

摘要: 由于无线传感器部署环境复杂多样、网络拓扑动态变化、节点资源受限且易受攻击破坏,造成节点故障失效而导致网络性能急剧下降甚至瘫痪。鉴于及时有效地故障诊断和网络重构直接关系到无线传感网的平稳可靠运行,针对无线传感网的故障诊断和网络重构机制进行了系统研究。首先,分析了无线传感网故障的根源并归纳说明了当前常用的网络故障诊断方法;接下来,阐述了几种有效的网络拓扑重构算法,进而给出了一种可行的基于故障诊断的网络拓扑重构方案。该方案能够一定程度上增强无线传感网的整体生存性。

关键词: 无线传感网; 故障诊断; 网络重构; 网络拓扑

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1006-883X(2021)01-0024-05

收稿日期: 2020-11-01

面向无线传感网的故障诊断和网络重构机制

王海涛 唐笑

南京审计大学金审学院, 南京 210023

0 引言

无线传感网是由大量传感器部署在某一特定的区域,通过无线通信连接,自组织构成的分布式网络系统,能完成环境信息采集、数据传输和数据处理等任务^[1]。然而,由于无线传感网的自组织、动态拓扑、部署环境复杂及节点资源受限等特点,常会出现某些传感节点能量耗尽或遭受攻击破坏而导致整个网络性能急剧下降甚至崩溃现象的出现^[2]。因此,无线传感网急需适当的技术手段来实时监测和快速定位失效/故障节点,并通过重构网络拓扑以及时恢复网络连通性,从而确保上层应用服务的持续稳定运行。具体而言,故障诊断用于迅速定位失效/故障节点的位置及原因,网络重构负责自主调整节点工作状态和重组网络拓扑以恢复网络通信服务^[3]。

网络重构技术最早应用于配电网来确保电力传输在正常情况下的经济性和异常情况下的可靠性^[4]。随后,网络重构技术逐渐在计算机网络和通信网络中得到广泛应用,目的是在网络即将发生故障或已出现事故后迅速采取补救措施,如隔离故障网络区域和重新

调配网络资源,使网络不至于整体瘫痪并尽快恢复原有服务性能。为了尽可能减少因网络故障造成的损失,希望通过故障诊断技术提前发现网络中存在的各种隐患,或在故障出现后尽快定位故障位置并确定故障原因,然后可以通过网络拓扑重构机制来恢复网络连通性并维持网络服务正常运行^[5]。不难看出,故障诊断是网络重构的重要支撑技术,通常根据网络监控和反馈得到的节点和链路状态等信息,采用相应的分析和评测方法来判断网络中是否发生故障以及出现故障的类型、位置及可能的原因。网络重构是恢复网络连通性和确保网络平稳运行的必要措施,网络重构机制涉及网络参数调整、节点重部署以及拓扑重组等多种方法,本文主要阐述基于拓扑重组的网络重构技术。

1 故障诊断技术

1.1 基本概念

无线传感网中的故障类型多样,包括软硬件故障、能耗失效故障和攻击失效故障等。故障诊断包括故障检测、故障定位和故障分析等内容^[5]。故障检测周期

性主动或基于事件触发被动向故障诊断系统发送检测信息；故障诊断系统根据反馈的检测数据通过某种算法或规则判断系统是否出现故障。若检测出故障，则通过故障定位功能来迅速确定故障出现的位置，并启动故障分析模块来分析故障的类型及可能的原因，并及时通告故障恢复模块或管理人员进行必要的干预。

1.2 主要方法

现有的故障诊断方法大致可以分为3类：基于知识的故障分析方法、基于解析模型的故障分析方法和基于信号处理的故障分析方法^[6]。

1.2.1 基于知识的故障分析方法

基于知识的故障分析方法的基本思想是在知识的概念和层次上，以知识处理技术为理论基础，通过概念和处理方法上的知识化实现系统的故障诊断，具体手段包括专家系统、图论、模糊推理、神经网络、故障树和知识观测器等方法。

专家系统的基本思想是根据专家的分析问题、处理问题的方法经验，建立知识库和推理机，设计一个程序，并以此程序为诊断依据进行故障诊断。一个完整的专家系统应包括知识库、推理机制、知识获取机制和解释机制。专家系统的优点是无需完全匹配发现的问题，而是通过构建一个合理的模型来试图完成问题的精确求解，其主要缺点是系统无法自主学习获取知识，不能检测出未保存在知识库中的未知故障。

基于图论的方法主要有基于符号有向图（symbol directed graph, SDG）的诊断方法和基于故障传播有向图（failure propagation directed graph, FPDG）的诊断方法。SDG方法将图中的节点对应为部件状态变量，连接两节点的边表示节点的关系，用“+”、“-”、“0”表示两节点间的影响关系，若任一节点处于非零状态则表示系统出现了故障。由于变量间的定性逻辑关系通常保持稳定不变，假设故障只能沿一致边传播，基于节点之间的相关关系和检测到的正负偏差来推测故障源节点。虽然此方法是定性的，但在实际的化工过程中，它有不可比拟的优势，可与其他方法进行结合。FPDG方法通过把系统中的对象抽象为图中的相应节点，把元件中的故障传播关系作为有向边，把系统建模为有向图，从而展开故障诊断。

神经网络具有自组织、自学习、联合记忆、并行处理、分布式存储和全局作用等特点，使其在故障诊断方面有很大的优势。基于神经网络的方法是通过专家求解问题的实例来训练神经网络并获取知识，相比专家系统，它的效率更高，质量更好。神经网络的优点是通用性较强，能够自主学习，缺点是为保障诊断的准确性和可靠性，只能利用明确的实例，而且需要足够多的学习实例，未能充分利用专家积累的宝贵经验。

故障树的基本思想是在特定的环境条件下，从人为、设备、系统等方面进行故障分析，将所有故障和可能的原因都分析出来，并将故障与原因的关系表示出来以生成故障分析树。

1.2.2 基于解析模型的故障诊断方法

基于解析模型的故障分析方法由来已久，主要思想是根据系统中元件之间的互相连接关系，建立一套用于诊断故障的数学模型，根据故障诊断相关的原理和数学方法对被测的故障进行针对性的诊断和分析，具体采用的手段有参数估计法和状态估计法。

参数估计法主要是通过比较元件参数与正常值的关系来判断系统是否出现故障以及故障的程度。具体而言，首先分析确定模型物理参数与元件参数之间的关系方程，然后求出实际的模型参数，根据关系方程解出元件参数。此方法的缺点是对于非双射的关系方程无法求出模型参数。因此，在处理实际问题时，常与其他诊断技术相结合，以获得更好的故障诊断效果。

状态估计法的主要思想是重构系统中的被控设备和系统的可测状态，将其与系统中的可测状态变量比较起来构成一个残差检测序列，再通过构造适当的残差序列模型，并用统计分析方法对相应的残差检测序列进行分析处理，从而将所有构成故障的信息从状态检测分析出来。

1.2.3 基于信号处理的故障分析方法

基于信号处理的故障分析方法的基本思想是测量系统的输入输出值，与正常值进行比较，若在正常范围内则系统正常，反之则系统出现故障。目前最常用的手段是基于小波变换的故障诊断方法。基于小波的故障诊断方法通过对观测数据进行小波变换，以其信

号的奇异性或频率结构变化为依据进行故障诊断，或者以系统的脉冲相应函数的小波变换直接进行故障诊断。小波变换不需要系统复杂的数学模型，小波变换抑制噪声的能力很强，效率高，计算快，运算量较少，是一种很有应用前景的故障诊断方法。

2 网络拓扑重构技术

2.1 基本概念

拓扑重构是指在故障发生后，采取相应的手段重组网络拓扑，恢复网络连通性，使网络尽快恢复服务性能^[7]。WSN中节点能量有限，大多部署在较为恶劣的环境中，并且WSN中往往存在一些关键节点，若关键节点耗尽能量或遭到攻击，很可能导致网络大面积瘫痪。关键节点通常是在网络通信中发挥作用较大，承担通信流量、网络负荷较多的部分节点，关键节点一旦失效，可能会导致整个网络崩溃或者瘫痪。对关键节点采取预先保护措施，可以极大地增强和提高网络的抗毁性。为此，可以对一些重要的、能导致网络快速瘫痪的关键节点进行备份，万一这些节点失效，则可以迅速地重新启动这些备用节点，快速地恢复网络性能，增强了网络的抗毁能力。

2.2 常用方法

网络拓扑重构的常用方法包括：基于最短路径树的拓扑维护算法、基于节点功率控制的拓扑重构方法、逐次近似计算方法和基于分簇的拓扑维护方法等^[8]。

基于最短路径树的拓扑维护算法的主要目的是在网络发生故障后采取措施确保网络连通，网络能够正常运转，以免出现分区。当网络出现故障时，故障节点失效，触发邻居节点响应，相互发送分组，根据发送的分组判断网络是否连通，若无法作出准确的判断，则继续触发其他邻居节点响应，直至网络恢复连通^[9]。

由于传感器网络节点存储的能量有限，因此节点能量在网络运行过程中非常重要，可以通过控制节点的发射功率来调节节点的覆盖范围。基于节点功率控制的拓扑重构方法即通过对节点功率的控制实现网络重构的方法。具体来说，当网络某一节点由于能量耗尽或者是遭受攻击后失效，不一定会导致整个网络失效，可能会出现网络分割，部分网络无法连通，可以

通过控制调整失效节点周围其他节点的运行功率，使它们跳过失效节点，使得至少有一条链路连通，从而实现网络重构^[10]。

逐次近似计算方法的基本思想是当网络拓扑结构或传输环境发生变化后，拓扑控制算法随之触发，计算使网络性能达到最佳的新拓扑。此方法虽然可以使重构后的网络达到最优，但是计算开销较大，收敛时间长，不适合移动性较强的网络场景^[11]。

基于分簇的拓扑维护方法是先将网络分簇，将节点按照功能的不同分为簇头、中继及普通节点。当簇头自测出即将失效时，会向所在簇的普通节点发出广播消息，以便寻找新的可替代的簇头；中继节点失效必须反馈给簇头节点，由簇头节点寻找新的节点进行代替^[12]。网络中大多数为普通节点，当少数普通节点失效时并不会对网络产生影响，所以一般不采取措施。

3 一种基于故障诊断的网络重构方案

基于故障诊断的网络重构方案的基本思想是首先利用故障诊断技术发现故障，确定故障点和故障原因，进而触发网络拓扑重构技术，恢复网络连通性以维持网络服务性能^[13]。因此，网络拓扑重构可分为重构触发和重构实现两个阶段，如图1所示。为实现重构触发，需要基于应用场景利用上述某种适当的故障诊断方法来及时发现故障，明确故障类型并建立故障推理模型，对故障进行分析来确定故障发生点。为实现网络重构，在网络刚发生故障但还未出现分区时，可以利用路由协议自身的恢复机制恢复路由通路；而当出现的故障造成了网络分区时，仅依靠路由恢复无法实现网络重构，则需要采取包括节点参数调整、节点主动移动和

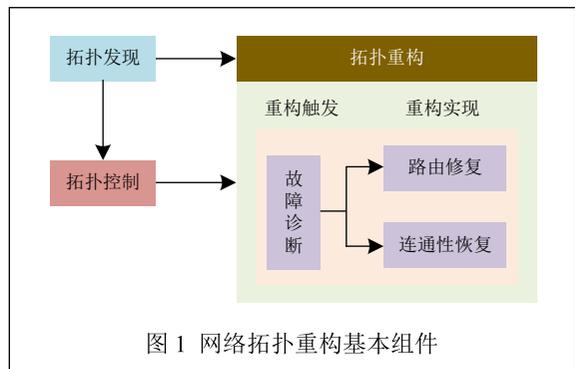
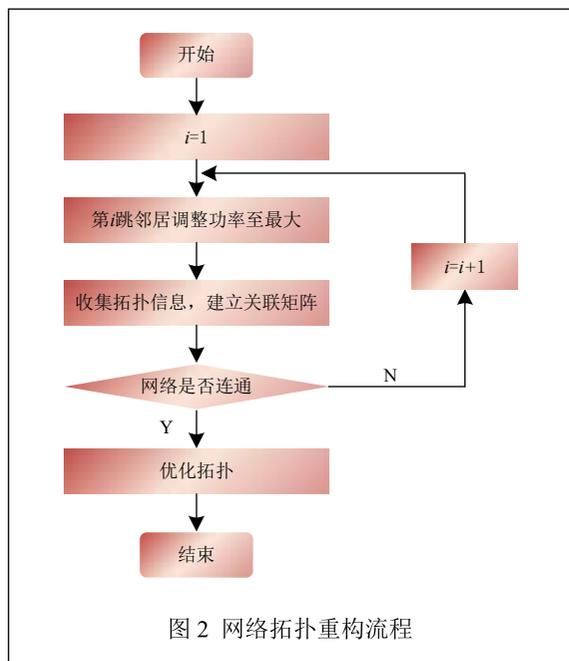


图1 网络拓扑重构基本组件

增补节点在内的其他手段来恢复网络连通性，进而维持网络服务正常运行。此外，有时还可采取额外的网络拓扑优化措施来提高网络性能。

鉴于在网络发生故障后，通常只是网络中部分节点遭受破坏或发生故障，因而网络重构无需对整个网络进行全局调整恢复，而是尽可能通过局部网络重构来恢复整个网络的连通性，从而显著降低网络恢复时间和节省控制开销。

为了尽可能减少网络重构涉及的节点数量和引入的控制开销，应该首先只触发故障节点的一跳节点予以响应，如果一跳节点响应后不足以恢复网络通信，则依次触发更多的两跳节点，直到触发所有其他网络节点。基于上述策略的网络重构的基本工作流程如图2所示。基本操作步骤简要说明如下：首先，通过逐渐增强故障节点的一跳邻居节点的发送功率使其弥补故障节点造成的网络空洞来消除网络分区，如果通过调整一跳邻居节点的功率至最大仍无法恢复网络连接，则需要调整故障节点的两跳邻居节点的功率来实现网络恢复，重复上述操作直至网络连通性恢复。但是，如果网络中部分节点以最大功率运行则容易耗尽能量而失效，进而大幅影响网络性能。因此，为提高网络生存性和优化网络性能，需要在确保网络连通的基础上



上进一步优化网络拓扑，如通过逐渐降低节点发送功率甚至允许少数冗余节点进入休眠状态以节省能量，目的是在保持网络连通的前提下尽量均衡网络节点的能耗。

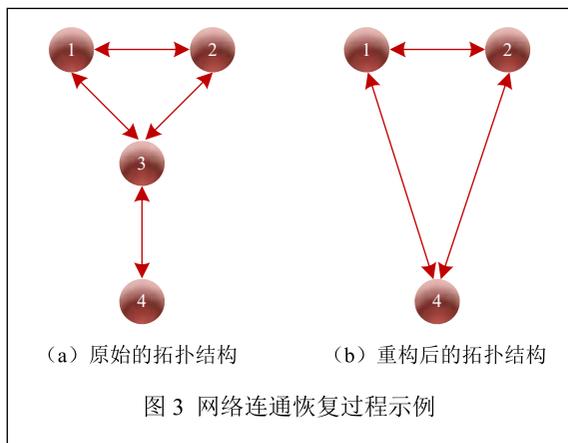
对于未引入拓扑重构的无线传感网来说，当部分节点发生故障时容易出现网络分割现象，导致网络不连通，造成网络性能大幅下降甚至瘫痪，而当引入上述拓扑重构方案后，可以通过调整部分节点传输功率有效防止出现网络分割，从而提高了网络服务性能。但是，由于该方案利用邻接关联矩阵来建立故障模型，当网络节点拓扑变化较快时，故障诊断正确率会随之下降，进而影响方案的使用效能。

基于图论，当前传感网 G 的网络拓扑定义为 $G=(V, E)$ ，其中 V 是所有节点的集合， E 是所有节点之间链路（边）的集合。令 $N_i[v]$ 是 G 中任意节点 v 的第 i 跳邻居节点的集合，并假设节点 v 最小功率和最大功率分别为 $P_{\min}(v)$ 和 $P_{\max}(v)$ ，并且初始时节点 v 的发射功率为 $P_{\min}(v)$ 。上述拓扑重构算法实现的伪代码如下：

```

Procedure Topology_Reconstruction ()
{
  i=1; //i 为初始迭代次数
  while Ni[v] ≠ V // 当 Ni[v]=V 时算法停止
  {
    For x in Ni[v] P(x)=Pmax(x); // 将节点 v 的一跳邻居节点的功率调整到最大功率
    if G(Ni[v])is connected break; // 如果节点更新功率后的网络拓扑连通则结束循环
    i++; // 否则 i+1, 并且对下一跳节点执行上述相同的功率调整操作
  }
  Optimize G(Ni[v]); // 对网络拓扑进行优化, 在保持网络连通前提下可适当降低节点功率
}
  
```

为了说明本方案的大致工作方式，图3给出了一个基于有向图的拓扑重构示例。首先，故障诊断算法定位出失效节点3，为了恢复网络连通性，首先通过调整节点3的一跳邻居节点1、2和4的发送功率，使得节点1、2和4可以相互通信，从而实现了局部网络连通的恢复；若是调整一跳节点仍不能使网络恢复，则继续触发两跳甚至于 $k(k>2)$ 跳将邻居节点功率调至最大，直到恢复网络的连通。



4 小结

近年来,随着物联网和智慧城市的蓬勃兴起,作为支撑技术之一的无线传感网的稳健可靠运行至关重要。本文针对无线传感网的特点研究了故障诊断和网络重构技术的应用方法,重点解决 WSN 中的临界故障发现和拓扑重构问题,即根据实时感知的 WSN 情景信息及时发现网络可能存在的瓶颈节点和故障节点,合理调整网络节点工作状态来恢复网络通信。论文对现有的故障诊断方法和网络拓扑重构技术进行了归纳总结,并设计了一种适合于无线传感网的网络拓扑重构方案,旨在增强无线传感网的整体生存性。今后将进一步对设计的方案进行针对性的仿真实验以验证其实际效果。

参考文献

[1] 李文锋,符修文. 无线传感网抗毁性[J]. 计算机学报, 2015, 38(03): 625-647.

[2] 田秀雯. 基于拓扑重构的无线传感网抗毁性优化策略研究[D]. 西安电子科技大学, 2017.

[3] 邹映琨. 多约束条件下战术网规划及抗毁重构方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2017.

[4] 梁海平, 顾雪平. 基于节点恢复可靠性的骨架网络重构[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(04): 30-34.

[5] 蒋文君, 刘润然, 范天龙, 等. 多层网络级联失效的预防和恢复策略概述[J]. 物理学报, 2020, 69(08): 81-91.

[6] 王宏力, 侯青剑. 故障诊断方法现状与展望[J]. 传感器与微系统, 2008(05): 1-4.

[7] 张晓博. 基于进化博弈下网络重构算法的研究[D]. 西安电子科技大学, 2014.

[8] 张剑, 何怡刚. 基于无向图所有生成树的网络重构遗传算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(05): 136-141.

[9] 陈乐. 智能控制在网络重构中的应用实现[J]. 信息通信, 2017(05): 228-230.

[10] 彭利民. 一种拓扑感知的虚拟网络重构算法[J]. 四川大学学报, 2015, 47(05): 110-115.

[11] 杨馥源. 智能配电网脆弱性评估及网络重构[D]. 西安理工大学, 2018.

[12] 王力立. 无线传感网节点部署及拓扑重构问题研究[D]. 南京理工大学, 2015.

[13] 王丹阳. Ad Hoc 网络拓扑监视与路由重构技术研究[D]. 西安工业大学, 2014.

Fault Diagnosis and Network Reconstruction Mechanisms for Wireless Sensor Network

WANG Haitao, TANG Xiao

(Nanjing Audit University Jinshen College, Nanjing 210023, China)

Abstract: Due to the complex and diverse deployment environment of wireless sensor, the dynamic change of network topology, the limited resources of nodes and the vulnerability to attack, the failure of nodes leads to the sharp decline or even paralysis of network performance. Since timely and effective fault diagnosis and network reconfiguration are directly related to the stable and reliable operation of wireless sensor networks, this paper mainly studies the fault diagnosis and network reconfiguration mechanism of wireless sensor networks. Firstly, this paper analyzes the root causes of wireless sensor network fault, and summarizes the current common network fault diagnosis methods; secondly, it describes several effective network topology reconstruction algorithms, and then gives a feasible network topology reconstruction scheme based on fault diagnosis, which can enhance the overall survivability of wireless sensor network to a certain extent.

Key words: wireless sensor network; fault diagnosis; network reconfiguration; network topology

作者简介

王海涛: 南京审计大学金审学院副教授, 博士, 计算机学会高级会员, 研究方向为网络架构、无线传感网、大数据和人工智能。

通信地址: 南京市秦淮区御道街标营 2 号 21 栋 2102 室

邮编: 210007 邮箱: haitmail@126.com

唐笑: 南京审计大学金审学院 16 级网络工程专业本科生, 研究方向为无线传感网。