

平行路径网络中信息对交通行为的影响研究

吴文祥, 黄海军

(北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100083)

摘要: 将一个用于分析两条路径网络中信息对交通行为影响的工作推广至一般平行路径结构的交通网络中, 建立了随机均衡和确定性均衡两种分配模型, 分析了信息发布对平均出行成本的影响, 并研究了表征行为随机程度的模型参数与系统性能指标之间的关系。

关键词: 交通信息; 交通行为; 均衡分配

中图分类号: U121

文献标识码: A

文章编号: 1007-9807(2003)02-0012-05

0 引言

许多研究人员发现公路网络的利用效率不高, 例如, King 等人的研究表明, 距离的 6% 和时间的 12% 被浪费掉了^[1,2]。Jeffery 认为驾车者平均多行驶了 6% 的不必要距离^[3]。因此, 现有的交通网络还有较大的能力提高空间。通过向用户提供交通信息, 诱导好交通流, 就可以提高网络的运行效率。有关模拟结果显示, 交通信息系统可以给有信息获得能力的驾车者带来 9% 到 14% 的收益, 如果考虑突发性的交通拥挤, 有信息获得能力的驾车者的收益还会更多^[4]。Kanafani 和 Al-Deek 运用简单的理论模型发现, 交通信息系统可使公路网络进入最佳使用状态, 产生 4% 的净收益^[5]。

然而, 交通信息提供的有效性是普遍的吗? 作者在文献[6]中对两条路径的简单网络进行了初步研究, 发现交通信息提供的有效性不是普遍的, 而是有条件的。本文进一步推广文献[6]的工作, 将两条路径的网络扩展至一般平行路径结构的网络, 用解析模型在线性成本函数的条件下研究这个问题, 从理论上冷静地看待交通信息提供的有效性。

1 模型与分析

设网络中有 m 条平行路径, 路径 r 的行驶成本函数为 $C_r(x_r) = a_r x_r + b_r$, 其中: a_r 是路径 r 的拥挤系数, 与通行能力成反比; b_r 是路径 r 的自由行驶费用。设 $a_i > a_j, b_i < b_j, \forall i > j$, 这表明路径 i 比路径 j 长, 但通行能力要小一些。这种线性成本函数在研究交通事故信息发布的有效性时也使用过^[7], 可以基本反映拥挤特征。当总交通量为 N 时, 网络的个人平均行驶成本为

$$TAC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m x_i (a_i x_i + b_i) \quad (1)$$

其中

$$\sum_{i=1}^m x_i = N \quad (2)$$

首先假设 m 条路径的交通状态不向外发布, 驾车者根据自己的经验估计选择路径, 此时可以用 Logit 随机均衡分配模型来描述这种经验行为^[8~10], 则路径 i 上的流量为

$$x_i^s = N \frac{\exp(- (a_i x_i^s + b_i))}{\sum_{i=1}^m \exp(- (a_i x_i^s + b_i))} \quad (3)$$

s. t. (2)

式中: s 表征路径选择行为的随机程度, s 越小, 路

收稿日期: 2002-07-09; 修订日期: 2003-03-12.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(79825101); 中国科学院访问学者资助项目.

作者简介: 吴文祥(1972—), 男, 安徽贵池人, 研究生, 现为北方工业大学教师.

径选择的随机性越强; 越大, 路径选择就越明智. 变量的上标 s 表示“随机 (stochastic)”.

由式(3) 可得

$$x_i^s \exp(-\beta(x_i^s + b_i)) = x_j^s \exp(-\beta(x_j^s + b_j)) \quad \forall i, j \quad (4)$$

显然 $x_i^s = x_j^s$ 不可能; 其次 $x_i^s > x_j^s$ 也是不可能的, 否则从式(4) 推出 $\beta(x_i^s + b_i) < \beta(x_j^s + b_j)$, 这是自相矛盾的; 再考虑 $x_i^s < x_j^s$, 从式(4) 推出 $\beta(x_i^s + b_i) > \beta(x_j^s + b_j)$, 这是可能的. 所以有 $x_i^s < x_j^s$, 且

$$\beta(x_i^s + b_i) > \beta(x_j^s + b_j) \quad (5)$$

假设引入了先进的交通信息系统, 所有路径的交通状态向外发布, 驾车者可以根据实际行驶费用来选择最佳路径. 根据 Wardrop 的用户均衡原则^[11], 系统将达到一个确定性均衡状态, 此时有

$$\beta(x_i^d + b_i) = \beta(x_j^d + b_j) \quad \forall i, j \quad (6)$$

s. t. (2)

式中变量的上标 d 表示“确定性 (deterministic)”.

从式(5) 和(6) 可以推出:

存在且仅存在一个 $h, 1 < h < m$, 当 $i > h$ 时, $\beta(x_i^s + b_i) > \beta(x_i^d + b_i)$, 即 $x_i^s > x_i^d$; 当 $i = h$ 时, $\beta(x_i^s + b_i) = \beta(x_i^d + b_i)$, 即 $x_i^s = x_i^d$.

这似乎表明, 由于随机择路行为的盲目性, 与信息周全时比较, 通行能力小的路径上(即 a_i 值较高的路径) 多了一些“不必要”的流量($x_i^s - x_i^d, i > h$), 而通行能力大的路径上少了一些“应该有”的流量($x_i^d - x_i^s, i = h$). 流量分布从(3) 变成(6) 一定合理吗? 或者, 交通信息发布一定有效吗? 下面分析个人平均成本在信息提供前后的变化.

令随机均衡状态的个人平均成本为 TAC^s , 确定性均衡状态的个人平均成本为 TAC^d , 有

$$TAC^d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m x_i^d (\beta(x_i^d + b_i)) \quad (7)$$

$$TAC^s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m x_i^s (\beta(x_i^s + b_i)) \quad (8)$$

当 $i > h$ 时, 令 $x_i^s = x_i^d + x_i, x_i > 0$; 当 $i = h$ 时, 令 $x_i^s = x_i^d - x_i, x_i > 0$, 有

$$\beta(x_i^s + b_i) = \beta(x_i^d + b_i) \quad (9)$$

再利用关系式 $\beta(x_i^d + b_i) = \text{常数}, \forall i$, 有

$$TAC^s - TAC^d = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=h+1}^m x_i^2 + \sum_{i=h+1}^m \beta(x_i^d + b_i) x_i - \sum_{i=1}^m \beta(x_i^d + b_i) x_i \right] \quad (10)$$

式(10) 表明: 由于信息提供, 通行能力小的路径转移出部分流量, 即 $x_i(h+1 \dots i \dots m)$, 这部分流量令自己获得内部决策收益 $\sum_{i=h+1}^m \beta(x_i^2)$, 让已经存在的流量 $x_i^d(h+1 \dots i \dots m)$ 获得外部收益 $\sum_{i=h+1}^m \beta(x_i^d) x_i$; 但是, 信息提供却让通行能力大的路径多获得一部分流量, 它们令已经存在的流量 $x_i^d - x_i(1 \dots i \dots h)$ 遭受外部损失 $\sum_{i=1}^h \beta(x_i^d - x_i) x_i$. 所以, 仅从式(10) 还看不出信息提供前后总成本的变化是上升还是下降的.

式(10) 可以进一步写为

$$TAC^s - TAC^d = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^m \beta(x_i^2) + \sum_{i=1}^h \beta(x_i^d) x_i - \sum_{i=h+1}^m \beta(x_i^d) x_i \right] \quad (11)$$

式(11) 表明, 交通信息系统能否取得以及取得收益的大小取决于成本函数的参数和 $x_i, \forall i$, 而 x_i 又与 x_i^s 相关, x_i^s 与参数 b_i 有关, 放映了驾车者对成本的认识能力. 在式(11) 右边的括号中, 第 1 项是正的, 本文重点研究后面两项.

若 $b_i = \text{常数}(\forall i)$, 即网络中所有路径的长度相等(但通行能力不相等), 由式(9), 有 $\sum_{i=1}^h \beta(x_i^d) x_i - \sum_{i=h+1}^m \beta(x_i^d) x_i = 0$, 因此, $TAC^s - TAC^d > 0$, 这表明信息提供是有效的, 它降低了网络的平均个人行驶费用, 整体上产生了正效益.

当 $b_i > b_j$, 按照前面的假设, 令 $b_i > b_j(\forall i > j)$, 易知 $\left(\sum_{i=1}^h \beta(x_i^d) x_i - \sum_{i=h+1}^m \beta(x_i^d) x_i \right) < \left(\sum_{i=1}^h \beta(x_i^d) x_i - \sum_{i=h+1}^m \beta(x_i^d) x_i \right) < 0$, 因此, $TAC^s - TAC^d > 0$ 不一定成立. 只有当 $\sum_{i=1}^m \beta(x_i^2) > \left(\sum_{i=h+1}^m \beta(x_i^d) x_i - \sum_{i=1}^h \beta(x_i^d) x_i \right)$ 时, $TAC^s - TAC^d > 0$ 才成立, 信息提供才是有效的, 否则信息提供产生负效益, 下面举例证明.

例 1 设网络中有三条并行路径, 各条路径的出行成本函数分别为 $C_1(x_1) = 1.032x_1 + 1, C_2(x_2) = 1.346x_2 + 1.808, C_3(x_3) = 2x_3 + 3.194$, 总流量 $N = 6, \beta = 1$ 时的随机均衡流量分

布为 $x_1 = 3, x_2 = 2, x_3 = 1$, 个人平均出行费用为 $TAC^s = 4.080$. 引入先进交通信息系统以后, 系统达到确定性用户均衡状态, 流量分布为 $x_1 = 3.373, x_2 = 1.985, x_3 = 0.642$, 个人平均出行费用为 $TAC^d = 4.479$. 可见, 交通信息系统的引入提高了网络的个人平均出行费用, 它是无效的.

2 个人出行费用和参数 的关系

黄海军对 Logit 运量随机均衡模型的算法和参数校正问题进行了研究^[9]. 下面研究参数 与驾车者的出行费用之间的关系.

设参数从 变为 , 不失一般性, 令 $\alpha < \beta$. 首先研究路径流量在不同参数值时的变化, 对于任意路径 i , x_i^s 表示参数为 值时求得的路径流量, x_i^s 表示参数为 值求得的路径流. 根据(4), 有

$$x_i^s \exp(\alpha (i x_i^s + b_i)) = x_j^s \exp(\beta (j x_j^s + b_j)) \quad \forall i, j \quad (12)$$

s. t. (2)

可以推出下面的重要性质.

性质 1 $\forall i, x_i^s \exp(\alpha (i x_i^s + b_i)) < x_i^s \exp(\beta (i x_i^s + b_i))$

证明 假设 $x_i^s \exp(\alpha (i x_i^s + b_i)) > x_i^s \exp(\beta (i x_i^s + b_i))$, 因为 $\alpha < \beta$, 所以 $\forall i$, 都有 $x_i^s > x_i^s$, 这与守恒条件(2) 矛盾.

性质 2 $x_m^s > x_m^s, x_1^s < x_1^s$.

证明 假设 $x_m^s < x_m^s$, 有 $x_m^s \exp(\alpha (m x_m^s + b_m)) > x_m^s \exp(\beta (m x_m^s + b_m))$, 又因为 $x_m^s < x_m^s$, 所以 $x_m^s \exp(\alpha (m x_m^s + b_m)) < x_m^s \exp(\beta (m x_m^s + b_m))$, 结合性质 1 和式(12), 得 $x_i^s \exp(\alpha (i x_i^s + b_i)) < x_i^s \exp(\beta (i x_i^s + b_i))$, 所以, $\forall i < m$, 有 $x_i^s < x_i^s$, 这显然与守恒条件(2) 相矛盾. 同理可证明 $x_1^s < x_1^s$.

性质 3 存在唯一的 $k, 1 < k < m$, 当 $i > k$ 时, $x_i^s > x_i^s$; 当 $i < k$ 时, $x_i^s < x_i^s$.

证明 从 x_1^s 到 x_m^s 和从 x_1^s 到 x_m^s , 均是单调下降的序列, 根据性质 2, 有 $x_1^s < x_1^s$ 和 $x_m^s > x_m^s$, 显然, 这两个序列各自形成的插值曲线一定会相交, 且仅相交一次, 对应交点横坐标的上整数, 就是要寻找的 k , 当 $i > k$ 时, $x_i^s > x_i^s$; 当 i

k 时, $x_i^s < x_i^s$. 证毕.

性质 3 说明, 存在这样的临界路径 k , 通行能力比路径 k 小的路径上的交通流量随着 变小而增大, 通行能力比路径 k 大的路径上的交通流量随着 变小而减少.

根据性质 3, 当 $i > k$ 时, 可令 $x_i^s = x_i^s + x(i)$, 当 $i < k$ 时, 令 $x_i^s = x_i^s - x(i)$, $x(i)$

0, 显然有守恒条件 $\sum_{i=1}^k x(i) = \sum_{i=k+1}^m x(i)$. 可以推出

$$TAC^s(\alpha) - TAC^s(\beta) = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^m i x_i^2 + 2 \left(\sum_{i=k+1}^k (i x_i^s + b_i) x(i) - \sum_{i=1}^k (i x_i^s + b_i) x(i) \right) - \left(\sum_{i=k+1}^m b_i x(i) - \sum_{i=1}^k b_i x(i) \right) \right] \quad (13)$$

式(13) 的右边, 第 1 项为正值, 由式(5) 和守恒条件可知, 第 2 项也是正值, 但第 3 项是负值. 如果 $b_i = b_j (\forall i, j)$, 则有 $TAC^s(\alpha) - TAC^s(\beta) > 0$, 表明信息收益随参数 值的减少(即路径选择的随机性上升) 而上升. 也有相反的情况, 下面举例说明.

例 2 设网络中有三条平行路径, 各条路径的出行成本函数分别为 $C_1(x_1) = 1.032x_1 + 1, C_2(x_2) = 1.346x_2 + 1.808, C_3(x_3) = 2x_3 + 3.194$, 总流量 $N = 6, \alpha = 100\ 000$ 时的随机均衡流量分布为 $x_1 = 3.158, x_2 = 2.113, x_3 = 0.729$, 个人平均出行费用为 $TAC^s = 4.652$. $\alpha = 1$ 时的随机均衡流量分布为 $x_1 = 3, x_2 = 2, x_3 = 1$, 个人平均出行费用为 $TAC^s = 4.414$. 可见, 参数 变小, 网络个人平均出行费用降低了, 即信息的有效性随路径选择的随机程度上升而下降了.

所以, 除特殊情形 ($b_i = b_j (\forall i, j)$) 之外, 信息提供的有效性与表征行为随机程度的参数之间的关系不是单调的, 取决于多种参数和具体的网络结构.

3 诱发新的交通需求

当 $TAC^s - TAC^d > 0$ 时, 信息系统的引入降低

了个人出行费用,长远地看,必然会诱发新的交通需求,从而可能导致新一轮交通拥挤.为了便于研究,先找出临界诱发量,即诱发的新交通需求所带来的个人行驶费用的提高量等于信息系统引入所带来的个人行驶费用的降低量.设诱发的交通需求为 x , i 路径上的新增交通需求为 x_i , 即有

$$x = \sum_{i=1}^m x_i$$

显然,对应于新交通需求下的确定性用户均衡状态,有

$$i(x_i^d + x_i) + b_i = j(x_j^d + x_j) + b_j \quad (14)$$

让式(14)减去式(6),得

$$i x_i = j x_j \quad (15)$$

式(15)实际上就是个人平均成本的提高量.结合

$$x = \sum_{i=1}^m x_i, \text{ 可解出 } i x_i = j x_j = \frac{x}{\sum_{i=1}^m 1/i}.$$

令 $TAC^s - TAC^d = \frac{x}{\sum_{i=1}^m 1/i}$, 临界诱发量就是

$$x^* = (TAC^s - TAC^d) \sum_{i=1}^m 1/i \quad (16)$$

所以,当诱发的交通流 $x < x^*$ 时,交通信息系统的引入仍然降低网络个人平均行驶费用,降低量为 $(TAC^s - TAC^d) - x / \sum_{i=1}^m 1/i$; 当诱发的

交通流 $x > x^*$ 时,交通信息系统的引入不能降低网络的个人平均行驶费用,反而会增加网络的个人平均行驶费用,达不到减缓拥挤的目的.此外,由关系 $a_i x_i = a_j x_j$ 和 $i > j$ 可知, $x_i < x_j$, 即新诱发的交通量多数进入通行能力较大的路径.

4 结 论

本文在线性成本函数的条件下,研究交通信息提供对交通行为的影响,解析地得出一些重要结论.交通信息系统不一定总是能够降低驾车者的个人行驶费用,它取决于网络的实际交通情况和具体结构.在交通行为的随机程度越大的网络中引入信息系统,效果也不一定就越好.引入信息系统会诱发新的交通需求,可能达不到预期的减缓交通拥挤的目的.本文的研究结论可以指导交通信息系统的建设.作者正在将研究工作进一步推广至一般格子结构的网络中,虽然不能像本文一样推导出解析解,但初步的数值模拟结果亦显示不能盲目发展交通信息系统,要因时、因地、因情^[12,13].关于交通信息诱导系统对出行选择的定性分析,可以参见文献^[14].将本研究引入包含公交方式的交通系统中,探讨信息和收费对交通行为的联合影响,是非常有意义的^[15].

参 考 文 献:

- [1] King G F. Driver performance in highway tasks [J]. Transportation Research Record, 1986, 1093: 1—11
- [2] King G F, Mast T S. Excess travel: Cause, extent, and consequences [J]. Transportation ResearchB, 1987, 25(4): 191—201
- [3] Jeffery D J. Route guidance and in-vehicle information systems[A]. in Bonsall P W, Bell M ed. Information Technology Applications in Transport [M]. Utrecht: VUN Science Press, 1986. 319—351
- [4] Tsuji H, Takahashi R, Yamamoto Y. A stochastic approach for estimating the effectiveness of e route guidance system and its related parameters [J]. Transportation Science, 1985, 19(4): 333—351
- [5] Kanafani A, Al-Deek H. A simple model for route guidance benefits [J]. Transportation Research Record, 1991, 1111: 126—134
- [6] 吴文祥, 黄海军. 交通信息对交通行为影响的评价模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(10): 81—83
- [7] 黄海军, 吴文祥. 交通事故信息发布的有效性分析 [J]. 系统工程理论方法应用, 2001, 10(4): 298—301
- [8] 黄海军. 城市交通网络平衡分析理论与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1994
- [9] Huang H J. A combined algorithm for solving and calibrating the stochastic user equilibrium assignment model [J]. Journal of the Operational Research Society, 1995, 46: 977—987
- [10] 黄海军, 顾昌耀. Fisk 运量随机配流模型的特性和参数校正 [J]. 系统科学与数学, 1997, 17: 376—380
- [11] Wardrop J. Some theoretical aspects of road traffic research [J]. Proceeding of the Institute of Civil Engineers, 1952, 1(2): 325—378

- [12] Lam W H K, Huang H J. A multi-class dynamic user equilibrium route and departure time choice problem in queuing networks with advanced traveler information systems [J]. Transportation Research C, accepted.
- [13] Yang H, Huang H J. Modeling user adoption of advanced traveler information systems: a control theoretic approach for optimal endogenous growth [J]. Transportation Research C, accepted.
- [14] 林 震, 杨 浩. 交通信息诱导系统对出行选择的影响分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2002, (4): 21—24
- [15] 黄海军, Bell M B H, Yang H. 公共与个体竞争交通系统的定价研究 [J]. 管理科学学报, 1998, 1(1): 17—23

Study on behavior impacts caused by travel information systems in parallel route network

WU Wen-xiang, HUANG Hai-jun

School of Economics & Management, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China

Abstract: This paper further investigates the impacts caused by travel information systems on traffic behavior through extending the authors' previous work to a general urban transportation network with parallel routes. The stochastic and deterministic user-equilibrium assignment models are used to carry out the analyses, i. e., computing the changes of average travel costs before and after the introduction of the information system. We also study how the parameter of the logit-based stochastic model affect the average individual travel cost, and how the information system induce potential traffic demand.

Key words: traffic information; travel behavior; equilibrium assignment