【交通物流 / Transportation Logistics】

基于系统动力学的地铁客流防疫调控仿真分析

胡明伟^{1, 2, 3}, 李微微¹, 陈湘生^{1, 2, 3}

1) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 2) 深圳大学滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东深圳 518060; 3) 深圳大学未来地下城市研究院, 广东深圳 518060

摘要: 新型冠状病毒主要通过飞沫和空气传播, 地铁是大运量公共交通方式, 站内客流密度高, 存在一定的感染风险, 需采取有效客流组织和调控措施降低站内感染风险概率. 借助系统动力学模型仿真地铁车站客流组织和分布; 提出改进的交通出行易感度计算模型, 并预测感染概率; 运用仿真手段评价限制进站客流量、控制服务设施数量、延长站厅走行流线及增加地铁发车频次4种客流调控方案, 并定量分析其对易感度的影响. 研究表明, 限制进站客流量对降低非付费区易感度较为有效; 增加地铁发车频次对降低付费区易感度较为有效; 延长站厅区域走行流线对降低站台层易感度较为有效. 系统动力学建模为客流防控措施的预案制定和比较评价提供有效手段, 仿真分析结果可为地铁站运营管理方采取科学防疫措施提供参考.

关键词: 交通运输工程; 新型冠状病毒肺炎; 地铁站; 系统动力学; 客流调控; 交通出行易感度

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.02111

Simulation analysis of epidemic prevention and regulation for metro passenger flow based on system dynamics

HU Mingwei^{1, 2, 3}, LI Weiwei¹, and CHEN Xiangsheng^{1, 2, 3}

1) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures of Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

3) Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: According to the spreading mechanism of corona virus disease 2019 (COVID-19), the passengers in the metro system have a certain risk of being infected because the metro is a large capacity public transport mode with high passenger density in the stations. Relevant operational agencies need to organize passenger flow and take measures effectively to reduce infection risk in stations. In this paper, we establish a system dynamics model to simulate the passenger flow organization and distribution in metro stations. Then, we build an improved calculation model for the traffic-infected susceptibility and use it to predict the probability of infection. Four passenger flow

Received: 2020-07-26; **Accepted:** 2020-10-18

Foundation: National Key Research and Development Project of China (2018YFB2100901); National Natural Science Foundation of China (52090084, L1924061)

Corresponding author: Professor CHEN Xiangsheng. E-mail: xschen@szu.edu.cn

Citation: HU Mingwei, LI Weiwei, CHEN Xiangsheng. Simulation analysis of epidemic prevention and regulation for metro passenger flow based on system dynamics [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(2): 111-120. (in Chinese)

control schemes are evaluated and their impacts on susceptibility are quantitatively analyzed. The four passenger flow control schemes include limiting the inbound passenger flow, controlling the number of service facilities, extending the streamline length of the station hall, and increasing the frequency of metro trains. The simulation results show that limiting the passenger flow is more effective in reducing the susceptibility of the unpaid area, increasing the frequency of metro trains is more effective in reducing the susceptibility of the paid area, and extending the streamline length of the station hall is more effective in reducing the susceptibility of the platform. We find that system dynamics modeling is an effective means to formulate and assess passenger flow organization schemes and control measures. The simulation results can provide a reference for metro station operational departments to take scientific epidemic prevention measures.

Key words: transportation engineering; corona virus disease 2019 (COVID-19); metro station; system dynamics (SD); passenger flow regulation; traffic-infected susceptibility

随着新型冠状病毒肺炎 (corona virus disease 2019, COVID-19) 后疫情时代的复工复产, 地铁的客流量也逐步增加, 境外输入病例时有发生, 且存在一定数量的无症状感染者^[1], 因此, 如何在保证居民正常出行需求下, 尽可能降低感染风险成为地铁运营亟待解决的问题之一。同时, 采取主动措施调控车站客流, 对确保乘客安全以及提升运输效率具有重要作用。

目前, 中国已有研究利用微观仿真建模方法分析地铁站内的客流问题。胡明伟等^[2-3]采用微观仿真模型评估地铁站的客流组织和管理。JI 等^[4-5]通过观测分析地铁车站内客流, 提出一种改进的社会力模型和元胞自动机模型。TRIVEDI 等^[6]基于智能体建模方法分析并计算地铁站乘客从候车区到上车的总时间。相比微观仿真模型, 系统动力学方法能对系统进行全局分析, 具有建模速度快、对不同方案的比选工作量更小的优势。陈春安等^[7-9]利用系统动力学模型对地铁车站客流进行推演仿真分析, 结果表明该模型方法能够预测分析客流。

已有研究表明^[10-12], 目前地铁的相关调控策略多是基于乘客安全、通行效率以及地铁的承载能力制定, 突发事件下策略选择需考虑的影响指标有待改进。如新冠病毒疫情影响下, 根据《中国-世界卫生组织新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 联合考察报告》中的相关研究^[13], 新冠肺炎的潜伏期一般为 1~14 d, 平均潜伏期为 5~6 d, 有可能存在无症状感染者乘坐地铁, 因此, 疫情防控期间地铁运营方在制定调控策略时还需考虑措施对乘客感染概率的影响。新型冠状病毒通过飞沫和空气传播时受到诸多因素的影响, 如传播环境、病原体数量与种类、及飞沫在不同室内环境的蒸发和散布特性等, 由于其中部分影响因素的参数无法精确计算,

且有些影响因素的研究起步较晚, 因此, 较难从机理上准确预测呼吸道传染病的感染概率。目前, 呼吸道传染病的预测模型多基于统计学预测疾病的感染风险和传播概率, 如 SI、SIS、SIR、SIRS 及 SEIR 模型等^[14-15]。张毅等^[16]通过研究传染病学统计预测模型, 提出交通出行易感度概念, 并分别计算了不同交通工具的易感度。

本研究考虑新冠病毒的传播特点, 运用系统动力学理论, 建立一种地铁站客流组织模型, 并利用该模型分析疫情影响下采用不同客流调控方案对地铁站出行易感度的影响, 以期为地铁站运营管理方采取科学防疫措施和评价提供参考。

1 理论概述

1.1 研究框架

运用系统动力学模型进行客流调控仿真和评价的研究框架如图 1。研究利用系统动力学, 客流组

图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

织分析以及考虑疫情的调控措施等手段搭建地铁站客流组织系统动力学模型, 依据基础数据仿真多种调控措施, 利用仿真结果分析其对地铁站客流动态变化及易感度评价参数的影响。

1.2 考虑疫情的客流调控措施

考虑 COVID-19 疫情对轨道交通的影响, 为了降低站内传染风险, 保证乘客及工作人员的安全, 以及站内的服务水平和质量, 需采取合理的客流调控措施。制定疫情下调控措施可以从降低站内人员密度, 增加人员间距以及减少站内驻留时间等方面考虑; 而传统的调控措施主要考虑通行效率, 以及当站内承载能力超过最大负荷时, 避免由于拥堵而引发安全隐患, 两者可能会存在矛盾, 因此, 调控措施需综合考虑制定。

地铁站客流组织可大致分为进站、出站及换乘过程, 具体流程如图 2。本研究仿真选择 4 种常用调控措施: 限制进站客流量、控制服务设施数量、延长站厅走行流线以及增加地铁发车频次。

图2 地铁站客流组织

Fig. 2 Passenger flow organization of metro station

限制进站客流量包括设定站外导流栏杆与限制进站客流量等。疫情期间, 北京地铁曾采用预约进站策略, 即限制高峰时段进站人数的预约名额, 乘客可以通过手机预约进站时段, 预约成功后, 由站内专门的预约通道快速进站乘车, 从而减少无效的站外排队时间, 降低站外人员聚集风险, 同时也降低了地铁客流密度, 控制地铁车厢的满载率。

控制服务设施数量包括调整服务设施(如闸机、安检设备及楼梯扶梯等)的布局、数量和服务速率。

延长站厅走行流线包括设置导流栏杆调整站内客流线等。疫情期间, 通过在排队地面粘贴 1 m 排队间隔线等方式控制人员间距。

增加地铁发车频次包括限制客流上车人数, 增加地铁列车频次等。限制上车人数是为了降低列车载客率, 增加地铁列车可以有效减少站台滞留乘客, 减少对乘客出行效率的影响。

1.3 考虑疫情的调控措施评价参数

依据文献[10-12], 在保障运营管理高效和乘客出行安全的前提下, 制定客流调控方案需考虑平均等待时间、平均停留时间、站厅承载客流、站台承载客流及上车人数等参数。但考虑到疫情对地铁运营的影响, 在制定合理运营措施时, 还应分析不同措施对传染控制的影响。

WELLS^[17]提出 quanta 概念, 从个人角度确定空气传染病的感染概率, 1 个 quanta 即 1 个人达到致病量的最少病原体数量, 具有统计意义概念。若假设飞沫核均匀散布于整个空间, 可计得一个人在空气中呼吸所得的 quanta 值, 通过计算有效接触率, 从而计算感染概率。

由于 Wells 理论没有考虑平均感染概率的差异, 当 quanta 值很高时, 计算出的感染概率可能超过 1, 因此, RILEY 等^[18]提出基于 Wells 假设的 Wells-Riley 模型, 为

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{Ipqt}{Q}\right) \quad (1)$$

其中, P 为感染概率; I 为感染人数; p 为呼吸通风量 (单位: m^3/h); q 为一个感染者的 quanta 产生率 (单位: quanta/h); t 为暴露时间 (单位: h); Q 为房间通风量 (单位: m^3/h)。

FENNELLY 等^[19]考虑口罩等的作用后, 提出改进的 Wells-Riley 模型, 为

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{Ipqt\theta}{Q}\right) \quad (2)$$

其中, θ 为口罩的渗透系数, $0 \leq \theta \leq 1$ 。

张毅等^[16]依据传染病学提出交通出行易感度概念, 即乘客通过乘坐交通载运工具接触到陌生个体中的感染者且被传染的概率, 并利用改进 Wells-Riley 模型对不同交通工具的易感度进行定量计算, 综合考虑风险程度的决定因素及进行参数化后, 得到交通出行易感度 P_i 为

$$P_i = 1 - \exp\left(-\frac{I_i N_{ai} q p \theta_i t_i}{N_{bi} V_i n_i \alpha_i}\right) \quad (3)$$

其中, N_{ai} 为第 i 种交通工具的实际载客人数; N_{bi} 为第 i 种交通工具的标准额定载客人数; V_i 为第 i 种交通工具的体积 (单位: m^3); n_i 为第 i 种交通工具每小时的通风次数 (单位: 次/h); α_i 为交通工具消毒措施带来的保护系数, $0 \leq \alpha_i \leq 1$ 。本研究借鉴该交通出行易感度概念分析不

同调控措施下站台层和站厅层各区域的客流易感度变化。

2 模型构建

本研究利用 AnyLogic 仿真平台构建系统动力学 (system dynamic, SD) 模型。其中, 系统动力学模块建模构成要素包括存量、流量、辅助变量及常量。通过分析地铁客流组织系统的因果关系, 利用构成要素建立系统的存量和流量图来反映系统中的辅助变量和状态变量关系, 并通过量化存量和流量图的各因素关系完成客流组织仿真模拟。

2.1 基本 SD 模型

地铁站客流 SD 模型的仿真区域分为站厅非付费区、站厅付费区及站台层。通过分析影响车站上述 3 个区域客流量的相关变量, 构建地铁车站各处的因果关系图, 结果请扫描论文末页右下角二维码见图 S1。

地铁内部客流按照乘坐目的可以分为进站客流、出站客流及换乘客流, 换乘方式包括同站台换乘、站厅换乘、通道换乘及出站换乘等, 不同换乘方式对各个区域客流的影响程度不同。依据因果关系及地铁客流组织分析, 并对影响因素与换乘客流进行合理简化后, 建立客流系统动力学模型, 请扫描论文末页右下角二维码见图 S2。模型各变量参数定义请扫描论文末页右下角二维码见表 S1。

依据车站内客流动态变化的逻辑关系与数学关系, 建立系统动力学方程。

1) 各存量的计算方式为累计流入量减去累计流出量, 为

$$Q_i = \int q_{i\text{in}}(t) dt - \int q_{i\text{out}}(t) dt \quad (4)$$

其中, Q_i 为地铁站内 i 处 t 时刻总流量; $q_{i\text{in}}(t)$ 为 i 处 t 时刻的流入流率; $q_{i\text{out}}(t)$ 为 i 处 t 时刻的流出流率。

2) 各服务设施, 如购票、安检或闸机处客流流出速率为

$$q_i(t) = \min(C_i \times n_i, F_i(t-1)) \times v_i / L_i \quad (i = 2, 3, 4, 5, 6, 9, 11, 13) \quad (5)$$

其中, $q_i(t)$ 为 i 处 t 时刻的流出速率; n_i 为 i 处服务设备数量; C_i 为该服务设备单个服务能力; v_i 为 i 通道内客流平均速度; L_i 为 i 通道长度。

3) 辅助存量的客流出速率为

$$F_i(t) = \min(C_i \times n_i, F_i(t-1)) \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

其中, $F_i(t)$ 为 i 处 t 时刻的流出速率。

此外, q_i 数值上等于乘客的到达率。数值的单位按照人/s 设置。

2.2 考虑疫情的调控模型

疫情发生后, 全国多个地铁公司均采取相应措施以应对地铁高峰及疫情防控, 如深圳地铁于 2020-03-05 发布采用“一站一方案”模式的倡议, 对出入口、站厅及站台 3 级进行客流管控措施; 北京地铁于 2020-03-06 起试行推出“预约进站”, 即通过预约进站减少站外排队时间, 降低地铁客流密度, 从而控制地铁车厢的满载率, 保障乘客出行安全, 并于 2020-03-31 对 4 条地铁线路使用超常列车运行 (即增加车辆投放) 图来提高运力。评价不同调控措施效果往往需要进行实地评估或仿真计算, 考虑到实地调查具有一定局限性和难度, 本研究通过调整系统动力学模型的参数, 仿真限制进站客流量、控制服务设施数量、延长站厅走行流线以及增加地铁发车频次 4 种客流调控措施, 得到实时站点区域的人流数据, 并计算感染概率, 以期验证使用模型分析地铁站客流控制策略对易感度影响的可行性。在系统动力学模型中增加进站闸机数、出站闸机数、延长距离及修改上下车触发等参数, 仿真模拟 4 种调控措施。建立模型如图 3。

2.3 考虑疫情的感染概率模型

2.3.1 易感度计算模型

考虑到地铁站厅和站台公共区域的室内通风来源复杂, 站厅出入口和站台层屏蔽门开关带来的隧道风均会影响公共区域的新风量。公共区域的人员流动与交通工具固定的额定载客人数定义亦不同。因此, 改进交通出行易感度计算公式为

$$P_i = 1 - \exp\left(-\frac{I_i F_{ai} q p \theta_i t_i}{F_{bi} Q_i \alpha_i}\right) \quad (7)$$

其中, P_i 为健康者被感染的概率; F_{ai} 为第 i 区域的实际客流人数; F_{bi} 为第 i 区域承载的最大客流人数; I_i 为感染者人数; p 为单一乘客的呼吸量 (单位: m^3/h); Q_i 为第 i 区域单一乘客的通风量 (单位: m^3/h); t_i 为第 i 区域的暴露接触时间 (单位: h); α_i 为第 i 区域消毒措施带来的保护系数, $0 \leq \alpha_i \leq 1$; θ_i 为第 i 区域乘客佩戴口罩的渗透系数, $0 \leq \theta_i \leq 1$ 。

图3 仿真调控措施的系统流程图

Fig. 3 System flow diagram of modeling control measures

2.3.2 参数设置

1) 人均通风量 Q_i . 《地铁设计规范》GB 50157—2013^[20]规定, 闭式运行时的地铁站内新鲜空气量不应少于 $12.6 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$, 且系统新风量不应少于总送风量的 10%. 文献[21-22]指出对于车站公共区域的空调最小新风量标准一般取以下 3 者中的最大值: 高峰期人员所需新风量 ($12.6 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$)、系统总送风量的 10%、以及屏蔽门漏风量和渗透风量之和. 因此, 本研究参考选择 $Q_i = 12.6 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$.

2) quanta 产生率 q . 由于不同病因、不同感染者所产生的 quanta 值均不同, 目前暂无 COVID-19 疫情的 quanta 准确取值. 张毅等^[16]综合肺结核、麻疹、甲型 H1N1 流感及重症急性呼吸综合征 (severe acute respiratory syndrome, SARS) 的 quanta 产生率, 估算 COVID-19 的 q 为 $100 \sim 122 \text{ quanta/h}$, 考虑到公共区域人员流动性较大, 本研究取 $q = 122 \text{ quanta/h}$.

3) 承载的最大客流人数 F_{bi} . 常用的承载最大客流人数定义为能稳定运行的车站所能承载的最大乘客数. 而站台承载能力可由设计有效面积 (有效长度和宽度) 和旅客最大安全密度决定^[23]. 文献[24]指出在实际运营过程中, 通常采取经验估计, 即当站内关键节点行人密度达到 6 人/m^2 时, 需要

采取相应措施. 由于本研究主要计算满足区域最大乘客的新风量, 所以 F_{bi} 按照站厅和站台层有效面积及人流密度 $0.5 \text{ m}^2/\text{人}$ 计算.

4) 防控措施的定量化参数. 防控措施主要体现在乘客是否佩戴好口罩以及站内的消毒效果, 口罩渗透系数 θ_i 参考文献[16]取统计值 0.2%. 消毒指标保护系数 α_i 取 0.7.

3 案例分析

3.1 SD 模型数据输入

因地铁站各区域客流组织状态特性不一, 不同站厅的建筑与客流存在较大差别, 本研究选择深圳地铁 12 号线在建的南山站为例, 应用模型仿真分析无换乘客流影响情况下的客流调控. 模型的乘客参数 (如客流量及走行速率)、设备参数 (如安检服务能力、闸机服务能力及楼扶梯通行能力) 取值参考初步设计图纸说明文件、其他站点相关文献及《地铁设计规范》GB 50157—2013^[20].

南山站 12 号线站厅层被桂庙路下穿隧道分割成左右两个端厅, 站台为侧式车站, 因此, 车站模型分别取站厅西侧端厅和站台层的右线站台公共区数据进行仿真. 依据实地调研, 行人的步行速度为 $1.3 \sim 1.5 \text{ m/s}$. 模型具体参数及其取值如表 1.

表 1 系统动力学模型参数设置
Table 1 Parameter setting of SD model

参数	取值	名称	取值
进站客流速率/(人·h ⁻¹)	2 470	发车间隔/s	110
出站客流速率/(人·h ⁻¹)	3 940	平均停站时间/s	30
扶梯通行能力/(人·h ⁻¹)	7 300	列车开行对数/(对·h ⁻¹)	30
上、下行扶梯数量/部	各 2(宽 1 m)	楼梯数/部	2(宽 2.4 m)
出站闸机/台	5	楼梯通行能力/(人·h ⁻¹)	3 200 × 2.4
进站闸机/台	6(含双向 1)	自动售票机/台	6
走行速度分布/(m·s ⁻¹)	均匀分布 $U(1.3, 1.5)$	售票机通行能力/(人·h ⁻¹)	300
安检设施通行能力/(人·h ⁻¹)	2 400	闸机通行能力/(人·h ⁻¹)	1 800
站台面积/m ²	891.67	站厅面积/m ²	1 039.11

3.2 易感度模型数据输入

模型的具体各参数设置如表 2。代入式(7)得

$$P_i = 1 - \exp\left(-\frac{F_{ai} \times 122 \times 0.24 \times 0.002 \times t_i}{F_{bi} \times 12.6 \times 0.7}\right) \quad (8)$$

暴露接触时间按照乘客在车站对应区域的停留时间估算,文献[21-22]指出,乘客从进入车站到乘车全过程大致需要 3~5 min,从下车到出站的时间约为 3 min,因此,模型以乘客在站厅(上车和下车)及站台各停留 2 min 计算。

表 2 易感度参数设置

Table 2 Parameter setting of traffic-infected susceptibility

参数	值
感染者/人	1
站厅承载的最大客流量/(人·h ⁻¹)	2 078
站台承载的最大客流量/(人·h ⁻¹)	1 783
乘客人均通风量/(m ³ ·h ⁻¹)	12.6
乘客人均呼吸量/(m ³ ·h ⁻¹)	0.24 ^[26]
q /(quanta·h ⁻¹)	122
保护系数	0.7
渗透系数/%	0.2

3.3 客流调控仿真分析

3.3.1 基础方案

未施加防疫客流控制方案时,运行模型后可得 3 个区域承载人数随时间变化关系,如图 4。承载人数曲线变化原因分析如下。

1) 站厅。由于各服务节点(如安检机)的服务效率有限,随着乘客(进站及出站乘客)到达区域的变化量大于设施的服务能力时,站厅非付费及付费区域会呈现拥挤排队,滞留乘客数随之增加,到达区域承载上限后,进站乘客会受到相应限制。

2) 站台层。该区域的承载客流随车辆到达乘客上下车的交替呈现周期性增加和消散过程。

在 3 600 s 的统计区间内,每 2 min 输出 1 次区间承载人数数据,并将人数取整可得:站厅非付费区的平均承载人数为 763 人,最大承载人数为 1 197 人;付费区的最大承载人数为 83 人,平均承载人数为 26 人;站台层的最大承载人数为 98 人,平均区域承载人数为 22 人。代入式(8)可得站厅非付费区易感度平均值为 0.284 662 2%,付费区易感度平均值为 0.012 709 0%,站台易感度平均值为 0.005 437 5%。

图 4 基础方案的承载人数

Fig. 4 The number of passengers under basic scheme

3.3.2 限制进站客流量

将进站客流限制比例作为关键变量, 在模型中设置参数限流率进行仿真. 在当前设置下, 考虑乘客限流比例过大对乘客出行的影响. 考虑到防控疫情要求, 人与人之间距离至少为 1 m, 则应满足客流密度 ≤ 1 人/ m^2 . 经试验, 设置限流比例为 0.5 时, 高峰时间内区域最大承载人数约为 600 人, 基本满足要求, 所以选择限流率为 0.5, 仿真得到 3 个区域的承载人数如图 5.

将图 5 与基础方案对比可见, 对进站乘车客流限制的主要影响区域为站厅非付费区域, 当设置进站客流限流比为 0.5 时, 站厅非付费区的承载人数下降至 516 人. 经计算, 非付费区的易感度降至 0.192 543 4%, 付费区易感度降至 0.012 418 8%.

3.3.3 控制服务设施数量

考虑到疫情防控需要减少接触人数以降低感染概率, 研究调整闸机数量 (即减少进站闸机数和增加出站闸机数) 对承载人数的影响. 结果如图 6.

将图 6 与基础方案对比可见, 当进站闸机数减少至 5 个, 出站闸机数增至 6 个时, 站厅付费区的最大承载人数减少为 68 人. 计算得到站厅付费区易感度降至 0.010 714 0%.

3.3.4 延长站厅走行流线

疫情期间可以通过设置铁栏或地面分隔标记来增加绕行距离. 但非付费区域绕行距离的增加, 会降低进站乘客速率及流量. 绕行距离过长, 会挤占

站厅区域其他设施空间, 影响乘客安全和行动效率. 研究分析延长非付费区安检至进站闸机走行距离, 结果如图 7. 可见, 当通道延长 10 m 时, 非付费区的承载人数增加. 计算得到站厅非付费区易感度增加至 0.352 943 0%, 付费区易感度下降至 0.011 490 5%, 站台易感度减少至 0.004 609 8%. 结果表明, 延长绕行距离可以有效减少上车人数, 但同时也存在站厅易感度上升的风险, 需要考虑排队乘客间距影响.

3.3.5 增加地铁发车频次

增加地铁发车频次是为了控制站台区域的等候流量和减少车内载客率, 模型在保持总下车人数不变的情况下, 将发车间隔周期从 110 s 变为 100 s 进行仿真, 结果如图 8. 由图 8 可见, 当保持总下车乘客数基本不变时, 增加发车频次主要影响的是站台乘客出站以及付费区乘客排队人数, 这是由于缩短发车间隔后, 下车乘客尚未及时出站. 计算得到站厅付费区易感度下降至 0.009 413 5%, 站台易感度下降至 0.005 432 2%. 因此, 在下车总人数基本不变的情况下, 采用增加发车频次措施时还需综合考虑其他因素.

根据以上研究结果, 将 4 种控制方案在地铁站 3 个区域的防疫控制结果进行汇总, 如表 3 及图 9. 结果表明, 防控措施对不同区域感染概率的影响各有针对性. 限制进站客流量对于降低非付费区易感度较为有效, 增加地铁发车频次对降低付费区易感

图 5 限制进站客流量的承载人数

Fig. 5 The number of passengers under flow control

图 6 控制闸机数量的承载人数

Fig. 6 The number of passengers under controlling auto fare collection (AFC)

图 7 延长走行流线的承载人数

Fig. 7 The number of passengers under extending the streamline length

图 8 增加地铁发车频次的承载人数

Fig. 8 The number of passengers under increasing train frequency

表 3 不同方案运行结果的比较

Table 3 The comparison of different schemes

防控措施	平均承载人数			易感度/%			易感度优化比例/%		
	站厅		站台	站厅		站台	站厅		站台
	非付费区	付费区		非付费区	付费区		非付费区	付费区	
基础方案	763	26	22	0.284 662 2	0.012 709 0	0.005 437 5			
限制进站客流量	516	25	22	0.192 543 4	0.012 418 8	0.005 437 5	-32.361	-2.283	0
控制服务设施数量	772	22	22	0.288 105 7	0.010 714 0	0.005 437 5	1.210	-15.698	0
延长站厅走行流线	946	23	19	0.352 943 0	0.011 490 5	0.004 609 8	23.987	-9.588	-15.223
增加地铁发车频次	771	19	22	0.287 475 4	0.009 413 5	0.005 432 2	0.988	-25.931	-0.097

图 9 4 种措施下的易感度优化对比图

Fig. 9 Comparison chart of susceptibility optimization under four measures

度较为有效,对于降低站台层易感度较为有效的是延长站厅走行流线。但采用不同策略时还需要考虑对地铁站其他区域的影响,如延长走行流线时需控制排队乘客间距,增加地铁发车频次需要综合考虑下车客流的影响。

4 结 论

考虑新冠疫情对地铁站客流调控的影响,建立地铁客流防疫调控的系统动力学模型,①利用该模型输出结果分析4种不同调控措施对站内承载人数控制的效果。结果表明,基于“流”的系统动力学建模在分析客流组织策略问题方面可行有效;②仿真结果表明,限制进站客流量对降低非付费区易感度较为有效,增加地铁发车频次对降低付费区易感度较为有效,延长站厅走行流线对站台层易感度降低较为有效。当采用不同的策略时也需要综合考虑其对其他区域的影响,必要时需额外增加辅助手段,如延长走行流线时需控制排队乘客间距。下一步研究可利用实时客流及相关换乘数据对模型的实用性和精度进行优化。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2100901);国家自然科学基金资助项目(52090084, L1924061)

作者简介:胡明伟(1972—),深圳大学教授、博士生导师。研究方向:交通仿真及智能交通等。
E-mail: humw@szu.edu.cn

引 文:胡明伟,李微微,陈湘生.基于系统动力学的地铁客流防疫调控仿真分析[J].深圳大学学报理工版,2021,38(2):111-120.

参考文献 / References:

- [1] 广东省人民政府新闻办公室. 广东省政府新闻办疫情防控第五十场新闻发布会[EB/OL]. (2020-04-02) [2020-05-02]. http://gdio.southcn.com/g/2020-04/02/content_190688522.htm.
Information Office of The People's Government of Guangdong Province. The 50th press conference of the Information Office of the People's Government of Guangdong Province [EB/OL]. (2020-04-02) [2020-05-02]. http://gdio.southcn.com/g/2020-04/02/content_190688522.htm. (in Chinese)
- [2] 胡明伟,黄文柯.行人交通仿真方法与技术[M].北京:清华大学出版社,2017.
HU Mingwei, HUANG Wenke. Methods and techniques of pedestrian traffic simulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017. (in Chinese)
- [3] HU Mingwei. A high-fidelity 3D simulation method for evaluating passenger flow organization and facility layout at metro stations [J]. Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2017, 93(10): 841-851.
- [4] JI Xiangfeng, ZHANG Jian, HU Yongkai, et al. Pedestrian movement analysis in transfer station corridor: velocity-based and acceleration-based [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 450: 416-434.
- [5] JI Xiangfeng, ZHOU Xuemei, RAN Bin. A cell-based study on pedestrian acceleration and overtaking in a transfer station corridor [J]. North-Holland, 2013, 392(8): 1828-1839.
- [6] TRIVEDI A, PANDEY M. Agent based modelling and simulation to estimate movement time of pilgrims from one place to another at Allahabad Jn. Railway Station during Kumbh Mela-2019 [J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2020, 34(1): 1-37.
- [7] 陈春安,荣建,李伴儒,等.基于系统动力学的枢纽换乘系统运能匹配研究[J].城市交通,2017,15(2):48-55,66.
CHEN Chun'an, RONG Jian, LI Banru, et al. Capacity matching of transfer system within public transit terminals based on system dynamics [J]. Urban Transport of China, 2017, 15(2): 48-55, 66. (in Chinese)
- [8] 吴开信,陈鉴声,刘蔼珺.基于系统动力学的地铁车站客流演变规律研究[J].科技风,2019(18):204-206.
WU Kaixin, CHEN Jiansheng, LIU Aijun. Research on the evolution rules of passenger flow in subway station based on system dynamics [J]. Technology Wind, 2019(18): 204-206. (in Chinese)
- [9] 郑雪梅,蒋熙.基于系统动力学的地铁客村站客流控制研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(11):2284-2289.
ZHENG Xuemei, JIANG Xi. The study of passenger flow control at kecun station of urban rail transit based on system dynamics [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(11): 2284-2289. (in Chinese)
- [10] 石俊刚,杨静,杨立兴.以安全为导向的地铁高峰时段多车站客流协同控制模型[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(1):125-131.
SHI Jungang, YANG Jing, YANG Lixing. Safety-oriented cooperative passenger flow control model in peak hours for a metro line [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(1): 125-131. (in Chinese)
- [11] 曾璐.突发事件下城市轨道交通客流控制方法研究[D].北京:北京交通大学,2018.
<http://journal.szu.edu.cn>

- ZENG Lu. Research on passenger flow control method for urban mass transit under emergency [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [12] 马 骁. 基于系统动力学的城市轨道交通车站客流仿真与控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- MA Xiao. Research on passenger flow simulation and control of urban rail transit station based on system dynamics [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [13] 中国疾病预防控制中心. 中国-世界卫生组织新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 联合考察报告 [EB/OL]. (2020-02-29) [2020-02-29]. <http://www.nhc.gov.cn/jkj/s3578/202002/87fd92510d094e4b9bad597608f5cc2c.shtml>.
- Chinese Bureau for Disease Control and Prevention. China-World Health Organization novel coronavirus pneumonia (COVID-19) joint survey report [EB/OL]. (2020-02-29) [2020-02-29]. <http://www.nhc.gov.cn/jkj/s3578/202002/87fd92510d094e4b9bad597608f5cc2c.shtml>. (in Chinese)
- [14] 钱 华, 章重洋, 郑晓红. 呼吸道传染病气溶胶传染致病机理及预测方法[J]. 科学通报, 2018, 63(10): 931-939.
- QIAN Hua, ZHANG Chongyang, ZHENG Xiaohong. The function of aerosols in transmitting and infecting of respiratory infectious diseases and its risk prediction [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(10): 931-939. (in Chinese)
- [15] 钱 华, 郑晓红, 张学军. 呼吸道传染病空气传播的感染概率的预测模型[J]. 东南大学学报自然科学版, 2012, 42(3): 468-472.
- QIAN Hua, ZHENG Xiaohong, ZHANG Xuejun. Prediction of risk of airborne transmitted diseases [J]. Journal of Southeast University Natural Science Edition, 2012, 42(3): 468-472. (in Chinese)
- [16] 张 毅, 王雪成, 毕清华. 基于新型冠状病毒传播机理的交通出行易感度研究[J]. 交通运输研究, 2020, 6(1): 73-80.
- ZHANG Yi, WANG Xuecheng, BI Qinghua. Travel-infected susceptibility based on transmission mechanism of COVID-19 [J]. Transport Research, 2020, 6(1): 73-80. (in Chinese)
- [17] WELLS W F. Airborne contagion and air hygiene: an ecological study of droplet infections [M]. Cambridge, USA: Harvard University Press, 1955.
- [18] RILEY E, MURPHY G, RILEY R. Airborne spread of measles in a suburban elementary school [J]. American Journal of Epidemiology, 1978, 107(5): 421-432.
- [19] FENNELLY K P, NARDELL E A. The relative efficacy of respirators and room ventilation in preventing occupational tuberculosis [J]. Infection Control Hospital Epidemiology, 1998, 19(10): 754-759.
- [20] GB 50157—2013 地铁设计规范[S]. 2013.
- GB 50157—2013 Code for design of metro [S]. (in Chinese)
- [21] 刘 兆. 地铁屏蔽门系统岛式站台新风量控制指标研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- LIU Zhao. Research on new air volume control index of island platform in subway screen door system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. (in Chinese)
- [22] 杨鑫泽. 广州地区地铁车站隧道活塞风的应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
- YANG Xinze. Application of piston wind in tunnel of guangzhou metro station [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019. (in Chinese)
- [23] 杨 静, 代盛旭, 周浪雅, 等. 城市轨道交通相邻多车站动态协同限流研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(3): 112-118.
- YANG Jing, DAI Shengxu, ZHOU Langya. A study on passenger flow control with multi-station dynamic coordination in urban transit system [J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(3): 112-118. (in Chinese)
- [24] 董瀚萱. 城市轨道交通车站承载能力计算及客流控制分析[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- DONG Hanxuan. Calculation of urban rail transit station carrying capacity and analysis of passenger flow control [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [25] GB 50736—2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范(附条文说明)[S].
- GB 50736—2012 Design specification for heating ventilation and air conditioning in civil buildings [S]. (in Chinese)
- [26] GAO Xiaolei, WEI Jianjian, COWLING B J, et al. Potential impact of a ventilation intervention for influenza in the context of a dense indoor contact network in Hong Kong [J]. Science of the Total Environment, 2016, 569: 373-381.

【中文责编: 方 圆; 英文责编: 淡 紫】

补充材料