量化能够减少汽车能源消耗,提高能源利用效率,研究表明,电动汽车质量每减少100 kg,续航里程将增加17 km^[1]。同时,轻量化车身还能减少碰撞时车辆的惯性动能,从而降低撞击的冲击力,减少事故造成的伤害。实现轻量化设计主要包括3种方法,即结构轻量化、材料轻

量化以及工艺轻量化,针对这些方法,国内外学者展开了相关研究。文献[2]通过多工况拓扑优化对前舱盖进行结构轻量化设计;文献[3]将碳纤维复合材料应用于汽车前端碰撞结构中,在提升吸能效果的同时实现了轻量化;文献[4]引入辊冲成型工艺完成底盘的设计与制造,达成减重目标。

近年来,综合“材料-结构-工艺”的一体化设计方法逐渐成为国内外学者的研究热点。文献

收稿日期:2023-07-07;修回日期:2023-08-28

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(202203a05020029)

作者简介:谷先广(1981—),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:gxghfut@163.com.

[5]提出适用于碳纤维复合材料汽车传动轴的“材料-结构-工艺”一体化设计方法,带有铺层工艺约束的复合材料传动轴相较于原钢制件质量减轻了 22.8%;文献[6]从铺层和结构 2 个设计角度对无人机复合材料机翼进行一体化设计,性能显著提升;文献[7]从材料选择、结构拓扑优化、真空压铸设计和性能分析 4 个方面进行整体式压铸纵梁的轻量化设计,得到的压铸纵梁相较于原件质量减轻了 31%;文献[8]针对乘用车保险杠、副车架及仪表盘横梁进行了“材料-结构-工艺”的一体化设计,得到的车身结构件在质量减轻的前提下,模态和刚度性能均有明显提升。以上研究表明,一体化设计方法具有广泛的设计适用性,为各领域结构的轻量化设计提供了有价值的思路。

因此,本文将“材料-结构-工艺”的一体化设计方法应用于新型车门结构的轻量化设计中。首先,基于多目标变权拓扑优化方法,在满足各项性能指标要求的前提下进行车门材料的增减优化;然后,结合精密铸造工艺^[9]对车门进行“材料-结构-工艺”的一体化设计,在满足结构性要求的前提下实现轻量化;最后,对最终设计方案进行试制,并通过性能测试试验验证仿真结果的准确性。

1 多目标变权拓扑优化理论

在车门概念设计时,刚度和模态是 2 个重要的设计目标。刚度设计旨在保证车门具有良好的抵抗变形的能力,与驾驶安全性密切相关;模态设计旨在行驶过程中使车门不会出现明显的振动,同时避免共振现象,因此,权衡刚度和模态性能的多目标拓扑优化具有重要的工程意义。本文以应变能表示结构柔度大小,一阶模态频率描述振动特性,构建多目标拓扑优化模型,同时引入变权系数方法^[10]进行完全客观的动态权重分配。

基于各向同性材料惩罚模型(solid isotropic material with penalization, SIMP)法^[11],以单元相对密度 x 为设计变量,构建多目标变权拓扑优化数学模型,即

$$\min P(x) = \left\{ \omega_0^p \sum_{k=1}^n \omega_k^p \left[\frac{C_k(x) - C_{k\min}}{C_{k\max} - C_{k\min}} \right]^p + (1 - \omega_0)^p \left[\frac{\lambda_{\max} - \lambda(x)}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}}; \quad (1)$$

$$\text{s. t. } V_i/V_0 \leq f,$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{U},$$

$$0 < x_{\min} \leq x \leq 1$$

其中: $P(x)$ 为综合响应函数; $C_k(x)$ 为第 k 个工况的应变能响应; $\lambda(x)$ 为一阶模态频率;体积分数 V_i/V_0 为约束; \mathbf{F} 、 \mathbf{U} 、 \mathbf{K} 分别为载荷矩阵、位移矩阵和刚度矩阵; p 为惩罚因子,通常取 1~3; $C_{k\min}$ 、 $C_{k\max}$ 分别为第 k 个工况下结构总应变能的最小值和最大值; λ_{\min} 、 λ_{\max} 分别为结构一阶模态频率的最小值和最大值; ω_0 为刚度权重系数; ω_k 为变权系数。 ω_k 可以表示为:

$$\omega_k = \frac{1 - \alpha_k}{\sum_{k=1}^n (1 - \alpha_k)} \quad (2)$$

$$\alpha_k = u_{C_k}(x) = \left[1 + \exp\left(a_1 - a_2 \frac{C_k(x) - C_{k\max}}{C_{k\min} - C_{k\max}} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

其中: α_k 为隶属度函数; a_1 、 a_2 为常数,通常 $a_1 = 2$, $a_2 = 4$,可根据收敛情况进行调整。

随着迭代步的增加,目标函数值 $C_k(x)$ 不断逼近第 k 工况下的应变能最优值 $C_{k\min}$,该目标权重系数 ω_k 随之减小,下一步迭代优化将侧重权重更大的子目标,最终实现各目标均达到最优的结果。优化后的多目标变权拓扑设计流程如图 1 所示。

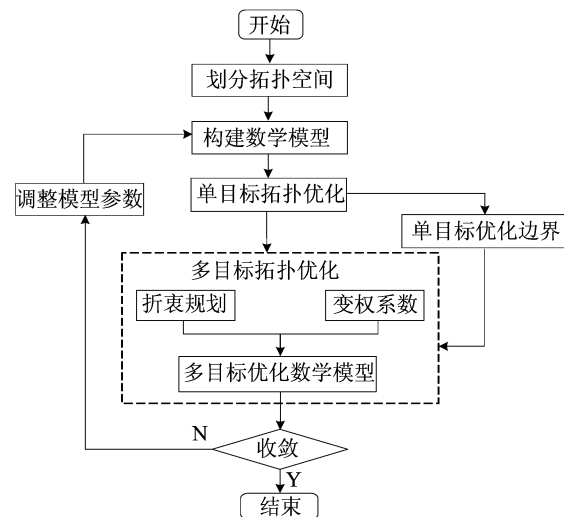


图 1 多目标变权拓扑优化流程

2 铸铝车门一体化设计

2.1 拓扑优化

首先进行给定设计域的拓扑优化,获得主要工况下载荷的传递路径,从而得出材料的分布情况,为一体化设计提供设计方向。

2.1.1 划分设计域

参考原钢制件结构边界进行内板拓扑空间的

划分,采用壳单元进行离散化处理。空间中保留了内板与车身贴合边界以及主要附件安装面,将窗框及玻璃升降器安装面、电机安装面、门锁、边框定义为非设计区域;其他部分定义为设计区域。拓扑空间划分如图 2 所示。



图 2 拓扑空间划分

2.1.2 单目标拓扑优化

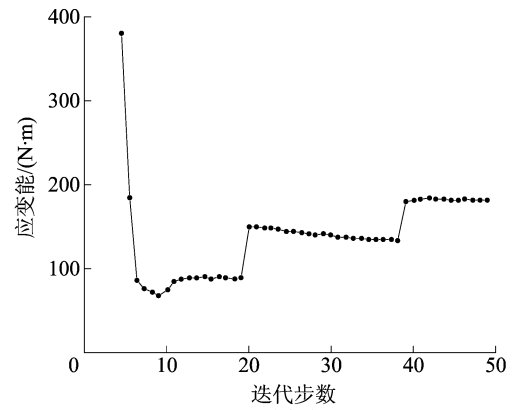
进行 4 个常见工况的单目标拓扑优化,工况及边界条件见表 1 所列。其中:工况①内板挤压、工况②整体下垂、工况③窗框挤压分别反映车门内板及窗框在常见载荷下抵抗变形的能力;工况④自由模态则反映车门的动态振动特性。

表 1 4 个常见工况及边界条件

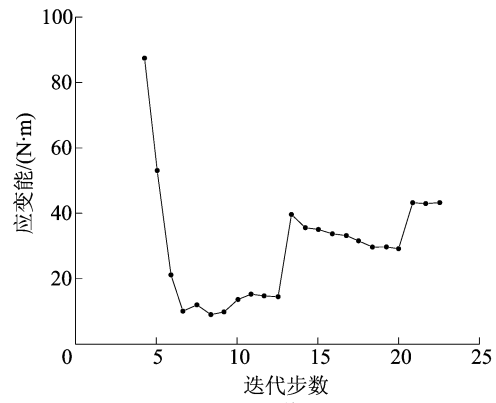
工况	约束	加载
① 内板挤压	门锁约束 1、2、3、5、6 自由度;铰链全约束	内板中心 Y 向加载 100 N
② 整体下垂	门锁约束 1、2 自由度;铰链全约束	门锁 Z 向加载 500 N
③ 窗框挤压	门锁约束 1、2、3、5、6 自由度;铰链全约束	窗框中心 Y 向加载 100 N
④ 自由模态		

单目标拓扑优化分别以工况①~工况③应变能最小、工况④一阶模态频率最大为目标,体积分数为约束,利用 Optistruct 软件进行不同工况下的单目标拓扑优化,优化前需要定义优化参数,其中体积分数设置为 0.3,刚度权重系数 $\omega_0=0.6$ 。

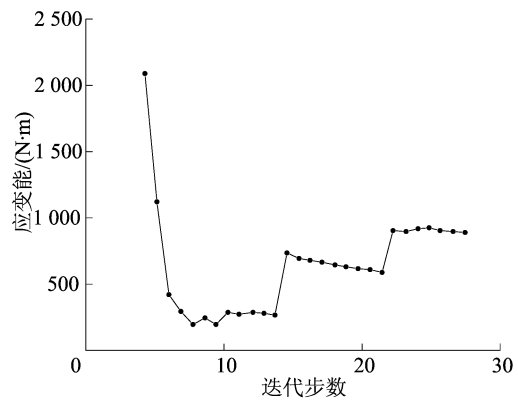
为提高拓扑优化准确性,避免棋盘格现象,通常设置最小单元尺寸为平均单元尺寸的 2~3 倍,最大单元尺寸设置为最小单元尺寸的 2 倍。在本例中,设置最小单元尺寸为 10 mm,最大单元尺寸为 20 mm;设置控制因子为 1,惩罚因子 p 为 2。在控制棋盘格现象的同时提高收敛效率,各工况单目标优化收敛曲线如图 3 所示。



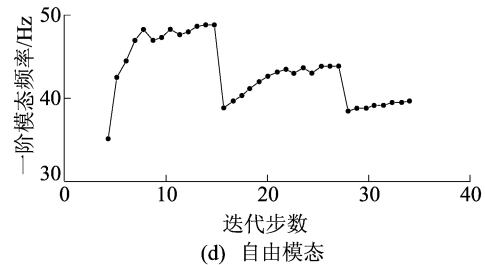
(a) 内板挤压



(b) 整体下垂



(c) 窗框挤压



(d) 自由模态

图 3 单目标优化收敛曲线

Optistruct 软件通过自动增大惩罚函数 p 以加速收敛,因此各工况优化迭代曲线均出现 2 次阶梯式变化,最终各应变能响应趋于平稳并达到迭代终止要求。

2.1.3 多目标拓扑优化

读取单目标优化 out 文件,各工况目标边界值见表 2、表 3 所列。

表 2 刚度优化目标边界 单位: N·m

工况	C_{kmax}	C_{kmin}	$C_{kmax} - C_{kmin}$
内板挤压	381.0	110.0	271.0
整体下垂	2 170.0	1 288.0	882.0
窗框挤压	90.7	66.0	24.7

表 3 一阶模态优化目标边界 单位: Hz

工况	λ_{max}	λ_{min}	$\lambda_{max} - \lambda_{min}$
自由模态	48	34	14

将上述目标值代入式(1)~(3)中,通过 HyperMath 软件编写多目标优化函数程序,设置接口类型为 HLIB,取刚度权重系数 $w_0 = 0.6$,体积分数设置为 0.3,保持其他设置不变。

2.1.4 拓扑优化结果分析

经过 58 次迭代计算,内板多目标拓扑载荷分布如图 4 所示,载荷分布云图展示了目标工况下载荷传递路径,相对密度 x 以不同颜色呈现在云图中。图 4 中:蓝色区域为相对密度为 0 的部分,可在后续设计中去除;红色部分相对密度为 1,为重要的传力部分,不可去除。

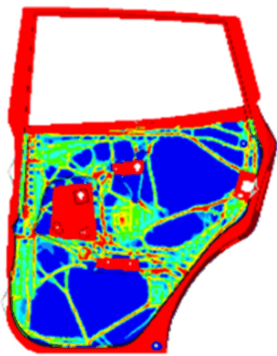


图 4 内板多目标拓扑载荷分布云图

由拓扑优化结果云图可知,载荷主要集中在内板中心、窗框以及车门靠近铰链约束边界处,这些分布区域分别受到了内板挤压、窗框挤压和下垂工况的影响。由此可见,引入变权系数的多目标拓扑优化充分考虑到了各子工况的性能要求,载荷分布结果可用于后续的优化设计。

2.2 工艺及材料选择

2.2.1 工艺选择

相较于传统铸造工艺,精密铸造生产的铸件

导热性更好、抗氧化能力更强,近几年广泛应用于汽车产业^[12]。目前,车用零部件生产中较常用的精密铸造方法是压力铸造和熔模铸造,其中熔模铸造尺寸精度可达 CT4~CT6 级,适用于制造尺寸精度要求较高、表面光洁度要求较高的复杂零件。因此,本文采用熔模精密铸造方法进行车门的设计与试制,工艺流程如图 5 所示。

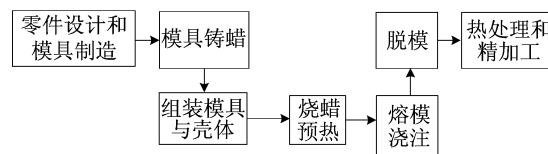


图 5 熔模精密铸造工艺流程

2.2.2 材料选择

根据铸造铝合金的材料选取标准^[13]以及项目需求列出几种用于熔模铸造的铝合金材料,相应的力学性能见表 4 所列。其中,铝铜合金 ZL205A 在保证较低成本的同时,具有更佳的抗拉强度和布氏硬度,而且合金中的铜元素也有利于提高合金耐热强度和断裂韧性。

因此,本文采用 ZL205A 材料进行车门的一体化设计,该材料与原钢制车门材料属性对比见表 5 所列。

表 4 几种适用熔模铸造的铝合金性能

合金类型	牌号	力学性能		
		抗拉强度/MPa	伸长率/%	布氏硬度 HBW
Al-Si	ZL114A	290	2	85
Al-Cu	ZL201	295	8	70
	ZL205A	440	7	100
Al-Mg	ZL301	280	9	60

注:ZL 代表铸铝;牌号中第 1 个数字表示合金类型(1 表示 Al-Si,2 表示 Al-Cu,3 表示 Al-Mg),后 2 位数字表示顺序号;牌号中“A”代表该合金为优质合金。

表 5 钢制与铸铝车门材料属性

类型	牌号	弹性模量/ (10^4 MPa)	泊松比	密度/ (10^{-9} t/mm ³)
钢制	DC01	21.0	0.30	7.85
铸铝	ZL205A	7.3	0.32	2.82

2.3 详细设计

由于 ZL205A 铝合金材料密度较小,铸造时金属液静压力小,设计结构存在的微小特征将导致气体难以排除,产生气孔。因此在铸件结构设

计时应去除钢制内板表面不必要的特征,使用平滑的板面代替,同时去除原钢制件内、外板复杂的包边连接结构。

2.3.1 壁厚尺寸设计

铸件壁厚的增加容易导致铸件内部气孔、疏松等缺陷产生,在概念模型设计阶段应遵循最小壁厚准则,尽可能避免通过增加壁厚来提升结构性能。本文控制车门壁厚不超过 4 mm,使铸铝件在减少材料的同时拥有较好的力学性能。

2.3.2 加强筋设计

加强筋设计时应遵循精密铸造工艺的筋长方向柔性准则,减少长直加强筋的使用以提高长度方向的柔性^[14]。

根据多目标拓扑优化结果,在内板窗框、门锁及内板中心区域增设随形加强筋。随形加强筋按照仿生蜻蜓翅脉^[15]的分布规律布置,在载荷集中区域铺设厚度 4 mm 的主加强筋,在细小载荷传递路径以及主加强筋之间铺设 3 mm 从加强筋,连接部分用倒角处理,以便后期清理。

车门内、外板详细设计结果如图 6 所示,整个过程实现了 15 个结构件的融合设计,生产效率大幅提升。图 6 展示了钢制与铸铝内、外板模型的对比效果。

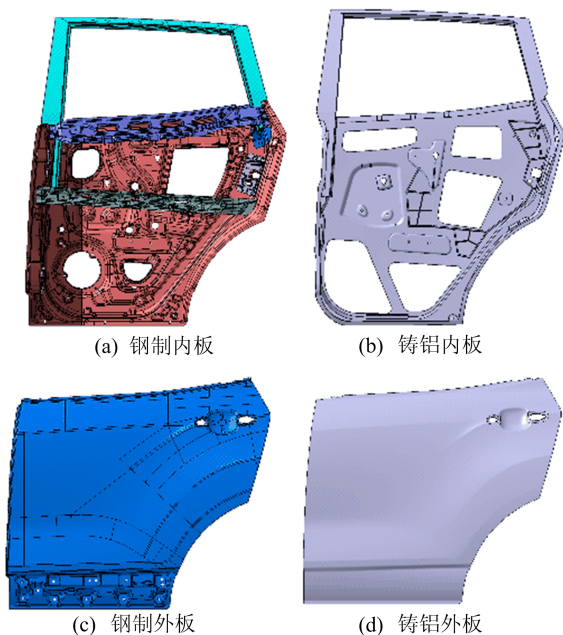


图 6 钢制及铸铝内、外板模型的对比

2.4 车门性能分析

新型车门性能评估是判断结构设计是否合理的关键。作为车身重要组成系统,车门的模态性能关系着整车的振动特性,同时其刚度性能对乘

员的驾驶安全性和车身密闭性有较大的影响。因此,需进行新型车门结构的模态和刚度分析。

2.4.1 模态仿真分析

在 ANSA 软件中完成车门有限元模型的建立,同时考虑到模型厚度均匀,故采用平均尺寸为 4 mm 的壳单元网格进行模型离散化处理。基于 NASTRAN 软件求解得到的一阶模态位移云图如图 7 所示。一阶模态频率见表 6 所列,对比可知,铸铝件在满足模态设计要求的前提下,模态性能相较于钢制件提升了 12.06%。

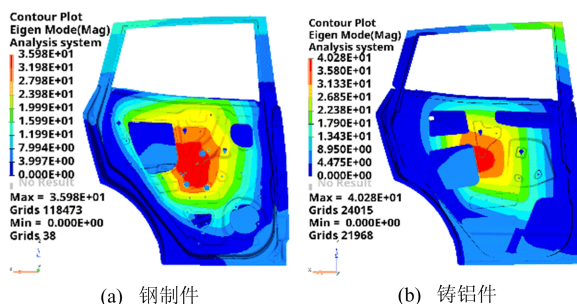


图 7 一阶模态位移云图

表 6 钢制与铸铝车门模态对比

类型	一阶模态频率/Hz	目标值/Hz
钢制件	41.78	≥40.00
铸铝件	46.82	≥40.00

2.4.2 下垂刚度仿真分析

本文研究车门在小开角情况下的下垂刚度,在车门门锁位置加载 Z 轴反方向的 500 N 集中载荷,并将自重考虑其中;约束铰链处 6 个方向自由度以及门锁位置 X、Y 向平动自由度,利用 ABAQUS 软件进行刚度性能计算。

仿真计算得到的下垂刚度位移云图如图 8 所示。从图 8 可以看出,钢制车门和铸铝车门的最大变形均发生在窗框左上角。

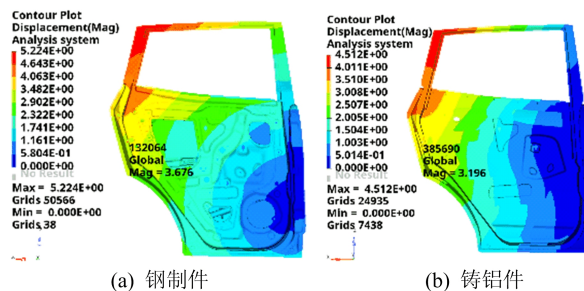


图 8 下垂刚度位移云图

钢制车门和铸铝车门下垂工况下的加载点变

形量见表 7 所列,对比可知铸铝车门满足变形要求,下垂刚度性能提升了 13.07%。

表 7 钢制与铸铝车门下垂刚度对比

类型	加载点变形量/mm	目标值/mm
钢制件	3.67	≤4.00
铸铝件	3.19	≤4.00

通过新型车门的性能仿真可知,该模型满足各项性能指标,可作为最终设计结果进行试制。

3 车门试制与性能试验

3.1 铸铝车门试制

通过熔模精密铸造制得的铸铝车门满足较高的尺寸精度。原钢制车门与铸铝车门模型如图 9 所示。

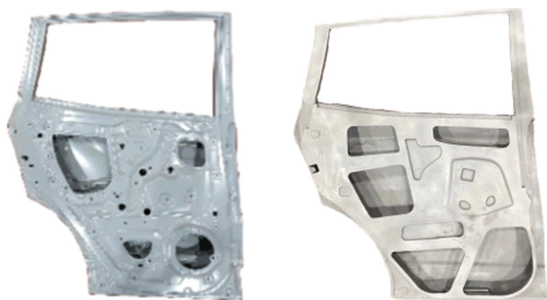


图 9 钢制和铸铝 2 种材料车门模型

铸铝车门的线性尺寸公差达到 ISO 标准的 CT4 级,表面粗糙度为 $0.8 \mu\text{m}$ 。原钢制车门总质量为 14.28 kg,铸铝车门总质量为 12.33 kg,轻量化率达 13.66%。

3.2 性能试验

为验证仿真分析的有效性,需要进行钢制和铸铝 2 种车门的性能测试试验。

3.2.1 模态试验

基于模态测试分析软件系统,搭建模态试验台进行模态测试,以获得 2 种不同材料车门的动态性能。

测试仪器包括 32 通道数据采集系统、力传感器、加速度传感器、激振锤、弹性绳等。

由于车门质量相对较轻,试验采用悬挂式测试方式,使用 4 根弹性绳对车门进行悬挂,使其处于近似自由状态,悬挂点分别为窗框两角和内板下端两侧的缓冲块安装孔和铰链安装孔,测试过程中保证板面水平。

预先在车门上进行测点的布置,相邻测点间距为 10 mm,每 2 个测点布置 1 个加速度传感器,两车门分别划分 38 个传感器布置点,如图 10 所示。数据采集每批传感器为 10 个,通过移动传感器分批进行测量。测试过程中,采用固定单点锤击的测试方法敲击门锁下 5 mm 处,观察各个测点的频响函数、相干曲线等。

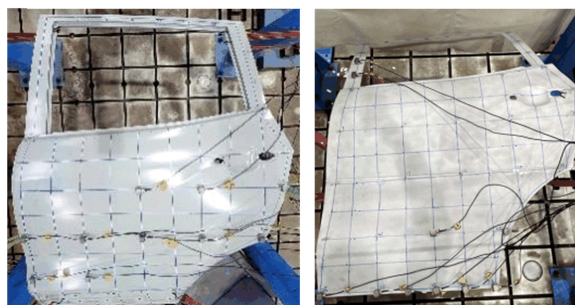


图 10 2 种车门模态测试传感器测点

通过 PolyLSCF 方法结合整体多项式拟合法识别模态参数,并基于振型动画辨识振型,结果如图 11 所示。

从图 11 可以看出,2 种车门的振型图均呈现为整体弯曲,与仿真结果一致。

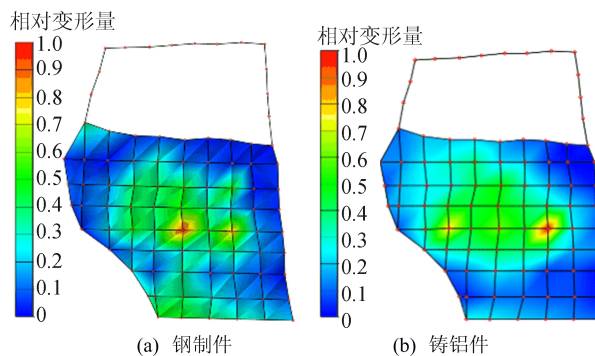


图 11 2 种车门振型云图

试验测得钢制和铸铝 2 种车门的一阶模态频率和阻尼比见表 8 所列。

表 8 钢制与铸铝车门模态参数

类型	一阶模态频率/Hz	阻尼比
钢制件	44.24	0.61
铸铝件	48.43	0.38

2 种车门模态频率试验与仿真数据的对比见表 9 所列。由表 9 可知,2 种车门仿真与试验结

果的误差均在 10%以内,一致性较好。

表 9 钢制与铸铝车门的模态性能仿真与试验结果对比

类型	一阶模态频率/Hz		误差/%
	仿真	试验	
钢制件	41.78	44.24	5.56
铸铝件	46.82	48.43	3.32

3.2.2 车门下垂刚度试验

通过定位夹具将车门定位在门型台架上进行车门下垂刚度试验,在门锁处分级加载,并通过位移传感器记录窗框位置 Z 向位移量,如图 12 所示。

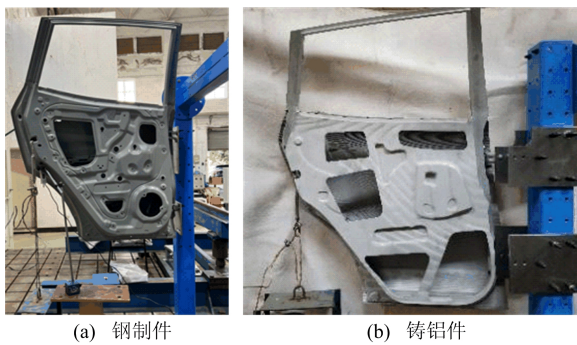


图 12 刚度测试试验

试验加载到 500 N 时加载点的最大变形量仿真与试验结果对比见表 10 所列,可以看出,仿真与试验误差均在 10%以内,一致性较好。

表 10 刚度性能仿真与试验结果对比

类型	加载点最大变形量/mm		误差/%
	仿真	试验	
钢制件	3.67	3.92	6.37
铸铝件	3.19	3.52	9.37

4 结 论

本文在多目标变权拓扑优化的基础上,结合精密铸造工艺要求对车门进行“材料-结构-工艺”的一体化设计和模态刚度分析,最后进行试制和试验验证。结果表明,本文设计试制的铸铝车门满足模态刚度设计要求,且各项性能在钢制车门基础上均有所提升,轻量化率达到 13.66%。

[参 考 文 献]

- [1] 翟慧颖,胡新. 电动汽车车身轻量化技术研究[J]. 时代汽车,2023(10):107-109.
- [2] 韩友国,刘向阳,吴洪涛,等. 电动汽车前舱盖轻量化设计研究[J]. 汽车零部件,2022(7):5-8.
- [3] ZANG M, HU Y F, ZHANG J G, et al. Crashworthiness of CFRP/aluminum alloy hybrid tubes under quasi-static axial crushing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 7740-7753.
- [4] 靳春宁,高妍,高世哲,等. 基于辊冲一体式纵梁的轻量化拖挂式房车底盘[J]. 汽车工程,2023, 45(5): 865-872.
- [5] 曹培欢,彭梓尧,岳晓丽,等. 碳纤维复合材料汽车传动轴材料结构及性能一体化设计[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(5): 89-96, 104.
- [6] 杨益彰,廖耀青. 基于变截面铺层的无人机机翼结构-材料一体化轻量化设计[J]. 无线互联科技, 2023, 20(12): 103-108.
- [7] 林佳武,李玄霜,陈宗明,等. 真空高压铸造铝合金车身后纵梁轻量化设计[J]. 汽车工程,2020, 42(3): 383-389, 400.
- [8] 董红顺. 精密铸造铝合金车身部件开发设计及应用[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
- [9] 汪永嘉,董红顺,张代胜,等. 保险杠前防撞梁材料-结构一体化轻量化设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(7): 86-93.
- [10] LIU J H, LUO L, XIAO X W, et al. Multi-objectives topology optimization of frame in an electric mining dump truck based on fuzzy satisfaction variable weight coefficients method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(6): 3059-3069.
- [11] PHILIP M B, NOBORU K. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2): 197-224.
- [12] ZHANG D X, ZHANG Y, YANG X F, et al. Quality management and control of low pressure cast aluminum alloy [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 301(1): 012054.
- [13] 全国铸造标准化技术委员会. 铸造铝合金:GB/T 1173—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2014:10-12.
- [14] 杨文彬. 铸件结构设计准则(三) [J]. 机械设计, 1995, 12(12): 1-4, 9.
- [15] 王君瑶,徐峰祥,华林. 仿蜻蜓翅脉的车门内板加强筋多目标优化设计[J]. 锻压技术,2022, 47(2): 30-41.

(责任编辑 胡亚敏)