

文章编号:1001-7372(2012)01-0135-06

## 基于小波变换的关联交叉口群关键路径识别方法

李岩<sup>1,2</sup>, 杨洁<sup>2</sup>, 过秀成<sup>2</sup>, 严亚丹<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**为提升关联交叉口群信号控制的性能,针对关联交叉口群各交叉口关联性强特点,采用小波变换对关联交叉口群各进、出口的交通检测流量数据进行分解、降噪、重构,并利用系统聚类方法识别关联交叉口群的关键路径;最后应用南京市广州路某交叉口群的实测数据对模型的可靠性进行了检验。结果表明:该模型识别的交叉口群关键路径与实际情况相符;该关键路径识别方法受外界干扰小,适用于各种交通状态,拥有较高的运算效率和可靠性,可作为关联交叉口群信号控制优化的基础。

**关键词:**交通工程;交叉口群;小波变换;关键路径识别;数据挖掘

**中图分类号:**U491.23 **文献标志码:**A

Critical Route Identification Method at Related Intersection  
Group Based on Wavelet TransformLI Yan<sup>1,2</sup>, YANG Jie<sup>2</sup>, GUO Xiu-cheng<sup>2</sup>, YAN Ya-dan<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to improve the traffic signal control performance, according to the strong relevance of the intersections at related intersections group, wavelet transform was applied to decomposition, noise reduction and reconstruction in a set of traffic flow time series collected from several detectors in signalized related intersections group. Critical route can be acquired by applying hierarchical cluster method to the reconstructed traffic count profiles. Field data of related intersections group at Guangzhou Road in Nanjing were used to verify reliability of model. The critical route identified by the proposed model which agrees well with actual state can be used for optimization of the traffic signal control for related intersections group with high efficiency, robustness and reliability. The proposed critical route identification method is little influenced by outside and can be regarded as basis of optimal control of related intersection group signal.

**Key words:** traffic engineering; intersection group; wavelet transform; critical route identification; data mining

## 0 引言

城市道路交叉口群是路网中地理位置相互毗邻

且交通关联性较强的若干交叉口的集合<sup>[1]</sup>。对交叉  
口群的各交叉口实施交通信号协调控制可有效提升  
交叉口群的整体运行效益。类似传统干线协调控

收稿日期:2011-04-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50422283);江苏省建设科技发展计划项目(JS200603)

(C) 1994-2024 China Academic Electronic Journal Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

制,交叉口群协调控制介于单点控制和区域控制之间,但其控制范围有所扩展,涵盖干线交叉口群和关联交叉口群 2 类控制类型<sup>[2]</sup>。交叉口群的关键路径为交通量最大且决定交叉口群整体运行效果的路径,关键路径的车流为协调控制的主要优化对象。干线交叉口群的关键路径基本与干道走向相同,而关联交叉口群的关键路径则不一定与特定道路延伸方向相同,且不同时间的关键路径可能发生变化(如周末和工作日或高峰时段和平峰时段等情况下的关键路径)。因此快速、准确地检测关联交叉口群的关键路径是优化并提高其交通信号协调控制性能的基础。

交叉口群交通信号协调控制要求关键路径检测方法适用各种交通状态,且具备动态识别、不易受外界环境影响的特性。常见的路径检测方法有交通调查统计分析、浮动车扩样法、视频检测法、交叉口 OD 估算法、时间序列相关分析法及基于车流集聚特性的数据挖掘法等<sup>[3-6]</sup>。以上方法虽可识别交叉口群的路径,但易受外界环境或人工因素影响,不能满足信号协调控制的检测要求。

针对关联交叉口群车流离散程度小的特点,本文中提出了基于小波变换的关键路径检测方法,首先应用小波变换技术对原始交通信号进行时、频域分解、降噪和重构,以剔除原始交通数据的非相关因素;再利用系统聚类方法对重构信号分类识别,从而获取关联交叉口群的关键路径。

## 1 关联交叉口群关键路径识别原理及框架

交叉口群关键路径的交通关联性远远大于非关键路径,因此,关键路径识别可转化为搜索交叉口群中交通关联性强的路径。交通关联性主要体现为交叉口间车队离散程度,即上游和下游车流特性的相似性。一旦关联交叉口群的上游交叉口因交通信号控制或交通拥堵引起流量、车速等交通流参数变化,短时变化特性可保持至下游交叉口。将交叉口群各进、出口交通流参数的短时变化特性作为依据,建立模型可识别关联交叉口群关键路径。模型需确定合适的交通参数以描述车流特征,并选取恰当的数据挖掘方法提取车流的短时变化特性。

交通流量数据作为时变信号,可被小波变换分解为不同频率信号的线性组合。如果  $\psi(t)$  为小波函数,则交通信号  $f(t)$  在尺度  $a$  和位移  $\tau$  下的小波变换为

$$W_f(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中:  $a$  为尺度因子;  $t$  为时间;  $W_f(a, \tau)$  为交通信号  $f(t)$  的连续小波变换。

为了减少小波变换系数的冗余度,将小波按 2 的幂级数离散化,即令  $a = 2^j, j \in \mathbb{Z}, \tau = k2^j T_s, k \in \mathbb{Z}$  (为简化起见,设步长  $T_s = 1$ ), 则对应的离散小波函数  $\psi_{j,k}(t)$  为

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t - k2^j T_s}{2^j}\right) = 2^{-j} \psi(2^{-j} t - k) \quad (2)$$

通过选取不同的尺度和位移,可应用小波变换算法提取交通信号在不同频率下的变化特征。将待分析交通信号看做不同频率时变信号组合成的信号空间,基于多分辨分析理论<sup>[7]</sup>,平方可积空间  $L^2(R)$  中的一个闭信号空间  $S$  可有如下分解

$$S = A_1 \oplus D_1 = A_2 \oplus D_2 \oplus D_1 = \dots = A_m \oplus D_m \oplus D_{m-1} \oplus \dots \oplus D_1 \quad (3)$$

$$A_m = \text{span}\{\varphi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \varphi(2^j t - k), j, k \in \mathbb{Z}\}$$

$$D_m = \text{span}\{\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k), j, k \in \mathbb{Z}\}$$

式中:  $\text{span}\{\cdot\}$  表示求待分析集合的生成空间,其表示所有包含这个集合的子空间的交集;  $\varphi(t)$  为尺度函数;  $\oplus$  表示求正交和;  $A_m, D_m$  分别为由  $\varphi_{j,k}(t)$  和  $\psi_{j,k}(t)$  张成的闭信号空间;  $m$  为分解层数。

在给定分辨率  $2^{-M}$  下,任意非线性函数  $f(t) \in L^2(R)$  可按式(4)近似分解

$$f(t) \approx f_M(t) = \sum_{n=0}^L a_{0,k} \varphi_{0,k}(t) + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{2^{m-1}L} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (4)$$

式中:  $M, L$  为常数,取决于逼近精度和插值点数目;  $n$  为自然数。

图 1 为 3 层多分辨分析的小波分解树。如图 1 所示,小波的多分辨分析只是对低频部分进一步分解,而高频部分则不考虑。经过小波分解的高频信号和低频信号互为母信号的正交补,一个多分辨分析的子空间可以用有限个子空间来逼近。通过小波变换的多尺度分析,可将交通信号  $f(t)$  展开为若干尺度信号  $\varphi_{j,k}(t)$  和小波信号  $\psi_{j,k}(t)$  的正交和,分析高频信号可获取交通信号的短时变化特性。关联交叉口群中的车流特征可用流量、密度和车速等交通流参数来进行描述。采用多个交通流参数会使算法的运算效率大大降低,在单一交通流参数即可标定关联交叉口群关键路径时,宜采用单交通流参数作

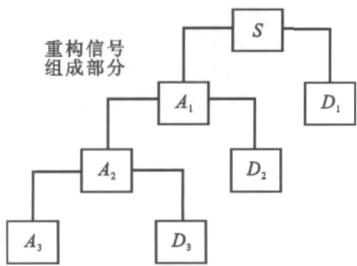


图 1 3 层多分辨分析的小波分解树

Fig. 1 Wavelet Three-layer Multi Level Decompositions

为关键路径检测依据。各交叉口进、出口的流量数据通过中国城市中广泛布设的交通感应线圈即可获得,采样率高,不易受外界环境影响,也不需布设额外的检测设备。

根据关联交叉口群车流的关联性和小波变换的滤波功能,建立基于小波变换的关联交叉口群关键路径识别模型。模型包含交通数据获取及处理、小波基函数选取、交通数据分解、交通数据降噪及重构和关键路径识别 5 个步骤。图 2 为基于小波变换的交叉口群关键路径识别框架。

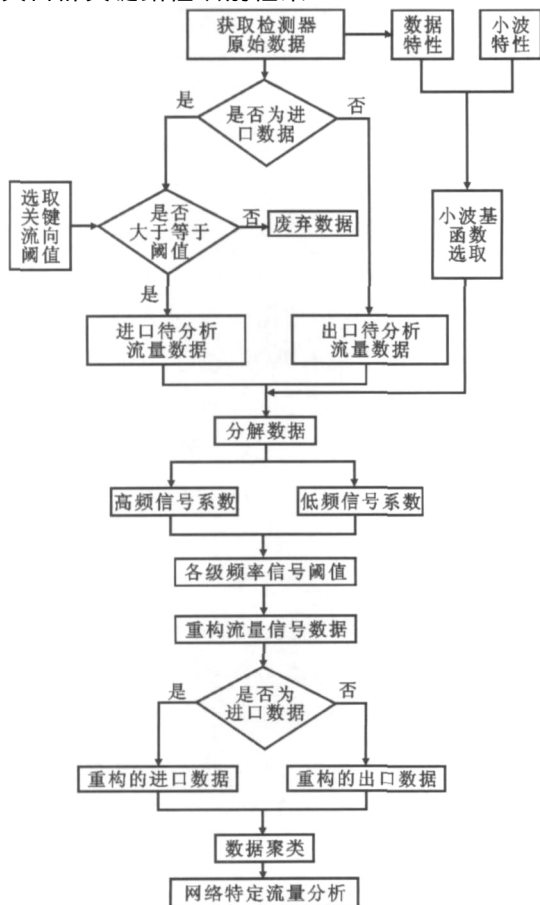


图 2 关联交叉口群关键路径识别框架

Fig. 2 Identification Framework of Critical

2 模型描述

2.1 交通数据获取及处理

本文中主要将从交通检测设备获取的原始数据处理成模型所需要的数据。模型采用交叉口进、出口各流向特定时间的累积交通量作为输入变量。为消除信号周期长度对交叉口流量变化的影响,将每 15 min 的流量数据应用于关键路径识别。关键路径阈值被用来排除非关键路径的进、出口流向,以提高模型的计算效率。当某一流向的流量与进口总流量的比值大于关键路径阈值时,此流向可能处于交叉口群的关键路径。关键路径阈值可根据经验选取初始值并试算确定。

2.2 小波基函数选取

与傅里叶变换相比,小波变换所用到的基函数具有不惟一性。不同的小波基函数分析同一问题可能产生不同结果。应用小波变换分析信号首先需针对分析信号特点选取适当的小波基函数。小波变换可分为连续小波变换(Continuous Wavelet Transform,CWT)和离散小波变换(Discrete Wavelet Transforms,DWT)2 种。处理为离散数据的交通检测数据时,宜选用离散小波函数。

通过比对 7 个常用的小波基函数及其特性<sup>[8]</sup>,选用多贝西系列及其延伸系列的离散小波基函数对关联交叉口群的关键路径进行识别,见表 1。小波基函数的滤波器长度越长,对所观测信号的高频分辨率越好;支撑长度越小,便可通过较少的计算量获得较高精度。综合比对各特性对分析交通数据的影响,本文中选取多贝西系列小波基函数和 Symlets 系列小波基函数进行试算。试算采用 12 h 的真实交通数据,应用 2 种小波基函数对其进行分解后再重构,并比较重构信号与原始信号误差的绝对值之和。试算结果表明,Symlets 系列小波基函数的误差约为多贝西系列小波基函数的 1/3,应选用 Symlets 系列小波基函数分析交通信号。

2.3 交通数据分解

设道路网检测到的原始交通信号为  $f(t)$ ,应用式(4)对信号进行分解,得出各层小波系数。经小波变换得到的各小波系数中,低频小波系数反映了交通量的基本变化特性,如日变化特性等,而高频系数反映了交通量的短时变化特性。关键路径识别模型关注各个交叉口进、出口车流的短时变化特征,即要求详尽的高频信号系数。在分解交通数据时宜分解到小波变换所支持的最高层<sup>[9]</sup>,并对其进行降噪、

表 1 常见小波基函数及其特性

Tab. 1 Common Wavelet Basis Functions and Their Characters

小波基函数	哈尔小波	多贝西小波	Coiflets 小波	Symlets 小波	莫勒特小波	墨西哥帽小波	迈耶小波
正交性	有	有	有	有	无	无	有
双正交性	有	有	有	有	无	无	有
紧支撑性	有	有	有	有	无	无	无
支撑长度	1	$2n-1$	$6n-1$	$2n-1$	有限长度	有限长度	有限长度
滤波器长度	2	$2n$	$6n$	$2n$	$[-4, 4]$	$[-5, 5]$	$[-8, 8]$
对称性	对称	近似对称	近似对称	近似对称	对称	对称	对称

注:小波基函数支撑长度为小波基函数横轴有值的范围,即不为 0 的宽度。

重构等处理。

## 2.4 交通数据降噪及重构

小波通过对各层分解的信号选取不同的通过阈值来实现其降噪功能。根据关键路径识别问题的特性可知,对于反映车流短时变化特征的高频小波系数应选用高通过阈值。在实际数据分析中,存在某非关键路径车流和关键路径车流拥有相类似高频信号的情况。因此在判定交叉口群关键路径时,不能仅采用高频信号作为识别关键路径的惟一标准,还需辅以低频信号来判定交叉口群的关键路径,即对反映车流本质特性的低频小波系数也选取较高通过的阈值。其他频率的小波系数选取低通过阈值,以滤除不能突显车流短时变化特性频段的交通信号。

交通数据的重构为信号分解的逆运算,采用相同的小波基函数将降噪后各频段的小波系数进行重构。重构的新交通信号既能反映原交通信号的短时变化特性,也具备原交通信号的基本特征,且不存在噪声频率信号的干扰,适于检测识别关联交叉口群的关键路径。

## 2.5 关键路径识别

经小波变换进行降噪处理的重构交通信号的短时变化特性比原始信号更明确,应用智能分类算法分别比对各交叉口进、出口的重构信号即可获得关联交叉口群的关键路径。系统聚类算法<sup>[10]</sup>能系统地分析各个变量之间的关系,计算各向量的空间距离并将其分类,适用于变量较少的情况,符合关联交叉口群关键路径识别的要求。应用系统聚类的方法识别关联交叉口关键路径可避免人工判别时主观因素的影响,提高关键路径识别效率。

## 3 算例分析

本文中采用南京市广州路交叉路群 2009 年 12 月 10 日 6:00~20:00 的实测数据验证模型有效性。交叉口群空间形态及检测器布设如图 3 所示。部分

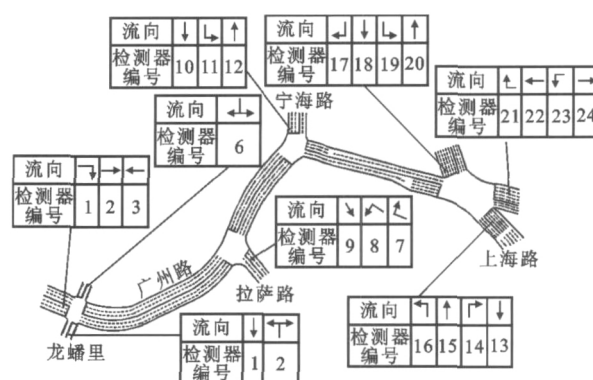


图 3 交叉口群及检测器布局

Fig. 3 Layouts of Intersections Group and Detectors

主要进、出口流向的检测数据如图 4 所示。实地调查结果显示交叉口群的关键路径为广州路西进口至上海路南出口,次要路径为广州路西进口至广州路东出口。分析交叉口群各进口转向流量特点,选定关键路径阈值为 40%,即当该流向流量超过总流量的 40%时,该流向数据被用于识别关键路径。应用 MATLAB R2010b 软件编写交叉口群关键路径识别程序模块。程序应用 Sym4 小波基函数将关键进口及出口流量数据分解至第 5 层,分别为  $A_5$ ,  $D_5$ ,  $D_4$ ,  $D_3$ ,  $D_2$  和  $D_1$ 。  $D_5$ ,  $D_4$ ,  $D_3$ ,  $D_2$ ,  $D_1$  对应高频信号系数的降噪阈值分别为 100%, 80%, 0%, 20%, 70%。通过对数据的降噪重构得到新的信号。以广州路西进口直行为例进行小波降噪处理,结果如图 5 所示。对各重构流量数据聚类分析的结果如图 6 所示。由图 6 可知,模型检测出交叉口群的关键路径与实际调查结果相符,因此可认为模型能够初步识别交叉口群的关键路径。

## 4 结 语

本文中针对关联交叉口群关键路径难以直接识别的实际问题,提出了一种基于小波变换的关联交叉口群关键路径检测方法,并通过实例验证了该方

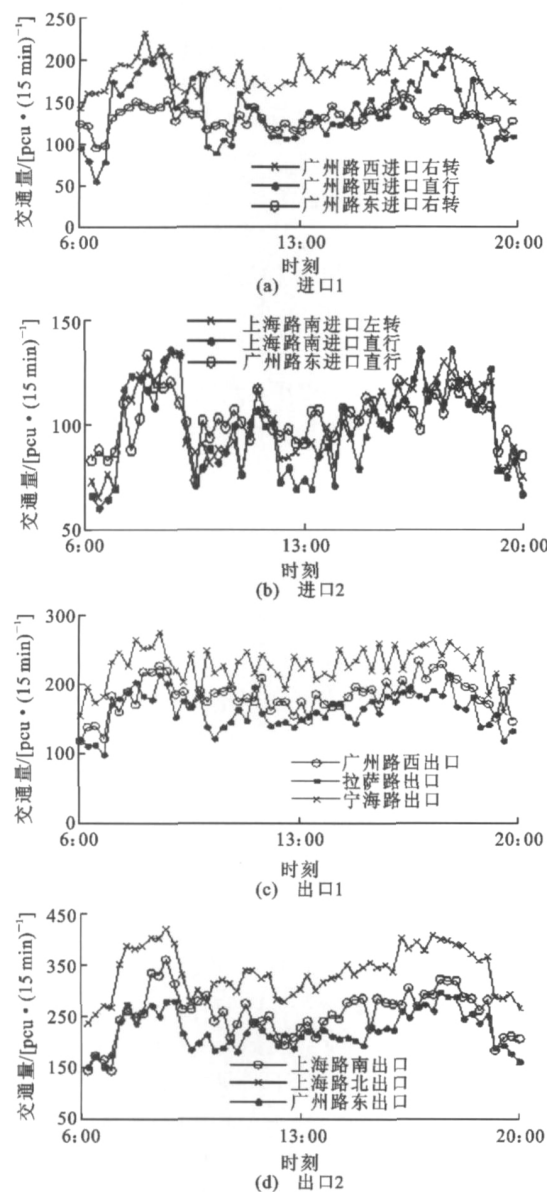


图 4 部分检测器流量数据  
Fig. 4 Some Detector Volume Data

法的有效性。和其他路径识别算法相比,该方法受外界因素干扰小,适用于各种交通状态,并拥有较高的运算效率和可靠性,为关联交叉口群信号控制优化奠定了良好的基础。后续研究应对该方法的参数值选取、检测精度及适用范围等问题进行深入探讨。

参考文献:

References:

[1] 杨晓光,曾松,杭明升.中国城市道路交通实时自适应控制与管理系统研究[J].交通运输工程学报,2001,1(2):74-77.  
YANG Xiao-guang, ZENG Song, HANG Ming-sheng. Research on Advanced Urban Traffic Control

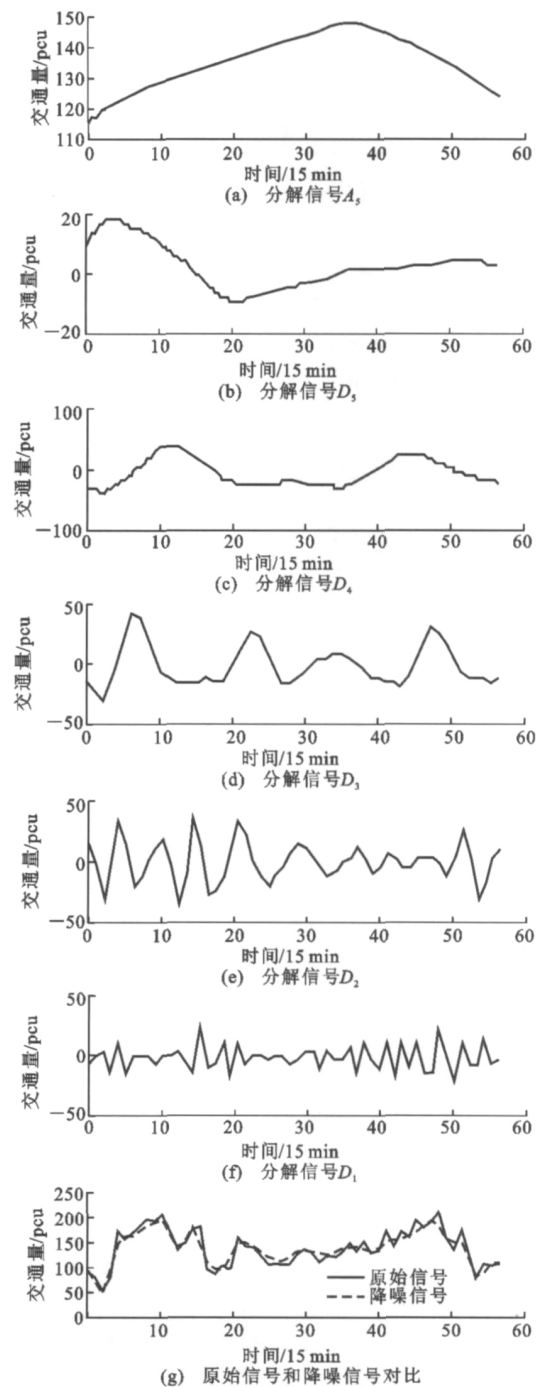


图 5 检测数据的小波分解与重构  
Fig. 5 Wavelet Decomposition and Reconstruction of Detected Data

and Management System for China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(2): 74-77.

[2] LI Yan, GUO Xiu-cheng, YANG Jie, et al. Mechanism Analysis and Implementation Framework for Traffic Signal Control of Over-saturated Intersection Group [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(4): 28-34.

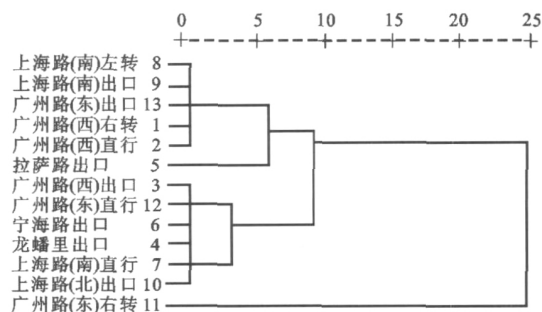


图6 重构流量数据聚类结果

Fig. 6 Cluster Results for Data of Reconstruction Volume

- [3] ROESS R P, PRASSAS E S, MCSHANE W R. Traffic Engineering [M]. Upper Saddle River; Pearson Education, 2004.
- [4] DIXON M P, RILETT L R. Population Origin-destination Estimation Using Automatic Vehicle Identification and Volume Data[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(2): 75-82.
- [5] 金逸文, 王景成. 基于相关分析的交通流参数修正方法研究[J]. 控制工程, 2008, 15(增 1): 142-144.  
JIN Yi-wen, WANG Jing-cheng. Modifying of Traffic

Flow Data Based on Correlation Analysis[J]. Control Engineering of China, 2008, 15(S1): 142-144.

- [6] ADAM Z, ABBAS M, YAN L. Critical Routes Identification Method Using Wavelet Filtering[C]//IEEE. Proceedings of 13th IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2010: 337-341.
- [7] PROAKIS J G, MANOLAKIS D G. Digital Signal Processing[M]. 4th ed. Upper Saddle River; Pearson Prentice Hall, 2006.
- [8] BOGGESS A, NARCOWICH F J. A First Course in Wavelets with Fourier Analysis[M]. 2nd ed. Hoboken; John Wiley & Sons, 2009.
- [9] MALLAT S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition; the Wavelet Representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.
- [10] RUI X, WUNSCH D. Survey of Clustering Algorithms[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2005, 16(3): 645-678.

(上接第 134 页)

- [3] LI H, MAO B H, BERTINI R L. Evaluating Impacts of Bus Facility Design Features on Transit Operations in Beijing, China: Simulation Approach [C]//TRB. Transportation Research Board 87th Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2008: 1-2.
- [4] ARASAN V T, VEDAGIRI P. Bus Priority on Roads Carrying Heterogeneous Traffic; a Study Using Computer Simulation [J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2008, 1: 45-64.
- [5] JACQUES K S T, LEVINSON H S. Operational Analysis of Bus Lanes on Arterials[R]. Washington DC: TRB, 1997.
- [6] 美国交通运输研究委员会. 公共交通通行能力和服务质量手册[M]. 2 版. 杨晓光, 滕靖, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Transportation Research Board. Bus Transit Capacity, Transit Capacity and Quality of Service Manual [M]. 2nd ed. Translated by YANG Xiao-guang, TENG Jing. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [7] DALE J, LUIS F. Assessing Travel Time Impacts of Measures to Enhance Bus Operations. Part I: Past

Evidence and Study Methodology [J]. Road and Transport Research: a Journal of Australian and New Zealand Research and Practice, 1999, 8(4): 41-54.

- [8] BLY P H, WEBSTER F V, OLDFIELD R H. Justification for Bus Lanes in Urban Areas[M]. London: Traffic Engineering and Control, 1978.
- [9] TIRACHINI A, HENSHER D A, JARA-DIAZ S R. Restating Modal Investment Priority with an Improved Model for Public Transport Analysis [J]. Transportation Research Part E, 2010, 46(6): 1148-1168.
- [10] VUCHIC V R. Urban Public Transportation; Systems and Technology [M]. Englewood Cliffs; Prentice Hall, 1981.
- [11] 郭中华. 城市道路路段交通流特性分析与模型研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.  
GUO Zhong-hua. Character Analysis and Model Research of Urban Road Link Traffic Flow[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [12] MAITRA B, SIKDAR P K, DHINGRA S L. Modeling Congestion on Urban Roads and Assessing Level of Service[J]. Journal of Transportation Engineering, 1999, 125(6): 508-514.