

基于多组分混合物扩散的无线传感器网络路由算法

李建坡¹, 何 敏¹, 于廷文², 杨月华¹

(1. 东北电力大学 计算机学院, 吉林省 吉林市 132012; 2. 广东省数字电网技术企业重点实验室 南方电网数字电网研究院有限公司, 广州 510000)

摘 要:为抑制无线传感器网络(WSN)能量空洞的形成和发展,均衡能量消耗和空洞分布,系统分析了空洞边缘存活区内节点密度、节点剩余能量和数据传输量以及多能量空洞距离等参数对能量空洞产生和发展的影响;为客观描述能量空洞特性,提出了能量空洞、融合能量空洞、空洞边缘域、空洞距离等一系列定义,借鉴多组分液体混合物扩散理论,通过计算能量空洞的扩散角度和扩散速度,构建了能量空洞演化模型。在此基础上,从基于能量空洞扩散系数的WSN分簇方法、抑制能量空洞的WSN数据传输优化方法和能量空洞边缘域内节点休眠调度策略三方面进行了研究。仿真结果表明:与LEACH、UCDTS和EHSRA等算法相比,本文算法在网络寿命、数据传输量、能耗均衡和空洞分布等方面均有显著提升。

关键词:信息与通信系统;无线传感器网络;能量空洞;动态分簇路由;多组分混合物扩散

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)12-4072-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240355

Wireless sensor network routing algorithm based on diffusion of multi-component mixtures

LI Jian-po¹, HE Min¹, YU Ting-wen², YANG Yue-hua¹

(1. School of Computer Science, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. Digital Grid Research Institute, China Southern Power Grid, Guangdong Provincial Key Laboratory of Digital Grid Technology, Guangzhou, 51000, China)

Abstract: To inhibit the formation and development of energy holes in wireless sensor networks (WSNs) and to equalize the energy consumption and hole distribution, the effects of parameters such as node density, node residual energy, and data transmission within the survival zone of hole edges, as well as the distance of multi-energy holes, on the generation and development of energy holes are systematically analyzed. To objectively describe the characteristics of energy holes, a series of definitions such as energy hole, fusion energy hole, hole edge domain, and hole distance are proposed. Drawing on the theory of diffusion of multi-component liquid mixtures, an energy hole evolution model is constructed by calculating

收稿日期: 2024-04-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61501106).

作者简介: 李建坡(1980-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 无线传感器网络, 5G 移动通信. E-mail: jianpoli@163.com

通信作者: 杨月华(1983-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 物联网协议, 智能信息处理. E-mail: yyh0504@126.com

the diffusion angle and diffusion velocity of energy holes. On this basis, the WSN clustering method based on the diffusion coefficient of the energy hole, the WSN data transmission optimization method to suppress the energy hole, and the node dormant scheduling strategy in the edge domain of the energy hole are studied. Simulation results show that the proposed algorithm has significant improvement in terms of network lifetime, data transmission, energy equalization, and hole distribution compared with LEACH, UCDS, and EHSRA algorithms.

Key words: communication and information systems; wireless sensor networks; energy hole; dynamic cluster routing; diffusion of multi-component mixtures

0 引言

能耗均衡是无线传感器网络(WSN)研究的关键问题之一^[1,2],对于提升网络工作效率和延长寿命至关重要。通过分析能量空洞的演化过程,并据此制订有效的分簇路由策略^[3,4],具有重要的研究价值和实际应用意义^[5]。

文献[6,7]阐述了能量空洞的形成及对网络数据传输的影响;由于汇聚节点附近的节点流量负载相对较大,加快了空洞形成^[8,9];网络中节点低密度区域以及数据量大的节点由于承担了更多的转发任务,容易形成能量空洞^[10];文献[11]研究了节点能量消耗与传输半径间的关系,并分析了对能量空洞形成的影响;文献[12]基于死亡节点和存活节点的分布规律以及数量变化,研究能量空洞的时间和空间演化,并提出了一系列能量空洞定义;簇头节点由于需要承担更多的转发任务,加快能量消耗速度,进而影响能量空洞的形成^[13];军用EHP缓解算法^[14]考虑剩余能量、节点到汇聚节点距离等参数之间的权重比,优先选择远离汇聚节点的簇头;文献[15]针对多层网络结构下的路由协议研究,簇头节点数量在朝汇聚节点的方向逐层增加,减轻汇聚节点周围负载;EAUCA协议^[16]在簇间数据转发中区分中继节点和簇头作用,节点度较低的节点负责将数据中继至基站。CDEIR协议^[17]通过有向生成树识别拥塞节点,并通过备用路径避免拥塞;利用传感器节点参数值对中继节点进行优先级排序传输^[18];文献[19]以40%的节点剩余能量为阈值,优化簇头调度;文献[20,21]中对于重叠覆盖部署的节点,设置簇内感知节点工作时重叠节点休眠的调度机制。

在WSN路由算法的相关研究中,对能量空洞特性的分析通常是片面的,并且缺乏对网络整体演化过程的深入研究。针对这一问题,提出了一个基于液体扩散理论的能量空洞演化模型。基于此模

型,设计了基于多组分混合物扩散的无线传感器网络路由算法(Wireless sensor network routing algorithm based on diffusion of multi-component mixtures, RADMCM),该算法包括分簇方法、簇间及簇内的数据传输策略以及节点休眠调度策略, RADMCM算法旨在有效抑制能量空洞的产生和扩散,从而延长网络的生命周期并提高网络性能。

1 能量空洞动态演化模型

1.1 能量空洞特性分析

通过综合分析能量空洞的产生和扩散情况,逐层分析死亡节点位置和数量的变化,提出了一系列描述能量空洞相关状态的基本定义,具体定义如下所示。

定义1 当网络中某区域出现两个或者两个以上死亡节点,且相邻死亡节点间的最小跳数小于等于2,距离小于等于节点的通信半径时,死亡节点及死亡节点间传输路径上的存活节点共同构成一个能量空洞,用 H_h 表示。

图1是网络中某个区域的节点分布情况。死亡节点 D_1 和 D_2 相邻之间跳数为2,那么 D_1 和 D_2 以及它们之间传输路径上的存活节点 N_2 形成一个能量空洞 $H_1=\{D_2, N_2, D_1\}$ 。死亡节点 D_3 和

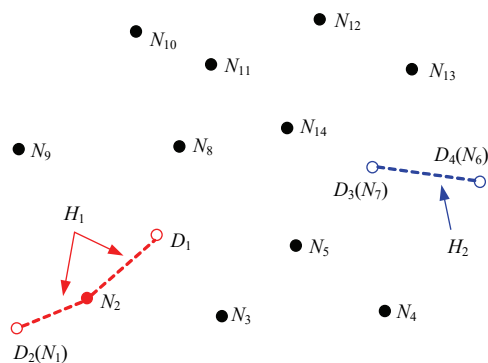


图1 能量空洞示意图

Fig. 1 Diagram of energy hole

D_4 相邻, 节点之间跳数为 1, 形成能量空洞 $H_2 = \{D_3, D_4\}$ 。

定义 2 融合能量空洞是当两个或者两个以上能量空洞产生交集时, 原来独立的能量空洞融合在一起, 形成融合能量空洞。

如图 2 所示, 在图 1 的基础上, 当原能量空洞 H_1 与 H_2 之间出现死亡节点时, 形成新的融合能量空洞 $H_3 = \{D_2, N_2, D_1, D_5, D_6, D_3, D_4\}$ 。

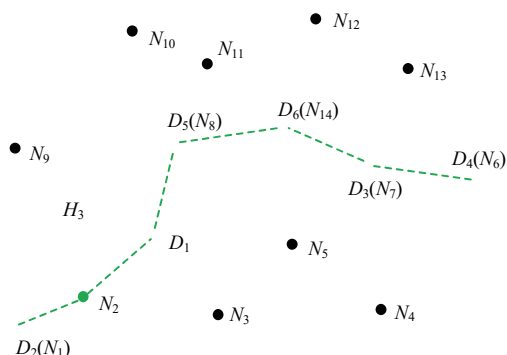


图 2 融合能量空洞示意图

Fig. 2 Diagram of the fusion energy hole

定义 3 在网络的某个能量空洞内, 如果存在一跳范围内的存活节点, 则这些节点称为空洞边缘死亡节点。同一个能量空洞中的所有空洞边缘死亡节点的一跳范围内所有节点组成了空洞边缘死亡区, 用 D_{H_i} 表示。

如图 3 所示, 在能量空洞 H_1 中, D_1 一跳范围内有存活节点 N_3 和 N_8 , D_2 一跳范围内有存活节点 N_2 , 则空洞边缘死亡节点为 D_2 和 D_1 , 空洞边缘死亡区 $D_{H_1} = \{D_2, N_2, D_1, N_3, N_8\}$ 。在能量空洞 H_2 中, D_3 一跳范围内有存活节点 N_5 , N_{14} 和 N_{13} , D_4 一跳范围内不存在存活节点, 空洞边缘死亡节点为 D_3 , 空洞边缘死亡区 $D_{H_2} = \{N_5, D_3, N_{14}, D_4, N_{13}\}$ 。

定义 4 空洞边缘存活节点是空洞边缘死亡

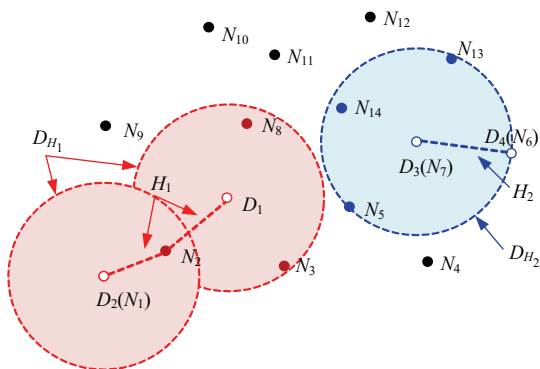


图 3 空洞边缘死亡区示意图

Fig. 3 Diagram of dead zone at the edge of the hole

节点在一跳传输范围内存在的存活节点。同一个能量空洞中的所有空洞边缘存活节点的一跳范围内存活节点组成了空洞边缘存活区, 用 S_{H_i} 表示。

如图 4 所示, 在能量空洞 H_1 中, 空洞边缘存活节点是 N_2 , N_3 和 N_8 。空洞边缘存活区 $S_{H_1} = \{N_2, N_3, N_5, N_8, N_{14}, N_{11}\}$ 。

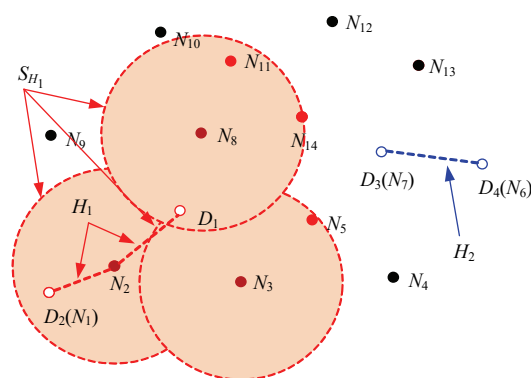


图 4 空洞边缘存活区示意图

Fig. 4 Diagram of the survival zone at the edge of the hole

定义 5 多能量空洞距离是指位于两个能量空洞的边缘死亡节点之间的最短距离, 用 d_{ef} 表示。

如图 5 所示, d_{1-3} 是 H_1 能量空洞边缘死亡节点 D_1 到 H_2 能量空洞边缘的死亡节点 D_3 之间的距离, d_{2-4} 是 H_1 能量空洞边缘死亡节点 D_2 到 H_2 能量空洞边缘的死亡节点 D_4 之间的距离, 取最短距离 d_{1-3} 为多能量空洞距离, d_{2-4} 为两个能量空洞的最大距离, 用 $d_{ef\max}$ 表示。

1.2 基于多组分液体混合物扩散的能量空洞动态演化模型

多组分液体混合物是指由两种或两种以上的化学物质组成的液体混合物。这些化学物质可以是不同种类, 也可以是不同浓度或比例。在多组分混合物中, 每种组分保持其独立性, 并且它们的性质在混合后仍然可以被区分出来, 使用下式计

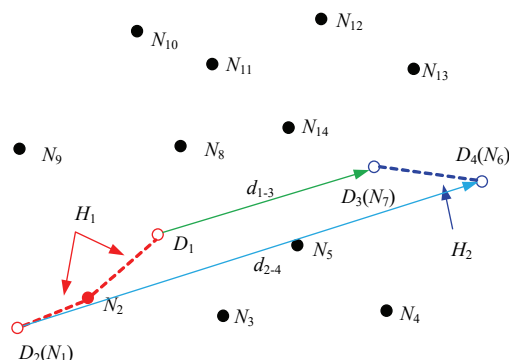


图 5 多能量空洞距离示意图

Fig. 5 Diagram of the distance between multi energy hole

算各组分的扩散通量^[22]。

$$J_l = -D_l \cdot \frac{\partial C_l}{\partial x} \quad (1)$$

式中: J_l 为第 l 个组分的扩散通量; D_l 为第 l 个组分的扩散系数; $\partial C_l / \partial x$ 为第 l 个组分的浓度梯度。

通过多组分液体混合物扩散现象类比分析能量空洞的动态演化过程。对模拟环境进行如下假设:

(1)当网络出现第一个死亡节点,类似向液体中滴入白色扩散物质。

(2)网络中死亡节点扩散是离散的,但液体扩散是连续的,因此,将由多个节点随机均匀部署一个无线传感器网络空间类比为多组分液体混合物。在这些混合物中,每个组分保持其个体特性。

(3)网络中的死亡节点和存活节点分别对应多组分液体混合物中的扩散物质和扩散介质。

1.2.1 单能量空洞扩散

通过将某种扩散介质滴入不同浓度的扩散物质中,类比分析单能量空洞融合的动态演化过程。在单能量空洞扩散系数计算公式中,空洞边缘存活节点个数较多时,采用较小的簇半径形成簇,此时,簇内节点数量较少,通信距离较短,能量空洞需要跨越较多的节点才能扩展到其他区域,能量空洞的扩散速度减慢。单能量空洞扩散系数能根据空洞边缘存活节点的能量情况自适应调整,当空洞边缘存活节点中剩余能量较低且能量消耗速率较高,将因能量迅速耗竭而更早地失去功能,能量空洞的扩散速度加快。空洞边缘存活节点的传输数据量大的节点会可能更早地失效,能量空洞的扩散速度加快。

单能量空洞扩散系数 K_{single} 根据空洞边缘存活区的节点密度、剩余能量、在上一轮中的能量消耗以及传输数据量因素设计,计算公式为:

$$K_{\text{single}} = \ln \left(\frac{N_{\text{alive}}}{N_{S_H}} \right) \cdot \left(\frac{E_{\text{max}}}{E_{S_H \text{ res}}} \cdot \frac{E_{S_H \text{ con}}}{\bar{E}_{\text{con}}} \right) \cdot \left| \ln \frac{R_{\text{avedatas}}}{R_{S_H \text{ data}}} \right| \quad (2)$$

式中: N_{alive} 为当前网络存活的节点数目; N_{S_H} 为空洞边缘存活区的邻居节点数目; E_{max} 为节点的初始能量; $E_{S_H \text{ res}}$ 为空洞边缘存活区的节点剩余能量; $E_{S_H \text{ con}}$ 为在上一轮中空洞边缘存活区的能量消耗; $\bar{E}_{\text{con}}$ 为所有节点在上一轮的平均能量消耗; R_{avedatas} 为网络平均传输数据量; $R_{S_H \text{ data}}$ 为在上一轮中空洞边缘存活区的传输数据量。

1.2.2 多能量空洞融合

通过向扩散介质的不同位置滴入不同浓度的

扩散物质类比分析多能量空洞融合的动态演化过程。多能量空洞融合扩散系数在单能量空洞扩散基础上,考虑空洞边缘存活节点距离多个失效区域较近,这些边缘存活节点负责收集区域数据以及跨越这些能量空洞区域维护通信连接,导致边缘节点在维持通信时消耗更多的能量,扩散速度变快。多能量空洞融合系数 K_{multiple} 计算公式为:

$$K_{\text{multiple}} = \ln \left(\frac{N_{\text{alive}}}{N_{S_H}} \right) \cdot \left(\frac{E_{\text{max}}}{E_{S_H \text{ res}}} \cdot \frac{E_{S_H \text{ con}}}{\bar{E}_{\text{con}}} \right) \cdot \left| \ln \frac{R_{\text{avedatas}}}{R_{S_H \text{ data}}} \right| \cdot \frac{d_{\text{eff max}}}{d_{\text{eff}}} \quad (3)$$

1.3 能量空洞扩散速度和方向

在完成一轮网络数据传输后,如果某个能量空洞区域内出现一个或多个死亡节点,更新空洞边缘死亡区。图6为网络中空洞扩散的示意图。

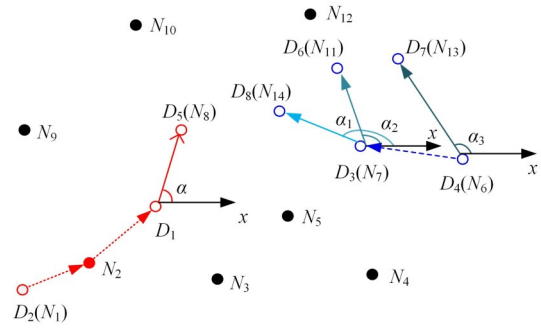


图6 空洞扩散示意图

Fig. 6 Diagram of hole diffusion

在一轮数据传输后,新的死亡节点 D_5 、 D_8 、 D_6 和 D_7 出现。已知两点坐标位置,可以通过反正切函数分别得出节点 D_1 到 D_5 的方向角度,即能量空洞 H_1 的扩散方向。 α_1 和 α_2 分别为上一轮中死亡节点 D_3 到其通信范围内新增死亡节点 D_8 和 D_6 的方向角度, α_3 为死亡节点 D_4 到其通信范围内新增死亡节点 D_7 的方向角度。计算能量空洞 H_2 的扩散方向:

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} + \frac{1}{3} \cdot \alpha_3 \right) \quad (4)$$

对于空洞边缘死亡区出现多个死亡节点,根据下式计算能量空洞的扩散方向角度 θ_h :

$$\theta_h = \frac{1}{g} \left(\frac{\sum_{i=1}^{u_1} \alpha_i}{\frac{u_1}{v} \cdot \frac{1}{u_1}} + \frac{\sum_{j=1}^{u_2} \alpha_j}{\frac{u_2}{v} \cdot \frac{1}{u_2}} + \dots + \frac{\sum_{z=1}^{u_g} \alpha_z}{\frac{u_g}{v} \cdot \frac{1}{u_g}} \right) = \frac{1}{g \cdot v} \left(\sum_{i=1}^{u_1} \alpha_i + \sum_{j=1}^{u_2} \alpha_j + \dots + \sum_{z=1}^{u_g} \alpha_z \right) \quad (5)$$

式中: g 为上一轮空洞边缘死亡节点个数; v 为在

新一轮中,上一轮 g 个空洞边缘死亡节点周围新增死亡节点的个数; u_1 为第一个空洞边缘死亡节点新增死亡节点个数,如图 6 所示, D_3 周围新增 2 个死亡节点; α_i 为上一轮第一个空洞边缘死亡节点到其新一轮中第 i 个新增死亡节点方向角度; u_2 为第二个空洞边缘死亡节点新增死亡节点个数; α_j 为上一轮第二个空洞边缘死亡节点到其新一轮中第 j 个新增死亡节点方向角度; u_v 为第 g 个空洞边缘死亡节点新增死亡节点个数; α_z 为上一轮第 v 个空洞边缘死亡节点到其新一轮中第 z 个新增死亡节点方向角度。

根据液体扩散理论,使用下式计算能量空洞的扩散速度 v_h :

$$v_h = \begin{cases} \frac{d_{\Delta t}}{\Delta t} \cdot K_{\text{single}}, & \text{单能量空洞} \\ \frac{d_{\Delta t}}{\Delta t} \cdot K_{\text{multiple}}, & \text{多能量空洞} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $d_{\Delta t}$ 为上一轮空洞边缘死亡区中心位置到新一轮空洞边缘死亡节点的最远距离。

如图 7 所示, $d_{\Delta t}$ 为边缘死亡区中心位置 O 到 D_8 的距离; Δt 为网络一轮数据传输时间。

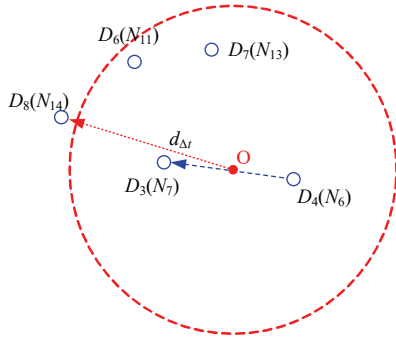


图 7 空洞扩散距离示意图

Fig. 7 Diagram of hole diffusion distance

通过构建能量空洞动态演化模型,能够全面呈现整个网络中节点的实时状态、能耗分布、空洞变化趋势等关键信息,从而更加准确地制订能量空洞抑制策略。

2 抑制能量空洞的 WSN 分簇方法

2.1 簇头选取方法

当网络没有出现死亡节点时,结合前面提到的单能量空洞扩散系数,充分考虑能耗均衡性。出现死亡节点后,考虑死亡节点区域位置,降低空洞边缘区域节点成为簇头的概率。没有出现死亡节点时的簇头选取概率 P 表示为:

$$P = \max \left(\frac{\eta_1}{K_{\text{single}}} + (1 - \eta_1) \cdot \frac{d_{\text{toBS-MAX}} - d_{\text{toBS}}}{d_{\text{toBS-MAX}} - d_{\text{toBS-MIN}}}, p_{\min} \right) \quad (7)$$

式中: η_1 为单能量空洞扩散系数的权重,取 $\eta_1 = 0.5$; $d_{\text{toBS-MAX}}$ 为所有节点到基站距离的最大值; $d_{\text{toBS-MIN}}$ 为所有节点到基站距离的最小值; d_{toBS} 为节点到基站距离; $p_{\min}$ 为最小选举收敛概率。

当网络出现死亡节点后,单能量空洞扩散系数中 N_{S_H}/N_{alive} 不能精确反映待选为簇头的邻居节点前后轮变化情况,需要判断待选为簇头节点周围是否新增了死亡节点,是否位于空洞的边缘域。网络出现死亡节点后的簇头选取概率 P_H 表示为:

$$P_H = \max \left(\frac{\eta_1 \cdot N_R}{K_{\text{single}} \cdot N_{R-1}} + (1 - \eta_1) \cdot \frac{d_{\text{toBS-MAX}} - d_{\text{toBS}}}{d_{\text{toBS-MAX}} - d_{\text{toBS-MIN}}}, p_{\min} \right) \quad (8)$$

式中: N_R 为在第 R 轮时的邻居节点数目; N_{R-1} 为在第 $R-1$ 轮时的邻居节点数目。

算法基于多个关键影响因素进行迭代选举,传感器节点之间通过广播信息的方式进行竞争,以选举出最适合担任簇头的节点。

2.2 簇半径计算方法

在没有出现死亡节点时,簇半径计算考虑节点到基站距离和节点分布密度,推迟空洞现象的出现。出现死亡节点后,考虑死亡节点区域位置,减小空洞边缘区域节点簇半径。网络没有出现死亡节点时的簇半径 R 表示为:

$$R = \left(1 + \frac{d_{\text{CHtoBS}} - \bar{d}_{\text{CHtoBS}}}{\eta_2 \cdot (d_{\text{CHtoBS-MAX}} - d_{\text{CHtoBS-MIN}})} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_{\text{CH-neighbor}}}{\eta_3 \cdot N_{\text{alive}}} \right) \cdot R_L \quad (9)$$

式中: d_{CHtoBS} 为簇头到基站的距离; $\bar{d}_{\text{CHtoBS}}$ 为所有簇头到基站距离的平均值; $d_{\text{CHtoBS-MAX}}$ 为所有簇头到基站距离的最大值; $d_{\text{CHtoBS-MIN}}$ 为所有簇头到基站距离的最小值; η_2 为簇头到基站距离的权重, η_3 为簇头周围存活节点密度的权重,取 $\eta_2 = 0.5$, $\eta_3 = 0.5$; $N_{\text{CH-neighbor}}$ 为簇头的邻居节点数目; R_L 为均匀分簇时的簇半径。

当簇头的邻居节点数目减少时, $N_{\text{CH-neighbor}}/N_{\text{alive}}$ 不能精确反映簇头的邻居节点前

后轮变化情况。需要判断待选为簇头节点周围是否新增了死亡节点,是否位于空洞的边缘域。网络出现死亡节点后的簇半径 R_H 表示为:

$$R_H = \left(1 + \frac{d_{CHtoBS} - \bar{d}_{CHtoBS}}{\eta_2 \cdot (d_{CHtoBS-MAX} - d_{CHtoBS-MIN})} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_{R-1}}{\eta_3 \cdot N_R} \right) \cdot R_L \quad (10)$$

通过综合考虑网络是否出现死亡节点的两种情况,在选取簇头并计算簇半径后,簇头将根据计算得到的簇半径广播当选消息。一旦普通节点收到簇头发出的广播当选消息,它们会选择信号强度最大的簇头,请求加入该簇,并在成功加入后广播加簇消息,从而完成整个无线传感器网络的动态分簇过程。抑制能量空洞的 WSN 分簇流程如图 8 所示。

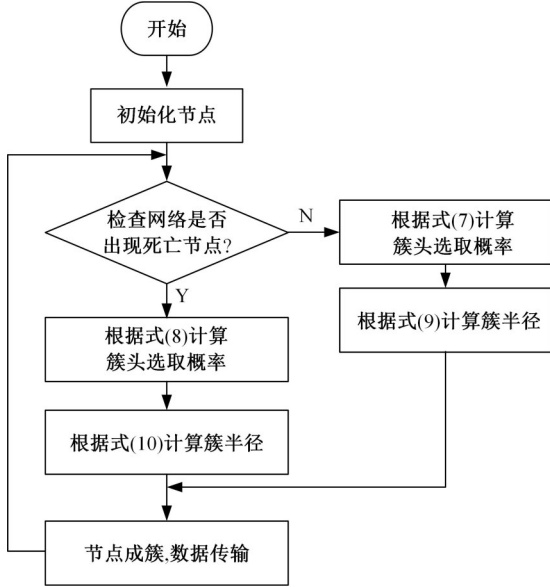


图 8 抑制能量空洞的 WSN 分簇流程图

Fig. 8 Flowchart of WSN clustering for energy hole suppression

3 抑制能量空洞的 WSN 数据传输优化方法

3.1 簇内节点的数据传输优先度策略

在簇头节点给簇内节点分配传输顺序时存在没有充分考虑节点的剩余能量以及节点是否位于空洞边缘域的问题。为解决这些问题,在簇内数据传输阶段提出了簇内节点传输优先度的概念,簇头节点根据簇内节点的剩余能量以及节点度的变化率计算簇内节点的数据传输优先度,第 i 个簇内第 j 个簇内节点的数据传输优先度 P_{ij} 计算公式为:

$$P_{ij} = \eta_4 \cdot \left(1 - \frac{E_{j\text{res}}}{E_{\max}} \right) + (1 - \eta_4) \cdot \frac{N_{R-1}}{N_R} \quad (11)$$

式中: η_4 为节点剩余能量权重,取 $\eta_4 = 0.5$; $E_{j\text{res}}$ 为簇内节点剩余能量。

通过按照簇内数据传输优先度的大小分配时隙,可以确保数据传输优先度较高的节点能够获得优先时隙。在分配到的时隙内,簇内节点将数据传输给簇头节点,完成整个簇内数据传输过程。

3.2 基于中继节点转发代价的簇间传输策略

在簇间数据传输阶段,簇头节点从其邻居簇头节点中选择下一跳作为中继节点。为了优化传输路径并提高传输速率,提出了簇头节点 m 到其邻居簇头节点 n 的簇间传输方案。若节点 m 到基站的距离大于节点 m 的通信半径,需要选择中继节点进行数据传输。中继节点应当具备较高的能量,有效路径最短。中继节点转发代价 f_{mn} 的计算公式如下:

$$f_{mn} = \begin{cases} \left(1 - \frac{E_{n\text{res}}}{E_{\max}} \right) \cdot \left(\frac{d_{mtoBS} - d_{toBS-MIN}}{d_{toBS-MAX} - d_{toBS-MIN}} \right) \cdot \left(\frac{N_{R-1}}{N_R} \right), & d_{mtoBS} \geq d_{ntoBS} \\ 2E_{\max}, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $E_{n\text{res}}$ 为待选为下一跳的簇头节点的剩余能量; d_{mtoBS} 为待寻找下一跳的簇头节点到基站的距离; d_{ntoBS} 为待选为下一跳节点的簇头节点到基站的距离。

簇头节点在完成簇内数据传输后,对收集到的数据进行压缩融合。之后将压缩融合后的数据转发给中继节点直到基站,实现簇间数据传输。每一轮数据传输流程图如图 9 所示。

3.3 能量空洞边缘存活区内节点休眠调度策略

能量空洞边缘存活区内的节点可能在同一时间进行工作,导致采集的数据不仅可能存在冗余,还可能导致空洞边缘存活节点过早耗尽能量而死亡,进而可能导致空洞区域的扩大。为了解决上述问题,基于能量空洞的特性与演化规律,选择性地在低能量区和能量空洞边缘区域进行节点休眠。能量空洞边缘存活区内节点休眠时间 T_{S_H} 计算公式如下:

$$T_{S_H} = K_{\text{multiple}} \cdot \frac{N_{R-1}}{N_R} \quad (13)$$

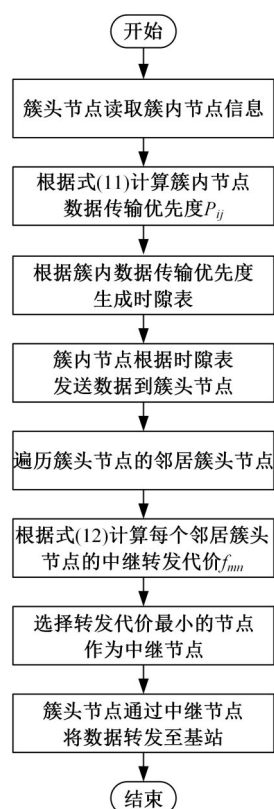


图 9 每轮数据传输流程图

Fig. 9 Flowchart for each round of data transfer

4 仿真实验与分析

4.1 仿真实验环境

选择在 Linux 环境下使用 NS2 平台进行仿真验证。仿真中设置网络内存在 100 个传感器节点,随机分布在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的正方形区域内,网络中每个节点的初始能量 $E_{\max} = 2\text{ J}$ 。为验证所提 RADMCM 算法的有效性,将本文算法与 LEACH^[23]、UCDTS^[24]、EHSRA^[12] 算法进行比较。

4.2 仿真结果分析

图 10 为 RADMCM 与 LEACH、UCDTS 和 EHSRA 算法在存活节点数量方面的对比图。横轴表示网络的工作时间,纵轴表示存活节点的数量。在簇头选举的过程中,因为判断网络中是否存在死节点,所以导致网络加剧能量消耗,并在第 230 轮中生成网络中的第一个死节点,相较于 LEACH 算法, RADMCM 算法的第一个死节点出现时间延迟了约 9.52%,与 UCDTS 和 EHSRA 算法相比, RADMCM 算法分别提前了约 47.73% 和 46.52%。RADMCM 算法通过判断网络是否存在死亡节点,以及节点是否位于空

洞边缘区域,避免位于空洞边缘区域节点过早死亡均衡网络能耗,成功延长了网络的生命周期,分别比 LEACH、UCDTS 和 EHSRA 算法延长 132.43%、45.45% 和 20.23%。

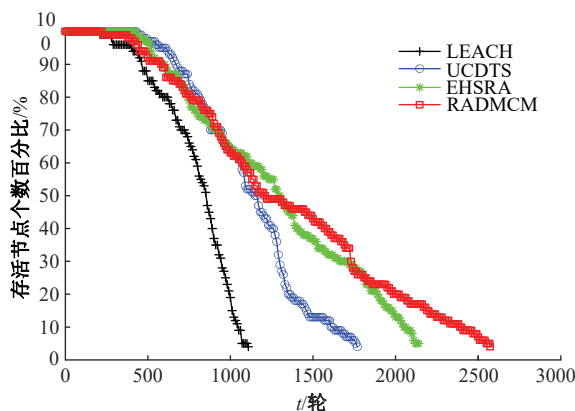


图 10 算法存活节点百分比的比较

Fig. 10 Comparison of the percentage of surviving nodes in algorithms

图 11 为 RADMCM、LEACH、UCDTS 和 EHSRA 算法在数据传输量方面的比较。横轴表示网络的工作时间,纵轴表示成功发送的数据包数量。在动态分簇的过程中,综合考虑了网络中是否存在死亡节点、单一能量空洞扩散的影响因素以及节点是否位于空洞边缘域,进行了簇头的选取和簇半径的计算,以及提出了簇间和簇内数据传输方法和节点休眠调度策略,以减缓存活节点的死亡,延长网络寿命,从而增加了成功发送的数据包数量。因此,与 LEACH、UCDTS 和 EHSRA 算法相比, RADMCM 算法分别提高了 24.6%、36.3% 和 6.26% 的数据传输量。

为客观分析能量空洞特性,利用统计学中的

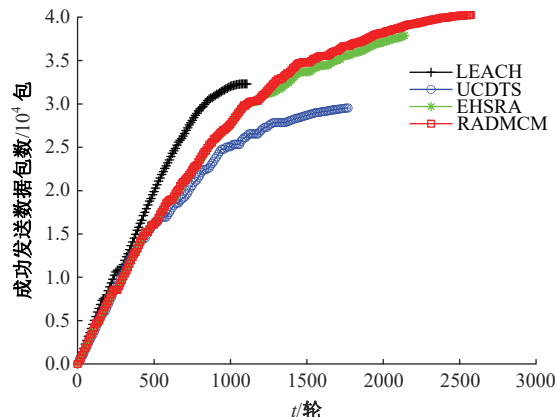


图 11 算法成功发送数据量比较

Fig. 11 Comparison of the amount of data successfully sent by the algorithms

一些概念对出现不同数量死亡节点时节点剩余能量值进行详细分析,包括平均剩余能量、能量极差、能量标准差。分析结果如表 1、表 2 和表 3 所示。表中加粗的部分表示本文算法性能对比其他算法有所提升。在死亡节点占 20% 和 30% 时,RAD-MCM 算法平均剩余能量低于 EHSRA 的值,但 RAD-MCM 算法的能量极差比 EHSRA 的值小,说明在判断是否出现死亡节点耗费能量,但由于在空洞边缘区域提出节点休眠概率,降低选为簇头的概率,减少成簇半径以及合理的簇内簇间的数据传输策略,网络能耗分布均衡。在死亡节点占 40% 和 50% 时,RAD-MCM 算法平均剩余能量高于 EHSRA 的值,RAD-MCM 算法的能量极差比 EHSRA 的值小,说明判断是否出现死亡节点,对于网络的中后期阶段,准确判断网络是否

表 1 算法在出现不同数量死亡节点时的平均剩余能量
Table 1 Average remaining energy of the algorithm when different numbers of dead nodes occur

死亡节点占比/%	LEACH	UCDTS	EHSRA	RAD-MCM
10	0.841 4	0.975 2	1.201 2	1.232 9
20	0.610 4	0.776 3	1.130 0	1.127 2
30	0.514 5	0.648 2	1.093 8	1.057 0
40	0.409 0	0.542 1	0.868 8	0.976 2
50	0.257 3	0.399 5	0.855 9	0.992 1

表 2 算法在出现不同数量死亡节点时的能量极差
Table 2 Extremely poor energy of the algorithm when different numbers of dead nodes occur

死亡节点占比/%	LEACH	UCDTS	EHSRA	RAD-MCM
10	1.306 9	1.477 5	1.581 9	1.504 1
20	1.190 2	1.329 9	1.488 1	1.350 8
30	0.999 5	1.265 6	1.418 5	1.226 0
40	0.933 8	1.172 1	1.290 5	1.057 4
50	0.704 0	1.075 3	1.227 0	0.676 1

表 3 算法在出现不同数量死亡节点时的能量标准差
Table 3 Energy standard deviation of the algorithm when different numbers of dead nodes occur

死亡节点占比/%	LEACH	UCDTS	EHSRA	RAD-MCM
10	0.439 6	0.513 2	0.597 7	0.469 8
20	0.372 4	0.472	0.618 6	0.432 2
30	0.293 8	0.424 9	0.600 4	0.333 6
40	0.248 4	0.372 8	0.529 1	0.317 5
50	0.175 0	0.290 1	0.507 9	0.105 4

存在死亡节点,成为维持网络能耗均衡策略中不可或缺的重要组成部分。RAD-MCM 算法的能量标准差小于 UCDTS 和 EHSRA 算法,稍微大于 LEACH 算法,当能量标准差处于较低水平时,这表明经过 RAD-MCM 算法优化后的网络节点剩余能量分布更趋均衡,即节点间的能量差异较小。

图 12~图 15 分别是 RAD-MCM 算法与 LEACH、UCDTS 和 EHSRA 算法在死亡节点占 20%、30%、40% 和 50% 时的等高线图对比图。等高线图是通过连接具有相同能量水平的节点而形成的一系列曲线,每一条曲线代表相同的节点能量水平,图中颜色条的值表示节点剩余能量百分比,该值越大和图中颜色越深说明节点剩余能量越高,图中白色区域内的节点是死亡或即将死

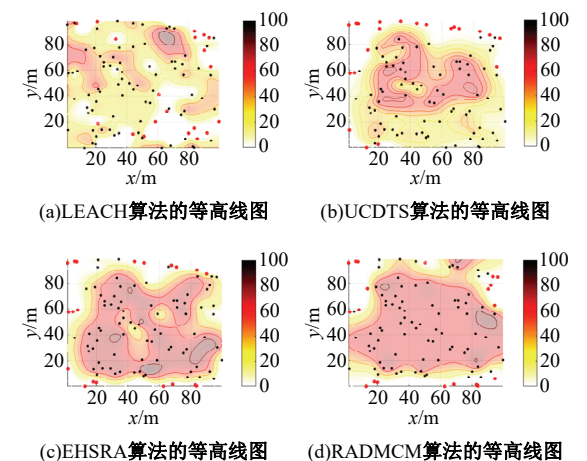


图 12 不同算法在死亡节点占 20% 的等高线图对比图
Fig. 12 Comparison of contour plots of different algorithms at 20% of dead nodes

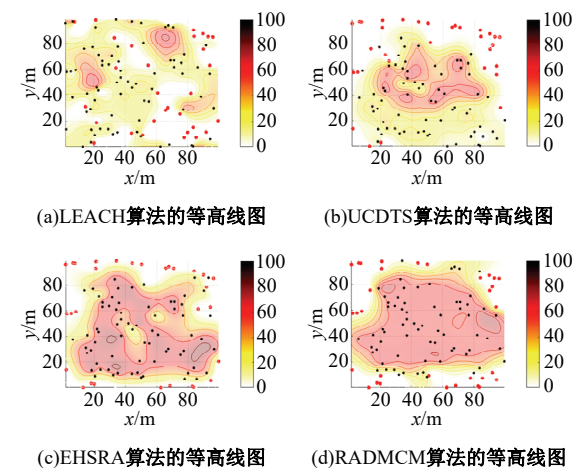


图 13 不同算法在死亡节点占 30% 的等高线图对比图
Fig. 13 Comparison of contour plots of different algorithms at 30% of dead nodes

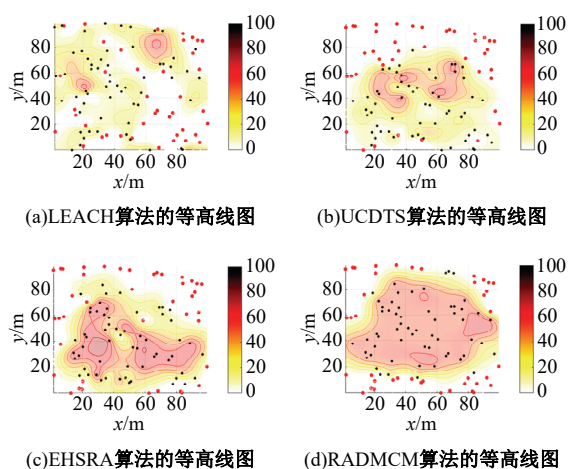


图 14 不同算法在死亡节点占 40% 的等高线图对比图

Fig. 14 Comparison of contour plots of different algorithms at 40% of dead nodes

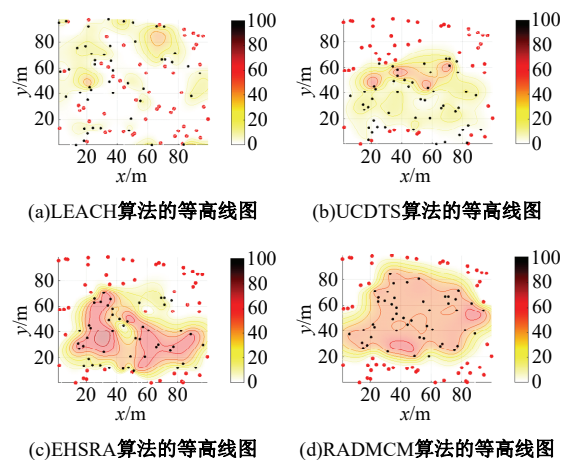


图 15 不同算法在死亡节点占 50% 的等高线图对比图

Fig. 15 Comparison of contour plots of different algorithms at 50% of dead nodes

亡的节点。当死亡节点占 40% 时, EHSRA 算法保持可以通信区域占网络面积的 32%, RAD-MCM 算法还保持可以通信区域占网络面积的 60%, 当死亡节点占 50% 时, LEACH、UCDTS 算法已经接近死亡, 存活节点分散。EHSRA 算法虽然存活节点能量很多, 但通信区域占网络面积的 28%, 相比之下, RADMCM 算法通信区域占网络面积的 52%。RADMCM 算法与其他 3 种算法相比, 前期死亡节点分布位于网络边缘区域, 在网络中间区域节点能量梯度维持在 10% 以内, 表明能量水平的变化相对平缓。RADMCM 算法在维持能耗均衡, 抑制能量空洞扩大方面取得了一定的效果。

表 4 是 4 种算法在出现不同数量死亡节点时的能量空洞数量及空洞最大值, 表中例如 5(4) 的

含义是存在 5 个能量空洞, 且所有空洞中最大的范围是存在 4 个死亡节点。当出现 10% 的死亡节点时, UCDTS 算法能量空洞区域最小, RAD-MCM 算法空洞内最大死亡节点数量比 UCDTS 算法少 4 个。当出现 20% 的死亡节点时, RAD-MCM 算法比 EHSRA 算法能量空洞个数多 1 个, 空洞内最大死亡节点数量相同。如图 12 的 (c) 和 (d) 所示, 可以知道因为 RADMCM 算法出现融合空洞, 导致能量空洞数量减少。当出现 30% 的死亡节点时, RADMCM 算法能量空洞数量比 UCDTS 算法多 1 个, 且空洞内最大死亡节点数量最少, 如图 13 的 (b) 和 (d) 所示, UCDTS 算法网络上半区域形成巨大的能量空洞, 导致能量空洞数量最小, 但空洞内死亡节点数量最大。在出现 40%~50% 的死亡节点过程当中, RADMCM 算法能量空洞数量和空洞内最大死亡节点数量最少。在网络的运行过程中, 无论是能量空洞的数量还是每个空洞内因能量耗尽而死亡的节点数量, 都维持在较低的水平, 说明 RADMCM 算法通过有效的路由算法和节点调度策略, 显著延长了网络的生命周期。说明 RADMCM 算法在分簇阶段根据网络是否出现死亡节点制订不同的分簇方法, 分阶段考虑簇内簇间数据传输策略, 以及重点考虑空洞边缘域死亡节点休眠情况, 在网络中后期, 延缓能量空洞扩散速度和维持网络相对均衡方面表现出色。

表 4 不同算法在出现不同数量死亡节点时的能量空洞情况

Table 4 Energy holes for different algorithms in the presence of different number of dead nodes

死亡节点占比/%	LEACH	UCDTS	EHSRA	RADMCM
10	5(4)	3(8)	5(3)	5(4)
20	8(5)	3(17)	4(6)	5(6)
30	9(13)	3(27)	4(17)	4(11)
40	8(21)	6(33)	4(29)	3(20)
50	7(29)	5(36)	5(33)	2(27)

5 结束语

本文建立了基于多组分液体混合物扩散的能量空洞动态演化模型, 反映了能量空洞在不同发展阶段的状态, 用于实时监测 WSN 中节点的能量消耗趋势。在此基础上, 基于多组分混合物扩散的无线传感器网络路由算法, 首先, 更准确地调整簇的结构, 以适应网络中可能出现的不同异常

情况。其次,解决了簇内传输顺序以及簇间节点接入冲突问题。最后,解决了能量空洞边缘存活区内节点休眠调度问题。仿真结果显示,RAD-MCM算法在网络寿命、数据传输、能耗均衡和空洞分布等方面均有显著改善。

参考文献:

- [1] Li J P, Li G C, Chu S C, et al. Modified parallel tunicate swarm algorithm and application in 3D WSNs coverage optimization[J]. *Journal of Internet Technology*, 2022, 23(2): 227-244.
- [2] 李建坡, 张庆华, 张展图, 等. 基于拥塞控制的无线传感器网络能耗优化路由算法[J]. *东北电力大学学报*, 2020, 40(4): 69-74.
Li Jian-po, Zhang Qing-hua, Zhang Zhan-tu, et al. Congestion control and energy optimization routing algorithm for wireless sensor networks[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2020, 40(4): 69-74.
- [3] 李建坡, 刘琨, 朱伟华. 基于链路质量优化的无线传感器网络数据传输算法[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2024, 54(9): 2668-2675.
Li Jian-po, Liu Kun, Zhu Wei-hua. Link quality optimization based data transmission algorithm for wireless sensor network[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2024, 54(9): 2668-2675.
- [4] Basumatary H, Debnath A, Deb Barma M K, et al. Performance analysis of centroid-based routing protocol in wireless sensor networks[J]. *IETE Technical Review*, 2024, 41(2): 187-199.
- [5] Dholey M K, Sinha D, Mukherjee S, et al. MSHRP: mobile sink based limited hop routing protocol for wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2023, 133(1): 93-118.
- [6] 刘涛, 庞博. 能耗均衡的低功耗自适应集分区路由改进算法[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(31): 13447-13453.
Liu Tao, Pang Bo. Improved LEACH routing algorithm based on partitioning and energy consumption balance[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(31): 13447-13453.
- [7] Edla D R, Lipare A, Parne S R. Load balanced cluster formation to avoid energy hole problem in WSN using fuzzy rule-based system[J]. *Wireless Networks*, 2023, 29(3): 1299-1310.
- [8] Dogra R, Rani S, Sharma B, et al. A novel dynamic clustering approach for energy hole mitigation in Internet of Things-based wireless sensor network[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2021, 34(9): No. e4806.
- [9] Aravind K, Maddikunta P K R. Dingo optimization based cluster based routing in internet of things[J]. *Sensors*, 2022, 22(20): No. 8064.
- [10] Rao K R, Rahman M Z U, Satamraju K P, et al. Genetic algorithm for cross-layer-based energy hole minimization in wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2022, 6(12): 1-4.
- [11] Nayak C K, Das S. Minimization of energy holes with lively bonding and the division of coverage[J]. *International Journal of e-Collaboration (IJeC)*, 2022, 18(2): 1-14.
- [12] Li J P, Han Q, Wang W T. Characteristics analysis and suppression strategy of energy hole in wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2022, 135: No. 102938.
- [13] Zhao X J, Xiong X X, Sun Z, et al. An immune clone selection based power control strategy for alleviating energy hole problems in wireless sensor networks[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2020, 11: 2505-2518.
- [14] Behera T M, Mohapatra S K. A novel scheme for mitigation of energy hole problem in wireless sensor network for military application[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2021, 34(11): No. e4886.
- [15] Lipare A, Edla D R, Dharavath R. Energy efficient routing structure to avoid energy hole problem in multi-layer network model[J]. *Wireless Personal Communications*, 2020, 112(4): 2575-2596.
- [16] Chauhan V, Soni S. Energy aware unequal clustering algorithm with multi-hop routing via low degree relay nodes for wireless sensor networks[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2021, 12: 2469-2482.
- [17] Prakash P S, Nagaraju K, Reddy A V, et al. CDEIR: intelligent routing for efficient wireless sensor networks using BUG algorithm[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 72895-72910.
- [18] Nagadivya S, Manoharan R. Energy efficient fuzzy logic prediction-based opportunistic routing protocol (EEFLPOR) for wireless sensor networks[J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2023, 16(5): 2089-2102.
- [19] Dogra R, Rani S, Sharma B, et al. A novel dynamic

- clustering approach for energy hole mitigation in Internet of Things-based wireless sensor network[J]. International Journal of Communication Systems, 2021, 34(9): No. e4806.
- [20] 孟建军, 王建明, 李德仓, 等. 铁路沿线线型无线传感器网络节点部署策略[J]. 传感技术学报, 2021, 34(6): 829-834.
Meng Jian-jun, Wang Jian-ming, Li De-cang, et al. The deployment strategy of wireless sensor network nodes along the railway[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(6): 829-834.
- [21] 桂易琪, 叶子鉴, 陈永康. 一种基于区域划分和内容流行度的NDN缓存策略[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2023, 44(2): 186-193.
Gui Yi-qi, Ye Zi-jian, Chen Yong-kang. Cache strategy of named-data networking based on community nodes division and content popularity[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2023, 44(2): 186-193.
- [22] 吴永胜, 王维德. 多组分液体混合物扩散系数及其计算[J]. 广东化工, 2010, 37(9): 152-153.
Wu Yong-sheng, Wang Wei-de. Diffusion coefficients in multicomponent liquid mixture and their calculation[J]. Guangdong Chemical Industry, 2010, 37(9): 152-153.
- [23] Lokhande M P, Patil D D. Enhancing the energy efficiency by LEACH protocol in the internet of things [J]. International Journal of Computational Science and Engineering, 2022, 25(1): 1-10.
- [24] Li J P, Dong Z Q. Uneven clustering and data transmission strategy for energy hole problem in wireless sensor networks[J]. Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2017, 8(2): 500-509.