

紧凑型缩尺模型风洞流道设计及其仿真验证

庞加斌^{1,2}, 李田田^{1,2}, 刘晓晖¹, 彭 为², 王建新¹

(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 汽车学院, 上海, 201804)

摘要: 汽车风洞设计中, 地面积不足是常见的工程难题, 因此为了符合风洞喷口和试验段长度设计标准, 不得不采用紧凑型流道设计来减小风洞占地面积, 以保证流场品质和风洞能量比等风洞核心技术指标不降低。应用计算流体力学仿真方法, 分析评估被压缩的扩散段内流动分离及二次流风险, 优化转角导流片尺寸和间距, 确保转角 4 出口的流场均匀性和湍流度指标最优。提出汽车风洞工程经济性指标风洞占地面积比, 对比基础设计方案, 紧凑型流道设计风洞占地面积减少近 30%。

关键词: 汽车模型风洞; 紧凑型流道设计; 流场品质; 能量比; 计算流体力学; 风洞占地面积系数

中图分类号: U467.5

文献标志码: A

Compact Airline Design of an Automotive Scaled Model Wind Tunnel And its Computational Fluid Dynamics Validation

PANG Jiabin^{1,2}, LI Tiantian^{1,2}, LIU Xiaohui¹, PENG Wei², WANG Jiaxin¹

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center of Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Automotive Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Inadequate land availability is a common engineering issue for automotive wind tunnel planning. To ensure no compromise of the design criteria for nozzle area and test section length, a compact airline design has to be adapted for smaller land occupancy. Meanwhile, the core wind tunnel specifications such as flow qualities and energy ratio shall also be guaranteed with no concession. Using computational fluid dynamics (CFD) simulation, the study has performed risk assessment regarding flow separation and secondary flows in shorten diffusers. Dimensions and spacing distance of turning vanes has been optimized as well for best flow uniformity and turbulence level at the exit of corner 4. Wind tunnel land occupancy ratio is proposed as the economic specification

of wind tunnel engineering. Compared with the basic design, the compact airline gives approximately 30% saving of land occupancy.

Key words: automotive model wind tunnel; compact airline design; flow qualities; wind tunnel energy ratio; computational fluid dynamics (CFD); wind tunnel land occupancy ratio

汽车风洞是整车空气动力性能研发的关键实验设施, 汽车电动化中的整车平台创新和能量反馈智控技术进一步强化了空气动力性能的重要性^[1]。欧盟和中国最新汽车排放测试法规已将风洞法纳入汽车行驶阻力测量体系^[2-3]。鉴于汽车行业对风洞测试数据准确性和重复精度的苛刻要求, 汽车风洞设计要求历来受严格的标准控制^[4], 并且新建风洞核心技术指标不断创新提高。

汽车空气动力参数测试可用缩比模型、全尺寸模型或整车完成。由于气动声学整车风洞(AAWT)能直接测量实车, 数据更可信, 因此近年来新建或升级的模型风洞引入与整车风洞一致的道路模拟技术^[5-6], 加上精细化模型设计和制造技术的进步, 如 3D 打印快速成型等技术的应用, 使得模型风洞同样可以提供与整车风洞一致的气动测试结果。因此, 汽车模型风洞不仅用于基础研究和造型设计选型, 也可用于局部设计优化和冷却气流设计优化^[7-9]。

同济大学于 2009 年建成了中国首座专业汽车风洞中心, 包括两座风洞的 3 个专业方向实验能力, 如图 1 和表 1 所示。随着我国汽车自主行业技术进步, 自主研发风洞实验需求持续增长, 尤其是汽车电动化智能化大趋势下, 对汽车空气动力学基础科研和技术创新要求更高。为此, 上海智能型新能源汽车研发与转化功能型平台在同济大学风洞中心内建设汽车模型风洞实验室, 构建高标准汽车空气动力

收稿日期: 2022-10-25

第一作者: 庞加斌(1970—), 男, 正高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为车身与空气动力学。E-mail: pang@tongji.edu.cn

学自主开发和科学研究风洞群体系。

缩尺模型风洞(SMWT)由同济风洞中心自主设计集成,项目最大挑战是工程限制条件:整个风洞安装在现风洞中心室内。同时喷口试验段尺寸和核

心技术指标不可降低,因此需要采用相对激进紧凑型布局。为降低项目技术风险,设计团队利用计算流体动力学仿真技术,对关键部段设计进行验证分析和优化。

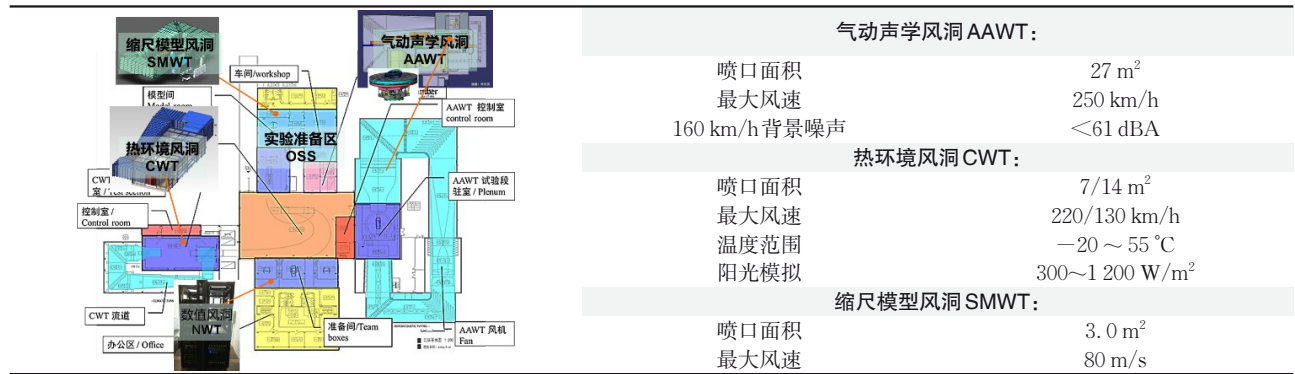


图1 同济大学汽车风洞中心功能平面图及关键技术参数

Fig.1 Functional plan and key technical parameters of Tongji-SAWTC

1 设计要求

汽车缩尺模型风洞用途广泛、应用灵活的空气动力学研发实验设施,以汽车模型为测试对象,但可轻松满足各种基础科研模型、工业气动模型、室外结构物抗风和航空飞行器模型实验要求。

1.1 关键尺寸参数

模型风洞为典型3/4开口回流式风洞,装备先进的路面运动模拟系统和高精度六分力天平,标准缩尺比例1/3。为了与气动声学风洞建立最佳一致性,喷口和试验段尺寸和核心技术指标应尽量相似。喷口和试验段关键尺寸参数见表1。

表1 缩尺模型风洞关键尺寸参数及AAWT对比

Tab.1 Comparison of key dimensions between SMWT and AAWT

名称	符号	单位	SMWT	AAWT(对比)
喷口面积	A_N	m ²	≥ 3.0	27.6
收缩比	CR	/	≥ 6	6
试验段(射流)长度	L_{jet}	m	5	15
转盘中心位置	X_C	m	1.6	4.7
收集口面积	A_C	m ²	5.2	47.0

1.2 核心技术指标

缩尺模型风洞绝对尺寸更小,为保证雷诺数相似,须更高的风速;同时,模型的局部流动雷诺数和边界层效应对湍流度或均匀性等流场品质更敏感,试验段的流场品质要求应比整车风洞更高。设计指标要求如表2,其中AAWT的流场指标已优于SAE J2071标准^[9]。

表2 缩尺模型风洞流场品质指标及AAWT对比

Tab.2 Comparison of flow field qualities between SMWT and AAWT

名称	符号	单位	SMWT	AAWT(对比)
最大风速	U_{max}	m/s	80	70
风速稳定性	$\delta U(t)$	m/s	0.10	0.15
气流偏角	α, β	(°)	< 0.2	< 0.5
湍流度	$I_{u,v,w}$	%	≤ 0.2	< 0.5
气流均匀性	$\Delta U/U$	%	≤ ±0.25	< 0.5

试验段的流场品质主要由整流装置(蜂窝器/阻尼网)和收缩段喷口控制,但转角4出口的流场品质输入越好,进入试验段的气流品质就越好。相比AAWT,模型风洞流道长度小得多,湍流及不均匀性的自然空间衰减距离很小,所以模型风洞对流道内流场品质要求必须更高,有必要从风机下游开始优化转角3和4的导流片设计,要求转角4出口的气流均匀性、偏角和湍流度等初级指标足够好。

1.3 工程建设条件

风洞工程通常受两个关键条件限制:占地面积和电力需求。在喷口和试验段关键尺寸、最大风速和流场品质要求确定后,工程条件限制越宽松,风洞设计就越容易;然而,占地面积大或宽松的风洞设计意味着更高建设成本和更多动力需求。

风洞的动力需求可用“能量比”^[10]度量,用ER表示,等于流过风洞实验段的气流动能与风机输入气动功率之比。风洞能量比等于总压力损失系统的倒数,是重要的风洞经济性指标。

$$ER = \frac{p_d \cdot Q}{p_{loss} \cdot Q} = \frac{p_d}{p_{loss}} = \frac{1}{\xi_{OA}} \quad (1)$$

式中: p_d 为试验段参考动压, p_{loss} 为风洞总压力损失, Q 为风量, ζ_{0A} 为风洞总压力损失系数。

典型的空气动力整车或模型风洞的能量比在 1.8~2.0,对应总压力损失系数 0.5~0.55。

风洞的能量比越高,风机额定功率越小,整个风洞的动力经济型越优;类似地引入用地经济性指标,引入风洞占地面积比,用 land area ratio 的缩写 LAR 表示,等于风洞喷口面积与整个流道外轮廓占地面积之比:

$$LAR = A_N / A_{land} \tag{2}$$

其中: A_N 为喷口面积,为关键设计尺寸参数, A_{land} 表示风洞流道外轮廓面积,等于风洞总长乘以总宽,如图 2 所示,为 AAWT 的外轮廓,尺寸参数代入式(2)得 AAWT 风洞占地面积比为 0.67%。

根据立项要求,缩尺模型风洞须在风洞中心室内建设,限定面积 25.4 m×12.4 m=314.96 m²。喷口面积 $A_N=3.0\text{ m}^2$,模型风洞占地面积比 $LAR=0.95\%$,用地经济性高出 AAWT 30%,这对风洞设计提出了挑战,即流道的设计必须非常紧凑。

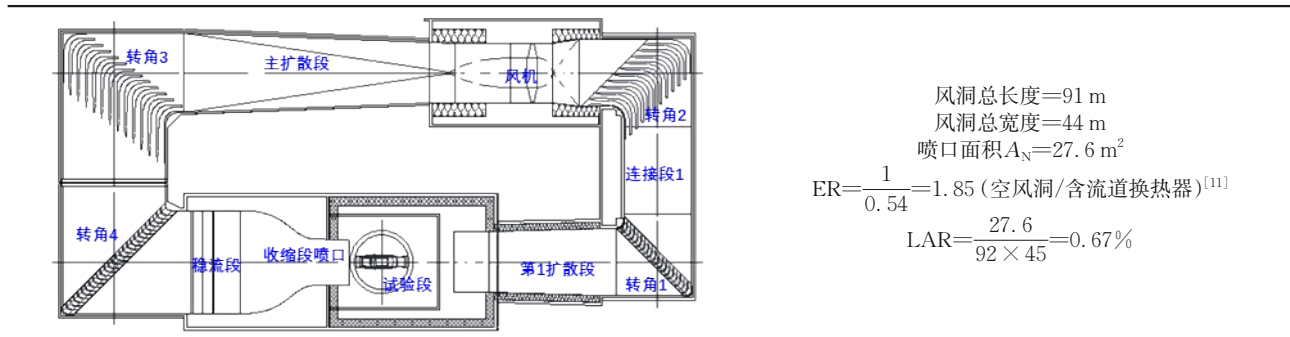


图2 AAWT外轮廓平面图及占地面积比
Fig.2 Exterior profile plan and land occupancy ratio of AAWT

2 紧凑型流道设计

2.1 不可缩减尺寸

为保证模型风洞与AAWT之间的功能相似,试验段关键尺寸参数不可缩减;为获得更优的流场品质指标,转角4至试验段的稳流段和收缩喷口尺寸,只宜增加,不可缩减。当最大风量确定后,鉴于3/4开口风洞的总体压力损失系数波动范围并不大,风机的选型和尺寸基本由当前风机制造领域的通用设计确定;为风机效率更优,应适当选择同型号中直径较大的设计,降低额定转速,风机噪声更小。

当流道关键位置的横截面积确定后,转角的尺寸基本确定;导流片设计和弦长变化引起的转角整体尺寸变化有限,因此也是不可缩减的流道部段。

2.2 缩短扩散段

紧凑型流道设计主要通过缩短扩散段实现,在 3.1 所述部段尺寸不可缩减的要求下,这意味着扩散角增大,那么扩散段内是否会出现流动分离,恶化流场品质,增大压力损失,成为风洞设计的关键点。

为满足模型风洞占地面积要求,只能压缩第 1 扩散段和主扩散段的长度。以 AAWT 尺寸的 1/3 为基础,对比模型风洞压缩设计如表 3,其中第 1 扩

散段的扩散角增大近 1 倍,主扩散段的扩散角增大 70%。最后,模型风洞的设计布局总尺寸确定为 25.3 m×11.8 m,满足了用地面积不超过 25.4 m×12.4 m 的限制要求。

表3 模型风洞第1扩散段和AAWT的1/3对比
Tab.3 Comparison of the first diffuser between SMWT and 1/3 AAWT

名称	第1扩散段		主扩散段	
	1/3-AAWT	SMWT	1/3-AAWT	SMWT
进口高度/m	1.81	1.80	/	/
进口宽度/m	2.90	2.90	/	/
进口水力直径/m	2.23	2.22	2.83	3.1
出口高度/m	2.56	2.50	3.77	3.77
出口宽度/m	3.20	3.20	3.77	4.00
出口水力直径/m	2.84	2.81	3.77	3.60
扩散段长度/m	6.10	3.10	12.91	8.68
出口—进口面积比	1.56	1.53	2.07	1.67
等效扩散角/(°)	5.78	10.8	5.66	6.20
长细比(L/D)	2.10	1.10	5.20	3.96

根据文献^[10]风洞扩散段的扩散角应不超过 5°,如此模型风洞的扩散段设计超出理想的标准,需要评估是否有流动分离风险,尤其是对二维平面扩散段;然而,对于圆形横截面或高宽比近似等于 1 的三维扩散段,基于直径或水力直径的扩散角无流动分离标准可高达 16°(半扩散角 8°)^[11],据此推断,模型

风洞采用缩短扩散段来实现紧凑型流道设计可行;为保证设计可靠,采用计算流体动力学(CFD)分析验证确实没有流动分离的风险。

3 CFD分析验证

细致的CFD分析不仅能够为研究提供丰富的流场数据,而且能够为工程设计直接贡献准确可靠的结果,对于风洞流道设计,CFD分析观察局部流

动图像,验证流动是否稳定无分离,更可以提供任何截面的速度分布、湍流度和气流偏角等流场品质信息,支撑设计优化。

3.1 第1扩散段分析

按照1/3的AAWT第1扩散段进行缩比,为提高仿真计算的准确性和收敛性,对进口和出口分别延长了1m和3m,所得扩散段如图3(a)所示。目前设计阶段的模型风洞结构(带相同的入口和出口延长)如图3(b)所示。

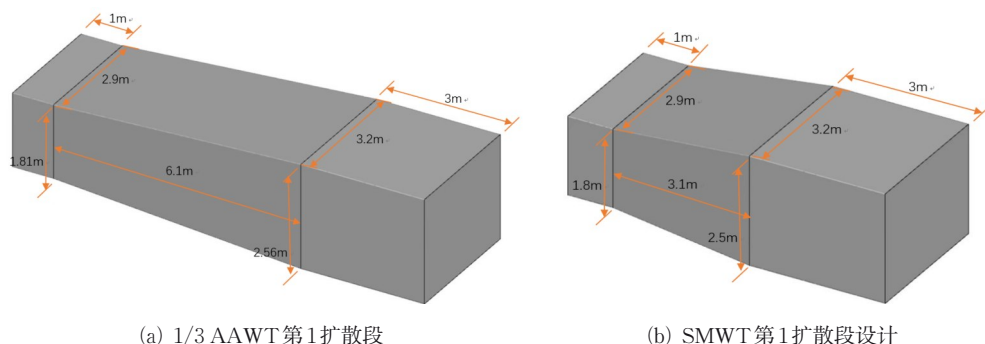


图3 第1扩散段CFD仿真分析计算域对比图

Fig.3 Comparison of the first diffuser CFD domain between SMWT and 1/3 AAWT

CFD仿真的边界条件采用扩散段入口为速度入口,来流速度48 m/s,扩散段出口为压力出口,背压为标准大气压,其它均为壁面边界。模型壁面表面网格为0.01 m,边界层网格总共6层,第1层距离壁面为0.000 5 m。湍流模型采用可实现性 $k-\epsilon$ 模型,近壁处采用全 y^+ 壁面函数处理。仿真结果如图4所示,由图明显可见虽然模型风洞第1扩散段被缩短,但并未出现边界层分离或二次流。

3.2 主扩散段分析

同上方法,对风机后方主扩散段进行CFD仿真分析对比。图5所示为1/3 AAWT主扩散段与缩尺模型风洞主扩散段的尺寸对比。仿真结果见图6,由图同样可见虽然模型风洞主扩散段被缩短,但并未出现边界层分离或二次流;缩短后的主扩散段出口截面静压系数总体降低,且不均匀性增大,不过截面分布结构基本相同。

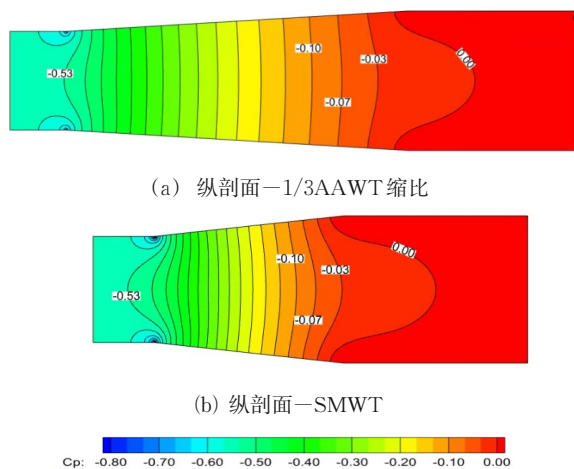


图4 第1扩散段中心纵剖面和出口横截面压力系数云图
Fig.4 Pressure coefficient cloud map of the first diffuser center section and outlet cross section

4 模型风洞流场品质及压力损失计算

4.1 流场品质

风洞流场品质主要是看喷口出口面和试验段的速度均匀性、湍流度、气流偏角和轴向静压梯度这些参数。其中均匀性和湍流度首先取决于从风机开始到转角4出口的流场品质,然后通过稳流舱内的蜂窝器和阻尼网改善,最后收缩段进一步提高流场品质参数;如果转角导流片数量足够,气流偏角更多受控于流道对称性和制作安装误差;试验段轴向静压梯度由收集口设计决定,与上游流道没有关系。因此,与风洞设计直接相关的流场品质参数主要是速度均匀性和湍流度两项。

用CFD仿真分析评估,如图7所示建立自风机

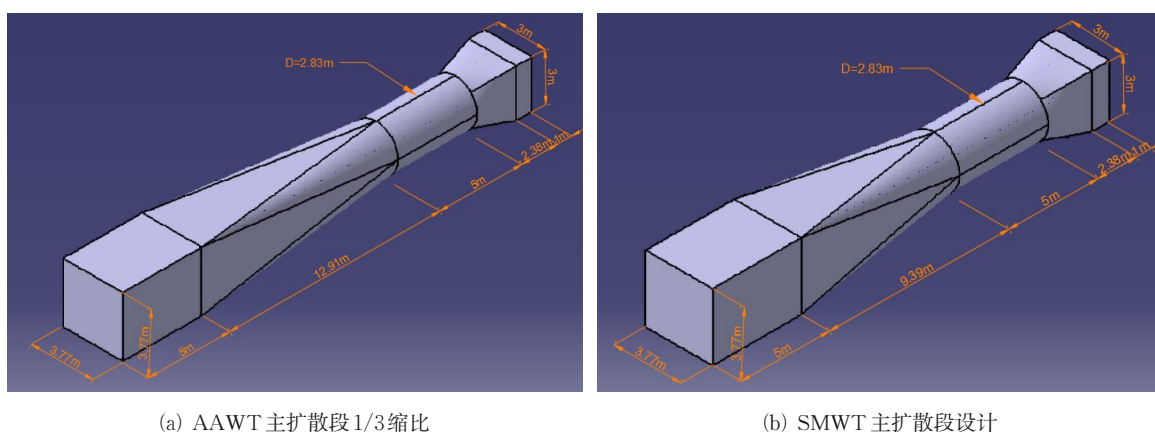


图5 主扩散段CFD仿真分析计算域对比图

Fig.5 Comparison of the main diffuser CFD domain between SMWT and 1/3 AAWT

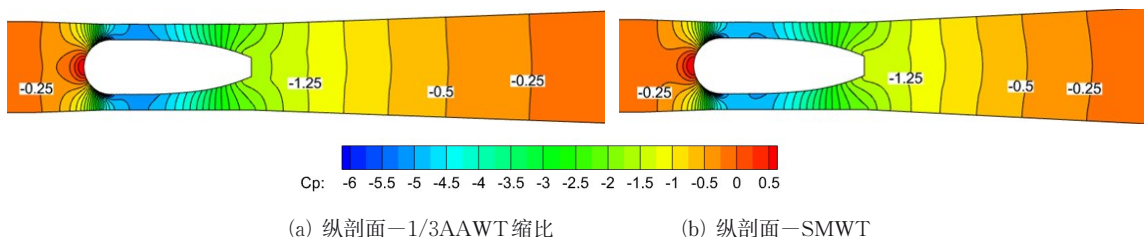


图6 主扩散段中心纵截面压力等值线图

Fig.6 Pressure coefficient contour map of the main diffuser center longitudinal section

段到转角4的完整模型。其中:风机模拟采用多重参考系MRF模型,转角3为宽度比为1.28的扩散拐角设计,转角4进出口截面相等;考虑不增加制造成本与压力损失,导流片均采用圆弧加直段形式。

CFD仿真计算转角4出口的速度不均匀性为

18%,湍流度为9.1%;与文献[11]同样以CFD计算的AAWT同位置数据(速度不均匀性15%,湍流度12%)基本吻合。如模型风洞设计为2层18目不锈钢细丝阻尼网(AAWT仅1层16目网),预计流场品质不低于设计指标要求。

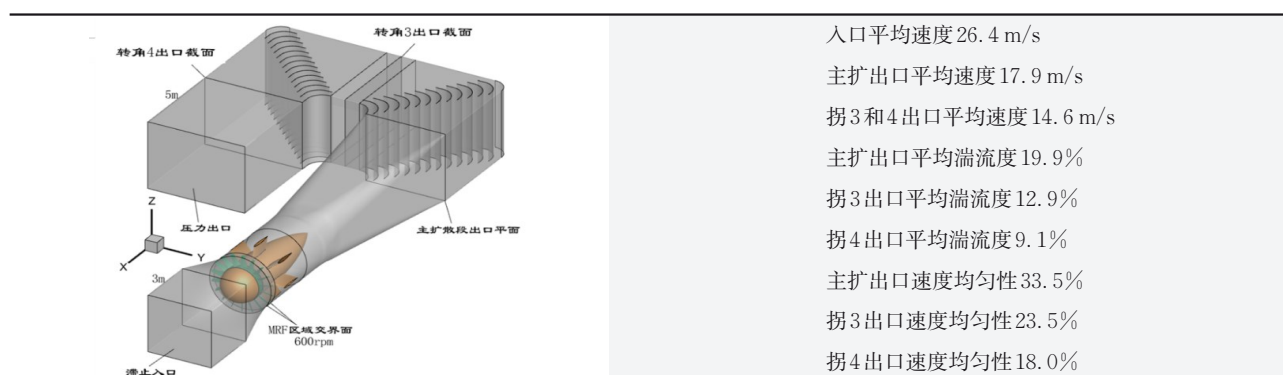


图7 模型风洞风机段到转角4出口的仿真模型及流场均匀性和湍流度结果

Fig.7 SMWT CFD domain from fan section to the fourth corner exit and the results of flow field homogeneity and turbulence intensity

4.2 压力损失

参考文献[12],基于上述模型风洞设计进行全风洞压力损失计算,结果如图8所示。空风洞总压力损失系数为0.49,能量比为2.04;有1/3模型

($C_d \times A = 0.28 \times 2.2 = 0.616$)总压力损失系数为0.52,能量比为1.92。

这里能量比指标高于AAWT的原因在于:模型风洞没有流道内散热器,且采用片式而不是消声导

流片;尽管缩短的扩散段阻力损失相对略有提高,但总的能量损失系数略微减小。

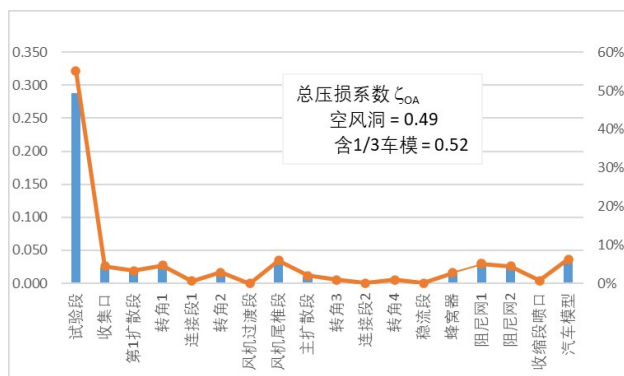


图8 模型风洞各段压力损失系数和总压损失系数

Fig.8 Pressure loss coefficient and total pressure loss coefficient of SMWT each section

5 结语

汽车风洞设计首先考虑保证试验段流场品质指标的气动原则,然而用地面积和结构成本也应当是风洞设计兼顾平衡的因素,尤其是受室内安装空间限制的缩尺模型风洞,必须实现风洞核心指标(喷口面积、试验段长度、流场品质和风机功率)不变的紧凑化模型风洞流道设计方案。

同济大学风洞中心基于已有的整车气动声学风洞,在项目空间苛刻限制条件下,以压缩第1扩散段和风机后主扩散短长度的方式,完成了紧凑型1/3缩尺模型风洞流道设计;经CFD仿真分析对比,缩短设计扩散段没有流动分离或二次流,压力梯度恢复完整,对流场品质指标的影响可控。通过增加1层阻尼网、省去流道换热器、采用低阻力片式转角导流片组合方案,全风洞总压力损失不超过原型整车风洞,风洞能量比达1.92。

有必要提示的是:紧凑型流道和片式转角导流片要求更高的制作和安装精度,以避免产生气流攻角从而降低流场品质指标。最后,上述计算结果还

需要在风洞建成后,通过实测数据进行确认和验证。

参考文献:

- [1] SCHUETZ T. Aerodynamics of road vehicles[M]. 5th ed. [S. l.]: SAE International, 2016.
- [2] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. 摩托车污染物排放限值及测量方法(中国第四阶段): GB 14622—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Environmental Protection, General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine. Limits and measurement methods for emissions of pollutants from motorcycles (CHINA IV): GB 14622—2016 [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.
- [3] Worldwide harmonized light vehicles test procedure: COMMISSION REGULATION (EU) 2017/1151 [S]. [S. l.]: Official Journal of the European Union, 2017.
- [4] Aerodynamic testing of road vehicles—Testing methods and procedures: SAE J 2084 [S]. [S. l.]: SURFACE VEHICLE INFORMATION REPORT, SAE International, 2016.
- [5] DUELL E G, KHARAZI A, MULLER S, et al. The BMW AVZ wind tunnel center [R]. [S. l.]: SAE Technical Paper 2010-01-0118, SAE International, 2010.
- [6] WITTMEIER F. The recent upgrade of the model scale wind tunnel of university of stuttgart [R]. [S. l.]: SAE Technical Paper 2017-01-1527, SAE International, 2017.
- [7] McKILLEN J, WALTER J, GESLIN M. The Honda R&D Americas scale model wind tunnel [R]. [S. l.]: SAE Technical Paper 2012-01-0301, SAE International, 2012.
- [8] 尹章顺,陈彩龙,王夫亮. 泛亚汽车缩比模型风洞性能与气动实验[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(5): 924.
YIN Z, CHEN C L, WANG F L. PATAC reduced scale wind tunnel performance and aerodynamic test [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(5): 924.
- [9] TORTOSA N. Paul nagle and tyler brooker. general motors full scale wind tunnel upgrade [R]. [S. l.]: SAE Technical Paper 2020-01-0687, SAE International, 2020.
- [10] BARLOW J B. Low-speed wind tunnel testing[M]. 3th ed. [S. l.]: John Wiley & Sons Inc, 1999.
- [11] Wallman S. Design report of aawt of tongji automotive wind tunnel center (No. 0506) [R]. [S. l.]: Wallner Brand IngenieurbGmbH, 2005.
- [12] Handbook hydraulic resistances