

# 阻塞比对开口式风洞喷口风速测量方法的影响

贾 青<sup>1,2</sup>, 黄 磊<sup>1,2</sup>, 鞠树彬<sup>1,2</sup>, 杨志刚<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 同济大学 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; 3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

**摘要:** 以 1 : 15 的 3/4 开口回流式模型风洞为研究对象, 通过放置不同比例大小的 Ahmed body 模型, 采用试验和数值计算相结合的方法, 研究阻塞比对于喷口法和驻室法这两种喷口风速测量方法的影响。结果表明: 不同的阻塞比工况下, 虽然驻室法测量误差稍大于喷口法测量误差, 但驻室法对于修正系数的敏感度明显低于喷口法, 即驻室法可使用更少的修正系数修正更多的工况, 更易进行修正。

**关键词:** 风洞试验; 数值仿真; 阻塞比; 喷口法; 驻室法; 误差修正

**中图分类号:** U467.1

**文献标志码:** A

## Influence of Blockage Ratio on Nozzle Wind Speed Measurement Method in Open-Jet Wind Tunnel

JIA Qing<sup>1,2</sup>, HUANG Lei<sup>1,2</sup>, JU Shubin<sup>1,2</sup>, YANG Zhigang<sup>1,2,3</sup>

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Lab of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Beijing Aeronautical Science and Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

**Abstract:** In this paper, the 3/4 open-jet closed circuit model wind tunnel with a ratio of 1 : 15 was taken as the research object. By placing the Ahmed body model with different proportions, the combination of experiment and numerical simulation was conducted to study the influence of blockage ratio on nozzle wind speed measurement by using the nozzle method and the plenum method. The results indicated that, for different blockage ratios, the measurement error of the plenum method was slightly larger than that of the nozzle method, but the sensitivity of the plenum method to the correction coefficient was significantly lower than that of the nozzle method i. e., more working conditions could be corrected with fewer correction coefficient for plenum

method, which meant that the plenum method was easier to be corrected.

**Key words:** wind tunnel experiment; numerical simulation; blockage ratio; nozzle method; plenum method; error correction

汽车风洞作为汽车设计过程中必不可少的开发平台, 能够实现静止状态下, 模拟汽车处在高速运动状态的流场情况<sup>[1]</sup>, 得到汽车所受到的力、力矩等测量数据, 再通过数据处理得到气动力系数。气动力系数的计算需要以获得准确的喷口风速为前提, 因此喷口风速测量的准确性对于风洞试验数据的精度十分重要。开口式风洞的风速测量方法主要有喷口法和驻室法, 两种方法均是基于压差计算得到喷口风速。

关于风洞驻室对汽车风洞流动特性的影响很多学者进行了研究<sup>[2-4]</sup>。驻室法与喷口法由于选择的测点位置的不同, 受到喷口阻塞效应的影响也就不同。关于如何消除这些干扰以及怎样对测量结果进行修正国内外专家学者展开了一系列研究, 提出很多有效的修正方法, 在风洞的研究方法方面积累了很多经验。同济大学杨志刚教授在美国通用汽车公司工作期间已经对汽车风洞的阻塞以及修正进行了深入的研究<sup>[5-7]</sup>。庞加斌教授对风洞试验的影响因素的总结, 提到了阻塞效应和边界层效应问题的解决办法<sup>[8]</sup>。尽管有以上研究基础, 但是对于喷口法与驻室法的优劣性以及使用范围始终未展开系统的研究, 对于风速测点的选择也缺少理论分析。

本文拟从两个角度研究阻塞比对两种喷口风速测量方法精度的影响, 一方面为研究两种喷口测量方法对于阻塞比不同的车型在试验中测量精度的影响, 通过改变车体模型的大小来模拟不同车型的测

收稿日期: 2019-02-15

基金项目: 上海地面交通专业技术服务平台(19DZ2290400)

第一作者: 贾 青(1979—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为空气动力学。E-mail: qing.jia@sawtc.com

试;另一方面以常见车型尺寸为研究对象,通过改变车体到喷口的距离研究两种喷口测量方法受阻塞效应的影响.为了使研究具有通用性,本文选用后倾角为 25°的 Ahmed body 模型作为车辆模型.参考市面常见车型,分别选取阻塞比为 3.0%、5.6%、8.0%和 10.0%的 4 种比例模型,采用数值仿真和试验相结合的方法对喷口和驻室风速测量精度展开了研究.然后选择阻塞比为 10.0%的 Ahmed body 模型进行不同喷口距离的仿真计算与试验研究,充分研究不同阻塞比影响下两种喷口风速测量方法的精度.

1 数值计算

数值仿真计算是一种有效便利的辅助方法,根据流体力学的基本方程,在计算机上仿真模拟风洞试验过程,并显示模拟的结果<sup>[9-11]</sup>.首先基于上海地面交通工具风洞中心 1:15 模型风洞建立数值模型,选取收缩段、试验段、扩散段 3 个主要部分建立几何模型,同时为了防止计算域出口处产生回流,在原出口位置后面增加了延伸段,同时参照模型风洞,在试验段前端设置压力平衡口,来平衡内外大气压.风洞计算仿真所使用的简化数值计算域模型如图 1 所示,喷口出口截面尺寸为 434 mm×283 mm,驻室尺寸为 1 517 mm(长)×1 185 mm(宽)×818 mm(高).

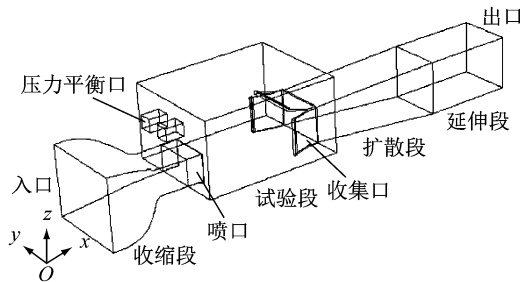


图 1 风洞计算仿真几何模型示意图

Fig.1 Schematic of geometric model of wind tunnel numerical simulation

综合考虑本次数值仿真模型的特点,选择四边形、六面体网格进行计算.为了避免近壁面处受到边界层效应的影响,在整个风洞壁面建立边界层网格,空风洞模型体网格总数约为 533 万.采用基于 RANS 方程框架中的可实现  $k-\epsilon$  两方程湍黏性传输模型和非平衡壁面函数对计算域内湍流进行求解.进、出口边界条件分别设为速度进口(velocity inlet)和出流(outflow)条件,压力平衡口为进风口(inlet vent)条件.

根据汽车风洞实际使用情况和模型风洞的气流稳定性,喷口的来流风速工况最大速度选择  $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最小速度选择  $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,速度梯度为  $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,共 7 个速度工况.具体工况设置如表 1 所示,入口与喷口之间为收缩段,收缩比例为 1:6,所以为了保证喷口速度,根据连续性方程在入口处设置相应的速度.计算先选用较为容易收敛的一阶迎风格式得到初值,后选用精度较高的二阶迎风格式计算,待残差收敛到  $10^{-5}$  以下,同时计算域中观测点的速度值不再变化时,认为计算收敛.

表 1 工况设置

Tab.1 Settings of working conditions

工况序号	喷口速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	入口速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	10	1.67
2	15	2.50
3	20	3.33
4	25	4.17
5	30	5.00
6	35	5.83
7	40	6.67

2 试验方法

2.1 工况设置

为了探究不同阻塞比对喷口法和驻室法测速的影响,就不同模型和同一模型不同位置两种情况进行试验,收集口角度选择 15°,试验工况共 49 种,如表 2 所示.为了保证试验的可重复性,相同喷口风速工况保持风机功率一致.在采集数据的过程中,为了确保试验数据具有统计意义,采样时间取 8 s,待数据稳定,无较大波动时,认为采集的数据有效.试验重复 3 次,取平均值作为最终结果.

表 2 模型风洞试验工况表

Tab.2 Test conditions of wind tunnel model

工况序号	模型阻塞比/%	模型前端与喷口截面的距离/mm	速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1~7	3.0	150	10~40
8~14	5.6	150	10~40
15~21	8.0	150	10~40
22~28	10.0	100	10~40
29~35	10.0	150	10~40
36~42	10.0	200	10~40
43~49	10.0	250	10~40

2.2 参考点风速测量

一般认为距离车前驻点 150 mm 处为真实来流风速,因此选取喷口出口截面中线距离地面 50 mm 的点的风速作为参考风速与喷口法和驻室法算得的

风速进行比较. 表 3 为利用 PIV (particle image velocimetry, 粒子图像测速法) 技术测量 49 种工况

表 3 利用 PIV 测量技术所得各工况参考点风速

Tab. 3 Wind speed of reference point for each working condition obtained by PIV

模型阻塞比/%	模型前端与喷口截面的距离/mm	参考点风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )						
		10	15	20	25	30	35	40
3.0	150	10.045	15.002	19.727	25.174	30.650	35.072	40.543
5.6	150	10.030	14.960	19.621	25.012	29.310	34.239	39.237
8.0	150	9.659	14.799	19.411	24.976	28.969	33.816	38.560
10.0	100	9.114	13.812	18.283	22.734	26.975	31.225	36.156
10.0	150	9.386	14.496	19.101	24.998	28.854	33.314	38.103
10.0	200	10.410	14.728	19.852	24.550	29.390	34.560	39.584
10.0	250	10.250	14.986	20.067	25.176	30.066	35.203	40.365

### 2.3 测点布置

喷口法的定义是通过测量收缩段入口端与喷口端内壁之间的静压差作为动压计算喷口速度;而驻室法的定义是通过收缩段入口端与喷口端外壁之间的静压差作为动压计算喷口速度. 首先设置收缩段入口位置的测压点  $L$ , 喷口法和驻室法在这个位置的测压点是重合的. 两种方法的区别是测压点  $S_1$ 、 $S_2$  位置的不同, 如图 2 所示. 其中, 喷口法在收缩段出口处的喷口内侧设置一组静压孔, 测点压力记作  $p_{S_1}$ ; 而驻室法是将收缩段出口处的测压点安置于喷口外侧驻室内速度近乎为零的位置, 测点压力记作  $p_{S_2}$ . 再根据公式(3)得到风洞来流风速.

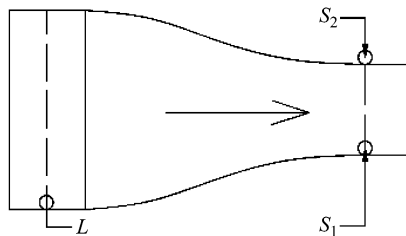


图 2 喷口法与驻室法测压位置示意图

Fig. 2 Pressure measurement positions of nozzle method and plenum method

根据伯努利方程

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = C \quad (1)$$

式中:  $p$  为流体中某点的压强, Pa;  $v$  为流体该点的流速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $g$  为重力加速度,  $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $h$  为该点所在高度, m;  $C$  为一个常量.

有

$$p_L + \frac{1}{2}\rho v_L^2 = p_S + \frac{1}{2}\rho v_S^2 \quad (2)$$

式中:  $p_L$  为收缩段入口测点压力, Pa;  $p_S$  为收缩段出

口测点压力, Pa;  $v_L$  为收缩段入口测点流速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $v_S$  为收缩段出口测点流速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

实验室常温常压, 室内无明显环境风速, 根据模型风洞收缩比有  $v_L = (1/6) v_S$ ,  $\rho$  为空气密度, 取  $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 于是化简得

$$v_S = 1.26281\sqrt{p_L - p_S} \quad (3)$$

根据整车风洞实际测点位置, 按同比例缩放后, 试验选用和数值仿真模型位置一致的测点位置. 收缩段入口测点压力  $p_L$  在稳定段与收缩段相接位置前 100 mm 处. 喷口法喷口测点压力  $p_{S_1}$  在距离喷口出口截面 50 mm 处, 驻室法喷口测点压力  $p_{S_2}$  在驻室内背风处, 距试验段墙壁 50 mm 的位置. 考虑到试验过程中流场压力分布的不均匀性, 为了获得更准确的壁面压力, 在所选截面位置的四周壁面都进行布点. 每个面上均匀选取 5~7 个测点.

### 3 结果分析

将测量得到的压力值代入公式(3), 得到喷口法和驻室法的测量风速  $v_1$ 、 $v_2$ . 然后对空风洞进行标定, 利用公式(4)计算喷口法和驻室法每种风速工况各对应的一个修正系数, 对所得一系列修正系数运用软件 MATLAB 拟合出空风洞下两种方法修正系数关于参考点风速的函数.

$$k = v_\infty / \sqrt{p_L - p_S} \quad (4)$$

式中:  $k$  为修正系数;  $v_\infty$  为参考点风速.

对  $v_1$ 、 $v_2$  进行修正, 得到经空风洞修正后的喷口法和驻室法风速  $v'_1$ 、 $v'_2$ , 将其与参考点风速  $v$  作差得到两种方法的测量误差  $\delta'_1$ 、 $\delta'_2$ . 试验存在喷口风速、阻塞比和 Ahmed body 前端面距喷口截面距离 3 个变量: ①控制 Ahmed body 阻塞比为 10.0%, 其前端面距喷口截面距离为 150 mm, 得到两种测量方法

受喷口风速影响的变化曲线,如图 3a 所示;②控制 Ahmed body 前端面距喷口距离为 150 mm,喷口风速为  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,得到两种测量方法受阻塞比影响的变化曲线,如图 3b 所示;③控制 Ahmed body 阻塞比为 10%,喷口风速为  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,得到两种测量方法受距离喷口截面距离影响的变化曲线,如图 3c 所示。

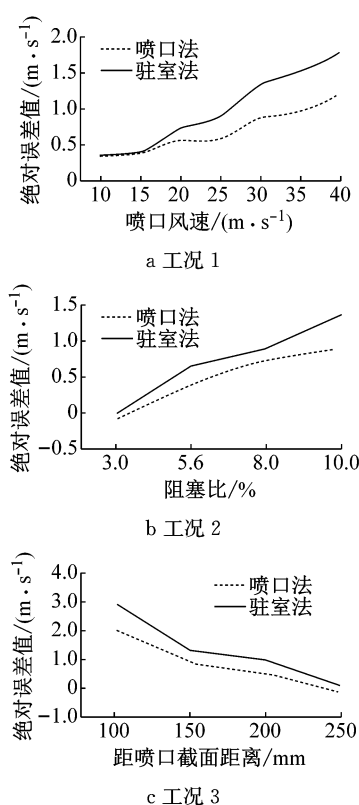


图 3 喷口法与驻室法测量绝对误差值随不同变量变化曲线图

Fig.3 Changes of measuring absolute errors of nozzle method and plenum method as different variants

分析可得:① 无论什么情况,通过驻室法测量得到的风速误差值均大于喷口法;② 其他变量固定时,误差值会随喷口风速的增加而增加;③ 对于一定的喷口风速,误差值会随 Ahmed body 阻塞比的增加或模型前端面距喷口截面距离的减小而增加。

### 3.1 二次修正后喷口法与驻室法误差比较

空风洞修正是初步修正,它一定程度上修正了空风洞自身对测量结果误差的影响。为了再进一步减小误差,需进行第二次修正。仿照空风洞修正方法,运用 MATLAB 拟合出有模型情况下两种方法修正系数关于参考点风速的函数。此次修正主要减小不同阻塞比对测量结果造成的误差。

首先,对阻塞比为 10.0%、距喷口出口截面 150 mm 的 Ahmed body 进行二次修正,得到一系列修正

系数;然后用这些修正系数对阻塞比为 3.0%、5.6% 和 8.0% 的结果进行修正。对比同一系列修正系数修正后的不同阻塞比测试结果误差值的变化量。对两种喷口测量方法进行对比,探究喷口法和驻室法测量误差对阻塞比影响的敏感程度,不太敏感的喷口风速测量方法更容易得到修正,其修正系数适用范围更大。

经二次修正后得到喷口法和驻室法风速  $v_1''$ 、 $v_2''$ , 将其与参考点风速  $v$  作差得到二次修正后两种方法的测量误差  $\delta_1''$ 、 $\delta_2''$ , 即

$$\delta_1'' = v_1'' - v \quad (5)$$

$$\delta_2'' = v_2'' - v \quad (6)$$

然后将两次修正后的误差相减,得到误差减小量  $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$

$$\Delta\delta_1 = \delta_1' - \delta_1'' \quad (7)$$

$$\Delta\delta_2 = \delta_2' - \delta_2'' \quad (8)$$

于是,每种阻塞比工况都得到了喷口法和驻室法经修正后的误差减小量,最后将阻塞比  $B_r$  为 3.0%、5.6% 和 8.0% 工况下的误差减小量  $\Delta\delta_{1-B_r}$ 、 $\Delta\delta_{2-B_r}$  分别与阻塞比为 10.0% 的误差减小量  $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$  作差,得到如图 4 所示的曲线图。

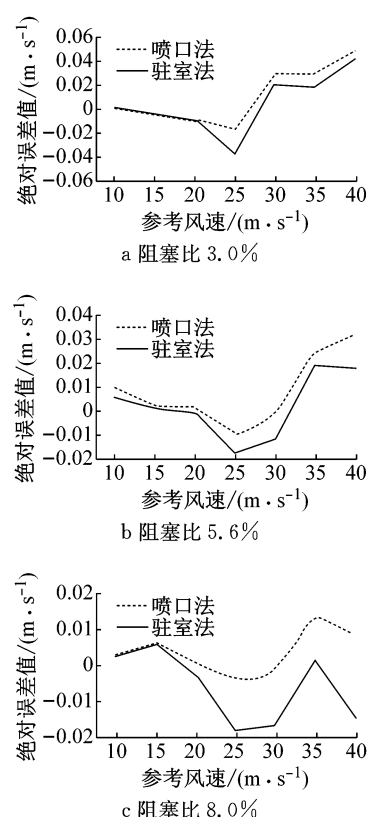


图 4 不同阻塞比与 10.0% 阻塞比工况的  $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$  差值曲线图

Fig.4 Difference of  $\Delta\delta_1$  and  $\Delta\delta_2$  at different blockage ratios and 10% blockage ratio

可以看出,3 种阻塞比工况下驻室法的计算差值都在喷口法以下.这说明驻室法经二次修正后对于不同阻塞比工况的改变,其误差修正程度没有喷口法改变得剧烈,也即驻室法测量误差对工况改变与喷口法相比更不敏感,更容易得到修正.

类似地,对阻塞比为 10.0%、距喷口出口截面 100 mm 的 Ahmed body 进行二次修正,得到一系列修正系数;然后利用这些修正系数同样对距喷口出口截面 150 mm、200 mm 和 250 mm 的测试工况进行修正.并根据同一系列修正系数对不同距离工况进行修正后的误差值变化量,考察两种方法对工况改变的敏感性问题.如上述方法,得到了如图 5 所示的曲线图.可以看出,3 种距离工况下驻室法的计算差值也都在喷口法以下.这也从另一角度说明,与喷口法测量误差相比,驻室法测量误差对工况改变更不敏感,更容易得到修正.

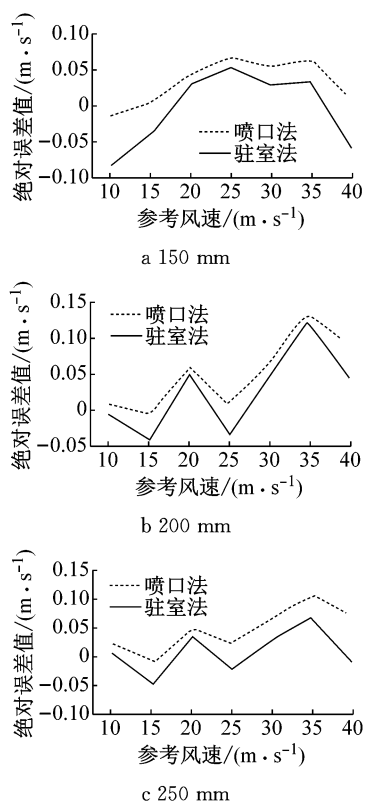


图 5 不同距离与 100 mm 距离工况的  $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$  差值曲线图

Fig.5 Difference of  $\Delta\delta_1$  and  $\Delta\delta_2$  at different distances and 100 mm distance

### 3.2 CFD(计算流体动力学)仿真结果分析

以 Ahmed body 距离喷口出口截面 150 mm、喷口风速为  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的不同阻塞比工况仿真结果为例,得到不同阻塞比  $y$  轴中截面压力云图如图 6 所示.两种喷口风速测量方法收缩段的测点位置一致,

所以驻室内静压的分布影响着两种测量方法的优劣性.喷口法测点位置在喷口内壁,而驻室法测点位置在喷口外壁.两个位置的静压值相差不大,但从图中可以看出,试验段上方静压值都整体小于核心射流区,因此不同阻塞比下驻室法得到的收缩段与喷口的压差都大于喷口法,测量得到的喷口风速也都大于喷口法,导致驻室法误差均大于喷口法误差. Ahmed body 的存在对流场的反作用会影响上游的压力场分布,对流动内的压力产生影响,喷口法的两组测点都在流动内,均受到了影响,增加或减小的趋势一致,两种误差在一定程度上抵消,使得结果看似更小,但两组参数的同时变化,使得最后结果的可控性变差.驻室法的测点则相对稳定,只有收缩段入口的测点受到影响,且距离测试模型较远,影响较小,

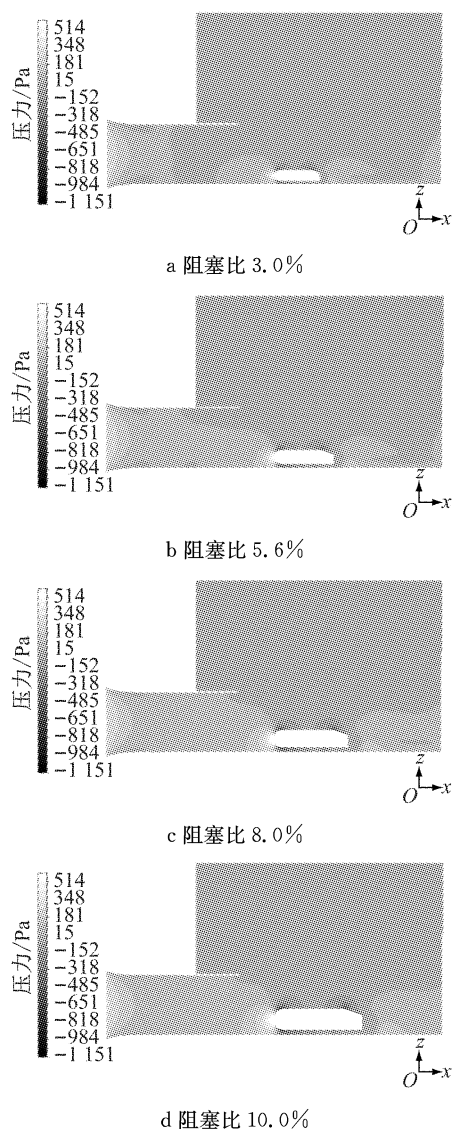


图 6 不同阻塞比  $y$  轴中截面压力云图

Fig.6 Pressure contour on  $y$ -axis middle cross-section at different blockage ratios

使得驻室法对不同的测试模型变化不敏感,这样的影响控制起来相对容易。

需要说明的是,由于计算压差时,喷口入口处的速度很小,将静压近似看做总压,忽略动压。随着风速的增大, $p_L$  与真实总压偏差也增大,因此测量误差值有上升趋势。

图 7~9 分别为  $x$  轴喷口法测点、驻室法测点和收缩段入口测点位置截面的压力云图。

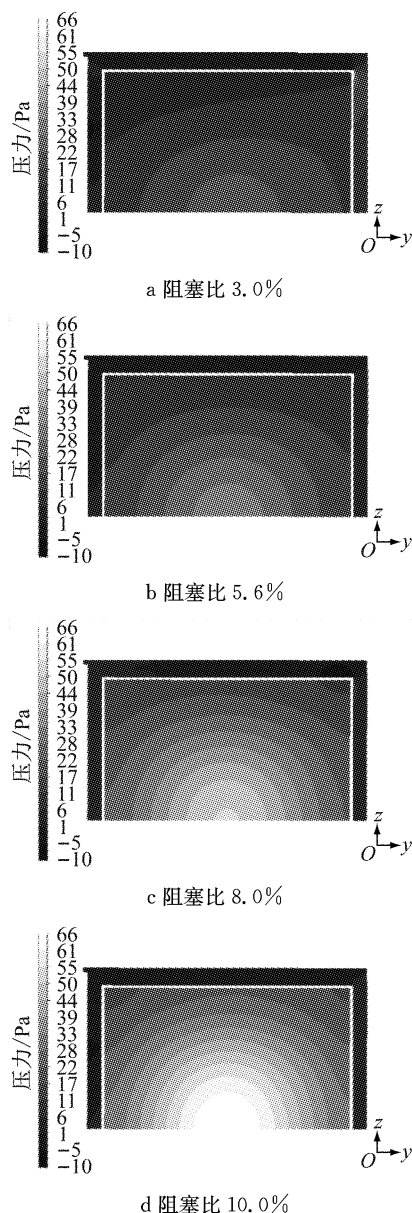


图 7 不同阻塞比  $x$  轴喷口法测点截面压力云图

Fig. 7 Pressure contour on cross-section of  $x$ -axis nozzle method measurement points at different blockage ratios

从图 7 可以看出,由于模型的存在对上游流场尤其是近地面流场的影响,喷口法测点截面的下方以及两边靠下部分压力值很高,但是此处压力波动

都比较大,很不稳定。这是喷口法和驻室法的主要差异。由于阻塞比的不同,模型对上游流场的反作用程度也是不同的,随着阻塞比的增大,这种对近地面流场的影响也在增大,正压值和影响区域都在变大,图 7a 的测点压力都比较小,而到图 7d 测点压力已增大到 60 Pa 左右。从图 6a 到 d,也可以看出这种影响区域的扩大和压力的增加。

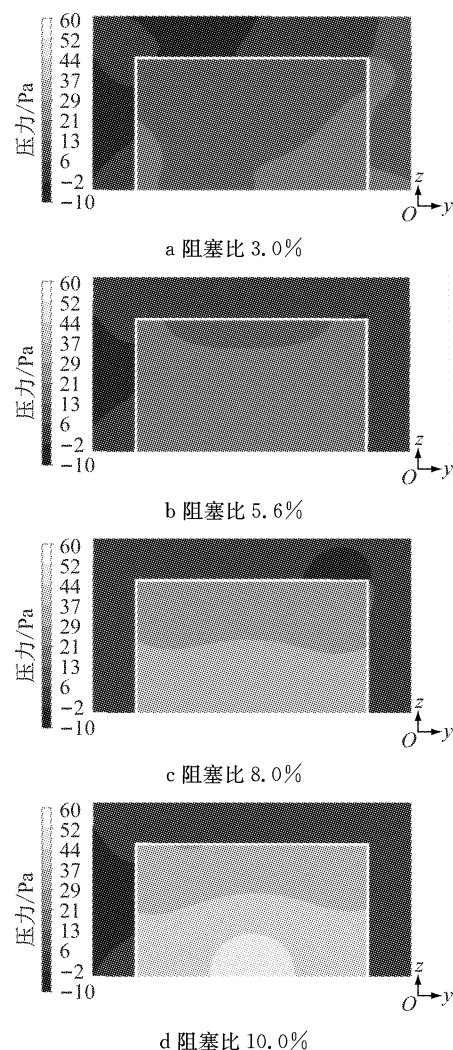


图 8 不同阻塞比  $x$  轴驻室法测点截面压力云图

Fig. 8 Pressure contour on cross-section of  $x$ -axis plenum method measurement points at different blockage ratios

而从图 8 可以看出,驻室法测点截面的压力比较稳定,对工况改变不是特别敏感,都在 0 Pa 左右,普遍较低,阻塞比的增大对压力变化改变不大。

收缩段入口测点截面位置也受模型对上游流场的反作用。从图 9 可以看出,压力有所回升,但由于距离增加,模型对上游流场的反作用影响变小,压力变化并没有喷口法测点截面的剧烈,不同阻塞比情况下,测点压力均维持在一个高压水平,增幅不大。

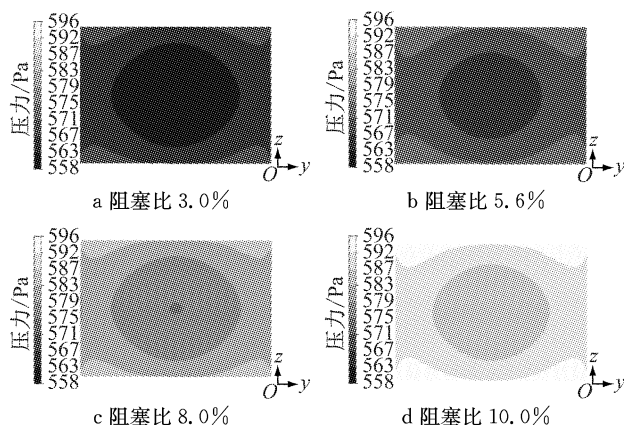


图 9 不同阻塞比  $x$  轴收缩段测点截面压力云图

Fig.9 Pressure contour on cross-section of  $x$ -axis contraction section measurement points at different blockage ratios

模型存在对上游流场的反作用使得参考点风速与计算风速都有偏差,而参考点位置比喷口法和驻室法测点位置更靠近模型,受影响更大,且随阻塞比的增加,这种受影响程度的增加幅度也会大于测点截面,导致测量误差增大。

## 4 结论

(1) 当其他变量固定时,喷口法和驻室法测量误差值都会随喷口风速的增加而增加。这是由于计算压差时,喷口入口处的速度很小,将静压近似看做总压,忽略动压。随着风速的增大,收缩段入口测点压力与真实总压偏差也增大,因此测量误差值有上升趋势。

(2) 在不同阻塞比、不同距离、不同风速的各种工况中,驻室法测量得到的风速误差均高于喷口法误差。这是由于 Ahmed body 的存在对流场的反作用会影响上游的压力场分布,对流动道内的压力产生影响,喷口法两个测量截面的测点都在流动道中,所受影响在一定程度上互相抵消,导致压差减小,所以误差也相应减小。

(3) 经二次修正后,驻室法和喷口法误差都得到进一步的降低,但是对于不同工况两种方法降低程度也不一样。其中,驻室法对于不同工况的改变更不敏感,其误差更容易得到修正。这是由于驻室法在喷口处的测点压力相对稳定,只有收缩段入口的测点会受到影响,且距离测试模型较远,影响较小,使

得驻室法对不同的测试模型变化不敏感,这样的影响控制起来相对容易。

(4) 基于本文研究结论,目前开口式风洞内多采用驻室法来确定喷口风速,一方面对于单变量的影响更容易进行修正,另一方面由于驻室法喷口处气流对下游干扰的不敏感性,同一修正系数的适用范围更广,可以更高效地对测试结果进行修正。有效提高了风洞测试的准确性和测试效率。

## 参考文献:

- [1] FENTON J. Advances in vehicle design [M]. London: Professional Engineering Publishing, 1999.
- [2] KUENSTNER R, DEUTENBACH K R, VAGT J D. Measurement of reference dynamic pressure in open-Jet automotive wind tunnels[R]. Detroit:SAE, 1992.
- [3] COGOTTI A, BUCHHEIM R, GARRONE A, *et al.* Comparison tests between some full-scale european automotive wind tunnels-pininfarina reference car[R]. Detroit:SAE, 1980.
- [4] WICKERN G, SCHWARTEKOPP B. Correction of nozzle gradient effects in open Jet wind tunnels[C]//SAE Technical Paper Series. Detroit:SAE, 2004;314-334.
- [5] YANG Z, SCHENKEL M, FADLER G J. Corrections of the pressure gradient effects on vehicle aerodynamic drag[R]. Detroit:SAE, 2003.
- [6] YANG Z, SCHENKEL M. Assessment of closed-wall wind tunnel blockage using CFD[R]. Detroit:SAE, 2004.
- [7] YANG Z, NASTOV A, SCHENKEL M. Further assessment of closed-wall wind tunnel blockage using CFD [R]. Detroit: SAE, 2005.
- [8] 庞加斌, 刘晓晖, 陈力, 等. 汽车风洞试验中的雷诺数、阻塞和边界层效应问题综述[J]. 汽车工程, 2009, 31(7):609.  
PANG Jiabin, LIU Xiaohui, CHEN Li, *et al.* A review on Reynolds number blockage and boundary layer effects in automotive wind tunnel tests[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(7):609.
- [9] 贾青, 杨志刚. 不同收集口角度下模型风洞试验段流场的数值模拟与试验研究[J]. 试验流体力学, 2007, 12(1):93.  
JIA Qing, YANG Zhigang. Simulation and test research for a model wind tunnel test section at different collector angles[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2007, 12(1):93.
- [10] 郭鸿志. 传输过程数值模拟[M]. 北京:冶金工业出版社, 1998.  
GUO Hongzhi. Numerical simulation of transmission process [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998.
- [11] 约翰 D·安德森. 计算流体力学基础及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.  
ANDERSON J D. Computational fluid dynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.