

文章编号: 1002-0268 (2004) 12-0093-03

动态 OD 反推理论中的关键问题研究

焦朋朋, 陆化普, 杨珊珊
(清华大学交通研究所, 北京 100084)

摘要: 针对 ITS 研究中动态 OD 矩阵难以获得的问题, 回顾动态 OD 反推理论的发展历程, 在此基础上明确了该领域研究中的四个关键问题: 状态变量的选择、系统方程的确定、OD 量与路段流量的关系和 OD 矩阵动态特性的体现。在对其进行分析的基础上提出每个关键问题的解决方法, 为动态 OD 反推理论的进一步研究奠定基础。

关键词: 动态 OD 反推; 状态变量; 系统方程

中图分类号: U491.1⁺12

文献标识码: A

Study on Key Issues of Theory for Dynamic OD Matrix Estimation

JIAO Peng-peng, LU Hua-pu, YANG Shan-shan

(Institute of Transportation Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

Abstract: Given the fact that dynamic OD matrix is difficult to get in ITS research, this paper reviews the evolution process of the theory of dynamic OD matrix estimation. Furthermore, this paper summarizes four key issues in the research: choice of state variables, system equation, relation between OD and traffic counts of road link, and dynamic characteristic of OD matrix. Based on the analysis of these key issues, the paper puts forward the method for the solution, and lays a foundation for further research of the theory.

Key words: Dynamic OD matrix estimation; State variable; System equation

作为解决交通拥挤的重要手段, 智能交通系统 ITS 受到了国内外交通专家日益广泛的关注。ITS 建立在对交通流实时以及未来分布形态正确分析的基础之上, 这一分析需要利用一定的动态交通需求预测模型, 而动态 OD 矩阵则是此类模型的基本输入数据, 它将直接影响到 ITS 系统的实时有效性。作为静态 OD 反推理论的延伸, 利用实时采集的路段流量及相关信息推求各个时段内 OD 交通量的动态 OD 反推理论在近 20 年内得到了众多研究者的关注。

纵观动态 OD 反推理论的发展历程, 尽管现有模型建立的思路有所不同, 但在建模过程以及设计算法求解的过程中, 都涉及到了状态变量的选择、系统方程的确定、OD 量与路段流量的关系以及 OD 矩阵动态特性的体现这四个方面的问题, 并针对这些问题做出了一定的简化和假设, 或采取某种方式进行了回避。这些问题也正是建立新的动态 OD 反推模型时必

须面对和解决的。

本文通过对动态 OD 反推领域既有研究成果的回顾, 从分析该理论的关键问题入手, 提出了相应的解决方法, 为该领域的研究理清思路, 并且为进一步的研究奠定坚实的基础。

1 状态变量的选择

要确定动态 OD 分布形式, 需要定义一组变量以描述其系统特征。引入卡尔曼 (Kalman) 滤波理论中状态空间的概念, 我们把这些变量称作状态变量。纵观已有的动态 OD 反推模型, 状态变量主要可以分为三类, 即 OD 量、划分参数和路径流量。

OD 量: 现有的模型多直接采用 OD 对 rs 间在时段 k 的 OD 交通量 t_{krs} 。

划分参数: $b_{ij}(k)$ 表示时段 k 内 O 点 i 的发生交通量中目的地为 j 的交通量的比例, 多用于参数优

收稿日期: 2003-10-09

作者简介: 焦朋朋 (1980—), 男, 安徽淮北人, 博士研究生, 主要从事交通规划理论研究与实际应用、交通管理、智能交通等方向研究。
(jiaopp01@mails.tsinghua.edu.cn)

化模型中的路口或高速路段的情况, 此时各节点的发生吸引量均可由观测值确定, 因此利用划分参数一方面可简化模型目标函数的表达, 另一方面约束形式也较为简单。

路径流量: 实时路径流量 f_k^r 表示在时段 t 内由 OD 对 r 的 O 点流入 r 间的路径 k 上的交通量。Wu (1997)^[1] 指出, 路径流量作为状态变量可以避免交通分配过程内含的误差, 因此多用于全路网模型。此外高速路段上由于不存在路径选择问题, 作为状态变量的划分参数也即相当于路径流量。

此外, 出于某些特殊考虑, 个别模型也采用了其它的状态变量。如 Ashok & Ben-Akiva^[2] 提出, 为了反映由人类活动的时空分布以及交通系统特征决定的交通分布模式, 引入了包含这类信息的 OD 矩阵初始值, 使用 OD 流量与相应时段最优历史值的偏差作为状态变量。

2 系统方程的确定

2.1 非基于交通分配的系统方程

在 Non-DTA-Based 动态 OD 反推理论中, 由于不涉及动态交通分配, 因此系统方程多直接利用划分参数的定义, 建立起交通发生量/流入量与交通吸引量/流出量间的动态关系, 多针对单个交叉口或小的高速路段。

这类系统方程的基本关系式如下

$$y_j(k) = \sum_{m=0}^M \sum_{i=1}^I \rho_{ij}^m(k) q_i(k-m) b_{ij}(k-m) \quad (1)$$

其中, $y_j(k)$ 为时段 k 内 j 点的交通吸引量/流出量; $q_i(k)$ 为时段 k 内 i 点的交通发生量/流入量; $\rho_{ij}^m(k)$ 为时段 $k-m$ 的 OD 量 $q_i(k-m) b_{ij}(k-m)$ 中对 $y_j(k)$ 有贡献的比例; M 为各 i 点的发生量对 $y_j(k)$ 有影响的之前时段数的最大值。

为了考虑走行时间的变化, 应用车队消散理论反映进出口流量的动态关系, 并对式(1)作了修正, 得到

$$y_j(k) = (1 - \alpha_j) y_j(k-1) + \alpha_j b_j^T q(k) \quad (2)$$

但上述模型仅适用于走行时间较短、因而符合几何分布的小型网络, 因此 Chang & Wu (1994)^[3] 在走行时间较长的高速路问题中采用走行时间的正态分布代替几何分布, 并对 $\rho_{ij}^m(k)$ 作了一定的简化, 得到了修正的系统方程。

$$y_j(k) = \sum_{i=1}^{J-1} \{ q_i [k - t_{ij}^+(k)] \theta_{ij}^+(k) b_{ij} [k - t_{ij}^+(k)] + q_i [k - t_{ij}^-(k)] \theta_{ij}^-(k) b_{ij} [k - t_{ij}^-(k)] \} \quad (3)$$

其中, 若令 $t_{ij}(k)$ 为自 i 驶向 j 并在时段 k 到达的平均走行时间, t_1 为单位时段长度, 则 $t_{ij}^-(k) = \text{int}[t_{ij}(k)/t_1]$, $t_{ij}^+(k) = t_{ij}^-(k) + 1$, $\theta_{ij}^+(k)$ 和 $\theta_{ij}^-(k)$ 即为相应时段的 $\rho_{ij}^m(k)$ 。

2.2 基于动态交通分配的系统方程

在 DTA-Based 动态 OD 反推理论中, 一般直接利用 OD 量作为状态变量, 并假设通过动态交通分配模型或仿真软件可得到分配矩阵 $\theta_{il}^m(k)$, 即 OD 对 r 间在时段 $k-m$ 的流量 $B_r(k-m)$ 对路段 l 在时段 k 的流量 $V_l(k)$ 的贡献。因此系统方程多直接利用此分配矩阵, 建立起 OD 量与路段流量间的动态关系, 一般针对全路网问题。

这类系统方程的基本关系式如下

$$V_l(k) = \sum_m \sum_r \theta_{lr}^m(k) B_r(k-m) \quad (4)$$

应该指出, 动态交通分配矩阵 θ_{lr}^m 不仅反映了在 OD 对 r 间的路径选择, 还反映了流量在路径上的推进过程, 实质上也就是走行时间。若采用动态路径流量作为状态变量, 回避了路径选择问题, 则只需考虑后者。由于走行时间在不基于交通分配的系统方程中也有所考虑, 因此可以认为, 基于交通分配的模型和不基于交通分配的模型并不是截然分开的。

3 OD 量与路段流量的关系

3.1 静态/动态网络中 OD 量与路段流量关系的不同

在静态 OD 反推问题中, 由于 OD 对间存在路径选择问题, 因此反映 OD 量与路段流量关系的分配矩阵函数 $A(\cdot)$ 有必要加以确定, 实际操作时 $A(\cdot)$ 可作为已知量给定, 也可在反推过程中结合交通分配模型进行计算。

应指出的是, 静态交通分配模型仅在进行路径选择时考虑走行时间(直接作为决策变量或作为广义费用的因素之一), 一旦路径确定后, 该路径上的交通量在 $t=0$ 时间内由 O 点到达 D 点, 且各组成路段的交通量都等于路径交通量。因此若假设 I_s 为由 O 点 r 指向 D 点 s 的路径的集合, 路径 $p \in I_s$, 则有

$$V = A(T) = \Delta P(C) T \quad (5)$$

其中, V 为观测路段流量组成的矢量, 设观测路段数为 L , 则 $V = [v_l]_{L \times 1}$; T 为 OD 矩阵的矢量形式, $rs \times 1$ 阶; $\Delta = [\hat{\phi}_p]$ 为多 OD 对间路径路段关系矩阵, 假如路径 p 包含路段 l , $\hat{\phi}_p = 1$, 否则 $\hat{\phi}_p = 0$; $P(C) = [p_{prs}(C)]$ 为路径选择矩阵; $p_{prs}(C)$ 为 OD 对 rs 间的流量经由路径 p 的比例; C 为路径广义费用, 由路径上各组成路段的

交通状况(主要是路段流量)确定。

与之相似,动态 OD 反推问题也同样涉及到 OD 量与路段流量间的关系,但考虑到网络的动态特性,即流量在网络上的移动需与路段的走行时间相一致,因此路径流量与路段流量间的关系不能简单的由网络的拓扑关系 Δ 决定。另一方面,考虑到流量在网络上的移动不是瞬时完成的,需要一定的时间,而在这一时间内,由于新流量的生成和原有流量的移动,网络上的交通状况可能发生了相当大的变化,最短路径也相应改变,因此若认为流量在移动过程中不断根据当前交通状况修正出行决策,也即在每个中途节点进行路径选择的话,路径流量本身 $P(C)T$ 也就失去了意义。

考虑到这一问题的复杂性,作者在下面探讨了动态交通分配理论在动态 OD 反推模型中实际应用的可能性,考察了不存在路径选择的问题中,路段以及路径走行时间的确定方法。

3.2 动态交通分配

动态交通分配理论的发展迄今已有 20 余年的历史。根据对出行者路径选择行为的假定,则可以分为动态用户平衡模型 DUE (Dynamic User Equilibrium) 和动态系统最优模型 DSO (Dynamic System Optimal)^[4,5]。

在动态 OD 反推理论中,一般使用动态用户平衡模型获得动态交通分配矩阵,且在理想状态下,这一过程应是一种反馈过程,即根据初始的动态交通分配矩阵进行动态 OD 反推,再将反推 OD 在交通网络上进行分配,获得新的动态交通分配矩阵,直至两次迭代的结果稳定。但由于迭代过程所需的时间较长,因此上述方法一般只能用于离线计算。

现有的动态 OD 反推算法中,如果需要考虑动态交通分配问题,一般采用动态 OD 矩阵的历史值,利用交通仿真软件或动态交通分配模型在网络上进行分配,将分配矩阵作为已知量给定,而不是把动态交通分配模型结合进反推过程中进行反馈计算。

3.3 不考虑路径选择的动态网络中走行时间的确定

在动态交通领域,走行时间一般可分为瞬时走行时间和实际/预测走行时间。

任一时刻的瞬时路段/路径走行时间即假设当前时刻的交通状况保持不变时,车辆穿越该路段/路径所需的走行时间,因此某时刻的瞬时路径走行时间即相应时刻的瞬时路段走行时间的总和。由于实际的动态交通网络中,道路交通条件是在不断变化的,因此这一假设下的走行时间虽然形式简单、易于确定,但却会引起相当的误差。

任一时刻的实际路段/路径走行时间即实际交通

状况下车辆穿越该路段/路径所需的走行时间,此时路径、路段走行时间的关系不能以简单的加和形式表示。定义 $\eta_p^s(t)$ 为 t 时刻从 r 出发的车辆经路径 p 驶至终点 s 所需的实际路径走行时间,我们可以采用递归算法求得 $\eta_p^s(t)$ 。假设路径 p 由节点 $r=1, 2, \dots, i, \dots, s$ 组成, $\eta_p^i(t)$ 为 t 时刻从 r 出发的车辆经由路径 p 驶至 i 所需的实际走行时间, $\tau_a(t)$ 为 t 时刻进入路段 a 的车辆的实际走行时间,则有

$$\eta_p^i(t) = \eta_p^{(i-1)}(t) + \tau_a[t + \eta_p^{(i-1)}(t)]$$

$$\forall p, r, i, \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (6)$$

其中,路段 $a = (i-1, i)$ 。

动态 OD 反推理论中,一般采用实际走行时间的概念,但实际走行时间的理论计算决定于多种因素,很难在模型中直接考虑。因此,目前的 OD 反推理论中均将走行时间作为已知量处理,或者假设可由试验车辆获得,或者采用车辆匀速行驶的假定,或者直接采用历史值。此外,Chang & Wu (1994)^[3] 提出了下述根据流密速关系利用观测数据计算路段走行时间的方法。

定义 L_j 为路段 j 的长度, $n_i(k)$ 表示时段 k 路段 i 上的平均车辆数, $U_i(k)$ 表示在时段 k 穿过路段 i 的起始断面的车辆数, $U'_j(k)$ 为在时段 k 经过路段 j 下游截面的车辆数, $Q_j(k)$ 为时段 k 路段 j 的平均交通流量, $\rho_j(k)$ 为时段 k 路段 j 的平均交通流密度, $V_j(k)$ 为时段 k 路段 j 的平均交通流速度, t_0 为观测时段长度,则根据交通流理论中的流密速关系可得到

$$V_j(k) = \frac{Q_j(k)}{\rho_j(k)} = \frac{L_j[U_j(k) + U'_j(k)]}{2n_j(k)t_0} \quad (7)$$

若 $L_j < V_j(k)t_0$, 则自 j 点出发并在时段 k 到达 $j+1$ 点的平均走行时间为

$$t_{j,j+1}(k) = \frac{L_j}{V_j(k)} = \frac{2n_j(k)t_0}{U_j(k) + U'_j(k)} \quad (8)$$

若 $L_j > V_j(k)t_0$, 确定整数 m' 满足约束(9)式,则路段走行时间见式(10)

$$\sum_{m=0}^{m'-1} V_j(k-m)t_0 \leq L_j \leq \sum_{m=0}^{m'} V_j(k-m)t_0 \quad (9)$$

$$t_{j,j+1}(k) = m't_0 + \frac{L_j - \sum_{m=0}^{m'-1} V_j(k-m)t_0}{V_j(k-m')} \quad (10)$$

4 OD 矩阵动态特性的体现

采用划分参数作为状态变量时,多数模型假设在一定数目的时段内划分参数保持不变。考虑到在同一交通高峰或平峰时段内,交通需求分(下转第 102 页)

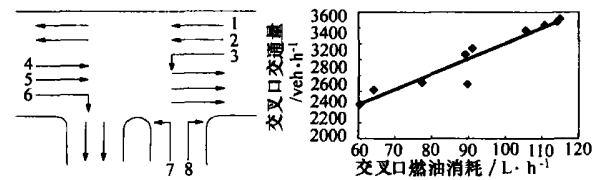


图 2 南京市北京东路-进 图 3 交叉口燃油消耗与
香河路交叉口示意图 交叉口交通量的关系



图 4 信号交叉口各种油耗所占比例

2%。
停车油耗过高的主要原因是该交叉口采用多相位，导致车辆停车时间过长。

(上接第 95 页)
布模式随时间变化较慢，这一假设不会产生过大的误差，是可接受的。此时，为了跟踪划分参数随时间的变化，可以采用两种方法。

4.1 滚动式方法 (Rolling Horizon)

根据经验或实际交通状况确定划分参数 $b_{ij}(k)$ 保持不变的时段数目 K ，定义初始的研究范围为时段 $k=1, 2, \dots, K$ ，利用这 K 个时段的路段流量观测值即可得到划分参数矩阵 $B(b_{ij})$ 。然后，采用滚动式方法对 $B(b_{ij})$ 进行更新，也就是说，将研究范围向前移动至少一个时段 $l(l \geq 1)$ ，在研究区间长度不变的情况下，研究时段变为 $k=l+1, l+2, \dots, l+K$ 。随着时间的延续，持续这一过程，即可得到划分参数随时间的变化情况。

4.2 折减系数法 (Discounting Parameter)

若动态 OD 反推模型在计算时段 k 的划分参数 $b_{ij}(k)$ 时，假定 $b_{ij}(k)$ 不仅是最后 K 个时段 $h=k-K+1, k-K+2, \dots, k$ 的均值，而是全部过去时段 $h=1, 2, \dots, k$ 的平均值。此时，引入折减系数 $d, 0 \leq d \leq 1$ ，将由时段 h 观测值定义的修正项 (如目标函数中时段 h 的误差项 $[y(h)-x(h)^T \beta(k)]^2$) 乘以 d^{k-h} ，则随着时间增加，越早的观测值折减的越多，因此对当前交通分布模式的影响越小，划分参数主要体现了最近观测量的影响，从而反映了 OD 分布模式随时间的变化情况。

5 结论

交叉口不仅是交通网络中的瓶颈地段，也是燃油消耗最多的地段。本文根据汽车燃油消耗微观模型，结合交通流理论，提出了一种信号交叉口燃油消耗的分析方法和步骤。实例分析显示，信号交叉口的燃油消耗与交通量之间有明显的相关性，论文同时给出了信号交叉口燃油消耗各组成部分所占的比例。

参考文献:

[1] 项乔君, 王伟. 汽车燃油消耗微观模型研究 [J]. 土木工程学报交通工程分册, 2002, 2(1).
[2] 王伟, 项乔君, 等. 城市交通系统能源消耗与环境影响分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
[3] National Council Highway Capacity Manual, Special Report 209 [R]. Washington: Transportation Research Board, 2000.
[4] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.

5 结论

现有动态 OD 反推模型建立的思路虽然有所不同，但基本都是基于路口、高速路段和全网这三种类型进行建立，而且在建模过程以及设计算法求解的过程中，都涉及到了以上几个方面的关键问题，因此作者在文中首先分析了动态 OD 反推理论的关键问题，在此基础上对这些关键问题的解决方法进行了进一步的分析，深入研究了模型中状态变量的选择、系统方程的确定、OD 量与路段流量的关系以及 OD 矩阵动态特性的体现，从而为动态 OD 反推理论的研究理清了思路。

参考文献:

[1] Wu W, Kachroo P. Dynamic Traffic Origin-destination Estimation Using Kalman Filter: An Application to Beltway Network with VMS Control [C]. Pittsburgh, Pennsylvania: Proceedings of SPIE-Photonics East, 1997, 3207: 242-249.
[2] Ashok K, Ben-Akiva. Dynamic Origin-destination Matrix Estimation and Prediction for Real-time Traffic Management Systems [C]. Proc. of the 12th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 1993: 465-484.
[3] Chang G, Wu J. Recursive Estimation of Time-varying O-D Flows from Traffic Counts in Freeway Corridors [J]. Transportation Research, 1994, B28: 141-160.
[4] 陆化普. 交通规划理论与方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
[5] Ran B Boyce. Dynamic Urban Transportation Network Models: Theory and Implications for IVHS [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1994.