

面向自动驾驶的低附着系数弯坡路段车辆制动性能边界研究

李维东¹, 杨 轸¹, 高 岭²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点试验室, 上海 201804; 2. 河北省交通规划设计研究院, 河北 石家庄, 050000)

摘要: 在覆水或覆冰雪的弯坡路段, 车辆在制动过程中容易发生滑移并失去控制, 是多雨及寒冷地区亟待解决的重要交通安全问题。文章首先分析了低附着系数弯坡路段中车辆对路面附着力的消耗特点, 在此基础上, 融合公路平、纵、横断面线形参数及路面附着系数、轮胎滚动阻力、车辆行驶空气阻力等行驶力学因素, 求解得到低附着系数弯坡路段中车辆行驶速度与最大制动减速度的关系。结合车辆制动滑移率, 提出适用于低附着系数弯坡路段的车辆最小制动距离预测模型, 并通过 CarSim 车辆动力学仿真试验对模型进行了验证。研究可为低附着系数弯坡路段自动驾驶车辆跟车速度与制动减速度优化控制提供参考, 也可多雨雪地区的互通立交匝道中车辆跟驰安全分析与风险预警提供支持。

关键词: 交通工程; 交通安全; 自动驾驶; 附着系数; 弯坡路段; 制动距离

中图分类号: U461.91

文献标识码: A

Research on Braking Performance Boundary of Vehicle on Curved Slope Section with Low Adhesion Coefficient for Automatic Driving

Li Weidong¹, Yang Zhen¹, Gao Ling²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Hebei Provincial Communications Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: On curved slope roads covered with water, snow or ice, vehicles are prone to skidding and losing control during braking, which is a critical traffic safety issue that needs to be addressed in rainy or cold regions. The characteristics of tire-road adhesion consumption by vehicles on low-adhesion curved slopes were first analyzed. Based on this, the geometric design parameters of highways—horizontal alignment, vertical alignment, and cross slope—are integrated with driving mechanical factors such as road adhesion coefficient, tire rolling resistance, and aerodynamic drag to derive the relationship between vehicle speed and maximum achievable braking deceleration. Considering the braking slip ratio, a predictive model for the minimum braking distance on low-adhesion curved slopes is proposed, and validated through CarSim-based vehicle dynamics simulations. The research can provide a reference for optimizing the following speed and braking deceleration control of autonomous vehicles on low-adhesion curved slopes, and also offer support for vehicle following safety assessment and risk warning on interchange ramps in rainy or snowy regions.

Key words: traffic engineering; traffic safety; automatic driving; adhesion coefficient; curved slope section; braking distance

在覆水或覆冰雪的弯坡路段, 由于路面附着系数显著降低, 车辆在制动过程中容易发生滑移, 驾驶员对车辆的控制能力可能显著下降甚至完全丧失, 严重威胁行车安全^[1-2]。Andrey 等^[3]通过对不同地区交通事故历史数据的统计分析指出, 相比于晴天, 雨天交通事故率增加了 70%。在覆水路段, 路表水膜形成润滑层, 降低了轮胎与路面之间的有效摩擦力, 显著增加了车辆滑移和失控的可能性。此外, 弯坡路段复杂的线形特性进一步加剧了车辆在制动过程中出现滑移的可能性, 多种危险因素的叠加使交通事

收稿日期: 2025-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52372336)

故风险显著提升。因此，研究低附着系数弯坡路段车辆行驶速度与制动最大减速度的关系并对制动距离进行估计具有重要意义。

近年来，研究人员针对低附着系数道路的车辆行驶状态与控制特性展开了多方面的探索。张弛等^[4]研究指出，车速和平曲线曲率对曲线路段行车风险影响显著，当车辆超速行驶时，不论道路线形或天气条件如何，紧急制动都可能导致车辆侧滑失控。针对雨天匝道工况，方成等^[5]建立了小客车行车安全度量模型，分析了最大侧向偏移量与行驶速度间的关系，并强调了速度控制在低附着系数弯道中的重要性。刘建蓓等^[6]则从运行速度限制角度，提出了一种考虑道路纵坡和路面状态的安全容许速度计算方法，并基于降雨条件下的实地测试，给出了可变限速标志的设置方法。

在车辆制动行为研究方面，吴善根等^[7]通过分析小客车与货车在平坡路段不同制动程度下的行为，提出了适用于不同驾驶条件的停车视距建议值。Kordani 等^[8]利用 Adams/car 模拟器，分析了湿滑、冰雪路面条件下摩擦系数变化对轿车、卡车等不同类型车辆制动距离的影响。李志鹏等^[9]则应用 MATLAB 仿真建立了冰雪路面及融雪剂路面条件下汽车在不同制动初速度下的制动距离模型。而在考虑复杂路段特性方面，Xia 等^[10]研究了车辆在弯道制动中的动态特性，指出在弯道中制动相比直线路段中制动具有更长的制动距离和较低稳定性，并提出了相应的停车视距计算模型。

尽管已有研究在车辆制动行为分析和动力学建模方面取得了重要进展，但多集中于直线纵坡路段或平坡曲线路段，研究对象多为特定环境条件下的车辆行为或制动特性，尚未系统融合弯坡路段的平、纵、横断面线形参数，以及路面附着系数、轮胎滚动阻力、车辆空气阻力等多因素特性。此外，对于低附着系数弯坡路段，现有研究对车辆行驶速度与最大制动减速度之间关系的关注较少，而这类研究对于提高车辆安全性和适应性具有重要意义，尤其在自动驾驶技术中，其研究成果可为优化速度和减速度协同控制策略提供支持。

此外，在道路服役状态监测技术与车路协同通信快速发展的背景下，通过布设路表水膜厚度检测器和空气湿度检测器等设备，已能实时采集特殊路段的道路环境数据^[11-12]，并由交通信息管控平台向自动驾驶车辆提供公路线形和路面功能信息。这些数据将帮助自动驾驶车辆提前获取前方弯坡路段的道路环境信息，从而主动优化行驶速度、跟车距离和减速控制策略，促进车路系统协同水平的提升。

1 低附着系数弯坡路段路面对车辆的附着特性

覆水、覆冰雪弯坡路段是多雨雪地区常见的高风险路段，相比于常规路段，路面附着特性在此类复杂环境下存在显著区别，车辆在行驶过程中面临更大的安全风险。这种风险主要来源于附着系数的降低及其复杂的分配与消耗规律，具体表现为以下几个方面。

1) 路面附着系数可用性显著降低。覆水、覆冰雪路面使车辆可使用的路面附着系数显著降低。路面水膜、冰雪层削弱了轮胎与路面的有效接触，导致轮胎与路面的有效摩擦力大幅减小，车辆在制动过程中附着力不足，极易发生打滑或失控。

2) 路面附着系数的多向分配。在下坡路段，车辆重力的分力沿纵坡方向作用，在制动时需额外消耗路面附着系数来平衡纵向的滑移趋势。在平面曲线中，车辆由于离心惯性向弯道外侧偏移，需要额外的路面摩擦力提供横向支撑。当路面附着系数较低时，车辆在纵向和横向的摩擦力需求叠加，导致附着系数快速消耗，难以同时满足纵向制动和横向稳定性，车辆极易发生滑移或失控。

3) 附着系数随车速增加呈现的非线性消耗。在弯道路段，随着车辆行驶速度的增加，路面附着系

数的消耗呈现出明显的非线性增长特点。当车辆速度提高时，离心力与速度的平方成正比地增加，车辆对横向附着力的需求迅速上升，附着系数的消耗加快。当附着系数被完全消耗时，车辆会失去抓地力，特别是在紧急制动时，出现打滑或失控的现象，危险性显著提升。

因此，本文聚焦低附着系数弯坡路段中车辆制动安全问题，首先考虑弯坡路段的线形特征对车辆行驶力学进行分析，融合公路平、纵、横断面线形参数，路面附着系数，轮胎滚动阻力，车辆空气阻力等多种动力学因素，求解低附着系数弯坡路段中车辆行驶速度与最大制动减速度的关系。在此基础上，结合车辆制动滑移率，建立了适用于低附着系数弯坡路段的最小制动距离预测模型，研究总体框架如图 1 所示。研究成果可为低附着系数弯坡路段中自动驾驶车辆的跟车速度与制动减速度调控提供支持，同时也可多雨雪地区的互通立交匝道中车辆跟驰安全分析与风险预警提供支持。

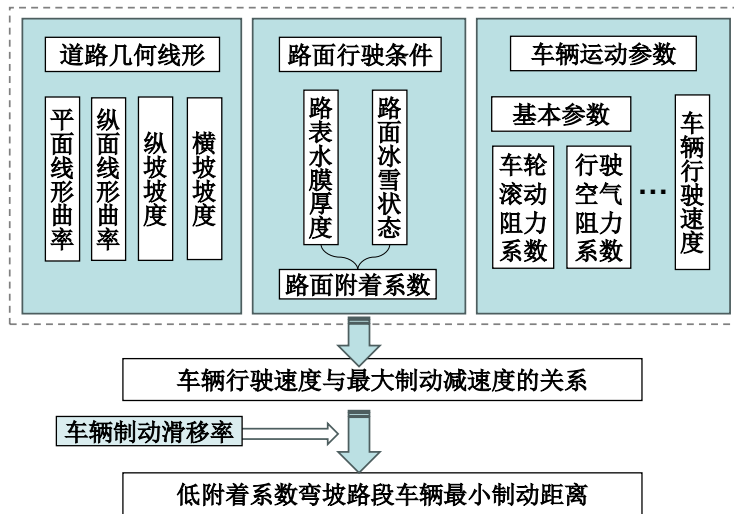


图 1 研究总体框架

Fig.1 General research framework

2 考虑弯坡路段线形特征的车辆行驶力学分析

在覆冰弯坡路段，由于附着系数较低，当车辆行驶至该类路段并采取制动行为时，极易发生滑移现象（图 2）。车辆滑移后，驾驶员往往难以有效控制车辆，进一步导致车辆碰撞或其他交通事故^[13-14]。这种情况在多雨及寒冷地区尤为突出，成为亟需应对的交通安全隐患。以下将考虑弯坡路段线形的几何特征，对弯坡路段中车辆的行驶力学进行分析。

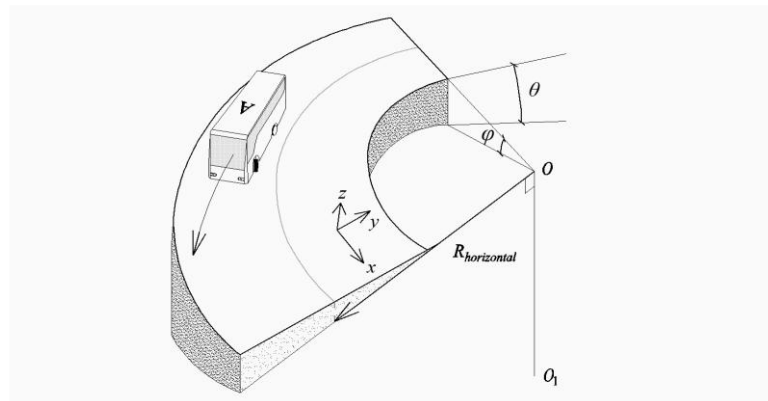


图 2 弯坡路段中车辆制动后滑移偏离车道示例

Fig.2 Example of vehicle skidding and lane deviation after braking on a curved slope road

在沿道路纵向的 x 方向上, 车辆的受力主要包括以下几部分: 车辆行驶过程中轮胎的滚动阻力、车辆行驶空气阻力、弯坡路段对车辆重力在 x 方向上的分力的反作用力 (在上坡路段, 该分力为 $-mg \sin \theta \cos \varphi$, 在下坡路段, 该分力为 $mg \sin \theta \cos \varphi$ 、路表对车辆的驱动力或制动力的反作用力。车辆在 x 方向的受力平衡方程如可表示为式 (1)。

在 y 方向上, 主要考虑路表对车辆重力沿路表 y 方向分力的反作用力、路表为平衡车辆转向离心惯性提供的的作用力、以及路表对车辆的摩擦力沿道路 y 方向的分力, 如式 (2) 所示。在 z 方向上, 车辆的受力主要包括路表对车辆重力沿路表 z 方向上分力的反作用力, 以及车辆沿纵断面竖曲线行驶时, 路表为平衡车辆离心惯性在沿路表 z 方向上提供的的作用力, 如式 (3) 所示。

$$ma_x = -C_r mg - \frac{1}{2} C \rho S v^2 \pm mg \sin \theta \cos \varphi + F_x \quad (1)$$

$$ma_y = mg \cos \theta \sin \varphi - \frac{m(v \cos \theta)^2 \cos \varphi}{R_{\text{horizontal}}} + F_y \quad (2)$$

$$ma_z = m \left(g \cos \theta \cos \varphi \pm \frac{v^2}{R_{\text{vertical}}} \cos \varphi \right) \quad (3)$$

在弯坡路段, 车辆所需消耗路面的摩擦力 f 可通过式 (4) 进行计算。进一步地, 根据摩擦力 f 的计算结果, 可以求解出车辆需消耗的路面附着系数 μ_{req} , 如式 (5) 所示。

$$f = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4)$$

$$\mu_{\text{req}} = \frac{f}{ma_z} \quad (5)$$

式中: m 为车辆质量, kg; v 为车辆行驶速度, m/s; g 为地区重力加速度, m/s²; $R_{\text{horizontal}}$ 为道路平面线形曲率半径, m; R_{vertical} 为道路纵断面线形曲率半径, m; θ 为道路纵坡坡度, rad; φ 为道路横坡坡度, rad; α_x 为车辆沿道路纵向的加速度, m/s²; α_y 为车辆沿道路横向的加速度, m/s²; α_z 为车辆沿道路法向的重力分量与惯性分量的合成加速度, m/s²; C_r 为车辆轮胎滚动阻力系数; C 为车辆行驶空气阻力系数; ρ 为空气密度, kg/m³; S 为车辆迎风面积, m²; F_x 为路面对车辆的摩擦力沿道路纵向 x 方向上的分力, kN; F_y 为路面对车辆的摩擦力沿道路横向 y 方向上的分力, kN; f 为路面对车辆的摩擦力, kN; μ_{req} 为车辆需消耗的路面附着系数。

3 基于路面附着系数求解车辆行驶速度与最大制动减速度的关系

在覆水或覆冰雪的低附着系数弯坡路段, 由于路面附着条件较差, 车辆在制动过程中容易发生滑移, 导致失控的风险显著增加。针对车辆在弯坡路段的制动情况, 结合式 (1) ~ 式 (5), 在已知路面附着系数的条件下, 可以基于道路几何线形参数及车辆行驶空气阻力等参数, 计算车辆行驶速度 v 与最大制

动减速度 $a_{x,max}$ 之间的关系，依据该关系，可进一步对车辆在低附着系数弯坡路段上的最小制动距离进行预测。

3.1 覆水、覆冰路面附着系数

对于覆水路面附着系数的估计，赵鸿铎等^[15]通过测量不同条件下路面摆值（BPN），研究了新制 SMA-13 试验路块、SMA-13 旧路面及 AC-13 旧路面在不同水膜厚度情况下的摩擦性能，并进行了数据回归分析，结果如表 1 所示。其中， h 为路面水膜厚度，mm。

表 1 实验路面在不同水膜厚度情况下的摆值

Tab.1 Friction coefficient of experimental pavement under different thickness of water film

参数	新制 SMA-13 实验路块	SMA-13 旧路面	AC-13 旧路面
路面构造深度 (mm)	1.02	0.43	0.62
摆值 (BPN) 回归公式	$-5.363\ln h + 49.944$	$-2.94\ln h + 46.71$	$-4.73\ln h + 45.15$
R^2	0.957 6	0.925 0	0.993 0

根据《公路路基路面现场测试规程（JTG 3450—2019）》，摆值（BPN）是利用摆式摩擦系数测定仪测得的路面摩擦系数表征值，其数值等于摩擦系数的 100 倍。摆值主要反映路面的滑动摩擦性能，这一性能通常略低于车辆轮胎在未滑移状态下的附着极限。因此，滑动摩擦系数一般略小于附着系数，但在实际的车辆制动安全分析中，出于安全考虑，常将滑动摩擦系数近似作为路面附着系数。基于此，通过表 1 中的摆值数据，可计算得到各类型路面在不同水膜厚度情况下的附着系数。

针对布置有水膜厚度检测仪的路段，可通过检测仪直接测量道路路表的水膜厚度。结合路面附着系数与水膜厚度的关系，可以进一步计算覆水路面的附着系数。对于未布置水膜厚度检测仪的路段，可根据降雨强度计算水膜厚度，并通过式（6）推算出该路段的附着系数^[16]。

$$h = \frac{0.068 L^{0.32} I^{0.41} T_{XD}^{1.17}}{S^{0.31}} \quad (6)$$

式中： h 为路面水膜厚度，mm； L 为水流路径长度，m； S 为路面坡度，%； I 为降雨强度，mm/h； T_{XD} 路面构造深度，mm。

对于覆冰雪路面，其附着系数随环境条件变化^[17]，如表 2 所示。

表 2 实验路面在不同冰雪覆盖状态下的附着系数

Tab.2 Friction coefficient of experimental pavement under different snow and ice coverage conditions

路面条件	覆冰路面	覆雪路面	重冻雪路面	氯化物融雪剂处理雪路面	砂处理雪路面	氯化物与砂混合处理雪路面
路面附着系数	0.10~0.20	0.20~0.30	0.30~0.40	0.35~0.45	0.30~0.40	0.30~0.50

结合道路线形条件、路面附着系数及车辆参数，可进一步采用式（7）计算路面附着系数富裕值 D_f 。

$$D_f = \mu - \mu_{req} \quad (7)$$

式中： μ 为路面附着系数。

因此，通过式（1）~式（7），可求解出路面附着系数富裕值 D_f 条件下，车辆行驶速度与最大制动减速度的关系。该关系可为自动驾驶车辆优化速度和减速控制策略提供支持。

3.2 基于路面附着系数求解车辆行驶速度与最大制动减速度的关系

以下以纵坡 $\theta = -2\%$ ，超高值 $\varphi = 3\%$ 的典型圆曲线弯坡路段为例，展示在不同路面附着系数条件下求解得到的车辆行驶速度与最大制动减速度的关系。车辆质量 1550 kg ，车辆风阻系数 $C = 0.30$ ，空气密度 $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$ ，车辆迎风面积 $S = 2.3 \text{ m}^2$ ，车辆沿道路下坡行驶，且路面附着系数富裕值 $D_f = 0$ 。

图 3 展示了在公路曲率半径 $R = 200 \text{ m}$ ， $R = 250 \text{ m}$ ， $R = 300 \text{ m}$ 三种情况下，车辆行驶速度与最大制动减速度的关系（该关系通过联立式（1）~式（7），由计算机采用数值方法求解并绘图得到）。

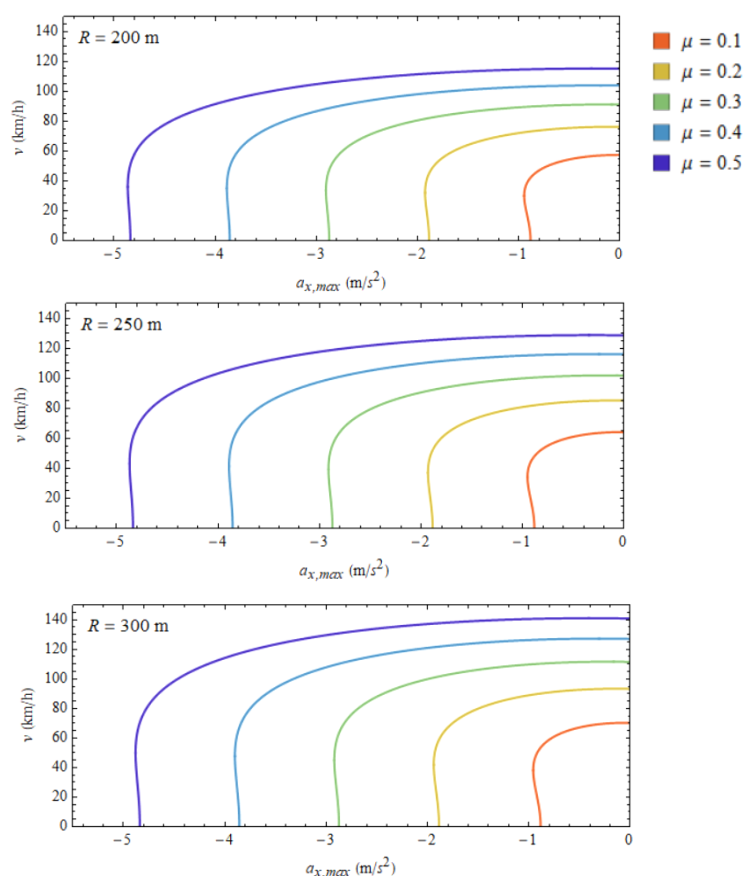


图 3 不同路面附着系数下车辆行驶速度与最大制动减速度的关系

Fig. 3 Relationship between vehicle speed and maximum braking deceleration under different road surface adhesion coefficients

由图 3 分析可知：

1) 路面附着系数对最大制动减速度的影响。当车辆速度一定时，路面附着系数对车辆最大制动减速度有很大影响。随着路面附着系数增加，车辆可采取的最大制动减速度显著提高。

2) 车速变化对最大制动减速度的影响。①当车辆速度较低且路面附着系数保持不变时，随着车速的增加，车辆允许采用的最大制动减速度略有增长：这是由于车辆通过弯道时增加的离心惯性平衡掉了

部分沿道路横坡方向向弯道内侧滑移的趋势，降低了车辆对路面附着系数的消耗；②随着车辆速度进一步增大，离心惯性完全平衡掉了车辆向弯道内侧滑移的趋势，此时车辆逐渐出现向弯道外侧滑移的趋势；③随着车辆速度持续增加，车辆的最大制动减速度迅速下降：这是由于车辆向弯道外侧滑移的趋势增强，导致对路面附着系数的需求大幅增加。

图 3 中车辆行驶速度与最大制动减速度的关系可用于约束自动驾驶车辆在弯坡路段的制动行为，在保留一定制动能力前提下为合理规划行驶速度提供依据，从而为自动驾驶系统的速度与制动控制策略优化提供支持。对于人工驾驶场景，车辆实际制动能力受到驾驶员经验、操作执行能力等因素的综合影响，且驾驶员难以实现对车辆减速度的量化感知和控制，因此上述车辆行驶速度与最大制动减速度的关系并不适用于直接为人工驾驶车辆驾驶员提供决策支持。

在不考虑车辆制动时防抱死系统（ABS）工作导致车辆纵向出现滑移的条件下，由式（8）可计算得到车辆的最小制动距离。考虑到在低附着系数弯坡路段以最大减速度进行实车制动试验存在很高的安全风险，为进一步验证模型的适用性，以下将基于 CarSim 车辆动力学仿真实验，比较 ABS 工作条件下的最小制动距离与模型计算的最小制动距离，并分析两者的差异。

$$l_{\min} = -v^2 / 2a_{x,\max} \quad (8)$$

式中： v 为车辆行驶速度，m/s； $a_{x,\max}$ 为车辆可采用的最大制动减速度，m/s²。

4 模型预测最小制动距离与仿真试验值差异分析

CarSim 是由美国 Mechanical Simulation 公司开发的车辆动力学仿真软件，广泛应用于车辆动力学性能测试及相关科研领域^[18-19]。该软件能够模拟车辆在多种复杂道路条件下的动态特性，为车辆设计与性能优化提供可靠的技术支持。为验证上述方法对车辆最小制动距离预测的可靠性，以下以覆水弯坡路段车辆制动减速的交通场景为例，采用 CarSim 动力学仿真软件建立车辆和道路模型，分析车辆制动过程中 ABS 工作条件下最小制动距离与模型计算出的最小制动距离的差异。试验车辆为中型轿车（参考车型为 2023 款一汽大众迈腾 280TSI），部分主要参数如表 3 所示，试验场景如图 4 所示。路面附着系数由表 1 中“AC-13 旧路面”的摆值（BPN）回归公式间接计算得到，并输入 CarSim 仿真平台作为路面附着条件。

表 3 试验车辆参数设置
Tab. 3 Test vehicle parameter setting

参数	车辆参数
车辆质量/ kg	1 550
车辆长度/ m	4.870
车辆宽度/ m	1.832
车辆高度/ m	1.480
车辆风阻系数	0.3
车辆迎风面积/ m ²	2.3
轴距/ m	2.870
轮心间距/ m	1.580
轮心高度/ m	0.325
ABS 前轮制动滑移率/%	15
ABS 后轮制动滑移率/%	12

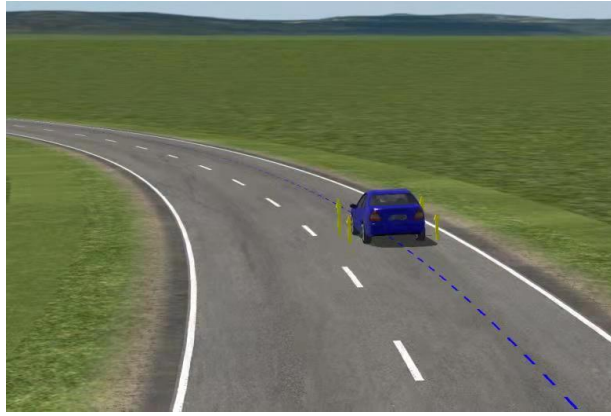


图 4 弯坡路段车辆动力学仿真试验场景

Fig.4 Vehicle dynamics simulation test scene on a curved slope road

选取一级、二级公路中典型的设计速度 $v = 60 \text{ km/h}$ 和 $v = 80 \text{ km/h}$ ，以道路圆曲线半径 $R = 400 \text{ m}$ 和 $R = 700 \text{ m}$ ， $\theta = -2\%$ ， $\varphi = 3\%$ 场景为例，通过车辆动力学仿真试验，得到覆水弯坡路段中车辆在 ABS 工作条件下的最小制动距离（图 5 中简称“仿真实验值”）。随后，将仿真实验值与模型计算的最小制动距离（图 5 中简称“模型计算值”）进行对比分析。

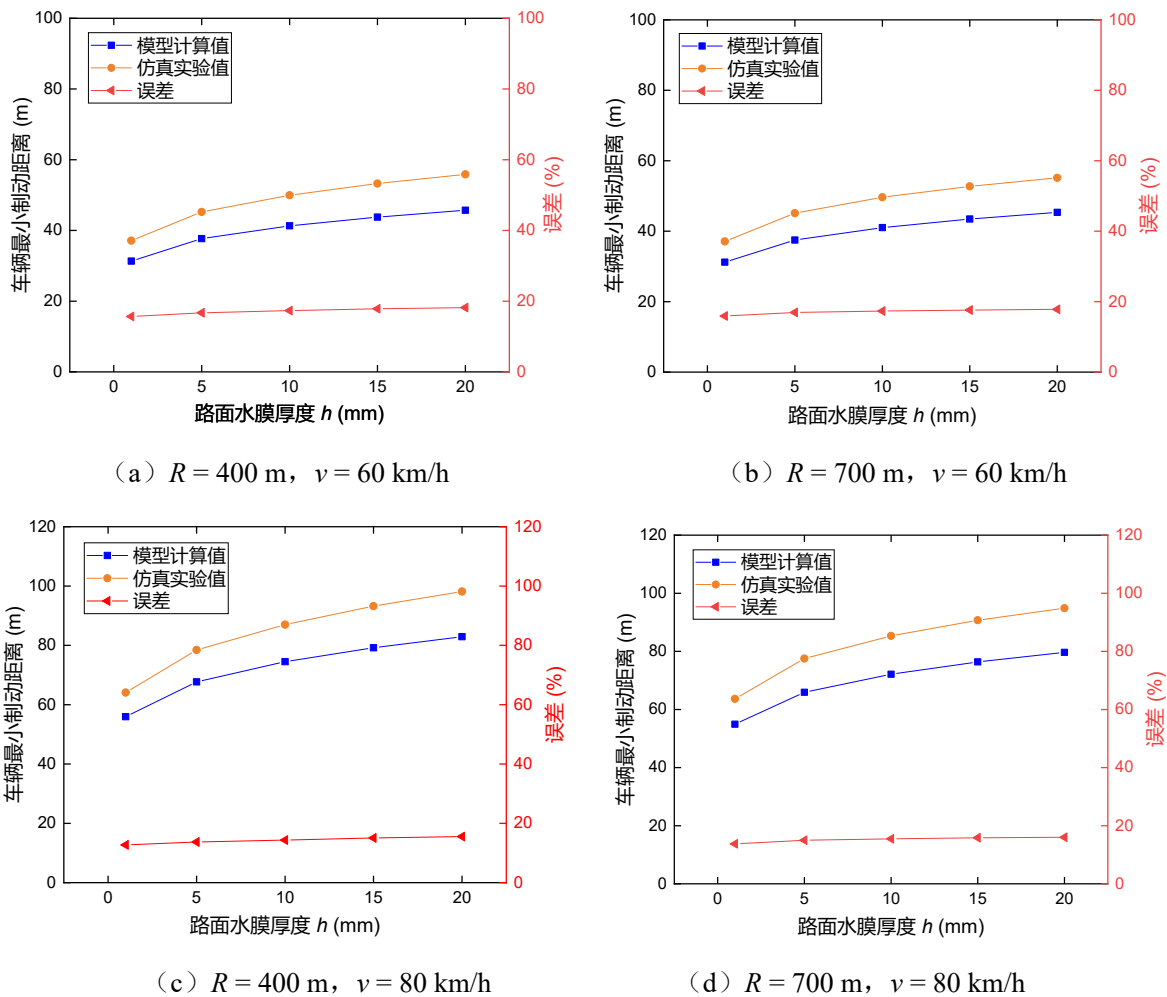


图 5 车辆最小制动距离模型计算值与仿真试验计算值对比

Fig.5 Comparison of the calculated value of the vehicle minimum braking distance model with that of the simulation test

由图 5 中的数据统计可知，车辆最小制动距离预测模型的计算结果比动力学仿真试验结果低 12.709%~18.190%，平均误差为 15.936%，该值接近试验车辆的制动滑移率。在不考虑车辆制动滑移的前提下，这一结果表明，研究提出的预测模型能够较为准确地预测车辆在覆水弯坡路段的最小制动距离，具备较好的可靠性和实用性。

5 考虑滑移率的车辆最小制动预测距离

通过联立式 (1) ~ 式 (8) 可以求解车辆的最小制动距离 l_{min} 。针对不同道路线形情况下的车辆最小制动距离数值，通过数据回归可进一步得出车辆最小制动距离的预测公式，如式 (9) ~ 式 (10) 所示。相比于利用制动距离预测模型动态求解，使用由数据回归得到的公式进行计算更加直接和简便，便于在实际交通场景中快速计算车辆的最小制动距离。图 6 展示了 $R=400$ m 和 $R=700$ m 条件下圆曲线路段车辆最小制动距离数据的回归响应面。

$$l_{\min,R=400\text{ m},\theta=-2\%,\varphi=3\%} = 7.33731 + \frac{367.90201}{[1 + e^{-(h+2.19935)/6.44483}][1 + e^{-(V-113.6429)/25.48023}]}, \quad (R^2=0.9984) \quad (9)$$

$$l_{\min,R=700\text{ m},\theta=-2\%,\varphi=3\%} = -2.5871 + \frac{278.52033}{[1 + e^{-(h+4.42756)/6.77306}][1 + e^{-(V-104.0569)/28.64185}]}, \quad (R^2=0.9999) \quad (10)$$

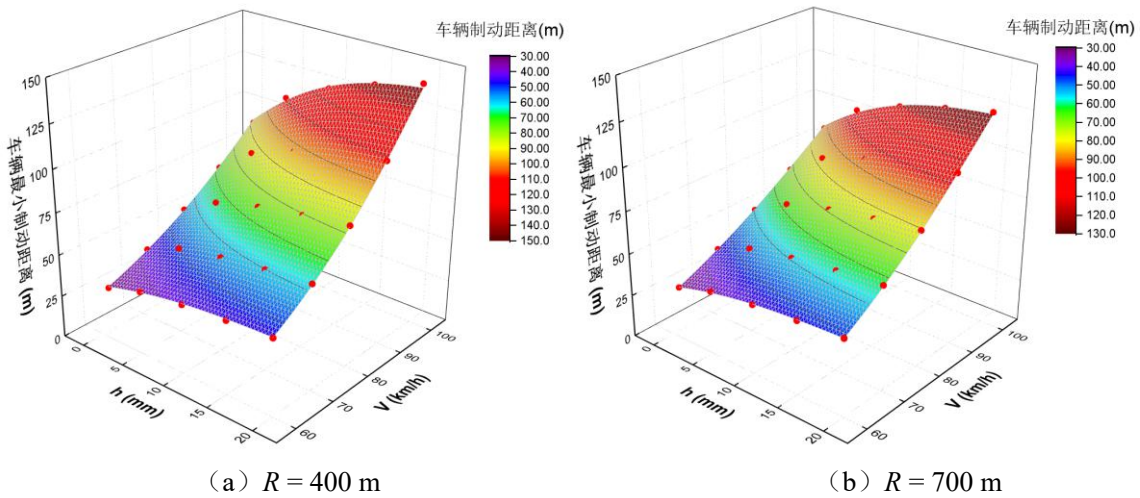


图 6 基于数据回归的车辆最小制动距离响应曲面图

Fig.6 Response surface of minimum braking distance based on data regression

在实际交通场景中，通过控制车辆的制动滑移率（式 (11)），能够最大化车辆的制动性能并避免车轮抱死，从而提高车辆的安全性与操控性^[20-21]。因此，在通过模型预测弯坡路段车辆最小制动距离时，应将车辆制动滑移率作为重要影响因素纳入考虑，如式 (12) 所示。

$$\beta = \frac{v - \omega r}{v} \times 100\% \quad (11)$$

式中： β 为车辆制动滑移率，%； v 为车辆行驶速度，m/s； ω 为车辆车轮转动角速度，rad/s； r 为车辆车轮滚动半径，m。

$$l_{c,\min} = l_{\min} / (1 - \beta) \quad (12)$$

式中： $l_{c,\min}$ 为考虑车辆制动滑移条件下的车辆最小制动距离，m； l_{\min} 为不考虑车辆滑移条件下的模型预测车辆最小制动距离，m。

考虑滑移率的车辆制动距离体现了低附着系数弯坡路段车辆的极限制动能力，可为自动驾驶车辆跟车距离控制与预警提供依据。在实际控制策略中，跟车距离应在确保大于最小制动距离的基础上，结合驾驶激进度设定相应的安全冗余系数。对于激进程度较高的驾驶策略，应配置更大的安全冗余系数，以提升系统在复杂工况下的鲁棒性，保障运行安全。

6 结论

1) 针对低附着系数弯坡路段，研究融合了公路平、纵、横断面线形参数、路面附着系数、轮胎滚动阻力、车辆空气阻力等动力学因素，求解得到车辆行驶速度与最大制动减速度之间的关系，可为低附着系数弯坡路段的自动驾驶车辆跟车速度与制动减速度优化控制提供支持。

2) 结合车辆制动滑移率，提出适用于低附着系数弯坡路段的车辆最小制动距离预测方法。通过 CarSim 车辆动力学仿真试验，对车辆最小制动距离预测模型进行了验证。该预测模型可为车辆跟车距离控制和预警提供参考。

3) 对于其他工况参数（如不同纵坡坡度、圆曲线和缓和曲线超高值、曲率半径，以及车辆质量、迎风面积等），仍可采用本文的方法对车辆的制动距离进行建模和分析，并为多雨雪地区互通立交匝道的线形优化设计等提供参考。

4) 研究提出的车辆最小制动距离预测模型是基于自动驾驶车辆充分利用路面附着系数条件下建立的，可为自动驾驶系统的速度与制动控制策略优化提供支持。对于人工驾驶场景，由于驾驶员操作存在不确定性，无法精确控制车辆减速度，在实际制动过程中难以快速达到车辆制动附着极限或有效触发车辆 ABS。因此，研究所提出的车辆最小制动距离预测模型并不适用于人工驾驶条件下的最小制动距离预测。未来研究计划进一步基于自然驾驶数据构建驾驶员行为模型，开展人工驾驶场景下的车辆制动性能建模与验证，并与本文研究进行对比，以进一步拓展对不同驾驶模式下车辆制动性能的研究。

5) 研究未考虑车辆在弯坡路段中的变道行为对制动效果的影响，模型仍基于车辆在单一车道内行驶的工况进行建模与验证。未来研究将进一步结合车辆变道行为，考虑其在低附着弯坡路段上的动力学响应差异及路径偏移对最小制动距离与滑移风险的影响，以拓展模型在复杂交通场景中的适用性。

参考文献：

- [1] DAN H C, HE L H, XU B. Experimental investigation on skid resistance of asphalt pavement under various slippery conditions[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(6): 485-499.
- [2] NEAMTU G. The importance and role of tyres on road vehicles: their influence on breaking distance[J]. International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies, 2024, 4(4): 1088-1101.
- [3] ANDREY J, YAGAR S. A temporal analysis of rain-related crash risk[J]. Accident; Analysis and Prevention, 1993, 25(4): 465-472.

- [4] 张驰,孟良,汪双杰,陈建兵,邵东建.高速公路曲线路段小客车制动行为侧滑风险仿真分析[J].中国公路学报,2015,28(12):134-142.
ZHANG C, MENG L, WANG S J, et al. Sideslip risk simulation analysis of passenger car braking behavior on expressway curved sections[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 134-142.
- [5] 方成,李元辉,燕北瑞.高速公路转弯匝道雨天小客车行车安全性及限速研究[J].交通运输研究, 2021,7(4):85-94.
FANG C, LI Y H, YAN B R, et al. Car driving safety and speed limit on expressway turning ramps in rainy weather[J]. Transport Research, 2021, 7(4): 85-94.
- [6] 刘建蓓,罗京,郭腾峰.基于安全容许速度的雨天公路可变限速方法[J].中国公路学报, 2015,28(12):128-133.
LIU J B, LUO J, GUO T F. Variable speed limit method based on safe permissible speed under wet weather[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 128-133.
- [7] 吴善根,李涛,林宣财,等.基于制动减速度的高速公路停车视距研究[J].公路交通科技, 2021, 38(9): 51-59.
WU S G, LI T, LIN X C, et al. Study on parking sight distance of expressway based on braking deceleration[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(9): 51-59.
- [8] KORDANI A A, RAHMANI O, NASIRI A A S, et al. Effect of adverse weather conditions on vehicle braking distance of highways[J]. Civil Engineering Journal, 2018, 4(1): 46-57.
- [9] 李志鹏,彭涛,王茜,等.融雪剂路面上汽车制动距离计算模型[J].交通运输工程学报, 2012, 12(1): 50-54.
LI Z P, PENG T, WANG Q, et al. Calculation model of automobile braking distance on pavement with deicing salt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 50-54.
- [10] XIA R X, WU D H, HE J, et al. A new model of stopping sight distance of curve braking based on vehicle dynamics[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2016, 2016(1): 4260705.
- [11] YE Z J, WEI Y, YANG S L, et al. IoT-enhanced smart road infrastructure systems for comprehensive real-time monitoring[J]. Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 2024, 4: 235-249.
- [12] GUERRERO-IBÁÑEZ J, ZEADALLY S, CONTRERAS-CASTILLO J, et al. Sensor technologies for intelligent transportation systems[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1212.
- [13] PARDILLO MAYORA J M, JURADO PIÑA R. An assessment of the skid resistance effect on traffic safety under wet-pavement conditions[J]. Accident Analysis and Prevention, 2009, 41(4): 881-886.
- [14] KHATTAK A J, SCHNEIDER R J, TARGA F. Risk factors in large truck rollovers and injury severity: analysis of single-vehicle collisions[J]. Transportation Research Record, 2003, 40: 1-22.
- [15] 赵鸿铎,伍梦竹,吴世涛.沥青道面摩擦系数随水膜厚度的变化规律[J].中国民航大学学报, 2015, 33(2): 47-52.
ZHAO H D, WU M Z, WU S T. Variation of asphalt pavement friction coefficient with change of water film thickness[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2015, 33(2): 47-52.
- [16] 罗京,刘建蓓,王元庆.路面水膜深度预测模型验证试验[J].中国公路学报,2015,28(12):57-63.
LUO J, LIU J B, WANG Y Q. Validation test on pavement water film depth prediction model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 57-63.
- [17] ICHIHARA K, MIZOGUCHI M. Skid resistance of snow-or ice-covered roads[J].Special Report, 1970, 8(10): 104-114.
- [18] 王国栋,刘立,孟宇,等.自动驾驶汽车避撞极限研究[J].汽车工程, 2024, 46(6): 985-994.
WANG G D, LIU L, MENG Y, et al. Research on collision avoidance limit of autonomous vehicles[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(6): 985-994.
- [19] 徐磊,彭金栓.基于 Carsim 和 Simulink 的超车换道仿真分析[J].科学技术与工程,2014,14(29):300-303.

XU L, PENG J S. Simulation and analysis on overtaking lane change based on Simulink and Carsim[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(29): 300-303.

[20] ZHU S W, FAN X B, QI G X, et al. Review of control algorithms of vehicle anti-lock braking system[J]. Recent Patents on Engineering, 2023, 17(2): e240322202610.

[21] PRETAGOSTINI F, FERRANTI L, BERARDO G, et al. Survey on wheel slip control design strategies, evaluation and application to antilock braking systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 10951-10970.



第一作者: 李维东（1992—），男，博士研究生，研究方向为道路交通安全、自动驾驶车辆安全控制、车辆动力学等。



通信作者: 杨轸（1974—），男，副研究员，博士，博士生导师，研究方向为道路交通安全、自动驾驶车辆安全控制、车路网联环境下车辆决策与控制方法等。