

5-15-2024

Optimization of Highway Emergency Lane Control Based on Kriging Genetic Algorithm

Jinjun Tang

School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China, jinjuntang@csu.edu.cn

Lipeng Hu

School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

Mingyang Li

School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

Xuan Zhang

School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Optimization of Highway Emergency Lane Control Based on Kriging Genetic Algorithm

Abstract

Abstract: To address the issue of how to effectively improve the highway operational efficiency and reduce the safety risks under different traffic flow conditions, this study proposed a genetic algorithm based on Kriging agent model is proposed to optimize the emergency lane control strategy. A mathematical optimization model is designed by combining the spatial and temporal characteristics of the emergency lane opening strategy. By introducing Kriging agent model, combining the genetic algorithm to build the optimization framework, and using simulation software to obtain data to train the agent model, the problem of minimizing the total travel time and the total exposed time-to-collision with both time and space constraints is solved. The change frequency of the emergency lane control at time and space dimension is constrained. The effect of the change of weights for efficiency and safety indicators in the objective function on the optimization results. Comparison in experiments show that the proposed optimization method reduces the total travel time of the road network by 14.9% and the total time exposed time-to-collision by 44.2%.

Keywords

smart highway, emergency lane, Kriging agent model, genetic algorithm, space-time constraints, simulation of urban mobility(SUMO)

Recommended Citation

Tang Jinjun, Hu Lipeng, Li Mingyang, et al. Optimization of Highway Emergency Lane Control Based on Kriging Genetic Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(5): 1165-1178.

基于Kriging遗传算法的高速公路应急车道管控优化

唐进君, 胡立鹏, 李明洋, 张璇

(中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 针对如何在不同交通流状况下有效提高高速公路运行效率和降低安全风险的问题, 提出基于Kriging代理模型的遗传算法优化应急车道管控策略。结合应急车道开放策略的时空特性设计数学优化模型, 通过引入Kriging代理模型, 结合遗传算法搭建优化框架, 采用仿真软件获取数据训练代理模型, 以此求解带有开放时间和开放空间双重约束的总行程时间与总碰撞暴露时间最小化问题。对车道控制时间与空间变量的变化频次进行了约束, 并对目标函数中效率与安全指标权重变化对优化结果的影响进行了分析。实验表明: 该优化方法使路网总行程时间减小14.9%, 碰撞暴露时间减小44.2%, 控制效果提升。

关键词: 智慧高速; 应急车道; Kriging代理模型; 遗传算法; 时空约束; SUMO(simulation of urban mobility)

中图分类号: TP391.9;U491 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)05-1165-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0090

引用格式: 唐进君, 胡立鹏, 李明洋, 等. 基于Kriging遗传算法的高速公路应急车道管控优化[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(5): 1165-1178.

Reference format: Tang Jinjun, Hu Lipeng, Li Mingyang, et al. Optimization of Highway Emergency Lane Control Based on Kriging Genetic Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(5): 1165-1178.

Optimization of Highway Emergency Lane Control Based on Kriging Genetic Algorithm

Tang Jinjun, Hu Lipeng, Li Mingyang, Zhang Xuan

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: To address the issue of how to effectively improve the highway operational efficiency and reduce the safety risks under different traffic flow conditions, this study proposed a genetic algorithm based on Kriging agent model is proposed to optimize the emergency lane control strategy. A mathematical optimization model is designed by combining the spatial and temporal characteristics of the emergency lane opening strategy. By introducing Kriging agent model, combining the genetic algorithm to build the optimization framework, and using simulation software to obtain data to train the agent model, the problem of minimizing the total travel time and the total exposed time-to-collision with both time and space constraints is solved. The change frequency of the emergency lane control at time and space dimension is constrained. The effect of the change of weights for efficiency and safety indicators in the objective function on the optimization results. Comparison in experiments show that the proposed optimization method reduces the total travel time of the road network by 14.9% and the total time exposed time-to-collision by 44.2%.

Keywords: smart highway; emergency lane; Kriging agent model; genetic algorithm; space-time constraints; simulation of urban mobility(SUMO)

收稿日期: 2023-02-06

修回日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52172310); 教育部人文社科基金(21YJCZH147)

第一作者: 唐进君(1983-), 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为交通仿真优化、高速公路主动式交通管控。E-mail: jinjuntang@csu.edu.cn

0 引言

随着国内高速公路迅速发展,截至 2021 年,我国高速公路里程已达 160 000 km,居世界首位^[1]。在快速发展的同时,高速公路交通事故增多,交通拥堵日益严重,一系列交通问题严重影响了运营效率与行车安全。智慧高速公路作为一种新型的公路发展趋势,成为解决交通拥堵与安全等问题的重要手段^[2]。智慧高速公路是一种具备自动信息感知、信息交互、端边云计算和自主决策与运营管控的系统^[3-4]。高速公路主动式交通管控技术是实现高速公路智慧化的关键阶段,通过实时流量预测与调控,实现快速高效的出行诱导服务,切实提高高速公路交通路网的通行效率、系统控制能力、服务水平,以及降低行车风险^[5]。

在高速公路主动式交通管控技术中,应急车道开放管控是关键技术之一,适时开放应急车道能有效改善高速公路拥堵状况,并能一定程度地提高高速公路运行安全性^[6-8]。在一些特定时间段,比如早晚高峰时段,使用应急车道或硬路肩作为附加车道,通行能力将提升约 20%~25%^[9]。文献[10]使用 VISSIM 仿真模型研究针对不同车辆类型限制场景下硬路肩使用的作用,指出硬路肩的使用可以显著减少车辆的行驶时间且使路网具备更稳定的交通流密度。文献[11]通过微观仿真研究英国 M25 高速公路开放 T-HSR(卡车专用硬路肩)对交通流的影响,表明在不同控制时间段开放 T-HSR 可以有效减少车辆排放,缓解高速公路交通拥堵。应急车道管控对高速公路通行效率提升是有效的,但应急车道管控策略仅仅从固定时间或固定空间单方面设定,形式单一。此外,国内外学者就应急车道开放措施对高速公路安全性影响进行了大量研究。文献[12]研究应急车道开放措施对韩国高速公路的安全影响,发现应急车道开放的长度与碰撞频率之间存在关系。文献[13]通过敏感性分析应急车道开放时间与碰撞频率的变化关系。文献[14]研究临时使用硬路肩对安全行为和碰

撞预防的影响,对宾西法利亚东南部 476 号州际公路安全性进行 VISSIM 仿真评估,指出在零时路肩使用情景下避免碰撞的可能性增加,但是碰撞没有明显减少。文献[15]以弗吉利亚 66 号州际公路为例研究主动交通管理,包括可变速度限制,车道使用控制信号和动态硬路肩运行措施,对交通安全和运营的影响。其有效实施使事故总数,多车和追尾事故本别减少了 4%、6%、31%。上述研究工作证明了应急车道开放与否对高速公路安全性具有一定影响,研究如何合理地开放应急车道以提升高速公路安全性意义重大。为了对应急车道进行更有效的管控,提高高速公路运行效率,一些学者对应急车道开放策略问题进行优化,结合了遗传算法,强化学习算法等优化开放策略。文献[16]结合 VISSIM 仿真模型提出通过遗传算法来优化以最小化总行程时间为目标的高速公路应急车道管控优化问题。文献[17]提出一种 q-learning 的强化学习技术,以行程时间为目标,优化可变限速和应急车道协调控制策略。文献[18]研究在事故条件下通过元胞传输模型以最小化总延误时间为目标,优化硬路肩使用策略,管控效果显著。针对应急车道管控策略优化的目标单一,且优化求解时间长,通过总结国内外对应急车道开放策略的相关研究成果发现,目前仍然存在的局限性:

(1) 应急车道开放管控策略优化方法仅针对在固定开放时间下优化开放空间策略或在固定开放空间下优化开放时间策略,是针对单一控制变量下的优化方法;

(2) 应急车道开放管控优化的目标函数往往从运行效率或者交通安全单方面考虑,并没有综合效率与安全的交互影响;

(3) 应急车道开放管控策略优化算法求解时间长、优化过程复杂,不利于实际工程应用。

为了解决上述问题,本文提出了基于 Kriging 代理模型的遗传算法来优化求解带有开放时间/空间双重约束双目标应急车道开放管控策略。

1 应急车道开放管控优化建模

1.1 问题描述

高速公路应急车道管控问题是针对如何在适时状态开放应急车道以提高高速公路通行效率, 增大行车安全性的策略管控问题。管控策略由管控时间和管控距离组成, 其描述了一段时间内, 整个应急车道需开放的位置起点及路段长度。通过在高速公路上实施应急车道管控策略可改善拥堵路段或事故路段高速公路交通运行状况。如图1所示, 在空间上, 将应急车道管控路段进行分段离散化, 将总的路段划分为长度基本相同的空间片段 i , 每一段的长度为 l_i , 长度在300~400 m之间^[16]。在时间上对管控的时长 T 进行间隔化, 取15 min为一个时间间隔 T^* , 在同一个15 min内不同的应急车道空间片段开放与关闭状态固定不变。设 E_i 为第 i 个空间片段应急车道开放关闭状态的0-1变量, E_i 为1时, 表示第 i 空间片段应急车道路段开放; E_i 为0时, 表示应急车道关闭。

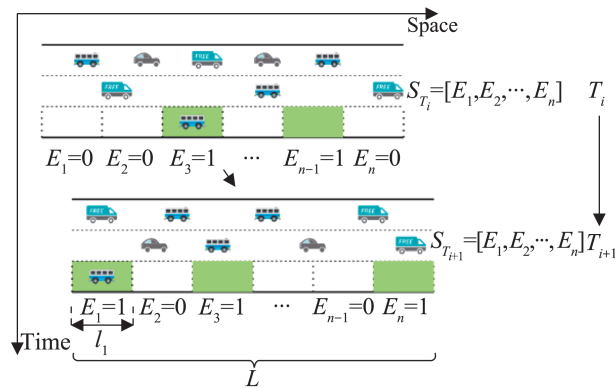


图1 策略图
Fig. 1 Policy

如图1中示例所示, 在同一个时间间隔 T^* , 所有空间片段的管控策略数学形式表示为 $S_T^i = \{E_i=0, E_2=0, \dots, E_{n-1}=1, E_n=0\}$ 。将管控时长 T 按时间间隔 T^* 分为 m 段, 则对时长 T 内应急车道的管控策略在数学形式上可表示为 $S_T = [S_T^1, S_T^2, \dots, S_T^m]$ 。管控策略在数学形式上是一个二维 $n \times m$ 的0-1变量矩阵, 描述了整个管控时长 T 内

应急车道管控路段 L 的各个空间片段在不同时间间隔的开放与关闭状态。考虑到部分管控策略并不合理, 为了对管控策略进行限制, 对管控策略添加时间和空间约束条件。实施每种管控策略 S_T^i 对高速公路交通状况影响的不同, 在约束条件下搜寻能使高速公路运行效率最好, 安全性最佳的最优管控策略 S_T^* 是亟待解决的优化问题。

针对上述优化问题, 提出如图2所示的技术路线, 优化目标从出行效率和行车安全两方面考虑, 在保证安全的同时, 寻找最高效的开放策略。选择总行程时间(total travel time, TTT)和总碰撞暴露时间(time exposed time-to-collision, TET)分别作为出行效率目标和行车安全目标, 并将两个目标加权组合为总目标 Y 。由于策略 S_T^i 与目标 Y 没有显示的数学解析关系, 则该问题属于“黑箱”问题。可通过SUMO仿真获取不同策略 S_T^i 对应的目标 Y 值, 但仿真耗时多, 优化过程漫长。引入响应面模型中的Kriging代理模型, 可近似输入策略 S_T^i 与输出目标 Y 之间的关系。每种策略对应一个解, 通过优化算法搜寻最优解过程中, 使用Kriging代理模型可省去仿真过程, 加速优化寻优过程。考虑到遗传算法具有通用性强, 搜索区域广的特点, 所以选用遗传算法作为寻优算法。为了评价所求得的最优策略对高速公路等待时间、紧急停车次数、流量等其他各项指标的影响, 设计评价模块对策略进行再次仿真测试以此来验证所提优化方法的有效性。

1.2 多目标优化函数

本文选取效率和安全两方面作为优化目标。总行程时间描述了路网中所有车辆的行程时间消耗量, 当所有车辆的总行程时间最小时, 道路利用率最高, 单位时间输出流量最大。故选择路网中所有车辆消耗的总行程时间作为第一个目标指标。从安全角度考虑, 总碰撞暴露时间表征所有的车辆在高速公路驾驶过程中处于危险状况的总时间, 可以反映高速公路所有车辆交通安全状况, 可作为第二个目标指标。

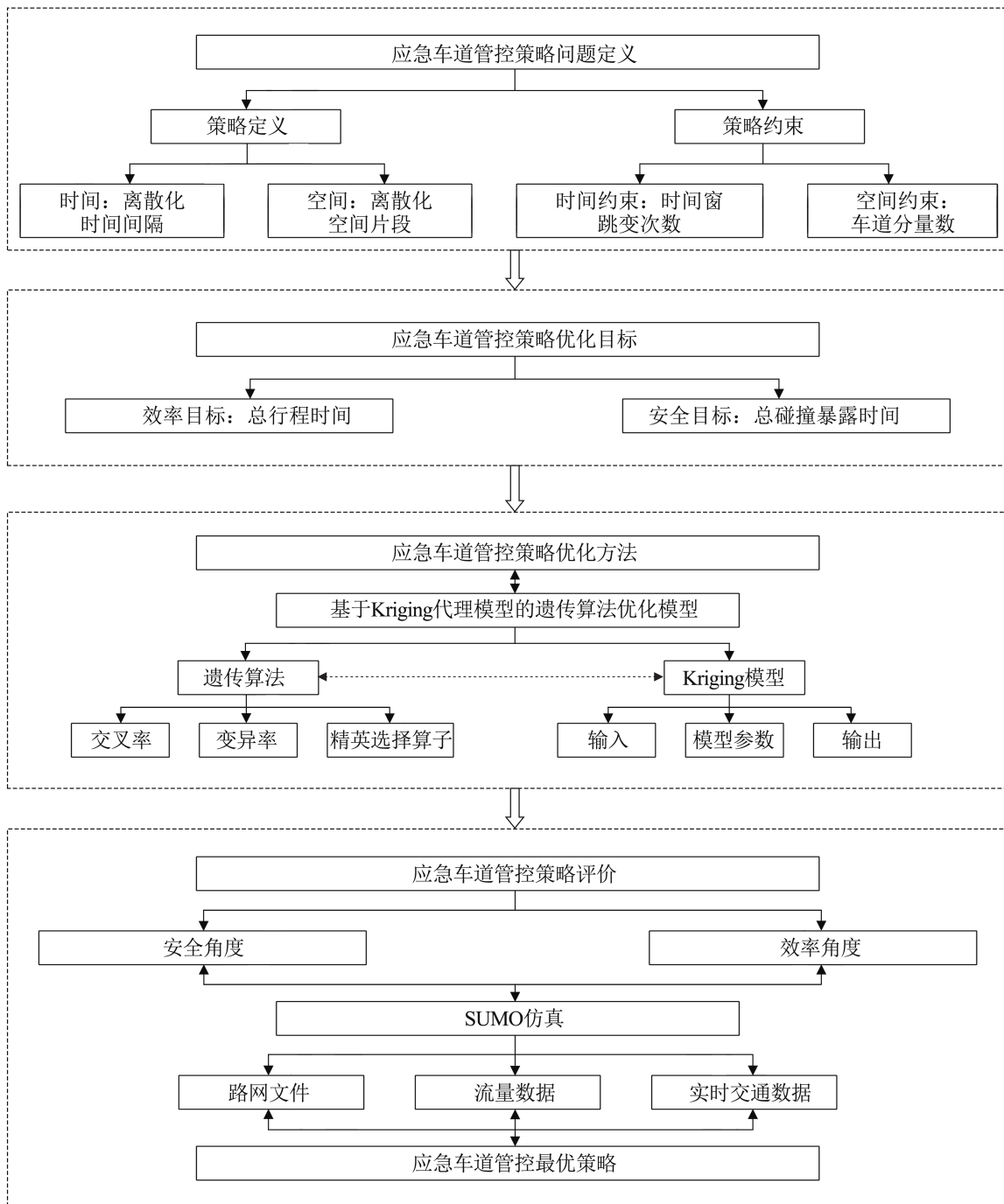


图2 技术路线

Fig. 2 Technology roadmap

效率目标总行程时间:

$$T_{TT,i}(t,k) = \delta_i \cdot \Delta k, \delta_i = \begin{cases} 1, & \text{车辆在路网中} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_{TT} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N T_{TT,i}(t,k)$$

式中: $T_{TT,i}(t,k)$ 为第 t 个周期第 k 个时间步第 i 辆车的行程时间; N 为在网车辆数; Δk 为仿真步长时间; T 为总的仿真时间。

安全目标总碰撞暴露时间表示的是车辆在行驶过程中在安全危急情况下所花费的总时间, 用

低于碰撞时间(time-to-collision, TTC)阈值的总时间来表征^[19]。碰撞时间TTC是指两辆车在相同路线上同向行驶,分别以各自速度继续行驶到发生碰撞的时间^[20]。参考前述研究,取1.5 s为TTC阈值时间^[21]。当TTC小于1.5 s时,车辆处于危险紧急状态,计入TET。

$$T_{ET}(t, k) = \sum_{i=1}^N \delta_k \cdot \Delta k \quad (2)$$

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & \forall 0 < T_{TC,i}(k) \leq T_{TC}^* \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$T_{ET} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N T_{ET}(t, k)$$

式中: $T_{ET}(t, k)$ 为第 t 个周期第 k 个时间步车辆TET值; T_{TC}^* 为TTC的阈值。

综合考虑安全以及效率指标,以加权方式将出行效率和行车安全双目标结合进行优化求解。通过两类指标进行归一化,并进行加权求和,得到总目标函数:

$$Y = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^L (\alpha_{TTT} T_{TS,i}(t, k) + \beta_{TET} T_{ET,i}(t, k)) \quad (3)$$

式中: $T_{TS,i}(t, k)$ 为路段 i 在第 k 个决策时段第 t 时刻车辆的总行程时间; $T_{ET,i}(t, k)$ 为路段 i 在第 k 个决策时段第 t 时刻车辆的总碰撞暴露时间; α_{TTT} 、 β_{TET} 分别为效率和安全指标的权重。

1.3 时空约束条件

考虑应急车道开启与关闭控制变化频繁对于实际管理成本和驾驶员行车安全的影响,在优化控制过程中,引入应急车道开启与关闭时空约束条件。为了研究连续时间间隔下道路交通状态变化情况从而建立时间约束条件,将两次时间间隔30 min设定为时间窗。对于时间约束,将时间窗作为观察仿真结果以及增加时间约束的时间窗口。以30 min作为一个时间窗,每15 min进行一次应急车道开关选择决策,定义相邻两次决策中应急车道所有空间片段开关状态变化次数总和为时间窗跳变次数。如图3所示, T 表示应急车道保持开启与关闭状态的时间间隔15 min,设定为最小决策时间间隔。

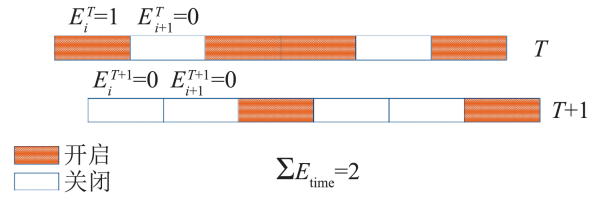


图3 时间约束图

Fig. 3 Time constraint

$$\sum_{i=1}^L (E_i(t+1) - E_i(t))^2 \leq N_{time}^* \quad (4)$$

式中: $E_i(t)$ 为第 t 个时间段第 i 个空间片段的开关状态; $E_i(t+1)$ 为第 $t+1$ 个时间段第 i 个空间片段的开关状态; N_{time}^* 为时间窗跳变次数,即所有空间片段控制变量 E_i 在一个时间窗内总的变换次数。控制变量 E_i 由0变为1,由1变为0计一次时间窗跳变次数。

为减少变化频率,保障行车安全性,时间约束控制跳变次数应在合理范围内。

为了避免应急车道空间片段开关状况太分散,增加驾驶员从主道向应急车道以及应急车道向主车道换道的次数,导致安全风险增大,对应急车道开启和关闭策略增加空间约束条件。图4展示了约束条件涉及的要素, L 表示车道总长, l_i 表示空间片段, E_i 表示空间片段开启与关闭的控制变量, E^{CC} 表示车道分量。引入图论中连通分量概念,定义描述应急车道开关状态离散程度的车道分量数。在同一个时间间隔15 min内,在空间上相连且处于开放状态的连续应急车道空间片段计为一个车道分量。图4中, $E^{CC}=0$ 表示当前空间片段不能组成一个车道分量; $E^{CC}=1$ 表示该连续开放空间片段组成一个车道分量。在同一个时间间隔,应急车道总路段的车道分量之和就为当前时间间隔车道分量数,记为 $N_{distance}$ 。如图4所示,每个小格代表一个空间片段,总共6个空间片段。其中, $E_i=1$, $E_{i+1}=0$, $E_{i+2}=1$, $E_{i+3}=1$,则第 i 、 $i+2$ 、 $i+3$ 空间片段处于开启状态,第 $i+1$ 空间片段处于关闭状态。由于第 i 、 $i+2$ 空间片段处于开启状态,但中间被处于关闭状态的第 $i+1$ 空间片段分开所以不能一起被记为一个车道分量,只有第 i 空间片段单独

被记为一个车道分量。第 $i+2$ 、 $i+3$ 空间片段处于开启状态且空间上相连，可被记为一个车道分量。由此可得，图示中所有空间片段由3个部分组成车道分量，即 $E_1^{CC}=1$ 、 $E_2^{CC}=1$ 、 $E_3^{CC}=1$ ，所以图4所示例子中总的车道分量数为3。

车道分量数需满足的约束条件：

$$\sum E^{CC} \leq N_{\text{distance}}^* \quad (5)$$

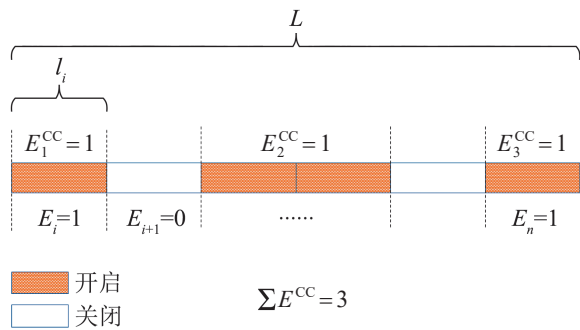


图4 空间约束图
Fig. 4 Spatial constraint

2 应急车道开放管控优化理论方法

2.1 Kriging 元模型

为了加快优化模型求解速度，本文采用 Kriging 元模型作为辅助模型，元模型又称为代理、仿真器、辅助模型等。它是底层仿真模型所隐含的输入/输出函数的近似值，与仿真实验产生的输入/输出数据相匹配的一种方法^[22]。Kriging 方法是一种近似精度很高的响应面模型方法，可以对全局进行近似，通过寻优可求得高精度的全局近似最优解^[23]。本文通过使用 Kriging 元模型将仿真模型的输入输出隐式关系进行表征，与搜索算法相结合，加快算法寻优速度。

Kriging 元模型基本假设：

$$G(x) = f(x)^T \beta + Z(x) \quad (6)$$

式中： $G(x)$ 为观察值，由全局估计以及局部估计计算得到； $f(x)$ 为回归函数向量； β 为回归系数向量； $f(x)^T \beta$ 为全局估计值； $Z(x)$ 为均值为0、方差为 σ^2 的随机过程函数，其协方差为

$$\text{Cov}[Z(x_i), Z(x_j)] = \sigma^2 Q(x_i, x_j; \theta) \quad (7)$$

$$Z(x) = X(x)R^{-1}(G - F\hat{\beta}) \quad (8)$$

$$\hat{\beta} = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} G \quad (9)$$

$$X(x) = [Q(x, x_1; \theta), Q(x, x_2; \theta), \dots, Q(x, x_n; \theta)]^T \quad (10)$$

式中： $Q(x_i, x_j; \theta)$ 为关于变量 θ 的随机过程函数； x_i 和 x_j 为样本点； $X(x)$ 为未知点 x 与训练点 (x_1, x_2, \dots, x_n) 之间的相关向量； R 为一个相关矩阵，其维度大小为 $n \times n$ ； G 为训练数据列向量； F 为由 $(f(x_1)^T, f(x_2)^T, \dots, f(x_n)^T)^T$ 计算得到的一个 $n \times p$ 矩阵。

函数 Q 取高斯随机过程：

$$Q(x_i, x_j; \theta) = \prod_{m=1}^M \exp[-\theta^m (x_i^m - x_j^m)^2] \quad (11)$$

式中： x_i^m 、 x_j^m 和 θ^m 分别为 x_i 、 x_j 和 θ 的第 m 个成分； M 为设计空间的维数。

Kriging 元模型的原理是在实验数据未知点 x 处，给出无偏估计值：

$$\hat{g}(x) = f(x)^T \hat{\beta} + Z(x) \quad (12)$$

式中： $\hat{g}(x)$ 为 x 点的估计值； $\hat{\beta}$ 为回归系数向量，通过广义最小的平方估计值估计得出。

上述各式中都包含有未知参数向量 θ ，可通过最大似然估计确定 θ 的最优值。本文通过搭建 Kriging 元模型用于近似表征仿真模型中的适应值函数，在寻优过程中加快速度，扩大寻优空间，寻求最优解。

2.2 遗传算法

遗传算法是一种基于种群的随机算法^[24]。遗传算法流程中的主要操作有交叉、变异和选择3种。交叉操作模拟实现现实世界中双亲遗传物质混合的机制。通过交叉操作可以生成新的解，且其来源于2个优质解，所以更可能会优于2个父代解。变异操作是遗传算法最重要的一个算子之一。对于采用位字符串方式来表征解的形式常采用位随机翻转突变方法。位随机翻转突变方法通过设定突变率，以一定的概率对零位或一位进行翻转。选择操作是遗传算法中另外一个重要算子之一，其通过保留父代中部分最合适群体作为新的父代群体进行下一次选

代, 可以加速解向最优解趋同的速度。其优点是按照适应度的比例进行采样选择, 既保证高适应度的解被选中概率大, 又能保留低适应度的解也能被选中, 减小出现收敛到局部最优的可能性。

将应急车道控制变量 E_i 作为遗传算法优化变量, 建立每 15 min 优化一次的应急车道开启与关闭控制模型, 以总目标函数为优化控制适应度函数。总目标函数值最小时, 代表总行程时间以及碰撞暴露时间之和最小, 系统在保证安全的同时效率最高, 单位时间高速公路流量最大, 也就是应急车道控制达到最优效果。图 5 展示了算法流程图, 描述了结合 Kriging 模型的遗传算法计算过程。本文遗传算法的种群规模为 50, 种群代数为 1 000, 交叉率为 0.9, 变异概率为 0.1。

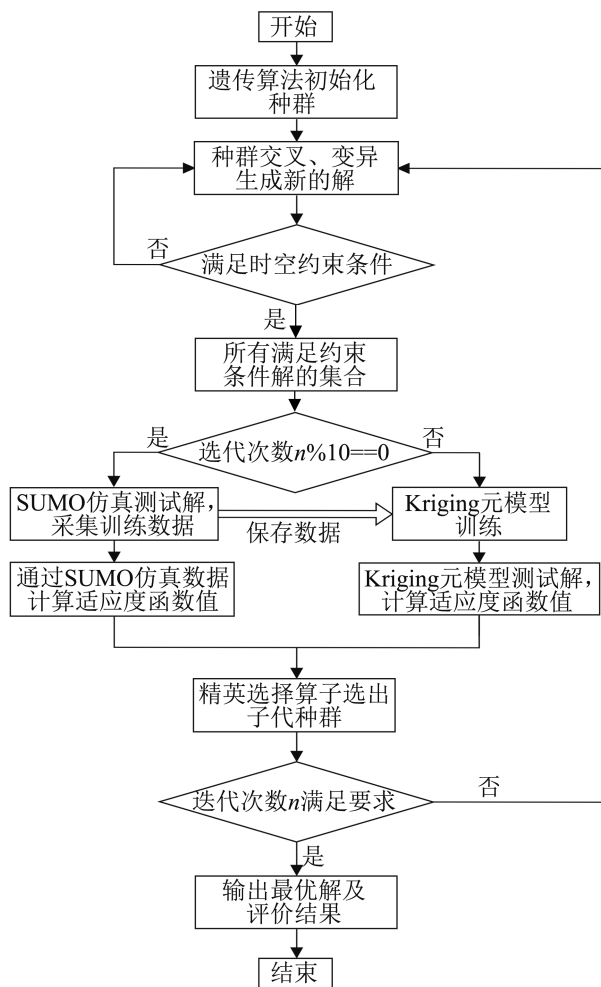


图5 遗传算法流程图

Fig. 5 Algorithm flowchart of GA

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真实验

以山东省济南市绕城高速作为仿真实例进行分析, 如图 6 所示。采用 SUMO 微观仿真软件搭建仿真环境, 使用每 15 min 高速公路门架采集到的交通流数据对仿真模型进行校正, 构建基于 Kriging 代理模型的遗传算法进行应急车道开放问题的求解。研究路段总长约为 6.5 km, 将路段划分为 16 个空间片段, 每个空间片段长度约为 400 m, 是应急车道开关状态最小决策对象。主车道宽度是 3.75 m, 应急车道宽度 3.5 m。参考实际数据车流构成, 在实验数据中, 将车辆类型分成小型车、中型车和大型车 3 种, 每种车型占比分别为 0.75、0.125 和 0.125。考虑到驾驶员的心理生理反应特点, 选择 Widemann 99 和 LC2013 模型作为车辆跟驰和变道模型^[25]。仿真总的时长设定为 2 h。经过实验测试, 时间窗跳变次数约束阈值 N_{time}^* 取 8 效果最佳。在一次时间窗 30 min 内, 所有空间片段开关状态跳变次数之和 ≤ 8 。实验中车道分量数约束阈值 $N_{distance}^*$ 取为 7, 即车道分量数在 $[0, 7]$ 区间内才满足空间约束条件。



图6 仿真路段

Fig. 6 Simulation highway

3.2 结果对比与分析

为了对比目标函数在不同效率与安全权重下，开放应急车道最优策略效果的差异。在相同流量数据下，实验将总目标函数 Y 中效率和安全指标的权重 α_{TTT} 、 β_{TET} 分别从0到1，每间隔0.1为一组，分成0/1、0.1/0.9、...、1/0等11组参数对比进行实验。与此同时，为了研究在不同流量条件下算法的有效性，对原始流量进行1.2倍以及1.5倍扩容，并从等待时间^[26]、累计占有率^[27]、紧急停车次数、流量、消耗能源^[28]等多个维度对比开放策略的优化效果。每组实验结果都在求得的最优应急车道开放策略上进行10次测试取平均值。从3个方面详细介绍对比实验分析结果。

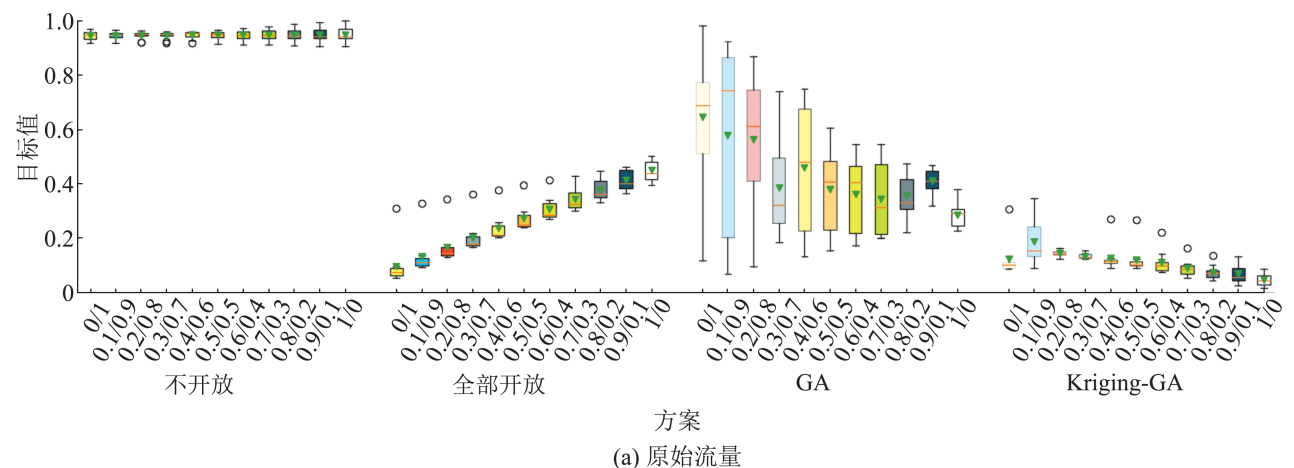
(1) 目标函数中权重对优化结果的影响

总目标函数 Y 中效率和安全指标的权重 α_{TTT} 、 β_{TET} 描述策略变化对效率和安全两种指标的影响程度。随着权重 α_{TTT} 不断变小 β_{TET} 不断变大，策略对效率指标影响逐渐变小，对安全指标影响逐渐变大。通过 T_{TT} 值和 T_{ET} 值分别表征高速公路效率和安全状况，对比分析2个指标随着权重的变化对应的最优值变化来描述权重对于策略优化的影响。

图7展示了总目标值 Y 在不同流量条件下不同权重对应的最优策略仿真结果。图7(a)展示在原始流量条件下，对比不开放、全部开放、GA算法和Kriging-GA算法在不同权重组合下最优策略测试得

到总目标值。在 α_{TTT} 、 β_{TET} 权重发生变化时，每组方案对应总目标值有所不同，并在 α_{TTT} 、 β_{TET} 比例为0/1时使用Kriging-GA算法寻优得到的最优策略总目标值取得最小，管控效果最好。在流量扩容到1.2倍时，不同的 α_{TTT} 、 β_{TET} 权重对结果影响变大，不同策略对应总目标值之间的差异变大。在使用Kriging-GA算法进行寻优的过程中，权重为0.9/0.1时总目标值取得最小。流量进一步增大，扩容到原始流量1.5倍时，相同策略10次测试结果离散程度更大，箱型图上下界区间更大，说明流量增加会使策略控制效果变得不稳定。在权重比例为1/0时，即只考虑效率这一种指标进行优化时，通过Kriging-GA算法寻优策略计算得到的总目标值最小，管控效果最佳。从实验结果上看，高速公路行车安全性在车道通行能力变大后更好，且在流量逐渐增大后更大的通行能力有助于提升安全性。但是相比全部开放，Kriging-GA算法搜索得到的最优开放方案的总目标值更小，管控效率更高同时安全性更好，说明通过分时段增加车道数进而增加通行能力的方式可以达到更好的管控效果。

综合上述分析，权重的变化对优化目标的影响导致最优策略的差异，进而导致管控效果在效率和安全指标上的不同。在不同流量条件下，综合考虑效率和安全指标相比仅考虑单一指标有更高效、更安全的管控效果。



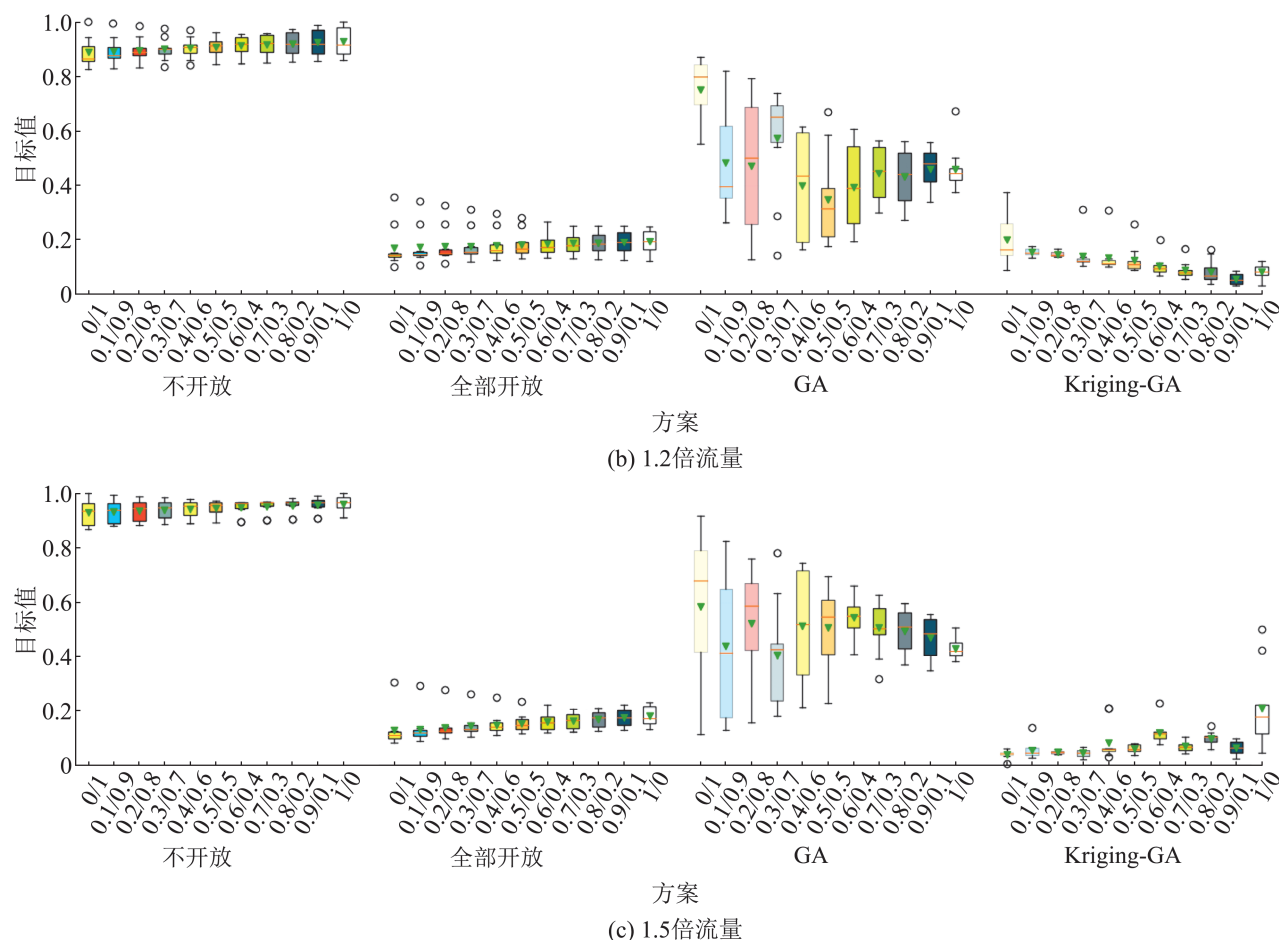


图7 不同流量条件下最优策略目标值对比

Fig. 7 Comparison of target values of optimal strategies under different flow conditions

(2) Kriging-GA 与 GA 算法优化结果对比

通过上述对比发现, 使用Kriging-GA算法寻优得到的最优策略要比GA算法寻优策略在效率和安全指标方面更优, 控制效果更好。为了进一步对比Kriging-GA算法和GA算法在优化过程中的差异, 选取实验数据为原始流量1.2倍增量, 在相同CPU机时下, 进行Kriging-GA算法与原始GA算法优化效果对比。图8表征在相同CPU机时下Kriging-GA算法和GA算法寻优过程中总目标函数值的变化过程。图中“目标值”曲线对应解的总目标函数值变化过程, “优化过程”曲线对解迭代过程中最优总目标函数值数据点进行展示。由于GA算法需频繁调用SUMO仿真测试不同的解, 优化过程缓慢。且从“优化过程”曲线可发现GA算法总目标函数值寻优迭代效果并不明显。而Kriging-GA算法通过

Kriging模型可直接计算出不同解的总目标函数值, 迭代速度快。图中GA算法数据点(680, 5.36)表示迭代680次最终取得最优总目标函数值为5.36, Kriging-GA算法数据点(11578, 5.35)说明算法迭代11578次取得最优总目标函数值为5.35。对比解的迭代次数, 在相同寻优时间下, GA算法迭代计算次数明显小于Kriging-GA算法。且在Kriging模型加速优化后, 经过种群迭代选择, Kriging-GA算法最优目标函数值比GA算法最优值更小, 算法效果更好。通过上述对比发现, 相较于原始GA算法需要通过SUMO仿真测试来得到不同解的目标函数值, 使用Kriging模型直接计算解的目标函数值可以极大加快GA算法种群迭代速度, 扩大搜索区域, 寻得更优的解。这充分体现出使用Kriging代理模型的优势, 可以加速解的寻优速度。

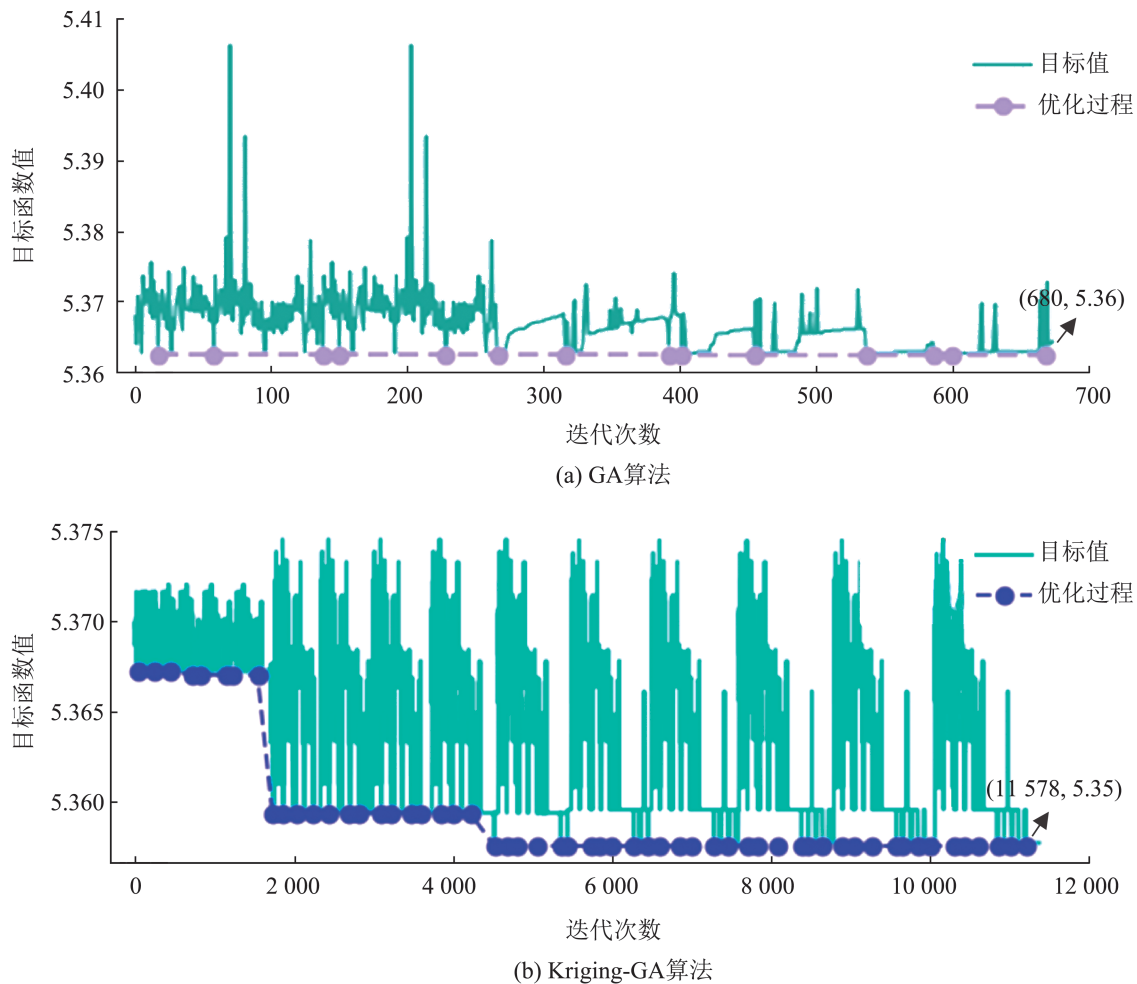


图8 应急车道开关问题求解优化过程

Fig. 8 Optimization process of emergency lane control

为了更直观地描述策略对应的开放状态，选取在原始流量条件下搜索得到最优解组合进行展示。图9展示了在原始流量条件下最优策略中应急车道所有控制变量 $\{E_i\}$ 在仿真2 h，8个时间间隔15 min的控制状态。图中，黄色方格表示该应急车道子片段(纵坐标)在该时间间隔15 min(横坐标)内处于开启状态，紫色方格表示该空间子片段不开放。可以从图中看到，GA算法与Kriging-GA算法处于开放状态的子片段数量比为64:51。Kriging-GA算法所得策略处于开放状态子片段更稀疏一些，且最优总目标值对比为5.34:5.33，说明该策略能更有效的降低TTT和TET值，在保证高速公路的行车安全的同时提高通行效率。

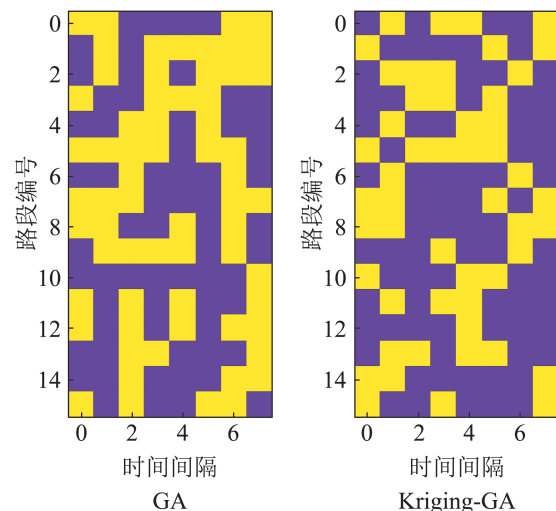


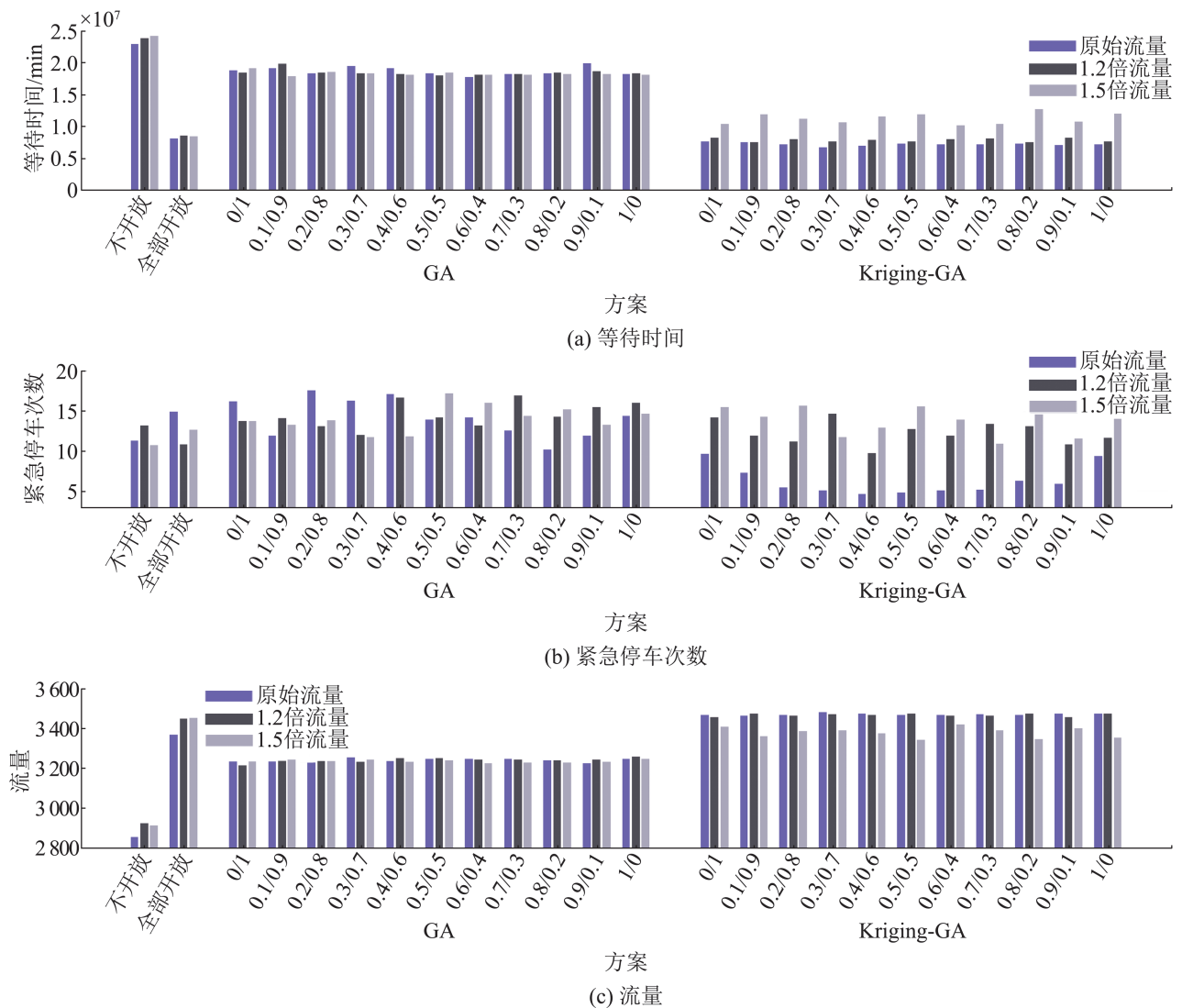
图9 应急车道开放路段效果对比

Fig. 9 Effect Comparison of emergency lane control

(3) 其他指标情况

上述对比主要针对目标函数中效率和安全两项指标, 为了进一步探讨使用Kriging-GA算法进行应急车道管控策略优化的效果好坏, 本文选取等待时间、紧急停车次数等指标进行更深入的对比分析。图10展示在1、1.2、1.5倍流量条件下, 通过不开放、全部开放、GA算法最优策略、Kriging-GA算法最优策略4种不同方案进行评价测试得到的结果。在原始流量条件下, 通过Kriging-GA算法寻得最优开放策略对应效率与安全指标权重为0/1, 所有车辆总的等待时间为2 116.87 h, 而不开放时等待时间为6 355.05 h, 减少66.68%; 在相同仿真时间下, 流量也从2 856辆增加到3 462辆, 增幅17.5%。此外,

不开放时紧急停车次数为11次, 而使用Kriging-GA算法得到的结果为10次, 降低9.01%。进一步增大流量, 在1.2倍流量条件下, 在实施Kriging-GA算法效率与安全权重0.9/0.1的最优解开放策略时, 路网等待时间为2 279.56 h, 相比于不开放的6 620.09 h减少65.56%。全部开放情况下, 等待时间为2 358.01 h, 最优策略相比较也减少3.3%。最优开放策略时, 路网流量为3 449辆, 不开放时为2 924辆, 增幅15.2%。在1.5倍流量条件下, Kriging-GA算法在效率与安全权重1/0时寻得最优开放策略, 路网总等待时间为2 862.14 h, 对比不开放时的6 700.29 h减小57.28%。随着流量的增大, 更大的通行能力可以更有效地提升高速公路通行效率。



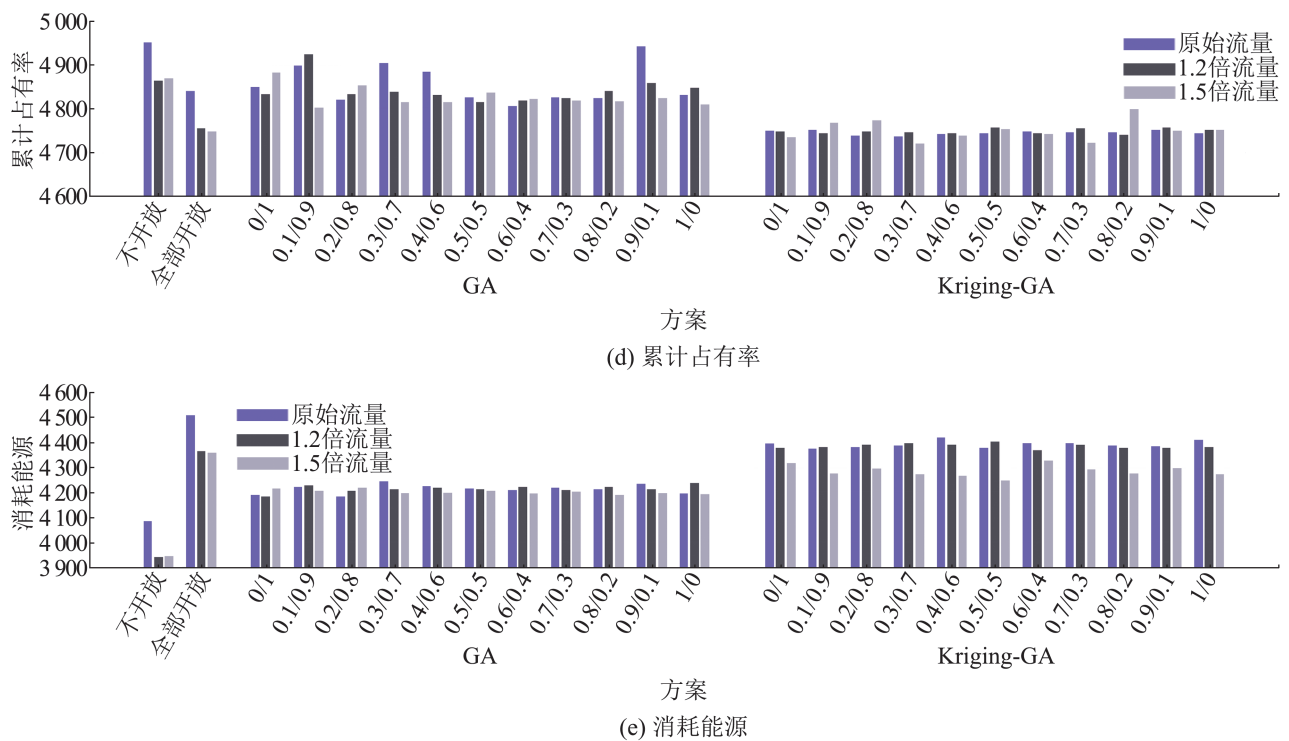


图10 不同流量条件下最优策略下不同指标对比

Fig. 10 Comparison of different indicators under optimal strategies under different traffic conditions

综上所述,通过对比不同指标,使用Kriging-GA算法寻优得到的策略有更好的控制效果。此外,在不同流量条件下最优管控策略对应的效率和安全权重并不相同,说明在流量发生变化时,管控效果会随着管控目标侧重于效率或安全的不同产生较大的差异。

4 结论

本文首先对应急车道开放策略进行时空离散化,即在时间上应急车道开启与关闭在固定时间间隔内保持不变,在空间上将应急车道划分为多个路段作为开启与关闭的最小决策单元。为减少应急车道频繁开启与关闭带来的潜在行车风险,在相邻时间窗对应急车道开启与关闭设定时空约束。引入基于时间窗的方式建立时间约束,参考图论连通分量定义车道分量数设计空间约束条件。综合考虑高速公路行车效率与驾驶安全,提出了基于总行程时间和总碰撞暴露时间最小化的双目标函数。同时考虑安全和效率两方面,有效弥补

现有研究的不足。在此基础上,搭建SUMO微观仿真环境,采用基于Kriging代理模型的遗传算法对目标函数进行优化求解。通过Kriging代理模型可减少遗传算法调用仿真次数,有效降低优化时间。但是高速公路拥堵问题复杂多变,紧紧考虑应急车道管控单一管理方式对高速公路交通状况影响有限。为了进一步提高高速公路管理水平,缓解拥堵,提高通行效率,在后续研究中,可将应急车道以及可变限速两项主动交通管控方式相结合,提升管控效果。

参考文献:

- [1] 李月姝,李平,王少飞,等.高速公路数字化基础设施分级方法研究[J].公路,2022,67(8):302-305.
- [2] 杜豫川,刘成龙,吴荻非,等.新一代智慧高速公路系统架构设计[J].中国公路学报,2022,35(4):203-214.
Du Yuchuan, Liu Chenglong, Wu Difei, et al. Framework of the New Generation of Smart Highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 203-214.
- [3] 赵祥模,高赢,徐志刚,等. IntelliWay-变耦合模块化智慧高速公路系统一体化架构及测评体系[J].中国公路

- 学报, 2023, 36(1): 176-201.
- Zhao Xiangmo, Gao Ying, Xu Zhigang, et al. IntelliWay: An Integrated Architecture and Testing Methodology for Intelligent Highway Using Varied Coupling Modularization[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(1): 176-201.
- [4] 孙超, 黄愉文, 张永捷. 数字时代全球智慧高速公路发展趋势及建设思考[J]. 公路, 2022, 67(4): 237-242.
- Sun Chao, Huang Yuwen, Zhang Yongjie. Trend Analysis and Development Thinking of Global Smart Expressway in Digital Age[J]. Highway, 2022, 67(4): 237-242.
- [5] 沙爱民. 高速公路客货系统分置建设对策建议与智慧运行模式探讨[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 1-7.
- Sha Aimin. Discussion on Countermeasures and Intelligent Operation Mode of Division Construction for the Expressway Passenger and Freight Transport System[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 1-7.
- [6] Arora K, Kattan L. Operational and Safety Impacts of Integrated Variable Speed Limit with Dynamic Hard Shoulder Running[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2023, 27(6): 769-798.
- [7] Ma Jiaqi, Hu Jia, Hale D K, et al. Dynamic Hard Shoulder Running for Traffic Incident Management[J]. Transportation Research Record, 2016, 2554(1): 120-128.
- [8] Kononov J, Hersey S, Reeves D, et al. Relationship Between Freeway Flow Parameters and Safety and Its Implications for Hard Shoulder Running[J]. Transportation Research Record, 2012, 2280(1): 10-17.
- [9] Justin Geistefeldt. Operational Experience with Temporary Hard Shoulder Running in Germany[J]. Transportation Research Record, 2012, 2278(1): 67-73.
- [10] Coffey S, Park S. Operational Evaluation of Part-time Shoulder Use for Interstate 476 in the State of Pennsylvania[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1724646.
- [11] Li Duo, Lasenby J. Mitigating Urban Motorway Congestion and Emissions via Active Traffic Management[J]. Research in Transportation Business & Management, 2023, 48: 100789.
- [12] Jaisung Choi, Tay R, Sangyoun Kim, et al. Safety Effects of Freeway Hard Shoulder Running[J]. Applied Sciences, 2019, 9(17): 3614.
- [13] Marco Guerrieri, Raffaele Mauro. Capacity and Safety Analysis of Hard-shoulder Running (HSR). A Motorway Case Study[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 92: 162-183.
- [14] Coffey S, Park S. Part-time Shoulder Use Operational Impact on the Safety Performance of Interstate 476[J]. Traffic Injury Prevention, 2020, 21(7): 470-475.
- [15] Dutta N, Boateng R A, Fontaine M D. Safety and Operational Effects of the Interstate 66 Active Traffic Management System[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2019, 145(3): 04018089.
- [16] 李瑞敏, 叶朕, 李斌. 高速公路临时路肩使用措施优化控制与仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3): 1036-1045.
- Li Ruimin, Ye Zhen, Li Bin. Optimal Control and Simulation of Hard Shoulder Running on Highways[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1036-1045.
- [17] Zhou Weiyi, Yang Mofeng, Lee M, et al. Q-learning-based Coordinated Variable Speed Limit and Hard Shoulder Running Control Strategy to Reduce Travel Time at Freeway Corridor[J]. Transportation Research Record, 2020, 2674(11): 915 - 925.
- [18] Li Ruimin, Ye Zhen, Li Bin, et al. Simulation of Hard Shoulder Running Combined with Queue Warning During Traffic Accident with CTM Model[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11(9): 553-560.
- [19] Li Ye, Li Zhibin, Wang Hao, et al. Evaluating the Safety Impact of Adaptive Cruise Control in Traffic Oscillations on Freeways[J]. Accident Analysis & Prevention, 2017, 104: 137-145.
- [20] Ward J R, Gabriel Agamennoni, Worrall S, et al. Extending Time to Collision for Probabilistic Reasoning in General Traffic Scenarios[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 51: 66-82.
- [21] Li Ye, Wang Hao, Wang Wei, et al. Evaluation of the Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Reducing Rear-end Collision Risks on Freeways[J]. Accident Analysis & Prevention, 2017, 98: 87-95.
- [22] Jack P C Kleijnen. Kriging Metamodeling in Simulation: A Review[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(3): 707-716.
- [23] W C M van Beers, Kleijnen J. Kriging for Interpolation in Random Simulation[J]. Journal of the Operational Research Society, 2003, 54(3): 255-262.
- [24] Mirjalili S. Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications[M]. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [25] Zhang Zhigang, Peng Rui, Qiao Jiangang. Analysis of Traffic Characteristics of Dynamic Open Hard Shoulder Road Based on SUMO[C]//2022 International Conference on Computer Engineering and Artificial Intelligence (ICCEAI). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 100-104.
- [26] 田雨萍, 朱弘戈, 朱晓东, 等. 面向高速公路匝道合流区通行效率的车路协同限速方法[J]. 公路, 2019, 64(8): 310-316.
- [27] 李志斌, 王炜, 李晓伟, 等. 高速公路车辆排队尾部交通

事故时空分布特征[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(4): 80-85, 108.

Li Zhibin, Wang Wei, Li Xiaowei, et al. Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Traffic Accident for Highway Vehicle Queue Tail[J]. Journal of Traffic

and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 80-85, 108.

[28] Yang Hao, Rakha H, Ala M V. Eco-cooperative Adaptive Cruise Control at Signalized Intersections Considering Queue Effects[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(6): 1575-1585.