

交通控制子区动态划分模型

段后利^{1,2}, 李志恒^{1,2}, 张毅^{1,2}, 胡坚明^{1,2}

(1. 清华大学自动化系, 北京 100084; 2. 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

摘要:传统的交通控制子区静态划分方法无法适应城市路网交通流的快速变化。针对该问题,研究了交叉口车队散布模型,提出了可协调度的概念以定量描述相邻交叉口间实施协调控制的必要性;在此基础上,建立了基于超图表示的城市路网模型,并设计了相应的超图划分算法,通过对超图的分割来实现交通控制子区的动态划分。基于北京市二环内实际路网的实例验证表明,该模型在高峰时段和平峰时段下,均能给出高质量的控制子区划分结果。

关键词:交通运输工程;交通信号;区域协调控制;道路网络;超图模型;动态子区划分

中图分类号:U491.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)Sup. 2-0013-06

Dynamic subdivision of road network into coordinated control regions

DUAN Hou-li^{1,2}, LI Zhi-heng^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, HU Jian-ming^{1,2}

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China)

Abstract: Coordinated control regions were generated statically in the past, which can't accommodate to the changing traffic condition over the road networks. Thus, a new method is proposed to solve this problem by subdividing the road network into control regions dynamically using a hypergraph-based model. First, the platoon dispersion model is analyzed; a new concept called "coordination desire" is indicated to describe the requirement of coordinate control between adjacent intersections. Then, we designed a hypergraph-based model to express the road network. A widely used hypergraph partitioning algorithm HMETIS is employed to subdivide the hypergraph into partitions which correspond to the coordinated control regions. Finally, a case study based on the actual road network and practical traffic data is presented to demonstrate the effectiveness of our model.

Key words: engineering of communication and transportation; traffic signal; coordinated control; urban road network; hypergraph model; network subdivision

针对日益严峻的交通拥挤和堵塞问题,传统的单点信号控制已无法满足城市日常交通管理的需求,而区域交通信号协调控制已被证明可以更

加有效地提高城市路网运行效率。Robertson等^[1]指出,依据路网条件、交通流状况和控制算法的不同,交通信号协调控制可以减少 10%~40%

收稿日期:2009-05-18.

基金项目:“973”国家重点基础研究发展规划项目(2006CB705506);“863”国家高技术研究发展计划项目(2007AA11Z215);国家自然科学基金项目(60834001,60774034,60721003,50708055);北京市科学技术委员会博士生论文资助(专项)资金项目(ZZ0807).

作者简介:段后利(1982-),男,博士研究生.研究方向:交通信号控制. E-mail:duanhouli00@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:李志恒(1974-),男,讲师,博士.研究方向:智能交通系统. E-mail:zhkli@tsinghua.edu.cn

交叉口延误和停车次数。然而,对于像北京这类拥有上千个交叉口的特大型城市而言,对整个城市路网进行统一的协调优化与控制是不现实的。一方面无法保证交通控制系统运行的实时性和可靠性,另一方面也无法针对路网不同部分交通状况的差异,在局部区域实施灵活的控制方案。因此,需要将整个交通路网划分为不同的交通控制子区,以每个子区为单位实施智能优化与控制;同时,随着实时交通状况的变化,路网的划分方式和结果(即划分得到的各子区的范围)也应相应地发生改变,以适应城市交通流的快速变化,提高控制系统整体效益。这一根据实时交通状况自动划分交通控制子区的过程被称为交通控制子区动态划分。

交通子区动态划分方法的研究中,如何确定相邻交叉口间是否需要协调控制是一个关键的问题。Robertson 和 Hunt^[2]定义了排队长度的减少量作为指标来衡量交叉口间协调控制的效益。Yagoda 等^[3]定义了“交叉口间协调需求度指标”,定量描述了交叉口间实时协调控制的必要性。莫汉康等^[4]提出了周期原则、流量原则和距离原则,并分别建立了各个原则下的交通子区自动划分过程。陈晓明等^[5]基于交通波理论建立了排队最远点模型,结合流量、距离原则研究了交通子区自动划分方法。但上述模型中的参数设定仍需要细致的人工干预,对专家经验有很强的依赖性,无法实现全自动的动态子区划分;另外,在划分过程中完全没有考虑到路网中普遍存在的紧邻交叉口、绿波干道等因素。因此,在处理国内特大型城市的复杂路网时,无法得到预期的结果。

作者针对上述问题,从研究相邻交叉口间的车队散布现象入手,分析了交叉口间实施协调控制的必要性并建立相应的交通信号控制子区动态划分模型。

1 交叉口间实施协调控制的必要性

交叉口间是否实施协调控制取决于实施协调控制所产生的效益大小。而交叉口间实施协调控制的效益,可通过研究交叉口间车队散布的规律来进行分析。所谓车队散布现象,表现为车队从上游交叉口绿灯期驶出后,由于车速的逐渐提高,车队由原来交叉口停车线前停车候灯时的紧密状态,到下游路段上行驶时,车队逐渐拉长,加上上游交叉口左、右转车辆的驶入,加长的车队在下游

交叉口的绿灯周期内,处于队尾的车辆来不及达到下游交叉口而被红灯截留^[6]。信号灯交叉口间距越远,车队拉得越开,散布现象越严重,被截留的车辆越多,交叉口间进行协调控制的效益也就越低。因此,本文利用上游交叉口放行的车队在下游交叉口绿灯时间内到达下游交叉口停车线处的比率来表征交叉口间协调控制的效益,称之为交叉口间的可协调度,利用符号 PF 表示。

路网中典型的两相邻交叉口及其时空图如下图所示 1 所示。

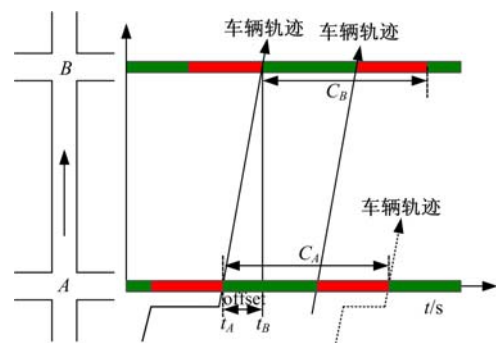


图 1 相邻交叉口时空图

Fig. 1 Time-space diagram of adjacent intersections

图中,交叉口 A 和交叉口 B 为相邻交叉口,交叉口 A 的周期为 C_A ,交叉口 B 的周期为 C_B ,在协调控制中,一般设定 $C_A = C_B = C$ 。交叉口 A 和交叉口 B 采用相同的相位设置,相位 1 中由交叉口 A 行驶向交叉口 B 的车队获得通行权。图 1 右侧为两交叉口间的时空图,其中绿色表示绿灯时段,红色表示红灯时段。 t_A 时刻,交叉口 A 的相位 1 获得通行权,交叉口 A 停车线前的排队车辆启动驶向交叉口 B。 t_B 时刻,交叉口 B 的相位 1 获得通行权,交叉口 B 停车线前的排队车辆可以启动通过交叉口 B。 $t_B - t_A = t_f$ 为由 A 到 B 的平均行驶时间。交叉口 A 和 B 的相位 1 的长度为 g 。由于车队散布现象的存在, $[t_A, t_A + g]$ 时间段内交叉口 A 放行的车辆不可能全部在 $[t_B, t_B + g]$ 时间段内到达交叉口 B。令 $[t_A, t_A + g]$ 时间段内交叉口 A 放行的车辆数为 N_A , $[t_B, t_B + g]$ 内到达交叉口 B 的车辆数为 N_B ,则定义交叉口 A 到 B 实施协调控制所产生的效益(即可协调度)为

$$PF_{AB} = f_p = \frac{N_B/N_A}{g/c} \quad (1)$$

为方便计算,假设各车辆在交叉口 A 和 B 之间匀速行驶,不同车辆的速度服从正态分布如下:

$$f(v) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(v-m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2)$$

式中: m 和 σ 分别为车速分布的均值和标准差。设交叉口 A 和 B 之间的距离为 D , 则车辆行驶时间 $\tau = D/v$, 由式(2)可推导平均行驶时间为

$$g(\tau) = \frac{1}{\tau^2 \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\frac{D}{v} - m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3)$$

设上游交叉口停车线处的车辆流率为 $q_1(t)$, 有

$$q_1(t) = \begin{cases} 0, & t < t_A \text{ 或 } t > t_A + g \\ q_s, & t_A \leq t \leq t_A + g \end{cases} \quad (4)$$

式中: q_s 为饱和流率。

则在 $[t, t + dt]$ 时间段内通过上游交叉口停车线的车辆数为 $q_1(t)dt$, 相应的在时间段 $[T, T + dT]$ 内通过下游交叉口停车线的车辆数为 $q_1(t)g(T-t)dtdT$, 则在绿灯时间段 $[t_B, t_B + g]$ 到达下游停车线的车辆数为:

$$N_B = \int_{t_B}^{t_B+g} \int_{t_A}^{t_A+g} g(T-t)q_1(t)dtdT \quad (5)$$

上游交叉口上一个绿灯周期放行的车辆数

$$N_A = \int_{t_A}^{t_A+g} q_1(t)dt \quad (6)$$

将式(3)~(6)代入式(1), 并设定适当的参数, 即可计算得到交叉口间的可协调度 PF。

2 基于超图模型的动态子区划分

2.1 基于超图表示的路网模型

为了更好地表现路网的实际状况, 本文采用了超图的形式来构建路网模型。超图是对图的一种扩展, 其模型为 $H = (V, E)$ 。其中 $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 是超图的顶点集合, $E = (e_1, e_2, \dots, e_m)$ 是超图的超边集合(设共有 m 条超边)。超边是超图中一组顶点的集合, 即超边 $e_i = (v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_j})$, 其中 $v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_j} \in V$ 。超图模型中, 每条超边可连接两个或两个以上的顶点^[7]。因此, 超图可以用来描述两个以上顶点之间的关系, 比普通图的表现力更强, 可以更好地描述实际路网中的紧邻交叉口、绿波干道等因素。

本文构建了基于超图表示的路网模型, 利用超图中的顶点来表示路网中的交叉口, 而超边则对应于一组相关交叉口的集合, 超边的权重则用来描述该超边中的交叉口间实施协调控制的必要性。路网模型构建中最核心的问题是如何构建超边并确定超边的权重。为此, 将超边划分为两类, 第一类超边仅包含两个顶点, 称之为两点超边; 第二类超边包含了三个及以上的顶点, 称之为多点

超边。

路网中任意两相邻交叉口间均可形成两点超边, 超边的权重等于交叉口间的可协调度。

$$W(E_{AB}) = PF_{AB} \quad (7)$$

多点超边反映了交通路网中的一些特殊因素, 也是需要重点考虑和研究的。在如下三种情况下将会形成多点超边:

(1) 紧邻交叉口。当路网中两个相邻交叉口间的距离小于 100 m 时, 称之为紧邻交叉口。两个紧邻交叉口必须采用同一信号控制器控制, 而非分别控制。因此, 紧邻交叉口必定位于同一超边中, 并与周围的交叉口组合形成多点超边。

(2) 绿波干道。城市中的某些特定的干道, 例如北京长安街, 需要实施干道协调控制以形成绿波带, 因此, 这些干道上的交叉口必须处于一具有较高权重的多点超边中。类似的, 特勤通道也需要相似的处理办法。

(3) 相关交叉口。路网中存在着这类交叉口, 它们不仅在地理位置上相近, 而且具有高度相关的交通流状态, 称之为相关交叉口^[8]。例如, A 是 B 和 C 的上游交叉口, 若 A 处于拥堵状态, 则以很大概率可以发现 B 和 C 顺序进入拥堵状态, 则认为 A、B、C 为相关交叉口, 需置于同一具有较高权重的多点超边中。

相关交叉口的发现具有较大的难度。本文采用了频繁集搜索和关联规则发掘的方法来搜索路网中的相关交叉口。为此, 首先需要定量地描述交叉口的交通流状态。本文定义了交叉口综合状态这一概念, 用符号 CSI 表示, 计算方法如下式:

$$CSI(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\alpha \times flow_j(t) + \beta \times occ_j(t)] \quad (8)$$

式中: N 为进入该交叉口的车道数; $flow_j(t)$ 为 t 时刻第 j 条车道的归一化流量; $occ_j(t)$ 为 t 时刻第 j 条车道的归一化占有率; α 和 β 为参数因子, 满足 $\alpha + \beta = 1$, 可根据实际情况调整流量和占有率的权重。

进一步将交叉口综合状态离散化为 6 个等级 A、B、C、D、E、F。其中等级 A 表示自由交通流, 而等级 F 表示严重的拥堵, 依此类推。用一个三元组 $\tau = [n, csi, k]$ 来描述交叉口的状态, 其中 n 为路网中交叉口的编号, csi 代表离散化以后的交叉口综合状态, k 为当前所处的时刻。令 $P = \{\tau_i / i = 1, 2, \dots, n\}$ 为所有可能的三元组的集合,

将 $\tau=[n,csi,k]$ 视为数据项,则 P 的每一个子集可以被视为一个交易(transaction)。设 T 为所有交易的集合,那么对于任意一个交易 C ,定义其支持数如下:

$$\sigma(C) = |\{t \mid t \in T, C \subseteq t\}| \quad (9)$$

而关联规则可以利用如下的形式表示^[9]:

$$X \overset{s, \alpha}{\Rightarrow} Y \quad (10)$$

式中: $X \subseteq P, Y \subseteq P, s$ 为支持度,其定义如下:

$$s = \sigma(X \cup Y) / |T| \quad (11)$$

α 为置信度,其定义如下:

$$\alpha = \sigma(X \cup Y) / \sigma(X) \quad (12)$$

关联规则可用来表示相邻交叉口之间的状态相关性。例如,令 $p = \{(n, F, k)\}$ 和 $q = \{(n+1, F, k+1)\}$ 为两个三元组,则 $p \overset{s, \alpha}{\Rightarrow} q$ 表示若交叉口 n 在 k 时刻处于状态 F ,则交叉口 $n+1$ 在 $k+1$ 时刻以 α 的置信度也处于状态 F 。因此,通过关联规则的发掘,可以搜索得到路网中的相关交叉口。

Apriori 算法是目前被广泛使用的、效率较高的一种关联规则发掘算法^[9]。选用该算法,来进行相关交叉口的发现,其流程如下:

(1) 利用交通流历史数据,即路网中各个交叉口的交通流量和占有率数据,计算交叉口各个时刻的综合交通状态,并进行离散化,形成三元组作为数据项。

(2) 利用 Apriori 算法从历史数据项中发掘关联规则,置信度和支持度的阈值由交通专家和工程师依据路网实际状况确定。

(3) 对获取的关联规则进行遍历,如果关联规则中涉及的三元组在空间点和时间点上均相邻,则所包含的交叉口点为相关交叉口。

相关交叉口搜索完毕之后,分别利用三类特殊情况下的交叉口点形成多点超边,并利用下式计算多点超边的权重:

$$W(E) = \sum_{\forall i, j \in E, i \neq j} PF_{ij} \quad (13)$$

式中: i, j 为该超边包含的任意两交叉口点; PF_{ij} 为两交叉口点间的可协调度,计算方法见式(1)。

综上,基于超图表示的路网建模过程如下:

(1) 根据 GIS 数据,搜索路网中的紧邻交叉口,并将它们合并视为一个顶点。

(2) 提取出已处在干道协调控制下的交叉口,组成超边并设定其权重为 1。

(3) 利用 Apriori 算法,搜索得到路网中的相关交叉口并形成相应的超边,计算其权重。

(4) 遍历剩下的交叉口点,分别与相邻的交叉口点两两组合形成两点超边,并计算其权重。

以如下的路网为例,该路网包含 14 个顶点。按照如上的步骤,首先发现交叉口 5 和 6 属于紧邻交叉口而将它们合并;接着得知交叉口 10、11、12、13 已实施干道协调控制,进而构建相应的超边;最后通过关联规则发掘发现交叉口 7、8、9 为相关交叉口而形成超边。最终,形成对应的超图可表示为如下的集合:

$$\begin{aligned} \{E^h\} = & \{(1,2), (2,3), (3,4), (1,5,10), \\ & (5,6,7), (2,7), (3,8), (4,9), \\ & (7,8,9), (5,6,10), (10,11,12,13), \\ & (7,12), (9,14), (13,14)\} \end{aligned}$$

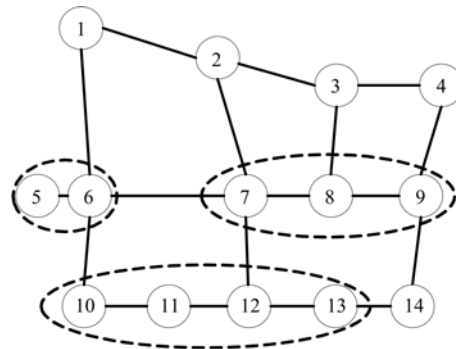


图 2 示例路网图

Fig. 2 Demonstration road network

2.2 超图划分模型

前文基于超图构建了路网模型,利用顶点来表示交叉口,超边对应于交叉口的集合,而超边的权重则描述了交叉口间的可协调程度。接着,需要将超图划分为若干子图,相应地也就将路网划分为若干对应的控制子区。为此,采用了一种被广泛应用的超图划分算法——HMETIS,其基本思想是将超图进行二分操作,保证分割过程中打断的超边权重之和最小;再对二分得到的两部分分别进行二分操作,直到得到的每一个子图内部的交叉口间都具有很高的可协调度^[10]。作为一种多层次的超图划分算法,HMETIS 算法已被证实可以在各种超图划分问题中产生高质量的分割结果,同时,该算法的时间效率很高,尤其是对于特大规模的超图。因此,很适合用于特大型城市的交通路网划分问题。

对超图二分操作的循环何时终止是算法中的一个关键问题。结合交通路网动态子区划分的实际要求,设置了如下两个终止条件,一旦其中任意一个被满足,二分操作循环即终止。

终止条件 1:当划分得到的子区中的超边的最小权重大于事先设定的阈值 W_s 时,即停止对该子区的进一步划分。

终止条件 2:当划分得到的子区的适合度 (fitness) 超过某一设定阈值时,则停止对该子区的进一步划分。

子区的适合度定义如下式所示:

$$fit(C) = \frac{\sum_{E \in C} W(E)}{\sum_{|E \cap C| > 0} W(E)} \quad (14)$$

式中: C 为划分得到的某一子区; E 为路网中的任意一条超边。

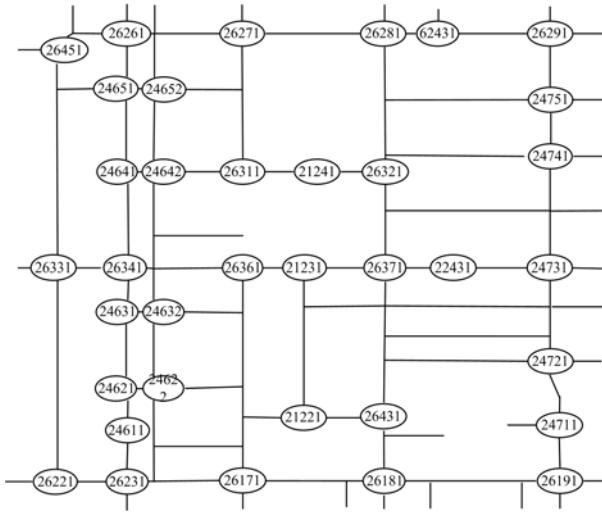


图 4 抽象节点图

Fig.4 Abstract road network in Beijing

3 案例研究

为了验证本文模型的有效性和性能,选用北京市二环内的实际路网作为研究对象来进行案例研究。该路网包含了 36 个交叉口,如图 3 所示。该路网可以被抽象为如图 4 所示的节点图,其中圆形的节点对应于路网中的交叉口,节点中的数



图 3 实际路网图

Fig.3 Actual road network in Beijing

字编号是对应的交叉口在 SCOOT 信号控制系统中的 ID,节点之间的连线对应于实际的交通路段。图 4 中忽略了没有实施信号控制的交叉口。

本案例研究中使用的数据来源于 SCOOT 信号控制系统,包括流量、占有率和平均速度。数据采集的时间为 2008 年 8 月 20 日,数据采集间隔为 5 min。子区动态划分的间隔为 15 min。为了进行对比研究,本文分别选取了上午 8 时和 11 时两个时间点进行模型验证,其中上午 8 时为典型的高峰时段,而上午 11 时则代表平峰时段。

3.1 高峰时段

采集了上午 8 时的交通数据,用于验证高峰时段本文模型的有效性。按照前述的路网建模步骤,首先,搜索三类特殊的交叉口以形成多点超边。显然,交叉口 24621 和 24622 为紧邻交叉口,同样,交叉口 24631 和 24632,24641 和 24642,24651 和 24652 均为成对的紧邻交叉口;交叉口 26221,26231,26171,26181 和 26191 位于长安街上,这是北京市最重要的一条干道,其上的交叉口处于干道协调控制下;通过关联规则发掘发现交叉口 26281,62431 和 26291 为相关交叉口,将它们包含在同一多点超边之中。高峰时段利用本文模型对该路网进行子区划分的结果如图 5 所示,整个路网被划分成 13 个协调控制子区,其中规模最大的子区包含 5 个交叉口,而规模最小的子区仅包含单个交叉口。

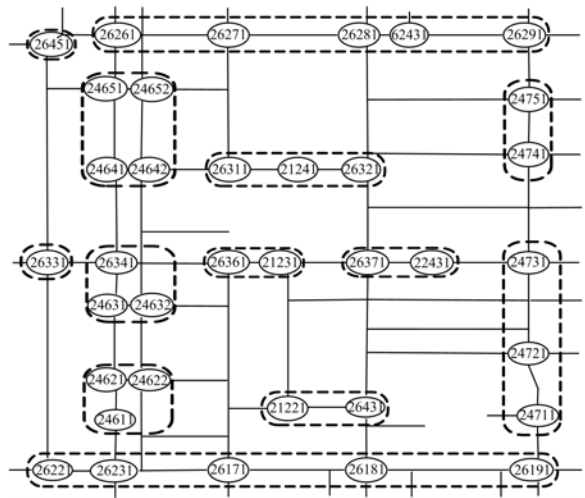


图 5 早 8 时的子区划分结果

Fig.5 Division result at 8 a.m.

3.2 平峰时段

采集了上午 11 时的交通数据,用于验证平峰时段模型的有效性。平峰时段与高峰时段相比,

基于超图表示的路网结构没有发生变化,变化的是模型中各个超边的权重。平峰时段按照本文模型对路网进行子区划分的结果如图 6 所示。整个路网被划分为 16 个协调控制子区,其中规模最大的子区包含 5 个交叉口,而规模最小的子区仅包含单个交叉口。

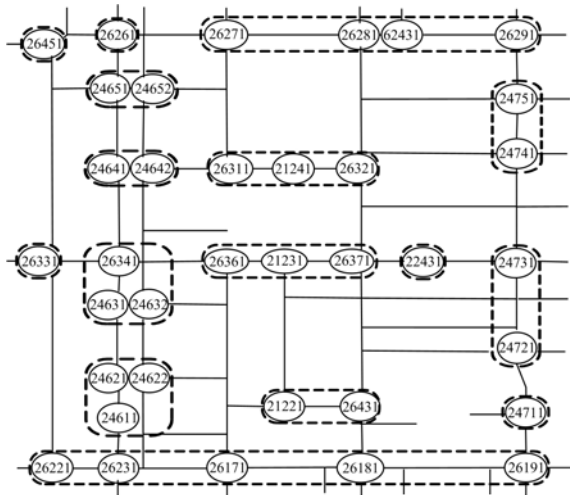


图 6 上午 11 点的子区划分结果

Fig. 6 Division result at 11 a. m.

比较高峰时段与平峰时段,发现高峰时段交叉口之间协调控制的要求要大于平峰时段,表现为形成的协调控制子区数目变少,而子区的平均规模增大了。分析其原因,高峰时段,交叉口处于饱和交通流状态,上游交叉口一直以饱和流率放行车队,车队较为紧密。而平峰时段交叉口处于不饱和状态,交叉口排队车辆放行完毕后,后续的车辆以近似平均分布的到达率陆续到达,导致车队的离散程度很高,交叉口口间实施协调控制的效益降低,可协调程度下降。

4 结束语

基于交叉口的车队散布模型,定量研究了交叉口间实施协调控制的必要性,并利用该指标设计了基于超图模型的子区动态划分算法。基于北京市实际路网实例验证了该算法的可行性和实用性。需要注意的是,虽然用于实例验证的路网包含了 36 个交叉口,但该算法同样可以有效地处理超大规模的路网,同时有效保证动态子区划分的实时性。这是由以下两点决定的:①本文模型是基于实际的交通工程需求而设计的,从对于路网中三类特殊因素的处理流程中可以清晰地看到这一点;②本文模型充分继承了超图模型划分算法 HMETIS 的

优点,该算法能够以非常高的效率处理大规模网络划分问题,同时保证产生高质量的分区。

参考文献:

[1] Robertson Dennis I, Bretherton R David. Optimizing networks of traffic signals in real time—the SCOOT method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(1): 11-15.

[2] Robertson D L, Hunt P B. A method of estimating the benefits of coordinating signals by TRANSYT and SCOOT[J]. Traffic Engineering and Control, 1982, 23 (11): 527-531.

[3] Yagoda H Nathan, Principe Edward H, Vick C Edwin, et al. Subdivision of signal systems into control areas [J]. Traffic Engineering, 1973: 42-45.

[4] 莫汉康,彭国雄,云美萍. 诱导条件下交通控制子区自动划分[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 54-59.
Mo Han-kang, Peng Guo-xiong, Yun Mei-ping. Automatic division of traffic control sub-area under condition of route guidance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2): 54-59.

[5] 陈晓明. 交通控制子区动态划分指标研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2007.
Chen Xiao-ming. Research on performance index of dynamic division about traffic control sub-area [D]. Changchun: Jilin University, College of Transportation, 2007.

[6] 王殿海,汪志涛. 车队离散模型研究[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 68-71.
Wang Dian-hai, Wang Zhi-tao. Study on platoon dispersion model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(1): 68-71.

[7] Berge C. Graphs and Hypergraphs[M]. New York: Elsevier, 1976.

[8] 任江涛. 基于数据挖掘的区域交通信息处理方法研究[D]. 北京: 清华大学自动化系, 2003.
Ren Jiang-tao. Research on area-wide traffic information processing methods based on data mining[D]. Beijing: Tsinghua University, Department of Automation, 2003.

[9] Agrawal R, Srikant R. Fast algorithm for mining association rules[C]// Proc of the 20th VLDB Conference, Santiago, Chile, 1994: 487-499.

[10] Karypis George, Aggarwal Rajat, Kumar Vipin, et al. Multilevel hypergraph partitioning: applications in VLSI domain[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 1999, 7(1): 69-79.