

基于小时间尺度网络中断故障识别的数学建模仿真

肖丽丽

南京邮电大学理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年3月18日; 录用日期: 2024年6月19日; 发布日期: 2024年6月27日

摘要

随着信息技术的迅猛发展和普及, 网络通信已成为现代社会不可或缺的一部分。网络为人们提供了高效、便捷的信息传输和交流渠道, 广泛应用于各个领域。然而, 网络中断故障频发, 给人们的生产生活带来了极大的不便和损失。特别是在小时间尺度下, 网络中断故障的发生更为频繁和难以预测, 对网络的稳定性和可靠性提出了更高的要求。本文深入研究了小时间尺度网络中断故障识别问题, 通过数学建模仿真方法, 实现了信号校正、故障定位以及容错识别。研究过程中, 首先对信号进行了校正处理, 以消除噪声和干扰, 提高故障定位的精度; 其次, 构建了容错数学模型, 包括可重构服务承载网络模型、资源紧迫度评估以及容错模型构建, 以应对网络中断故障; 最后, 通过实验与分析验证了模型的置信度和识别效率。实验结果表明, 本文提出的建模方法在小时间尺度网络中断故障识别中具有较高的准确性和效率, 为实际网络故障的快速处理提供了有效的理论支持。

关键词

小时间尺度, 网络中断故障, 数学建模, 仿真分析, 容错识别

Mathematical Modeling and Simulation of Network Interruption Fault Identification Based on Small Time Scale

Lili Xiao

College of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu

Received: Mar. 18th, 2024; accepted: Jun. 19th, 2024; published: Jun. 27th, 2024

Abstract

With the rapid development and popularization of information technology, network communica-

tion has become an indispensable part of modern society. Network provides people with efficient and convenient information transmission and communication channels, and is widely used in various fields. However, frequent network interruption faults bring great inconvenience and loss to people's production and life. Especially in the small time scale, the occurrence of network interruption fault is more frequent and difficult to predict, which puts forward higher requirements for the stability and reliability of the network. In this paper, we deeply study the problem of network interruption fault identification in small time scale, and realize signal correction, fault location and fault tolerance identification through mathematical modeling and simulation. In the research process, the signal is first corrected to eliminate noise and interference and improve the accuracy of fault location. Secondly, a fault-tolerant mathematical model is constructed, which includes reconfigurable service bearing network model, resource urgency evaluation and fault-tolerant model construction to deal with network interruption faults. Finally, the reliability and recognition efficiency of the model are verified by experiments and analysis. The experimental results show that the modeling method proposed in this paper has high accuracy and efficiency in the identification of network interruption faults in small time scales, and provides effective theoretical support for the fast processing of practical network faults.

Keywords

Small Time Scale, Network Interruption Fault, Mathematical Modeling, Simulation Analysis, Fault Tolerant Identification

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着信息技术的快速发展,网络中断故障频繁发生,给人们的生产生活带来了极大的不便。特别是在小时间尺度下,网络中断故障的快速识别和定位显得尤为重要。在通信网络中,小时间尺度网络中断故障往往由于设备故障、网络拥塞或外部干扰等多种因素引起[1]。这类故障具有突发性和不确定性,给故障识别和定位带来了极大的挑战。传统的故障识别方法往往依赖于经验知识和人工分析,效率低下且易出错[2]。本文研究了小时间尺度网络中断故障识别的数学建模仿真问题,通过信号校正、故障定位以及容错建模等方法,实现了对小时间尺度网络中断故障的快速识别和容错处理。实验结果表明,本文提出的建模方法具有较高的准确性和效率,为实际网络故障的快速处理提供了有效的理论支持。

2. 小时间尺度网络信号校正与故障定位

网络故障的快速定位和处理对于保障网络服务的连续性和稳定性至关重要。特别是在小时间尺度下,网络故障的发生往往具有突发性和不确定性[3],因此,对于网络信号的精确校正和故障定位提出了更高的要求。本文将从信号校正和故障定位两个方面,探讨小时间尺度网络中断故障识别问题。

2.1. 信号校正

信号校正是确保网络故障定位准确性的关键步骤。由于网络信号在传输过程中可能受到各种噪声和干扰的影响,导致信号失真或变形,进而影响故障定位的精度[4]。因此,在进行故障定位之前,必须对网络信号进行校正处理。信号校正的主要目的是消除信号中的噪声和干扰,提高信号的信噪比和稳定性[5]。滤波方法可以有效地去除信号中的高频噪声,平滑方法则可以消除信号的抖动和波动,提高信号的

稳定性[6]。同时,还可以利用信号处理技术,对信号进行进一步的分析和处理,提取出有用的信号特征。

1) 采由于具有良好的自主性和可扩充性,采集代理模块可以高效地从管理信息库中获得详细的网络运行情况,从而准确地掌握整个网络的局部情况。其工作原理可通过以下公式进行描述:

$$\begin{cases} o = [g_1 h_1, g_2 h_2, \dots, g_i h_i] \\ h_i \in u_i (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

2) 利用小时标网络的实体属性,抽取与之相应的先验信息。然后,在此基础上,对门限进行持续的优化和调整,从而构造出一个比较函数公式如下:

$$g(h) = \begin{cases} 0 & h \leq u \\ 1 & h > u \end{cases}$$

3) 根据对比函数的输出,得到用 Z 标识的预处理网络状态集。在集 Z 内的网络状态属性是 a 的情况下,以 N 来表达在小时标网络中的信号组成的矩阵,其计算公式为:

$$\begin{cases} z = [g_1 g(h_1), g_2 g(h_2), \dots, g_i g(h_i)] \\ N = [a_1, a_2, \dots, a_n] \end{cases}$$

4) 为提高贝叶斯模型的稳定性,失误情况下的解码概率可由控制中心在接收到时用如下方程来表达:

$$\begin{cases} Q(T \neq T|S) = Q(F|S) \\ Q = \sum_s Q(F|S)Q(S) \end{cases}$$

5) 在失误情况下,将解码概率之和转化为贝叶斯函数核函数。模型传输中心传输的各个序列的概率是不一样的,所以其接收的概率和修正方式没有直接的联系。核心公式是这样的:

$$\begin{cases} \min Q' = \min Q(T|S) \\ Q(T|S) = Q(T)Q(S|T)/Q(S) \end{cases}$$

6) 该算法的操作准则是为了在小时间尺度上对信号进行修正,从而保证系统的输出误差最小。以下是估价序列的表达式,其中, k 为最大序列:

$$Q(T|S) \prod_{i=1}^K Q(S|T)$$

2.2. 故障定位

故障定位是迅速识别网络中断故障的核心步骤。精确的故障定位不仅能迅速锁定故障位置,还能揭示故障根源,为故障处理提供及时、有效的信息支撑。在小时间尺度网络中,由于故障发生的短暂性,故障定位的准确性尤为关键,它要求在有限时间内迅速而准确地定位故障。

1) 采用了初始化贝叶斯方法,将各结点的坐标转换成二维向量坐标,从而建立起一套完整的矢量面。

2) 提出了一种基于小波变换的小波分解方法,将该小波分解成若干个邻域,并采用自适应调整算法来确定各子区内最适宜的节点数目。在此基础上,对每一子域中任意选取一向量坐标,构成一组量测数据集;

3) 在此基础上,提出了一种新的二维向量平面划分方法。若偏离值较小,则进行调整,转入下一步骤;若偏离值增加,则对其进行局部偏移修正,反复进行第3)步,直到获得所需的定位结果。

$$Y = \sum_{i=1}^K e[a(k), b(i)]$$

4) 用公式计算了一个新的结点向量集, 这里 H 是向量的个数:

$$b(i) = \frac{\sum_{i=1} a(i)}{|H(i)|}$$

5) 通过迭代运算, 发现节点向量集发生了变化, 偏移量也有减小的趋势。可以从下面的公式中判断重复终止的条件是否满足:

$$\varpi Y \geq Y^{(n-1)} - Y^n / Y^{(n-1)}$$

6) 该算法在给定的固定误差约束范围内对偏移门限进行了适当的调节, 形成了一组节点向量。该集上的结点分布状况可以很好地反映出小时间尺度上系统中出现故障的地方。通过对各结点的分布情况的分析, 能够更加精确地对网络中的失效位置进行定位, 并对其进行有效的故障处理, 并对其进行有效的恢复。

3. 小时间尺度网络故障容错辨识的数学模型

3.1. 小时间尺度网络中断故障识别

在小时间尺度网络中, 通信的往返过程往往涉及多条瓶颈链路的协作。对于每一个连接而言, 我们特别定义了输出链路 j_0 , 它负责在发送端进行数据的发送, 且其发送效率被优化至最佳状态。同时, 我们还定义了瓶颈链路 j_n , 其有效带宽 c_n 是通过特定的分配过程得出的, 这一分配过程专为当前连接而设计。当满足 $c_n - 1 > c_n$ 的条件时, 我们认为分配过程满足要求, 这一过程主要由 $j_n - 1$ 和 j_n 两条链路共同完成。除此之外, 网络中还存在非瓶颈链路 j , 它们位于 $j_n - 1$ 和 j_n 之间。这些非瓶颈链路在向连接过程分配带宽时, 需确保满足 $c_j \geq c_n - 1$ 的条件。

在通信的往返过程中, 我们假设有 n 条瓶颈链路参与。这些链路为连接分配的有效带宽需按照递减顺序排列, 即 $c_0 > c_1 > \dots > c_n$ 。其中, 分组级递增量 a 反映了中断故障窗口的特性, 而 c_n 则用于表示分组返回至发送端的速率。

对于输出链路 j_0 , 其最大发送效率 c_0 位于 c_0 和 $(1+a)c_n$ 之间的最小值。若满足 $c_i > (1+a)c_n$ 且 $c_i > c_i + 1$ 的条件, 则表示链路 j_i 和 $j_i - 1$ 位于往返路径中并满足条件。在这种情况下, 参与该过程的瓶颈链路数量将减少 r 条, 即链路 $j_i + 1, j_i + 2, \dots, j_n$ 将被排除在外。

若瓶颈链路有长缓冲区, 且其效能点在失效窗之外, 则最大数据包的均值可按下列公式计算:

$$\bar{q}_{\max} = \frac{\max(A(\omega_i))}{n}$$

基于上式, 以 i 第通讯来回时间作为实例, 研究了两条链路分别发送背对背数据包的情形。特别是, 每条链路传送一个包, 所有的包都被传输给瓶颈链路上。在这些情况下, 向链路 1 传输属于传输方的数据包, 向链路 2 传输属于瓶颈的数据。

$$q_1^{(i)} = \omega_i \left(1 - \frac{c_1}{(1+a(\omega_{i-1})) \times c_n} \right)$$

j 在相同状态下的最大分组计算公式为:

$$q_j^{(i)} = \omega_i \left(1 - \frac{c_j}{c_j - 1} \right)$$

并且：

$$\prod_{j=1}^{j=n} \left(1 - \frac{q_j^{(i)}}{\omega_i} \right) = \frac{1}{1 + a(\omega_{i-1})}$$

$$\prod_{j=1}^{j=n} \left(1 - \frac{q_j^{(i)}}{\omega_i} \right)^{q_j^{(i)} < \omega_i} \approx 1 - \frac{1}{\omega_i} \sum_{j=n}^{j=n} q_j^{(i)}$$

根据这一点，可以得到一个最大数据包数目的平均数，可以用下面的公式来算出，第 i 个通信来回的时间里，是一个瓶颈链路，并且是一个排队状态：

$$\bar{q}^{(i)} = \frac{\omega_i}{n} \times \frac{a(\omega_{i-1})}{1 + a(\omega_{i-1})} = \frac{\omega_{i-1} \times a(\omega_{i-1})}{n} = \frac{A(\omega_{i-1})}{n}$$

一个连接的有效带宽是通过一个链路来分配的，它需要符合一个统一的分发准则，这个准则是：

$$f(x) = \frac{1}{c_{\max}}, \quad 0 < x < c_{\max}$$

3.2. 容错数学建模

在复杂多变的网络环境中，网络中断故障的发生往往难以预测，且其影响范围可能迅速扩大，对网络的稳定性和业务的连续性构成严重威胁。因此，构建有效的容错数学模型，对于提升网络的容错能力、保障业务的稳定运行至关重要。

3.2.1. 可重构服务承载网模型

可重配置的承载网模型具有很强的弹性、可伸缩性，并且可以根据网络的变化进行动态调整。本项目提出了一种新的基于分布式计算的分布式计算方法，其主要研究内容为：通过对网络运行状态进行实时监控，并基于此动态调整资源配置与业务承载模式，以达到对网络失效的快速响应与容错。

在描述物理网络结构时，我们采用了无向图模型作为基本框架。在无向图中，集合代表了网络中的物理节点，这些节点是数据交换和传输的关键点。同时，集合则代表了连接这些物理节点的链路，它们构成了网络中数据流动的通道。而则表示网络能够提供的总承载能力，即网络在特定时间内能够传输的数据量。

对于 RSCN (可能是某种特定网络模型或架构的缩写)模型的构建，我们遵循了一套严格的标准。在这个模型中，集合代表了虚节点的集合，这些虚节点可能对应着物理节点在逻辑层面上的映射或抽象[7]。而集合则代表了虚链路，它们是连接虚节点的逻辑连接，是数据在逻辑层面上流动的路径[8]。值得注意的是，虚节点集合和虚链路集合分别是物理节点集合和物理链路集合的子集，这意味着 RSCN 模型是在物理网络的基础上构建的逻辑网络。

3.2.2. 资源紧迫度

资源紧迫度是评估网络资源在故障发生时所需资源的紧急程度和重要性的指标。在网络中断故障发生时，不同资源对于保障网络稳定性和业务连续性的重要性可能有所不同。因此，准确评估资源紧迫度，对于制定合理的容错策略、优化资源分配具有重要意义[9]。在网络中， e 节点承担着许多链路的传送任务，当 e 出现故障时，会引起链路的断开[10]，从而引起大范围的网络瘫痪，给整个网络的连通带来极大的影响。从这一点可以看出，节点 e 对整个网络的连通度起着至关重要的作用，所以要对其进行全面的分析。

1) 节点影响程度

设 n_i 表示网络中的节点，其在网络中 G^u 的连接度数用 d_i 表示。为了量化节点的影响程度，引入影响程度向量 NI ，它涵盖了节点 d_i 及其相邻节点的影响效应。

2) 节点连通程度

CF 代表物理网络中的资源节点，它可以用于描述网络在发生故障后的分割程度。当节点 n_i 发生故障时，剩余网络的连通性将受到严重影响。为了表示这种影响，采用邻接矩阵 $A(G^u)$ 来描述 G^u 中的连接关系。节点的影响程度可以用向量 $NCF = NI \cdot A(G^u)$ 来表示，它反映了 n_i 对节点连通程度的贡献。随着 $NCF(n_i)$ 值的增加，节点的连通程度也相应增强。为了更直观地比较不同节点的连通程度，对其进行归一化处理，得到最终的节点连通程度指标。

$$NCF(n_i) = \begin{cases} \frac{NCF(n_i) - \min(NCF)}{\max(NCF) - \min(NCF)}, & \max(NCF) - \min(NCF) \neq 0 \\ 1, & \max(NCF) - \min(NCF) = 0 \end{cases}$$

3) 链路联通程度

链路对网络连通性的重要程度可以通过其邻接节点的影响程度来衡量。具体地，采用公式 $ECF_{i,j} = (1/d_i + 1/d_j)$ 来描述这种影响，其中 d_i 和 d_j 分别代表链路两端节点的度数。这一公式能够反映链路在维持网络连通性方面的作用，有助于更全面地评估网络的结构和性能。

4) 饱和度

计算饱和度 $SF(x)$ ：根据推算公式，饱和度 $SF(x)$ 可以通过以下公式计算：

$$SF(x) = \frac{k}{pm_x}$$

考虑多个资源的饱和度：除了单个资源 x 的饱和度外，我们还可以考虑多个资源的饱和度。假设有多个资源 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，它们在 RSCN 中分别承载 $k_1, k_2, \dots, k_n$ 个单位，并且完成分配的百分比分别为 $PM_{x_1}, PM_{x_2}, \dots, PM_{x_n}$ 。则可以将多个资源的饱和度 $SF(x_i)$ 表示为：

$$SF(x_i) = \frac{k}{pm_{x_i}}, i = 1, 2, \dots, n$$

用饱和度表征了在网络中断失效后对 RSCN 的影响。其公式为：

$$SF(x) = \begin{cases} 0 & K = 0 \\ PM_x^{1/K} & x \in N^u \\ PM_x^{1/K} & x \in E^u \end{cases}$$

5) 资源紧迫程度

要获取资源的紧迫程度，需要综合考虑、以及这三个因素。通过结合这些参数，可以得出资源紧迫程度的计算公式：

$$\psi(x) = \begin{cases} \alpha \cdot NCF(x) + \beta \cdot SF(x), & x \in N^u \\ \alpha \cdot ECF(x) + \beta \cdot SF(x), & x \in E^u \end{cases}$$

在建立 RSCN 链路容错的数学模型时，除了要考虑网络的建立成本外，还要保证由于资源失效而导致的网络数目最少。要达到这个目的，就必须减少对那些紧迫的资源的使用率。在此基础上，将资源的紧急性和其初始值相结合，建立 RSCN 链路故障容错的数学模型。

$$C(G^s) = \sum_{e^s \in E^s} \psi(e^s) C(e^s) + \sum_{n^s \in N^s} \psi(n^s) C(n)$$

3.2.3. 容错模型构建

建立故障模型是进行故障诊断的一个重要环节。研究一种有效的网络故障容错模型，实现对网络故障的快速响应，并对网络进行科学的资源调度与业务重构，保证网络的稳定平稳运行。在建立 RSCN 链路容错的数学模型之前，必须对其进行详细的构造和分析，从而得到基本的要求。这一基本要求表现为：模型中的任意两个节点及其连接二者的链接带宽 s , t , d ，也可以看作是对模型的元要求。这里， s 、 t 是结点的数量， s 是邻居的状况， t 是链接的需求量。

在对模型进行了需求分解之后，再逐个解决每个元需求。要确定在 G^u 中 s 和 t 两者之间的连接路径，用 $V_{s,t}$ 来表示。这一构建过程需要满足特定的条件，确保模型的有效性和准确性。

$$\forall c \in V_{s,t}, b(c) \geq d_e$$

在模型构建过程中，我们面临着一个挑战：满足元需求的候选路径数量众多。为了解决这个问题，我们设定了明确的选择标准，即追求构建代价的最小化。为了实现这一目标，需对 G^u 权值矩阵进行优化，以寻找 s 和 t 之间代价最小的路径。这一步骤对于确保模型的效率与实用性至关重要。

$$\omega_{i,j} = \begin{cases} \infty, & a_{i,j} \neq 1 \text{ 或者 } b(c_{i,j}) \geq d_{e_{i,j}} \\ \psi(c_{i,j}^u) c(c_{i,j}^u) + (\psi(n_{i,j}^u) c(n_{i,j}^u) + \psi(c_j^u) c(c_j^u)) / 2, & a_{i,j} = 1 \end{cases}$$

为了获取最优路径 $V_{s,t}^{\min, \omega}$ ，采用了最短路径算法进行精确计算。通过实施链路恢复机制，完成了终端故障链路的映射工作。在整个过程中，始终致力于确保调整代价的最小化，从而顺利地完成了链路迁移，有效应对了网络中断故障，并提升了系统的容错能力。

4. 实验与分析

为了全面验证基于贝叶斯分类的小时间尺度网络中断故障识别数学模型的整体性能，我们计划进行一系列测试。其中，模型的可信度、识别效率和容错性是其主要的测试指标。在此基础上，将所建立的模型与基于逻辑公式的网络失效定位模型和基于对抗学习的异质无线网络失效检测模型进行比较验证。通过这种比较，我们能够更加精确地评价所提出的模型在多个方面的性能，以此来检验整个系统的有效性。

4.1. 不同模型的置信度对比

置信度是建立在一个以期望观察值作为平均值的正态分布之上，描述了辨识结果和期望的偏差分布。为了全面展现不同模型在实验中的表现，将所提模型、基于逻辑方程求解的网络故障定位模型以及基于 GAN 的异构无线网络故障检测模型的置信度都进行了计算，并与理想观测值进行分析，如图 1 所示。

从图 1 的数据，可以清晰地看到，在针对小时间尺度网络中断的故障识别任务中，所提模型的置信度与理想观测值的比例相当高。这充分表明了所提出的方法具有较高的置信度，因此其识别结果也更为准确。相比之下，其他模型的置信度占理想预测值的比例较低，这反映出这些模型的置信度相对较低，其识别结果可能不够精确。

4.2. 识别效率

本研究分别采用基于逻辑方程求解的网络故障定位模型以及基于 GAN 的异构无线网络故障检测模型，对小时间尺度网络中断的故障原因进行了识别。并对两种方法的辨识时间进行了比较。通常情况下，

随着识别时间的增加，识别的效率降低；相反，在较短的时间内，可以提高识别的效率。为了更加直观地比较每种模式的表现，已将特定的试验结果列于表 1。

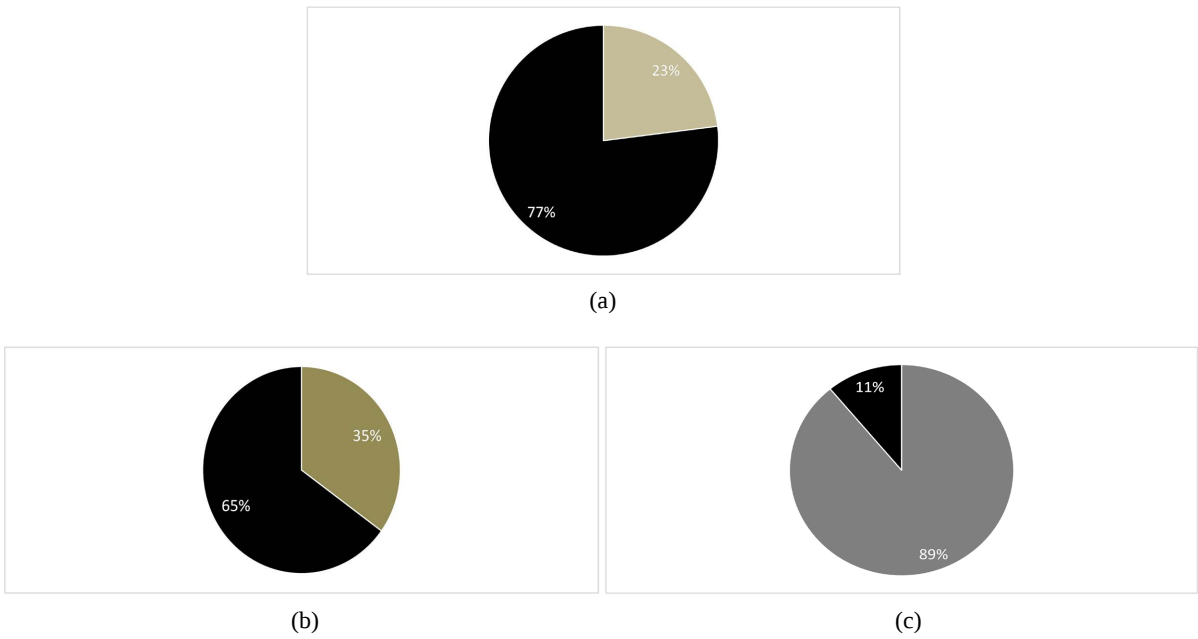


Figure 1. The confidence ratio of different models

图 1. 不同模型的置信度比例

Table 1. Comparison test of recognition time of different models

表 1. 不同模型的识别时间对比测试

实验序号	识别时间/ms		
	本文模型	基于逻辑方程求解解故障定位模型	基于 GAN 的异构无线网络故障检测模型
100	3.72	8.54	25.7
200	4.21	12.3	21.9
300	3.93	9.88	26.8
400	5.06	10.2	19.5
500	4.38	22.7	17.5
600	4.87	9.26	23.6
700	4.79	13.7	27.6
800	5.31	21.9	27.3
900	3.25	18.6	29.4
1000	4.26	17.6	30.1

分析表 1 中的数据，可以清晰地看到，在十次实验中，所提模型所需的识别时间均少于其他模型的识别时间。实验结果表明，该方法能够有效地解决小时间尺度干扰下的故障辨识问题。

4.3. 容错性能

召回率反映了模型对故障的辨识和修正能力，是对模型容错性能的一个重要度量。特别地，召回率愈高，说明模型对错误的复原能力愈好；相反，如果召回率较小，则说明该模型具有较差的复原能力。召回率按以下公式计算：

$$E = \frac{TP}{(TP + FN)} \times 100\%$$

实验部分，对比了所提模型与传统模型在故障识别与容错处理方面的性能差异。除了置信度和识别效率之外，还特别计算了所提模型的召回率，并绘制成图以便进行深入分析。如图 2 所示，进行了 5 次实验，对比了所提模型与基准模型的召回率。从图中可以明显看出，5 次实验中，所提模型的召回率均高于基准模型的召回率。这一结果充分证明了所提模型在针对小时间尺度网络中断的故障识别时，具有更强地发现错误并从错误中恢复的能力。

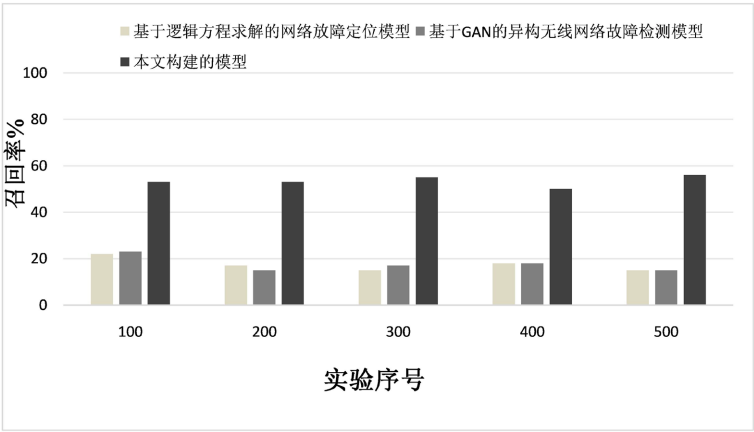


Figure 2. Comparison test of recall rates of different models
图 2. 不同模型的召回率对比测试

5. 结论

网络中断故障容错识别数学建模是网络工程领域的一项重要研究内容。通过构建可重构服务承载网模型、评估资源紧迫度以及构建容错模型，可以实现对网络中断故障的快速识别和容错处理，提升网络的稳定性和业务的连续性。实验结果表明，所提的容错数学建模方法在置信度和识别效率方面均表现出色，为实际网络故障的快速处理提供了有效的理论支持和技术手段。网络中断故障容错识别数学建模是一个具有重要意义的研究领域，其研究成果将为提升网络稳定性和业务连续性提供有力支持。

参考文献

- [1] 高景德, 王祥珩. 交流电机的多回路理论[J]. 清华大学学报, 1987, 27(1): 1-8.
- [2] 李沁雪, 钟伟伦, 曾岳烽, 等. 网络攻击下电力系统连锁故障仿真分析及处理[J]. 广州航海学院学报, 2023, 31(2): 1-6.
- [3] 霍江游, 张勇, 陈鹏, 等. 网络故障影响的分析方法, 装置, 存储介质及电子设备[P]. 中国专利, CN202211147678.3. 2024-03-11.
- [4] 李俊卿, 胡晓东, 耿继亚, 等. 基于 DMD 和改进胶囊网络的变工况轴承故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2023(11): 48-57.
- [5] 郭海涛, 彭浩, 杨志成, 等. 矢量网络分析仪故障定位方法及典型维修案例[J]. 机械管理开发, 2023(12):

- 225-227.
- [6] 赵梦, 田文波, 罗宇, 等. 航天用时间触发网络系统同步性的故障分析[J]. 飞控与探测, 2022(2): 5.
 - [7] 李亚梦, 王泽林, 高伟, 等. 一种网络故障的分析方法, 装置及设备[P]. 中国专利, CN202210576206.3. 2024-03-11.
 - [8] 刘丽, 张珂, 刘霖筠, 等. 网络故障的分析方法, 装置和计算机可读存储介质[P]. 中国专利, CN202211198453.0. 2024-03-11.
 - [9] 李罗红, 骆欧, 张铭光. 网络故障致大面积护理信息系统中断时的应急处理[J]. 华西医学, 2015, 30(10): 1968-1970. <https://doi.org/10.7507/1002-0179.20150562>
 - [10] 闫涛. ARP attack 导致网络出口中断故障的解决[J]. 平顶山工学院学报, 2005, 14(5): 28-30.