

城市轨道交通网络化应急抢险资源优化配置研究

李承喆

领科教育上海校区 上海 201615

【摘要】为进一步提高城市轨道交通能力,提高应急抢险效果,本文主要对城市轨道交通网络化应急抢险资源优化配置进行分析研究,通过对城市轨道交通特征以及风险评估的基础上,对具体应急抢险资源优化配置模型建立进行详细说明,最后对网络化配置的具体流程设计进行概况总结,包括预警与动员、智能调度、实时监控与指挥、后勤保障与支持以及技术支撑系统应用等,以期为相关人员提供参考。

【关键词】城市轨道交通网络化; 应急抢险; 资源优化配置

引言:

城市轨道交通作为现代城市公共交通系统的重要组成部分,以其高效、环保的特点成为越来越多城市的选择,随着城市轨道交通网络的不断扩展,其安全运营问题也日益受到社会各界的广泛关注,特别是在遭遇自然灾害、技术故障等紧急情况时,如何快速、有效地进行应急抢险,保障乘客安全和交通系统的稳定运行,成为一个亟待解决的问题,因此优化配置城市轨道交通网络化应急抢险资源,提高应急响应效率和处理能力,对于增强城市公共交通系统的韧性,保护人民生命财产安全具有重要意义。

1 城市轨道交通特征与风险评估

1.1 城市轨道交通网络结构分析

在城市轨道交通网络结构分析,需要对整个城市轨道交通系统的网络布局进行全面的描述和评估,包括了解各条轨道线路如何连接城市的不同区域,以及这些连接如何影响交通流量和乘客分布,分析中还需考虑轨道网络的节点,即车站的位置、数量以及它们的服务范围,同时轨道网络的密度、线路的交叉和转换点也是分析的重要内容,因为这些因素直接影响到网络的效率和脆弱性,通过对这些结构特征的深入了解,可以识别出网络中的关键节点和潜在的风险点,为进一步的风险评估和资源优化配置提供基础数据。

1.2 主要风险因素识别

城市轨道交通过程中的风险因素可以被划分为两类,一类是内生风险,如设备故障、电力中断、人为操作失误等,另一类是外生风险,包括自然灾害(如地震、洪水等)、社会事件(如罢工、恐怖袭击等)以及突发公共卫生事件。对于内生风险,需要通过历史数据分析、设备寿命研究、人为错误统计等方法,找出影响轨道交通正常运行的主要风险因子,主要涉及到轨道设备的维护标准、乘务员的培训质量、站台乘客管理等议题。对于外生风险不

能直接控制其发生,但可以通过风险评估,预测其可能影响轨道交通的程度和可能性,并据此进行应急资源配置,例如考虑地理位置和气候条件,某些城市更需要考虑防洪措施,同时所有城市都需要有针对性的反恐预案和应急响应机制。

1.3 应急抢险资源需求分析

在城市轨道交通网络中,应急抢险资源需求分析是识别所需资源类型与数量的关键步骤,以确保在发生紧急情况时的快速有效响应,此分析需要评估各类可能的紧急情况,如火灾、列车故障、自然灾害等,然后根据不同情况的特点和对应的响应时间要求,确定所需的救援设备、救护车辆、医疗设施及人员的具体需求,同时资源需求分析还需考虑资源的存储位置、快速调动的可行性以及多部门协调合作的效率,通过数据分析与模拟,可以优化资源配置,减少响应时间,提高救援效率。

1.4 风险评估模型构建

该模型构建需要识别与分析主要的风险因素,如自然灾害、技术故障、人为破坏等,接下来采用定量和定性相结合的方法来评估这些风险因素的可能性和影响程度,常用评估技术包括故障树分析(FTA)、事件树分析(ETA)和风险矩阵方法,可以确定不同风险事件对轨道交通运行安全的潜在影响,从而为资源优化配置提供科学依据,然后还需利用历史数据和专家经验进行模型验证和调整,确保评估结果的准确性和可靠性。

2 应急抢险资源优化配置模型

2.1 模型假设

模型假设包括:(1)同质性假设:认为所有的抢险队伍在能力和响应时间上是相同的,要求着每个队伍可以在定量评估中被等同考虑,简化了资源的差异性管理问题。

(2)需求确定性假设:假设在发生紧急事件时,对抢险

资源的需求是已知且确定的，这项假设允许相关人员通过历史数据和统计分析确定各类紧急事件对资源的需求量。

(3) 资源调度独立性假设：假定每次资源调度是独立的，不受之前调度决策的影响，这样可以使使用动态规划或线性规划等方法进行逐步优化。(4) 忽略抢险队伍准备时间假设：假定抢险队伍从接到命令到出发的准备时间可以忽略不计，说明可以将重点放在路途时间及资源配置效率上^[1]。

将以上假设纳入线性规划或混合整数线性规划(MILP)模型中，通过构建一个目标函数(如最小化总响应时间)，并设置必要的约束条件(如资源数量限制、抢险点需求等)来形成可求解的数学问题，使用优化软件(如CPLEX或Gurobi)来求解模型，以获得最优资源配置方案，并对所得到的解进行敏感性分析，检验假设改变时解的稳健性，以验证模型的实用性。

2.2 目标函数的构建

目标函数旨在量化应急响应的效率和效果，通常涉及最小化响应时间、成本和资源配置的不平衡性，具体来说可以设定目标函数为最小化抢险资源到达现场的平均时间加权和，同时考虑资源使用成本和资源分配的公平性。在构建目标函数时，需要考虑多种资源(如人员、设备、物资)的特性，以及在不同情况下的需求量，目标函数还应包含约束条件，如资源的可用性、调度策略的合理性以及抢险操作的安全要求，通过精确定义目标函数和约束条件，可以确保优化模型既能实现资源的高效配置，也能满足实际操作中的各种限制和要求。

具体目标函数构建需要最小化总响应实现，也就是所有资源库到需求点的调度路径的距离之和，具体表示为：

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} x_j$$

其中*i*、*j*分别为表示抢险资源库和抢险需求点， x_j 表示资源库向需求点的掉调度资源， d_{ij} 表示资源库和需求点的距离(*m*)。

2.3 约束条件的表述

约束条件表述目的是确保模型的实际应用性和效率，其中资源限制是一个基本约束，包括可用的救援人员数量、设备和资金，而时间约束关系到抢险响应速度，必须确保救援资源能在最短时间内到达事故现场，并且地理和交通约束也必须考虑，因为救援路径需要避开受损路段，同时优化行驶路线以缩短到达时间，最后技术支持系统的稳定性也是一项关键约束，确保在整个救援过程中信息流通和数据处理的准确性与实时性，在这些约束条件共同作用下，能够形成一个既符合实际操作也具备高效率的优化模型^[2]。

3 应急抢险资源网络化配置流程设计

3.1 预警与动员

在预警方面，需要开展预警系统的设计，建立一个以数据驱动的预警系统，此系统将集成多个传感器和监测设备，用于实时收集轨道交通状态、乘客流量、气象条件等数据，利用摄像头和红外传感器检测异常行为或潜在危险，通过地下轨道传感网监测结构稳定性，以及应用气象服务数据预测恶劣天气的发生，这些数据将通过高速网络传输至中央处理系统，经由大数据分析平台进行加工分析。

之后基于收集的数据，开发生态风险评估模型，该模型能够根据历史和实时数据预测潜在的风险等级，对风险等级采取阈值触发机制，当评估结果超越预设的安全阈值时，系统自动发出预警信号，而预警信号触发后，自动化动员机制启动，该机制基于事先制定的应急响应计划，调度必要的人员和物资，例如若监测到某段线路有结构性风险，系统会根据预先设定的逻辑(如距离最近、反应速度最快、资源丰富度等因素)自动通知邻近的抢修队伍和医疗救助团队做好待命准备。

此外为了确保有效性，这些预警机制和动员流程需要在非紧急时期进行频繁测试，通过模拟不同的紧急情况，可以收集数据并优化系统性能，比如在过去的三个月里通过模拟演练，预警系统平均响应时间为2.5分钟，动员指令发送后平均集结完成时间为15分钟，表明系统具备较好的即时反应能力^[3]。

3.2 智能调度

智能调度系统依托于先进的信息技术，如大数据分析、人工智能和地理信息系统(GIS)，以实现应急资源的快速、准确和高效配置。智能调度系统会收集和整合来自不同来源的数据，包括轨道交通运行数据、监控系统数据、气象信息以及应急资源库存状态等，这些数据通过实时分析，可以帮助决策者了解当前的网络状态和潜在的风险点。然后基于收集到的数据，智能调度系统利用机器学习算法预测可能的风险和事故发生的概率，以及对应的资源需求，例如使用决策树或神经网络模型来预测特定节点可能发生的事故类型和严重程度，从而提前准备必要的抢险资源。在资源调配方面，智能调度系统采用优化算法(如遗传算法或线性规划)来确定最优的资源配置方案，包括资源的种类、数量、调配时间和目的地，系统会计算多种调配方案，选择成本最低、响应时间最短的方案实施^[4]。

假设某城市轨道交通线路发生故障，智能调度系统可以立即计算出距离故障点最近的维修站，并根据当前的交通状况和资源可用性，调度最近的维修车辆和技术人员前往

处理，同时系统还会根据事故影响范围，调整周边线路的运行计划，以减少对整个网络的影响。

3.3 实时监控与指挥

实时监控与指挥依托于先进的信息技术，如地理信息系统（GIS）、大数据分析和物联网（IoT），以实现城市轨道交通系统状态的实时监测、评估和应急响应指挥，该环节的主要目的是通过实时数据分析，快速准确地识别潜在风险，及时调度应急资源，以最小化事故或故障的影响。

实时监控系统通过安装在轨道交通网络各关键节点的传感器收集数据，包括车辆位置、速度、乘客流量以及轨道设施的状态等信息，这些数据通过无线网络实时传输到中央监控中心，利用GIS技术在地图上可视化展示，使指挥人员能够直观了解整个网络的运行状态。而中央监控中心利用大数据分析技术对收集到的数据进行处理和分析，通过预设的算法模型识别异常模式和潜在风险，例如，通过分析车辆速度和乘客流量数据，系统可以预测并识别可能的拥堵区域或故障点，从而提前采取措施。一旦识别到潜在的风险或发生紧急情况，实时监控与指挥系统将立即启动应急响应机制，根据事故的性质和严重程度，系统会自动或由指挥人员手动调度附近的应急抢险资源，如救援人员、维修队伍和医疗支援，同时优化调度方案以确保快速响应，此外系统还会实时更新事故处理进展和资源配置状态，确保所有参与方能够同步获取最新信息。为了提高实时监控与指挥的效率和准确性，还需要建立一个完善的信息共享和通信机制，确保各应急管理部门、轨道交通运营商和公安、医疗等相关机构之间能够实时交换信息，形成联动机制^[5]。

3.4 后勤保障与支持

后勤保障与支持是城市轨道交通网络化应急抢险资源优化配置流程中的一个关键环节，它直接关系到应急响应的效率和效果。在设计后勤保障与支持流程时，首先需要可能对可能发生各种紧急情况进行分类和预测，基于此建立一个全面的资源需求数据库。这个数据库应包括但不限于：抢修工具、备用零件、应急照明、医疗急救包、食品和临时住宿设施等。

具体方法上可以采用基于GIS的资源管理系统，通过系统内置的地图和数据库，实现资源的快速定位、调度和管理，例如当某一区域发生事故时，系统能够自动计算出最近的资源仓库和最快的运输路线，以及预计到达时间，此外还应建立一个动态更新的资源调度平台，根据实时情况调整资源分配，确保资源能够高效、及时地送达需要的

地点。

在数据支持方面，需要通过历史数据分析确定各类资源的消耗速率和补给周期，以及在不同类型的紧急情况下的资源需求量，例如通过分析过去的事故案例，可以估算在一次轨道交通事故中，平均每小时需要多少升饮用水、多少套医疗急救包等。这些数据将作为资源储备和调度的重要依据。此外后勤保障与支持还需要考虑人员的管理和培训，应急响应人员应接受专业培训，包括急救技能、设备操作、应急通讯等，以确保响应人员能够在紧急情况下迅速有效地行动，同时建立一个志愿者数据库，志愿者在接受基本培训后，可以在紧急情况下提供辅助支持。

3.5 技术支撑系统（GIS、大数据分析等）

该系统以GIS和大数据分析技术为支撑，在城市轨道交通网络化应急抢险资源优化配置研究中，技术支撑系统扮演着至关重要的角色，特别是地理信息系统（GIS）和大数据分析。GIS可以有效地进行空间数据分析，帮助决策者理解资源分布和风险区域的空间关系。通过GIS，可以实现应急资源的精确定位和快速调度，如确定最佳资源存储地点和最快的救援路径。此外，GIS还能模拟不同紧急情况下的应急响应，以优化资源配置。

大数据分析则利用来自多个源的大量数据，如历史事故数据、天气情况、交通流量和社会媒体信息，通过算法模型分析，预测可能的风险点和资源需求，例如使用时间序列分析可以预测特定时间段内的事故发生概率，而机器学习模型可以根据过去的事故和响应时间来优化资源调度和管理策略。

结语：

综上所述，本提出了一个综合性的网络化资源配置流程，并以此为基础构建了相应的优化模型，为轨道交通领域的安全管理提供了一套科学、系统的应急资源调配解决方案。但当前模型与实践间仍然存在的局限性，后续研究可以从多个角度进行拓展，例如引入更复杂的网络环境，考虑更多元化的风险因素，或是实现更精细化的资源调配策略，以进一步提高整个城市应急管理体系的综合效能。

参考文献：

- [1] 刘佳玲, 秦博宇, 蔡其聪, 丁涛, 李恒毅. 计及可再生能源接入的城市轨道交通储能容量优化配置[J]. 电网技术: 1-10.
- [2] 曹凯, 张宁. 基于运行状态评价的城市轨道交通安检配置优化[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(11): 66-73.
- [3] 徐峰. 城市轨道交通信号系统冗余设计及备用控制中心配置方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 244-248.