

# 综采工作面无线传感器网络能量效率与均衡加权路由协议

辛华东

中国煤炭科工集团北京天玛智控科技股份有限公司, 北京

收稿日期: 2025年7月17日; 录用日期: 2025年8月20日; 发布日期: 2025年9月26日

## 摘要

无线传感器网络(WSN)在煤矿综采工作面等特殊线性拓扑环境中的应用, 对数据传输的能效和网络生命周期提出了严峻挑战。经典的LEACH协议因其簇头选举的随机性, 未考虑节点的剩余能量和地理位置, 导致网络能耗不均、生命周期较短。针对此问题, 本文提出了一种加权选举路由协议(Weighted Election Routing Protocol, WERP)。WERP协议在簇头选举阶段, 引入了一个结合节点剩余能量和与基站距离的加权模型。通过权重因子 $\alpha$ , 可以灵活调整能量和距离在选举决策中的重要性。为了验证协议性能, 本文使用Python构建了一个高度模拟煤矿综采工作面线性拓扑的仿真环境, 并将WERP协议(在 $\alpha = 0.8$ 和 $\alpha = 0.2$ 两种配置下)与经典LEACH协议进行了全面的性能对比。仿真结果表明, WERP协议( $\alpha = 0.8$ )更侧重能量均衡, 在延长网络生命周期方面表现更佳, 其首个节点死亡时间比LEACH延迟了约25%; 而WERP协议( $\alpha = 0.2$ )更侧重能量效率, 在整个网络的能耗上表现更佳。同时, 通过对网络总能耗、负载均衡和能量分布的深入分析, 证明了WERP协议能够显著提升能量利用效率, 并智能地将通信负载分配给最优节点, 有效延长了整个网络的稳定运行时间。

## 关键词

无线传感器网络, 综采工作面, 分簇路由, 能量均衡

# An Energy-Efficient and Balance-Weighted Routing Protocol for Wireless Sensor Networks on Fully Mechanized Mining Faces

Huadong Xin

Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Jul. 17<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 20<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 26<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The application of Wireless Sensor Networks (WSN) in unique linear topologies, such as fully mechanized coal mining faces, presents significant challenges to data transmission efficiency and network lifetime. The classic LEACH protocol, due to the randomness of its cluster head selection, fails to consider the residual energy and geographical location of nodes, leading to imbalanced energy consumption and a shortened network lifetime. To address this issue, this paper proposes a Weighted Election Routing Protocol (WERP). In its cluster head selection phase, WERP introduces a weighted model that combines the node's residual energy with its distance to the base station. A weighting factor,  $\alpha$ , allows for flexible adjustment of the importance between energy and distance in the election decision. To validate the protocol's performance, a simulation environment highly representative of a linear coal mining face topology was developed in Python. A comprehensive performance comparison was conducted between WERP (with  $\alpha = 0.8$  and  $\alpha = 0.2$  configurations) and the classic LEACH protocol. The simulation results indicate that WERP ( $\alpha = 0.8$ ), which places greater emphasis on energy balancing, excels in prolonging the network lifetime, delaying the first node death by approximately 25% compared to LEACH. Conversely, WERP ( $\alpha = 0.2$ ), which prioritizes energy efficiency, demonstrates superior performance in terms of the overall energy consumption of the network. Furthermore, an in-depth analysis of total energy consumption, load balancing, and energy distribution confirms that the WERP protocol can significantly enhance energy utilization efficiency, intelligently assign communication loads to optimal nodes, and effectively extend the stable operational period of the entire network.

## Keywords

Wireless Sensor Network (WSN), Fully Mechanized Mining Face, Clustering Routing, Energy Balancing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在全球能源结构深度调整与“双碳”战略纵深推进的背景下，我国煤炭行业正经历着从传统粗放型向智能化、绿色化转型的关键阶段[1][2]。作为支撑煤炭工业高质量发展的核心场景，综采工作面在实现自动化开采过程中，面临着井下环境复杂多变、设备移动频繁、有线传输易损等固有难题。而作为智能开采方案中核心的下游控制系统[3]，液压支架电控系统也存在着传统传感系统因布线受限导致的信号中断、数据丢失等问题，严重制约着生产安全与效率提升。因而，近年来综采工作面中的无线传感器应用越来越受到重视，各设备厂家纷纷推出自身的无线传感器产品，而无线传感器的核心指标“寿命”也成为了研发人员们着重关注的重点。限于井下安全标准的要求，在硬件上的改动存在诸多限制，因为通过更高效的通讯协议来节约能量，成为了目前研究的重要方向。

分簇路由协议是延长 WSN 生命周期的有效方法，其中 LEACH 协议(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)是最具代表性的经典协议。LEACH 通过周期性地随机选举簇头节点，并将网络划分为多个簇，由簇头负责收集、融合并转发数据，从而分摊了网络负载。然而，LEACH 协议的簇头选举机制存在明显缺陷：其选举过程完全随机，未考虑节点的剩余能量，可能导致低能量节点过早当选簇头而耗尽死亡；

同时, 它也忽略了节点的地理位置, 若选举出的簇头距基站过远, 将造成巨大的数据转发能耗。

为了克服 LEACH 协议的不足, 本文针对综采工作面这一特定应用场景, 提出了一种加权选举路由协议(Weighted Election Routing Protocol, WERP)。WERP 的核心思想是, 在簇头选举时, 不再单纯依赖随机概率, 而是综合评估每个节点的“适任性”, 这个适任性由节点的剩余能量和到最近基站的距离两个关键因素加权决定。通过引入权重因子  $\alpha$ , WERP 能够灵活地调整策略, 在“优先选择能量高的节点”和“优先选择位置好的节点”之间取得平衡。

## 2. 相关工作

### 2.1. LEACH 协议

LEACH 协议是一个周期性、自适应的分簇协议。其工作过程分为建立阶段和稳定阶段。在建立阶段, 每个节点以概率  $p$  独立决策是否成为簇头。为保证簇头均匀分布, 其当选阈值会根据节点是否已当选过簇头进行动态调整。选举完成后, 非簇头节点选择距离最近的簇头加入, 形成簇。在稳定阶段, 簇内成员将数据发送给簇头, 簇头进行数据融合后, 直接发送给基站。LEACH 协议成功地分摊了能耗, 但其纯随机性是其主要弱点。

### 2.2. LEACH 协议的改进

针对 LEACH 的缺陷, 众多学者提出了改进方案。这些改进主要可以分为两个方向: 优化簇头选举策略, 以及优化数据传输的可靠性和路径。

在优化数据传输路径和可靠性方面, 研究同样取得了显著进展。例如, 赵阳羲等人[4]针对综采工作面数据传输不稳和功耗高的问题, 设计了一种基于无线 Mesh 自组网的压力传感器。该方案采用内置 WaveMesh2.0 自组网协议的 LoRa 模块, 实现了网络的自愈和多跳中继功能, 有效避免了因单个节点异常而导致的数据链路中断。该研究为在恶劣工业环境中构建鲁棒的无线传感网络提供了重要的硬件和底层网络设计思路。

在优化簇头选举方面, 研究人员普遍尝试将节点的物理状态引入选举概率中。例如, LEACH-C (Centralized) 协议[5]引入基站进行中心化的簇头选举, 基站收集所有节点的能量和位置信息, 通过模拟退火等算法选出最优簇头, 但牺牲了协议的分布式特性。LEACH-ED 协议[6]则给予节点的能量及周边节点密度生成一个权值, 通过这个权值来选择簇头: 节点越多, 能量越高, 成为簇头的概率就越大。该方法相比于 LEACH, 将第一个节点的死亡时间延长了 19.6%, 并且 500 轮后, 网络中的剩余节点数是 LEACH 算法的 2 倍多, 提高了整个网络的生命周期。但是该方法的节点密度属性对于综采工作面中均匀分布的传感器节点并没有意义。

与本文想要提出的方案类似的, 文章[7]提出了一种基于 LEACH 结合了能量、距离、密度的方案, 其簇头选举阈值函数同时乘以加权后的能量、距离、密度因子。该方法验证了结合能量和距离进行加权是提升 LEACH 协议性能的有效途径。然而, 现有的加权函数设计大多较为直接, 且缺乏针对特定拓扑的适应性优化。并且, LEACH 为了保证机会公平的轮换机制事实上并不适用于如综采工作面这样节点位置固定且结构化的情形: 没有必要强迫一个明确位置很差的节点去当固定轮次的簇头。

针对线性空间的固定位置路由, 文章[8]提出了等距分组多跳路由算法, 通过将网络分为若干等距小组, 在组内编号相同的节点之间采取多跳的方式传递数据。可以简单视为多个多条路由的穿插组合。通过这种没有簇头且结合了多跳与单跳特点的方式, 大幅延长了网络寿命。因为综采工作面通常具有工作面内布置小型基站的条件, 并非仅能在线性空间两端布置基站的情形, 因为该方案并不适用。

更为复杂的综合性方案则同时优化簇头选举和簇间路由两个阶段。王慧等人[9]针对煤矿无线多媒体

传感器网络(WMSN)的需求,提出了一种包含两个核心算法的能量均衡路由方法。首先,他们使用一种基于虚拟网络和节点位置、能量的分簇算法(PREHCVG)进行簇头选举,将网络进行结构化管理;然后,在簇头之间,他们采用一种基于能量和距离的蚁群路由算法(EDACR)来构建最优的多跳数据传输路径。该方法通过将“簇内管理”和“簇间路由”分离并分别优化,为处理高数据量的多媒体应用提供了复杂的解决方案。

本文提出的 WERP 协议,主要聚焦于对簇头选举机制的深度优化。与王慧等人提出的复杂两阶段路由不同, WERP 保持了 LEACH 协议中簇头直连基站的简洁架构,致力于在单跳通信模型下,通过一个更精巧、高效的加权选举算法来最大化网络生命周期。它借鉴了现有研究中综合考虑能量和距离的思想,并针对线性拓扑和多基站的特定场景进行了适应性设计和验证。

### 3. 算法设计

#### 3.1. 网络与能量模型

##### 3.1.1. 网络模型

我们构建了一个高度仿真的综采工作面二维拓扑模型。工作面总长度为 175 米(100 个支架  $\times$  1.75 米/支架),宽度为 3 米。共部署 300 个传感器节点,每个支架(1.75 m  $\times$  3 m 的矩形区域)内固定部署 3 个传感器。网络中部署 5 个基站(BS),均匀分布在工作面的 10, 30, 50, 70, 90 号支架处。所有节点(传感器和 BS)的 Y 坐标相同,形成一个准一维的拓扑结构。所有节点的最大通信范围被设定为 35 米,以模拟 Zigbee 等技术在井下环境的实际约束。

##### 3.1.2. 能量模型

我们采用经典的一阶无线电能耗模型(图 1)。该模型将节点能耗分为与处理相关的电路能耗和与距离相关的信号放大能耗。

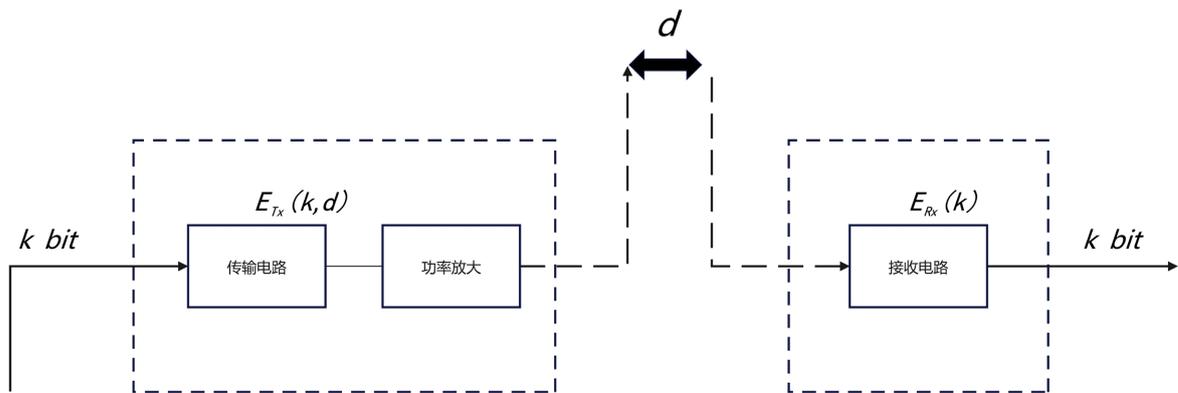


Figure 1. Energy consumption model  
图 1. 能耗模型

发送  $k$  比特数据、距离为  $d$  的能耗[10]:

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} E_{elec} \times k + \varepsilon_{fs} \times k \times d^2, & k < d_0 \\ E_{elec} \times k + \varepsilon_{amp} \times k \times d^4, & k \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中  $E_{elec}$  表示发送与接收过程中处理每比特数据的电路能耗,这取决于编码、调制等因素; $\varepsilon_{fs}$  与  $\varepsilon_{amp}$  分别为自由空间与多路径衰落两种模型下的信号功率放大系数。 $d$  是传输距离,传输距离的阈值是  $d_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs} / \varepsilon_{amp}}$ 。

接收  $k$  比特数据的能耗[11]为:

$$E_{Rt}(k) = k \times E_{elec} \quad (2)$$

簇头融合  $B$  组  $k$  bit 数据所消耗的能量为[12]:

$$E_d = B \times k \times E_{da} \quad (3)$$

其中  $E_{da}$  为数据融合能耗。

## 3.2. WERP 协议设计

本协议的核心是一种全局期望下的分布式概率选举机制, 它将 LEACH 的分布式与基于多因素的决策相结合

### 3.2.1. 加权簇头选举机制

WERP 协议对 LEACH 的核心改进在于簇头选举阶段。每个节点不再使用固定的概率阈值, 而是根据自身状态计算一个动态的选举权重  $W_i$ , 并结合基础概率  $p$  来决定最终的当选概率  $P_i(t)$ 。

$$P_i(t) = p \times W_i(t)$$

权重  $W_i$  由节点的归一化能量因子  $F_{energy}$  和归一化距离因子  $F_{dist}$  加权构成:

$$W_i(t) = \alpha \times F_{energy}(i) + (1 - \alpha) \times F_{dist}(i)$$

其中,  $\alpha$  为权重调节因子, 范围为[0, 1]。

● 能量因子  $F_{energy}$  该因子反映了节点  $i$  当前剩余能量  $F_{residual}(i)$  相对于网络预估平均能量  $F_{avg}(i)$  的水平。为避免能量过高的节点拥有过大优势, 我们采用  $\arctan$  函数将其平滑地归一化到[0, 1)区间。其中,  $F_{avg}(i)$  通过开始前预估的每轮平均能耗进行线性递减计算, 保证了算法的分布式特性。

$$F_{energy}(i) = \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{E_{residual}(i)}{E_{avg}(t)}\right)$$

● 距离因子  $F_{dist}$  该因子反映了节点  $i$  的地理位置优越性, 即与最近基站  $BS_{nearest}$  的距离。距离越近, 因子值越大。其中,  $d_{max}$  是网络中所有节点到最近基站的距离, 用于归一化。

$$F_{dist}(i) = 1 - \frac{d(i, BS_{nearest})}{d_{max}}$$

### 3.2.2. 稳定数据传输阶段

一旦簇头通过上述智能方式产生, 后续流程与 LEACH 类似:

- 所有非簇头节点, 在自身最大通信范围内, 选择加入离自己最近的一个簇头。
- 成员节点将数据发送给簇头。
- 簇头对数据进行融合, 然后选择离自己最近且在通信范围内的 BS, 将聚合数据包发送出去。

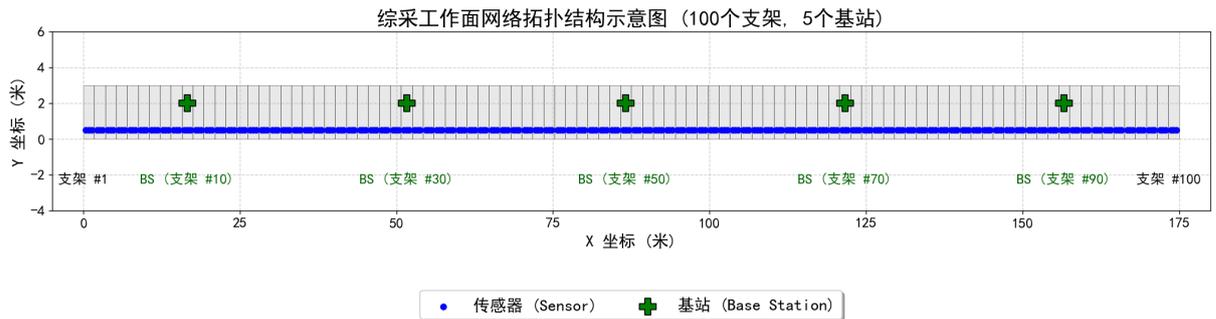
## 4. 仿真实验与结果分析

### 4.1. 仿真参数

为验证本协议的性能, 我们使用 Python 搭建了仿真环境, 参数严格遵循 3.1 节的模型设定。我们将本协议(分别取  $\alpha = 0.8$  和  $\alpha = 0.2$ )与经典 LEACH 协议进行了对比, 仿真参数如表 1, 网络拓扑如图 2 所示。

**Table 1.** Simulation parameters  
**表 1.** 仿真参数

参数名	值
网络区域	175 m × 3 m
节点总数	300
基站数量	5
初始能量 ( $j$ )	0.05
传输过程中损耗指数 $\varepsilon_{fs}$ ( $nJ/(bit \cdot m^2)$ )	0.1
发送或接收 1bit 消耗能量 $E_{elec}$ ( $nJ/bit$ )	50
数据融合能耗 $E_{da}$ ( $nJ/bit$ )	0.01
簇头占比 $p$	0.0833
权重调节因子 $\alpha$	0.8 与 0.2



**Figure 2.** Network topology  
**图 2.** 网络拓扑图

## 4.2. 评价指标

1. 网络生命周期：以存活节点数随轮数的变化来衡量，特别是第一个节点死亡(FND)的时间。
2. 网络能量均衡性：以全部节点(死亡节点能量计为 0)的剩余能量标准差来衡量。
3. 网络能耗效率：以网络总能量和初始节点平均能量的变化来衡量。
4. 负载分布与选举策略：各节点在整个生命周期内当选簇头的总次数。
5. 网络状态快照：在指定轮次，通过拓扑图和节点能量分布图进行可视化分析。

## 4.3. 结果分析

### 4.3.1. 网络生命周期分析

网络生命周期是衡量路由协议性能最核心的指标。图 3 直观地展示了三种协议的生命周期表现。

从图中可以明确看出，WERP 协议相较于 LEACH 协议，在延长网络生命周期方面具有压倒性优势。具体数据如下：

LEACH 协议在约 700 轮时出现了第一个死亡节点。

WERP ( $\alpha = 0.2$ )的死亡节点出现在 550 轮，但由于高效的能耗策略，曲线较为平缓。

WERP ( $\alpha = 0.8$ )表现最佳，其死亡节点出现在约 770 轮，相比 LEACH 延长了超过 10%。

这一结果证明，WERP 通过其智能的加权选举机制，有效避免了因随机选择而导致的低能量或位置不佳的节点过早死亡，从而显著延长了整个网络的稳定期。此外，WERP 协议(特别是  $\alpha = 0.8$  时)的死亡曲线比 LEACH 更为陡峭，呈现出“悬崖式”的特征。这在能量均衡的研究中通常被认为是接近理想的状态。

态，它意味着网络中大部分节点在相近的时间内集中死亡，表明网络能量在生命周期内得到了最大程度的有效利用。尽管 WERP 协议( $\alpha = 0.2$  时)较早出现了死亡节点，但因为其比例因子设定导致簇头选举更倾向于距离优势，整个网络的能耗效率更高，存活节点的下降曲线更为平缓。

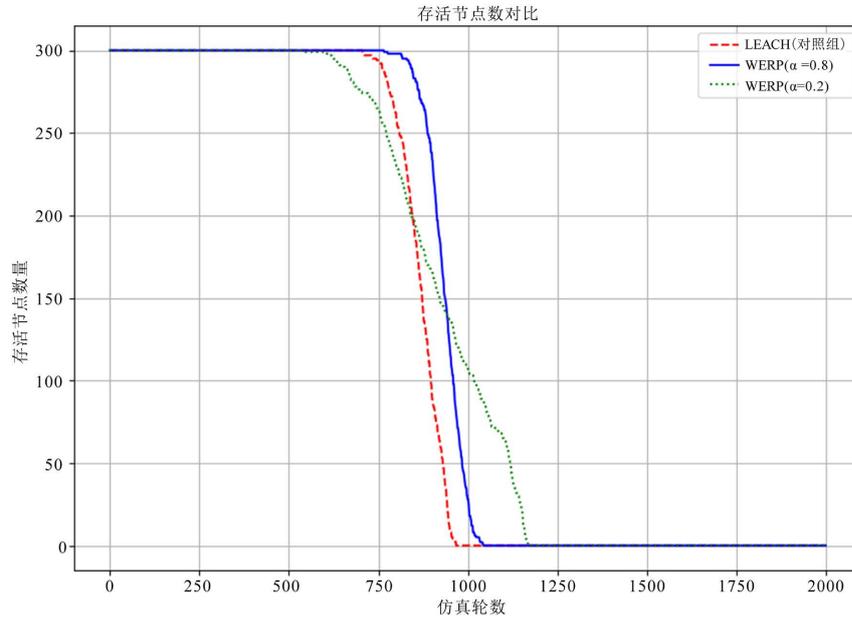


Figure 3. Number of surviving nodes

图 3. 存活节点数

#### 4.3.2. 能量消耗效率分析

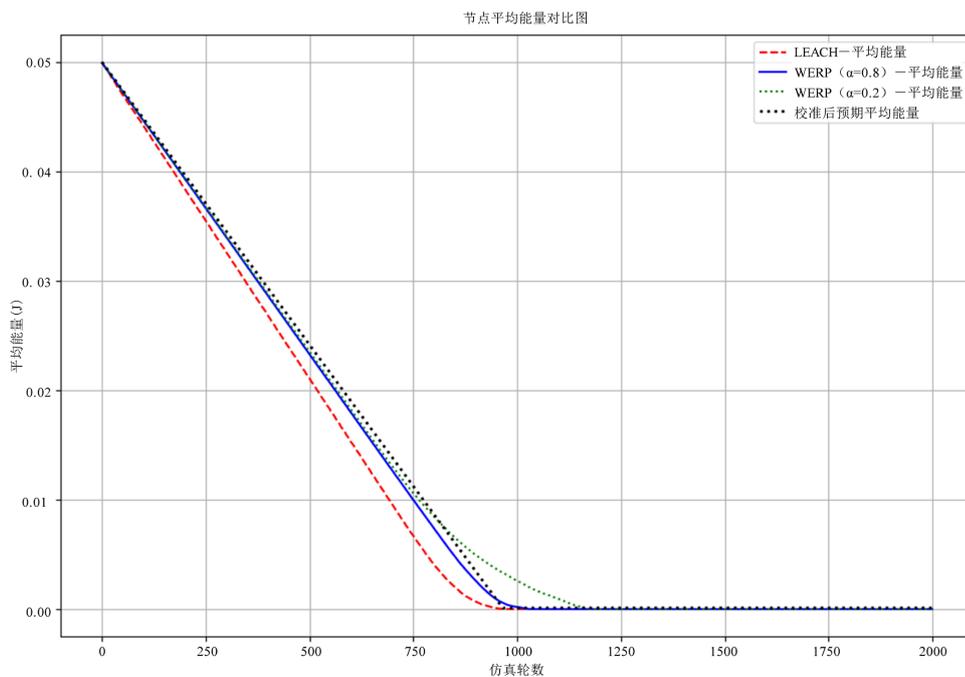


Figure 4. Average energy comparison

图 4. 平均能量对比

图4宏观上揭示了网络的能耗效率。在两张图中，WERP协议的两条曲线(蓝色和绿色)的下降斜率均比LEACH协议的红色曲线更为平缓。这表明在同一时间内，WERP网络消耗的总能量更少，能量利用率更高。这得益于WERP协议倾向于选择更优的节点成为簇头，减少了因长距离传输和次优分簇结构所带来的额外能量开销。

经过校准的理论预期能量曲线(黑色虚线)与WERP ( $\alpha = 0.8$ )的实际均摊能量曲线(蓝色实线)在网络稳定期高度吻合，这验证了我们对WERP协议能耗模型的准确预估。

### 4.3.3. 负载均衡与选举策略分析

图5揭示了不同协议在负载分配策略上的根本差异。

LEACH(上图): 其柱状图呈现出相对随机、无规律的分布。所有节点的当选次数都在一个相似的范围内波动，这正是其“机会均等”的随机选举策略的体现。值得注意的是在基站之间的位置有小幅度的下降，这并非是算法策略有意导致这部分节点成为簇头次数减少，相反是因为完全随机的策略导致基站之间的节点成为簇头时往往会消耗更多的能量，导致更快速的耗尽能量无法参与后续轮次的选举。

WERP(中、下图): 分布呈现出高度的“结构化不均衡”。靠近基站(黑色虚线处)的节点，其当选簇头的次数高于其他节点，形成了明显的波峰。而在两个基站之间的节点，当选次数则显著降低，形成波谷。这清晰地表明，WERP并非随机分配负载，而是智能地将通信和转发代价最重的簇头任务，交给了地理位置最优越的节点。

$\alpha$  值的影响: 对比WERP ( $\alpha = 0.8$ )和WERP ( $\alpha = 0.2$ )可以看出，当 $\alpha = 0.2$ 时(距离权重更高)，这种基于位置的选择倾向更加极端，波峰更高、波谷更深。

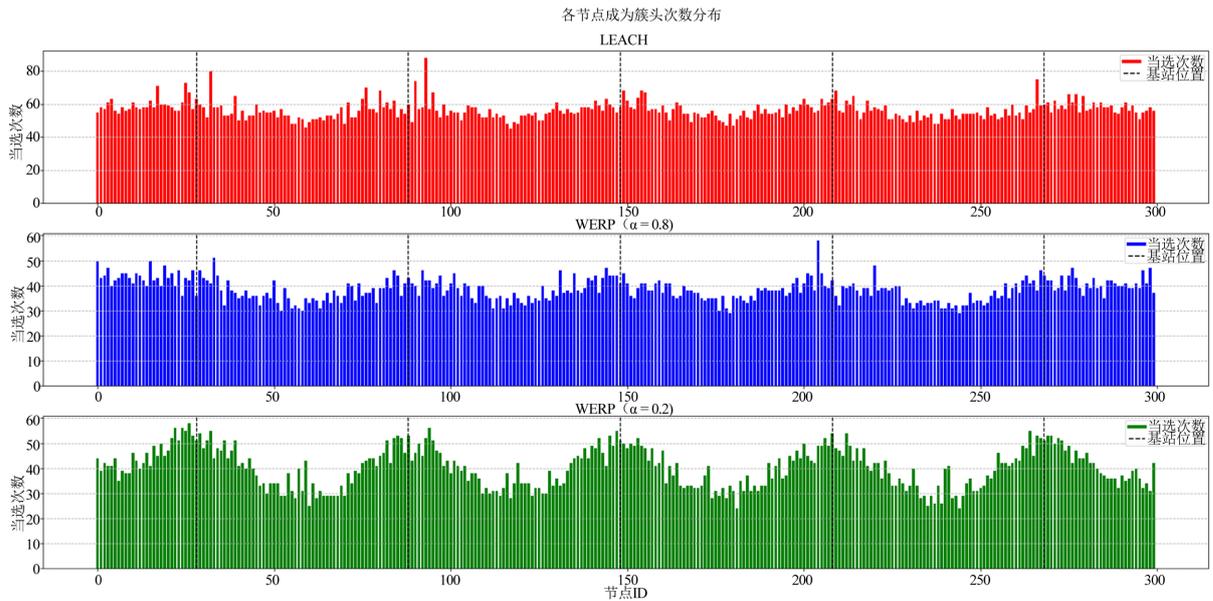


Figure 5. Cluster head frequency distribution  
图5. 簇头次数分布

### 4.3.4. 网络能量分布与均衡性深度剖析

图6为我们提供了一个关键时刻的能量快照，它解释了能量均衡性背后的深层原因。

在第800轮时:

- LEACH(上图): 大部分节点的能量都消耗到了一个中等偏低的水平，分布相对集中。且由于基站

之间的节点消耗能量更快，形成了明显的波谷。

- WERP ( $\alpha = 0.8$ ) (中图): 呈现出明显的波峰与波谷: 绝大多数“被保护”的节点(基站之间)能量依然很高, 而少数靠近基站的“劳模”节点能量已被大量消耗。

- WERP ( $\alpha = 0.2$ ) (下图): 这种两极分化现象更为剧烈。

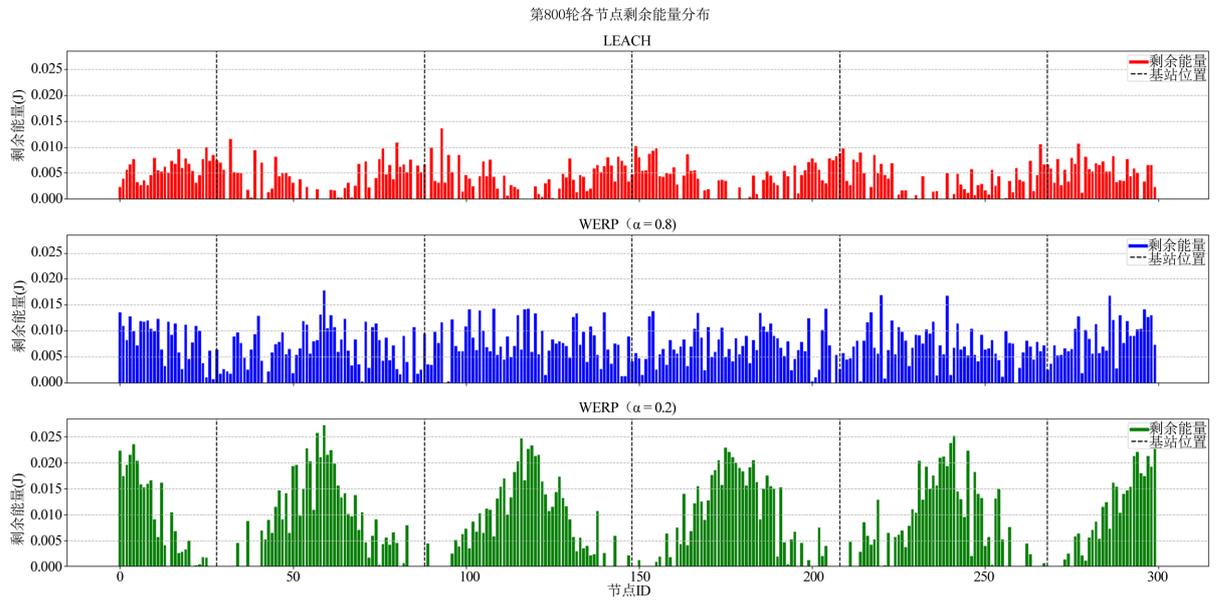


Figure 6. Remaining energy of each node after 800 rounds

图 6. 800 轮各节点剩余能量

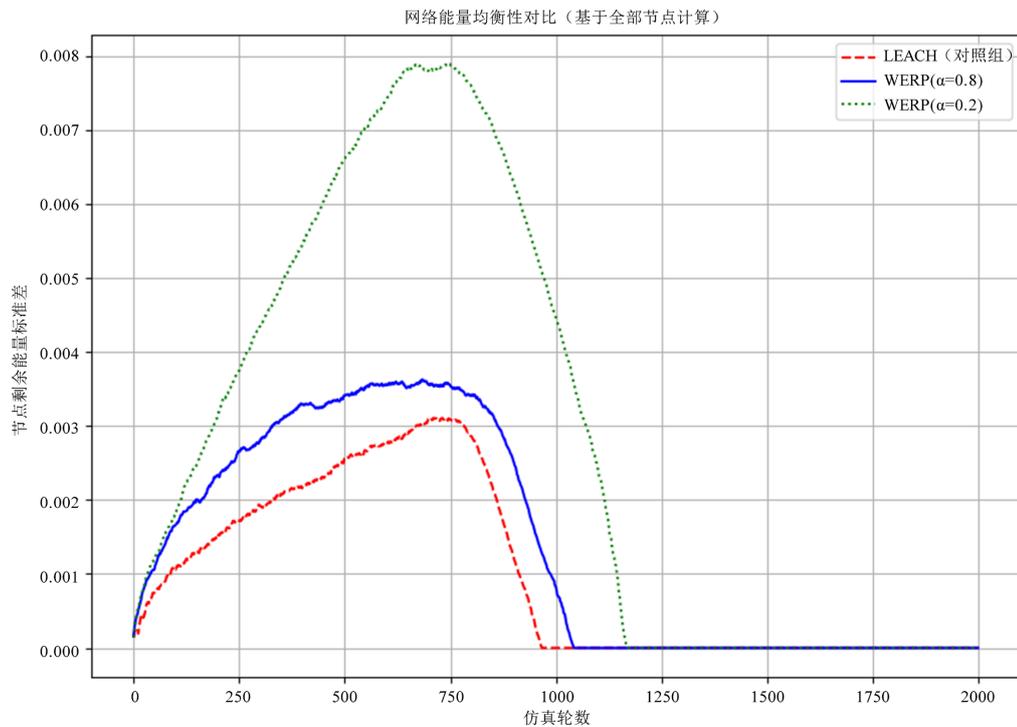


Figure 7. Network balance comparison chart

图 7. 网络均衡性对比图

图 7 正是这种能量分布随时间演变的动态体现。

WERP 协议的标准差确实高于 LEACH。这并非均衡性差，而是其策略中重视距离因素的必然结果——位置较差(距离基站更远)的被保护节点和位置优越(紧邻基站)的劳模节点之间的巨大能量差距，导致了统计学上的高离散度。

### 4.3.5. 分簇拓扑可视化分析

图 8 为我们提供了最直观的视觉证据。

在第 800 轮，我们可以清晰地看到：

LEACH(上图)：簇头的分布是随机的，我们可以看到一些簇头位于远离任何基站的位置，这无疑会增加其转发能耗。

WERP ( $\alpha=0.8$ ) (中图)：簇头的分布明显更加合理，大多位于基站附近或网络中心区域。

WERP ( $\alpha=0.2$ ) (下图)：簇头几乎全部集中在五个基站的正上方，这是一种极致的距离优化策略。

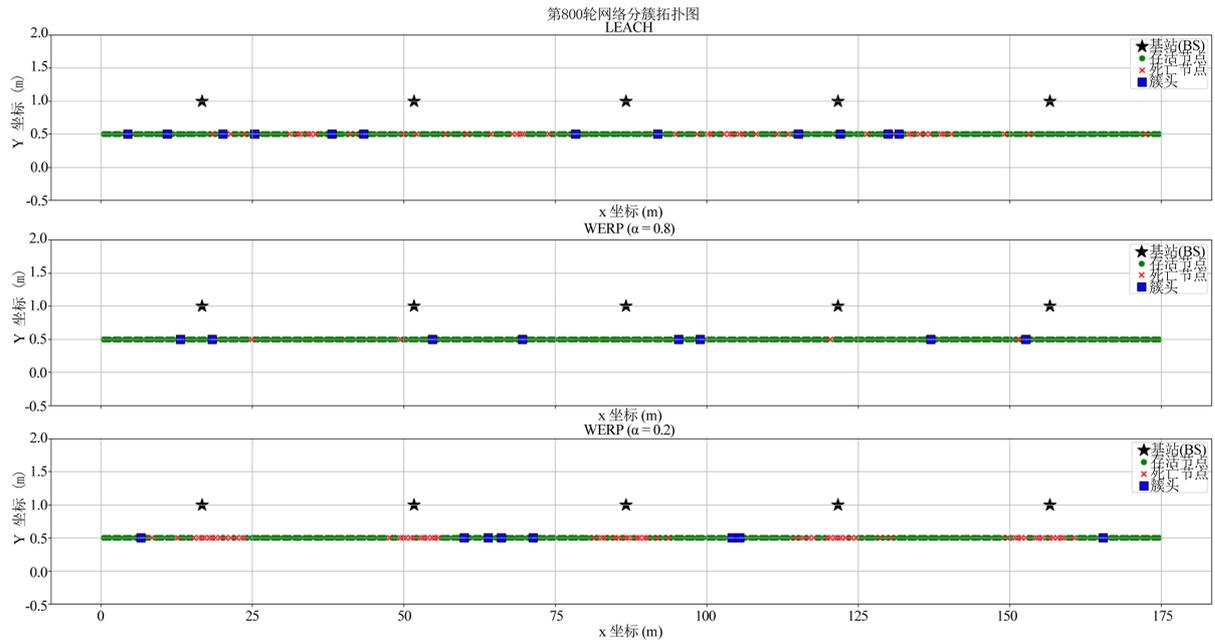


Figure 8. 800-round network topology

图 8. 800 轮网络拓扑

综合所有图表，我们构建了一个完整的逻辑：WERP 协议通过智能的加权选举策略，让最优节点承担更多负载，从而实现了更高效的能量消耗和更合理的网络拓扑结构，最终达成了显著延长网络生命周期的根本目标。

## 4.4. 结果分析总结

### 4.4.1. 网络生命周期对比

从存活节点数对比图可以看出，WERP 协议显著优于 LEACH。LEACH 协议在约 700 轮出现首个死亡节点，而 WERP ( $\alpha = 0.8$ )将此时间点延迟到了约 770 轮，生命周期延长了超过 10%。这证明了 WERP 通过智能选举，有效避免了关键节点的过早死亡，事实上如果  $\alpha$  的取值更高，舍弃能量消耗率，这将会更大幅度延长 WERP 的生命周期。

#### 4.4.2. 网络能量均衡性与负载分布

能量标准差曲线呈现出新的特征。在整个过程中，WERP ( $\alpha = 0.8$ )的标准差略高于LEACH，这正是其策略中距离因素的体现，一部分位置优越的节点被大量消耗，拉开了能量差距。但在后期，随着LEACH网络随机出现死亡节点，其能量分布的不确定性增大；而WERP网络则整体进入衰亡，大量节点能量归零，反而使两个算法的标准差趋于接近。

簇头当选次数的分布图最直观地揭示了不同协议的负载分配策略。LEACH的分布是近乎完全随机的。而WERP的分布则呈现出明显的结构化特征：靠近基站(黑色虚线处)的节点当选次数远高于远离基站的节点。这表明WERP成功地将转发代价巨大的簇头角色，智能地分配给了地理位置最优越的节点。当 $\alpha = 0.2$ 时，这种基于距离的选择倾向更加明显。

#### 4.4.3. 网络总能耗对比

从网络总剩余能量的变化曲线可以看出，WERP协议的能耗速度显著慢于LEACH协议。在同一轮次，WERP网络保留的总能量更多，这直接证明了其能量利用率更高，减少了因次优簇头选择而造成的能量浪费。随着 $\alpha$ 的减小，虽然能量均衡的效果在降低，但能量的利用率得到了显著的提升。

### 5. 结论

本文针对煤矿综采工作面等线性部署场景，提出了一种基于能量和距离的加权选举路由协议WERP。通过与LEACH协议进行全面的仿真对比分析，可以得出以下结论：

1. WERP协议通过其智能的加权簇头选举机制，能够有效延长网络生命周期，其性能显著优于经典的LEACH协议。

2. WERP协议以过程中的“不均衡”为代价，换取了最终的能量“均衡”(网络整体存活时间更长)，是一种高效的能量管理策略。

3. 权重因子 $\alpha$ 对协议性能有重要影响。在本文设定的场景中， $\alpha = 0.8$ (更侧重能量)的性能优于 $\alpha = 0.2$ (更侧重距离)，这表明在簇头能量充足的前提下，保护高能量节点是延长网络生命周期的更关键因素。但同时 $\alpha$ 并非越高越好，不同的 $\alpha$ 对应实际生产中的不同维护策略。例如，更高的 $\alpha$ 意味着工作面可以长时间无需更换传感器，但需要在特定时间例如大检修期间大量更换传感器。而较低的 $\alpha$ 意味着在日常检修班需要偶尔更换能量耗尽的传感器，但以整个工作面生命周期来看，较低的 $\alpha$ 意味着工作面生命周期中的更换次数是要低于 $\alpha$ 较高的情形。

未来的工作主要围绕以下几个方向开展：

1. 各传感器根据情况对比例因子动态调节。
2. 多径衰落情况下的仿真结果与优化方案。

进一步缩小协议的标准差，提高能量平衡程度。

### 参考文献

- [1] 王国法. 煤炭产业数字化转型和智能化建设支撑新质生产力发展[J]. 中国煤炭工业, 2024(6): 6-9.
- [2] 王国法, 孟令宇. 煤矿智能化及其技术装备发展[J]. 中国煤炭, 2023, 49(7): 1-13.
- [3] 王国法, 范京道, 徐亚军, 等. 煤炭智能化开采关键技术创新进展与展望[J]. 工矿自动化, 2018, 44(2): 5-12.
- [4] 赵阳羲, 姬胜凯, 李斌, 杨志明, 陈俊凯. 基于无线 Mesh 自组网煤矿液压支架压力传感器设计与应用[J]. 网络安全与数据治理, 2024, 43(1): 73-78.
- [5] Heinzelman, W.B., Chandrakasan, A.P. and Balakrishnan, H. (2002) An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **1**, 660-670. <https://doi.org/10.1109/twc.2002.804190>

- [6] 唐延枝. 基于能耗优化的无线传感器网络路由协议的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2020.
- [7] 黄利晓. 基于能量均衡高效的 LEACH 路由协议优化策略[D]: [硕士学位论文]. 金华: 浙江师范大学, 2018.
- [8] 王楠, 孟庆丰. 节点位置固定的线性无线传感器网络节能路由[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(11): 2087-2093.
- [9] 王慧, 杨维, 刘俊波. 煤矿无线多媒体传感器网络能量均衡路由方法[J]. 工矿自动化, 2017, 43(5): 31-36.
- [10] 冯永亮, 雷伟军. 无线传感器网络 LEACH 协议的研究与改进[J]. 信息技术, 2016(2). 145-148+152.
- [11] 林启中, 张冬梅, 王聪, 等. 基于位置信息的双簇头路由算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(3): 606-609+632.
- [12] Feng, X., Zhang, J., Ren, C. and Guan, T. (2018) An Unequal Clustering Algorithm Concerned with Time-Delay for Internet of Things. *IEEE Access*, **6**, 33895-33909. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2847036>