

城市复合公共交通网络韧性评估及恢复策略研究综述

甄云竹, 胡军红, 杨茗舒, 臧蕊

(南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 211800)

摘要: 为应对扰动事件对城市复合公共交通网络的影响, 从韧性视角出发, 系统梳理国内外复合公共交通网络韧性评估与恢复的相关研究。在对复合公共交通网络模型构建方法和特征进行分析的基础上, 界定了复合公共交通网络韧性的定义, 从网络拓扑和乘客出行两个方面分析评价指标的作用、计算方法和阈值, 并进一步探讨扰动事件下的恢复策略。研究表明, 城市复合公共交通网络的研究近年受到广泛关注, 并在模型构建、韧性评估和恢复策略3个方面取得一定的成果, 但仍需加强理论支撑, 探索更符合实际的复合公共交通网络模型构建方法与评估指标, 并关注实际客流与城市轨道交通运行交路共同作用下, 级联失效对复合公共交通网络的影响。

关键词: 复合公共交通网络; 韧性评估; 图论; 恢复策略; 超级网络; 级联失效

A Review of Resilience Assessment and Recovery Strategies for Urban Multimodal Public Transportation Networks

ZHEN Yunzhu, HU Junhong, YANG Mingshu, ZANG Rui

(School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211800, China)

Abstract: To address the impacts of disruptive events on urban multimodal public transportation networks, this paper systematically reviews domestic and international studies on resilience assessment and recovery strategies from a resilience perspective. Based on an analysis of modeling approaches and characteristics of multimodal public transportation networks, the paper defines the concept of network resilience, examines the role, calculation methods, and thresholds of evaluation indicators from both network topology and passenger travel perspectives, and further explores recovery strategies under disruptive events. The findings indicate that research on urban multimodal public transportation networks has received significant attention in recent years, with notable progress in three key areas: model construction, resilience assessment, and recovery strategies development. However, it is still needed to strengthen theoretical foundations, develop more realistic modeling methods and assessment indicators, and focus on the cascading failures that may arise from the interplay between actual passenger flows and urban rail transit operations.

Keywords: multimodal public transportation network; resilience assessment; graph theory; recovery strategy; supernetwork; cascading failure

收稿日期: 2024-06-29

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目“考虑复合公共交通网络韧性的故障恢复策略研究”(SJCX25_0629)

作者简介: 甄云竹(2001—), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通、交通网络韧性, 电子邮箱ZY21132006@163.com。

通信作者: 胡军红(1974—), 女, 河南新郑人, 博士, 副教授, 研究方向为交通运输规划与管理, 电子邮箱happyjunhong@163.com。

0 引言

随着中国城镇化进程加快, 人口密度不断提高, 私人汽车数量激增所带来的交通拥堵和环境污染问题日益严重。在此背景下,

城市公共交通因其高效的运输能力和公共服务属性逐渐成为居民出行的重要交通方式, 并得到了持续支持与大力建设^[1]。

城市轨道交通和公共汽电车是城市公共交通的重要组成部分。其中, 城市轨道交通

具有高效、准时、运输能力大的特点,能够确保乘客快速、准时地到达目的地;公共汽车运行范围广,可穿梭于城市的各个角落,为居民提供了灵活、便捷的出行服务。因此,公共交通网络的安全性和稳定性对城市的整体发展和居民的生活质量至关重要。然而,地震、洪水等自然灾害或火灾、停电等突发事件可能在公共交通运营过程中造成严重后果且难以提前预测。如何在灾害和突发事件发生前做好应急预案、在事后快速恢复公共交通运营,已成为当今城市公共交通管理部门关注的主要问题之一。

“韧性”概念因其能够刻画系统在突发事件前、中、后的全过程变化,逐步被应用于交通领域,成为衡量交通系统性能的重要指标,交通系统中基于韧性的扰动恢复策略也成为研究重点。本文从城市复合公共交通网络模型构建、韧性评估和恢复策略3个方面进行文献梳理与分析,通过与城市单一公共交通网络(如城市轨道交通网络或公共汽车网络)对比,总结现有研究不足,为复合公共交通网络的恢复策略提供新视角。

1 城市复合公共交通网络模型构建及特征

城市复合公共交通网络以公共交通方式为主导,是公共汽车、地铁、轻轨、有轨电车及快速公共汽车交通系统(Bus Rapid Transit, BRT)等多种交通方式的组合网络。刻画复合网络不仅需要关注各子网络的内部关系,更需要精准描述各子网络间的耦合关系。

1.1 模型构建

复合公共交通网络是典型的复杂网络系统,是相互依存的交通网络^[2],其模型拓扑结构是交通网络分析的基础。复合公共交通网络模型的拓扑结构主要有2类:基于图论的网络模型和基于超级网络的网络模型。

1) 基于图论的网络模型。

S. Julian, C. Von Ferber 等^[3-4]针对基于图论的网络模型构建方法进行研究,常见方法包括L-空间(L-Space)模型^[5]、P-空间(P-Space)模型^[6]、R-空间(R-Space,也称C-Space)模型^[7]和B-空间(B-Space)模型。其中,L-空间模型侧重体现交通网络的实际拓扑结构,能够直接反映网络的物理连接结

构,但无法体现网络的换乘特性;P-空间模型侧重交通网络中节点之间的潜在连接或路径,可以体现网络的换乘特性,但无法体现网络的实际结构,且模型构建复杂、计算量大;R-空间模型和B-空间模型将线路视为网络节点,构建的复合公共交通网络与实际拓扑结构有一定差异,直观性较差。基于图论的网络模型拓扑结构、构建原则和特征(以包含1条环线在内的公共交通网络为例)见表1。

由于L-空间模型构建的网络能较好地保留原网络的拓扑性质,因此现有研究中多用L-空间模型构建城市交通网络,较少使用P-空间模型,极少使用R-空间模型和B-空间模型。罗艺等^[8]分别用L-空间模型和P-空间模型构建公共汽车-地铁复合公共交通网络;彭浩翔^[9]基于L-空间模型、P-空间模型和R-空间模型构建徐州市复合公共交通无向有权网络,并使用Gephi软件对网络进行可视化处理,但其权重设定基于P-空间模型和R-空间模型中对边权的规则,即仅考虑节点之间的空间距离,未综合考虑线路数量、车辆班次、载客能力及换乘便利性等运营因素,从而使网络模型难以真实反映可达性与乘客的实际出行体验。

早期复合公共交通网络模型研究并未区分两层网络之间的差异性,将公共汽车车站和城市轨道交通车站均无差别地抽象为复合公共交通网络中的节点。例如,黄勇等^[10]以100~800 m为换乘步行距离构建重庆市复合公共交通网络模型(见图1a)。另有研究将节点按照耦合方式分类,例如:强添纲等^[11]根据地理位置定义3种两层复合节点和1种三层复合节点,构建哈尔滨市加权无向复合公共交通网络模型;陈烨等^[12]将换乘车站划分为单模式、双模式、单-双模式3种类型,以300 m为两层网络的换乘距离构建厦门市BRT-城市轨道交通的加权有向复合公共交通网络模型(见图1b)。更进一步,有研究在单层网络模型基础上构建换乘耦合网络层,例如:刘志勇等^[13]以500 m为换乘步行距离构建公共交通网络模型的耦合连边;基于L-空间模型,潘恒彦等^[14]考虑车辆发车间隔、单车载客能力及区间车速构建边权,并以800 m为地铁车站服务半径建立步行换乘路径,构建哈尔滨市公共汽车-地铁加权无向复合公共交通网络模型(见图1c)。

随着现代信息技术的发展,GIS技术因

其能够完整表征城市交通网络的地理特征,辅助刻画交通系统真实网络形态,并能体现不同交通方式独立运行特性,而被广泛应用于交通网络建模中。基于完整交通特性(整条道路和同向车道)的GIS数据模型,陆锋等^[15]提出交通网络的非平面数据模型建模方法。在此基础上,王信波等^[16]根据空间关系和步行可达性在基础道路网上实现公共汽车、BRT、地铁、私人汽车等交通方式的衔接,分层构建不同交通方式的网络拓扑,并针对杭州市道路网特点进行改进。基于集成化GIS平台ArcGIS,马帅男^[17]分别构建公共汽车层、城市轨道交通层网络,并设置换乘规则来构建换乘层,通过3层网络的有机结合刻画复合公共交通网络模型。

综上所述,结合L-空间模型、P-空间模型等复合公共交通网络模型构建方法,既有研究趋向于先单独构建分层网络模型,再考虑两层网络之间的耦合关系,呈现从无权无向网络向考虑乘客、行驶速度等交通特性

的有权网络的转变趋势,但目前对网络的方向性研究仍存在一些空缺。此外,GIS技术的应用在模型与实际网络地理位置的结合方面有一定优势,但随着城市交通网络节点和线路的增多,交通网络愈加复杂化,传统的基于图论的网络模型难以适应大范围复合公共交通网络建模需求。

2) 基于超级网络的网络模型。

超级网络主要包括基于超图的超网络和基于图的超网络两种。前者构建的网络中,通过“超边”连接任意数量的节点,反映多个节点间的关系;后者指多个单层网络构成的集合,更能体现多层(如城市轨道交通层、公共汽车层、出租汽车及网约车层)网络之间的关系,因此交通运输领域多采用后者构建网络模型。

A. Nagurney等^[18]将超越物理网络范畴的网络称为超级网络,其由异质网络彼此嵌套、相互交织构成,子网络内部存在信号控制子系统,各层子网络间也保持一定的独立

表1 基于图论的网络模型拓扑结构、构建原则和特征

Tab.1 Topological structures, construction principles, and characteristics of network models based on the graph theory

基于图论的网络模型	拓扑结构	构建原则	特征
L-空间模型		将车站抽象为节点,当且仅当两个相邻车站之间存在线路通过时用边进行连接	反映网络的实际拓扑结构,两点之间最多有一条直接连接的边,着重表现物理连接,但对换乘车站的信息表达不足
P-空间模型		将车站抽象为节点,同一条线路上所有车站均两两相连	反映车站之间的潜在连接,着重表现网络的换乘特性,但无法体现网络实际结构,且当车站间存在多条线路时难以描述
R-空间模型		将线路抽象为节点,当且仅当两条线路之间可以换乘时添加连边	反映线路之间的连接特性,但对换乘车站的信息表达不足
B-空间模型		将线路和车站抽象为两类节点,并通过线路和车站之间的连边表示其从属关系	反映线路和车站之间的关系,网络节点性质复杂,对线路内部、车站内部的关系表达不足

性,并通过虚拟弧相互联系。基于超级网络的网络模型将各种交通方式构成的复合公共交通网络视为不同层级的子网络,通过分层叠加、添加虚拟换乘弧等方法连接各子网络,构建高于各层子网络的超级网络。此类网络充分考虑不同交通网络之间的异质性,能刻画复杂的多重关联关系,因而近年来受到广泛关注。例如:J. Johnson^[19]提出表示不同层级网络的超级网络表述方法;郑力祥等^[20]基于超网络理论构建多方式出行网络模型。在此基础上,刘胜久等^[21]建立超级网络的关联矩阵,并运用Tracy-Singh和矩阵运算分析超级网络的扰动和稳定特性。

综上所述,对比两类网络模型:以L-空间模型为代表的传统基于图论的网络模型构建方法主要关注交通网络的空间布局和拓扑结构,强调节点和线段之间的连接关系;而基于超级网络的网络模型则具有多层、多级(如城市轨道交通层、城市轨道交通线路、城市轨道交通车站三级嵌套结构)、多属性等更复杂的特性,能有效处理网络层之间的

嵌套、换乘及属性多变等关系。

1.2 模型特征

网络是由具备特定功能的基本个体组成的系统,且个体之间存在一定的关系。基于单一公共交通网络的特性,既有研究对复合公共交通网络特性进行分析,主要衡量网络的连通度、聚集系数等性能。

研究表明,复合公共交通网络普遍具有小世界和无标度特性。这种特性虽然提高了网络的日常运营效率,但同时会增加故障在系统中的传播风险,进而增加了系统的脆弱性^[22]。例如:彭浩翔^[9]分析了复合公共交通网络的度与度分布、平均路径长度和网络直径、聚类系数、介数等拓扑指标,证明L-空间模型网络 and P-空间模型网络的无标度特征,以及R-空间模型网络的小世界特性;罗艺等^[8]利用两种方法构建公共汽车-地铁复合公共交通网络,进一步分析了网络效率指标,得到复合公共交通网络具有小世界和无标度特性;王淑良等^[23]通过深度学习对复合公共交通网络的拓扑属性进行识别,确认其具有无标度和小世界特性;Sun R. F.等^[24]对比西安市复合公共交通网络和单一公共交通网络的度、节点强度、平均路径长度和聚类系数,进一步证实复合公共交通网络车站之间的联系更加紧密、网络结构更加均衡;申晨^[25]创新性地提出城市公共交通线网的方向熵概念,用其度量网络空间方向分布情况,并应用于哈尔滨市公共交通网络。此外,有研究还对网络特性之间的关系进行分析,例如潘恒彦等^[14]将城市公共汽车-地铁加权复合网络与无权网络进行对比分析,虽然二者均为无标度网络,但加权复合公共交通网络的全局聚类性更高,其节点的聚类系数与加权复合聚类系数呈较强的正相关性。

综上所述,既有研究针对复合公共交通网络的特性分析大多基于度与度分布、平均路径长度等复杂网络拓扑指标,验证其具有小世界和无标度特性,以及复合公共交通网络的全局聚类性更高、车站之间的联系更加紧密。此外,研究趋势逐渐向考虑实际运营特征的方向发展。

1.3 小结

复合公共交通网络包括公共汽车、城市轨道交通等多层网络,构建其拓扑结构模型是进行网络特性分析、故障恢复等研究的

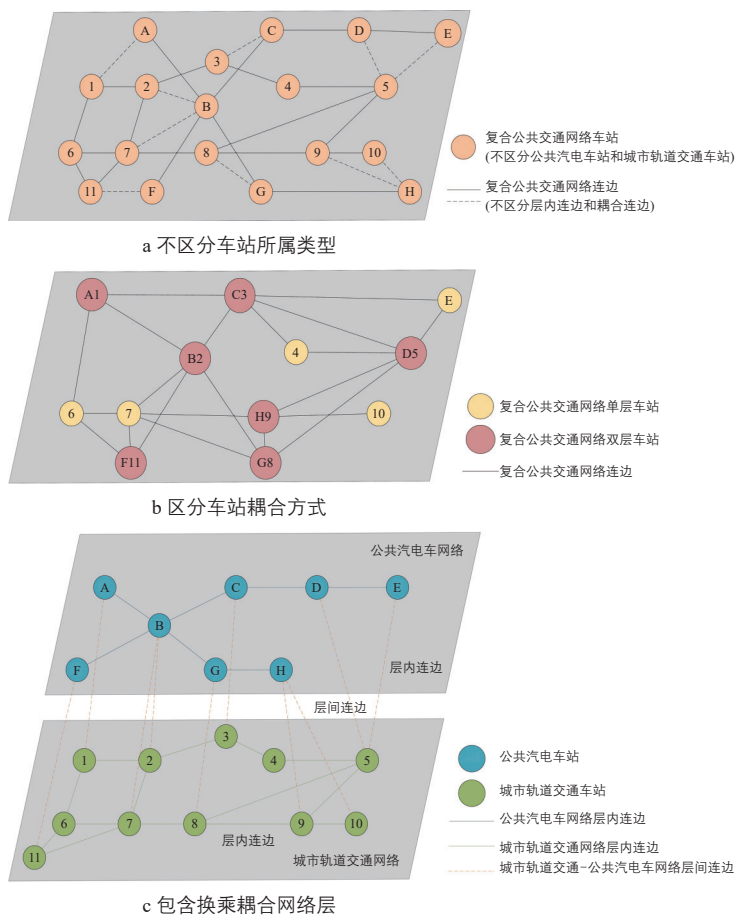


图1 基于图论的复合公共交通网络模型构建方法

Fig.1 Modeling approach for multimodal public transportation networks based on the graph theory

基础。

1) 理论分析层面。基于图论的方法更关注交通网络的空间布局和拓扑结构;基于超级网络的方法则能更好地描述多层、多级、多属性等复杂特性。由于超级网络理论仍处于发展阶段,当前多基于图论理论构建复合公共交通网络,研究趋势从无权无向网络向加权有向网络发展。

2) 技术方法层面。常通过构建换乘层来刻画复合公共交通网络模型,以弥补基于图论的网络模型在表述公共汽车、城市轨道交通等网络层间耦合关系方面的不足。复合公共交通网络模型特征的分析方面,多使用图论的拓扑指标并将其应用于复合公共交通网络,研究趋势向结合实际运营特征的方向发展。尽管如此,这些技术方法对复合网络层间耦合关系的评价仍显不足。

2 城市复合公共交通网络韧性评估

作为一个庞大复杂的系统,复合公共交通网络在运营过程中常面临各种扰动事件,这些事件可能导致网络中断。因此,为确保系统稳定运行,网络需要具备强大的抵抗和恢复能力。基于此,国内外学者提出系统“韧性(resilience)”的概念,并将其应用于交通领域。韧性不仅包括定性描述,还涵盖定量分析系统在各种扰动影响下性能变化的全过程。

2.1 韧性理论及内涵

“韧性”一词源自拉丁文“resillo”,意为“回弹”。其最早应用于力学领域,指材料在没有完全断裂或完全变形的情况下,因受力发生形变并存储恢复势能的能力。1973年,韧性概念被引入生态学领域,用于描述生态系统维持平衡稳定的特征。近年来,韧性理念逐渐在交通工程、城市规划等领域得到应用,成为评估公共交通网络稳定性和恢复能力的重要工具。

在交通领域,韧性的定义经历了一定演变。P. M. Murray-Tuite^[26]于2006年首次提出,交通系统韧性是指“系统在异常条件下的性能、恢复速度和恢复到原始状态所需的外部帮助”,并通过冗余性、多样性、适应性、快速恢复能力等10个维度进行评价;B. Nikola^[27]将铁路运输系统韧性定义为铁路系统在正常条件下提供有效服务,以及抵

抗、吸收、适应和快速从中断或灾难中恢复的能力;Zhang D. M. 等^[28]将城市轨道交通网络韧性定义为节点中断后的网络连通性水平,以及通过修复措施后连通性恢复到可接受水平的能力。英国交通运输部(Department for Transport)于2014年将交通韧性定义为“交通运输网络在极端天气的影响下维持运行并迅速恢复的能力”。

既有研究对韧性的定义仍然存在一定分歧,但均以系统受到影响后的性能变化为主要表述对象。韧性概念常与可靠性、鲁棒性(Robustness)、脆弱性等概念存在部分重合。具体而言,可靠性指网络系统在规定条件、规定时间内完成规定功能的能力,在随机袭击下常采用网络生存性衡量,在蓄意袭击下则采用网络抗毁性衡量;鲁棒性考虑系统在最坏情况下的性能变化;而脆弱性用于表述不同扰动下系统功能降低的程度。韧性则兼具以上概念的核心内容,强调扰动事件发生前后全过程中,系统在遭受扰动、破坏时应具备的准备、响应、恢复和自适应功能^[29-30]。因此,在系统因扰动产生持续变化时,采用韧性度量其变化程度具有一定优越性。

2.2 复合公共交通网络韧性

相较于单一公共交通网络,复合公共交通网络的韧性不仅包括公共汽车和城市轨道交通网络层的韧性,更重要的是网络层之间的韧性^[31]。因此,既有研究主要针对复合公共交通网络的鲁棒性、脆弱性等特性。例如:Lin Z. Y. 等^[32]构建了长春市公共交通加权复合公共交通网络模型,发现其集约化程度和稳定性较差,且复合公共交通网络在随机袭击下鲁棒性较强,在蓄意袭击下脆弱性较强;Sun G. X.^[33]在青岛市复合公共交通网络研究中发现,网络的鲁棒性不随节点容量增加而提高,过高的节点容量会导致系统的脆弱性增加,且轨道交通-公共汽车两种交通方式的比例会影响网络整体的稳定性,即当选择公共汽车出行的乘客多于选择轨道交通出行的乘客时,城市公共交通复合网络的鲁棒性更强。故本文将复合公共交通网络的韧性定义为:在面对自然灾害等各种扰动时,复合公共交通网络维持基本服务水平并迅速恢复正常运行的能力。

作为城市公共交通的主要组成部分,公共汽车和城市轨道交通均有可能发生故

障,进而影响整个公共交通网络。因此,两层网络之间会通过应急调度实现乘客疏散,以减少故障影响。当公共汽电车网络发生故障失效后,主要通过其内部的车辆和线路调度来消减影响,同时部分乘客转移至城市轨道交通网络完成出行^[22];当城市轨道交通网络发生故障失效后,由于其系统本身较为封闭,难以在短时间内通过内部运营调度解决,故乘客除了选择其他城市轨道交通线路外,还可以通过公共汽电车网络的应急调度车辆完成出行^[34]。综上所述,在灾害或事故等扰动事件下,复合公共交通系统的网络性能变化如图2所示。

当系统受到扰动后,复合公共交通网络性能经历从初始稳定状态到新稳定状态的变化过程,该过程体现了系统的韧性。

1) 初始稳定阶段至性能下降阶段。网络性能在稳定状态 $Q(t_0)$ 附近细微波动,此时城市轨道交通网络、公共汽电车网络及换乘网络3层均正常运行,体现了复合公共交通网络的可靠性。

2) 性能下降至响应阶段。由于 t_d 时刻突发事件发生,率先导致单层交通网络发生节点、连边或区域故障失效,并通过复合公共交通网络的耦合关系扩展至整个网络,导致网络性能下降。性能率先下降至最低要求性能 $Q(t_d)$,此时复合公共交通网络仍能维持正常运营状态,该性能储备用于应对突发事件,体现了网络的冗余性,避免系统性能快速损失导致全网失效。随后,网络性能进一步降低至最低性能 $Q(t_a)$,体现了复合公共交通网络的鲁棒性,即网络受到扰动后仍

能保持基础性能的稳定。

3) 响应至应急恢复阶段。响应阶段是交通运营管理部门对扰动事件的初步应对,主要包括确认扰动事件的原因、位置等信息,以及实施人群疏散等基础应急响应,该阶段持续时间一般较短。

4) 应急恢复至完全恢复阶段。该阶段为恢复阶段,包含应急恢复阶段和完全恢复阶段,体现了网络的可恢复性,是公共交通运营部门根据损失情况和现有资源制定高效合理恢复策略的阶段。应急恢复阶段主要包括实施公共汽电车的应急调度和接驳策略,体现了事故发生前制定的应急策略的有效性;故障完全恢复阶段包括执行故障受损部件的恢复策略,使网络性能恢复至最初水平,体现了系统受到扰动事件影响后的恢复能力。

5) 新稳定阶段。在多种恢复和应急策略的协同作用下,复合公共交通网络性能达到新稳定状态,恢复至正常水平并在其附近波动。

2.3 评估指标体系

指标体系用于全面评估网络在面对不可预见的外部或内部扰动时仍能保持稳定运行的能力。针对复合公共交通网络的韧性评估指标体系主要包括网络拓扑指标和乘客出行指标两个方面(见图3)。基于图论的方法,复合公共交通网络的韧性评估指标体系从单一公共交通网络的韧性评估体系演化而来,主要通过衡量网络在随机袭击和蓄意袭击下的表现来评估网络性能。

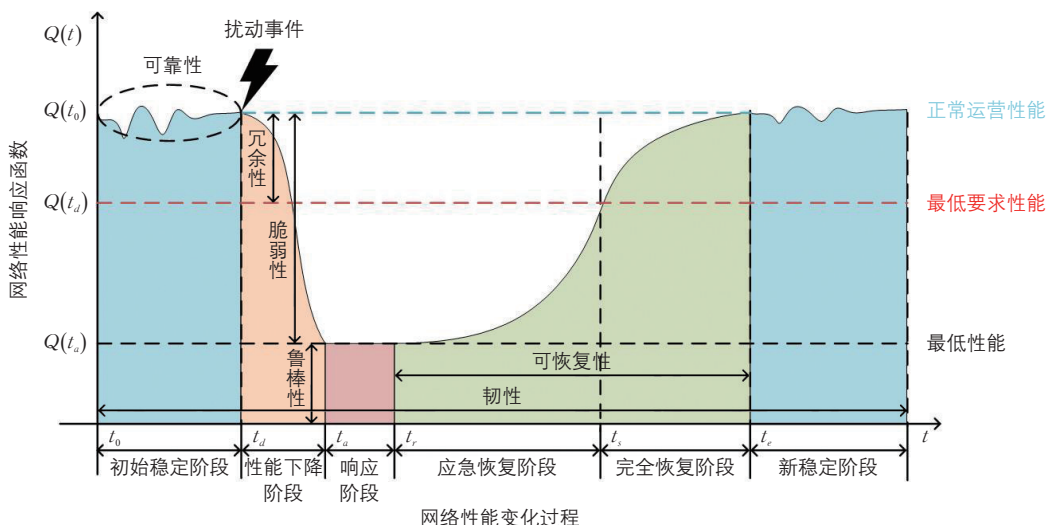


图2 扰动事件下复合公共交通网络性能变化曲线

Fig.2 Performance variation curves of multimodal public transportation networks under disruptive events

2.3.1 网络拓扑指标

网络拓扑指标包括最大连通子图、网络平均效率、平均最短路径长度、节点的度、平均聚类系数等, 这些指标的作用、计算方法和阈值总结见表2。更进一步地, Yang Y. 等^[35]创新性地构建了耦合参数、影响参数和节点容忍度参数, 并利用二元影响模型模拟了耦合模型的反馈过程和级联失效行为。在基于超级网络的网络模型中, 谭伟等^[36]对超级网络的超路径和最短路径进行分析, 揭示了不同交通网络构建方法在计算最短路径上的差异。

此外, 韧性作为评估网络系统受扰动后性能变化程度的重要指标, 其面临的袭击方式主要包括随机袭击(袭击节点或袭击连边)和蓄意袭击(基于节点度、节点介数等降序袭击)两类。彭浩翔^[9]利用随机袭击和蓄意袭击两种方式分析网络脆弱性指标; 申晨^[25]则采用随机袭击及按照节点度中心性、介数中心性等排序的蓄意袭击方式, 对哈尔滨市公共交通网络的鲁棒性进行分析。

网络失效规则在此基础上展开研究。例如, 结合边权, 潘恒彦等^[14]改进节点和连边受袭击后简单移除的弊端, 采用调整边权值的方式衡量网络受袭击的影响, 发现复合公共交通网络对随机袭击的鲁棒性显著高于蓄意袭击。考虑到节点和网络之间的耦合关系, 特别是复合公共交通网络中, 公共汽电车网络和城市轨道交通网络之间的复杂联系, 常用的级联失效模型包括沙堆模型、二值影响模型、负荷-容量模型3类。其中, 负荷-容量模型更符合实际交通网络交通量变化和节点失效规则, 因此在交通领域常被采用。例如: 考虑网络间的相互关系, 马学祥等^[37]基于改进的负荷-容量模型构建公共

汽电车-地铁双层网络模型, 并采用控制变量法对网络级联失效抗毁性进行敏感性分析; 基于车站级联故障比例和时步级联故障比例, 考虑相邻车站对初始车站负荷、边缘过境能力及耦合能力定义的影响, Zhang L. 等^[34]改进负荷-容量模型, 分析济南市公共汽电车故障车站对轨道交通车站的耦合效应; 以网络累计失效比例为韧性测量指标, Huang A. L. 等^[38]对北京市复合公共交通网络分析后发现, 动态交通量再分配能显著提高网络应对随机故障的韧性。

2.3.2 乘客出行指标

乘客是复合公共交通网络中的服务主体, 其特性对网络韧性评估具有显著影响, 不可忽视。近年来, 在关注网络拓扑特性的基础上, 既有研究逐渐加强了对乘客出行特征的分析, 其量化指标主要包括乘客出行时间、交通量、延误等。例如: 结合2015年1月7—13日北京市公共汽电车系统IC卡数据及地铁自动售检票系统(Automatic Fare Collection System, AFC)提取的个体出行起终点数据, 周雨阳等^[39]综合考虑车辆的满载率及行程时间衡量公共交通网络的相对可靠性; 基于2018年1月某工作日北京市AFC数据, 胡馨月等^[40]取每分钟地铁车站进站和出站客流量的最大值, 将地铁网络层的进出站客流量、邻接区间超载量作为地铁车站重要度的衡量指标; 马书红等^[41]采用考虑节点和网络重要性的边权来计算节点强度变化量, 以此作为网络功能韧性的衡量指标, 对关中平原城市群多方式交通网络进行分析; M. D' Lima 等^[42]分析了2012年8月伦敦城市轨道交通系统的乘客进站数据, 得到轨道交通客流特征, 并以突发事件发生后客流量的恢复速度作为韧性指标, 但其存在过度依赖

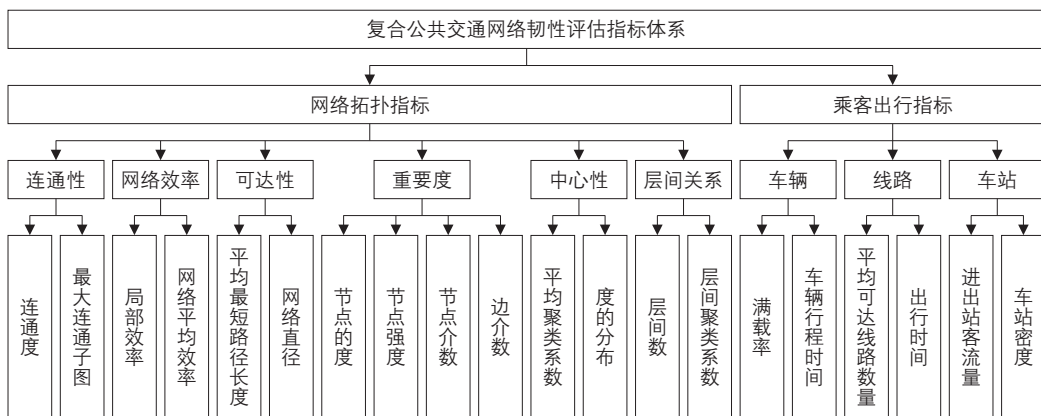


图3 复合公共交通网络韧性评估指标体系

Fig.3 Resilience assessment indicator system for multimodal public transportation networks

仿真技术的问题。在此基础上,考虑客流流动的最终结果,Zhang J. H. 等^[43]引入客流剩余流量,利用节点强度评估网络中节点的重要性,并应用于上海市地铁网络;陈锦渠等^[44]将单位时间内通过城市轨道交通网络出行的加权乘客人数作为指标,采用随机用户均衡客流分配模型对客流进行分配,对突发事件影响下的乘客状态变化进行动态分析,应用于成都地铁网络,该研究不仅考虑乘客流动过程,还分析了流动结果。

此外,复合公共交通网络的显著特性是网络层间的相互衔接,因此有研究结合两层网络间乘客的换乘过程分析韧性。例如:S. Krygsman 等^[45]研究进出站时间及其占总换乘时间的比例,将其作为公共交通可用性和使用情况的指标,并指出进出站时间会影响乘客对复合公共交通网络的选择;胡馨月等^[40]用地铁车站周边公共汽车站的密

度、在公共汽电车网络中的平均可达线路数量、换乘客流量与平均换乘时间的乘积(换乘可达性)3个指标作为地铁-公共汽电车的换乘协同指标,定量度量复合公共交通网络的耦合相关性,通过对北京市早高峰时段客流数据进行分析,发现车站识别结果受短期数据影响较大;周雨阳等^[46]将公共汽电车IC卡数据、地铁自动乘客计数(Automated Passenger Counter, APC)数据与北京南站应用程序编程接口(Application Programming Interface, API)出行数据进行对比分析,验证了API数据具有较高可信度,并进一步将出行时间(包括站内步行时间、候车时间、在车时间、换乘时间)及乘客平均换乘次数作为交通网络可达性的客流衡量指标。复合公共交通网络模型乘客出行指标的作用、计算方法、阈值总结见表3。

然而,在城市轨道交通与公共汽电车协

表2 复合公共交通网络模型网络拓扑指标的作用、计算方法和阈值

Tab.2 Functions, calculation methods, and thresholds of network topology indicators in multimodal public transportation network models				
指标		作用	计算方法	阈值
连通性	连通度	评估网络稳定性和可靠性, 指导网络设计优化	网络部分节点失效时, 剩余节点形成的连边数与网络完好时连边数的比值	0~1
	最大连通子图	识别复杂网络的最大连通部分	指一个不被另外任何一个连通子图所包含的子图, 用最大连通子图中的节点数与网络中节点总数的比值表示	0~1
网络效率	局部效率	衡量网络中节点对小规模故障的抵抗力	指当节点被移除后某节点与相邻节点所形成子图的网络效率, 用某节点邻居子图全局效率的平均值表示	0~1
	网络平均效率	衡量网络整体对故障的抵抗力	指在网络中信息传递的效率, 用网络中所有节点对效率(多为节点间最短路径的倒数 ^[57])的均值表示	0~1
可达性	平均最短路径长度	反映图中任意两点间相互到达的平均难易程度, 可评估整个图的连通性或紧密程度	指所有节点对之间最短路径长度的平均值, 用网络中所有节点对之间距离之和与节点对数量的比值表示	≥ 0
	网络直径	衡量网络规模大小, 表示网络中信息传递的最大延迟	指网络最短路径的最大值, 用网络中所有节点对距离的最大值表示	≥ 0
重要度	节点的度	衡量节点在无权网络中的重要性	指与节点相邻并直接相连的边数, 在有向网络中节点的度包括出度和入度	≥ 0
	节点强度	衡量节点在加权网络中的重要性	与节点相连的所有边的边权之和	≥ 0
	节点介数	反映节点在整个网络中的作用和影响力	网络中所有最短路径中经过该节点的路径数量与最短路径总数的比值	0~1
	边介数	反映边在整个网络中的作用和影响力	网络中所有最短路径中经过该边的路径数量与最短路径总数的比值	0~1
中心性	平均聚类系数	衡量网络中节点与其邻居之间联系的紧密程度	所有节点邻居之间实际实现的连接与所有可能连接的数量比值的平均值	0~1
	度的分布	反映网络中节点度的总体分布情况	网络中所有节点度的概率分布	
层间关系	层间度	衡量节点在多层网络中连接不同网络层的能力	节点所连接的其他层的边的数量	≥ 0
	层间聚类系数	衡量节点在不同网络层中邻居间联系的紧密程度	不同层中该节点邻居的连边数量与其邻居间可能存在的最大连边数的比值	0~1

同运营的过程中，城市轨道交通运营时刻表及接运公共汽电车的发车间隔均对乘客的出行时间产生影响，进而影响复合公共交通网络中的客流分布，但目前少有研究考虑通过协调两层网络运营时刻表来度量韧性。此外，针对多指标的综合评估，主要采用综合指标^[47]和加权指标^[48]两种方法。前者通过分析指标间的物理关系进行组合；后者则根据重要度等分配权重，通常还需结合熵权法^[30]、倒扣逆变换法、变异系数法、Critic法^[41]等对权重的正负相关性等特性进行标准化处理，以消除不同指标单位和量级对加权结果的影响。

综上所述，对复合公共交通网络韧性评估指标体系的研究主要通过随机袭击和蓄意袭击模拟实际失效情景，同时设定网络失效规则和客流分配规则，进而分析网络的动态特性。当前韧性评估的研究重点一方面在于改进级联失效规则，另一方面则关注韧性指标与交通特性的结合，例如改进网络最短路径、优化乘客分配方法等。

2.4 小结

复合公共交通网络的韧性可描述系统受扰动全过程的变化，韧性分析有助于描述网络的持续变化，对保障社会稳定和公共安全至关重要。

1) 理论分析层面。自韧性概念引入交通领域以来，其内涵涵盖交通网络抵抗及吸收和适应扰动事件影响，并通过响应措施恢复到初始性能水平的能力，侧重描述扰动事件发生全过程中的网络功能变化。既有研究多结合韧性三角形理论，先构建网络性能函

数，再用网络性能变化量化系统韧性。

2) 技术方法层面。复合公共交通网络韧性的评估方法多为动态评估，即动态分析受袭击前后网络性能的变化。目前，指标选取有考虑乘客换乘和分流等交通特性的趋势；复合公共交通网络韧性评估指标体系主要包括网络拓扑指标和乘客出行指标两方面。然而，当前研究较少考虑对复合公共交通网络层间耦合指标的描述；同时，虽然乘客出行指标的构建有结合网络最短路径、乘客分配方法等交通特性的趋势，但对运营时刻表影响客流的考虑仍显不足。

3 城市复合公共交通网络恢复策略

在复杂多变的城市交通环境中，复合公共交通网络面临各种潜在的风险和挑战，例如自然灾害、设备故障、人为破坏等，这些因素可能严重影响公共交通网络的正常运行，因此研究不同情景下的恢复策略具有重要意义。

复合公共交通网络的恢复策略主要包括故障的准确检测与通报、快速定位故障点并进行修复、调整运营计划等响应决策和恢复决策，其最终目的均为恢复网络的正常运行并进一步提高网络韧性。

3.1 响应决策

城市轨道交通系统和公共汽电车系统之间存在相互依赖关系，当一种交通方式发生故障后，交通需求可从故障交通方式转移到其他交通方式^[2]。

为缓解扰动事件对复合公共交通网络系

表3 复合公共交通网络模型乘客出行指标的作用、计算方法和阈值

Tab.3 Functions, calculation methods, and thresholds of passenger travel indicators in multimodal public transportation network models

指标		作用	计算方法	阈值
车辆	满载率	衡量车辆利用程度的重要指标，也是合理安排运力的重要依据之一	旅客周转量与客位(定员)公里的比值	0~1
	车辆行程时间	评价车辆通过区间的通畅程度	车辆行驶距离与行驶速度的比值	≥0
线路	平均可达线路数量	反映公共汽电车网络对地铁网络的延伸补充作用	地铁站周边公共汽电车站公共汽电车网络中的平均可达线路数量	≥0
	出行时间	反映地铁系统运行状况和乘客满意度的重要指标	站内步行时间、候车时间、在车时间以及换乘时间的和	≥0
车站	进出站客流量	表现和评价运营效益的直观指标，可评价线路负荷强度	取某车站进站和出站客流量的最大值	≥0
	车站密度	地铁站周边换乘公共汽电车站的分布疏密程度	某车站可达公共汽电车站数量与可达地铁站数量的比值	≥0

统的影响,响应决策从单层网络出发:一方面,优化应急公共汽车的调度接驳策略,例如刘璐菲等^[49]考虑滞留乘客的动态需求,通过实时响应机制提高应急接驳公共汽车的服务效率;另一方面,调整城市轨道交通网络的运营策略,例如陈玺阳等^[50]建立城市地铁线路韧性评估模型,并提出多区间单轨双向运行应急策略,L. P. Veelenur等^[51]考虑乘客出行选择,提出车辆重新调度和时刻表调整方法。

更进一步,有研究在复合公共交通网络背景下提出公共汽车接驳策略,即综合考虑车辆资源等多重约束,以系统网络韧性最大化为目标构建接驳线路模型,充分发挥公共汽车接驳灵活性和运输能力强的特点。然而,现实中由于公共汽车运营公司和城市轨道交通运营公司相互独立导致事故信息无法及时共享,进而引发公共汽车接驳预案存在响应时间长、组织协调难度大、运力难以匹配需求等两层网络衔接不畅的问题,加之公共汽车运行易受道路和天气等外部因素的影响,导致调度接驳策略往往难以达到预期的应急效果。

综上所述,复合公共交通网络响应决策研究主要集中于公共汽车的接驳和城市轨道交通的应急调度两方面,但大多数局限于单层网络,未充分考虑两层网络间的耦合关系;且公共汽车接驳方式在实际应用中因运行组织等问题难以发挥其优势。

3.2 恢复决策

在扰动事件发生初期,除对公共汽车和城市轨道交通进行应急调度外,还需及时恢复故障区间,多个区间同时发生故障时受损区间的恢复时序尤为重要。因此,有必要基于复合公共交通网络,总结其恢复时序的研究现状,尤其在恢复资源受限的情况下研究不同恢复方案的时序,确保最大限度恢复网络运营,消减扰动事件的负面影响,保障城市居民正常出行。

交通网络恢复时序的研究最早始于公路网络,都雪静等^[52]考虑事故后道路破坏、应急物资需求量不确定及各事故点需求紧迫度不同,求解突发事件下公路应急物资调度方法。相关研究方法也被应用于其他城市公共交通网络。在公共汽车领域,刘玉洁等^[53]考虑公共汽车网络在吸收和修复阶段的节点失效负载分配情况,构建两种网络韧性修

复方案,发现边吸收边修复相较于先吸收后修复的方案具有更优的网络韧性提升效果。在城市轨道交通领域,主要采用随机恢复、偏好恢复、目标恢复3种恢复策略。研究表明,随机恢复效果较粗糙,偏好恢复对关键车站选取有依赖性且客流重要性不可忽视,目标恢复效果具有动态特性。此外,有学者提出基于客流变化的仿真恢复策略,其虽然具有数据依赖性强的缺点,但在资源受限条件下能表现出更优的恢复效果。张洁斐等^[54]枚举3个节点之间的不同恢复时序方案,选取网络韧性指数最小的方案作为恢复策略,发现优先修复节点度较大的车站,进而修复其邻接车站并增加同步维修队伍,能最小化网络性能的损失,加快整体性能恢复;在此基础上,张雯婕等^[55]考虑中断场景下列车运行交路调整过程,以网络韧性损失最小和恢复总时长最小为目标,构建城市轨道交通故障恢复模型,采用多目标遗传算法(Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)求解。

早期复合公共交通网络系统恢复策略多采用关键车站优先恢复方式。例如,Zhang H.等^[56]分析呼和浩特市加权复合公共交通网络,发现关键节点和高权重连边在网络稳定性中发挥关键作用。因此,有研究通过考虑多种影响因素识别关键车站。以度、介数和接近中心性等节点重要度评估指标为基础,基于熵权法与最理想解距(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)法,王淑良等^[23]确定复合公共交通网络中关键节点的恢复时序;从公共交通网络视角出发,Yin D. Z.等^[22]考虑高负载节点失效引发连锁反应导致其他节点超载的级联失效过程,研究成都市城市轨道交通关键车站,发现其主要分布在高流量换乘车站和主干线,且适当增加冗余连接可抑制级联失效传播。

在复合公共交通网络中,考虑韧性的应急恢复策略研究相对较少,目前研究主要包括以网络韧性最大化为目标或以网络韧性为约束条件两类:前者如马壮林等^[57]以综合网络韧性最大化为目标,考虑大客流、修复资源限制等,求解最优恢复时序;后者如张洁斐^[30]从网络拓扑和运行状态两方面选取韧性指标,考虑级联失效过程,以修复成本和韧性为约束,采用NSGA-II算法求解最优的修复时序方案。但二者仅从单层网络最短路径

等角度出发考虑网络复合特性，建立复合公共交通网络的最短路径求解策略，而未充分考虑节点、边在耦合关系中的复合性。而在其他多层相依系统的研究中，系统之间的相互依赖性已被纳入考虑范围，例如 Ouyang M. 等^[58]采用随机恢复、独立恢复、优先恢复等多种方式，发现将总韧性量化为电力和天然气系统韧性的均匀加权求和的恢复方式产生的总韧性最大。

综上所述，交通网络恢复决策的相关研究中，恢复时序逐渐趋向于考虑客流、运行交路等因素的影响，重点关注级联失效影响下的网络韧性变化；针对考虑韧性的复合公共交通网络恢复时序研究较少，目前多借鉴多目标交通网络恢复时序优化模型，采用改进遗传算法求解，对多层网络间耦合关系的考虑仍显不足。

3.3 小结

复合公共交通网络发生扰动后，分析网络韧性变化并研究网络恢复策略有助于快速恢复网络正常运营，提高其在自然灾害、设备故障、人为失误等多种扰动场景下的综合能力。

1) 理论分析层面。复合公共交通网络的恢复策略主要包括网络响应决策和网络恢复决策：前者以公共汽电车应急接驳调度为主，辅以城市轨道交通运营时刻表调整；后者则关注失效区间的恢复时序。但在现实中，由于公共汽电车和城市轨道交通运营组织相互独立，以公共汽电车接驳为主的网络响应决策往往难以发挥预期效果。因此，既有研究多关注复合公共交通网络的恢复时序决策。

2) 技术方法层面。早期研究重点关注优先恢复网络中的关键车站，当前研究则多考虑资源限制、城市轨道交通运行交路等因素，构建以复合网络韧性最大化为目标的模型，并在有限恢复时间内采用算法求解恢复时序决策。然而，当前研究多从单层网络出发，主要考虑乘客应急接驳，对复合公共交通网络中两层网络间耦合关系的研究不足。

4 结束语

随着城市交通系统的网络化发展，提升复合公共交通网络应对扰动事件的韧性，既是国家要求，也关乎人民的出行安全。近年

来，该领域受到国内外学者广泛关注，在复合公共交通网络模型构建、韧性评估和恢复策略等方面取得了一定成果，但目前仍存在不足。本文通过对既有文献在复合公共交通网络模型构建、韧性评估和恢复策略3方面的研究进行分析，提出未来研究重点。

1) 构建更符合现实复合公共交通网络特征的拓扑结构模型。基于实际网络构建复合公共交通拓扑网络模型是研究的基础，但传统基于图论的网络模型难以考虑不同交通方式之间的耦合关系。因此，后续研究不仅需考虑公共汽电车和城市轨道交通单层网络内部线路的差异性，更需考虑两者间的差异与衔接关系。可在图论基础上添加虚拟换乘边，或采用超网络理论刻画网络层间关系，进而建立网络模型。此外，网络模型建立过程中可引入GIS等地理信息技术，构建精度更高的交通网络模型。

2) 综合网络拓扑、乘客出行和层间耦合指标构建韧性评估指标。目前，描述网络性能以量化韧性的研究主要从网络拓扑和乘客出行两方面展开，且有结合交通特性的趋势，但对运营时刻表的影响考虑不足。此外，复合公共交通网络中各子系统之间的相互影响不可忽略。因此，后续研究可关注网络拓扑和乘客出行两方面与层间耦合关系的有机结合，并进一步考虑运营时刻表的影响。

3) 考虑客流动态分配的级联失效规则、运行交路等因素制定复合公共交通网络的最优恢复策略。目前，以韧性为目标的恢复策略缺少对复合公共交通网络层间关系的分析，且针对级联失效的假设存在对客流变化不敏感等问题，导致研究结果与实际情况存在差距。此外，当前研究多考虑修复资源限制，但对列车运营的考虑较少。因此，后续研究中可关注级联失效规则与实际交通场景的对应关系，结合运行交路、修复资源等限制条件，构建更贴合实际的恢复模型。

参考文献：

References:

- [1] 张华, 雷凌云, 刘若云, 等. 中国城市交通发展现状与面向2035年展望[J]. 城市交通, 2024, 22(3): 36-42.
ZHANG H, LEI L Y, LIU R Y, et al. Urban transportation development in China: current state and 2035 prospect[J]. Urban transport of China, 2024, 22(3): 36-42.

- [2] ZHOU Y M, WANG J W, YANG H. Resilience of transportation systems: concepts and comprehensive review[J]. IEEE transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(12): 4262-4276.
- [3] JULIAN S, JANUSZ A H. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland[J]. Physical review E, 2005, 72(4): 046127.
- [4] 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.
- [5] 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(7): 250-258.
- YANG J F, ZHU D P, ZHAO R L. Analysis on characteristics of urban rail transit network and robustness of cascading failure[J]. Computer engineering and applications, 2022, 58(7): 250-258.
- [6] 王宇环, 靳诚, 杜家祺. 基于 Space-P 复杂网络的南京市轨道交通换乘可达性研究[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(1): 87-92.
- WANG Y H, JIN C, DU J Z. Research on accessibility of Nanjing metro based on Space-P complex network[J]. Geography and geo-information science, 2020, 36(1): 87-92.
- [7] 杨吉凯, 李宗平. 基于客流加权的城市轨道交通网络抗毁性能分析[J]. 科技与创新, 2017(6): 1-4.
- YANG J K, LI Z P. Destruction resistance analysis of urban rail transit network based on passenger flow weighting[J]. Science and technology & innovation, 2017(6): 1-4.
- [8] 罗艺, 钱大琳. 公交-地铁复合网络构建及网络特性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(5): 39-44.
- LUO Y, QIAN D L. Construction of subway and bus transport networks and analysis of the network topology characteristics[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2015, 15(5): 39-44.
- [9] 彭浩翔. 徐州市公共交通网络特性分析与优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- PENG H X. Study on analysis and optimization of the public transportation network in Xuzhou[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [10] 黄勇, 冯高乾, 葛国钦. 重庆市城市轨道交通与公共汽车换乘距离适宜性研究[J]. 城市交通, 2023, 21(3): 46-54.
- HUANG Y, FENG G Q, GE G Q. Suitability of transfer distance between urban rail transit stations and bus stops in Chongqing[J]. Urban transport of China, 2023, 21(3): 46-54.
- [11] 强添纲, 赵明明, 裴玉龙. 城市多模式交通网络的复杂网络特性与鲁棒性研究[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(1): 65-71.
- QIANG T G, ZHAO M M, PEI Y L. An analysis of characteristics of complex network and robustness in Harbin multi-mode traffic network[J]. Journal of transport information and safety, 2019, 37(1): 65-71.
- [12] 陈烨, 高悦尔, 沈晶晶. 基于复杂网络的快速公交-轨道交通站点分级研究[J]. 热带地理, 2023, 43(7): 1234-1246.
- CHEN Y, GAO Y E, SHEN J J. Classification of bus rapid transit-rail transit stations using complex network analysis[J]. Tropical geography, 2023, 43(7): 1234-1246.
- [13] 刘志勇, 李文帅, 李思奇, 等. 基于层间关联性的复合公共交通网络布局优化策略研究[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(3): 83-91.
- LIU Z Y, LI W S, LI S Q, et al. Composite public transport network layout optimization strategy based on interlayer correlation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(3): 83-91.
- [14] 潘恒彦, 张文会, 胡宝雨, 等. 城市公交-地铁加权复合网络构建及鲁棒性分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2582-2591.
- PAN H Y, ZHANG W H, HU B Y, et al. Construction and robustness analysis of urban weighted subway-bus composite network[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2022, 52(11): 2582-2591.
- [15] 陆锋, 周成虎, 万庆. 基于特征的城市交通网络非平面数据模型[J]. 测绘学报, 2000(4): 334-341.
- LU F, ZHOU C H, WAN Q. A Feature-based non-planar data model for urban traffic networks[J]. Acta geodaetica et cartographica sinica, 2000(4): 334-341.
- [16] 王信波, 俞立, 张贵军. 聚类算法分析及

- 在 GIS 中心选址中的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 256-260.
- WANG X B, YU L, ZHANG G J. Analysis of clustering algorithm and its simulation in GIS location[J]. Computer simulation, 2009, 26(9): 256-260.
- [17] 马帅男. 基于 GIS 的公交与轨道交通多层级网络性能分析与优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- MA S N. GIS-based multi-level network performance analysis and optimization of bus and rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [18] NAGURNEY A, DONG J. Super networks: decision-making for the information age[M]. Elgar: Edward Publishing, 2002.
- [19] JOHNSON J. Hypernetworks in the science of complex systems[M]. London: Imperial College Press, 2013.
- [20] 郑力祥, 四兵锋. 基于超网络的多模式交通的随机网络加载问题[J]. 山东科学, 2013, 26(5): 78-83.
- ZHENG L X, SI B F. Hyper-graph based stochastic multimodal traffic network assignment problem[J]. Shandong science, 2013, 26(5): 78-83.
- [21] 刘胜久, 李天瑞, 洪西进, 等. 基于矩阵运算的超网络构建方法研究及特性分析[J]. 智能系统学报, 2018, 13(3): 359-365.
- LIU S J, LI T R, HONG X J, et al. Super network building based on matrix operation and property analysis[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2018, 13(3): 359-365.
- [22] YIN D Z, HUANG W C, SHUAI B, et al. Structural characteristics analysis and cascading failure impact analysis of urban rail transit network: from the perspective of multi-layer network[J]. Reliability engineering & system safety, 2022, 218: 108161.
- [23] 王淑良, 陈辰, 张建华, 等. 基于复杂网络的关联公共交通系统韧性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2022, 19(4): 47-54.
- WANG S L, CHEN C, ZHANG J H, et al. Resilience analysis of public interdependent transport system based on complex network[J]. Complex systems and complexity science, 2022, 19(4): 47-54.
- [24] SUN R F, XIE F J, HUANG S R, et al. Construction and characteristics analysis of the Xi'an public transport network considering single-mode and multi-mode transferring[J]. Sustainability, 2024, 16: 3846.
- [25] 申晨. 城市公共交通网络空间拓扑结构特性及鲁棒性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- SHEN C. Research on topological structure characteristics and robustness of urban public transport network space[D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2023.
- [26] MURRAY-TUITTE P M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions[C]//PERRONE L F, WIELAND F P, LIU J, et al. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey: IEEE, 2006: 1398-1405.
- [27] NIKOLA B. Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda[J]. Transport reviews, 2020, 40(4): 457-478.
- [28] 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.
- [29] HU J H, YANG M S, ZHEN Y Z. A review of resilience assessment and recovery strategies of urban rail transit networks[J]. Sustainability, 2024, 16(15): 6390.
- [30] 张洁斐. 多模式公共交通网络韧性评估与提升方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- ZHANG J F. The methods of resilience evaluation and promotion for multi-modal public transit networks[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [31] CHEN H R, ZHOU R Y, CHEN H, et al. Static and dynamic resilience assessment for sustainable urban transportation systems: a case study of Xi'an, China[J]. Journal of cleaner production, 2022, 368: 133237.
- [32] LIN Z Y, ZHAO S Z, HOU B W, et al. Complexity and robustness analysis of public transport composite network[C]//ZENG Q. Proceedings volume 12081, sixth international conference on electromechanical control technology and transportation (ICECTT 2021). New York: Curran Associates, 2022: 1208122.
- [33] SUN G X. Robustness analysis of an urban public traffic network based on a multi-subnet composite complex network model[J].

- Entropy, 2023, 25(10): 1377.
- [34] ZHANG L, CHEN T T, LIU Z S, et al. Analysis of multi-modal public transportation system performance under metro disruptions: a dynamic resilience assessment framework [J]. Transportation research part A: policy and practice, 2024, 183: 104077.
- [35] YANG Y, HUANG A L, GUAN W. Statistic properties and cascading failures in a coupled transit network consisting of bus and subway systems[J]. International journal of modern physics B, 2014, 28(30): 1450212.
- [36] 谭伟, 桂兴凯, 王钰文, 等. 大规模多模式交通网络构建方法对比分析[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(4): 45-55.
- TAN W, GUI X K, WANG Y W, et al. Comparative analysis of construction methods for large-scale multimodal transportation networks[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(4): 45-55.
- [37] 马学祥, 韩梦薇, 周光鑫, 等. 基于双层网络模型的城市公共交通系统抗毁性研究[J]. 山东科学, 2024, 37(5): 79-88.
- MA X X, HAN M W, ZHOU G X, et al. Research on the invulnerability of urban public transport systems based on a double-layer network model[J]. Shandong science, 2024, 37(5): 79-88.
- [38] HUANG A L, ZHANG H M, GUAN W, et al. Cascading failures in weighted complex networks of transit systems based on coupled map lattices[J]. Mathematical problems in engineering, 2015, 2015: 1-16.
- [39] 周雨阳, 姚琳, 赵晋, 等. 基于IC卡数据的多模式公交相对可靠性评价[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(8): 1227-1233.
- ZHOU Y Y, YAO L, ZHAO J, et al. Evaluation on relative reliability of multi-mode public transport based on IC card[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(8): 1227-1233.
- [40] 胡馨月, 彭其渊, 陈锦渠, 等. 考虑公交换乘的地铁常态化限流站点识别方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(6): 169-180.
- HU X Y, PENG Q Y, CHEN J Q, et al. Identification method of metro stations with regularized passenger flow control considering bus transfers[J]. Railway transport and economy, 2024, 46(6): 169-180.
- [41] 马书红, 杨磊, 陈西芳. 风险扩散下城市群多模式交通网络的韧性演化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 42-51.
- MA S H, YANG L, CHEN X F. Resilience evolution of multi-mode transportation network in urban agglomeration based on risk diffusion[J]. Journal of South China University of Technology (natural science edition), 2023, 51(6): 42-51.
- [42] D' LIMA M, MEDDA F. A new measure of resilience: an application to the London underground[J]. Transportation research part A, 2015, 81: 35-46.
- [43] ZHANG J H, WANG Z Q, WANG S L, et al. Vulnerability assessments of urban rail transit networks based on redundant recovery[J]. Sustainability, 2020, 12(14):1-13.
- [44] 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 J Q, ZUO T, ZHU M, et al. Repair strategies for a damaged urban rail transit network[J]. Journal of safety and environment, 2022, 22(1): 316-323.
- [45] KRYGSMAN S, DIJST M, ARENTZE T. Multimodal public transport: an analysis of travel time elements and the interconnectivity ratio[J]. Transport policy, 2004, 11(3): 265-275.
- [46] 周雨阳, 李芮智, 潘利肖, 等. 北京南站公共交通可达性计算与评价[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(12): 1365-1376.
- ZHOU Y Y, LI R Z, PAN L X, et al. Public transit accessibility calculation and evaluation of the Beijing south railway station[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(12): 1365-1376.
- [47] BHAVATHRATHAN B K, PATIL G R. Quantifying resilience using a unique critical cost on road networks subject to recurring capacity disruptions[J]. Transportmetrica A: transport science, 2015, 11(9): 836-855.
- [48] ZHU C L, WU J P, LIU M Y, et al. Cyber-physical resilience modelling and assessment of urban roadway system interrupted by rainfall[J]. Reliability engineering and system safety, 2020, 204: 107095.
- [49] 刘璐菲, 周慧娟, 张尊栋. 考虑乘客动态需求的应急接驳公交调度优化[J]. 交通工

- 程, 2024, 24(5): 106–113.
- LIU L F, ZHOU H J, ZHANG Z D. Optimization of emergency bus dispatching scheme based on passenger dynamic demand[J]. Journal of transportation engineering, 2024, 24(5): 106–113.
- [50] 陈玺阳, 刘晨辉, 刘令, 等. 基于韧性理论的地铁线路局部中断事件应急策略[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(3): 82–89.
- CHEN X Y, LIU C H, LIU L, et al. Emergency response strategy for localized disruption events of subway lines based on toughness theory[J]. Journal of Zhengzhou University (engineering science), 2025, 46(3): 82–89
- [51] VEELENTURF L P, KIDD M P, CACCHIANI V, et al. A railway timetable rescheduling approach for handling large-scale disruptions[J]. Transportation science, 2015, 50(3): 841–862.
- [52] 都雪静, 王爱辉, 孙菲菲. 突发事件下公路应急物资调度优化[J]. 交通信息与安全, 2021, 39(4): 52–59.
- DU X J, WANG A H, SUN F F. The optimized scheduling of emergency supplies in highways under emergencies[J]. Journal of transport information and safety, 2021, 39(4): 52–59.
- [53] 刘玉洁, 吕文红, 高歌, 等. 城市公交网络系统韧性修复方案设计[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2023, 20(1): 57–65.
- LIU Y J, LYU W H, Gao G, et al. Design of resilience repair program for urban transit network systems[J]. Complex systems and complexity science, 2023, 20(1): 57–65.
- [54] 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.
- ZHANG J F, REN G, MA J F, et al. Decision-making method of repair sequence for metro network based on resilience evaluation [J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2020, 20(4): 14–20.
- [55] 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.
- ZHANG W J, HU J H, WEN C W, et al. Research on urban rail failure recovery considering network resilience[J]. China safety science journal, 2023, 33(4): 179–186.
- [56] ZHANG H, LU L. Modeling and analysis of public transport network in Hohhot based on complex network[J]. Sustainability, 2024, 16(20): 8849.
- [57] 马壮林, 程会媛, 邵逸恒, 等. 大客流干扰下多层公交-地铁网络的韧性评估[J]. 中国公路学报, 2024, 37(6): 267–278.
- MA Z L, CHENG H Y, SHAO Y H, et al. Resilience assessment of multilayer bus-metro network under large passenger flow interference[J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(6): 267–278.
- [58] OUYANG M, WANG Z H. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: With a focus on joint restoration modeling and analysis[J]. Reliability engineering & system safety, 2015, 141: 74–82.

(上接第24页)

- [92] ZHENG Y, ZHANG X N, LIANG Z. Multimodal subsidy design for network capacity flexibility optimization[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2020, 140: 16–35.
- [93] SHANG W L, CHEN Y Y, LI X G, et al. Resilience analysis of urban road networks based on adaptive signal controls: day-to-day traffic dynamics with deep reinforcement learning[J]. Complexity, 2020, 2020: 8841317.
- [94] CHO J K, GORDON P, MOORE II J E, et al. TransNIEMO: economic impact analysis using a model of consistent inter-regional economic and network equilibria[J]. Transportation planning and technology, 2015, 38(4): 483–502.
- [95] JENELIUS E, CATS O. The value of new public transport links for network robustness and redundancy[J]. Transportmetrica B, 2015, 11(9): 819–835.