

突发事件导致地铁单线运营中断时 乘客路径选择行为研究*

郭靖凡 田媛媛 李俊铖 何建涛 罗启祥

(广州地铁集团有限公司, 510310, 广州)

摘要 [目的] 为了深入了解突发事件对城市轨道交通乘客出行行为的影响,进而帮助运营部门更有效地应对突发事件带来的运营中断。[方法] 问卷设计涵盖了基础性问题(RP 法调查)和场景性问题(SP 法调查),涉及列车火灾、车站水淹、隧道异物侵入轨道等突发事件场景,以及同线短距离、同线长距离、两线间短距离、两线间长距离等多种出行距离场景。问卷通过广州地铁线网内各类线路车站现场线下发放以及官方公众号的线上渠道进行收集,共获得有效问卷 3 000 份。基于这些问卷数据,本文建立了多项 Logit(逻辑回归)模型,量化分析了出行时间、出行费用、换乘次数等乘客出行选择因素的影响程度。[结果及结论] 乘客的出行选择受到突发事件类型、出行距离和出行时段等多重因素的影响。特别是在同线短距离出行场景中,共享单车作为替代出行方式的选择比例平均超过 4.5%。所建立的多项 Logit 模型能够评估不同疏导措施对乘客选择概率的影响,为运营部门提供了有价值的决策支持。未来的研究将进一步预测 OD(起讫点)客流量,进行客流重新分配,并评估疏导措施的有效性,以优化应对策略。

关键词 城市轨道交通; 重大风险突发事件; 运营中断; 乘客出行行为特征

中图分类号 U293.1⁺³

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.008

Metro Passenger Path Choice Behavior during Single-line Operation Interruption in Risk Emergencies

GUO Jingfan, TIAN Yuanyuan, LI Juncheng, HE Jiantao, LUO Qixiang

(Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510310, Guangzhou, China)

Abstract [Objective] To gain insights into the impact of emergencies and incidents on urban rail transit passenger travel behavior, and assist operational departments in responding more effectively to operational disruptions caused by such occasions, a questionnaire is specially designed. [Method] The

questionnaire design covers both fundamental questions (revealed preference—RP survey) and scenario-based questions (stated preference—SP survey), addressing emergency scenarios such as train fires, station flooding, and foreign object intrusion into tunnels, as well as various travel distance scenarios including short and long distances on the same line and between two lines. The questionnaires are collected through offline distribution at various stations within the Guangzhou Metro network and online via the official public account, gathering a total of 3,000 valid responses. Based on these questionnaire data, multinomial Logit (logistic regression), abbreviated as MNL, models are established to quantitatively analyze the influence degrees of factors such as travel time, travel cost, and travel frequency on passenger travel choices. [Result & Conclusion] Passenger travel choices are influenced by multiple factors, including the type of emergency, travel distance, and travel period. Notably, in short-distance travel scenarios on the same line, shared bicycles account for an average of over 4.5% of the alternative travel choices. The established MNL models can evaluate the impact of different diversion measures on passenger choice probabilities, providing valuable decision support for operational departments. Future research will focus on further predicting OD (origin-destination) demand, redistributing passenger flow, and assessing the effectiveness of diversion measures to optimize response strategies.

Key words urban rail transit; major risk emergencies; operation interruption; characteristics of passenger travel behavior

0 引言

城市轨道交通网络的逐步构建,乘客选择轨道交通作为出行方式的比例逐年攀升。以广州为例,2022 年,该市中心城区内轨道交通与常规公交的出行占比已达 21%。尽管轨道交通运营方全力保障安全运营,但突发事件,特别是列车火灾、车站水

* 国家重点研发计划课题(2022YFC3005204)

淹、隧道异物侵限等重大风险事件,仍时有发生。例如,2022年8月8日,韩国首都圈遭遇特大暴雨,导致地铁1、4、5、7、9号线部分车站停运;2023年12月23日,韩国首尔地铁3号线发生火灾,列车停运1.5 h,众多上班族出行受阻。此类突发事件可能导致某条线路全线或部分区间运营中断,同时引发非中断区域的列车延误,相邻线路的运行计划也需相应调整。受影响的乘客面临不同的出行选择,对这部分乘客的出行行为进行深入分析,有助于轨道交通运营方减轻突发事件的影响,防止衍生安全事故的发生,并降低乘客的不满情绪。

文献[1]探讨了列车延误对乘客出行的影响。文献[2]基于城市轨道交通自动售检票数据,预测了运营中断对乘客出行的影响。文献[3]考虑了长时间中断情境下乘客的出行选择行为特征,并建立了选择模型。文献[4]分析了突发事件下受影响客流的界定范围,并结合调查问卷为受影响客流建立了重分布预测模型。文献[5]利用调查问卷,根据突发事件的持续时间和影响范围,对地铁站外沿线乘客的出行行为进行了建模,并提出了应对策略。文献[6]基于Logit(逻辑回归)模型和非线性回归方法,结合调查问卷结果,分析了影响乘客选择的因素。尽管上述研究基于调查问卷结果对受影响乘客的出行行为进行了研究,但仍存在以下不足:一是仅界定了突发事件的持续时间和影响范围,未对导致运营中断的突发事件类型及突发事件发生的峰期时段进行分类考虑;二是在不同重大风险突发事件和不同峰期时段场景下,乘客因出行目的地的时间紧迫性和突发事件心理承受能力不同,会选择不同的出行行为;三是问卷的调查对象多局限于单一线路,未覆盖不同性质类型线路的乘客;四是针对乘客出行行为的决策选项,未将共享单车纳入考虑;五是调查问卷中的模拟场景多局限于单一线路,未按出行距离的长短和是否发生换乘进行分类。

本研究假定背景为:乘客进站后即被告知出行路径受突发事件影响,且站内客流疏导等客控措施对乘客的影响主要体现在出行时间的改变上,如进站、出站或站内等待时间的增加。此类客流疏导措施在建模过程中被统一纳入出行时间因素考虑。此外,由于数据安全问题,地铁运营公司与数字地图服务提供商之间存在信息互通障碍和数据壁垒,且目前多方式信息发布渠道的整合较为困难。因此,突发事件下涵盖公交车、出租车、共享单车等多

方式的信息导航手段发展尚不完善。故本研究不考虑乘客利用线上导航手段获取信息的情况,假定地铁车站通过广播、PIDS(乘客信息显示系统)等方式向乘客公布线路运营中断信息,乘客能够公平地接收地铁的宣传引导信息,如晚点广播、诱导广播等,并在做出出行选择时考虑地铁的引导建议。

在此背景下,本研究针对不同峰期时段和不同重大风险突发事件导致的运营中断场景,开展了问卷调查,收集乘客行为数据,建立了多项Logit模型,分析了各场景下乘客的出行行为特征,以支撑受影响客流的重分布预测,并提出了疏导受影响客流的应对策略建议。

1 问卷设计和数据分析

根据国外研究及国内法案,给出了运营中断的分类定义。按照突发事件性质,运营中断可分为设备故障、社会治安、自然灾害、公共卫生四类。本研究假定背景中的重大风险突发事件指属于自然灾害类的列车火灾、车站水淹以及设备故障类中的隧道异物侵限。此外,由于假定为重大风险突发事件导致的运营中断,因此设定线路中断区间为双方向中断且中断时长未知,其他区间列车延误10 min以上,乘客进站后即被告知出行路径受到影响。

受影响的乘客根据出行受影响程度的不同,最多可有8种不同的决策选项,包括:①等待原轨道交通路线恢复(M1);②在有其他轨道交通路线可到达目的地的条件下,改变出行的地铁路线(M2);③放弃轨道交通路线,选择公交车(M3)、出租车(M4)或共享单车(M5);④在条件允许的情况下,选择轨道交通与公交车(M6)、出租车(M7)或共享单车(M8)的组合出行方式。

本研究在广州地铁线网各类型线路(包括1、3、5、21、18、22号线)的车站现场线下发放问卷,并通过官方公众号线上发放。问卷发放时间为2023年10月9日至2023年10月24日。问卷内容包括基础性问题(RP法调查)和场景性问题(SP法调查)。SP法调查包括列车火灾(S1)、车站水淹(S2)、隧道异物侵限(S3)、信号故障(S4)四种突发事件场景,以及同线短距离(TD1)、同线长距离(TD2)、两线间短距离(TD3)、两线间长距离(TD4)四种出行距离场景。RP法调查内容主要用于验证问卷数据的有效性,未纳入乘客出行选择影响因素的考量,因为根据轨道交通运营方的实践经验,以目前的技术

水平,难以精准获取每位受影响乘客的个人信息。即使明确了乘客个人信息对出行选择有影响,但由于无法获取这些信息,仍无法通过模型来分析其出行特征。

经过筛选,共获得有效问卷 3 000 份。基础性问题统计信息如表 1 所示。根据调查问卷中场景问题是否存在 M2 选项,分别统计了 4 种出行距离场景下各决策选项的选择意愿概率。其中,M2 可选情况下的选择意愿统计概率如表 2 所示。此外,还根据早高峰(PP1)、晚高峰(PP2)及平峰(PP3)3 个时段,分别统计了 4 种出行距离场景下各决策选项的选择意愿概率,如表 3 所示。

表 1 基础性问题统计信息

Tab.1 Basic problem statistical information

项目	描述	样本量/份	比例/%
主要出行时段	早高峰	1 145	38.2
	晚高峰	908	30.3
	早、晚高峰	92	3.1
	非高峰	855	28.5
突发事件导致 延误下的可容忍等待时间	≤3 min	274	9.1
	>3 ~ 10 min	1 389	46.3
	>10 ~ 15 min	922	30.7
	>15 min	415	13.8
突发事件导致 调整出行路径 时,可容忍增 加的换乘次数	0	107	3.6
	1 次	769	25.6
	2 次	1 589	53.0
	3 次或以上	535	17.9
突发事件导致 调整出行路径 时,可容忍增 加的出行时间	≤10 min	909	30.3
	>10 ~ 20 min	1 281	42.7
	>20 ~ 30 min	593	19.8
	>30 min	217	7.2

由表 2 可知:在不同事件导致的中断情况下,乘客对各决策选项的选择意愿存在差异。选择改变出行的地铁路线(M2)的概率大多超过 60%。随着出行距离的增加和换乘次数的增多,选择轨道交通与公交车、出租车、共享单车的组合方式(M6 + M7 + M8)的比例相对增加。在同线短距离(TD1)出行场景下,共享单车(M5)的选择概率相对较高。

由表 3 可知:在早高峰时段下,选择等待原轨道交通路线恢复(M1)的概率相对较高;在非高峰时段下,选择改变出行的地铁路线(M2)的概率相对较高;在晚高峰时段下,选择放弃轨道交通路线并

选择其他交通方式(M3)的概率相对较高。

表 2 M2 可选情况下各决策肢选择意愿统计概率

Tab.2 Statistical probability of each choice intention under M2 selectable condition

距离 场景	事件	选择意愿概率/%					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6 + M7 + M8
TD1	S1	13.4	67.1	7.2	8.8	3.5	
	S2	8.0	79.2	5.6	6.3	1.0	
	S3	13.9	42.2	17.4	21.2	5.3	
	S4	13.6	60.3	7.2	10.7	5.1	3.1
TD2	S1	11.4	75.0	5.6	6.5	1.4	
	S2	8.9	60.6	14.6	13.8	2.1	
	S3	11.4	58.2	11.4	16.5	2.6	
	S4	9.7	65.1	9.0	11.2	2.1	2.9
TD3	S1	9.7	68.9	5.3	2.6	1.1	12.3
	S2	8.4	69.0	6.3	6.5	0.7	9.1
	S3	12.7	59.4	4.2	9.2	1.6	13.0
	S4	11.9	68.8	5.2	5.6	1.3	7.2
TD4	S1	8.2	67.7	5.6	5.8	0.9	11.7
	S2	7.6	77.6	3.1	5.6	0.8	5.3
	S3	12.7	49.8	6.3	8.0	1.0	22.3
	S4	11.2	70.5	3.1	7.4	1.0	6.9

表 3 各峰期下各决策肢选择意愿统计概率

Tab.3 Statistical probability of each choice intention at each peak period

距离 场景	时段	选择意愿概率/%					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6 + M7 + M8
TD1	PP1	16.5	46.5	15.7	18.1	2.5	0.7
	PP2	16.3	45.7	22.8	12.0	3.3	0
	PP3	16.0	48.9	15.3	14.6	4.6	0.6
TD2	PP1	14.8	52.2	13.9	16.9	1.7	0.7
	PP2	10.9	57.6	18.5	9.8	3.3	0
	PP3	13.2	57.7	14.3	12.3	2.6	0
TD3	PP1	13.3	52.1	8.0	7.4	1.3	17.8
	PP2	9.8	47.8	10.9	13.0	3.3	15.2
	PP3	12.6	55.9	6.9	5.7	0.8	18.0
TD4	PP1	12.8	53.5	7.0	9.1	0.6	17.0
	PP2	9.8	56.5	15.2	5.4	1.1	12.0
	PP3	11.8	57.2	7.4	6.3	1.3	16.0

2 模型建立和参数估计

多项 Logit 模型具备量化评估乘客出行选择因

素影响力之能力,依据量化所得参数,可在实际应用情境中进一步推算出受影响因素作用下乘客对各备选出行方案的选择概率。本研究假定,不同高峰时段、出行距离类别及突发事件类型对选择方案效用存在影响,且该效用由出行时间、出行费用及换乘次数这3个构成因素共同决定。

若 $U_{i,n}$ 为个人 n 选择分枝 i 时的效用, $U_{j,n}$ 为个人 n 选择分枝 j 时的效用, C_n 为与个人 n 对应的选择肢集合,则当 $U_{i,n} > U_{j,n}$ 时,个人 n 将选择方案 i 。个人 n 选择方案 i 的概率为:

$$P_{i,n} = \frac{\exp V_{i,n}}{\sum_{j \in A_n} \exp V_{j,n}} \quad (1)$$

$$V_{i,n} = \sum_{k=1}^K \theta_k X_{k,i,n}, i \in A_n \quad (2)$$

式中:

$P_{i,n}$ ——出行者 n 选择方案 i 的概率;

$V_{i,n}$ ——出行者 n 选择方案 i 的效用函数的固定项;

A_n ——出行者 n 的选择方案的集合;

$X_{k,i,n}$ ——出行者 n 的选择方案 i 的第 k 个变量值;

θ_k ——第 k 个变量值的待定系数。

利用调查问卷所得数据作为训练集,依据突发事件类型、出行距离类型及峰期时段作为分类条件,采用极大似然估计法对模型参数进行标定,进而构建适用于各场景的出行方案选择模型。针对 S1、S2、S3 等场景,模型参数标定结果见表4,各场景下的拟合优度普遍高于0.2(因篇幅所限,信号故障场景未予列出)。

3 应对策略

当地铁线路因重大风险突发事件导致运营中断时,轨道交通运营方可采取以下措施以有效疏导受影响乘客:

1) 预先为线网内所有 OD(起讫点)对计算地铁线网内部的绕行路径方案。若某 OD 对不存在内部绕行路径,则参考第二点建议。同时,在官方 APP 上提供路径查询功能。事件发生后,通过微信和微博等社交媒体 APP 公众号、官方 APP,以及车站和列车广播等多种渠道,提醒受影响乘客进行查询。

2) 针对线网内所有 OD 对,预先计算非地铁出行方式(如公交车、出租车、共享单车等)下的路径

表4 模型参数标定结果

Tab.4 Model parameter calibration results

事件	距离	峰期	出行时间	出行费用	换乘次数	拟合优度
S1	TD1	PP1	-0.006 1	-0.004 2	-0.648 0	0.322 0
		PP2	-0.002 7	-0.003 6	-0.222 0	0.287 0
		PP3	-0.005 7	-0.005 4	-0.203 0	0.235 0
	TD2	PP1	-0.005 5	-0.001 4	-0.419 0	0.422 0
		PP2	-0.002 6	-0.001 0	-0.163 0	0.396 0
		PP3	-0.000 7	-0.000 2	-0.365 0	0.383 0
	TD3	PP1	-0.017 6	-0.010 4	-0.039 7	0.401 0
		PP2	-0.001 6	-0.005 8	-0.049 2	0.375 0
		PP3	-0.004 7	-0.005 5	-0.119 0	0.346 0
	TD4	PP1	-0.007 6	-0.006 0	-0.292 0	0.374 0
		PP2	-0.011 7	-0.007 2	-0.070 7	0.359 0
		PP3	-0.013 1	-0.007 0	-0.035 8	0.345 0
S2	TD1	PP1	-0.012 8	-0.012 1	-0.465 0	0.400 0
		PP2	-0.022 9	-0.007 4	-0.276 0	0.459 0
		PP3	-0.038 5	-0.003 3	-0.482 0	0.488 0
	TD2	PP1	-0.019 1	-0.013 5	-0.942 0	0.286 0
		PP2	-0.037 3	-0.006 7	-1.660 0	0.265 0
		PP3	-0.065 8	-0.010 0	-3.890 0	0.284 0
	TD3	PP1	-0.002 5	-0.005 6	-0.048 9	0.418 0
		PP2	-0.011 0	-0.007 8	-0.008 5	0.440 0
		PP3	-0.0163 0	-0.006 6	-0.063 2	0.503 0
	TD4	PP1	-0.006 1	-0.014 4	-0.639 0	0.585 0
		PP2	-0.006 4	-0.006 8	-0.719 0	0.552 0
		PP3	-0.017 5	-0.016 7	-0.246 0	0.616 0
S3	TD1	PP1	-0.023 5	-0.006 2	-0.480 0	0.073 6
		PP2	-0.006 6	-0.010 9	-0.901 0	0.111 0
		PP3	-0.009 1	-0.011 8	-0.827 0	0.105 0
	TD2	PP1	-0.020 3	-0.014 7	-0.277 0	0.258 0
		PP2	-0.030 2	-0.018 5	-0.160 0	0.259 0
		PP3	-0.032 3	-0.013 8	-0.086 7	0.281 0
	TD3	PP1	-0.006 2	-0.001 7	-0.016 6	0.347 0
		PP2	-0.002 4	-0.002 3	-0.166 0	0.256 0
		PP3	-0.003 9	-0.001 6	-0.091 4	0.248 0
	TD4	PP1	-0.017 6	-0.000 8	-0.563 0	0.224 0
		PP2	-0.016 8	-0.003 9	-0.630 0	0.241 0
		PP3	-0.030 3	-0.006 2	-1.050 0	0.262 0

方案。运营中断后,迅速判断中断区间前后的可达车站,并结合受影响乘客的起始/终点车站,提供地铁与其他交通方式的组合方案。同时,参考第一点

建议,为乘客提供查询途径。

3) 基于第一、二点预先计算的数据,结合表 4 中的模型标定参数,针对受线路中断影响的 OD 客流,使用公式(1)计算 M1 至 M8 的选择概率。在进行 OD 客流重分布预测及客流清算后,识别并预警断面客流增大的路线,及时加开列车以疏导客流。

4 结语

1) 本文根据导致运营中断的重大风险突发事件类别,通过覆盖线网各类型线路的乘客问卷调查,分析了不同场景下乘客出行行为的差异程度。结果表明,乘客对各决策肢的选择意愿受突发事件类别、出行距离场景及出行时段峰期的影响。

2) 调查问卷结果显示,在同线短距离(TD1)出行场景下,当突发事件导致运营中断时,选择共享单车(M5)作为替代出行方案的乘客平均比例超过 4.5%。这表明将共享单车纳入决策肢是符合实际情况的。

本文利用调研数据分析了乘客在突发事件下的路径选择行为,建立了 Logit 模型,并探讨了影响乘客在突发事件下不同路径选择行为的因素。根据所建立的路径选择模型,客流疏导措施、接驳策略等对乘客的影响主要体现在出行时间和出行方式的改变上。由此,可计算这些措施和策略对乘客路径选择概率的影响。本文的后续研究目标是在进行 OD 客流量预测后,根据乘客路径选择模型实现重新配流,并利用配流后的断面客运量等结果对不同疏导措施的有效性进行评估。进一步地,以系统最优或用户均衡为目标,根据断面客运量的改善情况和疏导措施的评价结果,对疏导措施进行优化。

参考文献

- [1] BARRON A, MELO P C, COHEN J M, et al. A passenger-focused management approach to the measurement of train delay im-

pacts[J]. Journal of the Transportation Research Record, 2013, 2351(1): 46.

- [2] SUN H, WU J, WU L, et al. Estimating the influence of common disruptions on urban rail transit networks[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 94: 62.

- [3] PNEVMATIKOU A M, KARLAFTIS M G, KEPAPTOSGLOU K. Metro service disruptions: how do people choose to travel[J]. Transportation, 2015, 42(6): 933.

- [4] 叶红霞. 突发事件下城市轨道交通网络客流重分布预测方法研究与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(8): 63.

YE Hongxia. On the prediction method of passenger flow redistribution under urban rail transit network emergency[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(8): 63.

- [5] 柳伍生, 潘自翔, 魏隽君, 等. 地铁站点运营中断下周边乘客的出行行为研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(11): 2953.

LIU Wusheng, PAN Zixiang, WEI Juanjun, et al. Research on the travel behavior of subway passengers under the influence of operation interruption[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(11): 2953.

- [6] 李臣, 陈艳艳, 周雨阳, 等. 城市轨道交通突发事件下乘客出行选择影响因素研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(7): 105.

LI Chen, CHEN Yanyan, ZHOU Yuyang, et al. Influencing factors of passenger travel choice under urban rail transit emergency conditions[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(7): 105.

- [7] 陈佳豪. 基于累积前景理论的城轨运营中断下乘客路径选择行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.

CHEN Jiahao. Research on passenger's path selection behavior under the interruption of urban rail operation based on cumulative prospect theory[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

· 收稿日期:2023-11-28 修回日期:2024-01-03 出版日期:2025-03-10

Received:2023-11-28 Revised:2024-01-03 Published:2025-03-10

· 通信作者:郭靖凡,高级工程师,guojingfan@gzmt. com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 39 页)

General Administration of Quality Supervision, Standardization Administration of the People's Republic of China. Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise; part 1: basic quantities and assessment procedures; GB/T 3222. 1—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

· 收稿日期:2022-12-06 修回日期:2023-02-24 出版日期:2025-03-10

Received:2022-12-06 Revised:2023-02-24 Published:2025-03-10

· 第一作者:王嘉,博士研究生,jiawang@tongji. edu. cn

通信作者:李莉,副研究员,lilee@tongji. edu. cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license