

基于多策略混合改进HHO算法的水环境监测网络节点部署优化研究

高深

福建绿疆生态环境咨询有限公司，福建福州

摘要：为精确捕捉水质参数的微小变化，提高水环境监测准确性与覆盖范围，掌握水质状况、预防水污染、改善水环境质量，利用多策略混合改进HHO算法，开展了水环境监测网络节点部署优化研究。定位水环境监测区域，在监测区域内合理设置监测断面；建立网络传感器节点覆盖范围与能量模型，设计节点部署方案；基于多策略混合改进HHO算法寻优，得出最优部署方案，提高监测网络的覆盖范围和能效。实验结果表明：该方法应用后，能够更有效地优化监测网络节点部署位置，确保监测区域至少98%的水体面积得到有效监测。

关键词：多策略混合改进HHO算法；水环境；网络监测；节点部署

Research on Node Deployment Optimization of Water Environment Monitoring Network Based on Multi-Strategy Hybrid Improved HHO Algorithm

Shen Gao

Fujian Lüjiang Ecological Environment Consulting Co., Ltd, Fuzhou, Fujian

Abstract: To accurately capture the minute changes in water quality parameters, improve the accuracy and coverage of water environment monitoring, grasp the water quality status, prevent water pollution and improve the water environment quality, the research on the deployment optimization of water environment monitoring network nodes was carried out by using the multi-strategy hybrid improved HHO algorithm. Locate the water environment monitoring area and reasonably set up monitoring sections within the monitoring area. Establish the coverage range and energy model of network sensor nodes, and design the node deployment scheme; Based on the multi-strategy hybrid improvement of the HHO algorithm for optimization, the optimal deployment scheme is obtained to enhance the coverage and energy efficiency of the monitoring network. The experimental results show that after the application of this method, the deployment positions of the monitoring network nodes can be optimized more effectively to ensure that at least 98% of the water area in the monitoring area is effectively monitored.

Keywords: Multi-strategy hybrid improved HHO algorithm; Water environment; Network monitoring; Node deployment

* 作者简介：高深（1995-），男，汉，福建福州，本科，研究内容为环境工程相关。

1 引言

地表水环境监测作为水资源保护和管理的重要手段,对于掌握水质状况、预防水污染、改善水环境质量具有重要意义。无线传感器网络(WSN)作为一种新型的信息采集技术,具有自组织、低功耗、高覆盖等优点,在水环境监测中展现出巨大的应用潜力。通过在水域中合理部署传感器节点,可以实现对水质参数的实时监测和数据采集,为水环境监测提供有力支持。

当前的水环境监测网络节点部署方法在实际应用中面临诸多问题,例如文献[1]提出方法主要依赖于历史监测数据,通过分析水体特征、污染源分布和监测需求,选择具有代表性的位置进行传感器节点的部署,由于未充分考虑水体的实际流动性和复杂性,可能导致监测网络在某些区域的覆盖不足或冗余;文献[2]提出方法利用改进布谷鸟搜索算法划分网格,在每个网格的中心或特定位置部署传感器节点,但是网格大小固定,可能无法精确捕捉水质参数的微小变化,影响了监测数据的精度和准确性。

多策略混合改进 Harris 鹰优化(HHO)算法作为一种新兴的元启发式算法,通过模拟 Harris 鹰的捕猎行为,提高了算法的搜索能力和优化效果,在解决复杂优化问题中展现出独特的优势[3]。基于此,本文开展了基于多策略混合改进 HHO 算法的水环境监测网络节点部署优化研究,以满足水环境监测网络节点部署优化的实际需求。

2 水环境监测网络节点部署优化研究

2.1 定位水环境监测区域

在开展基于多策略混合改进 HHO 算法的水环境监测网络节点部署优化研究时,前期资料收集工作尤为关键。收集监测区域的地理资料涵盖经纬度范围、行政区划边界等,地形资料包括海拔高度、坡度坡向、山地平原分布等,这些能为节点部署的空间定位提供基础框架;气候资料涉及年均降水量、气温变化、风向风速等,可辅助分析污染物随气候的扩散规律;水文资料包含水位变化、流速流量、

水体温度等,对了解水体运动及污染迁移有重要意义。调研区域内污染源分布时,工业排放要查清工厂的位置、排放污染物种类与浓度、排放时间规律等;农业面源污染需掌握耕地分布、化肥农药使用量及种类、畜禽养殖规模等;生活污水排放要明确居民区分布、人口数量、污水收集处理情况等。分析监测区域自然环境特征,河流流向决定了污染物的迁移路径,湖泊分布影响着污染的汇聚与扩散,湿地类型及其净化能力关乎污染的自然消减。明确监测的主要水质指标,如 pH 值、化学需氧量、氨氮含量等,结合监测目标和收集到的资料,确定监测区域的大致范围[4,5]。

为确保监测范围的全面性和针对性,特别考虑了水体类型(如河流、湖泊、水库等)及流域内特有的生态系统(如湿地生态系统、水生生物群落等)和地质特征(如土壤类型、岩石分布等)。利用 GIS 技术对监测区域进行空间分析,通过叠加各类数据图层,精准识别出关键的水体、污染源和生态敏感区(如饮用水源保护区、鱼类产卵场等)。基于这些分析,对监测区域边界进行微调,确保所有关键区域均被纳入监测范围,避免出现监测盲区。

在监测断面设置上,严格遵循科学原则,共设立了 10 个监测断面。其中 3 个背景断面位于流域上游,且距污染源至少 10 公里,能反映水体未受污染时的本底状况;4 个控制断面紧邻主要污染源排放口,可及时掌握污染物排放后的初始影响;3 个消减断面位于污染物主要降解区域,用于监测污染物在自然环境中的消减过程。每个监测断面上,根据水体深度,布置至少 3 个采样点,分别在表层、中层和底层,以确保水样能够全面反映水体在不同深度和位置的污染状况,为后续的算法优化和节点部署提供准确、全面的数据支撑。

通过以上流程内容,可以系统地定位水环境监测区域并实施有效的监测活动。

2.2 建立网络传感器节点覆盖范围与能量模型

依据监测区域的具体地形(如山地、平原、河谷等)、面积大小及监测精度要求,精准设计节点部署策略。若区域多山地且地势复杂,存在较多

高低起伏的地形和遮蔽物,会影响节点的感知和通信效果,因此节点数量需适当增加以适配地形,通常比平坦区域多20%-30%,确保信号能有效穿透障碍;当区域面积较大时,则需合理规划节点分布密度,避免因距离过远导致数据传输延迟或丢失,一般每平方公里部署5-8个节点,同时结合地形特点进行局部调整。在空间布局上,采用多策略混合改进HHO算法优化,该算法能综合权衡各方面因素。既要保证各节点均匀分布实现均衡覆盖,使监测区域内每个角落都能被有效监测,又要避免节点过度集中增加成本,通过算法的智能计算,在满足覆盖需求的前提下,将节点数量控制在合理范围内,达成覆盖范围与建设成本的平衡。同时,根据不同区域重要性调整节点密度,关键污染源周边和生态敏感区作为监测的重点区域,节点密度高于普通区域,例如在污染源周边500米范围内,节点密度可达到普通区域的2倍,以更精准地捕捉污染变化。基于每个节点固定的感知半径与通信距离,明确其独立覆盖范围,感知半径通常设置为50-100米,通信距离为100-200米,确保各节点能高效采集和传输数据,形成一个稳定的监测网络。为全面评估监测区域的覆盖效能,深入考量节点间可能出现的重叠覆盖区域与潜在监测盲区。通过引入覆盖度计算模型,结合空间重叠分析技术,精确量化整个监测网络的有效覆盖面积与效率。计算模型能统计有效覆盖区域占比,当占比达到95%以上时,可认为满足基本监测需求;空间重叠分析可识别重叠区域并优

化,对于重叠度过高的区域适当减少节点,对于存在盲区的区域及时补充节点,切实保障每一个关键区域都能被精准监测,无监测遗漏[6]。

分析传感器节点在不同工作状态下的能量消耗,包括感知、通信、计算等。考虑节点的休眠、唤醒机制对能耗的影响。根据能量消耗分析结果,构建能量消耗模型,表达式如下:

$$E_t = (P_s \times t_s + P_c \times t_c + P_r \times t_r) \times (1 - t_{sl}) + P_{sl} \times t_{sl} \quad (1)$$

其中, P_s 、 P_c 、 P_r 、 P_{sl} 分别表示传感器节点在感知、通信、计算、休眠状态下的平均功率; t_s 、 t_c 、 t_r 、 t_{sl} 分别表示在传感器节点在感知、通信、计算、休眠状态下的工作时间比例。利用上述模型与参数,在监测区域内动态部署传感器节点。

通过以上流程内容,可以系统地建立网络传感器节点的覆盖范围与能量模型,为无线传感器网络节点部署优化提供有力支持。

2.3 基于多策略混合改进HHO算法的监测网络节点部署优化

利用多策略混合改进HHO算法,对水环境监测网络节点部署方案作出优化,以提高监测网络的覆盖范围和能效。

水环境监测网络节点部署示意图如图1所示。

如图1所示,本文在优化传感器网络布局时,兼顾了节点数量与网络覆盖率的平衡。设定所有传感器具备统一的通信与感知半径,并定义集合是 $s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为无线传感器群, (x_i, y_i) 代表集合中任

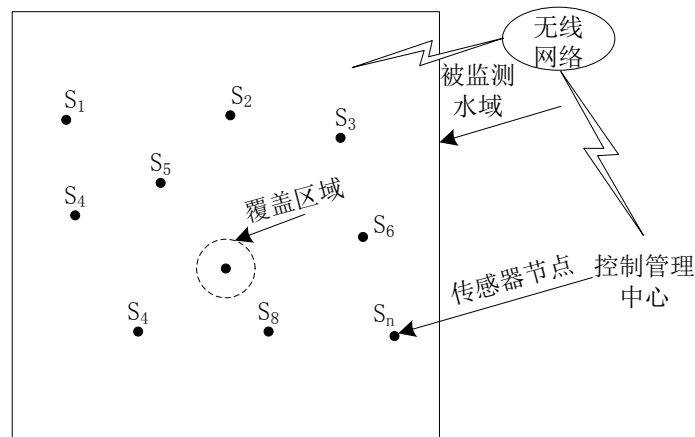


图1. 网络节点部署示意图

意传感器节点 s_i 的坐标,同时 (x_j, y_j) 标识监测区域内任意一点 s_j 的坐标。节点 s_i 至点 s_j 的直线距离(即欧氏距离)依据下述公式计算得出:

$$d(s_i, s_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

将监测区域A细分为多个网格点,对于坐标为 (x, y) 网格点 K ,其是否被传感器节点 S_i 覆盖的判定依据下述公式进行:

$$P(K, s_i) = \begin{cases} 1, d(s_i, p_j) \leq r \\ 0, otherwise \end{cases} \quad (3)$$

若对于任意坐标点 (x, y) ,存在至少一个传感器节点 C ,使得 $P_c(x, y, c_i)$ 成立,则确认该点被至少一个传感器有效覆盖。

在优化水环境监测网络节点部署的过程中,首先要构建一个初始种群。这个种群中的每个个体都对应着一套潜在的节点部署方案,其涵盖了节点的数量、位置分布等关键信息。初始种群的构建需综合参考监测区域的地形特征、污染源分布以及生态敏感区位置等因素,以保证种群的多样性和代表性,为后续的算法优化奠定良好基础。之后,利用多策略改进HHO算法对这些部署位置进行全局探索与优化。该算法的核心优势在于能够动态调整全局最优解的影响力,通过引入自适应权重因子,让算法在优化的不同阶段灵活平衡全局搜索与局部精细化的需求。在优化初期,权重因子取值较大,增强全局最优解的引导作用,使算法能在广阔的搜索空间内进行全面探索,避免过早陷入局部最优;而到了优化后期,权重因子自动减小,弱化全局最优解的影响,算法更侧重于对局部区域进行精细化搜索,从而提高解的精度。具体来说,算法借助莱维飞行机制生成新的候选解。莱维飞行所具有的长跳跃与短步进交替的特性,能让候选解在搜索空间中实现大范围的移动和小范围的精细探测。长跳跃有助于算法跳出已找到的局部最优区域,去发现更优的节点部署方案;短步进则能在潜在的最优区域附近进行细致搜索,不断优化节点位置,最终实现水环境监测网络节点部署的高效优化。公式如下:

$$X(t+1) = \omega \cdot X_b(t) + |X_b(t) - X_i(t)| \quad (4)$$

其中, $X_b(t)$ 表示当前全局最优解; ω 表示自适应权重因子; $X_i(t)$ 表示通过莱维飞行生成的解。利用自适应权重因子,动态调节全局最优个体在不同阶段的影响程度,提高局部搜索能力。

为了进一步增强种群的多样性和避免早熟收敛,引入柯西-高斯变异策略,随机选择种群中的个体,并应用两种不同类型的变异操作,公式如下:

$$U'_b = X'_r [1 + \lambda_1 C(0,1) + \lambda_2 G(0,1)] \quad (5)$$

其中, X'_r 表示随机选择的个体; λ_1 、 λ_2 均表示变异系数; $C(0,1)$ 、 $G(0,1)$ 分别表示柯西分布和高斯分布的随机数。这种混合变异方式有效增加了搜索空间的探索范围,提升了算法的全局搜索能力。

按照上述设计的多策略混合改进HHO算法进行迭代优化。在每次迭代中,算法根据更新后的节点位置得出相应的适应度值,并基于这些值对种群进行排序与选择,以保留优秀个体并淘汰较差解。通过多次迭代优化,最终收敛至一个最优的节点部署方案。该方案不仅实现了监测区域的全面覆盖,还确保了传感器节点的能效最大化。

最终,依据这一优化后的部署方案,在监测区域内精确部署传感器节点,构建起高效、可靠的水环境监测网络。

3 实验分析

3.1 实验区域

实验区域选定为S流域的一部分,总面积约为100平方公里。该区域呈现出规则的近似矩形形态,东西方向长度约10公里,南北方向宽度约10公里,整体地势较为平缓,仅在东北部存在局部丘陵地带,海拔落差约50米,这种地形特征对区域内水体的流动和污染物的扩散具有一定影响。区域内的核心水体是一条主要河流,其全长约8公里,自西向东贯穿整个区域,宛如一条蓝色丝带连接起各个部分。河流平均宽度约100米,最宽处位于中游地段,可达150米,而最窄处在上游源头附近,仅约50米。河流的水深变化较为明显,平均水深约5米,最深处可达10米,主要分布在下游的拐弯处,

这里水流相对平缓，容易形成污染物的聚集。在河流两侧，星罗棋布地分布着多个小型湖泊和湿地，它们如同璀璨的明珠点缀在流域中，总面积约占区域总面积的15%，即15平方公里。其中，最大的湖泊面积约为2平方公里，呈不规则圆形，平均水深约3米，湖岸线曲折，周边生长着茂密的水生植物，对水体具有一定的净化能力。这些湖泊和湿地与河流通过细小的水道相互连通，构成了复杂的水网系统，在调节区域水资源平衡和维护生态环境方面发挥着重要作用。该区域的污染源分布情况较为复杂。已知有3个工业排放口，分别位于河流的上游、中游和下游位置。上游排放口主要排放化工类废水，中游为机械制造废水，下游则以食品加工废水为主，每个排放口日均排放量约为500吨，这些工业废水若处理不当，将对河流水质造成严重威胁。此外，农业面源污染广泛存在，主要集中在河流两侧的农田区域，该区域面积约占区域总面积的40%，即40平方公里。农田中大量使用的化肥和农药，会随着地表径流进入河流和湖泊，成为水体污染的另一重要来源。

3.2 节点部署优化结果

将实验区域划分为10个监测子区域，预设监测点，如下表1所示。

表1. 监测子区域划分

序号	项目	参数
1	子区域面积	10平方公里，包含不同比例的水体类型和污染源。
2	子区域编号	从1到10，其中1-3号子区域位于河流上游；4-6号子区域位于河流中游；7-10号子区域位于河流下游及湖泊湿地。
3	监测点数量	5-10个

按照表1，对实验区域进行划分，部署水环境监测网络节点，开展实验测试。

将上文提出的基于多策略混合改进HHO算法的水环境监测网络节点部署优化方法设置为实验组，将文献[1,2]提出的两种传统部署方法分别设置为对照组A与对照组B。按照三种方法，对水环境监测网络节点作出部署，评估监测网络对流域内水体的覆盖程度，对比结果如图2所示。

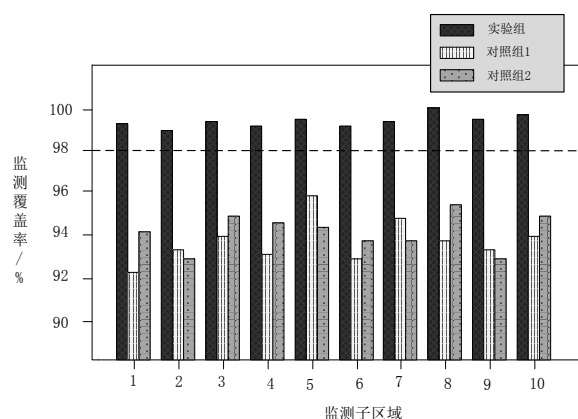


图2. 水环境监测网络节点覆盖率对比结果

由图2的对比结果可以看出，本文提出的部署优化方法应用后，在所有监测子区域均表现出更高的覆盖率，均达到了98%以上，显著高于两种传统部署方法，这表明多策略混合改进HHO算法能够更有效地优化节点部署位置，确保监测区域至少98%的水体面积得到有效监测。

4 结束语

本文提出的基于多策略混合改进HHO算法的水环境监测网络节点部署优化方法，核心目标在于通过精准优化WSN节点的部署位置，切实提高监测区域的覆盖率和监测精度。该方法借助算法的动态调整机制与全局优化能力，能让节点在复杂地形和多样水体环境中实现高效分布，减少监测盲区，使采集的数据更全面地反映水环境状况，为水环境监测提供更加准确、可靠的数据支持。当前水环境监测网络存在节点布局不合理、覆盖不均、数据精度不足等问题，而该方法通过科学的算法优化，可有效解决这些痛点。同时，它也为未来的水资源管理和保护开辟了新路径，为制定针对性的污染治理方案、开展生态修复工作等提供了有力的技术支撑。通过深入的理论与实践应用，该方法凭借其科学性和实用性，必将在水环境监测领域发挥重要作用，为提升环境保护工作的成效、推动可持续发展战略的实施贡献积极力量。

参考文献

[1] 嵇晓燕,王姗姗,杨凯,等.长江水环境质量监测网络运行

- 体系初步构建[J].环境监测管理与技术,2022,34(05): 1-5.
- [2]胡坚,胡峰俊,张红,等.基于改进布谷鸟搜索算法对水质监测无线传感器部署的优化[J].浙江农业学报,2020,32(05):897-903.
- [3]王普红,乔治宏,胡运立,等.无线传感网络关键技术及在环境监测中的应用[J].自动化技术与应用,2021,40(12):116-120.
- [4]刘海立,秦成,杨兵.水环境质量智慧监测网络建设方法研究[J].绿色科技,2021,23(20):102-104.
- [5]吴勇剑,刘晓飞,林森,等.基于无线传感器网络的海洋环境监测系统研究[J].中国设备工程,2021(02):146-147.
- [6]陈鑫琪,蔡浚丞,邢学珂.南京秦淮河流域水质自动监测网络规划研究[J].资源节约与环保,2020(10):48-49.

