

基于时空特征的干线协调控制子区划分方法

林皓博, 周 旦

(桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要:为应对干线交通流的时变性和空间分布差异性给干线协调控制带来的影响,提出了基于交通流时空特征的干线协调控制子区划分方法。首先,利用交通流时间相关系数和空间相关系数分析交通流的时空特征,根据交通流的时间特征来改进时段划分方法;其次,引入相邻交叉口关联系数和不停车通过路口车辆数作为子区划分指标,在时段划分的结果上进行子区划分,以交通流的空间特征来改进合并指数法,实现子区划分方案的更新;最后,以玉林市民主路为例验证该方法的实用性和有效性。结果显示,与传统的交通控制时段划分方法相比采用基于交通流时空特征的干线协调控制子区划分方法后,干线系统的总延误时间、车均停车延误时间、车均停车次数分别降低了 19.5%、23.4%、16.7%,说明该方法更能适应交通流的时空变化趋势,显著提高干线交通流的运行效率。

关键词: 交通控制;时空特征;时段划分;子区划分;关联度

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)12-0198-08

0 引 言

随着汽车保有量的持续增加,城市交通需求不断增长,城市交通控制问题日益严峻。交通流在时间和空间上动态变化^[1],这些变化使得固定的信号控制方案难以得到较好的控制效果,引起延误增加甚至出现个别时段道路拥挤^[2]。为了解决因交通流在时间和空间上分布差异所带来的交通控制问题,研究者开发了多种方法来细分控制时间段^[3-4],这些方法因不同的适应场景和优势,得到了大多数交通管理者的认同。Song 等^[5]优化了 K-means 算法流程,通过经验调整,有效减少了离群点数量,避免了过度分段。针对时段划分主观性过强的问题,官国宇等^[6]提出双截断高斯混合模型,利用 BIC 准则确定了最优类数。李文婧等^[7]引入递归思想改进有序聚类方法,提出了递归有序聚类算法。上述研究大多基于单独交叉口,而不是城市长干线多交叉口信号控制。也有学者研究城市多信号交叉口控制子区划分,提出了基于路网静态因素、动态因素及子区划分原则的控制子区划分方法^[8-10]。殷辰堃等^[11]通过构建交通流序列相似性指标,提出了基于 Neut 算法的路网静态分区的方法,旨在提出合适的动态区域边界控制方案。Ding 等^[12]依据相关性理论提出了连续划分子

区的方法,以实现入口的动态边界控制。另外,还可以利用干线断点成本^[13]、路网异质性差异^[14]等方法实现分区。修伟杰等分别提出了基于有序聚类算法的二次时段划分方法^[15]和基于均衡 K 的子区划分方法^[16],但 2 种方法都仅考虑了交通流在时间维度或空间维度的特征,难以解决交通流时空特征差异较大的交通协调控制问题。王磊等^[17]通过引进车流密度影响系数来改进关联度模型,提出了融合改进关联度模型和改进 Newman 算法的路网动态划分方法,并采用多个时段的交通流数据进行仿真验证,但这种方法未能考虑全天交通流时空变化趋势,区域路网的子区划分方案能否适应全天交通流的动态变化还有待进一步研究。Wang 等^[18]针对不同时段,设计了将平均速度作为随机变量的分层模型,以此描述干线内各交叉口的空间相关性和干线间的异质性。

当前时段划分研究的对象主要以单点控制为主,并取得了一定效果。但是单点控制下的时段划分方案难以适应长干线多交叉口交通流的变化,因为仅从单交叉口的时间维度上考虑交通流的变化趋势,难以解决干线交通流空间分布差异较大的交通控制问题。在当前协调控制子区划分的研究中,大部分使用的是特定时段的交通流量数据,其子区划分方案较难适应动态交通流的时空演化规律,且大部分协调控制子区划分方法仅考虑交通流在空间维度上的变化趋势,难以解决交通流在时间变化趋势不同时的交通控制问题。这些不足导致信号配时方案难以适应全天交通流在

收稿日期: 2023-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71861005)

作者简介: 林皓博(1998—),男,硕士,从事交通管理与控制方面的研究工作。

时空上的变化趋势,甚至在个别时段增加不必要的交通延误。

因此,本文基于干线交通流的时空特征分析,研究干线协调控制下多交叉口的控制时段划分方法和协调控制下的子区划分方法,并将 2 种方法进行有效结合,提出一种基于时空特征的协调控制子区划分方法:首先,根据时间特征进行时段划分;其次,依据空间特征在时段划分的结果上进行子区划分,以满足交通流动态变化的时空特征;最后,用实例来验证该方法的实用性和有效性。

1 城市干线交通流时空特征分析

研究表明,一定时间间隔内城市路网中交通流在时间和空间上的分布具有相似性。本文以玉林市民主路连续 5 个工作日的卡口数据为基础,利用交通流时间相关系数 $\rho_{s,n}$ 和交通流空间相关系数 $\rho_{s,x,n}$ 来量化干线交通流时空特征的相关性。

1.1 时空特征量化指标

皮尔逊相关系数 ρ 通常用来度量 2 个变量间的线性相关程度,在统计学中,用于衡量两边变量间的相关性,其大小在 -1 至 1 之间。当其值为 1 时,表示 2 个变量间具有完全正相关联系;当其值为 0 时,表示 2 个变量间不具有任何线性联系;当其值为 -1 时,表示 2 个变量间具有完全负相关联系。本文以皮尔逊系数 $\rho_{X,Y}$ 来量化分析研究区域的时空特征相关性,其表达式为:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{COV}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \tag{1}$$

式中: X,Y 为 2 个随机变量; $\text{cov}(X,Y)$ 为样本的协方

差; σ_X,σ_Y 分别对应 X 和 Y 变量的标准差。

1.2 时间特征分析

交通流时间相关系数 $\rho_{s,n}$ 用以衡量当前路段时刻交通流与第 n 个时间间隔交通流的相关性,其中: s 表示目标路段位置; n 为相隔时间间隔数。

时间间隔取 15 min,将连续 5 d 的卡口数据转换成 1 个长度为 480 个时间间隔的交通流序列 Z 矩阵,其表达式为:

$$Z = (z_1, z_2, z_3, \cdots, z_{n-1}, z_n) \tag{2}$$

式中: $n=480$ 。

时间区间取 3 h,12 个时间间隔,将交通流序列分为 12 组,使得交通流序列互斥,并得到矩阵 W ,其表达式为:

$$W = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & \cdots & z_{n-12} & z_{n-11} \\ z_2 & z_3 & \cdots & z_{n-11} & z_{n-10} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{12} & z_{13} & \cdots & z_{n-1} & z_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

依次计算出当前路段时刻交通流与时间间隔为 1 至 9 的交通流序列的相关系数。以民主路南往北江滨 - 公园路路段交通流序列的相关系数 S_n 计算结果(见表 1)为例,可知相隔时间间隔数 n 越大,对应交通流的相关系数越小,交通流的相关性随着时间跨度的增大而减小;时间间隔数为 1~3 时,所得的相关系数均大于 0.8,表示该时段内的交通流存在极强的相关性;时间间隔数为 4、5 时,相关系数为 0.6~0.8,表明路段在此时的交通流有强相关性;时间间隔数为 6~12 时,相关系数为 0.2~0.6,可以判断出路段在该时段内的交通流存在弱相关性。

表 1 交通流序列时间相关系数

S_n	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}
S_1	1.00	0.92	0.81	0.73	0.65	0.58	0.50	0.44	0.37	0.31	0.27	0.22
S_2	0.92	1.00	0.93	0.83	0.74	0.67	0.56	0.51	0.46	0.39	0.34	0.29
S_3	0.81	0.93	1.00	0.93	0.80	0.74	0.66	0.59	0.55	0.48	0.40	0.35
S_4	0.73	0.83	0.93	1.00	0.92	0.81	0.73	0.68	0.60	0.56	0.49	0.43
S_5	0.65	0.74	0.80	0.92	1.00	0.92	0.82	0.75	0.69	0.62	0.58	0.50
S_6	0.58	0.67	0.74	0.81	0.92	1.00	0.93	0.81	0.75	0.69	0.63	0.57
S_7	0.50	0.56	0.66	0.73	0.82	0.93	1.00	0.93	0.82	0.76	0.70	0.64
S_8	0.44	0.51	0.59	0.68	0.75	0.81	0.93	1.00	0.93	0.82	0.77	0.71
S_9	0.37	0.46	0.55	0.60	0.69	0.75	0.82	0.93	1.00	0.93	0.83	0.77
S_{10}	0.31	0.39	0.48	0.56	0.62	0.69	0.76	0.82	0.93	1.00	0.93	0.84
S_{11}	0.27	0.34	0.40	0.49	0.58	0.63	0.70	0.77	0.83	0.93	1.00	0.93
S_{12}	0.22	0.29	0.35	0.43	0.50	0.57	0.64	0.71	0.77	0.84	0.93	1.00

1.3 空间特征分析

交通流在路网中的运行过程可视为车流在路网中的传递过程,一个路段的交通流与其相交或相邻路段的交通流存在一定的关联性。以交通流空间相关系数 $\rho_{s,x,n}$ 来衡量路段自身与上下游不同时间间隔交通流的相关性。其中: s 为目标路段位置; x 表示上、下游路段, $x=u$ 表示目标路段的上游路段, $x=l$ 表示目标路段的下游路段。

时间间隔取15 min,将路段连续5个工作日的交通流按照时间先后排列转换成1个长度为480个时间间隔的交通流序列,分别计算路段自身与上游、下游不同时间间隔交通流的相关性。目标路段交通流序列 Z_s 及目标路段的上游路段交通流序列 Z_u 、下游路段交通流序列 Z_l 可用式(4)~式(6)表示:

$$Z_s = (z_{s,1}, z_{s,2}, z_{s,3}, \dots, z_{s,n-1}, z_{s,n}) \quad (4)$$

$$Z_u = (z_{u,1}, z_{u,2}, z_{u,3}, \dots, z_{u,n-1}, z_{u,n}) \quad (5)$$

$$Z_l = (z_{l,1}, z_{l,2}, z_{l,3}, \dots, z_{l,n-1}, z_{l,n}) \quad (6)$$

目标路段当前时刻交通流序列分别与上、下游不同时间间隔交通流序列组成的矩阵 W_u 、 W_l 为:

$$W_u = \begin{bmatrix} z_{s,1} & z_{s,2} & \cdots & z_{s,n-10} & z_{s,n-11} \\ z_{u,2} & z_{u,3} & \cdots & z_{u,n-9} & z_{u,n-10} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{u,12} & z_{u,13} & \cdots & z_{u,n-1} & z_{u,n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$W_l = \begin{bmatrix} z_{s,1} & z_{s,2} & \cdots & z_{s,n-10} & z_{s,n-11} \\ z_{l,2} & z_{l,3} & \cdots & z_{l,n-9} & z_{l,n-10} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{l,12} & z_{l,13} & \cdots & z_{l,n-1} & z_{l,n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

以民主路江滨往公园路段为例,得到的目标路段与上游、下游交通流序列空间相关系数见表2和表3。

表2 目标路段与上游交通流序列空间相关系数

$\rho_{s,t,1}$	$\rho_{s,t,2}$	$\rho_{s,t,3}$	$\rho_{s,t,4}$	$\rho_{s,t,5}$	$\rho_{s,t,6}$	$\rho_{s,t,7}$	$\rho_{s,t,8}$	$\rho_{s,t,9}$	$\rho_{s,t,10}$	$\rho_{s,t,11}$
0.92	0.85	0.76	0.68	0.62	0.55	0.50	0.44	0.39	0.35	0.31

表3 目标路段与下游交通流序列空间相关系数

$\rho_{s,l,1}$	$\rho_{s,l,2}$	$\rho_{s,l,3}$	$\rho_{s,l,4}$	$\rho_{s,l,5}$	$\rho_{s,l,6}$	$\rho_{s,l,7}$	$\rho_{s,l,8}$	$\rho_{s,l,9}$	$\rho_{s,l,10}$	$\rho_{s,l,11}$
0.92	0.86	0.80	0.72	0.65	0.59	0.54	0.49	0.45	0.40	0.36

序列在时间上的变化趋势,难以获得较为理想的时段划分结果;时段划分结果存在较多离散点等。因此,本文选择针对有序序列且不改变样本前后顺序的递归有序聚类算法^[7],并在干线时间特征的基础上,以城市干线多路口交通流量数据段内相似度最

由表2、表3可见,两者变化趋势相似,且随着时间跨度的增大,交通流序列系数减小。表2中的时间间隔数为1~3时,交通流空间相关系数均大于0.8,可判断该时间段内的交通流有极强的相关性;时间间隔数为4、5时,相关系数大于0.6,小于0.8,可判断该时段内的交通流存在强相关性;时间间隔数为6~12时,相关系数大于0.2,小于0.6,可知该时段内的交通流存在弱相关性。从表3来看,时间间隔数为3时,相关系数大于0.8,说明前3个时间间隔的交通流存在极强的相关性;时间间隔数为4、5时的交通流存在强相关性。

综上所述,由表1可知,在时间特征上,同路段在0.75 h内的交通流具有极强的相关性;由表2和表3可知,在空间特征上,相邻路段在0.5 h内的交通流具有极强的相关性。结合路段在时间和空间上的内在联系,并把所得到的时空特征关系应用于时段划分和子区划分当中,可进一步提高子区划分方案的适应性。

2 基于时空特征的子区划分方法

当前大部分子区划分方法未能考虑交通流在时间上的分布差异。本文以干线交通流的时空特征为基础,根据干线交通流的时间特征来改进时段划分方法,再利用空间特征来改进子区划分方法,并将2种方法相结合,应用于子区划分中,进而研究满足交通流时空变化趋势的子区划分方案。

2.1 基于改进有序聚类的时段划分模型

传统时段划分方法仅通过单一的交通流量数据变化趋势或K-means算法进行简单划分,虽然有一定参考价值,但存在一些问题,例如:忽略了交通流

大为目标进行控制时段划分。通常,递归有序聚类算法包括计算类直径、目标函数、递归求解和确定最佳分段数。

2.1.1 类直径

信号交叉口时段划分依据是使分段后各个类内

数据相似度最大。若用于交通控制,时段划分的交通流量数据序列中包括采集时间间隔为 15 min 的 96 个数据样本。干线第 A 个交叉口 24 h 交通流量时间序列与城市干线各交叉口全天交通流量序列矩阵 Q_A 的表达式为:

$$Q_A = [q_1, q_2, q_3, \dots, q_n] \quad (9)$$

$$N = [Q_1^T, Q_2^T, Q_3^T, \dots, Q_A^T] \quad (10)$$

式中: q_n 为交叉口第 n 个时间间隔的交通流量,pcu; T 表示转置矩阵; A 为城市干线上第 A 个交叉口; N 为干线各交叉口交通流量序列组成的流量矩阵。

有序聚类中,定义类 H 中包含采集数据样本 $\{q_k, q_{k+1}, \dots, q_j\} (1 \leq k < j \leq G)$, 由于干线交通流运行的时间变化特征,需要综合交通流时间特征对类内包含样本个数进行限制,那么类 H 可以记为:

$$H = \{k, k+1, \dots, j\} (1 \leq k \leq h_{\text{time}} \leq j \leq G) \quad (11)$$

式中: h_{time} 为干线交通流时间特征相关性参数,且 $h_{\text{time}} \geq 1$ 。

对于交通流量序列的有序聚类结果,每一类分别对应一个交通控制时段,通过类直径来描述类内数据的相似程度。类 H 的类内直径可以用离差平方和表示,其表达式为:

$$D(i, j) = (N_a - E_H^*)^2 \quad (12)$$

式中: $D(i, j)$ 为类 H 的类内离差平方和; N_a 为干线各交叉口第 a 个样本序列对应的交通流量矩阵; E_H^* 为类 H 中所有交通流量样本的均值。

2.1.2 时段划分目标函数

类内直径定义了各个分类数据的相似程度,进而可以将所有分类的类内直径之和定义为损失函数,损失函数最小的分类结果作为最优分类方案。其目标函数为:

$$p(G, K) = \min E[b(G, K)] \quad (13)$$

$$E[b(G, K)] = \sum_{a=1}^M \sum_{m=1}^K D(i_m, i_{m+1}-1) \quad (14)$$

式中: $b(G, K)$ 表示分类次数为 K 的时段划分方案; $E[b(G, K)]$ 为不同分类次数下的损失函数; $p(G, K)$ 表示 $b(G, K)$ 中损失函数最小所对应的时段划分方案; M 为交通流量矩阵总数。

2.1.3 递归求解

同时,为降低计算量并加快模型求解时间,引入递归优化的思想,即对于任何一种最优分段方案 $p(G, K)$,第 K 次分类的前提是第 $K-1$ 次分段也是最优的。损失函数的递推公式见式(15):

$$\begin{cases} E[b(G, 2)] = \min_{(2 \leq i \leq G)} \sum_{a=1}^r [D_a(1, i-1)] \\ E[b(G, K)] = \min_{K \leq i \leq G} \{E[p(i-1, K-1)] + \sum_{a=1}^r [D_a(i, G)]\} \end{cases} \quad (15)$$

式中: r 为对应时段各交叉口交通流量矩阵的数量。

以上述公式为基础,递推有序聚类的交通控制时段划分的过程如下:

(1)对于特定时段划分方案 $b(G, K)$,首先搜索最后一个分段点 s_K ,得到公式(16)。

$$\begin{aligned} E[b(s_K-1, K-1)] + \sum_{a=1}^r D_a(s_K, G) = \\ \min_{K \leq s_K \leq G} \{E[p(s_K-1, K-1)] + \sum_{a=1}^r D_a(s_K, G)\} \end{aligned} \quad (16)$$

(2)紧接着搜索倒数第 2 个分段点 s_{K-1} ,得到公式(17)。

$$\begin{aligned} E[b(s_{K-1}-1, K-2)] + \sum_{a=1}^r D_a(s_{K-1}, i_K) = \\ \min_{K-1 \leq s_{K-1} \leq s_K} \{E[p(s_{K-1}-1, K-2)] + \sum_{a=1}^r D_a(s_{K-1}, i_K)\} \end{aligned} \quad (17)$$

(3)以此类推,不断重复步骤(2),搜索出所有分段点,得到分类次数为 K 时,对应 $E[b(G, K)]$ 最小的时段划分方案。

2.1.4 最佳分段数

一般情况下,损失函数 $E[b(G, K)]$ 的大小随着分段次数 K 的增大而单调递减。本文用“拐点法”确定最佳分段数。根据拐点对应损失函数变化率最显著的特征,将确定最佳分段数的问题转化为求解曲线斜率变化率的问题。即任意 2 个相邻分段数最优分段方案所对应的损失值的离差斜率,对应斜率变化率突变的位置 K 为最佳分段点。对应 K 次分段和 $K+1$ 次分段的斜率为 $L(K)$,其表达式为:

$$L_D(K) = E[p(G, K+1)] - E[p(G, K)] \quad (18)$$

前、后 2 个相邻分段数斜率的变化率为:

$$L_R(K) = \frac{L_D(K) - L_D(K-1)}{L_D(K) - L_D(K+1)} \quad (19)$$

最佳分段数 K^* 为:

$$K^* = \max [L_R(K)] \quad (20)$$

2.2 协调控制子区划分模型

城市干线绿波协调控制的效果随着交叉口数量的增加而降低,难以获得较为理想的协调控制效果。为提高城市干线交通运行效率,应将异质性较大的交叉口分段协调。

因此,在相邻交叉口关联度模型选取原则中,相邻交叉口协调控制不仅需满足关联性要求,还需要满足基本的车辆通行需求,尽可能提高不停车通过相邻路口的车辆数。

2.2.1 相邻交叉口关联度模型

本文采用经典的 whiston 模型来表征相邻交叉口间的关联性,其关联度 I 的计算式为:

$$I = \frac{0.5}{1+t} \left[\frac{yq_{\max}}{\sum_{i=1} q_i} - 1 \right] \quad (21)$$

式中: y 为上游交叉口流入下游交叉口的流向数; t 为平均行程时间, s ; $q_{\max}$ 为上游交叉口的最大车辆数, pcu; $\sum_{i=1} q_i$ 为上游交叉口流向下路交叉口的车辆数, pcu。

控制子区合并阈值 $I_d = 0.35$, 通过比较相邻交叉口关联度计算值与 I_d 来判断相邻交叉口是否合适划入同一子区。

当绿波带宽最大通行能力不满足干线系统的直行车辆需求时, 部分直行车辆无法不停车通过交叉口, 降低了绿波协调控制效率, 此时需对子区划分进行调整, 其表达式为:

$$NV_{i,i+1} = \frac{BW_{i,i+1} \cdot \min(LN_{i,i+1}) \cdot 3\ 600}{C \cdot ht} \quad (22)$$

$$q_{si,i+1} = q_{sr,i} + q_{sl,i} + q_{sm,i} - q_{sr,i+1} - q_{sl,i+1} \quad (23)$$

式中: $NV_{i,i+1}$ 为 1 个周期内不停车通过路口 i 至路口 $i+1$ 的车辆数, pcu; $BW_{i,i+1}$ 为第 i 路口至第 $i+1$ 路口的绿波带宽, s ; $LN_{i,i+1}$ 为第 i 路口至第 $i+1$ 路口协调方向的直行车道数; C 为信号周期时长, s ; ht 为同一车道相邻车辆通过停止线的时间差, s ; $q_{si,i+1}$ 为驶入路口 $i+1$ 协调方向的直行车辆数, pcu; $q_{sm,i}$ 为路口 i 协调方向的直行车辆数, pcu; $q_{sl,i}$ 为路口 i 非协调方向的左转车辆数, pcu; $q_{sr,i}$ 为路口 i 非协调方向的右转车辆数, pcu; $q_{sl,i+1}$ 为路口 $i+1$ 协调方向的左转车辆数, pcu; $q_{sr,i+1}$ 为路口 $i+1$ 协调方向的右转车辆数, pcu。

当 $NV_{i,i+1}$ 小于 $q_{si,i+1}$ 时, NV 值无法满足当前干线直行交通流的需求, 因此会存在部分直行车辆无法不停车通过子区内所有交叉口, 产生车辆排队现象, 需对当前子区方案进行重新划分。

2.2.2 基于相邻交叉口关联度的协调控制子区划分流程

引入合并指数法作为子区划分方法, 以相邻交叉口关联度与绿波带最大通行能力为判断指标。关联交叉口优先考虑相邻交叉口绿波带最大通行能力指标, 再考虑关联度指标进行下一步判断; 独立交叉口仅考虑关联度指标。通过比较判断指标与合并指数阈值来判定相邻交叉口是否达到合并或分离的要求。初始合并指数总计值 O 赋 0; 当控制子区内部相

邻交叉口满足绿波带最大通行能力时, 合并指数总计值 O 加 1, 反之减 1; 在满足绿波带最大通行能力的基础上, 相邻交叉口满足关联度阈值, 合并指数总计值 O 加 1, 反之减 1。

基于交通流的空间特征, 在一定时间区间 $(0, T_s)$ 内相邻路段的交通流有极强的相关性。子区方案实施时间 $T_c \in (0, T_s)$ 时, 交叉口划入同一子区的合并指数阈值为 h_{space} ; 当子区方案实施时间 $T_c > T_s$ 时, 合并指数阈值为 h'_{space} ; 同理, 子区方案实施时间 $T_c \in (0, T_s)$ 时, 控制子区内部相邻交叉口分离的合并指数阈值为 $-h_{space}$; 当子区方案实施时间 $T_c > T_s$ 时, 合并指数阈值为 $-h'_{space}$ 。通过设置子区方案, 实施时间参数 T_s , 以此来提高子区划分实时效果, 满足复杂多变的交通流运行特征。当 $T_c \in (0, T_s)$ 时, 合并指数总计值 O 上限值为 h_{space} , 下限值为 $-h_{space}$; 当 $T_c > T_s$ 时, 合并指数总计值 O 上限值为 h'_{space} , 下限值为 $-h'_{space}$ 。实施新子区划分方案后, 所有相邻交叉口合并指数总计值 O 重置为 0。其中: T_s 为交通流在空间存在强相关性的时间, $\min$; T_c 为当前子区划分方案实施时间, $\min$ 。

基于相邻交叉口关联度的协调控制子区划分流程图见图 1。

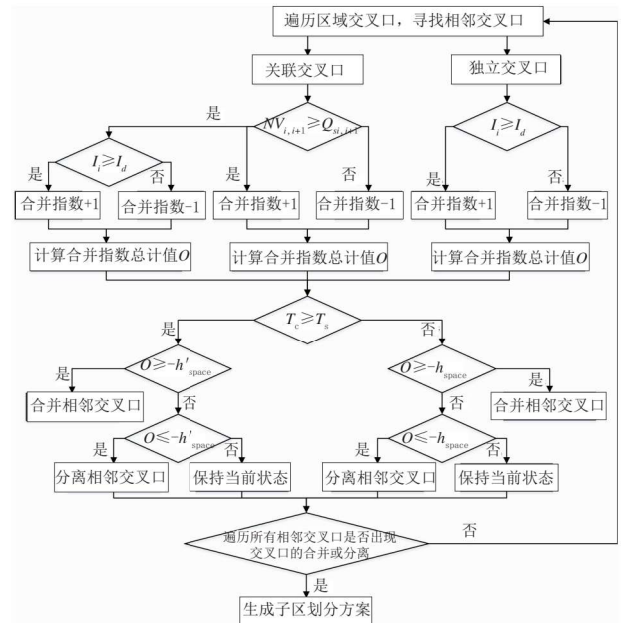


图 1 基于相邻交叉口关联度的协调控制子区划分流程图

2.3 基于时空特征的协调控制子区划分方法

控制时段的划分可以缓解绿波协调控制中由于交通流在时间分布上存在差异所带来的问题; 基于交叉口关联度的子区划分可以克服不同交叉口交通流在空间分布上存在差异所带来的控制问题。这 2 种方法都具有一定的局限性和适用性, 本文将 2 种

方法从时间和空间的维度进行有效结合,提出一种考虑交通流时空特征的子区划分方法,使子区划分方案能够克服交通流在时空分布不均衡时所带来的控制问题,提高城市干线协调控制效果。划分方法步骤如下:

步骤 1:根据式(1)~式(8)所示方法,完成城市干线交通流时空特征分析,确定时段划分与子区划分中的相关参数。

步骤 2:根据式(9)~式(20)所示方法,完成城市干线交通控制时段划分,以控制时段内最大小时交通量为设计流量,按照 Webster 配时方法更新时段控制配时方案。

步骤 3:以多时段控制方案运行 b 个时间间隔 t ,同时采集运行时间内各交叉口的流量分布情况,按照式(21)~式(23)的方法,计算相邻交叉口关联度,并根据子区划分方法对研究区域所有路口完成子区划分。

步骤 4:根据子区划分结果,将子区内部最大流量交叉口作为关键交叉口,以当前时间前后 1 h 的交通量作为信号配时设计交通量计算配时方案。更新子区划分方案与配时方案,并运行 b 个时间间隔 t ,采集运行时间内各交叉口的流量分布情况;按照式(21)~式(23)的方法,计算相邻交叉口关联度,并根据子区划分方法对研究区域所有路口完成子区划分。

步骤 5:判断当前子区划分方案是否与执行方案一致,如果是,则执行步骤 6,如果不是,则执行步骤 4。

步骤 6:判断当前时间是否到达下一控制时段边界,如果是,则转到步骤 7;如果不是,则返回步骤 4。

步骤 7:根据子区划分结果,子区内部交叉口以关键交叉口为公共周期,更新信号配时方案,执行新配时方案至 b 个时间间隔 t ,并采集运行时间内各交叉口的流量分布情况,按照式(21)~式(23)的方法,计算相邻交叉口关联度,并根据子区划分方法对研究区域所有路口完成子区划分。返回步骤 5。

基于时空特征的协调控制子区划分方法流程图见图 2。

3 实证分析

本文以广西玉林市城区主干道民主路开展实证分析。该道路起点北至教育路路口,终点南至万良路路口,共包含 6 个连续交叉口。民主路是玉林市城区连通南北的主要道路之一,且道路沿线用地不同,交

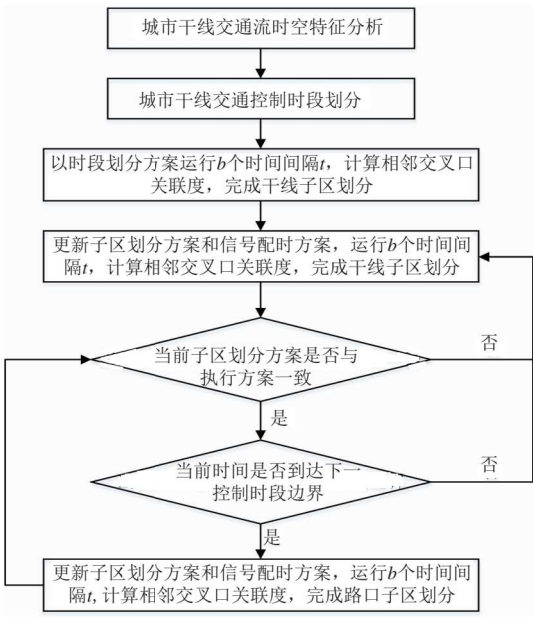


图 2 基于时空特征的协调控制子区划分方法流程图

通流在空间上分布情况各有不同;同时交通流量在时间上变化幅度较大,适用于本文所提出的方法进行实证分析。由于难以凭借划分结果对比不同方案的实施效果,所以本文借助 VISSIM 仿真来验证不同划分方案的优劣。

民主路示意图见图 3,其沿线各交叉口右转均不受信号控制。民主路沿线各交叉口间距见表 4,各路口 24 h 交通流量见图 4。

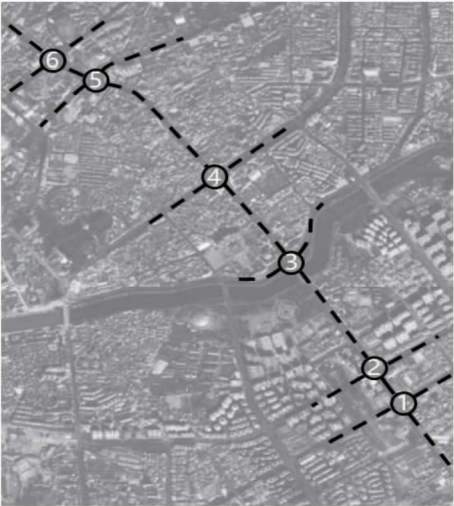


图 3 民主路示意图

表 4 沿线各交叉口间距

交叉口	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
间距 /m	216	784	592	743	221

根据民主路交通流时间特征分析结果,在交通控制时段划分过程中,干线交通流时间特征相关性参数 $h_{time}=5$;在子区划分过程中,各个参数取值如表

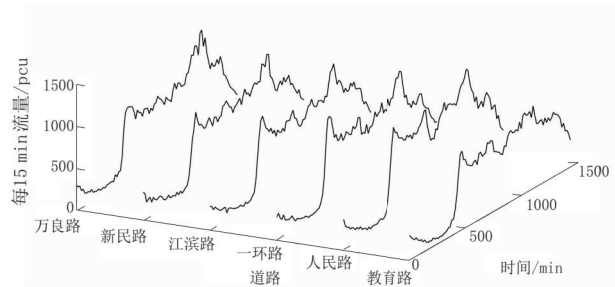


图4 民主路各路口24 h交通流量图

5所示。民主路各交叉口24 h流量数据时段划分结果见表6和图5。

表5 子区划分的参数值

T_s/min	h_{space}	h'_{space}	b	t/min
45	2	1	3	15

表6 控制时段划分结果

时段数	划分时间点
5	7:00
	17:00
	19:30
	22:15
	24:00

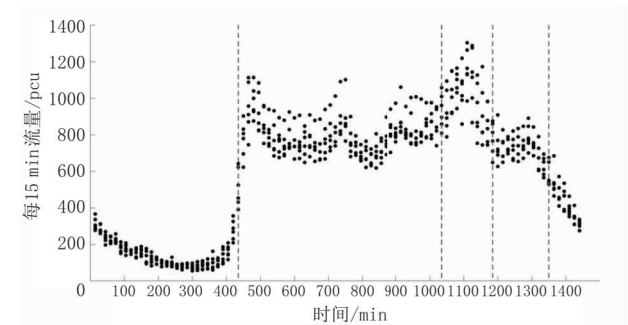


图5 民主路24 h交通流量聚类结果

基于时段划分结果,按照本文所提出的方法的完成城市干线子区划分,得到的民主路24 h子区划分结果如表7所示。

表7 基于时空特征的民主路24 h子区划分结果

时段划分结果		子区划分结果			
0:00~7:00	0:00~1:15	1:15~5:45	5:45~7:00		
	①②③④/⑤⑥	①②③④⑤⑥	①②/③④⑤⑥		
7:00~17:00	7:00~8:45	8:45~11:30	11:30~13:00	13:00~14:15	14:15~17:00
	①②/③④/⑤⑥	①②③④/⑤⑥	①②/③④/⑤⑥	①②/③/④/⑤⑥	①②/③④/⑤⑥
17:00~19:30	17:00~19:00	19:00~19:30			
	①②③④/⑤⑥	①②/③④/⑤⑥			
19:30~22:15	19:30~20:30	20:30~22:15			
	①②/③④/⑤⑥	①②/③/④/⑤⑥			
22:15~24:00	22:15~23:00	23:00~24:00			
	①②③/④/⑤⑥	①②③④/⑤⑥			

表7中:①表示万良路-民主路路口;②表示新民路-民主路路口;③表示江滨路-民主路路口;④表示公园路-民主路路口;⑤表示人民路-民主路路口;⑥表示教育路-民主路路口。

由表7基于时空特征的子区划分结果可知,由于万良路口至新民路口、教育路口至人民路口相邻路口间距较小,均未到达250 m,所以相邻交叉口关联性较强,不同时段下的子区划分方案所对应的2个路口均划分在同一子区进行协调控制;由于万良路口至江滨路口、公园路口至人民路口相邻交叉口间距较大,均超过700 m,所以在大部分子区划分方案中,对应相邻交叉口路段往往成为协调控制子区的边界。这说明,交叉口间距越小,相邻交叉口关联性越强,相邻交叉口越容易划分到同一子区进行协调控制;反之,相邻交叉口间距越大则相邻交叉口关联性越弱,相邻交叉口往往划分到不同的协调控制子区。

同时,对不同划分方案进行进一步研究,其仿真结果如表8所示。

表8 各方案对应评价指标及优化效果

评价指标	时段划分方法	本文方法	优化效果/%
总延误时间/s	163 871.1	137 103.2	19.5
车均停车延误时间/s	17.83	14.45	23.4
车均停车次数	0.56	0.48	16.7

由表8可知,本文所提方法与有序递归聚类时段划分方法相比,干线系统全天的总延误时间、车均停车延误时间和车均停车次数分别降低了19.5%、23.4%、16.7%,说明基于干线交通流时空特征的子区划分方法,不仅能适应交通流在时间维度上的宏观变化,提高子区划分方案的灵活性,还能克服交通流在空间分布上的差异,根据相邻交叉口关联度强

弱,将干线连续交叉口进行空间维度上的分割,进一步提高交通控制效益,因此更具有实用性。

4 结 语

针对 24 h 不同信号配时方案运行下的城市主干道,本文提出了基于干线全天交通流时空特征的协调控制子区划分方法。所提方法与仅进行时段划分的方法相比,在总延误时间、车均停车延误时间和车均停车次数 3 项评价指标上,分别降低了 19.5%、23.4%、16.7%,能够较好地适应干线交通流在时间和空间维度上的变化趋势,显著提高交通流在城市干线的运行效率。本研究为后续将开展的子区内部协调控制及相邻子区间协调控制研究打下了基础。

参考文献:

[1] 孙维亚,周凌焱,宋志豪.基于 GIS 的城市交通流时空特征分析[J].地理空间信息,2014,12(2):76-78.
[2] 刘东波,代磊磊,李娅,等.基于信号周期计算的交叉口管控时段划分[J].吉林大学学报(工学版),2013,43(6):1471-1475.
[3] 周丽.基于动态时段划分的交叉口信号控制模型与算法研究[D].济南:山东大学,2011.
[4] 赵伟明,王殿海,朱文韬,等.基于改进 NJW 算法的交通控制时段划分[J].浙江大学学报(工学版),2014,48(12):2259-2265,2276.
[5] SONG X, LI W, MA D, et al. An enhanced clustering-based method for determining time-of-day breakpoints through process optimization[J]. IEEE Access, 2018(1):1.
[6] 官国宇,王运豪,别一鸣.周期数据时段划分的双截断高斯混合模型及其 EM 算法[J].数理统计与管理,2022,41(1): 108-123.
[7] 李文婧,孙锋,李茜瑶,等.采用递归有序聚类的信号控制时段划分

方法[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(6):1150-1156.
[8] TIAN X, LIANG C, FENG T. Dynamic control subarea division based on node importance evaluating [J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2021(8).https://doi.org/10.1155/2021/9923514.
[9] HU Y, WANG Y, ZHANG J, et al. Correlation degree analysis of arterial adjacent intersections for coordinated control subunit partition [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10 (1): 1687814017748748.
[10] 冯远静,单敏,乐浩成,等.绿波协调控制的子区动态划分算法[J].控制理论与应用,2014,31(8):1034-1046.
[11] 殷辰堃,方茹,李拓.基于交通流时间序列相似性的 NCut 城市路网分区算法[J].交通运输工程学报,2021,21(5):238-250.
[12] DING H, DI Y R, FENG Z X, et al. A perimeter control method for a congested urban road network with dynamic and variable ranges [J]. Transportation Research Part B, 2022, 155 : 160-187.
[13] 余佳洁,季彦婕,卜卿,等.考虑断点成本的长干线分段绿波控制方法[J].浙江大学学报(工学版),2022,56(4):640-648.
[14] SAEEDMANESH M, GEROLIMINIS N. Optimization-based clustering of traffic networks using distinct local components[C]//IEEE. 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York:IEEE,2015: 2135-2140.
[15] 修伟杰,张立立,王力.基于动态 Fisher 聚类算法的多时段二次划分[J].科学技术与工程,2015,15(5):305-310.
[16] 修伟杰,王力,张立立,等.基于均衡 k 划分的动态子区划分方法[J].桂林理工大学学报,2022,42(1):229-235.
[17] 王磊,罗杰.融合改进关联度与 Newman 算法的区域交通划分研究[J].计算机工程与应用,2022,58(20):270-276.
[18] WANG X, FAN T, LI W, et al. Speed variation during peak and off-peak hours on urban arterials in Shanghai[J].Transportation Research Part C: Emerging Technologies,2016,67: 84-94.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com