

冰雪天气下高速公路可变限速控制研究

孙浩然, 刘明浩, 姜志伟, 杨盼盼

(长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064)

摘要: 为保障冰雪天气条件下高速公路的行车安全与通行效率, 在建立安全限速模型与交通流预测模型的基础上, 提出一种基于粒子群优化算法的可变限速控制策略; 首先, 通过分析冰雪天气下车辆制动性能和交通流演化规律, 提出适用于冰雪天气条件的高速公路安全限速模型以及交通流预测模型; 其次, 设计了兼顾通行效率与行车安全的优化目标函数, 并考虑实际行车需求给出相关约束条件; 最后, 基于交通流预测模型并结合粒子群优化算法对可变限速值进行求解, 并通过搭建的元胞自动机交通流模型将所提出的可变限速策略的控制效果与固定限速方案和分段安全限速方案进行对比仿真实验; 仿真结果表明, 相比于固定限速方案, 可变限速控制减少了总行程时间、总行程延误时间和车辆冲突时间; 相比于分段安全限速方案, 可变限速控制有效减小了管控路段内的车辆行驶速度标准差, 总行程延误时间和车辆冲突暴露时间也有所降低, 验证了所提出可变限速控制策略的有效性。

关键词: 智能交通; 可变限速控制; 粒子群优化; 冰雪天气; 交通流预测模型

Variable Speed Limit Control of Expressway Under Snow and Ice Weather

SUN Haoran, LIU MingHao, JIANG Zhiwei, YANG Panpan

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

Abstract: In order to availablely guarantee the driving safety and efficiency of expressway under snow and ice weather, a variable speed limit control strategy based on particle swarm optimization algorithm was proposed on the basis of the safety speed limit model and traffic flow prediction model. Firstly, by analyzing the vehicle braking performance and traffic flow evolution law under snow and ice weather, the highway safety speed limit model and traffic flow prediction model suitable for snow and ice weather were proposed. Secondly, the optimization objective function of traffic efficiency and traffic safety was designed, and the constraint conditions were given considering the actual traffic demand. Finally, based on the traffic flow prediction model and particle swarm optimization algorithm, the variable speed limit value was solved, and the cellular automata traffic flow model was used to compare the control effect of the proposed variable speed limit strategy with the fixed speed limit strategy and the segmented safety speed limit strategy. The simulation results show that compared with the fixed speed limiting strategy, the variable speed limiting control method can reduce the total time spend, total time delay and exposed time to collision. Compared with the segmented safety speed limiting strategy, the variable speed limiting control method can effectively reduce the standard deviation of vehicle speed in the controlled section, and the total time delay and exposed time to collision are also reduced, which validates the effectiveness of the proposed variable speed limiting control strategy.

Keywords: intelligent transportation; variable speed limit control; particle swarm optimization; snow and ice weather; traffic flow prediction model

0 引言

在冰雪天气下, 高速公路道路环境、路面状态和车辆性能均会发生一定程度的变化, 驾驶人的视线、情绪受到负面干扰, 车辆制动性能受限, 发生交通事故的几率增大^[1-2], 如何保障冰雪天气下的行车安全, 是高速公路运营管理部门面临的一项重要挑战。

限速控制是冰雪天气下保障高速公路行车安全的常用措

施。传统限速方法限速值确定后一般不会改变, 属于静态限速方法^[3]。然而, 高速公路是一个由人、车、路和环境组成的复杂动态系统, 传统静态限速方法无法在变化的道路交通环境下保障管控措施的持续适用, 有一定的局限性^[4]。灵活可变的限速值能够使驾驶员行驶速度始终保持在当前道路交通环境下的安全范围内, 从而提升冰雪天气下高速公路行车安全性^[5]。

为满足冰雪天气下高速公路安全行车需求, 研究人员对

收稿日期: 2022-09-01; 修回日期: 2022-10-05。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA1000303); 陕西省重点研发计划(2022GY-255); 中央高校基本科研业务费资助项目(300102320203)。

作者简介: 孙浩然(1997-), 男, 四川攀枝花人, 硕士研究生, 主要从事可变限速控制策略方向的研究。

通讯作者: 杨盼盼(1985-), 男, 河北石家庄人, 博士, 副教授, 主要从事智能交通系统方向的研究。

引用格式: 孙浩然, 刘明浩, 姜志伟, 等. 冰雪天气下高速公路可变限速控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 117-123.

可变限速管控策略进行了持续探索。Chen 等^[6]通过模拟不同天气条件下的跟车场景,对不同天气条件和道路类型下的驾驶员感知能力进行了定量评估。马超等^[7]对包括冰雪天气在内的不同恶劣天气类型与等级条件下的安全行车车速给出建议值,建立了恶劣天气条件下高速公路安全限速评估体系。姚冬冬等^[8]建立了考虑道路线型和路面摩擦系数的安全限速模型,并提出了一种冰雪条件下基于模糊控制的高速公路可变限速策略。Guo 等^[9]分析了恶劣天气因素和道路线型与坡道通行能力折减对通行的影响,提出恶劣天气下的可变限速控制策略。

然而,目前恶劣天气下高速可变限速的研究多集中在通过限速值的选取保障交通安全上,而针对冰雪天气条件下限速管控的同时有效保障通行效率的研究相对较少^[10]。鉴于此,本文研究冰雪天气下兼顾行车安全与通行效率的高速公路可变限速策略。从冰雪天气高速公路交通特性出发,分析冰雪天气条件下的安全限速模型,探索一种根据冰雪天气变化进行动态路况预测的可变限速控制方法,以改善冰雪天气对高速公路行车效率与安全造成的负面影响。最后通过对比仿真实验,验证了所提出方法的有效性。

1 冰雪天气高速公路可变限速模型

1.1 冰雪天气高速公路可变限速控制原理

高速公路作为一个复杂的动态系统,交通流各参数及其之间的关系会随着交通流演变以及路况环境的改变发生变化,可变限速控制通过对交通流运行状态进行人工干预,使高速公路交通流保持在较为稳定的运行状态,实现交通安全与效率的均衡。本文将宏观交通流预测应用于限速策略的反馈调节,整体管控流程如图 1 所示。

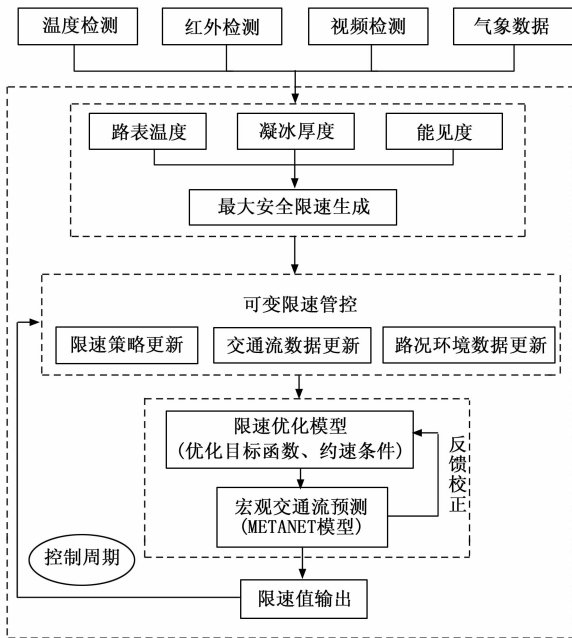


图 1 冰雪天气下高速路可变限速管控流程图

从图 1 可以看出,冰雪天气下高速路可变限速管控流程

为:每个控制周期内,通过检测器对交通流数据和气象数据以及路况信息进行采集并进行最大安全限速值更新;以交通流当前时刻运行状态作为输入,结合交通流预测模型与优化算法对控制目标函数进行求解,得出相应的限速策略,通过宏观交通流预测模型对限速调控效果进行反馈校正,最终得出合理可行的限速策略作用于系统。随着时间的推移,周期性地重复上述过程。

1.2 冰雪天气基于停车视距的安全限速模型

为保障冰雪天气下管控路段的行车安全,首先应保证停车视距满足要求。车辆的停车视距指从驾驶员发现前方障碍物开始,做出制动动作,使车辆从初始车速逐渐减速直至完全停止时所行驶的距离。本文将制动减速度作为关键参数,从车辆运动学角度构建停车视距计算模型,使停车视距计算更加合理。车辆的制动过程分析如图 2 所示。

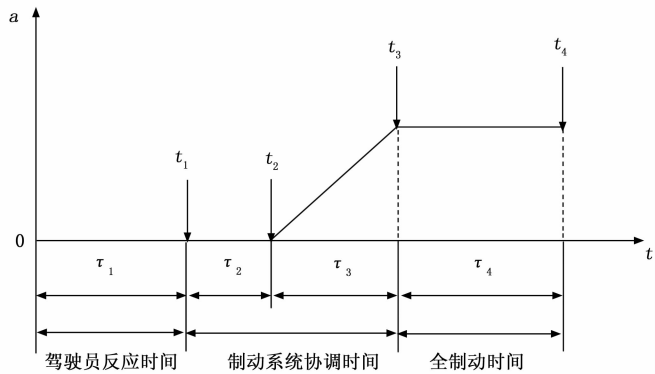


图 2 车辆制动过程分析图

整个过程分为驾驶员反应时间、制动系统协调时间以及全制动时间 3 个阶段,首先,当前方紧急情况,驾驶员经过视觉感知、危险识别以及判断决策进行制动操作,此为驾驶员反应阶段;受车辆制动结构以及驾驶人踏板速度影响,因此经制动系统响应后才会形成地面制动力,制动减速度逐渐由零增加至最大值,此为制动系统协调阶段;此后制动减速度保持最大值不变,直至车辆完全停止,此为全制动阶段。

将制动力提升阶段近似视作线性变化过程^[11],可得车辆制动过程的最小停车视距计算公式如下:

$$S_{min} = V_0(t_1 + t_2) + \frac{V_0^2}{2a_{max}} + \frac{V_1 t_3}{2} - \frac{a_{max}^2 t_3^2}{24} \quad (1)$$

式中, V_0 为车辆的初始速度; τ_1 为驾驶员反应时间; V 为制动力提升阶段任意时刻 t 的车辆速度; τ_2 为制动系统协调响应所需时间, τ_3 为制动力提升至最大值所需时间; a_{max} 为车辆所能达到的最大制动减速度; V_1 为车辆刚达到最大减速度 a_{max} 时的行驶速度。

考虑到冰雪天气的环境复杂性以及路况的不确定性,取最小安全距离 $L_s = 10 \text{ m}$ ^[12],构建冰雪天气下车辆安全停车视距模型:

$$S_{safe} = S_{min} + L_s =$$

$$\frac{V_0(\tau_1 + \tau_2)}{3.6} + \frac{V_0^2}{25.92a_{\max}} + \frac{V_0\tau_3}{7.2} - \frac{a_{\max}^2\tau_3^2}{24} + 10 \quad (2)$$

通常, 车辆最大减速度 a_{\max} 与路面摩擦系数有直接关系^[13]。冰雪路面是冰雪天气对行车安全造成影响的最主要因素。在冰雪路面条件下, 由于路面覆盖有积雪结冰层, 车轮无法像正常天气下与路面形成良好接触, 路面附着系数会减小, 车辆制动性能受到制约。文献[14]在封闭车道环境下对典型沥青混凝土路面处于不同的冰层厚度以及不同的冰层表面温度条件下进行路面附着系数测定, 并通过非线性回归分析对两参数与附着系数的定量关系进行拟合, 得出冰雪天气下路面摩擦系数与冰层表面温度和冰层表面厚度的关系:

$$\varphi = [(0.006\ 1 - 0.003\ 4\ h)T + 0.042\ 1\ h^{-0.751}]N + [(0.014\ 4\ T + 0.061\ 3)h - 0.008\ 7 + 0.494\ 2]C_e \quad (3)$$

式中, T 为冰层表面温度; h 为冰层厚度; N 为实验测量周期次数; C_e 为环境因素折算系数。

注: 实际中, 对车辆的制动过程视作产生一次相对摩擦, 取 $N = 1$; 取折算因子 $C_e = 0.37$ ^[15]。

驾驶员反应时间主要取决于前方障碍物的外形、颜色、司机的视力和机警程度以及气象能见度等因素。冰雪天气条件下, 驾驶员的生理及心理特征都会受到不同程度的影响, 使驾驶员产生紧张的情绪, 导致其反应迟钝, 判断决策能力下降。如果驾驶员在驾驶车辆的时候长时间处于紧张状态, 就会使驾驶员产生严重的视觉疲劳感, 有关研究显示, 大部分驾驶员在进入低能见度环境上时都会产生紧张不安的情绪; 而在低能见度条件下驾驶疲劳的速度会显著升高。此时能见度与降雪强度并非强线性对应关系, 而是在一定范围内的动态变化, 并且会受到雪粒子的大小、速度、密度、光谱特性等特征的影响^[16], 容易产生错误判断及视觉疲劳, 增加了行车危险性。鉴于冰雪天气下行车环境以灰白背景色为主, 本文取能见度与可视距离比值为 2.5 ^[17-18]。综合上述冰雪天气下驾驶员特性的相关研究, 并结合式 (2) ~ (3), 由摩擦附着系数和安全停车视距反算得出安全行驶车速, 得出不同附着系数和能见度条件下安全限速值计算公式为:

$$V_{\text{safe}} = \sqrt{105.27\varphi^2 + 0.27\varphi^3 - 259.2\varphi - 64.8\varphi L - 10.26\varphi} \quad (4)$$

式中, V_{safe} 为车辆安全限速值; L 为当前路段的气象能见度; φ 为路面摩擦附着系数。

1.3 基于 METANET 的交通流预测模型

准确预测交通流的演变趋势是使用可变限速控制进行科学管控的先决条件。METANET 模型的基本思想是将交通流进行时空维度上的离散化处理, 得到表示流量、速度、密度三参数间关系的模型。其对于交通流的描述采用宏观的二阶方程, 便于嵌入可变限速控制参数, 参数标定过程直观且准确, 可以模拟交通流参数间的非线性关系, 对于可变限速控制的作用机理的描述更加准确, 可从时间和空间维度对交通流演变情况进行周期性预测, 进一步满足可变限速管控系统的准确性与实时性需求, 为可变限速管控提供决策参考。

在此, 以 METANET 交通流模型对限速策略下的交通

流演化情况进行预测, 作为可变限速控制系统的交通流预测反馈。METANET 基本交通流模型描述如下:

$$\begin{cases} q(i, k) = \rho(i, k)v(i, k)\lambda_i \\ \rho(i, k+1) = \rho(i, k) + \frac{T}{L(i)\lambda_i}[q(i-1, k) - q(i, k)] \\ v(i, k+1) = v(i, k) + \frac{T}{\tau}(V(\rho_i(k)) - v(i, k)) + \frac{T}{L(i)}v(i, k)(v(i-1, k) - v(i, k)) - \frac{\eta T[\rho(i+1, k) - \rho(i, k)]}{\tau L(i)(\rho(i, k) + \theta)} \\ V(\rho_i(k)) = v_{f,i} \exp[-\frac{1}{a_m}(\frac{\rho(i, k)}{\rho_{cr,i}})^{a_c}] \end{cases} \quad (5)$$

其中: 第一项为流量速度密度方程, k 时刻路段 i 的交通流量等于同时段和路段的平均速度、密度和车道数相乘; 第二项中, $k+1$ 时刻的第 i 路段的密度是由 k 时刻的密度, 以及来自于 $i-1$ 路段的车流输入和离开 i 路段的车流输出计算得出; 第三项意义是 i 路段在 $k+1$ 时刻的空间平均速度分别受本路段期望速度、上游速度、下游密度三项因素的影响; 第四项中的 $V(\rho_i(k))$ 是驾驶员在路段 i 行驶时的期望速度。 $v_{f,i}$ 为 i 路段的自由流速度, $\rho_{cr,i}$ 为 i 路段的关键密度, τ, a_m, η, θ 为模型常量参数, 由具体的道路模型进行拟合标定。

在可变限速控制下, 期望速度 $V(\rho_i(k))$ 不但受到当前路段的车流密度影响, 也受到系统发布的限速值限制。由此, $V(\rho_i(k))$ 的计算公式更正为^[19]:

$$V(\rho_i(k)) = \min\{v_{f,i} \exp[-\frac{1}{a_m}(\frac{\rho(i, k)}{\rho_{cr,i}})^{a_c}], V_{art,i}\} \quad (6)$$

式中, $V_{art,i}$ 为当前时刻 i 路段由控制系统确定的限速值。

通过元胞自动机模型输入初始交通流得到管控路段在各控制周期内的交通流数据, 同时对预测模型输入相同的初始交通流, 并建立相应的目标函数:

$$J_M = \frac{1}{n_s n_k} \sum_{i \in S} \sum_{k=1}^{n_k} [(v_i(k) - v_i^m(k))^2 + \omega(q_i(k) - q_i^m(k))^2] \quad (7)$$

式中, ω 为权重系数, $v_i(k)$ 与 $v_i^m(k), q_i(k)$ 与 $q_i^m(k)$ 分别为微观模型下与预测模型下的速度与流量。

通过寻优算法, 求解目标函数 J_M 的最小值, 求解得到各参数组成的参数组即为与微观模型相匹配的 METANET 模型参数。

2 冰雪天气下可变限速控制策略

针对多目标优化问题, 可以通过分别给出各个控制目标在最终优化结果中的优先级, 通过权重分配的方式, 将多个目标优化函数通过线性加权求和的方式转化成较简单的单目标优化计算, 从而给出在考虑各控制目标权重情况下的最优解。冰雪天气条件下的可变限速管控策略主要针对行车安全和通行效率两个控制目标进行优化, 可通过分别设置关于行车安全的优化目标函数和关于通行效率的优化目标函数, 并进行合理的权重分配对各优化目标函数进行线性加权整合, 得出作用于系统的优化目标函数。

2.1 可变限速优化目标函数

当前,许多研究表明提升道路通行能力等同于提升交通效率。根据对交通流通行能力突变现象的研究可知,将管控路段的交通密度维持在关键密度以下,是提升通行能力的关键所在^[20]。由此,提出提升交通效率的目标函数:

$$J_1 = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i(k+1) - \rho_r}{\rho_i(k) + \sigma} \quad (8)$$

式中, $\rho_i(k)$ 和 $\rho_i(k+1)$ 分别为第 k 时刻第 i 段管控道路的车流平均密度, ρ_r 为路段关键密度, N 为管控路段数, σ 为常量参数。

在元胞自动机模型中,交通流速度的离散性表现在相邻元胞之间的速度变化,引申到宏观层面,减小相邻路段平均速度在时间及空间维度的离散程度,可进一步减小碰撞追尾事故发生概率,据此构建提升交通安全性的目标函数^[21]:

$$J_2 = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta v_{i,i-1}(k)}{(1 + C_{i,i-1}(k))v_i(k) - \Delta v_{i,i-1}(k)C_{i,i-1}(k)} \quad (9)$$

式中, $v_i(k)$ 为 k 时刻第 i 段管控道路的车流平均速度, $\Delta v_{i,i-1}(k)$ 为 k 时刻第 i 段与第 $i-1$ 管控道路的车流平均速度绝对差, $C_{i,i-1}(k)$ 为 k 时刻第 i 段与第 $i-1$ 管控道路的通行流量之比。

将减小相邻路段平均速度的离散性作为可变限速控制的安全性控制目标,将交通密度维持在关键密度附近作为可变限速控制的效率性控制目标,以各限速区段的限速值作为决策变量,建立冰雪天气下高速公路可变限速控制多目标优化模型,构建如下优化控制目标函数:

$$J = \alpha \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i(k+1) - \rho_r}{\rho_i(k) - \rho_r + \sigma} + \beta \sum_{i=1}^N \frac{\Delta v_{i,i-1}(k)}{(1 + C_{i,i-1}(k))v_i(k) - \Delta v_{i,i-1}(k)C_{i,i-1}(k)} \quad (10)$$

式中, α, β 分别为效率目标函数和安全目标函数的权重系数。

2.2 优化约束条件

为保障限速策略的可行性与合理性,需针对道路交通环境并结合驾驶员特性,对优化目标函数给出相关的约束条件。

2.2.1 安全车速约束

管控路段 i 在第 n 个管控周期内的限速值应当不大于当前路段的固有设计限速值以及当前路况下基于安全视距所确定的安全限速值,且不小于冰雪天气高速公路最小行车限速:

$$V_c(i, n) \leq \min\{V_{\text{safe}}(i, n), V_d\} \quad (11)$$

式中, $V_c(i, n)$ 为第 n 个管控周期内第 i 个路段的给定限速值; $V_{\text{safe}}(i, n)$ 为第 n 个管控周期内第 i 路段的最大安全限速值; V_d 为当前高速公路设计限速值。

2.2.2 交通流稳定性约束

通过对交通流稳定性的相关约束,可保障交通流的稳定性以及车辆行驶的安全性,抑制交通运动波的大量产生。一般情况下,相邻限速段的限速值差值不宜过大,对同一管控路段而言,相邻限速周期的限速值差值也应当控制在一定的范围内,以满足驾驶员对限速值变化跨度的心理接受范围:

$$\begin{cases} |V_c(i, n) - V_c(i-1, n)| \leq 10 \\ |V_c(i, n) - V_c(i, n-1)| \leq 10 \end{cases} \quad (12)$$

2.2.3 限速值合理性约束

考虑到驾驶员的视觉识别特性以及遵从度特征,限速值选取应作相应的取整处理,本文将限速值取为 5 的整数倍:

$$V_c(i, n) = V_c(i, n) \text{ mod } 5 \quad (13)$$

式中, mod 为取整函数。

2.3 基于粒子群算法的优化目标函数求解

本文使用粒子群优化算法对可变限速控制策略的优化目标函数进行求解。粒子群优化算法(PSO, particle swarm optimization)是由 Eberhart 和 Kennedy 于 1995 年提出的一种群体智能优化算法^[22],主要研究具有适应性的主体在与环境和其他主体的交互中进行学习行为,从而改变自身结构或行为的现象。其灵感来自于自然界中的鸟群集体觅食行为,种群中的鸟类个体抽象为没有质量的粒子,分别代表潜在的可行解,而食物的位置则被认为是全局最优解。通过模拟鸟群觅食的过程指引粒子在复杂的数据空间中逐步迭代搜索最优解。与传统的遗传变异算法相比,粒子群优化算法不需要使用遗传变异算法的操作符,即交叉、变异和选择等。此外,粒子群优化算法可以处理一些传统方法不能处理的不可导节点传递函数的极值点搜索问题,在解决实际工程应用问题中展现了其优越性。粒子群优化算法的收敛速度较快,算法参数设置灵活,算法结构简单清晰,易于工程化实现,目前已广泛应用于诸多的连续多目标优化模型问题的求解^[23]。

初始阶段,先对预先设置好种群规模的粒子种群中的每个粒子在搜索空间中赋予随机的初始速度和初始位置,粒子的位置代表了所求问题的可行解,通过粒子个体的迭代更新行为以及种群内的信息交互实现优化问题的求解。关于种群规模的选择方面,当粒子数越多时,迭代收敛至最优解位置附近的几率越高,但与此同时每一步迭代的计算成本增高,容易造成求解速度的降低,因此需考虑迭代效率与求解速度的均衡,根据求解问题的复杂程度与实际需求确定合适的种群规模。粒子在搜索更新的过程中,依据以下 3 个方面的因素更新自己的速度:首先为“惯性”,代表粒子具有保持自身速度的趋势;其次为“经验”,代表粒子搜索过程中具有飞往自身搜索到的最佳位置的倾向;最后为“共享”,代表粒子搜索过程中会与群体中其他个体互通信息,具有飞往种群搜索到的最佳位置的倾向,之后再根据更新后的速度信息对各粒子的位置信息进行逐个更新,随着迭代次数的增加,整个粒子群从无序状态向有序状态过渡,从而实现向最优解位置的靠近甚至成功搜索到最优解位置^[24]。

在 n 维搜索空间中,每个粒子拥有两个属性,即个体当前位置 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$ 和粒子个体速度 $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}]$,同时可获取记录中的个体最佳位置 p_{best} 和群体最佳位置 g_{best} 。其中个体当前位置是指每个粒子在本次迭代完成前所处的位置,个体最佳位置是指该粒子在搜索迭代过程

中所达到的历史极值, 群体最佳位置是所有粒子在搜索迭代过程中所达到的历史极值, 在粒子群优化算法中一般以最佳适应度表示。粒子个体速度则是根据上述 3 个属性对粒子每次迭代所行进的方向和距离进行调节的属性。在每一次的迭代中, 粒子通过跟踪粒子自身所找到的最优解位置 p_{best} 以及整个种群目前找到的最优解位置 g_{best} , 并在迭代中以上述两极值在向量空间的位置为导向对自身的位置 x_i 以及自身速度 v_i 进行逐次更新, 速度和位置信息更新公式分别如式 (14) 和式 (15) 所示:

$$v_{id}(t+1) = \omega \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot rand_1 \cdot (p_{best'_i} - x_{id}(t)) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (g_{best'_i} - x_{id}(t)) \quad (14)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (15)$$

式中, $v_{id}(t)$ 表示第 t 次迭代时第 i 个粒子在第 d 维度上的速度; ω 表示惯性权重; c_1 和 c_2 为初始化过程设置的粒子个体学习因子与粒子种群学习因子, 表示粒子速度更新时趋向个体最佳位置和种群最佳位置的权重; $rand_1$ 和 $rand_2$ 表示范围在 $[0, 1]$ 内的随机数; $p_{best'_i}$ 和 $g_{best'_i}$ 分别代表第 t 次迭代时第 i 个粒子在第 d 维度的个体极值位置以及第 t 次迭代时整个种群在第 d 维度的极值位置。

由于基本粒子群算法容易陷入局部最优的困境, 学者们对粒子群算法进行了各种优化改进, 以期实现各种实际优化问题的求解。对于基本粒子群优化算法的优化改进主要集中在对最大速度、惯性权重参数、学习因子进行改进、优化变异策略以及优化编码方式等方面^[25], 本文的控制目标为行车安全以及通行效率的优化, 对算法输出的准确性和实时性有着一定需求。通过限制粒子的最大速度来限制粒子群的最大运动范围, 防止粒子群因速度过快从最优区域飞出, 实现对粒子群优化算法搜索准确性的优化。另一方面, 通过设置变化的惯性权重参数可以控制粒子速度的更新快慢, 使粒子群优化算法在运行初期能够对全局进行充分探索, 后期能够满足局部重点区域搜索的需求, 从而实现了对粒子群算法搜索效率的优化。

当惯性权重 ω 以及粒子最大速度限制 v_{max} 随着迭代次数作动态更新时, 粒子群优化算法的性能会得到一定的提高。为求解得到使目标函数达到最优值且满足相应约束条件的决策变量, 选择针对粒子群算法中粒子的最大速度进行动态限制以及设置递减的惯性权重参数的方法分别对粒子群算法的搜索准确性以及搜索效率进行优化改进。粒子最大速度限制 v_{max} 和惯性权重参数 ω 的计算公式如式 (16) 和式 (17) 所示:

$$v_{max}^{t+1} = (1.0 - \frac{(1.0 - rand) \cdot t}{t_{max}}) \cdot v_{max}^t \quad (16)$$

$$\omega = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min}) \cdot \frac{t}{t_{max}} \quad (17)$$

式中, ω 表示当前迭代时的惯性权重参数; ω_{max} 和 ω_{min} 分别表示惯性因子变化范围的上下限; t 为当前迭代次数; t_{max} 为算法最大迭代次数; v_{max}^t 为第 t 次迭代时的粒子最大速度限制; $rand$ 表示范围在 $[0, 1]$ 内的随机数。

改进后的粒子群优化算法的寻优迭代性能可较好地满足可变限速控制系统的准确性需求。在可变限速控制问题的场景中, 各空间维度分别代表各限速路段的限速值, 每一个粒子坐标代表一个候选的限速控制策略, 根据优化目标函数通过多次迭代确定最优种群适应度, 从而寻得最优限速控制策略作用于可变限速控制系统。由于可变限速管控制系统的实时性需求, 需将粒子群优化算法的运算时间成本控制在一定的时间范围内, 本文通过粒子群优化算法优化目标函数在可变限速控制场景下最优适应度的实际收敛情况来确定优化算法的最大迭代次数, 粒子群优化算法最优适应度迭代过程如图 3 所示。

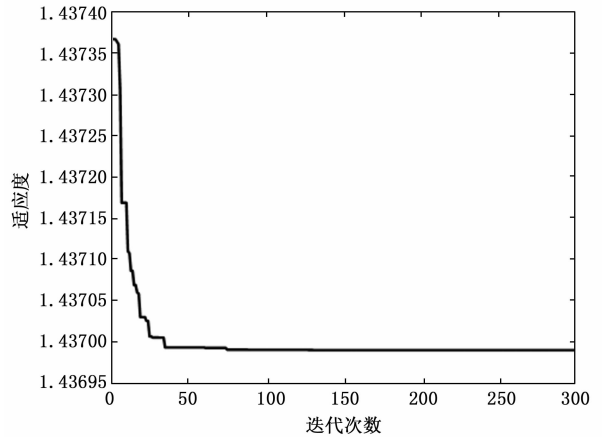


图 3 粒子群算法最优适应度迭代过程示意图

由图 3 可知, 当迭代次数超过 100 次后最优适应度的变化趋于稳定, 为简化计算并满足可变限速控制系统的实时性方面需求, 将最大迭代次数设置为 100。

基于粒子群优化的可变限速控制算法流程如表 1 所示。

表 1 基于粒子群优化的可变限速控制算法流程

输入	交通流数据信息, 约束条件, 种群规模 S 、粒子个体学习因子、粒子种群学习因子、优化目标函数、最大迭代次数
输出	各路段限速值
1)	while 输入条件准备就绪
2)	for 个体粒子 $i, i \in S$
3)	随机初始化粒子位置和速度, 记录当前个体与种群的历史最优位置与历史最优适应度
4)	end for
5)	根据约束条件以及个体与种群最优位置信息更新各粒子的位置和速度
6)	更新各粒子个体历史最优适应度和位置, 并对粒子最大速度限制 v_{max} 和惯性权重 ω 进行迭代更新
7)	通过交通流预测模型对交通流演变情况进行预测, 根据预测结果由优化目标函数计算种群历史最优适应度, 更新种群历史最优适应度和位置
8)	if 未达到最大迭代次数或未满足控制目标
9)	重复步骤 5)~7)
10)	else 记录当前种群最优适应度和最优位置
11)	end if
12)	将记录的种群最优位置作为最优解输出

3 仿真实验

为验证冰雪天气高速公路可变限速控制策略的可行性与优势, 分别将全线固定限速和分段安全限速两种控制方法与本文方法进行对比仿真研究。

3.1 仿真设置

选取十天高速公路 G7011 段作为可变限速控制路段, 如图 4 所示。整个路段道路曲率较小, 仿真中近似视作直线路段, 自左向右分别将可变限速管控路段划分为 A、B、C、D 四段, 最左侧为缓冲段, 均为等长的 1.2 km 路段。

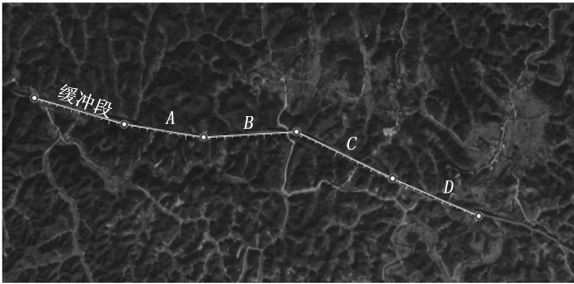


图 4 仿真路段示意图

根据寻优算法, 求解目标函数 J_M 的最小值, 此时得到的参数组即为与微观模型匹配性最佳的模型参数。仿真路段宏观交通流预测模型参数标定值如表 2 所示。

表 2 交通流预测模型标定参数组

参数	τ	v_f	a_m	ρ_{cr}	η	θ
标定值	10	43.4	0.7	29.6	29	25

仿真时长为 120 min, 其中前 20 min 为仿真预热期, 后 100 min 路况状态设定列于表 3, 限速值更新周期为 20 min, 车辆速度随机慢化概率设为 0.3, 粒子种群规模设置为 40, 粒子个体学习因子 c_1 和粒子种群学习因子分别设置为 0.8 和 0.9, 初始粒子最大速度限制设为 2.0, 优化目标函数权重系数 α 、 β 分别选为 3.0 和 1.0。

表 3 仿真路段路况状态

仿真时段/min		20~40	40~60	60~80	80~100	100~120
凝冰厚度/mm	A	2.1	1.9	2.0	2.4	2.4
	B	2.0	1.9	2.2	2.6	2.3
	C	2.0	2.0	2.3	2.4	2.3
	D	2.0	2.0	2.1	2.2	1.9
路面温度/°C	A	-5.6	-5.2	-6.0	-6.5	-6.4
	B	-5.0	-4.9	-6.2	-6.7	-6.9
	C	-4.9	-5.3	-5.9	-6.2	-6.9
	D	-4.7	-5.0	-6.3	-6.3	-6.5
能见度/m	A	200	250	220	280	270
	B	250	270	240	300	290
	C	250	270	250	300	300
	D	250	240	210	270	250

3.2 仿真结果与分析

根据仿真条件与上述模型计算所得可变限速方案列于表 4, 仿真结果如图 5~7 所示。

表 4 可变限速控制方案

仿真时段/min	限速方案/(km/h)			
	A	B	C	D
20~40	45	45	50	45
40~60	45	45	50	45
60~80	40	50	45	45
80~100	40	40	45	45
100~120	40	45	45	40

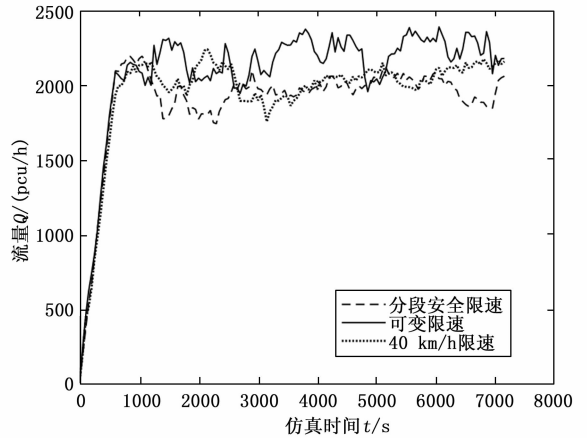


图 5 不同限速方案下整体路段通行能力

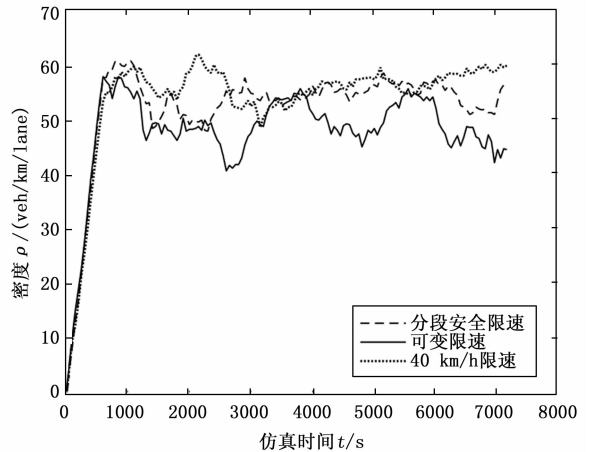


图 6 不同限速方案下整体路段交通密度

由图 5~6 可知, 对比其它两种限速方案, 本文提出的可变限速控制方案提升了道路通行能力, 并有效降低了车流密度。由图 7 可知, 相比分段安全限速方案, 本文提出的可变限速控制方案降低了车辆速度标准差, 优化了整体交通流的稳定性, 使行车安全性得到提升。

此外, 采用总行程时间 TTS (total time spend)、总行程延误时间 TTD (total time delay) 以及车辆冲突暴露时间 ETC (exposed time to collision) 三项指标, 分别从交通效率与安全两个方面对该可变控制策略的优化效果进行对比分析, 三项交通指标的仿真结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 相比于全线固定限速方法, 可变限速控制策略下的总行程时间与总行程延误时间分别减少了 20.5%

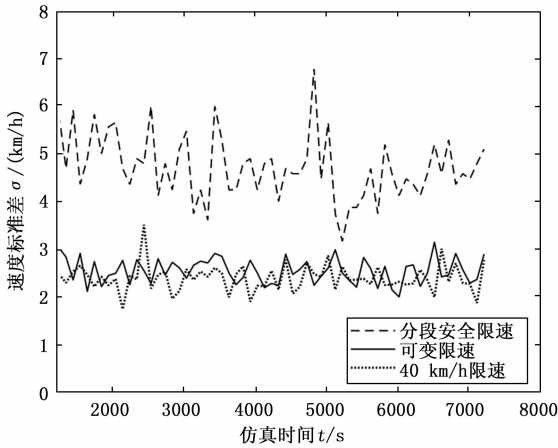


图7 不同限速方案下B路段车辆速度标准差

表5 不同限速控制策略的交通指标对比

控制方法	TTS/h	TTD/s	ETC/s
40 km/h 限速	257.1	113	220
本文方法	204.3	79	201
分段安全限速	177.3	106	230

和30.1%，车辆冲突暴露时间降低8.6%；相比于分段安全限速方法，可变限速控制策略下的总行程延误时间减少25.5%，车辆冲突暴露时间降低了12.6%。

由以上仿真结果可以看出，本文所提出的可变限速方案在提升道路通行效率的同时，通过对交通流的宏观调控，有效降低了车辆碰撞风险，改善了行车安全性。

4 结束语

针对冰雪条件下高速公路车辆通行效率及安全性降低的问题，在建立冰雪天气的高速公路安全限速模型以及交通流预测模型的基础上，设计了兼顾通行效率与行车安全的优化目标函数与相关约束条件，并通过粒子群优化算法对可变限速值进行求解，从而提出一种兼顾行车安全与通行效率的高速公路可变限速策略。仿真结果表明，所提出的可变限速方法与固定限速方法以及分段安全限速方法相比，能有效地提升行车安全和通行效率。

参考文献:

- [1] 谭忆秋, 李济鲈, 徐慧宁. 冰雪路面摩擦特性与运营风险管控研究综述 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (7): 1-17.
- [2] 刘佳雨, 冷军强, 尚平, 等. 冰雪路面下高速公路事故及严重程度影响因素分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54 (3): 57-64.
- [3] 李志斌, 金茂菁, 刘攀, 等. 提高高速公路通行效率的可变限速控制策略 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2013, 43 (5): 1204-1209.
- [4] 张成博. 冰雪条件下高速公路交通态势预估及智能管控技术 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [5] 万渝嘉. 冰雪天气下高速公路交通事故分析与预防对策研究

- [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [6] 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.
- [7] 马超, 林娟娟, 邓洁仪, 等. 恶劣天气下高速公路安全运营评估系统 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19 (1): 115-125.
- [8] 姚冬冬, 马林, 陶鹏飞, 等. 冰雪条件下高速公路可变限速方法 [J]. 吉林大学学报 (信息科学版), 2020, 38 (3): 258-265.
- [9] GUO J, MA C X, XU X C, et al. Investigation on variable speed limit control strategy of expressway under adverse weather conditions [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2022, 602: 127616.
- [10] CONRAN C, ABBAS M. Safety and mobility trade-off assessment of a microscopic variable speed limit model [C] //IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, IEEE, 2017: 1-6.
- [11] 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.
- [12] 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, 19 (3): 766-773.
- [13] 张璐雨. 考虑事故风险防控的高速公路逐级限速控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [14] WANG D, YIN C, OESER M, et al. Effect of the combined traffic load and weathering on the skid resistance of the aggregates for road surface [C] //2013 Airfield & Highway Pavement Conference, 2013.
- [15] TAN T, XING C, TAN Y, et al. Safety aspects on icy asphalt pavement in cold region through field investigations [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 161: 21-31.
- [16] 赵亮, 刘浩学, 王磊, 等. 恶劣天气下驾驶人生理反应与行车安全关系 [J]. 中国公路学报, 2016, 29 (11): 147-152.
- [17] 杨龙海, 张春, 仇晓赞, 等. 冰雪条件下中国驾驶员跟驰行为及模型研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20 (6): 145-155.
- [18] 奚少新. 基于驾驶员视觉特性的北方公路弯道诱导标色彩影响研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [19] 水宜水. 面向车联网安全环境的V2V信息传输与可变限速控制研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [20] 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]. 吉林大学学报 (工学版), 2018, 48 (3): 677-687.
- [21] 王翀. 车路协同环境下的高速公路匝道区域控制关键技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [22] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [J]. IEEE, 1995: 32-45.
- [23] 李红亚, 彭昱忠, 邓楚燕, 等. GA与PSO的混合研究综述 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (2): 20-28.
- [24] 高寒杰. 基于粒子群优化算法的混合聚类算法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [25] 吕柏行, 郭志光, 赵韦皓, 等. 标准粒子群算法的优化方式综述 [J]. 科学技术创新, 2021 (28): 33-37.