

汽车关门耳压舒适性 CFD 仿真分析及优化

许增满, 陈玉明, 史晨路, 凌子红, 陈达亮
中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司

【摘要】 车门系统是普通消费者使用最频繁的系统之一, 随着整车制造精度及气密性水平的提升, 关门瞬间乘员舱压耳感问题凸显。本文基于 STAR CCM+重叠网格技术, 建立关门耳压分析模型, 对关门耳压的影响因素进行研究。仿真分析结果表明, 气流通道及泄压阀有效泄漏面积是关门耳压的主要影响因素, 通过对乘员舱内气流通道及泄压阀有效面积的优化, 可有效改善关门耳压, 为关门耳压的前期预测及控制提供了借鉴及参考。

【关键词】 关门耳压, 舒适性, 仿真分析, 重叠网格

CFD Simulation Analysis and Optimization of Vehicle Door Closing Ear Pressure

Xu Zengman, Chen Yuming, Shi Chenlu, Ling Zihong, Chen Daliang

China Automotive Technology & Research Center, Automotive Engineering Research Institute

Abstract: Door system is one of the most frequently used system, with the improvement of manufacturing precision and sealing performance of the whole vehicle, the ear pressure problem more and more obvious. This paper based on overset mesh technology of STAR CCM+, the model of door closing ear pressure is built, the influence factors of ear pressure are studied. The simulation results show that the effective leakage area of the airflow channel and the pressure relief valve are the main factors of door closing ear pressure, the door closing ear pressure can be improved effectively by optimizing the effective area of airflow channel and the pressure relief valve, which provides a reference for the prediction and control of the door closing ear pressure.

Key words: door closing ear pressure, comfortable, simulation analysis, overset mesh

引言

随着传统汽车行业的消费升级, 消费者对于汽车的需求已经从传统的功能性代步需求向更加舒适性、科技化、智能化转变。因此, 主机厂也加大了对汽车技术研发的投入, 汽车产品的整体性能水平有了很大的提升, 整车制造精度及气密性水平也有了很大的提升, 由于在汽车开发前未考虑车内流场通道设计, 导致汽车上市后由于气阻效应而带来的关门瞬间压耳感问题较为突出, 气阻效应同时也会引起关门力偏大的问题, 从而严重影响车辆使用舒适性, 车型上市后气阻效应的整改成本高并且周期长。因此, 在汽车开发过程中在前期对关门耳压问题进行仿真预测分析可以降低开发成本, 规避由气阻效应引起的关门耳压问题和关门力问题。

目前, 针对于关门声品质的评价及研究较多, 而针对于关门耳压问题的研究比较少, 早在 2011 年, 韩国学者 Lee. Y. L^[1] 基于简单模型对车门关闭过程中的车内动态压力进行了研究, 分析了关门速度及车身泄漏量对关门瞬间车内压强的影响。吉林大学的张瑞^[2] 基于改进的米拉简单模型, 对泄压阀泄漏面积及开孔位置进行了研究。湖南大学的陈枫^[3] 基于电动小车模型, 在综合考虑整车气密性的基础上, 研究了关门耳压的影响因素。2019 年相龙洋^[4] 基于电动小车研究了关门速度和内饰板对耳压的影响, 提出了关门时降低车窗的方案来优化最小关门速度和关门耳压。马利宇等^[5] 基于数值计算的方法对车门关门耳压进行了研究, 采用内饰简单模型, 对泄压阀大小、车门与乘员舱比值关系与关门耳压的关系进行研究。江淮汽车的戴磊^[6] 从试验的角

度对泄压阀不同结构和布置进行了研究和验证。目前大多数的研究都基于简单模型的仿真研究或试验验证, 边界条件与实车测试相差较大, 此外, 简化的模型大多缺少对车内气流通道的分析及研究, 实际上乘员舱内饰等气流通道对关门耳压同样有较大的影响。

本文建立了精细化的关门耳压仿真分析模型, 结合车辆实际情况, 建立车内流场通道, 基于 STAR CCM+ 的重叠网格技术, 模拟车门实际关闭过程中的运动状态, 对车门关闭瞬间车内耳压舒适性进行仿真分析研究, 并通过优化气流通道及泄压阀有效面积的方案, 优化了车门关闭瞬间乘员舱内的耳压, 提升了关门耳压的舒适性。

1 压耳感问题机理分析

车辆在关门瞬间, 大量气体随车门旋转压入有限容积的乘员舱内, 少部分气体从车门与车身四周的间隙逸出, 如图 1 所示。

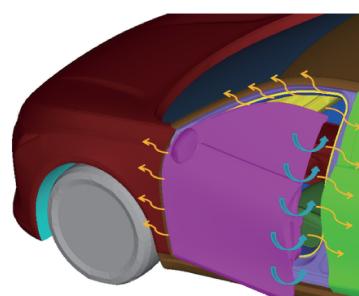


图 1 车门周边气流走向

根据质量守恒定律，质量守恒方程表达了单位时间内流体微元内质量增加的值等于流体通过各个控制面板流体微元体的质量之和^[1]，质量方程如式（1）所示：

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\mu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\nu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中， ρ 表示流体的密度， t 表示时间， μ 、 ν 、 w 为流体在 x 、 y 、 z 方向上的速度。根据气体状态方程如式（2）所示：

$$P = \rho RT \quad (2)$$

式中， ρ 表示流体的密度， R 表示气体常数， T 表示气体的温度。关门过程中气体的温度变化可以忽略不计，乘员舱体积不变，车门旋转压入乘员舱内的气体质量增加，使得乘员舱内气体密度增大，从而乘员舱内的压力升高。

随着车门的逐渐关闭，乘员舱内气体逐渐增加，从而乘员舱内压力不断提升，若车内气流通道设计不合理、泄压阀有效泄漏面积不足，乘员舱内气流通道就会形成瓶颈，乘员舱内的气体则不能快速顺畅地排出车外，从而会引起车内乘员的压耳感，影响车辆的乘坐舒适性。

2 关门耳压瞬态仿真分析

2.1 仿真模型介绍

在搭建仿真模型时，一般需对仿真结果影响不大的部件进行简化，从而提升仿真的效率。同时，为了保证仿真的精确度，结合开发车型的实际情况，需要对关门耳压仿真结果有影响的关键部件及气流通道进行精细化建模。本文在进行整车模型搭建时，忽略对于关门耳压无影响的底盘部件及发动机舱内部件，保留车身外表面及乘员舱内座椅、车窗玻璃、内饰等部件，由于气流通道上的各部件对关门过程气流的顺畅流通有影响，因此，处于气流通道上的部件也尽量保留，以更好地模拟在关门瞬间气流通道的特性。对于车门模型，保留车门内外钣金、内饰、车窗玻璃以及密封条等部件。本文仿真过程是基于 STAR CCM+ 的重叠网格技术进行模拟车门关闭的整个过程，因此，需在车门四周建立一个重叠区域。重叠区域如图 2 所示。

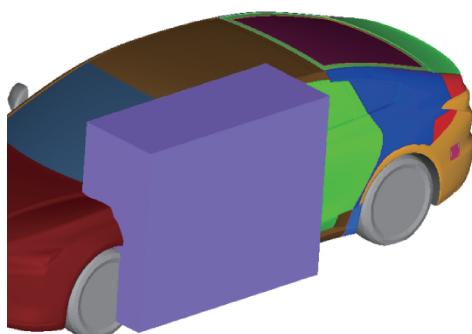


图 2 仿真模型的重叠区域

2.2 仿真监测点及分析目标

根据汽车关门耳压主观评价及客观测试的统计研究结果，一般情况下，当车辆在关闭左前车门时，驾驶员位置及后排右侧乘员位置压力幅值变化最大，也最容易产生耳压

感，从而引起乘客的抱怨，影响车辆使用的舒适性。因此，本文中仿真分析的工况为关闭左前门，车门关闭速度为 1.2m/s（车门即将关闭瞬间的速度），压力监测点为驾驶员位置和后排右侧乘员位置，如图 3 所示。通过监测驾驶员及后排右侧乘员位置分析车门关闭过程乘员舱内压力变化情况。

综合主观评价及客观测试的研究，一般乘用车在车门关闭瞬间，乘员舱内压力幅值高于 170Pa 会引起乘员的抱怨，因此，本文的仿真分析目标为关门瞬间乘员舱内监测点的压力幅值低于 170Pa。

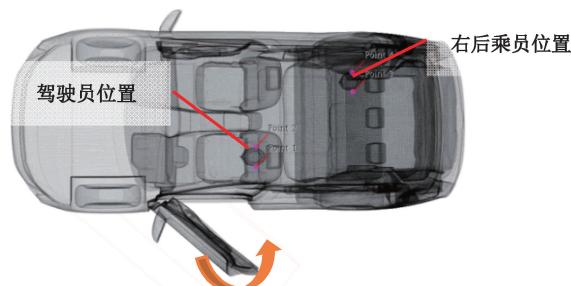


图 3 仿真模型监测点

2.3 边界条件介绍

为了模拟车辆在自由场空间内的关门工况，同时考虑网格数量及计算速度，本文在整车模型四周建立半径为 8m 的半球形计算域模型，如图 4 所示。在仿真模拟时，车门的旋转速度是计算模型的主要边界输入条件，为了更加准确地模拟车门实际关闭情况，本文中的关门速度输入条件采用实车采集的关门速度曲线作为车门旋转输入边界参数。实车速度曲线的采集是通过将角速度传感器布置在车门铰链附近，采集车门关闭过程的速度变化情况，将得到的过程速度曲线作为车门旋转的边界参数。

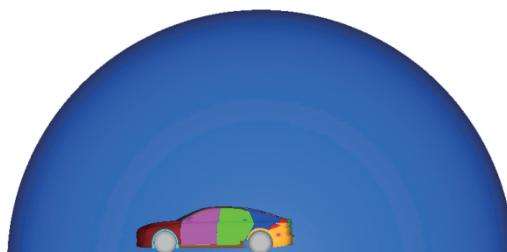


图 4 仿真模型计算域

2.4 仿真结果分析

关门耳压仿真分析为瞬态计算模型，为监测仿真过程中乘员舱内压力变化及气流走向的具体情况，对乘员舱主要气流通道的截面进行监测，整车 XY 方向截面的压力云图如图 5、图 6 所示，速度云图如图 7、图 8 所示。

通过 XY 向截面压力变化云图可知，车门在旋转过程中，乘员舱内压力不断升高，在车门关闭瞬间乘员舱内压力达到最大，随着乘员舱内气体沿气流通道排出车外，压力逐渐降低，乘员舱内压力变化情况与实际车辆乘员舱内压力变化情况一致。

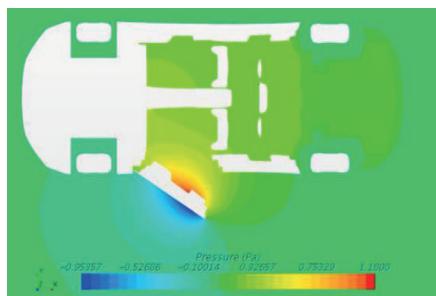


图 5 XY 向截面车门启动瞬间压力云图

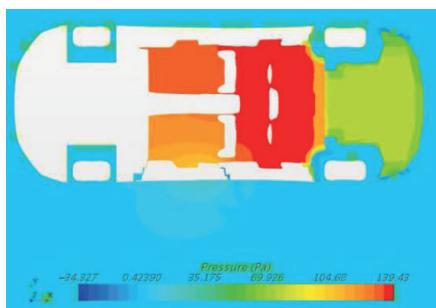


图 6 XY 向截面车门关闭瞬间压力云图

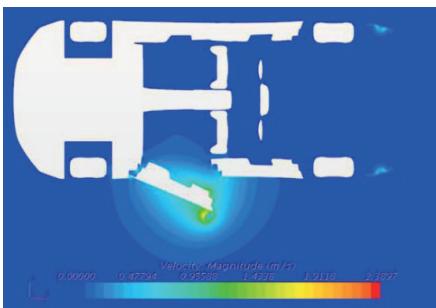


图 7 XY 向截面车门启动瞬间速度云图

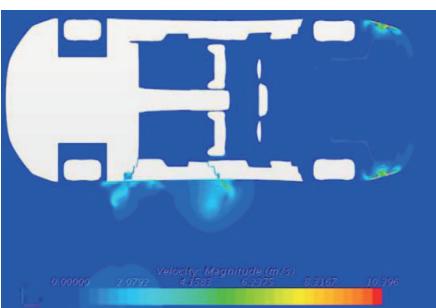


图 8 XY 向截面车门关闭瞬间速度云图

通过 XY 向截面速度变化云图可知, 车门在启动旋转瞬间, 车门周边的气体受到扰动, 气体沿不同方向流动, 随着车门的旋转关闭, 大部分气体随着车门的关闭被车门压入乘员舱内, 少部分气体沿着车门周边的缝隙流出, 压入乘员舱内的气体流经气流通道至泄压阀, 从泄压阀排出乘员舱, 仿真模型的气流的走向符合实车车门关闭时气流的走向。

以上, 通过 XY 向截面的速度云图及压力云图仿真结果分析可知, 仿真模型可以很好地模拟车辆在实际关闭过程中

的压力及速度变化情况, 仿真模型精确度较高, 满足车内流场问题的分析与研究。

驾驶员位置及后排右侧乘员位置压力幅值仿真结果见表 1。

表 1 Base 模型关门耳压仿真分析结果

(单位: Pa)

分析状态	驾驶员左耳	驾驶员右耳	右后乘员左耳	右后乘员右耳
Base	181.7	176.3	178.1	178.2

各监测点的关门压力曲线仿真结果如图 9~图 12 所示。

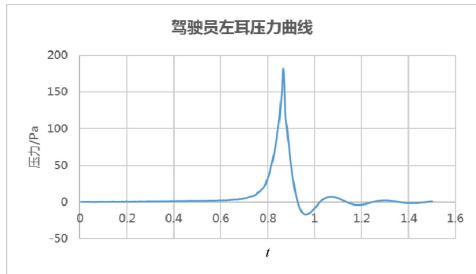


图 9 驾驶员左耳压力曲线

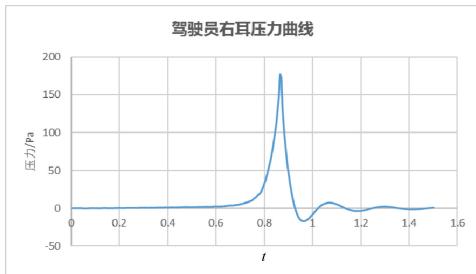


图 10 驾驶员右耳压力曲线

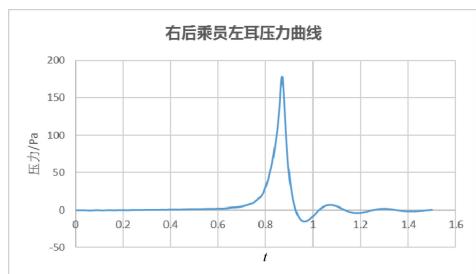


图 11 右后乘员左耳压力曲线

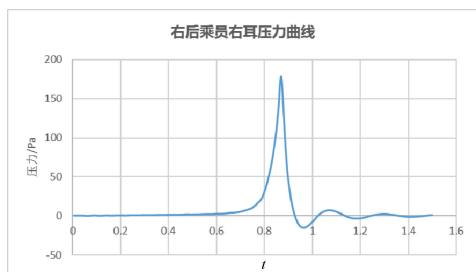


图 12 右后乘员右耳压力曲线

根据基础模型仿真结果可知,研究车型的关门耳压偏大,不满足关门瞬间耳压舒适性评价指标,存在关门耳压及关门气阻的风险,需要进一步对关门耳压进行优化分析。

2.5 关门耳压优化分析

整车车门关闭过程中气流主要分三个阶段,即压力输入、流通路径、压力输出,压力输入主要与车门的投影面积及关门速度相关,因研究车型车门造型及外造型数据已确定,无法进行更改,因此,本文主要考虑从气流通道及压力输出的角度对关门耳压进行优化分析。

2.5.1 气流通道有效面积优化

针对气流通道的有效开孔面积进行了三种优化方案计算分析,对行李舱左右两侧泄压开孔面积各增大 2500mm^2 、 5500mm^2 、 8000mm^2 ,如图13~图15所示。

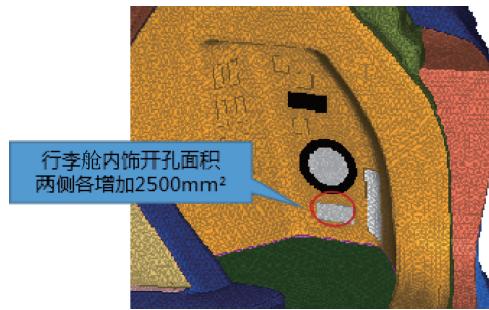


图 13 气流通道优化方案 1

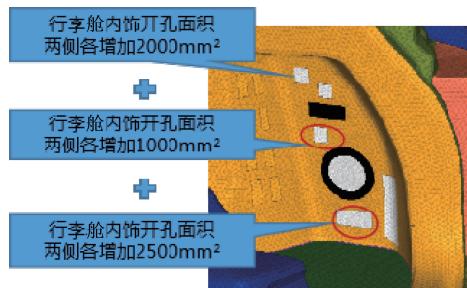


图 14 气流通道优化方案 2

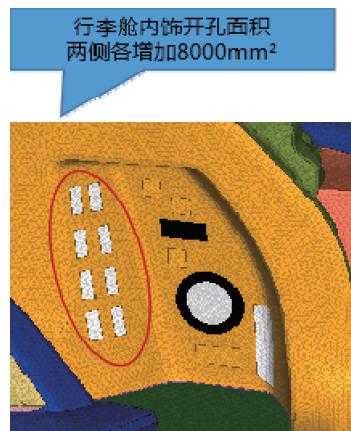


图 15 气流通道优化方案 3

气流通道有效面积优化方案优化结果见表2。

表 2 气流通道优化方案仿真分析结果

(单位: Pa)

序号	说明	驾驶员左耳	驾驶员右耳	右后乘员左耳	右后乘员右耳
1	原状态	181.7	176.3	178.1	178.2
2	通道开孔 增加 $2500\text{mm}^2 \times 2$	182.3	176.7	177.7	177.9
3	通道开孔增加 $5500\text{mm}^2 \times 2$	182.2	176.6	177.6	177.7
4	通道开孔增加 $8000\text{mm}^2 \times 2$	172.2	167.2	167.6	167.7

根据气流通道优化方案分析结果可知,在Base模型基础上只增加行李舱内饰开孔面积,对降低关门耳压效果不明显;当行李舱内饰开孔面积增大 8000mm^2 时,对降低关门耳压才有较为明显的效果,但是驾驶员左耳位置耳压仍不满足目标要求。

2.5.2 泄压阀有效面积优化

研究车型原始泄压阀有效泄压面积设计为单侧 7540mm^2 ,根据工程经验,该有效泄压面积偏小,不满足该类车型的一般要求,对泄压阀有效开孔面积进行了三种优化方案计算分析,左右两侧泄压阀有效泄压面积各增大 1200mm^2 、 1400mm^2 和 2600mm^2 ,如图16~图18所示。泄压阀有效面积优化方案仿真结果见表3。

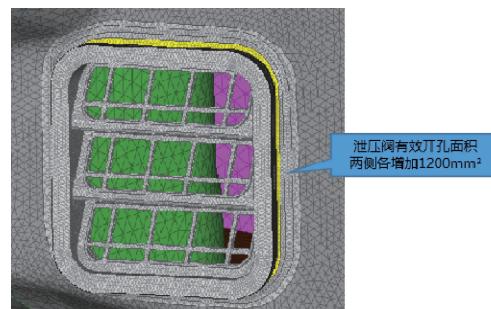


图 16 泄压阀优化方案 1

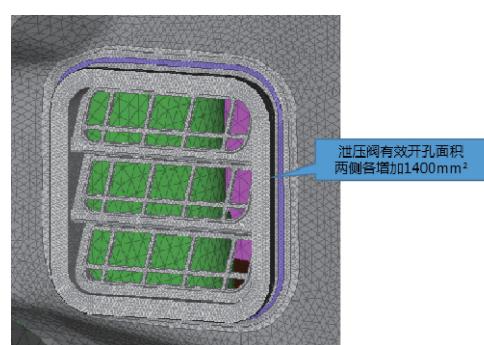


图 17 泄压阀优化方案 2

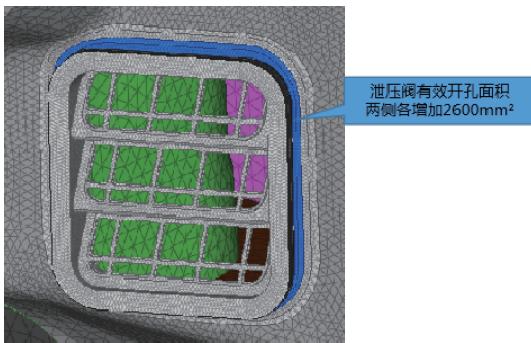


图 18 泄压阀优化方案 3

表 3 泄压阀有效面积优化方案仿真结果

(单位: Pa)

序号	方案说明	驾驶员左耳	驾驶员右耳	右后乘员左耳	右后乘员右耳
1	原状态	181.7	176.3	178.1	178.2
2	泄压阀有效面积增大 $1200\text{mm}^2 \times 2$	176.8	171.4	171.4	171.5
3	泄压阀有效面积增大 $1400\text{mm}^2 \times 2$	169.9	164.7	165.6	165.8
4	泄压阀有效面积增大 $2600\text{mm}^2 \times 2$	165.8	160.7	159.9	160

泄压阀优化方案仿真计算结果表明, 泄压阀有效面积增大对优化关门耳压有明显的效果, 泄压阀有效面积增大 1400mm^2 方案和增大 2600mm^2 的方案乘员舱内的压力均满足目标要求, 结果表明泄压阀有效面积仅增大 1400mm^2 的方案对关门耳压的优化效果要优于气流通道有效面积增大 8000mm^2 的方案, 说明该车型气流的主要瓶颈问题在于泄压阀有效面积偏小。

2.5.3 泄压阀与气流通道组合优化

通过对气流通道及泄压阀有效面积组合优化, 进一步研究气流通道和泄压阀的有效面积对关门耳压的影响情况, 组合方案的说明及仿真计算结果见表 4。

表 4 泄压阀与气流通道组合优化方案仿真结果

(单位: Pa)

序号	说明	驾驶员左耳	驾驶员右耳	右后乘员左耳	右后乘员右耳
1	原状态	181.7	176.3	178.1	178.2
2	泄压阀有效面积增大 $1200\text{mm}^2 \times 2$, 行李舱内饰开孔面积增加 $2500\text{mm}^2 \times 2$	173.4	168	167.1	167.2

(续)

序号	说明	驾驶员左耳	驾驶员右耳	右后乘员左耳	右后乘员右耳
3	泄压阀有效面积增大 $1400\text{mm}^2 \times 2$, 行李舱开孔增加 $2500\text{mm}^2 \times 2$	165.4	160.3	160.3	160.4
4	泄压阀有效面积增大 $2600\text{mm}^2 \times 2$, 行李舱开孔增加 $3500\text{mm}^2 \times 2$	164.9	159.8	157.7	157.9

气流通道和泄压阀的组合优化方案表明, 在优化泄压阀有效面积的基础上对气流通道开孔面积进行增大优化, 关门耳压降低明显, 乘员舱内耳压基本均可以满足目标要求。

通过对以上共计 9 种优化方案的优化效果总结可知, 气流通道泄压面积与泄压阀有效面积均是影响关门耳压的关键因素, 对相应的面积进行优化均有有利于降低关门耳压。泄压阀有效面积不足是影响关门耳压舒适性的主要因素, 泄压阀增加较小的面积即有明显的耳压优化效果, 泄压阀及气流通道有效面积的组合优化方案效果最优。

由于泄压阀的开孔面积增加有可能带来路噪和风噪等整车 NVH 性能变差的问题, 因此在综合评估气流通道开孔对整车 NVH 性能的影响基础上, 最终选取泄压阀有效面积增大 1400mm^2 , 行李舱内饰开孔面积增加 2500mm^2 的方案作为工程优化方案, 此方案在综合开孔面积较小的情况下, 既可以更好地满足关门耳压舒适性的目标要求, 降低气阻效应, 又能降低由开孔面积增加而引起的整车 NVH 问题, 达到性能平衡。

3 结论

本文对关门耳压舒适性的产生机理进行了阐述, 提出了一种基于 STAR CCM+重叠网格技术对关门内流场耳压舒适性的仿真分析方法, 仿真模型可以很好地模拟整车关门过程气流的走向及压力分布情况, 可以用于数据阶段对关门耳压风险的前期预测及优化分析, 仿真分析结果表明, 泄压阀有效泄压面积及气流通道泄压面积均是关门耳压的主要影响因素, 组合优化方案对关门耳压的优化效果最明显, 优化后关门耳压在 160Pa 左右, 满足关门耳压舒适性要求。

本文在数据阶段对研究车型的关门耳压问题进行了风险评估, 对影响因素进行了分析研究, 并进行了多种优化方案的仿真分析, 提出了开孔较小的情况下兼顾多性能的优化方案, 对关门耳压的前期控制提供一定的指导作用。

参 考 文 献

- [1] LEE Y L, HWANG S H. Flow characteristics in a cabin during door closure [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 225 (3): 318-327.
- [2] 张瑞. 车门关闭过程中的人耳压力舒适性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [3] 陈枫. 考虑整车密封性的车门关闭过程压强分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [4] 相龙洋, 何融, 顾彦, 等. 电动小车关门耳压感研究及优化 [J]. 上海汽车, 2019 (11): 18-22.
- [5] 马利宇, 张小矛, 邬文睿, 等. 汽车关门耳压感分析 [J]. 汽车与新动力, 2020, 3 (1): 68-71.
- [6] 戴磊, 曹维福, 袁德海. 汽车行李箱减压阀的设计及验证 [J]. 机械, 2015, 42 (11): 53-56.