

基于中国气象风速数据的汽车风平均阻力系数

袁海东^{1,2}, 王海洋², 庞彦伟¹, 刘学龙²

(1. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津 300300)

摘要: 空气动力学阻力是汽车行驶阻力的的重要组成部分,也是汽车能耗的重要来源。汽车在真实道路环境中行驶受到道路自然风的影响,为了准确计算和评价汽车在真实道路环境中行驶的气动阻力特性以及能源消耗,提出了循环工况风平均阻力系数计算方法。首先,通过分析气象数据获取近地区域自然风的分布特征,进而分析不同地形条件下汽车的偏航角概率分布特征,通过数值计算的方法分析汽车气动阻力系数随车速和偏航角的变化规律,并基于偏航角的概率分布特征计算获得了给定车速的风平均阻力系数,最后,提出循环工况风平均阻力系数的计算方法,并分析了不同地形条件和速度区间对汽车气动阻力的贡献量。结果表明,对于本文研究的车型,循环工况风平均阻力系数高于零偏航工况的阻力系数 9.2% 和 7.3%,城市工况对气动阻力系数的贡献量小于 5%,40 km/h 及以上车速区间均对气动阻力系数有较大的贡献量。

关键词: 汽车空气阻力;风平均阻力系数;平均风

中图分类号: U461.1

文献标志码: A

Wind Averaged Drag Coefficient of Automobile Based on China Weather Air Speed

YUAN Haidong^{1,2}, WANG Haiyang², PANG Yanwei¹, LIU Xuelong²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. CATARC (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: The aerodynamic resistance of automobile is an important part of driving resistance and an important source of automobile energy consumption. Automobiles are driving in a real road environment affected by the natural wind on the road. In order to accurately calculate and evaluate the aerodynamic drag characteristic and energy consumption of an automobile driving in a real road environment, a calculation method for the wind

averaged aerodynamic drag coefficient based on cycle conditions was proposed. First, the distribution characteristic of natural wind near the ground was obtained by analyzing meteorological data. Then, the probability distribution characteristic of the yaw angle of the automobile under different terrain conditions was analyzed. The changes of the aerodynamic drag coefficient of the automobile with the speed and yaw angle were analyzed by numerical calculation. The wind averaged drag coefficient of a given automobile speed was calculated based on the probability distribution characteristic of the yaw angle. Finally, the calculation method of the wind averaged drag coefficient based on cycle conditions was proposed, and the contribution of different terrain conditions and speed ranges on the aerodynamic drag of the vehicle was analyzed. The results show that for the models studied in this paper, the wind averaged drag coefficient based on cycle conditions is higher than that of the zero-yaw condition by 9.2% and 7.3%, and the contribution of urban condition to aerodynamic drag coefficient is less than 5%. The speed range of 40 km/h and above all has a greater contribution to aerodynamic drag coefficient.

Key words: aerodynamic resistance of automobile; wind averaged drag coefficient; averaged wind

汽车空气阻力是行驶阻力的的重要组成部分,在汽车中高速巡航工况下空气阻力是行驶阻力的主要来源。GB 19578—2021《乘用车燃油消耗量限值》^[1]以及 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)》^[2]中对汽车的燃油消耗和排放的标准要求越来越严格,因此,通过降低汽车空气阻力实现节能减排是汽车空气动力学的重要研究内容。

收稿日期: 2021-08-20

基金项目: 中国汽车技术研究中心指南类课题(21243417)

第一作者: 袁海东(1990—),男,工程师,工学博士,主要研究方向为汽车空气动力学。E-mail: yuanhaidong@catarc.ac.cn

通信作者: 刘学龙(1983—),男,高级工程师,硕士研究生,主要研究方向为汽车空气动力学。E-mail: liuxuelong@catarc.ac.cn

汽车空气阻力通常用阻力系数(C_D)来衡量,一般在汽车风洞实验室测量给定车速下的气动阻力系数,汽车风洞实验室根据相对运动原理模拟车辆在道路上行驶时与空气的相对运动,进而测量车身所受空气的作用力,风洞喷口的气流速度相对均匀,气流偏角接近零,湍流度一般低于0.5%,这和汽车在实际道路上行驶的状态存在差异,通常,受到自然风和湍流的影响,车辆行驶的真实道路环境中存在不同时间和空间尺度的湍流,环境气流的湍流度一般大于2%,平均5%,最大为10%~20%。真实道路环境中的平均风和湍流对汽车多项空气动力学性能产生影响,比如:研究表明道路湍流增大了汽车气动阻力且降低了气动阻力对偏航角的敏感性^[3];道路湍流对车内噪声平均声压级影响不大,但从室内成员的主观感受来平价,道路湍流对噪声的调制作用影响比较明显^[4-7];汽车的气动力对低频大尺度的湍流表现为准定长特性,对高频小尺度湍流表现为非定常特性^[8-14];侧风可以明显改善发动机的冷却性能,散热器的散热性能随着进风湍流度的增加而增强^[15-16];低湍流度条件下高估了一些减阻方法或气动部件的减阻效果^[17-18]。Cooper^[19]和Leuschen^[20]研究了不同气动装置在不同偏航角下对载重汽车气动阻力的影响。

Cooper^[21]利用静止站点的大气湍流数据,建立了一个理想的数学模型来预测移动车辆所经历的湍流条件。文献[22]和文献[23]分别通过实验测量和数值仿真的方法分析了真实道路环境的湍流和平均风对汽车气动阻力特性的影响,文献[22]通过在风洞中设置湍流发生器产生不同湍流和侧风特性的来流条件,以此评价湍流和平均风对阻力系数的影响规律,研究表明:零偏航阻力系数不能代表实际道路上汽车的阻力系数,且准定常阻力系数低估了动态湍流对气动阻力的影响。文献[23]通过数值计算分析了湍流强度和偏航角对气动阻力系数的影响规律,并且通过能耗函数估算了湍流和平均风对汽车能耗的影响。

如图1所示^[24],考虑道路平均风和湍流的影响,真实道路上行驶的汽车与空气的相对运动是比较复杂的。其中:考虑平均风的作用,汽车的行驶方向与汽车和空气的相对运动方向存在夹角,称之为偏航角;而道路上的平均风速在道路垂直高度方向存在近似指数形式的速度剖面,近地面附近风速为零,随着高度的增大平均风速增大,这就导致偏航角在垂向逐渐增大;另外,考虑到真实道路上的不同尺度的

湍流的影响,平均风的风速和风向都是随时间变化的,这导致高度方向的偏航角分布也是随时间变化的,因此导致了图1中所示的汽车与空气的复杂相对运动关系。本文暂不考虑湍流的影响,仅考虑道路平均风对汽车气动阻力的影响规律。

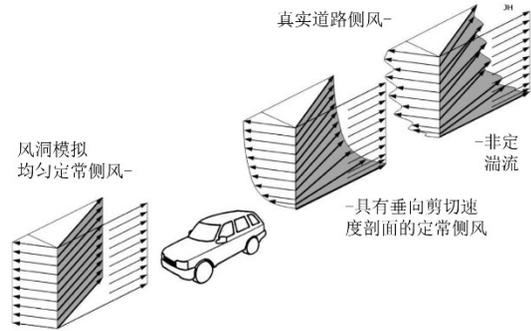


图1 真实道路上行驶的汽车与空气的相对运动

Fig.1 Relative movement of automobile and air on real road

车速在110 km/h(70 mph)时的空气动力学阻力系数通常用来评价车辆的气动阻力特性,然而该阻力系数是考虑所有影响因素的阻力系数的最低值,风平均阻力系数(C_{DW})被提出用来衡量车辆受到道路上的平均侧风影响的阻力系数,为了精确计算车辆真实的气动阻力能耗,基于循环工况的风平均阻力系数被采用。

考虑平均风对气动性能的影响主要用于评估真实道路行驶的阻力系数,以及用于气动优化设计中的工况参考。车辆在真实道路环境上行驶时,不同的车速以及不同平均风的风速和风向下车辆的气动阻力系数是不同的,可以使用风平均阻力系数来描述道路平均风作用下车辆的真实气动阻力系数,风平均阻力系数的一般计算公式如下:

$$C_{DW} = \int_0^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} C_D(\psi) \left(\frac{U_R}{U_V} \right)^2 d\theta \right] P(U_w) dU_w \quad (1)$$

式中: $C_D(\psi)$ 为给定车速 U_V 和偏航角 ψ 的阻力系数; U_V 、 U_w 和 U_R 分别为车速、风速和合成速度; θ 为风向角; $P(U_w)$ 为风速 U_w 的概率分布函数。在计算风平均阻力系数过程中,认为平均风的风向相对于车身为任意方向均匀分布,而平均风的风速则符合指定概率分布特征,为此需要对风向和风速进行两次积分运算。风速的分布特征可根据当地气象统计数据获得,或者通过道路测量获得,而不同偏航角下的阻力系数通常是由风洞试验或数值计算获得。目前常用的风平均阻力系数计算方法有MIRA

法、SAE法、TRRL法等^[25]。其中,MIRA法使用风速的威布尔分布进行计算,SAE法使用平均风速进行计算,而TRRL法假设风向角按给定分布特征进行计算。

上述公式计算的是指定车速下的风平均阻力系数,而车辆在道路上行驶过程中车速是始终在变化的,因此需要考虑不同车速下平均风对车辆阻力系数的影响规律。GB/T 38146.1—2019《中国汽车行驶工况 第1部分:轻型汽车》^[26]中规定了用于测量汽车能耗和排放的中国行驶工况,本文将采用此工况研究不同车速下车辆的风平均阻力系数。

基于循环工况的风平均阻力系数(C_{DWC})最初是由Howell等人^[27]建立的,循环工况风平均阻力系数在风平均阻力系数的基础上考虑循环工况中速度的变化的影响,可以用于计算的工况包括WLTP(世界轻型车测试规程)、NEDC(新欧洲循环工况)、EPA(美国环境保护署)工况和CLTC(中国工况)等循环工况。循环工况风平均阻力系数已经有了较为广泛的应用,例如:用来评价车身形状参数和气动部件对偏航工况下气动阻力的影响^[28];循环工况风平均阻力系数还用来评价道路侧风和阻力^[29]系数的雷诺数效应^[30]对滑行法测阻力系数的影响。

综上所述,本文的研究工作将包括如下几个方面:基于气象部门采集的风场数据估算全国范围的平均风概率分布特征;分析不同地形和车速条件下偏航角的概率分布特征;通过数值计算的方法分析不同车型的阻力系数随车速和偏航角的变化规律;计算给定车速的风平均阻力系数;分析中国循环工况下的汽车风平均阻力系数。

1 平均风概率分布估计

地面附近的自然风是由于地球大气层的热运动产生的,其风速和风向都会随着季节、气候和天气状况发生变,气象部门通过在全国范围内设置气象站,对当地的风向和风速进行记录,如图2所示。本文使用国家气象科学数据中心提供的中国境内839个气象站的日值气象数据^[31],对2011年1月至2015年12月份日平均风速进行统计分析。虽然地面风向具有地域性和季节性分布特征,但是考虑到汽车行驶方向的随机性,可以认为风向是在任意方向均匀分布的,而风速大小的分布则采用Weibull概率分布函数进行统计分析。计算公式如下:

$$P(U_w) = \frac{k}{c} \left(\frac{U_w}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{U_w}{c} \right)^k} \quad (2)$$

式中: k 和 c 分别为形状系数和比例系数;系数 k 和 c 及 U_w 则确定威布尔分布特征^[22]。形状系数 k 与平均风速有关,其平均风速可表示为

$$U_{WM} = c\Gamma(1 + k^{-1}) \quad (3)$$

式中的 Γ 为伽玛函数。

全国范围内全部气象观测站记录的日平均风速的Weibull分布估计参数如图3所示。由所有站点估算结果取平均值可得,形状参数 $k=2.40$,比例参数 $c=8.57$ km/h,该分布特征对应的地面上高10 m位置的风速为7.60 km/h。因此,全国范围内平均风速的概率分布特征如图4所示,其中虚线表示平均风速的位置,可以看出平均风速主要集中在5~10 km/h之间。



图2 全国气象观测点分布

Fig.2 Distribution of national meteorological observation sites

2 不同地形和车速下偏航角概率分布

上述基于气象数据分析获得的地面附近平均风速的概率分布特征描述的是地面以上高度为10 m的位置的风速分布,而汽车通常行驶所处的环境为地面以上4 m范围以内,因此需要通过气象数据估算近地面区域的风速分布特征。研究表明,地面以上垂直高度方向的平均风速符合对数分布特征,如下式所示:

$$U_w = U_{wG} \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中: U_w 为地面以上 z 处高度的风速; U_{wG} 为高度为 z_G 处的风速; α 为指数系数。近地面附近的风速分布特征受到地形的影响而不同,可以通过不同的指数分布特征描述不同地形条件下地面高度方向的平均风速分布特征,如表1所示。参考现有研究^[27],针对

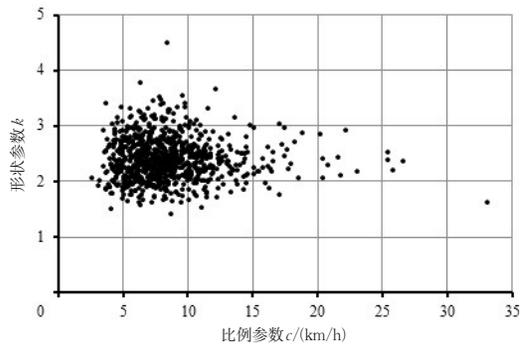


图3 全国各气象站观测记录的平均风Weibull分布参数
Fig.3 Weibull distribution parameters of average wind recorded by various meteorological observation sites across China

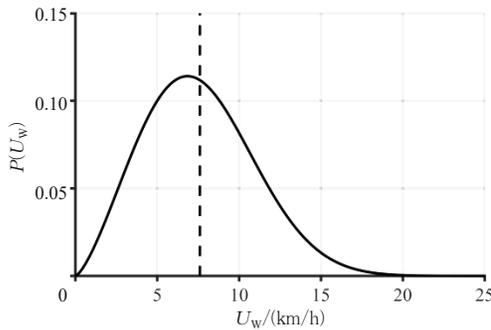


图4 全国范围内平均风速概率分布特征
Fig.4 Probability distribution of average wind speed across China

开阔地带、郊区和市区, α 指数系数为表1中所示。为此,通过式(4)和表1中 α 指数可以估算不同地形条件的近地面区域的风速分布特征。另外,有研究表明^[24],考虑一般乘用车,地面高度0.6 m位置处的平均速度可以近似等价于近地高度方向的速度梯度分布对气动阻力的影响,因此根据式(4)计算可以得到高度为0.6 m位置的平均风的分布特征。如图5所示,高度方向上平均风速的概率分布特征符合相同的概率分布规律。

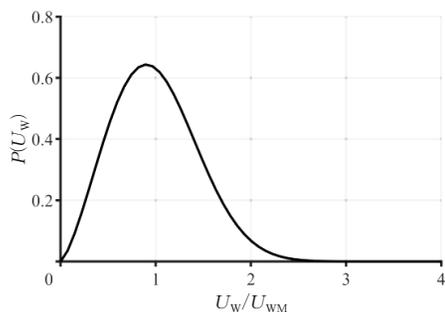


图5 平均风速概率分布特征
Fig.5 Probability distribution of average wind

表1 不同地形条件下,近地区域风速分布特征
Tab.1 Wind speed distribution near ground in different terrains

地形	车速/ (km/h)	α	$U_{W0.6}/$ $U_{W10.0}$	平均风速/ (km/h)	$c/$ (km/h)	k
开阔地带	(0,120]	0.16	0.638	4.85	5.46	2.40
郊区	(0,80]	0.22	0.539	4.09	4.61	2.40
市区	(0,50]	0.40	0.325	2.47	2.78	2.40

如图6所示,根据上述分析,车速、风速与合成速度形成速度三角形,由此可以得到合成速度和偏航角的计算公式如下:

$$U_R = \sqrt{U_V^2 + U_W^2 + 2U_V U_W \cos \theta} \quad (5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{U_W \sin \theta}{U_V + U_W \cos \theta} \right) \quad (6)$$

基于上述公式和平均风的概率分布特征可以估算不同地形和车速下的偏航角概率分布特征,如图7所示。除了20 km/h及以下车速区间,汽车的偏航角基本分布在 $\pm 24^\circ$ 范围内。

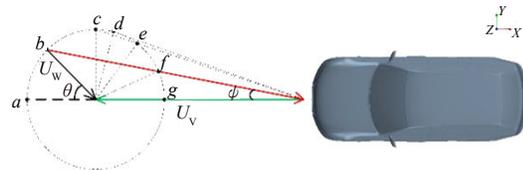


图6 车速、风速、合成风速组成的速度三角形
Fig.6 Speed triangle composed of vehicle speed, wind speed, and synthetic wind speed

3 气动阻力系数随车速和偏航角的变化规律

通常,汽车的气动阻力系数受到偏航角和车速的影响,为此,采用空气动力学标准模型DrivAer,分析不同车速和偏航角下气动阻力系数的变化规律。DrivAer是慕尼黑工业大学首先提出的介于简化模型与实车模型之间的空气动力学标准模型^[32],其设计细节比较接近实车设计,如图8所示。DrivAer模型包括了折背车、方背车和快背车3种后背形式。DrivAer模型曾被用来研究真实道路环境对汽车气动性能的影响规律,Jeff Howell等人利用DrivAer模型分析考虑剪切边界层侧风对汽车气动阻力的影响规律。本文主要通过数值仿真的方法分析了快背车和方背车两种车型的风阻系数随车速和偏航角的变化规律。

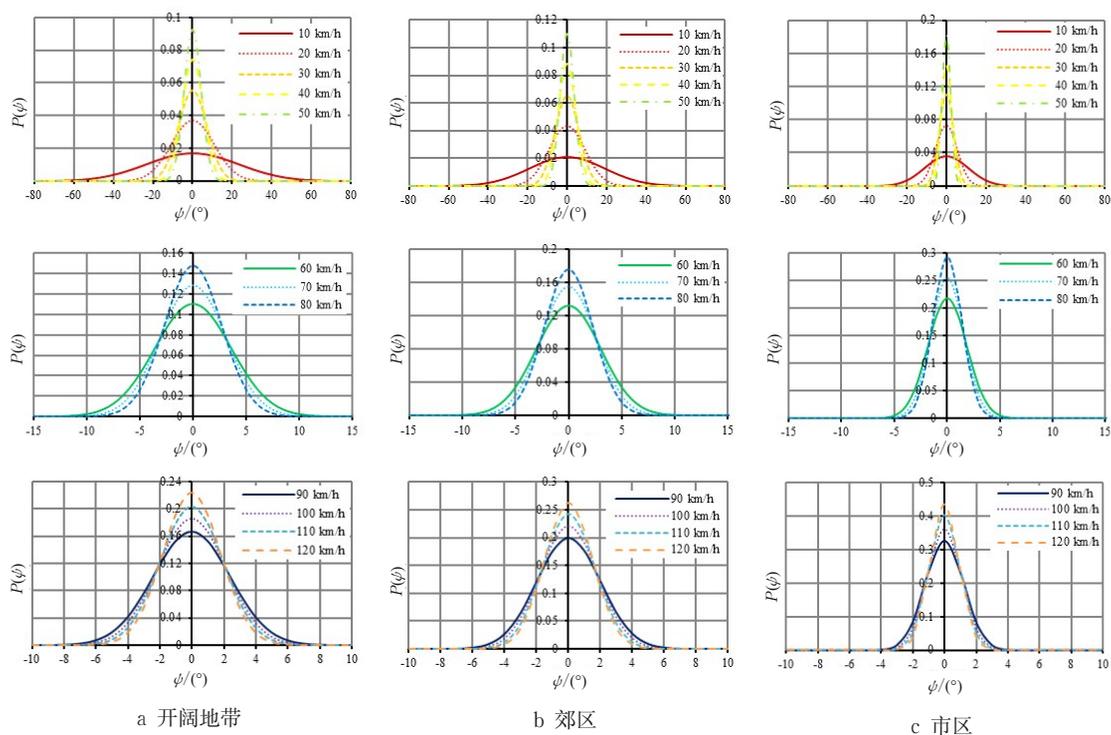


图7 不同地形条件下汽车的偏航角概率分布特征

Fig.7 Probability distribution of yaw angle of vehicles under different terrain conditions

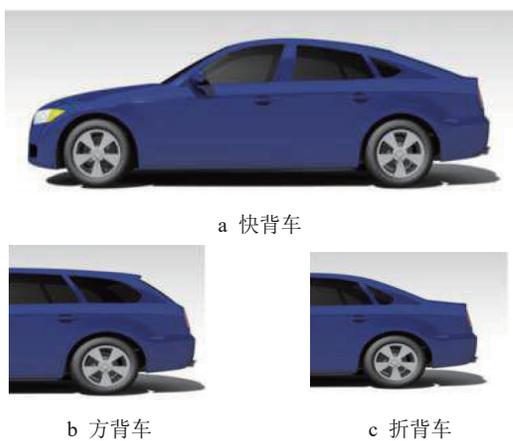


图8 空气动力学标准模型DrivAer

Fig.8 Aerodynamic standard DrivAer Model

数值仿真采用基于有限体积法的定常仿真分析方法,湍流模型采用可实现的*k*-epsilon湍流模型,计算域采用半无穷大空间,车前5倍车长位置设置速度入口边界,车后12倍车长位置设置压力出口边界条件,地面设置无滑移壁面边界,在7倍车高和左右13倍车宽的位置设置对称边界条件,计算模型采用全尺寸DrivAer模型,为了与实验数据对比,采用与试验相同的雷诺数,速度为16 m/s(实验中使用40%缩比模型,速度为40 m/s)。网格方案如图9所示,在模型壁面附近设置8层边界层网格,总厚度为4.6 mm,在车身以外区域设置逐层体空间加密区域,在轮腔和车尾设置空间加密区域。

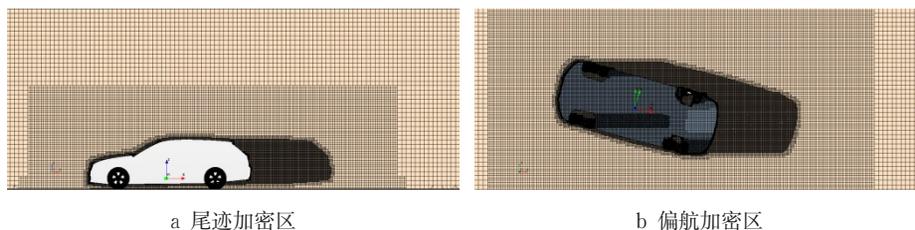


图9 网格方案

Fig.9 Grid strategy

如表2所示,本文对计算模型进行了网格相关性研究,采用了不同网格数量的6个网格方案,计算结果与试验和文献中的计算结果进行了对比。结果

看出,随着网格数量的增加, C_D 值的计算结果基本维持不变,快背车和方背车分别与试验测量结果的差异为5%和11%左右,本文的计算结果与文献中的

计算结果基本一致,这说明本文的计算方法是有效的。由于网格3及以上的网格方案中,尽管继续增加网格数量,但是 C_D 值的变化并不明显,网格3及以

上的网格方案中,计算结果与网格的相关性不大,兼顾考虑计算效率和计算精度,本文后续的计算采用网格3的网格方案进行分析。

表2 阻力系数的网格相关性
Tab.2 Grid correlation of drag coefficient

项目	网格		C_D			$\Delta C_D/\%$		
	面网格尺寸/mm	体网格数/万	快背车	方背车	折背车	快背车	方背车	折背车
试验 ^[33]	—	—	0.254	0.296	0.258	—	—	—
计算 ^[34]	—	8000	0.244	0.260	—	-3.9	-12.2	—
网格1	8-16	800	0.255	—	—	0.4	—	—
网格2	2-20	2500	0.240	—	—	-5.5	—	—
网格3	2-20	2800	0.242	0.262	0.241	-4.7	-11.5	-6.6
网格4	2-20	4300	0.243	0.261	0.241	-4.3	-11.8	-6.6
网格5	2-20	6300	0.241	0.260	0.239	-5.1	-12.2	-7.4
网格6	2-20	7800	0.241	0.259	0.239	-5.1	-12.5	-7.4

汽车气动阻力系数通常随着车速的变化而变化,通常存在一个临界速度,随着速度的增加阻力系数逐渐降低,达到临界速度后阻力系数保持不变。如图10所示,随着车速的增加,阻力系数逐渐降低,当车速增加到60~80 km/h左右,车速继续增加,阻力系数基本保持不变,车速在60~80 km/h公里以上的区域称为雷诺数无关区域,通常,汽车的气动阻力系数为该区域的阻力系数,低车速区域的阻力系数高于雷诺数无关区域的阻力系数,但汽车低速区域的风阻对整车的行驶阻力的贡献量降低,低速区域的风阻在整体风阻中的占比也比较低,风平均阻力系数需要考虑全部速度区间的风阻系数的平均值。

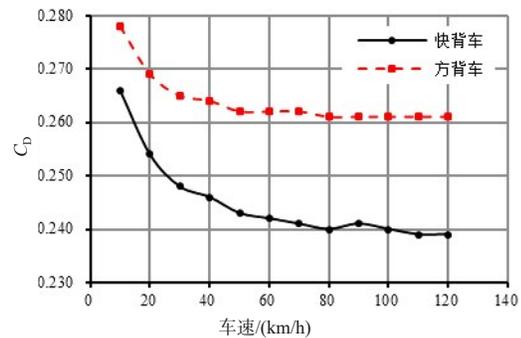


图10 零偏航不同车速的气动阻力系数
Fig.10 Drag coefficient at different speeds and zero yaw angle

根据第二部分的分析结果可知,不同车速具有不同的偏航角分布规律。为了进一步分析不同偏航角下气动阻力系数随车速的变化规律,在不同速度区间选择不同的偏航角分布范围进行研究,选择每个车速下偏航角的分布概率高于零偏航角分布概率1%以上的偏航角范围进行分析。在指定的偏航角范围内,选取一定间隔的偏航角进行分析,计算工

况如表3所示。

如图11所示,有偏航工况下阻力系数的变化规律与零偏航角工况下的变化规律基本一致,车速在60 km/h以上的区间中,指定偏航角的不同车速下的气动阻力系数基本一致。基于以上分析可知,对于60 km/h以上车速,在常见的偏航角分布范围内,汽车的气动阻力系数与车速无关。

表3 不同车速下的偏航角计算工况
Tab.3 Yaw angle at different automobile speeds

车速/(km/h)	偏航角/(°)											
10	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	
20	0	5	10	15	20	25	30	35	—	—	—	—
30	0	4	8	12	16	20	24	—	—	—	—	—
40	0	3	6	9	12	15	18	—	—	—	—	—
50	0	3	6	9	12	15	—	—	—	—	—	—
60	0	3	6	9	12	15	—	—	—	—	—	—
70	0	3	6	9	12	15	—	—	—	—	—	—
80	0	3	6	9	12	15	—	—	—	—	—	—
90	0	2	4	6	8	10	—	—	—	—	—	—
100	0	2	4	6	8	10	—	—	—	—	—	—
110	0	2	4	6	8	10	—	—	—	—	—	—
120	0	2	4	6	8	10	—	—	—	—	—	—

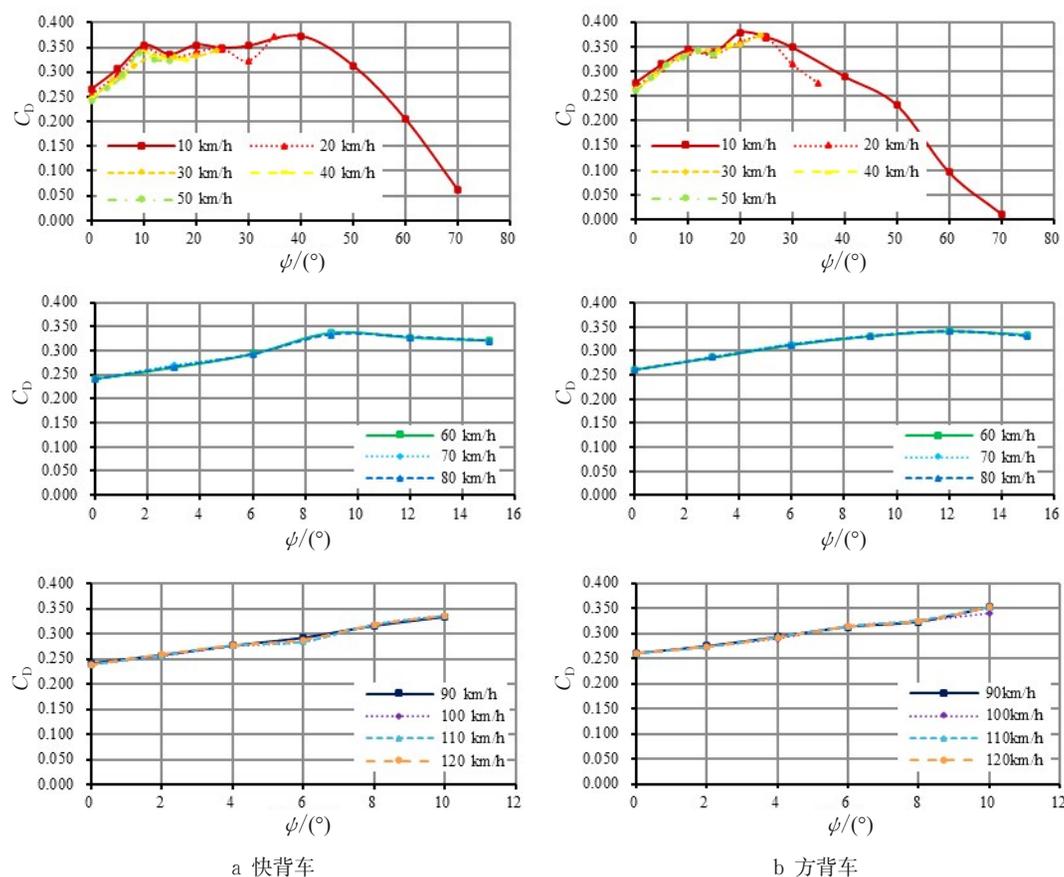


图11 不同车速和偏航角下气动阻力系数对比

Fig.11 Drag coefficient with different speed and yaw angle

4 给定车速的风平均阻力系数

由上述分析可知,车速在60 km/h以上,阻力系数与车速无关,而车速在60 km/h以下,阻力系数与车速和偏航角均相关,车速越低阻力系数越高。因此,为了考虑车辆在真实道路上行驶过程中的平均气动阻力系数,需要考虑不同车速和偏航角的阻力系数值。由第2部分分析结果可知,对于30 km/h以上的车速范围内,不同地形条件下,汽车的主要偏航角的分布基本在 $\pm 24^\circ$ 范围内,多数情况下偏航角集中在 $\pm 15^\circ$ 以内,在这样一个偏航角范围内,基本可以认为风速远小于车速,即 $U_w \ll U_v$ 。基于此条件,用于计算给定车速下的风平均阻力系数的式(1)可以改写为如下形式:

$$C_{DW(Yaw)} = \int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} C_D(\phi) / \cos \phi^2 P(\phi) d\phi \quad (6)$$

式中: $C_D(\phi)$ 为给定车速和偏航角下的阻力系数; $P(\phi)$ 为给定车速下的偏航角概率密度函数; ϕ_{\min} 与 ϕ_{\max} 为偏航角的最小值和最大值。基于式(6),可以根据给定车速下偏航角的概率分布特征估算该车速

下的风平均阻力系数。与基于偏航角概率分布的风平均阻力系数计算法类似的方法在文献中出现过,但是文献[35]中缺少 $\cos \phi^2$ 项。由于阻力系数是由相对速度无量纲化的,所以需要添加此项,这里不做详细解释。

经过计算可以获得不同地形和车速的风平均阻力系数,结果如图12所示。由图可以看出,风平均阻力系数高于零偏航工况的阻力系数,对于给定行驶地形条件,随着车速的增加,阻力系数逐渐降低,另外,由于不同地形条件下平均风速大小的差异的影响,开阔地形、郊区和城区的风平均阻力系数逐渐降低,因此,平均风速越高,其对阻力系数的影响越大,风平均阻力系数值越大。风平均阻力系数随车速的变化规律在文献[23]中出现过类似的结论。

5 循环工况风平均阻力系数

基于第4部分的分析可以获得给定行驶地形条件和车速下的风平均阻力系数,主要考虑了道路平均风对气动阻力系数的影响,为了获得汽车在真实

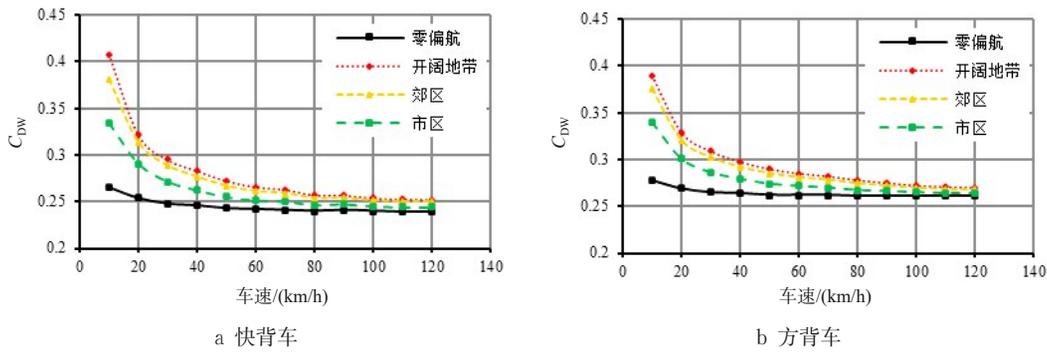


图 12 不同地形和车速的风平均阻力系数

Fig.12 Wind averaged drag coefficient with different speed and terrain

道路上行驶的气动阻力系数,还需要考虑车速和地形条件的影响,目前用于测试能耗和排放的循环工况包括:NEDC、EPA 标准工况、WLTP 循环工况以及 CLTC 工况。中国工况是基于全国范围的地形、交通、法规等驾驶环境和驾驶行为习惯制定的循环工况,为了衡量汽车在中国真实道路行驶的真实气动阻力系数,本文采用中国工况进行计算。图 13 为中国工况的速度时间曲线,一共包括高、中和低三个速度区间,一共 1 800 s,本文计算平均阻力系数时并不考虑停车怠速的时间段。图 14 展示了中国工况车速分布统计结果,可以看出,车速大部分集中在 60 km/h 以下的低速区域,因此,低速区域的阻力贡献不能被忽略。

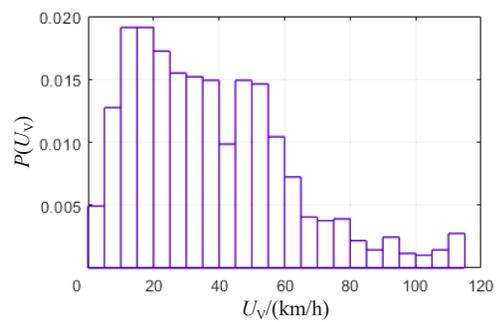


图 14 中国工况车速分布统计

Fig.14 Distribution of vehicle speed in China automotive test cycle

表 4 中国工况的平均速度和最高速度

Tab.4 Averaged and top speed of China automotive test cycle

区间	平均速度/(km/h)	最高速度/(km/h)
低速(1部)	20.8	48.1
中速(2部)	38.7	71.2
高速(3部)	54.2	114.0
全部	37.7	114.0

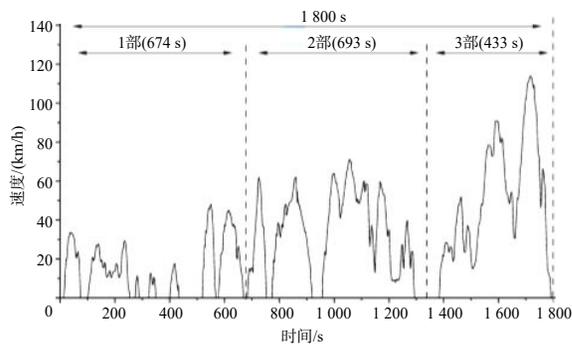


图 13 CLTC-P 工况曲线^[20]

Fig.13 Work condition curve of China Automotive Test Cycle^[20]

表 4 展示了中国工况 3 个速度区间的平均速度和最高速度,整个循环工况平均速度为 37.7 km/h。基于高、中和低三个速度区间的速度分布特征,将其分别对应于开阔地带、郊区和市区 3 种典型的地形条件,这样,前面关于不同地形条件下的平均风、偏航角分布特征和风平均阻力系数的分析结果可以用于循环工况风平均阻力系数的计算中。

式(7)表示气动阻力功率,从中可以看出气动阻力对整车能耗的影响与车速的 3 次方成正比,因此低速区域对整车阻力的贡献量很小。如 20 km/h 工况的气动阻力功率只有 110 km/h 工况的 0.6%,因此 20 km/h 及以下工况时,气动阻力对整车阻力的贡献量基本可以忽略。

$$P_A = \frac{C_{DW} \rho U_v^3 A}{2} \quad (7)$$

式(8)为循环工况风平均阻力系数的计算公式。基于此公式可以计算中国工况下汽车风平均阻力系数。表 5 为循环工况风平均阻力系数的计算结果,可以看出,与 120 km/h 零偏航无测风工况的阻力系数相比,快背车和方背车的循环工况风平均阻力系数分别增加了 9.2% 和 7.3%,对于两种车型,三种

地形条件的贡献量基本一致,其中城市工况贡献量不足5%,郊区工况和开阔地带分别贡献28%和67%。因此,汽车在真实道路上行驶过程中,城市路况对整车气动阻力的贡献量比较小,气动阻力主要来自于郊区和开阔地形的贡献。

$$C_{DWC} = \frac{\int_T C_{DW} U_V^3 dt}{\int_T U_V^3 dt} \quad (8)$$

表5 循环工况风平均阻力系数

Tab.5 Wind averaged drag coefficient based on cycle condition

车型	C_D	C_{DWC}	差值/%
快背车	0.239	0.261	9.20
		市区贡献量4.45%,郊区贡献量28.35%,开阔地带贡献量67.20%	
方背车	0.261	0.280	7.30
		市区贡献量4.39%,郊区贡献量8.34%,开阔地带贡献量67.26%	

差值= $(C_{DWC}-C_D)/C_D$ 。

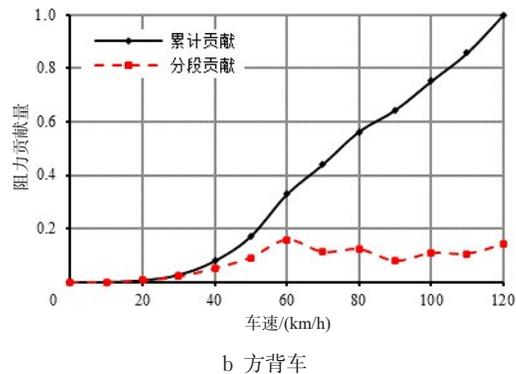
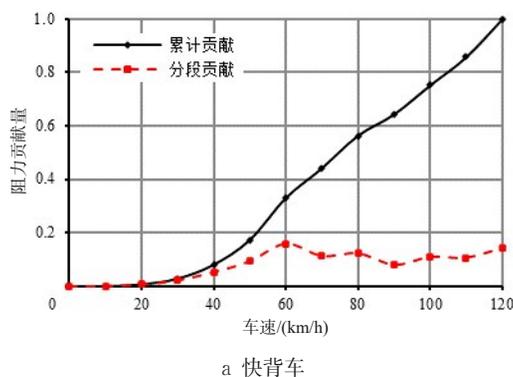


图15 不同速度区间对循环工况风平均阻力系数的贡献量分析

Fig.15 Analysis of contribution of speed ranges to the wind averaged drag coefficient based on Cycle Condition

6 结论

本文基于气象采集数据,首先采用威布尔分布函数估算了全国范围内近地区的平均风速分布特征。然后基于平均风在近地区域垂直高度方向的分布特征和不同地形条件的影响规律,计算获得了不同地形条件下车辆行驶范围内的偏航角的概率分布特征;采用DrivAer气动标准模型,通过数值计算的方法分析了气动阻力系数随车速和偏航角的变化规律;基于偏航角的概率分布计算获得给定车速下的汽车风平均阻力系数;计算了中国工况循环条件下汽车的风平均阻力系数,分析了中国工况中不同部分和不同速度区间对气动阻力的贡献量。基于以上工作,本文主要得到如下结论:

图15展示了两种车型不同速度区间对循环工况风平均阻力系数的贡献量,20 km/h以下的速度区间对阻力系数的贡献量仅有0.6%。由于城市工况的平均车速为20.8 km/h,因此该工况对阻力系数的贡献量很低,30~40 km/h速度区间的贡献量为5%,40 km/h以上速度区间的贡献量基本在10~15%之间。其中,50~60 km/h速度区间的贡献量最大为16%,因此,40 km/h及以上速度区间是气动阻力系数的主要贡献区间,60 km/h以下的速度区间贡献量为32.7%。由于中国工况中该速度区间的分布占比比较高,因此40~60 km/h速度区间的贡献量不能被忽略。基于以上分析可知,40 km/h及以上速度区间对汽车在真实道路上行驶所受的阻力系数都有重要影响,在该速度区间,阻力系数与车速相关。因此,在进行气动阻力优化和改进工作中,需要考虑该速度区间的气动阻力特征,低风速区间的阻力优化也应该被重视。

1) 基于威布尔分布估算的近地区域平均风速的概率分布特征,形状参数的平均值为2.4,比例参数的平均值为8.57 km/h,对应该分布特征,地面以上高度方向10 m的位置的平均风速为7.6 km/h。

2) 基于近地区域的平均风概率分布特征,计算获得不同地形条件下汽车行驶环境中的平均风概率分布特征,开阔地带、郊区和市区的威布尔分布比例参数分别为5.46、4.61、2.78 km/h。通过速度三角形可以计算获得偏航角概率分布特征,除了20 km/h及以下车速区间外,汽车在真实道路上行驶的偏航角主要分布在 $\pm 24^\circ$ 范围内。

3) 气动阻力系数与车速和偏航角的相关性分析可知,车速在60 km/h以上时,气动阻力系数与偏航角相关与车速无关,车速在60 km/h以下时,气动

阻力系数与车速和偏航角均相关,对于给定的偏航角,车速越低阻力系数越大。

4) 基于偏航角的概率分布特征计算获得了不同地形条件下给定车速的风平均阻力系数,对于开阔地形、郊区和市区三种地形条件,风平均阻力系数依次降低,且均高于零偏航工况的阻力系数。

5) 由循环工况风平均阻力系数分析结果可知, DrivAer 快背车和方背车的循环工况风平均阻力系数分别高于零偏航阻力系数的 9.2% 和 7.3%。由阻力系数的贡献量分析可知,城市工况贡献量不足 5%,郊区工况和开阔地带工况分别贡献 28% 和 67%。40 km/h 及以上速度区间对汽车在真实道路上行驶的气动阻力系数都有重要影响,在进行风阻分析与优化工作中应当充分考虑各个速度区间的风阻特性。

参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局. 乘用车燃油消耗量限值: GB 19578—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
State Administration for Market Regulation. Fuel consumption limits for passenger cars: GB 19578—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [2] 环境保护部. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段): GB 18352.6—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
Ministry of the Environmental Protection. Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles (China 6): GB 18352.6—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [3] D'HOOGHE 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 Papers, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1551>.
- [4] OETTLE N, SIMS-WILLIAMS D, DOINY R, *et al.* The effects of unsteady on-road flow conditions on cabin noise [J]. SAE Technical Papers, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4271/2010-01-0289>.
- [5] OETTLE N R, DAVID S W, ROBERT D, *et al.* The effects of unsteady on-road flow conditions on cabin noise: spectral and geometric dependence [J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2011, 4 (1) : 120. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0159>.
- [6] NICHOLAS O, OLIVER M, DAVID S W, *et al.* Evaluation of the aerodynamic and aeroacoustic response of a vehicle to transient flow conditions [J]. SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanical Systems, 2013, 6(1) : 389. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1250>.
- [7] OETTLE N R, SIMS-WILLIAMS D B, DOMINY, R G. Assessing the aeroacoustic response of a vehicle to transient flow conditions from the perspective of a vehicle occupant [J]. SAE International Journal of Passenger Cars Mechanical systems, 2014, 7(2) : 550. <https://doi.org/10.4271/2014-01-0591>.
- [8] FULLER J B, PASSMORE M. Unsteady aerodynamics of an oscillating fastback model [J]. SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanical Systems, 2013, 6(1) : 403. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1253>.
- [9] NICHOLAS O, OLIVER M, DAVID S W, *et al.* Evaluation of the aerodynamic and aeroacoustic response of a vehicle to transient flow conditions [J]. SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanical Systems, 2013, 6(1) : 389. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1250>.
- [10] OETTLE N, MANKOWSKI O, DAVID S W, *et al.* Assessment of a vehicle's transient aerodynamic response [C]// SAE 2012 World Congress & Exhibition. 2012. DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0449>.
- [11] PASCAL T, KIRSTIN H, RAINER D, *et al.* Experimental investigation of unsteady vehicle aerodynamics under time-dependent flow conditions - Part 1 [J]. SAE Technical Papers, 2011.
- [12] PASCAL T, KIRSTIN H, RAINER D, *et al.* Experimental investigation of unsteady vehicle aerodynamics under time-dependent flow conditions Part 2 [J]. SAE Technical Papers, 2011.
- [13] GUILMINEAU E, CHOMETON F. Numerical and experimental analysis of unsteady separated flow behind an oscillating car model [J]. SAE International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems, 2015, 1(1) : 646. DOI: <https://doi.org/10.4271/2008-01-0738>.
- [14] PASSMORE M A, MANSOR S. The measurement of transient aerodynamics using an oscillating model facility [J]. SAE international, 2006. DOI: <https://doi.org/10.4271/2006-01-0338>.
- [15] LIN C, SAUNDERS J W, WATKINS S. Effect of crosswinds on motor car engine cooling [J]. SAE Technical Papers, 1997. DOI: <https://doi.org/10.4271/970138>.
- [16] RYAN A M, TIMONEY D J. Measured and predicted effects of air flow non-uniformity on thermal performance of an r-134a evaporator [J]. SAE Technical Papers, 1997. DOI: <https://doi.org/10.4271/970831>.
- [17] GAYLARD A, NICHOLAS O, JOAQUIN, *et al.* Evaluation of non-uniform upstream flow effects on vehicle aerodynamics [J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2014, 7(2) : 692. DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-0614>.
- [18] WATKINS S, COOPER K. The unsteady wind environment of road vehicles, part two: effects on vehicle development and simulation of turbulence [J]. SAE Technical Papers, 2007. <https://doi.org/10.4271/2007-01-1237>.
- [19] COOPER K R. Truck aerodynamics reborn - lessons from the past [C]// International Truck & Bus Meeting & Exhibition. SAE Technical Papers, 2003. <https://doi.org/10.4271/2003->

- 01-3376.
- [20] LEUSCHEN J, COOPER K R. Full-scale wind tunnel tests of production and prototype, second-generation aerodynamic drag-reducing devices for tractor-trailers [C]// SAE International SAE 2006 Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition. SAE Technical Paper Series, 2006. DOI: 10.4271/2006-01-3456.
- [21] COOPER K R, WATKINS S. The unsteady wind environment of road vehicles, Part one: a review of the on-road turbulent wind environment [J]. SAE Technical Papers, 2007. DOI: 10.4271/2007-01-1236.
- [22] DANIEL S, CHRISTOPH S, FELIX W, *et al.* Investigation of aerodynamic drag in turbulent flow conditions [J]. SAE International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-1605>.
- [23] LUCA D, BRADLEY D, CHINWEI C, *et al.* Accurate fuel economy prediction via a realistic wind averaged drag coefficient [J]. SAE International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems, 2017, 10(1): 265. DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-01-1535>.
- [24] JEFF H, DAVID F, MARTIN P, *et al.* The effect of a sheared crosswind flow on car aerodynamics [J]. SAE International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems, 2017, 10(1): 278. DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-01-1536>.
- [25] WINDSOR S. Real world drag coefficient - is it wind averaged drag?[C]// The International Vehicle Aerodynamics Conference. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014: 3. <https://doi.org/10.1533/9780081002452.1.3>.
- [26] 国家市场监督管理总局. 中国汽车行驶工况 第1部分: 轻型汽车: GB/T 38146.1—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation. China automotive test cycle Part 1: Light-duty vehicles: GB/T 38146.1—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [27] HOWELL J, FORBES D, PASSMORE M. A drag coefficient for application to the WLTP driving cycle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(9): 1274. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407017704784>.
- [28] HOWELL J, PASSMORE M, WINDSOR S. A drag coefficient for test cycle application [J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2018, 11(5): 447. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0742>.
- [29] TODDY L, JOHN T, GREGORY F. Sensitivity analysis of aerodynamic drag coefficient to EPA coastdown ambient condition variation [J]. SAE Technical Papers, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-01-0666>.
- [30] FADLER G, LOUNSBERRY T, TRIPP J. Sensitivity analysis of coastdown test wind averaged drag coefficient for several functions of drag coefficient vs. speed [C]// WCX SAE World Congress Experience. 2020. DOI: 10.4271/2020-01-0663.
- [31] 国家气象科学数据中心. 中国地面气候资料日值数据集(V3.0)[DB/OL]. [2021-08-10]. <http://data.cma.cn>.
China Meteorological Data Service Center. China Ground Climate Daily Data Set (V3.0) [DB/OL]. [2021-08-10]. <http://data.cma.cn>.
- [32] Department of Mechanical Engineering, TUM. DrivAer model [EB/OL]. [2021-11-11]. <https://www.mw.tum.de/en/aer/research-groups/automotive/drivaer/>.
- [33] HEFT A I, INDINGER T, ADAMS N A. Introduction of a new realistic generic car model for aerodynamic investigations [J]. SAE World Congress, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0168>.
- [34] ASHTON N, REVELL A. Comparison of RANS and DES methods for the DrivAer automotive body [J]. SAE World Congress, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1538>.
- [35] FRÜH W G. From local wind energy resource to national wind power production [J]. AIMS Energy, 2015, 3(1): 101. DOI: 10.3934/energy.2015.1.101.