

# 汽车风阻系数试验与数值模拟的对比分析

付强<sup>1,2</sup>, 杨志刚<sup>1</sup>, 张辉香<sup>2</sup>, 梁盛平<sup>2</sup>, 朱贞英<sup>2</sup>

(1. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 吉利汽车研究院(宁波)有限公司, 浙江 宁波 315336)

**摘要:** 汽车风阻系数( $C_d$ )可以通过道路滑行试验、风洞试验和数值模拟获得。其中, 滑行试验最接近实际使用工况, 但受环境因素影响较大, 风阻系数重复性稍差; 风洞试验重复性最好; 数值模拟具有不确定性, 其原因在于湍流模型、网格策略等的选择对结果可能产生直接影响。为此, 对 15 款乘用车滑行试验、风洞试验和数值模拟结果进行分析, 结果发现以滑行试验作为对比基准, 其结果大多介于风洞试验和数值模拟的 $0^\circ\sim 5^\circ$ 偏航角之间。此外, 通过对以滑行为代表的道路行驶工况、风洞试验与数值模拟的差异点进行讨论, 并对某款电动车车型使用 3 种方法获得的风阻系数进行对比分析, 对误差产生原因进行初步解析。

**关键词:** 汽车空气动力学; 风阻系数; 滑行试验; 风洞试验; 数值模拟

中图分类号: U467

文献标志码: A

## Comparative Analysis of Automobile Drag Coefficient Test and Numerical Simulation

FU Qiang<sup>1,2</sup>, YANG Zhigang<sup>1</sup>, ZHANG Huixiang<sup>2</sup>, LIANG Shengping<sup>2</sup>, ZHU Zhenying<sup>2</sup>

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Geely Automobile Research Institute (Ningbo), Ningbo 315336, Zhejiang, China)

**Abstract:** The coefficient of drag ( $C_d$ ) can be obtained by road coast down test, wind tunnel test, and numerical simulation. Of the three methods, the coast down test is the closest to the actual use condition of consumers, but it is greatly affected by environmental factors. The  $C_d$  has a slightly poor repeatability. The wind tunnel test has the best repeatability. The numerical simulation is uncertain of because the choice of turbulence model and grid strategy may have a direct impact on the results. A comparison of the results of the coast down test, the wind tunnel test, and the numerical simulation of 15 passenger cars indicates that taking the coast down test as the comparison benchmark, most of the results are between

$0^\circ$  and  $5^\circ$  yaw angle of the wind tunnel test and the numerical simulation. By discussing the differences between the road driving conditions represented by the coast down behavior, the wind tunnel test, and the numerical simulation, the  $C_d$  obtained by the three methods for an electric vehicle model is compared, and the causes of errors are preliminarily analyzed.

**Key words:** vehicle aerodynamics; coefficient of drag; coast down test; wind tunnel test; numerical simulation

2020 年, 我国开始实施 GB 18352.6—2016《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》。由此可见, 我国对汽车节能减排的要求越来越高, 同时燃油车的经济性和电动车的续航的研究也越来越受到关注。改善汽车燃油经济性和续航能力可以通过降低汽车的行驶阻力来实现。汽车行驶过程中, 需要克服的阻力主要包括空气阻力、滚动阻力、制动器拖滞力、传动系阻力、轮毂轴承阻力以及车辆前束引起的阻力等。而随着行驶速度的增大, 空气阻力所占的比例越来越大。测量和评价以风阻系数( $C_d$ )为代表的空气阻力变得愈加重要。

风阻系数的“真值”问题一直是行业难题, 无法精确获得, 也导致各种研究手段缺乏进行准度比较的基准<sup>[1]</sup>。滑行试验、风洞试验和数值模拟是获得风阻系数的主要手段, 这 3 种方式各有优缺点, 综合考虑稳定性、可重复性等工程应用背景, 行业内通常使用风洞试验作为风阻系数的主要测量手段。风洞试验边界条件可控, 试验重复性高, 测得的风阻系数稳定, 但是风洞建造和维护成本均较高。基于计算流体动力学的数值模拟方法也是汽车空气动力学开发和研究的重要手段之一。随着计算机技术的不断发展, 数值模拟方法能够缩短开发周期, 并获得全计算域的流场信息, 成本也相对较低, 因此也得到越来越大的应用。但是数值模拟由于基础理论的限制,

对于实际行驶工况的模拟存在一定难度,准确性也需要进一步验证<sup>[2]</sup>。

本文首先分析了3种获得风阻系数方法之间的差异,并将多款车型道路滑行试验和风洞试验的风阻系数分别进行对比分析;然后对某款电动车车型使用3种方法获得的风阻系数进行比较,最后对偏差产生的原因进行初步解析。

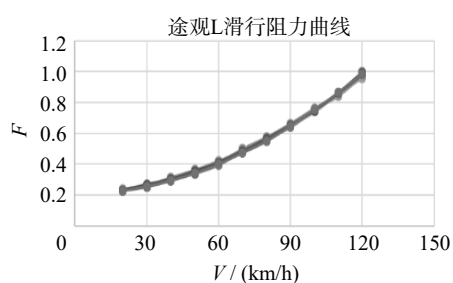
## 1 3种方法对比分析

### 1.1 滑行试验

汽车道路滑行试验可以得到汽车的风阻系数。汽车道路滑行是指汽车在水平路面且无风(近似)的条件下加速至某预定速度后,摘挡脱开动力,利用汽车的动能继续行驶的减速运动<sup>[3-4]</sup>。GB 18352.3—2005《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ阶段)》中规定:滑行试验时,首先将汽车变速器置空挡(电动车一般为空挡),然后加速,直到比选定试验车速  $V$  高出 10 km/h,测量汽车从  $V+\Delta V$  减速至  $V-\Delta V$  所用的时间  $t_1$ (其中  $\Delta V \leq 5$  km/h)。同样的过程在相反的方向再进行一次,测试时间  $t_2$ ,取  $t_1$  和  $t_2$  的平均值  $T$ ,多次重复试验,直到  $T$  的统计误差不大于 2%。根据 GB 18352.3—2005 规定,可以得出功率和修正到基准状态下的滑行阻力<sup>[4-5]</sup>。

一般认为,滚动阻力、空气阻力和传动系阻力的经验公式分别为<sup>[6]</sup>:

$$F_r = mgf \cos \alpha \quad (1)$$



a 阻力滑行曲线

式中: $m$ 为汽车质量; $g$ 为重力加速度; $f$ 为汽车滚动阻力系数; $\alpha$ 为坡度角。滚动阻力系数受多个因素影响,主要包括车速、路面种类、轮胎的材料与气压等。通常可以认为 $f$ 与车速呈线性关系。

$$\text{空气阻力 } F_d = 1/2 C_d A v^2 \rho \quad (2)$$

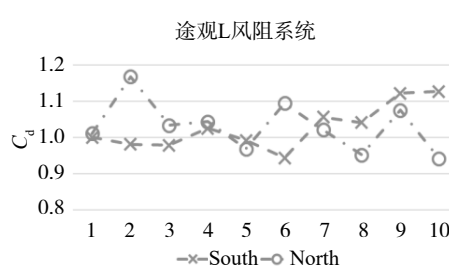
式中: $C_d$ 为汽车空气阻力系数; $A$ 为迎风面积; $v$ 为相对速度,是风速与车速的矢量和<sup>[3]</sup>; $\rho$ 为空气密度。

$$\text{传动系阻力 } F_c = b_0 + b_1 v \quad (3)$$

式中: $b_0$ 为传动系阻力系数; $b_1$ 为传动系阻力的速度影响系数。

使用二次多项式拟合滑行阻力曲线<sup>[5]</sup>,对应的二次项系数可以得到风阻系数。这种环境下的风阻系数是真实行驶条件下的风阻系数。但是,滑行试验的试验条件难以控制,天气影响较大,重复试验的试验环境无法完全保证一致,得到的风阻系数也无法保证较高的稳定性。此外,道路试验过程中存在很多随机因素,影响数据采集的结果,如路面凹凸情况、随机阵风等。这些随机因素会影响采集的时间和滑行距离,影响得到的滑行阻力曲线。

图1a给出了某车型的单次滑行获得的阻力曲线,通过该曲线使用式(2)可以获得风阻(空气阻力)系数。图1b是归一化后的风阻系数,其中south和north分别代表滑行的不同方向,可以看出直线段坡度和随机误差对结果的影响,滑行最终的结果是多次结果的平均值,在环境稳定的前提下,增加滑行次数可以减少误差,提高结果的稳定性。



b 单次滑行风阻系数

图1 滑行曲线及单次滑行获得风阻系数

Fig.1 Coast down curvature and  $C_d$  obtained from each coast down

### 1.2 风洞试验和数值模拟

风洞是一个复杂的非标设备,同一辆车在不同风洞进行试验也可能获得的试验结果不相同<sup>[1,7]</sup>。影响风洞试验结果的系统性因素有雷诺数效应、边界层效应、阻塞效应等<sup>[8]</sup>、结构性因素、环境因素等。其中结构性因素包括壁面干扰、测量系统误差、收缩

比、地面模拟系统、集气系统等;环境因素包括季节、海拔、温度、湿度等。尽管现代风洞能够有效进行温度、湿度等影响因素控制,但是不可重复一致的因素远多于可控因素,导致不同风洞针对同一测量物体难以获得稳定可比的测量结果。

本文风洞试验在同济大学上海地面交通工具风

洞中心(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, SAWTC)进行。本文数值模拟采用产品研发常用的计算域和网格策略,尺寸为 $60\text{ m}\times 20\text{ m}\times 12\text{ m}$ 。计算域采用速度入口边界,速度为 $120\text{ km/h}$ ,出口边界采用压力出口,压力设置为0,其余计算域边界为滑移壁面边界条件。车轮旋转速度根据入口风速 $120\text{ km/h}$ 和车轮静力半径近似得出,为 $103\text{ rad/s}$ ,车轮为旋转壁面。使用STAR-CCM+ 11.06 流体分析软件进行计算,湍流模型选择不可压缩模型和RNG  $k-\epsilon$  湍流模型。

### 1.3 差异分析

差异对比均基于盐城试验场的滑行试验、同济大学风洞结果和上文确定的数值模拟方法,尽量避免因方法误差导致的不一致性。表1对比了3种研究方法的差异。由表1可以看出,与滑行试验相比,风洞试验除湍流强度<sup>[1]</sup>远好于滑行试验和空间限制外,其他方面比较接近真实行驶工况。但是,由于空间和地面边界条件等的限制,风洞的结果均需要修正,其修正的目的正如Hucho所述:“风洞修正的目的是尽力弥补其与汽车在自然中行驶的差异。”<sup>[1]</sup>自然环境中的湍流强度对风阻系数有决定性的影响,不止影响结果稳定性,对真实行驶的流场结构、真实的偏航角等的影响也都是决定性的。

如图2所示,当湍流强度为4%时,研究车型的风阻增大0.010;湍流强度是10%时,研究车型的风阻增大0.024,超过总风阻的8%<sup>[9]</sup>。另外,全尺寸汽车风洞目前还不能进行全地面的模拟,导致地面效应对风阻系数的真实影响也无法在风洞中得以完全体现。这两个问题是风洞与路面行驶的主要差异点。数值模拟与两种实车试验方法具有全方面的差异。数值模拟在工程应用可接受的尺度内无法进行间隙、装配误差等方面的模拟,同时由于理论基础的不清晰,其求解方法是近似方法,无法获得精确解<sup>[2]</sup>。因此,目前我国及WLTP等法规均要求以试验方法为主,即滑行试验结果的准确性不只是技术问题,也有合规方面的问题,但数值模拟在可视化、响应速度快、不依赖物理样车方面具有独特的优势,也是不可或缺的工具。

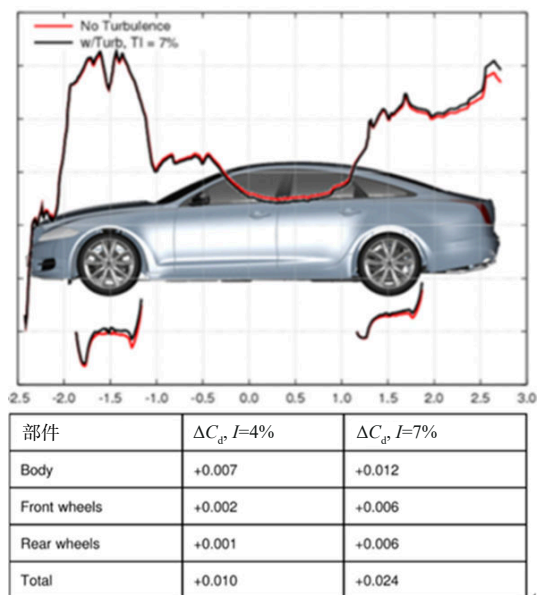


图2 湍流强度对汽车风阻的影响

Fig.2 Impact of turbulence intensity on  $C_d$

## 2 风阻系数对比分析

### 2.1 研究的车型

滑行试验采用的车型包括大众途观L、雪佛兰Bolt、Volvo XC90、大众途昂、Audi Q7、福特锐界、Audi A4、BMW X4、BMW 218I、本田缤智、Volvo XC60等共7款SUV车,其中4款为跨界车、4款为三厢车。滑行试验场地为江苏盐城大丰汽车试验场,滑行直线段长度为 $2.5\text{ km}$ ,路面水平度低于 $2^\circ$ 。

数值模拟车型为一款跨界电动车,研究时将对该车型的数值模拟、滑行试验及风洞试验结果进行全面对比。

### 2.2 滑行试验与风洞试验风阻系数对比

如图3所示,对比风洞试验无偏航时的风阻系数与滑行试验得到的风阻系数。可以看到,整体而言,滑行试验得到的风阻系数一般要比对应风洞试验得到的风阻系数大。本文所统计的车型风洞试验无偏航时的风阻系数与滑行试验得到的风阻系数平均偏差约为0.024。参考SAE J2263标准中的相关定义,定义偏差系数 $\epsilon = (C_{wd} - C_{rd}) / C_{wd} \times 100\%$ ,由此计算得出偏差系数约为7.45%。

表1 3种方法的主要差异对比

Tab.1 Comparison of differences of three methods

方法	湍流强度/%	泄漏	装配误差	地面边界条件	车轮及旋转方式	空间
滑行试验	2.0~10.0	真实	真实	真实行驶	真实	无限空间
风洞试验	0.2	真实	真实	模拟路面(五带系统)	接近真实	有限空间
数值模拟	1.0	无泄漏	无误差	壁面模拟	数学方法或近似模拟	近似无限空间

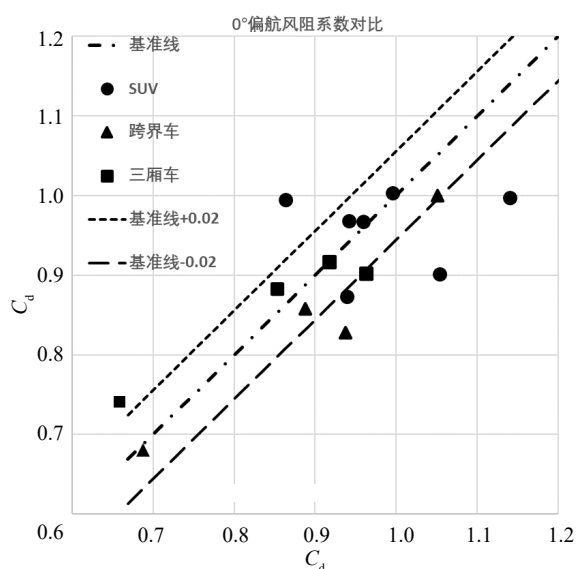


图3 滑行试验风阻与风洞试验(无偏航)风阻对比  
Fig3 Comparison of  $C_d$  from wind tunnel test and road coasting test

根据 GB 18352.5—2013 规定,滑行试验时的平均风速小于 3 m/s,最大风速小于 5 m/s。而汽车空档滑行时,车速是逐渐减小的,这意味着环境风速对试验的影响越来越大。图 4 给出风洞试验在 5°偏航下的风阻系数与滑行试验得到的风阻系数对比。两种试验方法得到风阻系数平均偏差约为 0.024,相应的偏差系数为 7.17%。可以看出,此时部分统计车型风洞试验得到的风阻系数比滑行试验得到的风阻系数大。汽车速度 33.33 m/s 时,侧风 2.91 m/s 才能达到 5°偏航。而标准要求试验时的平均风速小于 3 m/s,最大风速小于 5 m/s,侧向风速小于 2 m/s,因此选择 5°偏航以内的风洞试验得到的风阻系数,与滑行试验得到的风阻系数进行对比也值得被考虑。

需要注意的是,即使在风洞试验中,也存在 5°偏航角结果小于 0°偏航角的现象。如图 5 所示,在图中统计的 34 辆车的偏航角数据中,有 4 辆车 5°偏航角小于或者非常接近 0°偏航角,这已在图中用虚线标出,并标明相应数值。图 6 为 3 组车辆偏航角状态对比,分组已用框出。可以明显看出,每组中 0°偏航角小的车辆,其 5°偏航角数值均大于对比基准。从风洞试验结果角度也可以说明偏航角需要被纳入风阻系数的评价中。

结合上面的分析,如无法进行风洞试验得到汽车的风阻系数时,可以采用滑行试验得出。滑行试验受环境因素(侧风、温湿度等)影响较大,本文中已统计的车型滑行试验与风洞试验得到的风阻系数偏

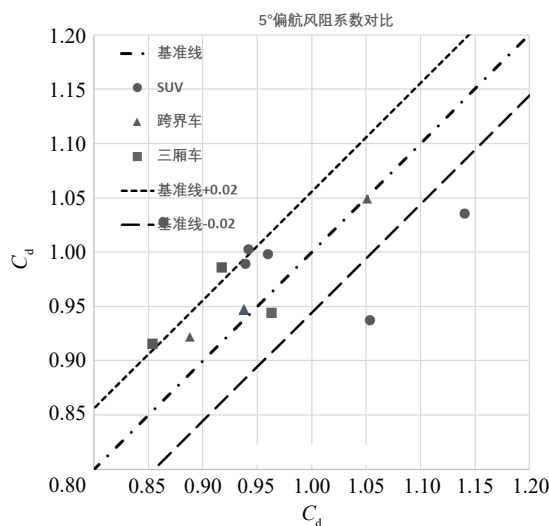


图4 滑行试验风阻与风洞试验(5°偏航)风阻对比  
Fig.4 Comparison of  $C_d$  from wind tunnel test (yaw angle=5°) and road coasting test

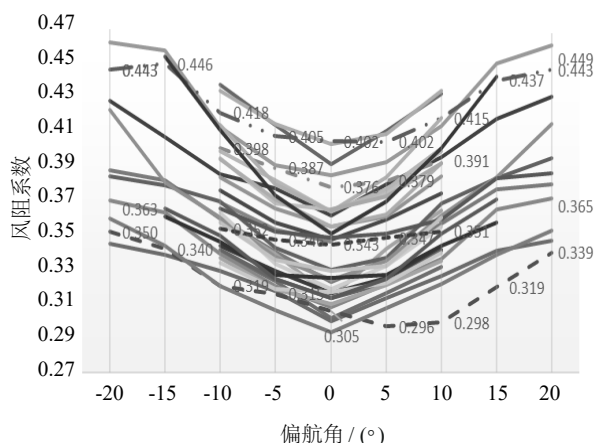


图5 34辆车的偏航角风阻系数  
Fig.5  $C_d$  of 34 vehicles at different yaw angle

差在 7% 以上。整体而言,风洞试验无偏航情况下得到的风阻系数一般要小于滑行试验得到的风阻系数,滑行试验得到的风阻系数一般对应风洞试验 0°到 5°偏航角下的风阻系数。

此外,滑行试验时应尽可能多次重复,减小随机因素对试验结果的影响。需要说明的是,受限于样本数量,本文对于滑行试验与风洞试验结果的对比还只是初步的。特别值得注意的是,0°偏航角通常不能代表真实路面行驶状态的风阻系数,也不总是各偏航角状态下的最低值,产品开发中和风洞试验时对偏航角的考察具有必要性。

### 2.3 某电动跨界车的3种方法对比分析

选取某大型跨界电动车作为研究对象,使用数

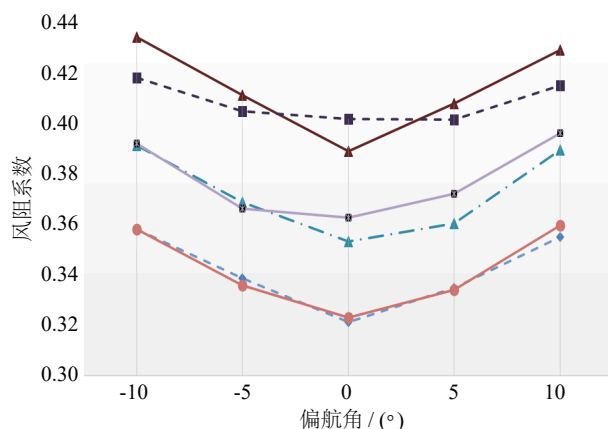


图6 3组典型偏航角风阻系数对比

Fig.6 Comparison of 3 groups typical vehicles at different yaw angles

值模拟、风洞试验和道路试验方法进行对比。该车型轴距大于2 900 mm,正投影面积约为 $2.62\text{m}^2$ 。

由图7可以看出,该车型在偏航角方面风洞试验和数值模拟趋势一致,但数值模拟高于风洞试验结果。滑行结果不存在偏航角工况,使用等值线是方便与风洞试验和数值模拟对比。针对该车型,滑行试验结果与风洞试验结果相差约0.002,比较接近;滑行试验与风洞试验 $0^\circ$ 偏航角相比差约0.01,其结果在偏航角 $2^\circ$ 到 $3^\circ$ 之间。需要说明的是,数值模拟与风洞试验结果对比是研究和开发过程中的热点问题,但两种方法获得的风阻系数并没有直接的关联性,且两种方法都有各自的系统误差和方法误差等误差项,其差别已经在表1中给出。两个方法获得的结果相近或者相差较大,需要系统性分析,不适宜作为彼此精度判断的准则。汽车空气动力学的最终目的是验证车辆真实路面行驶的空气动力学状态<sup>[1]</sup>,该目的也是汽车空气动力学所有研究结果的最终评价准则。

在超过50个样本的比较中,不同风洞之间的结果偏差可以超过0.02<sup>[1]</sup>;数值模拟的不同湍流模型及网格策略也会对结果造成较大影响;滑行试验重复性误差也经常超过0.02。因此,在实际的研究和产品开发中,使用3种方法相互验证、相互补充,并最终路面表现为最终评价依据是目前较为可行的研究方法。

### 3 结论

本文对比了多款车型滑行试验得到的风阻系数、风洞试验的风阻系数,以及数值模拟得到的风阻

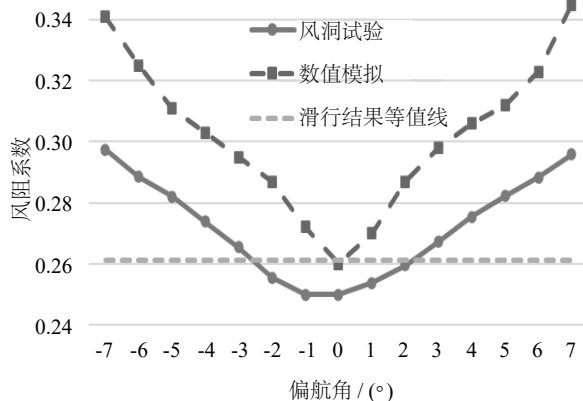


图7 数值模拟、风洞试验与滑行结果对比

Fig.7 Comparison of  $C_d$  from simulation, coast down test, and wind tunnel test

系数,并针对某款电动车采用这3种方法获得的风阻系数进行对比。结果表明:

(1) 滑行试验可以获得风阻系数,但由于滑行试验受环境因素(侧风、温湿度等)影响较大,需要尽量减小环境因素影响,增加试验次数;

(2) 数值模拟方法可以在没有物理样车阶段对各偏航角状态下的风阻系数进行预测和评价,其结果能够与风洞试验结果进行相互印证和补充;

(3) 针对风阻系数的评价,需要引入偏航角的影响。建议偏航角范围不小于 $5^\circ$ ,能够包含大部分车型真实路面行驶工况的风阻系数,用以进行较为准确的油耗及续航评估。

### 参考文献:

- [1] HUCHO W H. Aerodynamics of road vehicles [M]. 4th ed. Warrendale PA: SAE book, 1998.
- [2] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.  
WANG Fujun. Analysis of computational fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University press. 2004.
- [3] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.  
YU Zhisheng. Automobile theory [M]. Beijing: Tsinghua University press. 2000.
- [4] 张富兴,刘桂彬,高海洋,等. 我国汽车滑行试验标准分析与改进建议[J]. 北京汽车, 2012(2): 1.  
ZHANG Fuxing, LIU Guibin, GAO Haiyang, et al. Analysis and improvement suggestions of vehicle coast down test standards in China [J]. Beijing Automotive Engineering, 2012(2): 1.
- [5] 张庆良,赵树国. 汽车空气阻力系数的试验测定法[J]. 公路与汽运, 2009(5): 17.  
ZHANG Qingliang, ZHAO Shuguo. Test method for determination of automobile wind resistance coefficient [J]. Highways & Automotive Applications, 2009(5): 17.

- [6] OBIDI T Y. Theory and applications of aerodynamics for ground vehicles[M]. Warrendale PA: Society of Automotive Engineers, 2014.
- [7] BUCHHEIM R, UNGER R, JOUSSERANDOT P, *et al.* Comparison tests between major european and north american automotive wind tunnels[C]// SAE International Congress and Exposition. SAE Technical Paper 830301, 1983. <https://doi.org/10.4271/830301>.
- [8] 庞加斌, 刘晓晖, 陈力, 等. 汽车风洞试验中的雷诺数、阻塞和边界层效应问题综述[J]. 汽车工程, 2009, 31(7): 609.  
PANG Jiabin, LIU Xiaohui, CHEN Li, *et al.* A review on Reynolds number, blockage and boundary layer effect in automotive wind tunnel tests [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(7): 609.
- [9] D'HOOGE A, REBBECK L, PALIN R, *et al.* Application of real-world wind conditions for assessing aerodynamic drag for on-road range prediction[J]. SAE Technical Paper, 2015-01-1551. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1551>.
- [10] SAE International Surface Vehicle Recommended Practice. SAE road load measurement using onboard anemometry and coast down techniques: SAE Standard J 2263[S]. Warrendale PA: SAE International, 2008.