

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. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.002

GAO Lijun, CHEN Tao, LI Junqi, et al. Instability threshold of vehicles in floodwaters based on CFD[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 15-25. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.002

# 基于 CFD 的洪涝水流中车辆失稳阈值研究

高丽军<sup>1,2</sup>, 陈韬<sup>1,2</sup>, 李俊奇<sup>1,2</sup>, 李小静<sup>1,2</sup>, 王晓哲<sup>1,2</sup>

(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】道路行泄通道是大排水系统的核心组成部分, 为保障道路在发挥行泄通道作用时车辆的安全与稳定性, 【方法】以典型轿车奥迪 A4L 作为研究对象, 利用最优拉丁超立方抽样选取洪涝水流的流速与水深, 采用 VOF 方法, 通过 CFD 数值模拟计算车辆受到的水流作用力并分析车身附近的水流自由液面高度变化, 揭示车辆在不同水流条件下的失稳机理。【结果】结果显示: 车辆受到的水流阻力与浮力同时受到水深与流速的影响, 阻力系数的值稳定在一定范围内, 水流自由液面高度的剧烈变化显著影响车辆受到浮力的大小。【结论】结果表明: 当流速小于 1 m/s 时, 失稳水深阈值为 0.4 m; 当流速介于 1 m/s 和 4.5 m/s 之间, 摩擦系数为 0.25 或 0.35 时对应的失稳水深阈值可分别用关于流速的三次函数来表达; 当流速为 4.5 m/s 时, 失稳水深阈值分别为 0.24 m ( $\mu=0.25$ ) 和 0.27 m ( $\mu=0.35$ ); 最不利失稳阈值曲线下区域为安全区, 2 条曲线之间的区域定义为失稳风险区。研究成果可为道路行泄通道车辆失稳风险评估提供参考。

**关键词:** 洪涝水流; 车辆稳定性; 失稳阈值; 水流作用力; CFD; 数值模拟; 洪水预报; 城市内涝

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0015-11



## Instability threshold of vehicles in floodwaters based on CFD

GAO Lijun<sup>1,2</sup>, CHEN Tao<sup>1,2</sup>, LI Junqi<sup>1,2</sup>, LI Xiaojing<sup>1,2</sup>, WANG Xiaozhe<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment of Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** [Objective] The surface flood pathway is a critical component of major drainage system. To ensure the safety and stability of vehicles when the road plays the role of drainage path, [Methods] Audi A4L was selected as the research object. The optimal Latin hypercube design was used to select the flow velocity and water depth of the flood. The VOF method and CFD numerical simulation are used to calculate the flow force on the vehicle and analyze the change of the free water level near the

收稿日期: 2024-09-22; 修回日期: 2024-11-01; 录用日期: 2024-11-03; 网络出版日期: 2024-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52370093)

作者简介: 高丽军(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事城市雨水控制与海绵城市研究。E-mail: gaolijun13766@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.

vehicle body, so as to reveal the instability mechanism of the vehicle under different flow conditions. [Results] The result show that the drag force and buoyancy of the vehicle are affected by the water depth and velocity at the same time. The value of the drag coefficient is stable within a certain range, and the buoyancy of the vehicle is significantly affected by the drastic change of the free surface height of the water flow. [Conclusion] When the flow velocity is less than 1 m/s, the threshold of instability water depth is 0.4 m; When the flow velocity is between 1 m/s and 4.5 m/s, and the friction coefficient is 0.25 or 0.35, the threshold of instability water depth can be expressed as a cubic function of the flow velocity; When the flow velocity is 4.5 m/s, the threshold of instability depth is 0.24 m ( $\mu=0.25$ ) and 0.27 m ( $\mu=0.35$ ). The area below the curve of the most unfavorable instability threshold is the safe zone, and the area between the two curves is defined as the instability risk area. Research result can provide reference for the risk assessment of vehicle instability in the roadway drainage path.

**Keywords:** floodwaters; vehicle stability; instability threshold; flow force; CFD; numerical simulation; flood forecasting; urban waterlogging

## 0 引言

近年来, 世界各国频繁遭受洪水的侵袭, 造成经济损失与人员伤亡的风险逐年增加<sup>[1-3]</sup>。在中国城市化快速发展的过程中, 规划不当和过度开发等问题严重影响了城市生态系统, 使得城市对洪涝灾害的承载能力减弱<sup>[4]</sup>。城市暴雨内涝灾害发生时, 城市街道网络是受洪水影响的主要区域, 行人、车辆以及建筑物等极易受到洪水的伤害<sup>[5-7]</sup>。2004年8月16日, 英国的 Boscastle 发生暴雨导致 70 多处房屋被淹, 近百辆汽车被洪水冲走<sup>[8]</sup>。2023年7月底8月初, 京津冀地区遭遇特大暴雨, 北京门头沟发生城市内涝并叠加山洪暴发, 形成顺街行洪现象, 冲走大量停放在路边的车辆<sup>[9]</sup>。在极端的城市环境洪水灾害中, 部分汽车在漂浮过程中还会冲撞道路上的行人和附近的建筑物等, 若直接冲入河道, 冲击桥墩造成桥梁拥堵而发生溃决, 甚至损害水利设施, 造成更大威胁<sup>[10-11]</sup>。

随着城市防洪排涝综合体系的持续推进, 大排水系统逐渐被关注。道路行泄通道是大排水系统的核心组成部分, 道路作为城市主要基础设施, 在应对超标雨水、排除内涝上发挥的作用不容忽视<sup>[12-13]</sup>。道路发挥行泄通道作用时, 如何在洪涝条件下保障车辆的安全与稳定性, 需要深入研究。洪涝水流中车辆的稳定性主要是基于水深和流速来评估的<sup>[14]</sup>, 其研究主要集中在试验研究、纯理论分析和数值模拟三个方向<sup>[15]</sup>。XIA 等<sup>[16]</sup>分别利用基于相似理论的等比例模型车辆水槽试验和起动流速公式推导两种方法对车辆临界失稳阈值进行了研究, 发现二者的结果非常吻合。更进一步, 进行了包含 12 种车型的水槽试验, 提出了一种基于稳定性系数来划分不同类型车辆稳定性等级的新方法, 该系数基于离地间隙、车辆重量、车辆底盘面积和摩擦系数四个变量。除水槽试验外,

AL-QADAMI 等<sup>[17]</sup>测试了全尺寸原型车辆在静态和行进时受到的水平方向上的水流作用力, 但仅局限于缓流(弗劳德数小于 1), 而实际造成车辆滑移失稳的洪涝水流往往是急流(弗劳德数大于 1)。MILANESI 等<sup>[18]</sup>利用前人试验数据校准参数, 建立了车辆受两种方向水流冲击的无量纲概念模型, 并考虑了坡度作用。GOU 等<sup>[19]</sup>基于香农熵理论推导出了洪涝水流中车辆的起动流速表达式。ARRIGHI 等<sup>[20]</sup>使用计算流体力学(CFD)仿真软件 OpenFOAM 研究洪涝水流中车辆受到的阻力与升力。AL-QADAMI 等<sup>[21]</sup>利用 Flow-3D 对全尺寸乘用车在洪涝水流中的稳定性进行数值模拟, 通过开启 GMO 模块研究了车辆在六个自由度下与流体之间的耦合运动。AZHAR 等<sup>[22]</sup>采用光滑粒子流体动力学(SPH)模型, 对等比例缩放 3D 车辆模型进行了模拟研究, 并设计水槽试验对其进行了验证。然而, 以往利用水槽试验得到失稳阈值的研究缺乏对水流中车辆的受力分析, 进行水流作用力分析的水槽模型车又与全尺寸车辆存在一定差异。若进行全尺寸原型车试验, 实现使车辆滑移失稳的洪涝水流高流速条件投资巨大。对洪涝水流中车辆进行数值模拟有助于详细描述水流在车辆附近的流动状态, 深入了解作用在车辆上的水流作用力并揭示车辆失稳机理。另外, 由于其灵活度高、水流条件易实现并且成本低, 数值模拟分析逐渐成为研究洪涝水流中车辆稳定性的有力工具。

为定量分析洪涝水流中车辆失稳阈值, 采用最优拉丁超立方抽样方法生成 14 组水深流速数据, 以典型轿车奥迪 A4L 作为研究对象, 利用软件 CATIA 建立简化的车身三维曲面模型, 采用 ANSYS FLUENT 作为数值模拟工具分析洪涝水流在缓流和急流状态下冲击车辆尾部时车辆受到的水流作用力大小, 并提出车辆失稳阈值曲线, 揭示失稳机理。另外, 搜集前人

关于车辆在洪涝水流中稳定性的研究成果, 与数值模拟得到的失稳阈值曲线进行比较, 为城市构建道路行泄通道的风险管理提供科学依据。

## 1 受力分析及公式推导

### 1.1 受力分析

当洪涝水流围绕停在道路上的车辆流动时, 水流通常对车辆施加水平方向的阻力、竖直方向的浮力和绕流升力, 在水位较低时, 绕流升力可忽略不计<sup>[20]</sup>。假设道路上停放车辆的所有车轮都被锁住, 轮胎与路面会产生摩擦力来抵抗车辆在路面上滑动。因此, 洪涝水流中车辆的稳定性是由水流阻力、浮力、摩擦力和重力决定的<sup>[23]</sup>。

#### 1.1.1 水流阻力

洪涝水流中的车辆受到水平方向上的水流阻力  $F_D$ , 它取决于水深、流速和车辆迎风面积。表达式为

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

式中,  $F_D$  为水流阻力(N);  $\rho$  为水的密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $C_D$  为阻力系数;  $A_D$  为相同水深下静水时的汽车淹没部分垂直于流动方向的投影面积( $\text{m}^2$ );  $v$  为洪涝水流的流速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

#### 1.1.2 浮力

浮力  $F_B$  可表示为

$$F_B = \rho g V \quad (2)$$

式中,  $F_B$  为车辆受到的浮力(N);  $V$  为车辆排开水的体积( $\text{m}^3$ )。

#### 1.1.3 摩擦力

摩擦力  $F_R$  可以表示为

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

式中,  $F_R$  为车辆受到的摩擦力(N);  $\mu$  为轮胎与路面之间的摩擦系数;  $F_G$  为车辆受到的重力(N)。

## 1.2 失稳临界状态公式推导

已有的理论模型<sup>[18]</sup>和试验研究<sup>[24]</sup>中, 在应用式(2)计算浮力仅使用相同水深下静水时的淹没体积。事实上, 在快速流动的洪涝水流中, 有研究表明车辆受到的浮力受到洪涝水流流速的影响, 与平静水面相比其淹没体积会更低<sup>[22]</sup>。

洪涝水流中车辆的失稳形式主要包括漂浮和滑移。漂浮失稳的临界状态为

$$F_G = F_B \quad (4)$$

定义车辆受到水平方向上的净力为  $F_{net}$ , 滑移失稳的临界状态为

$$F_{net} = F_D - \mu (F_G - F_B) = 0 \quad (5)$$

## 2 数值计算模型

### 2.1 基础理论

#### 2.1.1 控制方程

洪涝水流为不可压缩流体的运动, 其基本控制方程如下。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

运动方程

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (7)$$

式中,  $\rho$  为流体密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $t$  为流动时间(s);  $u_i$ 、 $u_j$  为流体速度( $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$ )( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\mu$  为流体动力黏滞系数( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $p$  为流体微元上的压力( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $S_i$  为广义源项。

#### 2.1.2 RNG $k$ - $\varepsilon$ 模型

湍流模型选用 RNG  $k$ - $\varepsilon$  模型。湍动能  $k$  和湍动能耗散率  $\varepsilon$  方程分别为

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\mu \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

式中,  $k$  为湍动能( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ );  $\mu_i$  为流体湍动黏度( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $u_i$  为时均速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $G_k$  为由于平均速度梯度引起的湍流动能( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ );  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  为经验常数, 分别为 1.42 和 1.68;  $\varepsilon$  为湍动能耗散率( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ )。

#### 2.1.3 VOF 模型

VOF 模型中, 在每一个控制体网格所有的相体积分数之和为 1, 即

$$\sum_{q=1}^n F_q = 1 \quad (10)$$

式中,  $F_q$  为单元内第  $q$  相流体的体积分数。

对第  $q$  相流体, 体积分数连续性方程为

$$\frac{\partial F_q}{\partial t} + \frac{\partial (F_q u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (11)$$

式中,  $u_i$  为速度分量( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $x_i$  为坐标分量;  $t$  为时间(s)。

## 2.2 最优拉丁超立方抽样取值

拉丁超立方设计的原理是在  $n$  维空间中每一维坐标区间  $[x_k^{\min}, x_k^{\max}]$ ,  $k \in [1, n]$  均匀等分为  $m$  个

区间, 每个小区间记为  $[x_k^{i-1}, x_k^i]$ ,  $i \in [1, m]$ 。随机选取  $m$  个点, 保证一个因子的每个水平只被研究一次。最优拉丁超立方抽样在拉丁超立方抽样的基础上进行了改进, 使因子和响应的拟合更加精确真实<sup>[25]</sup>。考虑到真实洪涝水流的随机性, 深度及流速取值利用最优拉丁超立方抽样获取。图 1 显示了最优拉丁超立方抽样设计的试验点分布, 其可生成均匀的试验点分布, 具有非常好的空间填充性和均衡性<sup>[26]</sup>。

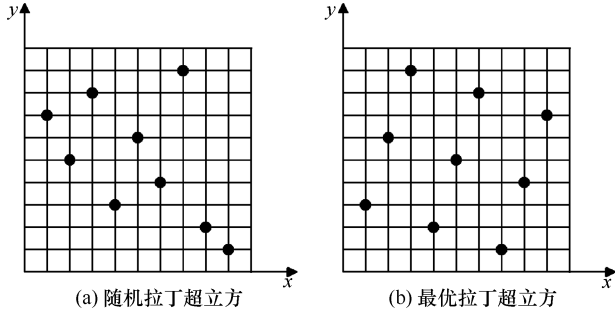


图 1 随机和最优拉丁超立方设计

Fig. 1 Random Latin hypercube and optimal Latin hypercube

基于最优拉丁超立方抽样方法, 获得 14 组试验样本, 工况编号、洪涝水流的深度及流速取值如图 2 所示。水流流态以弗劳德数  $Fr = 1$  为界限划分为缓流、临界流、急流, 图中红色曲线为临界状态。弗劳德数反映流体惯性力与重力的关系, 是判断水流流态的指标之一, 计算公式为

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (12)$$

式中,  $Fr$  为弗劳德数;  $g$  为重力加速度;  $U$  为洪涝水流的流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $h$  为水深 ( $\text{m}$ )。

### 2.3 车辆三维模型简化

选择常见的轿车奥迪 A4L 作为研究对象, 其全车尺寸为  $4\,858\text{ mm} \times 1\,847\text{ mm} \times 1\,414\text{ mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高), 离地间隙为  $170\text{ mm}$ , 总重量  $1\,700\text{ kg}$ 。该车的三维几何模型由 CATIA 创建, 其尺寸和形状设计与真实汽车的几何形状大致相同。在进行三维建模时, 对整车做密封处理并且对车身的一些复杂结构 (如车的装饰条、车灯、车轮、雨刮器和后视镜等) 进行了简化。图 3 显示了简化后的 3D 几何模型。

### 2.4 数值模型及参数设置

数值模拟采用全尺寸 3D 车辆模型, 流速设定的范围为  $0.63 \sim 4.58\text{ m/s}$ , 水深设定的范围为  $0.25 \sim 0.44\text{ m}$ 。来流方向正对车尾, 由于车辆的对称性, 故采用对称模型进行计算。计算域长为  $20\text{ m}$ , 宽  $8\text{ m}$ ,

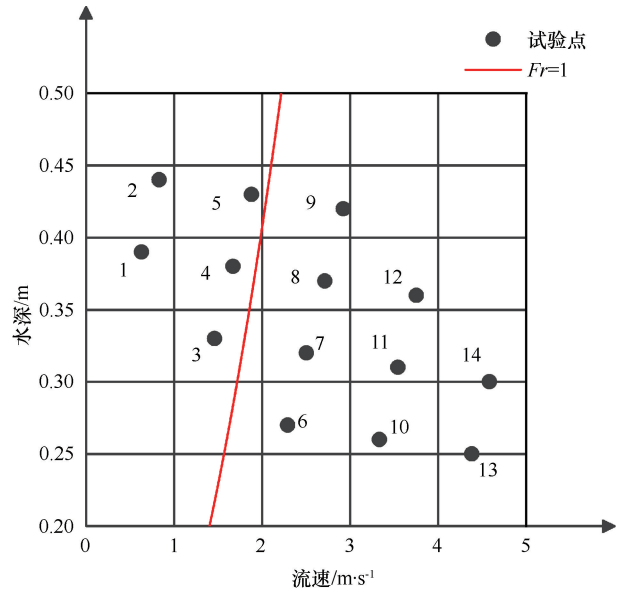


图 2 最优拉丁超立方设计试验点分布

Fig. 2 Distribution of test points for optimal Latin hypercube design

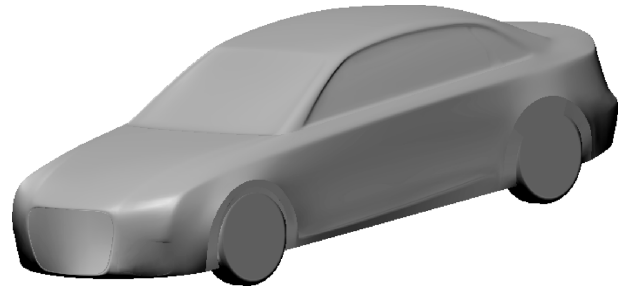


图 3 车身简化外形曲面模型

Fig. 3 Vehicle simplified contour surface model

高度为  $3\text{ m}$ 。车尾距离入口边界  $8.2\text{ m}$ , 距离出口边界  $11.8\text{ m}$ 。计算域侧壁、底部以及车身表面边界条件设置为无滑移墙边界, 计算域顶部和对称面施加对称边界条件。入口边界条件 (空气、水) 设置为速度入口, 不同工况下洪涝水流的水深即为“水”入口的高度。对于出口边界条件, 利用 UDF 定义出口处的压强分布, 在水线以上相对压强为  $0$ , 在水线以下相对压强随水深的增加而增加, 由下式计算

$$p = \rho gh \quad (13)$$

式中,  $p$  为相对压强 ( $\text{Pa}$ );  $h$  为水深 ( $\text{m}$ )。

压力方程与动量方程解耦采用 PISO 算法, 空间离散采用二阶迎风格式, 使用自适应时间步长, 初始时间步长为  $0.0001\text{ s}$ , 计算总时长为  $4\text{ s}$ 。

### 2.5 网格划分与网格无关性验证

对于 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型采用增强壁面函数去拟合近壁面边界层的流动, 该模型要求第一层网格的无

量纲高度处于对数率层, 即 30~300 之间<sup>[27]</sup>, 由此计算不同来流速度下对应的边界层参数。在划分网格时参考了 VAN DRUENEN 等<sup>[28]</sup> 自行车空气动力学研究的网格划分, 车辆与自行车同样拥有复杂的几何曲面结构, 故划分网格时采用混合网格, 即车体表面边界层的棱柱状网格、边界层外车身附近的多面体网格(非结构体网格)和车体扩充至规则形状时填充计算域的六面体网格(结构体网格)。六面体网格具有网格质量高、计算准确和稳定性高等优点。考虑到车辆车身附近以及水流冲击车尾处流场变化复杂, 同时对流场变化复杂处和水流区域设置加密区, 其网格划分细节如图 4 所示。

采用 3 种不同的网格生成方法来计算部分淹没车辆所受到的阻力, 得到 3 种不同尺寸的网格, 网格尺寸参数如表 1 所列, 并与 AL-QADAMI 等<sup>[17]</sup> 测试的全

尺寸原型车辆在水流中的阻力系数进行对比。考虑到在合理的计算成本下保证水力系数估算的准确性, 选择网格 2 进行后续的流体分析计算。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 流场分析

由于实验室测试<sup>[29]</sup> 和数值模拟<sup>[20]</sup> 都发现车辆顺流与逆流情况下的水流作用力差异极小, 因此对车辆顺流方向模拟了 14 种不同工况下车辆受到的水流阻力与浮力。图 4 以洪涝水流深度 0.32 m、流速 2.5 m/s 为代表, 展示了  $t=2.21$  s 时车身附近流速、自由液面高度、流线以及车身表面压力分布情况。图 5(a) 描述了车尾迎接水流冲击处以及从车辆底盘下流出的水流区域, 流速会下降, 并且车身侧面生成高流速的小区域。在气液两相流数值模拟中, 使用

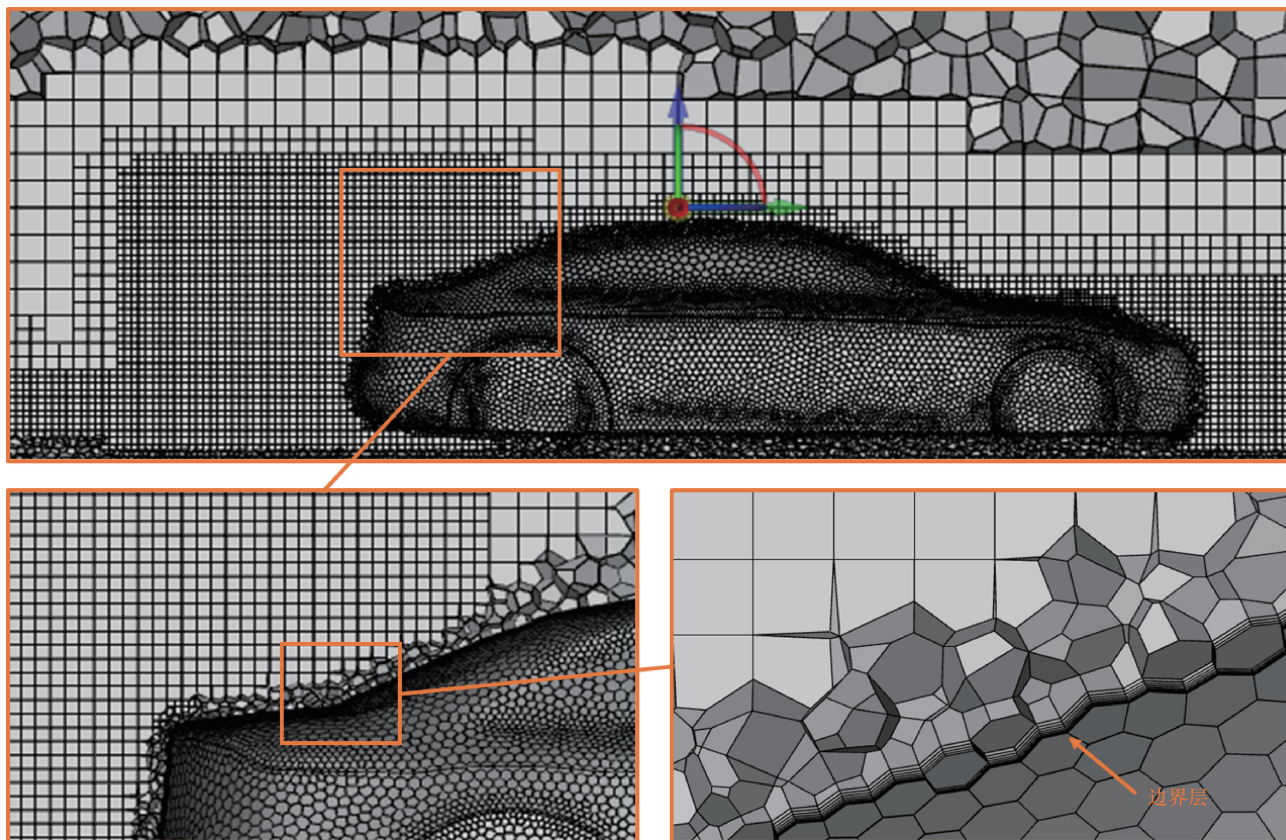


图 4 网格划分及细节处理

Fig. 4 Mesh division and detail processing

表 1 网格无关性验证

Table 1 Verification of mesh independence

网格编号	面网格最大尺寸/mm	车身面网格尺寸/mm	加密区尺寸/mm	体网格数量	阻力系数 $C_D$	$C_D$ 参考值
1	450	20	50	1 294 417	1.16	1.10
2	400	20	40	1 542 610	1.14	
3	350	20	32	2 466 081	1.13	

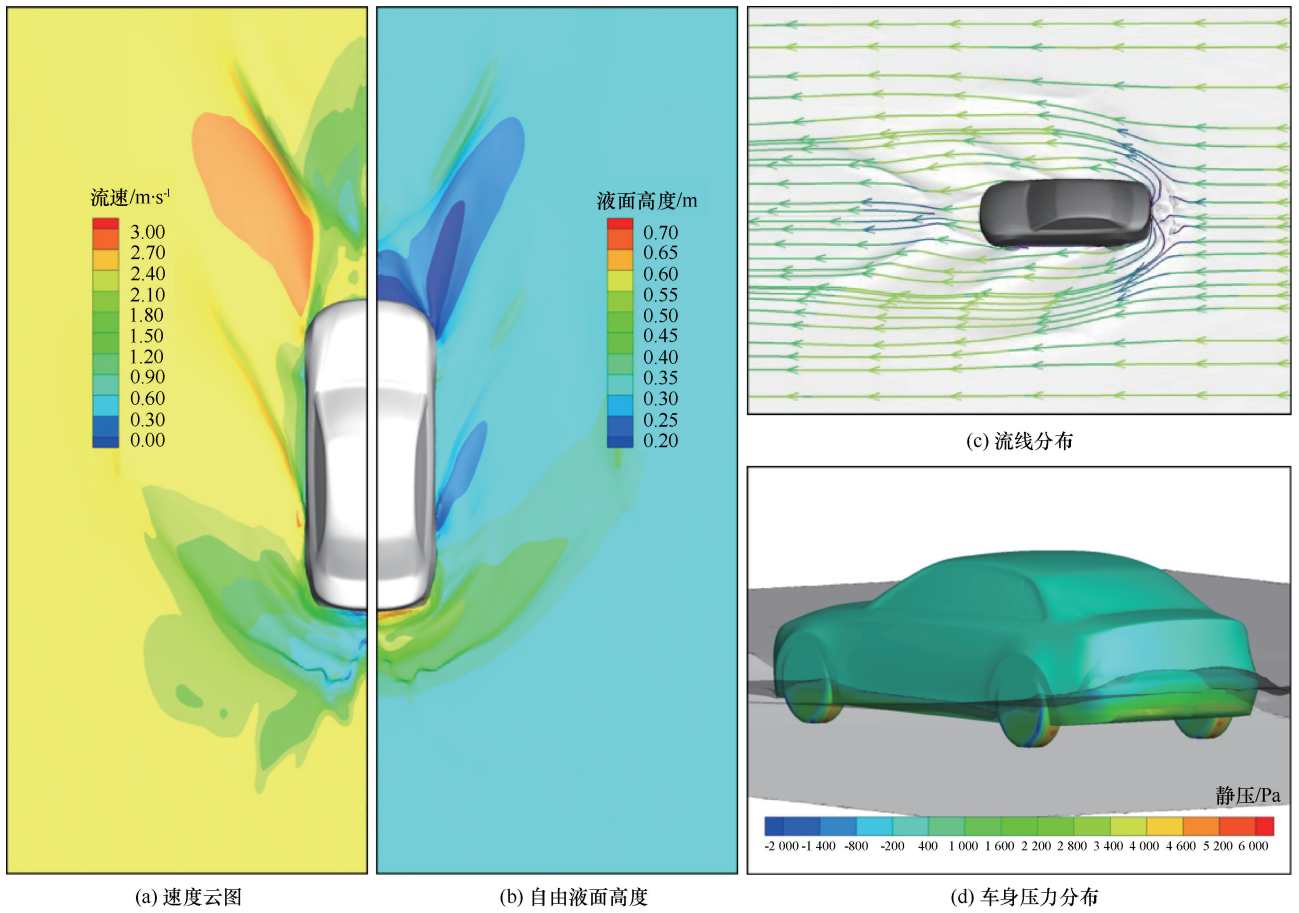


图 5  $v=2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $h=0.32 \text{ m}$ 、 $t=2.21 \text{ s}$  时车身附近速度云图、自由液面高度云图、流线分布及车身表面压力分布

Fig. 5 Contours of velocity and free surface height, distributions of static pressure along the perimeter and streamlines with 0.32 m water depth and  $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  velocity when  $t=2.21 \text{ s}$

VOF (volume of fluid) 技术捕捉自由液面, 如图 5(b) 所示, 在急流条件下, 水流在冲击车辆尾部时, 水深会立即增加, 产生壅水现象, 车尾处自由液面有一定爬升, 在车头处自由液面有明显下降, 在车身侧面的自由液面除靠近轮胎处以外基本无变化。车身附近自由液面的剧烈变化解释了急流条件下车辆受到的浮力并不等于静水时受到的浮力。图 5(c) 显示了车辆在水流中的三维流线图, 车尾处水流受到车辆阻挡, 出现水流向两侧绕流现象。图 5(d) 为车身表面压力分布图, 轮胎和车尾迎水处受高速水流的直接冲击, 受力较大。

### 3.2 水流力及阻力系数分析

利用 Fluent 软件的监视器功能获取车辆在  $Y$  方向上所受水流阻力  $F_D$  和  $Z$  方向上所受的浮力  $F_B$ , 在数值模拟过程中, 车辆周围水深并不是一个恒定值, 由于波浪的存在水流作用力的值不断振荡, 因此计算出震荡一段时间后的力的平均值, 从而得到水流阻力及浮力。图 6 与图 7 中  $X$ - $Y$  平面上红色曲线为临界状态

( $Fr=1$ ), 左侧为缓流, 右侧为急流, 带箭头折线描述了水流作用力随流速增大的变化情况。图 6 为车辆受到的水流阻力, 缓流条件下, 阻力随着流速的增加而增加。当水流为急流时, 水深同样影响着阻力的变化, 例如图中 9 号工况与 10 号工况, 虽然流速从  $2.92 \text{ m/s}$  增加到  $3.33 \text{ m/s}$ , 但水深从  $0.42 \text{ m}$  减少到  $0.26 \text{ m}$ , 水流阻力却大幅下降, 原因在于迎水面积的显著减少。整体而言急流条件下水流阻力随着水深与流速的同时增大而增大, 此时水流阻力是导致车辆失稳的主要因素。图 7 为车辆受到的浮力, 当水深接近且为缓流条件时, 流速增大导致浮力的减少, 例如图 7 中 2 号工况与 5 号工况, 主要原因在于车辆周围水流自由液面高度的变化导致车辆排水体积的减少, 这有利于车辆的稳定, KRAMER 等<sup>[30]</sup> 进行的模型车水槽试验印证了这一现象。但在急流时却相反, 车辆受到的浮力随流速增大而增大, 如工况 6、工况 10 和工况 13, 原因在于车身附近水流剧烈变化以及车尾受冲击处壅水高度的提高导致排水体积的增加。缓流

条件下车辆受到的浮力是导致车辆失稳(漂浮)的主要因素,而在急流条件时水流阻力与浮力共同作用致使车辆失稳(滑落)。

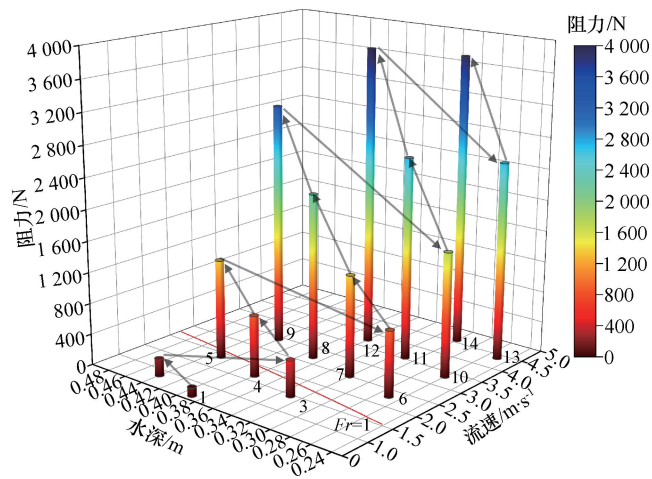


图6 车辆受到的水流阻力

Fig. 6 Drag forces on vehicle

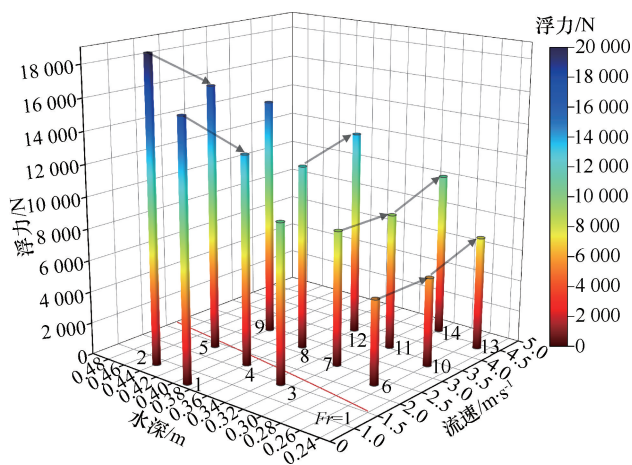


图7 车辆受到的浮力

Fig. 7 Buoyancy force on vehicle

由式(14)可计算阻力系数  $C_D$  的值

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho A_D v^2} \quad (14)$$

式中,  $F_D$  为 Fluent 获取的水流阻力(N);  $A_D$  为静水时的汽车淹没部分垂直于水流的投影面积( $\text{m}^2$ );  $v$  为洪涝水流的流速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

图8显示了阻力系数  $C_D$  随弗劳德数的变化情况,与 ARRIGHI 等<sup>[20]</sup>提出的  $C_D$  的值随弗劳德数的增大而递减的结论不同,  $C_D$  的值稳定在 1.16~1.39 的范围内,这与 SMITH 等<sup>[31]</sup>的研究结论十分吻合,即:无论是急流还是缓流,阻力系数  $C_D$  的值稳定在一定范围内。同样, ARSLAN 等<sup>[32]</sup>对半淹没长方体进行

CFD 数值模拟,其阻力系数的值稳定在 0.96~1.10。

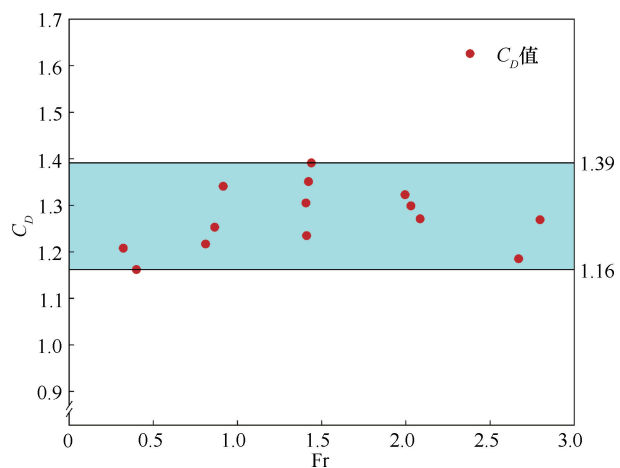


图8 阻力系数随弗劳德数的变化及范围

Fig. 8 Variation and range of drag coefficient with Froude number

### 3.3 临界失稳阈值曲线

道路积水情况下会大幅降低轮胎与路面之间的摩擦系数, SMITH 等<sup>[31]</sup>建议积水路面摩擦系数可取保守值 0.3。由于洪涝条件下泥浆、砂石和砾石等很可能被冲到道路上导致道路表面变得错综复杂,采用较低的摩擦系数可为车辆临界失稳阈值留有足够的余量,故摩擦系数  $\mu$  取 0.25~0.35。由式(5)可分别计算  $\mu = 0.25$  和  $\mu = 0.35$  时车辆在水平方向上的净力  $F_{net}$ , 利用 MATLAB 软件 scattered Interpolant 函数和自然临界插值方法绘制了  $F_{net}$  随流速与水深变化的三维曲面,如图9所示,图中浅灰色半透明平面为  $Z = 0$  平面,当  $F_{net} = 0$  时为车辆失稳临界状态,在同一坐标系上,对平面  $Z = 0$  与曲面的交线在  $X-Y$  平面上的投影进行拟合分析,可分别得到不同摩擦系数下车辆失稳阈值的拟合曲线关系式

$$y = 0.0035x^3 - 0.034x^2 + 0.052x + 0.378 (\mu = 0.25) \quad (15)$$

$$y = 0.0038x^3 - 0.04x^2 + 0.0847x + 0.35 (\mu = 0.35) \quad (16)$$

二者的拟合优度  $R^2$  均大于 0.99,且曲线位于数值模拟得到的稳定工况与失稳工况之间。参照澳大利亚 AR&R 手册中关于此类车辆的失稳阈值建议,当流速小于 1 m/s 时取失稳水深为 0.4 m,这与 AL-QADAMI 等<sup>[17]</sup>基于全尺寸小型车 Perodua Viva 试验的漂浮失稳阈值相吻合。当流速为 4.5 m/s 时,  $\mu = 0.25$  和  $\mu = 0.35$  对应的失稳水深阈值分别为 0.24 m 和 0.27 m。

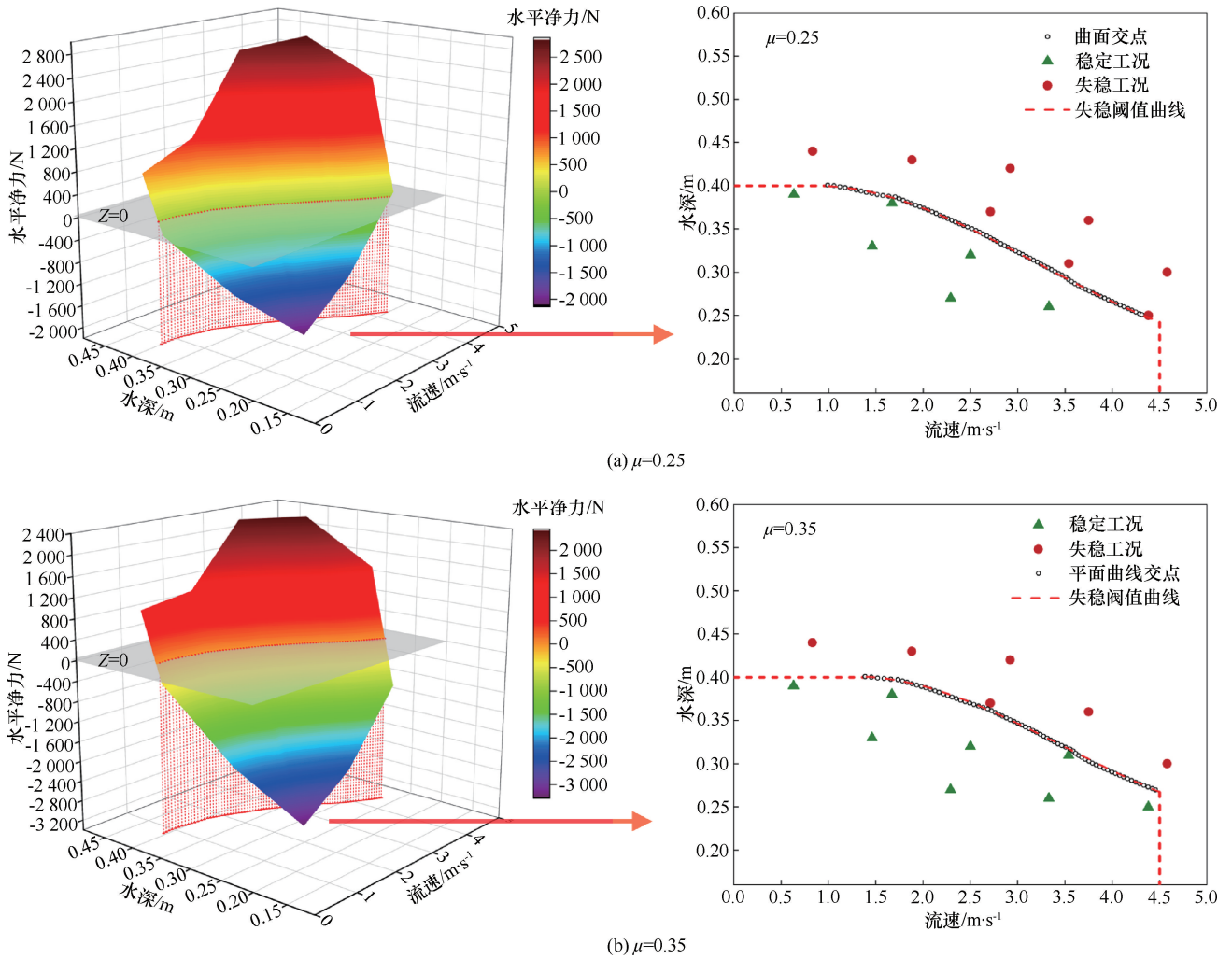


图 9 不同摩擦系数下车辆在水平方向上受到的净力和三维曲面交集函数

Fig. 9 Horizontal net force of vehicle and intersection function diagram of 3D surfaces under different friction coefficients

#### 4 结果比较

为验证数值模拟车辆失稳阈值的可靠性, 将拟合的失稳阈值曲线与澳大利亚 AR&R 手册建议的大型乘用车稳定阈值标准和前人关于车辆稳定性的研究数据进行比较, 如图 10 所示。

对于车辆在洪涝水流中稳定性的公式推导包括如下几种。

(1) XIA 等<sup>[16]</sup>采用理论分析方法提出了静止汽车在洪涝水流失稳的起动流速公式, 即

$$U = \alpha \left( \frac{h}{h_c} \right)^\beta \sqrt{2gl_c \left( \frac{h_c \rho_c}{h \rho_f} \right) - R_f} \quad (17)$$

式中,  $U$  为起动流速 ( $m \cdot s^{-1}$ );  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $R_f$  为经验参数;  $h$  为水深 ( $m$ );  $h_c$  为车辆高度 ( $m$ );  $l_c$  为车辆长度 ( $m$ );  $\rho_c$  为车辆的密度 ( $kg \cdot m^{-3}$ );  $\rho_f$  为水的密度 ( $kg \cdot m^{-3}$ )。

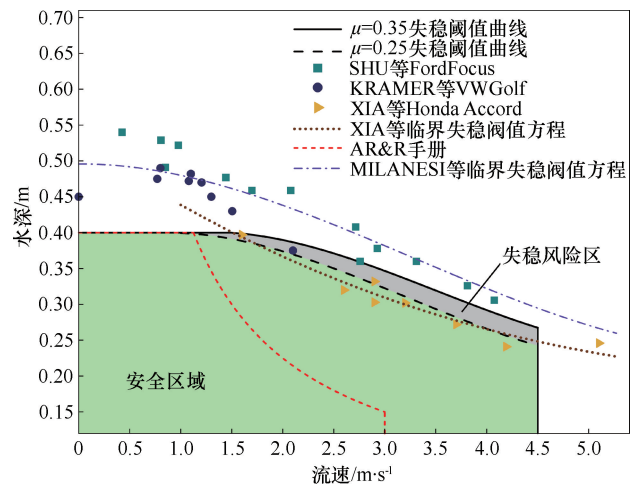


图 10 失稳阈值与 AR&R 和前人研究数据<sup>[29]</sup> 的比较

Fig. 10 Comparison of instability threshold with AR&R and previous research results<sup>[29]</sup>

利用水槽模型试验数据率定了公式中的相关参

数, 将参数带入到式(17)中, 结合 Honda Accord 的车身尺寸和密度, 得到 Honda Accord 的临界失稳阈值方程(见图 10 中棕色短点线)为

$$U = 0.212 \left( \frac{h}{1.48} \right)^{-0.562} \sqrt{\frac{28.776}{h} - 63.06} \quad (18)$$

(2)MILANESI 等<sup>[18]</sup>结合车辆受力分析推导出的车辆起动流速公式为

$$U = \sqrt{gh_v \frac{W - B_N}{B_N} \frac{2\mu\alpha l}{(C_D h_v + \mu C_L l)}} \quad (19)$$

式中,  $U$  为起动流速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $h_v$  为车身有效淹没深度(水流深度减去底盘高度)( $\text{m}$ );  $C_D$  为阻力系数;  $C_L$  为升力系数;  $W$  为车的重力( $\text{N}$ );  $B_N$  为浮力( $\text{N}$ );  $\mu$  为摩擦系数;  $\alpha$  表示车辆不透水的淹没体积占总体积的比例;  $l$  为车长( $\text{m}$ )。

利用前人试验数据校准参数后, 带入到式(19)中, 得到车辆在平行于水流方向上的临界失稳阈值方程(见图 10 中紫色点划线)为

$$U = \sqrt{\frac{604 - 1218h}{38h + 1}} \quad (20)$$

除公式推导的失稳阈值方程外, 图中散点分别为 SHU 等<sup>[29]</sup>关于 Ford Focus、KRAMER 等<sup>[30]</sup>关于 VW Golf 和 XIA 等<sup>[16]</sup>关于 Honda Accord 在平行于水流方向失稳时的水流数据。红色短划线为 AR&R 建议的稳定阈值, 由于 AR&R 基于最不利原则主要参考了车辆垂直于水流方向时的失稳数据且建议偏保守, 导致当流速大于  $1 \text{ m/s}$  时, 失稳水深阈值与流速成反比例关系, 曲线呈急剧下降趋势。当车辆平行于水流方向时, 与 AR&R 相比, 拟合的失稳阈值曲线和前人研究推导的失稳阈值曲线都下降较为平缓, 与 Ford Focus、VW Golf 和 Honda Accord 的临界失稳数据吻合良好。

## 5 结论

本文以典型轿车奥迪 A4L 为研究对象, 建立简化的车身曲面模型, 在流速和水深的不同组合中采用数值模拟的方法计算其受到的水流阻力与浮力, 对全尺寸轿车在洪涝水流中的稳定性进行了评估。

(1)车辆受到的水流阻力与竖直力同时受到水深与流速的影响, 阻力系数的值稳定在  $1.16 \sim 1.39$ , 不可设为恒定值。当洪涝水流为急流条件时, 计算车辆受到的浮力时还应考虑半淹没物体周围的水流自由液面高度的剧烈变化, 其显著影响浮力的大小。

(2)提出了典型轿车奥迪 A4L 在平行于洪涝水流

方向停放时的失稳阈值曲线, 当洪涝水流的流速小于  $1 \text{ m/s}$  时, 失稳水深阈值为  $0.4 \text{ m}$ , 当流速介于  $1 \text{ m/s}$  和  $4.5 \text{ m/s}$  之间时, 失稳水深阈值与流速的关系式为  $y = 0.0035x^3 - 0.034x^2 + 0.052x + 0.378$  ( $\mu = 0.25$ ) 和  $y = 0.0038x^3 - 0.04x^2 + 0.0847x + 0.35$  ( $\mu = 0.35$ )。当流速为  $4.5 \text{ m/s}$  时,  $\mu = 0.25$  和  $\mu = 0.35$  对应的失稳水深阈值分别为  $0.24 \text{ m}$  和  $0.27 \text{ m}$ 。2 条曲线之间的区域定义为失稳风险区。

(3)将拟合的失稳阈值曲线与前人研究推导的失稳阈值曲线和水槽实验得到模型车的临界失稳水流数据进行比较, 发现三者吻合良好, 验证了该阈值的可靠性。

未来应对不同的车辆类型和来流方向并考虑道路坡度进行更多的数值模拟与全尺寸车辆试验研究, 并研究车辆内部进水情况和质量空间分布对其稳定性的影响, 结合城市大排水系统中道路行泄系统的特点, 构建道路行泄时车辆失稳风险评估模型。

## 参考文献 (References):

- [1] YU J R, ZOU L, XIA J, et al. A multi-dimensional framework for improving flood risk assessment: Application in the Han River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 47: 101434.
- [2] ZHANG J, XU W, LIAO X, et al. Global mortality risk assessment from river flooding under climate change [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(6): 064036.
- [3] 胡义明, 温骥宇, 王静, 等. 欧美亚典型发达国家洪水标准及应对气候变化策略 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2024, 22(3): 605-617.  
HU Y M, WEN Q Y, WANG J, et al. Flood standards and coping strategies for climate change in typical developed countries in Europe, America, and Asia [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(3): 605-617.
- [4] 周紫蕊, 廖卫红, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市河网调控与分析: 以福州市仓山区龙津阳岐片区为例 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2023, 21(4): 770-779.  
ZHOU Z R, LIAO W H, LEI X H, et al. InfoWorks ICM-based urban river network regulation and analysis: A case study of Longjin Yangqi area in Cangshan District, Fuzhou City [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 770-779.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 刘非, 任春娇, 陈垚, 等. 山地城市暴雨洪水中人车失稳风险数值模拟研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(2): 62-77.  
LIU Fei, REN Chunjiao, CHEN Yao, et al. Numerical simulation study on the flood instability risk of people and vehicles in mountainous cities[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(2): 62-77.
- [8] BURT S J W. Cloudburst upon Hendrabortnick down: the Boscastle storm of 16 August 2004[J]. *Weather*, 2005, 60(8): 219-227.
- [9] 刘家宏, 梅超, 王佳, 等. 北京市门头沟流域“23·7”特大暴雨洪水过程分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(9): 50-55.  
LIU Jiahong, MEI Chao, WANG Jia, et al. Flood survey of “23·7” heavy rain in Mentougou Watershed of Beijing[J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(9): 50-55.
- [10] 张丽, 朱勇, 寻昊, 城市市政排水与水利防洪排涝标准的相容性衔接研究[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(8): 31-37.  
ZHANG Li, ZHU Yong, XUN Hao. Research on the compatibility and connection between urban municipal drainage and hydraulic flood control and drainage standards [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(8): 31-37.
- [11] 郝思佳, 王文川, 马强, 等. 基于水文水动力模型的山洪灾害复盘策略: 以河南王宗店村“7·20”山洪为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(6): 1-11.  
HAO Sijia, WANG Wenchuan, MA Qiang, et al. A numerical rehearsal strategy of flash flood disaster with hydrological and hydrodynamic modelling: case study of “7·20” flash flood disaster in Wangzongdian Village, Henan Province[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(6): 1-11.
- [12] 车伍, 杨正, 赵杨, 等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(16): 13-9.  
CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, et al. Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(16): 13-9.
- [13] 李俊奇, 王耀堂, 王文亮, 等. 城市道路用于大排水系统的规划设计方法与案例[J]. *给水排水*, 2017, 53(4): 18-24.  
LI Junqi, WANG Yaotang, WANG Wenliang, et al. Urban roads for major drainage system planning-design methods and cases [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(4): 18-24.
- [14] LAZZARIN T, VIERO D P, MOLINARI D, et al. Flood damage functions based on a single physics-and data-based impact parameter that jointly accounts for water depth and velocity [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127485.
- [15] AL-QADAMI E, RAZI M A M, SHAH S M H, et al. Floodwaters and vehicle hydrodynamics: A deep dive into risk mitigation unraveling vehicle stability in floods [J]. *Results in Engineering*, 2024: 102540.
- [16] 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: 1619-1630.
- [17] 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(1): 325-348.
- [18] MILANESI L, PILOTTI M. A conceptual model of vehicles stability in flood flows [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2020, 58(4): 701-708.
- [19] GOU L F, 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.
- [20] ARRIGHI C, ALCARRRECA-HUERTA J, 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.
- [21] AL-QADAMI E H H, RAZI M A M, DAMANIK W S, et al. Understanding the stability of passenger vehicles exposed to water flows through 3D CFD modelling [J]. *Sustainability*, 2023, 15(17): 13262.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] HU X Z, LI J Q, WANG W H, et al. Experimental testing to determine stability thresholds for partially submerged vehicles at different flow orientations [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129525.
- [25] 王登峰, 卢放. 基于多学科优化设计方法的白车身轻量化 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 45(1): 29-37.  
WANG Dengfeng, LU Fang. Body-in-white lightweight based on multidisciplinary design optimization [J]. *Journal of Jilin University*, 2015, 45(1): 29-37.
- [26] 季宁, 张卫星, 于洋洋, 等. 基于最优拉丁超立方抽样方法和 NSGA-II 算法的注射成型多目标优化 [J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(3): 72-77.  
JI Ning, ZHANG Weixing, YU Yangyang, et al. Multi-objective optimization of injection molding based on optimal Latin hypercube sampling method and NSGA-II algorithm [J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(3): 72-77.

- [27] 杨从新, 莫英祥, 郭艳磊, 等. 机电一体化轴流泵间隙泄漏流流动特性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23): 36-44.  
YANG Congxin, MO Yingxiang, GUO Yanlei, et al. Clearance leakage flow characteristics in mechatronic axial flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(23): 36-44.
- [28] VAN DRUENEN T, BLOCKEN B. CFD simulations of cyclist aerodynamics; Impact of computational parameters [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2024, 249: 105714.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] ARSLAN T, MALAVASI S, PETTERSEN B, et al. Turbulent flow around a semi-submerged rectangular cylinder [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2013, 135(4): 041801.

(责任编辑 王海锋)