

车尾水平收缩气动减阻的规律及机理

朱 晖^{1,2}, 郑子浩³, 杨志刚^{1,2}

(1. 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804; 3. 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广东 广州 511434)

摘要: 以 MIRA 两厢车为对象, 采用风洞实验和数值仿真方法, 对气动阻力受车尾水平收缩的影响规律进行研究, 表明车尾水平收缩提高尾部表面压力水平, 有效降低气动阻力; 基于可靠性被验证的数值仿真结果, 对尾流结构变化规律进行研究, 表明车尾水平收缩为尾部死水区提供额外动能, 抑制拖曳涡对的形成和发展, 减小尾迹区流动能量损失, 降低气动阻力。

关键词: 关气动减阻; 水平收缩; 流动机理

中图分类号: O355; U461.1

文献标志码: A

Regulation and Mechanism of Aerodynamic Drag Reduction by Horizontal Tail Contraction

ZHU Hui^{1, 2}, ZHENG Zihao³, YANG Zhigang^{1, 2}

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China; 3. Guangzhou Automobile Group Co. Ltd., Automotive Engineering Institute, Guangzhou 511434, China)

Abstract: Based on wind tunnel test and numerical simulation, the regulation of horizontal tail contraction on aerodynamic drag reduction was studied. The results indicate that tail contraction raises pressure level of tail surface and reduces aerodynamic drag. On the basis of the reliable numerical simulation results, the changes of wake structure were studied. The research indicates that the contraction provides additional kinetic energy for the dead zone behind tail, which suppresses formation and development of trailing vortex pair, therefore, the flow energy loss of wake and aerodynamic drag reduces.

Key words: aerodynamic drag reducing; horizontal tail contraction; flow mechanism

汽车在行驶过程中所受气动阻力主要为压差阻力, 压差阻力的形成与汽车造型密切相关, 因此可通过对汽车外形的优化设计达到气动减阻的目标^[1-3]。

提高车体尾部压力水平能有效降低压差阻力。针对车尾纵向外形参数^[4-7]对气动阻力的影响规律及机理的研究表明: 纵向外形参数对尾流场影响显著, 通过改变尾涡结构实现对气动阻力的控制。

艇尾造型是车尾水平收缩在汽车造型上的直观体现, 可见其应用由来已久^[1,8]。Hucho^[1]指出艇尾具有显著减阻效果, 傅立敏^[9]对后风窗 30° 倾角的汽车车尾进行 15° 水平收缩, 消除了该车型阻力系数峰值并使阻力系数下降达 17%。然而, 相关研究仍有不足之处: 缺乏在车长不变条件下水平收缩角对气动阻力影响规律的研究; 仅基于气动阻力及表面压力数据进行分析^[10-11], 缺乏流场试验及数值仿真数据, 难以辨析尾流结构变化, 因而不能从流动机理层面解释气动阻力变化的原因。

以车尾水平收缩角可变的两厢 MIRA 类车体模型^[12]为对象, 以风洞实验法为手段研究车尾收缩时水平收缩角对气动阻力及尾部表面压力分布的影响规律; 之后, 采用可靠性得以验证的数值仿真法, 以计算获得的流场数据为基础分析流场结构随车尾收缩的演化规律, 揭示车尾水平收缩气动减阻的机理。

1 模型风洞实验及结果

为研究水平收缩角对气动阻力及尾部表面压力分布的影响规律并为检验数值仿真方法可靠性提供依据, 设计缩比模型风洞实验。实验台架为上海地面交通工具风洞中心 1:15 开口式模型风洞, 最大风速为 $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 喷口面积为 0.123 m^2 。

参照标准 MIRA 两厢车构造, 以后轮后缘为界,

收稿日期: 2016-05-26

基金项目: 上海市地面交通工具风洞专业技术服务平台(16DZ2290400)

第一作者: 朱 晖(1977—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学。E-mail: zhuhuisuccess@163.com

通讯作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为流体力学。E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

使车尾向内水平收缩;考虑到两厢车的结构特征,使后风窗以 C 柱顶点为中心同时收缩且收缩角与车尾收缩角 α 相等,如图 1 所示.

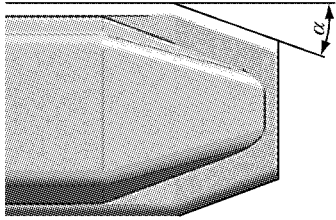


图 1 车尾收缩角方案

Fig.1 Scheme of tail contraction design

α 取值为 0° 、 4° 、 10° 和 16° ,皆为 1 : 12 缩比模型,各模型长、宽和高皆一致,分别为 347 mm、135 mm 和 118 mm,材料为工程代木. 为避免贴片式测压法对流场的干扰,采用非对称布置测压孔法^[13],测压孔坐标不随车尾收缩而变化并在分析数据时作镜像处理. 模型车头距离喷口 125 mm^[14],阻塞比为 10.4%,设车头地面投影中心为测量坐标原点,具体如图 2 所示.

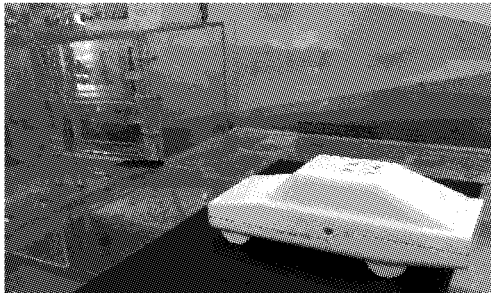


图 2 实验布置

Fig.2 Arrangement of wind tunnel test

风速设定在 $20 \sim 45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,气动阻力系数测量结果如图 3 所示. 由图可知,相同车尾收缩角下 C_D 随风速上升而不断下降,到 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上则基本没有变化;在雷诺数确定时,模型 C_D 值均随 α 的

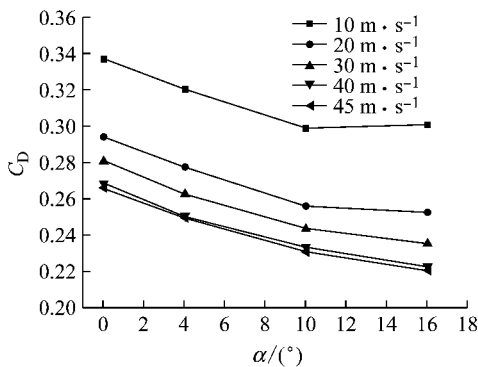


图 3 阻力系数

Fig.3 C_D of test

增大呈现下降趋势,但当 $\alpha > 10^\circ$ 时 C_D 下降幅度明显减缓.

在风速 $u = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时进行表面压力测量,并绘制不同截面处表面压力系数分布图. 测点分布见图 4,其中截面 1、2、3 处于后风窗处,距车体头部 270 mm、290 mm、310 mm;截面 4 处于车体侧面,离地高度 85 mm;截面 5、6 处于车体侧面及尾部,离地高度 68 mm、55 mm;截面 7、8 处于尾部分上翘角表面,距车体头部 298 mm、317 mm.

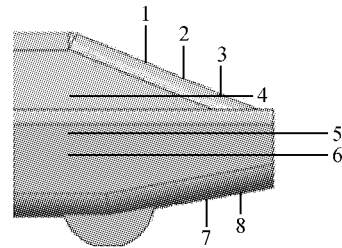


图 4 截面位置

Fig.4 Location of sections

后风窗处 C_P 变化如图 5 所示,截面 1 中靠近 C 柱处的 C_P 值较低而中部 C_P 值较高;随着后风窗收缩,截面处压力整体上升. 截面 2、3 中部变化趋势亦基本相同,但两端 C_P 变化无明显规律,这是由后风窗收缩造型特征所导致.

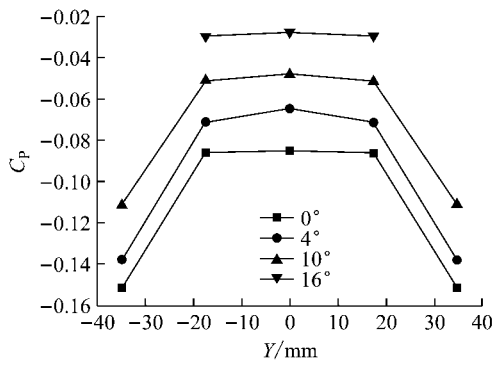
尾截面 6 处压力分布见图 6, C_P 随 α 的增大显著上升且在 $\alpha = 16^\circ$ 时 C_P 整体回升至正压. 但由于车尾端面的缩小部分抵消了尾部压力回升的优势,导致 α 从 10° 收缩至 16° 时 C_D 值的降幅减小.

车侧截面 6 处压力分布见图 7,气流流经收缩起始端 $x = 293 \text{ mm}$ 时,该处 C_P 值有所下降;车侧气流进入收缩角区域后靠近尾部的 C_P 值随 α 增大而逐渐上升.

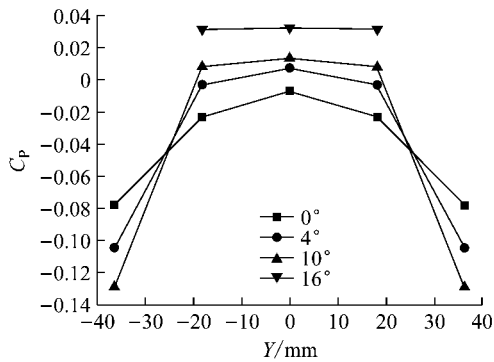
尾部分上翘角表面压力分布见图 8,压力水平皆随 α 的增大而上升. 由图 8a 可知,由于后轮分离区随收缩角变大而逐渐上移,使后轮负压区逐渐远离两侧测压孔,使得截面 7 两端 C_P 值升幅较中部大. 截面 8 处车底部受后轮分离区影响较小, Y 方向上不同测点 C_P 值上升较为平稳,如图 8b 所示.

2 数值仿真及实验验证

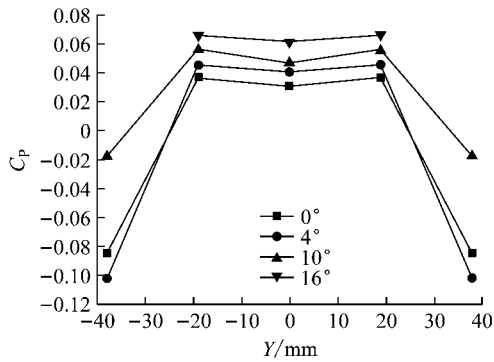
以全尺寸标准 MIRA 两厢车模型为基础设计车尾水平收缩模型并对其外部流场进行数值仿真,各模型长、宽、高保持一致,分别为 4 165 mm、1 625 mm、1 421 mm. 计算域设为 10 倍车长、10 倍车宽及



a 截面 1



b 截面 2



c 截面 3

图 5 后风窗表面压力系数分布

Fig.5 C_p distribution on back windshield

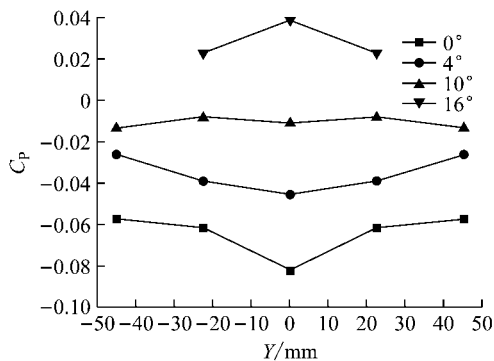


图 6 车尾表面压力系数分布

Fig.6 C_p distribution on tail

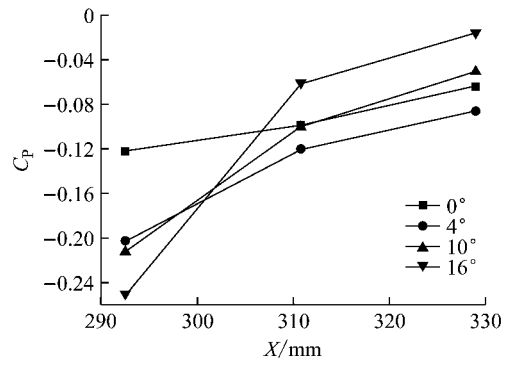
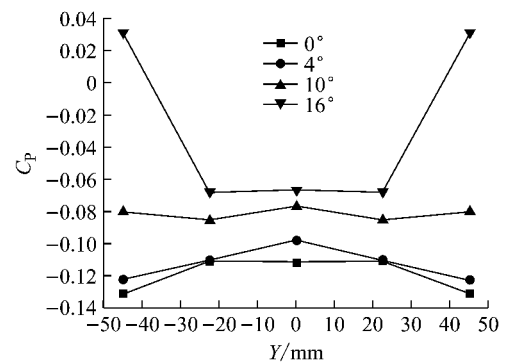
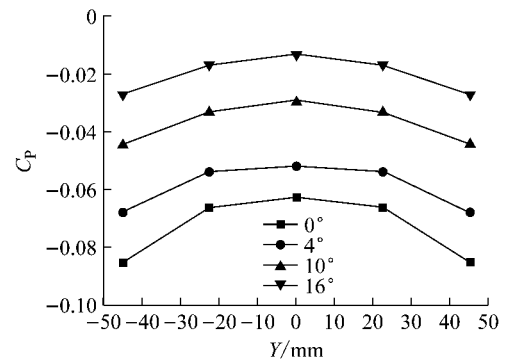


图 7 车侧表面压力系数分布

Fig.7 C_p distribution on side



a 截面 7



b 截面 8

图 8 尾部上翘角表面压力系数分布

Fig.8 C_p distribution on rear diffuser

1 300万. 基于 Fluent12.1 数值仿真平台,调用可实现 $k-\epsilon$ 湍流模型、二阶迎风格式及 SIMPLE 算法,进行流场的数值求解.

车尾收缩角 α 变化范围取 $0 \sim 20^\circ$ 范围,风速 $u_0 = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 阻力系数 C_D 随着 α 增大而显著下降,但降幅逐渐减小; C_D 在 16° 时取得极小值 0.221 2,降幅达 16.21%,之后 C_D 略有回升,如图 9 所示.

选取存在较大外形变化区域的截面 4 和截面 5 上的 C_p 分布进行数值仿真与试验结果的对比分析(已将缩比模型实验数据进行全尺寸换算). 由图 10

5 倍车高. 流场采用 4、5、6 面体混合非结构网格划分^[7],并对整车四周进行加密,体网格总数控制为

可知,在截面 4 处计算与实验所得 C_p 的变化趋势基本吻合,但在 C 柱附近存在流动分离现象区域处,二者所得结果存在差异.

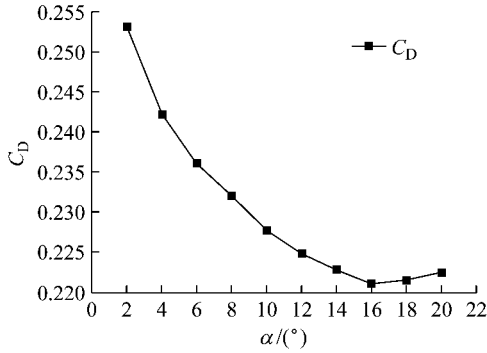


图 9 数值仿真阻力系数
Fig.9 C_D of simulation

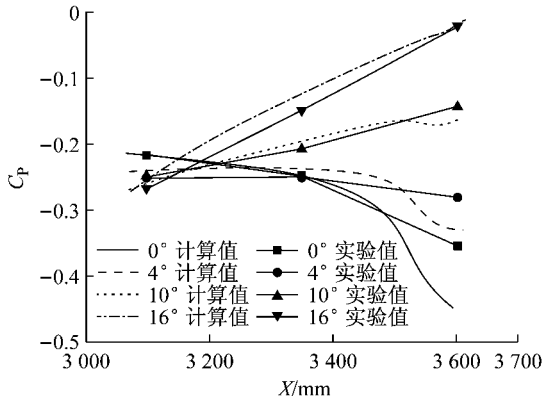
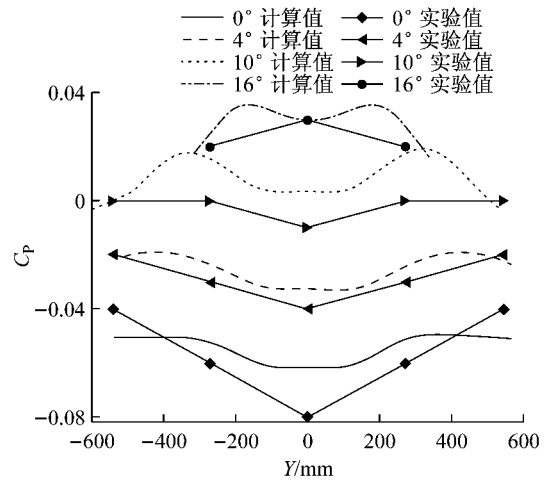


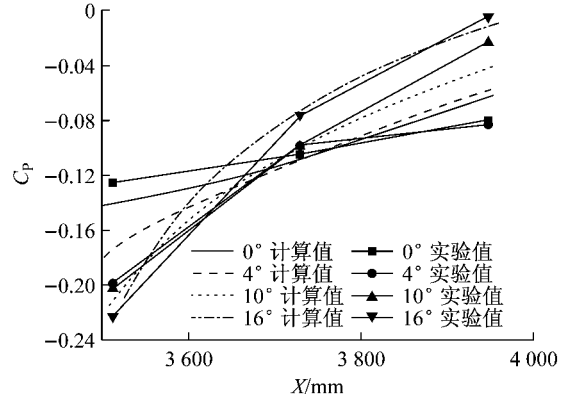
图 10 截面 4 处表面压力系数分布
Fig.10 C_p distribution on Section 4

尾部截面 5 的 C_p 对比见图 11. 仿真结果与试验值总体符合较好(由于实验测点数目受限,实验结果曲线不如仿真结果曲线光滑), C_p 均随 α 的增大而整体上升,且端面中部压力升幅均比两侧更为显著. 当 α 从 0° 变化到 4° 时,计算值及实验值均表明靠近车尾端面的车侧($X=3\ 950\text{ mm}$)处表面压力基本没有变化,可见在小角度变形条件下该处的表面压力水平未有显著升高.

计算值和实验结果之间存在一定的差异,其原因可归结为两点:由于实验雷诺数与仿真雷诺数之间的差异致使绕流场结构并非完全一致;仿真所采用的时均化两方程湍流模型对具有非定常大分离流动特性的近地钝体绕流场物理量的解算准确性不足. 虽然计算值与实验值之间的差异真实存在,但从对 C_D 变化趋势的预测及 C_p 分布的总体特征描述方面考察,数值仿真方法及其结果有效可信.



a 尾部区域



b 侧面区域

图 11 截面 5 处表面压力系数分布
Fig.11 C_p distribution on Section 5

3 基于流场特征的机理分析

对 0° 和 20° 车尾收缩角 MIRA 模型外部绕流场特征进行比较分析,研究车尾水平收缩气动减阻机理.

图 12 显示了尾流场发展的整体趋势. 0° 模型的侧风窗气流 F_c 越过 C 柱进入后风窗区域拖出 C 柱

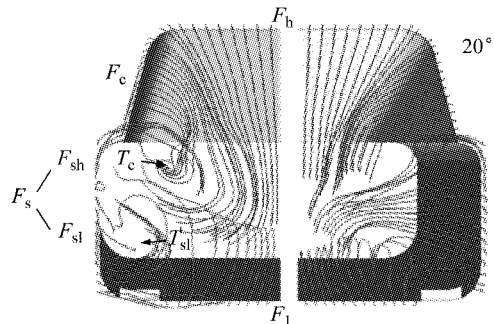


图 12 尾流场结构对比

Fig.12 Comparison of near wake structure

涡 T_c ; 车侧上部气流 F_{sh} 上升并于车尾上平面翻卷而出, 下部气流 F_{sl} 向车底流动并从上翘平面卷出, 形成拖曳涡 T_{sl} ; 车底气流 F_l 向外及向上扩散. 整个区域流动杂乱, 结构复杂.

20°模型 F_c 沿后风窗收缩趋势向后流动, 抑制 T_c 的形成及发展; F_{sh} 沿收缩角先上升后下沉, 从车尾侧进入尾流场且气流翻卷趋势减弱; F_{sl} 同样从车尾侧进入尾流场并抑制 T_{sl} 的形成和发展; 受下洗气流及尾部侧气流的作用, F_l 在横截面上扩散范围减小. 整个区域流动顺畅, 结构清晰.

如图 13 所示, 0°模型 F_c 自前而后进入风窗后部, 向纵向对称面方向流动. 气流越过 C 柱时产生分离, 随后附着于后风窗上, 并在下游发展形成 T_c . 图 14a 后风窗表面的分离线 NBL_{ch} 及附着线 PBL_{ch} 反映出狭长的 C 柱涡在近壁面的流动状态.

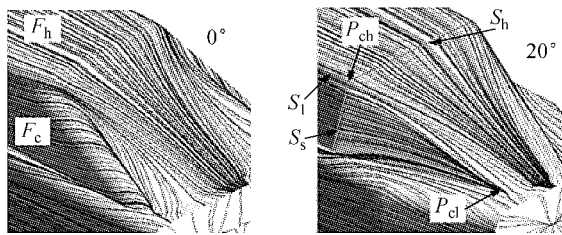


图 13 后风窗表面油流

Fig. 13 Oil streamline on back windshield

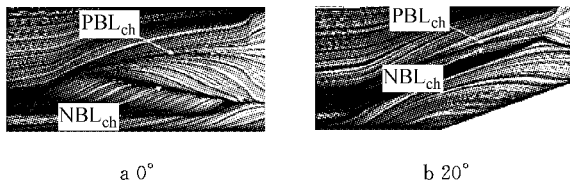


图 14 后风窗表面分离区

Fig. 14 Separation zone on back windshield

尾部收缩有效抑制了 F_c 指向纵向对称面的流动趋势, 使其沿后风窗侧面持续向后流动且气流分离现象减弱, 从而抑制了 T_c 的发展. 图 14b 中 PBL_{ch} 向 NBL_{ch} 靠拢, 表明 T_c 的尺度得以压缩, F_c 最终在 C 柱下顶点 P_{cl} 处汇集, 从车尾上平面处进入尾流场, 形成较强下洗气流.

车顶气流 F_b 受侧棱 S_l 附近气流及侧风窗再附着气流的影响, 在沿后风窗向后流动的过程中逐渐向纵向对称面附近汇聚. 收缩后该现象更为突出, 注入尾部分离区的下洗气流更为集中, 对尾部气流的梳理作用加强.

F_{sh} 可细分为上层 F_{sh}' 及下层 F_{sh}'' , 如图 15 所示. 收缩前 F_{sh}'' 较晚到达车尾上平面并自下而上翻卷而出. 收缩后 F_{sh}' 在新侧棱 S_v 之前到达上平面,

绕过 S_v 进入收缩角区域后, F_{sh}' 在 Z 方向压力梯度作用下再次下沉到车尾侧, 使得 F_{sh}'' 无法向上流动, 翻卷趋势减弱.

由图 16 可知, 收缩前 F_{sl} 向后下侧流动, 到达尾部上翘平面时在后轮分离区与车底气流形成汇合线 NBL_{sl} , 随后 F_{sl} 从车底翻卷而出. 收缩后, 后轮分离区向 Z 方向移动, F_{sl} 无法卷入到上翘平面且 NBL_{sl} 上移至车尾侧, 最终 F_{sl} 从侧面进入到尾流场.

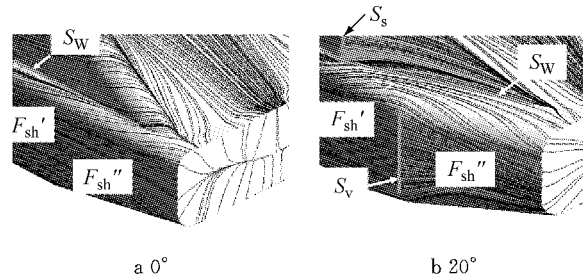


图 15 车尾侧上半部油流

Fig. 15 Oil streamline on upper tail side

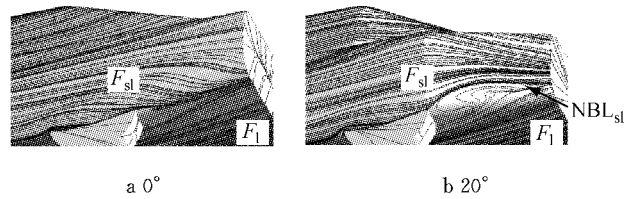


图 16 车尾侧下半部油流

Fig. 16 Oil streamline on lower tail side

如图 17 所示, 0°模型车尾端面后方存在一对展向涡 U_b 及 U_l , 上卷气流形成的 U_l 较 U_b 的尺度更大. 20°模型车尾端面后方的展向涡系尺度明显小于 0°模型且涡间边界模糊, 融合趋势明显.

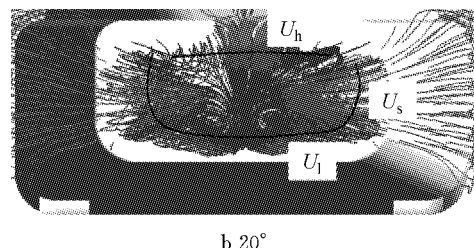
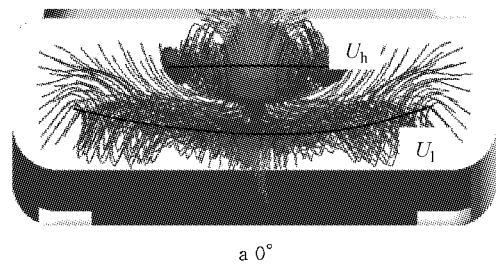


图 17 尾部涡结构对比

Fig. 17 Comparison of tail vortices structure

车尾侧 F_s 本应注入到 T_c , 增加 T_c 的涡量; 但车尾收缩角诱导 F_s 由车尾侧注入到尾端面死水区, 促使侧向涡对 U_s 的形成及发展; 同时, F_s 的注入为死水区提供额外的动能, 使尾部压力回升压差阻力显著下降。

0° 模型尾迹区纵向涡结构主要由 T_c 、 F_{sh} 翻卷形成的涡 T_{sh} 和 T_{sl} 形成, 见图 18。 T_{sh} 在尾后 1 000 mm

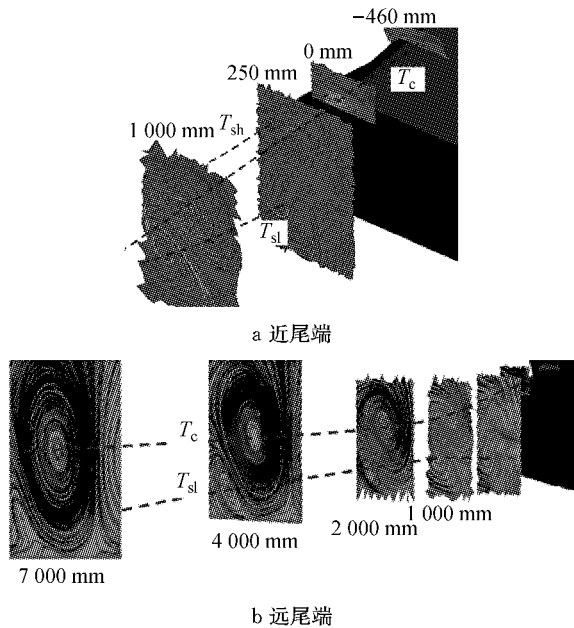


图 18 0° 模型尾后流线

Fig. 18 Streamline after tail of 0° model

处与 T_c 融合; 发展到 7 000 mm 后 T_{sl} 消失, 此时尾迹区主要的涡结构为以 T_c 为核心的拖曳涡对。

20° 模型尾迹区纵向涡结构如图 19 所示, T_c 只短暂出现在近尾端 -150 mm ~ 100 mm 处, F_s 引起的纵向涡消失。下洗气流在 1 240 mm 处形成近地面涡 T_g 。 T_g 与 0° 模型经充分发展后的 T_c 相比其涡量显著下降, 因此气动阻力显著减小, 如图 20 所示。

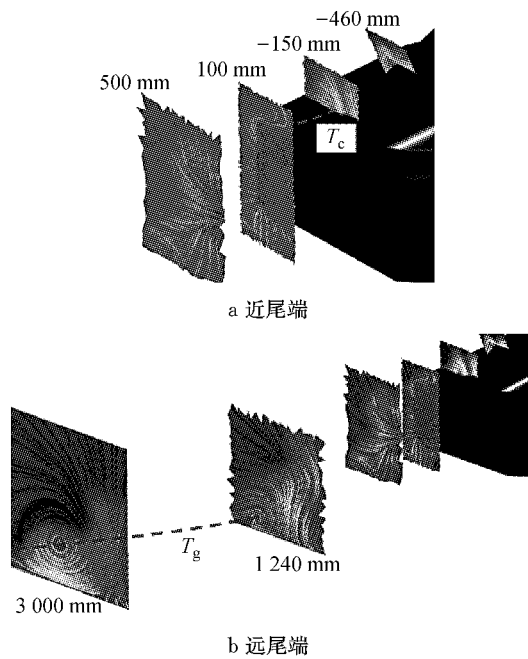


图 19 20° 模型尾后流线

Fig. 19 Streamline after tail of 20° model

窗气流越过 C 柱向对称面流动的趋势被减弱, 抑制了 C 柱附近涡系的发展, 进而抑制了尾迹区拖曳涡对的发展, 故有效降低了气动阻力。

参考文献:

- [1] HUCHO W H. Aerodynamics of road vehicles [M]. 4th ed. Detroit: SAE Inc, 2004.
- [2] 谷正气. 汽车空气动力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005. GU Zhengqi. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [3] 傅立敏. 汽车空气动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. FU Liming. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [4] KRAJNOVIC S, DAVIDSON L. Flow around a simplified car, Part 2: understanding the flow [J]. Journal of Fluids Engineering Transactions of the Asme, 2005, 127(5): 919.
- [5] ZHANG Y C, DING W, ZHANG Y. Aerodynamic shape optimization based on the MIRA reference car model [C]// SAE. [S.l.]: SAE, 2014; 2014-01-0603.
- [6] WANG J, ZHU H, YANG Z G. Study of aerodynamic drag reduction on a compact electric vehicle [J]. Advanced Materials Research, 2013, 694-697: 51.

(下转第 1389 页)

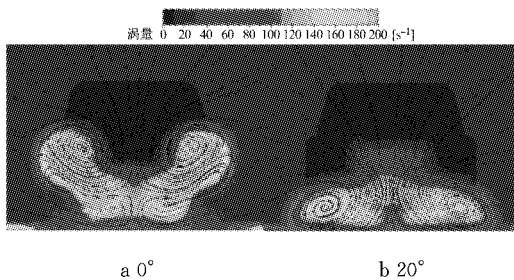


图 20 尾后 $X = 2 000$ mm 处涡量

Fig. 20 Vorticity on $X = 2 000$ mm after tail

4 结论

- (1) 随着水平面车尾收缩角的增大, 气动阻力显著减小;
- (2) 车尾收缩抑制车尾展向涡的发展并提高车尾端面压力水平, 因而减小压差阻力;
- (3) 随着车尾收缩角增大, 车尾侧气流向上、下翻卷趋势被抑制, 使尾部拖曳涡强度减弱, 能量耗散减小, 整车获得较低的气动阻力;
- (4) 伴随车尾收缩而形成的后风窗收缩使侧风