

文章编号:1005-0523(2020)05-0089-06

基于 BLPP 算法下的城际轨道交通票价优化策略

魏 薇

(陕西工业职业技术学院土木工程学院,陕西 咸阳 712000)

摘要:票价作为影响交通运输市场效益的关键性指标,直接关系到企业的经济收益。为给出城际轨道交通合理票价水平,论文提供了基于 BLPP 算法的票价定价模型,在考虑政府限价、企业成本的约束条件下,构造上层客流量与票价的函数,同时得到票价调整与旅客客流的变化关系。将算法应用于杭州至绍兴城际轨道交通中,结合旅客出行及 OD 调查数据,将城际轨道交通票价设为变量,在保证企业效益最大化的前提下,运算得到最优票价解,结果表明,此种定价策略能够明显提升运营管理企业的票款收入,为城际轨道交通的定价提供了科学依据。

关键词:票价;BLPP 算法;城际轨道交通;客流

中图分类号:F505

文献标志码:A

本文引用格式:魏薇. 基于 BLPP 算法下的城际轨道交通票价优化策略[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(5): 89-94.

Citation format: WEI W. Research on the optimization strategy of intercity rail transit ticket price based on BLPP algorithm[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(5): 89-94.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.013

随着城市区域化进程的加速,城市彼此间的联络更为密切,以此衍生出城际间大量的流通客流,在经济作用下,由于城际旅客出行需求量的增大,也带动了城际间多种多样交通运输方式的发展,而城际轨道交通作为新型运输方式在此过程中凸显出了越来越重要的作用。合理制定城际轨道交通票价不仅能够起到引导客运市场的作用,同时对于发挥运营管理企业的经济效益具有重要作用,为增强城际轨道交通在市场竞争能力,最大程度实现社会与企业的双赢,能够对票价进行科学研究具有必要性。

关于定价问题, Brian L Smith 等人对于高铁的投资可行性进行了分析,高铁的综合收益与政府、企业、人群多种因素有关,应当权衡考量^[1]; Chang 等对于高铁的收益进行了研究,将收益与乘客的乘车时间联系,以改进候车时间为前提,提出优化改进模型,进一步增加运营部门的收益^[2];张静对于铁路定价机制进行分析,认为在定价方法上不存在唯一的理论模式,并且认为在铁路票价制定中应当跟随市场环境变化而调整定价策略^[3];丁慧平等人从旅客出行时间价值、社会收益效果以及企业运营成本三要素入手,在研究票价形成的原理后,权衡三者,给出了高铁票价的定价策略^[4];雷蕾等人提出了基于敏感性的分析方法求解合理票价,以北京至上海高铁为例应用模型,在保证旅客出行费用最小化,公司效益最大化的前提下,求解出最优票价,提供给高铁运输市场参考^[5];高永峰等人在考虑乘客需求弹性的前提下,建立了基于城市客流需求的函数模型,给出了客流与票价的关系,分析了不同条件下乘坐公共交通乘客的出行需求规律,给出了公交的票价优化方案^[6];杨建国等人探讨了在保证客运市场中其他影响因素不变的情况下,票价调整导致客流变化的形式,建立了数学优化模型,应用北京至天津铁路的运营数据进行分析,计算出了优化票价^[7];邱奇等人设定客运市场中存在多种竞争方式,将城际轨道交通旅客的出行广义函数作为引入条件,构建票价优化模型,运算得到票价合理水平^[8]。

在现状研究上,定价问题研究主要集中于公交、高铁,对于城际轨道交通的研究较少;并且模型分析都侧重于企业纯效益值的计算,缺乏将企业成本考虑进去,同时缺少直接构造旅客出行选择与企业票款收入

收稿日期:2020-03-20

作者简介:魏薇(1990—),女,讲师,研究方向为城市轨道交通客流预测研究。E-mail:1007207659@qq.com。

的数量级联系。本文通过构建 BLPP 算法,建立上层企业效益函数,下层客出行选择函数,满足建立出票价与旅客出行的数量级关系,在保证运营管理公司收益最大化前提下,构建票价的数学优化方法,将函数应用到杭绍城际轨道交通中,得到最优票价,并将结果与不同定价方法进行对比,给出了具体的城际轨道交通票价优化策略。这种方法较以往研究,能够直接的得到票价调整带来客流与企业收入的量级关系。

1 建立模型

1.1 构造上层结构函数

双层优化算法(bilevel programming problem,简称 BLPP),是一种数学规划方法,算法包括两层关系结构,即上层函数和下层函数,两层函数都以各自明确的规划目标建立函数,并且上下层之间有相关的联系变量,因此 BLPP 算法是在满足双层目标的前提下,计算函数的最优解。本文构造 BLPP 算法,优点在于可以确定双层目标,既能满足旅客出行广义费用最低,又能使得城际轨道交通运营管理部门收益最大化,能够直接建立起旅客出行选择与收益的关系,提供一种合理的定价策略。在构造函数中,建立两层函数,第一层结构即客运管理部门运营收入函数,目标为追求收益的最大化,第二层结构即旅客出行选择函数,目标为出行广义费用最小化,在此原理下,既能保证旅客出行选择最优,同时满足企业的票款收入最大。

在第一层结构函数中,客运部门票款收入为 F_s ,等于客运量与平均票价的乘数,则可以表示为

$$F_s = q_n(P_n) \cdot P_n \quad (1)$$

其中: n 为某类运输方式; q_n 为客运量; P_n 为票价。

由于城际轨道交通在运营中存在消耗成本,成本主要包含列车开行费用、接触网电费、车辆损耗费用、车站管理费 4 部分^[9],可以表示为

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (2)$$

$$C_1 = \sum_{T \in \Omega} x \cdot L_T \quad (3)$$

$$C_2 = \sum_{T \in \Omega} \delta_1 \cdot L_T + \delta_2 \cdot N_T \quad (4)$$

$$C_3 = \sum_{T \in \Omega} \tau \cdot L_T \quad (5)$$

$$C_4 = \sum_{T \in \Omega} \eta \cdot N_T \quad (6)$$

其中: C 为总成本; C_1 为列车开行费用; C_2 为接触网电费; C_3 车辆损耗费用; C_4 车站管理费; L_T 为线路长度; N_T 为车站个数; x 为单位列车公里费用; δ_1 为接触网电费; δ_2 列车停站接触网使用电费; τ 为单位列车公里车辆使用费用; η 为车站服务费用。

由于客运管理部门为了盈利,其票款收入应当大于运营成本,则存在约束条件 1,可以表示为

$$q_n(P_n) \cdot P_n \geq C \quad (7)$$

政府对于城际轨道交通的定价一般有指导意见,为保障社会公益性,对价格会设置上限,则存在约束条件 2,可以表示为

$$P_n \leq P_{n(\max)} \quad (8)$$

为满足城际轨道交通收入最大化,构造以下票价的最优化模型来定义,如下所示

$$\max F_s = q_n(P_n) \cdot P_n \quad \text{st: } F_s \geq C \quad P_n \leq P_{n(\max)} \quad (9)$$

1.2 构造下层结构函数

第二层结构为城际旅客出行选择函数,旅客出行行为受运输方式的属性影响,即票价、运行时间以及综合因素,本文选取指数函数构造下层规划模型,将交运输方式自身属性作为指标,则下层函数如下所示

$$F_x = \mu (q_n)^{\omega} - \beta t_n - \gamma c_n \quad (10)$$

其中: μ , ω 为待定参数; t_n 为运行时间; p_n 为票价; c_n 为综合因素(一般为票价的 15%~25%,本文取 20%)^[10]

α 为受时间影响的敏感参数; β 为受票价影响的敏感参数; γ 为受综合因素影响的敏感参数。当票价变化时, 票价敏感参数 β 会随之变化, 敏感参数可以通过 spss 软件回归分析得到^[11]。

根据文献[12], 城际旅客出行如何选择会受到运输方式票价的影响, 往往某一类运输方式抬高票价, 对旅客吸引程度降低, 原客流分散到其他运输方式上, 而降低票价, 则对旅客吸引程度加强, 客流量提高。但是无论某种运输方式的客流量如何变化, 根据市场规律, 通道内总客流会保持在平衡的水平上。因此在总客运量平衡状况下, 构建票价与客流量之间的联系, 如下所示

$$\min F_x(x) = \min \sum_{n=1}^N \int_0^{q_n} \mu x^{\alpha} - \beta P_n - \gamma c_n \quad \text{st: } \sum_{n=1}^N q_n = Q, q_n \geq 0 \quad (11)$$

在其他指标不变的前提下, 改变票价, 将票价作为唯一变量, 在通道客流量总体平衡状态下, 存在票价的初始值, 设为 p_n^0 , 代入模型中计算, 可以得到对应的客流量 q_n^0 , 则 p_n^0 存在有解的必要条件为

$$F_x(q) - \mu = 0, Q = \Lambda^T q \quad (12)$$

式中: $F_x(q) = (F_x(q_1), F_x(q_1), \dots, F_x(q_n))^T, \Lambda = (1, \dots, 1)^T \in E^N$ 维数为 n , 全为 1 的列向量; μ 为拉格朗日向量。设 $y = [q, \mu]^T$, 则对于票价 p_n 变量的 Jacobi 矩阵有如下运算

$$\nabla y_{p_n} = J_y^{-1}(-J_{p_n}) \quad (13)$$

根据上式, 可以得到 n 种不同运输方式客运量对于票价的偏导数, 即 $\partial q_n / \partial p_n$, 偏导数能够反应通道内的客运需求量, 则它的下层结构函数通过泰勒展开式可以表达为

$$q_n(P_n) = q_n^{(0)} + \partial q_n / \partial p_n (p_n - p_n^{(0)}) \quad (14)$$

2 实例分析

2.1 研究背景

杭绍城际轨道交通在城际轨道交通的各类基础参数上具有典型性, 该线路处于即将投入运营, 票价优化分析具有一定的现实意义, 因此, 本文应用 BLPP 算法对杭州至绍兴城际轨道交通票价进行分析。2019 年 11 月, 对杭州至绍兴城际通道内进行旅客出行意愿调查和通道 OD 调查, 调查地点为绍兴至杭州大型客运枢纽站, 本次调查共向旅客发出 1 100 份问卷, 原始数据在编码和录入后, 修正了异常编码, 并剔除了无法统计的问卷数据之后, 共统计回收有效问卷 993 份, 问卷有效率为 90.3%。

根据调查, 杭州至绍兴城际通道内包含 5 种运输方式, 分别为私家车、城际大巴、城际公交、高铁、城际轨道交通, 2025 年杭州至绍兴城际通道内每日总客运量为 280.8 万人^[13-15], 杭绍城际轨道交通线路总长度 24.32 km, 线路共设立 8 个站点, 日均运营时间为 16 小时, 平均发车间隔为 20 min, 杭绍城际轨道交通考虑边际成本的定价为 11 元, 政府限价为 15 元。

2.2 下层结构函数运算

根据调查统计, 可以得到各类运输方式的平均运行时间, 将运行时间与其费率相乘可得各类运输方式的平均票价, 根据票价可以求得综合因素数值, 具体如表 1 所列。

表 1 各类运输方式基础信息
Tab.1 Basic information of various modes of transportation

运输方式	运行时间/min	票价/元	综合因素
私家车	40	21	4.2
城际大巴	56	13	2.6
城际公交	60	6	1.2
高铁	24	21	4.2
城际轨道交通	38	11	2.2

取 $\mu=7.4, \varpi=0.38$, 在票价为 11 元时, 通过 spss 软件进行回归计算, 可以得到 $\alpha=0.73, \beta=1.56, \gamma=1.28$, 其中 β 为票价的敏感参数, 代入下层结构函数, 计算如下

$$\begin{aligned} \min F_x(x) = & \min \int_0^{q_1} (7.4x^{0.38} - 56.58) dx + \int_0^{q_2} (7.4x^{0.38} - 58.77) dx + \int_0^{q_3} (7.4x^{0.38} - 52.06) dx \\ & + \int_0^{q_4} (7.4x^{0.38} - 46.42) dx + \int_0^{q_5} (7.4x^{0.38} - 42.88) dx \\ \text{st: } & q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 2\ 808\ 000, q_n \geq 0 \end{aligned}$$

通过 lingo 软件计算上式, 可得到州至绍兴通道内在平衡状态下各类运输方式的客运量, 如表 2 所列。

表 2 各类运输方式平衡状态下的客运量
Tab.2 Passenger volume under balanced state of various modes of transportation

运输方式	分担率	客运量/(万人/天)
私家车	18.94%	53.17
城际大巴	17.57%	49.33
城际公交	19.67%	55.23
高铁	21.54%	60.49
城际轨道交通	22.27%	62.53

根据式 12, 式 13, 得到矩阵 $J_y(p_n)$ 和 $J_{p_n}(p_n)$, 求解客流量对于各类运输方式票价偏导数

$$J_y(p_n) = \begin{bmatrix} 2.812q_1^{-0.66} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 2.812q_2^{-0.66} & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 2.812q_3^{-0.66} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 2.812q_4^{-0.66} & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.812q_5^{-0.66} & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{p_n}(p_n) = \begin{bmatrix} 1.56 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.56 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.56 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.56 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.56 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \nabla y_{p_n} = J_y^{-1}(-J_{p_n}) = \begin{bmatrix} -6.17 & 1.40 & 1.52 & 1.60 & 1.65 & -0.30 \\ 1.40 & -5.93 & 1.44 & 1.52 & 1.56 & -0.29 \\ 1.52 & 1.44 & -6.29 & 1.64 & 1.69 & -0.31 \\ 1.60 & 1.52 & 1.64 & -6.56 & 1.79 & -0.33 \\ 1.65 & 1.56 & 1.69 & 1.79 & -6.69 & -0.34 \\ 0.30 & 0.29 & 0.31 & 0.33 & 0.34 & -0.01 \end{bmatrix}$$

通过上式, 可以得到城际轨道交通客运量对票价的偏导数为 -6.69。

2.3 上层结构函数运算

根据文献[7], 可以得到参数估计值如下表所列, 代入式(2)~式(6)计算得到的运营成本为 29 679.56 万元/年。

将城际轨道交通客运量对票价的偏导数 -6.69 代入上层结构函数, 可以得到票价优化模型

$$\begin{aligned} \max F_s = & 62.53p_n - 6.69p_n(p_n - 11) \\ \text{st: } & F_s \geq 81.31 \end{aligned}$$

$$p_n \leq 15$$

表 3 参数估计值

Tab.3 Parameter estimates

参数	估计值
$x/(元/(车 \cdot km))$	70
$\delta_1/(元/km)$	11
$\delta_2/(元/km)$	150
$\tau/(元/(列车 \cdot km))$	65
$\eta/(元/列车)$	200

求解上式,得到在票价为 10 元,能够保证收益最大化,票价与函数值关系如图 1 所示。将不同票价取值代入 BLPP 算法,可以得到票价与客流量以及票款收入的关系,如图 2 所示。将边际成本定价下的票价 11 元和政府限价 15 元代入计算,可以得到城际轨道交通客流量以及票款收入,表 4 给出了不同定价法的收益对比。

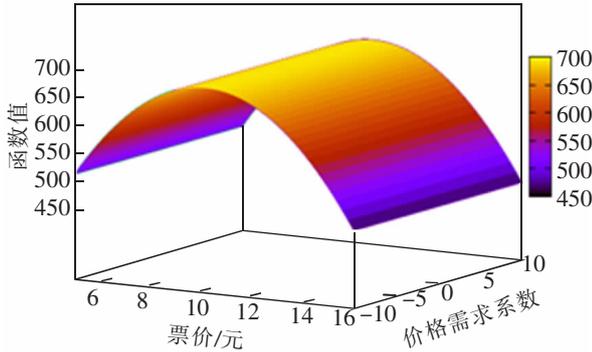


图 1 票价与函数关系图

Fig.1 Relationship between ticket price and function

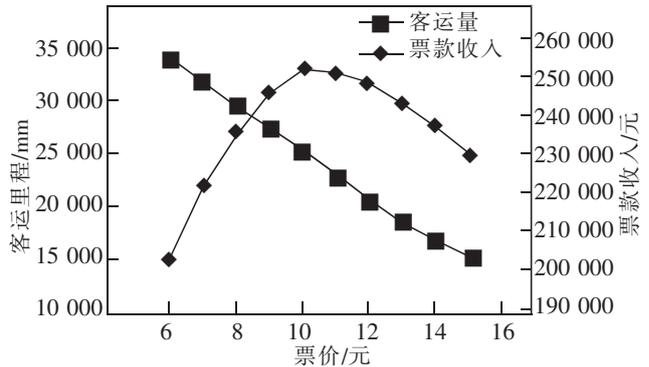


图 2 票价与客流量和票款收入关系

Fig.2 Relationship between ticket price, passenger flow and ticket revenue

表 4 不同定价法的收益对比
Tab.4 Income comparison of different pricing methods

序号	定价法	票价/元	客流量/ (万人/年)	票款收入/ (万元/年)	收益差额/ (万元/年)
1	边际成本定价	11	22 823.45	251 057.95	-1 595.05
2	双层规划模型定价	10	25 265.30	252 653.00	-
3	政府限价定价	15	15 337.16	230 057.4	-22 595.60

3 结论

本文以杭州指绍兴城际通道内旅客出行意愿和 OD 调查为依据,应用 BLPP 算法,在满足不超过政府限价的前提下,建立城际轨道交通票款收入与客流量之间的关系,给出最优票价定价策略,结论表明:

1) 城际旅客在选择运输方式上,会受票价影响,城际轨道交通票价提高客流量降低,客流转移至其他运输方式上,相反则客流量提升。

2) 在 BLPP 算法中,票价敏感性受参数 β 影响, β 值越大,客运量对票价的敏感性越强, β 值越小,客运量对票价的敏感性越弱。

3) 城际轨道交通与其他运输方式存在竞争关系,在保证利润的前提下,一定程度降低票价能够吸引更多的旅客选择轨道交通出行,发挥最大效益。

3) 从运营管理部门收益最大化为目标入手,计算最优票价为 10 元,可得到预计年收入为 252 653 万元,比边际成本定价增加收入 1 595.05 万元,比政府限价定价增加收入 22 595.60 万元。

4) 城际轨道交通具有一定的社会公益性,对于运营管理部门来说,票价要能够体现这一特性,在此前提下为提升票款收入,除了权衡票价与客流的关系,优化票价,还应当进一步节约成本降低费用。该方法同样适用于其他运输方式的定价策略上,为基于客流的票价优化政策提供了新的解决方法。

参考文献:

[1] BRIAN L S, MICHAEL J D. Traffic flow forecasting: comparison of modelling approaches[J]. Journal of Transportation Engineering, 1997, 261: 261-266.

- [2] CHANG Y H, CH C H, SHEN C C. A Multi-objective model for passenger train services planning: application to Taiwan, s high-speed rail line[J]. Transportation Research Part B, 2000, 34: 13-14.
- [3] 张静. 铁路客运定价机制分析[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(1): 78-82.
- [4] 丁慧平, 赵启兰, 李远慧. 高速铁路定价机制探析——成本、社会经济效益、乘客时间价值三维视角[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2018, 17(1): 33-40.
- [5] 雷蕾, 朱加发, 周茵, 等. 基于双层规划模型的京沪高速铁路票价研究[J]. 铁道运输与经济, 2018, 40(1): 8-13.
- [6] 高永峰, 四兵锋. 基于需求弹性的城市公交票价优化方法及实证分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(3): 163-168.
- [7] 杨建国, 四兵锋. 铁路客运产品票价的需求弹性分析[J]. 铁道运输与经济, 2018, 40(12): 18-23.
- [8] 邱奇, 唐永忠, 王皓. 基于双层规划模型的京津冀城际铁路票价水平研究[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(8): 1-5.
- [9] 姬生飞. 基于双目标模型的城际铁路票价水平研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [10] 伍拾煤, 裴玉龙, 程国柱. 基于动态广义费用的轨道交通客流划分模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014(4): 23-27.
- [11] 李文霞, 张春民, 李卓等. 兰渝运输通道内多种运输方式客流分担率研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(2): 321-326.
- [12] 陈伯阳, 蒋明清, 四兵锋, 等. 多方式竞争下城市公交需求价格弹性实证分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(4): 241-246.
- [13] 彭辉. 杭州至绍兴城际轨道交通项目交通调查及客流预测报告[R]. 西安: 长安大学, 2019.
- [14] 李文君, 符卓. 高速铁路客运需求弹性[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(11): 2116-2124.
- [15] 吴昊, 程楠. 我国高速铁路运价差异化策略研究——基于需求弹性的分析[J]. 价格理论与实际, 2017(10): 55-59.

Research on the Optimization Strategy of Intercity Rail Transit Ticket Price Based on BLPP Algorithm

Wei Wei

(School of Civil Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

Abstract: As a key index affecting the market efficiency of transportation, ticket pricing is directly related to the economic benefits of society and enterprises. In order to determine the reasonable ticket price level of intercity rail transit, this paper provides a fare pricing model based on BLPP algorithm. Considering the constraints of government price limit and enterprise cost, the function of upper passenger flow and fare is constructed, and the relationship between fare adjustment and passenger flow is obtained. The model is applied to the intercity rail transit from Hangzhou to Shaoxing. Combined with the passenger flow survey data, the intercity rail transit ticket price is set as a variable, and the optimal ticket price solution is obtained on the premise of maximizing the enterprise benefit. The calculation results show that this pricing strategy can significantly improve the ticket revenue of the operation and management enterprises, and provide a scientific basis for the pricing of intercity rail transit.

Key words: ticket price; BLPP algorithm; intercity rail transit; passenger flow