

文章编号: 1001-4098(2007) 11-0001-05

面向控制的城市快速路网宏观动态交通模型^{*}

干宏程

(上海理工大学 交通工程系, 上海 200093)

摘 要: 针对我国城市交通特点, 在改进经典的高速道路网宏观交通流模型 METANET 的基础上, 提出了面向控制的城市快速路网宏观动态交通模型。该交通模型能够更好地描述快速路出口匝道流出能力受限、快速路主线起始点车流以及快速路主线车速控制等现象。对上海高架快速路的实际交通流数据进行了仿真研究, 结果表明该模型较好地反映了城市快速路交通流的动态演化特征, 可以作为城市交通控制系统分析和设计的有力工具。

关键词: 城市快速路; 宏观交通流模型; 网络交通; 动态交通控制

中图分类号: U 491 **文献标识码:** A

精确合理的城市快速路宏观动态交通流模型是开发先进高效的交通控制策略的前提^[1-5]。更具体地讲, 精确的城市快速路交通流数学模型是完成交通数据处理和状态估计、控制策略设计以及仿真测试等任务所必需的。城市快速路交通流是由人-车-路组成的具有高度非线性和不确定性的复杂系统, 交通模型只是对交通流行为的一种近似数学表达, 因此任何模型都有其适用范围和局限性。交通流建模必须结合建模所在国家或地区的实际交通特点, 做到有的放矢。多年来, 发达国家的研究者已经结合他们所在国家的交通流特点, 提出了许多快速路模型^[2, 6-12], 有些学者还将模型扩展为能够描述网络交通流动态演化过程的宏观网络模型, 例如著名的 METANET 模型^[13-15]。我国学者近年来也对快速路交通流模型进行了探索, 取得一些原创成果^[16, 17], 但是这些成果未扩展至网络模型, 尚未用于实际交通控制中。本文从我国交通特点出发, 对 METANET 模型加以改进, 建立适用于我国的面向控制的城市快速路网宏观动态交通模型, 并给出模型的应用实例, 说明模型的合理性。

1 城市快速路网宏观动态交通模型

1.1 建模思路

Papageorgiou 等学者针对高速道路 (包括高速公路和城市快速路) 的特点, 提出了一种宏观网络交通流模型

——METANET^[1]。METANET 模型能够较好地描述高速道路的动态非线性特征 (例如冲击波、拥堵的形成和消散、停停走走等), 被研究人员广泛使用。但是考察我国城市交通特点后发现, METANET 模型应用于我国尚存在以下不足:

① 上海、北京等大都市高架快速路的出口匝道由于受所衔接地面普通道路影响, 经常出现“流出不畅”现象, 即快速路流出能力受限。这会严重影响快速路主线的运行。METANET 对此的描述尚不充分。

② 一些城市的快速路主线上安装了电子限速标志, 对车流进行限速诱导, METANET 未能描述限速对宏观交通流行为的影响。

③ 城市快速路主线起始点与常规的入口匝道都属于所建模路网的起点 (Origin), 但是两者的交通流运行性态不同, 主线起始点实际上是对路网边界上游的快速路的一种抽象。METANET 对主线起始点与常规入口匝道没有做区别对待。

本文对 METANET 模型加以改进, 以使模型能够更准确地描述快速路起始点车流、快速路流出能力受限、快速路主线限速等现象。

1.2 基本说明和变量

快速路网表示成一个由路段 (link) 和节点 (node) 组成的有向图。路段是道路属性 (如车道数、坡度、线形等) 相同

* 收稿日期: 2007-07-20

基金项目: 国家“十五”科技攻关资助项目 (2002B A404A 08); 上海市教委科学发展基金资助项目 (06E Z004); 上海理工大学博士启动基金资助项目 (X 693)

作者简介: 干宏程 (1978-), 男, 浙江宁波人, 上海理工大学城市建设与环境工程学院交通工程系副教授, 博士, 研究方向: 智能交通系统、交通系统工程。

的一段道路。节点是道路属性发生变化的位置(如分流节点)、以及存在出入口匝道的位置等。

交通流状态演化步距(模型取样周期)记作 T , 一般取 5~3(秒)。 t 表示时间, k 为时标, $t = kT, k = 0, 1, 2, \dots$ 路段进一步划分为若干等长的小段。用 m 表示路段, 则 N_m 表示路段 m 包含的小段数目, λ_m 表示小段车道数, Δ_m 表示小段长度。同一小段内的交通状态视为均匀。路段 m 上的第 i 小段的状态用下列变量表示: ① $d_{m,i}(k)$ ——车流密度(辆/公里/车道), ② $v_{m,i}(k)$ ——平均速度(公里/小时), ③ $q_{m,i}(k)$ ——流量(辆/小时)。

1.3 原始的 METANET 模型

METANET 有区分终点(destination-oriented)和不区分终点(non-destination-oriented)两种形式。本文采用不区分终点的形式, 模型的基本方程及其物理意义如下。

① 路段模型

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

$$q_{m,i}(k) = d_{m,i}(k) \cdot v_{m,i}(k) \cdot \lambda_m \quad (2)$$

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{f} [V_e(d_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)] + \frac{T}{\Delta_m} \cdot v_{m,i}(k) \cdot [v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)] - \frac{a \cdot T}{f \cdot \Delta_m} \cdot \frac{d_{m,i+1}(k) - d_{m,i}(k)}{d_{m,i}(k) + e} \quad (3)$$

$$V_e(d_{m,i}(k)) = v_{f,m} \cdot \exp\left[-\frac{1}{a_m} \left(\frac{d_{m,i}(k)}{d_{r,m}}\right)^{a_m}\right] \quad (4)$$

式(1)称为车辆守恒方程, 式(2)是流量计算公式, 式(3)称为动态速度方程, a, f, e 都是常量参数。式(4)称为稳态速度方程, 是式(3)中 $V_e(d_{m,i}(k))$ 的数学表达。 $v_{f,m}$ 和 $d_{r,m}$ 分别是 m 路段的自由流车速和临界密度, 为常量参数, a_m 与路段 m 有关, 是常量参数。如果考虑入口匝道流量冲击或主线车道数陡减引起车速主线下下降的“阻尼”现象, 可以在式(3)中添加相应的修正项, 文献[18]给出了具体介绍。

② 节点模型

$$Q_n(k) = \sum_{i \in I_n} q_{n,i}(k) \quad (5)$$

$$q_{m,0}(k) = U_n^m(k) Q_n(k), \quad m \in O_n \quad (6)$$

式(5)计算从节点 n 流出的流量 Q_n , I_n 表示节点 n 上游流入路段, I_n 为 I_n 的集合。式(6)计算节点下游流出路段 m 入口处的流量 $q_{m,0}$, O_n 表示节点 n 下游流出路段的集合。 U_n^m 称为转弯比例, 表示 Q_n 中选择路段 m 的车流所占的比例。

节点 n 的流出路段多于 1 个时, 流入路段 m 流出端(即路段 m 的第 N_m+1 个小段)的密度为:

$$d_{m,N_m+1}(k) = \frac{\sum_{i \in O_n} d_{i,1}^i(k)}{\sum_{i \in O_n} d_{i,1}(k)} \quad (7)$$

当流出路段既含常规路段, 又含主线终止点时, 主线终止点视为一种特殊路段, 主线终止点的密度或者由用户指定, 或者在式(7)中不作考虑。如果流出路段只含主线终止点, 则使用式(3)时, 略去含 $d_{m,i-1}(k)$ 的那一项。

节点 n 的上游流入路段多于 1 个时, 流出路段入口(即路段 m 的第 0 小段)的速度为:

$$v_{m,0}(k) = \frac{\sum_{i \in I_n} v_{i,N_i}(k) q_{i,N_i}(k)}{\sum_{i \in I_n} q_{i,N_i}(k)} \quad (8)$$

当上游流入路段既含常规路段, 又含主线起始点时, 主线起始点视为一种特殊路段, 主线起始点的速度或者由用户指定, 或者在式(8)中不作考虑。如果流入路段只含主线起始点, 则使用式(3)时, 略去含 $v_{m,i-1}(k)$ 的那一项。

③ 路网起点的排队模型

METANET 中, 起点包括快速路主线起始点和常规的入口匝道, 起点排队方程如下:

$$w_o(k+1) = w_o(k) + T[d_o(k) - q_o(k)] \quad (9)$$

$$q_o(k) = r_o(k) \cdot \min\left\{d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T}, Q_o, Q_o \cdot \frac{d_{\max_} - d_{i-1}}{d_{\max_} - d_{r_}}\right\} \quad (10)$$

w_o 表示起点 o 处排队车辆数, d_o 是 o 点的交通需求(辆/小时), q_o 是 o 点实际能够流入快速路主线的流量。当 o 为入口匝道时, r_o 为匝道调节率 ($0 \leq r_o \leq 1$), $r_o = 1$ 表示不调节, $r_o = 0$ 表示匝道关闭。 Q_o 是 o 点的通行能力, 为常量参数。 $_$ 是 o 点下游快速路主线路段, $d_{\max_}$ 和 $d_{r_}$ 分别为路段 $_$ 的堵塞密度和临界密度, 为常量参数。

1.4 对 METANET 模型的改进

① 对快速路主线限速的考虑

主线限速会对稳态速度产生影响, 为表示这种影响, 受文献[19]启发, 本文将方程(4)(稳态速度方程)改进为如下形式:

$$V_e(d_{m,i}(k)) = \min\left\{v_{f,m} \cdot \exp\left[-\frac{1}{a_m} \left(\frac{d_{m,i}(k)}{d_{r,m}}\right)^{a_m}\right], Z \cdot v_{control,m,i}(k)\right\} \quad (11)$$

$v_{control,m,i}(k)$ 是 k 时刻路段 m 的第 i 小段上的限速值。 Z 表示限速因子, 是需要标定的参数。国外研究发现, 当限速为非强制性(规劝型)时, Z 为 1.0 左右(即平均车速超过限速值 10% 左右), 当限速为强制性时, Z 为 0.9 左右(即平均车速低于限速值 10% 左右)。考虑限速影响的稳态速度实际上是式(4)计算值和式(11)右侧第二项的较小值。

② 主线起始点车流行为的建模

如图 1 所示, 把起始点 o 下游邻接路段 $_$ 第 1 小段的平均速度 v_{i-1} 和小段限速值 $v_{control,i-1}$ 中较小者记作 $v_{lim,i-1}$, 把起始点能够流入主线的最大流量记作 $q_{lim,i-1}$ 。对主线起始点车流的建模基于以下假设: 如果 $v_{lim,i-1} \geq V_e(d_{r,i-1})$, 说明

主线畅通, 则 q_{lim_i} 取为路段 i 的通行能力。如果 $v_{lim_i} < V_e(d_{cr_i})$ (即对应于小段临界密度 d_{cr_i} 的稳态速度), 则 q_{lim_i} 折减, q_{lim_i} 的计算利用式 (2) 和式 (4)。根据以上假设, 对方程 (10) 改进如下:

$$q_o(k) = \min\{d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T}, q_{lim_i}(k)\} \quad (12)$$

式 (12) 中的 q_{lim_i} 计算公式为

$$q_{lim_i}(k) = \begin{cases} \lambda_- \cdot v_{lim_i}(k) \cdot d_{cr_i} \left[-a \ln \frac{v_{lim_i}(k)}{v_{f_i}} \right]^{\frac{1}{a}}, & v_{lim_i}(k) < V_e(d_{cr_i}) \\ \lambda_- \cdot V_e(d_{cr_i}) \cdot d_{cr_i}, & v_{lim_i}(k) \geq V_e(d_{cr_i}) \end{cases} \quad (13)$$

式 (13) 中的 $v_{lim_i}(k) = \min\{v_{control_i}(k), v_{i-1}(k)\}$

小段速度 $v_{\mu,1}$
限速值 $V_{control, \mu, 1}$



图 1 主线起始点车流建模示意

③ 出口匝道流出能力受限的考虑

如图 3 所示, 本文构造了一个出口匝道 i 的密度更新方程如下:

$$d_i(k+1) = \begin{cases} d_{p, N_p}(k), & q^n(k) < Q_{out_i} \text{ 且 } d_{p, N_p}(k) < d_{cr_p} \\ \min\{\max\{d_i(k) + C_{out_i}(q^n(k) - Q_{out_i}), 0\}, d_{i, max}\}, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

该式计算出口匝道 i 的密度 d_i , 供式 (7) 计算时使用。 $q^n(k)$ 由式 (6) 计算得到, 是快速主线流入出口匝道 i 的流量, 可视为出口匝道流出需求。 Q_{out_i} 是出口匝道最大流出能力 (辆/小时), 受所衔接地面普通道路和交通状况影响, 是需要标定的参数。 d_{cr_p} 是出口匝道上游主线路

段的临界密度, 为常量参数。 C_{out} 是调节参数, 为常量。 $d_{i, max}$ 是 i 的阻塞密度, 为常量参数。该式的意义为: 当 $q^n(k)$ (需求) 小于 Q_{out} (供给) 且主线畅通时, $d_i(k+1)$ 取为 k 时刻匝道上游主线路段的密度 $d_{p, N_p}(k)$, 否则, $d_i(k+1)$ 由 $d_i(k)$, $q^n(k)$ 和 Q_{out} 等共同决定。此外, 式 (14) 还保证了 d_i 不超过阻塞密度 $d_{i, max}$ 。

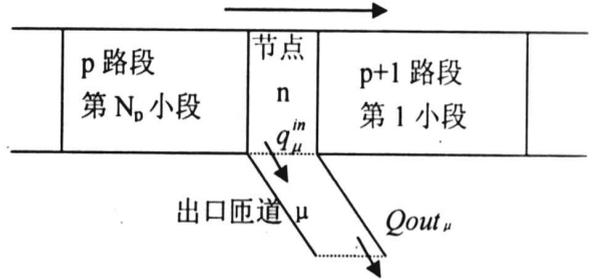


图 2 出口匝道流出能力受限的建模

④ 改进模型小结

改进后的模型由式 (1)~ 式 (13) 组成, 其使用方法为: (A) 对于采取限速措施的快速路主线小段, 用式 (11) 取代式 (4); (B) 对于主线起始点, 用式 (12) 和式 (13) 取代式 (10); (C) 对于出口匝道, 使用式 (14), 供式 (7) 使用; (D) 其他情况下的公式使用同原始 METANET 模型。

2 模型的应用

为了验证本文提出的模型的准确性, 针对上海市内环高架路外圈 (东向西) 一段 2.43 公里长的双车道快速路 (如图 3 所示), 进行了模型的标定。该标定路段包含一个出口匝道和一个入口匝道。路段分为 5 小段, 每小段都埋设了检测线圈, 以 20s 的采样周期检测流量、速度和占有率等参数。利用标定后的模型, 对快速路交通流进行了计算机仿真。图 4 给出了断面 3 的流量的仿真结果和实测值的对比图。图 5 给出了断面 3 的速度的仿真结果和实测值的对比图。由图 4 和图 5 可见, 流量的模型计算值和实测值很接近, 模型准确跟踪了速度的走势, 再现了交通流从畅通到拥挤、从拥挤到畅通的状态演变。可见, 本文提出的模型结构合理, 参数准确, 精度较高。模型标定过程详见文献 [3]。

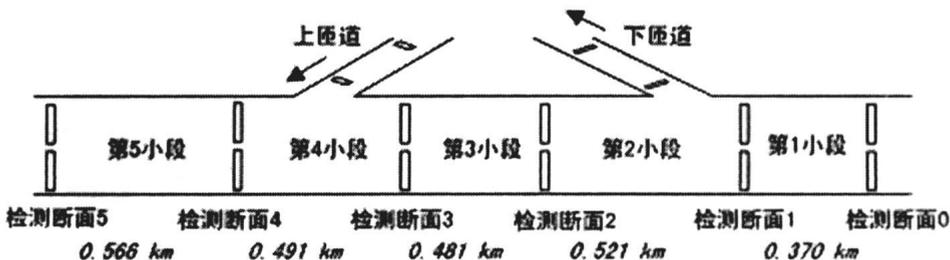


图 3 用于模型标定的高架快速路

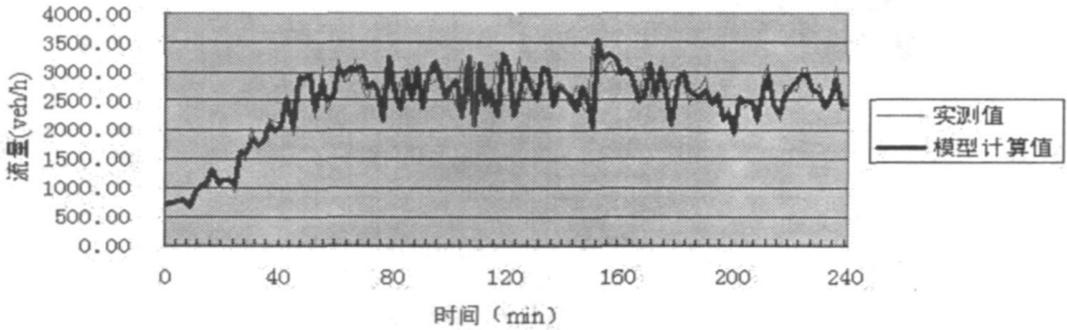


图4 流量的模型计算值和实测值的对比图

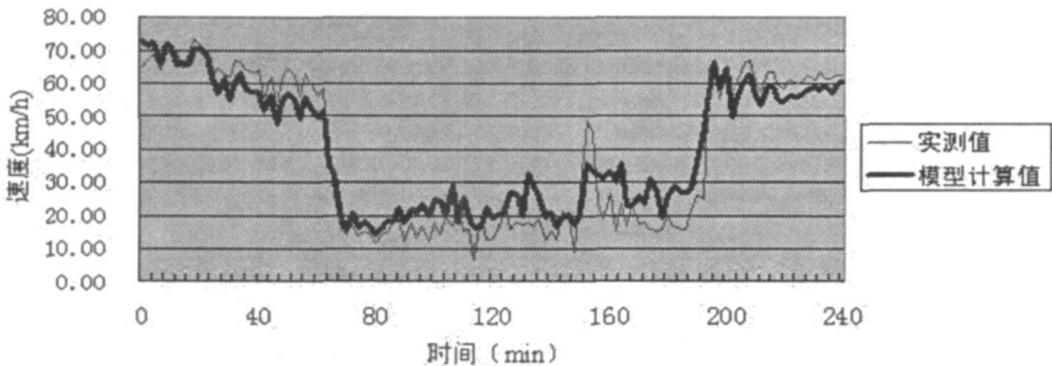


图5 速度的模型计算值和实测值的对比图

经过标定的城市快速路网宏观动态交通模型在智能化交通管理中有广泛用途,例如,入口匝道控制和可变限速等先进交通控制策略的设计、交通仿真、交通运行评价、交通状态(包括行程时间)的估计和短时预测、检测数据的修复等。本文利用该模型开发的计算机软件 GANEraST 已获国家专利^[20]。

3 结语

我国上海、北京等大都市的城市快速路都形成了网络规模,成为市内交通的重要载体。近年来,这些城市的城市快速路都出现了严重的拥挤、延误、事故和污染等问题不断加剧^[21],加强城市快速路网交通流建模和控制的研究已成当务之急。本文在对经典的 METANET 改进的基础上,提出了面向控制的城市快速路网宏观动态交通模型,并利用该模型对上海高架快速路交通流进行了仿真,仿真结果说明了模型的合理性。

下一步的研究设想有:①在模型中考虑交通事故等异常事件的影响,为交通应急指挥提供支撑;②利用仿真手段,考察入口匝道控制、路径诱导、可变限速控制等先进控制手段的效果;③将模型扩展到包括城市快速路和普通地面道路组成的城市大交通网络中,为实施快速路和普通道路的协调控制打基础。

参考文献:

- [1] Papageorgiou M. Application of automatic control concepts to traffic flow modeling and control [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- [2] Papageorgiou M. Macroscopic modeling of traffic flow on the BOULEVARD PERIPHERIQUE in Paris [J]. Transportation Research- B, 1989, 23(1): 29~ 47.
- [3] 干宏程,孙立军,郝媛,陈建阳.城市快速路高阶流体模型实证研究 [J]. 同济大学学报, 2007, 35(5): 602 ~ 606.
- [4] Gan H C, Wei Y, Fan B Q, Han Y. Integrated feedback control of urban freeway networks via nonlinear optimization [A]. Proceedings of the 86th annual meeting of Transportation Research Board CD-ROM [C]. Washington D C, USA, 2007.
- [5] 干宏程.城市快速路网交通诱导系统若干关键问题研究 [D].上海: 同济大学, 2006
- [6] Lighthill M J, Whitham G B. On kinematic waves II a traffic flow theory on long crowded roads [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1955, 229: 317~ 345.

- [7] Richard P L. Shockwaves on the highway [J]. *Operation Research*, 1955, 4: 42~ 49.
- [8] Payne H J. Models of freeway traffic and control [J]. *Simulation Council P proceedings*, 1971, 1(1): 51~ 61.
- [9] Michalopoulos P G, Yi P, Lyrintzis A S. Continuum modeling of traffic dynamics for congested freeways [J]. *Transportation Research- B*, 1993, 27(4): 315 ~ 332.
- [10] Zhang H M. A theory of non-equilibrium traffic flow [J]. *Transportation Research- B*, 1998, 32(7): 485~ 498.
- [11] Zhang H M. A non-equilibrium traffic flow model devoid of gas-like behavior [J]. *Transportation Research- B*, 2002, 36(3): 275~ 290.
- [12] Cremer M, Papageorgiou M. Parameter identification for a traffic flow model [J]. *Automatica*, 1981, 17: 837~ 843.
- [13] Messmer A, Papageorgiou M. METANET: a macroscopic simulation program for motorway networks [J]. *Traffic Engineering and Control*, 1990, 31: 466 ~ 470.
- [14] Papageorgiou M. Dynamic modeling, assignment, and route guidance in traffic networks [J]. *Transportation Research Part B*, 1990, 24(6): 471~ 495.
- [15] Kotsialos A, Papageorgiou M, Mangeas M, Haj-Salem H. Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control [J]. *Transportation Research Part C*, 2002, 10: 65 ~ 84.
- [16] 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.
- [17] 戴世强, 冯苏苇, 顾国庆. 交通流动力学: 它的内容、方法和意义 [J]. *自然杂志*, 1997, 19(4): 196~ 201.
- [18] Papageorgiou M, Blosseville J M. Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Penpherique in Paris Part I Modelling [J]. *Transportation Research Part A*, 1990, 24: 345 ~ 359.
- [19] Breton P, Hegyi A, Schutter B D, Hellendoorn H. Shock wave elimination/reduction by optimal coordination of variable speed limits [A]. *Proc. IEEE 5th Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC 02)* [C]. Singapore, 2002: 225~ 230.
- [20] 一种先进快速道路网交通流仿真软件 V1.0(软件著作权登记号: 2007SR00557).
- [21] 上海市市政工程管理局. 中心城快速路运行状况周报 [Z]. 2003, (1).

A Macroscopic Traffic Model for Dynamic Urban Freeway Network Control

GAN Hong-cheng

(Department of Transportation Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract Based on the analysis of the characteristics of urban freeway traffic in China, this paper improved the widely used macroscopic freeway network traffic model METANET, and proposed a macroscopic traffic model for dynamic urban freeway network control. The proposed model can better describe constrained out-flow at off-ramps, traffic flow behavior at mainstream origins, and travel flow behavior under the influence of dynamic speed limits. Simulation investigation of the model using real-world urban freeway traffic data at Shanghai, China, showed the satisfactory capability of the proposed model to describe the dynamic evolution of the urban freeway traffic. The proposed model provides a good tool for traffic control system design and analysis.

Key words Urban Freeways; Macroscopic Traffic Flow Model; Network Traffic; Dynamic Traffic Control