

文章编号: 1002-0268 (2006) 08-0101-05

城市快速道路交通流建模和控制

干宏程¹, 孙立军²

(1. 上海理工大学 交通工程系, 上海 200093; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 首先回顾城市快速路宏观流体模型的发展, 简析常用模型的推导建立过程, 讨论宏观模型的使用。然后, 以入口匝道流量调节作为受控快速路系统的控制输入, 构造城市快速路交通流动态控制模型及最优控制问题, 采用多层分散控制思想, 给出一种实用的准最佳控制方法, 通过交通仿真说明其有效性。

关键词: 城市快速路; 宏观流体模型; 流入控制; 准最佳控制

中图分类号: U491

文献标识码: A

Modeling and Control of Urban Expressway Traffic Flow

GAN Hong-cheng¹, SUN Li-jun²

(1. Department of Transportation Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Key Lab. of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education at Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: First, the authors briefly review the macroscopic models of multi-lane urban expressway traffic, give recommendations on using macroscopic models based on the analysis of the derivation of a common model. Then, taking ramp metering as the control strategy, it presents the mathematical formulation of the optimal control. Finally, it proposes a suboptimal control method which applies the multi-layer decentralized control approach and examines its effect and robustness by computer simulation.

Key words: urban expressway; macroscopic model; ramp metering; suboptimal control

0 引言

城市快速路是建于城市内部的一种高速道路, 具有无纵横干扰、连续行驶且通行能力大的特点, 在我国许多大都市已经成为市内交通的重要载体。然而, 随着交通需求快速增长, 快速路拥挤日益严重, 延误、事故和环境污染等随之加剧。为了确保快速路高效、有序运行, 对其进行合理控制已经成为必然。为此, 需要开展快速路交通流建模和控制研究。多年来, 国内外研究者已经提出许多交通流模型, 其中以面向控制的宏观流体模型为主要代表。以宏观模型为基础, 研究者们提出了各种控制策略,

如匝道控制、路由控制、通道控制、限速控制等。

本文将回顾宏观流体模型的发展, 讨论常用宏观模型的推导建立过程, 在此基础上, 以入口匝道流量调节作为受控快速路系统的控制输入, 构造城市快速路动态交通控制数学模型及最优控制问题, 并提出实用的控制方法, 通过仿真说明其有效性。

1 城市快速路宏观交通流模型

1.1 宏观流体模型回顾

宏观流体模型将交通流作为由大量车辆组成的可压缩连续流体介质, 从流体力学角度研究车辆集体的综合平均行为。本质上, 该模型由车辆守恒的

收稿日期: 2005-04-11

基金项目: 国家“十五”科技攻关资助项目 (2002BA404A08)

作者简介: 干宏程 (1978-), 男, 浙江宁波人, 工学博士, 讲师, 研究方向为智能交通系统、交通控制和信息诱导。 (yeliganhong@hotmail.com)

连续性方程和速度-密度关系两部分组成,其中,连续性方程是一个非线性偏微分方程,速度-密度关系是一个启发式方程,用来封闭连续性方程。不同交通流模型的差异本质上就体现在速密关系上。

1.1.1 连续性方程

考察一条很长的带有若干出入口匝道的城市快速路,根据流体力学,定义流量、速度和密度等集聚变量来描述车流的行为,从而建立车辆守恒的连续方程^[1,2]

$$\frac{\partial (\rho x)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho x)}{\partial x} u(x) = r - s, \quad (1)$$

式中,密度 ρ 为 t 时刻 x 点处单位长度道路上的车辆数;速度 u 为 t 时刻 x 点附近车辆的速度平均值;车流量 $q = \rho u$ 为 t 时刻 x 点处单位时间通过的车辆数; $r-s$ 为外来源,代表入匝流与出匝流之差。

1.1.2 速-密关系

研究者提出的各种速度-密度关系分为静态和动态两类,前者假定速度-密度始终处于平衡状态,后者允许车流速度偏离平衡速-密关系。速-密关系与连续性方程一起组成各种宏观流体模型。以下讨论一些常见的速-密关系。

20 世纪 50 年代 Lighthill、Whitham 和 Richards 提出了经典的 LWR 模型^[1,2],该模型使用平衡车流状态中的速-密关系来封闭连续方程,即 $u(x, t) = u_e(\rho(x, t))$ 。该模型能够模拟交通激波的形成、堵塞疏导等非线性特性,但是由于速度-密度为静态关系,因此不能正确反映实际交通中大多数处于非平衡状态的车流运动,不适合对交通迟滞现象、时停时走、车道数陡变和上下匝道交通等非平衡过程进行描述。

为了弥补 LWR 模型的缺陷,研究者从不同角度引入动力学方程,提出各种动态的速-密关系。例如,20 世纪 70 年代,Payne^[3]提出如下速-密关系

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_e - u}{T_r} - \frac{\gamma}{\rho T_r} \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

式中, γ 为期望指数, T_r 为松弛时间, u_e 称为平衡速度函数,其意义与 LWR 模型中同。

后来, Papageorgiou^[4] 对 payne 模型进行改进,以考虑匝道流量和车道数变化带来的阻尼效应,提出的速-密关系为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_e - u}{T_r} - \frac{\gamma}{\rho T_r} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\delta u \cdot r}{\rho}$$

式中, δ 为与匝道有关的参数, r 为入匝流量。对于出口匝道,用 s 代替 r 即可。

之后, Ross、Michalopoulos、吴正、张红军等学

者纷纷提出各自的动态速-密关系。例如, Ross^[5] 模型中的速密关系为 $\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_e - u}{T_r}$, 式中, u_e 为自由

流车速。Michalopoulos^[6] 模型中的速密关系为 $\frac{\partial u}{\partial t}$

$+ u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_e - u}{T_r} - G \frac{\partial u}{\partial t} - \sigma \rho^\beta \frac{\partial \rho}{\partial x}$, 式中, $G = \mu \rho^\epsilon \cdot (r - s)$, μ

ϵ 和 β 都为常数。吴正^[7] 模型中的速密关系为 $\frac{\partial u}{\partial t} +$

$u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{4} (n-1)^2 u_e^2 \rho^{\frac{1-n}{2}} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\tau_w}{\rho A}$, 式中, n 为交通

状态指数, ρ 为堵塞密度 A 为路宽或车道数, τ_w 为车

流经过单位面积路面时所受阻。张红军^[8] 模型中的

速-密关系为 $\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_e - u}{T_r} - \rho [u_e'(\rho)]^2 \frac{\partial \rho}{\partial x}$ 。

此外,有些学者在动力学方程右端加入 2 阶导数粘性项,得到类似 Navier-Stokes 方程的动力学方程,例如 Kühne、Kerner 和 Konhäuser 以及 Lee 等提出的模型。

以上讨论的都为各向同性模型,也有学者通过在动力学方程中直接引入不同的速度梯度提出各向异性模型,例如张红军^[9] 根据 Pipes 跟驰模型导出的模型、姜锐模型、薛郁模型等。

1.2 常用宏观模型简析

目前,快速路控制中最常用是 Payne 模型和 Papageorgiou 模型。以下以 Payne 模型为例,讨论宏观模型的推导建立过程,以便更好地认识模型。

由于驾驶员根据前方交通密度调整车速需要一个反应过程,车辆动力、传动装置也有一个调整时间,因此 payne 认为^[3] 下游车流密度的变化经过一定的时延将影响到上游车流的速度,即假设 $u(x, t + \tau) = u_e[\rho(x + \Delta x, t)]$ 。式中, τ 代表时延(即松弛时间 T_r)。把上式左侧对 τ 、右侧对 Δx 做泰勒展开,略去高

阶项,并假设^[3] $\Delta x = 0.5/\rho$, 令 $\gamma = -0.5 \frac{\partial u_e(\rho)}{\partial \rho}$ 为常数,

同时略去 (x, t) 以简化符号,则有 $\tau \cdot \frac{du}{dt} = u_e(\rho) - u$

$\gamma \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x}$ 。同时,考虑全导数 $\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$, 则有

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\tau} \left[u_e (\bar{\rho} - u) - \frac{\gamma}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right]. \quad (2)$$

式(1)和式(2)组成一个连续型交通流模型。

1.3 宏观模型在交通控制中的使用

以上讨论的宏观模型包含偏微分方程,还不能直接用于控制,因此需要将模型加以离散化,转化为时空离散的差分方程以便应用。为此,把城市快速路划分为 N 个路段,如图1所示,每个路段至多包含一个入口和一个出口,每个路段 $i, j=1, \dots, N$, 进一步分为 $n(i)$ 小段,小段长度为: $\Delta_j, j=1, 2, \dots, n(i)$, 各小段内交通流近似均匀,其交通变量记为 $\bar{\rho}_i^j(k)$ 、 $u_i^j(k)$ 和 $q_i^j(k)$ 。路段的入口、出口匝道流量记为 $r_i(k)$ 、 $s_i(k)$ 。采样周期取为 T 。

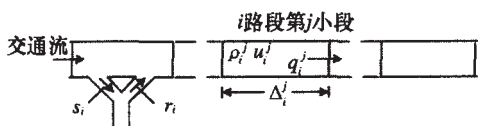


图1 城市快速路系统的分段示意图

Fig.1 An urban freeway system subdivided

此外,定义 d_i 为入口匝道 i 的交通需求(辆/h)。定义 α_{mn} 为 OD 比例,表示从 m 入口匝道进入的流量中经过路段 n 的百分比,记 $A=(\alpha_{mn})_{N \times N}$ 为 OD 矩阵。

根据以上定义,离散化后的连续方程为

$$\bar{\rho}_i^j(k+1) = \bar{\rho}_i^j(k) + \frac{T}{\Delta_j} \left[q_i^{j-1}(k) - q_i^j(k) + q_i^j(k) \right], \quad (3)$$

其中, $q_i^j(k) = \begin{cases} r_i(k) - s_i(k) & \text{if } j=1 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$,

式中, $s_i(k)$ 可以通过 OD 比例得到。

以 Payne 模型为例,速-密方程离散化后的差分形式^[4]为

$$\begin{aligned} u_i^j(k+1) = & u_i^j(k) + \frac{T}{\tau} \left[u_e \left[\bar{\rho}_i^j(k) \right] - u_i^j(k) \right] + \\ & T \cdot \zeta \cdot u_i^j(k) \cdot \left[u_i^{j-1}(k) - u_i^j(k) \right] - \\ & \frac{\gamma \cdot T}{\tau \cdot \Delta_j} \cdot \frac{\bar{\rho}_i^{j+1}(k) - \bar{\rho}_i^j(k)}{\bar{\rho}_i^j(k) + \kappa}. \end{aligned} \quad (4)$$

该式右侧包括4项:第1项为前一时间刻速度;第2项为松弛项,表明车速以时间 τ 的延迟逼近稳态密度下的车速;第3项是对流项,表明平均速度与上游相邻路段中的速度有关;第4项是期望项,表明驾驶员会根据前方的密度调整车速。 τ 、 ζ 、 γ 、 κ 为常量参数; $u_e(\cdot)$ 为平衡速度关系。差分模型中的流量公式^[4]如下

$$q_i^j(k) = \alpha \cdot \bar{\rho}_i^j(k) \cdot u_i^j(k) + (1 - \alpha) \cdot \bar{\rho}_i^{j+1}(k) \cdot u_i^{j+1}(k) \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (5)$$

式中, α 为常数参数。公式(3)、公式(4)和公式(5)组成差分形式的 Payne 模型。

对于差分模型, Δ 和 T 的选取至关重要。 Δ 选取过大会导致车流的局域异质化, T 选取过大则使得系统很难跟踪车流的动态变化,而 Δ 和 T 选取过小又会使宏观交通变量丧失物理意义。 Δ 和 T 的选取需要满足 $T < \Delta_{\min} / u_f$ 的条件, $\Delta_{\min}$ 为小段长度最小值, u_f 为自由流车速。根据国外经验,建议取 Δ 为 500~1 000 m, 取 T 为 10~30 s。

2 城市快速路动态交通控制的数学模型

把入口匝道流量调节看作受控的快速路系统主要的控制输入,那么控制系统的任务就是从可允许的控制域中合理地选取入口匝道调节率 r_i ,在空间和时间上合理分配入匝车流。

如果以系统总旅行时间最小化为优化目标,那么城市快速路最优控制问题描述为:“在满足交通流数学模型约束的条件下,从可允许的控制域中选取匝道调节率,使得快速路系统所有车辆的总旅行时间在给定时间域上最小”。问题的数学表达形式取决于使用的交通流模型。以下以 Payne 模型为基础构造具体的动态控制问题。

2.1 目标函数

系统总旅行时间包括快速路中运行车辆的旅行时间和入口匝道处排队车辆的等待时间两个部分。

运行车辆的旅行时间为 $J_1 = T \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{j=1}^{N_{\text{小段}}} \Delta_j \bar{\rho}_i^j(k) \right\}$, 式中,

$N_{\text{小段}}$ 为小段个数。匝道排队等待时间为 $J_2 = T \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{j=1}^{N_{\text{匝道}}} w_j(k) \right\}$, 式中, $w_j(k)$ 为入口匝道 j 在 k 时刻的排队车辆数, $N_{\text{匝道}}$ 为入口匝道个数。由此最优控制问题的目标函数为

$$J = J_1 + J_2 = T \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{j=1}^{N_{\text{小段}}} \Delta_j \bar{\rho}_i^j(k) + \sum_{j=1}^{N_{\text{匝道}}} w_j(k) \right\}. \quad (6)$$

2.2 约束条件

约束条件包括交通流模型约束和物理/技术约束两方面。模型约束由 Payne 模型和匝道排队长度模型组成,前者即公式(3)、公式(4)和公式(5),后者^[11]为

$$w_j(k+1) = w_j(k) + T [d_j(k) - r_j(k)]. \quad (7)$$

物理/技术约束与入匝需求 d 、采样周期 T 、最大

允许排队长度 $w_{\max}$ 、实时排队长 w 及匝道调节率 r 的允许域有关,可表达为如下形式^[10]:

$$\begin{aligned} \max\{r_{\min}, d(k) - [w_{\max} - w(k)]T\} \leq \\ r(k) \leq \min\{r_{\max}, d(k) + w(k)T\}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $r_{\min}$ 和 $r_{\max}$ 为调节率可行范围, $w_{\max}$ 为匝道最大允许排队长度。

2.3 优化问题

至此,对于图1所示的快速路系统,可以构造如下最优化问题:“在已知慢变扰动(交通需求 D 和 OD 比例 A)的轨线、系统状态(速度、密度和排队长度)初始值的情况下,以公式(6)为目标函数、以公式(3)、公式(4)、公式(5)、公式(7)和公式(8)为约束条件,计算最佳控制序列(匝道调节率),使得系统总旅行时间最小”,优化问题记为问题1。问题1可以借助庞特里亚金(Pontryagin)最小值原理^[11]求解,从而导致一个两点边值问题(TPBVP)。

然而,对于快速路这样的非线性复杂系统,如果对问题1直接优化,则维数高、计算量大,而且不一定保证迭代运算是收敛的;即使能求出解,也属于开环控制,对于事故等扰动和模型偏差等都很敏感,因此用于实际控制尚存在一些缺陷。为此,学者们提出各种准最佳控制^[10,11]方法,例如线性二次型反馈控制、分层递阶控制、递阶智能控制等方法,从而达到降低计算难度、满足实时控制要求之目的。

3 城市快速路动态交通控制策略

本文结合城市快速路实际特点,根据准最佳控制的思想,采用目前较成熟的多层分散控制方法,设计如下的3层分散控制系统。

(1) 优化层:对简化的问题1进行优化计算,确定系统的状态(密度、速度、入口排队数)和控制变量(匝道调节率)的期望轨线,以便于直接控制层进行在线实时控制。

(2) 直接控制层:根据交通流实时变化情况,采取适当的匝道调节率,使得各路段交通状态变量和控制变量尽量保持在期望最优值(标称值)附近,以求较平稳的控制。

(3) 自适应层:为优化层提供符合实时交通状况的模型参数或约束条件。当交通特性改变、出现强扰(D 和 A 的预测值与实际相差较大、出现拥挤等)时,改变模型参数或约束条件,重新启动优化层,修改期望轨线,通过直接控制层使现场交通保持在最优运行状态。

各控制层具体介绍如下。

3.1 优化层

城市快速路交通流的入口需求 D 和 OD 比例 A 在1天的某1时段(15~30 min)里变化缓慢,可以近似为常数。于是问题1可以简化,变为一个稳态交通最优控制问题。对于图1所示的城市快速路系统,稳态交通流情况下问题1简化为如下关系式

$$Q_i = q_i^1 = q_i^2 = \dots = q_i^{n(i)} = \sum_{j=1}^i (q_j r_j), \quad (9)$$

$$Q_i \leq q_{i, \max}, \quad (10)$$

式中, $q_{i, \max}$ 是路段 i 的通行能力。

而旅行时间最小公式(6)则等价^[11]为流入总量最大,即

$$J = \sum_{i=1}^N r_i. \quad (11)$$

稳态交通情况下的调约束方程为

$$\begin{aligned} \max\{r_{i, \min}, d_i - [w_{i, \max} - w_i(0)]T_{\text{稳态}}\} \leq \\ r_i(k) \leq \min\{r_{i, \max}, d_i + w_i(0)T_{\text{稳态}}\}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $w_i(0)$ 为入口初始排队长度, $T_{\text{稳态}}$ 为稳态优化考虑的时间。

简化后的问题1记为问题2,其本质是一个线性规划问题,可以借助常用的数学优化工具方便求解。

3.2 直接控制层

在多层分散控制结构中,整个快速路系统分为多个子系统,把各受控子系统的交通流模型在标称点(期望点)附近线性化,按偏离标称点的误差最小来构造一个适当的二次型性能指标,通过求解一个线性二次型(LQ)问题,并利用交迭式分散控制等技术,就得到局部最优的状态反馈闭环控制系统。例如,著名的ALINEA,就是一个典型的本地级控制器,在国内外有着广泛应用。本文即采用ALINEA^[12]算法,其表达式为

$$r_i(k) = r_i(k-1) + K_R [\hat{\rho} - \rho(k)], \quad (13)$$

式中, K_R 是调节参数, $\hat{\rho}$ 为密度标称点。

3.3 自适应层

当实际的 D 和 A 与预测值偏离较大,或者路段中出现局部拥挤,那么自适应层将启动新一轮的优化运算,修改期望轨线,通过直接控制层使交通保持在最优运行状态。对于出现拥挤的情况,一般根据拥挤的严重程度对 $q_{i, \max}$ 做相应修改。以单向二车道快速路为例,根据上海快速路实测数据,采用以下状态分级方法确定 $q_{i, \max}$ 。

状态 1: 正常交通流, $q_{li, \max}$ 取道路通行能力;

状态 2: 较拥挤, 2 100 辆/h;

状态 3: 严重拥挤, 1 500 辆/h。

路段交通状态一般采用路段 i 中各小段的密度最大值作为判定依据。

4 交通仿真

下面对一算例路网进行仿真计算, 考察三层分散控制方法的控制效果。仿真程序采用 C++ 和 Matlab 进行编制。

路网基本情况: 一条单向双车道的城市快速路, 长 30 km, 分为 6 个路段, 每段长 5 km, 每段进一步分为 5 个 1 km 长的小段, 每个路段第 1 小段含 1 对出入口匝道。假设初始时刻第 3 路段的第 2 小段由于事故等原因引起拥挤, 拥挤段密度为 $\rho_0^2=120$ 辆/km。入口匝道最小流入量不小于 100 辆/h, 即 $r_{i, \max}=100$ 。交通需求 D 和 OD 比例 A 假设已知, 为 $d_1=3\ 500$, $d_2=d_3=700$, $d_4=d_5=d_6=350$,

$$A=(\alpha_{m,n})_{N \times N} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ 0.95 & 1 & & & & \\ 0.9 & 0.95 & 1 & & & \\ 0.85 & 0.9 & 0.95 & 1 & & \\ 0.8 & 0.85 & 0.9 & 0.95 & 1 & \\ 0.75 & 0.8 & 0.85 & 0.9 & 0.95 & 1 \end{bmatrix},$$

其他参数取值为: $\tau=36\text{ s}$, $\xi=1$, $\gamma=60\text{ km}^2/\text{h}$, $\kappa=40\text{ veh/km}$, $\alpha=0.9$, $K_R=24$ 。

经过仿真计算, 对于不控制情况, 密度的时空变化如图 2 所示, 对于控制的情况, 密度的时空变化如图 3 所示。

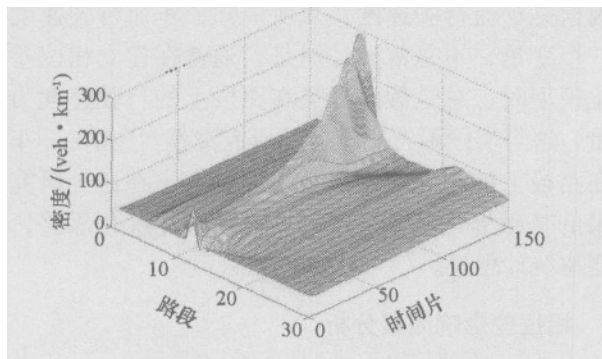


图 2 不控制时的密度时空变化图

Fig.2 Evolution of traffic density without control

由图 2 和图 3 可知, 不控制情况下, 事故引起的扰动破坏了交通流稳定性, 并且由于流入需求超过快速路通行能力而出现了常发性拥挤。控制的情

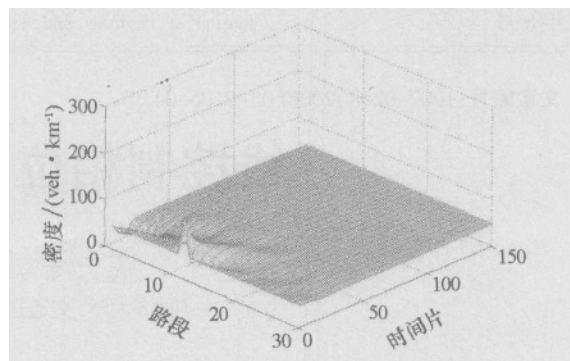


图 3 控制后的密度时空变化图

Fig.3 Evolution of traffic density with control

况下, 首先, 自适应层诊断出拥挤路段, 并判定为严重拥挤, 从而修改第 3 路段的 $q_{li, \max}$, 传输给优化层, 优化运算后得到系统状态变量和决策变量的标称点为: 调节率 $r_{\text{标称}}^\omega=\{1\ 350\ 100\ 100\ 350\ 350\ 350\}$; 密度 $\rho_{\text{标称}}^\omega=\{23.3\ 23.3\ 23.3\ 23.3\ 23.3\ 23.3\}$ 。大约过了 4 min, 交通流状态回复到正常交通流状态, 此时启动新一轮优化, $q_{li, \min}$ 恢复正常值, 新的优化运算结果为 $r_{\text{标称}}^\omega=\{3\ 500\ 675\ 208\ 220\ 230\ 240\}$, $\rho_{\text{标称}}^\omega=\{48\ 48\ 48\ 48\ 48\ 48\}$, 交通流不出现常发性拥挤。

可见, 三层分散控制系统既能有效消除偶发性及常发性拥挤, 又能预防常发性拥挤, 具有较强的鲁棒性。

5 结语

目前, 国内一些大都市的快速路都出现不同程度的拥挤, 延误、事故和污染等^[13]随之增加, 如何科学有效地对快速路进行管理已经成为摆在交通管理部门面前的难题。实际上, 城市快速路系统和市内区域交通系统(受交叉口红绿灯控制)是城市中彼此关联, 又相互独立的两个系统。为协调两者运行、充分发挥两者的资源, 在二者的耦合点(匝道口)实施流量控制已经成为必然。为此, 需要加强交通流建模和控制的理论研究和实践工作。

本文在回顾城市快速路宏观流体模型发展、简析常用模型的基础上, 构造了城市快速路动态流入控制模型及最优控制问题, 并提出了基于多层分散控制思想的实用的控制方法, 希望能够抛砖引玉, 促进快速路交通流建模和控制研究。(下转第 115 页)

6 结论

本文在线性效用函数的假设条件下,建立了交通个体出行模式选择概率与影响变量之间的线性近似关系,使模型能方便应用于个体出行模式决策分析中,为有效制定管理方案提供决策支持。

参考文献:

- [1] 黄海军. 城市交通网络平衡分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [2] 饭田恭敬. 交通工程学[M].北京: 人民交通出版社, 1994.
- [3] 陆化普,等. 交通规划理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社,

1998.

- [4] MOSHE BEN-AKIVA,STEVEN R LERMAN. Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand [M]. London: The MIT Press Carbridge, 1985.
- [5] 邵昀泓,王炜,程琳. 交通方式选择行为预测非集计模型应用研究 [R]. 可持续发展的城市交通—2005 全国博士生学术论坛, 2005.
- [6] 四兵锋,高自友. 多模式交通条件下合理制定旅客票价的优化模型及算法[J]. 中国管理科学, 2000, 8(4).
- [7] MATTEO MARSILI. on the multinomial logit model [J]. Physica A, 1999, 269.
- [8] J DE ORTUZAR, L G WILLUNSEN. Modeling Transport[M]. 1994.

(上接第 105 页)

参考文献:

- [1] M J LIGHTHILL, G B WHITHAM. On kinematic waves II: A traffic flow theory on long crowded roads [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1955, A 229: 317- 345.
- [2] M J LIGHTHILL, G B WHITHAM. On kinematic waves I: Flood movement in long rivers [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1955, A 229: 281- 316.
- [3] PAYNE H J. Models of freeway traffic and control [J]. Simulation Council P proceedings, 1971, 1 (1) : 51- 61.
- [4] PAPAGEORGIOU M. Macroscopic modeling of traffic flow on the BOUL EVARD PER IPHER IQU E in Paris [J]. Transportation Research-B , 1989, 23 (1) : 29- 47.
- [5] P ROSS. Traffic dynamics [J]. Transportation Research - B, 1988, 22(6):421- 435.
- [6] P G MICHALOPOULS, P Yi, A S LYRINTZIS. Continuum modeling of traffic dynamics for congested freeways [J]. Transportation Research-B, 1993, 27 (4):315- 332.

- [7] 吴正. 低速混合型城市交通的流体力学模型 [J]. 力学学报, 1994, 26 (2): 149- 157.
- [8] H M ZHANG. A theory of non-equilibrium traffic flow [J]. Transportation Research-B, 1998, 32(7):485- 498.
- [9] H M ZHANG. A non-equilibrium traffic flow model devoid of gas-like behavior [J]. Transportation Research-B, 2002, 36(3):275- 290.
- [10] 王亦兵, 韩曾晋, 贺国光. 城市高速公路交通控制综述 [J]. 自动化学报, 1998, 24(4): 484- 496.
- [11] PAPAGEORGIOU M. Comparison of macroscopic models for control of freeway traffic [J]. Transportation Research-B , 1983, 17 (2) : 106- 117.
- [12] MARKOS PAPAGEORGIOU, JEAN-MARC BLOSSEVILLE, H H SALEM. Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris: Part II: Coordinated on-ramp metering [J]. Transportation Research Part A, 1990, 24:361- 370.
- [13] 上海市市政工程管理局. 中心城快速路运行状况周报[R]. 2003.