

周双,钟丽萍,张立强,等. 旋转式车门质心位置对最小关门速度的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(1):69-75. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.01.010

ZHOU S,ZHONG L P,ZHANG L Q, et al. Influence of Centroid Position of Side Swinging Vehicle Door to Minimum Closing Speed [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition) , 2022, 37(1):69-75. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.01.010

# 旋转式车门质心位置对最小关门速度的影响

周双<sup>1</sup>,钟丽萍<sup>1\*</sup>,张立强<sup>1</sup>,陈梓铭<sup>2</sup>,周五峰<sup>3</sup>,周泽云<sup>1</sup>

(1.中南林业科技大学 机电工程学院,湖南 长沙 410004;

2.湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南 长沙 410082;

3.长安欧尚汽车研究院,重庆 400023)

**摘要:**针对 SUV 车型后门最小关闭速度明显高于前门的问题,采用仿真和实验相结合的方法研究车门质心位置对最小关门速度的影响.首先,通过 ADAMS 软件平台搭建 V01,V02 和 V03 这 3 款 SUV 车型的前后门多体动力学模型,得到了各车型前后门的最小关门速度,结合实车试验验证了多体动力学模型的可靠性和准确性.然后,基于 V01 车型前门的多体动力学仿真,分析车门质心位置沿车长、车宽和车高方向偏移对最小关门速度的影响.结果表明:与沿车宽和车高方向偏移相比,车门质心沿车长方向对最小关门速度的影响最大.当沿车尾方向偏移时最小关门速度逐渐降低,偏移 0.03,0.06 和 0.08 m 的最小关门速度分别降低 4.3%,12.1%和 14.1%;当沿车头方向偏移时最小关门速度逐渐增加,偏移 0.03,0.06 和 0.08 m 的最小关门速度分别增加 6.7%,10.1%和 11.8%.较高的  $L/L_0$  是 3 款车型后门最小关闭速度高于前门的根本原因.

**关键词:**汽车旋转门;多体动力学模型;最小关门速度;质心位置;偏移

中图分类号:U463.83<sup>+</sup>4

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2022)01-0069-07

## Influence of Centroid Position of Side Swinging Vehicle Door to Minimum Closing Speed

ZHOU Shuang<sup>1</sup>, ZHONG Liping<sup>1</sup>, ZHANG Liqiang<sup>1</sup>, CHEN Ziming<sup>2</sup>, ZHOU Wufeng<sup>3</sup>, ZHOU Zeyun<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Chang'an Oushang Automobile Institute, Chongqing 400023, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the minimum closing speed of the rear door of SUV is apparently higher than that of the front door, the influence of centroid position of doors on the minimum closing speed is studied by the method of combining simulation and experiment. Firstly, the multi-body dynamics models of the front and rear doors of three SUV V01, V02 and V03 are built using the ADAMS software platform, and the reliability and accuracy of which are verified based on the minimum closing speed of simulation and experiment. Then, the influence of the centroid position along the length, width and height direction of vehicle to the minimum closing speed is analyzed by the multi-body dynamics simulation of the V01 front door. The results show that the shift of centroid position along vehicle length direction has the greatest influence to the minimum door closing speed as compared with that along vehicle width and height directions. The minimum door closing speed decreases

收稿日期:2019-02-28

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2681);湖南省高校科技创新团队支持计划资助

\*通信作者,E-mail:csfuzlp@163.com

gradually as the centroid position moves toward the rear of vehicle, the minimum closing speeds at offsets of 0.03, 0.06 and 0.08 m decrease by 4.3%, 12.1% and 14.1%, respectively; The minimum door closing speed increases gradually as the centroid position moves toward the front of vehicle, the minimum closing speeds at offsets of 0.03, 0.06 and 0.08 m increase by 6.7%, 10.1% and 11.8%, respectively. The higher  $L/L_0$  is the root cause of the higher minimum closing speed of the rear doors than that of the front doors.

**Keywords:** side swinging door; multibody dynamics model; minimum closing speed; centroid position; displacement

旋转式车门,作为 SUV 车型的主要部件之一,其开、关的难易程度成为衡量 SUV 车型质量优劣的一个重要指标.合适的关门速度给客户传递出汽车可靠性、安全性及舒适性优良的信息;相反,车门关闭速度过大或过小都会给客户留下产品较次、不可靠等不良印象.

近年来,国内外诸多学者对轿车车门关门能量的影响进行了较广泛的研究.杨蕾等<sup>[1]</sup>提出影响车门关门能量的 6 大因素,并研究其对车门关闭力的影响,在 ADAMS 动力学分析软件中建立了车门的仿真模型,分析了各零件参数对关门能量的影响,并通过实验数据验证了 ADAMS 仿真模型的有效性;尹忠等<sup>[2]</sup>通过建立汽车车门数学计算模型,确定了影响车门关闭力的主要因素,建立了车门关闭力计算模型;刘九五<sup>[3]</sup>分析了影响车门关门力大小的 6 个车门系统因素,运用以蒙特卡洛算法为基础的 VisVSA 装配分析软件,通过计算得到车门与侧围之间的间隙偏差,通过结合车门装配偏差分析,使得车门关闭力的模拟计算精度提高;Kloess 等<sup>[4]</sup>提出了一种基于概率统计的方法对产品的过程偏差进行研究,并用车门的关门能量作为例证来论证其计算效率;Pereira 等<sup>[5]</sup>通过对旋转式车门进行整体分析,总结出车门关闭过程中能量释放的途径,在简化的情况下提出车门关闭过程中能量关系式;Mahadule 等<sup>[6]</sup>从门的密封条、门锁、铰链、门的重量、乘员舱内压力等各种门设计参数出发,建立了计算门关闭力的数学模型.此外,还开发了基于 MS-EXCEL 的计算工具,旨在计算每一个设计参数的关门速度和能量贡献;Hyung-il Moon 等<sup>[7]</sup>从实际车辆的几何/物理数据和虚拟反作用力与关门时间的关系出发,提出了一种预测最小关门速度的数值方法.当前,国内外学者<sup>[8-9]</sup>对旋转式车门的关闭性能的研究主要集中在 6 大因素、装配偏差、间隙偏差等对关门能量的影响上,或是计算、预测最小关门速度值,而对车门特性中质心位置偏移对最小关门速度的影响的研究甚少.

在车门子系统中,开、关门能量的损耗是由不同因素共同作用的结果,包括密封条、气压阻效应、铰链、锁、限位器以及车门特性等.车门特性又包括车门重量、质心位置、转动惯量、车门面积、铰链位置、车门内饰布置等<sup>[10]</sup>.本文针对汽车 SUV 车型左后门最小关门速度普遍高于左前门的现象,研究汽车车门特性中的质心位置对最小关门速度的影响.通过运用 ADAMS 软件对最小关门速度影响因素进行探索,为后续新产品车门设计和优化提供指导.

## 1 虚拟样机仿真模型建立

### 1.1 车门系统 ADAMS 模型建立流程

虽然 ADAMS 是很好的运动学和动力学仿真软件,但其建模功能相比其他三维制图软件较弱,特别是对于一些复杂的三维模型<sup>[11]</sup>.本文将 CATIA 软件中建立的模型以 STEP 或者 CATProduct 格式导入到 ADAMS 软件中,在此基础上建立多体动力学模型<sup>[12-14]</sup>.车门系统刚性体建模与柔性体建模包括 6 大子模块,它们分别是外开拉手建模、限位器建模、铰链建模、柔性车门建模、密封胶条等模型建模、锁体总成建模.车门模型建立的流程如图 1 所示.

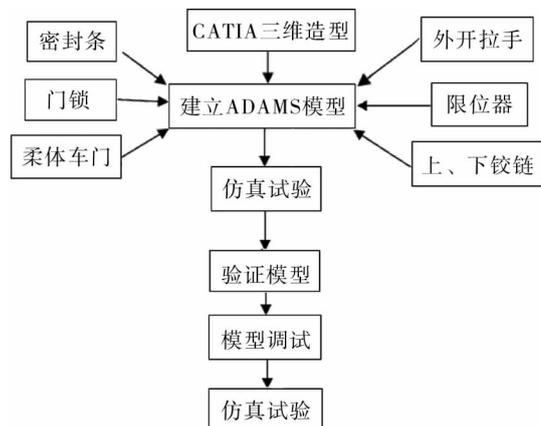


图 1 旋转式车门模型建立流程图

### 1.2 最小关闭速度仿真模型建立

将 ADAMS 仿真模型中车门开启至全开位置,在关门模型中完成对最小关门速度的仿真.在 hypermesh 中建立车门网格模型,建立对应限位器、铰链、门锁、把手等 6 个外联点,将模型用 Optistruct 模块运算,得出结果 mnf 文件,导入 ADAMS 模型.建立门锁单体主要运动构件,如棘轮、棘爪等,及其相应的运动副和接触,同时建立等效密封反力 280 N;建立构件间的运动副、作用类型以及添加位移驱动;建立柔性体拉杆,通过外联点连接把手总成与门锁单体.从车身其他部件都处于静止状态开始,在铰链旋转副处添加扭矩驱动车门关闭,使车门具有关闭的初始角速度,车门能克服限位器的阻力,绕铰链轴开始转动.最后,门锁位置棘轮与棘爪啮合,达到锁止状态,运动结束<sup>[15]</sup>,车门恰好关上.在车门门锁靠近 B 柱 2 cm 的地方建立一个点为速度测点,这个时候测点位置输出的关门速度即为车门的最小关门速度.车门最小关门速度仿真模型如图 2 所示.

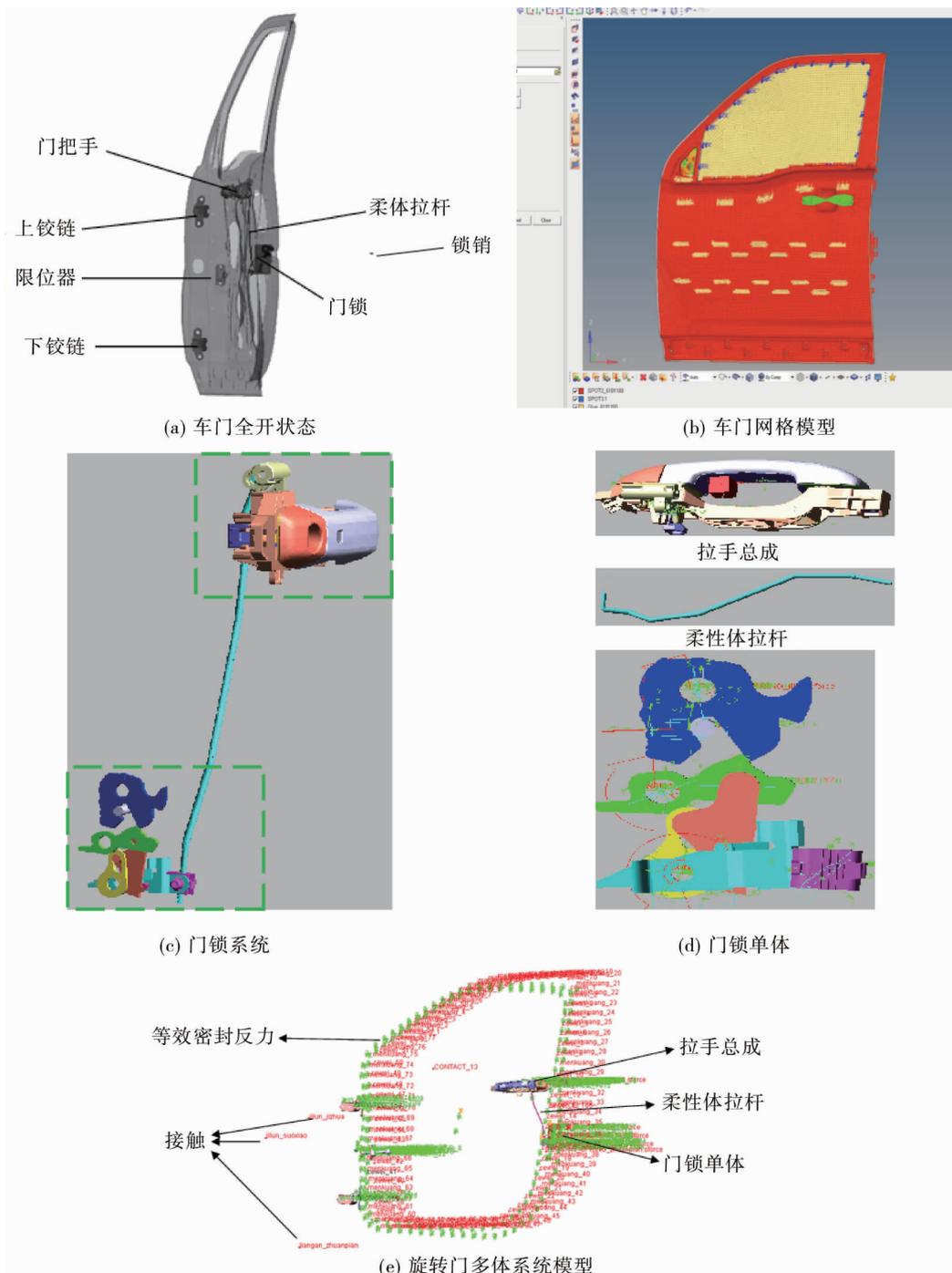


图 2 旋转式车门最小关门速度仿真模型

## 2 最小关门速度仿真分析及试验验证

### 2.1 最小关门速度仿真

分别对 V01, V02, V03 这 3 款 SUV 车型进行最小关门速度仿真, 在 ADAMS/View 中输出 3 款车型左前门、左后门最小关门速度仿真曲线如图 3 所示, 曲线对应的峰值即为最小关门速度值. V01 左前门、左后门峰值分别为 0.554, 0.593 m/s; V02 左前门、左后门峰值分别为 0.591, 0.612 m/s; V03 左前门、左后门峰值分别为 0.630, 0.728 m/s. 通常设计合理的车门, 在满足密封性能的前提下, 其关闭速度是 0.8~1.5 m/s, 这个速度值是在有气压阻效应的情况下得到的. 降低气压阻效应最直接有效的方法是在车身上开装有单向阀的通风口, 然而会引起噪声过大、进灰漏水等一系列问题, 所以本文不把气压阻效应作为影响关门能量的主要因素考虑. 因此, 仿真得到的最小关闭速度小于 0.8 m/s.

在整车设计中, 当车窗关闭时, 根据企业的产品设计要求, 汽车前门理想的关闭速度须保证在 1.0~1.2 m/s, 如果车门的最小关闭速度过大, 关闭轻便性差, 这不仅会影响顾客的使用体验, 同时由于车门关闭力过大, 将影响车门及整车的使用寿命和安全性能.

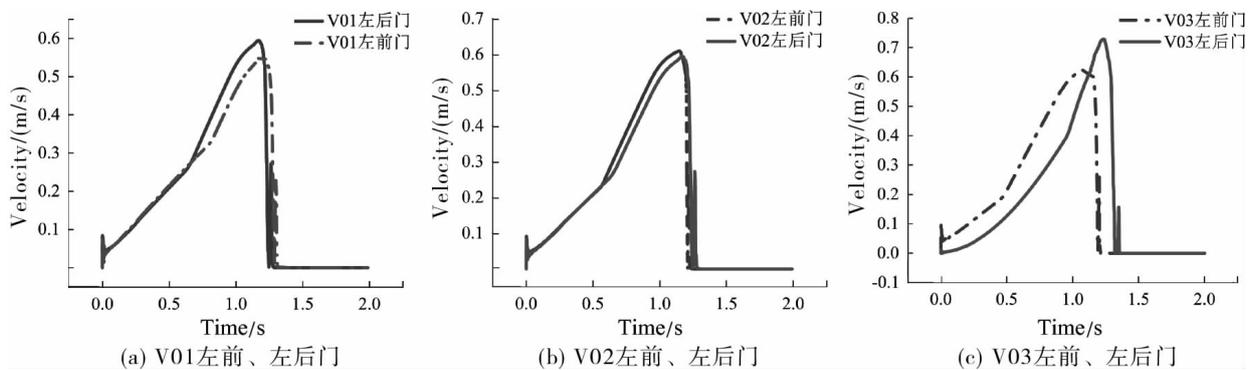


图 3 3 款车型左前、左后门最小关门速度曲线

由图 3 可知, 3 款车的关闭速度都是先从 0 开始逐渐增大, 然后又下降到 0. 因为车门在初始关门驱动及自重的作用下, 关闭速度逐渐增加, 该过程中空气阻力和铰链等对车门关闭有阻碍作用, 但是, 关门阻力小于初始关门力、车门自重和限位器的作用力; 当车门速度增大到最大值时, 车门密封条开始发挥作用, 而且在汽车乘员舱内空气不断碰触车体而被压缩至车门的未闭合处, 故气压阻力也逐渐增大, 车门关闭速度从最大值急剧减小到 0, 所以曲线的峰值为最小关闭速度值.

### 2.2 最小关门速度试验验证

试验设备: 编号为 V01, V02, V03 的 3 款 SUV 车, 精度为 1.0% 的 DEBRON 型关闭速度测量仪, 艾德堡 NK 数显推拉力计.

试验目的: 为了验证 ADAMS 软件在关门过程中车门最小关闭速度仿真的准确度, 对 V01, V02, V03 这 3 款试验用车左前门、左后门进行最小关门速度试验, 试验过程如图 4 所示.

试验原理与方法: 因为旋转门关闭过程中动能为主要能量形式, 所以将最小关闭速度作为关闭试验的输出指标, 测速仪测量车门处于全开位置至车门恰好关闭时, 门锁对应外板上靠近 B 柱 2 cm 位置 (测点) 处的车门速度. 本次试验一共需要 3 位试验人员, 其中 1 位试验人员对车门位置进行控制、1 位试验人员匀速施加驱动、1 位试验人员读取并记录试验数据. 初始状态: 汽车处于水平状态, 车窗及尾门完全打开, 从车门处于全开位置以推拉力计匀速推动车门关闭, 测速仪测量最小关门速度 (3 组); 分别对 V01, V02, V03 这 3 款试验用车左前门、左后门进行最小关门速度的试验, 进行多次试验, 记录最小关门速度.



图4 最小关门速度试验

3款车型左前门、左后门仿真和试验的最小关门速度值见表1.

表1 3款车型最小关门速度仿真与试验值对比

车型及车门	V01 车左前门	V01 车左后门	V02 车左前门	V02 车左后门	V03 车左前门	V03 车左后门	
最小关闭	仿真(无气阻)	0.554	0.593	0.591	0.612	0.630	0.728
速度/(m/s)	试验(无气阻)	0.61	0.64	0.56	0.65	0.66	0.68
	误差/%	10.1	7.3	5.2	5.8	4.5	6.6

由表1可知,3款车型仿真最小关门速度与实车试验最小关门速度误差最高为10.1%,其仿真误差均低于15%,符合企业对仿真误差的规范标准,误差可能是由系统简化处理、模型精度以及试验人为误差等问题共同造成的.

### 2.3 质心位置对最小关门速度影响分析

实车检验完仿真模型准确性后,在搭建好的ADAMS仿真模型中,基于V01车左前门,研究车门质心位置分别沿车长、车高、车宽3个方向的偏移对最小关闭速度的影响.将车门开启至全开位置,在铰链旋转副处添加扭矩驱动车门关闭,多次试验后找出最小关门速度.参照车身坐标系,该模型初始位置车门质心坐标为(939.260 6, -961.440 7, 537.162 2),车门长度为1.036 m,车门高1.292 m,车门总成质量为26.1 kg.

#### 2.3.1 车门质心位置沿车长方向偏移

对多体动力学模型中左前门质心位置沿车长方向进行偏移,在ADAMS/View的后处理中输出其最小关门速度曲线,仿真曲线如图5所示.

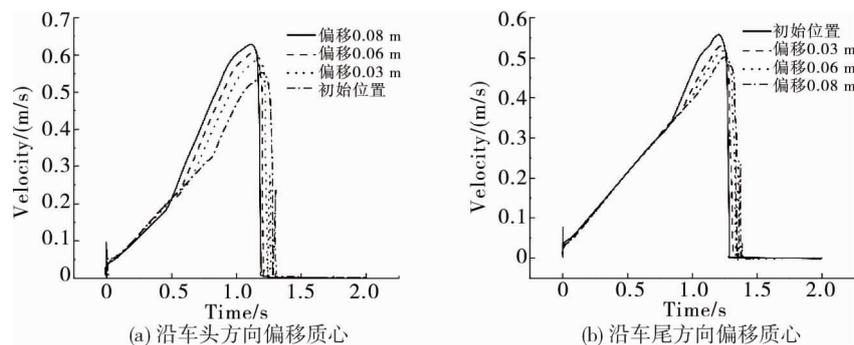


图5 最小关门速度曲线

由图5可以看出,在车长方向对质心位置偏移,最小关门速度的变化较为明显,并且呈现出一定的线性规律.车门质心位置向车尾方向偏移0.03 m时,最小关门速度由0.554降到0.530 m/s,降幅约4.3%;车门质心位置沿车头方向偏移0.03 m时,最小关门速度增到0.594 m/s,增幅约6.7%;车门质心位置向车尾方向偏移0.08 m时,最小关门速度降到0.476 m/s,降幅约14.1%;车门质心位置沿车头偏移0.08 m时,最小关门速度增到0.628 m/s,增幅约11.8%.

#### 2.3.2 车门质心位置沿车宽和车高方向偏移

基于该多体动力学模型,沿车宽和车高方向对质心位置偏移,仿真输出其最小关门速度.

车门质心位置向车内偏移0.03 m后,最小关闭速度值增大了0.01 m/s,约增大1.9%;车门质心位置沿车外方向偏移0.03 m后,最小关闭速度降低了0.001 m/s,约降低0.1%。车门质心位置偏移到0.06 m后最小关门速度不再改变。与车长方向相比,车门质心位置沿车宽方向进行偏移对最小关门速度影响较小。

相较于车长和车宽方向的偏移,车门质心往车高方向偏移对关门速度影响最小,最小关门速度几乎没有变化。

### 3 左后门最小关门速度偏高原因分析

为了找出车后门最小关门速度普遍高于前门的原因,对3款车型的车门质量、车门质心位置到铰链轴线的距离等信息进行对比。车门质心位置及速度测点位置分布示意图如图6所示,图6中 $L_0$ 表示质心位置到铰链轴线的距离, $L$ 表示铰链轴线到速度测点的距离。

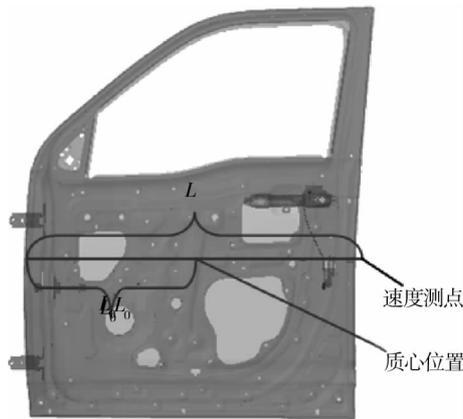


图6 质心位置

3款车型前后门质量、车门质心位置到铰链轴线的距离、车门长、车门高、铰链间距、质心位置分布情况等尺寸信息见表2。

表2 各车型尺寸信息

车门	质量/kg	铰链间距/m	质心到铰链距离 $L_0$ /m	车门长 $L$ /m	车门高/m	$\frac{L}{L_0}$
V01(前)	26.10	0.450	0.479	1.036	1.292	2.163
V01(后)	30.60	0.461	0.410	1.021	1.301	2.490
V02(前)	29.56	0.380	0.466	1.048	1.259	2.249
V02(后)	28.00	0.348	0.416	1.035	1.263	2.488
V03(前)	30.50	0.360	0.479	1.043	1.296	2.177
V03(后)	28.20	0.427	0.428	1.093	0.906	2.554

由于门体上所有点角速度一致,有

$$w_1 = w_2; \quad (1)$$

$$V = \frac{L}{L_0} V_0. \quad (2)$$

式中: $w_1$ 为车门质心位置的关闭角速度; $w_2$ 为车门测点位置的关闭角速度; $V$ 为车门测点位置的速度; $V_0$ 为车门质心位置的速度。

由式(1)和式(2)可知,当消耗的能量恒定,即车门质心位置速度 $V_0$ 为定值,车门质心位置朝车尾方向偏移, $L_0$ 值增大,则 $V$ 值减小;车门质心位置往车头偏移时, $L_0$ 值减小, $V$ 值增大。对比表2中3款车型前、后门 $\frac{L}{L_0}$ 值,3款车型后门 $\frac{L}{L_0}$ 值普遍要高于前门。所以当关闭耗能及车门质量一致或差异较小时,车门质心位置越往车尾方向移动,测点位置速度越小,导致左后门最小关闭速度普遍高于左前门。

## 4 结论

1) 基于多体动力学仿真和实车实验,获得了 V01, V02 和 V03 这 3 款 SUV 车型的最小关门速度,前后门的仿真与实验偏差分别为 10.1%/7.3%, 5.2%/5.8% 和 4.5%/6.6%, 验证了多体动力学模型的准确性。

2) 车门质心位置沿车长方向偏移对最小关门速度的影响最大。沿车头方向偏移时最小关门速度逐渐增加,而沿车尾方向偏移时最小关门速度逐渐降低。

3) 所研究的 3 款 SUV 车型后门长度与其质心至铰链距离的比明显高于前门,等效于将前车门质心向车头方向偏移,这是 3 款车型后门最小关闭速度高于前门的根本原因。

### 参考文献:

- [1] 杨蕾. 轿车车门关门能量仿真与试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [2] 尹忠, 唐荣平, 裘芝敏, 等. 汽车车门关闭力的计算[J]. 公路与汽运, 2007, 4(3): 5-7.
- [3] 宋凯, 刘九五, 成艾国. 考虑装配误差的车门关闭力计算[J]. 中国机械工程, 2016, 27(5): 602-608.
- [4] Kloess A, Mourelatos Z P, Meernik P R. Probabilistic analysis of an automotive body-door system[J]. Int. J. Vehicle Design, 2004, 34(2): 101-125.
- [5] Pereira F D. Automotive Door Closing Efforts Study[C] // Sae Brasil Congress & Exhibit, 2010.
- [6] Mahadule R, Chavan J. Evaluation of Minimum Door Closing Velocity Using Analytical Approach[C] // BITS Pilani Industry Day Conference 2015, 2016: 2016-01-0434.
- [7] Moon H, Kim H, Kim S B, et al. Predicted minimum door-closing velocity based on a three-dimensional door-closing simulation[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47(3): 296-306.
- [8] 张林涛, 李旭, 杨富凯. 某车型旋转式车门启闭过程分析及优化[J]. 2021, 46(18): 80-83.
- [9] 刘堃, 郑喜, 霖韩洋. 旋转式车门关闭力优化设计[J]. 中国设备工程, 2017, 2(24): 57-58.
- [10] 杨蕾, 张淑敏, 李应军. 面向最优关门能量的轿车车门设计[J]. 机械制造, 2006, 44(3): 40-42.
- [11] 于荣涛, 孙东明, 黄文婷. 基于 ADAMS 的公交车车门动力学分析[J]. 新技术新工艺, 2013, 4(4): 38-39.
- [12] 王祥, 蒋国璋, 阮景奎. 空压机曲轴动力学仿真与有限元分析[J]. 现代制造工程, 2015, 4(10): 74-77.
- [13] 沈意平, 李斌, 李学军, 等. 非扭矩载荷下风电齿轮传动系统动力学响应特性分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(4): 49-56.
- [14] 陈立锋, 张仕林, 彭向前, 等. 基于正交实验的输送带滚筒安装参数优化设计[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(1): 71-77.
- [15] 刘九五. 基于装配偏差分析的车门关闭力计算研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.