

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.08.025

城市财政可持续视角下城市轨道交通 定价方法研究

刘美银, 王建伟

(长安大学 经济管理学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 从城市财政可持续发展视角, 构建了成本和收益平衡条件下的城市轨道交通定价模型, 分析了城市对外扩展距离和城市轨道交通定价的关系, 提出了计算方法, 进行了算例分析。研究表明: 城市轨道交通对外扩展距离受到客流量和票价率相互作用影响, 一方面, 随着对外扩展距离增长, 在票价不变前提下, 由于客流量急剧降低, 政府补贴对促进降低票价率的作用日益减弱; 另一方面, 相同的政府补贴额, 过高的票价率, 会导致客流量减少, 进而使城市轨道交通对外扩展的距离减少。

关键词: 运输经济; 定价模型; 城市轨道交通定价方法; 财政可持续发展

中图分类号: F570.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2015) 08-0150-09

A Method for Pricing of Urban Rail Transit from Perspective of Financial Sustainability

LIU Mei-yin, WANG Jian-wei

(School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: We constructed the pricing model of urban rail transit under the equilibrium situation of costs and benefits to ensure financial sustainability for the expansion of urban city, analyzed the relationship between the distance of expansion and the pricing of urban rail transit, proposed a calculation method, and conducted the case study. The result shows that there is an interactional effect of the passenger volume and fare rate on the distance of expansion, (1) on one side, passenger volume decreases sharply when the distance of expansion increases with a fixed ticket price, which leads to less infection of government subsidy on the decrease of fare rate; (2) on the other side, under the situation of the same government subsidy, the higher the ticket rate is, the less the passenger volume is, which leads to less distance of the expansion.

Key words: transport economics; pricing model; pricing method of urban rail transit; financial sustainable development

0 引言

城市轨道交通作为城市交通重要组成部分, 是中心城市发展的重要载体^[1-2]。一些大中城市比较偏向于以城市轨道交通为载体, 实现对外快速扩展直接带动沿线经济社会发展, 进而实现居民“市民化”^[3-5]。但是, 城市轨道交通具有一次性投资大、运营成本高特点, 其对外扩展规模往往受到城市

政府财政收入和投入能力的限制, 进而影响对外扩展距离^[6-7]。票价对于平衡政府城市化对外扩展速度和缓解政府财政投入压力起到关键作用, 是维持政府的城市轨道交通建设运营财政支出可持续的重要因素^[8]。一方面, 制定城市轨道交通高票价, 可以提高城市轨道交通企业可持续发展能力, 减少城市政府建设运营财政资金投入, 可以有更多资金建设和运营城市轨道交通网络, 对外扩展速度更快,

收稿日期: 2015-03-19

作者简介: 刘美银 (1969-), 男, 江西石城人, 博士. (liumeiyin@mot.gov.cn)

但也会迫使乘客支付大量的票款, 增加乘客出行负担, 降低了城市轨道交通吸引力, 影响线路承载客流量。另一方面, 制定城市轨道交通低票价, 将增大企业亏损, 增加城市政府财政补贴压力, 不利于企业可持续经营, 也会减缓城市化对外扩展速度。为此, 以城市政府的财政可持续性为视角, 研究城市轨道交通定价方法, 对于正确认识和制定城市轨道交通对外扩展战略具有重要意义。

在分析了城市轨道交通线路规划、建设、运营成本 and 沿线土地收益的组成部分基础上, 提出了计算方法, 构建了考虑城市轨道交通土地收益、全生命周期成本、城市对外扩展的轨道交通票价定价模型, 并进行了算例分析, 以检验模型的有效性。

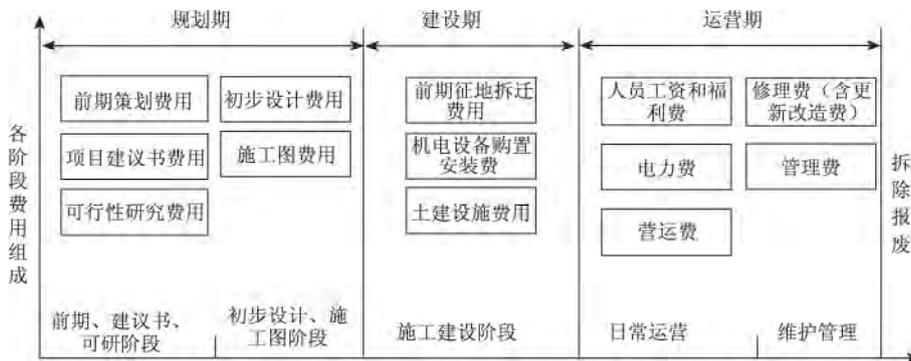


图 1 城市轨道交通全生命周期成本组成框图

Fig. 1 Block diagram of the whole life cycle cost of urban rail transit

1.2.1 规划设计成本计算方法

规划设计成本主要包括: 前期策划费用、项目建议书阶段费用、可行性研究费用及勘察设计费等。规划设计费用可按照建设成本的一定比例进行计算。

1.2.2 建设成本计算方法

建设成本主要由前期征地拆迁费用、土建设施费用、机电设备购置安装费等 3 部分组成。前期征地拆迁费用包括征地补偿、耕地占用税或者城镇土地使用税、管线、房屋和城市公用设施拆除以及交通疏解等费用。

根据《城市快速轨道交通工程项目建设标准》(试行), 对于固定资产折旧年限的要求, 可以算出车辆折旧率为 3.84%、车辆外的其他固定资产年综合基本折旧率为 4%。

全线城市轨道交通工程建设成本分担到每年的使用成本之和 $M_{i_建}$ 可以通过式 (1) 计算得到:

$$M_{i_建} = \sum_{j=1}^J \frac{v_{ij} \cdot r_i}{k_{ij}}, \quad (1)$$

1 模型的建立

1.1 问题描述

城市政府通过建设和运营城市轨道交通线路进行对外扩展, 以实现达到城市化目标, 但建设运营资金不可能无限制的追加, 会受到城市政府财政能力限制。假设若保持城市政府对于城市轨道交通建设运营的财政可持续性, 则需维持城市政府在城市轨道交通建设运营财政投入和收益方面的平衡。那么, 在给定中心城市对外扩展目标下, 城市轨道交通票价应当在什么水平, 才能维持城市轨道交通建设运营财政的可持续性?

1.2 生命周期成本分析

城市轨道交通全生命周期主要包括: 规划、建设、运营等阶段及拆除报废阶段等, 如图 1 所示。

式中, $M_{i_建}$ 为第 i 条线路工程建设成本分担到每年后, 平均每年的折旧 (或者使用) 成本; v_{ij} 为第 i 条线路第 j 种设施设备单位里程建设成本; k_{ij} 为第 i 条线路第 j 种设施设备的折旧年限; r_i 为第 i 条线路对外扩展距离。

在实际计算过程中, 各设施设备单位里程的使用成本和折旧成本可由实际统计得到, 可按表 1 估算得到。

1.2.3 运营成本计算方法

运营成本由经营成本和财务成本等两类组成。其中, 经营成本包括: 人员工资和福利费、电力费、修理费 (包括更新改造费用)、运营费以及管理费等, 但不包括固定资产折旧及费用摊销, 该费用已纳入建设成本中。

(1) 经营成本

1) 人员工资和福利费。主要包括: 年度人员工资、年度福利费用等两部分, 具体计算如式 (2) 所示:

表1 城市轨道交通设施设备建设资金估算参考表

Tab.1 Reference table for construction fund estimation of urban rail transit facilities

基本类别	类别	单位公里造价/万元	折旧年限
土建设施	车站	10 285	50
	区间	8 362.4	100
	轨道	1 006.2	10
	供电	3 852.6	15
	通信	855.2	15
机电设备	信号	1 470.2	15
	通风及空调	1 371.2	15
	自动售检票	909.2	10
	自动电扶梯	839.0	18
	其他	1 447.0	10
合计		30 398	—

$$F_{i, \text{人员}} = 10^{-4} f_{i, \text{人员}} \cdot \sigma_i (1 + \partial_{i, \text{人员}}), \quad (2)$$

式中, $F_{i, \text{人员}}$ 为第 i 条线路人员工资及福利费用; $f_{i, \text{人员}}$ 为第 i 条线路人员年平均工资; σ_i 为第 i 条线路人员定员数; $\partial_{i, \text{人员}}$ 为第 i 条线路人员福利占工资比例系数。

在实际计算过程中, 从业人员数量、工资福利可通过运营企业的实际数据得到。若统计数据不足情况时, 运营从业人员数量可按照中国土木工程学会标准《城市轨道交通运营管理指南》(CCES 01—2010) 所推荐的每公里配备从业人员 60 人来计算。运营从业人员平均工资水平可按照运营线路所在城市的职工工资平均水平来计算。职工福利费可按照国家有关规定, 取值为职工工资总额的 14% 进行计算。

2) 电力费。主要包括: 车辆牵引用电和动力照明用电费用。年度企业电力 D_i 的具体计算如式 (3) 所示:

$$D_{i, \text{电力}} = 10^{-4} \cdot 365 \cdot d_{i, \text{电力}} \cdot \omega_{i, \text{电力}}, \quad (3)$$

式中, $D_{i, \text{电力}}$ 为第 i 条线路年电力费; $d_{i, \text{电力}}$ 为第 i 条线路日均耗电量; $\omega_{i, \text{电力}}$ 为第 i 条线路单位耗电成本。

在实际计算过程中, 企业日均耗电量和耗电成本可统计得到。若无相关数据, 则电费按照每度 0.7 元计算。牵引耗电为每百里程 300 kW·h。动力照明约为牵引供电 1/3 来计算。

3) 修理费。主要包括车辆、其他设备的日常维修保养及大修提存。目前, 国内在这个费用上差异较大, 也没有统一标准。为此, 在实际计算中, 推荐采用 4.5 元/(veh·km) 测算, 年度走行车里程数有统计数据得到。在数据缺失情况下, 建议: 发车间隔在 2 min, 日均为 10 万 veh·km, 发车间隔在

10 min, 日均间隔取 2 万 veh·km。

$$B_{i, \text{修理}} = 10^{-4} \cdot 365 \cdot a_{i, \text{修理}} \cdot b_{i, \text{修理}}, \quad (4)$$

式中, $B_{i, \text{修理}}$ 为第 i 条线路年度修理费; $a_{i, \text{修理}}$ 为第 i 条线路单位里程修理费用; $b_{i, \text{修理}}$ 为第 i 条线路日均车公里数。

4) 营运费。主要指与营运运营有关的费用, 包括水费、运输费、事故费、计量费、车票印刷费、清洁费等。目前, 国内在这个费用上差异较大, 也没有统一标准。为此, 在实际计算中, 推荐采用 1.2 元/(veh·km) 及进行测算。

$$Y_{i, \text{营运}} = 10^{-4} \cdot 365 \cdot y_{i, \text{营运}} \cdot b_{i, \text{营运}}, \quad (5)$$

式中, $Y_{i, \text{营运}}$ 为第 i 条线路年度营运费; $y_{i, \text{营运}}$ 为第 i 条线路单位里程营运费; $b_{i, \text{营运}}$ 为第 i 条线路日均车公里数。

5) 管理费。主要包括管理人员工作及福利、工会经费、办公费、职工教育经费等。无统计数据情况下, 计算中建议 $g_{i, \text{管理}}$ 取值为 15%。

$$G_{i, \text{管理}} = g_{i, \text{管理}} \cdot O_{i, \text{运营}}, \quad (6)$$

式中, $G_{i, \text{管理}}$ 为第 i 条线路年度管理费; $g_{i, \text{管理}}$ 为第 i 条线路年度管理费占总成本比例系数; $O_{i, \text{运营}}$ 为第 i 条线路年度总体运营成本。

(2) 财务费用

财务费用主要包括城市轨道交通线路在运营期间应支付的固定资产投资借款及流动资金贷款利息等。无银行利率情况下, 建议贷款按月利率 0.5% 取值, 还款期限为 30 a, 即为 360 个月。

$$W_{i, \text{贷款}} = \frac{12 \cdot E_{i, \text{贷款}} \cdot \kappa_{i, \text{贷款}} \cdot (1 + \kappa_{i, \text{贷款}})^{\ell_{i, \text{贷款}}}}{(1 + \kappa_{i, \text{贷款}})^{\ell_{i, \text{贷款}}} - 1}, \quad (7)$$

式中, $W_{i, \text{贷款}}$ 为第 i 条线路贷款中一年需还款额; $E_{i, \text{贷款}}$ 为第 i 条线路建设和运营贷款额度; $\kappa_{i, \text{贷款}}$ 为第 i 条线路年度总体运营成本; $\ell_{i, \text{贷款}}$ 为第 i 条线路贷款还款期限。

据国内主要地铁运营统计发现, 每条线路的各运营成本组成及费用预估如表 2 所示。

表2 城市轨道交通线路运营成本总估算

Tab.2 Total cost estimation of urban rail transit operation

基本类别	类别	年费用/万元
运营成本	员工工资费用	4 800
	电费	2 500
	维修费	3 000
	营运费	900
	管理费	1 600

注: 表中费用主要根据国内线路平均预估

$$O_{i, \text{运营}} = F_{i, \text{人员}} + D_{i, \text{电力}} + B_{i, \text{修理}} + Y_{i, \text{营运}} + G_{i, \text{管理}} + W_{i, \text{贷款}}, \quad (8)$$

根据式 (2) ~ 式 (6), 可以得到:

$$O_{i, \text{运营}} = [10^{-4} f_{i, \text{人员}} \cdot \sigma_i (1 + \partial_{i, \text{人员}}) + 10^{-4} \cdot 365 \cdot d_{i, \text{力员}} \cdot \omega_{i, \text{力员}} + 10^{-4} \cdot 365 \cdot a_{i, \text{修理}} \cdot b_{i, \text{修理}} + 10^{-4} \cdot 365 \cdot y_{i, \text{营运}} \cdot b_{i, \text{营运}} + G_{i, \text{管理}} + \frac{12 \cdot E_{i, \text{贷款}} \cdot \kappa_{i, \text{贷款}} \cdot (1 + \kappa_{i, \text{贷款}})^{\ell_{i, \text{贷款}}}}{(1 + \kappa_{i, \text{贷款}})^{\ell_{i, \text{贷款}}} - 1}] (1 - g_{i, \text{管理}}), \quad (9)$$

通过式 (9), 可以计算得到线路运营成本。

1.3 沿线土地开发收益分析

各城市在修建城市轨道交通工程时, 往往会将沿线部分土地产权和开发权划拨给城市轨道交通企业, 以此来弥补建设运营成本。下面主要分析影响土地开发收益因素以及如何计算土地收益两个内容。

1.3.1 影响因素分析

沿线土地开发收益影响因素包括: 沿线土地价格、土地面积、征地和安置费情况以及土地市场开发费用等。

(1) 沿线土地价格: 受到土地性质、周边交通接驳、分批开发情况等因素影响, 分为商业用地、居住用地等。

(2) 土地面积: 沿线政府土地出让面积、沿线车站综合开发面积。

(3) 征地和安置费用情况: 主要受到土地政策和城市土地供需情况等影响, 同时还受到土地出让性质影响, 如农地、滩地等, 不同的出让性质, 直接影响征地和安置费用。

1.3.2 计算方法

沿线土地开发收益可以弥补企业经营亏损, 主要由沿线土地开发销售收入、开发过程支出以及开发商分成决定。城市轨道交通沿线土地开发收益收入 $S_{i, \text{收益}}$ 可以表示为:

$$S_{i, \text{收益}} = S q_{i, \text{销售}} - Z_{i, \text{开支}} - f_{i, \text{分成}}, \quad (10)$$

式中, $S_{i, \text{收益}}$ 为第 i 条线路土地收益; $S q_{i, \text{销售}}$ 为第 i 条线路沿线住宅或商业设施销售收入; $Z_{i, \text{开支}}$ 为第 i 条线路土地开发开支; $f_{i, \text{分成}}$ 为第 i 条线路土地开发过程开发商利益分成。

(1) 开发销售收入情况

沿线销售收入主要是沿线土地住宅和商业设施销售收入, 为可销售建筑总面积和建设单位售价乘积。

$$S q_{i, \text{销售}} = \sum_{u=1}^U \alpha_{i, \mu, \text{销售}} \cdot \beta_{i, \mu, \text{销售}}, \quad (11)$$

$$U_{i, \text{开发面积}} = \sum_{u=1}^U \alpha_{i, \mu, \text{销售}}, \quad (12)$$

$$S_{i, \text{收益}} = \sum_{u=1}^U \alpha_{i, \mu, \text{销售}} \cdot \beta_{i, \mu, \text{销售}} - (\xi_{i, \text{征地拆迁}} + \zeta_{i, \text{税费}} + \omega_{i, \text{建设成本}} + v_{i, \text{融资费用}} + \tau_{i, \text{销售费用}}) \cdot U_{i, \text{开发面积}} - f_{i, \text{分成}}, \quad (13)$$

式中, $\alpha_{i, \mu, \text{销售}}$ 为第 i 条线路第 u 种类型开发建筑销售总面积; $\beta_{i, \mu, \text{销售}}$ 为第 i 条线路第 u 种类型开发建筑单位售价; $\xi_{i, \text{征地拆迁}}$ 为第 i 条线路单位面积的征地费用、安置补助费及房屋拆迁费用; $\zeta_{i, \text{税费}}$ 为第 i 条线路单位面积的规费、管理费、设计费以及监理费; $\omega_{i, \text{建设成本}}$ 为第 i 条线路单位面积的建造成本; $v_{i, \text{融资费用}}$ 为第 i 条线路单位面积的融资成本; $\tau_{i, \text{销售费用}}$ 为第 i 条线路单位面积的销售费用; $U_{i, \text{开发面积}}$ 为第 i 条线路沿线开发建筑总面积。

(2) 开发费用支出情况

沿线开发费用支出主要由征地拆迁、建设成本、税费、融资成本、建设成本及销售费用等组成:

$$Z_{i, \text{开支}} = (\xi_{i, \text{征地拆迁}} + \zeta_{i, \text{税费}} + \omega_{i, \text{建设成本}} + v_{i, \text{融资费用}} + \tau_{i, \text{销售费用}}) \cdot U_{i, \text{开发面积}}, \quad (14)$$

式中 $Z_{i, \text{开支}}$ 为第 i 条线路土地开发过程的开支。

(3) 开发商利益分成情况

$$h_{i, \text{分成}} = K_{i, \text{分成}} \cdot f_{i, \text{分成}}, \quad (15)$$

式中, $f_{i, \text{分成}}$ 为第 i 条线路土地开发过程开发商利益分成; $h_{i, \text{分成}}$ 为第 i 条线路土地开发过程轨道公司利益分成; $K_{i, \text{分成}}$ 为第 i 条线路土地开发过程轨道公司和开发商利益分成系数。

1.4 沿线客流量分析

目前, 各城市在建设城市轨道交通线路实现对外扩展时, 往往会带动沿线与城市中心的人员交流, 直接使沿线客流量激增。下面分析影响沿线客流分布因素及承担量。

1.4.1 影响因素分析

沿线客流量影响因素包括: 沿线人口分布情况、城市对外结构布局、沿线交通衔接情况、沿线站点分布情况等。为方便起见, 以下主要分析沿线人口分布和站点分布情况等对城市轨道交通线路沿线客流量影响。

(1) 沿线人口分布情况

一般来说, 沿线区域的人口密度越大, 那么可能产生人员交流的可能性越大, 客流量也越大。以中心城区为核心的城市, 对外以不同圈层实现扩展, 不同的圈层的人口密度不同, 越是外层人口密度月低, 中心城镇的人口密度大。因此中心圈层的城市

轨道交通断面客流量大, 外围圈层的城市轨道交通客流量相对要小。

(2) 沿线站点分布情况

沿线站点分布将直接影响客流量的承担情况。一般来说, 在站点间隔小, 且站点数量多的情况下, 城市轨道交通对沿线的吸引范围越大, 客流量也越大。但是, 城市轨道交通定位是一种解决城市中长途客流的交通方式, 从节约城市轨道交通建设成本及提高运营效率出发, 城市轨道交通的站点不可能无限的多, 且间隔也可能太密。此外, 还和站点类型有关, 换乘站客流量比较大。

其次, 沿线城镇的对外结构布局、沿线交通衔接情况等也对城市轨道交通沿线的客流量产生较大影响, 沿线城镇的商业设施或者居民区分布越集中, 沿线交通衔接越好, 那么城市轨道交通沿线的客流量将越大。

1.4.2 计算方法

按照上述客流量影响因素分析, 结合杨京帅、张殿业等提出的城市轨道交通合理吸引范围计算方法, 可以计算得到城市轨道交通沿线客流量。按照方格网所有距离车站不大于接运距离 L 的各点都在面积为 $2L^2$ 的正方形内; 该情况下相当于以 $R = \sqrt{2.343\pi}L = 0.798L$ 为半径的圆形, 可近似认为距线路两侧各 $0.798L$ 的距离为车站的合理吸引范围, 即折算系数 $Z = 0.798$, 如图2所示。

$$Q_i = \sum_{j=1}^J \mu_{ij} \rho_{ij} \cdot 0.798L_{ij}^2, \quad (16)$$

式中, Q_i 为第 i 条线路的客流量; ρ_{ij} 为第 i 条线路 j 车站区域人口密度; μ_{ij} 为第 i 条线路 j 车站区域的客流吸引率。

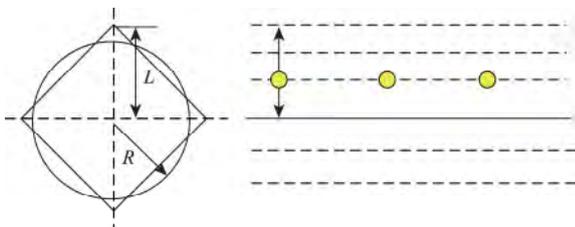


图2 城市轨道交通沿线站点客流吸引范围示意图

Fig. 2 Schematic diagram of attraction range of passenger flows at stations along urban rail transit

1.5 定价模型

为了便于研究起见, 假设城市轨道交通对外扩张按照圈层方式, 如图3所示。构建模型过程中, 假设以下条件:

(1) 城市轨道交通的客流承载能力大于等于实

际客流。

(2) 城市中心向外同一圈层的人口密度相等。

(3) 城市轨道交通运营的各个时期内, 任何时间的乘客获得的服务是同质的, 乘客乘坐任何时期城市轨道交通线路的心理感受没有差异。

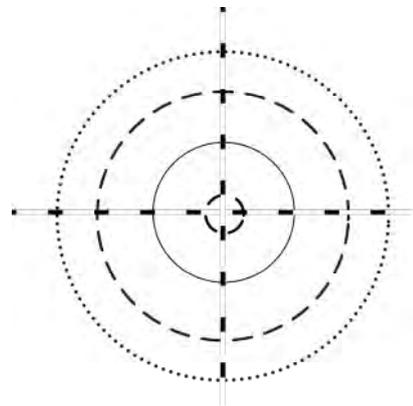


图3 城市轨道交通沿线对外扩充圈层结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of circle expansion along urban rail transit

除了已定义的符号外, 还需要定义以下符号:

P_i 为第 i 条线路每公里计算票价; ℓ 为第 i 条线路规划设计和建设成本的比例系数; $P_{i\text{票价}}$ 为第 i 条线路乘客每公里支付票价; $P_{i\text{能力}}$ 为第 i 条线路乘客每公里最大可承受支付水平; \bar{h}_i 为第 i 条线路运营中政府补贴额度; H_{\max} 为第 i 条线路政府最高运营补贴额度。

简单来说, 为确保城市轨道交通可持续经营, 在进行城市化对外扩展举措时, 需要根据自身财务和票价收入情况进行灵活调整, 以维持系统可持续经营。尽可能减少城市轨道交通票价, 减轻乘客出行负担, 增加城市轨道交通客流量。

$$\frac{1}{2} Q_i \cdot P_i \cdot r_i = H_{i\text{规划}} + M_{i\text{建设}} + O_{i\text{运营}} - S_{i\text{收益}}, \quad (17)$$

经计算得到:

$$P_{i\text{票价}} = P_i - \frac{\bar{h}_i}{Q_{i\text{运营}}}. \quad (18)$$

模型约束条件主要有以下3个。

(1) 政府补贴的限制, 政府投资城市轨道交通运营亏损的补贴不能超过其最高值, 即不能超过政府的支付能力。城市财政可持续主要是通过限制政府交通补贴数额, 维持在一定范围之内, 不能无限增长, 以减轻政府财政压力。

$$\bar{h}_i \leq H_{\max}. \quad (19)$$

(2) 乘客票价的承受能力限制, 乘客承担的出

行票价应该低于乘客的出行承受能力。若制定的票价超出乘客承受能力, 不但影响城市轨道交通分担率, 也会给乘客带来较大负担, 会违背了公共交通公益性定位的初衷。

$$P_{i \text{ 票价}} \leq P_{i \text{ 能力}} \quad (20)$$

(3) 城市对外扩展距离限制, 距离太短就失去了轨道交通作为中长距离工具优势。实际距离可根据圈层来设定。

$$r_i \geq R_{i \rho} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \mu_{ij} \rho_{ij} \cdot 0.798 L_{ij}^2 \cdot P_i \cdot r_i = (1 + \ell) \cdot \\ & \sum_{j=1}^J \frac{v_{ij} \cdot r_i}{k_{ij}} + [10^{-4} f_{i \text{ 人员}} \cdot \sigma_i (1 + \partial_{i \text{ 人员}}) + \\ & 10^{-4} \cdot 365 \cdot d_{i \text{ 电力}} \cdot \omega_{i \text{ 电力}} + 10^{-4} \cdot 365 \cdot a_{i \text{ 修理}} \cdot \\ & b_{i \text{ 修理}} + 10^{-4} \cdot 365 \cdot y_{i \text{ 营运}} \cdot b_{i \text{ 营运}} + G_{i \text{ 管理}} + \\ & 12 \cdot E_{i \text{ 贷款}} \cdot \kappa_{i \text{ 贷款}} \cdot \frac{(1 + \kappa_{i \text{ 贷款}})^{\ell_{i \text{ 贷款}}}}{(1 + \kappa_{i \text{ 贷款}})^{\ell_{i \text{ 贷款}}} - 1}] (1 - g_{i \text{ 管理}}) - \\ & K_{i \text{ 分成}} \cdot f_{i \text{ 分成}} \quad (23) \end{aligned}$$

2 求解算法

根据上述定价模型, 提出以下计算方法和步骤:

第 1 步, 根据城市总体规划和空间结构, 结合外部区域的人口分布情况, 划分中心城市对外扩展的圈层, 并分别标注 R_n ($n=0, 1, 2, \dots, N$)。在此基础上, 查找出城市人口分布资料, 标注出第 j 圈层人口密度 ρ_{ij} (简化条件下, 第 i 条线路 j 车站区域人口密度可假设为第 j 圈层人口密度)。

第 2 步, 根据城市轨道交通线路规划线路走向初步设计文件, 结合线路沿线周边土地开发面积、开发价格及销售价格等, 标注出第 i 条线路第 u 种类型开发建筑销售总面积 $\alpha_{i \mu \text{ 售}}$ 、第 u 种类型开发建筑单位售价 $\beta_{i \mu \text{ 销售}}$ 、沿线开发建筑总面积 $U_{i \text{ 开发面积}}$ 。

第 3 步, 借鉴本城市或者国内其他城市既有线路建设造价及运营成本情况, 标注出第 i 条线路的第 j 种设施设备的单位里程建设成本 v_{ij} 和折旧年限 k_{ij} , 以及日常运营的人员工资和福利费、电力费、修理费 (包括更新改造费用)、营运费以及管理费等。

第 4 步, 根据城市总体规划和城市空间结构, 结合城市轨道交通规划线路初步设计文件, 标注出车站区域的客流吸引率 μ_{ij} , 结合 j 车站区域人口密度 ρ_{ij} , 计算出第 i 条线路的客流量 Q_i 。

第 5 步, 调查分析城市居民出行成本可支付能力、政府财政收入情况及政府对于城市轨道交通补贴的能力, 标注出第 i 条城市轨道交通线路乘客每公里最大可

承受支付水平 $P_{i \text{ 能力}}$ 和政府最高运营补贴额度 H_{max} 。

第 6 步, 依据上述数据, 借助式 (18)、(19) 的模型, 计算出中心城市对外不同圈层的城市轨道交通票价变化情况。最大可承受支付水平 $P_{i \text{ 能力}}$ 和政府最高运营补贴额度 H_{max} 。对比国内不同城市的单位公里票价率, 结合政府补贴给定情况下, 可计算得到不同圈层的城市轨道交通票价。

3 算例分析

结合南京地铁 2 号线的算例的参数取值, 以及上述建设成本和运营成本、土地收益情况及沿线客流量等计算取值, 假设参数取值如表 3 ~ 表 6 所示。

表 3 城市轨道交通建设成本计算参数取值

Tab. 3 Calculation parameter values for urban rail transit construction cost

基本类别	类别	单位公里造价/万元	折旧年限
土建设施	车站	10 285	50
	区间	8 362.4	100
	轨道	1 006.2	10
	供电	3 852.6	15
	通信	855.2	15
机电设备	信号	1 470.2	15
	通风及空调	1 371.2	15
	自动售检票	909.2	10
	自动扶梯及电梯	839.0	18
	其他	1 447.0	10
合计	—	30 398	—

表 4 城市轨道交通运营成本计算参数取值

Tab. 4 Calculation parameter values for urban rail transit operation cost

成本类别	符号	具体名称	取值
年员工工资 ($F_{i \text{ 人员}}$)	$f_{i \text{ 人员}}$	人员年平均工资/ [万元·(人·年) ⁻¹]	4
	$\sigma_{i \text{ 人员}}$	从业定员数/ (人·km ⁻¹)	60
	$\partial_{i \text{ 人员}}$	福利占工资系数	0.3
年电费 ($D_{i \text{ 电力}}$)	$d_{i \text{ 电力}}$	日均耗电量/度	60 000
	$\omega_{i \text{ 电力}}$	单位耗电成本/(元·度 ⁻¹)	0.7
年维修费 ($B_{i \text{ 修理}}$)	$a_{i \text{ 修理}}$	单位车公里修理费/ [元·(veh·km) ⁻¹]	4.5
	$b_{i \text{ 修理}}$	日均车公里/ ($\times 10^4$ veh·km)	2
年营运费 ($y_{i \text{ 营运}}$)	$y_{i \text{ 营运}}$	单位车公里营运费/ [元·(veh·km) ⁻¹]	1.2
管理费 ($G_{i \text{ 管理}}$)	$g_{i \text{ 管理}}$	年度管理费占成本比例系数/%	15

注: 计算中列车日均走行里程约为 2 万 veh·km 相当于房山线里程

表 5 城市轨道交通沿线土地开发收益计算参数取值

Tab. 5 Calculation parameter values for land development gains along urban rail transit

计算类别	符号	具体名称	取值
销售收入 (Sq_i 销售)	$\alpha_{i\mu}$ 销售	第 u 类建筑销售面积/亩	5 000
	$\beta_{i\mu}$ 销售	第 u 类建筑单位售价/ (元·m ⁻²)	3 200 ~ 3 500
	U_i 开发面积	开发建筑总面积/m ²	15 000
土地开发 开支 (Z_i 开支)	ξ_i 征地拆迁	单位征地拆迁费用/ (元·m ⁻²)	2 000
	ζ_i 税费	单位面积的规费、管 理、设计、监理费/ (元·m ⁻²)	150
	ω_i 建设成本	单位面积建造成本/ (元·m ⁻²)	800 ~ 1 000
	ν_i 融资费用	单位面积融资成本/%	按照借贷利率为 5.5
	τ_i 销售费用	单位面积销售费用/%	按照收入 6
开发利益 分成 (f_i 分成)	h_i 分成	单位车公里修理费	—
	K_i 分成	公司和开发商利益 分成系数	0.5

表 6 城市轨道交通沿线客流量计算参数取值

Tab. 6 Calculation parameter values for traffic volume in urban rail transit

名称	计算类别	符号	具体名称	取值
客流 计算 (Q_i)	沿线客流量	ρ_{ij}	j 站区域人口密度	见表 3
		μ_{ij}	j 站区域客流吸引率	0.08
其他 参数	乘客承受力	P_i 能力	每公里承受水平/ (元·km ⁻²)	0.6
	城市政府补贴	\bar{h}_i	政府运营补贴额度/万	4 000
		H_{\max}	政府最高补贴额度/亿元	1
圈层间距	—	—	—	见表 3

依据上述参数取值，并采用模型 (24) 计算如下：

$$\frac{1}{2}Q_i \cdot P_i \cdot r_i = H_i \text{ 规划} + M_i \text{ 建设} + O_i \text{ 运营} - S_i \text{ 收益}, \quad (24)$$

可以计算得出平均票价 $P_i = 0.853$ 元/km，并依据 $P_{i \text{ 票价}} = P_i - \frac{\bar{h}_i}{Q_i \text{ 运营}}$ ，可以得到城市轨道交通的实际票价 $P_{i \text{ 票价}} = 0.853 - 4000/365 = 0.415$ 元/km。

依照上述参数，由模型 (24) 可分布计算得到中心城市各个圈层的票价率，在此价格下可以实现城市的可持续发展。城市轨道交通沿线对外扩充圈层结构和票价情况示意，如图 4 所示。

从图 4 可以看出，在城市轨道交通客流量不受票价影响的情况下（即车站区域的客流吸引率取值

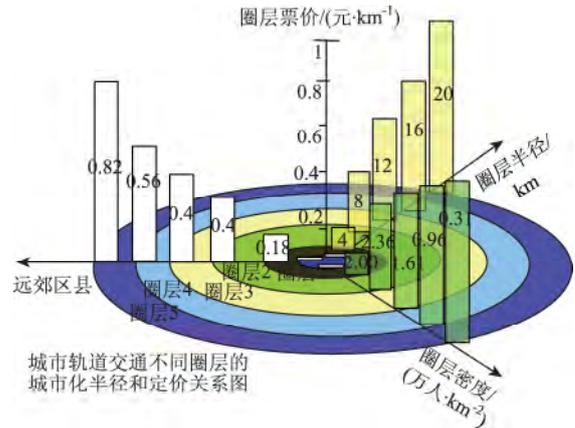


图 4 城市轨道交通沿线对外扩展圈层结构和票价示意图

Fig. 4 Expansion circle structure and fares along urban rail transit

为 0.08 时)，城市轨道交通对外扩展距离越远，为保持收支平衡，城市轨道交通的票价率越高。若城市轨道交通对外扩展距离达到 4 km，城市轨道交通票价为 0.18 元/km，若扩展距离达到 20 km，则票价率达到 0.82 元/km。主要原因是随着城市轨道交通对外扩展距离增加，车站区域所在的人口密度将急剧减少，导致票价不断攀升，票价率随着增大。

从图 5 可以看出，若城市轨道交通客流量不受票价影响（即车站区域的客流吸引率 $\mu_{ij} = 0.08$ 时），且票价率 $P_{i \text{ 票价}} = 0.6$ 元/km 时，城市轨道交通对外扩展距离为 $r_i = 17$ km 为合理取值（即可以扩展到圈层 4 以外），能保障城市发展具有可持续性。参照国内城市轨道交通票价率（统计国内城市上海、广州、深圳、杭州等城市票价率取值均 0.6 元/km 左右，认为 0.6 元/km 的取值相对比较合理）。

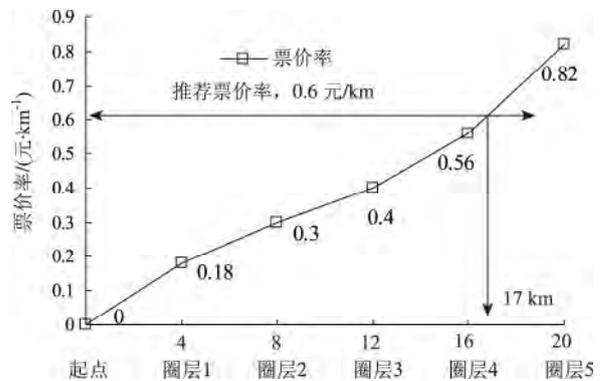


图 5 给定票价率前提下的城市轨道交通对外合理扩展距离
Fig. 5 Extension distance based on fixed fare rate of urban rail transit

(1) 情景 1: 比较分析城市轨道交通政府补贴

对城市轨道交通票价率的影响, 采用模型 (24) 计算不同政府补贴情况下的城市轨道交通票价率的变化情况, 如图 6 所示。计算过程中, 客流量不随票价率变化时, 票价率和城市对外扩展距离关系变化情况, 客流量由式 (14) 计算得到。

(2) 情景 2: 比较分析客流量对城市轨道交通票价率的影响, 采用模型 (24) 计算客流量不变和变化情况下的城市轨道交通票价率的变化情况, 如图 7 所示。为简单起见, 表征城市轨道交通沿线客流量计算主要引入票价弹性系统, 假定票价在不同圈层的弹性系数 $t = -0.05 \cdot X$, X 表示不同圈层的取值, $X = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

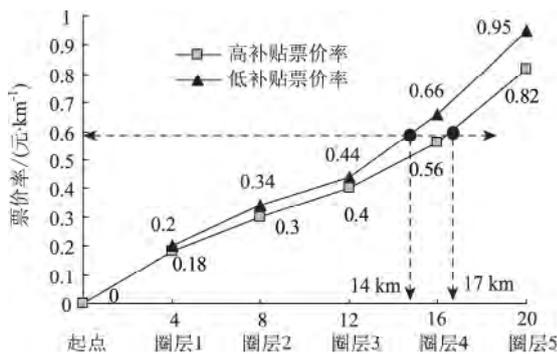


图 6 不同补贴情况下票价率和扩展距离关系

Fig. 6 Relationship between fare rate and extension distance in different subsidies

从图 6 和图 7 可以看出:

(1) 政府补贴直接推动了城市轨道交通对外扩展距离, 补贴越多, 扩展距离越长。若票价率 $P_{i \text{ 票价}} = 0.6 \text{ 元/km}$ 时, 在低补贴和高补贴的不同情况下, 城市轨道交通对外扩展距离 r_i 分别为 14 km 和 17 km, 扩展距离分别为圈层 4 和圈层 3。同时, 随着扩展距离增加, 线路的斜率越来越陡, 主要受客流量的影响, 对外扩展距离越长, 客流量越低, 则补贴发挥降低票价率的作用日益减少。在图 3 ~ 图 6 中的低补贴和高补贴不同的情况下, 城市轨道交通票价率差距分别为 0.1 元/km 和 0.13 元/km。充分说明了在中心城市外围, 随着扩展距离增加, 因客流量较低而导致的政府补贴对票价率的回退作用越来越小。

(2) 城市轨道交通对外扩展距离受到客流量和票价率相互作用影响。若票价率 $P_{i \text{ 票价}} = 0.6 \text{ 元/km}$ 时, 在客流量不变和客流量变化的不同情况下, 城市轨道交通对外扩展距离 r_i 分别为 17 km 和 12 km, 扩展距离分别为圈层 5 和圈层 2。说明了若城市轨道交通票价具有弹性, 相同的政府补贴额, 由于受到

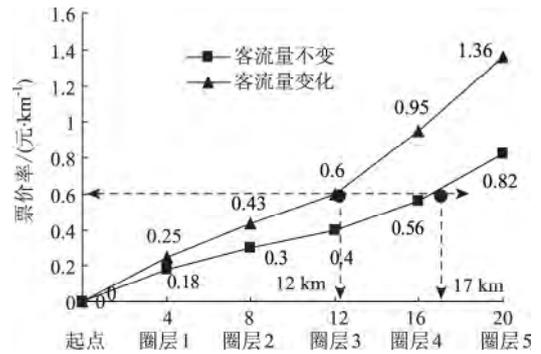


图 7 客流变化情况下票价率和扩展距离关系

Fig. 7 Relationship between fare rate and extension range of passenger volume

票价率较高, 客流量减少的影响, 在客流量变化的情况下, 城市轨道交通对外扩展的距离反而减少, 比客流量不变的情况少 5 km。特别是随着对外扩展距离增加, 城市轨道交通沿线车站的客流量减少, 对外扩展需要花费的资金将越来越多。

4 结论

从保障城市对外扩展可持续发展的角度出发, 构建了成本和收益平衡条件下的城市轨道交通定价模型, 重点分析了城市对外扩展距离和城市轨道交通定价的关系, 提出了计算方法, 进行了算例分析, 得出的主要研究结论如下:

(1) 从全周期角度考量城市轨道交通成本, 并提出了各项成本的计算方法。包括规划设计成本、建设成本和运营成本 3 方面。建设成本主要累计各项设施设备建设成本, 运营成本主要包括: 人力工资成本、维修费、管理费及电费等, 并将各项成本分摊到各折旧年来计算总的成本。

(2) 系统梳理了城市轨道交通建设运营收益, 包括沿线土地开发收益和广告收益等, 土地开发收益主要受到沿线地价、划拨土地面积及开发面积等影响, 并在此基础上计算了土地开发支出和收益。同时, 分析了城市轨道交通客流量和沿线车站周边人口密度和所在圈层位置关系, 提出了沿线车站客流量的计算方法。

(3) 构建了基于全成本和收益的定价模型, 提出了计算步骤。算例表明: ①政府补贴直接推动了城市轨道交通对外扩展距离, 补贴越多, 扩展距离越长。②随着扩展距离增加, 受客流量的影响, 对外扩展距离越长, 客流量越低, 则补贴在发挥降低票价率的作用日益减少。③城市轨道交通对外扩展距离受到客流量和票价率相互作用影响。若城市轨

道交通票价具有弹性,相同的政府补贴额,由于受到票价率较高,客流量减少的影响,在客流量变化的情况下,城市轨道交通对外扩展的距离反而减少。

参考文献:

References:

- [1] 汤薇,陈森发,仇向洋. 基于生命周期客流分摊成本的城市轨道交通定价方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2007, 5 (5): 69-74.
TANG Wei, CHEN Sen-fa, QIU Xiang-yang. The Urban Rail Transit Pricing Method by Life Cycle Cost Apportioned in the Entire Passengers [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2007, 5 (5): 69-74.
- [2] 蒋伟林. 香港地铁系统票价弹性的研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2006, 35 (11): 10-15.
JIANG Wei-lin. Fare Flexibility in Hong Kong Subway System [J]. Urban Mass Transit, 2006, 35 (11): 10-15.
- [3] 杨京帅,张殿业. 城市轨道交通车站合理吸引范围研究 [J]. 中国铁路, 2008, 20 (3): 72-75.
YANG Jing-shuai, ZHANG Dian-ye. Study on Reasonable Range Attracts City Rail Transit Station [J]. Chinese Railways, 2008, 20 (3): 72-75.
- [4] 蔡顺利,蒋玉琨. 北京地铁计程票价方案探讨 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2002, 2 (3): 44-47.
CAI Shun-li, JIANG Yu-kun. Inquiring into a Ticketing Price Scheme of Beijing Metro [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2002, 2 (3): 44-47.
- [5] 田振清. 城市轨道交通运营补贴模式及参数研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10 (1): 34-38.
TIAN Zhen-qing. On Mode with Parameters of Operational Subsidy of Urban Rail Transit [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10 (1): 34-38.
- [6] 陈曦. 我国地铁票价制定工作相关因素分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2006, 25 (10): 32-35.
CHEN Xi. Interrelated Factors in Metro Price Decision [J]. Urban Mass Transit, 2006, 25 (10): 32-35.
- [7] 五一. 基于运营效能的城市轨道交通票价确定方法 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38 (11): 1610-1614.
WU Yi. Calculation Method for Reasonable Fare Based on Operating Efficiency [J]. Journal of Tongji University: National Science Edition, 2010, 38 (11): 1610-1614.
- [8] 上海市城市交通管理局, 同济大学, 上海地铁运营有限公司. 世界典型城市轨道交通票制票价比较研究 [R]. 上海: 同济大学, 2007.
Shanghai Urban Traffic Management Department, Tongji University, Shanghai Metro Co., Ltd. Comparison of Ticket Prices of Urban Rail Transit in Typical Cities in the World [R]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- (上接第137页)
- LIU Wei-ming, TIAN Shi-yan. Fuzzy Comprehensive Identification Method of Real-time Traffic Conditions for Urban Road Based on Map Matching [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (10): 86-91.
- [9] 美国交通研究委员会, 道路通行能力手册 [M]. 任福田, 等译. 北京: 人民交通出版社, 2000
US Transportation Research Board. Highway Capacity Manual [M]. REN Fu-tian, et al translated. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [10] 张亚平,裴玉龙,周刚. 珠江三角洲地区城际道路服务水平评估研究 [J]. 公路交通科技, 2003, 20 (3): 108-109.
ZHANG Ya-ping, PEI Yu-long, ZHOU Gang. Evaluation of Level of Service of Intercity Highways in Zhujiang Delta [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20 (3): 108-109.
- [11] 汪双杰,方靖,周荣贵,等. 公路运行速度特征研究 [J]. 中国公路学报, 2010, 23 (增1): 25-26.
WANG Shuang-jie, FANG Jing, ZHOU Rong-gui, et al. Research on Operating Speed Characteristics of Highway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (S1): 25-26.
- [12] 陆建,孙祥龙,戴越. 普通公路车速分布特性的回归分析 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42 (2): 374-375.
LU Jian, SUN Xiang-long, DAI Yue. Regression Analysis on Speed Distribution Characteristics of Ordinary Road [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42 (2): 374-375.
- [13] BOWLING K G. Extension of the Level of Service Concept to Transportation Systems [R]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1998.
- [14] 邵敏华,孙立军. 城市道路等效通行能力概念的提出及理论解释 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36 (3): 310-314.
SHAO Min-hua, SUN Li-jun. Equivalent Capacity of Urban Street and Its Theoretic Explanation [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2008, 36 (3): 310-314.
- [15] 邵敏华,孙立军. 城市多级道路交通运行水平一体化评价模型 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38 (11): 1596-1599.
SHAO Min-hua, SUN Li-jun. United Evaluation Model of Traffic Operation Level for Different Types of Urban Road [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2010, 38 (11): 1596-1599.