# 风洞法测量汽车道路行驶阻力

高 岳,李珍妮,杨一春,郝剑虹,刘学龙

(中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300)

**摘 要:** 阐述了风洞法测量汽车行驶阻力的基本原理,并进行了风洞法和道路滑行法的对比测试试验。结果表明,风洞 法和道路滑行法测得的汽车行驶阻力数值十分接近,测得的行驶阻力相对偏差在 4% 以内,循环能量差在 ±5% 以内, 证明了风洞法的有效性。不同车速下的 *C*<sub>D</sub>\**A* 值差异对行驶阻力的影响极小,风洞法中的等速法与减速法相比,等速法 的试验结果更接近道路滑行结果。

关键词:风洞法;道路行驶阻力;滑行法;循环能量

中图分类号: U467.5+25 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2019.01.03

# Vehicle Road Load Measurement in a Wind Tunnel

GAO Yue, LI Zhenni, YANG Yichun, HAO Jianhong, LIU Xuelong

(China Automotive Technology & Research Center Co., Ltd, Tianjin 300300, China)

Abstract: The wind tunnel method for vehicle road load measurements had been introduced in this paper and a comparative test of the wind tunnel method and the coast-down method had been conducted. The test results show that the road load values measured by the wind tunnel method are very close to those measured by the coast-down method. The relative deviation of the road load is within 4%, the cycle energy differences are within  $\pm 5\%$  and the effectiveness of the wind tunnel method has been proved. The difference in  $C_{\rm D}*A$  values measured at various speeds shows very small impact on the road load. In the wind tunnel method, compared with the deceleration procedure, the measurement results obtained by the constant speed procedure are much closer to the results of coast-down method.

Keywords: wind tunnel method; road running resistance; coastdown method; cycle energy

GB18352.6—2016《轻型汽车污染物排放限值 及测量方法》(中国第六阶段)将于2020年开始实施, 国家对汽车节能减排的要求正在不断提高。底盘测 功机是一种能够在室内进行汽车综合排放及油耗测 试的检测设备,试验时需要将汽车道路行驶阻力曲 线作为输入。所以汽车道路行驶阻力测量结果的准 确性对排放或油耗检测结果有着直接影响,准确测 量汽车道路行驶阻力是确保排放或油耗检测准确性 的前提和关键。

GB18352.6—2016 中引用了《Global Technical Regulation on Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures (WLTP)》中的一种新的汽车行驶

收稿日期: 2018-09-19 改稿日期: 2018-10-11

参考文献引用格式:

高岳,李珍妮,杨一春,等.风洞法测量汽车道路行驶阻力 [J].汽车工程学报,2019,9(1):21-26.

GAO Yue, LI Zhenni, YANG Yichun, et al. Vehicle Road Load Measurement in a Wind Tunnel [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(1): 21–26. (in Chinese)

阻力的测量方法——风洞法<sup>[1-2]</sup>。如图1所示,风 洞法是将风洞与底盘测功机或平带式测功机相结 合,确定汽车道路行驶阻力的测量方法,其中行驶 阻力中的空气阻力可由风洞天平测得,滚动阻力可 由底盘测功机或平带式测功机测得。本研究选用的 是风洞天平和底盘测功机的组合方式。

道路滑行法由于在室外进行,会受外界环境(天 气、温度等因素)的约束和影响。相比于滑行法, 风洞法的测试完全在实验室内进行,不受外界环境 的约束和影响,测试的可重复性好。

本文选取了两款汽车为测试对象,依据 GB18352.6—2016《轻型汽车污染物排放限值及测 量方法》(中国第六阶段)中规定的行驶阻力测量 规范,对每辆车分别进行了风洞法和道路滑行法的 行驶阻力测量试验,对这两种方法及试验结果进行 了对比研究。研究结果将为后续国六标准执行及油 耗标准修订提供技术依据。



图 1 风洞法测量原理

# 1 试验车辆准备

对试验车进行了适当磨合,使车辆里程数超过 3000km,以满足标准要求。测量四轮定位并调节 至出厂值要求范围,胎压调整至下限。试验时所有 车窗、手动操作可调节装置都应处于关闭状态。

根据测量规范中对测试质量的定义及车辆信息,算出测试质量,并将车辆装载至测试质量。试验前后,对试验车辆、驾驶员和设备进行称重,以确定平均测试质量 *m*<sub>av</sub>。

车辆装载后测量并记录前后轮的轮眉高度,在 进行滑行法试验和风洞法试验时,需要确保两种方 法的轮眉高度保持一致,即车身姿态保持一致,这 一点非常关键。因为车身姿态的改变,会造成汽车 的正投影面积 *A*、风阻系数 *C*<sub>D</sub>、离地间隙等的改变, 进而直接影响汽车行驶阻力测量的结果。

试验车辆在试验前进行车辆预热,试验车辆应以118 km/h的速度行驶至少20分钟,直至达到稳定状态。

## 2 试验方法与数据处理

#### 2.1 滑行法

(1) 将试验车辆加速到比最高基准速度高 10 km/h 的速度,将变速器置于空挡位置,测量车辆 速度从( $V_j + \Delta V$ )滑行到( $V_j - \Delta V$ )的正向滑行时间  $t_{jai}$ (*i*代表第*i*次滑行试验)。相反方向进行同样的试验, 测反向滑行时间  $t_{jai}$ 。本次试验 $\Delta V$ 的取值为 5 km/h,基 准速度为: 130 km/h, 120 km/h,…, 30 km/h, 20 km/h。

(2) 重复上述往返试验,直到速度*V<sub>j</sub>*的滑行 平均时间满足下列方程定义的统计精度*P<sub>i</sub>*。

$$P_j = \frac{h \times \sigma_j}{\sqrt{n} \times \Delta t_j} \leqslant 0.03 \ . \tag{1}$$

式中:  $P_j$ 为速度  $V_j$ 下测量结果的统计精度; n为滑 行次数;  $\sigma_j$ 为标准偏差; h为系数,在标准中查表 可得;  $\Delta t_j$ 为速度  $V_j$ 的算术平均滑行时间, s。 $\sigma_j$ 、  $\Delta t_j$ 的具体计算公式可参照标准<sup>[1]</sup>中的 CC.4.3.1。

(3) 计算速度 V<sub>j</sub>时的行驶阻力 F<sub>j</sub>,得到 F-V
道路行驶阻力曲线,按照最小二乘法得到系数 f<sub>0</sub>,
f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>。

$$F_{j} = \frac{1}{3.6} \times (m_{\rm av} + m_{\rm r}) \times \frac{2 \times \Delta V}{\Delta t_{j}}$$
 (2)

式中: *m*<sub>av</sub> 为平均测试质量; *m*<sub>r</sub> 为所有转动部件的 等效质量, 可根据车辆的基准质量加上 25 kg 之和 的 3% 进行估算。

(4)如图2所示,将试验状态测得的道路行驶阻力曲线修正到基准状态。(试验温度: 17.31℃,大气压: 100.97 kPa)

2.2 风洞法

#### 2.2.1 空气阻力 F<sub>4i</sub> 测量

(1)空气阻力测量是在一座全尺寸汽车风洞内 完成的,风洞的流场指标 满足标准中的要求。



图 2 滑行阻力曲线基准状态修正前后对比

(2)按规范要求将试验车辆固定在测力天平 上,调整轮眉高度,确保该参数与滑行法测量时保 持一致。

(3)本次试验测量了每一基准速度 V<sub>j</sub>下的 C<sub>Dj</sub>\*A<sub>f</sub>值,分别基于每一基准速度 V<sub>j</sub>下的 C<sub>Dj</sub>\*A<sub>f</sub>值 和基于基准速度为 130 km/h 时的 C<sub>D130</sub>\*A<sub>f</sub>值计算得 到了汽车的行驶阻力,并进行了比较。发现基于二 者算得的行驶阻力差异极小,具体结果详见本文的 4.1 部分。

2.2.2 滚动阻力 F<sub>Di</sub> 测量

(1)将车辆装载至测试质量,保证轮眉高度与 滑行法的保持一致。按照规范要求将车辆固定在底 盘测功机上,车辆垂直方向不应增加额外的约束力。

(2)将底盘测功机的等效惯量设置成车辆的测试质量,将确定的空气阻力项系数 C<sub>D</sub>输入到底盘测功机。

(3)底盘测功机对滚动阻力的测量有两种方法——等速法和减速法。本文也分别采用了这两种方法进行了对比试验。

等速法:稳定车速下的测量,即当车速稳定在 每一基准速度时,底盘测功机对该基准速度下的滚 动阻力*F<sub>i</sub>Dyno</sub>进行直接测量,从前一基准速度应平* 滑过渡到下一基准速度点,每一基准速度稳定时间 为4~10s。测试工况为130 km/h,120 km/h,…, 20 km/h。

减速法:减速下的测量,即试验车辆在底盘测 功机上进行减速滑行。车辆预热后,将车速提高到 比最高基准速度至少高 10 km/h(即 140 km/h), 开始滑行。若连续两次滑行试验测得的力的偏差都 在 ±10 N 内,则滑行试验结束,本次试验的两辆 车均分别进行了两次滑行就已达到标准要求。按照 下式计算每个基准速度点 V<sub>i</sub>的滚动阻力 F<sub>iDyno</sub>。

$$F_{j\text{Dyno}} = F_{j\text{Decel}} - C_{\text{D}} \times V_{j}^{2} \quad (3)$$

式中:  $F_{jDecel}$  是以速度  $V_j$  在底盘测功机上滑行时的 行驶阻力;  $C_{\rm D}$ 为输入底盘测功机的空气阻力项系数。

(4)如图3和图4所示,将得到的滚动阻力数据进行滚筒曲面修正,并修正至基准状态。试验温度:20℃,大气压力:101.1 kPa。

滚筒曲面修正公式:

$$F_{j} = F_{j\text{Dyno}} \times \sqrt{\left[1 / \left(\frac{R_{\text{wheel}}}{R_{\text{Dyno}}} \times 0.2 + 1\right)\right]}$$
 (4)

式中: *R*<sub>wheel</sub> 为轮胎设计公称直径的一半, m; *R*<sub>Dyno</sub> 为底盘测功机滚筒半径, m。



# 结果与分析

3.1 不同基准速度下的 C<sub>Dj</sub>\*A<sub>f</sub> 值对行驶阻力的影响 为验证不同基准速度下的 C<sub>Dj</sub>\*A<sub>f</sub> 值对行驶阻力 的影响,本次试验对每一基准速度 V<sub>j</sub>下的 C<sub>Dj</sub>\*A<sub>f</sub>值进行了测量,结果如图 5 所示。



图 5 不同基准速度下的 C<sub>D</sub>\*A 值

图 6 为基于每一基准速度下的 C<sub>D</sub>\*A 值计算 得到的行驶阻力与基于基准速度为 130 km/h 时的 C<sub>D130</sub>\*A<sub>f</sub>值计算得到的行驶阻力的相对误差。A 车的 相对误差在 0.586% 以内(2.6 N 以内), B 车的相 对误差在 0.6% 以内(1.8 N 以内),误差极小,其 对测量结果的影响基本可以忽略。





# 图 6 基于每一基准速度下的 C<sub>D</sub>\*A 值计算得到的行驶 阻力与基于基准速度为 130 km/h 时的 C<sub>D130</sub>\*A<sub>f</sub> 值 计算得到的汽车行驶阻力的相对误差

所以从试验时间和成本的角度考虑,在汽车 无随车速改变而改变的空气动力学套件的前提下, 可选择只对某一基准速度下的 $C_{D}*A$ 值进行测量。 基准速度的选择建议在高速段,如图5所示,A车 与B车的 $C_{D}*A$ 值在高速段(60~130 km/h)范 围内,不同基准速度下的 $C_{D}*A$ 值波动较小,而在 低速段(20~60 km/h),由于风洞流场的稳定性 下降,及汽车的空气阻力数值过小,导致 $C_{D}*A$ 值 波动相对较大。所以建议在高速段范围内选择所 要测量的基准速度,基于本次试验数据,建议在 60~130 km/h范围内进行选择。

#### 3.2 分别基于风洞法与滑行法所测得的行驶阻力对比

图 7 和图 8 是 A 车的风洞法与滑行法所测行驶 阻力的对比情况。如图 7 所示,风洞法与滑行法所 测行驶阻力曲线趋势一致,随着速度的增大,风洞 法与滑行法所测行驶阻力的差值有所增大,在高速 段(90~130 km/h),等速法与滑行法的平均差值 在 13 N 以内,减速法与滑行法的平均差值在 25 N 以内,相比于高速段,低速段(20~90 km/h)的 差值明显比较小,其中等速法与滑行法的平均差值 在 7 N 以内,减速法与滑行法的平均差值

如图8所示,等速法与滑行法的相对误差在2.8% 以内,减速法除在极个别低速点误差在5%~6% 以外,其余都可以控制在4%以内。等速法与减速 法相比,等速法所测的行驶阻力更接近滑行法。



图 7 A 车风洞法与滑行法所测行驶阻力结果对比



图 8 A 车风洞法相对于滑行法的行驶阻力相对误差

图 9 和图 10 是 B 车的风洞法与滑行法所测结 果的对比情况。如图 9 所示, B 车的风洞法与滑行 法所测行驶阻力曲线趋势一致,随着速度的增大, 风洞法与滑行法所测行驶阻力的差值有所增大,与 A 车的变化趋势相似。



图 9 B 车风洞法与滑行法所测行驶阻力结果对比

如图 10 所示,车辆 B 的等速法与风洞法所测结果的相对误差在 2.8% 以内,平均相对误差是 1.96%。减速法与风洞法所测结果的相对偏差在 4% 以内,平均偏差是 1.987%。总体上讲,与减速法相比,等速法所测结果更接近滑行法所测结果。



图 10 B 车风洞法相对于滑行法的行驶阻力相对误差

#### 3.3 循环能量

循环能量 E 指在整个测试循环中车辆所需要的 能量,与车辆的行驶阻力和行驶距离有关。

$$E = \sum_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} E_i = \sum_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} F_i \times d_i \quad \circ \tag{5}$$

当 $F_i > 0$ 时,  $E_i = F_i \times d_i$ ; 当 $F_i \leq 0$ 时,  $E_i = 0$ 。 式中:  $E_i$ 为试验车辆从i-1时刻到i时刻的能量需求, Ws;  $F_i$ 为试验车辆从i-1时刻到i时刻的牵引力, N;  $d_i$ 为试验车辆从i-1时刻到i时刻的行驶距离, m。

依据 GB18352.6—2016 中的规定,风洞法与滑 行法之间的循环能量差在 ±5% 以内,才能证明所 使用设备或者设备组合的测量结果有效。循环能量 差ε<sub>k</sub>的计算公式为:

$$\varepsilon_{k} = \frac{E_{k,\text{WTM}}}{E_{k,\text{coastdown}}} - 1 \circ \tag{6}$$

式中:  $\varepsilon_k$ 为车辆在 WLTC 循环试验中风洞法与滑行法的循环能量差,%;  $E_{k, WTM}$  为车辆 k 基于风洞法获得的,基于 WLTC 循环的道路循环能量,J;  $E_{k, coastdown}$  为车辆 k 基于滑行法获得的,基于 WLTC 循环的道路循环能量,J。

基于 WLTC 测试循环,分别对 A 车和 B 车的 循环能量进行了计算。如图 11 ~ 13 所示, A 车和 B 车的循环能量差均在 5% 以内,其中 A 车的等速 法与滑行法的循环能量差是 1.21%, A 车减速法与 滑行法的循环能量差是 2.18%; B 车的等速法与滑 行法的循环能量差是 0.57%, B 车的减速法与滑行 法的循环能量差是 1.36%。证明了本次测试设备及 这种设备组合所测出的结果的有效性。



图 11 A 车分别基于风洞法和滑行法计算得到的循环能量







#### 图 13 B 车分别基于风洞法和滑行法计算得到的循环能量



#### 图 14 B 车分别基于风洞法和滑行法计算得到的循环能量差

#### 参考文献(References)

 [1] GB18352.6—2016. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段) [S]. 北京:中国标准出版社, 2016.
GB18352.6—2016.Limits and Measurement Methods for Emissions from Light-Duty Vehicles (China 6) [S].

#### 作者介绍



责任作者: 高岳(1981-),男,天津和 平区人。硕士,高级工程师,主要研究 方向为汽车空气动力学和汽车标准化。 Tel: 13820080566

E-mail: gaoyue@catarc.ac.cn

## 4 结论与建议

(1)不同车速下的 C<sub>D</sub>\*A 值差异很小,而这种 差异对行驶阻力的影响也是极小的,在本次试验中 综合两辆车的结果,相对误差在 0.6% 以内。所以 从节省试验时间和成本的角度考虑,在汽车无随车 速变化而改变的空气动力学套件的前提下,可选择 只测量某一基准速度下的 C<sub>D</sub>\*A 值。基于本次试验, 建议选择的速度范围是 60 ~ 130 km/h。

(2)综合 A、B 两辆试验车辆的测试结果,基于风洞法所测得的行驶阻力曲线与基于滑行法所测得的行驶阻力曲线,二者趋势一致,数值上十分接近,风洞法相对于滑行法的测量误差在 4% 以内(平均 15 N 以内),循环能量差在 ±5% 以内。证明了风洞法的有效性。

(3)在本次试验中,风洞法中的等速法与减 速法相比,等速法的测试结果更接近于滑行法。至 于这一结论是否普遍适用于其它车辆,还需进行更 多的试验进行进一步验证。

(4)等速法测滚动阻力,数据采集时一定要 等车速、测力值进入稳定状态后再开始采集,否则 会引起较大测量偏差,因为在稳定前,底盘测功机 所测的行驶阻力值会有非常大的波动。

(5)进行风洞法与滑行法的对比试验时,务 必要确保车身姿态一致,因为车身姿态对汽车的行 驶阻力有着直接而且显著的影响。建议应给定车辆 载荷分配的统一要求。

Beijing: China Standard Press, 2016. (in Chinese)

[2] Global Technical Regulation on Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures (WLTP) [Z]. 2016.



**通讯作者:** 李珍妮(1988-),女,山东 青岛人。硕士,工程师,主要研究方向 为汽车空气动力学。 Tel: 15122871651

E-mail: lizhenni@catarc.ac.cn