

引用格式:文森,张聚伟.基于改进粒子群算法的三维无线传感器网络节点部署算法[J].电光与控制,2018,25(9):33-36,70. WEN S, ZHANG J W. Node deployment algorithm for 3D wireless sensor networks based on improved PSO algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(9):33-36, 70.

基于改进粒子群算法的三维无线传感器网络节点部署算法

文森^{a,b}, 张聚伟^{a,b}

(河南科技大学, a. 电气工程学院; b. 河南省电力电子装置与系统工程实验室, 河南 洛阳 471023)

摘要: 针对水下传感器网络的节点部署问题,提出了一种基于改进粒子群(PSO)算法的三维传感器网络节点部署算法。通过线性调整 PSO 算法的权重因子,在有效避免节点陷入局部寻优的同时,实现对当前部署区域的全面部署,消除部署后期节点在最佳部署位置附近产生的震荡现象。与虚拟力算法相比,所提算法在较短时间内即可达到最优部署效果,并且在获得较高三维覆盖率的同时,有效地保证了网络节点之间的连通性。

关键词: 水下传感器网络; 三维部署; PSO 算法

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.09.007

Node Deployment Algorithm for 3D Wireless Sensor Networks Based on Improved PSO Algorithm

WEN Sen^{a,b}, ZHANG Ju-wei^{a,b}

(Henan University of Science and Technology, a. College of Electrical Engineering;

b. Power Electronics Device and System Engineering Laboratory of Henan, Luoyang 471023, China)

Abstract: A 3D node deployment algorithm is proposed based on Improved Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for underwater sensor networks. By adjusting the weighting factor of the PSO algorithm linearly, the comprehensive deployment of the current deployment area can be realized while avoiding local optimization of the nodes. The oscillations near the optimal deployment position can be eliminated too. Compared with the virtual force algorithm, the proposed algorithm can achieve the optimal deployment effect with a shorter time, and effectively ensure the connectivity between the network nodes while obtaining a high 3D coverage rate.

Key words: underwater sensor network; 3D deployment; PSO algorithm

0 引言

无线传感器网络指的是将大量传感器节点随机抛洒至待监测区域,通过一定的部署算法形成一个具有感知、通信功能的自组织的网络系统^[1-2]。覆盖问题是传感器网络的基本问题,而节点的部署策略将直接影响网络的覆盖性能甚至是网络的生命周期。文献[3]提出一种海洋表面覆盖部署方案,较好地利用了洋流和节点自身的运动能力;文献[4]基于分簇的水下传感器网络覆盖保持路由算法,提高了网络覆盖率,降低了网络能耗;文献[5]结合拥挤度控制算法和鱼

群算法提出一种改进的水下传感器节点布置算法,覆盖效果较好;文献[6]设计了刚性驱动节点移动策略,构建了完整的节点自组织部署方法;文献[7-8]通过传感器网络拓扑重构,提高了传感器网络部署效果;文献[9]提出双簇头结构的水下传感器网络,保证了网络的覆盖率和连通性;文献[10]基于告知因子的水下传感器节点覆盖模型,提升了覆盖性能并降低了运算量;文献[11]利用较少数量的活动传感器节点实现三维空间的K覆盖,并保证网络的连通性;文献[12]通过拥挤度控制和狼群算法相结合,避免了节点早熟,实现较好覆盖效果;文献[13]考虑到汇聚节点通信能耗过高,通过增加汇聚节点周围的传感器节点数量,从而保证网络连通率以及覆盖率;文献[14]提出基于连通支配集的部署算法,在保证高覆盖率的同时,有效降低部署过程中的通信和运动能耗;文献[15-16]提出两种不同的节点深度调节算法,在保持网络高覆盖率的同时,有效保证网络连通度,

收稿日期:2017-08-30

修回日期:2018-08-15

基金项目:国家自然科学基金(61040010,61304144);河南省关键技术攻关项目(152102210284);河南省教育厅科技项目(17A510009)

作者简介:文森(1991—),男,河南开封人,硕士生,研究方向为无线传感器网络。

增强网络可靠性。

综上所述,现有算法在水下传感器网络的节点三维部署方面存在诸多问题。本文针对现有算法的不足,提出基于改进粒子群(PSO)算法的三维传感器网络节点部署算法。通过动态调整 PSO 算法的权重因子,解决了传统 PSO 算法容易陷入局部寻优的缺点,实现对当前部署区域的高效覆盖,有效消除部署后期节点在最佳部署位置附近产生的震荡现象。该算法收敛速度快,部署效果良好,在实现最优部署的同时,具有较高的网络连通度。

1 问题描述

1.1 无线传感器节点感知模型

本文传感器节点感知模型为球体二元感知模型,如图1所示。

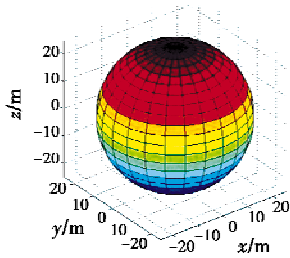


图1 传感器节点感知模型

Fig. 1 Sensor node perception model

假设第 n 个传感器节点 s_n 的位置坐标为 (x_n, y_n, z_n) , 感知半径为 r , 移动目标 p 的位置坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 则移动目标 p 到第 n 个传感器节点 s_n 的欧氏距离 $d(s, p)$ 为

$$d(s, p) = \sqrt{(x_p - x_n)^2 + (y_p - y_n)^2 + (z_p - z_n)^2} \quad (1)$$

假设移动目标 p 被第 n 个传感器节点 s_n 探测到的概率为 $p(s, p)$, 则

$$p(s, p) = \begin{cases} 1 & d(s, p) < r \\ 0 & d(s, p) \geq r \end{cases} \quad (2)$$

1.2 传感器节点覆盖分析

传感器网络节点进行三维部署时,节点之间存在相交、相离和相切3种情况。假设任意2个传感器节点 s_m, s_n 的欧氏距离为 $d(s_m, s_n)$, 即

$$d(s_m, s_n) = \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2 + (z_m - z_n)^2} \quad (3)$$

当 $d(s_m, s_n) > 2 \times r$ 时,节点 s_m, s_n 相离,传感器节点之间会存在一个覆盖盲区,导致整体覆盖率下降;当 $d(s_m, s_n) = 2 \times r$ 时,节点 s_m 和 s_n 相切,如图2a所示,二者之间依然存在覆盖盲区;当 $0 < d(s_m, s_n) < 2 \times r$ 时,传感器节点相交但不重合,为了便于分析计算,将其投影到二维空间,如图2b所示,当传感器节点 A, B, C 有且仅有一个公共点 D 时,就可以消除覆盖盲区,从而在保证获得最

大覆盖率的同时,尽可能降低传感器之间的重叠部分,有效提高了传感器节点的利用率。

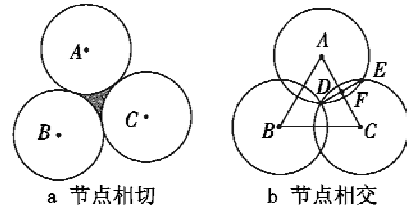


图2 传感器节点最佳部署方式

Fig. 2 The optimum deployment of sensor nodes

因此,采用图2b所示结构进行传感器节点优化部署。从图中可以看出,传感器节点 A, B, C 的圆心共同组成了一个正三角形 ABC , 其中,点 D 为3个传感器的共同交点,点 E 为传感器节点 A, C 的另一个交点,点 F 为线段 AC 与线段 DE 的交点,所以 $\angle BAC = \frac{\pi}{3}$, $\angle DAF = \frac{1}{2} \angle BAC = \frac{\pi}{6}$, 点 A 和点 D 之间的距离 $L_{AD} = r$, 线段 AC 垂直于线段 DE , 点 F 为线段 AC 和线段 DE 的中点。

由余弦定理可知,线段 AF 的长度为

$$L_{AF} = L_{AD} \times \cos(\angle DAF) = r \times \cos(\pi/6) = \sqrt{3}/2 \cdot r \quad (4)$$

线段 AC 的长度为

$$L_{AC} = 2 \times L_{AF} = 2 \times \sqrt{3}/2 \times r = \sqrt{3}r \quad (5)$$

为了消除覆盖盲区,将任意2个传感器节点之间的距离 $d = \sqrt{3}r$ 设为优化目标的临界值。

1.3 粒子群(PSO)算法

PSO 算法是当前广泛使用的一种智能算法,它通过模仿鸟群觅食行为,实现对目标的优化,与其他智能算法相比,具有参数设置少、收敛速度快以及容易实现等优点。

PSO 算法在迭代过程中通过跟踪全局最优值 (g_{Best}) 和个体最优值 (p_{Best}) 来更新自己。所谓 g_{Best} 是指整个种群中目前找到的最优解, p_{Best} 是指粒子本身所能找到的最优解。每次迭代优化时,根据式(6)、式(7)更新当前代的速度 v_i 和位置 x_i , 直到完成全部迭代,并输出当前的全局最优值。

$$v_i(t+1) = \omega * v_i(t) + c_1 * r_1 * [p_i(t) - x_i(t)] + c_2 * r_2 * [p_g(t) - x_i(t)] \quad (6)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (7)$$

式中: $v_i(t)$ 为粒子 i 在 t 时刻的速度; $x_i(t)$ 为粒子 i 在 t 时刻的位置; $p_i(t)$ 为 t 时刻个体最优值; $p_g(t)$ 为 t 时刻全局最优值; ω 为惯性权重系数; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数; c_1, c_2 为学习因子。

1.3.1 PSO 算法中速度的选择

在 PSO 算法中粒子的最大速度 v_{max} 代表了粒子单

位最大,当 v_{\max} 取值较大时,粒子搜索能力较强,但是也可能导致错过最优解位置;而当 v_{\max} 取值较小时,粒子全局搜索能力差,可能会造成局部寻优。因此,选择正确的速度最大值十分重要。本文中的传感器节点最大通信半径为 $2r$,因此为了获得最好的寻优结果,所提算法取 $v_{\max} = 2r$,即粒子的每维速度都被限制在 $[-2r, 2r]$ 。

1.3.2 PSO 算法中权重系数的选择

PSO 算法中的惯性权重 ω 影响微粒的局部寻优能力和全局寻优能力。较大的 ω 有利于跳出局部最小点,便于全局搜索,而较小的 ω 则有利于局部精确搜索,便于算法收敛,本文针对 PSO 算法容易早熟以及算法后期易在全局最优解附近产生震荡现象,选择采用线性变化的权重系数,即权重系数从最大值 ω_{\max} 线性减小到最小值 ω_{\min} 。权重系数 ω 随算法迭代次数的变化公式为

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{t * (\omega_{\max} - \omega_{\min})}{t_{\max}} \quad (8)$$

式中: t 表示当前迭代次数; t_{\max} 表示最大迭代次数; ω_{\max} , ω_{\min} 分别表示 ω 的极大、极小值,本文算法中取 $\omega_{\max} = 0.9$, $\omega_{\min} = 0.4$ 。

1.3.3 PSO 算法中 c_1, c_2 的选择

PSO 算法中的 c_1, c_2 又称为学习因子,其作用是可使粒子向群体内或邻域内的最优个体靠近,从而达到优化的目的。经过实验,在本文算法中 c_1, c_2 取值为 $c_1 = c_2 = 1.4962$ 。

2 算法实现

2.1 适应度函数的确定

在1.2节中讨论了传感器网络覆盖情况与传感器节点距离之间的关系。发现当传感器节点之间的距离等于 $\sqrt{3}$ 倍的感知半径时,整个传感器网络能够实现覆盖率和连通性二者最优。因此,可以将传感器节点的覆盖问题转化为传感器节点之间距离最优化的问题。首先,假设部署区域中存在的任意两个传感器节点 s_m, s_n 之间的距离为 $d(m, n)$,则对于任意 $m, n \in [1, N]$,

$$d(m, n) = \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2 + (z_m - z_n)^2} \quad (9)$$

假设适应度函数为 $f(x)$,将计算出来的 d 与节点最佳部署距离作对比,当 $d(m, n) < \sqrt{3}r$ 时,说明传感器节点重合的部分太多,此时令

$$f(x) = f(x) + r - \frac{d(m, n)}{2} \quad (10)$$

当 $d(m, n) > 2r$ 时,说明传感器节点已经相离,传感器节点已经出现大范围的部署盲区,这是需要避免的,此时令

$$f(x) = f(x) + d(m, n) \quad (11)$$

2.2 覆盖率的计算

为验证本文算法覆盖质量,将监测区域分别沿 x, y, z 轴划分 n 等份,每段的长度 $l = 1/n$,这些线段相交,共有 n^3 个交点,初始化被传感器节点覆盖的交点个数 $p_{\text{cover}} = 0$,然后分别计算这些交点到第 i 个传感器的距离 $D(i, n)$,即

$$D(i, n) = \sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2 + (z_i - z_n)^2} \quad (12)$$

更新 p_{cover}

$$p_{\text{cover}} = \begin{cases} p_{\text{cover}} + 1 & 0 < D(i, n) \leq r \\ p_{\text{cover}} & D(i, n) > r \end{cases} \quad (13)$$

由此,便可得到节点覆盖率为

$$R_{\text{cover}} = \frac{p_{\text{cover}}}{n^3} \quad (14)$$

2.3 算法步骤

- 1) 随机初始化 N 个传感器节点位置,并绘制其部署情况;
- 2) 随机初始化 D 个粒子的位置和速度;
- 3) 由式(9)、式(10)、式(11)计算所有粒子的适应度值;

4) 更新 p_{Best} 然后将粒子的适应度值 $f(x^{t+1})$ 与 $f(p_{\text{Best}}^t)$ 作比较,如果 $f(x^{t+1})$ 优于 $f(p_{\text{Best}}^t)$,则将当前的 $f(x^{t+1})$ 值作为 p_{Best}^{t+1} 的值,否则,不更新 p_{Best}^{t+1} ,即

$$p_{\text{Best}}^{t+1} = \begin{cases} X^{t+1} & f(X^{t+1}) \leq f(p_{\text{Best}}^t) \\ p_{\text{Best}}^t & f(X^{t+1}) > f(p_{\text{Best}}^t) \end{cases}; \quad (15)$$

5) 更新 g_{Best} ,将所有粒子的当前适应度值 $f(p_{\text{Best}}^{t+1})$ 和 $f(g_{\text{Best}}^t)$ 进行比较,如果 $f(p_{\text{Best}}^{t+1})$ 优于 $f(g_{\text{Best}}^t)$,则将当前的 p_{Best}^{t+1} 作为 g_{Best}^{t+1} 的值,否则,不更新 g_{Best}^{t+1} ,即

$$g_{\text{Best}}^{t+1} = \begin{cases} p_{\text{Best}}^{t+1} & f(p_{\text{Best}}^{t+1}) \leq f(g_{\text{Best}}^t) \\ p_{\text{Best}}^t & f(p_{\text{Best}}^{t+1}) > f(g_{\text{Best}}^t) \end{cases}; \quad (16)$$

6) 根据式(6)、式(7),更新粒子 i 的速度 v_i 和位置 x_i ;

7) 判断是否运行至最大迭代代数,如果已经达到最大运行代数,则算法结束,否则转至3)。

3 实验分析

3.1 仿真环境设置

本文使用 Matlab R2014a 进行仿真,从传感器节点覆盖率以及节点利用率方面对本文算法的部署性能进行了分析。假设传感器节点的部署区域为边长 $L = 200$ m 的立方体,每个传感器节点的感知半径 $r = 25$ m,取传感器节点数量 N 分别为 20, 40, 60, 80, 100。实验中粒子群算法参数设置如表 1 所示。

表1 粒子群算法参数设置

Table 1 Parameters setting in PSO algorithm

参数名	参数值
粒子群数目	10
最大迭代次数	20
最大权重 ω_{max}	0.9
最小权重 ω_{min}	0.4
最大速度 v_{max}	50
学习因子 c_1	1.4962
学习因子 c_2	1.4962

3.2 仿真结果

图3、图4分别是当 $N=60$ 时优化前和优化后传感器节点部署效果图,从图3中可明显看出有大量传感器节点的探测范围重合在一起,导致资源浪费,还有部分传感器节点距离其他传感器节点较远,导致传感器网络的连通性降低。而在图4中,经过本文算法优化后,消除了图3中传感器节点之间的重叠现象,整个部署区域也并未出现传感器网络无法连通的情况,所有传感器节点均匀分布在整個部署区域。相应的优化效果在图5中也有明显体现,由图5可看出,优化后的覆盖率相较优化前的覆盖率有了大幅提高,特别是当传感器节点数量 N 分别取 60, 80, 100 时覆盖率能够提高将近 30%。

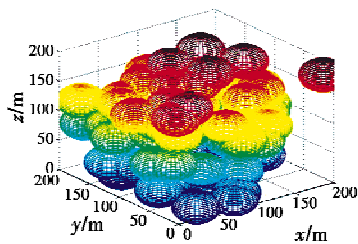


图3 60个传感器节点初始随机分布
Fig.3 The initial random distribution of the 60 sensor nodes

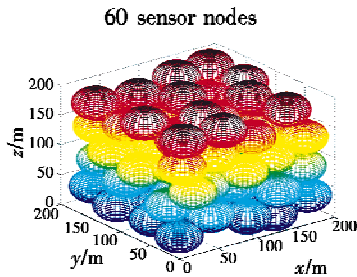


图4 60个传感器节点优化后分布
Fig.4 The distribution of 60 sensor nodes after optimization

定义传感器节点的利用率为实际覆盖率与理论覆盖率的比值,它反映传感器网络的冗余,节点利用率越高,传感器网络冗余越小。因为本文采用的是球形的传感器节点感知模型,而部署区域是一个边长为 L 的立方体,所以理论覆盖率为 $N \cdot \frac{4\pi r^3}{3} / L^3$,这是传感器网络理论上所能达到的最大覆盖度。

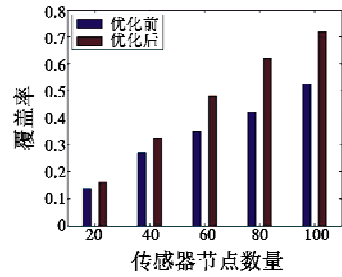


图5 PSO算法下不同数量传感器节点的覆盖率对比
Fig.5 Coverage comparison of different number of sensor nodes in PSO algorithm

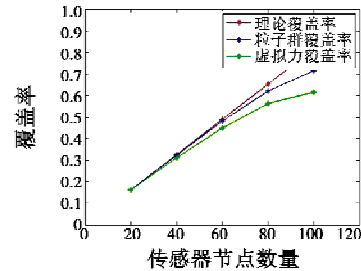


图6 不同算法下传感器节点覆盖率对比
Fig.6 Coverage rate of sensor nodes of different algorithms

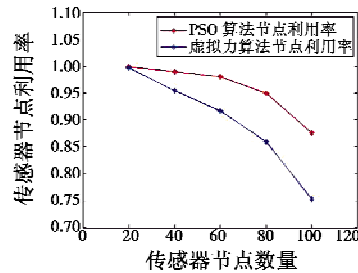


图7 不同算法下传感器节点利用率对比
Fig.7 Sensor node utilization rate of different algorithms

由图6、图7可以看出,当传感器节点数目少于80时,本文算法所能达到的网络覆盖度基本等于理论覆盖度,传感器节点利用率达到95%以上,但是随着节点数目增加,所能达到的实际网络覆盖度与理论值之间的差值开始明显变大,节点利用率出现下降,这是因为之前传感器节点的数量已经接近饱和,此时继续增加传感器的数量,传感器探测范围将会大量重合,但是相比于虚拟力算法,本文算法在性能上还是有一定的提升。

4 结论

针对水下传感器网络的节点部署问题,本文算法通过线性调整 PSO 算法的权重因子,在有效避免节点陷入局部寻优的同时,实现对当前部署区域的全面部署,有效消除部署后期节点在最佳部署位置附近产生的震荡现象。从仿真结果来看,该算法与虚拟力算法相比,能够达到更高的覆盖率,从而减少传感器节点数量,降低传感器网络成本。

(下转第70页)

- 模糊-PID 复合控制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(3):317-321.
- [3] ZHANG Y T. Sliding mode control with nonlinear disturbance observer based on genetic algorithm for rotary steering drilling stabilized platform[J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013, 6(17):3187-3192.
- [4] 夏运霞,包启亮,李锦英. 光电跟踪系统视轴稳定的鲁棒内模控制器设计[J]. 控制与决策, 2013, 28(7):1117-1120.
- [5] 申帅,张葆,李贤涛,等. 航空光电稳定平台质量不平衡力矩的前馈补偿[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5):1281-1290.
- [6] 彭树萍,于洪君,王伟国,等. 新型快速反射镜伺服系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5):1610-1615.
- [7] WANG X B, LIU J D, YANG D D, et al. On ADRC for photoelectrical stabilized platform [C]//International Conference on Mechanic Automation & Control Engineering, 2011:1452-1455.
- [8] 魏永清,许江宁,马恒. 自抗扰控制器在陀螺稳定平台控制系统中的应用[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(1):39-44.
- [9] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3):900-906.
- [10] ZHENG Q, GAO L Q, GAO Z. On validation of extended state observer through analysis and experimentation[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2012, 134(2):224-240.
- [11] 周向阳,赵蓓蓓. 惯性稳定平台扩张状态观测器/PD 复合控制[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(1):6-10.
- [12] 左义和,项昌乐,闫清东,等. 基于非线性 PID 的 E-CVT 控制研究[J]. 机械传动, 2010, 34(4):10-12.
- [13] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3):13-18.
- [14] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008:253-254.

(上接第 36 页)

参 考 文 献

- [1] CHEN K, MA M, CHENG E, et al. A survey on MAC protocols for underwater wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3):1433-1447.
- [2] 郭忠文,罗汉江,洪锋,等. 水下无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(3):377-389.
- [3] LUO J, WANG D, ZHANG Q. On the double mobility problem for water surface coverage with mobile sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(1):146-159.
- [4] 蒋鹏,阮斌锋. 基于分簇的水下传感器网络覆盖保持路由算法[J]. 电子学报, 2013, 41(10):2067-2073.
- [5] 夏娜,王长生,郑榕,等. 鱼群启发的水下传感器节点布置[J]. 自动化学报, 2012, 38(2):295-302.
- [6] 夏娜,郑语晨,杜华争,等. 刚性驱动水下传感器节点自组织布置[J]. 计算机学报, 2013, 36(3):494-505.
- [7] 何明,梁文辉,陈秋丽,等. 基于拓扑重构的水下移动无线传感器网络拓扑优化[J]. 通信学报, 2015, 36(6):78-87.
- [8] 何明,梁文辉,陈秋丽,等. 水下移动无线传感器网络拓扑愈合与优化[J]. 控制与决策, 2015, 30(2):251-255.
- [9] LIU L, LIU Y, ZHANG N. A complex network approach to topology control problem in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2014, 25(12):3046-3055.
- [10] 刘鹏鹏,姜卫东. 基于感知因子的水下传感器节点覆盖模型研究[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2015, 51(6):1203-1209.
- [11] AMMARI H M. 3D-k Cov-ComFor: an energy-efficient framework for composite forwarding in three-dimensional duty-cycled k -covered wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2016, 12(4):1-32.
- [12] JIANG P, FENG Y, WU F. Underwater sensor network re-deployment algorithm based on wolf search [J]. Sensors, 2016, 16(10):1754.
- [13] PENG J, XU Y, WU F. Node self-deployment algorithm based on an uneven cluster with radius adjusting for underwater sensor networks[J]. Sensors, 2016, 16(1):98.
- [14] JIANG P, LIU J, WU F, et al. Node deployment algorithm for underwater sensor networks based on connected dominating set[J]. Sensors, 2016, 16(3):388.
- [15] WANG Z, WANG B. A novel node sinking algorithm for 3D coverage and connectivity in underwater sensor networks[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V, 2017.
- [16] JIANG P, LIU S, LIU J, et al. A depth-adjustment deployment algorithm based on two-dimensional convex hull and spanning tree for underwater wireless sensor networks [J]. Sensors, 2016, 16(7):1087.