

雨雾天气下公路可变限速控制策略研究

张博宇, 闫茂德, 朱旭, 杨盼盼

(长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064)

摘要: 针对雨雾天气下公路交通事故上升与通行能力下降的问题, 综合考虑交通安全和通行效率两个因素, 提出一种雨雾天气下可变限速控制策略; 首先, 考虑雨雾天气下道路线形对车辆速度和道路通行能力的影响, 建立雨雾天气下动态交通流模型; 然后, 根据驾驶员可视距离、路面附着系数和道路曲线等因素确定雨雾天气下车辆最大安全速度; 最后, 采用自适应遗传算法对包含总行程时间和总行驶里程的目标函数进行求解, 得到雨雾天气下各路段的限速值; 仿真结果表明, 所提出的可变限速控制策略有效降低了雨雾天气下公路的行车风险, 并缓解了交通拥堵。

关键词: 雨雾天气; 可变限速控制; 动态交通流模型; 遗传算法

Variable Speed Limit Control Strategy for Highway Under Rainy and Foggy Weather

Zhang Boyu, Yan Maode, Zhu Xu, Yang Panpan

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The rainy and foggy weather causes the increasing traffic accident and decreasing traffic capacity. In this paper, a variable speed limit control strategy in rainy and foggy weather is proposed by taking the traffic safety and traffic efficiency into consideration. Firstly, considering the influence of road alignment on vehicle speed and road capacity in rainy and foggy weather, the dynamic traffic flow model is established. Then, the maximum safe speed is determined according to drivers' visual distance, road adhesion coefficient and road curve. Finally, adaptive genetic algorithm is used to solve the objective function including total travel time and total mileage, and the speed limit value of each section in rainy and foggy weather is obtained. The simulation results show that the proposed variable speed limit strategy can effectively reduce the traffic risk and traffic congestion in rainy and foggy weather.

Keywords: rainy and foggy weather; variable speed limit control strategy; dynamic traffic flow model; genetic algorithm

0 引言

雨雾天气增加了公路交通系统的运营压力。驾驶员在低能见度和湿滑路面上行车, 容易产生驾驶疲劳、驾驶行为失控等现象^[1], 在雨雾天气和道路线形多种因素的耦合作用下交通事故风险迅速上升^[2]。同时, 雨雾天气导致道路通行能力下降, 车辆密度增大, 容易发生交通阻塞和车辆排队, 降低了公路交通系统的运行效率^[3]。因而, 如何在雨雾天气下保证车辆安全高效的运行, 是公路运营中面临的重要问题。

限速控制是保障车辆在雨雾天气下安全行驶的重要措施, 国内外学者针对雨雾天气下的限速策略进行了大量研究。Theofilatos^[4]依据采集的实时交通和气象数据, 通过贝叶斯回归模型研究了不良天气和交通事故发生概率之间的关系。张驰^[5]根据驾驶员在不同能见度水平和曲线半径的驾驶行为特征, 确定了雾天不同能见度下的限速值。Bell-

ni^[6]通过研究速度和限速标志位置对驾驶行为的影响, 给出了确定限速值的方法。杨成里^[7]考虑了复杂道路条件和雾冰不良气候因素, 对高速公路限速路段进行划分并给出了相应的限速值。Yao^[8]研究了道路布局、道路环境和驾驶员的危险感知等因素对限速值可信度的影响。然而, 上述限速策略本质上属于静态限速策略, 限速值无法根据雨雾天气状况与交通流特征动态调整, 容易导致道路运行效率下降过度, 甚至引发道路拥堵。

可变限速控制是解决上述问题的可行途径, 其基本思想是根据交通流运行状态动态更新限速值, 以达到提升运行效率、缓解交通拥堵的目的^[9]。张珊^[10]通过分析雾天交通流特性, 建立了雾天交通流模型, 并提出了雾天可变限速控制策略。陈永恒^[11]通过研究冰雪条件下交通流特性, 提出一种基于Q学习算法的可变限速控制策略。Xu^[12]通过研究可变限速标志的安装位置, 降低了交通瓶颈出现的概率。Zhao^[9]在雾天车辆网环境下应用可变限速控制策略,

收稿日期: 2020-07-31; 修回日期: 2020-08-31。

基金项目: 国家自然科学基金(61803040); 中国博士后科学基金(2018M643556); 陕西省重点研发计划(2020GY-113, 2019GY-218); 中央高校基本科研业务费(300102328403, 300102320203)。

作者简介: 张博宇(1995-), 男, 河北辛集人, 硕士研究生, 主要从事公路可变限速系统方向的研究。

通讯作者: 闫茂德(1974-), 男, 陕西澄城人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能交通系统方向的研究。

引用格式: 张博宇, 闫茂德, 朱旭, 等. 雨雾天气下公路可变限速控制策略研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 135-139.

减小了车速变化幅度,降低交通事故风险。但是,上述研究中,未综合考虑雨雾天气和道路条件,限速因素较为单一,难以满足雨雾天气下公路安全行车实际需求。

有鉴于此,本文综合考虑雨雾天气状况,道路线形与坡度因素,研究雨雾天气下公路可变限速控制策略。首先,考虑雨雾天气,道路线形与坡度因素,对传统的元胞传输模型进行改进,并建立雨雾天气下公路动态交通流模型。继而,基于驾驶员可视距离、路面附着系数和道路曲线等因素确定雨雾天气下最大安全车速。在此基础上,采用自适应遗传算法对限速模型进行求解,得到雨雾天下各路段的限速值。仿真结果验证了所提方法的可行性和有效性。

1 基于改进元胞传输模型的雨雾天气公路交通流建模

目前,公路交通流多使用元胞传输模型进行描述^[13]。然而,传统的元胞传输模型未考虑雨雾天气下可变限速对路段内车流速度和通行能力的影响,且多局限于直线道路,较少考虑上下坡和弯道。因此,需要对传统的元胞传输模型进行改进,建立雨雾天气下更加精确的公路动态交通流模型。

首先,根据降雨强度和能见度,引入气象调整参数 α ,对雨雾天气下的车流速度和道路通行能力进行修正:

$$\alpha = a_1 + a_2 r + a_3 r^2 + a_4 d + a_5 d^2 + a_6 rd \quad (1)$$

其中: r 为降雨强度, d 为能见度, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 为权重系数,可以依据实际的降雨强度和能见度数据进行标定。

其次,考虑上下坡和弯道对道路车流速度影响,引入车流速度修正系数 β 对公路的车流速度进行修正:

$$\beta = \frac{v_{ramCur,i}}{v_{horStr,i}} \quad (2)$$

其中; $v_{horStr,i}$ 水平直线道路处车流速度, $v_{ramCur,i}$ 为上下坡和不同弯道上车流速度预测值^[14]:

$$v_{ramCur,i} = 108.63 - \frac{4257}{R_i} - \frac{444.57s_i}{L_i} \quad (3)$$

式中,下标 i 表示第 i 个元胞, R_i 为道路的曲线半径, s_i 为坡度, L_i 为路段长度。

再者,考虑上下坡和弯道对道路通行能力的影响,引入通行能力折减系数 γ 对道路的通行能力进行修正^[15]。如表 1 所示。

表 1 不同弯道和坡道下路段通行能力折减系数

曲度(°/km)	0	45	135	270
坡度(%)				
0	1	0.9	0.8	0.77
2	0.8	0.73	0.7	0.67
4	0.73	0.7	0.67	0.63
6	0.7	0.67	0.63	0.6

注:曲度为道路每千米弯道转角大小。

最后,将气象调整参数、车流速度修正系数、通行能力折减系数引入传统的元胞传输模型,得到第 i 个元胞内的

车流速度 $v_{c,i}$ 和通行能力 $Q_{c,i}$:

$$\begin{cases} v_{c,i} = \alpha \cdot \beta \cdot v_{isl,i} \\ Q_{c,i} = \alpha \cdot \gamma \cdot Q_i \end{cases} \quad (4)$$

其中: $v_{isl,i}$ 为元胞 i 内的限速值, Q_i 为第 i 个元胞内天气良好时水平直线道路的通行能力。

根据式(4),结合交通流流量守恒规律,可以模拟雨雾天气下交通流运行状态。每个元胞中的交通流参数更新步骤如下:

1) 车流量:上游元胞向相邻的下游元胞传递车流量, k 时刻第 i 个元胞向下游第 $i+1$ 个元胞传递的车流量 $q_i(k)$ 为:

$$q_i(k) = \min \left\{ n_i(k), Q_{c,i}, \frac{\omega_{i+1}}{v_{c,i+1}} (N_{i+1} - n_{i+1}(k)) \right\} \quad (5)$$

其中: $n_i(k)$ 为 k 时刻第 i 个元胞内的车辆数, N_{i+1} 为第 $i+1$ 个元胞内可容纳的最大车辆数, ω_{i+1} 为第 $i+1$ 个元胞内的交通波传播速度。

2) 车流密度:根据元胞间传递的车流量,更新 k 时刻第 i 个元胞内车流密度 $\rho_i(k)$:

$$\rho_i(k) = \rho_i(k-1) + \frac{\Delta T}{L_i \lambda_i} \{ q_{i-1}(k-1) - q_i(k-1) \} \quad (6)$$

其中, ΔT 为时间间隔长度, L_i 为第 i 个元胞的长度(单位 km), λ_i 为第 i 个元胞内的车道数。

3) 车流速度:根据第 i 个元胞内车流密度 $\rho_i(k)$,确定其车流速度 $v_i(k)$:

$$v_i(k) = \begin{cases} v_{c,i}, & \rho_i(k) \leq \rho_{cri,i} \\ \omega_i \left(\frac{\rho_{jam,i}}{\rho_i(k)} - 1 \right), & \rho_{cri,i} < \rho_i(k) \leq \rho_{jam,i} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\rho_{cri,i}$ 为第 i 个元胞的临界密度, $\rho_{jam,i}$ 为第 i 个元胞的阻塞密度。

2 基于自适应遗传算法的雨雾天气下公路可变限速控制策略

为了保障雨雾天气下公路的运营能力,提高服务水平,需要综合考虑气象信息、交通流运行状态和道路条件等因素对车辆进行可变限速控制。可变限速控制策略应遵循以下基本原则:

1) 在保证交通安全的前提下,提高车流速度,提高交通运行效率。

2) 同一控制周期内相邻路段限速值之差和同一路段相邻控制周期内限速值之差不能过大。

3) 限速值需为控制效果最优值。

基于以上原则,确立可变限速控制策略的目标函数与约束条件,并给出基于自适应遗传算法的限速值计算方法。

2.1 可变限速控制策略目标函数与约束条件

1) 目标函数:

可变限速控制策略旨在缓解雨雾天气造成的交通拥堵,减小出行时间,提高公路运行效率。因此,所建立的目标函数中,包含总行程时间和总行驶里程两个指标,期望达到较小的总行程时间与较大的总行驶里程。综合二者,制

定如下目标函数:

$$J = \Delta T \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M L_i \lambda_i \{ \alpha_{TTT} \rho_i(k) - \alpha_{TTD} \rho_i(k) v_i(k) \} \quad (8)$$

其中: M 为路段数, N 为控制周期的数量, α_{TTT} 为总行程时间系数, α_{TTD} 为总行驶里程系数。

2) 约束条件:

约束条件包括最大限速值和限速值变化幅度两个条件。其中, 最大限速值可保障车辆在安全速度下行驶; 限速值变化幅度可防止限速值变化幅度太大而致使驾驶员产生紧张与不适感, 避免发生交通事故。

(1) 最大限速值:

最大限速值是某一路段的限速值 $v_{isl,i}$ 不得高于该路段雨雾天气下车辆最大安全速度 $v_{max,i}$:

$$v_{isl,i} \leq v_{max,i} \quad (9)$$

雨雾天气下车辆最大安全速度 $v_{max,i}$ 为雨雾天气状况所能够提供的最大安全车速 $v_{weaMax,i}$ 和道路线形条件所能够提供的最大安全车速 $v_{curMax,i}$ 中较小者:

$$v_{max,i} = \min\{v_{weaMax,i}, v_{curMax,i}\} \quad (10)$$

①雨雾天气下最大安全车速:

雨雾天气状况所能够提供的最大安全车速 $v_{weaMax,i}$ 由驾驶员可视距离 S_i 、路面附着系数 μ_i 等因素决定。雨雾天气下, 驾驶员动视力 $I_{mob,i}$ 会受到车辆速度 v_i 的影响:

$$I_{mob,i} = I_{sta,i} \times 1.079 \times e^{-4.336 \times 10^{-3} v_i} \quad (11)$$

其中: $I_{sta,i}$ 为驾驶员静视力。

同时, 驾驶员的可视距离 S_i 由驾驶员动视力 $I_{mob,i}$ 和能见度 d_i 决定:

$$S_i = I_{mob,i} \times d_i \quad (12)$$

路面附着系数 μ_i 由车辆速度 v_i 和水膜厚度 H_i 决定:

$$\mu_i = 0.9458 - 0.0057 v_i - 0.0118 H_i \quad (13)$$

在此, 采用停车视距模型^[16]计算雨雾天气下最大安全车速 $v_{weaMax,i}$:

$$S_i = \frac{v_{weaMax,i} t}{3.6} + \frac{\left(\frac{v_{weaMax,i}}{3.6}\right)^2}{2\mu_i \cdot g} + D \quad (14)$$

其中: t 为驾驶员反应时间 (取 2.5 s), D 为停车后需与前车保持的安全距离 (单位 m), g 为重力加速度。

②弯道上最大安全车速:

在弯道上, 横向力系数 θ_i 受车辆速度 v_i 影响:

$$\theta_i = 0.1165 - 0.0004 v_i \quad (15)$$

弯道上最大安全车速 $v_{curMax,i}$ 由曲线半径 R_i 和横向力系数 θ_i 决定:

$$v_{curMax,i}^2 = 127 R_i (\theta_i + \varphi_i) \quad (16)$$

其中: θ_i 为横向力系数, φ_i 为超高横坡度, 即设置超高路段的横坡度。

(2) 限速值变化幅度:

限速值变化幅度包括两种, 一是同一控制周期内, 相邻路段之间限速值之差小于 20 km/h; 二是同一路段相邻控制周期内, 限速值之差小于 20 km/h。据此, 建立关于限速

值变化幅度的约束条件:

$$\begin{cases} |v_{isl,i}(k) - v_{isl,i+1}(k)| < 20 \\ |v_{isl,i}(k) - v_{isl,i}(k+1)| < 20 \end{cases} \quad (17)$$

2.2 基于自适应遗传算法的限速值计算方法

本节采用自适应遗传算法对目标函数进行求解, 以得到各个路段的限速值。传统遗传算法迭代次数多、搜索速度慢, 无法根据气象和交通流的动态特性及时更新限速值, 而自适应遗传算法通过可变的交叉算子和变异算子, 加快收敛速度, 可有效保证限速值的实时性。因此, 选择自适应遗传算法对雨雾天气下可变限速控制的限速值进行求解。

基于自适应遗传算法的限速值计算过程如下:

1) 初始化种群: 随机生成 n 个限速值作为初始种群, 并对每个限速值进行编码。

2) 选择: 根据各限速值的适应度, 确定其被选择的概率。某一路段上各代限速值中第 j 个限速值被选择的概率 $P_s(v_{isl,i}^j)$ 为:

$$P_s(v_{isl,i}^j) = \frac{f(v_{isl,i}^j)}{\sum_{j=1}^n f(v_{isl,i}^j)} \quad (18)$$

其中: $f(v_{isl,i}^j)$ 为第 i 路段上第 j 个限速值的适应度。

3) 交叉和变异: 通过使用交叉算子 $P_c(v_{isl,i}^j)$ 和变异算子 $P_m(v_{isl,i}^j)$ 改变父代限速值染色体基因信息, 产生子代限速值:

$$P_c(v_{isl,i}^j) = \begin{cases} c_1, & f(v_{isl,i}^j) < f_{avg} \\ \frac{c_2(f_{max} - f(v_{isl,i}^j))}{f_{max} - f_{avg}}, & f(v_{isl,i}^j) \geq f_{avg} \end{cases} \quad (19)$$

$$P_m(v_{isl,i}^j) = \begin{cases} c_3, & f(v_{isl,i}^j) < f_{avg} \\ \frac{c_4(f_{max} - f(v_{isl,i}^j))}{f_{max} - f_{avg}}, & f(v_{isl,i}^j) \geq f_{avg} \end{cases} \quad (20)$$

其中: c_1, c_2, c_3, c_4 为常数, f_{max} 为最大适应度, f_{avg} 为平均适应度。

4) 产生新的种群: 初始种群中的限速值经过选择、交叉和变异之后, 产生新的种群。将新的种群进行下一次迭代计算, 直至生成适应度达到要求的种群。

3 实验结果与分析

以一条长 20 km 双车道单向公路为研究对象 (如图 1 所示), 对本文所提出的可变限速控制策略进行仿真验证。将公路划分为 5 个路段, 每个路段长度为 4 km。根据车辆行驶方向, 各路段编号依次为 1, 2, 3, 4, 5。其中, 第 5 个路段坡度为 4%, 曲度为 45°/km。各路段的临界密度为 20 辆/km, 阻塞密度为 110 辆/km, 可容纳的最大车辆数为 880 辆。可变限速控制周期为 10 min, 仿真时长为 90 min。

各路段内的初始时刻车流密度和车流速度分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 各路段初始时刻车流密度 辆/km

路段	1	2	3	4	5
车流密度	20	25	18	23	30

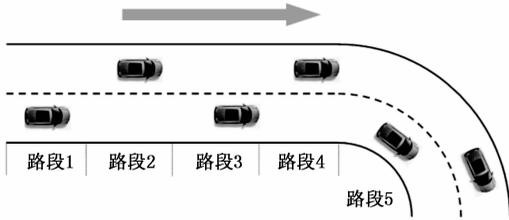


图 1 双车道单向公路

表 3 各路段初始时刻车速速度 km/h

路段	1	2	3	4	5
车速速度	105	110	108	100	98

各路段不同时间段内的降雨强度和能见度，如表 4 和表 5 所示。

表 4 各路段不同时段降雨强度 mm/h

路段 \ 时间 (min)	1	2	3	4	5
0~20	0	0	0.5	0.5	0.5
20~40	0	0	0.5	0.5	1
40~60	0	0.5	0.5	1	1.5
60~80	0.5	0.5	1	0.5	2
80~90	0	0	0	0.5	0.5

表 5 各路段不同时段能见度 m

路段 \ 时间 (min)	1	2	3	4	5
0~20	500	500	300	300	300
20~40	500	500	300	300	250
40~60	500	300	300	250	200
60~80	300	300	250	300	100
80~90	500	500	500	300	300

基于本文提出的可变限速控制策略，在上述场景下开展仿真实验研究，实验结果如下：

表 6 可变限速控制下各路段不同时段限速值 km/h

路段 \ 时间 (min)	1	2	3	4	5
0~10	90	90	80	75	70
10~20	90	80	80	75	70
20~30	80	80	80	70	65
30~40	80	80	70	70	65
40~50	90	75	75	65	60
50~60	80	75	70	65	60
60~70	70	70	60	70	50
70~80	75	70	70	70	50
80~90	90	90	80	75	70

表 6 为采取雨雾天气下公路可变限速控制策略时各路段不同时刻限速值。可见，由于不同路段不同时刻的天气状况不同，导致不同路段同一时刻的限速值不同，同一路段不同时刻的限速值也不相同，并且路段 5 的限速值低于

其它路段。可见，雨雾天气下公路可变限速控制策略可以依据实时天气信息调整限速值，并且针对道路条件复杂的路段会设置更低的限速值。

图 2 和图 3 是采取雨雾天气下公路可变限速控制策略时各路段车流速度和车流密度。可见，各路段内车辆以平稳速度运行，车辆密度平缓。路段 5 受道路条件的影响，车流速度低于其它路段，车辆密度也大于其它路段。结果表明，雨雾天气下公路可变限速控制策略，可以保证车辆平稳运行和出行效率。

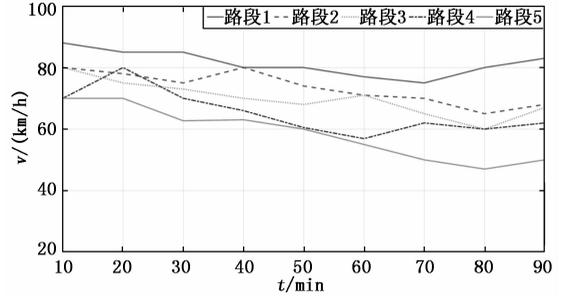


图 2 策略 1 控制下车流速度

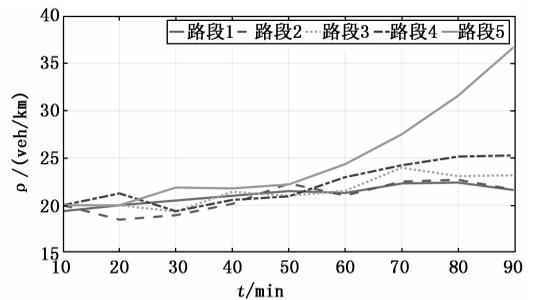


图 3 策略 1 控制下车流密度

为进一步验证本文所提方法的优越性，分别采取雨雾天气下公路可变限速控制策略（策略 1），不考虑道路线形的可变限速控制策略（策略 2）和静态限速控制策略（策略 3）3 种方案对公路进行限速研究，实验对比结果如图 4。

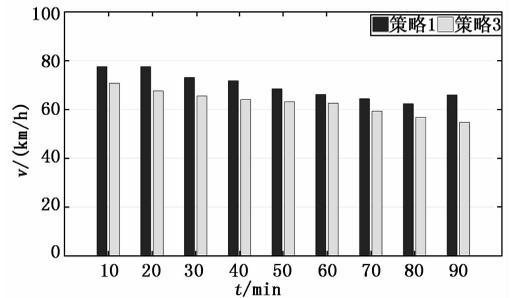


图 4 策略 1 和策略 3 下车流速度对比

图 4 是在策略 1 和策略 3 控制下各时间段道路车流速度对比。可见，采取策略 1 时平均车流速度（70.1 km/h）与采取策略 3 时平均车流速度（62.7 km/h）相比，平均车流速度提高了 11.8%。因此，雨雾天气下公路可变限速控制策略在保证行车安全性的前提下，可以有效增加车流速度，提升道路运行效率。

图 5 是在策略 1 和策略 3 下各时间段道路车流密度对比。

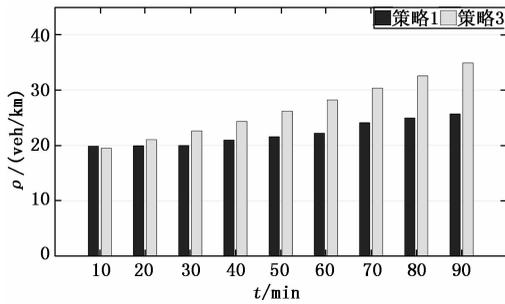


图5 策略1和策略3下车流密度对比

采取策略1时平均车流密度为22.1辆/km。采取策略3时平均车流密度为26.7辆/km。可见,采取策略1时平均车流密度降低了17.2%,因此本文所提的雨雾天气下公路可变限速控制策略,可以有效降低车流密度,缓解交通拥堵。

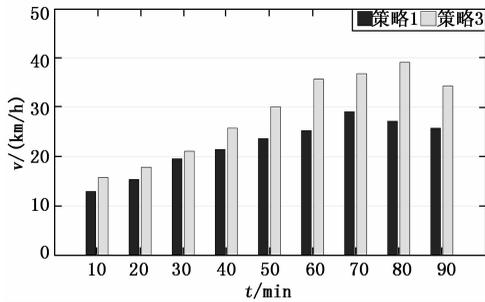


图6 策略1和策略3下最大车速差对比

图6为在策略1和策略3控制下相邻路段最大车速差对比。采取策略1时平均车速差为22.3 km/h,采取策略3时平均车速差为28.8 km/h。采取策略1时平均车速差减小22.6%。因此,雨雾天气下公路可变限速控制策略可以减小车速离散度,保证交通安全。

与不考虑道路线形的可变限速控制策略(策略2)进行对比研究,仿真结果如图7所示。

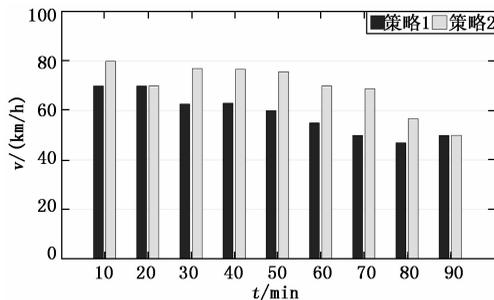


图7 策略1和策略2下路段5车流速度对比

从图7中可以看出,采取策略1时路段5的平均车流速度(58.6 km/h)与采取策略2时路段5的平均车流速度(69.4 km/h)相比,路段5内平均车流速度降低了15.6%。因此,本文所提出的雨雾天气下公路可变限速控制策略,可以保证车辆在弯坡路段以更低的速度行驶,提高了交通安全。

4 结束语

针对雨雾天气下公路的可变限速控制问题,考虑雨雾天气、弯道和上下坡因素对交通流运行状态的影响,对车

流速度和通行能力进行修正,建立了雨雾天气下动态交通流模型。综合考虑气象信息、交通流运行状态和道路条件提出雨雾天气下公路可变限速控制策略,建立了提高公路运行效率的目标函数和保证交通安全的约束条件。采用自适应遗传算法对目标函数进行求解,得到各路段的限速值。实验结果验证了所提方法的有效性。

参考文献:

- [1] Chen C, Zhao X, Liu H, et al. Influence of adverse weather on drivers' perceived risk during car following based on driving simulations [J]. Journal of Modern Transportation, 2019, 27 (4): 282-292.
- [2] 温惠英, 薛刚. 山区公路交通事故多要素风险综合分析方法: 以山区雨雾天气为例 [J]. 中国安全科学学报, 2019, 29 (9): 161-167.
- [3] 杨文臣, 李立, 胡澄宇, 等. 不利天气对公路交通安全及交通流的影响研究综述 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2019, 43 (5): 843-849.
- [4] Theofilatos, Athanasios. Incorporating real-time traffic and weather data to explore road accident likelihood and severity in urban arterials [J]. Journal of Safety Research, 2017, 61: 9-21
- [5] 张驰, 贺亚龙, 黄星, 等. 雾天不同能见度条件下高速公路限速建议值研究 [J]. 交通信息与安全, 2018, 36 (5): 25-33.
- [6] Bellini D, Iaconis M C, Traettino E. Speed limits and road warning signs as aid for driving behavior [J]. Transportation Research Procedia, 2020, 45: 135-142.
- [7] 杨成里. 山区雾冰不良气候下高速公路行车安全保障技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [8] Yao Y, Carsten O, Hibberd D. An empirical approach to determining speed limit credibility [J]. Transportation Research Part F, 2019, 63: 270-282.
- [9] Zhao X, Xu W, Ma J, et al. Effects of connected vehicle-based variable speed limit under different foggy conditions based on simulated driving [J]. Accident Analysis and Prevention, 2019, 128: 206-216.
- [10] 张珊, 张存保, 李薇. 雾天环境下高速公路可变限速控制方法研究 [J]. 吉林大学学报, 2018, 36 (2): 47-53.
- [11] 陈永恒, 刘鑫山, 熊帅, 等. 冰雪条件下快速路汇流区可变限速控制 [J]. 交通信息与安全, 2018, 48 (3): 677-687.
- [12] Xu C C, Li Z B, Pu Z Y, et al. Procedure for determining the deployment locations of variable speed limit signs to reduce crash risks at freeway recurrent bottlenecks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 47856-47863.
- [13] 孙剑, 殷炬元, 黎淘宁. 快速路入口匝道瓶颈宏观交通流模型 [J]. 交通运输工程学报, 2019, 19 (3): 122-133.
- [14] 白铭韬. 基于线形条件的高速公路运行速度预测及控制研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [15] 余凯. 不利条件下高速公路动态限速方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [16] 朱云升, 王世立, 龚娟, 等. 凝冰路面弯道路段停车视距计算方法 [J]. 安全与环境学报, 2019 (3): 766-773.