

北京市快速环路宏观基本图特征研究

贺正冰¹, 关 伟^{*1}, 樊玲玲¹, 关积珍²

(1. 北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 北京四通智能交通系统集成有限公司, 北京 100081)

摘要: 对应于整个路网的宏观基本图反映了路网宏观变量间一种可再现的稳定的函数关系, 该关系仅取决于路网属性和控制策略本身, 而不依赖于具体交通需求。而作为世界上最大的城市之一, 北京市的道路交通有着独一无二的特征。利用现有的高密度检测器数据, 绘制了北京市快速环路的宏观基本图, 在宏观上分析了北京市的交通特征; 发现了北京市快速环路宏观基本图中不同于现有理论的特征, 即在网络占有率方差与网络流量的对应关系中, 二者亦可表现出相同的趋势, 如较低占有率方差与较低网络流量间的对应关系。通过分析各环路交通拥堵的演化过程, 认为北京市由中心向外扩散的放射形拥堵过程是形成这种特殊关系的内在因素。

关键词: 城市交通; 宏观基本图; 城市快速路; 拥堵; 回滞现象

Characteristics of Macroscopic Fundamental Diagram for Beijing Urban Ring Freeways

HE Zheng-bing¹, GUAN Wei¹, FAN Ling-ling¹, GUAN Ji-zhen²

(1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing STONE Intelligent Transportation System Integration CO., LTD., Beijing 100081, China)

Abstract: A macroscopic fundamental diagram (MFD) gives an invariant functional relationship among macroscopic variables in a large urban area. Beijing as one of the largest cities in the world has a number of unique traffic features. A MFD is presented for Beijing urban ring freeways by using traffic detector data. It shows the characteristics of a MFD pertaining to Beijing urban ring freeways, and provides insight into traffic conditions in Beijing. A pattern that lower occupancy variance is associated with lower network flow is observed; it is different from present findings. The observation is investigated and is further attributed to out-sync of 5th ring and a radial spread of congestion in Beijing.

Key words: urban traffic; macroscopic fundamental diagram; urban freeway; congestion; hysteresis phenomena

1 引言

目前, 交通管理与控制方法仍严重依赖难以准确获得的数据, 加之出行行为与路网本身的复杂性, 其实际应用效果往往大打折扣^[1-3]。最近, 对应于区域路网的宏观基本图 (Macroscopic Funda-

mental Diagram) 的提出, 为深入认识区域路网交通流特征和演化过程, 并为研究数据依赖小且受出行者行为影响小的区域交通管控方法提供了新的思路与依据。

收稿日期: 2013-08-06

修回日期: 2013-11-14

录用日期: 2013-11-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 主题项目 (2011AA110303)。

作者简介: 贺正冰 (1982-), 男, 辽宁锦州人, 讲师, 博士。

*通讯作者: weig@bjtu.edu.cn

宏观基本关系为:路网空间上,平均流量、平均密度与平均速度两两呈现出可再现的稳定的函数关系,该关系仅取决于路网和控制策略本身,而与具体交通需求无关,即对于任意OD需求矩阵,同一路网平均密度(近似)对应同一路网平均流量.表现该宏观基本关系的图形则被称为宏观基本图.文献[4]和[5]分别使用交通波理论的变分形式^[6,7]和基于利用率的方法(Utilization-based Approach)在理论上证明了宏观基本图的存在性.文献[8]利用采集自日本横滨市的交通流数据发现:存在于单个基本关系中的大量散点,经过集聚(空间平均)后,几乎消失并呈现出清晰的函数特征;并且,不同日期中宏观基本图轨迹几乎重合,有力地实证了宏观基本图的存在性.文献[9]从法国图卢兹市路网宏观基本图中首次发现了顺时针回滞现象,并证实道路类型、路网结构与检测器位置均会对宏观基本图的特征产生影响.文献[10]从美国双子市数据中发现车辆分布异质性与同时发生的通行能力下降导致了这种回滞现象.文献[11]通过比较横滨市与双子市的宏观基本图,给出了清晰(well-defined)宏观基本图存在的充分条件,并发现城市道路网络较之高速公路网络更易得到清晰宏观基本图.

此外,文献[12-14]等通过抽象路网建立数学模型,研究了驾驶员适应能力、转弯率等微观因素

对宏观基本图特征的影响;文献[15-17]等通过计算机仿真研究了路网空间中车辆密度方差等对宏观基本图的影响;文献[18,19]等则研究了基于宏观基本图的区域边界控制、公交专用道划分等区域交通管理与控制问题.国内方面,文献[20]通过Vissim仿真软件为荷兰阿姆斯特丹市某区域建模,利用仿真数据绘制了该区域的宏观基本图,找出了影响宏观基本图形状的关键路段,为有效分配检测器资源提供依据.

综上,目前仅有横滨、图卢兹和双子市通过实际数据构造了宏观基本图,但由于目标路网特征略显简单(如高速公路较多、车道较少、拥堵程度不够等),仍需在更多实际网络上进行验证,以丰富并深化人们对宏观基本图的认识.相比之下,北京市快速环路具有匝道密度大、车道多、拥堵发生频率高等复杂特征.构造北京市快速环路的宏观基本图,并分析其特性,可有效地丰富现有宏观基本图的实证结果.因此,本文利用高密度检测器数据,构造了北京市快速环路宏观基本图,在整体上研究了北京市道路交通网络的时空演化特征;发现并解释了存在于宏观基本图中的有别于现有理论的特征,即不同时刻下所有检测器采集到的车辆占有率方差亦可表现出与平均流量一致的趋势.

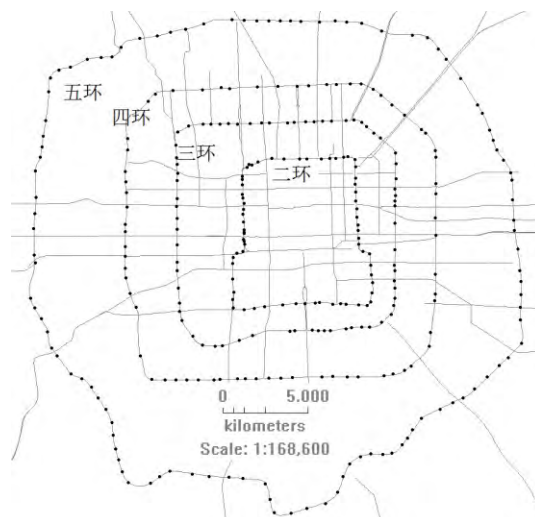


图1 北京市快速环路及检测器分布

(黑点:处于同一位置的对不同方向车流数据进行采集的两个检测器组)

Fig. 1 Urban freeway in Beijing and locations of loop detectors

(Black spot: a group of detectors collecting two directions traffic flow data)

2 北京市快速环路及检测器数据

北京市区现有四条环城快速路,即二环至五环,长度约为32.7公里、48公里、65.3公里、99公里和192公里(见图1)。二环到四环上,直道限速为80公里/小时,弯道限速60公里/小时;五环限速为90-100公里/小时;仅有五环在白天允许大型车辆行驶。

目前,二环到五环上分别安装有124、140、134和212个检测器组。本文所用数据采集自2010年5月13日(周四)上午6点到12点,每2分钟一个数据点。由于完整覆盖路网的实测数据稀缺,本文仅使用一天数据分析北京市快速环路宏观基本图特征。根据现有理论,宏观基本图反映了路网宏观交通变量间一种可再现的稳定的函数关系,因此,一天的分析结果仍可在一定程度上反映路网的长期特征。

3 北京市快速环路宏观基本图及其特征

通过观察单个检测器数据的流量-占有率关系图,剔除无法正常工作的检测器。使用网络平均流量和网络平均占有率(所有检测器在同一时刻的平均流量及平均占有率)构造北京市快速环路的宏观基本图^[8],如下式:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} q_{ij} \right), O = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} o_{ij} \right) \quad (1)$$

式中 i 为检测器组编号; N_i 为检测器组 N 中正常检测器个数; N 为路网中正常检测器总数; q_{ij} 和 o_{ij} 分别为第 i 个检测器组中第 j 个检测器两分钟内采集的流量和时间占有率。

图2(a)为网络平均流量与平均占有率关系图,即宏观基本图。如现有理论所述,单个基本图中大量的散点消失在集聚后的宏观基本图中。在该宏观基本图中,仍可观测到清晰的回滞现象,这说明回滞现象亦存在于城市快速路网络中。从图中可以看到北京市早高峰最大的网络平均流量约为1360辆/小时,最大的网络平均占有率约为23%。

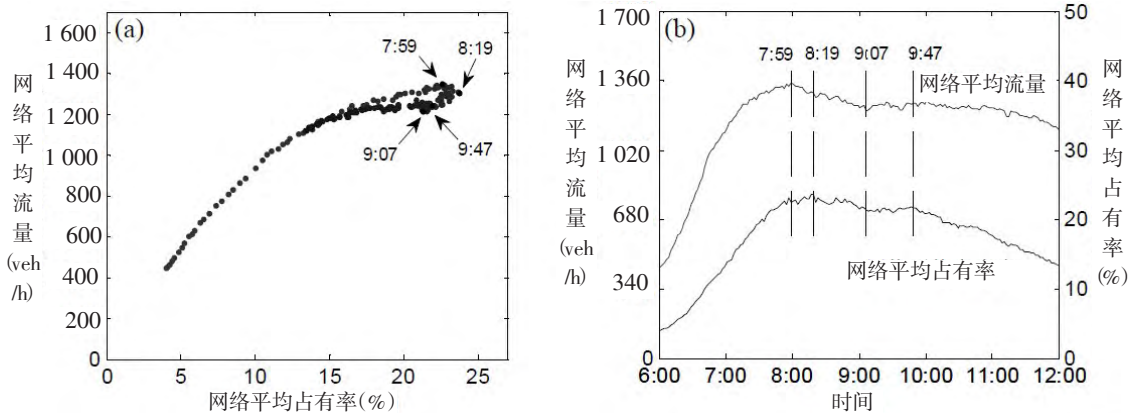


图2 2010年5月13日上午6点-12点北京市快速环路宏观基本图:(a)网络平均流量与网络平均占有率的关系;(b)网络平均流量与网络占有率的时间序列图

Fig. 2 An MFD for Beijing urban freeway during 6 a.m. to 12 p.m., May 13, 2010:(a) Relations between network mean flow and network mean occupancy; (b) Time series of network mean flow and network mean occupancy

图2(b)以时间序列的形式将网络平均流量和平均占有率关联。可以看到:网络平均流量在7:59达到最高峰,而网络平均占有率的峰值则发生在8:19。这表明在7:59至8:19期间,整个路网在宏观上处于拥堵状态。在网络由拥堵恢复的过程中,

网络平均流量和平均占有率表现出不同的下降速度,这一特征使得宏观基本图在回滞过程中表现出不同的速度(即斜率,见图2(b)中8:19-9:07,9:07-9:47和9:47-12:00)。

为了分析宏观基本图的内在机制及特征,图3

给出了各环路的网络平均流量和平均占有率的时间序列关系,分析得到如下特征:

(1)在早高峰开始时,二环至四环的网络平均占有率在8点左右达到最大,即路网中的车辆数最多;五环的高峰则出现在9点左右,晚于其他三个环路.表明了各环路上交通需求的差异性.

(2)二环至四环中,网络平均流量达到最大值并下降的时间均早于或等于网络平均占有率达到最大值的时间,在宏观上表明环路进入拥堵状态.

(3)二环和三环的网络平均占有率在9:00左右再次增加,即二环和三环上的网络平均占有率在由高峰恢复的过程中,并非单调递减.

(4)早高峰结束过程中(10:00以后),二环和三环的网络平均流量并没有像四环和五环那样随着网络平均占有率的下降而下降.

(5)总体上,在拥堵消散过程中,二环仍保持着相对较高的网络平均流量,网络平均占有率的下降对其影响有限.

特征(2)和(3)说明了路网拥堵在时空上的异质性;特征(3)和(4)则解释了宏观基本图回滞速度不同的原因;特征(2)、(4)和(5)仍较难解释,这可能与北京市中心区域的高需求及北京市快速环路所表现出来的四相交通流^[21,22]特征有关.

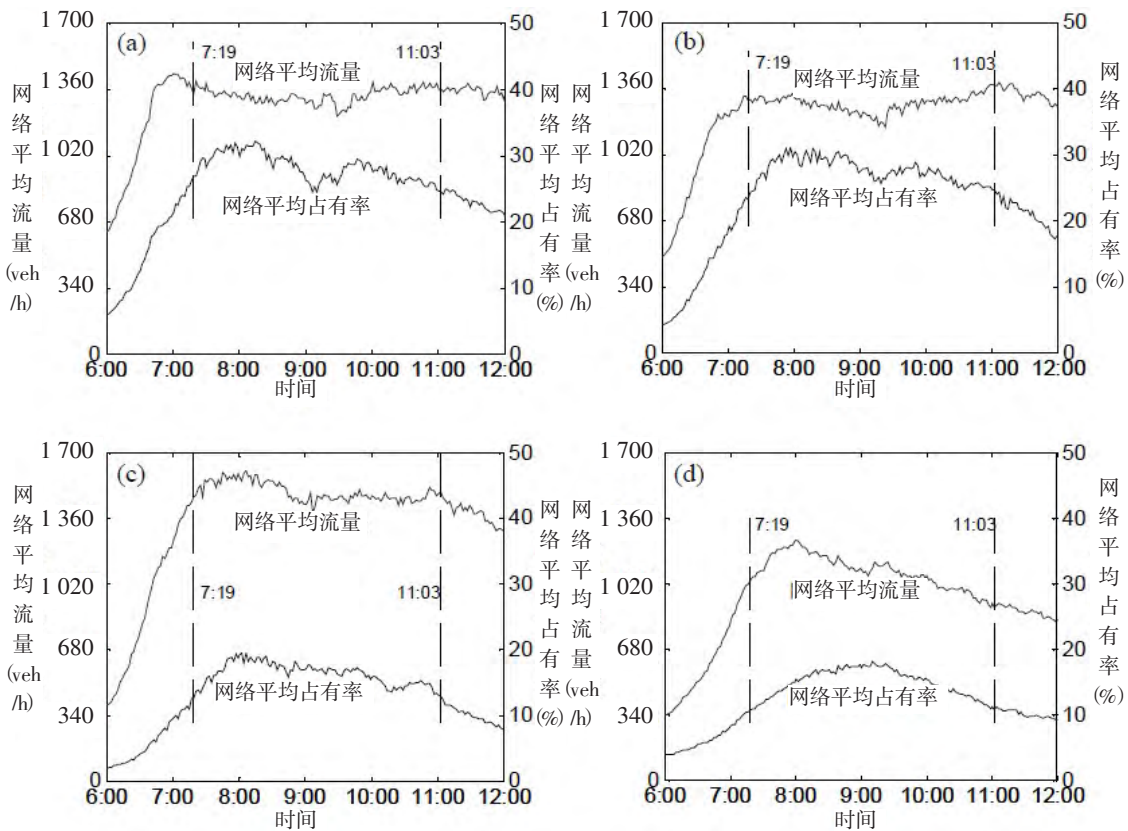


图3 网络平均流量与网络平均占有率的时间序列图:(a)二环;(b)三环;(c)四环;(d)五环

Fig. 3 Time series of network mean flow and network mean occupancy: (a) 2nd ring road; (b) 3rd ring road; (c) 4th ring road; (d) 5th ring road

4 北京市快速环路宏观基本图中的回滞现象

最近,文献[10]提出,在宏观基本图的回滞现

象中,所有检测器采集到的车辆占有率的方差(简记为网络占有率方差)与网络平均流量表现出相反的趋势,如较高的网络占有率方差对应较低的

网络平均流量.然而,在北京市快速环路宏观基本图中,我们发现了另一种关系,即二者亦可表现出相同的趋势.

在图4中同时构造网络平均占有率与平均流

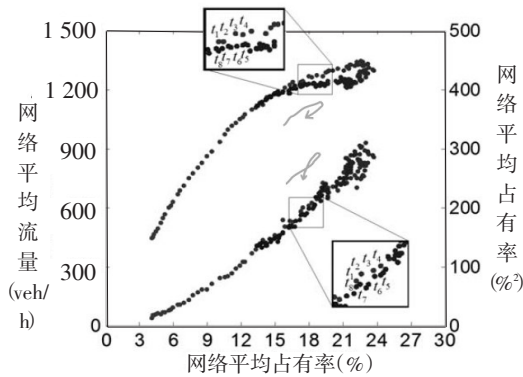


图4 二至五环网络平均流量、网络平均占有率及网络占有率方差关系图

Fig.4 A diagram presenting relations between network mean flow and network mean occupancy, and relations between network occupancy variance and network mean occupancy from 2nd to 5th ring road

为分析原因,比较相似网络平均占有率下的路网状态.选择时间点 $t_1=7:17$, $t_2=7:19$, $t_3=7:21$, $t_4=7:23$, $t_5=10:55$, $t_6=10:57$, $t_7=11:03$, $t_8=11:05$.其中 t_1 和 t_8 , t_2 和 t_7 , t_3 和 t_6 , t_4 和 t_5 有着近似的网络平均占有率(见图4).进一

量关系,以及网络平均占有率与占有率方差关系.不难发现,较低的网络占有率方差并未严格对应较高的网络平均流量,一种相反的关系同时存在.这与文献[10]的结论并不吻合.

步,以环路为单位修改网络平均占有率方差计算公式,以分析各环路对网络方差的影响,如下式:

$$V = \frac{1}{\sum_{r=2}^R M_r} \sum_{r=2}^R C_r \quad (2)$$

$$C_r = \sum_{m=1}^{M_r} (o_m^r - O)^2 \quad (3)$$

式中 V 为网络平均占有率方差; M_r 为环路 $r=2, \dots, R$ 上检测器组数量; o_m^r 为环路 r 上检测器组 m 获得的占有率.

由于 C_r 为正且与 V 线性相关,这里以 C_r 表示各环路数据对总体方差的贡献率.图5比较了各环路在四个时间对中的贡献率 C_r ,可以看到各环路贡献率在不同时间对中表现出相似的规律:对于网络平均占有率与网络占有率方差相反的对对应关系,二环和四环总是促进这种关系的形成;三环促进或不起作用;五环则阻碍了这一关系.五环与其他环路不同,说明了拥堵在空间(各环路间)上的不均匀性.

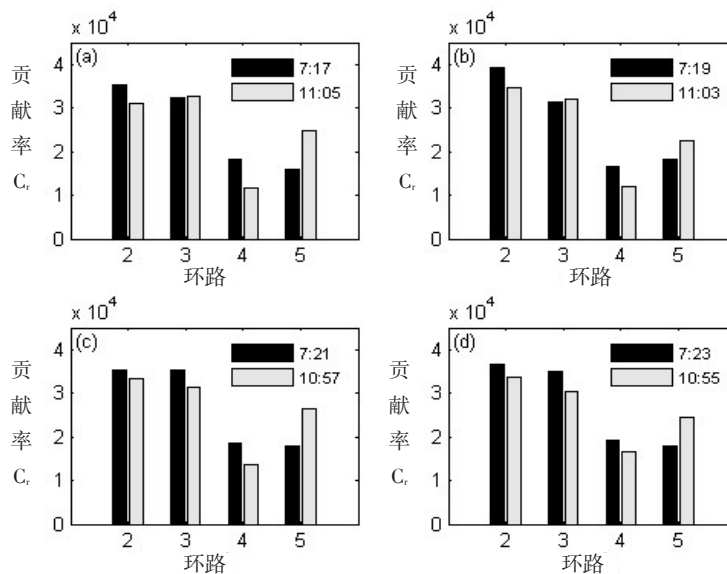


图5 各个环路对网络总体占有率方差的贡献 C_r : (a) t_1 和 t_8 ; (b) t_2 和 t_7 ; (c) t_3 和 t_6 ; (d) t_4 和 t_5

Fig.5 Contribution C_r of each ring road to network mean occupancy : (a) t_1 and t_8 ; (b) t_2 and t_7 ; (c) t_3 and t_6 ; (d) t_4 and t_5

以 t_2 和 t_7 为例,对各环路的宏观交通参数及其对应关系进行分析.如表1,五环上较高的网络占有率方差对应较低的网络平均流量,这与文献[10]中结论一致,二环至四环虽与其结论吻合,但不等号方向相反.若将所有环路数据组合后,其特征却由于各自数值与权重差异产生了与文献[10]相反的规律.因此,可以认为:五环上拥堵形成与其他环路的不同步性是导致这一相反结论的主要原因.

对单个环路而言,二环在 7:19 已处于拥堵状态(见图3);三环在 7:19 接近最大通行能力(即网络平均流量不随网络平均占有率的上升而变化);

四环和五环的网络平均占有率在 7:19 则刚刚开始增加,并且五环的高峰到达时间较四环更晚.可见各环高峰开始时间并不同步,而是向外放射形传播.这与北京市的超大城市面积和高密度的人口分布密切相关,也就是,超大路网范围放大了拥堵传播过程对宏观基本图的影响.

为了进一步验证该结论,仅使用二到四环数据绘制宏观基本图,如图6所示.显然,较高的网络平均占有率方差与较低的网络平均流量对应,这与文献[10]的结论一致.可见,正是五环造成了之前的差异.

表1 上午7:19和11:03,各环路宏观交通参数及其关系(U 为网络平均速度)
Table 1 Values of various macroscopic variables and their relations at time 7:19 a.m. and 11:03 a.m.
(U is network mean speed)

环号	$M_r^{7:19}$	$M_r^{11:03}$	$Q_r^{7:19}$	$Q_r^{11:03}$	$O_r^{7:19}$	$O_r^{11:03}$	$U_r^{7:19}$	$U_r^{11:03}$
二	111	113	$1\ 333.59 < 1\ 358.12$		$26.85 > 24.49$		$265.89 > 257.13$	
三	123	125	$1\ 296.57 < 1\ 374.76$		$23.17 < 24.66$		$224.66 > 204.01$	
四	102	102	$1\ 472.92 < 1\ 501.20$		$12.58 \approx 12.92$		$140.39 > 99.82$	
五	189	191	$1\ 038.15 > 897.15$		$10.75 \approx 10.74$		$52.05 < 73.99$	
二环-四环	336	340	$1\ 362.32 < 1\ 407.16$		$21.17 \approx 21.08$		$259.43 > 231.13$	
二环-五环	525	531	$1\ 245.61 > 1\ 223.71$		$17.42 \approx 17.36$		$200.67 > 190.24$	

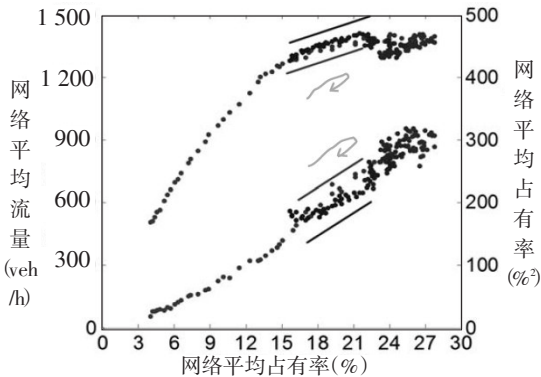


图6 二至四环网络平均流量、网络平均占有率及网络占有率方差关系图

Fig. 6 A diagram presenting relations between network mean flow and network mean occupancy, and relations between network occupancy variance and network mean occupancy from 2nd to 4th ring road

5 研究结论

利用现有海量交通流数据,构造了北京市快速环路的宏观基本图,并分析了其特征.如同现有理论所述,存在于单个基本图中的大量散点消失在集聚后的宏观基本图中,说明了宏观基本图在

北京城市快速环路上的存在性.然而,该宏观基本图仍表现出明显的回滞现象.本文在分析北京市交通拥堵形成的时空特征过程中,发现了一种不同于现有理论的宏观基本图特征,即在网络平均占有率方差与网络平均流量的对应关系中,二者的趋势亦可相同.通过分析各环拥堵形成特征,认为拥堵由内向外传播的影响及五环上拥堵形成的不同步性导致了该差异.因此,在今后针对北京市宏观基本图的研究中,建议略去五环以外路网,以保持网络相对较好的一致性.同时,本文丰富了人们关于超大路网对应宏观基本图特征的认识.

参考文献:

[1] 钟石泉,马寿峰,贺国光.交通诱导系统路网状态描述方法及仿真研究[J].系统工程学报,2009,24(1):23-31. [ZHONG S Q, MA S F, HE G G. Description and simulation of dynamic route guidance system road network[J]. Journal of Systems Engineering, 2009,24(1):23-31.]

[2] 高利平,刘明君,孙壮志,等.区域交通流信息诱导效果的仿真研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2008,8(4):

- 63–69. [GAO L P, LIU M J, SUN Z Z, et al. Simulation on impact of information guidance on regional traffic flow [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2008, 8(4): 63–69.]
- [3] 贺国光, 马寿峰, 交通诱导系统智能化方案及其仿真研究[J]. *系统工程学报*, 2002, 17(4): 10–15. [HE G G, MA S F. Design of intelligent route guidance system and it's simulation[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2002, 17(4): 10–15.]
- [4] Daganzo C F, Geroliminis N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008, 42(9): 771–781.
- [5] Helbing D. Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow[J]. *The European Physical Journal B*, 2009, 70(2): 229–241.
- [6] Daganzo C F. A variational formulation of kinematic waves: Basic theory and complex boundary conditions [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2005, 39(2): 187–196.
- [7] Daganzo C F. A variational formulation of kinematic waves: Solution methods[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2005, 39(10): 934–950.
- [8] Geroliminis N, Daganzo C F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008, 42(9): 759–770.
- [9] Buisson C, Ladir C. Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 127–136.
- [10] Geroliminis N, Sun J. Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(3): 605–617.
- [11] Geroliminis N, Sun J. Hysteresis phenomena of a macroscopic fundamental diagram in freeway networks[J]. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2011, 17: 213–228.
- [12] Daganzo C F. On the macroscopic stability of freeway traffic[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(5): 782–788.
- [13] Daganzo C F, Gayah V. Macroscopic relations of urban traffic variables: Bifurcations, multivaluedness and instability[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(1): 278–288.
- [14] Gayah V V, Daganzo C F. Clockwise hysteresis loops in the macroscopic fundamental diagram: An effect of network instability[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(4): 643–655.
- [15] Mazlounian A, Geroliminis N, Helbing D. The spatial variability of vehicle densities as determinant of urban network capacity[J]. *Philosophical Transactions – Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2010, 368(1928): 4627–4647.
- [16] Knoop V L, Hoogendoorn S. 2011 Two-variable macroscopic fundamental diagrams for traffic networks[C]// *Traffic and Granular Flow*, 2011, Moscow.
- [17] Ji Y B, Daamen W, Hoogendoorn S, et al. Macroscopic fundamental diagram: investigating its shape using simulation data[C]// *89th Annual Meeting of Transportation Research Board*, 2010: 1–12.
- [18] Daganzo C F. Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2007, 41(1): 49–62.
- [19] Gonzales E J, Geroliminis N, Cassidy M J, et al. On the allocation of city space to multiple transport modes[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2010, 33(8): 643–656.
- [20] 姬杨蓓蓓, Daame W. 阿姆斯特丹城市道路线圈检测器布设方法研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(5): 754–757. [JI Y B, Daame W. Loop detector location research on urban road in Amsterdam[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2010, 29(5): 754–757.]
- [21] Guan W, He S. Statistical features and phase identification of traffic flow on urban freeway[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2007, 7: 42–50.
- [22] Guan W, He S. Statistical features of traffic flow on urban freeways[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2008, 387, 944–954.