

# 全尺寸汽车空气动力学风洞相关性及修正研究

补涵, 王庆洋, 黄滔, 朱习加

(中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

**摘要:** 全尺寸汽车空气动力学风洞是汽车空气动力学性能重要的研究平台与开发工具。但风洞间测试结果普遍存在差异, 这对气动性能的研究与分析造成了一定的困难, 因此有必要开展风洞间的横向相关性和修正研究, 提高风洞测试结果的统一性和一致性。分别对德国和中国的两座全尺寸汽车风洞进行实车风洞测试, 开展风洞相关性及修正研究。研究表明, 对于同一工况, 不同风洞间的测试结果存在一定差异, 但不同工况与基础工况间差异变化趋势一致, 大小相似, 不同风洞间的测试结果能建立较好的相关关系, 形成相关性线性函数。通过空气阻力系数  $C_D$  修正方法, 可以减小风洞间由结构尺寸、流场参数导致的系统性误差, 修正后的风洞间空气阻力系数  $C_D$  测试结果差异降低了近 60%。

**关键词:** 全尺寸汽车风洞; 风洞相关性; 空气阻力系数修正; 风洞系统性误差

中图分类号: V211.74+7 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2022.03.04

## Study on Correlation and Correction for Full-Scale Automotive Wind Tunnels

BU Han, WANG Qingyang, HUANG Tao, ZHU Xijia

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

**Abstract:** The full-scale automotive aerodynamic wind tunnel is an important research platform and development tool for the aerodynamic performance test of vehicles. However, the differences in wind tunnels lead to different test results and difficulties in research and analysis of aerodynamic performance. Therefore, it is necessary to carry out correlational research and correction methods for wind tunnels to improve the uniformity and consistency of wind tunnel test results. In this paper, the correlational studies and correction methods were performed for the two full-scale automotive wind tunnels in Germany and China where production vehicles were tested. The results show there are certain differences in the wind tunnel test results for the same configuration. However, the variation trend and magnitudes are in close agreements for different configurations when compared with baseline. A good correlation can be found between the two wind tunnel test results. The systematic error caused by the different structure size and flow field parameters of the wind tunnels can be reduced by  $C_D$  coefficient correction, and the difference in  $C_D$  coefficient can be reduced by nearly 60% after correction.

**Keywords:** full-size automotive aerodynamic wind tunnel; wind tunnel correlation; aerodynamic drag coefficient correction; wind tunnel systematic error

收稿日期: 2021-12-31 改稿日期: 2022-01-13

基金项目: 第六届(2020-2022年度)中国科协青年人才托举工程项目(YESS20200219)

参考文献引用格式:

补涵, 王庆洋, 黄滔, 等. 全尺寸汽车空气动力学风洞相关性及修正研究[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(3): 244-253.

BU Han, WANG Qingyang, HUANG Tao, et al. Study on Correlation and Correction for Full-Scale Automotive Wind Tunnels[J].

Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(3): 244-253. (in Chinese)



近年来,随着国内汽车产业的蓬勃发展以及自主研发水平的不断提高,汽车空气动力学性能取得了长足进步。汽车风洞作为空气动力学性能研究的关键设备,在汽车开发过程中占据了举足轻重的地位。国内外各大主机厂和机构纷纷投入巨资建造、改进汽车风洞。但由于风洞设计、构造的不同,气动力测试结果存在着差异,即使同一车辆在不同风洞中也有着一定的差异。此外,无论如何先进的汽车风洞,其流场特性仍然与实际道路环境存在着差异,风洞结构对气动试验结果的干扰是不可避免的。因此,通过不同风洞的对比试验,进行汽车风洞的相关性和修正研究一直是汽车空气动力学试验发展过程中的基础课题。

汽车风洞相关性研究首先在欧洲开展起来。20世纪80年代,COGOTTI等<sup>[1]</sup>率先在欧洲的4座风洞中对汽车空气阻力系数、升力系数、压力分布、侧倾力矩等方面进行了风洞相关性测试,这次的测试结果证明了风洞相关性研究的可行性,0°偏航角时,同一工况4座风洞中空气阻力系数 $C_D$ 结果标准差低于2%。随后,越来越多的车辆在欧洲更广泛范围的风洞中进行测试,并逐渐扩展到北美地区的风洞<sup>[2-3]</sup>。

随着汽车空气动力学的发展,风洞试验条件不断改进和完善。真实道路模拟中至关重要的移动地面系统被逐渐引入到汽车风洞测试中。1998年,HOWELL等<sup>[4]</sup>分别在固定地面的MIRA风洞、带移动地面系统的Pininfarina风洞、以及真实道路间进行相关性测试,风洞结果与滑行测试结果吻合较好,空气阻力系数 $C_D$ 平均差值仅为0.008。

同时,风洞数量的增加导致数据交流、分享、利用变得迫在眉睫。然而,即使同一车辆的测试结果,在各个风洞之间也有着或大或小的差异,这给行业交流、协同发展、研发效率提升带来了极大的困扰。2008年,美国三大车企(通用、克莱斯勒、福特)的研究者在北美风洞进行相关性测试,并对空气阻力系数、升力系数、侧倾力矩等参数建立了相关性关系,提出了相关性函数关系式<sup>[5]</sup>。虽然3座风洞之间存在显著差异,但相关结果较好,风洞间测试结果的线性拟合相关性系数 $R^2$ 高于0.999。

由于国内风洞事业起步较晚,风洞数量较少,目前还鲜有风洞相关性之类的专门研究。

汽车风洞修正也随着汽车风洞的发展同步开展起来,20世纪80年代,英国的MIRA、荷兰的DNW等机构开了先河,随后还开发出适用于闭口式射流风洞空气阻力系数 $C_D$ 的修正方法,主要有面积比法、Merker修正法和压力特征法。20世纪90年代后,随着汽车风洞逐渐朝着3/4开口式整车风洞的方向发展,在封闭式射流修正技术的基础上逐渐提出了适用于开放式射流风洞的修正方法,并提出了新的汽车空气阻力系数 $C_D$ 值的综合修正方法<sup>[6]</sup>。

近年来,国内研究者针对汽车模型风洞进行了阻塞修正方法的研究,建立了模型风洞修正方法以及模型支撑修正方法<sup>[7-8]</sup>。而关于整车开放式射流风洞的修正研究则较少。总的来说,汽车空气阻力系数 $C_D$ 风洞测量值的修正技术研究在国内开展较少。

本文选取两辆测试车辆,依据SAE J2881\_201006<sup>[9]</sup>,分别在德国斯图加特内燃机与车辆研究所(简称FKFS)风洞中以及中国汽车工程研究院股份有限公司(简称CAERI)风洞中进行风洞测试,在该测试结果的基础上进行相关性研究,然后运用修正方式对测试结果进行修正,研究两座风洞测试结果差异的来源。

## 1 风洞相关性

本次整车气动风洞相关性修正研究基于两辆测试车辆(1辆轿车及1辆SUV),由CAERI风洞工作人员根据标准测试流程,分别在FKFS风洞和CAERI风洞中进行相同工况的风洞测试。整个测试过程中,未对车辆进行任何拆解或破坏操作,保持车辆在两座风洞中的测试状态不变。

两辆试验车的相关性测试空气阻力系数 $C_D$ 结果及工况贡献量计算结果汇总,如表1和图2所示。

根据相关性测试结果,无论轿车或SUV,FKFS风洞空气阻力系数 $C_D$ 测试结果均大于CAERI风洞测试结果,轿车平均相差约9 counts, SUV平均相差约7 counts。但在不同工况贡献量对比中,轿车及SUV的工况贡献量在FKFS风洞和CAERI风



(a) 轿车



(b) SUV

图1 风洞测试车辆

表1 风洞相关性空气阻力系数  $C_D$  测试结果

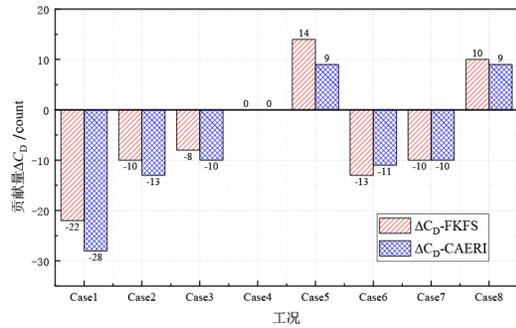
轿车				SUV			
工况	$C_{D-FKFS}$	$C_{D-CAERI}$	$\Delta C_D$	工况	$C_{D-FKFS}$	$C_{D-CAERI}$	$\Delta C_D$
Base	0.305	0.298	0.007	Base	0.382	0.376	0.006
Case1	0.283	0.270	0.013	Case1	0.361	0.353	0.008
Case2	0.295	0.285	0.010	Case2	0.360	0.352	0.008
Case3	0.297	0.288	0.009	Case3	0.365	0.357	0.008
Case4	0.305	0.298	0.007	Case4	0.379	0.372	0.007
Case5	0.319	0.307	0.012	Case5	0.379	0.373	0.006
Case6	0.292	0.287	0.005	Case6	0.383	0.377	0.006
Case7	0.295	0.288	0.007	Case7	0.373	0.363	0.010
Case8	0.315	0.307	0.008	Case8	0.373	0.366	0.007
-	-	-	-	Case9	0.377	0.371	0.006
-	-	-	-	Case10	0.391	0.382	0.009

洞中均呈现相同的变化趋势，且变化量基本一致，测试结果具有可比性。因此，在 CAERI 风洞与 FKFS 风洞之间进行进一步的空气阻力系数  $C_D$  相关性分析，如图3所示。

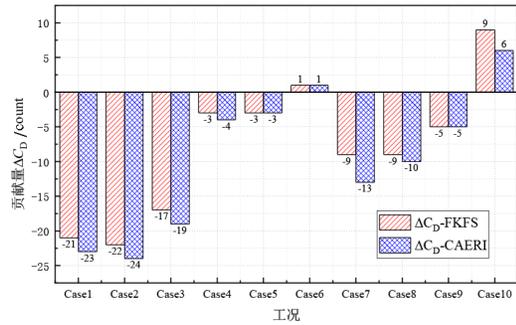
根据图3中 FKFS 风洞与 CAERI 风洞的相关性数据，可以拟合出两风洞之间的空气阻力系数  $C_D$  相关性函数为：

$$C_{D-CAERI} = 1.01784 \times C_{D-FKFS} - 0.01404 \quad R^2 = 0.99763$$

由拟合得到的空气阻力系数  $C_D$  相关性函数关



(a) 轿车



(b) SUV

图2 不同工况相对基础工况贡献量对比 ( $\Delta C_D = \text{Case}X - \text{Base}$ )

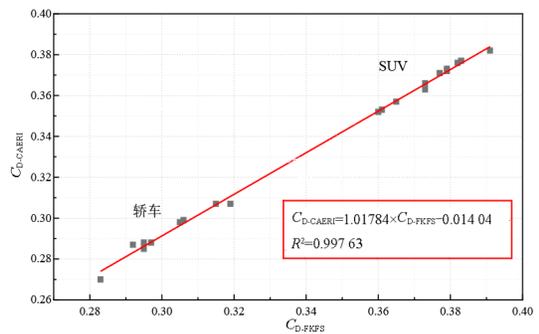


图3 FKFS 风洞与 CAERI 风洞空气阻力系数  $C_D$  相关性

系式可知，相关性系数  $R^2=0.99763$ ，接近于1，拟合关系较好。采用相关性函数关系式，FKFS 风洞或 CAERI 风洞中的测试数据能够直接换算成另一座风洞中的测试值，而不需要额外测试，换算值与风洞实际测试值基本一致，有着较高的可信度。采用风洞间相关性函数关系式，能够极大地拓宽风洞之间的数据交流，使彼此之间的数据具有可比性。同时，能够提高汽车空气动力学性能开发过程中的风洞协同开发能力，使新车开发可以在更广的风洞群范围内开展，缩短试验周期，提高研发效率。

通过风洞相关性测试的工况差异比较、贡献量分析、相关性函数拟合结果可知：两座风洞之间的空

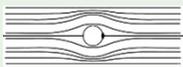
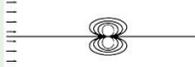
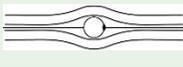
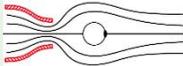
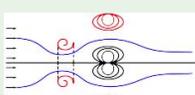
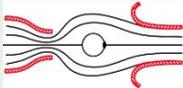
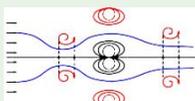
气阻力系数  $C_D$  测量值存在一定差异，但测量值差异在不同车型（轿车、SUV）之间相差不大，并且两座风洞之间能够建立良好的风洞相关性关系，形成相关性函数。由此推测 FKFS 风洞与 CAERI 风洞之间空气阻力系数  $C_D$  测量差异属于系统性差异，可以通过进一步的空气阻力系数  $C_D$  修正，减小或消除差异。

## 2 空气阻力系数 $C_D$ 修正

汽车风洞试验是通过车辆固定、气流流动、地效模拟的方式使车辆与气流、地面之间形成相对运

动，从而与道路行驶过程中车辆运动、气流与地面静止的流动状态达到流动相似。汽车在道路行驶过程中，处于无边界流场状态中，不存在边界效应或阻塞效应。而在风洞试验过程中，由于构造、设计、成本的限制，只能达到有限的试验段长度、喷口面积、收集口面积。相较于真实情况下的无边界流场，风洞流场环境为存在阻塞的有限流场环境。风洞中的阻塞干扰势流模型见表 2，包括受试验段、喷口、收集口阻塞影响的势流模型。

表 2 汽车风洞势流模型<sup>[6]</sup>

阶段	理想化的气流	流场状态	势流模型
1		无限流场中的物体	
2		无限长度但有限宽度射流中的物体	
3		物体距离喷口有限距离，喷口约束的流线	
4		物体后面有限距离的收集口（第 2 个流线约束）	

此外，无风情况下，大气环境趋于稳定，任何方向上基本不存在压力梯度。而风洞中由于喷口、收集口的阻塞，地面边界层的影响，存在一定的轴向压力梯度。阻塞效应以及轴向压力梯度共同影响风洞气动参数的测量，因此，风洞测试结果需要进行干扰修正使测试环境尽量接近真实道路环境。

CAERI 风洞和 FKFS 风洞均属于经典的 3/4 开口式射流风洞。对于此类风洞，国际上广泛采用 Merker 修正法进行修正<sup>[10-11]</sup>。根据经典的 Merker 修正法，由于风洞构造和参数差异，影响空气阻力系数  $C_D$  测量的因素主要有以下 4 项：喷口阻塞、实体阻塞、收集口阻塞以及轴向压力梯度（水平浮力）。

汽车空气阻力系数  $C_D$  的修正本质上是风洞动态压力或风速的修正，可以通过修正计算公式表达，如式（1）和式（2）所示。

$$C_{Dc} = \frac{C_{Dm} + \Delta C_{DHB}}{q_c/q_x} \quad (1)$$

$$q_c = q_0(1 + \varepsilon_s + \varepsilon_c)^2 \quad (2)$$

式中： $C_{Dc}$  为空气阻力系数修正值； $C_{Dm}$  为空气阻力系数测量值； $q_c$  为动态压力修正值，Pa； $q_x$  为动压测量值，Pa； $\Delta C_{DHB}$  为轴向压力梯度修正量； $q_0$  为喷口阻塞修正动态压力，Pa； $\varepsilon_s$  为实体阻塞修正系数； $\varepsilon_c$  为收集口阻塞修正系数。

### 2.1 喷口阻塞

喷口阻塞是阻塞的一种形式，是喷口和测试模型实体之间的气流速度变化造成的干扰因素（喷口阻塞干扰势流模型如图 4 所示），它是经典的阻塞干扰因素之一。气流流经车辆时，会在车辆正前方形成部分正压区，从而引起实际喷口面积减小，形成阻塞，导致实际气流流速增加， $C_D$  值上升。喷口

阻塞形成的根本原因在于风洞内确定风速时采用的“喷口法”或“驻室法”，在测试模型实体位置相同的情况下，因风洞喷口处的速度分布和射流内的风速分布不同产生系统误差，从而导致风洞测量结果的误差。

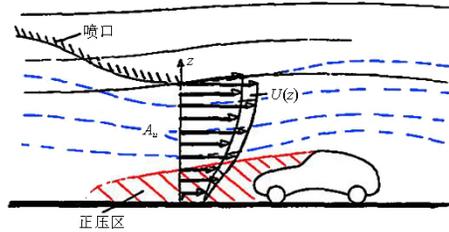


图4 喷口阻塞干扰势流模型<sup>[12]</sup>

喷口阻塞修正需要同时测量喷口法与驻室法的动态压力，通过改变势流模型中车辆等效源的位置  $x_s$ ，迭代计算，使喷口法动态压力修正值  $(1 + \varepsilon_N)^2 q_N$  与驻室法动态压力修正值  $(1 + \varepsilon_P)^2 q_P$  相等，从而对喷口阻塞进行修正，得到准确的动态压力  $q_0$ ，如式 (3) ~ (5) 及图5所示。

$$\varepsilon_N = \frac{(S/2C_N) \left[ 1 - x_s / (x_s^2 + R_N^2)^{1/2} \right]}{1 - (S/2C_N) \left[ 1 - x_s / (x_s^2 + R_N^2)^{1/2} \right]} \frac{R_N^3}{(x_N^2 + R_N^2)^{3/2}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_P = \frac{(S/4\pi) \left[ x_s / (x_s^2 + R_N^2)^{3/2} \right]}{1 - (S/4\pi) \left[ x_s / (x_s^2 + R_N^2)^{3/2} \right]} \frac{R_N^3}{(x_N^2 + R_N^2)^{3/2}} \quad (4)$$

$$(1 + \varepsilon_N)^2 q_N = (1 + \varepsilon_P)^2 q_P \equiv q_0 \quad (5)$$

式中： $\varepsilon_N$ 为喷口法修正系数； $S$ 为势流模型车辆正投影面积， $m^2$ ； $\varepsilon_P$ 为阻塞法修正系数； $C_N$ 为势流模型喷口面积， $m^2$ ； $x_s$ 为势流模型喷口至源的距离（通过迭代计算得出）， $m$ ； $R_N$ 为势流模型喷口等效半径， $m$ ； $x_N$ 为喷口距模型距离， $m$ 。

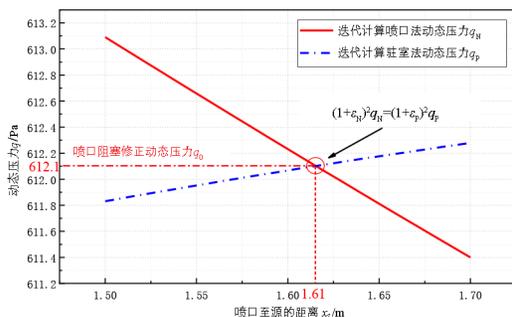


图5 喷口阻塞修正动态压力计算（轿车基础工况）

### 2.2 实体阻塞

由于模型（车辆）的存在，气流会沿着模型表面改变流向，根据势流理论，无粘气流不会分离，但实际的气流是具有一定粘性的，会在模型表面产生分离，从而造成气流的扩张，引起气流流速变化，施加在测试车辆上的气动力也会发生变化，因此会对风洞测量结果造成干扰，这就是射流扩张造成的实体阻塞影响，如图6所示。

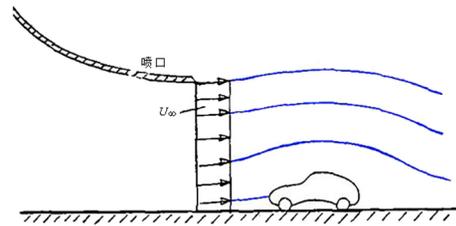


图6 实体阻塞示意图<sup>[12]</sup>

实体阻塞效果主要受车辆与喷口尺寸的影响，实体阻塞系数  $\varepsilon_s$  计算方法如式 (6) 所示。

$$\varepsilon_s = \tau \left( \frac{V}{L_m} \right)^{1/2} \frac{S}{C_N^{3/2}} \quad (6)$$

式中： $\tau$ 为风洞形状常数<sup>[12]</sup>； $V$ 为势流模型车辆体积， $m^3$ ； $L_m$ 为车辆长度， $m$ 。

### 2.3 收集口阻塞

由于测试模型（车辆）的尾流会使气流的轴向分布产生变化（图7），从而造成进入收集口的气流加速，类似于喷口处来流速度增加，从而造成收集口阻塞， $C_D$ 测试值上升。

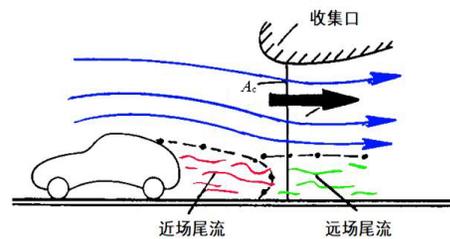


图7 收集口阻塞示意图<sup>[12]</sup>

收集口阻塞效果主要受收集口面积、车辆正投影面积、试验段长度的影响。由于收集口位于车辆后方，车辆尾流延伸至收集口的部分为远场尾流，车辆尾流未延伸至收集口的部分为近场尾流，收集口阻塞系数  $\varepsilon_c$  的计算方法如式 (7) 所示。

$$\varepsilon_c = \left( \frac{C_{Dm}}{4} \frac{S}{C_N} + \eta_w \frac{A_s}{C_c} \right) \frac{R_c^3}{(X_c^2 + R_c^2)^{3/2}} \quad (7)$$

式中： $\eta_w$ 为远场尾流修正经验常数=0.41； $A_s$ 为等效尾流面积， $m^2$ ； $C_c$ 为势流模型收集口面积， $m^2$ ； $R_c$ 为势流模型收集口等效半径， $m$ ； $X_c$ 为车尾至收集口距离， $m$ 。

### 2.4 轴向压力梯度

风洞中的轴向静压梯度是指在空气流动方向单位长度上的气压变化。由于该压力梯度的存在，风洞中车辆前端和后端存在静态压差，导致在阻力方向上除了空气阻力之外，多了一个水平方向上压力梯度造成的力，也称作“水平浮力”（图8），这个“水平浮力”叠加在空气阻力上，致使测出的汽车气动阻力结果有偏差，从而造成空气阻力系数 $C_D$ 偏大或者偏小。

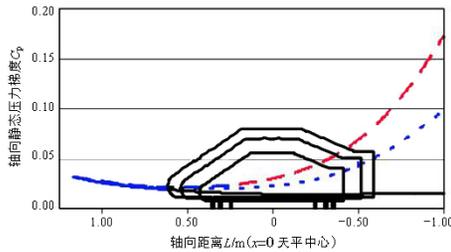


图8 轴向静压梯度示意图 [12]

轴向静压梯度修正需要同时测量两种不同的轴向静压梯度中的空气阻力系数 $C_{Dm1}$ 和 $C_{Dm2}$ ，通过迭代，计算出势流模型中车辆静压敏感长度，从而对水平浮力进行修正，计算出准确的空气阻力系数水平浮力修正量 $\Delta C_{DHB}$  [13]，如式（8）~（9）所示。

$$\Delta C_p = C_p(x) - C_p(x_b) \quad (8)$$

$$C_{Dm1} - \Delta C_{p1} = C_{Dm2} - \Delta C_{p2} \quad (9)$$

式中： $C_p(x)$ 为距天平中心 $x$ 处的静压梯度； $C_p(x_b)$ 为车头前保处的静压梯度。

通过改变 $C_p(x)$ 中 $x$ 值，不断迭代计算求得式（9）相等时的 $x$ 值。此时的 $x$ 值即为车辆静压敏感长度，计算得出的 $\Delta C_{p1}$ 与 $\Delta C_{p2}$ 即为水平浮力修正量 $\Delta C_{DHB}$ ，如图9所示。

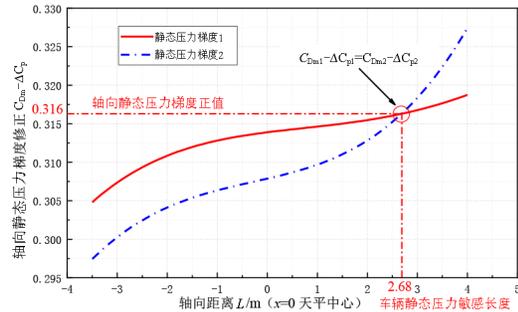


图9 轴向静压梯度修正示意图（轿车基础工况）

以FKFS风洞与CAERI风洞相关性测试车辆基础状态修正为例，风洞及车辆基本信息见表3。

表3 FKFS风洞、CAERI风洞及测试车辆基本信息

风洞信息	CAERI风洞	FKFS风洞	车辆信息	轿车	SUV
喷口面积/ $m^2$	28	22.5	车辆长度/ $m$	4.53	4.44
收集口面积/ $m^2$	49.9	28.5	正投影面积/ $m^2$	2.26	2.63
测速段长度/ $m$	18.00	9.95	车辆体积/ $m^3$	4.6	5.1
天平中心距喷口距离/ $m$	5.5	4.5			

运用上述空气阻力系数 $C_D$ 修正方法对两座风洞中的相关性测试结果进行修正，以轿车及SUV基础工况为例，逐次应用修正方法对各项干扰影响因素进行修正，见表4。

根据表4中的测试车辆基础状态修正结果，修正前，FKFS风洞与CAERI风洞中轿车与SUV的空气阻力系数 $C_D$ 分别差7 counts和6 counts，修正后，FKFS风洞与CAERI风洞的空气阻力系数 $C_D$ 分别差2.2 counts和0.5 count，修正效果明显。FKFS风洞中

轿车与SUV总修正量分别为-6 counts和-6.8 counts，CAERI风洞中轿车与SUV总修正量则是-1.2 counts和-1.3 counts，且CAERI风洞无论轿车或SUV各项修正量均小于FKFS风洞中的各项修正量，这表明CAERI风洞受到各种风洞修正因素的影响更小。本文中空气阻力系数 $C_D$ 修正主要对风洞结构、风洞参数进行修正，测试工况变化对于修正结果影响不大，不同测试工况修正量基本一致，可达到与基础状态修正类似的效果。

表4 测试车辆基础状态修正结果

序号	修正项	轿车				SUV			
		FKFS风洞		CAERI风洞		FKFS风洞		CAERI风洞	
		$C_D$	$\Delta C_D$						
1	原始 $C_D$ 值	0.305 0	-	0.298 0	-	0.382 0	-	0.376 0	-
2	正投影面积	0.301 4	-0.003 6	-	-	-	-	-	-
3	水平浮力	0.305 3	0.003 9	0.296 7	-0.001 3	0.387 5	0.005 5	0.374 4	-0.001 6
4	喷口阻塞	0.302 0	-0.003 3	0.294 4	-0.002 3	0.382 8	-0.004 7	0.371 1	-0.003 3
5	实体阻塞	0.306 5	0.004 5	0.297 2	0.002 8	0.389 7	0.006 9	0.375 4	0.004 3
6	收集口阻塞	0.299 0	-0.007 5	0.296 8	-0.000 4	0.375 2	-0.014 5	0.374 7	-0.000 7
7	总修正量	-	-0.006 0	-	-0.001 2	-	-0.006 8	-	-0.001 3
8	FKFS-CAERI	-	0.002 2	-	-	-	0.000 5	-	-

注:FKFS及CAERI风洞中轿车正投影面积差异较大,进行单独修正; $\Delta C_D$ 为该项修正后相对上一项的修正量。

表5 测试车辆雷诺数扫略修正结果

风速 $U/(km \cdot h^{-1})$	轿车				SUV			
	$C_{D-FKFS}$	$C_{D-CAERI}$	* $C_{D-FKFS}$	* $C_{D-CAERI}$	$C_{D-FKFS}$	$C_{D-CAERI}$	* $C_{D-FKFS}$	* $C_{D-CAERI}$
60	0.310	0.301	0.304	0.300	0.388	0.383	0.382	0.382
80	0.308	0.300	0.302	0.299	0.387	0.381	0.381	0.380
100	0.305	0.300	0.299	0.299	0.385	0.379	0.378	0.378
120	0.305	0.299	0.299	0.298	0.383	0.377	0.376	0.376
140	0.303	0.297	0.297	0.296	0.380	0.374	0.374	0.373
160	0.302	0.297	0.296	0.296	0.379	0.371	0.373	0.370
180	0.300	0.297	0.295	0.296	0.375	0.368	0.369	0.367

注:\* $C_D$ 为修正后的  $C_D$  系数

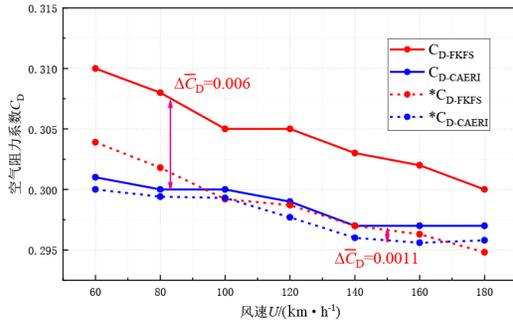
## 2.5 空气阻力系数 $C_D$ 修正结果

根据空气阻力系数  $C_D$  修正方法对测试车辆雷诺数扫略以及不同工况测试数据(表1)进行修正,两辆测试车辆的测试数据修正结果汇总如表5~6、图10~11所示。

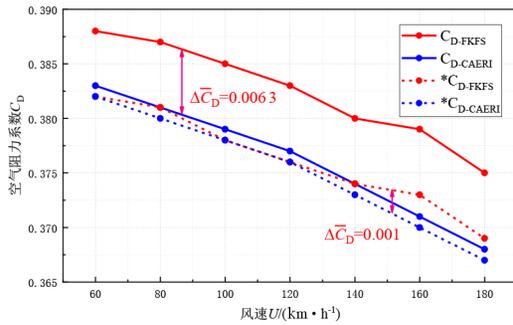
由图10可知,雷诺数扫略空气阻力系数  $C_D$  修正之前,在FKFS风洞和CAERI风洞测试中,轿车及SUV分别平均相差6 counts和6.3 counts,修正之后轿车及SUV分别平均相差1.1 counts和1 count,修正效果明显。修正之前,根据相关性测试结果,FKFS风洞空气阻力系数  $C_D$  测试结果均大于CAERI风洞测试结果,轿车平均相差约9 counts,SUV平均相差约7 counts。修正之后轿车平均相差4 counts,SUV则平均相差2 counts,修正后测试车辆

的空气阻力系数  $C_D$  的测试结果差异降低了近60%,如图11所示。因此,空气阻力系数  $C_D$  修正能够明显减小风洞之间空气阻力系数  $C_D$  测试差异,缩小了FKFS风洞与CAERI风洞之间的系统性差异,提高风洞相关性分析精度,使风洞与风洞之间测试数据更具可比性。

综上所述,通过修正能够减小风洞之间的测试结果差异,减小由于风洞结构(如喷口、收集口、有限流场范围)、流场参数(如静压梯度)差异造成的影响,使风洞测试环境尽可能地贴近真实道路环境。在风洞测试结果应用过程中(如风洞法道路行驶阻力计算、油耗评估),风洞结构和流场参数对测试结果影响较大,建议将风洞测试结果进行修正,排除风洞自身造成的干扰。



(a) 轿车



(b) SUV

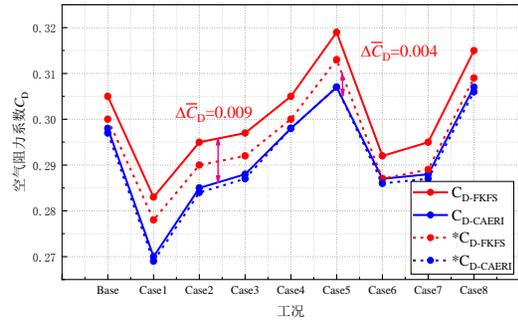
图10 轿车及SUV雷诺数扫略空气阻力系数  $C_D$  修正

表6 风洞相关性测试空气阻力系数  $C_D$  修正结果

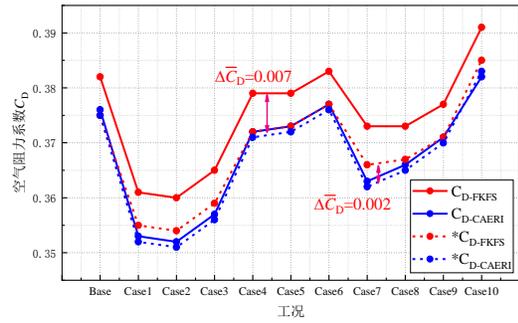
轿车				SUV			
工况	* $C_{D-FKFS}$	* $C_{D-CAERI}$	$\Delta C_D$	工况	* $C_{D-FKFS}$	* $C_{D-CAERI}$	$\Delta C_D$
Base	0.300	0.297	0.003	Base	0.375	0.375	0.000
Case1	0.278	0.269	0.009	Case1	0.355	0.352	0.003
Case2	0.290	0.284	0.006	Case2	0.354	0.351	0.003
Case3	0.292	0.287	0.005	Case3	0.359	0.356	0.003
Case4	0.300	0.298	0.002	Case4	0.372	0.371	0.001
Case5	0.313	0.307	0.006	Case5	0.373	0.372	0.001
Case6	0.287	0.286	0.001	Case6	0.377	0.376	0.001
Case7	0.289	0.287	0.002	Case7	0.366	0.362	0.004
Case8	0.309	0.306	0.003	Case8	0.367	0.365	0.002
-	-	-	-	Case9	0.371	0.370	0.001
-	-	-	-	Case10	0.385	0.383	0.002

### 3 空气阻力系数 $C_D$ 修正差异分析

FKFS风洞与CAERI风洞的空气阻力系数  $C_D$  修正结果中(表4),以轿车为例,4项干扰修正中的喷口阻塞及实体阻塞修正量相差不大,但水平浮力与收集口阻塞修正量则有较大差异,如图12所示。水平浮力修正量相差约5.2 counts,且修正量正负相



(a) 轿车工况修正前后



(b) SUV工况修正前后

图11 轿车及SUV不同工况空气阻力系数  $C_D$  修正

反;收集口阻塞修正中,FKFS风洞修正量较大,而CAERI风洞则修正量较小。因此,有必要对风洞间的测试差异来源进行进一步分析。

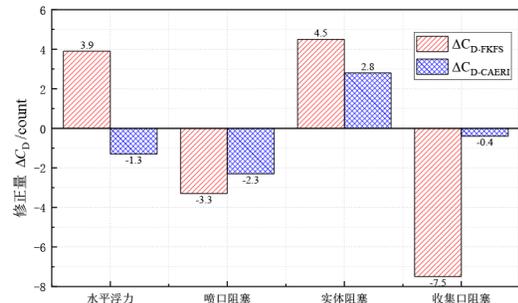


图12 FKFS风洞及CAERI风洞空气阻力系数  $C_D$  修正(轿车)

#### 3.1 轴向静压梯度修正

图13所示红色横线代表车辆在FKFS风洞与CAERI风洞中所处的位置,并记车头位置静压梯度为  $C_{p1}$ ,车辆静压敏感长度处静压梯度为  $C_{p2}$ 。由图可知,FKFS风洞中车辆尾部位置附近的压力变化较为明显,CAERI风洞中的则较为稳定。CAERI风洞中车头与敏感长度处的压力  $C_{p1}$  与  $C_{p2}$  相差较小,而FKFS风洞中敏感长度位置压力较车头位置则有较大增加。

根据空气阻力系数  $C_D$  修正方法, 车头与车辆静压敏感长度处的前后静压梯度差约等于空气阻力系数  $C_D$  修正量, 即  $\Delta C_p = C_{p1} - C_{p2} \approx \Delta C_D$ 。经过计算  $\Delta C_{p-FKFS} \approx \Delta C_{D-FKFS} = -0.0039$ ,  $\Delta C_{p-CAERI} \approx \Delta C_{D-CAERI} = 0.0013$ 。由此可知, 两座风洞的静压梯度差异造成了两座风洞的轴向静压梯度修正量差异。较短的试验段长度会使轴向静压在风洞流向长度上提前升高, 更长的风洞试验段长度有助于保证较长的轴向静压稳定区域, 如图 13 可知, FKFS 风洞仅有近 5 m 的轴向静压稳定区域 ( $|C_p| < 0.002$ ), 而 CAERI 风洞则有接近 10 m 长度的轴向静压稳定区域。

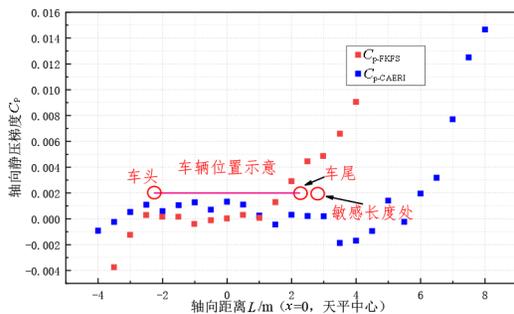


图 13 FKFS 风洞及 CAERI 风洞轴向静压梯度

### 3.2 收集口阻塞

根据修正方法, 将收集口阻塞分为两部分考虑: 远场尾流和近场尾流。由 FKFS 风洞及 CAERI 风洞基本信息对比可知, CAERI 风洞的收集口面积为  $49.9 \text{ m}^2$ , 试验段长度为 18 m, 均分别大于 FKFS 风洞收集口面积 ( $18 \text{ m}^2$ ) 和试验段长度 (9.95 m)。由于 CAERI 风洞试验段较长, 计算过程中可以忽略近场尾流干扰。经过计算, 收集口阻塞修正量分别为  $\Delta C_{D-FKFS} = -0.0075$ ,  $\Delta C_{D-CAERI} = -0.0004$ 。由于 CAERI 风洞采用更长的试验段长度和更大的收集口面积, 所以减小了收集口阻塞效应的影响。因此, 两座风洞结构尺寸的差异导致了收集口阻塞修正的差异。

## 4 结论与展望

本文以两辆测试车辆为研究对象, 分别在德国 FKFS 风洞与重庆 CAERI 风洞中进行不同测试工况下的相关性测试, 并使用修正方法对测试结果进行修正, 对比分析了整车气动风洞测试数据的相关性以及测试结果差异来源, 得出以下结论:

(1) 根据两辆测试车辆在两座风洞中的相关性测试结果可知, 同一车辆在不同风洞中同一工况的测试值存在一定差异, 但在工况贡献量上, 变化趋势一致, 变化量相差不大。同时, 两座风洞间能建立良好的风洞相关性关系, 形成相关性函数, 风洞间测试差异多属于系统性差异。

(2) 通过空气阻力系数  $C_D$  修正方法, 可以减小风洞间由结构尺寸、流场参数导致的系统性误差, 修正后能够明显缩小两座风洞之间空气阻力系数  $C_D$  的测试差异。

(3) 通过 FKFS 风洞与 CAERI 风洞空气阻力系数  $C_D$  修正对比, 由于 CAERI 风洞有着较大的喷口面积、收集口面积、较长的试验段长度和稳定的轴向静压梯度, 4 项空气阻力系数  $C_D$  干扰项的修正量都较小, 总修正量均在 1 count 左右, 修正与否对空气阻力系数  $C_D$  测量并无明显影响。

风洞相关性及风洞修正是风洞研究、应用过程中的两大重要课题。由以上研究可知, 风洞由于自身限制, 风洞与风洞之间、风洞与道路环境之间、风洞与 CFD 仿真之间的测试结果普遍存在着一定的差异。在汽车空气动力学性能开发过程中, 可以运用修正与相关性两类方法, 尽可能地减小彼此间的测试结果差异, 建立相关性关系, 使不同研究环境中的测试数据具有可比性。以此建立的相关性、修正方法对提高空气动力学性能协同开发能力、缩短研发周期、降低研发成本、提高研发效率有着重要的参考价值 and 工程应用价值。

本文是基于两辆测试车辆在两座风洞中进行风洞相关性及修正的研究, 后期可增加风洞和测试车辆的数量, 增加数据样本量, 使其研究成果更加具有代表性。另一方面, 在风洞差异研究过程中所使用的空气阻力系数  $C_D$  修正方法, 主要用于修正风洞中的阻塞效应, 减小结构尺寸及流场参数造成的干扰影响。在后续的研究中, 可将地面模拟系统 (五带移动带系统、边界层抽吸系统)、测力天平、支撑结构等因素纳入考虑, 进一步拓展风洞间、试验与仿真间测试结果差异的研究深度。

## 参考文献 (References)

- [1] COGOTTI A, BUCHHEIM R, GARRONE A, et al. Comparison Tests Between Some Full-Scale European Automotive Wind Tunnels—Pininfarina Reference Car [C]// SAE Technical Papers, 800139, 1980.
- [2] CARR G. Correlation of Aerodynamic Force Measurements in MIRA and Other Automotive Wind Tunnels [C]// SAE Technical Papers, 820374, 1982.
- [3] BUCHHEIM R, UNGER R, JOUSSERANDOT P. Comparison Tests Between Major European and North American Automotive Wind Tunnels [C]// SAE Technical Papers, 830301, 1983.
- [4] LE GOOD G, HOWELL J, PASSMORE M, et al. A Comparison of on-Road Aerodynamic Drag Measurements with Wind Tunnel Data from Pininfarina and MIRA [C]// SAE Technical Papers, 980394, 1998.
- [5] TORTOSA N, MEINERT F W, SCHENKEL F M, et al. A Correlation Study Between the Full Scale Wind Tunnels of Chrysler, Ford, and General Motors [C]// SAE Technical Papers, 2008-01-1205, 2008.
- [6] 陈军, 王勇, 石锋, 等. 汽车气动阻力系数  $C_D$  风洞测量值修正技术研究 [J]. 汽车工程, 2017, 39(4): 412-417.  
CHEN Jun, WANG Yong, SHI Feng, et al. A Research on Correction Techniques of Vehicle Aerodynamic Drag Coefficient  $C_D$  Measured in Wind Tunnels [J]. Automotive Engineering, 2017, 39(4): 412-417. (in Chinese)
- [7] 庞加斌, 林志兴, 余卓平, 等. TJ-2风洞汽车模型试验的修正方法 [J]. 汽车工程, 2002, 24(5): 371-375.  
PANG Jiabin, LIN Zhixing, YU Zhuoping, et al. Correction Methods for Automotive Model Tests in TJ-2 Wind Tunnel [J]. Automotive Engineering, 2002, 24(5): 371-375. (in Chinese)
- [8] 张英朝. 基于仿真与试验的汽车风洞修正研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.  
ZHANG Yingchao. Automotive Wind Tunnel Corrections Based on Numerical Simulation and Test [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- [9] J2881\_201006. Measurement of Aerodynamic Performance for Mass-Produced Cars and Light-Duty Trucks [S]. US: SAE International, 2010.
- [10] COLLIN C, MACK S, INDINGER T, et al. A Numerical and Experimental Evaluation of Open Jet Wind Tunnel Interferences Using the DrivAer Reference Model [C]// SAE Technical Papers, 2016-01-1597, 2016.
- [11] COOPER KR, MERCKER E, MÜLLER J. The Necessity for Boundary Corrections in a Standard Practice for the Open-Jet Wind Tunnel Testing of Automobiles [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(9): 1245-1273.
- [12] MERCKER E, WIEDEMANN J. On the Correction of Interference Effects in Open Jet Wind Tunnels [C]// SAE Technical Papers, 960671, 1996.
- [13] MERCKER E, COOPER K. A Two-Measurement Correction for the Effects of a Pressure Gradient on Automotive, Open-Jet, Wind Tunnel Measurements [C]// SAE Technical Papers, 2006-01-0568, 2006.

## 作者简介



补涵 (1995-), 男, 重庆潼南人, 硕士, 助理工程师, 主要从事汽车空气动力学及汽车风洞相关工作。

Tel: 18581050876

E-mail: buhan@caeri.com.cn