

# Subway Passenger Forecast Based on System Dynamics

Kaixin Wu<sup>1</sup>, Zihang Wu<sup>2</sup>, Chao Ning<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Rail Transportation, Wuyi University, Jiangmen Guangdong

<sup>2</sup>College of Automotive and Architectural Engineering, Beihua University, Jilin Jilin

Email: kaixinw07@163.com

Received: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2017; accepted: Apr. 5<sup>th</sup>, 2017; published: Apr. 11<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Based on system dynamics theory and method, through the analysis of the influence of subway traffic of the subjective and objective factors, and the causal relationship between the variables and the system, the system dynamics model of passenger flow prediction is built, furthermore, the general rule is found through a combination of quantitative and qualitative analysis. Taking Guangzhou Metro Line 3 as an example, the system dynamics model of the passenger flow prediction is established, and by using the Vensim software, a further study on the influence of the fare, the service level and so on is made.

## Keywords

Metro, System Dynamics Theory, Passenger Flow Forecast, Level of Service, Simulation

---

# 基于系统动力学的地铁客流预测研究

吴开信<sup>1</sup>, 吴子航<sup>2</sup>, 宁超<sup>1</sup>

<sup>1</sup>五邑大学轨道交通学院, 广东 江门

<sup>2</sup>北华大学汽车与建筑工程学院, 吉林 吉林

Email: kaixinw07@163.com

收稿日期: 2017年3月22日; 录用日期: 2017年4月5日; 发布日期: 2017年4月11日

---

## 摘要

基于系统动力学的理论和方法, 通过分析影响地铁客流量的主客观因素, 以及系统内各变量之间的因果关系, 构建了客流预测的系统动力学模型, 通过定量和定性相结合的方法, 深刻剖析地铁客流变化的一

般规律。本文以广州地铁3号线为例，建立了客流预测的系统动力学模型，用vensim软件进行了仿真，并就票价、服务水平等对客流的影响进行了进一步探讨。

## 关键词

地铁，系统动力学，客流预测，服务水平，仿真

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着珠三角地区经济的蓬勃发展和人口聚集程度的急速增加，地铁已成为该地区几个主要城市解决自身内部交通问题的首要选择。地铁客流量预测结果的准确性与否将直接影响到地铁规划阶段线路的走向、轨道交通项目建设的顺序以及建成后日常的运营管理等。城市轨道交通客流预测模式大致分为三类：基于现状客流 OD 的预测模式、非基于现状客流 OD 的预测模式、基于非集聚模型的预测模式。其中，以“四阶段法”为核心的预测模式(基于现状客流 OD 的预测模式)应用最为广泛[1]。陈煜定性分析了客流高断面超出设计水平的影响因素[2]；冷彪等探讨采用基于最小二乘支持向量机时间序列预测法、分峰段混合预测法对进、出站客流及换乘客流进行预测[3]；罗小强应用“情景分析”理论对超远期城市发展状态展开研究，并结合“四阶段”需求预测方法，提出了基于情景分析的城市轨道交通客流预测思路[4]。但从目前情况来看，城市轨道交通客流的预测结果与实际客流之间存在较大差异[5] [6]。针对这一现象，本文提出基于系统动力学模型的地铁客流预测方法，通过定量和定性相结合，系统分析客流的影响因素，深刻剖析地铁客流变化的一般规律，进一步加强对客流预测结果的评估分析。

## 2. 地铁客流量影响因素分析

### 2.1. 影响地铁客流量的宏观因素

#### ① 经济发展水平

毫无疑问，建设地铁对于政府有一定的财政要求。由于地铁花费比较大，政府必须考虑到资金回流问题，若只从建设成本角度来定价，地铁票价一般会高于其他公共交通。虽然地铁的出行效率要比公交好，但是如果票价超过居民预期值，将会使地铁在运营初期遭受冷遇。假如当前城市经济水平较高，且城市的未来规划足够完善，将有利于地铁车站客流量的增多。

#### ② 城市居民收入与消费结构

随着经济的不断发展进步，城市居民的可支配收入逐渐提升，进而他们的支付能力也随之提高。按照一般的社会规律来说，在居民得到最基本的生存和安全保障的前提下，对出游、探访亲友和休闲娱乐等方面的需求也随之增多，相对应的消费需求将会促进更多的出行欲望。

#### ③ 居民的出行需求特点

居民的出行需求特点会随着时间的推移逐渐发生改变，是促使居民选择不同出行交通工具的主要因素。事实上，居民的出行目的并不是居民选择不同交通工具的唯一影响因素，而是和其他因素相结合，共同影响居民对出行工具的选择。此外，居民的时间观念、收入水平和个人对不同交通工具偏好程度都会影响地铁的客流量变化。

#### ④ 与其他公交系统的配合

城市内的居民和其他外来务工人员都追求高效率的出行方式。当居民或者旅客离地铁站较远时(步行超过 10 分钟, 约 700 米), 地铁可能不在是他们的首选, 从而导致很多潜在客源消失。因而地铁应该加强和公交的联动协调, 扩大客源的有效范围。

## 2.2. 影响地铁客流量的微观因素

① 安全性: 乘客最关心的一个属性就是安全性, 缺乏安全性就会导致产品自身失去其应有的价值, 甚至还会给社会造成消极的影响。一般来说, 地铁与其他交通工具相比, 拥有较高的安全系数。

② 速度: 速度是交通工具机能的重要表现方面。对于乘客来说, 激起其出行需求的第一驱动力是速度与高效率。然而随着居民机动车保有量的逐渐上升, 道路拥堵时常见现象。地铁因其速度方面的独特优势, 使其可以快速的占领大城市的运输市场。

③ 准点率: 地铁可以提供比一般城市内部交通工具更为准确的到发时间, 减少旅客的时间成本。旅客出行时间可靠性方面, 地铁相对于市内道路交通有着明显的优势。

④ 舒适性: 在社会进步的同时, 居民对出行时舒适度的需求也在逐减提高。过去, 人们对于交通工具的看法是一种位移需求, 然而在当今时代, 旅客对旅行中的舒适性也有了要求。地铁的舒适度包括了列车运行时的平稳度、车厢内空气温度与湿度、车厢内的拥挤程度等。

⑤ 便利性: 便利性是乘客挑选目标交通工具的主要因素。便利性包含了很多方面, 其中包括了购买车票是否方便, 地铁站与其他常规公交衔接的紧密程度, 地铁全天的运行时间等。作为一个旅客, 会优先考虑从自身出发点到目标地方的整个过程是否方便快捷。

⑥ 票价: 票价的合理性是乘客最终是否挑选该交通工具的又一个关键因素。当今中国的经济发展水平与外国相比还是有一定的差距, 票价的高低将直接影响旅客的对出行方式的选择。对于地铁而言, 过高的票价将不利于地铁正常的运营。然而不同消费能力的人, 对票价合理性有着各自的看法。

## 3. 模型的建立

### 3.1. 模型的系统界定

系统界定是明确被研究的系统包括了哪些主要的系统因素。将系统动力学理论和实际经验相联系, 本文基于地铁交通系统的组织情况, 通过定性分析, 明确系统边界内包含以下几个重要变量: 周边经济水平、年度新增地铁车组的投资、地铁票价、乘客支付能力、乘客的心理票价、地铁服务水平、地铁的单位造价、地铁的建设周期、每辆地铁列车的价格等。

### 3.2. 系统因果关系分析

利用系统动力学分析被研究系统的基本结构时, 都需要利用因果关系图来进行解析。系统的反馈机制一般要通过因果关系图才能清晰说明其中的原理。理论认为, 反馈体制表现为两种反馈环, 即正反馈环和负反馈环。正反馈环指的是系统内部其中一个因素受到干扰后, 会促使与之相关的因素发生变化, 使系统表现出一种不稳定的动态行为; 负反馈环指的是系统内部其中一个因素受到干扰后, 该系统将会维持相对稳定, 表现出动态平衡的行为趋势。构建因果关系图能够简单模拟被研究系统的基本构成, 还能对不同的系统关键因素之间的影响方式进行简单化处理。

1) 根据地铁车站客流量变化的因素, 确定系统各个主要变量之间的因果关系, 如图 1 所示。箭头代表不同因素间的关连, 箭头尾部的“+”代表变量朝着相同方向改变, 箭头尾部的“-”代表变量朝着相反的方向改变。

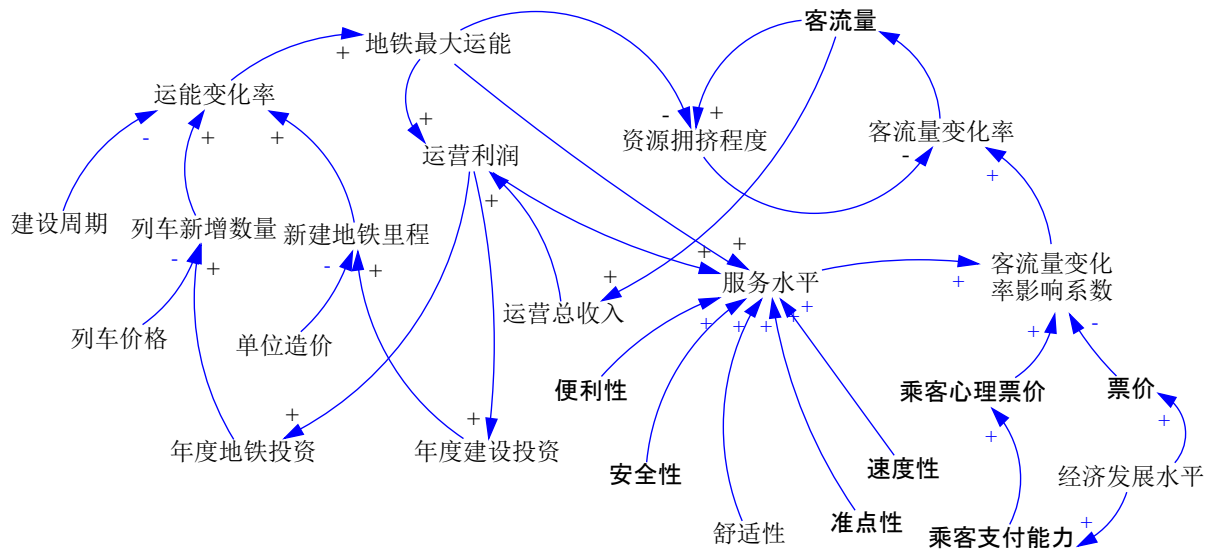


Figure 1. The causal relationship diagram of the passenger flow

图 1. 客流因果关系图

在图 1 中，包含了 4 个反馈环：

负反馈环 1：客流量—+→资源拥挤程度—-→客流量。

地铁客流的上升将会令地铁的资源占用率升高，从而令到资源拥挤度加深。地铁的拥挤度的加深又会令到地铁客流量的上升速度放缓。负反馈环 1 表现出了地铁客流和地铁拥挤程度之间的联系。

正反馈环 2：客流量—+→运营总收入—+→运营利润—+→服务水平—+→客流量。

地铁客流量的增多，会使运营总收入逐渐增加，从而也使运营利润有所提升，运营利润的上升能够提升地铁车站服务水平，进而促进客流量的快速增长。正反馈环 2 表现出地铁客流量与地铁服务水平之间的联系。

正反馈环 3： 地铁最大运能—-→资源拥挤程度—+→客流量—+→运营总收入  
—+→运营利润—+→年度投资—+→地铁最大运能

地铁最大运能的提升会减少资源的拥挤程度，因而能够通过增大地铁客流量来提升运营利润，从而使更多的投资被用来改善地铁的最大运能。正反馈环 3 表现出地铁的自我成长能力。

正反馈环 4： 地铁最大运能—+→服务水平—+→客流量—+→运营总收入  
—+→运营利润—+→年度投资—+→地铁最大运能

地铁最大运能的提升会减少资源的拥挤程度，提高服务水平，从而使地铁客流量增大，投资的热度将会上升，进而使地铁最大运能得到改善。正反馈环 4 反映出服务水平与地铁发展之间的相互作用机制。

### 3.3. 客流预测系统动力学模型构建

在建模的时候主要参考的外部条件为：周边经济水平、年度投资、乘客的支付能力、地铁票价、乘客的心理票价及服务水平、地铁线路的单位造价、地铁线路的建设周期、地铁列车的单位造价等因素。模型的流程图如图 2 所示。

模型中变量之间的数学关系如下：

$$\text{客流量} = \text{INTEG}(\text{客流量变化率}) \tag{2-1}$$

$$\text{客流量变化率} = (1 - \text{资源拥挤程度}) * \text{客流量变化率影响因素} * \text{客流量} \tag{2-2}$$

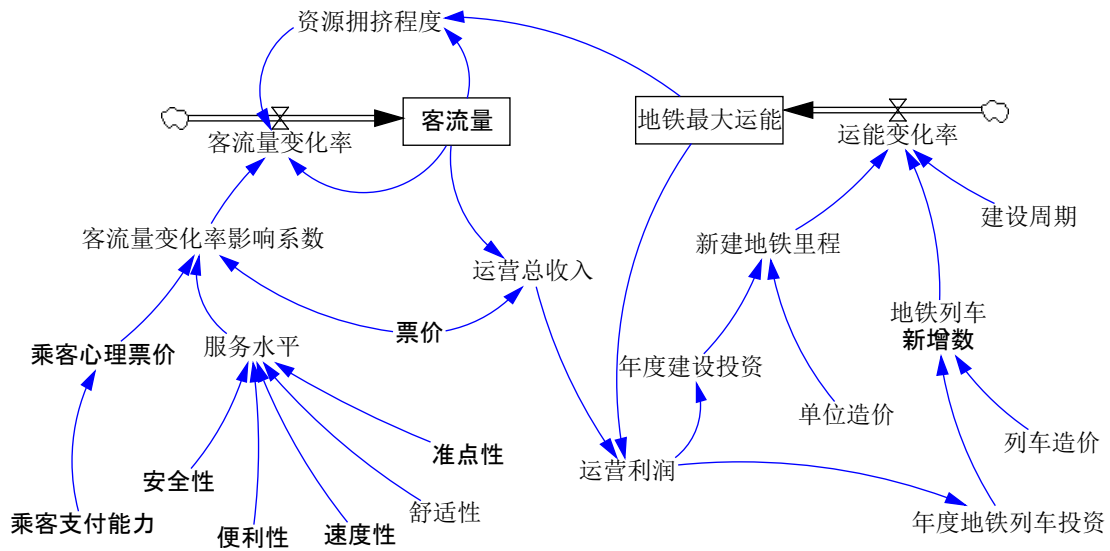


Figure 2. The flow model of passenger flow about Guangzhou Metro Line 3

图 2. 广州地铁 3 号线客流量模型流程图

$$\text{资源拥挤程度} = \text{客流量} / \text{地铁最大运能} \quad (2-3)$$

$$\text{客流量变化率影响因素} = 1 - \ln(\text{票价}) / \ln(\text{乘客心理票价}) + \sin(\text{服务水平}) \quad (2-4)$$

$$\text{服务水平} = a * \text{速度性} + b * \text{舒适性} + c * \text{安全性} + d * \text{便利性} + e * \text{准点性} \quad (2-5)$$

$$\text{地铁最大运能} = \text{INTEG}(\text{运能变化率}) \quad (2-6)$$

$$\text{运能变化率} = f * \text{DELAY}(\text{地铁列车组新增数}, 1) + g * \text{DELAY}(\text{新建地铁里程}, \text{建设周期}) \quad (2-7)$$

$$\text{运营总收入} = \text{票价} * \text{客流量} \quad (2-8)$$

$$\text{运营利润} = \text{运营总收入} - h * \text{地铁最大运能} \quad (2-9)$$

$$\text{地铁列车新增数} = \text{年度地铁列车投资} / \text{列车造价} \quad (2-10)$$

$$\text{新建地铁里程} = \text{年度建设投资} / \text{单位造价} \quad (2-11)$$

在以上给出的公式里，软件的仿真时间步长确定为 1 年； $a$  为速度性权重； $b$  为便利性权重； $c$  为安全性权重； $d$  为舒适性权重； $e$  为准点性权重； $h$  是地铁的单位运营成本； $f$  为一组地铁列车年度输送旅客的最大值； $g$  为单位地铁运送旅客数。

## 4. 客流量仿真研究

为了进一步对模型进行验证，本文以广州地铁 3 号线相关数据进行仿真。3 号线目前的实际客流量远超规划时的客流量，全线共 15 个站点高峰期需要实施常态化客流控制措施。虽然地铁公司先后采取了增加列车上线、开行高峰短线车等手段提升运能，行车间隔已从 7 分 50 秒压缩至 2 分 20 秒，行车组织中采用了大小交路，虽然运力得到大幅提高，但是仍然无法满足市民日益增长的出行需求。因此，以 3 号线客流为例进行分析有着重要的现实意义，可以为管理者提供更好的决策思路。

### 4.1. 常量的确定

#### 1) 票价初始值设定

根据广州地铁的定价措施，0 至 4 公里为 2 元；4 至 8 公里为 3 元；8 至 12 公里为 4 元；12 至 18 公

里为 5 元；18 至 24 公里为 6 元；24 公里之后，乘客每乘坐 8 公里，需要多付 1 元。根据全国 50 城市上班距离和时间排行榜，广州人均 13 公里左右，本研究中取票价初始值为 5 元。

#### 2) 总运能初始值

根据广州地铁 3 号线全日时分开行计划，广州地铁 3 号线每年最大发送量为 8.6 亿人次。所以仿真模拟中，广州地铁 3 号线的最大运量初始值取为 8.6 亿。

#### 3) 乘客支付能力

某个地区居民的出行支付能力，受到该地区居民的生活水平和人口比例影响，经过计算，结合近年年均支配收入的发展趋势，可以得到 2014 年广东省城市居民出行支付能力是每人每公里 0.6 元。本文设定广州市区乘客支付能力为每人每公里 0.6 元。

#### 4) 列车定员取值

三节编组列车载客量满载为 675 人，从 2010 年起全线三节改六节编组，即满载为 1350 人。

#### 5) 服务水平

服务水平是速度性、便捷性、准点性、安全性和舒适性的综合体现。2010 年全国乘客调查报告指出，速度性、便捷性、准点性、安全性和舒适性的权重分别是：0.25, 0.22, 0.16, 0.2, 0.17。在模型仿真的过程中，5 个变量取值区间为-0.4 至 0.4，取值越大代表该属性越完善。

#### 6) 客流量初始值

根据近年来广州地铁公布的数据，3 号线客流量大约占全网线客流量的百分之 24。2014 年广州地铁全线每日平均客流量为 624.5 万人次，推算出 2014 年 3 号线每日平均客流量是 149.88 万人次，全年发送旅客 5.47 亿人次。因此本研究将客流初始值取值为 5.47 亿。

#### 7) 其他常量

六编组的地铁车辆造价为 2.4 亿元；地铁线路单位造价取值为每公里 4.2 亿元；地铁的正常运营成本大约是每人每公里 0.5 元。本文研究的时间范围为 2014~2023 年。

## 4.2. 广州地铁 3 号线客流变化仿真

### 1) 票价对广州地铁 3 号线客流变化的影响

基于广州地铁的现行票价，模拟票价设置为 5 元，同时增加参考票价 7 元和 9 元，对广州地铁 3 号线的客流量利用 vensim 软件进行模拟仿真。当服务水平为 0.179 时，仿真结果如图 3 所示。

从仿真的结果可以看出，当服务水平不变的时候，地铁车票定价在 5 元时，其客流量增长速度最高；当票价提升到 7 元或者 9 元时，客流量仍然会继续上涨，但增长速度远不如定价 5 元的时候；当票价超过仿真中的临界值 11.2 元时，客流量将出现下降趋势。从仿真结果可以看出，在地铁最大运能足够状况下，如果地铁票价大于乘客心里票价的 1.44 倍时，广州地铁 3 号线的客流量将会出现下降的走势。因此，11.2 元是广州地铁 3 号线的极限票价。然而服务水平的提高，将有利于提升地铁的极限票价。

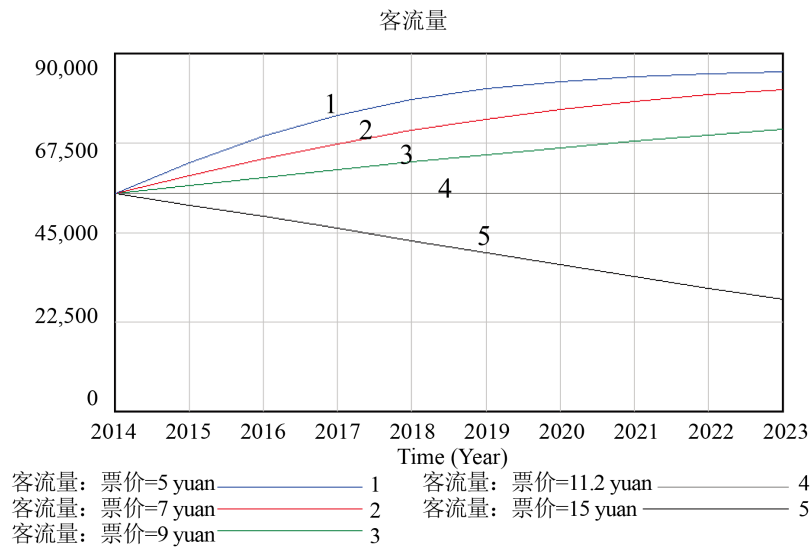
从以上仿真结果能够得到下面的结论：定价过高的地铁票价将阻碍地铁客流的成长，致使客流量未能实现设计伊始的规划，从而使地铁运能受到不必要的浪费；当地铁线路的客流量因经济发展而变得过大时，政府和地铁运营者可以尝试提高票价，从而使一部分不能接受票价的旅客分流到其他交通工具中去；提升地铁服务水平能够提高票价的上浮空间。

### 2) 服务水平对广州地铁 3 号线客流变化的影响

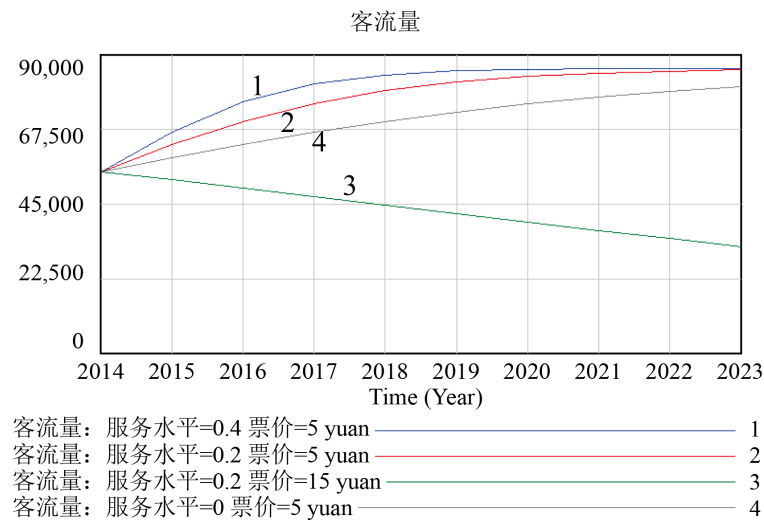
由模拟结果可知，高质量的服务水平将促使地铁客流的增加，如图 4 所示。

### 3) 舒适度与票价影响的比较

仿真结果指出，即使票价定为乘客的心里票价，但服务水平太低也不会被乘客认可。当服务水平足



**Figure 3.** The effect of Fares on the Subway Passenger Flow  
**图 3.** 票价对客流量的影响



**Figure 4.** The effect of service level on the Subway Passenger Flow  
**图 4.** 服务水平对客流量的影响

够高时，即使票价超过乘客的心里票价，地铁客流量也会呈现上升的趋势，如图 5 所示。

#### 4) 投资对广州地铁 3 号线客流变化的影响

当地铁的投资额不断上升的时候，资源拥挤程度就会越低，从而可能会导致地铁资源不必要的浪费，所以，政府和地铁管理者需要在地铁不同的时期，采用更合理的投资方向和投资力度。服务水平的提升促进地铁运营收入的增长，但如果地铁运营的总收入比地铁运营成本还要低的时候，运营利润将会呈现出消极的趋势，在这个时候地铁投资力度越大，运营利润负增长的势头将会越猛。如图 6 所示。

## 5. 结论

1) 当地铁平均票价太高的时候，部分地铁目标旅客将会选择其他交通工具出行，当地铁平均票价太低的时候，将不利于地铁的长期发展。因此，在地铁运营的成熟阶段，应该把重心放在提高服务水平上，

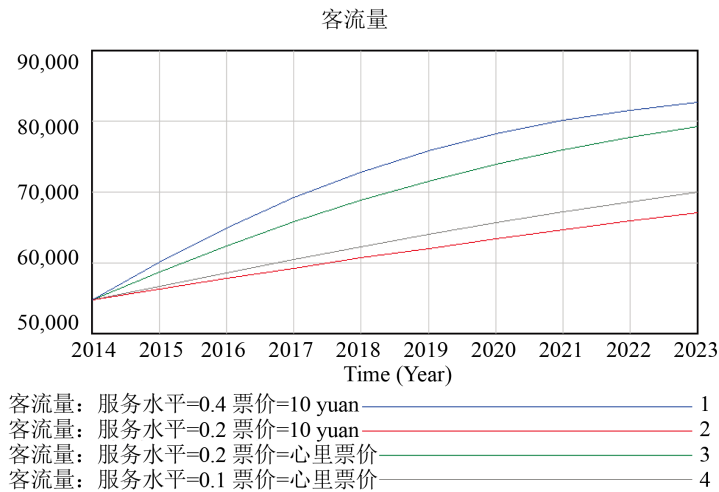


Figure 5. The compare of fare and service level on the Subway Passenger Flow

图 5. 票价与服务水平对线客流量的影响比较

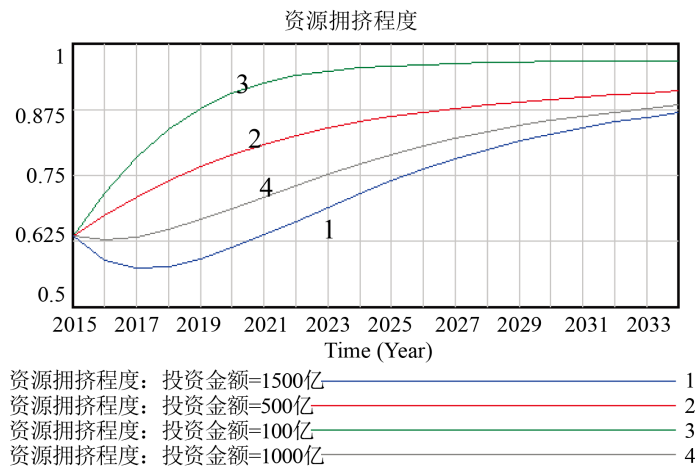


Figure 6. The impact of investment on the degree of congestion

图 6. 投资对资源拥挤程度的影响

考虑乘客的支付能力，运用地铁票价的经济杠杆作用，根据节假日提高票价来分流旅客，不但可以稳定运营收入，而且可以缓解车站内部过于拥挤的状况。

2) 为了增加地铁客流量，需要增加投资使地铁的服务水平得到逐步提高。当投资过剩时，会导致地铁运力的浪费，回收投资资金的过程将会比较长。因此，地铁投资方需要根据客流量的预测趋势，对地铁实行阶段化的投资策略，既能提供充足的运能，又能减少投资金额和运营成本。

3) 服务水平的高低会导致乘客对不同的出行方式表现出不一样的喜好，地铁的长时间发展，必须提供充足的运输能力来满足乘客的需求。与此同时，需要参考客流需求和服务水平的相关性，进而采取科学的与地铁自身发展阶段相匹配的票价和投资策略。这些手段都会促进地铁运营利润的增长，进而促使地铁的持续性发展。

### 基金项目

五邑大学教改项目(JX2016014)；大学生创新创业训练项目(2015041)。



---

## 参考文献 (References)

- [1] 王玉萍. 城市轨道交通客流预测与分析方法[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [2] 陈煜. 深圳地铁运营对轨道交通客流预测的启示[J]. 铁道工程学报, 2011(8): 107-111.
- [3] 冷彪, 曾加贝. 北京地铁换乘站客流预测模型研究[J]. 铁道运输与经济, 2012, 34(5): 71-75.
- [4] 罗小强. 城市轨道交通线网布局规划理论与方法研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [5] 施宗衡. 城市轨道交通客流预测相关问题分析[J]. 城市交通, 2009, 7(1): 45-46
- [6] 贾仁安, 丁荣华. 系统动力学——反馈动态性复杂分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojtt@hanspub.org](mailto:ojtt@hanspub.org)