

交通事件下快速路网匝道控制与路线诱导的集成控制

吕智林¹, 范炳全²

(1. 广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 上海理工大学 交通运输系统研究中心, 上海 200093)

摘要: 本文建立了交通事件影响下匝道控制与路线诱导相结合的完全集成控制模型, 即建立了一个以节点分流比例与匝道调节率为控制变量的非线性最优控制模型, 模型中考虑了突发交通事件后快速路的交通特点, 基于粒子群算法设计了模型的求解算法. 以一个简单的小型路网为例, 讨论了突发事件后采用不同控制策略对系统的全局影响. 仿真表明, 匝道控制与路线诱导相结合的集成控制有效地降低了事件的影响.

关键词: 城市快速路网; 交通事件; 集成控制; 粒子群优化

中图分类号: U491 **文献标识码:** A

Integration of ramp control and route guidance under accident conditions

LÜ Zhi-lin¹, FAN Bing-quan²

(1. College of Electric Engineering, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China;

2. Center of Research on Transports System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Under accident conditions, we propose a total integrated control strategy for the urban expressway networks, by making use of the ramp control and the route guidance. This strategy has a non-linear optimal model with the ramp metering and the splitting proportion as the controlled variables. It also takes into account the accidental traffic characteristics on the expressway. Based on the particle-swarm-optimization, we present a new numerical solution algorithm for this strategy. With a relatively simple network as example, we discuss the accidental impacts on the system performance under different field scenarios. The simulation results indicate that the total integrated strategy reduces the traffic retardation caused by the accident.

Key words: urban expressway networks; traffic incident; integrated control; particle swarm optimization

1 引言(Introduction)

在我国很多大型城市里, 由于道路建设的速度远远跟不上交通量的增长速度, 以及缺乏对快速路的系统研究和控制, 快速路阻塞现象屡见不鲜, 若突发交通事件, 将会造成更为严重的拥挤, 给社会造成巨大损失, 因此对偶发性事件影响的研究十分重要. 对于发生了交通异常事件的快速路网, 如果仅采用匝道控制或路线诱导, 效果不一定理想; 如果同时采用两种控制策略, 但在实施时不考虑它们之间的相互作用, 也会导致网络的部分恶化. 匝道控制与路线诱导的集成按集成水平来分, 可分为4级: 独立式、偏重式、协作式、完全集成式^[1,2]. 从理论上讲, 完全集成控制是较完善的, 代表了今后快速路网集成控制的发展方向.

由于交通系统的高度复杂性和系统集成中的

一些实际问题, 对于路线诱导与匝道控制如何协调及集成, 目前还处于探索阶段. Chang^[3]从系统最优角度讨论集成交通控制系统设计. Diakaki和Papageorgiou^[1]以英国Glasgow市的M8通道为背景, 通过仿真定量评估匝道控制、路由控制和路口信号灯控制的集成控制效果. Ben-Akiva^[4]设计了微观交通仿真平台, 来研究匝道、主线、集成控制对系统的整体影响. Kotsialos和Papageorgiou^[5]提出了一个将匝道控制与诱导相结合的完全集成控制策略, 并给出了一种可行方向算法对其进行求解. 吕智林^[6]在文献[5]的基础上研究了基于诱导信息的快速路网集成控制模型, 基于改进的遗传算法设计了求解算法. 王正武^[7]研究了高速公路主线限速与匝道融合的协调控制模型. 上述文献没有讨论突发交通事件的影响. 郑建潮^[8]在事件状态下, 对快速路交通通道

的优化控制建模进行了研究.

本文研究交通事件影响下的快速路网路线诱导与匝道控制相结合的完全集成控制策略. 即建立一个以节点分流比例与匝道调节率为控制变量的非线性最优控制模型; 模型中考虑了突发交通事件后快速路的交通特点; 借助滚动优化的思想, 基于粒子群优化算法(PSO)设计模型的求解算法; 最后给出了相应的仿真算例.

2 交通事件影响下城市快速路网集成控制模型的建立(Integrated control of urban expressway networks under incident impact)

2.1 构筑控制模型的基本假定(Assumption)

1) 节点用来表示道路几何条件发生变化的位置、出(入)口匝道和立交等. 快速路被节点分成若干路段. 出于建模精度考虑, 若相邻节点之间路段距离较长时, 可根据需要再分为若干小段.

2) 城市快速路网的起点(O 点)即为入口匝道、主线源点或主线分流节点; D 点为出口匝道或主线终点. 本文假定这些动态 OD 已获得, 不作深入研究.

3) 假定所有的交通需求都能直接或在等待一段时间后参与快速路的主线运行, 并假定交通需求的转移都发生在城市快速路网范围内.

4) 主线分流节点采用可变信息板(VMS)进行路线诱导控制, 而无匝道控制; 入匝节点有匝道控制, 而无诱导设施.

2.2 模型的符号定义(Definition of traffic variables)

i, j 分别为分流节点或入口匝道和出口匝道的下标; Δt 为时段长度; Δ_a, λ_a 分别为路段 a 的长度和车道数; C_a 为路段 a 的最大通行能力; $Ca_j(t)$ 为出口匝道 j 的实时最大通行能力; b 表示事件路段, $CC_b(t)$ 表示事件路段在 t 时段的瓶颈通行能力. $\rho_{ij}^a(t)$ 为 t 时段 OD 对 i, j 之间的流量在路段 a 上的密度, $\rho^a(t)$ 为 t 时段在路段 a 上的密度, $\rho_{jam}^a, \rho_{cr}^a$ 分别为路段 a 的阻塞密度和临界密度; $\nu^a(t)$ 为 t 时段路段 a 上车流的空间平均车速; $in_{ij,n}^a(t)$ 为 t 时段 OD 对 i, j 之间在分流节点 n 驶出流入路段 a 的流量; $q_{ij}^a(t)$ 为 t 时段 OD 对 i, j 之间在路段 a 上的流量, $q^a(t)$ 为 t 时段路段 a 上的流量, $q_{ij,n}(t)$ 为 t 时段 OD 对 i, j 间流向分流节点 n 的流量; $d_{ij}(t)$ 为 t 时段 OD 对 i, j 间的交通需求; $r_{ij}(t)$ 为 t 时段 OD 对 i, j 间的调节率; $r_i(t)$ 为控制变量, 表示 t 时段匝道 i 的总调节率; $r_{i,min}, r_{i,max}$ 分别为入口匝道 i 的最小调节率和最大调节率; $l_{ij}(t)$ 为

t 时段从入口匝道 i 驶向 j 的排队长度(排队车辆数), $l_{ij,n}$ 为 t 时段 OD 对 i, j 间在分流节点 n 的排队长度, $l_i(t)$ 是 t 时段入口匝道 i 的排队长度; $l_{i,max}$ 为入口匝道 i 的最大排队长度; $l^b(t)$ 为事件路段 b 在 t 时段的排队长度; O_{nj} 为 n, j 之间在分流节点 n 的驶出路段集合; $\beta_{N,nj}^a(t)$ 为 n, j 之间在没有任何诱导信息的情况下, 由用户自发选择路段 a 的分流比例; $\beta_{G,nj}^a$ 则是控制模型的控制变量, 表示 n, j 之间路段 a 最优分流比例; $\beta_{nj}^a(t)$ 是 n, j 之间路段 a 的实际分流比例; ε 表示用户的服从率.

2.3 交通异常事件的响应和分析(Reaction and analysis of traffic incident)

当快速路的某一路段发生突发事件时, 事件点的通行能力立即下降. 如果下降低于交通需求时, 交通流就要受到影响. 产生偶发性交通拥挤. 事发点通行能力的变化为: T_1 至 T_2 阶段为事件发生后的检测与反应时间, 此时路段通行能力由于异常事件的发生而下降; T_2 至 T_3 阶段为异常事件排除阶段, 由于对事件现场进行清理, 会占用一定的道路资源, 因此事发点的通行能力有可能会进一步降低; T_3 至 T_4 时段为离去时间, 异常事件处理完毕, 通行能力得以恢复, 排队开始消散. T_4 时段后排队完全消散, 交通状态恢复正常.

本文研究当事件发生后, 如何调整控制策略, 制定诱导方案将部分需求转移到备选路径, 从而降低事发路段上游的需求, 减少事件所造成的延误. 对交通事件进行响应, 即修正交通流模型, 包括: 事件路段通行能力的修正、事件路段的排队分析, 以及事件消除后, 事件路段通行能力的恢复和事件路段排队长度消散的分析.

假设事件发生在 b 路段, 在事件持续过程中, 路段 b 的通行能力下降到路段 b 的驶入流率以下, 排队将会产生并且其长度将不断增加. 现用 q^b 来表示事件路段 b 的流率, 即是驶入路段 b 上事发点的流率; CC_b 表示事件路段 b 的瓶颈通行能力. 因此排队率为

$$\varpi_m(t) = q^b(t) - CC_b(t). \quad (1)$$

该式表示由于驶入流率与驶出流率的差异对排队率产生的影响.

事件发生路段 b 的排队长度为

$$l^b(t+1) = l^b(t) + \varpi_m(t) \cdot \Delta t = l^b(t) + (q^b(t) - CC_b(t)) \cdot \Delta t, \quad t \in [T_1, T_3]. \quad (2)$$

此时事发路段的流出流量应根据瓶颈通行能力作如下修正:

$$q_{ij}^b(t) = \frac{q_{ij}^b(t)}{\sum_i \sum_j q_{ij}^b(t)} \cdot CC_b(t), t \in [T_1, T_3]. \quad (3)$$

当事件消除后, 驶离通行能力或者驶离排队车辆的流量通常小于稳定流时的通行能力. 局部的驾驶特性对此有较大的影响, 其影响幅度从显著减少通行能力的25%到实际上没有减少. 因此排队消散率为

$$\varpi_k(t) = \beta C_b - q^b(t), \beta \in [0.75, 1]. \quad (4)$$

事件消除后路段 b 的排队长度为

$$\begin{aligned} l^b(t+1) &= l^b(t) - \varpi_k(t) \cdot \Delta t = \\ l^b(t) - (\beta C_b - q^b(t)) \cdot \Delta t, t &\in [T_3, T_4]. \end{aligned} \quad (5)$$

排队消散时事发路段的流出流量应根据驶离通行能力作如下修正:

$$q_{ij}^b(t) = \frac{q_{ij}^b(t)}{\sum_i \sum_j q_{ij}^b(t)} \cdot \beta C_b, t \in [T_3, T_4]. \quad (6)$$

2.4 匝道控制与路线诱导相结合的集成控制(Integrated control model with the use of ramp control and route guidance)

通过上面的分析可知: 交通异常事件状态下的集成控制模型与正常情况下的集成控制模型存在几个方面不同: 1) 控制过程应考虑异常事件影响下的路段状态方程. 由于突发事件的发生, 事件点的通行能力立即下降, 导致事发路段出现排队现象, 因此要在模型中增加事件路段排队变量 $l^b(t)$ 和相应的状态方程; 2) 由于事件的发生, 事发路段必然会产生偶发性交通拥挤, 由于不能保证路段的密度低于或等于临界密度, 因此在确定路段的流量时, 需考虑其上游流量的影响(顺畅时)和下游流量的影响(拥挤时); 3) 系统的性能指标也需修正, 应考虑使事发路段的排队长度尽可能短.

在给定系统状态 $\mathbf{X}(t) = [\rho_{ij}^a(t), l_{ij}^a(t), l^b(t)]$ 的初值和动态交通需求的预测值 $\mathbf{d}(t) = [d_{ij}(t)]$ 的前提下, 确定一组匝道调节率 $\mathbf{r}(t) = [r_i(t)]$ 和节点分流比例 $\beta(t) = [\beta_{G,nj}^a(t)]$, 使得在满足状态转移方程、状态函数方程和其他约束条件前提下, 系统总的行程时间与异常事件造成的排队延误之和最小.

$$\begin{aligned} \min J &= \Delta t \sum_t \left(\sum_a \sum_i \sum_j \rho_{ij}^a(t) \cdot \Delta_a \cdot \lambda_a + \right. \\ &\quad \left. \sum_i \sum_j l_{ij}(t) + \sum_i \sum_j l_{ij,n}(t) + \right. \\ &\quad \left. \sum_b \theta_b \cdot l^b(t) \right), \end{aligned} \quad (7)$$

s.t.

$$\rho_{ij}^a(t+1) =$$

$$\begin{cases} \rho_{ij}^a(t) + (r_{ij}(t) - q_{ij}^a(t)) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta_a \lambda_a}, \\ a \text{ 是 } OD \text{ 对 } ij \text{ 的起始路段, 且 } i \text{ 为入匝点;} \\ \rho_{ij}^a(t) + (\text{in}_{ij,n}^a(t) - q_{ij}^a(t)) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta_a \lambda_a}, \\ a \text{ 是 } nj \text{ 的起始路段, 且 } n \text{ 为分流点;} \\ \rho_{ij}^a(t) + (q_{ij}^{a-1}(t) - q_{ij}^a(t)) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta_a \lambda_a}, \\ \text{其他情况;} \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho^a(t) = \sum_i \sum_j \rho_{ij}^a(t), \forall i, j, a, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \nu^a(t) &= (\nu_{\text{free}}^a - \nu_{\text{min}}^a) \cdot \\ &\quad [1 - (\rho^a(t) / \rho_{\text{jam}}^a)^{\varphi}]^{\beta} + \nu_{\text{min}}^a, \forall a, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} q_{ij}^a(t) &= \alpha(\rho^{a+1}(t)) \cdot \rho_{ij}^a(t) \cdot \nu^a(t) \cdot \lambda_a + \\ &\quad (1 - \alpha(\rho^{a+1}(t))) \cdot \\ &\quad \rho_{ij}^{a+1}(t) \cdot \nu^{a+1}(t) \cdot \lambda_{a+1}, \forall i, j, a. \end{aligned} \quad (11)$$

其中:

$$\alpha = \begin{cases} (\rho^{a+1}(t) - \rho_{\text{cr}}^{a+1} + 1)^{-1}, \\ \rho^{a+1}(t) > \rho_{\text{cr}}^{a+1} \text{ 且 } \rho_{ij}^a(t) \nu^a(t) \lambda_a > \\ \rho_{ij}^{a+1}(t) \nu^{a+1}(t) \lambda_{a+1}; \\ 1, \text{ 否则;} \end{cases}$$

$$l_{ij}(t+1) = l_{ij}(t) + (d_{ij}(t) - r_{ij}(t)) \cdot \Delta t, \quad (12)$$

$$r_{ij}(t) = \frac{d_{ij}(t) \cdot \Delta t + l_{ij}(t)}{\sum_j d_{ij}(t) \Delta t + l_{ij}(t)} \cdot r_i(t), \quad (13)$$

$$\text{in}^a(t) =$$

$$\begin{aligned} &\alpha \left(\sum_i \sum_j \beta_{nj}^a(t) \cdot (q_{ij,n}(t) + l_{ij,n}(t)) \right) + (1 - \alpha) \cdot \\ &\quad \rho^a(t) \cdot \nu^a(t) \cdot \lambda_a, a \text{ 为 } nj \text{ 的起始路段.} \end{aligned} \quad (14)$$

其中:

$$\alpha = \begin{cases} (\rho^a(t) - \rho_{\text{cr}}^a + 1)^{-1}, \\ \rho^a(t) > \rho_{\text{cr}}^a \text{ 且 } \sum_i \sum_j \beta_{nj}^a(t) \cdot (q_{ij,n}(t) + \\ l_{ij}(t)) > \rho^a(t) \cdot \nu^a(t) \cdot \lambda_a; \\ 1, \text{ 否则,} \end{cases}$$

$$\beta_{nj}^a(t) = (1 - \varepsilon) \cdot \beta_{N,nj}^a(t) + \beta_{G,nj}^a(t) \cdot \varepsilon,$$

$$\begin{aligned} \text{in}_{ij}^a(t) &= \frac{\beta_{nj}^a(t) \cdot (q_{ij,n}(t) + l_{ij,n}(t))}{\sum_i \sum_j \beta_{nj}^a(t) \cdot (q_{ij,n}(t) + l_{ij,n}(t))} \cdot \text{in}^a(t), \\ &\quad a \text{ 为 } nj \text{ 的起始路段,} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} l_{ij,n}(t+1) &= l_{ij,n}(t) + (q_{ij,n}(t) - \sum_{a \in O_{nj}} \text{in}_{ij}^a(t)) \cdot \Delta t, \\ &\quad a \text{ 为 } nj \text{ 的起始路段,} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{cases} l^b(t+1) = l^b(t) + (q^b(t) - CC_b(t)) \cdot \Delta t, \\ t \in [T_1, T_3], \end{cases} \quad (17)$$

$$q_{ij}^b(t) = \frac{q_{ij}^b(t)}{\sum_i \sum_j q_{ij}^b(t)} \cdot CC_b(t), \quad t \in [T_1, T_3], \quad \forall i, j, \quad (18)$$

$$l^b(t+1) = l^b(t) - (\beta C_b - q^b(t)) \cdot \Delta t, \quad t \in [T_3, T_4], \quad (19)$$

$$q_{ij}^b(t) = \frac{q_{ij}^b(t)}{\sum_i \sum_j q_{ij}^b(t)} \cdot \beta C_b, \quad t \in [T_3, T_4], \quad \forall i, j, \quad (20)$$

$$l_i(t) = \sum_j l_{ij}(t) \leq l_{i,\max}, \quad (21)$$

$$r_i(t) \leq \sum_j (d_{ij}(t) + l_{ij}(t) / \Delta t), \quad (22)$$

$$\sum_j q_{ij}^j(t) \leq Ca_j(t), \quad \forall i, j. \quad (23)$$

$$r_{i,\min} \leq r_i(t) \leq r_{i,\max}, \quad (24)$$

$$0 \leq \beta_{G,nj}^a(t) \leq 1, \quad (25)$$

$$\sum_{a \in O_{nj}} \beta_{G,nj}^a(t) = 1, \quad (26)$$

$$\begin{cases} \sum_i \sum_j \beta_{nj}^a(t) \cdot (q_{ij,n}(t) + l_{ij,n}(t)) \leq C_a, \\ a \text{ 为 } nj \text{ 的起始路段}, \end{cases} \quad (27)$$

$$\rho_{ij}^a(t), r_{ij}(t), l_{ij}(t), l^b(t), \nu^a(t) \geq 0, \quad \forall i, j. \quad (28)$$

$$|\beta_{G,nj}^a(t) - \beta_{G,nj}^a(t-1)| \leq 0.5, \quad (29)$$

$$|r_i(t) - r_i(t-1)| / r_i(t-1) \leq 0.2. \quad (30)$$

其中: 式(8)(9)为密度状态方程, 式(10)为速度方程, 式(11)为流量方程, 式(12)为入口匝道排队长度状态方程, 式(13)为入口匝道*i*流量中*OD*对*ij*之间的调节率与该匝道的总调节率之间的比例关系, 式(14)(15)为分流节点下游起始路段的流量方程, 式(16)为分流节点排队长度状态方程, 式(17)~(20)为事件路段排队长度状态方程及事件路段流量方程的修正, 式(21)~(27)为交通系统的容量约束及物理控制约束, 式(28)为非负约束, 式(29)(30)是为了避免控制轨迹过于震荡, 有利于控制的实现.

3 模型求解算法(Algorithm)

本文的控制模型是高维复杂的非线性动态优化问题, 而且实时性要求高, 粒子群优化算法作为一种高效的并行搜索算法, 具有算法简单, 运行速度快等特点, 因此本文采用PSO算法对模型进行求解.

Step 1 初始化: 确定群体规模popSize, 最大迭代次数iteMax, 罚因子 σ , 随机产生popSize个粒子的初始位置 $\mathbf{X}_k^{\text{iter}}$ 和初始速度 $\mathbf{V}_k^{\text{iter}}$, 组成初始种群;

每个粒子的位置向量代表了一个初始解向量, 该向量由各入口匝道调节率的初始解 $r_i(t)$ 以及节点分流比例的初始解 $\beta_{G,nj}^a(t)$ 组成, 其中 $t = 0, \dots, P-1$, 令iter = 0.

Step 2 按给定的匝道调节率 $r_i(t)$ 和分流比例 $\beta_{G,nj}^a(t)$, 根据模型中的式(8)~(20), 计算优化时段内的状态变量, 然后计算每个粒子的适应度. 其中

$$\begin{aligned} \text{粒子适应度} = & \\ & -(\text{性能指标} + \sigma \sum_{i=1}^H |\text{cnstrnt}[i]| + \\ & \sigma \sum_{i=H+1}^L \max(0, \text{cnstrnt}[i])), \end{aligned}$$

性能指标为式(7)中的 J , cnstrnt[i]为模型中的等式约束或不等式约束;

Step 3 评价各粒子的适应度, 即如果第 k 个粒子的适应度优于 $\mathbf{p}_{\text{Best}}[k]$ 的适应度, 则让 $\mathbf{p}_{\text{Best}}[k] = \mathbf{X}_k^{\text{iter}}, k = 1, \dots, \text{popSize}$; 如果第 k 个粒子的适应度优于 $\mathbf{g}_{\text{Best}}$ 的适应度, 则让 $\mathbf{g}_{\text{Best}} = \mathbf{X}_k^{\text{iter}}, k = 1, \dots, \text{popSize}$.

Step 4 按式

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_k^{\text{iter}+1} = & \\ & \varpi * \mathbf{V}_k^{\text{iter}} + c_1 * \text{rand}(\cdot) * (\mathbf{p}_{\text{Best}}[k] - \\ & \mathbf{X}_k^{\text{iter}}) + c_2 * \text{rand}(\cdot) * (\mathbf{g}_{\text{Best}} - \mathbf{X}_k^{\text{iter}}) \end{aligned}$$

更新粒子速度, 按式 $\mathbf{X}_k^{\text{iter}+1} = \mathbf{X}_k^{\text{iter}} + \mathbf{V}_k^{\text{iter}+1}$ 更新粒子位置, 其中 ϖ 为惯性权重, c_1, c_2 学习因子, rand($\cdot$)为随机函数, 产生[0, 1]的随机数. 如果iter达到给定的最大迭代次数iteMax, 则转Step 6;

Step 5 令iter = iter + 1, 转Step 2.

Step 6 停止, 输出最好解 $\mathbf{g}_{\text{Best}}$.

尽管上述算法获得的解是一个开环形式, 但可借鉴预测控制中滚动优化的思想. 具体来说, 从当前时刻起对快速路网未来 P 个时段内的交通需求进行预测, 并利用检测到的当前状态作为初值, 求解在这 P 个时段内的最优控制序列. 对于获得的控制序列, 只执行 M 个时段的控制量($M \leq P$), 然后进行下一轮的控制求解. 这样在每一次滚动优化过程中, 能够根据检测到的交通状态不断对预测过程和控制效果进行修正.

4 算例(Example)

时段长度 $\Delta t = 60$ s, 仿真时域长度为100 min. 路网拓扑结构如图1所示, 有5个节点、条路段、两个入口匝道(r_2, r_3, r_4), 两个出口匝道(s_2, s_3, s_4)、8个OD对

$$\begin{aligned} & (1 \rightarrow 5, 1 \rightarrow 3, 1 \rightarrow 2, 1 \rightarrow 4, \\ & 2 \rightarrow 5, 3 \rightarrow 4, 3 \rightarrow 5, 4 \rightarrow 5); \end{aligned}$$

各条路段的长度分别为

$$l_0 = 4 \text{ km}, l_1 = 3 \text{ km},$$

$$l_2 = 3 \text{ km}, l_3 = 2 \text{ km},$$

$$l_4 = 2 \text{ km}, l_5 = 2 \text{ km}, l_6 = 4 \text{ km}.$$

其中: l_0, l_6 为 4 车道, 其余路段均为 3 车道. 节点 1 为分流节点, 从节点 1 到节点 5 有两条路径, 路径 1 包含路段 l_1, l_2 , 路径 2 包含路段 l_3, l_4, l_5 ; 在没有任何诱导信息下, 假定 50% 的驾驶员选择路径 1 到达节点 5, 50% 的驾驶员选择路径 2 到达 5. 各路段自由行驶速度均为 80 km/h , 阻塞密度为 $110 \text{ veh}/(\text{km} \cdot \text{lane}^{-1})$, 临界密度为 $34 \text{ veh}/(\text{km} \cdot \text{lane}^{-1})$; 每车道通行能力均为 $1500 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{lane}^{-1})$; 各个入口匝道的调节率下限均为 300 veh/h , 而上限均为 1800 veh/h ; 出口匝道 2、3 的通行能力均为 2000 veh/h , 出口匝道 4 的通行能力为 2500 veh/h , 出口 5 的通行能力为 6000 veh/h ; 路段 l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 的初始密度均为 $24 \text{ veh}/(\text{km} \cdot \text{lane}^{-1})$, l_6 在仿真过程中均处于非拥挤状态; 各入口匝道、分流节点的初始排队长度为 0, 入口匝道允许的最大排队长度为 550 veh . 若采用集成控制, 本算例中假设驾驶员对诱导信息的服从率为 1.

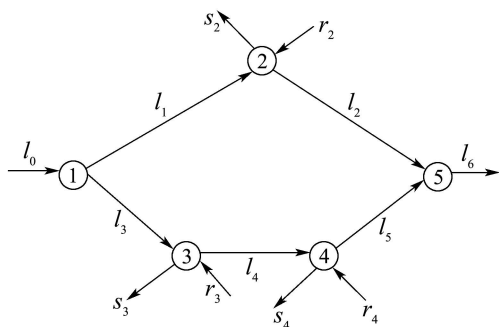


图 1 路网拓扑结构

Fig. 1 Network topology

假设在仿真时间第 20 min 时, 路段 l_4 的后半段突发交通事件, 导致事件点的通行能力下降到 2400 veh/h , 事件检测时间为 1 min, 反应和排除时间为 15 min, 事件排除前事件点的瓶颈通行能力一直为 2400 veh/h , 事件消除后, 假设驶离通行能力略小于最大通行能力, 直到事件路段的排队长度完全消散.

当突发交通事件而导致事件路段通行能力突然下降时, 只实施匝道控制(如图 2 所示), 其控制效果是有限的. 事件发生后, 只实施匝道控制, 并不能减小事件上游路段 l_3 的流量, 因此事件路段 l_4 的拥挤状况得不到有效缓解, 甚至出现严重回溢现象(如图 3 所示); 同时由于发生了严重拥挤, 导致入口匝道 r_3 出

现了超长排队, 最大排队长度接近 700 veh , 超出入口匝道最大排队长度约束, 出现不可行解.

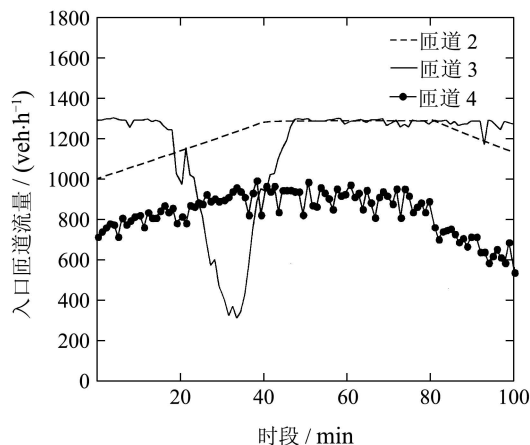


图 2 匝道控制下各入口匝道调节率时变图

Fig. 2 Coordinated ramp metering flow

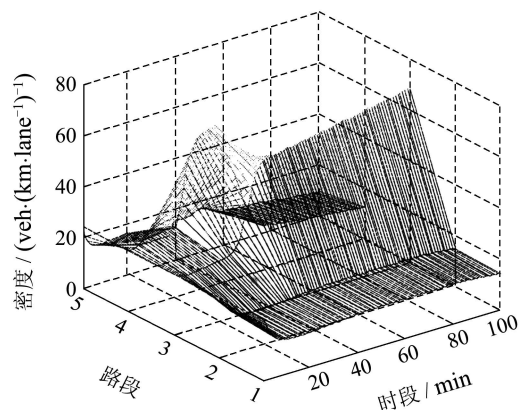


图 3 匝道控制下各路段密度时变图

Fig. 3 Mainstream density under ramp control

若检测到事件时, 实施集成控制(如图 4、5 所示), 那么在事件排除前, 路段 l_4 出现排队, 并产生一定拥挤, 但由于在分流节点 1 实施了诱导, 使得主线路段 l_3 的流量减小, 缓解了路段 l_4 的拥挤状况, 从而没有产生严重回溢现象(如图 6 所示); 事件排除, 通行能力恢复后, 路段 l_4 的排队很快就消散了, 并在仿真时间第 46 min 时, 路段 l_4 消除了拥挤现象, 即路段密度低于临界密度. 同时也减轻入口匝道 r_3 的压力, 使其排队长度满足约束条件.

实验 1 只实施匝道控制, 路网总的行程时间为 3216 veh.h ; 实验 2 先实施匝道控制, 检测到交通事件后实施集成控制, 路网总的行程时间为 2053 veh.h . 说明在发生交通事件后实施集成控制比只实施匝道控制在性能指标上提高了 36%.

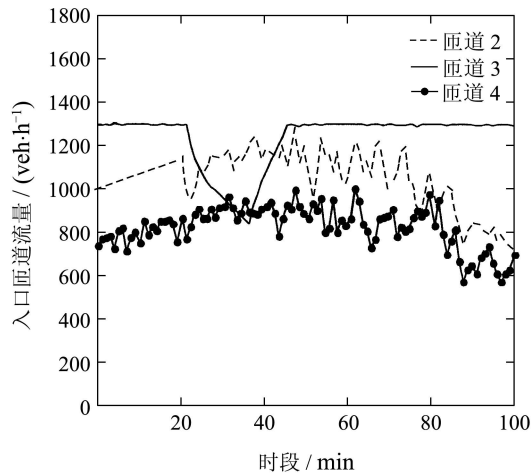


图4 集成控制下各入口匝道调节率时变图

Fig. 4 Ramp metering flow under integrated control

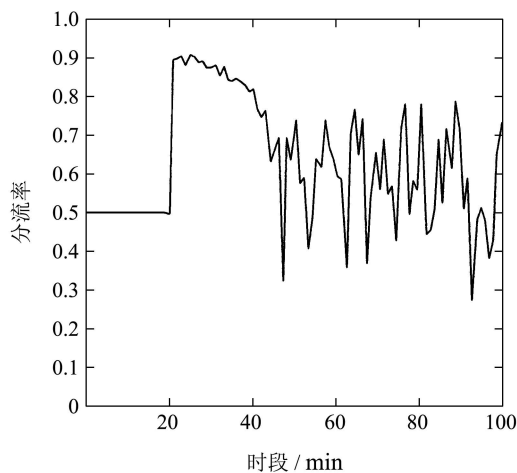


图5 集成控制下路径1-2-5分流比例时变图

Fig. 5 Splitting rate of route 1-2-5 under integrated control

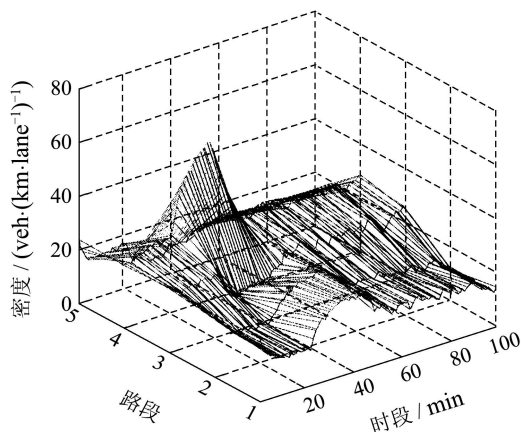


图6 集成控制下各路段密度时变图

Fig. 6 Mainstream density under integrated control

5 结论(Conclusions)

本文建立了偶发性交通事件影响下的匝道控制与路线诱导相结合的完全集成控制模型. 分析了突发交通事件后快速路的交通特点; 研究路线诱导和匝道控制对系统的综合影响, 以及它们之间复杂的相互作用; 采用滚动优化的思想, 基于PSO算法设计了模型的求解算法. 仿真表明, 模型和算法的性能良好, 突发交通事件后, 匝道控制与路线诱导的集成控制有效地降低了事件的影响. 但要将上述结果用于实际路网还需进一步探索和研究, 主要在于模型中的一些假设过于理想化, 如动态OD以及驾驶员对诱导信息的服从率都是难以获得和度量的.

参考文献(References):

- [1] DIAKAKI C, PAPAGEORGIOU M. Simulation studies of integrated corridors control in Glasgow[J]. *Transportation Research-C*, 1997, 5(3): 211 – 224.
- [2] 马寿峰, 李艳君, 贺国光. 城市交通控制与诱导协调模式的系统分析[J]. 管理科学学报, 2003, 6(3): 71 – 78.
(MA Shoufeng, LI Yanjun, HE Guoguang. System analysis for coordination modes between urban traffic control and vehicle route guidance[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2003, 6(3): 71 – 78.)
- [3] CHANG G L. A dynamic system-optimal control model for commuting traffic corridors[J]. *Transportation Research-C*, 1993, 1(1): 3 – 22.
- [4] BEN AKIVA M, CUNEO D. Evaluation of freeway control using a microscopic simulation laboratory[J]. *Transportation Research-C*, 2003, 11: 29 – 50.
- [5] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M, MANGEAS M. Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control[J]. *Transportation Research -C*, 2002, 10: 65 – 84.
- [6] 吕智林, 范炳全, 张林峰. 基于诱导信息的城市快速路网集成控制研究[J]. 系统工程学报, 2006, 21(5): 476 – 483.
(LÜ Zhilin, FAN Bingquan, ZHANG Linfeng. Integrated control of urban expressway networks based on guidance instructions[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2006, 21(5): 476 – 483.)
- [7] 王正武, 罗大庸, 黄中祥. 高速公路主线限速与匝道融合的协调控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 973 – 976.
(WANG Zhengwu, LUO Dayong, HUANG Zhongxiang. Coordinated control of variable speed limits and ramp metering[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(6): 973 – 976.)
- [8] 郑建湖, 陈洪, 董德存. 事件状态下城市快速路交通通道优化控制模型[J]. 系统工程, 2006, 24(2): 32 – 35.
(ZHENG Jianhu, CHEN Hong, DONG Decun. Optimal control model for urban freeway corridor under incident conditions[J]. *Systems Engineering*, 2006, 24(2): 32 – 35.)

作者简介:

吕智林 (1971—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为系统工程、智能交通, E-mail: luzhilin2001@163.com;

范炳全 (1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为系统工程、交通运输和区域规划, E-mail: crts-usst@163.com.