

文章编号: 1002-0268 (2000) 05-0038-04

交通事故对城市交通网络的影响研究

石小法, 王 炜

(东南大学, 江苏 南京 210096)

摘要: 利用 UE 均衡模型和排队论的方法, 建立一种在交通事故状态下评价交通网络功效的模型。这种模型考虑了用户的动态交通属性, 揭示了交通信息在交通网络中的重要性。

关键词: 交通网络; 交通信息; 交通事故; 功效

中图分类号: U491.13

文献标识码: A

Study on Accident Effects in Urban Transportation Network

SHI Xiao-fa, WANG Wei

(Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China)

Abstract: This paper proposes a model to evaluate the efficiency of a network during the accident state using user-equilibrium model and queuing theory, which has considered the users' dynamic transportation behavior. The importance of information in urban transportation network is revealed.

Key words: Transportation network; Transportation information; Accident; Network efficiency

众所周知, 城市交通网络包含很多复杂的内外在属性。如网络的结构、交通量的需求水平、网络的通行能力、用户(道路使用者)的交通行为、交通事故的发生率等。而这些因素都会直接或间接地影响交通网络的功效。交通网络的功效是指交通网络的功能和效率, 即在合理时间内每个 OD 对运送客货的能力。合理时间是一个依赖于时空的复杂概念, 在不同的时间和不同的空间有不同的合理时间。除了以上提到的影响交通网络功效的因素以外, 还有一个必须考虑的因素, 这就是交通信息。很多事实已经证明交通信息对交通网络功效产生非常重要的影响(如用户的路径选择、交通流量的分配、道路的拥挤水平等)。交通信息是指来源于智能运输系统(ITS)或先进交通信息系统(ATIS)提供的实时交通信息。当交通网络处于正常状态(没有发生交通事故)时, 交通信息能够提高交通网络的功效, 当交通网络处于非正常状态(发生交通事故等)时, 交通信息可以诱导交通流量, 缓解交通事故地段的交通拥挤状况, 减少交通事故地

段的堵塞时间。因为影响交通网络功效的很多因素都具有动态性和随机性, 这种具有动态性和随机性的因素是无法用模型去准确描述的, 所以要准确地度量交通网络的功效是非常困难的。

对交通网络功效的研究, 已有很多交通学家做了大量的工作。如 Ball 等^[2] 对这方面的工作做了一个很好的综述。Sanzo 和 Soumis^[7] 提出了评价交通网络功效的一般框架, 主要考虑了交通事故发生的概率及如何合理分配交通流量; Dial^[4]、Cascetta 等^[3] 及 Mahmassani^[5] 考虑了随机均衡模型及动态交通配流问题; Amott 等^[1]、Mahmassani 和 Peeta^[6]、Sanzo 和 Miot^[8] 考虑了交通信息对交通网络功效的影响。文献[8]提出了在已知交通事故发生概率的条件下如何评价城市交通网络的功效, 利用了修正的静态 UE 均衡模型, 主要的缺陷是没有考虑用户的动态交通属性。

本文根据文献[8]的思想, 充分考虑用户的动态交通属性, 提出了评价交通网络功效的一般模型, 重点研究了在可获得交通信息情况下, 交通事故对交

收稿日期: 1999-11-18

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(59838310)

作者简介: 石小法(1960-), 男, 安徽太湖人, 博士研究生。

通网络功效的影响, 说明了交通信息在交通网络中的重要性。

1 一般评价模型

虽然准确地评价交通网络功效是非常困难的, 但可以通过测量能够反映交通网络功效的主要指标来达到评价交通网络的目的。经常使用的主要指标有道路通行能力、交通延误、OD 对之间的运行时间等。用符号 U 来表示交通网络的功效, U 的具体意义可表示以上各项主要指标。由于交通网络经常受到动态和随机因素的影响, 因此 U 为随机变量。当交通网络中发生突变事件 (交通事故等) 时, 必然会减少网络的通行能力, 增加交通延误, 因而降低交通网络的功效; 当交通网络处于正常状态, 由于交通需求量的变化及用户行为的变化, 也会使得交通网络的功效经常发生变化。因此, U 是一个与时间 t 有关的随机变量 $U(t)$ 。设 U 为离散随机变量

$$P(U=U_i(t))=p_i \quad i=0, 1, \dots, N$$

上式说明随机变量 U 可取 $N+1$ 个值, 取 $U_i(t)$ 的概率为 P_i ($i=0, 1, \dots, N$)。这就相当于将交通网络分为 $N+1$ 个状态, 第 i 个状态, 交通网络的功效为 $U_i(t)$ 。因此可得离散状态下交通网络功效的期望值

$$E(U)=\sum_{i=0}^N U_i(t) p_i \quad (1)$$

若 U 为连续随机变量, 设密度函数为 $p(x)$, 则在 $[0, T]$ 时间内, 交通网络功效的期望值

$$E(U)=\int_0^T U(x, t) p(x) dx \quad (1)'$$

上文 (1) 和 (1)' 式给出了评价交通网络功效的一般模型。在 (1)' 中, 很难找到 $p(x)$ 的表达式。本文仅考虑离散形式 (1), 在 (1) 中, 若 N 越大, 问题就越复杂。在实际交通网络中, 仅考虑交通网络的两种状态: $i=0$, 交通网络处于正常状态; $i=1$, 交通网络处于非正常状态 (如交通网络中发生突发事件、交通事故等, 有些文献也称为“失败状态”)。当交通网络处于正常状态时, 交通网络的功效为 $U_0(t)$, 若忽略一些次要因素后, 可认为交通网络在正常状态下, 发挥最大的网络功效, 且认为 $U_0(t)=U_0$ 与时间 t 无关。当交通网络处于非正常状态时, 交通网络的功效为 $U_1(t)$, $U_1(t) \leq U_0$; 在交通网络中, 交通事故会影响交通网络功效的发挥, 即减少交通网络的通行能力, 增加交通延误, 加重交通拥挤水平, 降低交通网络的经济效益和社会效益。

另外, 已知交通事故发生 (相当于交通网络处于非正常状态) 的概率 p_1 , p_1 可以根据以往的数据和经验来确定。对于一个交通网络, 若 p_1 较小, 即发生交通事故的可能性较小, 网络处于正常状态的可能性大。若 p_1 较大, 说明交通网络经常发生交通事故, 此时, 这种交通网络有待于改进和管理。

2 在可获得交通信息条件下, 交通网络处于非正常状态下的评价模型

交通网络处于非正常状态, 即交通网络中有突发事件发生。设 t_0 时刻, 在交通网络某一路段 l_0 上发生交通事故, 此时交通网络处于非正常状态, 直到交通事故被排除网络恢复到正常状态为止。若没有交通信息系统 (ITS 或 ATIS) 为用户提供交通信息, 则用户不会知道 l_0 路段上已经发生交通事故, 原来准备经过 l_0 路段的用户仍然经过 l_0 路段, 只有当他到了 l_0 路段上才发现有交通事故, 从而引起排队现象, 而用户不知道交通事故的严重程度及排队队列的长度, 更不知道交通事故何时被排除, 因而交通事故会严重影响整个或部分交通网络的功效。若交通事故非常严重而引起 l_0 路段被关闭, 这就相当于交通网络中少了一条路段 l_0 , 若总的 OD 流量不变, 则必然会引起其它路径 (路段) 上的流量增加, 从而增加网络的交通负荷和增大路阻, 降低交通网络的功效。

本文考虑不是非常严重的交通事故对交通网络产生的影响。

设在 l_0 上由于交通事故而出现瓶颈现象, 在事故地点的流出量为 μ_0 , 小于事故发生前 l_0 上的流量 λ_0 。交通网络上用户均可获得 ATIS 提供的交通信息, 但 ATIS 提供的信息要滞后于交通事故的发生, 设滞后时间为 t_1-t_0 , 即在 t_1 时刻, 用户获得 l_0 路段上发生交通事故的信息。从 t_1 时刻后, 用户可从 ATIS 获得有关交通事故的实时信息, 如事故地段的队列长度、排除事故的进展情况等。

λ_0 和 μ_0 的确定。通过求解交通网络在正常状态下的 UE 均衡模型可得到 λ_0 ; 通过求解交通网络在非正常状态下的 UE 均衡模型可得到 μ_0 。在求解 UE 均衡模型中, 非正常状态下 l_0 上的通行能力小于正常状态下 l_0 上的通行能力, 因此有 $\mu_0 < \lambda_0$ 。一般来说, 网络处于非正常状态下, l_0 上的通行能力是很难得到的, 这与排除交通事故的进展有关, μ_0 只是一种近似值。

在用户获得发生交通事故的信息之前, 流向 l_0 的流量仍然为 λ_0 , 由此可得在 t_1 时刻, 事故地点上

游的队列为

$$L_q(t_1) = (t_1 - t_0)(\lambda_0 - \mu_0) \tag{2}$$

在(2)式中可以看到， λ_0 是常数， μ_0 是依赖于交通事故的严重程度， $t_1 - t_0$ 是交通信息滞后于交通事故的时间。 $L_q(t_1)$ 的大小取决于 $t_1 - t_0$ 和 μ_0 的大小，交通事故越严重， $L_q(t_1)$ 越大，交通信息滞后的时间越长， $L_q(t_1)$ 越大。由此可以看出，交通信息在交通网络中的重要性。

用户的动态交通属性。用户在 t_1 时刻获得交通事故的实时信息，知道发生交通事故的地段、事故的严重程度、事故地点前车辆的队列长度 $L_q(t_1)$ ，那些想要经过 l_0 路段的用户和那些想要经过属交通事故影响的路段的用户，就要根据交通信息来重新考虑自己的出行方案。出行方案一般有两个步骤：第一，是否出行，涉及到用户的出行目的及出行目的的重要性等复杂因素；第二，若出行，是否改变出行路线，涉及到用户的心理行为、事故地点前的队列长度、改变路径所引起的交通延误等因素。本文研究出行方案的第二步。考虑用户根据交通事故地点上游的队列长度来决定是否改变出行路径。若队列较长，改变出行路径的用户就会较多，因此 l_0 上的流入量变小，引起队列变短；若队列较短，改变出行路径的用户就会较少，因此 l_0 上的流入量变大，引起队列变长。这是一种动态的变化过程。排除交通事故需要有一段时间，若这段时间较短，说明交通事故很快被排除，则事故地点上游的车辆队列很快消失，交通网络恢复正常；若这段时间较长，则事故地点上游的车辆队列长度将会趋于稳定。由于用户可获得交通信息，知道事故地点上游队列的变化情况，当队列很长时，就不会有用户去排队等待，所以队列长度将会趋于稳定。稳定的队列长度是根据潜在使用该路段 (l_0) 的用户对交通延误的预期来决定的。若改变路径，将会增加交通延误 (不妨设为 $t_{改}$)；若仍然使用路段 l_0 ，由于排队现象也会增加交通延误 (不妨设为 $t_{队}$)。潜在用户将会根据 $t_{改}$ 来决定可接受的 $t_{队}$ ，当 $t_{队} > t_{改}$ 时，将改变行驶路径；当 $t_{队} < t_{改}$ 时，将排队等待。显然，不同OD对的用户会有不同的 $t_{改}$ ，这里只能根据交通网络结构，取 $t_{改}$ 的均值，从而得到稳定队列长度的期望值为 $M = t_{改}(\lambda_0 - \mu_0)$ 。以下分两种情形进行讨论。

情形1 $L_q(t_1) > M$ ，说明交通信息滞后时间较长，致使在 $t_1 - t_0$ 时间内，事故地点上游的队列长度长于用户预期的队列长度。在 t_1 时刻后，潜在使用 l_0 的用户将改变交通路径， l_0 上的流入量为0，

则 $t(t > t_1)$ 时刻的队列长度为

$$L_q(t) = L_q(t_1) - \mu_0(t - t_1) \tag{3}$$

令 $L_q(t) = M$ ，求得

$$t_2 = t_1 + \frac{L_q(t_1) - M}{\mu_0} \tag{3}'$$

在 t_2 时刻，队列长度达到用户的预期值 M ；在 t_2 时刻以后，队列保持稳定长度 M ， l_0 上的流入量等于事故地点的流出量 μ_0 。如图1所示。

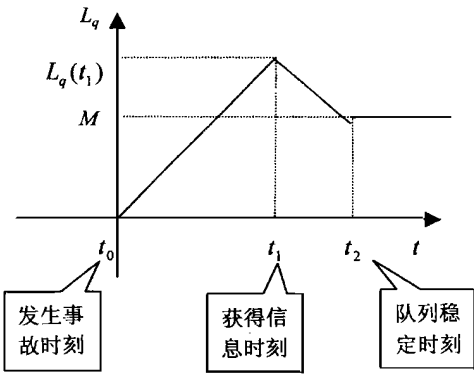


图1 $L_q(t_1) > M$ 的情形

从图1可知，在 t_0 到 t_2 之间，因排队现象，用户增加的最大交通延误为 $L_q(t_1) / \mu_0$ ； t_2 时刻以后，用户增加的交通延误为 M / μ_0 ；在 t_2 时刻以后，将有 $\lambda_0 - \mu_0$ 的流量改变行驶路径。

情形2 $L_q(t_1) < M$ ，说明交通信息滞后时间较短，在 $t_1 - t_0$ 时间内，事故地点上游的队列长度短于用户预期的队列长度 M 。用户将根据队列的长度作出是否改变路径的决定。若队列 $L_q(t_1)$ 很短，用户可能不会改变路径，仍然选择 l_0 ，即 l_0 的流入量为 λ_0 ；队列将会变长；随着队列的增长，改变路径的用户将会增多。设 t 时刻 l_0 的流入量为 $\lambda(t)$ 。

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0 & t_1 \leq t \leq t_1' \\ \frac{\lambda_0}{1 + t - t_1} & t_1' < t \end{cases} \tag{4}$$

按照(4)式，有 t 时刻的队列长度为

$$\begin{aligned} L_q(t) &= \int_{t_1}^t (\lambda(t) - \mu_0) dt + L_q(t_1) \\ &= \begin{cases} (\lambda_0 - \mu_0)(t - t_1) + L_q(t_1) = (\lambda_0 - \mu_0)(t - t_0) & t_1 \leq t \leq t_1' \\ \lambda_0 \ln(1 + t - t_1) - \mu_0(t - t_1) + L_q(t_1) & t > t_1' \end{cases} \end{aligned} \tag{5}$$

令 $L_q(t) = M$ ，求出 t_2 使得 $L_q(t_2) = M$ 。当

$t_1 \leq t \leq t_2$ 时, 队列长度按 (5) 式计算; 当 $t > t_2$ 时, 队列长度为稳定长度 M 。(4) 式应修改为

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0 & t_1 \leq t \leq t'_1 \\ \frac{\lambda_0}{1+t-t_1} & t'_1 < t < t_2 \\ \mu_0 & t \geq t_2 \end{cases} \quad (4)'$$

(5) 式只在 $t_1 \leq t \leq t_2$ 时成立, 当 $t > t_2$ 时, $L_q(t) = M$ 。注意 t'_1 是按照 $L_q(t_1)$ 的大小来决定的。若 $t'_1 = t_1$, 说明队列长度 $L_q(t_1)$ 较长, 用户对排队现象作出反应, 即逐渐改变出行路径, 相当于减少 λ_0 的流入量; 若 $t'_1 > t_1$, 说明队列长度 $L_q(t_1)$ 较短, 在 t_1 到 t'_1 之间, 用户仍然没有改变出行路径的意识, 直到队列长度达到 $L_q(t'_1)$ 时, 用户开始对排队现象作出反应。这里充分体现了用户的交通动态属性。以上情形如图 2 所示。

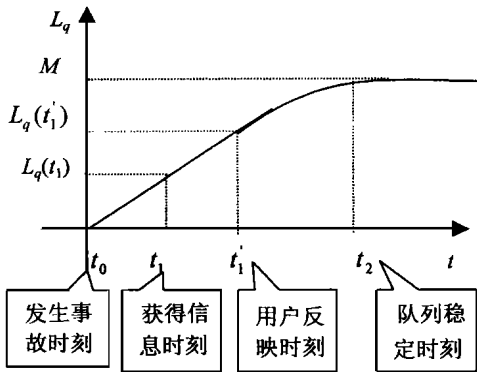


图 2 $L_q(t_1) < M$ 的情形

由图 2 可知, 在 t_0 到 t'_1 之间, 用户增加的最大交通延误为 $L_q(t'_1) / \mu_0$; 在 t'_1 到 t_2 之间, 用户增加的最大交通延误为 M / μ_0 ; t_2 时刻以后, 所有用户增加的交通延误为 M / μ_0 。

下面讨论当交通事故被排除后, 交通网络恢复正常状态需要多长时间。

设在 t^* ($t^* \geq t_2$) 时刻交通事故被排除, 此时, 事故地点的车辆流出量将会急剧增加, 设流出量为 μ_1 , 由于事故地点上游有车辆在等待通过, 因此 μ_1 将会达到 l_0 路段的实际通行能力。 λ_0 为交通网络处于正常状态下 l_0 上的流量, 有 $\mu_1 > \lambda_0$ 。计算

$$\zeta = \frac{M}{\mu_1 - \lambda_0} \quad (6)$$

(6) 式中的 ζ 表示等待队列 (N 辆车) 消失的时间。但在实际中, 队列消失的时间会小于 ζ , 这是因为在队列消失期内 l_0 上的流入量会小于 λ_0 。(6) 式为用户给出了队列消失时间的最保守估计, 即交通

网络在交通事故被排除后, 最多经过 ζ 时间就可以恢复到正常状态。

若排除事故的时间 $t^* < t_2$, 则 (6) 式变为

$$\zeta = \frac{L_q(t^*)}{\mu_1 - \lambda_0} \quad (6)'$$

式 (6)' 对情形 1 和情形 2 均成立。

以上分析还说明了交通信息对交通事故所引起的交通总延误具有很大影响。由图 1 和图 2 可知, 情形 1 的交通总延误大于情形 2 的交通总延误, 即交通信息滞后于事故发生时刻的时间越长, 则交通总延误就会越大。因此, 及时提供交通信息对提高交通网络功效有非常重要的意义。

3 结束语

本文主要研究了在可获得交通信息的条件下, 交通事故对城市交通网络功效的影响。如交通事故所引起的排队现象、增加的交通延误、事故排除后排队队列的消失时间等。揭示了交通信息在交通网络中的重要性。本文模型适用于对高速公路网由于交通事故所产生瓶颈现象的研究。

参考文献:

- [1] Amott R, Palma A, Lindsey R. Does Providing Information to Drivers Reduce Traffic Congestion?. *Transportation Research part A*, 1994, 25 (5): 309—318.
- [2] Ball M, Coulbourn C, Provan J S. *Network Reliability*, Handbook in OR & MS, Elsevier Science BV, Amsterdam, The Netherlands, 1995: 673—745.
- [3] Cascetta E, Cantarella G E, Gangi M. Evaluation of Control Strategies Through a Doubly Dynamic Assignment Model. *Transportation Research Record*, 1991, 1306: 1—13.
- [4] Dial R B. A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model which Obviates path Enumeration. *Transportation Research*, 1971: 83—111.
- [5] Mahmassani H S, Peeta S. Network Performance Under System Optimal and User Equilibrium Dynamic Assignment: Implications for Advanced Traveler Information System. *Transportation Research Record*, 1993, 1408: 83—93.
- [6] Mahmassani H S, Peeta S, Hu T, Ziliaskopoulos A K. Dynamic Traffic Assignment with Multiple User Classes for Real-Time ATIS/ATMS Applications. Working Paper, the University of Texas at Austin, 1993b.
- [7] Sanso B, Soumis F. Communication and Transportation Networks Reliability using Routing Models. *IEEE Transportation Reliability*, 1994, 40 (1): 29—38.
- [8] Sabro B, Milot L. Performability of a Congested Urban Transportation Network when Accident Information is Available. *Transportation Science*, 1999, 33 (1): 68—79.