

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220510001

基于网络效率的城市轨道交通网络震后性能评估*

范世杰, 游丹, 侯本伟, 许成顺

(北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 对于以地铁为主要组成部分的城市轨道交通系统,地震作用造成的车站、隧道等结构的损伤和破坏,会严重影响系统的交通运行功能。目前针对扰动事故场景下轨道交通网络性能的研究,主要集中于随机失效和蓄意攻击场景,缺乏地震场景下的相关研究。本文采用客流加权的网络效率指标,研究了不同地震作用下轨道交通网络的抗震性能。利用图论建模方法构建网络拓扑模型,基于车站、区间隧道等主体结构的地震易损性模型计算结构失效概率,采用 Monte Carlo 模拟方法抽样网络单元的震后状态,利用三类网络效率指标(拓扑网络效率、站点流量加权网络效率和网络服务效率)评价网络的震后性能。以北京市轨道交通网络为例,比较了不同地震作用场景下的网络性能指标,选择站点流量加权网络效率指标表示网络震后性能;计算不同 PGA 下的网络性能损失,拟合得到了案例轨道交通网络地震易损性模型,便于案例网络震后性能的快速评估。

关键词: 城市轨道交通系统; 地震灾害; 网络性能; 易损性模型

中图分类号: P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1165-09

Post-earthquake Performance Evaluation of Urban Rail Transit Network based on Network Efficiency

FAN Shijie, YOU Dan, HOU Benwei, XU Chengshun

(Faculty of Architecture, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: For the urban rail transit system with the subway as the main component, the damage and destruction of the stations, tunnels and other structures caused by the earthquake will seriously affect the traffic operation function of the system. At present, the research on the performance of the rail transit network in the disturbance accident scenarios mainly focuses on random failure and deliberate attack, and there is a lack of relevant research in the earthquake scenario. This paper uses the network efficiency index weighted by passenger flow to study the seismic performance of rail transit network under different earthquakes. The network topology model is constructed by using the graph theory modeling method, and the structural failure probability is calculated based on the seismic fragility models for main structures such as stations and section tunnels. Utilizing the Monte Carlo simulation method to sample the post-earthquake status of the network unit, three kinds of network efficiency indexes including topological network efficiency, site traffic-weighted network efficiency and network service efficiency are used to evaluate the post-earthquake performance of the

* 收稿日期:2022-05-10;修回日期:2022-05-23

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC1504305)资助

作者简介:范世杰(1996—),男,硕士研究生。主要从事生命线地震工程研究。E-mail:sjfan0538@163.com

通讯作者:许成顺(1977—),女,教授,博导,博士。主要从事岩土地震工程研究。E-mail:xuchengshun@bjut.edu.cn

network. Taking the Beijing rail transit network as an example, the network performance indicators under different earthquake action scenarios are compared, and the station traffic-weighted network efficiency index is selected to represent the network post-earthquake performance. The network performance loss under different PGAs is calculated, and the seismic vulnerability model of the rail transit network is fitted, which is convenient for quick post-earthquake performance evaluation of the case network.

Keywords: urban rail transit system; earthquake disaster; network performance; fragility model

引言

城市交通网络是保障城市正常运行重要的基础设施,研究其在灾害或事故扰动下的通行功能和性能是评估城市防灾能力的重要内容。历史地震灾害表明,强震作用下导致城市交通系统路段、桥梁、站点设施结构的破坏,严重影响交通系统的震后运行^[1]。对于以地铁为主要组成的城市轨道交通系统,其运行特征和地震破坏模式与地上交通系统存在较大差异,轨道交通系统车站和区间结构的地震破坏,不仅影响线路运输功能,还可能造成大量乘客受困和伤亡的严重次生灾害^[2]。

在地震作用对交通系统通行能力分析方面,现有研究多基于路段、桥梁等结构的易损性模型得到分析,城市交通系统中的所有单元都有可能因自身结构原因或外部原因而失效,而任意一个单元的失效,都会导致网络的整体可靠性发生改变。国内学者对城市交通系统的震后功能进行了大量研究:侯本伟等^[3]从路网、道路、桥梁系统3个方面,分析了道路、桥梁在地震灾害下的破坏状态,采用折减系数将破坏状态反映到路段的通行能力,利用 Monte Carlo 方法建立了路网系统震后连通可靠性分析和行程时间可靠性分析模型;宋建学等^[4]利用 Monte Carlo 方法并以路段通行概率为依据模拟了震后路网的通行能力,评价了道路网络的连通度;陈力波^[5]基于 2008 年汶川地震资料和桥梁震害数据,以典型的简直桥梁为例,建立了一套完整的地震易损性分析流程,并对汶川地区的路桥系统进行了地震损失风险评估;杨成等^[6]考虑了中小地震作用下,高铁列车脱轨可能造成的线路堵塞问题,通过 PSHA 方法确定了桥梁网络的地震危险性参数,并提出了考虑区域地震作用下的高铁网络连通易损性分析框架;王鼎等^[7]基于单一路段地震易损性模型,以最大分支数和最大分支直径为指标,给出了基于 Monte

Carlo 方法的路网地震易损性分析框架;宣功奉等^[8]使用路段通行能力的变化衡量交通网络失效水平,结合单元地震破坏状态分析了网络震后总体通行能力。

目前,对轨道交通网络的性能评价主要集中在可靠度、易损性等方面。慈立坤等^[9]对随机故障下的上海轨道交通网络可靠性进行了分析,并对网络中各节点的重要度进行了计算和排序。蔡虹等^[10]将客流量代入传统易损性的拓扑分析方法,分析了突发事故下北京轨道交通网络的易损性。周珺等^[11]以深圳轨道交通为研究对象,采用网络平均度、网络密度和平均路径长度等指标,研究了换乘车站故障对轨道交通网络可靠性的影响。Y.Zhang 等^[12]采用 Space L 方法建立轨道交通网络拓扑结构,评估了蓄意攻击和随机破坏场景下的网络韧性,以拓扑网络平均效率作为网络性能指标,以上海轨道交通网络为例模拟了不同修复方案下的网络性能;D.J.Sun 等^[13]采用客流变化、平均路径长度、网络效率三个综合指标从线路运营角度评估网络脆弱性,表明客流量是造成网络脆弱性的关键因素;吕彪等^[14]以服务效率和拓扑网络效率为网络性能指标,研究了随机破坏下的成都地铁网络性能,得到必须根据地铁运营实际合理选择性能指标。

综上可知,目前对轨道交通网络性能评价的研究主要集中在随机破坏和蓄意攻击场景,缺乏地震灾害场景下的网络性能分析。而地震对轨道交通系统的正常运营存在潜在威胁,评估不同地震作用下的轨道交通网络抗震性能,对快速评估轨道交通系统的震后功能并启动应急机制具有重要的现实意义。参考上述对地上交通系统的抗震性能研究方法,本文提出了一种基于轨道交通系统主体结构地震易损性模型、相对网络效率指标的轨道交通系统抗震性能评价模型。

1 轨道交通网络的性能评价

1.1 网络拓扑特征指标

将轨道交通网络简化为由节点和边组成的图论模型,节点代表地铁车站,节点之间的边代表连接地铁车站的区间(隧道或桥梁)。网络拓扑图可以用变量 G 表示:

$$G=[V,E] \quad (1)$$

式中, V 是轨道交通网络中所有车站的节点集,记为 $V=[v_i|1,2,\dots,N]$ (N 为车站总数); E 为网络中所有区间的边路集,表示为 $E=[e_{ij}|i,j \in S]$ 。

F.C.Von 等^[15]总结了四种类型的拓扑图: Space L、Space B、Space C 和 Space P,用于表示公共交通网络。本文选择 Space L 拓扑图表示轨道交通网络,因为它能清晰的表示轨道交通网络中单元的平面连接关系。网络中节点之间的连接状态用邻接矩阵 A 表示,记为 $A=[a_{ij}]_{N \times N}$ 。如果节点 i 和节点 j 没有直接相连,则 $a_{ij} = \infty$;如果节点 i 和节点 j 直接相连,则 $a_{ij} = 1$ 或实际边长;对角线元素 $a_{ij} = 0$ ($i = j$)。

对于轨道交通系统的拓扑网络,节点度 k_i 代表与节点 v_i 直接连接的节点的数量。平均节点度 k^* 定义为网络中所有节点的节点度 k_i 的平均值:

$$k^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad (2)$$

从节点 v_i 到节点 v_j 需要经过的最短路径的长度称为路径长度 d_{ij} 。平均路径长度 L 定义为网络中所有节点对 (v_i, v_j) 的所有路径长度 d_{ij} 的平均值:

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d(v_i, v_j) \quad (3)$$

相应地,网络直径 L^* 定义为所有节点对 (v_i, v_j) 中的最大路径长度 $\max\{d_{ij}\}$ 。聚类系数 C_i 定义为 e_i (节点 v_i 与其相邻的 k_i 节点总数之间的边数)与最大可能边数 $k_i(k_i-1)/2$ 的比值:

$$C_i = \frac{e_i}{k_i(k_i-1)/2} \quad (4)$$

网络聚类系数 C 是节点聚类系数 C_i 的平均值。

通过上述指标,可以表征拓扑网络的两个典型性质:小世界性质和无标度性质。小世界网络是指网络聚类系数较高,但路径长度较短的网络。从物理角度来看,小世界网络具有密集的连通性。当网络特征满足以下指标时,被称为小世界网络:

$$L > \frac{\ln(N)}{\ln(k^*)} \quad (5)$$

$$C < \frac{k^*}{N} \quad (6)$$

无标度网络是具有节点度 $P(k)$ 分布的网络,即节点度 k 的相对频率服从幂函数分布:

$$P(k) = \alpha k^{-\gamma} \quad (7)$$

式中,参数 α 和 γ 是幂函数曲线回归系数。 γ 的值通常在 2.1 到 4.0。一般来说,节点度的幂函数分布中少数节点的节点度大,大多数节点的节点度小。

1.2 网络通行能力评价指标

在评估轨道交通网络通行能力研究中,应用较为广泛的有拓扑网络效率 E_f 、流量加权网络效率 P 和网络服务效率 φ 。本节介绍此 3 类指标的定义与物理含义。需要指出的是,此 3 类指标均为连通可靠性指标,本文以轨道交通网络的连通性可靠性指标表征系统性能。

网络效率表示为网络中所有节点对效率的平均值,其中节点对效率反映从一个节点到达另一个节点的难易程度,通常表示为节点间距离的倒数。网络效率 (E_f) 是衡量网络连通性的指标,基于拓扑特征的网络效率指标定义为^[16]:

$$E_f = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (8)$$

式中, d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间最短路径的区间物理长度。

Y.Zhang 等^[12]将地铁车站区间的实际长度考虑为边路的权值,以进出站的客流总数为节点的权值,提出了站点流量加权网络效率指标 P :

$$P = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{\omega_{ij}}{d_{ij}} \quad (9)$$

$$\omega_{ij} = \frac{R_{(i,j)}}{\max(R_{(k,s)}, k=1 \sim N, s=1 \sim N, k \neq s)} \quad (10)$$

$$R_{(i,j)} = R_{j \rightarrow i} + R_{i \rightarrow j} = Q_i \sum_{k \neq i} \frac{Q_j}{Q_k} + Q_j \sum_{k \neq j} \frac{Q_i}{Q_k} \quad (11)$$

式中, d_{ij} 与式(8)中定义相同; $R(i,j)$ 表示 i, j 两个节点之间的客流量; ω_{ij} 是基于客流量的权重因子,定义为 $R(i,j)$ 与整个网络中任意两个站点之间最大客流量之比; Q_i 和 Q_j 分别表示 i 站和 j 站的乘客人数。

当扰动事件导致某一站点失效,很可能导致该站点所在的线路停运,事实上造成线路全部节点失效。基于此,吕彪等^[14]从地铁实际运营情况出发,

提出一种基于流量加载的服务效率指标。首先定义节点间服务效率,令 $\varphi_{s,ij}$ 表示节点 i,j 之间的服务效率,具体表示为:

$$\varphi_{s,ij} = \sum_{l \in L} \frac{(\delta_{ij} + \delta_{jl})f_l}{d_{ij}} \quad (12)$$

式中, L 为线路集合, $L = \{1,2,\dots,M\}$, M 为网络中的线路数量; f_l 为线路 l 上的日均客流量; δ_{il} 为0-1变量,如果节点 i 在线路 l 上, $\delta_{il} = 1$,否则 $\delta_{il} = 0$; d_{ij} 为节点 i,j 之间的最短拓扑距离,即从节点 i 到节点 j 所需经过的最小边数。若某一节点失效,途经该节点的线路列车停运,线路流量将变为0。

将网络服务效率表示为所有节点之间的服务效率平均值,即:

$$\varphi_s(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \varphi_{s,ij} \quad (13)$$

式中, $\varphi_s(G)$ 为网络 G 的服务效率。

根据上述式(8)、(9)、(13)计算拓扑网络效率、流量加权网络效率、网络服务效率时,得到的网络性能指标为绝对量,为比较相同灾害作用下三类指标的差异,本文采用三类指标的相对值来表示灾害作用下的网络性能:

$$\begin{cases} E_\gamma = E_\rho/E_{\rho_0} \\ P_\gamma = P_\rho/P_0 \\ \varphi_\gamma = \varphi_{s^*}(G)/\varphi_{s_0}(G) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\{E_{\rho_0}, P_0, \varphi_{s_0}(G)\}$ 分别表示正常运行状态下的各个网络效率指标; $\{E_\rho, P_\rho, \varphi_{s^*}(G)\}$ 分别表示灾害或事故扰动后的各个网络效率指标值。

2 地震作用下轨道交通网络的性能评价

我国规范《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[17]针对结构抗震性能分为I~III级,其中,性能I:地震后不破坏或轻微破坏,应能保持其正常使用功能;性能II:地震后可能破坏,经修补短期内应能恢复其正常使用功能;性能III:地震后可能产生较大破坏,但不应出现局部或整体倒毁。对于震后通行功能状态,性能I、II、III分别对应了正常使用、快速修复后使用、不能使用三类。综上,本文以震后通行功能为目标,将城市轨道交通网络抗震性能概括为:地震灾害作用下,主体结构不破坏或破坏后可在短期内快速恢复,城市轨道交通网络具有的通行能力。

2.1 地震作用下单元的超越概率

轨道交通系统由轨道/路基、桥梁、隧道、车站、照明通风设施和调度设施等组成,地震作用下这些设施都会遭受地震动和永久位移的影响,往往是车站、隧道、桥梁等主体结构发生破坏带来的损失最大^[18]。本文只考虑车站、区间隧道和区间桥梁三类主体结构的地震破坏对网络性能的影响。

地震易损性是指结构在不同水平的地震作用下发生不同破坏程度的概率,宏观地描述了地震动强度与结构破坏程度之间的关系,能从概率层面对工程结构的抗震性能进行宏观预测,以进行结构抗震防灾能力的快速评估^[19]。

假定地震易损性服从双参数对数正态分布^[5,20],易损性函数由给定地震动水平作用下达到或超过特定破坏状态的超越概率表示,表达式为:

$$P[D \geq C|IM] = \Phi\left(\frac{\ln(IM/IM^*)}{\beta_{\text{comp}}}\right) \quad (15)$$

式中, P 表示某一破坏状态下结构失效的超越概率; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; D 表示系统的响应(结构的地震需求); C 表示系统的承载力(结构的抗震能力); IM 为地震动强度指标,本文中用 PGA 表示; IM^* 代表某一破坏状态下地震动强度指标 IM 的中间临界值; β_{comp} 代表系统的对数正态标准偏差。

在结构震害预测以及抗震性能设计中,性能要求与地震作用水平下的结构破坏等级有关。对于结构破坏等级的依据指标、结构状态和功能状态,相关规范^[21-24]和学者针对建筑结构、隧道结构、桥梁结构的破坏等级给出了不同定义。当前对城市轨道交通结构的地震破坏等级划分尚未形成统一的标准,庄海洋等^[25-26]根据层间位移角限值划分了地铁车站结构的破坏等级,给出了结构状态和功能状态描述。钟紫蓝等^[19,27]采用Pushover分析得到的中柱底部剪力之和与层间位移角的力-位移曲线划分极限状态,给出了地铁车站不同破坏等级的地震易损性模型。陈力波等^[28]根据汶川地震桥梁结构的破坏记录、地震动分布特征,建立了桥梁结构的经验易损性模型。美国联邦应急管理署灾害评估模型HAZUS手册^[18]中也给出了轨道交通系统车站、桥梁、隧道主体结构的易损性模型。依据上述易损性模型,可计算不同地震动加速度峰值(PGA)作用下,轨道交通结构处于不同破坏等级的概率。

参考上述地铁车站、区间隧道、桥梁结构易损

性“中等破坏”的结构状态、功能状态与《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[17]中性能II目标相符,且与本研究震后功能要求一致。本节选择钟紫蓝、陈力波、HAZUS手册中易损性模型的“中等破坏”等级对应的易损性曲线,以地面运动峰值加速度(PGA)表示地震荷载的强度,在这些易损性曲线中,相应的曲线对应的分布参数见表1。将参数代入式(15)以计算不同地震作用下车站、区间桥梁、区间隧道结构的通行功能的超越概率,各类结构超越概率模型如图1所示。

表1 轨道交通主体结构地震易损性模型参数
Table 1 Seismic fragility model parameters of main structures in rail transit

地震动荷载 (PGA/g)	普通车站	换乘车站	明挖隧道	盾构隧道	区间桥梁
中值(IM*)	0.62	0.88	0.7	0.8	0.43
对数标准差(β_{comp})	0.53	0.47	0.6	0.6	0.54

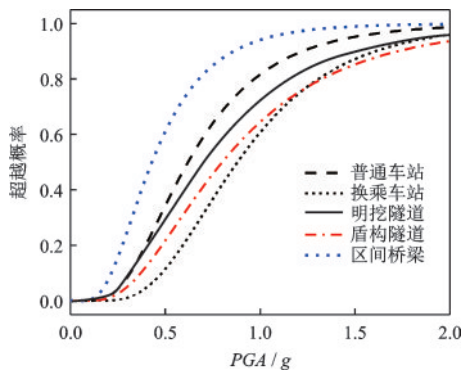


图1 不同结构类型的地震易损性曲线

Fig.1 Seismic fragility curves for different structures

2.2 网络震后性能评价

按照表1所示地震易损性模型,可以计算地震作用下各结构单元的“中等破坏”超越概率,本节采用 Monte Carlo(MC)方法模拟轨道交通网络结构震后状态,进而采用1.2节列出的三类网络效率指标计算轨道交通网络的震后通行能力。

假定网络中节点和区间边单元存在工作或失效两种状态,各单元的失效相互独立;根据表1可计算网络中第*i*个单元的震后失效概率为 $P(X_i=0)=p_{fi}$,工作概率为 $P(X_i=1)=p_{Ri}=1-p_{fi}$ 。根据上述假定,网络单元为服从0-1分布的离散型随机变量,基于MC方法的网络震后性能评估包括以下步骤:

(1)主体结构单元地震失效概率。通过表1数

据计算网络中主体结构单元(隧道、车站和桥梁等)的“中等破坏”超越概率 P_{fj} 。

(2)结构单元震后状态抽样。针对每个结构单元,根据 P_{fj} 和拉丁超立方抽样(LHS)方法产生*m*个震后状态样本。

(3)网络震后状态样本。根据每个单元的第*i*($i=1\sim m$)个震后状态样本,从初始网络拓扑中删除处于“破坏”状态的结构单元,形成第*i*个网络震后状态样本。

(4)网络样本震后性能评估。对于第*i*个震后网络状态样本,计算该网络震后状态样本对应的网络效率指标 $\{E_{\gamma}(i), P_{\gamma}(i), \varphi_{\gamma}(i)\}$;重复第(3)~(4)步*m*次,得到*m*个震后网络状态样本对应的网络效率指标。

(5)网络震后性能估计。计算*m*个震后状态样本网络效率指标 $\{E_{\gamma}(i), P_{\gamma}(i), \varphi_{\gamma}(i)\}$ 的样本平均值 $\{\bar{E}_{\gamma}, \bar{P}_{\gamma}, \bar{\varphi}_{\gamma}\}$,以所有网络样本的效率指标平均值表示轨道交通网络震后性能。

3 算例分析

3.1 案例网络及其拓扑特征

以北京主城区轨道交通网络为例,分析不同地震作用下的网络抗震性能。截至2020年底,北京轨道交通网络运营线路23条,包含295个车站(240个普通站、55个换乘站)和335个站间区段(总里程727 km)。网络 SpaceL 拓扑结构如图2所示,图中

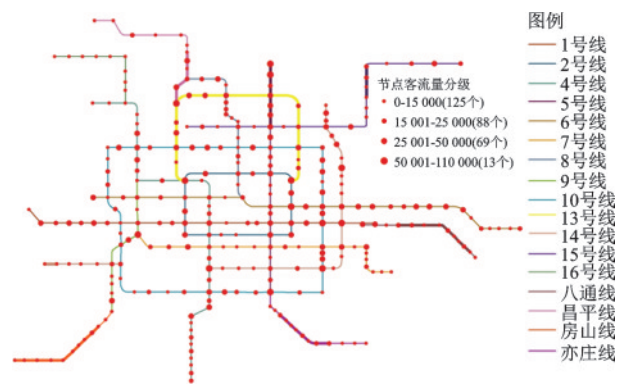


图2 北京市轨道交通网络拓扑图

Fig.2 Topology of Beijing rail transit network

每个节点代表1座车站,节点之间每条边代表1个站间区段。站点客流量根据某工作日的进出站人数计算。图2所示的网络中,未考虑中心城区与远

郊连接的线路。对网络中的 295 个站点建立邻接矩阵 $A(N=295)$, 计算轨道交通网络的拓扑特征指标, 具体数据见表 2。

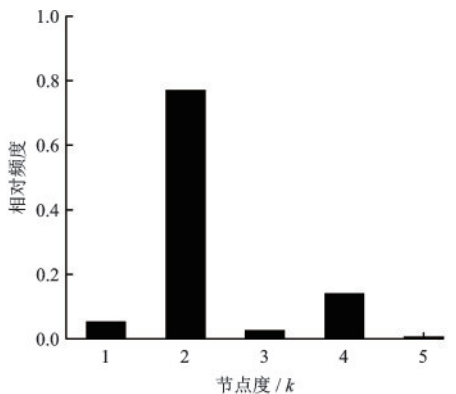
表 2 北京轨道交通网络特征参数

Table 2 Characteristic parameters of Beijing rail transit network

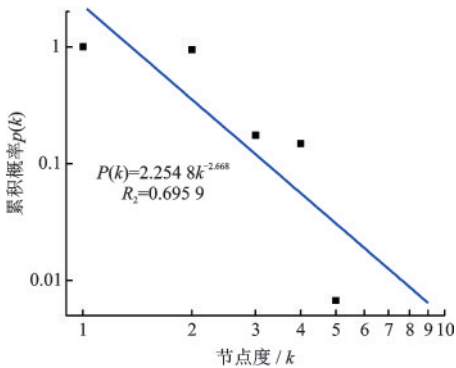
特征量	节点数 N	边数	平均节点度 D^*	平均路径长度 L	聚类系数 C	网络直径 L^*
数值	295	335	2.276	15.41	0.002 2	46

表 2 中, 在分析网络的拓扑连接特征并计算平均路径长度 L 时, 每个边长采用单位长度。由上表可知, 北京轨道交通网络的平均节点度 D^* 为 2.276, 平均路径长度 L 为 15.41, 代表任意两个车站之间的连接平均需要经过 15.41 个车站, 且 $\ln(N)/\ln(k^*)=6.92, k^*/N=0.007 7$ 。由式(5)和式(6), 表明北京轨道交通网络是一个小世界网络, 根据小世界网络的特征^[29], 案例轨道交通网络具有密集连通性。

图 3(a) 显示了不同节点度 k 的相对频度(度为 k



(a) 节点度相对频度直方图



(b) 节点度 k 累积概率分布曲线拟合

图 3 案例网络的节点度分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of node degree in the case network

的节点数/总节点数), 根据不同节点度 k 的相对频度计算其累积概率 $p(k)$, 图 3(b) 为双对数坐标显示的 $p(k)$ 数据点和关系式。根据式(7)及图 3(b), 累积概率 $p(k)$ 是节点度 k 的幂指数函数, $\alpha=2.254 8, \gamma=2.668$ 。因此, 案例轨道交通网络是一个无标度网络。根据无标度网络的特征^[30-32], 其对于随机失效的鲁棒性较强、对于蓄意攻击的脆弱性较高。

3.2 网络震后性能评价指标比较

根据《地下结构抗震设计标准》^[24], 北京地区抗震设防烈度为 VIII 度, 对应的抗震设计地震动参数为 $PGA=0.2g$ 或 $0.3g$; 根据《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[17], 设防烈度 VIII 度和 IX 度对应的 E1~E3 地震动峰值加速度区间为 $0.1g\sim 0.62g$; 本节算例计算 $PGA=0.2g\sim 0.6g$ 多个地震荷载条件下的轨道交通网络的抗震性能。根据图 1 所示的易损性曲线, 得到地震作用下各类主体结构“中等破坏”超越概率见表 3。

表 3 不同 PGA 下主体结构“中等破坏”的超越概率

Table 3 Exceedance probability of "moderate failure" of main structures under different PGAs

PGA/g	普通车站	换乘车站	开挖隧道	盾构隧道	连续桥梁
0.6	0.475 3	0.207 6	0.398 6	0.315 8	0.731 4
0.5	0.342 4	0.114 5	0.287 5	0.216 7	0.610 0
0.4	0.204 1	0.046 7	0.175 5	0.124 0	0.446 7
0.3	0.085 4	0.011 0	0.079 0	0.051 1	0.252 5
0.2	0.016 4	0.000 8	0.018 4	0.010 4	0.078 2

根据表 3 中的超越概率, 基于 1.3 节所示的采用 LHS 抽样的 Monte Carlo 模拟方法抽取破坏单元样本, 共计抽样 100 次, 得到三类相对网络效率指标表示的轨道交通网络抗震性能如图 4 所示。本节计算网络性能指标时, 网络边长按照其实际长度计算。

由表 3 可得, 地震作用强度 (PGA) 越大、结构“中等破坏”超越概率越大; 根据图 4(a), 在相同地震作用下, 三类指标值的取值排序为: $P_\gamma > E_\gamma > \varphi_\gamma$; 三类指标表示的震后轨道交通网络的相对网络效率值, 均随着地震作用强度 (PGA) 增加而减小; 随着 PGA 增大, P_γ 指标降低大体遵循线性规律, 在 $PGA \geq 0.4g$ 的工况中, φ_γ 指标趋近于 0; 考虑到案例轨道交通网络是小世界、无标度网络, 具有密集连通性和对随机破坏的鲁棒性, 且根据站点、区间结

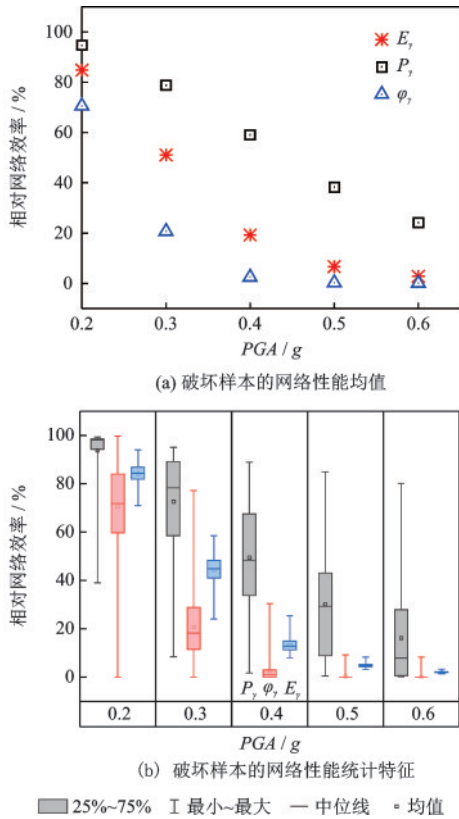


图4 不同地震作用下三类指标表示的网络性能

Fig.4 Network performance represented by three indexes under different seismic intensities

构“中等破坏”超越概率采用LHS抽样方法随机产生的破坏样本与随机破坏场景较为相似,又由于北京地区轨道交通结构抗震设防烈度为VIII度($PGA=0.2g$ 或 $0.3g$),可认为案例轨道交通网络在 $PGA=0.4g$ 时仍具有一定的连通性能;因此,在本文案例中 φ_γ 指标不适合于表征轨道网络震后性能。

从图4(b)可知,在不同的地震作用强度 E_γ 指标对应的样本指标值区间最窄,以在 $PGA=\{0.3g, 0.4g\}$ 地震作用下样本指标25%~75%分位点的区间为例, P_γ 对应的样本指标区间长度分别为 $\{0.5853\sim 0.8919, 0.3383\sim 0.6755\}$, E_γ 对应的指标区间仅为 $\{0.4098\sim 0.4829, 0.1124\sim 0.1491\}$ 。由于根据结构“中等破坏”超越概率随机产生网络破坏样本,当网络样本指标区间较窄时,表明网络中各站点或区间单元的重要度差异较小;由于 E_γ 指标仅考虑了网络拓扑特征,未考虑站点客流量的影响,导致案例网络模型中各站点重要度差异较小;而实际中,对于西二旗站、生命科学园站等产业聚集地的较大客流量,是轨道交通网络运行保障的重要单元;但由于这两个站点处于网络拓扑结构的西

北侧边缘, E_γ 指标不能体现这些站点对网络性的影响。

综上所述,基于网络拓扑的 E_γ 指标未考虑客流量的影响,不能表征网络重要站点单元的影响;在设防烈度对应的地震作用下,加权网络拓扑和线路客流量的 φ_γ 指标值偏小,与轨道交通网络的小世界、无标度特征不符。加权网络拓扑和站点客流量的相对网络效率指标 P_γ 评价结果较为合理,建议采用 P_γ 指标评估轨道交通网络的震后性能。

3.3 网络性能评估的地震易损性模型

3.2节计算得到的5种地震动强度作用下的网络抗震性能结果,本节计算案例轨道交通网络在不同 PGA 作用下的性能指标 P_γ ,以期获得案例轨道交通网络的地震易损性模型。

假定地震动荷载参数 PGA 在 $[0, 1.5]$ 变化, PGA 取值间隔为0.02。对于每个 PGA 值,采用LHS随机抽取1000个网络破坏样本,得到不同地震动强度下的相对网络效率 P_γ ;图5(a)给出了网络性能损失指标 $P_{\gamma L}=1-P_\gamma$ 随 PGA 增加的变化趋势。从图5(a)可知, $P_{\gamma L}$ 均值曲线与对数正态分布的累积概率分布曲线相似,借鉴HAZUS手册^[18]拟合基础

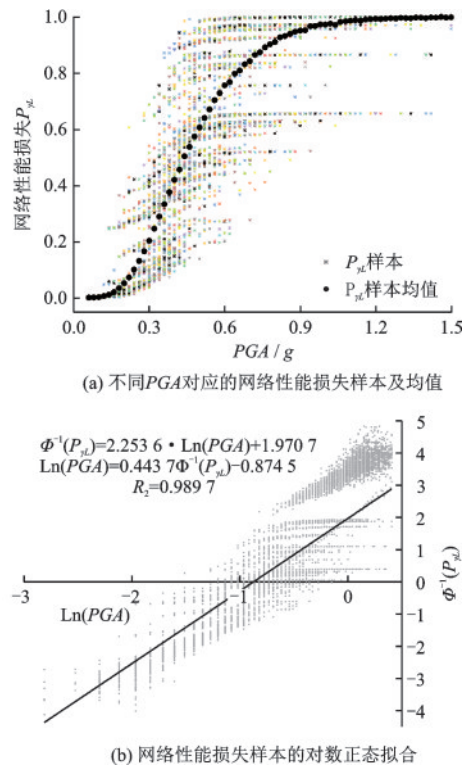


图5 不同PGA下轨道交通网络性能损失指标分布特征
Fig.5 Distribution characteristics of performance loss index of rail transit network under different PGAs

设施系统易损性模型曲线的思路,本节尝试拟合案例网络的对数正态分布曲线参数。采用概率纸方法^[32]得到 $\text{Ln}(PGA)$ 与 $\Phi^{-1}(P_{yL})$ 的线性关系如图 5(b)所示。根据图中拟合的参数可知, P_{yL} 指标可用 $\text{Ln}(PGA)$ 的正态分布累积概率分布函数表示,均值 $\mu_{\text{Ln}(PGA)} = -0.8745$, 标准差 $\sigma_{\text{Ln}(PGA)} = 0.4437$, $\mu_{\text{Ln}(PGA)}$ 对应的 PGA 中值为 $m_{PGA} = 0.4171$ 。

根据图 5(b)所示的性能函数参数,计算不同 PGA 对应的网络性能曲线及其 1 倍方差曲线如图 6 所示,拟合参数见表 4。

从图 6 可知,本节拟合的网络性能曲线基本涵盖了不同地震破坏场景对应的样本值;图中显示了网络性能损失值随着地震动强度 PGA 增加而逐渐增大;根据该易损性模型,可以整体评估不同地震作用下案例轨道交通网络的性能损失。

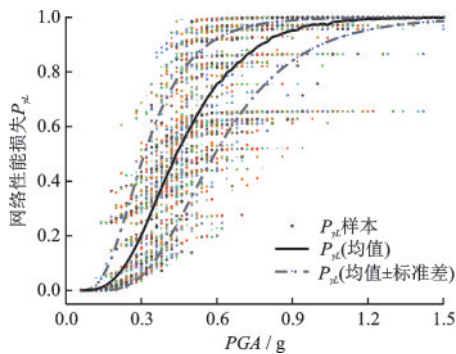


图 6 案例轨道交通网络地震易损性模型

Fig.6 Seismic fragility model of the rail transit network

表 4 轨道交通网络性能损失易损性模型参数

Table 4 Fragility parameters of the rail transit network performance loss

地震动荷载 (PGA/g)	网络性能损失 P_{yL}		
	均值 μ	$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma$
中值	0.4171	0.5921	0.3120
对数标准差	0.4437	0.4195	0.4620

4 结 论

本文基于城市轨道交通系统中车站、隧道等主体结构的地震易损性模型,生成网络地震破坏场景;采用三类网络效率指标计算网络震后性能,建立了基于 Monte Carlo 模拟的轨道交通网络震后性能评估模型。以北京中心城区的轨道交通网络为案例进行分析,结论如下:

(1) 比较了三类指标(拓扑网络效率 E_y 、站点流量加权网络效率 P_y 、网络服务效率 φ_y)表示的网络震后性能, E_y 指标无法体现客流量大、处于网络边缘位置的重要站点影响; φ_y 指标值偏小,与轨道交通网络的小世界、无标度特征不符;建议采用 P_y 指标评估轨道交通网络的震后性能。

(2) 通过 Monte Carlo 随机抽样,得到不同地震作用强度(PGA)对应的网络状态样本,拟合地震作用强度与网络性能损失的对数正态分布曲线参数,得到了案例轨道交通网络性能评估地震易损性模型,可以整体评估不同地震作用下对应的网络性能损失。

参考文献:

[1] 何祥,袁永博,张明媛. 城市轨道交通系统地震级联失效研究[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(6): 79-86.
He X, Yuan Y B, Zhang M Y. Cascading failure of urban traffic system under earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(6): 79-86. (in Chinese)

[2] 夏泽郁,汤育春,李启明. 基于韧性理论的中国城市轨道交通事故统计分析[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(3): 148-156.
Xia Z Y, Tang Y C, Li Q M. Statistical analysis of urban rail transit accidents in China based on resilience theory[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(3): 148-156. (in Chinese)

[3] 侯本伟,李小军,韩强,等. 基于 Monte Carlo 模拟的公路网络震后连通性与通行时间分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 287-296.
Hou B W, Li X J, Han Q, et al. Post-earthquake Connectivity and travel time analysis of highway networks based on Monte Carlo simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6): 287-296. (in Chinese)

[4] 宋建学,李杰. 震后城市交通系统连通性模拟[J]. 自然灾害学报, 1996, 23(1): 73-78.
Song J X, Li J. Post-earthquake connectivity simulation of urban traffic system [J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 23(1): 73-78. (in Chinese)

[5] 陈力波. 汶川地区公路桥梁地震易损性分析研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
Chen L B. Seismic vulnerability analysis for highway bridges in Wenchuan region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)

[6] 杨成,庾靖,殷弘鹏,等. 基于地震行车危险性分析的

- 桥梁网络易损性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1338-1347.
- Yang C, Yu J, Yin H P, et al. Bridge network vulnerability assessment based on the hazard of moving vehicle over bridge[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(6): 1338-1347. (in Chinese)
- [7] 王鼎, 王晓文, 冯德成, 等. 基于蒙特卡洛模拟的城市道路网络地震易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 558-567.
- Wang D, Wang X W, Feng D C, et al. Seismic fragility analysis of urban road network based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 558-567. (in Chinese)
- [8] 宣功奉, 林均岐, 刘金龙. 交通网络震后整体功能失效评估方法[J]. 地震研究, 2022, 45(3): 362-369.
- Xuan G F, Lin J Q, Liu J L. A Method for assessing the overall function failure of transportation networks after an earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 2022, 45(3): 362-369. (in Chinese)
- [9] 慈立坤, 胡蒙达. 上海城市轨道交通网络运营可靠性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(5): 41-44.
- Ci L K, Hu M D. Reliability of Shanghai urban rail transit networking operation [J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(5): 41-44. (in Chinese)
- [10] 蔡虹, 朱金福, 徐腾飞. 客流量对城市轨道交通网络易损性的影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(5): 800-805.
- Cai H, Zhu J F, Xu T F. Influence study of passenger flow capacity on the vulnerability of the urban rail transit network[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41(5): 800-805. (in Chinese)
- [11] 周珺, 杨永泰, 罗钦. 基于复杂网络的深圳城市轨道交通网络结构脆弱性研究[J]. 中国高新科技, 2018, 35(12): 49-51.
- Zhou J, Yang Y T, Luo Q. Network vulnerability analysis of Shenzhen urban rail transit network based on complex network[J]. China High and New Technology, 2018, 35(12): 49-51. (in Chinese)
- [12] Zhang Y, Ayyub B M, Saadat Y, et al. A double-weighted vulnerability assessment model for metrorail transit networks and its application in Shanghai Metro [J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2020, 29: 100358.
- [13] Sun D J, Guan S. Measuring vulnerability of urban metro network from line operation perspective [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 94: 348-359.
- [14] 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 B, Guan X Y, Gao Z Q. 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)
- [15] Von F 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.
- [16] Latora V, Marchiori M. Efficient behavior of small-world networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(19): 198701.
- [17] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [18] Federal Emergency Management Agency (FEMA). Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model, hazus - MH 2.1 technical manual[R]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [19] 钟紫蓝, 申轶尧, 郝亚茹, 等. 基于IDA方法的两层三跨地铁地下结构地震易损性分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 916-924.
- Zhong Z L, Shen Y Y, Hao Y R, et al. Seismic fragility analysis of two-story and three-span metro station structures based on IDA method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 916-924. (in Chinese)
- [20] Park J, Towashiraporn P, Craig J I, et al. Seismic fragility analysis of low-rise unreinforced masonry structures [J]. Engineering Structures, 2009, 31(1): 125-137.
- [21] 国家标准建筑抗震设计规范管理组. 建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)统一培训教材[M]. 北京: 地震出版社, 2010.
- [22] 建(构)筑地震破坏等级划分标准: GB/T 24335—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [23] 生命线工程地震破坏等级划分: GB/T 24336—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [24] 地下结构抗震设计标准: GB/T 51336—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

(本文责编: 苏泽云)

(下转第 1190 页)