

面向变电站环境的无线传感网络分簇路由算法

温开云¹, 赵洪山¹, 赵仕策^{2,3}

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 石家庄铁道大学河北省交通电力网智能融合技术与装备协同创新中心, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 当前无线传感器网络路由协议众多, 但没有充分考虑无线通信方式的传输距离、传感器所处环境的电磁干扰, 导致其无法应用在电力行业。提出一种计及传感节点密度、通信距离以及链路质量的无线传感网络路由策略。针对输变电场景传感器众多、不具备组网能力的问题, 提出利用计算能力较强的汇聚节点接收传感器信息, 并对其组网的解决方案。首先, 根据实际传感器部署位置, 通过密度可达原则及通信距离约束对传感节点进行合理分簇, 并为每个簇分配能量充足且具有一定计算能力的汇聚节点。然后, 结合汇聚节点之间的通信距离及链路质量, 构建汇聚节点网络的赋权有向图, 通过 Dijkstra 算法求解最优路径从而获得路由表。最后, 仿真结果表明, 在 50% 节点失效时, 所提算法的网络生存时间相较于低功耗自适应集簇分层协议、集中式自适应集簇分层协议以及改进型自适应集簇分层协议分别延长了 72.5%、82.8%、52.1%。此外, 在实验室搭建了简单的无线传感网络, 验证了算法的可行性。

关键词: 输变电场景; 无线传感网络; 路由算法; 链路质量

Clustering-based routing algorithm for wireless sensor networks in substation environments

WEN Kaiyun¹, ZHAO Hongshan¹, ZHAO Shice^{2,3}

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Hebei Provincial Collaborative Innovation Center of Transportation Power Grid Intelligent Integration Technology and Equipment, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Although there are many wireless sensor network (WSN) routing protocols, most fail to fully consider the effects of communication distance and electromagnetic interference in the sensor environment, making them unsuitable for power industry applications. This paper proposes a WSN routing protocol that considers sensor node density, communication distance, and link quality. Given the problem that numerous sensors in power transmission and substation scenarios do not have networking capability, a solution is proposed in which more powerful sink nodes are used to receive sensor data and establish the network. First, according to the actual sensor deployment location, clustering is performed according to the density-reachability principle and communication distance constraints, and each cluster is assigned a sink node with sufficient energy and certain computing capacity. Then, considering the communication distance and link quality between the sink nodes, a weighted directed graph of the sink node network is constructed, and the optimal routing paths are obtained using Dijkstra's algorithm to build the routing table. Finally, simulation results show that when 50% of nodes fail, the proposed algorithm extends network lifetime by 72.5%, 82.8%, and 52.1% compared with the classical low energy adaptive clustering hierarchy, centralized low energy adaptive clustering hierarchy, and improved low energy adaptive clustering hierarchy protocols, respectively. In addition, a simple WSN is built in the laboratory to verify the feasibility of the algorithm.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51277074).

Key words: transformer substation; wireless sensor network; routing algorithm; link quality

0 引言

智能电网实现的前提是完成电力基础设施的数字化, 即在主要电力设备上合理配置各种在线监测传感器, 以掌握电力设备真实的运行态势^[1]。无线传感网络(wireless sensor network, WSN)凭借自组织、低功耗、低成本的优势, 被广泛应用于环境监测、医疗保健及工业监测等领域^[2-4]。然而, 由于传感器节点能量有限, 如何充分有效利用有限资源, 设计高效的路由算法延长网络寿命是无线传感网络研究中的一个关键问题。

根据节点参与通信的方式, WSN 路由协议可分为平面路由协议和层次路由协议^[5]。在平面路由协议中, 当节点需要发送数据时, 需要以其他节点作为中继节点, 将数据转发至接收节点^[6]。虽然平面路由协议结构简单, 易于实现和维护, 但由于缺乏对通信资源的优化管理, 数据在传输过程中会产生大量的重复消息, 造成消息“内爆”, 导致节点能量快速耗尽, 影响网络稳定性和生存周期。因此, 平面路由协议不适用于电力行业中大规模无线传感器的组网^[7]。

层次路由协议是一种将大规模网络划分为不同层次的路由协议。低功耗自适应集簇分层协议(low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)是最早提出的分层路由算法之一^[8]。通过随机循环地选择簇头节点将整个网络的能耗负载分配到每个传感器节点。然而, 簇头选择完全随机, 导致能量较低的节点被选为簇头, 加速其死亡, 从而影响网络寿命。因此, 进一步提出了集中式自适应集簇分层协议(centralized low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH-C), 其中仅当节点能量高于网络平均剩余能量时, 才可能被选为簇头^[9]。文献[10]基于节点剩余能量, 并引入数据融合和多跳传输, 提出一种改进 LEACH 协议(improved low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH-IMP)。文献[11]利用节点剩余能量和簇内通信代价作为参数选择簇头, 使得簇头分布更加均匀。文献[12]考虑节点剩余能量、节点度、节点深度和传输功率 4 个标准构建网络拓扑。文献[13]建议将监控区域划分为多个分区, 对于每个分区, 利用 PEGASIS 算法选择簇头并通过最小生成树与基站进行通信。随着人工智能的不断发展, 元启发算法在无线传感器网络领域的应用日益广泛^[14-16]。文献[17]考虑节点能量和位置因素, 提出一种基于自组织映射的面向能量的聚类协议。文献[18]提出了一种适用于 WSN 的多目标灰狼优化智能路由机制, 以防止网络过早死亡。基于传统人工蜂群算法,

文献[19]引入簇头能量、簇头密度和簇头位置等因素, 提出一种改进人工蜂群算法选择簇头。虽然这些改进措施使得簇头选择更加合理, 但大量的计算任务不仅增加了节点计算复杂度, 而且通信开销也会变大。在面向传感器数量众多的实际输变电场景时, 上述算法仍然存在以下困难。

1) 现有算法假定所有传感节点都能够将数据以单跳方式传输至基站, 而当前无线通信技术如蓝牙、WIFI 等^[20], 受传输距离及带宽约束, 无法支撑节点与基站之间直接通信。

2) 根据算法复杂度要求, 每个传感节点都需具备一定的计算能力。而在输变电场景中, 监测区域较大、传感器较多, 为了节约成本, 传感器计算能力较低, 不具有组网的能力。

3) 没有考虑环境对通信质量的影响。由于电力设备长期处于高压的运行条件下^[21], 复杂多变的磁场可能会给链路质量带来一定的干扰, 影响整个网络的稳定性。

针对上述问题, 本文根据电力行业监测需求, 以变电站电气设备为监测对象, 提出一种计及传感器节点密度、通信距离及链路质量的无线传感网络分簇路由方法。主要贡献如下: 1) 改变传统先选簇首再分簇的方法, 提出一种先根据节点密度分簇, 再部署汇聚节点, 最后对汇聚节点组网的解决方案。2) 根据传感器节点分布密度, 提出一种适用于电力行业的改进基于密度的空间聚类算法, 解决簇首分布不均匀的问题; 3) 针对输变电环境电磁干扰问题, 通过构建以通信距离和链路质量为综合指标的有向图, 并基于 Dijkstra 算法求解最优传输路径, 提高传感网络的抗干扰能力。

1 网络模型

当前无线传感网络路由算法在模型建立时, 假设所有传感节点同构, 并在传感节点中随机选取簇头。而在变电站中, 传感器节点由于布线困难, 通常选择电池供电, 且用于接收传感器节点数据的汇聚节点需具备一定计算能力和充足的电能。因此, 传统无线传感网络路由协议不再适用于电力行业。

与传统无线传感网络组网步骤不同, 本文提出一种先分簇后部署簇头的适用于变电站环境的无线传感网络分簇路由算法。图 1 为变电站无线传感网络结构组成。首先对监测区域内的传感器节点进行分簇, 并根据通信距离最短原则为每个簇配置汇聚节点。为节约成本, 传感器计算能力较低, 只进行数据采集并以单跳的方式发送至汇聚节点, 不参与组网过程。然后对汇聚节点进行组网, 若某个汇聚

节点存在数据孤岛时，通过部署中继节点使其与最近的汇聚节点建立邻居关系。进而汇聚节点及中继节点之间通过多跳的方式将数据传输至边缘网关。最后，边缘网关将整个网络的数据通过 4G/5G 上传至监测云平台。

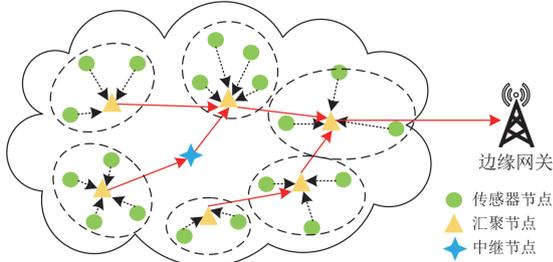


图 1 变电站 WSN 结构组成

Fig. 1 Composition of WSN structure in substation

根据整体方案描述，本文对面向变电站环境的无线传感网络提出一些假设条件：

- 1) 传感器节点不是随机分布的，而是根据实际变电站中电力设备监测需求进行部署，且在部署完成后均不再发生移动；
- 2) 所有传感器节点具有唯一的标识，且通信距离和能量有限，无法直接与基站直接通信；
- 3) 汇聚节点能量充足，具备一定的计算能力，能够完成数据融合，并且可通过改变发射功率调整通信距离。

从网络开始运行到传感节点全部死亡的全过程，可以用“轮”来划分，如图 2 所示。其中每一轮又分为两个阶段，分别是路由形成阶段和稳定的数据传输阶段。

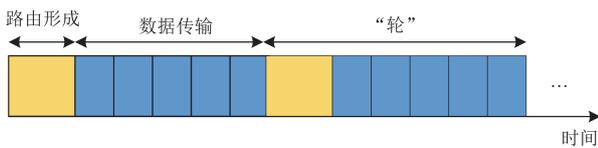


图 2 本文算法的时间划分

Fig. 2 Time line division of the proposed algorithm

2 计及密度、距离及质量的 WSN 路由算法

2.1 基于改进 DBSCAN 的 WSN 分簇算法

基于密度的噪声应用空间聚类算法(density based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)，通过一组“邻域”参数 (ϵ, P_{\min}) 刻画样本的紧密程度^[22]。其中， ϵ 表示传感器节点的通信距离， P_{\min} 表示成为核心节点所需的最少邻居数。 ϵ 由所选择的无线通信方式决定， P_{\min} 根据现场应用经验选取。

本文主要针对变电站场景构建无线传感网络，

表 1 给出了变电站中主要电力设备的监测需求。由表 1 可知，每个电力设备所配置的传感器数量不少于 3 个，因此本文设置 P_{\min} 为 3。DBSCAN 从样本密度的角度考察样本之间的可连接性，并不断扩展聚类簇从而获得最终的分簇结果。

表 1 电气设备在线监测综合要求

Table 1 Comprehensive requirements for online monitoring of electrical equipment

监测对象	监测需求
变压器	油溶气体、套管介损、电容、局部放电、微水、铁芯及夹件接地电流、红外
开关柜	局部放电、梅花触头温度、电缆接头温度
GIS	局部放电、气体、温度
避雷器	泄露全电流、容性电流、雷击、红外
绝缘子	绝缘电阻、泄露电流、红外、紫外
断路器	分合闸线圈电流、电压、振动信号
环境	温度、湿度

给定传感器节点集 $N = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，定义如下概念。

1) 邻居节点：节点 m 的邻居节点 $N_\epsilon(x_m)$ 定义为样本 N 中与节点 m 距离不大于 ϵ 的样本集合。

$$N_\epsilon(x_m) = \{x_n \in N | d(x_n, x_m) \leq \epsilon\} \quad (1)$$

2) 核心点：如果 $N_\epsilon(x_m)$ 中至少包含 P_{\min} 个样本，则称 x_m 为核心点。

$$|N_\epsilon(x_m)| \geq P_{\min} \quad (2)$$

3) 密度直达：如果 x_n 在 $N_\epsilon(x_m)$ 中，且 x_m 为核心对象，则称 x_n 由 x_m 密度直达。

$$\begin{cases} x_n \in N_\epsilon(x_m) \\ |N_\epsilon(x_m)| \geq P_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

4) 密度可达：存在一组对象链 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ ，如果任意 P_i 到 P_{i+1} 密度直达，则 P_i 到 P_{i+1} 密度可达。

5) 密度相连：若存在核心点 x_s ，使得 x_s 到 x_p 和 x_q 都密度可达，则称 x_p 和 x_q 密度相连。

如图 3 所示，节点 1 为核心对象，节点 2 由节点 1 密度直达，节点 3 由节点 1 密度可达，节点 3 与节点 4 密度相连。基于这些概念，寻找由密度可达关系导出的最大密度相连样本集合即为“簇”。具体地，若 x_i 为核心点，由密度可达的所有样本组成的集合 $C = \{x_j \in N | x_j \text{ 由 } x_i \text{ 密度可达}\}$ 即为一个簇。因此，成为簇需满足式(4)所示的两个条件。

$$\begin{cases} x_i \in C, x_j \in C \Rightarrow x_i \text{ 与 } x_j \text{ 密度相连} \\ x_i \in C, x_j \text{ 由 } x_i \text{ 密度可达} \Rightarrow x_j \in C \end{cases} \quad (4)$$

虽然 DBSCAN 算法弥补了如 K-means 等聚类算法无法发现形状不规则的簇的缺点^[23]，而且在分

类前无需给定簇的个数, 非常适用用电力背景中无线传感节点分簇。但是, 在 DBSCAN 算法原型中, 根据参数 ε 查找每个样本点的邻居节点时需要遍历整个样本集, 导致大量且不必要的计算开销。因此, 本文引入 K 近邻思想, 并采用 KD-Tree 构建搜索树, 对数据进行预处理, 找到每个样本点的邻居节点, 并根据参数 P_{\min} 确定核心点。

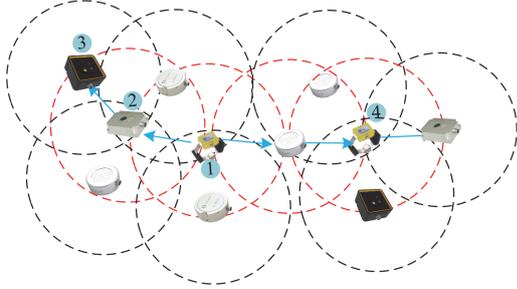


图3 基本概念图

Fig. 3 Basic concept diagram

对于传感器集合 $M = \{(1,10), (4,8), (5,1), (6,9), (7,3), (12,11)\}$, 构建 KD-Tree 的过程如图 4 所示。首先通过当前节点深度选择分割维度, 对于奇数深度的节点, 选择第一维度进行分割, 对于偶数深度的节点, 选择第二维度进行分割, 采用循环的方式在两个维度之间切换。然后找到该维度上所有点的中位数计算分隔值, 并据此将数据划分两个子集。最后重复上述操作, 分别为它们选择分割维度、计算分隔值、划分数据集, 并递归地构建左子树和右子树, 直到数据集被完全划分。

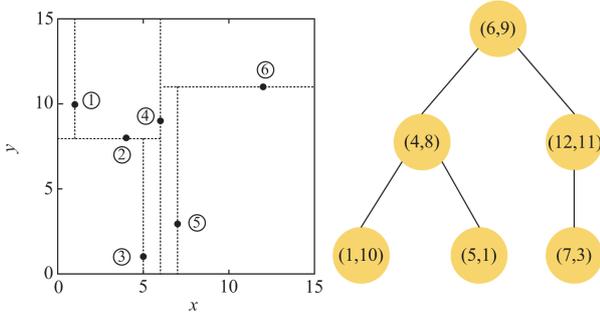


图4 KD-Tree 结构构建

Fig. 4 KD-Tree structure construction

在得到 KD-Tree 后, 考虑以下近邻搜索问题, 具体过程如图 5 所示: 在点集 M 中找出距离点 $(3, 8.5)$ 最近的一个点。首先从根节点 $(6, 9)$ 查找到点 $(4, 8)$ 。由于此时分割超平面为 $y = 8$, 而目标点 $y = 8.5$, 因此进入右子树查找到点 $(5, 1)$ 。此时, 假设点 $(5, 1)$ 为当前最近点, 与查询点距离为 7.8 。然后回溯到点 $(4, 8)$, 计算与查询点距离为 1.1 , 比当前最近点更靠近查询点, 因此更新最近点为 $(4, 8)$ 。用同

样的方法再次确定一个蓝色的圆, 从图 5 中可见该圆与超平面 $y = 8$ 相交, 因此进入 $(4, 8)$ 的另一个子空间查找。点 $(1, 10)$ 与查询点距离为 2.5 , 比当前最近点远, 因此保持最近点不变, 继续回溯到根节点 $(6, 9)$ 。由于绿色圆与超平面 $x = 6$ 不相交, 因此不需要进入根节点的右子树进行查找, 至此搜索结束。由此可见, 相比 DBSCAN 中的遍历整个样本, KD-Tree 能够省去大部分数据点的搜索, 从而减少搜索计算量。表 2 为所提基于改进 DBSCAN 的分簇算法的伪代码。

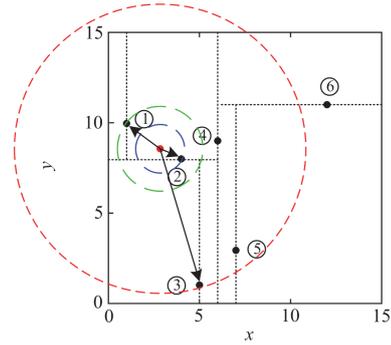


图5 最近邻搜索过程

Fig. 5 Nearest neighbor search process

表2 基于改进 DBSCAN 的分簇算法

Table 2 Clustering algorithm based on improved DBSCAN

Algorithm 1: Framework of Sensor Node Clustering Algorithm

Input: $N = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, (\varepsilon, P_{\min})$

begin

1 Initialize the core node set $H \leftarrow \emptyset$, the set of unvisited samples $W \leftarrow N$,

2 the queue, $Q \leftarrow \langle 0 \rangle$ the number of clusters $k \leftarrow 0$

3 **for** $j = 1, 2, \dots, m$ **do**

4 Determine the neighbor node set $N_\varepsilon(x_j)$ of x_j

5 **if** $|N_\varepsilon(x_j)| \geq P_{\min}$ **then**

6 $H = H \cup \{x_j\}$

7 **end if**

8 **end for**

9 **while** $H \neq \emptyset$ **do**

10 The set of currently unvisited samples $W_{old} \leftarrow W$

11 $W \leftarrow W \setminus \{0\}$

12 **while** $Q \neq \emptyset$ **do**

13 $q \leftarrow Q[0]$

14 **if** $|N_\varepsilon(q)| \geq P_{\min}$ **then**

15 $\Delta \leftarrow N_\varepsilon(q) \cap W, Q \leftarrow \Delta, W \leftarrow W \setminus \Delta$

16 **end if**

17 **end while**

18 $k \leftarrow k + 1, C_k \leftarrow W_{old} \setminus W, H \leftarrow H \setminus C_k$

19 **end while**

Output: $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$

2.2 考虑链路质量及通信距离的多跳路由算法

由于电力设备常运行在高电压、大电流状态下，导致设备周围磁场环境复杂多变，严重干扰无线通信质量。因此，本文提出一种考虑链路质量及通信距离的 Dijkstra 多跳路由算法。为了更好地对汇聚节点路由网络进行分析，根据汇聚节点网络构建相应的权重图。定义一个赋权有向图 G 为

$$G = (H, E, P) \quad (5)$$

式中： H 为汇聚节点集合； E 为两个汇聚节点形成的边的集合； P 为每条边的权重。为了使数据传输的路径最短，首先根据边缘网关与汇聚节点位置确定传输方向向量。如图 6(a)所示，节点 1—节点 6 为汇聚节点，节点 7 为边缘网关，则规定朝向节点 7 的方向为方向向量， $\vec{L} = (1, 0)$ 即 x 轴的正方向。 $\vec{e}_{i,j}$ 为 h_i 到 h_j 形成的边，即一条有向传输路径，其中 h_i 、 h_j 分别为第 i 个和第 j 个汇聚节点； $p_{i,j}$ 为边 $\vec{e}_{i,j}$ 所属的权重值。 θ 为边 $\vec{e}_{i,j}$ 和方向向量 \vec{L} 的夹角，通过点乘运算可求余弦值。只有同时满足式(6)的两个条件，两个汇聚节点之间才能形成一条有向传输路径。其中， R 为汇聚节点的通信距离，由于汇聚节点能量充足，其通信距离大于传感节点的通信距离 r 。

$$\begin{cases} \cos \theta = \frac{\vec{e}_{i,j} \cdot \vec{L}}{\|\vec{e}_{i,j}\| \times \|\vec{L}\|} > 0 \\ \|\vec{e}_{i,j}\| \leq R \end{cases} \quad (6)$$

在变电站场景中，由于监测区域较大，可能出现如节点 3 这样没有能够直接或间接与节点 7 进行连接的边。此时，需要额外部署中继节点转发节点 3 汇聚的数据。如果传输方向上存在距离节点 3 最近的汇聚节点，那么在它们之间遵循距离最短原则确定中继节点位置。否则，在节点 3 与节点 7 之间确定中继节点位置。得到最终完整的赋权有向图如图 6(b)所示。

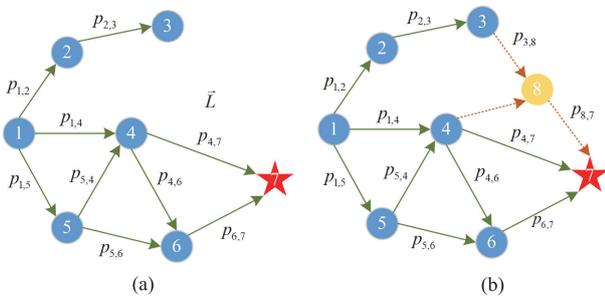


图 6 汇聚节点网络拓扑

Fig. 6 Sink node network topology

本文在考虑传输距离的基础上，增加了描述无线信号质量的链路质量指示(link quality indicator, LQI)和接收信号强度指示(received signal strength indicator, RSSI)作为约束条件，以此保证网络传输的可靠性。其中，LQI 通过衡量接收到的信号与理想信号之间的错误累积值来评估无线链路的可靠性，RSSI 通过测量接收到的信号能量来评估无线信号的强度^[24]。式(7)为节点 i 到节点 j 之间的通信质量表达式， $f(L_{QI})$ 和 $f(R_{SSI})$ 分别为链路质量和信号强度计算函数。在 ZigBee、Bluetooth 等无线通信的 PHY 层均提供了参数接口，可直接获得。

$$q(h_i, h_j) = f(L_{QI}) + f(R_{SSI}) \quad (7)$$

$$\begin{cases} p_{\vec{e}_{i,j}} = \alpha \times d(h_i, h_j) + \beta \times q(h_i, h_j) \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $p_{\vec{e}_{i,j}}$ 为边 $\vec{e}_{i,j}$ 的综合权重； $d(h_i, h_j)$ 为汇聚节点 h_i 、 h_j 之间的通信距离； $q(h_i, h_j)$ 为汇聚节点 h_i 、 h_j 之间的通信质量； α 、 β 分别为通信距离和通信质量在综合权重中所占的权重值。

综上，有向图中边的综合权重可由节点之间的通信距离和通信质量共同决定。在电力设备状态监测中，与网络时延相比，更关注网络的稳定性和可靠性。因此，设置 α 为 0.3， β 为 0.7。例如，在图 5 中，节点 1—节点 7 中有 3 条路径可选，包括 $\vec{e}_{1,2}$ 、 $\vec{e}_{1,4}$ 、 $\vec{e}_{1,5}$ ，若只考虑路径长度，则选择 $\vec{e}_{1,2}$ 为最优路径。而此时，如果 $\vec{e}_{1,2}$ 路径干扰最大， $\vec{e}_{1,4}$ 却没有干扰，那么选择 $\vec{e}_{1,2}$ 作为下一跳路径时就会造成丢包现象。因此，为了网络可靠性，综合考虑通信质量则选择 $\vec{e}_{1,4}$ 为最优路径。

在得到整个网络拓扑有向图后，利用 Dijkstra 算法得到最合适多跳路由路径。Dijkstra 算法是一种基于贪心策略的最短路径算法，通过计算一个节点到其他所有节点的最小代价并不断递进以确定起点与终点之间的最优路径^[25]。由图 6 得到无线传感网络的有向拓扑矩阵，如式(9)所示。其中 ∞ 表示两个节点由于距离大于可通信范围而无法形成路径。

$$G = \begin{bmatrix} 0 & p_{1,2} & \infty & \infty & p_{1,5} & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 0 & p_{2,3} & p_{2,4} & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & 0 & \infty & \infty & \infty & \infty & p_{3,8} \\ \infty & \infty & p_{4,3} & 0 & \infty & p_{4,6} & p_{4,7} & p_{4,8} \\ \infty & \infty & \infty & p_{5,4} & 0 & p_{5,6} & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & p_{6,7} & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & p_{8,7} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

令起点为 h_s , $d[i]$ 为起始点 h_s 到任一节点 h_i 的最小权值, 并令 S 为从起点找到的最短路径的终点集, 算法伪代码如表 3 所示, 具体求解步骤如下:

- 1) 寻找初始权重最小的节点 h_j , 即 $d[j] = \min\{d[i]\}$, 此时, $S = S \cup \{h_j\}$;
- 2) 对于 h_j 的每个邻居节点 h_i , 如果 $d[j] + p(h_j, h_i) < d[i]$, 则进行下一步;
- 3) 更新 $d[i] = d[j] + p(h_j, h_i)$, 不断重复上述步骤, 以此得到最短路径的集合。

表 3 基于 Dijkstra 汇聚节点路由算法

Table 3 Routing algorithm for sink nodes based on Dijkstra

Algorithm 2: Sink node routing algorithm

Input: $G = (H, E, P)$

begin

```

1   $S \leftarrow \{s\}$ 
2   $d[s, s] \leftarrow 0$ 
3  for  $h_i \in H \setminus \{s\}$  do
4       $d[s, h_i] \leftarrow p(s, h_i)$ 
5      (when  $h_i$  not found,  $d[s, h_i] \leftarrow \infty$ )
6  end for
7  while  $H \setminus S \neq \emptyset$  do
8      find  $\min_{h_j \in H} d[s, h_j]$  from the set  $V \setminus S$ 
9       $S \leftarrow S \cup \{h_j\}$ 
10     for each neighbor  $h_i$  of  $h_j$  where  $h_i \notin S$  do
11         if  $d[j] + p(h_j, h_i) < d[i]$  then
12              $d[i] \leftarrow d[j] + p(h_j, h_i)$ 
13         end if
14     end for
15 end while

```

Output: The optimal path from the edge gateway to each sink node

3 算例分析

3.1 能耗模型及参数设置

在仿真验证中, 本文选择与 LEACH 相同的能耗模型, 节点发送数据的能耗主要包括功率放大器的能耗和发射电路的静态能耗, 其表达式为

$$E_{Tx}(n, d) = \begin{cases} nE_{elec} + n\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ nE_{elec} + n\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: E_{Tx} 为发射能耗; n 为传输数据的长度; d 为节点之间的距离; d_0 为距离阈值; E_{elec} 为每传输 1 bit 数据产生的能耗。当 $d < d_0$ 时, 选择自由空间模型的功放因子参数 ϵ_{fs} ; 当 $d \geq d_0$ 时, 则选择多路衰减模型的功放因子参数 ϵ_{mp} 。节点接收 n bit 数据所消耗的能量为

$$E_{Rx}(n) = nE_{elec} \quad (11)$$

式中: E_{Rx} 为接收能耗。对于汇聚节点, 除接收、转发数据耗能之外, 还有融合数据这一额外的能量消耗, 其计算公式为

$$E_{DA}(m) = mE_{DA} \quad (12)$$

式中: E_{DA} 为融合 1 bit 数据的能耗; m 为融合数据量。

本文选择中国某 220 kV 变电站为监测区域, 并根据表 1 中实际电力设备监测需求部署相应传感器装置, 其分布图如图 7 所示。网络相关仿真参数设置如表 4 所示。

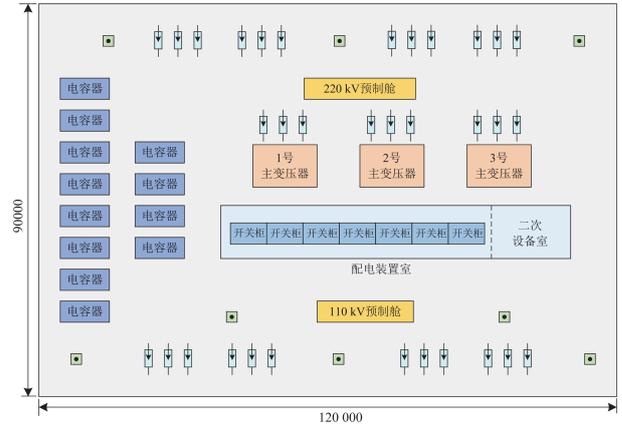


图 7 变电站分布图

Fig. 7 Substation distribution map

表 4 仿真参数表

Table 4 Simulation parameter settings

参数	数值
监测区域	120 m×90 m
边缘网关位置	(120,45) m
传感器节点数量	130
传感节点初始能量	0.5 J
E_{elec}	50 nJ/bit
能耗系数 ϵ_{fs}	10 pJ/(bit·m ²)
能耗系数 ϵ_{mp}	0.0013 pJ/(bit·m ⁴)
E_{DA}	5 nJ/bit
传感节点通信半径	10 m
汇聚节点通信半径	30 m

3.2 仿真与实验

为验证本文方法的有效性, 分别与 LEACH、LEACH-C、LEACH-IMP 进行对比仿真分析, 4 种算法在相同参数下进行模拟。仿真的重点为本文路由方法与对比方法的网络生存时间和可靠性。为了便于分析, 表 5 对 4 种路由协议的特征进行了对比。

表 5 不同路由协议的特征对比

Table 5 Characteristics comparison of different routing protocols

协议	分簇及簇首选举方式	簇首间通信方式
LEACH ^[8]	完全随机	单跳
LEACH-C ^[9]	考虑节点分布与能量，部分随机	单跳
LEACH-IMP ^[10]	考虑节点能量，部分随机	多跳
本文方法	考虑通信距离、链路质量、节点密度	多跳

图 8 和图 9 分别为 LEACH、LEACH-C、LEACH-IMP 及本文方法随迭代次数的增加，存活节点数量和节点死亡率的对比。仿真结果表明，4 种算法中最后一个节点死亡的迭代次数分别为 1498、2062、1795、2690，本文所提算法的网络寿命比其他 3 种算法分别提高了 79.57%、30.46%、49.86%。其中，LEACH-C 第一个死亡节点出现的时间晚于 LEACH 和 LEACH-IMP，这是因为 LEACH-C 加入了集中控制策略，考虑了簇首节点的分布。但是，由于 LEACH-C 每迭代一次都需要重新计算最优的簇首分布，消耗了大量的能量。因此在网络生命后期，节点死亡速度明显快于 LEACH-IMP，这可以从图 8 中死亡率为 20% 和 50% 时看出来。LEACH 在分簇时完全随机，因此无论是在第一个死亡节点出现的时刻还是在整体网络寿命周期上，表现的性能都是最差的；与传统网络模型相比，本文首先根据传感节点密度进行分簇，进而以节点与汇聚节点的距离最短原则为每个簇部署相应的汇聚节点。由于本文研究的电力背景下汇聚节点具有充足能量，因此，无论是第一个节点死亡的时间还是最后一个节点死亡的时间，本文所提方案均优于其他 3 种协议。此外，本文所提算法第一次出现死亡节点的时间与网络最终结束的时间差最小，再一次体现了其优越性。

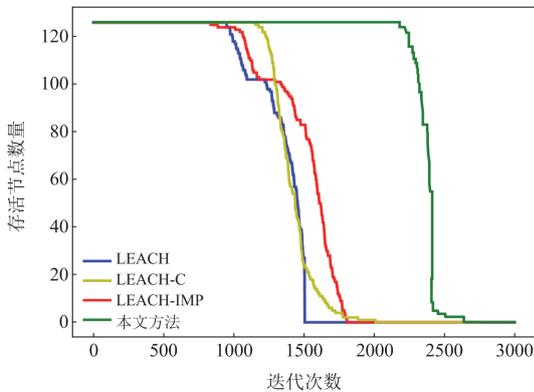


图 8 存活节点数量对比

Fig. 8 Comparison of number of alive nodes

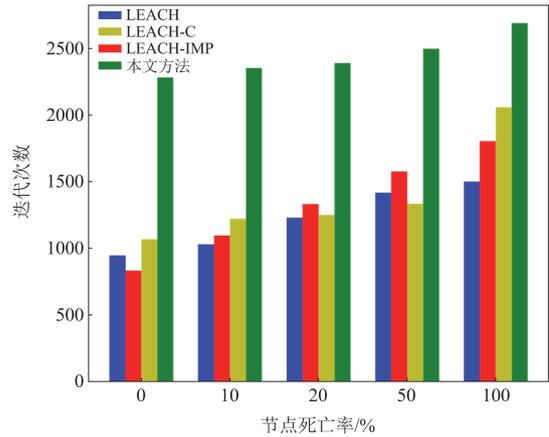


图 9 节点死亡率对比

Fig. 9 Comparison of node mortality rate

图 10 所示为边缘网关接收传输数据包数量的对比。当网络寿命结束时，LEACH、LEACH-C、LEACH-IMP 以及本文算法传输的数据包数量分别为 1.33×10^5 、 1.82×10^5 、 1.95×10^5 、 2.79×10^5 ，本文算法相较于其他算法分别提高了 109.77%、53.29%、43.07%。

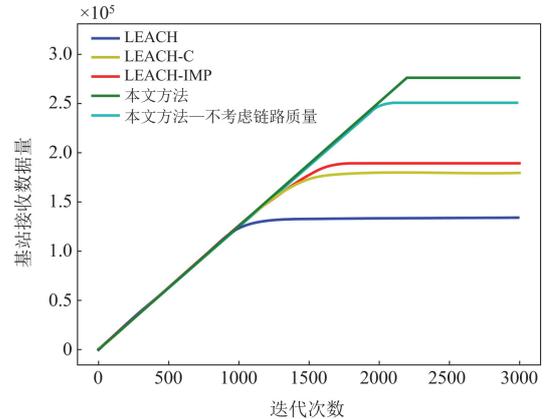


图 10 基站接收数据包对比图

Fig. 10 Comparison of data packet received at the base station

其次，为验证本文方法的可靠性，增加了一次消融实验进行对比。具体地，由于本文方案模型不同于对比算法的模型，本文只在所提算法中加入随机链路质量因素，并假设链路质量 $p_{i,j}$ 与丢包率的关系如表 6 所示。统计不考虑链路质量时本文算法的数据包总量，如图 10 中的蓝绿色线条为 2.54×10^5 。由于所提算法在汇聚节点之间的多跳路径选择中考虑了链路质量的影响，因此接收数据量比没有考虑链路质量影响的方法提高了 9.84%。

此外，为验证所提方案的可行性，作者在实验室进行了简单的实验。如图 11 所示，选择学校动态

模拟实验室为监测区域, 其中包括开关柜、环网柜、电机等监测对象。传感器选择课题组研发的温湿度传感器、超声波传感器以及 TEV 传感器等, 笔记本电脑充当边缘网关。传感器微控制器(microcontroller unit, MCU)为 STM32F103, 汇聚节点 MCU 为 K210。选择低功耗蓝牙作为无线通信方式, 通信芯片型号为 EFR32BG22C224F512GM32-C, 最大输出功率为 6 dBm, 最大通信距离为 30 m, 最大通信速率为 400 kbps。

表 6 链路质量与丢包率关系

Table 6 Relationship between link quality and packet loss rate

$p_{i,j}$	丢包率/%
$1 \geq p_{i,j} > 0.8$	0
$0.8 \geq p_{i,j} > 0.5$	30
$0.5 \geq p_{i,j} > 0.3$	50
$0.3 \geq p_{i,j} > 0$	70



图 11 实验模拟测试

Fig. 11 Experimental simulation test

根据第 2 节汇聚节点路由算法, 每轮数据传输流程如图 12 所示, 具体步骤如下:

- 1) 边缘网关广播询问汇聚节点位置及链路质量信息;
- 2) 汇聚节点收到边缘网关的询问信息后, 再次进行广播传输至邻居节点, 从而使整个网络汇聚节点都收到询问信息;
- 3) 汇聚节点收到来自网关的广播后, 将自己的位置信息以及与邻居节点之间的链路质量信息发送至边缘网关;
- 4) 边缘网关收到所有汇聚节点的位置和链路质量后, 构建最佳路由表并分发给每个汇聚节点进行维护;
- 5) 汇聚节点给簇成员节点分配 TDMA 时隙^[26], 采集节点信息后根据路由表将信息发送至下一节点直至边缘网关。至此, 完成一轮的信息传输。

对于每个传感器节点, 分别设置了 3 种工作状态, 分别为活跃状态、空闲状态和睡眠状态。传感

器节点能耗主要来源于 MCU、放大器以及通信模块的收发器。本文主要针对以上部件, 选取超声波局部放电传感器进行能耗估算, 结果如表 7 所示。基于传感器测试的能耗, 计算了 3 种工作模式(I: 全时工作状态; II: 每小时工作 5 min、空闲 55 min; III: 每小时工作 5 min、睡眠 55 min)下 3.3 V、10 000 mAh 电池的寿命, 结果如图 13 所示。由图可知, 模式 III 中传感器电池寿命可长达 220.5 天。

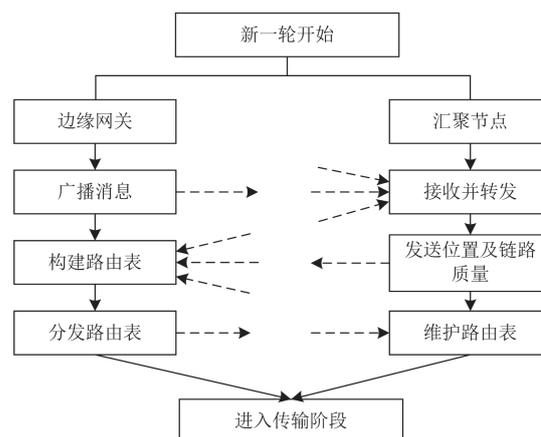


图 12 本文算法流程图

Fig. 12 Flow chart of the proposed algorithm

表 7 能耗评估和测量

Table 7 Energy consumption assessment and measurement

	mW		
	活跃	空闲	睡眠
MCU	47.5	13.78	0.115
功放模块	7	0	0
发送模块	4	1.02	0.011
接收模块	4	0.60	0.011
估算	62.5	15.4	0.252
实际	71	18	0.35

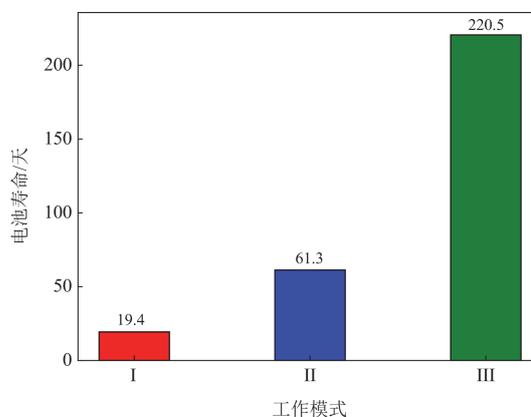


图 13 不同工作模式下电池寿命

Fig. 13 Battery life in different working modes

4 结论

本文针对无线通信距离受限、环境电磁干扰等问题,以变电站为例,提出一种计及传感器节点密度、通信距离及链路质量的汇聚节点组网方案。改变传统先选取簇头再分簇的组网顺序,本文首先根据实际传感器节点位置及通信距离,利用 DBSCAN 对节点进行分簇,并引入 KD-Tree 加快邻居节点搜索速度。在设计汇聚节点之间的路由策略时,考虑到变电站环境中的电磁干扰,以通信距离和链路质量为综合权重构建汇聚节点有向图,并利用 Dijkstra 算法求解汇聚节点到边缘网关的最优路径。仿真结果表明,所提算法延长了网络的生存时间,并在恶劣环境中具有一定的抗干扰能力。

虽然所提方案在与经典算法的对比分析中取得了较好的结果,并通过实验验证了其可行性。但是在首次组网时,需要知道每个传感器节点的具体位置信息,才能够完成分簇任务。后续的研究将考虑这一因素,对算法和模型进行改进,降低模型的复杂度,提高模型性能。

参考文献

- [1] 刘东超, 陈志刚, 崔龙飞. 基于物联网的环网柜在线监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 60-67.
LIU Dongchao, CHEN Zhigang, CUI Longfei. Online monitoring technology of a ring network cabinet based on the internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 60-67.
- [2] 赵仕策, 赵洪山, 寿佩瑶. 智能电力设备关键技术及运维探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 1-10.
ZHAO Shice, ZHAO Hongshan, SHOU Peiyao. Discussion on key technology and operation & maintenance of intelligent power equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 1-10.
- [3] 吴润泽, 王浩楠, 郭昊博, 等. 基于机器学习的自适应双模协同无线充电调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 86-95.
WU Runze, WANG Haonan, GUO Haobo, et al. Adaptive dual-mode cooperative wireless charging scheduling strategy based on machine learning[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 86-95.
- [4] CHEN H, WANG X, LI Z, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 1-8.
- [5] 熊小萍, 刘瑞, 蔡义明. 计及节点重要度协同知识模型的电力通信 QoS 路由策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 45-53.
XIONG Xiaoping, LIU Rui, CAI Yiming. Power communication QoS routing strategy considering node importance degree and knowledge model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 45-53.
- [6] DUBOIS F, RENAUD-GOUD P, STOLF P. Capacitated vehicle routing problem under deadlines: an application to flooding crisis[J]. IEEE Access, 2022, 10: 45629-45642.
- [7] MUZAMMAL S M, MURUGESAN R K, JHANJHI N Z. A comprehensive review on secure routing in internet of things: mitigation methods and trust-based approaches[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 8(6): 4186-4210.
- [8] HANDY M J, HAASE M, TIMMERMANN D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C] // 4th international workshop on mobile and wireless communications network, September 9-11, 2002, Stockholm, Sweden: 368-372.
- [9] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [10] SALAU H B, ONUMANYI A J, SALAMI A F, et al. Improved clustering routing protocol for low energy adaptive cluster-based routing in wireless sensor network[J]. 2018.
- [11] 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.
- [12] HUANG Y, TANG B, DENG L, et al. Fuzzy analytic hierarchy process-based balanced topology control of wireless sensor networks for machine vibration monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(15): 8256-8264.
- [13] WANG C, ZHANG Y, WANG X, et al. Hybrid multihop partition-based clustering routing protocol for WSNs[J]. IEEE Sensors Letters, 2018, 2(1): 1-4.
- [14] FAN B, XIN Y. A clustering and routing algorithm for fast changes of large-scale WSN in IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(3): 5036-5049.
- [15] PRIYADARSHI R. Energy-efficient routing in wireless sensor networks: a meta-heuristic and artificial intelligence-based approach: a comprehensive review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2024, 31(4): 2109-2137.
- [16] DEL-VALLE-SOTO C, RODRÍGUEZ A, ASCENCIO-

- PIÑA C R. A survey of energy-efficient clustering routing protocols for wireless sensor networks based on metaheuristic approaches[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(9): 9699-9770.
- [17] KULKARNI U M, KULKARNI D V, KENCHANNAVAR H H. Neural network based energy conservation for wireless sensor network[C]// 2017 International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon), August 17-19, 2017, Bengaluru, India: 1312-1316.
- [18] OJHA A, CHANAK P. Multi-objective gray-wolf-optimization-based data routing scheme for wireless sensor networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(6): 4615-4623.
- [19] 谢英辉, 彭维捷, 陶志勇. 基于蚁群算法的能耗均衡的安全路由[J]. *传感技术学报*, 2021, 34(9): 1258-1263. XIE Yinghui, PENG Weijie, TAO Zhiyong. Ant colony-based energy balancing secure routing for wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34(9): 1258-1263.
- [20] 仝杰, 齐子豪, 蒲天骄, 等. 电力物联网边缘智能: 概念、架构、技术及应用[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(14): 5473-5496. TONG Jie, QI Tianhao, PU Tianjiao, et al. Edge intelligence to power internet of things: concept, architecture, technology and application[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(14): 5473-5496.
- [21] 谢志远, 曹通. 基于 PSA 的中压电力线载波通信自适应阻抗匹配[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(18): 45-52. XIE Zhiyuan, CAO Tong. Adaptive impedance matching of medium voltage power line carrier communication based on PSA[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(18): 45-52.
- [22] SCHUBERT E, SANDER J, ESTER M, et al. DBSCAN revisited, revisited: why and how you should (still) use DBSCAN[J]. *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, 2017, 42(3): 1-21.
- [23] IKOTUN A M, EZUGWU A E, ABUALIGAH L, et al. K-means clustering algorithms: a comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data[J]. *Information Sciences*, 2023, 622: 178-210.
- [24] 胡青松, 罗大伟, 张梅香, 等. 基于链路质量估计的灾害监测传感网分簇路由[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(6): 26-32. HU Qingsong, LU Dawei, ZHANG Meixiang, et al. Clustering routing based on link quality estimation for disaster monitoring sensor network[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(6): 26-32.
- [25] ZHOU Y, HUANG N. Airport AGV path optimization model based on ant colony algorithm to optimize Dijkstra algorithm in urban systems[J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2022, 35.
- [26] 孙彦景, 李林, 王博文, 等. 灾后无人机自组网高动态多信道 TDMA 调度算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2024, 51(2): 56-67. SUN Yanjing, LI Lin, WANG Bowen, et al. Highly dynamic multi-channel TDMA scheduling algorithm for the UAV AD HOC network in post-disaster[J]. *Journal of Xidian University*, 2024, 51(2): 56-67.

收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2025-02-21

作者简介:

温开云(1996—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力物联网、电力设备状态监测; E-mail: ncepu_wky@163.com

赵洪山(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能电网的控制理论与控制方法、电力设备状态监测、故障预估与故障诊断方法、智能电网资产优化管理; E-mail: zhaohshcn@126.com

赵仕策(1994—), 男, 博士, 研究方向为配电设备的多参量传感与智能感知方法。E-mail: zscsysut@163.com

(编辑 魏小丽)