

控制与决策

Control and Decision

基于二型模糊逻辑的高速公路匝道自适应控制

唐进君, 蒋艾佳, 李明洋, 王超, 孔德兰

引用本文:

唐进君, 蒋艾佳, 李明洋, 等. 基于二型模糊逻辑的高速公路匝道自适应控制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 822–832.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于视觉引导多AGV系统的改进A*路径规划算法](#)

Improved A* path planning algorithm for vision-guided multi-AGV system

控制与决策. 2021, 36(8): 1881–1890 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1670>

[车辆跟随控制策略的状态可达集建模及验证方法](#)

A modeling and verification method of state reachable set for vehicle following control strategy

控制与决策. 2021, 36(7): 1679–1685 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1562>

[基于Frenet坐标系的自动驾驶轨迹规划与优化算法](#)

Trajectory planning and optimization algorithm for automated driving based on Frenet coordinate system

控制与决策. 2021, 36(4): 815–824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0748>

[基于MCPDDPG的智能车辆路径规划方法及应用](#)

The method and application of intelligent vehicle path planning based on MCPDDPG

控制与决策. 2021, 36(4): 835–846 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0460>

[基于生成对抗网络的大规模路网交通流预测算法](#)

Traffic flow forecasting algorithm for large-scale road network based on GAN

控制与决策. 2021, 36(12): 2937–2945 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0333>

基于二型模糊逻辑的高速公路匝道自适应控制

唐进君^{1†}, 蒋艾佳¹, 李明洋¹, 王超², 孔德兰³

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 济南 250000;
3. 山东高速集团智慧管理中心, 济南 250000)

摘要: 入口匝道控制作为高速公路主动管控的重要技术之一, 能够有效解决高速公路合流区拥堵问题, 合理的控制策略是保证控制效果的前提, 为此, 提出一种基于加点策略的 Kriging 辅助模拟退火遗传优化二型模糊控制方法. 该方法能够兼顾高速公路主线和匝道的运行性能, 基于二型模糊逻辑进行控制策略推理, 结合变论域思想和搜索算法调节模糊控制参数, 并通过加点更新的代理模型解决仿真优化中耗时过长的问题. 以济南绕城高速为实例, 对比验证上述控制方法的有效性和优越性, 并针对不同的流量场景设计不同的控制方法. 实验结果表明, 将所设计的控制策略应用于拥堵情况下, 能够在匝道约束内有效优化主线运行状态, 在非拥堵情况下能够在节约计算资源与成本的同时, 进一步提升主线的运行性能.

关键词: 高速公路主动管控; 匝道控制; 二型模糊控制; 变论域控制; 模拟退火遗传算法; 加点策略

中图分类号: U491.5+4 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0033

引用格式: 唐进君, 蒋艾佳, 李明洋, 等. 基于二型模糊逻辑的高速公路匝道自适应控制 [J]. 控制与决策, 2025, 40(3): 822-832.

Adaptive ramp metering for highway based on type-2 fuzzy logic

TANG Jin-jun^{1†}, JIANG Ai-jia¹, LI Ming-yang¹, WANG Chao², KONG De-lan³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd, Jinan 250000, China;
3. Shandong Expressway Group Smart Management Center, Jinan 250000, China)

Abstract: As one of the important technologies of active management and control for highway, ramp metering can effectively alleviate congestion problems in merging areas of highways. A reasonable control strategy is the premise to ensure the control effect. This paper proposes a type-2 fuzzy logic control method optimized by the simulated annealing aided genetic algorithm (SAGA) with the Kriging model based on the infill sampling strategy, taking into account the highway operational performance of main line and ramp. The method uses type-2 fuzzy logic for inference of the control strategy, and combines the variable universe control and the search algorithm to adjust fuzzy control parameters. With a view to solving the expensive optimization problem in simulation optimization, a surrogate model updated by the infill sampling strategy is applied. Taking the highway in Jinan City from Shandong Province as an example, the effectiveness and superiority of the proposed method are verified through the comparative experiments, and different control methods are designed for different traffic scenarios. The results show that the control strategy can productively optimize the traffic operational status of the main line within the constraint of the ramp in congested situation. In non-congested situation, it can further improve the traffic operational performance of the main line while saving computational resource and cost.

Keywords: active management and control for highway; ramp metering; type-2 fuzzy logic control; variable universe control; SAGA; infill sampling strategy

0 引言

高速公路作为现代交通运输的重要基础设施, 凭借高服务水平的特点吸引了大量的交通需求, 同

时也有着合流区拥堵的问题, 主动管控技术在缓解拥堵方面发挥了至关重要的作用^[1]. 针对合流区拥堵问题, 广泛应用的高速公路主动管控技术是入口

收稿日期: 2024-01-07; 录用日期: 2024-06-02.

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2023GK2014); 山东省交通运输厅科技计划项目 (2022B62); 国家自然科学基金面上项目 (52172310); 交通运输行业重点科技项目 (2022-ZD6-077).

[†]通信作者. E-mail: jinjuntang@csu.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

匝道控制,这是一种根据实时道路信息控制匝道信号,调节车辆准入,从而减少主线交通流拥堵、提高合流区通行效率的方法。

按照对交通流的响应方式的不同,入口匝道控制可分为静态控制和动态感应控制。定时控制^[2]是一种典型的静态控制,具有固定的信号配时。ALINEA (asservissement linéaire d'entrée autoroutière) 作为应用最广泛的动态感应控制方法,有效改善了合流区的交通运行状态^[3-4]。以此为基础,学者们对ALINEA进行了扩展,进一步提高了道路的通行效率^[5-6]。随着交通系统愈加复杂,智能控制方法应运而生,模糊神经网络^[7]、模型预测控制^[8]、强化学习^[9]等方法在匝道的自适应控制领域得到了应用。对于难以准确描述的复杂系统,模糊控制具有一定优越性,该方法按照模糊规则进行闭环反馈控制,无需输入准确数据或建立精确模型,在难以量化的非线性问题上具有突出的处理能力^[10]。因此学者们对匝道模糊控制展开了研究和探索,20世纪90年代入口匝道模糊控制理论被提出。Taylor等^[11]通过模拟实验验证了匝道模糊控制器的突出性能;贵舒玥等^[12]采用VISSIM(vision traffic simulator)实现了模糊控制仿真,并与定时控制效果进行对比,得到了模糊控制能够提高主线通行效率、同时兼顾匝道车流的结论。众多研究表明,匝道模糊控制能够有效对高速公路合流区实施主动管控,但当前主流应用的一型模糊控制方法局限于对个体内不确定性进行建模,不能很好地表达个体间不确定性^[13]。为了更加精准地建模语义概念,二型模糊控制成为学术界的研究热点,在智能控制领域蕴含着巨大的发展潜力。基于区间二型模糊集(IT2 FS)的控制方法相对简单、高效且计算成本较低,得到了国内外的广泛关注^[14]。

此外,模糊控制存在参数难以标定、依赖专家经验等问题,优化求解更佳的控制策略具有丰富的理论研究价值^[15]。相比于精确算法,遗传算法(GA)、模拟退火算法(SA)、粒子群算法(PSO)等启发式算法通用性强、求解效率高,在解决大规模的复杂问题方面更加适用。刘佳佳等^[16]利用遗传算法优化模糊控制器,依托SUMO仿真平台验证了基于GA的模糊控制对于提高交叉口通行能力的有效性;Lin等^[17]将模糊控制与多目标差分进化算法相结合,用于城市交叉口信号控制实验,结果表明优化后的控制方法有效降低了车辆平均延误,能够更好地应对复杂多变的交通场景;佃松宜等^[18]应用改进的量子粒子群算法优化区间二型模糊集参数,发现二型模糊逻辑控制器在处理不确定性以及抗扰动能力方面效果

更佳。上述研究实现了控制效果的优化,但单一的搜索算法存在一定局限性,混合搜索算法将不同的优化算法有机结合,充分利用算法自身的优势,提高搜索性能。理论上启发式算法可以找到优化解,然而基于仿真优化的控制方法耗时长、计算量庞大,在工程应用中无法保证实时性,因此简化搜索寻优过程这一问题仍有待探索。

综上所述,本文针对高速公路匝道自适应控制与优化问题,提出一种基于模拟退火遗传算法(SAGA)加点优化的二型模糊控制方法。首先兼顾主线和匝道性能,设计合适的区间二型模糊控制器,实现更精准的入口匝道调节率计算。为了提升二型模糊控制效果、简化控制参数的优化求解过程,结合变论域控制思想^[19-20],提出基于SAGA的多目标优化方法,用于隶属度函数参数的寻优。考虑到优化与仿真过程中存在的迭代次数多、耗费时间长等问题,设计基于加点策略的克里金(Kriging)模型^[21]辅助SAGA进行参数寻优,通过不断增加有效样本点,迭代更新代理模型。最后,构建济南绕城高速公路仿真模型,考虑不同时段的流量场景设计实验,对比不同入口匝道控制方法的控制效果。实验结果表明,本文提出的控制策略能够在匝道排队约束范围内,有效提升主线运行性能,相比其他控制方法具有更好的控制效果。

1 变论域二型模糊控制

1.1 二型模糊逻辑控制

为了更好地描述系统的不确定性,拓展一型模糊逻辑系统,构建两输入、单输出的区间二型模糊控制器。区间二型模糊逻辑控制器(Type-2 FLC)与传统模糊控制器的设计方法类似,模糊逻辑通常表示为“IF-THEN”规则的形式,假设模糊系统设置 M 条模糊规则,第 $m(m=1,2,\dots,M)$ 条规则表示为

$$\text{If } x_A \text{ is } \tilde{A}_m \text{ and } x_B \text{ is } \tilde{B}_m, \text{ Then } y \text{ is } \tilde{Y}_m. \quad (1)$$

其中: x_A 和 x_B 表示控制器输入, y 表示控制器输出, \tilde{A}_m 、 \tilde{B}_m 和 \tilde{Y}_m 表示区间二型模糊集。

一型模糊集的隶属度函数是精确的,元素在集合中具有确定的隶属度值,二型模糊集的隶属度函数不同于一型模糊集,其取值为一个区间,在二型模糊集中元素的隶属度一般表示为一个区间,元素 x_A 在模糊集 \tilde{A}_m 的隶属度区间为

$$[\mu_{\tilde{A}_m}(x_A), \mu_{\bar{\tilde{A}_m}}(x_A)]. \quad (2)$$

其中:区间左端取决于下隶属度函数(LMF),区间右端取决于上隶属度函数(UMF),由LMF与UMF构成的区域表示不确定性覆盖域(FOU)。

在模糊推理过程中,选择合适的 t -norm 算子是保证控制效果的关键. t -norm 算子是针对多个模糊变量进行逻辑运算的方法,常用的 t -norm 算子包括乘法 t -norm 和最小值 t -norm. 采用乘法 t -norm 计算第 m 条规则的激活度区间 $F_m(x)$ 为

$$F_m(x) = [\mu_{\underline{A}_m}(x_A) \times \mu_{\underline{B}_m}(x_B), \mu_{\overline{A}_m}(x_A) \times \mu_{\overline{B}_m}(x_B)]. \quad (3)$$

区间二型模糊控制器模糊推理的输出为区间二型模糊集,需要对二型模糊集进行降型,再去模糊化输出. 降型是区别于一型模糊控制器的关键步骤,基本思想是采用具有代表性的低阶模糊集代替高阶模糊集. 对于二型模糊集,降型的本质是对其内嵌的一型模糊集求取质心,构成新的一型模糊集. 在实际应用中,主要有 5 种降型方法,其中最常用的是 Center-of-Sets(COS) 降型器,如下所示:

$$Y_{\text{cos}}(x) = \bigcup_{\substack{f_m \in F_m(x) \\ y_m \in Y_m}} \frac{\sum_{m=1}^M f_m y_m}{\sum_{m=1}^M f_m} = [y_l, y_r], \quad (4)$$

其中 y_l 和 y_r 表示降型后的区间端点值.

降型后区间左端点值 y_l 的计算公式为

$$y_l = \frac{\sum_{m=1}^L \bar{f}_m \underline{y}_m + \sum_{m=L+1}^M \underline{f}_m \underline{y}_m}{\sum_{m=1}^L \bar{f}_m + \sum_{m=L+1}^M \underline{f}_m}, \quad \underline{y}_l \leq y_l \leq \underline{y}_{l+1}. \quad (5)$$

其中: L 表示转换点,右端点值 y_r 的计算方法同理.

对于 y_l 和 y_r 的求解,目前已经有比较完善的算法体系,大致分为 KM(karnik-mendel) 算法、WM(wu-mendel) 算法和其他降型算法^[23],其中应用最为广泛的是 KM 算法,核心在于迭代寻找合适的转换点. 考虑到这一过程需要消耗大量的计算成本,采用 EKM(enhanced karnik-mendel) 算法求解二型模糊集的质心,减少迭代次数,提高控制器效率. 完成降型步骤后,将 y_l 和 y_r 的算术平均值作为控制器的去模糊化输出.

1.2 二型模糊控制器设计

1.2.1 划分模糊集

匝道合流区拥堵呈现向上游传播的趋势,选取反映主线上游和匝道交通状态的指标作为模糊控制器的输入. 综合考虑,将主线上游道路占有率、匝道排队长度作为输入变量,匝道排队长度的约束范围为 $[0, 200]$,将绿灯延时作为输出变量,模糊集划分结果如表 1 所示. 在表 1 中: NB、NS、NE、ZN、ZE、

ZP、PO、PS、PB 的含义分别表示为负大、负中、负小、零负、零、零正、正小、正中、正大.

表1 模糊集划分情况

	变量	模糊子集
输入	道路占有率	ZE、ZP、PO、PS、PB
	排队长度	ZE、ZP、PO、PS、PB
输出	绿灯延时	NB、NS、NE、ZN、ZE、ZP、PO、PS、PB

1.2.2 选择隶属度函数

隶属度函数用于表征论域内元素属于模糊集的程度,值域为 $[0, 1]$. 目前没有成熟的理论方法来确定隶属度函数的类型和参数,函数设计具有较强的主观性. 由于高斯型隶属度函数的连续性和调节性好,梯形隶属度函数很好地避免了输入微小变化引起的输出突变问题,将高斯型隶属度函数作为输入隶属度函数,梯形隶属度函数作为输出隶属度函数.

1.2.3 设计模糊规则

模糊规则是模糊控制的核心,控制效果的好坏在一定程度上取决于模糊规则的优劣. 实际控制中,模糊规则的设计具有很强的灵活性,一般需要遵守以下原则^[24]: 1) 根据专业知识和控制经验设计. 编写模糊规则时需要考虑模糊规则的数量和覆盖度,保证规则的合理性. 2) 符合实际应用场景. 在高速公路入口匝道场景下,当主线阻塞严重时主线通行应相对优先,而匝道车流量过大时匝道通行应相对优先,防止匝道车流溢出. 3) 按照系统实际需求进行评价和调整. 通过实际交通数据和仿真实验进行模糊规则的验证,并加以优化和调整以达到更好的控制效果. 遵循设计原则,结合仿真实验对比,设计如表 2 所示的 25 条模糊规则.

表2 模糊规则表

主线指标	匝道指标				
	ZE	ZP	PO	PS	PB
ZE	ZE	ZP	PO	PB	PB
ZP	ZN	ZE	ZP	PS	PB
PO	NS	NE	ZN	ZP	PO
PS	NB	NS	NE	ZE	ZP
PB	NB	NB	NS	ZN	ZE

1.2.4 去模糊化

选取面积重心法 (Centroid) 进行去模糊化处理.

1.3 变论域控制

传统模糊控制器的隶属度函数相对固定,在实际控制时可能存在控制方案不合理、效果不佳等问题. 当隶属度函数的论域和输入、输出不匹配时,控制器无法充分利用模糊规则,导致控制精度降低. 本文引入变论域控制,自适应调整模糊控制器论域,在模糊规则数量一定时,通过输入论域伸缩因子将系

统输入与模糊论域进行适配,相当于局部增加模糊规则的数量,提高了控制的精度;通过输出论域伸缩

因子调节控制器输出,保证控制器输出的稳定性.变论域二型模糊控制器的结构如图1所示.

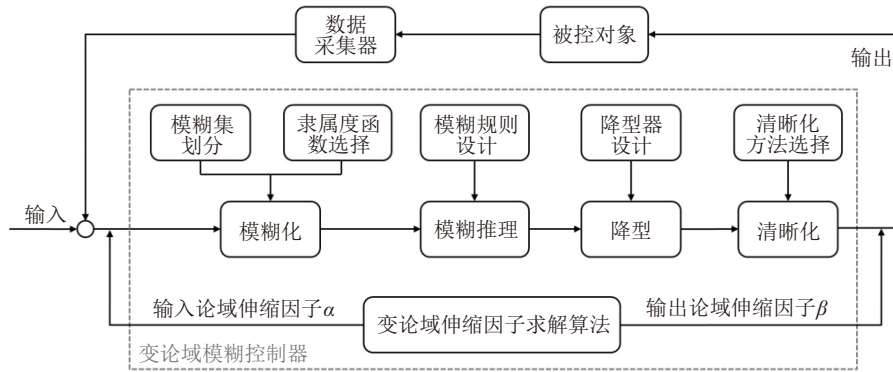


图1 变论域模糊控制器结构

假设模糊控制器初始输入论域为 $[-X_1, X_1]$ 、 $[-X_2, X_2]$, 初始输出论域为 $[-Y, Y]$, 通过输入论域伸缩因子 α_1 、 α_2 和输出论域伸缩因子 β 调整后, 论域为 $[-\alpha_1 X_1, \alpha_1 X_1]$ 、 $[-\alpha_2 X_2, \alpha_2 X_2]$ 、 $[-\beta Y, \beta Y]$.

2 基于加点策略的 Kriging 辅助模拟退火遗传算法

论域伸缩因子通常基于函数等方法进行设计^[25], 应用于复杂多变的交通系统中适应性较差. 为了提高模糊控制系统的自适应能力, 更好地响应复杂的交通环境, 设计 SAGA 进行输入、输出论域伸缩因子的搜索寻优. SAGA 本质上是一种枚举思想的算法, 在仿真评估个体适应度时需要耗费大量的时间和算力成本, 这类仿真优化问题属于昂贵优化问题 (EOP). 为了高效解决 EOP, 引入基于加点策略的 Kriging 模型代替个体适应度的仿真评估过程, 旨在计算资源有限的情况下得到满意的优化结果. 由于 Kriging 模型的初始样本质量会影响模型的拟合精度, 为了避免因样本分布不均导致算法陷入局部最优, 提出基于最大化最小距离准则的拉丁超立方采样方法, 用于 Kriging 模型的初始样本构建.

2.1 模拟退火遗传算法

GA 通过生成庞大的初始种群实现全局搜索能力, 但在局部搜索方面相对较弱; 而 SA 具有较强的局部搜索能力, 采用 Metropolis 准则, 以一定概率接受劣质解, 且接受劣质解的概率随着算法进行逐渐趋近于零, 能够有效避免陷入局部最优. SAGA 是一种将 GA 与 SA 有机结合的混合搜索算法, 具有更好的优化效果, 将 GA 搜索得到的可能解, 采用 SA 进一步搜索, 直到满足搜索终止条件^[26].

step 1: 初始化. 初始化一组解 $(\alpha_1, \alpha_2, \beta)$, 根据变量范围和搜索精度要求, 采用二进制编码将其表示为长度为 d 的染色体, 如图2所示. 生成初始种群,

种群规模为 s , 最大迭代次数为 Q . 规定 SA 的初始温度为 t_0 , 最小温度为 t_{\min} , 降温系数为 r .

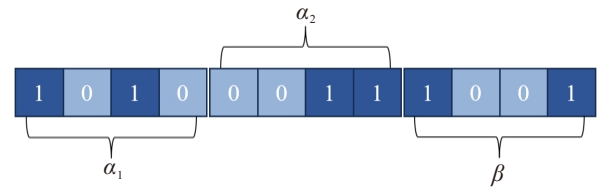


图2 染色体编码

step 2: 设计适应度函数. 行程时间能够反映道路利用率和通行能力, 进而评估路段交通状况. 将优化目标设置为最大限度减少主线行程时间和匝道行程时间, 分别赋予主线、匝道行程时间指标权重, 构造适应度函数, 如下式所示, 适应度值 f 越大, 说明整体交通状况越好, 控制策略效果越好:

$$f = \frac{1}{\mu_m TT_m + \mu_r TT_r} \quad (6)$$

其中: TT_m 、 TT_r 分别表示主线、匝道行程时间, μ_m 、 μ_r 分别表示主线、匝道行程时间指标权重.

step 3: 选择、交叉、变异更新种群. 在选择阶段, 采用精英保留策略, 规定种群内适应度值最高的一定数量的个体不进行交叉和变异操作, 直接保留至子代种群. 其余个体通过轮盘赌法进行选择, 被选择的个体作为父代, 以交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 进行染色体的交叉、变异操作, 生成新的子代个体. 交叉、变异过程如图3、图4所示.

step 4: 对新生成的子代进行模拟退火修正. 根据 Metropolis 准则接受新解.

$$P = \begin{cases} 1, & f_j - f_i \leq 0; \\ e^{-\frac{f_j - f_i}{t_k}}, & f_j - f_i > 0. \end{cases} \quad (7)$$

其中: t_k 表示当前第 k 代的温度, f_i 表示当前解, f_j 表示邻域解.

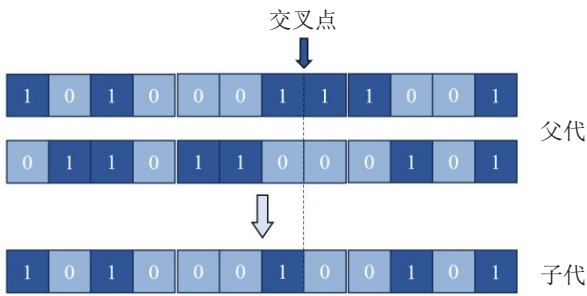


图3 染色体交叉过程

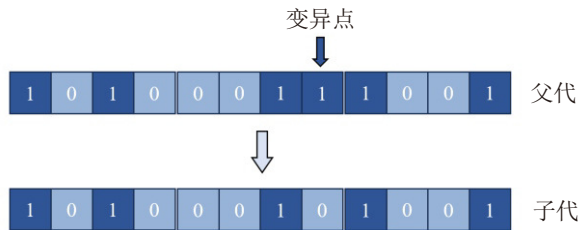


图4 染色体变异过程

由式(7)可知,随着温度下降,接受劣质解的概率趋近于零。

step 5: 迭代至算法终止条件. 算法终止条件为达到最大迭代次数. 当 $Q \leq Q_{\max}$, $Q = Q + 1$ 时, 循环执行 step 3 和 step 4, step 4 中温度 $t < t_{\min}$ 时结束搜索, 终止条件与降温函数有关, 即

$$t_{k+1} = r \times t_k. \quad (8)$$

当 $Q > Q_{\max}$ 时, 种群停止迭代更新, 算法搜索的当前优化解即为论域伸缩因子的最终取值。

2.2 基于加点策略的 Kriging 模型

代理模型是一种模型近似方法, 使用高效的代理模型来近似适应度评估中的仿真模型, 是解决仿真优化问题的有效途径^[27]. 采用地统计学常用的 Kriging 模型代替耗时较长的仿真过程, 通过仿真计算训练样本对应的真实响应值, 并基于该组样本构造近似的数学模型, 一般表达式为

$$y(x) = \sum_{i=1}^m \beta_i f_i(x) + z(x). \quad (9)$$

其中: $y(x)$ 表示 Kriging 模型的近似函数; $f_i(x)$ 表示回归基函数; β_i 表示回归系数向量; $z(x)$ 表示静态随机过程函数, 其协方差表示为

$$\text{Cov}(z(x_i), z(x_j)) = \sigma^2 R(x_i, x_j). \quad (10)$$

为了进一步加速算法寻优过程, 在训练 Kriging 模型时引入加点策略, 辅助 SAGA 算法进行搜索, 能够有效提高模型的寻优效率。

step 1: 以较少的初始样本训练粗糙的 Kriging 模型, 初始样本点的数量与设计变量的个数有关;

step 2: 在搜索迭代过程中, 将对于寻优更加有

利的样本点加入模型训练集, 实现模型的动态更新;

step 3: 循环执行 step 2, 每一次更新都向着模型拟合更加精确的方向进行, 直至满足模型精度要求。

2.3 基于最大化最小距离准则的拉丁超立方采样

样本质量会影响代理模型的拟合精度. 在计算资源有限的条件下, 如果初始样本集中分布, 可能会陷入局部最优. 拉丁超立方采样 (LHS) 是一种分层采样技术, 相比简单随机抽样, LHS 有效避免了重复采样, 采样点分布比较均匀, 但样本是否均匀仍具有一定随机性^[28].

基于最大化最小距离准则的拉丁超立方采样对采样点进一步优化调整, 针对 LHS 得到的样本, 按一定顺序重新分布, 使得采样点更加均匀、空间填充性更好, 有效减少了搜索次数、提高寻优效率. 定义待确定采样点与所有已知采样点之间的距离的最小值为该采样点的特征距离, 以特征距离最大化为目标, 确定采样点位置^[29]. 以二维问题为例, 采样目标表达式为

$$\text{Max} : \text{Min} D(x_i, x_j), \quad i \geq 1, \quad j \leq N, \quad i \neq j. \quad (11)$$

其中: $D(x_i, x_j)$ 表示两个采样点 x_i, x_j 之间的距离, N 表示单一维度上待采样点的数量。

3 仿真与结果分析

3.1 控制模型总体架构

高速公路入口匝道主动管控的关键点在于如何根据道路信息进行合理的信号配时, 以提高主线通行效率, 同时满足匝道的排队约束. 针对这一问题, 提出如图 5 所示的控制优化模型架构, 从主线性能和匝道性能两方面考虑, 寻找最佳的匝道控制策略。

3.2 仿真实验

3.2.1 路段选择及模型建立

本文采用 Python 联合 VISSIM 仿真方法, 以济南绕城高速公路为研究对象, 研究路段为小许家-郭店方向的入口匝道. 主线设计时速为 100 ~ 120 km/h, 双向四车道, 根据实际车流构成, 将车辆输入类型分为客车和货车, 主线车流占比分别为 80 %, 20 %, 匝道车流占比分别为 70 %, 30 %。

对节假日拥堵时段的匝道进行研究, 选取 2021 年 2 月 27 日高速公路门架采集的交通流数据, 当日主线流量变化如图 6 所示. 该路段早高峰为 9 : 00 ~ 11 : 00, 晚高峰为 16 : 00 ~ 18 : 00, 定义 9 : 00 ~ 18 : 00 为匝道控制策略实施时段. 在该时段内, 车流量峰值为 3 397 veh/h, 谷值为 2 210 veh/h. 据此设置仿真车辆输入, 大流量场景下主线 3 400 veh/h、匝道 700 veh/h, 小流量场景下主线 2 200 veh/h、匝道

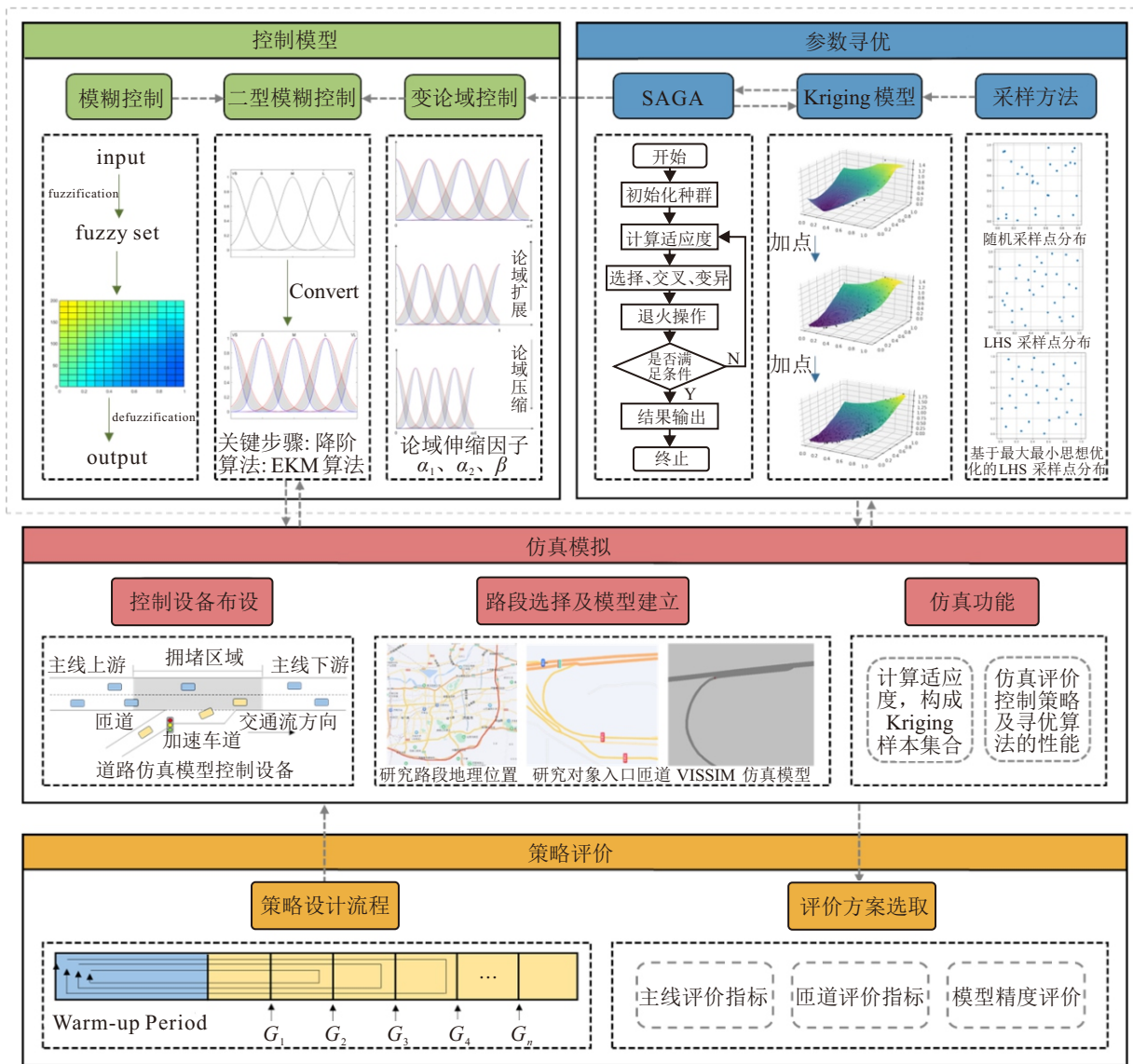


图5 高速公路匝道控制模型总体架构

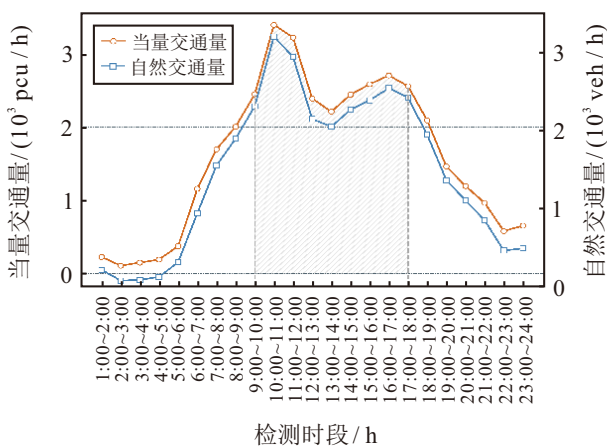


图6 郭店立交主线(小许家-郭店方向)流量数据

450 veh/h, 分别在两种流量场景下, 进行控制策略的对比与评价。

郭店立交入口匝道仿真模型, 在主线合适位置设置数据采集器, 在匝道停车线前设置排队检测器。采集的数据一方面能够反映实时交通状态, 作为模

糊控制器的输入, 另一方面可以作为评价指标, 用于不同控制策略的控制效果对比。

仿真模型在主线不设置信号灯, 在入口匝道与加速车道交汇处设置周期为 120 s 的信号灯, 初始信号配时方案为绿灯时长 $T_g = 58$ s, 红灯时长 $T_r = 58$ s, 黄灯时长 $T_y = 4$ s 保持不变。将第 k 个周期采集的交通参数输入模糊控制器, 计算输出下一个周期的绿灯延时 G_k , 即

$$T_g(k+1) = T_g(k) + G_k. \quad (12)$$

3.2.2 实验方案设计

实验首先进行 1 200 s 预热, 使交通流达到稳定运行状态。预热结束后, 实施控制策略并采集交通流数据, 采集间隔为 120 s。为了避免单次仿真随机性带来的结果差异, 保证实验结果的可靠性和稳定性, 以及仿真实验的一致性和可重复性, 实验规避了影响结果随机性的随机种子取值, 遵循随机性原则选

取3个随机种子为50、90、140,分别进行仿真,并计算评价指标的平均值。

论域伸缩因子的优化参考了滚动寻优的思想,按照时间顺序,依次搜索 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 的优化解。在计算 G_k 时,将第1个周期至第 $k+1$ 个周期作为实验时段,计算实验时段各周期评价指标的平均值,作为寻优和评价的参考依据。

为了对控制策略进行合理评估,遵循典型性、全面性、可比性等原则,共选择9种评价指标,其中包括6种主线评价指标:主线行程时间、主线延误、主线上游车流量、主线下游车流量、主线上游平均车速和主线下游平均车速,以及3种匝道评价指标:匝道排队长度、匝道延误和匝道停车次数。

3.3 结果分析与对比

本文在2种流量场景、3个随机种子的条件下,进行5个控制周期的仿真实验,共寻优24组论域伸缩因子。单次实验选取30个初始样本点,每次种群完成迭代后,向Kriging模型训练集中添加当前种群内适应度最高的5个样本点。代理模型的更新次数取决于模型精度要求,以平均绝对误差(MAE)、均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE)为评价指标,反映Kriging模型对于样本点响应的误差情况。结果显示,Kriging模型在迭代更新过程中,评价指标小幅度波动后,整体呈现下降趋势,在模型更新10次处的响应预测值达到相对较高的精度,此时评价指标较小

且趋于稳定。因此,设置Kriging模型的最大更新次数为10次,单组伸缩因子的优化过程共产生80个代理模型训练样本点,计算时长约为150 min。

3.3.1 不同参数设置的仿真实验结果

适应度函数指标权重是影响控制效果的重要参数。在适应度函数中,分别以高速公路主线、匝道的行程时间来反映主线、匝道的交通状态,以主线、匝道指标权重体现策略寻优时对二者性能的重视程度,权重越大表示在控制时对其性能越重视。为了探究权重对控制策略优化效果的影响、确定不同流量场景的最佳权重取值,分别在不同场景下设置关于指标权重 μ_m 、 μ_r 的对比实验,首先对比了 $\mu_m < \mu_r$ 、 $\mu_m = \mu_r$ 和 $\mu_m > \mu_r$ 条件下的控制效果。

图7所示为大流量场景下的仿真结果,图7(a)~图7(e)表示不同指标权重关系对主线评价指标的影响。结果表明:大流量场景下, $\mu_m > \mu_r$ 时能够更好地调节主线运行状态,对于行程时间、车流量、平均车速等指标均具有一定优化效果。图7(f)和图7(g)表示不同指标权重关系对匝道评价指标的影响,当 $\mu_m > \mu_r$ 时,控制策略对匝道的通行能力会产生一定负面影响,但其影响小于 $\mu_m = \mu_r$ 条件下的控制策略。结合实际控制时一般需要优先保证高速公路主线运行畅通的原则,调整权重的研究范围为 $\mu_m > \mu_r$,表示在匝道控制时,适当地加强对主线性能的优化,能够获得更好的整体管控效果。

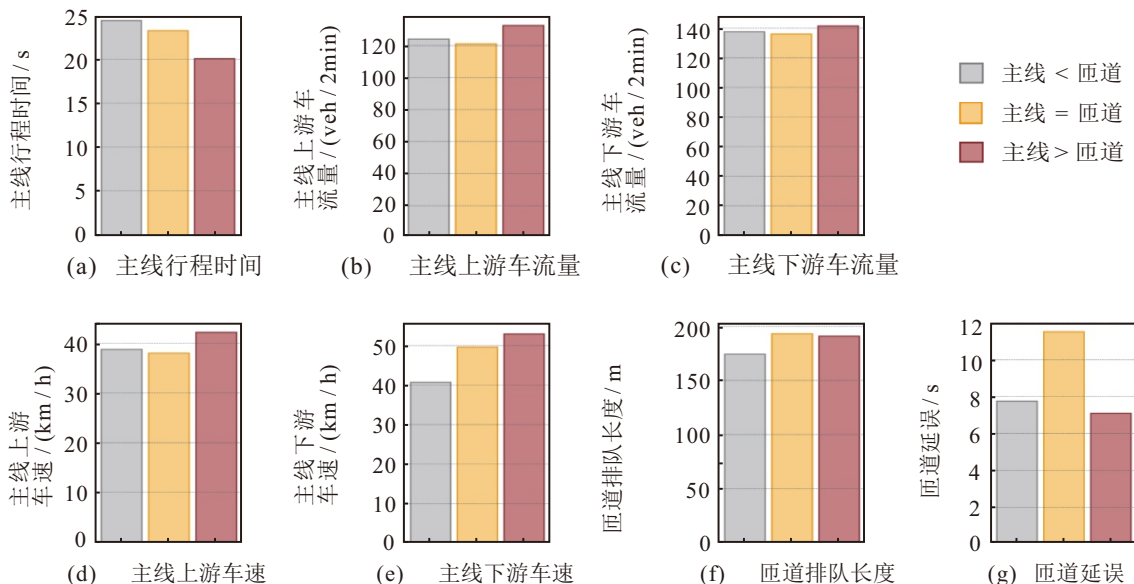


图7 不同目标权重关系下策略评价价值

在此基础上,分析不同场景下的最佳指标权重取值。以0.1为间隔,设置权重对比实验,实验条件分别为0.6:0.4、0.7:0.3、0.8:0.2、0.9:0.1。以大流量场景为例,仿真评价结果如图8所示,图8中标注“*”为每个仿真评价指标最优值对应的指标权重。

结果显示:大流量场景下,选取权重0.6:0.4构造适应度函数,能够在主线行程时间、主线延误、上游、下游车流量、上游车速和匝道延误方面体现最佳控制效果,在权重0.8:0.2时得到相对更优的下游车速,在权重0.9:0.1时得到相对更优的匝道性能。因此,

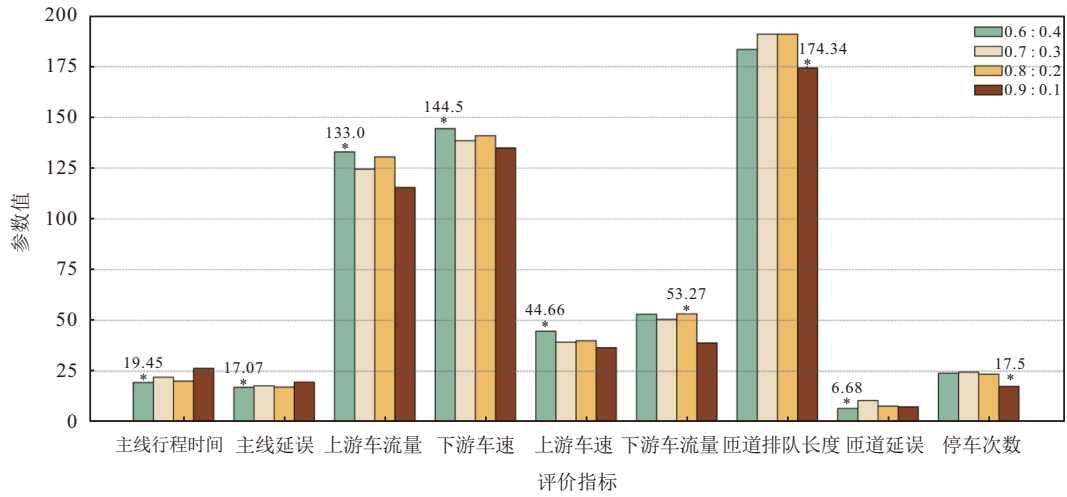


图8 大流量场景下不同权重组合的仿真评价结果

选取指标权重 0.6 : 0.4 构造大流量场景下的适应度函数. 同理, 小流量场景下的最佳指标权重为 0.9 : 0.1.

综上所述, 指标权重会影响控制策略的优化, 在实际应用时, 针对不同路况需要综合考虑、及时响应, 选取合适的指标权重, 以达到更好的控制效果.

3.3.2 不同控制方法的仿真评价结果

针对大流量、小流量两种场景, 应用本文研究方法分别进行仿真实验, 并与定时控制、一型模糊控

制、二型模糊控制进行对比评价, 确定不同流量场景下的最佳控制策略.

图 9 展示了大流量场景下 4 种控制方法的仿真评价结果.

散点表示不同随机种子的仿真结果, 柱体表示评价指标的平均值. 分析可知: 相较于一型模糊控制, 二型模糊控制方法的控制效果更佳, 主线行程时间减少了 5.3 %, 主线延误减少了 7.3 %, 上游车速提升

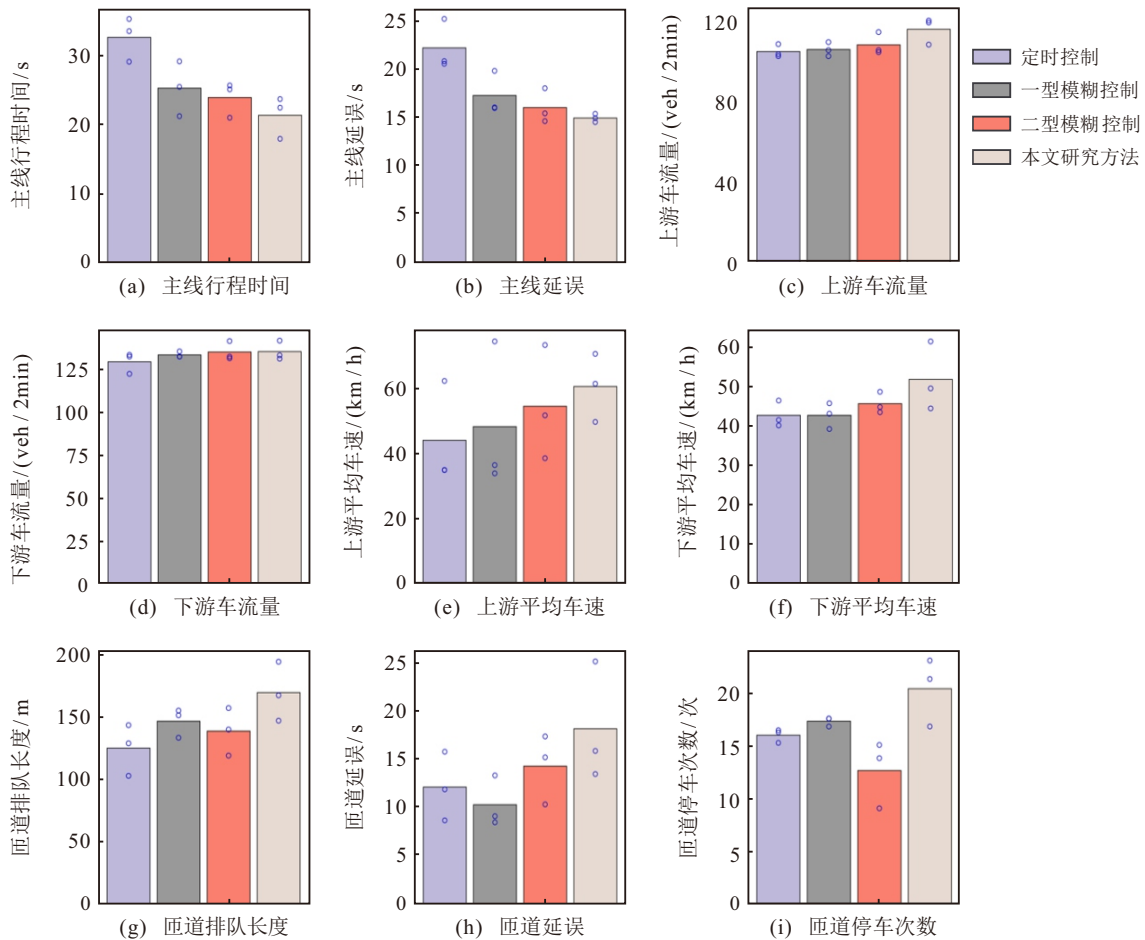


图9 大流量场景下仿真评价指标对比

了 13.1%，下游车速提升了 6.9%，并且匝道排队长度和停车次数相对较小。本文研究方法在此基础上加以改进，相较于定时控制、一型模糊控制、二型模糊控制的主线评价指标均有所提升。相较于定时控制，本文研究方法减少了 34.3% 的主线行程时间和 32.7% 的主线延误，主线上游性能提升明显，增加了 10.5% 的车流量，提升了 37.9% 的平均车速；相较于一型模糊控制，减少了 15.4% 的主线行程时间和 13.5% 的主线延误；相较于二型模糊控制，减

少了 10.6% 的主线行程时间和 6.7% 的主线延误。

综上，本文研究的方法对于主线性能具有良好的优化效果，能够有效地缓解主线拥堵，但匝道评价指标反映出在优化主线的同时，会牺牲一定的匝道性能。

图 10 为小流量场景下的仿真评价结果。不同于大流量拥堵场景，小流量场景下的主线和匝道的输入车流量较小，基本无拥堵情况发生，道路交通保持在一个相对稳定的状态。

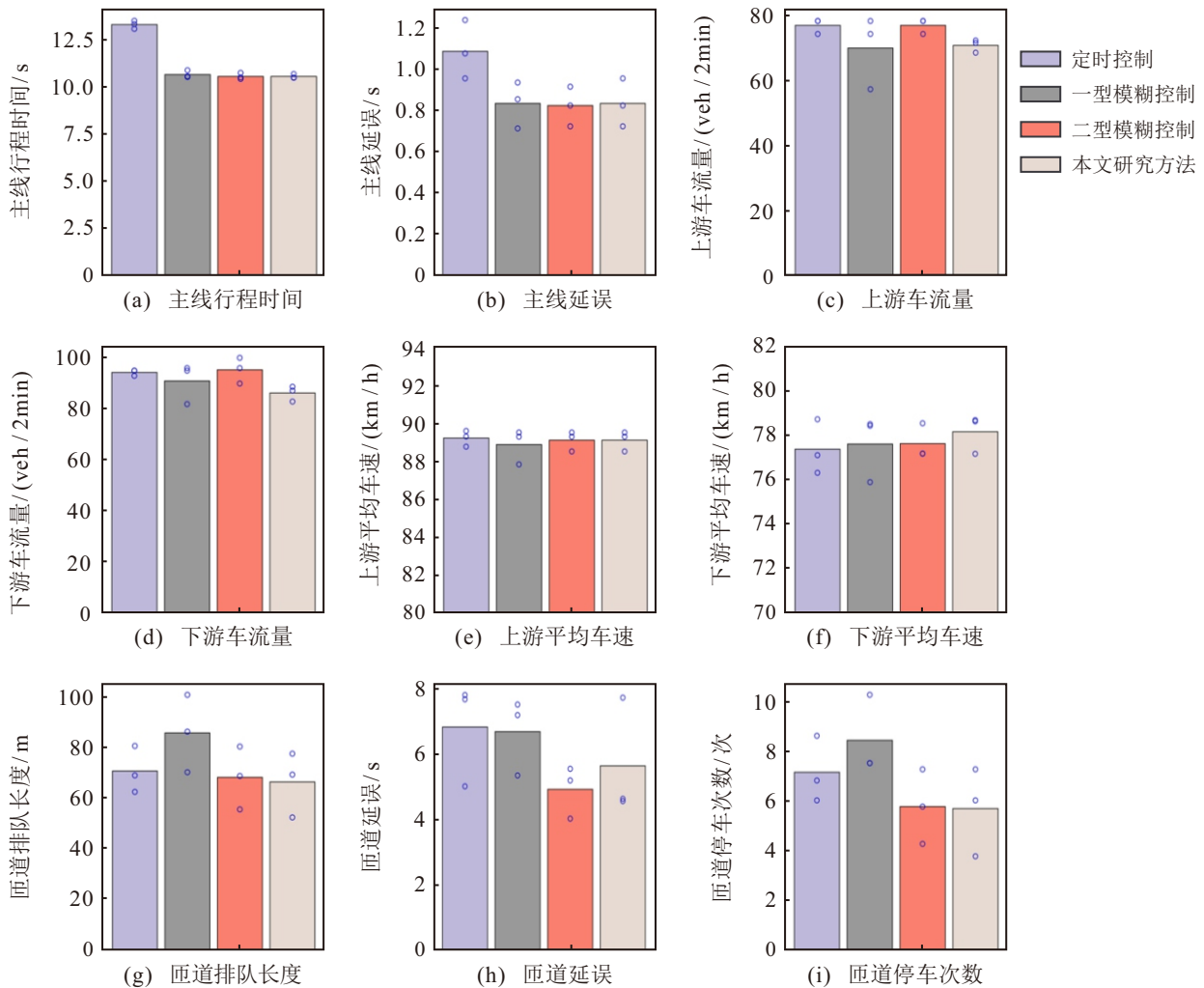


图10 小流量场景下仿真评价指标对比

1) 小流量场景下，本文研究方法与二型模糊控制的控制效果相近。经过试验调优的二型模糊控制器可以较好地适应稳定的交通场景，结合优化策略后对道路性能的提升不明显，反而可能无法实现稳定的控制效果。在此背景下，由于随机种子选取的随机性，控制结果可能会有一定波动，出现诸如图 10(h) 中所示的现象：相较于本文研究方法，二型模糊控制取得了相对略小的平均匝道延误。

2) 综合考虑实际工程应用，时间、计算成本和控制器稳定性等因素，在小流量场景下选取二型模糊

控制方法更合适，采用经过调优的二型模糊控制器可以取得较好的控制效果。相较于定时控制和一型模糊控制，二型模糊控制对主线和匝道的性能均具有更好的优化效果。相比于定时控制，二型模糊控制的优势明显，主线行程时间减少了 20.7%，主线延误减少了 24.1%，匝道排队长度减少了 36.3%，匝道延误减少了 28.0%；相比于一型模糊控制，二型模糊控制的匝道排队长度和停车次数明显较小。

综上所述，在小流量场景下，应实施二型模糊控制策略，能够较好地兼顾主线和匝道性能。

4 结论

本文改进了传统的匝道模糊控制方法,根据实时采集数据自适应调整模糊控制器,在匝道排队的限制下,缓解高速公路合流区拥堵,提升主线性能。首先,采用二型模糊逻辑设计控制器,较好地建模了个体间不确定性。其次,结合变论域思想,以主线和匝道行程时间最小化为优化目标,以无匝道排队溢出为约束条件,设计了一种 SAGA 优化算法,调节模糊控制器参数。考虑到仿真优化自身存在的局限性,提出了基于加点策略的 Kriging 模型来辅助寻优,加速个体适应度的计算过程,并结合基于最大化最小距离准则的拉丁超立方采样方法构建 Kriging 模型的初始样本。最后,建立面向高速公路的 VISSIM 仿真模型,分别在大流量拥堵和小流量畅通两种场景下进行实验,通过济南绕城高速实例验证了本文提出的控制策略的有效性和优越性。虽然本文研究方法具有较好的控制效果,但拥堵较为严重时,仅针对单一入口匝道进行控制,难以彻底解决合流区拥堵问题,甚至导致排队溢出等更加严重的交通问题。因此,在后续的研究中,需要考虑协调多个匝道进行控制,设计合理的协调控制方案,提升高速公路系统的整体管控效果。

参考文献 (References)

- [1] 杨晓光, 胡仕星月, 张梦雅. 智能高速公路交通应用技术发展综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(10): 142-164. (Yang X G, Hu S X Y, Zhang M Y. Development of intelligent motorway traffic application technologies: A review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 142-164.)
- [2] Wattleworth J A. Peak period analysis and control of a freeway system/with discussion[J]. Highway Research Record, 1967, 157(1): 1-21.
- [3] 乔彦甫, 赵斌, 方传武, 等. 基于 ALINEA 算法的城市快速路匝道控制方法[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(5): 1001-1007. (Qiao Y F, Zhao B, Fang C W, et al. Study of ramp control method for urban expressways using improvised ALINEA algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(5): 1001-1007.)
- [4] Abuamer I M, Celikoglu H B. Local ramp metering strategy ALINEA: Microscopic simulation based evaluation study on Istanbul freeways[J]. Transportation Research Procedia, 2017, 22: 598-606.
- [5] Frejo J R D, de Schutter B. Feed-forward ALINEA: A ramp metering control algorithm for nearby and distant bottlenecks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(7): 2448-2458.
- [6] Ci Y S, Wu H L, Sun Y C, et al. A prediction model with wavelet neural network optimized by the chicken swarm optimization for on-ramps metering of the urban expressway[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2022, 26(3): 356-365.
- [7] 张伟, 肖日东, 邓晶. 基于遗传算法的动态模糊神经网络城市快速路入口匝道控制[J]. 公路交通科技, 2017, 13(2): 129-134. (Zhang W, Xiao R D, Deng J. Dynamic fuzzy neural network for controlling entrance ramp of urban expressway based on genetic algorithm[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 13(2): 129-134.)
- [8] van de Weg G S, Hegyi A, Hoogendoorn S P, et al. Efficient freeway MPC by parameterization of ALINEA and a speed-limited area[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(1): 16-29.
- [9] Han Y, Wang M, Li L H, et al. A physics-informed reinforcement learning-based strategy for local and coordinated ramp metering[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 137: 103584.
- [10] 林昱辰, 王嘉文, 邹林志, 等. 城市快速路入口匝道控制方法综述[J]. 物流技术, 2021, 40(6): 63-67. (Lin Y C, Wang J W, Zou L Z, et al. Review on methods of ramp entry control for urban fast roads[J]. Logistics Technology, 2021, 40(6): 63-67.)
- [11] Taylor C, Meldrum D, Jacobson L. Fuzzy ramp metering: Design overview and simulation results[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1634(1): 10-18.
- [12] 贵舒玥, 何烈云, 金石磊. 城市快速路入口匝道交通信号模糊控制算法[J]. 交通科技, 2021(5): 105-110. (Gui S Y, He L Y, Jin S L. Fuzzy control algorithm of import ramp traffic signals on urban expressway[J]. Transportation Science & Technology, 2021(5): 105-110.)
- [13] 伍冬睿, 曾志刚, 莫红, 等. 区间二型模糊集和模糊系统: 综述与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(8): 1539-1556. (Wu D R, Zeng Z G, Mo H, et al. Interval type-2 fuzzy sets and systems: Overview and outlook[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(8): 1539-1556.)
- [14] Mittal K, Jain A, Vaisla K S, et al. A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 95: 103916.
- [15] 章程, 赵靖, 杨晓光, 等. 城市快速路入口匝道控制研究综述[J]. 上海理工大学学报, 2023, 45(4): 332-344. (Zhang C, Zhao J, Yang X G, et al. A review of ramp metering for urban expressway[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2023, 45(4): 332-344.)
- [16] 刘佳佳, 左兴权. 交叉口交通信号灯的模糊控制及优化研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(12): 2401-2408. (Liu J J, Zuo X Q. Research on fuzzy control and

- optimization for traffic lights at single intersection[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(12): 2401-2408.)
- [17] Lin H F, Han Y H, Cai W W, et al. Traffic signal optimization based on fuzzy control and differential evolution algorithm[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(8): 8555-8566.
- [18] 佃松宜, 梁伟博, 赵涛. 基于改进 QPSO 的两轮移动机器人区间二型模糊逻辑控制[J]. *控制与决策*, 2019, 34(2): 261-268.
(Dian S Y, Liang W B, Zhao T. Interval type-2 fuzzy logic control for a two-wheeled mobile robot based on improved QPSO[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(2): 261-268.)
- [19] 周红标, 李杨, 张庆宇, 等. 污水处理过程多变量自适应变论域模糊控制[J]. *仪表技术与传感器*, 2023(1): 107-116.
(Zhou H B, Li Y, Zhang Q Y, et al. Multivariable adaptive variable universe fuzzy control for wastewater treatment process[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2023(1): 107-116.)
- [20] 李韶华, 张培强, 杨建森. 轮毂电机驱动电动汽车主动悬架 T-S 变论域模糊控制研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(24): 201-209.
(Li S H, Zhang P Q, Yang J S. Research on T-S variable domain fuzzy control of active suspension on the electric vehicle driven by an in-wheel motor[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(24): 201-209.)
- [21] 王普毅, 白影春, 林程, 等. 基于 EGO 加点策略的动力电池包多目标优化[J]. *汽车工程*, 2021, 43(10): 1457-1465.
(Wang P Y, Bai Y C, Lin C, et al. Multi-objective optimization of traction battery pack based on EGO strategy with additive sample points[J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(10): 1457-1465.)
- [22] 秦晋栋, 徐婷婷. 二型模糊决策理论与方法研究综述[J]. *控制与决策*, 2023, 38(6): 1510-1523.
(Qin J D, Xu T T. Type-2 fuzzy decision-making theories and methodologies: A systematic review[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(6): 1510-1523.)
- [23] 赵涛岩, 李平, 曹江涛. 二型模糊系统降型算法综述[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(2): 436-444.
(Zhao T Y, Li P, Cao J T. Overview of type-reduction algorithms for type-2 fuzzy logic systems[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(2): 436-444.)
- [24] Varshney A K, Torra V. Literature review of the recent trends and applications in various fuzzy rule-based systems[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2023, 25(6): 2163-2186.
- [25] 张新荣, 康龙, 唐家朋, 等. 基于变论域模糊多参数自整定 PID 控制的智能挖掘机轨迹跟踪[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(2): 240-250.
(Zhang X R, Kang L, Tang J P, et al. Trajectory tracking of intelligent excavator using variable universe fuzzy multi-parameter self-tuning pid control[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(2): 240-250.)
- [26] Liu C, Zhang F Q, Zhang H, et al. Optimization of assembly sequence of building components based on simulated annealing genetic algorithm[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, 62: 257-268.
- [27] Amaran S, Sahinidis N V, Sharda B, et al. Simulation optimization: A review of algorithms and applications[J]. *Annals of Operations Research*, 2016, 240(1): 351-380.
- [28] 王飞梦, 孙靖, 戴红伟, 等. 区间约束违反度引导的区间约束多目标进化算法[J]. *控制与决策*, DOI: 10.10.13195/j.kzyjc.2023.1759.
(Wang F M, Sun J, Dai H W, et al. An interval constraint violation degree guided interval constrained multi-objective evolutionary algorithm[J]. *Control and Decision*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1759.)
- [29] Yi J, Li X Y, Xiao M, et al. Construction of nested maximin designs based on successive local enumeration and modified novel global harmony search algorithm[J]. *Engineering Optimization*, 2017, 49(1): 161-180.

作者简介

唐进君 (1983-), 男, 教授, 博士生导师, 主要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;

蒋艾佳 (2000-), 女, 硕士生, 主要研究方向为高速公路主动式交通管控, E-mail: 224212143@csu.edu.cn;

李明洋 (1997-), 男, 博士生, 主要研究方向为灵活式公交的运筹优化, E-mail: 214201026@csu.edu.cn;

王超 (1989-), 男, 博士, 主要研究方向为智慧高速、高速公路建设, E-mail: Ws8727200@163.com;

孔德兰 (1986-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高速公路交通智慧大脑、指挥调度智慧化, E-mail: kdl418@163.com.