

张立立^{1,2} 姚迪¹ 王芳¹ 李晶¹ 赵琦² 于沛³

城市道路交通主动控制系统与模型设计

摘要

为实现城市道路管控的智能化,缓解交通拥堵,研究和设计了城市道路交通主动控制系统.系统由4个子系统构成,其中云-边-端支撑子系统是计算、通信和存储的基础,可视化软硬件在环子系统是指挥决策与演练的关键,实时控制子系统和实时仿真子系统是道路主动控制的核心,用以保障交通控制的实时性和先进性.系统采用基于时空资源分配的主动控制模型,将传统以周期、绿信比调节为核心的交叉口信号被动控制转变为车道可变、相位相序可调且具有链状连接特性的交叉口主动控制.实际数据仿真分析表明,系统的主动控制能够有效降低交叉口通行车辆的总行程时间和平均排队长度.

关键词

城市道路交通;信号控制系统;主动控制算法;实时控制;实时仿真;可视化;云计算;边缘计算

中图分类号 U491.1

文献标志码 A

收稿日期 2021-08-21

资助项目 国家重点研发计划(2017YFC0821102);北京市自然科学基金(4214070);北京市科学技术协会2021—2023年度青年人才托举工程项目;北京市教育委员会科技计划(KM201910017006, KM202010017011);北京石油化工学院交叉科研探索项目(BIPTCSF-006);北方工业大学北京城市治理研究基地(筹)2021年度开放课题

作者简介

张立立,男,博士,讲师,研究方向为智能交通控制.zhanglili@bjpt.edu.cn

于沛(通信作者),讲师,主要研究方向为交通管理、应急管理.biaacd_yupe@163.com

0 引言

作为理论与技术创新应用的重要领域,城市道路交通长期得到国内外学者的关注,其中城市道路交通控制作为保障居民出行安全、出行效率和出行舒适度的主要措施更是成为该领域研究的重点^[1].智能交通控制系统是实现先进交通控制算法、缓解交通拥堵的重要支撑^[2].以SCATS^[3]、SCOOT^[4]为代表的国外交通控制系统已经发展几十年,并已广泛应用.国内智能交通控制系统的研究主要集中在控制方法层面,形成了三类典型交通控制研究方向:以现代控制理论为基础,以交叉口为被控对象构建数学模型,利用控制理论中的经典方法进行控制被称为基于模型的交通控制^[5-7];交通系统的复杂性导致以交叉口为核心的被控对象的数学模型难以有效构建,所以数据驱动的思想被引入交通控制领域,即利用系统的输入输出数据实现控制与决策^[8-9];城市交通控制的建模复杂性、数据种类和规模丰富性和交通拥堵的迫切性为人工智能技术的应用提供了场景支撑,基于人工智能的交通控制理论与方法被提出并逐渐成为主流^[10-11].考虑到道路交通的“时间线上‘车占用物理空间’这一‘实体资源问题’”^[12]从未改变的本质情况,城市道路交通控制归根到底是一个对道路时空资源分配的控制问题.上述三类典型交通控制大多建立在传统被动交通控制理论基础之上,以相位、周期、绿信比为变量进行交通流的被动适应性控制,难以实现对道路时空资源的有效分配.为此,以提前性、预防性和主动性为特点,以预测交通流作为未来控制方案的研究对象,根据交通流形态实现控制策略的理念,研究人员提出了主动交通控制的概念^[13-14].

主动交通控制大多处在理论研究层面,实际系统开发和应用层面较少^[15-16].基于传统被动交通控制的系统如HT-UTCS系统^[17]采用三级分布式控制(点线面),为方案生成+专家系统式的自适应控制系统;Intellific系统^[18]提供实时方案选择的控制策略形式.随着车路协同等技术的发展,基于传统交通控制理论设计和研发的被动交通控制系统已难以适应交通管控需求,采用控制变量更为丰富的主动交通控制系统被广泛关注.基于此,本文研究和开发主动交通控制系统,以平行仿真、云计算、边缘计算等技术为基础设计系统各部分功能,并研究了采用时空资源分配的主动交通控制模型.

- 1 北京石油化工学院 信息工程学院,北京,102617
- 2 北方工业大学 城市道路交通智能控制技术北京市重点实验室,北京,100144
- 3 中国消防救援学院,北京,102202

1 主动控制系统

1.1 主动控制系统架构

城市道路主动交通控制系统 (Urban Traffic Active Control, UTAC) 对控制、仿真和计算具有较高要求,为此在设计系统时构建了 4 个子系统,包括实时控制子系统、实时仿真子系统、可视化软硬件在环子系统和云-边-端支撑子系统,如图 1 所示。

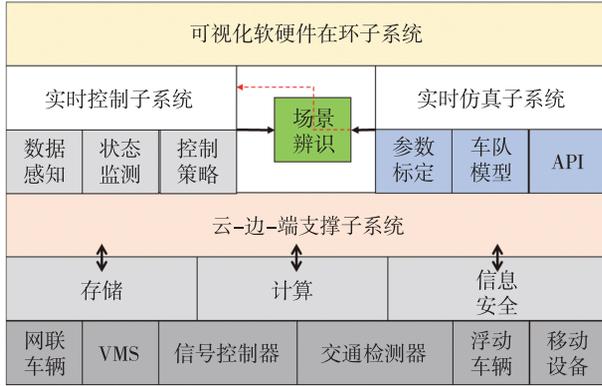


图 1 UTAC 主动控制系统总体架构

Fig. 1 Overall architecture of urban traffic active control system

1) 在设计控制与仿真子系统时借鉴了平行系统理论的理念和国内部分城市交通管理者的需求,实时仿真子系统提供了对新型控制策略和交通管理理念的快速实现、验证和优化,实时控制系统提供了对于被验证控制策略的现场执行,并通过可视化软硬件在环系统有效地连接了实时控制子系统与实时仿真子系统。

2) 可视化软硬件在环系统作为桥梁和展示的途径为管理者和研究人员提供了解城市道路交通的宏观视角。其中实时控制子系统和实时仿真子系统是 UTAC 的基础,可视化软硬件在环系统可以模拟控制策略和交通状态,所采用的数据可以是现场的实时数据,使它成为现实交通的一种映射;同时也可以采用实时仿真子系统的的结果,使可视化软硬件在环系统成为仿真交通的一种呈现。城市交通的管理者,可以在宏观的视角发现和甄别交通控制效果,也可以构建不同的交通场景测试新型的控制策略。

3) 云-边-端支撑子系统,利用虚拟化技术提供具有弹性的存储、计算和信息安全能力,尤其系统还设计了 GPU 资源,可以为人工智能技术的应用提供算力支持。边缘计算是作为支撑未来城市道路交通关键节点被设计的,主要是提供信息安全和现场计算的能力。需要说明的是未来城市交叉口将是自动

驾驶、车联网、公共交通、移动出行等各类交通场景数据汇聚的关键节点,因此提供边缘侧的信息安全与计算能力是非常重要的。

1.2 实时控制子系统

不同于欧美等发达国家,中国交通出行需求具有地域特点,机动车为主和非机动车与机动车混合的交通出行方式同时存在。为此 UTAC 中的实时控制子系统也充分考虑到这一特点,提供多种被控对象和控制目标的选择,并且根据这一特点可能出现的交通需求情况,设计了两类控制算法库:一类为传统交通控制算法,如干线绿波控制、单点自适应控制、防溢流控制、多时段定时控制和特殊灯色控制等控制算法;另一类是主动控制算法。控制策略是支持多种检测数据类型的,包括地磁检测器、广域雷达检测器、视频检测器和浮动车检测器,考虑到评估的重要性还设计了失衡指数、饱和指数等评价指标集合以提供更直观和合理的控制策略评价反馈,并且系统提供 VPN 在线升级与备份和信号控制配时方案数据的校验保护机制,其中在线升级的设计灵感来源于智能手机的在线升级设计和中国部分城市交通管理部分在以往的系统升级中出现的各类问题和经验,信号控制配时方案数据的校验保护机制的设计能有效阻止因为工作人员疏忽和不专业出现配时方案异常导致的交通安全问题,如图 2 所示。

1.3 实时仿真子系统

实时仿真子系统^[19]以快速分析和验证新型的信号控制策略为目标,因此不同于微观仿真软件 VISSIM、PARAMICS 和宏观规划仿真软件 TransModeler^[20],它以中观视角的交通流为仿真主体,主要仿真交通流在控制策略影响下的结果,以此来促进控制策略的迭代优化。为了实现在仿真时交通流的可视化、交通流的动力学参数标定和路网基础参数标定等任务,仿真驱动引擎的设计参考了 SUMO 仿真软件^[21]。

仿真参数自动标定:在设计该实时仿真子系统时主动忽略了单个车辆的动力学特性和基于人工的仿真参数标定,并且该系统采用检测器数据和 GIS 数据自动标定包括静态数据(道路属性:道路长度、车道宽度、交叉口形状等)和动态数据(车型比例、车速分布、转向比例、车头时距等),同时交通流特性和跟驰特性基于历史检测数据累积,实时检测数据修正得到。

先进控制策略的实现:实时仿真子系统提供了

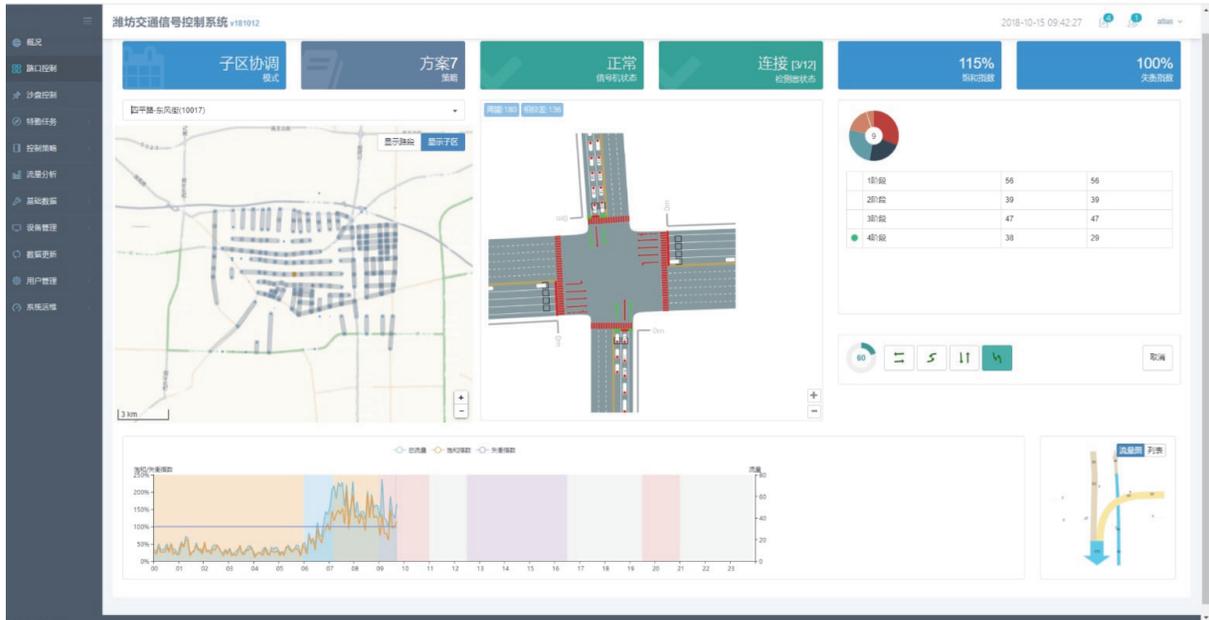


图2 实时交通控制系统

Fig.2 Real-time traffic control system

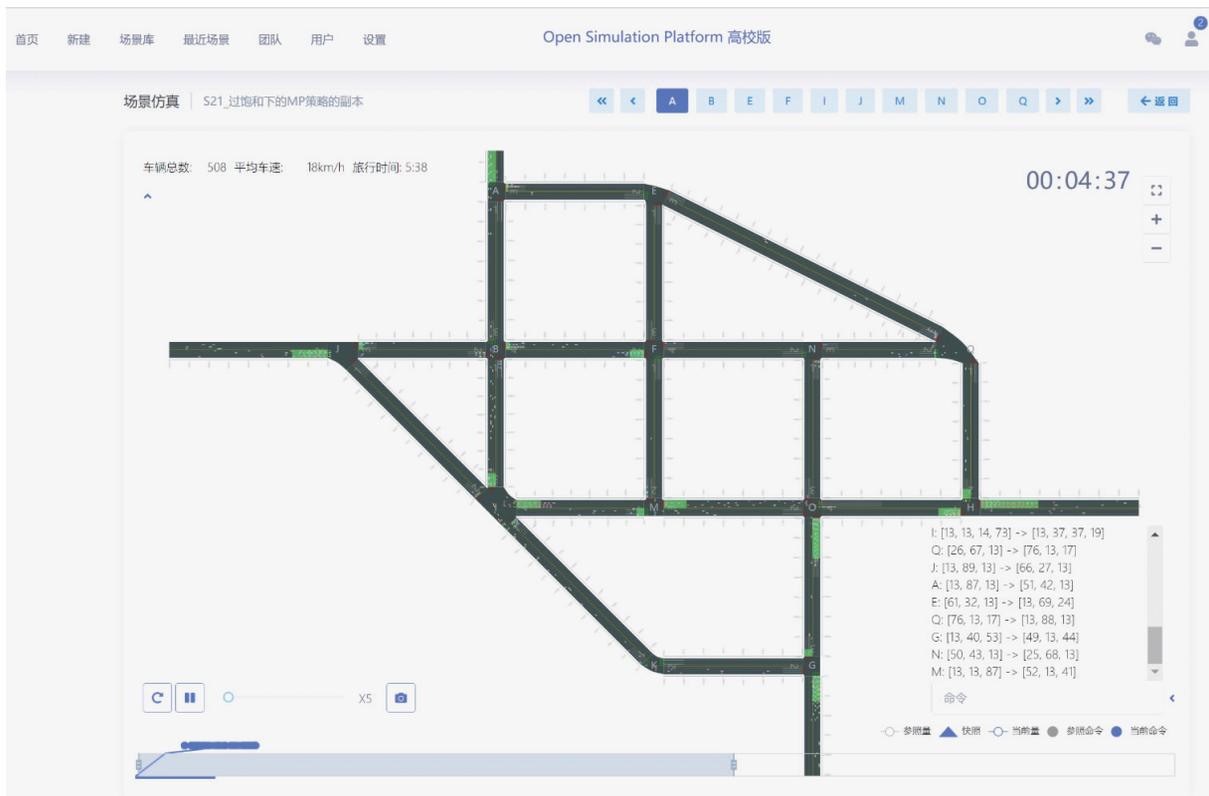


图3 实时交通仿真系统

Fig.3 Real-time traffic simulation system

针对新的控制策略开发的良好支持.将检测数据封装为标准的输入输出变量,将信号控制、车辆、可变标志等定为控制变量保存在数据库中.针对不同的

场景设计控制策略,利用平行仿真架构实现实时仿真子系统与实时控制子系统的交互,当新的控制策略被证明为可靠时,可以直接推送到实时控制子系

统中,并在恰当的时机开始在现实的环境中执行。

2 基于时空资源分配的主动控制模型

从道路交通时间线上“车占用物理空间”这一实体资源问题出发,城市道路交通控制归根结底是一个对道路时空资源分配的控制问题.以广义交通控制理念为核心,建立主动控制模型,将传统以周期、绿信比调节为核心的交叉口信号被动控制转变为车道可变、相位相序可调且具有链状连接特性的交叉口主动控制.城市交叉口交通控制中涉及的时空变量包括车道、相位、相序、相位绿灯时间共4类,在主动控制模型构建时充分考虑4类变量。

如图4交叉口由内部冲突区域和上下游连接路段组成.设交叉口的连接路段集合中的路段 j, a 的状态方程为

$$n_{j,a}(k+1) = n_{j,a}(k) + q_{j,a,in}(k) - q_{j,a,out}(k), \quad (1)$$

式(1)表示采样周期 $k+1$ 内路段 j, a 的车辆数,等于采样周期 k 内路段 j, a 上的车辆数与上游路段流向 j, a 的车辆数和流出 j, a 的车辆数的差的和.其中: $n_{j,a}(k)$ 表示路段 j, a 在采样周期 k 的车辆数; $q_{j,a,in}(k)$ 表示采样周期 k 内上游路段发送给路段 j, a 的车辆数; $q_{j,a,out}(k)$ 表示采样周期 k 内路段 j, a 发送给下游路段的车辆数。

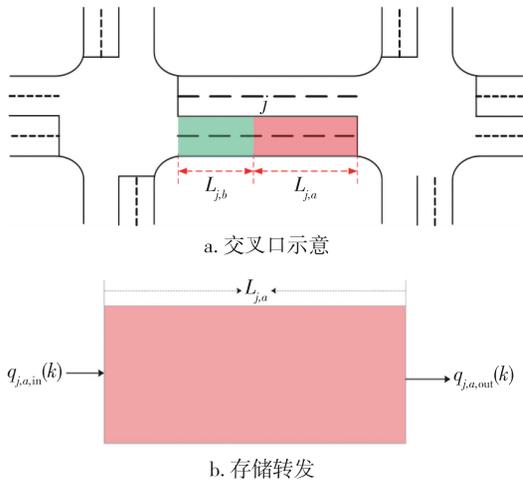


图4 交叉口交通控制模型

Fig. 4 Model of traffic control at intersections

为了能够准确表征车道属性的动态特性,提出车道基因概念,即通过将车道的转向属性描述为控制变量予以输出.如图5所示,车道的转向属性包括左转、直行和右转,分别用 L, T 和 R 表示,即车道的基因的基本组成单元为 L, T 和 R 。

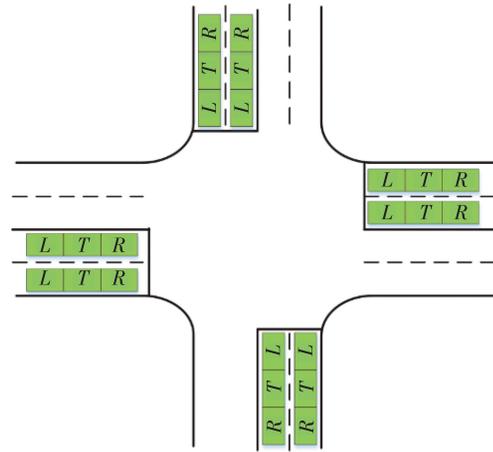


图5 交叉口车道基因组

Fig. 5 Lane genomes at intersections

进一步,交叉口进口车道转向属性与下游连接路段组成交叉口调度车流的最小单元.如图6所示,路段 j, a 为上游路段,路段 o 为下游路段;路段 j, a 的车道用 $R_{j,a} = \{r, r = 1, 2, \dots, m\}$ 表示,其中 m 表示路段 j, a 包含的车道数; $F_{j,a}(k) = \{f_r^{(j,a)}(k)\}_{r=1,2,\dots,m}$ 表示采样周期 k 内车道基因表达组合,其中 $f_r^{(j,a)}(k)$ 表示车道 r 的基因表达; $f_r^{(j,a)}(k) = \{G_u^{(j,a \rightarrow r)}(k)\}_{u=1,2,3}$,其中 $G_u^{(j,a \rightarrow r)}(k)$ 表示车道 r 的基因,一个车道由3个基因组成,分别为 G_1, G_2, G_3 ,其中有 $G_1 \rightarrow L$,表示第1个基因映射为左转, $G_2 \rightarrow T$,表示第2个基因映射为直行, $G_3 \rightarrow R$,表示第3个基因映射为右转,并且有

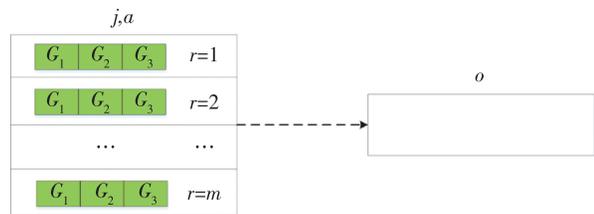
$$G_u^{(j,a \rightarrow r)}(k) = \begin{cases} 0, & \text{基因没有表达,} \\ 1, & \text{基因表达.} \end{cases}$$


图6 路段 j, a 的车道基因及下游路段连接

Fig. 6 Lane genes and downstream link of section j, a

通过上述描述,可以建立车道基因的调控变量:

$$\Gamma_{j,a}(k) = \{\tilde{\omega}_{j,a,o}(k)\}_{o=1,2,\dots,w_{j,a}(k)}, \quad (2)$$

其中: $\Gamma_{j,a}(t)$ 表示调控变量集合; $\tilde{\omega}_{j,a,o}(k)$ 表示调控变量,它是关于车道数量的函数,由式(3)可得;

$$w_{j,a}(k) = \sum_{u=1}^3 G_{F_{j,a}(k) [\cup] (u)}, n_{j,a}(k) \text{ 表示路段 } j, a \text{ 到路段 } o \text{ 的连接数量,其中 } F_{j,a}(k) [\cup] = f_{r=1}^{(j,a)}(k) \cup f_{r=2}^{(j,a)}$$

$(k) \cdots \cup f_{r=m}^{(j,a)}(k), G_{F_{j,a}(k)} [\cup]^{(1)}$ 表示车道组基因表达并集的第 1 个基因, $G_{F_{j,a}(k)} [\cup]^{(2)}$ 表示车道基因表达并集的第 2 个基因, $G_{F_{j,a}(k)} [\cup]^{(3)}$ 表示车道基因表达并集的第 3 个基因.

$$\begin{cases} \tilde{\omega}_{j,a,o}(k) = \frac{\omega_o^{j,a}(k)}{m}, \\ \omega_o^{(j,a)}(k) = \left\{ \sum_{i=1}^m G_{i,u}^{(j,a \rightarrow o)} \right\}_{u=1,2,3}, \end{cases}$$

s.t.

$$0 < \tilde{\omega}_{j,a,o}(k) \leq 1, \quad (3)$$

式中: $\omega_o^{(j,a)}(k)$ 表示车道基因表达后,相同基因的数量.

$q_{j,a,out}(k)$ 可变化为 $q_{j,a,out}(k) = \sum_{i=1}^m q_{j,a,m}(k) = \sum_{i=1}^m \tilde{\omega}_{j,a,o}(k) \cdot S_{j,a} \cdot g_{j,a,o}(k)$,表示当前相位绿灯方式以饱和流率速度放行,其放行的下游车道由调控变量 $\tilde{\omega}_{j,a,o}(k)$ 决定,因此将调控变量式(2)代入交叉口存储转发模型式(1)可得主动控制模型:

$$n_{j,a}(k+1) = n_{j,a}(k) + q_{j,a,in}(k) - \min\{w_{j,a}(k), w_{j,a}^{Xx}(k)\} \sum_{o=0} \tilde{\omega}_{j,a,o}(k) \cdot S_{j,a} \cdot g_{j,a,o}(k), \quad (4)$$

式中: $S_{j,a}$ 表示路段通行能力; $g_{j,a,o}(k)$ 表示采样周期 k 内路段 j, a 所在相位的绿灯时间,且有 $g_{j,a,o}(k) \geq g_{j,a,o,min}$; 绿灯时间 $g_{j,a,o}(k)$ 与调控变量 $\phi_{j,a,o}(k)$ 中的 o 和相位数量有关,因此可由 $w_{j,a}^{Xx}(k)$ 表示; $\min\{w_{j,a}(k), w_{j,a}^{Xx}(k)\}$ 表示上下游路段连接与相位数量并不相同,原因是 $\begin{cases} w_{j,a}(k) \geq 1, \\ w_{j,a}^{Xx}(k) \geq 0, \end{cases}$ 即上下游不能没有连接,但相位可以在采样周期 k 内不隶属于相序.

3 仿真分析

为了验证 UTAC 主动控制系统的主动控制模型的有效性,利用系统的实时仿真子系统进行仿真对比验证.采用山东省潍坊市胜利东街与四平路交叉口实际流量数据进行仿真验证.该交叉口为该地区较为核心路口,东西向为双向 8 车道、南北向为双向 6 车道,如图 7a 所示,交叉口采用的原始配时如图 7b 所示,其中周期为 160 s.流量数据由安装在车道上的地磁检测器获取,交叉口的固定配时由潍坊市交通支队提供.

单次仿真时间为 36 000 s,进行 10 次仿真并取

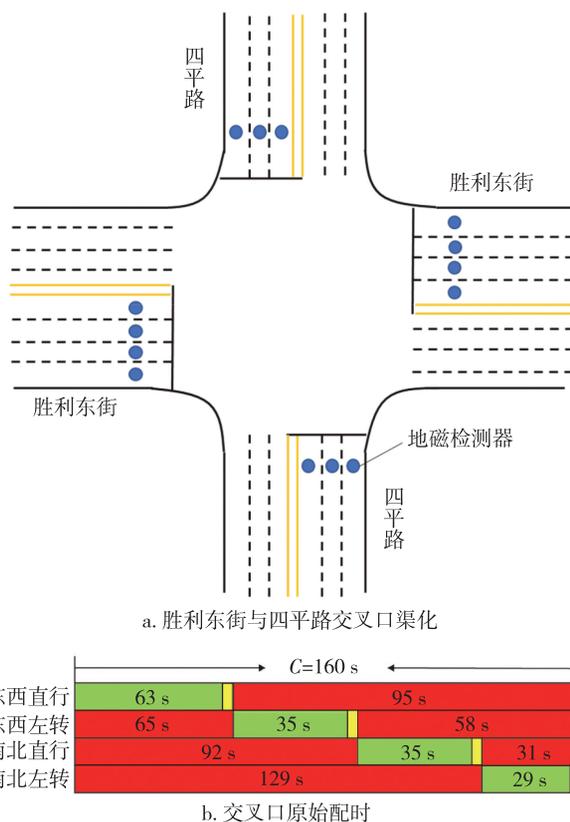


图 7 山东省潍坊市胜利东街与四平路交叉口

Fig. 7 Intersection of Shengli East Street and Siping Road of Weifang, Shandong province, intersection channelization (a) and original timing to pass the intersection (b)

平均值.评价参数选择交叉口总行程时间和总排队长度,数据采样间隔为 600 s.

如图 8 所示,对交叉口通过车辆的总行程时间和平均排队长度进行对比.采用主动控制时交叉口通过车辆的总行程时间低于定时控制时交叉口通过车辆的总行程时间;采用主动控制时交叉口的平均排队长度低于定时控制时交叉口的平均排队长度,可知主动控制较定时控制具有更好的控制效果.但在图 8b 中仿真时间为 8 000 s 时定时控制下交叉口平均排队长度低于主动控制,原因是由于交叉口输入流量变化较大导致采用主动控制调整时交通流需要一定的适应时间.

4 结论

区别于传统交通信号控制系统,UTAC 采用主动控制、平行仿真等技术实现控制与仿真的深度交互和控制策略的修正与部署应用.针对传统的被动交通控制策略控制变量不够丰富的问题,UTAC 采用了时空资源分配主动控制模型,该算法能够扩展

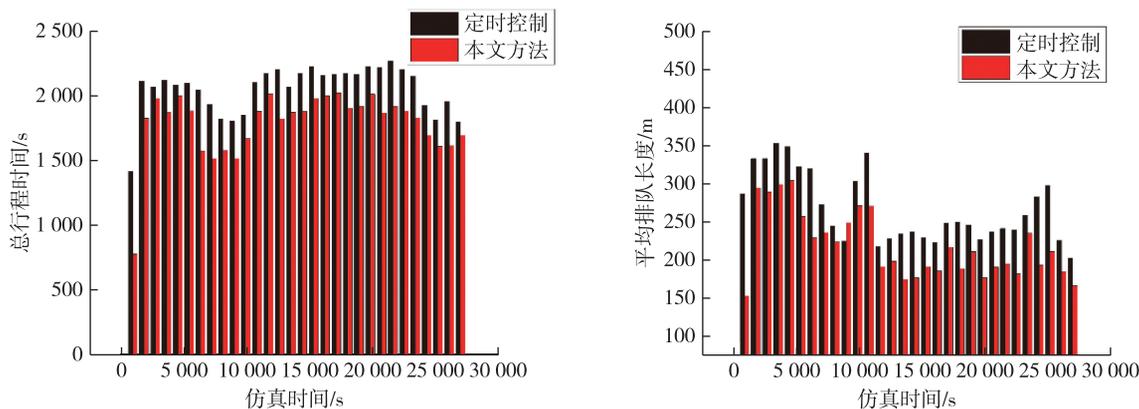


图8 定时控制与本文控制效果对比

Fig. 8 Comparisons between timing control and the proposed active control, (a) total delay time and (b) average queue value

控制变量的维度.但在本文中只采用了单交叉口进行仿真对比验证,虽然与传统固定控制方式相比具有明显优势,但仍需将该系统及仿真应用到更大规模的路网控制中进行有效性检验.

致谢: 本文向提供仿真验证实际数据的山东省潍坊市交通警察支队表示感谢.

参考文献

References

- [1] 张立立,王力,张玲玉.城市道路交通控制概述与展望[J].科学技术与工程,2020,20(16):6322-6329
ZHANG Lili, WANG Li, ZHANG Lingyu. Urban road traffic control overview and prospect[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(16): 6322-6329
- [2] 李力,王飞跃.地面交通控制的百年回顾和未来展望[J].自动化学报,2018,44(4):577-583
LI Li, WANG Feiyue. Ground traffic control in the past century and its future perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(4): 577-583
- [3] 陆化普.智能交通系统主要技术的发展[J].科技导报,2019,37(6):27-35
LU Huapu. Progress of intelligent transportation system key technologies[J]. Science and Technology Review, 2019, 37(6): 27-35
- [4] 王明军,李志恒,张毅.基于UTC/SCOOT的城市交通控制管理平台设计与应用[J].公路交通科技,2006(6):116-120
WANG Mingjun, LI Zhiheng, ZHANG Yi. Design and application of traffic control management platform based on UTC[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006(6): 116-120
- [5] 杨文臣,张轮,田毕江,等.城市道路交通信号自适应控制方法研究综述[J].交通科技,2017(4):152-157
YANG Wenchen, ZHANG Lun, TIAN Bijiang, et al. Urban adaptive traffic signal control methods: a survey of the state of the art[J]. Transportation Science & Technology, 2017(4): 152-157
- [6] 董海龙,汤旻安,程海鹏.非均衡交通流五岔路口交通信号智能控制研究[J].郑州大学学报(工学版),2017,38(1):68-73
DONG Hailong, TANG Minan, CHENG Haipeng. Research on intelligent control of traffic signal for five-road intersection of unbalanced traffic flow[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2017, 38(1): 68-73
- [7] 常玉林,郑献予,张鹏.基于相交道路左转饱和和交通量的MULTIBAND改进模型[J].郑州大学学报(工学版),2018,39(1):29-35
CHANG Yulin, ZHENG Xianyu, ZHANG Peng. An advanced multiband model based on saturation traffic volume of left turning of crossing road[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2018, 39(1): 29-35
- [8] 李永强,李康,冯远静.数据驱动交通响应绿波协调信号控制[J].控制理论与应用,2016,33(5):588-598
LI Yongqiang, LI Kang, FENG Yuanjing. Data-driven traffic-responsive green wave coordinated signal control[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(5): 588-598
- [9] 郝建根,侯忠生,柳向斌.基于多参数规划的单交叉口排队长度均衡控制[J].控制与决策,2013,28(4):595-599
HAO Jiangen, HOU Zhongsheng, LIU Xiangbin. Vehicle queuing length balanced-control of the signalized isolated intersection via multi-parametric programming[J]. Control and Decision, 2013, 28(4): 595-599
- [10] 刘义,何均宏.强化学习在城市交通信号灯控制方法中的应用[J].科技导报,2019,37(6):84-90
LIU Yi, HE Junhong. A survey of the application of reinforcement learning in urban traffic signal control methods[J]. Science and Technology Review, 2019, 37(6): 84-90
- [11] Li L, Lü Y S, Wang F Y. Traffic signal timing via deep reinforcement learning[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(3): 247-254
- [12] ITS智能交通.对话ITSC首席科学家王笑京:智慧交通的变与不变[EB/OL]. [2021-08-06]. <http://www.geekpark.net/news/248646>
- [13] Zhang L L, Zhao Q, Wang L, et al. Research on urban

- traffic signal control systems based on cyber physical systems [J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020:8894812
- [14] Zhang L L, Zhao Q, Wang L, et al. Urban intersection signal control based on time-space resource scheduling [J]. IEEE Access, 2021, 9:49281-49291
- [15] 孙芙灵.德国主动交通流管控系统调研(上)[J].中国交通信息化,2021(3):86-89
- [16] 孙芙灵.德国主动交通流管控系统调研(下)[J].中国交通信息化,2021(5):100-103
- [17] 公安部交通管理科学研究所.交通信号控制系统[M].北京:公安部交通管理科学研究所,2008
Traffic Management Research Institute of the Ministry of Public Security. Traffic signal control system [M]. Beijing: Traffic Management Research Institute of the Ministry of Public Security, 2008
- [18] 赛文交通网.中国交通信号控制系统的技术变迁[EB/OL]. [2021-08-01]. http://www.7its.com/html/2018/dongtai_1029/7584.html
- [19] Wang L, Zhang L L, Zhang L Y, et al. On-line simulation system of urban road traffic signal control based on scene driven [C]. 2019 IEEE 8th Data Driven Control and Learning Systems Conference, 2019:1213-1218
- [20] Lu L, Yun T L, Li L, et al. A comparison of phase transitions produced by PARAMICS, TransModeler, and Vissim [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2010, 2(3):19-24
- [21] Codeca L, Frank R, Faye S, et al. Luxembourg SUMO traffic (LuST) Scenario; traffic demand evaluation [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017, 9(2):52-66

Design on active control system and model of urban road traffic

ZHANG Lili^{1,2} YAO Di¹ WANG Fang¹ LI Jing¹ ZHAO Qi² YU Pei³

1 College of Information Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617

2 Beijing Key Laboratory of Urban Intelligent Traffic Control Technology, North China University of Technology, Beijing 100144

3 China Fire and Rescue Academy, Beijing 102202

Abstract This paper proposes an active control system for urban road traffic, with the purpose to provide a new way to realize the intelligent control of urban traffic and alleviate traffic congestion. The system is composed of four subsystems. The cloud-side-end support subsystem constitutes the basis of computing, communication and storage. The visualized hardware- and software-in-the-loop subsystem is the key to command, make decision, and exercise in traffic control. The real-time control subsystem and real-time simulation subsystem constitute the core of traffic control operation, which can guarantee the real-time and advanced traffic control. Instead of traditional passive control of intersection signals relying on cycle and green ratio adjustment, the system adopts an active control of intersections characterized with variable lanes, adjustable phase sequence and chain connection features. Experimental analysis shows that the system can effectively reduce the total delay time and average queue value of vehicles waiting on the traffic lights at the intersection.

Key words urban road traffic; signal control system; active control algorithm; real-time control; real-time simulation; visualization; cloud computing; edge computing