

# 考虑多特性因素的路网交叉口群动态划分方法

曲大义, 贾彦峰, 刘冬梅, 杨晶茹, 王五林

(青岛理工大学汽车与交通学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 基于原有的路径关联性模型, 综合考虑车辆离散性、阻滞性和局部路网交通流空间特征规律, 建立了相邻交叉口间的路径关联性模型, 弥补了初始模型仅考虑单一指标的不足; 根据路径关联度模型的计算结果, 利用聚类分析对信号控制交叉口群进行了动态划分。案例分析 and 仿真结果表明: 协同考虑多重特性因素的路径关联度模型动态划分交叉口群, 可以提高区域信号协调控制效果和车辆通行效率。

**关键词:** 交通信息工程及控制; 交叉口群; 关联度; 离散性; 阻滞性; 动态 OD 路径

**中图分类号:** U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2019)05-1478-06

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20180376

## Dynamic partitioning method for road network intersection considering multiple factors

QU Da-yi, JIA Yan-feng, LIU Dong-mei, YANG Jing-ru, WANG Wu-lin

(College of Automobile and Transportation, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** Based on the original path correlation model, considering the discrete vehicle, block and spatial characteristics of local traffic flow, path correlation model between adjacent crosses is established. This model compensates the shortcoming of the original model, which only considers a single index. Based on the calculation results of the path correlation model, signal control intersection groups are dynamically divided using the hierarchical clustering method. Case analysis and simulation results show that the new model of intersection group dynamic division based on signal control protocol can improve the regional Regulation efficiency.

**Key words:** traffic information engineering and control; intersection group; correlation degree; discrepancy; block ability; dynamic OD path

## 0 引言

城市路网交叉口关联度是衡量道路中某个交叉口与其他交叉口相互关系强弱的指标。交叉口群是城市道路网络中具有较强关联性的多个相邻交叉口及其中间路段的集合, 交叉口关联度是划

分交叉口群范围、判断是否需要协调控制的重要依据。马莹莹等<sup>[1]</sup>以流量饱和度和自由行程时间为关联度计算指标, 建立相邻交叉口关联性的拉普拉斯矩阵, 以此作为划分交叉口群范围的工具; Yagoda等<sup>[2]</sup>认为交叉口之间的相关性主要与路段上的流量  $Q$  和长度  $L$  有关, 并使用耦合

收稿日期: 2018-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678320).

作者简介: 曲大义(1973-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 交通流理论与交通控制. E-mail: dyqu@263.net

指标表示两个交叉口之间的相关性。胡华等<sup>[3]</sup>认为影响相邻交叉口关联性的因素包括路段长度、上游交叉口车流量及其到达规律。马万经等<sup>[4]</sup>首次考虑了交通流的空间变化,以流量比为特征,应用聚类分析方法确定各交叉口群的划分范围。综上所述,以往的研究表明,现有关联度模型大多反映了交叉口两段之间的关系<sup>[5-10]</sup>,难以表现网络中多交叉口相互影响的综合效益,且缺乏考虑交叉口间局部交通流空间的动态变化。因此,在原有模型基础上,建立相邻交叉口之间的路径关联度模型全面考虑了多种关联度指标和交通流的动态变化,并根据所建模型的计算结果应用层次聚类法对交叉口群进行动态划分<sup>[11,12]</sup>。

## 1 关联指标选取

### 1.1 离散性关联指标

为反映车流运行特性和路径长度对关联度的影响,将车队离散性加入路径关联度计算模型中。假设一个车队在路径开始时车头时距为 $\bar{h}_0$ ,到达路径末端时不会发生车辆驶入、驶出或者超车现象,行驶车辆仅受车队离散因素影响,平均车头间距变为 $\bar{h}_d$ ,那么 $\bar{h}_0 < \bar{h}_d$ ,  $\bar{q}_0 > \bar{q}_d$ ,其中, $\bar{q}_0$ 为路径起点的平均流率; $\bar{q}_d$ 为路径终点的平均流率。

定义离散性关联指标为某一理想车队在相同时间段内路径起和迄点车辆数的比值,即 $I_1 = n_d/n_0$ ,其中:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_0} h_0(i) \leq t_g < \sum_{i=1}^{n_0+1} h_0(i) \\ \sum_{i=1}^{n_d} h_d(i) \leq t_g < \sum_{i=1}^{n_d+1} h_d(i) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_1$ 为离散型关联性指标; $h_0(i)$ 为车队在路径起点第 $i$ 辆车的车头时距, $s$ ;  $h_d(i)$ 为车队在路径终点第 $i$ 辆车的车头时距, $s$ ;  $n_0$ 为车队在路径起点绿灯时间内通过的车辆数,veh;  $n_d$ 为车队在路径终点绿灯时间内通过的车辆数,veh。

$h_0(i)$ 、 $h_d(i)$ 可通过实地观测获得,也可利用Robertson车队离散公式对车辆数进行估算,因此有:

$$n_0 = \sum_{i=1}^{t_g} q_0(i), n_d = \sum_{i=1}^{t_g} q_d(i+T) \quad (2)$$

在车速不变下变动路径长度和绿信比获得离散性关联指标 $I_1$ ,结果如图1所示。

结果表明:在路径长度增长、绿信比减小的情

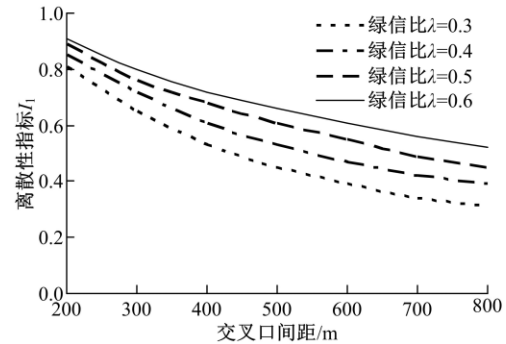


图1 路径长度及绿信比对离散性指标的影响

Fig. 1 Influence of path length and green letter ratio on discrete index

况下,离散性关联指标 $I_1$ 会降低。在交叉口间距较小时绿信比值对 $I_1$ 的影响程度不显著,随着距离的增加, $I_1$ 受绿信比的影响愈发显著;同时,相同间距绿信比越小,对 $I_1$ 值的影响也越敏感。

### 1.2 阻滞性关联指标

滞留排队属于关联交叉口的交通负面效应之一,并且与交叉口距离、平均车速、车道渠化等因素有关,处理不当就会出现路口车辆溢出现象,也应当考虑到路径关联度模型当中。

如图2所示, $d_1$ 为车辆滞留长度; $d_2$ 为车辆开始降速直至为零的距离; $d_3$ 为正常运行的距离。用功能区长度 $D$ 与路段总长度 $L$ 的比值分析关联度。区域内某条路径的路段为 $m$ ,计算每条车道的功能区长度为:

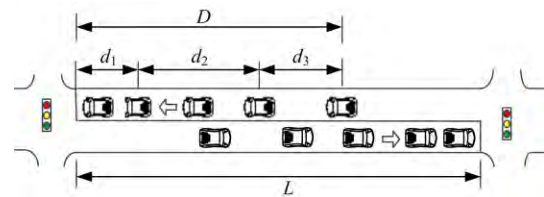


图2 交叉口上游功能区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of upstream functional area at intersection

$$D_n^m = d_{1n}^m + d_{2n}^m + d_{3n}^m \quad (3)$$

式中: $D_n^m$ 为路段 $m$ 第 $n$ 条车道的功能区长度, $m$ ;  $d_{1n}^m$ 为路段 $m$ 第 $n$ 条车道的车队排列长度, $m$ ;  $d_{2n}^m$ 为减速距离, $m$ ;  $d_{3n}^m$ 为感知-反应距离, $m$ 。

若该路径前进方向的交叉口进口道有 $N$ 条不同车道,将 $I_2^m$ 定义为路段 $m$ 功能区长度最大值与路段长度 $L$ 的比值,即:

$$I_2^m = \max(D_1^m, D_2^m, \dots, D_n^m, \dots, D_N^m)/L \quad (4)$$

若该路径由 $M$ 个路段组成,则其阻滞性指标 $I_2$ 为:

$$I_2 = \sum_{m=1}^M I_2^m / M \quad (5)$$

在同样条件下计算阻滞性关联指标  $I_2$ , 结果如图3所示。

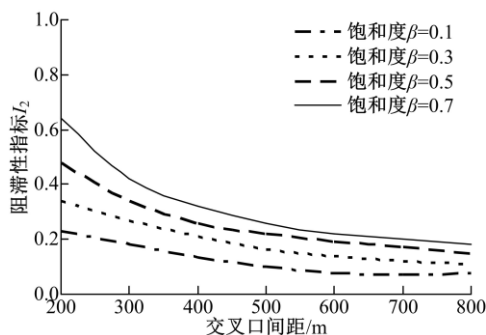


图3 交叉口距离及饱和度对阻滞性指标的影响

Fig. 3 Effect of intersection spacing and saturation on block index

结果表明:当路径仅包含一个路段时,交叉口饱和度与交叉口间距对  $I_2$  均有较大影响。 $I_2$  值随交叉口间距的增加而减小,在交叉口间距较小时饱和度对  $I_2$  值影响较为显著,同时饱和度越大,因滞留车队的影响,  $I_2$  也会增大。随着间距增大,其对  $I_2$  值影响的差异性降低。

### 1.3 OD 路径关联指标

两个指标未考虑局部路网动态交通流路径分布情况,对于有信号灯控制的交叉口之间存在连接住宅区或商务楼的支路,这些支路有早晚高峰进出流量大、车流 OD 路径分布明显等特点,如图4所示。

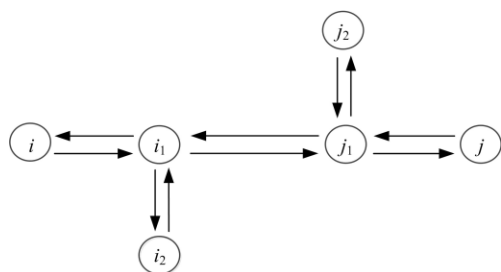


图4 OD 路径示意图

Fig. 4 Schematic diagram of path

通过分析局部路网交通流路径分布可较准确地判断下游交通量来自于上游的百分比,提高相邻交叉口关联强度的判别,减少交叉口群边界的控制延误和停车次数。

假设  $O$  为交通生成的集合点; $m$  为维度; $D$  为交通吸引点的设置; $n$  为维度;任何一对 OD 之间的交通流量为  $Q_{od}$ ;部分区域道路网的交通流动

态矩阵为  $OD = (Q_{od})_{m \times n}$ ;  $P$  为两两之间的所有 OD 路径集合当地的道路网络; $L$  为所有连接当地的道路网络。设置 0-1 变量  $\delta_{l,p}^{od}$  为如下含义:

$$\delta_{l,p}^{od} = \begin{cases} 0, & l \text{ 不在 } od \text{ 的 } P \text{ 上} \\ 1, & l \text{ 在 } od \text{ 的 } P \text{ 上} \end{cases} \quad (6)$$

连线流量  $Q_l$  和路径流量  $Q_p$  的关系为:

$$Q_l = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_{od}} \delta_{l,p}^{od} Q_p \quad (7)$$

路径流量  $Q_p$  和 OD 流量  $Q_{od}$  之间的关系为:

$$Q_{od} = \sum_{p \in P_{od}} Q_p \quad (8)$$

定义图4中路口  $i$  至路口  $j$  的 OD 路径指标为  $I_{i-j}^p$ ;路口  $j$  至路口  $i$  的为  $I_{j-i}^p$ ,则  $I_{i-j}^p$  与  $I_{j-i}^p$  的计算公式如下:

$$I_{i-j}^p = 1 / [(\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_{od}} \delta_{i \rightarrow j,p}^{od}) - 1] \cdot \{ [\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_{od}} \delta_{i \rightarrow j,p}^{od} \times \max(\delta_{i \rightarrow j,p}^{od} \times Q_p)] / Q_l - 1 \} \cdot \frac{1}{1+t} \quad (9)$$

$$I_{j-i}^p = 1 / [(\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_{od}} \delta_{j \rightarrow i,p}^{od}) - 1] \cdot \{ [\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_{od}} \delta_{j \rightarrow i,p}^{od} \times \max(\delta_{j \rightarrow i,p}^{od} \times Q_p)] / Q_l - 1 \} \cdot \frac{1}{1+t} \quad (10)$$

则2个交叉口的 OD 路径关联指标为:

$$I_3 = \max(I_{i-j}^p, I_{j-i}^p) \quad (11)$$

## 2 交叉口群动态划分方法

### 2.1 路径关联度计算

由于三个关联度指标代表的物理含义不同,存在量纲上的差异,需要对计算出的所有路径的  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  进行无量纲处理,分别记为  $I'_1$ 、 $I'_2$  和  $I'_3$ :

$$\begin{cases} I'_1 = (I_{1\max} - I_1) / (I_{1\max} - I_{1\min}) \\ I'_2 = (I_{2\max} - I_2) / (I_{2\max} - I_{2\min}) \\ I'_3 = (I_{3\max} - I_3) / (I_{3\max} - I_{3\min}) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $I_{1\max}$ 、 $I_{2\max}$ 、 $I_{3\max}$  为区域路网内相应指标的最大值;  $I_{1\min}$ 、 $I_{2\min}$ 、 $I_{3\min}$  为区域路网内相应指标的最小值。

因此,某条路径关联度  $I$  为:

$$I = I'_1 + I'_2 + I'_3, I \in [0, 3] \quad (13)$$

2.2 交叉口群动态划分流程

聚类分析是一组统计分析技术,其将研究对象划分为相对同质的组。迄今已经提出了很多聚类算法,为能快速有效地处理大量数据,采用层次聚类方法对交叉口群进行动态划分。

在基于层次聚类方法对交叉口群进行动态划分时,需要知道一定区域内路网各时段 OD 路径以及各交叉口各时段的入口流量,并将相邻交叉口的路径关联度作为其聚类指标,关联度阈值应提前设定。利用此方法划分交叉口群的步骤如下:

- Step1 在路网中设置交叉口和路段集,对不同时段 *OD* 矩阵进行动态加载。
- Step2 搜索所有路段,根据式(13)得到所有相邻交叉口的路径关联度值。
- Step3 选定相邻交叉口路径关联度阈值,若计算出的路径关联度值小于该值,则可以将上下游交叉口划分到不同的交叉口群。
- Step4 在整个区域内,将关联度高的相邻路段合并成主路径划入一个交叉口群内,并相应删除划分后的路段和交叉口,再一次确认此时路段集是否为空,若是转 Step6,否则转 Step5。
- Step5 搜索所有路口集合,根据最新生成的相邻交叉口关联度值与阈值进行比较判断是否能归入此交叉口群:若是,删除对应路段和路口。进一步判断路段集合是否为空,若是转 Step6;否则转 Step4;
- Step6 并入新的交叉口群,形成基于路径关联度的交叉口群划分方案,算法结束。

3 实例验证与仿真分析

3.1 路径关联度计算结果

以青岛市某区域路网为例,如图 5 所示。实地调查获取数据包括各交叉口渠化形式及转向流量,如表 1 所示。

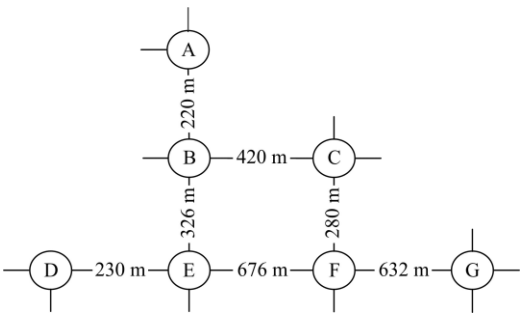


图 5 区域路网示意图

Fig. 5 Schematic diagram of regional road network

转向编号包括 3 个字母,首字母为交叉口编号,第二个表示进口道方向,第三个表示驶出方向。如“FER-CSL-BER”表示车辆由东进口驶入交叉口“F”,再右转驶入交叉口“C”后左转驶入交叉口“B”,最后右转驶出。通过交通调查已知某时间段该路网有“ESR-FWL-CST”“GSL-FER-CST”“DWT-EWL-BST-AST”3 条主要 OD 路径,车流在路段中的平均速度为 30 km/h。采用回溯法分别计算路网内所有路径的关联度值 *I*,表 2 为根据关联度值由高到低列出的前 10 条路径,可见,路径距离越小车流到达下游路口的脉冲式特征越显著,但当短路径交叉口流量较小时,车队排队滞留关联度指标减小,相应关联度值降低。以路径“BWT-CWT”为例,路径长度虽然小于路径“EWT-FWT”,但流量低,连续车队规模小,对

表 1 区域各交叉口渠化形式及转向流量

Table 1 channelization forms and steering flow at each intersection

路口	车道属性	流量/(veh·h <sup>-1</sup> )			路口	车道属性	流量/(veh·h <sup>-1</sup> )			路口	车道属性	流量/(veh·h <sup>-1</sup> )		
		左转	直行	右转			左转	直行	右转			左转	直行	右转
		L	T	R			L	T	R			L	T	R
AW	左+右	372	—	262	CS	左+直+直右	200	1289	223	FE	左+直+右	198	340	670
AS	左+直+直	186	1775	—	CN	左+直+直右	220	920	137	FW	左+直+右	280	300	195
AN	直+直+右	—	764	243	DE	左+直+直右	221	720	176	FS	左+直+直右	248	450	202
BE	直左+直右	149	224	168	DW	左+直+直右	256	960	160	FN	左+直+右	199	320	179
BW	直左+直右	136	256	124	DS	直左+直右	146	252	160	GE	左+直+直右	103	498	224
BS	左+直+直右	103	1576	190	EE	左+直+右	165	202	220	GW	左+直+右	133	288	168
BN	左+直+直右	201	832	219	EW	左+左+直右	1203	198	124	GS	左+直左+右	455	221	200
CE	直左+直右	168	241	147	ES	左+直+直右	212	432	189	GN	左+直+右	179	250	248
CW	直左+直右	170	276	156	EN	左+直+直右	249	389	143					



下游路口车队排队滞留的影响较小,所以关联度值低于“EWT-FWT”。由此可见,本文模型能多层次反映交叉口间路径长度、排队滞留、车队离散和车流时空分布等因素。

表2 部分路径关联度值

Table 2 Path correlation value

序号	路径编号	$I'_1$	$I'_2$	$I'_3$	$I$
1	DWT-EWL	0.73	0.64	0.71	2.08
2	EWL-BST	0.66	0.43	0.88	1.97
3	BST-AST	0.58	0.54	0.79	1.91
4	GSL-FER	0.55	0.52	0.79	1.86
5	FER-CST	0.66	0.52	0.65	1.83
6	EST-BST	0.54	0.51	0.52	1.57
7	EWT-FWT	0.52	0.48	0.47	1.47
8	FST-CST	0.42	0.45	0.51	1.38
9	GET-FET	0.44	0.39	0.38	1.21
10	BWT-CWT	0.39	0.22	0.31	0.92

### 3.2 信号协调控制方案比较

为进一步验证路径关联度计算方法的合理性,选择此时关联度值排列在前5位的路径划分成2个交叉口群进行信号协调控制,如图6所示。仿真结果表明,关联路径的识别有助于提高信号协调控制效率。

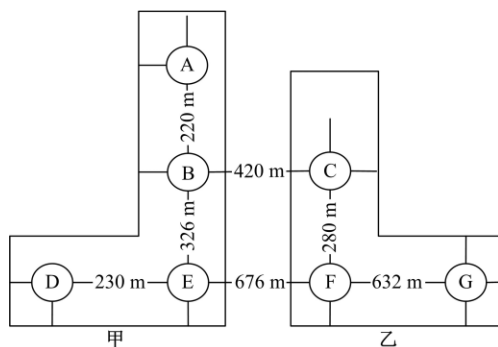


图6 交叉口群划分示意图

Fig. 6 Sketch map of intersection group division

现有方案是采用绿波控制思路分别对“DWT-EWT-FWT-GWT”、“BWT-CWT”路径实施线控,方案二将该区域路网划分成图6所示的甲、乙两个交叉口群,每个交叉口群确定一个公共信号周期,依据路径关联度确定协调方向并对相位差和相序进行优化。对于交叉口群甲,将E设为关键交叉口,优先协调路径“DWT-EWL-BST-AST”获得最大绿波带宽,再协调路径“EST-BST-AST”。同样于交叉口群乙,优先协调路径“GSL-FER-CST”获得最大绿波带宽,再协调路径“FST-CST”,如图7所示。

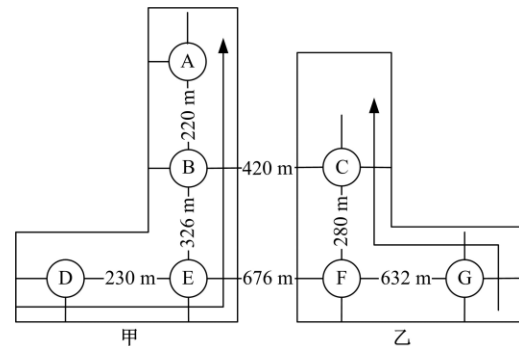
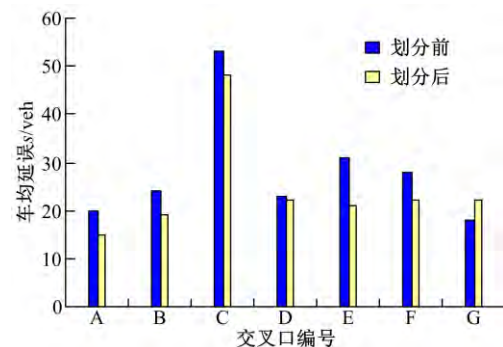


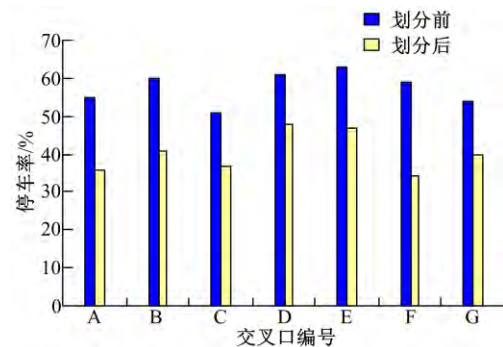
图7 交叉口群主路径协调方向示意图

Fig. 7 Schematic diagram of intersection of main path coordinate direction

通过Synchro7仿真分析各控制方案,获得协调前、后各交叉口的车均延误与停车率等评价指标,如图8所示。在实行路径协调控制后,此区域交通运行效果得到提高,方案二中车均延误和停车率降低幅度值分别为7.3%、20.4%。但在方案二中,对于交叉口群乙,由于公共周期长度远大于交叉口G自身最优周期长度,导致西向东车均延误增加了19.4%。对关联度高且实施协调控制的路径而言,虽然调整了个别转向的优先级,运行状况稍有降低,但通过优化,区域路网的交通运行效率总体上明显提高。结果表明,通过计算各



(a)车均延误比较



(b)停车率比较

图8 各交叉口交通运行效益指标比较

Fig. 8 Comparison of traffic operation benefit indexes

路径的关联度可有效地找到交叉口群内的协调相位差,提高路网交通运行效益。

## 4 结束语

综合考虑路径长度、路口流量、排队长度、车流离散和OD路径分布等影响因素,建立的系统模型能较好弥补单指标模型的不足,基于多因素交叉口群动态划分方法也为关联度值的计算提供了一种新思路,实例表明,该方法能提高交叉口群划分的合理性,减少车辆在路段上的停车次数和控制延误,提高区域路网运行效率。

### 参考文献:

- [1] 马莹莹, 杨晓光, 曾滢. 基于谱方法的交通信号控制网络小区划分方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(12): 2290-2296.  
Ma Ying-ying, Yang Xiao-guang, Zeng Ying. Urban traffic signal control network partitioning using spectral method[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30 (12): 2290-2296.
- [2] Yagoda H N, Principe E H, Vick C E, et al. Subdivision of signal systems into control areas[J]. Traffic Engineering Inst Traffic Engr, 1973, 43(12): 42-45.
- [3] 胡华, 高云峰, 杨晓光. 考虑路网OD路径的交叉口群动态划分方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(31): 1-4.  
Hu Hua, Gao Yun-feng, Yang Xiao-guang. Method of intersection-group dynamic division considering OD path in road network[J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(31): 1-4.
- [4] 马万经, 李晓丹, 杨晓光. 基于路径的信号控制交叉口关联度计算模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(11): 1462-1466.  
Ma Wan-jing, Li Xiao-dan, Yang Xiao-guang. Incidence degree model of signalized intersection group based on routes[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2009, 37 (11): 1462-1466.
- [5] 卢凯, 徐建闽, 郑淑鉴. 相邻交叉口关联度分析及其应用[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 37(11): 37-42.  
Lu Kai, Xu Jian-min, Zheng Shu-jian. Correlation degree analysis of neighboring intersections and its application[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 37 (11): 37-42.
- [6] 杨庆芳, 陈林. 交通控制子区动态划分方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(增刊2): 145-148.  
Yang Qing-fang, Chen Lin. Dynamic division method of traffic control subsystem[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(Sup. 2): 145-148.
- [7] 段后利, 李志恒, 张毅, 等. 交通控制子区动态划分模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(增刊2): 13-18.  
Duan Hou-li, Li Zhi-heng, Zhang Yi, et al. Dynamic division model of traffic control subsystem[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(Sup. 2): 13-18.
- [8] Morris B T, Trivedi M M. Learning, modeling and classification of vehicle track patterns from live video[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(3): 425-437.
- [9] Chang C P. How to decide the interconnection of isolated traffic signals[C]//Conference on Winter Simulation, ACM, 1985: 445-453.
- [10] 曲大义, 杨建, 陈秀锋, 等. 车辆跟驰的分子动力学特性及其模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, 42(5): 1198-1202.  
Qu Da-yi, Yang Jian, Chen Xiu-feng, et al. Molecular dynamic characteristics of car-following and its model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(5): 1198-1202.
- [11] 张红云, 刘向东, 段晓东, 等. 数据挖掘中聚类算法比较研究[J]. 计算机应用与软件, 2003, 20(2): 5-6, 77.  
Zhang Hong-yun, Liu Xiang-dong, Duan Xiao-dong, et al. The comparison of clustering methods in data mining[J]. Computer Applications and Software, 2003, 20(2): 5-6, 77.
- [12] 曲大义, 万孟飞, 李娟, 等. 基于交通波理论的干线相位差优化及其控制方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2017, 47(2): 429-437.  
Qu Da-yi, Wan Meng-fei, Li Juan, et al. Offset optimization of arterial traffic based on traffic-wave theory and its control method[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(2): 429-437.