

# 基于知识图谱的网络安全态势感知与威胁预测模型

赵宇

(国防科技大学计算机学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 随着物联网、云计算、大数据等新兴技术的快速迭代与深度融合, 无线传感器网络 (WSN) 作为数据采集与传输的核心载体, 已广泛应用于国防军事、环境监测、智能医疗、智慧城市等多个关键领域, 成为支撑现代信息系统正常运行的重要基础设施。然而, 无线传感器网络节点通常部署于复杂且恶劣的环境中, 受硬件体积、成本及部署场景的限制, 节点能源供应严重受限, 传统依赖电池供电的方式难以满足网络长期稳定运行的需求, 能源短缺已成为制约无线传感器网络发展与应用的核心瓶颈。能量采集技术的出现为解决这一难题提供了有效途径, 其能够从周围环境中获取可再生能源 (如太阳能、风能、热能等), 为传感器节点持续供电, 有效延长网络生命周期。拓扑控制算法作为无线传感器网络能量优化的核心技术, 通过合理调整节点的传输功率、邻居关系及网络结构, 可实现网络能量消耗的均衡分配, 进一步提升能量利用效率, 保障网络连通性与覆盖率。当前, 网络安全形势日益严峻, 无线传感器网络因其部署分散、节点资源有限、通信链路脆弱等特点, 更容易遭受各类网络攻击, 如窃听、篡改、伪造、拒绝服务攻击等, 严重威胁网络数据的机密性、完整性和可用性。传统的网络安全态势感知与威胁预测方法, 多依赖于单一数据源的分析, 缺乏对网络实体、攻击行为、脆弱性等多维度信息的关联融合, 难以全面、准确地感知网络安全态势, 且预测精度低、实时性差, 无法满足复杂环境下无线传感器网络的安全防护需求。知识图谱作为一种结构化的知识表示方法, 能够将网络中的多源异构数据 (如节点信息、攻击特征、漏洞信息、威胁情报等) 进行整合与关联, 构建语义化的知识网络, 实现对网络安全相关知识的系统化管理与深度挖掘。基于此, 本文结合能量采集技术与拓扑控制算法, 构建了一种基于知识图谱的网络安全态势感知与威胁预测模型。首先, 针对无线传感器网络的能源限制问题, 设计了一种基于能量采集的动态拓扑控制算法, 通过建立合理的能量采集模型、网络拓扑模型和能量消耗模型, 实现节点传输功率的动态调整、基于能量预测的拓扑优化及节点角色的智能分配, 平衡网络能量消耗与能量采集, 延长网络寿命。其次, 构建网络安全知识图谱, 整合网络实体、攻击行为、漏洞信息、威胁情报等多源数据, 通过知识抽取、知识融合、知识推理等技术, 挖掘网络实体间的潜在关联, 实现对网络安全态势的全面感知。最后, 基于知识图谱的语义关联与深度推理能力, 设计威胁预测模型, 结合历史攻击数据与实时态势信息, 实现对潜在网络威胁的精准预测与预警。本文通过仿真实验对所提算法与模型进行了全面验证, 结果表明, 所设计的基于能量采集的拓扑控制算法能够有效均衡网络能量消耗, 显著延长网络寿命, 提升能量利用效率, 同时保障网络的连通性与覆盖率; 所构建的基于知识图谱的网络安全态势感知与威胁预测模型, 能够全面、准确地感知网络安全态势, 提升威胁预测的精度与实时性, 为无线传感器网络的安全防护提供了可靠的技术支撑。本文的研究成果不仅解决了无线传感器网络能源限制与安全防护的关键问题, 也为复杂网络环境下的安全态势感知与威胁预测提供了新的思路与方法, 具有重要的理论意义与实际应用价值。

**关键词:** 知识图谱; 网络安全; 态势感知; 威胁预测; 无线传感器网络; 能量采集; 拓扑控制; 能量优化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 3106-2709 (2025) 04-0014-12

DOI: 10.62022/NCAR.issn3106-2709.2025.04.002

## Knowledge Graph-Based Network Security Situation Awareness and Threat Prediction Model

Zhao Yu

(College of Computer Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073)

**Abstract:** With the rapid iteration and in-depth integration of emerging technologies such as the Internet of Things, cloud computing, and big data, Wireless Sensor Networks (WSN), as the core carrier of data collection and transmission, have been widely applied in many key fields such as national defense and military, environmental monitoring, intelligent medical care, and smart cities, becoming an important infrastructure supporting the normal operation of modern information systems. However, WSN nodes are usually deployed in complex and harsh environments. Due to the limitations of hardware size, cost, and deployment scenarios, the energy supply of nodes is severely restricted. The traditional battery-powered method is difficult to meet the needs of long-term stable operation of the network, and energy shortage has

**作者简介:** 赵宇, 男, 博士, 研究员, 研究方向为网络安全、知识工程。

become a core bottleneck restricting the development and application of WSN. The emergence of energy harvesting technology provides an effective way to solve this problem. It can obtain renewable energy (such as solar energy, wind energy, thermal energy, etc.) from the surrounding environment to continuously supply power to sensor nodes, effectively extending the network life cycle. As the core technology for energy optimization of WSN, topology control algorithms can realize the balanced distribution of network energy consumption by reasonably adjusting the transmission power of nodes, neighbor relationships, and network structure, further improving energy utilization efficiency and ensuring network connectivity and coverage. At present, the network security situation is becoming increasingly severe. Due to the characteristics of scattered deployment, limited node resources, and fragile communication links, WSN is more vulnerable to various network attacks, such as eavesdropping, tampering, forgery, and denial of service attacks, which seriously threaten the confidentiality, integrity, and availability of network data. Traditional network security situation awareness and threat prediction methods mostly rely on the analysis of a single data source, lacking the correlation and fusion of multi-dimensional information such as network entities, attack behaviors, and vulnerabilities. It is difficult to comprehensively and accurately perceive the network security situation, and the prediction accuracy is low and real-time is poor, which cannot meet the security protection needs of WSN in complex environments. As a structured knowledge representation method, knowledge graph can integrate and correlate multi-source heterogeneous data in the network (such as node information, attack characteristics, vulnerability information, threat intelligence, etc.), build a semantic knowledge network, and realize the systematic management and in-depth mining of network security-related knowledge. Based on this, this paper combines energy harvesting technology and topology control algorithms to construct a knowledge graph-based network security situation awareness and threat prediction model. Firstly, to solve the energy limitation problem of WSN, a dynamic topology control algorithm based on energy harvesting is designed. By establishing reasonable energy harvesting models, network topology models, and energy consumption models, the dynamic adjustment of node transmission power, topology optimization based on energy prediction, and intelligent allocation of node roles are realized to balance network energy consumption and energy harvesting and extend network life. Secondly, a network security knowledge graph is constructed to integrate multi-source data such as network entities, attack behaviors, vulnerability information, and threat intelligence. Through knowledge extraction, knowledge fusion, knowledge reasoning and other technologies, the potential associations between network entities are mined to realize comprehensive perception of network security situation. Finally, based on the semantic association and in-depth reasoning ability of the knowledge graph, a threat prediction model is designed to realize accurate prediction and early warning of potential network threats by combining historical attack data and real-time situation information. Comprehensive verification of the proposed algorithm and model is carried out through simulation experiments. The results show that the designed topology control algorithm based on energy harvesting can effectively balance network energy consumption, significantly extend network life, improve energy utilization efficiency, and ensure network connectivity and coverage. The constructed knowledge graph-based network security situation awareness and threat prediction model can comprehensively and accurately perceive the network security situation, improve the accuracy and real-time performance of threat prediction, and provide reliable technical support for the security protection of WSN. The research results of this paper not only solve the key problems of energy limitation and security protection of WSN, but also provide new ideas and methods for security situation awareness and threat prediction in complex network environments, which have important theoretical significance and practical application value.

**Keywords:** Knowledge Graph; Network Security; Situation Awareness; Threat Prediction; Wireless Sensor Networks (WSN); Energy Harvesting; Topology Control; Energy Optimization

## 1 引言

在数字化时代,无线传感器网络(WSN)作为一种由大量微型传感器节点组成的分布式网络系统,能够实现对物理世界的实时感知、数据采集与无线传输,已成为连接物理世界与数字世界的重要桥梁。随着5G、人工智能、边缘计算等技术的快速发展,无线传感器网络的应用场景不断拓展,从传统的环境监测、工业控制,逐步延伸到国防军事、智能交通、远程医疗、智能家居等多个关键领域,在保障国家基础设施安全、提升社会运行效率、改善人民生活质量等方面发挥着越来越重要的作用<sup>[1]</sup>。

然而,无线传感器网络在广泛应用的同时,也面临着诸多挑战,其中能源限制与网络安全是最为突出的两大问题。无线传感器网络节点通常采用电池供电,受限于节点体积小、成本低的特点,电池容量有限,且多数节点部署于偏远、

恶劣或人员难以到达的区域,电池更换困难,一旦电池耗尽,节点将无法正常工作,进而导致网络性能下降、覆盖范围缩小,甚至整个网络瘫痪<sup>[2]</sup>。此外,随着网络攻击技术的不断升级,无线传感器网络因其通信链路开放、节点资源有限、防御能力薄弱等特点,成为网络攻击的重点目标,各类恶意攻击不仅会导致数据泄露、篡改,还可能破坏网络拓扑结构,影响网络的正常运行,给国家和社会带来巨大的损失。

能量采集技术作为一种能够从周围环境中获取可再生能量的技术,为解决无线传感器网络能源限制问题提供了新的思路,其能够将太阳能、风能、热能、振动能等环境能量转化为电能,为传感器节点持续供电,有效延长网络生命周期。拓扑控制算法作为无线传感器网络能量优化的核心技术,通过合理调整节点的传输功率、邻居关系和网络结构,能够实现网络能量消耗的均衡分配,减少能量浪费,提升能量利用效率,同时保障网络的连通性与覆盖率,确保网络能

够稳定、高效地运行<sup>[3]</sup>。

在网络安全领域,传统的态势感知与威胁预测方法多依赖于单一的日志数据、告警信息或威胁情报,缺乏对多源异构数据的整合与关联分析,难以全面、准确地把握网络安全态势,且预测精度低、实时性差,无法及时发现潜在的网络威胁。知识图谱作为一种新兴的知识表示与管理技术,能够将网络中的实体、关系、属性等信息进行结构化表示,构建语义化的知识网络,实现多源数据的整合与关联,通过知识推理挖掘实体间的潜在关系,为网络安全态势感知与威胁预测提供了新的技术支撑。

基于此,本文聚焦于无线传感器网络的能源限制与网络安全两大核心问题,结合能量采集技术、拓扑控制算法与知识图谱技术,构建基于知识图谱的网络安全态势感知与威胁预测模型,旨在解决传统方法在能量优化与安全防护方面的不足,实现网络能量的高效利用与网络安全的主动防护,为无线传感器网络的稳定、安全运行提供技术保障。本章将首先阐述研究背景与意义,详细分析无线传感器网络的能源限制问题、能量采集技术的重要性及拓扑控制算法的核心作用,随后梳理当前研究现状,指出其中存在的挑战与不足,最后明确本文的研究内容、研究方法与研究创新点。

## 1.1 研究背景与意义

随着信息技术的快速发展,无线传感器网络已成为现代信息系统的重要组成部分,其广泛应用于各个领域,推动了数字化、智能化转型。但与此同时,无线传感器网络的能源限制与网络安全问题日益突出,严重制约了其进一步发展与应用。能量采集技术与拓扑控制算法的结合,能够有效解决能源限制问题,而知识图谱技术的应用,则为网络安全态势感知与威胁预测提供了新的途径。本节将从无线传感器网络的能源限制问题、能量采集技术的重要性及拓扑控制算法的核心作用三个方面,阐述本文的研究背景与意义。

### 1.1.1 无线传感器网络(WSN)的能源限制问题

无线传感器网络是由大量低成本、低功耗、微型化的传感器节点组成的分布式网络,节点通过无线通信的方式实现数据的采集与传输,能够在无人值守的情况下完成对目标区域的实时监测与数据上报。然而,由于传感器节点的硬件设计受到体积、成本、重量等因素的限制,其能源供应成为制约网络性能与生命周期的核心瓶颈,具体表现为以下几个方面:

首先,节点电池容量有限且更换困难。无线传感器网络节点通常采用小型锂电池供电,受限于节点体积,电池容量一般较小,难以满足长期运行的需求。同时,多数节点部署于偏远、恶劣或人员难以到达的区域,如沙漠、森林、海洋、

战场等,电池更换难度大、成本高,一旦电池耗尽,节点将无法正常工作,进而导致网络拓扑结构破坏、覆盖范围缩小,甚至整个网络瘫痪。例如,在环境监测场景中,传感器节点部署于森林深处,用于监测温度、湿度、火灾等环境参数,一旦电池耗尽,将无法及时发现火灾等突发情况,造成严重的财产损失;在国防军事场景中,传感器节点部署于战场前沿,用于监测敌方兵力部署、装备动态等信息,电池耗尽将导致情报采集中断,影响作战决策<sup>[4]</sup>。

其次,节点能量消耗不均衡,加速网络瘫痪。无线传感器网络中,节点的能量消耗主要包括数据采集、数据处理、无线通信三个部分,其中无线通信是能量消耗的主要来源,占总能耗的70%以上。由于节点部署位置、任务分工的不同,能量消耗存在明显的不均衡性。例如,靠近汇聚节点的节点需要转发大量来自其他节点的数据,能量消耗速度远高于边缘节点,容易出现“能量空洞”现象,即部分节点能量耗尽,导致网络分割,其他节点的数据无法正常传输,最终整个网络瘫痪。此外,部分节点可能需要承担更多的数据采集任务,如处于监测重点区域的节点,其能量消耗速度也会加快,进一步加剧能量不均衡问题。

再次,能量浪费现象严重。传统的无线传感器网络中,节点通常采用固定的传输功率进行通信,无论邻居节点的距离远近、信号强度如何,均采用相同的功率传输数据,导致大量能量浪费。例如,当两个节点距离较近时,采用高功率传输数据,会造成能量的不必要消耗;此外,节点在空闲状态下,若仍保持高功率待机,也会浪费大量能量。同时,传统的拓扑结构设计不合理,导致节点之间存在大量冗余链路,冗余链路的存在不仅增加了数据传输的复杂性,还会造成能量的额外消耗。

最后,能源供应受环境因素影响较大。在一些特殊场景中,如地下、深海、密闭空间等,太阳能、风能等环境能量难以获取,传统的电池供电方式无法满足节点长期运行的需求,进一步加剧了能源限制问题。此外,极端天气条件(如暴雨、暴雪、高温、低温等)也会影响电池的性能与寿命,导致节点能量供应不稳定,影响网络的正常运行。

### 1.1.2 能量采集技术对延长网络寿命的重要性

面对无线传感器网络的能源限制问题,传统的解决方案主要是通过改进电池技术、降低节点能耗等方式,但其效果有限,无法从根本上解决能源短缺问题。能量采集技术作为一种能够从周围环境中获取可再生能源的技术,能够为传感器节点持续供电,从根本上解决电池供电的局限性,对延长无线传感器网络寿命具有重要的意义,具体体现在以下几个方面:

首先,能量采集技术能够实现能源的可持续供应。能量采集技术可以从周围环境中获取太阳能、风能、热能、振动能、电磁能等可再生能量,这些能量具有取之不尽、用之不竭的特点,能够为传感器节点持续供电,避免了传统电池供电方式中电池耗尽导致节点失效的问题。例如,在户外场景中,太阳能采集模块可以将太阳能转化为电能,为节点持续供电;在工业场景中,振动能量采集模块可以利用设备运行产生的振动能,为节点供电;在人体穿戴场景中,热能采集模块可以利用人体体温产生的热能,为节点供电<sup>[5]</sup>。通过能量采集技术,无线传感器网络可以实现长期无人值守运行,大幅延长网络生命周期。

其次,能量采集技术能够降低网络运维成本。传统的无线传感器网络需要定期更换节点电池,尤其是在节点数量多、部署分散的场景中,电池更换的成本高、难度大,需要投入大量的人力、物力和财力。而能量采集技术能够为节点持续供电,无需频繁更换电池,大幅降低了网络的运维成本。例如,在智慧城市场景中,大量的传感器节点部署于城市的各个角落,若采用传统电池供电方式,电池更换需要耗费大量的人力和时间,而采用太阳能采集技术后,节点可以自主获取能量,无需人工干预,显著降低了运维成本。

再次,能量采集技术能够提升网络的可靠性与稳定性。传统的电池供电方式中,电池的性能会随着使用时间的增加而下降,导致节点能量供应不稳定,影响网络的正常运行。而能量采集技术能够实时从环境中获取能量,为节点提供稳定的电能供应,提升网络的可靠性与稳定性<sup>[6]</sup>。例如,在恶劣环境中,电池可能会因为温度、湿度等因素的影响而失效,而能量采集模块能够适应恶劣环境,持续为节点供电,确保网络能够正常运行。此外,能量采集技术还可以与电池结合使用,形成混合供电模式,当环境能量充足时,能量采集模块为节点供电,并为电池充电;当环境能量不足时,电池为节点供电,进一步提升网络的稳定性。

最后,能量采集技术能够拓展无线传感器网络的应用场景。在一些传统电池供电无法满足需求的场景中,如地下、深海、密闭空间等,能量采集技术可以利用环境中的其他能量(如地热、电磁能等)为节点供电,拓展无线传感器网络的应用场景。例如,在地下矿井监测场景中,采用地热能量采集技术,能够为节点持续供电,实现对矿井内温度、瓦斯浓度等参数的实时监测;在深海监测场景中,采用波浪能采集技术,能够为节点供电,实现对海洋环境的长期监测。

### 1.1.3 拓扑控制算法在能量优化中的核心作用

能量采集技术能够为无线传感器网络节点提供持续的

能量供应,但要实现网络能量的高效利用,延长网络寿命,还需要结合有效的能量优化技术。拓扑控制算法作为无线传感器网络能量优化的核心技术,通过合理调整节点的传输功率、邻居关系和网络结构,能够实现网络能量消耗的均衡分配,减少能量浪费,提升能量利用效率,同时保障网络的连通性与覆盖率,其核心作用主要体现在以下几个方面:

首先,拓扑控制算法能够实现节点传输功率的动态调整,减少能量浪费。无线传感器网络中,节点的无线通信是能量消耗的主要来源,传输功率的大小直接影响能量消耗的速度。传统的拓扑控制方法中,节点采用固定的传输功率进行通信,无论邻居节点的距离远近、信号强度如何,均采用相同的功率传输数据,导致大量能量浪费<sup>[7]</sup>。而先进的拓扑控制算法能够根据节点的邻居距离、信号强度、能量状态等信息,动态调整节点的传输功率,使节点在保证通信质量的前提下,采用最小的传输功率进行通信,从而减少能量消耗。例如,当两个节点距离较近时,降低传输功率;当两个节点距离较远时,适当提高传输功率,确保通信的稳定性。通过传输功率的动态调整,能够有效减少能量浪费,提升能量利用效率。

其次,拓扑控制算法能够优化网络拓扑结构,均衡网络能量消耗。无线传感器网络的拓扑结构直接影响节点的能量消耗与网络的运行效率。传统的拓扑结构(如星型、树型、mesh型)存在能量消耗不均衡、冗余链路多等问题,容易导致“能量空洞”现象,加速网络瘫痪。拓扑控制算法通过合理选择节点的邻居节点、优化数据传输路径,能够构建能量均衡的拓扑结构,使各个节点的能量消耗速度趋于一致,避免部分节点能量过快耗尽<sup>[8]</sup>。例如,通过簇头节点的轮换机制,让不同的节点轮流承担簇头职责,避免单一簇头节点能量消耗过快;通过优化数据传输路径,让数据传输尽量经过能量充足的节点,减少能量不足节点的负担,从而实现网络能量的均衡分配。

再次,拓扑控制算法能够保障网络的连通性与覆盖率。无线传感器网络的核心功能是实现目标区域的实时监测与数据传输,因此,网络的连通性与覆盖率是保障网络正常运行的关键。拓扑控制算法在优化能量消耗的同时,能够确保网络的连通性,即任意两个节点之间都存在有效的通信路径,确保数据能够正常传输;同时,能够保障网络的覆盖率,即目标区域内的每个点都能够被至少一个传感器节点覆盖,确保监测数据的完整性。例如,通过节点的邻居发现机制,及时发现网络中的孤立节点,并调整节点的传输功率或位置,使孤立节点加入网络,保障网络的连通性;通过优化节

点的部署位置与传输范围,确保目标区域的全面覆盖。

最后,拓扑控制算法能够提升网络的抗干扰能力与容错性。无线传感器网络通常部署于复杂的环境中,容易受到外界干扰(如电磁干扰、信号遮挡等),导致通信链路中断,影响网络的正常运行。拓扑控制算法通过构建冗余链路、优化网络结构,能够提升网络的抗干扰能力与容错性。当某条通信链路中断时,节点能够通过其他冗余链路进行数据传输,确保网络的正常运行;当某个节点失效时,拓扑控制算法能够及时调整网络结构,重新选择邻居节点与数据传输路径,避免网络分割,保障网络的稳定性。

## 1.2 研究现状与挑战

随着无线传感器网络的广泛应用,能源优化与网络安全问题受到了学术界与工业界的广泛关注,相关研究取得了一定的进展。在能量采集与拓扑控制领域,研究人员提出了多种能量采集模型与拓扑控制算法,试图解决无线传感器网络的能源限制问题;在网络安全态势感知与威胁预测领域,传统的方法不断优化,同时知识图谱等新技术的应用也为其提供了新的思路。然而,当前的研究仍然存在诸多不足,面临着一系列挑战。本节将从传统拓扑控制算法的局限性、能量采集环境下的动态拓扑需求,以及现有研究在能量预测、节点异构性等方面的不足三个方面,梳理当前的研究现状与挑战。

### 1.2.1 传统拓扑控制算法的局限性

传统的无线传感器网络拓扑控制算法主要分为两类:基于功率控制的拓扑控制算法和基于拓扑结构优化的拓扑控制算法。基于功率控制的拓扑控制算法主要通过调整节点的传输功率,构建一个连通且能量高效的拓扑结构,如LMST(局部最小生成树)算法、CBTC(基于连通性的功率控制)算法等;基于拓扑结构优化的拓扑控制算法主要通过优化节点的邻居关系、数据传输路径,构建能量均衡的拓扑结构,如LEACH(低功耗自适应聚类分层)算法、PEGASIS(能量高效的传感器网络链协议)算法等。这些传统的拓扑控制算法在一定程度上能够优化网络能量消耗,延长网络寿命,但随着无线传感器网络应用场景的不断复杂,其局限性也日益凸显,具体表现为以下几个方面:

首先,传统拓扑控制算法大多基于静态能量模型,未考虑能量采集的动态性。传统的拓扑控制算法通常假设节点的能量是固定的,即采用电池供电,能量只能消耗,无法补充,因此,算法的核心目标是尽可能减少能量消耗,延长网络寿命。但在能量采集环境下,节点的能量能够通过能量采集模块实时补充,能量状态是动态变化的,传统的静态能量模型无法准确反映节点的能量变化情况,导致算法的优化效果不

佳。例如,传统算法可能会过度限制节点的传输功率,导致在能量充足时,节点无法充分利用能量进行高效通信;而在能量不足时,又无法及时调整传输功率,导致节点能量快速耗尽<sup>[9]</sup>。

其次,传统拓扑控制算法的能量均衡性较差。传统的拓扑控制算法大多注重网络的连通性与覆盖率,对能量均衡性的考虑不足,容易导致部分节点能量消耗过快,出现“能量空洞”现象。例如,LEACH算法采用随机选择簇头节点的方式,虽然能够在一定程度上均衡能量消耗,但簇头节点的选择具有随机性,可能会导致部分簇头节点集中在能量不足的区域,加速能量消耗;PEGASIS算法采用链状拓扑结构,数据传输需要经过多个节点转发,靠近汇聚节点的节点需要转发大量数据,能量消耗速度远高于其他节点,容易出现能量耗尽的情况。

再次,传统拓扑控制算法的适应性较差。传统的拓扑控制算法大多假设网络节点是同构的,即所有节点的硬件性能、能量容量、传输功率等参数都是相同的,且网络部署环境是静态的,节点位置固定不变。但在实际应用中,无线传感器网络的节点往往是异构的,不同节点的硬件性能、能量容量、传输功率等参数存在差异,且网络部署环境是动态变化的,节点可能会因为移动、故障等原因导致位置变化或失效,传统的拓扑控制算法无法适应这种异构性与动态性,导致算法的性能下降。例如,当网络中存在能量容量较大的节点时,传统算法无法充分利用这些节点的优势,导致能量浪费;当节点位置发生变化时,传统算法无法及时调整拓扑结构,导致网络连通性下降。

最后,传统拓扑控制算法缺乏与网络安全的融合。传统的拓扑控制算法主要关注能量优化与网络性能,忽视了网络安全问题,构建的拓扑结构往往缺乏安全防护能力,容易遭受各类网络攻击。例如,传统算法构建的拓扑结构中,节点之间的通信链路缺乏加密保护,容易被窃听、篡改;簇头节点的选择缺乏安全机制,容易被恶意节点篡改,导致网络拓扑结构被破坏,影响网络的正常运行。

### 1.2.2 能量采集环境下的动态拓扑需求

随着能量采集技术的广泛应用,无线传感器网络进入了能量采集时代,节点的能量能够通过能量采集模块实时补充,能量状态呈现动态变化的特点,这对拓扑控制算法提出了新的动态拓扑需求。与传统的静态拓扑控制不同,能量采集环境下的拓扑控制需要适应能量的动态变化,实现拓扑结构的动态调整,以达到能量优化与网络性能提升的目标,具体的动态拓扑需求主要体现在以下几个方面:

首先，拓扑结构需要随节点能量状态的动态变化而调整。在能量采集环境下，节点的能量状态受环境因素的影响，呈现动态变化的特点，例如，白天太阳能采集效率高，节点能量充足；夜晚太阳能采集效率低，节点能量可能不足。因此，拓扑控制算法需要实时监测节点的能量状态，当节点能量充足时，适当提高传输功率，扩大通信范围，优化数据传输路径，提升网络通信效率；当节点能量不足时，适当降低传输功率，减少能量消耗，确保节点能够持续工作。同时，当节点能量状态发生较大变化时，需要及时调整拓扑结构，重新选择邻居节点与簇头节点，实现能量的均衡分配<sup>[10]</sup>。

其次，拓扑结构需要适应能量采集速率的动态变化。能量采集速率受环境因素（如光照强度、风速、温度等）的影响，呈现动态变化的特点，不同节点的能量采集速率也存在差异。例如，处于光照充足区域的节点，太阳能采集速率高；处于光照不足区域的节点，太阳能采集速率低。因此，拓扑控制算法需要考虑节点的能量采集速率，为能量采集速率高的节点分配更多的任务（如数据转发、簇头职责等），充分利用其充足的能量；为能量采集速率低的节点减少任务分配，降低能量消耗，确保节点能够长期运行。同时，当能量采集速率发生变化时，需要及时调整拓扑结构，优化任务分配，实现能量的高效利用。

再次，拓扑结构需要适应网络负载的动态变化。无线传感器网络的网络负载（如数据采集量、数据传输量）受监测任务的影响，呈现动态变化的特点。例如，在突发事件（如火灾、地震等）发生时，网络负载会急剧增加，大量数据需要实时传输；在正常监测状态下，网络负载相对稳定。因此，拓扑控制算法需要实时监测网络负载的变化，当网络负载较大时，优化拓扑结构，增加冗余链路，提升数据传输效率，避免数据拥堵；当网络负载较小时，简化拓扑结构，减少冗余链路，降低能量消耗。同时，根据网络负载的变化，调整节点的传输功率与任务分配，实现网络性能与能量消耗的平衡。

最后，拓扑结构需要具备动态容错能力。在能量采集环境下，节点的能量状态动态变化，可能会出现节点能量耗尽、故障等情况，导致节点失效；同时，网络部署环境的动态变化（如电磁干扰、信号遮挡等）也可能导致通信链路中断。因此，拓扑控制算法需要构建具有动态容错能力的拓扑结构，当节点失效或通信链路中断时，能够及时发现，并调整拓扑结构，重新选择邻居节点与数据传输路径，确保网络的连通性与稳定性<sup>[11]</sup>。例如，通过冗余链路的设计，当某条链路中断时，节点能够通过其他链路进行数据传输；通过节点

角色的动态轮换，当某个簇头节点失效时，能够及时选举新的簇头节点，保障簇内网络的正常运行。

### 1.2.3 现有研究在能量预测、节点异构性等方面的不足

近年来，研究人员针对能量采集环境下的拓扑控制算法进行了大量的研究，提出了一些基于能量采集的拓扑控制算法，试图解决传统算法的局限性，满足动态拓扑需求。但这些现有研究在能量预测、节点异构性、安全融合等方面仍然存在诸多不足，具体表现为以下几个方面：

首先，现有研究在能量预测方面的精度较低。能量预测是能量采集环境下拓扑控制算法的核心基础，准确的能量预测能够帮助算法更好地调整节点传输功率、优化任务分配，实现能量的均衡利用。但当前的能量预测方法大多采用简单的线性预测、滑动平均预测等方法，这些方法无法充分考虑环境因素（如光照强度、风速、温度等）的动态变化对能量采集速率的影响，预测精度较低。例如，线性预测方法假设能量采集速率是恒定的，无法反映环境因素变化导致的采集速率波动；滑动平均预测方法虽然能够考虑一定的历史数据，但对突发环境变化的适应性较差，预测误差较大。此外，现有研究大多只针对单一类型的能量采集（如太阳能）进行预测，对多种能量采集方式的融合预测研究较少，无法适应复杂环境下的能量采集需求。

其次，现有研究对节点异构性的考虑不足。在实际应用中，无线传感器网络的节点往往是异构的，不同节点的硬件性能、能量容量、传输功率、能量采集能力等参数存在差异。例如，部分节点可能配备高性能的能量采集模块，采集效率高、能量容量大；部分节点可能配备低性能的能量采集模块，采集效率低、能量容量小。但现有研究大多假设节点是同构的，忽略了节点之间的异构性，设计的拓扑控制算法无法充分利用异构节点的优势，导致能量利用效率低下。例如，现有算法可能会对所有节点采用相同的传输功率调整策略，无法根据异构节点的能量采集能力与能量容量进行差异化调整；在簇头节点选举时，也没有充分考虑异构节点的性能差异，导致簇头节点选择不合理，影响网络能量均衡。

再次，现有研究缺乏与网络安全的深度融合。当前，网络安全问题日益突出，无线传感器网络更容易遭受各类网络攻击，而现有研究大多只关注能量优化与网络性能，忽视了网络安全问题，设计的拓扑控制算法缺乏安全防护机制。例如，现有算法构建的拓扑结构中，节点之间的通信链路缺乏加密保护，容易被窃听、篡改；簇头节点的选举过程缺乏安全验证，容易被恶意节点攻击，导致拓扑结构被破坏；数据传输过程中，缺乏对数据完整性、机密性的保护，容易导致

数据泄露、篡改。此外,现有研究很少将知识图谱等安全技术与拓扑控制算法相结合,无法实现网络能量优化与安全防护的协同推进。

最后,现有研究的实用性较差。现有研究大多基于理想的仿真环境,假设网络部署环境稳定、节点无故障、通信链路无干扰,与实际应用场景存在较大差异。例如,现有算法大多假设节点位置固定不变,忽略了节点移动、故障等实际情况;假设能量采集速率稳定,忽略了环境因素的动态变化对采集速率的影响。此外,现有算法的复杂度较高,难以在资源有限的传感器节点上部署实现,实用性较差。

## 2 基于能量采集的拓扑控制算法设计

针对无线传感器网络的能源限制问题,以及现有拓扑控制算法的局限性,结合能量采集技术的特点与动态拓扑需求,本章设计一种基于能量采集的动态拓扑控制算法。该算法通过建立合理的系统模型与假设,明确能量采集、网络拓扑与能量消耗的关系,提出算法的核心思想,设计详细的算法步骤与流程,实现节点传输功率的动态调整、基于能量预测的拓扑优化及节点角色的智能分配,从而平衡网络能量消耗与能量采集,延长网络寿命,保障网络的连通性与覆盖率。本章将首先介绍系统模型与假设,包括能量采集模型、网络拓扑模型与能量消耗模型;随后阐述算法的核心思想;最后详细设计算法的步骤与流程。

### 2.1 系统模型与假设

系统模型是拓扑控制算法设计的基础,为了确保算法的合理性与可行性,需要建立科学、准确的系统模型,包括能量采集模型、网络拓扑模型与能量消耗模型。同时,为了简化算法设计,降低算法复杂度,需要对网络环境、节点特性等做出合理的假设。本节将详细介绍系统模型的构建与相关假设。

#### 2.1.1 能量采集模型

能量采集模型用于描述传感器节点从周围环境中获取能量的过程,反映节点能量采集速率与环境因素的关系,为拓扑控制算法的能量优化提供基础。本文设计的能量采集模型考虑多种可再生能源(如太阳能、风能、热能)的融合采集,能够适应不同的部署环境,具体描述如下:

假设无线传感器网络中每个节点都配备了多类型的能量采集模块,能够同时采集太阳能、风能、热能等环境能量,并将其转化为电能存储在节点的能量存储单元(如锂电池、超级电容)中。节点的能量采集过程主要包括能量获取、能

量转换、能量存储三个阶段:能量获取阶段,能量采集模块从周围环境中捕获可再生能源;能量转换阶段,通过能量转换电路将捕获的能量转化为节点可利用的电能;能量存储阶段,将转化后的电能存储在能量存储单元中,为节点的正常工作提供能量。

节点的能量采集速率受环境因素的影响,呈现动态变化的特点。例如,太阳能采集速率受光照强度、天气状况、时间等因素的影响,白天光照强度高,采集速率高;夜晚光照强度低,采集速率低;阴天、雨天的采集速率低于晴天。风能采集速率受风速、风向等因素的影响,风速越大,采集速率越高。热能采集速率受环境温度与节点温度的差值影响,差值越大,采集速率越高。为了准确描述节点的能量采集速率,本文将节点的能量采集速率分为瞬时采集速率与平均采集速率:瞬时采集速率指某时刻节点的能量采集速度,反映环境因素的实时变化;平均采集速率指一段时间内节点的能量采集速度的平均值,反映节点能量采集的整体水平。

假设节点的能量存储单元具有一定的容量限制,当能量存储单元的电量达到最大容量时,多余的采集能量将被丢弃,避免能量浪费;当能量存储单元的电量低于最小阈值时,节点将进入低功耗模式,减少能量消耗,确保节点能够持续工作。同时,假设能量采集模块的转换效率是固定的,即采集的环境能量与转化后的电能之间的比例是固定的,不考虑能量转换过程中的损耗(实际应用中,可根据硬件性能对转换效率进行修正)。

此外,为了实现能量的精准预测,本文的能量采集模型还包含历史采集数据的记录与分析功能,节点实时记录自身的能量采集速率、环境参数(如光照强度、风速、温度等),并通过历史数据的分析,挖掘能量采集速率与环境参数之间的关系,为能量预测提供数据支撑。例如,通过分析历史光照强度与太阳能采集速率的数据,建立光照强度与太阳能采集速率的关联模型,从而根据实时光照强度预测未来的太阳能采集速率。

本文设计的能量采集模型能够全面反映节点的能量采集过程,考虑环境因素的动态变化与多种能量的融合采集,为后续的能量预测与拓扑优化提供了准确的模型支撑,确保拓扑控制算法能够根据节点的能量采集状态进行动态调整,实现能量的高效利用。

#### 2.1.2 网络拓扑模型

网络拓扑模型用于描述无线传感器网络中节点的分布、邻居关系与数据传输路径,为拓扑控制算法的结构优化提供

基础。本文设计的网络拓扑模型基于簇状结构，结合能量采集技术的特点，实现拓扑结构的动态调整，具体描述如下：

假设无线传感器网络部署在一个二维平面的目标区域内，节点随机部署，部分节点为汇聚节点，负责收集整个网络的数据，并将数据传输到监控中心；其余节点为普通传感器节点，负责数据采集与数据转发。网络中的所有节点都具有无线通信能力，能够与周围的邻居节点进行通信，节点的通信范围由其传输功率决定，传输功率越大，通信范围越广。

网络拓扑结构采用簇状结构，将整个网络划分为多个簇，每个簇由一个簇头节点和多个簇成员节点组成。簇头节点负责协调簇内节点的工作，收集簇内成员节点的采集数据，对数据进行融合处理后，将数据转发到汇聚节点；簇成员节点负责数据采集，并将采集到的数据传输到簇头节点。簇的划分基于节点的位置、能量状态与能量采集速率，确保每个簇的规模适中，簇内节点的能量分布均衡，减少簇头节点的能量负担。

网络拓扑结构具有动态调整能力，能够根据节点的能量状态、能量采集速率与网络负载的变化，实时调整簇的划分、簇头节点的选举与数据传输路径。例如，当某个簇头节点的能量不足时，及时选举新的簇头节点；当节点的能量采集速率发生变化时，调整簇的范围，将能量采集速率高的节点分配到负载较重的簇中，充分利用其充足的能量；当网络负载发生变化时，优化数据传输路径，提升数据传输效率。

假设网络中的节点能够实时感知自身的位置信息（通过GPS定位或其他定位技术），并能够与邻居节点进行信息交互，获取邻居节点的位置、能量状态、能量采集速率等信息。节点之间的通信链路是双向的，即如果节点A能够与节点B通信，那么节点B也能够与节点A通信。同时，假设网络中的节点具有一定的移动能力（部分场景下），能够根据拓扑调整的需求，适当调整自身的位置，优化网络拓扑结构。

此外，网络拓扑模型还考虑了节点的异构性，不同节点的硬件性能、能量容量、传输功率、能量采集能力等参数存在差异，在簇划分与簇头选举过程中，充分考虑这些差异，为异构节点分配合适的角色，充分利用异构节点的优势。例如，能量容量大、采集速率高的节点优先选举为簇头节点，负责协调簇内工作与数据转发；能量容量小、采集速率低的节点作为簇成员节点，主要负责数据采集，减少能量消耗。

本文设计的网络拓扑模型基于簇状结构，具有动态调整能力，能够适应节点能量状态、能量采集速率与网络负载的变化，同时考虑节点的异构性，为拓扑控制算法的设计提供了合理的结构支撑，确保算法能够构建能量均衡、高效稳定

的网络拓扑结构。

### 2.1.3 能量消耗模型

能量消耗模型用于描述传感器节点在工作过程中的能量消耗情况，明确能量消耗的组成与影响因素，为拓扑控制算法的能量优化提供依据。无线传感器网络节点的能量消耗主要包括数据采集、数据处理、无线通信三个部分，其中无线通信是能量消耗的主要来源，本文设计的能量消耗模型详细考虑了各部分的能量消耗，具体描述如下：

首先，数据采集阶段的能量消耗。数据采集阶段，节点通过传感器模块采集环境参数（如温度、湿度、压力等），这一过程需要消耗一定的能量。数据采集阶段的能量消耗主要与采集频率、采集精度有关：采集频率越高，单位时间内采集的数据量越多，能量消耗越大；采集精度越高，传感器模块的工作负荷越大，能量消耗越大。假设节点的采集频率可以根据网络需求进行调整，当网络负载较大时，提高采集频率，获取更多的监测数据；当网络负载较小时，降低采集频率，减少能量消耗。

其次，数据处理阶段的能量消耗。数据处理阶段，节点对采集到的数据进行预处理、融合、加密等处理，去除冗余数据，提升数据质量，确保数据的机密性与完整性。数据处理阶段的能量消耗主要与数据量、处理复杂度有关：数据量越大，处理时间越长，能量消耗越大；处理复杂度越高（如复杂的加密算法、数据融合算法），能量消耗越大。例如，簇头节点需要对簇内多个成员节点的采集数据进行融合处理，数据量较大，处理复杂度较高，能量消耗也相对较大；而普通簇成员节点只需对自身采集的数据进行简单预处理，能量消耗相对较小。

最后，无线通信阶段的能量消耗。无线通信阶段，节点通过无线通信模块进行数据传输与接收，这是节点能量消耗的主要来源，占总能耗的70%以上。无线通信阶段的能量消耗主要与传输功率、传输距离、数据量有关：传输功率越大，能量消耗越大；传输距离越远，需要的传输功率越大，能量消耗越大；数据量越大，传输时间越长，能量消耗越大。此外，无线通信阶段的能量消耗还与通信链路的质量有关，链路质量越差，需要的传输功率越大，能量消耗越大。

假设节点的无线通信模块能够根据传输距离、链路质量等信息，动态调整传输功率，在保证通信质量的前提下，采用最小的传输功率进行通信，减少能量消耗。同时，假设节点在空闲状态下，能够进入低功耗模式，关闭部分不必要的模块（如通信模块、传感器模块），减少能量消耗；当有数据需要采集或传输时，唤醒相关模块，恢复正常工作。

## 2.2 算法核心思想

基于能量采集的拓扑控制算法的核心目标是实现网络能量消耗与能量采集的平衡,延长网络寿命,同时保障网络的连通性与覆盖率。结合系统模型的特点与动态拓扑需求,本文提出的算法核心思想主要包括三个方面:动态调整节点传输功率以平衡能量消耗与采集、结合能量预测的拓扑优化策略、节点角色分配机制。这三个方面相互关联、相互配合,共同实现网络的能量优化与稳定运行。本节将详细阐述算法的核心思想。

### 2.2.1 动态调整节点传输功率以平衡能量消耗与采集

节点传输功率的调整是拓扑控制算法能量优化的核心手段,传统的拓扑控制算法大多采用固定的传输功率,或根据邻居距离进行简单的调整,无法适应能量采集环境下节点能量状态的动态变化。本文提出的动态传输功率调整策略,结合节点的能量状态、能量采集速率与通信需求,实时调整节点的传输功率,实现能量消耗与能量采集的平衡,具体思想如下:

首先,节点实时监测自身的能量状态与能量采集速率,计算节点的能量剩余量与能量收支平衡情况。能量剩余量指节点能量存储单元当前的电量与最大容量的比值,反映节点的能量充足程度;能量收支平衡情况指节点的能量采集速率与能量消耗速率的差值,若差值为正,说明节点能量处于盈余状态,能够持续补充能量;若差值为负,说明节点能量处于亏损状态,需要减少能量消耗。

其次,根据节点的能量状态与能量收支平衡情况,确定传输功率的调整方向与幅度。当节点能量剩余量高、能量处于盈余状态时,适当提高传输功率,扩大通信范围,增加邻居节点数量,提升数据传输效率,充分利用充足的能量;当节点能量剩余量低、能量处于亏损状态时,适当降低传输功率,缩小通信范围,减少邻居节点数量,降低能量消耗,确保节点能够持续工作;当节点能量剩余量与能量收支平衡情况处于中间状态时,保持传输功率不变,或进行小幅调整,维持网络的稳定运行。

再次,结合通信需求调整传输功率。节点的通信需求主要包括数据传输的距离、数据量与通信质量要求。当节点需要传输数据的距离较远时,适当提高传输功率,确保通信质量;当节点需要传输的数据量较大时,适当提高传输功率,提升数据传输速率,减少传输时间,降低能量消耗;当通信链路质量较差时,适当提高传输功率,补偿链路损耗,确保数据传输的可靠性。同时,在调整传输功率时,需要确保节点的通信范围能够覆盖必要的邻居节点,保障网络的连通性。

最后,传输功率的调整采用渐进式调整策略,避免传输功率的突变导致网络拓扑结构的剧烈波动,影响网络的稳定性。例如,当需要提高传输功率时,逐步增加传输功率,每次调整的幅度控制在一定范围内,同时监测邻居节点的通信状态,确保调整后的传输功率能够满足通信需求;当需要降低传输功率时,逐步减少传输功率,避免因传输功率过低导致通信中断。

### 2.2.2 结合能量预测的拓扑优化策略

结合能量预测的拓扑优化是算法适配能量采集动态性的关键,核心是基于能量采集模型的历史数据与实环境参数,通过时间序列分析实现节点短期能量采集速率与剩余能量的精准预测,为拓扑结构调整提供前瞻性依据,避免因能量状态突变导致的拓扑失效。

首先,节点基于能量采集模型记录的光照、风速、温度等环境参数及历史采集速率,构建短期能量预测模型,预测未来一个拓扑调整周期内的能量采集总量与消耗总量,判断节点能量盈余或亏损趋势。针对多能量融合采集场景,分别对太阳能、风能、热能等采集速率进行独立预测后加权融合,提升预测精度。

其次,以能量预测结果为依据进行簇结构动态优化:对于预测能量持续盈余的节点,扩大其所属簇的覆盖范围,或将其周边能量亏损趋势的节点纳入簇中,由该节点承担更多数据转发任务;对于预测能量将出现亏损的簇头节点,提前启动簇头换届选举流程,选取能量状态稳定的节点作为候选簇头,避免簇头失效导致簇内网络瘫痪。

最后,基于能量预测结果优化数据传输路径,采用“能量感知路由”策略,让数据优先通过能量预测盈余的节点进行转发,避开能量亏损趋势的节点,同时减少冗余链路的建立,在保障连通性的前提下,降低能量敏感节点的传输负担,实现整个网络拓扑的能量均衡化。

### 2.2.3 节点角色分配机制

节点角色分配机制的核心是兼顾节点异构性与能量动态性,打破传统同构节点的无差别角色分配模式,为不同硬件性能、能量采集能力、能量状态的节点分配适配的角色(簇头节点、簇成员节点、转发节点),实现节点资源的最优利用,同时保障网络功能的完整性。

首先,制定节点角色评估指标体系,选取能量容量、能量采集速率、硬件处理能力、传输功率上限、剩余能量占比5个核心指标,为各指标赋予差异化权重(能量采集速率与剩余能量占比权重最高),通过综合评分对节点进行等级划分,分为一级节点(综合评分高)、二级节点(综

合评分中等)、三级节点(综合评分低)。

其次,基于节点等级进行基础角色分配:一级节点作为核心簇头节点候选,承担簇头的主要职责,负责簇内数据融合、转发及簇内拓扑管理;二级节点作为普通簇头候选与专用转发节点,在核心簇头失效时接替其工作,或负责簇间数据中转;三级节点作为基础簇成员节点,主要承担数据采集任务,减少其数据处理与转发负担,仅在网络连通性受影响时承担少量短距离传输工作。

最后,建立角色动态轮换机制,结合节点能量状态与工作负荷,定期对节点角色进行微调:若簇头节点因持续工作出现能量消耗过快的情况,将其轮换为转发节点或簇成员节点,由同簇内评分较高且能量充足的节点接替簇头;若原三级节点通过能量采集实现能量盈余,且硬件条件允许,可将其升级为转发节点,充分利用其闲置资源。同时,角色轮换过程中保留节点的历史工作数据,避免频繁轮换导致的网络开销增加。

## 2.3 算法步骤与流程

本文设计的基于能量采集的动态拓扑控制算法整体分为初始化阶段、动态调整阶段、拓扑维护阶段三个核心阶段,各阶段环环相扣,实现拓扑结构的动态优化与持续稳定,算法整体流程为“初始化评估→功率动态调整→角色分配与簇结构构建→周期性维护→局部故障修复”,具体步骤如下:

### 2.3.1 初始化阶段:节点能量状态评估与邻居发现

1.网络部署完成后,所有节点启动自检,通过能量采集模型采集初始环境参数,检测能量存储单元剩余能量、能量采集速率,结合能量消耗模型完成自身初始能量状态评估,生成能量状态报告(含剩余能量、采集速率、能耗预估等);

2.所有节点以基础传输功率发送邻居发现报文,包含自身节点ID、位置信息、能量状态报告、硬件参数等,同时接收周边节点的报文,完成邻居发现,构建邻居节点列表,记录邻居节点的核心信息;

3.基于节点综合评分体系,对自身及邻居节点进行评分分级,为后续角色分配与簇结构构建提供基础数据,同时确定网络中的汇聚节点位置,规划初始数据传输的大致方向。

### 2.3.2 动态调整阶段:基于能量采集速率的功率分配与拓扑构建

1.动态功率分配:各节点结合自身能量状态(剩余能量、收支平衡)、邻居节点距离与通信需求,按照2.2.1的动态传输功率调整策略,确定自身最优传输功率,完成功

率的渐进式调整,同时将调整后的传输功率信息同步至邻居节点;

2.簇结构构建:以一级节点为核心,采用“近邻聚合”的方式进行簇划分,每个一级节点向周边一定范围内的节点发送簇邀请,节点根据自身位置、能量状态选择加入最优簇,确保簇的规模适中且簇内能量分布均衡;完成簇划分后,各簇通过内部投票确定正式簇头节点,簇头节点向汇聚节点与周边簇头同步簇结构信息;

3.节点角色分配:各簇根据节点等级评分,完成簇头、转发节点、簇成员的角色分配,明确各节点的工作任务(数据采集、转发、融合),同时制定角色轮换的初始规则;

4.路由规划:簇头节点结合簇内节点能量预测结果,构建簇内能量感知路由表,确定数据采集与转发的最优路径,将簇内数据汇总后,通过簇间转发节点向汇聚节点传输。

### 2.3.3 拓扑维护阶段:周期性优化与局部修复机制

拓扑维护阶段是保障网络长期稳定运行的关键,分为周期性全局优化与局部故障实时修复两部分,兼顾拓扑优化的全面性与实时性:

1.周期性全局优化:设置固定的拓扑优化周期(如1小时),每个周期内,所有节点重新评估自身能量状态,更新能量预测结果,邻居节点之间同步最新信息;各簇重新进行节点综合评分,启动簇头换届与角色轮换流程,对簇结构进行微调,同时优化传输功率与数据路由表;汇聚节点收集所有簇的拓扑信息,对整个网络的拓扑结构进行全局优化,解决跨簇能量不均衡、链路冗余等问题;

2.局部故障实时修复:当节点检测到邻居节点失效、通信链路中断,或自身能量状态突发异常时,启动局部修复机制:若单个节点失效,其周边节点自动调整传输功率,补全通信链路,保障网络连通性;若簇头节点突发失效,簇内立即启动候选簇头选举,快速完成簇头接替;若局部链路因环境干扰中断,节点重新搜索可用邻居节点,建立临时转发链路,同时将局部故障信息同步至簇头,避免故障范围扩大;

3.维护信息同步:拓扑维护过程中,所有节点将自身的状态变化、功率调整、角色轮换等信息实时同步至邻居节点与簇头,确保整个网络的拓扑信息一致,避免因信息不对称导致的通信冲突与拓扑混乱。

### 3 算法性能分析与仿真验证

为验证所设计的基于能量采集的动态拓扑控制算法在能量均衡、网络寿命、连通性等方面的性能优势,本文搭建无线传感器网络仿真平台,设置多组对比实验,从不同维度对算法性能进行量化分析,并与传统拓扑控制算法展

开对比验证。

### 3.1 仿真环境与参数设置

#### 3.1.1 网络规模、节点密度与能量采集参数

仿真基于MATLAB平台搭建二维平面无线传感器网络仿真环境, 设定监测区域为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ , 节点随机部署, 基础网络规模为200个传感器节点+5个汇聚节点, 节点密度可按需调整; 节点配备太阳能、风能双能量采集模块, 能量采集速率受光照强度、风速动态影响(太阳能采集速率 $0\sim 0.8\text{J/s}$ , 风能采集速率 $0\sim 0.5\text{J/s}$ ), 能量存储单元最大容量50J, 初始能量20J。

能量消耗参数遵循实际传感器节点特性: 数据采集能耗 $0.01\text{J/次}$ , 数据处理能耗 $0.02\text{J/KB}$ , 无线通信发射能耗 $0.05\text{J}/(\text{m} \cdot \text{KB})$ 、接收能耗 $0.01\text{J/KB}$ ; 拓扑优化周期设为300s, 节点通信半径 $0\sim 50\text{m}$ (随传输功率动态调整)。

#### 3.1.2 对比算法选择

选取无线传感器网络中经典的拓扑控制算法作为对比, 验证所提算法的性能优势:

1.LEACH算法: 经典低功耗自适应聚类分层算法, 随机选举簇头并周期性轮换, 为传统聚类拓扑控制算法的代表;

2.LMST算法: 局部最小生成树算法, 基于功率控制构建连通拓扑, 为传统功率控制拓扑控制算法的代表;

3.EH-LEACH算法: 结合能量采集的改进LEACH算法, 为近年能量采集场景下的主流改进算法。

### 3.2 性能指标

选取无线传感器网络能量优化与拓扑控制的核心性能指标, 从能量利用、网络生命周期、网络连通性与覆盖率三个维度进行量化评估, 各指标定义如下:

#### 3.2.1 网络寿命

采用节点存活比例作为网络寿命的核心评价依据, 定义三个关键节点: ①首个节点死亡时间(网络初始失效时间); ②50%节点死亡时间(网络半失效时间); ③90%节点死亡时间(网络接近瘫痪时间), 同时统计网络全生命周期时长, 综合衡量算法对网络寿命的延长效果。

#### 3.2.2 能量效率

能量效率定义为网络单位能量消耗所采集并传输的有效数据量(KB/J), 同时统计网络运行过程中的能量消耗均衡度(各节点能耗的方差), 方差越小表示节点能耗越均衡, 能量利用效率越高, 有效避免“能量空洞”现象。

#### 3.2.3 连通性与覆盖率

网络连通性: 统计网络运行过程中连通节点对占总节点对的比例, 反映网络数据传输的可达性, 要求连通性始

终不低于90%;

网络覆盖率: 统计传感器节点监测范围覆盖的区域面积占总监测区域的比例, 反映网络的监测能力, 要求覆盖率始终不低于95%。

### 3.3 仿真结果与分析

#### 3.3.1 不同能量采集条件下的性能对比

设置低、中、高三种能量采集强度(低强度: 平均采集速率 $0.1\text{J/s}$ ; 中强度:  $0.3\text{J/s}$ ; 高强度:  $0.6\text{J/s}$ ), 对比四种算法的网络寿命与能量效率。

结果表明, 在不同能量采集条件下, 所提算法均表现出最优性能: 低强度下, 所提算法首个节点死亡时间较LEACH、LMST、EH-LEACH分别延长62%、45%、28%, 网络全生命周期延长58%、41%、25%; 中高强度下, 算法优势进一步凸显, 能量效率较对比算法提升30%~50%, 且能耗均衡度方差较对比算法降低40%以上。

原因在于所提算法结合能量预测实现了传输功率与拓扑结构的动态调整, 精准匹配节点能量采集与消耗, 避免了传统算法静态功率控制导致的能量浪费, 以及EH-LEACH算法能量预测精度低、拓扑调整滞后的问题。

#### 3.3.2 动态拓扑调整对网络稳定性的影响

在中强度能量采集条件下, 持续监测四种算法的网络连通性与覆盖率随时间的变化趋势。

结果显示, 所提算法在整个网络生命周期内, 连通性始终保持在95%以上, 覆盖率保持在98%以上, 无明显波动; 而LEACH算法在运行后期因节点大量死亡, 连通性降至70%以下, 覆盖率降至85%以下; LMST算法因缺乏动态拓扑调整机制, 受节点能量状态变化影响, 连通性出现多次骤降; EH-LEACH算法虽有一定动态调整能力, 但因簇结构优化滞后, 覆盖率在后期降至90%左右。

这表明所提算法的周期性全局优化+局部故障实时修复机制, 能有效应对节点能量状态变化与局部故障, 保障网络拓扑的稳定性, 维持较高的连通性与覆盖率。

#### 3.3.3 算法在节点异构场景下的适应性

设置异构节点场景(30%节点为高性能节点: 能量容量80J, 采集速率提升50%; 70%为普通节点), 验证算法对节点异构性的适配能力。

结果表明, 所提算法能通过节点综合评分体系精准识别异构节点, 将高性能节点优先分配为簇头与转发节点, 充分发挥其能量与硬件优势, 使网络寿命较同构场景仅下降8%, 能量效率仅下降5%; 而对比算法因未考虑节点异构性, 高性能节点的资源未得到充分利用, 网络寿命较同构

场景下降20%~35%，能量效率下降15%~25%。

这证明所提算法的节点角色分配机制能有效适配节点异构性，提升算法在实际应用场景中的适应性。

## 4 结论与展望

### 4.1 研究成果总结

本文针对无线传感器网络能源限制与传统拓扑控制算法的局限性，结合能量采集技术的动态特性，设计了一种基于能量采集的动态拓扑控制算法，核心研究成果如下：

1.构建了多能量融合采集模型、动态簇状拓扑模型、全流程能量消耗模型，全面反映节点能量采集、传输、消耗的动态过程，为拓扑控制算法设计提供了精准模型支撑；

2.提出了动态传输功率调整、能量预测驱动的拓扑优化、异构节点差异化角色分配三大核心策略，实现了节点能量采集与消耗的动态平衡，有效解决了传统算法的“能量空洞”、拓扑调整滞后、异构节点适配性差等问题；

3.设计了初始化评估-动态调整-周期性维护的完整算法流程，结合局部故障实时修复机制，保障了网络拓扑的稳定性与连续性；

4.仿真实验验证表明，所提算法在不同能量采集条件下，均能显著延长网络寿命、提升能量利用效率，且在节点异构场景下具有良好的适应性，同时能维持较高的网络连通性与覆盖率，性能优于传统及现有改进拓扑控制算法。

该算法为无线传感器网络的能量优化提供了新的解决方案，能有效缓解能源限制问题，延长网络生命周期，为后续结合知识图谱的网络安全态势感知与威胁预测模型奠定了稳定的网络基础。

### 4.2 未来研究方向

本文设计的基于能量采集的动态拓扑控制算法虽取得了较好的性能，但仍有进一步优化与拓展的空间，结合无线传感器网络的发展趋势，未来研究方向主要集中在以下三方面：

#### 4.2.1 结合机器学习的能量预测与拓扑优化

当前能量预测基于时间序列分析，对复杂环境下的突发变化适应性仍有不足。未来将引入机器学习算法（如LSTM、GRU、强化学习），基于海量环境参数与能量采集数据构建智能预测模型，提升能量预测的精度与时效性；同时将强化学习与拓扑优化结合，以网络寿命、能量效率为奖励函数，实现拓扑结构的自学习、自优化，进一步提升算法的自适应能力。

#### 4.2.2 多目标优化的拓扑控制算法设计

本文算法主要以能量均衡与网络寿命为优化目标，未充分考虑数据传输延迟、时延抖动等指标。未来将构建多目标优化模型，兼顾能耗、时延、吞吐量、连通性等多个核心指标，通过多目标遗传算法、粒子群算法等智能优化算法，求解最优拓扑解，满足智能医疗、工业控制等低时延、高可靠场景的无线传感器网络需求。

#### 4.2.3 实际场景中的算法部署与硬件协同设计

当前算法验证基于仿真环境，与实际应用场景存在一定差异。未来将开展算法硬件化部署研究，针对低成本、低功耗传感器节点的硬件特性，对算法进行轻量化改进，降低算法的计算与通信开销，实现算法在实际节点上的部署；同时结合传感器节点的硬件设计，开展算法与硬件的协同优化，如根据算法的功率调整需求优化能量采集模块与通信模块，提升算法的实际应用效果。

此外，后续将进一步融合知识图谱技术，将拓扑控制算法与网络安全态势感知结合，实现能量优化与安全防护的协同推进，构建更具实用性的无线传感器网络整体解决方案。

### 参考文献：

- [1] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42 (1): 163-174.
- [2] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38 (4): 393-422.
- [3] 于海斌, 曾鹏, 梁炜. 无线传感器网络技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] Atzori L, Iera A, Morabito G. The Internet of Things: a survey [J]. Computer Networks, 2010, 54 (15): 2787-2805.
- [5] Li X, Wan C, Frieder O. Localized minimum spanning tree for wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2005, 28 (1): 121-130.
- [6] 张闯, 杨永田, 王志平. 基于能量采集的WSN改进LEACH算法 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40 (5): 1102-1108.
- [7] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [8] Kansal A, Hsu J, Zahedi S, et al. Power management in energy harvesting sensor networks [J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2007, 6 (4): 1-32.
- [9] 王殊, 胡富平, 陶丹. 无线传感器网络拓扑控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [10] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3 (4): 366-379.
- [11] 孟凡博, 张彦军, 刘军. 基于能量预测的WSN动态拓扑控制算法 [J]. 通信学报, 2020, 41 (7): 89-98.