

基于多学科设计优化的路网交通分布式协同控制

唐少虎^{1,2†}, 刘小明³, 朱伟¹, 郑建春¹, 尚春琳³

(1. 北京城市系统工程研究中心, 北京 100035; 2. 北京联合大学 城市轨道交通与物流学院, 北京 100101;
3. 北方工业大学 城市道路交通智能控制技术北京市重点实验室, 北京 100144)

摘要: 城市路网交通控制直接影响着交通运行效率, 对其优化研究已成为缓解城市交通拥堵问题的热点之一. 鉴于此, 针对高峰交通路网将其分为过饱和区域与过饱和关联区域, 在采用灰色关联分析-谱聚类方法对关联区域划分的基础上, 构建路网交通分布式协同控制模型, 进一步提出基于多学科设计优化的过饱和区域及其关联区域协同优化求解方法. 通过搭建实例路网模型分析算法优化效果, 结果表明所提出方法能够明显改善路网交通运行效率, 有助于缓解城市通勤高峰时段的交通拥堵和扩散问题.

关键词: 城市路网; 过饱和和交通控制; 区域划分; 分布式协同; 多学科设计优化

中图分类号: U491.4

文献标志码: A

Distributed cooperative control of road network traffic based on multidisciplinary design optimization

TANG Shao-hu^{1,2†}, LIU Xiao-ming³, ZHU Wei¹, ZHENG Jian-chun¹, SHANG Chun-lin³

(1. Beijing Research Center of Urban Systems Engineering, Beijing 100035, China; 2. College of Urban Rail Transit and Logistics, Beijing Union University, Beijing 100101, China; 3. Beijing Key Lab of Urban Road Traffic Intelligent Technology, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Traffic control of urban road networks has a direct impact on the efficiency of traffic operation, and its optimization research has become one of the hotspots to solve the problem of urban traffic jam. In this paper, the peak traffic network is divided into oversaturated region and its associated areas, and the grey relational analysis and spectral clustering method are used to divide the associated areas. Then, a distributed traffic cooperative control model is proposed. Furthermore, a cooperative optimization solution of over-saturated region and its associated areas based on multidisciplinary design optimization is proposed. The optimization results of the algorithm are analyzed by setting up an example network model. The results show that the proposed method can significantly improve the traffic efficiency of the road network, and help to alleviate the traffic congestion and proliferation during rush hour.

Keywords: urban road network; over-saturated traffic control; areas division; distributed cooperative; multidisciplinary design optimization

0 引言

针对城市路网交通拥堵现象持续加剧的问题, 路网交通控制是否合理对于缓解过饱和和交通拥堵问题起着至关重要的作用. 实际情况表明, 城市道路交通拥堵通常源于局部路口进而向四周扩散, 由于传统交通控制只是被动响应交通需求变化, 已经无法满足城市日益增长的交通需求, 故需采用新的信号控制理念, 建立路网交通主动协同控制方法和技术, 以提升路网交通运行效率.

针对路网交通拥堵问题, 国内外研究人员进行了

积极探索, 并取得了丰富的研究成果. 特别是在宏观基本图(Macroscopic fundamental diagram, MFD)应用方面, 由于其符合路网特性, 交通流参数关系明确, 易于获取且便于从全局优化控制参数等特点, 近年来的研究成果较多, 包括其存在性证明^[1-3]、影响因素^[4-7]、网络控制与评价^[8-10]等. 其中, 在路网交通控制方面, Haddad等^[11]提出了基于MFD的分段二阶系统, 在分析区域稳态基础上建立了状态反馈控制策略, 但是在复杂路网结构下难以求解. Hajiahmadi等^[12]建立了区域边界控制器以及切换信号配时方案控制器,

收稿日期: 2018-01-24; 修回日期: 2018-04-23.

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2017M620673); 北京市自然科学基金项目(8184070); 北京市博士后工作经费资助项目(2017-22-078).

责任编辑: 林崇.

†通讯作者. E-mail: tshaohu@163.com.

通过模型预测控制(Model predictive control, MPC)优化区域信号控制,但是没有给出混合控制适用的交通状况. Sirmatel等^[13]在前期基于MPC边界控制的基础上,融合路径诱导驱动机制,模拟了交通拥挤情况下算法的控制效果,但是如何准确实现路径选择分配尚需深入. 丁恒等^[14]提出了多子区边界协调控制方法,建立了多目标边界协调优化模型,但是没有给出子区内部优化控制方法. 张逊逊等^[15]提出了多子区协调控制策略,建立了线性时变离散模型,进一步设计了边界反馈控制器,但是没有给出子区划分依据. Kouvelas等^[16]提出一种适用于异构交通网络的自适应控制方案,基于实时数据应用迭代数据驱动算法优化多变量边界控制器,但是仿真结果表明仅在少数交叉口条件下有效降低了总延误时间. 此外还有一些研究者通过建立路网状态模型,结合智能算法优化控制方案,但依然面临建模复杂、求解较难的问题.

鉴于此,本文将城市交通路网分为过饱和区域与过饱和和关联区域,考虑过饱和区域交通供给不足与关联区域交通需求差异性特点,建立两类区域的分布式协同控制模型. 该模型通过过饱和区域交通优化控制与关联区域协同控制主动调控关联区域进入过饱和区域交通量,保持过饱和区域边界最佳通行能力,即“快出缓进”. 同时,在划分关联区域交通子区的基础上,通过构建过饱和区域与关联区域协同控制,进一步均衡关联区域交通需求压力、提升道路资源利用效率. 通过建立路网分布式协同控制方法,可以提升过饱和和关联区域的交通需求分担能力,降低对过饱和区域及边界交叉口等瓶颈节点的交通压力,从而提高路网整体的交通通行效率.

1 问题分析

如图1所示,假设存在9个交叉口的城市区域路网,分别由3个过饱和区域交叉口和6个关联区域交叉口组成. 交叉口1、2、3的边界输入流量分别为

$$Q_1 = \sum_{i=1}^3 q_{4i}^i, Q_2 = \sum_{i=1}^3 q_{5i}^i, Q_3 = \sum_{i=1}^3 q_{6i}^i. \quad (1)$$

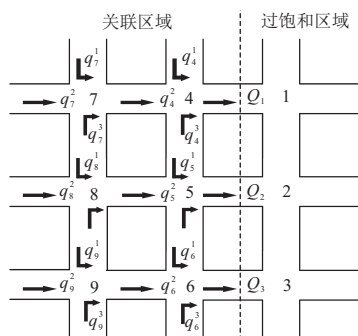


图1 过饱和区域与关联区域示意图

可见流入过饱和边界交叉口的流量分别由其相邻上游交叉口3个进口方向的直行、左转和右转车

流组成,3股交通流直接对下游过饱和区域边界交叉口产生交通通行压力. 这3股不同的交通流又分别来自上游的交叉口,上下游相邻交叉口交通流相互关联. 若不能有效管控关联区域交叉口进入过饱和区域的交通流,则对交通系统运行效率造成严重影响.

同时,如果只是针对过饱和区域进行边界需求控制,则将导致关联区域边界的交通需求增大,对其内部交通运行造成不稳定性和不确定性后果,如排队溢出、拥堵扩散等问题^[17-18]. 为了避免上述问题,有必要建立协同控制模型,对过饱和区域及关联区域进行协同控制. 其中,过饱和关联区域是指与过饱和区域在地理位置上相邻的区域,其内部交通流直接提供了过饱和区域的交通需求,其道路时空资源利用率和信号控制的有效性和合理性对过饱和区域的交通拥堵缓解起着至关重要的作用.

2 路网分布式协同控制

2.1 交叉口关联度计算

区域交通是一个具有白色和灰色特征信息的灰色系统,应用灰色关联分析方法^[19]分析区域内部交叉口的关联度关系,具体步骤如下.

针对交叉口之间的关联度计算,区域内两两相邻的交叉口之间的关系主要有3种: 1) 交通流供给关系 q ; 2) 位置距离关系 l ; 3) 道路属性关系 p . 假设关联区域中存在 n 个交叉口,以区域中的一个交叉口 i 为例,如图2所示,4个方向的3个因素分别表示为 (q_i^1, l_i^1, p_i^1) 、 (q_i^2, l_i^2, p_i^2) 、 (q_i^3, l_i^3, p_i^3) 、 (q_i^4, l_i^4, p_i^4) ,那么确定评价对象数量为 n ,每个对象的评价指标数为12. 交叉口 i 的比较数列记作

$$X_i = \{X_i(k) | k = 1, 2, \dots, 12\}, 0 < i < n + 1, \quad (2)$$

$$X_i = \{q_i^1, l_i^1, p_i^1, q_i^2, l_i^2, p_i^2, q_i^3, l_i^3, p_i^3, q_i^4, l_i^4, p_i^4\}. \quad (3)$$

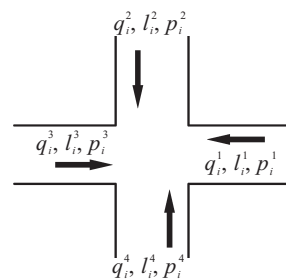


图2 交叉口4个方向3因素示意图

交通流量的参考值设置为进口通行能力 $n_j C_{cap}$, $0 < j < 5$. 其中: C_{cap} 为单车道通行能力, n_j 为进口 j 车道数. 位置距离关系根据交叉口之间的距离由小到大的5个区间分别设置为 $x/4$, $x = [0, 1, \dots, 4]$, 即距离越近相关性越大,距离越远相关度越小. 同理,道路属性关系根据道路的功能级别由高到低分别进行5级量化: $y/5$, $y = [1, 2, \dots, 5]$. 关联度分析的目的在于

为了计算各相邻交叉口的关联度,并依据计算得到的关联度大小进行关联区域划分,关联度值越大交叉口关联关系越紧密,参考数列可记为

$$X_0 = \{X_0(k) = 1|k = 1, 2, \dots, 12\}. \quad (4)$$

需要对比较数列 X_i 中的交通流量进行无量纲化处理,采用上游驶入的交通流量与下游交叉口进口通行能力的比值 α 表示.

处理比较数列后,利用下式分别计算比较序列与参考序列对应元素的关联系数:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}, \quad k = 1, 2, \dots, 12, \quad (5)$$

其中 ρ 为分辨系数, $0 < \rho < 1$, 其值越小,关联系数差异越大,区分能力越强,通常取值为 $\rho = 0.5$.

关联度 γ 表示为

$$r = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W_k \zeta_i(k), \quad 0 < k < m. \quad (6)$$

其中: W_k 为各指标权重系数, m 为某指标采样数量.

由关联度公式(6),可得交叉口与其进口道的上游交叉口关联度为

$$r_i^j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W_{kj} \zeta_{ij}(k), \quad 0 < j < 5, 0 < k < 4. \quad (7)$$

其中: W_{kj} 为交叉口 i 的进口道 j 在 k 个评价指标的权重系数, $\zeta_{ij}(k)$ 为交叉口 i 的进口道 j 在 k 个评价指标的关联系数.

需要指出的是,当计算完全部交叉口与其上游交叉口的关联度后,相邻的两个交叉口由于根据不同的交通流向来确定上下游关系,关联度计算了两次,确定两个相邻交叉口的最终关联度表示为

$$r_{i,i+1} = \max(r_i^{i+1}, r_{i+1}^i), \quad (8)$$

其中 r_i^{i+1} 和 r_{i+1}^i 分别是互为上游交叉口计算所得的两个交叉口之间的关联度.

2.2 过饱和和区域关联区域划分

谱聚类算法^[20-21]将聚类问题转化为对图的最优划分求解问题,算法将研究对象样本看作节点,样本间的相似度(关联度)看作带权的边,目标是找到一种图分割的方法使得不同数据簇之间数据的连接边权重尽量小,而同一数据簇内部的数据连接边权重尽量大.依据谱聚类算法原理,将关联区域内的交叉口视为研究节点,交叉口之间存在的交通流量、路段长度和道路属性视为节点间关联度关系的主要影响因素,

从而建立谱聚类算法基本构成元素,并依据算法步骤进行关联区域划分.

需要注意的是,此分区不同于信号控制子区划分,考虑的因素不仅是为了方便信号协同控制以提升交通通行能力,主要目的是为了缓解因进行过饱和和区域边界需求控制造成关联区域交通压力提升和拥堵扩散等问题.

根据上节关联度计算,可得到关联区域内相邻交叉口之间的关联度定量化关系 $r_{i,i+1}$. 将关联区域内的 n 个交叉口看作 n 个节点,关联度看作两个节点间的权重,根据谱聚类算法定义,可以得到关联加权图 $G(V, E)$. 其中: V 为关联区域内所有交叉口节点集合, $V^t = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$, E 为关联区域内交叉口之间的权重集合. $E = \{r_{ij}\}, i, j = 1, 2, \dots, n$, 从而得到关联度矩阵 W , 并构造对角矩阵 $D_{ii} = \sum_j W_{ij}$, 进而得到拉普拉斯矩阵 $L = D^{-1}W$. 计算拉普拉斯矩阵 L 的特征向量后,构造新的特征矩阵 L' , 其后对特征矩阵 L' 作 K -means 聚类从而得到 K 个关联子区集合 C^s . 最后,经过上述谱聚类算法分析后得到划分后的关联子区集合为

$$C^s = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}, \quad C_i = \{n_1, n_2, \dots, n_j\}, \\ C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_k = V^t, \quad C_i \cap C_j = \emptyset.$$

需要指出的是,划分后关联区域分区的数量及分区收敛条件与关联区域大小有直接关系,即关联区域内交叉口越多,分区数量也越多,反之越少.分区收敛条件根据区域内交叉口数量设置在一定范围内 $[K - N, K + N]$, 即应用 K -means 聚类经过多次循环迭代后将关联区域的分区数量划分为 k 个关联分区时,则认为完成关联区域的划分.

结合基于灰色关联分析的交叉口关联度计算方法,利用谱聚类算法进行关联划分.下面给出关联区域子区划分的详细步骤.

算法1 基于灰色关联分析-谱聚类的关联区域划分算法.

输入: 关联区域 n 个交叉口节点集合 V^t 、比较数列 X_i 和参考数列 X_0 ;

输出: 关联子区集合 C^s .

Step 1: 节点对象确定 V^t 和数据预处理. 整理分析关联区域内部所有交叉口节点,确认节点对象和评价指标相关参数,对节点评价指标数值进行预处理.

Step 2: 节点比较数列 X_i 和参考数列 X_0 . 根据节点的全部评价指标和数据,给出关联区域内全部节点对象的比较数列和参考数列,并对比较数列进行无量

纲化处理.

Step 3: 节点关联系数 $\zeta_i(k)$ 求解. 针对关联区域内节点的多个评价指标, 分别计算比较序列与参考序列对应元素的关联系数.

Step 4: 节点关联度 r_i^j 求解. 根据节点关联系数结果, 分别计算节点与其上游4个方向节点的关联度.

Step 5: 全部节点关联度 r_{all} 计算. 对关联区域中全部节点计算与其相关节点的关联度, 并确认两两节点的最终关联度关系.

Step 6: 构建关联矩阵 W . 已知节点加权图 $G(V, E)$, 根据节点间的关联度, 构建关联度矩阵 $W = [r_{ij}]_{n \times n}$.

Step 7: 构建 Laplacian 矩阵 L . 根据关联度矩阵 W , 计算拉普拉斯矩阵 $L = D - W$.

Step 8: 求解特征向量. 计算矩阵 L 的前 K 个最小特征值和对应的特征向量 v_1, v_2, \dots, v_k .

Step 9: 构建特征矩阵 L' . 根据 K 个 n 维特征向量 v_1, v_2, \dots, v_k 构建 $n \times K$ 维矩阵 L' , 其行向量定义为 y_1, y_2, \dots, y_n , 对应 K 维特征空间内的 n 个点.

Step 10: K -means 算法行聚类. 利用 K -means 聚类算法对矩阵 L' 进行行聚类 $K_{means}(L', K)$, 得到 K 个类簇 $\{B_1, B_2, \dots, B_k\}$.

Step 11: 得到关联子区集合 C^s . 根据 K 个类簇 $\{B_1, B_2, \dots, B_k\}$ 得到关联子区集合

$$C^s = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}, C_j = \{n_i | y_i \in B_j\},$$

$$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, k.$$

2.3 过饱和区域与关联区域协同控制

过饱和区域判别和控制模型采用文献[22]的方法, 在关联区域分区的基础上, 构建包含过饱和和区域

和关联区域的路网协同控制模型.

针对过饱和区域已经建立了基于 MFD 的交通控制模型, 关联区域交通控制策略及模型应满足过饱和和区域交通控制的基本要求和条件, 制定与过饱和和区域交通协同控制方法策略, 从而建立协同控制模型; 另一方面, 需防止交通拥堵由过饱和和区域扩散到关联区域, 导致交通运行效率下降、交通安全隐患等问题, 形成关联区域交通需求及供给的动态平衡策略, 建立关联区域交通供需平衡控制模型.

过饱和区域与关联区域协同控制流程如图3所示, 通过基于 MFD 过饱和和区域交通控制建立过饱和和区域交通控制方案, 结合灰色关联分析-谱聚类关联区域划分建立关联区域分区方案, 进一步基于多学科设计优化构建过饱和区域及关联区域系统级优化和关联区域分区学科级优化模型, 通过迭代控制优化, 从而建立过饱和区域及关联区域的分布式协同控制. 其中, 关联区域与过饱和和区域协同控制以满足过饱和和区域边界需求控制为前提, 然后形成关联区域边界交叉口交通控制策略, 同理关联区域边界上游交叉口交通控制需满足边界交叉口控制要求, 依次递推可得到各级上游交叉口控制方案, 进而建立关联区域分区的控制方案, 从而构建关联区域各分区控制方案.

如图4所示, 为保持路网整体交通运行的稳定性和高效性, 过饱和区域与关联区域间的交通流量应保持在动态平衡状况下, 逐步降低进入过饱和区域的交通流量, 促进过饱和区域内交通流快速有序通过, 从而缓解过饱和区域的交通拥堵状况. 基于此建立过饱和区域与关联区域边界交通流动态平衡模型

$$\min \left[\sum_{i=1}^n (Q_{in}^i - Q_{out}^i) + \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{in}^i - Q_{out}^i)^2 \right]. \quad (9)$$

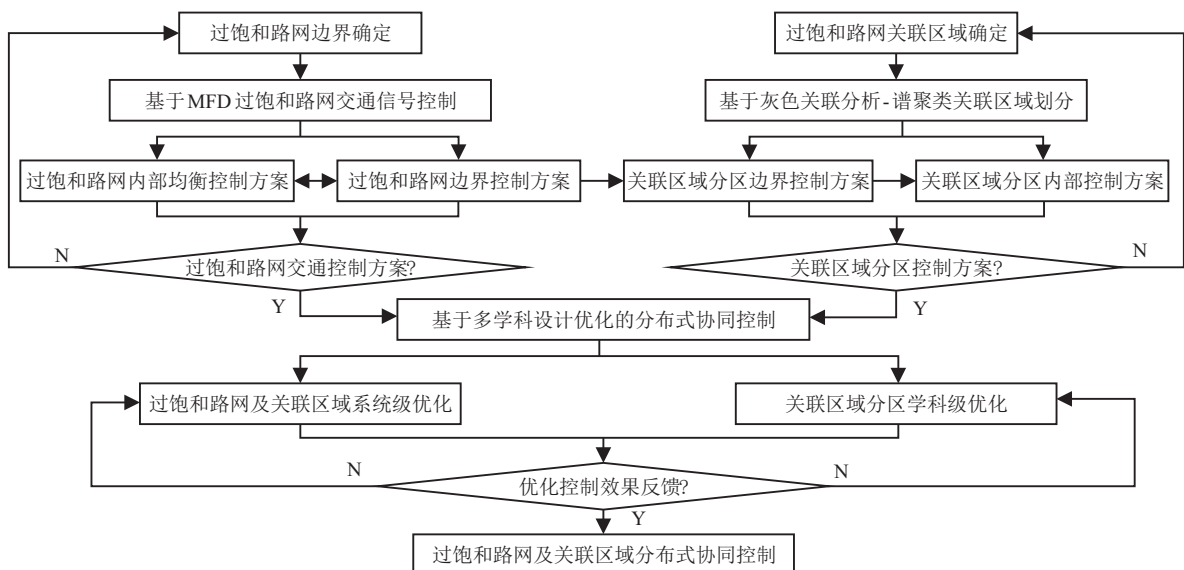


图3 过饱和区域与关联区域协同控制流程

其中: Q_{in}^i 为能够进入过饱和区域的交通流量, Q_{out}^i 为关联区域输出到过饱和区域的交通流量. 模型意义是为缓解过饱和区域交通拥堵状况并使路网保持在较高的通行效率, 使得过饱和区域能够允许进入的交通流量与关联区域全部输出的交通流量差异最小.

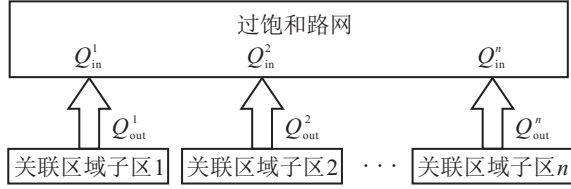


图4 过饱和区域与关联区域交通协同控制模型

通过关联区域子区 i 边界交叉口进入过饱和区域的交通流量为 Q_{in}^i , 即能够进入过饱和区域的交通流量可表示为

$$Q_{in}^i = \sum_{l=1}^b \sum_{j=1}^m k_{lj} g_{lj}(t) C_{cap}. \quad (10)$$

其中: $g_{lj}(t)$ 为过饱和区域边界交叉口输入相位控制器, C_{cap} 为单车道通行能力, k_{lj} 为输入相位对应的车道数, b 为边界交叉口数量, m 为输入相位数量.

关联区域输出到过饱和区域的交通流量为 Q_{out}^i , 即关联区域边界交叉口输出交通流量可表示为

$$Q_{out}^i = \sum_{l=1}^e \sum_{j=1}^c h_{lj} p_{lj}(t) C_{cap}. \quad (11)$$

其中: $p_{lj}(t)$ 为关联区域边界交叉口输出相位控制器, h_{lj} 为输出相位对应的车道数, e 为关联区域边界交叉口数量, c 为输出相位数量.

通过边界交通流动态平衡模型可得到关联区域边界交叉口控制方案, 从而形成过饱和区域与关联区域边界交叉口协同控制策略. 进一步, 基于关联区域边界控制策略依次对边界交叉口相邻的上游交叉口建立交通流平衡模型如下所示:

$$\min \left[\sum_{i=1}^n (q_{up}^i - q_{down}^i) + \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_{up}^i - q_{down}^i)^2 \right]. \quad (12)$$

其中: $q_{up}^i = \sum_{j=1}^p k_j f_j C_{cap}$ 为关联区域上游交叉口输出

到相邻下游交叉口的交通流量, $q_{down}^i = \sum_{j=1}^t k_j f_j C_{cap}$ 为相邻下游交叉口能够放行的交通流量, f_j 为交叉口输入或输出相位控制器. 需要指出的是, 这里提到的上游和下游以及输入和输出, 是针对边界交叉口的上下游方向, 而不是其他几个方向. 其他方向的交通控制方案是在得到当前交叉口输入相位的基础上, 再根据历史流量或实时流量在剩余周期时间中按比例

计算得出.

2.4 约束分析

关联区域输出的交通流量 Q_{out}^i 应不大于实际进入过饱和区域的交通流量 Q_{in}^i , 即满足

$$Q_{out}^i - Q_{in}^i \leq 0, \quad 0 < i < n. \quad (13)$$

同理, 为防止关联区域各分区内部路段发生溢流现象, 关联区域上游交叉口输出到相邻下游交叉口的交通流量 q_{up}^i 应不大于下游交叉口能够放行的交通流量 q_{down}^i , 即满足

$$q_{up}^i - q_{down}^i \leq 0, \quad 0 < i < m, \quad (14)$$

其中 m 为关联分区交叉口数量.

同时, 要避免非输入相位下交通流出现溢出问题, 针对这种情况需考虑其他相位设置的合理性和可行性因素, 从两个方面进行预防: 一方面与同交叉口其他非输入相位进行协调, 优化相位时间, 提高交通流较大相位的通行能力; 另一方面, 与上游交叉口进行协同控制, 在下游路段发生溢流前进行绿灯相位早断, 切断持续产生的交通需求以避免对交叉口交通安全有序运行的不良影响, 即建立如下策略:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r y_{up}^i(t) n_i C_{cap} - \sum_{j=1}^t y_{down}^j(t) n_j C_{cap} < l_{max}, \\ y_{down}^x(t) = \frac{q_{down}^j(t)}{\sum_{x=1}^e q_{down}^j(t)} \sum_{x=1}^e y_{down}^x(t). \end{cases} \quad (15)$$

交叉口所有相位还需满足

$$\begin{cases} \sum y(t) + \sum g(t) = C_{eff}, \\ y_{min} < y(t) < y_{max}, \\ g_{min} < g(t) < g_{max}. \end{cases} \quad (16)$$

其中: $y(t)$ 为非输入相位有效绿灯时间, $g(t)$ 为输入相位有效绿灯时间, C_{eff} 为周期有效绿灯时间.

3 基于多学科设计优化求解

3.1 基本框架

考虑到关联分区的并行分布式信号控制优化问题, 基于不同分区控制需求的异同, 通过构建各区的优化目标进一步确定关联分区优化问题的设计变量和约束条件. 同时关联区域与过饱和区域以及关联分区之间还存在协同控制关系, 故采用多学科设计优化中的协同优化方法 (Collaborative optimization, CO)^[23-24], 基于多学科设计优化的过饱和区域及其关联区域分布式协同优化框架, 如图5所示.

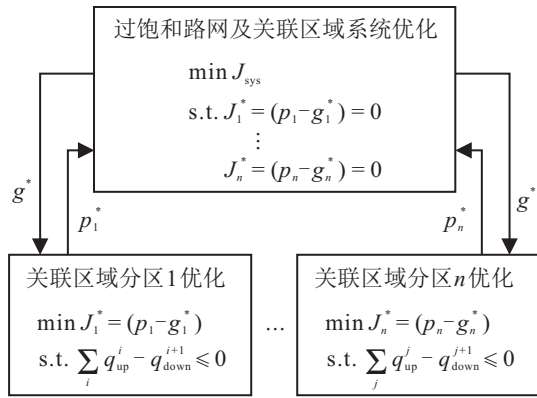


图5 过饱和区域及关联区域分布式协同优化框架

系统级优化是对过饱和区域及其关联区域所有耦合和共享的边界信号控制器进行系统优化,满足过饱和区域边界输入流量与关联区域输出的流量一致性约束,关联区域的边界控制器服从系统分配的控制方案,即系统全局变量. 学科级优化是关联区域各分区基于系统级下发的边界控制方案,在满足自身约束下,使得关联区域边界控制器控制方案与系统下发方案差异最小化,经过迭代反馈过程,建立对分区内各交叉口的逐级控制优化.

3.2 求解模型

根据上述框架和基本思想,分别给出过饱和区域及关联区域系统级优化模型和关联区域分区学科级优化模型.

过饱和区域及关联区域系统级优化模型为

$$\left\{ \begin{aligned} & J_{\text{sys}} = \min \left[\sum_{i=1}^n \left(\sum_{l=1}^b \sum_{j=1}^m k_{lj} g_{lj}^*(t) C_{\text{cap}} - \sum_{l=1}^e \sum_{j=1}^c h_{lj} p_{lj}(t) C_{\text{cap}} \right) + \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{l=1}^b \sum_{j=1}^m k_{lj} g_{lj}^*(t) C_{\text{cap}} - \sum_{l=1}^e \sum_{j=1}^c h_{lj} p_{lj}(t) C_{\text{cap}} \right)^2 \right]; \\ & \text{s.t. } J_1^* = \sum_l (p_{lj} - g_{lj}^*)^2 = 0, \\ & \quad \vdots \\ & \quad J_n^* = \sum_l (p_{lj} - g_{lj}^*)^2 = 0. \end{aligned} \right. \quad (17)$$

其中: $g_{lj}^*(t)$ 为过饱和区域边界交叉口输入相位控制器, k_{lj} 为过饱和区域边界交叉口输入相位对应的车道数, $p_{lj}(t)$ 为关联区域边界交叉口输出相位控制器, h_{lj} 为关联区域边界交叉口输出相位对应的车道数, n 为关联子区数量, b 为过饱和区域边界交叉口数量, m 为相应的过饱和区域边界交叉口输入相位数量, e 为关联区域边界交叉口数量, c 为相应的关联区

域输出相位数量.

关联区域分区学科级优化模型如下:

关联分区1为

$$\min J_1^* = \sum_l (p_{lj} - g_{lj}^*)^2; \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \sum_i \left(\sum_{j=1}^p k_j^{i+1} f_j^{i+1} C_{\text{cap}} - \sum_{j=1}^t k_j^i f_j^i C_{\text{cap}} \right) \leq L_{\text{max}}^i.$$

当 i 为边界交叉口时,有

$$\sum_{j=1}^p k_j^{i+1} f_j^{i+1} C_{\text{cap}} - \sum_{j=1}^t k_j^i p_{lj} C_{\text{cap}} \leq L_{\text{max}}^i,$$

$$y_i^x(t) = \frac{q_i^j(t)}{e} \sum_{x=1}^e y_i^x(t),$$

$$\sum y(t) + \sum f(t) = C_{\text{eff}}^i,$$

$$f_{\text{min}} < f < f_{\text{max}}, y_{\text{min}} < y(t) < y_{\text{max}}.$$

⋮

关联分区 n 为

$$\min J_n^* = \sum_l (p_{lj} - g_{lj}^*)^2; \quad (19)$$

$$\text{s.t. } \sum_i \left(\sum_{j=1}^p k_j^{i+1} f_j^{i+1} C_{\text{cap}} - \sum_{j=1}^t k_j^i f_j^i C_{\text{cap}} \right) \leq L_{\text{max}}^i.$$

当 i 为边界交叉口时,有

$$\sum_{j=1}^p k_j^{i+1} f_j^{i+1} C_{\text{cap}} - \sum_{j=1}^t k_j^i p_{lj} C_{\text{cap}} \leq L_{\text{max}}^i,$$

$$y_i^x(t) = \frac{q_i^j(t)}{e} \sum_{x=1}^e y_i^x(t),$$

$$\sum y(t) + \sum f(t) = C_{\text{eff}}^i,$$

$$f_{\text{min}} < f < f_{\text{max}}, y_{\text{min}} < y(t) < y_{\text{max}}.$$

其中: p_{lj} 为关联分区优化的最优解; g_{lj}^* 为系统级优化的最优解,即系统级分配给各学科级的控制变量; $f(t)$ 为输入相位有效绿灯时间; $y(t)$ 为非输入相位有效绿灯时间.

4 实例分析

4.1 路网模型

为验证本文算法的有效性,以北京望京地区作为研究实例建立路网模型. 已知该路网东起利泽中二路,西至望京西路,南临湖光中街,北接望京北路,总面积约2平方公里,路网由23个信号交叉口 I_1, I_2, \dots, I_{23} 、36个内部路段 $L_{1-2}, L_{2-3}, \dots, L_{22-23}$ 组成.

应用交通仿真软件 VISSIM 建立望京地区路网仿真模型,经实地调查、数据分析、路网搭建、初始

配时、流量设置、检测器配置、参数标定等一系列基础工作后,最终形成如图6所示的路网仿真模型,其中路网模型参数标定采用文献[25]方法进行校正。

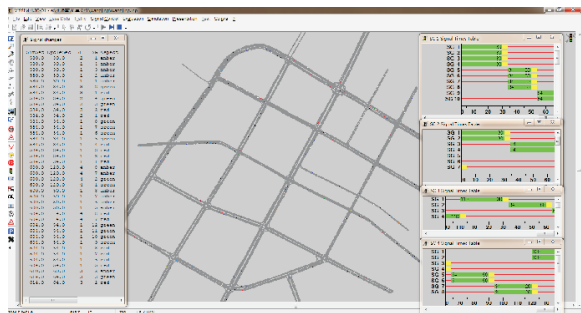


图6 北京望京仿真路网模型

4.2 区域划分

在路网动静态交通数据调查的基础上,对路网交叉口间距、路段交通流量以及道路功能属性整理分析,建立该地区路网的动静态交通数据信息,并依据本文所提出方法进行子区划分。应用Matlab实现算法并对所建实例路网进行关联区域划分,最终得到关联区域分区划分结果如图7和表1所示。

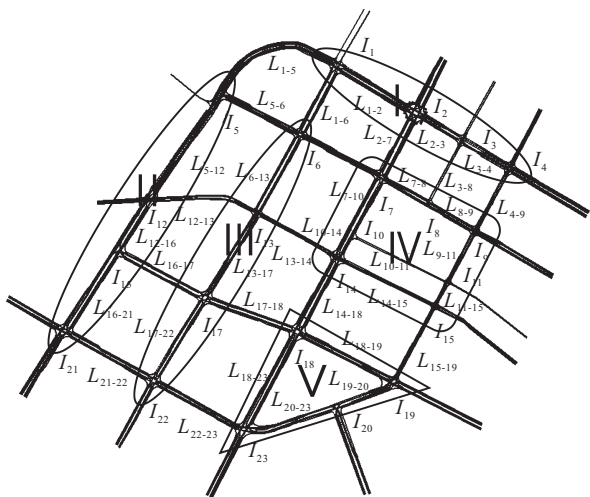


图7 区域分区划分结果

表1 关联区域各分区包含交叉口信息表

分区	交叉口
1	I_1, I_2, I_3, I_4
2	$I_5, I_{12}, I_{16}, I_{21}$
3	$I_6, I_{13}, I_{17}, I_{22}$
4	$I_7, I_8, I_9, I_{10}, I_{11}, I_{14}, I_{15}$
5	$I_{18}, I_{19}, I_{20}, I_{23}$

4.3 仿真分析

针对仿真路网车流量输入,分别选用低峰(06:00~07:00)、平峰(11:00~12:00)和晚高峰(18:00~19:00)车流量数据,每种交通状态分别采用工作日(周一)和周末(周六)两种车流量数据,针对不同的交通流量,分别选用固定信号配时、干线协调控制、区域协同控制3种信号控制方式进行在环仿真,其中干道

协调控制的子区与实际干道包含的交叉口一致,区域协同包括过饱和区域以及关联区域划分后的多个子区协同,且相同交通状态下的子区划分不变。选取车辆平均延误时间 T_{dla} 、平均停车次数 T_{stp} 、平均行驶速度 V_{avg} 以及路网总延误时间 T_{all_dla} 作为评价指标,对3种控制方式下的仿真控制效果进行分析和评价。

每种情况分别用不同的随机种子仿真10次,每次仿真时间为4500s。仿真开始的900s为预热时间,此段时间的所有指标数据不计入统计数据,只取其最后一小时仿真结果数据,统计的评价指标数据为10次仿真结果的算术平均值。下面分别给出4个指标在低峰、平峰以及高峰等不同交通状态下3种控制方式效果的对比分析。

图8为工作日和周末不同交通状态下3种控制方式的延误时间对比。可以发现,固定配时下的车辆平均延误时间无论在工作日还是周末的不同交通状态中数值是最大的,区域协同控制的延误时间数值是最小的,干线协调控制介于两者之间。其中,工作日和周末低峰情况下的干线协调以及区域协同控制延误差别不大,当交通状态变为高峰时,区域协同控制延误改善效果明显好于干线协调,反映了干线协调在大交通流量下的能力局限性,相反,通过路网分布式协同控制,降低了车辆的平均延误时间,有助于缓解交通拥堵现象。

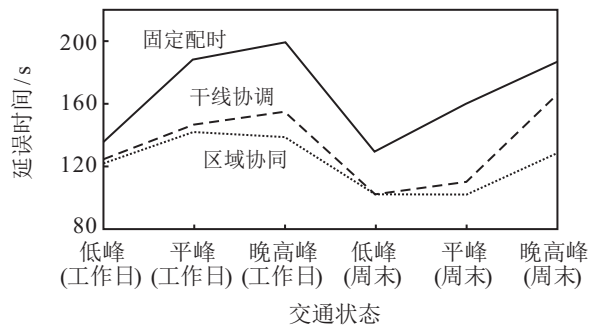


图8 3种控制方式的延误时间对比

图9为工作日和周末不同交通状态下3种控制方式的平均速度对比。区域协同控制的车辆平均速度最大,固定配时控制车辆平均速度最小,干线协调

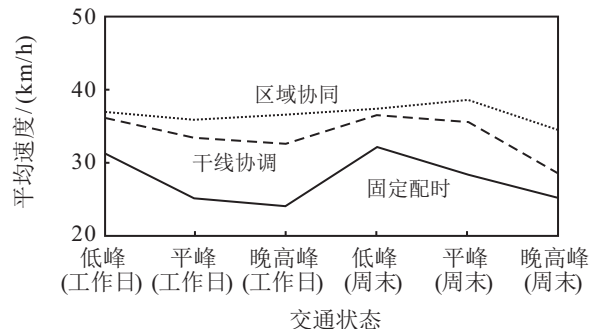


图9 3种控制方式的平均速度对比

控制的车辆平均速度介于两者之间. 其中, 区域协同的平均速度折线从工作日低峰一直到周末晚高峰都保持在较为平稳的状态, 固定配时的速度波动变化最大, 晚高峰平均速度下降明显, 而通过区域协同控制的路网平均速度得到明显提升, 表明通过区域主动分布式协同控制, 使路网交通保持了较高的通行能力.

图10为工作日和周末不同交通状态下3种控制方式的停车次数对比. 固定配时的停车次数最多, 干线协调停车次数次之, 区域协同控制停车次数最少, 固定配时的停车次数在不同交通状态下的变化幅度较大, 高峰停车次数增长明显, 区域协同在工作日平峰和晚高峰的停车次数对比工作日低峰并没有显著增长, 说明交通流量越大, 协同控制效果越明显. 另外, 周末晚高峰干线协调对比区域协同的停车次数增加明显, 这也从侧面反映了在适度交通需求下, 干线绿波协调有助于提升交通效率, 但当交通需求持续增长后, 仅通过干线协调无法改善路网交通的运行效率.

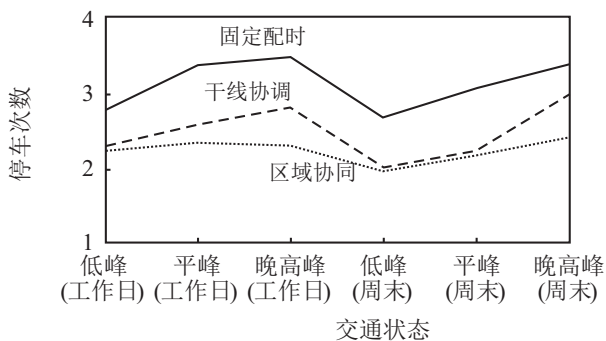


图10 3种控制方式的停车次数对比

图11为工作日和周末不同交通状态下3种控制方式的总延误对比. 可以发现, 无论工作日还是周末, 3种交通状态下固定配时的总延误是最大的, 且随着交通需求的增加, 总延误呈直线增长, 增幅较大. 区域协同控制下的总延误时间显著低于其他两种控制方式. 通过区域协同能够主动控制交通流分布、均衡交通需求压力, 从而有效降低由于交通拥堵造成的路网延误时间.

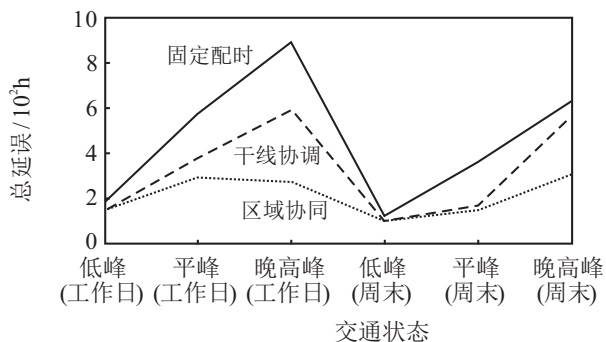


图11 3种控制方式的总延误对比

综上, 在区域划分的基础上, 综合考虑过饱和区域及关联区域分区交叉口分布式控制与区域间的协同控制, 建立了路网交通分布式协同控制模型和方法, 通过仿真分析可知, 该方法能够有效提高路网交通的运行效率, 特别是针对路网高峰交通, 多个评价指标的改善效果较为明显.

5 结论

本文针对城市路网存在的交通过饱和现象导致路网区域拥堵等问题, 首先, 在对路网拥堵问题分析的基础上, 设计了基于灰色关联分析的交叉口关联度计算方法, 进一步提出了基于谱聚类的关联区域划分方法; 然后, 结合过饱和和区域控制方法, 提出了过饱和区域及其关联区域的交通流动态平衡模型, 并通过应用多学科设计优化理论, 建立了路网过饱和区域及其关联区域分布式协同控制模型; 最后, 通过搭建实例路网模型, 对所提出方法进行验证分析, 结果表明, 所提出路网交通分布式协同算法能够实现对包含过饱和区域及其关联区域的全路网交通信号进行优化控制, 明显提升了路网交通运行效率, 从而缓解了路网区域过饱和、交通拥堵及扩散等问题. 接下来的工作, 一方面针对不同路网拓扑结构、路口数量等条件下分析本文方法的控制效果; 另一方面, 考虑实际应用场景条件限制等问题, 建立面向不同情景下的路网交通协同优化方法, 进一步提升本文算法和模型的适用性和有效性.

参考文献(References)

- [1] Geroliminis N, Daganzo C F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings[J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 2008, 42(9): 759-770.
- [2] Daganzo C F, Lehe L J. Traffic flow on signalized streets[J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 2016, 90(8): 56-69.
- [3] He Z, He S, Guan W. A figure-eight hysteresis pattern in macroscopic fundamental diagrams and its microscopic causes[J]. *Transportation Letters*, 2014, 7(3): 133-142.
- [4] Boyac B, Geroliminis N. Exploring the effect of variability of urban systems characteristics in the network capacity[J]. *Transportation Research Part B*, 2012, 46(10): 1607-1623.
- [5] Mahmassani H S, Saberi M, Zockaie A. Urban network gridlock: Theory, characteristics, and dynamics[J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2013, 36(11): 480-497.
- [6] Buisson C, Ladier C. Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams[J]. *Transportation Research Record J of the Transportation Research Board*,

- 2017, 137(2124): 127-136.
- [7] Zhang L, Garoni T M, Gier J D. A comparative study of macroscopic fundamental diagrams of arterial road networks governed by adaptive traffic signal systems[J]. *Transportation Research Part B*, 2013, 49(2): 1-23.
- [8] Keyvan-Ekbatani M, Papageorgiou M, Papamichail I. Urban congestion gating control based on reduced operational network fundamental diagrams[J]. *Transportation Research Part C*, 2013, 33(4): 74-87.
- [9] Knoop V L, Hoogendoorn S P, Van J W C. Routing strategies based on macroscopic fundamental diagram[J]. *Transportation Research Record*, 2012, 2315(1): 1-10.
- [10] Keyvan-Ekbatani M, Papageorgiou M, Papamichail I. Perimeter traffic control via remote feedback gating[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2014, 111(5): 645-653.
- [11] Haddad J, Geroliminis N. On the stability of traffic perimeter control in two-region urban cities[J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 2012, 46(9): 1159-1176.
- [12] Hajiahmadi M, Haddad J, De Schutter B, et al. Optimal hybrid macroscopic traffic control for urban regions: Perimeter and switching signal plans controllers[C]. *European Control Conf. Zurich: IEEE*, 2013: 3500-3505.
- [13] Sirmatel I I, Geroliminis N. Model predictive control of large-scale urban networks via perimeter control and route guidance actuation[C]. *Decision and Control. Las Vegas: IEEE*, 2016: 6765-6770.
- [14] 丁恒, 郭放, 蒋程斌, 等. 多个MFD子区边界协调控制方法[J]. *自动化学报*, 2017, 43(4): 548-559.
(Ding H, Guo F, Jiang C B, et al. Coordinated method of perimeter control for multiple MFD sub-regions[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(4): 548-559.)
- [15] 张逊逊, 许宏科, 闫茂德. 基于MFD的城市区域路网多子区协调控制策略[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(1): 98-105.
(Zhang X X, Xu H K, Yan M D. Coordinated control strategy for multi-subarea based on mfd in urban zonal road networks[J]. *J of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(1): 98-105.)
- [16] Kouvelas, A, Saeedmanesh M, Geroliminis N. Enhancing model-based feedback perimeter control with data-driven online adaptive optimization[J]. *Transportation Research Part B*, 2017, 96(2): 26-45.
- [17] 胡晓健, 王炜, 陆建. 控制排队长度的高密度路网信号优化模型[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(12): 1693-1698.
(Hu X J, Wang W, Lu J. Traffic signal control model based on queue management in high-density network[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(12): 1693-1698.)
- [18] 李轶舜, 徐建闽, 王琳虹. 过饱和交通网络的多层边界主动控制方法[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(7): 27-32.
(Li Y S, Xu J M, Wang L H. Active multi-layer perimeter control strategy of oversaturated traffic networks[J]. *J of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2012, 40(7): 27-32.)
- [19] Hashemi S H, Karimi A, Tavana M. An integrated green supplier selection approach with analytic network process and improved grey relational analysis[J]. *Int J of Production Economics*, 2015, 159(1): 178-191.
- [20] Lyzinski V, Sussman D L, Fishkind D E, et al. Spectral clustering for divide-and-conquer graph matching[J]. *Parallel Computing*, 2015, 47(C): 70-87.
- [21] Cribben I, Yu Y. Estimating whole-brain dynamics by using spectral clustering[J]. *J of the Royal Statistical Society Series C*, 2017, 66(3): 607-627.
- [22] 刘小明, 唐少虎, 朱凤华, 等. 基于MFD的城市区域过饱和和交通信号优化控制[J]. *自动化学报*, 2017, 43(7): 1220-1233.
(Liu X M, Tang S H, Zhu F H, et al. Urban area oversaturated traffic signal optimization control based on MFD[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(7): 1220-1233.)
- [23] Chiba K, Oyama A, Obayashi S, et al. Multidisciplinary design optimization and data mining for transonic regional-jet wing[J]. *J of Aircraft*, 2015, 44(4): 1100-1112.
- [24] Yao X, Zhou J, Li Y, et al. An enhanced collaborative optimization approach with design structure matrix algorithms to group and decouple multidisciplines[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016(9): 1-8.
- [25] 唐少虎, 刘小明. 基于IAGSO算法的VISSIM模型校正研究与实现[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(5): 74-80.
(Tang S H, Liu X M. VISSIM model calibration based on IAGSO algorithm[J]. *J of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(5): 74-80.)

作者简介

唐少虎(1986—), 男, 博士, 从事城市交通智能控制、城市安全韧性等研究, E-mail: tshaohu@163.com;

刘小明(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 从事城市交通流理论与智能控制等研究, E-mail: tslxm@sina.com;

朱伟(1978—), 男, 研究员, 博士, 从事城市韧性理论与应急管理研究, E-mail: zhuweianquan@126.com;

郑建春(1977—), 男, 副研究员, 博士, 从事城市安全与风险评估等研究, E-mail: zheng_jianchun@sina.com;

尚春琳(1989—), 男, 博士生, 从事城市智能交通控制与管理的研究, E-mail: shangchunlin007@126.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)