

汪辉, 李俊奇, 王文海, 等. 城市道路洪涝条件下足尺车辆失稳风险阈值试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(9): 76-94. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.006

WANG Hui, LI Junqi, WANG Wenhai, et al. Experimental study on the instability risk threshold of foot-size vehicles under urban road flooding conditions [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(9): 76-94. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.006

城市道路洪涝条件下足尺车辆失稳 风险阈值试验研究

汪辉^{1,2}, 李俊奇^{1,2}, 王文海^{1,2}, 李小静^{1,2}, 郭俊杰^{1,2}, 高丽军^{1,2}

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044)

摘要:【目的】在城市化快速发展的背景下, 极端气候事件频发导致城市道路洪涝灾害加剧, 由此引发的车辆失稳、制动失效等交通安全问题日益凸显。研究车辆在洪涝积水中的失稳风险阈值, 对洪涝风险评估以及应急管理领域具有极为重要的理论价值与实践意义。【方法】通过试验研究新、旧轮胎在不同的路面条件(干燥、润湿、积水状态)和不同载荷下的摩擦系数。以大众 Polo 为研究对象, 利用旋转轴承和三轴姿态传感器调整车辆迎流方向, 通过力学传感器和数据采集器来测量在不同水深、流速下车辆所受的水流作用力, 揭示车辆失稳机理。【结果】结果显示: 摩擦系数 μ 在 0.320 到 0.898 之间, 相同车轮的沥青路面的摩擦系数大于水泥路面, 而在相同路面条件下, 摩擦系数的状况为: 润湿状态>干燥状态>积水状态, 且新轮胎的摩擦系数普遍大于旧轮胎。对于非密封车辆, 当水深大于 0.45 m 时, 汽车浮力逐渐减少直至沉底, 且在相同水深条件下, 浮力随流速增加呈现减少的趋势。汽车受到的绕流阻力 F_D 和横向力 F_T 随着流速和水深的增加而增加, 汽车在不同迎流方向($0^\circ \sim 180^\circ$)的绕流阻力系数 C_D 在 0.466~1.067 之间, 横向力系数 C_T 在 0~0.407 之间。【结论】结果表明: 汽车在迎流方向为 90° 时最易失稳, 在 0° 时最难失稳。采用底线思维, 摩擦系数取 0.320, 当流速、水深乘积 hv_{\min} 大于 $0.81 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 汽车发生滑动失稳, 并拟合了不同迎流方向下失稳临界流速阈值和水深的关系曲线。研究结果可为车辆失稳预警系统开发提供关键参数支撑, 同时为城市道路排水性能评估标准优化提供科学依据。

关键词: 城市洪涝; 车辆失稳; 风险阈值; 摩擦系数; 绕流阻力系数; 横向力系数; 气候变化; 风险评估

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.006

中图分类号: X43

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

文章编号: 1000-0860(2025)09-0076-19



Experimental study on the instability risk threshold of foot-size vehicles under urban road flooding conditions

WANG Hui^{1,2}, LI Junqi^{1,2}, WANG Wenhai^{1,2}, LI Xiaojing^{1,2}, GUO Junjie^{1,2}, GAO Lijun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development

收稿日期: 2025-04-09; 修回日期: 2025-05-06; 录用日期: 2025-05-07; 网络出版日期: 2025-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52370093)

作者简介: 汪辉(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事城市雨水控制利用与海绵城市研究。E-mail: wanghui000127@163.com

通信作者: 李俊奇(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事城市雨水控制利用与海绵城市研究。E-mail: lijunqi@bucea.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: [Objective] Under the background of rapid urbanization, the frequent occurrence of extreme weather events has led to the intensification of urban road flooding, which has led to vehicle instability, brake failure and other traffic safety problems that are becoming more and more prominent. The study of vehicle instability risk thresholds in flooded water is of great theoretical value and practical significance in the field of flood risk assessment and emergency management. [Methods] The friction coefficients of new and old wheels under different road conditions (dry, wet, and waterlogged) and different loads were investigated experimentally. Taking the Volkswagen Polo as the research object, the rotary bearing and three-axis attitude sensor were used to adjust the direction of the vehicle to meet the flow, and the mechanical sensors and data collector were used to measure the force of the water flow on the vehicle under different water depths and flow rates, so as to reveal the mechanism of the vehicle's destabilization. [Results] The results show that the coefficient of friction μ ranges from 0.320 to 0.898, the coefficient of friction of asphalt pavement with the same wheels is larger than that of cement pavement, and the condition of coefficient of friction under the same pavement condition is as follows: wet condition > dry condition > waterlogged condition, and the coefficient of friction of the new tires is generally larger than that of the old tires. For non-sealed vehicles, when the water depth is greater than 0.45 m, the buoyancy of the car gradually decreases until it sinks to the bottom, and under the same water depth conditions, the buoyancy shows a decreasing trend with the increase of flow velocity. The flow resistance F_D and transverse force F_T of the car increased with the increase of flow velocity and water depth, and the coefficient of flow resistance C_D of the car in different flow directions ($0^\circ \sim 180^\circ$) ranged from 0.466 to 1.067, and the coefficient of transverse force C_T ranged from 0 to 0.407. [Conclusion] The car is most easily destabilized at 90° in the head-on direction and most difficult to destabilize at 0° . Adopting the bottom line thinking, the friction coefficient is taken as 0.320, and when the product of flow velocity and water depth lv_{\min} is greater than $0.81 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, the car slides and destabilizes. And fitted curves for the relationship between the critical flow rate threshold for instability and water depth for different headwater directions. The results of the study can provide key parameter support for the development of vehicle instability early warning system, and at the same time, provide scientific basis for the optimization of urban road drainage performance evaluation standard.

Keywords: urban flooding; vehicle instability; risk threshold; friction coefficient; coefficient of resistance to flow bypass; coefficient of lateral force; climate change; risk assessment

0 引言

随着全球气候变化的加剧以及城市化进程的快速推进,导致极端降雨事件频率和强度增加、不透水面积增加、“热岛效应”和“雨岛效应”频发,产汇流机制发生变化、地表径流量也不断地增加,城市洪涝灾害问题日益严重^[1-3]。而道路作为城市基础设施的重要组成部分,一旦被洪涝积水淹没,车辆在行驶过程中面临着诸多安全风险,其中车辆失稳是最为突出的问题之一,严重威胁着驾乘人员的生命财产安全。据世界卫生组织统计,全球每年因湿滑路面导致的交通事故占总事故量的23%以上^[4]。相关研究表明,车辆在洪涝条件下的失稳危险程度主要受水深、流速、道路坡度、来流方向、流态、载荷、车辆状况(车型、尺寸、重量、密封性、手刹模式、轮胎状况、水动力设计、离地间隙等)以及道路粗糙度等影响^[5-12]。其中,轮胎与地面之间的摩擦系数是研究洪涝条件下车辆稳定性的关键参数,其主要取决于轮胎

材料、路面、道路粗糙度以及轮胎和道路的状况等。车轮与路面间的摩擦系数作为表征车辆动力学性能的核心参数,其变化直接影响车辆的行驶安全性和稳定性^[13]。因此,探究洪涝条件下车辆摩擦系数的变化规律及其影响因素,可为车辆失稳阈值的研究提供关键数据支撑。

众多学者针对城市道路洪涝条件下车辆失稳风险开展了一系列研究,主要包括水槽试验、理论分析和数值模拟。SMITH等^[8]测量了三种类型足尺车辆在不同水流条件下的牵引力,并评估了原型车辆在不同地面条件(包括混凝土、砾石和沙子)的摩擦系数,但所有测试均在实验室条件下进行,因此必须采用更保守的阈值标准。AL-QADAMI等^[9]研究了足尺车辆在迎流方向为 90° 和 0° 下部分淹没并暴露于亚临界流的水动力,发现随着流速,弗劳德数和车速的增加,绕流阻力大大增加。AL-QADAMI等^[14]提出要探索不同轮胎类型和新旧程度对摩擦系数和车辆稳定性的影

响。部分学者运用水动力学平衡理论, 结合数学模型来研究车辆在洪涝积水中的稳定性。肖宣炜等^[15]基于泥沙起动理论推导出洪水中汽车的起动流速公式, 通过模型车试验率定其中的关键参数。GUO 等^[16]基于 SHANNON 和 TALLIS 熵概念, 导出了受淹车辆初始速度与水深关系的表达式。MILANESI 等^[17]提出一种考虑坡度作用的车辆稳定性无量纲概念模型。然而, 这些理论模型往往基于一些假设条件的简化, 需要大量数据验证, 在实际复杂多变的洪涝环境中, 模型的准确性和适用性受到一定限制。一些学者研究借助计算流体动力学(CFD)软件对车辆在洪涝积水中的稳定性进行了模拟分析。AL-QADAMI 等^[18]通过 Flow-3D 软件在六个自由度和耦合运动条件下模拟全尺寸中型乘用车在洪涝积水中的稳定性。AZHAR 等^[19]使用平滑粒子流体动力学 (SPH) 进行数值研究, 结果证实了当前澳大利亚降雨和径流条件下车辆的安全标准, 同时也表明稳定性曲线可以根据不同道路状况而修正。部分学者采用一维二维水动力模型来研究汽车稳定性, DONG 等^[20]通过水动力模型详细讨论了人和车辆的淹没特征和危险度的时空变化。CHAO 等^[21]从街区尺度出发, 通过数值模拟证实了城市街道布局对内涝的影响, 并量化了街道布局对洪涝积水中人车风险的影响。EVANS 等^[22]分析了车辆和行人组合水深-流速稳定性函数, 导出风险指标以量化洪涝积水对车辆乘员造成的风险。WANG 等^[23]、DONG 等^[24]、任春娇等^[25]都通过一二维水动力模型模拟并结合人车失稳临界流速公式来评估人车失稳风险。数值模拟方法能够直观呈现车辆在洪涝积水中的复杂流动现象, 为深入理解车辆失稳过程提供了有力工具。但数值模拟结果高度依赖于模型参数和边界条件, 模拟结果与实际情况可能存在一定偏差。尽管已有研究在城市道路洪涝条件下车辆失稳风险领域取得了一定进展, 但仍存在诸多有待完善之处。一方面, 现有研究多侧重于单一或少数几个影响因素对车辆失稳的作用, 缺乏对多因素耦合作用下车辆失稳风险的深入探究; 另一方面, 车辆失稳风险阈值的确定受试验条件和模型车辆的限制, 不同研究得到的阈值结果差异较大, 且大多缺乏充分的足尺试验验证。

通过汽车轮胎摩擦系数和水槽试验研究, 深入探究城市道路洪涝条件下车辆失稳风险阈值。考虑不同地面条件、地面粗糙度、载荷、轮胎新旧对摩擦系数的影响, 构建了一套基于多传感器测量的车辆失稳试验平台。以大众 Polo 真车作为研究对象, 探讨流速、

水深和迎流方向多个关键因素的耦合作用对车辆失稳的影响规律, 在此基础上建立了车辆失稳风险阈值模型, 为城市洪涝风险评估和应急管理提供更为科学、有效的技术支撑。

1 洪涝条件下车辆稳定性分析

1.1 受力分析

研究主要探讨洪涝条件下部分淹没静态车辆的临界失稳阈值。当洪涝积水在道路上停放的车辆周围流动时, 水流在竖直方向通常会对车辆施加四个力, 包括重力(F_G)、绕流升力(F_L)、浮力(F_B)以及地面对车辆产生的支持力(F_N)。水平方向的受力主要有绕流阻力(F_D)、轮胎与地面之间的摩擦力(F_R)和横向力(F_T), 如图 1 所示。

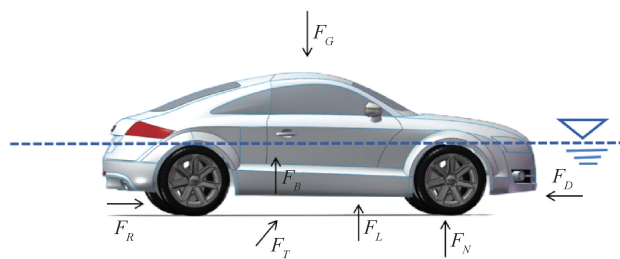


图 1 汽车在洪涝积水中的受力分析

Fig. 1 Force analysis of automobiles in flooded standing water

1.1.1 浮力

汽车在水中产生浮力的根本原因是水对汽车产生的向上和向下的压力差, 根据阿基米德原理, 浸入液体里的物体受到向上的浮力, 其浮力的大小等于它排开的液体受到的重量。汽车所受浮力主要受车辆自身的体积和淹没深度影响, 随水深增加而增加, 表示为

$$F_B = \rho g V \quad (1)$$

式中, F_B 为汽车所受浮力 (N); ρ 为水的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); V 为汽车排开水的体积 (m^3)。

1.1.2 绕流升力

当水流绕过车辆时, 车辆的形状会导致水流在车辆不同部位的速度发生变化。实际上, 只有在流速足够高的情况下绕流升力才会比较明显, 由于本研究是在亚临界流状态下进行, 在这种状态下, 竖直方向绕流升力的影响并不显著^[26], 因此, 本文并没有考虑竖直方向绕流升力的影响, 仅给出其表达式为

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A_L v^2 \quad (2)$$

式中, F_L 为绕流升力 (N); C_L 为绕流升力系数; A_L 为车辆的垂直投影面积 (m^2); v 为流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.1.3 摩擦力

摩擦力为车辆轮胎与地面接触时产生的阻碍车辆滑动的力, 由车辆有效重力与地面摩擦系数决定, 表示为

$$F_R = \mu F_N = \mu(F_G - F_B - F_L) \quad (3)$$

式中, F_R 为轮胎与地面的摩擦力(N); μ 为轮胎与地面的摩擦系数; F_N 为地面对车辆的支持力(N)。

1.1.4 绕流阻力

水流冲击车辆时, 因压差阻力和表面摩擦形成的水平力, 方向与水流一致。绕流阻力随着流速、汽车投影面积增加而增加, 表示为

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D v^2 \quad (4)$$

式中, F_D 为绕流阻力(N); C_D 为绕流阻力系数, 取决于雷诺数和车辆的形状; A_D 为汽车淹没部分垂直于流动方向的投影面积(m^2)。

1.1.5 横向力

水流绕过车辆时, 两侧流速差异或局部压力变化(如涡流)引发横向压力差形成了垂直于水流方向的横向力, 导致车辆横向偏移, 表示为

$$F_T = \frac{1}{2} \rho C_T A_T v^2 \quad (5)$$

式中, F_T 为横向力(N); C_T 为绕流阻力系数; A_T 为平行于流向的车辆淹没部分的投影面积(m^2)。

1.2 失稳形式

城市洪涝条件下车辆失稳一般分为三种模式: 漂浮、滑动和倾倒失稳。倾倒失稳是 BC Hydro (2005)^[27]首次提出, 通常发生在车辆已经漂浮或者滑动且遇到不平整地形的车辆。因此, 大部分研究一般不把车辆倾倒失稳作为主要分析对象^[28]。

1.2.1 滑动失稳

当水流对车辆产生绕流阻力和横向力的合力超过轮胎与地面之间摩擦力时, 则会发生滑动失稳, 如图2所示, 表示为

$$\overline{F_R} < \overline{F_D} + \overline{F_T} \quad (6)$$

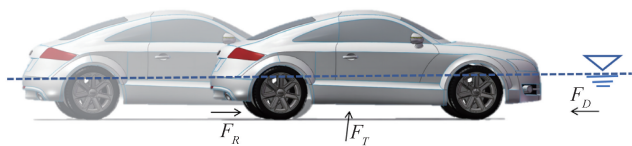


图2 滑动失稳示意

Fig. 2 Schematic of sliding instability

根据平行四边形法则并联立式(3)一式(6), 即得到汽车滑动失稳起动流速为^[29]

$$v = \sqrt[4]{\frac{4[\mu(F_G - F_B)]^2}{\rho^2 C_D^2 + \rho^2 C_T^2 A_T^2}} \quad (7)$$

1.2.2 漂浮失稳

对于静态车辆, 当所受浮力与升力的合力超过车辆重力时, (在亚临界流态条件下, 水流对车辆产生的升力可忽略), 车辆会发生漂浮失稳, 如图3所示, 表示为

$$F_G < F_B + F_L \quad (8)$$

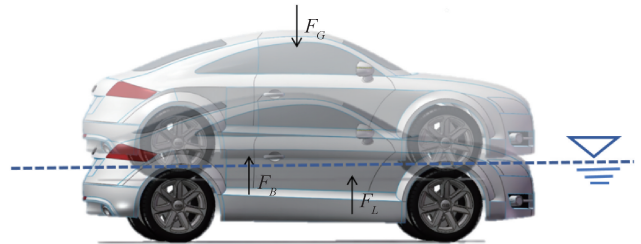


图3 漂浮失稳示意

Fig. 3 Schematic diagram of floating instability

2 试验设计及方法

2.1 车轮摩擦系数测试

2.1.1 摩擦系数试验装置

试验装置通过两个长方体钢槽配重箱, 规格为长700 mm×宽300 mm×高500 mm, 中间开直径为50 mm的孔用来穿方形杆子。方形钢架的规格为长1500 mm×宽700 mm×高35 mm, 在钢槽上焊住卡扣与钢架连接, 两个小橡胶车轮与钢架连接, 轮子规格为直径300 mm, 中心宽度80 mm, 轮宽48 mm, 轴承孔20 mm, 使用一根长1 m, 直径为20 mm的直线硬光轴和4个20 mm的光轴固定环锁紧两个小车轮。两个称重传感器用来测量后面两个小车轮所承担的正压力, 型号为NA2-100 kg。通过4个光轴支撑固定座, 型号SK20立式, 结合传感器连接板与钢架连接, 最后使用拉紧绳将两钢槽和试验轮胎拉紧, 形成一个整体摩擦试验装置, 如图4和图5所示。试验采用S弯传感器, 量程500 kg, 与变送器和多通道数据采集器连接采集力的变化。使用手拉葫芦和绑带将内侧配重箱底部拉向图4右侧, 当拉力达到峰值时, 即轮胎滑动, 由此可计算车辆的摩擦系数。

2.1.2 摩擦试验配重

车辆的实图和参数如图6所示和表1所列。根据ARRIGHI等^[30]提出的浮力公式来估算不同水深下车辆所受的浮力, 如表2所列。

$$F_B = \rho g(h - GC)LW \quad (9)$$

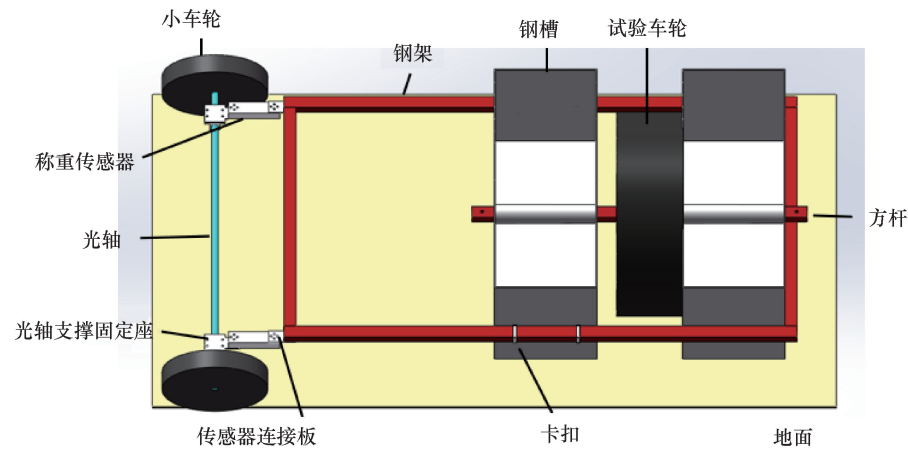


图4 摩擦系数试验装置三维图

Fig. 4 Friction coefficient test device three-dimensional drawing



图5 摩擦系数试验装置实物

Fig. 5 Friction coefficient test device



图6 足尺试验车辆照片

Fig. 6 Actual picture of the foot test vehicle

式中, F_c 为车辆的重力 (N); ρ 为水的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); g 为重力加速度; h 为水深 (m); GC 为车辆离地间隙 (m); L 为车长 (m); W 为车宽 (m)。

根据汽车在不同水深下所受浮力大小来计算其支撑力大小, 设计不同水深下需要配重的试验组 (注: 试验组所受浮力均小于自身车重), 如表 3 所列。

2.2 车辆水流作用力测试

2.2.1 水槽试验装置

试验在长 16 m, 宽 6 m, 高 2 m (下层 0.8 m、上层 1.2 m) 的双层矩形钢制水槽中进行。动力设备使用了 9 台潜水推流器, 配套三台变频器改变电机工作频率, 以实现电机的变速运行, 从而获得不同的流量。试验通过水泵将

表 1 车辆参数

Table 1 Vehicle parameters

车 型	长/mm	宽/mm	高/mm	实测离地间隙/mm	实测重量/kg
大众 polo	4 200	1 650	1 465	180	1 100

表 2 不同水深下的大众 polo 浮力估算

Table 2 Volkswagen polo buoyancy estimation in different water depths

水深/cm	20	22	24	26	28	30
浮力/N	1 358.3	2 716.6	4 074.8	5 433.1	6 791.4	8 149.7

水流输送到上下层水池, 同时通过电机调节流量, 以改变水深及流速, 最后流经上层水池的水将流入下层, 构成完整回路, 实现试验用水的自循环系统。在水槽中放入锌块, 阻隔水和氧气、内部铁反应, 通过牺牲阳极保护阴极, 将锈蚀铁转为腐蚀锌层, 增强耐腐蚀性, 防止水槽过早生锈。通过梅陇锁连接手拉葫芦、超载保护 S 弯传感器、4 条锰钢链条最后连接到每个车轮轮毂上, 让车辆处于一个垂直吊挂的状态, 车顶通过直线导轨光杆和直线轴承配套连接在圆形转盘轴承上的二维力传感器 (见图 7)。使用二维传感器测量水平 x 、 y 方向的力, S 弯传感器测量竖直 z 方向的力。试验使用称重变送器输出信号, 数据采用多通道 AD 数据采集器进行记录和保存, 水深和流速采用多普勒流量计测量, 误差低于 1.5%。车辆在水槽装置中可以实现不同角度的旋转和固定, 角度通过三轴姿态传感器测量 (校准后无磁场干扰)。

试验在亚临界流状态下进行, 表 4 给出了试验过程的水深 h 、流速 v 、弗劳德数 Fr 及雷诺数 Re 的范围值。

表 3 不同水深下大众 polo 配重

Table 3 Volkswagen Polo counterweights for different water depths

轮胎规格	轮胎硬度	20 cm 水深支撑力配重质量/kg	22 cm 水深支撑力配重质量/kg	24 cm 水深支撑力配重质量/kg	26 cm 水深支撑力配重质量/kg	28 cm 水深支撑力配重质量/kg	30 cm 水深支撑力配重质量/kg
195/55R15(新)	69	240.3	205.7	171	136.4	101.7	67.1
195/55R15(旧)	94	240.3	205.7	171	136.4	101.7	67.1

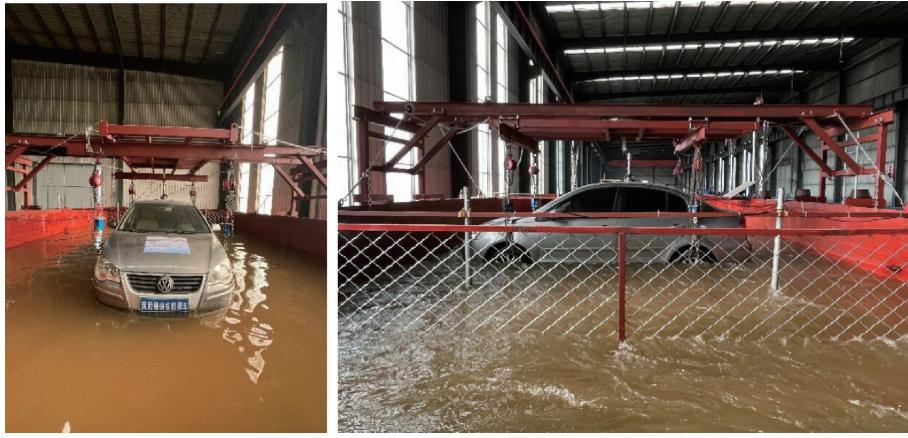


图 7 水槽试验照片

Fig. 7 Sink real picture

表 4 水槽试验工况条件

Table 4 Sink test conditions

汽车类型	水深/m	流速/ $m \cdot s^{-1}$	弗劳德数 Fr	雷诺数 Re
大众 Polo	0.203 ~ 0.529	0.276 ~ 1.347	0.132 ~ 0.703	$1.15 \times 10^6 \sim 5.64 \times 10^6$

2.2.2 浮力测量

将大众 Polo 放入水槽并使水深达到 15 cm, 使用 4 个 S 弯传感器测量车辆垂直方向的合力, 数据采集器记录该力值, 汽车重力减去合力即为车辆所受浮力 F_{B_1} 。每次将水深按 5 cm 递增, 使用多普勒流量计监测水位变化, 确保水深的精确控制。在每个水深

下, 再次使用 S 弯传感器测量垂直方向的力, 并使用数据采集器记录相应数据, 计算得到浮力 F_{B_2} 、 F_{B_3} …。根据垂直方向力的变化, 以此来计算浮力随水深的变化。

2.2.3 绕流阻力和横向力测量

试验前对车辆重量进行了调整, 保证整个试验过程中车辆重量相同。传感器吊装过程中是柔性的, 不受横向载荷的一个状态。试验过程中将车辆吊起离板子不超过 5 mm, 让车辆处于轻微悬浮状态, 以此消除摩擦力的影响。

使用多普勒流量计监测水位变化, 通过调整电机频率来获得不同的流速, 使用旋转轴承来调整迎流角度, 最后通过二维力传感器来采集水平 x 、 y 方向的水流作用力。试验中每次水深按 5 cm 递增, 测量静态水深 25~50 cm, 共 6 组水深, 每组水深测量 8 个流速, 每组测试不同车辆迎流角度变化间隔为 30° , 由 0° 变化至 180° , 共进行 336 次水槽试验。在试验过程中。当方位角 $\alpha = 0^\circ$ 时, 汽车车头正对来流, 当 $\alpha = 90^\circ$ 时, 汽车的长轴与水流垂直, 当 $\alpha = 180^\circ$ 时, 汽车车尾正对来流, 如图 8 所示。

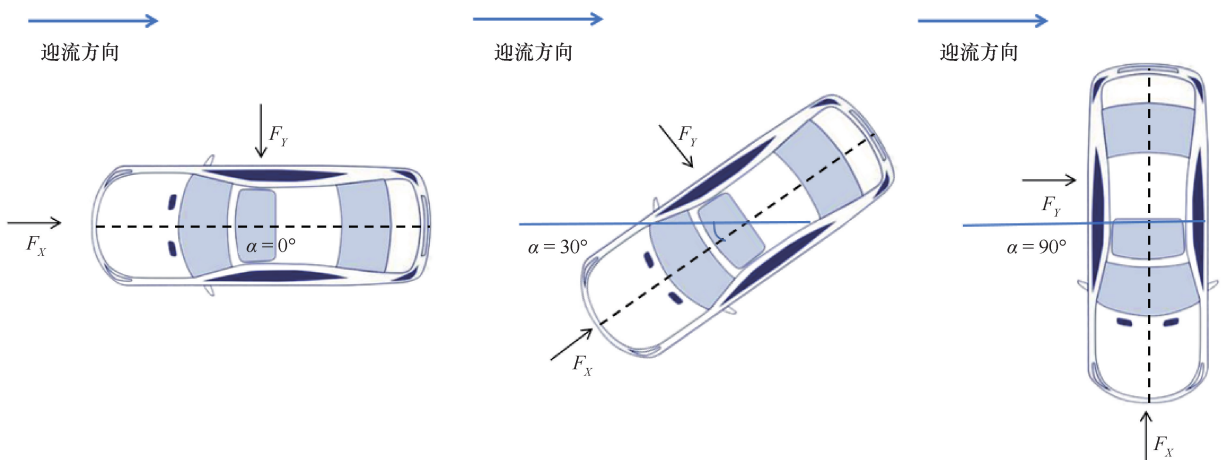


图 8 试验方向角度

Fig. 8 Test direction angle

沿汽车长轴测量的力 F_X 和垂直于车辆长轴的力 F_Y 可以被正交分解为平行于水流方向的阻力 F_D 和垂直于水流方向的横向力 F_T 。因此, 绕流阻力和横向力可以表示为

$$\begin{cases} F_D = F_X \cos \alpha + F_Y \sin \alpha \\ F_T = F_Y \sin \alpha - F_X \cos \alpha \end{cases} \quad (10)$$

式中, F_D 为绕流阻力(N); F_T 为横向力(N); F_X 、 F_Y 分别为沿车辆长轴和垂直于车辆长轴的力。

3 试验结果及分析

3.1 车轮摩擦系数分析

使用路面纹理激光扫描仪对两种试验路面进行扫描, 通过测量的高程来计算平均断面构造深度(MPD)等指标来评价路面的粗糙程度, 如表5所列。

表5 不同试验地面的纹理采集数据

Table 5 Texture acquisition data for different test surfaces

试验地面材料	MPD	ETD	RMS	Ra	Rq
沥青路面	0.394	0.515	0.292	0.221	0.293
水泥路面	0.042	0.234	0.041	0.037	0.046

图9展示了不同试验路面纹理模型, 利用冷色到暖色的渐变(蓝色→红色), 直观反映路面高程的空间分布。颜色越偏红, 代表路面微凸体高度越高, 纹理越粗糙; 颜色越偏蓝, 代表路面微凸体高度越低, 纹理越平滑。

通过将多通道数据采集器输出的电压信号峰值转化为水平牵引力, 得出不同地面条件下新、旧轮胎的摩擦系数, 可为道路洪涝条件下车辆阈值试验的摩擦系数提供参考, 如图10所示。

在干燥水泥路面上, 195/55R15(新)轮胎的摩擦系数随着载荷从 67.1 kg 逐步增加到 240.3 kg, 呈现出较为明显的下降趋势, 从 0.676 降至 0.572。在该路面条件下, 随着车辆载重的增加, 轮胎与路面之间的摩擦力相对轮胎所承受的载荷的比例在逐渐减小。对于 195/55R15(旧)轮胎, 同样在干燥水泥路面, 从 67.1 kg 到 240.3 kg 的载荷变化过程中, 摩擦系数从 0.477 降至 0.397, 下降趋势与新轮胎类似, 但整体摩擦系数数值低于新轮胎。在润湿水泥路面时, 新轮胎的摩擦系数在载荷增加过程中也有所下降, 从 0.826 降至 0.686。然而, 与干燥水泥路面相比, 其摩擦系数的初始值较高且变化幅度相对较小。旧轮胎在润湿水泥路面上的摩擦系数变化趋势与新轮胎相似, 从 0.759 降至 0.689。积水水泥路面的情况较为特殊, 195/55R15(新)轮胎的摩擦系数从 0.584 降至

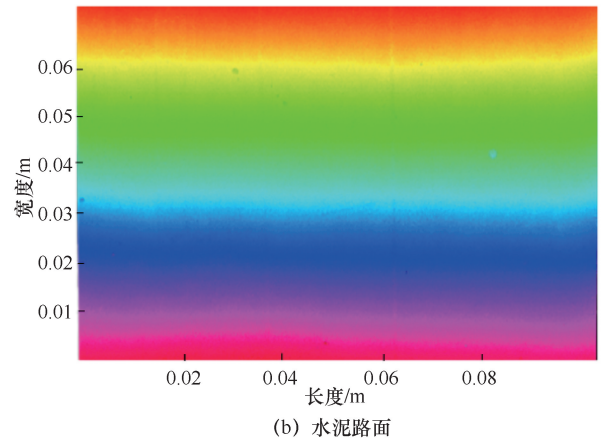
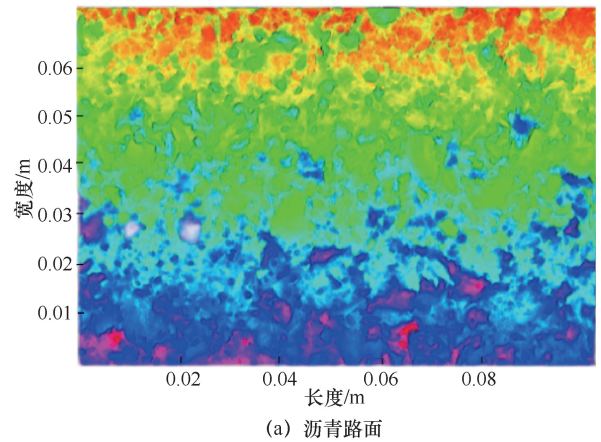
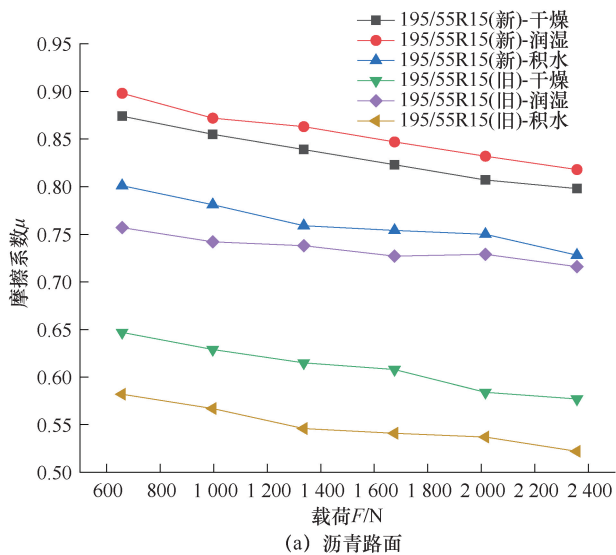


图9 不同试验路面纹理模型

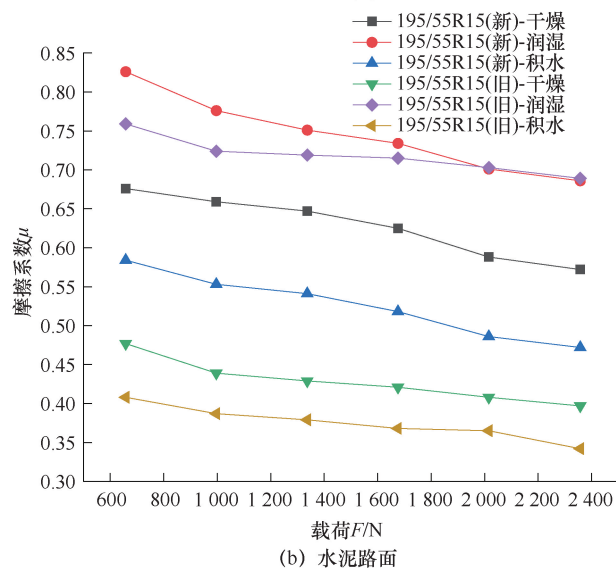
Fig. 9 Texture model of different test pavements

0.472, 下降幅度较为明显。此时水膜的影响更为突出, 轮胎在积水路面上行驶时, 部分花纹沟槽被水填充, 导致轮胎与路面的实际接触面积减小, 摩擦力降低。旧轮胎的摩擦系数从 0.408 降至 0.342, 在积水路面的摩擦系数整体低于新轮胎。

在干燥沥青路面上, 195/55R15(新)轮胎的摩擦系数从 0.874 降至 0.798, 随着载荷的增加呈现出稳定的下降趋势。沥青路面的材料特性和微观纹理与水泥路面有所不同, 使得轮胎在其上的摩擦性能表现也存在差异。新轮胎在该路面上的摩擦系数较高, 反映出其在干燥沥青路面上具有较好的抓地力。旧轮胎的摩擦系数从 0.647 降至 0.577, 遵循载荷增加摩擦系数减小的规律, 且与新轮胎相比, 其在干燥沥青路面上的摩擦系数下降幅度相对较小。在润湿沥青路面, 新轮胎的摩擦系数从 0.898 降至 0.818, 变化相对较为平缓。由于沥青路面本身具有一定的疏水性, 在润湿状态下, 水对轮胎与路面摩擦的影响相对水泥路面较小。旧轮胎的摩擦系数从 0.757 降至 0.716, 其变化趋势与新轮胎相似, 但整体摩擦系数较低。积水沥青路面上, 195/55R15(新)轮胎的摩擦系数从 0.801



(a) 沥青路面



(b) 水泥路面

图 10 不同地面条件下车轮的摩擦系数

Fig. 10 Friction coefficients of wheels under different ground conditions

降至 0.728, 下降幅度相对较小。因为沥青路面的纹理和排水性能使得轮胎在积水情况下仍能保持一定的摩擦力。旧轮胎的摩擦系数从 0.582 降至 0.522。

沥青和水泥两种路面的摩擦力试验结果表明, 相同车轮的沥青路面的摩擦系数大于水泥路面, 高约 10%~20%。事实上, 轮胎与路面之间的摩擦主要取决于轮胎橡胶的性质、温度和路面材料的粗糙度, 但地面和轮胎之间存在的尘土粉末会影响它自身提供的滑动摩擦机制。颗粒大小和分布的不均匀, 改变轮胎表面的微观凹凸结构, 导致不同的区域接触面积不同, 进而使摩擦系数呈现不稳定性。

在相同路面条件下, 不同湿润状态下摩擦系数不同, 结果显示, 润湿状态>干燥状态>积水状态。润湿状态下摩擦系数比干燥状态高约 15%~20%, 而积

水状态下摩擦系数比干燥状态低约 10%~15%。分析其原因是润湿状态下道路所产生水膜厚度较小, 水膜尚未大面积连接, 其产生流动性和弹性较低, 而且水与尘土粉末相互作用会增强颗粒间的黏附、改变颗粒排列和表面结构、增加阻力, 在一定程度上破坏了尘粒的滚动效应, 导致摩擦系数略有增加。而在道路产生积水状态下, 水的低黏度和较高的表面张力使其能够覆盖路面, 形成稳定的水膜厚度, 当水膜稳定且均匀分布时, 轮胎与路面之间的接触更加平滑, 同时减少了轮胎与颗粒物之间的摩擦, 从而导致摩擦系数的减少。

在相同路面条件下, 轮胎的新旧程度会影响其摩擦系数, 结果显示, 新轮胎的摩擦系数普遍大于旧轮胎, 高约 15%~20%。新轮胎的胎面花纹较深, 有助于增加与路面的接触面积, 而旧轮胎由于磨损, 花纹变浅, 接触面积减少, 摩擦系数下降。另一方面, 新胎的橡胶更柔软, 弹性更好, 能更紧密地贴合路面, 增加摩擦系数。随着使用年限增加, 轮胎胎面磨损变浅, 橡胶老化变硬, 导致摩擦系数下降。

部分轮胎的摩擦系数会随载荷的增加而减少, 而有一部分并未呈现出一定的规律性。在干燥路面条件下, 摩擦系数变化较为平缓, 下降幅度约为 3%~5%; 而在积水路面条件下, 摩擦系数下降幅度达到 8%~12%。随着载荷增加, 轮胎与路面接触面积增大, 但单位面积压力也上升, 致使轮胎橡胶发生复杂变形, 影响微观接触状态。在较高载荷下, 轮胎局部区域可能出现过度变形, 破坏了与路面的有效啮合与黏附, 从而降低摩擦系数, 这一趋势在不同路面状况下的表现有所差异, 干燥路面条件下摩擦系数的变化相对较为平缓, 而在积水路面由于水膜的干扰, 摩擦系数的下降幅度更为显著。

3.2 浮力分析

通过试验数据可以建立浮力与水深的函数关系曲线。以水深 h 为横坐标, 浮力 F_B 为纵坐标, 绘制曲线(见图 11)。试验结果表明, 对于非密封车辆, 随着水深的增加, 浮力会呈现逐渐增加→逐渐减少→完全消失的规律。当车辆部分浸入水中时, 浮力随浸入体积的增加而增加, 当水位到达一定高度后, 浮力的增加速度会减缓; 试验车辆为非密封性的, 水位到达车门和底盘缝隙后迅速渗入车内, 导致车辆自重和进水量增加, 浮力逐渐被抵消, 呈现出降低的趋势。当车辆完全充满水后, 浮力仅由车辆外壳和部件的体积决定, 由于金属、塑料等材料的密度均大于水, 车辆会逐渐沉底。

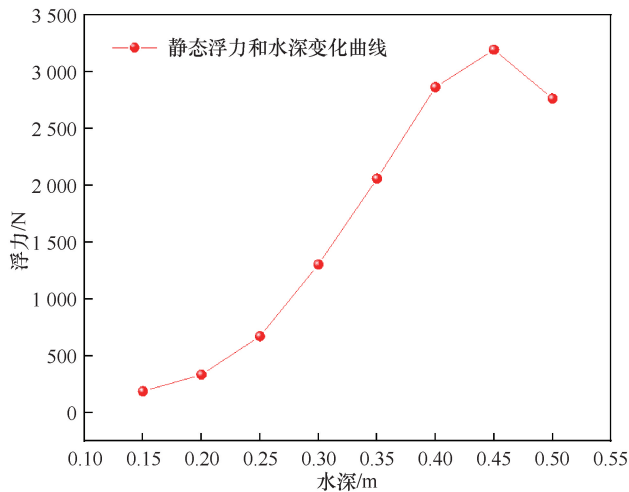


图 11 浮力和水深关系曲线

Fig. 11 Plot of buoyancy versus water depth

试验过程中发现汽车在静态水深和水流动状态下所受浮力不同, 这与高丽军等^[31] 研究结果相吻合, 在不同水深情况下变化趋势基本相似, 以 40 cm 水深为例, 图 12 展现了不同迎流方向下流速和浮力之间的关系。随着水流流速的增加, 车辆所受浮力逐渐减少, 且迎流角度在 60° 至 120° 的下降趋势更加明显, 0° 和 180° 相对平缓。该现象可解释为, 当水流快速冲刷车辆底部时, 根据伯努利方程原理, 当车辆底部流速高(如水流冲刷底盘), 底部静压降低, 导致车辆底部与顶部之间的压力差减小, 进而减少等效浮力。当迎流方向为 60° 和 120° 时, 车头和车尾通常为流线型设计, 水流可平滑绕行, 减少流动分离和涡流产生, 水流对汽车的横向冲击力较弱。同时压力分布相对对称, 动压效应(如伯努利效应导致的压力差)

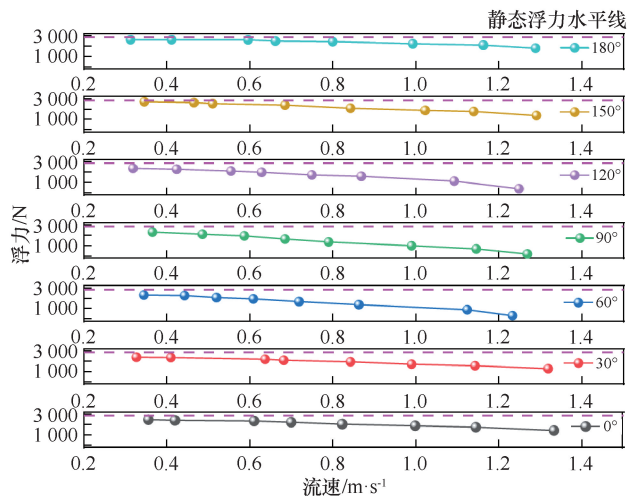


图 12 不同迎流方向下流速和浮力之间的关系

Fig. 12 Relationship between flow velocity and buoyancy for different headwater directions

在车头与车尾可在一定程度上相互抵消, 减缓浮力下降趋势。当迎流方向为 0° 至 180° 时, 水流绕过车身时发生流动分离, 在车体背流侧形成大范围低压区, 形成横向压力差, 产生等效向下的“吸力”, 从而加剧了浮力下降趋势。

3.3 绕流阻力和横向力分析

以水深 h 和流速 v 的乘积为 X 轴, 以迎流方向为 Y 轴, 以绕流阻力 F_D 和横向力 F_T 为 Z 轴, 绘制了汽车在不同迎流方向下不同水流条件的绕流阻力 F_D 和横向力 F_T , 如图 13 所示。

汽车在不同迎流方向受到的绕流阻力 F_D 与横向力 F_T 大小变化趋势在不同水流条件下具有相似性。具体而言, 当迎流方向相同时, 汽车受到的绕流阻力和横向力随着流速和水深乘积的增加而增加。而在相同的水深下, 随着流速的增长, 绕流阻力在迎流方向上从 0° 到 90° 逐渐增加, 从 90° 到 180° 逐渐减少, 呈单峰分布特征; 而横向力在迎流方向上从 0° 到 60° 和 90° 到 150° 逐渐增加, 从 60° 到 90° 和 150° 到 180° 逐渐减少, 呈双峰分布特征, 这种双峰特征与钝体绕流中的卡门涡街 (Karman Vortex Street) 现象类似^[32]。

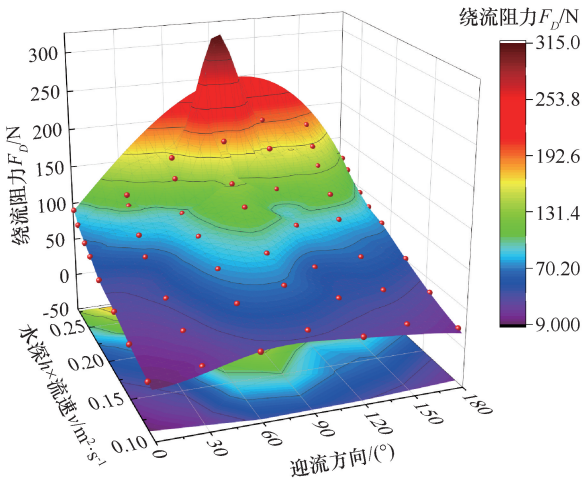
对比相同水深和流速条件下不同迎流角度的绕流阻力, 结果显示, 当迎流方向为 90° 时, 汽车受到的绕流阻力最大, 原因是其钝体形状导致流动剧烈分离, 汽车正面承受高压区, 背面因尾流区扩大形成低压区, 产生显著的压差阻力。同时, 边界层分离点前移, 尾流区的湍流强度增大, 进一步加剧能量耗散, 导致绕流阻力出现峰值。而当迎流方向为 0°, 流线型车头可引导水流平顺绕过车身, 分离点后移, 尾流区缩小, 延迟边界层分离, 降低形状阻力, 汽车受到的绕流阻力最小。另外, 当迎流方向为 60° 和 150° 时, 因为非对称流动分离诱导侧向压力梯度, 此时汽车受到的横向力最大。汽车绕流阻力的单峰特征由压差阻力主导, 而横向力的双峰特征与流动分离的不对称性及漩涡脱落相关。水深和流速通过改变弗劳德数、雷诺数和边界层特性等, 直接影响分离点位置、尾流结构及侧向力波动, 最终导致车辆失稳风险的变化。

3.4 绕流阻力系数和横向力系数分析

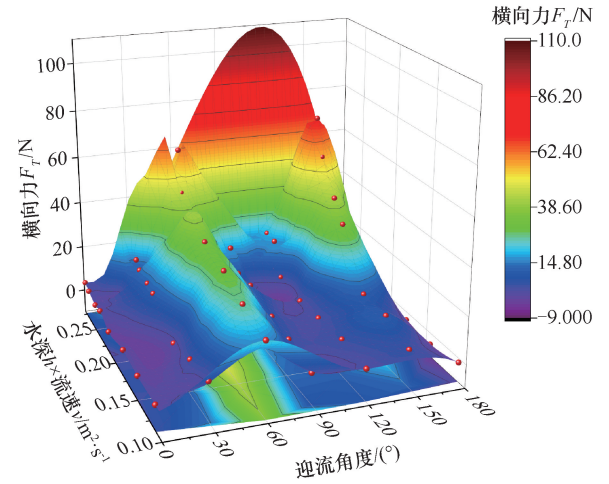
通过 Solidworks 软件建立汽车 3D 几何模型, 尺寸和形状与大众 Polo 保持一致。使用软件建立不同方向的迎流基准面, 然后通过草图软件中的“侧影实体”功能, 将汽车的轮廓投影在迎流基准面上, 利用生成的闭环草图构建平面区域, 运用软件评估功

能中的测量工具, 精确测定汽车在不同迎流方向的投影面积, 如图 14 所示。随后, 根据试验不同的水深

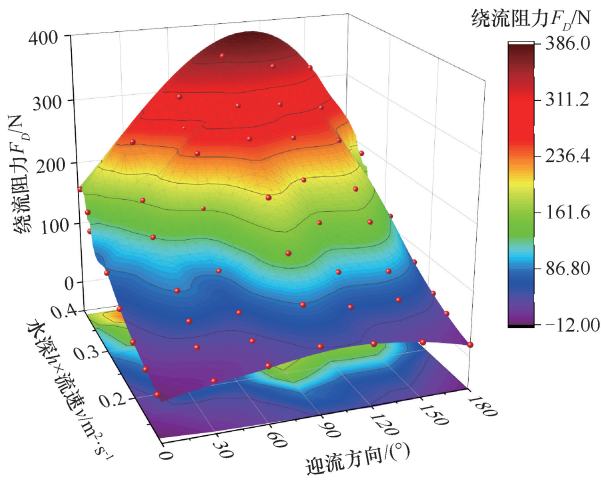
条件, 对草图中水面以上部分进行剪裁, 实现了多角度及不同水深条件下投影面积的精准测量^[33]。



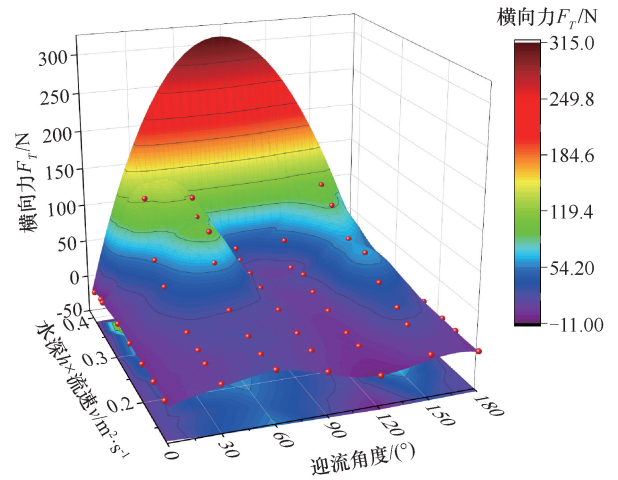
(a) 0.25 m水深下的绕流阻力



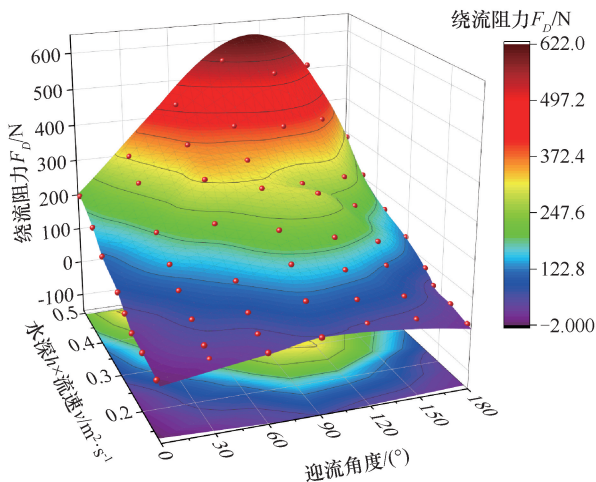
(b) 0.25 m水深下的横向力



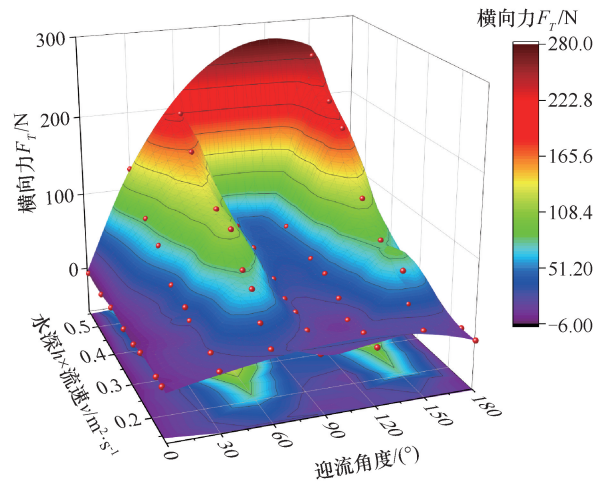
(c) 0.3 m水深下的绕流阻力



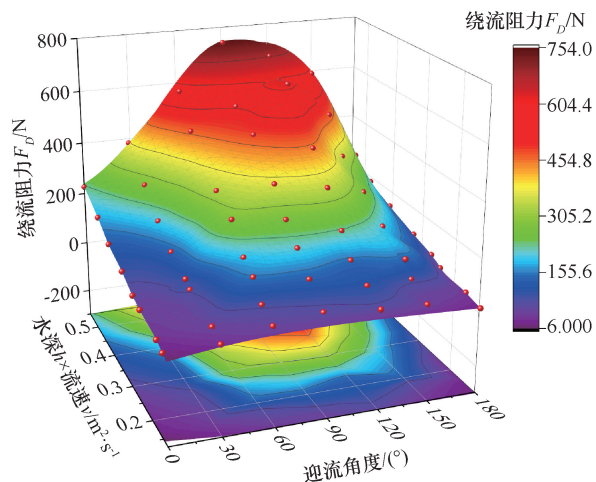
(d) 0.3 m水深下的横向力



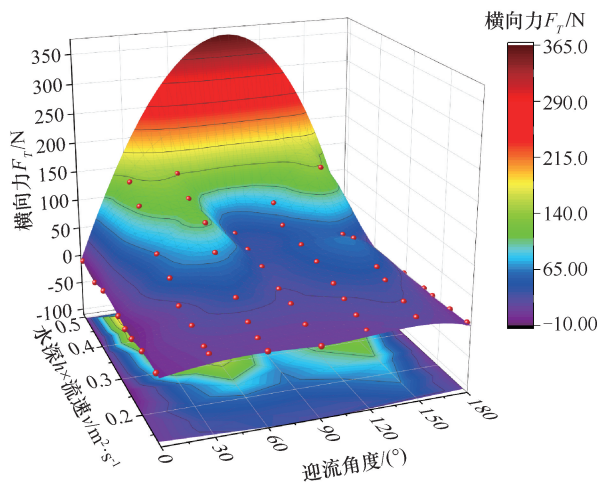
(e) 0.35 m水深下的绕流阻力



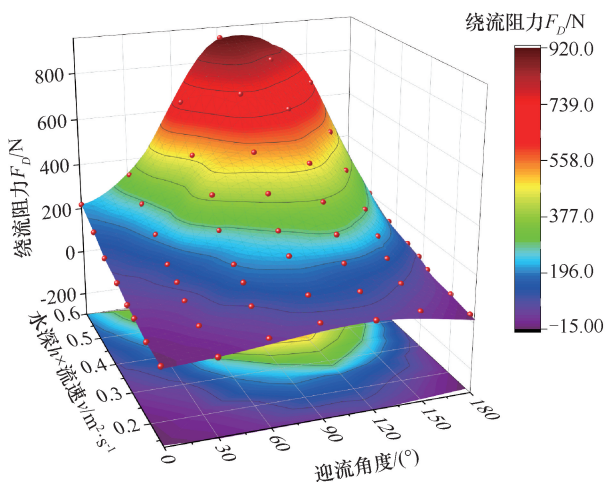
(f) 0.35 m水深下的横向力



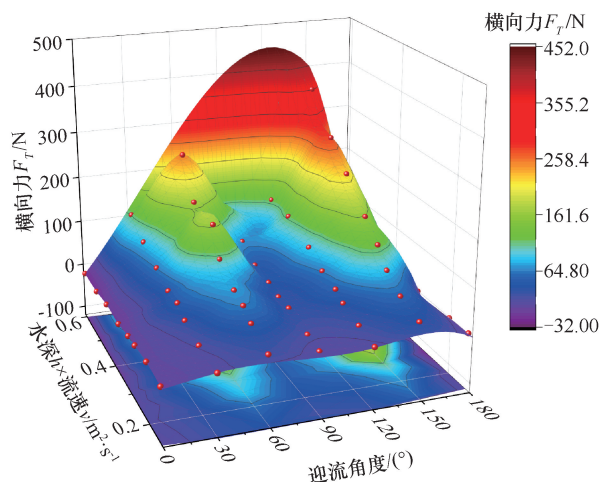
(g) 0.4 m水深下的绕流阻力



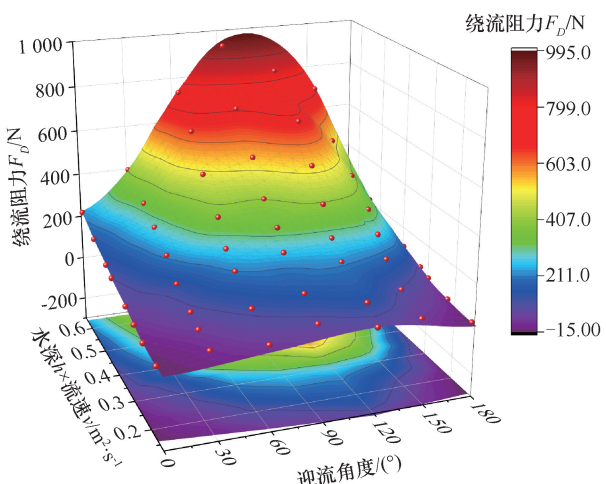
(h) 0.4 m水深下的横向力



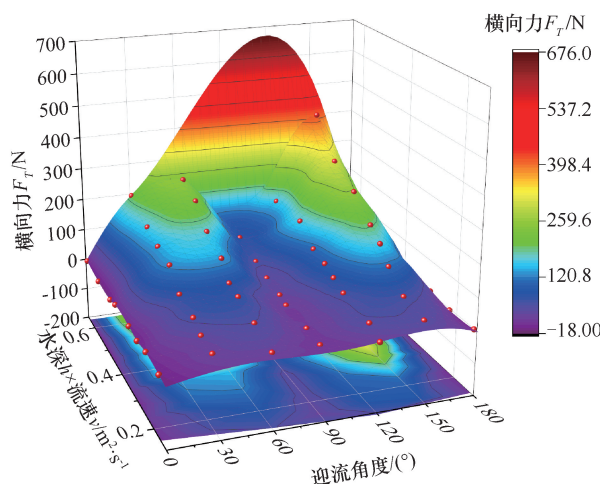
(i) 0.45 m水深下的绕流阻力



(j) 0.45 m水深下的横向力



(k) 0.5 m水深下的绕流阻力



(l) 0.5 m水深下的横向力

图 13 不同水深×流速下不同迎流方向汽车所受的绕流阻力和横向力

Fig. 13 Winding resistance and lateral force on a car in different headwater directions at different water depths x flow velocities

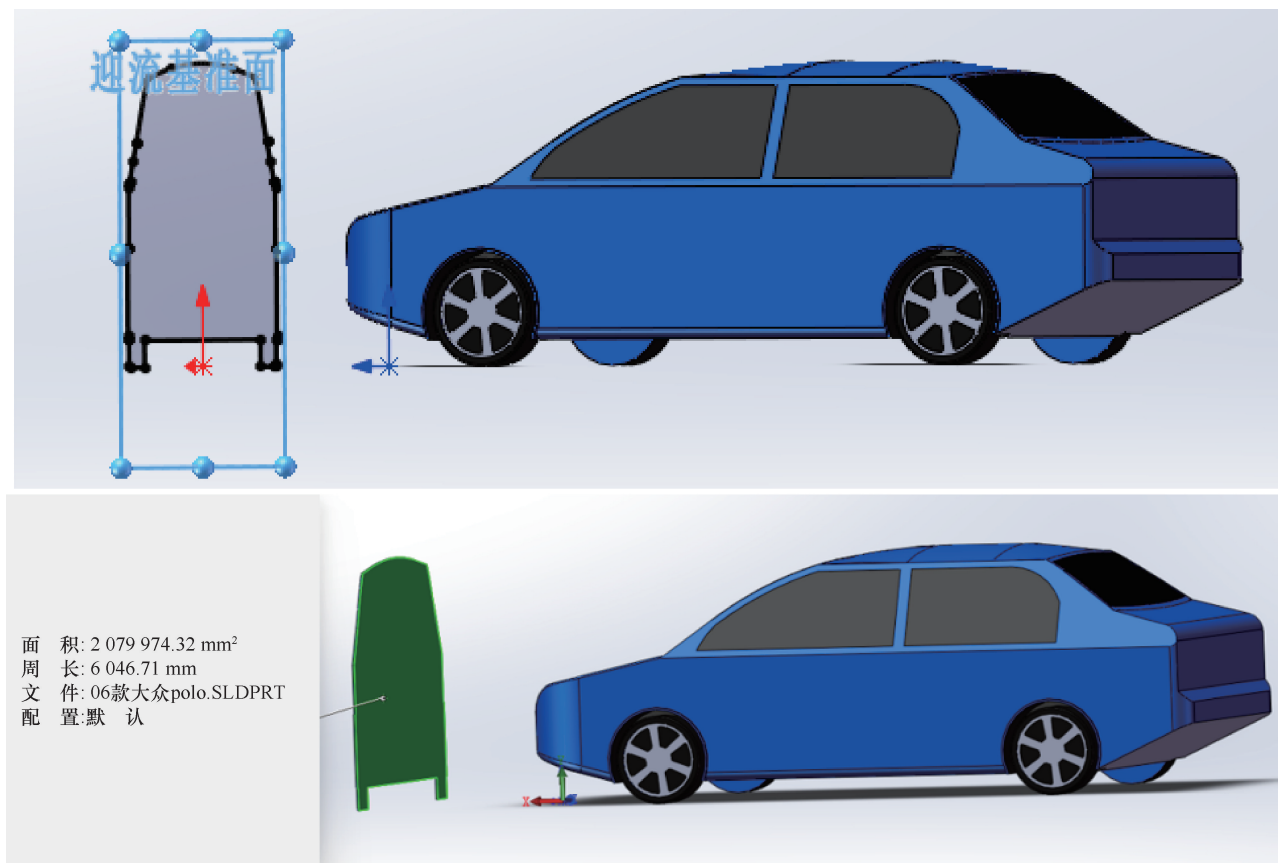


图 14 投影面积测量

Fig. 14 Projected Area Measurement

主要研究 0° 到 180° 迎流方向下汽车的稳定性, 0° 和 180° , 30° 和 150° , 60° 和 120° 这几个迎流方向的投影面积两两相等, 因此只需计算 0° 到 90° 的投影面积。不同迎流方向下投影面积随水深变化的关系曲线如图 15 所示。

A_T 为平行于流向的车辆淹没部分的投影面积, 即迎流方向为 0° 的 A_T 与 90° 的 A_D 相等, 迎流方向为 30° 的 A_T 与 60° 或 120° 的 A_D 相等, 以此类推, 根据所得投影面积数据, 拟合出不同迎流角度的投影面积随水深的变化关系曲线, 拟合结果汇总如表 6 所列。

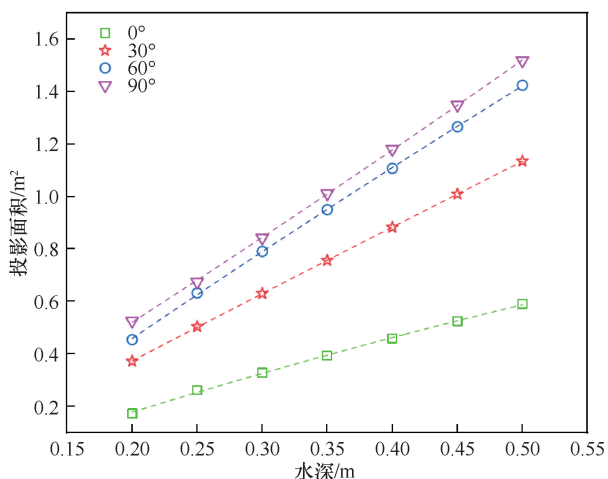


图 15 不同迎流角度下的投影面积

Fig. 15 Projected areas at different headwater angles

表 6 不同迎流方向水深和投影面积的拟合曲线

Table 6 Fitted curves of water depth and projected area for different headwater directions

迎流角度/ $^\circ$	R^2	拟合曲线方程
0	0.998	$A_D = 1.758h - 0.562h^2 - 0.149$
	0.999	$A_T = 2.989h + 0.489h^2 - 0.095$
30	0.997	$A_D = 2.633h - 0.138h^2 - 0.147$
	0.999	$A_T = 3.548h - 0.484h^2 - 0.231$
60	0.999	$A_D = 3.548h - 0.484h^2 - 0.231$
	0.997	$A_T = 2.633h - 0.138h^2 - 0.147$
90	0.999	$A_D = 2.989h + 0.489h^2 - 0.095$
	0.998	$A_T = 1.758h - 0.562h^2 - 0.149$

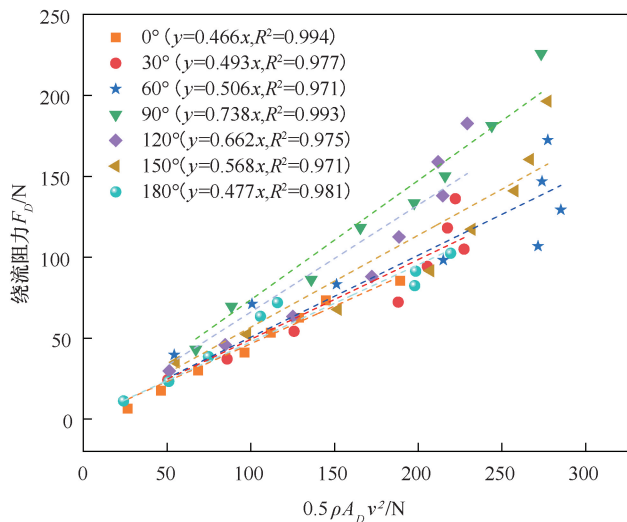
以 $0.5\rho A_D v^2$ 和 $0.5\rho A_T v^2$ 为横坐标, 以绕流阻力 F_D 和横向力 F_T 为纵坐标, 绘制散点图, 然后在每个试验水深的不同流速条件下, 对汽车不同迎流方向进行一次函数线性拟合(截距为 0), 拟合关系曲线的斜率即为绕流阻力系数 C_D 和横向力系数 C_T 。在流体力

A_D 为汽车淹没部分垂直于流动方向的投影面积,

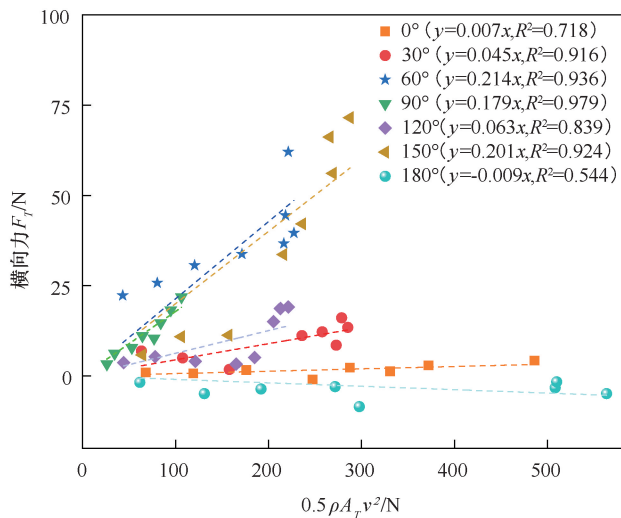
学中, 汽车模型风洞试验发现, 对于钝体(如汽车), 当 Re 超过临界值(通常为 10^5 量级)时, 分离点固定在物体肩部, 形成稳定的剪切层, C_D 的波动小于 2%, 满足工程设计中的 Re 无关性假设^[34]。本试验

水流条件的雷诺数 Re 在 1.15×10^6 到 5.64×10^6 之间, 因此可将每个迎流方向下的绕流阻力系数 C_D 和横向力系数 C_T 看作恒定值。

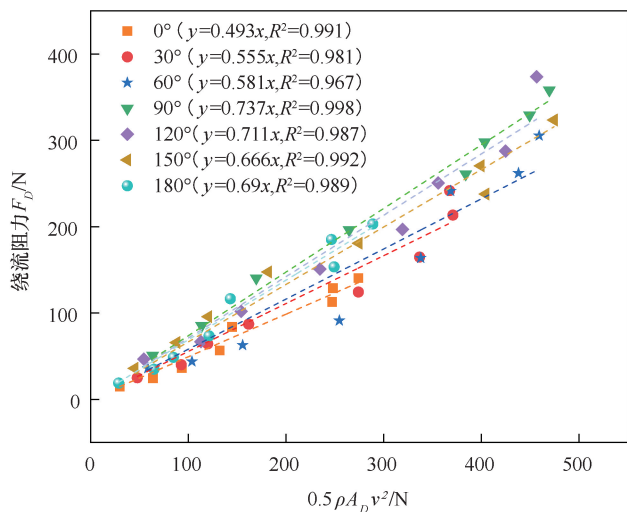
由图 16 可看出, 汽车的绕流阻力系数在 0° 到



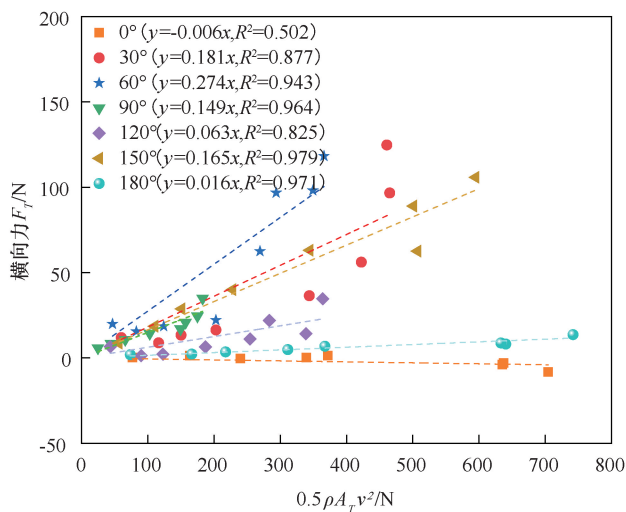
(a) 0.25 m



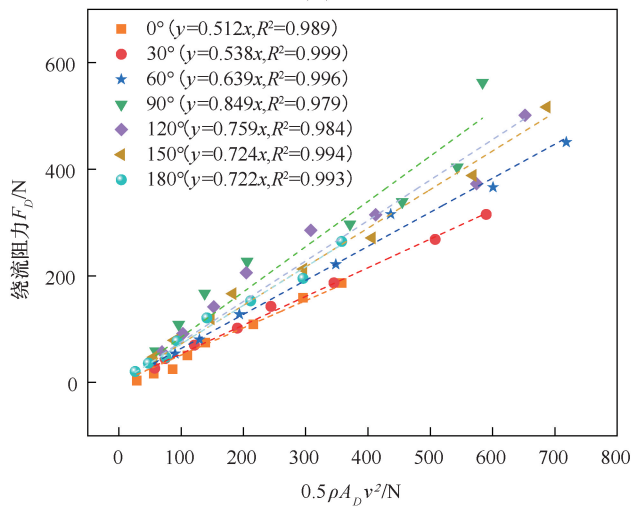
(b) 0.25 m



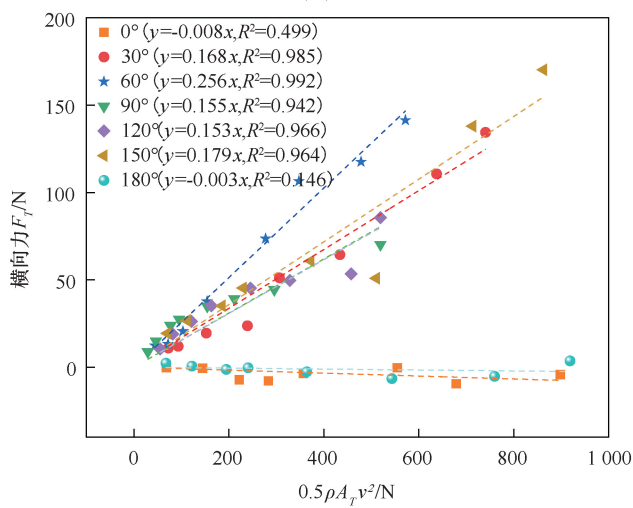
(c) 0.3 m



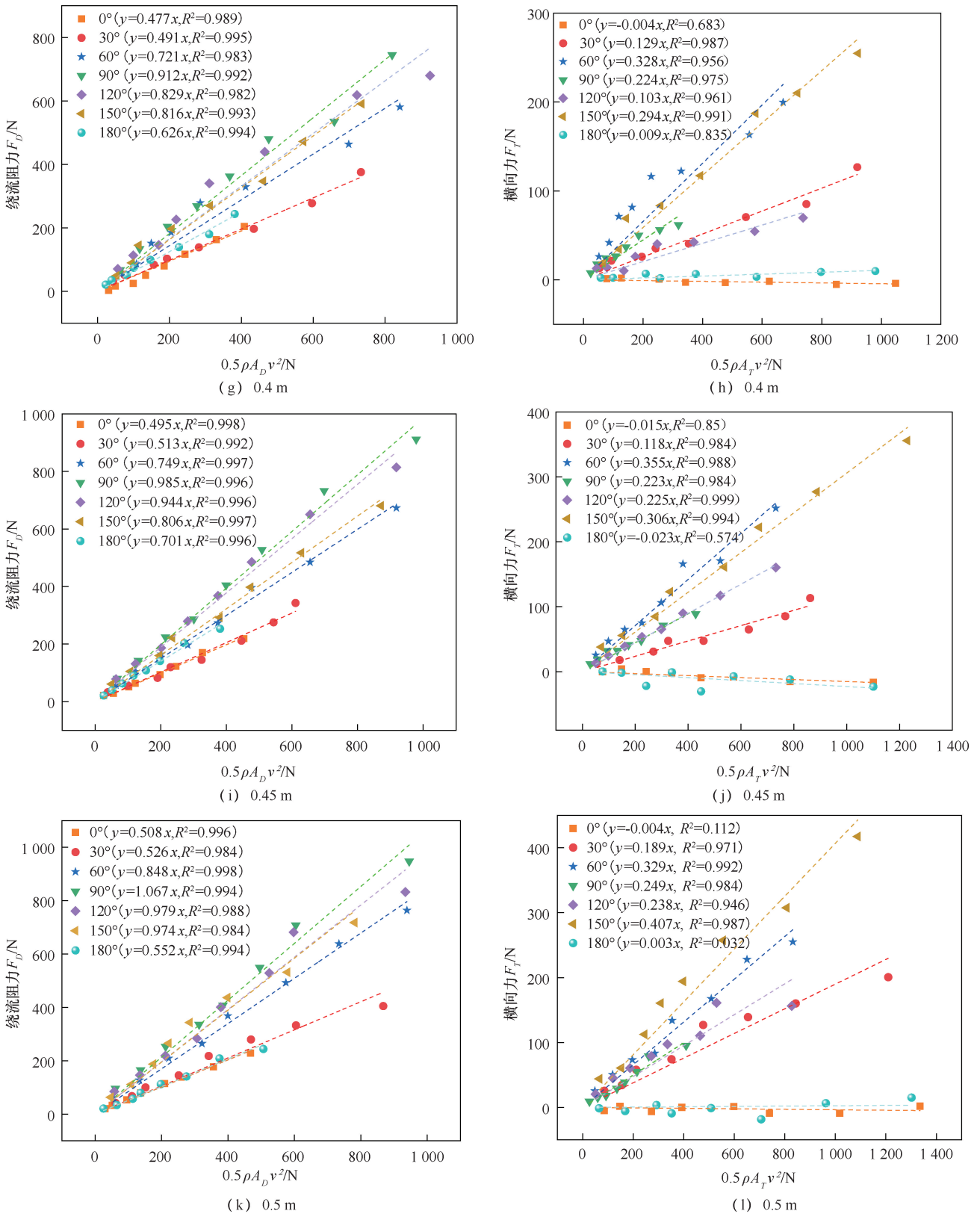
(d) 0.3 m



(e) 0.35 m



(f) 0.35 m

图 16 不同水深下不同迎流方向汽车 F_D 与 $0.5\rho A_D v^2$ 以及 F_T 与 $0.5\rho A_T v^2$ 的线性拟合Fig. 16 Linear fits of F_D versus $0.5\rho A_D v^2$ and F_T versus $0.5\rho A_T v^2$ for cars with different headward currents at different water depths

90°的迎流方向上逐渐增加, 在 90°到 180°的迎流方向上逐渐减少(与绕流阻力 F_D 变化规律相同)。汽车

的横向力系数在来流方向 0°到 60°和 90°到 150°增加, 在来流方向 60°到 90°和 150°到 180°逐渐减少

(与横向力 F_T 变化规律相同)。汽车在不同迎流方向 ($0^\circ \sim 180^\circ$) 的绕流阻力系数 C_D 在 0.466 ~ 1.067 之间, 横向力系数 C_T 在 0 ~ 0.407 之间。ARRIGHI 等^[30]通过数值模拟得到绕流阻力系数 C_D 在 0.06 ~ 0.83 之间, SMITH 等^[8]通过模型车试验得到绕流阻力系数 C_D 在 0.98 ~ 1.83 之间, 不同学者得到的绕流阻力系数存在一定差异, 主要因为 C_D 随水深、流速和车辆类型以及形状而变化。

3.5 汽车临界失稳风险阈值分析

根据式(7)的汽车滑动失稳起动流速公式, 从底线思维出发, 选取了型号为 195/55R15 旧轮胎在积水水泥路面, 配重为 240.3 kg 工况的摩擦系数, 该工况的摩擦系数为 0.32, 在所有工况中最小, 此时车也最容易失稳, 得到不同迎流方向下不同水深对应的失稳流速阈值, 如图 17 所示。

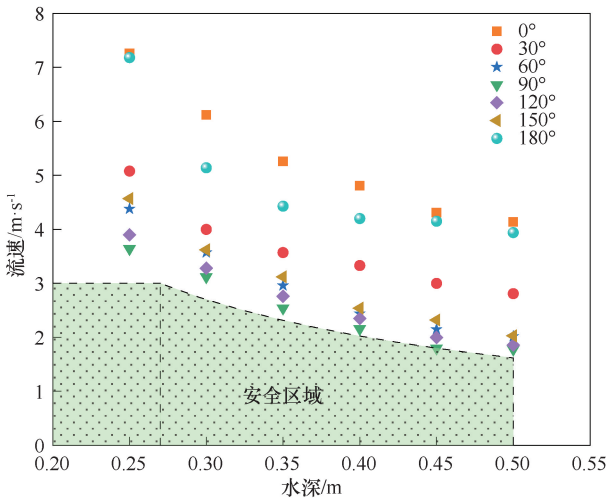


图 17 不同迎流方向下不同水深对应的失稳流速阈值

Fig. 17 Threshold values of unsteady flow velocity corresponding to different water depths in different headwater directions

汽车在洪涝积水中的稳定性与水深和流速直接相关, 在低水深的情况下, 滑动失稳起主导作用, 临界失稳流速较高。而在高水深情况下, 漂浮失稳会起主导作用, 临界失稳流速显著下降, 这与 XIA 等^[35]、SHU 等^[36]、TEO 等^[37]、KRAMER 等^[7]、MARTÍNEZ-GOMARIZ 等^[26]、SHAH 等^[38]的研究结果吻合。汽车在不同迎流方向下的稳定性会发生显著变化。试验结果发现, 所有迎流角度均呈现失稳流速随水深增加而下降的规律, 且汽车在迎流方向为 90° 时最易失稳, 在 0° 时最难失稳。这与 XIA 等^[39]、SHAH 等^[40]、AL-QADAMI 等^[9-41]、HU 等^[42]的研究结果吻合。

在不同试验工况下, 当流速、水深乘积 hv_{\min} 大

于 $0.81 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 汽车发生滑动失稳。表 7 拟合了不同迎流方向下失稳临界流速阈值和水深的关系曲线。对于相同水深条件下, 汽车在迎流方向为 90° 到 0° 时, 临界失稳流速阈值不断增大, $90^\circ \sim 180^\circ$ 具有相同的规律。原因主要因为当车辆迎流角度为 90° 时, 车辆侧面的横向尺寸较大, 投影面积最大, 且绕流阻力系数达到峰值。此时水流直接冲击车辆前部, 流动分离发生在车身两侧, 较为显著, 尾部形成大尺度涡旋, 导致压差阻力主导, 易引发横向失稳, 从而导致临界失稳流速降低。当车辆迎流角度为 0° 和 180° 时, 横向力系数趋近于零, 流动分离集中于车头和车尾, 尾流对称性较高, 压力分布更均匀, 侧向力显著降低, 临界流速阈值因此显著提高。

表 7 不同迎流方向下失稳临界流速阈值和水深的关系曲线

Table 7 Relationship curves between critical flow velocity threshold for instability and water depth for different headwater directions

迎流角度/ $(^\circ)$	R^2	拟合曲线方程
0	0.998	$v = -80.23h + 139.1h^2 - 83.1h^3 + 19.93$
30	0.995	$v = -137.09h + 317.14h^2 - 251.11h^3 + 23.43$
60	0.999	$v = -27.88h + 15.09h^2 - 16.3h^3 + 10.15$
90	0.998	$v = 18.36h - 97.52h^2 + 108.15h^3 + 3.46$
120	0.999	$v = -12.63h - 11.33h^2 + 29.63h^3 + 7.29$
150	0.997	$v = -72.29h + 138.24h^2 - 94.81h^3 + 15.48$
180	0.996	$v = -327.38h + 780.05h^2 - 618.52h^3 + 49.91$

4 结果讨论

4.1 研究方法比较

与 SMITH 等^[8]的实验室摩擦系数测试相比, 本文采用真实道路材料(沥青/水泥)和不同湿润状态(干燥、润湿、积水)模拟实际洪涝场景。此外, 通过旋转轴承和三轴姿态传感器调整车辆迎流方向 ($0^\circ \sim 180^\circ$), 实现了多角度水动力耦合作用分析, 弥补了 AL-QADAMI 等^[9]仅研究 0° 和 90° 方向的不足。通过力学传感器、多普勒流量计和三维姿态传感器同步测量不同迎流方向的水深、流速、浮力、绕流阻力及横向力, 数据维度更全面, 弥补了前人对于足尺车辆滑动失稳试验的空白。相较于高帅领等^[43]基于泥沙起动理论的简化模型, 本文实测数据为失稳阈值模型的构建提供了更高精度的验证依据。

但是本文仅针对大众 Polo 非密封静态车辆, 未涵盖 SUV、救护车等不同车型及动态行驶状态的影响。AL-QADAMI 等^[18]的数值模拟表明, 运动车辆的失稳阈值显著低于静态车辆。试验仅在亚临界流态 ($Fr = 0.132 \sim 0.703$) 下开展, 未考虑超临界流或湍流

脉动对失稳的瞬时冲击效应。AZHAR 等^[19]的 SPH 模拟显示, 湍流涡脱落可能加剧横向力波动, 导致阈值预测偏差。绕流阻力系数 C_D 和横向力系数 C_T 的恒定假设在高雷诺数 ($Re > 10^6$) 下虽符合工程惯例, 但未考虑局部流动分离的非稳态特性, 可能低估极端工况下的失稳风险。

4.2 试验结果对比与准确性验证

本文计算的绕流阻力系数 ($C_D = 0.466 \sim 1.067$) 与 ARRIGHI 等^[30]的数值模拟结果 ($C_D = 0.06 \sim 0.83$) 和 SMITH 等^[8]的模型车试验结果 ($C_D = 0.98 \sim 1.83$) 存在部分重叠, 但整体范围更宽。差异主要源于车辆几何形状与试验条件, ARRIGHI 等^[30]研究的小型车投影面积较小, 而 SMITH 等^[8]采用简化模型导致压差阻力高估。本文通过足尺试验精确测量投影面积, 有效平衡了形状效应, 与 HU 等^[42]的实测数据 ($C_D = 0.52 \sim 1.12$) 吻合度较高, 验证了方法的准确性。

MILANESI 等^[17]开发了一个受流量影响的车辆稳

定性无量纲概念模型, 表达式为

$$v = \sqrt{gh_v \frac{F_G \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\mu} \right) - B_N}{F_B} \frac{2\mu\alpha L \cos \theta}{(C_D h_v + \mu C_L L)}} \quad (11)$$

式中, v 为起动流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); h_v 为车身有效淹没深度 (水深减去底盘高度) (m); α 表示车辆不透水的淹没体积占体积的比例; L 为车长 (m); θ 为坡度。

通过试验数据校准代入式 (11) 中, 不考虑坡度影响, 得到迎流方向为 0° 和 90° 的失稳阈值方程, 其公式为

$$v = \sqrt{\frac{604 - 1218h}{38h + 1}} \quad (12)$$

$$v = \sqrt{\frac{390 - 788h}{68h - 1}} \quad (13)$$

试验阈值曲线与其它足尺车辆失稳试验数据的比较如图 18 所示。红色为澳大利亚 AR&R 准则对于小乘客车的失稳判别标准, 但是给出的阈值较为保守,

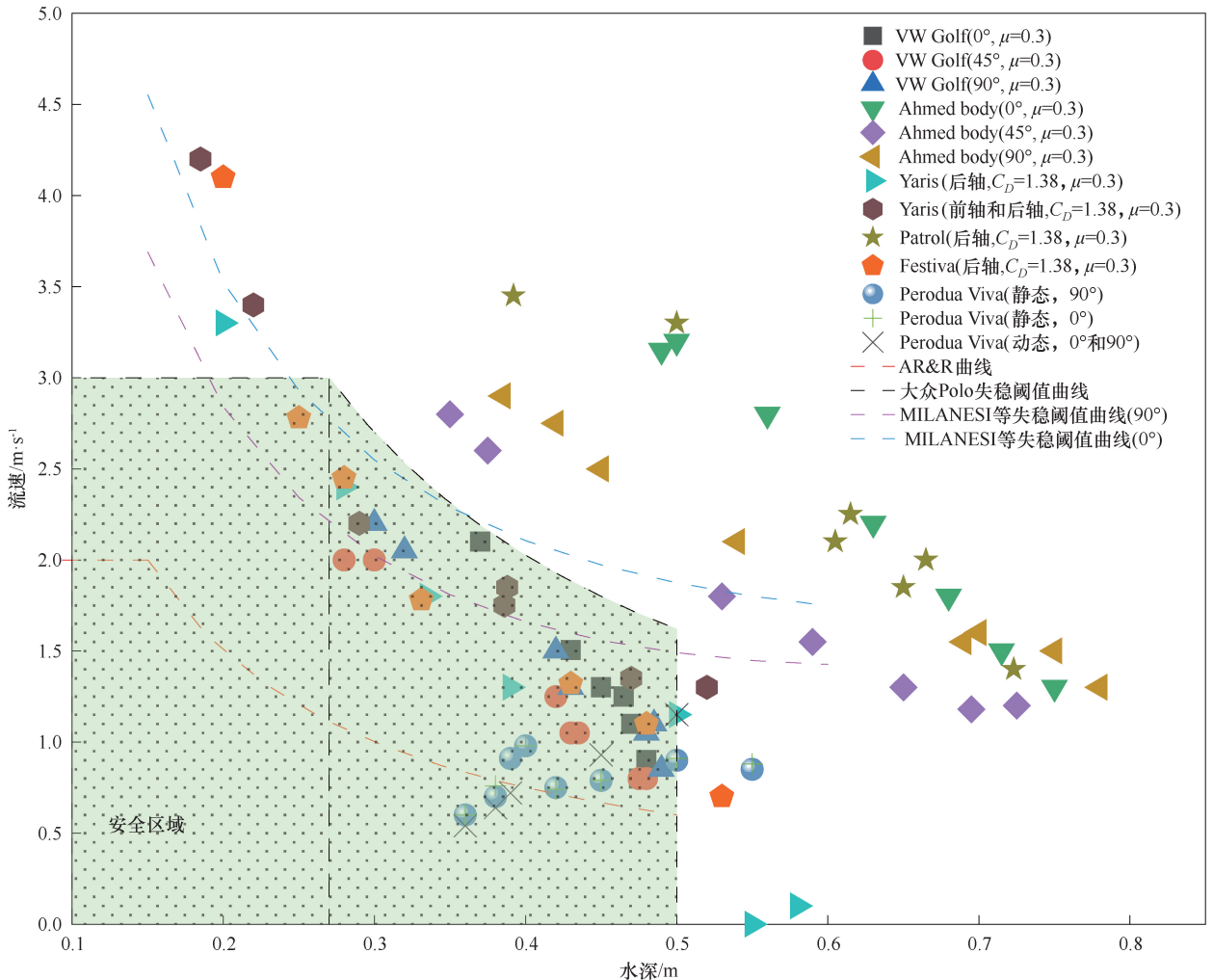


图 18 试验阈值曲线与其他足尺车辆失稳试验数据的比较^[7-9]

Fig. 18 Comparison of test threshold curves with other foot-size vehicle instability test data^[7-9]

随着车辆设计的不断变化,需要及时更新。图中散点为其他学者足尺试验的数据,通过对比发现本文失稳阈值曲线相交于澳大利亚 AR&R 准则偏大,但是和 MILANESI 等^[17]失稳阈值曲线以及足尺试验的数据吻合良好。

4.3 研究不足与未来方向

当前研究在车辆失稳风险评估方面仍存在一些不足之处。足尺试验主要研究非密封车辆在多种因素下的稳定性,且只考虑了亚临界流态下的水流条件,未来可继续探究不同类型的密封足尺静态和运动车辆在不同流态、迎流方向、坡度下的稳定性,同时需要进一步的研究来确定不同汽车在不同水流条件下的阻力系数。

本文主要探究大众 Polo 小型车在道路洪涝条件下的稳定性,缺乏对不同类型、不同尺寸和不同用途的车辆的系统研究。未来可在现代汽车分类基础上,结合洪涝条件下汽车失稳的主要影响因素,深入考量其在车身结构、质量分布、轮胎特性、悬挂系统等显著差异,考虑不同车辆的空气动力学与水动力学特性,针对现有车型(小型车、SUV、越野车等),动力类型(燃油车、混动汽车、新能源汽车等)与之前的差异,给出现代车辆失稳评估的分类方法,基于界定的汽车分类方法,进一步深入探究不同汽车类型的失稳阈值判别指标。

5 结 论

以大众 Polo 为研究对象,探究新旧车轮在不同的路面条件(干燥、润湿、积水状态)和不同载荷下的摩擦系数,通过水槽试验研究了汽车在不同水深、流速、迎流方向下的水动力学特征,基于滑动平衡力学理论的初始速度公式,揭示足尺车辆在洪涝积水中的失稳机理。

(1)摩擦系数 μ 在 0.320~0.898 之间,相同车轮的沥青路面的摩擦系数大于水泥路面,而在相同路面材料下,摩擦系数的状况为:润湿状态>干燥状态>积水状态,且新轮胎的摩擦系数普遍大于旧轮胎。在测试的轮胎型号和路面条件组合中,均呈现出随着载荷增加摩擦系数减小的普遍趋势。

(2)对于非密封车辆部分浸入水中时,浮力随浸入深度增加而增大,但是在水深 0.45 m 时车辆进水导致总重量增加,当总重量大于最大浮力时,浮力出现拐点,开始减小。总体趋势为:逐渐增加→逐渐减少→趋近于零。

(3)绕流阻力 F_D 和横向力 F_T 随着流速和水深的

增加而增加,汽车在迎流方向为 90° 时,绕流阻力达到最大值。当迎流方向为 60° 和 150° 时,横向力达到最大值。

(4)汽车在不同迎流方向($0^\circ\sim 180^\circ$)的绕流阻力系数 C_D 在 0.466~1.067 之间,横向力系数 C_T 在 0~0.407 之间,且变化趋势与绕流阻力 F_D 和横向力 F_T 相同。

(5)汽车在迎流方向为 90° 时最易失稳,在 0° 时最难失稳。在迎流方向为 $0^\circ\sim 90^\circ$ 时,临界失稳流速阈值不断减少, 180° 到 90° 也呈现相同的规律。拟合了不同迎流方向下失稳临界流速阈值和水深的关系曲线。采用底线思维,摩擦系数取 0.320,当流速、水深乘积 hw_{\min} 大于 $0.81\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$,汽车发生滑动失稳。

未来可继续探究不同类型的密封足尺静态和运动车辆在不同流态、迎流方向、坡度下的稳定性,同时需要进一步的研究来确定不同汽车在不同水流条件下的阻力系数,基于车辆失稳风险阈值,对大排水系统的规划和道路行泄通道进行优化设计。

参考文献(References):

- [1] 尹志国,牛发阳,汤辉. 基于博弈论和后悔理论的城市洪涝灾害韧性评价:以西安市为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(1): 74-87.
YIN Zhiguo, NIU Fayang, TANG Hui. Resilience evaluation of urban flood disasters based on game theory and regret theory: A case study of Xi'an City [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(1): 74-87.
- [2] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 7-17.
XU Chongxue, LI Peng. Progress on hydrological response to urbanization: Mechanisms, methods and solutions [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 7-17.
- [3] 李娜,张念强,丁志雄. 我国城市内涝问题分析与对策建议[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(5): 77-79.
LI Na, ZHANG Nianqiang, DING Zhixiong, et al. Integration green sponge city concept into urban flood management and drainage system [J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(5): 77-79.
- [4] World Health Organization. Global Status Report on Road Safety 2023: Summary [M]. Geneva: World Health Organization, 2023.
- [5] ARRIGHI C, CASTELLI F, OUMERACI H. Effects of flow orientation on the onset of motion of flooded vehicles [M]//ERPICUM S, DEWALS B, ARCHAMBEAU P, et al. Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change. London: CRC Press, 2016: 837-841.
- [6] TODA K, ISHIGAKI T, OZAKI T. Experiments study on floating car in flooding [C]//DAVID B, ALBERT C, SLOBODAN D, et al. International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and

- Europe. Exeter, England: University of Exeter, 2013: 1-33.
- [7] KRAMER M, TERHEIDEN K, WIEPRECHT S. Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2016, 17: 77-84.
- [8] SMITH G P, MODRA B D, FELDER S. Full-scale testing of stability curves for vehicles in flood waters[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2019, 12(S2): e12527.
- [9] AL-QADAMI E H H, MUSTAFFA Z, SHAH S M H, et al. Full-scale experimental investigations on the response of a flooded passenger vehicle under subcritical conditions[J]. *Natural Hazards*, 2022, 110: 325-348.
- [10] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, MATÍNEZ-GOMARIZ E, et al. Hazard risks pertaining to partially submerged non-stationary vehicle on low-lying roadways under subcritical flows[J]. *Results in Engineering*, 2019, 3: 100032.
- [11] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, MATÍNEZ-GOMARIZ E, et al. Hydrodynamic effect on non-stationary vehicles at varying Froude numbers under subcritical flows on flat roadways[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2020, 13(4): e12657.
- [12] AL-QADAMI E H H, MUSTAFFA Z, ABDURRASHEED A S, et al. Static and moving vehicles stability criteria inside floodwaters: A review[J]. *Engineering Letters*, 2021, 29(3): 1264-1276.
- [13] PERSSON B N J. Theory of rubber friction and contact mechanics[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2001, 115(8): 3840-3861.
- [14] AL-QADAMI E, RAZI M A M, SHAH S M H, et al. Floodwaters and vehicle hydrodynamics: A deep dive into risk mitigation unravelling vehicle stability in floods[J]. *Results in Engineering*, 2024, 23: 102540.
- [15] 肖宣炜, 夏军强, 舒彩文, 等. 洪水中汽车稳定性的理论分析及试验研究[J]. *泥沙研究*, 2013(1): 53-59.
- XIAO X W, XIA J Q, SHU C W, et al. Theoretical analysis and experimental study of stability of flooded vehicles[J]. *Journal of Sediment Research*, 2013(1): 53-59.
- [16] GOU L, LIU Y, ZHANG Y P, et al. Estimating the instability criterion of vehicles in urban flooding by an entropic method[J]. *Urban Climate*, 2022, 41: 101069.
- [17] MILANESI L, PILOTTI M. A conceptual model of vehicles stability in flood flows[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2020, 58(4): 701-708.
- [18] AL-QADAMI E H H, MUSTAFFA Z, AL-ATROUSH M E, et al. A numerical approach to understand the responses of passenger vehicles moving through floodwaters[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2022, 15(4): e12828.
- [19] AZHAR F, PAUWELS V R N, BUI H H. Confirmation of vehicle stability criteria through a combination of smoothed particle hydrodynamics and laboratory measurements[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2023, 16(2): e12885.
- [20] DONG B, XIA J, LI Q, et al. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: Case study of the “7.20” flood event in Zhengzhou, China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 80: 103205.
- [21] MEI C, LIU J H, SHI H Y, et al. Exploring impact of street layout on urban flood risk of people and vehicles under extreme rainfall based on numerical experiments[J]. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(9): 2561-2574.
- [22] EVANS B, LAM A, WEST C, et al. A combined stability function to quantify flood risks to pedestrians and vehicle occupants[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168237.
- [23] WANG N, HOU J, DU Y, et al. A dynamic, convenient and accurate method for assessing the flood risk of people and vehicle[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797: 149036.
- [24] DONG B, XIA J, ZHOU M, et al. Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 827: 154098.
- [25] 任春娇. 暴雨雨型对城市洪水中人车失稳风险变化影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- REN Chunjiao. Study on the Influence of Rainstorm Pattern on the Instability Risk of People and Vehicles in Urban Floods [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [26] MARTINEZ-GOMARIZ E, GOMEZ M, RUSSO B, et al. A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding[J]. *Urban Water Journal*, 2017, 14(9): 930-939.
- [27] BC Hydro. Life Safety Model Formal Description Engineering Report E299[R]. Columbia: BC Hydro, British, 2005.
- [28] SHAND T D, COX R J, BLACKA M J, et al. Australian Rainfall and Runoff Project 10: Appropriate Safety Criteria for Vehicles[R]. Australia: Water Research Laboratory, The University of New South Wales, 2011.
- [29] 胡孝哲. 道路洪涝条件下汽车稳定性试验及行泄通道安全性研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
- HU Xiaozhe. Research on Vehicle Stability Experiments and Safety of Surface Pathway during Road Flooding[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering And Architecture, 2023.
- [30] ARRIGHI C, ALCÉRRECA-HUERTA J C, OUMERACI H, et al. Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, 57: 170-184.
- [31] 高丽军, 陈韬, 李俊奇, 等. 基于 CFD 的洪涝水流中车辆失稳阈值研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(1): 15-25.
- Gao Lijun, CHEN Tao, LI Junqi, et al. Instability threshold of vehicles in floodwaters based on CFD[J]. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2025, 56(1): 15-25.

- [32] 张伟伟, 豆子皓, 李新涛, 等. 桥梁若干流致振动与卡门涡街[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(3): 405-412.
ZAHNG Weiwei, DOU Zihao, LI Xintao, et al. Various flow-induced vibrations of bridges and on Carman vortex street[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(3): 405-412.
- [33] 郭昕. 道路洪涝条件下人体稳定性研究及风险预警设备研发[D]. 北京: 北京建筑大学, 2024.
GUO Xin. Research on Pedestrian Stability During a Flood Event and Development of Risk Prevention Equipment[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering And Architecture, 2023.
- [34] SCHUETZ T C. Aerodynamics of Road Vehicles[M]. Warrendale: SAE International, 2015.
- [35] XIA J, TEO F Y, LIN B, et al. Formula of incipient velocity for flooded vehicles[J]. Natural Hazards, 2011, 58: 1-14.
- [36] SHU C, XIA J, FALCONER R A, et al. Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters[J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(6): 709-717.
- [37] TEO F Y, XIA J, FALCONER R A, et al. Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows[J]. International Journal of River Basin Management, 2012, 10(2): 149-160.
- [38] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, YUSOF K W. Experimental studies on the threshold of vehicle instability in floodwaters[J]. Journal Teknologi, 2018, 80(5): 25-36.
- [39] XIA J, FALCONER R A, XIAO X, et al. Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies[J]. Natural Hazards, 2014, 70(2): 1619-1630.
- [40] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, YUSOF K W, et al. Influence of forces on vehicle's instability in floodwaters[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2018, 9(4): 3245-3258.
- [41] AL-QADAMI E H H, RAZI M A M, DAMANIK W S, et al. 3-Dimensional numerical study on the critical orientation of the flooded passenger vehicles[J]. Engineering Letters, 2023, 31(3): 961-968.
- [42] HU X, LI J, WANG W, et al. Experimental testing to determine stability thresholds for partially submerged vehicles at different flow orientations[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129525.
- [43] 高帅领, 夏军强, 周美蓉, 等. 洪水顺流作用下行驶车辆稳定性的模型试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(2): 95-100.
GAO Shuailing, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. A model test study of the stability of vehicles running along the flood current[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(2): 95-100.

(责任编辑 王海锋)