

基于模拟道路车身姿态的汽车空气动力学风洞测试

高岳, 范广军, 赵志祥, 田运

(中国汽车技术研究中心有限公司, 天津, 300300)

摘要: 汽车在风洞内进行气动力测试时, 由于车身姿态与实际道路状态不同, 导致所测气动数据与真实数值存在差异。本文通过使用风洞天平系统的“浮动模式”来模拟车辆在道路上的实际车身姿态的方法, 测试了 9 台不同车辆在初始固定姿态、车轮转动姿态和实际道路姿态下的车身姿态数据和气动性能数据, 分析了车轮转动和气动升力/力矩对于车身姿态和气动性能的影响, 给出了缩小风洞测试数据与实际道路测试数据差异的建议。

关键词: 汽车空气动力学; 风洞测试; 车身姿态

中图分类号: V211.74; U461.1

文献标志码: A

Wind Tunnel Test of Motor Vehicle Aerodynamics Based on Simulated Road Ride Height

GAO Yue, FAN Guangjun, ZHAO Zhixiang, TIAN Yun
(China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd.,
Tianjin 300300, China)

Abstract: When conducting aerodynamic test of vehicles in a wind tunnel, the discrepancy between the vehicle's ride height in the tunnel and its actual ride height on the road results in differences between the measured aerodynamic data and the actual values. A method of simulating the actual ride height of vehicles on the road is explored in this study using the "floating mode" of the wind tunnel balance system to test the ride height and aerodynamic performance data of 9 different vehicles under initial fixed ride height, wheel rotation ride height, and actual road ride height. The impact of wheel rotation and aerodynamic lift/torque on vehicle ride height and aerodynamic performance is analyzed, and recommendations for minimizing the disparity between wind tunnel test data and actual road test data are provided.

Keywords: vehicle aerodynamics; wind tunnel test; ride height

汽车在配备五带式天平及路面模拟系统的整车风洞内进行气动六分力测试时, 需通过裙边约束系统将天平的测力部分与车辆连接为一个整体进行测量, 起到固定车辆三个方向的自由度及传递受力的作用。裙边约束装置主要由夹持裙边的夹具与连接天平的撑杆组成。传统的测力天平, 裙边约束装置为“固定”式, 即夹具与撑杆在测试中距离风洞实验室地面的高度为恒定值, 车辆在测试过程中, 按照设定好的固定车身姿态进行测试, 在此状态下车辆的悬架系统不起作用, 车身姿态在整个测试过程中不会产生变化。

汽车在实际道路上滑行进行气动力测试时, 悬架系统起作用, 车身姿态随外部激励产生变化。假设道路平坦光滑, 则车身姿态主要受两方面的影响, 一是车轮高速旋转导致轮胎的转动半径增大, 车身上浮; 二是受到气动升力及升力矩的影响, 车身姿态上下起伏, 俯仰及侧倾。

根据上述分析, 汽车在风洞内进行气动力测试时, 车身姿态与实际道路状态存在一定的差异, 这就导致所测气动数据与真实数值存在差异^[1-2]。如气动阻力不一致, 则影响对汽车的排放、油耗及续航里程等关键性能指标的准确预测; 如气动升力或侧向力不一致, 则会影响汽车高速行驶稳定性或侧风稳定性等性能的评估。

本文旨在研究真实的道路车身姿态与风洞内姿态的差异, 分析影响姿态的因素以及模拟道路姿态与风洞固定姿态下, 车辆气动力测试结果的差异。

1 研究思路

本文使用中国汽车技术研究中心有限公司气动声学风洞的高精度天平及移动路面系统, 在风洞中模拟实际道路车身姿态。该天平系统具有“浮动模式”测试功能, 其裙边约束装置可释放车辆的 Z 向自

由度,使车辆自身悬架系统处于工作状态,并可在此状态下进行气动六分量的精准测量,同时裙边约束系统与车辆裙边连接点距风洞地面的Z向高度数据也实时被记录。

在浮动模式下,风洞不起风的状态转动车轮至指定车速,这时车身会上浮,记录裙边约束系统撑杆的Z向高度,与车轮静止状态撑杆Z向高度进行对比,可以得到单纯车轮转动情况下,车身姿态的变化量。在此状态下,叠加风洞起风的状态,则车身姿态受气动升力及升力矩产生的变化量,也可以被单独分离出来。图1所示为某测试车辆的数据,其中上下各两条曲线分别代表裙边约束系统的前轴撑杆和后轴撑杆的Z向高度随测试时间变化的趋势。

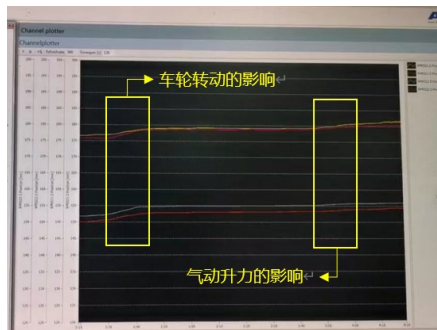


图 1 裙边约束撑杆Z向高度随测试时间变化

Fig.1 RPRS Z-height position varies against time

2 试验准备

2.1 试验车辆

本文共测试了9款不同尺寸及动力类型的车辆,按照如下名称进行分类:两厢轿车、小型SUV、紧凑型SUV、SUV1、SUV2、电动SUV、溜背轿车、电动性能车、性能车。

2.2 车辆准备

所有测试车辆均为量产车,轮胎充气至厂商指定胎压,按照T/CSAE 146—2020^[3]的要求进行加载。车辆加载质量为170 kg,配载分布为前排主驾驶和副驾驶位置各75 kg,后排座椅位置20 kg。所有车辆测量正投影面积用于计算气动系数。

2.3 试验方案

(1) 将加载后的测试车辆与天平进行连接固定,对齐车辆中轴线与风洞中轴线,天平撑杆设置为浮动模式,车轮低速转动(5 km/h)至车身姿态稳定后停止转动,记录此时的撑杆Z向位置,此为初始车身姿态。

(2) 天平撑杆继续设置为浮动模式,风洞不起

风,车轮转动达到相应速度(80、100、120、140 km/h)并维持1 min以上,稳定后记录各速度下撑杆Z向位置。

(3) 进行偏航角0°下的风速扫略(80、100、120、140 km/h),分别测试车辆下列状态下的气动六分量:①初始车身姿态(撑杆固定模式);②不起风状态记录的车轮转动状态下的车身姿态(撑杆固定模式),也称车轮转动姿态;③浮动车身姿态(撑杆浮动模式,记录相应速度下的撑杆Z向位置),也称模拟道路姿态。

(4) 固定风速为120 km/h,分别测试车辆偏航角为-10°、-20°、-30°时下列状态下的气动六分量:①不起风状态记录的车轮转动状态下的车身姿态(撑杆固定模式);②浮动车身姿态(浮动模式,记录撑杆位置)。

3 结果分析

3.1 速度对车身上浮的影响

由表1可以看出:车轮转动速度越快,车身上浮越明显。车身上浮是由于车轮转动产生的离心力导致轮胎变形,车轮转动半径增大,轮胎抬高了车身;而转动速度越快,离心力越大,导致的轮胎变形也就越大,从而车身上浮也越明显。测试风速越高,车身上浮越明显。这种情况下的车身进一步上浮是由车辆受到的气动升力引起的,由于气动升力与速度的平方成正比,所以风速越高,气动升力越大,车身上浮越明显。

3.2 单纯车轮转动对姿态、气动阻力及气动升力的影响

随着车轮转动,可以发现,所有试验车辆的车身姿态均上浮:在140 km/h时,一般车辆上浮幅度在3~4 mm左右;而高性能车辆上浮幅度稍低,在2~3 mm左右(见图2)。造成此现象的原因推测是因为高性能车辆大多采用扁平比较高的轮胎,离心力导致的轮胎半径增大量较小。另外一个现象是一般车辆前轴的上浮幅度大于后轴,而高性能车辆前后轴上浮较平均,造成此现象的原因是由于一般车辆为前置发动机,质心靠近前轴,静止状态下前轮受压变形较大,轮胎转动半径增大后可恢复的形变量较大,而性能车辆一般追求前后轴质量分布均匀,故前后轮胎受压变形较均匀。

因大部分的车辆前后轴上浮幅度是不均等的,故会带来正投影面积A的改变,所以在分析气动阻

表 1 试验车辆在不同风速下撑杆 Z 向高度位置					
Tab.1 Z-height position by different wind speeds					
单位: mm					
车辆类型	工况	80 km/h	100 km/h	120 km/h	140 km/h
两厢轿车	车轮转动	128.45	128.88	129.65	130.45
	车轮转动+风洞起风	128.94	129.70	130.95	132.34
小型SUV	车轮转动	162.36	163.00	163.74	164.28
	车轮转动+风洞起风	162.93	164.20	164.96	165.92
紧凑型SUV	车轮转动	113.17	113.66	113.95	114.86
	车轮转动+风洞起风	113.82	114.03	115.03	116.18
SUV1	车轮转动	200.63	201.34	202.09	202.86
	车轮转动+风洞起风	201.13	201.37	202.09	203.03
SUV2	车轮转动	226.80	227.52	228.12	228.84
	车轮转动+风洞起风	228.14	228.46	229.36	230.28
电动SUV	车轮转动	170.32	170.87	171.50	172.26
	车轮转动+风洞起风	170.80	171.11	171.70	172.13
溜背轿车	车轮转动	76.96	77.54	78.23	78.99
	车轮转动+风洞起风	77.69	78.19	78.87	80.03
电动性能车	车轮转动	86.46	87.06	87.69	88.61
	车轮转动+风洞起风	87.23	87.46	88.07	89.01
性能车	车轮转动	78.73	78.95	79.25	79.61
	车轮转动+风洞起风	78.88	79.14	79.45	79.85

注:表中撑杆高度数据为四个撑杆的算数平均值。

力影响时本文以 $C_d(A)$ 的变化量为依据,而非传统的 C_d ,这样可以避免正投影面积 A 变化带来的影响。所有试验车辆在车身姿态上浮条件下,车辆 $C_d(A)$ 相比于初始车身姿态测得的数值均增大(见图3)。

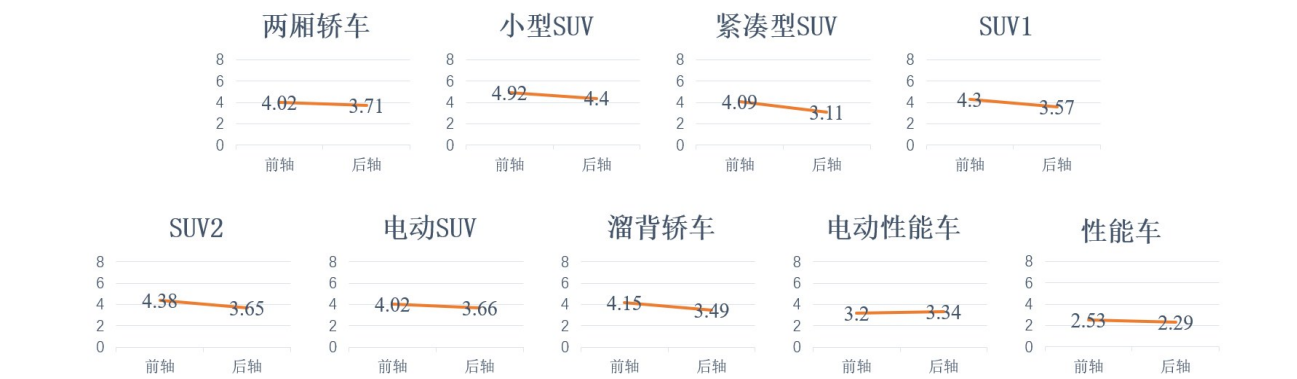


图 2 纯车轮转动状态下前后轴撑杆位置($V=140\text{ km/h}$, $Y=0$ 为车辆原始姿态撑杆位置)

Fig. 2 F/R RPRS strut position due to wheel rotation ($V=140\text{ km/h}$, $Y=0$ for original RPRS strut position)

对比模拟道路姿态和纯车轮转动姿态下的气动升力(见图6),在车身姿态前倾的车辆中,两厢轿车、SUV2、电动SUV、电动性能车的升力减少,紧凑型

所以单纯考虑车轮转动带来的车身姿态上浮对车辆的气动阻力的影响是负面的,即会增大气动阻力。

在纯车轮转动姿态下,试验车辆的气动升力系数 C_L 相比于初始车身姿态测得的数值普遍有轻微的增大趋势,除了紧凑型SUV有明显增大及电动性能车出现了减少。

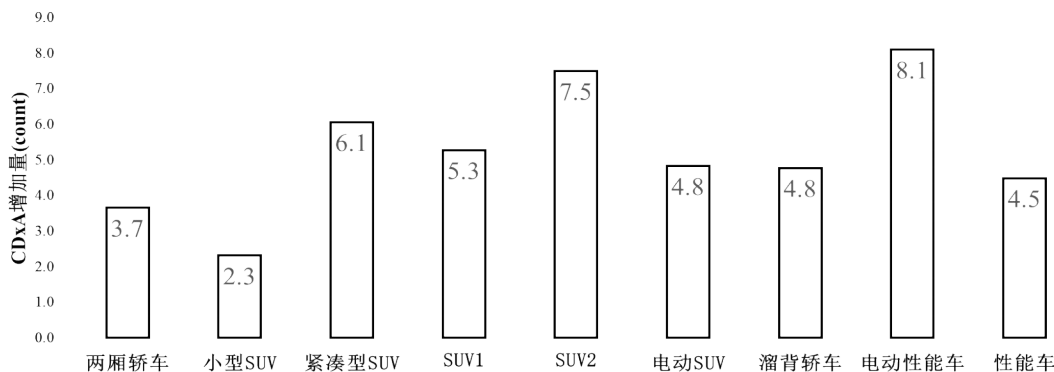
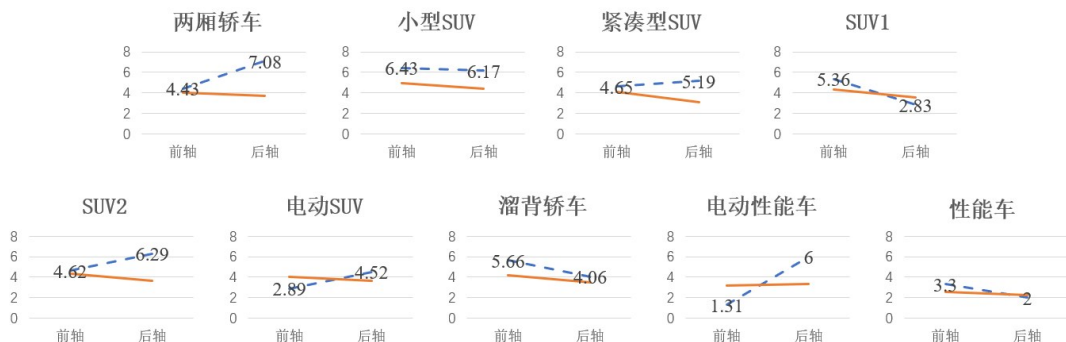
3.3 车轮转动叠加升力作用(模拟道路姿态)对姿态、气动阻力及气动升力的影响

叠加升力对姿态的影响后,车身姿态已接近实际道路滑行姿态,可以看出根据前/后轴升力的差异及俯仰力矩的正/负,车身姿态呈现出不同的变化趋势(见图4)。较之纯车轮转动的状态,俯仰力矩为正的车辆出现了前倾的趋势,而为负的车辆则是呈现后仰的趋势。前后轴升力较为均衡,即俯仰力矩的绝对值接近0的车辆,如小型SUV,车身姿态较之纯车轮转动状态进一步整体上浮。

对比模拟道路姿态和纯车轮转动姿态下的气动阻力,可以发现气动阻力的变化呈现不止一种的趋势(见图5)。在车身姿态前倾的车辆中,两厢轿车、电动SUV、电动性能车的 $C_d(A)$ 减小,紧凑型SUV、SUV2的 $C_d(A)$ 增大;在车身姿态后仰的车辆中,SUV1的 $C_d(A)$ 减小,小型SUV、溜背轿车的 $C_d(A)$ 增大,性能车的 $C_d(A)$ 基本无变化。

对比模拟道路姿态和初始姿态的气动阻力,则模拟道路姿态下所有试验车辆测得的 $C_d(A)$ 相比于初始姿态均增大,表明在风洞中使用传统的裙边撑杆固定模式测得的气动阻力数值小于实际道路滑行的数值。

SUV 升力无变化;在后仰的车辆中,小型SUV升力减小,SUV1无明显变化,溜背轿车和性能车升力增大。虽然因为车辆造型的不同,导致升力的变化趋

图3 车轮转动姿态对比初始固定姿态气动阻力的变化量($V=140$ km/h)Fig. 3 $C_d(A)$ variation due to ride height, wheel rotation vs. original ($V=140$ km/h)图4 模拟道路姿态(虚线)及车轮转动姿态(实线)前/后轴撑杆位置($V=140$ km/h)Fig. 4 F/R strut position, simulated road ride height (dashed line) vs. wheel rotation ride height (solid line) ($V=140$ km/h)表2 车轮转动姿态下试验车辆前/后轴升力系数及俯仰力矩系数($V=140$ km/h)Tab. 2 CLF, CLR, CPM of wheel rotation ride height ($V=140$ km/h)

	前轴升力 C_{LF}	后轴升力 C_{LR}	俯仰力矩 C_{PM}
两厢轿车	0.02	0.16	-0.07
小型SUV	0.06	0.02	0.02
紧凑型SUV	0.03	0.07	-0.02
SUV1	0.13	-0.05	0.09
SUV2	0.01	0.08	-0.04
电动SUV	0.01	0.07	-0.03
溜背轿车	0.15	0.03	0.06
电动性能车	-0.12	0.17	-0.15
性能车	0.12	-0.07	0.10

势并不绝对,但基本可以得出车辆前倾时升力减小,后仰时升力增大的一般性规律。

对比模拟道路姿态和初始车身姿态下的气动升力,两厢轿车、小型SUV、SUV2、电动SUV、电动性能车的升力减小,其余车辆增大。

3.4 浮动模式下大偏航角状态车身姿态变化及对气动六分量的影响

车辆在风洞中的偏航状态下,撑杆浮动模式相

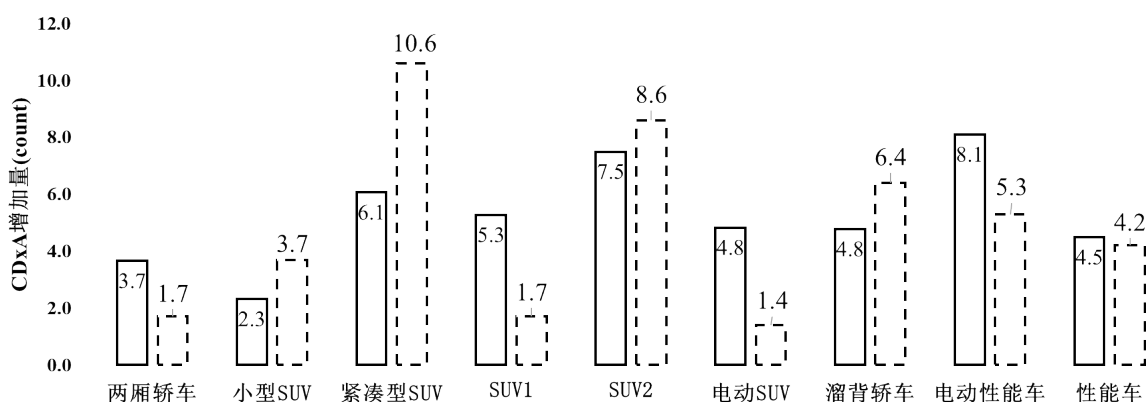
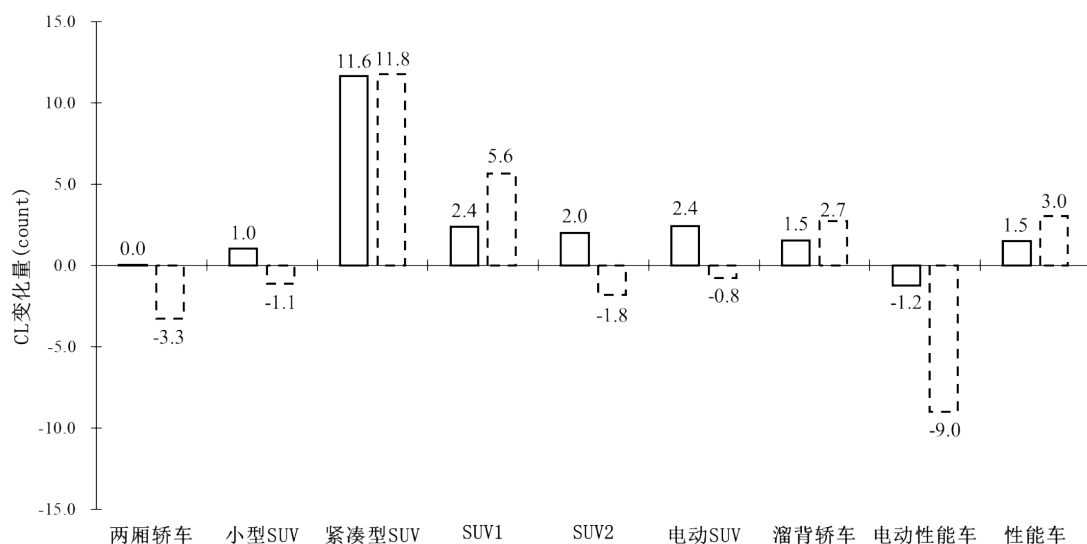
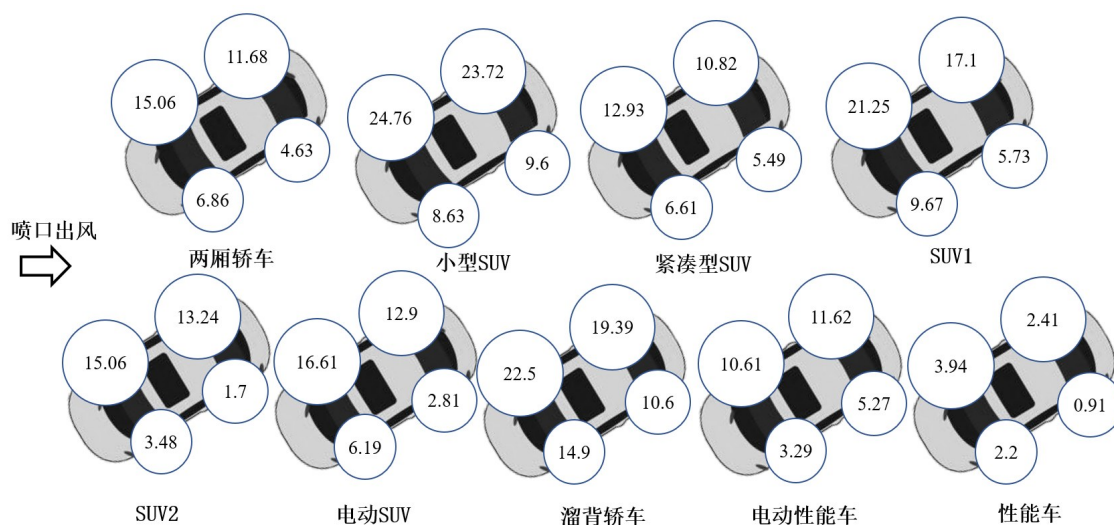
比于固定模式的车身姿态呈现出较大的变化。以($V=120$ km/h、偏角 $=-30^\circ$ 工况为例,图7中所有车辆的浮动模式撑杆高度均大于固定模式,而迎风侧增大明显大于背风侧,车辆出现侧倾的姿态。

大部分试验车辆在浮动模式侧倾状态下的气动六分量相比固定模式下有较大变化(见图8、图9),尤其以气动阻力(增大20~40 count)、气动升力(增大10~30 count)、侧倾力矩(增大10~20 count)和俯仰力矩(增大10 count)最为明显。

值得一提的是,在试验车辆中,性能车在大角度偏航的状态下,车身上浮及侧倾量均很小,导致其气动六分量没有出现较大的变化,推测其原因是悬架系统调教得比较硬,悬架行程较短,亦或者有更全面更完善的气动设计,使其在大偏航状态仍可以维持其原本的气动性能。

4 结论

车辆的车身姿态随车轮转动而上浮,在不考虑升力影响的情况下,上浮高度与车速(轮胎转速)成

图 5 初始状态($Y=0$)、车轮转动姿态和模拟道路姿态下的 $C_d(A)$ 变化量($V=140$ km/h)Fig. 5 $C_d(A)$ variation due to ride heights: original vs. wheel rotation vs. simulated road ($V=140$ km/h)图 6 初始状态($Y=0$)、车轮转动姿态和模拟道路姿态下的 C_L 变化量($V=140$ km/h)Fig. 6 C_L variation due to ride heights: original vs. wheel rotation vs. simulated road ($V=140$ km/h)图 7 撑杆变化量 浮动模式对比固定模式(单位:mm; $V=120$ km/h、偏角= -30°)Fig. 7 RPRS strut variation: floating vs. fixed (Unit: mm; $V=120$ km/h, AoA= -30°)

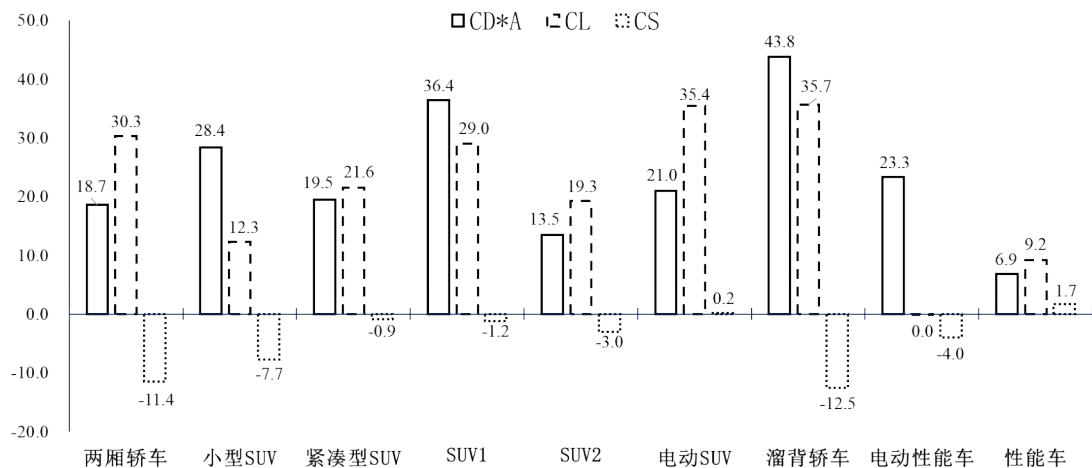


图8 气动阻力/升力/侧向力变化量浮动模式对比固定模式(单位:count; $V=120\text{ km/h}$, 偏角 $=-30^\circ$)

Fig. 8 $C_d(A)$, C_L , C_s variation due to ride heights: floating vs. fixed (Unit: count; $V=120\text{ km/h}$, AoA $=-30^\circ$)

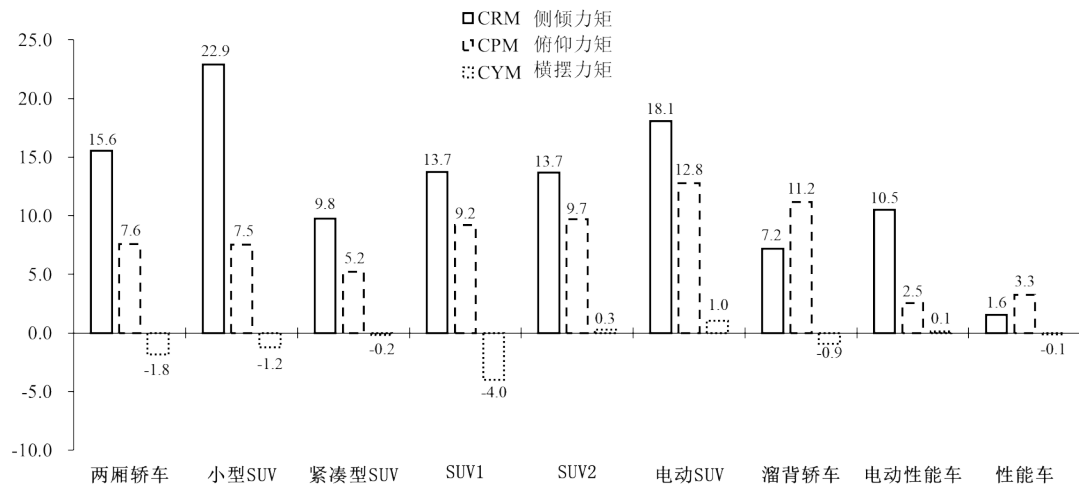


图9 气动侧倾/俯仰/横摆力矩变化量浮动模式对比固定模式(单位:count; $V=120\text{ km/h}$, 偏角 $=-30^\circ$)

Fig. 9 CRM, CPM, CYM variation due to ride heights: floating vs. fixed (Unit: count; $V=120\text{ km/h}$, AoA $=-30^\circ$)

正比,前置发动机的车辆前轴上浮幅度大于后轴,质量分配均匀的性能车辆前后轴上浮较平均。

单纯考虑车轮转动带来的影响,气动阻力增大,在叠加气动升力及俯仰力矩对姿态的影响后,根据车辆不同,气动阻力增大的趋势会加剧或减缓,但模拟道路姿态测试的气动阻力始终高于初始固定姿态,表明在风洞中使用传统固定模式测得的气动阻力数值小于实际道路滑行的数值。

模拟道路姿态测试气动升力变化趋势与车辆造型相关,但总体符合以下趋势:车身姿态上浮,升力增大;车身姿态前倾,升力减小;车身姿态后仰,升力增大。

偏航状态下,模拟道路姿态与固定姿态之间车身姿态差异较大,车辆出现侧倾,导致气动六分力差

异大。悬架较硬或较短的车辆,或整车气动设计较好的车辆,在偏航时姿态变化较小,有利于维持原本的气动性能。

5 对于风洞试验的建议

进行气动阻力测试及风洞法道路载荷测试^[4]时,使用浮动模式测试可使结果更接近“真实”状态(道路滑行试验)。如风洞不具备浮动模式,可在固定模式下,使用在道路滑行中获得的车身姿态(近似方法:在车辆本身前后轴升力平衡的前提下,车身姿态整体提高4~5 mm左右进行测试)。

对于前轴/后轴升力分布不平衡的车辆,推荐使用浮动模式进行测试。

验证主动格栅、主动尾翼、空气悬架等随车速变化的主动装置的气动改善效果时,应注意其不仅仅带来气动六分量的变化,还会改变车辆的姿态,带来更进一步叠加或减弱的气动效果,可在浮动模式下进行验证。

使用风洞评估车辆在大偏航角(横风)状态的气动特性时,推荐使用浮动模式,以便更好的与实际道路(如:侧风试验路)的试验结果^[5]进行对比。

参考文献:

- [1] SCHNEPF B, TESCH G, INDINGER T. On the influence of ride height changes on the aerodynamic performance of wheel designs [J]. *International Journal of Automotive Engineering*, 2015(6): 23.
- [2] VDOVIN A, SEBBEN S, WALKER T. *et al.* Investigation of vehicle ride height and wheel position influence on the aerodynamic forces of ground vehicles [C]//The International Vehicle Aerodynamics Conference. The Institution of Mechanical Engineers IMechE, 2014: 81.
- [3] 中国汽车工程学会. 汽车整车空气动力学风洞试验 气动力风洞试验方法: T/CSAE 146—2020[S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2020.
Chinese Society of Automotive Engineers. Full scale automotive aerodynamic wind tunnel test — the method of automotive aerodynamic performance test: T/CSAE 146—2020 [S]. Beijing: Chinese Society of Automotive Engineers, 2020.
- [4] 全国汽车标准化技术委员会. 道路车辆 侧风敏感性 风机输入开环试验方法: GB/T 41722—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
National Technical Committee for Automobile Standardization. Road vehicles—Sensitivity to lateral wind—Open-loop test method using wind generator input: GB/T 41722—2022 [S]. Beijing: China Standard Publishing Press, 2022.
- [5] 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: 中国环境出版社, 2016.
Ministry of Environmental Protection of China. Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles (CHINA 6): GB 18352.6—2016 [S]. Beijing: China Environment Publishing Press, 2016.