

庚泽华, 王亚伟, 王嘉文. 基于PID控制的交通边界控制方法[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(7): 231-235. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240737

# 基于PID控制的交通边界控制方法

庚泽华, 王亚伟, 王嘉文

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 随着城市化进程的不断加速, 交通拥堵已成为城市面临的主要挑战之一。为了解决城市路网中心区域因车辆累积而导致的拥堵问题, 本文利用宏观基本图的特有属性, 提出了基于PID控制的交通边界控制方法。首先, 建立被控区域车辆动态平衡方程, 确定被控区域与外部区域车辆转移关系; 其次, 引入PID控制器作为路网边界控制器, 通过调节进入被控区域的车辆转移比率, 控制进入被控区域内部的车辆数; 最后, 利用VISSIM仿真软件的仿真结果表明: 路网内部的车辆总数能够稳定在最佳累积值附近。

**关键词:** 交通拥堵; 宏观基本图; 边界控制; PID控制

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)07-0231-05

## Traffic boundary control method based on PID control

YU Zehua, WANG Yawei, WANG Jiawen

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

**Abstract:** As urbanization accelerates, traffic congestion has become one of the primary challenges faced by cities. To address the congestion problem caused by vehicle accumulation in the central areas of urban road networks, this paper utilizes the unique attributes of macroscopic fundamental diagrams and proposes a traffic boundary control method based on PID control. Firstly, establish the dynamic equilibrium equation for vehicles in the controlled area and determine the vehicle transfer relationship between the controlled area and external areas. Next, introduce PID control as the boundary controller of the road network. By adjusting the vehicle transfer ratio into the controlled area, control the number of vehicles entering the interior of the controlled area. Finally, utilize VISSIM simulation software for simulation. The simulation results indicate that the total number of vehicles within the road network can stabilize near the optimal accumulation value.

**Key words:** traffic congestion; macroscopic fundamental diagram; boundary control; PID control

## 0 引言

随着城市人口的增长和城市化的加速推进, 交通拥堵问题越发严重, 解决交通拥堵是当今交通领域面临的一个重大问题。在宏观交通控制领域, 基于宏观基本图(Macroscopic Fundamental Diagram, MFD)的研究主要关注城市交通网络的整体特性, 通过交通流量、密度和速度之间的关系来评估交通状况<sup>[1]</sup>。城市交通路网宏观基本图作为一种常用的宏观路网流量控制工具, 为同质路网区域信号优化提供了帮助<sup>[2]</sup>。MFD的获取可以通过大量的仿真实验和基于实际交通数据的案例计算得出<sup>[3]</sup>。为了方便宏观基本图在交通领域的运用, 一些学者

将宏观基本图拟合成梯形函数和三元一次函数模型, 利用函数模型中各项的系数来描述该地区MFD的特点<sup>[4]</sup>。MFD描述了城市交通网络中车辆累积和行程完成之间的关系, 可以利用MFD的这种关系判断一个区域是否发生拥堵<sup>[5]</sup>。利用宏观基本图的性质研究同质区域之间车流量调控时发现, 平均车流量随着车辆数量的增加而增加, 直至达到由MFD函数确定的临界车辆数量。然而当进入车辆的数量大于MFD的临界值时, 则平均流量将会显著减少<sup>[6]</sup>。为了使交通控制效果更佳, 临界车辆数值通常设置的比MFD理论临界值小<sup>[7]</sup>。

在交通控制研究领域, Haddad<sup>[8]</sup>在2012年提出利用交通宏观基本图对城市路网进行最优边界控

**作者简介:** 庚泽华(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通工程管理; 王亚伟(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能交通与仿真; 王嘉文(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 交通信息工程及控制。

收稿日期: 2024-01-24

哈尔滨工业大学主办 ◆ 科技创新与应用

制的方法;2015年,Hajiahmadi等<sup>[9]</sup>提出一种新颖的混合MFD模型,能够模拟切换信号配时对城市路网MFD的影响,并构建基于混合模型的模型预测方法,用简化数学模型来降低优化问题的计算复杂度。为了提高交通控制的鲁棒性,Zheng等<sup>[10]</sup>提出一种参考模型自适应控制方法,这种分布式自适应边界控制方法更具有灵活性;Mohajerpour<sup>[11]</sup>提出基于路网部分信息反馈的交通边界控制算法,在动态的路网中使用宏观基本图建模,并假定异构拥堵的路网被划分为两个同质拥堵的区域和一个拥堵程度较低的外部区域,运用超调控制方法和PI控制器对车流量进行控制;Guo等<sup>[12]</sup>提出一种基于MFD模型和交通边界约束的城市拥堵区域交通控制策略,使用离线优化方法获得车辆累积值和控制值;Yildirimoglu等<sup>[13]</sup>提出一种基于路径分配和区域路线规划的路网分层交通管理策略,并在城市路网案例中验证了分层控制方案能够改善路网的流动性。

本文将PID控制加入到边界控制方法中,建立PID控制模型,通过比例、微分和积分调节控制进入路网内部的车辆数。通过仿真,比较了固定配时信号控制和带有PID控制的交通边界控制效果,带有PID控制的交通边界控制效果更佳。

## 1 控制区域宏观基本图获取

宏观基本图是一种用于分析交通拥堵和交通流量的模型,可以帮助交通管理者更好地解决交通拥堵问题<sup>[14-15]</sup>。获取交通区域的宏观基本图,首先通过交通摄像头、传感器或其他数据采集设备完成交通流量、速度、密度等信息的采集<sup>[16]</sup>;其次,对获得的交通数据分析处理;最后,选择合适的拟合曲线建立宏观基本图模型。一般来说,宏观基本图包括4个阶段:自由流阶段、临界饱和阶段、拥堵阶段和阻塞阶段,如图1所示。

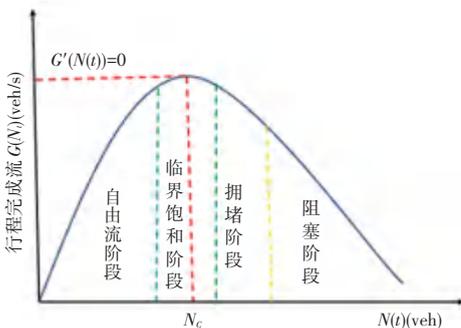


图1 宏观基本图

Fig. 1 Macroscopic fundamental diagram

低流量时,即处于临界饱和阶段之前的状态,道

路系统能够容纳更多的车辆而不出现拥堵,随着交通流量的增加,通行速度下降,导致交通流动性减弱,容易产生拥堵现象。交通边界控制需要将被控区域的车辆数保持在宏观基本图中的临界饱和值 $N_c$ 附近,调节车辆进入被控区域的数量,防止车流的状态进入临界饱和值 $N_c$ 的右侧,从而使路网的运行达到最佳效率。

## 2 模型建立

### 2.1 被控区域车辆动态方程

对于一个有大量交通需求且交通高度饱和的城市区域,将其定义为被控区域。将时间离散为等间隔区间,即 $t = kT$ ,其中 $k = 1, 2, 3, \dots, t$ 是模拟时间间隔。被控区域内部 $t$ 时刻的累积车辆数为 $n_1$ ,如公式(1)所示:

$$n_1(t+1) = n_1(t) + T(\sum_{i \in z} q_i^{\text{in}} - \sum_{i \in z} q_i^{\text{out}}) + q_{11}(t) \quad (1)$$

其中, $i$ 为被控区域带信号控制的路口, $i = 1, 2, 3, \dots, z$ 为被控区域带信号控制路口的集合; $q_i^{\text{in}}(t)$ 表示 $t$ 时刻第 $i$ 个路口流入被控区域的车流量; $q_i^{\text{out}}(t)$ 表示 $t$ 时刻第 $i$ 个路口流出被控区域的车流量; $q_{11}(t)$ 表示 $t$ 时刻起点为被控区域内,终点是被控区域外的需求流量。

被控区域内部的车辆变化可由公式(2)表示:

$$\frac{dn_{11}(t)}{dt} = q_{11}(t) + u_{21} q_{21}(t) - \frac{n_{11}}{n_1} G_1(n_1(t)) \quad (2)$$

其中, $G_1(n_1(t))$ 表示 $t$ 时刻从被控区域内部离开路网的车辆数; $q_{21}(t)$ 表示 $t$ 时刻起点为被控区域外,终点是被控区域内部的交通流量; $u_{21}$ 为被控区域外部车辆向被控区域内部的转移比率; $n_{11}$ 为 $t$ 时刻起点在被控区域内部,终点也在被控区域内部的车辆数。

从外部进入被控区域内部的车辆变化率,如公式(3)所示:

$$\frac{dn_{12}(t)}{dt} = q_{12}(t) - \frac{n_{12}}{n_1} G_1(n_1(t)) u_{12}(t) \quad (3)$$

其中, $q_{12}(t)$ 表示 $t$ 时刻起点为被控区域内部,终点是被控区域外部的交通流量; $n_{12}$ 为 $t$ 时刻起点在被控区域内部,终点在被控区域外部的车辆数; $u_{12}$ 为被控区域内部向被控区域外部的转移比率。

$t$ 时刻被控区域内部总的车辆数为 $n_1(t)$ ,如公式(4)所示:

$$n_1(t) = n_{11}(t) + n_{12}(t) \quad (4)$$

对于车流密度分布相对均匀的城市路网,路网

内累积车辆总数和车辆完成流量的关系可以用式 (5) 近似表示:

$$G_s(n_s(t)) = a n_s^3(t) + b n_s^2(t) + c n_s(t) \quad (5)$$

其中,  $n_s(t)$  表示被控区域内的累积车辆数, 且  $n_s(t) > 0$ ;  $G_s(n_s(t))$  表示  $t$  时刻离开被控区域车辆数;  $s$  表示区域编号;  $t$  表示统计间隔;  $a, b, c$  为 MFD 的曲线拟合系数, 是由路网自身决定的常数, 主要通过检测器数据或仿真数据获取<sup>[17]</sup>。

### 2.2 PID 控制器

根据被控区域的交通状态, 通过 PID 控制器调整信号灯控制参数, 优化被控区域内部的交通流。在不同的交通条件下, 调整 PID 控制器的参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  以及交通模型的参数, 实现被控交通系统的稳定和快速响应<sup>[18]</sup>。调整比例参数  $K_p$  可以加快系统的响应速度, 对当前的误差做出快速调整; 调整积分参数  $K_i$  可以消除系统的稳态误差, 以免引起系统的不稳定; 调整微分参数  $K_d$  可以减小系统的超调和震荡。根据交通系统的实际响应, 通过联合调整  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ , 获得满足性能要求的 PID 控制器, 其原理如图 2 所示。

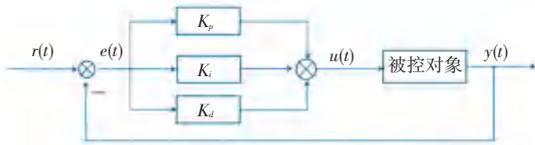


图 2 PID 控制器原理

Fig. 2 PID controller principle

首先, 定义交通系统的状态  $y(t)$  与被控区域内的累积车辆数  $n(t)$  关系, 如式 (6) 所示:

$$y(t) = n(t) \quad (6)$$

被控区域期望的交通系统输出  $r(t)$  是期望达到的目标累积车辆数, 关系如式 (7) 所示:

$$r(t) = N_c(t) \quad (7)$$

其中,  $N_c(t)$  为被控区域内部的最佳累积车辆数。

在交通边界控制项目中, 为了实现精准控制, 需要计算实际输出与期望输出之间的误差  $e(t)$ , 如式 (8) 所示:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (8)$$

设计 PID 控制器, 其中比例、积分、和微分项分别对应于误差的控制, 如式 (9) 所示:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

将 PID 控制器的输出  $u(t)$  作为信号灯控制  $f(t)$  的输入, 关系如式 (10) 所示:

$$f(t) = u(t) \quad (10)$$

根据交通控制系统模型, 建立被控区域车辆的动态守恒方程与信号灯时间变化之间的关系, 如式 (11) 所示:

$$n(t + 1) = F(f(t), t) \quad (11)$$

其中,  $F(f(t), t)$  是一个关于交通控制系统的二阶系统函数。

### 3 基于 PID 控制的交通边界控制方法

将 PID 控制运用到交通边界控制上, 对缓解被控区域车辆拥堵以及提升道路的通行效率有很好的效果<sup>[19]</sup>。

首先, 通过被控子区域内的车辆检测器获取实时的路网内部车辆的数据, 确定是否发生拥堵, 以拥堵区域相邻的交叉口为控制点, 将这些点虚拟连接起来, 形成一个被控子区域的闭合控制区域<sup>[20]</sup>。边界控制示意图如图 3 所示, 在确定被控子区域 1 后, 依据交通宏观基本图理论, 将被控子区域 1 的车辆数维持在该区域宏观基本图中  $N_c$  附近; 将控制的参考值设置为被控子区域宏观基本图的车辆最佳累积值, 通过 PID 控制器的控制方法限制进入拥堵区的车流量, 使得路网中累积车辆数快速趋近于参考值, 并且稳定在参考值附近。

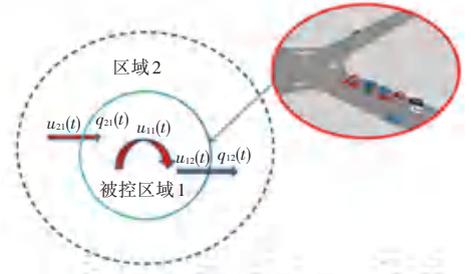


图 3 边界控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of boundary control

在交通管理中, 特别是在宏观区域, PID 控制可以用于调整交通流, 优化整个被控子区域的交通运行。通常涉及到交通信号灯、车道指导、公共交通工具的调度等多方面的控制。在宏观区域交通控制中, 状态可以包括整体交通流量、平均车速、拥堵情况等, 这些状态的监测是通过被控区域传感器进行的<sup>[21]</sup>。为了建立交通宏观区域中以控制信号灯的时间变化为输入、累积车辆数为输出的 PID 控制系统, 定义系统的状态变量为被控区域内部车辆的累积数, 参考值为期望达到的累积车辆数目标, 这一目标数量是根据被控子区域的交通宏观基本图设定的。PID 交通边界控制方法如图 4 所示。

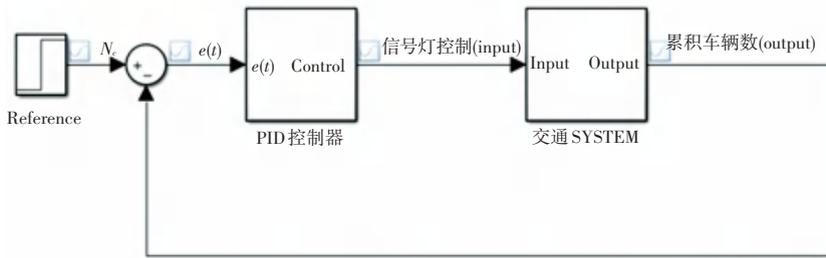


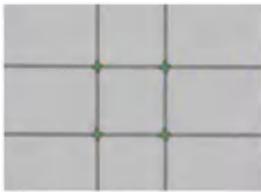
图4 PID 交通边界控制方法

Fig. 4 PID traffic boundary control method

## 4 案例验证

### 4.1 路网描述与宏观基本图获取

通过德国 PTV 公司开发的 VISSIM 交通模拟仿真软件建立一个  $2 \times 2$  的均质路网如图 5 所示,所有内部的路段长度为 250 m,路网周边设置了 12 个控制节点,每个交叉口的上游路段设置数据采集点。为了模拟高峰时段被控路网的交通状态,70%的起点在控制节点外的路网上,70%的目的地将要在被控区域内部。另外 30% 的流量需求是起点在被控区域内部,终点也是在控制区域内部。

图5  $2 \times 2$  仿真路网示意图Fig. 5  $2 \times 2$  homogeneous grid network used for simulation

通过设置在路网中的数据采集点和车辆动态方程,在 VISSIM 交通仿真软件中采用一个单峰的高峰期时段来模拟拥堵;设置 8 个不同的随机种子,对路网进行多次仿真,将数据进行处理,得到被控路网的交通宏观基本图,如图 6 所示。

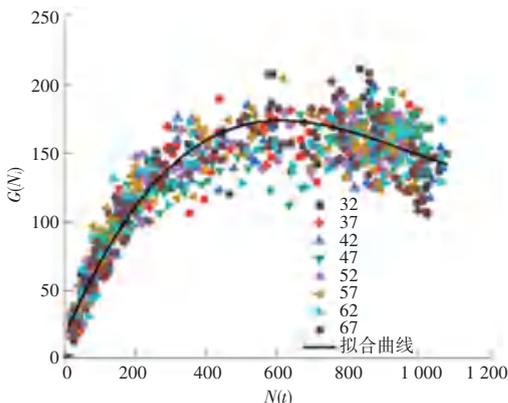


图6 被控区域交通宏观基本图

Fig. 6 Macroscopic fundamental diagram in the controlled area

### 4.2 鲁棒性分析

根据仿真数据,获取的被控区域的交通宏观基本图的  $N_c$  值为 600,因此将参考值  $r(t)$  设置为 600,在 MATLAB 中的 PID 控制器中进行仿真。当仅仅使用比例参数 ( $P$ ) 进行控制如图 7 所示,交通流系统稳态误差始终无法到 0,所以仅仅通过比例控制无法消除系统最后的稳态误差。使用比例微分和积分控制器联合对系统进行控制时,如图 8 所示,可以看出,系统的输入最终稳定在参考值附近且稳态误差最终趋向于 0,系统是稳定可控的。

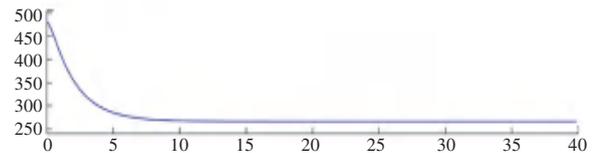
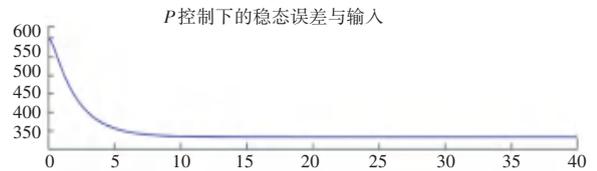
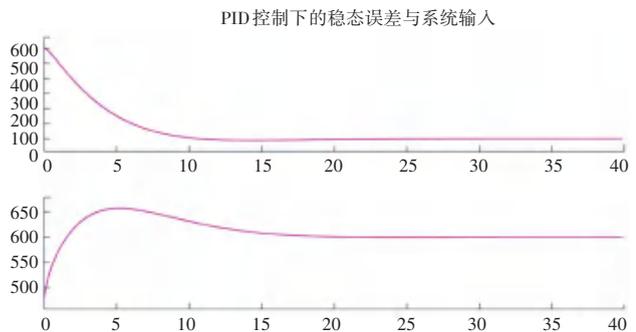
图7 仅用  $P$  控制的系统Fig. 7 A system controlled only with  $P$  control

图8 PID 控制的系统

Fig. 8 PID controlled system

### 4.3 仿真结果与分析

根据交通宏观基本图最佳车辆累积数值  $N_c$ ,利用 VISSIM 软件进行仿真,得到无控制下的路网车

辆累积数值图和PID控制下的路网车辆累积数值图,如图9所示。仿真结果表明,基于PID控制下的路网车辆累积数波动较为平稳,当车辆累积数值到达 $N_c$ 附近,PID控制可以用于调整信号灯的时序,控制进入路网内部的车辆,缓解路网内部的拥堵。无控制下的累积车辆数突破路网的最佳车辆累积数值产生拥堵。

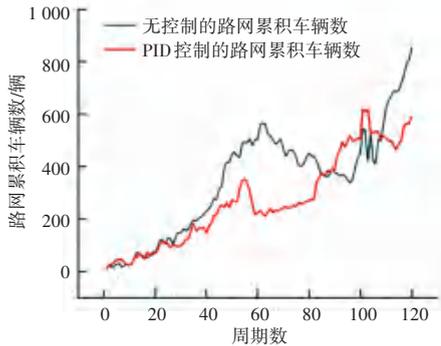


图9 路网车辆累积数

Fig. 9 Accumulated number of vehicles in the road network

## 5 结束语

本文利用交通宏观基本图的特有属性,当被控区域发生交通拥堵时,采用PID控制方法控制信号灯,限制进入被控区域的车流量,使被控区域内部的累计车辆数能够稳定在交通宏观基本图最佳累积值附近。在实际应用中,PID参数需要根据被控区域路网的特定情况进行适当调整,通过不断地监测路网的交通情况,实现更有效的交通流管理。

## 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] 刘小明,唐少虎,朱风华,等. 基于MFD的城市区域过饱和交通信号优化控制[J]. *自动化学报*, 2017, 43(7): 1220-1233.

[3] GEROLIMINIS N. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008, 42(9): 759-770.

[4] KEYVAN E M. Macroscopic network-level traffic models: Bridging fifty years of development toward the next era [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 131: 103334.

[5] LODER A. A functional form with a physical meaning for the macroscopic fundamental diagram [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 137: 119-132.

[6] 丁恒,周静文,郑小燕,等. 交通发生吸引源集聚影响下路网宏观基本特性[J]. *物理学报*, 2020, 69(7): 127-137.

[7] ABOUDOLAS K. Perimeter and boundary flow control in multi-reservoir heterogeneous networks [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2013, 55: 265-281.

[8] HADDAD J. Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: A model predictive approach [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 14(1): 348-359.

[9] HAJIAHMADI M, HADDAD J, DE SCHUTTER B. Optimal hybrid perimeter and switching plans control for urban traffic networks [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 23(2): 464-478.

[10] ZHENG Z. Adaptive perimeter control for multi-region accumulation-based models with state delays [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 137: 133-153.

[11] MOHAJERPOOR R.  $H_\infty$  robust perimeter flow control in urban networks with partial information feedback [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 137: 47-73.

[12] GUO Y, YANG L, HAO S, et al. Perimeter traffic control for single urban congested region with macroscopic fundamental diagram and boundary conditions [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, 562: 125401.

[13] YILDIRIMOGLU M. Hierarchical control of heterogeneous large-scale urban road networks via path assignment and regional route guidance [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 118: 106-123.

[14] 王鹏,李艳雯,杨迪,等. 基于层级控制的宏观基本图交通信号控制模型[J]. *计算机应用*, 2021, 41(2): 571-576.

[15] 傅惠,王叶飞,陈赛飞. 面向宏观基本图的多模式交通路网分区算法[J]. *工业工程*, 2020, 23(1): 1-9.

[16] SIRMATEL I I, TSITSOKAS D, KOUVELAS A. Modeling, estimation, and control in large-scale urban road networks with remaining travel distance dynamics [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 128: 103157.

[17] AMBUHL L, LODER A, BLIEMER M C J. A functional form with a physical meaning for the macroscopic fundamental diagram [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 137: 119-132.

[18] 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.

[19] HADDAD J, IOSLOVICH I. Optimal feedback control for a perimeter traffic flow at an urban region [C]//Proceedings of 2014 11<sup>th</sup> International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO). IEEE, 2014: 14-20.

[20] PAPAGEORGIOU M. Urban congestion gating control based on reduced operational network fundamental diagrams [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 33: 74-87.

[21] FU Y, Li S, YANG L. Robust perimeter control design for two urban regions with sampled-data and input saturation [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 9(1): 86-108.