

城市轨道交通网络化运营的多路径可达票务清分模型

谢小星¹ 秦 凯² 郭英明³ 黄丹辉⁴

(1. 厦门南洋职业学院外语与旅游学院, 361102, 厦门; 2. 广州-创智源信息技术有限公司, 510640, 广州;

3. 广东省交通城建技师学院教务科, 510520, 广州; 4. 厦门城市职业学院轨道交通院, 361008, 厦门//第一作者, 高级工程师)

摘 要 城市轨道交通网络化运营情况下换乘站的设置, 给乘客出行带来便捷的同时, 也给票务清分产生了影响。基于乘客出行路径的清分思路, 通过分析影响城市轨道交通票务清分的主要因素, 确立了票务清分模型的方法和要素选择原则, 提出了城市轨道交通线下多路径可达票务清分模型的构建方法。

关键词 城市轨道交通; 线网; 票务清分模型; 多路径可达
中图分类号 U293.22; F530.7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.032

Urban Rail Transit Fare Clearing Model of Multiple Access Routes under Network Operation

XIE Xiaoxing, QIN Kai, GUO Yingming, HUANG Danhui

Abstract The setting of transfer stations under urban rail transit networking operation brings convenience to passengers, but affects the fare clearing at the same time. Based on the clearing ideas on passenger travel paths, main factors influencing urban rail transit fare clearing are analyzed, methods of clearing model establishment and principles of factor selection are determined. Finally, a fare clearing model of multiple access routes under urban rail transit networking operation is put forward.

Key words urban rail transit; network; fare clearing model; multiple access routes

First-author's address School of Foreign Languages and Tourism, Xiamen Nanyang Vocational College, 361102, Xiamen, China

随着城市轨道交通网络化发展, 以及换乘站的增加, 使得乘客到达目的地的路径有了多种选择。近年来国内地铁建设投融资模式的变化, 不同投资主体的引入, 线路的运营主体也将趋于多样化。各运营主体为谋求自身最大利益, 必将对票款等收入格外关注, 票款等收入的分配也将会带来较多争议

与困扰。地铁运营可持续发展需求的提出, 运营管理进一步精细化与科学化, 对线路的行车组织计划管理及按线路进行合理的成本收益核算的要求越来越高。基于以上因素, 如何对票款收入进行合理有效的分配, 以适应城市轨道交通发展的需求, 成为目前需要解决的问题。本文通过对影响清分因素的分析、清分规则的确立等, 提出了城市轨道交通网络化运营情况下的票务清分模型建设思路, 为城市轨道交通票务的清分提供参考。

1 多路径可达票务清分模型构建的主要思路

城市轨道交通网络化运营的多路径可达票务清分方法是基于乘客出行路径的清分方法, 相对于最短路径法, 考虑了除最短路径之外的其他路径的概率因素。因此, 它实际上在算法里包含了最短路径法。由于多路径概率选择法考虑的因素更加全面, 能切合实际地反映真实的乘客出行情况, 因此可得到更加准确的乘客出行。所以, 能根据这些信息做出更加准确的收益清分。

如图1所示, 若在某个清分结算周期内, 由车站X至车站Y的票务收入为W, 由X至Y的可选路径有3条, 分别为X—A—B—Y、X—C—D—Y、X—E—Y。假定有比例为 ν_1 的乘客选择路径X—A—B—Y到达Y站, 显然路径X—A—B—Y的票务收入应为 $\nu_1 W$; 同理, 有比例为 ν_2 的乘客选择路径X—C—D—Y到达Y站, 其票务收入应为 $\nu_2 W$; 有比例为 ν_3 的乘客选择路径X—E—Y到达Y站, 票务收入应为 $\nu_3 W$ 。

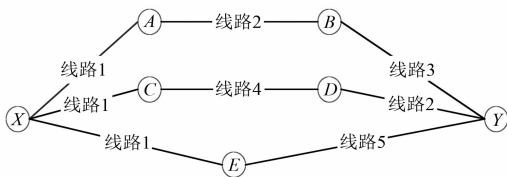


图1 城市轨道交通车站X、Y之间可达路径模拟图

对于路径 $X-A-B-Y$, 若线路 1、线路 2、线路 3 占路径 $X-A-B-Y$ 总里程的比例系数分别为 μ_{11} 、 μ_{12} 、 μ_{13} , 则线路 1 在路径 $X-A-B-Y$ 上获得的票务收入应为 $\mu_{11}\nu_1 W$, 线路 2 在路径 $X-A-B-Y$ 上获得的票务收入应为 $\mu_{12}\nu_1 W$, 线路 3 在路径 $X-A-B-Y$ 上获得的票务收入应为 $\mu_{13}\nu_1 W$ 。

同理, 对于路径 $X-C-D-Y$, 若线路 1、线路 4、线路 2 占路径 $X-C-D-Y$ 总里程的比例系数分别为 μ_{21} 、 μ_{22} 、 μ_{23} , 则线路 1、线路 4、线路 2 在路径 $X-C-D-Y$ 上获得的票务收入分别为 $\mu_{21}\nu_2 W$ 、 $\mu_{22}\nu_2 W$ 、 $\mu_{23}\nu_2 W$; 对于路径 $X-E-Y$, 若线路 1、线路 5 占路径 $X-E-Y$ 总里程的比例系数分别为 μ_{31} 、 μ_{32} , 则线路 1、线路 5 在路径 $X-E-Y$ 上获得的票务收入分别为 $\mu_{31}\nu_3 W$ 、 $\mu_{32}\nu_3 W$ 。

因此, 由车站 X 至车站 Y 的票务收入中, 线路 1 的票务收入应为 $\mu_{11}\nu_1 W + \mu_{22}\nu_2 W + \mu_{31}\nu_3 W$, 线路 2 的票务收入应为 $\mu_{12}\nu_1 W + \mu_{23}\nu_2 W$, 线路 3 的票务收入应为 $\mu_{13}\nu_1 W$, 线路 4 的票务收入应为 $\mu_{22}\nu_2 W$, 线路 5 的票务收入应为 $\mu_{32}\nu_3 W$ 。

由以上思路可知, 只要确定了乘客在各路径上的客流分配比例 ν , 以及各线路在路径上的里程占比 μ , 即可完成票务的清分工作。

2 影响票务清分的主要因素分析

客流在不同路径上的分配比例是清分法中最为重要的因素, 而路径流量分配比例与乘客的路径选择行为直接相关。因此, 影响乘客路径选择行为的主要因素构成了影响清分的主要因素, 一般可分为四类, 包括乘客的社会经济因素、乘客出行特征因素、运营管理因素和轨道交通网络因素。

2.1 乘客的社会经济因素

职业因素对乘客的路径选择有一定影响, 一般离退休人员会选择换乘次数少且方便舒适的出行路径。学生、工薪阶层更倾向于选择出行时间最小的路径, 特别在早高峰期, 这一选择倾向更加明显。

随着收入水平的提高, 乘客对于方便、舒适和安全等方面的要求会逐渐提高, 更希望选择换乘次数少且方便舒适的路径。

2.2 乘客出行特征因素

出行特征主要包括出行距离、出行目的、出行时段、出行次数及付费方式等。

不同的出行距离对乘客选择路径有一定影响。对于长途出行, 乘客更希望通过换乘而减少总的出

行时间; 对于短途出行, 乘客则不希望选择换乘次数较多的路径。

基于不同的出行目的, 乘客对路径的选择会有不同。如以探亲访友为目的的乘客一般不会太在意出行时间的长短, 而更在意出行过程中的方便舒适等因素; 上班或公务出行的乘客则对时间较为敏感, 更希望能有快捷的出行。

高峰时段上下车的乘客较多, 车厢内、站台、换乘通道较为拥挤, 出行舒适度较差, 会增加乘客换乘的时间成本。因此在高峰期, 乘客会倾向于选择换乘次数较少的路径。

虽然地铁的付费方式有月票、一卡通、单程票、二维码、工作证等形式, 但不同的付费方式对路径选择不存在影响。

2.3 运营管理因素

1) 票价。一般情况下, 乘客会选择票价较低的路径, 但在目前国内各大城市的轨道交通中, 一旦起迄点确定, 则该起迄点之间的票价就是确定的, 因此, 一般情况, 票价对乘客的路径选择没有影响。

2) 安全性。安全性是指运营商保证乘客使用其轨道交通线路的安全程度。目前, 这一因素对乘客的路径选择没有显著影响。

3) 方便舒适性。方便舒适性是指乘客在乘车时能享受到的一些功能, 基本内容包括是否拥挤、环境是否适宜、换乘是否便捷等。通常, 在其他条件不变时, 乘客会倾向于选择更方便、更舒适的线路出行。

4) 正点率。正点率是指运营商在运输组织时, 提供给乘客出行的列车运行时刻的准确程度。目前我国地铁的正点率较高, 故障晚点的现象极少, 因此可忽略该因素对乘客路径选择的影响。

2.4 城市轨道交通网络因素

城市轨道交通网络因素主要包括线网结构、换乘方便性、运营模式、运营时间及出行时间等。

在城市轨道交通中, 线网结构直接影响到乘客出行路径的数量及出行路径的构成; 换乘方便性是指城市轨道交通换乘站在换乘距离、时间等方面的便利程度, 包括发车间隔、换乘步行距离、站内导向指引等。

运营模式主要包括单个运营商经营的城市轨道交通线路及多个运营商经营的城市轨道交通线路。在单个运营商经营的情况下, 乘客某次出行的车费按清分规则全部划归唯一路径所涉及的运营

商所有。在多个运营商经营情况下,若仅单路径,则可以按照各自承担的运距比例分配收入;若为可选多路径,收入分配需要分为两步计算,首先把乘客的车费在多条可选路径之间分配,然后针对每条路径,根据所涉及的各运营上的运距比例分配该路径的车费收入。

3 多路径可达票务清分模型的要素

双比例多要素法是指综合考虑多种清分因素(最短路径、换乘次数、乘车时间等)进行建模的清分方法。通过现场调查和数据分析,更能体现乘客出行路径的多样性,合理地反映乘客出行的选择行为,这也使得票款收入在运营主体间的分配相对科学、准确、客观、公平,能相对合理地解决多路径带来的清分争议问题。

3.1 票务清分模型中的“双比例”及“要素”

“双比例”是指有效路径的客流分配比例和有效路径上的线路里程比例。有效路径的客流分配比例是指乘车区间各有效路径之间的客流分配比例;有效路径上线路里程比例是指每一条有效路径上各线路里程的分配比例。

多要素是指多种清分要素(见图 2)。在综合分析轨道交通网络结构和乘客出行等多方面的情况后,可以将清分要素分为不确定性要素和确定性要素两大类。

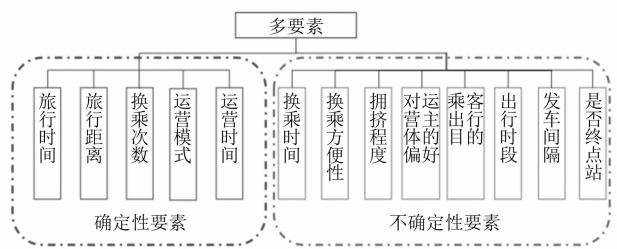


图 2 多要素罗列图

确定性要素指随着轨道交通网络的规划设计和运营管理的信息而确定的要素,如旅行时间、旅行距离、换乘次数、运营模式及各线路运营服务时间等。

不确定性要素是指随着实际情况的不同,不同的时间、不同的线路会有所不同,比如换乘时间、拥挤程度、发车时间及出行时段等。

3.2 模型要素选择的原则

由于所构建模型的复杂性,在构建模型时不可能将所有要素都考虑进来,因此需要对模型要素进

行筛选,筛选时要注意以下原则:

1) 能最大程度地反映乘客的出行习惯。不同乘客的出行习惯不尽相同,所选择的要素要最大程度反映大部分乘客的出行习惯。

2) 有利于构建模型的稳定性。线网的结构规模会随着时间的推移而不断复杂化,所选用的要素要能够适应这种变化。

3) 有利于模型的实用性。所选要素要能实用于城市轨道交通票务清分的实际情况,尽可能使各运营商之间的利益都得到保障。

4) 有利于所构建模型的可验证性。可供选择的要素有很多,但是如果选择的要素太多,模型过于复杂,不利于构建模型的可验证性。

3.3 城市轨道交通票务清分模型应选用的 3 要素

借鉴北京、上海、广州、深圳四大城市建模时票务清分要素的选择经验,城市轨道交通票务清分模型应考虑旅行时间、旅行距离、换乘次数这 3 个要素。其原因如下:

1) 上述 3 个要素反映了 85% 以上乘客的出行行为。根据北京市 2014 年 2 月对轨道交通全线网的出行影响因素调查结果可知,时间最少、里程最短、换乘最少分别占乘客出行影响因素的 61%、9% 及 15%,而对乘客拥挤程度定义则不明确,目前可以不考虑拥挤程度这个因素。

2) 所建模型稳定实用,相对易于验证。基于 3 个可控要素建立的双比例多要素清分模型,忽略了其他不可控要素对清分模型的影响,相对而言更加易于验证,并且也能保持模型的稳定性和实用性。

3) 3 个要素可最大限度降低票务清分模型建设的风险。

4 票务清分模型的构建

票务清分模型如式(1)所示:

$$E_i = \sum_0 \sum_D W_{OD} \cdot \sum_{k=1}^K (P_{OD,k} \times \delta_{i,OD,k}) \tag{1}$$

式中:

- E_i ——线路 i 的分配收益;
- W_{OD} ——车站 O 至车站 D 的总收益;
- $P_{OD,k}$ ——客流分配系数;
- $\delta_{i,OD,k}$ ——线路 i 在由车站 O 至车站 D 的第 k 条路径上的里程比重。

清分模型的设计与构建由以下若干过程或步骤组成(见图 3)。

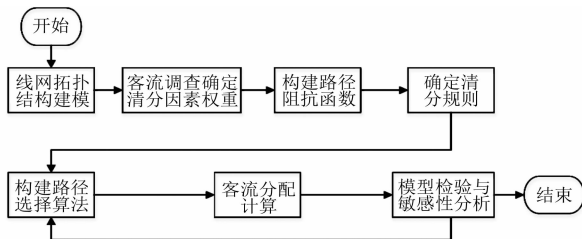


图3 票务清分模型建模步骤图

4.1 线网拓扑结构建模

线网拓扑结构图是指由站点和线路构成的元素结构图。针对城市轨道交通线网拓扑元素而言,线网拓扑结构图包括路网拓扑站点结点元素、区间边线元素、换乘结点元素、线路元素、可达路径元素、有效路径元素等。每个拓扑元素又都拥有若干属性。

4.2 客流调查确定清分因素权重

乘客对出行路径的选择偏好,受旅行时间、换乘次数、旅行距离等要素的综合影响。对于不同乘客而言,在其进行路径选择时,往往基于自身特点、出行特性等原因,必定将其中某一个要素作为其出行路径判断的首要因素。

对乘客出行路径选择的首要影响因素,可以通过一定样本的客流调查,获得在样本范围内,分别选用不同要素作为首要要素的乘客比例。当样本足够大时,可认为调查结果具有普遍适用性。因此,可以把乘客选择首要要素的比例,作为该要素的权重比例,是合乎上述逻辑要求的。

从客流调查问卷影响乘客换乘路线选择的5个因素中,选取乘客排序第1位的因素进行因素权重比例的计算。

以每份问卷作为1个样本,总样本数记为 n ,计算公式如下:

$$P_i = \sum_{i=1}^5 x_i / n \times 100\% \quad (2)$$

式中:

P_i ——第 i 个因素的权重比例;

x_i ——第 i 个因素。

目前,票务清分模型中需要将其中3个因素作为清分影响要素,故需把3个所选要素的所占权重比例再次归一化处理,即所选3要素按比例分摊其它两个要素的权重之和,如式(3)所示:

$$P_{j,0} = P_j + \sum_{k=1}^2 P_k \times P_j / \sum_{j=1}^3 P_j \quad (3)$$

式中:

$P_{j,0}$ ——第 j 个因素的归一化后的权重比例;

P_j ——所选3要素中的第 j 个因素, $1 \leq j \leq 3$;

P_k ——未选两要素中的第 k 个因素, $1 \leq k \leq 2$ 。

4.3 构建路径阻抗函数

所谓阻抗函数是指时间与线路交通负荷、中转站延误与中转站负荷之间的关系,其影响乘客对出行路径的选择和客流量的分配。在具体分配过程中,由区间乘坐时间及换乘站换乘延误共同组成出行交通阻抗,其中涉及因素包括乘车时间、换乘时间、候车时间等。阻抗在客流分配中可以通过路径阻抗函数来描述。

乘客选择路径考虑的3个主要因素分别为旅行时间(包含乘车时间、换乘时间)、换乘次数、旅行距离,其中以旅行时间的单位作为阻抗的量纲。

阻抗函数定义如下:路径阻抗=乘车时间+换乘放大与惩罚系数×换乘时间。其中,乘车时间=区间运行时间+列车停站时间。

$$c_{rs,k} = (T_{rs,k} + E_{rs,k}) \times \eta = [(1 + Y(x)) \times \sum (t_{w,k} + t_{m,k}) + \alpha \times \sum_{i=1}^{Z_i} \beta^{Z_i} \times (\lambda_i t_{i,k} + h_{i,k}) \times (1 + f(x_{i,k}))] \times \eta \quad (4)$$

式中:

$c_{rs,k}$ ——由 r 站至 s 站第 k 条路径的阻抗;

$T_{rs,k}$ ——由 r 站至 s 站第 k 条路径的总乘车时间;

$E_{rs,k}$ ——由 r 站至 s 站第 k 条路径的总换乘时间;

$Y(x)$ ——单位乘车时间内因车厢拥挤而产生的额外时间开销函数;

α ——乘客对换乘时间的敏感度,通过对乘客的调查分析获得;

β ——换乘次数的惩罚系数,通过对乘客的调查分析获得;

Z_i ——第 k 条路径所需的换乘次数;

λ_i ——第 i 次换乘所对应换乘站的换乘方式惩罚系数,即换乘步行时间转化率;

$f(x_{i,k})$ ——第 k 条路径的第 i 个换乘站的换乘拥挤度放大系数;

$t_{w,k}$ ——列车经过第 k 条路径上第 w 段的运行时间;

$t_{m,k}$ ——列车经过第 k 条路径上第 m 个站点的站停时间;

$t_{i,k}$ ——第 k 条路径上第 i 次换乘的换乘走行时间;

$h_{i,k}$ ——第 k 条路径上第 i 次换乘的换乘候车时间;

η ——乘客对乘坐站数的敏感程度, $\eta = \frac{S_{rs,k}}{S_{rs,\min}}$;

$S_{rs,k}$ ——由 r 站至 s 站第 k 条路径的总站数;

$S_{rs,\min}$ ——由 r 站至 s 站的最少站数。

客流调查显示,乘车站数对乘客出行选择影响最低,所以票务清分建模不考虑此参数。

4.4 构建路径选择算法

BFS(广度优先搜索算法)是一种图形搜索算法。简单而言,BFS 是从根节点开始,沿着树的宽度遍历树的节点。如果所有节点均被访问,则算法中止。BFS 算法作为多种计算机算法原型,具有普遍的适用性与应用价值。因此,票务清分建模采用 BFS 算法作为模型的路径搜索算法。

4.5 确定票务清分规则

清分规则是在遵循清分原则的前提下,针对各种具体情况而形成的由一系列规则组成的细则体系,是清分模型的组成部分,亦是调整和修改清分算法及其相关参数的依据。

城市轨道交通票务清分规则可以分为运营规则、清分方法规则和清分参数规则 3 大类(见图 4)。

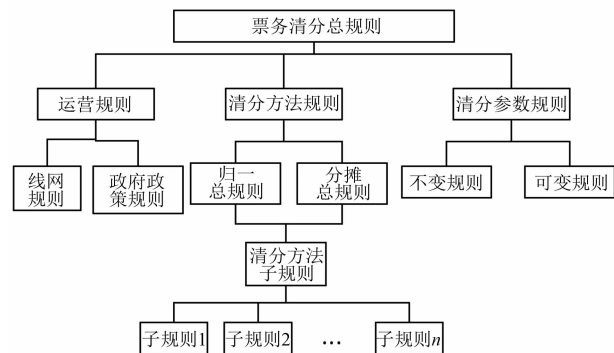


图 4 票务清分参数规则结构图

4.6 客流分配计算

目前,应用于城市轨道交通的客流分配计算方法均是从道路方法中借鉴而来的。近几年应用较广泛的是正态分布概率分配模型和 Logit 模型。

4.7 票务清分模型检验及敏感性分析

在票务清分模型构建过程中,会涉及部分影响因子的取值,取值后根据实际调研数据进行数据修正及阈值修改。其中,修改差异主要来源于乘客对出行费用的不同理解。对比分析有效路径选择结果与理论数值之间的差异,根据不同的行程结果反馈修正阈值,修正辅助分析参数敏感性。

5 结语

城市轨道交通网络化运营的票务清分模型的建立,实现了对不同路径乘客票款的清分,为线路成本规制及行车组织管理提供了依据,提高了管理的科学性。清分模型在运行期间不是一成不变的,其随着实际情况的不断变化而变化,因此票务清分模型还需要进行相应的调整。

1) 客流会随着时间的变化而相应变化,为了让票务清分更合理客观,需要定期优化模型参数。

2) 每开通 1 条新线,线网结构即会发生变化,客流的分配比例亦会发生变化,这时必须对票务清分模型的参数做出相应调整。

3) 随着线网的不断扩增,可能会不断有新运营商加入,当新的运营商对原有的票务清分规则不认可时,有可能需要对已有的票务清分规则进行调整。

参考文献

- [1] 李明高,毛保华,蒋玉琨,等.城市轨道交通网络换乘便捷性研究[J].中国铁道科学,2015(3): 113.
- [2] 钱堃,陈垚,毛保华.考虑换乘时间影响的城市轨道交通路径选择行为研究[J].交通运输系统工程与信息,2015(2): 116.
- [3] 林湛,蒋明青,刘剑锋,等.城市轨道交通客流分配的改进 Logit 模型及方法[J].交通运输系统工程与信息,2012(1): 145.
- [4] 秦志鹏.成网条件下城市轨道交通乘客出行路径选择问题研究[D].北京:北京交通大学,2011: 80.
- [5] 四兵锋,张好智,高自友.求解 Logit 随机网络配流问题的改进 Dial 算法[J].中国公路学报,2009(1): 78.
- [6] 毛保华,四兵锋,刘智丽.城市轨道交通网络管理及收入分配理论与方法[M].北京:科学出版社,2007.

(收稿日期:2018-12-28)

《城市轨道交通研究》欢迎投稿

投稿网址: tougao.umat1998.com