

文章编号: 1002-0268 (2004) 09-0082-04

道路阻抗函数理论与应用研究

王元庆¹, 周伟², 吕连恩¹

(1. 长安大学交通工程研究所, 陕西 西安 710064; 2. 交通部科学研究院, 北京 100029)

摘要: 在广义交通阻抗概念下, 提出综合路阻函数模型。把时间、费用、交通流、收费站和城市节点影响通过参数标定建立起综合函数关系, 避免了一般综合性路阻函数费用与时间相互转换过程中, 需要时间价值参数这一难定量的指标。将建立的综合路阻函数模型, 通过等式关系转化成交通规划软件TransCAD内部函数形式, 以实现模型与交通规划软件结合应用, 弥补了本文建立的路阻函数没有对交叉口进行专项考虑的缺陷。并用河北唐山的实例说明该函数模型的可行性。结果表明本文方法较常用的BPR曲线拟合交通量误差有显著降低。

关键词: 路阻函数; 极大似然估计法; 标定; TransCAD软件

中图分类号: U491

文献标识码: A

Theory and Application Study of the Road Traffic Impedance Function

WANG Yuan-qing¹, ZHOU Wei², LV Lian-en¹

(1. Chang'an University Traffic Engineering Institute, Shaanxi Xi'an 710064, China;

2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Under the conception of general traffic impedance, this paper brings out the aggregative road impedance function model to build up the aggregative function relationship of time, toll, traffic flow, the effect of tollbooth and city node as a whole through calibrating parameters. This paper avoids calibrating time value parameter which is difficult to confirm during the complex process of the mutual conversion between the toll and time as usual. In order to apply the general traffic impedance model and traffic planning software together, this paper converts the general traffic impedance model into the built-in function of TransCAD through formula transformation. The defect of unconsidered crossing problem is atoned specially. An example of Tangshan in Hebei province is given to demonstrate the effect of this paper's idea. The error data of distribution traffic flow by this new method is reduced significantly than common BPR curve. The results show that this paper developed a feasible, improved traffic impedance method.

Key words: Road impedance function; Maximum likelihood estimation method; Calibration; TransCAD software

0 前言

交通阻抗是进行交通分配和路网规划的重要参数, 是路网属性抽象的重要内容之一, 也是OD流拟合同题研究的重点。广义的交通阻抗(又称为延误、费用)本文定义为: 人、车、路三方面因素对交通出行的阻力作用。狭义的交通阻抗一般是指车辆出行在道路上所花费的行程时间。交通阻抗函数, 简称路阻函数, 就是把交通阻抗量化的数学表达式。本文在

许多学者^[2~5]研究的成果基础上, 综合考虑行程时间、交通量、费用和城市节点因素影响, 通过对函数模型参数的标定建立起适合道路网的综合路阻函数模型, 并将时间价值性与费用相统一, 使路阻函数更加直观的反映道路阻抗情况。同时也避免了一般综合性路阻函数将费用与时间相互转换中需要确定时间价值参数的过程。因为时间价值本身是一个比较抽象的概念, 将其定量化比较困难。而本文建立的路阻函数经实例应用具有较好的可行性与适用性。

1 路阻函数模型建立

基于道路网络（如市域路网）交通分配路径的选择理论，本文提出如下路阻函数模型

$$F_i = k_1 X_i + k_2 Y_i \quad (1)$$

式中， X_i 为时间阻抗，包括路段上消耗时间和因收费引起的延误，其中路宽等路段上的自身物理条件和交通流本身的特点引起的交通拥挤所导致的时间延误也包括在内； Y_i 为费用阻抗，包括运输费用和道路的收费； k_1 、 k_2 为参数。

若路网中某两个 OD 点有 n 个路径，其中第 i 个可行路径由 m_i 个路段连接而成，则路径 i 由公式 (1) 进行累加推导可得

$$F_i = k_1 \sum_{o=1}^{m_i} X_{i_o} + k_2 \sum_{o=1}^{m_i} Y_{i_o} \quad (2)$$

1.1 X_i 的计算

若路网中某两个 OD 点有 n 个路径，其中第 i 个可行路径由 m_i 个路段连接而成，则经对式 (2) 进行累加推导可得

$$X_i = T_i + T_{S_i} + T_c \quad (3)$$

$$\text{其中，} \textcircled{1} T_i = \frac{t_0}{\alpha_1} \left[1 + \left(\frac{V_i}{C_i} \right)^\beta \right]$$

函数 T_i 是国家九五交通科技重点攻关项目公路通行能力研究中，结合我国大规模实际交通调查数据对 BPR 函数进行重新标定建立的模型（见公式 (4)）而得来的。

$$\begin{cases} U = \frac{\alpha_1 U_s}{1 + \left(\frac{V_i}{C_i} \right)^\beta} \\ \beta = \alpha_2 + \alpha_3 \left(\frac{V_i}{C_i} \right)^3 \end{cases} \quad (4)$$

式中， T_i 为平均行驶车速为 U 的路段 i 起终点间的路段行驶时间，min； U 为路段的平均行驶车速，km/h； U_s 为各等级公路的设计车速，km/h； α_1 、 α_2 、 α_3 、 β 为回归参数与修正系数， α_1 、 α_2 、 α_3 的取值见文献 [10]； t_0 为基于设计车速的路段行驶时间，min； V_i 为路段的交通量，veh/h； C_i 为路段的通行能力，veh/h。

$$\textcircled{2} T_{S_i} = t_j + t_z + t_p - t_x$$

式中， T_{S_i} 是由于一处公路收费所引起的延误； t_j 为车辆正常行驶减至进行排队的时间，计算公式为 $t_j = V_0 \beta / 6a_1$ ； V_0 为正常行驶车速，km/h； a_1 为减速度， m/s^2 ，通常取 $a_1 = 2.5 m/s^2$ ； t_z 为车辆缴费后

车速达到正常行驶车速的时间，计算公式为 $t_z = V_0 / 3.62a_2$ ； a_2 为加速度， m/s^2 ，通常取 $a_2 = 1.5 m/s^2$ ； t_p 为车辆在收费站处平均排队等待时间，对于高等级公路收费站的排队服务时间，其满足多路并列的单通道服务的排队论模型（有关经典排队论理论详见文献 [1]、文献 [2] 等），因此用排队论中 $M/M/N$ 系统来描述是合理的。其中前两个 M 分别表示泊松输入、负指数分布服务， N 表示有 N 个服务台同时服务，在本文的模型中即为单向交通收费口个数； t_x 为无收费站时车辆按正常车速通过收费站影响区域（通常定为 700m）所花费的时间，min。

$$\textcircled{3} T_c = 60^\circ w_1 \cdot w_2 \sqrt{v} \quad (5a)$$

$$\text{或 } T_c = 60^\circ \pi \cdot R \sqrt{v} \quad (5b)$$

式中， T_c 为表示经过城市节点的时间延误，min； w_1 为城市类别系数，建议大城市 $w_1 = 1.3$ ，中等城市 $w_1 = 1.15$ ，小城市 $w_1 = 1.1$ ； w_2 为非直线系数，在交通流方向有主干道时， $w_2 = 1.0$ ，对于复杂的路网，过境路线不明确，根据路网结构的不同， w_2 取不同值：方格网 $w_2 = 1.41$ ，环形放射式 $w_2 = 1.1 \sim 1.2$ ，自由式 $w_2 = 1.2 \sim 1.4$ ，混合式 $w_2 = 1.2 \sim 1.4$ ； v 为经过城市的平均车速，km/h； R 为城市外环等效半径，km。

路网抽象时，城市常常被抽象成一个节点。本文将城市节点的延误用式 (5) 来确定。其中，(5a) 式适用于没有环路的城市节点，而对于有环路的城市，按 (5b) 式把车辆路经城市时走的路径看成是半个外环的长度。

1.2 Y_i 的计算

$$Y_i = \sum_{m=1}^5 f_{im} (W_m + B_i) L_i \quad (6)$$

式中， m 为收费车型分类数，根据交通部的最新收费车型分类标准，把车型分为 5 大类，即 $m = 1 \sim 5$ 分别表示大、小客车和大、中、小货车； f_{im} 为路段上述 5 类车型数量； W_m 表示路段上述 5 种车型的收费率，元/km； B_i 为路段 i 自由流量 5 类车型的单位里程行驶费用，元/km； L_i 为路段 i 的长度，km。

2 路阻函数模型解析

2.1 函数构成分析

本文提出的路阻函数模型由两大部分构成， X_i 为时间阻抗，包括路段上消耗时间和因收费引起的延误，其中路宽等路段上的自身物理条件和交通流本身

的特点引起的交通拥挤所导致的时间延误, 都在 BPR 函数中反映出来; Y_i 为费用阻抗, 包括运输费用和道路的收费, 在建立函数时可采用目前比较适应我国公路收费现状应用比较广泛的封闭式收费模式 (即道路全封闭, 起点买票或取票终点验票或付费) 来建立函数关系, 也可以根据某条路具体情况对函数收费费用部分进行模型修改。

2.2 量纲问题

路阻函数值 F_i 根据具体路网强调阻抗作用的不同, 可取时间值与费用值两种, 由 k_1 、 k_2 建立起函数量纲上的统一。如果路段 i 的路阻函数值 F_i 为时间值量纲 \min 时, 费用值的量纲是元, 则 k_2 的量纲是 $\min/\text{元}$, 此时 k_1 为无量纲参数; 反之如果路段 i 的路阻函数值 F_i 费用值量纲为元时, 则 k_1 的量纲为元 \min , k_2 为无量纲参数。

2.3 模型的求解问题

函数模型的求解关键在于标定参数 k_1 、 k_2 。对于参数 k_1 、 k_2 的标定问题, 属于参数估计中的点估计问题。由于参数 k_1 、 k_2 与其母体矩的关系具有不确定性, 而参数 k_1 、 k_2 的取值可以看成是在路径选择约束范围内, 对各条路径选择情况概率最大时 (在对方程求一阶导数的零点中反映出来), 参数 k_1 、 k_2 所对应的值。因此本文采用极大似然估计法进行函数模型的参数标定。再根据目前交通分配应用较广泛的 Logit 模型, 由上述公式 (2) 的前提条件, 则选择第 i 个可行路径的概率为

$$P_i = \frac{e^{-bF_i}}{\sum_{j=1}^n e^{-bF_j}} \quad (7)$$

式中, P_i 为选择路径 i 的概率; F 为交通阻抗; b 为无量纲分配参数, 由论证表明^[8,9], 令 $b=1.0$ 时的 Logit 模型与基于 Logit 模型缺点改进的 Dail 算法所得的路径选择概率完全相同。因此本文计算中 b 的值取 1.0, 应用 Logit 模型建立起路阻值与路径选择概率之间的关系。

3 路阻函数模型中参数 k_1 、 k_2 极大似然估计值的确定

设某 OD 点间的总交通量为 Q , 其之间有 n 个路径, 每个路径上分配的交通量分别为 Q_1 、 Q_2 、... Q_n , 则有 $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$, 每辆车的路线选择相互独立, 概率为 P_i , 把 Q 辆车的出行路径选择看成是 Q 重贝

努力 (Bernoulli) 分布, 根据极大似然估计原理, 该 OD 点间车辆的 n 个出行选择路径的联合概率分布为

$$L_n = \frac{Q!}{Q_1! Q_2! Q_3! \dots Q_n!} \prod_{i=1}^n P_i^{Q_i}$$

为了求解参数 k_1 、 k_2 极大似然估计值方便, 把 L_n 的公式两边取对数得

$$\ln L_n = \sum_{i=1}^n Q_i \ln P_i + \ln \left(\frac{Q!}{Q_1! \dots Q_n!} \right)$$

对 k_θ 求导, 则有

$$\frac{\partial \ln L_n}{\partial k_\theta} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{P_i} \frac{\partial P_i}{\partial k_\theta} = 0, \theta = 1, 2 \quad (8)$$

把式 (7) 代入式 (8) 得

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{P_i} e^{-F_i} \left[\frac{\partial F_i}{\partial k_\theta} \sum_{j=1}^n e^{-F_j} - \sum_{j=1}^n \frac{e^{-F_j}}{\partial k_\theta} \frac{\partial F_j}{\partial k_\theta} \right] = 0 \quad \theta = 1, 2 \quad (9)$$

从式 (9) 中解出 k_1 、 k_2 的极大似然函数值, 就完成了对式 (1) 和式 (2) 的路阻函数的标定。基于简单的求解原则, 取 $n=2$, 即只有两个可选路径时, 则 $Q = Q_1 + Q_2$, (9) 式左端可化为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{e^{-F_1}}{e^{-F_2}} \quad (10)$$

可见, 由式 (10) 得, 当 $n=2$ 时, 方程组 (9) 只有一个独立的方程, 无法求出 k_1 、 k_2 , 应该再找一 OD 点, 且其之间也只有两个可选路径, 再建立一个形式如 (10) 的方程组成关于 k_1 、 k_2 的方程组求解; 或者选取 OD 点间的可选路径个数 $n \geq 3$, 此时公式 (9) 中 e^{-F_i} 项消不掉, 也可以建立求解 k_1 、 k_2 的方程组, 但此法计算量大求解困难, 在实际计算中, 一般采用第一种计算方法, 即选取典型的 OD 点对进行计算。

4 道路阻抗函数与 TransCAD 结合应用

为了将建立的阻抗模型应用于实践, 本文通过等式 (11) ~ (13) 的转换, 将建立的路阻函数转化成 TransCAD 内部函数形式, 并将路阻函数所需相关数据添加到 TransCAD 线层的数据图视中, 使 TransCAD 调用广义路阻函数, 以利用交通规划软件的计算功能提高模型应用效率。式 (11) ~ (13) 中, 等式左边参数为 TransCAD 内部函数参数, 具体含义见参考文献 [11] 中交通分配模块中关于用户自定义路阻函数说明部分; 等式右边的参数与前述各式中参数相同。

$$\varphi = k_1 t_0 U / (\alpha_1 L_i) = k_1 U / (\alpha_1 U_s), \quad \text{且 } \alpha_1 = 1 \quad (11)$$

$$k_i = k_1 (T_{si} + T_c) \quad (12)$$

$$\delta = k_2 \sum_{m=1}^5 f_m (w_i + B_i) \quad (13)$$

5 实例

采用唐山OD调查数据对建立的模型理论进行验证, 经过选取多个OD点对进行参数标定, 最终采用 k_1 和 k_2 的值为: 对于道路等级较低的路网区域(南北方向大部分路网)取 $k_1=0.036$ 、 $k_2=0.175$; 对于道路等级较高路网区域(东西方向分区之间路段)取 $k_1=0.011$ 、 $k_2=0.008$ 。最后将 k_1 和 k_2 添加到数据图视中应用到交通分配模型中。为了对比本文建立的路阻函数应用效果, 在相同条件下, 也给出应用BPR函数进行交通分配的结果, 并且这些效果图都是OD分配的直接结果, 没有进行OD数据修正, 以便于反映路阻函数对OD分配的影响, 具体见图1~图4。由图1、图2可以看出交通分配效果的差异性, 说明路阻函数对交通分配效果具有很大影响; 从图3、图4可以看出OD数据分配结果与现状路段交通量之间的相对误差, 本文建立的阻抗函数分配误差明显小于BPR函数分配误差。分配结果数据在TransCAD的数据图视中可以得出, BPR函数分配的结果各路段相对误差主要集中在0.2~0.3之间, 而应用本文建立的广义路阻函数分配结果的相对误差主要集中在0.05~0.15。可见, 本文建立的路阻函数能够较现实地反映交通流在路网中的分布情况。



图1 应用本文路阻函数分配效果



图2 应用BPR函数交通分配效果



图3 应用本文建立的路阻函数OD分配结果与调查路段交通量相对误差



图4 应用BPR函数OD分配结果与调查路段交通量相对误差

6 结论

(1) 针对我国目前道路交通状况和结合前人的研究成果, 基于广义交通阻抗概念建立了新的综合性路阻函数模型, 当实际的道路基本参数确定后, 就可以对模型参数进行标定, 从而避免了时间与费用的相互转化计算过程。

(2) 用极大似然理论对模型参数的标定, 事实证明与实际的交通分配情况误差较小。

(3) 当交通量较小, 收费公路长度较长时, 收费站口处的时间延误可以忽略不计, 建议收费站处的时间延误占总阻抗时间延误比例很小时(如1%以下), 可以忽略其影响。

(4) 在模型的建立中, 某些无法定量的交通阻抗影响因素, 如信息的诱导作用、驾驶员的心理作用、天气状况等, 目前还是无法将这些因素进行考虑, 需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 徐吉谦, 主编. 交通工程总论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [2] 熊桂林, 查伟雄. 道路交通阻抗的排队论分析方法 [J]. 系统工程, 2002 (5): 64-65.
- [3] 王伟, 张庆涛, 李伟, 曹洪. 收费公路交通阻抗分析方法 [J]. 中国公路学报, 1998 (8): 50-54.
- [4] 陈建阳, 杨佩昆. 交通分配中行程时间、车辆运营费用及道路收费的相互转换 [J]. 中国公路学报, 1994, 7 (2): 34-35.
- [5] 靳文舟, 张杰, 张旭莉. 路阻函数的最大似然标定法 [J]. 公路交通科技, 1996 (12): 25-27.
- [6] 谭满春, 徐建闽, 唐松安. 诱导阻抗均衡公路网交通分配模型 [J]. 系统工程, 2001 (9).
- [7] 汪荣鑫. 数理统计 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- [8] 刘灿齐, 编著. 现代交通规划学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [9] 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.
- [10] 王伟, 邓卫, 杨琪, 等著. 公路网络规划建设与管理方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [11] TransCAD Transportation GIS Software Version 4.0 Demo User's Guide [Z]. 中国代理: 北京友好创达科技有限公司, 2002.
- [12] 周刚, 常成利. 高速公路收费站通行能力研究 [J]. 公路交通科技, 2001 (6).