

风洞结构对试验段静压系数和静压梯度的影响

李启良^{1,2}, 戴文童^{1,2}, 杜开颜^{1,2}, 杨志刚^{1,2}

(1. 同济大学 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与热环境模拟重点实验室, 上海 201804)

摘要: 静压系数和静压梯度是评估汽车风洞试验段流场品质的重要参数. 以数值仿真为主, 风洞试验为辅的方法研究了风洞结构对试验段静压系数和静压梯度的影响. 通过研究发现, 使用包含 2 个拐角的计算模型进行静压系数和静压梯度仿真, 可以得到真实的结果. 无论是大喷口还是小喷口, 收集口高度为 270 mm 时, 对应试验段静压系数和静压梯度最平缓, 试验段可用长度最长, 对试验测量影响最小. 对于大喷口, 随着收集口高度降低, 收集口处静压系数和静压梯度不断下降; 当收集口高度为 240 mm 时, 靠近收集口处的静压系数和静压梯度变为负值. 对于小喷口, 收集口面积远大于喷口面积, 气流到达收集口的速度有所减少, 当地静压系数和静压梯度均为正值.

关键词: 风洞结构; 试验段; 静压系数; 静压梯度; 收集口高度

中图分类号: U467.1

文献标志码: A

Influence of Wind Tunnel Structure on Static Pressure Coefficient and Static Pressure Gradient of the Test Section

LI Qiliang^{1,2}, DAI Wentong^{1,2}, DU Kaiyan^{1,2},
YANG Zhigang^{1,2}

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Lab of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China)

Abstract: The static pressure coefficient and static pressure gradient are key parameters to estimate the flow quality of automotive wind tunnel test section. Numerical simulation was used along with wind tunnel test to study the influence of wind tunnel structure on static pressure coefficient and static pressure gradient of the test section. It is found that real

results can be obtained by simulation of the static pressure coefficient and static pressure gradient using the computational model with two corners. No matter it is big or small nozzle, the static pressure coefficient and static pressure gradient corresponding to the collector height of 270 mm is the gentlest and the effective length of test section is the longest, which has the slightest impact on measurement. For the big nozzle, the static pressure coefficient and static pressure gradient at the position of collector is decreasing constantly with the reduction of the height of collector. When the height of collector is 240 mm, the static pressure coefficient and static pressure gradient close to the collector becomes negative. For the small nozzle, the area of the collector is much larger than that of the nozzle so that the velocity of airflow at the collector decreases, which contributes to a positive value of the local static pressure coefficient and static pressure gradient.

Key words: wind tunnel structure; test section; static pressure coefficient; static pressure gradient; collector height

随着汽车工业的发展, 对汽车动力性、经济性以及安全性的要求都有所提升, 为此许多汽车企业和研究机构都在新建或改造风洞使其能够更好地满足高性能汽车产品的开发^[1-5]. 汽车风洞属于低速风洞, 它的设计虽然是基于航空航天所使用的高速风洞的一些技术准则, 但又有自身的要求^[6]. 汽车风洞的流场品质的好坏决定其能否模拟车辆高速行驶时的状况, 影响着测量结果的准确性. 试验段中心轴向的静压系数和静压梯度是评价汽车风洞流场品质的重要参数, 它的大小影响汽车气动力测量结果的准确性^[7-9]. 试验段静压系数和静压梯度(如无特别说

收稿日期: 2017-03-22

基金项目: 上海市地面交通工具风洞专业技术服务平台项目(16DZ2290400); 国家自然科学基金(11502171)

第一作者: 李启良(1980—), 男, 副研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车气动噪声与风洞技术.

E-mail: qiliang@tongji.edu.cn

通讯作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学与风洞技术.

E-mail: zhigang.yang@sawtc.com

明均指中心轴向)主要受喷口尺寸、试验段长度、收集口大小和角度等试验段结构因素的影响. 为了优化试验段静压系数和静压梯度分布, 以往的研究者对于试验段长度、收集口形状和角度等做了一系列研究^[10-14], 发现这些因素的改变对于静压系数和静压梯度有一定的影响.

试验段主要结构参数可用扩散角进行统一. 文献^[15]基于风洞中心气动-声学整车风洞实际尺寸, 通过固定喷口和试验段长度, 改变收集口横截面尺寸, 实现扩散角的改变. 研究发现扩散角对试验段静压系数影响较大. 为了进一步扩展研究结论适用范围, 本文基于风洞中心热环境整车风洞实际尺寸, 建立不同喷口大小和不同收集口高度的风洞结构模型, 通过数值仿真方法评估风洞结构对试验段静压系数和静压梯度的影响, 为后续风洞设计提供参考.

1 数值仿真方法

为了减少网格数和计算资源, 基于热环境风洞真实结构尺寸, 建立 1 : 15 的缩比模型, 如图 1a 所示. 模型由收缩段、喷口、试验段、驻室、收集口、第 1 拐角、直流段、第 2 拐角和延长段组成.

大喷口和小喷口宽度均为 0.204 m, 高度分别为 0.305、0.153 m. 收集口宽度均为 0.29 m, 高度分

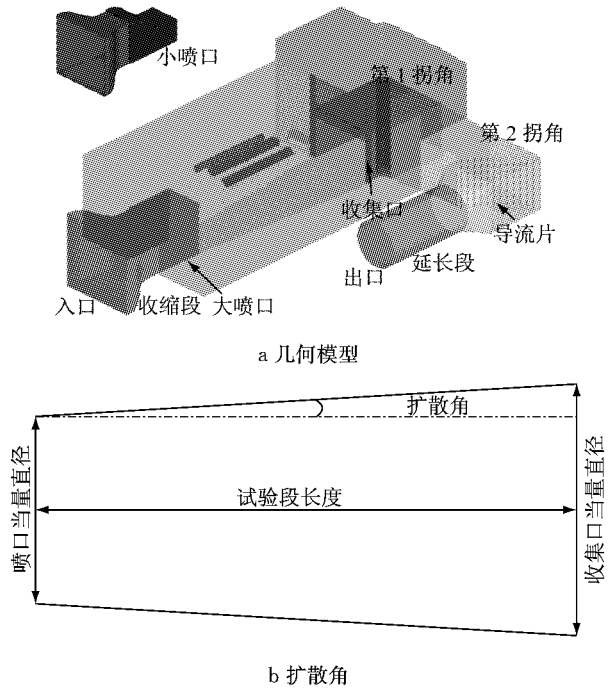


图 1 几何模型与扩散角
Fig. 1 Geometry model and diffuser angle

别为 0.24、0.27 和 0.30 m. 大喷口、小喷口对应试验段长度分别为 1.133、1.001 m. 为了明确不同风洞结构对试验段静压系数和静压梯度的影响, 确定了表 1 所示的 6 个计算方案.

表 1 数值模型

Tab. 1 Models of numerical simulation

方案	喷口尺寸/m			收集口尺寸/m			试验段长度/m	扩散角/(°)
	高度	宽度	当量直径	高度	宽度	当量直径		
1	0.153	0.204	0.174	0.240	0.294	0.264	1.001	2.57
2	0.153	0.204	0.174	0.270	0.294	0.281	1.001	3.06
3	0.153	0.204	0.174	0.300	0.294	0.296	1.001	3.49
4	0.305	0.204	0.244	0.240	0.294	0.264	1.133	0.51
5	0.305	0.204	0.244	0.270	0.294	0.281	1.133	0.94
6	0.305	0.204	0.244	0.300	0.294	0.296	1.133	1.31

在几何模型所形成的计算域内创建三角形面网格, 面网格总数量为 44 万个. 收集口、喷口以及地面等区域网格尺寸大小为 5 mm, 收缩段、驻室、扩散段以及延长段等处面网格尺寸大小为 10 mm. 采用四面体网格, 网格总数为 800 万个. 不同模型对应的面网格总数和体网格总数差异不大. 为了更好地模拟近壁处边界层, 在壁面生成 5 层边界层网格. 边界层网格第 1 层厚度为 1 mm, 对应量纲一化的距离 y^+ 为 90(30 $m \cdot s^{-1}$ 的喷口风速), 满足可实现 $k-\epsilon$ 湍流模型对壁面 y^+ 的要求.

采用 FLUENT16.1 的 Realizable $k-\epsilon$ 两方程湍流模型和非平衡壁面函数进行计算域内湍流求

解^[16]. 收缩段入口设定为速度入口, 设定数值可以满足喷口出口速度为 $30 m \cdot s^{-1}$. 出口设为自由出流. 数值计算首先选用较为稳定的一阶格式, 迭代 1 000 次后选用精度更高的二阶格式迭代 9 000 次, 满足设定残差和监控物理量条件.

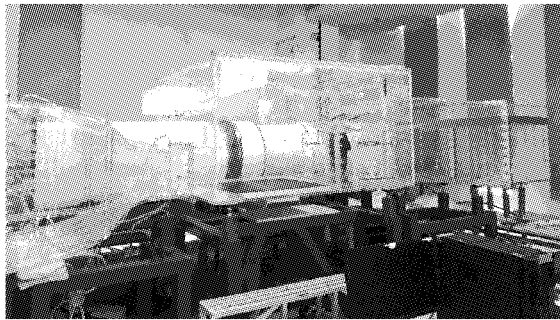
2 结果分析与讨论

2.1 数值方法验证

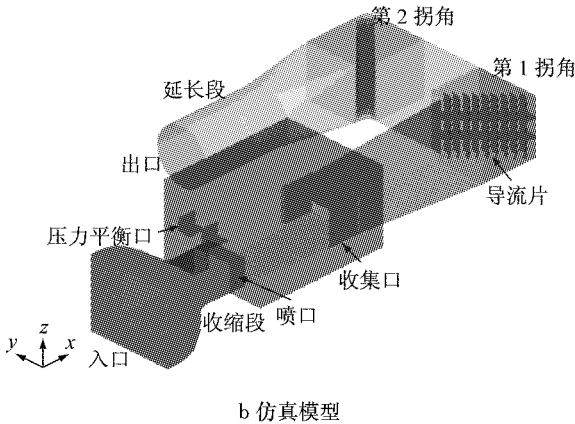
由于并未搭建缩比热环境模型风洞, 因而无法获得与仿真对应的静压系数和静压梯度的试验数据. 为了验证本文数值计算方法的正确性, 在结构相

似的 1:15 的气动-声学模型风洞进行试验. 使用皮托管测量了 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速下, 距试验段地面 50 mm 高度中心线上的静压. 以喷口出口截面上的点为第 1 个测点, 沿着轴线以 50 mm 为间距创建 20 个测点, 其中距喷口 300 mm 的测点为参考点.

图 2 所示为模型风洞试验平台和仿真模型, 该仿真模型的网格划分、边界条件、计算设置均与本文研究模型相同, 间接验证了本文数值仿真方法的可行性.



a 试验平台



b 仿真模型

图 2 试验平台和仿真模型

Fig. 2 Test platform and simulation model

以长为 5 m 的汽车为参考, 建立归一化试验段长度 x/L , 其中 $L=333 \text{ mm}$, x 为测点到参考点的距离. 负值表示测点在参考点前方. 静压系数 $C_p(x_i)$ 和静压梯度 $dC_p(x_i)/dx_i$ 分别如式(1)和式(2)所示.

$$C_p(x_i) = \frac{P_{xi} - P_\infty}{P_t - P_\infty} \quad (1)$$

$$\frac{dC_p(x_i)}{dx_i} = \frac{C_p(x_{i+1}) - C_p(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (2)$$

式中: P_{xi} 为测点 i 的静压, Pa; P_∞ 为参考点的静压, Pa; P_t 为参考点的总压, Pa.

图 3 给出了数值仿真与试验的静压系数和静压梯度曲线. 从图 3 可以看出, 静压系数和静压梯度具有相同的变化趋势. 两者的数值仿真结果与试验结果无论从趋势上还是数值上都保持一致. 试验结果

与数值仿真结果均表明, 随着 x/L 变大, 静压系数先保持平稳略有下降, 到 $x/L=0.60$ 后开始大幅上升. $x/L=1.95$ 时的静压系数仿真数值为 0.141, 试验结果为 0.139, 两者相差很小. 数值仿真结果和试验结果的一致表明本文采用数值仿真方法的正确性, 并可间接验证后续的仿真结果.

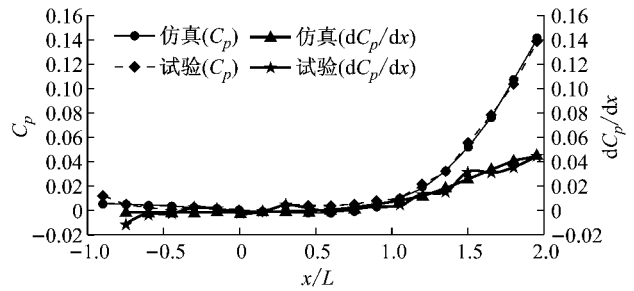
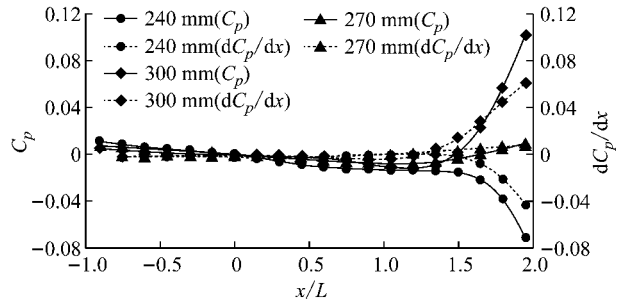


图 3 试验结果与数值仿真结果对比

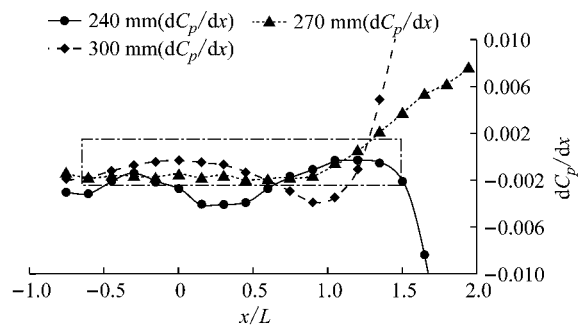
Fig. 3 Comparison of numerical result and test result

2.2 大喷口仿真结果对比

图 4 给出了大喷口的静压系数和静压梯度仿真结果. 从图 4 可以看出, 静压系数曲线和静压梯度曲线有相同的变化趋势. 收集口高度为 300 mm 和 270 mm 时, 静压系数曲线在靠近收集口处逐渐上升, 而收集口高度为 240 mm 时, 静压系数曲线从 $x/L=1.20$ 开始下降, 呈现出不同的变化规律.



a 静压系数与静压梯度



b 静压梯度平缓区域

图 4 大喷口静压系数和静压梯度对比

Fig. 4 Comparison of static pressure coefficient and static pressure gradient for big nozzle

收集口高度为 300 mm 时的静压系数曲线在 $x/L=1.20$ 处达到最低点,静压系数为 -0.010 ,然后开始快速上升,最后在 $x/L=1.95$ 处达到最大值 0.100 ,相比其他收集口高度对应曲线的静压系数数值更高.收集口高度为 270 mm 的静压系数曲线比较平稳,整条曲线变化幅度很小,从起点处静压系数为 0.007 ,一直下降到 $x/L=1.05$,静压系数数值达到 -0.009 ,降幅很小,从 $x/L=1.05$ 开始,静压系数曲线小幅度持续上升,直到 $x/L=1.95$,静压系数最高达到 0.010 ,比其他 2 条曲线更接近零轴,变化幅度最小.收集口高度为 240 mm 的静压系数曲线与其他静压系数曲线不同,其静压系数持续下降.在 $x/L=-0.90\sim 1.50$ 范围内,静压系数降低幅度较小, $x/L=1.50$ 时的静压系数约为 -0.020 .之后静压系数开始大幅度降低,最后在 $x/L=1.95$ 时静压系数达到 -0.070 .

风洞试验段静压系数和静压梯度越小,试验段流场品质越高,对测量影响越小.静压梯度平缓区域越大,试验段可用长度越长,风洞性能越好.为此选取静压梯度绝对值为 0.002 来评估收集口高度的影响.从图 4b 可以看到,收集口高度分别为 270 mm 和 300 mm 时,试验段可用长度分别为 $x/L=-0.75\sim 1.35$ 和 $x/L=-0.75\sim 0.60$,显然前者优于后者.收集口高度为 240 mm 时,多处测点静压梯度超过 0.002 ,会对测量结果造成一定的影响.

为了探究大喷口静压系数和静压梯度变化的机理,截取 $y=0$ 截面速度云图以及流线图,如图 5 所示.

从图 5a 可以看出,收集口高度低于喷口高度,气流从喷口出发沿着核心射流区流动,靠近收集口附近时,气流向收集口上方略有扩散,试验段上方收集口附近存在较小的漩涡.核心射流区的速度临近收集口时略有增加,气流流入收集口后可观察到速度明显上升,这是由于收集口高度小于喷口,流体区域横截面积突然减小,虽然气流向试验段上方有扩散,但是速度依然增加.对于图 5b,收集口高度同样低于喷口高度,流场结构与图 5a 基本相同,仍在试验段上方收集口附近存在较小的漩涡.由于气流到达收集口速度与喷口速度基本一致,所以静压系数和静压梯度较为平稳.图 5c 的速度分布不同于图 5a 和图 5b,收集口高度与喷口高度保持一致,气流向收集口上方扩散程度比另外 2 个收集口高度更强.未出现由于流体区域横截面积减小而速度增加的现象.气流到达收集口后速度略有下降.

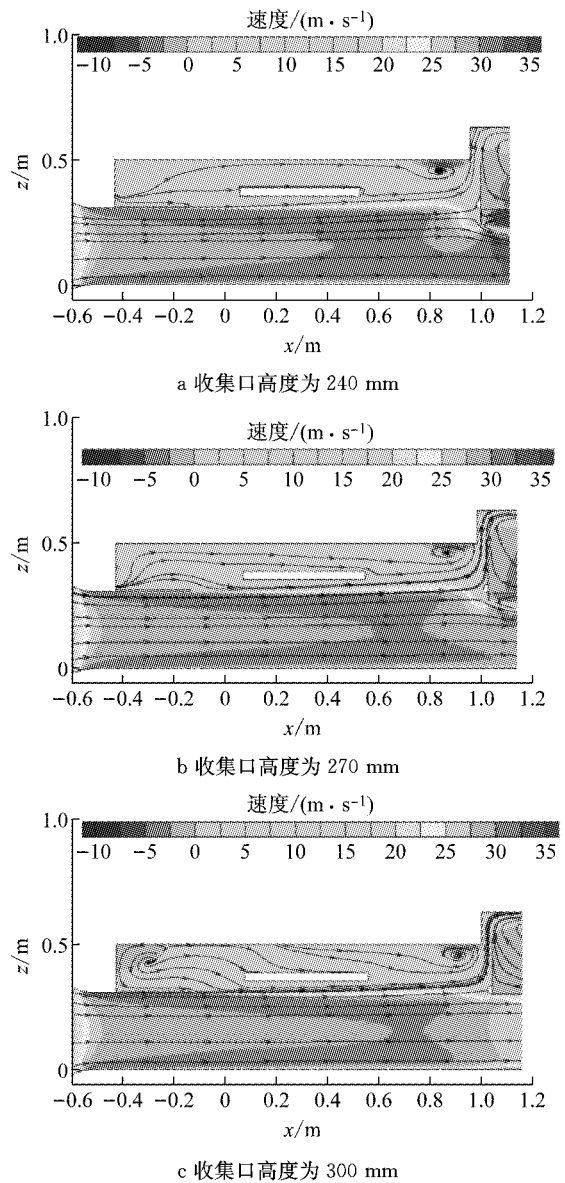


图 5 中截面速度云图和流线图(大喷口)

Fig. 5 Velocity contour and pathlines of middle plane(big nozzle)

2.3 小喷口仿真结果对比

图 6 给出了小喷口的静压系数和静压梯度仿真结果.从图 6 可以看出,静压系数和静压梯度在靠近收集口处均有不同程度上升,变化规律相同.静压系数曲线在 $x/L=-0.90\sim -0.60$ 范围内有所下降,这是由于小喷口比大喷口的喷口长度更长.由于测点仍始于大喷口截面,所以前 2 个测点在喷口截面以内,喷口呈收缩状.由于截面面积减少导致流体速度增大和静压系数降低.从 $x/L=-0.90$ 开始,3 条静压系数曲线先保持一致下降,到 $x/L=-0.60$ 后,静压系数曲线保持平稳,在零轴上下,从 $x/L=0.30$ 开始,不同高度的 3 条曲线出现差异.收集口高度为 300 mm 时的静压系数曲线开始逐渐上升,增幅逐渐

增大,到 $x/L=1.95$ 处静压系数接近 0.120. 收集口高度为 270 mm 和 240 mm 时的静压系数先是略有下降,从 $x/L=1.20$ 开始,静压系数开始增加,增幅逐渐增大;收集口高度为 240 mm 时的静压系数略高于收集口高度为 270 mm. $x/L=1.95$ 处,收集口高度为 300、270 和 240 mm 时的静压系数依次为 0.120、0.078、0.098. 可见,收集口高度为 270 mm 的静压系数最低,但它与收集口高度为 240 mm 的差别较小.

仍以静压梯度绝对值为 0.002 来评估收集口高度的影响. 从图 6b 可以看出,收集口高度分别为 270 mm 和 240 mm 时,试验段可用长度分别为 $x/L=-0.40\sim 1.35$ 和 $x/L=-0.40\sim 1.30$,大于收集口高度为 300 mm 时对应的可用长度 $x/L=-0.40\sim 1.00$.

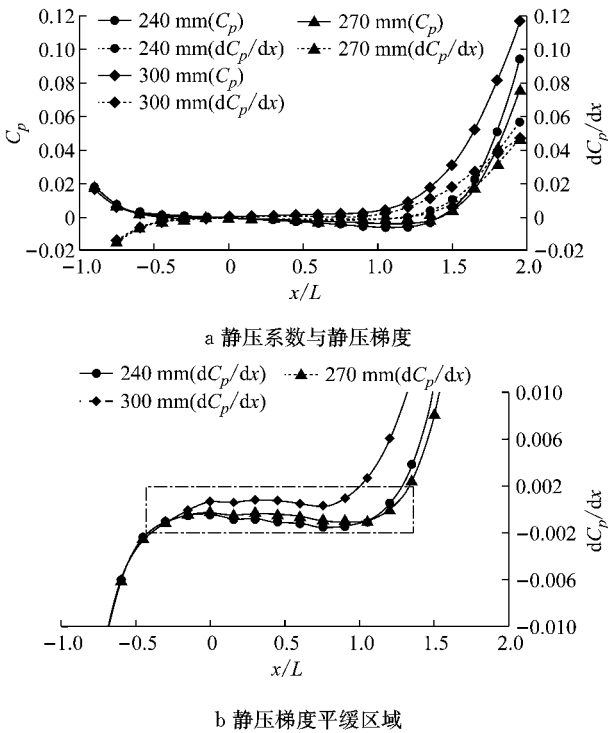


图 6 小喷口静压系数和静压梯度对比

Fig. 6 Comparison of static pressure coefficient and static pressure coefficient for small nozzle

图 7 给出不同收集口高度, $y=0$ 截面速度云图以及流线图. 从图 7a 和 7b 可以看到,它们的流场结构基本相同,具体体现在收集口上盖板前方、上方和下方均形成漩涡. 由于收集口面积大于喷口面积,因而气流到达收集口处速度下降,压力上升. 对比收集口盖板前方涡心位置和涡的大小可以发现,相比收集口高度为 240 mm,收集口高度为 270 mm 的涡心更靠近喷口和射流区,涡更大. 该涡对气流扩散起到

一定抑制作用,减少了当地气流速度的降低,使当地静压更小.

收集口高度为 300 mm 时呈现出的流场结构与收集口高度为 240 mm 和 270 mm 的不同,具体体现在收集口盖板前方和上方出现漩涡,但下方无漩涡. 收集口前方的涡心位置进一步靠近喷口,远离射流区. 由于缺少收集口盖板下方漩涡和前方漩涡的抑制,气流扩散更容易,速度降低和当地静压增加更明显.

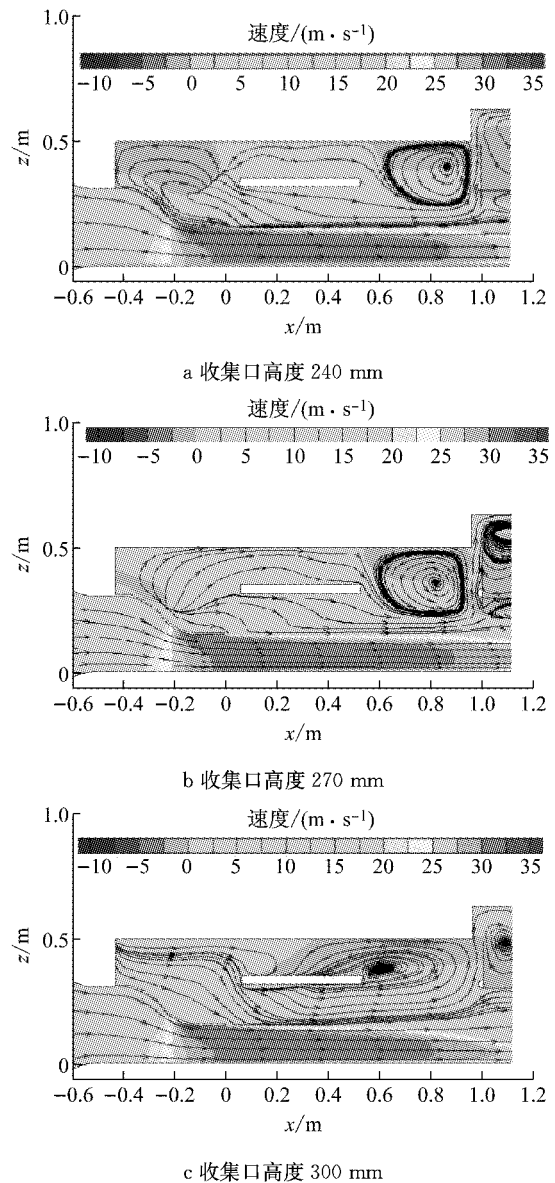


图 7 中截面速度云图和流线图(小喷口)

Fig. 7 Velocity contour and pathlines of middle plane (small nozzle)

3 结论

建立了 2 种喷口大小,3 种收集口高度的风洞结

构,通过数值仿真得到试验段静压系数和静压梯度变化规律,结论如下:

(1) 通过试验验证,采用基于 RANS 方程框架中的 Realizable $k-\epsilon$ 方程对计算域内湍流进行求解能够得到和试验一致的静压系数和静压梯度结果.使用包含 2 个拐角的计算模型,能够给出风洞结构对静压系数和静压梯度影响的结果.

(2) 无论是大喷口还是小喷口,收集口高度为 270 mm 时的静压系数和静压梯度均优于其他 2 种收集口高度,最接近零轴,变化幅度最小,试验段可用长度最长,对试验测量影响最小.

(3) 对于大喷口,随着收集口高度降低,收集口处静压系数和静压梯度不断下降.当收集口高度降低到 240 mm 时,试验段后部靠近收集口处的静压系数和静压梯度变为负值.对于小喷口,试验段后部靠近收集口处的静压系数和静压梯度均为正值.

参考文献:

- [1] EDWARD D, AMIR K, SAM M. The BMW AVZ wind tunnel center [C/CD]// Social Automotive Engineering. [S.l.];SAE, 2010-01-0118.
- [2] TADAKUMA K, SUGIYAMA T, MAEDA K, *et al.* Development of full-scale wind tunnel for enhancement of vehicle aerodynamic and aero-acoustic performance [C/CD]// Social Automotive Engineering. [S.l.];SAE, 2014-01-0598.
- [3] BLUMRICH R, WIDDECKE N, WIEDEMANN J, *et al.* New FKFS technology at the full-scale aeroacoustic wind tunnel of university of stuttgart [C/CD] // Social Automotive Engineering. [S.l.];SAE, 2015-01-1557.
- [4] TORTOSA N, SCHROECK D, NAGLE T, *et al.* General motors new reduced scale wind tunnel center. [C/CD]// Social Automotive Engineering. [S.l.];SAE, 2017-01-1534
- [5] WITTMEIER F. The recent upgrade of the model scale wind tunnel of university of stuttgart[C/CD]// Social Automotive Engineering. [S.l.];SAE, 2017-01-1527.
- [6] 国防科学技术工业委员会. 高速风洞和低速风洞流场品质规范;GJB 1179—1991 [S]. 北京:中国标准出版社,1992. Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Specification for flow quality of high and low speed wind tunnels;GJB 1179—1991 [S]. Beijing:China Standards Press, 1992.
- [7] MERCKER E, COOPER K, FISCHER O, *et al.* The influence of a horizontal pressure distribution on aerodynamic drag in open and closed wind tunnels [C/CD] // Social Automotive Engineering. [S.l.];SAE, 2005-01-0867.
- [8] MERCKER E, COOPER K R. A two-measurement correction for the effects of a pressure gradient on automotive, open-jet, wind tunnel measurements [C/CD] // Social Automotive Engineering. [S.l.];SAE, 2006-01-0568.
- [9] YANG Z, SCHENKEL M, GREGORY J F. Corrections for the pressure gradient effect on vehicle aerodynamic drag[C/CD]// Social Automotive Engineering. [S.l.];SAE, 2003-01-0935.
- [10] EDWARD D, SAM M, JOSEPH Y. Improving open jet wind tunnel axial pressure gradient[C/CD]// Progress in Vehicle Aerodynamic and Thermal Management. Stuttgart: FKFS, 2009.
- [11] DEUTENBACH R. Influence of plenum dimensions on drag measurements in 3/4 open jet automotive wind tunnels[C/CD] // Social Automotive Engineering. [S.l.];SAE, 951000.
- [12] 杜开颜,杨志刚,李启良. 流道引流对风洞试验段轴向静压因数的影响[J]. 计算机辅助工程,2016,25(3):40. DU Kaiyan, YANG Zhigang, LI Qiliang. Effects of re-injection from airline on axial static pressure factor of wind tunnel test section[J]. Computer Aided Engineering, 2016,25(3): 40.
- [13] 徐玉冬,杨志刚,李启良. 收集口形状和角度对汽车风洞试验段轴向静压因数的影响[J]. 计算机辅助工程,2014,23(4):12. XU Yudong, YANG Zhigang, LI Qiliang. Effect of collector shape and angle on axial static pressure factor of automotive wind tunnel test section [J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(4):12.
- [14] 李启良,郑志强,贾青,等. 两种改善汽车风洞轴向静压系数的方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(3):422. LI Qiliang, ZHENG Zhiqiang, JIA Qing, *et al.* Two methods to improve the axial static pressure coefficient of automotive[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(3):422.
- [15] 李启良,陈力,杨志刚,等. 不同扩散角下汽车风洞试验段轴向静压系数[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,42(8):1227. LI Qiliang, CHEN Li, YANG Zhigang, *et al.* Axial static pressure coefficients of automotive wind tunnel test section at different diffuser angles [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2014, 42(8): 1227.
- [16] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, *et al.* A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: model development and validation[J]. Computers and Fluids, 1995, 24(3):227.