

基于排队论的沈阳地铁节日客流运营优化方法



张澎^{1,*}, 李世阳²

¹沈阳地铁集团有限公司, 辽宁沈阳 110011

²东北大学数学系, 辽宁沈阳 110819

摘要: 通过研究沈阳地铁进出站客流数据来分析客流特征, 得出节日客流量与日常客流量的变化, 根据满载率以及乘客的平均等待时长来判断行车间隔是否需要优化以及如何优化, 为优化行车间隔给予参考。说明了节日客流数据的选取, 通过平均进站客流量的比例作为划分换乘站不同线路进站客流量的依据。进行时间序列平稳性检验, 为了计算满载率给出了地铁站的客流吸引因子。运用 MATLAB 中的随机数生成器来生成进站乘客之间的时间间隔, 检验了地铁进站数据服从泊松分布, 计算出地铁的满载率和乘客的平均等待时间。提出在春节、清明节、劳动节、端午节、中秋节期间, 通过权衡满载率和服务时间来设置行车间隔。最后对本文的方法进行了总结和说明, 本文提出的方法对地铁运营优化具有一定的参考价值。

关键词: 地铁; 客流特征; 满载率; 排队论

DOI: [10.57237/j.wjms.2022.01.004](https://doi.org/10.57237/j.wjms.2022.01.004)

Study on the Operation and Optimization of Holiday Passenger Flow of Shenyang Metro on the Basis of Queuing Theory

Zhang Peng¹, Li Shiyang²

¹Shenyang Metro Group Co., Ltd., Shenyang 110011, China

²Department of Mathematics, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: By studying the passenger flow data in and out of the station of Shenyang Metro, the changes of holiday and daily passenger flow are obtained. Determine whether and how to optimize the running interval according to the load factor and the average waiting time of passengers, and provide reference for optimizing the running interval. The selection of holiday passenger flow data is explained, the proportion of the average inbound passenger flow is used as the basis for dividing the inbound passenger flow of different lines at the transfer station. The time series stationarity test is carried out and the passenger flow attraction factor of the subway station is given in order to calculate the full load rate. By using the Random number Generator in MATLAB to generate the time interval between incoming passengers, it is checked that the incoming data of subway obeys Poisson distribution, the full-load ratio of subway and the average waiting time of passengers are calculated. During the Spring Festival, Qingming Festival, Labor Day, Dragon Boat

*通信作者: 张澎, zhang90peng@126.com

Festival and Mid-Autumn Festival, the driving interval is set by weighing the full load rate and the service time. Finally, the method of this paper is summarized and explained, the method proposed in this paper has certain reference value for subway operation optimization.

Keywords: Metro; Passenger Flow Characteristics; Full-load Ratio; Queuing Theory

1 引言

为了对公共交通运输业的部分情况有直观的了解, 必然离不开对运输系统的模拟仿真, Sims 利用 Paxport 对英国地铁安全疏散时间进行仿真[22]; 文献[4, 7, 9, 12]通过仿真软件对车站的进站、换乘进行模拟仿真。文献[6, 14, 16]研究了公共交通的适应性评价和大型枢纽站的组织优化; 文献[23]研究了公共交通中断对乘客的影响, 开发了一种新的转移推理算法, 利用智能卡数据量化了对乘客行程干扰的概率分布; 文献[1, 13, 15, 19]则主要研究了城市轨道交通的换乘模式、智能综合监控系统, 并且研究了国外部分城市轨道交通安全管理工作, 为国内的交通安全保卫工作提出了建议。上述研究和实践是针对公共交通运输的不同方面展开的, 对地铁的研究具有借鉴意义。

在关于地铁的研究上, 主要是研究地铁的排队进站优化, 客流预测和组织, 换乘站的效率, 地铁运营组织方法等方面: 文献[5, 8]研究了地铁站自动检票机的配置; 文献[2, 10]研究了大小交路在地铁中的应用, 并对这两种方式进行了优势分析和总结; 文献[11, 17, 20, 21]主要是提供了可供借鉴的地铁运行调整方式、制约因素以及调整原则; 文献[3]指出了现有地铁系统存在的问题, 并提出了智慧地铁的概念以及四个研究方向, 认为当前的大量地铁数据得不到利用, 地铁系统仍有很大的提升空间; 文献[18]研究了北京地铁节假日的客流特点, 并总结了节假日期间地铁运营组织措施和方法。综上所述, 地铁系统还有很多方面有待研究, 地铁智能化程度有待提高, 大量地铁数据中存在的信息等待被提取利用。本文应用排队论方法模拟地铁运行, 并计算满载率和平均等待时长。

2 客流特征分析

2.1 数据选取

节假日期间, 受休闲、购物、天气等因素的影响,

地铁站在短时间内可能出现大客流。如何避免出现地铁站过于拥挤的状况, 这对地铁的运营组织提出了更高的要求。如何根据节假日客流特征, 提高地铁运营组织的灵活性和多样性, 充分利用地铁运输能力, 确保地铁系统运营安全, 是节假日地铁运营待解决的问题。

我国节假日包括元旦、春节、清明节、劳动节、端午节、中秋节和国庆节, 其中春节和国庆节为 3 日假期, 其余为 1 日假期。我们选取了春节、清明节、劳动节、端午节、中秋节五个假期的数据, 将假期数据提取出来, 重点研究, 目的是为了提提高节假日期间地铁运营质量, 同时也可以尽可能地提高公共资源利用率。本文的数据来源于沈阳地铁集团有限公司。

2.2 平稳性检验

为确定数据序列是有确定趋势而非完全随机数列, 这里我们通过时间路径图法和自相关函数图对数据进行时间序列平稳性检验。

我们首先介绍一下平稳时间序列的定义, 若时间序列 y_t 满足: (1) 对任意时间 t , 其均值恒为常数; (2) 对任意时间 t 和 s , 其自相关系数只与时间间隔 $t-s$ 有关, 而与 t 和 s 的起始点无关。那么, 这个时间序列就成为平稳时间序列。

时间路径图法是通过绘制出时间序列散点图, 如果观察散点是围绕均值上下波动, 判断序列平稳, 否则, 判断序列非平稳。以天数为横坐标, 以一天内的全部进站客流量为纵坐标, 先作出进站客流量散点图, 观察数据是否在均值附近波动, 接着对数据的平稳性进行判断, 发现数据在平均值附近波动, 主观判断春节期间的进站客流满足平稳性条件, 见图 1。

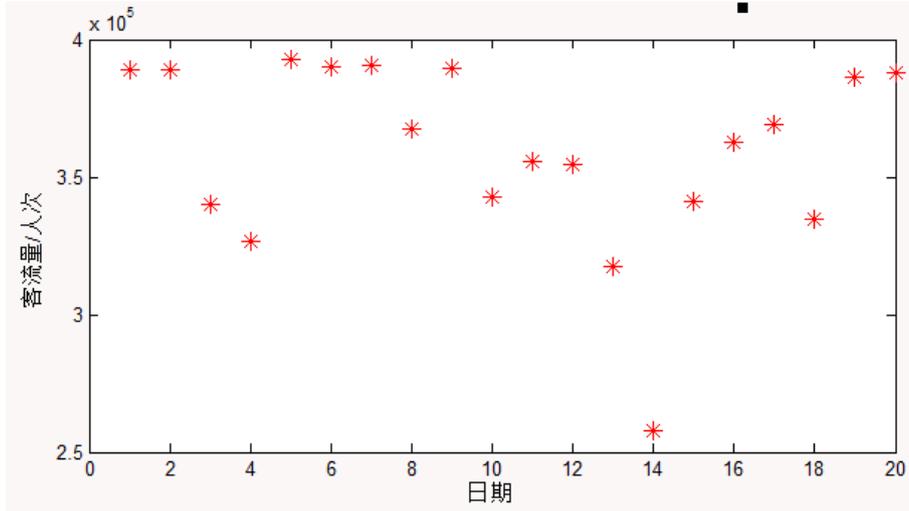


图1 一号线春节期间客流量散点图

自相关系数图法是通过观察序列的自相关系数图。如果序列的自相关系数很快的(滞后阶数 k 大于 2 或 3 时) 趋于零, 即很快落入随机区间, 判断序列平稳, 否则, 判断序列非平稳。将数据导入 Eviews, 画出数据的相关系数图, 检验自相关系数是否很快趋于 0, 根据自相关系数图, 认为春节对比日期的数据满足平稳性条件, 见图 2。类似的, 我们检验了其他假期的平稳性, 发现均满足平稳性要求。

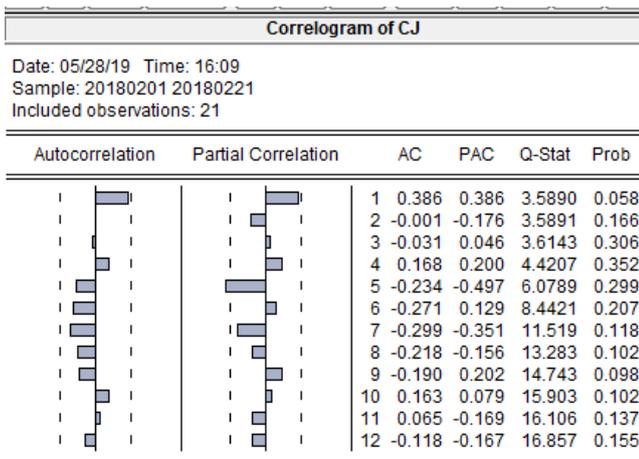


图2 一号线春节期间客流量自相关系数图

$$mzl = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{a_i \cdot (1 - \alpha_i) \cdot 10 + u_i}{Z}$$

其中: n —地铁线路一共有 n 站; a_i —地铁到达第 i 站时车内的乘客量; u_i —第 i 站的上车人数; Z —地铁满载时所搭乘的乘客数量。

为了计算满载率, 需知道每辆地铁的下车乘客的数量, 由于我们只知道每个时段的总出站乘客数, 所以必须找到方法来计算每辆地铁在每个站的下车人数, 因此本文将每站下车乘客的数量与地铁搭乘乘客的总数的比值定义为站点 i 的对乘客的吸引因子 α_i , 即当一辆含有乘客 x_i 人的地铁到达站点 i 时, 会有 d_i 名乘客下地铁, α_i 定义为 $\alpha_i = d_i / x_i$, 同样我们也可以根据吸引因子来求下地铁的乘客数量。

为了计算地铁站的吸引因子, 我们决定先利用已知的进出站数据简单的将吸引因子定义为站点 i 每个时段出站人数占进站人数的比例, 取一个月内的平均值作为站点 i 各个时段的吸引因子 α_i 。经过计算发现各个站点不同时段的进出站比例变化不大, 所以我们对各个时段的吸引因子再取平均作为站点 i 的吸引因子 α_i 。

3 排队论优化行车间隔

3.1 地铁站的客流吸引因子

在计算地铁满载率的时候, 我们计算出各个区间满载率, 然后取和作为地铁本次运营的满载率, 采用的是以下公式:

3.2 地铁运行模拟

泊松分布是概率论与统计学中常见的随机概率分布, 适用于描述随机事件在单位时间内发生的次数, 如某一服务机构在一定时间内的到达人数。我们首选的时段客流分布为泊松分布, 泊松分布具有平稳性、

无后效性、在同一瞬间多余一个事件出现概率可忽略不计的普通性。经过假设检验，时段进站客流服从泊松分布；泊松分布的概率密度函数是

$$P(x=k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!},$$

泊松分布的参数 λ 表示单位时间(或单位面积)内随机事件的平均发生率。在概率论中，常用指数分布描述泊松过程中的事件之间的时间间隔的概率分布，即指数分布是描述以恒定平均速率连续且独立的事件发生的过程，其概率密度函数为：

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} e^{-\frac{x}{\theta}}, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0, \end{cases}$$

其中 θ 是指数分布的一个参数， $1/\theta$ 表示单位时间内随机事件的发生次数。若随机变量服从参数为 θ 的指数分布，则记为 $x \sim E(\theta)$ ，并且 $E(x) = \theta$ ， $D(x) = \theta^2$ 。

为了模拟地铁乘客进站，我们选用了指数分布随机数生成器，生成地铁乘客进站的时间间隔，利用地铁到站时间进行限制乘客数量。

3.3 满载率及平均等待时长计算

把地铁所有行车区间上的满载率之和作为运行一次的满载率，并把每站所有乘客的等待时间之和的平均值作为该站地铁乘客的平均等待时长，接着通过权衡满载率和平均等待时长对行车间隔进行调整。

(1) 春节

经过模拟发现一号线在春节假期间满载率普遍较低，上行方向平均满载率为 0.6995，下行方向平均满载率为 0.2611，为了增大满载率，我们增加了低峰时段的行车间隔，由 501s 增加到 900s，调整之后上行方向平均满载率为 0.7305，下行方向平均满载率为 0.2611，由此看出增大行车间隔可以有效的提高车辆满载率，并且不会对乘客的平均等待时长产生太大影响，并且在调整低峰行车间隔时，车辆满载率并无太大变化，由此看出影响满载率的主要是低峰时的行车间隔，所以对春节期间的运行命令调整的建议是适量增大春节期间的行车间隔。

同时发现二号线春节期间的满载率过低，上行方向发车 183 辆，下行方向发车 169 辆，上行方向为 0.4046，下行方向为 0.4215，乘客平均等待时长为 0.37 小时；

经过调整行车间隔后，上行方向发车 129 辆，下行方向发车 149 辆，满载率为 0.4155，平均等待时长为 0.37 小时。

(2) 清明节

经过模拟运行发现清明节期间一二号线各时段满载率平均为 3.0667，说明清明节期间各辆列车利用率较高，每辆列车一次运输可运输三倍的载客量，并且经过检验，没有发现有区间超载，所以可以不对现有行车间隔变动，但地铁运营方应加强安全保护措施，避免意外发生，同时应监控客流，在客流量较大及时发车。

(3) 劳动节、端午节及中秋节

经过模拟发现这三个节假日期间的地铁满载率类似，主要都是一号线满载率偏高，为 13-14，并且部分区间存在满载率大于 1 的现象，而二号线则是运行刚好，满载率为 4 左右，不存在满载率大于 1 的区间。

因此，在实际运营中应针对时段客流特征，调整行车间隔以期得到较好的满载率的同时，减少不必要的风险。

4 方法总结

本文的主要目的是为了模拟地铁运行并计算地铁运行的满载率，为此首先对所给数据进行了分析和处理，在计算出满载率之后，根据满载率以及乘客的平均等待时长来判断行车间隔是否需要优化以及如何优化。

对数据的处理主要是为了模拟地铁运行做准备，模拟地铁运行需要的数据包括各个站点各个时段上下行的进站客流量，每个地铁站的下车比例，运营命令以及各个线路的站停时间和区间运行时间。在计算各个上下行进站客流量时，本文利用地铁站的吸引因子对进站数据进行了划分，并且对于换乘站本文通过平均进站客流量的比例作为划分换乘站不同线路进站客流量的依据；通过计算一段时间内的进出站客流量的比例，取平均值作为地铁站的下车比例，由于地铁公司对于不同日期有不同的运营命令，所以需要根据研究的日期查找不同的运营命令，运营命令里主要给出了不同峰期的行车间隔以及首末班车发车时间，在模拟地铁运行时需根据行车间隔控制发车时间，并且通过首末班车时间控制发车数量，而站停时间以及区间运行时间则是固定不变的，一二号线不同之处在于，一号线路的上下行站停时间一致，而二号线路的站停

时间则分为了上下行方向,因此在模拟不同线路地铁运行时,需注意站停时间以及区间运行时间参数的调取和设置。

为了模拟地铁运行,首先我们对进站客流量这一时间序列数据进行了平稳性检验,发现进站客流量并非是完全随机序列,接着先假设进站客流量所服从泊松分布,接着进行了假设检验,发现可以接受原假设,由此我们可以认为地铁乘客进站的时间间隔服从指数分布,利用指数分布的随机数生成器来生成不同时段的进站客流量,利用满载率计算公式求出地铁运行的满载率,并记录下乘客的等待时长。

致谢

作者对审稿人耐心细致的审阅和有意义的建议表示诚挚的感谢。

参考文献

- [1] 陈诚,高国飞,魏远,等. 苏州市轨道交通客流时空分布特征 [J]. 现代城市轨道交通, 2017, 11: 42-48.
- [2] 陈健,曾瑜. 深圳地铁 3 号线大小交路运行方式探讨 [J]. 都市轨道交通, 2014, 27 (2): 54-56.
- [3] 陈德旺,章明亮,沈铺. 智慧地铁:基于大数据与人工智能的新型地铁系统 [J]. 智能城市, 2018, 4 (19): 8-10.
- [4] 戴建强. 基于排队论和 Anylogic 仿真的车站进站排队优化 [J]. 铁路计算机应用, 2018, 17 (9): 41-43.
- [5] 郭湘君. 基于排队论的地铁站自动检票机配置研究 [J]. 电子测试, 2016, 13: 38-40.
- [6] 胡春平. 客流枢纽换乘效率及流线组织方法研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- [7] 霍杨. 基于客流模拟的沈阳地铁 1、2 号线换乘站改造设计研究 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62 (7): 149-151.
- [8] 林曦. 考虑随机性与服务水平的地铁站自动售票机配置方法 [D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- [9] 林向荣,张成科. MATLAB 在排队论仿真中的应用 [J]. 广东工业大学学报(社会科学版), 2002, 2 (增刊): 162-163.
- [10] 刘浩江. 小交路运行在地铁行车组织中的应用 [J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14 (5): 91-94.
- [11] 路飞,宋沐民,田国会. 基于多智能体的地铁列车运行调整方案 [D]. 中国铁道科学, 2007, 28(1): 124-125.
- [12] 聂广论,刘洋,黄璐. 排队系统的模拟仿真 [J]. 黑龙江工程学院学报, 2014, 28 (4): 57-59.
- [13] 田苗苗. 城市轨道交通线网换成系统分析与效率评价 [D]. 北京:北京交通大学, 2007.
- [14] 王英男. 大型综合交通枢纽站客流预测及组织优化方法研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2008.
- [15] 王富章,李萍,刘德山. 城市轨道交通智能综合监控系统及关键技术 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2004, 4 (3): 25-27.
- [16] 许文娟. 城市公共交通与城市发展的适应性评价研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- [17] 徐瑞华,刘峰博,范围. 基于换乘运力协调的地铁列车运行调整策略 [D]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17 (6): 165-169.
- [18] 禹丹丹,陈文,韩庆龙,等. 北京地铁节假日客流特点和运营组织方法分析 [J]. 现代城市轨道交通, 2019(4): 58-66.
- [19] 袁桂娟. 国外城市轨道交通警务建设的实践及启示 [J]. 铁道警察学院学报, 2018, 28 (137): 53-55.
- [20] 张学兵,俞太亮,李广刚. 地铁列车运行调整策略选择与制约因素分析 [J]. 现代城市轨道交通, 2011 (5): 70-72.
- [21] 周美含. 城市轨道交通列车运行调整方法研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- [22] SIMS D. See how they run: modeling evacuations in VR [J]. Computer Graphics and Applications. 1995, 15 (2): 11-13.
- [23] Yap M. D., Cats O., Oort N., et al. A robust transfer inference algorithm for public transport journeys during disruptions [J]. Transportation Research Procedia, 2017, 27: 1042-1049.

作者简介

张澎

1990 年生, 硕士, 统计师, 主要研究方向: 统计分析.

E-mail: zhang90peng@126.com