

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.04.024

基于元胞自动机的雨天高速公路可变限速控制

李素兰^{*1,2}, 施俊庆³, 张谢东¹, 陈林武³, 夏顺娅³

(1. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉市城市道路桥隧事务中心, 湖北 武汉 430015;
3. 浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321004)

摘要: 针对雨天高速公路交通安全和通行效率问题, 通过考虑降雨强度对水膜厚度和能见度的影响, 基于不同降雨条件下的路面附着系数, 建立了随机减速幅度随车速变化的大小车混合交通流元胞自动机模型。根据车辆速度、最大减速度及与前车的间距判断是否发生交通冲突。最大减速度随着雨量增加而减小。构建了以交通冲突率和平均行程时间为代表的交通安全与通行效率评价指标。通过微观仿真手段, 以中雨为例分析了大小车比例、减速概率、车辆到达率和换道概率对冲突率和平均行程时间的影响, 研究了暴雨、大雨、中雨条件下限速值对冲突率和平均行程时间的影响, 以寻找不同降雨条件下的最佳限速值。仿真结果表明: 减少车辆到达率、缩小大小车比例、降低减速概率和提高换道概率有助于缩短高速公路平均行程时间; 减少车辆到达率、降低减速概率、换道概率和大小车混合程度有助于降低冲突率; 相同降雨条件下, 平均行程时间随着限速值的增加而下降, 冲突率随着限速值的增加而上升; 不同降雨条件下, 冲突率随着降雨强度的增加而上升, 最佳限速值随着降雨强度的增加而下降。综合考虑交通安全性与交通效率, 建议高速公路暴雨和大雨条件下小型车辆限速值分别取 60 km/h 和 80 km/h。

关键词: 交通工程; 可变限速控制; 元胞自动机模型; 雨天; 仿真技术

中图分类号: U491.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 04-0194-07

Variable Speed-limit Control of Expressway in Rainy Days Based on Cellular Automaton

LI Su-lan^{*1,2}, SHI Jun-qing³, ZHANG Xie-dong¹, CHEN Lin-wu³, XIA Shun-ya³

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China;
2. Wuhan Urban Road, Bridge and Tunnel affairs Center, Wuhan Hubei 430015, China;
3. School of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang 321004, China)

Abstract: In order to solve the problems of traffic safety and efficiency on expressways in rainy days, considering the influence of rainfall intensity on the water film thickness and visibility, a cellular automaton model of mixed traffic flow with random deceleration amplitude varying with vehicle speed is established based on the road surface adhesion coefficient under different rainfall conditions. Whether there is a traffic conflict is determined according to the vehicle speed, maximum deceleration and the distance between the vehicle and the front vehicle. The maximum deceleration rate decreases with the increase of rainfall intensity. The traffic safety and traffic efficiency evaluation indicators represented by traffic conflict rate and average travel time are constructed. By means of micro simulation, taking moderate rain for example, the influences of the ratio of large and small vehicles, the probability of slowing down, the vehicle arrival rate and the probability of lane changing on the conflict rate and travel time are analyzed. The influence of the speed limit value on the conflict rate and average travel time under the scenarios of rainstorm, heavy rain and moderate rain is studied to find the best speed limit value under different rainfall conditions. The simulation result indicates that (1)

收稿日期: 2020-12-17

基金项目: 湖北省交通运输厅科技项目 (2016-13-1-3)

作者简介 (* 通讯作者): 李素兰 (1982-), 女, 湖北咸宁人, 博士研究生, 高级工程师. (lisulan@126.com)

the average travel time on expressway can be shortened by reducing the deceleration probability and increasing the lane changing probability; (2) reducing the arrival rate of vehicles, reducing the deceleration probability, lane changing probability and the mixing degree of large and small vehicles will help to reduce the conflict rate; (3) under the same rainfall condition, the average travel time decreases with the increase of the speed limit value, while the conflict rate increases with the increase of the speed limit value; (4) under different rainfall conditions, the conflict rate increases with the increase of rainfall intensity, while the optimal speed limit decreases with the increase of rainfall intensity. In comprehensive consideration of traffic safety and traffic efficiency, it is suggested that the speed limit of small vehicles under the conditions of rainstorm and heavy rain on expressway should be 60 km/h and 80 km/h respectively.

Key words: traffic engineering; variable speed-limit control; cellular automaton model; rainy day; simulation technology

0 引言

正常情况下,我国高速公路对小汽车和其他机动车的最高限速分别为 120 km/h 和 100 km/h^[1]。降雨条件下,车辆制动性能减弱,当前车紧急制动时,容易发生追尾事故,因此有必要对限速值进行调整。如果车辆限速值设置过高,会影响驾驶员的判断能力,增加纵向碰撞和翻车的可能性,并增大事故的严重性;反之,则会增加行程时间,降低高速公路的通行效率。因此,需要在交通安全和通行效率之间寻求一个平衡点,使得整体效益最大化^[2-4]。

元胞自动机模型是一种定义在一个具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上,按照一定的局部规则,在离散的时间维度上演化的动力学系统。由于其离散型、有限性、局部性特征,能够通过简单的规则模拟复杂的交通系统,在动态交通流模型领域得到了广泛的应用^[5-6]。近年来,国内外学者利用元胞自动机模型对雨天等灾害天气下的交通流特性及限速问题进行了研究。庞明宝等^[7]研究了雨天高速公路可变限速控制与道路几何线形参数值的交通流非线性行为对交通安全的影响。朱娜^[8]建立了基于安全距离的雨天城市快速路元胞自动机交通流模型,并从速度特性、通行能力等方面对快速路雨天交通流特性进行了分析。Pang 等^[9]提出了一种改进的双车道单向高速公路元胞自动机模型,探讨了不同降雨强度下的交通流特性,并对可变限速和车流量控制进行了模拟试验。刘展宏等^[10]针对雾天条件下跟驰状态不稳定的现象,引入动态随机加速进行分段建模,建立了雾天条件下的元胞自动机模型。黄磊^[11]以路面附着系数量化天气因素,推导出动态安全间距,建立了更安全和符合实际道路环境的单车道模型,分析了不同天气下的限速策略对交通流

和动能损耗的影响。张甜甜^[12]建立了雾霾低能见度下的限速交通流元胞自动机模型,分析得到了低能见度不同密度下的安全限速值,并与限速标准进行了比较。郑莎莎^[13]建立了一个在雾雨天气下可能发生追尾事故的单向三车道高速公路元胞自动机模型,得到了与不同能见度天气相应的最佳上游交通量和速度限制值。Shi 等^[14]建立了雾天高速公路双车道元胞自动机模型,研究了间断放行措施对减少交通事故和尾气排放的影响。现有的雨天高速公路元胞自动机模型较少考虑降雨强度对水膜厚度、路面附着系数和能见度的影响,且未考虑不同车型的影响。

本研究针对雨天高速公路交通流的特点,综合考虑降雨强度对能见度、水膜厚度、路面附着系数、大小车长度和制动加速度的影响,提出适合于雨天高速公路的混合交通流元胞自动机模型,构建以交通冲突率和平均行程时间为代表的交通安全与通行效率评价指标,对大小车比例、减速概率、车辆到达率、换道概率等因素对高速公路交通安全和通行效率的影响进行仿真与分析,寻求特定交通条件下暴雨、大雨和中雨时的高速公路最佳限速值。

1 雨天高速公路元胞自动机模型

1.1 模型基本假设

如图 1 所示,高速公路某路段为单向 3 车道,每个车道被分割成 L 个元胞,每个元胞 (cell) 长度

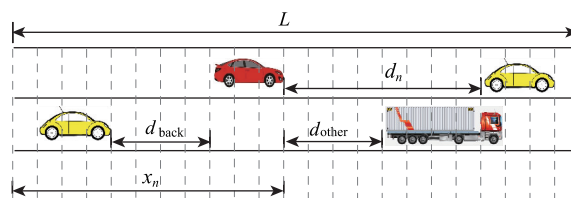


图 1 高速公路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of expressway

为2 m, 车辆分为大车和小车, 分别占据5个元胞和3个元胞, 每个时间步对应于现实中的1 s。

设 x_n 和 v_n 分别为第 n 辆车在该路段某车道中的位置与速度。 v_n 可以取0到 $v_{\max}$ 之间的任意一个整数, 其中 $v_{\max}(\geq 1)$ 为最大速度。 d_n 为第 n 辆车与前车之间的距离; d_{back} 为第 n 辆车与相邻车道后方车辆的间距; d_{other} 为第 n 辆车与相邻车道前方车辆的间距。单位时间内到达路段终点的车辆数为 Q , 其中, 第 i 辆车的行程时间为 T_i 。

平均行程时间 $\bar{T}$ 的计算式为:

$$\bar{T} = \frac{1}{Q} \times \sum_{i=1}^Q T_i. \quad (1)$$

交通冲突率是指单位距离内平均每辆车发生交通事故的次数, 计算式为:

$$R = \frac{K}{Q \times L} \times 500, \quad (2)$$

式中, R 为冲突率; K 为冲突数; L 为路段长度。

冲突数 K 的计算式为:

$$K = \sum_{i=1}^Q q_i, \quad (3)$$

式中, q_i 为第 i 辆车的冲突次数, 对每个时间步, 当 $v_{\text{back}}(t) - d_{\text{back}} \geq s_0$ 时, 计为1次冲突; s_0 为车辆最大减速度, 当车辆速度与前车间距小于最大减速度时, 车辆就有可能相撞。正常情况下, 车辆的最大减速度为 g , 即 10 m/s^2 , 相当于 5 cell/s^2 。雨天时, s_0 的数值随着雨量增大而减小^[15], 假设中雨、大雨、暴雨时的车辆最大减速度 s_0 分别取4, 3, 2 cell/s^2 , 相当于8, 6, 4 m/s^2 。

车辆的更新过程由2步完成。第1步, 车辆按照换道规则进行换道; 第2步, 换道后, 各条车道上的车辆按照单车道模型规则前进。

1.2 车辆换道规则

车辆根据STCA模型的换道规则进行换道^[16]。同时, 为了避免潜在的碰撞可能, 随机选取从内侧车道往外侧车道或从外侧车道往内侧车道的方式进行更新, 以避免内侧车道和外侧车道上的车辆同时选择中间车道上的同一元胞而发生碰撞。

(1) $\min(v_n+1, v_{\max}) > d_n$ 且 $d_{\text{other}} > d_n$, 表示车辆速度大于与前车的间距, 且旁边车道具有更好的行驶条件。

(2) $d_{\text{back}} > d_{\text{safe}}$, 表示车辆与相邻车道后车距离大于安全距离, 其中 d_{safe} 为安全距离。

当满足上述2个条件时, 车辆按照一定概率

P_{change} 向旁边车道换道, $x_n \rightarrow x_{n,\text{other}}$ 。

1.3 车辆前进规则

(1) 加速

若 $v_n < v_{\max}$, 则速度取 v_n+1 ; 若 $v_n = v_{\max}$, 则 v_n 不变, 如式(3)所示, 表示驾驶员都有以尽量快的速度行驶的一般趋势, 但不能超过最高车速^[17]。

$$v_n(t+1) = \min[v_n(t) + 1, v_{\max}]. \quad (4)$$

(2) 减速

$v_n(t+1) = \min[v_n(t+1), d_n(t), l, d_s(t)]$, (5) 式中, L 为能见度, 中雨时取400, 大雨时取250, 暴雨时取100^[18]; $d_n(t)$ 为车辆与前车之间的距离, 即车头间距减去前车所占的元胞个数; $d_s(t)$ 为最小安全跟驰距离。

最小安全跟驰距离与天气有关。降雨对其影响主要通过路面附着系数和驾驶员反应及制动响应时间来体现, 即^[19]:

$$d_s(t) = \text{round} \left[v_n(t) \cdot T_n + \frac{v_n(t)^2}{g\varphi_n} - \frac{v_{n+1}(t)^2}{g\varphi_{n+1}} + S \right], \quad (6)$$

式中, T_n 为驾驶员反应及制动响应时间; φ_n 为路面附着系数; S 为静止时两车之间的最小安全间距; g 为重力加速度, 取值 9.8 m/s^2 。

路面附着系数与降雨强度有关, 计算式为^[15]:

$$\varphi = 0.6603 - 0.02664v_n(t) - 0.0057h, \quad (7)$$

式中 h 为水膜厚度。

水膜厚度与降雨强度的关系为^[20]:

$$h = 0.1258 \times l^{0.6715} \times i^{-0.3147} \times TD^{0.7261} \times q^{0.7786}, \quad (8)$$

式中, l 为坡长; i 为坡度; TD 为构造深度, 一般取值为0.1 mm; q 为降雨强度, 中雨时取0.2, 大雨时取0.6, 暴雨时取1.3。

(3) 随机减速

车辆在高速公路上行驶时, 会存在一些不确定偶然因素导致车辆不能按期望车速正常行驶, 比如前车突然刹车、旁边车道车辆忽然变道或驾驶员暂时性走神等等, 都会引起车辆减速。在模型中这种偶然概率被称为随机减速概率, 表示车辆会以一定的概率受周围交通状况的影响而选择减速。

正常情况下, 车辆速度越快, 受到干扰后速度下降幅度越大, 因此对不同的车速, 采用不同的减速幅度。

若 $v_n(t+1) > 0$, 则车辆以随机减速概率 P_{slow} 减速, 减速比例为原车速的20%, 结果四舍五入。

$$v_n(t+1) = \text{Round}[v_n(t+1) \times 0.8]。 \quad (9)$$

(4) 位置更新

车辆按照式(4)~(9)中更新好的速度向前行驶:

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)。 \quad (10)$$

2 雨天高速公路交通仿真与分析

假设路段长 L 取 500 cell, 即 1 000 m, 驾驶员反应及制动响应时间取 1 s, 静止时两车之间的最小安全间距取 2 cell, 即 4 m^[18], 坡长取 8 m, 坡度取 3%。在给定的车辆到达率下, 车辆从 3 条车道的起始点随机产生, 初始车速从 0 到 $v_{\max}$ 中随机选取, 大车的最大车速为小车最大车速的 80%。对每个特定的条件仿真 10 次, 每次仿真 10 000 步, 结果取平均值。

2.1 大小车比例对交通安全和通行效率的影响

假设小车最大车速为 11 cell/s, 即 80 km/h, 大车最大车速为 9 cell/s, 即 65 km/h, 车辆到达率为 2 000 pcu/h, 换道概率取 0.2, 随机减速概率取 0.03, 大车比例从 0.1 开始, 每次增加 0.1, 直到 0.9, 仿真结果如图 2 和图 3 所示。

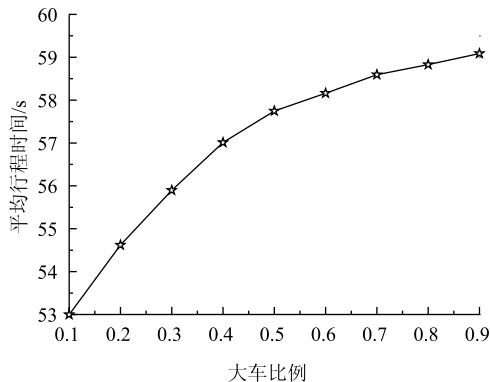


图2 大车比例对平均行程时间的影响(中雨)

Fig. 2 Influence of large vehicles' proportion on average travel time (moderate rain)

如图 2 所示, 当大车比例为 0.1 时, 高速公路上大部分都是小车, 车速较快, 平均行程时间为 53 s, 随着大车比例的增加, 平均车速下降, 平均行程时间增加; 当大车比例为 0.9 时, 平均行程时间为 59 s, 说明高速公路上的车型比例以及快慢车比例对高速公路通行效率具有非常重要的影响。

如图 3 所示, 在不同的降雨条件下, 冲突率随大车比例的变化趋势基本一致, 且暴雨冲突率最大, 大雨次之, 中雨最小。冲突率先随着大车比例的增加而上升, 到达某极值后下降。这是因为随着大车比例的增加, 大小车的比例趋于一致, 车辆之间的速度差

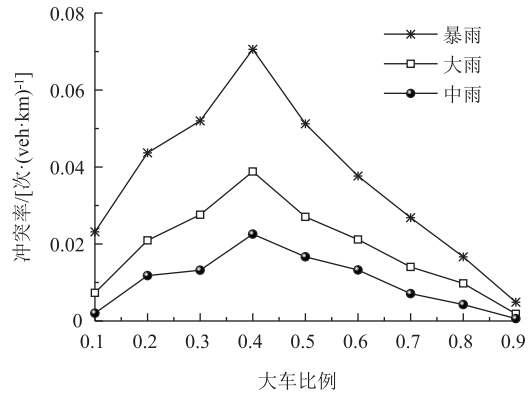


图3 不同降雨条件下大车比例对冲突率的影响

Fig. 3 Influence of large vehicles' proportion on conflict rate under different rainfall conditions

异逐渐明显, 大车以较慢的车速行驶在前方, 阻挡小车正常行驶产生冲突, 当大车比例为 40% 时, 车辆冲突率达到最大, 中雨时为 0.022 次/(veh·km), 大雨时为 0.038 次/(veh·km), 暴雨时达到 0.072 次/(veh·km)。当大车比例大于 40% 时, 车辆冲突率随着大车比例的增加而下降, 这是因为随着大车比例的增加, 路段中的车型趋于一致, 车辆之间的速度差异变小, 从而减少了交通冲突的可能性。

2.2 减速概率对交通安全和通行效率的影响

假设小车最大车速为 11 cell/s, 即 80 km/h, 大车最大车速为 9 cell/s, 即 65 km/h, 车辆到达率为 2 000 veh/h, 换道概率取 0.2, 大车与小车比例为 1:4, 随机减速概率从 0 开始, 每次增加 0.005, 直到 0.05 为止, 仿真结果如图 4 和图 5 所示。

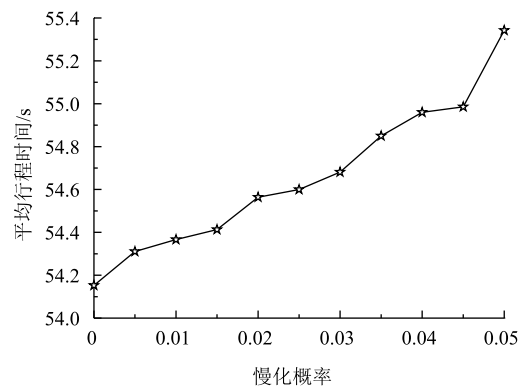


图4 减速概率对平均行程时间的影响(中雨)

Fig. 4 Influence of deceleration probability on average travel time (moderate rain)

如图 4 所示, 平均行程时间随着减速概率的增加而增加, 说明周围交通状况对车辆的速度和高速公路的通行效率有较大的影响。周围的交通状况越复杂, 车辆的平均速度越慢。

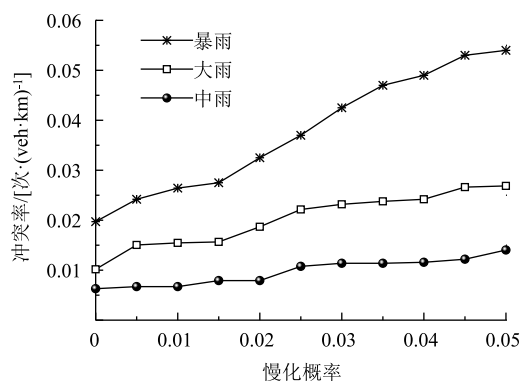


图5 减速概率对冲突率的影响

Fig. 5 Influence of deceleration probability on conflict rate

如图5所示,无论是暴雨、大雨还是中雨,冲突率都随着减速概率的增加而增加,总体呈现平稳上升的趋势,这是因为随着减速概率增加,车辆随机减速的可能性增加,导致后车不得不减速,从而产生交通冲突。同时,当减速概率一定时,冲突率随着雨量的增大而增大,因为随着雨量增大,车辆最大减速度变小,需要更长的安全距离,同样的间距更容易产生冲突,因此,冲突率随之增大。

2.3 流量对交通安全和通行效率的影响

假设小车最大车速分别为8, 11, 14 cell/s, 即约等于60, 80, 100 km/h, 大车的相应车速分别为小车车速的80%, 换道概率取0.2, 大车与小车比例为1:4, 随机减速概率取0.03, 车辆到达率从0 veh/h开始, 每次增加100 veh/h, 直到3 600 veh/h为止, 仿真结果如图6和图7所示。

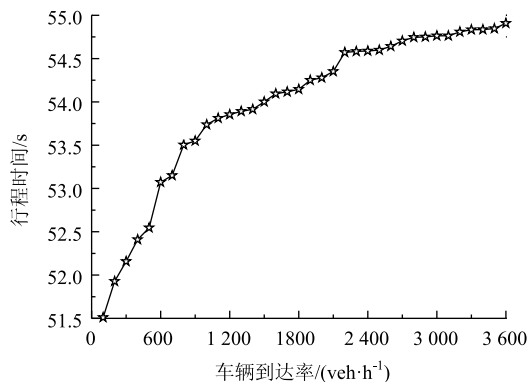


图6 车辆到达率与平均行程时间关系(中雨)

Fig. 6 Relationship between vehicle arrival rate and average travel time (moderate rain)

如图6所示,平均行程时间随着车辆到达率的增加而增加。高峰期间高速公路车辆较多,车辆之间的相互影响增强,平峰期间车辆较少,车辆之间的相互影响随之减弱。相互影响越大,平均车速越慢。

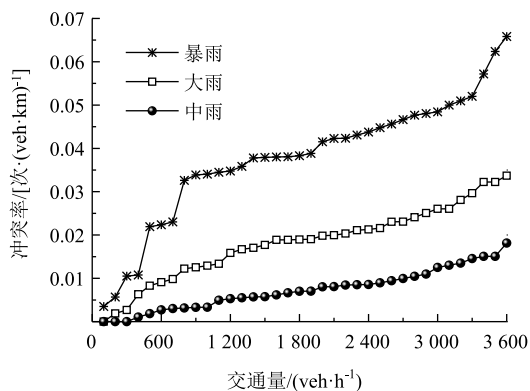


图7 不同降雨条件下的交通量与冲突率关系

Fig. 7 Relationships between traffic volume and conflict rate under different rainfall conditions

如图7所示,不同降雨情况下,冲突率随流量变化的趋势基本吻合,车流量与冲突率之间的关系规律性较为明显。通过分析,可以得到以下几点:

(1) 在低流量情况下,降雨因素对冲突率的影响较小。由于道路中车流量低,车辆之间的空隙较大,相互影响较小,能够满足安全跟驰距离,因而不同降雨情况下的冲突率相差较小。

(2) 随着流量的增加,降雨因素对冲突率的影响逐渐增强,具体表现为降雨量越大,冲突率越大,变化越明显。这是由于降雨量增大会使道路中水膜厚度变大,导致摩擦系数降低,从而需要更大的最小安全跟驰距离,致使发生冲突的概率增大。

(3) 在相同降雨量情况下,冲突率随着流量的增加而上升。暴雨时最为明显,大雨次之,中雨时变化最小。

2.4 换道概率对交通安全和通行效率的影响

假设小车最大车速为11 cell/s, 即80 km/h, 大车最大车速为9 cell/s, 即65 km/h, 车辆到达率为2 000 veh/h, 随机减速概率取0.03, 换道概率从0开始, 每次增加0.05, 直到0.5为止, 仿真结果如图8和图9所示。

高速公路上行驶的车辆具有不同的期望车速,有的车辆会选择趋向于按最高限速行驶,而在实际行驶路况中不一定能达到最高速度行驶,为了满足这个意愿,车辆会选择换道以达到最高限速行驶的目的。车辆换道会在一定程度上影响相邻车道后车的安全驾驶,因此换道行为是影响车辆正常行驶的一个重要因素。如图8所示,平均行程时间随着换道概率的增加而减小。显然,换道能够提高部分车辆的车速,从而提高道路整体的通行效率。

如图9所示,总体而言,随着车辆换道概率增

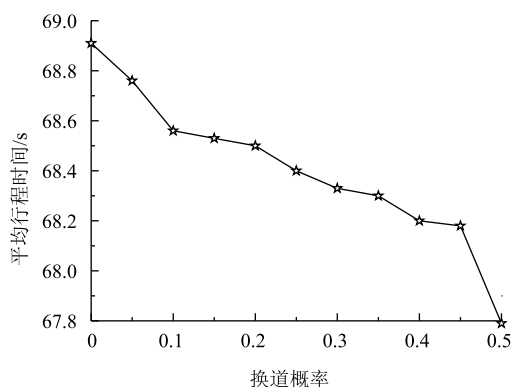


图8 换道概率与平均行程时间关系

Fig. 8 Relationship between lane changing probability and average travel time

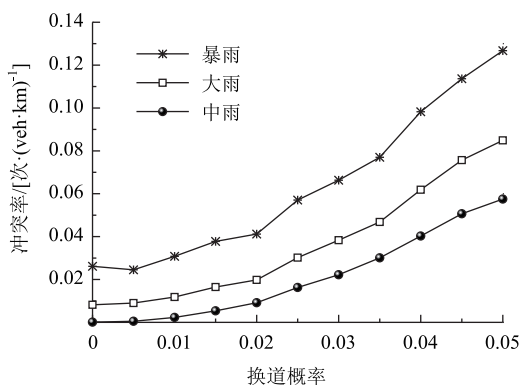


图9 不同降雨条件下的换道概率与冲突率关系

Fig. 9 Relationships between lane changing probability and conflict rate under different rainfall conditions

加,车辆的冲突率不断上升。这是因为驾驶员为满足以尽量快的速度行驶,会干扰相邻车道车辆的正常行驶,迫使相邻车道车辆不得不减速以保持安全行驶,从而造成相应的冲突。同时,在不同的天气条件下,冲突率随换道概率的变化趋势基本一致。

3 雨天高速公路建议限速值的仿真与分析

正常情况下的高速公路限速值是充分考虑道路性能、车辆机械性能、轮胎的承受能力、气候特点、驾驶员的生理特性等诸多因素综合考虑而制定的,既能保证驾驶安全,又能充分利用道路资源。当天气条件不允许设置该最高限速值时,需要适当降低限速值。为寻求合理的限速值,使得车辆行驶能够兼顾安全与效率,本研究通过仿真试验来分析不同降雨条件下限速值因素对交通安全和通行效率的影响。

假设高速公路长 1 000 m,车辆到达率为 2 000 veh/h,换道概率取 0.2,随机减速概率取 0.03,大车与小车比例为 1:4,小车最大车速从

6 cell/s (43.2 km/h) 开始,每次增加 1 cell/s,直到 16 cell/s (115.2 km/h),大车最大车速为小车车速的 0.8,每个车速仿真 10 次,每次仿真 10 000 步,结果取平均值,仿真结果如图 10 所示。

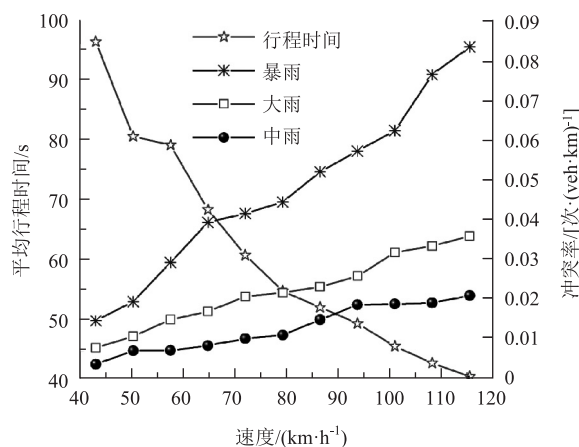


图10 限速值对冲突率与平均行程时间的影响

Fig. 10 Influence of limited speed value on conflict rate and average travel time

对比暴雨、大雨和中雨条件下不同限速值对应的平均行程时间和冲突率变化可以发现:

(1) 冲突率随着车辆行驶速度的增加而上升。以暴雨为例,当限速值为 43.2 km/h 时,冲突率为 0.015 次/(veh·km);当限速值为 115.2 km/h 时,冲突率增加至 0.833 次/(veh·km),增加了近 55 倍。

(2) 平均行程时间随着限速值的增加而下降。当限速值为 43.2 km/h 时,平均行程时间为 96.4 s,此时车辆平均行程车速为 37.4 km/h;当限速值为 115.2 km/h 时,平均行程时间为 40.6 s,此时车辆平均行程车速为 88.7 km/h。

(3) 行程车速的增加幅度小于最高限速的增加幅度。从最低到最高,限速值增加了 72 km/h,而车辆平均行程车速只增加了 51.3 km/h。

(4) 冲突率随着降雨强度的增加而上升。当限速值为 79.2 km/h 时,中雨条件下的冲突率为 0.011 次/(veh·km),大雨条件下的冲突率为 0.022 次/(veh·km),暴雨条件下的冲突率为 0.045 次/(veh·km)。

(5) 不同的降雨条件具有不同的最佳限速值。在暴雨条件下,随限速值变化的冲突率与平均行程时间在 66 km/h 时达到平衡,大雨情况下在 79 km/h 时达到平衡,中雨条件下在 90 km/h 时达到平衡。因此,综合考虑交通安全性与交通效率,结合《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》第 81 条的

规定,对于小型汽车,建议暴雨条件下取限速值为 60 km/h,大雨情况下取限速值为 80 km/h。

4 结 论

本研究综合考虑了降雨强度对水膜厚度及路面附着系数的影响,建立了随机慢化减速幅度随车速变化的混合交通流元胞自动机模型。选取交通冲突率和平均行程时间作为交通安全和通行效率的评价指标,分析了大小车比例、减速概率、车辆到达率、换道概率对高速公路交通安全和通行效率的影响,并寻求不同降雨条件下的高速公路最佳限速值。主要研究结论如下:

(1) 减少车辆到达率、缩小大车比例、降低减速概率、提高换道概率有助于缩短高速公路平均行程时间;减少车辆到达率、降低减速概率和换道概率、降低大小车混合程度有助于降低冲突率。

(2) 相同降雨条件下,平均行程时间随着限速值的增加而下降,冲突率随着车辆行驶速度的增加而上升,通过仿真可以得到最佳限速值,实现通行效率和交通安全的同步优化。

(3) 冲突率随着降雨强度的增加而上升,最佳限速值随着降雨强度的增加而下降。建议高速公路暴雨和大雨条件下小型车辆限速值分别取 60 km/h 和 80 km/h。

参考文献:

References:

- [1] 全国人大常委会. 中华人民共和国道路交通安全法实施条例(2017年修订) [M]. 北京: 中国法制出版社, 2017.
NPC Standing Committee. Regulations of People's Republic of China on Implementation of Road Traffic Safety Law (revised in 2017) [M]. Beijing: China Legal Publishing House, 2017.
- [2] ANDREY J, MILS B, VANDEMOLLEN J. A Temporal Analysis of Weather-related Collision Risk for Ottawa, Canada: 1990-1998 [C] // Proceedings of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2003.
- [3] QIU L, NIXON W A. Effects of Adverse Weather on Traffic Crashes: Systematic Review and Meta-Analysis [J]. Transportation Research Record, 2008, 2055: 139-146.
- [4] GAO K, TU H Z, SUN L J, et al. Impacts of Reduced Visibility under Hazy Weather Condition on Collision Risk and Car-following Behavior: Implications for Traffic Control and Management [J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2020, 14 (8): 635-642.
- [5] 施俊庆, 李志强, 李素兰, 等. 考虑双向交通的城市路网交通流元胞自动机模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17 (2): 90-96.
SHI Jun-qing, LI Zhi-qiang, LI Su-lan, et al. A Cellular Automaton Model of Urban Road Network Considering Bidirectional Traffic [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17 (2): 90-96.
- [6] 李素兰, 张谢东, 施俊庆, 等. 信号控制交叉口交通流建模与通行能力分析 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (12): 108-114.
LI Su-lan, ZHANG Xie-dong, SHI Jun-qing, et al. Traffic Flow Modeling and Capacity Analysis of Signalized Intersection [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (12): 108-114.
- [7] 庞明宝, 任泊宁. 高速公路弯道雨天可能交通事故的CA模型仿真 [J]. 中国安全科学学报, 2017, 27 (7): 24-29.
PANG Ming-bao, REN Bo-ning. Simulation of Possible Traffic Accident in Rainy Weather on Freeway Curve Using CA Model [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27 (7): 24-29.
- [8] 朱娜. 基于元胞自动机的城市快速路雨天交通流模型 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
ZHU Na. Study on Traffic Flow Model of Urban Expressway under Rain Weather Based on Cellular Automaton [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [9] PANG M B, REN B N. Effects of Rainy Weather on Traffic Accidents of a Freeway Using Cellular Automata Model [J]. Chinese Physics B, 2017, 26 (10): 519-530.
- [10] 刘展宏, 杨秀建, 吴相稷, 等. 基于元胞自动机的雾天车辆跟驰建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2021, 33 (10): 2399-2410.
LIU Zhan-hong, YANG Xiu-jian, WU Xiang-ji, et al. Modeling and Simulation of Car Following in Fog Based on Cellular Automata [J]. Journal of Systems Simulation, 2021, 33 (10): 2399-2410.
- [11] 黄磊. 基于元胞自动机模型的非间断交通流模拟 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
HUANG Lei. Simulation of Non-interrupted Traffic Flow Based on Cellular Automata Model [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.
- [12] 张甜甜. 雾霾天气下道路交通流特性研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.

(下转第 208 页)

- and Engineering Edition), 2013, 37 (3): 545-548.
- [16] 曹文娟. 考虑弹性需求交通分配的城市办公区单向交通组织优化研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
CAO Wen-juan. Study on One-way Traffic Organization in Urban Office Area Considering Elastic Demand Traffic Allocation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [17] 王玉, 申铨京, 周昱洲, 等. 一种求解交通网络中最短路径问题的人工蜂群算法 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2021, 59 (5): 1144-1150.
WANG Yu, SHEN Xuan-jing, ZHOU Yu-zhou, et al. An Artificial Bee Colony Algorithm for Solving the Shortest Path Problem in Traffic Network [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2021, 59 (5): 1144-1150.
- [18] LEBLANC L J, MORLOK E K, PIERSKALLA W P. An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem [J]. Transportation Research, 1975, 9 (5): 309-318.
- [19] NGUYEN S, DUPUIS C. An Efficient Method for Computing Traffic Equilibria in Networks with Asymmetric Transportation Costs [J]. Transportation Science, 1984, 18 (2): 99-204.
- [20] CHEN A, ZHOU Z, LAM W. Modeling Stochastic Perception Error in the Mean-excess Traffic Equilibrium Model [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45 (10): 1619-1640.

(上接第 200 页)

- ZHANG Tian-tian. Research on Characteristics of Road Traffic Flow under Hazy Weather [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [13] 郑莎莎. 基于 CAM 的雾雨天气下高速公路控制信号施加策略研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
ZHENG Sha-sha. Research on CAM-based Expressway Control Signal Imposition Strategy under Fog and Rain [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.
- [14] SHI J, TAN J H. Traffic Accident and Emission Reduction through Intermittent Release Measures for Heavy Fog Weather [J]. Modern Physics Letters B: Condensed Matter Physics, Statistical Physics, Applied Physics, 2015, 29 (25): 1550148.
- [15] 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 Tian-jian, HUANG Xiao-ming, LIU Qing-quan. Part Hydroplaning Effect on Pavement Friction Coefficient [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3 (4): 10-12.
- [16] CHOWDHURY D, WOLF D E, SCHRECKENBERG M. Particle Hopping Models for Two-lane Traffic with Two Kinds of Vehicles: Effects of Lane-changing Rules [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1997, 235 (3/4): 417-439.
- [17] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic [J]. Journal de Physique I, 1992, 2 (12): 2221-2229.
- [18] 卢国范. 恶劣天气条件下长营高速公路交通安全管理方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
LU Guo-fan. Study on Traffic Safety Management of Changchun-Yingchengzi Expressway under Adverse Weather Condition [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [19] 刘俊德. 灾害条件下高速公路行车安全管理技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
LIU Jun-de. Study on of Freeway Traffic Safety Management Technology under Disaster Condition [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [20] 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 Tian-jian, HUANG Xiao-ming, LIU Qing-quan, 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.