

## 城市轨道交通线网票务清分方法综述\*

王耀<sup>1</sup> 李继铭<sup>2</sup> 高申<sup>3</sup> 刘光杰<sup>1</sup> 徐忠全<sup>4</sup>

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 210044, 南京; 2. 南京地铁运营有限责任公司, 211135, 南京; 3. 南京熊猫信息产业集团公司, 210002, 南京; 4. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 100070, 北京)

**摘要** [目的]城市轨道交通迅猛发展,许多城市已形成多运营主体的轨道交通线网,并围绕“一卡通”和虚拟二维码等公共交通支付手段已融合形成更大的市域交通网络。城市轨道交通线网作为连接各种交通网络的核心,其票务清分尤为重要,有必要为国内相关城市票务清分系统建设和设计提供更为合理的清分方法。[方法]介绍了国内外城市轨道交通票务清分方案,对国内主要城市在多线路出行下的票务清分方法进行了分析和比较,通过分析清分模型与算法的优缺点选取适用的票务清分方法。[结果及结论]国内普遍采用的一票换乘模式,使得其仅依赖 OD(起讫点)对记录,难以公平合理地将票款分配给可能涉及多个运营主体,更为科学合理的清分方案需要进一步加强对 AFC(自动售检票)系统的大数据研究,更需要依托现有技术与计算模型加强对乘客选择路径行为的实时分析和超时预测精度,以推动清分机制能够按照实际运营情况准确地进行自适应动态调整。

**关键词** 城市轨道交通;线网;自动售检票系统;票务清分中图分类号 U293.22

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.053

## Review of Urban Rail Transit Ticket Clearing Methods

WANG Yao<sup>1</sup>, LI Jiming<sup>2</sup>, GAO Shen<sup>3</sup>, LIU Guangjie<sup>1</sup>, XU Zhongquan<sup>4</sup>

(1. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, 210044, Nanjing, China; 2. Nanjing Metro Operation Co., Ltd., 211135, Nanjing, China; 3. Nanjing Panda Information Industry Group Corporation, 210002, Nanjing, China; 4. Beijing Signal Group Research Institute Co., Ltd., 100070, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] With the rapid development of urban rail transit, many cities have formed rail transit line networks with multiple operating entities, and have integrated around public transportation payment methods such as "one-card" and

virtual QR codes to form a larger urban transportation network. As the core of connecting all kinds of transportation networks, the ticket clearing for urban rail transit line network is especially important. It is necessary to provide a more reasonable clearing method for the construction and design of ticket clearing systems for relevant cities in China. [Method] Through an introduction to urban rail transit ticket clearing schemes in both domestic and foreign cities, the ticket clearing methods for multi-line travel in major Chinese cities are analyzed and compared, and the applicable ticket clearing method is selected through analyzing the advantages and disadvantages of the clearing models and algorithms. [Result & Conclusion] The one-ticket transfer model commonly used in China relies only on OD (origin and destination) for checking records, making it difficult to fairly and reasonably distribute the fare to multiple operating entities that may be involved. A more scientific and reasonable clearing scheme needs to further strengthen big data research on the AFC (automatic fare collection) system, and more importantly, relying on existing technologies and computing models is required to strengthen the real-time analysis and overtime prediction accuracy of passengers' path selection behavior, so as to enable the clearing mechanism accurately make adaptive dynamic adjustments according to actual operating conditions.

**Key words** urban rail transit; line network; automatic fare collection system; ticket clearing

城市轨道交通特别是地铁已成为当代大城市居民出行的主要方式,既便利了居民生活,又大大减轻了地面交通的压力。随着城市轨道交通线网的日益扩大,为构建良好的城市轨道交通经营氛围,促进城市轨道交通的可持续经营和发展,如何使城市轨道交通线网的票款收入在不同经营者间客观、公正、合理地分配已成为城市轨道交通网络

\* 国家重点研发计划项目(2021QY0700);国家自然科学基金项目(U21B2003)

化经营管理的一个重要课题。

本文在介绍地铁线网清分系统和技术的基础上,总结归纳了国内外典型的线路票务清分方案,详细梳理线路,票务清分采用的模型和方法<sup>[1]</sup>,并分析了已有票务清分方法的优缺点,为涉及到多主体运营的票务清分方案提供设计参考。

## 1 城市轨道交通线网票务清分

### 1.1 票务清分概念

城市轨道交通线网票务清分的实质是:通过一定的方式,计量和分摊在城市轨道交通线网上各经营企业的经济收益。与车票利润清分有关的经济属性,主要有经营成本、站点规模、线路里程、换乘车站规模、换乘途径、行驶距离、营业期限、车票政策等,由于这些属性具有动态性,因此城市轨道交通线网票务收益清分的根本就是建立相对科学的清分原则,并转换为具体的清分方法,来测算各线路的分成比例。

### 1.2 票务清分体系

随着城市轨道交通网络的扩展,其票务清分方法也越来越复杂。票务清分技术演进历程中大致可概括为以下三种票务清分方法:早期人工分账方法,过渡阶段的出站确认法,当前广泛采用的基于乘客出行路径的清分方法。其中,第三种清分方法又可具体分为最短路径清分法<sup>[2]</sup>、K 短路径清分法<sup>[3]</sup>、多路径选择概率清分法<sup>[4]</sup>、高斯混合模型法等。

## 2 国内外城市轨道交通线网票务清分方案现状

### 2.1 国外主要城市的地铁线网票务清分方案

国外的许多城市轨道交通工程起步相对较早,对于票务清分系统的建立也相对较为完善。在国外城市中,现有地铁的换乘方式与票务清分方法多种多样,大致有以下两种:

1) 刷卡换乘:刷卡换乘的方式以巴黎城市轨道交通为代表,其主要特点是旅客必须刷卡出闸机才可以换乘到不同的线路。

2) 一票换乘:是指乘客只在进出车站时的 OD (起讫点)处刷卡,在换乘车站时无需刷卡。由于国外地铁通常是多主体运营,因此很少采用一票换乘方式。

由表 1 可知,国外大部分城市,虽然采取的是多

运营商共同投资的方式进行轨道交通的建设,其地铁线路间尽管是互联的,但为避免利润的纠葛,在大部分城市中要求旅客必须刷卡换乘,从而划分了不同的公司经营主体。

表 1 国外部分城市地铁线网的票务清分状况

Tab. 1 Ticket clearing status of subway line network in some foreign cities

城市名	投资方式	换乘方式	票务清分方法
纽约、东京	多投资方共同运营	相同投资商所属线路之间支持无障碍换乘,不同投资商所属线路之间需要刷卡出站然后进站	不存在利益纠葛,无需清分
芝加哥	多投资方共同运营	付费区换乘时要使用地铁卡,插卡但不扣除费用	记录了换乘信息,清分工作简单
巴黎	国家投资	全部线路实现闸机刷卡换乘	不存在清分
新加坡	多运营商	无障碍换乘	最短路径清分

### 2.2 国内主要城市的轨道交通线网票务清分方案

国内城市早晚高峰客运量大,更关注通行效率,目前普遍实行一票换乘方式。随着中国各城市轨道交通线网的扩展和完善,票务清分系统也在发生不断变化。现以北京、深圳、上海、广州、天津、南京为例,简要说明国内城市轨道交通线网票务清分系统的总体状况。

#### 2.2.1 北京

北京的城市轨道交通系统采用多比例清分方法。该方法仅考虑最短路径、最少换乘、最短时间 3 个因素。2008 年北京市地铁开始引入了基于多路径概率筛选方法的“两阶段、双比例”清分模式<sup>[5]</sup>。

2014 年前后,曾提议采取“推定型”的清分模式测算客运分布,通过乘客的旅行时间与实际列车运行图相匹配来完成运算与统计分析,以提高清点模型的精确度和可靠性。但是,由于推定型模型的约束条件较高、算法的模型相对来说较为复杂,在城市轨道交通网络中进行票款清分还是沿用了运算比较简单,且同时还可以提高整个系统分配可靠性的“分配型”方法模型。

#### 2.2.2 深圳

深圳对城市轨道交通线网的票务清分方法的选择,是随着地铁线网的复杂化和运营商的多元化而逐步改变的。早期,因为只是一家运营商,所以并没有做票务清分工作;2009 年,深圳轨道交通 3

号线投资公司投资经营3号线,开始时就实行最少途径清分方式;2013年,随着港铁运营商的投入经营,票务清分方法则由最短路径清分法转变为多路径选择概率清分法。此外,深圳地铁通过把路网布局、换乘方式、列车间距等决定因素产生的影响计算在路径阻抗中,再根据舒适度、拥堵程度等不确定因素的高峰时段(早高峰、晚高峰)和平峰时段对路径阻抗做出调整,具体执行了两套参数,一个适合于高峰时段,一个适合于平峰时段。

### 2.2.3 上海

上海城市轨道交通线网的票务清分方法主要经过四个阶段:无清分阶段(1993—2000年),人工分账阶段(2001—2005年),最短路径清分阶段(2006—2007年),K短路径清分阶段(2008年至今)。自2008年至今,上海城市轨道交通还引入了多路径选择概率清分法。由于乘客在选择行进路线上总会遵循相应的原则,即行进总里程最短、行进总时间最小、所经站点数量最少、所需换乘次数最少、拥挤量最少等。在参数调整策略上,上海城市轨道交通系统采取每条线路通车之后进行统一调度的管理模式。

### 2.2.4 广州

广州地铁在前期仅有2条线时采用出站确认法;从第3条线开通时,改用最短路径确认法;2006年路网结构变得更加复杂,为此进行多比例清分建模的立项。在2015年,6号线建成以前主要把单个OD之间的全部客流都安排在里程较少的有效路线上;在6号线建设以后,广州地铁使用多因素匹配算法,但其分摊比重不能充分考虑乘客的属性特征,不同线路间的分摊计算规则还缺乏较好的科学基础。为此,着重研究了“双比例”原则中的客流分配比例,并针对客运属性分类加以清分,提供了在实际经营工作中简便可行的清分算法。

### 2.2.5 天津

天津地铁在票务清分规则设置时以车站为清分基点,采用将运营收益清分至每个车站的模式,主要提供支持最短路径寻径和时间权重寻径两种路径选择方案。

### 2.2.6 南京

南京地铁在只有2条线路时采用的票务清分方法是最短路径确认法,2015年有了多条线路后南京地铁采用多路径选择概率清分法。客流根据在OD的各个出行路线中的权重分配,分为三步完成:第

一步,利用计算机模糊判别技术,对乘客乘坐地铁后实际经过的路线作出模拟判别,确定两站之间的所有路线;第二步,采用阈值计算的方式完成有效路线的确定,并用分摊法对有效路线进行计算;第三步,根据路线距离、车站班次密度、换乘便利性、车厢舒适程度等乘客对路线的不确定因子,对前一步骤测算得出的乘客对路线的权重进行调整。

## 3 当前主要线路间的票务清分方法

在存在多种换乘选择时候,票务清分的实质是票款在不同线路上的清分。

### 3.1 最短路径清分法

如果某条出行路径的路径阻抗很小,则该路径即是最短路径。所谓路径阻抗是指以出行时间为基本要素,综合考量换乘时间、拥堵情况、交通安全以及妨碍乘客出行路径选取的各种因素。

假设在OD的各路径中,路径*i*具有最少的路径阻抗,即路径*i*也将是在OD中的最短路径。最短路径清分法的基本思路是,首先使用路径搜索算法找出OD中的最短路径,其次再将OD中的所有客流分摊在该路径上,最后再依据该路径上相关网络所对应的营业里程数,测算出在该线路上各网络所对应的最后清分份额。

这种清分法的好处是易于应用,同时也在线网规模不太复杂的情形下,可以更好地表现出多数OD间的客运分配情况。目前,该方法已经被不少线网还未成形的城市轨道交通系统所使用。

### 3.2 K短路径清分法

由于线网日益复杂化,最短路径清分法不符合实际的人流分布情况。K短路径清分法的主要思路是把OD之间的客流分摊给比OD间路径阻抗小的*k*条路径。K短路径清分法是建立在最短路径清分法的基础上,根据最短路径优先被乘客所选择,然后选取次短路径,进而选择次次短路径来构建的,在处理时会选取几率相对较大的*k*条路径作为有效出行路径。K短路径清分法的具体流程包括:

1) 步骤1:计算出对应的最短路径(阻抗最小的路径);

2) 步骤2:将最短路径的其中一段路径移除,用其他可达路径中的最短路径代替移除的路径。基于此,形成了一条不同于步骤1中最短路径的路径;

3) 步骤3:重复步骤2,将所有得到的路径进行



整合,选择其最短的即可。

在实际应用中,一般取  $k \leq 5$ 。确定了 OD 间的  $k$  条最短路径后,需要确认这  $k$  条路径的乘客选择的概率,通常利用 Logit 模型或者正态分布模型得出 K 短路径清分法的客流分配比例。

K 短路径清分法是对最短路径清分法的补充和完善,但是该模型在最短路径计算方面考虑的路径阻抗因素较为单一,特别当路网规模扩大、换乘站点增多且附带考虑其他等待时间因素时,K 短路径清分法的计算有可能与实际乘客选择差异较大,且分配比例的参数也缺乏有效的校正机制,导致清分不够精确和公平。

### 3.3 多路径选择概率清分法

多路径选择概率清分法中最主要的是双比例多因素法。“双比例”是指在有效路径的客流分配比例和线路里程分配比例。

设城市轨道交通线网中某 OD 对间票价为  $q$ , 设总出行量为  $d$ , 则该区间的票价收入  $R = dq$ 。假设乘客们能够在 OD 之间的  $w$  条有效路线中随机选取一个,并假设在第  $w$  条路线的选取几率为  $P_w$ ; 用向量  $A = [a_{1i} \ a_{2i} \ \cdots \ a_{wi}]^T$  表示 OD 对的  $w$  条路径上  $i$  号线所占站点数的比例,则在这个 OD 对之间地铁  $i$  号线运营商所占的清分比例  $Q_m = P_w A_i$ 。  $Q = [Q_1 \ Q_2 \ \cdots \ Q_i]$  也可用于描述与城市轨道交通  $i$  号线 OD 对之间所取得的清分份额,则地铁  $i$  号线所取得的收入  $C_i = RQ_i$ 。

“多因素”主要是在清分过程中引入考虑的各种要素,具体地可分为:① 确定性因素是由于地铁线路的规划和运行管理因素所决定的因素,包括出行时段、出行间隔、换乘时间、运行方式和各线的运行工作时间等;② 不确定性因素是指由于现实状态的差异,在不同的时段、不同情况下可能有所不同,如换乘时间、道路拥堵程度、出发日期和出行时间等。

多因素分析主要指通过实地调研与统计分析,找出阻碍乘车路径选择的主要因素,并由此建立出行路径的阻抗函数。这里的路径阻抗函数是指综合各种主要因素后得到的线路赋值。在票务清分中,把每个有效路径的路径阻抗值作为输入,使用 Logit 模式和正态分布模式确定各有效路径的客流分配比例。

双比例多因素法本质上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。但

是,类似 K 短路径清分法,双比例多因素法采用 Logit 模型或者正态分布模型进行客流分配比例的计算也存在主观性和参数难以校准的问题。

### 3.4 高斯混合模型法

高斯混合模型法本质上是一种基于 OD 记录中包含的进出站时间信息推断乘客线路选择的方法。OD 记录中的进出站时间差,即指乘客的出行时间由上车时刻、运行时刻、候车时刻所构成,其中:乘车时刻包括车站间运营时间和停站时间<sup>[6]</sup>;车站间运营时间是指列车在两个车站间的运营时间,在通常情况下是固定不变的;站停时间在各个车站有差别,但仍然是比较固定的。因此,乘车时间取决于行车调度且大多数情况下是稳定不变的。

相比较而言,乘客行走距离的影响因素要多得多,首先和行走速度直接有关,同时也和乘客上下车的车厢距离、换乘路径、车站的拥挤度强等相关。乘客的候车时间则决定于行车调度时刻、进站时间、步行时间和车站的拥挤度。

综上,影响出行时间的因素非常多,因此高斯混合模型法假设当 OD 之间的路线只有 1 个时,乘客的出行时间也是遵循着单高斯分布规律的;当 OD 之间的路线有多条时,旅客出行时间也是遵循着混合高斯分布规律的(即不同路径选择下的高斯分布的混合)。在 OD 之间存在多个有效路线时,通过 EM(期望最大化)算法可以对混合的比例进行估计。实际操作中的高斯混合模型法参考了多因素机制,来筛选所有有效路径数量,以确定输入到 EM 算法中的计算参数。

总体来说,高斯混合模型法基于 OD 中包含的时间信息,是一种可由实际出行数据校准的方法,其计算的比例可信性较强,相对上述几种方法更为合理,但是乘客出行时间是否较为严格地符合高斯分布、多路径之间是否统计上可区分、基于多因素的有效路径筛选是否客观合理等问题依然存在值得进一步研究之处。

基于以上分析,当前主要线路间的票务清分方法的特点如下:

1) 最短路径清分法、K 短路径清分法较为简单,分别基于路程来找到 OD 之间的最短和有效路径,在多路径的基础上通过一种最小路径阻抗优先的统计分布来进行多线路之间的分配。

2) 多路径选择概率清分法在路径阻抗设计方面,考虑了更多的影响因素,并通过调查的形式确

定主要影响因素,融合形成了综合性的路径阻抗函数,并使用类似于 K 短路径清分法进行线路之间的概率分配。

3) 高斯混合模型法挖掘利用 OD 中包含的时间信息,提出通过估计多个可区分高斯源随机变量的混合比例来确定多路径之间的乘客选择比例。

## 4 结语

本文主要介绍了城市轨道交通系统票务清分的基本概念,调研给出了国内外主要城市轨道交通线网采用的票务清分方案。详细介绍了国内主要城市采用的最短路径清分法、K 短路径清分法、多路径选择概率清分法、时间权重法和高斯混合模型法,并分析了其优缺点。现有研究和相关实践表明,复杂交通网络背景下的票务清分依旧是个具有非常挑战性的课题,给出更为科学合理的清分方案不但需要进一步加强对 AFC(自动售检票)系统的大数据研究,更需要依托现有技术与模型加强对乘客选择路径行为的实时分析和超时预测精度,推动清分机制能够按照实际运营情况准确地进行自适应动态调整。

## 参考文献

- [1] 侯文静. 轨道交通票务清分体系的建设[J]. 现代经济信息, 2018(9): 371.  
HOU Wenjing. Construction of ticketing sorting system in rail transit[J]. Modern Economic Information, 2018(9): 371.
- [2] 钟锐楠. 地铁清分系统中票务管理的设计与实现[D]. 西安:

西安电子科技大学, 2019.

ZHONG Ruinan. Design and implementation of ticket management in subway clearing system[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.

- [3] 潘祥. 网络状态下的城市轨道交通清分方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
PAN Xiang. Research on income distribution model of urban rail transit under the network condition [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [4] 周翔. 地铁票务清分系统的设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.  
ZHOU Xiang. Design and implementation of subway clearing system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [5] 方佳锴. 一种基于高斯混合模型的不均衡分类方法[J]. 电脑知识与技术, 2022, 18(2): 28.  
FANG Jiakai. An unbalanced classification method based on Gaussian mixture model[J]. Computer Knowledge and Technology, 2022, 18(2): 28.
- [6] 黄艳国, 张升升, 刘红军. 基于高斯混合模型聚类算法的交通状态划分[J]. 现代电子技术, 2022, 45(7): 168.  
HUANG Yanguo, ZHANG Shengsheng, LIU Hongjun. Urban road traffic state identification based on Gaussian mixture model clustering algorithm[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(7): 168.

· 收稿日期:2022-10-24 修回日期:2023-03-02 出版日期:2024-12-10

Received:2022-10-24 Revised:2023-03-02 Published:2024-12-10

· 通信作者:王耀,硕士研究生,360233369@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## 《城市轨道交通设施设备运行维护管理办法》修订版发布

日前,交通运输部发布了修订后的《城市轨道交通设施设备运行维护管理办法》(交运规〔2024〕9号,以下简称《管理办法》)。

修订背景为:2019年,交通运输部发布了《城市轨道交通设施设备运行维护管理办法》(交运规〔2019〕8号),在指导地方加强设施设备运行维护、保障运营安全等方面发挥了重要作用。为充分汲取近年来发生的险性事件教训,进一步强化设施设备维护管理,结合行业发展实际,对《管理办法》部分内容作了修订完善。

修订的主要内容为:修订后的《管理办法》共6章34条。完善了设施设备状态运行监测体系,增加了通信、信号等系统的运行测试和安全防护要求。优化了车辆、信号、通信等设施设备维护要求,强化了设施设备更新改造全过程安全要求。进一步明确了,委外维修单位应具备安全管理条件和技术能力,加强对委外单位的监督检查要求,夯实运营单位对委外维修的安全管理责任。

(来源:交通运输部官网)