

# 风雨环境下高速车辆的气动特性和横向稳定性研究

陈禹, 汪怡平, 马瑞, 胡松源

(武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 针对汽车在高速行驶时遇到突发性风雨环境导致车辆侧偏而引发的车辆横向稳定性问题, 使用欧拉-拉格朗日方法对风雨环境下汽车外流场与雨滴分布进行数值模拟。研究不同侧风速度和降雨强度下的空气动力学特性, 建立整车多体动力学模型并加载气动载荷, 计算风雨环境下车辆的侧偏位移。研究结果表明, 侧风速度一定时, 降雨会导致背风侧拖曳涡及尾涡扩散区域增大, 车身背风侧负压区域扩大, 尾部气流速度降低, 气动阻力及气动侧力也随之增大, 路面附着条件的改变也会进一步降低车辆横向稳定性。

**关键词:** 风雨环境; 欧拉-拉格朗日方法; 气动特性; 横向稳定性

中图分类号: U462.2 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.01.07

## Study on the Aerodynamic Characteristics and Lateral Stability of High-Speed Vehicles Under Windy and Rainy Conditions

CHEN Yu, WANG Yiping, MA Rui, HU Songyuan

(Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Aiming at the instability of high-speed vehicles in windy and rainy environments, the Euler-Lagrange method was used to numerically simulate the external flow field of automobiles under such conditions. The aerodynamic characteristics was investigated at different side wind speeds and rainfall intensities. The whole vehicle dynamics model was established and subjected to aerodynamic loads. The lateral displacement of the vehicle under the windy and rainy conditions was calculated. The results show that, at a constant side wind speed, rainfall increases the drag vortex and the wake vortex diffusion region on the leeward side. Changes in the vortex structure increase the negative pressure area on the leeward side of the body and reduce the trailing airflow velocity. As a result, aerodynamic drag and side forces are increased. Additionally, changes in road surface adhesion further reduces the vehicle's lateral stability.

**Keywords:** wind and rainfall environment; Euler-Lagrange method; aerodynamic characteristics; lateral stability

沿海城市常出现伴随着强降雨和大风的强对流天气, 其破坏性强、持续时间短。强对流天气发生时会在短时间内出现降水强度变大、风力增强等现

象, 同时, 其局地性强, 水平影响范围小到甚至只有几十米<sup>[1]</sup>。汽车在高速行驶时突遇此种天气极易发生侧偏进而引起严重的安全事故。据美国交通部

收稿日期: 2023-12-06 改稿日期: 2024-02-25 网络首发日期: 2024-06-07

基金项目: 湖北省支持企业科技创新发展专项(2021BA015); 湖北省科技重大专项(2021AAA006)

参考文献引用格式:

陈禹, 汪怡平, 马瑞, 等. 风雨环境下高速车辆的气动特性和横向稳定性研究[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(1): 59-68.

CHEN Yu, WANG Yiping, MA Rui, et al. Study on the Aerodynamic Characteristics and Lateral Stability of High-Speed Vehicles Under Windy and Rainy Conditions[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(1): 59-68. (in Chinese)



联邦公路管理局的统计, 每年有 23% 的交通事故与恶劣天气相关, 其中 46% 发生在降雨期间<sup>[2]</sup>。2019 年, 因为突发的强风雨天气, 在英国德比郡的一条高速公路上一小时内发生了两起严重的交通事故<sup>[3]</sup>。由此可见, 强对流天气及其引发的强风雨环境会给公众行车安全与公路运营管理带来很大的挑战。研究恶劣天气对汽车安全性能的影响可以优化智能交通系统, 以便在主要道路上进行更好的主动安全管理。

在风雨环境下, 强风会严重破坏流场对称性, 使气动力和气动力矩瞬间发生变化, 改变车辆的行驶轨迹<sup>[4]</sup>, 而空气中存在的大量离散相雨滴与高速行驶车辆周围的复杂气流相耦合, 汽车周围的流场会驱使雨滴的流动, 而雨滴的存在也会对汽车流场带来影响。降雨也会在道路表面形成一层水膜, 降低轮胎与路面的附着系数, 影响车辆行驶安全。

风雨环境对运动物体的影响一直受到国内外学者的关注, 但大多数研究都集中在高速载具。如 THOMPSON 等<sup>[5]</sup> 在风洞中模拟雨天条件下, 翼型的表面特性和空气动力系数; SHAO Xueming 等<sup>[6]</sup> 研究了强风雨环境下的高速列车的气动特性, 采用基于力矩平衡的准静态稳定性分析方法, 确定了列车在不同雨风等级下的极限安全速度; YU Mengge 等<sup>[7]</sup> 基于非球形雨滴假设研究了暴雨环境下高速列车的绕流、压力系数分布等参数, 建立了与列车速度和降雨强度相关的气动力系数的显式预测方程。目前, 国内外对汽车在风雨环境下的气动特性研究较少, 冯伟等<sup>[8]</sup> 研究了风雨环境下车辆气动特性与车速、风速及降雨强度的关系; KOGBARA 等<sup>[9]</sup> 基于坡面流的总流量公式和紊流理论研究了降雨对路面抗滑性能和行车安全的影响。

强风雨环境下汽车外流场本质上属于气-液两相流问题, 常用的数值计算方法主要有欧拉-拉格朗日方法和欧拉-欧拉方法。二者对空气的建模均采用欧拉方法, 将空气视为连续流体, 用 Navier-Stokes 方程描述空气随时间及空间的变化, 对雨滴

的建模前者采用拉格朗日方法, 将雨滴视为相互离散的颗粒, 后者采用欧拉方法, 将雨滴视为与空气相互贯穿的连续流体<sup>[10-11]</sup>。目前, 对于风雨环境下车辆气动特性的研究较少, 以往研究对实际降雨环境的建模较简略, 车辆行驶工况不够明确, 关于恶劣天气下高速车辆横向稳定性的研究也极少考虑降雨的影响。

本文采用欧拉-拉格朗日方法, 建立风雨环境下高速车辆空气动力学模型, 分析车辆流场特性及气动力特性; 建立湿滑路面模型与整车多体动力学模型, 实现汽车多体动力学(Multi-Body Dynamics, MBD) 和计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的耦合仿真, 分析不同风雨环境下的车辆动力学响应, 揭示侧风速度与降雨强度对车辆横向稳定性的影响规律。

## 1 数值计算方法

### 1.1 连续相模型

汽车外流场的求解满足质量和能量守恒, 其中, 空气流速较低可视为不可压缩流动<sup>[12]</sup>。采用雷诺时均模拟法对流场进行求解, 引入 Navier-Stokes 方程后的控制方程如下。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\rho \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{i,j}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \bar{u}_i' u_j') - M_i \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $\bar{u}_j$ 、 $\bar{u}_i$  为雷诺平均速度;  $\bar{p}$  为雷诺平均压力;  $\bar{\tau}_{i,j}$  为湍流平均后附加应力张量;  $M_i$  为相间动量交换分量。

由于  $\bar{\tau}_{i,j}$  的引入, 整个系统不封闭, 无法对方程组直接进行求解。因此, 对于汽车外流场这一雷诺数高达 106 的充分发展湍流流场, 本文选用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型, 它能更好地模拟剪切旋流, 适用于复杂的风雨两相流动模拟<sup>[13]</sup>。

湍流动能  $k$  方程为:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial (ku_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍流耗散率  $\varepsilon$  方程为:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (4)$$

$$C_1 = \max \left( 0.43, \frac{S}{S+5} \right) \quad (5)$$

$$C_2 = C_2' + \frac{C_a S^3 (1 - S/S_0)}{1 + \beta S^3} \quad (6)$$

$$S = \left( 2S_{i,j} \times S_{i,j} \right)^{1/2} \frac{k}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$S_{i,j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

式中:  $\delta_k = \delta_\varepsilon = 1.2$ , 分别为  $k$  和  $\varepsilon$  在式中的湍流普朗特数;  $C_2' = 1.68$ ;  $C_a = 0.0845$ ;  $S_0 = 4.38$ ;  $\beta = 0.012$ ;  $G_k$  为来自层流速度梯度的湍流能量。

## 1.2 离散相模型

采用拉格朗日法对离散相进行数值模拟, 假设雨滴是不变形的粒子, 雨滴动量的变化由作用于雨滴的表面力和体积力来平衡。

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{2} C_d \rho A_p |u_s| u_s - V_p \nabla P_s + m_p g \quad (9)$$

式中:  $v_p$  为瞬时雨滴速度;  $C_d$  为雨滴的曳力系数;  $\rho$  为连续相密度;  $A_p$  为雨滴投影面积;  $u_s$  为雨滴滑移速度;  $V_p$  为雨滴体积;  $\nabla P_s$  为连续相中静压梯度。

描述降雨环境特征的主要参数包括降雨强度、雨滴粒径分布、雨滴终速和雨滴体积分数。一般用降雨强度来描述降雨的宏观特征量, 用雨滴谱来描述降雨的微观特征量。Gamma 雨滴谱适用于各种降雨强度条件下的降雨事件, 可以准确描述各种降雨强度下的雨滴直径大小分布情况<sup>[14]</sup>。Gamma 分布函数的具体表达式为:

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (10)$$

式中:  $N(D)$  为单位体积中直径为  $D$  的雨滴数量;  $N_0$  为浓度参数, 取值为 8 000;  $\lambda$  为尺度参数,  $\lambda = 7.09I^{-0.27} \text{ mm}^{-1}$ , 其中,  $I$  为降雨强度;  $\mu$  为雨滴形状参数, 根据经验取  $\mu = 2$ 。

雨滴在受到车辆周围流场影响之前会达到一个恒定的速度, 它由雨滴直径决定, MARKOWITZ<sup>[15]</sup> 得出的雨滴最终速度计算式为:

$$V_p = 9.58 \left( 1 - \exp \left( - \left( \frac{10^3 D_p}{1.77} \right)^{1.147} \right) \right) \quad (11)$$

式中:  $V_p$  为雨滴最终速度;  $D_p$  为雨滴直径。

## 1.3 相间耦合

由于计算中所采用的瞬态降雨强度为 100~300 mm/h, 雨滴体积分数为  $3.3 \times 10^{-6} \sim 9.9 \times 10^{-6}$ , 颗粒运动轨迹对流场有较大影响。考虑连续相与离散相之间的相互作用, 采用双向耦合模型<sup>[16]</sup>。根据雨滴运动的拉格朗日方程, 相间动量交换可以表示为:

$$M_{ex} = \sum \frac{3\mu C_D Re_p}{4\rho_p D_p^2} u_s \dot{m}_p \Delta t \quad (12)$$

式中:  $M_{ex}$  为颗粒的动量变化;  $C_D$  为颗粒阻力系数;  $Re_p$  为颗粒雷诺数;  $\dot{m}_p$  为单位体积的颗粒质量流率;  $\Delta t$  为相互作用时间。

## 2 模型选择及计算方法验证

### 2.1 整车几何模型

本文以某全尺寸轿车作为研究对象, 其几何模型如图 1 所示。车长 4.95 m, 车宽 1.88 m, 车高 1.47 m, 正投影面积为 2.334 m<sup>2</sup>, 在 120 km/h 的速度下的雷诺数为  $1.13 \times 10^7$ 。为提升计算效率, 对模型的几何细节进行了适当简化, 去除了模型中的进气栅、门把手、刮雨器等对流场影响较小的附件, 同时对底盘进行了光顺处理。

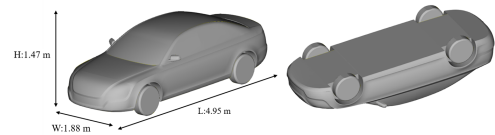


图 1 轿车几何模型

### 2.2 计算域及边界条件设置

计算域大小根据汽车尺寸以及风雨耦合场的形成与发展确定, 以减少边界对流动的影响, 阻塞比为 0.93%。计算区域如图 2 所示, 长度为  $16L$ , 宽度为  $14W$ , 高度为  $7H$ 。

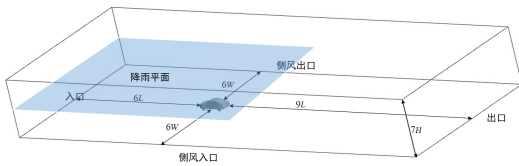


图2 计算域示意图

边界条件的设置见表1，采用合成速度法模拟不同的侧风工况，在入口和侧风入口处施加合成风速，合成风速为汽车移动速度与侧向风速的矢量和。拉格朗日离散相的计算需要通过喷射器完成粒子的初始条件设定，综合考虑雨滴受流场影响达到最终速度的形成时间以及计算效率，在车顶上方3 m处设置降雨平面。

表1 边界条件设置

计算域边界	边界类型	边界条件
入口	Velocity Inlet	合成速度矢量和
出口	Pressure Outlet	大气压强
侧风入口	Velocity Inlet	合成速度矢量和
侧风出口	Pressure Outlet	大气压强
顶面	Symmetry	对称壁面
地面	Wall	滑移壁面
车身表面	Wall	壁面
降雨平面	Injector	部件喷射器

基于Gamma雨滴谱模型，本文共建立60种不同直径的球形颗粒代表实际降雨环境中直径为0~6 mm的雨滴，不同降雨强度下的粒径分布如图3所示。通过场函数实现对不同粒径雨滴最终速度的控制，雨滴最终速度由式(11)计算得出。

计算域网格如图4所示。车身周围网格尺寸为

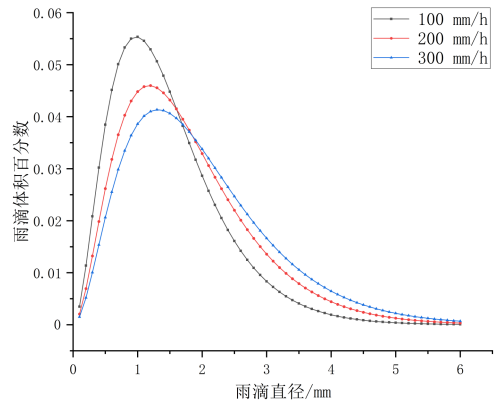


图3 不同降雨强度下的雨滴粒径分布

15 mm，背景网格尺寸为100~150 mm，边界层网格总厚度为8 mm，层数为5层，增长率为1.2，满足 $y^+$ 在30~120间。为提高离散相的求解精度，加密域重点设置在降雨平面及来流方向，3层加密尺寸为30、50、80 mm。

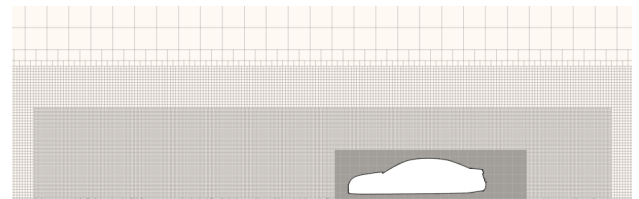


图4 计算域网格

通过调整车身网格尺寸与加密域尺寸得到表2中的网格方案。以气动阻力系数( $C_d$ )作为评价指标验证模型的网格无关性。随着网格数的增加， $C_d$ 值逐步降低，也更接近试验值。在网格数达到1 055万后， $C_d$ 值趋于稳定，且方案3的计算误差仅为0.77%。综合考虑仿真精度与计算效率，选择方案3。

表2 不同网格数量的 $C_d$ 值及试验结果

	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	试验值
网格数量	6, 803, 421	8, 708, 379	10, 550, 458	14, 422, 476	22, 075, 962	
$C_d$	0.266 4	0.263 6	0.262 8	0.262 7	0.262 7	0.260 8

### 2.3 试验验证

由于试验条件的限制，进行强风雨环境下车辆的横向稳定性试验比较困难。本研究在湖南大学

HD-2风洞中进行了1:3的轿车模型风洞试验，如图5所示。对比风洞试验和数值计算在侧风工况下得到的气动力系数，评估气动计算中湍流模型选择

和计算设置的可靠性。

汽车外流场的稳态数值计算与风洞试验应满足几何相似、运动相似及动力相似。数值计算和风洞中的几何形状及气流相对位置均保持相似。汽车车速远低于音速，动力相似仅考虑雷诺数相似原则。风洞来流速度为 30 m/s，模型长度为 1 650 mm，试验雷诺数为  $3.39 \times 10^6$ ，因此，数值计算雷诺数与试验雷诺数均大于  $5 \times 10^5$ ，雷诺数对气动力系数的影响可以忽略不计。



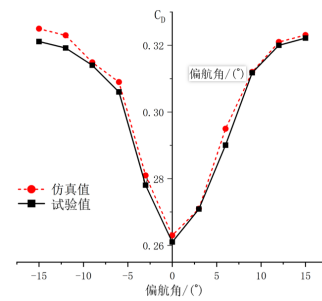
图 5 1:3 模型风洞试验

通过在风洞中测量不同偏航角下的气动力对仿真结果进行验证。不同偏航角下的气动阻力和侧向力使用专门的六分力浮框式应变天平进行测量，汽车偏航角从  $-15^\circ \sim 15^\circ$  变化，每隔  $3^\circ$  测量一次。不同偏航角下计算得到的气动阻力系数和侧向力系数以及风洞测量值对比表明，计算结果与试验结果吻合良好，仿真误差均在 5% 以内，说明数值计算方案具有较高精度，如图 6 所示。

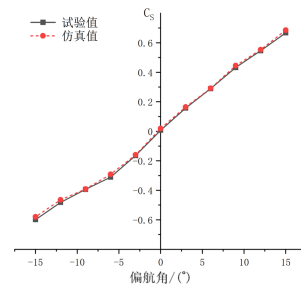
### 3 流场结果分析

为研究高速汽车在突遇强降雨天气的动力学响应，分析不同侧风和降雨条件对车辆行驶稳定性的影响。综合考虑常见的侧风事故风速和强降雨天气下的瞬时降雨强度，选择车速为 120 km/h，侧风速度分别为 0、10、20 m/s，降雨强度分别为 0、100、200、300 mm/h 的条件进行数值计算。

不同降雨强度及侧风速度下的整车气动阻力及气动侧力见表 3。侧风速度是影响气动力的主要因素。在侧风速度相同的工况下，降雨强度增大导致单位时间内落至车身的雨滴质量增大，雨滴载荷的增大会导致气动阻力与气动侧力增大，但增加幅度



(a) 阻力系数



(b) 侧向力系数

图 6 仿真结果与试验结果对比

相对较小。在 10、20 m/s 的侧风速度下，气动阻力最多增加 5.4%、4.1%，气动侧力最多增加 4.9%、2.9%。

表 3 不同工况下的气动阻力与气动侧力

侧风速度/ (m/s)	降雨强度/ (mm/h)	气动阻力/N	气动侧力/N
0	0	357.48	
	100	363.96	
	200	367.47	
	300	374.48	
10	0	439.51	722.89
	100	446.58	738.73
	200	456.57	746.80
	300	463.57	758.73
20	0	727.03	1 432.70
	100	734.46	1 452.67
	200	745.79	1 467.63
	300	756.86	1 474.61

图 7 为车速 120 km/h 时不同降雨强度下的气动阻力曲线，气动阻力分为压力阻力和摩擦阻力。前者由空气作用在汽车表面上的法向压力引起，后者由平行于汽车表面的剪切粘性力引起。由图可知，

雨滴对压力阻力和摩擦阻力都有影响。当降雨强度增大时,压力阻力和摩擦阻力同时增大,而降雨对两种阻力的占比影响不大,其中,压力阻力约占 86%,摩擦阻力约占 14%。

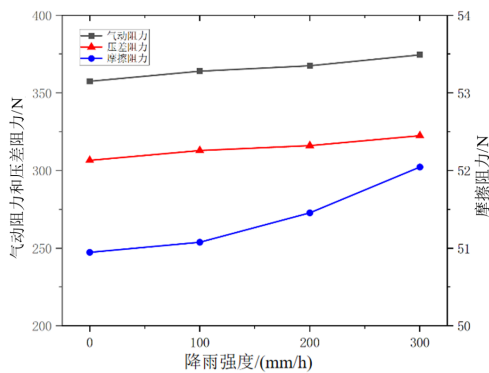


图 7 气动阻力组成

图 8 为无侧风与侧风速度为 10 m/s 的工况下,距离地面 0.8 m 处流场界面的速度分布图。由图可知,在无侧风时,车身左右两侧的流场基本呈对称分布,并在车身尾部形成了对称分布的纵向涡流。侧风导致汽车尾涡被破坏并分离形成小的涡旋,汽车尾流负压区的面积增加且向背风侧偏移,尾涡分离发展形成的小型涡旋速度较低,增大了气动阻力。车后端迎风侧流场速度增大,出现了明显的气流分离现象,增大了横摆力矩。

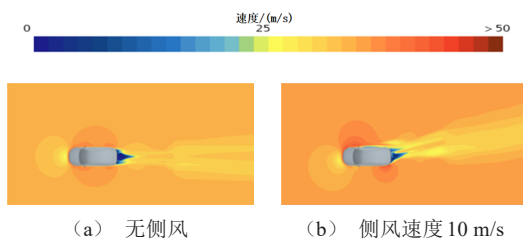


图 8 水平截面速度分布

图 9 为汽车纵向对称平面处的雨滴体积分数分布,表示雨滴在汽车近场的分布状况。由图可知,雨滴撞击在车身表面破碎成小水滴,在车头、发动机盖和挡风玻璃等区域出现明显的飞溅现象。雨滴体积分数随降雨强度的升高而增大,挡风玻璃处的液相分布更明显,雨滴在此处大量汇聚并随气流向后移动,汽车周围最大雨滴体积分数分布也在此处。

图 10 为 10 m/s 的侧风工况下尾部速度矢量分布

对比图。由图可知,侧风破坏了尾涡的对称结构,在尾部形成了两个较大的顺时针旋转和一个逆时针旋转的纵向涡,同时,汽车尾部拖曳涡分离发展形成了一个顺时针旋转的纵向涡。雨滴的加入改变了流场结构,汽车尾部涡核位置整体向右移动,右后方纵向涡的扩散区也明显增大。

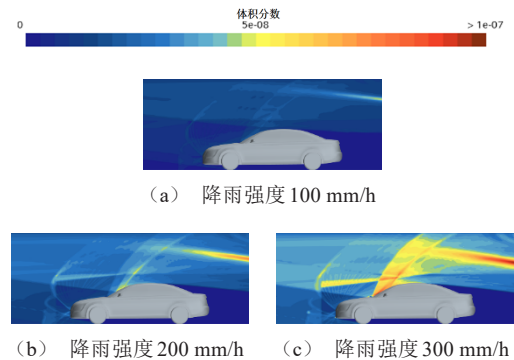


图 9 雨滴体积分数分布

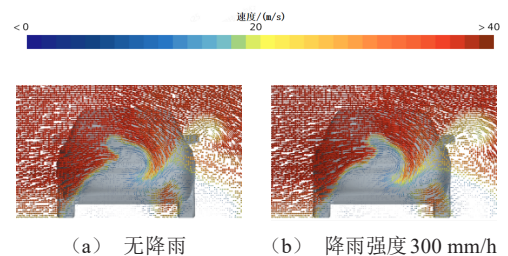


图 10 尾部速度矢量图

图 11 为汽车背风侧在 10 m/s 的侧风工况下附加上湍动能函数的等压零值面,可以用来分析车身外流场气流分离状态并监测湍流耗散情况。为与风洞试验工况相对应,仿真计算中未考虑车轮旋转的情况,因此,云图中轮腔处的气流分离状况会与实际情况存在一定差异,此处主要分析环境因素对汽车流场结构的影响。可以看到,侧风使后视镜及前轮的气流分离与车身发生了明显的撞击,增大了气动侧力。随着降雨强度的增大,汽车背风侧拖曳涡扩散区域逐渐增大,同时涡旋能量增大,耗散减慢,导致了汽车气动侧力逐渐增大;降雨增加了汽车尾部纵向脱落涡的扩散区域,使涡核位置向后移动,增大了气动阻力。

图 12 为在不同风雨环境下车身表面的压力分布。随着侧风风速的增大,车身表面压力分布逐渐不对称,气流分别在轿车迎风侧和背风侧的 C 柱和

A 柱处分离，汽车的迎风侧与背风侧的压力差导致侧向力和横摆力矩增大。降雨导致车顶背风侧负压区域增加，背风侧车门压力分布发生改变，负压区向尾部偏移。而车头和迎风侧车门区域压力变化较小，其压力受风场影响较大，降雨强度的改变对该区域的表面压力影响较小。

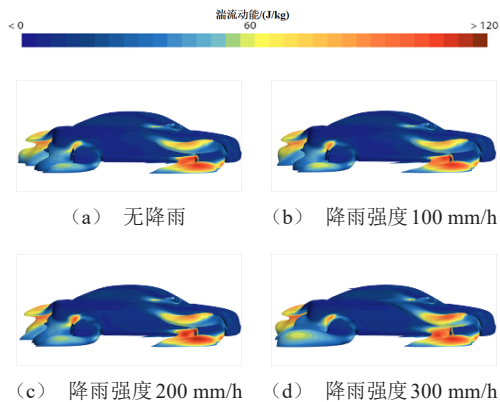


图 11 等压零值面处的湍流动能分布

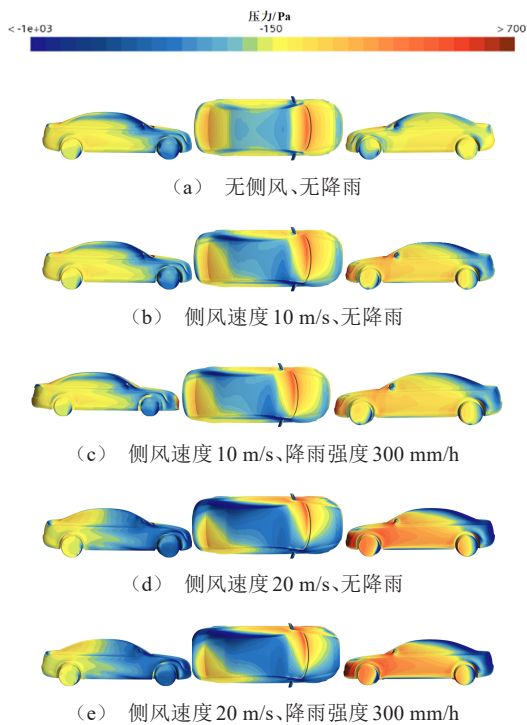


图 12 汽车表面压力分布

## 4 行驶稳定性响应

### 4.1 多体动力学模型

基于 CarSim 建立了包括车体、轮胎、转向系、悬架、制动系和传动系等七大子系统，共 27 自由

度。采用魔术公式模型以精准计算轮胎的力与力矩。流场计算所得结果以气动六分力的形式加载至整车质心，完成多体动力学与空气动力学的耦合。关键动力学参数，见表 4。

表 4 整车参数表

参数	值
整车整备质量/kg	1 792
整车轴距/m	1.562
前轮轮距/m	1.525
后轮轮距/m	1.530
整车轴距/m	2.822
质心到前轴距离/m	1.228
绕 x 轴转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	901
绕 y 轴转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	5 910
绕 z 轴转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	5 584

### 4.2 湿滑路面模型

降雨会使路面附上一层水膜，水膜会在轮胎与路面之间起到润滑作用，阻碍轮胎与路面的接触，降低轮胎与地面间的附着系数。沥青路面的水膜厚度计算式为<sup>[17]</sup>：

$$h_w = 0.1258 \times l^{0.6715} \times i^{-0.3147} \times R^{0.7786} \times \text{TD}^{0.7261} \quad (13)$$

式中： $h_w$  为水膜厚度，单位 mm； $l$  为坡面长度，取 5 m； $i$  为坡面坡度，取 2%； $R$  为根据瞬时降雨强度估计的平均降雨强度，单位 mm/min；TD 为表面构造深度，取 1 mm。

降雨对轮胎与路面间的接触影响较多，将车轮转动定义为稳态滚动，子午线轮胎与路面的附着系数由车速及水膜厚度决定，其计算式为<sup>[18]</sup>：

$$\varphi = 0.9458 - 0.0057V - 0.00118h_w \quad (14)$$

式中： $\varphi$  为轮胎与路面的附着系数； $V$  为车辆行驶速度，单位 km/h。

### 4.3 动力学响应计算

采用 CFD-MBD 单向耦合方式，忽略车辆行驶过程中横摆角导致的气动力变化，将外流场计算结果作为动力学仿真的输入，分析环境恒定扰动作用下车辆的动力学响应。仿真采取开环控制以模拟驾

驶员突遇强风雨环境未做出任何反应的情况, 车辆转向盘保持锁死状态。通过 Matlab/Simulink 将 CFD 仿真中得到的气动六分力加载至车辆车身质心处, 通过多体动力学计算模拟车辆在受到风雨环境影响 2 s 时的行驶状况。由于驾驶员及车辆的 ESP 系统会对车辆的失控现象做出应对, 因此, 重点通过风雨环境作用 0.5 s 内, 车辆的侧偏位移、横摆角速度及最大横摆角加速度评价车辆行驶稳定性。

车辆在风雨环境下受到侧向扰动产生的侧偏距离称为侧偏位移, 是评价汽车横向稳定性能的主要参数, 如图 13 所示。横摆角变化量和横摆角速度则代表了车辆发生侧偏过程中的车身姿态变化量与剧烈程度, 也是车辆横向稳定性能的主要客观评价指标。车辆经过动力学仿真求解后得到的动力学响

应, 见表 5。可以发现, 车辆的侧偏位移随降雨强度的增大而增大, 在 20 m/s 的强侧风条件下, 降雨强度为 100、200、300 mm/h 的侧偏位移较无雨时增加了 8.13%、9.11%、9.51%, 相较于侧向力与横摆力矩的增加幅度明显增大。这是因为降雨环境下道路附着的一层水膜显著降低了路面附着系数, 加剧了侧向扰动对于车辆的动力学响应。但在强降雨环境下, 路面附着系数的改变并不明显, 降雨强度的提升对车辆侧偏位移的影响较小。

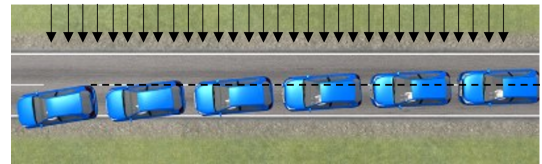


图 13 汽车侧偏示意图

表 5 不同工况下车辆的动力学响应

侧风速度/(m/s)	降雨强度/(mm/h)	侧偏位移/mm	横摆角变化量/(°)	最大横摆角速度/[(°)/s]
10	0	165.5	3.856	1.246 5
	100	169.1	4.156	1.283 5
	200	170.9	4.419	1.309 9
	300	173.4	4.755	1.306 7
20	0	307.5	10.22	1.753 4
	100	321.7	12.68	1.901 7
	200	324.6	13.16	1.898 6
	300	325.8	14.49	1.894 8

在 120 km/h 车速下, 随着侧风速度的提升, 该车辆在 0.5 s 内的侧偏位移、横摆角速度变化量及最大横摆角速度都显著增大, 这主要是由随侧风速度提升而增大的侧向力与横摆力矩导致的。车辆的侧偏位移和横摆角变化量均与降雨强度呈正相关, 在有雨环境下, 最大横摆角速度相较于无雨工况有所提升, 但随着降雨强度的提升未呈现明显的变化趋势。在突遇强风雨环境, 驾驶员未做出反应的 0.5 s 内, 车辆在最极端工况下, 即侧风速度为 20 m/s, 降雨强度为 300 mm/h 时的侧偏位移为 325.8 mm, 横摆角变化量为 14.49°, 已经接近发生侧滑事故的极限位移 0.5 m<sup>[19]</sup>。

## 5 结论

针对高速车辆遭遇强风雨环境的横向稳定性问

题, 本文基于球形雨滴假设, 采用欧拉-拉格朗日方法研究风雨环境下高速车辆的气动特性, 通过进行 CFD 与 MBD 的耦合仿真, 对车辆进行了多工况的流场与动力学仿真, 主要结论如下。

1) 降雨会影响汽车外流场结构, 影响车辆侧风气动特性。在 10 m/s 的侧风速度下, 300 mm/h 的降雨强度相比于无雨工况, 汽车受到的气动阻力和气动侧力最大增加 5.4% 和 4.9%。

2) 降雨导致背风侧拖曳涡扩散区域增大, 涡旋能量增大, 耗散减慢, 尾部涡核位置向右移动, 增大了汽车气动侧力。也增加了汽车后轮区域及尾部纵向脱落涡的扩散区域, 尾部气流速度降低, 并使涡核位置向后移动, 增大了气动阻力。

3) 降雨会改变整车气动特性和路面附着状况, 在降雨强度较小时, 路面附着系数降低使车辆横向

稳定性能明显下降, 在降雨强度较大时, 气动特性的变化是横向稳定性能改变的主要因素。

## 6 不足与展望

1) 研究采用单向耦合方法, 将CFD稳态计算结果作为动力学输入, 研究车辆动力学响应。未考

虑非稳定侧风及车身姿态改变对气动六分力的影响。后续研究可以考虑采用双向耦合方法, 减小仿真与实际情况的差异。

2) 由于试验设备的原因, 未能通过环境风洞模拟风雨环境中的汽车外流场, 今后将改进试验设备, 进一步研究降雨对车辆气动特性的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] ZIPSER E J, LIU Chuntao. Extreme Convection vs. Extreme Rainfall: A Global View [J]. *Current Climate Change Reports*, 2022, 7(4): 1-10.
- [2] U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. How do Weather Events Impact Roads [EB/OL]. [2023-2-1]. [https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1\\_roadimpact.htm](https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1_roadimpact.htm).
- [3] MANNING C, KENDON E J, FOWLER H J, et al. Extreme Windstorms and Sting Jets in Convection-Permitting Climate Simulations over Europe [J]. *Climate Dynamics*, 2022, 58(9/10): 2387-2404.
- [4] ZHANG Qianwen, SU Chuqi, WANG Yiping. Numerical Investigation on Aerodynamic Performance and Stability of a Sedan Under Wind-Bridge-Tunnel Road Condition [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59(5): 3963-3980.
- [5] THOMPSON B E, JANG J, DION J L. Wing Performance in Moderate Rain [J]. *Journal of Aircraft*, 1995, 32(5): 1034-1039.
- [6] SHAO Xueming, WAN Jun, CHEN Dawei, et al. Aerodynamic Modeling and Stability Analysis of a High-Speed Train Under Strong Rain and Crosswind Conditions [J]. *Journal of Zhejiang University—Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2011, 12(12): 964-970.
- [7] YU Mengge, LIU Jiali, DAI Zhiyuan. Aerodynamic Characteristics of a High-Speed Train Exposed to Heavy Rain Environment Based on Non-Spherical Raindrop [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 211: 104532.1-104532.11.
- [8] 冯伟, 杜礼明, 倪守隆. 风雨环境下轿车行驶中的气动特性研究 [J]. *机电工程*, 2015, 32(4): 474-478.  
FENG Wei, DU Liming, NI Shoulong. Numerical Analysis of Aerodynamic Characteristics of Sedan Driving in Wind and Rainfall Environment [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(4): 474-478. (in Chinese)
- [9] KOGBARA R B, MASAD E A, KASSEM E, et al. A State-of-the-Art Review of Parameters Influencing Measurement and Modeling of Skid Resistance of Asphalt Pavements [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114: 602-617.
- [10] 于梦阁, 李海庆, 刘加利, 等. 强风雨环境下高速列车空气动力学性能研究 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(4): 185-192.  
YU Mengge, LI Haiqing, LIU Jiali, et al. Study on the Aerodynamic Performance of the High-Speed Train Under Strong Wind and Rainfall Environment [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(4): 185-192. (in Chinese)
- [11] 岳煜斐, 曾秋兰, 李振山, 等. 挟雨风对高速列车气动特性及运行稳定性影响的数值模拟 [J]. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 943-950.  
YUE Yufei, ZENG Qiulan, LI Zhenshan, et al. Numerical Simulating Effects of Rain-Loaded Wind on the Aerodynamic Characteristics and Running Stability of High-Speed Trains [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(4): 943-950. (in Chinese)
- [12] WANG Jingyu, HU Xingjun. Application of RNG  $k-\varepsilon$  Turbulence Model on Numerical Simulation in Vehicle External Flow Field [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 170-173: 3324-3328.
- [13] JOHNSON R W, KLICHE D V. Large Sample Comparison of Parameter Estimates in Gamma Raindrop Distributions [J]. *Atmosphere*, 2020, 11(4): 1-11.
- [14] THURAI M, BRINGI V N. Application of the Generalized Gamma Model to Represent the Full Rain Drop Size Distribution Spectra [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2018, 57(5): 1197-1210.
- [15] MARKOWITZ A H. Raindrop Size Distribution Expressions [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1976, 15(9): 1029-1031.
- [16] WU Zhenlong, CAO Yihua. Numerical Simulation of Flow over an Airfoil in Heavy Rain Via a Two-Way

- Coupled Eulerian-Lagrangian Approach [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 69: 81-92.
- [17] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉, 等. 沥青路面表面水膜厚度试验[J]. 公路交通科技, 2004, 21(12): 14-17.  
JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan, et al. Test Depth of Water Film on Asphalt Pavement Surface [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(12): 14-17. (in Chinese)
- [18] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉. 部分滑水对路面附着系数的影响[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4): 10-12.  
JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan. Part Hydroplaning Effect on Pavement Friction Coefficient [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 10-12. (in Chinese)
- [19] 韩万水, 陈艾荣. 风环境下行驶于大跨度桥梁上的车辆安全评价及影响因素研究[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(4): 466-472.  
HAN Wanshui, CHEN Airong. Safety Assessment of Moving Vehicles on a Long-Span Bridge Under Crosswind and Influence Factors Analysis [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(4): 466-472. (in Chinese)

#### 作者简介



陈禹 (1999-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究方向为汽车空气动力学及多体动力学。  
E-mail: cynia999@163.com

#### 通信作者



汪怡平 (1984-), 男, 湖南衡阳人, 教授, 主要研究方向为汽车空气动力学。  
E-mail: wangyiping@whut.edu.cn