

轨道交通网络韧性评估与最优恢复策略

王松, 刘杰*, 黄健畅

山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南 250357

摘要:为提高轨道交通网络应对突发扰动事件的恢复能力,构建融合流量服务效率和网络运行效率的轨道交通网络韧性评估模型,以网络韧性最大化为目标建立轨道交通网络恢复策略模型,将遗传算法与自适应大邻域搜索算法相结合,提出一种混合自适应大邻域搜索遗传算法求解网络韧性最大化恢复策略模型;以杭州市轨道交通为实例,通过随机攻击和针对性攻击模拟自然灾害、人为破坏及运营管控等扰动情景,对比分析3种扰动情景下随机恢复策略、节点度优先恢复策略、重要度优先恢复策略和网络韧性最大化恢复策略的站点恢复顺序及网络韧性表现。结果表明:在3种扰动情景中,网络韧性最大化恢复策略对轨道交通网络的修复效果均最优,其次为节点度优先、重要度优先恢复策略,随机恢复策略的修复效果最差;人为破坏情景中,轨道交通网络所受影响最严重,此时网络韧性最大化恢复策略的网络韧性分别比其他3种策略分别增大6.7%、7.6%、25.1%;同时修复1个站点时,轨道交通网络约需8 h恢复至最优,同时修复4个站点时,约需3 h恢复至最优,可同时修复的站点越多,网络韧性恢复越快。在扰动发生初期尽快采用最优恢复策略并增大修复资源投入,可显著提高轨道交通网络的恢复效率与网络韧性。

关键词:轨道交通;网络韧性;恢复策略;遗传算法;自适应大邻域搜索算法

中图分类号:U239.5

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)05-0011-08

引用格式:王松,刘杰,黄健畅. 轨道交通网络韧性评估与最优恢复策略[J]. 山东交通学院学报,2025,33(5): 11-18.

WANG Song, LIU Jie, HUANG Jianchang. Resilience assessment and optimal recovery strategy of rail transit network[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(5): 11-18.

0 引言

轨道交通是城市公共交通的重要组成部分,其安全、可靠运行对保障城市交通正常运转具有重要意义。随着城市轨道交通网络规模的不断扩大与结构日趋复杂,轨道交通系统在日常运营中面临极端天气、人为破坏、公共卫生事件等不确定性与突发事件的威胁。一旦发生此类事件,轨道交通网络的正常运行状态易受干扰甚至中断,如何在有限资源与时间约束下,抑制影响的扩散、快速制定有效的恢复策略、保障乘客安全与出行效率,已成为提高轨道交通网络韧性与运行可靠性的关键课题。

网络韧性是指网络系统在面临持续性的干扰、攻击、压力或未知的颠覆性变化时,能持续交付可接受的服务,并维持其核心功能的能力。交通网络韧性是指交通网络在面对各种内外部干扰时能预测、承受、适应、恢复并从中学习的能力^[1-4]。轨道交通网络受到干扰后,需根据科学的网络韧性评估以制定最优的恢复策略。在韧性评估指标方面,已有研究多基于拓扑网络结构展开:裴玉龙等^[5]提出增广 Space L

收稿日期:2024-09-10

基金项目:国家高端外国专家引进计划(G2022023003);山东省人文社会科学课题(2021-YYGL-15);山东省重点研发计划(软科学)重点项目(2023RZB06052)

第一作者简介:王松(1999—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为交通运输规划与管理,E-mail:song07170717@163.com。

*通信作者简介:刘杰(1986—),男,济南人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为交通运输规划与管理,E-mail:ajiede1986@163.com。

网络模型,分析南京市主城区多模式公交网络均衡性的测度方法;张雯婕等^[6]将网络平均效率作为网络韧性性能映射函数,构建以网络韧性损失和恢复总时长最小为目标的城市轨道交通故障恢复模型,以成都地铁网络为例,分析不同失效场景的恢复时序;Zhu 等^[7]针对城市轨道交通车站故障,提出以性能损失最小化和修复效率最大化为目标的模型修复策略,基于成都地铁案例,分析随机攻击与蓄意攻击条件下的韧性修复效果;侯本伟等^[8]采用 Space L 方法构建轨道交通网络模型,以网络平均效率表示网络联通性能,分析地震灾害作用后的轨道交通网络抗震韧性指数和韧性损失。

从交通运营与乘客出行角度出发,如何在轨道交通网络受损后实现快速恢复并合理引导出行替代方案,成为研究关注的重点,学者们逐渐引入多类型性能指标全面评估交通网络韧性:李晔等^[9]分析城市交通网络在突发公共卫生事件中经历的不同阶段,并针对各阶段的特点提出相应交通系统恢复策略;吕彪等^[10]构建反映线路流量变化的路网服务效率指标,据此设计路网服务韧性评价体系及节点关键性评估模型,基于遗传算法求解模型获得最优恢复策略;Xu 等^[11]综合考虑网络拓扑结构、流量特征和需求分布等因素,构建故障条件下相互依存的交通网络弹性评估模型,量化评估不同网络依存关系对整体韧性的影响;张洁斐等^[12]研究地铁网络站点修复时序方案,基于 Space L 方法建模,通过计算网络平均效率衡量网络性能;马敏等^[13]基于拓扑网络效率,提出以网络性能响应函数为基础的韧性评估方法,构建以网络韧性指标最大化为目标的恢复优化模型,采用自适应遗传算法求解模型;陈锦渠等^[14]依据乘客出行时间提出站点运营服务水平评价指标,构建基于站点剩余运营服务水平的韧性评价指标,评估成都地铁在大客流冲击下的韧性表现;黄莺等^[15]基于网络韧性变化曲线制定地铁网络受损后的恢复策略。已有研究成果仍存在以下不足:现有研究多基于静态网络拓扑结构选取韧性评估指标,忽略了网络拓扑结构与动态客流量间的相互作用,在拓扑结构中无法体现客流的相关特征;提出的随机恢复、偏好恢复等恢复策略难以达到最优效果,当扰动事件造成多个站点或线路失效时,缺乏系统性的最优恢复方案;轨道交通网络遭受随机攻击和针对性攻击时,未充分考虑轨道交通节点或线路流量差异,影响恢复策略的科学性。

本文从轨道交通网络实际运营出发,定义流量服务效率和网络运行效率,加权后构建轨道交通网络性能映射函数,评估轨道交通网络韧性。构建轨道交通网络韧性最大化恢复策略模型,通过自适应大邻域搜索算法改进传统遗传算法进行模型求解,模拟轨道交通网络实际运营中可能遭受攻击情景,以杭州市轨道交通为例对比不同恢复策略下的网络韧性,以期为轨道交通网络规划、修复及韧性提高提供一定的理论依据。

1 轨道交通网络韧性评估

1.1 网络韧性

遭受攻击后,轨道交通网络性能 $F(t)$ 随时间 t 的变化过程如图 1 所示。假设在 t_e 时刻网络受到特定扰动事件 e 的冲击,在 t_r 时刻网络恢复正常,网络韧性可通过网络性能的累计损失进行量化,即在 t_e-t_r 的轨道交通网络性能曲线与坐标轴围成的灰色区域面积与未受干扰状态下网络性能 $F(t_0)$ 与坐标轴围成的矩形面积之比,扰动事件 e 发生后 t 时刻的轨道交通网络韧性^[16]

$$R(t|e) = \int_{t_e}^t F(t) dt / [(t - t_e) F(t_0)]。$$

扰动事件发生后,若能在恢复阶段初期采用最优恢复策略,可显著提高轨道交通网络的恢复效率,使网络性能迅速恢复至正常水平。

1.2 网络性能映射函数

为综合评估轨道交通网络在遭受扰动后的服务状态,需构建网络服务性能映射函数。当轨道站点或

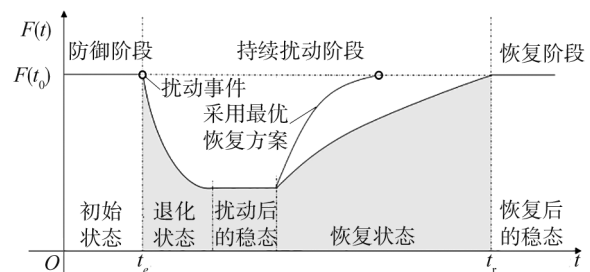


图 1 扰动事件下的轨道交通网络性能变化

线路因受到攻击而失效时,客流量加权的效率与网络运行效率均显著下降,严重影响轨道交通正常运营^[17]。分别定义流量服务效率与网络运行效率,并通过加权方式将其融合为轨道交通网络性能映射函数,全面反映受到特定扰动事件后轨道交通的综合服务水平。

定义流量服务效率 φ 为扰动事件发生后缺失的客流量与常规状态下客流量之比,公式为:

$$\varphi = \left(\sum_{i,j \in V} Q_{ij} - \sum_{i,j \in V} Q'_{ij} \right) / \sum_{i,j \in V} Q_{ij}, \quad (1)$$

式中: Q_{ij} 为未扰动时节点 i, j 间的客流量, Q'_{ij} 为扰动事件发生后节点 i, j 间的客流量, V 为节点集合。

在轨道交通网络中,车站和线路是构成网络的基本元素。采用 Space L 方法将车站抽象为节点,将 2 个相邻车站间的线路抽象为边,构建网络拓扑结构。 $G=(V, L)$ 为轨道交通网络,其中, $V=(1, 2, \dots, N)$, N 为节点总数, L 为边集合。矩阵 $A=(a_{ij})_{N \times N}$ 为网络中任意 2 个节点间的连接,若节点 i, j 间直接相连, $a_{ij}=1$; 否则, $a_{ij}=0$ 。当 a_{ij} 由 1 变为 0 时,认为站点连接线路失效。网络运行效率

$$E = (2 \sum_{i \neq j} Q_{ij} / d_{ij}) / [N(N-1)], \quad (2)$$

式中 d_{ij} 为节点 i, j 间的最短路径长度。

采用熵权法-耦合协调度综合权重法确定流量服务效率和网络运行效率的权重,将式(1)(2)通过权重耦合,构建融合网络运行效率与流量服务效率的轨道交通网络性能映射函数

$$F = \alpha \varphi + \beta E_e / E_0,$$

式中: α 为流量服务效率的权重; β 为网络运行效率的权重, $\alpha + \beta = 1$; E_e 为发生扰动事件后的网络运行效率; E_0 为原始网络运行效率。

2 轨道交通网络最优恢复策略

2.1 恢复策略模型

在扰动事件引发轨道交通网络节点或边失效后,快速确定失效节点的最优恢复顺序,高效恢复轨道交通网络正常运营,是轨道交通网络韧性研究的关键问题^[18]。以网络性能损失最小、网络韧性最大为目标优化节点恢复顺序,确定最优恢复策略,保障整个轨道交通网络的稳定性与运营连续性。

面对同一扰动,采用不同的恢复策略时,网络韧性表现差异显著。现有研究多采用穷举法、随机或基于节点优先级的恢复策略,但这些方法在恢复效果或效率上存在一定局限性。本文提出一种以网络韧性最大化为目标的恢复策略,通过系统筛选所有备选方案,识别能达到最大网络韧性的恢复方案,并将其作为最优恢复方案的判定依据。构建网络韧性最大化恢复策略模型为:

$$\max [R(X|e)] = \int_{t_e}^{t(x)} F[x|(t|e)] dt / \{[t(x) - t_e] F(t)\},$$

式中: $R(X|e)$ 为扰动事件发生后恢复方案的网络韧性; X 为备选方案集合; $t(x)$ 为采用备选方案 x 下网络完全恢复的时间, $x \in X$; $F[x|(t|e)]$ 为扰动事件发生后采用备选方案 x 在 t 时刻的网络性能响应函数。

2.2 求解算法

自适应大邻域搜索算法^[19]在传统邻域搜索框架中引入对算子性能的评估机制,能依据历史表现自适应地选择破坏与修复算子,增强全局搜索能力,在单次迭代中可搜索多个邻域结构^[20],并根据算子的历史情况和使用次数自行选择下一代迭代算子,通过算子间的竞争生成当前解的邻域,避免算法陷入局部最优解。

传统遗传算法通常预设固定的交叉与变异概率,收敛速度较慢,且易早熟收敛^[21]。将遗传算法与自适应大邻域搜索算法相结合,构建混合自适应大邻域搜索遗传算法,求解网络韧性最大化恢复策略模型,能在复杂优化问题中表现更优的稳定性与收敛性能,有效处理复杂约束与多目标优化需求,并具备良好的鲁棒性。

自适应大邻域搜索算法在计算算子得分的同时,记录算子使用次数。若每次迭代都更新算子权重,

在处理大规模问题时所需时间较长,可通过合理设置算子更新衰降系数 ρ 平衡求解时间和权重更新间的关系,控制权重更新的频率。每次更新后的权重作为下一次迭代算子的权重,公式为:

$$W_i = \begin{cases} (1 - \rho) W_i + \rho S_i / N_i, N_i > 0 \\ (1 - \rho) W_i, N_i = 0 \end{cases},$$

式中: W_i 为算子 i 每次更新权重; S_i 为算子 i 的总得分,与算子的被选择次数和使用该算子后产生的邻域解的质量有关; N_i 为算子被选择的次数。

自适应大邻域搜索算法通过对当前解执行重复的破坏与修复操作,在解空间中探索新的可行解。将遗传算法种群内当前最优个体作为自适应大邻域搜索算法的初始解,经其搜索后生成新个体;通过种群更新机制,将新个体替换遗传算法中适应度最差的个体。依此方式不断迭代,逐步提高种群的整体质量,实现优化目标。

3 算例分析

3.1 轨道交通网络拓扑结构

杭州市轨道交通网络规模较大,车站较多,全年客运总量客流量较大,客流强度较高。截至 2023 年 12 月 31 日,杭州市轨道交通运营线路共 12 条,运营里程 516 km,运营车站共 256 座^[22]。本文以杭州市轨道交通为例,采用 Space L 方法构建其网络拓扑结构,如图 2 所示。

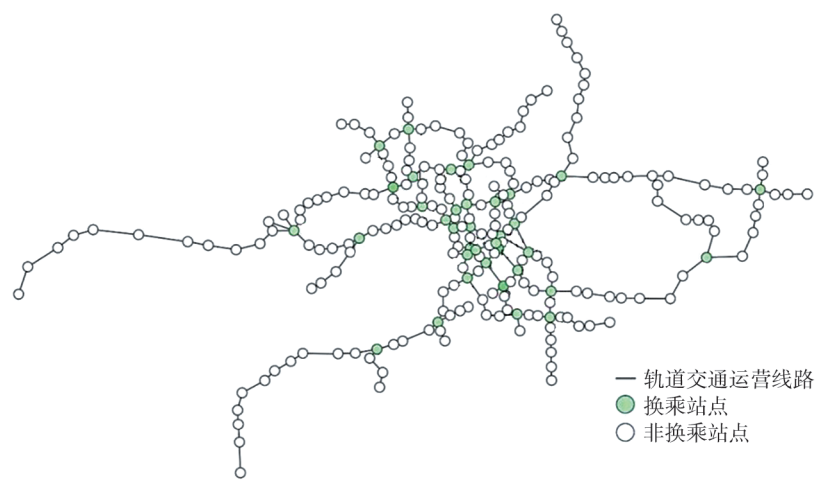


图 2 杭州市轨道交通网络拓扑结构

3.2 参数确定

通过熵权法-耦合协调度综合权重法,计算得到流量服务效率和网络运行效率的权重分别为 0.43、0.57。设计小规模案例验证混合自适应大邻域搜索遗传算法的有效性,随机选取两组杭州市轨道交通站点作为攻击对象,第 1 组站点编号为 1、11、21、31、41、51、61、71、81、91,第 2 组站点编号为 2、12、22、32、42、52、62、72、82、92,分别采用混合自适应大邻域搜索遗传算法及软件 CPLEX 进行求解,得到轨道交通站点恢复顺序及轨道交通网络韧性如表 1 所示。

表 1 案例算法对比

攻击对象	求解方法	轨道交通站点恢复顺序	轨道交通网络韧性
第 1 组	CPLEX	21→81→91→41→51→71→31→61→11→1	0.786 4
	混合自适应大邻域搜索遗传算法	21→91→81→41→51→71→11→61→1→31	0.891 2
第 2 组	CPLEX	42→62→82→22→12→2→52→72→32→92	0.622 0
	混合自适应大邻域搜索遗传算法	62→42→22→82→12→52→2→92→32→72	0.923 5

由表1可知:2组算例中,混合自适应大邻域搜索遗传算法求解方案的网络韧性均大于CPLEX,说明混合自适应大邻域搜索遗传算法求解此类问题可行。

为便于模型求解与数据处理,设定扰动事件发生于初始时刻,即 $t_e=0$ 。设定遗传算法参数为:种群规模为100,最大遗传代数为120,交叉概率为0.8,变异概率为0.02;设定自适应大邻域搜索算法参数为:随机破坏算子的破坏比例为0.1~0.4,最坏破坏算子的破坏数为4~20,后悔值修复算子中次优候选位置数为5。

3.3 扰动环境设置

在杭州市轨道交通网络的仿真环境中,设置随机攻击与针对性攻击两种模式^[23],分别模拟自然灾害、人为破坏及运营管控等现实扰动情景,根据不同扰动情景生成相应的轨道交通失效站点,具体设置如表2所示。

表2 扰动情景

攻击方式	扰动情景假设	失效站点方案	失效站点编号
随机攻击	扰动情景1(自然灾害)	随机生成10个站点	32、34、64、88、91、151、178、207、225、234
针对性攻击	扰动情景2(人为破坏)	节点度最大的10个站点	16、21、39、49、71、96、102、118、122、199
	扰动情景3(运营管控)	客流量最大的10个站点	8、12、14、47、111、112、157、141、185、223

3.4 轨道交通网络韧性分析

3.4.1 不同恢复策略下的轨道交通网络韧性

受实际资源限制,设定恢复机制时,假定同一时间仅能对单一节点进行修复作业。随机恢复策略是一种无偏好的恢复方法,即在所有失效站点中,以完全随机方式选择下一个要修复的站点,直至所有站点恢复,该策略无需先验信息,决策成本较低,但恢复效率较低,性能表现不稳定。偏好恢复策略根据失效站点某一项预设的、被认为重要的属性进行排序,并优先修复该属性值最高的站点,其中,节点度优先恢复策略是按失效站点度的大小顺序确定恢复顺序,该策略仅考虑网络拓扑结构特征;重要度优先恢复策略是按失效站点重要度的大小顺序确定恢复顺序,该策略侧重于客流分布因素。对比分析3种扰动情景下分别采用随机恢复策略、偏好恢复策略(节点度优先恢复策略、重要度优先恢复策略)和轨道交通网络韧性最大化恢复策略的站点恢复顺序及轨道交通网络韧性,结果如表3所示。

表3 3种扰动情景下各恢复策略的轨道交通站点恢复顺序及轨道交通网络韧性

扰动情景	恢复策略	轨道交通站点恢复顺序	轨道交通网络韧性
1	随机	225→34→78→88→151→132→207→64→234→91	0.689 3
	节点度优先	115→32→234→34→207→178→91→64→88→225	0.891 3
	重要度优先	234→178→88→115→32→34→207→91→64→225	0.873 5
	网络韧性最大化	115→234→32→178→34→207→91→88→64→255	0.952 4
2	随机	21→199→39→49→16→71→118→96→102→122	0.732 5
	节点度优先	122→16→49→102→118→21→96→39→199→71	0.903 7
	重要度优先	122→49→16→21→39→102→118→96→71→199	0.912 2
	网络韧性最大化	49→122→16→102→21→118→39→96→199→71	0.978 3
3	随机	8→12→14→47→111→112→157→141→185→223	0.770 3
	节点度优先	223→8→14→12→47→185→111→112→141→157	0.932 3
	重要度优先	223→8→12→14→47→185→157→141→111→112	0.934 8
	网络韧性最大化	223→8→141→14→12→47→157→185→111→112	0.954 2

由表3可知:在3种扰动情景下,网络韧性最大化恢复策略的网络韧性均大于其他3种恢复策略,网络恢复效果较好。

不限定恢复时间,3种扰动情景下各恢复策略的网络韧性恢复曲线如图3所示。由图3可知:在3种扰动情景下,采用网络韧性最大化恢复策略的修复效果在任意时间均最优;重要度优先恢复策略、节点度优先恢复策略与随机恢复策略的修复效果因扰动类型不同差异显著。除扰动情景1外,重要度优先恢复策略的网络韧性均优于节点度优先恢复策略,说明在韧性评估中,融合客流属性的站点重要度指标较单纯依靠拓扑结构的节点度更具影响力。不同扰动情景对网络性能的潜在影响具有明显区别,在扰动情景2(模拟人为破坏事件)中,网络韧性下降至0,表明该类扰动所造成的影响最严重,破坏性最强,此时采用网络韧性最大化恢复策略的网络韧性比重要度优先恢复策略、节点度优先恢复策略、随机恢复策略分别增大6.7%、7.6%、25.1%。

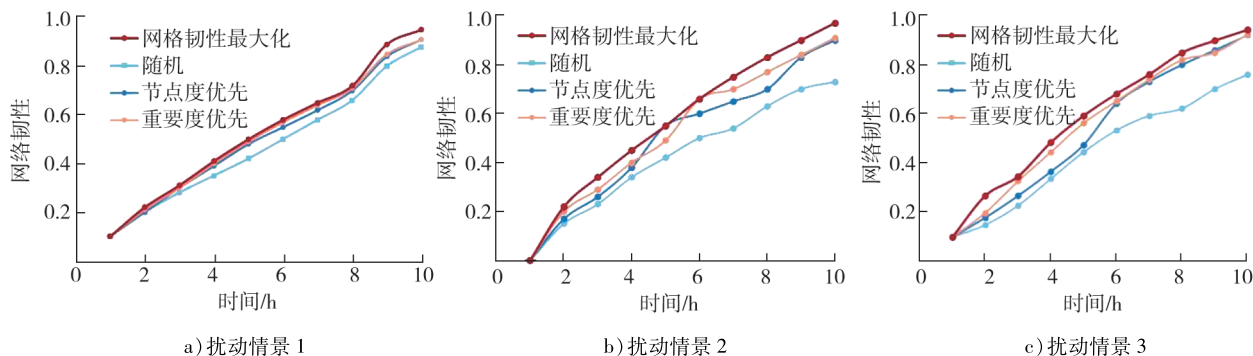


图3 3种扰动情景下各恢复策略的网络韧性恢复曲线

在实际运营中,扰动事件导致部分站点或线路停运,影响乘客出行行为,乘客需改乘其他交通方式或调整出行路径。若乘客转乘公交继续行程,需系统考虑轨道交通站点与公交系统的接驳安排,包括接驳站点设置、线路规划及相应客流量预估。因此,在确定失效站点的恢复时序时,应综合考虑接驳交通的服务能力与因客流转移所造成的潜在损失程度。

3.4.2 不同修复资源投入下的网络韧性

以扰动情景2为例,分析不同修复资源投入对网络韧性的恢复效果的影响,结果如图4所示。由图4可知:若同时仅修复1个站点,约8h后网络韧性可恢复至最优;若同时修复4个站点,约3h后网络性能就能达到最优。可同时修复的站点越多,网络韧性恢复越快,说明增大修复资源投入,可缩短修复时间,提高恢复效率。若轨道交通网络中大部分站点失效,需综合考虑修复成本等现实约束,难以实现多站点同步修复。

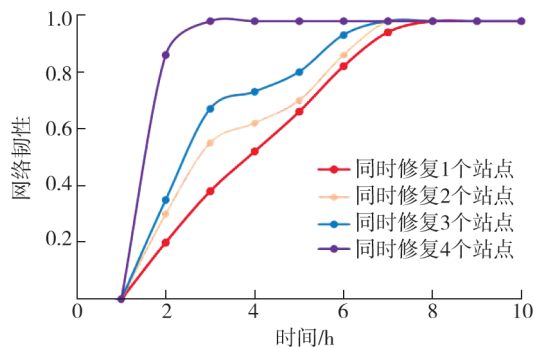


图4 不同修复资源投入下的网络韧性恢复曲线

4 结束语

轨道交通网络韧性是保障轨道交通运营和抗干扰能力的核心指标,对提高轨道交通安全和可靠运营具有重要意义,本文通过加权方式将流量服务效率与网络运行效率融合为轨道交通网络性能映射函数,评估轨道交通网络韧性。构建以网络韧性最大化为目标的恢复策略模型,并通过混合自适应大邻域搜索遗传算法求解模型。以杭州市轨道交通为例,设置自然灾害(扰动情景1)、人为破坏(扰动情景2)及运营管控(扰动情景3)等3种扰动情景,对比分析随机恢复策略、节点度优先恢复策略、重要度优先恢复策略和网络韧性最大化恢复策略下的轨道交通网络韧性。

1)采用将遗传算法与自适应大邻域搜索相结合的策略,求解轨道交通网络受到攻击时的站点恢复顺序可行,改进算法求解方案的网络韧性高于软件 CPLEX 的求解方案。

2)3种扰动情景下,网络韧性最大化恢复策略对杭州市轨道交通网络的修复效果均最佳,其次是节点度优先和重要度优先恢复策略,随机恢复策略的修复效果最不理想。扰动情景2中,网络韧性最大化恢复策略的网络韧性比重要度优先恢复策略、节点度优先恢复策略、随机恢复策略分别增大6.7%、7.6%、25.1%。

3)若同时仅修复1个站点,约8h后网络韧性恢复至最优;若同时修复4个站点,约3h后网络性能就能达到最优。可同时修复的站点越多,网络韧性恢复越快,增大修复资源投入,可缩短修复时间,提高恢复效率。

扰动事件引发的轨道交通站点或线路停运将改变乘客出行决策,后续研究有必要引入公交接驳能力与潜在客流损失,构建融合乘客出行行为与多模式交通接驳的网络韧性评估模型。

参考文献:

- [1] 路庆昌,刘鹏,徐标,等.运营事件下基于韧性的地铁网络保护决策优化[J].交通运输工程学报,2023,23(3):209-220.
- [2] WANG N. Resilience analysis of urban rail transit network under large passenger flow[C]//Proceedings of IEEE 22nd International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion. Guangzhou, China: IEEE, 2022:444-446.
- [3] 马敏,胡大伟,刘杰,等.基于客流加权的城市轨道交通网络抗毁性分析[J].中国安全科学学报,2022,32(12):141-149.
- [4] ZHOU M Z, ZHOU J P. Multiscalar trip resilience and metro station-area characteristics: A case study of Hong Kong amid the pandemic[J]. Journal of Transport Geography, 2024, 116: 103851.
- [5] 裴玉龙,金英群,常铮.城市多模式公交网络拓扑结构与布局均衡性研究[J].中国公路学报,2021,34(1):127-138.
- [6] 张雯婕,胡军红,闻成维,等.考虑网络韧性的城市轨道交通故障恢复研究[J].中国安全科学学报,2023,33(4):179-186.
- [7] ZHU M, CHEN J Q, YIN Y. Repair strategies of an urban rail transit network based on optimal resilience[C]//Proceedings of 6th International Conference on Transportation Information and Safety. Wuhan, China: IEEE, 2021:871-876.
- [8] 侯本伟,游丹,范世杰,等.基于网络效率的城市轨道交通网络抗震韧性评估[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(3):509-519.
- [9] 李晔,刘兴华,何青.面向防疫的城市交通系统韧性特征及提升策略[J].城市交通,2020,18(3):80-87.
- [10] 吕彪,管心怡,高自强.地铁网络服务韧性评估与最优恢复策略[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(5):198-205.
- [11] XU P C, LU Q C, XIE C, et al. Modeling the resilience of interdependent networks: the role of function dependency in metro and bus systems[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2024, 179: 103907.
- [12] 张洁斐,任刚,马景峰,等.基于韧性评估的地铁网络修复时序决策方法[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(4):14-20.
- [13] 马敏,胡大伟,舒兰,等.城市轨道交通网络韧性评估及恢复策略[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(2):396-404.
- [14] 陈锦渠,张帆,彭其渊,等.大客流下城市轨道交通站点韧性评估及划分[J].安全与环境学报,2022,22(6):2994-3002.
- [15] 黄莺,刘梦茹,魏晋果,等.基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究[J].灾害学,2021,36(1):32-36.
- [16] MA Z A, YANG X, WU J J, et al. Measuring the resilience of an urban rail transit network: a multi-dimensional evaluation model[J]. Transport Policy, 2022, 129: 38-50.
- [17] MURRAY-TUITTE P M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user

- equilibrium conditions [C]//Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2006: 1398–1405.
- [18] 李晓辉, 李沛帆, 于振宁, 等. 自适应大邻域搜索算法在无人机物流路径规划问题中的应用[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(11): 260–265.
- [19] 杨子越. 分阶段改进大邻域搜索算法求解取送货车辆路径问题[J]. 中国水运, 2024(2): 57–60.
- [20] 李洋. 城市轨道交通网络韧性评估与最优恢复策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [21] 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.
- [22] 中国交通新闻网. 2023 年城市轨道交通运营数据速报[EB/OL]. (2024-01-16) [2024-08-25]. https://www.zgjt.com/2024-01/16/content_396116.html.
- [23] REN X L, TANG T, YIN J T. A mixed integer programming approach for the resilience-oriented train rescheduling optimization in railway networks [C]//Proceedings of China Automation Congress. Beijing, China: IEEE, 2021: 5754–5759.

Resilience assessment and optimal recovery strategy of rail transit network

WANG Song, LIU Jie^{*}, HUANG Jianchang

School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To improve the recovery capability of rail transit networks in response to sudden disturbance events, a resilience assessment model for rail transit networks is proposed, which integrates traffic service efficiency and network operational efficiency. A recovery strategy model for rail transit networks is established with the objective of maximizing network resilience. By combining genetic algorithms with adaptive large neighborhood search algorithms, a hybrid adaptive large neighborhood search genetic algorithm is proposed to solve the resilience maximization recovery strategy model. Taking the rail transit system of Hangzhou as an example, disturbance scenarios such as natural disasters, human-made damages, and special control measures are simulated using random and deliberate attacks. The station recovery sequence and network resilience performance of random recovery strategies, node-degree-first recovery strategies, importance-first recovery strategies, and resilience-maximization recovery strategies are compared and analyzed under three disturbance scenarios. The results indicate that under all three disturbance scenarios, the resilience-maximization recovery strategy achieves the best repair effect on the rail transit network, followed by node-degree-first and importance-first recovery strategies, while the random recovery strategy exhibits the worst repair effect. In the human-made damage scenario, the rail transit network is most severely affected, and at this time, the resilience-maximization recovery strategy improves the network resilience by 6.7%, 7.6%, and 25.1% compared to the other three strategies, respectively. Furthermore, when repairing one station, the rail transit network requires approximately 8 hours to recover to optimal performance, while repairing four stations simultaneously only requires about 3 hours to reach optimal recovery. The greater the number of stations that can be repaired simultaneously at the same time point, the faster the network resilience is restored. Implementing the optimal recovery strategy as soon as possible and increasing the repair resource investment in the early stage of the disturbance can significantly improve the recovery efficiency and network resilience of the rail transit network.

Keywords: rail transit; network resilience; recovery strategy; genetic algorithm; adaptive large neighborhood search algorithm

(责任编辑: 赵玉真)