文章编号:1673-0291(2026)01-0059-12 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250010

站点失效下铁路客运网络韧性评估与恢复策略研究

李 彪[a,b,c],陶思宇[a,b,c],鲁工圆[a,b,c],彭其渊[a,b,c]
(西南交通大学 a.交通运输与物流学院,b.综合交通运输智能化国家地方联合工程研究中心,
c.综合交通大数据应用技术国家工程实验室,成都 611756)

摘 要:针对站点失效下铁路客运网络韧性评估及大规模站点失效后的网络韧性恢复问题,提出一种基于服务效率指标的铁路客运网络韧性评估与最优韧性恢复方法.首先,从网络服务能力和实际运营特性的角度出发,构建铁路客运服务网络模型,提出考虑站点间运营列车数目的服务效率指标,并基于韧性曲线和服务效率指标建立网络服务韧性评估模型.然后,以恢复韧性最大化为目标构建最优韧性恢复模型,并设计改进的粒子群算法(Particle Swarm Optimization,PSO),用于求解大规模站点失效下的最优恢复策略.最后,以成渝铁路客运网络为实例进行韧性评估,并对3种干扰情景下不同恢复策略的韧性恢复效果进行对比.研究结果表明:以服务效率为指标能够准确评估站点失效对网络性能的影响,精准识别关键站点;基于韧性恢复模型求解获得的最优恢复策略在3种干扰情景下的恢复效果均优于随机恢复和度值恢复策略;在蓄意攻击情景中,最优恢复策略下网络的恢复韧性比随机恢复和度值恢复策略分别提升69.90%和4.81%.

关键词:铁路网络;复杂网络;服务韧性;粒子群算法;韧性恢复
中图分类号:U125 **文献标志码**:A

Resilience assessment and recovery strategy for railway passenger networks under station failures

LI Biao[a,b,c], *TAO Siyu*[a,b,c], *LU Gongyuan*[a,b,c], *PENG Qiyuan*[a,b,c]
(a.School of Transportation and Logistics, b.National and Local Joint Engineering Research Center of Integrated Transportation Intelligence, c.National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: To address the challenges of resilience assessment and post-failure recovery in railway passenger networks following large-scale station failures, this study proposes a railway passenger network resilience assessment and optimal recovery method based on a service efficiency indicator. First, from the perspectives of network service capacity and actual operational characteristics, a railway passenger service network model is constructed. A service efficiency indicator considering the number of operating trains between stations is proposed, and a network service resilience assessment model is established using the resilience curve and the service efficiency indicator. Second, an optimal resilience

收稿日期:2025-01-17;**修回日期**:2025-07-16
基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4300502);国家自然科学基金(72501229);中央高校基本科研业务费专项资金(2682025CX185)
Foundation items: National Key R&D Plan (2022YFB4300502); National Natural Science Foundation of China (72501229); Fundamental Research Funds for the Central Universities(2682025CX185)
第一作者:李彪(2001—),男,山西大同人,硕士生.研究方向为交通运输规划与管理.**email**:libiaoswjtu@126.com.
通信作者:陶思宇(1980—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,博士.**email**:taosiyu@swjtu.edu.cn.

引用格式:李彪,陶思宇,鲁工圆,等.站点失效下铁路客运网络韧性评估与恢复策略研究[J].北京交通大学学报,2026,50(1):59-70.
LI Biao, TAO Siyu, LU Gongyuan, et al.Resilience assessment and recovery strategy for railway passenger networks under station failures[J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(1): 59-70.(in Chinese)

recovery model is formulated with the objective of maximizing recovery resilience, and an improved Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is developed to determine the optimal recovery strategy under large-scale station failures. Finally, the Chengdu-Chongqing railway passenger network is used as a case study to evaluate network resilience and compare the resilience recovery performance of different strategies under three disturbance scenarios. The results indicate that the service efficiency indicator effectively assesses the impact of station failures on network performance and accurately identifies critical stations. The optimal recovery strategy derived from the resilience recovery model consistently outperforms both random and degree recovery strategies across all disturbance scenarios. Under deliberate attack scenarios, the recovery resilience of the network achieved by the optimal strategy improves by 69.90% and 4.81% compared with the random and degree recovery strategies, respectively.

Keywords: railway network; complex network; service resilience; particle swarm optimization; resilience recovery

联合国2030年可持续发展议程中将“安全、有韧性、可持续发展的城市”作为重要议题之一，提出未来城市发展应围绕提升城市韧性展开[1].近年来，贯通城市间的铁路旅客运输系统日益复杂，日常运营过程中不可避免会受到突发事件(人为干扰、自然灾害或设备故障等)的干扰，导致系统中部分站点暂时丧失运输功能，甚至可能引发大规模旅客滞留、区域交通瘫痪乃至社会经济连锁反应[2].从系统韧性的角度制定合理恢复方案，能够最大限度降低系统面对干扰后的韧性损失，对于提升铁路运营系统服务水平，完善铁路应急管理系统的体系和促进城市群交通韧性等方面有积极意义.文献[3]在研究生态系统时首次以韧性作为指标，评估系统抵抗外界干扰的能力.文献[4]将系统韧性描述为系统在正常情况下提供服务的能力及面对外界干扰能够抵抗、吸收、适应并快速恢复的能力.近年来，韧性在交通网络系统领域的研究中得到了广泛而深入的应用.

当前针对铁路客运网络韧性的研究通常基于复杂网络理论展开，文献[5]选取我国若干代表性城市为研究对象，采用P空间法构建了高铁网络模型，并运用复杂网络理论分析了网络特性及拓扑特征.文献[6]构建了关中平原城市群多模式交通网络，采用随机和蓄意攻击模拟站点失效对多模式交通网络结构韧性进行了分析.文献[7]结合超图理论构建了铁路客运超网络模型，通过模拟站点失效动态评估了网络韧性，并识别出网络的关键站点.文献[8]分别采用L空间法和P空间法构建了铁路客运物理网络和服务网络模型，通过模拟突发干扰网络性能响应情况评估了两个网络的韧性.随着铁路客运网络韧性研究的不断深入，部分学者发现仅从拓扑结构的角度研究铁路客运网络韧性难以有效反映网络的实际服务能力和运营特性，因此近年来的一些研究更关注铁路客运网络的功能属性.文献[9]构建考虑客流量和旅行时间的高铁网络服务性能指标，评估了高铁网络的脆弱性.文献[10]基于L空间法建立了时空加权城市群铁路客运网络模型，通过模拟连边失效评估了网络的抵抗韧性，识别了网络的关键线路.文献[11]构建了空间加权轨道交通网络，并以全局效率比作为指标评估了网络的韧性.文献[12]运用P空间法构建高铁多重加权时空网络，基于考虑时间和客流量的性能指标评估了高铁网络韧性，识别了网络中的重要站点.

虽然大部分学者从不同角度研究了网络在运营过程中受到干扰后网络的韧性表现，进而识别关键站点和线路并加以防范，但是在运营过程中突发扰动事件仍然不可避免，因此人们开始关注网络受到干扰后如何快速有效恢复网络韧性.文献[13]以网络性能损失度为指标，采用遍历法对比发现站点不同恢复顺序下的网络性能损失有明显区别，在时间和资源有限的情况下，站点恢复序列对提升网络韧性恢复能力有重要影响.文献[14]以网络拓扑效率为韧性指标，基于韧性曲线提出以最大化恢复力为目标函数的网络韧性恢复模型，并采用遗传算法求解最优恢复序列.文献[15]提出以客流加权的网络性能评估指标，构建了网络最优韧性恢复模型，并采用遗传算法求解最优恢复序列.文献[16]在研究轨道交通网络韧性恢复时考虑了恢复资源及站点失效程度等约束条件.文献[17]则基于韧性三角理论，结合考虑客流量和旅行时间加权的网络性能指标构建了网络韧性恢复模型.文献[18]通过模拟站点失效从放弃出行旅客量和恢复时间研究了轨道交通网络的恢复韧性.文献[19]将烟草物流配送系统抽象为网络，以系统运行水平为指标，提出系统最优韧性

恢复优化模型,并且设计自适应遗传算法求解.

综上,当前铁路客运网络韧性研究已取得一定进展,相关研究已逐步从单纯基于拓扑结构的视角转向综合考虑网络功能属性的方向,然而大多仍沿用城市轨道交通网络韧性研究中以客流量、距离和旅行时间加权构建网络性能评估指标的方法.铁路客运网络与城市轨道交通网络在运营特性上存在显著差异:①城市轨道交通以高频、短间隔和固定班次运行,线路密集,主要服务城市及近郊通勤人群,客流分布较为稳定;铁路客运网络则受调度和需求影响,班次较少、间隔较长、站距大、服务范围广,且客流受假期和季节性影响明显,呈现出较强的时空波动性与不均衡性.②铁路客运网络的服务功能依赖于列车运行作为载体,若站点失效造成行车中断,网络服务性能会受到较大影响,仅从时间和距离加权难以准确评估行车中断对网络实际性能的影响.因此,现有的以客流量或旅行时间构建的网络性能评估指标在应用于铁路客运网络时,具有一定的局限性,难以直观充分反映其实际运营特性和服务能力.此外,当前关于铁路客运网络韧性的研究大多集中于抵抗韧性方面,而对于恢复韧性的研究则相对不足.

因此,本文以铁路客运交通网络为研究对象,首先提出一种综合考虑网络连通性和服务能力的服务网络建模方法;其次构建考虑网络站点间运营列车数量的服务效率指标来量化铁路客运网络服务性能,并基于服务效率和韧性曲线构建铁路客运网络服务韧性模型;再次构建以服务恢复韧性最大化为目标函数的最优韧性恢复模型,并设计了一种适应大规模站点失效的改进粒子群算法(Particle Swarm Optimization,PSO)求解失效站点最优恢复序列;最后通过实例分析验证了方法的合理性,并结合分析结果提出了具有实际意义的结论.

1　铁路客运网络韧性评估模型

1.1　网络韧性的定性描述

网络受到干扰是指网络在正常运行过程中受到自然灾害(地震、火灾、暴雨等)、蓄意攻击、设备故障等不可抗力的突发事件导致网络中若干站点会因无法承受干扰而丧失运输功能,此部分站点不仅与其他站点连边全部断开,而且会因丧失运输功能引发行车中断,进而影响线路后续站点间的服务性能.因突发事件干扰导致功能丧失的站点称为失效站点.

当网络部分站点失效时,性能虽然会受到影响,但是不会瞬间降为0,而是经历一个逐步衰减过程,因此面对突发事件的干扰,网络会展现出一定的韧性.文献[20]将网络韧性描述为网络在受干扰情况下维持和恢复服务性能的能力,主要包括抵抗韧性和恢复韧性两个部分;抵抗韧性是指当网络系统面对突发事件干扰后仍然能够维持一定的服务性能,对干扰具有抵抗和吸收能力;恢复韧性是指通过人为干预后网络系统的性能逐步恢复,最终达到受干扰前的水平.网络受到干扰性能下降至完全恢复的过程如图1所示.

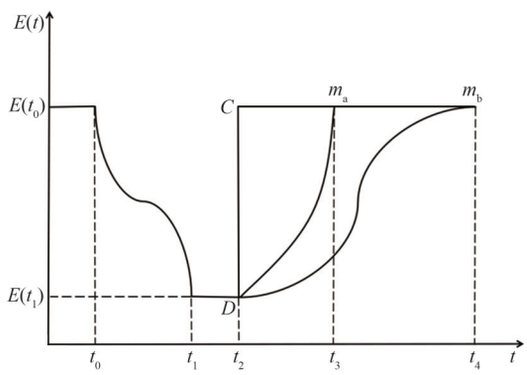


图1　网络韧性曲线图

Fig.1　Network resilience curve

图1中:网络在t_0时刻受到干扰,服务性能开始下降,t_0到t_1阶段为网络持续受扰动阶段,t_1时刻为网络面对全部干扰后仍能保持的服务性能;服务性能下降曲线的陡峭程度表示网络抵抗、吸收和适应干扰的能力,即网络的抵抗韧性,曲线越陡峭表示网络的抵抗韧性越弱,反之越平缓则表示网络的抵抗韧性越强;t_2为恢复开始时刻,t_3和t_4分别为采用m_a和m_b两种不同恢复策略的完全恢复时刻;采用策略m_a网络性能损失为CDm_a围成的面积,而采用策略m_b网络性能损失为CDm_b围成的面积,显然不同的恢复策略会影响网络服务性能的恢复速度,采取合适的恢复策略能够显著降低网络在突发事件干扰下的服务性能损失,从而提升网络的恢复韧性.

1.2　网络服务性能指标

基于L空间法,将铁路客运站视为网络中的站点,将客运站之间的铁路线路抽象为连边,从而构建铁路客运物理拓扑网络[21].为评估站点失效造成行车中断对网络性能的影响,准确反映网络服务能力和实际运营特性,引入P空间法构建铁路客运服务网络模型,若某一车次列车经停多个站点,则这些站点可被视为相互直接可达,该车次的所有经停站构成一个完全子图,任意两站点间均添加一条服务连边,L空间法和P空间法如图2所示.

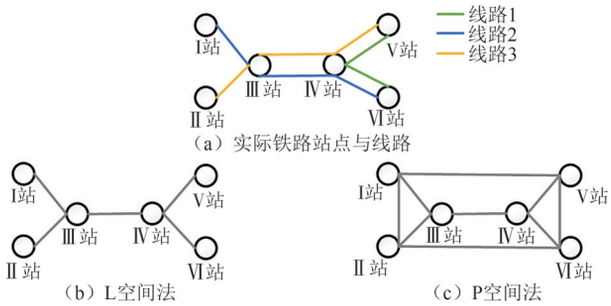


图 2 L空间法和P空间法网络建模示意

Fig.2 Schematic diagram of railway network modeling using L-space and P-space methods

具体服务网络建模流程为：首先基于L空间法构建铁路客运物理拓扑网络，网络表示为 $W_{\mathrm{L}}=[A,B_{\mathrm{L}}]$，其中 A 表示网络中所有站点的集合，B_{L} 表示拓扑连边的集合；然后提取网络中各个车站全部经停列车的车次编号集合记为 S，$S_i\subseteq S$ 为在站点 i 停靠的列车集合，对于任意两个站点 i 和 $j(i,j\in A)$，若存在某车次列车 s 使得 $s\in S_i$ 且 $s\in S_j$，则该车次列车在站点 i 与 j 均有停靠，在 W_{L} 中的 i 和 j 站点间添加服务连边 B_{ij}，服务连边 B_{ij} 的权重 ω_{ij} 定义为站点 i 和 j 站点之间共同经停的列车车次数目；最后基于此构建铁路客运服务网络模型用 $W=[A,B]$ 表示，B 表示网络中所有服务连边集合．权重 ω_{ij} 和服务连边 B 为

$$\omega_{ij}=\left|S_i\cap S_j\right|\quad\forall i,j\in A \tag{1}$$

$$B_{ij}=\begin{cases}\omega_{ij} & \text{站点}i,j\text{之间的连边权重值}\\ 0 & \text{站点}i,j\text{之间不相连或}i=j\end{cases} \tag{2}$$

式中：i,j 为网络中任意两个站点；S_i 和 S_j 为经停站点 i 和 j 的列车车次集合；$S_i\cap S_j$ 为共同经停站点 i 和站点 j 的列车车次数目．

当某一站点失效时，该站点与其他站点连边全部断开，同时该站点失效引发行车中断，导致线路上后续站点间的服务连边权重下降，若连边权重降为0则连边断开．为准确评估站点失效后造成行车中断对网络性能的影响，提出一种考虑站点间运营列车数目的网络服务效率指标，该指标以网络中所有站点对之间运营列车数目的平均值作为量化依据，网络服务效率 E 表示为

$$E=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1,i\neq j}^{N}\left(1\Big/\sum_{i,j\in A}^{i\neq j}\frac{1}{\omega_{ij}}\right) \tag{3}$$

式中：N 为网络站点数量；ω_{ij} 为站点 i,j 之间连边的权重，ω_{ij} 越大，网络服务效率越高．

1.3 网络服务韧性模型

结合韧性三角理论[22]，将网络服务韧性定义为突发事件持续干扰阶段或干扰后持续恢复阶段的网络服务效率与正常状态下服务效率的比值，网络服务韧性 R 表示为

$$R\left(t\middle|m_e\right)=\frac{\int_{t_{\mathrm{start}}}^{t_{\mathrm{end}}}E\left(t\middle|m_e\right)\mathrm{d}t}{\left(t_{\mathrm{end}}-t_{\mathrm{start}}\right)E\left(t_0\right)} \tag{4}$$

式中：t_{start} 和 t_{end} 分别为恢复开始时刻和性能完全恢复时刻；$E(t_0)$ 为网络正常运营时的服务效率；$E\left(t\middle|m_e\right)$ 为受干扰网络在第 m_e 种恢复策略下 t 时刻网络的服务效率；$R\left(t\middle|m_e\right)$ 为受干扰网络在第 m_e 种恢复策略下 t 时刻网络的服务韧性．

基于网络韧性曲线图，网络服务韧性可表示为网络在第 m_{a} 种恢复策略下性能恢复开始时刻 t_2 至完全恢复时刻 t_3 网络性能曲线围成的面积 $S'_{\mathrm{D}t_2t_3m_{\mathrm{a}}}$ 与对应时刻正常性能曲线围成面积 $S'_{\mathrm{C}t_2t_3m_{\mathrm{a}}}$ 的比值．

2 网络服务韧性恢复优化模型

2.1 最优韧性恢复模型

假设在某次突发事件干扰后网络中编号为[1,3,4,7,9]5个站点失效，恢复过程即通过投入相应恢复资源对这些失效站点进行恢复．假设各个站点的恢复时间相同，这5个站点恢复顺序的任意一种排列即表示一种恢复策略，所有可行恢复策略即5个站点的全排列．面对突发事件干扰，不同的恢复策略会直接影响网络的服务恢复韧性，基于网络韧性曲线图对比恢复策略 m_{a} 和 m_{b}，采取策略 m_{a} 能够使网络服务性能迅速恢复，网络恢复韧性损失显著降低，因此当网络在正常运行过程中遇到突发事件干扰后，选取合适的恢复策略，使网络服务性能在短期内迅速有效恢复至干扰前的水平至关重要．

根据以往研究和经验，面对突发干扰时，通常采用的恢复方法包括：随机恢复、遍历恢复和基于某种特征指标的优先恢复[23]，随机恢复是指各个站点的恢复顺序完全随机，方法随意性较高，往往不能很好地规避恢复过程中网络的韧性损失；遍历恢复是指将所有可能的恢复策略都罗列出来，对比选择最优恢复顺序，该方法虽然能够确定最优恢复策略，但面对干扰做出反应的时间会较长，如果失效站点数目达到15个以上，恢复策略的种类高达15！=1 307 674 368 000种，显然不适用于大规模站点失效的情形；基于某种特征指标的优先恢复是指按照失效站点特征指标（如度、介数和聚类系数等）的排序从大到小依次恢复，该方法相较于随机恢复和遍历恢复更具有合理性，但是当网络中若干不

具有明显特征或特征高度相似的普通站点失效时,难以准确区分其重要度,基于该方法选择恢复策略易漏掉最优恢复策略而选到次优恢复策略.为了弥补上述恢复方法的缺点,以服务韧性函数最大化为目标函数构建最优韧性恢复模型,将失效站点的全排列作为可行解空间,在所有可行解空间中找到能够使目标函数最大的恢复策略,从而确保恢复过程中的网络韧性损失达到最小.最优韧性恢复模型的目标函数和约束条件为

$$\max R\left(t\middle|m_e\right)=\frac{\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}}E\left(t\middle|m_e\right)\mathrm{d}t}{\left(t_{\text{end}}-t_{\text{start}}\right)E\left(t_0\right)} \tag{5}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}m_e\in M\\ \sum_{i=1}^{n}\theta_i=1\\ E\left(t_{\text{end}}\right)=E\left(t_0\right)\\ t_{\text{end}}-t_{\text{start}}\leqslant T\end{cases} \tag{6}$$

式中:M为所有恢复策略可行解集合;n为失效站点的数量;θ_i为站点i的恢复变量,为0-1变量,当正在恢复站点i时,θ_i为1,其他为0,表示同时只能恢复1个站点;$E(t_{\text{end}})$为网络在修复完成时刻的服务效率;约束条件$E(t_{\text{end}})=E(t_0)$表示网络在完成全部修复后,其服务性能应恢复至干扰前的正常水平,确保功能完全恢复;$t_{\text{end}}-t_{\text{start}}\leqslant T$表示整个修复过程的总时长不能超过给定的最长修复总时长T.

因为失效站点数量始终是一个有限集合,每恢复一个站点就会对应一个网络性能值,最优恢复策略为失效站点集合的一种排列,寻找最优解的过程相当于在离散排列空间中找到最优恢复排列顺序,故将问题抽象为离散问题,优化目标函数抽象为

$$\max R(m_e)=\frac{\sum_{\text{start}}^{\text{end}}\left(E\left(t_{\text{start}}\right)+E\left(t_{\text{start}+1}\right)\right)}{2nE\left(t_0\right)} \tag{7}$$

2.2　改进 PSO 算法

最优韧性恢复模型属于典型的单目标组合优化,当失效站点数量较多时,该模型将面临极其庞大的解空间,若运用数学解析求解,难以在可接受时间内获得有效解,而启发式算法对于求解此类型问题有显著优势.当前该领域研究广泛采用遗传算法(Genetic Algorithm,GA)求解,尽管GA具有良好的全局搜索能力,但在面对庞大的解空间时,其搜索耗时长、收敛速度慢、参数设置复杂等问题显著[24].为此,引入PSO算法来求解失效站点恢复策略优化问题,并针对该问题的离散特性进行改进.

算法中将每种恢复策略$m_e=[x_1,x_2,\cdots,x_n]$编码为1个粒子,其中x_k表示当前恢复策略中第k个被修复的失效站点编号,每个粒子在搜索空间中的位置对应于失效站点编号的1个排列,适应度函数为$R(m_e)$.考虑到传统PSO中的连续速度更新机制不适用于离散空间,因此提出一种基于索引交换的速度和位置更新方法,使粒子从当前位置向最优位置移动,粒子更新速度V_e为

$$V_e=\mu\cdot V_e^{\text{pred}}+c_1\ r_1\left(m_e^{\text{best}}-m_e\right)+c_2\ r_2\left(G_{\text{best}}-m_e\right) \tag{8}$$

式中:V_e^{pred}为上一代粒子的速度趋势,保留上一代搜索趋势确保搜索的连贯性;μ为惯性权重,用来控制粒子速度的延伸性,调控粒子的探索能力;c_1为个体学习因子,调控粒子向个体最优靠近的程度;c_2为社会学习因子,调控粒子向全局最优靠近的程度;r_1,r_2是[0,1]范围内的随机数,对粒子的更新引入随机性,防止限于局部最优;m_e^{best}为第e个粒子历史上所经历的最优位置,即个体最优解;G_{best}为迄今为止整个种群中所有粒子的全局最优位置,即全局最优解.

交换操作实际体现在速度更新中的个体学习项$c_1\ r_1\left(m_e^{\text{best}}-m_e\right)$和社会学习项$c_2\ r_2\left(G_{\text{best}}-m_e\right)$两部分.假设失效站点编号为[1,3,4,7,9],在算法迭代过程中某粒子$m_e=[4,1,9,3,7]$,当前个体最优$m_e^{\text{best}}=[1,4,9,7,3]$,当前全局最优$G_{\text{best}}=[1,9,4,3,7]$.首先比较$m_e$和$m_e^{\text{best}}$,需要先交换$m_e$位置1和位置2,然后交换位置4和位置5的失效站点编号,即$c_1\ r_1\left(m_e^{\text{best}}-m_e\right)=\{(1,2),(4,5)\}$;然后比较$m_e$和$G_{\text{best}}$,需要先交换$m_e$位置1和位置2然后交换位置2和位置3的失效站点编号,即$c_2\ r_2\left(G_{\text{best}}-m_e\right)=\{(1,2),(2,3)\}$;最后综合惯性权重$\mu$及学习因子$c_1,c_2$来考虑随机性,最终确定交换操作$V_e=\{(1,2),(2,3),(4,5)\}$,基于此速度更新粒子位置,获得$m_e^{\text{new}}=[1,9,4,7,3]$.至此粒子通过交换操作完成一次粒子位置的更新,原理如图3所示.

为了使算法迭代前期拥有较强的全局搜索能力,同时强化算法后期的局部搜索能力,采用非线性

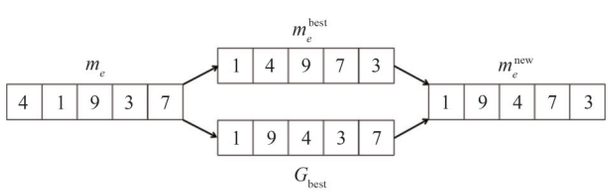


图3　粒子位置更新交换操作示意

Fig.3　Schematic diagram of particle position update and exchange operations

惯性权重来实现迭代过程中对惯性权重的实时动态调整，惯性权重表示为

$$\mu=\mu_{\max}-\left(\mu_{\max}-\mu_{\min}\right)\left(\frac{g}{g_{\max}}\right)^2 \tag{9}$$

式中：$\mu_{\min}$和$\mu_{\max}$为算法输入的设定最小和最大惯性系数；g为迭代次数；$g_{\max}$为最大迭代次数.

算法具体流程共包括5个步骤.

步骤1：确定算法参数，包括最大迭代次数$g_{\max}$、惯性权重$\mu_{\min}$和$\mu_{\max}$、学习因子c_1和c_2，初始粒子数量和位置.

步骤2：计算各个粒子的适应度，初始化个体最优$m_e^{\text{best}}=m_e$，$\max\left(R(m_e)\right)$所对应的粒子为初始全局最优G_{best}.

步骤3：迭代开始后，按照速度更新原则更新粒子的位置，计算更新后粒子的适应度$R\left(m_e^{\text{new}}\right)$，若$R\left(m_e^{\text{new}}\right)>R\left(m_e^{\text{best}}\right)$，则$m_e^{\text{best}}=m_e^{\text{new}}$；若$R\left(m_e^{\text{new}}\right)>R\left(G_{\text{best}}\right)$，则$G_{\text{best}}=m_e^{\text{new}}$.

步骤4：判断是否达到算法设定最大迭代次数$g_{\max}$，若达到，则转入步骤5，若未达到，则转入步骤3.

步骤5：迭代结束，输出结果G_{best}.

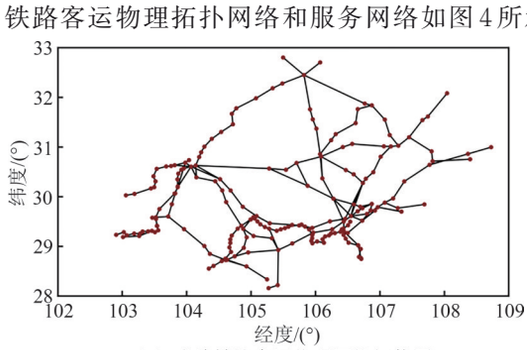
改进PSO算法在结构和机制上针对站点恢复序列这一离散组合优化问题，将恢复顺序抽象为离散粒子的位置，通过引入索引交叉替换操作代替传统连续速度更新方式，使算法适应排列空间的搜索需求；引入非线性惯性权重动态调整策略，增强算法初期全局探索能力与后期的局部收敛能力，更高效地搜索最优解.算法结构更简洁、参数更少，求解效率更高，尤其适用大规模站点失效下网络韧性恢复优化.

3 实例分析

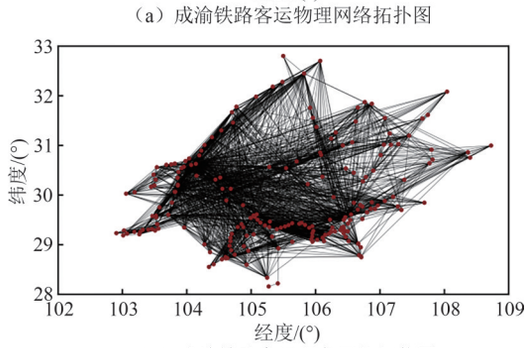
算例选取成渝双城经济圈铁路网络为研究对象.首先，构建成渝双城经济圈铁路客运服务网络，并结合复杂网络理论的拓扑特征指标，从静态拓扑角度分析服务网络的整体连通情况；然后，针对该网络进行了两次仿真分析，第1次仿真模拟网络中各站点单独失效对网络服务性能的影响，以识别铁路客运网络中关键站点，第2次仿真采用随机攻击、序号攻击和基于第1次仿真获得的站点重要度排序攻击3种策略模拟站点持续失效评估网络的抵抗韧性表现；最后，设置了3种突发事件干扰下的站点失效情景，分别模拟3种情景下随机修复、度值修复和最优修复策略的恢复效果，验证最优韧性恢复模型可以有效提升网络恢复韧性.

3.1 网络构建及拓扑分析

首先，基于文献[25]确定研究范围内的车站，并通过高德地图拾取各个站点的经纬度坐标；然后，根据中国铁路地图网的公开数据，统计截至2024年11月21日各车站经停列车的车次编号及站点间的连接情况；最后，依据服务网络建模方法构建成渝双城经济圈铁路客运服务网络.服务网络不仅保留了基础拓扑网络的信息，同时引入了列车车次对站点连通性的影响，以站点间运营列车数目作为连边权重进而反映成渝双城经济圈铁路客运网络的服务能力.铁路客运物理拓扑网络和服务网络如图4所示.



（a）成渝铁路客运物理网络拓扑图



（b）成渝铁路客运服务网络拓扑图

图4 铁路客运物理网络和服务网络拓扑图

Fig.4 Topological diagrams of the railway passenger physical network and service network

基于复杂网络理论对成渝双城经济圈铁路客运服务网络拓扑特征指标的计算结果见表1.

表1 网络各拓扑特征指标计算值

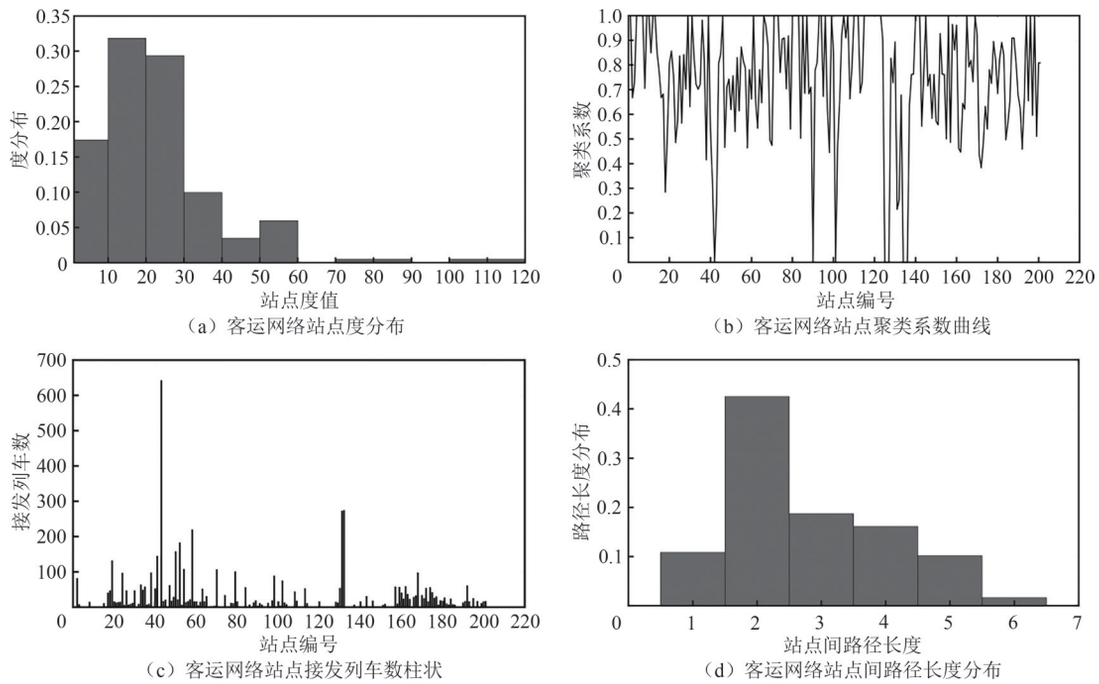
Tab.1 Calculated values of topological characteristic metrics of the network

拓扑特征指标	计算值	拓扑特征指标	计算值
站点数	201	平均介数	0.008 9
连边数	2 179	平均路径长度	2.773 5
平均度	21.68	平均站点强度	130.50
平均聚类系数	0.74	平均接发列车数	27.02

由表1可知：网络共有201个站点和2 179条连边，这些站点作为铁路运输的重要枢纽，承担着区域间人员流动的关键作用；平均度为21.68，网络整体

连通性较强;平均聚类系数为0.74,表明网络局部聚合特性明显,具有较强的局域联系;平均介数为0.008 9,网络整体具备较好的冗余性;平均路径长度为2.773 5,网络整体覆盖和线路连接比较合理,便于旅客高效出行;平均站点强度为130.50,各站点每日平均接发27趟列车,网络整体具备较高的运行效率和旅客输送能力,能有效满足区域间的旅客出行需求.

网络中站点的度分布情况、聚类系数、接发列车数及站点间路径长度分布情况如图5所示.



(a) 客运网络站点度分布　(b) 客运网络站点聚类系数曲线

(c) 客运网络站点接发列车数柱状　(d) 客运网络站点间路径长度分布

图5　网络各拓扑指标

Fig.5　Distributions of topological metrics of the network

由图5可知:成渝双城经济圈铁路客运服务网络中有60%的站点度集中在10~30,站点间连通性较高;聚类系数曲线图显示网络中绝大部分站点的聚类系数均大于0.5,网络局部区域站点间联系紧密,聚类系数为0的站点大多为不提供旅客运输服务的车站;站点接发列车柱状图显示43号站点(成都东站)每日接发列车数量远高于其他车站,该车站作为枢纽中的核心车站,承担着更多的运输任务;站点间路径长度分布显示,网络中约40%的站点对之间的路径长度为2,大多数车站之间路径长度集中在2~3,网络具有较短的出行路径和较高的换乘效率,整体结构合理.

3.2　网络关键站点识别

为了验证基于站点间运营列车数目加权的服务效率指标的合理性,通过Matlab仿真模拟单站点失效对网络服务性能的影响,识别网络中关键站点.仿真中还引入文献[10]提出的考虑旅客平均出行时间的网络服务性能评估指标(即时间加权效率)进行对比分析,该指标区别于传统拓扑指标,是现有研究中提出从服务和运营特性评估铁路客运网络性能的指标,以站点间的旅客旅行时间作为连边权重,从旅客的时间可达性角度评估网络服务性能.在仿真中,依次对网络中的站点进行失效模拟,并记录各个站点失效后网络的服务效率和时间加权效率,结果如图6所示.

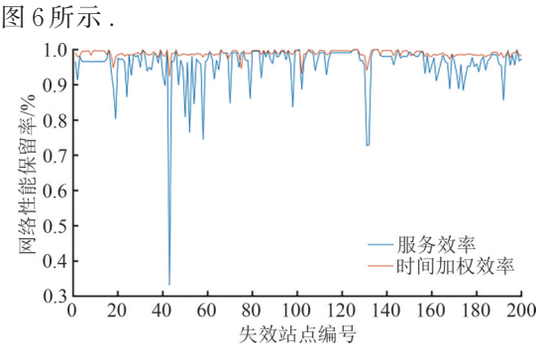


图6　单站点失效两种效率变化趋势

Fig.6　Variation trends of two efficiency metrics under single-station failures

由图6可知:两条仿真结果曲线的变化趋势存在显著差异,基于时间加权效率的仿真结果显示,单站点失效对网络服务性能的影响较小,任意站点失效后网络服务性能下降均不会超过10%;相比之下,基于服务效率指标的仿真结果中单站点失效后网络服务性能下降幅度相对较大,重要度前10的关键站点分别失效导致网络服务性能平均下降率为

25.26%;以时间加权效率评估网络服务性能时无法充分考虑行车中断对后续线路站点可达性的影响,而服务效率指标则能够更好地从实际情况评估单站点失效后对网络服务性能的影响.

分别对基于两种指标的仿真结果进行排序,识别出网络中关键站点见表2.

表2 基于两种效率识别的关键站点排序表

Tab.2 Ranking of critical stations identified based on two efficiency metrics

排名	服务效率			时间加权效率		
	站点名称	性能下降百分比/%	接发列车数量	站点名称	性能下降百分比/%	接发列车数量
1	成都东	66.85	643	成都东	7.62	643
2	重庆西	27.26	273	泸州	6.87	75
3	重庆北	27.04	275	重庆西	5.96	273
4	广元	25.52	220	隆昌	5.38	2
5	绵阳	23.55	183	峨眉	5.17	43
6	乐山	19.17	132	重庆北	3.06	275
7	德阳	19.16	158	万州北	2.76	98
8	自贡	16.34	89	内江	2.67	4
9	江油	15.49	108	万源	2.39	25
10	内江北	15.22	107	达州	2.30	61

由表2可知:两个指标的仿真结果中识别出的最关键站点均为成都东站,截至2024年11月21日搜集的数据显示,成都东站每日接发的旅客列车数量高达643列,因此该站对网络整体服务性能具有决定性影响;对比两种指标下的重要站点识别结果可知,基于时间加权效率指标识别的关键站点中包含了一些小型客运站,如隆昌站每日接发列车两列,内江站每日接发列车4列,基于服务效率指标仿真识别的重要站点均为网络中的大型车站,每日接发列车数量较大,这些站点失效会造成大规模行车中断进而影响网络服务性能,仿真结果更加符合实际.

为分析关键站点的重要性差异,分别进行了两组失效模拟:一组为基于服务效率指标识别的成都东、重庆西、重庆北、广元、绵阳前5关键站点依次持续失效;另一组为基于时间加权效率指标识别的成都东、泸州、重庆西、隆昌、峨眉前5关键站点依次持续失效.仿真结果记录如图7所示.

由图7可知,相较于时间加权效率重要度攻击,网络在服务效率重要度攻击策略下表现出更差的抵抗韧性,表明基于服务效率识别关键站点的仿真结果更具有合理性和可信度,同时证明服务效率指标更能准确反映站点失效后网络的实际服务能力和运营特性.

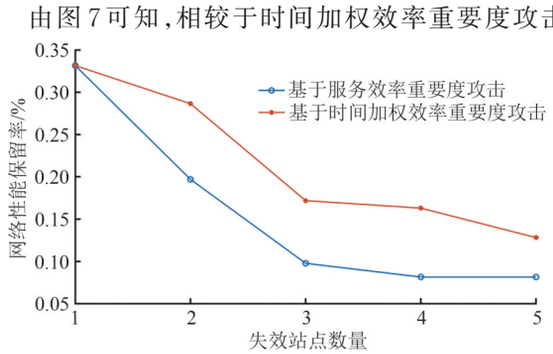


图7 两种策略下站点持续失效网络性能变化曲线

Fig.7 Network performance variation curves under continuous station failures for two strategies

3.3 网络抵抗韧性评估

为了评估网络的抵抗韧性,采用序号攻击、随机攻击和重要度攻击3种策略模拟多站点持续失效.重要度攻击是指按照基于服务效率指标识别的关键站点排序从大到小依次攻击,序号攻击是指按照站点编号依次攻击使站点失效,随机攻击即随机选择网络中的站点攻击.仿真结果如图8所示.

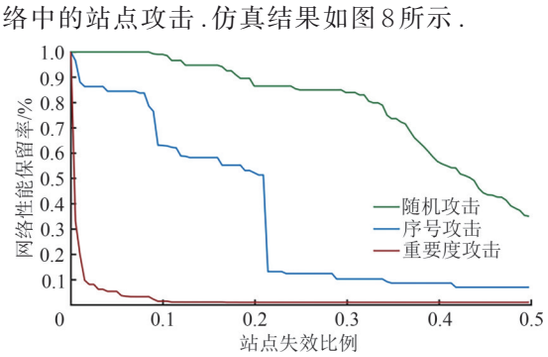


图8 不同攻击策略下多站点持续失效网络性能曲线

Fig.8 Network performance curves under multi-station continuous failures for different attack strategies

由图8可知:成渝双城经济圈铁路客运服务网络在重要度攻击策略下表现出较差的抵抗韧性,网络中失效的站点比例达到10%时,服务性能保留率几乎为0,随着站点持续失效,网络迅速崩溃;在序号攻击策略下,网络前期表现出较强的抵抗韧性,但当失效站点比例超过20%后网络性能迅速下降;网

络在随机攻击中表现出较强的抵抗韧性,网络性能下降缓慢.

3.4　网络服务韧性恢复

在韧性恢复仿真算例中,设置了3种突发事件干扰情景.其中,情景1是网络重要度排名前20的车站遭受蓄意攻击失效,失效站点为{成都东,重庆西,重庆北,广元,绵阳,乐山,德阳,自贡,江油,内江北、达州、宜宾西、眉山东、南充、泸州、万州北、遂宁、峨眉、成都南、天府机场};情景2是内江市发生地震导致该区域13个站点全部失效,失效站点为{资中西、资中北、内江南、白马北、内江东、内江、内江北、椁木镇、双凤驿、迎祥街、隆昌北、隆昌、李市镇};情景3是由于线路老化、电力系统故障导致重要度排名倒数前20的站点失效,失效站点为{自贡北、毛坝、大山铺、兴文南、叙永北、燕岗、蒲江、双流西、安靖、天府、内江南、安福镇、黄碾、铜罐驿、石场、茄子溪、重庆南、小南海、镇紫街、华蓥}.各情景下失效站点编号见表3.

表 3　3种干扰情景下失效站点编号

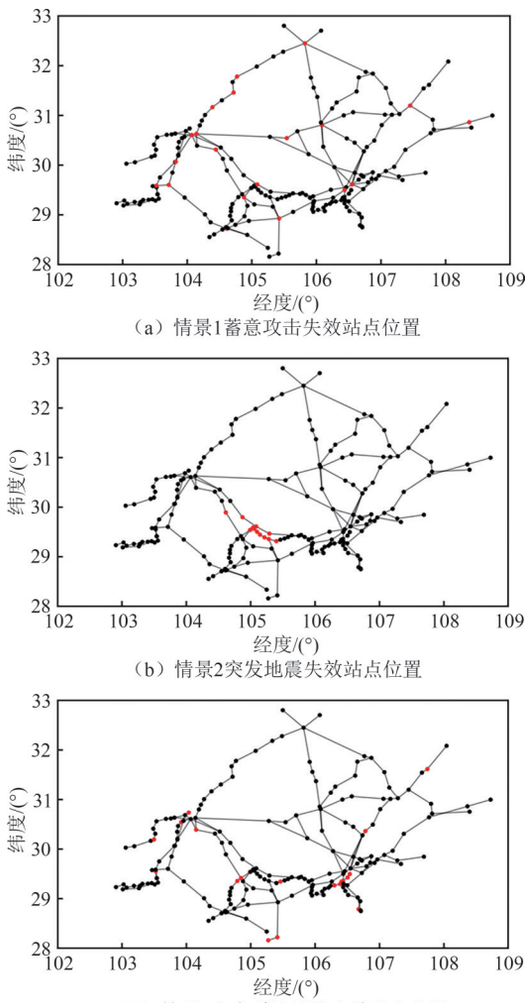
Tab.3　Failed station numbers under three disruption scenarios

情景	站点失效原因	失效站点编号
1	蓄意攻击	43,131,132,58,52,19,50,98,54,70 192,79,24,174,102,168,172,18,41,47
2	突发地震	64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76
3	电力系统故障	99,194,100,90,101,16,31,39,42,46 66,105,125,126,127,134,135,136,145,198

3种干扰情景下对应的失效车站在整个铁路服务网络中的空间位置分布如图9所示.图9中,标红的站点表示在对应情景中被设定为失效的站点.

通过随机恢复、度值恢复和最优恢复3种恢复策略,对3种干扰情景下的失效站点进行恢复,其中随机恢复即恢复顺序完全随机;度值恢复是指按照失效站点的度值排序从大到小进行逐一恢复;最优恢复则基于最优韧性恢复优化模型,通过改进的PSO算法求解获得最优恢复顺序.

在算法参数设置方面,结合该算例的规模与特性,通过多组预实验进行调优和验证后,设定算法中粒子个数为45个,g_{max}为100次,个体学习因子$c_1=2.0$,社会学习因子$c_2=1.2$,惯性权重采用非线性递减策略,其中$\mu_{min}=0.2$,$\mu_{max}=1.2$.三种干扰情景在不同恢复策略下的恢复结果如图10所示.由图10可知,基于最优韧性恢复优化模型求解的最优恢复策略在3种干扰情景下的修复效果均优于其他两种



(a) 情景1蓄意攻击失效站点位置

(b) 情景2突发地震失效站点位置

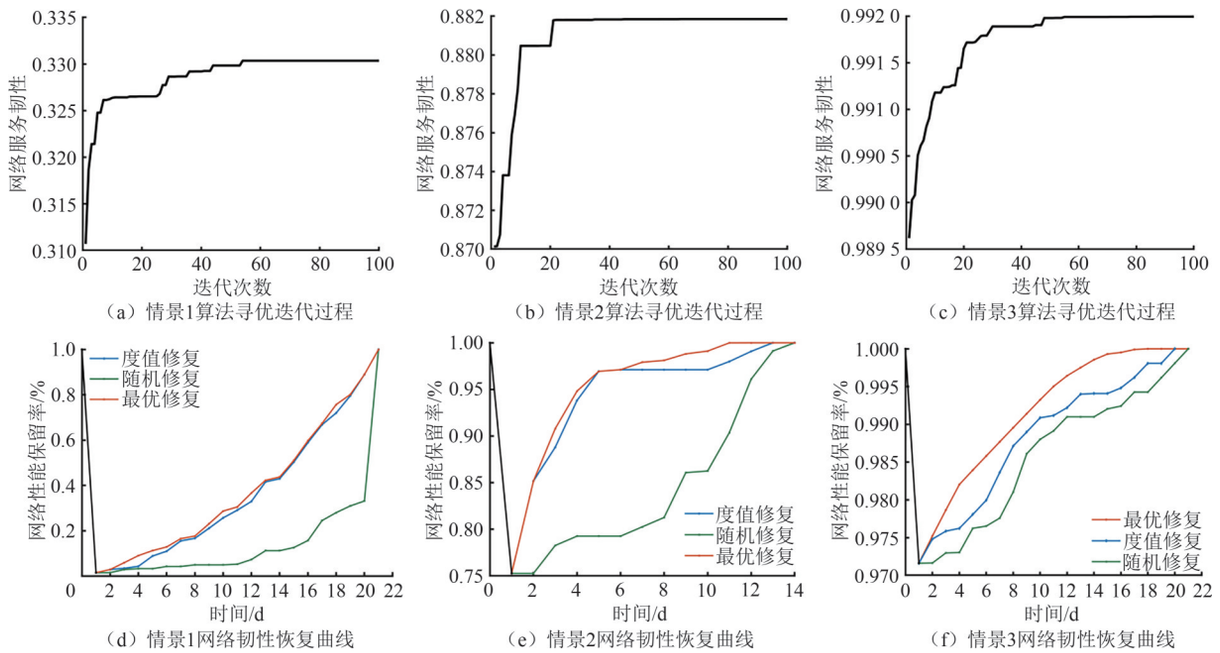
(c) 情景3电力系统故障失效站点位置

图 9　3种情景下失效站点位置

Fig.9　Locations of failed stations under three scenarios

恢复策略.

3种干扰情景下各恢复策略的恢复顺序及恢复韧性值见表4.由表4可知:在情景1中,最优恢复策略下网络恢复韧性可以达到0.330 4,比随机恢复高69.9%,比度值恢复高4.81%,表明最优恢复能使网络受干扰后快速恢复到预期状态,最大程度降低突发事件对网络造成的韧性损失;分别对比3种情景下的各恢复策略的恢复效果可知,情景2中最优恢复策略与度值恢复策略的恢复韧性分别为0.881 8和0.873 1,二者差距较小,表明当失效站点集中于某一地理区域(如地震导致的区域性站点失效)时,度值指标在一定程度上能够反映站点的重要性;在情景3中,最优恢复策略的恢复韧性为0.992 0,其修复效果明显优于度值恢复与随机恢复,这是因为在该情景中失效站点为一批重要度较低、特征指标相近的小型站点,如果按照随机恢复或者度值恢复则会很容易选到次优恢复方案,最优恢复能够很好地避免这种情况.



（a）情景1算法寻优迭代过程 （b）情景2算法寻优迭代过程 （c）情景3算法寻优迭代过程

（d）情景1网络韧性恢复曲线 （e）情景2网络韧性恢复曲线 （f）情景3网络韧性恢复曲线

图 10 3种情景下韧性恢复曲线

Fig.10 Resilience recovery curves under three scenarios

表 4 3种干扰情景下各恢复策略的恢复顺序及恢复韧性值

Tab.4 Recovery sequences and resilience values of different strategies under three disruption scenarios

干扰情景	恢复策略	恢复顺序	网络恢复韧性
1	随机恢复	19→131→174→168→41→54→24→172→52→70→58→192→47→102→18→132→79→98→50→43	0.099 4
	度值恢复	43→58→52→131→50→132→19→54→70→41→24→79→98→102→168→47→172→192→174→18	0.314 5
	最优恢复	43→132→131→18→58→192→41→19→98→174→52→79→168→54→47→24→70→50→172→63	0.330 4
2	随机恢复	67→76→68→73→71→66→72→70→69→74→65→64→75	0.768 3
	度值恢复	70→65→74→64→69→71→72→73→75→76→67→68→66	0.873 1
	最优恢复	70→75→69→64→74→65→76→73→71→72→67→68→66	0.881 8
3	随机恢复	134→145→127→100→66→194→101→136→46→125→31→90→126→105→99→198→135→42→39→16	0.985 8
	度值恢复	99→100→90→101→194→16→31→39→42→46→66→105→125→126→127→134→135→136→145→198	0.988 7
	最优恢复	136→101→99→46→39→42→16→31→198→125→145→66→105→135→100→194→127→134→126→90	0.992 0

4 结论

1）通过分别采用服务效率和时间加权效率作为评估指标仿真模拟单站点失效，获得的站点重要度排序有明显差异，基于服务效率获得的结果能够更准确地反映铁路网络站点失效后的实际性能，结果更具有合理性和可靠度．对于评估结果中比较关键的站点，如成都东、重庆西和重庆北站，应重点监测并在日常维护和灾前预防中投入更多的资源．

2）在仿真模拟多站点持续失效时，成渝铁路客运网络在序号攻击和随机攻击前期具有较强的抵抗韧性，在蓄意攻击策略下表现出很差的抵抗韧性．

3）基于最优韧性恢复模型获得的最优恢复策略能使恢复过程中网络恢复韧性达到最大，网络服务性能在突发事件干扰中可以迅速恢复至正常水平，而如果使用随机恢复或优先恢复策略会造成较

大的韧性损失.

4）当失效站点集合重要度差异并不明显,难以依据某准则进行优先恢复时,最优韧性恢复模型获得的最优恢复策略优势更为明显,其恢复效果明显优于优先恢复和随机恢复.

本研究为铁路客运网络系统在灾前防护和灾后恢复提供了理论依据,对于提升铁路客运网络韧性和保障旅客出行安全具有重要意义.后续研究可进一步考虑站点恢复时间、恢复资源及多站点同时恢复的影响.

参考文献(References):

[1] PIZZO B. Problematizing resilience: Implications for planning theory and practice[J]. Cities, 2015, 43: 133－140.

[2] LIU S, YIN C S, CHEN D J, et al. Cascading failure in multiple critical infrastructure interdependent networks of syncretic railway system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(6): 5740－5753.

[3] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1－23.

[4] MARTÍN B, ORTEGA E, CUEVAS-WIZNER R, et al. Assessing road network resilience: An accessibility comparative analysis[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 95: 102851.

[5] 来逢波, 许冰, 续颖, 等. 高铁复杂网络拓扑特征及节点中心性研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(6): 14－22.
LAI Fengbo, XU Bing, XU Ying, et al. Study on topological characteristics and node centrality of high-speed railway complex network[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(6): 14－22. (in Chinese)

[6] 马书红, 武亚俊, 陈西芳. 城市群多模式交通网络结构韧性分析: 以关中平原城市群为例[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(7): 1228－1235.
MA Shuhong, WU Yajun, CHEN Xifang. Structural resilience of multimodal transportation networks in urban agglomerations: A case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration network[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(7): 1228－1235. (in Chinese)

[7] 唐坤, 徐添, 郭唐仪, 等. 超网络视角下中国高速铁路网络拓扑特性与韧性研究[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(11): 3639－3649.
TANG Kun, XU Tian, GUO Tangyi, et al. Characteristics and robustness analysis of high-speed railway network in China: A hypernetwork perspective[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2024, 44(11): 3639－3649. (in Chinese)

[8] 李一章. 基于物理网与服务网复杂结构分析的铁路网络韧性研究[D]. 北京:北京交通大学,2024.
LI Yizhang. Research on railway network resilience based on complex structure analysis of physical and service networks [D]. Beijing : Beijing Jiaotong University, 2024. (in Chinese)

[9] LI T, RONG L L. Impacts of service feature on vulnerability analysis of high-speed rail network[J]. Transport Policy, 2021, 110: 238－253.

[10] 吴鹏, 李得伟. 时空视角下城市群铁路客运网络抵抗韧性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(11): 1860－1869.
WU Peng, LI Dewei. Resistance resilience of railway passenger transport networks in urban agglomerations from a spatiotemporal perspective[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2024, 64(11): 1860－1869. (in Chinese)

[11] XU C, XU X G. A two-stage resilience promotion approach for urban rail transit networks based on topology enhancement and recovery optimization[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2024, 635: 129496.

[12] 李涛, 荣莉莉. 时空视角下中国高铁网络脆弱性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7): 1801－1809.
LI Tao, RONG Lili. Vulnerability analysis of high-speed rail network in China from spatial-temporal perspective[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(7): 1801－1809. (in Chinese)

[13] ZHANG D M, DU F, HUANG H W, et al. Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example[J]. Safety Science, 2018, 106: 230－243.

[14] 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.
HUANG Ying, LIU Mengru, WEI Jinguo, et al. Research on urban metro network recovery strategy based on resilience curve [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 32－36. (in Chinese)

[15] 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.
LV Biao, GUAN Xinyi, GAO Ziqiang. Evaluation and optimal recovery strategy of metro network service resilience[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 198－205, 221. (in Chinese)

[16] 陈锦渠, 左彤, 朱蔓, 等. 城市轨道交通网络失效修复

策略[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(1): 316－323.
CHEN Jinqu, ZUO Tong, ZHU Man, et al. Repair strategies for a damaged urban rail transit network[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(1): 316－323. (in Chinese)

[17] CHEN J Q, LIU J, PENG Q Y, et al. Resilience assessment of an urban rail transit network: A case study of Chengdu subway[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2022, 586: 126517.

[18] MA Z A, YANG X, SHANG W L, et al. Resilience analysis of an urban rail transit for the passenger travel service[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 128: 104085.

[19] 朱峻, 万红波, 潘红兴, 等. 烟草物流配送系统韧性提升策略研究[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(3): 29－38.
ZHU Jun, WAN Hongbo, PAN Hongxing, et al. Research on strategies for improving the resilience of tobacco logistics distribution systems[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(3): 29－38. (in Chinese)

[20] 杨琦, 张雅妮, 周雨晴, 等. 复杂网络理论及其在公共交通韧性领域的应用综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 215－229.
YANG Qi, ZHANG Yani, ZHOU Yuqing, et al. A review of complex network theory and its application in the resilience of public transportation systems[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 215－229. (in Chinese)

[21] VON FERBER C, HOLOVATCH T, HOLOVATCH Y, et al. Public transport networks: Empirical analysis and modeling[J]. The European Physical Journal B, 2009, 68(2): 261－275.

[22] HOSSEINI S, BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E. A review of definitions and measures of system resilience[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 145: 47－61.

[23] 殷勇, 陈锦渠, 朱蔓, 等. 城市轨道交通站点失效修复策略[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(4): 865－872.
YIN Yong, CHEN Jinqu, ZHU Man, et al. Repair strategies for failure of urban rail transit stations[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(4): 865－872. (in Chinese)

[24] 刘军, 杨青文, 王金涛, 等. 基于改进遗传算法的空间信息网恢复策略[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(04): 524－530.
LIU Jun, YANG Qingwen, WANG Jintao, et al. Spatial information network restoration strategy based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2021, 42(4): 524－530. (in Chinese)

[25] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发《成渝地区双城经济圈多层次轨道交通规划》的通知[EB/OL]. (2021-12-22)[2025-10-27]. http://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202112/t20211222_1308923.html.
National Development and Reform Commission. Notice on the issuance of the *Multilevel rail transit planning for the Chengdu-Chongqing economic circle*[EB/OL]. (2021-12-22)[2025-10-27]. http://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202112/t20211222_1308923.html.(in Chinese)