

# 基于 IHBA 优化模糊 C 均值的三维 WSN 分簇路由算法

杨靖<sup>1</sup>, 徐碧阳<sup>1</sup>, 李维正<sup>2</sup>, 李伟<sup>3</sup>, 朱兆强<sup>4</sup>, 覃涛<sup>1</sup>

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;  
3. 贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025; 4. 中国电建集团贵州工程有限公司, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 针对分簇路由算法在三维场景下能量消耗大、网络生存周期短的问题, 提出了一种基于改进蜜獾算法优化模糊 C 均值的三维无线传感网分簇路由算法 IFCRA。IFCRA 分别对网络成簇、簇首选举以及数据传输阶段进行了优化。首先, 采用改进蜜獾算法优化模糊 C 均值算法, 解决模糊 C 均值易陷入局部最优的问题, 并综合节点的距离和能量特征划分拓扑结构。其次, 结合簇内节点的能量和相对距离构建最优簇首函数, 平衡簇首负载。最后, 采用自适应传输机制寻找中继节点, 综合节点距离和能量构建最优传输路径函数, 采用改进蜜獾算法进行寻优, 均衡数据传输能耗。仿真结果表明, IFCRA 在三维异构场景中分簇合理、能耗均衡且生存周期长。

**关键词:** 三维无线传感网; 分簇路由; 蜜獾算法; 模糊 C 均值; 能耗均衡

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2023236

## 3D WSN clustering routing algorithm based on IHBA optimized fuzzy C-means

YANG Jing<sup>1</sup>, XU Biyang<sup>1</sup>, LI Weizheng<sup>2</sup>, LI Wei<sup>3</sup>, ZHU Zhaoqiang<sup>4</sup>, QIN Tao<sup>1</sup>

1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China  
2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 3. School of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China  
4. China Power Construction Group Guizhou Engineering Co., Ltd, Guiyang 550025, China

**Abstract:** Aiming at the problem that clustering routing algorithm in a three-dimensional (3D) scene has high energy consumption and short network lifetime, a clustering routing algorithm IFCRA for 3D wireless sensor networks based on improved honey badger algorithm optimized fuzzy C-means was proposed. The network clustering, cluster head election, and data transmission stages were optimized respectively. Firstly, the improved honey badger algorithm was used to optimize the fuzzy C-means algorithm, solving the problem of fuzzy C-means easily falling into local optima, and the topological structure was divided based on the distance and energy characteristics of nodes. Secondly, the optimal cluster head function was constructed by combining the energy and relative distance of nodes within the cluster to balance the cluster head load. Finally, an adaptive transmission mechanism was used to search for relay nodes, and the optimal transmission path function was constructed by combining node distance and energy. The improved honey badger algorithm was used to optimize the data transmission energy consumption. Simulation results show that IFCRA has reasonable clustering, balanced energy consumption, and long lifespan in a 3D heterogeneous scene.

**Keywords:** 3D wireless sensor network, clustering routing, honey badger algorithm, fuzzy C-means, energy consumption balance

收稿日期: 2023-07-11; 修回日期: 2023-11-13

通信作者: 徐碧阳, gs.byxu21@gzu.edu.cn

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No.61640014); 贵州省教育厅创新群体基金资助项目 (No.黔教合 KY 字[2021]012); 贵州省科技支撑计划基金资助项目 (No.黔科合支撑[2022]一般 017, No.黔科合支撑[2023]一般 411, No.黔科合支撑[2023]一般 412, No.黔科合支撑[2019]2152); 贵州省教育厅工程研究中心基金资助项目 (No.黔教技[2022]040, No.黔教技[2022]043); 中国电力建设股份有限公司科技基金资助项目 (No.DJ-ZDXM-2020-19, No.DJ-ZDXM-2022-44); 贵州省双碳研究院开放课题基金资助项目 (No.DCRE-2023-13)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61640014), Innovation Group of Guizhou Education Department (No.KY[2021]012), Guizhou Provincial Science and Technology Projects (No.[2022]017, No.[2023]411, No.[2023]412, No.[2019]2152), Engineering Research Center of Guizhou Education Department (No.[2022]040, No.[2022]043), Science and Technology Project of Power Construction Corporation of China, Ltd (No.DJ-ZDXM-2020-19, No. DJ-ZDXM-2022-44), Project of Guizhou Double Carbon Research Institute (No.DCRE-2023-13)

## 0 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)是由大量随机部署的传感器节点构成的多跳自组织网络,被广泛用于环境监测、灾害预警、智慧城市等物联网的数据感知阶段。WSN的传感器节点能量有限,且主要的消耗在数据传输阶段,因此,通过优化路由算法控制节点间的数据传输始终是该领域的研究热点。此外,随着WSN的应用普及和研究深入,基于三维空间的路由算法也成为众多学者关注的热点问题。现有的WSN路由算法在空间上的部署差异较大,导致数据传输过程中的能耗远超二维平面。目前,研究者主要通过优化路由协议的分簇拓扑结构和数据传输机制来延长网络的生存周期。

针对分簇拓扑结构的优化,众多学者首先对分簇的根本机制进行研究。文献[1]提出低功耗自适应聚类层次(LEACH, low energy adaptive clustering hierarchy)算法,首次将分簇的思想引入路由算法中,同时提出“轮”的概念,并将每一轮划分为簇的建立阶段和稳态阶段。在簇的建立阶段,簇内节点收集被测区域的信息并传输给对应的随机生成的簇首节点;在簇的稳态阶段,簇首对收集的数据进行融合后传送给汇聚节点。LEACH算法初步解决了网络负载均衡的问题,但由于簇首选举随机且仅采用单跳方式与基站通信,网络容易出现簇结构不均匀和“能量空洞”的问题。文献[2]在LEACH分簇的基础上引入节点能量因素对簇首的选举进行改进,使剩余能量较多的节点当选簇首的概率更大,但远距离的数据传输会导致节点消耗更多的能量。文献[3]提出稳定选举协议(SEP, stable election protocol),该协议考虑节点间的异构性,将初始节点分为普通节点与高级节点,并在簇首选举时采用不同的能量加权,提高了节点的存活时间,但仍存在簇大小不均匀的问题。文献[4]提出分布式节能聚类(DEEC, distributed energy-efficient clustering)算法,该算法将剩余能量引入簇首选举中,但不能充分利用节点的额外能量。文献[5]提出基于能量优化的三维空间LEACH算法,该算法对三维空间的LEACH进行改进,结合能量损耗模型与网络节点的剩余能量,对簇首选举公式进行优化,均衡了网络能量负载,但簇首与其他节点的位置不合理,仍出现极大簇和极小簇的情况。文献[6]在文献[1]的基础上引入三维架构,并提出了最优簇首数,节省了

数据传输能耗,但忽视了当前网络节点的动态变化对簇首数的影响。

除此之外,研究者也将聚类算法引入WSN的分簇过程中。文献[7]提出一种基于布谷鸟优化K均值的WSN分簇路由算法,该算法使用布谷鸟算法选出初始聚类中心,克服了聚类算法初始分布不均匀的问题,同时综合考虑节点的剩余能量与簇首到聚类中心的距离选举簇首,使簇的分布更加均匀,但布谷鸟算法容易陷入局部最优,会导致分簇规模依然不合理的现象。文献[8]提出一种基于萤火虫算法优化模糊C均值(FCM, fuzzy C-means)的WSN路由算法,该算法结合剩余能量和距离建立簇首选举的适应度函数,动态更新簇首节点,降低节点能耗,但萤火虫算法收敛精度低,会导致FCM分簇陷入局部最优。文献[9]提出适用于三维球形网络结构的WSN分簇路由算法,该算法采用层次聚类对网络进行分簇,采用副簇首缓解簇首的压力,有效均衡了节点整体的能耗,但分簇策略复杂度高,不适用于大规模网络。

针对数据传输机制的优化,文献[10]提出基于模糊C均值聚类及群体智能的WSN分簇路由算法,该算法采用蚁群优化算法搜索簇首与基站之间的多条路径,提高了能量的利用率,但靠近基站的节点能量消耗大,导致节点的能量负载不均衡。文献[11]提出一种基于粒子群优化模糊C均值的分簇路由算法,该算法设置中继节点平衡簇首的负载,综合考虑节点的能量、距离以及中继节点位置的均衡性构建最优路径的适应度函数,有效地提升了数据的传输效率,但该算法仅针对二维平面,忽视了实际应用环境复杂导致数据传输能耗高的问题。文献[12]提出一种基于脆弱蚁群算法的三维无线传感器网络路由分簇算法,该算法在簇内设置关键节点,使簇首采用多跳路径传输,同时采用脆弱蚁群算法寻找最优路径,但频繁的多跳路径传输会导致路由算法冗余化。文献[13]对无线传感器网络节点距离传输的能耗进行研究,提出最小能距比、最佳发送距离的概念,使节点转发数据时的能量利用率达到最优。

上述WSN路由算法在一定程度上延长了网络的生存周期,均衡了网络能耗,但仍然存在一些问题。1) 针对簇首选举,存在簇首节点利用率低、簇首位置不合理以及分簇不均匀的问题;2) 针对拓扑划分,存在对聚类算法优化时未考虑群体智能算法收敛速

度慢和容易陷入局部最优的问题；3) 针对数据传输机制，基于三维场景的路由算法目前研究较少，且存在频繁多跳传输导致路由算法冗余的问题。

综上所述，本文提出一种基于改进蜜獾算法 (HBA, honey badger algorithm) 优化模糊 C 均值的三维 WSN 分簇路由算法 IFCRA，主要通过分簇拓扑结构和数据传输机制进行优化来提高 WSN 路由算法在高维空间的适配性。为满足三维场景下低能耗的需求，首先，在成簇阶段，采用改进后的蜜獾算法对模糊 C 均值进行优化，解决聚类中心模糊且容易陷入局部最优的问题。然后，引入动态最优簇首数，采用改进的模糊 C 均值算法对成簇方式进行优化，使成簇大小均匀。接着，在簇首选举阶段，结合簇内节点的能量与距离选取最优簇首，平衡簇首的能耗。最后，在数据传输阶段，采用单跳传输与多跳传输相结合的动态自适应传输机制，寻找中继节点，平衡簇首通信的负载，同时结合最优跳数、节点间的距离和能量构建最优传输路径的适应度函数，并采用改进的蜜獾算法进行求解。

## 1 系统模型

### 1.1 网络模型

本文对三维场景下的 WSN 模型做出以下假设。

1) 传感器节点部署在边长均为  $M\text{ m}$  三维立方体区域，基站位于区域中心且具有无限能量，节点分布如图 1 所示，图中的坐标轴表示立方体的边长为  $100\text{ m}$ 。

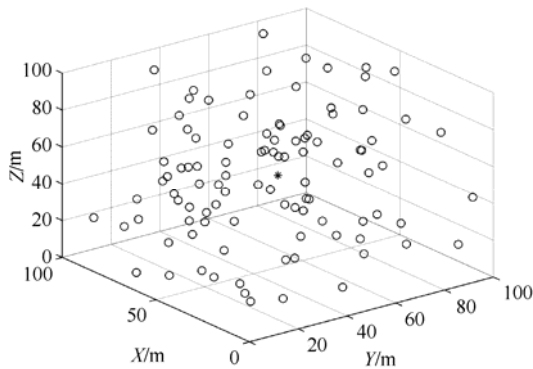


图 1 三维 WSN 节点分布

2) 传感器节点是固定的，节点之间的距离为欧氏距离，每个节点都有一个唯一的 ID 号。

3) 传感器节点的能量由一定能量的电池支持，且初始能量不同，可查询自身剩余能量。

4) 传感器节点具有相同的计算能力、通信能力、数据融合和处理能力。

5) 不考虑温度、噪声等因素对传感器网络的影响。

### 1.2 能耗模型

WSN 的能量消耗主要在数据传输阶段，根据发送节点与接收节点之间的距离  $d$  与通信阈值  $d_0$ ，分别使用自由空间模型与多径衰落信道模型进行建模<sup>[14]</sup>。能耗模型如图 2 所示。

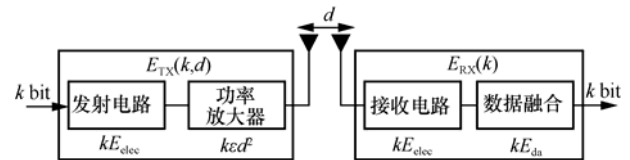


图 2 WSN 的能耗模型

节点发送  $k\text{ bit}$  数据消耗的能量可以表示为

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (2)$$

节点接收  $k\text{ bit}$  数据消耗的能量可以表示为

$$E_{RX} = kE_{elec} + kE_{da} \quad (3)$$

其中， $\epsilon_{fs}$  为自由空间模型的功放系数， $\epsilon_{mp}$  为多径衰落信道模型的功放系数， $E_{elec}$  为每传输  $1\text{ bit}$  数据消耗的能量， $E_{da}$  为融合  $1\text{ bit}$  数据消耗的能量。

## 2 改进蜜獾算法优化 FCM 算法

FCM 算法是一种基于软划分的聚类算法<sup>[15]</sup>，并且广泛用于图像处理、数据挖掘等领域。不同于硬聚类在分类时的硬性标准，软聚类算法分类时主要根据隶属度的高低，隶属度越高相似度越高。但标准 FCM 算法存在聚类中心模糊和陷入局部最优解的问题，因此本文采用元启发式算法对其进行优化。

### 2.1 标准 FCM 算法

假设在三维空间  $X$  中部署  $N$  个节点  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ，模糊聚类中心为  $K$ 。FCM 算法的目标函数可以表示为

$$J(U, V) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^K u_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (4)$$

其中,  $U = \{u_{ij}\}$  为数据节点对  $K$  个聚类中心的隶属度值组成的矩阵,  $u_{ij}$  为节点  $x_j$  对聚类中心  $v_i$  的隶属度值,  $V = \{v_i\}$  为  $K$  个聚类中心组成的矩阵,  $m \in [1, \infty)$  为模糊指数, 本文取  $m = 2$ ,  $d_{ij} = \|x_j - v_i\|$  为节点  $x_j$  对聚类中心  $v_i$  的距离。隶属度应满足

$$\sum_{i=1}^K u_{ij} = 1 \quad (5)$$

对目标函数求拉格朗日偏导得到隶属度值  $u_{ij}$ 、聚类中心  $v_i$ , 可表示为

$$u_{ij} = \left[ \sum_{k=1}^K \left( \frac{x_j - v_i}{x_j - v_k} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_j u_{ij}^m}{\sum_{j=1}^N u_{ij}^m} \quad (7)$$

满足迭代停止条件后, FCM 输出最优结果。

### 2.2 蜜獾算法

HBA 是模拟蜜獾在自然界中觅食行为的元启发式优化算法<sup>[16]</sup>。由于蜜獾不擅长定位蜂巢, 导蜜鸟不擅长打开蜂巢, 两者通常合作得到蜂蜜。HBA 分为挖掘阶段与采蜜阶段, 挖掘阶段的位置更新式可以表示为

$$\begin{aligned} x_{\text{new}} &= x_{\text{prey}} + F\beta I x_{\text{prey}} + Fr_3 \cdot \\ & wd_i |\cos(2\pi r_4)[1 - \cos(2\pi r_5)]| \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $x_{\text{prey}}$  为猎物的全局最优位置;  $\beta \in [1, \infty)$  为蜜獾获取食物的能力, 通常设为 6;  $d_i$  是猎物与第  $i$  只蜜獾之间的距离,  $r_3$ 、 $r_4$  和  $r_5$  是 (0,1) 范围内 3 个不同的随机数;  $I_i$  是猎物的气味强度, 由式(9)确定;  $w$  为更新密度因子, 由式(12)确定;  $F$  是改变搜索方向的标志, 由式(13)确定。

$$I_i = r_2 \frac{S}{4\pi d_i^2} \quad (9)$$

$$S = (x_i - x_{i+1})^2 \quad (10)$$

$$d_i = x_{\text{prey}} - x_i \quad (11)$$

$$w = C \exp\left(-\frac{t}{t_{\text{max}}}\right) \quad (12)$$

$$F = \begin{cases} 1, & r_6 \leq 0.5 \\ -1, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $r_2$  为(0,1)内的随机数,  $S$  为源强度或猎物集中强度,  $t_{\text{max}}$  是最大迭代次数,  $C$  为一个大于 1 的常数, 通常设置为 2,  $r_6$  为(0,1)内的随机数。

采蜜阶段的位置更新式可以表示为

$$x_{\text{new}} = x_{\text{prey}} + Fr_7 wd_i \quad (14)$$

其中,  $x_{\text{new}}$  是蜜獾的新位置,  $x_{\text{prey}}$  是猎物的位置。

### 2.3 基于多策略改进的蜜獾优化算法

由于原始蜜獾算法存在收敛速度慢、容易陷入局部最优的问题, 本文引入文献[17]提出的基于多策略改进的蜜獾优化算法 (IHBA, improved honey badger optimization algorithm based on multi-strategy)。该算法的密度更新因子表示为

$$w_1 = 2 \left[ 1 - \sin\left(\left(\frac{t}{t_{\text{max}}}\right)^2 \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (15)$$

挖掘阶段的位置更新式为

$$\begin{aligned} x_{\text{new}} &= x_{\text{prey}} + F\beta I x_{\text{prey}} + Fr_3 \cdot \\ & ad_i |\cos(2\pi r_4)[1 - \cos(2\pi r_5)]| x_{\text{gnew}} \end{aligned} \quad (16)$$

$$x_{\text{gnew}} = x_i |\sin(r_1) - r_2 \sin(r_2)| c_1 x_b - c_2 x_i \quad (17)$$

$$c_1 = a(1-h) + bh \quad (18)$$

$$c_2 = ah + b(1-h) \quad (19)$$

其中,  $x_{\text{gnew}}$  为迭代后个体的位置,  $x_b$  为个体的最优位置;  $r_1$  为(0,  $2\pi$ ) 内的随机数,  $r_2$  为(0,  $\pi$ ) 内的随机数;  $a$ 、 $b$  是黄金分割系数的初始值, 且  $a = \pi$ ,  $b = -\pi$ ;  $h$  是黄金分割比率, 取  $h = \frac{\sqrt{5}-1}{2} \approx 0.6183$ 。

### 2.4 基于 IHBA 优化的 FCM 算法

FCM 初始化随机生成的聚类中心可能会在后续迭代过程中陷入局部最优解, 影响最终聚类效果。本文采用 IHBA 对 FCM 进行优化, 主要包括以下几点。

#### 1) 种群位置编码

设样本空间的模糊聚类中心的个数为  $K$ , 数据的特征向量维度为  $D$ 。设定种群中的每只蜜獾的位置为样本空间中的一组聚类中心, 则每只蜜獾为一个  $K \times D$  的矩阵, 蜜獾个体的编码公式为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{K1} & x_{K2} & \dots & x_{KD} \end{bmatrix}_{K \times D} \quad (20)$$

2) 设计适应度函数

在 FCM 中,  $J(U,V)$  越小表示聚类效果越好, 因此将式(4)作为适应度函数, 并采用 IHBA 进行求解。其中蜜獾种群在样本数据空间中搜寻的最优解为最优的聚类中心。

基于 IHBA 优化的 FCM 算法的具体步骤如下。

**Step1** 初始化 IHBA、FCM 算法的参数。

**Step2** 执行 IHBA, 根据式(4)求解最优的初始聚类中心。

**Step3** 执行 FCM 算法。

**Step4** 满足误差阈值后算法结束, 输出最优聚类中心。

IHBA 优化 FCM 算法的流程如图 3 所示。

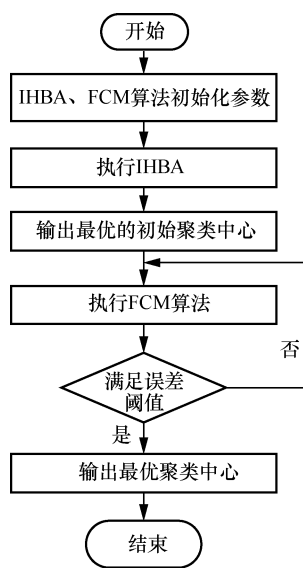


图 3 IHBA 优化 FCM 算法的流程

3 IFCRA

IFCRA 设计时沿用 LEACH 协议“轮”的思想, 并且仍采用 TDMA 时隙分配机制驱动节点通信。IFCRA 充分考虑三维场景下低能耗的需求, 它的“轮”主要包含分簇拓扑阶段和数据传输阶段。当一轮传输结束时, 节点会发送自身位置和剩余能量等状态信息。IFCRA 的工作时刻表如图 4 所示。

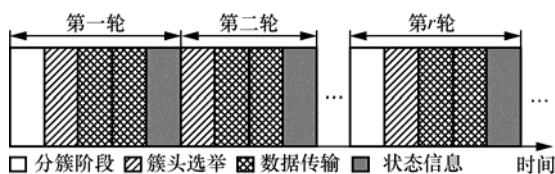


图 4 IFCRA 的工作时刻表

3.1 成簇阶段

簇首数对网络的性能影响很大, 均匀的簇规模有利于延长网络的生存周期。为充分考虑三维空间下数据传输对能量的高要求, 本文对文献[6]提出的最优簇首数进行优化, 文献[6]的最优簇首数表示为

$$C_{opt} = 0.2147 \left( N \frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}} \frac{M^2}{d_{toBS}^4} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (21)$$

其中,  $C_{opt}$  为最优簇首数,  $N$  为传感器节点的个数, 传感器节点部署在  $M \times M \times M$  的三维空间中,  $d_{toBS}$  为簇首节点到 BS 的距离,  $\epsilon_{fs}$  为自由空间模型的功放系数,  $\epsilon_{mp}$  为多径衰落信道模型的功放系数。

随着网络的运行, 一些节点因能量耗尽陷入死亡, 原来的最优簇首数可能不再适应当前网络。为均衡网络分簇, 本文采用动态分簇的设置, 可表示为

$$C_{opt} = 0.2147 \left( N_{alive} \frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}} \frac{M^2}{d_{toBS}^4} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (22)$$

其中,  $N_{alive}$  为传感器节点存活的个数。

当网络内存活的节点数发生变化时,  $C_{opt}$  会相应地发生改变, IFCRA 根据  $C_{opt}$  的变化动态地对网络节点进行分簇, 使网络分簇更加均匀, 有效避免通信过程中因传输距离参差不齐而造成某些簇内节点过早死亡的现象<sup>[9]</sup>, 延长了网络的生存周期, 平衡了节点负载, 均衡了网络能耗。

3.2 簇首选举阶段

网络中簇首不仅要接收簇内节点传来的信息, 还要将接收的信息进行融合并传送给基站。当簇首的负载过大时, 簇首往往会过早死亡, 簇内通信无法正常进行, 从而影响整个网络的通信情况。为平衡簇首的负载, 本文综合考虑簇内节点的能量和节点之间的相对位置 2 个因素, 构建簇首选举适应度函数  $f_{CH}$ , 求取  $f_{CH}$  的最小值。

数据传输与融合对簇首的能量有着较高的要求, 高能量的簇首能够维持簇内节点与簇间节点之间的正常通信。因此, 本文考虑簇内节点的总能量与簇内节点剩余能量的比值作为参考, 可表示为

$$f_e(i) = \frac{\sum_{j=1}^n E_j(i)}{E_j^{res}(i)} \quad (23)$$

其中,  $n$  为簇内节点的个数,  $E_j(i)$  为第  $j$  个簇内节

点的总能量,  $E_j^{\text{res}}(i)$  为第  $j$  个簇内第  $i$  个节点的剩余能量。  $f_e(i)$  的值越小, 则表明整个簇内第  $i$  个节点的剩余能量越大, 该节点成为簇首的概率就越高。

网络的能耗主要消耗在数据传输阶段, 传输的距离直接影响数据消耗的能量, 距离越长, 能量消耗越大。因此本文考虑簇内节点到基站的总距离与簇内节点之间的距离比值作为参考, 可表示为

$$f_d(i) = \frac{\sum_{i=1}^n d_{\text{BS}}(i)}{d_{\text{max}}(i) - d(i, j)} \quad (24)$$

其中,  $d_{\text{BS}}(i)$  为簇内节点  $i$  到基站的距离之和,  $d_{\text{max}}(i)$  为节点  $i$  到基站的最远距离,  $d(i, j)$  为节点  $i$  与所属簇内其他节点  $j$  的距离。  $f_d(i)$  的值越小, 则表明簇首节点的位置越均匀, 簇首节点到基站的距离越近, 有利于降低传输能耗。

基于簇内节点的能量和相对位置 2 个因素, 簇首选举适应度函数  $f_{\text{CH}}$  可表示为

$$f_{\text{CH}} = \alpha f_e(i) + \beta f_d(i) \quad (25)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  为权重系数, 且  $\alpha + \beta = 1$ 。

三维 WSN 路由算法要满足能量消耗低的原则, 随着网络的运行, 能量因素会随着数据传输占主导地位。因此本文将权重系数设置为

$$\alpha = \frac{3}{4} \left( 1 + \frac{E_0 - E_{\text{res}}(r)}{E_0} \right) \quad (26)$$

$$\beta = 1 - \alpha \quad (27)$$

其中,  $E_0$  为网络中的总初始能量,  $E_{\text{res}}(r)$  为当前轮数的网络剩余能量。随着网络的运行, 节点的剩余能量会变少, 节点消耗的能量变多, 权重系数  $\alpha$  变大,  $\beta$  变小, 能量因素占主导。

### 3.3 数据传输阶段

IFCRA 在数据传输阶段主要收集处理簇内数据和转发传输簇间数据。在实际的通信过程中, 仍采用 LEACH 算法<sup>[1]</sup>的时分多址 (TDMA) 时隙分配机制处理节点间的通信逻辑, 节点在所分配的时隙内被唤醒, 然后进行感知、处理和发送数据, 其余时间保持休眠状态, 从而节省各个节点的能耗。

在簇内通信阶段, IFCRA 首先通过最优簇首数  $C_{\text{opt}}$  确定聚类中心, 其次采用 IHBA 求出最优的初始聚类中心替代 FCM 算法随机初始化的聚类中心, 然后 FCM 算法根据最优的初始聚类中心迭代计算

求出最终的聚类中心, 最后根据聚类中心以及簇首选举策略选出簇首。通过采取以上策略优化网络的分簇拓扑结构, 使成簇更加均匀, 簇首节点的位置分布更加合理, 降低了网络能耗。簇首节点与簇内其他节点的通信能耗模型采用式(1), 并且簇内节点与簇首之间的通信是单跳传输的。

在簇间通信阶段, 簇首节点将收集到的信息融合处理后转发至 BS, 从而完成本轮的数据传输。在实际的通信过程中, 传感器部署的范围很大, 存在一些簇首离基站距离较远的情况。根据通信能耗模型, 通信距离大于阈值时能量的消耗远大于通信距离小于阈值时的能量。为有效降低传输过程中的能耗, 本文设计中继节点平衡簇首的负载, 将长距离的单跳传输转化成短距离的多跳传输, 同时构建最优传输路径适应度函数, 采用 IHBA 求出最优的多跳传输路径。

为合理规划簇首到基站的跳数, 本文采用文献[13]提出的最佳传输距离  $d_{\text{best}}$  作为判断需要多跳传输的条件, 当簇首到基站的距离大于最佳传输距离时采用多跳传输, 反之采用单跳传输。IFCRA 具体的传输机制如图 5 所示。

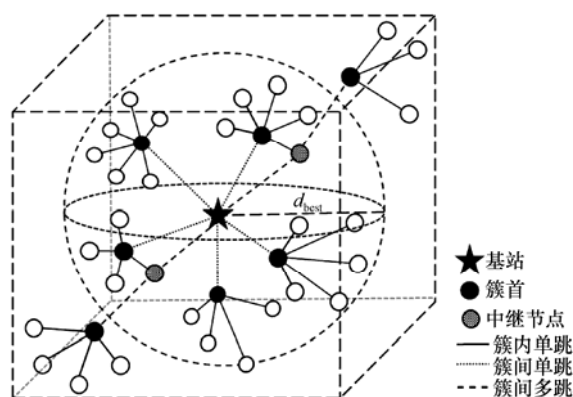


图 5 IFCRA 传输机制

#### 1) 蜜獾种群位置编码

设定种群中每只蜜獾的位置都为簇首节点到 BS 的路径, 整个路径中经过中继节点的次数由最佳跳数决定, 可表示为

$$\text{hop} = \text{round} \left( \frac{d_{\text{toBS}}}{d_{\text{best}}} \right) + 1 \quad (28)$$

其中,  $d_{\text{toBS}}$  为簇首节点到 BS 的距离;  $d_{\text{best}}$  为文献[13]提出的一阶无线通信模型下最低能耗的节点通信距离 32 m, 即簇首节点到 BS 的最优距离为 32 m。

部署区域内节点之间的相对位置由  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴坐标表示，每只蜜獾是一个  $3 \times \text{hop}$  的向量，蜜獾个体的编码可表示为

$$D = \begin{bmatrix} x_{CH}, x_{r_1}, \dots, x_{r_{\text{hop}-1}}, x_{BS} \\ y_{CH}, y_{r_1}, \dots, y_{r_{\text{hop}-1}}, y_{BS} \\ z_{CH}, z_{r_1}, \dots, z_{r_{\text{hop}-1}}, z_{BS} \end{bmatrix}_{3 \times \text{hop}} \quad (29)$$

其中， $x$  为节点的  $X$  轴坐标， $y$  为节点的  $Y$  轴坐标， $z$  为节点的  $Z$  轴坐标，CH 为簇首节点， $r$  为中继节点，BS 为基站。

### 2) 适应度函数的设计

当蜜獾种群位置编码完成后，蜜獾个体对最优传输路径的适应度函数进行求解。为均衡网络能耗，本文拟定中继节点在非簇首的节点中产生，并且综合考虑中继节点到基站的距离、中继节点到 CH 的距离和中继节点当前的剩余能量，构建最优路径的适应度函数  $f_{\text{route}}$ ，可表示为

$$f_{\text{route}} = \alpha \frac{\overline{E_{\text{total}}}}{E_r} + \beta \left( \sum \left| d_{\text{adj}} - \frac{d_{\text{total}}}{\text{hop}} \right| \frac{d_{\text{total}}}{d_{\text{toBS}}} \right) \quad (30)$$

其中， $\overline{E_{\text{total}}}$  为网络中所有节点总能量的平均值， $\overline{E_r}$  为选择的中继节点总剩余能量的平均值，两者比值越小，表明中继节点的能量越充足； $d_{\text{total}}$  为传输路径的总和， $d_{\text{adj}}$  为相邻中继节点间的邻接矩阵， $\frac{d_{\text{total}}}{\text{hop}}$  为理想情况下相邻节点之间的平均距离，邻接矩阵与平均距离的差值越小，表明中继节点的位置分布越均匀，传输距离越接近最优传输距离； $d_{\text{toBS}}$  为簇首节点到 BS 的直线距离， $\frac{d_{\text{total}}}{d_{\text{toBS}}}$  比值越小，表明中继节点的传输距离越接近原来的单跳直线传输，缩短了传输距离； $\alpha$  和  $\beta$  仍按照式(26)和式(27)更新。

### 3.4 IFCRA 流程和复杂度分析

IFCRA 流程如图 6 所示。

假设网络中传感器节点的总数为  $N$ ，最优簇首数为  $C_{\text{opt}}$ ，蜜獾种群的维度为  $D$ 。在网络分簇阶段，本文采 IHBA 改进的 FCM 算法对网络进行分簇，该阶段的时间复杂度为  $O(TNDC_{\text{opt}}^2)$  在簇首选举阶段，最优簇首的选取需要遍历簇内所有节点，该阶段的时间复杂度为  $O(N)$ 。在簇内通信阶段，簇内节点均向对应的簇首发送数据，簇首接收数据并对其进行融合处理，该阶段的时间复杂度为  $O(N)$ 。在簇间通信阶段，IHBA 寻找最优传输路径，该阶段的时间复杂度

为  $O(TNDL)$ ，其中  $L$  是簇首节点需要多跳传输的个数。因此，IFCRA 的时间复杂度为  $O(TNDC_{\text{opt}}^2)$ 。

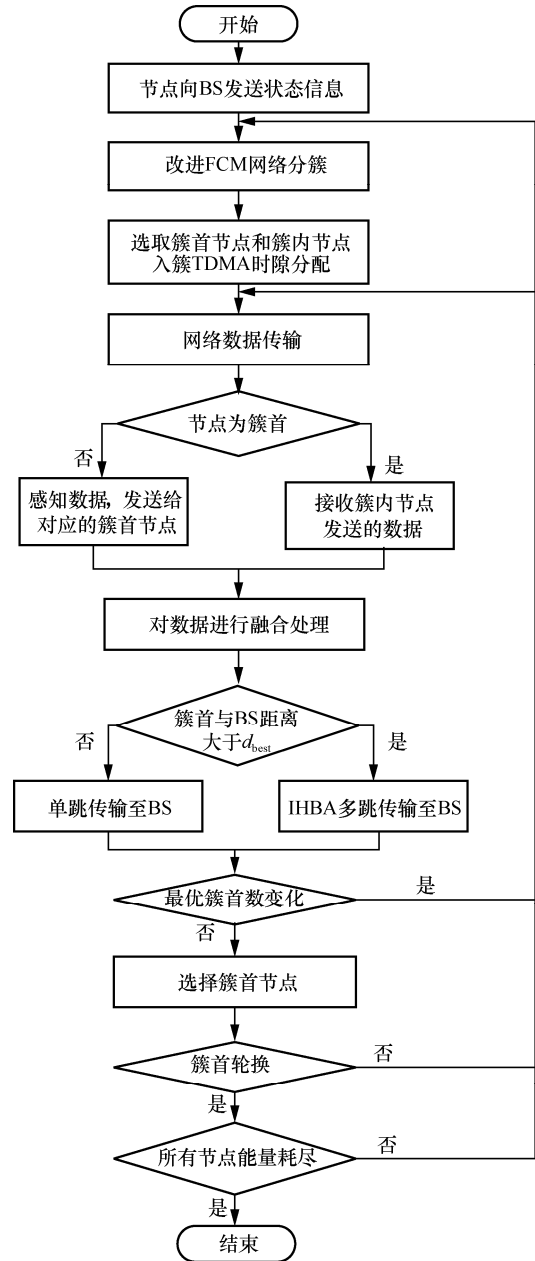


图 6 IFCRA 流程

## 4 仿真分析

### 4.1 实验设计与参数设置

为验证三维空间下 IFCRA 的性能，本文针对三维空间中能量异构的网络场景，将 IFCRA 与 SEP-3D、DEEC-3D 在 MATLAB 2016a 中进行仿真对比，对比指标涉及网络成簇效果、网络生存周期、网络剩余能量、BS 吞吐量以及网络能耗均衡性。

其中 SEP-3D、DEEC-3D 为 SEP<sup>[3]</sup>、DEEC<sup>[4]</sup> 这 2 种算法在三维网络结构中所采用的路由算法。为验证 3 种算法在不同场景的性能, 本文设计 2 种实验场景。场景 1: 在 100 m×100 m×100 m 的三维空间内部随机部署 100 个节点, BS 位于(50 m, 50 m, 50 m)。场景 2: 在 200 m×200 m×200 m 的三维空间内部随机部署 200 个节点, BS 位于(100 m, 100 m, 100 m)。三维 WSN 的仿真参数如表 1 所示, 改进的 FCM 算法涉及的参数如表 2 所示。

表 1 三维 WSN 的仿真参数

参数	取值
普通节点初始能量 $E_0 / J$	0.5~1
数据包长度 /bit	4 000
控制消息长度 /bit	100
$E_{da} / (nJ \cdot bit^{-1})$	5
$E_{TX} / (nJ \cdot bit^{-1})$	50
$E_{RX} / (nJ \cdot bit^{-1})$	50
$\epsilon_{fs} / (pJ \cdot (bit \cdot m^2)^{-1})$	10
$\epsilon_{mp} / (pJ \cdot (bit \cdot m^4)^{-1})$	0.001 3

表 2 改进的 FCM 算法涉及的参数

算法	参数	取值
改进的 FCM	$m$	2
	$\epsilon$	$1 \times 10^{-5}$
	$N$	50
	$iter_{max}$	100
	$\beta$	6
IHBA	$N$	50
	$iter_{max}$	100
	$\beta$	6

### 4.2 仿真结果分析

#### 1) 网络分簇效果分析

图 7~图 9 为 SEP-3D、DEEC-3D、IFCRA 在 2 种场景下的分簇情况, 其中, 黑色标注的节点为选出的簇首节点, \*为基站。2 个场景中的坐标轴均为立方体的边长, 分别为 100 m 和 200 m。

纵向比较。由图 7 可知, SEP-3D 算法分簇存在极大簇与极小簇的情况。其中, 图 7(a)最大簇有 36 个节点, 最小簇有 10 个节点。簇首节点离基站的距离较远, 簇内节点对簇首的依赖较大。由图 8 可知, DEEC-3D 算法分簇的规模与 SEP-3D 算法相比更加均匀, 但仍存在最大簇与最小簇的情况, 且

图 8(a)最大簇有 21 个节点, 最小簇仅有 4 个节点, 并且仍存在簇首距离基站较远的现象。由图 9 可知, IFCRA 分簇均匀, 簇内节点的数目比较稳定, 且不存在极大簇与极小簇的情况, 簇首到基站的距离相对合理, 有效降低了网络能耗。

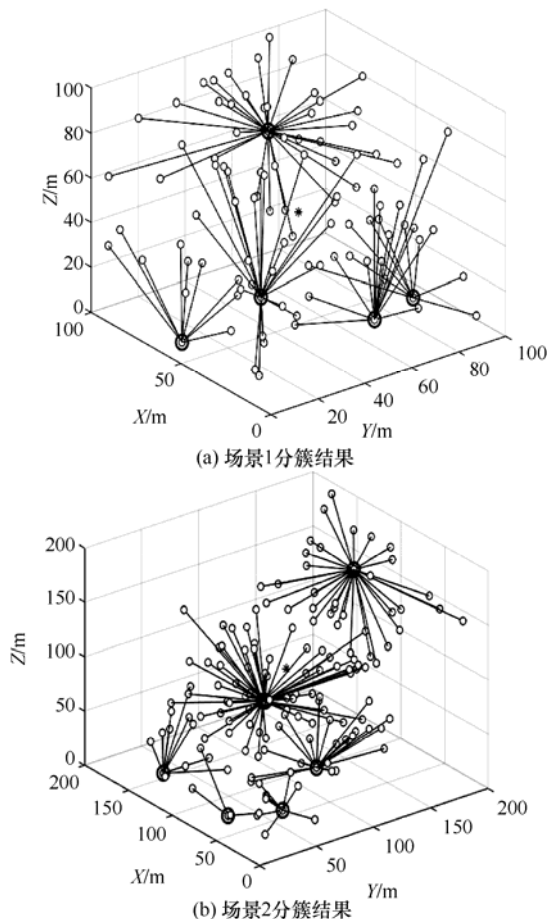


图 7 SEP-3D 算法在 2 种场景下的分簇结果

横向比较。随着网络规模的增大, SEP-3D 算法与 DEEC-3D 算法出现极大簇与极小簇的现象更严重, 而 IFCRA 仍能保持均匀分簇, 优势更加明显。

综上所述, IFCRA 在三维空间中的分簇效果优于其他 2 种算法, 并且 IFCRA 成簇大小均匀, 簇首在簇内位置分布合理, 保证了簇首到基站的低能耗传输, 证明了改进的 FCM 分簇的优越性。

#### 2) 网络生存周期

传感器节点的能量仅靠自身携带的电池提供, 节点部署之后能量补充是非常困难的, 随着网络的运行, 节点能量耗尽后就会陷入死亡, 分簇拓扑结构和传输机制会发生变化, 从而影响整个网络的性能。因此对有限能量下节点生存周期的研究是非常重要的。本文对网络生存周期的研究如图 10 和

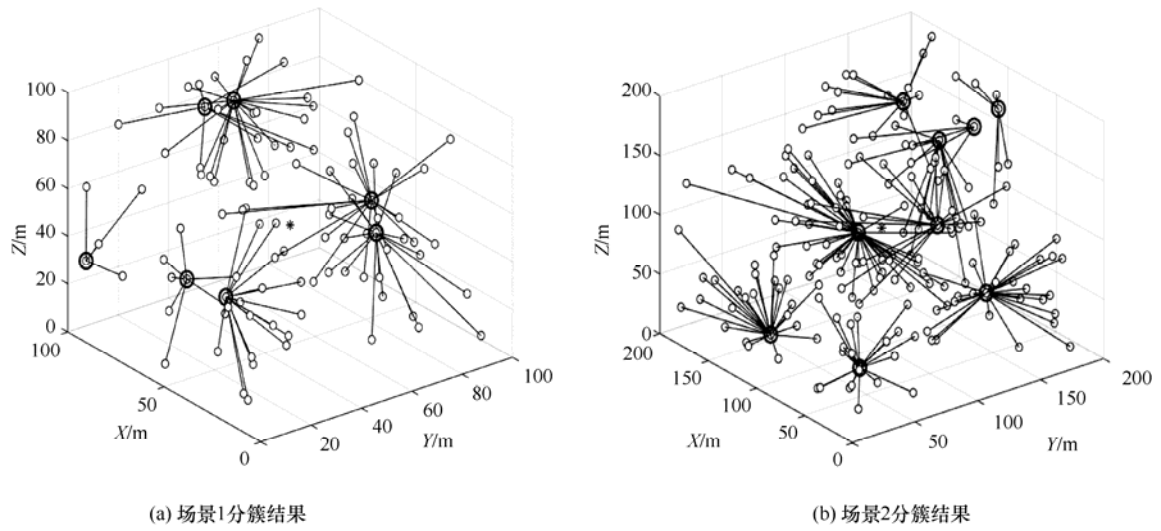


图 8 DEEC-3D 算法在 2 种场景下的分簇结果

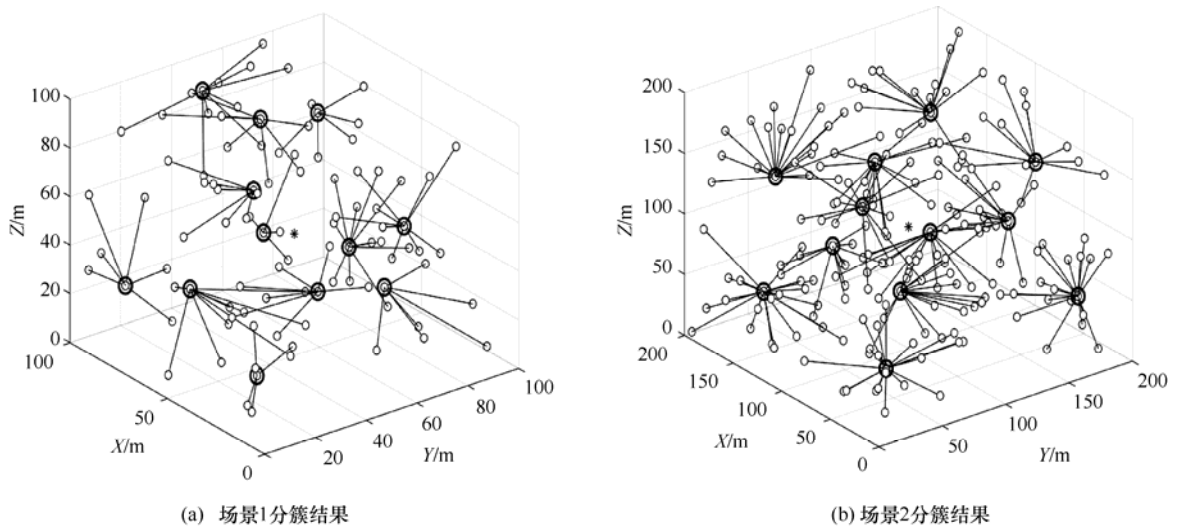


图 9 IFCRA 在 2 种场景下的分簇结果

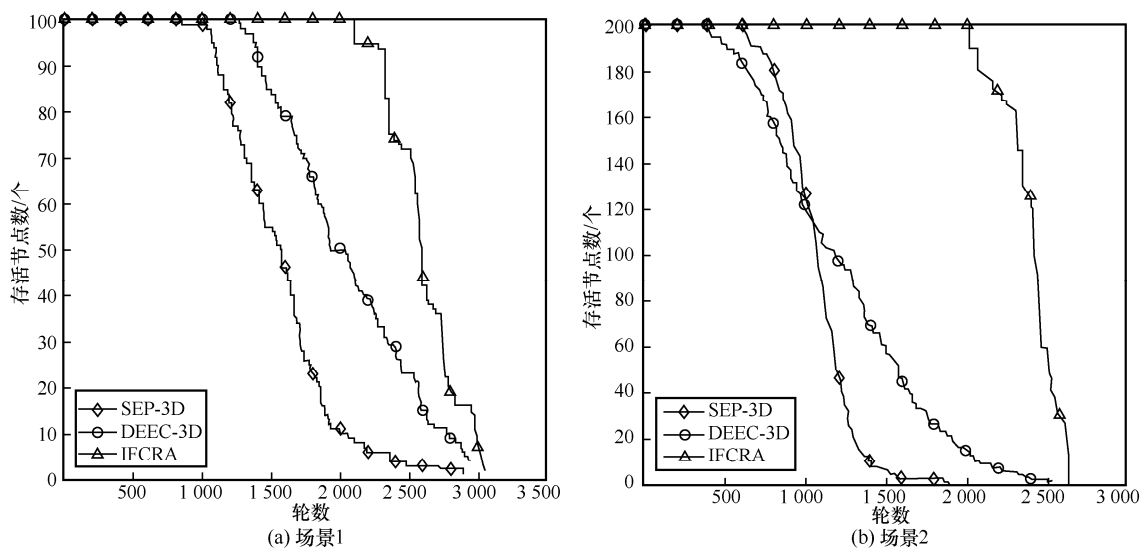


图 10 3 种算法在三维 WSN 能量异构场景下存活节点的变化趋势

图 11 所示。其中，图 10 为 3 种算法在三维 WSN 能量异构场景下存活节点的变化趋势，图 11 为 3 种算法节点死亡的比例相同时对应的轮数。

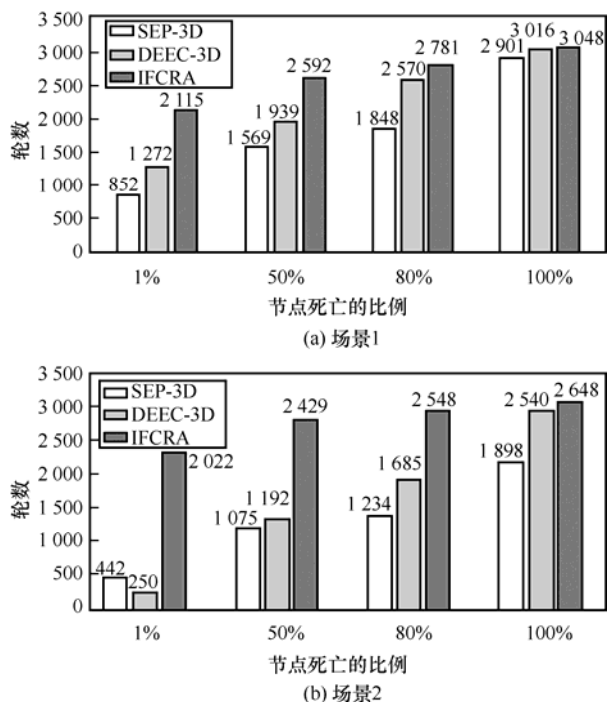


图 11 3 种算法节点死亡的比例相同时对应的轮数

由图 10 可知，在三维 WSN 能量异构的网络场景中，SEP-3D 算法、DEEC-3D 算法均出现节点死亡时 IFCRA 仍能在网络中正常运行。场景 1 中，当 SEP-3D 算法死亡节点数超过 92%、DEEC-3D 算法死亡节点数超过 58%时，IFCRA 才开始有节点死亡。场景 2 中，当 SEP-3D 算法节点全部死亡、DEEC-3D 算法死亡节点数超过 96%时，IFCRA 才开始有节点死亡。

由图 11 可知，IFCRA 1%节点、50%节点、80%节点、全部节点死亡的轮数均晚于其他 2 种算法，网络生存周期最长。

综上所述，在三维异构场景下，IFCRA 的分簇拓扑结构与数据传输机制有效延长了网络的生存周期。

### 3) 网络剩余能量

如何降低能耗是三维 WSN 路由算法的关键问题之一，本文对网络的剩余能量即不同轮数下当前能量总和与初始能量总和之比进行研究。图 12 展示了 3 种算法的网络剩余能量。

由图 12 可知，当 3 种算法在同一轮数下时，IFCRA 网络剩余能量最高，下降速率最缓。当网络规模扩大

时，IFCRA 仍优于其他 2 种算法。这表明 IFCRA 分簇均匀，簇内单跳和簇间单跳与多跳相结合的通信机制有效均衡了簇首的负载，降低了网络能耗。

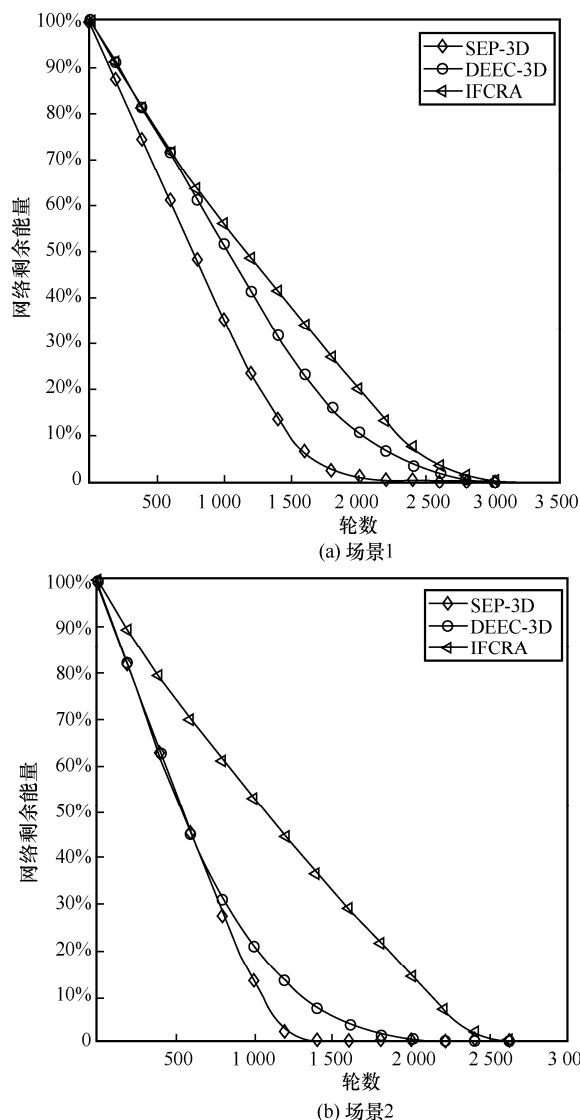


图 12 3 种算法的网络剩余能量

### 4) BS 吞吐量

网络中吞吐量也是三维 WSN 关注的一个重要信息，基站接收的数据包越多，能量分布越平衡<sup>[18]</sup>。在数据传输的过程中，簇内节点仅与簇首进行通信，簇首采用单跳或多跳的方式与基站进行通信。因此本文对 BS 吞吐量即簇首向基站传输的数据量进行研究。图 13 为 3 种算法的 BS 吞吐量。

由图 13 可知，在三维异构场景下，IFCRA 发送的数据明显多于其他 2 种算法。图 13(a)中，IFCRA 的吞吐量比 SEP-3D 算法、DEEC-3D 算法分别增加了 69.2%、43.83%。图 13(b)中，IFCRA 的吞吐量

比 SEP-3D 算法、DEEC-3D 算法分别增加了 92%、50%。这表明 IFCRA 能够使节点之间的合作更加紧密，保证在实际监测中数据的完整传输。

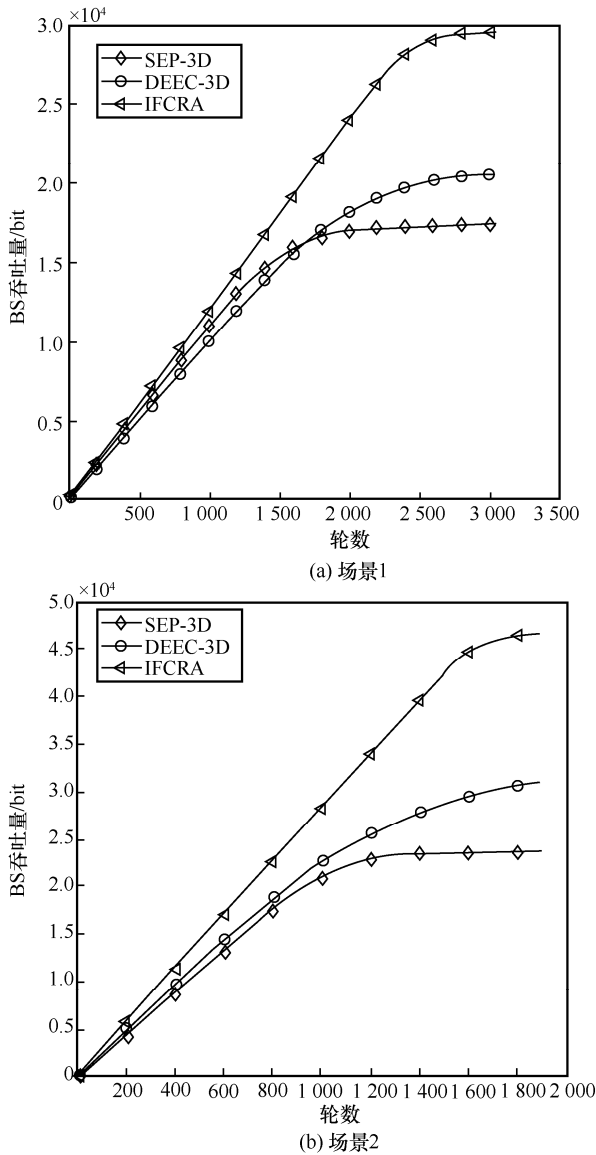


图 13 3 种算法的 BS 吞吐量

### 5) 网络能耗均衡性

均衡的网络能耗能有效延长网络的生存周期，本文对 3 种算法进行能耗均衡性的仿真对比。本文假定当网络中 80% 节点死亡时，网络失效。表 3 为 3 种算法在 2 种场景下分别运行 30 次得到的能耗均值与标准差。

由表 3 可知，IFCRA 在 2 种场景下的能耗均值与标准差均低于其他 2 种算法，这表明 IFCRA 在三维 WSN 传输中的总能耗较低，能耗波动平稳，网络能耗均衡。

表 3 3 种算法在 2 种场景下分别运行 30 次得到的能耗均值与标准差

算法	能耗均值		标准差	
	场景 1	场景 2	场景 1	场景 2
SEP-3D	73.816 0	150.245 3	0.095 2	0.167 3
DEEC-3D	73.709 2	148.275 0	0.127 9	0.146 4
IFCRA	73.699 5	145.466 7	0.058 2	0.126 5

## 5 结束语

为提高 WSN 路由算法在高维空间的适配性，本文提出了一种基于 IHBA 优化 FCM 的三维 WSN 分簇路由算法 IFCRA，分别对网络成簇阶段、簇首选举阶段以及数据传输阶段进行了优化。针对三维 WSN 节点能量异构的场景，首先在网络成簇阶段，采用 IHBA 优化 FCM 算法，解决 FCM 算法因初始聚类中心模糊容易陷入局部最优的问题，并采用改进后的 FCM 对异构 WSN 进行分簇，使成簇规模大小均匀；其次在簇首选举阶段，结合簇内节点的能量和相对距离选取最优簇首，均衡簇首负载；最后在数据传输阶段，采用单跳传输与多跳传输相结合的动态自适应传输机制，结合最优跳数寻找中继节点，综合考虑节点间的距离和能量构建最优传输路径的适应度函数，并采用 IHBA 进行求解，均衡数据的传输能耗。仿真结果表明，针对三维异构 WSN 的场景，IFCRA 成簇规模均匀，有效均衡了网络能耗，延长了网络的生存周期。现有算法主要在网络中节点位置相对固定的背景下设计<sup>[19]</sup>，后续可对移动节点在三维 WSN 中的数据传输展开研究。

### 参考文献：

- [1] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Piscataway: IEEE Press, 2002: 32-41.
- [2] ZHOU X, ZHANG R, HO C K. Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4754-4767.
- [3] SMARAGDAKIS G, MATTA I, BESTAVROS A. SEP: a stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2004: 223-233.
- [4] QING L, ZHU Q, WANG M. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2006, 29(12): 2230-2237.
- [5] 于雷, 刘海隆. 基于能量优化的三维空间 LEACH 改进算法研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 389-393.

- YU L, LIU H L. Improved algorithm of LEACH in 3D space for energy optimization[J]. Computer Simulation, 2022, 39(9): 389-393.
- [6] BAGHOURI M, HAJRAOUI A, CHAKKOR S. Low energy adaptive clustering hierarchy for three-dimensional wireless sensor network[J]. Computer Communications, 2015(1): 214-218.
- [7] 朱开磊, 孙爱晶. 基于布谷鸟优化K均值的WSN分簇路由算法[J]. 物联网学报, 2022, 6(1): 73-81.
- ZHU K L, SUN A J. WSN clustering routing algorithm based on cuckoo search algorithm optimized K-means[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(1): 73-81.
- [8] 余修武, 秦晓坤, 刘永. 基于萤火虫算法优化FCM的WSN路由算法[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(2): 50-56.
- YU X W, QIN X K, LIU Y. WSN routing algorithm based on firefly algorithm to optimize FCM[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(2): 50-56.
- [9] 史多水. 面向基础设施监测的三维无线传感器网络能耗均衡路由协议研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2021.
- SHI D S. Research on energy balance routing protocol of 3D wireless sensor networks for infrastructure monitoring[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2021.
- [10] 戚攀, 包开阳, 马鼎盛. 基于模糊C均值聚类及群体智能的WSN分层路由算法[J]. 计算机应用, 2018, 38(7): 1974-1980, 1988.
- QI P, BAO K Y, MA X Y. WSN hierarchical routing algorithm based on fuzzy C-means clustering and swarm intelligence[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(7): 1974-1980, 1988.
- [11] 孙爱晶, 李世昌, 张艺才. 基于PSO优化模糊C均值的WSN分簇路由算法[J]. 通信学报, 2021, 42(3): 91-99.
- SUN A J, LI S C, ZHANG Y C. WSN clustering routing algorithm based on PSO optimized fuzzy C-means[J]. Journal on Communications, 2021, 42(3): 91-99.
- [12] ZHANG T Y, CHEN G, ZENG Q T, et al. Routing clustering protocol for 3D wireless sensor networks based on fragile collection ant colony algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 58874-58888.
- [13] 郭书城, 卢昱, 许定根. 无线传感器网络节点距离传输的能耗研究[C]//2010年工程和商业管理国际会议. 詹姆斯麦迪逊大学: 美国科研出版社, 2010: 5232-5234.
- GUO S C, LU Y, XU D Y. Research on energy dissipation of transmission distance of node for wireless sensor[C]//Proceedings of International Conference on Engineering and Business Management (EBM2010) Computer Science. James Madison University: Scientific Research Publishing, 2010: 5232-5234.
- [14] XU Y, JIAO W G, TIAN M Q. An energy-efficient routing protocol for 3D wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 19550-19559.
- [15] JIANG X P, BAI R B, WALLACE S R, et al. Soft clustering-based scenario bundling for a progressive hedging heuristic in stochastic service network design[J]. Computers and Operations Research, 2021, 128(5): 105182-105197.
- [16] HASHIM F A, HOUSSEIN E H, HUSSAIN K, et al. Honey badger algorithm: new metaheuristic algorithm for solving optimization problems[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022, 192: 84-110.
- [17] 徐碧阳, 覃涛, 魏巍, 等. 基于多策略改进的蜜獾优化算法[J]. 小型微型计算机系统, 2023, doi: 21.1106.TP.20230207.0901.005.
- XU B Y, QIN T, WEI W, et al. improved honey badger optimization algorithm based on multi-strategies[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2023 doi: 21.1106.TP.20230207.0901.005.
- [18] 马巧巧, 董黎刚, 蒋献. 面向SDWSN的分布式高效节能分簇路由算法[J]. 电信科学, 2023, 39(3): 100-114.
- MA Q Q, DONG L G, JIANG X. Distributed high-efficiency entropy energy-saving clustering routing algorithm for SDWS[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(3): 100-114.
- [19] 黄仁季, 叶清, 吴倩. 无线传感器网络节点位置隐私保护研究[J]. 网络与信息安全学报, 2017, 3(11): 59-67.
- HUANG R J, YE Q, WU Q. Research of location privacy protection in wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2017, 3(11): 59-67.

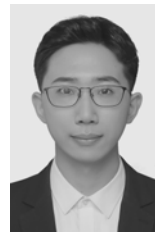
## [作者简介]



杨靖(1973-), 男, 贵州贵阳人, 博士, 贵州大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网技术及应用。



徐碧阳(1999-), 女, 山西霍州人, 贵州大学硕士生, 主要研究方向为无线传感网络路由技术。



李维正(1998-), 男, 河南商丘人, 许继电气股份有限公司助理产品设计师, 主要研究方向为物联网、新能源。



李伟(1977-), 男, 土家族, 贵州德江人, 博士, 贵州大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为蔬菜学。

朱兆强(1970-), 男, 贵州遵义人, 中国电建集团贵州工程有限公司高级工程师, 主要研究方向为动力工程。

覃涛(1980-), 男, 贵州铜仁人, 贵州大学讲师, 主要研究方向为嵌入式系统。