

同濟大學

毕业设计(论文)开题报告

(适用于工科类、理科类专业)

课题名称 基于地铁网络脆弱性分析的应急公
备车点选址研究

副标题

学院(系) 交通运输工程学院

专 业 交通运输

学生姓名 宋禧 学 号 2052105

2024 年 02 月 26 日

一、毕业设计（论文）课题背景（含文献综述）

1.1 研究背景及意义

近年来，随着城市化进程的加深，公共交通的重要性愈发凸显。地铁作为公共交通的重要组成部分，在人口聚集的大城市，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，地铁网络仍在快速发展中：截至 2023 年 12 月，我国 55 个城市开通运营城市轨道交通线路 306 条，运营里程 10165.7 公里。其中，北京运营里程最长（836km），其次为上海（831km），广州（653km）等。随着地铁线路不断完善。地铁网络也更加复杂，地铁系统的运营难度也随之增大。

在地铁系统中，由于其复杂的网络结构和大量的乘客流动，在面临自然灾害、设备故障、恐怖袭击等突发事件时，通常会出现列车延误或者运营中断，导致大量乘客出行延误、滞留。为了减少不良影响，地铁突发事件应急响应措施包括：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一种较好的解决方案，即设置应急公交备车点进行临时公交接驳。

为保证地铁中各个站点发生事故时都能在较短时间内能够进行公交接驳，地铁应急公交备车点的选址研究成为值得研究的课题。同时，考虑到地铁站点、区间突发事件发生的概率和站点能否正常运行对网络影响程度等因素，可通过脆弱性指标识别网络中的重要区间和车站，基于重要度排序确定优先提供接驳服务的集合。进而考虑备车点覆盖性指标在候选集中进行方案优选。

1.2 地铁脆弱性分析常用方法

1.2.1 脆弱性定义

脆弱性这一概念最初是运用于自然科学领域对自然灾害的研究，如今已经被广泛应用于多个研究领域，包括灾难预防、气候变化、工程学、生态学等。脆弱性在不同领域侧重的重点也不同，主要可分为以下三类：①脆弱性是指系统暴露于不利影响下的可能性，侧重于对灾害造成的可能影响进行研究；②脆弱性是指系统受到不利影响而损坏的程度，侧重于不利影响对系统造成的后果；③脆弱性是系统承受不利影响的能力，侧重于系统对不利影响的抵抗或恢复能力。

在地铁系统，脆弱性研究属于第二类，具体可以定义为：当遭受突发事件攻击造成线路或站点中断运营时，地铁系统性能的下降程度。

1.2.2 地铁脆弱性特征

1) 内在性：地铁网络是集设备、人员、环境为一体的复杂系统，有复杂的内部结构，与各个环节密切相关。因此脆弱性是地铁网络的固有属性。

2) 多样性：由于系统受到内外部干扰因素类型、干扰方式的不同，地铁网络展现出的脆弱性也有所不同，而且通常与干扰强度呈现正相关。

3) 动态性：由于地铁客流需求每时每刻都是动态变化的，因此其脆弱性也会发生动态的变化。如客流量较大的工作日早晚高峰，此时地铁脆弱性要比其他时间更大，此时中断运营，会造成严重的乘客滞留。

1.2.3 地铁脆弱性评价方法

脆弱性评价指标的计算需要对多个变量进行分析，并按照各变量的特点为其赋予权重，目前存在的赋权方法包括主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法是相关领域专家及决

策者根据自己主观认识和经验判断进行赋权，常用方法有层次分析法、环比平方法等。客观赋权法则是根据各变量的特点按照一定规则进行赋权，该方法不考虑专家和决策者的主观偏好，常用方法包括灰色关联分析法、熵权法、因子分析法等。

1.3 地铁应急公交备车点选址

地铁应急公交备车点选址涉及到应急设施选址模型的应用，在这方面已经有许多较为经典的选址模型，包括覆盖模型、P-中值模型和P-中位模型。

1.3.1 覆盖模型

覆盖模型包括集合覆盖模型和最大覆盖模型。覆盖模型指对于某类设施需求点存在最大可接受服务距离限制的情况，当该类设施设置在需求点最大可接受服务距离内时，则需求点被该类设施覆盖。集合覆盖模型是一种全覆盖模型，该模型要求用最少的服务设施点去实现所有需求点的覆盖。在地铁应急公交服务点布局问题上，该模型要求对于每一个地铁应急需求点，都存在一个地铁应急公交服务点，使得应急公交车量从该服务点到对应需求点的时间不会超过时间限制。

$$\begin{aligned} & \min \sum_{j \in J} x_j \\ & \text{s.t.} \sum_{j \in N_i} x_j \geq 1, \forall i \in I \\ & N_t = \{j | d_{ij} \leq r\} \end{aligned}$$

式中， i ——需求点标号；

j ——设施点标号；

I ——需求点集合；

J ——设施点集合；

r ——设施点服务半径；

N_i ——可对需求点 i 提供服务的设施点 j 的集合；

d_{ij} ——需求点 i 到设施点 j 的距离；

$x_j = \begin{cases} 1 & \text{若服务设施点} j \text{被选中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}, \forall j \in J。$

最大覆盖模型是指在设施点数目有所限制时，合理分布设施点使得接受服务的需求量达到最大。该模型存在建设成本的限制，且不要求所有的需求点都被覆盖，即旨在使用有限的资源来获取最大的服务效益

$$\begin{aligned} & \max \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} h_{ij} y_{ij} \\ & \text{s.t.} \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_{ij}, \forall i \in I \\ & \sum_{j \in J} x_j \leq p \end{aligned}$$

式中， p ——可建立的设施点总数；

h_{ij} ——设施点 j 为需求点 i 服务的需求量；

$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若需求点} i \text{由设施点} j \text{服务} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}, \forall i \in I, j \in J。$

1.3.2 P-中值模型

P-中值模型是在设施点数目为P的情况下，使得设施点到需求点的加权平均距离最短。中值选址问题最早由学者Hakimi (1964) 提出，其目标是使得所有需求点到设施点的加权距

离的平均值最短，该问题中的距离可抽象为时间或费用。应急公交服务中最需要考虑的就是服务时间，因此，在满足建设成本情况下，考虑设施点到其覆盖的需求点的时间最短具有重要意义。该模型如下：

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i \in I} \sum_j w_i d_{ij} y_{ij} \\ \text{s. t.} & \sum_{j \in J} y_{ij} = 1, \forall i \in I \\ & y_{ij} \leq x_j, \forall i \in I, j \in J \\ & \sum_{j \in J} x_j = P \end{aligned}$$

式中， w_i ——需求点 i 的需求量。

1.3.3 P-中位模型

P-中心模型是设施服务点的数量一定，通过合理布局P个设施点使得所有需求点到离它最近的设施点的距离中最大距离最小。该模型为极小化极大模型，即实现最坏的情况最优化，其最优的目标值称为P-半径。模型具体如下：

$$\begin{aligned} \min & D \\ \text{s. t.} & \sum_{j \in J} y_{ij} = 1, \forall i \in I \\ & y_{ij} \leq x_j, \forall i \in I, j \in J \\ & \sum_{j \in J} x_j = P \\ & D \geq \sum_{j \in J} w_i d_{ij} y_{ij}, i \in I \end{aligned}$$

式中， D ——需求点到候选设施点的最大距离。

1.4 研究现状

1.4.1 地铁脆弱性研究现状

Berdica^[1]首次提出道路网络脆弱性是指系统对降低路网性能的事件的敏感程度，同时指出该定义同样适用于其他交通系统。

Jenelius 等^[2]提出了一种道路覆盖网络区域运行中断下脆弱性分析的方法，基于网格理论，用网格覆盖整个道路网进行分析。通过对瑞典道路网络研究发现区域覆盖中断的影响很大程度上取决于受影响地区本身的内部、出境和入境旅行需求水平。

Yap 等^[3]提出识别多层次公共交通网络中最脆弱节点的方法，并量化已识别节点的脆弱性的社会成本，并用荷兰案例进行研究，发现地铁网络中特别拥挤的节点脆弱性更高。

García-Palomares 等^[4]将脆弱性测度运用到马德里地铁系统，通过 GIS 分析得到每个网络链路中断或错过行程次数的后果，计算出线路和站点的脆弱性。

Jianhua Zhang 等^[5]采用用户均衡与时间补偿机制研究城市轨道交通的鲁棒性，同时分析了在三种不同攻击条件下网络特征变化。

Ermagun 等^[6]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。

袁竞峰^[7]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 3 个方面对地铁脆弱性进行分析。

李近瑜等^[8]将多层网络方法与 SpaceL 建模方法相结合，建立城市公共交通多层网络模型，对不同城市形态的公共交通多层网络脆弱性进行分析。

王楠等^[9]通过定性和定量相结合的分析方法提出了一种城市公交-地铁互补交通网络脆弱性分析框架，从静态和动态两方面进行了脆弱性测度。

马壮林等^[10]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。

宋英华等^[11]对城市内涝条件下城市公交—地铁双层交通网络的脆弱性进行分析，构建了地铁、公交无向加权双层交通网络模型，并发现节点故障对网络脆弱性的影响更大。

赵美怡等^[12]分别从乘客输送、网络运营角度出发，测度城市轨道交通网络运营的脆弱性，

识别出对网络脆弱性影响较大的关键区间和站点。

李冰玉等^[13]建立了基于客流实时分布的客流拥堵网络传播模型，分析轨道交通网络结构脆弱性和运输组织脆弱性。

目前，对地铁网络的脆弱性研究已经比较成熟，主要研究方向涵盖脆弱性影响因素、脆弱性评价指标、网络节点或边的重要度评估及互补网络脆弱性研究等方面。大部分研究对地铁网络脆弱性的分析主要包括两方面，一方面评估网络中节点或连边的重要度，另一方面则通过删除网络中节点或连边的方式，对网络相关指标变化进行评价。

1.4.2 地铁应急公交备车点选址研究现状

Teng 等^[14]研究了城市轨道交通中断条件下的客流分配问题，并基于乘客行为和偏好调查构建了多项式 Logit 模型。

Gu 等^[15]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^[16]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，对应急公交钓鱼进行优化。

Pender 等^[17]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。

陈志宗^[18]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。

腾靖等^[19]提出公共汽车应急运能计算方法和机动车备选点选址方法，给出基于信息化条件的公共汽车交通应急联动实施措施。

刘爽等^[20]人构建了地铁乘客滞留风险模型，并结合改进的 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^[21]人构建了建立了以应急接驳乘客等待时间总延误最小为目标函数的反向集合覆盖选址模型，形成了均衡配置在城市中心区域内外部的蓄车点选址布局模式。

肖畅等^[22]通过对地铁网络脆弱性评价以覆盖最优、服务时间最短、成本最小为目标函数求解了应急公交服务点的布局方案。

赵颖等^[23]基于场所应急疏散风险，以最小化区域内应急疏散时间为目标，建立基于应急需求的公交车驻车点选址模型。使用混沌策略结合模拟退火算法对传统遗传算法进行改进求解。

国内外在应急设施的布局模型已有一定数量的研究成果，包括覆盖模型、P-中值模型、P-中心模型等。对地铁中断条件下，公交衔接客流也有比较成熟的理论研究，包括客流分配、公交衔接方案等。

二、毕业设计（论文）方案介绍（主要内容）

2.1 课题拟研究的内容

本课题首先从地铁站点脆弱性分析入手，计算各地铁站点的脆弱性评价指标，通过脆弱性指标识别网络中的重要区间和车站，基于重要度排序确定优先提供接驳服务的集合。进而考虑备车点覆盖性指标在候选集合中进行方案优选。

2.1.1 绪论

主要阐述研究背景与意义，国内外研究现状，明确本课题研究的价值和目前已有的相关研究成果理论。介绍本课题主要的研究目标，内容，技术路线。

2.1.2 面向城市轨道交通网络的拓扑结构特性的复杂网络指标分析。

首先要对地铁网络进行模型构建，通常使用的方法是SpaceL法构建地铁网络拓扑模型，将地铁站点作为网络的节点，若两个节点相邻且它们之间有地铁线路通过，则这两个节点之间存在一条连边，以此类推得到的节点和连边则构成了地铁网络模型。接下对构建好的复杂网络进行指标分析，从而得到更清晰的网络特征，通常对以下指标进行分析：节点度、节点度分布、介数、平均路径长度和聚类系数等。

2.1.3 线路中断影响下的城市轨道交通客流分配

首先综合考虑乘客出行过程中可能受到的制约因素，建立出行阻抗函数。其次考虑乘客在线路中断条件下的路径选择策略，最后基于Logit函数对客流分配进行建模。

2.1.4 轨道交通网络服务脆弱性分析

将客流出行时间损失为测度对轨道交通网络服务的脆弱性进行分析。可以通过删除某断连边后基于上述客流分配模型重新进行客流分配，统计总客流出行时间，作为脆弱性指标计算依据。

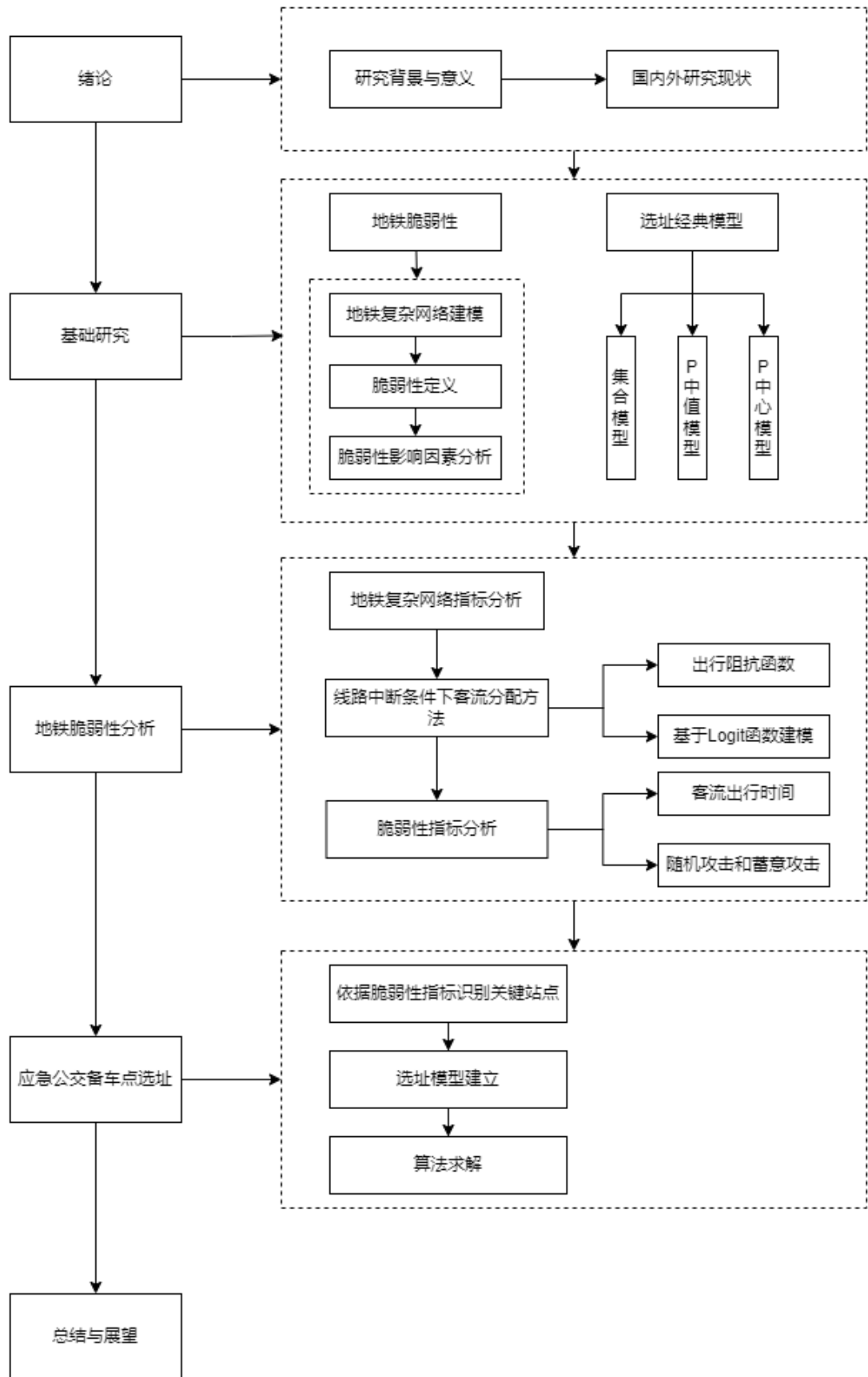
2.1.5 基于脆弱性排序的公交备车点选址优化

根据前面分析计算得到的各站点脆弱性指标，对其进行排序识别出影响整个网络性能的关键站点，形成需要进行公交接驳的站点集合。然后针对该集合进行备车点选址优化。

2.1.6 案例分析

基于上海市城市轨道交通网络和客流情况，通过对网络建模，脆弱性评价等手段识别出关键站点集合，针对对集合内车站进行应急公交备车点的选址。

2.2 技术路线



三、毕业设计（论文）的主要参考文献

- [1] 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.
- [2] Jenelius E, Mattsson L G, Levinson D M. The Traveler Costs of Unplanned Transport Network Disruptions: An Activity-Based Modeling Approach[J]. Social Science Electronic Publishing, 2010(74).
- [3] Yap M D, Oort N V, Nes R V, et al. Identification and quantification of link vulnerability in multi-level public transport networks: a passenger perspective[J].Transportation, 2018(3):1-20.
- [4] Rodríguez-Núñez E, García-Palomares J C. Measuring the vulnerability of public transport networks[J]. Journal of transport geography, 2014, 35: 50-63.
- [5] Zhang Jianhua . Robustness assessments of urban rail transit networks based on user equilibrium with time compensation mechanism[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2023,613:128530.
- [6] 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. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2023.103710.
- [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 (05): 92-98. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2012.05.005.
- [8] 李近瑜. 城市公共交通系统的多层网络建模与脆弱性分析[D]. 兰州理工大学, 2023. DOI:10.27206/d.cnki.gsgsu.2023.000357.
- [9] 王楠. 城市公交-地铁互补交通网络脆弱性研究[D]. 大连海事大学, 2021. DOI:10.26989/d.cnki.gdlhu.2021.000512.
- [10] 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 (08): 164-172. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2023.08.0098.
- [11] 宋英华,李玉枝,霍非舟等. 城区内涝条件下城市公交-地铁双层交通网络的脆弱性分析 [J]. 安全与环境工程, 2021, 28 (02): 114-120. DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2021.02.016.
- [12] 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, 2019. DOI:10.27414/d.cnki.gxnju.2019.001002.
- [13] 李冰玉. 城市轨道交通网络脆弱性研究[D]. 西南交通大学, 2015.
- [14] Jing Teng, Wangrui Liu. Development of a behavior-based passenger flow assignment model for urban rail transit in section interruption circumstance[J]. Urban Rail Transit,2015, 1(1): 35-46.
- [15] Gu Wei, Yu Jie, Ji Yuxiong, et al. Plan-based flexible bus bridging operation strategy[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 91: 209-229. DOI:10.1016/j.trc.2018.03.015.
- [16] Wang Jiadong, Yuan Zhenzhou, Yin Yonghao. Optimization of Bus Bridging Service under Unexpected Metro Disruptions with Dynamic Passenger Flows[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019, 2019: 1-13. DOI:10.1155/2019/6965728.
- [17] Pender B, Currie G, Delbosc A, et al. Improving bus bridging responses via satellite bus reserve locations[J]. Journal of Transport Geography, 2014, 34: 202-210.

DOI:10.1016/j.jtrangeo.2013.12.007.

- [18] 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, (04): 10-14.
- [19] 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 (05): 13-17.
- [20] 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. DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2018.04.017.
- [21] 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 (04): 143-150. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2018.04.015.
- [22] 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, 2021.
DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2021.004615.
- [23] 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, 2022.
DOI:10.27205/d.cnki.gltec.2022.000642.

四、审核意见

宋禧(2052105)

指导教师审核意见：（针对选题的价值及可行性作出具体评价）

能较为准确地理解研究任务需求，文献综述较为全面，技术路线可行，同意开题。

指导教师签名 滕靖

校外指导教师签名 伍敏

2024 年 02 月 28 日

专业审核意见：

宋禧同学开题报告格式规范，研究内容合理可行，同意开题

负责人签名 王鹏玲

2024 年 03 月 01 日