

基于马尔可夫链的旅游轨道交通客流分配模型

董 皓 王何斐* 雷佳祺

(北京公交有轨电车有限公司, 100080, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为克服传统客流分配方法在旅游轨道交通规划应用中的局限性, 提出 MCA(基于马尔可夫链的旅游轨道交通客流分配)模型。旅游出行满足马尔可夫链“无后效性”, 通过站点转移矩阵和站点选择矩阵运算求得路径选择概率, 从而实现 OD(起讫点)量在区间上的客流分配。以五台山风景名胜实际案例为研究背景, 对旅游阻抗函数进行多元线性回归分析, 剔除 1 个非显著变量后计算其他 5 个显著变量参数取值, 并对分散度系数进行敏感性分析; 分别计算本模型以及 AON(全有全无)、UE(用户均衡)和 SUE(随机用户均衡)客流分配模型在各区间的客流分配量; 对比 4 种模型的计算精度和效率。平均相对误差计算结果的优劣排序依次为 MCA, UE, SUE, AON, 均方根误差计算结果的优劣同上。MCA 的计算效率最高。研究结果表明, 所提模型更适用于旅游交通场景。

关键词 轨道交通; 旅游交通; 客流分配模型

中图分类号 U293.12; U239.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.008

Passenger Flow Assignment Model of Tourist Rail Transit Based on Markov Chain

DONG Hao, WANG Hefei, LEI Jiaqi

Abstract To overcome the limitations of applying conventional passenger flow assignment methods in tourist rail transit planning, a MCA model (tourist rail transit passenger flow assignment based on Markov Chain) is proposed. Tourist travel process satisfy the non-aftereffect property of Markov Chain, station transition matrix and selection matrix are built for the calculation of routes selection probability, so as to accomplish OD (origin-destination) flow assignment to each interval. Taking the practical case of Mount Wutai as research background, multiple linear regression analysis of tourist impedance function is carried out. 1 non-significant variable is eliminated and parameters of other 5 significant variables are estimated, and sensitivity analysis of disperse coefficient are conducted. Passenger flow assigned to each interval are calculated by using MCA, AON (all-or-nothing), UE (user

equilibrium) and SUE (stochastic user equilibrium) respectively. By comparing computational accuracy and efficiency of the 4 models, the mean relative error calculation results are ranked from best to worst as MCA, UE, SUE, AON, and the root-mean-square error calculated results are ranked the same as above. MCA has the highest calculation efficiency. Research results show that the proposed model is more suitable for tourist rail transit scenario.

Key words rail transit; tourism transportation; passenger flow assignment model

Author's address Beijing Public Transit Tram Co., Ltd., 100080, Beijing, China

旅游交通通常定义为以旅游观光为目的的人、物、思想或信息在空间上的移动^[1]。景区旅游交通是指游客在观光游览过程中产生的一系列交通现象, 主要交通方式包括观光轨道交通、观光汽车、游览船、直升机、索道及步行等。旅游交通受制于环境保护、生态保护和文物保护等影响, 道路和停车设施往往难以扩容。为满足景区发展规划和游客接待量增长, 快捷、舒适、大容量、全天候、环境友好的轨道交通逐步成为更优的选择。

在城市轨道交通网络客流分配模型和研究方面, 可以将理论算法概括为随机概率分配模型和用户均衡分配模型两类^[2-3]。随机概率分配模型是基于随机效用理论, 建立非集计模型计算路径选择概率从而实现客流分配^[2], 通过建立包括区间、换乘节点、线路和网络拓扑结构阻抗的综合阻抗函数, 采用 Logit 模型或 Probit 模型实现客流在公共交通网络上的分配。用户均衡分配模型基于 Wardrop 用户均衡原理, 目前已形成用户均衡、随机用户均衡和动态用户均衡客流分配理论^[2-3]。文献[4]提出在公共交通网络客流拥塞和多重路径场景下的动态用户均衡客流分配模型。文献[5]构建基于用户

* 通信作者

和服务均衡理论的结构化网络公共交通客流分配模型。此外,国内外学者应用马尔可夫链构建客流分配模型,通过矩阵运算实现在城市公共交通网络上的分配^[6-8]。然而,以旅游观光为目的的出行活动在目的地、出行方式、出行路径和出行链构成等方面与以其他目的的出行存在较大的不同之处^[1],传统的客流分配方法在旅游轨道交通网络客流分配中的应用存在明显的局限性。

对以漫游方式的出行链的交通需求预测可以采用概率过程模型或效用理论,前者简便且适用性强,但在解释转移概率和空间选择等方面存在不足;后者适用性强,可分析景点魅力度的测度^[1]。为克服马尔可夫链在轨道交通规划中客流分配阶段的缺陷和不足,本文通过结合旅游阻抗函数和效用理论的方式,实现对旅游轨道交通客流分配的目的。所提模型适用于旅游交通场景,对客流预测和客流精细化管理具有一定的指导意义和实用价值。

1 问题描述

在旅游轨道交通线路规划时,通常以现状公交网络作为分析对象,判定现状公共交通客运需求和运输能力匹配情况,识别主要客流走廊和大客流区间,搭建以旅游轨道交通为骨干,常规旅游巴士及其他方式为补充的多层次公共交通网络。城市通勤出行中,乘客通常提前制定出行计划,其中包括出发时间、出行路径和出行方式,同时有出行时间最短、换乘次数最少、出行费用最低等要求。在旅游观光出行中,游客倾向于选择漫游游览的方式,但这样的出行方式会增加广义出行成本。使用传统城市轨道交通客流分配方法获得的结果往往与实测结果相去甚远,这也对旅游轨道交通线路规划提出新的要求。

旅游观光出行过程可简化为游客从出发站点经过多个中间站点到达目的站点,该过程可视为从出发站点按照一定转移概率选择经过各中间站点最终到达目的站点。通过对中间站点的选择判断路径选择,从而实现区间客流分配,而中间站点的选择则受到景点和旅途中的乘车、换乘、游览、餐饮、消费和住宿等出行目的选择的影响。从广义上讲,上述过程满足马尔可夫链“无后效性”原则,游客在站点间的转移过程视为状态转移,后续站点的选择条件分布独立于前序站点的选择,仅与当前站点的选择相关,因此游客在出行过程中的路径选择

行为满足马尔可夫链条件^[6]。

2 理论建模

2.1 马尔可夫链

在马尔可夫链中,将网络中的站点视为马尔科夫过程中的状态,网络中两相邻车站间的客流移动视为马尔可夫过程中的状态转移。根据马尔科夫性,游客在从出发站点到达目的站点的过程中重复完成状态转移,状态转移概率之和为1。

将网络定义为由 n 个站点组成,其中出发站点为 g 个,目的站点为 h 个。将目的站点与其他站点间的客流转移概率用马尔可夫状态转移矩阵表示,则有:

$$P = \begin{bmatrix} Q & S \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{\substack{n-h & h \\ h}}^{n-h} \quad (1)$$

式中:

S ——非目的站点到目的站点的转移概率矩阵;

Q ——非目的站点间的转移概率矩阵。

若站点间不存在直接有效路径连接,则转移概率为0,将非目的站点间的转移概率矩阵定义为:

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & Q_1 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix}_{\substack{g & n-g-h \\ n-g-h}}^g \quad (2)$$

式中:

Q_1 ——出发站点到中间站点的转移概率矩阵;

Q_2 ——中间站点间的转移概率矩阵。

根据马尔可夫链性质,从出发站点 i ($i=1,2,\dots,n$) 经过 n 次转移到达站点 j ($j=1,2,\dots,n$) 的概率为矩阵 Q^n 的元素 (i,j) 。游客从出发站点到其他各站点需要经历多次状态转移,因此,将游客从出发站点到达网络上各站点的概率定义为 $I+Q^1+Q^2+\dots$ (I 为单位矩阵),假设矩阵 Q 满足 Hawkins-Simon 条件^[8]且各阶矩阵之和收敛,则满足下列条件:

$$I + Q^1 + Q^2 + \dots = (I - Q)^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} g & n-g-h \\ 0 & Q_1(I - Q_2)^{-1} \\ 0 & (I - Q_2)^{-1} \end{bmatrix}_{n-g-h}^g \quad (3)$$

式中:

$Q_1(I - Q_2)^{-1}$ ——出发站点关于中间站点选择的条件概率矩阵。

2.2 旅游阻抗函数

将游客出行行为选择集定义为乘车、换乘、游

览、餐饮、消费、住宿,将目的站点对应的行为选择指标定义为站间距、车站 500 m 半径景点覆盖率、周边景点游客接待量、餐饮用地面积、零售用地面积、酒店和民宿床位数。考虑到上述指标量纲不同,因此将上述指标做归一化处理。站点选择旅游阻抗指标如表 1 所示,其中: x_{kij} 为站点 i 至站点 j 的旅游阻抗指标 $k(k=1,2,\cdots,6)$ 归一化前的指标。

表 1 站点选择旅游阻抗指标

Tab. 1 Tourist impedance index of station selection		
序号	游客出行行为	指标名称
1	乘车	站点 i 距站点 j 的距离, m
2	换乘	站点 j 500 m 半径内的景点覆盖率, %
3	游览	站点 j 周边景点游客接待量, 人次/d
4	餐饮	站点 j 周边餐饮用地面积, m ²
5	消费	站点 j 周边零售用地面积, m ²
6	住宿	站点 j 周边酒店和民宿床位数, 个

$$z_{kij} = \frac{x_{kij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{kij})^2}} \quad (4)$$

式中:

z_{kij} ——站点 i 至站点 j 的旅游阻抗指标 k 归一化后的指标。

基于随机效用理论,使用上述指标定义站点 i 至站点 j 的旅游阻抗函数 $a_{ij}(a_{ij} \geq 0)$ 为:

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^6 \theta_k z_{kij} + \sigma \quad (5)$$

式中:

θ_k ——指标 k 的待定参数;
 σ ——随机误差项。

建立站点 i 至站点 j 旅游阻抗函数 a_{ij} 与站点 i 至站点 j 第 r 条路径的广义出行成本 c_{rgh} 的关系:

$$c_{rgh} = \sum_{r=1}^{\infty} \delta_{rgh,ij} a_{ij} \quad (6)$$

式中:

$\delta_{rgh,ij}$ ——出发站点 g 与目的站点 h 之间两相邻中间站点 i 和 j 存在路径 r ,则取值为 1; 否则为 0。

2.3 状态转移概率

根据站点旅游阻抗函数的定义描述相邻站点间的状态转移情况^[8],定义矩阵 $V_{n \times n}$ 的元素 (i, j) 如下:

$$v_{ij} = \begin{cases} \exp(-\lambda a_{ij}), & \text{站点 } i \text{ 和 } j \text{ 间存在路径} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中:

λ ——分散度系数。

则矩阵 $V_{n \times n}$ 的元素 (i, j) 平方运算满足下列条件:

$$v_{ij}^2 = \sum_{d=1}^n v_{id} v_{dj} =$$

$$\sum_{d=1}^n \exp[-\lambda(a_{id} + a_{dj})] = \sum \exp(-\lambda c_{ij}^2) \quad (8)$$

式中:

v_{id} ——站点 i 至中间站点 d 的状态转移量;
 v_{dj} ——中间站点 d 至站点 j 的状态转移量;
 a_{id} ——站点 i 至中间站点 d 的旅游阻抗函数;
 a_{dj} ——中间站点 d 至站点 j 的旅游阻抗函数;
 c_{2ij} ——站点 i 与站点 j 之间第 2 条路径的广义出行成本。

因此,矩阵 $V_{n \times n}$ 的元素 (i, j) 的 y 次方满足下列条件:

$$v_{ij}^y = \sum \exp(-\lambda c_{ij}^y) \quad (9)$$

将矩阵 $V_{n \times n}$ 各次方求和,根据式(3)可得:

$$W = V + V^2 + V^3 + \cdots = (I - V)^{-1} - I \quad (10)$$

矩阵 $W_{n \times n}$ 的元素 (i, j) 表达式为:

$$w_{ij} = \sum_{r=1}^{\infty} \exp(-\lambda c_{r,ij}) \quad (11)$$

式中:

$c_{r,ij}$ ——站点 i 与站点 j 之间第 r 条路径的广义出行成本。

参考基于随机效用理论的行为选择模型,将状态转移概率(条件概率)与站点 i 对站点 j 的旅游阻抗函数 a_{ij} 、站点 j 至目的站点 h 的广义出行成本 c_{jh} 、站点 i 至目的站点 h 的广义出行成本 c_{ih} 的关系定义如下:

$$P(j|i) = \exp[-\lambda(a_{ij} + b_{jh} - b_{ih})] = \exp(-\lambda a_{ij}) \frac{w_{jh}}{w_{ih}} \quad (12)$$

式中:

b_{jh} ——站点 j 至目的站点 h 的阻抗;
 b_{ih} ——站点 i 至目的站点 h 的阻抗;
 w_{jh} ——站点 j 至目的站点 h 的状态转移概率;
 w_{ih} ——站点 i 至目的站点 h 的状态转移概率。

$$\left. \begin{aligned} w_{jh} &= \sum_{r=1}^{\infty} \exp(-\lambda c_{r,jh}) \\ w_{ih} &= \sum_{r=1}^{\infty} \exp(-\lambda c_{r,ih}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:

$c_{r,jh}$ ——站点 j 至目的站点 h 第 r 条路径的广义出行成本;

$c_{r,ih}$ ——站点 i 至目的站点 h 第 r 条路径的广义出行成本。

$$\left. \begin{aligned} b_{jh} &= -\frac{1}{\lambda} \ln \left[\sum_{r=1}^{\infty} \exp(-\lambda c_{r,jh}) \right] = -\frac{1}{\lambda} \ln(w_{jh}) \\ b_{ih} &= -\frac{1}{\lambda} \ln \left[\sum_{r=1}^{\infty} \exp(-\lambda c_{r,ih}) \right] = -\frac{1}{\lambda} \ln(w_{ih}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

通过式(1)求得状态转移概率为正,且满足以下条件:

$$\sum_j P(j|i) = \frac{\sum_j \exp(-\lambda a_{ij}) w_{jh}}{w_{ih}} = \frac{w_{ih}}{w_{ih}} = 1 \quad (15)$$

路径选择概率满足以下条件:

$$\begin{aligned} \prod_{ij} P(j|i)^{\delta_{rgh,ij}} &= \prod_{ij} \exp[-\lambda(a_{ij} + b_{jh} - b_{ih})]^{\delta_{rgh,ij}} = \\ &= \exp(-\lambda \sum_{ij} \delta_{rgh,ij} a_{ij}) \exp[-\lambda \sum_{ij} \delta_{rgh,ij} (b_{jh} - b_{ih})] = \\ &= \exp(-\lambda c_{rgh}) \exp[-\lambda(b_{hh} - b_{gh})] = \\ &= \frac{\exp(-\lambda c_{rgh})}{\sum_{r=1}^{\infty} \exp(-\lambda c_{rgh})} \end{aligned} \quad (16)$$

式中:

b_{hh} ——目的站点 h 与目的站点 h 的阻抗,取值为0;

b_{gh} ——出发站点 g 与目的站点 h 的阻抗。

2.4 站点选择概率

由式(14)计算获得的 $P(j|i)$ 可以作为状态转移概率矩阵 Q 的第 (i, j) 个元素,用于矩阵运算。根据式(2)分别计算矩阵 Q_1 和矩阵 $(I - Q_2)^{-1}$,进而求得矩阵 $Q_1(I - Q_2)^{-1}$ 。对于单OD(起讫点)点对客流分配,矩阵 $Q_1(I - Q_2)^{-1}$ 中的元素 $(1, i)$ 为出发站点 g 到达中间站点 i 的选择概率 $P(i)$ 。

2.5 单OD点对区间客流分配

由式(16)可以看出,基于马尔可夫链的单OD点对客流分配方法与Logit客流分配模型表达式形式类似,将各OD点对在路径 r 上的分配客流量累加计算可获得路径 r 的客流量。对于特定OD点的客流分配,计算求得站点选择概率 $P(i)_{gh}$ 与状态转移概率 $P(j|i)_{gh}$,两者的乘积为相邻站点 i 至站点 j 的区间选择概率 $P(ij)_{gh}$,则有:

$$P(ij)_{gh} = P(i)_{gh} P(j|i)_{gh} \quad (17)$$

特定OD点对在站点 i 和站点 j 的区间分配客流量 $f_{ij,u}$ 为OD量 u_{gh} 与区间选择概率 $P(ij)_{gh}$ 的乘积,站点 i 和站点 j 的区间分配客流量 f_{ij} 为所有相关OD点对在区间 ij 上的分配客流量累加,则有:

$$f_{ij} = \sum_u f_{ij,u} = \sum_{gh} u_{gh} P(ij)_{gh} = \sum_u u_{gh} P(i)_{gh} P(j|i)_{gh} \quad (18)$$

2.6 算法逻辑

输入站点选择旅游阻抗指标,经过9个步骤可以实现区间客流分配量的输出,算法逻辑如图1所示。

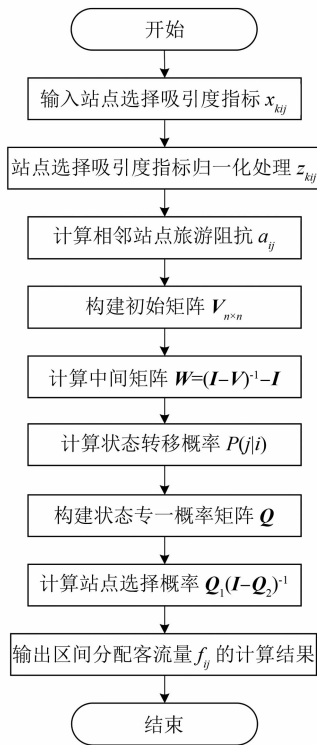


图1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

3 算例分析

选取五台山风景名胜区作为案例。该景区通过规划旅游轨道交通疏解当前道路通行能力不足、停车能力不足和交通治理混乱等问题。在轨道交通线网规划中的线路布设阶段,通过将现状OD数据加载至公交网络识别大客流走廊和区间,为旅游轨道交通规划中的线路路由、线路布设、敷设方式和制式选型提供依据。

所截取的局部道路公交网络如图2所示。将出发站点设为黛螺顶站,目的站点设为菩萨顶站,共

有 6 路、7 路、202 路、204 路 4 条道路公交线路和 7 条路径可供选择。

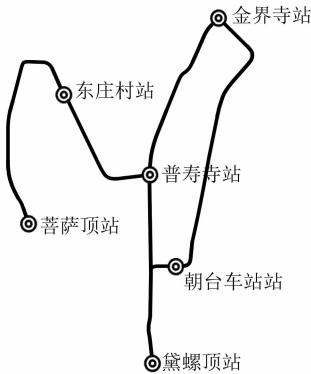


图 2 局部道路公交网络示意图

Fig. 2 Diagram of local road public transport network

3.1 参数估计与检验

根据式(4)和式(5)计算五台山风景名胜区内所有车站旅游阻抗指标,根据式(6)以及 OD 矩阵测算相邻站点的转移概率,共获得 40 组观测样本。然后通过多元非线性回归实现各指标待定参数估计。模型回归结果和模型参数估计结果分别如表 2 和表 3 所示。其中: F 值为 F 检验的指标,通过 F 检验则至少一个自变量和应变量存在显著影响关系; t 值为 t 检验的过程值,表征自变量和应变量之间影响关系的显著性;模型 1 为第 1 次回归分析结果;模型 2 为第 2 次回归分析结果。由表 2 和表 3 可以看出,指标 z_{5ij} 的显著性 = 0.487 > 0.05,因此作为非显著性评价指标将其剔除后,进行第 2 次回归分析;第 2 次回归分析的所有指标显著性均小于 0.01,证明各指标非常显著,模型 2 调整后的决定系数 = 0.684,拟合效果较好。指标 z_{1ij} 系数为正值,证明其与旅游阻抗函数呈显著正相关关系,指标 z_{2ij} 、 z_{3ij} 、 z_{4ij} 和 z_{6ij} 为负值,证明上述 4 个指标与旅游阻抗函数呈显著负相关关系。

表 2 模型回归结果

Tab. 2 Model regression result

模型	决定系数	调整后的 决定系数	标准误差	F 值	显著性
模型 1	0.729	0.679	0.737 46	14.769	0.000
模型 2	0.725	0.684	0.731 95	17.890	0.000

根据参数估计结果,待定参数 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 和 θ_6 取值分别为 4.173、-3.790、-2.850、-4.678 和 -4.223,随机误差项 σ 取值为 5.741。根据式(6)和式(17)计算区间客流分配量,对分散度系数 λ 进行敏感性分

表 3 模型参数估计结果

Tab. 3 Estimation result of model parameters

模型	参数	非标准化系数		t 值	显著性	95.0%置信区间	
		估计值	标准误差			下限	上限
模型 1	σ	5.737	0.307	18.657	0.000	5.111	6.362
	z_{1ij}	4.036	1.547	2.610	0.014	0.890	7.183
	z_{2ij}	-3.673	1.108	-3.316	0.002	-5.927	-1.419
	z_{3ij}	-2.938	0.956	-3.075	0.004	-4.882	-0.994
	z_{4ij}	-4.634	1.011	-4.585	0.000	-6.690	-2.578
	z_{5ij}	2.139	3.044	0.703	0.487	-4.054	8.333
	z_{6ij}	-6.211	2.987	-2.079	0.045	-12.289	-0.133
模型 2	σ	5.741	0.305	18.818	0.000	5.121	6.362
	z_{1ij}	4.173	1.523	2.740	0.010	1.078	7.267
	z_{2ij}	-3.790	1.087	-3.487	0.001	-5.999	-1.581
	z_{3ij}	-2.850	0.940	-3.031	0.005	-4.761	-0.939
	z_{4ij}	-4.678	1.001	-4.673	0.000	-6.713	-2.644
	z_{6ij}	-4.223	0.954	-4.427	0.000	-6.162	-2.285

析,检验 λ 在不同取值情况下的 MCA(基于马尔可夫链的旅游轨道交通客流分配)模型客流分配结果,如图 3 所示。由图 3 可知,即便 λ 取值存在差异,各区间客流分配结果与实测值相对较为相符,当 $\lambda=0.15$ 时,分配结果最接近实测值,从而验证了 MCA 模型在路径选择应用中的科学性和有效性。

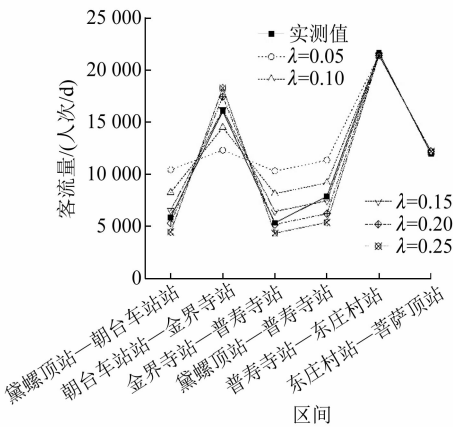


图 3 分散度系数灵敏度分析

Fig. 3 Sensitivity analysis of dispersion coefficient

3.2 模型预测结果对比

为进一步验证不同模型在旅游出行路径选择场景下的应用效果,通过交通仿真软件分别使用 MCA($\lambda=0.15$)、全有全无(AON)、用户均衡(UE)和随机用户均衡(SUE)客流分配模型计算 6 个区间的客流分配量。

4 种模型在各区间的客流分配量计算结果与实测值相对误差的中心和散布情况如图 4 所示。由图 4 可知,从宏观来看,MCA 和 UE 的相对误差中位数和四分位间距显著小于 AON 和 SUE,然而,UE

在黛螺顶站—普寿寺站区间的分配结果与实测值的相对误差为异常值,由此可以判断,MCA 分配精度更高且更可靠。

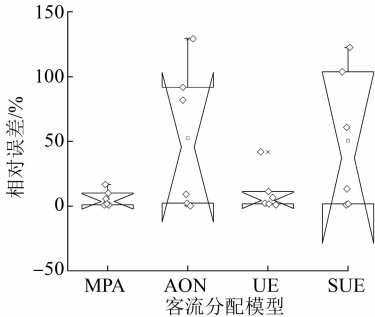


图 4 区间客流分配量相对误差箱线图

Fig. 4 Box diagram of relative error of section passenger flow assignment

为进一步验证 4 种分配方法的计算精度,分别计算 4 种方法在 m 个区间上的客流分配结果与实测值的平均相对误差 R_{ME} 和均方根误差 R_{MSE} , 则有:

$$R_{ME} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{|f_m - f'_m|}{f_m} \tag{19}$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\sum_{m=1}^M (f_m - f'_m)^2} \tag{20}$$

式中:

f_m ——分配客流量模型;

f'_m ——实际客流量。

4 种区间客流分配量模型的计算结果及实测客流量如表 4 所示。平均相对误差和均方根误差计算结果如表 5 所示。

表 4 不同区间的实测客流量和各模型的计算客流量

Tab. 4 Field-measured passenger flow and calculated passenger flow in each model of different intervals						
序号	区间	实测客流量/(人次/d)	不同模型计算客流量/(人次/d)			
			MCA	AON	UE	SUE
1	黛螺顶站—朝台车车站	5 887	6 552	3 070	5 536	9 072
2	朝台车车站—金界寺站	16 040	16 192	17 671	17 209	13 673
3	金界寺站—普寿寺站	5 351	6 435	2 943	5 419	8 955
4	黛螺顶站—普寿寺站	7 892	7 468	3 444	6 451	9 987
5	普寿寺站—东庄村站	21 608	21 387	21 115	21 386	21 386
6	东庄村站—菩萨顶站	11 966	12 182	11 996	12 182	12 182

表 5 不同客流分配量模型的指标计算结果

Tab. 5 Index calculation result of different passenger flow assignment model

区间客流分配量模型	$R_{ME}/\%$	R_{MSE}	迭代次数/次	计算时间/s
MCA	6.07	1 383.92	—	0.037
AON	52.43	6 035.60	—	0.016
UE	10.84	1 914.43	3	0.046
SUE	50.55	5 763.88	15	0.193

根据平均相对误差和均方根误差计算结果可知,在本算例场景下,各模型的平均相对误差计算结果排序为 MCA (6.07%) < UE (10.84%) < SUE (50.55%) < AON (52.43%), 各模型的均方根误差计算结果排序为 MCA (1 383.92) < UE (1 914.43) < SUE (5 763.88) < AON (6 035.60)。设置最大迭代次数为 100 次、收敛标准为 0.1 的条件下,UE 收敛迭代次数为 3, SUE 收敛迭代次数为 15, MCA 和 AON 无需迭代计算。各模型的计算时间排序为 AON (0.016 s) < MCA (0.037 s) < UE (0.046 s) < SUE

(0.193 s), 在实现 36 组 OD 点对数据客流分配中, MCA 模型的计算效率相对较高。

由此可见,本文所提出的基于马尔可夫链的旅游轨道交通客流分配模型的精确度和计算效率均较高。城市轨道交通和道路公交具备共性特征,以往诸多研究将道路公交客流分配方法应用在轨道交通客流分配实践中^[7],本模型同样适用于轨道交通规划中的客流分配及运营管理中的客流精细化分析。

4 结语

1) 提出基于马尔可夫链的旅游轨道交通客流分配模型,使用与乘车、换乘、游览、餐饮、消费和住宿等选择行为相关的 6 项指标量化相邻两站的旅游阻抗,通过站点转移矩阵和站点选择矩阵运算求得路径选择概率,从而实现单 OD 点对在区间上的分配。

2) 以五台山风景名胜区实际案例为研究背景,使用实际数据通过多元线性回归对旅游阻抗函数

进行参数估计,旅游阻抗指标零售用地面积为非显著变量被剔除,除站间距为正相关显著变量外,其他 4 项指标均为负相关显著变量,计算出调整后的决定系数值为 0.684,拟合效果较好,分散度系数 λ 的近似解为 0.15。旅游阻抗函数的构造和参数估计有助于筛选出影响游客出行选择的显著变量,同时影响客流分配结果的合理性和准确性。

3) 对比 4 种区间客流分配量模型与实测结果的相对误差中心和散布情况,发现 MCA 相对误差中位数和四分位间距最小,且不存在显著异常值。

4) 通过计算与实测数据的平均相对误差和均方根误差,对比 4 种模型的计算精度排序为 MCA>UE>SUE>AON,计算时间排序为 AON<UE<MCA<SUE,MCA 模型的计算效率相对较高。

本文提出的基于马尔可夫链的旅游轨道交通客流分配模型更适用于旅游交通场景,对客流预测和客流精细化管理具有一定的指导意义和实用价值。

参考文献

- [1] 关宏志,任军,刘兰辉. 旅游交通规划的基础框架[J]. 北京规划建设,2001(6):32.
GUAN Hongzhi, REN Jun, LIU Lanhui. Basic framework of tourist traffic planning[J]. Beijing City Planning & Construction Review, 2001(6):32.
- [2] 周玮腾,韩宝明,冯超. 城市轨道交通网络客流分配模型和算

法综述[J]. 系统工程理论与实践,2017(2):440.

ZHOU Weiteng, HAN Baoming, FENG Chao. A review of passenger flow assignment model and algorithm for urban rail transit network[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2017(2):440.

- [3] 黄鉴,蒋赛. 基于换乘网络的城市轨道交通客流分配模型[J]. 城市轨道交通研究,2017(8):1.
HUANG Jian, JIANG Sai. Passenger flow distribution model for urban rail transit based on transfer network[J]. Urban Mass Transit, 2017(8):1.
- [4] TROZZI V, GENTILE G, BELL M G H, et al. Dynamic user equilibrium in public transport networks with passenger congestion and hyperpaths[J]. Transportation Research Part B, 2013, 57(6):266.
- [5] LEURENT F, CHANDAKAS E, POULHES A. User and service equilibrium in a structural model of traffic assignment to a transit network[J]. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2011, 20(20):495.
- [6] 曾鸷,李军,朱晖. 面向换乘行为的城市公交客流分配及应用[J]. 系统管理学报,2015(1):22.
ZENG Ying, LI Jun, ZHU Hui. Passengers' transfer behavior-based urban transport flow distribution and its application[J]. Journal of Systems & Management, 2015(1):22.
- [7] HAZELTON M L, WATLING D P. Computation of equilibrium distributions of Markov traffic—assignment models[J]. Transportation Science, 2004, 38(3):331.
- [8] AKAMATSU T. Cyclic flows, Markov process and stochastic traffic assignment[J]. Transportation Research Part B, 1996, 30(5):369.

(收稿日期:2022-04-24)

(上接第 37 页)

- ZHANG Lili, WEI Renyong. Analysis and research on ergonomic interface of electric locomotive driver's cab[J]. Technology for Electric Locomotives, 2000(1):11.
- [3] 陈德钧. 地铁车辆司机操纵台人机界面工效学设计方法[D]. 北京:北京交通大学,2014.
CHEN Dejun. Ergonomic design method for human-machine interface of metro train driver's desk[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [4] 胡亚锋,魏峰,支锦亦. 高速动车组驾驶室设计中的人机界面分析[J]. 艺术与设计(理论),2012(7):108.
HU Yafeng, WEI Feng, ZHI Jinyi. Analysis on human-computer interface in high speed EMU cab design[J]. Art and Design, 2012(7):108.
- [5] 钮松. 面向民机驾驶舱人机工效设计的布局优化研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.

NIU Song. The layout optimization study for civil aircraft cockpit ergonomics design [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

- [6] STABTON N A. Hierarchical task analysis: developments, applications, and extensions [J]. Applied Ergonomics, 2006, 37:55.
- [7] WALKER G H, STANTON N A, YOUNG M S. Hierarchical task analysis of driving: a new research tool[C]//Hanson M A. Contemporary Ergonomics. London: Taylor & Francis Inc, 2001:499.
- [8] LU Z, HAPPEE R, CABRALL C D D, et al. Human factors of transitions in automated driving: a general framework and literature survey [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2016, 43:183.

(收稿日期:2020-08-26)