

基于宏观基本图的相邻子区协调控制方法

赵靖¹, 马万经^{*2}, 汪涛², 廖大彬²

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 为了提升道路网整体运行效益, 克服针对单个控制子区的最优化控制可能造成的拥堵转移, 本研究基于宏观基本图的概念, 建立控制子区间驶入驶出交通量的协调控制模型. 该模型以两个相邻控制子区为对象, 考虑各子区自身宏观基本图特征及交通量流入流出关系. 在运用博弈论对其相互作用进行描述的基础上, 提出了一种以两个子区整体运行效益最大化为目标的博弈控制逻辑及其求解流程. 通过VS2010对所建立的博弈进行仿真, 验证了模型的可行性及控制效果. 研究表明, 不同的控制策略对相邻小区的运行水平(收益)会造成不同的影响, 但经多次博弈后, 两相邻控制子区整体运行状况可稳定在一个最佳水平. 博弈结果显示路网容量相对较小的控制子区更应受到保护, 当内部车辆数达到最佳车辆数时应对其进行流入限制.

关键词: 交通工程; 边界流量控制; 宏观基本图; 控制子区; 博弈论

DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2016.01.012

Coordinated Perimeter Flow Control for Two Subareas with Macroscopic Fundamental Diagrams

ZHAO Jing¹, MA Wan-jing², WANG Tao², LIAO Da-bin²

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to improve the performance of the entire road network, and prevent the congestion transfer caused by the optimal control for a single traffic control subarea, a coordinated perimeter flow control model is proposed. The proposed model aims at two adjacent traffic control subareas. The macroscopic fundamental diagram for each of the subareas and the relationship of the inflows and outflows are considered. After describing the interaction between the two subareas by the game theory, a game-based control logic is formulated and solved to maximum the performance of the two subareas as a whole. The feasibility and benefits of the proposed control are tested by VS2010 simulation. The results show that different control strategies lead to different benefits of the two subareas. However, a stable and efficient operation situation could be obtained by multiple gaming. Moreover, the subarea with lower network capacity may deserve more protection. The inflow should be controlled when its number of internal vehicles reaches the optimal value.

Keywords: traffic engineering; perimeter flow control; macroscopic fundamental diagram; control subareas; game theory

收稿日期: 2015-08-11

修回日期: 2015-09-22

录用日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(51238008, 51138003).

作者简介: 赵靖(1983-), 男, 上海人, 讲师, 博士.

*通信作者: mawanjing@tongji.edu.cn

0 引言

随着交通需求的不断增长,交通拥堵成为城市常态化问题.为了提高重点区域交通运行效率,在单点及干线信号控制系统研究的基础上,一系列区域信号控制系统被提出并得到了广泛应用.控制逻辑一般采用区域、子区和交叉口三级结构.各子区往往作为一个独立的控制对象,子区间的控制策略和控制方案联系较少.

但近年来关于宏观基本图的研究发现,流出道路网车辆数和路网内车辆数之间存在抛物线关系,当路网内车辆数达到某一数值时,网络整体运行效率存在一个最高值^[1].欲使重点区域运行效率保持在最高值附近,就需要对子区的驶入交通量进行控制.因此,控制子区之间的控制策略与子区运行效果存在紧密联系,对子区的控制不仅应包括内部交叉口的信号控制,还应对子区间的交通量转换进行控制.

本研究将基于宏观基本图的概念,建立控制子区间驶入驶出交通量的协调控制模型.以两个相邻控制子区为研究对象,考虑各子区自身宏观基本图特征及交通量流入流出关系,提出一种博弈控制逻辑,确保相邻子区整体处于最优的运行状态.

1 相关研究综述

宏观基本图的概念由Daganzo提出,他将整个网络检测器的流量和占有率集聚后得到了一个离散度很小的曲线,可用于反映网络交通流状态^[1].对于该理论,研究人员基于检测数据、仿真和模型解析等方法对其存在性及特征指标进行了验证.Feng^[2]和He^[3]运用道路检测器和出租车数据分别针对城市一般道路网和快速路网论证了宏观基本图的存在性.姬杨蓓蓓则基于仿真论证了阿姆斯特丹城市路网宏观基本图的存在性^[4].Leclercq采用解析模型,提出了依据路径的拓扑结构及变分理论来描述宏观基本图的方法^[5].Xie在此基础上增加了对公共交通的考虑^[6].Daganzo则将检测器数据与模型解析相结合,给出了如何通过较少的数据获取宏观基本图的建模方法^[7].

在对宏观基本图特征指标研究的基础上^[8],研

究人员开始将其运用于网络控制,主要包括控制子区划分和控制策略两个方面.

为了使控制子区交通流具有更好同质性,提高其理论最大路网容量,研究人员提出了一系列子区划分方法.最初以相邻交叉口关联性作为划分依据^[9].但有学者认为该方法将造成路段的不连续性,为此李刚奇构建了以交通流数据为主的子区评价指标,提出了一种基于路段交通流密度的子区划分方法^[10].之后,Haddad指出最佳的运行状态未必是稳定的,进而提出了以子区运行的稳定性为基础的子区划分方法^[11].Ji则进一步提出应基于时间特征对子区进行动态划分^[12].

在控制子区划分的基础上,依据控制交通需求来提高道路可达性的总体思想^[1],王福建采用密度及速度作为路网拥堵评价指标,总结了对趋于拥堵的路网实施控制的基本对策^[13].Mehdi进一步研究了网络交通控制的可行性及实施条件^[14].Yoshiit特别针对城市快速路网,提出了区域计量控制方法,通过对阪神快速路网的仿真研究验证了该方法的有效性^[15].

综上所述,网络宏观基本图的获取及描述已日趋成熟,并已形成一些针对单个子区的控制策略.但实际运行中,控制子区并不是一个独立的系统,其外部交通流入流出均与周边相邻子区有着密切的联系.因此,若仅考虑单个控制子区,虽然可以使该子区达到较好的控制效果,但可能导致拥堵被转移到其他子区.本研究以此为切入点,研究相邻子区之间交通运行状态的博弈演化过程,通过控制子区相互的驶入驶出交通量,使相邻子区整体处于最优的运行状态.

2 控制模型建立

2.1 相邻控制子区博弈特征分析

对于两个存在宏观基本图的相邻控制子区,各自存在一个最佳的内部车辆数使其处于最佳的运行状态.如图1所示,当子区内部车辆数超过最佳车辆数时,为维持子区最佳的运行状态,需控制驶入子区的车辆数.然而,这意味着相邻子区的驶出车辆数受到了限制,可能影响相邻子区的运行状态.因此,两相邻子区为维持各自的最佳状态,存

在着竞争关系.对于管理者,则希望由各控制子区构成的大区域有最好的运行效果.因此,需要对两个子区进行协调控制.相邻控制子区存在的上述竞争与合作关系问题可通过博弈论来描述.基本要素包括:

(1) 参与者.

两相邻子区构成了两个博弈参与者.

(2) 信息.

博弈中的信息是子区交通实时状态,可以通过检测器等设备获取,并被双方了解.

(3) 战略.

两个博弈者的选择战略集由对方子区的驶出交通量构成.

(4) 收益.

依据宏观基本图的基本特点,每个子区均存在一个最佳内部车辆数,此时子区驶出交通量达到最大.当子区内车辆数偏离最优值时,子区运行效益就会下降,因此将子区内部车辆数与最佳车辆数之间的偏差来反映收益大小,具体如式(1)所示.

$$-(N - n_i)^2 \quad (1)$$

式中: N 表示子区内部最佳车辆数; n_i 表示控制周期 t 子区内部车辆数.

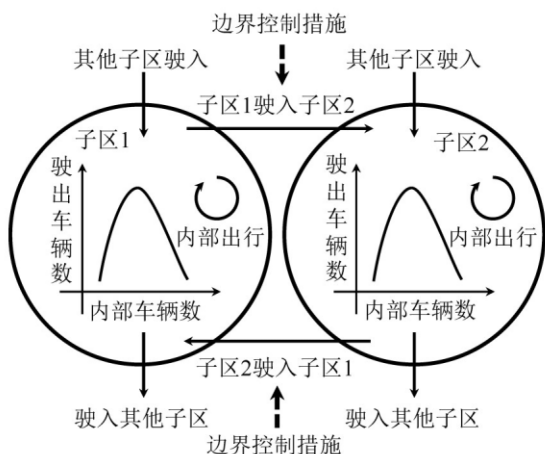


图1 相邻小区交通量驶入驶出关联性

Fig. 1 Relationship of the inflows and outflows between the two adjacent subareas

2.2 相邻控制子区博弈控制模型

为了使整个路网的效益最高,可通过二人合作博弈理论实现博弈双方的合作,最终使两子区

的收益之和最高.因此控制目标如式(2)所示.

$$\max \sum_{i=1}^2 -(N_i - n_{it})^2 \quad (2)$$

式中: N_i 表示子区 i 内部最佳车辆数; n_{it} 表示控制周期 t 子区 i 内部车辆数.

两子区博弈过程中对驶入子区的外部需求进行控制,而一个子区驶入的控制,相当于变相的对另一个子区的驶出交通量进行了控制.而子区之间主要通过路段进行链接,因此由于子区1驶入到子区2的实际交通量最大值由两个因素决定:

(1) 从子区1驶向子区2的交通需求;

(2) 子区1到子区2方向的道路通行能力,最小值为0.

因此,在一次博弈过程中子区1驶入到子区2的控制交通量策略应满足式(3).

$$\min(v_{12t}, c_{12t}) \geq q_{12t} \geq 0 \quad (3)$$

式中: v_{12t} 表示控制周期 t 从子区1驶向子区2的交通需求; c_{12t} 表示控制周期 t 子区1到子区2方向的道路通行能力; q_{12t} 表示控制周期 t 从子区1驶入子区2的控制车辆数.

同理,子区2驶入到子区1的控制交通量策略应满足式(4).

$$\min(v_{21t}, c_{21t}) \geq q_{21t} \geq 0 \quad (4)$$

式中: v_{21t} 表示控制周期 t 从子区2驶向子区1的交通需求; c_{21t} 表示控制周期 t 子区2到子区1方向的道路通行能力; q_{21t} 表示控制周期 t 从子区2驶入子区1的控制车辆数.

博弈过程中,博弈参与人的选择策略主要从满足上述约束条件的解构成的策略集中选取,通过计算两个参与人在不同策略组合情况下的收益值,最后确定纳什均衡解并确定最优控制方案.

2.3 相邻控制子区博弈控制模型

博弈结果应满足纳什均衡,表示博弈方都不愿或不会单独改变自己策略的策略组合^[16].

两子区博弈控制求解分为以下5个步骤,流程如图2所示.

Step 1 计算各子区内部车辆数.

Step 2 由各子区当前内部车辆数和宏观基本图计算子区总驶出车辆需求.并结合驶入博弈对方子区车辆需求占总驶出车辆需求的比例,确定该

控制周期从博弈中的一个子区驶向另一子区的交通需求。

Step 3 结合通行能力约束,确定子区控制驶入量的策略选择空间。

Step 4 计算各策略组合情况下两个子区的收益值,确定博弈纳什均衡解。

Step 5 实施控制策略,返回 step1,进入下一个控制周期。

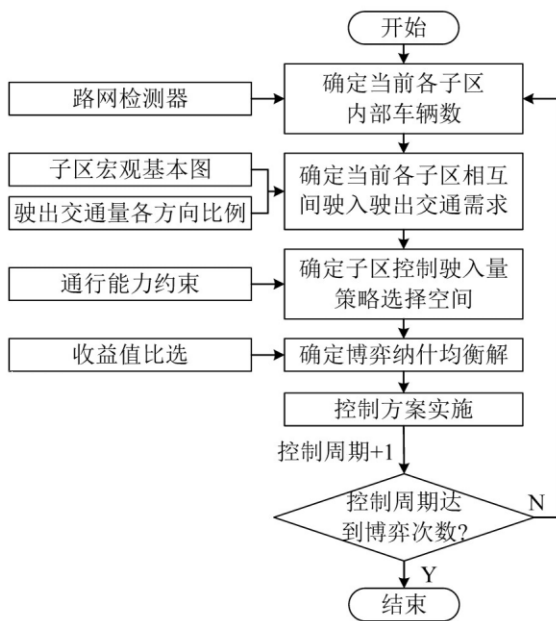


图2 博弈控制模型求解流程图

Fig. 2 Flow chart for the solution of the game-based control model

3 控制效果检验

为验证博弈模型的效果以两个相邻子区的协调控制作为案例进行计算和分析,本文利用VC++实现上述两子区之间博弈的仿真。

控制子区1的宏观基本图拟合回归函数如式(5)所示,最佳状态点为内部车辆数500辆,每个控制周期驶出车辆数100辆。子区2的宏观基本图拟合回归函数如式(6)所示,最佳状态点为内部车辆数1000辆,每个控制周期驶出车辆数300辆。子区1和子区2的驶出车辆中,驶向对方子区的比例均为50%。子区之间的连接道路总通行能力为200辆/控制周期。子区1每个控制周期会在内部新增交通量50辆。

$$O_1 = -0.0003 \times [500 - n_1]^2 + 100 \quad (5)$$

$$O_2 = -0.0004 \times [1000 - n_2]^2 + 300 \quad (6)$$

式中: O_1 、 O_2 分别表示从子区1和子区2的驶出交通量。

通过两子区之间的博弈,确定每个博弈控制周期内的最佳控制方案,进而使得整个路网控制效果达到最优。通过VS2010对上述博弈进行仿真,共进行200次博弈并对每次博弈控制效果进行分析。

两子区通过多次博弈达到最优控制结果时,子区1和子区2的内部车辆数变化情况及控制驶入流量变化情况分别如图3~图6所示。

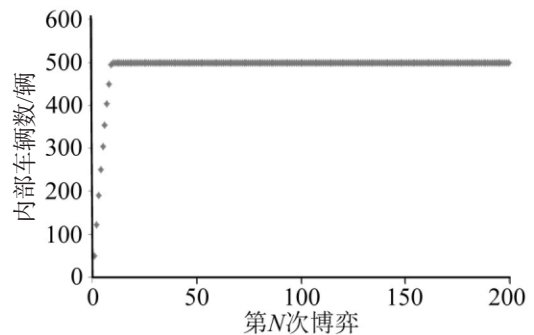


图3 子区1内部车辆数变化情况

Fig. 3 Changes of the number of internal vehicles in subarea 1

由图3可以看出,随着博弈的不断进行,子区1内部车辆数由0辆逐步增加到最佳状态的500辆,并维持在最佳状态值。

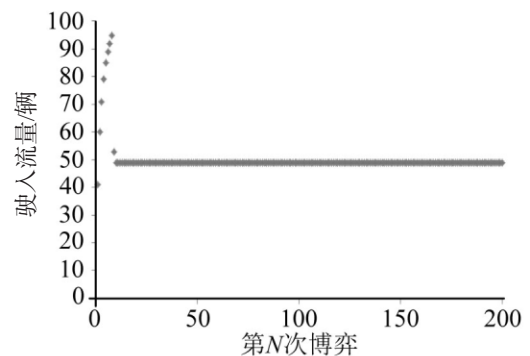


图4 子区1控制驶入流量变化情况

Fig. 4 Changes of the controlled inflows for subarea 1

图4反映了子区1的控制驶入流量随博弈次数的变化情况。博弈开始阶段,子区1内部车辆数较少,由子区2到子区1的需求逐步增加,因此,控

制驶入量也随之增长,当博弈一定次数后,子区1内部车辆数逐步逼近其最佳状态值,博弈控制驶入量逐步趋于稳定,最后控制驶入流量稳定在50辆/控制周期左右。

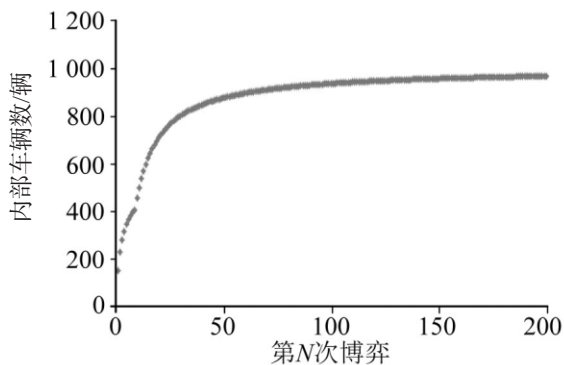


图5 子区2内部车辆数变化情况

Fig. 5 Changes of the number of internal vehicles in subarea 2

图5反映出子区2内部车辆数随博弈次数的变化情况.随着博弈的不断进行,子区2内部车辆数逐步增加,当博弈到一段时间后,由于2号子区驶出车辆中目的地在子区1内部的驶出流量受到子区1的控制,因此其内部车辆数出现一个波动点,随后,由于子区1的驶入流量稳定在50辆/控制周期,子区2的内部车辆数也随之逐步稳定。

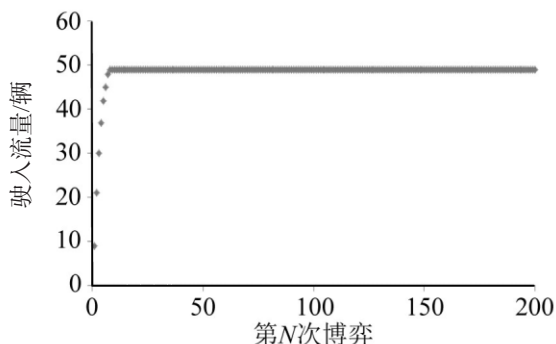


图6 子区2控制驶入流量变化情况

Fig. 6 Changes of the controlled inflows for subarea 2

图6反映了子区2的控制驶入流量随博弈次数的变化情况.与子区1类似,开始驶入控制量同样随着博弈次数的增加逐步增加,最后稳定在50辆/控制周期。

由图3~图6内部车辆数及控制驶入流量变化情况发现,子区1较子区2更容易达到稳定状

态.这主要是由于本次仿真初始状态是路网内交通量为0,同时子区1容量较小,因此经过10次博弈之后,子区1就达到了最佳运行状态.而子区2容量较大,因此需要更长的时间达到平衡.这符合实际中容量较小的路网(如老城区)容易达到一个比较稳定的饱和度,交通时变特征不十分显著,而容量较大的路网(如外围新建城区)高峰特征更为显著。

进一步分析各子区内排队车辆数变化情况,如图7所示.随着博弈的不断进行,子区1的排队车辆数始终为0辆,即驶出子区2的交通量能全部驶入到子区1;子区2的排队车辆数逐步增大,最后趋于平衡(100辆).此时,子区1的内部车辆数及子区2的驶入车辆数均保持不变,整个路网处于稳定的运行中.该博弈结果说明路网容量相对较小的控制子区更应受到保护,因为其交通运行更为脆弱.在现实中,老城区相对于城市其他区域可能更有实施流入限制的必要性。

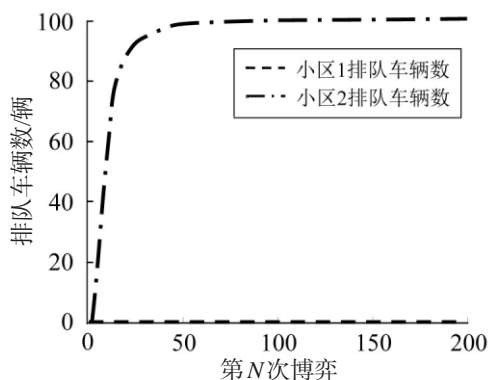


图7 各子区排队车辆数变化情况

Fig. 7 Changes of the number of queued vehicles for each subarea

各子区收益情况如图8所示.随着博弈的不断进行,两个子区的收益值均在不断增大,但由于子区2容量大,达到最佳运行状态的速度较子区1慢,因此在稳定之前子区2的收益总是小于子区1的收益值(内部车辆数小于最佳内部车辆数).这与现实中平峰过渡至高峰过程中,交通量总是不断汇集至干道系统(类似于子区2拥有更大的容量)的现象相吻合.最终达到稳定状态,并通过控制使收益保持在最大值。

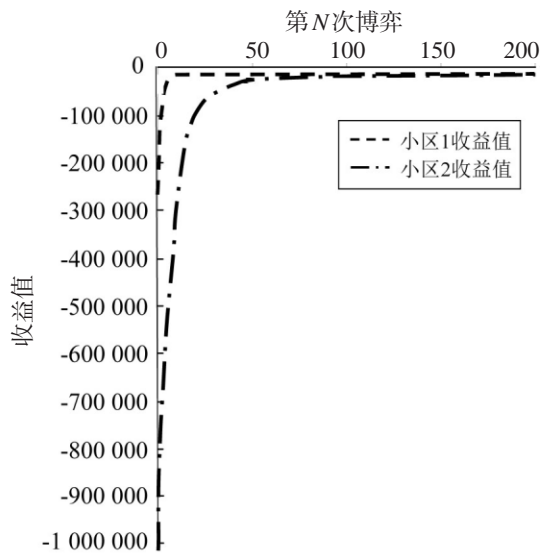


图8 各子区收益变化情况

Fig. 8 Changes of the benefits for each subarea

4 结 论

相邻子区之间的协调控制是对整个路网进行控制的基础.通过博弈论分析了相邻子区之间的协调关系,在宏观基本图的基础上对相邻子区进行博弈协调控制,并结合仿真案例对模型控制效果进行验证.研究主要得出以下几点结论:

(1) 不同的控制策略对相邻小区的运行水平(收益)会造成不同的影响,但通过博弈模型可使两相邻交通小区整体运行水平最佳.

(2) 交通容量相对小的控制子区更容易达到稳定状态,现实中表现为容量较小的路网(如老城区)饱和度相对稳定,交通时变特征不十分显著,而容量较大的路网(如外围新建城区)高峰特征更为显著.

(3) 路网容量相对较小的控制子区更应受到保护,必要时应对其进行流入限制,例如城市老城区.

但本研究仅针对两个相邻交通控制子区,未考虑采取限流措施之后,车辆可能改变行驶路径并由其他控制子区绕行的情况,有待进一步研究.

参考文献:

[1] Daganzo C F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches[J]. Transportation Research Part

B: Methodological, 2007, 41(1): 49–62.

- [2] Feng G. Macroscopic fundamental diagrams for Stockholm using FCD data[D]. England: Royal Institute of Technology, 2011.
- [3] He Z, He S, Guan W. A figure-eight hysteresis pattern in macroscopic fundamental diagrams and its microscopic causes[J]. Transportation Letters, 2015, 7(3): 133–142.
- [4] 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. [JIYANG B 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.]
- [5] Leclercq L, Geroliminis N. Estimating MFDs in simple networks with route choice[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013(57): 468–484.
- [6] Xie X, Chiabaut N, Leclercq L. Macroscopic fundamental diagram for urban streets and mixed traffic: cross-comparison of estimation methods[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013(2390): 1–10.
- [7] 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.
- [8] 许菲菲, 何兆成, 沙志仁. 交通管理措施对路网宏观基本图的影响分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(2): 185–190. [XU F F, HE Z C, SHA Z R. Impacts of traffic management measures on urban network microscopic fundamental diagram[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(2): 185–190.]
- [9] 马莹莹, 杨晓光, 曾滢. 基于谱方法的城市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 Y Y, YANG X G, ZENG Y. Urban traffic signal control network partitioning using spectral method[J]. System Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(12): 2290–2296.]
- [10] 李刚奇, 赵娅丽. 基于宏观交通理论的交通控制子区划分方法[C]. 第七届中国智能交通年会优秀论文集, 2012. [LI G Q, ZHAO Y L. Urban traffic signal control network partitioning based on macro-traffic flow theory[C]. 2012 China Intelligent Transportation Annual Symposium, 2012.]
- [11] Haddad J, Geroliminis N. On the stability of traffic perimeter control in two-region urban cities[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(9): 1159–1176.
- [12] Ji Y, Geroliminis N. On the spatial partitioning of urban transportation networks[J]. Transportation Research Part

- B: Methodological, 2012, 46(10): 1639–1656.
- [13] 王福建, 韦薇, 王殿海, 等. 基于宏观基本图的城市路网交通状态判别与监控[C]. 第七届中国智能交通年会, 2012. [WANG F J, WEI W, WANG D H, et al. Urban road network traffic state identification and monitoring based on macroscopic fundamental diagram[C]. 2012 China Intelligent Transportation Annual Symposium, 2012.]
- [14] Keyvan-Ekbatani M, Kouvelas A, Papamichail I, et al. Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2012, 46(10):1393–1403.
- [15] Toshio Y, Yuji Y, Kitamura R. Evaluation of an area metering control method using the macroscopic fundamental diagram[C]. The 12th World Conference on Transportation Research, Lisbon, Portugal, 2010.
- [16] KydLand F. Noncooperative and dominant player solutions in discrete dynamic games[J]. International Economic Review, 1975, 16(2): 321–335.

上接第77页

- [4] 陈旻, 刘平. 频谱分析仪检波方式的分析与研究[J]. 现代电子技术, 2010(1): 97–99. [CHEN M, LIU P. Analysis and research of the detector types of spectrum analyzer[J]. Modern Electronics Technique, 2010(1): 97–99.]
- [5] 崔强, 靳冬. 均方根值—平均值检波器的实测对比与研究[J]. 安全与电磁兼容, 2010(1): 17–19. [CUI Q, JIN D. Comparison and analysis on the test results of RMS-average detector with others[J]. Safety & Emc, 2010(1): 17–19.]
- [6] Krug F, Russer P. Quasi-peak detector model for a time-domain measurement system[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(2): 320–326.
- [7] Krug F, Braun S, Russer P. A novel quasi-peak-detector for time-domain EMI-measurements[J]. Advances in Radio Science, 2004(2): 27–32.
- [8] Medler Jens. Experience with the RMS-Average detector[C]. 2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2008.
- [9] 单秦, 闻映红, 李艳. 高速铁路专用通信信道电波传播特性[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(2): 125–132. [SHAN Q, WEN Y H, LI Y. Radio wave propagation characteristics of special communication channel for high-speed railway[J]. China Railway Science, 2013, 34(2): 125–132.]
- [10] Guan K, Zhong Z D, Ai B. Propagation measurements and modeling of crossing bridges on high-speed railway at 930 MHz[J]. IEEE Trans Veh. Technol, 2014, 63(2): 502–517.
- [11] 林木, 张文珪, 唐剑群. GSM-R无线网络覆盖和服务质量(QoS)测试方法[S]. 铁道部科学技术司科技运[2008]170号, 2008: 1–32. [LIN M, ZHANG W Y, TANG J Q. Test specification of field strength and quality of service for GSM-R digital mobile communication network [S]. Department of Science and Technology of the Ministry of Railway, KJY[2008] No.170, 2008: 1–32.]
- [12] GSM-R Operators Group. System requirements specification version 15.4.0 [S]. EIRENE, 2014.