

## 同济大学本科毕业设计（论文）原创性声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本毕业设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担，并承诺已遵从《同济大学交通运输工程学院本科毕业设计（论文）检测及处理办法（试行）》提交论文检测报告，文字重合比符合答辩要求，检测报告真实有效。

毕业设计（论文）作者签名：宋禧

2024 年 6 月 1 日

## 基于地铁网络脆弱性分析的应急公交备点选址研究

### 摘 要

随着城市化进程的加深，城市人口聚集加速，城市内公共交通尤其是城市轨道交通需求增加。近年来，城市地铁规模快速发展，逐步进入网络化运营。承载高强度客流的地铁网络一旦发生运营中断，会导致大量乘客滞留，造成不良影响。为提高城市地铁网络安全水平，完善地铁应急保障体系，应急公交接驳是其中一个关键环节，而合理的应急公交备车点布局是应急公交优秀服务质量的基础。因此有必要考虑客流量进行应急公交备车点选址研究。

本文从地铁网络脆弱性分析入手，首先建立考虑乘客换乘和列车运行的地铁网络拓扑模型，然后构建地铁客流分配模型，得到正常条件下地铁客流分布。通过分析线路中断条件下的客流重分配，计算站点、区间失效情况下的客流损失时间，形成以客流损失时间为测度的地铁网络脆弱性指标。在以上研究的基础上建立应急公交备车点选址模型，该模型以应急公交服务质量最优，备车点成本最小为优化目标，并且将地铁站点脆弱性指标纳入模型，基于站点脆弱性指标赋予不同的备车点覆盖次数和应急公交服务质量，从而对乘客滞留规模更大站点提供更高效率、充足的客流疏散服务。最后，将模型运用到上海地铁网络的实例中，得到不同倾向下的应急公交备车点布局方案，为有关部门制定方案提供参考。

**关键词：**地铁网络拓扑，客流分配，脆弱性，公交备车点选址

# Location of Emergency Bus Depots Based on Subway Network Vulnerability Analysis

## ABSTRACT

As urbanization progresses, the concentration of urban populations accelerates, and the demand for public transportation, especially urban rail transit, increases. In recent years, the scale of urban subways has developed rapidly and has gradually entered a networked operation phase. A subway network carrying high-intensity passenger flows, if interrupted in its operations, can lead to a large number of passengers being stranded, resulting in adverse effects. To enhance the security level of urban subway networks and to improve the subway emergency response system, emergency public transport connections are a key link, and the rational layout of emergency public transport stand-by points is the foundation of excellent emergency public transport service quality. Therefore, it is necessary to consider the passenger flow for the site selection of emergency public transport stand-by points.

This paper starts with an analysis of the subway's vulnerability, first establishing a subway network topology model that takes into account passenger transfers and train operations, and then constructs a subway passenger flow distribution model to obtain the distribution of subway passenger flows under normal conditions. By analyzing the redistribution of passenger flows under the condition of line interruptions, calculating the passenger loss time in the case of station and section failures, a subway vulnerability index measured by passenger loss time is formed. Based on the above research, an emergency public transport stand-by point location model is established, which optimizes for the best quality of emergency public transport service and the minimum cost of stand-by points, and incorporates subway station vulnerability indicators into the model. Based on the station vulnerability index, different stand-by point coverage times and emergency public transport service quality are assigned, thereby providing more efficient and sufficient passenger evacuation services for stations with larger passenger stranding scales. Finally, the model is applied to the Shanghai subway network as an example, and emergency public transport stand-by point layout plans under different tendencies are obtained, providing a reference for relevant departments to formulate plans.

**Key words:** subway network topology, passenger flow assignment, vulnerability, location of bus depots

## 目 录

摘 要 .....	II
ABSTRACT .....	III
1 绪 论 .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	1
1.2.1 地铁网络脆弱性 .....	1
1.2.2 应急公交备车点选址 .....	2
1.2.3 研究现状总结 .....	3
1.3 研究内容及技术路线 .....	3
1.3.1 研究内容 .....	3
1.3.2 技术路线 .....	4
2 理论基础 .....	5
2.1 地铁复杂网络构建 .....	5
2.1.1 地铁复杂网络建模方法 .....	5
2.1.2 复杂网络建模软件 .....	5
2.2 地铁网络脆弱性分析方法 .....	5
2.2.1 攻击策略 .....	5
2.2.2 脆弱性指标构建 .....	6
2.3 选址模型 .....	6
2.4 本章小结 .....	8
3 以客流出行损失时间为测度的地铁网络脆弱性分析 .....	9
3.1 地铁网络拓扑模型 .....	9
3.1.1 拓扑网络模型 .....	9
3.1.2 考虑换乘和列车运行的地铁拓扑网络模型 .....	9
3.2 地铁客流分配模型 .....	10
3.2.1 有效出行路径搜索 .....	10
3.2.2 乘客出行广义费用函数 .....	11
3.2.3 出行路径选择模型 .....	12
3.3 线路中断条件下的客流重分配 .....	13
3.4 脆弱性评估指标 .....	14
3.5 本章小结 .....	14
4 基于地铁网络脆弱性的应急公交备车点选址模型 .....	15
4.1 地铁应急公交接驳流程 .....	15
4.2 选址模型 .....	15
4.2.1 问题描述与模型假设 .....	15
4.2.2 数学模型 .....	16
4.3 模型求解 .....	17
4.4 本章小结 .....	18
5 案例分析 .....	19
5.1 案例说明 .....	19
5.2.2 客流 OD 数据 .....	21
5.2.3 应急公交备车点候选点数据 .....	21
5.3 上海地铁网络脆弱性分析 .....	22

5.3.1 有效路径搜索 .....	22
5.3.2 客流分配 .....	23
5.3.3 脆弱性指标计算 .....	25
5.4 应急公交备车点选址 .....	26
5.4.1 参数设置 .....	26
5.4.2 模型求解 .....	27
5.5 本章小结 .....	29
6 总结与展望 .....	30
5.1 总结与成果 .....	30
5.2 不足与展望 .....	30
参考文献 .....	31
附 录 .....	33
附录 1 上海地铁网络早高峰 8-9 时客流分布结果（部分） .....	33
附录 2 地铁网络脆弱性指标（部分） .....	35
附录 2.1 站点脆弱性指标（降序排列后取前一百个站点） .....	35
附录 2.2 区间脆弱性指标（降序排列后取前一百个区间） .....	38
附录 3 应急公交备车点布局方案一 .....	41
附录 4 Python 代码 .....	47
附录 4.1 地铁网络建模 .....	47
附录 4.2 客流分配代码 .....	50
附录 4.3 应急公交备车点选址 .....	55
谢 辞 .....	56

装

订

线

## 1 绪论

### 1.1 研究背景与意义

近年来，随着城市化进程的加深，大量人口在城市聚集，公共交通的重要性愈发凸显。地铁因其运量大、安全准时、绿色环保等特点，在城市公共交通领域扮演着极为重要的角色。尤其在一些高人口密度的大城市，地铁日均客运量可达几百万，甚至上千万，对城市的正常运转起着至关重要的作用。与此同时，我国地铁仍在快速发展中：截至 2024 年 4 月，我国 55 个城市开通运营城市轨道交通线路 310 条，运营里程 10273.7 公里。其中，上海运营里程最长（864.8km），其次为北京（836km），广州（641.5km）等<sup>[1]</sup>。随着地铁线路愈发完善，线网密度不断增加，地铁系统进入到网络化运营时代。

在地铁规模不断扩大的同时，地铁运营压力也不断增大，安全运营在不断遭受着挑战。在面临自然灾害、设备故障、恐怖袭击等突发事件时，地铁站点、区间受到影响无法正常运行，从而导致地铁列车延误、甚至局部地铁网络运营中断，进而导致大量乘客出行延误、滞留。为了减少突发事件造成的不良影响，《国家城市轨道交通运营突发事件应急预案》要求各城市要具备轨道交通地铁突发事件应急响应能力，采取的相关应急措施包括：人员搜救、现场疏散、乘客转运、抢修抢险等。在乘客转运方面，公交以其调动灵活、部署快捷等特点提供了较为完善的解决方案，即设置应急公交备车点对中断地铁站进行临时公交接驳。例如，2024 年 2 月 23 日早高峰，上海地铁 9 号线、5 号线因触网挂冰，部分区段中断运营，其中，9 号线松江南站至九亭区段停运时间接近 3 个小时，造成了居民出行不便。故障发生后，轨道交通应急预案启动，启用公交接驳运送滞留客流上万人次，减缓了地铁运营中断造成的不良影响，可见部署应急公交运力资源是完善地铁应急保障体系的重要一环。

然而，地铁网络拓扑和承载客流分布决定了各地铁站点对于应急公交接驳的需求并不均衡，且公交资源是有限的，需要重点保障运营中断后对乘客出行影响大的即脆弱性高的地铁站点的应急公交接驳服务。通过对地铁网络脆弱性进行分析和评估，从而基于地铁站脆弱性得到合理应急公交备车点布局方案，为此本文开展了基于地铁网络脆弱性分析的应急公交备车点选址研究。

### 1.2 国内外研究现状

#### 1.2.1 地铁网络脆弱性

脆弱性概念最早在自然灾害的研究中提出，之后逐渐广泛应用于各种领域，近年来关于交通网络的脆弱性研究也在增多，但关于交通网络脆弱性的定义还尚未达成共识。首次将脆弱性概念运用到交通领域的是 Berdica<sup>[2]</sup>，他提出交通网络脆弱性是指影响网络性能的突发事件对交通系统的影响程度。Husdal J.<sup>[3]</sup>同样认为交通脆弱性是网络对于事件或故障的敏感性，并提出脆弱性应该被纳入交通成本效益的分析中。Ermagun 等<sup>[4]</sup>提出了脆弱性的不确定性概念，对不同网络进行攻击后，分析网络的性能损失，发现脆弱性和脆弱性的不确定性都随着网络规模的增加而增加。赵美怡<sup>[5]</sup>通过总结前人对脆弱性概念的界定、辨析于脆弱性相关概念（如鲁棒性、弹性等）得到

城市轨道交通网络脆弱性是区间或站点失效后对网络的影响程度。

国内外学者对于地铁网络脆弱性分析和评估的方法也有一定的研究，总体上可以分成三类。

①通过统计分析往年地铁事故，通过分析事故发生的类型、频率、造成后果等因素来对地铁网络的脆弱性进行评估分析。García-Palomares 等<sup>[6]</sup>对马德里地铁系统进行脆弱性分析，通过 GIS 分析得到网络线路中断或列车延误的次数和后果，计算出线路和站点的脆弱性。袁竞峰<sup>[7]</sup>等对上海地铁网络进行了研究，通过对地铁事故进行数据统计分析，从物理、结构、社会功能三个方面对地铁脆弱性进行分析。

②通过对地铁网络进行拓扑网络建模，然后采用随机攻击或蓄意攻击等不同攻击策略对网络进行模拟攻击，得到地铁网络性能指标损失，从而分析地铁网络的脆弱性。Xing 等<sup>[8]</sup>以上海地铁网络为例，研究了加权地铁网络在应对随机故障和蓄意攻击方面的脆弱性。马壮林等<sup>[9]</sup>从多层网络视角提出一种多层有向时间加权的地铁网络模型构建方法。并且分析了不同攻击策略对多层地铁网络脆弱性的影响。

③基于区间中断条件下的客流重分配，通过模拟地铁网络内客流分布得到乘客广义出行费用，由此进一步处理得到用于评估地铁网络脆弱性的指标。李大愚等<sup>[10]</sup>基于复杂网络基本网络，通过研究交通量变化，从乘客出行延误时间和未满足出行乘客数量两个方面构建地铁网络脆弱性评价指标。邓中秋<sup>[11]</sup>基于 Logit 模型构建了地铁网络客流分配模型，通过网络客流损失率和乘客出行广义费用得到网络能效改变率，用于评价地铁网络的脆弱性。

## 1.2.2 应急公交备车点选址

应急公交备车点选址是地铁应急公交接驳的关键环节，合理的公交布局不仅能提高服务质量还能有效降低应急公交运维成本。应急公交备车点选址属于基础设施选址的一个子问题，目前国内外学者对于设施选址问题已经有了很多研究成果。

国外关于设施选址研究起步很早，1964 年，Hakimi<sup>[12]</sup>提出 P-中值和 P-中心模型；1969 年，Roth 提出集合覆盖模型。这三个问题被认为是选址领域的经典模型，后续选址问题基本上也基于这三个问题的理论模型。在应急公交备车点选址问题上，Gu 等<sup>[13]</sup>以公交车衔接时间与乘客延误时间最小构建了两阶段模型，对应急公交的衔接方案进行优化。Wang 等<sup>[14]</sup>考虑了地铁中断期间的动态客流需求，建立了多目标优化模型，对应急公交服务点布局进行优化。Pender 等<sup>[15]</sup>通过优化储存公交车点至应急点的出行时间、受影响乘客的数量，从而提供应急公交备车点布局方案。

国内对于选址问题研究起步较晚，但是对选址问题研究深入到具体场景。陈志宗等<sup>[16]</sup>整合了多种经典选址模型，建立了应急设施的多目标选址模型，求解得到不同策略下应急设施的布局结果。滕靖等<sup>[17]</sup>提出应急公交运能计算方法，并构建了考虑公交运能的备车点选址整数规划模型。刘爽等<sup>[18]</sup>结合乘客滞留风险因素改进 P-中心模型，求解得到考虑乘客滞留风险的应急公交驻车点选址方案；邓亚娟等<sup>[19]</sup>人以乘客延误时间最小为目标，得到了不同数量下的城市轨道交通蓄车点选址方案。肖畅<sup>[20]</sup>通过灰色关联法构建地铁脆弱性评价体系，以覆盖最优、服务时间最短、成本最小为目标，求解得到应急公交服务点布局方案。赵颖<sup>[21]</sup>在研究应急公交疏散流程的基础上，以应急疏散时间为优化目标，建立考虑公交备车点数目的公交车驻车点选址模型。

## 1.2.3 研究现状总结

### （1） 地铁网络脆弱性

总体来讲，对于地铁脆弱性分析研究逐渐趋于成熟。之前研究成果主要集中于对地铁网络拓扑结构的研究，通过物理网络结构性能来评估的网络脆弱性，由于没有考虑到实际乘客出行，评估结果往往会趋向具有高节点度或介数的节点更加脆弱。但在地铁实际运营条件下，地铁网络中客流高负载的分散节点往往会导致严重的乘客滞留，造成严重不良影响，与前文脆弱性分析评估结果不能很好吻合。因此，关于地铁网络脆弱性的研究视角正在从地铁网络拓扑结构等较为宏观的角度转向在地铁网络基础上通过研究客流分布、换乘等更细致的场景，建立脆弱性评价体系，从运输服务视角来研究脆弱性。

### （2） 应急公交备车点选址

目前，应急公交备车点选址理论已经较为成熟，现有研究成果多数通过考虑不同因素，如乘客滞留风险、公交运能等；不同优化目标，如乘客延误时间最小、应急疏散时间最小、运维成本最小等，来进行应急公交备车点选址的研究。现有研究成果的研究案例规模较小，大多研究仅仅选取某一个城市中的 3-5 条地铁线路简化后作为研究对象，地铁站点总数通常不超过 50 个，缺乏大规模案例的研究。

综合以上研究可以看出，目前对于地铁运输网络脆弱性的研究相对较少，而且更少有研究将地铁网络脆弱性分析结果应用到实际问题中。因此本文通过基于客流分配模型对地铁运输网络脆弱性进行分析，并以此为基础进行应急公交备车点的选址研究。最后案例分析部分，以整个上海地铁网络为研究对象，填补应急公交备车点选址研究大规模网络研究方面的空白。

## 1.3 研究内容及技术路线

### 1.3.1 研究内容

本文从地铁的脆弱性分析入手，首先构建线路中断条件下的客流分配模型，计算站点、区间失效情况下的客流损失时间，形成以客流损失时间为测度的站点脆弱性指标。然后基于站点脆弱性指标建立多目标应急公交备车点选址模型并求解。最后将模型运用到上海地铁网络的实例中，获取应急公交备车点布局方案，验证模型和方法的科学性和可行性。



## 1.3.2 技术路线

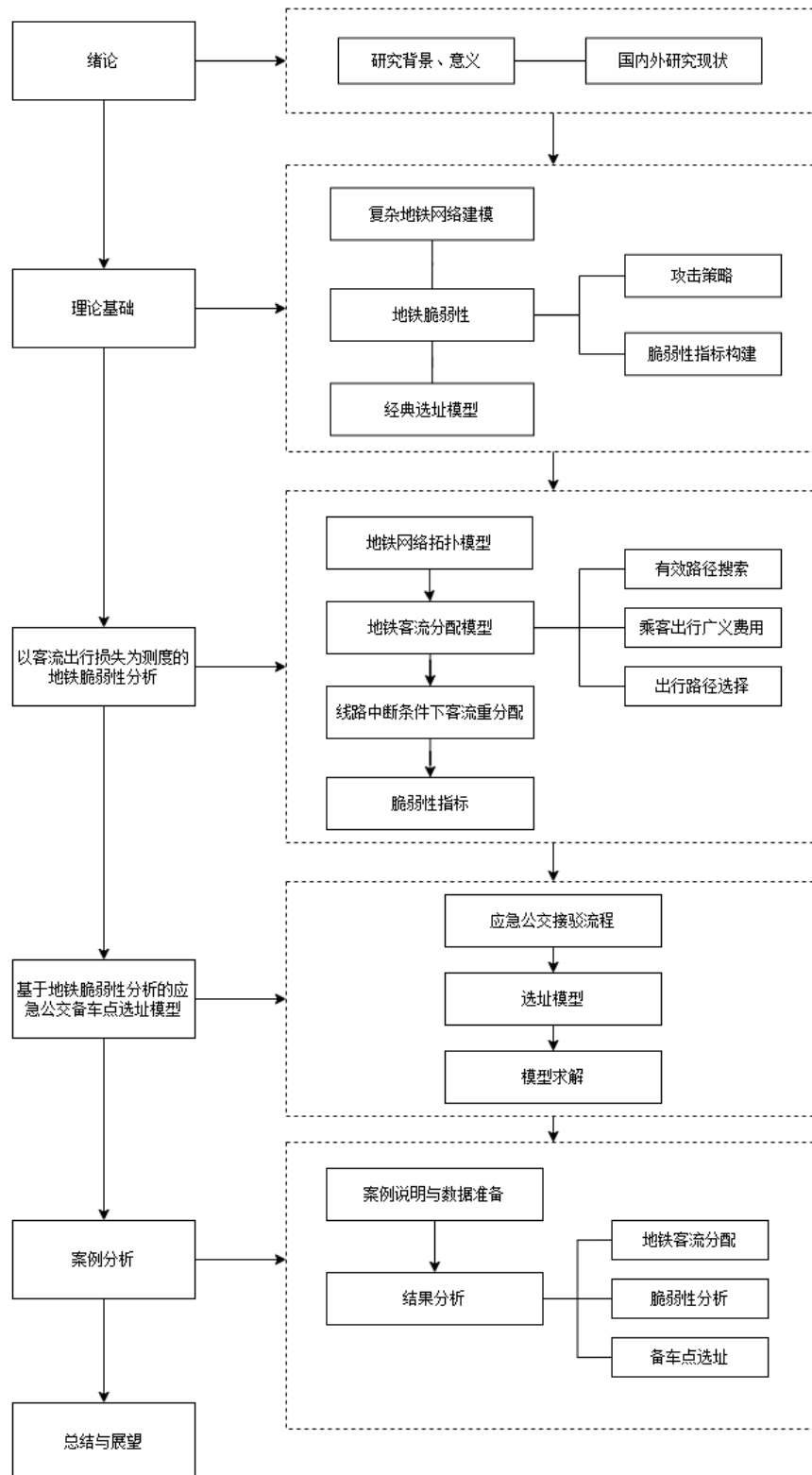


图 1.1 技术路线图

## 2 理论基础

### 2.1 地铁复杂网络构建

地铁复杂网络模型的构建是地铁客流分配、地铁网络脆弱性分析以及公交备车点选址的基础。城市地铁网络通常由站点以及连接站点的区间组成，并且整个网络互相连通，因此可以较容易抽象为节点和连边组成的拓扑网络结构从而进行建模。

#### 2.1.1 地铁复杂网络建模方法

地铁复杂网络建模方法主要有以下两种：SpaceL 模型和 SpaceP 模型。

##### （1）SpaceL 模型

SpaceL 模型中，将地铁站点视为节点，边视为连接两个地铁站点的区间，以此为基础得到的节点和连边组成了地铁拓扑网络。SpaceL 建模方法能够很好地展示地铁网络结构，主要用于地铁网络上动态仿真以及客流分布等研究，有利于对地铁网络客流进行模拟和预测，进而评估和优化地铁网络性能。

##### （2）SpaceP 模型

SpaceP 模型中，同样将地铁站点视作节点，对于地铁中任意两个站点，如果这两个站点均属于同一条线路（即两个站点可以无换乘直达），则相应的两个节点间形成一条连边。SpaceP 模型更加关注网络中的换乘关系，多用于分析整个公共交通网络，研究出行者如何在地铁网络内进行换乘，以及地铁与其他交通工具的换乘。

本文对于地铁网络脆弱性分析是基于对地铁网络客流流动的研究进行的，因此地铁复杂网络构建采用 SpaceL 模型。

#### 2.1.2 复杂网络建模软件

目前复杂网络建模软件通常有以下几种：Gephi、Pajek、Python (NetworkX、igraph)、MATLAB 等。Gephi 和 Pajek 都是专门用于复杂网络分析的软件，有丰富的网络分析和可视化功能，但自由度相对较低，不利于后续操作。Python 作为方便上手的编程语言，其有丰富和强大的第三方库。利用 NetworkX 库可以更加灵活地进行复杂网络的构建和分析，还可以结合 Pandas、NumPy 等数据分析库进行后续客流分配等工作。因此本文采用 Python 的 NetworkX 库进行地铁复杂网络的模型构建。

### 2.2 地铁网络脆弱性分析方法

#### 2.2.1 攻击策略

地铁系统通常会面临各种突发事件和复杂外部环境，包括自然灾害，系统故障等，总体上可以分成两种类型：随机故障和蓄意攻击。随机故障可描述为由于一个或几个站点随机出行的故障而导致线路中断，地铁停止运营。蓄意攻击则指由人为操纵对地铁系统蓄意或有针对性的破坏。这两种类型事件的区别主要在于随机故障可能与站点、列车使用时长和客流量相关，而

蓄意攻击则通常发生在具有高节点度或介数的枢纽以造成更大规模的破坏。地铁系统常见故障和攻击行为总结在下表 2.1:

表 2.1 地铁系统常见故障和攻击行为汇总<sup>[8][11]</sup>

网络故障	事故原因	案例
随机故障	技术故障	钢轨裂纹、车轮破损、制动功能功能、信号故障、电源故障、车门故障
	乘客和地铁工作人员	拥堵踩踏、自杀、坠轨、电梯事故、醉酒人员造成破坏、车站/列车内抽烟、乘客携带危险或易燃物品、乘客被车门/屏蔽门夹住、司机误操作、危险信号通过 (SPAD)
	管理行为	关闭车站、关闭车站出入口、线路临时维护
	外部环境	恶劣天气、轨道上的异物等
蓄意攻击	蓄意或针对性破坏	恐怖主义、破坏公物、乘客蓄意携带危险或易燃物品、侵入、放火、群体斗殴

因此攻击策略也可分为随机故障和蓄意攻击两类。大多数研究者攻击策略为: 随机故障情况下, 每个节点或边以相等的概率发生故障; 蓄意攻击情况下, 研究者通过研究网络拓扑结构计算站点节点度、介数、加权介数等指标, 按照不同指标排名进行攻击。

## 2.2.2 脆弱性指标构建

脆弱性指标的构建主要可分为两类: 基于复杂网络指标变化构建、基于地铁网络客流分布构建。基于复杂网络指标变化构建的指标有很多, 在此列举: (1) 最大连通子图: 当节点受到攻击并从网络中删除时, 整个连通图将分裂成多个子图和断开的部分。最大连通子图是拥有最多节点的子图。(2) 网络效率: 使用平均最短路径的倒数来表达地铁容量和网络中任意两点间的连通度。(3) 平均聚类指数: 表示节点与其相邻节点的连接情况。基于地铁网络客流分布构建脆弱性评价指标的研究还相对较少, 目前主要是通过计算区间中断或列车延误后导致乘客广义出行费用增加来作为指标依据。此外, 也有一些学者使用多因素统计分析法通过综合多种指标来对地铁网络脆弱性进行分析评价。

## 2.3 选址模型

应急公交备车点选址可以视作基础设施选址的子问题, 而设施选址领域经过多年研究已经有许多较为经典的选址模型, 本节主要介绍以下三种模型: 覆盖模型、P-中值模型和 P-中心模型。

### 2.3.1 覆盖模型

覆盖模型指在服务设施的最大服务范围有限的情况下, 以满足大多数或所有需求点为约束, 确定服务设施的位置。覆盖模型主要分为两类: 集合覆盖模型和最大覆盖模型。集合覆盖模型保证在对所有需求点进行全覆盖的前提下, 使用尽可能少的服务设施数量。对于应急公交

备车点选址，则意味着每个地铁站的服务半径内必须至少有一个为它提供服务的地铁站。具体模型如下：

$$\min \sum_{j \in J} x_j \quad (2.1)$$

$$s. t. \sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (2.2)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (2.3)$$

其中， $N_i$ 表示覆盖需求点 $i$ 的候选设施点集合；目标函数(2.1)保证基础设施数量最少；约束(2.2)表示每个需求点至少要被一个设施点覆盖。约束(2.3)表示决策变量的取值。

而实际情况中，常常由于预算或者资源的约束，有限的设施不能保证需求点都被覆盖，此时，优先考虑需求强度大的需求点是十分必要的，因此最大覆盖模型被提出以解决该问题。最大覆盖模型是指资源有限的条件下，即设施点数量有限，如何合理配置使得需求较大的需求点尽可能被覆盖。具体模型如下：

$$\max_{j \in J} \sum_{i \in I} h_i y_{ij} \quad (2.4)$$

$$s. t. \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_{ij}, \forall i \in I \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (2.6)$$

其中， $p$ 为服务设施点建设的最大数目； $h_i$ 表示需求点 $i$ 的需求量；目标函数(2.4)保证尽可能多覆盖更多需求点，约束条件(2.5)表示只有候选点被选为设施点才能提供服务；约束条件(2.6)表示服务设施数目数量限制。

### 2.2.2 P-中值模型

P-中值模型是物流和运营管理中常用的选址模型之一，主要用于确定有限数目设施的最佳位置，最小化从设施点到需求点的距离。每个需求点被分配到最近的设施点，优化目标是需求点到其分配设施点的加权距离之和最小。具体模型如下：

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} w_i d_{ij} y_{ij} \quad (2.7)$$

$$s. t. \sum_{j \in J} y_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (2.8)$$

$$y_{ij} \leq x_j, \forall i \in I, j \in J \quad (2.9)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (2.10)$$

其中， $w_i$ 表示需求点 $i$ 的需求量； $d_{ij}$ 表示需求点 $i$ 到设施点 $j$ 的距离； $y_{ij}, x_j$ 表示0-1类型的决策变量。目标函数(2.7)表示优化目标为需求点到对应设施点的加权距离之和最小，约束条件(2.8)表示每个需求点只由一个设施点提供服务；约束条件(2.9)表示只有被选中的设施点才能为需求点提供服务；约束条件(2.10)限制了设施点的总数。

## 2.2.3 P-中心模型

与 P-中值模型寻求加权距离之和最小不同，P-中心模型的优化目标是使服务效率最大，即在选定  $p$  个设施点后，使得任一需求点到距离最近的设施点的最远距离最小。具体模型如下：

$$\min D \quad (2.11)$$

$$s. t. \sum_{j \in J} y_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (2.12)$$

$$y_{ij} \leq x_j, \forall i \in I, j \in J \quad (2.13)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (2.14)$$

$$D \geq \sum_{j \in J} w_i d_{ij} y_{ij}, i \in I \quad (2.15)$$

其中， $D$  表示需求点到设施点的最大距离。目标函数 (2.11) 表示优化目标为需求点到设施点的最大距离；约束条件 (2.12) 表示每个需求点只由一个设施提供服务；约束条件 (2.13) 表示只有被选中的设施点才能为需求点提供服务；约束条件 (2.14) 表示设施点的数量限制；约束条件 (2.15) 保证  $D$  为需求点到设施点的最大距离。

## 2.4 本章小结

本章首先总结了当前常用的复杂地铁网络建模方法以及相应的建模工具，进而确定本研究选取 SpaceL 模型对地铁网络进行建模，并用 Python 的 NetworkX 库实现。随后介绍并分析了现有地铁网络脆弱性评估框架，主要阐述了现有攻击策略和脆弱性指标构建思路，最后介绍设施选址问题的三个经典模型。这些基础理论被用于本研究的全过程。

### 3 以客流出行损失时间为测度的地铁网络脆弱性分析

#### 3.1 地铁网络拓扑模型

##### 3.1.1 拓扑网络模型

本文拓扑网络结构建立采用 SpaceL 模型，将每个地铁站视作节点，连接相邻两个地铁车站的区间视为连边，以此构建地铁拓扑网络。由于地铁线路有上下行之分，因此采用有向图来对地铁网络拓扑结构进行描述。假设地铁网络为  $G$ ，则：

$$G = \{S, A, L\} \quad (3.1)$$

其中  $S = \{s_1, s_2 \dots s_n\}$  表示地铁网络中站点的集合， $A = \{a_1, a_2 \dots a_n\}$  表示地铁网络中区间的集合， $A$  中每个元素  $a_n = (s_i, s_j)$  表示区间  $a_n$  是站点  $s_i$  到站点  $s_j$  的列车轨道边， $L = \{l_1, l_2 \dots l_n\}$  表示地铁网络中线路的集合。然后定义节点连接关系  $a$  如下， $D$  表示地铁网络  $G$  的邻接矩阵。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{站点 } s_i \text{ 与 } s_j \text{ 之间存在连接} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

对于地铁网络仅仅描述节点和边的关系还不足以表达地铁网络的全部信息，各个站点之间的距离不同，列车停站时间也不同，因此要对模型中的连边分配权重。设加权后的地铁网络为  $G_w$ ，则：

$$G_w = \{S, A, L, w\} \quad (3.4)$$

其中  $w = \{w_1, w_2 \dots w_n\}$  表示分配给网络中边  $a_n$  的权重  $w_n$ 。接着在地铁网络邻接矩阵  $D$  的基础上构建加权地铁网络的邻接矩阵  $B$ ：

$$b_{ij} = \begin{cases} w_{ij} & a_{ij} \in A \\ 0 & a_{ij} \notin A \end{cases} \quad (3.5)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

##### 3.1.2 考虑换乘和列车运行的地铁拓扑网络模型

为方便后续进行客流分配相关研究，在此将乘客换乘和列车运行纳入到地铁拓扑网络模型的构建中。地铁列车在地铁网络中运行时，每个站点都需要停站，并且在不同区间运行速度也不尽相同。单纯通过距离对边进行权重分配不能很好展现列车运行对乘客出行造成的影响。因此本文将轨道区间边，即连接两个相邻站点的连边，分配权重为列车在区间运行时间与区间起始站停站时间之和。

$$w_{ij} = t_{ij}^{run} + t_i^{stop} \quad (3.7)$$

其中 $w_{ij}$ 表示地铁区间 $a_{ij}$ 的权重， $t_{ij}^{run}$ 表示地铁列车在区间 $a_{ij}$ 行驶所需要的时间， $t_i^{stop}$ 表示地铁列车在站点 $s_i$ 的停站时间。

同样需要处理的还有换乘站，为了能够在地铁网络中表达乘客出行过程中的换乘行为，对换乘站进行处理。前文在构建地铁网络拓扑模型过程中添加了线路信息，因此可以将换乘站分割成属于不同线路的虚拟站点，然后这些站点之间的连边表示乘客的换乘行为，权重可以表示乘客换乘所用时间。原模型和考虑换乘边的模型如图 3.1 所示

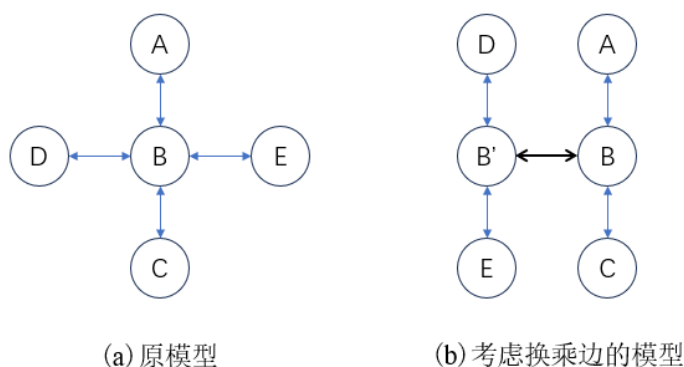


图 3.1 考虑换乘边的模型示意图

图中站点 B 为换乘站，在原模型中换乘站作为一个节点，无法表达乘客的换乘行为。但在添加了换乘边后可以通过车站 B 和 B' 之间的边来表示换乘行为，并且可以将换乘时间作为权重分配给换乘边。但需要注意 B' 是为了方便表达而虚拟的站点，实际并不存在。

## 3.2 地铁客流分配模型

乘客出行时通常会查询地铁软件或地图软件，基于平台提供的多条出行路径选择合适的路径进行出行。因此地铁客流分配模型建立需要搜索足够的有效出行路径，然后基于出行选择模型将客流分配到不同的候选有效路径上，进而得到地铁网络客流分布。

### 3.2.1 有效出行路径搜索

#### (1) 搜索 K 短路

K 短路算法是一种用于在图中找到从某起点到某终点所有不同路径中前 K 条最短路径的算法。 $A^*$ 算法定义一个函数 $f(x) = g(x) + h(x)$ 表示路径的当前状态，其中 $g(x)$ 为从初始状态到达当前状态的实际代价， $h(x)$ 为从当前状态到达目标状态的最佳路径估计代价，每次取出 $f(x)$ 最优的状态 $x$ ，扩展其所有子状态。以下是采用 $A^*$ 算法的求解 K 短路的基本步骤：

Step1: 将起点加入最优队列。令 $g(x)$ 为从当前节点到达终点的最短路径长度。

Step2: 选择启发式函数 $h(n)$ ，用于估计从节点 $n$ 到目标节点的最小成本，常用的启发式函数有欧几里得距离、曼哈顿距离等。

Step3: 从优先队列选取 $f(x)$ 最小的节点  $x$ , 如果节点  $x$  即为终点, 则记录当前最短路信息到  $K$  短路列表。否则基于节点 $x$ 探索所有相邻节点, 计算相邻节点的 $f(x)$ , 更新优先队列后重复循环。

Step5: 结束条件:  $K$  短路列表中有  $k$  条路径或遍历完所有节点。

## (2) 判断有效路径

有效路径是指在符合一般乘客出行规律的路径。本文主要从以下三个条件来对  $K$  短路算法搜索得到的最短路径进行筛选, 以确保待分配路径的有效性。

### ① 路径内不含重复站点;

一般来说在一条正常的乘客出行路径中, 乘客不会经过同一个地铁站点两次, 因此对于所有路径经过的站点进行判断, 如果出现重复站点则将该条路径从候选列表内剔除。

### ② 路径内不含重复路线;

正常情况下, 如果可以不换乘直接达到目的地, 乘客是不会选择需要换乘的路径。也就是说乘客出行不会从  $A$  线路换乘到  $B$  线路, 然后再换乘到  $A$  线路。筛选生成的出行路径, 如果出现不连续的重复路线, 意味着路径出现了无意义换乘, 剔除这些路径。

### ③ 换乘次数;

通常来讲, 乘客出行对于换乘次数有一定容忍上限, 如果换乘次数太多, 其出行便捷度降低而且出行时间会答复增加。在这种情况下, 出行者可能会采取其他交通方式, 放弃地铁出行。筛选生成的出行路径, 剔除其中换乘次数大于最大换乘次数  $N$  的路径。

## 3.2.2 乘客出行广义费用函数

乘客在在地铁内的出行行为可以概况为以下几个部分, 进入地铁站、候车、乘坐地铁、换乘、出站。每个部分都会产生出行或等待的时间, 而乘客出行路径的选择主要也是基于该条路径的出行费用。因此乘客出行广义费用函数可以由以下几个部分组成: 候车时间、在车时间、换乘时间和进出站时间。

### (1) 候车时间

乘客在进入地铁站和换乘后都需要在站台候车, 而候车时间与列车发车间隔和乘客到达站台的时间分布相关。本文假设乘客在较短时间内到达站台的时间分布是均匀的, 候车时间等于发车间隔的二分之一。具体可表示为:

$$WT_k^{od} = \sum (1 + n_k^{od}) \frac{1}{2} d_l \quad (3.8)$$

其中,  $WT_k^{od}$ 表示某一对  $OD$  间第  $k$  条路径的候车时间,  $n_k^{od}$ 表示某一对  $OD$  间第  $k$  条路径需要的换乘次数,  $d_l$ 表示地铁在线路 $l$ 的列车发车间隔。

### (2) 在车时间

在车时间是指乘客在列车上的时间成本, 包括列车运行时间和列车停站时间。具体可表示为:

$$RT_k^{od} = \sum T_{ij}^{run} + \sum T_i^{stop} \quad (3.9)$$

其中,  $RT_k^{od}$ 表示某一对  $OD$  间第  $k$  条路径的在车时间,  $T_{ij}^{run}$ 表示列车在地铁区间 $a_{ij}$ 运行所需



的时间，停站时间 $T_i^{stop}$ 表示列车在站点 $s_i$ 的停站时间。

### （3）换乘时间

换乘时间是指乘客在换乘站内的行走时间，换乘时间可以在地铁网络中的换乘边体现。具体可表示为：

$$TT_k^{od} = \sum t_{lm}^i \quad (3.10)$$

其中， $TT_k^{od}$ 表示某一对 OD 间第 k 条路径的换乘时间， $t_{lm}^i$ 表示乘客在地铁站 $s_i$ 从线路 $l$ 换乘到 $m$ 所需要的时间。

### （4）进出站时间

乘客进出站时间也可以考虑在内，进出站时间通常只与进出地铁站规模大小和路线设置有关。具体表示如下：

$$IT_k^{od} = t_{in}^o + t_{out}^d \quad (3.11)$$

其中， $IT_k^{od}$ 表示某一对 OD 间第 k 条路径的进出站时间， $t_{in}^o$ 表示乘客在地铁站 $s_o$ 进站所需时间， $t_{out}^d$ 表示乘客在地铁站 $s_d$ 出站所需时间。

### （5）拥挤度系数

除以上因素外，乘客出行还会考虑地铁拥挤度，尤其是在工作日早晚高峰，由于乘车人数太多，乘客出行舒适度会大幅下降。因此本文加入一个以列车满载率为变量的拥挤度函数<sup>[22]</sup>，用来表示由于列车满载率变化对乘客出行意愿的影响。具体表示如下：

$$f(r) = \begin{cases} 0 & r \leq r_0 \\ \alpha(r - r_0) & r_0 \leq r \leq r_1 \\ \alpha(r_1 - r_0) + \beta(r - r_1) & r \geq r_1 \end{cases} \quad (3.12)$$

其中， $f(r)$ 表示拥挤度系数，可以用来描述因列车拥挤导致乘客在车时间费用的增加， $r$ 表示列车在区间运行满载率， $\alpha, \beta, r_0, r_1$ 为拥挤度函数的参数。

综上，乘客出行广义费用函数可以表示为：

$$C_k^{od} = (1 + f(r)) * RT_k^{od} + WT_k^{od} + TT_k^{od} + IT_k^{od} \quad (3.13)$$

## 3.2.3 出行路径选择模型

地铁网络客流分布是由客流 OD 以及乘客出行路径选择形成。乘客出行路径选择通常采用随机效用理论进行模拟。随机效用理论基于乘客在选择出行路径时会基于个人偏好、成本等因素做出决策。因此首先需要定义每条路径的效用函数。

### （1）效用函数

对于某一对 OD，通过 k 短路算法搜索得到候选路径。每条候选路径基于乘客出行广义费用都可以计算出一个效用值，效用值越大的路径意味着该路径出行成本更低，被乘客选择的概率也就越大。本文基于随机效用理论，将乘客出行广义费用作为效用函数的固定部分构建效用函数如下：

$$U_k^{od} = -C_k^{od} + \varepsilon_k^{od} \quad (3.14)$$

其中,  $U_k^{od}$  表示 OD 对在第  $k$  条路径上的效用值,  $C_k^{od}$  表示 OD 对在第  $k$  条路径上的乘客出行费用,  $\varepsilon_k^{od}$  表示 OD 对在第  $k$  条路径上的尚未观测到的效用以及误差, 即效用函数的随机部分。

## (2) 基于 Logit 模型的出行路径选择概率计算

假设效用误差  $\varepsilon_k^{od}$  服从独立同分布的极值分布, 则可通过 Logit 模型来预测乘客选择不同路径的概率, 具体表达如下:

$$p_k^{od} = \frac{\exp(-\theta * C_k^{od})}{\sum_{k \in R^{od}} \exp(-\theta * C_k^{od})} \quad \forall k \in R^{od} \quad (3.15)$$

$$D(\varepsilon_k^{od}) = \frac{\pi^2}{6\theta^2} \quad (3.16)$$

其中,  $p_k^{od}$  表示 OD 对的有效路径中第  $k$  条路径被选择的概率;  $\theta$  表示与效用误差  $\varepsilon_k^{od}$  方差相关的参数, 两者具体关系如式(3.16)所示, 通常需回归分析进行标定;  $R^{od}$  表示 OD 对即起始站点  $s_o$  与到达站点  $s_d$  之间所有有效路径的集合。

为避免路径选择概率过于集中于某一条路径, 导致不合理的客流分配结果, 采用乘客出行广义费用相对插值重新计算路径被选择的概率, 改进后的 Logit 模型表达如下:

$$p_k^{od} = \frac{\exp\left(-\theta * \frac{C_k^{od}}{C_{min}^{od}}\right)}{\sum_{k \in R^{od}} \exp\left(-\theta * \frac{C_k^{od}}{C_{min}^{od}}\right)} \quad \forall k \in R^{od} \quad (3.17)$$

其中,  $C_{min}^{od}$  表示 OD 对间所有有效路径中广义费用的最小值。

## 3.3 线路中断条件下的客流重分配

线路中断是指地铁系统在遭遇突发事件后, 造成的地铁运营中断。线路中断可分为区间中断和站点中断。区间中断的处理办法是将网络中区间对应的边移除。站点中断的处理办法是将网络中站点对应的节点以及与该节点相连的边移除。处理后的网络视作全新的网络, 然后在此全新网络上进行客流分配。

在地铁突然中断运营后客流重分配, 实际上是对受到中断运营影响的客流进行重新分配。因此需要对线路中断条件下的客流进行分类:

### (1) 无法到达目的地的客流

当线路中断后, 会有部分客流无法通过乘坐地铁到达预计目的地。这部分客流包括, 起点或终点在线路中断范围内的客流, 没有有效出行路径的客流。此类客流只能通过换乘其他交通工具或原地等待地铁恢复运营到达目的地。通常来讲, 此类客流是造成客流滞留的最主要原因。

### (2) 出行路径改变的客流

当线路中断后, 会有部分客流原本出行路径因线路中断无法出行, 但是通过改变出行路径仍然可以通过地铁到达目的地。此部分客流一般情况下会继续采用地铁出行, 因此在客流重分配时需要基于线路中断后的地铁网络重新寻找有效路径, 将这部分客流重新分配到网络。

### (3) 无影响的客流

线路中断对于整个地铁网络的影响是有限的，因此出行路径远离或不含有中断区域的客流几乎不会受到影响。对于这部分客流，假设他们出行路径不会变化，安装原有路径继续出行。但值得注意的是，客流重分配后会造成客流在网络上的分布变化，进而导致区间拥挤度发生变化，严格来说即便这部分客流的出行体验也会受到影响。

### 3.4 脆弱性评估指标

本文地铁网络脆弱性分析是以客流出行损失时间为测度的，因此结合上文对线路中断条件下的客流分类，我们需要对受影响客流量的乘客出行费用与线路中断前的出行费用做差，得到客流出行损失时间。

#### （1）无法到达目的地的客流

对于无法到达目的地的客流，其客流损失时间难以通过与原出行费用对比得到。因此本文假设这部分客流在线路中断时期的时间全部损失，即这部分客流的脆弱性指标等于乘客数量与地铁中断时间的乘积，具体表示如下：

$$V_1 = \sum N_1 T_{zd} \quad (3.18)$$

其中， $V_1$ 表示无法到达目的地客流的脆弱性， $N_1$ 表示无法到达目的地的客流的乘客数量， $T_{zd}$ 表示地铁突发事件导致地铁运营中断时间，这部分可以通过统计近年来地铁突发事件得到。

#### （2）出行路径改变的客流

对于出行路径改变的客流，由于线路中断后选择的路径出行费用必然会大于原出行费用，因此这部分客流损失时间可以表达为线路中断后出行费用与原出行费用的差值。具体表示如下：

$$V_2 = \sum N_2 (C_k^{od'} - C_k^{od}) \quad (3.19)$$

其中， $V_2$ 表示出行路径改变客流的脆弱性， $N_2$ 表示出行路径改变客流的乘客数量， $C_k^{od'}$ 表示改变出行路径后的广义出行费用， $C_k^{od}$ 表示改变出行路径前的广义出行费用。

综上所述，以客流损失时间为测度的脆弱性指标可由下式表示：

$$V = V_1 + V_2 \quad (3.20)$$

### 3.5 本章小结

本章主要研究了通过建立线路中断条件下的客流分配模型，计算得到以客流出行损失时间为测度的地铁网络脆弱性指标。首先建立了考虑换乘和列车运行的地铁拓扑网络模型，奠定了客流分析的网络基础。随后从有效出行路径搜索、乘客出行广义费用函数和基于随即效用理论的改进 Logit 模型的乘客出行路径选择模型进行客流分配。接下来分析了线路中断条件下不同类型客流的处理办法，并以此为基础得到了以客流出行损失时间为测度的脆弱性指标。

## 4 基于地铁网络脆弱性的应急公交备车点选址模型

### 4.1 地铁应急公交接驳流程

根据上海市道路运输管理局发布的《轨道交通突发事件交通保障应急预案》可以得到地铁应急公交接驳流程如下：

- （1）轨道交通突发事件发生后，轨道交通企业应在 15 分钟内向指挥中心报告突发事件基本要素、影响区段、客流规模及其可能延续的时间等情况。
- （2）指挥中心接到报告后应立即通知市道路运输局及有关部门负责人。市道运中心接到突发事件情况报告后，应立即向地面公交相关企业通报情况，并要求做好增援准备。
- （3）轨道交通企业判断情况后，向指挥中心提出启动应急公交接驳服务申请，申请内容包括需增援线路区段及车站，所需公交车辆数，现场指挥联络电话，公交临时车辆标识交接地点等。
- （4）指挥中心通过申请，启动应急公交接驳服务预案，向公交相关企业下达指令，指令内容包括需增援线路区段及车站、所需公交车辆数、轨道交通车站有关联络人员及电话等。
- （5）相关公交企业接到指令后，应在 15 分钟内将第一辆车调集至指定地点，并在车辆到达前 5 分钟与轨道交通企业联系，做好车辆标识交接、运营组织等工作。
- （6）轨道交通恢复运营后，轨道交通企业应及时上报有关信息，由指挥中心下达应急公交接驳服务结束指令。

从以上应急公交接驳流程可以得到，地铁突发事件发生后到应急公交到达目标地点分两部分，程序性沟通和判断所需时间和调动公交到达目标地点所需时间。程序性沟通和判断所需时间是必要的，只能通过优化公交到达目标地点时间来提高应急公交接驳服务质量。而公交资源是有限的，为最大化利用现有资源，发挥现有资源的最大作用，基于地铁网络脆弱性的应急公交备车点选址是十分必要的。

### 4.2 选址模型

#### 4.2.1 问题描述与模型假设

当地铁系统遭遇突发事件后，为疏散滞留乘客启动应急公交接驳服务进行乘客转运，对于滞留乘客，他们想要应急公交尽可能快提供服务以便快速脱离危险环境或继续行程，而公交资源是有限的，与乘客需求间产生了矛盾，因此本节建立基于地铁网络脆弱性的应急公交备车点选址模型，从而在平衡服务质量和资源消耗条件下找到较优的应急公交备车点布局方案。确保在地铁运营中断的条件下，应急公交能迅速提供接驳服务，实现滞留乘客的快速疏散和转运。

为构建数学模型需要如下基本假设：

- （1）应急公交备车点候选点为现有公交线路的首末公交站、公交停车场、客运中心等。
- （2）应急公交为公交线路上实际运营的公交，当应急公交接驳预案启动时，接驳地铁站点所对应应急公交备车点内所有公交车被视作可分配的应急公交。
- （3）应急公交到达目标站点所用时间应急公交备车点到目标站点的距离和公交平均行驶速

度得到。

(4) 应急公交接驳服务是初期运营中断时候有应急公交赶到，满足乘客对公交支援的及时性的期望，尽快启动车站的乘客转运程序。对乘客滞留规模大的车站，即脆弱性高的车站，后续要集合多个备车点进行车辆支援。

## 4.2.2 数学模型

本模型以基础设施选址领域经典模型中的覆盖模型为基础，基于地铁网络脆弱性分析，以脆弱站点优先的应急公交服务质量最优和备车点运维成本最小为目标函数，以备车点对不同站点覆盖次数为约束，建立基于地铁网络脆弱性的应急公交备车点选址模型。模型的相关参数和变量定义如下：

参数：

$i \in I, I = \{1, 2, 3, \dots, s\}$ ,  $i$  为地铁站点编号,  $I$  为地铁站点集合,  $s$  为最大地铁站点编号；

$j \in J, J = \{1, 2, 3, \dots, b\}$ ,  $j$  为应急公交备车点候选点编号,  $J$  为应急公交备车点候选点集合,  $b$  为最大应急公交备车点候选点编号；

$v_i$  表示地铁站点  $i$  的脆弱性评价指标；

$t_0$  表示应急公交从接收到指令到出发所需准备时间；

$d_{ij}$  表示从应急公交备车点  $j$  到地铁站点  $i$  的距离；

$v$  表示应急公交的平均行驶速度；

$D$  表示应急公交备车点的能够提供服务的覆盖半径；

$\gamma_1, \gamma_2$  表示基于地铁网络脆弱性分析后的地铁站点分类的脆弱性指标界限；

$T_{ij}$  表示应急公交从接到指令从备车点  $j$  出发到达地铁站点  $i$  所需时间。具体计算如下：

$$T_{ij} = t_0 + \frac{d_{ij}}{v} \quad (4.1)$$

$c_j$  表示应急公交备车点  $j$  的运营维护成本，由于作为备车点

决策变量：

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{选择候选点 } j \text{ 为备车点} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{备车点 } j \text{ 为地铁站点 } i \text{ 提供服务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

基于上述参数和决策变量构建选址模型，模型表达如下：

$$\text{Min} Z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{ij} \frac{v_i}{T_{ij}} \quad (4.2)$$

$$\text{Min} Z_2 = \sum_{j \in J} x_j c_j \quad (4.3)$$

$$s.t. \quad y_{ij} \leq x_j, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4.4)$$

$$d_{ij} y_{ij} \leq D, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4.5)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad (4.6)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad (4.7)$$

$$\text{当 } 0 \leq v_i \leq \gamma_1, 1 \leq \sum_{j \in J} y_{ij} \leq 3 \quad (4.8)$$

$$\text{当 } \gamma_1 < v_i \leq \gamma_2, 2 \leq \sum_{j \in J} y_{ij} \leq 5 \quad (4.9)$$

$$\text{当 } \gamma_2 < v_i \leq 1, 3 \leq \sum_{j \in J} y_{ij} \leq 7 \quad (4.10)$$

目标函数(4.2)基于引力模型表示备车点对其服务的响应时间，脆弱性指标越大的地铁站点对于备车点的引力越强，该目标函数可以保证应急公交备车点对地铁站响应时间尽可能短，覆盖次数尽可能多，并且考虑到地铁站脆弱性不同，对于脆弱性高的地铁站提供更好的服务质量。

目标函数(4.3)表示运营和维护公交备车点的总成本，使用最低成本提供更好的应急公交服务。

约束条件(4.4)表示只有当候选点被选为备车点时才能为地铁站提供服务。(4.5)表示地铁站与为其提供应急公交服务的备车点距离不大于备车点服务覆盖半径。约束条件(4.6)(4.7)表示对决策变量的 0-1 约束。约束条件(4.8)(4.9)(4.10)表示根据地铁站脆弱性指标的不同规定地铁站被备车点覆盖的最小覆盖次数和最大覆盖次数（可根据实际需求进行调整）。模型考虑了对于脆弱性较低的车站，在出现乘客滞留后规模较小，通过少量备车点提供应急公交接驳以及城市出租车体系可以应对，但是对于高脆弱性车站，其乘客滞留规模较大，少量备车点无法提供足够服务。因此本文依照前人研究<sup>[20]</sup>设定了不同地铁站点的最低覆盖次数，并根据模型运行得到的方案表现限定了最大覆盖次数。既保证了能满足需求，又不浪费资源。此外还可以弥补目标函数基于引力模型可能会导致备车点过于集中在密集地铁站点区域的问题。

#### 4.3 模型求解

本文建立的选址模型属于多目标模型，该模型涉及到两个互相冲突的优化目标，两个目标函数无法同时取到最优值。通常情况下，多目标问题的解决方案一个 Pareto 最优解集。目前常用解决多目标优化问题的方法有：线性加权法、主要目标法、逼近目标法等。常用算法有：遗传算法、粒子群算法、差分进化算法等。本文采用线性加权法对多目标模型进行处理，并使用 Gurobi 求解器进行求解。

在对目标函数进行线性加权前，由于目标函数的量纲不统一，需要对目标函数进行无量纲化，使得目标函数数量级在同一数值。本文采用归一化方法对目标函数进行转化，转化公式如下：

$$Z'_i = \frac{Z_i - \min(Z_i)}{\max(Z_i) - \min(Z_i)} \quad (4.11)$$

对处理后的目标函数基础进行线性加权将多目标函数转化为单目标函数如下：

$$\text{Min}Z = w_1 Z'_1 + w_2 Z'_2 \quad (4.12)$$

不同权重可以表达不同目标函数的重要程度，因此可以得出不同倾向下的应急公交备车点选址方案。本文在案例分析章节讨论了不同权重对于选址方案的影响。

本研究采用了 Gurobi 求解器对模型进行求解。Gurobi 求解器是一种可用于求解大规模数学

规划模型的商业求解器，支持求解大规模线性问题、二次问题和多目标优化问题等常见的数学模型。Gurobi 支持多种编程语言，包括 Python、MATLAB、C++ 等常见语言。Gurobi 是在数学模型框架下求解，但在节点探索中内置了 40 多种启发式算法用于快速找到可行解加快收敛。具体求解过程可分为以下三个阶段，预处理阶段、求解阶段及输出阶段。其中，预处理阶段首先采用启发式算法来找到一个初始解，确定改模型是否有解，然后对模型冗余约束进行削减以简化模型；求解阶段 Gurobi 通过根松弛方法得到原问题的松弛模型并结合启发式算法获得模型解的下界，再利用单纯形法和分支切割算法和多种剪枝策略来收紧界限，不断逼近求解下界，最终得到最优解；输出阶段 Gurobi 输出求解过程和求解信息。

使用 Gurobi 求解，首先下载 Gurobi 提供的 python 库，然后将数学模型转写为符合 Gurobi 语法的 Python 语句，求解器会基于所给模型类型选择合适的求解方法和算法，最后设置相关参数即可使用 Gurobi 求解器进行求解，得到最优方案。

#### 4.4 本章小结

本章建立了基于网络地铁网络脆弱性的应急公交备车点选址模型。首先对地铁应急公交接驳流程进行梳理，进而分析了基于地铁网络脆弱性进行应急公交备车点选址布局的重要性。随后构建了以应急公交服务质量最优、备车点运维成本最小为目标的多目标选址模型。最后提出了对多目标模型的求解办法，先对目标函数进行归一化处理并通过线性加权的方法将多目标优化转化为单目标优化问题，然后使用 Gurobi 求解器得到改权重下的最优方案。此外，通过调整目标函数权重可以求解得到不同倾向下的备车点布局方案。

## 5 案例分析

为验证本文提出的地铁客流分配模型、地铁网络脆弱性分析和应急公交备车点选址模型的有效性与合理性，本文选取上海地铁网络作为案例，依照第三章、第四章提出的方法和模型求得地铁网络的客流分布、站点脆弱性指标，最后通过调整目标函数权重，得到不同倾向下的应急公交备车点布局方案。

### 5.1 案例说明

截至目前，上海地铁网络是国内运营里程最长的地铁网络，运营线路共 20 条，共设车站 508 座，运营里程达 864.8km。上海地铁线路图如图 5.1 所示。2024 年 3 月 8 日，上海地铁客运量 1339 万人次创下历史单日最高客流纪录，2023 年全年客流量为 3.61 亿人次。上海地铁承载着大量的居民出行需求，必须做好地铁突发中断后的应急公交接驳预案，因此本案例适合用于进行应急公交备车点选址的研究，同时也具有一定典型性。

### 5.2 数据准备

#### 5.2.1 上海地铁网络数据

上海地铁数据可以通过百度地图开放平台 API 获取，可以提取地铁线路信息以及站点的经纬度信息。此时获取到的数据还无法使用，需要对有支路的线路名称以及四号线环线进行处理，便于后续进行地铁网络建模。处理好的站点信息（部分）如下表 5.1：

表 5.1 地铁站点信息（部分）

地铁站点	线路名称	lon	lat
莘庄	地铁 1 号线(莘庄-富锦路)	121.38096225052834	31.113165188226247
外环路	地铁 1 号线(莘庄-富锦路)	121.38838590705079	31.122819229067794
莲花路	地铁 1 号线(莘庄-富锦路)	121.39814793295776	31.132750440735812
锦江乐园	地铁 1 号线(莘庄-富锦路)	121.4094288171254	31.144026970698118
上海南站	地铁 1 号线(莘庄-富锦路)	121.42494215047739	31.156544039117378
漕宝路	地铁 1 号线(莘庄-富锦路)	121.43029458449674	31.170289495569552
上海体育馆	地铁 1 号线(莘庄-富锦路)	121.4318230873843	31.183882054184938
徐家汇	地铁 1 号线(莘庄-富锦路)	121.43373059775313	31.194669135691857
衡山路	地铁 1 号线(莘庄-富锦路)	121.44215114255208	31.206888683416025
常熟路	地铁 1 号线(莘庄-富锦路)	121.4466977911767	31.215516618789966



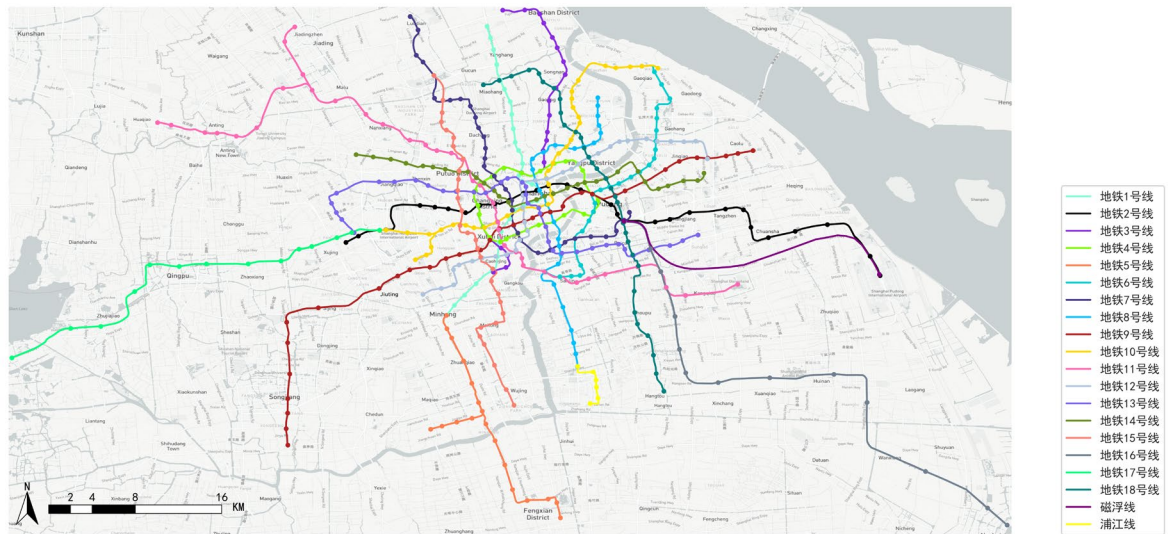


图 5.1 上海地铁线路示意图

根据处理好的站点和线路信息，计算每个区间的长度。《城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告》<sup>[23]</sup>中提到 2023 年上海地铁平均运行速度为 37.3.km/h，为方便计算，本文每站停站时间取 30s，线间换乘时间<sup>[24]</sup>取 5min，通过上述数据可以计算网络中轨道边的权重，即区间列车运行时间加停站时间，换乘边的权重取换乘实际。在已知节点间关系以及各边的权重，可以通过 Python 的 NetworkX 库构建网络拓扑图，如图 5.2 所示：

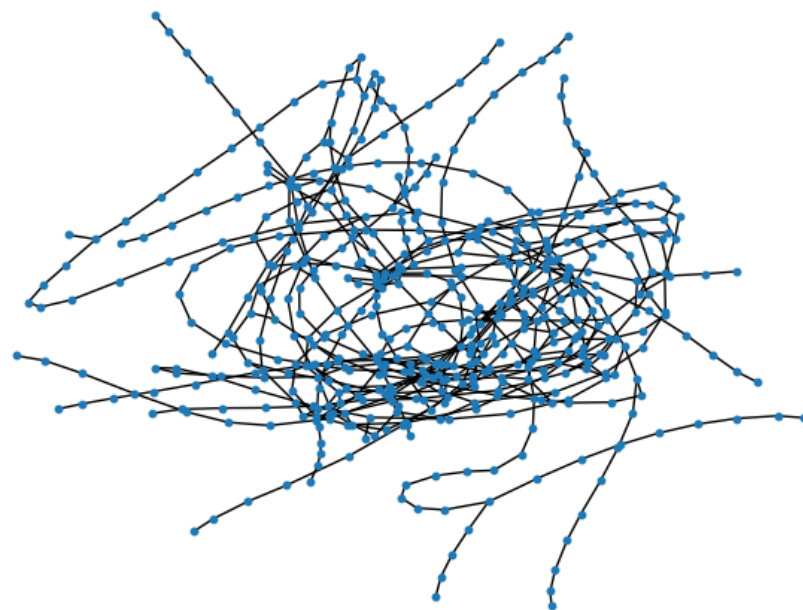


图 5.2 上海地铁网络拓扑图

## 5.2.2 客流 OD 数据

客流 OD 输入数据采用上海市某工作日早高峰 8-9 时的地铁客流 OD 数据。经过数据处理后得到 205454 对 OD 及其客流量数据。部分 OD 数据如下表 5.2 所示：

表 5.2 上海某工作日 8-9 时地铁站间 OD 数据（部分）

	进站 ID	进站线路	进站站点	出站 ID	出站线路	出站站点	客流量/人
0	111	1	莘庄	112	1	外环路	43
1	111	1	莘庄	113	1	莲花路	63
2	111	1	莘庄	114	1	锦江乐园	44
3	111	1	莘庄	115	1	上海南站	22
4	111	1	莘庄	116	1	漕宝路	29
5	111	1	莘庄	117	1	上海体育馆	10
6	111	1	莘庄	118	1	徐家汇	27
7	111	1	莘庄	119	1	衡山路	11
8	111	1	莘庄	120	1	常熟路	6
9	111	1	莘庄	121	1	陕西南路	12

## 5.2.3 应急公交备车点候选点数据

本案例选取公交线路首末站作为应急公交备车点候选点，通过爬取 8648 网站信息获取上海公交线路数据，共获取到公交线路 3237 条。从获取到的公交线路中提取首末站并进行筛选和去重后，得到 1458 个公交车首末站，即有 1458 个应急公交备车点候选点。部分公交车首末站如表 5.3 所示：

表 5.3 应急公交备车点候选点信息（部分）

公交车首末站名称	lon	lat
老西门	121.4798985	31.22225119
沪青平公路漕盈路	121.0960595	31.1364691
汇金路站	121.1500877	31.16252817
中山公园地铁站	121.4118386	31.22170289
东长治路公平路枢纽站	121.5030209	31.25554856
松江客运中心(北)	121.227934	31.05728206
松江火车站	121.2228232	31.00230566
东新桥	121.4773955	31.23424292
江浦路中山北二路	121.5120508	31.28415227
西部工业园区公交站	121.158381	31.02477909

### 5.3 上海地铁网络脆弱性分析

基于数据准备阶段构建的上海地铁网络以及客流 OD 数据，本节依照第三章提出的地铁网络脆弱性分析方法对案例上海地铁网络进行脆弱性分析。首先对上海地铁网络进行客流分配，得到客流分布，然后通过中断每一个站点、区间得到每个站点、区间的客流出行损失时间，并通过处理得到每个站点的脆弱性指标，最后对上海地铁网络脆弱性进行分析。

#### 5.3.1 有效路径搜索

在进行客流分配前首先要对所有 OD 对的有效路径进行搜索。基于 K 短路算法搜索得到路径后再通过有效路径定义对得到路径剔除，最后得到乘客出行可选择的路径。表 5.4 列举了 OD 对间搜索到的有效路径：

表 5.4 OD 地铁 11 号线武威路到地铁 2 号线虹桥火车站间的有效路径

编号	路径
1	['地铁 11 号线武威路', '地铁 11 号线祁连山路', '地铁 11 号线李子园', '地铁 11 号线上海西站', '地铁 11 号线真如', '地铁 11 号线枫桥路', '地铁 11 号线曹杨路', '地铁 11 号线隆德路', '地铁 11 号线江苏路', '地铁 2 号线江苏路', '地铁 2 号线中山公园', '地铁 2 号线娄山关路', '地铁 2 号线威宁路', '地铁 2 号线北新泾', '地铁 2 号线淞虹路', '地铁 2 号线虹桥 2 号航站楼', '地铁 2 号线虹桥火车站']
2	['地铁 11 号线武威路', '地铁 11 号线祁连山路', '地铁 11 号线李子园', '地铁 11 号线上海西站', '地铁 15 号线上海西站', '地铁 15 号线铜川路', '地铁 15 号线梅岭北路', '地铁 15 号线大渡河路', '地铁 15 号线长风公园', '地铁 15 号线娄山关路', '地铁 2 号线娄山关路', '地铁 2 号线威宁路', '地铁 2 号线北新泾', '地铁 2 号线淞虹路', '地铁 2 号线虹桥 2 号航站楼', '地铁 2 号线虹桥火车站']
3	['地铁 11 号线武威路', '地铁 11 号线祁连山路', '地铁 11 号线李子园', '地铁 11 号线上海西站', '地铁 11 号线真如', '地铁 11 号线枫桥路', '地铁 11 号线曹杨路', '地铁 4 号线曹杨路', '地铁 4 号线金沙江路', '地铁 4 号线中山公园', '地铁 2 号线中山公园', '地铁 2 号线娄山关路', '地铁 2 号线威宁路', '地铁 2 号线北新泾', '地铁 2 号线淞虹路', '地铁 2 号线虹桥 2 号航站楼', '地铁 2 号线虹桥火车站']
4	['地铁 11 号线武威路', '地铁 11 号线祁连山路', '地铁 11 号线李子园', '地铁 11 号线上海西站', '地铁 11 号线真如', '地铁 11 号线枫桥路', '地铁 11 号线曹杨路', '地铁 3 号线曹杨路', '地铁 3 号线金沙江路', '地铁 3 号线中山公园', '地铁 2 号线中山公园', '地铁 2 号线娄山关路', '地铁 2 号线威宁路', '地铁 2 号线北新泾', '地铁 2 号线淞虹路', '地铁 2 号线虹桥 2 号航站楼', '地铁 2 号线虹桥火车站']
5	['地铁 11 号线武威路', '地铁 11 号线祁连山路', '地铁 11 号线李子园', '地铁 11 号线上海西站', '地铁 11 号线真如', '地铁 11 号线枫桥路', '地铁 11 号线曹杨路', '地铁 11 号线隆德路', '地铁 11 号线江苏路', '地铁 11 号线交通大学', '地铁 10 号线交通大学', '地铁 10 号线虹桥路', '地铁 10 号线宋园路', '地铁 10 号线伊犁路', '地铁 10 号线水城路', '地铁 10 号线龙溪路', '地铁 10 号线上海动物园', '地铁 10 号线虹桥 1 号航站楼', '地铁 10 号线虹桥 2 号航站楼', '地铁 10 号线虹桥火车站', '地铁 2 号线虹桥火车站']

## 5.3.2 客流分配

### （1）基本参数

前文确定了上海地铁平均行驶速度为 37.3km/h，停站时间取 30s，换乘时间取 5min。此外为方便计算，乘客进出站时间统一取 5min。

在拥挤度函数部分，根据前人研究<sup>[22][25]</sup>， $r_0$ 取 0.7， $r_1$ 取 1， $\alpha$ 取 1.1， $\beta$ 取 1.5。

在乘客出行选择模型部分， $\theta$ 是一个常数，用于表达乘客对于地铁网络的熟悉程度，通常需要进行回归分析标定，根据其他学者研究<sup>[26]</sup>， $\theta$ 取值范围通常为[0.05,5]。闫科维<sup>[27]</sup>和陈培文<sup>[28]</sup>以不同地铁网络作为研究案例，对 $\theta$ 的取值做了详细的回归分析和研究后得到相同结论， $\theta$ 取值在[3,3.5]是比较合理的。因此本文 $\theta$ 取 3.2。

### （2）客流分布结果

基于以上模型数据和搜索到的 OD 间有效出行路径，基于乘客广义出行出行函数以及改进 Logit 乘客出行路径选择对 OD 客流进行分配，得到上海地铁客流分布如图 5.3 所示。详细分配结果见附录 1。

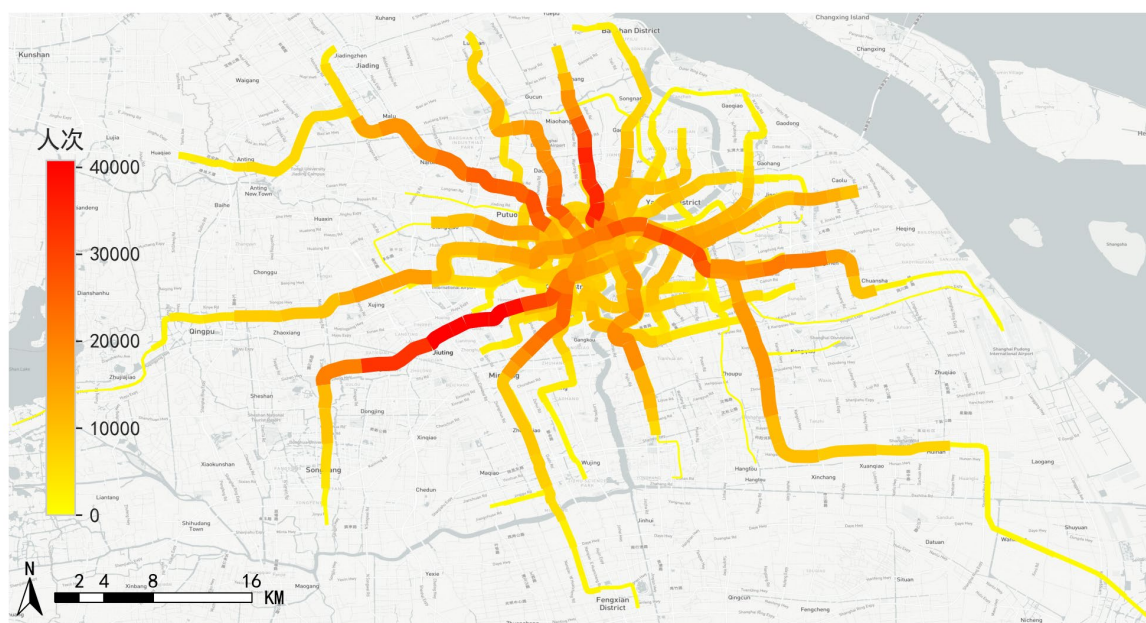


图 5.3 上海地铁早高峰 8-9 时客流分布

从图中我们可以看到地铁 1 号线、2 号线、9 号线、10 号线、11 号线等线路客流量强度较大。因此选取 9 号线和 11 号线对其断面客流进行分析。9 号线、11 号线断面客流如图 5.4、图 5.5 所示。

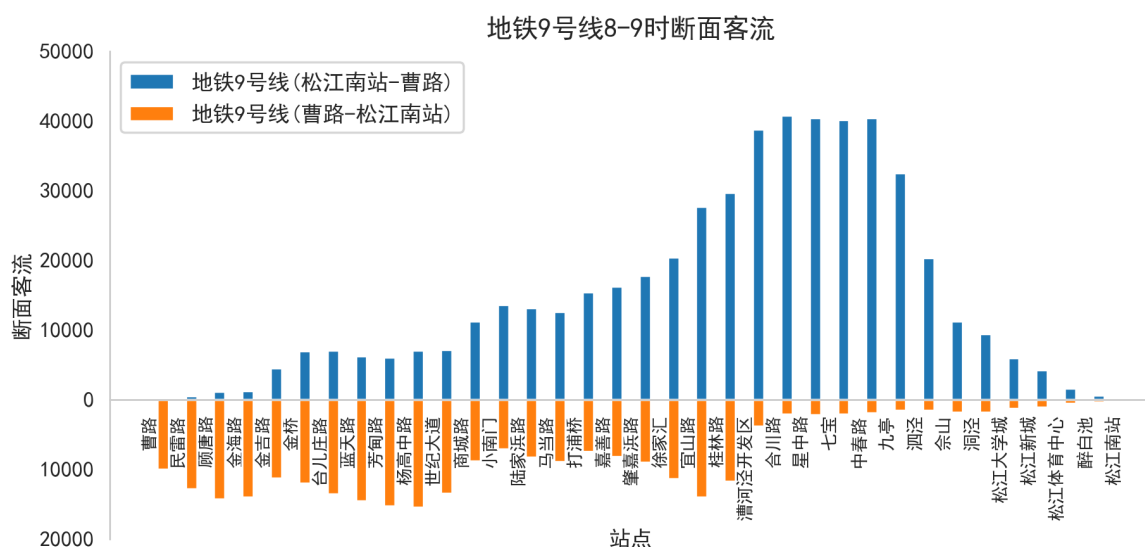


图 5.4 上海地铁 9 号线 8-9 时断面客流

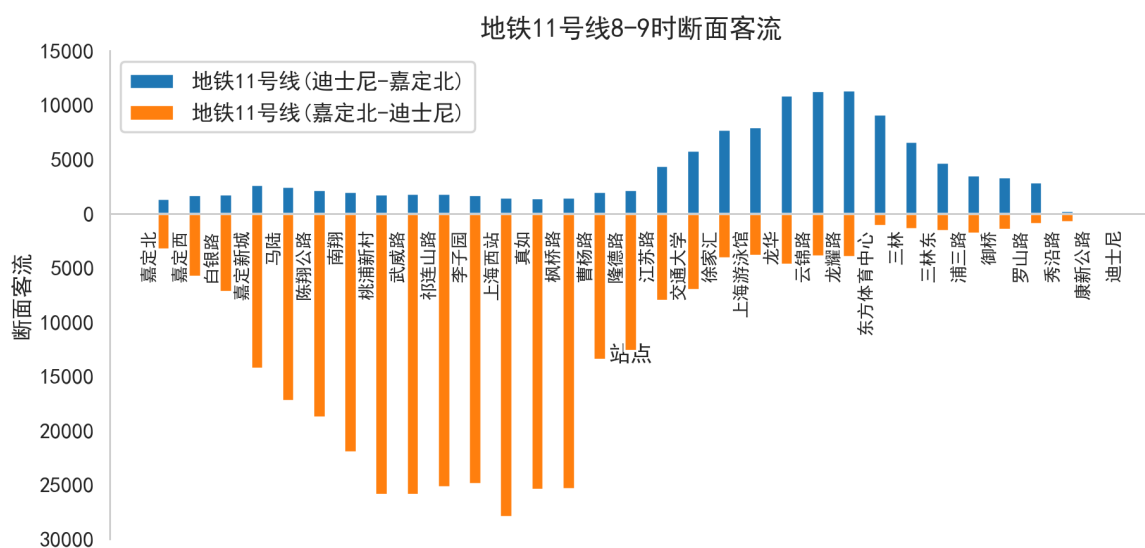


表 5.5 上海地铁 11 号线 8-9 时断面客流

可以看到 9 号线九亭到漕河泾开发区区段客流量强度很高，根据线路和地铁分析可得分析，地铁 9 号线作为唯一衔接松江区与市区的轨道交通，而松江区属于人口聚集，多为居住区域，工作日早高峰居民需要从松江区乘坐地铁到达市区工作，可以看到在企业聚集区域漕河泾开发区站点后客流强度有明显下降。由于这段线路没有任何换乘站，因此如果在早高峰时期这段线路运营中断一定会造成严重的乘客滞留，该区段站点的脆弱性指数很高。11 号线同理，11 号线承载着连接嘉定区和上海市中心的客流，工作日从嘉定到市中心部分区段客流量明显更高。

### 5.3.3 脆弱性指标计算

在通过对上海地铁进行客流分配得到上海地铁网络客流分布以后，可以通过循环依次删除网络中的节点或区间，然后识别受影响的客流，最后计算得到每个站点和区间的客流出行损失时间。部分站点和区间的客流损失时间如表 5.5、表 5.6 所示：

表 5.5 站点客流出行损失时间（部分）

地铁站点	客流出行损失时间/（万人*小时）
地铁 2 号线人民广场	4.40365
地铁 2 号线世纪大道	4.39255
地铁 2 号线陆家嘴	4.2823
地铁 2 号线南京东路	4.22805
地铁 9 号线桂林路	3.8719
地铁 2 号线静安寺	3.85705
地铁 9 号线漕河泾开发区	3.8368
地铁 1 号线上海火车站	3.82295
地铁 2 号线东昌路	3.71435
地铁 2 号线南京西路	3.70435
地铁 9 号线徐家汇	3.695
地铁 1 号线汉中路	3.6748
地铁 2 号线龙阳路	3.6746
地铁 9 号线宜山路	3.55525

表 5.6 区间客流出行损失时间（部分）

地铁区间	客流出行损失时间/（万人*小时）
地铁 2 号线南京东路 地铁 2 号线陆家嘴	3.72615
地铁 2 号线陆家嘴 地铁 2 号线南京东路	3.72615
地铁 2 号线人民广场 地铁 2 号线南京东路	3.5557
地铁 2 号线南京东路 地铁 2 号线人民广场	3.5557
地铁 2 号线陆家嘴 地铁 2 号线东昌路	3.37045
地铁 2 号线东昌路 地铁 2 号线陆家嘴	3.37045
地铁 9 号线桂林路 地铁 9 号线漕河泾开发区	3.35065
地铁 9 号线漕河泾开发区 地铁 9 号线桂林路	3.35065
地铁 1 号线上海火车站 地铁 1 号线中山北路	3.3364
地铁 1 号线中山北路 地铁 1 号线上海火车站	3.3364
地铁 2 号线静安寺 地铁 2 号线南京西路	3.3306
地铁 2 号线南京西路 地铁 2 号线静安寺	3.3306

由此得到了整个网络的以客流出行损失时间为测度的脆弱性分布，通过客流出行损失时间降序排名可以得到网络中脆弱性的高的站点和区间，详见附录 2。在日常运营中要加强对这些站点区间的维护，在这些关键站点区间遭遇突发事件中断运营时要更加迅速反应，及时启动应急预案，避免造成严重不良后果。

同时由上图可以看出区间脆弱性和站点脆弱性有很强的相关性，脆弱性高的地铁站点与其相关的区间脆弱性也高。同时结合地铁线路图与客流分布可以看出，地铁脆弱性和网络结构、客流强度有很大的关系。如地铁 9 号线、2 号线客流强度大，同时由网络中心向边缘延申，没有换乘线路可以分担或接替其客流，这种线路的某些区段往往具有很高的脆弱性。

## 5.4 应急公交备车点选址

### 5.4.1 参数设置

应急公交备车点覆盖半径：上海市《轨道交通突发事件交通保障应急预案》中提到，公交企业在接受到指挥中心命令后，第一辆应急公交应在十五分钟内到达需求地铁站点。《上海市交通行业发展报告（2022）》中提到，2021 年工作日早高峰公交车在公交车专用道的平均行驶速度 19.6km/h。考虑到公交车并不会一直行驶在公交车专用道，本文应急公交备车点覆盖半径取 4km。

应急公交从接收到指令到出发所需准备时间 $t_0$ 本文取 2 分钟。应急公交备车点到地铁站的距离 $d_{ij}$ 可以由前文地铁站点和备车点候选点的经纬度坐标计算得到距离矩阵。应急公交备车点维护成本 $c_{ij}$ 取统一值，后续可通过实际调查，结合备车点公交容量大小精确取值。

关于站点的脆弱性指标，由于仅仅通过选取前文计算得到的站点客流出行损失时间无法很好体现区间脆弱性对应急公交备车点选址的影响。考虑到如果区间出现故障，地铁发生运营中断，那么无法出行的客流将会聚集在该区间的起始站点，应急公交提供接驳服务也同样市对该起始站点提供。因此将区间脆弱性赋予给该区间的起始站点，与站点脆弱性指标相结合得到了用于应急公交备车点选址的站点脆弱性指标。为方便后续处理，本文对脆弱性指标进行简单的数据处理，使其落到[0,1]区间。部分站点脆弱性指标如表 5.7 所示：

表 5.7 地铁站点的脆弱性指标（部分）

地铁站点	脆弱性指标
南京东路	1
线陆家嘴	0.988599178
人民广场	0.978756179
世纪大道	0.930655156
桂林路	0.910825559
上海火车站	0.907074601
漕河泾开发区	0.907052844
东昌路	0.903480297
南京西路	0.898306412



最后需要确定的是用于区分站点重要性类型的脆弱性分类界限。首先对站点脆弱性指标的分布进行分析，如图 5.6 所示：

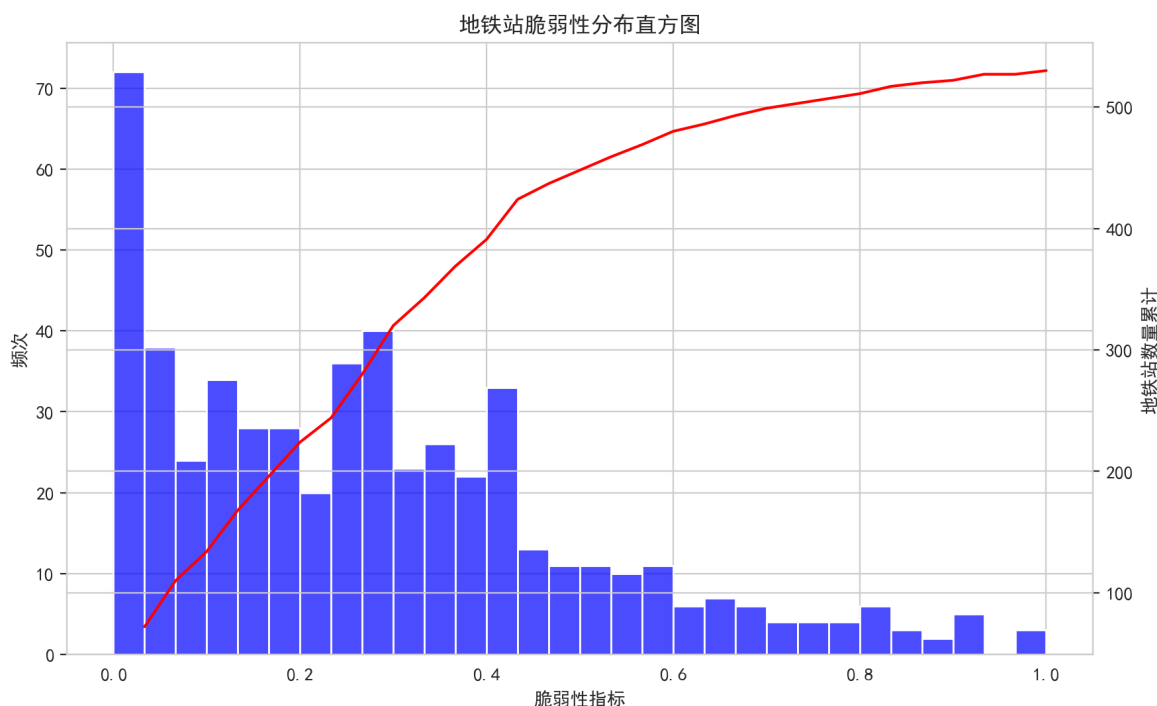


图 5.6 地铁站点的脆弱性指标分布直方图

上图是所有地铁站点的脆弱性分布直方图，左边 y 轴对应蓝色条形，表示脆弱性指标落在某一区间的站点数量，右边 y 轴对应红色曲线，表示地铁站点数量累计。可以看出，绝大部分地铁站点的脆弱性指标集中在[0.0,0.45]区间，约占所有站点的 85%以上，剩下的站点脆弱性指标平均分布在[0.45,1.0]，由于这部分站点数量很少，因此可以将 0.45 作为区分脆弱性程度最高站点的界限。而在[0.0,0.45]部分的站点在 0.2 附近其数量累计曲线的斜率又有一些变化，因此可以以 0.2 作为另一个区分界限。即 $\gamma_1, \gamma_2$ 分布取 0.2 和 0.45。

## 5.4.2 模型求解

基于上述模型参数设置和脆弱性分析后得到的站点脆弱性指标，将数据带入模型，通过求解器 Gurobi 求解可得到应急公交备车点布局方案。此外，还可以通过调整目标函数线性加权的权重来得到不同倾向下的应急公交备车点布局方案。本文拟定了三种方案如下：

### (1) 方案一

目标函数权重取 $w_1 = 0.5, w_2 = 0.5$ 。即应急公交服务质量与运维成本均衡考虑。得到方案如图 5.7 所示，详细布局方案见附录 2。



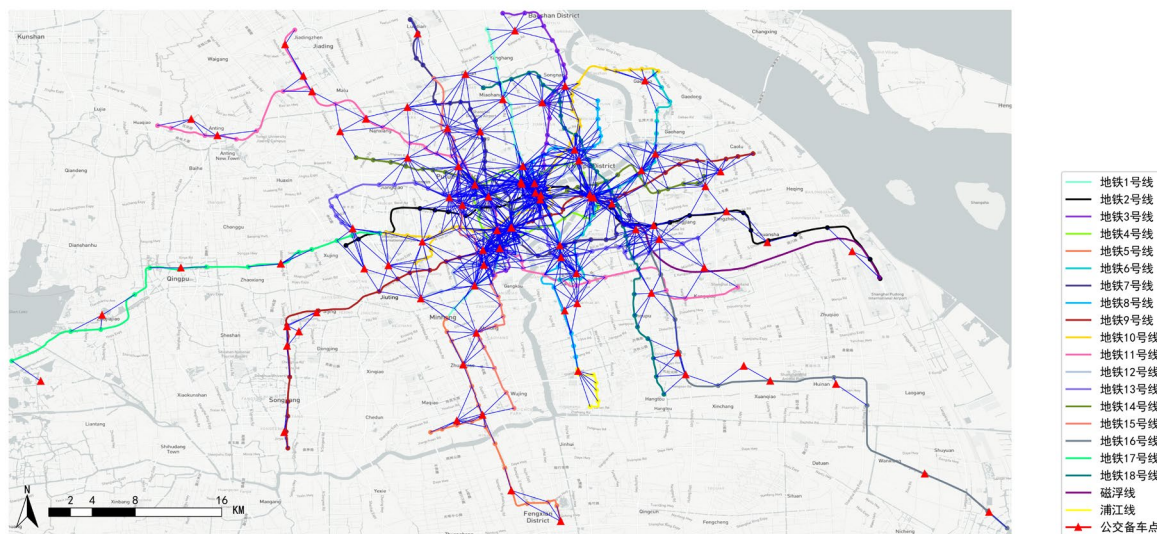


图 5.7 应急公交备车点布局方案一

## (2) 方案二

目标函数权重取 $w_1 = 0.7, w_2 = 0.3$ 。即优先考虑应急公交服务质量，选取较多的应急公交备车点。得到方案如图 5.8 所示：

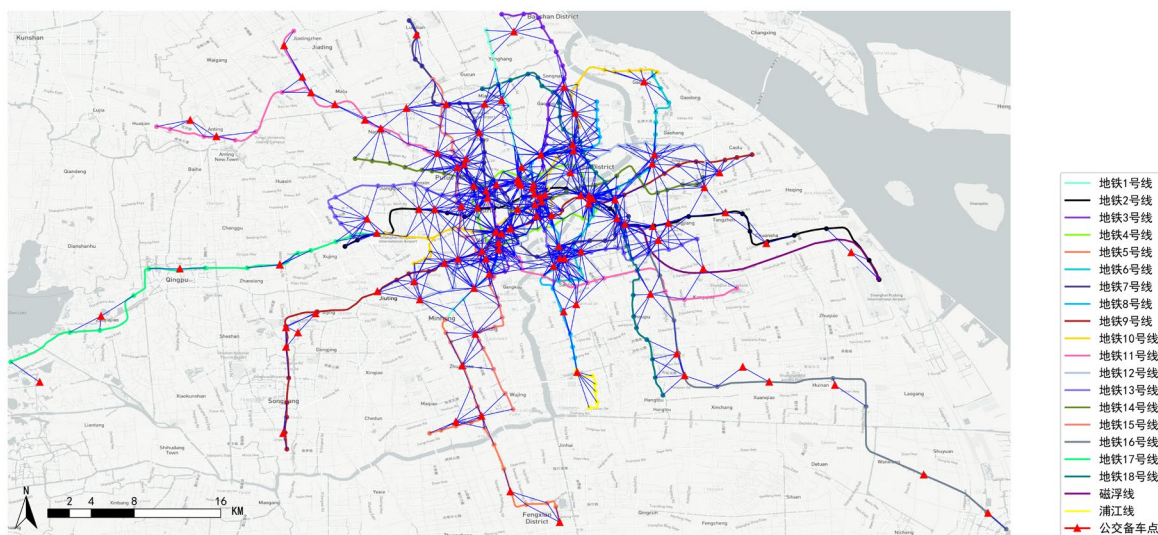


图 5.8 应急公交备车点布局方案二

## (3) 方案三

目标函数权重取 $w_1 = 0.3, w_2 = 0.7$ 。即在资源局限情况下，尽可能使用少的成本提供应急公交服务。得到方案如图 5.9 所示：

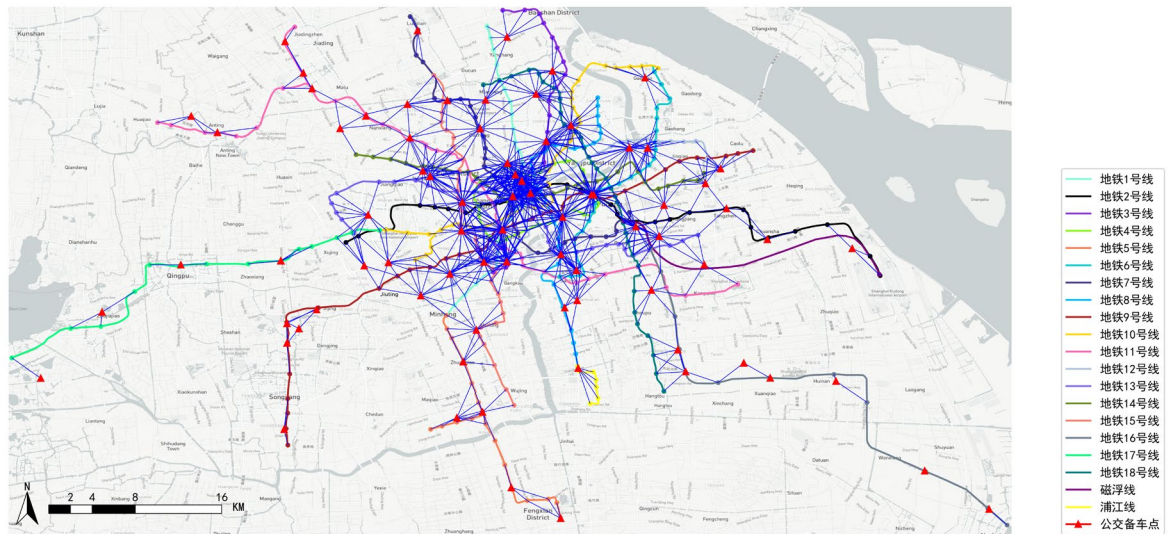


图 5.9 应急公交备车点布局方案三

总结上述三种方案可以得到表 5.8:

表 5.8 应急公交备车点布局方案对比

	权重设置	$Z_1'$	$Z_2'$	备车点数量
方案一	$w_1 = 0.5, w_2 = 0.5$	0.32	0.26	102
方案二	$w_1 = 0.7, w_2 = 0.3$	0.4	0.39	119
方案三	$w_1 = 0.3, w_2 = 0.7$	0.18	0.17	78

## 5.5 本章小结

本章主要选取上海地铁网络作为案例为案例，验证了地铁客流分配模型、地铁网络脆弱性分析和应急公交备车点选址模型的有效性与合理性。首先对案例上海地铁网络进行说明分析，然后以此介绍上海地铁网络数据、客流 OD 数据、应急公交备车点候选点数据并建立上海地铁网络拓扑模型。随后依照第三章的方法和模型求得地铁网络的客流分布、站点和区间的脆弱性指标并作分析。最后基于第四章提出的选址模型，通过调整目标函数权重，得到了三种不同倾向下的应急公交备车点布局方案，较好地验证了本文方法和模型的有效性与合理性。

## 6 总结与展望

### 5.1 总结与成果

本文引入了地铁网络脆弱性分析到应急公交备车点选址的研究中，得到了针对地铁站点脆弱性的备车点布局方案。首先本文总结了地铁网络脆弱性现有理论以及三种选址模型，随后通过构建地铁客流分布模型，建立了以客流出行损失时间为测度的地铁网络脆弱性分析框架，然后构建基于地铁网络脆弱性的应急公交备车点选址模型，最后以上海地铁为案例进行实例分析，提供了三种不同倾向下的应急公交备车点布局方案供参考。本文主要研究成果如下

（1）建立以客流出行损失时间为测度的地铁网络脆弱性分析框架。建立考虑列车运行和乘客换乘的地铁网络拓扑模型。通过 K 短路算法搜索乘客出行有效路径，构建乘客出行广义费用函数，建立基于随即效用理论的乘客出行选择模型，最后通过线路中断条件下的客流重分配计算得到站点和区间的客流出行损失时间。

（2）基于地铁站点的脆弱性进行公交备车点选址，对高脆弱性的地铁站点提供首车应急服务。建立基于地铁网络脆弱性分析的应急公交备车点选址研究，通过基于地铁站点的脆弱性指标，对高脆弱性的地铁站点进行针对性保护，从而达到合理利用有限资源，最大化服务质量的目标。

（3）以上海地铁网络为案例进行实例分析。基于本文提出的模型和方法，得到不同倾向下的应急公交备车点布局方案，可为有关部门制定方案提供参考。

### 5.2 不足与展望

地铁应急公交备车点布局需要考虑多种因素制约，涉及政府、轨道交通和公交企业与出行乘客等多种主体，并且应急公交服务有严格的启动条件和流程。本文虽然建立了基于地铁网络脆弱性分析的应急公交备车点选址模型，并提供了不同倾向下的布局方案，具有一定的参考价值。但由于时间精力以及自身水平有限，本文研究还有许多不足之处。为此，针对本文的不足之处对进一步研究方向提出以下展望：

（1）构建客流分配模型较为粗糙，仅仅从较为宏观的角度将客流量分配到出行路径上，同时模型中一些参数取统一值。后续研究可以从微观角度通过建立地铁客流出行仿真模型，纳入列车发车到站时刻表和客流动态变化构建更加精确的动态客流分布模型。

（2）脆弱性指标仅以客流出行损失时间为衡量。后续研究可以通过加入物理网络性能指标、加载客流后的运输网络性能指标等，如统计地铁突发事件和线路中断事件的分布，节点的网络介数，网络效率等，基于多种因素构建地铁网络脆弱性评价体系。

（3）应急公交备车点选址还有所欠缺。后续研究可以将应急公交运量以及备车点容量纳入选址模型进行分析。此外，还可以进行应急公交接驳路线的方案设计研究，从而建立完整的应急公交接驳服务理论，为实际应用提供更完善的参考。

## 参考文献

- [1] 交通运输部. 2024 年 4 月城市轨道交通运营数据速报[EB/OL]. (2024-05-10) [2024-05-23].  
<https://mp.weixin.qq.com/s/wjkwqMmbZF7fTFhAVAMDg>.
- [2] Berdica K. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done[J]. Transport Policy, 2002, 9(2): 117-127.
- [3] Husdal J. The vulnerability of road networks in a cost-benefit perspective[C]//Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting (TRB 2005), Washington DC, USA. 2005: 9-13.
- [4] Ermagun A, Tajik N, Janatabadi F, et al. Uncertainty in vulnerability of metro transit networks: A global perspective[J]. Journal of Transport Geography, 2023, 113: 103710.
- [5] 赵美怡. 城市轨道交通网络脆弱性分析与评估[D]. 西南交通大学, 2020.
- [6] Rodríguez-Núñez E, García-Palomares J C. Measuring the vulnerability of public transport networks[J]. Journal of Transport Geography, 2014, 35: 50-63.
- [7] 袁竞峰, 李启明, 贾若愚, 等. 城市地铁网络系统运行脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(5): 92-98.
- [8] Xing Y, Lu J, Chen S, et al. Vulnerability analysis of urban rail transit based on complex network theory: a case study of Shanghai Metro[J]. Public Transport, 2017, 9(3): 501-525.
- [9] 马壮林, 邵逸恒, 舒兰, 等. 多层网络视角下地铁网络脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8): 164-172.
- [10] 李大愚, 高光锐. 城市地铁网脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(3): 157-161.
- [11] 邓中秋. 城市轨道交通网络突发事件与脆弱性研究[D]. 北京交通大学, 2021.
- [12] Hakimi S L. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems[J]. Operations research, 1965, 13(3): 462-475.
- [13] Gu W, Yu J, Ji Y, 等. Plan-based flexible bus bridging operation strategy[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 91: 209-229.
- [14] Wang J, Yuan Z, Yin Y. Optimization of Bus Bridging Service under Unexpected Metro Disruptions with Dynamic Passenger Flows[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019, 2019: 1-13.
- [15] Pender B, Currie G, Delbosc A, 等. Improving bus bridging responses via satellite bus reserve locations[J]. Journal of Transport Geography, 2014, 34: 202-210.
- [16] 陈志宗, 尤建新. 重大突发事件应急救援设施选址的多目标决策模型[J]. 管理科学,

2006(4): 10-14.

- [17] 滕靖, 徐瑞华. 城市轨道交通突发事件下公交应急联动策略[J]. 铁道学报, 2010, 32(5): 13-17.
- [18] 刘爽, 支晓宇, 陈绍宽, 等. 基于车站滞留风险的应急驻车点选址研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(4): 110-115+129.
- [19] 邓亚娟, 茹小磊, 梁国华, 等. 城市轨道交通应急接驳公交蓄车点选址[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(4): 143-150.
- [20] 肖畅. 基于脆弱性的地铁应急公交服务点布局研究[D]. 华中科技大学, 2023.
- [21] 赵颖. 基于应急需求的公交车驻车点选址问题研究[D]. 兰州交通大学, 2023.
- [22] 王禹兮. 地铁突发中断时客流影响分析及重分配方法[D]. 北京交通大学, 2023.
- [23] 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告解读[J]. 城市轨道交通, 2024(4): 15-17.
- [24] 于鸿飞. 城轨路网客流非均衡随机动态分配及其在运营中断时的应用研究[D]. 北京交通大学, 2015.
- [25] 尹浩东. 运营中断条件下城市轨道交通乘客出行行为建模与客流诱导优化研究[D]. 北京交通大学, 2017.
- [26] Raveau S, Muñoz J C, De Grange L. A topological route choice model for metro[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2011, 45(2): 138-147.
- [27] 闫科维. 基于动态客流分配的地铁网络化运营突发事件响应研究[D]. 西南交通大学, 2024.
- [28] 陈培文. 基于改进 Logit 模型的城市轨道交通客流分配方法研究[D]. 北京交通大学, 2019.

## 附 录

### 附录 1 上海地铁网络早高峰 8-9 时客流分布结果（部分）

注：此表区间中仅表示单向区间，如爱国路—复兴岛，表示由爱国路站到复兴路站的区间，对应断面客流也仅表示单向区间的断面客流。

区间	断面客流/（人*小时 <sup>-1</sup> ）	区间	断面客流/（人*小时 <sup>-1</sup> ）
爱国路—复兴岛	7519	龙华—龙华中路	3393
爱国路—隆昌路	1131	龙华—上海游泳馆	3873
爱辉路—呼兰路	431	龙华—云锦路	10913
爱辉路—江杨南路	6	龙华中路—大木桥路	3382
安亭—上海汽车城	968	龙华中路—东安路	6145
安亭—兆丰路	4947	龙华中路—后滩	9409
鞍山新村—江浦路	10384	龙华中路—龙华	9465
鞍山新村—四平路	1864	龙华中路—龙华中路	5254
白银路—嘉定西	5827	龙溪路—龙柏新村	3372
白银路—嘉定新城	1811	龙溪路—上海动物园	6184
宝安公路—共富新村	874	龙溪路—水城路	3815
宝安公路—友谊西路	6583	龙阳路—芳华路	5306
宝山路—宝山路	4378	龙阳路—芳芯路	2474
宝山路—东宝兴路	10926	龙阳路—花木路	119
宝山路—海伦路	2182	龙阳路—华夏中路	14218
宝山路—上海火车站	15876	龙阳路—龙阳路	38448
宝杨路—水产路	1180	龙阳路—浦东国际机场	0
宝杨路—友谊路	3848	龙阳路—世纪公园	9250
北蔡—陈春路	3931	龙阳路—迎春路	1732
北蔡—下南路	2534	龙阳路—张江高科	16637
北桥—剑川路	7799	龙耀路—东方体育中心	11365
北桥—颛桥	2227	龙耀路—云锦路	3916
北新泾—淞虹路	11797	隆昌路—爱国路	8396
北新泾—威宁路	12303	隆昌路—宁国路	1913
北洋泾路—德平路	13418	隆德路—曹杨路	13487
北洋泾路—民生路	2669	隆德路—江苏路	2184
北中路—芳芯路	1270	隆德路—金沙江路	9889
北中路—莲溪路	2474	隆德路—隆德路	3712
博兴路—金桥路	1664	隆德路—武宁路	2368

区间	断面客流/（人*小时 <sup>-1</sup> ）	区间	断面客流/（人*小时 <sup>-1</sup> ）
博兴路—五莲路	9433	娄山关路—红宝石路	2335
曹路—民雷路	110	娄山关路—娄山关路	2680
曹杨路—曹杨路	18759	娄山关路—威宁路	14988
曹杨路—枫桥路	25372	娄山关路—长风公园	6519
曹杨路—金沙江路	7252	娄山关路—中山公园	16663
曹杨路—隆德路	2039	芦恒路—凌兆新村	2548
曹杨路—武宁路	215	芦恒路—浦江镇	12280
曹杨路—镇坪路	14974	鲁班路—大木桥路	6070
曹杨路—中宁路	2859	鲁班路—西藏南路	3574
漕宝路—漕宝路	6171	陆家浜路—老西门	7040
漕宝路—桂林公园	6522	陆家浜路—陆家浜路	6013
漕宝路—龙漕路	5625	陆家浜路—马当路	13100
漕宝路—上海南站	24752	陆家浜路—西藏南路	15449
漕宝路—上海体育馆	3939	陆家浜路—小南门	7152
漕河泾开发区—桂林路	11766	陆家嘴—东昌路	25816
漕河泾开发区—合川路	38739	陆家嘴—陆家嘴	6215
漕溪路—龙漕路	5020	陆家嘴—南京东路	23925
漕溪路—宜山路	2158	陆家嘴—浦东南路	2687
漕盈路—淀山湖大道	1709	陆家嘴—豫园	4938
漕盈路—青浦新城	561	罗南新村—美兰湖	4084
昌吉东路—上海汽车城	5525	罗南新村—潘广路	562
昌吉东路—上海赛车场	1850	罗山路—华夏中路	527
昌平路—静安寺	2587	罗山路—罗山路	3059
昌平路—长寿路	17908	罗山路—秀沿路	2916
昌邑路—昌邑路	1102	罗山路—御桥	1462
昌邑路—丹阳路	2828	罗山路—周浦东	16572
昌邑路—民生路	966	罗秀路—华东理工大学	999
昌邑路—歇浦路	2101	罗秀路—朱梅路	5543
昌邑路—源深路	225	马当路—打浦桥	12636
常熟路—常熟路	5181	马当路—陆家浜路	8310
常熟路—衡山路	16814	马当路—马当路	4091
常熟路—静安寺	11332	马当路—世博会博物馆	7859
常熟路—陕西南路	7433	马当路—一大会址·新天地	4847
常熟路—肇嘉浜路	6202	马陆—陈翔公路	2477
场中路—大场镇	785	马陆—嘉定新城	14284



区间	断面客流/（人*小时 <sup>-1</sup> ）	区间	断面客流/（人*小时 <sup>-1</sup> ）
场中路—上大路	16755	梅岭北路—大渡河路	371
陈春路—北蔡	2881	梅岭北路—铜川路	7691
陈春路—莲溪路	2259	美兰湖—罗南新村	403
陈翔公路—马陆	17277	民雷路—曹路	10032
陈翔公路—南翔	2230	民雷路—顾唐路	537
成山路—成山路	6244	民生路—北洋泾路	13807
成山路—东明路	8392	民生路—昌邑路	2095
成山路—杨思	18053	民生路—民生路	3560
成山路—耀华路	3767	民生路—杨高中路	2013
成山路—长清路	1954	民生路—源深体育中心	2442
赤峰路—大柏树	13299	闵瑞路—浦航路	0
赤峰路—虹口足球场	2540	闵瑞路—三鲁公路	0
川沙—华夏东路	526	闵行开发区—文井路	362
川沙—凌空路	2260	南陈路—上大路	760
创新中路—华夏东路	13777	南陈路—上海大学	15391

## 附录 2 地铁网络脆弱性指标（部分）

### 附录 2.1 站点脆弱性指标（降序排列后取前一百个站点）

地铁站点	客流损失时间（万人*小时）
地铁 2 号线人民广场	4.40365
地铁 2 号线世纪大道	4.39255
地铁 2 号线陆家嘴	4.2823
地铁 2 号线南京东路	4.22805
地铁 9 号线桂林路	3.8719
地铁 2 号线静安寺	3.85705
地铁 9 号线漕河泾开发区	3.8368
地铁 1 号线上海火车站	3.82295
地铁 2 号线东昌路	3.71435
地铁 2 号线南京西路	3.70435
地铁 9 号线徐家汇	3.695
地铁 1 号线汉中路	3.6748
地铁 2 号线龙阳路	3.6746
地铁 9 号线宜山路	3.55525
地铁 2 号线江苏路	3.53035



地铁站点	客流损失时间（万人*小时）
地铁 1 号线人民广场	3.46595
地铁 9 号线合川路	3.4274
地铁 1 号线中山北路	3.4089
地铁 1 号线延长路	3.29275
地铁 9 号线七宝	3.2259
地铁 9 号线星中路	3.1548
地铁 11 号线上海西站	3.1302
地铁 2 号线上海科技馆	3.1186
地铁 1 号线上海马戏城	3.1162
地铁 11 号线曹杨路	3.1072
地铁 2 号线中山公园	3.1041
地铁 2 号线娄山关路	3.0607
地铁 2 号线世纪公园	3.0427
地铁 9 号线中春路	3.00755
地铁 9 号线九亭	2.969
地铁 1 号线上海南站	2.9553
地铁 1 号线汶水路	2.9408
地铁 11 号线枫桥路	2.9216
地铁 8 号线人民广场	2.90315
地铁 11 号线真如	2.82
地铁 1 号线徐家汇	2.81265
地铁 9 号线肇嘉浜路	2.80465
地铁 7 号线镇坪路	2.7736
地铁 1 号线漕宝路	2.7731
地铁 2 号线张江高科	2.75325
地铁 11 号线李子园	2.71465
地铁 9 号线世纪大道	2.6988
地铁 11 号线祁连山路	2.6619
地铁 9 号线嘉善路	2.63745
地铁 7 号线静安寺	2.6079
地铁 1 号线上海体育馆	2.60775
地铁 8 号线陆家浜路	2.5939
地铁 11 号线江苏路	2.58115
地铁 2 号线威宁路	2.5801
地铁 4 号线世纪大道	2.5777

地铁站点	客流损失时间（万人*小时）
地铁 1 号线新闸路	2.57065
地铁 11 号线桃浦新村	2.566
地铁 1 号线彭浦新村	2.55795
地铁 11 号线武威路	2.5438
地铁 7 号线长寿路	2.52665
地铁 11 号线隆德路	2.4692
地铁 9 号线陆家浜路	2.4645
地铁 7 号线岚皋路	2.45675
地铁 1 号线锦江乐园	2.4459
地铁 2 号线金科路	2.4429
地铁 9 号线马当路	2.4307
地铁 2 号线北新泾	2.39835
地铁 1 号线常熟路	2.3811
地铁 8 号线老西门	2.3748
地铁 9 号线打浦桥	2.3723
地铁 2 号线淞虹路	2.36915
地铁 1 号线陕西南路	2.34595
地铁 7 号线新村路	2.33015
地铁 11 号线南翔	2.3301
地铁 9 号线泗泾	2.30965
地铁 1 号线莲花路	2.29205
地铁 8 号线西藏南路	2.2593
地铁 7 号线昌平路	2.22215
地铁 9 号线商城路	2.20745
地铁 6 号线世纪大道	2.1899
地铁 9 号线小南门	2.1777
地铁 9 号线杨高中路	2.1742
地铁 8 号线曲阜路	2.1726
地铁 11 号线徐家汇	2.16625
地铁 8 号线东方体育中心	2.15265
地铁 1 号线衡山路	2.138
地铁 1 号线共康路	2.13455
地铁 8 号线耀华路	2.11595
地铁 13 号线大渡河路	2.10645
地铁 7 号线大华三路	2.10625

地铁站点	客流损失时间（万人*小时）
地铁 2 号线广兰路	2.0907
地铁 1 号线一大会址·黄陂南路	2.08755
地铁 8 号线大世界	2.07745
地铁 7 号线常熟路	2.068
地铁 12 号线汉中路	2.05495
地铁 11 号线交通大学	2.05045
地铁 7 号线肇嘉浜路	2.04315
地铁 11 号线陈翔公路	2.01065
地铁 11 号线东方体育中心	1.98425
地铁 4 号线大连路	1.9786
地铁 10 号线南京东路	1.9658
地铁 8 号线成山路	1.9599
地铁 3 号线虹口足球场	1.9527
地铁 3 号线镇坪路	1.93065
地铁 9 号线芳甸路	1.92335

## 附录 2.2 区间脆弱性指标（降序排列后取前一百个区间）

注：此处的地铁区间同样为单向区间

地铁区间		客流损失时间（万人*小时）
地铁 2 号线南京东路	地铁 2 号线陆家嘴	3.72615
地铁 2 号线陆家嘴	地铁 2 号线南京东路	3.72615
地铁 2 号线人民广场	地铁 2 号线南京东路	3.5557
地铁 2 号线南京东路	地铁 2 号线人民广场	3.5557
地铁 2 号线陆家嘴	地铁 2 号线东昌路	3.37045
地铁 2 号线东昌路	地铁 2 号线陆家嘴	3.37045
地铁 9 号线桂林路	地铁 9 号线漕河泾开发区	3.35065
地铁 9 号线漕河泾开发区	地铁 9 号线桂林路	3.35065
地铁 1 号线上海火车站	地铁 1 号线中山北路	3.3364
地铁 1 号线中山北路	地铁 1 号线上海火车站	3.3364
地铁 2 号线静安寺	地铁 2 号线南京西路	3.3306
地铁 2 号线南京西路	地铁 2 号线静安寺	3.3306
地铁 2 号线东昌路	地铁 2 号线世纪大道	3.31605
地铁 2 号线世纪大道	地铁 2 号线东昌路	3.31605
地铁 2 号线南京西路	地铁 2 号线人民广场	3.30645

地铁区间		客流损失时间（万人*小时）
地铁 2 号线人民广场	地铁 2 号线南京西路	3.30645
地铁 1 号线汉中路	地铁 1 号线上海火车站	3.2828
地铁 1 号线上海火车站	地铁 1 号线汉中路	3.2828
地铁 9 号线宜山路	地铁 9 号线桂林路	3.2627
地铁 9 号线桂林路	地铁 9 号线宜山路	3.2627
地铁 9 号线漕河泾开发区	地铁 9 号线合川路	3.25445
地铁 9 号线合川路	地铁 9 号线漕河泾开发区	3.25445
地铁 1 号线中山北路	地铁 1 号线延长路	3.19675
地铁 1 号线延长路	地铁 1 号线中山北路	3.19675
地铁 9 号线合川路	地铁 9 号线星中路	3.12275
地铁 9 号线星中路	地铁 9 号线合川路	3.12275
地铁 9 号线星中路	地铁 9 号线七宝	3.06005
地铁 9 号线七宝	地铁 9 号线星中路	3.06005
地铁 2 号线江苏路	地铁 2 号线静安寺	3.02315
地铁 2 号线静安寺	地铁 2 号线江苏路	3.02315
地铁 9 号线徐家汇	地铁 9 号线宜山路	3.00775
地铁 9 号线宜山路	地铁 9 号线徐家汇	3.00775
地铁 2 号线世纪大道	地铁 2 号线上海科技馆	3.0045
地铁 2 号线上海科技馆	地铁 2 号线世纪大道	3.0045
地铁 1 号线延长路	地铁 1 号线上海马戏城	2.99425
地铁 1 号线上海马戏城	地铁 1 号线延长路	2.99425
地铁 2 号线上海科技馆	地铁 2 号线世纪公园	2.9905
地铁 2 号线世纪公园	地铁 2 号线上海科技馆	2.9905
地铁 9 号线七宝	地铁 9 号线中春路	2.9268
地铁 9 号线中春路	地铁 9 号线七宝	2.9268
地铁 11 号线枫桥路	地铁 11 号线曹杨路	2.8657
地铁 11 号线曹杨路	地铁 11 号线枫桥路	2.8657
地铁 9 号线中春路	地铁 9 号线九亭	2.84305
地铁 9 号线九亭	地铁 9 号线中春路	2.84305
地铁 2 号线世纪公园	地铁 2 号线龙阳路	2.81445
地铁 2 号线龙阳路	地铁 2 号线世纪公园	2.81445
地铁 11 号线真如	地铁 11 号线枫桥路	2.7861
地铁 11 号线枫桥路	地铁 11 号线真如	2.7861
地铁 1 号线上海马戏城	地铁 1 号线汶水路	2.7544
地铁 1 号线汶水路	地铁 1 号线上海马戏城	2.7544

装  
订  
线

地铁区间		客流损失时间（万人*小时）
地铁 2 号线娄山关路	地铁 2 号线中山公园	2.7119
地铁 2 号线中山公园	地铁 2 号线娄山关路	2.7119
地铁 2 号线中山公园	地铁 2 号线江苏路	2.6801
地铁 2 号线江苏路	地铁 2 号线中山公园	2.6801
地铁 11 号线上海西站	地铁 11 号线真如	2.667
地铁 11 号线真如	地铁 11 号线上海西站	2.667
地铁 11 号线李子园	地铁 11 号线上海西站	2.6569
地铁 11 号线上海西站	地铁 11 号线李子园	2.6569
地铁 11 号线祁连山路	地铁 11 号线李子园	2.59655
地铁 11 号线李子园	地铁 11 号线祁连山路	2.59655
地铁 2 号线龙阳路	地铁 2 号线张江高科	2.5965
地铁 2 号线张江高科	地铁 2 号线龙阳路	2.5965
地铁 9 号线肇嘉浜路	地铁 9 号线徐家汇	2.56135
地铁 9 号线徐家汇	地铁 9 号线肇嘉浜路	2.56135
地铁 11 号线武威路	地铁 11 号线祁连山路	2.5413
地铁 11 号线祁连山路	地铁 11 号线武威路	2.5413
地铁 11 号线桃浦新村	地铁 11 号线武威路	2.53515
地铁 11 号线武威路	地铁 11 号线桃浦新村	2.53515
地铁 1 号线上海南站	地铁 1 号线漕宝路	2.5223
地铁 1 号线漕宝路	地铁 1 号线上海南站	2.5223
地铁 1 号线新闸路	地铁 1 号线汉中路	2.51125
地铁 1 号线汉中路	地铁 1 号线新闸路	2.51125
地铁 1 号线汶水路	地铁 1 号线彭浦新村	2.50395
地铁 1 号线彭浦新村	地铁 1 号线汶水路	2.50395
地铁 2 号线威宁路	地铁 2 号线娄山关路	2.50255
地铁 2 号线娄山关路	地铁 2 号线威宁路	2.50255
地铁 1 号线人民广场	地铁 1 号线新闸路	2.49045
地铁 1 号线新闸路	地铁 1 号线人民广场	2.49045
地铁 1 号线漕宝路	地铁 1 号线上海体育馆	2.4697
地铁 1 号线上海体育馆	地铁 1 号线漕宝路	2.4697
地铁 7 号线镇坪路	地铁 7 号线岚皋路	2.42645
地铁 7 号线岚皋路	地铁 7 号线镇坪路	2.42645
地铁 1 号线锦江乐园	地铁 1 号线上海南站	2.41425
地铁 1 号线上海南站	地铁 1 号线锦江乐园	2.41425
地铁 2 号线北新泾	地铁 2 号线威宁路	2.34075

地铁区间		客流损失时间（万人*小时）
地铁 2 号线威宁路	地铁 2 号线北新泾	2.34075
地铁 7 号线岚皋路	地铁 7 号线新村路	2.3008
地铁 7 号线新村路	地铁 7 号线岚皋路	2.3008
地铁 9 号线嘉善路	地铁 9 号线肇嘉浜路	2.29175
地铁 9 号线肇嘉浜路	地铁 9 号线嘉善路	2.29175
地铁 2 号线张江高科	地铁 2 号线金科路	2.2764
地铁 2 号线金科路	地铁 2 号线张江高科	2.2764
地铁 9 号线九亭	地铁 9 号线泗泾	2.27485
地铁 9 号线泗泾	地铁 9 号线九亭	2.27485
地铁 11 号线南翔	地铁 11 号线桃浦新村	2.24575
地铁 11 号线桃浦新村	地铁 11 号线南翔	2.24575
地铁 1 号线莲花路	地铁 1 号线锦江乐园	2.22625
地铁 1 号线锦江乐园	地铁 1 号线莲花路	2.22625
地铁 9 号线打浦桥	地铁 9 号线嘉善路	2.1815
地铁 9 号线嘉善路	地铁 9 号线打浦桥	2.1815

## 附录 3 应急公交备车点布局方案一

地铁站点	对应的公交备车点编号	地铁站点	对应的公交备车点编号
莘庄	[174, 1340]	漕河泾开发区	[88, 474, 479, 516, 789]
外环路	[174, 479, 1340]	合川路	[474, 479, 516, 789]
莲花路	[174, 474, 479]	星中路	[516, 1228, 1340]
锦江乐园	[474, 479, 789]	七宝	[516, 1228, 1340]
上海南站	[88, 474, 479, 789]	中春路	[1228, 1316, 1340]
漕宝路	[88, 160, 474, 479, 789, 971, 1309]	九亭	[1228, 1316, 1340]
上海体育馆	[88, 160, 474, 789, 971, 1309]	泗泾	[186, 194, 423]
徐家汇	[88, 160, 474, 789, 971, 1309]	佘山	[186, 194, 423, 577]
衡山路	[88, 160, 556, 560, 870, 971, 1309]	洞泾	[186, 194, 577]
常熟路	[160, 556, 558, 560, 870, 971, 1309]	松江大学城	[577]
陕西南路	[160, 522, 556, 558, 560, 712, 1309]	松江新城	[6]
一大会址·黄陂南路	[42, 160, 522, 556, 558, 560, 712]	松江体育中心	[6]
人民广场	[42, 357, 522, 556, 558, 560, 712]	醉白池	[6]
新闸路	[42, 357, 522, 556, 558, 560, 712]	松江南站	[6]
汉中路	[42, 357, 522, 556, 558, 560, 712]	虹桥 1 号航站楼	[516, 1228]

地铁站点	对应的公交备车点编号	地铁站点	对应的公交备车点编号
上海火车站	[42, 357, 522, 556, 558, 560, 712]	楼	
中山北路	[42, 357, 522, 556, 558, 560, 712]	上海动物园	[516]
延长路	[42, 357, 522, 712]	龙溪路	[367, 516, 1225]
上海马戏城	[42, 131, 357]	水城路	[367, 516, 789, 1225]
汶水路	[131, 357, 691]	伊犁路	[367, 789, 870, 971, 1225]
彭浦新村	[131, 691, 850]	宋园路	[88, 160, 367, 789, 971]
共康路	[131, 691, 850]	交通大学	[88, 160, 789, 971, 1309]
通河新村	[691, 850]	上海图书馆	[88, 160, 870, 971, 1309]
		一大会址·新	[160, 522, 556, 558, 560]
		天地	
呼兰路	[387, 691]	豫园	[522, 556, 558, 560, 712]
共富新村	[387, 691]	天潼路	[522, 556, 558, 560, 712]
宝安公路	[387, 680]	四川北路	[357, 522, 556, 558, 712]
友谊西路	[680]	邮电新村	[14, 357, 522, 683]
富锦路	[680]	同济大学	[14, 683]
徐泾东	[674, 1228, 1316]	国权路	[14, 683]
虹桥火车站	[674, 1228]	五角场	[14, 683]
虹桥2号航站楼	[516, 674, 1228]	江湾体育场	[683, 825, 850]
淞虹路	[367, 516, 1225]	三门路	[825, 850]
北新泾	[367, 516, 1225]	殷高东路	[825, 850]
威宁路	[367, 526, 1225]	新江湾城	[825, 850]
娄山关路	[367, 526, 870, 971, 1225]	国帆路	[825, 850]
中山公园	[160, 367, 526, 870, 971, 1225, 1309]	双江路	[543]
江苏路	[160, 367, 526, 712, 870, 971, 1309]	高桥西	[543]
静安寺	[42, 160, 556, 560, 712, 870, 1309]	高桥	[543]
南京西路	[42, 357, 522, 556, 558, 560, 712]	基隆路	[543]
南京东路	[42, 357, 522, 556, 558, 560, 712]	龙柏新村	[516]
陆家嘴	[176, 522, 556, 558, 560, 598, 752]	紫藤路	[516, 1228]
东昌路	[14, 176, 558, 560, 598, 664, 752]	航中路	[516, 1228, 1340]
世纪大道	[176, 598, 664, 752]	嘉定北	[1400]
上海科技馆	[176, 598, 643, 664, 752]	嘉定西	[919, 1400]
世纪公园	[176, 189, 598, 643, 664, 752]	白银路	[654, 919, 1400]
龙阳路	[189, 643, 664, 752, 972]	嘉定新城	[654, 919]
张江高科	[189, 643, 972]	马陆	[97, 654, 1421]
金科路	[189, 643, 972]	陈翔公路	[97, 183, 1421]

地铁站点	对应的公交备车点编号	地铁站点	对应的公交备车点编号
广兰路	[189, 276, 536, 972]	南翔	[97, 183, 1421]
唐镇	[276, 536]	桃浦新村	[183, 708, 861]
创新中路	[274, 276]	武威路	[114, 708, 861]
华夏东路	[274, 276]	祁连山路	[114, 708, 861]
川沙	[274]	李子园	[114, 131, 526, 708]
凌空路	[274]	上海西站	[114, 131, 526, 708, 1225]
远东大道	[936]	真如	[114, 367, 526, 870, 1225]
海天三路	[936]	枫桥路	[114, 367, 526, 870, 1225]
浦东国际机场	[936]	隆德路	[42, 367, 526, 712, 870, 971, 1225]
蟠祥路	[1316]	上海游泳馆	[88, 160, 789, 971, 1309]
江杨北路	[680]	龙华	[88, 160, 789, 971, 1309]
铁力路	[680]	云锦路	[88, 160, 298, 335, 474, 789, 1309]
友谊路	[680]	龙耀路	[88, 298, 474]
宝杨路	[680]	三林	[231, 247, 248, 298]
水产路	[680]	三林东	[231, 247, 248, 298]
淞滨路	[825]	浦三路	[231, 247]
张华浜	[825]	御桥	[539, 972]
淞发路	[825, 850]	罗山路	[539, 972]
长江南路	[825, 850]	秀沿路	[539]
殷高西路	[825, 850]	康新公路	[431, 539]
江湾镇	[825, 850]	迪士尼	[431]
大柏树	[683, 850]	上海赛车场	[654, 919]
赤峰路	[14, 357, 683]	昌吉东路	[1420]
虹口足球场	[14, 42, 357, 522, 683]	上海汽车城	[1420]
东宝兴路	[42, 357, 522, 556, 712]	安亭	[1416, 1420]
宝山路	[42, 357, 522, 556, 712]	兆丰路	[1416, 1420]
中潭路	[42, 357, 526, 712, 870]	光明路	[1416]
镇坪路	[42, 357, 526, 712, 870]	花桥	[1416]
曹杨路	[114, 367, 526, 870, 1225]	七莘路	[1340]
金沙江路	[114, 367, 526, 870, 1225]	虹莘路	[479, 1340]
延安西路	[160, 367, 870, 971, 1309]	顾戴路	[474, 479, 1340]
虹桥路	[88, 160, 789, 971, 1309]	东兰路	[474, 479, 789]
宜山路	[88, 160, 789, 971, 1309]	虹梅路	[474, 479, 789]
漕溪路	[88, 474, 789]	虹漕路	[88, 474, 479, 789]
龙漕路	[88, 474, 789]	桂林公园	[88, 474, 479, 789, 971]



地铁站点	对应的公交备车点编号	地铁站点	对应的公交备车点编号
石龙路	[88, 474, 789]	国际客运中心	[14, 522, 556, 558, 683]
海伦路	[14, 357, 522, 556, 683]	提篮桥	[14, 176, 598, 683, 752]
临平路	[14, 357, 522, 598, 683]	江浦公园	[14, 598, 683]
大连路	[14, 176, 598, 683, 752]	宁国路	[14, 683]
杨树浦路	[14, 176, 598, 683, 752]	隆昌路	[14, 683, 822]
浦东大道	[14, 176, 598, 664, 752]	爱国路	[822, 1189]
浦电路	[176, 598, 664, 752]	复兴岛	[822, 1189]
蓝村路	[176, 598, 664, 752]	东陆路	[822, 1189]
塘桥	[176, 335, 598, 664, 752]	杨高北路	[822, 1189]
南浦大桥	[176, 335, 558, 560, 598]	金京路	[1189]
西藏南路	[298, 335, 556, 558, 560]	申江路	[939, 1189]
鲁班路	[160, 335, 558, 560, 1309]	金运路	[861]
大木桥路	[88, 160, 335, 971, 1309]	金沙江西路	[861]
东安路	[88, 160, 789, 971, 1309]	丰庄	[861, 1225]
上海体育场	[88, 160, 789, 971, 1309]	祁连山南路	[114, 367, 861, 1225]
春申路	[174, 1338]	真北路	[114, 367, 526, 1225]
银都路	[174, 1338]	大渡河路	[114, 367, 526, 870, 1225]
颛桥	[174, 1338]	武宁路	[42, 367, 526, 712, 870]
北桥	[1013, 1338, 1455]	江宁路	[42, 357, 522, 712, 870]
剑川路	[1013, 1455]	自然博物馆	[42, 522, 556, 558, 712]
东川路	[1013, 1455]	淮海中路	[522, 556, 558, 560, 712]
江川路	[1013, 1455]	世博会博物馆	[160, 298, 335, 560, 1309]
西渡	[1013]	世博大道	[160, 298, 335, 1309]
萧塘	[484]	华鹏路	[231, 298, 335]
奉浦大道	[484]	下南路	[231, 643]
环城东路	[484, 986]	北蔡	[189, 643, 972]
望园路	[484, 986]	陈春路	[189, 643, 972]
金海湖	[986]	莲溪路	[643, 972]
奉贤新城	[986]	华夏中路	[189, 643, 972]
金平路	[1013, 1455]	中科路	[189, 431, 972]
华宁路	[1013, 1455]	学林路	[189, 431, 972]
文井路	[1455]	张江路	[276, 431, 972]
闵行开发区	[1455]	纪翟路	[674]
港城路	[543]	芳乐路	[674]
外高桥保税区北	[543]	季乐路	[674]

地铁站点	对应的公交备车点编号	地铁站点	对应的公交备车点编号
航津路	[543]	运乐路	[674]
外高桥保税区南	[543]	诸光路	[674, 1316]
洲海路	[543]	封浜	[1421]
五洲大道	[1189]	乐秀路	[861]
东靖路	[1189]	临洮路	[861]
巨峰路	[822, 1189]	嘉怡路	[861]
五莲路	[822, 1189]	定边路	[114, 861, 1225]
博兴路	[822, 1189]	真新新村	[114, 861, 1225]
金桥路	[822, 1189]	真光路	[114, 526, 1225]
云山路	[822, 1189]	铜川路	[114, 526, 1225]
德平路	[664, 752, 822, 1189]	中宁路	[367, 526, 870]
北洋泾路	[176, 598, 664, 752, 822]	武定路	[526, 712, 870]
民生路	[176, 598, 664, 752, 822]	浦东南路	[176, 598, 752]
源深体育中心	[176, 598, 664, 752]	源深路	[176, 598, 752]
上海儿童医学中心	[176, 335, 598, 664, 752]	昌邑路	[176, 598, 752]
临沂新村	[176, 298, 335]	歇浦路	[176, 598, 752]
高科西路	[231, 298, 335]	黄杨路	[189, 822]
东明路	[231, 298, 335]	云顺路	[536, 822, 1189]
高青路	[231, 298, 335]	浦东足球场	[536, 939]
华夏西路	[231, 247, 298]	金粤路	[536, 939]
上南路	[231, 247, 298]	桂桥路	[939]
灵岩南路	[231, 247, 298]	锦秋路	[183, 387, 708]
东方体育中心	[231, 298, 335]	丰翔路	[131, 183, 708]
花木路	[643, 664, 972]	南大路	[131, 183, 708]
芳华路	[189, 643, 664]	祁安路	[114, 131, 708]
锦绣路	[643, 664]	古浪路	[114, 131, 708]
杨高南路	[231, 298, 335]	武威东路	[114, 131, 708]
云台路	[231, 298, 335]	梅岭北路	[114, 367, 526, 870, 1225]
耀华路	[231, 298, 335]	长风公园	[114, 367, 526, 870, 1225]
长清路	[231, 298, 335]	红宝石路	[367, 516, 789, 971, 1225]
后滩	[88, 160, 298, 335, 1309]	姚虹路	[88, 367, 474, 789, 971]
龙华中路	[88, 160, 789, 971, 1309]	吴中路	[88, 474, 789, 971, 1309]
肇嘉浜路	[88, 160, 789, 971, 1309]	华东理工大学	[88, 474, 479, 789]
昌平路	[42, 357, 522, 526, 556, 712, 870]	罗秀路	[474, 479]

地铁站点	对应的公交备车点编号	地铁站点	对应的公交备车点编号
长寿路	[42, 357, 522, 526, 556, 712, 870]	朱梅路	[174, 479]
岚皋路	[42, 114, 357, 526, 712, 870]	华泾西	[174]
新村路	[114, 131, 357, 526, 870]	虹梅南路	[174]
大华三路	[114, 131, 357, 526]	景西路	[174]
行知路	[114, 131, 708]	曙建路	[174, 1338]
大场镇	[131, 708]	双柏路	[174, 1338]
场中路	[131, 691, 708]	元江路	[1338]
上大路	[131, 387, 691, 708]	永德路	[1013]
南陈路	[131, 387, 691, 708]	紫竹高新区	[1013]
上海大学	[183, 387, 708]	周浦东	[287, 539]
祁华路	[183, 708]	鹤沙航城	[287, 1216]
顾村公园	[183, 387]	航头东	[287, 1216]
刘行	[395]	新场	[1216, 1321]
潘广路	[395]	野生动物园	[290, 1321]
罗南新村	[395]	惠南	[573]
美兰湖	[395]	惠南东	[573]
市光路	[825]	书院	[253]
嫩江路	[825]	临港大道	[299]
翔殷路	[683]	滴水湖	[299]
黄兴公园	[14, 683]	蟠龙路	[674, 1316]
延吉中路	[14, 683]	徐盈路	[195, 1237]
黄兴路	[14, 683]	徐泾北城	[195, 1237]
江浦路	[14, 683]	嘉松中路	[195, 1237]
鞍山新村	[14, 683]	赵巷	[195, 1237]
四平路	[14, 683]	汇金路	[608]
曲阳路	[14, 357, 683]	青浦新城	[608]
西藏北路	[42, 357, 522, 556, 712]	漕盈路	[608]
中兴路	[42, 357, 522, 556, 558, 560, 712]	淀山湖大道	[1241]
曲阜路	[42, 357, 522, 556, 558, 560, 712]	朱家角	[1241]
大世界	[42, 357, 522, 556, 558, 560, 712]	东方绿舟	[1241]
老西门	[42, 160, 522, 556, 558, 560, 712]	西岑	[1244]
陆家浜路	[160, 335, 522, 556, 558, 560, 1309]	殷高路	[825, 850]
中华艺术宫	[231, 298, 335]	上海财经大学	[683, 825, 850]
成山路	[231, 298, 335]	复旦大学	[14, 683, 850]
杨思	[231, 298, 335]	抚顺路	[14, 683]

地铁站点	对应的公交备车点编号	地铁站点	对应的公交备车点编号
凌兆新村	[231, 247, 248, 298]	平凉路	[14, 598, 683]
芦恒路	[247, 248]	丹阳路	[14, 598, 752]
浦江镇	[247, 248]	迎春路	[176, 664, 752]
江月路	[180, 248]	芳芯路	[189, 643, 972]
联航路	[180]	北中路	[189, 643, 972]
沈杜公路	[180]	康桥	[539]
曹路	[939]	周浦	[539]
民雷路	[939]	繁荣路	[539]
顾唐路	[536, 939]	沈梅路	[287]
金海路	[536, 939]	鹤涛路	[287, 1216]
金吉路	[536, 939, 1189]	下沙	[287, 1216]
金桥	[536, 822, 939, 1189]	航头	[1216]
台儿庄路	[822, 1189]	大康路	[387]
蓝天路	[664, 822, 1189]	爱辉路	[691, 850]
芳甸路	[176, 598, 643, 664, 752, 822]	江杨南路	[691, 825, 850]
杨高中路	[176, 598, 643, 664, 752, 822]	长江西路	[825, 850]
商城路	[14, 176, 558, 560, 598, 664, 752]	通南路	[825, 850]
小南门	[176, 522, 556, 558, 560, 598, 752]	三鲁公路	[180]
马当路	[160, 335, 522, 556, 558, 560, 1309]	闵瑞路	[180]
打浦桥	[160, 335, 556, 558, 560, 971, 1309]	浦航路	[180]
嘉善路	[88, 160, 556, 558, 560, 971, 1309]	东城一路	[180]
桂林路	[88, 160, 474, 479, 789, 971, 1309]	汇臻路	[180]

## 附录 4 Python 代码

### 附录 4.1 地铁网络建模

#地铁网络切片

```
def split_subwayline(line, stop):
```

```
    def getline(r2, line_geometry):
```

```
        ls = []
```

```
        if r2['o_project'] <= r2['d_project']:
```

```
            tmp1 = np.linspace(r2['o_project'], r2['d_project'], 10)
```

```
        if r2['o_project'] > r2['d_project']:
```

```
            tmp1 = np.linspace( # pragma: no cover
```

```
                r2['o_project'] - line_geometry.length, r2['d_project'], 10)
```

```

        tmp1[tmp1 < 0] = tmp1[tmp1 < 0] + line_geometry.length # pragma: no cover
    for j in tmp1:
        ls.append(line_geometry.interpolate(j))
    return LineString(ls)
lss = []
for k in range(len(line)):
    r = line.iloc[k]
    line_geometry = r['geometry']
    tmp = stop[stop['linename'] == r['linename']].copy()
    for i in tmp.columns:
        tmp[i + '1'] = tmp[i].shift(-1)
    tmp = tmp.iloc[:-1]
    tmp = tmp[['stationnames', 'stationnames1',
               'geometry', 'geometry1', 'linename', 'line']]
    tmp['o_project'] = tmp['geometry'].apply(
        r['geometry'].project)
    tmp['d_project'] = tmp['geometry1'].apply(
        r['geometry'].project)
    tmp['geometry'] = tmp.apply(
        lambda r2: getline(r2, line_geometry), axis=1)
    lss.append(tmp)
metro_line_splited = pd.concat(lss).drop('geometry1', axis=1)
metro_line_splited.crs = 'epsg:4326'
metro_line_splited['length'] = metro_line_splited.to_crs(epsg=3857).length
metro_line_splited = metro_line_splited.drop(
    ['o_project', 'd_project'], axis=1)
return metro_line_splited

#地铁网络建模
def metro_network(line, stop, transfertime=5, nxgraph=True):
    # Obtain edge1: Network edge for line section.
    linestop = stop.copy()
    if ('speed' not in line.columns) | ('stoptime' not in line.columns):
        raise ValueError( # pragma: no cover
            'Lines should have `line` column to store line name,'
            '`speed` column to store metro speed and'
            '`stoptime` column to store stop time at each station' )

```

```

for i in linestyle.columns:
    linestyle[i + '1'] = linestyle[i].shift(-1)
linestop = linestyle[linestop['linename'] == linestyle['linename1']].copy()
linestop = linestyle.rename(
    columns={'stationnames': 'ostop', 'stationnames1': 'dstop'})
linestop['ostation'] = linestyle['line'] + linestyle['ostop']
linestop['dstation'] = linestyle['line'] + linestyle['dstop']
edge1 = linestyle[['ostation', 'dstation']].copy()
metrolinesplit = split_subwayline(line, stop)
metrolinesplit['ostation'] = metrolinesplit['line'] + \
    metrolinesplit['stationnames']
metrolinesplit['dstation'] = metrolinesplit['line'] + \
    metrolinesplit['stationnames1']
metrolinesplit = metrolinesplit[['ostation', 'dstation', 'line', 'length']]
edge1 = pd.merge(edge1, metrolinesplit, how='left')
edge1 = pd.merge(edge1, line[['line', 'speed', 'stoptime']])
edge1['duration'] = 60 * (edge1['length'] / 1000) /\
    edge1['speed'] + edge1['stoptime']
edge1 = edge1[['ostation', 'dstation', 'duration']].drop_duplicates(
    subset=['ostation', 'dstation'])
linestop = stop.copy()
linestop['station'] = linestyle['line'] + linestyle['stationnames']
tmp = linestyle.groupby(['stationnames'])[
    'linename'].count().rename('count').reset_index()
tmp = pd.merge(linestop, tmp[tmp['count'] > 2]
    ['stationnames'], on='stationnames')
tmp = tmp[['stationnames', 'line', 'station']].drop_duplicates()
tmp = pd.merge(tmp, tmp, on='stationnames')
edge2 = tmp[tmp['line_x'] != tmp['line_y']][['station_x', 'station_y']]
edge2['duration'] = transfertime
edge2.columns = edge1.columns
edge = pd.concat([edge1, edge2])
node = list(edge['ostation']).drop_duplicates())
if nxgraph:
    import networkx as nx
    G = nx.Graph()

```

```
G.add_nodes_from(node)
G.add_weighted_edges_from(edge.values)
return G
else:
    return edge1, edge2, node # pragma: no cover
```

## 附录 4.2 客流分配代码

### （1）K 短路算法

#K 短路算法

```
def heuristic(a, b):
    return abs(a[0] - b[0]) + abs(a[1] - b[1])

def get_k_shortest_paths(graph, start, end, k):
    def reconstruct_path(came_from, current):
        total_path = [current]
        while current in came_from:
            current = came_from[current]
            total_path.append(current)
        return total_path[::-1]

    open_set = []
    heapq.heappush(open_set, (0, start))
    came_from = {start: None}
    g_score = {node: float('inf') for node in graph}
    g_score[start] = 0
    k_shortest_paths = []
    while open_set and len(k_shortest_paths) < k:
        _, current = heapq.heappop(open_set)
        if current == end:
            k_shortest_paths.append(reconstruct_path(came_from, end))
            for path_node in k_shortest_paths[-1][1:]:
                if path_node in came_from:
                    del came_from[path_node]
            continue
        for neighbor in graph[current]:
            tentative_g_score = g_score[current] + graph[current][neighbor]
            if tentative_g_score < g_score[neighbor]:
                came_from[neighbor] = current
```

```

        g_score[neighbor] = tentative_g_score
        f_score = tentative_g_score + heuristic(end, neighbor)
        heapq.heappush(open_set, (f_score, neighbor))

    return k_shortest_paths
#筛选有效路径
def verify_path(paths):
    dropindex=[]
    #paths= ast.literal_eval(paths)
    for j in range(len(paths)):
        path = paths[j]
        used_lines = set()
        used_lines.add(path[0].split('线')[0])
        repeated_lines = set()
        for s in range(len(path)-1):
            if path[s].split('线')[0] != path[s+1].split('线')[0] :#判断是否换乘
                if path[s+1].split('线')[0] in used_lines:# 检查线路是否已经使用过
                    repeated_lines.add(path[s+1].split('线')[0])
                else:
                    used_lines.add(path[s+1].split('线')[0])
            transfercount = len(used_lines)-1
            if len(repeated_lines) != 0 or transfercount >=5:
                dropindex.append(j)
    paths = [element for index, element in enumerate(paths) if index not in dropindex]
    return paths

```

## （2）乘客广义出行费用计算与客流分配

#计算路径的在车时间

```

def get_path_traveltime(G, path):
    traveltime = 0
    for i in range(len(path) - 1):
        traveltime += G.get_edge_data(path[i], path[i + 1])['weight']
    return traveltime
# 计算换乘次数
def get_transfer_count(path):
    transfer_count = 0
    for i in range(1, len(path)):

```



```

        if path[i].split('线')[0] != path[i-1].split('线')[0]:
            transfer_count += 1

    return transfer_count

#更新客流表
def update_flow(ls,passenger_flow):
    ls = pd.concat(ls)
    flow = ls.groupby(['o','d'])['volume'].sum().reset_index()
    flow = pd.merge(passenger_flow,flow ,on=['o','d'],suffixes=('_df1', '_df2'),how='left')
    flow['volume_df2'].fillna(0,inplace=True)
    flow['volume']=flow['volume_df2']+flow['volume_df1']
    flow.drop(columns=['volume_df1','volume_df2'],inplace=True)
    return flow

#计算拥挤度
def get_congestion(path,passenger_flow):
    tmp = pd.DataFrame(path,columns=['o'])
    tmp['d'] = tmp['o'].shift(-1)
    tmp = tmp.iloc[:-1]
    flow = pd.merge(tmp,passenger_flow,on=['o','d'],how='left')['volume'].sum()
    rate = flow/(capacity*len(path))
    if rate <= 0.7:
        congestion = 0
    elif rate <= 1:
        congestion = alpha*(rate-0.7)
    else:
        congestion = alpha*(1-0.7)+beta*(rate-1)
    return congestion

#计算出行阻抗
def get_cost(path,congestion):
    transfercount = get_transfer_count(path)
    f1 = get_path_travelttime(G,path) - transfercount*transfertime
    f2 = transfercount*transfertime
    f3 = metrogap*0.5+intime+outtime
    fee = f1*(1+congestion) + f2 + f3
    return fee

#分配客流
def assignment(OD,passenger_flow,part):

```

```
ls = []
length = len(OD)
for i in tqdm(range(length),position=0):
    r=OD.iloc[i]
    cost = []
    for z in range(len(r['paths'])):
        path = r['paths'][z]
        congestion = get_congestion(path,passenger_flow)
        fee = get_cost(path,congestion)
        cost.append(fee)
    probabilities = []
    cost = np.array(cost)
    cost = cost/60
    probability = np.exp(-theta *cost) / np.sum(np.exp(-theta* cost))
    probabilities=list(probability)
    for x, path in enumerate(r['paths']):
        tmp = pd.DataFrame(path, columns=['o'])
        tmp['d'] = tmp['o'].shift(-1)
        tmp = tmp.iloc[:-1]
        tmp['volume'] = int(r['volume'] * probability[x] * part)
        ls.append(tmp)
return ls
```

### （3）客流出行损失时间计算

#识别包含该区间的 OD

```
def recognize_section(OD,ostation,dstation):
```

```
    index=set()
    r=OD['paths']
    for i in range(len(r)):
        if ostation in r[i] and dstation in r[i]:
            index.add(i)
    index=list(index)
    return OD.iloc[index].reset_index(drop=True)
```

#识别包含车站的 OD

```
def recognize_station(OD,station):
```

```
    index=set()
```

```

r=OD['paths']
for i in range(len(r)):
    if station in r[i]:
        index.add(i)
index=list(index)
return OD.iloc[index].reset_index(drop=True)
#计算车站的客流损失时间
tqdm.pandas()
for i in tqdm(range(len(stations))):
    losstime = 0
    OD_affected = recognize_station(OD, stations[i])
    if OD_affected.empty:
        continue
    G_station = G.copy()
    G_station.remove_node(stations[i])
    OD_affected['path'] = OD_affected.apply(lambda x: get_shortest_paths(G_station, x['ostation'],
x['dstation']),axis=1)
    OD_affected['path'] = OD_affected.apply(lambda x :verify_path(x['path']), axis=1)
    nopath = OD_affected['path'].apply(lambda x: isinstance(x, list) and not x)
    num_nopath =nopath.sum()
    losstime = OD_affected[nopath]['volume'].sum() * pausedtime
    OD_alter = OD_affected[~nopath].reset_index(drop=True)
    OD_alter['paths'] = OD_alter['paths'].apply(ast.literal_eval)
    altertime = 0
    for j in range(len(OD_alter)):
        r = OD_alter.iloc[j]
        path_old = r['paths']
        path_alter = r['path']
        congestion_old = get_congestion(path_old,flow)
        congestion_alter = get_congestion(path_alter,flow)
#计算出行阻抗
        cost_old = get_cost(path_old,congestion_old)
        cost_alter = get_cost(path_alter,congestion_alter)
        altertime =altertime + (cost_alter-cost_old)*r['volume']
    losstime = losstime + altertime
    stations_loss['losstime'][i] = losstime

```

## 附录 4.3 应急公交备车点选址

```
#模型声明
m = gp.Model('bus.model')
I = list(range(530))
J = list(range(1458))
#决策变量
x = m.addVars(J, vtype=GRB.BINARY,name='x')
y = m.addVars(I, J, vtype=GRB.BINARY,name='y')
m.update()
a = []
t = []
for i in I:
    a.append(gp.quicksum(y[i,j] for j in J))
#约束条件
for i in I:
    for j in J:
        m.addConstr(x[j] >= y[i, j])
        m.addConstr(distance[i][j] * y[i, j] <= D)
for i in I:
    if 0<=index[i] <=0.2 :
        m.addConstr(a[i] >= 1)
        m.addConstr(a[i] <= 3)
    elif 0.2<index[i] <=0.45:
        m.addConstr(a[i] >= 2)
        m.addConstr(a[i] <= 5)
    else:
        m.addConstr(a[i] >= 3)
        m.addConstr(a[i] <= 7)
#目标函数
m.setObjectiveN((-gp.quicksum(y[i,j]*(index[i]/(distance[i][j]/v+t0)) for i in I for j in
J))),weight=0.5,name='obj1',index = 0)
m.setObjectiveN((gp.quicksum(x[j]for j in J)),weight=0.5,name='obj2',index = 1)
#求解
m.optimize()
```

## 谢 辞

在本研究完成的过程中，我得到了许多人的帮助和支持，在此对他们表达深深的感谢。

感谢我的毕设指导老师滕靖老师对我进行全面且细致的指导，从论文开题、拟定研究任务到研究工作开展以及最后论文撰写过程中，滕老师多次为我梳理研究思路，提出许多有指导性的建议。同时在研究过程中，滕老师严格把控研究工作进度，基本做到了每周对研究工作进行讨论，使我的毕业设计能够顺利完成。在此再次感谢滕老师的辛勤付出。

感谢大学四年来传授我知识的老师们，是他们无私的奉献，让我学到了得以完成本研究的交通、数学领域知识。

感谢我的室友段楚豫和蓝翊文，在研究过程中不免遇到一些问题，是在与他们的讨论中碰撞出灵感的火花，让问题得以解决。

感谢我的家人，多年来他们一直无条件支持着我，给予我面对困难和未知的勇气与信心。

最后还要感谢本领域的研究者，是他们对理论的创新和付出构建了本文的研究基础，让研究得以顺利展开和完成。

装

订

线