

# 复杂轨道交通网络级联失效传播机理与防控研究

张秋霞 席莹 马明远 张娜

西安欧亚学院 陕西 西安 710065

**【摘要】**：复杂的轨道交通系统结构复杂，具有运力耦合性，且存在客流随机性，这些因素的出现极有可能诱发级联失效问题，相关事故的频发对城市交通运行和公众安全会造成重大威胁。因此，相关工作人员需要以复杂轨道交通网络为研究对象，围绕其特点深入剖析级联失效的触发机制、传播路径和动态演化过程的问题，建立符合城市轨道交通运行特点的级联失效动力学模型构建方法，从预防、事中控制和事后修复三个层面，研究有针对性的预防和控制措施，从而阐明级联失效由局部失效向全局传播的本质机理，这样能够为提高复杂轨道交通网络的抗干扰能力和网络运行的稳定性奠定基础。

**【关键词】**：复杂轨道交通网络；级联失效；传播机理；防控策略

DOI:10.12417/3041-0630.26.05.092

在城镇化快速发展的背景下，复杂轨道交通网络逐渐呈现出“多线多站多换乘”的特点，其运行状况对城市交通的健康运行和公共出行的安全具有重要意义。与一般的复杂路网相比，复杂轨道交通网络具有拓扑结构关联性、运力供需均衡性和客流时空波动性等特点，其局部站点的故障容易通过换乘节点、运力转移等途径蔓延，引起全网级联失效，导致大量旅客停留和运行中断。现有的复杂网络级联失效研究主要集中在一般性的路网上，而对其特征的系统研究尚有欠缺，很难准确地揭示其特有的传播机理和防控要点。因此，相关人员需要探究失效传播的机理，并探究相关的防控措施，为城市轨道交通网络的安全稳定运营提供理论指导<sup>[1]</sup>。

## 1 复杂轨道交通网络级联失效传播机理分析

### 1.1 级联失效触发机理

复杂轨道交通系统级联失效引发是多个要素的共同作用，其本质是网络结构特征、运行状态波动和外界干扰共同作用的综合效应。在网络结构层面上，复杂轨道交通网络中有众多的换乘节点，这些节点是多条线路之间的衔接点，承担着旅客转运和运力调配等重要职能，其结构性的弱点导致了局部失效容易迅速传递。此外，由于各线运力耦合所造成的单条线运力衰减，将会引起相关线路的旅客滞留，构成级联失效触发的结构性依据。在运行状况方面，由于乘客在时间和空间上的不平衡，容易导致局部站点运力过载，一旦过载超出轨道交通网络承受极限，将引起车站停靠能力下降、线路运行效率下降等局部失效，从而形成级联失效的触发机制。在外在干扰方面，如设备故障、极端天气、突发公共事件等外界影响，可导致路网中各节点或线路的正常运行受到干扰，导致路网运力供需失衡，引发局部失效问题<sup>[2]</sup>。

### 1.2 级联失效传播路径与模式

由于复杂轨道交通网络特有的网络结构和运行特点，其级联失效的蔓延路径和方式不同于一般的复杂网络，表现出多路径多层的传输特点。其中，传播路径可划分为以换乘节点为中心的节点传导路径和以线路为核心的线路传导路径，一旦其中一个换乘节点出现失效，其所携带的中转客流就会迁移到邻近的换乘节点，造成邻近节点超载，从而引起邻近节点的失效，进而引发网络的连锁效应。而在此过程中，当一条线路发生失效时，其沿线的旅客将转向平行线路或关联线路，造成相关线路运力达到饱和，从而引起线路运行效率下降，并逐渐扩展到全网。传播模式分为渐进式传播与突发式传播两种，前者源自运行状况逐渐退化，比如客流逐渐积累的运力过载，失效从局部慢速蔓延、传播缓慢、具有可预见性；而突发式传播，则由重大设备故障、极端天气等外界因素引起，失效迅速向相关节点和线路蔓延，快速造成全网运营中断，其传播迅速、破坏力强。

## 2 复杂轨道交通网络级联失效防控策略

### 2.1 预防策略

(1) 网络结构优化策略：想要解决复杂轨道交通网络中的级联失效问题，关键在于如何对其进行合理的网络结构设计和节点布局，以提高其抵抗干扰和冗余性，并符合其运行特点。为此，要通过对换乘枢纽的薄弱环节进行合理的布局和设计，增加换乘通道数量，提高换乘效率，减轻单个换乘节点的客流负荷，减小节点失效的发生概率。还要在路网中适当添加备用线路和冗余节点，建立多通路连接的网络结构，在某个线路或某个节点出现失效时，利用备用通路进行旅客和运力的迅速转移，从而阻止失效蔓延。而且利用复杂网络的相关原理，对

作者简介：张秋霞（1989.07-），女，汉族，甘肃甘谷人，硕士研究生，讲师，研究方向为：随机图论。

基金信息：西安欧亚学院校级科研基金项目，基金号：2023XJZK07。

线路连接模式进行优化,减小聚集系数和平均路径长度,提高网络均匀性,防止在局部地区出现结构性薄弱节点。

(2)运营调控策略:运营调控需要以复杂轨道交通网络为研究对象,以系统运行状况为核心,通过对系统运力和客流的精确控制,实现路网运力的供求均衡,预防局部失效的发生和蔓延,体现城市轨道交通系统的动态性和针对性。为此要建立客流时空预测模型,对不同时段、不同站点的客流进行准确地预测,并对列车的发车间隔和载客量进行预先调整,以实现运力动态匹配,防止局部站点或线路上的客流聚集。针对客流高峰期,需要采取分时段、分站点的客流调控措施,通过限流和引导换乘等手段,将局部的客流分流,减少运力过载的风险。同时,构建运行状态的动态监控机制,对各节点和各线路的运行参数进行实时追踪,一旦检测到某个节点或某条线路存在运力异常时,立即采取相应的调节措施,对相关线路进行运力调配,防止异常情况继续蔓延<sup>[5]</sup>。

(3)监测预警体系构建:基于多维度、多角度的监控,准确捕获级联失效的早期信号,进而实现对级联失效的及早预警和干预,这是防范城市轨道交通系统级联失效发生的根本途径。因此,要建立多源监控网络,融合站点客流、列车运行状态等多种监测数据,对网络节点、线路和外部环境进行实时监控,保证监测数据的完整性和精度。在此基础上,需要构建路网级联失效的预警指标体系,选择节点承载率、线路运力利用率、列车延误时长等为核心预警指标,确定各个指标的预警阈值,并对路网运行状况的异常程度进行定量评估。通过对监控数据的演变规律进行分析,准确辨识级联失效的早期触发信号,从而对失效的触发、蔓延进行事前预测。

## 2.2 事中控制策略

(1)故障快速隔离:该领域工作人员需要思考如何在出现区域故障后迅速切断故障点或线路,切断其故障蔓延途径,进而降低故障对整个网络运行造成的冲击,这样才能展现出复杂轨道交通网络故障处理的时效性和专业化。为此,要融合多源监控信息和故障诊断方法,实现故障早期精确定位,判断故障类型和危害程度,为故障隔离提供支持。根据不同的故障类别,设计有差别的隔离策略。如在节点失效时,通过封闭失效车站的换乘功能,快速引导客流撤离,将失效节点和相关节点隔开,防止因客流迁移而引起邻近节点超载。而当线路发生故障时,可以采取截断线路运力供给和调整行车线路的方法,使故障线路与相关线路相分离,从而避免故障沿线路传播。

(2)动态调度调整:在复杂轨道交通网络中,需要对故障状态下的行车组织和运力进行及时地优化配置,有效应对故障后的路网状况,有效减轻客流滞留,保持路网的基础运作职能,符合复杂轨道交通的灵活调配要求。工作人员需要根据故

障后的路网状况,对剩余各节点和线路的运力状况进行实时分析,并根据客流分布状况,对列车发车间隔、行车路线和停靠车站进行动态调整,提高剩余路网运力的利用效率,满足客流疏散需要<sup>[4]</sup>。

(3)跨部门协同处置:在级联失效发生时,要实现故障的有效管控,其关键在于将轨道交通运营、设备维修、公安交通等多个部门的力量进行有效融合,从而形成处置合力,实现对故障的有效应对。为此要构建跨部门协作应急机制,明确各部门的工作职责和协作流程,以保证出现故障时能够快速反应和有效协作。其中,轨道交通运营部门负责对网络状况进行监控,及时调整调度方案,并做好疏导客流。设备维修部门负责对故障进行快速排查和维修,公安交通部门则负责维持站点周边交通秩序,协助客流疏散。还需要构建应急处置信息共享平台,突破部门间的信息屏障,提高处置的科学性和时效性。

(4)负荷重新分配:在复杂轨道交通网络中,负荷重新分配是对级联失效进行事中控制的一个重要步骤,其核心在于对已发生故障的节点的客流及运力负荷进行科学调配,以防止剩余网络因负荷超载而引起新的失效,从而体现城市轨道交通负荷分配的合理性。因此,要分析网络中各节点和各线路的运力状况,构建负荷重新分配模型,并根据客流分布特点提出最优的负荷分配策略,保证各节点和各线路的负荷均衡,避免出现过载现象。通过优化列车运行线路、调整换乘引导和增开临时列车等手段,对客流负荷进行快速分流和重新分配,把故障区域的客流逐渐引导到其余正常线路上,减轻局部负荷压力<sup>[5]</sup>。

## 2.3 事后恢复策略

(1)恢复优先级确定:为了确保复杂轨道交通网络的良好运作,需要构建恢复优先级评价指标体系,以客流承载能力、换乘重要性、故障影响范围等为核心指标,并结合利用定量评估手段对失效节点和线路进行优先级排序。同时,需要以核心换乘节点与骨干线路为修复重点,因为这些节点与线路是路网连通和运力供给的关键,相关区域的修复可以迅速提高整个路网的运营能力,减轻客流滞留。而且,通过对关联节点和支线线路的修复,能够不断改善路网的连通性,增加运力供给。工作人员还要对次要节点与辅助线路进行修复,从而实现整个网络运营的完全恢复。

(2)快速修复与运力恢复:想要尽快恢复复杂轨道交通网络,就要根据各类失效类型制订差异化的修复方案。如对于设备故障类失效需要组建专业的维修团队,优先调配维修资源,并迅速查明故障根源,配合开展修复工作,这样能够切实缩短修复时间。还要根据损坏程度制定科学的修复方案,合理安排施工进度,保证修复质量与安全性。在修复期间,要同步推进运力恢复工作,对已修复的节点和线路要分阶段地恢复列车运行和客流中转功能,通过调整列车发车间隔与运力分配,

循序渐进地恢复运力供给。对于尚未全面恢复的区域,采取临时调度措施,以保证客流的基本出行需求,最大限度地降低恢复期间对公众出行的影响。

(3) 网络重构与优化:针对我国复杂轨道交通网络级联失效的特点,结合级联失效传播机理与处置经验,提出针对性的网络重构与优化方法。在分析级联失效传播机制和防控处置方法的基础上,要辨识轨道交通网络的薄弱节点、薄弱线路和运力瓶颈,依据这些信息实现网络拓扑结构重构,优化节点布局与线路连接方式,进而提高网络的抗扰动能力。同时要对网络运营方案进行优化,要结合客流时空分布特征,合理调整运力分配与调度策略,提升网络运营的科学性与稳定性。这样才能弥补原有网络的缺陷,提升网络的整体稳定性和抗失效能力,构建更加安全、高效、可靠的复杂轨道交通网络运作环境<sup>[6]</sup>。

(4) 防控体系迭代完善:防控体系的迭代完善是我国复杂轨道交通网络级联失效事后恢复的长效保障,其关键在于通过对级联失效的触发、传播规律和防控处置经验的总结,找出当前防控体系的不足,不断对防控策略、监测预警、应急处置等各个环节进行迭代优化,进而提高防控体系的针对性和有效

性。为此,工作人员要对级联失效处置全流程进行系统性梳理,分析防控策略的执行成效,识别预防、事中控制和事后恢复中存在的预警精度不足或者应急响应效率低下等问题,明确迭代优化的方向。通过完善监测预警体系,能够修正预警指标与预警阈值,改进预警模型,提高预警的精度和时效性。而且要结合级联失效传播规律来优化网络结构优化,提升运营调控效果等,增强策略的针对性和可操作性,从而为复杂轨道交通网络的长期安全稳定运营提供持久支撑动力。

### 3 结语

综上所述,复杂轨道交通网络级联失效传播呈现出结构相关性强、运力耦合性强、客流驱动性强等特点,其触发、传播和演化等特征有别于一般的复杂网络,需要在理论和实践上同时兼顾。为此,需要依据复杂轨道交通网络级联失效传播机理、传播路径和规律进行深入剖析,建立符合运营实际的复杂轨道交通网络级联失效传播动力学模型,从预防、事中控制、事后修复三个方面,分别提出有针对性的防控措施。这样才能促进我国复杂轨道交通网络防控体系不断完善,确保我国城市轨道交通的高质量发展。

### 参考文献:

- [1] 芮晓彬,林伟涵,吉嘉欣,王志晓.城市轨道交通网络站点中心性评估及级联失效抗毁性研究[J].电子与信息学报,2025,47(10):3893-3903.
- [2] 韩紫金,钱名军,王玺宪,张凯悦.基于超图理论的城市轨道交通超网络级联失效仿真[J].系统仿真学报,2024,36(12):2960-2970.
- [3] 詹斌,袁野,杨世武,盛涛.基于加权网络的城市轨道交通网络特性与级联失效分析[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2022,44(06):917-923+929.
- [4] 杨景峰,朱大鹏,赵瑞琳.城市轨道交通网络特性与级联失效鲁棒性分析[J].计算机工程与应用,2022,58(07):250-258.
- [5] 朱岩,孙健,王兴举.基于耦合映像格子模型的城市轨道交通网络可靠性研究[J].上海理工大学学报,2021,43(01):93-101.
- [6] 李思倩,帅斌,刘奕杉.城市轨道交通网络级联失效机理研究[J].综合运输,2020,42(07):69-74+120.