

基于数理统计的地铁车站换乘走行时间估计研究

童燚杰, 王利鑫, 潘明轩, 李正洋, 金 波

(西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031)

摘 要:对车站换乘走行时间的估计是分析成网条件下地铁线路间列车合理衔接,减少乘客总换乘等待时间的前提。基于数理统计方法对地铁车站换乘走行时间规律进行研究,设计地铁车站换乘走行时间规律的抽样调查方法,同时采用正态分布和对数正态分布函数对地铁车站换乘走行时间分布进行描述,并利用极大似然估计法对其中的参数进行估计。最后,以重庆地铁两路口换乘站为例,对所提出方法的实际可行性进行验证。

关键词:走行时间;数理统计;抽样调查;正态分布;两路口

中图分类号:U231

文献标识码:A

文章编号:1008-5696(2016)01-0007-05

Estimation on the Transfer Walking Time in the Subway Station Based on Mathematic Statistics

TONG Yijie, WANG Lixin, PAN Mingxuan, LI Zhengyang, JIN Bo

(School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Estimation of the transfer walking time in subway stations is the premise of analyzing the subway reasonably connection between subway lines and the decrease of the total transfer passengers' waiting time in the condition of subway network. This paper researches the law of transfer walking time in the subway station based on the method of mathematical statistics. It designs a sampling survey method to infer the law of transfer walking time in the subway station. By using the normal distribution function and the lognormal distribution function, this paper describes the regular of transfer walking time in the subway station. Then it estimates the parameters by using the method of maximum likelihood estimation. Finally, taking Lianglukou subway station in Chongqing as an example to verify the practical feasibility of the proposed method.

Key words: walking time; mathematical statistics; sampling survey; normal distribution; Lianglukou

乘坐地铁出行时,当出发地与目的地不在一条线路上时,常需要换乘,乘客先后乘坐的线路分别称做输送线路和衔接线路。在地铁换乘站内,乘客会在从输送线路到衔接线路的过程中花费换乘走行时间,便捷的换乘方式能缩短走行时间,而复杂的换乘方式则会极大地增加换乘走行时间。因此,研究换乘走行时间是地铁系统设计的热点之一。

从现有文献[2-6]来看,国内专家学者研究的方向是合理规划换乘站内布置、乘客到站时间研究、

地铁线路间换乘衔接等问题,但缺乏对乘客在换乘站内走行规律的研究。国外研究人员对城市轨道交通网络比较注重,研究内容大多是关于如何协调轨道网络的问题,对地铁线路间的换乘走行时间规律的研究较少。本文基于真实的调研数据,研究换乘走行时间,用数理统计方法估计换乘走行时间规律,设计一种简便而高效的调查方法,采用科学的比较方法,对此类问题进行研究。

1 数理统计方法

数理统计方法对处理调研结果的误差程度起决定性作用。

收稿日期:2015-12-17

基金项目:西南交通大学 2015 年国家大学生创新创业训练计划项目 (201510613047)

作者简介:童燚杰(1994—),男,本科在读,研究方向:交通运输。

1.1 正态分布与对数正态分布

一般认为换乘走行时间规律符合正态分布函数,应用 MATLAB 软件对数据用正态分布函数和类型相同的对数正态分布函数进行拟合,根据对数似然估计值,选择估计值更优的函数。

正态分布函数的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (1)$$

其中第一参数 μ 服从正态分布的随机变量均值,第二参数 σ 为此随机变量的标准差。服从正态分布的随机变量概率规律为:变量的频数呈中间高、两端对称逐渐减少的趋势,曲线走向为钟形; σ 越小,分布越集中在 μ 附近, σ 越大,分布越分散。

对数正态分布函数是对数为正态分布函数的任意随机变量的概率分布。对数的正态概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \times \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], & x > 0; \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

第一参数 μ 符合对数正态分布函数的随机变量对数均值,第二参数 σ 为此函数随机变量的对数标准差。

1.2 极大似然估计法

极大似然估计法的基本观点是认为目前观测到的是最有可能发生的事。从数理统计的角度来看,所谓“观测到的”就是对样本进行观察时所获取的观测值,极大似然估计就是将这个可能性表示为待估参数的函数(即似然函数),通过寻找该函数的极大值来确定参数的估计值。

当总体 X 为连续型时,设概率密度为 $f(x, \theta)$, θ 为待估参数,且 $\theta \in \Theta$, X_1, X_2, \dots, X_n 是来自总体 X 的样本,若 x_1, x_2, \dots, x_n 为对应于 X_1, X_2, \dots, X_n 的样本值, $L(\theta) = L(x_1, x_2, \dots, x_n), \theta = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta)$, $L(\theta)$ 为样本的似然函数。

当样本的似然函数为正态函数或对数正态函数时,极大似然估计参数即为正态函数或对数正态函数的均值。

2 数据调查方法

为方便乘客换乘,地铁换乘站多采用站内换乘,即不走付费区换乘,换乘不被记录,因此 AFC(自动售检票系统)数据难以用来计算乘客的换乘走行时间,只能采用人工调的方法。由于通道换乘走行时间服从概率分布的随机变量,本文运用概率

论与数理统计方法,对通道换乘走行时间进行简单随机抽样,通过样本去推断总体的分布情况,得到换乘走行时间的分布函数。

2.1 样本选取

通常情况下,在同一地铁换乘通道中,老年人的走行时间要比年轻人多,而且距离越长时间相差越大。在实际抽样调查中,从便于外貌区分角度出发,将乘客分为中青年(12~60岁)和老年(60岁以上)两类。根据文献[8]的研究,在城市轨道交通出行的总客流中,中青年所占的比例约为95%,即在随机抽样调查中,设置中青年与老年乘客数量的比例为19:1,男女乘客数量的比例为1:1。

此外,此次抽样调查选在平峰时段,避开上下班高峰时段,平峰时段客流量较小,选取上午9:00—12:00和下午14:00—16:00进行调研。

2.2 样本容量

在进行抽样调查时,需确定样本容量大小,当样本容量过小时,不能满足数理统计的精度需求;反之,当样本容量过大时,虽然会提高数理统计的精度,但会加大调研工作量。因此,适当的样本容量既能满足数理统计的需求,又不会使调研工作量过大。调研样本的容量大小可以根据数理统计所需数据的精度来确定,满足精度的最小样本容量可以根据统计学的原理计算

$$N = (Z \times \sigma / E)^2. \quad (3)$$

式中: N 为样本容量, Z 为标准误差的置信水平。

置信度取95%时,对应的 $Z=1.96$,即样本平均值在1.96倍实际总体数据平均值标准误差范围内的概率为95%,置信度越小, Z 越小。 σ 为总体标准差,表示样本的离散程度大小,在未进行大规模调查之前,可以用少量样本数据进行计算估计,此处取0.8作为参数值, \min 。 E 为换乘走行时间允许存在的样本误差,其值越小,说明需要调查的样本量越多,此处取允许误差为 $\pm 10\%$,即 E 取0.1,则最小样本容量 $N = (Z \times \sigma / E)^2 = (1.96 \times 0.72 / 0.1)^2 = 199$,所以在实际调研中,样本容量取为200人。

2.3 调查方法

一般地铁换乘站两条换乘线路间会利用两条通道分开,少数运用一条大通道进行换乘,因此两条通道换乘时,需要以两个方向客流为调研对象,分别采集和处理两个方向的换乘走行时间。

换乘站客流量随时间变化较大,换乘走行时间与客流量的大小直接关系,换乘走行时间采集时段应尽量与列车时刻表换乘协调研究的时段相一

致,保证换乘走行时间的准确性。

本次调查时段选取在工作日的上午 9:00—12:00 和下午 14:00—16:00 客流平峰时间。走行时间的测量采用人工调查方法,需要 3 名调查人员(A,B,C),其中 2 人在地铁到站开门时开始计时,并以最快的速度到达衔接线路,记录每 1 名乘客的到达时间,其中 1 名调查员 A 专门负责记录男性乘客,另 1 名调查员 B 记录女性乘客,最后 1 名调查人员 C 跟随最后 1 位乘客(除有特殊情况者)到达衔接线路作为本次换乘的结束点,最先到达调查员(A 或 B)记录下最后到达调查员 C 的走行时间,即可认为本次换乘全部结束。由于进站乘客流线与换乘乘客流线不重叠,所以进站客流不会影响调查结果。

3 案例应用

上述调研方法适用于所有地铁换乘站,本文选用重庆地铁两路口站作为研究案例。作为两路口地铁换乘站的组成线路,重庆地铁 1 号线和 3 号线是地铁线网中的重要线路,1 号线横贯市区,3 号线纵贯市区,两线路都途经市区的繁华区域,客流量较大。

3.1 两路口换乘站概况

重庆地铁两路口换乘站是重庆地铁 1 号线和 3 号线的交汇站,该站处于城市中心区,换乘客流量较大。地铁 1 号线和 3 号线在中部连接,在两路口的两个车站上下立交,呈“十”字型换乘,两路口地理位置及车站布置形式如图 1 所示。



图 1 两路口站地理位置及车站布置形式

两路口地铁换乘站为地下车站岛式站台设计。两路口换乘站的 1 号线至 3 号线换乘方式为站厅换

乘,换乘乘客可由 1 号线站台上 1 次楼梯后进入售票大厅,再下 2 次楼梯后到达 3 号线站台;3 号线换乘至 1 号线是结点换乘,乘客可由 3 号线站台江北机场方向一端上 1 次楼梯到达 1 号线站台。两路口的设施结构及换乘流线如图 2 所示。

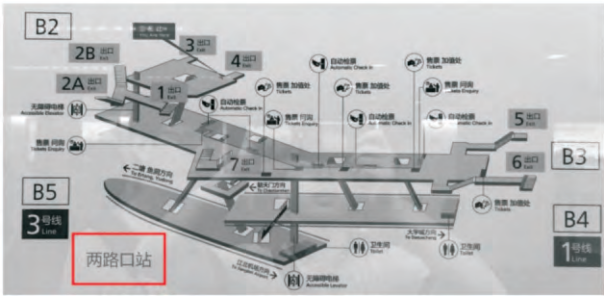


图 2 两路口站设施结构及换乘流线

从图 2 的两路口设施结构图及调查人员实地调查发现,1 号线上行方向换乘 3 号线上行方向、1 号线上行方向换乘 3 号线下行方向的路程长度相等,同理,1 号线下行换乘 3 号线的上行、下行方向路程一样;3 号线上行换乘 1 号线上行、下行路程相等;3 号线下行换乘 1 号线上行、下行路程相等。简单地说,1 号线换乘 3 号线的 4 个方向两两镜面对称,3 号线换乘 1 号线的 4 个方向也两两镜面对称。所以,为节省调查工作量,选择 1 号线上行方向换乘 3 号线上行方向、3 号线上行方向换乘 1 号线上行方向作为 8 个换乘方向的代表和调研对象。

3.2 换乘走行时间拟合

数据拟合是处理数据的一个重要方法。本文采用 MATLAB 软件进行函数拟合,比较参数似然估计值的大小,确定正态函数与对数正态函数的拟合效果优劣。

3.2.1 1 号线到 3 号线

通过对乘客走行时间调查数据的处理,用 MATLAB 对走行时间的概率密度分布函数进行拟合。数据拟合时,用 MATLAB 的拟合工具处理样本数据,即得到拟合曲线及 2 个参数的值。估计参数结果及其有效性如表 1 所示,拟合效果如图 3~图 6 所示(调查方向 1 号线上行简化为 1 号线,3 号线上行简化为 3 号线)。

表 1 1 号线换乘 3 号线走行时间的函数分布估计参数及检验参数值

函数类型	μ	σ	μ 的标准差	σ 的标准差	似然估计值
正态	167.425 00	40.898 700	2.891 980 0	2.052 650 0	-1.025. 51
对数正态	5.087 52	0.266 785	0.018 864 6	0.013 389 6	-1.036. 53

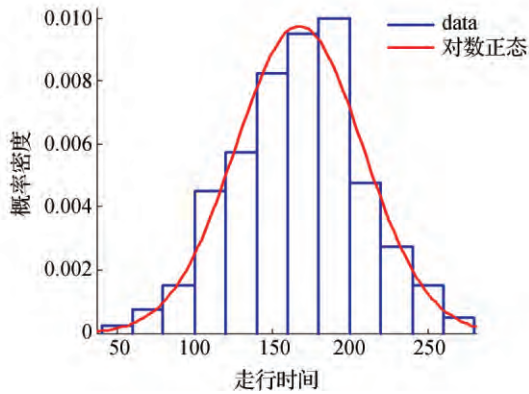


图 3 1 号线换乘 3 号线行走时间概率密度函数(正态)拟合效果

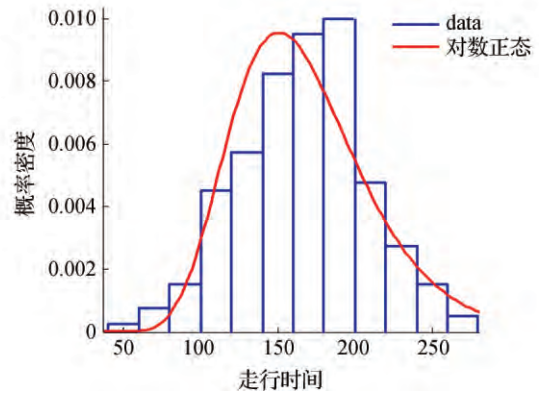


图 5 1 号线换乘 3 号线行走时间概率密度函数(对数正态)拟合效果

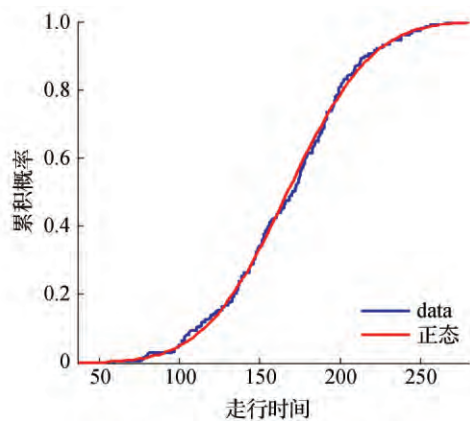


图 4 1 号线换乘 3 号线行走时间累积概率分布函数(正态)拟合效果

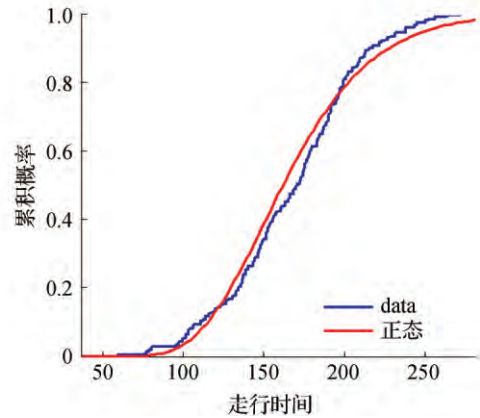


图 6 1 号线换乘 3 号线行走时间累积概率分布函数(对数正态)拟合效果

通过正态函数、对数正态函数与调查数据拟合效果对比来看,正态函数的似然估计值更优,正态函数拟合更好。两路口站 1 号线换乘 3 号线方向用正态分布来描述,调查数据曲线与正态分布效果图中概率密度函数、累计概率分布函数的拟合曲线比较匹配,拟合效果更理想。根据拟合结果,1 号线乘客换乘至 3 号线的换乘行走时间概率密度函数为

$$f_{13}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 40.8987} \times \exp\left[-\frac{(x-167.425)^2}{2 \times 40.8987^2}\right]. \quad (4)$$

3.2.2 3 号线到 1 号线

采用与 3.2.1 相同的方法,可以得到 3 号线换乘 1 号线的正态函数与对数正态函数的相应参数(见表 2)。

表 2 3 号线换乘 1 号线行走时间的函数分布估计参数及检验参数值

函数类型	μ	σ	μ 的标准差	σ 的标准差	似然估计值
正态	86.322 80	35.105 800	2.482 350 0	1.761 910 0	-994.961
对数正态	4.375 86	0.411 906	0.029 126 1	0.020 672 9	-981.067

根据 3.2.1 的叙述可知,两路口站 3 号线换乘 1 号线方向用对数正态函数来描述,调查数据与对数正态效果图中的概率密度函数、累计概率分布函数的拟合曲线更匹配,拟合效果更理想。根据拟合结果,3 号线乘客换乘至 1 号线的换乘行走时间概率密度函数为

$$f_{31}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.411906 \times x} \times \exp\left[-\frac{(\ln x - 4.37586)^2}{2 \times 0.411906^2}\right], & x > 0; \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

3.2.3 预测其他方向

得出两路口站 1 号线上行换乘 3 号线上行和 3 号线上行换乘 1 号线上行的拟合函数后,运用极大似然估计法,得出 2 个方向换乘走行时间的估计值。

1)1 号线换乘 3 号线。由 1 号线乘客换乘至 3 号线的换乘走行时间概率密度函数式(4)可得出:均值 μ 为 167.425 s,即极大似然估计参数为 167.425 s,最终估计换乘走行时间为 167.425 s。

2)3 号线换乘 1 号线。由 3 号线乘客换乘至 1 号线的换乘走行时间概率密度函数式(5)可得出:对数均值 μ 为 4.375 86 s,即极大似然估计参数为

79.508 s,最终估计换乘走行时间为 79.508 s。

根据换乘站内换乘装置布置和 1 号线、3 号线岛式站台设计,推知 1 号线换乘 3 号线 4 个方向的路线两两镜面对称,3 号线换乘 1 号线 4 个方向的路线也是两两镜面对称,因此,可以大致估计出其他 6 个方向的换乘走行时间。估计换乘走行时间产生的误差对分析成网条件下地铁线路间列车合理衔接、减少乘客总换乘等待时间的影响不大,因此,根据极大似然估计法,估计 8 个方向换乘走行时间,如表 3 所示。

表 3 两路口站换乘走行时间估计表

换乘方向	1 上行— 3 上行	1 上行— 3 下行	1 下行— 3 上行	1 下行— 3 下行	3 上行— 1 上行	3 上行— 1 下行	3 下行— 1 上行	3 下行— 1 下行
走行时间/s	167.43	167.43	167.43	167.43	79.51	79.51	79.51	79.51

4 结束语

本文通过重庆地铁两路口换乘站的实地调查,研究所有换乘方向的走行时间及规律,验证本文提出方法的实用性,为换乘总等待时间的优化提供基础。算例结果表明,运用本文提出的方法估计结果比较准确,对地铁车站换乘走行时间规律用正态分布和对数正态分布函数进行描述,但对于具体的换乘方向可选择似然估计值更优的函数。本文所提出的方法能解决绝大多数的地铁换乘站的走行时间研究。

参考文献:

[1] 张迅. 基于换乘协调的城市轨道交通换乘站列车衔接优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
[2] 康逢娇. 基于 AHP 的轨道交通换乘方案选择研究[J]. 交通科技与经济,2015,17(1):48-51.
[3] 周艳芳,周磊山,乐逸祥. 城市轨道网络换乘站列车衔

接同步协调优化研究[J]. 铁道学报,2011,33(3):9-15.
[4] 孙鹏,赵佳虹,丁宏飞. 基于换乘协调的城市轨道交通列车开行方案优化[J]. 铁道运输与经济,2011,33(12):67-70.
[5] 白广争,郭进,石洪国,等. 基于离站时刻协调的地铁换乘站列车衔接优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2013,13(5):134-138.
[6] 吕慎,田锋. 轨道交通枢纽换乘乘客到站时间均值[J]. 交通标准化,2013(21):21-25.
[7] Zhou W T, Han B M, Yin H D. Study on the k-shortest paths searching algorithm of urban mass transit network based on the network characteristics [J]. Applied Mechanics and Materials,2014,505:689-697.
[8] 徐蔷薇. 城市轨道交通枢纽乘客个体出行行为分析及建模[D]. 北京:北京交通大学,2008.
[9] 朱燕堂,赵选民,徐伟. 应用概率统计方法[M]. 西安:西北工业大学出版社,1996.

[责任编辑:王 欣]