

关于改造航空风洞为汽车试验风洞的技术探讨

蔡国华¹ 傅立敏²

¹(北京空气动力研究所七室, 北京, 100074)

²(吉林工业大学轿车教研室, 长春, 130025)

TECHNOLOGY RESEARCHES ABOUT MODIFYING AERONAUTICAL WIND TUNNEL FOR AERODYNAMIC TESTS OF AUTOMOBILE MODELS

Cai Guohua¹, Fu Limin²

¹(Beijing Institute of Aerodynamics, Beijing, 100074)

²(Jilin University of Technology, Changchun, 130025)

摘要 在介绍汽车风洞性能的基础上,对改造航空风洞为汽车试验风洞的主要技术要点进行了分析探讨,并介绍了 FD-09 低速航空风洞改造情况及其功用。建造地面板和附面层吸除装置,证明该方案是很成功的。

关键词 汽车模型 汽车风洞 风洞试验 地面模拟

中国分类号 V 211.7, U 461.1

Abstract The classification of automotive testing wind tunnels and the general situation of some typical testing wind tunnels oversea exclusively for motor vehicles are presented. Some problems in modifying an aeronautical wind tunnel for automobile testing are analysed and discussed. Then a case of modifying the FD-09 aeronautical wind tunnel for automobile testing, as well as its application after modification, is described. After building the ground plate and boundary layer suction equipment, the authors measured the aerodynamic characters of car and truck models in this wind tunnel and compared the testing results with the test of Tianjing minibus performed in MIRA wind tunnel in England. The rebuilt plan for FD-09 wind tunnel proved very successful and it is worth popularization.

Key words automobile model, automobile wind tunnel, wind tunnel testing, ground simulation

汽车高速行驶时的经济性、操纵性、安全性与其空气动力特性密切相关。风洞模拟试验是研究汽车空气动力学特性的有效途径。因此,国外各大汽车集团公司不惜花巨资建造汽车试验专用风洞,以开发低阻、舒适、美观、安全的新颖现代化汽车。目前,国内尚未建成汽车专用风洞。为适应汽车工业发展需要,利用现有航空风洞和测试设备,对其进行必要技术改造,可以承担汽车气动减阻和操纵稳定性等空气动力学性能研究,对现有汽车改型、优化和新型车的设计具有重要意义,对促进

我国汽车空气动力学的研究发展,必将产生积极作用^[1]。

1 汽车风洞概况

汽车风洞有全尺寸整车风洞和缩尺模型风洞之分,前者风洞除进行气动力特性测量外,还能进行发动机冷却、气动噪音、车内通风、车身表面雨水流向、照明灯光和积尘等研究,后者风洞主要用于气动力特性测量和新产品开发、方案优化设计。表 1 为日本和欧美一些典型汽车风洞试验段形式、尺寸及试验风速范围等参数。

表 1 国外汽车风洞

部门	试验段形式	宽×高×长/m	风速范围/m·s ⁻¹
日产汽车公司	直流闭口矩形	6×3.5×10	6~33
本田汽车公司	回流闭口矩形	5×3.5×8	5~60
本田汽车公司	回流闭口矩形	1.2×0.7×2	4~40
英国汽车工业研究会	直流闭口矩形	7.83×4.34×15.2	40
英国汽车工业研究会	直流闭口矩形	2.06×1.03×3.81	3.2~45
福特汽车公司	回流闭口矩形	6.5×3.82×12	55.5
福特汽车公司	回流闭口矩形	4.5×2×6.1	72
通用汽车公司	回流闭口矩形	10.4×5.5×23.2	26
克莱斯勒公司	回流闭口矩形	6.1×3.81×9.14	64

从表1看到,国外汽车风洞试验段以回流闭口矩形试验段居多,风速范围较广,从 3m/s 至 72m/s

国内目前无汽车专用风洞,但航空航天科研部门和一些高等院校拥有试验段 3m 量级多座风洞,诸如中国空气动力研究与发展中心(CARDC)FL-13、FL-12;北京空气动力研究所(BIA)FD-09;哈尔滨空气动力研究所(HARD)FL-8风洞;南京航空航天大学(NUAA)NH-2风洞等。因此可以充分利用现有航空风洞,对其进行必要技术改造,如配置汽车专用天平,设置能满足各类汽车不同轮、轴距的四轮支撑系统和地面板及其附面层吸除设备等技术措施。

2 汽车风洞性能的基本要求

美国汽车工程师协会(SAE)编制了汽车风洞及空气动力学实验技术标准^[2],依此作为改造FD-09航空风洞为汽车风洞时的依据,具体要求分述如下:

(1) 风洞流场品质要符合SAE指标。SAE给定流场指标是:在模型区速度不均匀度 $\leq 0.25\%$,速度脉动均方根 $\leq 0.5\%$,气流偏角 $\leq 0.5^\circ$,湍流度 $\leq 0.5\%$,纵向静压梯度 $\leq 1\%$ 。

(2) 洞壁干扰要符合SAE试验规范。汽车正投影面积与风洞试验段横截面积之比 $\leq 5\%$,以轴距为参考长度的试验雷诺数 $\geq 1 \times 10^6$ 。

表2 一些汽车模型几何参数

车型	迎风面积/ m^2	轴距/ m	堵塞比/ $\%$	雷诺数/ 10^6
Tianjin 面包车 (1:4)	0.2060	0.645	2.34	2.22
CA 141 载货卡车 (1:5)	0.1836	0.814	2.09	2.81
EQ 140 载货卡车 (1:5)	0.1876	0.790	2.13	2.72
CA 774 轿车 (1:5)	0.0880	0.680	1.00	2.34

注:迎风面积是根据模型和标准板用长焦相机拍摄,经积分仪测量得到。雷诺数以风速 50m/s 计算。

(2) 研制模型四轮支撑和H梁连接机构 通过汽车四轮安装在地面板上是较好支撑方式。考虑到不同汽车类型和缩尺比例,汽车模型的轮、轴距要做到无级可调。因此,采用四轮偏心类似行星旋转运动机构方案来实现的^[4],按照国产车1:5缩尺模型得出轮距变化,范围为 $250\sim 500\text{mm}$ 。轴距变化范围为 $400\sim 850\text{mm}$ 。图1为四轮偏心机构示意图,可以看出, a 点绕 o 点旋转,轮子支撑点 b 又绕 a 点旋转,且安装在地面板内称之为H梁上。模型所承受气动力是通过四轮经H梁传到天平上,图2为模型安装示意图。

(3) 建造地面板效应模拟装置 改造航空风

(3) 能满足各类汽车不同轮、轴距的四轮支撑方式。四轮支撑具有模拟真实且无支架干扰的优点。

(4) 地面板附面层位移厚度 δ^* 与汽车模型底部距地间隙 E 的比值应在 $8\sim 5\%$ 以内,此值过大,需进行附面层控制。

(5) 配置合适量程的汽车专用天平和满足车身表面压力分布测量的扫描阀压力传感器组件。

(6) 具备测量汽车尾流参数和显示汽车周围流场的能力。

航空风洞与汽车气动力试验主要不同之处是模型支撑方式和地面板附面层模拟。因此,改造航空风洞为汽车风洞的重点就在于研究模型四轮支撑和天平联接机构和地面板附面层控制技术。

3 改造FD-09航空风洞为汽车风洞的技术措施

(1) FD-09风洞概况 该座风洞为北京空气动力研究所一座中型单回流闭口低速风洞,气流速度为 $10\sim 100\text{m/s}$,试验段截面为 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 四角圆化,有效面积为 8.785m^2 ,长 12m ,收缩比为10。大收缩比、长试验段和设有冷却气流的换气装置是该座风洞的气动布局特点,流场品质优良。

除了地面板附面层模拟外,FD-09风洞流场品质均高于SAE指标^[3]。表2中选择了不同类型国产车,可以看到风洞堵塞比和雷诺数是很容易满足的。

洞为汽车风洞的主要技术关键是进行地面板附面层模拟研究,即设法消除或减弱地面板附面层影响。目前主要有4种方法,即皮带传动法、镜像法、固定地面板法和地面板附面层吸除法。皮带传动法,在欧美汽车风洞中常有采用,但结构复杂,投资较大,还有模型安装等一些技术难点。镜像法要做2个完全相同模型,不经济,目前只有俄罗斯在进行地效飞机时采用。图3、图4分别为皮带传动法和镜像法示意图。我们选定地面板附面层吸除法,具体方案:具有附面层吸除装置的铝材料蜂窝结构地面板,尺寸为 6.29m (长) $\times 2.95\text{m}$ (宽) $\times 0.088\text{m}$ (厚),地面板距下洞壁高度在 $0.5\sim 0.7\text{m}$

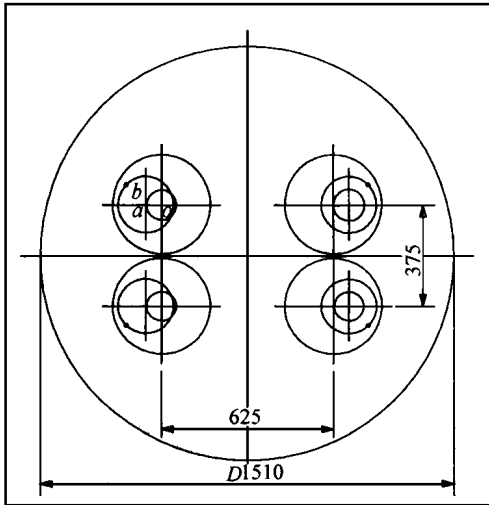


图 1 轮轴距可变的四轮支撑机构

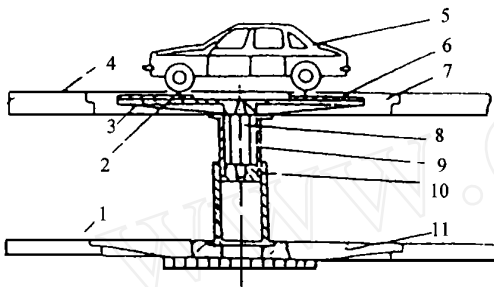


图 2 模型安装示意图

1. 风洞下壁面, 2. 模型四轮支点, 3.H 梁, 4. 地面板,
5. 汽车模型, 6. 偏心支撑机构, 7. 地面板转盘, 8. 杆式应变天平, 9. 天平保护罩, 10. 转盘支撑, 11. β转盘

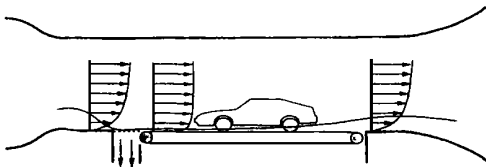


图 3 皮带传动法消除附面层

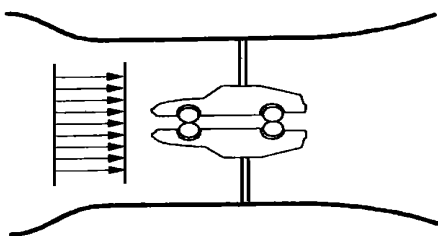


图 4 镜像法消除附面层

之间可调; 转盘直径 1.5m, 经过各方案对比, 确定在距地面板前缘 1.2m 处开一长度为 2.7m、宽为 100mm 的横向槽缝, 用一台 15kW 交流电机驱动一离心机, 风机转速为 900r/min, 抽气量为

417m³/min。风机安装在实验段下面, 通过一变截面管道与地面板下表面的排气口相联, 由风机抽出附面层内低能空气再进入扩散段重新送回风洞内。图 5 为从风洞下洞壁抽吸附面层示意图。

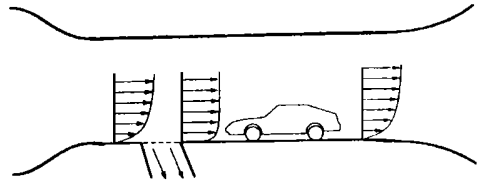


图 5 吸除风洞壁面附面层

有人可能会提出, 不用另设地面板, 能否把汽车直接安装在风洞下壁上呢? 答案是否定的。在风洞试验段中心在风速 50m/s 下测得附面层厚度 δ 约为 135mm, 位移厚度 δ^* 约为 18.6mm。如此厚的附面层是不满足汽车气动力试验要求的。利用地面板将大幅度减低附面层厚度。在距地面板前缘 2.5m 处, 用总压排管测得附面层厚度 δ 为 38.2mm, 位移厚度 δ^* 为 5.5mm。建议地面板附面层采用湍流平板附面层公式将与实测结果非常吻合, 公式如下

$$\delta = 0.37 \frac{x}{R e_x^{1/5}}, \delta^* = \delta/7$$

在进行地面板附面层抽气下测量, 附面层位移厚度 δ 能减薄 1~2mm。从上可得到, 用地板法能大幅度减小附面层厚度, 而辅以抽气措施, 又能平均减小附面层位移厚度 δ 达 27.3%。采用附面层吸除, 能有效减薄附面层效应, 但不可能全部消除。

(4) 建造测力和测压系统 统计各种车型气动力载荷, 重点是统计 1.5 轿车模型确定天平量程范围, 并同时加工了杆式和盒式汽车专用 2 种应变天平^[5], 以便进行对比性测量。盒式天平具有刚性好、结构紧凑特点, 尺寸为 200mm (长) × 100mm (宽) × 64mm (高)。杆式天平具有准度高、技术成熟特点, 尺寸为 $\varnothing 78$ mm、长度为 400mm。表 3 为天平设计量程。从实际使用情况来看, 天平设计载荷量程偏大, 不利于测量精度提高。

(5) 汽车标模校核试验 改造后的 FD-09 风洞首先进行了有、无地面板抽气下全面流场校核。在地面板槽缝宽度、抽气量方案优选确定后, 采用由英国 MIRA 设计、制造的 1/4 缩尺的天津三峰面包车作为标模进行地面板有、无抽气条件下气动力特性测量。该模型曾在 MIRA 风洞 (2.01m × 1.03m × 3.81m 带活动地面板) 进行过

测量。从表4中看到,数据的一致性非常好,说明有、无抽气与活动地板三者测量结果几乎无差异。由此得到,采用地板方案是成功的,还进一步得到,附面层厚度已经不厚的情况下,抽气的影

响是可以忽略不计。当然,这仅是对天津三峰面包车而言,对汽车底部特别接近地面的赛车,那就另当别论了。

表3 专用汽车模型天平量程

阻力/N	升力/N	侧力/N	横滚力矩/N·m	侧偏力矩/N·m	纵倾力矩/N·m
800	±1000	±1000	±300	±300	±300

表4 天津三峰面包车阻力系数

β	MIRA 风洞 (活动地板)	FD-09 风洞 (抽气地板)	FD-09 风洞 (无抽气地板)
0°	0.352	0.352	
5°	0.356	0.356	0.355
10°	0.389	0.395	0.389
15°	0.424	0.420	0.417

除了进行标模校核试验外,还进行CA 774 轿车、Audi-100 轿车改型、气动优化试验,还完成了CA 141、EQ 140 等载货卡车气动力特性测量^[6]。上述结果表明,把现有航空风洞改造为汽车试验风洞是成功的,对推动我国汽车气动力试验研究和促进国产车气动性能的优化设计将作出积极贡献。

参 考 文 献

- 1 傅立敏 汽车空气动力学 北京:机械工业出版社,1996
- 2 Carr G W. Aerodynamic testing of road vehicles: testing methods and procedures SAE Technical Information Report J2084, Warrendale: SAE, 1991
- 3 孔祥福 FD-09 风洞带地板条件下的流场校测报告 BG7-270, 北京:北京空气动力研究所,1989
- 4 裴致程 转盘系统及其有关技术问题 BG7-269, 北京:北京空气动力研究所,1989
- 5 武家陶,叶明磊 盒式和杆式汽车天平设计和校测 BG7-271, 北京:北京空气动力研究所,1989

- 6 蔡国华 天津面包车、CA 141 和 EQ 140 卡车、红旗轿车模型风洞测力实验 BG7-268, 北京:北京空气动力研究所,1989

蔡国华, 研究员, 1939 年生, 1964 年毕业于浙江大学流体力学专业, 现在航天工业总公司第 701 所从事航天航空飞行器低速气动力和风工程及工业气动力实验研究, 并任中国汽车标准化委员会动力学分标委委员。曾获部科技进步二等奖和三等奖。在学术期刊上发表论文 20 余篇。通信地址: 北京市 7201

信箱 17 箱, 邮编 100074, 电话 (010) 68375739 (办), 83874057 (宅), 传真: 68374758

傅立敏, 教授, 1942 年生, 1966 年毕业于吉林工业大学汽车工程系, 现任职该校轿车车型开发中心, 从事汽车空气动力学研究和教学, 兼任中国空气动力学学会工业气动力委员会委员。出版“汽车空气动力学”专著, 在国内外期刊上发表论文多篇, 曾获中国汽车工业总公司科技进步三等奖, 一汽集团二等奖。通信地址: 吉林省长春市人民大街 142 号吉林工业大学轿车车型开发中心, 邮编 130025。电话 (0431) 5682351-3744 (办), 5903433 (宅), 传真 5683397