

董正方, 李乐意, 咎子卉, 等. 城市轨道交通系统震后修复顺序优化[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2025, 45(6): 216-226.

DONG Zheng-fang, LI Le-yi, ZAN Zi-hui, et al. Post-earthquake repair sequence optimization of urban rail transit system[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(6): 216-226.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.06.017

## 城市轨道交通系统震后修复顺序优化

董正方<sup>1</sup>, 李乐意<sup>1</sup>, 咎子卉<sup>2</sup>, 代鹏翔<sup>1</sup>, 李运华<sup>1</sup>

(1. 河南大学 建筑工程学院, 河南 开封 475004; 2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010)

**摘要:** 为了提高城市轨道交通系统的抗震韧性, 基于复杂网络理论和抗震韧性评估理论, 对城市轨道交通系统震后结构修复顺序进行优化研究。首先, 从单元失效情况、网络连通性、网络交通运输功能3个维度定义城市轨道交通系统的性能响应函数, 并据此求其相应的恢复力, 将其加权求和得到综合恢复力。其次, 以单一维度恢复力最大为目标, 建立城市轨道交通系统单目标优化模型, 通过遗传算法来进行求解。进一步综合考虑多维度(例如三维度)恢复力最大建立城市轨道交通系统多目标优化模型, 通过多目标遗传算法(例如改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II))进行求解。最后, 以郑州市轨道交通系统网络为典型案例, 对其地震后结构修复顺序进行优化, 设置结构失效单目标优化、网络连通单目标优化、网络功能单目标优化、多目标优化、随机修复、偏好修复6种修复工况。研究表明: 优化的修复顺序较随机修复的恢复力均有所提升, 提升幅度为0.8%~12%; 多目标优化修复顺序的综合恢复力最大, 较其他工况提升幅度为4%~6%; 通过优化震后结构的修复顺序可以有效提高城市轨道交通系统的抗震韧性, 其中多目标优化可以得到系统综合恢复力最大的优化方案。研究成果可为城市轨道交通系统的震后抢修工作提供参考。

**关键词:** 交通工程; 城市轨道交通系统; 修复顺序优化; NSGA-II

**中图分类号:** U239.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8879(2025)06-0216-11

### Post-earthquake repair sequence optimization of urban rail transit system

DONG Zheng-fang<sup>1</sup>, LI Le-yi<sup>1</sup>, ZAN Zi-hui<sup>2</sup>, DAI Peng-xiang<sup>1</sup>, LI Yun-hua<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;

2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to improve the seismic resilience of urban rail transit system, based on complex network theory and seismic resilience evaluation theory, the post-earthquake structural repair sequence of urban rail transit system was optimized. Firstly, the performance response function of urban rail transit system was defined from three perspectives: unit failure, network connectivity and network transportation function. Based on this, the corresponding restoring force was obtained, and the comprehensive restoring force was obtained by weighted sum. Secondly, aiming at maximizing

收稿日期: 2025-05-24

基金项目: 河南省自然科学基金项目(242300421433); 中国博士后科学基金项目(2024M750780);

中建六局科技研发计划项目(CSCEC6B-2024-Z-7)

作者简介: 董正方(1980-), 男, 河南滑县人, 教授, 工学博士, E-mail: dzf@henu.edu.cn.

通讯作者: 李运华(1980-), 男, 河南项城人, 高级实验师, E-mail: 24561591@qq.com.

the single dimensional resilience, a single-objective optimization model of urban rail transit system was established and solved by genetic algorithm. Further, considering the maximum three-dimensional resilience, a multi-objective optimization model of urban rail transit system was established and solved by multi objective genetic algorithm (such as improved non-dominated sorting genetic algorithm- II (NSGA- II)). Finally, taking Zhengzhou rail transit network as a typical case, the post-earthquake structural repair sequence was optimized. Six repair conditions were set up, including single-objective optimization of structural failure, single-objective optimization of network connectivity, single-objective optimization of network function, multi-objective optimization, random repair and preference repair. The results show that the restoring force of the optimized repair sequence is higher than that of the random repair, with an increase of 0.8%-12%. Comprehensive restoring force of multi-objective optimization repair sequence is the largest and 4%-6% higher than other working conditions. Therefore, by optimizing the repair sequence of the post-earthquake structure, the seismic resilience of urban rail transit system can be effectively improved, and the multi-objective optimization can obtain the optimization scheme with the largest comprehensive restoring force of the system. The research in this paper can provide reference for the post-earthquake repair work of urban rail transit system. 8 tabs, 14 figs, 27 refs.

**Key words:** traffic engineering; urban rail transit system; repair sequence optimize; NSGA- II

## 0 引 言

城市轨道交通系统因其快速高效、安全舒适、节能环保等特点成为解决城市交通堵塞、环境污染等问题的有效方式。截止到 2025 年 8 月,中国共有 54 个城市开通运营轨道交通线路 331 条,运营里程达到了 11 210.7 km<sup>[1]</sup>。但中国是一个地震频发的国家,并且已建和新建的轨道交通大多位于地震高烈度区,当地震发生时,轨道交通结构在地震中易发生破坏<sup>[2-4]</sup>,进而导致整个轨道交通系统功能的丧失。因此如何在有限修复资源下合理安排震后结构的修复顺序,对于提高整个系统的抗震韧性具有重大意义。

韧性的概念最早由 Holling<sup>[5]</sup>等引入生态系统中,随着研究的不断深入,韧性的概念被广泛接受。Bruneau 等<sup>[6]</sup>对社区抗震韧性进行了定量评估,提出的“韧性三角形”模型影响深远。该模型是通过定义工程系统在地震中性能随时间变化的函数来实现系统抗震韧性的定量评估,可以较好地模拟工程系统在地震中的破坏及修复过程,将韧性的快速性、鲁棒性等特点完美地融合在一起,故被广泛应用于后续工程系统的韧性定量评估研究中。刘威等<sup>[7-9]</sup>基于该模型分别对供水管网、燃气管网和交通网络的韧性进行了评估。袁万城等<sup>[10]</sup>对桥梁工程抗震韧性进行了总结和展望。

现有城市轨道交通韧性研究集中于随机失效、蓄意攻击等场景下的韧性定量评估及韧性提升策略研究。黄莺等<sup>[11]</sup>以网络平均效率为韧性指标,以系统恢复力最大为目标构建了城市轨道交通系统的恢复模型,采用遗传算法求解了小规模和大规模站点失效场景下的最优修复顺序。LI 等<sup>[12]</sup>提出了加权客流量的指标评价网络性能,以北京市轨道交通系统为例评估了随机失效场景下的系统韧性,并基于网络拓扑优化研究了韧性提升策略。马敏等<sup>[13]</sup>提出了综合考虑网络拓扑结构和网络服务质量的性能响应函数,通过自适应遗传算法求解了西安市轨道交通系统在蓄意攻击和随机攻击场景下的恢复策略。这些研究通常以城市轨道交通系统单一维度的恢复力最大为目标来优化系统恢复策略,属于单目标优化问题,常采用遗传算法进行求解。遗传算法最早由 John Holland 教授依据生物遗传机制所提出的一种随机全局搜索优化算法<sup>[14]</sup>。该算法对于任意非线性条件下的任意目标函数在任意离散、连续或混合的搜索空间中搜索全局最优解,已用于求解旅行商(TSP)问题和产品的生产调度问题<sup>[15]</sup>。由于对其他维度的恢复力缺乏关注,当前研究所得的结果可能相对片面。

当综合考虑多维度的恢复力优化城市轨道交通系统的恢复策略属于多目标优化问题。当前学

者们已经对工程系统的维修恢复策略开展了多目标优化研究。杨国俊等<sup>[16]</sup>基于碎片化分区方法对桥梁网络震后修复优先级进行了优化。Han 等<sup>[17]</sup>以桥梁网络性能最大和养护费用最小为目标,通过非支配排序遗传算法-Ⅱ(NSGA-Ⅱ)进行求解,得到了桥梁网络最优养护方案。寇峥等<sup>[18]</sup>在震后可恢复性、经济损失、震前加固费用等方面通过 NSGA-Ⅱ 优化了桥梁网络的震前加固顺序。李昊昌等<sup>[19]</sup>以路面养护效益最大、养护资金最小为目标建立了多目标优化模型,通过改进的 NSGA-Ⅱ 对其进行了求解,得到了最优的路面修复决策。上述研究均采用 NSGA-Ⅱ 来进行求解,据统计,NSGA-Ⅱ 在各个领域的多目标优化研究中被引用了 34 682 次<sup>[20]</sup>,可见其在解决多目标优化问题方面具有重要地位。且有研究表明该算法在求解目标数在 3 个及以下的多目标优化问题时能以较快地速度收敛到满足优化目标和约束条件的优质解<sup>[21]</sup>,是求解多目标优化问题的强有力工具。然而目前仍然缺乏城市轨道交通系统的恢复策略的多目标优化研究,且多目标优化所得的恢复策略是否优于传统的单目标优化所得的恢复策略也值得探讨。

综上针对现有研究不足,本文在现有韧性研究的基础上提出可以考虑城市轨道交通系统结构失效情况、网络连通程度以及客流运输功能的多维度性能响应函数,并分别从单目标和多目标进行修复顺序优化。

## 1 抗震韧性评估模型

### 1.1 韧性曲线

城市轨道交通系统的韧性曲线指系统的性能水平随时间的变化情况,如图 1 所示,图 1 中: $Q_0$  为系统正常运行的性能; $Q_1$  为系统震后性能最低点;

$Q(t)$  为性能响应函数。图 1 表示城市轨道交通系统在  $t_0$  时遭受地震冲击,系统性能下降, $t_1$  时启动修复工作,系统性能随着修复不断提高,直至  $t_2$  时系统性能水平恢复到初始水平。常用修复时间内韧性曲线的面积积分与修复时间的比值来表示系统的抗震韧性  $R$ ,如式 1 所示<sup>[22]</sup>

$$R = \frac{1}{t_2 - t_0} \int_{t_0}^{t_2} Q(t) dt \quad (1)$$

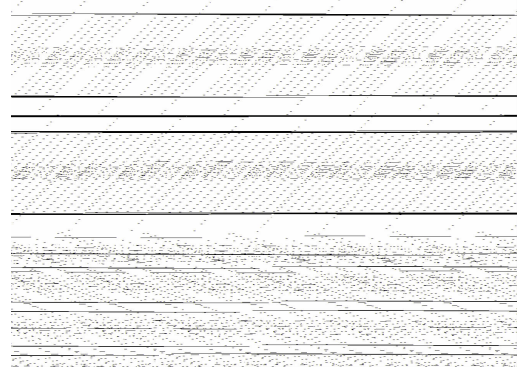


图 1 城市轨道交通系统韧性曲线

Fig. 1 Resilience curve of urban rail transit system

城市轨道交通系统由车站和区间结构(桥梁、隧道)组成,参考公交系统<sup>[23]</sup>,属于空间复杂网络。将城市轨道交通系统简化为由节点(车站)和连边(桥梁、隧道)组成的复杂网络,采用复杂网络法进行研究,网络的拓扑指标如表 1 所示。

### 1.2 多维度性能响应函数

综合考虑震后结构失效情况、网络连通程度、网络交通运输功能等因素,提出多维度城市轨道交通系统性能响应函数。

#### 1.2.1 结构失效维度

结构失效维度的性能响应函数如式(2)所示,其含义为城市轨道交通系统震后未失效结构的比例随时间的变化情况,即

表 1 网络拓扑指标

Table 1 Network topology indexes

名称	计算公式	备注
度	$k_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$	$k_i$ 为节点 $i$ 的度值,表示与该节点相连的节点数目; $N$ 为网络中所有结构(即节点)的总数; $a_{ij}$ 为节点 $i$ 与节点 $j$ 间是否存在连边,若是则取 1,否则取 0
度分布	$p(k) = \frac{n_k}{N}$	$p(k)$ 为节点的度值的分布情况; $n_k$ 为网络中度为 $k$ 的节点的个数
网络直径	$D = \max d_{ij}$	$D$ 为网络直径,表示网络中任意两点最短路径的最大值; $d_{ij}$ 为 $i$ 节点到达 $j$ 节点最短路径所包含的连边数
网络平均路径长度	$L_c = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} d_{ij}$	$L_c$ 为网络平均路径长度,表示网络中任意两节点间最短路径的平均值
网络效率	$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$	$E$ 为网络效率,表示网络中任意两节点最短路径倒数的平均值

$$Q_l(t) = \frac{n_l(t)}{N} \quad (2)$$

式中:  $Q_l(t)$  为结构失效维度的性能响应函数;  $n_l(t)$  为  $t$  时网络中未失效结构的数目; 单元是否失效的判断方法采用文献[24]的方法。

1.2.2 网络连通维度

本文采用网络效率指标来衡量网络的连通性, 网络连通维度的性能响应函数如式(3)所示, 其含义为城市轨道交通系统连通性随时间的变化情况, 即

$$Q_c(t) = \frac{E(t)}{E_b} \quad (3)$$

式中:  $Q_c(t)$  为网络连通维度的性能响应函数;  $E(t)$  为  $t$  时网络的效率;  $E_b$  为未发生地震时网络的效率。

1.2.3 网络功能维度

本文采用网络服务效率指标  $E_a$  衡量网络的交通运输功能, 网络服务效率计算如式(4)<sup>[25]</sup>所示, 网络功能维度的性能响应函数如式(5)所示, 其含义为城市轨道交通系统功能随时间的变化情况, 即

$$E_a = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \sum_{l \in L} \frac{(\delta_{il} - \delta_{jl}) f_l}{d_{ij}} \quad (4)$$

$$Q_a(t) = \frac{E_a(t)}{E_{a,b}} \quad (5)$$

式中:  $L$  为线路集合;  $f_l$  为线路  $l$  上的日均客流量;  $\delta_{il}$  为 0 或 1 变量, 若  $i$  在  $l$  上, 则为 1, 否则为 0;  $E_a(t)$  为  $t$  时网络的网络服务效率;  $E_{a,b}$  为未发生地震时的网络服务效率。

在现实修复过程中, 仅当结构修复完成时, 系统性能才能增长, 即修复过程中系统性能不增长, 修复结束时刻系统性能提升。阶梯型的修复路径可以较好地反映这一特点, 故本文采用阶梯型恢复路径。震后的修复顺序及修复资源也会影响韧性曲线, 故本文做出以下假设:

- (1) 假设修复资源有限, 同一时间仅修复 1 个结构, 仅当该结构修复完毕再进行下一结构的修复;
- (2) 由于修复区间结构时, 修复资源要从车站进入, 故本文假设优先修复车站结构, 当车站结构全部修复完毕再修复区间结构;
- (3) 单个结构的修复时间依据多次分布抽样结果的均值来代表<sup>[26]</sup>。

2 修复优化模型

第 1 节定义了三维度的性能响应函数, 以 2 个车站结构, 3 个区间结构失效为例, 得到的韧性曲线如图 2 所示。

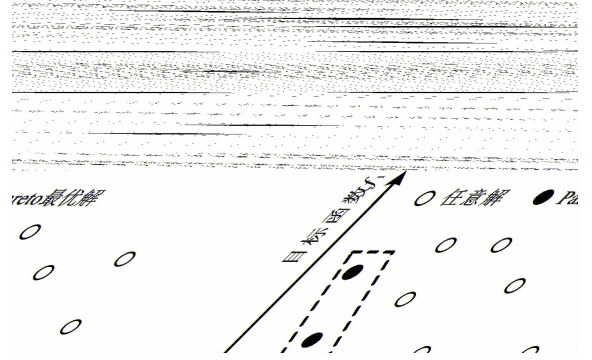


图 2 三维度韧性曲线

Fig. 2 Three dimensional resilience curves

然假定了先修复车站后修复区间结构, 修复车站或区间结构时的修复顺序仍然会导致系统抗震韧性的变化。不同修复顺序下不同性能响应函数的恢复力表示为式(6)~(8)

$$R_l(x) = \sum_{i=0}^S \frac{Q_l(t_i) t_i}{t_s} \quad (6)$$

$$R_c(x) = \sum_{i=0}^S \frac{Q_c(t_i) t_i}{t_s} \quad (7)$$

$$R_a(x) = \sum_{i=0}^S \frac{Q_a(t_i) t_i}{t_s} \quad (8)$$

式中:  $R_l(x)$ 、 $R_c(x)$ 、 $R_a(x)$  分别为修复顺序  $x$  下的结构失效维度、网络连通维度、网络功能维度的恢复力;  $S$  为失效结构的总数;  $Q_l(t_i)$ 、 $Q_c(t_i)$ 、 $Q_a(t_i)$  为  $t_i$  时不同维度的网络性能;  $t_i$  为第  $i$  个结构修复完成的时刻;  $t_s$  为  $S$  个结构修复完成的时刻。

为了综合评价城市轨道交通系统的恢复力, 将上述三维度的恢复力加权求和得到综合恢复力  $R(x)$ , 如式(9)所示

$$R(x) = \omega_1 R_l(x) + \omega_2 R_c(x) + \omega_3 R_a(x) \quad (9)$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  分别为不同维度的权重因子。

为了保证城市轨道交通系统以较高的恢复力实现性能恢复, 对其震后失效结构的修复顺序进行优化是一个典型的组合优化问题。当失效结构较少时, 可以将潜在所有修复顺序穷举, 筛选出恢复力最高的修复顺序。但随着失效结构的增多, 可供选择的修复顺序将呈指数级增长, 仍采取穷举法不可行, 故本文构建以网络恢复力最大化为目标的优化模型, 根据决策者关心的维度不同分为单目标优化和多目标优化。决策者仅关注单一维度的恢复力为单目标优化, 其目标函数为式(10)~(12)。不同维度的恢复力不能同时达到最大, 若决策者综合考虑三维度的恢复力则为多目标优化, 其目标函数将式(10)~(12)联立即可

$$\max [R_l(x)] = \max \sum_{i=0}^S \frac{Q_l(t_i)t_i}{t_s} \quad (10)$$

$$\max [R_e(x)] = \max \sum_{i=0}^S \frac{Q_e(t_i)t_i}{t_s} \quad (11)$$

$$\max [R_a(x)] = \max \sum_{i=0}^S \frac{Q_a(t_i)t_i}{t_s} \quad (12)$$

### 3 模型优化求解方法

城市轨道交通系统修复模型分别进行单目标优化和多目标优化。

#### 3.1 传统遗传算法

采取传统遗传算法求解单目标优化模型。

##### 3.1.1 编码

编码是将所求问题的解转化成遗传空间的染色体,对于  $m$  个失效车站,  $n$  个失效区间的修复顺序问题,采用整数编码方法。将整个染色体分为两部分,前一部分分成  $m$  段,每段为失效车站编号,这部分代表车站的修复顺序。后一部分分成  $n$  段,每段为失效区间编号,这部分代表区间的修复顺序。当  $m=4$ 、 $n=6$  时的染色体形式如图 3 所示。

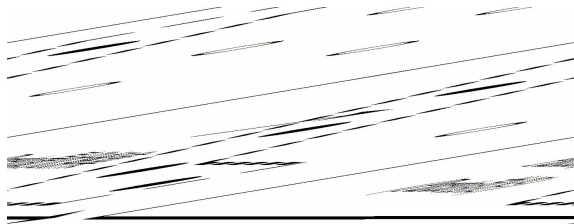


图 3 修复顺序编码形式

Fig. 3 Coding form of repair order

##### 3.1.2 适应度函数

适应度是解优劣的评价指标,本文要求解的是城市轨道交通系统恢复力最大的修复顺序,恢复力的大小就是评价修复顺序优劣的指标,因此适应度函数与目标函数一致。

##### 3.1.3 选择

选择操作指将每次迭代过程中的优良个体选择出来进行后续的交叉和变异操作,个体适应度越大,被选中的概率越大,基于轮盘赌的方法,个体  $s$  被选中的概率如式(13)所示。为了算法可以较快收敛,采取精英策略,将每代中最优的个体直接遗传至下一代,不进行交叉和变异操作

$$P_s = F_s / \sum_{s=1}^{N_1} F_s \quad (13)$$

式中:  $P_s$  为个体  $s$  被选中的概率;  $F_s$  为个体  $s$  的适应度;  $N_1$  为种群所包含的个体总数。

#### 3.1.4 交叉和变异

交叉和变异操作是遗传算法中更新种群的重要手段。交叉指根据一定交叉概率将 2 个优良的染色体进行部分基因序列交换产生新个体的过程,本文染色体的交叉方式如图 4 所示。变异指将交叉产生的子代依据变异概率在染色体的某点位发生变化,生成新个体的过程,本文染色体的变异方式如图 5 所示。

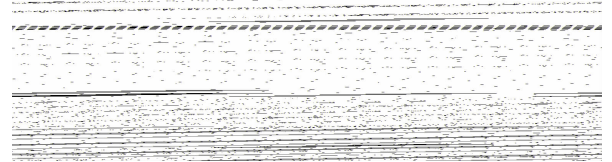


图 4 染色体交叉方式

Fig. 4 Chromosomal crossover mode

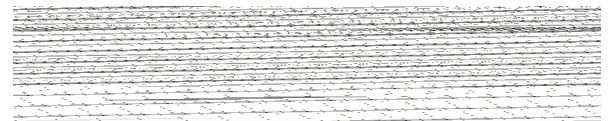


图 5 染色体变异方式

Fig. 5 Chromosome variation mode

值得注意的是由于本文将染色体分为车站部分和区间部分,故在交叉操作时车站部分的染色体与车站部分的染色体交叉,区间部分染色体与区间部分染色体交叉,两者互不干扰。

#### 3.2 NSGA-II 算法

采取 NSGA-II 算法求解多目标优化模型。该算法是遗传算法的一种改进,算法内部也包含了染色体选择、交叉、变异等操作,不同之处在于: NSGA-II 算法的最优解为 Pareto 最优解组成的解集,如图 6 所示。该算法为第 2 代改良版本<sup>[27]</sup>,相较于初代算法引入了快速非支配排序、精英策略和拥挤度比较算子,大幅降低了算法的计算复杂度,使得 Pareto 最优解前沿中的个体均匀扩展到整个解空间,保证了种群的多样性。精英策略扩大了采样空间,将父代种群与其产生的子代种群组合,共同竞争下一代种群,有利于保持父代中的优良个体进入下一代。

其中染色体的编码、交叉、变异等操作与第 3.1 节遗传算法保持一致,本文的 NSGA-II 算法流程如图 7 所示。图 7 中:  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  均为重要度;中间虚框交叉处箭头表示左上 1、2、3、4、5 保留 3、5 并提前,后面补上左下的 4、2、1,形成右上 3、5、4、2、1,右下 4、2、1、3、5 类似。

对比上述 2 种算法可知:对于单目标问题,遗传

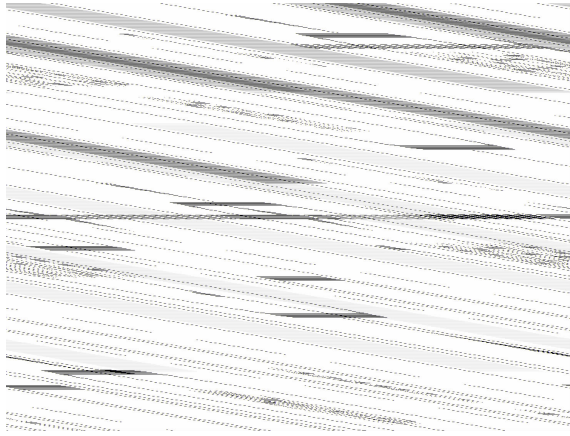


图 6 Pareto 最优解(2个目标函数)

Fig. 6 Pareto optimal solution (two objective functions)

算法有其优越性;NSGA-II 算法专门针对多目标优化问题设计,可以解决多个冲突的优化目标。

### 4 典型案例

#### 4.1 模型建立

以郑州市城市轨道交通系统为典型案例,建立其复杂网络模型,如图 8 所示。郑州市轨道交通系统目前开通运行 8 条线路,共计 153 个节点单元(包括 17 个换乘车站和 136 个普通车站),共计 164 个边单元(包括 9 个桥梁结构和 155 个隧道结构)。

郑州市城市轨道交通网络呈放射状加 1 环线的形式,对其拓扑特征指标进行计算,结果见表 2,其度分布见图 9。

郑州市轨道交通网络的平均度为 2.14,表示每个车站平均与 2.14 个车站相连接,从其度分布可以看出有 82% 的站点的度为 2。度为 0 的站点所占比例为 0,即网络中并没有孤立的站点;度为 1 的站点

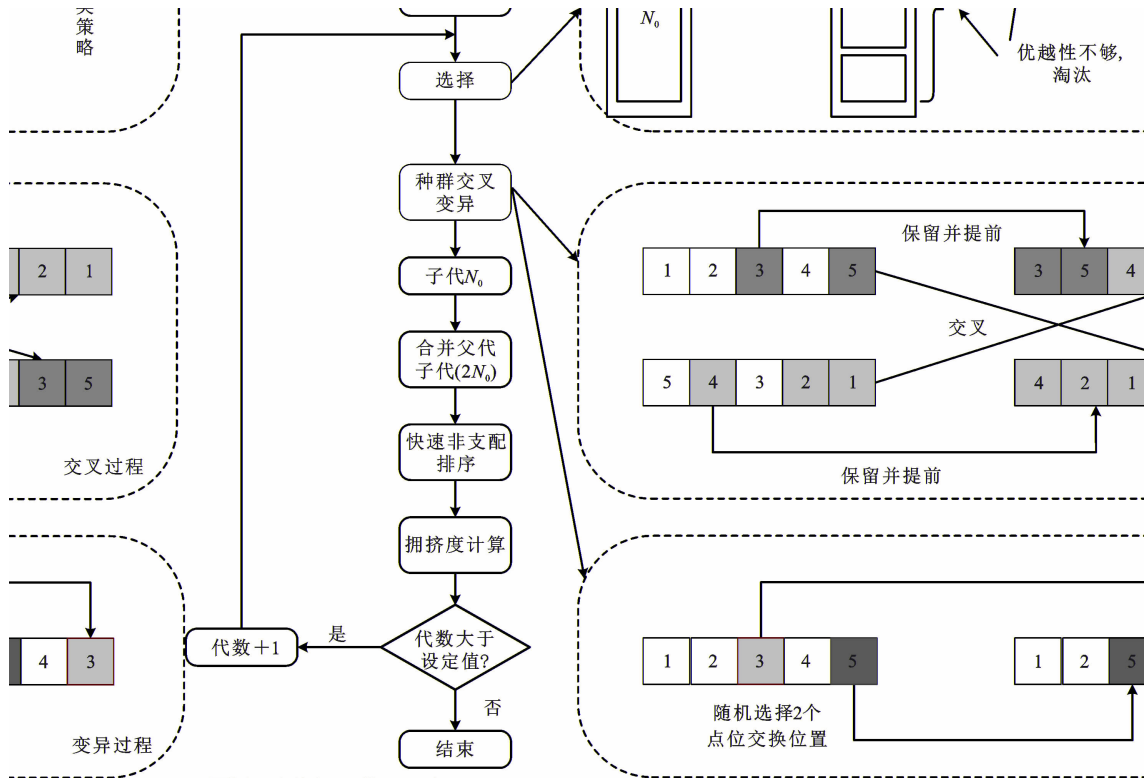


图 7 NSGA-II 算法流程

Fig. 7 NSGA-II algorithm flow chart

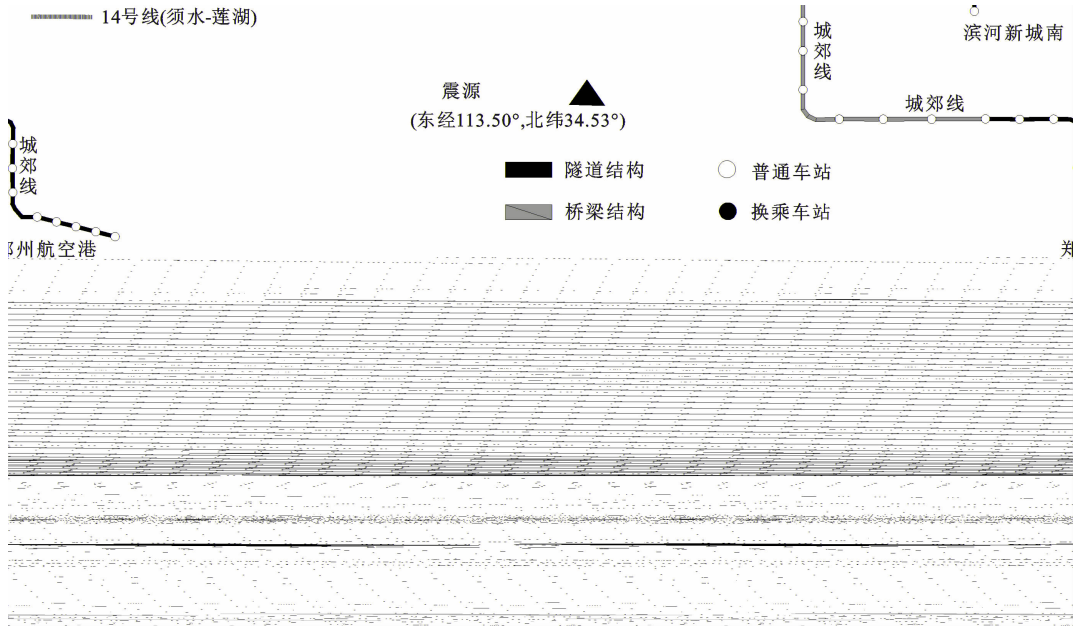


图8 城市轨道交通复杂网络模型

Fig. 8 Complex network model of urban rail transit

表2 网络拓扑指标

Table 2 Network topology indexes

节点数	连边数	平均度	网络直径	网络平均路径长度	网络效率
153	164	2.14	47	14.32	0.12

结构的修复时间依据分布模型多次抽样结果的均值来代表,见表3。

### 4.2 单目标优化结果

分别以结构失效维度、网络连通维度、网络功能维度恢复力最大为目标,通过遗传算法进行修复顺序求解。通过多次试验,遗传算法的种群为20,交叉概率为0.9,变异概率为0.05,迭代次数为300,进化过程如图10所示。

以结构失效维度恢复力最大的优化中,算法在257代收敛,该维度的恢复力达到0.959。以网络连通维度恢复力最大的优化中,算法在255代收敛,该维度的恢复力为0.804。以网络功能维度恢复力最大的优化中,算法在201代收敛,该维度的恢复力为0.842。分别记3次优化所得的最优修复顺序为顺序1~3,并得到3种顺序的三维度韧性曲线,如图11所示。

从图11可以看出:3种修复顺序下结构失效维度的韧性曲线基本重合,这是由于不同结构对于该维度性能的贡献相差不大引起的。而3种修复顺序下网络连通与网络功能维度韧性曲线差距明显,可见修复顺序差异会对其恢复力产生较大的影响。

### 4.3 多目标优化结果

通过NSGA-II算法求解本文建立的多目标优化模型,通过多次试验,设定算法的种群为20,交叉概率为1,变异概率为0.2,迭代次数为100,初始种群的Pareto前沿与优化后种群的Pareto前沿对



图9 度分布

Fig. 9 Degree distribution

一般为线路的起止站点与终止站点,其所占的比例大约为7%;度为3、4的站点一般为线路与线路的交叉点,即换乘车站,其所占的比例大约为11%。网络直径为47,即网络中任意2点之间路径的最大值为47,体现了网络的规模较大,其平均路径长度为14.32,即从网络中任一车站到达另一车站所需经过平均区间数量为14.32个。

按照蒙特卡洛模拟<sup>[24]</sup>的某次结果为研究对象,该次模拟共计12个车站结构,16个区间结构失效,

表 3 震后失效结构

Table 3 Post-earthquake failure structures

编号	车站名称	车站类型	修复时间/d	编号	区间结构名称	区间类型	修复时间/d
1	十八里河	普通车站	0.99	13	华南城西-小乔	区间桥梁	3.06
2	常庄	普通车站	1.52	14	双湖大道-沙窝李	区间桥梁	5.95
3	奥体中心西	普通车站	2.45	15	沙窝李-十八里河	区间桥梁	4.14
4	安宁路	普通车站	1.01	16	安宁路-洞林寺	区间隧道	2.16
5	洞林寺	普通车站	2.74	17	沙口路-海滩寺	区间隧道	2.94
6	众意西路	普通车站	2.01	18	省骨科医院-经北二路	区间隧道	3.65
7	航海广场	普通车站	0.24	19	经开中心广场-福塔东	区间隧道	4.19
8	兴隆铺	普通车站	2.32	20	奥体中心-市委党校	区间隧道	2.63
9	同乐	普通车站	1.24	21	市民大道-铁炉	区间隧道	2.73
10	郑州文庙	普通车站	0.99	22	铁炉-须水	区间隧道	3.53
11	老鸦陈	普通车站	1.80	23	二七广场-郑州火车站	区间隧道	2.21
12	金岱	普通车站	1.08	24	兰寨-梧桐街	区间隧道	2.47
				25	郑大科技园-河南工业大学	区间隧道	2.07
				26	西大街-东大街	区间隧道	3.55
				27	司赵-滨河新城南	区间隧道	1.93
				28	省体育中心-北二十里铺	区间隧道	3.77



图 10 修复顺序优化过程

Fig. 10 Repair sequence optimization process

比如图 12 所示。

相较于初始种群的 Pareto 前沿个体,优化后的 Pareto 前沿个体在三维度的恢复力均有所提升。从最终的 Pareto 前沿中挑选综合恢复力最大的个体作为最终多目标优化的结果,将该修复顺序记为顺序 4,得到其韧性曲线,如图 13 所示。

#### 4.4 不同修复方案对比分析

为了与第 4.3 节优化修复顺序对比,设置随机修复顺序和偏好修复顺序 2 种工况。其中偏好修复顺序指优先修复重要度较高的结构,其中重要度的评价标准为将单个结构从网络移除后网络效率的下降程度,下降越多则该结构越重要。记随机修复顺序为顺序 5,偏好修复顺序为顺序 6。本文的工况设

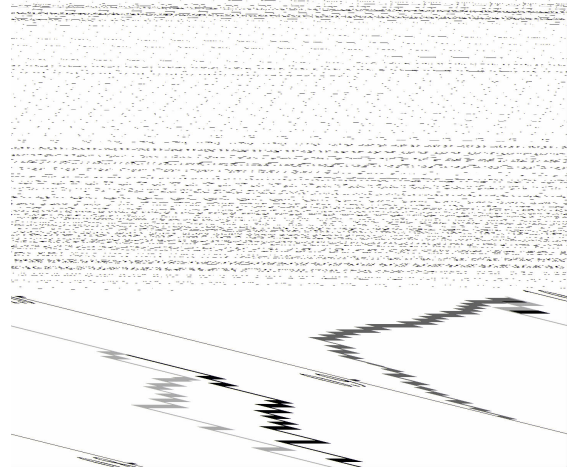


图 11 单目标优化修复顺序韧性曲线

Fig. 11 Single objective repair sequence resilience curves

置见表 4。

图 14 为不同修复顺序的恢复力对比结果。由图 14 可知:通过遗传算法所得的修复顺序可以使得该修复顺序在某一维度的恢复力达到最大。如顺序 1 的结构失效恢复力最大,较随机修复提高了 0.8%;顺序 2 的网络连通恢复力最大,较随机修复提高了 12%;顺序 3 的网络功能恢复力最大,较随机修复提高了 9%。

偏好修复虽然符合大众认知,但该修复顺序在多个恢复力的对比中均不能达到最大。其结构失效恢复力较顺序 1 下降了 0.4%,在单元连通恢复力较顺序 2 下降了 0.5%,在网络功能恢复力较顺序 4 下降了 1.8%。

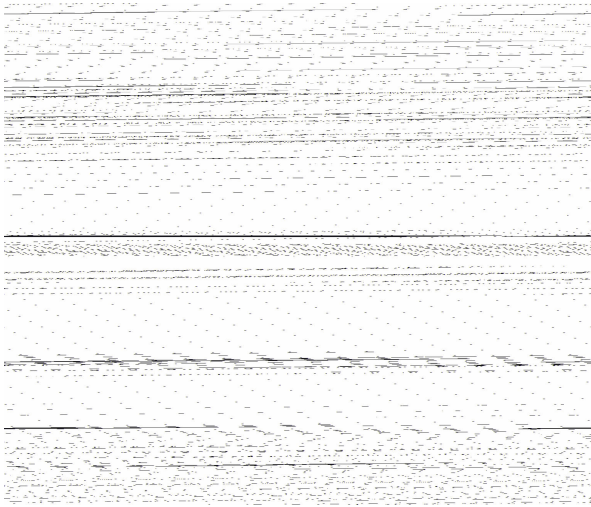


图 12 Pareto 前沿对比  
Fig. 12 Pareto frontier comparison

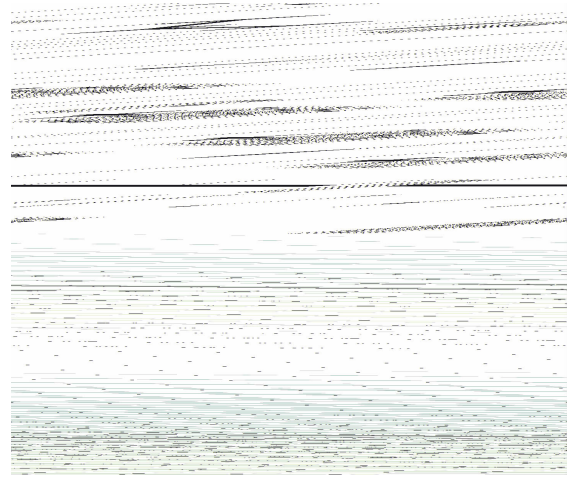


图 13 多目标优化修复顺序韧性曲线  
Fig. 13 Multi-objective optimization repair sequence resilience curves

表 4 工况设置

Table 4 Working condition setting

工况	顺序	修复顺序
结构失效恢复力单目标优化	1	车站
		7-12-4-10-1-9-3-5-6-2-8-11
网络连通恢复力单目标优化	2	区间
		23-16-13-25-20-27-24-17-26-22-21-28-19-15-14-18
网络功能恢复力单目标优化	3	车站
		12-11-9-7-8-6-2-5-1-3-10-4
多目标优化	4	区间
		23-13-21-17-20-16-24-22-15-14-25-18-27-26-28-19
随机修复	5	车站
		12-9-7-6-8-3-2-4-1-11-10-5
偏好修复	6	区间
		18-17-23-21-20-24-13-25-26-16-28-15-14-19-22-27
多目标优化	4	车站
		10-12-7-5-1-6-8-2-9-11-4-3
随机修复	5	区间
		23-20-21-17-24-16-26-25-28-27-13-18-15-14-22-19
偏好修复	6	车站
		5-2-8-7-11-4-3-1-6-10-12-9
偏好修复	6	区间
		25-14-20-13-26-17-16-18-24-28-22-23-19-27-15-21
偏好修复	6	车站
		1-3-12-7-4-9-10-6-8-5-11-2
偏好修复	6	区间
		15-14-21-13-20-24-17-16-23-22-18-27-25-19-28-26

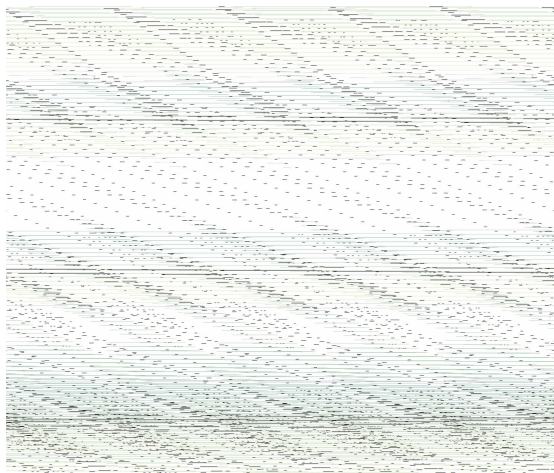


图 14 不同修复顺序恢复力对比  
Fig. 14 Comparison of restoring forces of different repair sequences

多目标优化所得修复顺序与单目标优化修复顺序相比虽在一个维度的恢复力下降,但在另外 2 个维度均有提升,如顺序 4 相较于顺序 1 结构失效恢复力下降了 0.2%,但其网络连通恢复力与网络功能恢复力分别提升了 3.2%和 2.6%。对比所有优化过的修复顺序,多目标优化修复顺序的综合恢复力提升幅度为 0.1%~1.8%。多目标优化虽然不能使得修复顺序不同维度的恢复力都达到最大,但其综合恢复力最大,故当综合考虑 3 个维度的恢复力时,应当采取多目标优化所得的修复顺序。

### 5 结 语

(1)从多个维度定义城市轨道交通系统的性能响应函数,对于城市轨道交通系统的恢复力评价更全面。

(2)通过优化所得的修复顺序可以有效提升城市轨道交通系统各个维度的恢复力以及综合恢复力。与随机修复相比结构失效、网络连通、网络功能维度恢复力最大提升分别为0.8%、12%、9%,综合恢复力最大提升为6%。

(3)多目标优化所得的修复顺序虽然不能使得单个维度的恢复力达到最大,但其综合恢复力在所有优化方案中最大,提升幅度为0.1%~1.8%。当综合考虑多个维度的恢复力时,应当采取多目标优化的方法。

(4)本文的多目标优化模型是一种高效、低成本获得城市轨道交通系统综合恢复力较高修复顺序的方法,可为震后结构的抢修工作提供有力支撑。但结构失效仅考虑了城市轨道交通主体结构的失效可能性,然而轨道、通风照明设施、电力设施等的失效也会影响系统性能,在后续研究中也应考虑。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2025年8月城市轨道交通运营数据速报[EB/OL]. [2025-05-01]https://www.mot.gov.cn/fenixigongbao/yunlifenxi/202509/t20250909\_4176362.html.  
Ministry of Transport of the People's Republic China. Quick report of urban rail transit operation data in August 2025[EB/OL]. [2025-05-01]https://www.mot.gov.cn/fenixigongbao/yunlifenxi/202509/t20250909\_4176362.html.
- [2] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to daikai subway station[J]. Soils and foundations, 1996, 36(S): 283-300.
- [3] 刘爱文,夏珊,徐超.汶川地震交通系统震害及震后抢修[J].震灾防御技术,2008,3(3):243-250.  
LIU Ai-wen, XIA Shan, XU Chao. Earthquake damage and post-earthquake repair of traffic system in Wenchuan earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(3): 243-250.
- [4] YASHIRO K, KOJIMA Y, SHIMIZU M. Historical earthquake damage to tunnels in Japan and case studies of railway tunnels in the 2004 Niigataken-Chuetsu Earthquake[J]. Quarterly Report of RTRI, 2007, 48(3): 136-141.
- [5] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [6] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance seismic resilience of communities [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [7] 刘威,武千翔.考虑多组件的供水管网抗震韧性分析与韧性提升策略[J].地震研究,2023,46(2): 271-279.  
LIU Wei, WU Qian-xiang. Seismic resilience analysis of water distribution networks with multi-components and resilience improvement strategies[J]. Journal of Seismological Research, 2023, 46(2): 271-279.
- [8] 宗成才,冀昆,温瑞智,等.城市燃气管网三维度抗震韧性定量评估方法[J].工程力学,2021,38(2): 146-156.  
ZONG Cheng-cai, JI Kun, WEN Rui-zhi, et al. Quantitative evaluation method of three-dimensional seismic resilience of urban gas pipeline network[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(2): 146-156.
- [9] 吴秋婷.城市地铁网络韧性的评价及提升研究[D].北京:中国矿业大学,2022.  
WU Qiu-ting. Evaluation and improvement of urban subway network resilience [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
- [10] 袁万城,王思杰,李怀峰,等.桥梁抗震智能与韧性的发展[J].中国公路学报,2021,34(2):98-117.  
YUAN Wan-cheng, WANG Si-jie, LI Huai-feng, et al. Development of intelligence and resilience for bridge seismic design [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 98-117.
- [11] 黄莺,刘梦茹,魏晋果.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.  
HUANG Ying, LIU Meng-ru, WEI Jin-guo, et al. Research on urban subway network recovery strategy based on resilience curve [J]. Disasterology, 2021, 36(1): 32-36.
- [12] LI Z L, JIN C, HU P, et al. Resilience-based transportation network recovery strategy during emergency recovery phase under uncertainty [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 188(8): 503-514.
- [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.  
MA Min, HU Da-wei, SHU Lan, et al. Urban rail transit network resilience assessment and recovery strategy [J]. Journal of Jilin University (Engineering edition), 2023, 53(2): 396-404.

- [14] AL-SHALABI M, ANBAR M, WAN T C. Energy efficient multi-hop path in wireless sensor networks using an enhanced genetic algorithm[J]. *Information Sciences*, 2019, 500(10): 259-273.
- [15] 王金贺, 张晓红, 曾建潮. 非完美维修模型下的风电机组最优维修决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(5): 1151-1160.  
WANG Jin-he, ZHANG Xiao-hong, ZENG Jian-chao. Optimal maintenance decision of wind turbine under imperfect maintenance model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(5): 1151-1160.
- [16] 杨国俊, 毛建博, 田里, 等. 基于碎片化分区的桥梁网络震后修复优先级分析与优化[J]. *工程力学*, 2024, 41(5): 211-223.  
YANG Guo-jun, MAO Jian-bo, TIAN Li, et al. Analysis and optimization of post-earthquake restoration priority of bridge network upon fragmentation[J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(5): 211-223.
- [17] HAN X, YANG D Y, FRANGOPOL D M. Risk-based life-cycle optimization of deteriorating steel bridges: Investigation on the use of novel corrosion resistant steel [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(8): 1668-1686.
- [18] 寇峥, 李宁. 基于 NSGA-II 的城市桥梁系统震后可恢复性分析与优化[J]. *工程力学*, 2021, 38(3): 148-158, 180.  
KOU Zheng, LI Ning. Study on earthquake resilience analysis and optimization for urban bridge network system based on NSGA-II algorithm[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(3): 148-158, 180.
- [19] 李昊昌, 张燕, 张雨馨, 等. 基于改进 NSGA-II 的多目标路面养护决策优化研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2023, 42(6): 29-36.  
LI Hao-chang, ZHANG Yan, ZHANG Yu-xin, et al. Research on multi-objective road maintenance decision optimization method based on improved fast NSGA-II [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2023, 42(6): 29-36.
- [20] 高培超, 王昊煜, 宋长青. 多目标优化 NSGA 系列算法与地理决策: 原理、现状与展望[J]. *地球信息科学学报*, 2023, 25(1): 25-39.  
GAO Pei-chao, WANG Hao-yi, SONG Chang-qing, et al. Multi-objective optimization NSGA series algorithms and geographic decision-making: Principle, current situation and prospect [J]. *Journal of Earth Information Science*, 2023, 25(1): 25-39.
- [21] 戴理朝, 康哲, 陈瑞, 等. 基于 NSGA-III 的桥梁网络多目标维修决策优化研究[J]. *土木工程学报*, 2024, 57(5): 41-52.  
DAI Li-zhao, KANG Zhe, CHEN Rui, et al. Study on multi-objective maintenance decision optimization of bridge networks based on NSGA-III [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2024, 57(5): 41-52.
- [22] CIMELLARO G P, FUMO C, REINHORN A, et al. Seismic resilience of health care facilities[J]. *Anidis*, 2008, 2(4): 64-70.
- [23] 李婷, 李乐天, 毛新华, 等. 基于复杂网络理论的公交站点便捷性评价方法[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2025, 45(3): 141-151.  
LI Ting, LI Le-tian, MAO Xin-hua, et al. Convenience evaluation method of bus stops based on complex network theory [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2025, 45(3): 141-151.
- [24] 范世杰, 游丹, 侯本伟. 基于网络效率的城市轨道交通网络震后性能评估[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(6): 1165-1173, 1190.  
FAN Shi-jie, YOU Dan, HOU Ben-wei. Post-earthquake performance evaluation of urban rail transit network based on network efficiency [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(6): 1165-1173, 1190.
- [25] 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, 221.  
LYU Biao, GUAN Xin-yi, GAO Zi-qiang. Subway network service resilience assessment and optimal recovery strategy [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(5): 198-205, 221.
- [26] Federal Emergency Management Agency. Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model, hazus-MH 2.1 technical manual [R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [27] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.