

车辆后备箱变容设计及外流场数值模拟分析

解瑞雪¹, 张明恒^{1,2}, 胡平^{*1,2}, 王帅¹, 赵秀栋¹

(1.大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2.大连理工大学 汽车工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 功能多元化及实用化是当前车辆工程领域的研究热点和趋势. 针对家庭经济型轿车的实际应用需求, 从车辆后备箱容积可变角度开展研究工作. 首先, 基于机构再生运动链理论对后备箱变形机构的基本结构进行设计; 其次, 为获得最优的机构设计方案, 对车辆变形前后的气动性能进行数值模拟分析, 并根据模拟分析结果对设计方案进行相应改进. 研究结果表明, 设计的变形机构满足设计目标要求, 能够完成车辆在三厢形态与两厢形态之间的变形, 且三厢形态车辆的阻力系数小于两厢形态, 有一定的气动性能优势. 相关研究结果为可变容积车辆设计提供了理论分析依据和实践参考.

关键词: 车辆变形设计; 计算流体力学; 数值模拟; 阻力系数

中图分类号: U463.82 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201504002

0 引言

随着汽车技术的快速发展, 人们对交通工具提出了更高要求. 对于普通消费者, 购买多款不同类型车辆实现不同的出行目的逐渐成为一种发展趋势. 与此同时, 城市的交通环境状况日益严峻, 这迫使相关管理部门不得不采取类似汽车限购等措施来应对拥堵与环境污染等问题^[1]. 因此, 消费者需求多元化与节能减排、低碳经济的矛盾成为汽车行业进一步发展所面临的一大社会经济问题. 交通工具的功能多元化研究是解决该问题的关键所在, 同时也是未来行业发展的趋势与研究热点.

目前车辆的变形技术研究主要体现在三方面: 最小离地间隙、轴距和后备箱容积. 科研人员在总结车辆变形领域已有成果基础上, 从车辆设计本身出发, 提出了车辆变形的全新概念, 即汽车本身具备一定的变形功能, 可以根据消费者的实际需求进行变形, 达到一车两用或一车多用的目的.

已有研究中, 大箱扩容方案均是在不改变车辆外形基础上, 通过有效利用驾驶室后排座椅空

间或提升后备箱开口幅度和开口面积(如掀背式方案), 以此获得尽可能大的后备箱货物装载量. 本文对家庭轿车的后备箱进行改型, 使车辆具备三厢形态与两厢形态, 且两种模式间可进行相互切换, 以克服现有三厢轿车后备箱容积较小、载物受限的缺陷.

1 变形机构设计

本文的设计目标为以现有三厢轿车为设计平台开展后备箱变形设计, 使车辆具备三厢与两厢形态间自由切换的功能. 为达到上述设计目标, 经过对设计平台的详细分析, 本文提出了如图1所示的变形设计方案.

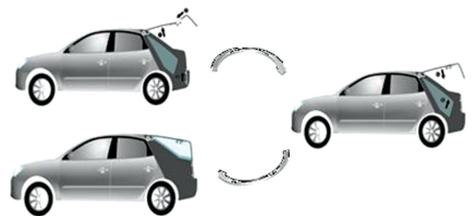


图1 变形设计方案

Fig.1 Variant design scheme

1.1 变形机构的抽象及简化

基于上述变形方案,后备箱在绕旋转中心转动基础上还耦合有杆件的平动,系统杆件自由度为 2. 基于机构再生运动链理论^[2],设计的机构运动简图图谱如图 2 所示. 4 种方案均由七杆机构构成,理论上均能够完成预定的变形要求. 方案一和方案三均含有三副构件,方案复杂,运动不易控制;方案四中机构尺寸较大. 方案二的约束运动结构为 1、2、3、4 四杆机构,主要运动可看作 1、2、3、4 杆的四杆平面运动,5、6 杆主要起到死点支撑作用,可以在两厢模式下对机构起到支撑作用. 该方案简洁稳定,因此本文选择方案二进行机构设计. 其中部件 2 与 3 间的运动属于一种复合运动,因此需要对该处进行详细的结构设计和优化.

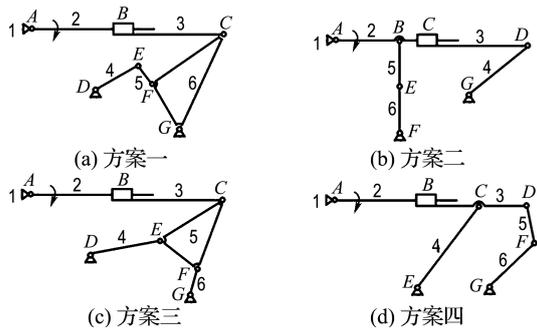


图 2 变形机构设计方案简图

Fig. 2 Variant mechanism design scheme diagram

1.2 主要变形机构设计及动力学仿真

根据平移旋转复合运动的要求,所设计的弧形滑道机构如图 3 所示. 弧形滑道一方面在变形过程中承受后备箱盖板的垂直力,另一方面为后备箱变形提供导向作用,便于内插. 同时,以 12 V 直流电机为动力源,结合滑块和弧形滑道的运动关系,即可实现机构的自由变形.

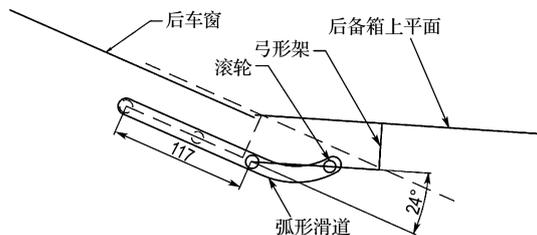


图 3 弧形滑道机构布置图

Fig. 3 Cambered slipway schematic diagram

为验证所设计机构的合理性及对驱动电机进

行合理估计,本文在 Adams 中建立了对应的机构模型并进行了运动仿真分析. 仿真基本参数为后车窗质量 15 kg,后备箱质量 20 kg,质心均位于几何中心,最大开启角度 80° ,运动仿真结果如图 4 所示. 由图可知,后窗的开启角速度 ω 变化平稳,要求的最大电机功率为 280 Nm/s,说明所设计的后车窗自动开闭机构可以满足设计目标要求.

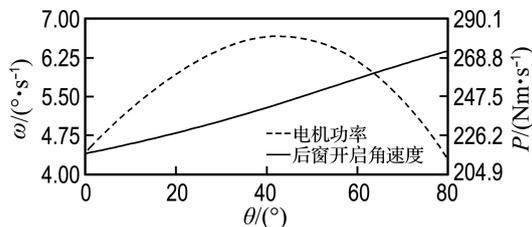


图 4 后窗开启角速度及电机功率

Fig. 4 Angular velocity of rear window and motor power

1.3 变形机构布置

基于上述变形方案,本文设计的变形机构整体布置如图 5 所示,其中包括 7 个子机构. 后车窗与后备箱上平面可经弧形滑道机构移动构成两厢时的尾部顶面,后备箱垂直面形成两厢时后垂直面的上半部分,该变形动作是整个变形过程的核心. 尾部两侧及尾部后垂直面下半部分未封闭处分别由侧垂直面及后垂直面配板加以封闭. 图 6 为样车变形机构布置实拍图,图 7 为实车照片.

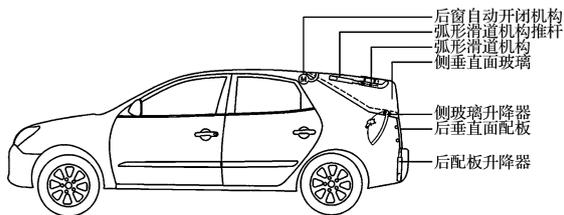


图 5 机构布置图

Fig. 5 Mechanism arrangement diagram



图 6 样车变形机构布置实拍图

Fig. 6 Real car mechanism arrangement diagram



(a) 三厢轿车



(b) 两厢轿车

图7 实车照片

Fig. 7 Real car photos

2 外流场数值模拟分析

2.1 外流场数值模拟

对设计平台进行逆向工程处理后即可获得车辆的实体三维模型,在不改变流体轨迹整体走向的前提下,本文对该模型进行了相应简化:对表面局部凹凸作平滑处理,忽略车身外部后视镜、雨刮器等突起物;轮胎简化为圆柱体形状等.所获得的车辆几何模型如图8所示.



(a) 三厢轿车



(b) 两厢轿车

图8 车辆三维模型

Fig. 8 3D model of vehicles

基于上述模型,本文利用 ANSYS 软件对车辆变形前后的外流场变化情况进行了具体数值模拟分析,采用的基本参数与模型方法为计算域:车前3倍车长,车后6倍车长,顶部4倍车高,左右侧部各3倍车宽^[3];网格:四面体+边界层网格^[4],车身及尾部区域网格细化,生成三厢网格 459×10^4 ,两厢网格 436×10^4 ;边界条件:入口流速30 m/s,出口压力为0,地面为移动壁面,对称面为对称边界,车身表面为无滑移边界,其他为自

由滑移壁面边界;湍流模型:Realizable $k-\epsilon$ 模型^[5];离散格式:一阶迎风格式+二阶迎风格式;求解器:分离式求解器.

2.2 模拟结果分析

2.2.1 阻力系数分析 阻力系数是汽车空气动力学性能中最重要的评价指标,由车辆外形决定,气动阻力系数越小,轿车行驶时受到的空气阻力就越小,油耗也越小.汽车外形的气动特性由气动阻力系数来描述^[6]:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A}$$

式中:正投影面积 $A = 1.05 \text{ m}^2$,空气密度 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$,车速 $v = 30 \text{ m/s}$, D 为车辆迎风面气动阻力.三厢车与两厢车气动阻力系数如表1、2所示.

表1 三厢形态阻力

Tab. 1 Resistance of sedan form

区域	压差阻力/N	摩擦阻力/N	阻力合计/N	阻力系数
车身	131.12	16.85	147.97	0.255
前轮	29.97	0.65	30.62	0.053
后轮	18.43	0.57	19.00	0.032
总计	179.52	18.07	197.59	0.340

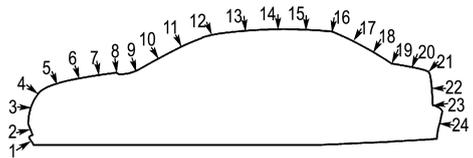
表2 两厢形态阻力

Tab. 2 Resistance of hatchback form

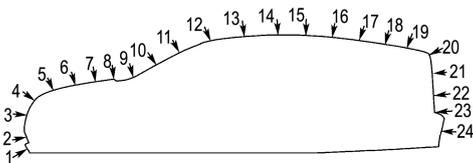
区域	压差阻力/N	摩擦阻力/N	阻力合计/N	阻力系数
车身	144.02	16.39	160.41	0.277
前轮	29.71	0.60	30.31	0.052
后轮	20.17	0.56	20.73	0.036
总计	193.90	17.55	211.45	0.365

数据显示,三厢形态的空气阻力系数略小于两厢形态的,且尾部的改变对前轮附近的流场影响较小,对后轮附近的流场影响较大.

2.2.2 对称面上表面压力分布 作用在汽车上的气动力与汽车周围压力分布直接相关,而车身表面的压力分布对汽车的气动特性有重要影响^[7].为了更好地理解可变容积车辆在两种形态下阻力产生差异的原因,引入车身表面压力分布.为测量对称面压力系数 β ,在车辆对称面曲线上各布置24个测点,测点分布如图9所示.图10为对称面上表面压力系数曲线.



(a) 三厢形态



(b) 两厢形态

图 9 车辆测点分布

Fig. 9 Measuring points distribution of vehicle

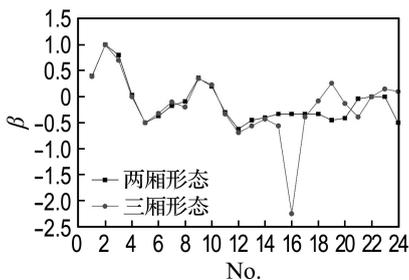


图 10 对称面上表面压力系数

Fig. 10 Pressure coefficient on top surface of symmetry plane

在 1~14 号测点,两组数据基本相同,尾部的变化未对车身前部压力产生较大影响,但 15~24 号测点区域则差距明显. 车辆处于三厢形态时,由于后车窗与车顶夹角较大,且没有圆滑过渡,当气流流经此处时发生严重分离并产生较大的负压,压力系数为 -2.25(16 号测点). 此后气流速度逐渐降低,当气流流经后挡风玻璃与行李舱顶盖连接处时(19 号测点),由于对气流的阻挡,压力系数增大为 0.25. 当气流流经行李舱盖边缘时,气流速度小幅度增加. 相比之下,变形后两厢形态车辆顶部过渡圆滑,气流更为平顺.

2.2.3 车辆外流场流态分析 通过对称面上表面压力系数分布,只能较浅显地分析影响两种形态气动性能的关键因素,本节利用外流场流态分析手段,对车辆外流场进行深入分析^[8]. 在模型尾部创建 10 个截面,通过对比模型尾部不同位置截面的速度矢量、湍流动能和尾部流线,分析车辆两种形态下尾部涡流的形成和发展、漩涡的强度及分布和气流的流动情况^[9]. 尾部截面布置如图 11

所示,第 1 截面距车尾 100 mm,第 1 至第 5 截面间隔均为 100 mm,第 5 至第 9 截面各间隔 200 mm,第 10 截面距第 9 截面 400 mm.

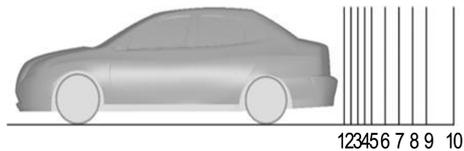


图 11 尾部截面布置

Fig. 11 Cross sections distribution of tail

图 12 是第 1、第 5 和第 10 截面速度矢量图.

由图 12 看出,车辆尾部形成两对方向相反的涡流^[10]. 三厢形态上部涡流较小,原因是三厢形态尾部垂直面高度较小,部分侧面气流流过 C 柱后与顶面气流汇合,使得上部涡流不明显且位置靠下,由于更多地受到下部涡流的影响,在矢量图中表现为长条状. 两厢形态由于尾部垂直面高度大,上部侧面气流与顶面气流在尾部形成涡流,涡流位置靠上,下部涡流对其影响较小.

随着截面到车尾距离的增加,下部涡流逐渐向周围发展,上部涡流逐渐下移,并很快消失. 三厢车下部涡流核心位置低于两厢车下部涡流核心位置. 三厢车上部涡流消失较快,两厢车上部涡流消失较慢.

图 13 是第 1、第 5 和第 10 截面湍流动能分布,图 14 为外部流线分布.

由图 13、14 可知,三厢形态与两厢形态尾部不同位置的湍流动能分布差异较大. 任一截面处,三厢形态的湍流动能都低于两厢形态,尾部涡流携带的能量较小,故三厢形态比两厢形态阻力小,与气动阻力系数表现出的结论一致. 同时三厢形态上部涡流较小,与截面速度矢量图的结论吻合. 两厢形态尾部涡流湍流动能大,两对涡流核心更为靠上,流线相对三厢形态更不规则.

2.3 模拟结果优化

由上述仿真模拟结果可知,两厢形态阻力系数高的主要原因是尾部后车厢垂直高度大. 但考虑到变形车项目的目的,两厢形态追求空间体积大,重视实用性能,因此尾部倾角不宜减小. 而三厢形态尾部倾角大,分离严重,而且不涉及太多空间限制,有必要对三厢形态的尾部造型进一步优化,从而提高变形车的气动性能.

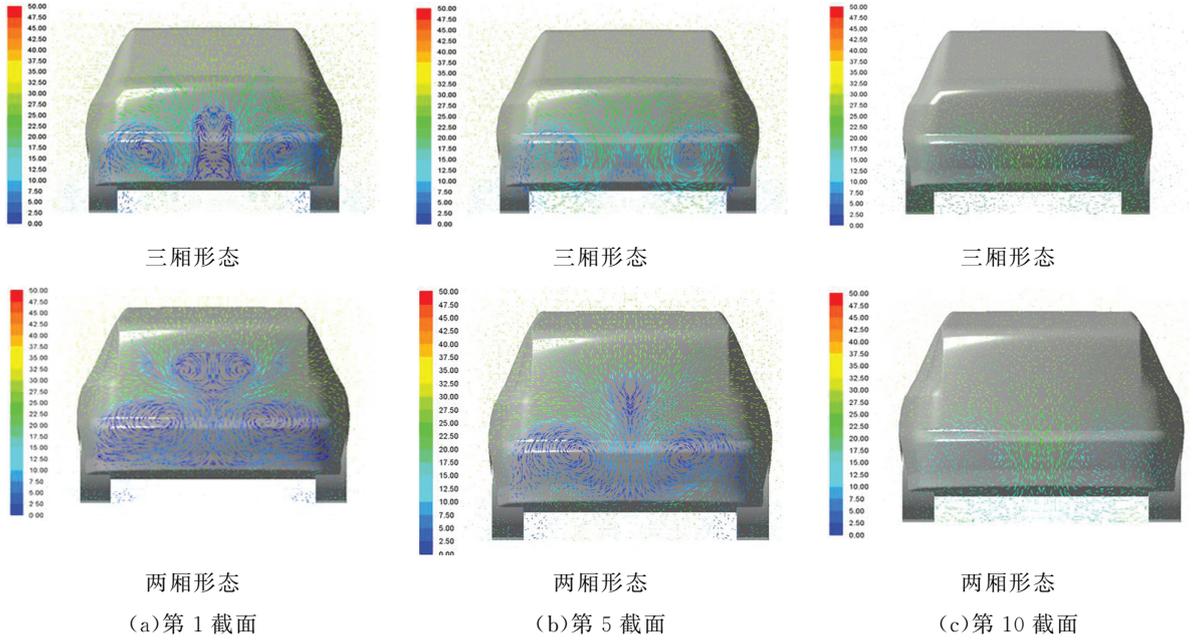


图 12 不同截面上速度矢量

Fig. 12 Velocity vector on different cross sections

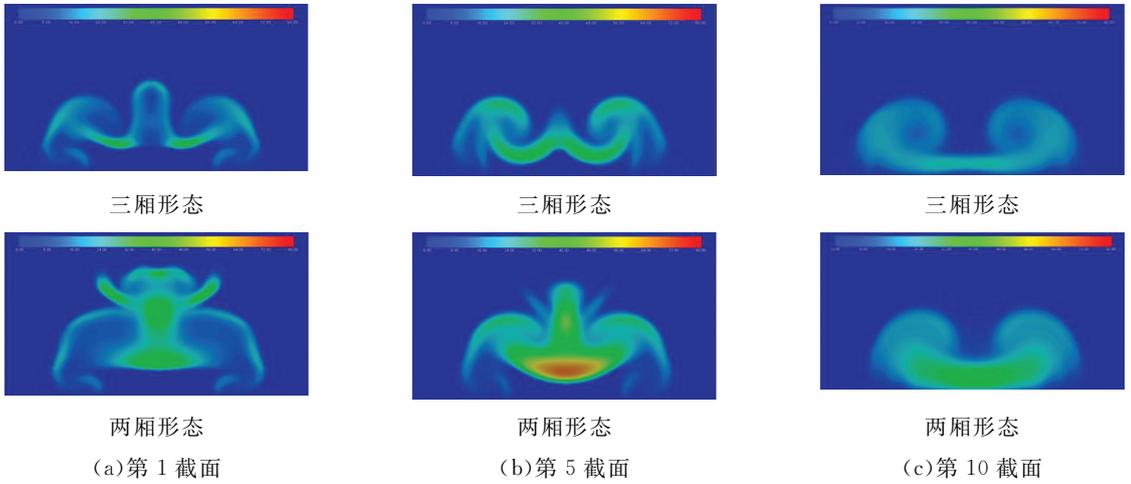


图 13 不同截面上湍流动能

Fig. 13 Turbulent kinetic energy on different cross sections

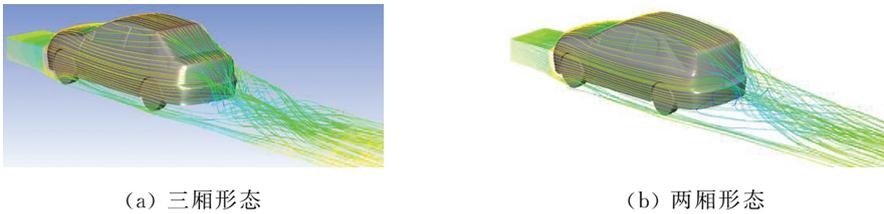


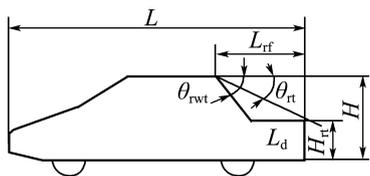
图 14 外部流线图

Fig. 14 External flow chart

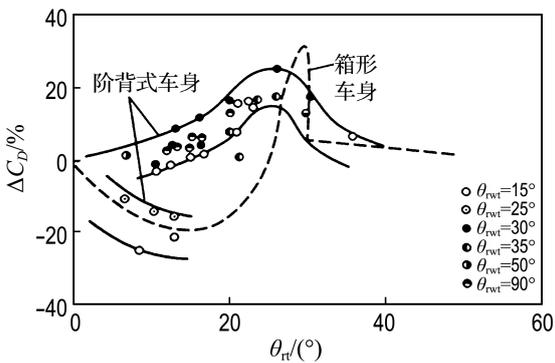
为获得优化的外形结构,本文通过引入后假想角参数对车身外形变化与复杂的气流现象进行

优化分析^[11].后假想角 θ_{π} 是车身顶盖后缘如行李箱边缘的连线与顶盖的夹角,后假想角与气动阻

力系数的关系如图 15 所示. 可见, 对于箱形车身, 后假想角 θ_{rt} 在 20° 附近时对气动阻力系数的降低有较大影响; 对于阶背式车身, 后假想角 θ_{rt} 在 20° 附近且 $\theta_{rwt} = 25^\circ$ 时对气动阻力系数的降低有较大影响. 因此, 本文根据这种变化规律, 将优化改进的目标设定为 $\theta_{rt} = 20^\circ, \theta_{rwt} = 25^\circ$. 基于该优化目标, 本文分别对原车模型的尾部进行了改进并进行了相应的模拟分析, 分析结果如图 16 所示. 可见, 优化后车辆压力系数为 0.290, 相比优化前 ($\theta_{rt} = 20^\circ, \theta_{rwt} = 28.5^\circ$) 整体降低了 15%, 车身、前轮和后轮处的阻力均分别下降.



(a) 尺寸



(b) $\Delta C_D - \theta_{rt}$

图 15 后假想角与 C_D 的关系

Fig. 15 Relationship between rear hypothetical angle and C_D

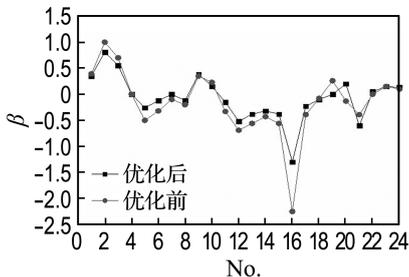


图 16 车身对称面压力系数

Fig. 16 Pressure coefficient on symmetry plane of vehicle

3 结 语

本文基于对车辆的功能多元化需求, 从车辆

后备厢变容角度开展变形方案与变形机构的相关设计研究工作. 目前所设计的变形机构执行方案已经在样机上进行了应用, 变形过程稳定, 未产生干涉现象, 从实践上证明了该设计方案具有简单易行、可靠性较高的特点. 变形机构的运动仿真结果表明所提出的设计方案具有良好的动力学性能. 同时, 车辆变形前后的外流场数值模拟分析结果表明, 三厢形态的阻力系数较小, 升力系数略大于两厢形态, 尾部形态对前部车身压力分布影响不大, 较两厢形态而言, 三厢形态具有一定的气动性能优势.

结合具体实践过程还应着重在以下方面进行深入研究: 由于所给出的设计方案涉及多运动部件间的耦合性运动关系, 各杆件的运动速度、方向及加速度等因素是影响整体变形速度、能量消耗的重要方面, 因此有必要针对各运动部件的运动特性从整体上对其进行合理的控制策略优化.

参 考 文 献:

[1] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3):345-359.
JIANG Ze-min. Reflections on energy issues in China [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(3):345-359. (in Chinese)

[2] 颜鸿森. 颜氏创造性机构设计:(一)设计方法[J]. 机械设计, 1995(10):39-41.
YAN Hong-sen. Creative mechanism design of Yan:(1) Design method [J]. *Journal of Machine Design*, 1995(10):39-41. (in Chinese)

[3] 谷正气, 郭建成, 张清林, 等. 某跑车尾翼外形变化对气动升力影响的仿真分析[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(3):248-252.
GU Zheng-qi, GUO Jian-cheng, ZHANG Qing-lin, et al. Simulation study into the influence of appearance variation of a sport car's rear wing on the aerodynamic lift [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(3):248-252. (in Chinese)

[4] 杨 博, 傅立敏. 轿车外流场网格生成策略及数值模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4):8-11.
YANG Bo, FU Li-min. Mesh generation strategies of the external flow field around a sedan and the numerical simulation research [J]. *Transactions of*

- the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, **38**(4):8-11. (in Chinese)
- [5] WANG Jing-yu, HU Xing-jun. Application of RNG $k-\epsilon$ turbulence model on numerical simulation in vehicle external flow field [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2012, **170-173**:3324-3328.
- [6] 张英朝. 汽车空气动力学数值模拟技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
ZHANG Ying-zhao. **Automobile Aerodynamics Numerical Simulation Technology** [M]. Beijing: Peking University Press, 2011. (in Chinese)
- [7] 顾文领, 崔俊杰. 基于 Fluent 的汽车外流场特性研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2014, **52**(3):55-57, 65.
GU Wen-ling, CUI Jun-jie. Characteristics of car external flow field based on Fluent [J]. **Agricultural Equipment & Vehicle Engineering**, 2014, **52**(3):55-57, 65. (in Chinese)
- [8] 覃群, 黎仕增, 吴春玲, 等. 基于 STAR-CCM+ 的某汽车外流场的数值模拟[J]. 制造业自动化, 2012, **34**(7):151-153.
QIN Qun, LI Shi-zeng, WU Chun-ling, *et al.* Numerical simulation of the vehicle external flow with STAR-CCM + [J]. **Manufacturing Automation**, 2012, **34**(7):151-153. (in Chinese)
- [9] Guilmineau E. Numerical simulations of flow around a realistic generic car model [J]. **SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems**, 2014, **7**(2):646-653.
- [10] 胡杰桦, 谷正气, 何忆斌, 等. 汽车尾部流场湍流模型数值分析与实验研究[J]. 系统仿真学报, 2010, **22**(2):321-325.
HU Jie-hua, GU Zheng-qi, HE Yi-bin, *et al.* Numerical simulation and experimental research on turbulent wake of vehicle [J]. **Journal of System Simulation**, 2010, **22**(2):321-325. (in Chinese)
- [11] 傅立敏. 汽车设计与空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
FU Li-min. **Automobile Design and Aerodynamics** [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)

Design of vehicle with variable volume trunk and numerical simulation analysis of its external flow field

XIE Rui-xue¹, ZHANG Ming-heng^{1,2}, HU Ping^{*1,2}, WANG Shuai¹, ZHAO Xiu-dong¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Multi-function and practicality have attracted more attention in the research of vehicle engineering. Based on the requirements for family economic cars, more attentions are paid to the vehicle trunk transforming. Firstly, based on the regenerated movement link theory, the structure of the transformation mechanism for vehicle trunk is designed. Furthermore, in order to obtain an optimal design, a numerical simulation analysis based on aerodynamic performance is conducted, and the improvements are made with these simulation results. The results prove that the proposed mechanical structure design conforms with the requirements and completes the transformation between the forms of sedan and hatchback. The sedan has the smaller wind resistance coefficient than the hatchback, and has the advantages in aerodynamics. The study results supply theoretical support and practical basis for variable volume vehicle design.

Key words: variant vehicle design; calculation fluid dynamics (CFD); numerical simulation; drag coefficient