

文章编号: 1006-2467(2023)10-1250-11

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.359

一种基于路网抗震韧性的路段重要度评价方法

陈轶钦, 黄淑萍

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 路段韧性重要度评价对于提升路网抗震韧性水平至关重要. 以韧性的增加值(RAW)为评价指标, 提出了一种基于路网抗震韧性的路段重要度评价方法. 借助动态贝叶斯网络(DBN)双向推理能力, 以初始 DBN 为基准, 不同时刻路段连通状态为证据, 更新路网韧性曲线, 计算路网韧性的增加值, 评价不同时刻路段韧性重要度, 并以青岛市市南区局部路网为例验证路段重要度评价方法. 结果表明: 同一时刻不同路段的韧性重要度不同; 同一路段的韧性重要度与维修速率成正相关; 不同路段的韧性重要度对时间的敏感程度不同. 提出的重要度评价方法重新定义并量化了不同时刻路段抗震韧性重要度, 识别了韧性重要度较高且对时间较敏感的路段, 将有限的维修资源向该部分路段倾斜的震后恢复策略与加固韧性重要度较高路段的震前预防策略能够更有效地提高路网抗震韧性水平.

关键词: 路网; 抗震韧性; 路段韧性重要度; 动态贝叶斯网络; 韧性增加值

中图分类号: U 491 **文献标志码:** A

An Evaluation Method for Link Importance Based on Seismic Resilience of Road Network

CHEN Yiqin, HUANG Shuping

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The evaluation of link resilience importance is essential for improving the seismic resilience level of the road network. Using resilience achievement worth (RAW) as evaluation index, an evaluation method of link importance based on seismic resilience of road networks was proposed. With the help of the bidirectional inference ability of dynamic Bayesian network (DBN), taking the initial DBN as the benchmark and the link connectivity at different times as the evidence, the resilience curve of the road network was updated, the RAW was calculated, and the link resilience importance at different times was evaluated. Taking the local road network in Shinan District of Qingdao as an example, the evaluation method of link importance was verified. The results show that the seismic resilience importance varies with each link at the same time. The resilience importance of the same link is positively correlated with maintenance rate. The resilience importance of different links varies in sensitivity to time. The proposed importance evaluation method redefines and quantifies the seismic resilience importance of links at different times, and identifies the links with high resilience importance and sensitivity to time. The post-earthquake

收稿日期: 2022-09-13 修回日期: 2022-12-09 录用日期: 2022-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(51978397)资助项目

作者简介: 陈轶钦(1998-), 硕士生, 从事道路交通系统/路网韧性研究.

通信作者: 黄淑萍, 副教授, 电话(Tel.): 021-34206697; E-mail: sphuang@sjtu.edu.cn.

recovery strategy that inclines the limited maintenance resources to these links and the pre-earthquake prevention strategy that reinforces the links with higher resilience importance can more efficiently improve the seismic resilience of the road network.

Key words: road network; seismic resilience; link resilience importance; dynamic Bayesian network (DBN); resilience achievement worth (RAW)

工程系统发展至今,呈现出高度复杂化与集成化的特点,系统内部构件与构件、子系统与子系统间相互联系、相互依赖,不可避免地增加了系统发生级联故障的隐患。识别重要构件可以降低级联故障的风险,提高系统的安全性,是工程系统安全的一大研究重点。

过去,工程系统的可靠性(reliability)、脆弱性(vulnerability)与鲁棒性(robustness)是主要研究方向,构件的重要度指标因而基于系统的可靠性/脆弱性/鲁棒性。以上 3 种属性互有差异,但都关注系统的灾前预防阶段,缺少对系统灾后恢复阶段的考虑。近几年来,韧性理论受到广泛关注,许多学者开始转向工程系统韧性的研究。韧性(resilience)是系统抵抗灾害事件干扰、恢复功能的能力,涉及自灾害发生至系统性能恢复的全过程,系统韧性的研究可以为系统灾前预防与灾后恢复策略提供重要的参考。

基于韧性的构件重要度指标的基本思想与基于可靠性、脆弱性的重要度指标类似,即构件重要度体现在构件的状态变化对系统的正面/负面影响。已有的文献多采用二态极值的原则,即考虑构件完好无损/完全损坏两个状态,以系统韧性的增加/减少值(Resilience Achievement/Reduction Worth, RAW/RRW)作为重要度指标^[1-2]。Li 等^[3]提出还可以将构件状态波动一定数值或一定比例下系统韧性的增加/减少值作为评价指标。

已有的文献多考虑灾害事件发生初始时刻时,构件处于完好无损/完全损坏对系统韧性的影响。Li 等^[3]考虑构件自 $t=0$ 始终连通/中断时系统总体韧性的变化;Barker 等^[1]考虑构件的连通/中断对系统恢复时间的影响;潘星等^[4]考虑构件 $t=0$ 时刻中断时系统的 RRW;Zhang 等^[5-6]基于构件 $t=0$ 时刻的连通/中断,计算构件的结构重要度、冗余重要度和加固重要度。

具体到道路交通系统,识别重要构件一般指识别重要路段。目前,路段脆弱性重要度的研究较为丰富,而路段韧性重要度的研究较少,吕彪等^[2]以路段自 $t=0$ 时刻起始终中断/连通时不同时刻韧性的变化作为 RRW/RAW,未考虑该路段的恢复过程;

Gao 等^[7]以概率重要度和临界重要度评价不同时刻路段中断/连通时对系统连通韧性的影响程度,并以某时刻所评价路段的瞬时状态变化为假设。何祥等^[8]采用扩展傅里叶振幅灵敏度检验(EFAST)方法提出了一种各路段基于不同韧性能力的重要度评价框架,分别评价路段的抵御、吸收和恢复能力对路网韧性的影响。

综观已有文献,本文认为目前构件/路段韧性重要度的研究主要存在两点不足。第一,已有多数研究仅以灾害发生初始时刻构件状态变化对系统韧性的影响来评价构件韧性重要度,评价结果不够全面。构件韧性重要度可能会随时间变化,因而不同时刻构件韧性重要度及其排序可能会与 $t=0$ 时刻不同;此外,从定义来看,韧性是系统鲁棒性(灾前抵抗)与恢复性(灾后恢复)的综合体现, $t=0$ 时刻构件重要度只反映了构件的鲁棒性水平对系统韧性的影响。第二,已有的不同时刻路段韧性重要度研究考虑的是某时刻路段状态的瞬时变化对系统韧性的影响,实质上是一种将连续的系统韧性曲线在时间维度上离散化,每个时刻单独进行敏感性分析的方法,关注的是该时刻系统韧性的变化,不考虑该时刻路段状态的变化对其他时刻系统韧性的影响,缺少系统韧性的全过程变化视角。此外,仅单纯将具有连续时间属性的韧性在时间维度上离散化,不考虑不同时刻路段状态的变化对其他时刻系统韧性的影响,是基于维修短时或瞬时完成的假设,这与一般维修过程不符,实际维修并非瞬时完成,并对恢复系统韧性具有过程性的影响。因此,考虑由路段的维修过程而引起的系统韧性全过程变化更具有现实意义。

简而言之,目前大多数的研究基本思路沿袭了可靠性、脆弱性的构件/路段重要度识别,忽略了恢复过程在构件/路段重要度识别中的作用。对于构件/路段,初始状态与恢复过程都会影响其韧性重要度。因此,对于构件/路段韧性重要度的评价不能仅仅沿用可靠性、脆弱性研究的思路,只考虑瞬时状态的变化,而应考虑路段在不同恢复过程下的重要度变化。

贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)因其直观

表达变量间的关系、处理不确定性、信息融合等能力,是可靠性、脆弱性研究中应用较多的图论方法^[9-10].BN 能够以节点的观测数据为证据,结合先验条件概率表实现双向(向前、向后)推理,更新网络各节点的后验概率,适用于构件重要度的识别.作为 BN 的扩展,动态贝叶斯网络(Dynamic Bayesian Network, DBN)的优势在于直观表达变量时变特征的能力,其增加了时间维度,以跨时间片变量间的条件概率表征变量随时间的变化. BN 双向推理实现的是某时刻观测节点的父节点与子节点的概率更新,而 DBN 双向推理实现的是观测节点的父节点与子节点的全过程时刻概率更新,能够同时反映系统韧性的两要素——抗震鲁棒性与震后恢复性的动态变化.

综上所述,以韧性的增加值 RAW 为评价指标,提出一种基于路网抗震韧性的路段重要度评价方法.此重要度评价方法重新定义并量化了不同时刻路段抗震韧性重要度,能够从震前预防和震后恢复两个视角指导路网抗震韧性水平的提升.对震前预防策略来说,需要重点关注 $t=0$ 时刻重要度较高的路段,提高路段抗震鲁棒性,从韧性理论中的鲁棒性部分提高路网韧性水平;对震后恢复策略来说,需要合理分配维修资源,优先修复重要度对时间较敏感的路段,提高路段震后恢复性,从韧性理论中的恢复性部分提高路网韧性水平.

1 路网抗震韧性的量化模型

1.1 基于性能曲线的韧性函数

韧性是系统对干扰事件抵抗、恢复性能的能力,韧性函数是量化系统韧性的常用模型,其以系统性能随时间变化的曲线为基础.

一般来说,一次干扰事件发生后,系统性能会经历 4 个阶段,即灾前阶段、抵抗/破坏阶段、恢复阶段和恢复后阶段. Henry 等^[11]给出了普遍的系统受干扰事件影响的性能曲线,如图 1 所示.图中: $F(t)$ 为 t 时刻系统的性能; $F(t_0)$ 为干扰事件发生前系统正常运行时的性能; $F(t_d)$ 为系统受干扰事件影响后的性能; $F(t_f)$ 为系统恢复后的性能; S_0 为系统初始稳定状态; S_d 为破坏状态; S_f 为恢复后稳定状态; t_0 为初始时刻; t_e 为干扰事件发生的起始时刻; t_d 为干扰事件影响的结束时刻; t_s 为系统恢复的起始时刻; t_f 为系统恢复 95% 或 100% 初始稳定状态水平的时刻.

$[t_e, t_f]$ 时间段系统性能曲线表达了系统自干扰事件发生起,抵抗干扰事件造成的负面影响,并逐

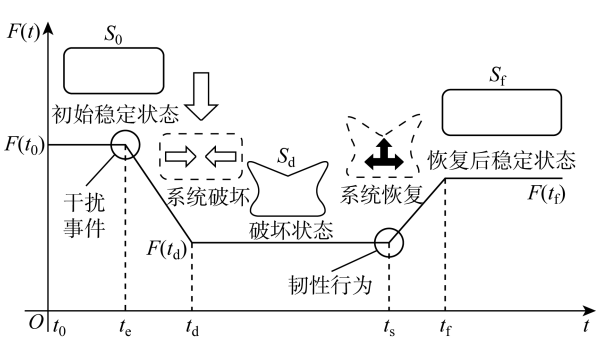


图 1 干扰事件下的系统性能变化曲线
Fig. 1 Curve of system performance in one disrupted event

渐恢复至原有或新稳定水平时性能随时间变化的特征.该时间段的性能曲线即为系统韧性量化的基础,应用韧性函数即可计算系统 t 时刻的韧性.韧性函数表示为系统性能曲线与横轴所围面积和系统正常运行时性能与横轴所围面积之比,表达式如下:

$$R(t) = \frac{\int_{t_e}^t F(t) dt}{F(t_0)(t - t_e)}, t_e < t \leq t_f \quad (1)$$

式中: $R(t)$ 为 t 时刻系统的韧性.

1.2 路网抗震性能之一——连通性

1.2.1 路网的抗震功能组成 在地震发生后,可按照不同的功能将区域路网节点划分为三类——救援要害部门、人口密集区和区域对外出入口.其中,救援要害部门由政府部门、消防公安单位与医院组成;人口密集区由避灾疏散场所、社区与商业区组成;区域对外出入口由公路出入口、火车站、码头等组成.受灾区域路网承担的任务主要包括应急救援、物资运输和医疗救护,如图 2 所示.

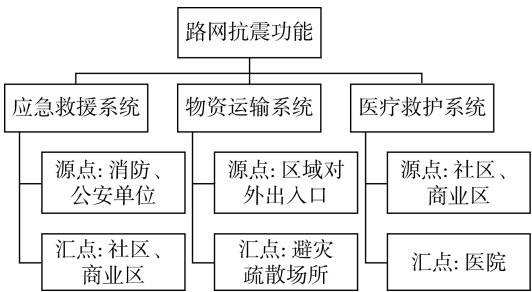


图 2 路网的抗震功能组成
Fig. 2 Seismic functions of road network

应急救援、物资运输和医疗救护系统作为抗震功能的子系统,3 个功能均有效时,路网的抗震功能被认为是有效的.因此,子系统的连通性共同决定了路网的连通性.

1.2.2 路网抗震功能的连通逻辑 基于图 2 的内容并进行路网分析,路网抗震功能的连通逻辑如下:

- (1) 路段—路径. 路径上的每条路段都连通时, 该条路径被认为是连通的, 路段与路径的关系类似逻辑门中的“与门”.
- (2) 路径—OD 对. OD 对所含路径至少有一条是连通时, 该 OD 对被认为是连通的, 路径与 OD 对的关系类似逻辑门中的“或门”.
- (3) OD 对—OD 对中的 O 点 /D 点. 与 O 点 /D 点组成的 OD 对中至少有一对是连通时, 该 O 点 /D 点被认为是连通的, O 点 /D 点与相应的 OD 对的关系类似逻辑门中的“或门”.
- (4) O 点 /D 点—抗震功能系统. 抗震功能系统所含的每个 O 点 /D 点都连通时, 该系统被认为是连通的, O 点 /D 点与系统的关系类似逻辑门中的“与门”.
- (5) 抗震功能系统—路网. 路网的抗震功能分系统均连通时, 该路网被认为是连通的, 抗震功能系统与路网的关系类似逻辑门中的“与门”.

1.2.3 路网连通性随时间的变化 基于上节的内容可以得到, 路段的连通性共同决定了路网抗震功能的连通性, 赋予路段连通性的时变特征能够推导路网连通性的时变特征.

假定维修速率不变, 在维修过程中, 路段状态的变化仅由上一时刻的状态决定, 与之前时刻的状态无关, 这一规律符合马尔可夫链. 马尔可夫链是一种离散的马尔可夫过程, 该过程中, 在给定当前知识或信息的情况下, 只有当前的状态用于预测将来, 过去 (即历史状态) 对于预测未来 (即当前之后的状态) 是无关的. 在马尔可夫链模型中, 对象从一个状态变到另一个状态是遵循概率分布的. 状态的改变称为“迁移”, 与不同的状态改变相关的概率称为“状态迁移概率”.

在本文构建的路段状态的马尔可夫链中, 路段状态分为“连通”与“中断”, 状态迁移概率由维修速率决定. 路段状态的迁移概率矩阵如表 1 所示. 表中: $\lambda = 1/t_{\text{MTTR}}$, λ 为维修速率, t_{MTTR} 为维修时间 (Mean Time to Repair, MTTR)^[12].

表 1 路段状态的迁移矩阵
Tab. 1 Transition matrix of road state

状态	$t-1$ 时刻中断状态	$t-1$ 时刻连通状态
t 时刻中断状态	$1-\lambda$	0
t 时刻连通状态	λ	1

地震破坏时间相对于震后抢修时间非常短暂, 假定地震灾害对系统的破坏是瞬时的, 且道路抢修工作及时进行, 即考虑图 1 中 $[t_s, t_f]$ 时间段的连通

性曲线量化评价路网的韧性.

2 基于路网抗震韧性的路段重要度评价方法

采用 DBN 表征路网抗震功能的连通逻辑及路段连通性随时间的变化, 输出路网连通性时变曲线, 应用韧性函数量化路网韧性曲线. 借助 DBN 双向推理能力, 以初始 DBN 为基准, 不同时刻路段连通为证据, 更新路网韧性曲线, 计算韧性的增加值, 评价不同时刻路段韧性重要度. 评价方法技术路线如图 3 所示.

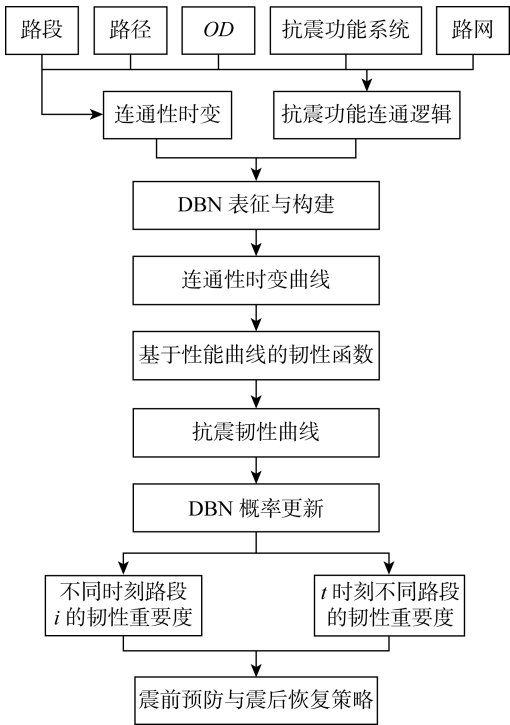


图 3 评价方法技术路线图
Fig. 3 Roadmap for evaluation

2.1 基准 DBN 构建

本文构建的基准 DBN 如图 4 所示. 其中, 地震节点 (烈度 7、烈度 8、烈度 9) 与恢复节点 (7 恢复速率、8 度恢复速率、9 度恢复速率) 为三态节点, 其余节点 (中断、连通) 均为二态节点. 节点之间的边代表条件概率表 (Conditioned Probability Table, CPT), 反映节点的因果关系, 表 2 给出了 DBN 中边的意义.

构建动态贝叶斯网络模型的过程如图 5 所示. 与 BN 模型构建类似, DBN 的建模也需要先确定节点及各节点间的因果关系. 而两者的不同之处在于, DBN 建模还需确定各节点间在时间维度上是否存在因果关系, 即 BN 模型的构建需要节点及各节点

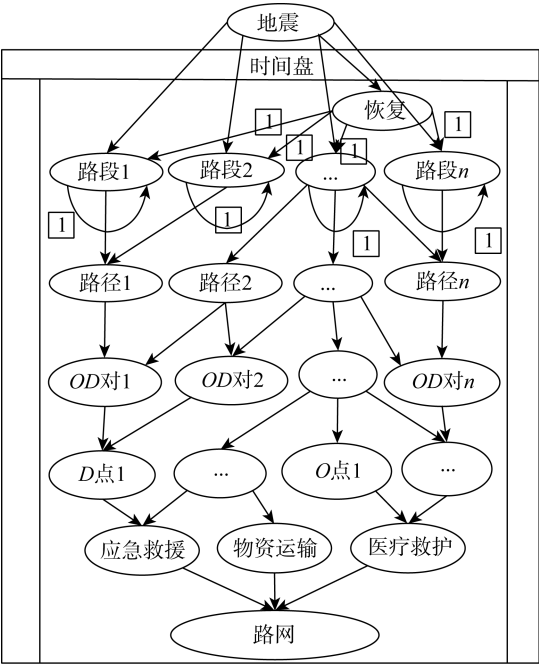


图 4 路网动态贝叶斯网络结构示意图
Fig. 4 DBN diagram of road network

表 2 DBN 中边的意义
Tab. 2 Edges in DBN

边	意义
地震—路段	不同烈度下路段的连通/中断概率
地震—恢复	不同烈度下的恢复速率
恢复—路段 & 路段—路段	路段 t 时刻的连通概率由恢复速率与 $t-1$ 时刻的连通概率决定
路段—路径	“与门”连接
路径—OD 对	“或门”连接
OD 对—O 点/D 点	“或门”连接
O 点/D 点—抗震功能系统	“与门”连接
抗震功能系统—路网	“与门”连接

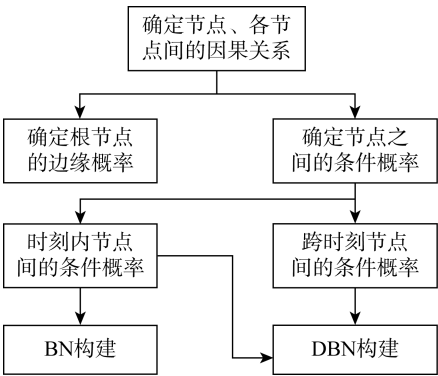


图 5 动态贝叶斯网络建模过程
Fig. 5 Modeling of DBN

基于 1.2 节内容,可构建本文的基准 DBN. 其中,“路网的抗震功能组成”用于确定 DBN 中的节点,即“路段”“路径”“OD 对”“O/D 点”“抗震功能系统”和“路网”节点;“路网抗震功能的连通逻辑”用于确定时刻内节点间的条件概率;“路网连通性随时间的变化”用于确定跨时刻节点间的 CPT,即不同时刻的“路段”节点之间的条件概率.

除此之外,构建的 DBN 中还有“地震”与“恢复”节点.“地震”节点为根节点,与“路段”节点的连通概率和“恢复”节点的恢复速率存在因果关系,影响路网初始时刻的连通性;“恢复”节点与“路段”节点的恢复过程存在因果关系,影响路网的连通性时变.“地震”节点的边缘概率由所考虑的烈度而定,评价何烈度下的路网韧性,即设置该烈度的发生概率为 1.

CPT 的来源较为广泛,可来自于调查问卷、模拟实验数据或专家访谈,本文的 CPT 则是基于客观数据进行设置,相对客观. 其中,“地震”与“路段”节点间的 CPT 是基于震害数据并采用震害经验统计法计算得到的;时刻内各节点的 CPT 是基于路网分析得到的客观逻辑设置的;跨时刻节点间的 CPT 是基于表 1 路段状态的迁移矩阵设置的. 因此,本文所构建的基准 DBN 较为客观、符合现实情况.

基于地震烈度的先验概率与节点间的条件概率表,可以计算每一时刻路网的连通性,输出连通性曲线,应用韧性函数即可得到路网的抗震韧性曲线. 具体方法与过程可参考文献[13].

2.2 路段韧性重要度评价

2.2.1 路网韧性重要度指标 本文基于韧性的内涵,将 t 时刻路段韧性重要度定义为:自 $t=0$ 时刻起,至 t 时刻路段修复至连通时路网韧性的增加值. 路段韧性重要度指标的表达式如下:

$$I_{\text{RAW}}^t_i = R(t_f | e_i^t) - R(t_f), \quad 0 \leq t \leq t_f \quad (2)$$

式中: $I_{\text{RAW}}^t_i$ 为 t 时刻路段 i 对路网韧性的重要度; e_i^t 表示以 t 时刻路段 i 连通作为证据; $R(t_f | e_i^t)$ 表示 t 时刻路段 i 连通条件下路网 t_f 时刻的韧性值; $R(t_f)$ 表示基准路网 t_f 时刻的韧性值.

该路段韧性重要度指标是对已有路段韧性重要度指标^[2,7]的一种改进. 与仅考虑初始时刻路段处于完全中断/连通对路网韧性的影响作为重要度指标相比,本指标考虑了不同时刻路段恢复对路网韧性的影响;与考虑某时刻路段完全中断/连通对路网韧性的影响作为重要度指标相比,本指标考虑了路段的恢复过程对全过程路网韧性(即韧性曲线的变化)的影响.

间的 CPT,DBN 模型在上述两个要素外还需各节点间跨时刻的 CPT.

如图 6 所示,传统路段韧性重要度指的是路段瞬时连通下该时刻系统韧性的增加值,韧性曲线在该时刻骤变;本文路段韧性重要度指的是路段在不同维修速率下基准时刻的系统韧性增加值,关注韧性曲线的全过程变化。

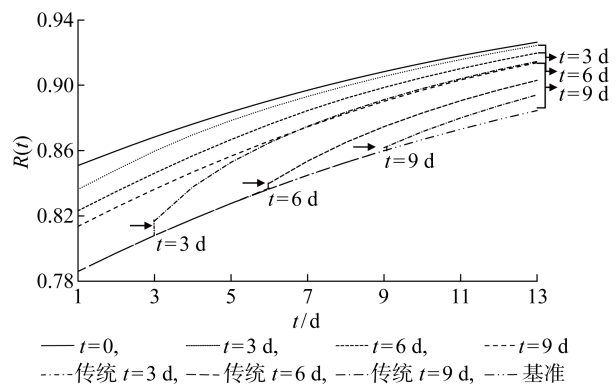


图 6 路段韧性重要度对比

Fig. 6 Comparison of link resilience importance

2.2.2 路段韧性重要度评价 在基准 DBN 中添加 t 时刻路段 i 连通的证据后, DBN 的向前推理能够更新节点(路段 i 节点自身、路段 i 节点的父节点与子节点) t 时刻及以后的概率变化, 向后推理能够更新节点初始时刻至 t 时刻的概率变化, 实现路网韧性的全过程概率更新, 如图 7 所示。将更新后的路

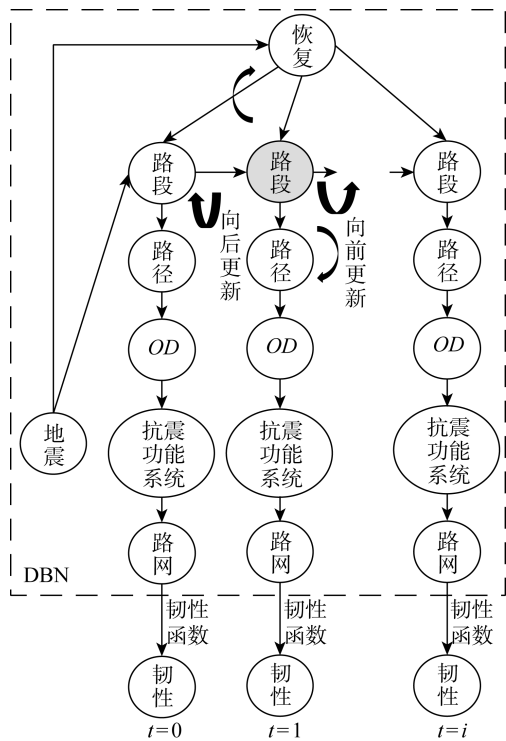


图 7 DBN 的概率更新原理

Fig. 7 DBN principle of probability updating

网韧性与基准路网韧性代入式(2),即可评价路段韧性重要度。

本文提出的路段韧性重要度指标符合韧性的内涵,重要度评价方法能够指导区域路网灾前预防与灾后恢复策略。 $t=0$ 时刻的路段韧性重要度反映了路段受地震作用依然保持连通条件下路网韧性的提高水平,符合韧性内涵中的鲁棒性部分,对应灾前预防工作; $t>0$ 时刻的路段韧性重要度反映了路段震后不同修复速率条件下路网韧性的提高水平,符合韧性内涵中的恢复性部分,对应灾后恢复工作。

3 实例应用

3.1 实例概况

选择青岛市市南区局部(八大湖、金门路、香港中路和珠海路 4 个街道)路网作为实例,验证本文提出的基于路网韧性的路段重要度评价方法的实用性。该路网的拓扑结构图包含 17 个节点、42 条路段,如图 8 所示;不同烈度下路段的连通概率如表 3 所示,其为张洁^[14]通过震害调查数据,结合震害经验统计法计算得到的客观结果;路段—路径—OD 对—O 点 / D 点—抗震功能系统的关联信息如表 4 所示。其中,应急救援 / 物资运输系统的连通指其所含的所有 D 点的连通,每个 D 点的连通表示每个汇点均有至少一个 O 点(救援部门 / 物资运输点)能够服务;医疗救护系统的连通指所含的所有 O 点的连通,每个 O 点的连通表示每个源点均有至少一个 D 点(医院)能够服务。

方东平等^[15]给出了不同烈度下各类交通功能完全恢复的平均时间,基于此,本文设定 7 度、8 度、9 度烈度下的恢复时间 $t_{MTTR}=2, 5, 11$ d。

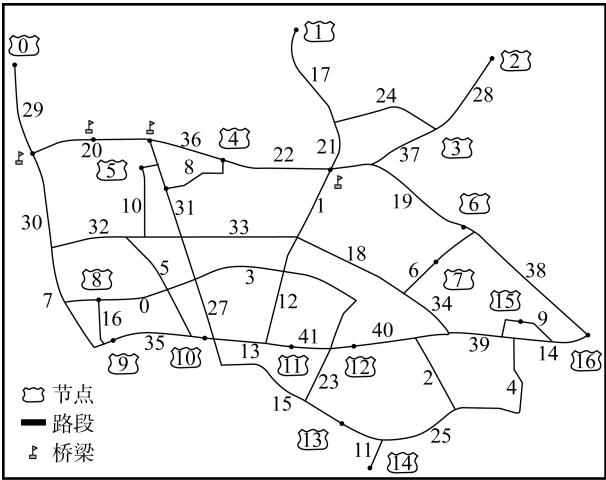


图 8 路网拓扑结构图

Fig. 8 Topological structure of road network

表 3 不同烈度下路段的连通概率^[14]

Tab. 3 Connectivity probability of links at different intensities^[14]

路段	7 度	8 度	9 度	路段	7 度	8 度	9 度	路段	7 度	8 度	9 度	路段	7 度	8 度	9 度
0	1	1	0.89	11	—	—	—	22	0.86	0.82	0.79	32	1	0.98	0.96
1	1	1	0.92	12	1	1	0.92	23	1	1	0.95	33	1	0.98	0.96
2	1	1	1	13	1	1	1	24	1	1	1	34	1	1	0.5
3	1	1	0.89	14	1	1	1	25	1	1	1	35	1	1	1
4	1	1	1	15	1	1	1	26	—	—	—	36	0.71	0.64	0.55
5	1	1	0	16	1	1	1	27	1	1	0.92	37	0.86	0.82	0.79
6	—	—	—	17	1	1	0.98	28	1	1	0.99	38	1	1	1
7	1	1	0.98	18	1	0.98	0.96	29	1	1	0.98	39	1	1	0.86
8	1	1	1	19	1	1	1	30	1	1	0.98	40	1	1	0.5
9	—	—	—	20	0.71	0.64	0.59	31	1	1	0.92	41	1	1	1
10	1	1	0	21	1	1	0.98								

表 4 抗震功能分系统下的 OD 对及路径

Tab. 4 OD pairs and routes of each subsystem

抗震功能系统	OD 对	路径	抗震功能系统	OD 对	路径
应急救援系统	(5)→(4)	36	医疗救护系统	(4)→(3)	22+37
		8			22+21+24
	(5)→(10)	10+5		(4)→(8)	8+31+27+0
		31+27			36+20+30+7+0
	(5)→(11)	31+27+13		(10)→(8)	35+16
		31+33+12			27+0
	(15)→(12)	39+40		(10)→(13)	15
		4+25+15+23			13+41+23+15
	(0)→(7)	29+20+36+22+19		(11)→(8)	13+35+16
		29+30+32+33+18			41+3+0
物资运输系统	(0)→(14)	29+30+7+35+15		(11)→(13)	41+23+15
		29+20+31+27+15			41+40+2+25
	(1)→(7)	17+21+19		(12)→(8)	41+3+0
		17+21+1+18			41+13+35+16
	(2)→(7)	28+37+19		(12)→(13)	41+23+15
		28+37+1+18			40+2+25
	(16)→(7)	38			
		14+39+34			

3.2 基准 DBN 构建

基于上述实例信息与数据,构建路网的 DBN. 该 DBN 能够评价路网的全过程抗震韧性,同时也是评价路段韧性重要度的基准.

在 7、8 度烈度下,该路网的连通性始终为 1,因而其韧性也为 1,可能的原因是所选算例的设计抗震烈度高,路网 7、8 度烈度下性能未受损. 因此本文

关注 9 度烈度下该路网的连通性与抗震韧性,9 度烈度下路网的基准连通性曲线与韧性曲线如图 9 所示.

9 度烈度下,自 0 时刻开始,路网的连通性逐渐恢复. $t=13$ d 时,路网的连通性约为 0.954,超过了路网连通性期望水平(本文取 1)的 95%,因此取 $t_f=13$ d 为路网恢复至期望水平的时刻. 路网的韧

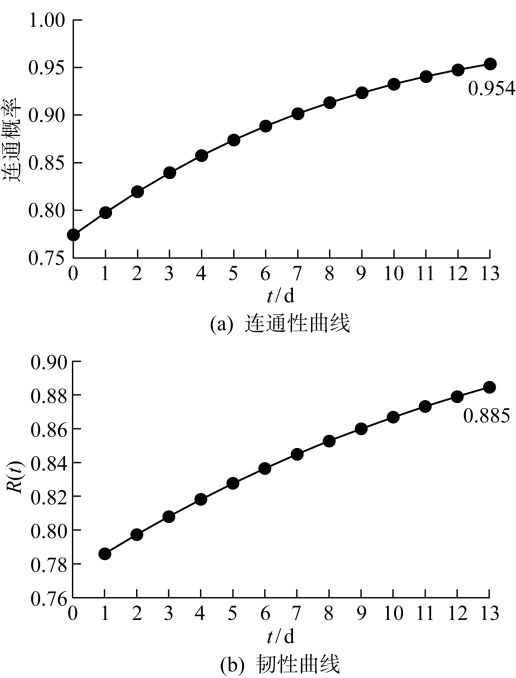


图 9 9 度烈度下路网的连通性和韧性曲线

Fig. 9 Connectivity and resilience curves of road network at intensity 9

性也逐渐提高,最终韧性水平为 0.885.

3.3 路段韧性重要度评价

$t=0$ 代表地震影响结束的时刻, $t=3, 6, 9\text{ d}$

分别位于维修前期、中期和后期 3 个不同的时间段,本文选择 $t=0, 3, 6, 9\text{ d}$ 共 4 个时刻评价路段的韧性重要度,具有一定的代表性.同时,仅考虑在 9 度烈度下有中断概率的路段作为研究对象,不考虑 9 度烈度下完全连通的路段如路段 2、4 等.其中,路段 5 和路段 10 较为特殊,其在 9 度烈度下完全中断,且这两条路段属于同一路径,仅考虑其中一条连通并不影响路径的状态变化,因此在重要度评价中将其视为一条路段,即 5&10.

3.3.1 t 时刻不同路段连通下的路网韧性曲线

以 t 时刻路段 i 连通作为证据,将概率更新后的路网连通性曲线代入式(1),得到相应路网的韧性曲线如图 10 所示,这里给出韧性重要度较为显著的、具有代表性的路段 31、27、5&10 和 29 的相应结果.

从图 10 可以得到, t 时刻不同路段的连通均会提高路网的韧性水平,但提高的程度不同,该提高程度即代表路段韧性重要度. $t=0$ 时刻,路段 31、27 和 5&10 连通时,路网的韧性水平有显著提高,与基准路网韧性值 0.885 相比,该 3 条路段的连通对路网韧性的提高值分别为 0.041、0.035 和 0.028;其余路段对路网韧性的提高程度较为接近,其中路段 29 的连通对路网韧性的提高值为 0.01. $t=3, 6, 9\text{ d}$ 时刻,路段 31、27 的韧性重要度依然较为显著,

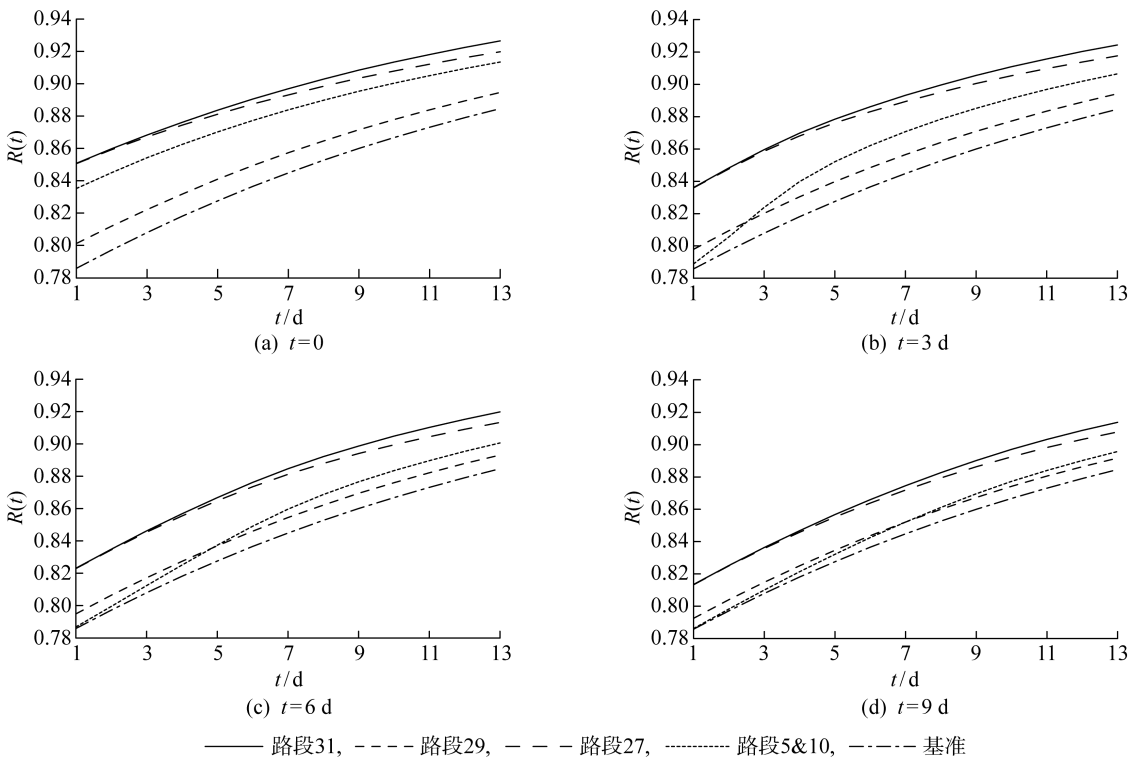


图 10 t 时刻不同路段连通条件下路网的韧性曲线

Fig. 10 Resilience curves of road network of different connected links at time t

而路段 5&10 的重要度逐渐下降。

因此,从路网震前预防策略来看,需要重点关注路段 31、27 和 5&10,提升其抗震鲁棒性能够更高效地提升路网的抗震鲁棒性水平,从而提升路网的抗震韧性。

3.3.2 路段在不同时刻连通下的路网韧性曲线

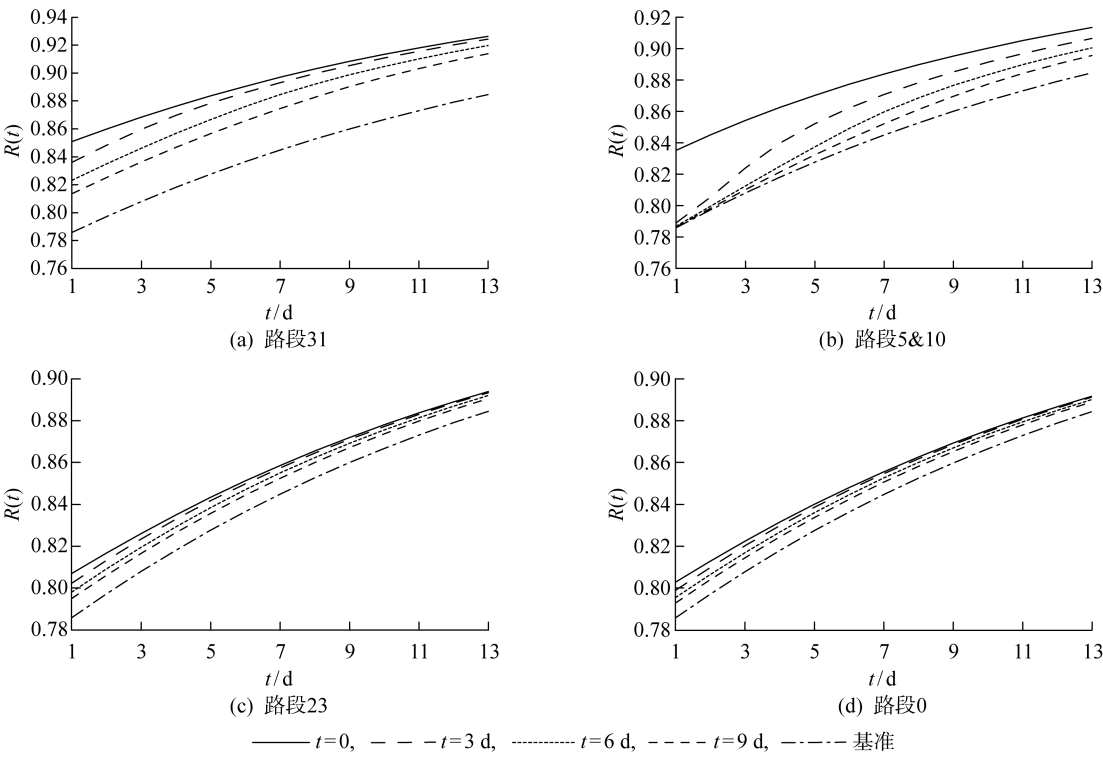


图 11 路段 i 不同时刻连通条件下路网的韧性曲线
Fig. 11 Resilience of road network of connected link i at different times

不同路段的韧性重要度对 t 时刻的敏感程度不同. 路段 31 与路段 5&10 的韧性重要度对 t 时刻较为敏感,路段 23 与路段 0 的韧性重要度对 t 时刻敏感度较低. 以路段 5&10 为例, $t=0$ 时刻其重要度为 0.028, $t=3$ d 时刻为 0.021, $t=6$ d 时刻为 0.015, $t=9$ d 时刻下降到 0.011,不同时刻其重要度差距较为显著;而对路段 23 来说, $t=0$ 时刻其重要度为 0.009,至 $t=9$ d 时刻下降到 0.006,差距较小.

因此,从路网震后恢复策略来看,在维修资源有限的条件下,重要度较高且对时间较为敏感的路段的维修优先级应视为最高级,其次为重要度较高但重要度对时间敏感性较低的路段,再次为重要度较低但对时间较为敏感的路段,最后为重要度与时间敏感性均较低的路段.

3.3.3 路段韧性重要度总结 根据式(2)计算得到的路段韧性重要度结果如表 5 和图 12 所示.

以路段 i 在不同时刻连通为证据,路网的韧性曲线如图 11 所示,这里给出路段 31、5&10、23 和 0 的相应结果.

从图 11 可以得到,路段在不同时刻的连通均会提高路网的韧性水平,但提高的程度不同,路段韧性重要度与维修速率成正相关.

表 5 路段韧性重要度结果				
Tab. 5 Results of link resilience importance				
路段	$t=0$	$t=3$ d	$t=6$ d	$t=9$ d
31	0.041	0.039	0.035	0.029
27	0.035	0.033	0.028	0.023
5&10	0.028	0.021	0.015	0.011
29	0.01	0.009	0.008	0.007
23	0.009	0.008	0.007	0.006
22	0.007	0.007	0.005	0.004
0	0.007	0.006	0.005	0.004
40	0.007	0.006	0.005	0.004
20	0.005	0.004	0.003	0.003
7	0.002	0.002	0.002	0.001
30	0.002	0.002	0.002	0.001
39	0.001	0.001	0.001	0

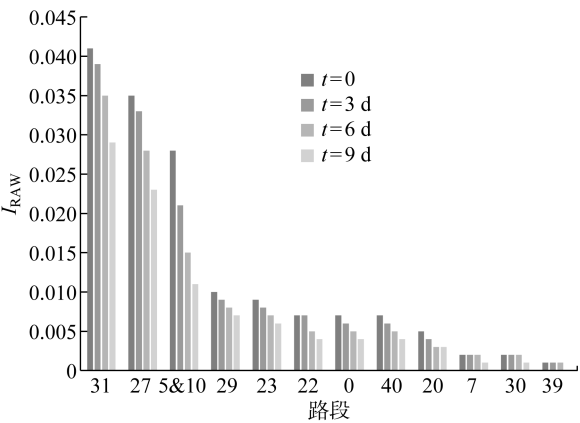


图 12 各时刻路段韧性重要度

Fig. 12 Link resilience importance at different times

3.3.1 和 3.3.2 节分别从横向(t 时刻不同路段)与纵向(路段不同时刻)对比了路网抗震韧性曲线的变化,图 12 总结了路段韧性重要度的横向与纵向比较结果.从图 12 可以得到,路段的重要度与重要度对时间的敏感性是路网抗震韧性水平提高程度的两个重要因素.重要度较高且对时间较为敏感的路段连通的时刻越早,路网韧性水平提高越显著;路段 31、27 和 5&10 的连通能够显著提高路网的韧性水平,而路段 7、30 和 39 的连通对于路网韧性水平的提高程度较小.

路段韧性重要度评价的结果可以为路网震前预防和震后恢复策略的制定提供参考.对震前预防策略来说,需要重点关注 $t=0$ 时刻重要度较高的路段,如 31、27 和 5&10 等,提高路段抗震鲁棒性,从韧性理论中的鲁棒性部分提高路网韧性水平;对震后恢复策略来说,需要合理分配维修资源,优先修复重要度较高且对时间较为敏感的路段,提高路段震后恢复性,从韧性理论中的恢复性部分提高路网韧性水平.

4 结论

已有研究多根据瞬时的构件/路段状态变化导致的系统韧性变化来识别重要构件/路段,同时较少关注除初始时刻 $t=0$ 外的时刻,基本思路沿袭了可靠性、脆弱性的构件/路段重要度识别,忽略了恢复过程在构件/路段重要度识别中的作用.因此,以路网韧性的增加值 RAW 为评价指标,提出了一种基于路网抗震韧性的路段重要度评价方法.以 9 度烈度下青岛市市南区局部路网的路段韧性重要度评价为例,结果表明:

(1) 本文提出的路段重要度指标是对已有路段韧性重要度指标的一种改进,考虑了路段的恢复过

程以及对全过程路网韧性(即韧性曲线的变化)的影响.

(2) 同一时刻不同路段的连通均会提高路网的韧性水平,但提高的程度不同;同一路段在不同时刻的连通均会提高路网的韧性水平,但提高的程度不同,路段恢复至连通状态的时刻越早,路网的韧性水平越高.

(3) 不同路段的韧性重要度对 t 时刻的敏感程度不同.因此,路网韧性策略需要重点关注重要度较高且对时间较为敏感的路段.

(4) 提出的基于路网抗震韧性的路段重要度评价方法实现了从路网韧性到路段重要度的一种整体与局部的联系,从宏观和微观两个视角为路网抗震韧性水平的提高提供参考.

本文提出的路段抗震韧性重要度评价方法能够指导路网震前预防和震后恢复策略制定,从而改善路网韧性,提升抗震减灾水平,但也存在一定的不足之处,后续可以在以下方面继续开展研究工作:

(1) 本文仅考虑了路网抗震性能中最基本的连通性时变曲线作为抗震韧性评价的指标.实际上,运输能力、行程时间可靠性等也属于抗震性能的范围,综合考虑多种抗震性能能够丰富路网抗震韧性评价.因此,后续研究可探索基于多指标的路网抗震韧性评价.

(2) 在维修前期对重要路段进行抢修是提升路网抗震韧性水平最高效的方式,但也对维修资源、成本提出了更高的要求.后续研究可结合不同路段在不同时刻的韧性重要度评价结果与维修资源、成本,探索兼顾成本与效率的震后路网修复策略.

(3) 本文所构建的模型中,假定地震对道路交通系统的影响结束后立刻进行道路抢修工作,忽略了实际情况中的一些延滞时间;同时,假定路段的维修速率都是相同的.实际情况中,维修速率还与路段受损情况、维修资源等相关.后续研究中可基于实际数据,在路段时变特征的表达上对维修速率及状态迁移矩阵进一步改进.

参考文献:

[1] BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E, ROCCO C M. Resilience-based network component importance measures[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2013(117): 89-97.

[2] 吕彪,高自强,刘一骊. 道路交通系统韧性及路段重要度评估[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(2): 114-121.

LV Biao, GAO Ziqiang, LIU Yiliu. Evaluation of

- road transportation system resilience and link importance[J]. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, 2020, 20(2): 114-121.
- [3] LI R Y, GAO Y. On the component resilience importance measures for infrastructure systems[J]. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, 2022(36): 100481.
- [4] 潘星, 蒋卓, 杨艳京. 基于弹性的体系组件重要度及恢复策略[J]. **北京航空航天大学学报**, 2017, 43(9): 1713-1720.
- PAN Xing, JIANG Zhuo, YANG Yanjing. Resilience-based component importance and recovery strategy for system-of-systems[J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 2017, 43(9): 1713-1720.
- [5] ZHANG Y B, KANG R, LI R Y, *et al.* Resilience-based component importance measures for complex networks[C] // **2016 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu)**. Chengdu, China: IEEE, 2016: 1-6.
- [6] WEN M L, CHEN Y B, YANG Y, *et al.* Resilience-based component importance measures[J]. **International Journal of Robust and Nonlinear Control**, 2020, 30(11): 4244-4254.
- [7] GAO Z Q, LV B, GUAN X Y, *et al.* Connectivity resilience assessment of urban road networks under earthquake based on Bayesian network[C] // **2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems**. Rhodes, Greece: IEEE, 2020: 1-6.
- [8] 何祥, 袁永博, 周方, 等. 道路网络路段韧性重要度的 EFAST 评价方法[J]. **安全与环境学报**, 2023, 23(8): 675-681.
- HE Xiang, YUAN Yongbo, ZHOU Fang, *et al.* An EFAST-based evaluation method for resilience importance of road-network links[J]. **Journal of Safety and Environment**, 2023, 23(8): 675-681.
- [9] 陈舞, 王浩, 张国华, 等. 基于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的隧道坍塌易发性评价[J]. **上海交通大学学报**, 2020, 54(8): 820-830.
- CHEN Wu, WANG Hao, ZHANG Guohua, *et al.* Evaluation of tunnel collapse susceptibility based on T-S fuzzy fault tree and Bayesian network[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2020, 54(8): 820-830.
- [10] HUANG K Q, GU Y K, LIANG L Q. Reliability risk evaluation method for complex mechanical system based on optimal Bayesian network[J]. **Journal of Donghua University (English Edition)**, 2016, 33(2): 177-182.
- [11] HENRY D, RAMIREZ-MARQUEZ J E. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2012(99): 114-122.
- [12] QI T, MING Y, ALTYNGUL Z. A dynamic Bayesian network-based approach to resilience assessment of engineered systems[J]. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2020(65): 104152.
- [13] 陈轶钦, 黄淑萍. 基于动态贝叶斯网络的道路交通系统抗震韧性评价[J]. **地震研究**, 2023, 46(2): 280-290.
- CHEN Yiqin, HUANG Shuping. Seismic resilience evaluation of road traffic system based on dynamic Bayesian network[J]. **Journal of Seismological Research**, 2023, 46(2): 280-290.
- [14] 张洁. 城市应急道路网络构成及抗震可靠性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- ZHANG Jie. Building of urban emergency road network and seismic reliability research[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [15] 方东平, 李全旺, 李楠, 等. 社区地震安全韧性评估系统及应用示范[J]. **工程力学**, 2020, 37(10): 28-44.
- FANG Dongping, LI Quanwang, LI Nan, *et al.* An evaluation system for community seismic resilience and its application in a typical community[J]. **Engineering Mechanics**, 2020, 37(10): 28-44.

(本文编辑: 王一凡)