

快速路网宏观交通流仿真系统的开发与仿真^①

张声荣¹, 干宏程¹, 孙鑫², 杨珍珍¹

¹(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

²(石油化工科学研究院 应用化学系, 北京 100083)

摘要: 为了给快速路网运行状况分析和控制策略评价提供高效辅助决策工具, 提出快速路网宏观交通流仿真系统整体框架, 分输入模块、仿真模块和输出模块三部分, 并给出采用 Microsoft Visual Basic 面向对象语言开发的实现流程图和关键技术。仿真案例采用该系统对包含两个起点、两个终点的快速路网进行仿真, 刻画交通拥挤的形成、传播和消散过程, 并模拟 ALINEA 匝道控制策略情景下路网的运行状况。仿真案例表明, 该系统能较好地描述网络交通流的时空动态演化, 是测试、评价交通控制策略的有效工具。

关键词: 城市快速路; 宏观交通流仿真; 交通控制; 交通仿真系统; 常发性交通拥挤

Development and Simulation of Macroscopic Traffic Flow Simulation System for Urban Freeway Networks

ZHANG Sheng-Rong¹, GAN Hong-Cheng¹, SUN Xin², YANG Zhen-Zhen¹

¹(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

²(Department of Applied Chemistry, Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to provide an effective method for traffic operation and evaluating different traffic control strategies for urban freeway network, this paper provides a macroscopic traffic flow simulation system for urban freeway. Whole framework of the system includes input module, simulation module and output module. Then it describes the program process and gives the main technical details via the object-oriented language Microsoft Visual Basic. Finally, taking the example of an urban freeway network with two origins and two destinations, this paper describes the process of generation, spreading and dissipation of the recurrent congestion. Besides, it simulates the effects of the ALINEA ramp metering strategy. Research results show that the system does not only do well in describing the evolution of the network traffic flow, but also testing and evaluating traffic control strategy effectively.

Key words: urban freeway; macroscopic traffic simulation; traffic control; traffic simulation system; recurrent congestion

城市快速路是建于城市内部的一种高速道路, 具有单向多车道、无纵横干扰、连续行驶且通行能力大的特点, 已成为我国大都市内重要的交通载体。然而随着经济的不断发展, 交通需求持续快速增长, 快速路的交通拥挤问题不断加剧, 已成为各国亟待解决的问题^[1]。由于交通系统具有高度的非线性和不确定性, 现场试验方法不仅成本高, 而且还存在危险性, 甚至不可行, 这时, 应用计算机技术进行交通仿真就成为

解决这一问题的有效技术手段。简单地说, 交通仿真技术运用计算机技术建立能够近似代替现实交通系统的计算机模型, 利用该模型来评价交通控制方案设计的优劣等^[2], 寻求复杂现实交通问题的解决方案。

交通仿真的基础是交通仿真模型, 从交通流理论的角度, 分为宏观交通仿真和微观交通仿真^[3-8]。宏观交通仿真中, 交通流被视为由大量车辆组成的可压缩的连续流体, 车流运行状态由流量、密度、速度等集

① 基金项目:国家自然科学基金(51008195);上海市教育委员会科研创新项目(09YZ205);上海市研究生创新基金(JWCXSL1022)

收稿时间:2010-11-29;收到修改稿时间:2011-01-17

计变量来表示, 这些变量正对应于实际交通监控中所采集的交通流参数, 因而宏观交通仿真能直观地反应整个路网的服务水平, 诊断实际运行中存在的问题。本文采用经典的宏观动态交通流模型 METANET 开发仿真系统^[9,10], 并用该系统分析路网拥挤演化过程, 模拟交通控制策略的实施效果, 以期与相关部门设计、测试、评价快速路网控制措施提供辅助决策工具。

1 快速路网宏观交通流仿真系统框架

城市快速路网交通系统由节点和有向路段组成, 节点用来表示存在出入口匝道、立交或道路属性发生变化的位置, 而路网的起点(O)为主线源点或入口匝道, 终点(J)为出行目的地或出口匝道。路段则是属性(如纵坡、车道数等)相同的一段快速路, 为了便于仿真, 将路段细分为若干小段, 小段标号沿着行车方向增大, 路段 m 第 i 小段在 k 时刻的交通状态用密度、速度和流量来表示, 分别记为 $\rho_{m,i}(k)$ 、 $v_{m,i}(k)$ 和 $q_{m,i}(k)$, 单位分别为: 辆/千米/车道、千米/小时和辆/小时, 其中 k 为取样周期(仿真周期) T 的时间标。

快速路网宏观交通仿真系统整体框架如图 1 所示, 包括输入模块、仿真模块和输出模块三部分, 每一模块封装在独立函数中, 这样不但能减少冗余代码, 而且便于维护。

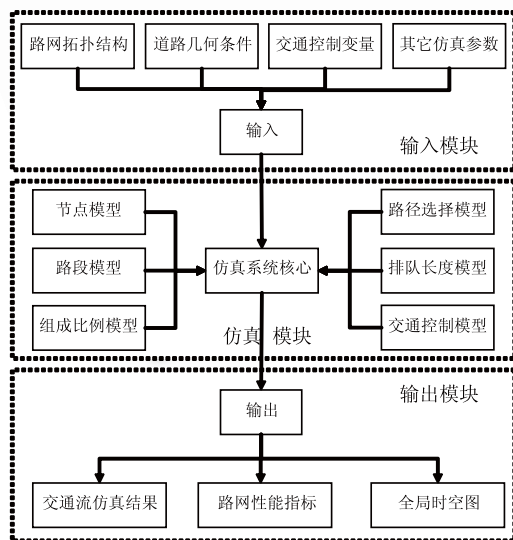


图 1 快速路网宏观交通流仿真系统框架图

1.1 输入模块

路网拓扑结构及道路几何条件是宏观交通仿真

的基础, 路网拓扑结构用于描述路网中节点与路段的连接关系, 道路几何条件是路网中路段的几何特征参数, 如长度、车道数、纵坡等。路网拓扑结构采用图 2 的描述方法, 能为计算机仿真系统设计提供极大便利^[11]。

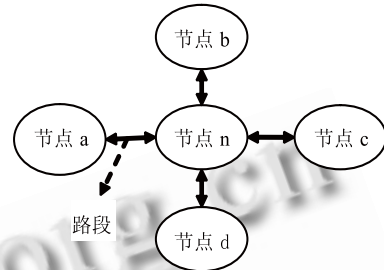


图 2 用节点与路段描述路网拓扑结构

交通控制变量取值由交通控制策略给出, 其它仿真参数包括交通需求、仿真模块内各模型参数和打印输出参数等。

1.2 仿真模块

仿真模块是宏观交通仿真系统的核心部分, 交通流建模所涉及的模型包括节点模型、路段模型、交通组成比例模型、路径选择模型和排队长度模型, 若要仿真测试控制策略的实施效果, 须添加交通控制算法模型。

① 节点模型

$$Q_{n,j}(k) = \sum_{\mu \in I_n} q_{\mu, N_\mu}(k) \gamma_{\mu, N_\mu}(k), \forall (n, j) \quad (1)$$

$$q_{m,0}(k) = \sum_{j \in J_m} \beta_{n,j}^m(k) Q_{n,j}(k), \forall m \in O_n \quad (2)$$

$$\gamma_{m,0,j}(k) = \frac{\beta_{n,j}^m(k) \cdot Q_{n,j}(k)}{q_{m,0}(k)}, \forall m \in O_n, j \in J_m \quad (3)$$

式(1)-(3)中, I_n 为流入节点 n 的路段集合; O_n 为从节点 n 流出的路段集合; J_m 为经路段 m 到达的终点集合; $Q_{n,j}(k)$ 为从节点 n 出发驶往终点 j 的交通流量; $\beta_{n,j}^m(k)$ 为 $Q_{n,j}(k)$ 中选择路段 m 的交通量比例, 即分流比例; $q_{m,0}(k)$ 为路段 m 入口处流量, $\gamma_{m,0,j}(k)$ 为 $q_{m,0}(k)$ 中流向终点 j 的比例。

② 路段模型

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{\lambda_m \Delta_m} \cdot [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)] \quad (4)$$

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) v_{m,i}(k) \lambda_m \quad (5)$$

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} [V_{fund}(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)] + \frac{T}{\Delta_m} v_{m,i}(k) [v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)] \quad (6)$$

$$- \frac{vT[\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)]}{\tau\Delta_m[\rho_{m,i}(k) + \kappa]} \quad (7)$$

$$V_{fund}(\rho_{m,i}(k)) = v_{F,m} \exp\left[-\frac{1}{a_m} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}}\right)^{a_m}\right]$$

式(4)为连续性方程, Δ_m 是小段长度, λ_m 是小段车道数; 式(5)为流密速关系; 式(6)为动态速度-密度方程, v 为期望指数, κ 是常量参数; 式(7)是稳态速度-密度关系, $v_{F,m}$ 是路段 m 的自由流车速, $\rho_{cr,m}$ 为路段 m 临界密度, 指流量达到通行能力时路段 m 的车流密度, a_m 为常量参数。

③ 交通组成比例模型

$$\rho_{m,i}(k) = \sum_{j=1}^{j_m} \rho_{m,i,j}(k) \quad (8)$$

$$\gamma_{m,i,j}(k) = \frac{\rho_{m,i,j}(k)}{\rho_{m,i}(k)} \quad (9)$$

式(8)和(9)用于求交通组成比例, 和路段模型组合使用。 $\gamma_{m,i,j}(k)$ 为 $q_{m,i}(k)$ 中流向终点 j 的交通组成比例。

④ 路径选择模型

不发布交通诱导信息时的实际分流比例称为名义分流比例, 记为 $\beta_{N,n,j}^m$; 发布交通诱导信息时, 则引入“服从率”来表征驾驶员对诱导信息的响应特性。实际的分流比例计算公式为:

$$\beta_{n,j}^m = (1 - \varepsilon)\beta_{N,n,j}^m + \beta_{G,n,j}^m \varepsilon \quad (10)$$

式(10)中, $\beta_{G,n,j}^m$ 是决策变量, ε 为服从率, 服从率为 1, 表明驾驶员全部遵循诱导信息; 服从率为 0, 表明所有驾驶员都忽略诱导信息。

⑤ 排队长度模型

$$w_{o,j}(k+1) = w_{o,j}(k) + T[\theta_{o,j}(k) \cdot d_o(k) - \gamma_{o,j}(k) \cdot q_o(k)] \quad (11)$$

$$w_o(k) = \sum_{j \in J_o} w_{o,j}(k) \quad (12)$$

$$\gamma_{o,j}(k) = \frac{w_{o,j}(k)}{w_o(k)} \quad (13)$$

$$q_o(k) = \eta_o(k) \cdot \min\left\{d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T}, Q_o \cdot \min\left[1, \frac{\rho_{max} - \rho_{\mu,1}}{\rho_{max} - \rho_{\mu,cr}}\right]\right\} \quad (14)$$

式(11)计算起点 O 驶向终点 j 的排队车辆数, $d_o(k)$ 是 k 时刻起点 O 产生的交通需求, $\theta_{o,j}(k)$ 是 $d_o(k)$ 中驶向终点 j 的比例, $q_o(k)$ 是 k 时刻起点 O 实际流入主线的流量; 式(12)和(13)分别计算总的排队数 $w_o(k)$ 和驶向

终点 j 的排队车辆组成比例 $\gamma_{o,j}(k)$; 式(14)中, $\eta_o(k)$ 是匝道调节率, $0 \leq \eta_o(k) \leq 1$, 是交通控制变量, 由匝道控制策略确定, 不控制时取 1, Q_o 为起点或入口匝道的通行能力, ρ_{max} 是阻塞交通状态时的车流密度, $\rho_{\mu,1}$ 是主线下游紧邻路段第一小段的密度, $\rho_{\mu,cr}$ 是对应的临界密度。

⑥ 交通控制模型

常见的交通控制策略有入口匝道调节、路径诱导、动态电子限速、拥挤收费等^[12], 对应的交通控制模型也多种多样, 本文限于篇幅, 仅以入口匝道控制模型为例。

ALINEA 反馈式入口匝道控制是入口匝道控制中常用的方法, 其控制算法基于以下反馈积分器公式:

$$r(k_A) = r(k_A - 1) - K_R(\rho_{out}(k_A) - \hat{\rho}) \quad (15)$$

式(15)中, $r(k_A)$ 为入口匝道在 $k_A T_A$ 时刻流入量; T_A 为 ALINEA 匝道控制周期, k_A 为匝道控制时间标; $r(k_A - 1)$ 为入口匝道在 $(k_A - 1)T_A$ 时刻的实际流量; K_R 为调节因子; $\rho_{out}(k_A)$ 为下游小段在 $k_A T_A$ 时刻的密度; $\hat{\rho}$ 为匝道下游小段密度的期望值。应用上述模型嵌入实际交通控制中时, 需要将入口匝道流量转化为绿灯时长^[13]。

1.3 输出模块

输出模块包括三部分, 首先获得由仿真模块计算的宏观交通流仿真结果, 包括任意时刻路网中任意小段的速度、流量、密度、以及起点的排队车辆数, 这些基础数据经过加工可获得路网的性能指标和输出全局时空图。

① 路网性能指标

性能指标 1: 总行程时间 (TTT, total time spent): 反应整个仿真周期内路网中所有车辆的运行时间, 单位: 辆·时, 计算公式如下:

$$TTT = \sum_k \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) \Delta_m \lambda_m T \quad (16)$$

性能指标 2: 总排队时间 (TWT, total waiting time): 整个仿真时长内路网所有起点排队车辆的等候时间, 单位: 辆·时, 计算公式如下:

$$TWT = \sum_k \sum_o w_o(k) T \quad (17)$$

性能指标 3: 平均车速 (MS, mean speed), 整个仿真时长内路网的平均行车速度, 单位: 千米/时, 计算公式如下:

$$MS = \frac{\sum_k \sum_m \sum_i v_{m,i}(k) \cdot \Delta_m \cdot q_{m,i}(k)}{\sum_k \sum_m \sum_i \Delta_m \cdot q_{m,i}(k)} \quad (18)$$

② 全局时空图

在路网全局时空图输出界面，使用不同的颜色来表示不同小段的交通状态，交通状态可选择小段的密度或速度，划分标准可由用户根据具体需要设定，较为常用的方法把小段速度划分为三级：用“绿”、“黄”和“红”三种颜色分别进行标识，对应三种不同交通状态：畅通、拥挤和阻塞^[14]，不同交通状态时小段速度的取值范围由用户设定。

2 快速路网宏观交通流仿真系统实现

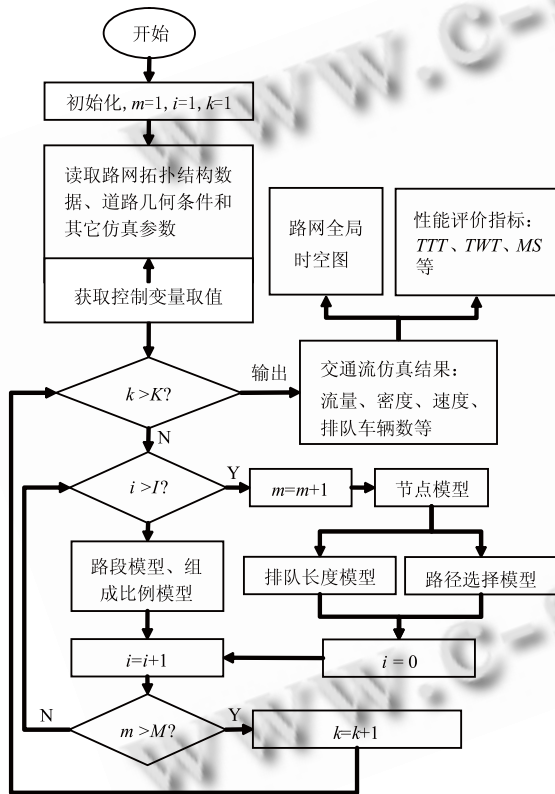


图 3 快速路网宏观交通流仿真系统实现流程

快速路网宏观交通流仿真系统实现流程如图 3 所示，其中 K 为仿真周期，I 为路段 m 的小段数，M 为总路段数。系统开发平台为 Windows XP，开发语言使用 Microsoft Visual Basic 6.0，界面友好，操作方便。开始仿真后，设定三维数组 $\rho(m, i, k)$ 、 $v(m, i, k)$ 、 $q(m, i, k)$ 分别用来存储仿真计算获得的 $\rho_{m,i}(k)$ 、 $v_{m,i}(k)$ 和 $q_{m,i}(k)$ 值，然后分别存放在交通状态数据库 traff_ser

的密度表、速度表和流量表中，初始化后给出初始交通状态 $\rho(m, i, 0)$ 、 $v(m, i, 0)$ 、 $q(m, i, 0)$ 。路网拓扑结构数据通过文本文件“路网.txt”导入，道路几何条件通过“路段.xls”数据表导入，控制变量取值在测试控制策略时由嵌入仿真模块的控制模型算法给出，无控制时由用户直接输入。

在仿真模块，对于路段模型，由于小段交通状态与上、下游小段都有关系，因此引入“虚拟小段”的概念，即添加小段的“第 0 小段”和“第 I+1 小段”，来分别确定路段 m 第 1 小段和最后小段的交通状态^[15]。当节点上游有多个流入路段时，应考虑节点处的合流作用，其流出路段速度由上游所有流入路段共同决定，所以流出该节点的下游路段 m“虚拟第 0 小段”的速度计算公式为：

$$v(m, 0, k) = \frac{\sum_{m' \in I_n} v(m', I, k) \cdot q(m', I, k)}{\sum_{m' \in I_n} q(m', I, k)} \quad (19)$$

其中， I_n 为所有流入路段的集合。类似地，当节点下游有多个流出路段时，应考虑节点流出路段的拥挤对节点上游流入路段产生的影响，流入该节点的路段 m 的“虚拟第 I+1 小段”密度计算公式为：

$$\rho(m, I+1, k) = \frac{\sum_{m' \in O_n} \rho(m', 1, k)^2}{\sum_{m' \in O_n} q(m', 1, k)} \quad (20)$$

其中， O_n 为所有流出路段的集合。

仿真模块计算完毕后，读取交通状态数据库 traff_ser，采用式(16)-(18)计算性能评价指标，并在屏幕上输出。路网全局时空图实现方法如下：

```

IF v(m, i, k) > u_up THEN
    Line_m_i.bordercolor = RGB(0, 255, 0) '绿，“畅通”
ELSE IF v(m, i, k) < u_down THEN
    Line_m_i.bordercolor = RGB(255, 0, 0) '红，“阻塞”
ELSE THEN
    Line_m_i.bordercolor = RGB(255, 255, 0) '黄，“拥挤”
EndIf
    
```

路段 m 第 i 小段的交通状态通过 Line 控件颜色进行指示，“绿”表示交通畅通，对应的小段速度取值范围为： $[u_{up}, +\infty)$ ；“红”表示交通拥堵，对应的小段速度取值范围为： $[0, u_{down}]$ ，“黄”表示交通堵塞，对应的小段速度取值范围为： (u_{down}, u_{up}) ， u_{up} 和

u_down 取值由用户在其它仿真参数界面输入。

3 快速路网宏观交通流仿真案例

3.1 路网拓扑结构和输入条件设定

图4为一快速路网,包含2个起点和2个终点, O_1 为主线入口, O_2 为入口匝道, J_1 为出口匝道, J_2 为主线出口。节点和路段编号分别标于图中。路段1、6为4车道,其余2车道,长度均为2.4km,等分为3小段。节点B为分流节点,从 O_1 到 J_2 有两条路径,路径1-3-5-6(主路径)和路径1-2-4-6(次路径),起点 O_1 和入口匝道 O_2 的交通需求如图5所示,仿真周期 $T=8s$, $u_{up}=40km/h$, $u_{down}=20km/h$ 仿真时间为工作日上午7至10时,其它仿真参数见文献[16]。仿真情景分两种:不控制情景和入口匝道控制情景。

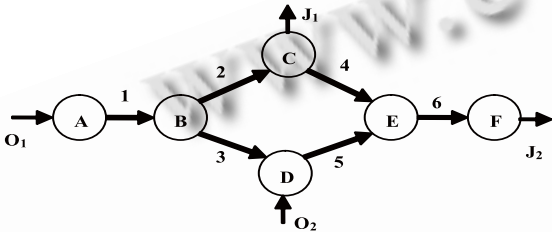


图4 快速路网拓扑结构图

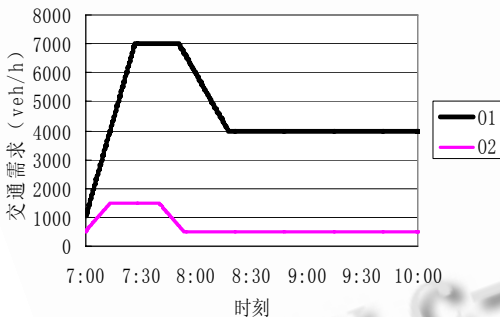
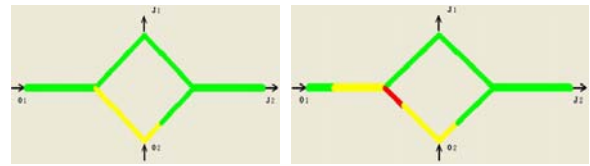


图5 O_1 和 O_2 交通需求时变图

3.2 仿真结果分析

① 不控制情景

不控制情景的初始时刻,整个仿真路网为畅通状态。随着早高峰时刻的到来,约在7:29时,入口匝道上游出现拥挤;约在7:37时,拥挤传播到分流节点(图6(a)),并向上游传播;在7:51时传播到主线路段1第2小段(图6(b)),且路段3第1小段出现了严重的拥堵,速度最低为19.2km/h。早高峰结束后,约8:20整个路网恢复正常。

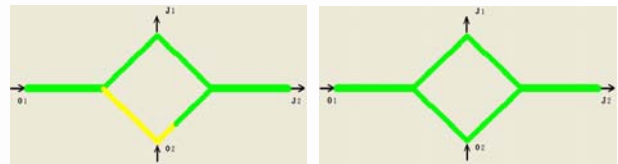


(a) 7:37 (b) 7:51

图6 不控制情景的路网全局时空图截图

② 入口匝道控制情景

对入口匝道 O_2 采用 ALINEA 入口匝道控制策略后,约在7:30时,入口匝道上游出现拥挤;在7:45时,拥挤传播到分流节点(图7(a)),与不控制情景不同的是,拥挤未继续向节点上游共用路段传播,止于路段3第1小段,其最低速度提升至约32km/h;到8:15时,整个路网恢复正常(图7(b))。



(a) 7:45 (b) 8:15

图7 入口匝道控制情景的路网全局时空图截图

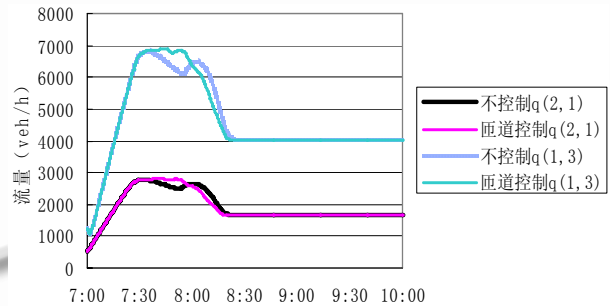


图8 两种情景下流量时变图

图8给出了两种情景下路段2第1小段和路段1第3小段的流量对比图, $q(m, i)$ 表示路段 m 第 i 小段的流量。“不控制”时当主线发生拥挤时,次路径依然保持畅通(图6(b)),但流量却有所下降(图8),这种现象可解释为:在分流节点上游共用路段发生拥挤,车流流出受限,导致次路径未被充分利用,整个路网利用效率降低。实施入口匝道控制后,高峰时段的拥挤时间由8:20结束提前至8:15,缩短5分钟,从图8可知,高峰时主线共用路段和次路径的流量均有所提高。以输出总行程时间(TTT)作为路网性能评价指

标,不控制时为 2228 辆·时,匝道控制时为 2100 辆·时,减小 5.7%,说明 ALINEA 匝道控制策略有效遏制了拥挤波蔓延到主线上游共用路段,提高了整个路网的利用效率,显示了控制策略的有效性。限于篇幅,本文仅对入口匝道控制策略的运行效益进行了评价测试。

4 结语

当前,智能交通系统(ITS)已成为研究热点,基于宏观交通流模型的交通仿真技术具有直观、灵活、高效、成本低的特点,笔者开发的宏观交通流仿真系统能细致刻画网络交通流的动态时空演化,描述拥挤的传播和消散过程,测试、评价控制策略的实施效果,研究表明该系统能为快速路网的运行状况分析和交通控制策略的评价提供辅助决策依据。

参考文献

- 郝媛,徐天东,干宏程,孙立军.城市快速路交通流特性研究. 交通运输工程与信息学报,2006,4(4):21-27.
- 张立东,王英龙,贾磊,潘景山.交通仿真研究现状分析. 计算机仿真,2006,23(6):255-257.
- 杨兆升,姜桂艳.城市交通流诱导系统结构框架研究. 公路交通科技,1997,14(3):58-60.
- 钟邦秀,杨晓光.面向对象微观交通仿真系统的研究与实现. 系统仿真学报,2002,14(4):418-421.
- 马建明,荣建,任福田,李征.信号交叉口微观仿真模型研究. 计算机仿真,2001,18(4):6-10.
- 邹智军.城市快速路入口匝道控制仿真分析. 同济大学学报(自然科学版),2009,37(5):631-636.
- 徐岩宇,高尚,徐岩涛.基于 VRGS 的交通流微观仿真软件的开发. 系统仿真学报,1999,11(3):194-197.
- 马寿峰,贺国光,刘豹.一种通用的城市道路交通流微观仿真系统的研究. 系统工程学报,1998,13(4):8-15.
- Messmer A, Papageorgiou M. METANET: a macroscopic simulation program for motorway networks. *Traffic Engineering and Control*, 1990,31(8/9):466-470.
- Messmer A, Papageorgiou M. Route diversion control in motorway network via nonlinear optimization. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1995,3(1):144-154.
- 王宇,叶家玮,谢振东.交通流仿真系统软件设计及应用. 交通与计算机,2006,24(4):5-8.
- Kotsialos A, Papageorgiou M, Mangeas M, Haj-Salem H. Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control. *Transportation Research Part C*, 2002,10(1):65-84.
- Diakaki C, Papageorgiou M. Simulation studies of integrated corridor control in Glasgow. *Transportation Research*, 1997, 5(3/4):213-215.
- 姬杨蓓蓓,张小宁,孙立军.基于元胞传输模型的交通事件消散建模. 重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(3): 74-80.
- 干宏程,孙立军.城市快速路动态网络交通流建模及仿真研究. 交通与计算机,2005,23(2):24-26.
- 徐春艳.基于仿真评价的城市快速路网集成控制研究[硕士学位论文].上海:上海理工大学,2010.

(上转第 56 页)

- Lviv, Ukraine: House of Lviv Polytechnic, 2004:169-172.
- 高丽,杨树元,李海强.一种基于标记的分水岭图像分割新算法. 中国图象图形学报,2007,6(12):1025-1032.
- 陈军波,喻圣辉,舒振宇.基于控制标记符分水岭的医学图像分割. 长江大学学报,2008,5(2):96-98.
- Haris K, Efstratiadis SN, Maglaveras N, Katsaggelos AK. *IEEE Trans on image processing*, 1998,7(12):1684-1699.
- O'Callaghan RJ, Bull DR. Combined morphological-spectral unsupervised image segmentation. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2005,14(1):49-62.
- 徐秋平,郭敏,王亚荣.基于分水岭变换和图割的彩色图像快速分割. 计算机工程,2009,35(19):211-213.
- Hafner J, Sawhney HS. Efficient Color Histogram Indexing for Quadratic Form Distance Functions. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995,17(7):729-736.