

扩散段洞壁位置度偏差对汽车风洞流场影响的 试验研究

张惠林*, 赵峰, 易卫, 耿子海#, 孔婷婷, 朱琳

比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2023年12月5日; 录用日期: 2024年1月2日; 发布日期: 2024年1月10日

摘要

开展汽车风洞扩散段洞壁位置度偏差对流场影响的试验研究, 是为了确认汽车风洞工程建设过程中混凝土部段内洞壁位置度偏差对试验段流场的影响情况, 并为汽车风洞建设过程中混凝土施工工艺条件把控标准提供依据。试验在某实验室气动声学风洞开展, 将前后缘5°倒角的软质平板模型安装在风洞动力段下游扩散段单侧壁以模拟风洞此部段的位置度偏差。在空风洞基准状态与风洞内洞壁安装位置度偏差带两种试验工况下, 分别研究了位置度偏差对速度均匀性、湍流度、气流偏角、风洞背景噪声和标模阻力测量的影响。试验结果表明: 扩散段位置度偏差对试验段中央区域的速度均匀性、风洞背景噪声和气流偏角的影响较小, 但对湍流度以及标模阻力测量有明显的影响。因此, 汽车风洞的混凝土结构施工工艺必须严格执行行业标准以确保风洞流场品质及测试结果的可靠性。

关键词

汽车风洞, 试验段流场, 位置度偏差

Experimental Study on the Influence of Diffusion-Section Wall Position Deviation on the Flow Field of Automobile Wind Tunnel

Huilin Zhang*, Feng Zhao, Wei Yi, Zihai Geng#, Tingting Kong, Lin Zhu

BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Dec. 5th, 2023; accepted: Jan. 2nd, 2024; published: Jan. 10th, 2024

*第一作者。

#通信作者。

文章引用: 张惠林, 赵峰, 易卫, 耿子海, 孔婷婷, 朱琳. 扩散段洞壁位置度偏差对汽车风洞流场影响的试验研究[J]. 应用物理, 2024, 14(1): 10-18. DOI: 10.12677/app.2024.141002

Abstract

The experimental study on the influence of the wall position deviation of the diffusion section of the automobile wind tunnel on the flow field is carried out to confirm the influence of the wall position deviation of the concrete section on the flow field of the test section in the construction process of the automobile wind tunnel, and to provide a basis for the control standard of the concrete construction process conditions in the construction process of the automobile wind tunnel. The experiment was carried out in a laboratory aeroacoustic wind tunnel. The soft flat model with a 5-degree chamfer on the front and rear edges was installed on the single side wall of the downstream diffusion section of the power section of the wind tunnel to simulate the position deviation of this section of the wind tunnel. Under the two test conditions of the empty wind tunnel reference state and the wall installation position deviation zone in the wind tunnel, the influence of the position deviation on the velocity uniformity, turbulence, flow deflection angle, wind tunnel background noise and mold resistance measurement was studied respectively. The test results show that the diffusion section position deviation has little influence on the velocity uniformity, wind tunnel background noise and flow deflection angle of the central area of the test section, but has a significant influence on the turbulence and the mold resistance measurement. Therefore, the construction process of the concrete structure of the automobile wind tunnel must be strictly implemented in accordance with the industry standards to ensure the quality of the wind tunnel flow field and the reliability of the test results.

Keywords

Automobile Wind Tunnel, Flow Field of Test Section, Position Deviation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

汽车风洞建设项目是一项复杂的系统工程，其最终的流场品质不仅取决于设计，而且还受加工建造质量的影响[1]。特别是全尺寸气动声学风洞，混凝土结构占比较大，而混凝土建筑行业标准[2]普遍低于钢结构加工精度的标准。混凝土施工过程中产生的误差(如洞壁位置度偏差)如何影响试验段流场品质的相关研究很少，而该问题直接决定着对施工工艺条件的要求和施工标准的把控。研究该问题的核心价值在于为风洞设计和土建施工技术条件合理化平台，避免过度约束造成不必要的工程浪费。

追溯汽车风洞发展历史，美国、德国、日本、加拿大等发达国家起步早、研究成果系统且完整，但是关于汽车风洞高品质流场决定因素的文献较少[3]。为此，本文针对风洞建设中关注的工程问题开展试验研究。

本文结合风洞内洞壁存在位置度偏差的物理条件，初步判定该问题与湍流新理论中描述的工程场景吻合[4]，即洞壁位置度偏差的本质是改变了风洞内洞壁的壁面条件，进而导致风洞的背景湍流度发生变化[5]。在此判断的基础上通过风洞试验对这个问题开展了系统研究和验证，包括洞壁位置度偏差可能影响的流场品质参数，如速度分布、流动方向、背景噪声等。当发现位置度偏差对流场品质产生的影响达到一定程度时又进一步验证了其其对风洞阻力测量的影响。

2. 试验设计

试验在某实验室气动声学风洞中开展, 该风洞的气动轮廓与汽车气动声学风洞在气动构型上属于同一类别, 两种风洞的气动问题具有可类比性。由于扩散段内表面具有曲率, 因此试验中将软质平板模型粘贴在风洞扩散段单侧洞壁模拟位置度偏差。在空风洞基准状态和内洞壁有位置度偏差带两种试验工况下开展以下研究: (1) 过热线测量轴向速度和湍流度[6]; (2) 通过 PIV 测量试验段中央区域二维速度分布并换算成该区域的气流方向场[7]; (3) 通过传声器测量风洞背景噪声[8]; (4) 通过天平测量风洞标模阻力[9] [10]。

2.1. 试验风洞与模型

气动声学风洞开口试验段喷口截面宽 1.8 m、高 1.4 m、长 5 m, 稳定内装有 6 层阻尼网。风洞试验段最大风速 80 m/s, 最低稳定风速 8 m/s, 湍流度优于 0.5%, 空风洞流场指标见表 1。

Table 1. Flow field quality of the wind tunnel

表 1. 风洞开口试验段流场指标

项目	参数
尺寸(m)	1.8 × 1.4
最大空风洞风速(m/s)	80
最小稳定风速(m/s)	8
模型区气流偏角(°)	≤0.5
模型区动压场系数 μ_i	≤0.5%
模型区动压稳定性 η	≤0.005
模型区轴向静压梯度	≤0.005
模型区中心湍流度 ε	≤0.5%
开口试验段背景噪声	75 dBA (风速 70 m/s)
消声室	截止频率 200 Hz

试验使用的平板模型长 2000 mm、宽 1000 mm、厚度 20 mm, 材料具有一定韧性、强度较好, 平板前后缘倒角 5°。平板模型剖面示意图及该模型在风洞扩散段内安装如图 1 所示。



(a) 平板模型剖面示意图



(b) 平板模型在风洞内安装

Figure 1. The installation of flat plate model in diffusion section

图 1. 安装在风洞扩散段内的平板模型

2.2. 试验内容与方法

试验内容分成四个部分，分别是洞壁位置度偏差带对试验段轴向速度均匀性与湍流度、试验段气流方向场、风洞背景噪声以及对风洞标模阻力的影响。针对上述四部分试验内容，分别采用热线测湍流度技术、PIV 测速度矢量场技术、传声器测噪声技术、天平测力技术，得到不同试验条件下的速度分布、湍流度、速度矢量场、背景噪声、标模阻力等试验结果，并进行对比分析。

(1) 位置度偏差对湍流度和速度均匀性影响测量

研究选择通过试验段模型区中心(距离喷口 2 m)的横截面作为测量截面,测量点位置布置如图 2 所示,图中三角形标识点为试验段测量截面中心点,7 个圆形标识点为速度及湍流度测量点。

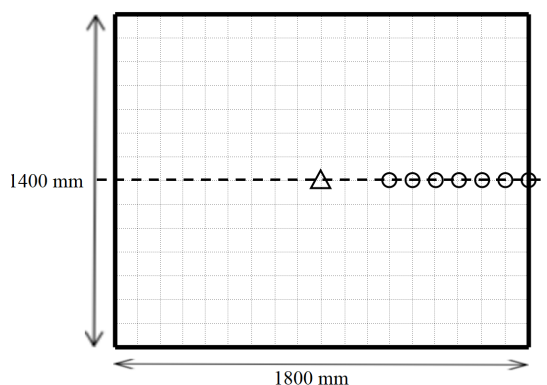


Figure 2. Schematic diagram of measurement section of wind tunnel test section

图 2. 风洞试验段测量截面示意图

试验使用 DANTEC Streamline CTA 四通道热线风速仪。该设备包括信号调理主机、探头标定器、测控处计算机、三维移测架、移测架驱动控制机、探头和电缆附件等。设备最高采样频率 1 MHz, 速度测量范围速度 0~300 m/s, 测量精度 0.1 m/s。试验使用采样频率 20 kHz, 采样时间 5 s。使用 DANTEC 配套软件, 结合试验前的校准曲线对风速测量结果完成计算, 风速结果取平均值; 湍流度的数据处理中引入了经验模式分解(EMD)自适应滤波和 HHT 时频谱分析方法剔除背景噪声。

(2) 位置度偏差对气流偏角影响测量

试验使用 PIV 系统来实现速度矢量场测量。该系统主要由以下部件构成: 100 mJ/532nm Litron 激光器、Photron 4M 相机、同步控制器等。测量位置选择试验段中央区域水平截面, 测量区域为 200 mm × 150 mm。试验获取的粒子图像采用德国 PIVTEC 公司开发的 PIVview2C 软件进行分析处理, 处理过程采用 FFT 标准相关算法(standard FFT correlation)和 3 点高斯峰值算法(3-point Gauss fit), 计算过程中采用二次相关(multiple correlation)和移动窗口提高分析精度。

(3) 位置度偏差对背景噪声影响测量

声学指标是衡量气动声学风洞的重要参数, 因此本项研究中也测量了位置度偏差对背景噪声的影响。试验采用丹麦进口 GRAS 传声器, 型号为 46AE1/2"CCP, 配套 NI 数据采集设备和数据处理软件。传声器安装在风洞试验段轴线标高所在平面, 轴向位置在试验段转盘中心处, 距离试验段轴线的横向距离为 2.8 m。

(4) 位置度偏差对阻力系数影响测量

位置度偏差带对试验段流场的影响只是一个中间量, 为进一步验证其对最终试验测量结果的影响, 研究中采用标模在不同状态下进行测力试验对比。试验使用六分量杆式应变天平, 阻力元量程 300 N,

精度 0.03%。模型姿态角测试范围 0~10°。

3. 试验结果与分析

3.1. 位置度偏差带对试验段速度均匀性与湍流度的影响

空风洞与有位置度偏差带状态下的速度分布结果表明位置度偏差带对速度分布基本没有影响，结果展示如图 3 所示。

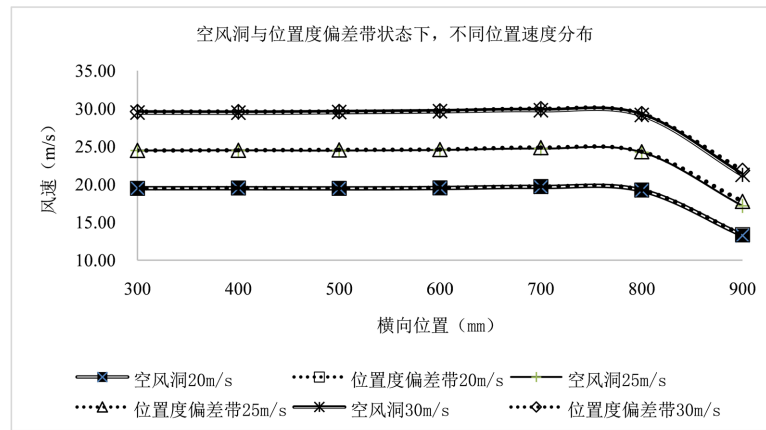


Figure 3. The effect of position deviation on velocity distribution
图 3. 位置度偏差对速度分布影响

图 4 所展示的是试验段风速 30 m/s 时，空风洞基准状态与不同厚度偏差带状态下的湍流度分布。从试验结果可以看出洞壁位置度偏差带对试验段湍流度产生明显影响。在靠近试验段中央位置的测量点，厚度为 20 mm 的位置度偏差带湍流度比空风洞增大 25%。为了进一步研究偏置带对湍流度的影响，增加了一组厚度为 10 mm 的位置度偏差带(如文中未特别注明偏差带厚度，均为 20 mm 厚偏差带)试验工况，结果表明在靠近试验段中央位置，10 mm 位置度偏差带状态下的湍流度比空风洞增大 21%，但其他位置变化很小。结合表 2 所展示的结果，原因可能是：越靠近试验段中心湍流度的基数越低，对扰动就越敏感，相对变化量也越大。

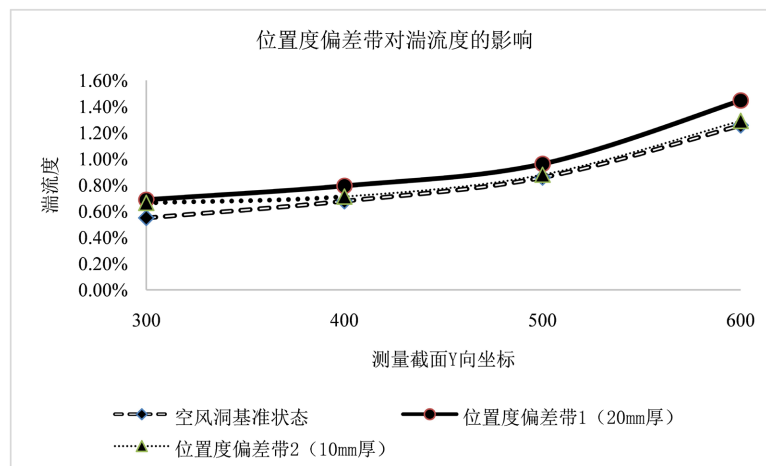


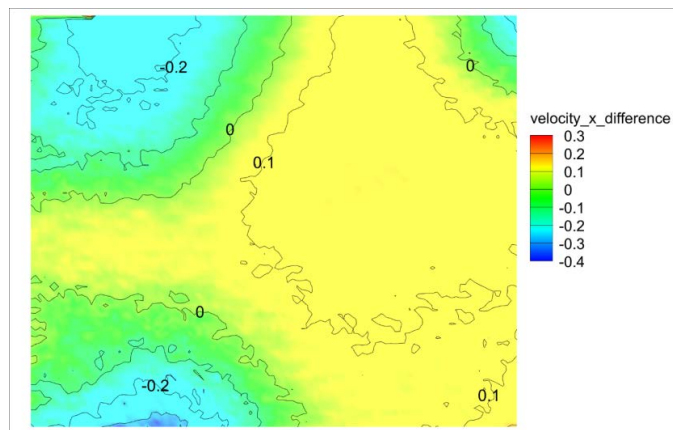
Figure 4. The effect of position deviation bands with different thickness on turbulence intensity (flow velocity is 30 m/s)
图 4. 不同偏差带厚度对湍流度影响(风速 30 m/s)

Table 2. Comparison of turbulence under different thickness deviation bands
表 2. 空风洞与不同厚度偏差带下的湍流度对比(风速 30m/s)

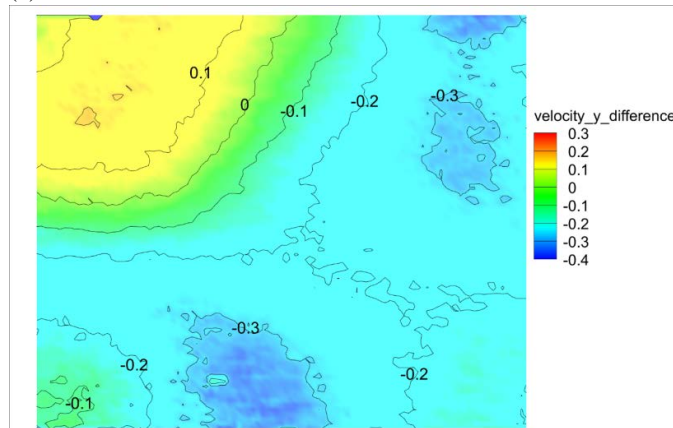
位置(mm)	空风洞	偏差带 1 (20 mm 厚)		偏差带 2 (10 mm 厚)	
	湍流度	湍流度	变化量	湍流度	变化量
300	0.549%	0.688%	25%	0.664%	21%
400	0.677%	0.794%	17%	0.712%	5%
500	0.858%	0.962%	12%	0.879%	2%
600	1.256%	1.446%	15%	1.29%	3%
700	2.34%	2.467%	5%	2.388%	2%
800	7.818%	8.565%	10%	7.84%	0.3%

3.2. 位置度偏差带对试验段气流方向场的影响

图 5 所展示的是来流 30 m/s 的试验状态下, 空风洞基准状态与有位置度偏差带的试验工况下速度矢量场的 PIV 试验结果。从试验结果判定沿气流流向的速度变化很小, 这与一维热线测量的速度分布结果吻合。而两种状态下横向速度差值大于轴向速度差值, 可依据横向与轴向的速度分布估算横向气流偏角变化量约为 0.1° , 对照空风洞基准状态流场校测结果的 0.5° , 可以认为洞壁位置度偏差带对试验测试区域的气流方向影响较小。



(a) 两种工况下轴向速度差值云图



(b) 两种工况下横向速度差值云图

Figure 5. PIV test results of velocity vector field in the central region of the test section
图 5. 试验段中央区域速度矢量场 PIV 试验结果

3.3. 位置度偏差带对试验段背景噪声的影响

表 3 给出了空风洞与不同位置度偏差带的试验条件下风洞背景噪声试验结果。结果表明：在相同风速状态下，不同位置度偏差带与空风洞的背景噪声差异在 0.3 dB 之内，因此位置度偏差带对风洞背景噪声的影响基本可以忽略。

Table 3. The effect of position deviation band on background noise of wind tunnel

表 3. 位置度偏差带对风洞背景噪声的影响

风速(m/s)	空风洞(dBA)	位置度偏差带(dBA)
20	47.8	48.0
25	54.0	53.8
30	58.6	58.9

3.4. 位置度偏差带对标模阻力的影响

图 6 展示了来流风速 30 m/s，空风洞基准状态与有位置度偏差带两种工况下的风洞标模阻力系数结果。结果表明：风洞内洞壁存在位置度偏差相比于空风洞基准状态，标模阻力系数增大，在 0°、5°、10° 迎角时分别增大 5 counts、5 counts 和 6 counts (重复性误差 < 0.5 count)。



Figure 6. Difference of drag coefficient of standard model under different test conditions

图 6. 不同试验条件下标模阻力系数差量

3.5. 试验结果综合分析

基于湍流新理论，在风洞动力系统下游扩散段单侧壁布置洞壁位置度偏差带改变了汽车风洞内洞壁条件，必然会导致壁湍流的生成，湍流产生过程见图 7。此部段壁湍流充分发展后随主流流过第三拐角段、第四拐角段，经过稳定段的蜂窝器、阻尼网后得到了衰减。通过对比空风洞与位置度偏差带两种状态下的流场脉动速度功率谱也可以发现，位置度偏差带主要改变的是中高频的湍流脉动强度，特别是在一些固定的频带极大地耦合放大了原来的湍流强度，如图 8 所示。壁面条件改变的直接影响是试验段湍流度的变化，间接影响是试验模型的转换位置。在相同试验风速状态下，因模型区背景湍流度不同从而导致模型表面层流与湍流浸润面积不同，从而导致模型阻力的变化。

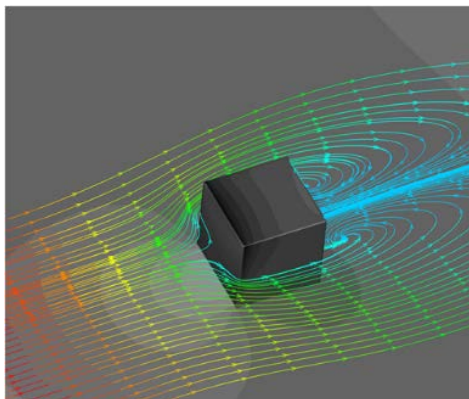


Figure 7. The turbulent structure around a rough element
图 7. 粗糙元周围湍流结构

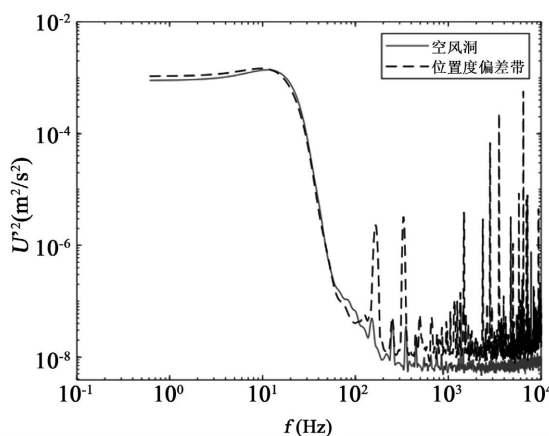


Figure 8. Pulsating velocity power spectrum under different test conditions
图 8. 不同试验条件下的流场脉动速度功率谱

4. 结论

本文通过试验研究了位置度偏差对试验段流场的影响, 结果表明位置度偏差带对试验段中心区域速度分布、气流偏角以及风洞背景噪声的影响可以忽略, 但会明显增加试验段的湍流度, 最大增量约 25%, 湍流度的改变又间接的影响了标模阻力测量结果, 导致标模阻力测量结果偏大, 增量约为 5 counts。综上, 汽车风洞的洞壁位置度偏差问题值得关注, 在工程建设过程中需要严格执行行业相关标准。

参考文献

- [1] Bauwessen, N. (2013) DIN 18202 Tolerances in Building Construction.
- [2] Nagle, P., Brooker, T., Bari, G., Walter, J., *et al.* (2023) The Ford Rolling Road Wind Tunnel Facility. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, **5**, 2138-2159. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0654>
- [3] Best, S., Bari, G., Brooker, T., Flynt, G., Walter, J., *et al.* (2023) The Honda Automotive Laboratory of Ohio Wind Tunnel. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, **5**, 2116-2137. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0656>
- [4] 翟庆良. 湍流新理论及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020: 10-24.
- [5] 刘政崇, 等. 高低速风洞气动与结构设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 30-56.
- [6] 杜钰锋. 热线探针校准方法研究及改进[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(11): 2224-2231.

- [7] 王勇, 陈鹏, 黄奔, 等. 基于 PIV 速度场测量的压力梯度计算[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1491-1504.
- [8] 张军, 陈鹏, 雷红胜, 等. 航空声学风洞 3/4 开口试验平台地板对远场噪声测量的影响[J]. 航空学报, 2016, 37(8): 2574-2582. <https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2016.0184>
- [9] 战培国. 风洞天平校准标准研究[J]. 航空科学技术, 2012, 135(3): 24-26.
- [10] AIAA (2020) Calibration and Use of Internal Strain-Gage Balances with Application to Wind Tunnel Testing (AIAA R-091A-2020).