

车辆开闭件耐久性能预测与优化分析*

PREDICTION AND OPTIMIZATION ANALYSIS OF DURABILITY PERFORMANCE OF AUTOMOTIVE CLOSURES

郭鹏博** 刘哲*** 李辉 高大威

(上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

GUO PengBo LIU Zhe LI Hui GAO DaWei

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

摘要 针对某汽车车门开闭过程中产生的疲劳失效问题,利用 Hypermesh 构建车门开闭有限元模型,再联合显式动力学求解器 Ls-Dyna 建立车门开闭非线性瞬态动力学模型,进而将非线性瞬态分析求解出来的包含应力-时间历程的 d3plot 文件导入 nCode DesignLife 中搭建疲劳分析模块,结合 10 万次车门开闭耐久试验对结果进行验证。结果表明,两者在损伤位置上以及损伤程度上一致性较好。最后采用多目标粒子群优化(Multi-Particle Swarm Optimization, MPSO)算法,以车门轻量化和最小损伤为目标对车门进行多目标优化设计,并依据工程实际选取最优解,使车门总成质量减小 0.17 kg,车门损伤值减小约 24.33%。优化结果表明, MPSO 算法可以有效应用于车门的多目标优化设计,为后续车门的设计开发提供了一定思路。

关键词 车门 疲劳耐久 显式动力学 粒子群优化

中图分类号 U463.83

Abstract Aiming at the fatigue failure problem of a car door opening and closing process. The Hypermesh was used to construct a finite element model of door opening and closing, and then Ls-Dyna, an explicit dynamics solver, was used to establish a nonlinear transient dynamics model of door opening and closing. The d3plot file containing the stress-time history solved by the nonlinear transient analysis was imported into nCode DesignLife to build the fatigue analysis module, and the results were verified with 100 000 times of door opening and closing durability tests, and the conclusions show that both of them have good consistency in terms of the damage location and the damage degree. Finally, multi-particle swarm optimization (MPSO) was used to optimize the door with the objectives of door lightweight and minimum damage, and the optimal solution was selected according to the engineering reality, which reduced the mass of the door assembly by 0.17 kg, and the damage value of the door was reduced by about 24.33%. The optimization results show that the MPSO algorithm can be effectively applied to the multi-objective optimization design of the door, which provides certain ideas for the design and development of the subsequent door.

Key words Vehicle door; Fatigue endurance; Explicit dynamics; Particle swarm optimization

Corresponding author: LIU Zhe, E-mail: zheliu@foxmail.com

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52175239).

Manuscript received 20240403, in revised form 20240422.

0 引言

车门作为全车使用最频繁、最重要的开闭件,其疲劳耐久性能预估已然成为汽车产品开发阶段的关键步骤,直接影响着用户体验以及车辆的整体寿命^[1-2]。一般情况下,车门的耐久性能都通过车门开闭工况下的疲劳试验来评估,显然这种方法成本高昂且耗时,相比

之下,计算机仿真分析则可以在开发前期介入^[3-5],并大幅缩短试验周期与成本。

迄今为止,国内外众多学者在车门开闭疲劳方面做了大量的工作。UNADKAT S 等^[6]通过模态分析获得瞬态应力-时间历程,在执行多次设计迭代后使仿真的计算时间和应力收敛更快,最后通过试验验证了其准确性。SHRIVASTAVA R 等^[7]通过车门开闭非线性

* 20240403 收到初稿, 20240422 收到修改稿。国家自然科学基金项目(52175239)资助。

** 郭鹏博,男,2002年生,河南漯河人,汉族,上海理工大学机械工程学院本科生,主要研究方向为智能车身设计。

*** 刘哲(通信作者),男,1991年生,山东济宁人,汉族,上海理工大学机械工程学院讲师,博士,硕士研究生导师,主要研究方向为智能车身设计。

瞬态仿真联合物理试验的方法,研究主次密封和门门之间的载荷分布对于车门结构和寿命的影响,结果表明,仿真与试验结果一致性较好。秦训鹏等^[8]采用面心复合设计方法构建了车门三阶模态的二阶响应面函数,实现了通过改变车门厚度进行轻量化设计的目标。龙岩等^[9]分析了多项重要参数对车门疲劳寿命的影响,并利用多目标粒子群优化(Multi-Particle Swarm Optimization, MPSO)算法对车门进行了轻量化和疲劳寿命优化设计。SHU Y L 等^[10]结合测试载荷与直接瞬态响应法预测卡车车门薄弱位置,结果表明试验与仿真一致性较好。KAPADNIS P C 等^[11]结合蒙特卡洛模拟与试验设计方法建立了车门可靠性设计优化流程,实现了预测车门耐久性概率分布的目标,并通过大量有限元模型验证了该流程的准确性。SONG G G 等^[12]对车门关闭疲劳耐久分析发现,基于线性应力的方法在较高应力和较短疲劳寿命下更为保守,而基于非线性应力的方法在低周疲劳问题上更为准确。

MPSO 算法广泛应用于多目标优化的求解。钟正强等^[13]针对单壁钢套箱围堰的经济和安全问题,建立钢套箱围堰参数优化模型,采用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对围堰进行多目标优化得出最优解,结果表明,PSO 算法可以有效应用于单壁钢围堰优化。蔡傲等^[14]为确定系杆拱桥合理成桥状态下的索力,采用改进的 PSO 算法对索力目标函数进行快速求解并进行自适应优化,为索力计算提供了高效求解思路。

本文首先利用 Hypermesh 建立车门总成以及四分之一车身的有限元模型,其次联合 Ls-Dyna 建立车门开闭非线性瞬态动力学模型,对车门设置正确的运动状态以及接触。进而将分析出来的应力-时间历程导入 nCode DesignLife 中,利用 Miner 线性累积损伤理论对开闭工况下的车门进行疲劳分析,再与车门开闭耐久试验进行对比。最后采用 MPSO 算法对车门轻量化以及寿命进行多目标优化,仿真结果验证了优化方案的可行性。

1 分析流程

本文的研究分析流程如图 1 所示,分析步骤如下:

1) 在 Hypermesh 中建立车门开闭有限元模型,包括四分之一的白车身以及完整的车门结构。

2) 定义车门开闭模型的边界条件,并给车门施加 1.5 m/s 的初始速度。

3) 将模型提交至 Ls-Dyna 进行求解,并对结果进行分析探讨仿真结果的可行性,最后与车门开闭耐久性试验结果进行对比。

4) 将瞬态分析得到的应力-时间历程导入 nCode

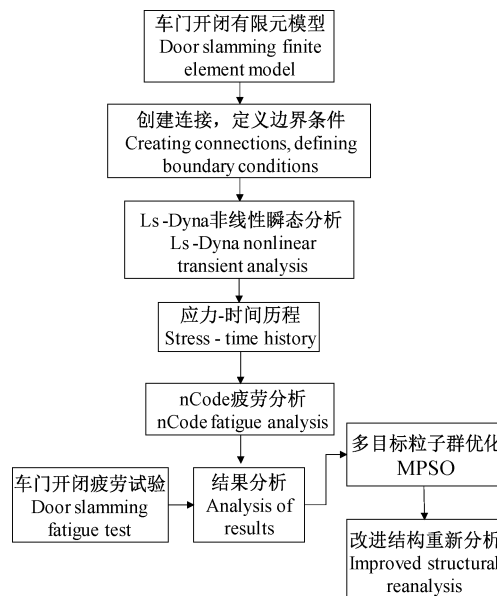


图 1 分析流程图

Fig. 1 Analysis flow chart

中,利用 Miner 线性累积损伤理论对车门开闭工况进行疲劳分析。

5) 采用 MPSO 对该位置进行多目标优化,并依据优化后的结果,改进有限元模型再次分析,以验证优化结果的可行性。

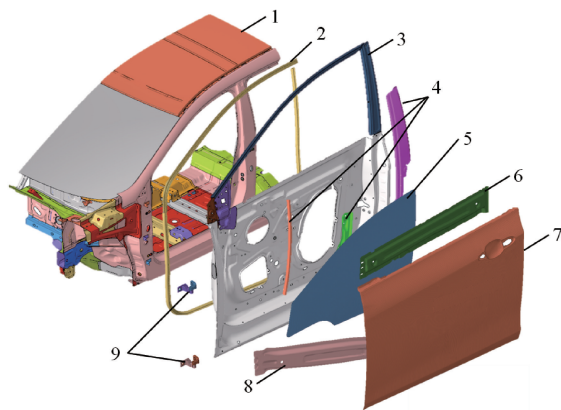
2 仿真分析

2.1 有限元模型建立

由于非线性分析方法在计算应力上优于线性分析,在本研究中,为了获取极限状态下,即车窗全开状态下车门关闭时的真实应力-时间历程,故采用非线性瞬态分析。非线性瞬态动力学分析是利用有限元方法对车门开闭瞬时工况进行非线性瞬态疲劳仿真。本文采用的显式求解器是 Ls-Dyna,有限元建模以及连接设置都遵从 Ls-Dyna 的要求。

通过模型缩减,车门开闭模型只需取四分之一的白车身与车门配合,有限元模型由白车门、白车身、车门和车身铰链、车门和车身密封件、车门玻璃、车门保险杠组成。rigid 刚性单元可以有效传递载荷,车门各钣金件之间采用 rigid 刚性单元进行连接。车门与白车身通过车门铰链连接,车门铰链以及车门门锁的旋转通过 revJoints 连接进行模拟。焊点在疲劳分析中尤为重要,采用 *MAT_SPOTWELD (MAT_100) 材质卡的三维六边形单元对白车身和车门点焊进行模拟。焊缝焊接采用 *MAT_SPOTWELD (MAT_100) 的 MIG_BEAM 单元进行模拟,螺栓采用 RigidBody 单元进行模拟。车门密封条在车门开闭疲劳中起着至关重要的作用,它可以有效缓解关门时所产生的冲击力。在 Ls-Dyna 中,密封条模型一端通过面面接触(*CONTACT_

AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE)与车门固连,另一端保持自由并通过点面接触(*CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE)与白车身连接。模型整体采用5 mm的网格,所建车门开闭模型节点数量为398 354个,网格数量为402 872个。Ls-Dyna非线性瞬态仿真有限元模型如图2所示。



1. 1/4 白车身; 2. 车门密封条; 3. 车门内板; 4. 车窗导轨; 5. 车窗; 6. 加强板; 7. 车门外板; 8. 防撞梁; 9. 车门铰链。
1. 1/4 white body; 2. Car door seal strip; 3. Door inner panel; 4. Window rails; 5. Window; 6. Stiffener plate; 7. Door outer plate; 8. Anti-collision beam; 9. Door hinge assy.

图2 Ls-Dyna非线性瞬态仿真有限元模型

Fig.2 Ls-Dyna finite element model for nonlinear transient simulation

为了减少计算成本,初始状态下车门和白车身呈 1.5° 打开状,只需要在此状态下施加相当于关门状态下的角速度即可。选择车门点集如图3所示,通过(*INITIAL_VELOCITY_GENERATION)卡片定义其速度为1.5 m/s,同时在车门铰链处设置车门旋转的全局坐标,旋转轴设置在车门铰链处。车门开闭模型约束点共1 932个节点,约束其6个方向的自由度。最后施加全局重力,设置求解的时间步长,提交到Ls-Dyna中进行求解。

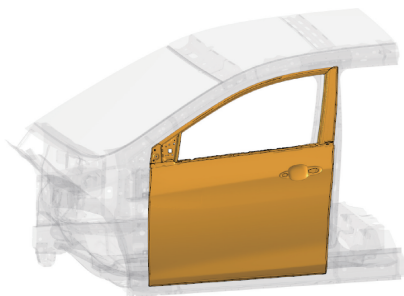


图3 车门点集

Fig.3 Door speed applied

2.2 显式动力学结果分析

在Ls-Dyna非线性瞬态碰撞分析中需要考虑沙漏能大小,研究表明,沙漏能小于总能量的5%时分析结

果才是可靠的,这一点对于验证本文有限元建模的准确性非常重要。如图4所示,本仿真沙漏能明显小于总能量的5%。在碰撞之前车门的全部能量来自于动能,车门与车身在0.05 s左右与车身发生接触,此时车门内能增加,动能减小而总能量保持不变,能量分布与实际相符。

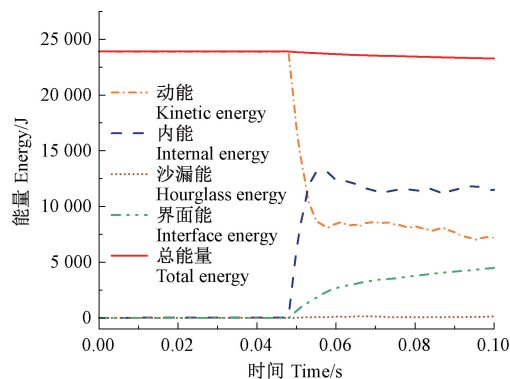


图4 非线性瞬态分析能量分布

Fig.4 Nonlinear transient analysis energy distribution

图4正确揭示了车门关闭瞬时的能量分布关系,验证了本文所建立的非线性瞬态分析模型的正确性。图5所示为车门瞬时基于Ls-Dyna瞬态仿真的应力分布。车门与车身发生碰撞时,车门左上方边角以及下部发生应力集中,车门铰链处有较高应力,应力分布情况符合实际,可以将基于Ls-Dyna的车门开闭非线性瞬态仿真应力-时间历程导入nCode进行后续疲劳分析。

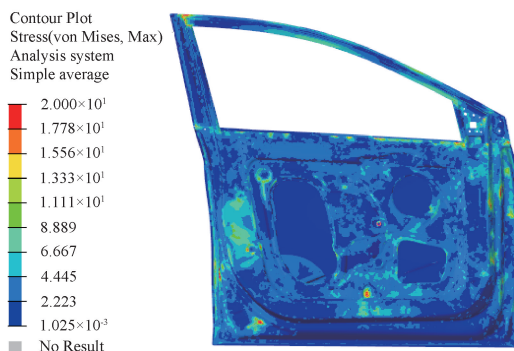


图5 基于Ls-Dyna瞬态仿真应力分布

Fig.5 Stress distribution based on Ls-Dyna transient simulation

2.3 疲劳分析

通过上述基于显式动力学的非线性瞬态仿真,得到车门关闭瞬时的应力-时间历程,将Ls-Dyna求解得到的d3plot结果文件导入nCode中进行疲劳寿命分析。联合nCode创建疲劳分析模块的分析流程如图6所示。

在nCode中的SNAalysis模块中根据本文的需求,设置处理类型为Material,事件处理方式CombinedFast,该方法基于Miner线性累积损伤理论将

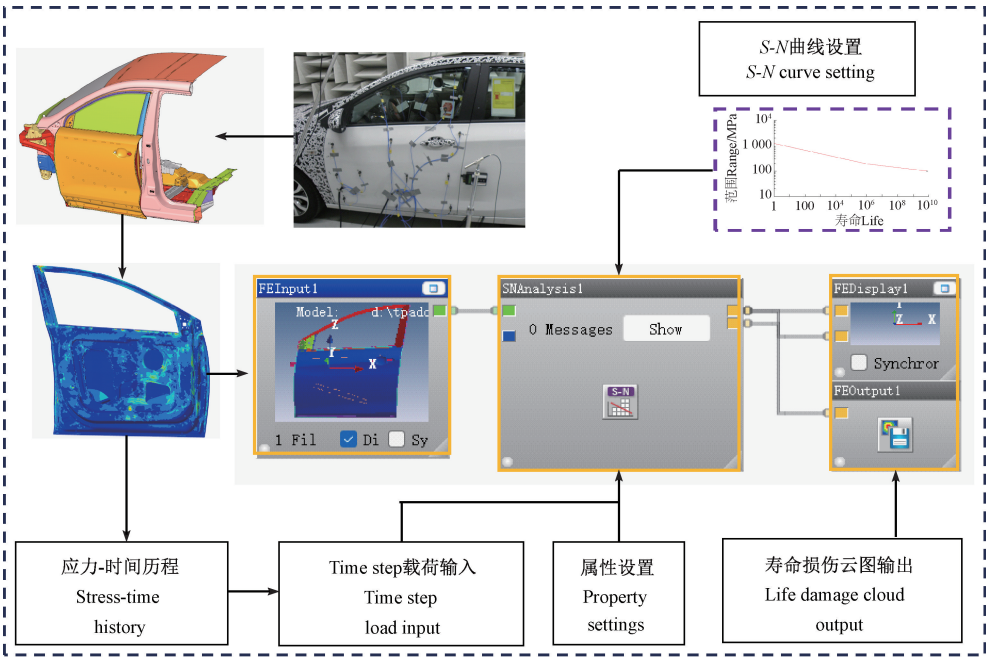


图 6 nCode 疲劳分析流程

Fig. 6 Analysis process of nCode fatigue

每一个疲劳事件独立处理,同时处理事件间的剩余循环,该方法兼顾计算精度较高、耗时较短两方面。应力修正方式为 Goodman,在没有材料相关具体参数时使用该方法较为保守。由于车门开闭总成材料较多,均用拉伸试验测出 $S-N$ 曲线过于繁琐,因此在 nCode 中可以输入材料的极限拉伸强度 (Ultimate Tensile Strength, UTS),便可自动拟合出材料的 $S-N$ 曲线,所需部分材料的 UTS 如表 1 所示。车门主体部分材料采用 DC01、DC04 以及 DC06,车门铰链部分采用强度较高的 ST52,加强板为 Q235。在载荷加载设置中,选用 Time step 直接调用有限元分析应力-时间历程,进行 10 万次循环。

表 1 部分材料的 UTS

Tab. 1 Ultimate tensile strength of selected materials

材料 Material	弹性模量 Elasticity modulus/MPa	UTS/MPa
DC01	210 000	220
DC04	210 000	240
DC06	210 000	269
ST52	210 000	490
Q235	210 000	431

提交 nCode 计算后,车门寿命损伤计算结果如图 7 所示。车门内板左下角焊点连接处存在明显损伤,大小为 1.271,根据 Miner 线性累计损伤理论,该位置损伤大于 1,发生了破坏。虽然在车门上、下铰链处存在较大应力,但该区域采用强度较高的材料且设有加强板,故该区域没有发生损伤。

最后根据车辆可靠性试验要求,对车门进行 10 万

次开闭试验后,车门内板左下角焊点处出现明显开裂损伤,车门开闭疲劳试验结果如图 8 所示。将基于 Ls-Dyna 的非线性瞬态动力学的疲劳分析结果以及车门开闭工况下的疲劳试验结果进行对比,发现两者在损伤发生位置上较为吻合,验证了上述非线性瞬态动力学仿真的正确性。同时也为后续车门经 MPSO 优化后的仿真验证提供了一定的基础。

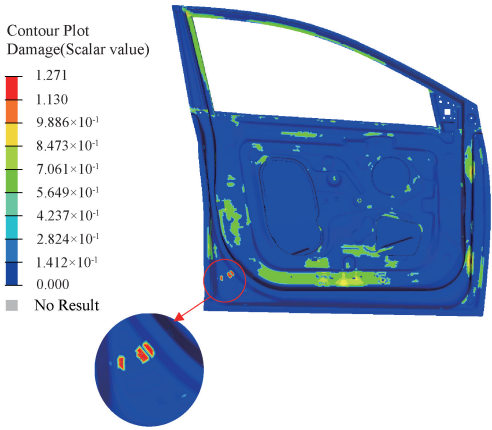


图 7 基于 Ls-Dyna 的疲劳分析结果

Fig. 7 Fatigue analysis results based on Ls-Dyna

3 优化分析

由第 2 节可知,车门在经过 10 万次开闭以后,车门内板左下角处出现明显损伤,没有达到规定的 10 万次开闭要求。一味增加损伤处的材料厚度虽然可以有效解决车门损伤问题,但也会增加车门质量,从而影响整车轻量化的目标。因此需要将车门轻量化以及损伤最小作为目标,对车门进行多目标优化。

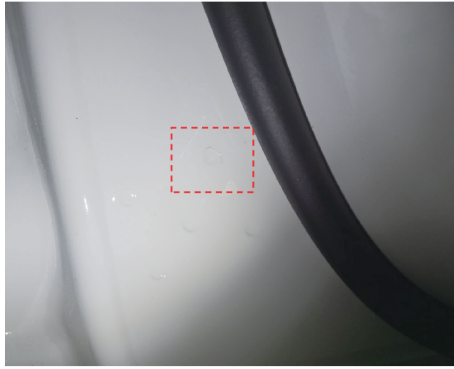


图 8 车门开闭疲劳试验结果

Fig. 8 Door opening and closing fatigue test results

PSO 算法从随机解出发,通过不断迭代寻找目标的最优解集,最后根据工程实际选择最优解。考虑影响车门质量的部件以及损伤部件,初步选取车门内板厚度,车窗玻璃厚度以及防撞梁的厚度作为设计变量,具体参数如表 2 所示。

表 2 设计变量
Tab. 2 Design variables

变量 Variable	初始值 Initial value	上限 Upper bound	下限 Lower bound
车门内板厚度 Inner plate thickness d_1/mm	0.7	1.0	0.5
车窗玻璃厚度 Window glass thickness d_2/mm	3.8	4.2	3.6
防撞梁厚度 Crash beam thickness d_3/mm	1.4	1.8	1.0

根据上述三个设计变量,采用代理模型联合 MPSO 算法,设置粒子群规模为 60,迭代次数为 120,优化得到的车门质量与车门损伤的关系如图 9 所示。

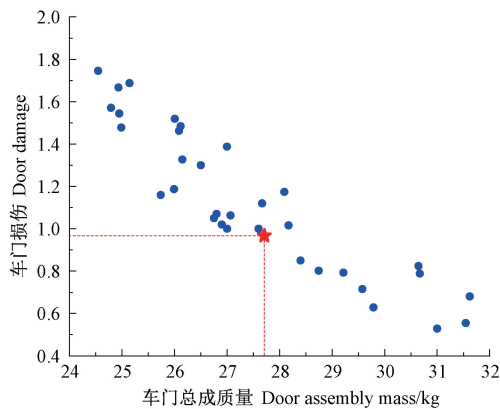


图 9 MPSO 优化结果

Fig. 9 Multi-particle swarm optimization results

由图 9 可知,根据 MPSO 优化得到的 Pareto 最优解集在可行解空间内均匀分布,车门总成质量与损伤值成反比。基于综合性能以及工程实际的考虑,

最优解应该满足车门在 10 万次开闭下不发生损伤,即损伤值小于 1,且车门总成质量最好不大于优化前的 27.88 kg。故在 Pareto 解集内选择质量为 27.71 kg、损伤值为 0.961 的最优优化结果。车门损伤云图如图 10 所示,此时车门内板左下角损伤已在规定范围之内。与优化前的车门相比,质量减少 0.17 kg,车门损伤减少约 24.33%,达到了本文多目标优化的目的。

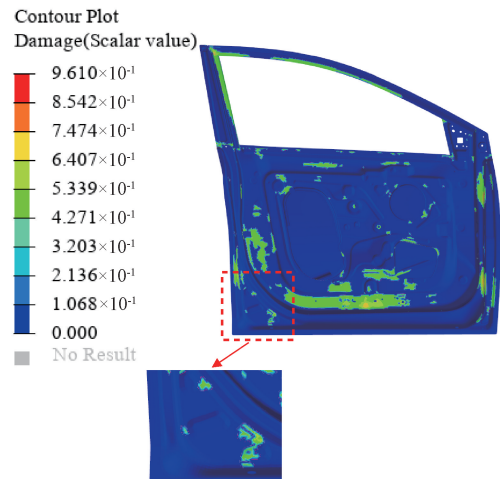


图 10 优化后的损伤云图

Fig. 10 Optimised damage cloud

4 结论

为了解决车门在开闭过程中产生的疲劳失效问题,本文采用 Hypermesh 联合 Ls-Dyna 建立车门开闭非线性瞬态仿真模型,进一步采用 nCode 对车门开闭耐久性能进行研究,最后针对车门耐久性能不足的问题,采用 MPSO 算法,在不增加车门质量的情况下使车门损伤值减少约 24.33%。本文所做主要工作和结论如下:

1) 利用 Hypermesh 联合 Ls-Dyna 建立车门开闭非线性瞬态仿真模型,设置了正确的连接和接触。通过分析仿真结果能量分布和应力分布,验证了所建非线性瞬态模型的准确性。

2) 将 Ls-Dyna 求解得到的应力-时间历程导入 nCode 中进行疲劳分析,针对车门损伤仿真结果进行探讨,最后通过车门开闭耐久性试验与仿真结果对比,验证了疲劳分析流程的准确性。

3) 利用 MPSO 算法,以车门轻量化和最小损伤为目标,求解得到车门总成质量和损伤值的 Pareto 最优解集,结果表明,车门总成质量与损伤值成反比,并依据工程实际选择最优解,为后续车门的开发设计提供了一定思路。

参考文献 (References)

- [1] 张宇,李昌,韩兴,等.基于 nCode 汽车后桥疲劳失效灵敏度评估方法[J].机械强度,2021,43(4):936-944.
ZHANG Yu, LI Chang, HAN Xing, et al. Fatigue failure sensitivity evaluation method of automobile rear axle based on ncode [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43 (4): 936-944 (In Chinese).
- [2] 胡浩炬,邓小强,叶树斌,等.汽车悬置橡胶结构抗疲劳设计[J].机械强度,2022,44(2):491-496.
HU HaoJu, DENG XiaoQiang, Ye ShuBin, et al. Fatigue design for powertrain rubber mount [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(2):491-496 (In Chinese).
- [3] 舒爱梅,翁建生,韩强,等.温度场分布下汽车排气系统振动疲劳寿命分析[J].机械强度,2020,42(3):667-674.
SHU AiMei, WENG JianSheng, HAN Qiang, et al. Research on vibration fatigue life of vehicle exhaust system under temperature field distribution [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42 (3):667-674 (In Chinese).
- [4] 张帅,郭志军,王传青.基于分析驱动设计的参数化白车身前端结构轻量化多目标优化[J].汽车工程,2019,41(9):1102-1107.
ZHANG Shuai, GUO ZhiJun, WANG ChuanQing. Multi-objective lightweight optimization of parametric frontend biw structure based on analysis-driven design [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(9): 1102-1107 (In Chinese).
- [5] YANG Z. Fatigue analysis of automotive components of inhomogeneous material under variable-amplitude cyclic loads [R]. SAE Technical Paper, 2023; 2023-01-0725.
- [6] UNADKAT S, KANGDE S, BURKUL M, et al. Closure slam CAE method investigation for automobiles [R]. SAE Technical Paper, 2016;2016-01-1349.
- [7] SHRIVASTAVA R, DHOLE A, RAVAL C. Virtual simulation of door slam test, study of relative sensitive parameters and correlation with physical test [R]. SAE Technical Paper, 2019;2019-26-0275.
- [8] 秦训鹏,冯佳伟,王永亮,等.基于响应面方法的微型车车门模态分析与优化[J].中国机械工程,2017,28(14):1690-1695.
QIN XunPeng, FENG JiaWei, WANG YongLiang, et al. Structural modal analysis and optimization of mini-car door based on response surface method [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(14): 1690-1695 (In Chinese).
- [9] 龙岩,蒋凌山,刘雪强,等.某轿车车门轻量化与疲劳寿命多目标综合优化[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(11):2732-2742.
LONG Yan, JIANG LingShan, LIU XueQiang, et al. Multi-objective optimization of lightweight and fatigue life for car door [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(11):2732-2742 (In Chinese).
- [10] SHU Y L, XIAN Z Y, HUI H, et al. Truck door slam fatigue finite element analysis and experimental research [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3365(602/603/604/605): 17-20.
- [11] KAPADNIS P C, HAMILTON D, HAUBOLD F, et al. Reliability based design optimization process for door slam durability [R]. SAE Technical Paper, 2021;2021-01-0280.
- [12] SONG G G, TAN C A. Door slam CAE method investigation [R]. SAE Technical Paper, 2015; 2015-01-1324.
- [13] 钟正强,刘卓泽,彭建新,等.基于粒子群算法的单壁钢围堰加固施工优化[J].公路交通科技,2022,39(7):90-97.
ZHONG ZhengQiang, LIU ZhuoZe, PENG JianXin, et al. Optimizing reinforcement construction of single-wall steel cofferdam based on PSO [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(7):90-97 (In Chinese).
- [14] 蔡微,张宇航,王林柯,等.自适应粒子群算法在成桥索力优化中的应用[J].公路交通科技,2022,39(1):81-87.
CAI Jing, ZHANG YuHang, WANG LinKe, et al. Application of adaptive PSO in optimization of cable force of completed bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(1):81-87 (In Chinese).