

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0191

基于不确定理论的网络时间可靠性评估方法

马骥¹, 李瑞莹^{1,2,*}, 张清源³, 康锐^{1,2,3}

(1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191; 2. 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100191;

3. 杭州市北京航空航天大学国际创新研究院(北京航空航天大学国际创新学院), 杭州 311115)

摘 要: 针对现有的网络时间可靠性评估方法往往只考虑固有不确定性的影响, 而忽略由于故障信息不足而导致的认知不确定性对可靠性评估结果影响的问题, 提出一种基于不确定理论的新方法。根据网络可靠性关注的节点范围, 设计了单节点对和多节点对时间可靠度两类度量参数, 提出了扩展不确定网络模型可直接实现对节点和链路上的认知不确定性特征建模, 并进一步设计了基于最可靠路径和最可靠扩展不确定子网络的单节点和多节点对时间可靠度算法。分别以一个六节点网络、中国教育和科研计算机网(CERNET)骨干网络为例, 应用所提方法实现了2种时间可靠性指标的评估, 验证了所提方法的正确性和有效性。

关 键 词: 时间可靠性评估; 认知不确定性; 扩展不确定网络; 不确定理论; 确信可靠性

中图分类号: TB114.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)04-1267-10

通信、电力、交通等网络设施为人们的生活带来了极大的便捷。为分析这类网络化结构系统的可靠性水平, 研究者开展了大量研究。最早的网络可靠性研究集中在连通可靠性方面, 其关注在规定时间内和规定条件下网络保持连通的能力^[1]。连通可靠性主要考查网络中节点和链路故障对网络互联互通的影响。考虑到建立网络的目的是要传输信息、物质和能量, 除了满足连通要求, 网络还需要满足这些负载对网络性能的要求^[2-3]。作为网络功能体现, 性能(时间、容量、丢包率等)是网络在工程实践中着重考察的内容。因此, 研究人员在连通可靠性的基础上加入性能约束条件, 逐渐形成了性能可靠性概念^[4]。性能可靠性是指在规定时间内和规定时间内, 网络提供的性能满足传输要求的能力。目前, 常见的性能可靠性参数有时间可靠性, 容量可靠性等, 其中, 时间可靠性作为网络中重要的可靠性参数, 关注的是信息、物质和能量在网络

中传输时间满足传输时间阈值的能力^[4]。

时间可靠性, 在通信网络和交通网络里也称为及时可靠性或行程时间可靠性, 研究人员提出了很多评估方法。Liu等^[5]将通信网络中时延表征为离散随机变量并建立随机流网络, 基于概率用户均衡模型和时延失效模型, 提出通信网络时间可靠性定义和算法。Wu等^[6]考虑航空电子全双工交换以太网中流量随机性对时延的影响, 提出一种基于网络演算的时间可靠性概率算法。Wang和Guo^[7]考虑随机攻击和故意攻击对交通网络的影响, 给出基于旅行时间系数和延迟系数的时间可靠度定义, 基于复杂网络理论对交通网络的时间可靠性进行了评估。Zhang等^[8]提出线性量化混合模型, 分析不同因素对旅行时间可靠性的影响并对高速公路的时间可靠度进行了评估。

上述时间可靠性评估方法均以概率论为基础, 计算网络传输时间满足用户要求的概率。在这些

收稿日期: 2023-04-21; 录用日期: 2023-07-20; 网络出版时间: 2023-07-28 17:01

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230728.1358.001

基金项目: 国家自然科学基金(61773044, 62073009); 可靠性与环境工程技术重点实验室基金(WDZC2019601A301)

*通信作者. E-mail: liruiying@buaa.edu.cn

引用格式: 马骥, 李瑞莹, 张清源, 等. 基于不确定理论的网络时间可靠性评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(4): 1267-1276.

MA J, LI R Y, ZHANG Q Y, et al. Network time reliability evaluation method based on uncertainty theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(4): 1267-1276 (in Chinese).

方法中,故障数据是开展可靠性评估的基础。当故障数据充足时,由于符合概率论中的大数定律条件,可以应用概率论评估网络可靠性,此时系统主要表现为固有不确定性(即随机不确定性)。然而,当故障信息不足时(单个或几个故障数据),此时系统存在认知不确定性^[9]。例如,对于一些新研网络,受成本和环境等因素影响,很难获取足够的故障数据^[10-13]。这种情况下就无法应用概率论进行网络可靠性评估。

为量化认知不确定性,一些数学理论相继被提出,如证据理论^[14]、模糊理论^[15]和区间理论^[16]等。Mi等^[17]开发了一种基于证据网络的网络可靠性分层算法。Qi和Cheng^[18]采用区间理论来评估发电网络的精确可靠性。Zhang等^[19]基于模糊理论对网络的旅行时间可靠性进行了评估。然而,模糊理论不满足对偶性,会造成反直觉的可靠性评估结果;基于证据理论或区间理论的方法存在区间扩张等问题,对网络特别是对于大型网络会造成可靠性评估结果不准确^[20];为此,Liu^[21]在2007年提出不确定理论。不确定理论将只有有限信息的事件表述为不确定变量,用不确定测度(非频率)来描述该事件发生的可能性。由于不确定测度服从对偶性公理和乘积公理,因此,基于不确定理论的可靠性度量可以克服上述理论中存在的对偶性问题及区间扩张的问题。Kang等^[22-23]基于不确定理论、概率论和机会理论^[24]提出确信可靠性理论,分别可以解决系统存在认知不确定性、固有不确定性和2种不确定性混合场景下的系统可靠性度量问题。在不确定理论描述的认知不确定性分支,Wang等^[25]采用不确定变量表达原油海运网络中各个节点的连通性,建立了最可靠路径选择模型,设计了网络连通可靠性评估方法。Hosseini和Pishvae^[26]考虑了灾后交通网络中链路通断和容量的认知不确定性,基于不确定理论对网络的容量可靠性进行了评估。然而由于没有考虑时间约束,且只能评估2个节点之间的端端可靠性,上述方法无法直接应用到时间可靠性评估中。

因此,基于上述分析,本文基于不确定理论对受认知不确定性影响的网络设计时间可靠性度量参数和评估方法。首先,考虑网络特征,给出了单节点对和多节点对时间可靠度定义;然后,建立扩展不确定网络描述受认知不确定性影响的网络,并基于该模型给出了单节点对和多节点时间可靠度算法;最后,以一个简单网络验证了本文方法的准确性并基于某个教育网骨干网络作为案例给出了时间可靠性评估流程。本文方法能够解决认知不

确定性条件下网络时间可靠性量化问题,既适用于双向网络,也适用于单向网络。

1 时间可靠性

在确信可靠性理论中,系统确信可靠性是指系统功能的性能裕量大于0的能力^[22-23]。其中,性能裕量 $m(t)$ 是系统的性能指标与需求阈值之间的距离,定义如下^[27]:

$$m(t)=\begin{cases} p_{\text{th}}-p(t) & p(t)\text{为望小型参数} \\ p(t)-p_{\text{th}} & p(t)\text{为望大型参数} \\ \min(p_{\text{th,U}}-p(t),p(t)-p_{\text{th,L}}) & p(t)\text{为望目型参数} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $p(t)$ 表示系统在 t 时刻的性能参数; p_{th} 表示系统中性能参数阈值,即故障判据; $p_{\text{th,U}}$ 和 $p_{\text{th,L}}$ 分别表示望目型参数阈值的上界和下界。

当 $m(t)>0$ 时,系统的功能满足要求。当系统故障特征存在认知不确定性特征时,其确信可靠度为系统性能裕量大于0的不确定测度,即

$$R_{\text{B}}^{\text{U}}(t)=\mathcal{M}\{m(t)>0\} \quad (2)$$

传输时间是通信网络、交通网络的关键性能参数。基于确信可靠性理论,对于受认知不确定性影响的网络,其时间可靠度为时间裕量大于0的不确定测度。通常,网络可靠性参数还会根据所考察的节点范围进一步分为:端端可靠度、 K 端可靠度和全端可靠度。其中, K 端可靠度是指节点集 K 内所有节点之间实现规定功能的概率^[28],而端端可靠度和全端可靠度则分别是 K 端可靠度在“节点集 K 只有2个节点”和“节点集 K 为网络中所有节点”情况下的特例^[29]。然而,在一些应用场景中,比起关注特定用户群,本文更关心网络能满足多少百分比用户的需求,即关注网络中可靠的节点对数(2个节点为一组节点对)。因此,为了能够表述出不同节点对要求范围下的网络时间可靠度,本文分别定义了单节点对和多节点对时间可靠度。

定义1 单节点对时间可靠度。单节点对时间可靠度是 t 时刻指定节点 v_s 与节点 v_t 之间的传输时间裕量 $m_{\text{sn}}(t)$ 大于0的不确定测度。

$$R_{\text{sn}}(t)=\mathcal{M}\{m_{\text{sn}}(t)>0\}=\mathcal{M}\{D_{\text{th}}-D_{\text{sn}}(t)>0\} \quad (3)$$

式中: $D_{\text{sn}}(t)$ 表示在 t 时刻节点 v_s 与节点 v_t 之间的传输时间; D_{th} 表示传输时间阈值。

定义2 多节点对时间可靠度。多节点对时间可靠度是 t 时刻网络中至少 $k(1\leq k\leq K,K$ 为网络中总节点对数组节点对的传输时间裕量 $m_{\text{mn}(k)}(t)$ 大于0的不确定测度:

$$R_{mn(k)}(t) = \mathcal{M}\{m_{mn(k)}(t) > 0\} = \mathcal{M}\{D_{th} - D_{mn(k)}(t) > 0\} \quad (4)$$

式中: $D_{mn(k)}(t)$ 表示 t 时刻 k 组节点对的传输时间, 其值为网络中所有 K 组节点对传输时间的第 k 小值; D_{th} 表示传输时间阈值。

需要指出的是, 单节点对时间可靠度不等同于 $k=1$ 时的多节点对时间可靠度, 这是因为前者关注指定节点对, 而后者关注任意一组节点对。此外, 当 $k=K$ 时的多节点对时间可靠度关注的是网络中所有节点之间的传输时间都满足要求的不确定测度。

2 时间可靠性模型与算法

首先, 本节给出网络时间可靠性模型, 然后, 基于该模型分别给出单节点对与多节点对时间可靠度算法。为方便表达, 本文将表达式中的 t 略去, 下文中提及的 R 、 D 均是指 t 时刻下的可靠度和传输时间。

本文假设:

- 1) 网络中节点和链路只有故障和正常 2 种状态, 不存在性能降级状态。
- 2) 网络中各节点、链路上的故障相互独立。
- 3) 网络中信息、物质和能量传输不存在循环情况。

2.1 模 型

对于受认知不确定性影响的网络, Liu^[30]提出不确定网络的概念, 其描述了网络中链路权重的认知不确定性。然而现实世界中的网络, 节点也有权重且可能存在认知不确定性。虽然可以通过图变换的方式, 将节点扩展成链路, 用链路的权重和认知不确定性表征节点相应特征, 即通过扩展网络规模建立等效的不确定网络, 但是网络规模的扩大无疑会使后续的相关计算变得更为复杂。因此, 本文在不确定网络的基础上定义了扩展不确定网络, 用于描述链路和节点权重存在认知不确定性的网络。下面给出扩展不确定网络的定义。

定义 3 扩展不确定网络。扩展不确定网络是由节点集合 V , 链路集合 E 及节点与链路集合对应的不确定变量集合 W 组成的三元组, 记作 $G(V, E, W)$ 。

通常来说, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_{N+M}\}$ 。在该网络中, V 和 E 定义了网络的结构, W 表示链路和节点上的权重, 为不确定变量集合。其中, $w_1, w_2, \dots, w_N$ 表示节点 $1, 2, \dots, N$ 上的权重, $w_{N+1}, w_{N+2}, \dots, w_{N+M}$ 表示链路 $1, 2, \dots, M$ 上的权重。

基于扩展不确定网络定义可以建立时间可靠

性模型 $G(V, E, D)$, 其中, D 表示链路和节点上的传输时间集合, 具体建模过程如下:

考虑到节点和链路只有正常和故障 2 种状态, 本文将节点和链路状态(正常或故障)表述为布尔不确定变量 $\xi_i, i=1, 2, \dots, N+M$ 。基于专家经验或节点与链路的故障数据, 采用不确定统计方法^[21]可以得到 ξ_i 分别为 1 或 0 时的不确定测度。对于 ξ_i , 有

$$\xi_i = \begin{cases} 1 & \text{节点/链路正常, 不确定测度为 } \alpha_i \\ 0 & \text{节点/链路故障, 不确定测度为 } 1 - \alpha_i \end{cases} \quad (5)$$

收集无故障情况下各个节点和链路上的传输时间, 记作 d_i^c 。此时节点或链路上传输时间 d_i 可以表示为 d_i^c 与 ξ_i 的乘积, 即 $d_i = \xi_i \times d_i^c$ 。对于 d_i , 有

$$d_i = \begin{cases} d_i^c & \text{节点/链路正常, 不确定测度为 } \alpha_i \\ \infty & \text{节点/链路故障, 不确定测度为 } 1 - \alpha_i \end{cases} \quad (6)$$

根据网络连接关系建立扩展不确定网络模型, 并建立传输时间邻接矩阵。传输时间邻接矩阵如下所示:

$$A(G) = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & d_{1,N} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & d_{2,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{N,1} & d_{N,2} & \cdots & d_{N,N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

为方便邻接矩阵的表示, 根据节点和链路之间的连接关系将 d_i 转化为 $d_{x,y}$, $1 \leq x, y \leq N$ 。当 $x=y$ 时, $d_{x,y}$ 表示节点 x 上的传输时间; 当 $x \neq y$ 时, $d_{x,y}$ 表示节点 x 与节点 y 之间链路上的传输时间。

2.2 单节点对时间可靠度算法

根据定义 1, 计算扩展不确定网络的单节点对时间可靠度。首先, 需要确定扩展不确定网络中节点 v_s 与节点 v_t 之间的传输时间 D_{sn} 。在扩展不确定网络中, D_{sn} 可以表示为

$$D_{sn} = f_{sn}(d_1, d_2, \dots, d_{N+M}) \quad (8)$$

式中: $d_1, d_2, \dots, d_{N+M}$ 表示扩展不确定网络 G 中节点和链路上的传输时间; f_{sn} 为网络单节点对时间函数。在扩展不确定网络中, 当某个节点或链路上的传输时间增加时, 节点 v_s 和节点 v_t 之间的传输时间只会会出现 2 种可能情况: 保持不变或变大。因此, f_{sn} 为一个单增函数。

根据式 (7) 和文献 [31] 中的定理, 可以计算网络中的单节点对时间可靠度。

定理 1^[31] 假设 m 为有限的正整数, $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m$ 为独立的取有限值的不确定变量, 即对 $i=1, 2, \dots, m$, $\eta_i \in \Omega_i = \{b_1^{(i)}, b_2^{(i)}, \dots, b_{h_i}^{(i)}\}$, 其中, $h_i \geq 2$, $b_1^{(i)} <$

$b_2^{(i)} < \dots < b_{h_i}^{(i)}$ 。如果 f 为一个单调的函数, 那么 $\eta = f(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m)$ 的分布满足:

$$\mathcal{M}\{\eta \leq k\} = \sup_{f(B_1, B_2, \dots, B_m) \subset (-\infty, k]} \min_{1 \leq i \leq m} \mathcal{M}\{\eta_i \leq B_i\} \tag{9}$$

式中: B_i 为集合 $\{b_1^{(i)}, b_2^{(i)}, \dots, b_{h_i}^{(i)}\}$ 的子集, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

根据定理 1 计算单节点对时间可靠度, 具体过程如下: 首先, 枚举出扩展不确定网络中所有满足时间阈值要求的子网络; 然后, 计算每个子网络中各个节点和链路都正常情况下的不确定测度; 最后, 对这些不确定测度取大, 得到的值即为单节点对时间可靠度。然而对于较大规模网络, 逐一枚举子网络将花费很长的计算时间。因此, 上述算法无法直接应用到较大规模网络中。为解决上述问题, 本文提出一个更为便捷的单节点对时间可靠度算法: 基于最可靠路径的单节点对时间可靠度。

首先, 给出最可靠路径的定义。

定义 4 最可靠路径。 p^* 为扩展不确定网络 G 中从节点 v_s 到节点 v_t 的一条满足传输时间阈值要求的路径。如果对于扩展不确定网络 G 中任意一条从节点 v_s 到节点 v_t 且满足传输时间阈值要求的路径 p , 都存在 $R_{sn,p^*} \geq R_{sn,p}$, 那么称 p^* 为最可靠路径, 其中, R_{sn,p^*} 和 $R_{sn,p}$ 分别是路径 p^* 和任意路径 p 的单节点对时间可靠度。

对于满足传输时间阈值要求的路径 p , 当该路径的所有节点和链路都连通时, 该路径是可靠的。根据定理 1, 路径 p 的单节点对时间可靠度为

$$R_{sn,p} = \min_{a_i \in p} \mathcal{M}\{d_i = d_i^c\} \tag{10}$$

式中: a_i 表示路径 p 上的节点或链路; d_i^c 表示节点或链路正常情况下的传输时间, 当 $d_i = d_i^c$ 时表示该节点或链路是连通的。

根据最可靠路径定义, 下面给出关于单节点对时间可靠度的定理。

定理 2 p^* 为扩展不确定网络 G 中节点 v_s 到节点 v_t 的最可靠路径, 则有

$$R_{sn,G} = R_{sn,p^*} \tag{11}$$

式中: $R_{sn,G}$ 为扩展不确定网络 G 中节点 v_s 到节点 v_t 的单节点对时间可靠度; R_{sn,p^*} 为路径 p^* 的单节点对时间可靠度。

证明 假设在扩展不确定网络 G 中从节点 v_s 到节点 v_t 共有 h 条满足传输时间阈值要求的路径, 分别为 $p_1, p_2, \dots, p_h$, 这些路径的可靠度分别为 $R_{sn,p_1}, R_{sn,p_2}, \dots, R_{sn,p_h}$ 。在这 h 条路径中, 只要有一条路径存在, 那么节点 v_s 到节点 v_t 是可靠的。因此下式成立:

$$R_{sn,G} = R_{sn,p_1} \vee R_{sn,p_2} \vee \dots \vee R_{sn,p_h} \tag{12}$$

根据定义 4 可知

$$R_{sn,p^*} = R_{sn,p_1} \vee R_{sn,p_2} \vee \dots \vee R_{sn,p_h} \tag{13}$$

证毕

基于定理 2, 本文给出扩展不确定网络中节点 v_s 和节点 v_t 之间的单节点对时间可靠度算法, 具体过程如下。

步骤 1 基于扩展不确定网络 $G(V, E, D)$, 构造不考虑故障情况下的确定网络 $G^c(V, E, D^c)$, 其中 $D^c = \{d_1^c, d_2^c, \dots, d_{N+M}^c\}$ 为确定性常量集合, 表示无故障情况下各个节点和链路上的时间。

步骤 2 在确定网络 $G^c(V, E, D^c)$ 中, 基于深度优先搜索算法选出节点 v_s 和节点 v_t 之间所有满足传输时间阈值要求的路径 $p_1, p_2, \dots, p_h$ 。

步骤 3 基于扩展不确定网络 $G(V, E, D)$, 计算出路径 $p_1, p_2, \dots, p_h$ 对应时间可靠度 $R_{sn,p_1}, R_{sn,p_2}, \dots, R_{sn,p_h}$ 。其中, 时间可靠度值最大的路径为最可靠路径, 最大值为节点 v_s 和节点 v_t 的时间可靠度。

单节点对时间可靠度算法的复杂度主要为求解步骤 2。由于本文将扩展不确定网络用邻接矩阵表示, 基于深度优先搜索算法思想计算指定节点间所有满足要求的路径。此时单节点对时间可靠度算法的复杂度为 $O(N^2)$, 其中, N 表示网络中的节点数。

2.3 多节点对时间可靠度算法

根据定义 2, 计算扩展不确定网络 G 的多节点对时间可靠度。首先, 需要得到 k 组节点对的传输时间 $D_{mn(k)}$ 。在扩展不确定网络中, 存在

$$D_{mn(k)} = f_{mn(k)}(d_1, d_2, \dots, d_{N+M}) \tag{14}$$

式中: $f_{mn(k)}$ 为多节点对传输时间函数, 是一个单增的函数。

和单节点对时间可靠度算法类似, 借助定理 1, 可以对一些简单网络的多节点对时间可靠度进行评估, 但却无法应用到大型网络中。为解决上述问题, 本文给出多节点对时间可靠度算法。首先, 给出可靠扩展不确定子网络和最可靠扩展不确定子网络的定义。

定义 5 可靠扩展不确定子网络。 $S_k = (V_k, E_k, D_k)$ 是扩展不确定网络 $G(V, E, D)$ 的子网络, 其中, $V_k \subseteq V, E_k \subseteq E, D_k \subseteq D$ 。当该子网络中所有链路和节点都存在时, 有 k 组节点对满足传输时间阈值要求, 且去掉任意一条链路或节点都不满足上述要求, 那么该子网络称为可靠扩展不确定子网络。

图 1 为一个具有 6 个节点和 8 条链路的扩展不确定网络, 各个节点和链路上无故障情况下的传输时间和对应的不确定测度如表 1 所示。该网络各

个节点之间的传输时间阈值均为 10 ms。那么, 当要求的节点对数为 3 时, 满足该要求的可靠扩展不确定子网络有 16 个, 本文给出 4 个示例, 如图 2 所示。

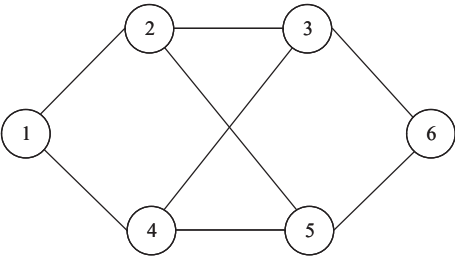


图 1 扩展不确定网络
Fig. 1 Extended uncertain network

表 1 节点和链路信息

Table 1 Node and link information					
节点编号	节点时间/ms	节点不确定测度	链路编号	节点时间/ms	节点不确定测度
1	1	0.99	$e_{1,2}$	1.5	0.96
2	1.9	0.97	$e_{1,4}$	1	0.92
3	1.9	0.94	$e_{2,3}$	1	0.93
4	1.9	0.96	$e_{2,5}$	1	0.98
5	1.9	0.95	$e_{3,4}$	1.5	0.91
6	1	0.98	$e_{3,6}$	1.5	0.95
			$e_{4,5}$	2	0.97
			$e_{5,6}$	1	0.94

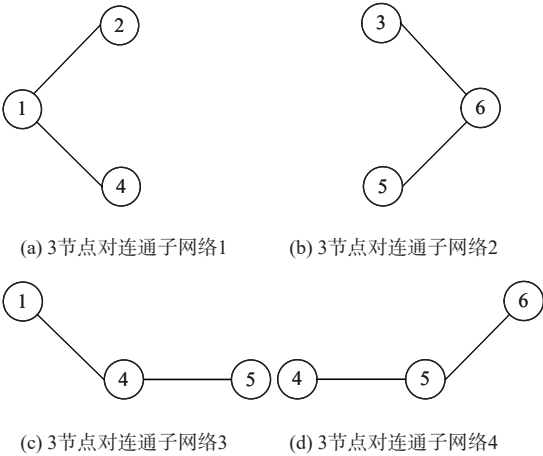


图 2 可靠扩展不确定网络
Fig. 2 Reliable extended uncertain network

定义 6 最可靠扩展不确定子网络。 S_k^* 为扩展不确定网络 G 中的一个可靠扩展不确定子网络, 如果对于扩展不确定网络 G 中任意一个可靠扩展不确定子网络, 都存在 $R_{mn(k), S_k^*} \geq R_{mn(k), S_k}$, 那么称 S_k^* 为最可靠扩展不确定子网络。其中, $R_{mn(k), S_k^*}$ 和 $R_{mn(k), S_k}$ 分别是 S_k^* 和 S_k 的多节点对时间可靠度。

定理 3 在扩展不确定网络 G 中, S_k^* 为最可靠扩展不确定子网络, 则有

$$R_{mn(k), G} = R_{mn(k), S_k^*} \quad (15)$$

式中: $R_{mn(k), G}$ 和 $R_{mn(k), S_k^*}$ 分别为扩展不确定网络 G 和最可靠扩展不确定子网络 S_k^* 的多节点对时间可靠度。

证明 令 $G(V, E, D)$ 为一个扩展不确定网络。在扩展不确定网络中, 很明显 $R_{mn(k), G} \geq R_{mn(k), S_k^*}$, 因此, 本文只需证明 $R_{mn(k), G} \leq R_{mn(k), S_k^*}$ 。

根据定理 1, 扩展不确定网络 G 中的多节点对时间可靠度为

$$R_{mn(k), G} = \sup_{f_{mn(k)}(B_1, B_2, \dots, B_{N+M}) < D_{th}} \min_{1 \leq i \leq N+M} \mathcal{M}\{d_i \in B_i\} \quad (16)$$

式中: B_i 为集合 $\{d_i^c, \infty\}$ 的子集, $i = 1, 2, \dots, N + M$ 。那么, 肯定存在一组 $\{B_i^c\}_{i=1}^{N+M}$, 取值 $\{d_i^c\}$ 或 $\{d_i^c, \infty\}$, 使得

$$R_{mn(k), G} = \min_{1 \leq i \leq N+M} \mathcal{M}\{d_i \in B_i^c\} = \min_{1 \leq j \leq J} \mathcal{M}\{d_{i_j} = d_{i_j}^c\} \quad (17)$$

式中: i_j 和 J 分别为 $\{i | B_i^c = \{d_i^c\}, 1 \leq i \leq N + M\}$ 的元素和元素规模。

那么由 J 个链路和节点组成的子网络 S 肯定满足 k 组节点对时间可靠的条件。如果子网络 S 中存在一条链路或节点不影响子网络 S 保持 k 组节点对时间可靠, 则将这条链路或节点去除, 得到一个新的子网络 S_1 , 包含 $J-1$ 个链路和节点。此时 S_1 肯定满足 k 组节点对时间可靠的条件, 且满足:

$$R_{mn(k), G} \geq R_{mn(k), S_1} \geq \min_{1 \leq j \leq J, j \neq J'} \mathcal{M}\{d_{i_j} = d_{i_j}^c\} \geq \min_{1 \leq j \leq J} \mathcal{M}\{d_{i_j} = d_{i_j}^c\} = R_{mn(k), G} \quad (18)$$

式中: $i_{j'}$ 为被移除的节点或链路的下标。此时得到

$$R_{mn(k), G} = R_{mn(k), S_1} \quad (19)$$

重复上述删除链路或节点的过程, 直到子网络没有多余的链路和节点可以去除, 且满足有 k 节点对时间可靠的条件。此时的子网络为一个可靠扩展不确定子网络且满足

$$R_{mn(k), G} = R_{mn(k), S_k} \leq R_{mn(k), S_k^*} \quad (20)$$

所以, 综上所述, 可知

$$R_{mn(k), S_k^*} \leq R_{mn(k), G} \leq R_{mn(k), S_k^*} \quad (21)$$

证得 $R_{mn(k), G} = R_{mn(k), S_k^*}$ 。 **证毕**
基于定理 3, 对扩展不确定网络 G 中多节点对时间可靠度的计算转化为对 S_k^* 中多节点对时间可靠度的计算。

定理 4 S_k^* 为扩展不确定网络 G 的最可靠扩展不确定子网络。假设网络 G 中共有 K 组节点对, 且这些节点对对应的单节点对时间可靠度分别为 $R_{sn, G, 1}, R_{sn, G, 2}, \dots, R_{sn, G, K}$, 那么 S_k^* 的多节点对时间可靠

度为

$$R_{mn(k),S_k^*} = k - \max [R_{sn,G,1}, R_{sn,G,2}, \cdots, R_{sn,G,K}] \quad (22)$$

式中: $k\text{-max}[\cdot]$ 表示 $[\cdot]$ 中第 k 大的值。

证明 令 S_k 为一个可靠扩展不确定子网络。根据定理 1 和定义 6, S_k 中的多节点对时间可靠度为

$$R_{mn(k),S_k} = \min_{e_i \in S_k} \mathcal{M}\{d_i = d_i^c\} \quad (23)$$

令 S_k 中的 k 个最可靠路径分别为 $p_1^*, p_2^*, \cdots, p_k^*$ 。那么存在

$$\begin{aligned} R_{mn(k),S_k} &= \min_{e_i \in S_k} \mathcal{M}\{d_i = d_i^c\} = \min_{e_i \in \bigcup_{j=1}^k p_j^*} \mathcal{M}\{d_i = d_i^c\} = \\ &= \min_{1 \leq j \leq k} \min_{e_h \in p_j^*} \mathcal{M}\{d_h = d_h^c\} = \min_{1 \leq j \leq k} R_{sn,S_k,j} \end{aligned} \quad (24)$$

式中: $R_{sn,S_k,j}$ 表示子网络 S_k 中第 j 组节点对对应的单节点对时间可靠度。

已知在扩展不确定网络 G 中共有 K 组节点对, 且这些节点对对应的单节点对时间可靠度分别为 $R_{sn,G,1}, R_{sn,G,2}, \cdots, R_{sn,G,K}$ 。考虑到 S_k 是 G 的子网络, 式 (24) 可以写为

$$R_{mn(k),S_k} = \min_{1 \leq j \leq k} R_{sn,S_k,j} = \min_{1 \leq j \leq k} R_{sn,G,j} \quad (25)$$

式中: $R_{sn,G,j}$ 为第 j 组节点对对应的单节点对时间可靠度。

对于最可靠扩展不确定子网络 S_k^* , 根据定义 6, 其多节点对时间可靠度为扩展不确定网络 G 中第 k 大单节点对时间可靠度, 即

$$R_{mn(k),S_k^*} = k - \max [R_{sn,G,1}, R_{sn,G,2}, \cdots, R_{sn,G,K}] \quad (26)$$

证毕

基于定理 3 和定理 4, 本文给出多节点对时间可靠度算法, 具体过程如下。

步骤 1 计算出扩展不确定网络 G 中的节点对总数 K 。

步骤 2 基于单节点对时间可靠度算法, 分别计算出扩展不确定网络中 K 组节点对对应的单节点对时间可靠度。

步骤 3 最后, 将这些可靠度从大到小依次排序, 第 k 个值为扩展不确定网络 G 的多节点对 (要求节点对数为 k) 时间可靠度。

多节点对时间可靠度算法的复杂度主要为步骤 2 中求解扩展不确定网络中 K 组节点对对应的单节点对时间可靠度。考虑到 $K = N(N-1)/2$, 因此单节点对时间可靠度算法的复杂度为 $O(N^4)$, 其中, N 表示网络中的节点数。

3 案例分析

3.1 简单案例

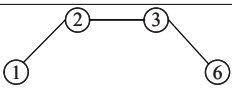
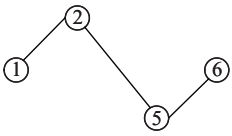
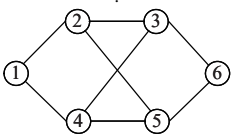
本节基于图 1 中的网络, 分别使用基于定理 1 的枚举算法和单节点对时间可靠度算法和多节点对时间可靠度算法计算网络的单节点对时间可靠度和多节点对时间可靠度。网络中各个节点和链路上无故障情况下的传输时间和对应的不确定测度如表 1 所示。假设网络各个节点之间的传输时间阈值均为 10 ms。

1) 单节点对时间可靠度验证。本文以节点 1 和节点 6 为目标节点对, 计算其对应的单节点对时间可靠度。

根据定理 1, 首先, 需要枚举出图 1 中所有使得节点 1 和节点 6 传输时间满足时间阈值要求的子网络, 共有 95 个这样的子网络。然后, 分别计算这 95 个子网络的可靠度, 具体信息如表 2 所示。最后, 对表 2 中子网络可靠度取大, 得到节点 1 和节点 6 的单节点对时间可靠度为 0.94。

根据单节点对时间可靠度算法, 同样也可计算出节点 1 和节点 6 之间的单节点对时间可靠度

表 2 满足节点 1 和节点 6 传输时间要求的子网络信息

Table 2 Subnetwork information meeting transmission time requirement of node 1 and node 6	
编号	子网络 子网络可靠度
1	 0.99 ∧ 0.96 ∧ 0.97 ∧ 0.93 ∧ 0.94 ∧ 0.95 ∧ 0.98=0.93
⋮	⋮
4	 0.99 ∧ 0.96 ∧ 0.97 ∧ 0.98 ∧ 0.95 ∧ 0.94 ∧ 0.98=0.94
⋮	⋮
95	 0.99 ∧ 0.96 ∧ 0.97 ∧ 0.93 ∧ 0.94 ∧ 0.95 ∧ 0.98 ∧ 0.94 ∧ 0.95 ∧ 0.91 ∧ 0.97 ∧ 0.96 ∧ 0.98 ∧ 0.92=0.91

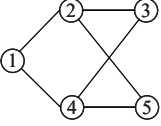
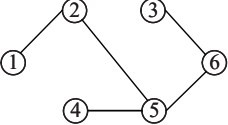
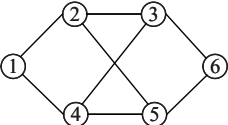
为 0.94, 最可靠路径为 1-2-5-6, 与枚举算法结果相同, 验证了单节点对时间可靠度算法的准确性。

2) 多节点对时间可靠度验证。图 1 的网络共有 15 个节点对, 本文以 $k=10$ 为例, 计算其对应的多节点对时间可靠度。

同样根据定理 1, 首先, 需要找出满足 10 个节点对传输时间要求的子网络, 共有 79 个这样的子图。然后, 分别计算这些子网络的可靠度, 具体信息如表 3 所示。最后, 对这些子网络的可靠度取最大值, 得到 $k=10$ 时多节点对时间可靠度。

表 3 满足 10 个节点对传输时间要求的子网络信息

Table 3 Subnetwork information meeting transmission time requirement of 10 node pairs

编号	子网络	子网络可靠度
1		$0.99 \wedge 0.96 \wedge 0.97 \wedge 0.93 \wedge 0.94 \wedge 0.98 \wedge 0.92 \wedge 0.96 \wedge 0.97 \wedge 0.95 \wedge 0.91=0.91$
⋮	⋮	⋮
4		$0.99 \wedge 0.96 \wedge 0.97 \wedge 0.98 \wedge 0.95 \wedge 0.94 \wedge 0.97 \wedge 0.96 \wedge 0.94 \wedge 0.98 \wedge 0.95=0.94$
⋮	⋮	⋮
79		$0.99 \wedge 0.96 \wedge 0.97 \wedge 0.93 \wedge 0.94 \wedge 0.95 \wedge 0.98 \wedge 0.94 \wedge 0.95 \wedge 0.91 \wedge 0.97 \wedge 0.96 \wedge 0.98 \wedge 0.92=0.91$

由表 3 可知, 编号 4 子网络的可靠度最大。因此, 求得 $k=10$ 时的多节点对时间可靠度为 0.94。同样, 基于算法 2 计算得出 $k=10$ 时的多节点对时间可靠度为 0.94, 与上述计算结果相同, 验证了多节点对时间可靠度算法的准确性。

3.2 教育网案例

对中国教育和科研计算机网(China education and resrarch network, CERNET)骨干网络进行时间可靠度评估。CERNET 是负责实现校园间信息共享和远程教育的计算机互联网络。在 20 个城市间分布有节点, 并通过 22 条链路连接在一起。CERNET 骨干网络的拓扑结构如图 3 所示^[32]。

在本文案例中, 假设 CERNET 骨干网络中各个

节点和链路都只有故障和正常 2 种状态, 节点和链路上的故障相互独立。基于 CERNET 骨干网络中有限的可靠性数据或专家经验, 根据不确定统计方法可以获取到各个节点和链路是否故障的不确定分布, 进而得到节点和链路正常的不确定测度, 具体方法可以参考文献 [21]。CERNET 骨干网络中各个节点和链路上的信息分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 节点信息

Table 4 Node information

节点	时延/ms	不确定测度	节点	时延/ms	不确定测度
哈尔滨	2	0.983	杭州	2	0.991
长春	2	0.988	厦门	2	0.989
沈阳	2	0.995	广州	2	0.986
大连	2	0.987	长沙	2	0.989
北京	1	0.991	武汉	2	0.980
天津	2	0.986	郑州	2	0.986
济南	2	0.987	重庆	2	0.987
合肥	2	0.983	成都	2	0.992
南京	2	0.988	西安	2	0.996
上海	2	0.994	兰州	2	0.989

1) 单节点对时间可靠性分析。根据 CERNET 骨干网络中各个节点和链路的信息, 可以建立扩展不确定网络。基于单节点对时间可靠度算法和扩展不确定网络, 通过寻找指定节点对的最可靠路径, 计算相应的单节点时间可靠度。表 6 为时延阈

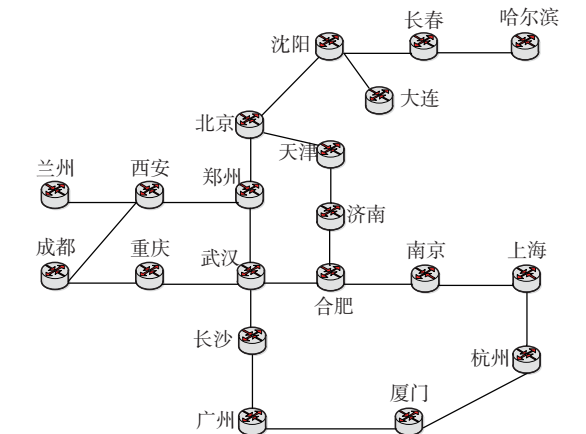


图 3 CERNET 骨干网络拓扑结构^[32]

Fig. 3 Topology structure of CERNET backbone network^[32]

表 5 链路信息

Table 5 Link information

链路	时延/ms	不确定 测度	链路	时延/ms	不确定 测度
哈尔滨-长春	1	0.986	上海-杭州	0.5	0.981
长春-沈阳	1	0.983	杭州-厦门	3	0.985
沈阳-大连	1	0.978	厦门-广州	2	0.991
沈阳-北京	2	0.986	广州-长沙	2	0.984
北京-天津	0.5	0.987	长沙-武汉	1	0.989
北京-郑州	2	0.987	武汉-郑州	1.5	0.976
天津-济南	1	0.988	武汉-重庆	3	0.982
济南-合肥	1	0.986	郑州-西安	1.5	0.979
合肥-南京	0.5	0.983	重庆-成都	1	0.993
合肥-武汉	1.5	0.979	成都-西安	2.5	0.988

值为 35 ms 时不同节点对的时间可靠度和最可靠路径。

在时间可靠性评估的过程中,本文寻找的是满足时延阈值要求的最可靠路径。以表 6 中兰州与合肥之间的通信为例,其共有 6 条可能的传输路径,其中,满足时延要求的路径包括 3 条,分别为 16.5 ms、22 ms 和 22 ms,在这些满足时延要求的路径中,最可靠路径为“兰州-西安-郑州-北京-天津-济南-合肥”,因此,这条路径的可靠度决定了兰州与合肥之间的时间可靠度。时延最小路径“兰州-西安-郑州-武汉-合肥”没有被选中的原因是郑州与武汉之间链路的可靠度较低,限制了“兰州-西安-郑州-武汉-合肥”这条路径的可靠度。

时延阈值取值约束了可能的传输路径,以哈尔滨和广州之间的单节点对时间可靠度为例,表 7 为不同时延阈值下的单节点对时间可靠度和最可靠路径。

由表 7 可知,不同时延阈值要求下的时间可靠

表 6 不同节点对之间的单节点对时间可靠度

Table 6 Single-node-pair time reliability between different node pairs

节点对	可靠度	最可靠路径
哈尔滨-广州	0.979	哈尔滨-长春-沈阳-北京-天津-济南-合肥-武汉-长沙-广州
成都-上海	0.983	成都-重庆-武汉-合肥-南京-上海
兰州-合肥	0.981	兰州-西安-郑州-北京-天津-济南-合肥

表 7 不同时延阈值下的单节点对时间可靠度

Table 7 Single-node-pair time reliability under different delay thresholds

时延 阈值/ms	可靠度	最可靠路径
30	0.976	哈尔滨-长春-沈阳-北京-郑州-武汉-长沙-广州
35	0.979	哈尔滨-长春-沈阳-北京-天津-济南-合肥-武汉-长沙-广州
40	0.981	哈尔滨-长春-沈阳-北京-天津-济南-合肥-南京-上海-杭州-厦门-广州

度和最可靠路径不相同。当时延阈值为 30 ms 时,最可靠路径为“哈尔滨-长春-沈阳-北京-郑州-武汉-长沙-广州”,对应的可靠度为 0.976。由于时延阈值较小,此时从哈尔滨到广州满足时延阈值要求的路径只有这一条,此时该路径为最可靠路径且可靠度为 0.976。当时延阈值提升到 35 ms,满足时延阈值要求的路径变成了 2 条,由于武汉-郑州这条链路的可靠度较低影响了其所属路径的可靠度,此时最可靠路径为“哈尔滨-长春-沈阳-北京-天津-济南-合肥-武汉-长沙-广州”,其可靠度为 0.979。当时延阈值提升到 40 ms 时,最可靠路径变为了“哈尔滨-长春-沈阳-北京-天津-济南-合肥-南京-上海-杭州-厦门-广州”,此时的可靠度为 0.981。

2) 多节点对时间可靠性分析。基于扩展不确定网络和多节点对时间可靠度算法,可以计算多节点对时间可靠度。网络中有 20 个节点,因此,该网络共有 $20 \times (20-1) / 2 = 190$ 组节点对。表 8 为在时延阈值为 35 ms 时,要求节点对数 k 取不同值时,网络的多节点对时间可靠度。

表 8 多节点对时间可靠度

Table 8 Multi-node-pair time reliability

要求节点对数	可靠度	要求节点对数	可靠度
19	0.984	114	0.980
38	0.983	133	0.979
57	0.981	152	0.979
76	0.981	171	0.978
95	0.980	190	0.976

注:可靠度指要求达到传输时间要求的节点对数占网络总节点对数的比例。

多节点对时间可靠度随着要求节点对数的增加而减少。根据多节点对时间可靠度算法,多节点对时间可靠度等于网络中第 k 大的单节点对时间可靠度。因此,当 $k=10$ 时,网络的多节点对连通可靠度为表中最大值 0.984。当 $k=190$ 时,系统的多节点对时间可靠度为表中最小值 0.976,表示网络中所有节点对间的数据传输都及时可靠的信度,即网络的全端时间可靠度。

图 4 为时延阈值分别为 30, 35, 40 ms 时,网络的多节点对时间可靠度。由图 4 可知,当时延阈值的提升时,要求节点对数 k 为 [87,99], [110,126], [156,162] 和 [185,190] 范围内的多节点对时间可靠度有相应的提升,在 k 取其值时,时间可靠度则没有变化。这是由于当时延阈值增加时,节点对之间满足时延阈值要求的路径会增加,当新增加路径的可靠度大于原有路径的可靠度时,该节点对的单节点对时间可靠度会增加,进而对应的多节点对可靠度也会提升。而当新增加路径的可靠度不大于

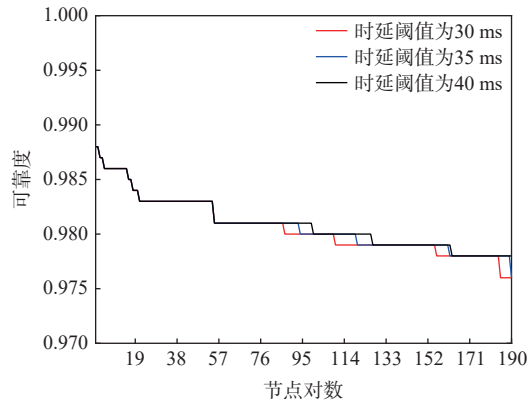


图 4 不同时延阈值下多节点对时间可靠度

Fig. 4 Multi-node-pair time reliability under different delay thresholds

原有路径的可靠度时, 此时对应的多节点对时间可靠度则不会改变。

3) 算法复杂度分析。为评估 2 种算法的计算复杂度, 表 9 以 CERNET 骨干网络为例分别给出单节点对时间可靠度算法和多节点对时间可靠度算法的运行时间。2 种算法均基于 MATLAB 2017b 实现, 且运行环境为 Windows 10 家庭中文版 Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU @ 2.40 GHz, 8 GB RAM。

表 9 2 种算法的运行时间

Table 9 Running time of two algorithms	
算法	运行时间/ms
单节点对时间可靠度算法	2.689
多节点对时间可靠度算法	93.61

由表 9 可知, 多节点对时间可靠度算法的运行时间要远高于单节点对时间可靠度算法的运行时间, 与第 2 节中的算法复杂度分析结论一致。2 种算法的运行时间都较低, 能够用于复杂网络的时间可靠度评估。

4 结 论

1) 本文通过建立扩展不确定网络表征节点和链路的认知不确定性, 可对存在认知不确定性的网络时间可靠性进行评估。

2) 本文提出单节点对和多节点对 2 种时间可靠性度量及其算法, 可以满足不同应用场景需求。

未来将进一步研究节点和链路性能降级情况下的网络时间可靠性评估方法。

参考文献 (References)

[1] GAUR V, YADAV O P, SONI G, et al. A literature review on network reliability analysis and its engineering applications[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2021, 235(2): 167-181.

[2] HONG S, LV C, ZHAO T D, et al. Cascading failure analysis and restoration strategy in an interdependent network[J]. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2016, 49(19): 195101.

[3] HONG S, ZHU J X, BRAUNSTEIN L A, et al. Cascading failure and recovery of spatially interdependent networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2017, 2017(10): 103208.

[4] 黄宁, 伍志韬. 网络可靠性评估模型与算法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(12): 2651-2660.

HUANG N, WU Z T. Survey of network reliability evaluation models and algorithms[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(12): 2651-2660(in Chinese).

[5] LIU Z, HUANG N, LI D P. An algorithm for delay-reliability in communication networks based on probabilistic user equilibrium model[C]// Proceedings of the International Conference on Information Science and Cloud Computing Companion. Piscataway: IEEE Press, 2013: 135-141.

[6] WU Z T, HUANG N, LI R Y, et al. A delay reliability estimation method for avionics full duplex switched ethernet based on stochastic network calculus[J]. Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2015, 17(2): 288-296.

[7] WANG W X, GUO R J. Travel time reliability of highway network under multiple failure modes[J]. Sustainability, 2022, 14(12): 7256.

[8] ZHANG X X, ZHAO M, APPIAH J, et al. Prediction of travel time reliability on interstates using linear quantile mixed models[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2023, 2677(2): 774-791.

[9] JUNG Y, JO H, CHOO J, et al. Statistical model calibration and design optimization under aleatory and epistemic uncertainty[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 222: 108428.

[10] BAUDRIT C, DUBOIS D. Practical representations of incomplete probabilistic knowledge[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2006, 51(1): 86-108.

[11] SIMON C, WEBER P. Imprecise reliability by evidential networks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2009, 223(2): 119-131.

[12] MUSHARRAF M, BRADBURY-SQUIRES D, KHAN F, et al. A virtual experimental technique for data collection for a Bayesian network approach to human reliability analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 132: 1-8.

[13] FILIPPI G, VASILE M, KRPELIK D, et al. Space systems resilience optimisation under epistemic uncertainty[J]. Acta Astronautica, 2019, 165: 195-210.

[14] BEER M, FERSON S, KREINOVICH V. Imprecise probabilities in engineering analyses[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 37(1-2): 4-29.

[15] ZADEH L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 100: 9-34.

[16] MOORE R E. Methods and applications of interval analysis[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1979.

[17] MI J H, LU N, LI Y F, et al. An evidential network-based hierarchical method for system reliability analysis with common cause failures and mixed uncertainties[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 220: 108295.

[18] QI X J, CHENG Q. Imprecise reliability assessment of generating

systems involving interval probability[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(17): 4332-4337.

[19] ZHANG X F, LI R M, LIU M, et al. Evaluating travel time reliability based on fuzzy logic[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 97-98: 952-955.

[20] KANG R, ZHANG Q Y, ZENG Z G, et al. Measuring reliability under epistemic uncertainty: review on non-probabilistic reliability metrics[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(3): 571-579.

[21] LIU B D. Uncertainty theory[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 205-234.

[22] ZHANG Q Y, KANG R, WEN M L. Belief reliability for uncertain random systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(6): 3605-3614.

[23] 康锐. 确信可靠性理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 63-65.

KANG R. Belief reliability theory and methodology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 63-65 (in Chinese).

[24] LIU Y H. Uncertain random variables: a mixture of uncertainty and randomness[J]. Soft Computing, 2013, 17(4): 625-634.

[25] WANG S, YANG D, LU J. A connectivity reliability-cost approach for path selection in the maritime transportation of China's crude oil imports[J]. Maritime Policy & Management, 2018, 45(5): 567-584.

[26] HOSSEINI A, PISHVAEE M S. Capacity reliability under uncertainty in transportation networks: an optimization framework and stability assessment methodology[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2022, 21(3): 479-512.

[27] ZENG Z G, KANG R, WEN M L, et al. A model-based reliability metric considering aleatory and epistemic uncertainty[J]. IEEE Access, 2017, 5: 15505-15515.

[28] KARGER D R. A randomized fully polynomial time approximation scheme for the all-terminal network reliability problem[J]. IAM Review, 2001, 43(3): 499-522.

[29] YE H W C. An improved sum-of-disjoint-products technique for symbolic multi-state flow network reliability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015, 64(4): 1185-1193.

[30] LIU W. Uncertain programming models for shortest path problem with uncertain arc lengths[C]//Proceedings of the First International Conference on Uncertainty Theory. Urumchi: Journal of the Operations Research Society of China, 2010: 148-153.

[31] 高原. 不确定图与不确定网络[D]. 北京: 清华大学, 2013: 21-26.

GAO Y. Uncertain graph and uncertain network[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013: 21-26 (in Chinese).

[32] 李瑞莹, 李枚楠. 基于 Monte Carlo 和启发式算法的网络可靠性分配[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(7): 695-700.

LI R Y, LI M N. Network reliability allocation based on Monte Carlo and heuristic algorithm[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(7): 695-700 (in Chinese).

Network time reliability evaluation method based on uncertainty theory

MA Ji^{1, 2, *}, ZHANG Qingyuan³, KANG Rui^{1, 2, 3}

- (1. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Science & Technology on Reliability & Environmental Engineering Laboratory, Beijing 100191, China;
3. Hangzhou International Innovation Institute of Beihang University, Hangzhou 311115, China)

Abstract: The current network time reliability evaluation methods only consider the effect of inherent uncertainty but ignore the impact of epistemic uncertainty due to a lack of failure information on reliability evaluation results. To address this issue, a new method based on uncertainty theory was proposed. Based on the node range for network reliability, two metric parameters including single-node-pair time reliability and multi-node-pair time reliability were designed. An extended uncertain network model was proposed, which could directly model the epistemic uncertainty features on both nodes and links. Two algorithms were proposed to compute single-node-pair and multi-node-pair time reliability based on the most reliable path and the most reliable extended uncertain subnetwork. Finally, the proposed method was proposed to evaluate two time reliability metrics with a six-node network and the China education and research network (CERNET) backbone network as the example, and the results verify the correctness and effectiveness of the method.

Keywords: time reliability evaluation; epistemic uncertainty; extended uncertain network; uncertainty theory; assured reliability