

基于数字孪生技术的地铁站列车换乘衔接方案研究

刘星文¹ 汪武芽¹ 刘志刚¹ 刘丁珍²

1. 江西交通职业技术学院; 2. 南昌轨道交通集团运营分公司

摘要:随着我国地铁线路由线组网的趋势加速,换乘站数量与规模日益庞大,保证换乘客流的安全与效率成为地铁客运组织的重点。列车换乘衔接方案是影响大客流下乘客安全快速换乘的关键因素。论文基于数字孪生技术提出了一种新的寻找最优列车换乘衔接方案的方法,通过对车站换乘区域、列车进出站、换乘与上下车客流、列车换乘衔接方案的数字孪生,构建了乘客换乘全过程的数字孪生体,进而确定使得换乘区域行人密度达到最小的最优列车换乘衔接方案,并以南昌地铁大厦站为例进行了验证。

关键词:换乘客流; 数字孪生; 列车换乘衔接

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.21.048

一、引言

城市轨道交通换乘客流的组织原则是组织好换乘客流、缩短换乘路径、减少换乘客流与进出站客流的交叉、干扰^[1],换乘能力的影响因素主要有换乘楼梯的宽度、换乘扶梯设置、站台候车区面积与列车换乘衔接方案等。在换乘站开通运营后,这些因素很难有优化的空间,且成本过高,因此只有列车换乘衔接方案存在优化的可能性。论文研究的重点就是找到最优列车换乘衔接方案,使得换乘区域在大客流的挑战下安全有效地执行换乘任务。

二、换乘站列车换乘衔接方案研究

在已有研究中,大部分的方案优化目标为乘客的乘车满意度最大,或者换乘客流的整体换乘效率最优^[2]。然而,考虑到大客流背景下,保证地铁站乘客的通行安全是车站运营的第一原则,其次才是换乘效率与乘客的满意度。因此本文把保证换乘区域乘客走行安全,预防大客流背景下拥堵踩踏突发事件作为优化目标。大客流背景下,换乘区域发生拥挤踩踏突发事件的概率降低,就必须降低该区域单位面积内最大的乘客人口密度,即使得车站换乘区域内最严重拥挤区的人群拥挤程度最低。基于以上分析,建立换乘站列车换乘衔接方案优化模型。

(一) 模型优化目标

大客流背景下高峰小时期间,减小换乘区域内单位面积内最大客流密度。从保障大客流组织安全角度,必须将车站通道、楼扶梯等客运设施的客流密度控制在 $3.8\text{人}/\text{m}^2$ 这个安全红线内;从保障通行效率角度,车站的动态客流密度应不超出 $2.2\text{人}/\text{m}^2$ 这个界限^[3]。最大客

流密超出该界限,则此方案不可行;最大客流密度越低,则此方案越优。

(二) 决策变量

换乘站不同线路列车到达的间隔时间。由于国内大部分地铁换乘站为两线换乘,因此这里的间隔时间描述为,从换乘站一条线路上行(下行)列车到达站台的时间点开始,到另一线路上行(下行)列车到达站台的时间点为止的间隔时间。

(三) 约束条件

该模型的约束条件包括换乘客流量、行人速度与换乘设施。这三个因素均会影响乘客从一条线路的换乘至另一条线路的时间。而乘客换乘所需的时间会直接对换乘区域内的客流密度产生影响。

三、建立乘客换乘过程的数字孪生体

模型的求解方法为建立乘客换乘过程的数字孪生体,通过对比不同列车换乘衔接方案下数字孪生体的运行指标,确定最优方案。

(一) 车站换乘区域的数字孪生

目前利用AnyLogic对地铁车站站厅、站台的行人仿真应用已经较为成熟,成功案例丰富^[4]。利用AnyLogic对车站换乘区域的数字孪生步骤如下:

Step1: 对目标地铁站的站台与换乘设施进行测绘,制作站台层与换乘设施的CAD图;

Step2: 将站台与换乘设施的CAD图导入AnyLogic,并按等比例修改宽度高度,还原现实换乘区域的真实尺寸;

Step3: 在AnyLogic中将站台与换乘设施的CAD平面图分层建模,重点刻画换乘区域中的有效站台,屏蔽门,自动扶梯,楼梯,垂梯。换乘区域内的立柱、卫生间、站台三角间、设备用房、运营管理用房因为与换乘行为无关,均用墙体刻画。

(二) 列车进出站的数字孪生

与换乘过程相关的列车进出站行为包括“1号线”上行列车到站时间、出站时间,“1号线”下行列车到站时间、出站时间;“2号线”上行列车到站时间、出站时间,“2号线”下行列车到站时间、出站时间。这些时间节点理论上参照现行的列车运行图均能获取,但考虑到本文研究的是大客流背景下的换乘过程,列车进出站的时间特别是停站的时间可能会因为站台大客流的冲击而略微波动,同一站台的上下行列车到站时间差也会与列车运行图的规定值有所差距。故在对列车进出站

数字孪生建模时，既要参考现行的列车运行图，还要结合现场的观测数据，对列车运行图进行修正，以还原最接近现场情况的大客流背景下的列车进出站时刻。将列车进出站时刻导入AnyLogic中，即刻画出乘客在站台门处出现与消失的具体时刻，生成列车进出站的数字孪生模型。

（三）换乘与上下车客流的数字孪生

具体步骤如下：

Step1：在目标地铁站换乘区域布设视频摄像头，或利用既有站内CCTV监控画面采集地铁站内换乘客流量与换乘行人速度。

Step2：基于AI深度学习算法对采集的视频进行行人检测。截取目标地铁车站节假日，早晚高峰小时等大客流发生时间段的视频，利用YOLOv5和DeepSort对视频中行人进行识别与跟踪探究^[5]。

Step3：在AnyLogic的换乘区域数字孪生模型中搭建换乘行人逻辑。使用行人库中的流图模块，结合实际定义3类行人流逻辑：下车出站客流，既有候车上车客流，下车换乘候车上车客流。

Step4：将视频识别的客流大数据取平均值后导入AnyLogic。对step3中3类行人流进行赋值，刻画出其具体的客流量与行进速度分布。

至此建立了换乘与上下车客流的数字孪生模型。该模型采集了实际场景的长时间真实数据，置信度能够满足数字孪生技术的要求。

（四）列车换乘衔接方案的数字孪生

基于在AnyLogic中已建立的车站换乘区域、列车进出站、换乘与上下车客流的数字孪生模型，三者结合在AnyLogic可生成换乘全过程的数字孪生体。

设定列车换乘衔接方案，即在该数字孪生体中设定不同线路列车初始到站间隔时间 t ，数字孪生体运行特定时长（一般为1个小时），即在一个高峰小时内，列车与乘客不断重复到站出站、下车候车上车的整个逻辑。最后获取数字孪生体节点区域的行人密度热力图（区域颜色越红行人密度越大），最大行人密度出现区域以及该最大值，最大行人密度值记做 n 。

（五）通过半分法逼近最优列车换乘衔接方案

由于地铁列车运行图的时间精度为秒，若要穷举法罗列所有可能的列车换乘衔接方案，数字孪生体的运行次数将达到300-400余次，获取所有次数生成的最大行人密度值，最小者对应的列车换乘衔接方案为最优。而通过半分法可以大大加快最优解的搜寻速度。具体步骤如下：

Step1：设定起始不同线路列车到站间隔时间 t_0 ， $t_0=0$ ，利用Anylogic中的换乘过程数字孪生体，运行一小时后获得换乘区域最大行人密度 n_0 。

Step2：设定最大间隔时间 t_1 ，最大间隔时间一般使之等于高峰小时地铁列车上下行行车间隔时间，获得 n_1 。

Step3：设定间隔时间 t_2 ， $t_2=t_1/2$ ，获得 n_2 。

Step4：对比 n_0 与 n_1 的大小，若 $n_0 < n_1$ ，则设定下次间隔时间 $t_3=(t_0+t_2)/2$ ；若 $n_1 < n_0$ ，设定下次模拟间隔时间 $t_3=(t_1+t_2)/2$ ，获得 n_3 。

Step5：对比 n_2 与 n_3 的大小，若 $n_2 < n_3$ ，则设定下次间隔时间 $t_4=(t_2+t_3)/2$ ；若 $n_3 < n_2$ ，设定下次模拟间隔时间 $t_4=(t_0+t_3)/2$ ，获得 n_4 。

Step6：继续以上步骤，直到间隔时间精度步进至秒。例如第 $x-1$ 次模拟的间隔时间为2分10秒，第 x 次模拟的间隔时间为2分11秒，停止搜寻，得到最优列车换乘衔接方案，即间隔时间为2分11秒。

四、案例分析

（一）地铁大厦站换乘区域的数字孪生

地铁大厦站是南昌地铁1号线与2号线的T型换乘站，客流量大，容易引发拥挤踩踏、人流缓慢、乘客投诉等突发状况。换乘设备为连接1号线与2号线站台的两段楼梯，无自动扶梯。利用CAD绘制地铁大厦站换乘区域，将其导入AnyLogic，建立地铁大厦站换乘区域的数字孪生模型。

（二）列车进出站的数字孪生

根据南昌地铁的列车运行图，通过实地调研，对地铁大厦站上下行列车到站间隔时间进行记录，15次数据取均值，得到1号线上下行列车到站间隔时间为2min42s，2号线上下行列车到站间隔时间为2min48s。将以上时间数据导入到AnyLogic中，得到乘客在两站台列车上下车的精确时间节点。

（三）换乘与上下车客流的数字孪生

按照控制变量与大数据的思路，选取8个工作日下午5：30-6：30晚高峰时间段，团队采集了换乘区域的乘客走行视频。利用YOLOv5与Deepsort对视频中行人进行识别与跟踪，得到区域内换乘与上下车乘客客流量与行人速度信息。结合团队现场统计的客流数据，取平均值，得到换乘区域各支客流量及流向。

在AnyLogic中建立行人下车出站，候车上车，下车换乘候车上车的三类客流的行人逻辑，如图4-1所示。

（四）列车换乘衔接方案的数字孪生

（1）初始方案的数字孪生体的运行

设定列车换乘衔接方案的初始值，即1，2号线上行列车到站间隔时间 $t_0=0$ 。数字孪生体按照实际列车进出站时间节点循环运行1个高峰小时后，得到换乘区域的行人密度热力图（图5-2）。最大行人密度出现区域为换乘楼梯在2号线站台出口处，最大行人密度 $n_0=3.02$ 人/ m^2 。

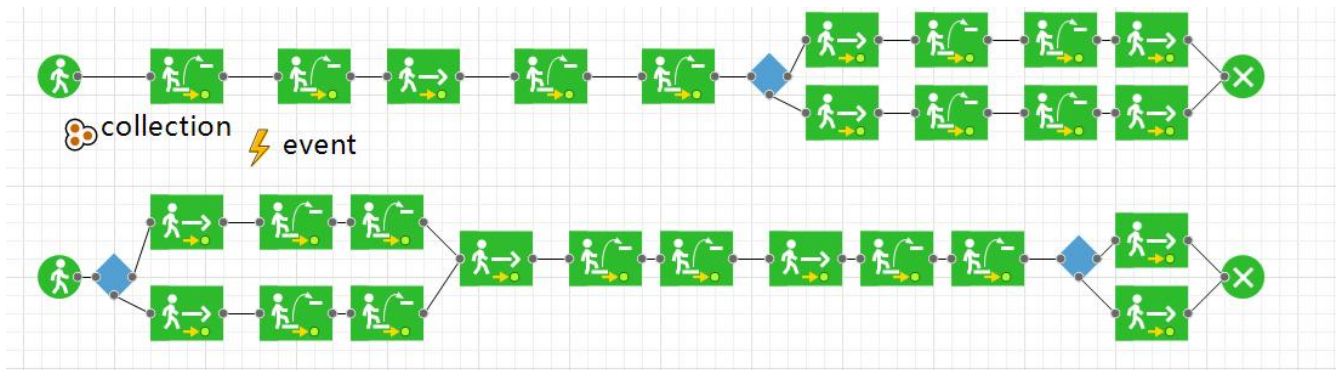


图4-1 行人逻辑构建图

表4-1 二分法搜索结果表

数字孪生体运行次数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
列车换乘衔接时间t (s)	0	390	195	292	243	213	228	221	222	220
最大行人密度n (人/m ²)	3.02	2.07	2.03	2.54	1.78	1.71	1.64	1.63	1.63	1.61

(2) 利用二分法搜索最优列车换乘衔接方案

二分法搜索结果总结见表4-1。

经过共9次运行后，找到当 $t_0=220\text{ s}=3'40''$ 时，此时最大行人密度得到最小值 $n_0=1.61\text{人/m}^2$ ，出现区域为换乘楼梯在2号线站台出口处，确定南昌地铁地铁大厦站最优列车换乘衔接方案，即1，2号线上行列车初始到达间隔为3分40秒。

(五) 最优列车换乘衔接方案的应用

通过观测换乘过程数字孪生体的运行数据，可确定地铁大厦站的最优列车换乘衔接方案。值得注意的是，3分40秒是1，2号线上行列车初始到达间隔时间。在应用时，可在高峰小时开始时刻，记录1号线上行列车的到站时间，并对2号线上行列车的到站时间进行人为干预，如延长或适当缩短2号线列车在上一站的停站时间，适当加快或减慢2号线列车在上一区间的运行速度，从而确保3分40秒后2号线列车刚好在地铁大厦站停车。

由于1号线，2号线高峰小时内上线运营的列车数目固定，1号线最大上线列车是22列，2号线最大上线列车是20列，因此高峰小时的1号线列车行车间隔4分48秒，2号线列车行车间隔6分30秒无法也无须变更。高峰小时内，1，2号线上行列车的二次时间差，三次时间差等按图行车即可，无须特意调整。

五、结论与建议

本文通过现场调研获取的基础数据，在AnyLogic中构建了南昌地铁大厦站乘客换乘过程数字孪生体并成功运行。通过总结多次不同列车换乘衔接方案下的运行结果，得出以下结论与建议：

在高峰小时时期，最优列车换乘衔接方案为设定3分40秒作为1号线、2号线上行列车初始到达衔接时间。通过观测一小时内数字孪生体的运行过程发现， $t=3\text{分}$

40秒时，整个换乘区域的行人分布较为均衡，能最大限度地降低了人群拥堵导致踩踏客伤事故发生的风险。且最大行人密度出现区域位于换乘楼梯在2号线站台出口处，两个站台处的客流密度最大不超过，说明一个高峰小时内大部分乘客在下车换乘到达目标站台时能很快上车，总候车时间明显下降，能有效提升乘客的整体换乘体验。

参考文献

- [1] 郭玉媛. 高峰期客流交叉干扰的分析与对策[J]. 上海铁道科技. 2009 (03): 129-134.
- [2] 冯延伟. 城市轨道交通换乘站高峰期客流控制方法研究[D]. 北方工业大学, 2016.
- [3] 宁善平, 熊律, 江伟, 赵晨. 大客流下城市轨道交通车站运营安全风险评估[J]. 山东交通学院学报. 2020, 28 (03): 33-40.
- [4] 陈雪梅, 陈俊强, 李燕玲. 地铁车站客流仿真模型构建研究[J]. 无线互联科技. 2021, 18 (08): 42-44.
- [5] 骆海琪. 地铁车站假日大客流的组织[J]. 交通企业管理. 2001 (09): 10-12.

基金项目：江西省教育厅科学技术研究项目“城市轨道交通客流转换与换乘设施优化研究”（课题编号：GJJ204609）研究成果。

作者简介：

刘星文（1993—），男，硕士，讲师，主要研究方向为城市轨道交通运营。

汪武芽（1978—），男，硕士，副教授，主要研究方向为交通运输、高职教育。

刘志刚（1990—），男，博士，讲师，主要研究方向为城市轨道交通车辆技术。

刘丁珍（1990—），女，工程师，主要研究方向为地铁运营安全管理。