



重庆交通大学  
CHONGQING JIAOTONG UNIVERSITY

# 本科毕业论文（设计）

题目： 道路客运场站乘客集散  
行为仿真与优化设计

学 院： 交通运输学院  
专 业： 交 通 运 输  
学 生 姓 名： 骈 宇 庄  
学 号： 631503010809  
指 导 教 师： 常庆宪 彭金栓  
评 阅 教 师： 陈 坚  
完 成 时 间： 2019 年 5 月 23 日

重庆交通大学

CHONGQING JIAOTONG UNIVERSITY

本人郑重声明：所提交的毕业论文（设计），是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文研究做出过重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

作者签名（亲笔）：                      年        月        日

本毕业论文（设计）作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，本科生在校攻读期间毕业论文（设计）工作的知识产权单位属重庆交通大学，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权重庆交通大学可以将毕业论文（设计）的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编毕业设计（论文）。

作者签名（亲笔）：                      年        月        日

导师签名（亲笔）：                  年        月        日

## 摘 要

道路客运场站是运输经营者和旅客进行贸易活动的地方，是运输经营者为有运输需求的旅客提供相应服务的场所，它在道路运输系统的运营和城市的发展中起着关键作用。由于道路运输的特殊性质，客运站往往会发生旅客集散现象，其特点为时间较为集中，数量庞大。不管是旅客自身需求还是场站安全方面都希望集散现象能在较短的时间内完成，如果不能使场站内的旅客及时集散，一方面会使场站附近及内部产生拥堵，安全性降低；另一方面会延长旅客在场站内的滞留时间，给其交通行为带来较大的影响，甚至可能会在场站内出现混乱。因此，快速、高效的集散客流，保证道路客运场站的正常秩序是一个亟需解决的问题，

为量化分析旅客在道路客运场站中的交通特性和聚散现象，本文对比分析集散行为调查方法，并从宏观和微观两个层面分别阐述了场站内旅客行为特征及交通特性，为仿真过程中的行人参数设定提供了取值参考。

根据行人间、行人-环境设施间相互作用程度，从宏观、中观和微观三个层面分析了常见的旅客集散仿真模型的基本原理及特点并通过优劣势比较，确定了本文微观仿真层次的基础。接着对比分析了基于不同建模原理下的微观仿真软件的优缺点及适用性，最终选择了基于社会力模型为研究基础的 Massmotion 仿真软件。

基于 Massmotion 仿真平台，提出了关于群体出行、行李携带状况等行人特征和购票、安检、车辆驶离等功能区模拟的实现方法，并以黄山高铁综合客运站为实例分析对象进行仿真建模，通过分析客运站主要功能区及服务设施的累计流量、人均密度和行人速度比，寻找客运站内的瓶颈点并提出相应的优化改进措施。仿真结果表明，安检区及检票区服务能力并不能满足旅客通行需求，旅客下车通道通行效率较低；进行交通组织流线优化后，安检区服务能力提高 41.20%，旅客平均滞留场站时间缩短了 30.44%，平均步行距离缩短了 26.36%，平均步行速度提高了 9.01%，下车通道通行效率提高 14.38%。

**关键词：**道路客运场站；集散行为；行人仿真；社会力模型；Massmotion

## **Simulation and Optimization Design of Passenger Distribution Behavior of Road Passenger Stations**

### **Abstract**

The road passenger terminal station is a place where transport operators and passengers conduct trade activities. It is a place where transport operators provide corresponding services for passengers with transportation needs. It plays a key role in the operation of road transport systems and the development of cities. Due to the special nature of road transportation, passenger stations often have passenger distribution problems, which are characterized by a relatively concentrated time and a large number. Regardless of whether it is the passenger's own needs or the safety of the station, it is hoped that the distribution phenomenon can be completed in a short period of time. If the passengers in the station cannot be collected in time, the congestion will be caused near and inside the station, and the safety will be reduced. On the one hand, it will prolong the staying time of passengers in the station, which will have a greater impact on their traffic behavior, and may even cause confusion in the station. Therefore, the rapid and efficient distribution of passenger flow and the guarantee of the normal order of the road passenger station are an urgent problem to be solved.

In order to quantitatively analyze the traffic characteristics and gathering behavior of passengers in road passenger transportation stations, this paper compares and analyzes the survey methods of distributed behavior, and expounds the behavior characteristics and traffic characteristics of passengers in the station from the macro and micro levels. The pedestrian parameter setting in the middle provides a reference for the value.

According to the interaction degree between pedestrians and pedestrian-environment facilities, the basic principles and characteristics of common passenger-dispersion simulation models are analyzed from the macro, meso and micro levels. The basis of micro-simulation level is determined by comparing the advantages and disadvantages. . Then the advantages and disadvantages and applicability of micro-simulation software based on different modeling principles are compared and analyzed. Finally, the Massmotion simulation software based on social force model is selected.

Based on the Massmotion simulation platform, the pedestrian characteristics such as group travel, baggage carrying status, and the realization method of ticket area, security check, vehicle departure and other functional areas are proposed. The simulation analysis is carried out with Huangshan High-speed Railway Comprehensive Passenger Station as an example. By analyzing the cumulative traffic, the per capita density and the pedestrian speed

ratio of the main functional areas and service facilities of the passenger station, the bottlenecks in the passenger station are found and corresponding optimization and improvement measures are proposed. The simulation results show that the service capacity of the security check-up area and the ticket-checking area can not meet the passenger traffic demand, and the traffic efficiency of passengers' getting-off lanes is low. After the traffic organization stream is optimized, the service capacity of the security check-up area is increased by 41.20%, and the average station time of passengers is shortened. 30.44%, the average walking distance was shortened by 26.36%, the average walking speed was increased by 9.01%, and the passing lane efficiency was increased by 14.38%.

**Key Words:** Road passenger station; Distributing behavior; Pedestrian simulation; Social power model; Massmotion

## 目 录

摘 要 .....	II
Abstract.....	III
1 绪论 .....	1
1.1 研究背景和意义 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	1
1.2 国内外研究综述 .....	2
1.2.1 元胞自动机模型的研究方法 .....	3
1.2.2 社会力模型的研究方法 .....	4
1.2.3 Agent 模型的研究方法 .....	4
1.3 研究方法和主要内容 .....	5
1.3.1 研究方法 .....	5
1.3.2 主要研究内容 .....	6
1.4 技术路线 .....	7
2 道路旅客集散行为特征理论分析 .....	8
2.1 集散行为调查方法 .....	8
2.1.1 调查时段和研究区域 .....	8
2.1.2 调查数据类型 .....	9
2.1.3 数据采集和处理 .....	9
2.2 旅客交通特性分析 .....	11
2.2.1 宏观特性 .....	11
2.2.2 微观模型 .....	11
2.3 旅客的行为特征分析 .....	13
2.4 小结 .....	15
3 乘客集散仿真模型与仿真平台 .....	16
3.1 宏观模型 .....	16
3.1.1 气体动力学模型 .....	16
3.1.2 流体动力学模型 .....	17
3.2 中观模型 .....	17
3.2.1 格子气模型 .....	17
3.2.2 排队网络模型 .....	18

3.3 微观模型 .....	19
3.3.1 元胞自动机模型 .....	19
3.3.2 社会力模型 .....	20
3.3.3 智能体模型 .....	22
3.4 主流微观仿真平台的分析对比 .....	23
3.4.1 基于元胞建模原理的软件 .....	23
3.4.2 基于社会力模型的仿真软件 .....	24
3.4.3 其他仿真软件 .....	24
3.5 小结 .....	25
4 道路客运场站微观仿真设计与实现 .....	26
4.1 仿真软件概述及建模方法 .....	26
4.1.1 Massmotion 软件介绍 .....	26
4.1.2 建模方法 .....	27
4.1.3 建模步骤 .....	29
4.2 旅客集散行为仿真实现方法 .....	31
4.2.1 携带行李的行人行为模拟 .....	31
4.2.2 行人群体出行行为模拟 .....	32
4.2.3 购票区域与安检区域模拟 .....	33
4.2.4 车辆到达及驶离模拟 .....	35
4.3 实例研究 .....	36
4.3.1 黄山高铁综合客运站概况 .....	36
4.3.2 数据调查 .....	39
4.3.3 场站仿真建模 .....	41
4.3.4 仿真结果分析 .....	44
4.3.5 交通流线优化 .....	49
4.4 小结 .....	54
5 结论与展望 .....	56
参 考 文 献 .....	58
致    谢 .....	61
附录 1 黄山北站高铁列车时刻表 .....	62
附录 2 黄山高铁综合客运站发车时刻表 .....	65

# 1 绪论

## 1.1 研究背景和意义

### 1.1.1 研究背景

道路客运场站是运输经营者和旅客进行贸易活动的地方，是运输经营者为有运输需求的旅客提供相应服务的场所，是联系城市内外交通的纽带和桥梁，它在道路运输系统的运营和城市的发展中起着关键作用，场站的选址、布局、规模，都将直接影响其功能的发挥和服务水平的体现，影响社会效益和经济效益。

虽然道路运输方面许多客运站的规模达到了世界先进水平，但旅客满意度还有较大的提高空间。由于道路运输的特殊性质，客运站往往会发生旅客集散现象，其特点为时间较为集中，数量庞大。不管是旅客自身需求还是场站安全方面都希望集散现象能在较短的时间内完成，如果不能使场站内的旅客及时集散，一方面会使场站附近及内部产生拥堵，安全性降低；另一方面会延长旅客在场站内的滞留时间，给其交通行为带来较大的影响，甚至可能会在场站内出现混乱。因此，快速、高效的集散客流，保证道路客运场站的正常秩序是一个亟需解决的问题，也是本文将要研究的主要内容。

随着现代化信息技术的快速发展，计算机仿真在各领域都得到了较好的应用，特别是对于交通规划设计、运输组织管理等方面十分重要。道路客运场站旅客的集散行为是交通行为学的重要理论基础，能否准确掌握和分析旅客在站台的集散行为直接关系到道路客运场站的布局设计、客流组织以及建设投资。然而传统的理论研究难以对居民的出行行为进行精细化和深入地剖析，对乘客行为的仿真研究已成为交通领域和仿真领域的热点。综上所述，运用 Massmotion 仿真软件对道路客运场站旅客集散行为进行分析和仿真评价就显得十分重要。

### 1.1.2 研究意义

道路客运场站内旅客的集散行为理论在国内外仍然属于起步阶段，对此方面进行进一步研究不仅能对道路客运场站旅客集散行为及仿真模型理论进行完善，还可以补充道路客运场站动态评价方面的缺失，对于行人交通特性和行为特性的研究也具有重要意义。通过实地调研数据所构建的仿真模型能够在道路客运场站建设规划阶段提供技术评估，在实际运营阶段提供运输组织仿真支持，具有十分重要的现实意义。



综上所述，对道路客运场站乘客的集散行为进行仿真研究，不仅能够填补当前研究的空白，在对场站集散能力进行评估的同时，为设施布置、交通组织流线优化提供依据和参考建议，提高了客运站的安全可靠性。

## 1.2 国内外研究综述

行人仿真模型众多，可以从不同方面进行分类，主要有宏观-微观、连续-离散、确定-随机<sup>[1]</sup>等。本文主要根据行人-行人、行人-环境设施两种相互作用程度，即按宏观、中观、微观层面进行论述。宏观层面重点从全局的角度分析行人运动过程的交通特性，其中以 Henderson<sup>[2]</sup>提出的基于流体力学的宏观行人流仿真为代表。此后，一大批专家学者开始对行人仿真进行研究。

中观层面在描述时间、流量、密度等时空特性的基础上，又能保留微观的一些特征。其中以 Florian<sup>[3]</sup>在 2001 年提出的中观仿真模型为代表，他采用许多行人个体所构成的行人单元来描述行人流。

宏观层面与中观层面的相关模型虽然可以较好的解释一些宏观上的行人流特性，但是在一些特殊的场所（如地铁站、地下商场等），其较难描述场景下的行人特征，而且其只考虑行人系统外部因素对行人行为的影响，缺乏对系统内部行人与行人之间、行人与设备和环境、行人与其他交通系统关系的微观解析。

随着仿真模型对行为过程的细节程度要求不断提高，微观层面的研究学者提出了众多模型，可算是收获颇丰。主要有元胞自动机模型、力学模型、网络排队模型<sup>[4, 5]</sup>、Agent 模型等。而元胞自动机模型又可以分为成本效益元胞自动机<sup>[6]</sup>、CA，力学模型又可以分为社会力模型、磁力模型<sup>[7]</sup>。对于主要的微观仿真模型，陈坚等<sup>[8]</sup>进行了细节比较，结果如表 1.1 所示。接下来本文将主要介绍元胞自动机模型、社会力模型和 Agent 模型这三种常见的模型。

表 1.1 旅客行为研究方法对比

建模原理	代表模型	描述现象	运动方向	碰撞处理	参数 标定	乘客类 别细分	障碍物 区分
基于元胞	移动效益元胞模型	排队	收益值	网格占用 状态	观测	否	否
	元胞自动机模型	排队、自组织	自定义		数据 分析	否	否
基于网络	排队网络模型	排队、疏散	随机选择	先入先出	观测	否	否

续表 1.1

建模原理	代表模型	描述现象	运动方向	碰撞处理	参数 标定	乘客类 别细分	障碍物 区分
基于网络	磁力学模型	排队、路径 决策	异极相吸	相对速度	观测	否	模糊
	气体力学模型	行走状态	加速度	所受激励	观测	否	否
基于动力学	社会力模型	排队、自组 织	期望速度	社会力- 斥力	观测	否	否
基于智能体	自适应 Agent	均可	智能选择	自主处理	/	否	模糊

### 1.2.1 元胞自动机模型的研究方法

Cremer 和 Ludwig<sup>[9]</sup>首次提出了元胞自动机模型，其模型当时主要用于车辆仿真方面，随后 Blue 等<sup>[10]</sup>提出了将元胞自动机模型用于描述行人运动，并且实现了双向行人运动的模拟。

在此之后，一大批学者开始对行人运动进行研究，国内外学者对元胞自动机模型也进行了各种各样的改进优化，他们的研究成果主要在紧急情况下的行人疏散和正常情况下的行人仿真两个方面。

Hu Jun 等<sup>[11]</sup>提出了一种新的三维元胞自动机模型，其主要是在行人疏散研究中结合了阶梯因素。模拟结果显示，出口流率、疏散时间和初始时行人的密度呈现正相关，而与出口宽度呈现负相关，除此之外还发现系统最优疏散时间与总体行人平均速度和出口的宽度有关，他们之间存在一个理想的阈值。

Yukari 等<sup>[12]</sup>建立了基于 Voronoi 网络的新型元胞自动机模型，把方形单元格变成三角形网络。这种三角形网络适用于局限的地方如角落、空间、人行走的地方等，模拟能够很好地模拟行人的进出。

国内的专家学者对于采用元胞自动机模型对行人进行模拟方面的研究成果也很多，同时在不同场景提出了不同的规则模拟行人运动。

蒲刚<sup>[13]</sup>基于群体的仿真研究中对群体的行为及交通特性进行了详细的分析。不足之处在于为了便于仿真把群体看成一个更大的个体，忽略群体之间位置的变换对行人流的影响。

童蔚苹等<sup>[14]</sup>考虑了结伴行为的行人，建立了场域元胞自动机模型。仿真结果表明行人和其他行人会保持一定的距离，结伴行人间的间距较小，易出现成团的现象。

### 1.2.2 社会力模型的研究方法

社会力模型首次是由 Helbing<sup>[15]</sup>提出来的，他提出基于力的作用来模拟行人行为，展现了与实际符合的自组织现象。随后，国内外专家学者对社会力模型进行了更进一步的研究和优化改进。杨亚琛等人<sup>[16]</sup>对社会力模型的改进进行了详细的综述。

Weiliang 等<sup>[17]</sup>对信号交叉口的行人进行研究，考虑了车辆、人行横道边界、信号灯等因素对社会力模型进行改进，再现了行人间的排斥与吸引现象，并与实际进行验证比较，验证模型的合理性。

国内对社会力模型改进研究的主要学者代表是何民<sup>[18]</sup>，其对行人仿真模型有较深的研究。例如：对社会力模型进行改进即添加群体模型，研究表明群体的移动速度受同伴群的影响。

张诗波<sup>[19]</sup>用 Agent 和社会力模型结合，并对社会力模型进行改进。利用 PTSim 仿真平台，对单双向、瓶颈处及不同环境下的人流进行模拟分析。

樊冬<sup>[20]</sup>通过对广场的行人进行视频采集，然后用 video-track 软件进行行人数据提取。把群体行为因素加入到社会力模型中，利用 Pedsim 软件进行行人仿真研究，分析了不同比例群体的群体特征。

何民<sup>[21]</sup>结合 Agent 与动态避让算法对模型进行改进研究，仿真实验结果表明，改进后的模型能够更好地模拟冲突行人之间的避让行为。同年，其关于群体动态分组的研究，文中<sup>[22]</sup>构建了动态分组模型，结果表明模型能够较好的重现行人流特征。

### 1.2.3 Agent 模型的研究方法

智能体模型，Franklin 等<sup>[23]</sup>定义为一个系统，它能与环境之间相互作用，并根据自己的目标进行行动。Marcelo 等<sup>[24]</sup>在元胞自动机的基础上提出 Agent 模型，描述了不同特征的行人（速度、性别等）的行为和躲避障碍物行为。

此后，国内外很多学者把 CA 与 Agent 联系起来，共同建立相关模型进行不同问题的研究，尤其在行人仿真方面的研究成果颇丰。

Stefania 等<sup>[25]</sup>基于行人的智能体，考虑群体作用，建立群体感知模型。通过简单的模型测试，在动态人群中展现出合理的群体凝聚力，根据实验数据与对比实际数据表明了可行性。

Giuseppe 等<sup>[26]</sup>建立了基于元胞自动机的智能体模型，考虑了组群因素进行仿真分析。结果表明组群在人流密度较大时，表现出了凝聚力，这与现实中观察的现象是一致的。

之后随着计算机技术的兴起，Scottde Marchi 等<sup>[27]</sup>对 ABM (Agent-Based Models) 进行综述。ABM 流行于各个领域，包含社会科学、生物学、自然科学等，其中也包含了交通领域的仿真研究。

Manenti 等<sup>[28]</sup>基于 ABM 考虑个人半径、群体半径和视野半径因素，构造了组群模型。通过用学生实验和仿真模拟，研究发现在不拥挤的时候，个体速度普遍较群体快，而在人群密度较大时，群体的速度有时比个体速度还快，这可能是群体中后面的人要追赶群组中的 Leader 而产生的。

国内关于两者结合的研究也有很多，在紧急疏散和正常情况下的行人仿真两个方面研究较多。

邹田春等<sup>[29]</sup>建立了典型的民机客舱模型和人员模型，对四种不同出口打开方式的模型进行应急撤离仿真。仿真结果表明，不同出口打开方式对应急撤离性能具有显著影响。

刘全平<sup>[30]</sup>结合两者的优势，建立感知模型和决策模型，并对行人的各种行为进行建模及仿真算法的编写。最后对教室突发火灾事件进行模拟，研究了不同出口数量、不同宽度、不同布局等对紧急疏散的影响。

蒲刚<sup>[13]</sup>考虑同伴群行为，将两者结合进行建模分析。在仿真时把同伴群看成一个整体进行同步移动，并应用 AdobeFlashCS3 进行仿真模拟，结果发现不同的同伴群比例对人群有不同的影响。把同伴群看做一个整体是为了方便仿真模拟，这是与实际不太相符的，行人在实际行走过程中会适当调整自身的位置，不可能保持一种姿势持续走下去。

综上所述，在行人仿真模型方面，国内外的众多学者专家已经研究 40 多年，期间呈现了很多优秀的研究成果。但对行人交通流的研究远远不及对机动车交通流的研究深入，尤其是针对道路客运场站旅客交通特性及行为特征的研究更是处于刚刚起步的阶段。对于道路客运场站内的设施服务水平评价、售票安检检票等功能区的瓶颈形成机理以及乘客携带行李、群体出行的特性等问题，较少有研究者提及。故本文针对以上研究方向，深入分析乘客集散行为特征，进一步探求道路客运场站行人仿真。

### 1.3 研究方法和主要内容

#### 1.3.1 研究方法

本文所采用的研究方法有：

(1) 文献分析法。首先通过收集国内外文献资料掌握目前对道路客运场站旅客集散行为仿真方面的研究状况，在学习已有成果及科学方法的基础上对所选课题研究内容有个整体了解，分析所需要使用的数据，制定详细的调研方案。

(2) 调查研究法。根据调研方案选择适合的数据采集方法和时间段对黄山高铁综合客运站进行实地调查，了解客运站的整体布局，并根据所需数据列表，采集相关数据。

(3) 仿真研究法。通过采用 Massmotion 仿真软件，对黄山旅游客运中心行人流进行仿真，通过对仿真结果的分析，得到旅客集散情况及主要问题。同时将优化后的场站进行仿真对比，使优化效果更加明显。

实施方案：首先进行资料收集，确定研究内容；其次进行基础理论研究，研究对象为仿真模型和仿真软件；再次进行实地调研，获得集散规律特征，为仿真做准备；最后进行实例的仿真研究。

### 1.3.2 主要研究内容

基于道路客运场站旅客集散行为的特殊性以及复杂性，初步对场站内旅客交通特性和行为特性进行分析；同时根据行人间、行人环境设施间的相互作用程度，分别叙述宏观、中观和微观三个层面的行人流模型，并根据道路客运站旅客特征及各模型软件优劣性，最终选择 Massmotion 微观仿真软件；以黄山高铁综合客运站为研究对象，对场站内旅客集散行为进行仿真模拟，找出客运站交通流线不足之处，并对改进方案进行评价分析。

第一章主要介绍研究背景、研究意义以及目前国内外对道路客运场站旅客集散行为为仿真方法的研究现状，并提出技术路线。

第二章主要对旅客集散行为的各调查方法进行比较，同时对行人的交通特性和行为特性进行了宏观和微观两个层面的分析，为后续仿真过程中的行人参数设定提供了取值参考。

第三章主要根据行人间、行人环境设施间的相互作用程度，对宏观模、中观和微观行人流模型的基本原理及各自优劣进行了分别论述，并结合道路客运场站的特点，选取微观模型作为仿真原理。同时对比分析了基于不同建模原理下的仿真软件的优缺点及适用性，最终选择了基于社会力模型为研究基础的 Massmotion 仿真软件。

第四章在介绍软件功能及操作的同时，对道路客运场站内可能出现的旅客集散行为进行仿真模拟，随后以黄山高铁综合客运站为实例，通过建模仿真直观的对客运站的集散水平进行评价，并提出改进优化方案。

## 1.4 技术路线

本文的技术路线如图 1.1 所示。

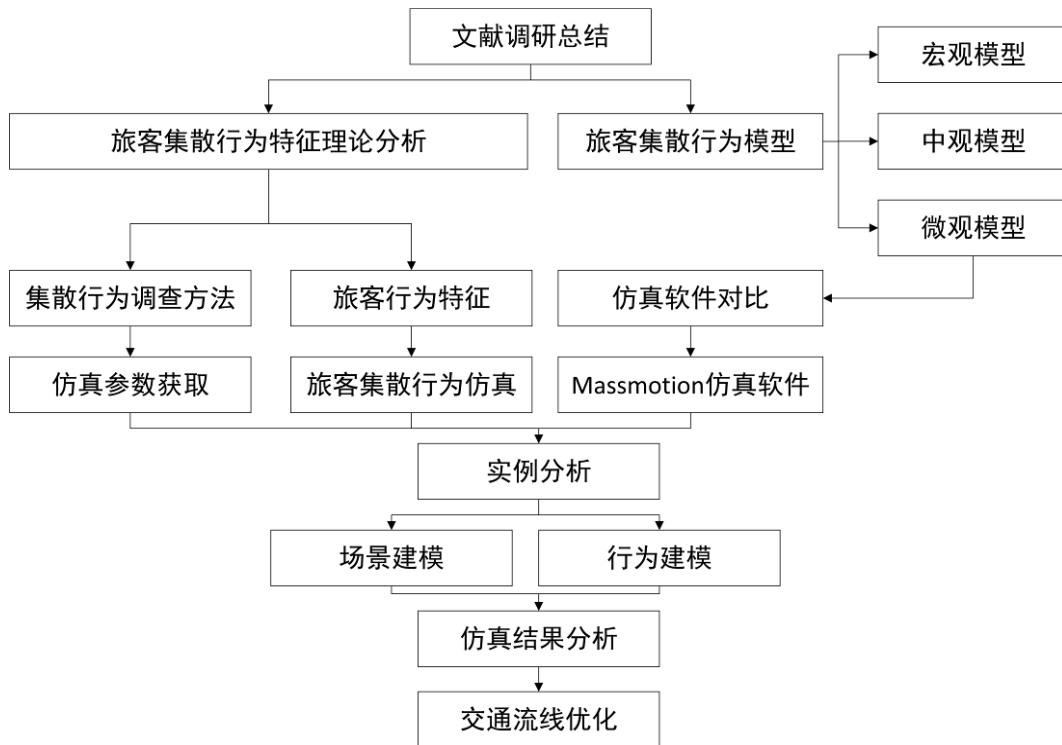


图 1.1 技术路线



## 2 道路旅客集散行为特征理论分析

为了能够深入研究道路客运场站的客流集散问题，有必要通过实际的旅客交通调查作为了解旅客集散行为的手段，从而客观地反映实际旅客行为的基本特征。这样不仅能够更加了解道路客运场站旅客的集散行为特征，并获得必要的交通参数；还能为模型后续的相关参数和仿真参数的设定提供理论依据，使得仿真结果与实际情况更加契合，为其比较分析奠定了基础。

### 2.1 集散行为调查方法

根据行人个体与行人流特性的不同，可以把交通调查所获得数据分为宏观行为数据和微观行为数据两个部分。宏观行为数据主要是用于描述行人流的交通特性，其包括行人流的速度、密度、流量和冲突等；微观行为数据主要是用对个体交通行为特征的描述，其包括行人的步速、步幅、步频、路径的选择、行人的空间需求、道路客运场站设施利用时间等<sup>[31]</sup>。

#### 2.1.1 调查时段和研究区域

在调查旅客行为的过程中，往往需要根据调查数据的类型确定调查期和研究区域。根据相关学者的研究和实际的观测，同一地点不同时间段内，旅客年龄的组成结构、交通特性、步行速度和携带行李情况等都将会有所不同。

因此，调查宏观行为数据（速度、流量、密度、延迟等）的时候，应该在一个连续的、渐变的时期内进行，在此期间数据量需要能够尽可能地显示正态分布趋势。同时一般选取客流平峰时期对道路客运场站进行设施参数的调查，目的是为了防止在场站内实地调研的过程中影响旅客的正常服务及流线通畅。如果需要调查场站设施及服务水平能否满足日常客流动态波动需求，则调查时段应选择节假日等客流高峰时段。不仅如此，调查方法不同，调查时段的选择可能也不相同。比如选择调查问卷方法来对旅客行为进行调查时，最好选择客流平峰时段。如果在高峰客流时段进行调查，此时人群密度较高，旅客为了更快疏散，会尽可能避免途中延误时间，所以很难对旅客进行调查。

研究区域通常根据旅客的行为特征和可观测范围来进行确定，如果需要调查旅客在售票处的行为，则可以将售票处前排队入口和售票窗口做为界限，其围成的区域就是研究区域。通常将楼梯电梯及自动扶梯、换乘通道、检票区域、售票区域及候车大厅等作为研究区域。

### 2.1.2 调查数据类型

一般来说，微观行为调查的目的是获得旅客个体交通行为特征，微观行为数据之间没有相互关联，所以可以对其参数进行逐一调查。而宏观行为调查则不一样，强烈的目的性和关联性是其调查数据的特点。一般来说宏观数据主要包括行人流参数（流量、速度、密度）、延误调查、路径选择行为调查和冲突调查。具体数据见表 2.1 所示。

表 2.1 宏观数据调查的类型

调查类型	代表参数	调查目的
行人流参数调查	流量、速度、密度	了解旅客设施、环境、流向、目的等行为特征
延误调查	延误时间	确定不停条件下旅客的出行时间损失
路径选择行为调查	方式选择的比例	对场站内可选设施的利用效率进行综合评估
冲突调查	冲突点数目	对不同规模的旅客带来的冲突分布和冲突强度

由于调查过程中往往会受到资源限制的问题，所以如果要全部完成旅客行为各参数的调查，需要大量的资金和精力的投入。所以可以采用联合调查的方法进行，联合调查的优势在于可以同时采集多种数据，可以有效的节约调查资源，提高人员调查效率。可以进行联合调查的数据如表 2.2 所示。

表 2.2 可采用联合调查的数据

	速度	流量	密度	延误	冲突
步幅、步频、步速	√	√	×	√	√
行人的空间需求	×	×	√	×	×
路径选择	√	×	×	√	×
设施利用时间	√	×	×	√	×

注 1)：√表示二者可以做联合调查，×表示二者不能做联合调查

### 2.1.3 数据采集和处理

现场数据采集主要是为了获取与旅客行为有关的量化信息，由于调查形式的差别，数据采集的方法也有所差异，常用的数据采集方法有定点观测、录像采集、问卷调查和跟踪调查四种。

不同的数据采集方法，其适用条件各不相同，同时所采集的交通特性参数也不完全一样。调查问卷法可以应用于多种情况，它能采集旅客到达客运站的出行需求、容忍时长、出行目的等所需参数，从总体上分析旅客行为。跟踪调查法不适用于大面积调查，它在考虑调查成本的情况下，主要是在选定的条件下对旅客个体在场站内可能



出现的行为特征进行观测，其采集的参数主要是单个旅客的时间、路径选择、排队、速度、碰撞规避等交通行为。定点观测一般用于采集客流量不大、观测范围有限的道路客运场站，其一般采集客运站流量、旅客流线交叉情况、旅客延误等交通行为。目前在行人调查中使用最多适用范围较广的是录像采集法，它的优势在于可以通过重放录像获取所需细节信息，存储携带方便，能够一次获得所需的全部交通行为数据。它的劣势主要是该调查方法需要一定数量的摄像设备，并且录像后的数据处理分析需要较长时间。采用录像调查时还需要注意以下问题，即录像设备的位置要尽量同客流行走方向垂直，且拍摄范围要能够覆盖当前研究区域，不然后期图像处理时将对录制图像进行坐标变化，处理时长及难度将大大增加。不同数据采集方法的调查对象和优缺点如下表 2.3 所示。

表 2.3 数据采集方法间的采集参数及优劣势比较

数据采集方法	主要采集参数	优点	缺点
问卷调查法	出行目的、出行期望、出行规律等	方法简单，适用范围广泛	需要消耗大量的人力物力，无法调查高峰时期的行人特征
跟踪调查法	速度、时间、路径选择、碰撞规避、排队等行为	针对某类特殊的人群准确地记录微观交通行为特征	耗时耗力
定点观测法	流量、冲突、延误等行为	简单易行	准确性较差
录像采集法	流量、速度、冲突、时间、延误、排队等行为	存储方便，可以重放细节信息，能够一次调查所有交通行为数据	需要大量的摄像设备，拍摄时有要求且数据需要进行后期处理

跟踪调查、定点观测和问卷调查方法能够直接获取所需要的数据。录像采集法由于在数据调查后，从现场获得的视频数据无法直接得到所需的交通行为特性，需要通过一定的手段对其进行分析和处理。

一般选取例如 SPSS 等统计软件对采集到的数据进行分析，通过拟合方法求取曲线关系中的各变量参数，应用  $u$  检验或  $t$  检验对拟合结果的精确程度进行判定。同时采用横向对比来分析行人调查数据，即将采集处理后的数据与已有模型所得到的数据或其他城市的数据进行对比，从而分析数据的本地特征。

## 2.2 旅客交通特性分析

### 2.2.1 宏观特性

通过国内外学者大量的调查研究，旅客在道路客运场站内的交通特性部分与其他交通设施上相同，比如快速移动特性，但其还具有其他交通特性所没有的特殊行为。

(1) 站内走行的路线较长，容忍时间较长，活动具有多样性。旅客在站内一般需要经历进站、购票、候车、购物、检票、出站等多种活动，而这些活动并不仅仅局限于行走，所以在从事这些活动时可能会出现排队、拥挤等现象。并且道路客运场站内各设施距离相对较远，需要旅客行走距离较长。所以当旅客来到客运站时，心理基本已经对上述活动有了预期，可容忍时间也就相对较长。

(2) 旅客受周围环境影响较大。周围环境对旅客的影响主要是来自视觉、听觉和感觉三个方面。视觉方面主要是导向标识大小位置的设计，会对旅客在道路客运场站内的走行时间产生影响，导向标识设计越合理，旅客越能在场站内快速的集散。听觉方面主要是场站内的广播。旅客在场站内的引导除了依据标识标牌外也依赖于广播通知，广播的及时性会大大提高旅客的集散能力。感觉方面主要是客车时刻表的影响。对于进站旅客，距离发车时间越近，旅客越会更快的到达检票处检票上车；而如果所搭客车已经发出，则旅客的速度就会变慢，且急于到达目的地，产生了超越和跟随两种行为的交替出现。

(3) 场站流量具有较强的突变性和往复性。客车一般具有规定的行车时刻表，且呈现明显的间断性。当客车接近发车时刻时，场站内的客流量会急剧升高，这种现象会维持一段时间，随后客流量会因为客车的发车而逐渐减少。当下趟客车接近发车时，这种情况又周而复始。

### 2.2.2 微观模型

#### (1) 行人速度

行人速度是行人在单位时间内行进的距离，一般用  $m/s$ 、 $m/min$  或  $km/h$  来表示<sup>[32]</sup>。行人速度集中在  $0.73-2.0m/s$  之间，平均速度为  $1.21m/s$ 。

行人步行速度的影响因素主要有行人的心境、年龄、体质、出行目的、受教育程度和性别，同时还受到行人所在的地区、周围道路交通状况、环境干扰、街景等条件影响。一般来说，成年人的平均步行速度为  $1.0m/s-1.7m/s$ ，老年人的步行速度较成年人更慢，儿童的步行速度随机性较大；由于性别上的差异，通常男性步行速度要快于女性，经统计结果研究，男性的平均走行速度为  $1.4m/s$ ，而女性的是  $1.27m/s$ ；有明确出行目的的行人步速比漫无目的的行人高得多；结伴行人步速高于单独行人。

对研究地点而言，无信号交叉口的行人走行速度最快，其次为信号交叉口、机场、地铁、铁路等，再次为人行道、广场、购物区。对于行人步速的统计如表 2.4 所示。

表 2.4 行人步行速度统计

序号	行人类别	样本量	平均速度 ( $m/s$ )
1	全体	3033	1.21
2	男	1591	1.25
	女	1349	1.16
3	男中青年	1392	1.28
	男性老年	199	1.02
	女性中青年	1100	1.21
	女性老年	240	0.98
	儿童	98	1.19
4	中青年	2492	1.25
	老年	448	1.00

## (2) 行人步幅与步频

步幅是指行人两脚先后着地时，前脚跟与后脚跟之间的距离<sup>[33]</sup>。旅客的步幅、步频主要受行人的出行目的、行人密度、行人交通设施的物理属性、年龄构成等因素影响。根据众多专家学者测量所得，我国行人步幅平均值为  $0.637m$ ，男性平均步幅为  $0.67m$ ，女性平均步幅为  $0.61m$ 。通常来说，男性的步幅稍大于女性；中青年人步幅与妇女、老年人和儿童的步幅相比较较大一些；上坡时的步幅比下坡的步幅小；行走者精神愉悦时步幅稍大于精神不振时的步幅。行人步幅的统计如表 2.5 所示。

表 2.5 行人步幅统计表

单位:  $m$ 

编号	总体	男性	女性	中青年男子	中青年女子	老年男子
1.平均值	0.5615	0.6056	0.5643	0.6474	0.6314	0.5639
2.平均值	/	/	/	0.7500(15-30岁)	0.6600(15-19岁)	0.6000(>60岁)
				0.7300(30-40岁)		
				0.7000(>40岁)	0.6000(>20岁)	
3.平均值	0.6350	0.6660	0.6060	0.6680	0.6240	0.5710
4.建议值	0.6400	0.6700	0.6000	0.6800	0.6200	0.5800

步频是指行人在单位时间内行进的步数。陈然，董力耘学者根据对我国上海市行人的步频步速的调查，结合《交通工程学》提出的标准，得到我国行人每分钟行走步数在 80-150 次之间，旅客平均步频为 1.96 步/秒<sup>[34]</sup>。

### (3) 行人空间需求

行人空间是指人形通道或有行人排队处提供给每位行人的平均面积，它是采用行人站立或行走时占据的“面积”来表示，而不是通常意义上占据的“体积”来表示。Weidmann U 提出行人行走是趋向于与障碍物和其他行人保持一定的间距，即行人在行走时也有一定的空间需求<sup>[35]</sup>。所以行人空间需求可以分为静态空间需求和动态空间需求两部分。

旅客身体所占的静态空间通常用人体前后胸的厚度和两肩膀的宽度来表示，根据我国大量的人体参数研究所得到的结论，95%的男性肩宽在  $57.9\text{ cm}$  之下，肩厚在  $33\text{ cm}$  之内，人体的平均投影面积为  $0.146\text{ m}^2$ 。除此之外，在拥挤状态的情况下，行人占据公共空间的面积可以分为以下四类，见表 2.6 所示。

表 2.6 拥挤状态下的行人占用空间

指标/类别	接触区域	不接触区域	个人舒适区域	可行动区域
当量直径( $m$ )/面积( $m^2$ )	23.05/0.28	45.7/0.66	53.3/0.93	60.9/1.21

旅客动态空间被定义为行人在行走的状态下所需要的空间范围，它主要包括避让与反应区、感应区、视觉区、布置两脚区、步幅区等。根据学者专家之前大量的调查研究表明，由于性别的不同，男女步幅也不相同，所以在行走的过程中，当旅客间的距离为  $2.1\text{ m}$  时，其会感觉到舒适感，此时所构成的动态空间能够防止行人前后的旅客发生踩踏、拥挤等安全事故。

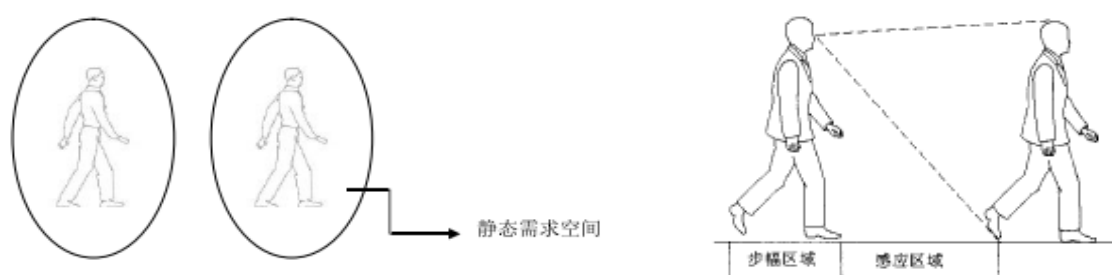


图 2.1 旅客静态和动态空间需求

## 2.3 旅客的行为特征分析

### (1) 行人交通有自动渠化现象

自动渠化是一种现象，在这种现象中，两组行进方向相反的人在移动时自动形成类似于“车道”，在每条“车道”中，行人都向同一方向移动。行人在场站内部行走

时，一般都是双向混合的，所以很容易出现自动渠化现象，这将减少不同行进方向人间的相互作用，从而提高行人在场站内的行走效率。我们国家的交通规则是向右行驶，所以通常在场站内形成的也是右侧行走的人流。

### （2） 群体同行情况

群体同行是指两个或两个以上的行人由于特殊的社会关系或相同的出行目的而结伴行走。在道路客运场站中，这种现象广泛存在，一般以 2-4 人居多。群体走行的特征与个体走形的特征存在一些不同。排斥他人和避免碰撞的特征只有在行人行走中才存在，而群体同行的要求则是必须同时处在一个较小的空间中保持结伴状态。群体同行与个体行走相比，行动往往较慢，步行速度较小。其在模拟仿真中既保持着组队状态下的吸引特性，也存在着避免相互碰撞的排斥特性。群体的平均步行速度随群体规模的增大而减小，所以当场站内处于高密度状态时，规模较大的旅行团体会极大的影响场站客流总体的集散速度。

### （3） 携带行李情况

道路客运场站的旅客一般行程较远，通常会携带有大型背包、手提箱、二轮拉杆箱等行李，这些行李体积、重量、个数都会影响行人行走时的空间需求和行走速度。但对于普通小箱包、塑料袋、腰包等小件行李走对行人行走影响较小。

### （4） 期望速度

期望速度也被称为自由流速度，它指的是以他们自己具体的出行目的，他们的身体素质等，同时不受其他行人等因素的干扰为前提，行人选择的最舒适的行走速度。当场站各设施行人密度较低时，旅行行走速度基本为期望速度。期望速度是旅客对于场站内部服务环境优劣的一个评估指标，同时也是仿真中的一个重要参数。

在对道路客运场站进行仿真的时候，行人的期望速度并不是简单地设置为一个定值，而是根据场站不同设施进行不同的设定，这也符合现实条件下大量行人的走行特性以及行人期望速度在时空上的随机变化规律。场站设施的环境、出行者的出行目的、出行时间弹性等都会对期望速度产生影响，所以一般情况下都是根据实地调研从而获得数据求取步行速度，其计算公式如式 2.1 所示：

$$V_{\text{期望}} = \frac{\Delta S}{T_2 - T_1} \quad (2.1)$$

其中， $V_{\text{期望}}$  ——行人的期望步行速度（m/s）；

$\Delta S$  ——调查区域内行人实际行走距离（m）；

$T_1, T_2$  ——行人离开/进入调查区域的实际时间（s）。

## 2.4 小结

本章主要分析了旅客集散行为的调查方法，对调查时段和研究区域进行了确定，同时对比了不同调查方法、不同数据采集和处理之间的差异。除此之外还对行人的交通特性和行为特性进行了宏观和微观两个层面的分析，为后续仿真过程中的行人参数设定提供了取值参考。

### 3 乘客集散仿真模型与仿真平台

近几十年来,行人作为道路客运场站系统的重要组成部分越来越受到大家的重视。行人运动是高度自我组织和智能化的体现,它的运动状态也与建筑环境和其他行人的影响密切相关。当前主要有三种常见的模拟模型:宏观模型、中模型和微观模型,其中宏观模型集中关注在行人总体集散和交通流参数均值,如平均速度与平均流量、平均密度之间的关系;中观模型关注的主要是小群体的疏散行为;微观模型主要研究的是行人的个体行为以及行人与其他行人之间的相互关系。下面将分别分析三个层面模型各自的原理和特点,比较选取适合道路客运场站行人的仿真模型。

#### 3.1 宏观模型

宏观模型重点是从全局的角度分析行人运动过程的交通特性,其一般是把行人流看作是气体或液体,从而不考虑行人流中个体的具体行为。宏观模型通常是基于流体力学(或气体力学)模型,采用连续流动的介质来模拟行人运动。这种方法可以很好的反映行人流的特征,但其没有注重行人个体相互之间的作用及行人的异质性,要反映行人的复杂运动和个体受力行为,是比较困难的,存在一定的局限性。

##### 3.1.1 气体动力学模型

Hoogendoorn 等人在 1992 年提出了气体动力学模型,其将交通工程理论中的相关车辆模型与行人研究相结合。其基本思路是当行人密度较低时,行人可以自由的行走,把流动的气体分子作为行人,将步行速度相近的行人分为一个组,当做群体进行研究,然后采用气体动力学的相关理论,建立行人运动的动态方程。

$$\begin{cases} \frac{\partial \langle \delta_\mu \rangle}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_{\mu,\alpha}} (\langle \delta_\mu \rangle \langle v_{\mu,\alpha} \rangle) + Q_\mu(1) + \sum_v \left[ \frac{m_\mu}{m_v} \langle \delta_v \rangle x_\mu^{v\mu}(1) - \langle \delta_\mu \rangle x_\mu^{v\mu}(1) \right] \\ \langle \delta_\mu \rangle = m_\mu \langle \rho_\mu \rangle \end{cases} \quad (3.1)$$

其中,  $\mu$ ——表示行人的类别;  $t$ ——为时间;

$m_\mu$ ——表示行人  $\mu$  的质量;

$\langle \rho_\mu \rangle$ ——表示行人  $\mu$  所在的空间密度;

$\langle V_\mu \rangle$ ——表示行人  $\mu$  的平均速度;

$x_\mu$ ——表示行人  $\mu$  的位置;

$Q_\mu(1)$ ——表示由行人  $\mu$  进出系统而添加的补偿额。

### 3.1.2 流体动力学模型

流体力学模型是 Henderson 最早提出来的行人仿真模型。当旅客密度较高的时候，行人的运动受到周围行人的影响，行人速度的方差较小，此时可将行人描述为具有流体性质的流动体。通过流体力学模型可以描述随着时间的变化，速度与密度之间的关系作用。

$$\begin{cases} m\bar{\sigma}l\bar{v} = \cos \tan t \\ l(\frac{1}{2}m\bar{\sigma}v^2 + \frac{1}{2}m\bar{\sigma}\bar{v}v) = \cos \tan t \\ E + m\bar{\sigma}v^2 + \frac{1}{2}m\bar{\sigma}\bar{v}^2 = \cos \tan t \end{cases} \quad (3.2)$$

其中， $m$ ——表示行人的质量；

$\bar{\sigma}$ ——表示粒子密度；

$l$ ——表示通道宽度；

$E$ ——表示势能。

行人的速度 可以按照下式计算：

$$v = \bar{v} + v' \quad (3.3)$$

式中， $v$ 为行人速度； $\bar{v}$ 为平均速度； $v'$ 为随机扰动速度。

## 3.2 中观模型

中观模型是介于微观与宏观之间的行人仿真模型，它同时具有宏观和微观模型的特征，其中经典模型是格子气模型和排队网络模型。

### 3.2.1 格子气模型

格子气模型的基本方法是将模拟空间分成不同的网格或三角形，在模拟中行人被认为是一个粒子。行人位于网格和网格之间的交点上，并且可以在三个方向上移动：前面、后面和右边。在模拟的过程中首先要规定一个随机偏向强度  $D$ ， $D$  的大小决定了一个行人移动到周围网格的概率，行人的下一个运动方向是根据三个方向的概率值的大小来确定的。例如方形的大厅和一个宽度为  $W$  的出口。在这种场景中人的运动规律一般是从各个角落涌入出口。因此在这种情况下人们会有一个主方向，即无论从任何位置均朝向出口，并且不会后退，此时其目标点的行人一共有 8 种可能性，如图 3.1 所示。



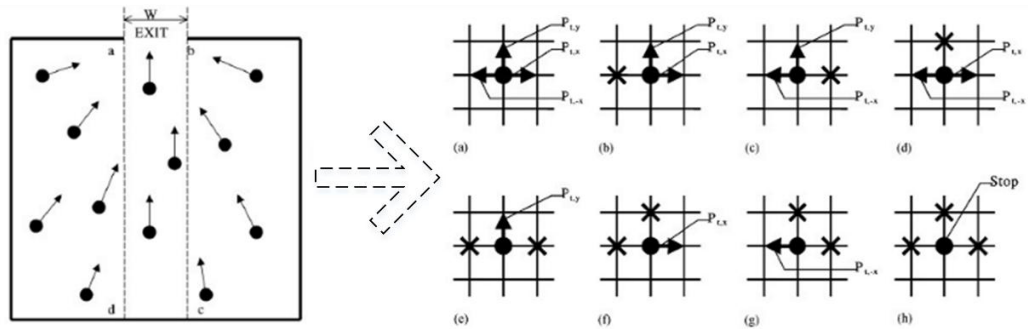


图 3.1 8 种可能的情况

### 3.2.2 排队网络模型

排队网络模型是由 Lovas.GG 等人提出的,其旨在研究行人运动在紧急情况下拥堵行为的。这种模型可以反映出在火灾等情况下行人求生逃逸的行为情况,模型中采用“节点”和衔接节点的“边”组成的网络  $G(V,E)$  来表示行人所处的环境,如图 3.2 所示。

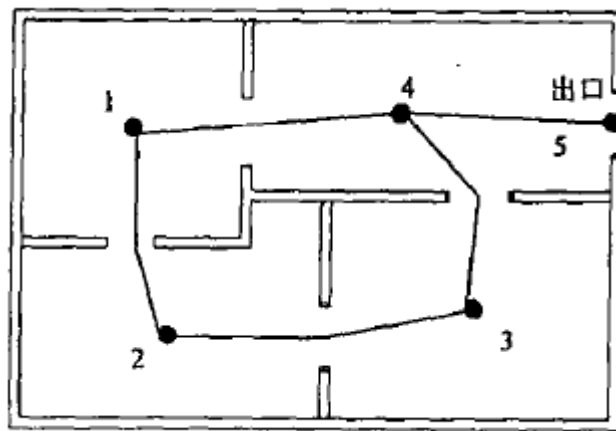


图 3.2 排队网络模型

每个节点代表一个目的地  $d(i)$ , 用于模拟一个区域内的行人所在的范围, 而“边”  $d(i, j)$  被表示为某两个相对独立的区域之间的线路, 每一条边都根据相邻区域之间的门的宽度来加权  $w(i, j)$ 。行人从起点 1 移动到终点 5 的过程可以被认为是行人“选择临时节点——接受节点中的服务——离开这个节点并选择下一个节点”的过程。

行人的路径选择取决于节点之间是否连通、节点的能力以及节点间的距离三个方面的因素, 这些因素总称为系统状态, 则用  $r_k(i, j, X)$  表示在系统状态为  $X$  的情况下第  $k$

个行人从  $i$  节点出发, 选择下一个节点为  $j$  的概率, 这一概率决定了行人的路径选择, 并且在节点中接收服务的过程是一个标准的 G/M/1 的排队系统。

### 3.3 微观模型

微观模型的特点主要在于其是以一个行人的角度来建模, 该模型将行人认为是一个个有独立行为能力和某些智能特征的个体, 能够反映复杂的行人运动。微观模型关注行人个体的运动过程, 能够以一种相当真实的方式再现行人的运动, 同时考虑到能见度、速度、方向、规避等因素。微观模型分为两大类: 离散型模型和连续型模型, 下面主要介绍应用范围最为广泛的社会力模型、元胞自动机模型和智能体模型三种经典模型。

#### 3.3.1 元胞自动机模型

元胞自动机模型是一种离散的动力系统, 由一个均匀一致的网格中的有限状态的元胞组成, 它是人工智能领域的模拟算法, 随后应用于交通流模拟。基本原理是将现实中的道路模拟为网格, 行人模拟为在网格上移动的元胞, 通过将行人的移动过程与车辆的移动过程进行比较, 将其分为两个过程: 改变路线和改变速度。行人根据周围网络状态的组合, 在离散时间内建立行人运动的规则, 从而完成整个模拟过程。每个网格最多只能被一个人占据或为空。

该模型基于这样一种假设, 即每个人都有最大的运行需求速度  $v_{\max}(p_i)$ , 在每段时间内, 它经历了四个阶段: 1) 换道判断; 2) 换道处理; 3) 速度评估; 4) 行人移动。根据这四个步骤, 行人根据规则来决策自己的行为, 同时模型规定了行人行为的移动规则只有“换道”和“前进”两种, 即: 在行人决策自己的行为之前, 首先判断是否需要换道; 其次评价行人的运动速度。一个行人的移动速度不仅取决于其最大行进需求速度  $v_{\max}(p_i)$  还取决于前方未被占用的网格数  $g_f(p_i)$ , 因此, 取二者长度最小值

$$\min\{v_{\max}(p_i), g_f(p_i)\}。$$

如图 3.3 所示, 对于行人 P, 其换道规则如下:

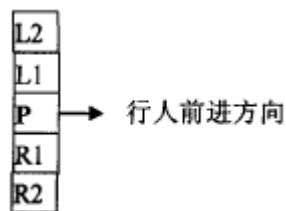


图 3.3 元胞自动机中的行人换道规则

规则 1: L1 和 R1 同时被占用, 则行人只能保持在原“道”;

规则 2: 行人不得在下列条件下改变路线: L1 已越过边境; L1 已被占用; L1 未被占用但 L2 被占用。同样的规则适用于 R1, R2;

规则 3: 行人从现道路切换到有更多步行空间的道路;

规则 4: 随机选择行走空间相同的可选“道”, 分别指定: 在 L1、P 和 R1 之间选择时, 随机概率比为 1:8:1; 当在 L1 和 R1 之间选择时, 随机概率比为 1:1; 当在 L1 和 P 之间或 R1 和 P 之间选择时, 随机概率比是 1:1。

移动规则:  $\min\{v_{\max}(p_i), g_f(p_i)\}$ 。

模型的合理性是通过效验速度-流量-密度的相互关系来证明的, 当多方向流量相互交织时, 则在一定概率下的位置交换原则被采用, 以避免行人之间的冲突。

### 3.3.2 社会力模型

社会力模型最早由德国交通流专家 Helbing 等提出, 这是一个典型的力学模型用于描述行人的运动, 其可以成功复现行人的自组织现象, 主要包括行人交通中的拱形阻塞、渠化、从众、快即是慢、分层等。它是目前最常用的行人流模型, 许多模拟软件使用社会力量模型来模拟行人的运动, 如 Massmotion 和 Anylogic。

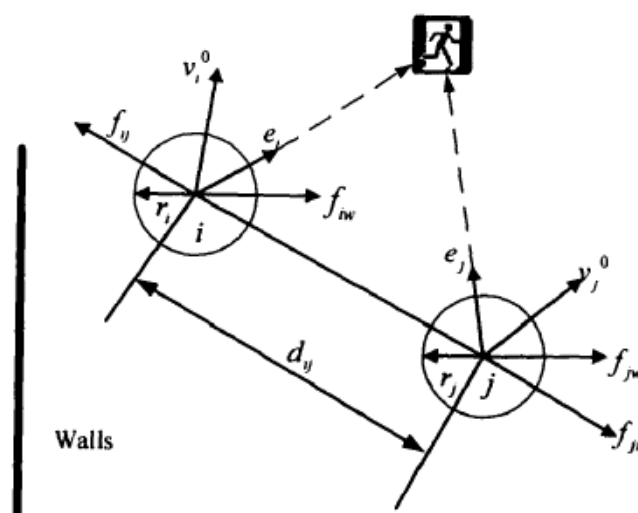


图 3.4 社会力模型

社会力量模型认为, 行人的行走不受外部力量的影响, 而是由自身的驱动力影响, 这种力量称为社会力, 社会力主要由三类组成:

(1) 一个行人的力量必须向前移动,以达到和保持所需的期望速度。如果行人 $\alpha$ 路径 $\bar{r}_\alpha^1, \bar{r}_\alpha^2 \cdots \bar{r}_\alpha^k \cdots \bar{r}_\alpha^n$ 最终到达目的地 $\bar{r}_\alpha^0$ ,在 $t$ 和 $t+1$ 时刻分别在位置 $\bar{r}_\alpha(t)$ 和 $\bar{r}_\alpha(t+1)$ ,则行人在 $t$ 时刻的行走方向可以表示为:

$$\bar{e}_\alpha(t) = \frac{\bar{r}_\alpha(t+1) - \bar{r}_\alpha(t)}{\|\bar{r}_\alpha(t+1) - \bar{r}_\alpha(t)\|} \quad (3.4)$$

在未受到任何干扰的情况下,行人的期望速度为 $\omega_0$ ,假设实际速度为 $\bar{v}_\alpha$ ,则由实际速度加速到期望速度的过程可表示为:

$$\bar{F}_\alpha(\bar{v}_\alpha, \omega_\alpha \bar{e}_\alpha) = \frac{1}{\tau} (\omega_\alpha \bar{e}_\alpha - \bar{v}_\alpha) \quad (3.5)$$

(2) 与障碍物或其他行人保持一定距离的力。行人 $\alpha$ 对于行人 $\beta$ 保持一定距离类似 $\alpha$ 处于 $\beta$ 形成的斥力场中,在场强的作用下,斥力与行人之间的距离 $\bar{r}_{\alpha\beta}$ 成反比,计算如下:

$$\bar{f}_{\alpha\beta}(\bar{r}_{\alpha\beta}) = -\nabla_{\bar{r}_{\alpha\beta}} V_{\alpha\beta} [b(\bar{r}_{\alpha\beta})] \quad (3.6)$$

其中: $b$ 表示在行人模型为椭圆体的情况下的短轴距离, $V_{\alpha\beta}$ 表示场强,是以 $b$ 为自变量的单调递减函数。类似地,可以计算行人与障碍物 $B$ 之间的斥力:

$$\bar{f}_{\alpha\beta}(\bar{r}_{\alpha\beta}) = -\nabla_{\bar{r}_{\alpha\beta}} U_{\alpha\beta} [\|\bar{r}_{\alpha\beta}\|] \quad (3.7)$$

(3) 行人对外界环境的好奇心造成的吸引力,如行人碰见朋友、报摊等产生的吸引力。这种吸引力与持续时间成反比,计算如下:

$$\bar{f}_{ai}(\|\bar{r}_{ai}\|, t) = -\nabla_{\bar{r}_{ai}} W_{ai}(\|\bar{r}_{ai}\|, t) \quad (3.8)$$

模型中的社会力只适用于向前移动的行人或障碍物,而不是向前移动的人,则需要乘以一个系数 $c(0 < c < 1)$ 。

根据上述三个力的总和,得到社会力的模型:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{F}_\alpha(t) + \Delta \quad (3.9)$$

其中, $\bar{V}$ 表示实际移动速度, $\Delta$ 表示波动系数, $\bar{F}_\alpha(t)$ 为行人所受的社会力,计算如下:

$$\bar{F}_\alpha(t) = \bar{F}_\alpha(\bar{V}_\alpha, \omega_\alpha \bar{e}_\alpha) + \sum_{\beta} \bar{f}_{\alpha\beta}(\bar{r}_{\alpha\beta}) + \sum_B \bar{f}_{\alpha\beta}(\bar{r}_{\alpha\beta}) + \sum_i \bar{f}_{ai}(\bar{r}_{ai}, t) \quad (3.10)$$

社会力模型能够模拟行人行为的实际情况,包括自组织现象(人们不喜欢绕圈或者行走至对面,即使这条道路很笔直但非常拥挤的时候也不例外,人们喜欢以舒适的步

行速度和人们保持一定距离或同障碍的边界保持一定的距离)。此外，还能模拟紧急情况下的行人疏散，这可以被认为是对行人流的较现实的模拟。

### 3.3.3 智能体模型

基于智能体的模型（Agent Based Model, ABM）是一种微观模拟仿真工具，它在虚拟环境中复现一系列自主智能体的交互行为以及它们所处的环境。这个工具相信任何系统都是由一系列实体组成的，即智能体，它们可以相互作用，存在一个环境支持它们生存。智能体的概念是 ABM 最关键的部分，一个智能体是一个独立的实体，有精确的限制和具体的目标，能够呈现自主的行为，有感知和通信的能力。智能体可能对周围环境拥有一些不完整的信息，并希望有能力影响其他智能体。交互的含义为智能体与其他智能体交流的能力，并从周围环境中收集信息，环境是指为智能体的生存和动态交互提供物理支持。系统的整体表现和性能是智能体的行为和动态交互的结果，而智能体的行为和动态交互则是智能体追求自己的目标或对外界刺激做出反应的结果。因此，ABM 遵循一种自下而上的方法来理解现实的世界系统。

在行人交通中，行人表示为智能体，给智能体提供了个体行为的某些原则，每个网格只能被单个智能体占据，如图 3.5 所示。ABM 是自下而上构建社会结构的计算模型，根据行人虚拟模型规则来控制他们之间的相互作用从而来建立一个紧急组。智能体模型主要研究紧急情况和不协调造成的中断，在正常情况下智能体模型的模拟成本比元胞自动机模型、引力模型等要高，同时也会耗费更多的资源。

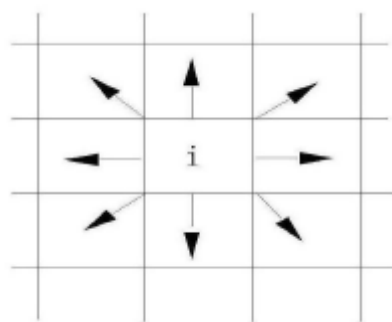


图 3.5 基于智能体模型构型图

通过对行人流模型的分析，考虑了各类模型的特点及适用性，如宏观模型和中观模型模拟行人行为比较粗糙，不考虑个体之间的关系，并结合要模拟的道路客运场站内行人行为，因此本文选用微观仿真模型来对道路客运场站内的行人进行模拟。各模型优劣势比较见表 3.1 所示。

表 3.1 各模型方法优劣势比较

模型名称	优势	劣势
气体动力学模型	能较为真实的反映行人堵塞、排队成行	不区分个体之间的差异，且结论
流体动力学模型	及密度波的传播等行人流现象	缺乏经验数据支持
格子气模型	较宏观模型更精细，考虑个人行为个体更精确	只考虑单个行人个体，而忽略了他们之间的作用力
排队网络模型	将行人所处的环境用“节点”和“边”抽象表示，将复杂情况精简	无法体现碰撞及行人之间的相互协作问题；“先进先出”排队策略未必适合于行人系统
社会力模型	明确行人交通行为的产生源于自身的主观行为，能够解释行人交通行为本质；以行人模型为椭圆体作为行人间避让的方法较基于网络模型精确；	无法解决碰撞问题；
元胞自动机模型	计算速度快、效率高；能够在不同密度条件下反映正常、拥堵、高峰的行人流；	模型中行人不能后退和绕道，与实际交通现象不切合
智能体模型	符合实际行人交通行为，一般不单独存在，易于其他模型进行相互结合	模型较为复杂，对计算机要求较高；成本高，消耗资源高

通过调查分析得到道路客运场站内旅客数量比较多、行为迥异，通过上述分析的微观仿真模型中，只有社会力模型能模拟如此复杂的行人行为，也能把真实的情况清楚地表达出来，因此本文选取的行人流模型为社会力模型。

### 3.4 主流微观仿真平台的分析对比

目前，市面上有许多的行人流仿真软件，比较常用仿真软件主要是 Legion、STEPS、SimWalk、Anylogic、VISSIM、PSD、Massmotion 等，本文将根据各仿真软件建模原理的差异，结合所需模拟仿真场所的特点，选取最合适的软件进行分析比较。

#### 3.4.1 基于元胞建模原理的软件

基于元胞自动机原理建模的主流仿真软件主要有 Legion 和 STEPS。作为一种更成熟、更广泛使用的仿真软件，Legion 软件能够模拟行人步行运动，同时考虑到行人间和行人与环境间的相互作用。它允许把 Excel 中的客流量 OD 数据导入输入端，并在数据输出端对服务水平进行统计计算和自定义输出，目前主要用于公共场合（如车站、奥运会场馆等）行人紧急疏散评价。

STEPS 仿真系统最开始的时候只是用于对紧急状态下行人在封闭空间的疏散情况进行评价，在许多专家学者的改进之后，后来被用来评估不同状态下的旅客的行为。该仿真系统驱动人群运动的机制是每个人都想用自由步行速度走向下一个目标，花费

尽可能短的时间，同时不与其他行人和障碍发生碰撞。它主要由两个部分组成：行人的空间运动模块和行人的特征属性模块，空间运动模块主要是采用 CA 的思想把空间划分为行人运动的均匀网络，元胞大小表示其可以使用的空间大小；行人特征属性模块可以看做多个智能体建模的集合，其中系统中的行人为能有自主性学习的智能体。

### 3.4.2 基于社会力模型的仿真软件

基于社会力建模思路的仿真软件较多，其代表性软件有 SimWalk、Anylogic、VISSIM 和 Massmotion。SimWalk 软件主要采用基于行人（Agent-based）的技术，每个人都代表有一个特定目的地、行走速度同时避免拥挤，而主要算法是基于社会力模型的势场算法。它的优势主要在于研究机场的客流特征、火车站乘客的行为以及体育场的疏散时间等，主要输出行人流量、密度、空间利用率等参数。

Anylogic 是集系统动力学、离散过程建模以及智能体方法于一身的仿真工具。行人仿真主要依靠其行人库实现，核心算法是社会力模型。用户可以根据创建车站、出入口、通道等人行设施，或用流程图来描述旅客在集散过程中的行为步骤，最终通过行人数目、平均密度、停留时间等统计数据 and 动画方式进行输出结果。

VISSIM 是一种基于时间间隔和驾驶行为的微观模拟建模工具，主要用于评估城市公共交通的运行状态，软件在最新版本中开发了基于社会力模型的行人运动模块—VISWALK。

MassMotion 是一种先进的行人模拟软件和人群分析软件，它采用的是对象自主化系统，用于预测人们与建筑环境的交互情况，并提供有关设施中的拥挤情况、利用率情况和乘员安全的明确信息。其所有集散都是基于连续的三维模型空间实现的，在通过大型、复杂、多层的环境时，每个个体均可选择属于自己的独特路径—自动动态的路径选择，现主要用于铁轨和站台规划、机场航站楼设计与规划、火灾和疏散规划等。

### 3.4.3 其他仿真软件

除了主流的仿真软件之外，还有一些例如 NOMAD、PAXPORT 等特殊应用的仿真软件。NOMAD 仿真系统包括活动调度和旅客行为两部分，活动调度用于活动区域的选取，旅客行为用于运动路径的决策，其主要适用于交通枢纽内部的行人设施的评价。PAXPORT 本质上是宏观层次的仿真系统，其核心是计量行人整体的流量、速度和密度。常用仿真软件的功能对比如下表 4.1 所示。

表 3.2 不同仿真软件差异比较

仿真软件	建模方法	仿真输出结果	二次开发	能否实现人、车混合仿真
Legion	元胞自动机，行人被模拟为实体	图形、数据、图表；人流密度、步行时间、排队长度、空间利用率等数据文件有行人流量、人群密度、所使用的出口、空间利用率等；交互式三维和二维可视化图形，动画和图片	否	可与 Aimsum 衔接
STEPS			否	/
SimWalk	基于社会力模型的势场模型，基于主体的技术	4 种显示模式，截图和动画、事件统计、个体统计、人群统计、出入口统计等	否	/
VISSIM		行人时间、排队长度等	可以	独立的模块与交通库一起
Anylogic	社会力模型，基于智能体技术	输出动画和行人数目、平均密度、停留时间等数据及图表	可以	实现人、车混合仿真
Massmotion		强大的统计和分析功能，能提供图、表和云图等数据输出形式	可以	否

目前已经有很多仿真软件的行人模块都是以社会力模型为基础的，其中技术比较先进，应用比较熟练的社会力模型仿真软件要属 vssim、AnyLogic 和 Massmotion 这三款交通仿真软件。考虑到这三款仿真软件模拟的效果、输出类型，以及输入数据以行车时间表格为主等，Massmotion 仿真软件更契合本文。此外，Massmotion 仿真软件采用三维模型进行建模，使仿真模拟更接近于现实。因此，本文选用 Massmotion 9.0 研究道路客运场站旅客集散行为的微观仿真。

### 3.5 小结

本章首先根据行人间、行人-环境设施间相互作用程度，从宏观、中观和微观三个层面分析了行人流模型基本原理及特点。其次针对三方面模型选取了流体动力学模型、气体动力学模型、格子气模型、排队网络模型、社会力模型、元胞自动机模型和智能体模型等代表性模型进行了介绍，通过优劣势比较，确定了本文微观仿真层次的基础。接着对比分析了基于不同建模原理下的微观仿真软件的优缺点及适用性，最终选择了基于社会力模型为研究基础的 Massmotion 仿真软件。



## 4 道路客运场站微观仿真设计与实现

### 4.1 仿真软件概述及建模方法

#### 4.1.1 Massmotion 软件介绍

MassMotion 仿真软件是一个对象自主化系统，用于预测人们与周围建筑环境的交互情况。它内部所有计算都是基于连续的三维模型空间实现的，可以集成在 BIM 中，且在通过大型、复杂、多层次的环境时，每个个体可选择属于自己的独特路径—自动动态的路径选择。它凭借非常强大的设计和交流工具，应用于轨道和站台规划、机场航站楼设计和规划、火灾和疏散规划、区域仿真等领域，同时生成的演示 3D 视频和图片经常使人对于项目有着更直观的理解。

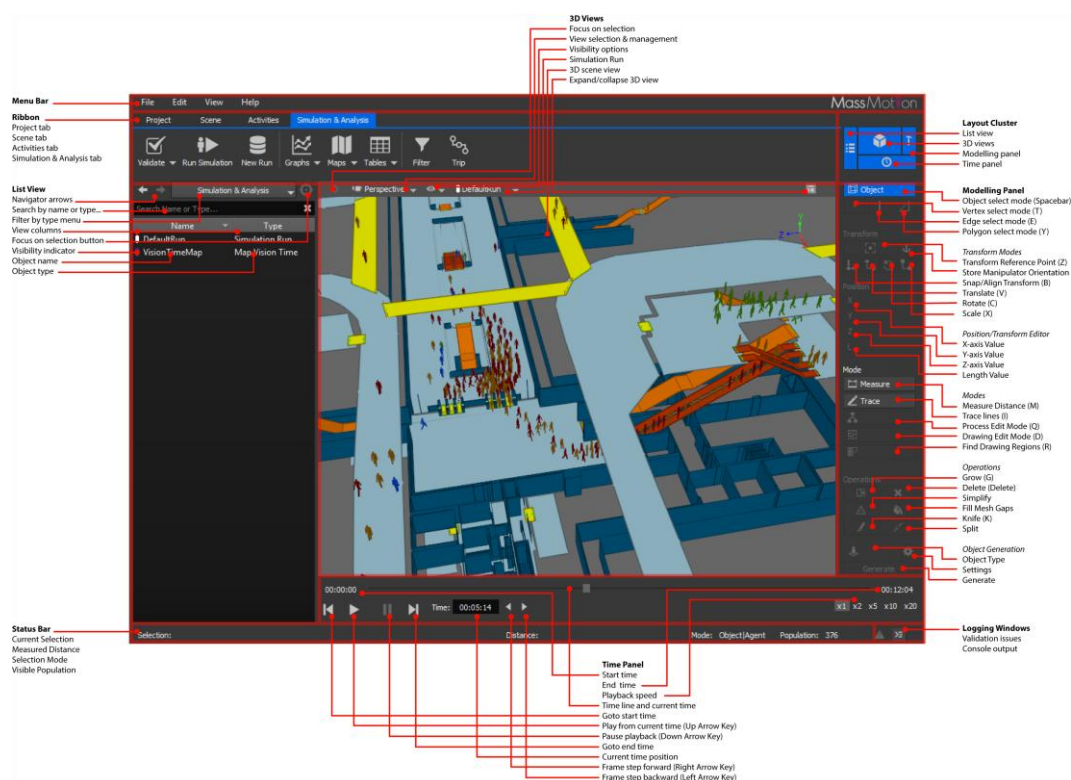


图 4.1 Massmotion9.0 主界面

Massmotion 仿真软件的仿真库是由商业应用发展而来的，首先用户可以将自己之前建好的 3D 模型或 CAD 图纸导入 Massmotion 中作为背景底图，然后用户根据底图功能区的布置要求将相应对象拖入到模型中生成想要的场景，比如（地板、楼梯、链路、

障碍物等），选择相应的对象双击可通过改变对象参数设置合适的属性。对于一些功能区（如售票区、安检区等）需要搭建流程链进行逻辑层面编辑，以满足用户所需要的服务功能。在场景和逻辑图层搭建好后，需要对仿真活动进行设定，主要是确定行人生成参数及活动目的。最后，Massmotion 软件在仿真结束后还可以进行数据采集、显示设施行人使用率等。不同窗口的主要功能及作用如表 4.1 所示。

表 4.1 Massmotion 主用户界面窗口功能描述

窗口类型	主要功能描述
主菜单	主要提供打开和保存项目、导入和导出的命令、更改窗口可见性等
功能区	主要提供管理项目和导入导出内容、创建场景和活动相关对象、运行模拟和创建分析对象等
布局集群	主要用于折叠和展开列表视图、场景视图、工具面板和时间面板
列表视图	主要用于控制显示的对象类型、颜色和状态信息
3D 场景视图	主要用于选择对象、保存和调用自定义视点、控制场景渲染方式等
工具面板	主要用于显示和控制当前对象选择模式、位置、平移、旋转和比例等
时间面板	主要用于控制一个或多个模拟运行的数据回放
状态栏	主要提供有关当前选择和代理填充的信息、显示控制台和问题窗口

#### 4.1.2 建模方法

Massmotion 的仿真库是一个模拟“真实”的环境中行人流的高级库。Massmotion 的仿真库包括场景（scene）和行为（activities）模块两个主要部分，一般在仿真后也使用分析（Analysis）模块采集相关数据并进行分析。

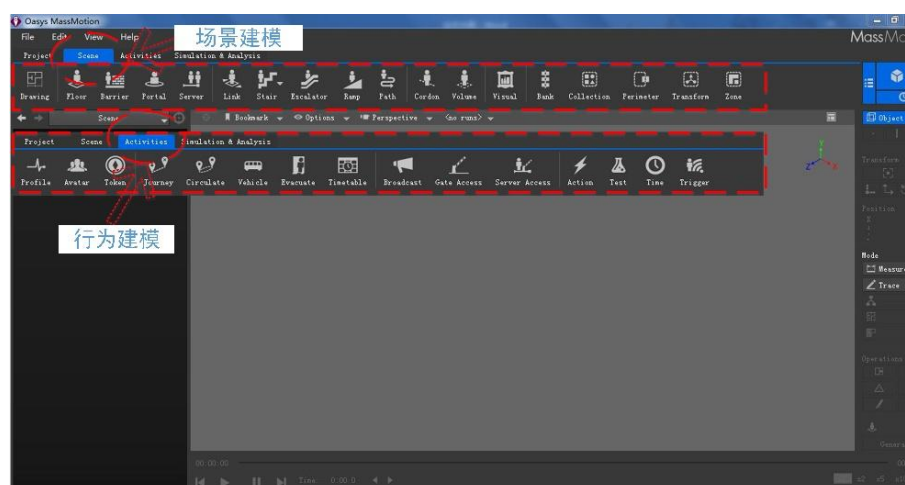











图 4.2 Massmotion 仿真界面视图

### (1) 场景建模的空间标记对象介绍

场景建模部分包括地板、障碍物、楼梯、斜坡、扶梯、服务等。可以根据导入的底图或 3D 模型将所需对象加入场景中,并根据用户需求对各对象的属性进行设定,从而尽可能满足用户的预期,主要对象及其功能如下表 4.2 所示。在建立场景模型的过程中,一般可以用“障碍物”描绘出墙壁、障碍物和忽略的工作区部分;对于售票口、安检口等功能区域,采用“服务”构建流程模型,从而形成流程链,同时设定服务时间、容量等影响参数;对于时间门、车辆到达(上下车)部分,可以采用“链接”或“斜坡”来模拟,并对它开闭时间、容量等必要参数进行设置,同时“链接”还可以用来设置旋转门;当构建两层及以上建筑时,可采用“链接”和“路线”组合模拟电梯,也可以直接采用“楼梯”、“扶梯”、“斜坡”来链接相互楼层;采用“门户”模块来设定行人的生成源、中途目的地和到达地。

表 4.2 场景建模主要模块功能介绍









对象图例	名称	主要功能描述	属性设定
	Floor	定义“可步行”区域范围	名称、大小、地图分辨率 限制密度、限制速度等
	Barrier	限定行人在仿真环境中不可通过的区域和设置矩形障碍物	/
	Portal	定义行人的产生、中间目的地和到达的位置	名称、位置、行人分配方式、 进入仿真的条件等
	Server	定义服务和队列,主要用于流程建模,是流程链的基本模块	服务数、服务时间、队列数、 启动服务要求、服务活动等
	Link		
	Stair	连接地板与地板,一般可以充当门或桥梁	名称、方向、大小、通过时间、通过 容量、开启/关闭时间等
	Escalator		
	Ramp	用于连接不同海拔高度的两层	名称、大小、启用做门、 容量限制、优先访问设置等
	Path	设定行人行走的路径、方向	名称、大小、位置、大小和 展示形式、容量限制等

### (2) 行人仿真的行为建模模块介绍

行动建模模块主要是根据用户所构建的场景和需求对行人的基本属性进行设置,行人的基本属性包括行人的步行速度、类型(有无行李、有无小孩、行李重量)等。

除此之外，通过用户的需求可以设置行人运动的行为，Massmotion 软件提供了“单向移动”、“循环移动”、“车辆事件”和“疏散事件”等一系列情景可供选择。“单向移动”是指行人从起始地经过一系列行为最终到达目的地的事件，该移动行人最终不回到起始地；“循环移动”是指行人从起始地经过预先设置的运动行为最终回到起始地的事件；“车辆事件”一般是用于模拟启动和到达具有规律性的车辆/飞机等场景；“疏散事件”一般用于模拟紧急情况下行人在封闭空间内进行出口的寻找和疏散的行为。除此之外，对于车站/航站楼等旅客，出行需要车票/机票等通行证件，否则限制通过，此部分可以采用 Massmotion 中的“标记”来进行模拟通行证。行人主要行为控件的功能和属性设定见下表 4.3 所示。

表 4.3 行人建模主要行为控件的功能及属性设定

控件图例	名称	主要功能	属性设定
	Profile	对行人的基本属性进行设定	行人类型、速度、大小、方向偏好、路径选择成本因素等
	Token	可用于表示某些行人或限制对象的访问	/
	Journey	创建单向移动人流	起始时间、人员总量、持续时间、起源地等
	Circulate	创建循环移动人流	
	Vehicle	创建用来模拟常规的抵达和起飞的“车辆”	车头时距、循环周期、上下车时间设置、车辆容量等
	Evacuate	创建用来模拟疏散的事件	提前等待时间、等待方式、撤退路线等
	Timetable	用于批量创建的行人及行人移动控制	导入时间表、基本路径、参考事件、行人计划等
	Action	设定行人的一系列活动	通过建立活动的逻辑关系（IF/Then/Else）来对行人增减标记/任务

#### 4.1.3 建模步骤

通过 Massmotion 9.0 的行人仿真的步骤主要包括：准备阶段、场景建模、行为建模和仿真分析四个阶段。具体流程图和演示图见下图 4.3 所示。

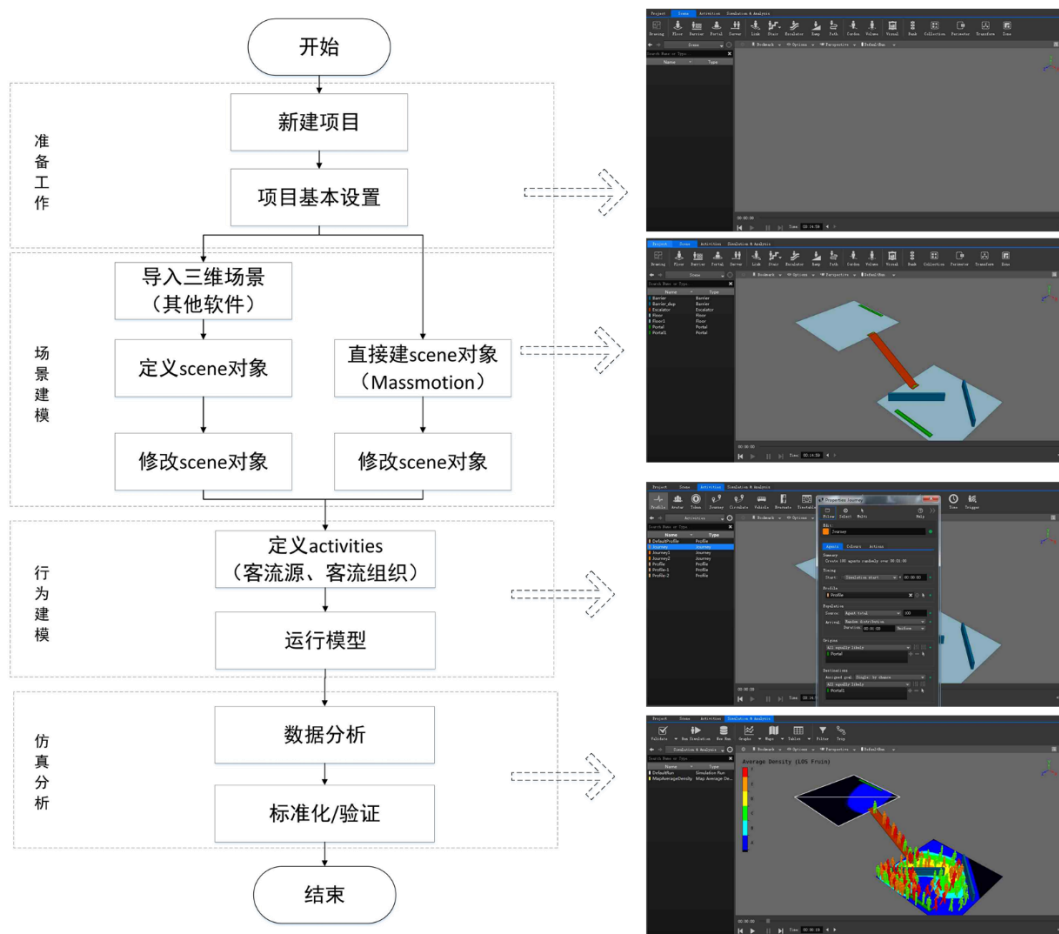


图 4.3 Massmotion 建模仿真流程及演示图

**Step1: 准备阶段。**打开 Massmotion 9.0 仿真软件，点击新建项目。在新项目中可以自己手动构建场景，也可以导入之前建立好的 3D（BIM）模型或者 AutoCAD 绘制好的图纸成为底图；

**Step2: 场景建模。**根据底图和用户需求，从场景模块中选择合适的对象拖至底图中，然后双击所选对象进入属性界面，对各对象的属性进行设定，以便达到所需要的场景；

**Step3: 行为建模。**在行为建模板块设置行人的基本参数（步速、类型、行走偏向等），然后根据所需要模拟的情景，构建行人行为事件，并对其各属性进行设置（起源地、容量、持续时间等）；

**Step4: 仿真分析。**仿真结束后，在模拟与分析模块选择需要采集的相关数据类型（人均密度、设施利用率等），然后在其属性窗口中选取需要采集的设施对象，最后对采集的对象进行数据输出或动画视频输出。

## 4.2 旅客集散行为仿真实现方法

道路客运场站的旅客行为众多，情况又极为复杂，所以在建模仿真的过程中要切实符合实际场站情况，就需要在软件中使用一定的假设或采用一些技巧来达到我们想要的仿真结果。本小节主要是对道路客运场站中旅客从达到至乘车离开过程中可能发生的复杂行为进行仿真模拟，为下一小节实例仿真奠定基调。下面主要是对行人在客运场内可能出现的携带行李、群体出行等行为进行仿真，以及场站内与旅客行为有关的购票区域、安检区域和车辆到达离开等设施环境进行模拟。

### 4.2.1 携带行李的行人行为模拟

在道路客运场站内有不少的行人因为旅途较远或出行时间较长而携带有行李，且行李的数目、大小和重量不一样，而这些都会影响行人在场站内的步行速度，因此在仿真研究时需要对其进行专门的研究。在只是考虑空间需求的情况下，只需在 **Prifile** 中设定行人的大小、速度、方向偏好和路径选择成本等。

**Step1:** 用 **Floor** 和 **Barrier** 构建场景地板和墙壁，绘制出四个行人通道；接着添加八个 **Portal** 对象作为行人发生源和目的地。

**Step2:** 在活动（**Activities**）建模模块根据行人的不同情况建立相应的 **Prifile** 对象，并对其对象进行属性设置。各情况行人参数设置如下表 4.4 所示。

表 4.4 不同情况行人的参数设置

行人情况	行人大小 (范围)	行人大小 (均值)	步行速度 (范围)	步行速度 (均值)
无行李携带（黄）	0.2-0.3	0.25	0.65-2.05	1.55
携带行李较小（红）	0.12-0.29	0.22	1.1-1.9	1.53
携带行李较中（绿）	0.24-0.36	0.3	0.65-2.05	1.53
携带行李较大（蓝）	0.35-0.44	0.39	0.9-1.8	1.32

注：方向偏好均为偏向靠右，路径选择成本均为水平距离成本权重

**Step3:** 运行模拟程序，分析模拟结果。

仿真结果如下图 4.4 所示，从图中开始看到，没带行李的旅客比携带行李的旅客步行速度更快且所需空间更小，携带行李越大步行速度越慢且所需空间越大。仿真结果基本符合实际情况。

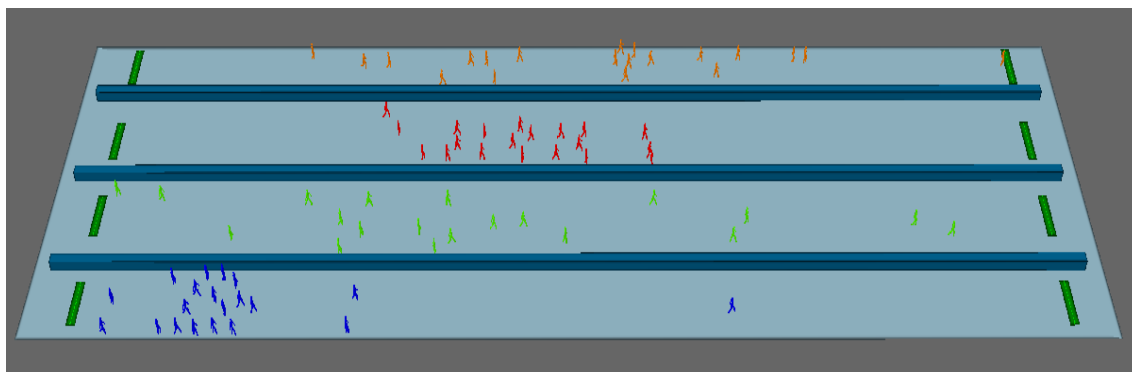


图 4.4 携带行李的行人仿真

#### 4.2.2 行人群体出行行为模拟

由于本文重点研究的是旅客在道路客运场站内的集散情况。在实际生活中，旅客并不全是独自前往客运站，有部分可能为组团旅客（2 人及以上）。组团旅客对客运站存在着不同的影响，主要表现为步行速度较慢与行人范围较大，且在安检区和售票区的服务时间也较一般旅客服务时间长。下面将对道路客运场站内的行人群体出行现象进行仿真模拟。

**Step1:** 用 Floor 和 Barrier 构建场景地板和墙壁，绘制出四个行人通道；接着添加八个 Portal 对象作为行人发生源和目的地。

**Step2:** 在活动（Activities）建模模块根据行人的不同情况建立相应的 Profile 对象，并对其对象进行属性设置。各情况行人参数设置如下表 4.5 所示。

表 4.5 不同情况行人的参数设置

行人情况	行人大小 (范围)	行人大小 (均值)	步行速度 (范围)	步行速度 (均值)
无团队状况（黄）	0.2-0.3	0.25	0.65-2.05	1.55
2 人团体（红）	0.35-0.44	0.39	1-1.9	1.37
3-5 人团体（绿）	0.45-0.6	0.55	0.8-1.5	1.24
5 人以上团体（蓝）	0.55-0.7	0.64	0.5-1.3	1.15

注：方向偏好均为偏向靠右，路径选择成本均为水平距离成本权重

**Step3:** 运行模拟程序，分析模拟结果。

仿真结果如下图 4.5 所示，从图中开始看到，群体人数越多，其行人大小就越大，其步行速度也就越慢，所需要的空间也越多。模拟仿真情景符合实际情况。



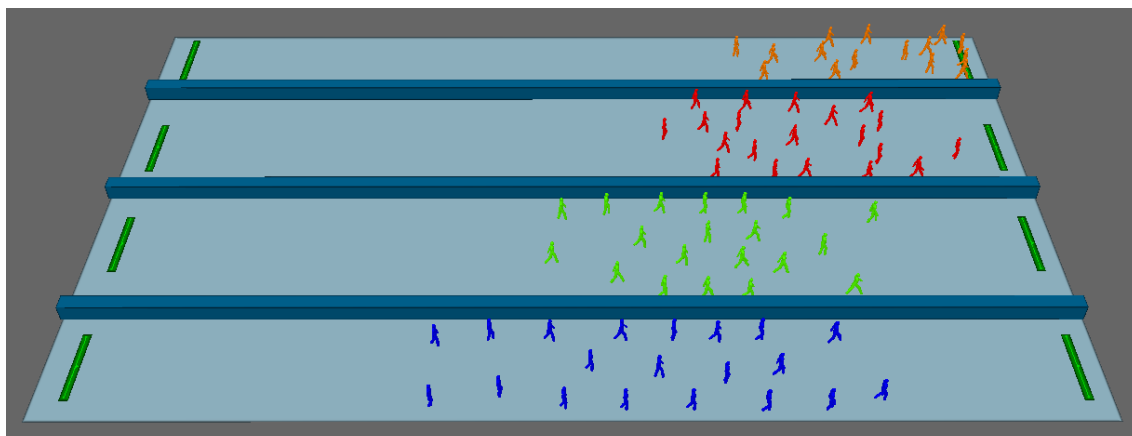


图 4.5 行人群体出行的行人仿真

#### 4.2.3 购票区域与安检区域模拟

行人在道路客运场站内的集散过程中，需要完成购票、检票等活动，因此需要对行人服务和等待的过程进行模拟。

**Step1:** 构建场景模块。本文采用 Floor 和 Barrier 构建场景地板、售票窗口、安检窗口和墙壁，绘制出安检区域和售票区域；接着添加五个 Server 对象，为下一步建立流程链做准备；最后添加两个 Portal 对象作为行人发生源和目的地。构建好的场景如下图所示。

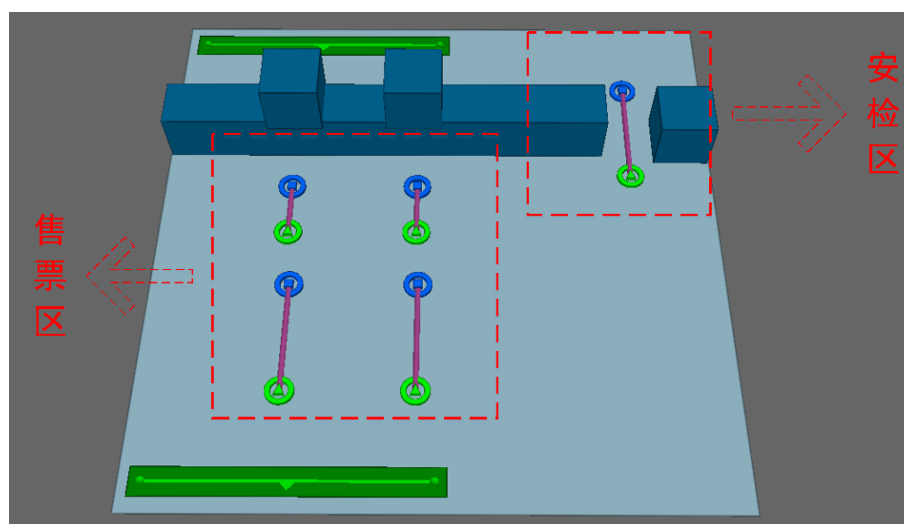


图 4.6 售票区和安检区场景模块搭建

**Step2:** 构建旅客服务流程链。在模型中添加三个“Token”命名为“车票”、“现金支付”和“网络支付”，添加 Token 的目的是为了以后便于在行人上进行标记，从



而更加有效有序的安排行人在场景中的移动。然后采用 Edit Process 将相关联的服务器进行链接，从而形成过程链，用于模拟售票区、排队等待区和安检区的行人移动的规则。具体仿真情况如图 4.7 所示。

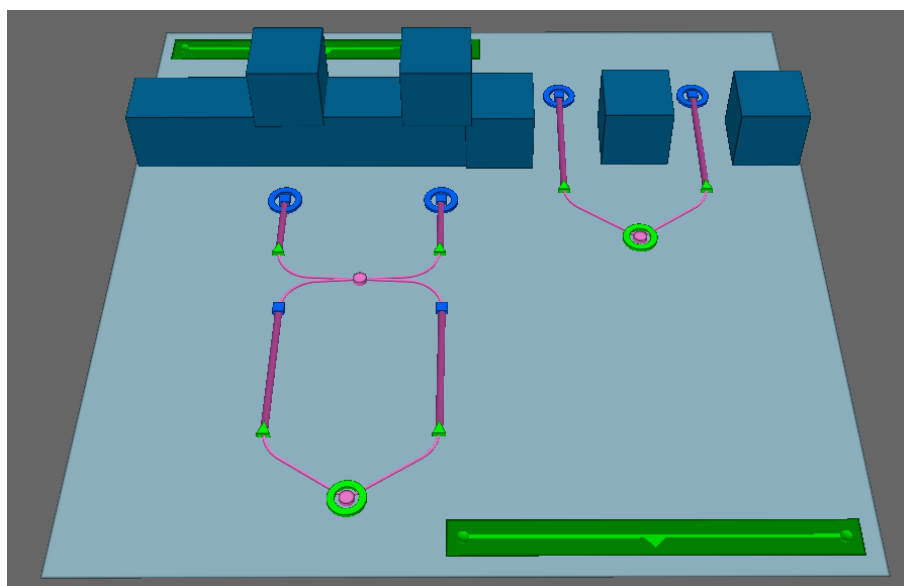


图 4.7 旅客服务流程链

**Step3:** 制定售票区服务规则。当旅客进入道路客运场站后，需要完成购票-安检-候车程序，所以对售票区域售票服务链进行属性编辑，要求进入售票阶段的行人需要携带“现金支付”或“网络支付”标记。

**Step4:** 行人运动流程制定。当旅客来到客运站时，部分旅客之前已在网络购票并取票，而其余旅客需要进行现场买票。旅客购票方式主要分为现金购票和网络支付两种，且以网络支付为主。旅客在客运站内主要需要经历进站—排队—购票—安检等服务流程，只有拥有车票才可进行检票候车。因此根据这一服务流程，通过对 Portal、Server 对象进行属性设置，构建行人运动流程制定。具体规则如下：

首先假定 10%的行人拥有“车票”标记，表明其在进入客运站前就已经网络购票取票，剩下 90%的行人无标记；同时设定 80%的行人拥有“网络支付”标记，20%的行人拥有“现金支付”标记，表明行人购票方式的选择期望。

接着对所有到达行人进行“车票”标记判断，如果拥有“车票”标记，则寻找“安检”服务流程链；如果未拥有“车票”标记，则寻找“排队”服务流程链。对于进入“排队”服务流程链的行人根据最小成本选择进入“购票”服务流程链的路径。当其完成“购票”服务流程链后，将会得到“安检”标记，并寻找“安检”服务流程链。

进入“安检”服务流程链的行人，通过安检后寻找目的地，结束仿真模拟。具体活动流程逻辑图见下图 4.8 所示。

确定完活动流程后，根据售票口、安检口服务时间对 Server 对象进行设置，确定等待时间和限制容量属性。最后根据所模拟的场景进行设置活动事件，完成仿真模拟。

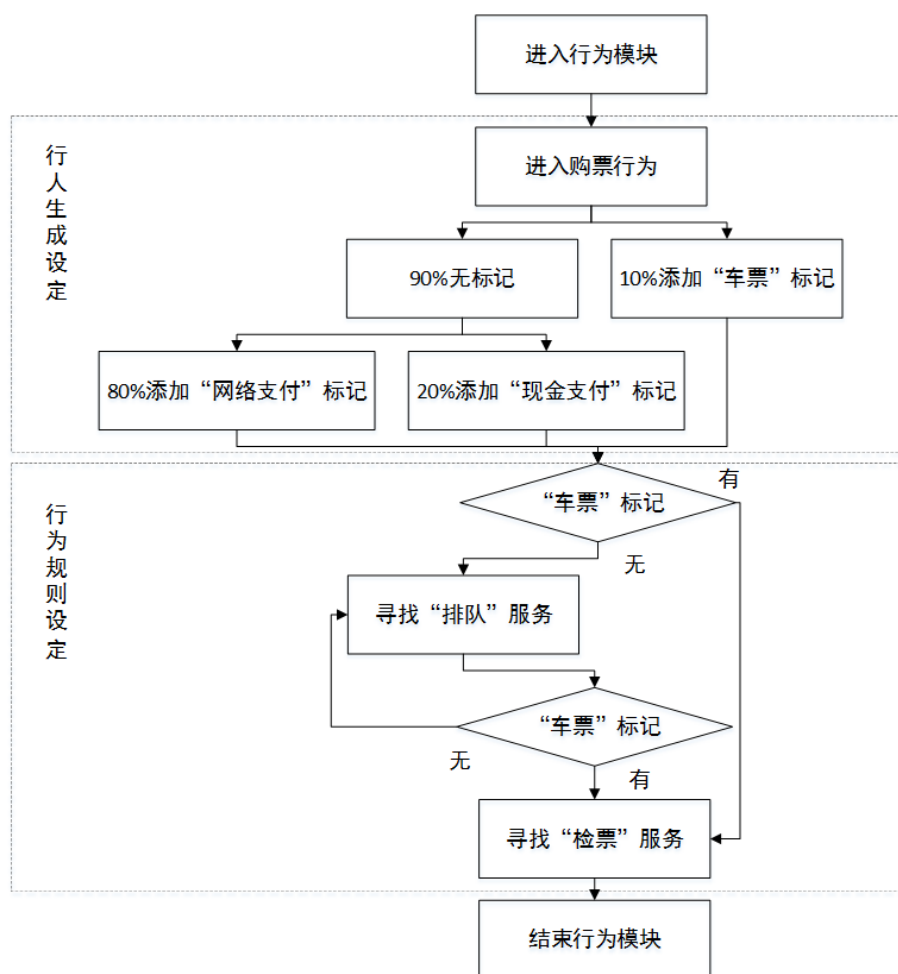


图 4.8 旅客行为模块逻辑图

#### 4.2.4 车辆到达及驶离模拟

旅客到达道路客运场站的主要目的是想通过搭乘客运车辆到达其目的地，因此旅客在客运场站内的疏散主要是依据车辆的发车班次及时间确定。在 Massmotion 软件中，可以采用车辆事件对行人在客运站内的到达和离开进行仿真模拟。

### Step1: 设置车辆基本参数

根据所需要仿真模拟的场景，在车辆行为（Vehicle）中对其属性进行设置。需要设置的基本参数包括车辆开始时间、车门开启时间、重复类型、车辆容量限制等。其中车门开启时间可以表示车辆在客运站内停留时长；车辆容量限制则可根据车辆额定座位数进行确定；重复类型主要根据所需要模拟仿真的环境不同而选取不同类型，分别为定期重复和时刻表重复两种。通常来说，一般道路客运站基本都是按照行车时刻表发车，故重复类型一般导入时刻表数据。

### Step2: 设置上车旅客参数

除了需要设定车辆基本参数外，不同枢纽场站旅客集散行为不同，如道路客运场站一般上下车站台分离，而轨道枢纽一般为上下车站台共用，所以根据模拟情况不同，对上/下车旅客参数也需要进行设定。由于本文主要为研究道路客运场站，故以上车旅客参数为例。

上车旅客参数主要包括检票时间和行人分布情况。通过大量调研，道路客运场站一般提前 5 分钟进行检票，故检票时间可设置为 00:05:00。行人分布主要分为均匀分布、正态分布、随机分布和时刻表分布，可根据不同客运站情况进行选择。

## 4.3 实例研究

本章将以研究中所确定的微观仿真模型为依据，通过 Massmotion9.0 仿真软件建立仿真系统，对黄山高铁综合客运站进行乘客集散仿真。通过仿真发现客运场存在问题并提出优化改进方案。

### 4.3.1 黄山高铁综合客运站概况

黄山高铁综合客运站是以汽车作为交通工具在客运过程中从事客运组织、车辆存放、车辆维修等服务活动的经营场所。其位于黄山市屯溪区梅林大道 50 号，紧靠黄山北站高铁站、公交车站、出租车乘车点等，是旅客产生“位移”的起点和终点。具体见图 4.9 所示。

#### （1）客运站功能定位

黄山高铁综合客运站在旅客运输的全过程中，始终起着组织、协调、安全、技术和监督运输市场的重要作用。交通运输部《汽车客运站级别划分与建设要求》（JT/T200-2004）规定，枢纽站的主要功能有：运输服务功能、运输组织功能、中转换乘功能、多式联运功能、通讯、信息功能以及辅助服务功能等六项基本功能。结合黄山高铁综合客运站旅客运输的实际，具有如下功能：

### ① 多式联运功能

本站是集多种道路运输方式于一体的综合枢纽，站场建设不但满足公交、铁路、客运、出租车的出行需求，还满足上述运输方式的多式联运功能：不但充分利用了各运输方式设备、资源，发挥其现代化管理的优势，还方便旅客中转、换乘，确保旅客安全、迅速完成中转、换乘，实现旅客的“零距离”换乘。



图 4.9 黄山高铁综合客运站地理位置

### ② 旅客运输服务与组织功能

旅客运输服务功能主要体现在：售票、候车、问询、小件寄存、广播通讯、检票、组织旅客上下车、安排运营车辆班次、制定发车时刻、提供车辆安检、维修等旅客运输服务活动。旅客运输组织功能主要包括：客流组织与管理，它是通过运输生产组织与管理，收集客流信息和客流变化规律的资料，根据旅客流量、流向等因素，合理安排客运线路，开辟新班线、班次；运力组织与管理，它是通过向社会提供客源、客流信息，吸纳和组织各种经济成份的营运车辆进站经营，运用市场机制协调客源与运力之间的匹配关系，使运力和运量保持相对平衡；运行组织与管理，主要是办理参营车辆到发手续，组织按班次时刻表准点发车，实现合理的车辆调度等。

### ③ 旅游集散功能

充分利用资源优势与信息共享，使高铁、出租车、公交车和旅游客运系统构成有效衔接，为旅客提供旅游快速集散服务。

### ④ 车辆调度与信息服务功能

黄山高铁综合客运站作为集多种道路运输方式于一体的综合枢纽，可以利用其先进的计算机设备，通过信息中心实现信息互通、资源共享，为旅客运输经营者提供迅速、及时、准确的信息服务。车站应利用站内的计算机设备和通信设备，对收集到的客流信息及时进行处理、汇总与分析，为企业或政府部门进行宏观决策提供基础数据。

### ⑤ 辅助服务功能

黄山高铁综合客运站除了能完成旅客运输等主营业务外，还应开展车辆维护、安检、司乘公寓服务、购物服务等业务，一方面保证旅客运输服务质量的需要，另一方面通过开展多种经营、综合服务业务，以便获取最大的车站效益。

### ⑥ 延伸服务功能

利用站前下沉广场设立黄山游客到访中心、旅行社超市、黄山旅游纪念品旗舰店、黄山非物质文化遗产展示区、旅游用品超市和汽车租赁服务。

## (2) 客运站平面布局

黄山高铁综合客运站位于黄山市屯溪区梅林大道 50 号，客运站共一层平面，三个旅客出入口。其中 1 号口与风雨长廊相连，可至黄山高铁北站、出租车乘车点、公交车乘车点等换乘运输场所；2 号口为站前广场，可通过梅林大道乘车前往市区；3 号口与 2 号口紧邻，主要为客运站下车乘客出站口。

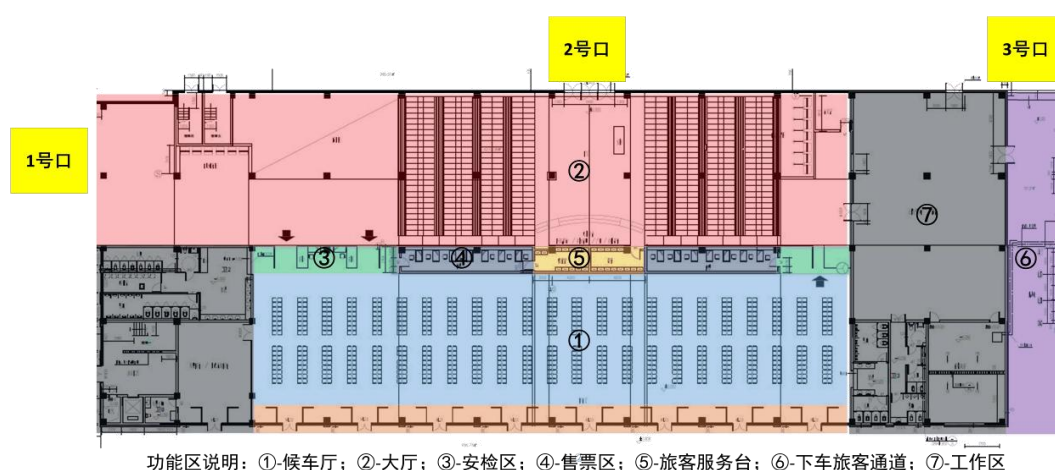


图 4.10 客运站平面布局图



客运站内规划有大厅、售票区、安检区、旅客服务台、候车厅、工作区、商业区等部分。其中，客运站前部的售票区规划有 8 个人工售票窗口，1 号门附近放置有 2 个网络取票窗口；安检区规划有 3 套安检设备，分别位于售票区两侧；3 号口附近设置有 ATM 机和商铺，满足旅客游购需求。客运站后部为候车厅、检票区和发车位部分。候车厅安置有 46 张 12 座座椅同时可以满足 600 人休息且两侧安装有充电设备供旅客充电；检票区共设置了 9 个检票口，1 号检票口为工作人员专用通道，其余为旅客检票窗口；同时客运站后部共设置了 12 个发车位以便车辆停靠。具体平面布局图见图 4.10 所示。

### （3）进站及出站流线

道路客运场站内乘客流线可以分为三类：进站流线、出站流线、换乘流线。本文中黄山高铁综合客运站仅供乘客上下车，而乘客在车站的集散过程就是乘客进出站的过程，因此，有必要对乘客的进出站流线进行分析。旅客流线见图 4.11 所示。

其中进站流线中乘客的具体任务流程为：乘客从 1 号或 2 号口进入客运站前部，首先在售票区或网络取票区购票取票，然后在安检区接收安检，到达客运站后部；接着在候车厅进行等待，在开车前 5 分钟来到相应车次的检票口检票上车。出站流线中旅客流程为：旅客在下车点下车，然后通过旅客出口通道到达 3 号口，接着来到站前广场搭乘其他交通工具离开客运站。

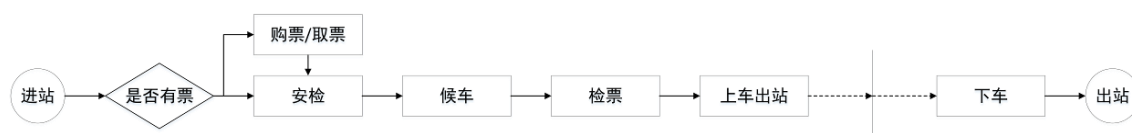


图 4.11 旅客流线图

### 4.3.2 数据调查

根据实地调查，黄山高铁综合客运站客流量平高峰明显，非节假日客流量较小，场站设施服务能力能够很好地满足旅客需求，故本文重点考虑节假日高峰时期客运站客流情况及场站设施服务状况，并对其发现的问题进行改进优化。

本文选取 2019 年 4 月 6 日 13:30-16:30 作为调查时间在黄山高铁综合客运站进行实地调查。首先，通过实地测量获得场站内部各部分的尺寸（如场站长宽度、售票区面积等）、设施设备的数目及布置方式，从而绘制场站的平面布局图。其次，通过数据采集的方法比较，最终选取录像采集方法对客流量、购票安检服务时长、行人步行速度等数据进行采集。

本次数据采集主要是对研究区域进行定点视频录像的方法进行，采集 30 分钟的视频，然后对数据进行处理，主要获取各入口的进出站流量以及行人在车站中的行走速度。根据数据采集的结果，用软件绘制出二号出入口不同类型旅客进站流量的箱线图如图 4.12 所示，其中 A-D 分别表示为无携带行李、携带小型行李、携带中型行李和携带大型行李；1-4 分别表示为单人出行、2 人团体出行、3-5 人团体出行以及 5 人以上团体出行。

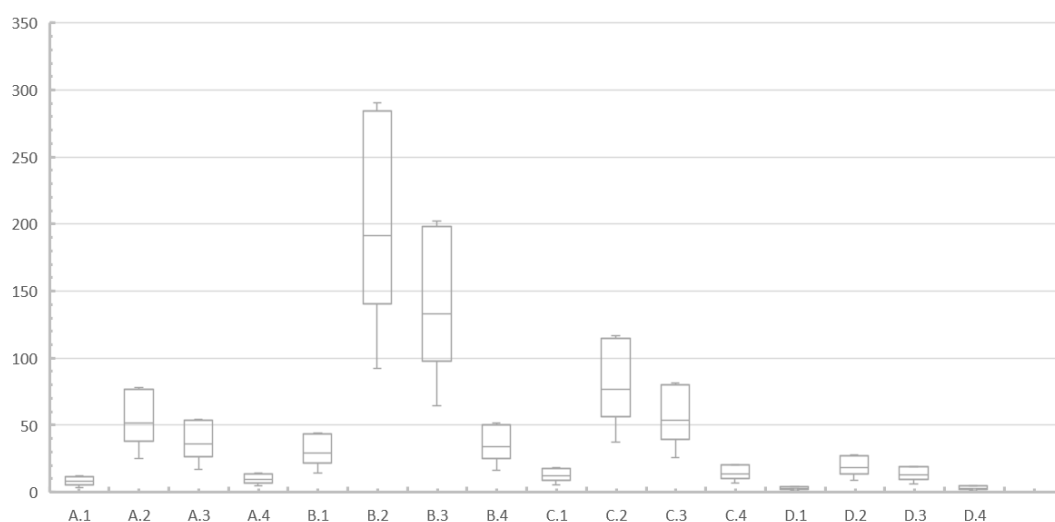


图 4.12 二号口不同类型乘客进站流量箱线图

不同箱线图表示的内容有所差别，以二号口进站“小行李-2 人”数据为例，其表示 30 分钟内，旅客进站的最小流量是 90 人，最大流量 290 人，有 25%的时间旅客进站流量在 141 人以下，有 25%的时间旅客进站流量在 285 以上，大部分时间旅客进站流量为 141-285 人之间，其中中位数出现在 191 人附近。箱线图中心的直线表明，进站旅客流量随时间的分布大致为正态分布，直线不在箱体中央，表明数据的离散程度较大，这也切合实际情况。

从图 4.12 中还可以看出，进站旅客类型主要为携带小、中型行李且大部分为 2-5 人的小团体，数据大致符合实际情况。由于黄山高铁综合客运站主要承担黄山市旅游班线（黄山、宏村、西递等），且大部分行人游玩行程安排为 1-2 日，主要携带小型行李。但由于黄山游玩大部分旅客会准备登山杖、帐篷等物资，故前往黄山南的旅客行李体积较大一些。随着网络的发展，大部分行人旅行会邀约好友、亲人一起，且年轻旅客会提前上网制定攻略，小部分行人会独自出游或报团游玩，故客运站内以 2-5

人小团体为主。根据视频的调查统计，不同类型的旅客在客运站内的行走速度并不完全相同。

### 4.3.3 场站仿真建模

实例中主要涉及黄山高铁综合客运站乘客集散过程仿真，可使用 Massmotion 软件对其进行建模，结合软件对客运站客流的仿真，分析场站关键区域的客流密度和重要设施的利用情况。Massmotion 仿真模块可以分为场景（scene）建模和行为（Activities）建模两个关键步骤，这两个步骤应单独建模，但同时又是相辅相成的，在建模的过程中，首先导入场站平面图进行场景搭建，并根据实际需要将场景对象进行属性设置；然后对行人流进行添加，根据实际客运情况，对行人流参数进行必要设置；接着再根据场站内旅客的实际行为特征，拖入相应的行为事件，并对行为事件的基本参数进行设置；最后运行建立好的仿真，并对仿真结果进行分析处理。

Massmotion 的行人仿真以社会力模型为基础，可自由调整行人大小、期望速度、行人行走偏好、路径选择成本等。根据交通调查所获得的基础数据的分析结论，作为模型的参数输入，可以对实际仿真建模提供更为准确的基础参数。

#### （1）场景建模

##### ① 场站搭建

首先将根据实地调查数据所绘制的黄山高铁综合客运站 CAD 平面图导入 Massmotion 软件中作为底图锁定，应用场景模块中的“Floor”和“Barrier”对大厅、售票区、安检区、候车区、检票区、发车位、下车通道等进行范围划定，确定客运站大体轮廓；接着添加 11 个“Server”对象，为下一步建立售票区和安检区的流程链做准备；最后添加 13 个 Portal 对象作为行人发生源和上车点。场景建模如图 4.13 所示。

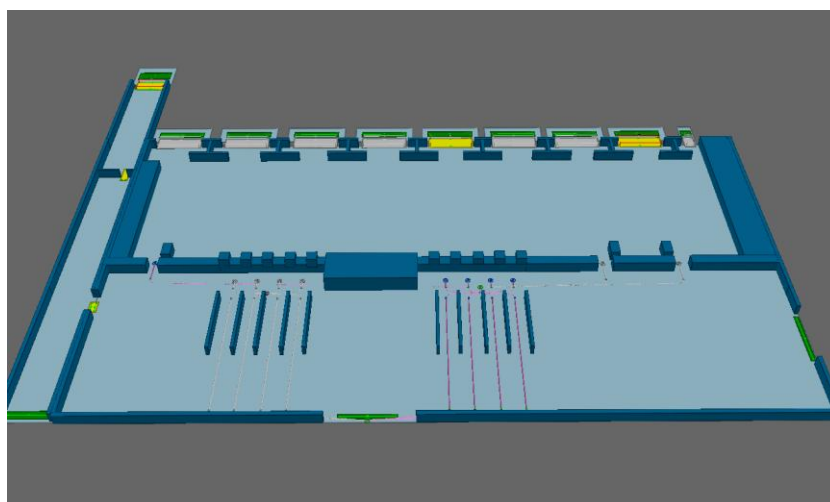


图 4.13 黄山高铁综合客运站场景建模



## ② 场站服务流程搭建

道路客运场站内，存在各类来源和目的的行人流，同一行人流内不同的行人又有不同的路径选择行为，对换乘行人进行行为模拟时，要进行分类考虑。其中乘客的进站过程可以描述为从不同出入口产生的乘客根据自身的实际情况选择直接安检或前往人口售票，随后进行安检。通过安检的行人进入站内候车厅，根据前往的目的地不同，在不同的检票口等待上车。出站的过程比进站过程简单很多，从下车点下车后，通过下车旅客通道出站或从侧面入口进入购物商店，随后从场站 2 号口出站。

添加“现金支付”、“网络支付”、“车票”等标记，按照图 4.8 的逻辑图绘制流程链从而形成安检售票服务功能。部分场景对象已经被仿真软件设置了默认参数，但是对于部分特殊对象，需要自主设置相关参数。

表 4.6 客运站场景建模参数设置

对象类型	对于场景元素	参数名称	赋值
Server	售票	容量限制	1
		服务时间	Uniform (00:00:15,00:00:35)
	安检	容量限制	1
		服务时间	Uniform (00:00:10,00:00:30)

服务流程搭建好后，需要对场站内的对象进行属性设置。正常情况下，对于每个对象的相关属性，Massmotion 仿真软件给客户提供了默认的参数值，但是由于仿真实际对象会有特殊性，根据黄山高铁综合客运站的实际情况，将重要参数设置如下表 4.7 所示。

表 4.7 场站服务设施参数设定

对象类型	对应环境元素	参数名称	赋值
Action	网络取票	概率	(0.1,0.9)
	购票方式	概率	(0.8,0.2)
	出站行为	概率	(0.73,0.27)

根据现场调查记录，黄山高铁综合客运站虽然设置有 8 个售票窗口，3 个安检口和 9 个检票口，但在客流平峰时期只开设 5、6 号两个售票窗口，1 号安检口和 2、5 号检票口，在客流高峰时期开设 5-8 号四个售票窗口，1 号安检口和 2、4、5 号三个检票口。因此在 Massmotion 仿真软件中，对于其余设施属性上设置为 Enable。

## (2) 行为建模

## ① 行人基本属性设定

在道路客运场站内，旅客对于行李携带和团队出行的情况各不相同，其步行速度和空间范围需求也有所不同。根据客运站实际情况的调查，在仿真模型中对行人的属性设置如下表 4.8 所示。

表 4.8 行人步行速度和行人范围设置表

对象类型	对应环境元素	参数名称	赋值
Profile	无携带行李单人	行人范围	0.12-0.23
		速度	0.65-2.05
	无携带行李 2 人组	行人范围	0.35-0.44
		速度	1.0-1.9
	无携带行李 3-5 人组	行人范围	0.45-0.6
		速度	0.8-1.5
	无携带行李 5 人以上组	行人范围	0.55-0.7
		速度	0.5-1.3
	携带小行李单人	行人范围	0.12-0.29
		速度	1.1-1.9
	携带小行李 2 人组	行人范围	0.37-0.52
		速度	0.8-1.7
	携带小行李 3-5 人组	行人范围	0.53-0.78
		速度	0.74-1.45
	携带小行李 5 人以上组	行人范围	0.60-0.75
		速度	0.42-1.27
	携带中行李单人	行人范围	0.23-0.42
		速度	0.92-1.75
	携带中行李 2 人组	行人范围	0.43-0.56
		速度	0.65-1.59
	携带中行李 3-5 人组	行人范围	0.57-0.73
		速度	0.63-1.42
	携带中行李 5 人以上组	行人范围	0.65-0.73
		速度	0.45-1.04
	携带大行李单人	行人范围	0.37-0.49
		速度	0.81-1.58
	携带大行李 2 人组	行人范围	0.52-0.66
		速度	0.55-1.43
	携带大行李 3-5 人组	行人范围	0.62-0.76

续表 4.8

对象类型	对应环境元素	参数名称	赋值赋值
Profile	携带大行李 3-5 人组	速度	0.52-1.25
	带大行李 5 人以上组	行人范围	0.68-0.79
		速度	0.42-1.05

## ② 行为事件设定

由于黄山高铁综合客运站主要为旅游客运班线，且为定点发车，所以在行为事件中选择“Vehicle”行为事件较为切合。由于客运站建在黄山高铁北站旁，客流源主要来源于高铁站到站旅客，所以在客运站仿真中将“Vehicle”行为事件的行人发生源设置为高铁站的列车到达时刻，具体数据见附录一；其车辆发车时间导入场站车辆时刻表，见附录二。其余属性设置见下表 4.9 所示。

表 4.9 Vehicle 行为事件属性设定

对象类型	参数名称	赋值
Vehicle1-2（进站）	车辆到达时间	发车时间表，见附录 2
	车辆停留时间	00:05:00-00:07:00
	车辆容量限制	37
	车辆到达前行人行为时间	00:05:00
	行人进入客运站时间	高铁列车到达时间表，见附录 1
Vehicle3（出站）	车辆到达时间	到车时间表，见附录 2
	车辆停留时间	00:05:00
	车辆容量限制	Uniform（37,54）
	车辆到达前行人行为时间	00:00:00

## ③ 设置统计分析模块

为了研究不同设施的能力与旅客强度是否匹配，在分析（Analysis）模块中进行数据获取与分析。在仿真运行结束后，选取所需要获取的数据类型及输出形式，即可获得仿真过程中旅客集散情况及设施利用程度。

### 4.3.4 仿真结果分析

仿真检验主要采用观测法。通过可视化的仿真动画，也可以直观发现场站现有管理方案和设施布局不合理和需要改进的问题。

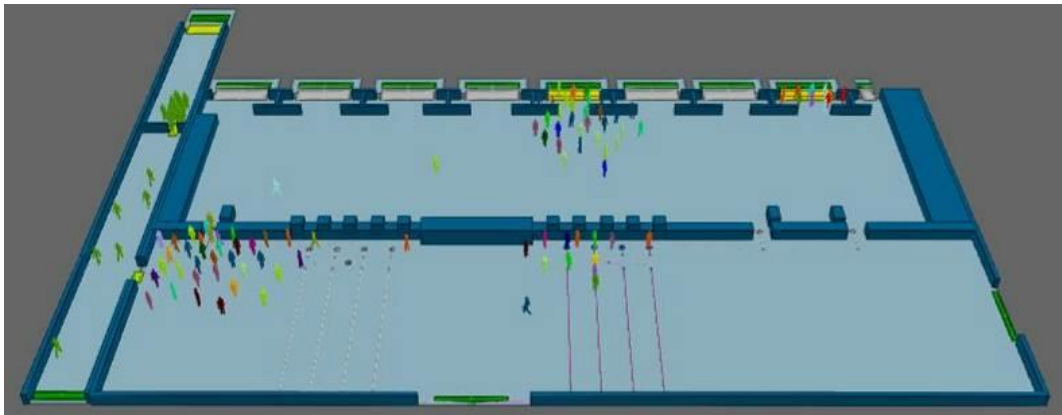


图 4.14 客运站 3D 仿真效果

从仿真动画可以看出，所建立的仿真模型，可以有效的仿真行人的各个特征（不同颜色代表不同类型的行人），在排队、组群、接受服务，流线交叉等各方面，与实际结果较为接近。为了便于观察黄山高铁综合客运站内的行人移动情况，以及各区域设施的利用程度是否满足要求，是否会造成人群堆积拥堵等，可加入分析模块“Average Density Map”、“Cumulative Flow Count”和“Population Count”等进行数据采集和可视化观察。

#### （1） 仿真基本数据

分析客运站仿真结果的第一步是对客运站总仿真过程有较清晰的认知，然后才根据总仿真过程对各设施和服务过程进行具体分析。道路客运场站仿真的基本数据主要包括场站内总人数变化情况、行人密度变化情况和行人速度变化情况。为了采集获得上述数据，本文采用 Massmotion 分析模块中的“Population Count”、“Agent Density”以及“Agent Speed Ratio”进行采集分析。

从客运站站内行人总量变化图可以清晰地看出行人进站时刻、行人检票上车时刻及各时刻站内行人总数。站内行人总量总体呈上升趋势，表明客运站内行人出现滞留，且随着时间的推移，滞留情况越来越严重。仿真进行 2 小时后，客运站总进站 643 人，总出站 222 人，已疏散 599 人，客运站内滞留人数 266 人，由此可得客运站服务能力仅为 58.63%。具体见图 4.15 所示。

Massmotion 仿真软件里的速度比是指行人实际行走速度与期望速度的比值，比值越低说明堵塞越严重。从分析速度比堆积图中可以看出场站内的行人随着时间的推移，低速度比的比例越来越大，说明场站内出现了排队堵塞情况且并未随着时间消散。客运站行人密度图中低密度区域占比越来越少，而高密度区域占比越来越大，也证明了上述观点。具体情况见图 4.16 所示。

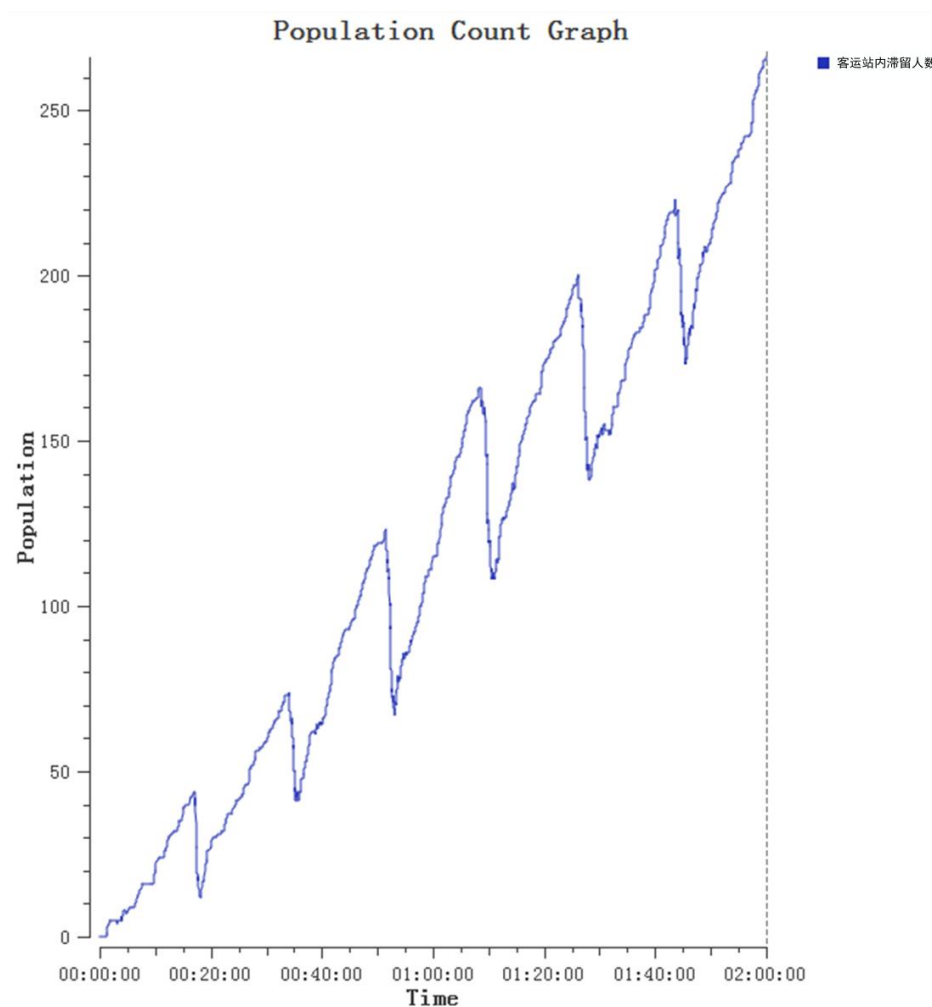


图 4.15 客运站站内行人总量变化图

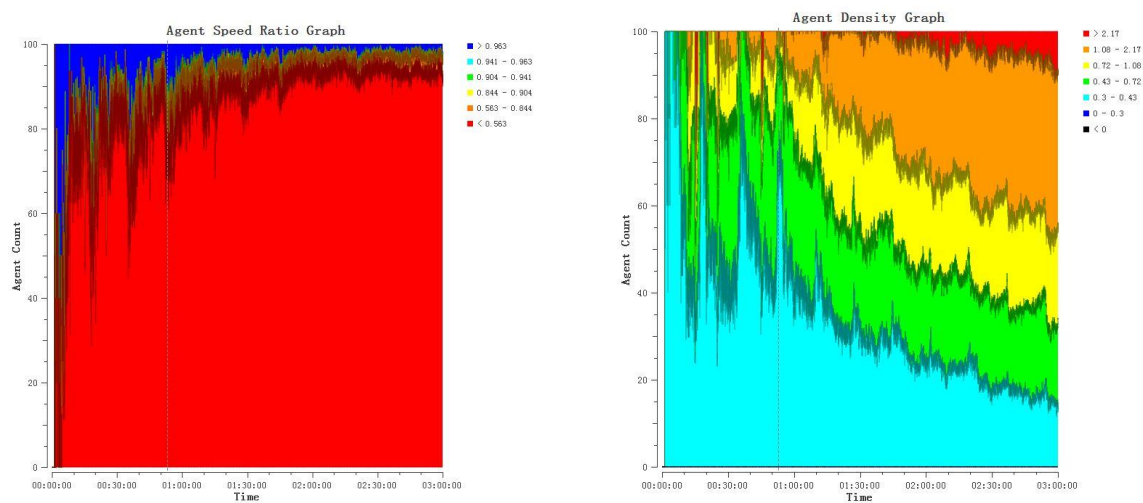


图 4.16 客运站行人密度及速度比堆积图

采用“Agent Summary”模块，对 865 个行人进行总体分析，对每个行人的进站时间、出站时间、行走距离、步行速度等信息进行记录，求得客运站内行人平均集散时间为 00:16:47，平均行走距离为 475.60 m，平均步行速度为  $1.195\text{ m/s}$ 。

## (2) 平均密度

平均密度图可用于显示对象的哪些部分平均而言最拥挤。每个点的颜色将指示围绕该点的圆圈中给定时间范围内的平均密度（每平方米剂量）。用于计算密度的圆圈具有 3.25 平方米的标准面积。

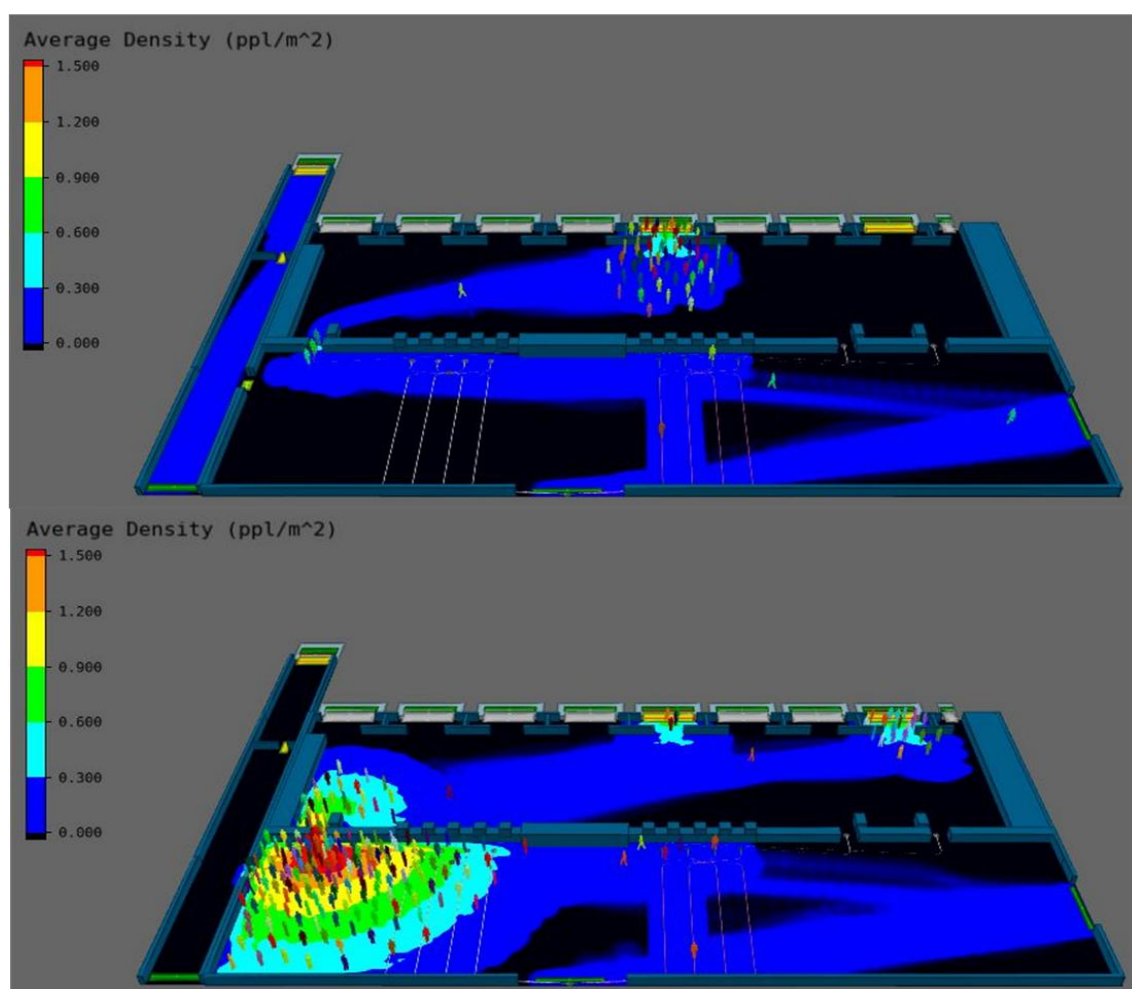


图 4.17 客运站 30 分钟及 2 小时平均密度图

图 4.17 中颜色代表该局部的平均密度，黑色表示行人未停留区域。蓝色对应于低密度区域、黄色表示中等密度区域和红色表示高密度区域。由图 4.17 可以看出，在仿真 30 分钟后，场站后部平均密度大于前部区域平均密度，并且 5 号检票口密度和 1 号

安检口颜色较重,表明该处设施的能力已经不能满足行人通行需求,乘客在集散过程中拥堵情况较为严重,需要对交通组织方式和设施设备配置进行进一步优化。随着仿真时间的推移,1号安检口拥堵情况越来越严重,2小时后进站旅客基本在安检区滞留。

### (3) 累计流量

累计流量计数图主要是用来测量从开始到给定时间完成对象服务的数量。在道路客运站站内,根据旅客进站服务流线,需要对进站、售票、安检、检票等主要功能区的累计流量进行分析,从而判断其设施服务能力是否满足旅客需求。

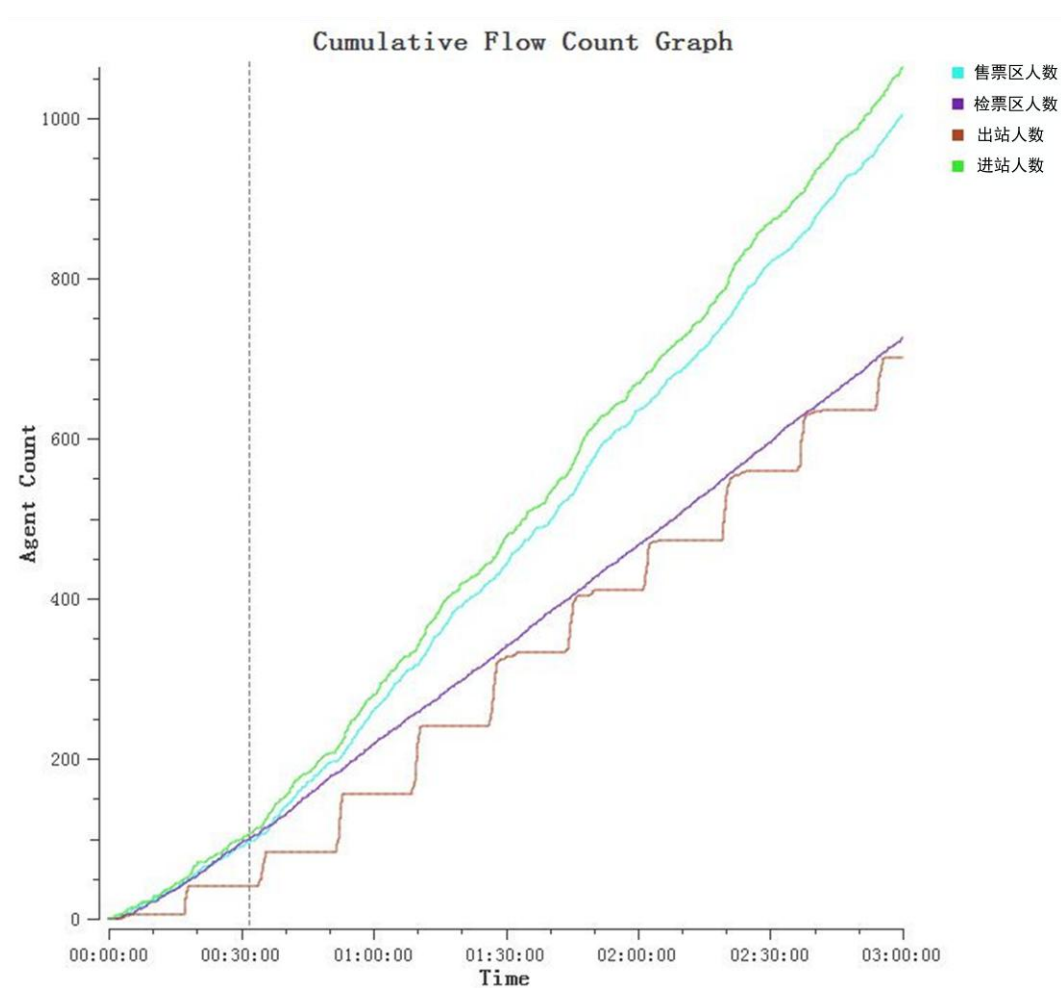


图 4.18 客运站主要功能区累计流量图

根据上述累计流量图 4.18 所示,同时将主要服务器基本数据进行记录(具体见表 4.12 所示),可以看出以下一些结论:

① 进站流量比出站流量大，且随着时间的推移，差距越来越明显，说明场站内滞留旅客人数随着时间越来越多，客运站总体服务水平并不能很好的满足旅客通行需求；

② 进站流量与售票区流量比较，两者累计流量相差不大。说明客运站售票区的服务能力能够较好的满足旅客购票需求，并未产生较大的延误。

③ 售票区流量与安检区流量进行比较，两者流量差距随着时间的推移越来越大，说明安检区服务能力有待加强，客流出现排队堵塞情况。

④ 安检区流量与检票区流量进行比较，可以发现当流量较小时，两者差距较大。随着时间的推移，差距越来越小，候车厅基本无滞留旅客。但由于流量较大时，安检区出现排队拥堵，大部分旅客并未进入候车厅，故候车检票区是否能满足旅客高峰流量情况，有待后续研究。

表 4.10 各服务器基本数据

名称	服务总人数	平均服务人口	平均服务前等待
售票 1	188	0.60	0:00:27
售票 3	167	0.65	0:00:14
售票 4	112	0.76	0:00:22
售票 2	169	0.64	0:00:18
安检 1	466	69.74	0:05:37

综上所述，通过上述仿真结果指标的分析，客运站主要问题为安检区服务能力不够，行人产生明显拥堵；旅客下车通道单向旋转门效率不高，行人会产生明显排队现象。

#### 4.3.5 设施设备优化

##### (1) 优化改进措施提出

为了解决安检区、检票区服务能力与客流强度不匹配和客流疏散效率不高的问题，对场站内的行人流线进行优化，提出的改进方案如下：

- ① 增加安检区安检闸机数量，适应当前高峰客流强度；
- ② 增加前往黄山南方向的检票口数量，提高旅客检票效率；
- ③ 将旅客下车通道单向旋转门改为多个单向旋转门，保证旅客有效的疏散出站。

采取该优化措施并不需要改动站厅层的行为建模和场景建模，只需要对部分对象属性将“Disable”变为“Enable”即可，但具体增加哪些对象可用，增加几个则需要进一步的研究分析。



## (2) 安检区优化研究

为了提高安检区服务能力，本文提出增加安检闸机数量的方法。同时为了选取最合适的优化方案，首先先确定增加安检闸机数量，在客运场站其他场景对象和行为都不变的情况下，分别增加 2 号安检机一台（2 号方案）、增加 3 号安检机一台（3 号方案）和 2、3 号安检机两台（4 号方案）三种方案。为了对比优化后的安检区服务能力，依然选用累计流量计数图来分析。

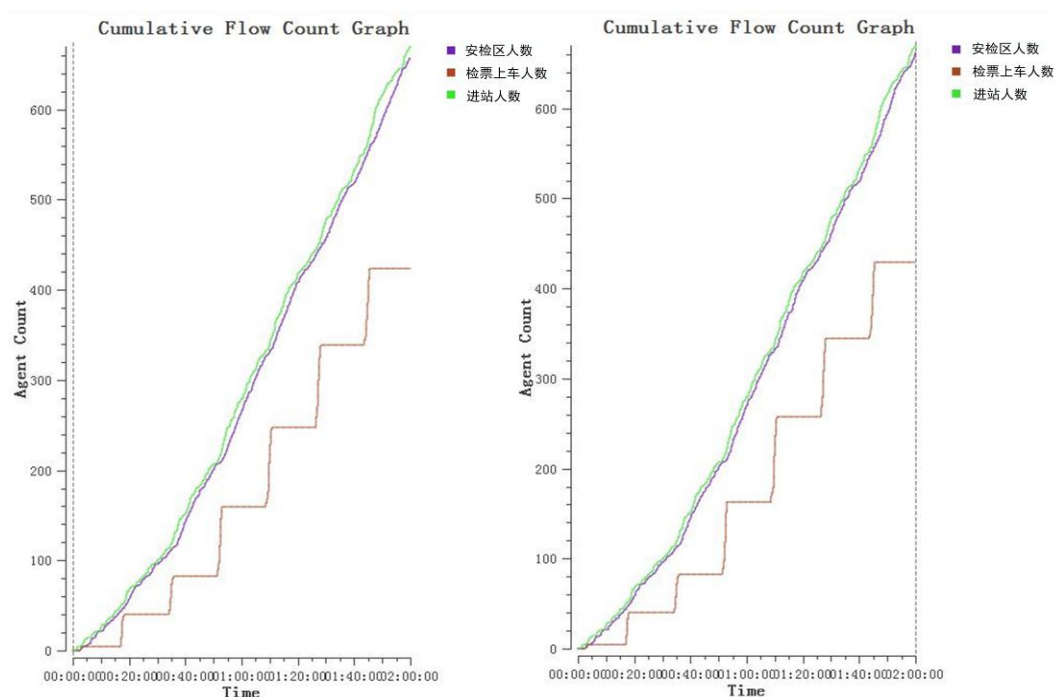


图 4.19 两种安检区优化方案累计流量计数图

从图 4.19 中可以看出，优化后的方案安检区服务人数趋近于进站人数，表明安检区服务能力满足旅客通行需求，并未出现拥堵情况。随后将三种优化方案的各服务器主要数据进行记录，同时与原数据进行对比分析，具体见表 4.11 所示。

表 4.11 优化后安检闸机服务数据

方案	设施名称	服务总人数	服务器上的平均人口	平均服务前等待
1	安检 1	466	69.74	0:05:37
2	安检 1	274	1.11	00:00:13
	安检 2	384	1.64	00:00:16
3	安检 1	279	1.09	00:00:13
	安检 3	380	1.59	00:00:12

续表 4.11

方案	设施名称	服务总人数	服务器上的平均人口	平均服务前等待
4	安检 1	144	0.81	00:00:12
	安检 2	294	0.83	00:00:13
	安检 3	224	0.78	00:00:12

将 3 种优化方案的安检闸机服务数据进行对比，可以看出 3 种优化方案安检区服务人数从 466 人增长到 660 人左右，安检能力分别提高 41.20%，41.42% 和 42.06%。虽然安检服务人数增长较大，但 3 种优化方案效果相差不大，说明增加 1 台安检闸机时安检区服务能力便以超过旅客通行能力。故安检机只需增加 1 台即可。

确定了案件闸机增加数量，接下来便是要确认增加闸机的对象。虽然 2 号和 3 号闸机都位于客运站右部，但旅客通过安检后寻找相应检票口的路径可能并不相同，其距离、时间成本也可能不完全相同。因此本着总成本最优的原理，需要对两台安检闸机分别研究讨论。

通过分别增加 2 号、3 号安检闸机进行仿真，选取“Agent Social Cost”（行人社会成本）模块进行分析评价。评价结果见表 4.12 所示。通过成本数据我们可以看出，虽然选取 2 号安检机在活动时间/成本拥堵时间/成本上更有优势，但其两者相差不大，影响变化可忽略不计，故选择二者其一都可以，为了便于后续分析，本文选取增加 2 号安检闸机方案。

表 4.12 2/3 号安检闸机行人社会成本

安检闸机序号	活动时间	拥堵时间	活动成本	拥堵成本
2	39:46:39	01:39:31	5293.564	12.2406
3	39:51:27	01:44:52	5373.492	12.4461

### （3）检票口优化研究

通过上述安检区累计流量计数图，可以看出当安检服务能力达到旅客通行需求的时候，进站口人数仍然远大于检票上车人数，说明场站内还有大量旅客滞留。为了解决这一问题，提出了增加检票口数量的方案。通过图 4.20 可知，5 号检票口比 2 号检票口行人平均密度更高，说明 5 号检票口（前往黄山南）的旅客较为拥堵。因此，本文提出对前往黄山南的旅客在 5-9 号检票口再增加一个检票口检票上车。

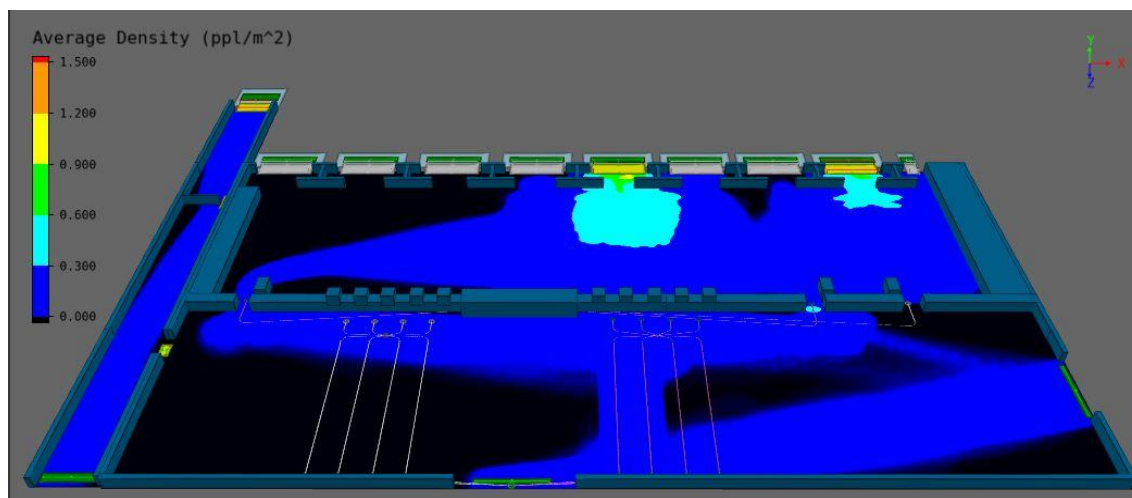


图 4.20 客运站行人平均密度图

通过分别对 6-9 号检票口进行单独分析，得到四个检票口对行人平均密度和客运站站内行人流量影响近似，故本文增加 8 号检票口检票。将增加 8 号检票口后的场站进行仿真，对行人平均密度和累计行人流量数进行比较分析。具体见图 4.21 和图 4.22 所示。

通过行人平均密度图的对比，可以看出 5 号检票口的行人平均密度大大下降，说明旅客堵塞情况得到了较大的缓解；同时进站-检票人数差距与优化前进行对比，可以看出优化后检票人数与进站人数差距不大，说明场站内旅客滞留现象得到了缓解，旅客滞留人数大大降低。这些都说明增加 8 号检票口有利于客运站旅客有效的集散。

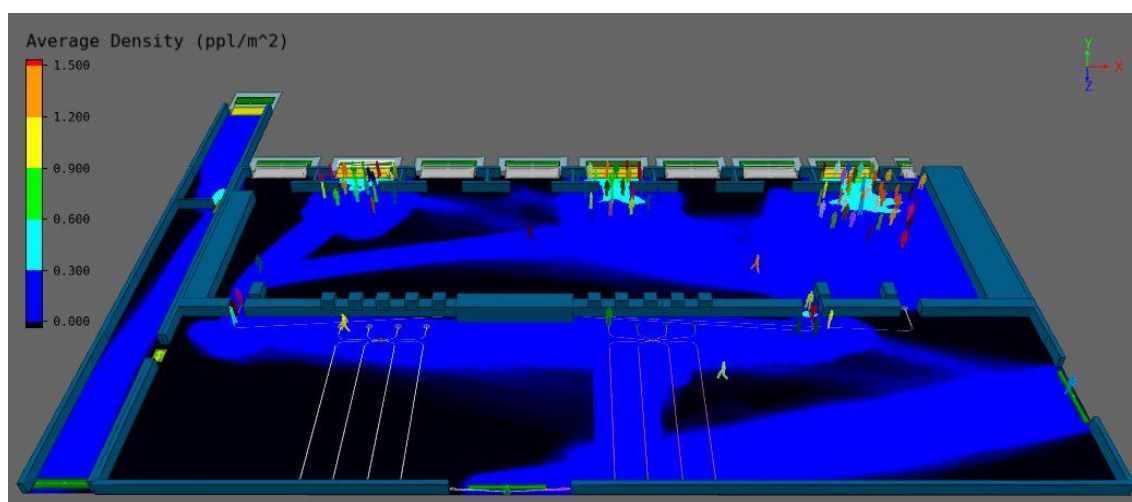


图 4.21 优化后的场站行人平均密度

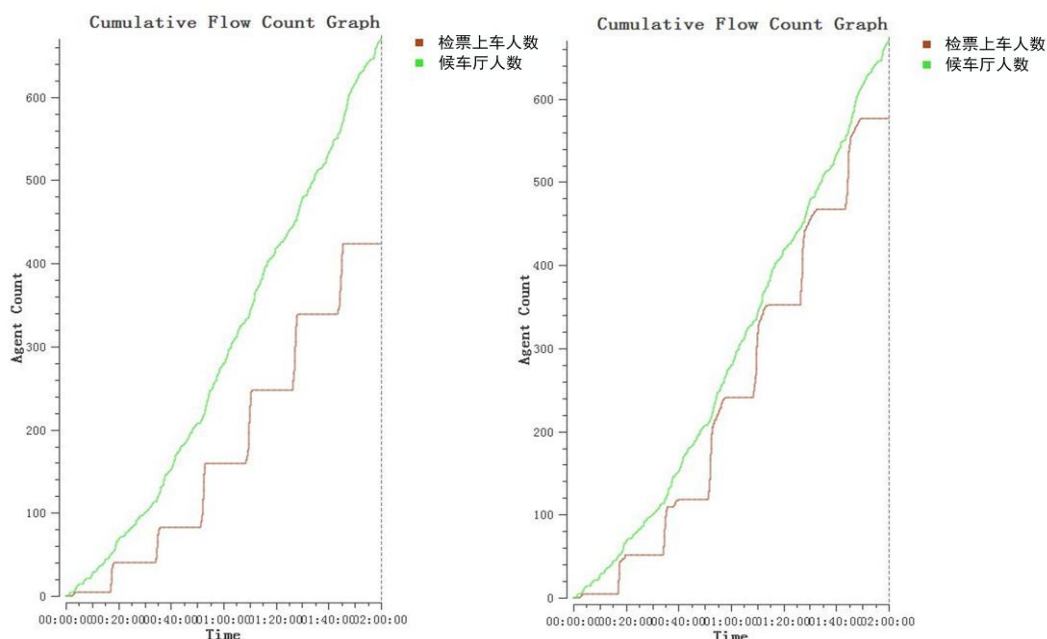


图 4.22 优化前后累计行人流量对比

通过对 865 个行人进行总体分析,可以看出旅客平均滞留场站时间缩短了 30.44%,平均步行距离缩短了 35.80%,平均步行速度提高了 9.01%。具体数据见表 4.13 所示。

表 4.13 优化前后旅客行走基本数据

方案名称	旅客平均滞留场站时间	旅客平均步行距离	旅客平均步行速度
优化前	00:09:35	144.1317	1.0962
优化后	00:06:40	106.1386	1.1950

#### (4) 旅客下车通道优化研究

为了解决旅客下车通道单向旋转门通行效率较低的问题,本文提出了增加单向旋转门数量的优化方案。经过实地调研,下车疏散通道宽度足够安装两个单向旋转门,但目前只安装有一个,而其余空间均被栏杆围住没有使用。为了验证方法的可行性,对增加 1 个单向旋转门优化方案进行仿真。选取累计流量评价指标,对通过旋转门前和通过旋转门后的人数进行对比,从而分析通行效率。数据具体情况见图 4.23 所示。

通过累计流量图可以看出,增加一个单向通行旋转门后,旋转门前后的累计流量差大幅度减小,说明旅客通过旋转门的通行效率大幅度提高,同时也说明该改进方案可行。

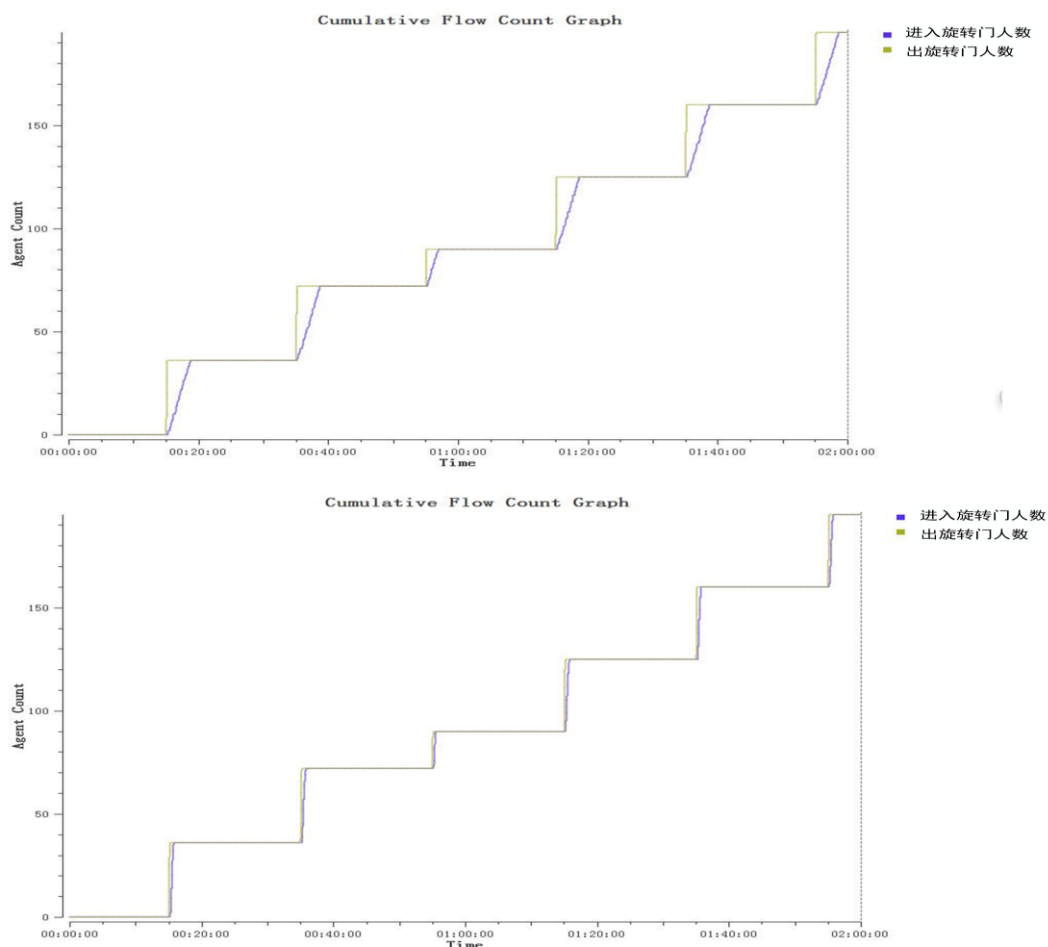


图 4.23 旅客下车通道优化方案累计流量对比图

根据对仿真 2 小时内出站旅客 195 人的数据统计，可以得到优化前后旋转门性能的提升数据，具体见表 4.14 所示。从表中可以看出，增加一个旋转门后，旅客平均滞留场站时间缩短了 14.38%，旅客平均步行距离及旅客平均步行速度变化较小。

表 4.14 优化前后旋转门服务数据

方案名称	旅客平均滞留场站时间	旅客平均步行距离	旅客平均步行速度
优化前	00:02:39	58.8554	1.3864
优化后	00:02:19	59.1737	1.3720

#### 4.4 小结

本章在对 Massmotion 仿真软件平台介绍的基础上，对建模方法及其步骤进行了分析。根据旅客集散行为的特点，对道路客运场站内可能出行的旅客集散行为，如携带

行李、群体出行、购票安检区域活动及车辆到达离去等进行仿真模拟，为后续实例验证奠定了基础。

实例研究主要以黄山高铁综合客运站为例，简要介绍了客运站的基本概况及定位，确定了所需要采集的数据，在场站内进行实地调研获得行人类型及数量、场站尺寸、发车时刻表及高铁到站时刻表，为后续仿真参数设置做准备。运用前面章节所论述的仿真原理及软件操作，在 **Massmotion** 中对客运站进行仿真研究，搭建场景模型和行为模型，对象属性依据采集数据确定，力求契合场站实际情况。通过场站仿真结果，采用客运站行人平均密度、累计行人流量等分析模块，发现场站安检区、检票口及旅客下车通道服务水平与旅客通行能力不匹配的问题。为了提高旅客集散效率，对场站内交通组织流线进行优化，提出改进措施，并对优化后的模型进行指标对比评价，证明了改进方案的可行性及优越性。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

本文以我国道路客运场站为研究对象，分析旅客在场站内的集散行为特征，通过实地的调查及数据的采集，运用 Massmotion 仿真软件以黄山高铁综合客运站为例进行仿真模拟，找出目前客运场站中存在的主要问题，提出改进措施。运用仿真软件对优化改进前后的方案进行仿真并通过分析人流密度、累计流量等图表进行评价，可以实现客运场站优化改进后旅客能很好的疏散，没有出现排队拥堵，大大提高了整体的效率，也提高了乘客的舒适度。本文主要的研究工作和研究成果总结如下：

(1) 研究了道路旅客集散行为的理论特征。介绍并对比不同的行人行为调查方法，结合道路客运场站特点，对调查时段和研究区域进行了确定。同时对行人的交通特性和行为特性进行了宏观和微观两个层面的分析，丰富了论文理论基础。

(2) 研究了行人流模型，通过查阅国内外文献，根据描述行人运动的精度不同，分别从宏观模型、中观模型及微观模型三个方面分析行人流模型原理及特点。

(3) 对比分析了基于不同建模原理下的仿真软件的优缺点及适用性，集合道路客运场站行人行为特点，最终选择了基于社会力模型为研究基础的 Massmotion 仿真软件对场站内可能出行的旅客集散行为，如携带行李、群体出行、楼梯/扶梯/斜坡通行、购票安检区域活动及车辆到达离去等进行仿真模拟。

(4) 结合黄山高铁综合客运站的实际情况和仿真软件数据需求，进行了数据调查，获得了行人类型及数量、场站尺寸、发车时刻表及高铁到站时刻表等资料，为仿真模拟提供了数据基础。

(5) 建立了黄山高铁综合客运站 Massmotion 仿真模型。通过仿真发现客运站安检区安检闸机和检票口服务能力与旅客通行需求不匹配；且旅客下车通道单向旋转门数量太少，疏散效率较低。

(6) 通过优化设计黄山高铁综合客运站的设施布置，提出增加 2 号安检闸机，8 号检票口，同时对旅客下车通道旋转门增加至 2 个。并运用 Massmotion 仿真软件对优化改进前后的方案进行仿真评价，为客运站的设施设计和运营管理提供辅助设计与决策支持。

### 5.2 不足与展望

这项研究的特点是问题比较复杂，影响因素较多，但由于本人时间和精力有限，未来还可以在以下领域进行拓展：

（1） 本文没有将道路客运场站全部影响因素考虑在内如天气、节假日等特殊情况，所以还有待继续深入研究。

（2） 在场站实地调研过程中，对于不同类型行人的步行速度测量可能由于笔者自身观测，存在随机误差，后续有待进一步的研究其误差影响。

（3） **Massmotion** 仿真软件中行人以最小成本原则选择行走路径，但实地调查发现，并不是所有行人都以此原则行走，旅客路径选择影响因素有待深入研究。



## 参 考 文 献

- [1] 廖明军, 李克平, 王凯英, 等. 行人交通微观仿真研究综述[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010,34(01):180-183.
- [2] Henderson L F. On the fluid mechanics of human crowd motion[J]. Transportation Research, 1974,8(6):509-515.
- [3] Florian M, Mahut M, Tremblay N. A hybrid optimization-mesoscopic simulation dynamic traffic assignment model[C]. Intelligent Transportation Systems, 2001.
- [4] 丁晓青. 基于排队网络模型及行人仿真的车站应急疏散能力研究[D]. 北京交通大学, 2016.
- [5] Shaaban K, Abdel-Warith K. Agent-based Modeling of Pedestrian Behavior at an Unmarked Midblock Crossing[J]. Procedia Computer Science, 2017,109:26-33.
- [6] 付宇. 轨道站内行人移动模型与仿真[D]. 北京交通大学, 2012.
- [7] 张诗波, 何民, 骆勇, 等. 行人交通研究综述[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2013,32(6):29-33.
- [8] 傅志妍, 陈坚, 李武, 等. 城市轨道交通车站乘客聚散行为仿真及优化[J]. 铁道运输与经济, 2018,40(02):100-104.
- [9] Cremer M, Ludwig J. A fast simulation model for traffic flow on the basis of boolean operations[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2014,28(4):297-303.
- [10] Blue V J, Adler J L. Cellular Automata Microsimulation of Bidirectional Pedestrian Flows[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999,1678(1):135-141.
- [11] Hu J, Lei Y. A cellular automata model of pedestrian evacuation in three-dimensional space[J]. Acta Physica Sinica, 2014,63(8):1642-1651.
- [12] Hiyoshi H, Tanioka Y, Hamamoto T, et al. Pedestrian Movement Model based on Voronoi Cellular Automata[J]. Transportation Research Procedia, 2014,2:336-343.
- [13] 蒲刚. 基于元胞自动机的同伴群行人交通仿真研究[D]. 昆明理工大学, 2012.
- [14] 童蔚苹, 程琳. 考虑结伴行为的行人流场域元胞自动机模型[J]. 系统工程理论与实践, 2014,34(09):2386-2391.
- [15] Helbing D, Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Phys.rev.e, 1995,51(5):4282.

- [16] 杨亚琛, 尹华省, 陈坚, 等. 行人运动行为的社会力模型研究现状与展望[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015,34(6):94-100.
- [17] Zeng W, Nakamura H, Peng C. A Modified Social Force Model for Pedestrian Behavior Simulation at Signalized Crosswalks[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2014,138:521-530.
- [18] 何民, 樊冬, 栾庆熊, 等. 行人同伴群社会力学仿真[J]. 北京工业大学学报, 2015,41(3):419-425.
- [19] 张诗波. 基于Agent的行人交通微观仿真建模与分析[D]. 昆明理工大学, 2007.
- [20] 樊冬. 基于群体行为的行人微观仿真模型研究[D]. 海军装备研究院, 2014.
- [21] 何民, 栾庆熊, 税文兵, 等. 考虑同伴群的行人感知避让社会力改进模型[J]. 公路交通科技, 2017,34(03):125-130.
- [22] 何民, 韩智泉, 于海宁, 等. 考虑同伴群动态交流分组的行人仿真模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017,17(02):140-145.
- [23] Franklin S, Graesser A. Is It an agent, or just a program? [C]. A taxonomy for autonomous agents: International Workshop on Agents Theories, 1997.
- [24] Toyama M C, Bazzan A L C, Silva R D. An agent-based simulation of pedestrian dynamics[C]. From lane formation to auditorium evacuation: International Joint Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems, 2006.
- [25] Bandini S, Rubagotti F, Vizzari G, et al. An agent model of pedestrian and group dynamics[C]. experiments on group cohesion: International Conference on Artificial Intelligence Around Man & Beyond, 2011.
- [26] Vizzari G, Manenti L, Crociani L. Adaptive pedestrian behaviour for the preservation of group cohesion[J]. Complex Adaptive Systems Modeling, 2013,1(1):7.
- [27] Marchi S D, Page S E. Agent-Based Models[J]. Annual Review of Political Science, 2014,17(1):1-20.
- [28] Manenti L, Manzoni S, Vizzari G, et al. An Agent-Based Proxemic Model for Pedestrian and Group Dynamics[C]. Motivations and First Experiments: International Workshop on Multi-agent Systems & Agent-based Simulation, 2011.
- [29] 邹田春, 潘庭, 杜月娟, 等. 基于多智能体和元胞自动机民机应急撤离仿真[J]. 计算机仿真,

2015,32(9):56-60.

- [30] 刘全平. 基于多智能体和元胞自动机模型的虚拟人群行为研究[D]. 国防科学技术大学, 2013.
- [31] 李得伟. 城市轨道交通枢纽乘客集散模型及微观仿真理论[D]. 北京交通大学, 2007.
- [32] 姚鹏. 行人过街设施设置的关键问题研究[D]. 西南交通大学, 2014.
- [33] 樊羽裳. 城市轨道交通车站双向通道行人避让行为仿真模型研究[D]. 北京交通大学, 2016.
- [34] 陈然, 董力耘. 中国大都市行人交通特征的实测和初步分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2005,11(1):93-97.
- [35] 曹守华. 城市轨道交通乘客交通特性分析及建模[D]. 北京交通大学, 2009.

## 致 谢

论文写到致谢，也意味着论文的结尾，同时也表明我的大学四年生涯即将到达终点。放眼过去，四年的学习和生活就像昨夜，在我母校重庆交通大学的这段岁月，不仅丰富了我的学术知识，培养了我的品德，同时也对我的思维进行了更深的训练，这些对我未来工作和生活都是宝贵的财富。借此论文完成之际，向所有帮助和支持过我的老师、同学、朋友、亲人表示衷心的感谢。

感谢我的本科论文导师彭金栓教授。彭老师对科研的热情，对教学的严谨，对生活的热爱都处处感染着我，使我受益匪浅。本篇论文从最开始的框架构思到最后论文的修改，都是在彭老师的耐心指导下不断成熟完善的。在论文即将完成之际，向我的导师彭金栓教授表示崇高的敬意和由衷的感谢！

感谢我的母校重庆交通大学给我提供了良好的学习氛围，感谢交通运输学院对我本科四年的悉心栽培，特别是彭勇教授、胥耀方副教授、王代瑜老师、杨亚琛副教授、陈坚教授、向红艳教授、唐秋生教授等所有授课老师，正是他们在本科课程上的悉心指导，才使我对专业知识有了更深刻的了解，丰富了我的知识深度和专业兴趣。

感谢黄山高铁综合客运站的舒心桃总经理、叶志新副总经理和刘莉副总经理对我在客运站毕业实习的关心与照顾。正是因为他们的配合，我才能对客运站有更深地了解并对论文所需要的数据能够进行实地调研采集获取。

感谢华南理工大学许伦辉教授及师兄师姐对我毕业设计的悉心指导，在仿真建模方面给予了我很大的帮助，使模型更加切合实际。

最后，我想感谢我的家人，正是你们的默默支持和陪伴才使我不断进步，才能让我在大学生涯全身心的投入到学习中，我的非常感谢你们。

最后一并向本文所引用文献、资料的作者和提供者表示诚挚的谢意。

附录 1 黄山北站高铁列车时刻表

车次	始发站	始发时间	到站时间	查询站	开车时间	终点站
<u>D5586</u>	黄山北	5:52	5:52	黄山北	5:52	<u>杭州东</u>
<u>D5588</u>	黄山北	6:25	6:25	黄山北	6:25	<u>杭州东</u>
<u>G7302</u>	黄山北	7:09	7:09	黄山北	7:09	<u>上海虹桥</u>
<u>G7402</u>	黄山北	7:11	7:11	黄山北	7:11	<u>蚌埠南</u>
<u>G7194</u>	黄山北	7:24	7:24	黄山北	7:24	<u>常州北</u>
<u>G7452</u>	黄山北	7:33	7:33	黄山北	7:33	<u>南京南</u>
<u>G352</u>	黄山北	8:00	8:00	黄山北	8:00	<u>北京南</u>
<u>G7316</u>	黄山北	8:17	8:17	黄山北	8:17	<u>常州</u>
<u>D5596</u>	黄山北	8:20	8:20	黄山北	8:20	<u>合肥南</u>
<u>D3324</u>	景德镇北	7:25	8:38	黄山北	8:41	<u>上海虹桥</u>
<u>D5590</u>	黄山北	9:00	9:00	黄山北	9:00	<u>杭州东</u>
<u>G7304</u>	黄山北	9:22	9:22	黄山北	9:22	<u>上海虹桥</u>
<u>G2388/G2389</u>	杭州东	7:39	9:24	黄山北	9:30	<u>西安北</u>
<u>G7306</u>	黄山北	9:32	9:32	黄山北	9:32	<u>上海虹桥</u>
<u>G302</u>	福州	7:01	9:34	黄山北	9:38	<u>北京南</u>
<u>G7414</u>	黄山北	9:53	9:53	黄山北	9:53	<u>合肥南</u>
<u>G2385</u>	杭州东	8:00	9:57	黄山北	10:00	<u>厦门北</u>
<u>G1611</u>	合肥南	8:21	10:09	黄山北	10:12	<u>厦门北</u>
<u>G1397</u>	合肥南	8:28	10:17	黄山北	10:22	<u>昆明南</u>
<u>G1452</u>	九江	8:12	10:28	黄山北	10:31	<u>杭州东</u>
<u>G1669</u>	徐州东	6:58	10:29	黄山北	10:32	<u>厦门北</u>
<u>G2395/G2398</u>	杭州东	8:24	10:34	黄山北	10:39	<u>郑州东</u>
<u>G2380</u>	厦门北	6:06	10:36	黄山北	10:42	<u>杭州东</u>
<u>G1902/G1903</u>	福州	8:13	10:47	黄山北	10:50	<u>西安北</u>
<u>G1619</u>	合肥南	9:08	10:56	黄山北	11:00	<u>南昌西</u>
<u>G1509</u>	南京南	7:00	11:08	黄山北	11:11	<u>三明</u>
<u>D5578</u>	黄山北	11:15	11:15	黄山北	11:15	<u>杭州东</u>
<u>D2107/D2110</u>	衢州	9:41	11:18	黄山北	11:24	<u>杭州东</u>
<u>G1601</u>	合肥南	9:25	11:21	黄山北	11:26	<u>深圳北</u>
<u>G322</u>	厦门北	6:57	11:46	黄山北	11:49	<u>北京南</u>
<u>G345</u>	济南西	6:55	11:51	黄山北	11:54	<u>福州</u>

续表附录 1-1

车次	始发站	始发时间	到站时间	查询站	开车时间	终点站
<u>G7495/G7498</u>	<u>黄山北</u>	11:54	11:54	黄山北	11:54	<u>苍南</u>
<u>G242/G243</u>	<u>厦门北</u>	7:45	12:00	黄山北	12:03	<u>青岛</u>
<u>G28</u>	<u>福州</u>	9:52	12:05	黄山北	12:09	<u>北京南</u>
<u>G1905/G1908</u>	<u>郑州东</u>	6:30	12:06	黄山北	12:12	<u>福州</u>
<u>G330</u>	<u>福州</u>	9:45	12:30	黄山北	12:33	<u>天津西</u>
<u>D2175/D2178</u>	<u>武汉</u>	8:10	12:45	黄山北	12:50	<u>千岛湖</u>
<u>D5582</u>	<u>黄山北</u>	12:57	12:57	黄山北	12:57	<u>杭州东</u>
<u>G7308</u>	<u>黄山北</u>	13:03	13:03	黄山北	13:03	<u>上海虹桥</u>
<u>G324</u>	<u>厦门北</u>	8:57	13:23	黄山北	13:26	<u>北京南</u>
<u>G7318</u>	<u>黄山北</u>	13:48	13:48	黄山北	13:48	<u>上海</u>
<u>D3395/D3398</u>	<u>宜昌东</u>	7:10	13:53	黄山北	14:03	<u>杭州东</u>
<u>G7416</u>	<u>黄山北</u>	13:53	13:53	黄山北	13:53	<u>合肥南</u>
<u>G2382</u>	<u>南昌西</u>	10:37	14:24	黄山北	14:28	<u>杭州东</u>
<u>G2379</u>	<u>杭州东</u>	12:35	14:28	黄山北	14:33	<u>厦门北</u>
<u>G270</u>	<u>黄山北</u>	14:33	14:33	黄山北	14:33	<u>北京南</u>
<u>D2176/D2177</u>	<u>千岛湖</u>	13:51	14:40	黄山北	14:45	<u>武汉</u>
<u>G304</u>	<u>福州</u>	12:15	14:47	黄山北	14:50	<u>北京南</u>
<u>G7192</u>	<u>黄山北</u>	15:04	15:04	黄山北	15:04	<u>南京南</u>
<u>G636</u>	<u>广州南</u>	8:25	15:12	黄山北	15:17	<u>合肥南</u>
<u>G356</u>	<u>厦门北</u>	10:59	15:17	黄山北	15:22	<u>北京南</u>
<u>G27</u>	<u>北京南</u>	9:45	15:18	黄山北	15:21	<u>福州</u>
<u>G7481/G7484</u>	<u>黄山北</u>	15:21	15:21	黄山北	15:21	<u>温州南</u>
<u>G355</u>	<u>北京南</u>	8:40	15:31	黄山北	15:36	<u>厦门北</u>
<u>D5598</u>	<u>黄山北</u>	15:50	15:50	黄山北	15:50	<u>合肥南</u>
<u>G635</u>	<u>合肥南</u>	14:03	15:58	黄山北	16:01	<u>广州南</u>
<u>G7310</u>	<u>黄山北</u>	15:59	15:59	黄山北	15:59	<u>上海虹桥</u>
<u>G7418</u>	<u>黄山北</u>	16:07	16:07	黄山北	16:07	<u>合肥南</u>
<u>G241/G244</u>	<u>青岛</u>	7:39	16:17	黄山北	16:20	<u>厦门北</u>
<u>G7312</u>	<u>黄山北</u>	16:25	16:25	黄山北	16:25	<u>上海虹桥</u>
<u>G1510</u>	<u>三明</u>	13:57	16:28	黄山北	16:31	<u>南京南</u>
<u>G329</u>	<u>天津西</u>	10:32	16:34	黄山北	16:40	<u>福州</u>
<u>G1620</u>	<u>南昌西</u>	14:12	16:40	黄山北	16:43	<u>合肥南</u>
<u>G1602</u>	<u>深圳北</u>	8:54	16:54	黄山北	16:59	<u>合肥南</u>

续表附录 1-2

车次	始发站	始发时间	到站时间	查询站	开车时间	终点站
<u>G323</u>	<u>北京南</u>	10:10	16:57	黄山北	17:00	<u>厦门北</u>
<u>G2387/G2390</u>	<u>西安北</u>	7:16	17:12	黄山北	17:15	<u>杭州东</u>
<u>G301</u>	北京南	10:30	17:12	黄山北	17:16	<u>福州南</u>
<u>G348</u>	<u>福州</u>	14:54	17:28	黄山北	17:31	<u>济南西</u>
<u>D5584</u>	<u>黄山北</u>	17:31	17:31	黄山北	17:31	<u>杭州东</u>
<u>G1906/G1907</u>	<u>福州</u>	15:19	17:46	黄山北	17:49	<u>郑州东</u>
<u>D2108/D2109</u>	杭州东	16:07	17:53	黄山北	17:56	<u>衢州</u>
<u>D5580</u>	黄山北	18:15	18:15	黄山北	18:15	<u>杭州东</u>
<u>G325</u>	<u>北京南</u>	12:05	18:21	黄山北	18:27	<u>厦门北</u>
<u>G2381</u>	<u>杭州东</u>	16:47	18:38	黄山北	18:42	<u>南昌西</u>
<u>D3396/D3397</u>	<u>杭州东</u>	16:19	18:43	黄山北	18:51	<u>汉口</u>
<u>G1901/G1904</u>	西安北	10:57	18:53	黄山北	18:57	<u>福州</u>
<u>G303</u>	北京南	12:30	19:04	黄山北	19:10	<u>福州</u>
<u>G7460</u>	<u>黄山北</u>	19:13	19:13	黄山北	19:13	<u>南京南</u>
<u>G1670</u>	<u>厦门北</u>	14:52	19:24	黄山北	19:28	<u>徐州东</u>
<u>G2396/G2397</u>	<u>郑州东</u>	12:39	19:29	黄山北	19:34	<u>杭州东</u>
<u>G1612</u>	厦门北	15:00	19:38	黄山北	19:41	<u>合肥南</u>
<u>G1398</u>	<u>昆明南</u>	9:38	19:48	黄山北	19:51	<u>合肥南</u>
<u>G2386</u>	<u>厦门北</u>	15:32	20:25	黄山北	20:28	<u>杭州东</u>
<u>G1393</u>	<u>上海虹桥</u>	17:45	20:31	黄山北	20:34	<u>九江</u>
<u>G7422</u>	<u>黄山北</u>	21:16	21:16	黄山北	21:16	<u>合肥南</u>
<u>D3323</u>	<u>上海虹桥</u>	19:06	22:05	黄山北	22:08	<u>景德镇北</u>

## 附录 2 黄山高铁综合客运站发车时刻表

目的地（5 号检票口）	发车时间	目的地（2 号检票口）	发车时间
黄山南	8:00	宏村	8:35
黄山南	8:30	祁门	9:00
黄山南	8:40	宏村	9:35
黄山南	9:00	祁门	10:00
黄山南	9:30	宏村	10:05
黄山南	10:00	宏村	10:25
黄山南	10:10	宏村	10:35
云谷寺	10:20	宏村	10:45
黄山南	10:25	祁门	11:00
黄山南	10:30	宏村	11:05
黄山南	10:40	太平客运站	11:20
黄山南	10:50	宏村	11:25
黄山北	11:20	宏村	11:35
黄山南	11:50	祁门	12:00
黄山南	12:00	宏村	12:05
东黄山	12:20	宏村	12:35
黄山南	12:40	祁门	13:00
黄山南	13:00	宏村	13:05



续表附录 2-1

目的地（5 号检票口）	发车时间	目的地（2 号检票口）	发车时间
黄山南	13:00	宏村	13:05
黄山北	13:10	宏村	13:35
黄山南	13:20	祁门	14:00
黄山南	13:40	宏村	14:05
黄山南	14:00	宏村	14:35
黄山北	14:10	祁门	15:00
黄山南	14:20	宏村	15:05
黄山南	14:40	宏村	15:35
黄山南	14:50	太平客运站	16:00
黄山南	15:30	宏村	16:35
黄山南	16:00	祁门	17:00
黄山南	16:10	宏村	17:25
黄山南	16:20	宏村	18:25
黄山南	16:30		
黄山南	17:30		
黄山南	17:40		
黄山南	17:50		
黄山南	19:10		