

文章编号:1671-1637(2013)06-0119-08

# 过饱和交叉口交通信号控制研究现状与展望

李瑞敏

(清华大学 交通研究所, 北京 100084)

**摘要:**为应对日益严峻的信号交叉口拥堵,总结了过饱和交叉口交通信号控制研究的发展歷程和研究现状,并分析了未来发展趋势。介绍了过饱和交通流信号控制的多个目标,包括最小化延误、最大化通行能力、排队长度约束等。分析了过饱和交叉口交通信号控制的多种模型与求解算法,例如线性规划与优化模型、混合整数规划模型、基于软计算技术和人工智能技术的模型等。总结了典型交通仿真平台和信号控制优化软件对过饱和交通信号控制的支持,以及现有多个典型信号控制系统中对过饱和交通流状态的控制方法。分析结果表明:由于过饱和交叉口的交通流特性,当前过饱和交叉口信号控制方法需要解决变量过多、计算复杂、计算效率低等问题;过饱和网络的交通流特性、集成优化模型、高效求解算法与技术、仿真平台和示范应用是未来需要关注的研究趋势。

**关键词:**交通信号控制;过饱和交叉口;控制目标;优化模型;交通仿真

**中图分类号:**U491.51

**文献标志码:**A

## Study status and prospect of traffic signal control for over-saturated intersection

LI Rui-min

(Institute of Transportation Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to relieve the serious congestion at signalized intersections, the development course and research status of traffic signal control at over-saturated intersection were summarized, and future development trend was analyzed. The various control objectives of over-saturated traffic flow were introduced, including the minimum delay, the maximum capacity and the queue limitation etc. Several kinds of traffic signal control models and algorithms at over-saturated intersection were analyzed, such as linear programming and optimization models, mixed integer linear programming models and other models based on soft computing and artificial intelligence techniques etc. The traffic signal control under over-saturated condition which was supported by the typical traffic simulation platform and signal control optimization software was summarized, as well as the traffic signal control methods at over-saturated intersection in some typical traffic control systems. Analysis result indicates that according to the traffic flow characteristics at over-saturated intersection, some problems need to be solved by the control methods, including too much parameters, computational complexity and lower computation efficiency etc. In over-saturated network, traffic flow characteristics, integrated optimization model, highly efficient solving algorithm and technology, simulation platform and demonstration application are the future research trends which need to concentrate on. 58 refs.

收稿日期:2013-06-03

基金项目:国家自然科学基金项目(50908125);高等学校博士学科点专项科研基金项目(200800031059)

作者简介:李瑞敏(1979-),男,山东莱州人,清华大学副教授,工学博士,从事智能交通控制研究。

**Key words:** traffic signal control; over-saturated intersection; control objective; optimization model; traffic simulation

**Author resume:** LI Rui-min(1979-), male, associate professor, PhD, +86-10-62770985, lrmin@tsinghua.edu.cn.

## 0 引 言

作为城市交通管理系统的重要组成部分,交通信号控制是交通工程研究领域的重要课题。到目前为止,绝大多数交通信号控制理论与方法的研究均面向非饱和交通流状态展开,对于饱和与过饱和状态下的交叉口信号控制和网络协调控制研究较少。由于交通流特点的独特性,目前,在中国运行着的一些信号控制系统,如 SCOOT (Split-Cycle-Offset Optimization Technique) 与 SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) 等,由于其控制原理等方面的限制,在饱和与过饱和状态下的控制效果不理想,难以满足中国城市早晚交通高峰时段的过饱和和交通状态信号控制的需求。

相比非饱和状态,饱和与过饱和状态下的道路网络交通流有其自身的变化特性,如由于排队导致的回溢现象与由于相邻车道的阻塞导致的车道饱和和流量的减少甚至通行能力的下降等,同时,对信号控制的需求也有所不同,例如控制目标的排序、多控制目标的协调优化、控制参数的同步优化、协调方式的动态变化等,因此,城市路网饱和与过饱和状态下的交通信号控制理论与方法有其自身特殊性的需求<sup>[1-2]</sup>。本文系统梳理了饱和与过饱和状态交通信号控制相关领域的国内外研究现状,并分析了目前存在的问题和未来的研究方向,为相关研究提供借鉴和参考。

国外对过饱和状态交叉口信号控制的研究开展较早,截止目前主要研究内容集中在单个过饱和交叉口及由多个过饱和交叉口构成的干线协调控制问题上,并逐渐推向对于过饱和状态下的网络协调控制的研究。相对而言,中国在该领域的研究起步较晚,近年来开始有该研究领域的文献出现,研究人员也逐渐增多。总体而言,目前国内外在过饱和和交通信号控制方面的研究主要包括以下 3 方面:过饱和和交通状况下的交通流特性的研究、过饱和和交通状况下的控制策略与模型的研究与用于过饱和和交通状况信号控制分析的交通仿真工具与控制系统研究。过饱和和交通状况下的控制策略和模型的研究是当前研究的核心和重点,又可细分为以下 3 方面的内容:过

饱和和交通流信号控制目标的研究、过饱和和交通流信号控制模型的研究与过饱和和交通流信号控制模型求解算法的研究等。

## 1 过饱和和交通流信号控制目标

鉴于过饱和和交通流与非饱和和交通流特性的区别,在对过饱和和交通流进行信号控制模型与策略研究时,如何针对不同的交通流状况选取恰当的控制优化目标是需要着重考虑的问题之一。

在最初的研究中,研究人员主要借鉴非饱和和交通流信号控制的目标,以延误最小为优化目标<sup>[3]</sup>,此后考虑了单车最大延误的限制<sup>[4]</sup>。20 世纪 70 年代,Michalopoulos 等将排队长度限制引入过饱和和交叉口的信号控制中,体现了过饱和和交叉口构成的路网中必须考虑的一个交通流运行的特性,即交通流的回溢现象<sup>[5-7]</sup>;1997 年,Ahn 等又将主干道网络的最大通过量和防止出现回流现象(实际上也是控制排队长度)作为控制目标引入过饱和和主干道网络信号控制中<sup>[8]</sup>。

此后对过饱和和交叉口控制的研究多集中在多目标方面。Ceder 等提出 2 个用于过饱和状况交通流控制的优化目标,最小化最大的排队长度与最小化积累排队长度的增量,研究结果表明这 2 个优化目标在大多数情况下是一致的<sup>[9]</sup>;Lieberman 等将优化目标扩展为 3 个:最大化系统通过量、充分利用道路的存储能力与提供均等的服务<sup>[10]</sup>。在最新的一些研究中,优化目标也在上述研究的范围之内,如通行能力最大等<sup>[11]</sup>。

在软件 TRANSYT-7F 8.0 版中<sup>[12]</sup>,为了处理过饱和和交通状态,主要基于交通通过量和排队衡量,增加了以下 4 个优化目标函数。

(1)最小化排队率  $R$  和无效指数  $D$  的乘积,即  $RD$ 。

(2)最大化通过率与无效指数的比值。

(3)最大化通过率,并且在不降低通过率的情况下最小化无效指数  $D$ 。

(4)最大化通过率,如果饱和度和超过一定界限,则进行相应的惩罚。

在一些已经实现过饱和和交通控制的交通信号控

制系统中,MOVA (Microprocessor Optimised Vehicle Actuation)<sup>[13]</sup>在过饱和状态下以通行能力最大为目标进行处理,其处理对象往往局限在一个信号交叉口,而 SMART NETS 项目中开发的新一代的控制策略 TUC(Traffic-responsive Urban Control)<sup>[14]</sup>则在过饱和状态下以最小化形成过饱和状态和车队拥挤的可能性为控制目标,并考虑使得通行能力最大化的目标。

从以上研究可以看出,由于过饱和交叉口的交通流拥堵影响特性,对交叉口排队的管理成为过饱和和交叉口交通信号控制的重要目标<sup>[15-17]</sup>,在过饱和交叉口的信号控制中引入排队控制的目标是通过信号配时使排队的负面影响最小。排队管理策略通常有以下几种:使用一个信号控制机控制较近的交叉口;平衡冲突方向的排队长度;防止排队造成拥堵的繁衍;控制进入瓶颈区的交通流;控制排队进入瓶颈区等。

在中国对过饱和交叉口的信号控制研究中,多目标的综合成为首要的选择,或者是比较传统的以延误、停车率、燃油消耗为综合指标<sup>[18]</sup>,或者是考虑过饱和交叉口的交通控制特点及需求,以预防交通拥挤和快速消散交通拥挤为优化目标<sup>[19]</sup>,并考虑通行优先权的方式,设置最大排队长度和最长绿灯时长建立控制模型,其他一些研究也采取了多目标综合的方式<sup>[20-22]</sup>。

Shepherd 对过饱和交叉口信号控制的目标进行了整理,划分为以下 3 类:通行能力提高、排队管理与限制进入某一区域的交通输入<sup>[23]</sup>。总体而言,由于过饱和交通流状态与非饱和交通流状态在交通流特性及网络特性等方面的区别,使得在对控制目标的选择上也有较大的差异。已有研究表明,控制通行能力最大及排队管理,即控制最大排队长度,已成为过饱和交通控制的最重要目标,其他目标则包括延误最小化、最小化最大单车延误、最小化停车率等。

## 2 过饱和和交通流信号控制模型

交通控制问题的核心是规划与优化的问题,因此,目前在对过饱和交通状况下交通控制模型的研究方面还是以各种数学规划模型为主。

### 2.1 线性规划与优化模型

Gazis 较早研究了单向道路相交的单个与 2 个交叉口的饱和交叉口系统的信号控制问题<sup>[3]</sup>,以单点过饱和交叉口的控制模型为基础进行拓展,利用半图形化方法建立了解析模型,以延误最小为优化

目标,并且应用了 Poniriyagin 控制理论,然而,由于变量数量问题,该方法难以扩展到包括多个交叉口的饱和交通网络中。

随后 Dans 等应用存储转发网络建立了过饱和和交叉口信号控制系统的线性规划模型<sup>[4]</sup>,并考虑了在给定出行路径情况下的配时优化问题,其控制目标为延误最小,同时考虑了单车最大延误的限制,研究对象仍以单向道路、两交叉口组成的系统为主。单交叉口模型目标函数为

$$\min F = \int_0^T (Q_1 + Q_2) dt \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \frac{dQ_1}{dt} = \begin{cases} v_1 - u & Q_1 > 0 \\ \max\{0, v_1 - u\} & Q_1 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = \begin{cases} v_2 - s_2 \left(1 - \frac{L}{C}\right) + \frac{s_2 u}{s_1} & Q_2 > 0 \\ \max\left\{0, v_2 - s_2 \left(1 - \frac{L}{C}\right) + \frac{s_2 u}{s_1}\right\} & Q_2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$u = \frac{s_1 g}{C} \quad (4)$$

$$g_{\min} \leq g \leq g_{\max} \quad (5)$$

$$\frac{v_1 - dQ_1/dt}{s_1} + \frac{v_2 - dQ_2/dt}{s_2} \leq 1 - \frac{L}{C} \quad (6)$$

式中: $F$  为目标函数; $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为进口道 1、2 的排队长度; $t$  为研究时长; $T$  为过饱和时长; $v_1$ 、 $v_2$  分别为进口道 1、2 的到达流率; $u$  为进口道 1 的离去率,是时间和控制变量的函数; $s_1$ 、 $s_2$  分别为进口道 1、2 的饱和流率; $L$  为周期总损失时间; $C$  为周期长; $g$ 、 $g_{\min}$ 、 $g_{\max}$  分别为进口道 1 所对应相位的绿灯时间、最小绿灯时间和最大绿灯时间。

式(2)、(3)可以用差分方程来近似,并且总延误的最小化就成为一个线性规划问题<sup>[24]</sup>。后来的部分研究以此为基础展开:Michalopoulos 等在 Gazis 模型的基础上将排队长度限制引入过饱和交叉口的信号控制中,体现了过饱和交叉口构成的路网中必须考虑的一个交通流运行的特性,即交通流的回溢现象<sup>[5-7]</sup>;Diakaki 基于存储转发网络将信号控制问题建模为线性二次优化控制问题,并应用到了 TUC 系统的开发中<sup>[14]</sup>;Aboudolas 等基于存储转发网络又进行扩展,提出了应用于大型城市拥堵道路交通网络的 2 种方法,其一为建模为开环约束二次优化控制问题,使用二次规划进行求解,其二为建模为开环约束非线性优化控制问题,使用可行方向求解算法求解<sup>[25]</sup>。

Ceder 等利用线性规划方法建立了用于单点交叉口非饱和与过饱和状态下的配时优化模型,并利

用实际路口对模型的有效性进行了验证<sup>[9]</sup>。Chen 系统地研究了过饱和网络的信号控制问题,提出了用于单点控制的动态线性规划模型,研究了基于延误和排队长度管理的折衷优化方法,并将其扩展到网络范围,最后应用仿真手段进行了验证<sup>[24]</sup>,但未考虑相序优化等问题。近似动态规划的方法也被用于过饱和交叉口单点信号控制的优化<sup>[25-26]</sup>。Chang 等提出了用于单个过饱和交叉口的离散动态优化模型及其算法,仿真结果表明相比之前连续动态优化模型,该模型在控制效果上有所改进<sup>[27]</sup>;此后 Chang 等又将过饱和交叉口控制算法拓展到了网络范围,提出了基于最大协调可能性来决定最优控制的算法,并整合了过饱和与欠饱和 2 种不同的控制过程<sup>[28]</sup>。

## 2.2 混合整数规划方法

其他数学规划方法也逐渐被用于过饱和和交叉口交通信号控制优化模型的研究中,其中混合整数规划方法应用较多。Kim 等运用混合整数线性规划方法建立了动态模型,为过饱和状态下的钻石型路口提供优化的信号配时<sup>[29]</sup>;Lieberman 等针对过饱和和干线提出混合整数线性规划模型,以控制排队长度,由该模型产生相位差的优化值与各进口道的排队长度<sup>[10,30]</sup>,利用非线性规划调整每个信号周期的绿信比,以使得每个饱和进口道上的实际干线排队长度逐渐接近由混合整数规划模型计算得到的最佳队列长度,从而实现其控制目标;Lo 等利用细胞传输模型(Cell Transmission Model, CTM)将网络信号优化问题建模为混合整数线性规划,并在此基础上开发了动态信号配时控制优化方法,利用遗传算法进行求解,在过饱和情况下可以提供灵活的控制方案<sup>[31]</sup>。

时至今日,除了引入模糊控制等其他控制理论以外,众多的研究过饱和交通流信号控制的模型基本上都是以各种数学规划理论为基础进行建模。早期的研究多以单向道路构成的单个或 2 个交叉口为研究对象,以延误最小为控制目标,利用解析方法来确定定时控制的参数,因此,基本不具备网络规模范围内在线应用的实用性。同时,由于过饱和和交通流的特性与非饱和交通流差异显著,在协调控制中需要考虑的因素众多,除对延误、停车次数、通行能力最大化等的优化外,还需要考虑防止在过饱和情况下所产生的回溢、单车延误过大、最小化过饱和和持续时间等因素,因此,使得控制变量和状态变量较多,且具有更多的不确定性,由此在进行过饱和和交叉

口的网络协调控制时,解析方法在应用时存在变量过多、计算复杂等问题。

## 2.3 软计算技术和人工智能技术

近年来,软计算技术和人工智能技术的发展,为过饱和和交叉口的信号控制提供了可能的技术支撑,不少学者借助各种软计算技术研究了干道及网络在过饱和状态下的网络控制优化问题。遗传算法由于其在处理优化问题方面的优势而在过饱和交通控制中获得了较多的关注,神经网络与模糊控制技术也在过饱和和交通状况的信号控制中有部分研究。

目前,遗传算法主要被用于进行过饱和和状态干线的协调控制。Park 等提出针对过饱和和状态的遗传算法(Genetic Algorithm, GA)最优化程序,同时优化周期长、绿信比、相位差及相序,优化目标考虑最小化延误及最大化通过量,并用由 4 个交叉口构成的干线进行了仿真验证,研究表明这个基于遗传算法的最优化程序提供的解决方案与 TRANSYT-7F 8.1 版本相比更具有统计学意义<sup>[32-33]</sup>。

Aub-lebdeh 等在应用遗传算法进行过饱和和状态信号控制方面进行了较多的研究,先是提出了对于双向过饱和和干道的动态信号控制和排队管理算法的模型和求解方法<sup>[34-36]</sup>,该算法至少可以在主要方向上获得最优的控制和排队管理方案,并使用遗传算法进行求解,随后又测试了 4 个不同的交通管理方案<sup>[37]</sup>,通过为干道和相交道路分配不同的优先权以实现特定的系统性能指标;Girianna 等将文献<sup>[34-36]</sup>的算法进行扩展,将其应用到过饱和状态的网络环境中,以调整沿多交叉干道和平行干道的过饱和和状态信号,利用遗传算法获得了良好的效果<sup>[38-40]</sup>;近来 Hajbabaie 等<sup>[41]</sup>又对遗传算法、进化策略及近似动态规划进行了对比分析。

遗传算法也被应用于针对钻石型路口的干线协调信号控制软件中<sup>[42]</sup>,可以处理非饱和与过饱和 2 种情况。陈娟等提出了基于 IPNSGA-II (Iterative Predictive Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II) 遗传算法的启发式分层控制算法框架来进行过饱和和城市交通干线的控制优化问题<sup>[43-44]</sup>,以解决过饱和和情况下面临的多目标优化问题。

在神经网络和模糊控制方面,虽然这 2 种技术在非饱和和交通信号控制中已有大量研究与应用,但是在针对过饱和和交通信号控制研究方面尚不多见,并且因计算效率等问题,目前多集中于对单个过饱和和交叉口的信号控制研究中<sup>[45-46]</sup>。相关研究表明,模糊控制在针对过饱和和状态交叉口的信号控制中,

与定时控制、感应控制相比有一定的效果<sup>[47-50]</sup>。

在其他技术方面,目前智能体技术<sup>[51]</sup>、基于规则的自适应控制策略<sup>[52-53]</sup>等都有所应用。近期有研究将多种方法同时应用,如模糊控制与遗传算法相结合<sup>[54]</sup>。由目前的研究趋势看,由于过饱和交叉口信号控制中对计算复杂性及计算速度的要求,软计算技术和人工智能技术在未来的研究中将有一定的应用前景,但实时在线的计算效率也是此类技术应用时需要重点考虑的问题之一。

### 3 其他相关研究

#### 3.1 相关交通仿真工具

计算机仿真已经成为交通信号控制研究中的重要手段,对于过饱和交叉口的信号控制优化而言也不例外。1967年,仿真手段就被用来研究面向单向道路构成的单个交叉口的4种不同的过饱和和交叉口信号控制策略<sup>[55]</sup>;其后Messer将Prosser-Dunne模型进行扩展,以研究过饱和和交叉口,并建立了相应的仿真模型,通过仿真的手段研究了过饱和和交叉口及干线的交通流特性<sup>[56-57]</sup>;Ahn等开发了一个交通仿真模型,为过饱和和城市干道网络的信号配时提供支撑,仿真模型包括随机数生成模型、驾驶人和车辆特性、系统初始化时间等模块,可以用于单向或双向道路的二相位或三相位控制(只适用于双向道路)的仿真研究<sup>[8]</sup>。在其他的一些研究中,也开发了相应的仿真模型来为过饱和和交通流信号控制模型的研究与优化提供分析环境<sup>[31,53]</sup>,然而,这些针对性的仿真研究更多针对某个问题,缺乏通用性。

在目前的一些较为成熟的信号控制优化软件中,也有部分软件出现处理过饱和和交通网络状态的算法或模块。在TRANSYT-7F 8.0版以后的版本和SYNCHRO 7.0中引入了用于处理过饱和和交通网络状况信号优化的算法。在TRANSYT-7F 8.0之后的版本中,相应考虑了对饱和及过饱和情况的处理,采用的方法是在TRANSYT-7F中加入一个新的功能,使用户能够为指定的连线确定一个车队长度极限,然后,信号优化器去寻找方案,此方案使最大车队长度超过预先设定位置的可能性最小。实现方法如下:在性能指标(Performance Index, PI)中加入一个惩罚系统,一旦信号配时长度超过预定的极限,将使PI值增大,优化器将寻求新的配时方案。研究表明,TRANSYT-7F的控制方法对于过饱和和交通状况的控制效果有一定的改善。

#### 3.2 控制系统中对过饱和和交通流的处理

在20世纪七八十年代开始开发自适应交通信号控制系统之初,往往针对的都是非饱和情况下的交通流状况,对过饱和的情况考虑不足,例如SCOOT将饱和度作为控制的主要目标,只有在短距离交叉口时,考虑到要避免车辆排队堵塞上游交叉口,才把拥挤系数作为控制目标之一。

近年来,随着道路交通流量的不断增加和道路交叉口饱和度的不断增大,一些交通信号控制系统在研究过程中开始引入对过饱和和交通流状态的控制问题,例如SCOOT,在其目前的版本SCOOT MC3(Managing Congestion, Communications and Control)<sup>[58]</sup>中,又在4个领域增强了SCOOT的控制功能,包括通讯、拥堵控制、公交优先及行人设施管理。在拥堵控制方面,增加一个拥堵监控的模块,以提高之前SCOOT中就存在的管理拥堵的特性。该模块在后台运行,持续搜索和分析拥堵问题,然后报告结果,并帮助工程师优化利用SCOOT所能利用的工具去管理交通拥堵。拥堵监控模块的目标是持续监控SCOOT控制网络内的交通拥堵问题,识别出导致严重问题的车道并诊断出问题原因,以改善这些车道,随后将给出推荐的措施。当然,拥堵监控模块主要处理常发性拥堵,而非由事故等异常事件导致的偶发性拥堵。

MOVA对延误和停车的最小化过程不适应于过饱和时段,所以采用了通行能力最大化的过程作为替代。一旦某路口过饱和,则使得通行能力最大和延误最小的信号时长之间很可能存在关联。这一假设是MOVA在过饱和情况下进行控制的基础。

近年来,在欧盟完成的SMART NETS项目中,开发的新一代的控制策略TUC<sup>[15]</sup>也充分考虑了过饱和和交通流的情况,在其绿信比的控制模块中,控制目标是使过饱和状态和车队堵塞发生的可能性最小,采用的基本方法是将城市交通控制问题表达为线性二次方程最优控制问题,基于存储转发的数学建模方法进行建模。

### 4 未来发展趋势

目前,国内外在研究过饱和状态下的交通信号控制优化方面存在以下4个特点。

(1)以过饱和的单个和干线协调控制为主,对网络协调控制优化研究开始逐渐增多,但受计算效率等问题的制约。

(2)主要以多目标优化为主,且在主要目标方面

与非饱和状况有所区别。

(3)传统解析方法的限制使得研究人员开始寻求软计算技术和人工智能技术的支持。

(4)优化内容从单一的绿信比逐步扩展到周期长、绿信比、相位差乃至相序优化。

交通信号控制系统的发展是随着计算机技术、控制理论、信息技术等的发展而不断发展的。结合其他基础技术与理论的发展,未来过饱和状态交通信号控制理论研究需要在以下 4 个方面不断完善。

#### 4.1 过饱和网络的交通流特性

检测技术的发展使得目前更多的检测信息可被获取,例如,视频检测器可以直接观测到视野范围内的排队长度等,因此,基于不断发展的检测技术,今后可以以理论分析与现场调查相结合的方式,研究过饱和和交叉口的交通流特性,主要包括排队的形成和消散、阻滞现象、上下游交叉口的联系,以及多个关键指标的估计、预测与计算方法,如信号控制状态下的排队长度预测、延误分析、饱和流率实测等,以更好地解析过饱和状态下的网络交通流的变化规律,为信号控制策略的研究提供基础支撑,也是在线实时优化控制模型或系统能够有效运行的基础。

#### 4.2 面向网络层面的集成优化模型

过饱和和交通流的信号控制需要从网络层面与全局的角度进行控制。进一步讲,需要将网络交通信号控制与交通信息服务或诱导结合起来进行研究,即从传统的交通信号控制多是被动适应交通流的变化,向对交通流进行主动介入管理的方向发展,因此,所建立的模型需要考虑交通控制、交通信息服务、交通诱导等多种交通管控方式的整合,形成面向网络层面的集成化主动交通管控优化模型及方法,目前已有研究开始考虑相关内容。同时需要考虑群体控制与个体控制的结合,考虑对自动驾驶以及车联网等技术的集成。

#### 4.3 高效求解算法与技术

对过饱和和交叉口的集成化建模及优化导致变量、优化目标等的多样性,使得所建立的模型往往过于复杂,求解单个路口时,计算速度尚能满足实时在线优化的需求,而针对网络层面则无法进行实时计算。未来随着计算机运算速度的进一步提高,可针对过饱和和网络层面进行基于网络的交通信号集成优化模型,利用不断发展的软计算技术,研究能够具有实用效果的可进行实时在线优化的模型求解算法与技术。

#### 4.4 仿真平台与示范应用

以理论与方法研究成果为基础,结合现有可进行二次开发的仿真软件,如 PARAMICS (Parallel Microscopic Simulator)等,整合过饱和道路交通流的交通流基本模型,建立进行过饱和路网动态优化控制的仿真环境,为过饱和路网优化控制方法的研究提供辅助工具。中国城市的路网特性、交通流特性、交通参与者特性等都与国外存在较大差异,因此,所研究的模型成果需结合中国城市具体实际案例进行示范应用研究,不断提高模型的有效性。

### 5 结 语

中国机动车保有量的快速增长导致今后中国城市交通信号控制的一个重要任务就是要对早晚交通高峰时段过饱和和交通流进行良好的网络控制。本文对当前国内外针对过饱和和交通流信号控制研究的部分内容、重点、现有成果与未来趋势进行了系统的整理和分析,并结合中国城市道路交通网络发展特点提出了未来的展望,以期对中国在该领域的研究具有良好的借鉴作用。

#### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] 蒋贤才,苏小红. 拥挤交通环境下经典信号控制理论适应性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(5): 28-33.  
JIANG Xian-cai, SU Xiao-hong. Adaptability analysis of classical signal control theory applied in crowded traffic environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(5): 28-33. (in Chinese)
- [2] CHEN Shuai-yu, XU Hao, LIU Hong-chao. Timing oversaturated signals: what can we learn from classic and state-of-the-art signal control models[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(1): 97-110.
- [3] GAZIS D C. Optimum control of a system of oversaturated intersections[J]. Operations Research, 1964, 12(6): 815-831.
- [4] DANS G C, GAZIS D C. Optimal control of oversaturated store-and-forward transportation networks [J]. Transportation Science, 1976, 10(1): 1-19.
- [5] MICHALOPOULOS P G, STEPHANOPOULOS G. Oversaturated signal systems with queue length constraints—I: single intersection[J]. Transportation Research, 1977, 11(6): 413-421.
- [6] MICHALOPOULOS P G, STEPHANOPOULOS G. Oversaturated signal systems with queue length constraints—II: systems of intersections[J]. Transportation Research, 1977, 11(6): 423-428.
- [7] MICHALOPOULOS P G, STEPHANOPOULOS G. Optimal control of oversaturated intersections theoretical and practical

- considerations[J]. Traffic Engineering and Control, 1978, 19(5): 216-221.
- [8] AHN G H, MACHEMEHL R B. Methodology for traffic signal timing in oversaturated arterial networks[R]. Austin: University of Texas at Austin, 1997.
- [9] CEDER A, RESHETNIK I. An algorithm to minimize queues at signalized intersections[J]. Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(6): 615-622.
- [10] LIEBERMAN E B, CHANG J, PRASSAS E S. Formulation of real-time control policy for oversaturated arterials[J]. Transportation Research Record, 2000(1727): 77-88.
- [11] TALMOR I, MAHALEL D. Signal design for an isolated intersection during congestion[J]. Journal of the Operational Research Society, 2007, 58(4): 454-466.
- [12] LI Min-tang, GAN A C. Signal timing optimization for over-saturated networks using TRANSYT-7F[J]. Transportation Research Record, 1999(1683): 118-126.
- [13] CRABTREE M R. Application guide 44: MOVA traffic control manual[R]. Reading: Transportation Research Laboratory, 2005.
- [14] DIAKAKI C. Signal management in real time for urban traffic networks[R]. Chania: Technical University of Crete, 2002.
- [15] DENNEY R W, HEAD L, SPENCER K. Signal timing under saturated conditions[R]. Washington DC: Federal Highway Administration of US Department of Transportation, 2008.
- [16] SONG Xian-min, TAO Peng-fei, CHEN Li-gang, et al. Offset optimization based on queue length constraint for saturated arterial intersections[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2012(2012): 1-13.
- [17] 李 岩, 赵志宏, 李鹏飞, 等. 过饱和状态交通信号控制方法综述[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 116-126.
- LI Yan, ZHAO Zhi-hong, LI Peng-fei, et al. Review of traffic signal control methods under over-saturated conditions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4): 116-126. (in Chinese)
- [18] 廖明军, 周庆华, 王凯英, 等. 饱和交叉口信号配时研究[J]. 森林工程, 2005, 21(1): 67-68.
- LIAO Ming-jun, ZHOU Qing-hua, WANG Kai-ying, et al. Signal timing of saturated intersection[J]. Forest Engineering, 2005, 21(1): 67-68. (in Chinese)
- [19] 裴玉龙, 蒋贤才. 饱和交通状态下的绿信比优化及其应用研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11): 1499-1502.
- PEI Yu-long, JIANG Xian-cai. Green ratio optimizing and application in saturated traffic flow[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(11): 1499-1502. (in Chinese)
- [20] 陈昱光. 城市道路交通瓶颈信号控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- CHEN Yu-guang. Research on signal control methods of traffic bottlenecks in city road network[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [21] 唐德华, 许伦辉, 林 泉. 过饱和和信号交叉口的多目标控制模型[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(19): 5726-5729.
- TANG De-hua, XU Lun-hui, LIN Quan. Multi-objective control model of over-saturated signalized intersection[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(19): 5726-5729. (in Chinese)
- [22] 陈 娟, 袁长亮. 城市过饱和路网的偏好多目标相容优化控制[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(10): 13-16, 45.
- CHEN Juan, YUAN Chang-liang. Urban oversaturated traffic network control based on preference multi-objective compatible optimization control[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(10): 13-16, 45. (in Chinese)
- [23] SHEPHERD S P. A review of traffic signal control[R]. Leeds: University of Leeds, 1992.
- [24] CHEN Shuai-yu. Real-time traffic signal control for over-saturated networks[D]. Lubbock: Texas Tech University, 2007.
- [25] ABOUDOLAS K, PAPAGEORGIOU M, KOSMATOPOULOS E. Store-and-forward based methods for the signal control problem in large-scale congested urban road networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2009, 17(2): 163-174.
- [26] 贾 琰. 基于近似动态规划的交通控制算法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- JIA Yan. Traffic control algorithm based on approximate dynamic programming[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [27] CHANG T H, LIN J T. Optimal signal timing for an oversaturated intersection[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2000, 34(6): 471-491.
- [28] CHANG T H, SUN G Y. Modeling and optimization of an oversaturated signalized network[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2004, 38(8): 687-707.
- [29] KIM Y, MESSER C J. Traffic signal timing models for oversaturated signalized interchanges[R]. Austin: Texas Transportation Institute, 1992.
- [30] CHANG J. Real-time traffic control policy for oversaturated arterials[D]. New York: New York University, 2000.
- [31] LO H K, CHOW A H F. Control strategies for oversaturated traffic[J]. Journal of Transportation Engineering, 2004, 130(4): 466-478.
- [32] PARK B, MESSER C J, URBANIK T. Traffic signal optimization program for oversaturated conditions: genetic algorithm approach[J]. Transportation Research Record, 1999(1683): 133-142.
- [33] PARK B, MESSER C J, URBANIK T. Enhanced genetic algorithm for signal-timing optimization of oversaturated intersections[J]. Transportation Research Record, 2000(1727): 32-41.
- [34] ABU-LEBDEH G. Development of dynamic traffic signal control procedures for oversaturated arterials and genetic algorithms solutions[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.
- [35] ABU-LEBDEH G, BENEKOHAL R F. Genetic algorithms for traffic signal control and queue management of oversaturated two-way arterials[J]. Transportation Research Record, 2000(1727):

- 61-67.
- [36] ABU-LEBDEH G, BENEKOHAL R F. Signal coordination and arterial capacity in oversaturated conditions[J]. Transportation Research Record, 2000(1727): 68-76.
- [37] ABU-LEBDEH G, BENEKOHAL R F. Design and evaluation of dynamic traffic management strategies for congested conditions[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2003, 37(2): 109-127.
- [38] GIRIANNI M. Dynamic signal coordination models for a network with oversaturated intersections[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
- [39] GIRIANNI M, BENEKOHAL R F. Dynamic signal coordination for networks with oversaturated intersections[J]. Transportation Research Record, 2002(1811): 122-130.
- [40] GIRIANNI M, BENEKOHAL R F. Using genetic algorithms to design signal coordination for oversaturated networks[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2004, 8(2): 117-129.
- [41] HAJBABAIE A, MEDINA J C, BENEKOHAL R F. Traffic signal coordination and queue management in oversaturated intersection[R]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011.
- [42] KOVVALI V G, MESSER C J, CHAUDHARY N A, et al. Program for optimizing diamond interchanges in oversaturated conditions[J]. Transportation Research Record, 2002(1811): 166-176.
- [43] 陈娟,徐立鸿,袁长亮. 分层控制算法在过饱和和交通干线控制中的应用[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(15): 4122-4127, 4131. CHEN Juan, XU Li-hong, YUAN Chang-liang. Hierarchy control algorithm and its application in urban arterial control problem[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(15): 4122-4127, 4131. (in Chinese)
- [44] 陈娟,徐立鸿,袁长亮. 多目标相容控制在过饱和和相邻交叉口控制中的应用[J]. 信息与控制, 2008, 37(4): 487-493, 499. CHEN Juan, XU Li-hong, YUAN Chang-liang. Application of multi-objective compatible control to oversaturated adjacent intersection control[J]. Information and Control, 2008, 37(4): 487-493, 499. (in Chinese)
- [45] MAGHREBI F. On a hopfield net arising in the modelling and control of over-saturated signalized intersections[J]. Neural Processing Letters, 1999, 10(3): 161-169.
- [46] XU Jing, YU Wen-sheng, YI Jian-qiang, et al. Traffic signal timing with neural dynamic optimization[C]//LIU De-rong, FEI Shu-min, HOU Zeng-guang, et al. Proceeding of Advances in Neural Networks. Nanjing: Springer, 2007: 358-367.
- [47] GEGOV A. Multilevel intelligent fuzzy control of oversaturated urban traffic networks[J]. International Journal of Systems Science, 1994, 25(6): 967-978.
- [48] ZHANG Lin, LI Hong-long, PREVEDOUROS P D. Signal control for oversaturated intersections using fuzzy logic[C]//ASCE. First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices. Beijing: ASCE, 2008: 179-184.
- [49] ABBAS S A, SHERAZ S M, NOOR H. Fuzzy rule based traffic signal control system for oversaturated intersections[C]//IEEE. 2009 International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing. Wuhan: IEEE, 2009: 162-165.
- [50] 于泉,荣建. 基于模糊逻辑的过饱和和交叉口定周期配时方案优化[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(11): 1173-1176. YU Quan, RONG Jian. Fixed timing plan optimization for oversaturated intersection based on fuzzy logic[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(11): 1173-1176. (in Chinese)
- [51] MIZUNO K, NISHIHARA S. Distributed constraint satisfaction for urban traffic signal control[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007(4798): 73-84.
- [52] LI Hong-long. Traffic adaptive control for isolated, over-saturated intersections[D]. Honolulu: University of Hawaii, 2002.
- [53] LI Hong, PREVEDOUROS P D. Traffic adaptive control for oversaturated isolated intersections: model development and simulation testing[J]. Journal of Transportation Engineering, 2004, 130(5): 594-601.
- [54] ZANG Li-lin, HU Pei-feng, ZHU Wen-xing. Study on dynamic coordinated control of traffic signals for oversaturated arterials[J]. Journal of Information and Computational Science, 2012, 9(12): 3625-3632.
- [55] GREEN D H. Control of oversaturated intersections[J]. Operational Research Quarterly, 1967, 18(2): 161-173.
- [56] MESSER C J. Extension and application of Prosser-Dunne model to traffic operation analysis of oversaturated, closely spaced signalized intersections[J]. Transportation Research Record, 1998(1646): 106-114.
- [57] MESSER C J. Simulation studies of traffic operations at oversaturated, closely spaced signalized intersections[J]. Transportation Research Record, 1998(1646): 115-123.
- [58] BRETHERTON D, BODGER M, COWLING J. SCOOT—managing congestion, control and communications[J]. Traffic Engineering and Control, 2006, 47(3): 88-92.