

中文引用格式:王博,商宇航,姚立超,等. 基于改进遗传算法的电厂粉尘监测节点覆盖控制研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9):121-130.

英文引用格式:WANG Bo, SHANG Yuhang, YAO Lichao, et al. Research on power plant dust monitoring node coverage control based on improved genetic algorithm[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9):121-130.

# 基于改进遗传算法的电厂粉尘监测节点 覆盖控制研究\*

王博副教授,商宇航,姚立超,蒋永清\*\*教授

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院,黑龙江 哈尔滨 150080)

中图分类号:X924.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.09.0960

资助项目:黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目(LJGXCG2022-068)。

**【摘要】** 为有效降低粉尘环境监测中存在盲区和管控缺失的风险,优化火电厂粉尘环境监测系统的节点覆盖控制,延长无线传感器网络(WSN)寿命,提出一种基于改进遗传算法的节能优化方法。首先构建基于节点覆盖率、节点布设总能耗和节点通信传输总能耗的网络覆盖质量目标函数;然后针对传统遗传算法存在局部最优和编码重复的问题,提出整数编码的染色体组合方案、自适应调节交叉和变异概率的方法,以及精英保留策略;最后通过仿真对比分析,确定优化后的节点数量和分布方案。结果表明:改进的遗传算法显著提高了收敛速度,所需迭代次数减少至20次,适应度值优化52.18%;在节点部署和覆盖研究中,优化后的节点数量为42个,覆盖率达97.28%,节点休眠率为76.19%,有效提升了火电厂粉尘环境监测系统的节能效果。

**【关键词】** 改进遗传算法; 电厂粉尘; 环境监测; 节点覆盖控制; 无线传感器网络(WSN); 精英保留策略

## Research on power plant dust monitoring node coverage control based on improved genetic algorithm

WANG Bo, SHANG Yuhang, YAO Lichao, JIANG Yongqing

(School of Measurement and Control Technology and Communication Engineering,  
Harbin University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang 150080, China)

**Abstract:** In order to effectively reduce the risk of blind zones and lack of control in dust environment monitoring, optimize the node coverage control of the dust environment monitoring system in thermal power plants, and prolong the lifetime of WSN, an energy-saving optimization method based on improved genetic algorithms was proposed. Firstly, based on node coverage, total energy consumption of node deployment and total energy consumption of node communication and transmission, the network coverage quality objective function was constructed. Then, aiming at the problems of the local optimization and coding duplication existing in traditional genetic algorithms, the chromosome combination scheme of integer coding, the adaptive adjustment method of crossover and mutation probability and the elite retention

\* 文章编号:1003-3033(2024)09-0121-10; 收稿日期:2024-03-14; 修稿日期:2024-06-19

\*\* 通信作者:蒋永清(1971—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,教授,主要从事工业安全风险评估、安全风险预测预警算法、智能保障技术等研究工作。E-mail:13936455312@126.com。

strategy were proposed. Finally, the simulation comparison and analysis were performed to determine the optimized node number and distribution scheme. The results show that the improved genetic algorithm significantly improves the convergence speed. The number of iterations required is reduced to 20, and the fitness value is optimized by 52.18%. In the node deployment and coverage study, the optimized number of nodes is 42, the coverage rate is 97.28%, and the node dormancy rate is 76.19%, which effectively improves the energy-saving effect of the dust environmental monitoring system in the thermal power plant.

**Keywords:** improved genetic algorithm; power plant dust; environment monitoring; node coverage control; wireless sensor network (WSN); elite retention strategy

## 0 引言

无线传感器技术因其低成本和高性能,被广泛应用于火电厂等工业监测系统。无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)也易于部署在厂区内,能够实时监测粉尘环境<sup>[1]</sup>。然而,由于煤尘扩散范围较广,传统监测方法难以满足监测需求<sup>[2]</sup>,因此,基于WSN技术建立火电厂粉尘环境监测系统显得尤为重要。然而,传感器节点的能量有限,通信耗能高,且部署位置不便于维护和更换电池,尤其在粉尘涉爆场所,更换电池更是存在较高的安全风险<sup>[3]</sup>。此外,传统节点随机分布部署方式容易导致节点分布不均、网络不连通、覆盖质量低下等问题,甚至可能出现监测盲区和粉尘爆炸风险管控缺失等问题<sup>[4-6]</sup>。因此,优化节点覆盖控制以提高火电厂粉尘监测系统的节能效果具有重要意义。

国内外关于WSN节点覆盖控制和定位问题的研究已经取得了诸多进展。KRISHNANAND等<sup>[7]</sup>提出了基于群智能优化理论的节点定位萤火虫优化(Glowworm Swarm Optimization, GSO)算法,该算法通过多点并行和全局随机搜索策略,实现了快速有效的节点定位。然而,当前国际上对GSO算法的研究大多集中在算法优化、性能分析和实际应用上,对其数学理论和参数设置等问题的探讨较为有限<sup>[8-9]</sup>。此外,余修武等<sup>[10]</sup>提出了基于优化的麻雀搜索算法改进的轴尾矿库WSN定位算法,该算法显著提高了定位精度和收敛速度,但其计算复杂性较高,全局优化能力有限,对动态环境的适应性不足,且缺乏自适应参数调节机制。同时,郭瑞等<sup>[11]</sup>则提出了基于信息融合技术与遗传支持向量机相结合的算法,更准确地预测了煤矿瓦斯浓度,但其模型复杂且可解释性较差,且扩展性和适用性有待验证。这些研究在节点定位和覆盖控制方面取得了进展,但在高效节能、精确定位和网络覆盖质量优化上仍有改进空间。

针对现有研究中在WSN节点定位和覆盖控制方面的不足,鉴于此,笔者拟提出一种改进的遗传算法,通过引入整数编码的染色体组合方案、自适应调节交叉和变异概率的方法以及精英保留策略,求解网络覆盖质量目标函数,在保证覆盖率的前提下,解决传统遗传算法的局部最优和编码重复问题,提升算法的全局优化能力和稳定性,优化节点的数量和空间分布位置,从而实现火电厂粉尘环境监测系统的节能效果优化。

## 1 改进遗传算法的基本原理

遗传算法是一种可以用来求解复杂组合优化问题的随机优化搜索方法<sup>[12]</sup>。为确定单元区域内最优节点数量及其空间位置,探究WSN节点覆盖控制问题,文中通过改进的遗传算法程序求解WSN节点覆盖控制的优化模型。涉及到的遗传操作包括选择、交叉、变异3个基本遗传算子<sup>[13-16]</sup>。

在遗传算法中加入变异算子,主要有2方面原因<sup>[17-19]</sup>:①在遗传优化过程中,赋予算法较强的局部随机性,使其在基因优化接近最优解时具有较大的收敛速度,从而使遗传优化结果更趋近于最优解。②保持种群的多样性,避免算法过早收敛到非最优解,确保遗传算法在整个搜索空间中有更大的概率收敛到全局最优解。改进后的遗传算法运算流程如图1所示。

### 1.1 改进交叉操作的染色体组合方案

交叉和变异操作决定了遗传算法的优化结果,是优化遗传算法的关键步骤。在使用遗传算法进行节点覆盖控制研究时,种群中的每条染色体对应一个节点组合方案。假设有2条染色体需要交叉,如果采用传统的单点交叉方法(将交叉点的位置设为2),结果如图2所示。

从图2看出,交叉后的2条染色体存在编码重复现象。如果强行修复,不仅会增加计算时间和计算量,而且会破坏遗传算法的自然进化过程。因此,

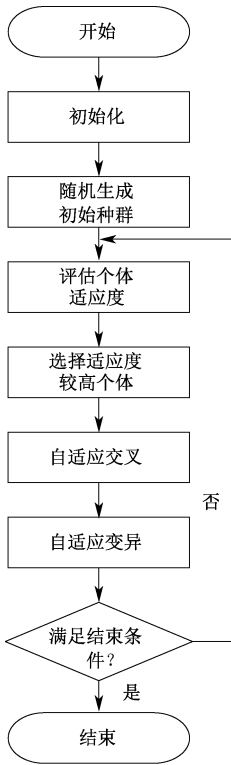


图 1 基于精英保留策略的改进遗传算法流程  
Fig. 1 Flow chart of improved genetic algorithm based on elite retention strategy

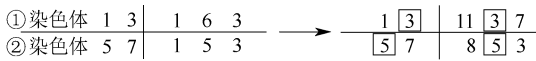


图 2 传统单点交叉方法的染色体

Fig. 2 Chromosome diagram of traditional single-point crossing method

有必要改进交叉操作,用一种快速的遗传算法来计算出问题的可行解,具体步骤如下:

- 1) 将①染色体交点前的基因与②染色体中所有基因进行比较。
- 2) 如果有与①相同的基因,即图 2 中框起的部分,则②将移除相同的部分,其余的在前排。
- 3) 比较完成后,从剩余的基因序列中取出①中缺失的部分,填入①。
- 4) 同理可得,染色体②的变化与染色体①不同,但染色体②也需要在交点前补充基因。

改进后的染色体交叉操作前后的对比情况,如图 3 所示,由图 3 可知:上述过程解决了染色体交叉后的代码重复问题,既避免了强制修复染色体而导致增加求解复杂度的问题,又保证了遗传算法的自然进化。

### 1.2 自适应调节交叉概率和变异概率的方法

传统遗传算法的交叉和变异概率是固定的,这

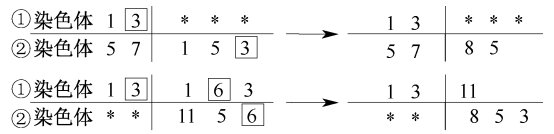


图 3 改进交叉操作后的染色体  
Fig. 3 Schematic diagram of chromosomes after improved crossing operation

种方式不利于保留优秀的基因,且容易早熟。因此,文中通过引入  $\text{logsig}$  函数,使得个体的交叉和变异概率随着遗传进化的进程进行自适应调节,有利于避免传统遗传算法局部最优的问题。

$$\text{logsig}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (1)$$

式中  $x$  为输入值。

通过引用  $\text{logsig}$  函数,使得遗传算法在进化过程中,实现个体的早期交叉和变异概率较大、中后期交叉和变异概率逐渐降低的效果。早期个体情况参差不齐,较差的个体需要较大的交叉和变异概率使其加速变异。而随着个体不断的交叉变异,优良的个体得以保留,较差的个体数量逐渐变少,群体适应度也在不断提升,此时交叉和变异概率也逐渐降低,从而降低优秀的个体向变差的方向发生变异的概率,进而保留个体的优秀基因。

### 1.3 精英保留策略

传统的遗传算法逐代进行遗传进化,每一代的优秀个体进入下一代的交叉变异过程中容易丢失部分优秀个体。因此,文中提出一种精英保留策略,即每一代个体的交叉变异过程结束后,将变异后的新群体与上一代群体混合,从中筛选出优秀个体进入下一代的交叉变异过程,从而避免上一代群体中的优秀个体被剔除。通过这种精英保留策略,使得每一代的优秀个体始终随着改进遗传算法的迭代计算保留下去,直至在变异后的新群体中不再是较高适应度的个体。

## 2 电厂粉尘监测节点覆盖控制计算

### 2.1 电厂粉尘监测节点布置

为更好地监测火电厂粉尘环境,防范职业危害和粉尘爆炸风险,选用一种基于光透射法和光散射法原理的粉尘浓度监测仪测量粉尘浓度,并提出如下 WSN 区域布设原则:

- 1) 多选择风速较低的区域。风速较低的区域,粉尘颗粒运动速度低,易发生沉降形成粉尘层,由粉

尘的特性可知:当粉尘层遇到空气扰动时会形成高浓度粉尘环境,从而构成粉尘爆炸风险。1 mm 厚的粉尘层扬起后即可在一个高度为 5 m、面积为 200 m<sup>2</sup> 的车间内形成爆炸性粉尘云,且在发生初次粉尘爆炸后,冲击波易激起粉尘层发生二次爆炸。因此,应多选择风速较低的区域布设 WSN。

2) 多选择粉尘浓度较高的区域。当粉尘浓度超过粉尘爆炸下限浓度时,在满足一定条件下可能发生粉尘爆炸,粉尘浓度超过了爆炸下限,这些区域有较高的概率在发生煤尘泄漏时聚集大量粉尘。因此,应多选择粉尘浓度较高的区域布设 WSN。

3) 多选择全年最大风频方向。粉尘浓度分布与风向有着强关联性,下风向侧的粉尘浓度更高,其他风向的粉尘浓度较低,但也存在粉尘浓度超过爆炸下限的区域。由于风向会随着气候经常发生变化,但受地理因素影响部分风向出现频率较高,则全年最大风频方向的区域出现高浓度粉尘的概率更大。因此,应多选择全年最大风频方向的区域布设 WSN,其他风向的区域可满足基本监测需要即可。

4) 多选择易形成相对密闭空间的区域。粉尘爆炸需要具备 5 个要素,其中一个要素即为需要相对密闭的空间。所以,尽管在发生煤尘泄漏时,厂区内下风侧大部分区域分布着高浓度粉尘,但大部分空间是开放的,并不一定会发生粉尘爆炸。因此,应多选择易形成相对密闭空间的区域布设 WSN。

按照上述布设原则,WSN 布设区域选择如图 4 所示,图中灰色区域部分即为 WSN 集中布设区域,其余部分可少量分散均匀布设 WSN 节点。

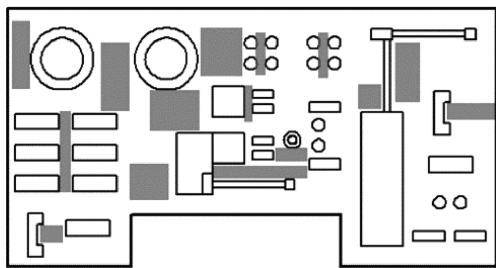


图 4 布设区域选择

Fig. 4 Layout area selection diagram

## 2.2 目标函数建立

根据 WSN 区域布设原则,每个选定的区域均可布设 1 套 WSN,现设定 1 个长 100 m、宽 100 m、高 3 m 的单元区域作为研究对象,通过上述的改进遗传算法优化计算单元区域内的 WSN 节点覆盖效果。每个节点作为火电厂粉尘环境监测系统的数据采集模块,均包含一组基于光透射法和光散射法原理的

粉尘浓度传感器、风速、湿度、温度等传感器,节点的布置应尽可能独立且分布均匀,以确保在监测或测量区域内能够获得全面且准确的数据。

文中针对 WSN 节点的覆盖质量,建立目标函数  $F$ ,其覆盖质量主要考虑 WSN 的覆盖率、网络通信、网络寿命等因素。在确保火电厂粉尘环境监测系统的监测目标能够完全覆盖在无线传感器的有效区域内,尽量减少监测盲区,降低网络耗能。因此,为进一步提升火电厂粉尘环境监测系统节能效果,文中基于改进遗传算法计算  $F$  的最优解从而实现最佳的覆盖质量。

根据线性规划模型建立目标函数  $F$ ,在每个监测点布局方案中,某一故障易发目标的贡献仅由灵敏度最高的监测点的灵敏度值来决定。这样的方法既能确保最优解具有更高的灵敏度,又能使各监测节点全面反映其失效情况。此外,节点休眠调度算法将节点状态分为活动、休眠和半休眠 3 种,其中半休眠状态作为活动和休眠状态之间的过渡状态。由于节点在活动状态下的能耗远大于在休眠状态下的能耗,因此,通过合理调度节点状态,可有效减少网络整体能耗。

为获得最高的 WSN 覆盖质量,影响目标函数  $F$  的参数如下:

1) 覆盖率。为保障火电厂粉尘环境监测系统的有效性,满足防治职业危害和粉尘爆炸的监测需求,布设节点时需要尽可能覆盖整个场地,避免监控盲区的存在,即节点覆盖率  $R$  越高,则 WSN 覆盖质量  $F$  越高。因此,设定每个活动节点的感知半径  $r$  为 20 m,在感知半径内相邻节点能够保持高质量通信,则节点覆盖率  $R$  计算过程如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m V_i - V_l}{V} \quad (2)$$

式中: $R$  为节点覆盖率; $m$  为节点数量; $V$  为单元区域的体积,m<sup>3</sup>; $i$  为第  $i$  个节点; $V_i$  为节点感知区域的体积,m<sup>3</sup>; $V_l$  为节点感知重叠区域的总体积,m<sup>3</sup>。

在单元区域的空间中,设定保持高质量通信的节点感知区域为体积相同的球体,则节点感知区域的体积  $V_i$  如下:

$$V_i = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (3)$$

则在文中设定的单元区域中,节点覆盖率  $R$  的计算过程如下:

$$R = \frac{4m\pi r^3 - 3V_1}{3V} \quad (4)$$

2) 节点布设总能耗。WSN 节点采用有限供电方式,即传感器节点由电池供电。为降低 WSN 整体能耗,避免冗余节点造成的能量浪费,应在保证 WSN 覆盖率的基础上,尽量减少节点数量,确定满足覆盖要求的最小工作节点集,此时节点布设总能耗  $Q$  最低,即节点布设总能耗  $Q$  越低,则 WSN 覆盖质量  $F$  越高。

$$Q = m \cdot q \quad (5)$$

式中: $Q$  为节点布设总能耗, $J$ ;  $q$  为单个工作节点的能耗, $J$ 。

3) 节点通信传输总能耗。由于节点的通信能力有限,单个节点通信传输消耗的能量  $E$  与通信传输距离有关,节点通信传输消耗的能量随着距离的增加而急剧增加。

$$E = k \cdot d^n \quad (6)$$

式中: $E$  为单个节点通信传输消耗能量, $J$ ;  $k$  为系数,与基站的距离有关; $d$  为节点通信传输距离, $m$ ;  $n$  为变量参数,通常取值为  $2 \leq n \leq 4$ ,取  $n=3$ 。

则节点的剩余能量如下:

$$Q_a = q - u \cdot E = q - u \cdot k \cdot d^n \quad (7)$$

式中: $Q_a$  为节点的剩余能量, $J$ ;  $u$  为节点通信传输次数。因此,为延长网络寿命,一方面 WSN 在应用节点休眠调度算法的基础上,尽量采用多跳通信传输;另一方面应尽量减少相邻节点之间的距离,使得节点通信传输总能耗  $D$  尽可能低,即节点通信传输总能耗  $D$  越低,则 WSN 覆盖质量  $F$  越高。

$$D = \sum_{i=1}^m E_i = \sum_{i=1}^m k d_i^n \quad (8)$$

式中: $D$  为节点通信传输总能耗, $J$ ;  $E_i$  为第  $i$  个节点的通信传输能耗, $J$ 。

由上述影响网络覆盖质量目标函数  $F$  的参数分析可知:布设的节点数量越多,节点覆盖率越高,节点布设总能耗越高,相邻节点的距离越小,节点通信传输总能耗越低。节点休眠率越高,则节点总能量消耗越慢,节点通信传输总能耗越低。因此,为保证目标函数的单调性,取节点未覆盖率参与目标函数计算,建立质量覆盖线性规划模型如下:

$$F = Q + D + (1 - R) \quad (9)$$

联立式(4)、式(5)、式(8),则网络覆盖质量目标函数  $F$  的求解过程如下:

$$F = m \cdot q + \sum_{i=1}^m k d_i^n + \frac{3(V + V_1) - 4m\pi r^3}{3V} \quad (10)$$

## 2.3 改进遗传算法求解

由式(8)和式(9)可知:节点未覆盖率越低,越接近目标需求,节点布设总能耗越低、节点通信传输总能耗越低,WSN 整体越节能,因此,目标函数的取值理论上越小越好。但由于 3 个目标之间,节点未覆盖率与节点布设总能耗呈负相关,节点未覆盖率与节点通信传输总能耗呈正相关,节点布设总能耗与节点通信传输总能耗呈负相关,因此,需要通过改进遗传算法求解 WSN 覆盖质量的目标函数,目标函数的最小值即 WSN 覆盖质量的最优解,运算过程如下:

1) 初始化。采用实数编码方式编码节点空间位置,设定种群规模为 80,每个个体在长 100 m、宽 100 m、高 3 m 的单元区域内随机产生 50 个节点空间坐标,并进行归一化,从而建立初始群体  $P(0)$ 。

$$P(0) = \{a_1, a_2, \dots, a_j\} \quad (11)$$

式中  $a_j$  群体中第  $j$  个个体的三维空间坐标,  $j \in [0, 80]$ 。

设置进化的迭代次数为  $t$  ( $0 \leq t \leq 500$ ),即最多迭代 500 次,对 50 个节点空间坐标进行寻优。

2) 个体评价。在第  $t$  代群体的适应度评估过程中,使用式(10)作为适应度函数,其物理意义代表 WSN 的覆盖质量,包括节点布设总耗能、节点通信传输总耗能和节点未覆盖率 3 个因素。通过最小化适应度函数可得到平衡三者之间关系的 WSN 节点布局和控制策略。

计算第  $t$  代群体  $P(t)$  中的适应度时,将  $P(t)$  代入至式(10)中计算得到此代适应度函数的值。

3) 选择运算。在遗传算法中,首先将选择算子应用于整个群体,从中挑选出最优个体或通过配对交叉产生的新个体,将这些具有较高适应度的个体遗传给下一代,同时剔除适应度较低的个体。选择过程主要基于对个体适应度的评价,因此需要计算每个个体在种群中适应度所占的比例,即适应度选择概率如下:

$$p_s(a_i) = \frac{f(a_i)}{\sum_{i=1}^j f(a_i)} \quad (12)$$

为实现这一过程,文中采用轮盘赌方式,从群体中选择适应度较高的个体,以确保这些个体有更大的机会传递其基因到下一代。

4) 交叉运算。交叉算子在遗传算法中扮演着重要角色,设置初始交叉概率,将交叉算子作用于群体,并应用式(1)的 logsig 函数进行自适应调节。

$$c_p(t) = 0.5 + \text{logsig}\left(5 \times \left(\frac{t}{500} - 0.5\right)\right) \times 0.3 \tag{13}$$

式中  $c_p(t)$  表示在时间  $t$  时刻的自适应交叉概率。

5) 变异运算。在一个种群中,改变个体某些点位上的遗传数值进行变异,得到下一代的群体  $P(t+1)$ 。设置初始变异概率  $m_p(t) = 0.1$ ,将变异算子作用于群体,并按照式(1)的  $\text{logsig}$  函数进行自适应调节,使得算法能够在不同的进化阶段灵活调整变异率,从而增强种群的多样性和适应性。

$$m_p(t) = 0.1 - \text{logsig}\left(5 \times \left(\frac{t}{500} - 0.5\right)\right) \times 0.1 \tag{14}$$

6) 终止条件判断。若  $t = 500$ ,则已达到最大

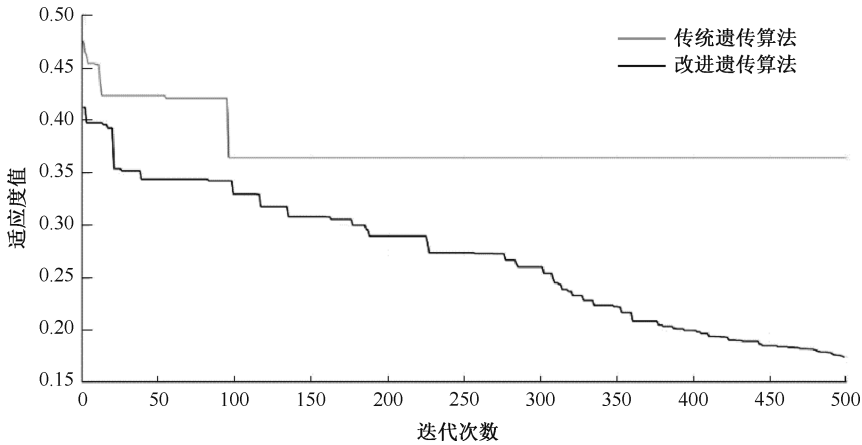


图5 改进遗传算法收敛对比

Fig. 5 Convergence comparison diagram of improved genetic algorithm

选取某一时刻的结果进行研究,运算结果如图6所示。由图6可知:文中所采用的改进遗传算法与传统遗传算法相比,目标函数运算结果得到了大幅的降低,初始节点数量从20开始,目标函数运算结果减少了50%以上,改进效果突出。随着初始节点数量的增加,目标函数运算结果降低的幅度趋于平缓,可见初始节点数量达到60以后,继续增加的意义并不大。

不同初始节点数量下的节点覆盖率和节点休眠率,如图7所示。由图7可知:随着初始节点数量增大,节点覆盖率和节点休眠率整体均呈上升趋势。在文中的3个目标中,首要目标即是节点覆盖率,火电厂粉尘环境监测系统的设计目的是为了防止职业危害和粉尘爆炸,节点覆盖率直接影响了是否存在监控盲区。因此,当初始节点数量为50时,节点覆盖率最大,当初始节点数量继续增长时,节点覆盖率开始下降。此时节点休眠率为76.19%,即在节点

迭代次数,此时的最优解即为进化过程中最大适应度的个体,在此基础上循环20次后,对历史最优适应度值进行比较,得到最终的目标函数的最小值,即目标函数的最优解,终止计算。

为确定合适的节点布设数量,分别设置初始节点数量  $m$  为 10、20、30、40、50、60,并按照上述运算过程进行求解运算,改进遗传算法收敛对比如图5所示。由图5可知:文中改进的遗传算法收敛速度远大于传统遗传算法,传统遗传算法适应度达到0.3649需要迭代95次,而文中改进的遗传算法仅需20次。且最终改进遗传算法的适应度值0.1745,相比传统遗传算法的适应度值0.3649,优化了52.18%,可见文中所采用的改进遗传算法效果较好。

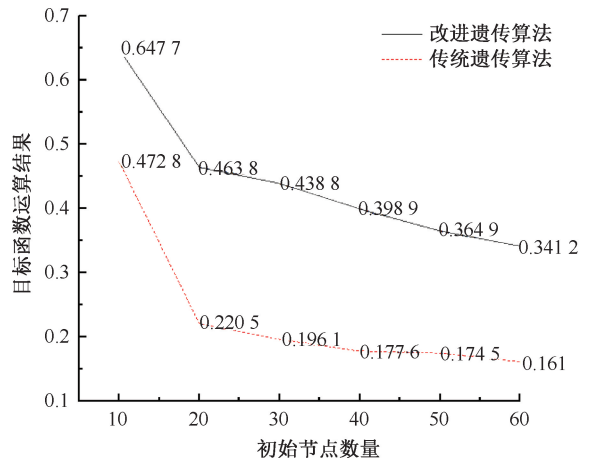


图6 改进遗传算法运算结果对比

Fig. 6 Comparison of results of improved genetic algorithm

休眠调度算法的调节下每一时刻仅23.81%的节点处于工作状态。

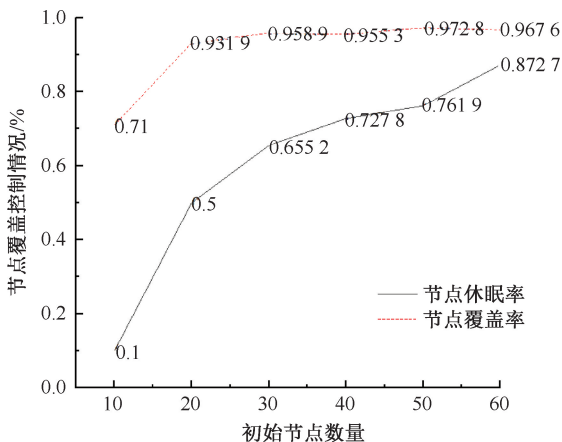


图 7 节点覆盖控制情况对比

Fig. 7 Comparison of node coverage control

不同初始节点数量下的节点布设总能耗与节点通信传输总能耗的能量消耗总和如图 8 所示。由图 7 和图 8 可知:当初始节点数量为 50 时,其目标函数最优解仅比初始节点数量为 60 时高一些,节点能量消耗总和略高于初始节点数量为 40 和 60 的时候。因此,选择初始节点数量为 50 作为研究对象,此时目标函数求解情况较好,首要目标节点覆盖率最高,节点能量消耗总和较低。当初始节点数量为 50 时,经计算确定单元区域内最优节点数量为 42 个,节点覆盖率 97.28%,节点休眠率 76.19%。

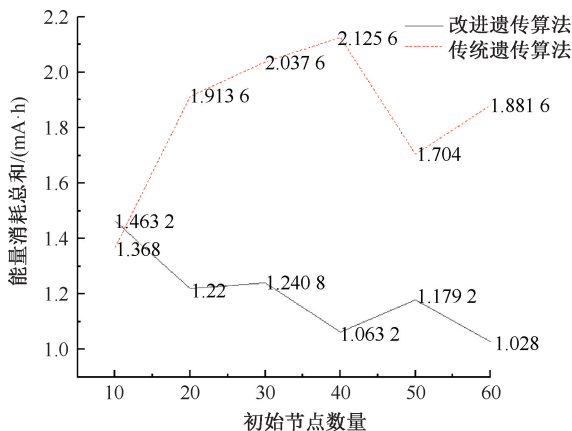


图 8 能量消耗总和对比

Fig. 8 Comparison of total energy consumption

选取某一时刻的节点分布情况如图 9 所示,图中灰色球体代表工作状态的节点,深黑色球体代表休眠状态的节点。长方体代表长 100 m、宽 100 m、高 3 m 的单元区域,节点布设在单元区域所在的空间内。

由于设定节点的感知半径为 20 m,远大于场地高度,所以节点布设高度对节点的通信能力没有影

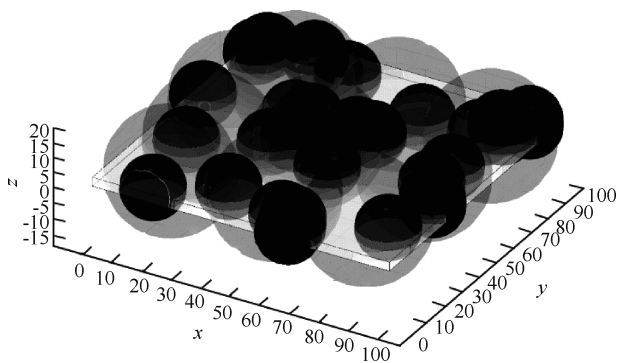


图 9 节点分布情况

Fig. 9 Node distribution diagram

响。但出于实际因素考虑,粉尘颗粒受重力影响发生沉降,不同高度的粉尘浓度差异较大,其易发生职业危害和易出现粉尘爆炸的高度也不同,因此,节点应布设在不同高度的位置采集信息。节点分布情况俯视图如图 10 所示,从图 10 可以看出,节点覆盖率高,较好地解决了传统节点随机分布部署的方式导致的节点覆盖率低的问题。

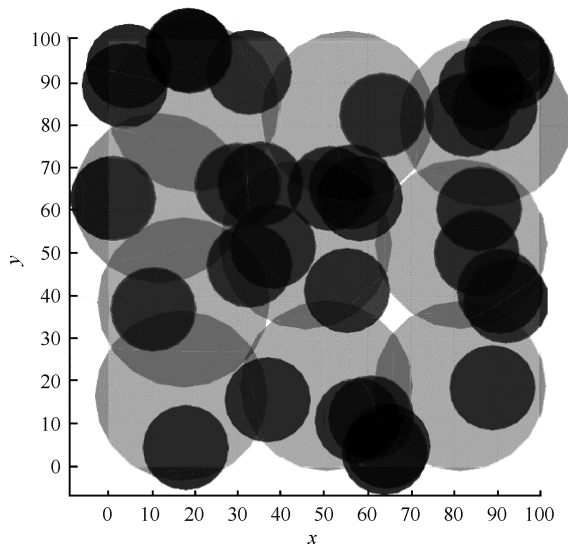


图 10 节点分布情况俯视图

Fig. 10 Top view of node distribution

### 3 电厂粉尘监测系统效果验证

为验证文中所提出方法的有效性,建立一系列仿真环境,利用相关工具进行性能分析和评价,并与 Vahabi、Eslaminejad、Dashti<sup>[20]</sup>、Titaev<sup>[21]</sup>方法的性能进行比较。

对比结果表明:在传感器节点初始能量分布较广的情况下,所提出的路由标准显著提高了网络寿命和节点的平均寿命。仿真环境的主要参数见表 1。

表 1 主要仿真参数

Table 1 Main simulation parameters

序号	仿真参数	取值
1	节点数量	100
2	分布面积/ m <sup>2</sup>	100×100
3	基站位置	(50, 175)
4	初始能量/ J	0.005
5	光电子器件能量损耗/(pJ·bit <sup>-1</sup> )	4
6	能量系数/ (pJ·bit <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	4
7	扫描角度/(°)	60
8	接收数据能量损耗/(pJ·bit <sup>-1</sup> )	60
9	数据融合能耗/ (nJ·bit <sup>-1</sup> )	5
10	包长/bit	4 000
11	控制包长/bit	200

从预期簇头比率  $p$  上看,不同取值对网络能耗和寿命的影响如图 11 所示。

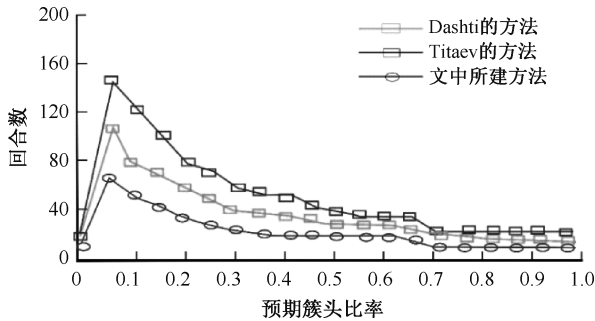


图 11 不同簇头比率对网络寿命的影响

Fig. 11 Influence of different cluster head ratios on network lifetime

从图 11 看出,当预期簇头比率  $p=0.05$  时,节点的死亡回合数最大,相比其他方法  $p$  的取值存活时间最久。另外,当  $p=0.05$  时,3 种方法的节点死亡回合数差异最大。随着  $p$  值的增加,则节点的存活时间变短。

在 3 种方法中,基于局部能量和距离的聚类算法 (Local Energy and Distance-Based Clustering Algorithm, LEDBCA) 和低能量自适应聚类层次 (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH) 协议对节点剩余能量的影响主要体现在多跳网络结构中,节点剩余能量与回合数的关系如图 12 所示。通过利用多跳网络结构,这些协议能够更有效地管理节点的能量消耗,延长整个网络的寿命。

从图 12 看出,在运行该方法的前 10 个回合中,LEDBCA 和 LEACH 协议对多跳网络结构引起的节

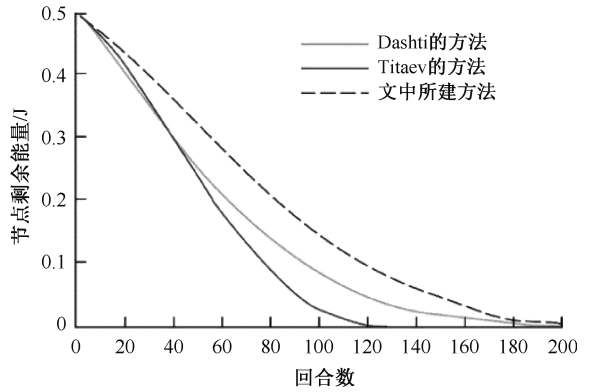


图 12 节点剩余能量与回合数的关系

Fig. 12 Relation between residual energy of nodes and number of turns

点剩余能量的影响几乎相同。然而,随着网络运行时间的延长,文中所采用方法的优点逐渐显现出来,节省了更多能量。从 3 条曲线的斜率看出,文中所采用方法代表的曲线斜率最小,即能耗较慢。

网络寿命是衡量 WSN 节能效果优劣的根本指标之一,良好的休眠管理策略能够有效延长网络寿命,网络中的节点的存活数量可反映出网络的寿命是否得以延长,回合数与节点寿命的关系如图 13 所示。由图 13 可知:随着网络运行时间的增加,采用文中所建方法进行节能优化的 WSN 优势更加明显。未进行节能优化和采用文中所建方法节能优化的 WSN 在网络中死亡一半节点的回合数分别为  $r = 98$  和  $r = 147$ ,网络寿命延长 49 个回合,此时采用文中所建方法进行节能优化的 WSN 相比未进行节能优化的无 WSN 寿命高出 50%。

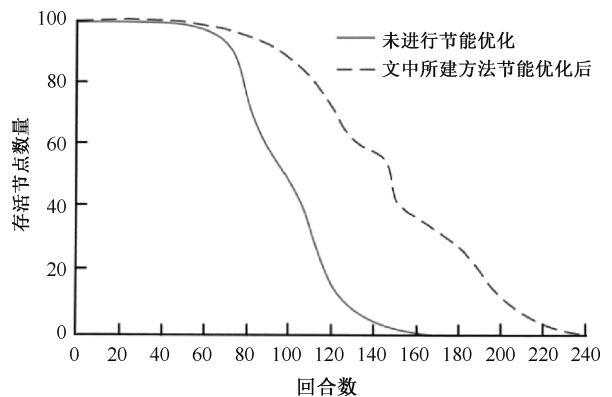


图 13 回合数与节点寿命的关系

Fig. 13 Relationship between number of turns and lifetime of nodes

当  $r = 170$  时,未进行节能优化的 WSN 所有节点都死亡,而采用文中所建方法进行节能优化的 WSN 仍有 38 个节点存活。最终采用文中所建方法

进行节能优化的 WSN 在  $r = 240$  时节点全部死亡,相比未进行节能优化的 WSN 寿命高出 41%。即一般未进行节能优化的 WSN 寿命在 2 年左右,通过文中所建的方法进行节能优化后,WSN 寿命在 2 年 10 个月左右,延长了 10 个月左右,进而减少了更换电池的次数,进一步延长了网络寿命。这一结果表明:文中采用的方法在多跳网络结构下能有效延长 WSN 的寿命。

## 4 结 论

1) 改进遗传算法收敛速度远大于传统遗传算法,传统遗传算法适应度达到 0.364 9 需要迭代 95 次,而文中改进的遗传算法仅需 20 次。且最终

改进遗传算法的适应度值 0.174 5,相比传统遗传算法的适应度值 0.364 9,优化了 52.18%。

2) 考虑了多个因素,包括覆盖率、能耗等,通过对不同初始节点数量的计算对比,确定最优初始节点数量为 50 个,最终得到 42 个最优节点,覆盖率达 97.28%,节点休眠率为 76.19%,进一步对火电厂粉尘环境监测系统进行了节能优化。

3) 文中的 WSN 节点为多种传感器提供了数据采集,其中部分传感器数据可能出现冗余。如为减少节点数量,可将相邻位置温度和湿度传感器合并使用,降低对应传感器数量。同时,可考虑非集中式传感器分散布置方式,降低 WSN 的整体能耗。还可以进一步研究基站位置的选择对节能优化的影响。

## 参 考 文 献

- [1] MEHMOOD G, KHAN M S, WAHEED A, et al. An efficient and secure session key management scheme in wireless sensor network[J]. Complexity, 2021: DOI:10.1155/2021/6577492.
- [2] 贾青青,贾纹纹,张秦,等.基于 NB-IoT 的典型气体污染物实时监测系统设计[J].传感器与微系统,2022,41(9): 102-104,108.  
JIA Qingqing, JIA Wenwen, ZHANG Qin, et al. Real-time monitoring system design for typical air pollutants based on NB-IoT[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(9): 102-104, 108.
- [3] 王明华,黄畅,王彦,等.无线传感器网络节点重部署研究进展[J].计算机应用研究,2023,40(4):978-986.  
WANG Minghua, HUANG Chang, WANG Yan, et al. Research progress of nodes redeployment in wireless sensor network[J]. Application Research of Computers, 2023, 40(4): 978-986.
- [4] MINH T N, KEITH A T. Optimizing number of clusters for energy saving purpose in wireless sensor networks[C]. International Conference on Engineering Research and Applications, 2018: 455-461.
- [5] 李守玉,何庆,陈俊.改进平衡优化器算法的 WSN 覆盖优化[J].计算机应用研究,2022,39(4):1168-1172, 1189.  
LI Shouyu, HE Qing, CHEN Jun. Improved equilibrium optimizer algorithm for WSN coverage optimization[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(4): 1168-1172, 1189.
- [6] 郭超,杨宇轩,胡荣磊,等.基于粒子群算法的 WSN 覆盖优化[J].计算机应用研究,2020,37(4):1170-1173, 1182.  
GUO Chao, YANG Yuxuan, HU Ronglei, et al. WSN coverage optimization based on particle swarm optimization[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(4): 1170-1173, 1182.
- [7] KRISHNANAND K N, DEBASISH G. Theoretical foundations for rendezvous of glowworm-inspired agent swarms at multiple locations[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(7): 549-569.
- [8] NEEDELL D, VERSHYNIN R. Uniform uncertainty principle and signal recovery via regularized orthogonal matching pursuit[J]. Foundations of Computational Mathematics, 2009, 9(3): 318-334.
- [9] NEEDELL D, VERSHYNIN R. Signal recovery from incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Processing, 2010, 4(2): 310-316.
- [10] 余修武,彭威,余员琴,等.基于 SSO 的铀尾矿库无线传感器网络定位算法[J].中国安全科学学报,2023,33(4): 84-90.  
YU Xiuwu, PENG Wei, YU Yuanqin, et al. Localization algorithm for uranium tailings reservoir based on SSO in wireless sensor network[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 84-90.
- [11] 郭瑞,徐广璐.基于信息融合与 GA-SVM 的煤矿瓦斯浓度多传感器预测模型研究[J].中国安全科学学报,2013,

23(9):33-38.

GUO Rui, XU Guanglu. Research on coal mine gas concentration multi-sensor prediction model based on information fusion and GA-SVM[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(9): 33-38.

- [12] 李静,莫思敏. 基于改进遗传算法的深度神经网络优化研究[J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(8): 1 503-1 511.  
LI Jing, MO Simin. Optimizing deep neural networks using a modified genetic algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2021, 43(8): 1 503-1 511.
- [13] ZHOU Xiaoping, HUANG Xiaocheng, ZHAO Xiaofeng. Optimization of the critical slip surface of three-dimensional slope by using an improved genetic algorithm[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(8): DOI:org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001747.
- [14] 余成成,徐巍,钟宇超,等. 基于多通信半径和改进遗传算法的 DV-Hop 定位[J]. 仪表技术与传感器, 2023(2): 99-103, 120.  
YU Chengcheng, XU Wei, ZHONG Yuchao, et al. DV-Hop localization based on multiple communication radius and improved genetic algorithm[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(2): 99-103, 120.
- [15] 李汝宁,冯兴,姚仰平,等. 基于改进遗传算法的机场场道施工方案多目标优化[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-11[2024-08-30]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0893>.  
LI Runing, FENG Xing, YAO Yangping, et al. Multi objective optimization of airport runway construction scheme based on improved genetic algorithm[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1-11[2024-08-30]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0893>.
- [16] WEI Huixian, LIU Jia. Computer mathematical modeling based on the improved genetic algorithm and mobile computing[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2022, 2021: DOI:org/10.1155/2021/1584435.
- [17] 向征,袁博轩,刘玥琳. 基于多目标融合及改进遗传算法的终端区进场协同排序[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 13 104-13 113.  
XIANG Zheng, YUAN Boxuan, LIU Yuelin. Collaborative sequencing of arrival flights in terminal area based on multi-objective fusion and improved genetic algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(29): 13 104-13 113.
- [18] 周天清,胡海琴,曾新亮. NOMA-MEC 系统中基于改进遗传算法的协作式计算卸载与资源管理[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(9): 3 014-3 023.  
ZHOU Tianqing, HU Haiqin, ZENG Xinliang. Cooperative computation offloading and resource management based on improved genetic algorithm in NOMA-MEC systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(9): 3 014-3 023.
- [19] HAMZA M, MUHAMMAD B, ABUBAKAR S A. An improved genetic algorithm based power system stabilizer for power system stabilization[C]. 2019 IEEE AFRICON, 2019: 1-5.
- [20] SHAHROKH V, MOHAMMADREZA E, SEYED E D. Integration of geographic and hierarchical routing protocols for energy saving in wireless sensor networks with mobile sink[J]. Wireless Networks, 2019, 25(5): 2 953-2 961.
- [21] ALEXANDER T. Energy saving routing metric for aggregate low rate wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2019, 26(3): 2 037-2 050.



**作者简介:** 王博 (1989—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,主要从事工业安全风险评估、安全风险预测预警算法、智能保障技术等研究工作。E-mail:15546645502@126.com。