



铁道科学与工程学报  
*Journal of Railway Science and Engineering*  
ISSN 1672-7029, CN 43-1423/U

## 《铁道科学与工程学报》网络首发论文

题目: 基于递阶优化的城市区域路网交通控制  
作者: 吉柯, 唐进君, 曾捷, 刘鑫源  
DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20220242  
收稿日期: 2022-02-14  
网络首发日期: 2022-05-19  
引用格式: 吉柯, 唐进君, 曾捷, 刘鑫源. 基于递阶优化的城市区域路网交通控制[J/OL]. 铁道科学与工程学报. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20220242>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

收稿日期：2022-02-14  
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52172310）；教育部人文社会科学青年基金资助项目（21YJCZH147）；中南大学创新驱动项目（2020CX041）  
通信作者：唐进君（1983-），男，广西桂林人，副教授，博士，从事智能交通系统研究；E-mail: jinjuntang@csu.edu.cn  
DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20220242

# 基于递阶优化的城市区域路网交通控制

吉柯，唐进君，曾捷，刘鑫源

(中南大学 交通运输工程学院，湖南 长沙 410075)

**摘要：**城市道路拥堵问题随着城市机动化的快速发展日益凸显，采用合理的控制手段提高区域路网效率成为急需解决的问题。本文以长沙市部分路网作为研究对象，选取连续 5 个工作日的早高峰流量数据进行研究。首先在 VISSIM 仿真软件中根据抽象路网搭建仿真路网，将仿真路网中的交通数据与实际道路车牌识别数据相匹配，以交叉口通过车辆数为评价标准计算仿真路网与实际道路的误差率，保证仿真路网真实性；其次采用反压力值作为道路反馈指标，计算路网中的压力分布情况；而后基于周期稳定性，将研究范围内的交叉口划分为两类，以大小周期的方式进行信号配时优化，考虑交通高峰期道路饱和度偏高的情况，将传统韦伯斯特算法进行改进后作为控制方法；采用递阶优化的思想进行控制策略计算；最后对控制策略进行仿真验证，在结果中从路网和车辆两个方面选取在网车辆数、到达车辆数、车均延误和车辆速度四个指标对优化前后的路网状况进行评价。优化后的路网较原始路网在到达车辆数和车辆速度方面有所提升，在网车辆数和车均延误有所下降。同时，针对不同饱和度的交叉口，控制策略在四个评价指标方面也有相同的优化趋势。结果表明，基于递阶优化的路网交通控制能够提高路网的通行效率，改善路网运行环境。

**关键词：**交通控制；递阶优化；交通仿真；城市路网；车牌识别数据

**中图分类号：**U491      **文献标志码：**A

## Urban road network traffic control based on hierarchical optimization

JI Ke, TANG Jinjun, ZENG Jie, LIU Xinyuan

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** With the rapid development in urban motorization, urban road congestion has become a serious problem. Establishing effective traffic control methods to improve the efficiency of road network is an effective method to solve this problem. The road network in Changsha city and the data of rush hour in the morning of 5 consecutive working days were used as the research object in the experiment. Firstly, the simulated network is built according to the abstract network and matched with the actual vehicle license recognition data in VISSIM. In order to ensure the authenticity of the simulated network, the difference between the simulated network and the actual road was calculated by the number of vehicles at the intersection. Secondly, the pressure of road network is calculated by the value of backpressure. And the intersections with different saturation levels are optimized with different cycle times. At the same time, Webster algorithm is improved to adapt to the situation of high saturation in peak time. Then, based on hierarchical optimization, the control strategy is conducted by combing the backpressure control and improved Webster algorithm. Finally, the control strategy is verified in the simulation. From two aspects of the road network and vehicles, four indexes including the number of vehicles running on the network, the number of vehicles arriving at the boundary, vehicle delay and vehicles speed are selected to evaluate the optimization situation. Compared with the case without optimization, the number of vehicles arriving at the boundary and vehicle speed both increase. The number of vehicles running on the road network and vehicle delays decrease. At the same time, for intersections with different saturation, the control strategy has the same optimization trend in four evaluation indexes. The result indicates that the road network traffic control based on hierarchical optimization can improve the traffic efficiency.

**Key words:** traffic control; hierarchical optimization; traffic simulation; urban road network; vehicle license recognition data

城市居民的出行在工作日均具有早晚高峰现象。对于高等级道路来说,在高峰期往往伴随着需要多次停车、道路拥挤、等待时间长的情况。与此同时,车流常常具有显著的潮汐性,同一条道路在不同时刻两个方向上具有很明显的流量差。对于城市道路而言,虽然高峰期存在较为明显的拥堵现象,但并不是所有的道路都拥堵。主干路、次干路等道路可能存在较高的延误,但仍存在着利用率不高的次干路和支路。对此,如何有效利用饱和度和偏低的路段分流高饱和路段的车流,实现路网压力均衡,成为了目前研究的热点问题。对信号配时进行优化是交叉口优化的基本手段之一,近年来也出现了许多与新技术相结合的优化方法。赵纯等<sup>[1]</sup>采用基于深度 Q-Learning 的方法来优化信号配时,采用深度神经网络进行训练和输出,结果表明改进后的深度强化学习可以动态的控制信号配时,相较于传统静态配时,该方法的控制效果更佳。卢凯等<sup>[2]</sup>则是从绿波的角度,基于车速和信号协同制定了一套信号控制方案。牟亮等<sup>[3]</sup>基于快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)提出了一种改进的区域信号控制方案。虽然学者们的研究切入点各不相同,但都是在向着动态、区域性等目标进行研究。信号配时的优化目标已不再是单点或单线的问题,而是转向对于某个区域进行协调控制。近年来,对于城市路网的协调控制研究层出不穷。梁超等<sup>[4]</sup>设计了一种区域交通流量协调控制器,对路网密度进行平衡,试验表明在这种控制下,路网的平均密度有所下降、车辆速度有所提升、车辆延误有所下降。郭亚娟<sup>[5]</sup>是基于社团发现提出了拥堵区域预警,在此基础上结合宏观基本图提出了路网动态边界控制策略。申慧<sup>[6]</sup>提出了一种单向全通行的控制方法,用于解决车流冲突及车辆排队问题;在路段溢流问题上,提出了相关三转向车流的同步控制方法加以控制;在路网划分问题上,提出了基于重叠划分的交叉口分组方法。双层模型作为一种常见的模型,上下两层优化目标相对独立,但求解结果能够协调优化目标,得出全局最优,在交通优化领域的应用也十分广泛。王秋平等<sup>[7]</sup>结合历史街区的交通问题,基于双层规划模型提出了基于微循环的交通优化方案。高雪溢<sup>[8]</sup>也采用了相同的方法,选用速度最大、延误最小等指标作为上层模型的决策目标,并基于层次分析法构建了评价方法。这两份研究的结果都表明,双层规划模型对于交通优化有良好的效果。但是,目前双层模型在指标的选取方面仍偏向于常见指标,如速度、延误等,本文以道路反压力值作为优化指标,相对于常见指标而言,可以直观的表现出道路压力情况;同时,由于反压力控制方法具有寻找反压力值最大的特点,因此利用反压力值可以很好的进行单点信号控制优化。在双层模型的基础之上,可在道路网络设计、道路交通管控措施和信号配时实时控制等多个方面进行递阶优化控制。徐云雯<sup>[9]</sup>提出以递阶优化对大规模路网进行控制优化,采用状态转移概率模型进行信号控制,建立了混合反压力控制的大规模路网递阶优化控制模型。陈斌<sup>[10]</sup>则是建立了交通状态评价函数,以大系统递阶控制思想构建了交通控制和交通流诱导的协同模型。二位学者的研究都使用 VISSIM 仿真软件进行了模拟验证,所提出的方案得到了较好的验证,但他们的仿真道路环境均为假设环境,道路状态较为理想化,缺乏在实际路网当中的应用验证。本文以长沙市道路网络作为研究对象,以实际道路环境在 VISSIM 软件搭建仿真路网,利用实测车牌识别数据校正仿真模型,采用递阶优化思想构建双层模型。其中,上层模型中以路网反压力指标最优为优化目标,下层模型采用改进韦伯斯特算法作为控制方案;最后在仿真中验证优化模型的可行性与优势。

## 1 基础数据及仿真路网

### 1.1 路网概况

本文选用的研究区域是长沙市城市道路区域路网,如图 1 所示。该区域北至五一大道、南至城南西路、西至蔡锷南路、东至曙光路。该区域内包含主干路、次干路等多种道路等级,路幅宽度也覆盖了双向两车道至双向十车道。结合湖南省长沙市的车牌识别系统(License Plate Recognition, LPR)所覆盖的交叉口,将研究路网抽象为具有 23 个交叉口的路网,如图 2 所示。图中所示共计 23 个交叉口,其中,10 号交叉口南北方向和东西方向在空间上不交叉,此交叉口不存在信号配时,因此在后期研究中并未针对该交叉口进行优化。

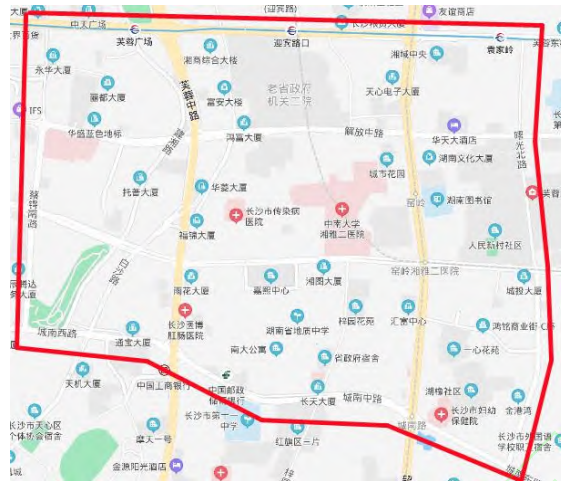


图1 研究区域

Fig.1 Study area



图2 抽象路网

Fig.2 Abstract network

## 1.2 数据概况

本文的研究重点在于针对路网的拥堵情况进行调节，因此选取了工作日的早高峰时段作为研究的时间范围。研究范围内，早高峰交通拥堵较为严重，直行车辆的二次排队情况非常普遍，如交叉口 1-9-13-16-20 沿线，虽然道路多为双向八车道和双向十车道，但仍存在较大的交通压力。结合 LPR 系统所采集到的数据进行分析，本文选取了 2019 年 7 月 1 日至 7 月 5 日连续五个工作日的车流量进行分析。选取时间段为早 7 时至 9 时，该时间段内每日流量分布具有相似趋势，为便于流量输入，采用取平均值的方式进行处理，将数据作为研究路网的车流量数据，表 1 为部分交叉口的基础信息。

表 1 部分交叉口基本信息

Table 1 Basic information of some intersections

交叉口编号	进口道方向	进口道车道数	进口道长度（米）	进口道流量（辆/小时）	交叉口编号	进口道方向	进口道车道数	进口道长度（米）	进口道流量（辆/小时）
1	东	6	40	1313	13	东	6	40	1479
	西	6	40	2238		西	6	40	1709
	南	/				南	/		
	北	3	30	331		北	2	30	1095
9	东	4	40	1803	16	东	4	30	1798
	西	6	40	2075		西	4	30	1999
	南	6	50	1952		南	2	25	1049



除车流量数据外,本文同步收集了研究范围内 22 个交叉口的信号配时参数。由于各交叉口面积、车道数等原因,信号周期从 100 秒至 190 秒不等,信号周期时长跨度较大,如图 3 所示。从现状来看,交叉口信号周期时长大致分为两类,部分支路及次干路相交的交叉口信号周期在 120 秒以下,而信号周期时长较大的交叉口时间多分布于 140 至 190 秒之间。

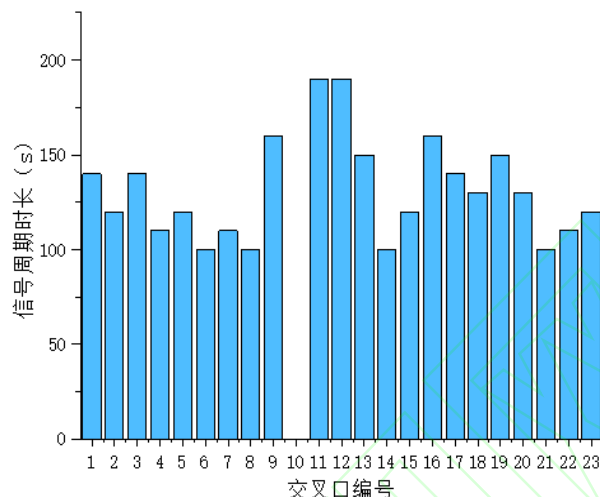


图 3 研究范围内各交叉口信号周期时长

Fig. 3 Signal cycle time of intersection in the study area

### 1.3 仿真路网

基于已获取的基础数据,本文采用 VISSIM 软件对研究区域的路网进行仿真模拟。在进行路网搭建前对实际道路条件进行了调查,详细记录了各类交通信息,如:车道数量、进口道长度、有无特殊车道及特殊交通管控等。在此基础之上绘制得出如图 4 所示的仿真路网。

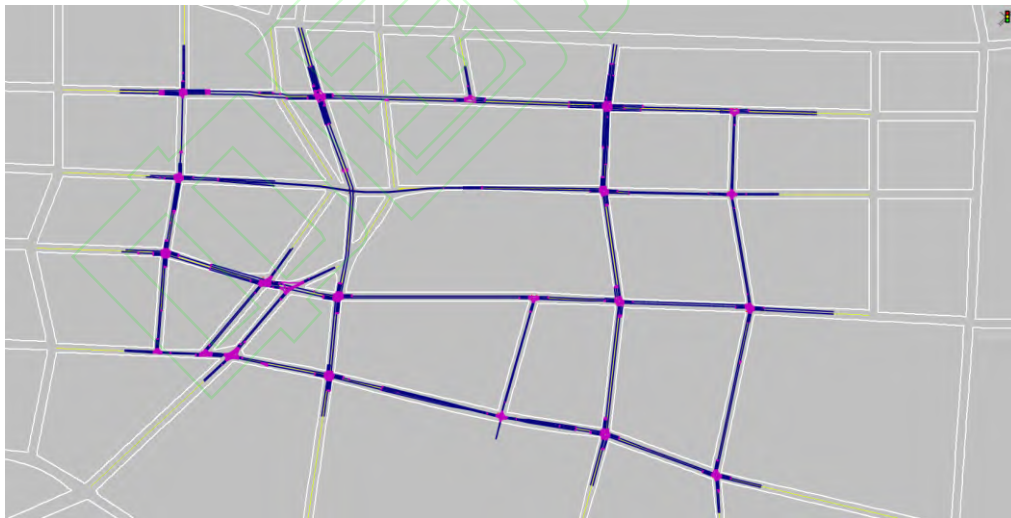


图 4 仿真路网

Fig. 4 Simulation of road network

在该路网上输入经过处理的 LPR 系统采集数据,输入端仅包括路网的边界交叉口,即交叉口 1、2、3、4、6、8、9、12、13、15、16、19、20、21、22、23。并在交叉口进口道处设置数据采集器,以一小时作为评价周期,测量通过每一个进口车道的车辆数,汇总得出每个交叉口的通过车辆数。将其与 LPR 系统采集得出的数据进行对比,得出如图 5 所示的结果。针对误差率大于 0.1 的 1、18、19 号交叉口,以进口道方向计算了误差率,如表 2 所示。

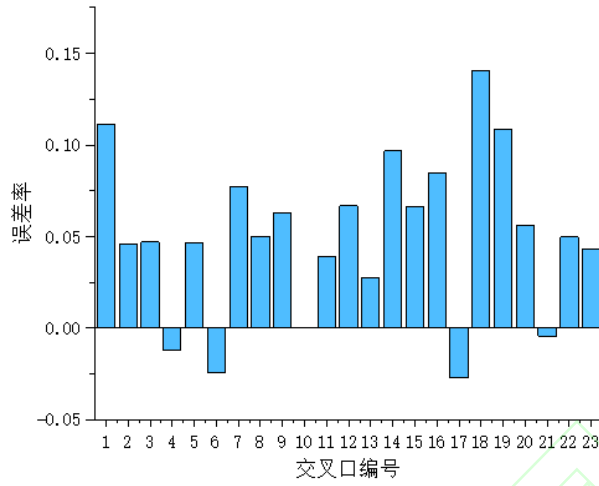


图 5 仿真结果与真实数据的差异

Fig. 5 Differences between simulation results and real data

表 2 部分交叉口误差率

Table 2 Differences between simulation results and real data of some intersections

交叉口编号	东进口误差率	西进口误差率	南进口误差率	北进口误差率	交叉口平均误差率
1	12.81%	11.61%	/	0.60%	11.15%
18	18.65%	22.64%	1.44%	19.46%	14.08%
19	-5.78%	9.63%	8.55%	24.96%	10.88%

由图 5 可以看出, 22 个路口中评价数据与真实数据差异最大的交叉口为 18 号交叉口, 差异率为 14.08%。86.3% 的交叉口误差率控制在 10% 以下, 说明本文搭建的仿真路网与实际环境具有较高的相似性。

## 2 递阶优化控制模型

### 2.1 反压力指标

反压力控制算法最初应用于数据传输方面<sup>[11]</sup>, 反压力控制由于其寻找最大压力值的特点可被应用于单个交叉口的信号控制<sup>[12-14]</sup>。对于任意路段  $l$ , 在任意时刻  $k$  可根据交通量、路段长度等参数得出反压力值  $w_l(k)$ <sup>[15]</sup>, 见公式 (1)。

$$w_{l,m}(k) = x_{l,m}(k) - \sum_{h \in o_m} r_{m,h}(k) x_{m,h}(k) \quad (1)$$

其中:  $x_{l,m}(k)$  表示在  $k$  时刻由路段  $l$  到路段  $m$  的车辆数;  $r_{m,h}(k)$  表示从  $k$  时刻到  $k+1$  时刻内由路段  $m$  到路段  $h$  的转弯率,  $r_{m,h}(k) \in (0,1)$ ;  $o_m$  表示路段  $m$  的下游合集, 如图 6 所示。

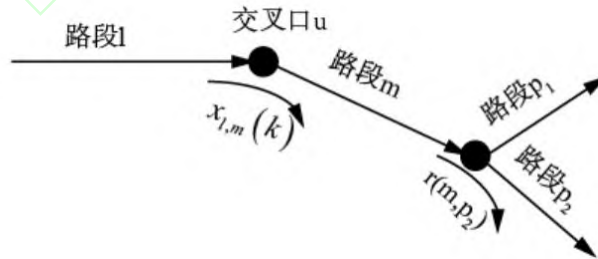


图 6 反压力参数示意图

Fig. 6 Schematic diagram of back pressure parameters

本文所选用的数据为车道级别, 因此, 针对每一车道的交通流可获取一个反压力值, 在此基础上, 应进一步计算交叉口的反压力指标。对于交叉口  $u$  而言, 整个交叉口的反压力指标值  $p_u(k)$  计算如公式 (2)。

$$p_u(k) = \sum_{u_u \in U_u} \sum_{(l,m) \in u_u} w_{l,m}(k) s_{l,m}(k) c_{l,m}(k) \quad (2)$$

其中,  $U_u$  代表交叉口  $u$  的相位集合;  $u_u$  代表交叉口  $u$  的相位;  $s_{l,m}(k)$  表示从  $k$  时刻到  $k+1$  时刻内由路段  $l$  到路段  $m$  的信号值;  $c_{l,m}(k)$  表示从  $k$  时刻到  $k+1$  时刻内由路段  $l$  到路段  $m$  的交通流的饱和流速。

在计算得出单一交叉口的反压力值后, 需要计算得出整个路网的反压力指标值  $\gamma(k)$ , 以该值作为优化依据。

$$\gamma(k) = \sum \delta_l w_l(k) \quad (3)$$

其中,  $\delta_l$  是路段  $l$  的权系数, 用于平衡路网中不同路段的延迟时间。

同时, 在计算得出交叉口的反压力值后, 可以通过信号控制矩阵  $s_u(k)$  确定当前交叉口在下一个优化周期内的控制策略。

## 2.2 递阶优化模型

考虑以反压力指标作为路网的实时判别参数, 在此基础之上, 引入双层优化模型, 上层以路段反压力指标作为输入参数, 结合优化目标和限制条件确定信号矩阵及最优控制方案。下层以采用改进韦伯斯特算法作为控制算法, 确定交叉口的信号控制方案。在确定的优化周期下, 对路网的信号控制进行优化。

### 2.2.1 上层模型

对于上层模型, 优化目标即为计算得出的整体路网反压力指标最优, 即公式 (4)。约束条件方面, 一方面对于交叉口  $u$ , 在  $k$  时刻的相位  $u_n$  有开和关两种形式, 分别为 1 和 0, 在  $k$  时刻时, 整个路口的相位  $u_n$  的累加和为 1, 保证只有单一相位处于开放状态, 即公式 (5)。另一方面对于道路  $p$  来说, 压力指标可以通过分周期采集的数据计算得出, 但对于交通量既有输入又有输出的路段来说, 需要同时考虑输入和输出两种情况, 只考虑压力指标数值有可能会产生超过道路性能的情况, 导致求解没有意义, 因此需要对道路承载力进行约束, 即公式 (6)。

目标函数及限制条件如下式:

$$\max Z = \gamma(k) \quad (4)$$

$$\sum u_n(k) = 1 \quad (5)$$

$$x_{l,m}(k+1) = x_{l,m}(k) + z_{l,m}(k) - h_{l,m}(k) \quad (6)$$

其中,  $x_{l,m}(k)$  表示  $k$  时刻从路段  $l$  到路段  $m$  的车辆数;  $z_{l,m}(k)$  表示从  $k$  时刻到  $k+1$  时刻内路径  $p$  的交通需求量;  $h_{l,m}(k)$  表示从  $k$  时刻到  $k+1$  时刻内路段  $l$  到路段  $m$  的车辆数。

### 2.2.2 下层模型

对于下层模型, 主要集中在路网范围内单个信号交叉口的配时方案决策控制。根据现有的交通流采集数据和信号配时数据得出, 部分路口如 14、18 号交叉口饱和度和偏高, 不太适用于常规的韦伯斯特配时方法, 因此考虑参考金勇等<sup>[16]</sup>的研究, 在韦伯斯特有效绿灯时间的概念中, 加入交叉口通行能力最大和车均延误最低为目标函数, 单一相位满足临界条件为约束的模型。以此作为改进韦伯斯特算法, 进行下层决策控制。

$$\max Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} S_{ij} \frac{g_i}{C} \quad (7)$$

$$\min d = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} q_{ij} d_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} q_{ij}} \quad (8)$$

$$\frac{y_i}{Y} (C_{\min} - L) \leq g_i \leq \frac{y_i}{Y} (C_{\max} - L) \quad (9)$$

其中,  $Q$  为交叉口通行能力;  $S_{ij}$  为  $i$  相位中的  $j$  车道组的饱和流率;  $g_i$  为  $i$  相位的有效绿灯时间,  $C$  为交叉口周期;  $d$  为交叉口每辆车的平均延误;  $q_{ij}$  为  $i$  相位中的  $j$  车道组的流量;  $d_{ij}$  为相位中的  $j$  车道组的平均延误;  $y_i$  为  $i$  相位的流量比;  $Y$  为交叉口总流量比;  $L$  为每周期总损失时间;  $C_{\min}$  为最小周期时间;  $C_{\max}$  为最大周期时间。

在进行交叉口控制优化时, 为便于形成稳定的区域性信号协调信号控制, 考虑采用新的配时周期。因研究区域内 22 个信号控制交叉口的复杂程度不同, 考虑以 90 秒、180 秒两个周期作为新的配时周期。对于原方案中高饱和度、进口车道数多的交叉口采用 180 秒大周期, 而原方案中交通压力较低的交叉口则采用 90 秒小周期。

## 3 仿真结果分析

### 3.1 仿真结果

为对比提出优化模型的有效性, 本文设置了三种运行方案, 方案一采用当前固定配时方案; 方案二采用递阶优化控制, 但下层模型仅采用常规韦伯斯特控制算法; 方案三采用递阶优化控制, 下层模型采用改进韦伯斯特控制算法。

对于路网的通行效率，采用在网车辆数和到达车辆数两个指标进行对比，如图 7、图 8 所示。其中，在网车辆数表示进入路网的车辆中在当前时刻仍处于路网上行驶的车辆数；到达车辆数表示进入路网的车辆中在当前时刻已行驶至路网边界的车辆数。

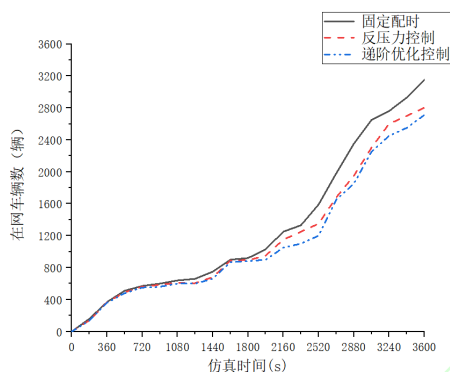


图 7 在网车辆数

Fig. 7 The number of vehicles running on the road network

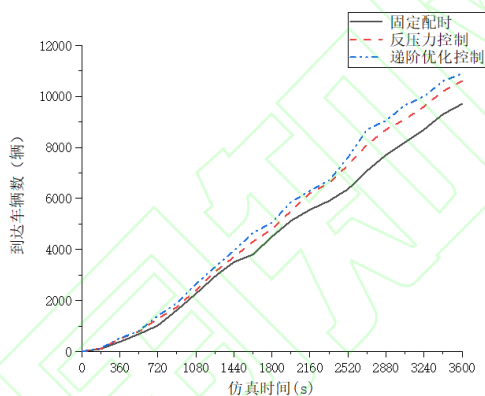


图 8 到达车辆数

Fig. 8 The number of vehicles arriving at the boundary

从以上两图中可以看出，对于在网车辆数，方案二和方案三相较于方案一均有所降低，说明优化方案与原始方案相较，道路饱和度有所下降，对于拥堵路段具有一定的疏导作用；到达车辆数在 1440 秒后方案二、三相较于方案一也有了显著提高，说明优化后车辆的通行效率提高，更多的车辆能够在一定的仿真时间内到达研究边界，方案三在路网通行效率方面提升程度略高于方案二。在对单个交叉口数据进行对比后发现，高饱和度交叉口在使用递阶优化控制后交叉口通行效率有所提高。

从车辆角度考虑，选取车均延误和车辆速度两个指标进行对比，如图 9 和图 10 所示。

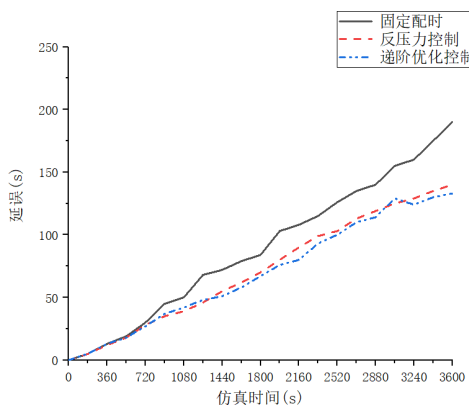


图 9 车均延误

Fig. 9 Average vehicle delay

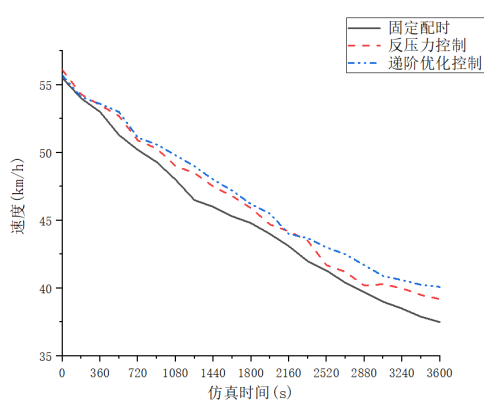


图 10 车均速度

Fig. 10 Average vehicle speed



图 8 中，方案二与方案三的延误增长与方案一相比更加平缓，延误相对较低。因此对于方案二和方案三来说，延误变化趋势差别不大。图 9 中，方案二与方案三在网车辆的行驶速度高于方案一，其中，方案三车辆行驶速度更高。因此，该结果说明本文采用的双层递阶控制方法具有更好的控制效果。

### 3.2 分析讨论

从仿真结果来看，使用递阶优化模型进行路网控制后，整体路网在各个评价指标上都有所提升。但针对高饱和度提出的改进韦伯斯特算法的应用效果，在对比中并不明显。

因此考虑将饱和度等于 0.6 作为划分点，将 22 个信号交叉口划分为 A、B 两类，交叉口饱和度大于 0.6 定义为 A 类，包括交叉口 1、9、11、12、14、16、18、20。其余交叉口定义为 B 类，再对四类指标进行对比，得出如下所示结果。

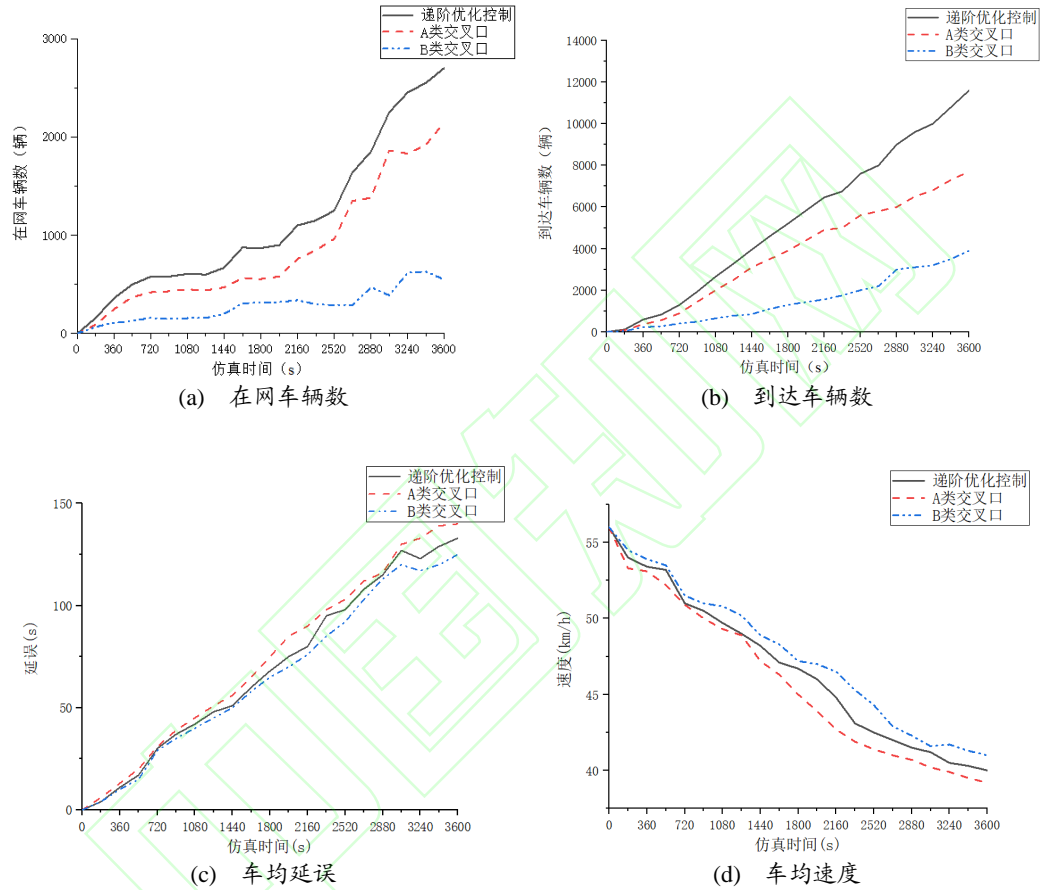


图 11 不同饱和度交叉口仿真结果对比

Fig. 11 Simulation results of intersections with different saturation

A 类交叉口作为饱和度较高的交叉口，同时车道数较多，B 类则车道数较少，双向四车道居多。在对比中可以看出，A 类交叉口无论是在网车辆数还是通过车辆数，都与总体形式相接近；而 B 类交叉口的数据变化幅度不大。A 类交叉口的在网车辆数在后期远高于 B 类交叉口，说明 A 类交叉口的拥堵情况更加严重。在速度和延误方面，两类交叉口的数据变化趋势与整体相接近。B 类交叉口虽然通过车辆数不及 A 类交叉口，但在延误方面相对低，在速度方面相对高，也符合高峰时期的实际情况。

在递阶优化控制中，考虑到部分交叉口可能出现高饱和度的情况，改进了传统韦伯斯特算法。针对改进算法对不同饱和度交叉口的影响做出了如图 12 所示的结果。

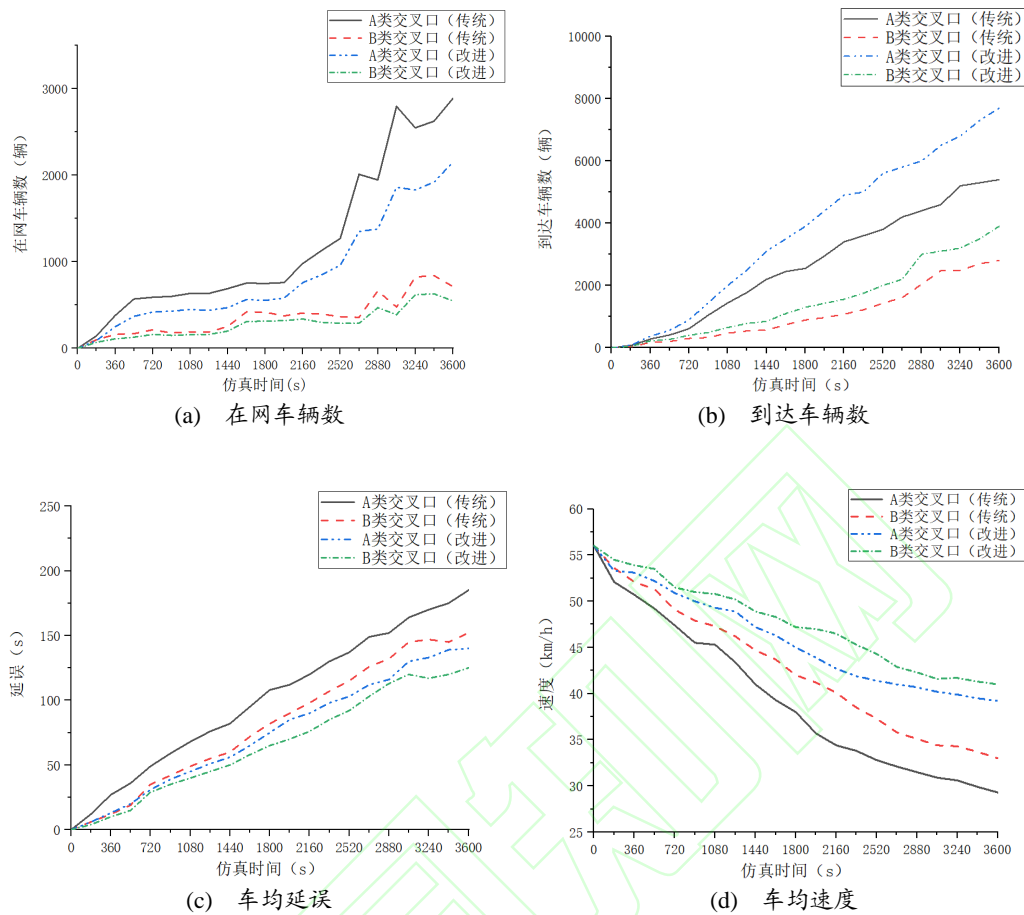


图 12 改进算法对不同饱和度交叉口的影响

Fig. 12 Influence of improved algorithm on intersections with different saturation

从图中来看, 由于针对高饱和度交叉口对配时算法进行了改进, A 类交叉口在网车辆数下降的幅度要高于 B 类交叉口, 同时, A 类交叉口的车均延误下降幅度也高于 B 类交叉口, 说明递阶优化控制对高饱和度交叉口的通行效率具有更明显的改善。同时在到达车辆数方面, 以递阶优化控制的 A、B 两类交叉口的到达车辆数都有一定的提升幅度; 而在递阶优化控制下, A 类交叉口的速度虽然在数值上不如 B 类交叉口, 但与未改进算法的控制效果相比, 递阶优化控制对高饱和度交叉口的车辆速度具有更好的改善作用。因此, 该结果表明本文提出的递阶控制方法对不同饱和度情况下的交叉口均有较好的控制效果。

本文采用的双层递阶控制方法针对当前数据具有一定的优化效果, 但同时需要一定的设备成本, 用以提供数据基础。取得的优化效果和实施成本与实际路网的交通饱和度相关, 当交通饱和度高于本研究同时仍处于可控状态下, 则可以取得相对更加明显的优化效果。

## 4 结论

1) 在网车辆数减少表明控制方案对于拥堵路段具有疏导作用, 到达车辆数增加表明路网通行效率得到提高;

2) 对于在路网中运行的车辆来说, 车辆速度的提高和车均延误的下降均表明车辆行驶更加顺畅, 车辆通行效率得到提高, 具有更好的驾驶感受。

3) 在下层控制中, 考虑在高饱和度交叉口传统韦伯斯特方法适用度不高, 因此采用了改进韦伯斯特算法。该方法有效地提高了高饱和度路口的通行效率。

## 参考文献:

[1] 赵纯, 董小明. 基于深度 Q-Learning 的信号灯配时优化研究[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(8):198-203.

- ZHAO Chun, DONG Xiaoming. Research on signal timing optimization based on deep Q-learning[J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(8):198-203.
- [2] 卢凯, 张杰华, 邓兴栋, 等. 基于车速与信号协同优化的区域绿波协调控制模型[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7):31-41.  
LU Kai, ZHANG Jiehua, DENG Xingdong, et al. Regional green wave coordinated control model based on cooperative optimization of vehicle speed and traffic signal[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7):31-41.
- [3] 牟亮, 赵红, 李燕, 仇俊政, 等. 基于改进 NSGA-II 的区域交通信号优化控制[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2021, 18(3):80-87.  
MOU Liang, ZHAO Hong, LI Yan, et al. Regional traffic signal optimal control based on improved NSGA-II[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2021, 18(3): 80-87.
- [4] 梁超, 范炳全, 韩印. 区域交通流协调控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(3):112-117.  
LIANG Chao, FAN Bingquan, HAN Yin. Coordination control method of regional traffic flow[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(3):112-117.
- [5] 郭亚娟. 城市道路交通拥堵区域动态识别及边界控制策略研究[D]. 济南:山东大学, 2020.  
GUO Yajuan. Research on dynamic identification and perimeter control strategies of urban traffic congested regions[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [6] 申慧. 预防区域路网过饱和的优化控制方法研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2021.  
SHEN Hui. Research on optimal control method to prevent over-saturation of regional road network[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [7] 王秋平, 丁猛. 历史街区交通微循环优化的双层规划模型[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(3):125-132.  
WANG Qiuping, DING Meng. Bi-level programming model of traffic microcirculation optimization for historic district[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(3):125-132.
- [8] 高雪溢. 城市交通微循环系统优化及评价模型[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2021.  
GAO Xueyi. Optimization and evaluation model of urban traffic microcirculation system[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.
- [9] 徐云雯. 城市交通路网随机建模与递阶优化[D]. 上海:上海交通大学, 2019.  
XU Yunwen. Stochastic modeling and hierarchical optimization of urban traffic network[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [10] 陈斌. 基于大系统递阶优化的交通控制与诱导协同方法研究[D]. 西安:长安大学, 2012.  
CHEN Bin. Research on cooperation of traffic control and traffic flow guidance based on hierarchical optimization of large-scale systems[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [11] PUMIR T, ANDERSON L, TRIANTAFYLLOS D, et al. Stability of modified max pressure controller with application to signalized traffic networks[C]//2015 American Control Conference (ACC). July 1-3, 2015, Chicago, IL, USA. IEEE, 2015: 1879-1886.
- [12] ANDERSON L, PUMIR T, TRIANTAFYLLOS D, et al. Stability and implementation of a cycle-based max pressure controller for signalized traffic networks[J]. Networks & Heterogeneous Media, 2018, 13(2):241-260.
- [13] MERCADER P, UWAYID W, HADDAD J. Max-pressure traffic controller based on travel times: an experimental analysis[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 110: 275-290.
- [14] GREGOIRE J, QIAN Xiangjun, FRAZZOLI E, et al. Capacity-aware backpressure traffic signal control[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2015, 2(2): 164-173.
- [15] VARAIYA P. Max pressure control of a network of signalized intersections[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 36: 177-195.
- [16] 金勇, 姚荣涵. 单点交叉口固定信号配时优化模型[J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(6):30-35.  
JIN Yong, YAO Ronghan. Optimization models of pretimed signal timing for isolated intersections[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2011, 32(6):30-35.