

文章编号:1671-8879(2014)05-0129-9

诱导条件下的路网交通过饱和预防性控制

邵海鹏^{1,2}, 伍速锋³, 李宙峰⁴

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 弗吉尼亚理工大学 交通工程研究所, 美国 弗吉尼亚 黑堡 24060;
3. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044; 4. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要:为预防路网局部过度拥堵导致路网大面积过饱和, 分析了路段和路网的过饱和交通状态, 提出路网过饱和状态判定及过饱和诱导控制策略启动时机的判定方法; 基于有向图论, 在固定交通需求条件下, 以路段饱和度最大值最小化为目标, 路段通行能力和路段流量平衡为主要约束条件, 建立了交通诱导模型; 以路段饱和度方差最小化为目标, 路段通行能力和相位时长调整的极限值为约束条件, 建立了交通控制模型; 采用遗传算法进行求解。算例路网的试验对比表明, 交通诱导使路网过饱和路段的最大饱和度有所降低, 降低了 19.6%; 交通控制模型使各路段的饱和度均衡, 标准差也有一定程度的降低, 降低了 12.9%; 表明在交通诱导和控制协同管理下, 路网运行指标有所改善, 在一定程度上预能防路网过饱和状态发生。

关键词:交通工程; 过饱和交通; 交通诱导; 交通控制

中图分类号:U411 **文献标志码:**A

Preventive signal control for over-saturated road network under traffic guidance

SHAO Hai-peng^{1,2}, WU Su-feng³, LI Zhou-feng⁴

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24060, U. S; 3. China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China; 4. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to prevent congestion of local road network which often leads to large scale road network over-saturation, the over-saturation states of road sections and road network were analyzed, and the method of road network over-saturation judgment and the method of ripe time judgment to trigger the guidance and control strategy were proposed. Based on graphic theory, the traffic guidance model was established under fixed traffic demand, taking the maximum saturation minimization as the objective, capacity and link flow balance as constraints. Traffic control model was established taking the link saturation variance minimization as the objective and link capacity and maximum phase time incremental as constraints. The models were solved by use of Genetic Algorithm. The experiments on case road network reveal that traffic guidance leads to reduction of maximum link oversaturation by 19.6%, and traffic control model leads to equilibrium of the saturation of each link the reduction of variation by 12.9%. As a result, the collaboration

收稿日期:2014-04-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50808021, 51208054); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2010JC124);

同济大学道路与交通工程教育部重点实验室开放课题(K201208)

作者简介:邵海鹏(1978-), 男, 江苏沛县人, 副教授, 工学博士, 博士后, E-mail: shaohp@chd.edu.cn。

of traffic guidance and traffic control can significantly improve the performance of road network. To certain extent, the model can prevent large scale oversaturation and congestion of road network. 7 tabs, 3 figs, 24 refs.

Key words: traffic engineering; oversaturated traffic flow; traffic guidance; traffic control

0 引言

交通拥堵已经成为大中城市交通管理的难题,为缓解交通拥堵,通过交通需求管理来降低出行总量,还应采用先进的交通管理手段挖掘路网潜能。交通拥堵一方面具有空间不均衡性,另一方面具有时间不均衡性。很多情况下,交通拥堵是由于局部路网过饱和引发了局部拥堵,而后又导致更大规模路网上的拥堵。过饱和交通流是一种不稳定的状态,任何微小的波动都有可能局部地区甚至大范围交通的瘫痪。通过交通诱导与交通控制相结合以避免局部拥堵造成大规模拥堵,是目前解决城市交通拥挤问题的较为有效可行的方法。

早在 1974 年,Allsop 就开始了交通诱导与交通控制协同的研究,认为在进行信号控制时应该考虑交通分配问题,提出考虑绿灯时间的路径费用函数是交通流和绿灯时间的函数^[1]。Maher 等于 1975 年、Gartner 于 1976 年也指出区域交通控制与交通分配会相互影响^[2-3]。20 世纪 80 年代初到 90 年代末,Shimizu 等开始利用迭代、一体化与博弈等数学方法研究两者的协同模型,模型中的信号控制参数是使总的排队长度最小来计算最优出行路径^[4-5]。后来,Gartner 等提出了实时的诱导与控制协同模型,依据不同的交通状态,结合交通诱导提出预防拥堵的控制方案^[6]。中国相关研究开展较晚,最早是葛颖恩等在 1998 年分析了交通控制组合中的问题,并以交通流量小于通行能力下的总阻抗最小为目标建立模型,但当时只给了概念性的描述^[7]。吉林大学在这个领域做了很多工作,1999 年,杨兆升等基于模糊控制来考虑交通诱导与交通控制问题,结合所检测到的路段饱和度更改控制方案,但模糊控制很多时候依赖专家的经验^[8],保丽霞则提出了一种基于消散拥堵和系统总出行时间最小的双目标诱导控制协同优化模型^[9]。谷远利等也以总出行时间最小为目标,使用蚁群算法进行求解^[10]。戴红等则把加权的方法引入拥挤度的计算中^[11]。魏玉晓提出的协调模型,一方面消散拥堵均衡路网,一方面使系统总行驶时间最小^[12]。王亮和李润梅等采

用递阶协调优化、双层优化等方法考虑控制和诱导的协调^[13-14]。关于过饱和交通控制,李瑞敏和李岩分别做了较为详细的研究回顾^[15-16]。最初是关于单点交叉口过饱和交通控制,而且这方面的文献较多,后来为了解决干线道路上的过饱和尤其是排队在上游交叉口溢出的问题,开始了关于过饱和干线协调控制,主要控制目标是延误最小、排队长度最小(以免排队在上游交叉口溢出)、或在综合多个目标的情况下制定交通控制策略^[17-19]。D'ans 等较早应用存储转发网络建立了过饱和交叉口信号控制系统的线形规划模型^[18],后来 Aboudolas 等又提出应用于大城市拥堵网络的控制方法^[20]。Girianna 等基于线性多变量反馈调节器,提出了一种过饱和交通状态下的区域协调控制模型^[21],但随着路网规模的增大,求解越发困难,李岩等提出了在过饱和状态下以关键路径上通过车辆数最大与平均排队车辆数最小为目标的控制机理^[22],但没有给出具体模型;Chang 等提出离散动态优化模型来研究单点过饱和交叉口的控制,后来又将该思路扩展到网络范围,提出基于最大协调可能性来决定最优控制的算法,整合了过饱和和欠饱和两种不同的控制过程^[23]。

由以上的分析可以看出,关于通过交通控制与交通诱导相互协同来研究城市交通控制策略方面有较多的研究,且取得了许多不错的研究结果,但是将交通诱导与交通控制结合起来处理过饱和交通流的研究却不多。另外国内外对过饱和和交叉口控制的研究大多数侧重于单点交叉口,没有太多考虑交通诱导的结合,以往的研究中也没有涉及启动过饱和控制策略时机问题。而且在实际应用中,当交通流过饱和和引发交通拥堵的情况下,控制系统已难以奏效,在实际交通流尚未达到过饱和状态时候,实施预防性控制更具有实际应用意义。为此,本文将交通诱导和过饱和交叉口的控制结合起来,先通过交通诱导,将过饱和路段上的交通引导到区域中非饱和的路段上去,然后通过对区域中各交叉口信号配时参数的优化,均衡交通流。提出在过饱和以及区域过饱和的路网上实施交通控制和诱导的方法,并提出启动过饱和控制策略

的时机,采用遗传算法进行求解。

1 过饱和和交通状态分析

1.1 过饱和和交通状态的界定

1.1.1 单个交叉口过饱和

关于过饱和的定义,较早是由 Gazis 提出的,当交叉口所有关键路段的交通量超过其所能放行的交通量时,该交叉口就处于过饱和状态^[17]。Pignataro 等认为过饱和状态的表现特征是排队过长,在上游交叉口溢出,并影响上游交叉口的通行,当每个周期到达交叉口的交通量总是会出现滞留,且若干个相邻路口同时出现过饱和时,就会造成局部路网“死锁”^[24]。李岩等将过饱和定义为 $V/C > 1$ (V : 交通量,pcu/h, C 通行能力,pcu/h) 的交通状态^[16],本文借鉴此定义来界定过饱和和状态。若每周期车辆增量与前一周滞留车辆数之和小于绿灯时间,则该进口道非饱和;否则为趋于过饱和的状态。在路网的视角下,当路网的交通需求小于通行能力时为非饱和状态;交通需求大于通行能力时为过饱和状态;交通需求等于通行能力时为不稳定的临界状态。

1.1.2 路段和路网过饱和

(1) 非饱和、微饱和及饱和。设有向路段 a 的饱和度和为 r_a , 路段交通量为 q_a , 路段 a 的通行能力为 M_a 。对城市区域路网,交叉口间距小,交叉口和路段的相互影响显著,由于交叉口的信号控制,路段的通行能力实际上有所折减,相当于折减为 λM_a (这样计算偏保守) λ 为绿信比。定义路段饱和的临界值为

$$r_a = q_a / (\lambda M_a) = 1 \quad (1)$$

根据文献[16],过饱和就是 $V/C > 1$ 的交通状态。因此本文规定当 $r_a < 1$ 时,路段非饱和,当 $r_a > 1$ 时,路段过饱和。为了识别启动过饱和和交通控制策略的时机,定义微饱和和度为

$$\mu \leq r_a < 1 \quad (2)$$

式中: μ 为微饱和和度,是车流开始出现不稳定状态的饱和和度,其取值可以依据调查结果或历史数据。

(2) 路网过饱和和状态的判定。当局部发生轻微拥堵时,非饱和和路网可以在不借助外界干预下自行恢复。但当拥挤较严重时,如不采取一定的管控措施,拥堵将加重并扩散到更大范围。若把路网描述成一个有向图,交叉口视为结点,路段视为连线,则当过饱和的路段占总的路段的比例超过某一个值,且这些过饱和和路段在路网中的分布较为集中,则该路网处于过饱和和状态,即满足:

$$N_{os} / N_t > \alpha_1 \quad (3)$$

$$\text{且} \quad N_e / N_{os} > \beta_1 \quad (4)$$

式中: N_{os} 为网络中过饱和和路段的数量; N_t 为网络中路段的总数; N_e 为由过饱和和路段所组成的最大连通子图包含的边数; α_1 、 β_1 分别为判断阈值。

1.2 启动过饱和和控制策略的时机

为了防止个别路段的过饱和和导致大范围交通拥堵,应该在路网局部范围开始发生拥堵但路网整体尚处于非饱和和状态时,择机启动诱导和控制方案。启动条件为

$$N_{os} / N_t \geq \alpha_2 \quad (5)$$

$$\text{且} \quad (N_{os} + N_m) / N_t \geq \beta_2 \quad (6)$$

式中: N_m 为微饱和和路段数量; α_2 、 β_2 为启动阈值。当诱导和控制发挥作用,路网饱和和状况逐渐得到缓和,路网状态相应的指标低于启动阈值时,可恢复为非饱和和状态下常规的管控策略。

2 模型构建

2.1 模型构建

为避免路网局部发生过度拥堵,首先引导车辆避开饱和和度较高或过饱和和的路段,在交通过饱和和状态尚未发生时,采取预防性的诱导和控制措施,降低过饱和和状态发生的可能性,再进行信号配时的优化,分别建立交通诱导模型与交通控制模型。

用有向图 $G(N, A)$ 表示交通网络,其中 N 是节点集, A 为有向弧集,路段(弧) $a \in A$ 。设 r 表示起点, s 表示终点, $A(r)$ 表示有向路段起点是 r 的路段集合, $B(s)$ 则表示有向路段终点是 s 的路段集合。 $q_r^s(t)$ 表示 t 时刻 r 流向 s 的 OD, 假设此 OD 已知。

定义 T 为计算时间步长,每隔 T 时间更新一次控制方案。 T 太长会使得控制的准确性降低;太短又会因交通控制策略变化过快而引起交通流不稳定。考虑到信号控制的需要, T 取为接近周期长度的整数倍数为宜,可取为一倍周期或两倍周期的近似值。

2.1.1 交通诱导模型

为了达到交通诱导的目标,就要使路网中饱和和度最大的路段控制在一定的饱和和度水平(路网整体交通需求须低于路网容量,且路网的整体 V/C 低于此目标值),以保证其他路段的饱和和度也不会过大。因此,确定诱导模型的优化目标是使区域内路段饱和和度的最大值最小化。模型的输入为 OD, 输出为该诱导策略下的交通分配结果,模型为

$$f_1 = \min(\max\{r_a(t) \mid a \in A\}) \quad (7)$$

s. t.

$$\begin{cases} r_a(t) = x_a(t) / (C_a(t) \lambda_a(t) M_a), \forall a \in A, t \\ x_a^s(t+T) = x_a^s(t) + \int_t^{t+T} (u_a^s(\omega) - v_a^s(\omega)) d\omega, \forall a \in A, s \in N, t \\ \sum_{a \in A(r)} u_a^s(t) = q_a^s(t) + \sum_{a \in B(r)} v_a^s(t), \forall r \neq s, a \in A, t \\ 0 \leq x_a(t) / C_a(t) \leq M_a, \forall a \in A, t \\ x_a(t) = \sum_{s \in N} x_a^s, v_a(t) = \sum_{s \in N} v_a^s(t), u_a(t) = \sum_{s \in N} u_a^s, \forall a \in A, t \\ u_a^s(t) \geq 0, v_a^s(t) \geq 0, \forall a \in A, s \in N, t \end{cases} \quad (8)$$

式中: $r_a(t)$ 为 t 时刻 a 路段的饱和度; $x_a(t)$ 为 t 时刻 a 路段上的车辆数(pcu); $x_a^s(t)$ 为 t 时刻路段 a 上的流向终点 s 的车辆数(pcu); $\lambda_a(t)$ 为路段 a 对应的下游交叉口进口道的绿信比; M_a 为路段 a 的通行能力(pcu/s); $u_a^s(t)$ 为 t 时刻进入路段 a , 流向终点 s 的路段流入率(pcu/s); $u_a(t)$ 为 t 时刻路段 a 的流入率(pcu/s); $v_a^s(t)$ 为路段 a 上 t 时刻流向终点 s 的流出率(pcu/s); $v_a(t)$ 为 t 时刻路段 a 的流出率(pcu/s); $C_a(t)$ 为 t 时刻车辆在路段 a 的行驶时间(s), $C_a(t) = C_a^f \left[1 + 0.15 \left(\frac{v_a(t)}{\lambda_a(t) M_a} \right)^4 \right]$, C_a^f 为路段 a 上的自由流行驶时间。

2.1.2 交通控制模型

将诱导模型求解得到的路段流量作为控制模型的输入, 交通控制模型以路网中各路段饱和度的方差最小作为目标函数, 模型如下

$$f_2 = \min_{\Delta g_{ij}} \Omega \quad (9)$$

s. t.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n g_{ij} = C_i - nL \\ |\Delta g_{ij}| \leq \theta \\ 0 \leq x_a(t) \leq M_a, u_a(t) \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: Ω 为饱和度的方差; g_{ij} 为信号交叉口 i 的第 j 个相位的绿灯时间(s), $i=1, 2, 3, \dots, n$; C_i 为信号交叉口 i 的周期时间(s), $i=1, 2, 3, \dots, n$ 为交叉口相位数, $n=2, 3, \dots, 8$; L 为绿灯间隔时间(s), 假设所有交叉口的绿灯间隔时间为常数; Δg_{ij} 为交叉口 i 的第 j 个相位的绿灯调整时间(s); θ 为交叉口各相位绿灯调整时间的极限值(s);

模型说明:

(1) 设网络内所有路段饱和度的均值为 $\overline{r(t+T)}$, 则目标函数可变换为

$$\begin{aligned} f_2 = \min_{\Delta g_{ij}} \Omega &= \min_{\Delta g_{ij}} \frac{1}{m} \sum_{a=1}^m (r_a(t+T) - \overline{r(t+T)})^2 = \\ &= \min_{\Delta g_{ij}} \frac{1}{m} \sum_{a=1}^m \left(\frac{x_a(t) + \int_t^{t+T} (u_a(\omega) - v_a(\omega)) d\omega}{C_a(t)(g'_{ij} + \Delta g_{ij}) / C_i M_a} - \overline{r(t+T)} \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: g'_{ij} 为信号调整前交叉口 i 的第 j 个相位的绿灯时间; m 为路网中路段总数量; T 为优化计算的步长, 则约束条件式(10)的第 1 个条件可变为

$$\sum_{j=1}^n (g'_{ij} + \Delta g_{ij}) = C_i - nL$$

(2) 决策变量为 Δg_{ij} 。

2.2 过饱和诱导控制策略实施步骤

过饱和诱导交通控制策略实施步骤如下:

Step1: 令 $t=0$, 路网进行初始化, 输入当前路网的各项状态指标, 具体包括: 路段长度、 M_a 、 C_a^f 、 OD^r 、信号周期 C 、初始绿灯时间 $g'_{i,j}$ 、初始路段流量 $x_a(0)$;

Step2: 令 $t=t+T$, 更新路网内各路段饱和度;

Step3: 判断路段饱和度是否满足过饱和控制策略的启动条件; 若满足, 转入 Step4, 否则转入 Step2;

Step4: 先求解交通诱导模型, 将计算结果作为交通控制模型的输入, 求解交通控制模型, 调整各交叉口信号时间。流程图如图 1 所示。

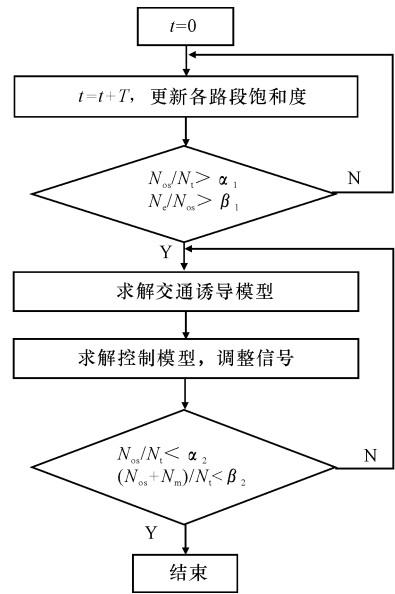


图 1 过饱和路网交通诱导和控制策略实施步骤

Fig. 1 Guidance and control strategy for oversaturated road network

3 模型求解与实例分析

3.1 求解方法

本文中的交通诱导模型和交通控制模型均为带有多约束的非线性规划问题, 其求解方法有传统算法和智能算法。智能算法中的遗传算法是一种对目标函数和约束条件几乎没有任何要求的优化算法, 特别适合于求解多目标、多约束最优化问题。鉴于此, 模型选用遗传算法进行求解。关于遗传算法的原

理,本文不做赘述。

3.2 问题描述

建立了一个小型路网(图 2),包含 9 个交叉口(编号 1~9),24 条有向路段,路段上的箭头符号表示该路段的方向。所有路段的静态属性都相同,包

括:长度为 450 m;包含 2 个车道;自由流通行时间为 45 s;单车道通行能力为 720 pcu/h,即 0.2 pcu/s,则双车道通行能力为 0.4 puc/s。根据上文中的假设,各交叉口为定周期两相位控制,绿灯间隔时间都为 3 s。路网相关初始数据见表 1 所示。

表 1 路网初始数据
Tab. 1 Initial data of the experiment road network

路段编号	长度/m	$M_a/(\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1})$	$(C_i, g_{i,j})/\text{s}$	$\lambda_a(t)$	C_a^f/s	$C_a(t)/\text{s}$	$x_a(t)/\text{pcu}$	$r_a(t)$
2-1	450	0.4	(70,32)	0.457 1	45	53.203 1	10	1.027 9
4-1	450	0.4	(70,32)	0.457 1	45	48.281 3	4	0.453 1
1-2	450	0.4	(70,32)	0.457 1	45	48.281 3	4	0.453 1
3-2	450	0.4	(70,32)	0.457 1	45	51.562 5	8	0.848 5
5-2	450	0.4	(70,32)	0.457 1	45	47.460 9	3	0.345 7
2-3	450	0.4	(70,32)	0.457 1	45	50.742 2	7	0.754 4
6-3	450	0.4	(70,32)	0.457 1	45	47.460 9	3	0.345 7
1-4	450	0.4	(80,37)	0.462 5	45	48.243 2	4	0.448 2
5-4	450	0.4	(80,37)	0.462 5	45	51.486 5	8	0.839 9
7-4	450	0.4	(80,37)	0.462 5	45	52.297 3	9	0.930 2
2-5	450	0.4	(80,37)	0.462 5	45	53.108 1	10	1.017 8
4-5	450	0.4	(80,37)	0.462 5	45	48.243 2	4	0.448 2
6-5	450	0.4	(80,37)	0.462 5	45	53.918 9	11	1.102 8
8-5	450	0.4	(80,37)	0.462 5	45	56.351 4	14	1.342 9
3-6	450	0.4	(80,37)	0.462 5	45	47.432 4	3	0.341 9
5-6	450	0.4	(80,37)	0.462 5	45	51.486 5	8	0.839 9
9-6	450	0.4	(80,37)	0.462 5	45	48.243 2	4	0.448 2
4-7	450	0.4	(60,27)	0.450 0	45	50.000 0	6	0.666 7
8-7	450	0.4	(60,27)	0.450 0	45	49.166 7	5	0.565 0
5-8	450	0.4	(60,27)	0.450 0	45	47.500 0	3	0.350 9
7-8	450	0.4	(60,27)	0.450 0	45	54.166 7	11	1.128 2
9-8	450	0.4	(60,27)	0.450 0	45	52.500 0	9	0.952 4
6-9	450	0.4	(60,27)	0.450 0	45	51.666 7	8	0.860 2
8-9	450	0.4	(60,27)	0.450 0	45	48.333 3	4	0.459 8

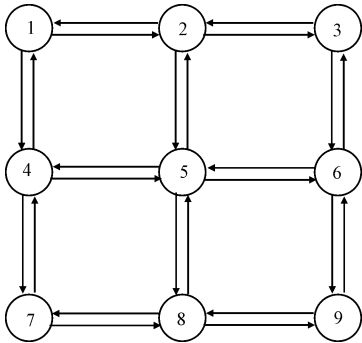


图 2 试验路网
Fig. 2 Experiment road network

在表 1 中,第 1 列为路段编号,例如 2-1 表示节点 2 到节点 1 的有向路段; M_a 代表路段通行能力,均为 0.4 pcu/s; (C_i, g_{ij}) 分别代表有向路段下游交叉口的周期时间和所在相位的绿灯时间,例如路段 2-1 下游交叉口 1 的周期时间为 70 s,其对应相位的绿灯时间为 32 s。考虑到大多数次路交叉

口其周期时间大约在 60~90 s 以内,因此本例中选取 60 s、70 s、80 s 作为交叉口的周期时间; $\lambda_a(t)$ 、 C_a^f 、 $x_a(t)$ 、 $C_a(t)$ 、 $r_a(t)$ 意义及计算方法同前,数据的取值参照城市次干路的情况。

本算例中各参数取值为, $\alpha_1=0.3$ 、 $\beta_1=0.3$, $\alpha_2=0.15$ 、 $\beta_2=0.5$ 、 $\mu=0.75$ 。由表 1 可知,在当前时刻, $N_t=24$, $N_{os}=5$, $N_m=7$ 。则有

$$N_{os}/N_t=0.17>0.15;$$

且

$$(N_{os}+N_m)/N_t=0.54>0.5$$

符合启动过饱和控制策略的条件。

设从 1 到 9 的 OD 需求流量 $OD_1^9=0.42$ pcu/s,从 9 到 1 的 OD 需求流量 $OD_9^1=0.48$ pcu/s。根据图 2,从 1 到 9 和从 9 到 1 各有 6 条路径。考虑从 1 到 9 的 OD 分配,在未经诱导的情况下,OD 需求流量是均匀加载到这 6 条路径上的,每条路径的流量都为 0.07 pcu/h。同理,从交叉口 9 到 1 的每条路

径的流量都为 0.08 pcu/h。所有交叉口信号控制策略保持不变,计算步长 T 取为 40 s。在没有诱导的情况下,将交通需求简单加载到路网上,得到表 2 中的数据。

表 2 无交通诱导和信号调整的路网数据

Tab. 2 Road network performance data without guidance and signal control optimization

路段编号	r_a	路段编号	r_a
2-1	1.538 3	6-5	1.319 0
4-1	1.415 2	8-5	1.691 2
1-2	1.007 9	3-6	0.358 2
3-2	0.630 0	5-6	0.868 3
5-2	0.777 1	9-6	1.131 1
2-3	0.495 3	4-7	0.441 7
6-3	0.777 1	8-7	0.446 5
1-4	0.996 7	5-8	0.695 3
5-4	0.952 3	7-8	1.008 1
7-4	0.730 0	9-8	1.447 9
2-5	1.105 0	6-9	1.208 1
4-5	0.682 9	8-9	1.023 2

3.3 交通诱导模型求解

3.3.1 诱导条件下节点 1 到节点 9 的分配

使用 Matlab 的遗传算法工具箱进行求解,各参数取值为:种群规模为 80,优良个体数:2;交叉率:

0.7;变异率 0.3;选择函数:随机均匀选择;交叉函数:分散变异;变异函数:高斯变异;终止条件:最大代数 为 300;其他参数均采用 Matlab 遗传算法工具箱中的默认值。从 1 到 9 之间共有 6 条路径,分别为:1:1-2-3-6-9;2:1-2-5-6-9;3:1-2-5-8-9;4:1-4-7-8-9;5:1-4-5-6-9;6:1-4-5-8-9。经过计算,可得到 1 到 9 之间各路径的分配结果为: $u_1=0.0891$ pcu/h, $u_2=0.056 3$ pcu/h, $u_3=0.040 5$ pcu/h, $u_4=0.060 0$ pcu/h, $u_5=0.130 4$ pcu/h, $u_6=0.043 6$ pcu/h。

3.3.2 诱导条件下节点 9 到节点 1 的分配

同样采用遗传算法对从 9 到 1 的交通量进行分配。1 到 9 共有 6 条路径,分别为:1:9-6-3-2-1;2:9-6-5-2-1;3:9-6-5-4-1;4:9-8-7-4-1;5:9-8-5-2-1;6:9-8-5-4-1。各路径分配结果为: $u'_1=0.093 8$ pcu/h, $u'_2=0.090 4$ pcu/h, $u'_3=0.079 6$ pcu/h, $u'_4=0.185 4$ pcu/h, $u'_5=0.012 2$ pcu/h, $u'_6=0.018 6$ pcu/h。

经过交通诱导后的路网数据见表 3(表中省略了路段长度及车辆数信息)。

表 3 经交通诱导后的路网数据

Tab. 3 Road network performance data with guidance

路段编号	$M_a/(\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1})$	$(C_i, g_{i,j})/\text{s}$	$\lambda_a(t)$	C_a^f/s	$C_a(t)/\text{s}$	$r_a(t)$
2-1	0.4	(70,32)	0.457 1	45	68.024 0	1.359 0
4-1	0.4	(70,32)	0.457 1	45	66.854 3	1.341 4
1-2	0.4	(70,32)	0.457 1	45	49.405 1	0.898 8
3-2	0.4	(70,32)	0.457 1	45	46.517 7	0.688 6
5-2	0.4	(70,32)	0.457 1	45	45.465 7	0.512 5
2-3	0.4	(70,32)	0.457 1	45	45.750 8	0.577 5
6-3	0.4	(70,32)	0.457 1	45	45.335 3	0.472 1
1-4	0.4	(80,37)	0.462 5	45	55.045 4	1.104 5
5-4	0.4	(80,37)	0.462 5	45	46.553 2	0.692 6
7-4	0.4	(80,37)	0.462 5	45	57.472 4	1.165 9
2-5	0.4	(80,37)	0.462 5	45	50.032 0	0.929 2
4-5	0.4	(80,37)	0.462 5	45	48.289 2	0.835 5
6-5	0.4	(80,37)	0.462 5	45	68.024 0	1.359 0
8-5	0.4	(80,37)	0.462 5	45	58.783 4	1.195 4
3-6	0.4	(80,37)	0.462 5	45	45.265 2	0.445 2
5-6	0.4	(80,37)	0.462 5	45	53.667 4	1.064 5
9-6	0.4	(80,37)	0.462 5	45	60.840 4	1.237 7
4-7	0.4	(60,27)	0.450 0	45	45.168 2	0.397 3
8-7	0.4	(60,27)	0.450 0	45	49.901 2	0.923 1
5-8	0.4	(60,27)	0.450 0	45	45.239 7	0.434 1
7-8	0.4	(60,27)	0.450 0	45	50.904 6	0.967 1
9-8	0.4	(60,27)	0.450 0	45	67.234 7	1.347 2
6-9	0.4	(60,27)	0.450 0	45	55.045 4	1.104 5
8-9	0.4	(60,27)	0.450 0	45	46.820 0	0.720 6

3.4 交通控制模型求解

在交通控制模型中,假设各交叉口信号周期是固定的,并且不考虑相邻交叉口的相位差,这样模型的控制变量只有各个交叉口各个相位的绿灯调整时间。在本例中,共有 9 个交叉口,每个交叉口都是两相位控制,共有 18 个变量,分别为 x_1, x_2, \cdots, x_{18} (实际上为 9 个独立变量),单位为 s。它们与交叉口和相位的对应关系见表 4 所示。交叉口相位绿灯调整时间的极限值 θ 取 10 s。

根据交通控制模型及表 3 中的数据,应用遗传算法对模型进行求解。模型中的参数选择与交通诱导模型求解中的参数选择一致。计算结果如下(单位:s)

$$\begin{aligned} x_1 &= 0.695, x_2 = -0.695, x_3 = 0.933, \\ x_4 &= -0.933, x_5 = -0.540, x_6 = 0.540, \\ x_7 &= -1.676, x_8 = 1.676, x_9 = -1.054, \\ x_{10} &= 1.054, x_{11} = 0.094, x_{12} = -0.094, \\ x_{13} &= -0.431, x_{14} = 0.431, x_{15} = -9.159, \\ x_{16} &= 9.159, x_{17} = -3.136, x_{18} = 3.136 \end{aligned}$$

将上述结果的小数部分按照四舍五入取整,得到结果如下

$$\begin{aligned} x_1 &= 1, x_2 = -1, x_3 = 1, x_4 = -1, x_5 = -1, \\ x_6 &= 1, x_7 = -2, x_8 = 2, x_9 = -1, x_{10} = 1, \\ x_{11} &= 0, x_{12} = 0, x_{13} = 0, x_{14} = 0, x_{15} = -9, \\ x_{16} &= 9, x_{17} = -3, x_{18} = 3 \end{aligned}$$

应用上述结果对信号配时参数进行调整,调整后的路网数据见表 5 所示。

表 4 变量与交叉口和相位对应

Tab. 4 List of signal phases and according control variables					
交叉口编号	东西相位	南北相位	交叉口编号	东西相位	南北相位
1	x_1		5		x_{10}
1		x_2	6	x_{11}	
2	x_3		6		x_{12}
2		x_4	7	x_{13}	
3	x_5		7		x_{14}
3		x_6	8	x_{15}	
4	x_7		8		x_{16}
4		x_8	9	x_{17}	
5	x_9		9		x_{18}

表 5 经信号调整后的路网数据

Tab. 5 Road network performance data after signal control optimization

路段编号	$M_a/(\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1})$	$(C_i, g_{i,j})/\text{s}$	$\lambda_a(t)$	C_d^i/s	$C_a(t)/\text{s}$	$r_a(t)$
2-1	0.4	(70,33)	0.471 4	45	87.840 7	1.587 2
4-1	0.4	(70,31)	0.442 9	45	69.791 5	1.384 4
1-2	0.4	(70,33)	0.471 4	45	48.888 8	0.871 2
3-2	0.4	(70,33)	0.471 4	45	46.341 5	0.667 7
5-2	0.4	(70,31)	0.442 9	45	45.528 8	0.529 1
2-3	0.4	(70,31)	0.442 9	45	45.664 6	0.596 3
6-3	0.4	(70,33)	0.471 4	45	45.296 1	0.457 7
1-4	0.4	(80,38)	0.475 0	45	53.145 7	1.048 1
5-4	0.4	(80,35)	0.437 5	45	46.943 4	0.732 5
7-4	0.4	(80,39)	0.487 5	45	55.103 8	1.106 1
2-5	0.4	(80,38)	0.475 0	45	49.520 1	0.904 6
4-5	0.4	(80,36)	0.450 0	45	48.668 5	0.858 6
6-5	0.4	(80,36)	0.450 0	45	70.690 5	1.396 7
8-5	0.4	(80,38)	0.475 0	45	57.396 7	1.164 1
3-6	0.4	(80,37)	0.462 5	45	45.265 5	0.445 4
5-6	0.4	(80,37)	0.462 5	45	53.669 5	1.064 6
9-6	0.4	(80,37)	0.462 5	45	60.872 1	1.238 3
4-7	0.4	(60,27)	0.450 0	45	45.168 2	0.397 3
8-7	0.4	(60,27)	0.450 0	45	49.897 7	0.922 9
5-8	0.4	(60,18)	0.300 0	45	46.214 0	0.651 2
7-8	0.4	(60,36)	0.600 0	45	46.867 3	0.725 2
9-8	0.4	(60,36)	0.600 0	45	52.037 3	1.010 5
6-9	0.4	(60,30)	0.500 0	45	51.591 1	0.994 1
8-9	0.4	(60,24)	0.400 0	45	47.913 1	0.810 5

3.5 结果分析

选取路段的饱和度作为路网诱导控制效果的评价因素。结合表 2、表 3 及表 5 中各路段新的饱和度值,进行对比分析。

3.5.1 路段饱和度最大值、最小值及平均值

在没有诱导和控制的情况和进行诱导和控制优化后的路网运行指标对比见表 6。

表 6 有无诱导和交通控制优化的路网运行状况对比
Tab. 6 Comparison between road networks with and without guidance and signal control optimization

有无诱导控制	饱和度最大值	饱和度最小值	饱和度平均值
无诱导控制	1.691 2	0.358 2	0.947 8
有诱导控制	1.359 0	0.397 3	0.907 2

由表 6 可知,在交通诱导的作用下,路网中路段饱和度的最大值得到有效控制,由 1.691 2 下降到 1.359,下降了 19.6%,避免了某些拥挤路段的拥挤程度进一步扩大;同时有诱导时的路段饱和度的最小值有所上升,这样使各路段的饱和度更趋于均衡。同时可以发现,路网的平均饱和度也有所降低,但降低量较少,这是由于路网的整体交通需求没有减少,所以交通诱导和控制措施的主要作用是平衡了各路段的饱和度。

3.5.2 路网中各路段的饱和度

有无诱导和控制优化的各路段饱和度的比较见表 7 所示。

表 7 有无诱导和控制优化的各路段饱和度
Tab. 7 Saturation of each link with and without guidance and signal control optimization

路段编号	无诱导	有诱导	路段编号	无诱导	有诱导
2-1	1.538 3	1.587 2	6-5	1.319 0	1.396 7
4-1	1.415 2	1.384 4	8-5	1.691 2	1.164 1
1-2	1.007 9	0.871 2	3-6	0.358 2	0.445 4
3-2	0.630 0	0.667 7	5-6	0.868 3	1.064 6
5-2	0.777 1	0.529 1	9-6	1.131 1	1.238 3
2-3	0.495 3	0.596 3	4-7	0.441 7	0.397 3
6-3	0.777 1	0.457 7	8-7	0.446 5	0.922 9
1-4	0.996 7	1.048 1	5-8	0.695 3	0.651 2
5-4	0.952 3	0.732 5	7-8	1.008 1	0.725 2
7-4	0.730 0	1.106 1	9-8	1.447 9	1.010 5
2-5	1.105 0	0.904 6	6-9	1.208 1	0.994 1
4-5	0.682 9	0.858 6	8-9	1.023 2	0.810 5

从图 3 可知,有诱导时的各路段的饱和度差异较无诱导时小。根据计算,无诱导情况下饱和度的标准差是 0.364 5,有诱导情况下标准差是 0.317 6,降低了 12.9%,各路段饱和度都趋于均匀,表明交

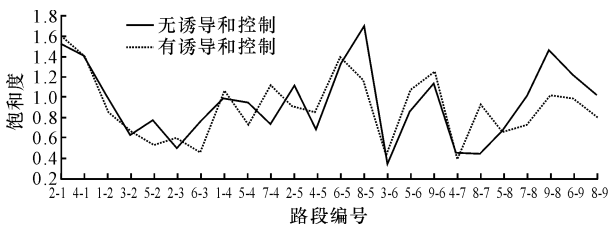


图 3 有无诱导和控制优化情况下各路段饱和度比较
Fig. 3 Comparison between link saturations with and without guidance and signal control optimization

通控制模型在一定程度上均衡了路网的饱和度。

应该注意的是,前述由于考虑交叉口信号控制路段的影响而将路段通行能力的计算值进行折减,因此路段的实际饱和度要小于计算值。比如,在本例中计算的饱和度为 r 时,实际饱和度为 λr ,因此从这个角度来说,饱和度稍大于 1 的情况与实际情况并不矛盾。

3.5.3 交通诱导的实施

交通诱导模型求解的结果是各条路径分配的流量,在实际应用中,可通过交通流实时检测系统连续获取各条路段的交通流状况,并以求解得到的流量作为诱导管理的目标值,通过可变信息标志、车载广播等方式进行交通诱导,使得路段流量逐渐接近目标值。但严格地说,在实际应用中,要想通过交通诱导使每条路段都准确达到目标流量是很困难甚至不可能的,只能在一定程度上接近目标值。

4 结 语

(1)路网过饱和和预防控制需要在路网总交通需求不高于路网容量时才有意义,预防性控制应在有部分集中的路段趋于饱和且尚未发生拥堵时进行。

(2)通过交通诱导管理,路网的最大饱和度有所降低,从而有效避免局部路段引发更大范围拥堵;交通诱导和控制协同工作,能有效缓解路网的局部过饱和问题,降低饱和路段的拥挤程度,均衡交通荷载。

(3)对路网过饱和状态的界定、阈值的选取还需更多的实验和观测来确定。后续的研究还应考虑微观条件下接受诱导管理的出行者比例问题,以更准确反映实际状况。

参考文献:

References:

[1] Allsop R E. Some possibilities for using traffic control

- to influence trip distribution and route choice[C]//Elsevier Publishing Company. Transportation and traffic theory; Proceedings of the 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Sydney: University of New South Wales, 1974; 345-373.
- [2] Maher M J, Akcelik R. The re-distributional effects of an area traffic control policy[J]. Traffic Engineering & Control, 1975, 16(9): 383-385.
- [3] Gartner N H, Gershwin S B, Little J D, et al. Pilot study of computer-based urban traffic management [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1980, 14(1): 203-217.
- [4] Shimizu H, Kobayashi M, Yonezawa Y. A route guidance system of a traffic network[C]//SICE. Proceedings of the 34th SICE Annual Conference, International Session Papers. Hokkaido: IEEE, 1995; 1549-1552.
- [5] Shimizu H, Nanba T, Narumi A. Time and space variations of dynamic traffic information on a traffic control system[C]//SICE. Proceedings of the 35th SICE Annual Conference, International Session Papers. Tottori: IEEE, 1996; 1337-1342.
- [6] Gartner N H, Al-Malik M. Combined model for signal control and route choice in urban traffic networks[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1996, 1554 (1): 27-35.
- [7] 葛颖恩, 杨佩昆. 路线选择和交叉口控制组合问题解析[J]. 公路交通科技, 1998, 15(2): 33-37.
- GE Ying-en, YANG Pei-kun. A review of combined route choice -intersection control problems[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1998, 15(2): 33-37. (in Chinese)
- [8] 杨兆升, 徐立群. 模糊控制原理在城市交通流诱导系统和控制系统一体化研究中的应用[J]. 公路交通科技, 1999, 16(1): 27-30.
- YANG Zhao-sheng, XU Li-qun. Application of fuzzy control theory for study on traffic flow guidance system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1999, 16(1): 27-30. (in Chinese)
- [9] 保丽霞, 杨兆升, 胡健萌, 等. 交通流诱导与控制协同的双目标优化模型及准最优求解算法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(2): 319-324.
- BAO Li-xia, YANG Zhao-sheng, HU Jian-meng, et al. Quasi-optimal algorithm for double-objective optimization model of traffic flow guidance coordinated with signal control[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(2): 319-324. (in Chinese)
- [10] 谷远利, 李善梅, 邵春福. 基于蚁群算法的交通控制与诱导协同研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10): 2754-2761.
- GU Yuan-li, LI Shan-mei, SHAO Chun-fu. Study on cooperation of traffic control and route guidance based on ant algorithm[J]. Journal of system simulation, 2008, 20(10): 2754-2761. (in Chinese)
- [11] 戴红, 杨兆升, 肖萍萍. 交通流诱导与控制协同优化模型的遗传算法求解[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(3): 157-160.
- DAI Hong, YANG Zhao-sheng, XIAO Ping-ping. Application of genetic algorithm in coordination optimization model between traffic flow guidance and traffic control[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(B03): 157-160. (in Chinese)
- [12] 魏玉晓. 城市道路交通控制与交通诱导协调优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- WEI Yu-xiao. Study on the optimization of traffic control coordinated with traffic guidance for the urban road[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [13] 王亮, 马寿峰, 贺国光. 一种交通控制与诱导递阶协调优化模型[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(6): 126-133.
- WANG Liang, MA Shou-feng, HE Guo-guang. A hierarchical coordination model between traffic control and route guidance[J]. System Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(6): 126-133. (in Chinese)
- [14] 李润梅, 汤淑明. 饱和路网中动态交通分配与路口控制一体化建模研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(8): 1811-1815.
- LI Run-mei, TANG Shu-ming. Integrative modeling study of dynamic traffic assignment and traffic control in saturated network[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(8): 1811-1815. (in Chinese)
- [15] 李瑞敏. 过饱和和交叉口交通信号控制研究现状与展望[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 119-126.
- LI Rui-min. Study status and prospect of traffic signal control for over-saturated intersection[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 119-126. (in Chinese)
- [16] 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.

