文章编号:1005-0523(2022)06-0066-11

基于SWARM的山地城市干线调控优化方法

荣晓楠[1,2],谭 静[1,2],蔡晓禹[1,2],彭 博[1,2],王玉婷[1,2]

(1. 山地城市交通系统与安全重庆市重点实验室,重庆 400074; 2. 重庆交通大学交通运输学院,重庆 400074)

摘要:山地城市干线承担城市主要交通出行量,具有交通流特性差异大,交通分布不均衡等特点,对交通管控提出了新要求。为提升城市干线交通效率,以山地城市干线系统为研究对象,基于SWARM算法,建立山地城市干线协调管控优化方法。在协调控制层面,建立基于子区延误最小的拥堵源头追溯协调控制方法;在单点控制层面,建立基于分层递阶反馈优化控制,最终结合协调层面和单点层面的调节率生成协调控制方案。实例验证显示:针对干线多车道汇入系统,SWARM优化算法场景相对于无管控场景平均延误和平均停车次数分别降低了22.06%,28.42%;相对于现行管控方案场景,干线多车道汇入系统的平均延误,平均停车次数和平均旅行时间分别降低了23.04%,24.08%,19.38%。研究表明,SWARM优化算法对山地城市干线多车道汇入系统的管控效果良好。

关键词:山地城市;城市干线;SWARM优化算法;协调控制

中图分类号:U491.1 **文献标志码**:A

本文引用格式:荣晓楠,谭静,蔡晓禹,等. 基于SWARM的山地城市干线调控优化方法[J]. 华东交通大学学报,2022,39(6):66-76.

Optimization Method of Mountain City Trunk Line Based on SWARM Algorithm

Rong Xiaonan[1,2], Tan Jing[1,2], Cai Xiaoyu[1,2], Peng Bo[1,2], Wang Yuting[1,2]

(1.Chongqing Key Lab of Traffic System & Safety in Mountain Cities, Chongqing 400074, China;
2. College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Mountain city trunk line undertakes the main traffic volume of the city, which has the characteristics of large differences in traffic flow characteristics and uneven traffic distribution, creating new requirements for traffic control. In order to improve the traffic efficiency of urban trunk line, this paper takes the mountain city trunk line system as the research object and establishes the optimization method of coordinated control of mountain city trunk line based on swarm algorithm. At the level of coordinated control, a coordinated control method for tracing the source of congestion based on the minimum delay in the sub area is established. At the single point control level, the optimal control based on hierarchical feedback is built up. Finally, the coordinated control scheme is generated by combining the regulation rate at the coordination level and the single point level. The example verification shows that for the trunk multi-lane merging system, the average delay and average parking times of swarm optimization algorithm scene are reduced by 22.06% and 28.42% respectively compared with the uncontrolled scene. Compared with the current control scheme scenario, the average delay, average parking times

收稿日期:2022-03-01
基金项目:重庆市技术创新与应用示范专项社会民生类重点研发项目(cstc2018jscx-mszdX0085)

and average travel time of trunk multi-lane merging system have been reduced by 23.04%, 24.08% and 19.38% respectively. It can be proved that the swarm optimization algorithm has a good control effect on the multi-lane merging system of trunk lines in mountainous cities.

Key words: mountain city; urban trunk line; SWARM optimization algorithm; coordinated control

Citation format:RONG X N,TAN J,CAI X Y,et al. Optimization method of mountain city trunk line based on SWARM algorithm[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(6):66-76.

山地城市路网连通性较弱，交通分布不均衡，导致山地城市干线成为城市交通系统的主动脉。城市干线系统是山地城市道路网络的生命线,承担着山地城市主要交通出行量，交通流特性差异大,但山地城市干线道路开口分布不均且一般无辅道,交织复杂,管控难度大。

干线协调控制一般是以交通系统运行效率最大为控制目标,通过全面掌握交通规律来实现协调控制,主要分为定时控制、感应控制及自适应控制。

在定时控制方面,最早由 Morgan 等[1]提出双向绿波信号协调控制的设计方法。Little 等[2]提出的 MAXBAND 模型。随着研究的深入,Chenu 等[3]在博弈论的基础上提出了干线绿波协调并行算法。荆彬彬等[4]提出了双周期干线绿波信号协调控制模型。王殿海等[5]通过优化经典数值算法对绿波带宽度进行改进。龙科军等[6]建立了基于限速和干线绿波的控制模型。曲大义等[7]以延误最小为目标的相位差,建立了干线协调控制相位差优化模型。王晨宇等[8]提出非公共周期的干线协调控制模型。

感应控制研究方面,大多为单点感应控制方法研究。宋现敏等[9]基于逻辑规则,提出了感应协调控制下绿灯时间实时优化方法。何必胜等[10]提出具有“要”“抢”，跳相功能的公交优先预信号感应控制的方法。张蕾等[11]运用模糊控制理论对感应控制进行配时优化,提出一种感应控制的优化方法。顾鸿儒等[12]提出一种基于层次颜色 Petri 网的交叉路口的信号灯动态配时控制模型。张帅鹏等[13]提出一种基于 NEME 编号和合流相位的跳相序感应控制策略,实现相位的动态组合。

干线自适应协调控制现阶段仍不够成熟,国内外的干线自适应控制系统主要有 SCATS[14],SCOOT[15],RHODE[16],OPAC[17]等。国内学者也进行了相关研究。杨义军等[18]提出了基于排队长度的单点自适应信号控制方法。常玉林等[19]基于相邻相位所在方向进口道流量关系制定的模糊规则集得出,以实现干线协调下的单点自适应控制。杜鹏程等[20]基于 ALINEA 控制方法,构建了快速路入口匝道信号控制算法及衔接交叉口信号优化算法。

总体而言,干线协调控制的控制目标主要分为绿波带最宽和延误最小两大类。目前国内外大部分的协调控制研究均在几个交叉口共用同一信号周期的条件下进行优化,然而,该方法在流量波动较大的交通状态下会产生时空资源的浪费,且研究成果多用于平原城市。适用于山地城市的干线系统的协调管控还需要进一步研究。

本文提出一种在轨迹数据驱动下的基于 SWARM 优化算法的山地城市干线多车道汇入系统协调管控方法。SWARM 算法在协调控制层 SWARM1 是通过预测交通流来识别道路瓶颈点,以预防交通拥挤；在单点信号控制层 SWARM2 是利用局部检测器检测交通流数据确定匝道调节率,该算法能较好的利用快速路、道路交叉口及匝道的交通流检测设备。通过对复杂交织区、多路合流等干线关键节点建立多点位的协调管控方法,并应用到干线系统，可进一步提升干线及干线毗邻区域的交通效率,缓解城市道路交通压力。

1　算法简介

1.1　SWARM 算法

20 世纪 90 年代末，美国国家工程技术公司联合加州交通运输局共同研发的控制算法——全系统自适应匝道控制系统(SWARM)。

SWARM 算法是基于交通流密度的匝道实时控制算法,包含两种不同管控层面的匝道控制算法,即管控系统多匝道协调控制层 SWARM1，常规的单点信号控制层 SWARM2，分别从两个层面求解匝道调

节率，再选取二者中较小值作为系统应用的最终入口匝道调节率，该算法技术路线如图1所示。

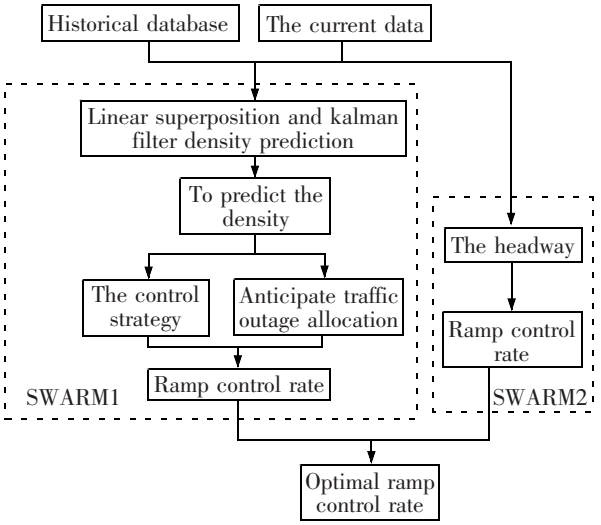


图1 SWARM控制算法技术路线

Fig.1 Technical route of SWARM control algorithm

SWARM算法是通过预测的交通流量数据来计算匝道调节率，故保证SWARM算法的控制效果精准的预测模型和全面的OD数据是算法关键。该算法存在一定的缺点。

1）需要准确的预测模型；

2）需要大量的实际交通流和OD数据；

3）需要设置大量的车辆感应装置，以便获取精准的实际路网交通数据，实施成本较高；

4）模型是静态的，在计算匝道调节率的过程中忽略了一些动态因素。

1.2 SWARM优化算法

针对山地城市干线多车道汇入节点交织区秩序混乱、通行效率低下、拥堵易发等特点，本文将原有的SWARM控制算法进行如下改进。

1）山地城市干线多车道汇入系统是间断流和连续流的混合交通流系统，其由高速路、城市快速路、主干道等城市不同等级道路组合而成，不同等级道路的交通流特性区别较大，且匝道和主线的交通功能在某些节点中相似，仅对匝道进行协调控制无法有效解决干线系统的交通拥堵，据此本文提出考虑将主线和匝道同时作为控制对象来解决这一弊端。

2）在SWARM1部分，改进了基于历史交通密度数据的调节率分配权重计算。本文通过获取大量RFID数据所记录的车辆移动信息，根据轨迹OD数据追溯拥堵源头，以此精确控制干线及入口匝道流量汇入权重。

3）在SWARM2部分，本文引入分层递阶反馈单点优化控制，考虑干线和衔接交叉口对入口匝道的影响，结合影响区控制目标来确定干线和匝道的调节率。

SWARM优化控制算法技术路线如图2所示。

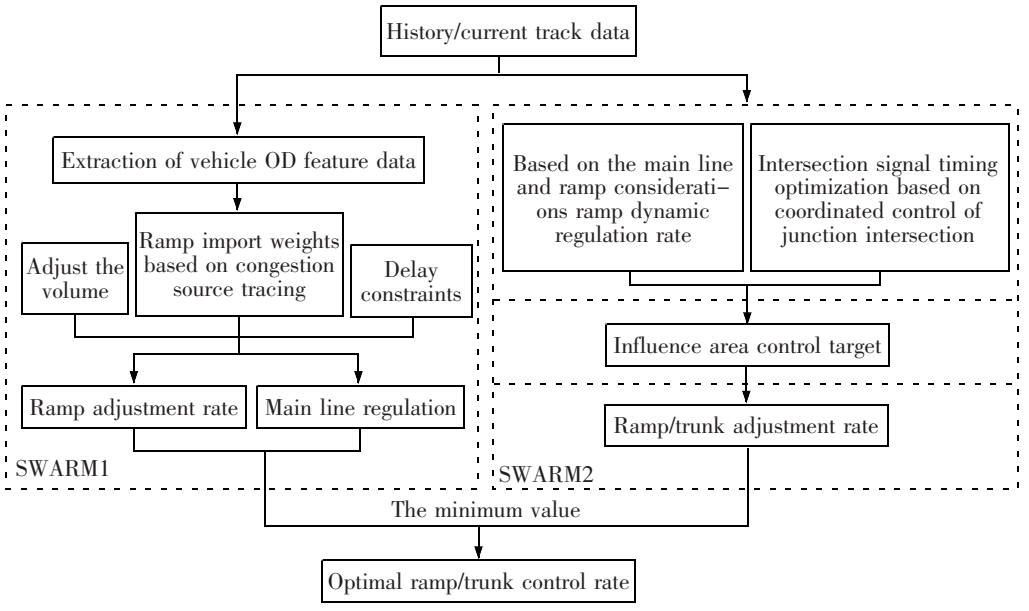


图2 SWARM优化控制算法技术路线

Fig.2 Technical route of SWARM optimized control algorithm

2　基于 SWARM 优化算法的协调管控

2.1　基于子区延误的拥堵溯源调控方法

2.1.1　基本思路

在 SWARM 优化算法的 SWARM1 部分提出了基于子区延误最小的拥堵源头追溯的干线协调控制方法。根据历史交通轨迹数据还原城市干线系统的交通 OD 规律,追溯瓶颈路段产生拥堵的源头,确定上游主线和匝道汇入干线瓶颈路段的流量比例,最终结合控制子区间边界调节总量[21]和控制目标(延误约束)计算主线和匝道的调节率[22]。

2.1.2　模型建立

1) 基于拥堵源头追溯的主线和匝道汇入权重确定。控制子区调节总量按比例分配至上游节点的主线和匝道,该比例值的确定是通过追溯干线瓶颈路段的拥堵源头来完成[23]。提取控制子区内所有出入口的 RFID 数据,从历史 RFID 数据中提取干线系统车辆的移动信息, 并按照车辆 ID 和行车方向对数据进行排序,还原车辆在控制子区内的 OD 信息。根据 OD 信息追溯瓶颈路段车辆的源头,确定权重

$$F_i=(Q_i(k)-Q_{i\text{off}}(k))/Q_i(k) \tag{1}$$

$$f_{ij}=(q_{ij}(k)-q_{ij\text{off}}(k))/q_{ij}(k) \tag{2}$$

式中:F_i 为 i 子区主线的权重;f_{ij} 为 i 子区第 j 个节点匝道的权重;$Q_i(k)$为 i 子区主线交通需求;$q_{ij}(k)$为 i 子区第 j 个节点 k 时段时匝道的交通需求;$Q_{i\text{off}}(k)$为 i 子区主线由出口匝道流出的总量;$q_{ij\text{off}}(k)$为 i 子区第 j 个节点 k 时段入口匝道由出口匝道流出的总量。

2) 控制目标确定。在协调管控方案中,多采用单因素作为管控目标。路网的交通运行效率主要通过车均延误或车均停车次数这两种指标来表征,车均延误和车均停车次数是协调管控目标函数中的关键指标,尤其是车均延误,是目标函数中使用得最为广泛的指标,且被证明为最经济有效的指标之一[24]。故本文的目标函数也采用了控制子区内部各控制点位总延误最小。

$$\min\sum_{j=1}^{m}\left(\sum_{j=1}^{m}\alpha_{ij}D_{s_{ij}}+\sum_{j=1}^{m}\beta_{ij}D_{r_{ij}}\right) \tag{3}$$

式中:$D_{s_{ij}}$ 为 i 子区内第 j 个节点的主线延误;$D_{r_{ij}}$ 为 i 子区内第 j 个节点的入口匝道延误; 由于主线和匝道的道路等级或者道路功能的差异,主线和匝道的延误对路网会产生不同程度的经济影响,故引入 α, β 分别代表主线和匝道的经济效益系数(具体取值根据实际路网情况确定)。

许多学者对欠饱和、近饱和和过饱和状态的延误模型进行综合分析研究,提出了综合延误模型[13],该模型的延误计算主要由两部分组成:正常相位延误 D_1,随机延误和过饱和延误 D_1,即

$$D=D_1+D_2=\frac{q'\cdot C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda\cdot x)}+N_0 \tag{4}$$

式中:q'为车辆到达率;C 为控制节点的信号周期时长,s;λ 为车道绿信比;x 为车道饱和度。正常相位延误 D_1 的计算模型与韦伯斯特延误模型相同,随机延误和过饱和延误 D_2 用过饱和溢出车辆数 N_0 和饱和度 x 的乘积表示。

$$N_0=\begin{cases}\dfrac{1.5(x-x_0)}{1-x} & x>x_0\\ 0 & x\leqslant x_0\end{cases} \tag{5}$$

其中

$$x_0=0.67+\frac{X\cdot G_e}{600} \tag{6}$$

式中:X 为饱和流量;G_e 为有效绿灯时间。

延误主要与车辆到达率、周期和绿信比相关,而某节点主线的车辆到达率 $q'_{s_{ij}}(k)$与通过上游控制点位的车流量,即上游控制点位主线和匝道的调节率有直接关系。

$$q'_{s_{ij}}(k)=F_{ij}S_{ij-1}(k)+f_{ij}r_{ij-1}(k) \tag{7}$$

其中,当上游节点主线控制手段为黄闪,即不做管控时, 主线调节率等于上游节点主线交通需求,即 $S_{ij}(k)=Q_{ij-1}(k)$;同理,当上游节点匝道不做管控时,匝道调节率等于该匝道交通需求,即 $r_{ij}(k)=q_{ij}(k)$,某节点的匝道交通量到达率 $q'_{r_{ij}}(k)$与单位时间到达匝道的交通流量相等。

为保证干线绿波行驶,假设多车道汇入点控制周期时长相同,且不设全红时间,则

$$\lambda\approx\frac{Y_v}{Y} \tag{8}$$

$$Y=\sum_{v=1}^{g}y_v=\sum_{v=1}^{g}\frac{q_v/h}{X_v} \tag{9}$$

$$y_s=\frac{s_{ij}/h}{X_s} \tag{10}$$

$$y_r=\frac{r_{ij}/h}{X_r} \tag{11}$$

式中:λ 为绿信比;Y 为各相位临界车道的交通流量比之和;y_v 为某相位临界车道的交通流量比;v 为相

位编号；g 为相位数；q_v 为该相位车流量；h 为相位控制的车道数；γ_s，γ_r 分别为主线和匝道控制的临界车道交通流量比；X_s，X_r 分别为主线和匝道的车道饱和流量。

3）调节率计算。当瓶颈处的剩余通行能力大于到达瓶颈处的车流量时，该子区内部主线和匝道都不需要做流量调控，即到达瓶颈处车流量与瓶颈处的剩余通行能力的差值 $\Delta_i k \leqslant 0$ 时（变量），该子区内部不需要进行协调管控。

$$\Delta_i k = F_{ij} Q_{ij}(k) + \sum_{j=1}^{m} f_{ij} q_{ij}(k) - C_i(k) \tag{12}$$

匝道和主线的调节率是根据子区内瓶颈处的通行能力、匝道和主线的流量需求以及基于拥堵源头追溯确定主线和匝道汇入多车道控制点位的权重来计算。到达瓶颈处的车流量由两部分组成：该子区内最靠近瓶颈处的有主线控制的节点 y 的主线通过流量和该控制点匝道及下游匝道的流量。再根据拥堵源头追溯确定主线和匝道的调节率，且上游节点的管控会影响下游节点的车辆到达率，从而影响车辆延误。

$$C_i(k) \geqslant F_{iy} S_{iy}(k) + \sum_{j=y}^{m} f_{ij} q_{ij}(k) \quad (y=1,2,\cdots,m) \tag{13}$$

$$r_{ij}(k) = (C_i(k) - F_{iy} S_{iy}(k)) f_{ij} \Big/ \sum_{j=y}^{m} f_{ij} \tag{14}$$

$$S_{ij}(k)_{\min} \leqslant S_{ij}(k) \leqslant S_{ij}(k)_{\max} \tag{15}$$

$$S_{ij}(k)_{\max} = Q_{ij}(k) + l_{sj} \tag{16}$$

$$r_{ij}(k)_{\min} \leqslant r_{ij}(k) \leqslant r_{ij}(k)_{\max} \tag{17}$$

$$r_{ij}(k)_{\max} = q_{ij}(k) + l_{rj} \tag{18}$$

式中：$C_i(k)$ 为 i 子区瓶颈处通行能力；$R_i(k)$ 为 i 子区调节总量；$S_{ij}(k)$，$r_{ij}(k)$ 分别为 i 子区第 j 个节点在 k 时段的主线和匝道调节率；$\Delta_i k$ 为 i 子区内在 k 时段主线和匝道需要减少的交通总量；$Q_{ij}(k)$，$q_{ij}(k)$ 分别为节点 j 主线和匝道在 k 时段的流量需求；l_{sj}，l_{rj} 分别为节点 j 主线和入口匝道排队车辆数。

在实际应用时，若非干线达到极度拥堵，否则都选取 3~4 veh/min 作为匝道最小调节率，当调节率小于 3 veh/min 时，排队等待的车辆会错误认为调节信号出现了问题而出现闯红灯的违规驾驶行为，导致控制效果不佳。

2.2 基于分层递阶反馈的单点控制方法

山地城市干线交通系统相对复杂，由高速路、快速路和城市道路多等级道路组成，故山地城市干线交通系统中的交通管控涉及到 3 个层面的交通流控制，即干线交通流、入口匝道交通流与入口匝道衔接的交叉口汇入匝道的交通流。由于各等级道路的交通流运行规律相差较大，若将三者统一建模求解，将造成模型参数繁杂，模型复杂，且约束条件苛刻，难以求解的问题。故在 SWARM2 部分提出基于分层递阶反馈的单点控制方法[25]。

2.2.1 基本思路

本文基于分层递阶反馈思想，从两方面入手建立单点控制模型：考虑主线和匝道的相互影响，及考虑匝道和衔接交叉口的相互影响。在 SWARM2 部分的基于分层递阶反馈的单点控制方法思路如下。

1）分布式计算：综合考虑的主线交通流和匝道交通流变化，计算主线和匝道的初步调节率，同时，考虑衔接交叉口与入口匝道的相互影响求解衔接交叉口汇入匝道的流量；

2）启发式目标：确定单点控制的管控目标。即以主线和匝道的延误加权之和最小为控制目标；

3）反馈优化：根据单点控制的管控目标，将主线和匝道的初步调节率进行反馈优化。单点控制范围为主线-匝道连接处，匝道，匝道-相接道路连接处及衔接交叉口，如图 3 所示。

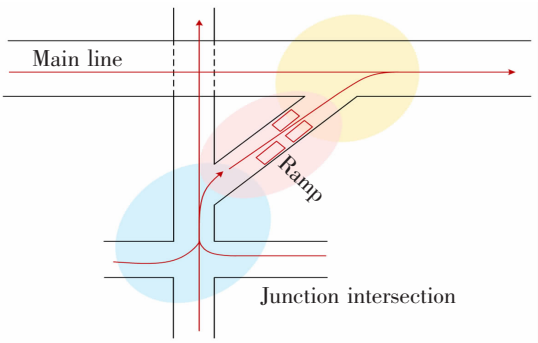


图 3 单点控制范围示意图

Fig.3 Schematic diagram of single point control range

2.2.2 模型建立

基于分层递阶反馈的单点控制模型建立主要分为如下 3 个步骤。

1）分布式计算。分层计算的第 1 层，主要是通过考虑节点主线下游容量与主线及匝道上游交通需求来计算主线和匝道的调节率。若主线下游拥堵，为避免主线排队或通行能力持续降低，应主动减少主线上游或上游匝道的车流驶入主线下游。

$$S_{ij}(k+1)+r_{ij}(k+1)\leqslant C_{ij}(k) \tag{19}$$

式中：$S_{ij}(k+1)$为 i 子区中第 j 个节点在$(k+1)$时段的主线调节率；$r_{ij}(k+1)$为 i 子区中第 j 个节点在$(k+1)$时段得入口匝道调节率；$C_{ij}(k)$为 i 子区中第 j 个节点在 k 时段主线下游通行能力。

单点管控中主线和匝道的调节率同样存在最大最小值

$$s_{ij}(k)_{\min}\leqslant s_{ij}(k)\leqslant s_{ij}(k)_{\max} \tag{20}$$

$$r_{ij}(k)_{\min}\leqslant r_{ij}(k)\leqslant r_{ij}(k)_{\max} \tag{21}$$

分层计算的第 2 层，通过获取衔接交叉口与匝道的 RFID 数据所记录的车辆移动信息，追溯衔接交叉口各进口道汇入匝道的流量比例，求解衔接交叉口汇入匝道的流量。

$$q_{i,j,r,\mathrm{on}}(k+1)=\sum_{i=1}^{n}\sigma_x q_{i,j,J,x} \tag{22}$$

式中：$q_{i,j,r,\mathrm{on}}(k+1)$为由衔接交叉口汇入匝道的总流量；$\sigma_x$ 为衔接交叉口编号为 x 的进口道汇入比例；$q_{i,j,J,x}$ 为第 i 子区内第 j 个节点的衔接交叉口编号为 x 的进口道的交通需求。

2）启发式目标。以解决山地城市干线系统常发性拥堵为目标，在节点方面，以节点总延误最小为控制目标。

$$\min(\alpha\sum_{j=1}^{m}D_{s_{ij}}+\beta\sum_{j=1}^{m}D_{r_{ij}}) \tag{23}$$

式中：$D_{s_{ij}}$为 i 子区内第 j 个节点的主线延误；$D_{r_{ij}}$为 i 子区内第 j 个节点的入口匝道延误；α，β 分别为主线和匝道的优先权系数（具体取值根据实际路网情况确定）。

3）反馈优化。为保证山地城市干线系统的交通运行效率最佳，可通过控制衔接交叉口汇入量，牺牲衔接交叉口的通行能力来降低干线系统的交通压力。衔接交叉口汇入匝道总量与匝道调节率存在如下关系。

$$q_{i,j,r,\mathrm{on}}(k+1)\leqslant N_{ijR}+r_{ij}(k+1)-l_{ij}(k) \tag{24}$$

式中：N_{ijR} 为该匝道可接受排队车辆数；$l_{ij}(k)$为 k 时段排队车辆数。

根据以上约束条件，再结合主线/匝道的调节率计算公式和节点控制目标联合求解调节率的最优值。

3　案例分析

3.1　研究区域交通特性分析

选择重庆市机场路（新牌坊立交–人和立交–东环立交–金渝立交），以及民安大道、人和大道、金渝大道及周边重要节点构成的影响区两部分，简称为机场路及其影响区，机场路干线全长约为 7.5 km，机场路干线的影响区范围有 14 km^2。研究方向为新牌坊立交至金渝立交的单方向，研究区域由 4 个信控交叉口，3 个多车道汇入点，7 个入口匝道，10 个出口匝道及节点间的相接道路构成。如图 4 所示。

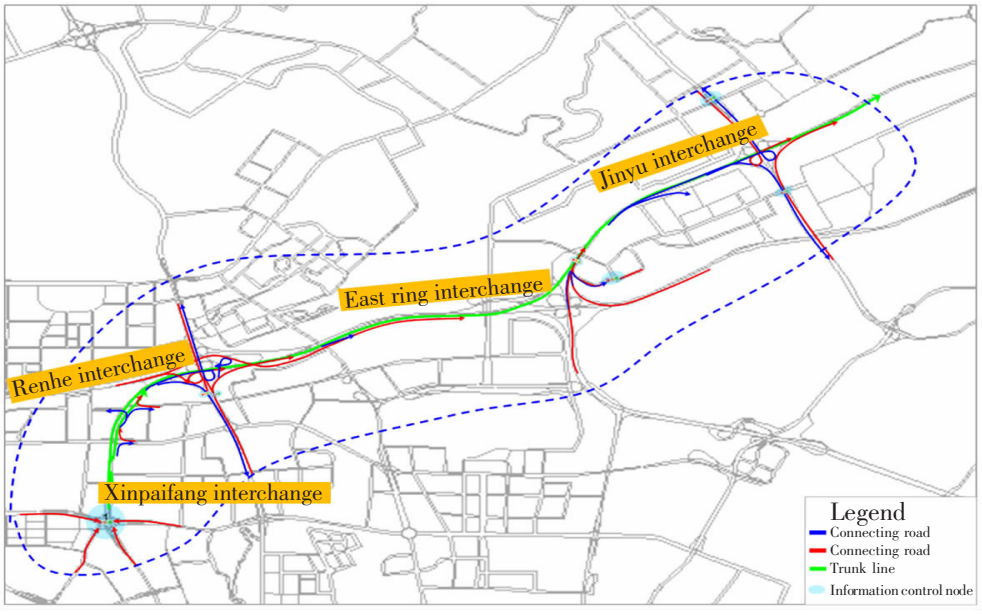


图 4　实证研究区域区位图

Fig.4　Regional map of empirical research

研究区域的交通系统由高速路、城市快速路和主干路等不同等级的城市道路组合而成，如表1所示。

实例研究区域交通拥堵频发，拥堵主要集中在人和立交、东环立交及金渝立交，在晚高峰时段（17:00—19:00）尤为显著，且拥堵持续时间较长，如图5所示。研究区域呈现交通特性差异大、节点间距不均匀、交织区复杂、交通拥堵频发的特点。



图5 东环立交区域部分时段交通状态

Fig.5 Traffic conditions of east ring interchange area in some periods

表1 实证研究区域道路等级

Tab.1 Empirical study on regional road grade

Road name	Road grade
Shanghai–Chongqing freeway	Free way
The inner ring expressway	Expressway
Airport road	Expressway
Hongjin street	Arterial road
Renhe street	Arterial road
Jinyu street	Arterial road
Taishan street	Arterial road
Jintong road	Arterial road
Jiagong zone 1st road	Secondary trunk road
Tianlong road	Branch road
Taihu west road	Branch road
Minxin road	Branch road
Huimin road	Branch road

3.2 研究区域仿真模型建立

本研究需建立基于VISSIM仿真的重庆市机场路及其影响区路网模型，在模型中输入数据包括：道路网络数据、控制管理数据、交通需求数据、驾驶员–车辆数据。利用VISSIM仿真分别试验了无控制、现行管控与基于SWARM优化算法的协调控制3种情景。

基于SWARM优化算法的协调控制方案中的各子区控制点位主线和匝道的调节率，见表2、表3。其中A为内环快速；B为沪渝高速；C为民心路。控制子区Ⅰ仅包含一个控制点位，且为五路环形交叉口，子区内部无需进行协调管控，按SWARM优化算法调节后的流量设置单点最优管控方案。

表2 控制子区Ⅱ调节率

Tab.2 Regulation rate of control sub area Ⅱ

Point	Control sub area Ⅱ			
Position	2	3	4	5
$S_{ij}(k)$/(veh/h)	–	–	3 675	–
$r_{ij}(k)$/(veh/h)	300	180	1 070	–

表3 控制子区Ⅲ调节率

Tab.3 Regulation rate of control sub area Ⅲ

Point	Control sub area Ⅲ				
Position	6			7	8
	A	B	C		
$S_{ij}(k)$/(veh/h)	–	–	–	–	–
$r_{ij}(k)$/(veh/h)	–	1 020	175	965	–

3.3 控制效果对比

为验证本文提出的协调管控方法的效果，使用3种不同的评价方法对3种情景的管控效果进行分析。

3.3.1 车辆路网评价

VISSIM中的车辆路网评价功能可输出整个干线多车道汇入系统中的车辆特征属性。而本文在协调管控层面的控制目标为子区延误最小，故在车辆路网评价中主要选取车辆平均延误和车辆平均停车次数两个参数分别对各控制子区和干线多车道汇入控制系统进行评价，评价结果见表4。

表 4　系统交通运行评价结果
Tab.4　System traffic operation evaluation results

Control scheme		Evaluating indicator	
		Average delay/s	Average number of stops/freq
Control sub area Ⅰ	Uncontrolled	113.68	6.29
	Current control scheme	105.73	5.73
	Swarm optimization algorithm control	95.09	4.68
Control sub area Ⅱ	Uncontrolled	104.27	4.67
	Current control scheme	96.32	4.18
	Swarm optimization algorithm control	54.07	2.20
Control sub area Ⅲ	Uncontrolled	143.21	5.46
	Current control scheme	150.4	5.82
	Swarm optimization algorithm control	112.62	3.73
Trunk multi-lane merging system	Uncontrolled	369.19	16.22
	Current control scheme	358.40	15.73
	Swarm optimization algorithm control	287.75	11.61

由表 4 可知,现行管控方案的平均延误和平均停车次数相对于无管控场景的改进较小，而采用 SWARM 优化算法进行控制,对这两个指标有明显的改进,针对干线多车道汇入系统而言,这两个指标分别降低了 22.06%,28.42%。

3.3.2　干线车辆行程时间和延误评价

通过测量控制子区Ⅱ、控制子区Ⅲ及干线多车道汇入系统的干线车辆的平均延误、平均停车次数和平均行程时间来评价干线的交通运行效果。由于控制子区Ⅰ仅包含一个控制节点,故不对控制子区Ⅰ中的干线交通运行情况进行评价。在 VISSIM 中,从干线设置行程时间测量和延误时间测量来获取这 3 个指标,其中,该评价方法中的平均延误和平均停车次数指测量路段的所有被观察车辆相对无任何干扰情况或无任何信号控制情况来计算平均延误时间和平均停车次数,故在该评价方法中不再将无管控场景纳入对比分析。控制子区Ⅱ、控制子区Ⅲ及干线多车道汇入系统的干线运行评价结果见表 5。

由表 5 可知，采用 SWARM 优化算法进行控制,对干线的平均延误,平均停车次数和平均旅行时间有明显的改善:针对这 3 个指标,SWARM 优化算法相对于现行管控方案,在控制子区Ⅱ中分别降低了 28.94%,23.05%,10.06%，在控制子区Ⅲ中分别降低了 24.25%,24.94%,27.96，在干线多车道汇入系统中分别降低了 23.04%,24.08%,19.38%。总

表 5　干线交通运行评价结果
Tab.5　Evaluation results of trunk traffic operation

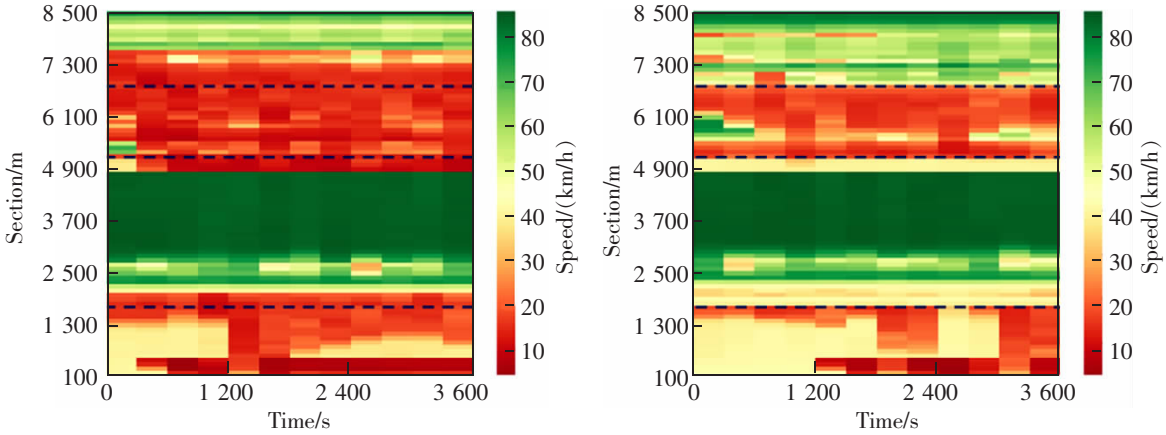
Control scheme		Evaluating indicator		
		Average delay/s	Average number of stops/freq	Average travel time/s
Control sub area Ⅱ	Current control scheme	104.82	4.86	300.58
	Swarm optimization algorithm control	74.48	3.74	270.33
Control sub area Ⅲ	Current control scheme	191.97	7.78	309.01
	Swarm optimization algorithm control	145.40	5.84	222.60
Trunk multi-lane merging system	Current control scheme	297.37	12.83	632.59
	Swarm optimization algorithm control	227.78	9.74	509.97

体而言,SWARM优化算法控制对干线的交通运行效果改善明显。

3.4 缓堵效果评价

利用VISSIM仿真路段区段评价功能捕获新牌坊立交–金渝立交的干线车辆特征属性,以300 s为时间间隔记录每一路段区段(100 m)的平均车速,其中,0~400 m为控制子区Ⅰ,400~4500 m为控制子区Ⅱ,4 500~8 200 m为控制子区Ⅲ。仿真总时长设置为4 800 s,其中包括1 200 s的路网预热时间,3 600 s的评价数据采集时间。将评价结果用Python进行加工,将每个路段区段在不同时间的速度值用颜色表示(颜色划分参照交通状态分级标准[26]),现行管控方案和SWARM优化算法管控方案的速度时空演变图见图7,图8。

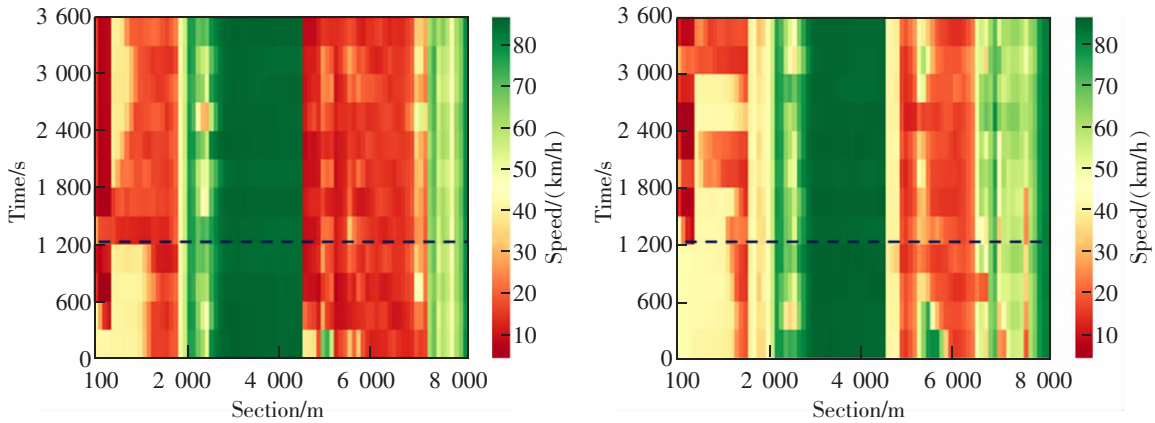
由图7和图8可知,SWARM优化算法管控方案相对于现行管控方案能有效缓解部分路段区段的拥堵,在拥堵路段长度和拥堵持续时间两方面都有较明显的提升。如明显降低了控制子区Ⅲ的拥堵持续时间,提前消散了控制子区Ⅰ的拥堵。



(a) Current control scheme (b) Swarm optimization algorithm control scheme

图7 速度时空演变图空间维度对比

Fig.7 Comparison of spatial dimensions of velocity spatio–temporal evolution diagrams



(a) Current control scheme (b) Swarm optimization algorithm control scheme

图8 速度时空演变图时间维度对比

Fig.8 Comparison of the time dimension of the time–space evolution diagram of speed

4 结论

1)针对实证研究区域,SWARM优化算法场景相对于无管控场景平均延误和平均停车次数分别降低了22.06%,28.42%。

2)针对实证研究区域的干线,SWARM优化算法场景相对于现行管控场景平均延误降低了23.04%,平均停车次数下降了24.08%,平均旅行时

间则节省了 19.38%,且拥堵持续时间和拥堵路段长度都有明显的改善。

3) 采用 SWARM 优化算法对山地城市干线多车道汇入系统进行控制,可有效降低车辆平均延误,减少停车次数,提升山地城市干线系统的运行效率。

参考文献:

[1] MORGAN J T,LITTLE J D C. Synchronizing traffic signals for maximal bandwidth[J]. Operations Research,1964,12(6):896–912.

[2] LITTLE J D C,KELSON M D,GARTNER N H. A versatile program for setting signals on arteries and triangular networks[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board,1981,795:40–46.

[3] CHENU S F,EPELMAN M A,SMITH R I. A parallel algorithm for coordinated traffic signal control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2006,7(4):551–564.

[4] 荆彬彬,徐建闽,鄢小文. 适于双周期的干道绿波信号协调控制模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2018,18(1):73–80.
JING B B,XU J M,YAN X W. Coordinated control model of green wave signal of trunk road suitable for two periods[J]. Transportation System Engineering and Information,2018,18(1):73–80.

[5] 王殿海,杨希锐,宋现敏. 交通信号干线协调控制经典数值计算法的改进[J]. 吉林大学学报(工学版),2011,41(1):29–34.
WANG D H,YANG X R,SONG X M. Improvement of classical numerical calculation method for coordinated control of traffic signal trunks[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2011,41(1):29–34.

[6] 龙科军,高志波,吴伟,等. 城市道路干线信号协调控制与车速引导集成优化[J]. 长安大学学报(自然科学版),2018,38(2):94–102.
LONG K J,GAO Z B,WU W,et al. Integrated optimization of coordinated control of urban road arterial signals and vehicle speed guidance[J]. Journal of Chang′an University(Natural Science Edition),2018,38(2):94–102.

[7] 曲大义,杨晶茹,邴其春,等. 基于干线车流排队特性的相位差优化模型[J]. 吉林大学学报(工学版),2018(6):1685–1693.
QU D Y,YANG J R,BING Q H,et al. Phase difference optimization model based on queuing characteristics of trunk line traffic[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2018(6):1685–1693.

[8] 王晨宇,成卫,李冰. 非公共周期干线协调控制方法[J]. 东北林业大学学报,2021,49(5):157–162.
WAN C Y,CHENG W,LI B. Coordinated control method of nonpublic periodic trunk line[J]. Journal of Northeast Forestry University,2021,49(5):157–162.

[9] 宋现敏,王殿海,金盛. 感应式协调控制下绿信比优化方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2009,39(S2):154–157.
SONG X M,WANG D H,JIN S. Green signal ratio optimization method under inductive coordinated control[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2009,39(S2):154–157.

[10] 何必胜,宋瑞,何世伟,等. 交叉口公交优先预信号感应控制策略仿真实现[J]. 系统仿真学报,2011(9):1909–1914.
HE B S,SONG R,HE S W,et al. Simulation realization of pre–signal induction control strategy for public transport priority at intersections[J]. Journal of System Simulation,2011(9):1909–1914.

[11] 张蕾. 基于模糊控制及绿时利用率的感应控制优化[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版),2012(3):68–71.
ZHANG L. Induction control optimization based on fuzzy control and green hour utilization rate[J]. Journal of Hunan City University(Natural Science Edition),2012(3):68–71.

[12] 顾鸿儒,孙连坤. 基于层次颜色 Petri 网的全感应控制交通信号灯建模与仿真[J]. 计算机工程与科学,2016,38(9):1887–1893.
GU H R,SUN L K. Modeling and simulation of full–sensing control traffic lights based on hierarchical color Petri nets[J]. Computer Engineering and Science,2016,38(9):1887–1893.

[13] 张帅鹏,柳祖鹏,何雅琴,等. 基于 NEMA 编号和合流相位的跳相序感应控制策略[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(5):863–867.
ZHANG S P,LIU Z P,HE Y Q,et al. Phase hopping sequence induction control strategy based on NEMA number and merging phase[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition),2021,45(5):863–867.

[14] 刘智勇,梁渭清. 城市交通信号控制的进展[J]. 公路交通科技,2003,20(6):121–125.
LIU Z Y,LIANG W Q. The progress of urban traffic signal control[J]. Highway and Transportation Science and Technology,2003,20(6):121–125.

[15] STALLARD C,OWEN L E,MEDEIROS D J,et al. Evaluating adaptive signal control using corsim[C]//Simulation Conference. Piscataway,N. J:IEEE,1998.

[16] NATHAN H,GARTNER F J,POORAN C M,et al. Implementation of OPAC adaptive control strategy in a traffic signal network[J]. IEEE Intelligent Transportation System Conference Proceedings,2001,3(2):195–200.

[17] 罗霞,刘澜,刘海旭. 交通管理与控制案例集[M]. 北京:人民交通出版社,2016.

LUO X,LIU L,LIU H X. Collection of traffic management and control cases[M]. Beijing: People's Communications Press,2016.

[18] 杨义军,胡灵龙,张伟,等. 基于排队长度的单点自适应信号控制方法[C]//中国智能交通年会,2016.
YANG Y J,HU L L,ZHANG W,et al Single point adaptive signal control method based on queue length[C]//China Intelligent Transportation Annual Conference,2016.

[19] 常玉林,郑献予,张鹏. 干线协调控制下的单点自适应信号控制方法[J]. 物流技术,2017,36(4):68-73.
CHANG Y L,ZHENG X Y,ZHANG P. Single point adaptive signal control method under trunk line coordinated control[J]. Logistics Technology,2017,36(4):68-73.

[20] 杜鹏程. 快速路入口匝道与衔接交叉口自适应协同控制方法[J]. 交通与运输,2022,38(1):43-48.
DU P C. Adaptive cooperative control method of Expressway on ramp and junction[J]. Transportation and Transportation,2022,38(1):43-48.

[21] 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 Ramp control method of urban expressway based on alinea algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2017,52(5):1001-1007.

[22] 马庚华,何瑞,郑长江,等. 考虑行人过街因素的环形交叉口配时优化方法研究[J]. 华东交通大学学报,2019,36(1):59-65.
MA G H,HE R,ZHENG C J,et al Study on optimization method of roundabout timing considering pedestrian crossing factors[J]. Journal of East China Jiaotong University,2019,36(1):59-65.

[23] 吴启顺,蔡晓禹,蔡明. 基于FCM快速路交通状态判别加权指数研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(6):289-295.
WU Q S,CAI X Y,CAI M. Research on traffic state discrimination weighting index of expressway based on FCM [J]. Science Technology and Engineering,2017,17(6):289-295.

[24] 蔡晓禹,蔡明. 基于FCM山地城市快速路交通状态判别方法研究[J]. 公路,2016,61(7):229-234.
CAI X Y,CAI M. Research on traffic state discrimination method of expressway in mountainous cities based on FCM [J]. Highway,2016,61(7):229-234.

[25] 郭放. 基于MFD的交通诱导与边界控制协同方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
GUO F. Research on collaborative method of traffic guidance and boundary control based on MFD[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2017.

[26] 欧诗琪,俞春辉,马万经. 干线信号协调背景下的网联公交实时优先控制方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022,50(3):339-350.
OU S Q,YU C H,MA W J. Real time priority control method of network bus under the background of trunk signal coordination[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition),2022,50(3):339-350.



第一作者:荣晓楠(1997—),女,硕士研究生,研究方向为交通信息工程及控制。E-mail:275479358@qq.com。



通信作者:蔡晓禹(1979—),男,教授,博士研究生导师,研究方向为深度学习交通视频检测与状态识别。E-mail:caixiaoyu@cqjtu.edu.cn。

(责任编辑:刘棉玲)