

基于蓝牙技术的公共交通枢纽行人流服务水平仿真研究

摘要

随着城镇化水平的逐步提高，大量人口向城市涌入，使得城市内的交通压力加剧。大力发展公共交通、提倡以人为本的绿色交通发展理念是解决城市交通的重要思路。公共交通枢纽是城市道路网络的重要节点，而行人作为公共交通枢纽的重要组成部分，其服务水平关系着公共交通枢纽的运行效率。服务水平的高低直接影响着行人的舒适度和安全性，同时对公交吸引力的提升也有重要作用。有效数据的缺乏以及行人需求的不断复杂化，使得规划者对行人流与设施间关系的分析和建模收到局限。而蓝牙技术作为一种新型的交通采集技术，其实时性、低成本、不干扰交通流的特点，可以完善目前的行人流数据采集方式。然而，蓝牙在国内行人流中的应用还较少。本文探索性的使用了蓝牙技术作为公共交通枢纽行人流数据的主要采集方式，以上海市莘庄公共交通枢纽南广场为研究对象，借助仿真手段分析了公共交通枢纽的行人流服务水平及设施参数对服务水平的影响。

主要研究内容侧重于三方面：1) 对蓝牙技术采集行人流数据的采集率进行验证，同时根据蓝牙数据对枢纽站内的行人流速度和行程时间进行分析；2) 以蓝牙数据为输入参数，对枢纽设施建立仿真模型，探讨枢纽内行人流的特点，并对其总体服务水平进行评价；3) 以排队论为基础建立分析模型，分析设施参数的改变对行人流服务率的影响。本文研究的技术路线如图 1 所示。

本文第一章介绍了研究背景及国内外研究综述，并总结了相关研究领域的研究缺陷。第二章介绍蓝牙设备在行人流监测中的应用原理，设计了本研究的实验方案，同时对蓝牙数据进行处理，并分析枢纽内的行人流速度和时间的信息；第三章建立了仿真模型，并对行人流特征进行建模，建立行人流速度-流量-密度的参数模型，并以仿真模型为基础对行人流服务水平进行评估；第四章建立排队论分析模型，以蓝牙和仿真数据进行验证，并进行敏感

性分析，以分析其设施设计参数对行人流服务水平的影响；文章最后一章对本文工作进行了总结，并对后续工作进行展望。

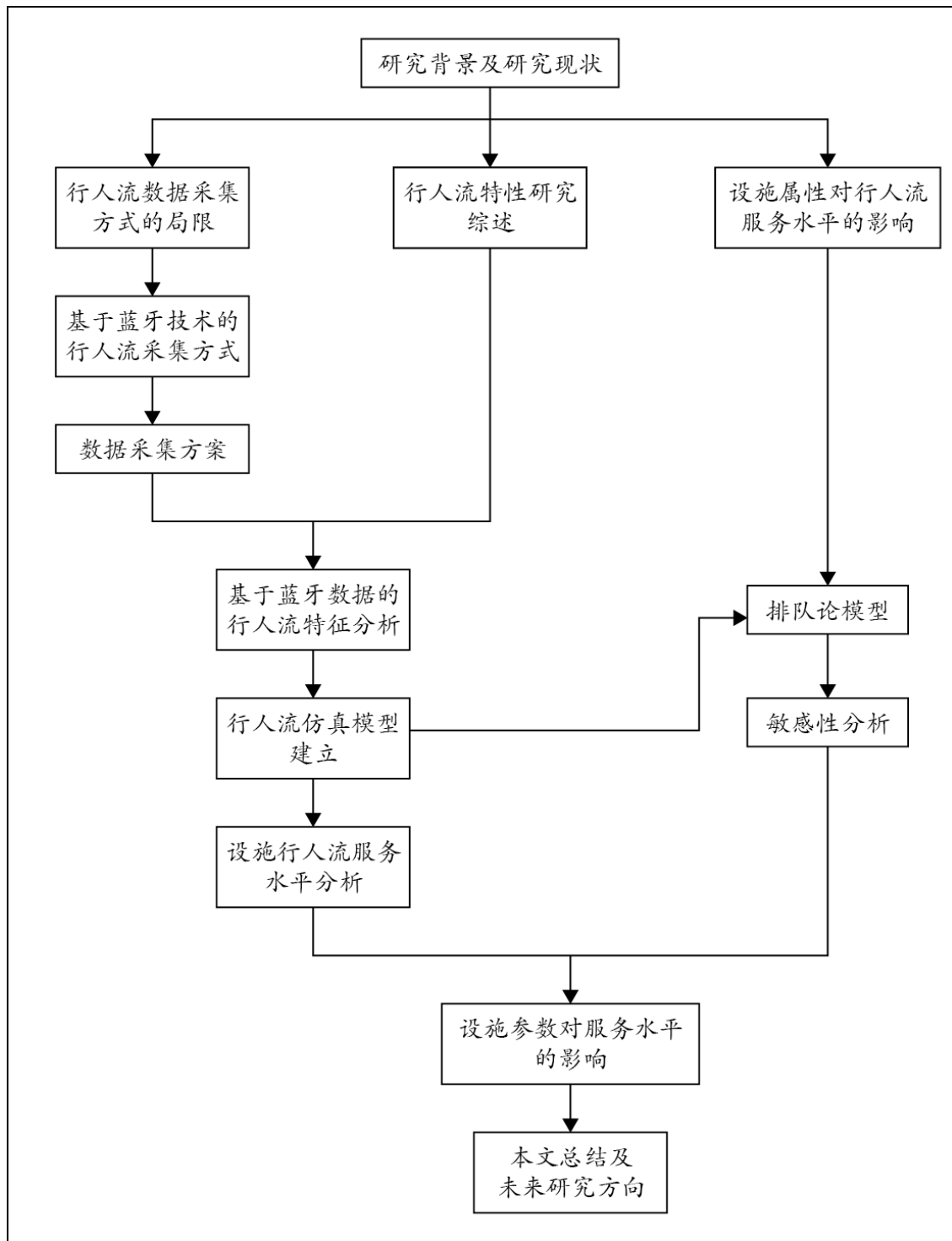


图 1 研究思路及技术路线图

接下来，将从以下四方面对本文工作进行总结：

- 1) 数据采集方案
- 2) 基于蓝牙数据的行人流特征分析
- 3) 行人流服务水平仿真分析
- 4) 设施规模对行人流服务水平的影响

一、数据采集方案

1、蓝牙设备安装方案

本研究选择上海市莘庄地铁站南广场为研究对象及调研地点。为了更加清晰的分析南广场的行人流线，以地铁站为主要起讫点，行人步行流线主要分为三个方向，分别地铁站—购物中心、地铁站—居民区、地铁站—公交车/出租车换乘点，以三个方向的行人流为主要研究对象，采集其行人流特征信息。因此，在地铁站、出租车和公交车换乘点、居民区和购物中心布置四台蓝牙设备，设备具体安装位置见图2。



图2 莘庄地铁站南广场布局及蓝牙设备安装图

2、行人流数据采集方案

蓝牙技术因其成本低、实时采集等优点被应用在行人流监测中，然而因行人流中开启蓝牙设备的比例与车流中相比较低，故需要采用视频采集、人工调查等方式对蓝牙设备采集率进行辅助调查。

本研究在采集行人流时，根据所需数据选择调研时间段。根据实验安排及枢纽站特性，选择的观察日期为2015年4月29日至2015年5月2日。蓝牙设备安装在指定地点，24小时连续工作，将数据采集后再提取早晚高峰分析。通过蓝牙设备的安装地点确定不同蓝牙设备之间（文中表示枢纽站内主要节点）的行人流特征，得到的主要参数为：个体行人的速度和完成路径的行程时间。

此外，在地铁站进出口设置视频摄像头，观测时间分别选取4月30日的高峰小时和平峰时段，选取早晚高峰各一个小时，早晚平峰各一个小时，以算出不同时段总人流量，进而得出蓝牙的采集率。为了得到准确的公交和出租车换乘率，使用人工调查的方式对公交车和出租车的行人数量进行观察，时间段与视频记录同步。

3、蓝牙采集率

本文通过对蓝牙数据的筛选和缺失值修补，完成了蓝牙数据的预处理工作。结合视频和人工数据，测得不同方向蓝牙设备的采集率在2%-4%之间，结合前人研究，本研究的蓝牙监测率可以保证分析的准确性，此外，因以往研究已对蓝牙技术监测行人流的可行性进行了验证，因此本研究将不再对此方面进行论证。

二、基于蓝牙数据的行人流特征分析

1、基于蓝牙数据的行人流行程时间分析

行程时间（Travel time）记录了行人在枢纽内每条流线上的行走时间，可以通过蓝牙设备的终端网站直接获取。本研究中，将蓝牙设备安装在枢纽内，并实时观测一周时间，最终取观测状态良好的其中四天进行统计分析。为了更直观的分析行人流进出站不同方向的行程时间特征，以一小时为单位，

对使用蓝牙设备获取的行人行程时间数据绘制箱型统计图进行分析。

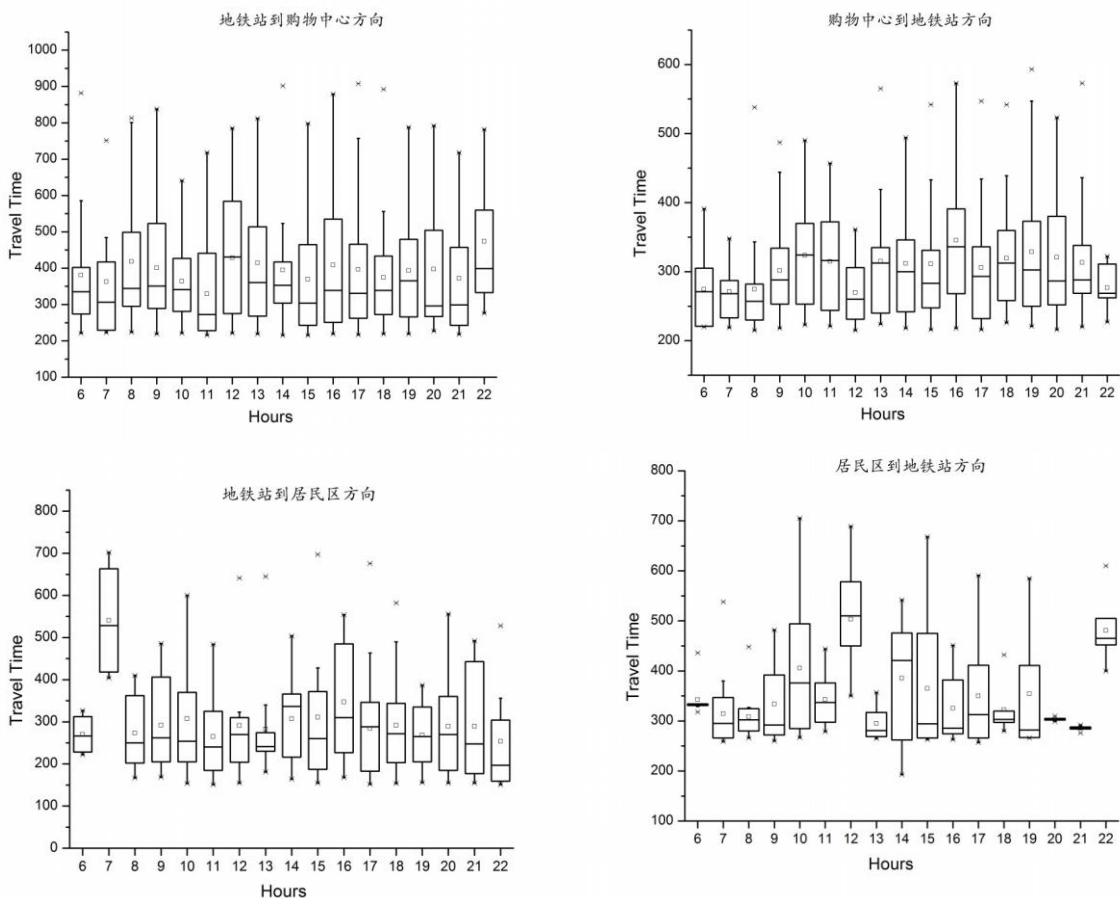


图3 蓝牙数据行人行程时间统计分析

从箱形图的分布可以看出，行程时间中位数分布总体较为均衡，可以得出不同小时内，行程时间均在较小的范围内浮动。行人流的行程时间在从行程时间长短的角度，早晚高峰的趋势并不明显，这表明行人流在枢纽内行走时，其行走时间的长短不仅受时段的影响，也受其他因素如周边环境、步行距离、出行目的等因素影响。

2、基于蓝牙数据的行人流速度分析

速度是最能反映行人流行走特性的参数之一，本文同样以一小时为单位，对蓝牙设备采集到的行人流速度进行分析。

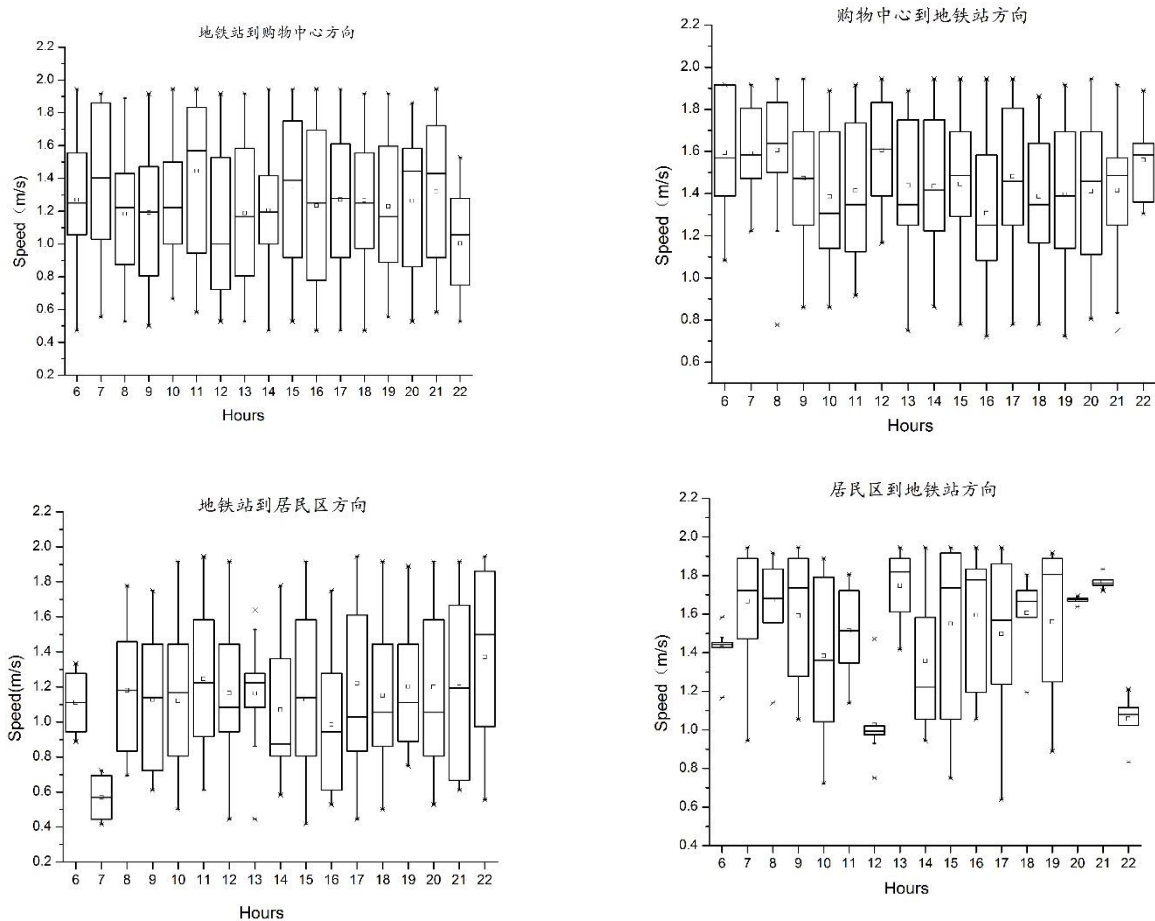


图 4 蓝牙数据行人流速度统计分析

从图 4 中的箱形图可以看出，行人流在交通枢纽内的速度分布比较分散化，对应于同一路径的两个方向的行人流，以地铁站为起点，行人进站速度明显大于相同时段的出站速度，这是因为相比于出站人群，进站人群主观上更希望尽快到达站内，因此会加快速度进站。而从速度分布的角度来看，速度的大小随时间的分布整体上较为分散，早晚高峰速度值的特征不明显，对此种情形的解释可能为，因为早晚高峰时间，虽然人流较大，但在观测时间内，枢纽站行人流量在设施内没有达到设施的通行能力，行人流即使在高峰小时内也处于自由流状态，行人流并没有达到饱和或者拥挤状态，因而高峰

小时速度并无明显减慢。

以往的研究中，大量的研究表明当行人流处于自由流状态下，其速度服从正态分布。为了验证蓝牙设备测得的行人流数据是否符合正态分布，对其进行高斯拟合分析。

表 1 行人流速度高斯函数拟合结果

方向	速度均值	速度标准差	拟合 R 方
地铁站到购物中心	1.25	0.42	0.59
购物中心到地铁站	1.56	0.32	0.57
地铁站到居民区	1.15	0.41	0.81
居民区到地铁站	1.52	0.34	0.63

高斯分布的拟合结果中，从地铁站出站到购物中心行人平均速度为 1.25m/s,从购物中心进站客流平均速度为 1.56m/s,从地铁站出站到居民区平均速度为 1.15m/s，从居民区进站到地铁站客流平均速度为 1.53m/s。在拟合结果中，标准差的大小同一目的地，出站方向的速度小于进站方向，且进站方向行人流速度分布更加集中，进站方向速度方差更大。

三、行人流服务水平仿真分析

1、速度比率

以蓝牙数据采集到的速度数据和同时段视频采集到的流量数据输入到仿真模型中，运行成功后，对行人流在模型中行走时的服务水平进行评价，以实际速度与期望速度的比率代表行人行走时的主观感受。

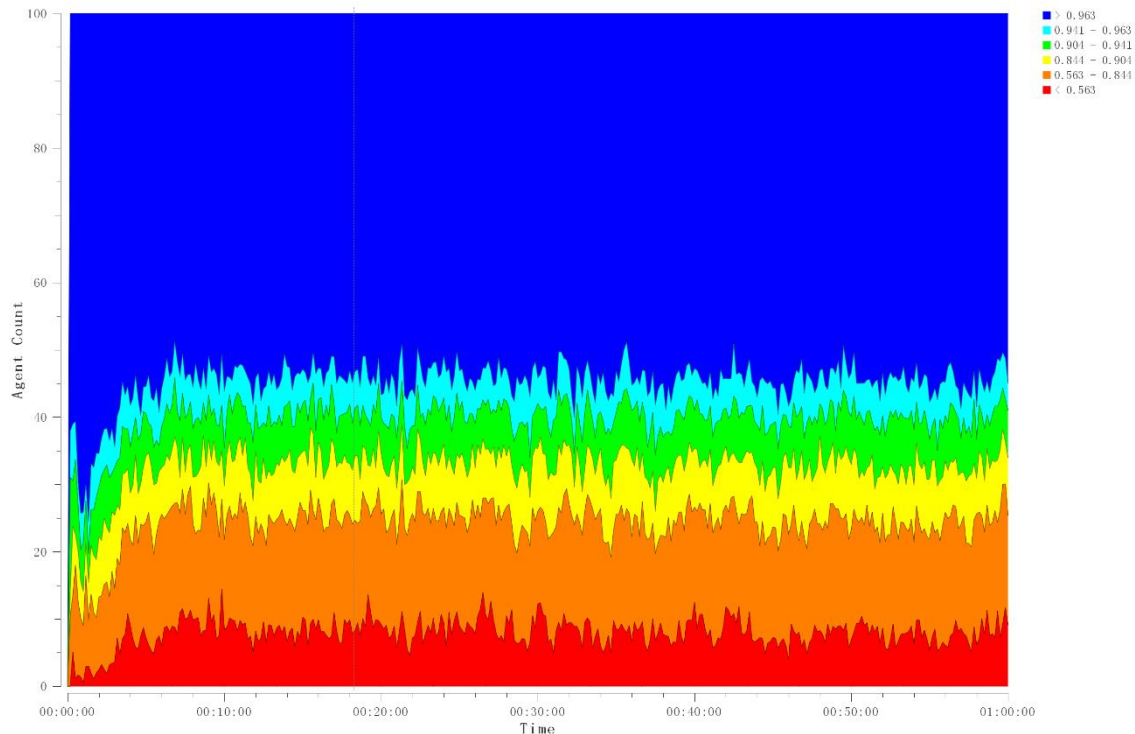


图 5 枢纽内速度与期望速度的比率分布图

由图 10 可以看出，采集时间段内的行人枢纽速度情况统计中，行人流的速度变动幅度较小，在仿真时间 1 小时内，行人流速度的变动范围较为均衡。在与期望速度（期望速度在此处可以指不同服务水平时，理想情况下行人应该达到的速度值）的比值中，达到期望速度 96% 以上的行人最多，其次为达到期望速度值的 56%-84% 之间的行人，再者实际速度值小于期望值的 56% 的行人流，实际速度值在期望值的 84%-90% 之间、90%-94% 之间和 94%-96% 之间的行人数量相差不大。

以上统计是对枢纽内各方向、各路径的所有行人进行统计的。对行人流实际速度与期望速度的比率中发现，采集时间段内，行人大多数可以按照接近理想速度值的状态下行走，因此，从总体的角度来讲，此时枢纽内的行人流行人不至于拥挤。

2、密度

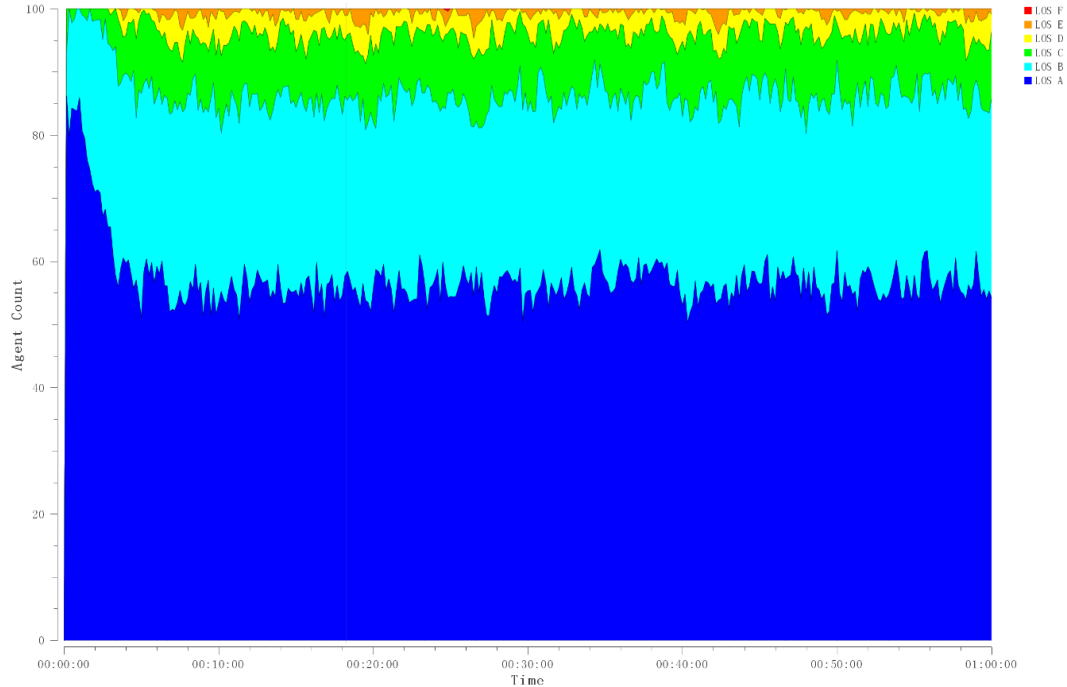


图 6 枢纽内行人密度图

由图 11 可以看出，在仿真开始阶段，行人流密度水平较高，即处于 LOS A 水平的行人较多，随着仿真的进行，行人不断进入到模型中，流量增加，LOS A 的人减少，到 2 分 30 秒时（通过实际仿真过程的观测得到 2 分半的数值）行人流基本上处于平稳状态。由上图可以分析出，在每个统计间隔(10s)中内，行人处于服务水平 A 级的人数最多，B、C、D、E 水平中的行人依次减少，而本次仿真中处于 LOS F 中的行人较少。

3、服务水平时间

行人在行走的过程中，其瞬时速度和密度会随着周边的密度、环境和其他行人的特性而改变，因此，上文分析的行人流服务水平实际是统计间隔内的行人所处的平均服务水平。行人在完成一段较长的路径时，可能经历不同的服务水平。因此，本文通过仿真软件统计每个行人个体在完成每条路径时所经历的不同服务水平。服务水平时间是指行人在整个路径中，经历不同服务水平的的时间。

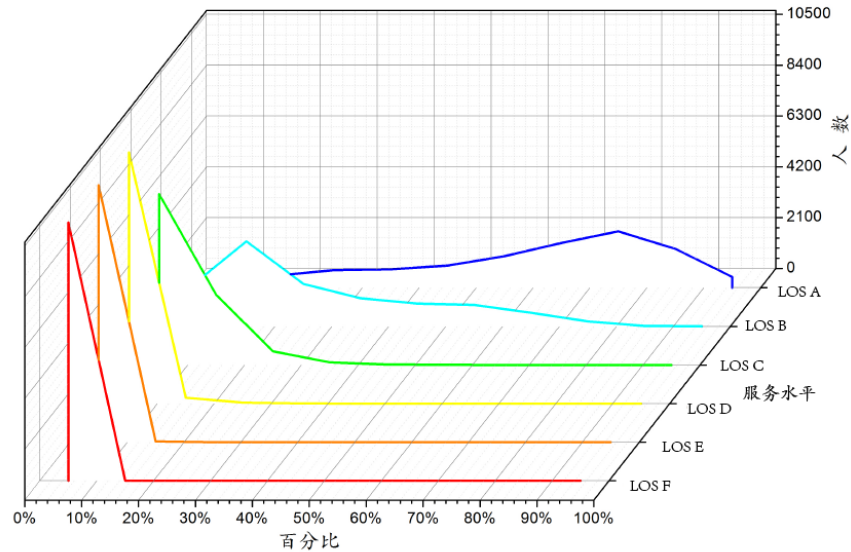


图 7 行人服务水平时间频数分布图

从上图可以得出结论，在所有成功完成仿真过程的行人中，行程中的大部分时间处于行人流服务水平 A 水平上。处于 LOS F 水平的平均时间小于 10% 的人较多，几乎没有人完成整个行程的过程中有超过 10% 的时间处于 LOS F 水平；处于 LOS E 水平的时间也少于 10%，只有很少的一部分人 LOS E 时间的百分比大于 10%；处于 LOS C 的时间大部分行人都低于 30%；对于 LOS B，LOS B 时间的经历时间占百分比 10%-20% 的人最多；LOS A 的时间在百分之 70 以上的人占总人数的比率最高。因此从总体上来看，行人流处于 LOS A-LOS C 的时间最多，行人流大多处于较为顺畅的状态。

以上分别从速度、密度和行人服务水平时间三个角度对采集时间段的行人流服务水平进行了定量和定性相结合的评价。

四、设施规模对行人流服务水平的影响

本章采用排队论的分析方法，从设施服务的角度，即设施服务率，构建了服务水平分析模型。该模型将每个行人假设为一个“顾客”，将行人设施即人行道根据行人行走所需的空间分成横纵向的行人服务站和服务台。为了

验证模型的可靠性，本文以仿真数据为基础，将仿真模型中的相关参数代入到行程时间模型中，计算得到不同设施内的行人流行程时间，进而与仿真模型中所得到的行程时间进行对比，结果表明，仿真模型中的行程时间和排队论中的行程时间具有显著相关性，从而验证了排队论模型的准确性。本文在排队论模型的基础上，以设施服务率模型为基础，对模型的敏感性进行了分析，即分析了行人服务水平、设施宽度和自由流速度对设施服务率的影响，

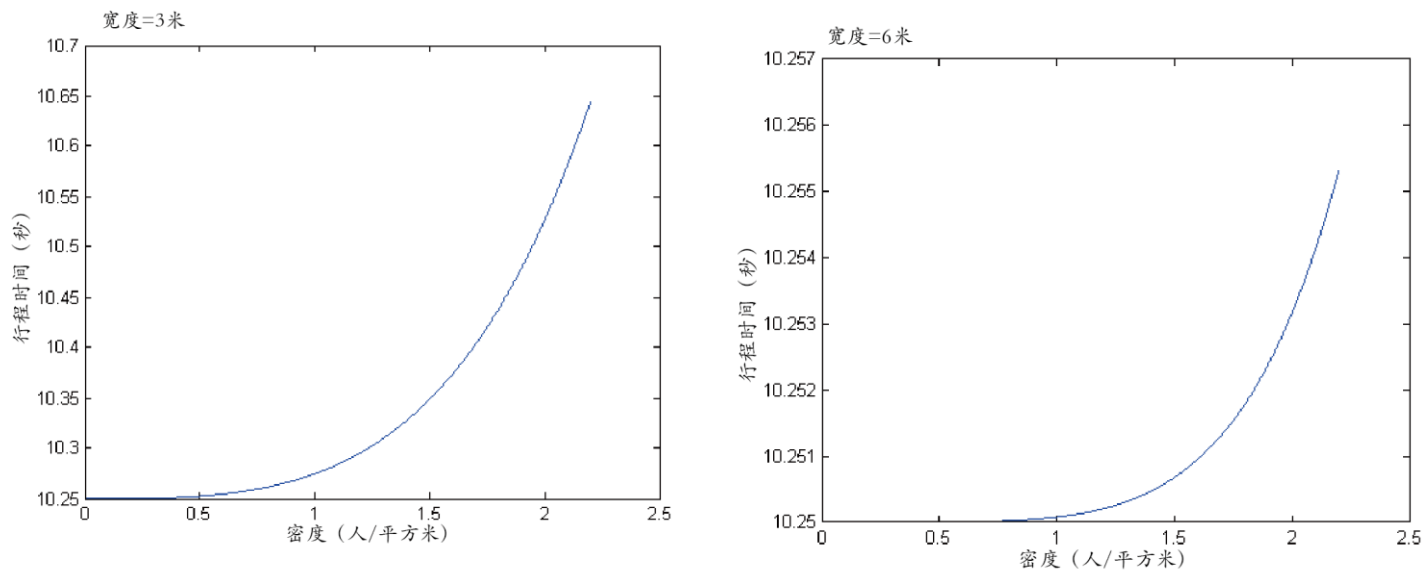


图 8 不同宽度下行人密度与行程时间关系图

从上图可以看出，在保证行人流设施不变的情况下，行程时间随着密度的增加而增加，且密度越大，这种变化率越大。随着设施宽度的增加，行人行程时间随密度变化的敏感度降低。

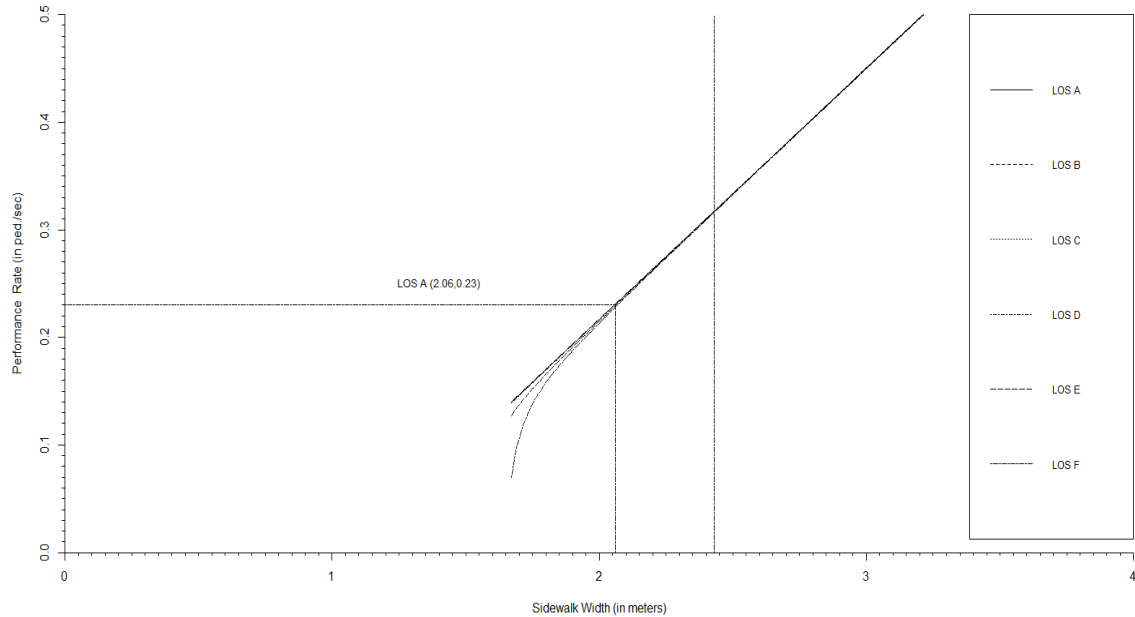


图 9 行人服务水平和设施宽度对服务率的影响

当设施宽度小于 2.54 米时，设施服务率与设施宽度呈曲线变化，当设施宽度达到 2.54 米时，设施服务率随设施宽度呈线性增长。在此种情况下，认为 2.54 米是设施的有效宽度。对实践的指导意义表现为，规划者可根据观测到的自由流速度、最大密度，和已知的行人流服务水平设计设施的宽度。

在设施宽度小于有效宽度时，达到指定服务率的条件取决于不同的服务水平。图中点 LOS A (2.06,0.23)的实际意义为，当行人通道通过率为 828/小时 (0.23 人/秒)，则设施宽度至少要达到 2.06 米以上才能将行人流密度控制在 0.309 人/平方米以下。如果在行人通道只有一个出口，则需要采用监控措施，限制行人通过量，保证每十秒钟行人出口通过人数不多于 23 人。

此外，在设施宽度小于有效宽度时，当行人处于 LOS E 和 LOS F 两个水平时，宽度的增加对行人服务率的提高影响更大，LOS F 的变化率更加明显，这是因为在 LOS E 和 LOS F 水平时，行人密度较高，达到设施的通行能力甚

至超出饱和值，此时若增加设施宽度，将极大的缓解行人的拥挤程度。这对密度较大情况下的行人设施规划具有重要意义。

图 15 表明了不同服务水平下，速度对设施服务率的影响。其中 X 轴表示行人流速度，Y 轴表示设施宽度，Z 轴表示设施的服务效率。从图中可以看出，随着行人流速度的提高，设施服务率也相应提高。然而，在行人流服务水平较低的情况下，即行人流密度较大的情况下，因速度提高所带来的设施服务率的升高效果并不明显。在 LOS F 的水平下，随着行人流自由流速度的增加设施服务率甚至不增加。这是因为当行人流服务水平较低时，速度较大的行人会被前方行人所阻碍，因而整体的服务率不能随着速度而提高。

此外，在较高的服务水平下，设施服务率会随着设施宽度的增加显著增加，然而在服务水平较低的情况下，此影响效率下降。这同时也可以说明，行人流服务水平是设施服务率的重要影响因素。

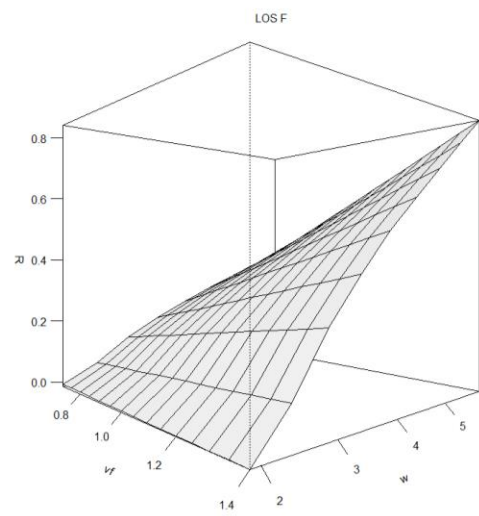
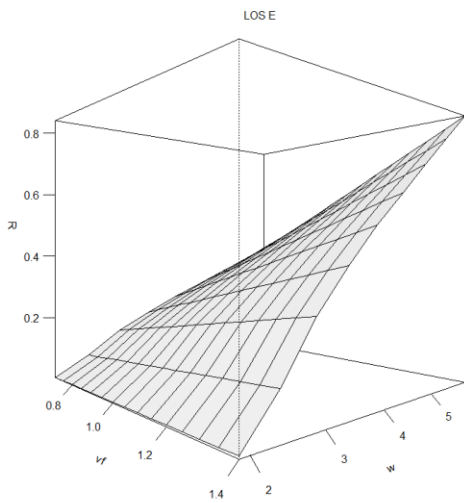
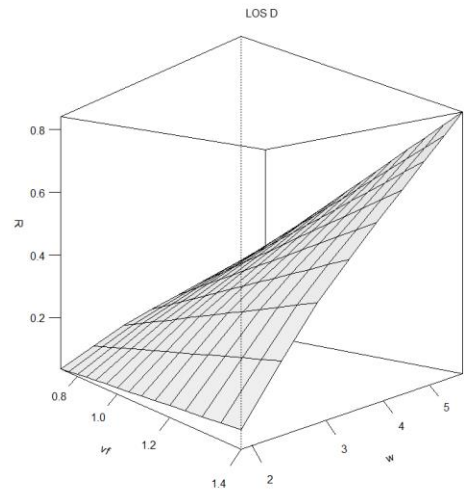
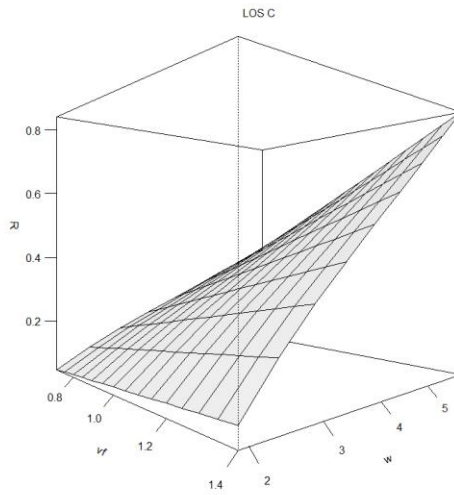
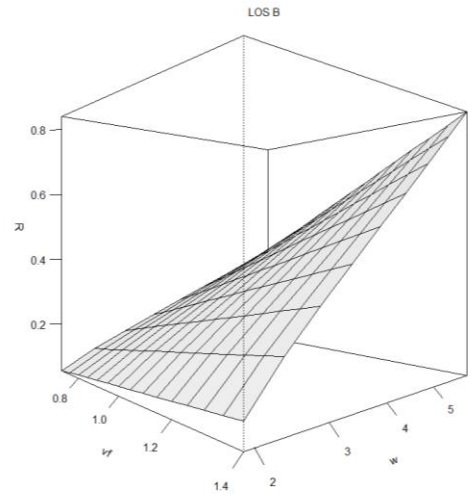
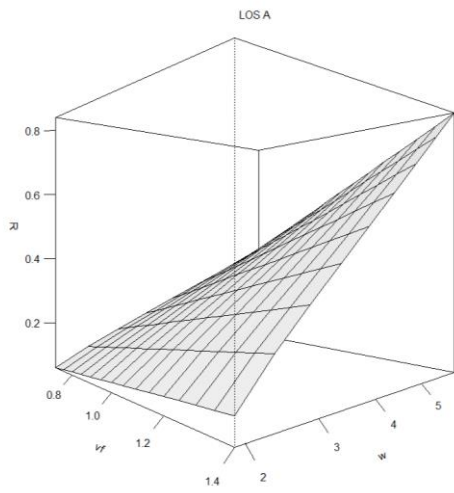


图 10 不同服务水平下自由流速度和设施宽度对设施服务率的影响

五、总结与展望

本文采用蓝牙数据为行人流数据的采集方法，借助行人流仿真的辅助手段，探讨了公共交通枢纽行人设施的行人流特征、行人服务水平及设施服务率的关系。主要研究内容包括行人流蓝牙数据的分析、仿真模型的建立、基于仿真结果的公共交通枢纽行人流特征分析以及基于排队论的行人设施服务率分析。

本文的分析过程在公共交通枢纽行人流服务水平的监控中较为新颖，尤其适用于国内公共交通枢纽的分析与建模。主要创新点主要有以下两方面：

1) 突破传统的行人流数据采集方式，尝试使用蓝牙设备采集行人流数据，并参照国外研究成果对蓝牙技术采集国内行人流数据的采集率进行了验证，通过对蓝牙数据的分析，用实际测量和理论分析的方法证明了蓝牙技术在实时监控行人流方面应用的可行性。

2) 创新性的将行人流仿真结果和排队论相结合，提供了分析行人流设施对枢纽服务效率的研究模型，也从设施的角度分析了行人流服务水平的影响，并与蓝牙技术的数据特点相结合，为蓝牙监控公共交通枢纽行人流服务水平提供了新方法和新思路。

因设备、数据、时间等限制，本研究仍存在很多不足，有待进一步深入探究。