



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



流量处理能力均衡的无模型自适应迭代学习交通信号控制

王洪力, 侯忠生

引用本文:

王洪力, 侯忠生. 流量处理能力均衡的无模型自适应迭代学习交通信号控制[J]. *控制与决策*, 2024, 39(9): 3033–3042.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0600>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

区分交通流模式的混合服务路口信号控制策略

Signal control strategies of mixed service intersections to discriminate traffic flow patterns

控制与决策. 2021, 36(6): 1509–1515 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1520>

基于数据驱动的非线性网络系统自适应迭代学习控制

Data driven adaptive learning control of nonlinear network system

控制与决策. 2021, 36(6): 1523–1528 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1182>

高超声速飞行器间歇故障改进自适应容错控制

Improved adaptive fault-tolerant control of intermittent faults in hypersonic flight vehicle

控制与决策. 2021, 36(11): 2627–2636 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0483>

基于改进萤火虫算法的区域交通信号配时优化

Timing optimization of regional traffic signals based on improved firefly algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2829–2834 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1835>

具有未建模动态和输出约束的耦合系统的分散自适应控制

Decentralized adaptive control for interconnected systems with unmodeled dynamics and output constraints

控制与决策. 2018, 33(12): 2113–2121 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0933>

流量处理能力均衡的无模型自适应迭代学习交通信号控制

王洪力, 侯忠生[†]

(青岛大学 自动化学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对城市多交叉口系统具有强非线性、时变以及周期性等特点, 同时考虑道路固有容量以及道路拥堵缓解的迫切程度等因素, 在分布式控制架构下, 设计基于分散估计分散控制的无模型自适应迭代学习信号配时方案. 该方案通过实时调整各交叉口信号配时来调节各路口的流量, 使每个交叉口流量处理能力均衡, 从而提高道路资源的利用率, 达到缓解城市交通拥堵的目的. 最后, 通过仿真分析进一步验证了所提方案的有效性.

关键词: 多交叉口; 无模型自适应迭代学习控制; 流量处理能力均衡; 分散估计分散控制; 信号配时

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0600

引用格式: 王洪力, 侯忠生. 流量处理能力均衡的无模型自适应迭代学习交通信号控制 [J]. 控制与决策, 2024, 39(9): 3033-3042.

Model free adaptive iterative learning traffic signal control for balancing the intersection traffic flow

WANG Hong-li, HOU Zhong-sheng[†]

(School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: For the characteristics of urban multi-intersection systems, such as strong nonlinearity, time-varying and periodicity, at the same time considering factors such as the inherent capacity of the road and the urgency of alleviating road congestion, under a distributed control architecture, a model free adaptive iterative learning signal timing scheme based on decentralized estimation and decentralized control is designed. By adjusting the signal timing of each intersection in real time, the traffic processing of each intersection is adjusted, and the traffic processing capacity of each intersection is balanced. Furthermore, it can improve the utilization rate of road resources and alleviate urban traffic congestion. Finally, the effectiveness of the proposed scheme is further verified through simulation analysis.

Keywords: traffic jam; model free adaptive iterative learning control; traffic flow equilibrium; decentralized estimation decentralized control; signal timing

0 引言

随着社会经济的发展,城市机动车保有量急剧上升,城市交通拥堵问题愈发严重,因此,如何在现有交通基础设施下制定更加高效的交通信号控制策略,缓解城市交通拥堵是一项值得研究的工作.众所周知,城市交通多交叉口协调控制是城市交通信号控制系统成功应用的关键.城市道路信号控制系统分为定时控制、感应控制和区域自适应控制^[1].传统的定时控制是根据交叉口局部历史交通数据进行信号配时,但对复杂多变的交通状况不具适应能力.感应控制则是根据交叉口车辆到达的实时信息来进行信号配时,但该方案未考虑路网交叉口之间的协调性,故可

能导致交通系统整体控制效果较差.区域自适应控制是依据区域交通环境变化自适应地调节控制系统交通信号配时,使系统工作在最优状态^[2-3],但该方案必须建立精确的交通系统模型,而多交叉口系统具有很强的非线性、内部的不确定性以及较强的外部干扰,建立精确的系统数学模型非常困难.

无模型自适应控制(model free adaptive control, MFAC)是一种典型的数据驱动控制方法^[4],其基本思想是利用动态线性化方法,基于伪偏导数(pseudo partial derivative, PPD)等新概念,建立一个与非线性系统输入/输出(input output, I/O)行为等价的动态线性化数据模型,然后根据该虚拟的数据模型,进行

收稿日期: 2023-05-06; 录用日期: 2023-09-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61833001).

责任编委: 关新平.

[†]通讯作者. E-mail: zhshhou@bjtu.edu.cn.

*本文附带电子附录文件,可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

控制系统设计与稳定性分析. MFAC方法可以仅利用受控系统的I/O数据实现被控系统的自适应控制^[5-6],在许多领域得到广泛应用^[7-9]. 迭代学习控制(iterative learning control, ILC)^[10]的概念于1978年被提出,并在1984年被正式描述为迭代学习控制理论^[11]. ILC可以从先前迭代的过程信息来更新当前循环的控制输入信号,使系统输出在迭代轴方向跟踪期望信号的效果越来越好,它是处理重复运行系统控制问题的一种有效控制方法^[12-15],同时也是典型的数据驱动控制方法之一. 这些数据驱动控制方法极大地拓展了控制理论的应用范围,已成为控制工程领域的重要工具.

无模型自适应迭代学习控制(model free adaptive iterative learning, MFAILC)^[16]是一种基于最优性能指标的迭代学习控制方法,本质上是迭代轴上的MFAC,它结合了MFAC和ILC各自的优点. MFAILC的被控对象是一般未知非线性非仿射系统,与MFAC相比, MFAILC沿着迭代轴而非时间轴对系统动力学进行线性化,然后基于优化方法进行控制系统设计,可以实现仅用系统I/O数据的无模型控制. 与传统ILC相比,它突破了传统最优ILC依赖模型,要求受控系统具有严格重复初始条件和严格相同期望轨迹的本质限制. 目前, MFAILC在理论研究与实际应用方面已有很多成果. 文献[17]提出了高阶无模型自适应迭代学习控制方案;文献[18]针对多智能体系统的包容控制问题,提出了一种新的MFAILC方案,并拓展到了迭代切换拓扑情况;文献[19]提出了基于MFAILC的城市交通信号控制方案,并设计了数据丢失补偿方法. 由于MFAILC方案具有数据驱动无模型自适应控制和迭代学习特征,非常适合在城市交通控制领域的实际应用.

流量处理能力(traffic processing ability, TPA)是由Wu等^[20]提出的一种新的拥堵评价指标,定义为道路输入能力与输入需求之差,用于描述道路当前的承载能力能否满足交通需求的程度. 与排队长度作为道路状态相比, TPA能够反映道路的容纳能力、交通资源利用率以及信号控制的协调程度. 因此,本文基于TPA的概念,提出使不同相位之间的TPA差趋于均衡的思想,充分利用绿灯时间,提高交通资源利用率.

目前针对城市路网信号控制策略的研究大多以道路排队长度作为反映交通状态的指标^[21-22],采用集中式的优化方案,且多数工作需要建立精确数学模型^[23-24]. 文献[25-26]设计了基于最大压力控制算法的交通控制策略,虽然考虑了道路下游容量的影响,但该方案依赖模型的精确建立. 众所周知,基于模型

的控制方案所得出的预测值与实际值之间可能存在误差. 文献[27]以TPA作为道路拥堵的衡量指标,很好地解决了道路固有容量对交通信号控制的影响,但是同样需要城市交通系统模型的精确建立. 文献[28]针对多区域城市交通路网设计了无模型自适应预测控制方案,但该方案未考虑城市交通突出的重复运行特征,是反馈控制方法,无论运行次数增加多少次,其控制效果都不能得到改进. 另外,该方案是集中式控制方法. 文献[29]研究了区域边界控制问题,同样未考虑道路的重复运行模式的问题. 文献[30]将MFAILC应用于异构城市道路网络的边界控制,以解决多区域城市交通系统的强耦合难以建模问题,但交通控制对象仅为进入和离开区域的交通流量宏观比率,并不是实际交通信号配时. 目前在实际应用中, SCOOT^[31]系统和SCATS^[32]系统应用最广. SCOOT需要建立交通系统模型,费时费力,且精确建模困难. SCATS系统虽然不需要建立交通系统模型,但它是一种实时选择式自适应控制,不能利用系统重复性运行特征,不具有学习能力,应用效果一般.

城市交通系统每天产生大量的交通数据没有被充分利用. 同时,由于交通系统的内部耦合复杂,集中式控制方案在大规模城市路网中的应用受到了计算复杂性和通信负担的限制. 因此,本文针对城市交通信号控制问题,提出基于多输入多输出(multi input multi output, MIMO)系统的分散估计分散控制型MFAILC(decentralized estimation and decentralized MFAILC, DED-MACILC)方案. 本文贡献如下:

1) 无需建立交通系统数学模型,仅利用系统I/O数据进行控制器设计,避免模型不精确以及未建模动力学等问题.

2) 针对城市道路多交叉口系统内部耦合严重,难以解耦处理,采用分散估计分散控制方案,可有效处理多交叉口之间的耦合问题,同时避免集中控制计算负担和通信瓶颈的限制.

3) 考虑城市道路交通系统重复性运行特征,具有迭代学习能力,随着系统运行次数的增加,系统控制性能逐步提高.

4) 提出基于TPA的均衡思想,该思想考虑道路固有容纳能力,避免不同相位TPA不均衡的情况.

1 两相位交叉口流量处理能力均衡思想

1.1 两相位交叉口流量处理能力模型

首先介绍本文城市道路交叉口动力学模型.

在城市交通路网中,如图1所示:从路口 n 到路口 m 的道路用有序数对 (n, m) 表示;从道路 (j, n) 到

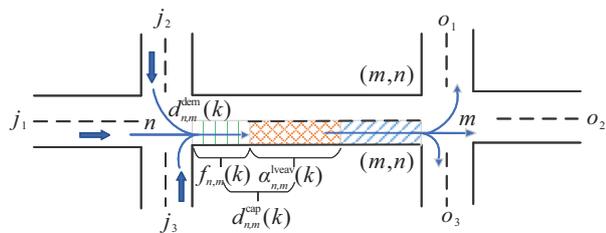


图1 道路中的交通流动态

(n, m) 的交通流用三元组 (j, n, m) 表示; 道路 (n, m) 上游路口和下游路口分别用集合 $J_{n,m}$ 和 $O_{n,m}$ 表示; $j \in J_{n,m}$ 为交叉口 n 的上游交叉口; $o \in O_{n,m}$ 为交叉口 m 的下游交叉口; $j_1 \sim j_3, n, m, o_1 \sim o_3 \in I$ 为不同交叉口; I 为路网交叉口集合; I_n^N 为交叉口 $n \in I$ 邻居交叉口集合. 本文采用文献[31]中的模型, 建模用到的变量如表1所示.

表1 建立模型所用变量

变量	物理意义
I	路网所有交叉口集合
I_n^N	交叉口 n 的邻居交叉口集合
$J_{n,m}$	道路 (n, m) 上游交叉口集合
$O_{n,m}$	道路 (n, m) 下游交叉口集合
C	信号周期/s
j	交叉口 n 上游交叉口
o	交叉口 m 下游交叉口
$g_{j,n,m}(k)$	k 周期的绿灯时间/s
$d_{n,m}^{dem}(k)$	k 周期内想要进入道路 (n, m) 的车辆数/veh
$d_{n,m}^{cap}(k)$	k 周期结束时道路 (n, m) 能容纳的车辆数/veh
$r_{n,m}(k)$	k 周期内道路 (n, m) 外部输入需求/veh
$s_{j,n,m}(k)$	交通流 (j, n, m) 饱和输出流量/(veh/s)
$\alpha_{j,n,m}^{leave}(k)$	交通流 (j, n, m) 在 k 周期内平均输出车流量/(veh/s)
$\alpha_{n,m}^{enter}(k)$	在 k 周期内进入道路 (n, m) 平均流量/(veh/s)
$f_{n,m}(k)$	k 周期初始前的空闲空间/veh
$M_{n,m}$	道路固有容纳能力/veh
$n_{n,m}(k)$	k 周期开始时道路 (n, m) 排队车辆数/veh
$P_{n,m}(k)$	k 周期开始时道路 (n, m) 的流量处理能力/veh

注1 本文中的交叉口模型仅用于产生交通数据, 不参与控制器设计.

1.1.1 道路输入需求

道路输入需求 $d_{n,m}^{dem}(k)$, 定义为在 k 周期内想要进入道路 (n, m) 的车辆数 (veh), 在图1中用蓝色箭头表示. 本文将道路 (n, m) 上游输出流量和路网外部输入流量近似为其输入需求, 公式如下:

$$d_{n,m}^{dem}(k) = \sum_{j \in J_{n,m}} C[\alpha_{j,n,m}^{leave}(k) + r_{n,m}(k)]. \quad (1)$$

其中: $r_{n,m}(k)$ 为 k 周期内来自路网外部的交通需求 (veh), 即 $d_{n,m}^{dem}(k)$ 除了上游交叉口流出的流量, 更多交通需求来自道路 (n, m) 两侧不同用地产生的出行需求 $r_{n,m}(k)$; C 为信号灯的周期 (s); $\alpha_{j,n,m}^{leave}(k)$ 为交通流 (j, n, m) 在 k 周期内的平均输出车流量 (veh/s), 本文

采用存储转发模型来计算, 公式为

$$\alpha_{j,n,m}^{leave}(k) = \frac{s_{j,n,m}(k)g_{j,n,m}(k)}{C}, \quad (2)$$

$s_{j,n,m}(k)$ 是交通流 (j, n, m) 饱和输出流量 (veh/s), $g_{j,n,m}(k)$ 是第 k 个周期的绿灯时长 (s).

1.1.2 道路输入能力

道路输入能力 $d_{n,m}^{cap}(k)$, 定义为在 k 周期结束时最多容纳的车辆数, 公式如下:

$$d_{n,m}^{cap}(k) = C\alpha_{n,m}^{leave}(k) + f_{n,m}(k). \quad (3)$$

其中: $C\alpha_{n,m}^{leave}(k)$ 表示在 k 周期内道路 (n, m) 由于车辆驶出而空出的新空间, 在图1中橙色交叉线区域所示; $\alpha_{n,m}^{leave}$ 为 k 周期内离开道路 (n, m) 的车流量 (veh/s), 基于存储转发模型, 可表示为

$$\alpha_{n,m}^{leave}(k) = \sum_{o \in O_{n,m}} \frac{s_{n,m,o}(k)g_{n,m,o}(k)}{C}. \quad (4)$$

式(3)中 $f_{n,m}$ 为 k 周期开始时刻的空闲空间 (veh), 如图1中竖线阴影部分所示, 公式为

$$f_{n,m}(k) = M_{n,m} - n_{n,m}(k). \quad (5)$$

其中: $M_{n,m}$ 表示道路 (n, m) 固有容纳能力 (veh); $n_{n,m}(k)$ 表示在 k 周期初始时道路的排队车辆数 (veh), 在图1中用斜线阴影部分表示.

1.1.3 流量处理能力

TPA 定义为道路的输入能力与输入需求的差. 本文用 $P_{n,m}(k+1)$ 表示道路 (n, m) 在 $k+1$ 周期开始时的 TPA, 并将其作为道路的状态. 根据定义有

$$P_{n,m}(k+1) = d_{n,m}^{cap}(k) - d_{n,m}^{dem}(k). \quad (6)$$

将式(3)~(5)代入(6)中得

$$P_{n,m}(k+1) = M_{n,m} - n_{n,m}(k) + C\alpha_{n,m}^{leave}(k) - d_{n,m}^{dem}(k). \quad (7)$$

将时间后退一步, 可以得到道路 TPA 为

$$P_{n,m}(k) = M_{n,m} - n_{n,m}(k-1) + C\alpha_{n,m}^{leave}(k-1) - d_{n,m}^{dem}(k-1). \quad (8)$$

将式(7)和(8)相减得

$$P_{n,m}(k+1) = P_{n,m}(k) - n_{n,m}(k) + n_{n,m}(k-1) + C(\alpha_{n,m}^{leave}(k) - \alpha_{n,m}^{leave}(k-1)) - d_{n,m}^{dem}(k) + d_{n,m}^{dem}(k-1). \quad (9)$$

根据流量守恒定律可知

$$n_{n,m}(k) = n_{n,m}(k-1) + C(\alpha_{n,m}^{enter}(k-1) - \alpha_{n,m}^{leave}(k-1)), \quad (10)$$

其中 $\alpha_{n,m}^{enter}(k-1)$ 表示在 $k-1$ 周期内进入道路 (n, m) 的平均流量 (veh/s).

将式(10)代入(9)得

$$P_{n,m}(k+1) = P_{n,m}(k) - d_{n,m}^{dem}(k) + d_{n,m}^{dem}(k-1) +$$

$$C(\alpha_{n,m}^{leave}(k) - \alpha_{n,m}^{enter}(k - 1)). \quad (11)$$

根据式(1)知道

$$-C\alpha_{n,m}^{enter}(k - 1) + d_{n,m}^{dem}(k - 1) = 0. \quad (12)$$

因此式(11)可以重新写为

$$P_{n,m}(k + 1) = P_{n,m}(k) + C\alpha_{n,m}^{leave}(k) - d_{n,m}^{dem}(k). \quad (13)$$

将式(1)、(2)和(4)代入(13)中得

$$P_{n,m}(k + 1) = P_{n,m}(k) + \sum_{o \in O_{m,m}} s_{n,m,o} g_{n,m,o}(k) - \sum_{j \in J_{n,m}} s_{j,n,m} g_{j,n,m}(k) - Cr_{n,m}(k), \quad (14)$$

式(14)为道路(n, m)在k + 1时刻开始时的TPA.

1.2 流量处理能力均衡思想

TPA均衡思想是根据各相位TPA大小实时动态地分配绿灯时间,以确保绿灯时间充分利用. 简而言之,就是给TPA较小的相位分配更多绿灯时间,避免相位TPA不均衡的情况,即当两条路排队长度相同时,容纳能力大的道路可以承载更多车辆,容纳能力较小的道路对于拥堵缓解更为迫切. 按照上述TPA均衡思想,两相位交叉口的控制目标表示为

$$y_n(k) = \min(\min(P_{m,n}(k + 1), P_{j_2,n}(k + 1)) - \min(P_{j_1,n}(k + 1), P_{j_3,n}(k + 1))),$$

其中min(a, b)为取a、b中较小值. 值得注意的是,为了便于描述,本文路网中所有交叉口只包含两个相位,但该模型的基本思想和方法可以根据具体情况扩展为包含其他相位,以实现更广泛的交叉口控制.

2 DED-MFAILC方法设计

2.1 多交叉口系统的分解

城市道路多交叉口系统是一个复杂互联、强耦合的MIMO系统. 传统整体型控制方法是基于交通系统模型,将其视为整体,根据各交叉口的状态信息来设计控制器. 然而,交通系统内部耦合严重,无法精确建模,更加难以解耦处理. 因此,很多有用的控制理论方法无法引入到交通系统应用. 本文采用分散估计分散控制型方案^[31],该方案将强耦合的MIMO多交叉口系统分解为若干多输入单输出(multiple input single output, MISO)交叉口,从而将对整个系统的控制器分割为对各交叉口的控制律设计,简化了复杂互联系统的处理. 同时,也不需要受控系统模型,仅依赖实际交通系统的I/O数据.

城市道路多交叉口系统可被分解为图2所示的N个独立交叉口. 图2中P_n可看作一个MISO的交叉口系统; y_n为输出,表示交叉口不同相位TPA差值; 输

入为g_n和其他N - 1个可测互联影响项z_{mn}. 定义第n个交叉口的增广控制输入为

$$\mathbf{U}_n(k) = [g_n(k), z_{1n}(k), \dots, z_{mn}(k), \dots, z_{Nn}(k)]^T \in \mathbf{R}^N, \quad m \neq n, m, n = 1, 2, \dots, N.$$

其中:仅有g_n是可控制变量,其他交叉口流入本交叉口的交通流入量是不可控变量,但可测量; z_{mn}为交叉口m对交叉口n的互联影响项; g_{mn}(k)为第k个周期交叉口m向交叉口n放行的绿灯时间.

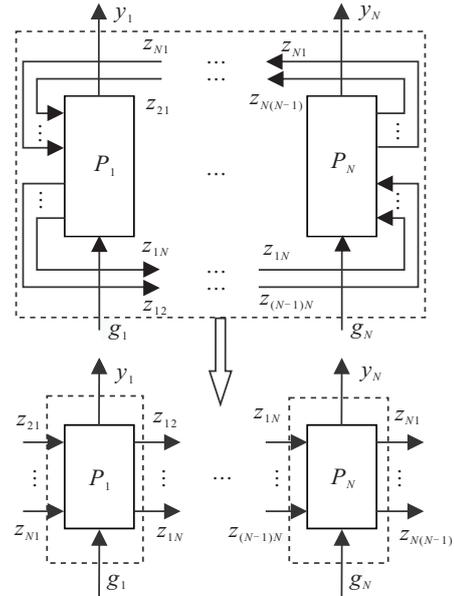


图2 多交叉口网络交通系统分解图

通过上述方法将MIMO的交通系统分解为多个MISO交叉口,每个交叉口由一个交叉口以及进入交叉口的不同相位车道组成.

2.2 交叉口间互联影响项的描述

交叉口之间的相互影响主要表现为,同方向相邻交叉口对本交叉口车辆到达率的影响. 车辆到达率受到放行车辆数和交叉口之间距离的影响,放行车辆数又受到该交叉口在k - 1时刻的绿灯时间和不受信号控制右转车辆数的影响. 因此,互联影响项之间存在如下关系:

$$z_{mn}(k) = f_n^1(g_{mn}(k - 1), r(k), d).$$

其中: f¹(...)为互联影响函数; r(k)为k时刻右转车辆到达率(vch/s); d为交叉口之间的距离(m). 在仿真实验中,互联项简化为z_{mn}(k) = δ[g_{mn}(k - 1) + r(k)], δ = 1/d, δ ∈ (0, 1]. δ称为距离惩罚因子,交叉口距离越近互联影响越严重,δ越大,反之δ越小. 基于上述分析可知,交叉口之间的互联影响项z_{mn}(k)是可测的.

2.3 交叉口数据模型等价转化

在城市道路多交叉口系统中,交叉口的车流量不仅与当前各个交叉口的信号控制有关,还有可能

与先前时刻各个交叉口信号控制的变化量有关. 因此, 本文采用偏格式动态线性化 (partial form dynamic linearization, PFDL) 方法^[33], 在 PFDL 数据模型中, 考虑了下一时刻道路中车辆数的变化量, 以及当前时刻固定长度的滑动时间窗口内所有交叉口信号控制输入的变化量的时变动态关系. 第 n 个交叉口 TPA 之差可以描述为如下非线性系统:

$$y_n(k+1, i) = f_n(y_n(k, i), \dots, y_n(k-n_y, i), \mathbf{U}_n(k, i), \dots, \mathbf{U}_n(k-n_u, i)). \quad (15)$$

其中: $f_n(\dots)$ 为未知非线性函数; $i = 1, 2, \dots$ 是迭代次数, 如昨天、今天等; $k \in [0, 1, \dots, K-1]$, 表示时刻; $\mathbf{U}_n(k, i) \in \mathbf{R}^N$, $y_n(k, i) \in \mathbf{R}$ 分别为第 i 次迭代第 k 个采样时刻交叉口 n 输入和系统输出; $z_{mn}(k, i) \in \mathbf{R}$ ($m \neq n$) 为第 i 次迭代第 k 个采样周期内, 交叉口 m 对交叉口 n 的可测互联影响; n_y, n_u 是未知的非负整数; $\mathbf{U}_n(k, i) = [g_n(k, i), z_{1n}(k, i), \dots, z_{mn}(k, i), \dots, z_{Nn}(k, i)]^T$, $m \neq n, m, n = 1, 2, \dots, N$.

定义交叉口 n 的控制输入 $\mathbf{U}_n(k, i)$ 在一个滑动时间窗口 $[k-L+1, k]$ 内所有增广信号控制输入向量为

$$\bar{\mathbf{U}}_n(k, i) = [\mathbf{U}_n^T(k, i), \dots, \mathbf{U}_n^T(k-L+1, i)]^T \in \mathbf{R}^{NL}.$$

其中: $\bar{\mathbf{U}}_n(k, i)$ 满足 $k < 0$ 时, 有 $\bar{\mathbf{U}}_n(k, i) = \mathbf{0}_{NL}$; L 为交叉口系统信号控制线性化长度常数.

假设 1 交叉口 n 的动态 $f_n(\dots)$ 关于 $\mathbf{U}_n(k, i), \dots, \mathbf{U}_n(k-L+1, i)$ 每个分量的偏导数是连续的.

假设 2^[31] 系统 (15) 沿迭代轴方向满足广义 Lipschitz 条件, 即 $\forall k \in \{0, 1, \dots, T\}$ 和 $\forall i = 1, 2, \dots$, 若 $\|\bar{\mathbf{U}}_n(k, i)\| \neq \mathbf{0}$, 则下式成立:

$$|\Delta y_n(k+1, i)| \leq b \|\Delta \bar{\mathbf{U}}_n(k, i)\|.$$

其中: $\Delta y_n(k+1, i) = y_n(k+1, i) - y_n(k+1, i-1)$; $\Delta \bar{\mathbf{U}}_n(k, i) = \bar{\mathbf{U}}_n(k, i) - \bar{\mathbf{U}}_n(k, i-1)$; $b > 0$ 是一个常数.

注 2 假设 1 是控制系统设计中一般非线性系统的一种典型约束条件. 假设 2 是城市交通系统固有性质决定的物理约束条件, 即各相位中绿灯时间的有限变化不会导致道路中车辆数量的无限变化.

引理 1^[16] 若系统 (15) 满足假设 1 和假设 2, 并对所有时刻 k 都满足 $\|\Delta \bar{\mathbf{U}}_n(k, i)\| \neq 0$, 则必然存在一个被称为伪分块梯度 (pseudo partitioned gradient, PPG) 的时变参数向量 $\hat{\Phi}_n(k, i)$, 使得交叉口 n 的动态方程 (15) 可以被等价转化为如下的 PFDL 数据模型:

$$\Delta y_n(k+1, i) = \hat{\Phi}_n^T(k, i) \Delta \bar{\mathbf{U}}_n(k, i). \quad (16)$$

其中: $\hat{\Phi}_n(k, i) = [\hat{\Phi}_{n,1}^T(k, i), \dots, \hat{\Phi}_{n,L}^T(k, i)]^T \in \mathbf{R}^{NL}$; $\hat{\Phi}_{n,L}(k, i) = [\hat{\Phi}_{n,L}(k, i), \psi_{1m,L}(k, i), \dots, \psi_{Nm,L}(k, i)]^T \in \mathbf{R}^N$ ($m \neq n, m, n = 1, \dots, N$) 为子块分量.

2.4 交叉口控制算法设计

交叉口伪分块梯度的估计算法表示如下:

$$J(\hat{\Phi}_{n,L}(k, i)) = \mu \|\hat{\Phi}_{n,L}(k, i) - \hat{\Phi}_{n,L}(k, i-1)\|^2 + |\Delta y_n(k+1, i-1) - \hat{\Phi}_{n,L}^T(k, i) \Delta \bar{\mathbf{U}}_n(k, i-1)|^2, \quad (17)$$

其中 $\mu > 0$ 是一个权重因子, 用来防止 PPG 的估计值变化过于剧烈. 最小化式 (17), 可得 PPG 估计算法

$$\hat{\Phi}_{n,L}(k, i) = \hat{\Phi}_{n,L}(k, i-1) + \frac{\eta \Delta \bar{\mathbf{U}}_n(k, i-1) \Delta y_n(k+1, i-1)}{\mu + \|\Delta \bar{\mathbf{U}}_n(k, i-1)\|^2} - \frac{\eta \Delta \bar{\mathbf{U}}_n(k, i-1) (\hat{\Phi}_{n,L}^T(k, i-1) \Delta \bar{\mathbf{U}}_n(k, i-1))}{\mu + \|\Delta \bar{\mathbf{U}}_n(k, i-1)\|^2}. \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{n,1}(k, i) &= \hat{\phi}_{n,1}(k, 1), \\ &\text{if } \text{sign}(\hat{\phi}_{n,1}(k, i)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}_{n,1}(k, 1)), \\ &\text{or } |\hat{\phi}_{n,1}(k, i)| \leq \varepsilon, |\Delta g_{nm,1}(k, i)| \leq \varepsilon. \\ \hat{\psi}_{nm,1}(k, i) &= \hat{\psi}_{nm,1}(k, 1), \\ &\text{if } \text{sign}(\hat{\psi}_{nm}(k, i)) \neq \text{sign}(\hat{\psi}_{nm}(k, 1)), \\ &\text{or } |\hat{\psi}_{nm}(k, i)| \leq \varepsilon, \text{ or } |\Delta z_{nm}(k, i)| \leq \varepsilon. \end{aligned} \quad (19)$$

其中: 式 (19) 为重置算法, $\hat{\phi}_{n,1}(k, 1), \psi_{nm,1}(k, 1)$ 分别为 $\hat{\phi}_{n,1}(k, i), \hat{\psi}_{nm,1}(k, i)$ 的初始值, ε 是一个正常数.

考虑如下关于控制器输入 $\mathbf{U}_n(k, i)$ 目标函数:

$$J(\mathbf{U}_n(k, i)) = |e_n(k+1, i)|^2 + \lambda \|\Delta \mathbf{U}_n(k, i)\|^2. \quad (20)$$

其中: $e_n(k+1, i)$ 为系统误差; 加权因子 λ 的作用是限制控制输入变化过大. 对 $\mathbf{U}_n(k, i)$ 求偏导, 并令其等于零, 从而得到如下控制算法:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_n(k, i) &= \mathbf{U}_n(k, i-1) + \frac{\rho_1 \hat{\Phi}_{n,1}(k, i) e_n(k+1, i-1)}{\lambda + \|\hat{\Phi}_{n,1}(k, i)\|^2} - \\ &\frac{\hat{\Phi}_{n,1}(k, i) \sum_{l=2}^L \rho_l \hat{\Phi}_{n,l}^T(k, i) \Delta g_n(k-l+1, i)}{\lambda + \|\hat{\Phi}_{n,1}(k, i)\|^2} - \\ &\frac{\hat{\Phi}_{n,1}^T(k, i) \sum_{l=2}^L \sum_{n=1, n \neq m}^N \rho_l \psi_{nm,l}^T(k, i) \Delta z_{nm}(k-l+1, i)}{\lambda + \|\hat{\Phi}_{n,L}(k, i)\|^2}. \end{aligned} \quad (21)$$

其中 $\rho_1, \rho_l \in (0, 1]$ 是步长因子.

$$U_n(k, i) = \begin{cases} U_n^{\min}(k, i), & U_n(k, i) < U_n^{\min}(k, i); \\ U_n^{\max}(k, i), & U_n(k, i) > U_n^{\max}(k, i); \\ U_n(k, i), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (22)$$

式(22)是根据实际交通情况对信号灯控制输入的上下限约束. 因此, 式(18)、(19)和式(21)、(22)组成偏格式动态线性化DED-MFAILC (partial form dynamic linearization DED-MFAILC, PFDL-DED-MFAILC)信号配时控制方案.

本文方案将复杂互联、强耦合MIMO的多交叉口系统分解为 N 个MISO交叉口系统, 每个交叉口系统有一个当前的可控信号输入和 $N - 1$ 个不可控的输入, 其不可控输入为其他交叉口对本交叉口的互联影响, 这些互联影响可以通过交通检测器测量. 互联影响可被式(21)等号右边第3项补偿掉, 故本文方案可以很好地处理MIMO交通系统内部耦合.

3 仿真分析与验证

3.1 仿真环境设置

为了验证所提方案的有效性, 使用Matlab建立

一个四交叉口网络, 该网络由4个交叉口8个交通需求点组成. 按照图2的分解, 路网被划分为4个交叉口系统, 每个交叉口系统有两个信号相位; 交叉口系统中的每条道路长600 m; 系统在时域中的采样间隔 T 和交叉口信号周期时长 C 均设置为120 s; 总仿真时长为7200 s, 即60个信号周期长度, 路网内部能容纳的车辆数为800 veh; 最大最小绿灯时间分别为85 s和35 s. 其他参数如下: $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 为500、600、200、400, $\rho_1 \sim \rho_4 = 1$, $\eta_1 \sim \eta_4 = 0.1$, $\varepsilon = 10^{-5}$, $L = 3$, $\mu = 10$.

将本文提出的方案在表2的中、高两种不同需求情景下测试, 并与Webster定时控制方案^[34]、紧格式动态线性化MFAC (Compact form dynamic linearization MFAC, CFDL-MFAC)方案^[35]、DED-MFAC方案^[35]、紧格式MFAILC方案^[19]、紧格式DED-MFAILC方案、偏格式MFAILC方案进行比较. 其中, 紧格式DED-MFAILC方案为偏格式DED-MFAILC方案中 $L = 1$ 的情况, 偏格式MFAILC方案为紧格式MFAILC方案推广. 总迭代次数设置为150次, 在首次迭代中参数设置与其他控制策略相同.

表2 路网的交通需求

车辆输入点	中等交通需求		高交通需求	
	0~3600/s	3600~7200/s	0~3600/s	3600~7200/s
1	1360	1050	1560	1250
2	450	250	650	450
3	950	830	1150	1030
4	900	700	1100	900
5	490	520	690	720
6	810	500	1010	700
7	860	500	1060	700
8	850	350	1050	550

选择以下标准比较路网的控制性能:

1) k 时刻路网的总花费时间 (total time spent, TTS)(s)

$$TTS(k) = \sum_k^N C \cdot n_z(k).$$

2) k 时刻路网中总车辆数 (total number of vehicles, TNV)(veh)

$$TNV(k) = \sum_{n \in I} \sum_{m \in I_n^N} n_{(n,m)}(k).$$

3) 第 n 个交叉口TPA平均值 $E(y_n)$ (veh)

$$E(y_n) = \sum_{k=1}^K \frac{y_n(k)}{K}.$$

4) 交叉口TPA差异的误差均方差 $MSE_{n,i}$

$$MSE_{n,i} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |y_{n,d}(k) - y_n(k)|^2.$$

5) 系统的协调误差 ξ , 定义为误差均方根(veh)

$$\xi = \sqrt{(E(y_1) - E(y_2))^2 + \dots + (E(y_{n-1}) - E(y_n))^2}.$$

6) 总延误时间TDT (total delay time, TDT)(s)^[36]

TDT =

$$\frac{C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{g}{C}\right)x\right]} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65 \left(\frac{C}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} x^{2+5\left(\frac{g}{C}\right)}.$$

其中: $n_z(k)$ 为路网中的车辆数; $n_{(n,m)}(k)$ 为道路 (n, m) 中的车辆数; x 为饱和度(流量与容量之比); q 为到达速率(veh/s).

3.2 仿真结果分析

首先, 在中等输入不同控制方案下对比TDT与排队长度, 如表3所示, 括号中数据是本文所提方案与对比方案在相应指标上的改善.

表3 不同控制策略下TDT和排队长度的性能比较

控制方案	中等交通需求		高交通需求	
	排队长度/veh	TDT/s	排队长度/veh	TDT/s
定时控制	4.79×10^4 (19.45%)	2.27(11.27%)	1.52×10^4 (16.92%)	1.60×10^6 (45.50%)
CFDL-MFAC	4.55×10^4 (13.47%)	2.23(9.30%)	1.51×10^4 (16.15%)	1.54×10^6 (40.00%)
DED-MFAC	4.22×10^4 (5.24%)	2.07(1.47%)	1.50×10^4 (15.38%)	1.31×10^6 (19.10%)
CFDL-MFAILC	4.23×10^4 (5.49%)	2.23(9.31%)	1.44×10^4 (10.77%)	1.52×10^6 (38.20%)
CFDL-DED-MFAILC	4.15×10^4 (3.49%)	2.17(6.37%)	1.33×10^4 (2.31%)	1.18×10^6 (7.27%)
PFDL-MFAILC	4.03×10^4 (0.50%)	2.07(1.47%)	1.35×10^4 (3.85%)	1.20×10^6 (9.01%)
PFDL-DED-MFAILC	4.01×10^4	2.04	1.30×10^4	1.10×10^6

由表3可知, 偏格式DED-MFAILC方案下有最低的TDT和排队长度, 分别比定时控制减少16.92%和45.5%, 因此所提方案在中等需求下能够改善交通状态. 当外部需求进一步增加时, PFDL-DED-MFAILC方案TDT和排队长度分别比定时控制减少了11.27%和19.5%, 在过饱和的交通状态下, 方案的控制性能有所下降.

表4为不同方案下的TNV和TTS, 可以看出, 分布式框架下的3种方案(DED-MFAC、紧格式DED-MFAILC、偏格式DED-MFAILC)的性能都明显优于对应的集中控制方案, 这是因为道路的拥堵通过相邻路段由近及远传播, 而分布式控制则利用邻居之间的信息进行交互协作, 从而实现交叉口之间的信息交互, 协调平衡交叉口之间的TPA. 值得注意的是, 带有MFAILC的4种方案的TNV、TDT、TTS以及排队长度也都明显少于其余3种方案, 这是因为MFAILC可以通过不断优化交通信号控制算法来提高交通系统的效率和可靠性.

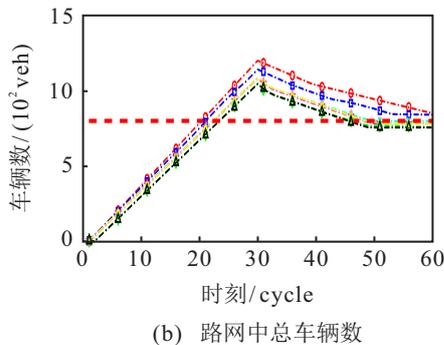
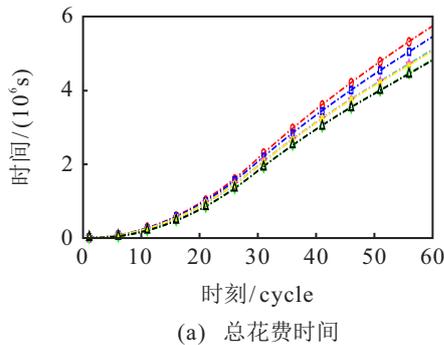


图3 不同控制策略下路网TTS与TNV

图3为路网中总的车辆数TNV与路网中车辆总花费时间TTS, 可以看出, 偏格式DED-MFAILC方案和偏格式MFAILC方案在整个仿真过程中有最低的TTS和TNV. 因为PFDL数据模型方法能够有效地捕获多交叉口系统的复杂动态, 并将这种复杂性分散降低. 同时, 该方案具有迭代学习的能力, 可以充分利用交通流的重复性. 将两者结合起来, 可以不断降低整个路网中车辆的TTS, 并增加离开路网的TNV.

表4 决策矩阵

控制方案	评价指标	
	TNV/veh	TTS/s
定时控制	851(12.57%)	5.74(19.33 $\times 10^6$ %)
CFDL-MFAC	800(5.82%)	5.45(13.33 $\times 10^6$ %)
DED-MFAC	795(4.91%)	5.15(7.07 $\times 10^6$ %)
CFDL-MFAILC	783(3.56%)	5.08(4.78 $\times 10^6$ %)
CFDL-DED-MFAILC	783(3.56%)	5.06(5.20 $\times 10^6$ %)
PFDL-MFAILC	759(0.40%)	4.83(0.41 $\times 10^6$ %)
PFDL-DED-MFAILC	756	1.10 $\times 10^6$

图4为交叉口不同相位TPA差异变化, 可以看出, 带有MFAILC的方案交叉口TPA差异均在期望值附近很小的范围波动, 且明显小于其余控制方案, 都较为理想地完成了跟踪效果. 除外部输入较大的交叉口1外, DED-MFAC方案也有良好的跟踪效果. 与此相比, 定时控制方案与MFAC方案波动明显, 跟踪效果较差, 但MFAC跟踪效果又明显优于定时控制.

对比可以发现, 虽然4种迭代学习方案都有较好的控制效果, 可以完成对多交叉口系统的解耦控制, 但紧格式和偏格式DED-MFAILC方案考虑了交叉口之间耦合的影响, 有更好的控制效果, 信号变化更加稳定, 保证了交通系统的平稳运行, 如图5所示.

图6为不同方案下多交叉口系统TPA差异变化,

可以看出:在定时控制与MFAC方案下,TPA差值随着仿真时间的增加逐渐变大,逐渐远离期望值零;在本文方案下,TPA差值的波动明显小于其他控制方案.结合图3以及表4中的数据可以发现,TPA差值越大,交叉口中TNV和TTS越多,道路越拥堵,拥堵消散越迫切.因此,TPA的均衡程度可以反应路网的拥堵水平,通过平衡道路之间的TPA可以缓解交通拥堵,提高路网的通行效率以及交通资源的利用率.

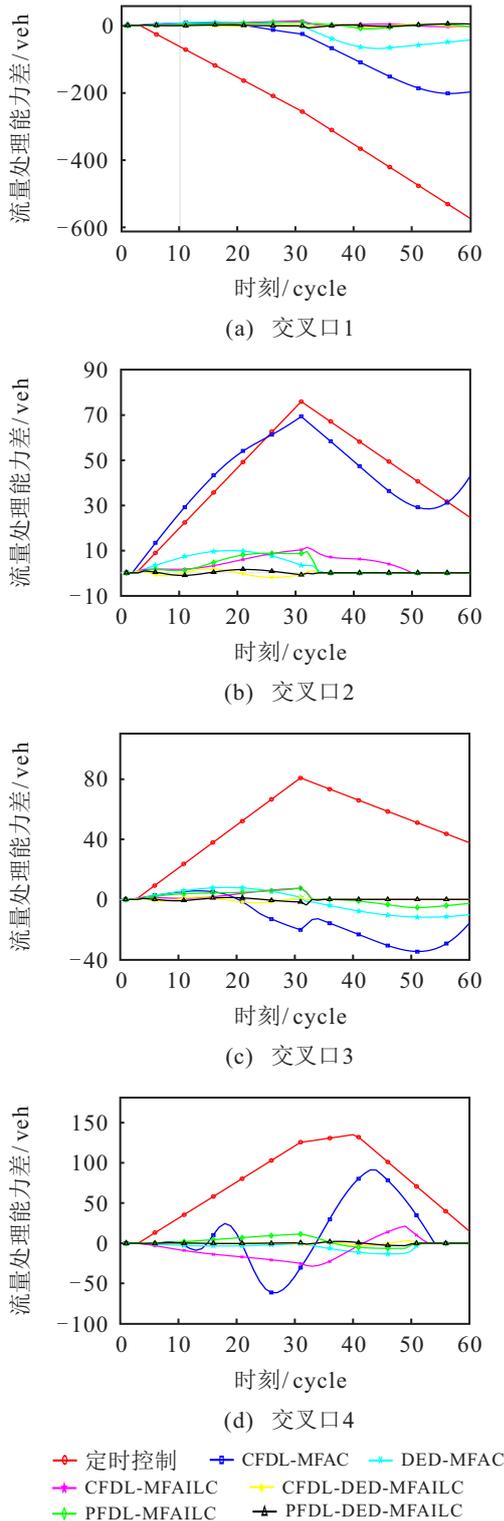


图4 各个交叉口TPA差的变化

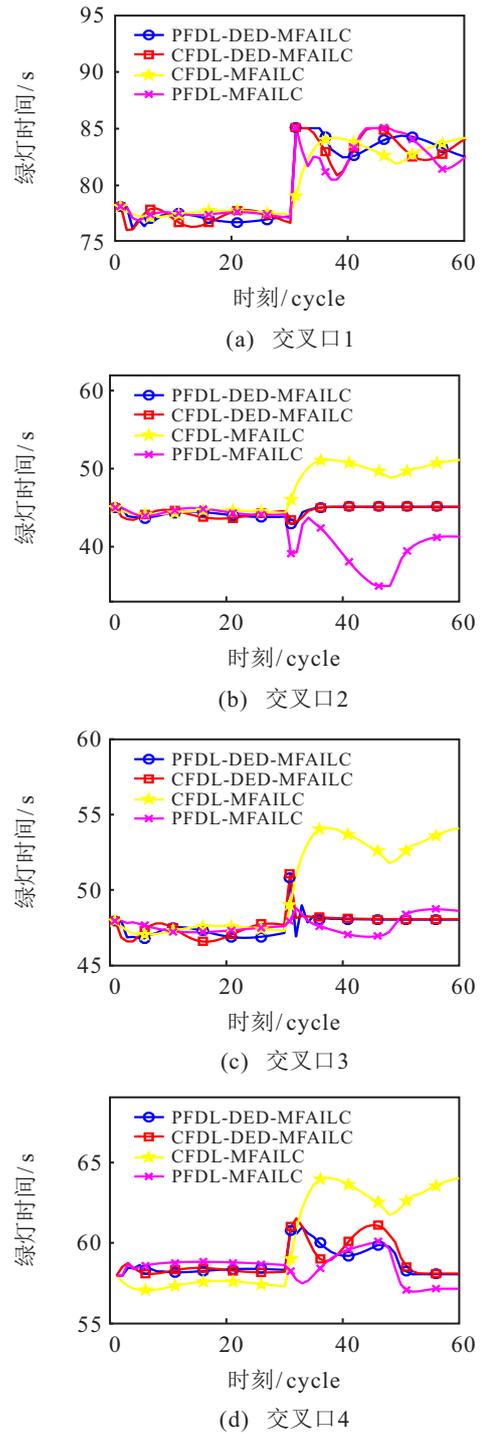


图5 不同交叉口东西相位绿灯变化

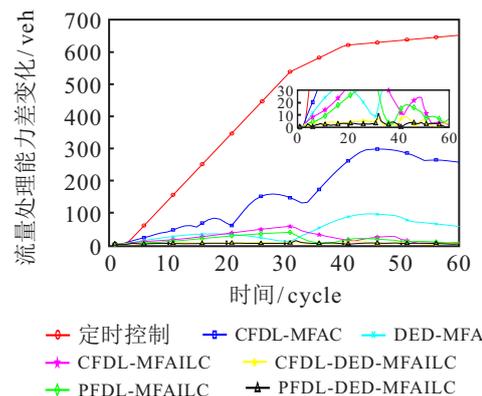


图6 不同方案下TPA差的变化

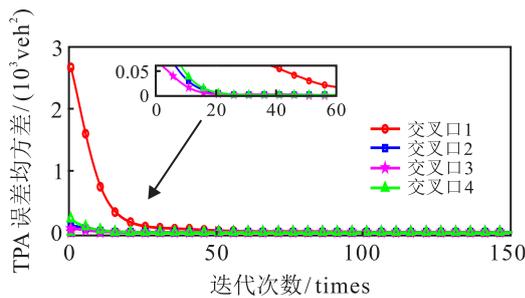
表5为交叉口的均值和协调误差,对比发现,紧格式与偏格式MFAILC方案虽然有较好的跟踪效果,但协调误差分别为 $\xi = 10.42$ 和 $\xi = 2.06$,协调效果并不理想.相比之下,紧格式与偏格式DED-MFAILC方

案协调误差分别为 $\xi = 1.34$ 和 $\xi = 0.94$,均优于其余5种控制方案,但偏格式DED-MFAILC方案的稳定性更好,整个系统协调误差更小,协调效果更加理想.

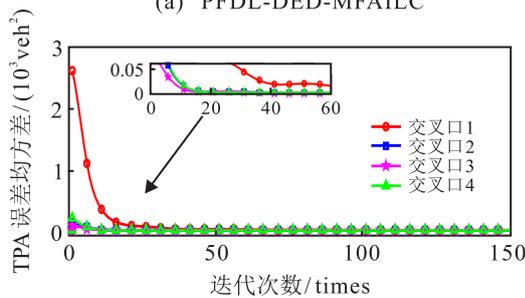
表5 不同控制策略下交叉口均值与协调误差

控制策略	评价指标				
	$E(y_1)$	$E(y_2)$	$E(y_3)$	$E(y_4)$	ξ
定时控制	274.77	42.79	48.59	74.38	233.49
CFDL-MFAC	74.77	41.43	15.68	28.46	44.02
DED-MFAC	29.28	3.82	7.42	4.03	25.93
CFDL-MFAILC	4.28	4.03	1.60	11.73	10.42
CFDL-DED-MFAILC	1.89	0.57	0.52	0.66	1.34
PFDL-MFAILC	4.48	2.67	3.47	4.07	2.06
PFDL-DED-MFAILC	1.30	0.31	0.43	0.61	0.94

从图7可以看出,经过150次迭代后,紧格式与偏格式DED-MFAILC方案跟踪误差均趋近于零.然而,由于交叉口1外部输入为过饱和,交叉口1经过150次迭代后并没有趋近于零,而是在很小的范围波动,这是一个可以接受的结果.



(a) PFDL-DED-MFAILC



(b) CFDL-DED-MFAILC

图7 流量处理能力误差均方差

4 结论

针对多交叉口复杂互联、具有强耦合难以建模的问题,基于TPA均衡思想,在分布式架构下,设计了PFDL-DED-MFAILC方案.该方案仅利用交通运行的I/O数据,即可实现对交叉口系统的信号控制.此外,所提方案具有迭代学习能力,能够在重复运行的交通控制中不断提高控制性能.同时,该方案考虑了道路固有容纳能力,能够反映道路拥堵缓解的迫切程度.最后通过仿真对比,验证了所提出方案的优越性和有效性.

参考文献(References)

- [1] Kerner B S. Introduction to modern traffic flow theory and control: The long road to three-phase traffic theory[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [2] 雷鸿博, 郭戈, 高原. 通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 933-939. (Lei H B, Guo G, Gao Y. Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption[J]. Control and Decision, 2021, 36(4): 933-939.)
- [3] 孙康华, 刘忠诚, 赵敏, 等. 动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 729-737. (Sun D H, Liu Z C, Zhao M, et al. CPS-based mixed traffic pinning control considering dynamic physical topology[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 729-737.)
- [4] Hou Z S. The parameter identification, adaptive control and model free learning adaptive control for nonlinear systems[D]. Shenyang: Northeastern University, 1994.
- [5] Hou Z S, Jin S T. A novel data-driven control approach for a class of discrete-time nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(6): 1549-1558.
- [6] Hou Z S, Xiong S S. On model-free adaptive control and its stability analysis[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(11): 4555-4569.
- [7] Ma Y, Wang X, Quan Z, et al. Data-driven measurement of receiver sensitivity in wireless communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(5): 3665-3676.
- [8] Fetanat M, Stevens M, Hayward C, et al. A physiological control system for an implantable heart pump that accommodates for interpatient and inpatient variations[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2020, 67(4): 1167-1175.
- [9] Hou Z S, Jin S T. Data-driven model-free adaptive control for a class of MIMO nonlinear discrete-time systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(12): 2173-2188.

- [10] Uchiyama M. Formation of high-speed motion pattern of a mechanical arm by trial[J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 1978, 14(6): 706-712.
- [11] Arimoto S, Kawamura S, Miyazaki F. Bettering operation of Robots by learning[J]. Journal of Robotic Systems, 1984, 1(2): 123-140.
- [12] 曹伟, 乔金杰, 孙明. 非仿射非线性多智能体系统迭代学习一致跟踪[J]. 控制与决策, 2023, 38(4): 929-934. (Cao W, Qiao J J, Sun M. Iterative learning consensus tracking for non-affine nonlinear multi-agent systems[J]. Control and Decision, 2023, 38(4): 929-934.)
- [13] Ahn H S, Chen Y Q, Moore K L. Iterative learning control: Brief survey and categorization[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2007, 37(6): 1099-1121.
- [14] Zhang M S, Hou Z S. Model free adaptive predictive ramp control for freeway with iterative learning outer-loop[J]. Control Theory & Application, 2023, 40(5): 781-791.
- [15] Huang D Q, Xu J X, Venkataramanan V, et al. High-performance tracking of piezoelectric positioning stage using current-cycle iterative learning control with gain scheduling[J]. IEEE Transactions on Indust Electron, 2013, 61(2): 1085-1098.
- [16] 池荣虎, 侯忠生. 非线性非仿射离散时间系统的两阶段最优迭代学习控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(10): 1061-1065. (Chi R H, Hou Z S. Dual-stage optimal iterative learning control for nonlinear non-affine discrete-time systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(10): 1061-1065.)
- [17] 池荣虎, 侯忠生, 于镭, 等. 高阶无模型自适应迭代学习控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(7): 795-798. (Chi R H, Hou Z S, Yu L, et al. Higher-order model-free adaptive iterative learning control[J]. Control and Decision, 2008, 23(7): 795-798.)
- [18] Liu T, Hou Z S. Model-free adaptive iterative learning containment control for unknown heterogeneous nonlinear MASs with disturbances[J]. Neurocomputing, 2023, 515: 121-132.
- [19] Li D, Hou Z S. Data-driven urban traffic model-free adaptive iterative learning control with traffic data dropout compensation[J]. IET Control Theory & Applications, 2021, 15(11): 1533-1544.
- [20] Wu N, Xi Y G, Li D W. Optimization of traffic signal split for arterial and side streets in urban traffic networks[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(4): 25-30.
- [21] Jang K, Kim H, Jang I G. Traffic signal optimization for oversaturated urban networks: Queue growth equalization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 2121-2128.
- [22] 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 J G, Hou Z S, Liu X B. Vehicle queuing length balanced-control of the signalized isolated intersection via multi-parametric programming[J]. Control and Decision, 2013, 28(4): 595-599.)
- [23] Kim D, Jeong O. Cooperative traffic signal control with traffic flow prediction in multi-intersection[J]. Sensors, 2019, 20(1): 137.
- [24] Azimirad E, Pariz N, Sistani M B N. A novel fuzzy model and control of single intersection at urban traffic network[J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(1): 107-111.
- [25] Varaiya P. Max pressure control of a network of signalized intersections[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 36: 177-195.
- [26] Gregoire J, Qian X J, Frazzoli E, et al. Capacity-aware backpressure traffic signal control[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2015, 2(2): 164-173.
- [27] Wu N, Li D W, Xi Y G. Distributed weighted balanced control of traffic signals for urban traffic congestion[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(10): 3710-3720.
- [28] Li D, De Schutter B. Distributed model-free adaptive predictive control for urban traffic networks[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(1): 180-192.
- [29] Li D, Hou Z S. Perimeter control of urban traffic networks based on model-free adaptive control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(10): 6460-6472.
- [30] Ren Y, Hou Z S, Sirmatel I I, et al. Data driven model free adaptive iterative learning perimeter control for large-scale urban road networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 115: 102618.
- [31] Blanc N, Kroening D, Sharygina N. Scoot: A tool for the analysis of SystemC models[C]. International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 467-470.
- [32] Sims A G, Dobinson K W. The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980, 29(2): 130-137.
- [33] Hou Z S, Jin S T. Model free adaptive control: Theory and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [34] Webster F V. Traffic signal settings[J]. Road Research Technical Paper, 1958(39).
- [35] 雷霆. 城市交通系统无模型自适应宏观边界控制方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. (Lei T. Model-free adaptive macro-boundary control method for urban traffic system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.)
- [36] Rounnail N, Tarko A, Li J. Traffic flow at signalized intersections[C]. 79th TRB Annual Meeting, 1999.

作者简介

王洪力(1995—), 男, 硕士生, 从事无模型自适应控制迭代学习、城市交通控制等研究, E-mail: 1315699108@qq.com;

侯忠生(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事数据驱动控制、无模型自适应控制、学习控制、智能交通等研究, E-mail: zhshhou@bjtu.edu.cn.