

文章编号: 1002-0268 (2006) 05 0143-04

基于网络均衡的运输通道客流分配模型

谢亚伟

(河南省建设投资总公司, 河南 郑州 450008)

摘要: 根据各运输方式的经济技术特征, 构建了运输通道的时空运营网络来描述各运输方式的竞争性。认为旅客的时间价值 (VOT) 服从某种分布, 旅客的广义出行费用取决于票价和时间两个参数。运用城市交通分配网络均衡思想, 提出基于网络的区域运输通道多交通模式客流分配模型, 建立了用户最优和系统最优两个目标函数, 并给出了模型的求解方法。用一数值示例验证了模型的有效性。

关键词: 综合运输; 网络均衡; 区域运输通道; 客流分配; 多交通模式

中图分类号: U116.3

文献标识码: A

Trip Assignment Model for Transportation Corridor Based on Network Equilibrium

XIE Ya-wei

(Henan Provincial Investment Company, Henan Zhengzhou 450008, China)

Abstract: Based on operational characteristics of each transportation mode, a time-space operational network of a regional transportation corridor, which can reflect mode competition, is constructed. Let the probability density function of the distribution of VOT across the user population be represented by certain distribution, the cost of the system users be composed of time and fare, using the idea of network equilibrium, the trip assignment model for transportation corridor is developed. Two objective functions of UE and SO are formulated, and the solving algorithm is presented. With a practical example, the model is tested.

Key words: Integrated transportation; Network equilibrium; Regional transportation corridor; Trip assignment; Multi mode

0 引言

运输通道是由多种交通方式构成, 连接多个客货流生成地而形成的廊道状地域经济空间系统。按空间层次可分为国际运输通道、国内大经济区间的区际运输通道、城际运输通道, 城市内部的交通走廊。运输通道是经济走廊或都市连绵带生成和发展的基础条件。目前, 多交通模式的旅客出行分配一般采用多项式对数模型, 即 Logit 模型^[1]。但该模型有许多局限性, 如不能反映各运输方式的运能限制及时间空间上的竞争特性; 效用函数确定依赖于个体的出行行为调查, 参数估计非常困难; 解决多 OD 点对分配问题比较困难^[2]。本文提出的基于网络均衡的客流分配模

型, 构建了能反映运输通道运营特征的时空运营网络, 旅客的广义出行费用取决于票价、时间两个参数, 认为旅客时间价值 (VOT) 是随机变量, 克服了 Logit 模型的上述局限。

1 运输通道的交通网络描述

用图论中的图来描述交通网络非常方便。图 1 可用来描述区域运输通道的交通网络。有如下约定: ① 两类节点: 城市节点和车站节点; 两种路段: 主路段和联结路段 (图中, 车站节点: 1~20; 城市节点: A~E); ② 城市既是出行生成点也是目的地, 旅客运输只能在车站间完成; ③ 联结路段是城市至车站间的路段, 联接路段的耗时代表了旅客候车和延误时间的

收稿日期: 2005-02-28

作者简介: 谢亚伟 (1963-), 男, 安徽灵璧人, 高级工程师、高级经济师, 主要研究方向为交通投资与管理. (xyw@hntc.com.cn)

总和；④主路段是各运输方式车站间的路段，其上车辆的行使时间定义为旅客的车内时间；⑤提供两种服务：相邻城市间的慢车服务和跨多个城市的快车服务；⑥每次出行只选择一种交通方式，且中途不改变。⑦国铁（CR）、民航（AR）、高速铁路（HSR）3种运输方式的车速和发车班次相对固定，公路（HWY）出行状况与路段车流量、车速相关。

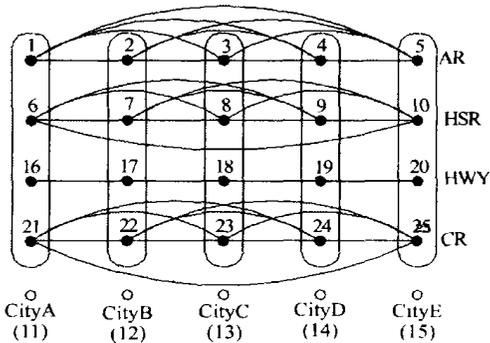


图 1 某区域运输通道的交通网络构成

Fig 1 Base network forming of a transportation corridor

该网络描述能反映某城市的旅客流入和流出总量，可用节点、路段约束条件表示车站、运营区间的旅客发送能力和运能。两种路段区分了车内时间和候车时间。该网络图具有可扩充性，如增加通道内的城市节点数目，增加新的运输方式和运营线路等。

2 构建各运输方式的时间-空间运行网络图

图 1 只给出了运输通道内各种运输方式的服务线路，只有将上述基本网络转换成动态的时间-空间运营网络，才能反映各运输方式时间-空间上的竞争特性，揭示出行总需求与各种运输方式总供给之间动态的平衡关系。

为表述方便，以国有铁路为例说明时间-空间运行网络的构建方法，并做如下假定：通道内各城市间的距离为 100km，国铁的运行速度为 100km/h，将一天分为 9 个时段（6:00AM ~ 24:00PM），每时段 2h，记为 P1, P2, P3, ..., P9。为了用静态网络的架构表述通道运营的动态特性，用时段下标区分不同时刻的同一节点，如 20_{p4}表示 P4 时段的车站节点 20。因此，200km 运营里程（A 城 ~ C 城、B 城 ~ D 城等）可在同一时段完成，400km 则要到第 3 个时段才能到达。图 2 和图 3 分别描述了 P1 时段国有铁路的时间-空间运营网络和旅客可选择的出行路径。至于其他时段，构建时空运营图方法相同，只要知道其运行速度，就可以构建时间-空间运营网络和旅客出行路径网络图。综合各运输方式的子网络就是旅客出行路径

选择的完整网络。

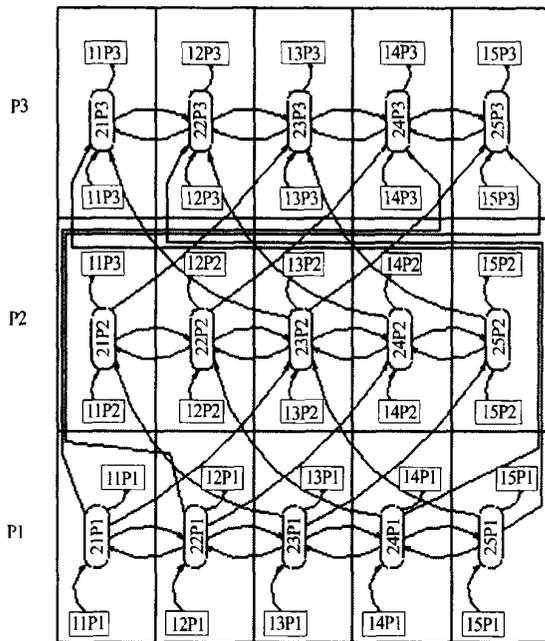


图 2 国有铁路 3 个时段的时空运营图

Fig 2 CR system time-space operation diagram for three time periods

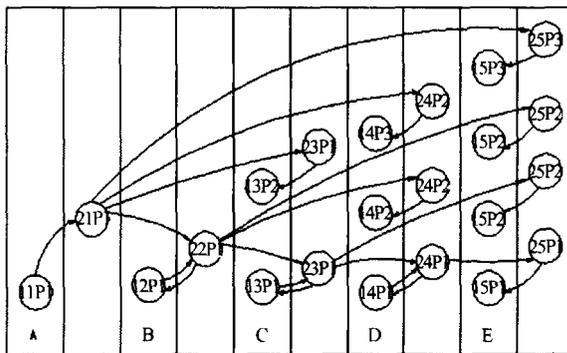


图 3 P1 时段乘客可选择的出行路径

Fig 3 Service paths for trip-makers of time period one

考虑到数学语言描述问题的便利，将上述带有时间下标的节点转换成普通的静态网络节点。节点转换采用式 (1)。节点转换后，所有的节点、路段和旅客的出行路径都可以用新的网络节点号来标识。

$$N = n + (pn - 1) \times K \quad (1)$$

式中，N 为新节点号；n 为图 1 中基本网络节点号；pn 为时段下标；K 为基本网络的总节点数。

3 基于网络均衡的旅客出行分配模型

假设旅客都选择广义出行费用最小的路径，且预先知道每个路径的广义出行费用。基于上述假设，可得到基于网络均衡思想的区域运输通道客流分配模

型。需强调的是,对于区域运输通道的配流问题,路径选择的实质是交通方式选择,核心问题是求解使用某种运输方式的总客流量,个体的具体交通方式选择行为是次要的。

3.1 旅客出行的广义费用和时间价值

一般的网络均衡分配模型只考虑时间一个参数,且认为旅客出行的时间价值是常量,这与实际情况不符,在做旅客出行分配时误差很大。本文提出用户出行广义费用的双参数模型,见式(2)。

$$C_m(\tau) = f_m + [T_m + W(x_m, F_m)]\tau \quad (2)$$

式中, C_m 为运输方式 m 的广义出行费用; f_m 为运输方式 m 的直接费用,主要指票价、通行费; T_m 为旅客的车内时间; $W(x_m, F_m)$ 为旅客的候车和延误时间,与出行人数 x_m 、发车频率 F_m 有关; τ 为旅客的 VOT 值。一般认为旅客的时间价值是随机量,其概率密度函数呈对数正态分布^[3]。

$$f(\tau) = \frac{1}{\beta \sqrt{2\pi}} \tau^{-1} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \tau - \alpha}{\beta}\right)^2\right] \quad (3)$$

$0 < \alpha < \infty, \beta > 0$

式中, α, β 与 τ 的平均值 μ 和标准差 σ 有关。

$$\alpha = \ln \mu - \frac{1}{2} \beta^2, \beta^2 = \ln \left[1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right] \quad (4)$$

3.2 基于网络均衡的旅客出行分配模型

假定各运输方式的时间-空间运营图、各运输方式票价、运能、出行需求 OD 矩阵、 $f(\tau)$ 参数已知。定义以下集合,总节点集 $N = \{i, j \mid i, j = 1, 2, 3, \dots, k\}$; 城市节点集 $C = \{r, s \mid r, s \in N \text{ and } r, s = 1, 2, 3, \dots, k\}$; 运输方式 m 的车站节点: $S^m = \{p^m, q^m \mid p^m, q^m \in N \text{ and } p^m, q^m \neq r, s\}$ 。借鉴城市交通分配理论中的用户最优和系统最优概念,提出式(5)、(6)作为运输通道最优出行分布的目标函数^[4]。其含义为按某种方式配置运输资源,使网络的总出行费用最小和资源利用效率最高。数学表达式为

$$\min_{x_{i,j}^{r,s}} \int_{\tau} \sum_{r,s} \sum_{i,j} [f_{i,j}^{r,s} + \tau f_{i,j}^{r,s}(x_{i,j}^{r,s})] d\tau \quad (5)$$

$$\min_{x_{i,j}^{r,s}} \int_{\tau} \sum_{r,s} \sum_{i,j} [f_{i,j}^{r,s} + \tau f_{i,j}^{r,s}(x_{i,j}^{r,s})] \times x_{i,j}^{r,s}(\tau) d\tau \quad (6)$$

约束条件: ①正流量条件 $x_{i,j}^{r,s} \geq 0$; ②路段流量小于总流出量, $x_{i,j}^{r,s} \leq x_{r,s}^m$; ③流量连续条件, a) $x_{r,i}^{r,s} = x_{i,j}^{r,s} = x_{j,s}^{r,s} \quad \forall i, j, r, s$; b) $x_{r,i} = \sum_s \delta_{i,s}^s x_{r,i}^{r,s} \quad \forall i$; c) $x_{j,s} = \sum_r \delta_{r,s}^r x_{j,s}^{r,s} \quad \forall j$; ④运能约束条件: a) $x_{i,j}^{r,s} \leq K_{i,j}^{r,s}$; b) $x_{r,i}^{r,s} \leq M$; c) $x_{j,s}^{r,s} \leq M$ 。

式中, $f_{i,j}^{r,s}$ 为 OD 点为 r, s , 使用 i, j 节点间路径出行的

固定费用,这里指票价或通行费; $t_{i,j}^{r,s}$ 为 OD 点为 r, s , 使用 i, j 节点间路径出行的时间消耗; τ 为 VOT 值; $x_{i,j}^{r,s}$ 为 OD 点为 r, s , 使用 i, j 节点间路径出行的客流量; $K_{i,j}^{r,s}$ 为路径上某种运输方式的运能; $\delta_{i,j}^{r,s}$ 为路段使用条件; M 为足够大的数。

上述目标函数为非线性规划模型,约束条件为线性。可用 T2 算法求解。

4 模型的求解方法^[5~7]

4.1 最短路径分配

T2 交通分配模型的最短路径分配用于求解如下问题: 路网中路段的广义出行费用已知,出行的 VOT (时间价值)是随机分布的交通分配问题。式(7)、(8)为可行的分配结果。

$$v_{od}(a) = \sum_{(e|j_e=d)} x_{oe}(a) - \sum_{(e|i_e=d)} x_{oe}(a) \quad (7)$$

$$v_{od}(a) = v_{od} \circ f_{od}(a) \quad (8)$$

式中, $v_{od}(a)$ 为从起点 O 到终点 D , 时间价值为 α 的总出行数。 $x_{oe}(a)$ 为起点为节点 O , 时间价值为 α 的路段 e 上的流量。 $f_{od}(a)$ 为从起点 O 到终点 D , 时间价值为 α 的概率密度函数。

某旅客时间价值 $L < \alpha < U$, 使用某种运输方式 m 出行的概率为 $\text{Prob}(m) = \int_L^U f_{od}(a) da$ 。

4.2 T2 算法

T2 算法是求解双参数均衡配流问题的一种有效算法,主要有以下 5 个步骤。

Step A: 初始化

$$\bar{X}^0 = \arg \min_{X \in X} G[\bar{X} \mid \bar{c}^0, \bar{t}^0]$$

$$x_e^0 \leftarrow \int_A x_e(a) da \quad u_e^0 \leftarrow \int_A a x_e(a) da \quad (9)$$

Step B: 梯度(迭代)方向

取路段的费用和时间成本为某一定值, $c_e^0 \leftarrow c_e(x_e^0), t_e^0 \leftarrow t_e(x_e^0)$, 进行一次 T2 最短路径分配, 得

$$\bar{X} = \arg \min_{y \in X} G[\bar{y} \mid \bar{c}^0, \bar{t}^0]$$

$$\Delta x_e \leftarrow \left[\int_A x_e(a) da - x_e^0 \right] \quad \Delta u_e \leftarrow \left[\int_A a x_e(a) da - u_e^0 \right] \quad (10)$$

Step C: 终止条件

令

$$L[\lambda, (x_e), (u_e)] =$$

$$\sum_e [c_e(x_e^0 + \lambda \Delta x_e) x_e + t_e(x_e^0 + \lambda \Delta x_e) u_e]$$

若

$$\frac{L[0, (\Delta x_e), (\Delta u_e)]}{L[0, (x_e), (u_e)]} < \epsilon \quad (11)$$

则停止迭代。否则执行 Step D。

Step D: 确定步长

令 $\lambda \leftarrow 1$ 若 $L[1, (\Delta x_e), (\Delta u_e)] \leq 0 \quad \arg L[\lambda, (\Delta x_e), (\Delta u_e)] = 0$, 否则

Step E: 更新所有的 (x_e^0) 和 (u_e^0) , $x_e^0 \leftarrow x_e^0 + \Delta x_e^0$, $u_e^0 \leftarrow u_e^0 + \Delta u_e^0$, 转至 Step B。

5 数值算例

一区域综合运输通道, 现阶段有公路、常速铁

表 1 某运输通道各运输方式的技术参数

Tab 1 Transportation mode characteristics of example corridor

运输方式	参数	区间长度 / km	行程时间/min			票价/元			运输能力/人·d ⁻¹			出行总需求 /万人·d ⁻¹
			AR	CR	HSR	AR	CR	HSR	AR	CR	HSR	
OD 点对	A-B, OD1	150	N	80	45	N	25	42	N	3600	3500	0.7
	A-C, OD2	360	40	220	100	400	55	140	2000	6000	4500	1.2
	A-D, OD3	650	70	550	180	600	175	300	5500	12500	8600	2.1
	B-C, OD4	200	N	110	50	N	28	48	N	2000	800	0.4
	B-D, OD5	480	55	320	140	540	85	220	3500	7000	3200	1.1
	C-D, OD6	280	N	160	80	N	35	120	N	4000	2000	0.8

型, 计算最优出行分布 $(V_m^i, V_{OD}^i) \rightarrow$ 与各方式现阶段客流份额 \bar{V}_{OD}^i 比较 \rightarrow 计算客流分布加权误差 [Error] \rightarrow 误差是否在允许范围内 (否, 重新设 VOT^i 初值) $VOT^i \rightarrow$ 代表了现阶段出行用户的间间价值。

设公路客运出行的自由流速度为 70km/h, 出行费用 0.1 元/km。每车道的通行能力为 2 000 标准车/h。为验证模型的有效性, 旅客 VOT 取两组数值: 平均值 $\mu=12$ 元/h、22 元/h; 标准差 $\sigma=4$ 元/h、6 元/h。用上述算法求解, 计算结果见表 2。

表 2 各运输方式的客运流量分配结果/人

Tab 2 Market share of example corridor for each transportation mode

运输方式	$\mu=22 \quad \sigma=6$ 元/h				$\mu=12 \quad \sigma=4$ 元/h			
	AR	CR	HSR	HWY	AR	CR	HSR	HWY
OD1	N	2463	2844	1693	N	3462	1356	2182
OD2	1895	3535	4378	2192	787	5478	2284	3442
OD3	5345	4739	7880	3036	1981	10052	4736	4231
OD4	N	1725	780	1495	N	1857	235	1908
OD5	3223	2889	3128	1760	798	5966	1724	2612
OD8	N	3291	1285	3424	N	3874	968	3158

从表 2 可以看出, 对于平均收入较高的出行人群 (VOT 值高), 长途出行, 一般选择航空和高速铁路。高速铁路建成后, 分流了部分航空客流, 普通铁路的市场份额有较大下降。对于低时间价值的出行人群, 这种效果不明显。

6 结论

基于网络的运输通道客流分配模型, 反映了各运

路、航空 3 种运输方式。随着沿线客流量的增长, 拟在通道内建设高速铁路, 通道构成及各运输方式的技术参数见表 1。需要说明的是, 表 1 中相关参数是假定值, 在做实际的运输通道客流分配时, 参数取值可通过实际调查获得^[8]。

旅客时间价值可通过现阶段各运输方式的客流市场份额, 利用上述模型标定得到。标定的主要步骤如下:

设定 VOT 的初值 $VOT^i \rightarrow$ 使用建立的用户均衡模

型, 计算最优出行分布 $(V_m^i, V_{OD}^i) \rightarrow$ 与各方式现阶段客流份额 \bar{V}_{OD}^i 比较 \rightarrow 计算客流分布加权误差 [Error] \rightarrow 误差是否在允许范围内 (否, 重新设 VOT^i 初值) $VOT^i \rightarrow$ 代表了现阶段出行用户的间间价值。该模型可以用来估算运输通道内各交通方式的客运市场份额。合理的市场份额预测, 有助于了解现状及未来各运输方式对运输需求的适应情况, 制定合理的运力投放策略; 确定新交通方式 (如高速铁路) 的合理建设时机。为政府制定合理的运输政策, 优化配置交通运输资源, 提供重要的理论依据。

参考文献:

- [1] 段国钦. 交通走廊运输需求分析及其运输结构优化研究 [D]. 长安大学硕士论文, 2001.
- [2] 马波涛, 张于心, 赵翠霞. 运用 Logit 模型对高速客流分担率的估计 [J]. 北方交通大学学报, 2003, 27 (2).
- [3] Hai Yang, Hoi Yan kong Value of Time Distributions and Competitive Bus Services [J]. Transportation Research part E, 2001; (37): 411-424.
- [4] 刘灿齐. 现代交通规划学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [5] Lejoon Chang, Guang-len Chang Calibration of Intercity Trip Time Value with a Network Assignment Model: A Case Study for the Korean NW-SE Corridor [J]. Journal of Transportation and Statistics, 2002, 5 (2-3): 45-57.
- [6] Dial B R Bicriterion Traffic Assignment: Efficient Algorithms Plus Examples [J]. Transportation Research, part B, 1997, 31 (5): 357-372.
- [7] 四兵锋, 赵小梅, 高自友. 综合运输体系下的客运流量分离模型及算法研究 [J]. 铁道学报, 2004 (12).
- [8] 李友好. 基于综合运输的运输通道理论与实证研究 [D]. 同济大学博士学位论文, 2005.