

无线传感器网络 可靠性评估

周志杰 贺 维 胡冠宇 周晓光 曲媛媛 乔佩利 著



科学出版社

无线传感器网络可靠性评估

周志杰 贺 维 胡冠宇 周晓光 曲媛媛 乔佩利 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以无线传感器网络可靠性相关问题研究为出发点,通过对无线传感器网络可靠性影响因素的深入分析,根据影响因素的特性划分为内部因素和外部因素两个方面。在对内部因素进行研究时,通过对传感器数据的时间、空间、属性相关性进行分析,提出基于分层置信规则库模型的无线传感器网络故障诊断方法。在对外部因素进行研究时,通过对网络特征数据的图形化处理,提出基于卷积神经网络的无线传感器网络安全检测方法。在综合利用内部与外部因素实现可靠性评估时,通过对可靠性影响因素的特征分析,提出基于分层置信规则库的无线传感器网络可靠性评估方法。

本书可供从事人工智能、网络安全等相关专业研究生做教材使用,同时适合从事无线传感器相关专业工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络可靠性评估 / 周志杰等著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-060091-2

I. ①无… II. ①周… III. ①无线电通信-传感器-计算机网络-可靠性-评估 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 292107 号

责任编辑: 魏英杰 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 9

字数: 179 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)可靠性是保障网络正常工作的前提,是提高网络性能的基础。WSN 可靠性不仅是网络设计的关键指标,也是保障网络正常运行和管理维护的重要依据。由于 WSN 自身特点和工作环境的特殊性,其与传统无线网络具有显著的差异。在 WSN 中,传感器个体运算能力、存储资源、电池容量有限;传感器间通信线路带宽有限、传输速率较低;信号间存在相互干扰、传输信号随着通信距离不断衰减;传感器易受到恶劣天气、电磁辐射等环境因素的影响;WSN 易受到被动窃听、主动入侵、拒绝服务等来自互联网的网络攻击。基于以上因素,在进行 WSN 可靠性研究时,只有综合考虑不同因素对 WSN 产生的影响,才能全面、客观地实现 WSN 可靠性评估。WSN 可靠性研究是当今学术界的研究重点和难点,目前仍未形成较为完整和成熟的理论框架。

本书围绕 WSN 可靠性评估的相关问题进行研究,通过对影响 WSN 运行可靠性的各个环节进行分析,汇总主要的影响因素,并根据其产生的原因进行分类,将影响因素划分为内部因素和外部因素。从不同因素对 WSN 造成的影响效果出发,构建 WSN 可靠性评估指标体系,即通过对 WSN 故障状态评估和 WSN 安全状态评估完成对 WSN 可靠性评估。在对 WSN 故障问题研究时,主要从 WSN 节点故障问题展开研究;在对 WSN 安全问题研究时,主要从 WSN 攻击问题展开研究,同时针对多因素 WSN 可靠性评估问题,设计分层可靠性评估模型。基于以上研究,构建 WSN 可靠性评估系统。该系统易于扩展,可实现对 WSN 的运行可靠性评估。

在本书的写作过程中,得到火箭军工程大学胡昌华教授、长春工

业大学张邦成教授、空军工程大学张琳教授、火箭军工程大学常雷雷博士和美国得州大学西南医学中心周治国博士后的关心和帮助。在本书出版之际谨向他们表示衷心的感谢!

同时,本书的出版得到火箭军工程大学导弹工程学院、空军工程大学防空反导学院、海南师范大学信息科学技术学院老师和同学的支持和帮助,在此一并表示感谢!

本书相关的研究工作得到国家自然科学基金项目(61773388、61833016、61751304、61702142、61370031、61374138)和海南省自然科学基金项目(617120)的资助。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者指正。

周志杰

2018年9月于西安

目 录

前言

第 1 章 无线传感器网络可靠性评估系统	1
1.1 引言	1
1.2 无线传感器网络可靠性	1
1.2.1 无线传感器网络可靠性影响因素	1
1.2.2 无线传感器网络可靠性评估分析	2
1.2.3 无线传感器网络可靠性评估系统模型	3
1.3 无线传感器网络基本构成	4
1.3.1 无线传感器网络基本结构	4
1.3.2 无线传感器网络的特点	6
1.4 无线传感器网络可靠性相关研究分析	6
1.4.1 无线传感器网络的可靠性研究	6
1.4.2 无线传感器网络的可靠性评估方法研究	8
1.5 无线传感器网络可靠性研究存在的问题	8
1.6 本书的结构安排	9
1.7 本章小结	10
第 2 章 无线传感器网络可靠性评估框架	11
2.1 引言	11
2.2 无线传感器网络运行可靠性	11
2.3 无线传感器网络可靠性影响因素	12
2.3.1 传感器节点	12
2.3.2 无线通信	13
2.3.3 工作环境	13

2.3.4	物理破坏	13
2.3.5	网络攻击	14
2.4	无线传感器网络可靠性评估指标体系	15
2.5	无线传感器网络可靠性评估框架	16
2.5.1	无线传感器网络运行状态检测	17
2.5.2	分层可靠性评估模型的建立	18
2.5.3	可靠性问题研究框架	18
2.6	本章小结	21
第3章	无线传感器网络的节点故障诊断	22
3.1	引言	22
3.2	无线传感器网络的故障	22
3.2.1	无线传感器网络的节点故障类型	22
3.2.2	无线传感器网络的故障诊断问题研究	23
3.2.3	无线传感器网络的故障诊断研究存在的不足	24
3.3	置信规则库	25
3.3.1	置信规则库模型	25
3.3.2	置信规则库模型构建	26
3.3.3	置信规则库推理方法	27
3.3.4	置信规则库参数优化算法	28
3.4	无线传感器网络的节点故障诊断问题	29
3.4.1	无线传感器网络的节点故障诊断问题定义	29
3.4.2	无线传感器网络的节点故障检测	30
3.4.3	无线传感器网络的节点故障类型判断	30
3.5	传感器数据相关性分析	31
3.5.1	时间相关性	31
3.5.2	空间相关性	32
3.5.3	属性相关性	32

3.6 基于置信规则库的节点故障诊断模型	33
3.6.1 故障检测	33
3.6.2 故障类型判断	34
3.7 基于置信规则库的节点故障诊断模型的推理	36
3.8 基于置信规则库的节点故障诊断模型的参数优化	37
3.9 基于置信规则库的节点故障诊断实现过程	40
3.10 仿真实验	41
3.10.1 实验设计	42
3.10.2 基于 K-means 的传感器聚类实现	45
3.10.3 基于分层置信规则库的节点故障类型判断模型实现	46
3.10.4 实验结果分析	54
3.11 本章小结	57
第 4 章 无线传感器网络的网络入侵检测	58
4.1 引言	58
4.2 无线传感器网络的网络安全	58
4.2.1 无线传感器网络安全问题分析	58
4.2.2 无线传感器网络入侵检测问题研究	59
4.2.3 无线传感器网络入侵检测问题研究的不足	60
4.3 深度学习	61
4.3.1 深度学习概述	61
4.3.2 深度学习模型	62
4.4 无线传感器网络的网络入侵检测问题	69
4.4.1 获取属性关系	70
4.4.2 入侵检测	70
4.5 基于卷积神经网络的网络入侵检测模型	71
4.5.1 利用 CNN 实现入侵检测的模型结构	71
4.5.2 基于 CNN 的入侵检测模型结构	72

4.6	基于卷积神经网络的网络入侵检测模型的数据处理	73
4.7	卷积神经网络的模型结构	75
4.8	基于迁移学习的卷积神经网络的模型训练	78
4.9	基于卷积神经网络的网络入侵检测的实现过程	79
4.9.1	模型训练	79
4.9.2	模型检测	80
4.10	仿真实验	81
4.10.1	实验设计	81
4.10.2	基于 CNN 的网络入侵检测模型实现	83
4.10.3	实验结果分析	86
4.11	本章小结	89
第 5 章	无线传感器网络可靠性评估	90
5.1	引言	90
5.2	无线传感器网络可靠性评估	90
5.3	无线传感器网络可靠性评估问题	91
5.3.1	无线传感器网络故障评估	92
5.3.2	无线传感器网络安全评估	92
5.3.3	无线传感器网络可靠性评估	93
5.4	基于置信规则库的可靠性评估模型	93
5.4.1	可靠性评估模型基本结构	93
5.4.2	无线传感器网络故障评估	94
5.4.3	无线传感器网络安全评估	97
5.4.4	无线传感器网络可靠性评估	99
5.5	基于置信规则库的可靠性评估模型的推理	101
5.5.1	无训练模型推理	101
5.5.2	有训练模型推理	103

5.6 基于置信规则库的可靠性评估模型的参数优化·····	104
5.7 基于置信规则库的可靠性评估实现过程·····	106
5.8 仿真实验·····	107
5.8.1 实验设计 ·····	109
5.8.2 基于分层置信规则库的可靠性评估模型实现 ·····	109
5.8.3 实验结果分析 ·····	114
5.9 实际案例分析·····	119
5.9.1 实验设计 ·····	119
5.9.2 实验结果分析 ·····	122
5.10 本章小结 ·····	124
第 6 章 总结与展望 ·····	125
参考文献 ·····	127

第1章 无线传感器网络可靠性评估系统

1.1 引言

WSN 是一种新的信息获取和处理的网络。WSN 由部署在一定区域内的大量、低功耗的传感器节点组成,是通过无线通信方式构成的自组织、多跳的网络系统^[1]。通过传感器节点之间的相互协作,WSN 能够实时监测、感知和采集监测对象的信息。通过对汇总的信息进行数据处理,WSN 能够为用户提供详尽、有效的观测数据^[2]。WSN 是感知客观世界的重要途径,在军事国防、环境监测、灾难预警、医疗健康、智慧农业、智能交通等领域具有广阔的应用前景^[3]。美国的 *Businessweek* 将 WSN 与效用计算、塑料电子学、仿生人体器官列为全球未来四大高技术产业。麻省理工学院的 *Technology Review* 将 WSN 列为未来改变世界的十大新兴技术之首。

1.2 无线传感器网络可靠性

1.2.1 无线传感器网络可靠性影响因素

随着 WSN 的快速发展,WSN 可靠性问题越来越受到行业的重视。WSN 应用对可靠性有着比较严格的要求,一旦 WSN 可靠性无法获得保障,轻则导致网络系统失效,重则造成经济损失、人员伤亡等严重后果。因此,WSN 可靠性不仅是网络设计的关键指标,同时也是保障网络正常运行和管理维护的重要依据。由于 WSN 自身的特点,WSN 可靠性存在一些先天不利的因素,具体表现如下^[4,5]。

① 节点资源有限。由于成本和能源供应的限制,其运算能力和存

储能力有限,传感器节点数据处理和转发能力受到限制。

② 节点间无线通信资源有限。由于传感器节点间采用无线通信方式,节点间通信带宽和抗干扰能力有限,传感器节点间无线通信的稳定性受到限制。

③ 网络可维护性差。由于 WSN 采用自组织、无中心、分布式、多跳转发的组网方式,网络的可维护能力差,随着运行时间的增加 WSN 的可靠性不断下降。

④ 工作环境恶劣。由于 WSN 经常部署于条件恶劣的区域,传感器节点受到电磁辐射、恶劣天气等环境的影响,传感器节点易出现故障,网络通信效果差。

⑤ 网络易遭受外部攻击。由于 WSN 需要公共网络(如互联网)将数据汇总到数据处理中心,网络会受到来自外部的攻击,因此会出现 WSN 数据被窃取、篡改,网络服务被阻塞等问题。

因此,在对 WSN 整体可靠性进行研究时,需要综合考虑各种对 WSN 可靠性造成影响的因素,才能对 WSN 可靠性实现客观、全面的评价。

1.2.2 无线传感器网络可靠性评估分析

可靠性评估是指通过有计划、有目的的收集系统设计、测试、运行阶段的数据,通过统计分析的方法对系统的可靠性进行评估^[6]。如图 1-1 所示为 WSN 的生命周期图。可靠性评估在不同阶段的意义如下。

① 在 WSN 设计阶段,根据系统的需求,设定不同的评估指标,以此为基础进行 WSN 的方案设计,并通过指标验证方案的可靠性。

② 在 WSN 部署阶段,收集系统数据,进行处理和分析,掌握 WSN 的可靠性情况,同时找到当前薄弱环节对 WSN 进行优化,设计改进措施。

③ 在 WSN 运行阶段,实时收集系统数据,通过对数据分析,评估当前 WSN 的可靠性,了解其当前的运行状态,确保获取数据的有效性。



图 1-1 WSN 生命周期图

④ 在 WSN 维护阶段，通过对系统运行过程中收集到的数据的分析，判定当前 WSN 存在的问题，并根据问题的特性对 WSN 进行修正，提高可靠性，从而延长其运行周期。

1.2.3 无线传感器网络可靠性评估系统模型

传统的可靠性评估更关注系统设计阶段的可靠性评估，然而 WSN 是一种动态网络拓扑结构，传感器节点和通信线路受大量的随机性和不确定性因素干扰，导致网络的稳定性和采集数据的准确性实时发生改变，因此对 WSN 的运行可靠性评估更具有实际意义。这不仅能够让使用者了解 WSN 运行状态和采集数据的可靠性，同时为 WSN 维护提供基础数据支撑^[7]。如图 1-2 所示为 WSN 可靠性评估系统的模型，主要完成以下三个方面的工作。

① 可靠性影响因素分析。根据 WSN 自身工作特点，分析对 WSN 可靠性影响的各种因素，从而确定 WSN 运行可靠性的评估指标和评估框架。

② 运行状态检测。在 WSN 运行过程中，检测各种评估指标的状态，为后续可靠性评估进行数据收集。

③ 可靠性评估。根据运行状态检测结果，分别完成对不同指标的评估，进而实现对 WSN 可靠性的综合评估。

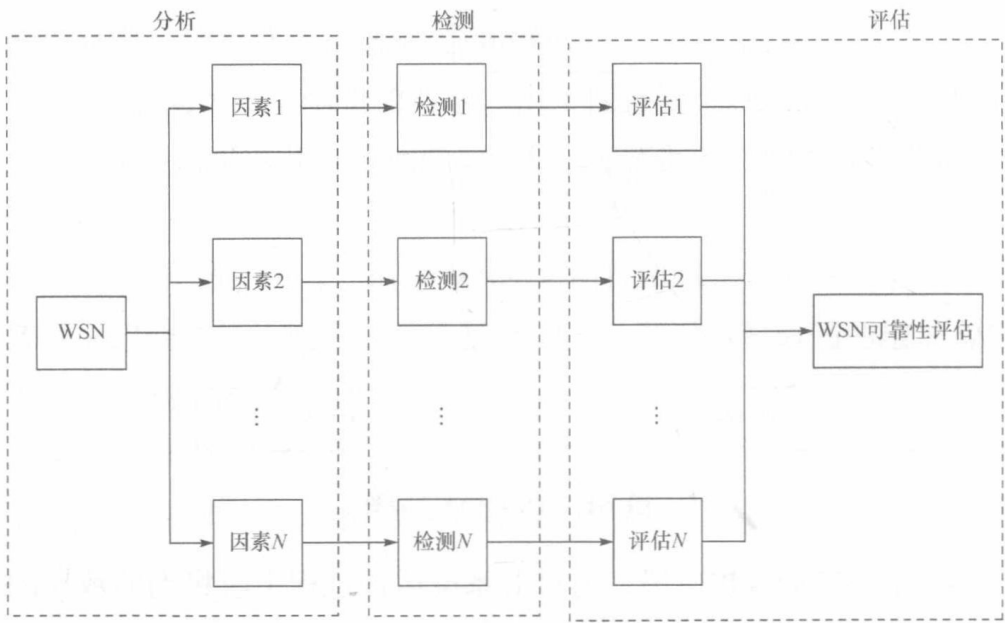


图 1-2 WSN 可靠性评估系统模型

通过以上描述可知，要实现客观、全面的 WSN 可靠性评估，需要考虑评估系统的各个环节，综合利用 WSN 运行中产生的各种信息，才能给出恰当的解决方案。

1.3 无线传感器网络基本构成

1.3.1 无线传感器网络基本结构

WSN 的作用是感知、采集和传输监测区域内监测对象的信息，并对信息进行数据处理和数据融合，将处理后的数据提供给用户^[8]。如图 1-3 所示为一个典型的 WSN 基本结构，主要由监测区域传感器节点、无线传输通道、汇聚节点、传输网络、数据处理中心组成^[9]。

① 传感器节点主要负责对监测区域内监测对象的信息采集和传输，具有体积小、能耗低等特点，同时具有无线传输、信息采集和数据处理的能力。如图 1-4 所示为传感器节点的基本结构。传感器节点通常由数据采集模块、数据处理模块、数据传输模块和能源供应模块组成。

通过不同的数据采集模块，传感器节点能采集温度、湿度、声音、加速度、压力、光感应等不同类型的信息。

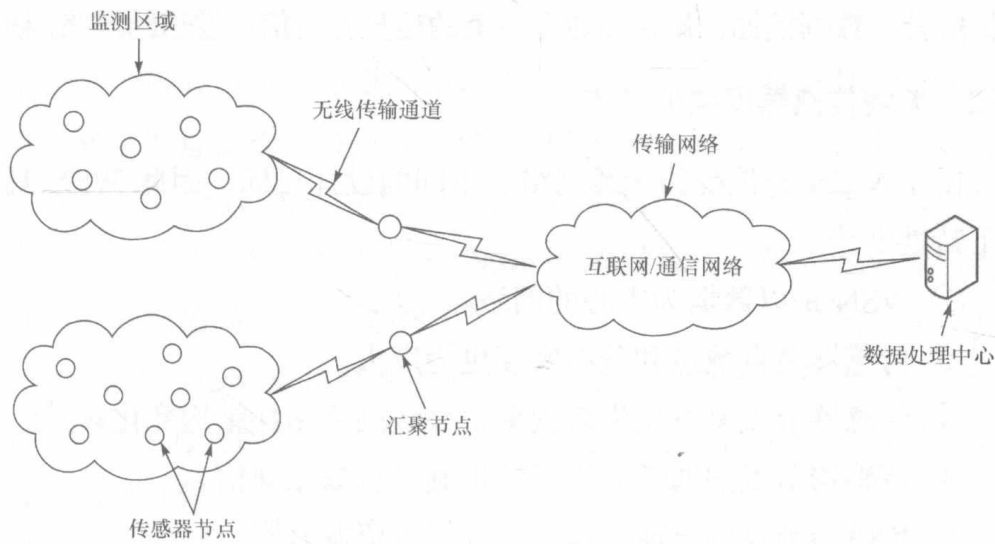


图 1-3 典型的 WSN 基本结构

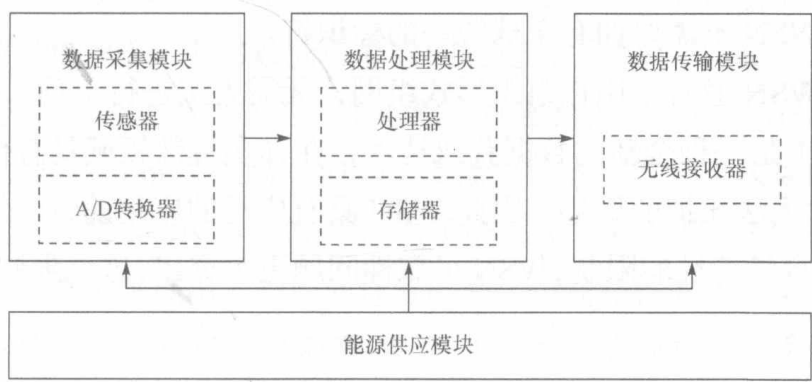


图 1-4 传感器节点的基本结构

② 无线传输通道是传感器节点间或传感器节点与汇聚节点间的数据传输线路，可采用微波、蓝牙、红外线等多种方式通信。

③ 汇聚节点主要负责将下级传感器节点采集的数据通过传输网络发送给数据处理中心，可看作网关节点。通常情况下，汇聚节点功能强大，且不受自身能耗因素的限制。

④ 传输网络是汇聚节点和数据处理中心间的数据传输线路，通常

可采用互联网、通信网络和卫星网络等多种网络形式。

⑤ 数据处理中心主要负责对 WSN 中获取的监测信息进行数据处理、数据融合、数据挖掘,最终形成有价值的信息并将信息发送给网络用户。

1.3.2 无线传感器网络的特点

由于 WSN 与传统的无线网络有不同的设计目标,因此 WSN 具有以下特性^[10,11]。

- ① WSN 是以数据为中心的网络。
- ② 传感器节点数量和分布密度更为庞大。
- ③ 传感器节点易发生失效现象,导致网络拓扑结构变化频繁。
- ④ 传感器节点间通常采用广播机制进行数据通信。
- ⑤ 传感器节点的电池、运算、存储等资源有限。
- ⑥ 无线传输通道的带宽、频率等资源有限。
- ⑦ WSN 不需要拥有全球统一的标识符。
- ⑧ WSN 通常采用自组织形式组网,无需人工进行干预。

WSN 是一种全新的数据获取技术,在许多特殊领域具有传统数据获取技术无法比拟的优势,因此 WSN 具有广泛的应用前景。但是,由于 WSN 自身特性的限制,WSN 可靠性问题更为突出,这也限制了 WSN 的发展^[12]。

1.4 无线传感器网络可靠性相关研究分析

近年来,WSN 可靠性问题引起学术界的广泛关注,全球更多的学者正在把精力投入到 WSN 可靠性问题研究。

1.4.1 无线传感器网络的可靠性研究

当前针对 WSN 可靠性问题的研究主要有以下几个方面。

① 基于传感器节点的研究,主要从传感器节点的故障问题、能耗问题、数据安全问题等出发研究 WSN 的可靠性^[13,14]。Distefano 提出从

传感器节点的角度表示 WSN 的可靠性, 并从动态系统角度对 WSN 可靠性进行研究^[15]。在考虑传感器个体故障和共因故障的情况下, Chowdhury 等提出一种基于蒙特卡罗模拟的可靠性计算方法^[16]。为了避免由于缺少接收节点和遭受网络攻击, 传感器节点数据破坏, Bahi 等基于流行病学原理提出一种在无人值守 WSN 中传感器节点数据有效性的保障方法^[17]。Feng 等建立了一种基于传感器节点故障和能量消耗问题的 WSN 可靠性分析模型^[18]。Kabashkin 等设计了一种 WSN 传感器节点可靠性分析的马尔可夫模型^[19]。

② 基于 WSN 通信网络的研究, 主要从路由选择问题、可靠传输问题、网络连通问题等方面对 WSN 的可靠性进行研究^[20,21]。例如, Shen 等考虑恶意软件环境, 提出一种评估 WSN 可靠性的方法, 保障 WSN 数据传输的有效性^[22]。在对 WSN 不同路由算法的可靠性和性能进行比较后, Zonouz 等提出一种动态路由算法实现端到端的可靠传输^[23]。Cai 等对事件驱动的 WSN 中的数据可靠性问题进行了研究^[24]。在考虑网络连通性的基础上, Xu 等建立了一个不确定性随机谱, 用来评估移动 WSN 的生存能力^[25]。Yan 等提出一种基于多播模型的有序二叉决策图的组播算法, 用于评估 WSN 可靠性^[26]。为了满足用户对 WSN 传输可靠性评估的需要, Zhu 等提出一种面向任务的基于传输路径的 WSN 传输可靠性评估模型^[27]。Ahmed 等针对在 WSN 上传输多媒体数据效率低下的问题, 对 WSN 数据包拥塞控制协议进行修改, 提出一种轻量化的可靠性机制^[28]。Chen 等设计了一种改进的可靠性协同通信数据采集方案, 在不降低网络生存周期的前提下, 实现提高网络通信的可靠性^[29]。

③ 基于特殊应用环境下的可靠性研究, 主要讨论在特殊应用环境下如何保障 WSN 可靠性问题^[30]。例如, Silva 等对工业应用中 WSN 可靠性进行研究^[31]。Kumar 等对工业 WSN 的可靠性和实效性服务质量保障进行了研究^[32]。Wang 等对人体传感器网络的可靠性进行了研究^[33]。Wu 等对部署在一个带状区域的 WSN 的可靠性进行了研究, 如煤矿、