

文章编号:1671-1637(2012)06-0104-07

## 突发灾害下交通控制与VMS协同技术

林赐云<sup>1,2</sup>, 龚勃文<sup>1,2</sup>, 赵丁选<sup>1,3</sup>, 刘雪莲<sup>4</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130012; 2. 吉林大学交通学院, 吉林 长春 130012; 3. 吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130012; 4. 宁波工程学院机械工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:**估计了可变信息板(VMS)的影响范围,构建了交通控制与VMS的协同一体化模型。通过VMS影响驾驶人的出行路径选择行为,引导路网交通流向最优交通流分布模式发展。通过交通控制调整交叉口信号参数,实现路网交通流的截流与分流,最终形成路网交通流最优交通分布模式。采用Frank-Wolfe均衡分配和遗传算法相结合对模型进行优化求解,利用Paramics API开发模型和算法。以Paramics软件为仿真平台,以山东省淄博市淄博新区为模拟路网,在路网突发灾害下对模型和算法进行了验证。验证结果表明:路网饱和度越大,构建的模型相对于Synchro模型,提高路网交通流运行性能指标的效果越明显,促进路网交通流稳定性的能力越强,越能均衡分配路网负载。当受灾交通流疏散完成80%,路网连线饱和度分别为不大于0.8,大于0.8且不大于1.0,大于1.0时,相比Synchro模型,构建模型的受灾交通流疏散时间分别减少11.55、21.84、25.64 min,疏散速度分别提高25.98%、31.83%、20.16%。

**关键词:**交通控制;协同优化;双层规划;可变信息板;突发灾害

**中图分类号:**U491 **文献标志码:**A

## Traffic control and VMS collaborative technique in sudden disaster

LIN Ci-yun<sup>1,2</sup>, GONG Bo-wen<sup>1,2</sup>, ZHAO Ding-xuan<sup>1,3</sup>, LIU Xue-lian<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China; 2. School of Traffic, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China; 3. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China; 4. School of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

**Abstract:** The influence scope of variable message signs(VMS) was estimated, and a collaborative model integrated of traffic control and VMS was constructed. The route choice behavior of driver was impacted by VMS, and the development of network traffic flow was guided by VMS to the optimization distribution mode. The interception and shunt of network traffic flow were fulfilled by adjusting intersection signal parameters in traffic control to form an optimal traffic flow distribution mode. The model was optimized and solved by combining Frank-Wolfe equilibrium assignment and genetic algorithm. The model and algorithm were developed by using Paramics API. In the condition of network with burst disaster, the model and algorithm were verified by taking software Paramics as simulation platform and Zibo New District of Shandong Province as simulation network. Verified result shows that with the increase of road network saturation, compared with Synchro model, the effect of the model is more obvious in improving performance

收稿日期:2012-07-18

基金项目:国家863计划项目(2009AA11Z218);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110061120043);中国博士后科学基金项目(2011M500615,20100481054,2012T50300);浙江省教育厅科研基金项目(Y201224940)

作者简介:林赐云(1980-),男,福建漳州人,吉林大学讲师,工学博士,从事智能交通控制研究。

indexes of road network traffic flow, the ability promoting the stability of road network's traffic flow is stronger, and the equilibrium assignment ability of road network loading is better. When the evacuation of traffic flow for sudden disaster completes 80%, and the link saturations of road network are not more than 0.8, between 0.8 and 1.0, more than 1.0 respectively, compared with Synchro model, the evacuation times respectively decrease by 11.55, 21.84, 25.64 min, the evacuation speed respectively increase by 25.98%, 31.83%, 20.16%. 1 tab, 3 figs, 20 refs.

**Key words:** traffic control; collaborative optimization; bi-level programming; variable message signs; sudden disaster

**Author resume:** LIN Ci-yun (1980-), male, lecturer, PhD, +86-431-85095591, linciyun@jlu.edu.cn.

## 0 引言

交通控制和交通诱导作为独立的系统分别进行交通流优化管理均存在一定的局限性<sup>[1]</sup>:交通控制从时间上优化交通流分布,但没有考虑由于交通控制引发交通流在空间上产生重分布效应;交通诱导从空间上均衡路网交通负荷,没有考虑交通诱导引发交通流在时间上产生增量更新<sup>[2]</sup>。

自 1974 年 Allsop 首次提出在交通控制中考虑动态交通分配后,为促进交通流时空优化分布,实现路网均衡负载,各国学者开始对交通控制和交通诱导的协同理论与应用技术展开研究。Gartner 等用动态交通分配模型预测路网交通状态,以此作为交通信号优化的依据,构建了自适应交通信号控制与动态交通诱导的协同框架<sup>[3]</sup>;Abdelfatah 等基于时变的 OD 出行信息,利用启发式算法对交通信号和路径分布同时进行优化,以提高路网整体性能<sup>[4]</sup>;Lo 基于元胞自动机,采用流体动力学模型对时变的路网交通流分布模式进行优化,并将其与动态交通信号优化一起作为混合整数线性规划的约束条件进行优化求解<sup>[5]</sup>;Varia 等采用遗传算法对最佳交通分布模式与最优信号方案进行动态优化,能有效降低交通出行费用<sup>[6]</sup>;Ukkusuri 等基于元胞自动机构建了路网动态交通流优化分布模型,并将模型用于交通信号优化配时<sup>[7]</sup>;Karoonsoontawong 等针对路网交通流的持续增长,以路网行程时间与离差平方和为优化目标,提出了一种双层鲁棒模型,对交通信号与交通分布模式进行同步优化<sup>[8]</sup>;Mitsakis 等基于人工智能与共用交通信息平台,利用预测的交通信息,构建了一种动态交通分配与交通控制协同模型<sup>[9]</sup>;卢守峰考虑诱导一致性,提出了基于解析法的信号控制与可变信息板(Variable Message Signs, VMS)路径诱导的协同模型<sup>[10]</sup>;杨庆芳等提出了一

种基于 Q 学习算法的交通控制与诱导协同模式的在线选择模型,以适应交通流的动态变化<sup>[11]</sup>;崔后盾针对不同的交通状态,提出交通信号与 VMS 的不同协同模式与策略<sup>[12]</sup>。

目前,国内外交通控制与交通诱导的协同研究主要针对常态下的交通需求、交通出行模式以及路网交通状态。在突发灾害下,路网的交通流分布特征有别于常态条件,受道路条件及驾驶人精神压力的影响,交通拥堵的发生具有明显的时空波动性,随机性与不确定性增强等,因此,本文借助以上研究成果,针对突发灾害下受灾区域 VMS 可变信息板对交通出行者出行路径选择及疏散交通流分布的影响,研究交通信号控制与 VMS 诱导的协同优化模型,实现受灾区域交通流的优化分布,以达到快速疏散受灾区域交通流的目的。

## 1 VMS 的影响范围估计

根据交通控制与交通诱导协同运作的特点,当 VMS 所在交通控制区域内某一位置发生交通事件或交通拥挤,在引导驾驶人避开的同时,通过将时变的交通出行需求合理引导到不同的路径上,可以降低交通控制区域内出行者的出行费用或系统费用。同时,交通控制系统对相应交叉口的信号配时方案进行调整,通过交通信号实现交通流的截流与分流,从控制的角度促进交通出行需求在不同的路径上分布,在时空上实现 VMS 影响范围内交通流按最优的分布方式进行加载。在突发灾害后,交通控制与 VMS 诱导的目的是引导并疏散交通流避开拥挤区域,促进疏散路径上交通负荷均衡分布,提高疏散路网的通行能力,实现受灾区域交通流快速疏散。同时,在突发灾害下,VMS 提供的诱导信息能够有效减轻驾驶人出行过程中的恐慌情绪和精神压力,驾驶人对 VMS 也具有较高的诱导服从率<sup>[13-14]</sup>,因此,

基于驾驶人对 VMS 的信任,通过交通信号调整,促进 VMS 影响范围内最优交通流分布模型的形成,而 VMS 对驾驶人出行路径选择的影响范围则是对路网交通流分布模式优化的前提条件。VMS 影响范围估计过程具体如下<sup>[15-16]</sup>。

1.1 符号定义

$G(N, A)$  为 VMS 所在的交通控制区域,其中  $N$  为控制区域内的交叉口集合,任一交叉口  $i \in N, A$  为控制区域内的连线集合; $R$  为控制区域内出行起点的集合; $S$  为控制区域内出行讫点的集合; $K_{rs}$  为起点  $r$  与讫点  $s$  之间路径的集合, $r \in R, s \in S$ ,任一路径  $k \in K_{rs}; \bar{k}$  为起点  $r$  与讫点  $s$  之间的最优路径; $i_{a1}, i_{a2}$  分别为连线  $a$  的上、下游交叉口, $a \in A; x_a$  为连线  $a$  的当前实际交通量; $\bar{x}_a$  为连线  $a$  的最优分布交通量; $\tau_a^0$  为连线  $a$  的自由流路段行程时间; $C_a$  为连线  $a$  的通行能力; $q_{rs}$  为起点  $r$  与讫点  $s$  之间的交通需求量; $\delta_{ka}^{rs}$  为 0-1 变量,当连线  $a$  在路径  $k$  上时为 1,否则为 0; $\alpha(n)$  为第  $n$  次迭代的更新步长; $x_a(n)$  为第  $n$  次迭代连线  $a$  的交通量; $\tau_a(n)$  为第  $n$  次迭代连线  $a$  的路段行程时间; $K_{rs}(n)$  为第  $n$  次迭代起点  $r$  与讫点  $s$  之间的路径集; $\bar{k}(n)$  为第  $n$  次迭代起点  $r$  与讫点  $s$  之间的最优路径; $x_k^{rs}(n)$  为第  $n$  次迭代路径  $k$  上的交通量; $f[x_k^{rs}(n)]$  为关于  $x_k^{rs}(n)$  的最优交通流分布函数; $d_k^{rs}(n)$  为路径  $k$  的行程时间; $\sigma_k^{rs}(n)$  为路径  $k$  的缩放函数。

1.2 具体步骤

初始化: $n$  与  $x_a(0)$  为 0,  $\tau_a(0) = \tau_a^0, K_{rs}(0)$  为空集。

Step 1: 方案初始化。

Step 1.1: 更新  $n$  值,  $n = n + 1$ 。

Step 1.2: 求解最优路径  $\bar{k}(n)$

$$K_{rs}(n) = \bar{k}(n) \cup K_{rs}(n-1)$$

Step 1.3: 采用全有全无交通分配法进行交通流分配

$$x_{\bar{k}(n)}^{rs}(n) = q_{rs}$$

Step 1.4: 计算连线  $a$  的交通量

$$x_a(n) = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}(n)} x_k^{rs}(n) \delta_{ka}^{rs} \quad (1)$$

Step 2: 最优路径的更新迭代。

Step 2.1: 更新  $n$  值,  $n = n + 1$ 。

Step 2.2: 更新路段行程时间

$$\tau_a(n) = \tau_a^0 \left\{ 1 + 0.15 \left[ \frac{x_a(n-1)}{C_a} \right]^4 \right\} \quad (2)$$

Step 2.3: 求解  $r, s$  之间的最短路径  $\bar{k}(n)$

$$K_{rs}(n) = \begin{cases} \bar{k}(n) \cup K_{rs}(n-1) & \bar{k}(n) \notin K_{rs}(n-1) \\ K_{rs}(n-1) & \text{其他} \end{cases}$$

Step 3: 网络交通流的均衡分配。

Step 3.1: 根据最优交通量分布函数  $\min f[x_k^{rs}(n)]$ , 约束条件为  $x_k^{rs}(n) \geq 0$ , 获取路径  $k$  的行程时间

$$\begin{cases} d_k^{rs}(n) = \frac{df[x_k^{rs}(n)]}{dx_k^{rs}(n)} \\ \frac{df[x_k^{rs}(n)]}{dx_k^{rs}(n)} = \sum_{a \in A} \tau_a(n) \delta_{ka}^{rs} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} d_{\bar{k}}^{rs}(n) = \frac{df[x_{\bar{k}}^{rs}(n)]}{dx_{\bar{k}}^{rs}(n)} \\ \frac{df[x_{\bar{k}}^{rs}(n)]}{dx_{\bar{k}}^{rs}(n)} = \sum_{a \in A} \tau_a(n) \delta_{\bar{k}a}^{rs} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sigma_k^{rs}(n) = \frac{d^2 f[x_k^{rs}(n)]}{d[x_k^{rs}(n)]^2} \\ \frac{d^2 f[x_k^{rs}(n)]}{d[x_k^{rs}(n)]^2} = \sum_{a \in A} \tau_a(n) (\delta_{ka}^{rs} - \delta_{\bar{k}a}^{rs})^2 \end{cases} \quad (5)$$

Step 3.2: 计算非最优路径  $k$  的交通量

$$x_k^{rs}(n+1) = \max \left\{ 0, x_k^{rs}(n) - \frac{\alpha(n)}{\sigma_k^{rs}(n)} \cdot [d_k^{rs}(n) - d_{\bar{k}}^{rs}(n)] \right\} \quad (6)$$

如果  $x_k^{rs}(n+1)$  为 0, 则将该路径  $k$  从  $K_{rs}(n)$  中去除, 表示为

$$K_{rs}(n) = K_{rs}(n) \setminus k$$

Step 3.3: 更新最优路径的交通量

$$x_{\bar{k}(n)}^{rs}(n+1) = q_{rs} - \sum_{k \in K_{rs}(n) \setminus \bar{k}(n)} x_k^{rs}(n+1) \quad (7)$$

Step 3.4: 更新连线  $a$  的交通量

$$x_a(n+1) = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}(n)} x_k^{rs}(n+1) \delta_{ka}^{rs} \quad (8)$$

Step 4: 计算最优路径  $\bar{k}(n)$  与其他路径的性能差异  $E$ , 作为路网内是否实现均衡分配的判断标准

$$E = \max_{rs} \sum_{k \in K_{rs}(n) \setminus \bar{k}(n)} \left\{ \frac{x_k^{rs}(n)}{q_{rs}} \left[ \frac{d_k^{rs}(n) - d_{\bar{k}}^{rs}(n)}{d_{\bar{k}}^{rs}(n)} \right] \right\} \quad (9)$$

Step 5: 判断收敛性, 若  $E$  小于收敛误差  $\tilde{E}$ , 则计算结束, 控制区域内连线  $a$  的最优流量  $\tilde{x}_a$  满足下式, 否则返回 Step 2

$$\tilde{x}_a = x_a(n+1)$$

Step 6: 计算控制区域内各连线实际交通量与最优交通量分布之间的差异  $\Gamma_a$

$$\Gamma_a = \left| \frac{x_a - \tilde{x}_a}{C_a} \right| \quad (10)$$

Step 7: 确定 VMS 影响范围, 如果  $\Gamma_a$  大于流量

最优分布误差  $\Gamma$ , 交叉口  $i_{a1}$ 、 $i_{a2}$  均需进行信号调整, 连线  $a$  与交叉口  $i_{a1}$ 、 $i_{a2}$  为 VMS 影响区域。

## 2 交通控制与 VMS 诱导的协同一体化模型

### 2.1 模型框架

突发灾害下道路交通需求剧增, 受灾区域短时间内聚集大量的交通流, 交通流系统内部的不稳定性逐渐增加, 交通流趋向于自组织临界状态。为了避免交通流稳定性的丧失, 冲突交通流的协同作用导致交通控制的产生, 交通控制反过来在时间上分离冲突交通流, 使交通流系统处于有序状态。同时, 突发灾害引发道路通行能力陡降, 需要在短时间内快速疏散受灾区域的交通流, 交通流系统的内部不稳定性依然存在, 需要进一步演化到新的宏观有序结构, 疏散交通流与道路交通网络的协同作用导致交通诱导的产生, 交通诱导反过来在空间上疏散交通流, 使交通流系统处于有序状态。从协同学的观点, 在突发灾害下应急交通组织与疏散过程中, 交通控制和交通诱导扮演着序参量的作用, 而序参量之间的协同合作决定着系统的有序结构, 因此, 在突发灾害下只有进一步加强交通控制与交通诱导的协同合作, 才能实现交通流有序、快速、高效的疏散, 达到 1 加 1 大于 2 的效果。在突发灾害下, 要实现受灾区域交通流的快速疏散, 前提是实现疏散路网交通流均衡负载, 以提高疏散路网的通行能力, 因此, VMS 诱导的目的是通过影响驾驶人出行路径选择行为, 引导交通流向最佳交通流分布模式发展, 而交通控制的目的是通过交通信号的调整, 改变路径行程时间, 从而影响驾驶人出行路径选择, 即通过交通信号实现交通流的截流、分流, 促进交通流向最佳交通流分布模式发展。基于此, 本文提出了基于双层规划的协同优化模型, 见图 1,  $F(m)$  为第  $m$  次迭代路网初始交通流分布,  $\tilde{F}(m)$  为第  $m$  次迭代路网最优交通流分布,  $\Delta$  为最优交通流分布逼近误差, 迭代次数的更新为  $m = m + 1$ 。

### 2.2 VMS 下的路径选择模型

动态交通诱导提供的诱导信息属于建议性信息, 出行者根据自己的主观能动性和出行期望对诱导信息进行响应, 并选择满足个性需求的出行路径。在突发灾害下, 出行者的目的是选择预期行程时间最短的路径, 尽可能在短时间内驶离受灾区域, 本文采用 Henderson 提出的以行程时间为效用函数的

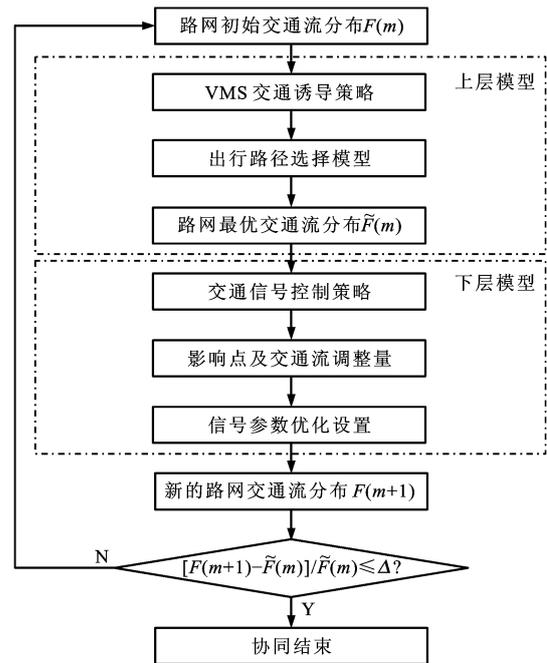


图 1 模型框架

Fig. 1 Model framework

交通事件下路径选择模型作为突发灾害驾驶人应急疏散的路径选择模型<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} P_k(t) = \frac{1}{1 + e^{\alpha - \beta \theta_k(t)}} \\ \theta_k(t) = \frac{d_k(t) - d_k^*(t)}{d_k^*(t)} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $P_k(t)$  为  $t$  时刻驾驶人在 VMS 信息引导下选择替代路径  $k$  的概率;  $\alpha$ 、 $\beta$  均为驾驶人路径选择影响因子;  $\theta_k(t)$  为  $t$  时刻驾驶人选择替代路径  $k$  期望获得的行程时间节省率;  $d_k(t)$  为  $t$  时刻驾驶人到达目的地的期望路径行程时间;  $d_k^*(t)$  为  $t$  时刻驾驶人选择替代路径  $k$  的期望路径行程时间。

由式(11)可知, 替代路径节省的路径行程时间越大, 替代路径被选择的概率也越大, 符合疏散条件下驾驶人的出行特性。

### 2.3 基于双层规划的协同一体化模型

对于动态交通诱导系统, 在突发灾害下进行交通诱导的目的是在最短的时间内将路网内的交通流疏散到指定安全区域, 因此, 将用户动态最优分配模型作为上层问题, 以路网内车辆行程时间最小为目标<sup>[18]</sup>, 表示为

$$\begin{aligned} \min \Phi[x_a(t), \tau_a(t)] &= \sum_{a \in A} \int_0^{x_a(t)} \tau_a(t) dt \quad (12) \\ \text{s. t. } \sum_{a \in O_i} x_a^r(t) - \sum_{a \in I_i} x_a^r(t) &= \begin{cases} q_{rs}(t) & i = r \\ -q_{rs}(t) & i = s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{r \in R, s \in S} x_a^{rs}(t) &= x_a(t) \\ \frac{\partial x_a(t)}{\partial t} &= v_a(t) - u_a(t) \\ \sum_{k \in K_{rs}} x_k^{rs}(t) &= q_{rs}(t) \\ \sum_{k \in K_{rs}} x_k^{rs}(t)[1 - P_k^{rs}(t)] &= x_k^{rs}(t+1) \\ \tau_a(t) &= \tau_a^0 \left\{ 1 + 0.15 \left[ \frac{x_a(t-1)}{C_a} \right]^4 \right\} \\ &\quad + \zeta_a(t) + \psi(t) \end{aligned}$$

式中:  $\Phi(\cdot)$  为路网车辆行程时间之和;  $\tau_a(t)$  为  $t$  时刻通过连线  $a$  的平均行程时间;  $x_a(t)$  为  $t$  时刻驶入连线  $a$  的交通量;  $x_a^{rs}(t)$ 、 $x_k^{rs}(t)$  分别为  $t$  时刻起点  $r$  与讫点  $s$  之间驶入连线  $a$  与路径  $k$  的交通量;  $P_k^{rs}(t)$  为  $t$  时刻从起点  $r$  到讫点  $s$  选择路径  $k$  出行的概率;  $q_{rs}(t)$  为  $t$  时刻起点  $r$  与讫点  $s$  之间的交通需求;  $I_i$  为驶向节点  $i$  的连线集合,  $I_i \subset A$ ;  $O_i$  为驶离节点  $i$  的连线集合,  $O_i \subset A$ ;  $v_a(t)$  为  $t$  时刻连线  $a$  上的车辆驶入率;  $u_a(t)$  为  $t$  时刻连线  $a$  上的车辆驶出率;  $\zeta_a(t)$  为  $t$  时刻连线  $a$  的车辆平均延误;  $\psi(t)$  为  $t$  时刻行程时间随机因子;  $x_a(t)$ 、 $x_k^{rs}(t)$ 、 $P_k^{rs}(t)$ 、 $q_{rs}(t)$ 、 $v_a(t)$  与  $u_a(t)$  为非负变量。

对于交通信号控制系统,在突发灾害下进行交通控制的目的是在分离冲突交通流,保证疏散交通流安全的同时,使路网内的疏散车辆快速通过交叉口,因此,将全局信号参数优化模型作为下层问题,并以路网内交叉口延误最小为目标,表示为

$$\min D[x_a(t), \zeta_a(t)] = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a(t)} \zeta_a(t) dt \quad (13)$$

$$\text{s. t. } T_{\min} \leq T_a(t) \leq T_{\max}$$

$$g_{\min} \leq g_a(t) \leq g_{\max}$$

$$\lambda_{\min} \leq \lambda_a(t) \leq \lambda_{\max}$$

$$\sum_{l \in L_a} g_i^l(t) = g_a(t)$$

$$g_a(t) = g_a(t) - \eta_a \Delta x_a(t)$$

$$\vartheta_a(t) = \omega[\tau_a(t), T_a(t)]$$

$$u_a(t) \leq \lambda_a(t) \mu_a$$

$$g_a(t) \mu_a \leq C_a$$

式中:  $D(\cdot)$  为路网内车辆在交叉口的停车延误之和;  $T_a(t)$  为  $t$  时刻连线  $a$  的周期时长;  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  分别为最小周期时长和最大周期时长;  $g_{\min}$ 、 $g_{\max}$  分别为最小绿灯时长和最大绿灯时长;  $g_i^l(t)$  为  $t$  时刻节点  $i$  相位  $l$  的绿灯时长;  $g_a(t)$  为  $t$  时刻连线  $a$  的绿灯时长;  $\lambda_a(t)$  为  $t$  时刻连线  $a$  的饱和度;  $\lambda_{\min}$ 、 $\lambda_{\max}$  为连线最小饱和度和最大饱和度;  $\mu_a$  为连线  $a$  的饱和流

率;  $L_a$  为连线  $a$  上信号相位的集合;  $\eta_a$  为连线  $a$  的绿灯时长调整系数;  $\Delta x_a(t)$  为  $t$  时刻连线  $a$  的交通量增量;  $\vartheta_a(t)$  为  $t$  时刻连线  $a$  上的起步时距;  $\omega(\cdot)$  为关于行程时间  $\tau$  和周期时长  $T$  的起步时距函数;  $g_a(t)$ 、 $\zeta_a(t)$  与  $\lambda_a(t)$  为非负变量。

### 3 模型的求解算法

双层规划的非凸性和非处处可微性使得问题的求解非常困难,采用传统的非线性规划方法求解非线性双层规划问题显得非常复杂<sup>[19]</sup>。由于上层问题是动态交通分配中用户均衡的问题,下层问题是信号参数的全局优化问题,因此,本文采用 Frank-Wolfe 均衡分配和遗传算法进行问题的求解,具体步骤如下:

初始化设置:将路网内当前的信号配时参数和交通流参数作为初始优化值,初始化  $n$ 、 $m$  均为 0,  $x_a(0) = x_a$ ,  $\tau_a(0) = \tau_a$ ,  $\mathbf{A}_i(0) = \mathbf{A}_i$ , 其中  $\tau_a$  为连线  $a$  的当前路段行程时间,  $\mathbf{A}_i(0)$  为节点  $i$  出事时刻的信号配时参数向量,  $\mathbf{A}_i$  为节点  $i$  的当前信号配时参数向量。

Step 1: 初始化交通流分布  $F(m)$ , 设置内循环  $n = n + 1$ 。

Step 2: 交通流均衡分配的迭代求解。

Step 2.1: 更新连线  $a$  的路段行程时间

$$\begin{aligned} \tau_a(n) &= \tau_a^0 \left\{ 1 + 0.15 \left[ \frac{x_a(n-1)}{C_a} \right]^4 \right\} + \\ &\quad \zeta_a(m) + \psi(m) \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $\zeta_a(m)$  为第  $m$  次迭代连线的车辆平均延误;  $\psi(m)$  为第  $m$  次迭代行程时间随机因子。

Step 2.2: 更新  $r$  与  $s$  之间的最短路径  $\bar{k}(n)$  及路径集  $K_{rs}(n)$ 。

Step 3: 网络交通流的均衡分配。

Step 3.1: 计算  $r$  与  $s$  之间的路线行程时间及搜索补偿缩放函数

$$d_k^{rs}(n) = \sum_{a \in A} \tau_a(n) \delta_{ka}^{rs} \quad (15)$$

$$\sigma_k^{rs}(n) = \sum_{a \in A} \tau_a(n) (\delta_{ka}^{rs} - \delta_{\bar{k}a}^{rs})^2 \quad (16)$$

Step 3.2: 更新路径  $k$  的选择概率  $P_k^{rs}(t)$ 。

Step 3.3: 计算路径  $k$  的交通量  $x_k^{rs}(n)$ 。

Step 3.4: 更新连线  $a$  的交通量  $x_a(n)$ 。

Step 4: 内循环收敛性判断。若满足条件,记录当前路网条件下的最优交通流分布模式  $\tilde{F}(m)$ , 否则返回 Step 2。

Step 5: 将第  $m$  次迭代连线  $a$  的交通量  $x_a(m)$ 、第  $m$  次迭代连线  $a$  上的车辆驶入率  $v_a(m)$ 、第  $m$  次迭代连线  $a$  上的车辆驶出率  $u_a(m)$ 、交叉口  $i$  第  $m$

次迭代的信号配时参数向量  $\mathbf{A}_i(m)$  进行二进制编码,形成染色体。

Step 6: 设置群的大小  $H$  及迭代最大次数  $Z$ 。

Step 7: 对染色体进行选择、交叉、变异、反转等操作,求解最佳配时方案  $\mathbf{A}_i(m+1)$ 。

Step 8: 预测配时方案为  $\mathbf{A}_i(m+1)$  路口的  $x_a(m+1)$ 、 $v_a(m+1)$ 、 $u_a(m+1)$ , 获得新的交通流分布  $F(m+1)$ 。

Step 9: 判断外循环收敛性,如果

$$[F(m+1) - \tilde{F}(m)] / \tilde{F}(m) \leq \Delta \quad (17)$$

成立,则结束运算,否则令  $m = m + 1$ ,返回 Step 1。

### 4 模型与算法验证

以山东省淄博市淄博新区为模拟路网进行交通控制与 VMS 协同运作效果仿真与验证,路网内安装有 4 个 VMS 可变信息板,分别位于联通路和西八路上。为模拟突发灾害下出行者的恐慌、紧张情绪等对道路通行能力产生的影响,本文基于扰动理论,利用随机扰动因子对模拟路网的路段通行能力进行了随机衰减<sup>[20]</sup>,路网条件、VMS 设置与交通信号控制情况见图 2。

本文以 Paramics 为仿真平台,通过 Paramics API 实现交通控制与 VMS 的协同优化模型(简称 TCVMS)。由于模拟路网为新建城区,交通基础设施比较完备,但路网交通量相对较少,全天中路网连线饱和度  $\lambda_a$  均低于 0.8。本文以 2008 年 4 月 16~26 日

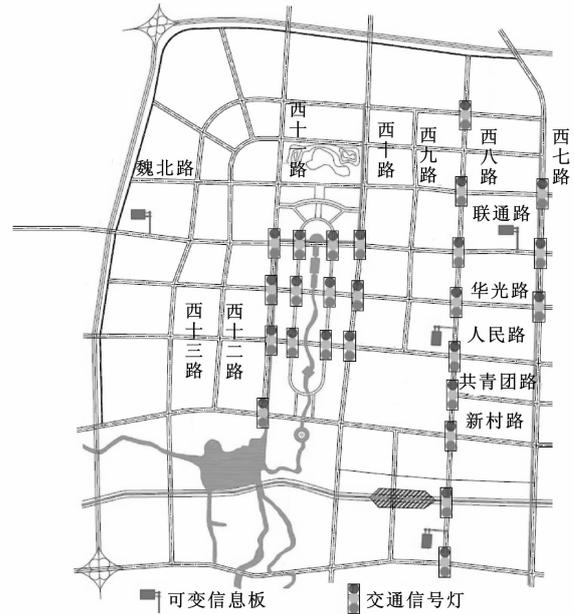


图 2 模拟路网

Fig. 2 Simulation network

路网实际交通量模拟突发灾害下  $\lambda_a$  小于等于 0.8 时路网的交通流运行情况,通过设置路网内各出入口的 OD 交通流,模拟突发灾害下路网连线饱和度分别为  $0.8 < \lambda_a \leq 1.0$ 、 $\lambda_a > 1.0$  时的交通流情况,并将路网交通流数据分别输入 Synchro V6 配时优化软件中,获取路网内的信号方案,用于模拟受灾路网无协同控制情况下的路网交通流运行效果,并对路网内的车辆平均延误、平均速度以及交叉口平均饱和度、平均排队长度进行对比分析,见表 1。

表 1 对比结果

Tab. 1 Comparison results

饱和度	模型	平均延误/s	标准偏差	平均速度/(km · h <sup>-1</sup> )	标准偏差	交叉口饱和度	标准偏差	排队长度/m	标准偏差
$\lambda_a \leq 0.8$	Synchro	5.241	2.041	45.320	6.773	0.621	0.142	6.533	6.179
	TCVMS	5.112	1.724	46.170	5.465	0.611	0.101	6.527	5.491
$0.8 < \lambda_a \leq 1.0$	Synchro	24.320	6.317	35.840	9.194	0.860	0.201	18.960	4.234
	TCVMS	22.310	5.256	38.420	7.851	0.833	0.193	15.350	4.211
$\lambda_a > 1.0$	Synchro	37.290	5.542	25.160	4.527	0.939	0.114	36.470	7.712
	TCVMS	34.230	4.437	28.130	3.699	0.905	0.102	33.620	6.985

由表 1 中的结果可以计算出,当  $\lambda_a \leq 0.8$  时,与 Synchro 模型相比:本文模型减少延误 2.461%,降低延误标准偏差 15.530%;提高速度 1.876%,降低速度标准偏差 19.310%;减少交叉口饱和度 1.674%,降低交叉口饱和度标准偏差 28.940%;减少排队长度 0.092%,降低排队长度标准偏差 11.130%。以上数据说明在低饱和度下,实施协同优化对提高路网交通流运行性能效果并不显著,但可以提高路网交通流运行的稳定性,促进交通流的

均衡分配。当  $0.8 < \lambda_a \leq 1.0$  时,本文模型减少延误 8.265%,降低延误标准偏差 16.800%;提高速度 7.199%,降低速度标准偏差 14.610%;减少交叉口饱和度 3.183%,降低交叉口饱和度标准偏差 4.320%;减少排队长度 19.040%,降低排队长度标准偏差 0.543%。以上数据说明在饱和交通流状态下,实施协同优化可以有效提高路网交通流运行性能以及交通流运行的稳定性。当  $\lambda_a > 1.0$  时,本文模型减少延误 8.206%,降低延误标准偏差

19.940%;提高速度 11.800%,降低速度标准偏差 18.290%;减少交叉口饱和度 3.651%,降低交叉口饱和度标准偏差 10.360%;减少排队长度 7.815%,降低排队长度标准偏差 9.427%。以上数据说明在过饱和和交通流状态下,实施协同优化可显著提高路网交通流运行性能指标。从总体来看,相比 Synchro 模型,路网连线饱和度越高,本文模型提高路网交通流运行性能指标的效果越显著,促进路网交通流运行稳定性的能力越强,越能均衡分配路网负载。

对不同受灾区域、不同交通流条件下受困车辆疏散百分比与疏散时间的关系进行了分析,结果见图 3。当路网连线饱和度分别为  $\lambda_a \leq 0.8$ 、 $0.8 < \lambda_a \leq 1.0$ 、 $\lambda_a > 1.0$ ,且受灾交通流疏散完成 80%时,相比 Synchro 模型,本文模型的受灾交通流疏散时间分别减少 11.55、21.84、25.64 min,疏散速度分别提高 25.98%、31.83%、20.16%,说明本文模型在各种交通状态下都能提高交通流的疏散速度,疏散效果明显优于 Synchro 模型。

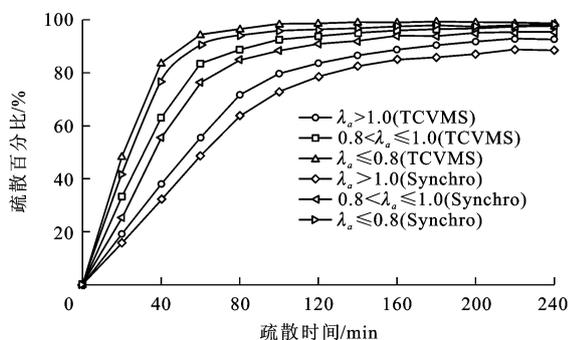


图 3 疏散百分比与时间关系

Fig. 3 Relationship of evacuated percentage and time

## 5 结 语

本文基于双层规划构建突发灾害下交通控制与 VMS 诱导的协同一体化模型,以路网最优交通流分布模式为目标,在交通控制中根据 VMS 诱导引发的路段交通量变化来优化信号方案,在 VMS 诱导中根据交通控制引发的路段行程时间变化来引导驾驶人进行路径选择,优化路段交通量的加载。通过交通控制与 VMS 诱导的相互促进,共同实现路网最优交通流分布模式的形成。最后采用 Frank-Wolfe 均衡分配和遗传算法对模型进行优化求解,以山东淄博新区为模拟路网,搭建仿真平台对本文模型和算法进行模拟验证,验证结果表明,交通控制与 VMS 诱导的协同优化能够有效降低路网车辆延误,提高行车速度,实现受灾区域交通流的快速疏散。

本文以智能交通系统能够获取受灾区域路网全局的交通流信息为前提条件建立模型,由于受突发灾害的影响,路网上的交通基础设施有可能遭受物理性或功能性破坏,造成路网交通信息的缺失。同时,本文模型算法属于离线仿真优化,其求解速度无法满足应急交通组织保障在线决策支持,因此,本文的下一步工作是在考虑路网交通数据缺失情况下,进行交通控制与 VMS 诱导的协同优化,同时提高模型求解速度,以满足在线应急交通组织保障和决策支持的需要。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] GHODS A H, FU L, RAHIMI-KIAN A. An efficient optimization approach to real-time coordinated and integrated freeway traffic control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(4): 873-884.
- [2] WU Xin-kai, LIU H X, GEROLIMINIS N. An empirical analysis on the arterial fundamental diagram [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(1): 255-266.
- [3] GARTNER N H, STAMATIADIS C. Integration of dynamic traffic assignment with real-time traffic adaptive control system[J]. Transportation Research Record, 1998(1644): 150-156.
- [4] ABDELFAH A S, MAHMAMASSANI H S. System optimal time-dependent path assignment and signal timing in traffic network[J]. Transportation Research Record, 1998(1645): 185-193.
- [5] LO H K. A cell-based traffic control formulation: strategies and benefits of dynamic timing plans [J]. Transportation Science, 2001, 35(2): 148-164.
- [6] VARIA H R, DHINGRA S L. Dynamic optimal traffic assignment and signal time optimization using genetic algorithms[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19(4): 260-273.
- [7] UKKUSURI S V, RAMADURAI G, PATIL G. A robust transportation signal control problem accounting for traffic dynamics[J]. Computers and Operations Research, 2010, 37(5): 869-879.
- [8] KAROONSOONTAWONG A, WALLER S T. Integrated network capacity expansion and traffic signal optimization problem: robust bi-level dynamic formulation[J]. Networks and Spatial Economics, 2010, 10(4): 525-550.
- [9] MITSAKIS E, SALANOVA J M, GIANOPOULOS G. Combined dynamic traffic assignment and urban traffic control models[J]. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2011(20): 427-436.
- [10] 卢守峰. 基于元胞自动机的交通信号控制与路径诱导的协同研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.

(下转第 118 页)

- analysis of airborne AIS receiver [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(10): 57-62. (in Chinese)
- [6] 陈秀伟, 贾瑛卓. 船载自动识别系统设计[J]. 大连海事大学学报, 2007, 33(增 1): 108-110, 119.  
CHEN Xiu-wei, JIA Ying-zhuo. Automatic identification system design on universal shipborne[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2007, 33(S1): 108-110, 119. (in Chinese)
- [7] 陶立敏, 许昌如. 自动识别系统(AIS)基站的组网研究[J]. 航海技术, 2004(4): 31-33.  
TAO Li-min, XU Chang-ru. Study of the AIS netting[J]. Marine Technology, 2004(4): 31-33. (in Chinese)
- [8] ADLER R M, FULLER J. An integrated framework for assessing and mitigating risks to maritime critical infrastructure[C]//IEEE. Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security. Woburn: IEEE, 2007: 252-257.
- [9] GIOMPAPA S, CROCI R, DI STEFANO R, et al. Naval target classification by fusion of IR and EO sensors[C]//SPIE. Proceedings of 2007 SPIE European Symposium on Optics and Photonics in Security and Defence. Florence: SPIE, 2007: 17-21.
- [10] 李 瑛, 胡楚锋, 李南京, 等. 阵列射频仿真系统精度改进方法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7045-7047.  
LI Ying, HU Chu-feng, LI Nan-jing, et al. Investigation on method of improving precision for RF simulation system[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(22): 7045-7047. (in Chinese)
- [11] 马 枫, 严新平, 初秀民, 等. 船舶自动识别系统信号失效与场强的相关性[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(3): 111-114.  
MA Feng, YAN Xin-ping, CHU Xiu-min, et al. Correlation between signal failure and field strength in automatic identify system[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2011, 37(3): 111-114. (in Chinese)
- [12] AKOS D M, FROM M, KARLSSON M, et al. Receiver measured time in the VDL mode 4 system [C] // IEEE. Proceedings of 2000 IEEE Position Location and Navigation Symposium. San Diego: IEEE, 2000: 309-316.
- [13] 刘宇宏. 船舶避碰智能决策支持系统的设计与实现[J]. 中国航海, 2004, 27(4): 32-37.  
LIU Yu-hong. Design and realization of intelligent decision support system for vessel collision avoidance[J]. Navigation of China, 2004, 27(4): 32-37. (in Chinese)
- [14] 徐建闽, 林 思, 焦光庭, 等. 大交通模式下的 ITS 体系框架研究[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(2): 1-4, 50.  
XU Jian-min, LIN Si, JIAO Guang-ting, et al. ITS architecture of general communications [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2009, 27(2): 1-4, 50. (in Chinese)
- [15] 翟雅娟, 翁剑成, 荣 建, 等. 多源数据融合的区间车辆速度预测算法研究[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(3): 74-77.  
ZHAI Ya-qiao, WENG Jian-cheng, RONG Jian, et al. A travel speed forecasting algorithm based on multi-source data fusion [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2009, 27(3): 74-77. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 110 页)
- LU Shou-feng. The study on combined traffic signal control and route guidance based on cellular automata[D]. Chang-chun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [11] 杨庆芳, 杨 朝. 基于 Q-学习算法的交通控制与诱导协同模式的在线选择[J]. 吉林大学学报:工学版, 2010, 40(5): 1215-1219.  
YANG Qing-fang, YANG Chao. On-line selection method of the traffic control and route guidance collaboration mode based on Q-learning algorithm[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(5): 1215-1219. (in Chinese)
- [12] 崔后盾. 信号控制与 VMS 诱导的协同策略及信息发布的优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
CUI Hou-dun. The coordination strategy between signal control and VMS and optimization for information publishing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [13] CHATTERJEE K, HOUNSELL N B, FIRMIN P E, et al. Driver response to variable message sign information in London[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2002, 10(2): 149-169.
- [14] 尚华艳, 黄海军, 高自友. 可变信息标志诱导下的路径选择行为[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(7): 166-172.  
SHANG Hua-yan, HUANG Hai-jun, GAO Zi-you. Route choice behavior under guidance of variable message signs[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2009, 29(7): 166-172. (in Chinese)
- [15] LEE C, RAN B, YANG F, et al. A hybrid tree approach to modeling alternate route choice behavior with online information[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 2010, 14(4): 209-219.
- [16] TAY R, DEB A. Effectiveness of road safety messages on variable message signs[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(3): 18-23.
- [17] HENDERSON J M. A planning model for optimizing locations of changeable message signs[D]. Waterloo: University of Waterloo, 2004.
- [18] CHEN L W, HU T Y. Dynamic flow equilibrium for flow-responsive signal settings and time-dependent traffic assignment[C]//IEEE. Proceedings of the 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Saint Louis: IEEE, 2009: 615-620.
- [19] 李润梅, 李 伟. 饱和路网中动态交通分配和控制一体化建模研究[J]. 信息与控制, 2004, 33(6): 641-645.  
LI Run-mei, LI Wei. The integrative modeling of dynamic traffic assignment and traffic control in saturated networks[J]. Information and Control, 2004, 33(6): 641-645. (in Chinese)
- [20] KIM E Y, KIN S C, SEONG B S. Structure of attractive and repulsive hard-core Yukawa fluids; density functional perturbation theory[J]. Fluid Phase Equilibria, 2011, 308(1/2): 90-97.