# Optimization Method for Complex Wireless Sensor Network Topology Considering Node Load*

XIAO Ying[1*], YANG Xingguo[2], QIN Zhihua[1]
(1.College of Artificial Intelligence, Guangxi Transport Vocational and Technical College, Nanning Guangxi 530023, China;
2.College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hu'nan 420027, China)

**Abstract**: The significant increase in the number of nodes in complex wireless sensor networks leads to a surge in data transmission and processing, making the network structure more complex, increasing the difficulty and energy consumption of data transmission and processing. To this end, a complex wireless sensor network topology optimization method considering node load is proposed. The degree distribution, clustering coefficient, and average path length of wireless sensor networks are calculated, and the architecture of wireless sensor networks is analyzed. Under the consideration of node load, the concept of sub clusters is introduced, and the hierarchical clustering structure of energy buffering components in wireless sensor networks is used to dynamically optimize the topology of wireless sensor networks in real time based on the remaining energy of nodes, achieving the optimization of complex wireless sensor network topology. The simulation results show that the energy consumption of the proposed method is 1.61 W, the minimum end-to-end average delay is 0.11 s, and the maximum average packet delivery rate is 99.5%. This proves that the method can effectively optimize the topology of complex wireless sensor networks.

**Key words**: wireless sensor network; topological structure optimization; node load; hierarchical clustering; remaining energy of nodes
**EEACC**: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.10.019

# 考虑节点负载的复杂无线传感网络拓扑结构优化方法*

肖 英[1*], 杨兴果[2], 覃志华[1]
(1.广西交通职业技术学院人工智能学院, 广西 南宁 530023; 2.湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 420027)

**摘 要**: 复杂无线传感器网络中的节点数量大量增加, 导致数据传输量和处理量的激增, 网络的结构变得更加复杂, 增加了数据传输和处理的难度和能耗。为此, 提出一种考虑节点负载的复杂无线传感网络拓扑结构优化方法。计算无线传感网络度分布、聚类系数、平均路径长度, 对无线传感网络的体系结构展开分析。在考虑节点负载的情况下, 引入子簇概念, 通过无线传感网络缓冲能量组件分级分簇结构, 基于节点剩余能量实时动态优化无线传感网络拓扑结构, 实现复杂无线传感网络拓扑结构优化。仿真结果表明, 所提方法的能耗为 1.61 W, 端到端平均时延最小值为 0.11 s, 分组平均投递率最大值为 99.5%, 证明该方法可有效实现复杂无线传感网络拓扑结构优化。

**关键词**: 无线传感网络; 拓扑结构优化; 节点负载; 分级分簇; 节点剩余能量
**中图分类号**: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)10-1872-06

无线传感网络在诸多领域的应用越来越广泛, 例如环境监测、智能交通、农业智能化等。在这些应用场景中, 传感器节点需要收集和处理大量数据, 同时还需要能够自组织和协同工作, 以实现信息的有效传输和处理[1]。因此, 如何优化无线传感网络的拓扑结构, 提高网络的性能和可靠性, 成为了当前研究的热点问题。无线传感网络的拓扑结构是指节点之间的连接关系, 它直接影响着网络的性能和可靠性。目前, 无线传感网络的拓扑结构主要分为平面结构和层次结构[2]。平面结构简单, 易于实现, 但它的可扩展性较差, 不适合大规模的网络部署。层次结构可以实现大规模的网络部署, 但节点的管理和维护较为复杂, 且容易出现单点故障。因此, 如何设计出一种具有良好可扩展性、可靠性和高效性的无线传感网络拓扑结构, 成为了当前亟待解决的问题。

**项目来源**: 2022 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY127); 2021 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY1127)
**收稿日期**: 2023-10-31 **修改日期**: 2023-11-23

近年来,国内外相关专家针对复杂无线传感网络拓扑结构优化展开了研究,并取得了一定的研究成果。文献[3]提出基于 wolf-pack 算法的无线传感器网络拓扑优化策略,结合无线传感器网络拓扑结构的特点和 wolf-pack 算法的优化思想,提出了一种新的灰狼优化算法,增加了最优解的邻域搜索范围,增强了狼群分布的均匀性和狼群搜索的遍历能力,大大提高了算法的计算速度和精度。在相同的概率下,簇头被周期性地随机选择,无线传感器网络的整体能耗被均匀地分配到传感器节点,以实现集群中成员节点数据的均衡分布,完成无线传感器网络拓扑优化的设计。该方法应用后网络的平均覆盖率有所提高,但算法的平均传输延迟较高。文献[4]提出基于最优刚性子图的网络拓扑优化处理方法,通过各个节点通信过程中的功率变化,组建节点功率集合,将其设定为博弈的策略集,采用均衡能耗为目标组建博弈函数,将其收敛至纳什均衡点,获取网络初始拓扑结构,同时引入最优刚性子图删除网络中的冗余链路,最终实现网络拓扑优化处理。该方法的平均传输延迟较短,但平均数据包传递率较大。文献[5]提出基于压缩感知的网络拓扑优化方法,优先对传感器节点局部展开优化,采用聚类方法分析观测数据在字典上的投影系数,获取网络在正常工作情况下的分布状态曲线,同时结合压缩感知理论完成网络优化处理。该方法的平均数据包传递率较小,但平均覆盖率较低。

针对上述问题,提出一种考虑节点负载的复杂无线传感网络拓扑结构优化方法。传统的无线传感网络拓扑结构优化方法往往忽视了节点负载对网络性能的影响。然而,在实际应用中,节点的能量、计算能力、通信能力等都是有限的,节点负载过高可能会导致节点过早失效或性能下降。所提方法在考虑节点负载的情况下,引入了子簇概念,通过将无线传感网络划分为不同的子簇,并设立簇头节点负责与主节点进行通信,可以大大降低普通节点的通信开销,有效节省能量。同时,分级分簇结构还可以根据实际需要动态调整,适应不同的应用场景和需求。传统的无线传感网络拓扑结构优化方法往往需要事先确定好网络的拓扑结构,然后再进行优化。然而,在实际应用中,网络环境往往是动态变化的,因此这种预先确定拓扑结构的方法往往难以达到最优效果。而所提方法主要关注于网络的度分布、聚类系数、平均路径长度等拓扑特性,基于节点剩余能量实时动态优化无线传感网络拓扑结构,可以适应网络环境的动态变化,实现更加高效的拓扑结构优化。

## 1　复杂无线传感网络拓扑结构分析

在无线传感网络中,拓扑结构是影响网络性能和稳定性的关键因素之一。复杂的无线传感网络拓扑结构可以提供更好的连通性和覆盖范围,但也带来了更多的挑战。如何设计有效的优化算法来处理复杂的网络拓扑结构和能量限制等问题成为研究的难点。为此,通过计算无线传感网络的度分布、聚类系数和平均路径长度,对无线传感网络的体系结构进行深入分析。

无线传感网络[6]主要是传感器节点所组成,需要实时对研究区域内的信息展开监测,节点获取的监测信息采用多跳方式传输,并且将完成处理后的数据直接传输给观察者。图 1 给出无线传感网络拓扑体系结构。

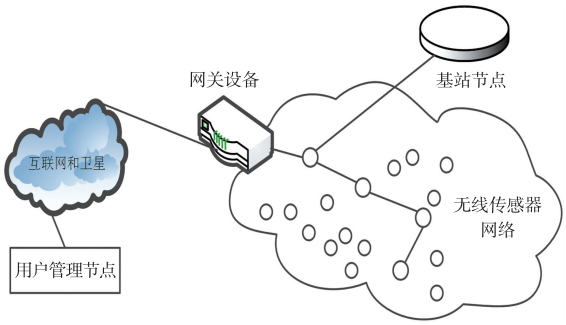


**图 1　无线传感网络拓扑体系结构**

在无线传感器应用过程中,需要保证每个节点都可以完成数据接收和发送等工作,也就是可以像终端一样完成本地消息的发送和接收,可以对其加以处理,同时还需要对其他节点传输过来的信息展开处理,主要包括存储和转发等相关操作,可以结合真实需求完成路由选择。而网络中的网关和基站主要被用于外部数据的交换工作。所以,要求网络中的节点不仅可以接收和发送数据,同时还需要有较高的计算效率和良好的通信能力等[7]。

传感器节点是网络中十分重要的组成部分,通过各个节点的功能完成对网络的运行管理。但是无论无线传感网络处于任意一种环境下,网络节点的基本组成模块如图 2 所示。

复杂网络主要被应用于描述和研究系统的基本结构和网络特性,是一门跨越多门学科的网络新科学。主要通过定量和定性的方式了解网络的基本特性,可以从网络特征以及性质等多个不同方面对网络模型展开分析,同时也能够对无线传感网络的复杂特性展开进一步分析。

①度分布

度分布是用于描述无线传感网络重要性的一种

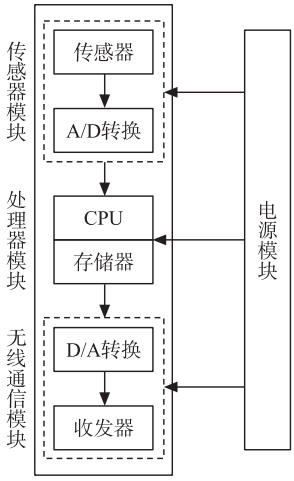


**图 2 无线传感器网络节点体系结构**

特征参数,侧重于对整个网络性能的评估。在无向图中,各个节点 $i$ 对应的度 $a_i$ 是由和节点 $i$ 相连的边总数所决定的。根据箭头所指方向的差异还可以将其划分为出度和入度。可以通过节点度的平均值 $\bar{a}$ 对无线传感器网络的度数大小情况展开描述,对应的计算公式为:

$$\bar{a}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\langle a_i\rangle \tag{1}$$

式中:$n$ 代表节点总数。

②聚类系数

聚类系数主要对网络的完全连通性展开评估,对网络的局部特性展开刻画。其中,节点 $i$ 对应的聚类系数 $E_{ij}$ 如式(2)所示:

$$E_{ij}=\frac{\bar{a}B_{ij}}{a_i(a_i-1)} \tag{2}$$

式中:$B_{ij}$ 代表节点 $i$ 和节点 $j$ 实际相互连接的边数总和。

对无线传感网络中全部节点的聚类系数展开去平均处理[8],进而得到无线传感网络聚类系数 $\bar{E}_{ij}$,如式(3)所示:

$$\bar{E}_{ij}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[E_{ij}] \tag{3}$$

③平均路径长度

对网络的总体特征展开评估时,需要考虑网络的直径以及节点间的距离等相关参数,以上参数对于衡量网络中数据传输延时具有重要意义[9]。在无线传感网络中,设定节点 $i$ 和节点 $j$ 之间的通信距离为 $d_{ij}$,用节点 $i$ 到节点 $j$ 经历的全部边数最小值衡量通信距离的大小。其中,网络的直径 $D$ 可以通过对比全部节点的通信距离选取最大值得到,将其表示为式(4)的形式:

$$D=\max_{i,j}(d_{ij}) \tag{4}$$

在展开网络平均路径长度 $H$ 计算过程中,设定无线传感器网络为无向网络,计算随机两个节点之间的距离平均值得到平均路径长度,即:

$$H=\frac{2D}{n(n-1)} \tag{5}$$

复杂网络模型的提出可以更好地理解网络中各个节点之间的连通关系,同时无线传感网络的复杂性主要体现在以下几个方面:①网络结构复杂性:网络在工作状态下,传感器节点会出现消失或者加入的情况,造成网络结构呈现动态化变化。主要表现在人为攻击或者自然环境因素等多个方面。②网络的复杂演化能力;可以将传感器看作是一个自组织且开放的网络系统,在组网过程中,普通节点更加倾向于和连接度更高的超级节点或者提供充足能量的骨干节点组建连接,以上的组网方式满足无标度网络中节点连接的择优规则,同时网络最终也将演化为具有无标度特征的拓扑结构。

## 2 考虑节点负载的复杂无线传感网络拓扑结构优化

了解度分布有助于优化网络结构,确保重要节点得到适当的能量补给和数据处理能力。通过对聚类系数的分析,可以识别出网络中的热点区域和连接薄弱环节,从而针对性地优化网络拓扑结构。通过对平均路径长度的计算,可以评估网络的通信效率和连通性,从而优化节点间的连接方式和拓扑结构,这为复杂无线传感网络拓扑结构的优化提供了关键指导。

考虑节点负载优化复杂无线传感网络拓扑结构,通过引入子簇概念,可以将网络划分为更小的、更具有管理性的部分,有助于提高网络的效率和响应速度。分级分簇结构将网络中的节点根据其剩余能量进行分级,并分配到不同的簇中。高级节点可以作为簇头,负责数据的融合和传输,而低级节点则作为普通成员,负责采集数据。这样的结构可以更好地利用网络资源,提高网络的鲁棒性。通过实时监测节点的剩余能量,动态调整网络拓扑结构。当节点的能量低于一定阈值时,系统会自动将其从当前簇移除,并分配到其他簇中。这种动态调整可以确保网络的稳定运行,并延长整个网络的生命周期。

无线传感网络在实际运行过程中,会受到不同影响因素的影响。例如能量消耗以及人为攻击等,以上因素的存在会导致网络的分析变得越来越困难。在考虑以上多重因素的基础上,需要确保网络具有更好的扩展性以及均衡不同因素的影响。在对

复杂无线传感网络拓扑结构分析的基础上,需要考虑节点负载情况[10],通过式(6)展开节点负载均衡因子计算:

$$\beta=\frac{\bar{E}_{ij}\left(\sum_{i=1}^{n}I_j\right)^2}{Hn\sum_{i=1}^{n}I_j^2} \tag{6}$$

式中:$\beta$ 代表均衡因子,也就是节点的负载均衡程度,取值越接近 1,则代表其负载均衡能力越强;$I_j$ 代表节点 $j$ 的负载均衡程度。

在考虑节点负载[11]情况下,针对复杂无线传感网络拓扑结构展开整体优化处理,优化中引入传感器休眠模式,通过数据相关性展开传感器模式调节。设定 $S_{ij}$ 为节点 $i$ 和节点 $j$ 的数据相关性,对应的计算公式为:

$$S_{ij}=\frac{\beta[C_i-L(C_i)]\times[C_j-L(C_j)]}{n\times\sqrt{\mathrm{Var}(C_i)}\times\sqrt{\mathrm{Var}(C_j)}} \tag{7}$$

式中:Var(·)代表计算偏差;$C_i$ 和 $C_j$ 代表节点 $i$ 和节点 $j$ 对应的传输数据;$L(\cdot)$ 代表计算数据的平均值。

无线传感器网络的链路建立可以通过图展开描述,一个由 $n$ 个节点组成的无线传感器网络利用式(8)所示的无向图 $G$ 描述:

$$G=(\boldsymbol{V},\boldsymbol{E}) \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{V}$ 为顶点数集合;$\boldsymbol{E}$ 为无线传感器节点之间的通信链路集合。

现阶段,多级分簇算法在无线传感器网络中具有十分广泛的应用,在多级分簇算法中,将无线传感器网络看作一个无向图,可以更好地理解和优化网络的拓扑结构。利用图的连通性分析来评估网络的可靠性和稳定性,利用最短路径分析来优化网络的通信路径,利用聚类系数分析来评估网络的紧密程度和信息传递效率等。通过无向图图论中的算法和技术,可以更好地理解和优化多级分簇算法的网络拓扑结构,从而提高网络的性能和生命周期。考虑到实际需求,采用一种三层分级的 THCMRG 拓扑算法展开复杂无线传感网络拓扑结构优化处理。

优先建立初始簇,在构建初始簇的过程中,将采集获取的消息全部广播给网络中的各个节点,同时为网络中的节点赋值,取值范围在 0~1 之间。完成节点赋值处理后,将其和事先设定好的阈值对比,如果小于阈值,则将其设定为随机簇头。在选定簇头后,通过广播方式向各个节点发送信息。网络中的非簇头节点根据接收到的信号强度确定其归属的簇,并将相关信息加入到对应的簇中,以此构建初始的簇结构。另外,通过初始分簇算法展开簇头选择以及赋值均为随机的,各个节点被选中的概率是一致的,这样可以确保网络的分簇更加均衡[12]。

在子簇的形成阶段,设定由 $m$ 个子簇形成初始簇,根据节点缓冲量取值确定最终簇头的数量,有效避免大量数据被存储在同一个节点中,减少数据传输过程中的丢包率。在簇内,能量取值最高的 $m$ 个节点设定为子簇簇头 SC,有效确保 SC 内包含足够的能量完成消息收集和传递等相关工作。在簇内所期望 SC 的数量 $m$ 对应的计算式如下所示:

$$m=\frac{S_{ij}Gc_s}{\mathrm{sc}_s} \tag{9}$$

式中:$c_s$ 和 $\mathrm{sc}_s$ 分别为整体簇和子簇内的节点数量。

得到簇头后,利用簇头展开消息广播,并选取出 $m$ 个 SC 节点和 C 节点,SC 节点广播信息给簇内节点,根据信号接收强度确定形成子簇的数量。子簇内各个节点收集消息后传递给 SC,再利用 SC 将消息汇聚传递给 C。同时在子簇形成阶段,将能量值排名在前 $m$ 的节点设定为 SC,采用引入节点剩余能量的方式,可以有效避免节点因为负荷过重而迅速消耗能量的情况,确保网络节点负载的均衡性。另外,在建立子簇的过程中,还需要考虑节点数据包的缓冲能力,保证网络通信分配更加合理,同时可以有效提升网络的稳定性。

在考虑节点负载的情况下,针对复杂无线传感网络,对形成多个簇的头节点 C 采用节点剩余能量展开拓扑处理,确保各个簇头节点之间的顺利通信,也促使网络中各个节点的负载更加均衡。

## 3　仿真分析

为了验证考虑节点负载的复杂无线传感网络拓扑结构优化方法的有效性,设计仿真对比测试。

为了模拟真实环境中的无线传感网络,在 MATLAB 仿真环境中对复杂无线传感网络拓扑结构展开仿真分析,在展开初始网络设置时,主要选取距离 Sink 节点最近的两个簇头作为初始节点,建立初始网络,相关实验参数设定如表 1 所示。

在上述参数设置下,设计仿真步骤如下:①通过控制中心对无线传感网络进行实时监测和数据采集。收集网络中的节点负载数据、能量消耗数据、度分布、聚类系数、平均路径长度等指标,并对这些数据进行处理和分析。②根据节点负载情况和实际需求,引入子簇概念,并构建一种分级分簇结构。在该结构中,将节点分为不同的簇,每个簇中包含一定数量的子节点。③考虑到节点能量的限制和变化,利

用剩余能量,调整节点间的通信关系和簇结构,确保网络的连通性和稳定性,实时动态优化无线传感网络拓扑结构。

**表 1 实验参数设定**

| | |
|---|---|
| 节点通信半径/m | 10~60 |
| 节点删除概率/% | 0~1 |
| 网络初始簇头节点数量/个 | 4 |
| 节点饱和度 | 60 |
| 簇头节点的最大能量/J | 10 |
| 簇头节点的最小能量/J | 5 |
| 最小运行时间/s | 1 500 |
| 最小节点度 | 1 |
| 最大传输半径/m | 250 |
| 初始能量/J | 4 |
| 节点产生数据包/bit | 800 |

以文献[3]提出的基于 wolf-pack 算法的无线传感器网络拓扑优化策略(wolf-pack 算法),文献[4]提出的基于最优刚性子图的网络拓扑优化处理方法(最优刚性子图方法),文献[5]提出的基于压缩感知的网络拓扑优化方法(压缩感知方法)为对比方法,从传输距离和能耗关系、节点负载和端到端平均时延的关系、分组平均投递率三方面验证所提方法的优化无线传感网络拓扑结构的性能。

①传输距离和能耗关系分析

在传输距离相同的情况下,经过计算获取各个方法对应的能耗值,通过图 3 对各个方法的能耗和传输距离的关系展开分析。

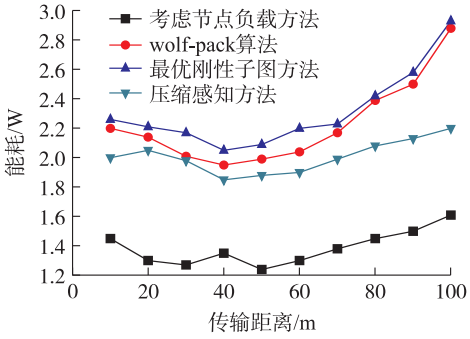


**图 3 不同方法的传输距离和能耗关系分析**

由图 3 可以看出,当传输距离从 10 m 增加到 100 m 时,4 种方法对应的能耗整体上呈现先下降后上升的趋势,经过对比可知,所提方法的能耗最低,当传输距离增加到 100 m 时,所提方法的能耗为 1.61 W。说明所提方法展开复杂无线传感网络拓扑结构优化后有助于能耗的减少。所提方法通过引入子簇概念和缓冲能量组件分级分簇结构,避免了某些节点因过度使用而提前耗尽能量,也保证了在网络生命周期内,整体能量的消耗更加均匀和持久,实现了无线传感网络的能量均衡使用。

②节点负载和端到端平均时延的关系分析

在实时的监测网络系统中,对于时间具有十分严格的要求。单一数据包从源节点到目的节点所经历的时间和数据传输速率等存在密切关联,如果平均时延取值太大会影响整个网络的实时性和有效性。其中,平均时延的取值越小,则说明网络数据传输越顺利,也是衡量网络是否正常运行的一个重要指标。在考虑节点负载的情况下,通过图 4 对各个方法的端到端平均时延展开分析。

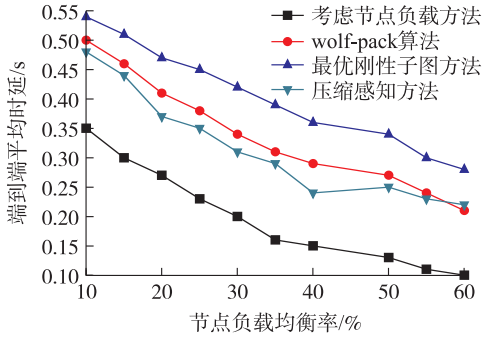


**图 4 考虑节点负载情况下各个方法的端到端平均时延测试结果比较**

由图 4 可以看出,在节点负载均衡率持续增加的情况下,4 种方法的端到端平均时延整体上呈下降趋势,但所提方法的时延要明显低于对比方法,最小值为 0.11 s。由此可见,所提方法产生的端到端时延更小,验证了所提方法的优越性和有效性。所提方法通过动态调整节点的状态和位置,可以减少数据从源节点到目的节点的传输路径,在需要时创建更优的通信路径,数据从发送方传输到接收方的时间较短,从而降低传输时延。

③分组平均投递率

数据在网络中是被划分为多个数据包展开传输的,分组平均投递率为目的节点接收到的数据包总数与源节点发送的数据包总数的比值,其取值越大,说明数据包在传输过程中的丢包率越低,网络性能也就越好。

在考虑负载均衡的情况下,通过图 5 对各个方法的分组平均投递率展开实验分析。

由图 5 可知,4 种方法的分组平均投递率会随着节点负载均衡率的增加呈现上升趋势。当经过所提方法展开无线传感网络拓扑结构优化处理后,该方法的分组平均投递率得到较大程度提升,最大值为 99.5%,可以有效减少数据包在传输过程中的丢包情况,降低了数据被截获或篡改的风险,提高了网络的安全性。也更进一步验证所提方法的实用性和

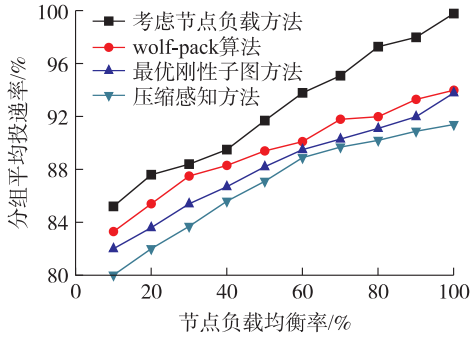


**图 5　不同方法的分组平均投递率实验结果比较**

优越性。所提方法通过优化网络的拓扑结构,可以增强网络的连通性和稳定性,确保了簇间通信的连通性,减少数据传输的丢包率和错误率,从而提高分组的投递率。

综上所述,所提考虑节点负载的复杂无线传感网络拓扑结构优化方法在提高网络的可靠性、稳定性、效率和安全性方面都表现出了优越的性能。

## 5　结束语

提出一种考虑节点负载的复杂无线传感网络拓扑结构优化方法。通过引入子簇概念,构建了基于节点剩余能量的分级分簇结构,实现了网络整体的能量均衡。根据节点剩余能量实时动态优化网络拓扑结构,确保簇间通信的连通性,对于解决无线传感网络中存在的能耗过大和数据拥堵等问题具有重要意义。仿真分析证明,当无线传感网络的传输距离为 100 m 时,应用所提方法得到无线传感网络的能耗为 1.61 W、端到端平均时延最小值为 0.11 s,无线传感网络拓扑结构优化后所提方法的分组平均投递率最大值为 99.5%。根据上述结果可知,该优化方法具有较低的计算复杂度和较好的可扩展性,能够有效地降低能耗、提高网络连通性和数据传输效率。

**肖　英**(1982—),女,汉族,湖南湘乡人,工程硕士,工程师,广西交通职业技术学院副教授,研究方向:计算机科学与技术。主持或参与完成省部级、市厅级教科研课题 13 项;主编教材 2 部,分别入选首批“十四五”职业教育国家规划教材,广西“十四五”自治区职业教育规划教材;公开发表论文 8 篇;指导学生参加各类竞赛获省级二等奖 4 项,xiaoying198200@163.com。

## 参考文献:

[1] Kodoth P K,Edachana G.An Energy Efficient Data Gathering Scheme for Wireless Sensor Networks Using Hybrid Crow Search Algorithm[J]. IET Communications,2021,15(7):906-916.

[2] 唐春兰,胡晓容. 分布式光纤应变传感网络拓扑结构模型优化方法[J]. 激光杂志,2021,42(5):120-124.

[3] Wang S,You H,Yue Y,et al. A Novel Topology Optimization of Coverage-Oriented Strategy for Wireless Sensor Networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks,2021,17(4):277-323.

[4] 魏连锁,韩建,金涛,等. 基于最优刚性子图的势博弈无线传感器网络拓扑优化算法[J]. 工程科学与技术,2021,53(2):125-132.

[5] 戴睿,任梦婕,尚雯珂,等. 基于压缩感知的空间场传感网络优化方法研究[J]. 电工电能新技术,2023,42(5):88-96.

[6] 柳艳,肖旻,王纪军,等. 一种高效节能的小世界无线传感器网络[J]. 火力与指挥控制,2021,46(1):117-122,128.

[7] Nagarajan L,Thangavelu S. Hybrid Grey Wolf Sunflower Optimisation Algorithm for Energy-Efficient Cluster Head Selection in Wireless Sensor Networks for Lifetime Enhancement[J]. IET commUnications,2021,15(3):384-396.

[8] 王海峰,张利. 考虑节点间距的无线传感网络节点分配算法[J]. 传感技术学报,2022,35(7):980-984.

[9] 杨峰,马铭. 无线多跳通信网络数据传输延时补偿算法[J]. 计算机仿真,2022,39(4):146-149,253.

[10] 孙环,陈宏滨. 基于萤火虫算法的无线传感器网络节点重部署策略[J]. 计算机应用,2021,41(2):492-497.

[11] Lineykin S,Sitbon M,Kuperman A. Design and Optimization of Low-Temperature Gradient Thermoelectric Harvester for Wireless Sensor Network Node on Water Pipelines[J]. Applied Energy,2021,283(1):116240.

[12] 刘涛,庞博. 基于遗传算法的异构无线传感器网络分簇算法[J]. 现代电子技术,2022,45(5):25-30.