

文章编号:1671-1637(2014)06-0110-07

基于聚类分析的城市交通 TOD 优化控制方法

姚 佼,徐洁琼,韩 印

(上海理工大学 管理学院,上海 200093)

摘 要:为了降低环形线圈车辆检测器故障率,基于指数平滑异同移动平均线法对缺失历史数据进行修补,运用 Ward 最小方差法对历史交通流量数据进行聚类分析,以改进立方群准则作为聚类终止条件,确定 TOD 多方案控制的最优方案数和最佳切换时刻,利用交通信号配时优化软件 Synchro 对 TOD 优化控制方法进行仿真验证。验证结果表明:优化控制方法能够提供更精细的 TOD 控制方案,更能体现对实际交通需求波动的响应,优化后控制方案的车均延误减少率平均为 11.90%,其中早高峰前时段的车均延误减少率为 20.27%,晚低峰、晚高峰和早高峰的车均延误减少率分别为 12.99%、8.07%、6.25%。

关键词:智能交通系统;城市交通;聚类分析;立方群准则;TOD 优化控制方法;车均延误

中图分类号:U491.54

文献标志码:A

TOD optimal control method of urban traffic based on clustering analysis

YAO Jiao, XU Jie-qiong, HAN Yin

(School of Business, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To overcome the high failure rate of circular loop vehicle detector in real road, the loss historical data were mended by using moving average convergence divergence method. The historical traffic flow data were clustered by using Ward least square method. A clustering terminal condition was proposed to determine the optimal control plan number and switch time of TOD multi-schedule control based on the modified cubic clustering criterion. TOD optimal control method was simulated and verified by using signal timing optimization software Synchro. Verification result indicates that TOD optimal control method can provide more detailed TOD control plan, which can also respond the fluctuation of real traffic demand. The average decrement rate of each vehicle delay based on the optimal control method is 11.9%, in which the decrement rate in pre-morning peak period is 20.27%, and the values in evening low peak period, evening peak period and morning peak period are 12.99%, 8.07% and 6.25%, respectively. 5 tabs, 5 figs, 24 refs.

Key words: intelligent transportation system; urban traffic; clustering analysis; cubic clustering criterion; TOD optimal control method; average vehicle delay

Author resume: YAO-Jiao(1982-), male, lecturer, PhD, +86-21-65710430, yaojiao@126.com.

收稿日期:2014-07-13

基金项目:国家自然科学基金项目(60974093);上海高校一流学科建设计划项目(S1201YLXK);上海高校青年教师培养资助计划项目(slg12009)

作者简介:姚 佼(1982-),男,山西运城人,上海理工大学讲师,工学博士,从事智能交通控制研究。

0 引言

当前,大多数城市交通控制系统主要基于环形线圈检测器信息。Klein 等认为环形线圈检测器的故障率高达 25%,即使最好的维修养护,全年也有 11.7%的故障率^[1]。在中国,这一数据高达 30%,特别是在一些处于建设期的城市,这一比例甚至更高^[2]。可见,基于环形线圈检测器信息进行的交通控制极易差之毫厘,谬以千里,效果自然大打折扣。Papageorgiou 认为每天不同时段(Time-of-Day, TOD)的多方案选择对于稳态交通流效果显著,并以快速路动态交通流模型进行了验证^[3];对于地面道路,Kreer 认为除过饱和状态外,基于环形线圈检测器数据和相关预测算法的交通响应控制方案与基于历史平均数据的 TRANSYT 网络信号配时优化方案几乎无差异^[4],相对于交通响应优化控制,每天不同时段的多方案选择控制更具费用效益优势。

判断现状 TOD 控制方案切换时刻主要依赖于交通工程师的经验,除非交通需求的变化每天保持不变,否则很难判断最佳的时间切换点。Hauser 等认为利用传统的层次聚类分析法对 TOD 控制方案的最佳切换时刻进行优化时,由于所需数据量庞大,生成的聚类层中可能存在落点较少的问题,容易出现噪音^[5];Park 等利用遗传算法等启发式算法对 TOD 控制方案的最佳时间切换点进行了优化研究^[6-10],但最优解易陷入局部最优;Wang 等利用 K 均值聚类法克服了以上缺点^[11-12],但需事先指定最优控制方案数;Yang 等比较了 Kohonen 聚类法和 K 均值聚类法对多时段控制方案的效益,结果表明后者效果更佳^[13];Guo 等在上述研究的基础上,基于数据采集实现了协调、半感应 TOD 控制方案最佳切换时刻的自动切换^[14-16],但仍需事先指定最优方案数。

基于上述分析,本文同时考虑 TOD 多方案的最优方案数和最佳切换时刻,并以此为研究对象,首先对缺失历史交通流量数据进行修补,消除检测器故障的影响,进而考虑到交通控制方案的稳定性,以小时交通流量为样本,采用 Ward 最小方差法计算样本的类间距离,并基于改进立方群准则对其进行合并处理,确定 TOD 控制的最优方案数与相应的方案切换时刻,最后通过相关的案例进行验证分析。

1 数据预处理

交通控制方案的制定主要依赖车道数、车道功

能等交通资源的供给条件,以及交通流量等需求条件,前者一般而言较为固定,因此,本文研究的历史数据主要为历史交通流量数据。对于数据的预处理主要是统计若干天的历史数据,对因检测器故障造成的缺失数据进行修补。可以利用自数据缺失之日起前 $1 \sim n$ 天相应时段的历史数据进行缺失数据的修补。若数据缺失之日为第 i 天,则当天相应时段的流量数据估计值 x_i 为

$$x_i = (1 + \sigma_i)X_i = (1 + \sigma_i) \frac{1}{n}(x_{i-1} + x_{i-2} + \cdots + x_{i-n}) \quad (1)$$

式中: σ_i 为第 i 天相应时段流量数据估计值的随机波动范围,可根据同期历史数据的波动范围确定; X_i 为第 i 天之前 $1 \sim n$ 天相应时段历史流量数据的平均值; $x_{i-1} \sim x_{i-n}$ 为第 $i-1 \sim i-n$ 天相应时段的历史流量数据。

采用指数平滑异同移动平均线(Moving Average Convergence Divergence, MACD)确定 σ_i ,具体步骤如下。

Step 1:计算短期(一般选 n 为 7 d 时相应时段的交通流量数据)移动指数平均值(Exponential Moving Average, EMA)与长期(一般选 n 为 30 d 时相应时段的交通流量数据)移动指数平均值。

第 $i-1 \sim i-n$ 天相应时段交通流量数据移动指数平均值 $E_i(n)$ 为

$$E_i(n) = \frac{n-2}{n+1}E_{i-1}(n) + \frac{2}{n+1}x_i \quad (2)$$

定义一个处理历史数据的平滑系数 α ,则式(2)变为

$$\begin{aligned} E_i(n) &= \alpha x_i + (1 - \alpha) \frac{n-2}{n+1}E_{i-1}(n) = \alpha x_i + \\ &(1 - \alpha)[\alpha x_{i-1} + (1 - \alpha)E_{i-2}(n)] = \\ &\alpha[x_i + (1 - \alpha)x_{i-1} + (1 - \alpha)2x_{i-2} + \\ &\cdots + (1 - \alpha)nx_{i-n}] \quad (3) \\ \alpha &= \frac{2}{n+1} \end{aligned}$$

由式(3)可以看出,在移动指数平均值 $E_i(n)$ 的计算中,每天相同时段交通流量数据的权重以等比形式缩小,时间越靠近当前时刻,其权重越大,说明 $E_i(n)$ 对近期时段的流量加强了权重比,更能及时反映近期流量的波动情况。

Step 2:计算第 i 天相应时段交通流量数据的短期移动指数平均值和长期移动指数平均值的离差值(Difference, DIF) d_i

$$d_i = E_i(7) - E_i(30) \quad (4)$$

Step 3:根据离差值计算第 i 天前 $1 \sim n$ 天 (n 一般取 15 d) 的移动指数平均值,即离差平均值(Difference Exponential Average, DEA) D_i

$$D_i = \frac{n-2}{n+1}D_{i-1} + \frac{2}{n+1}d_i \quad (5)$$

σ_i 的取值为数据缺失之日,即第 i 天的离差平均值 D_i 。

2 基于改进立方群准则的聚类分析

2.1 历史交通流量数据的聚类

TOD 多时段方案选择的核心思想是对类似的交通需求采用相同的控制策略,因此,有必要对历史数据进行聚类,然后由相关的交通模型生成相应的控制方案。考虑到不同控制方案的过渡需要一定的时间(15~20 min)^[17-21],在这段时间内,交通流处于不稳定状态,无法真实体现相关控制方案的效益,因此,交通控制方案的切换不易太频繁。基于此,将进行聚类的交通流量数据时间单元确定为 1 h,将其作为一个原始的类,然后按一定的规则和方法进行聚类,直到满足一定的终止条件。

类的合并方法主要计算类间的距离,将类间距离最小的 2 个类合并,再重新进行各类间的聚类,以此循环,直至终止。本文采用 Ward 最小方差法计算类间距离,具体算法如下。

设有 A 、 B 两个类,其中各有 a 、 b 个观测样本,类 C 为类 A 、 B 并集样本组成的类, Ward 最小方差法定义 A 、 B 两个类的类间距离 J 为

$$J = L_C - L_A - L_B \quad (6)$$

$$L_C = \sum_{j=1}^{a+b} |y_j - Y_C|^2 \quad (7)$$

$$L_A = \sum_{g=1}^a |y_g - Y_A|^2 \quad (8)$$

$$L_B = \sum_{h=1}^b |y_h - Y_B|^2 \quad (9)$$

$$Y_C = \frac{1}{a+b} \sum_{j=1}^{a+b} y_j \quad (10)$$

式中: L_A 、 L_B 、 L_C 分别为类 A 、 B 、 C 的类内距离; Y_A 、 Y_B 、 Y_C 分别为类 A 、 B 、 C 中所有元素的均值; y_g 、 y_h 、 y_j 分别为类 A 、 B 、 C 中第 g 、 h 、 j 个观测样本值。

每次合并聚类时,总是选择这样的 2 个类 A 、 B ,使它们合并成类后的类间距离最小。需要注意的是,此算法的计算时间要求相对较长,初始类的数量不宜过多。如果聚类的基本时间单元为 10、5 min 或更小,初始需要的聚类将比较多,需要首先

使用快速聚类方法^[22-23]将这些类聚类为数目为 50 以内的类,然后再使用上述算法以提高聚类的效率。

2.2 最优 TOD 控制方案数

上文的聚类过程中需要反复计算类间距离,因此,算法效率较低。如果能够确定最优聚类数,即最优的 TOD 控制方案数,则可使其作为聚类的停止规则,大大提高效率。

立方群准则(Cubic Clustering Criterion, CCC)通过比较给定样本数据一定分类数条件下的统计量 R^2 和均匀分布的种群点集的期望统计量 $E(R^2)$,确定最优聚类数,在经济、生物等领域得到了广泛的应用。立方群准则具体表述为

$$c = \frac{\sqrt{(Nq/2)}}{[0.001 + E(R^2)]^{1.2}} \ln \left[\frac{1 - E(R^2)}{1 - R^2} \right] \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \sum_{r=1}^s D_r / T \quad (12)$$

$$D_r = \sum_{u=1}^w |y_{r,u} - Y_r|^2 \quad (13)$$

$$T = \sum_{v=1}^o |y_v - Y'|^2 \quad (14)$$

式中: c 为立方群准则的统计值,其意义为针对不同的聚类个数统计出不同的 c 值,最大统计值对应的聚类数即为最优聚类数; N 为观测样本数量; q 为观测样本的属性个数; D_r 为第 r 个类中所有观测样本与该类中心的欧几里德距离平方之和,即类内离差的平方和; Y_r 为第 r 个类中所有观测样本的均值; $y_{r,u}$ 为第 r 个类中第 u 个观测样本值; T 为所有观测样本总离差的平方和(Total-sample Sum of Square, TSS); Y' 为所有观测样本的均值; y_v 为所有类中第 v 个观测样本值。

此外,由于样本选取的有限性,特别是小样本的情况下,会出现选取样本的偶然波动导致计算的 R^2 大于种群的实际 R^2 ,因此,需要进行均等分配的虚无假设,计算 R^2 的期望统计量 $E(R^2)$,进而通过立方群准则的统计值 c 寻找到最优聚类数。

由立方群准则可知, R^2 表示由于聚类产生的方差比例范围,取值为 0~1,越接近 1,表明类内离差的平方和在总离差的平方和中所占的比例越小,即说明了类越分越开。需要注意的是,类的合并总会使 R^2 减小,如果均匀减小,则应该合并,如果某次合并使 R^2 急剧减小,则不应进行合并。由于在给定样本的情况下,总离差的平方和 T 为常数,故对 R^2 求导得

$$dR^2 = -\frac{1}{T} \sum_{r=1}^s dD_r \quad (15)$$

综合上述考虑,在选择最优 TOD 控制方案数时,需要对传统的立方群准则加以改进,加入式(15)约束,具体的判断步骤如下。

Step 1:根据 Ward 最小方差法对观测样本进行类的合并。

Step 2:在类的合并过程中,计算随着聚类数目减少的 dR^2 ,当 dR^2 突然增大时,考虑聚类终止。

Step 3:在 dR^2 突然增大之前的聚类中,若 dR^2 大致相等,则进一步比较其立方群准则的统计值 c ,取其中较大者为最优聚类数,即最优 TOD 控制方案数。

3 案例分析

试验选取广州市主城区东北片区区庄立交北侧的一个关键交叉口,先烈中路与太和岗路交叉口,交叉口的车道功能和相位设置见图 1。现状控制方案分晚低峰、早高峰、午平峰、晚高峰 4 个运行时段,聚类前现状控制方案的运行时段见表 1,具体信号配时方案见表 2。

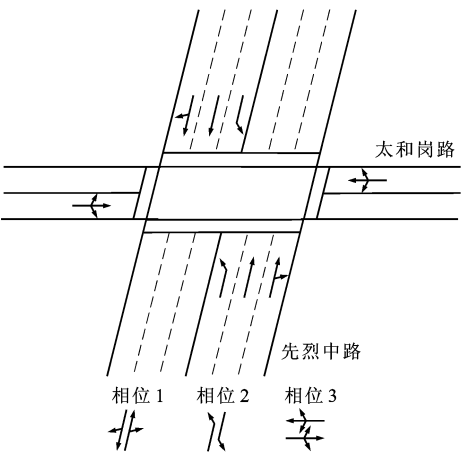


图 1 车道功能和相位设置

Fig. 1 Lane function and phase configuration

表 1 现状控制方案的运行时段

Tab. 1 Operation periods of current control plans

编号	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
名称	晚低峰	早高峰	午平峰	晚高峰
符号	——	——	==
时段	20:00~7:00	7:00~12:00	12:00~14:00	14:00~20:00

以小时为单位采集 2012 年 5 月 1 日至 2012 年 6 月 1 日间工作日的 24 h 流量数据,数据来源于广州市智能交通管理指挥系统的自适应交通控制子系统 SCATS(Sydney Coordinated Adaptive Traffic System)的检测器数据,分别以时段 0~23 表示时段 0:00~0:59、⋯、23:00~23:59。在对历史交通

流量数据进行修补后,利用数据统计分析软件 SARS 按照本文方法进行聚类,聚类的迭代过程见表 3,原始类 0~23 分别表示时段 0~23 的数据。

表 2 信号配时方案

Tab. 2 Signal timing plans

编号	周期	相位 1 绿灯时长	相位 2 绿灯时长	相位 3 绿灯时长
方案 1	55	20	15	20
方案 2	65	24	20	21
方案 3	60	20	20	20
方案 4	70	25	22	23

表 3 历史交通流量数据的聚类过程

Fig. 3 Clustering procedure of historical traffic flow data

合并类	类的合并		类中元素个数	R^2	$E(R^2)$	c
CL23	8	10	2	1.000		
CL22	7	20	2	1.000		
CL21	3	5	2	1.000		
CL20	2	6	2	0.999		
CL19	16	17	2	0.999		
CL18	9	18	2	0.999		
CL17	CL22	13	3	0.999		
CL16	19	21	2	0.998		
CL15	11	14	2	0.998		
CL14	CL18	CL19	4	0.998		
CL13	12	CL16	3	0.997		
CL12	CL21	4	3	0.997		
CL11	CL17	CL13	6	0.996		
CL10	CL23	CL15	4	0.995		
CL9	0	1	2	0.993		
CL8	CL10	CL14	8	0.991		
CL7	CL8	15	9	0.988		
CL6	CL11	22	7	0.983		
CL5	CL9	CL20	4	0.977		
CL4	CL5	23	5	0.962	0.951	0.900
CL3	CL4	CL12	8	0.918	0.906	0.510
CL2	CL6	CL7	16	0.863	0.769	2.500
CL1	CL3	CL2	24	0.000	0.000	0.000

根据改进的立方群准则,可以看出当聚类数为 4 或 3 时, R^2 有加速减小的趋势,且 dR^2 大致相同,因此,应该在聚类数为 4 或 3 处停止合并。继续比较两者立方群准则的统计值,聚类数为 4 时较大,因此,4 为最优聚类数,即此交叉口 TOD 控制方案数的最优值为 4,聚类后 TOD 控制方案的运行时段见表 4。聚类前后不同 TOD 控制方案运行时段的对

比见图 2。

表 4 聚类后控制方案的运行时段

Tab. 4 Operation periods of control plans after clustering				
编号	聚类 1	聚类 2	聚类 3	聚类 4
名称	早平峰、晚平峰	晚低峰	早高峰前、午平峰、晚高峰后	早高峰、晚高峰
符号	——	——	==
时段	6:00~7:00、 23:00~2:00	2:00~ 6:00	7:00~8:00、 12:00~14:00、 19:00~23:00	8:00~12:00、 14:00~19:00

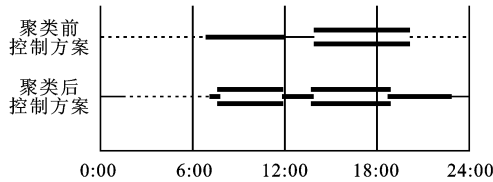


图 2 运行时段对比

Fig. 2 Comparison of operation periods

图 3 为实际交通需求波动曲线。通过对图 2、3 的对比分析,可以得出如下结论。

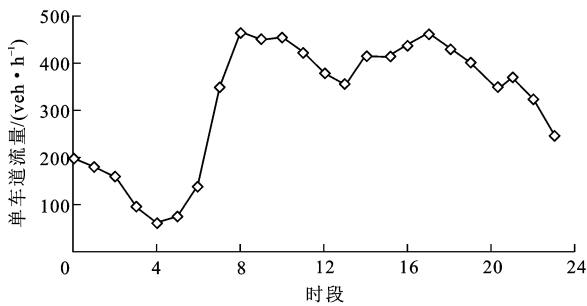


图 3 实际交通流量

Fig. 3 Actual traffic flow

(1)本文方法能够响应交通需求更微小的变化,提供更精细的 TOD 控制方案。

(2)聚类分析法将白天除午平峰的大部分时间均归类为高峰方案,这是因为目标交叉口为主干道上的关键交叉口,早晚高峰均处于饱和状态,因此,两者已经无明显差异。

(3)不同时间段可以聚类为相同的控制策略,因为其交通需求本质上具有相似性,如本文将早高峰前、午平峰与晚高峰后聚类为一个方案,就是因为晚高峰后的交通需求与午平峰、早高峰前的交通特征具有相似性。

(4)从晚低峰过渡到早高峰持续时间很短,即早高峰前(7:00~8:00),这是只有在本文控制方案中才能体现出来的;晚高峰后(19:00~23:00)的持续时间相对较长,这段时间内的交通需求可能主要是广大市民的休闲、娱乐、购物需求。

(5)晚平峰(23:00~2:00)和早平峰(6:00~

7:00)需单独设置一个控制方案,这 2 段时间的交通需求分别为外出返家(呈现逐渐减少的趋势)和开始出门上班(呈现逐渐增加的趋势),其交通特征与其他时间段均不同,具有一定的特殊性。

将聚类前后各运行时段的交通流量分别输入交通信号配时优化软件 Synchro,得到相应的优化控制方案,进而得到聚类前后控制方案的车均延误,结果见表 5。车均延误的对比曲线见图 4,聚类前后控制方案的车均延误减少率见图 5,可以得出以下结论。

表 5 聚类前后控制方案的车均延误

Tab. 5 Average each vehicle delays of control plans before and after clustering

控制方案	编号	时段名称	车均延误/s
聚类前控制方案	方案 1	晚低峰	15.4
	方案 2	早高峰	30.1
	方案 3	晚高峰	32.2
	方案 4	午平峰	25.6
聚类后控制方案	聚类 1	早平峰、晚平峰	15.7
	聚类 2	晚低峰	13.4
	聚类 3	早高峰前、午平峰、晚高峰后	20.4
	聚类 4	早高峰、晚高峰	29.6

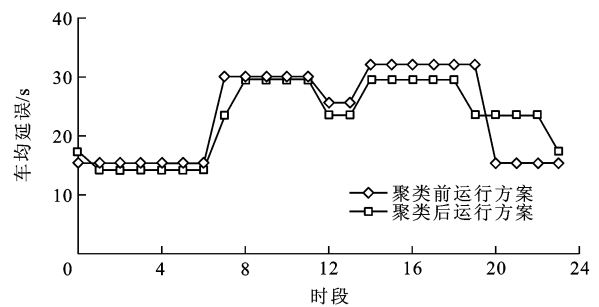


图 4 车均延误对比曲线

Fig. 4 Comparison curves of average each vehicle delay

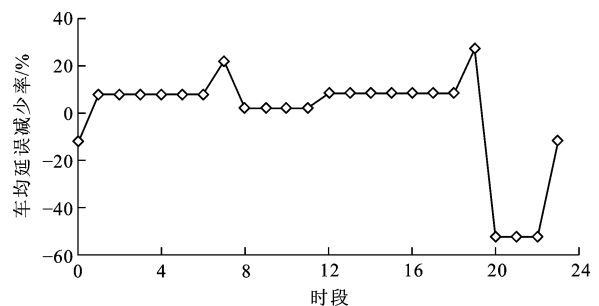


图 5 车均延误减少率

Fig. 5 Decrement rates of average each vehicle delay

(1)本文控制方案控制效益良好,车均延误减少率平均为 11.90%。

(2)聚类后除晚高峰后(19:00~23:00)和早平峰(6:00~7:00)外,其余方案均优于现状运行方案,

特别是早高峰前(7:00~8:00)车均延误减少率高达20.27%,晚低峰、晚高峰和早高峰的车均延误减少率分别为12.99%、8.07%和6.25%。

(3)在晚高峰后(19:00~23:00)和早平峰(6:00~7:00)时段,现状运行方案的计算结果是与晚低峰平均后的结果,而非现实情况的真实反映,而本文聚类的分析结果恰好能够分别反映广大市民此段时间内的休闲、娱乐、购物返家需求和出门上班的交通需求这一真实状况。

需要说明的是,本文数据为工作日数据,相关的节假日 TOD 控制方案亦可参考本文方法和思路制定。

4 结 语

(1)基于改进立方群准则的聚类可以找到更符合实际交通需求的最优 TOD 控制方案数和最近切换时间点。

(2)基于本文方法制定的 TOD 控制方案可以显著改善相关的控制效益指标。

(3)本文 TOD 优化控制方法对非高峰的控制效益改善程度优于高峰期间,特别是对于高峰前一段时间内的改善尤为明显。

(4)需要指出的是,本文方法仅适应于非饱和情况,对于过饱和状态需进行特殊对待。此外,本文实证仅考虑单个交叉口 TOD 多时段控制方案计划,当需要干线协调控制时,可能需要作出调整。关于 TOD 控制方案间的过渡问题,涉及到不同方案切换对交通流的扰动,情况相对复杂,需进行单独研究。对于 TOD 控制方案的老化问题,需在采集历史数据的基础上,通过相应的算法进行监控,及时发现和更新^[24],这些均需在以后的研究中加以关注。

参考文献:

References:

- [1] KLEIN L A, MILLS M K, GIBSON D R P. Traffic Detector Handbook[M]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2006.
- [2] 麻育平,王 磊. 交通信号控制系统中 TOD 优化方法浅析[J]. 道路交通管理, 2012(6): 48-50.
MA Yu-ping, WANG Lei. Analysis of TOD optimization method in traffic signal control system[J]. Road Traffic Management, 2012(6): 48-50. (in Chinese)
- [3] PAPAGEORGIOU M. A new approach to time-of-day control based on a dynamic freeway traffic model[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1980, 14(4): 349-360.
- [4] KREER J B. Factors affecting the relative performance of

- traffic responsive and time-of-day traffic signal control[J]. Transportation Research, 1976, 10(2): 75-81.
- [5] HAUSER T A, SCHERER W T. Data mining tools for real-time traffic signal decision support and maintenance[C]//IEEE. 2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Tucson: IEEE, 2001: 1471-1477.
- [6] PARK B, LEE D H, YUN I. Enhancement of time of day based traffic signal control[C]//IEEE. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Manchester: IEEE, 2003: 3619-3624.
- [7] PARK B, SANTRA P, YUN I, et al. Optimization of time-of-day breakpoints for better traffic signal control[J]. Transportation Research Record, 2004(1867): 217-223.
- [8] PARK B, LEE J. A procedure for determining time-of-day break points for coordinated actuated traffic signal systems[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2008, 12(1): 37-44.
- [9] LEE J, KIM J, PARK B. A genetic algorithm-based procedure for determining optimal time-of-day break points for coordinated actuated traffic signal systems[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15(1): 197-203.
- [10] ZHOU Zhan-hong, CAI Ming. Intersection signal control multi-objective optimization based on genetic algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(2): 153-158.
- [11] WANG Xiao-dong, COTTRELL W, MU Si-chun. Using K-means clustering to identify time-of-day break points for traffic signal timing plans[C]//IEEE. Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Vienna: IEEE, 2005: 519-524.
- [12] RATROUT N T. Subtractive clustering-based K-means technique for determining optimum time-of-day breakpoints[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 25(5): 380-387.
- [13] YANG Jun, YANG Yang. Optimization of time of day break points of intersection using cluster method[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2013, 5(6): 479-487.
- [14] GUO Rui, ZHANG Yu. Cluster analysis-based procedure to identify time-of-day breakpoints for coordinated semi-actuated traffic signal system[C]//TRB. Transportation Research Board 91st Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2012: 1-18.
- [15] GUO Rui, ZHANG Yu. Identifying time-of-day breakpoints based on nonintrusive data collection platforms[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 2014, 18(2): 164-174.
- [16] QU Xiao-bo, ZHANG Jin, WANG Shuai-an, et al. Modelling follow up time at a single-lane roundabout[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(2): 97-102.
- [17] BALKE K N, RAO K S, HUSTED M. Incorporating the effects of signal transition in the selection of timing plans in

- traffic responsive signal systems[R]. Austin: Texas A&M University, 1998.
- [18] SHELBY S G, BULLOCK D M, GETTMAN D. Transition methods in traffic signal control[J]. Transportation Research Record, 2006(1978): 130-140.
- [19] 栗红强, 陆化普, 刘 强. 城市交通线控多时段配时方案过渡算法研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(5): 779-781, 852.
- LI Hong-qiang, LU Hua-pu, LIU Qiang. Research on transition algorithms for timing plans of arterial time in-day traffic control[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2008, 32(5): 779-781, 852. (in Chinese)
- [20] 卢 凯, 徐建闽, 郑淑鉴, 等. 交通信号协调控制方案过渡优化算法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(6): 97-103.
- LU Kai, XU Jian-min, ZHENG Shu-jian, et al. Optimization algorithm of coordinated control scheme transition of traffic signal[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(6): 97-103. (in Chinese)
- [21] WANG Jian-qiang, NIU Hui-min. Graded-information feedback strategy in two-route systems under ATIS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(2): 138-145.
- [22] SARLE W S. Cubic clustering criterion[R]. Cary: SAS Institute Inc., 1983.
- [23] LIAO Fei-xiong, ARENTZE T, TIMMERMANS H. Multi-state supernetworks: recent progress and prospects[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 13-27.
- [24] 姚 佼. 基于车辆行驶数据的交叉口交通控制机制研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
- YAO Jiao. Study on vehicle probe data based traffic control mechanism at isolated intersection[D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 109 页)
- [11] LIU H X, MA Wen-teng. A virtual vehicle probe model for time-dependent travel time estimation on signalized arterials[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2009, 17(1): 11-26.
- [12] JENELIUS E, KOUTSOPOULOS H N. Travel time estimation for urban road networks using low frequency probe vehicle data[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 53: 64-81.
- [13] 李 嘉, 刘春华, 胡赛阳, 等. 基于交通数据融合技术的行程时间预测模型[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(1): 33-38.
- LI Jia, LIU Chun-hua, HU Sai-yang, et al. A travel time prediction model based on traffic data fusion technology[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(1): 33-38. (in Chinese)
- [14] 方路平, 陈仕骅, 赵飞帆. 基于小样本浮动车系统的平均行程时间估计[J]. 计算机仿真, 2012, 29(9): 367-370.
- FANG Lu-ping, CHEN Shi-xiao, ZHAO Fei-fan. Average link travel time estimation based on floating car of small sample size[J]. Computer Simulation, 2012, 29(9): 367-370. (in Chinese)
- [15] 姜桂艳, 常安德, 张 玮. 基于 GPS 浮动车的路段行程时间估计方法比较[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(增 2): 182-186.
- JIANG Gui-yan, CHANG An-de, ZHANG Wei. Comparison of link travel-time estimation methods based on GPS equipped floating car[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(S2): 182-186. (in Chinese)
- [16] 姜桂艳, 常安德, 张 玮, 等. 基于 GPS 浮动车的自然路段行程时间估计方法[J]. 公路, 2009(11): 87-90.
- JIANG Gui-yan, CHANG An-de, ZHANG Wei. Physical link travel-time estimation method based on GPS equipped floating car[J]. Highway, 2009(11): 87-90. (in Chinese)
- [17] 姜桂艳, 常安德, 吴超腾. 基于 GPS 浮动车的交通信息采集方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(4): 971-975.
- JIANG Gui-yan, CHANG An-de, WU Chao-teng. Traffic information collection method based on GPS equipped floating car[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(4): 971-975. (in Chinese)
- [18] 韩 舒, 林航飞, 辛飞飞. 浮动车采集系统中城市道路分段方法研究[J]. 交通与计算机, 2007, 25(5): 105-109.
- HAN Shu, LIN Hang-fei, XIN Fei-fei. Method of merging urban road subsections based on floating car data[J]. Computer and Communications, 2007, 25(5): 105-109. (in Chinese)
- [19] 熊英格, 徐卓立, 刘好德. 基于浮动车数据的交叉口范围动态划分方法[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(5): 38-43.
- XIONG Ying-ge, XU Zhuo-li, LIU Hao-de. Methods of intersection dynamic subsections based on floating car data[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2009, 27(5): 38-43. (in Chinese)
- [20] 胡小文. 基于探测车数据和固定检测器数据的路段行程时间估计[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- HU Xiao-wen. Link travel time estimation based on probe data and fixed detector data[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)