



浙江工业大学

硕士学位论文

论文题目：有向传感器网络中多移动目标 K 级覆盖研究

作者姓名

汪念华

指导教师

蒋一波 副教授

学科专业

计算机技术

学位类型

专业硕士

培养类别

全日制专业型学位硕士

所在学院

计算机科学与技术学院

提交日期 2019 年 06 月

Research on k level coverage algorithm of moving targets in wireless video sensor networks

Dissertation Submitted to
Zhejiang University of Technology
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Engineering



by

NianHua Wang

Dissertation Supervisor: Prof. YiBo Jiang

June., 2019

浙江工业大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经加以标注引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不含为获得浙江工业大学或其它教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江工业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密 ☐，在一年解密后适用本授权书。
- 2、保密 ☐，在三年解密后适用本授权书。
- 3、不保密 ☐。

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

中图分类号 TP391

学校代码 10337

UDC 540

密级 公开

研究生类别 全日制专业学位硕士



浙江工业大学

硕士学位论文

有向传感器网络中多移动目标 K 级覆盖研究

Research on k level coverage algorithm of moving
targets in wireless video sensor networks

作 者 汪念华

第一导师 蒋一波 副教授

申请学位 专业硕士

计算机科学与技术

学科专业 计算机技术

培养单位 学院

研究方向 无线传感器网络

答辩委员会主席 ***

答辩日期: 2019 年 月 日

有向传感器网络中多移动目标 K 级覆盖研究

摘 要

随着无线网络近年来在通信范围、可扩展性等方面的改善,无线技术得到了高速的发展。在无线网络的各分支中,无线传感器网络由于其广泛的应用,得到了学术界的广泛关注。目前大规模 WSN 中的通信已经得到了显著改善,使其能够部署在地形复杂的区域。无线网络覆盖算法的研究,能够代替人力实现入侵检测等安防措施,为企业节约成本、提高监测、生产效率等方面做出巨大的贡献。

如何有效保障传感器网络的覆盖质量,是开展无线传感器网络应用的必要前提。本文提出一种应用在无线视频传感器网络中的多移动目标多重覆盖控制策略,对提高小水电厂区监控质量,保障生产安全有着重要的意义。

本论文重点针对有向感知网络中的均衡负载、多目标 K 重覆盖问题、覆盖质量评价指标等方面展开研究,针对多移动目标 K 重覆盖问题,首先建立数学模型,通过仿真对比实验验证,并最终应用于小电站远程监控管理平台。

本文主要的研究工作及创新点总结如下:

1. 研究了现有的传感器模型以及它们在不同场景下的应用,结合实际场景定义了适合本次研究的有向感知模型。改进了原有的 K 重覆盖质量函数,同时考虑了传感器间的平衡负载,为本论文的研究工作奠定了基础。

2. 在变速移动目标 K 重覆盖问题中,采取概率预测轨迹模型,更好的模拟了现实中可能入侵监控区域的目标轨迹。对于概率预测模型中客观存在的期望覆盖质量与实际覆盖质量存在差异的情况,在均衡负载的约束下,采用一定冗余的覆盖。

3. 考虑传感器节点能耗问题,选择性的对部分传感器进行动态启动或休眠,在定长能量约束下,延长整个监控区域在一定覆盖质量下的工作时间。

4. 将本论文提出的有向传感器网络多移动目标 K 重覆盖优化方法成功运用到小水电厂区远程监控系统中,在 B/S 架构下实现厂区信息管理、传感器覆盖优化、远程控制水电机组、入侵预警等主要功能。

本文着力研究一种基于目标导向的有向传感器网络中多移动目标 K 重覆盖控制策略,在均衡能耗的基础上,保证一定的覆盖质量,最终将控制策略应用于农村小水电站远程监控系统中。

关键词: 有向感知网络, 多移动目标, K 覆盖, 能耗均衡, 目标导向算法

Research on k level coverage algorithm of moving targets in wireless video sensor networks

ABSTRACT

In recent years, wireless video sensor networks have been widely used in industrial and agricultural, environmental monitoring, military and other important fields. As a new way of information acquisition and processing, the emergence of wireless video sensor networks provides a new solution for moving target tracking. Its performance in various aspects such as ease of deployment, tracking accuracy, reliability, and scalability has enabled it to show significant advantages in areas such as surveillance and security. The guarantee of the coverage quality of the sensor network is a necessary prerequisite for the development of related work. This dissertation focuses on the problem of insufficient supervision of human intrusion safety in SHP stations. Researching a multi-moving target K-level coverage control strategy in wireless video sensor networks is of great significance for improving the monitoring performance of the entire network and ensuring the safety of SHP stations.

This dissertation focuses on the key issues such as wireless video sensor network sensing model, moving target trajectory prediction model, wireless video sensor overall balanced load, moving target K-level coverage, coverage quality evaluation index and other key issues. The assumptions, the establishment of mathematical models, the proposed algorithm, and the steps of the simulation contrast experiment are fully explained and will be successfully applied to the simulation platform of the wireless video sensor network of the small hydropower plant.

The main achievements of this paper are as follows:

1. Investigated the existing various types of directed sensor perception models and their application in different scenarios, combined with the actual scene to define a directed perceptual model suitable for this study. The original K-level coverage quality function is improved, and the balance load between sensors is also taken into consideration, which builds a foundation for the research work.

2. For the K-coverage problem of variable-speed moving targets, the probabilistic trajectory model is used to better simulate the motion characteristics of

moving targets. For the case where there is a difference between the expected coverage quality and the actual coverage quality that exist objectively in the probabilistic forecasting model, a certain amount of redundant coverage is used under the constraint of the balanced load, and the expected difference between the coverage quality and the actual situation is reduced.

3. Considering the energy consumption of sensor nodes, some sensors are selectively activated or hibernated dynamically. Under fixed-length energy constraints, the working time of the entire monitoring area under a certain coverage quality is extended.

4. Apply the multi-objective K-level coverage algorithm of the directional sensor network proposed in this paper to the remote monitoring system of the small hydropower plant area, using the B/S architecture to implement a series of functions such as plant area monitoring, intrusion warning, energy conservation management, and decision management.

This paper focuses on the research of goal-oriented multi-objective K-level coverage control algorithm for directional sensors. At the same time, the coverage quality function is improved and the consideration of node energy balance is added.

KEY WORDS: DWSNs, Multiple moving targets, k level coverage, balanced energy consumption, target-oriented algorithm

目 录

摘 要.....	IX
ABSTRACT.....	X
第一章 绪 论.....	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 无线传感器网络介绍.....	1
1.1.2 国内外研究现状.....	2
1.2 课题背景与意义	4
1.3 课题结构	5
第二章 无线感知网络覆盖理论.....	6
2.1 引言.....	6
2.2 有向感知器.....	6
2.2.1 视频传感器.....	6
2.2.2 红外传感器.....	6
2.2.3 超声波传感器.....	6
2.3 有向感知模型.....	7
2.4 无线感知网络分类.....	8
2.5 WSN 覆盖问题分类.....	9
2.5.1 覆盖问题基本概念.....	9
2.5.2 覆盖问题分类.....	9
2.5.3 完全覆盖数学模型.....	10
2.5.4 部分覆盖数学模型.....	10
2.5.5 D-陷阱覆盖数学模型.....	11
2.5.6 目标覆盖数学模型.....	11
2.5.7 路径覆盖数学模型.....	11
2.6 传感器网络部署策略.....	12
2.7 传感器网络覆盖性能指标.....	13
2.7.1 覆盖率评价指标.....	13
2.7.2 网络能耗指标.....	14
2.8 典型覆盖优化算法.....	14
2.9 无线传感器网络应用.....	15
2.10 本章小结.....	16
第三章 多目标覆盖控制方法.....	17
3.1 引言.....	17
3.1.1 有向感知网络与全向感知网络.....	17
3.1.1 最少节点最大覆盖算法.....	17
3.1.2 MCMS 问题描述.....	17
3.1.3 整数线性规划算法.....	18
3.1.4 一种启发式贪心算法.....	19
3.2 一种受网络生命周期约束的目标导向有向传感器网络覆盖算法.....	20
3.2.1 引言.....	20

3.2.2 算法具体实施.....	21
3.2.3 算法描述.....	22
3.3 本章小结.....	22
4 基于能耗均衡的有向传感器网络中多移动目标变速 K 级覆盖算法.....	24
4.1 引言.....	24
4.2 有向感知模型.....	25
4.3 节点能耗模型.....	25
4.3.1 能耗模型.....	26
4.3.2 能耗优化模型.....	27
4.4 覆盖质量评价.....	27
4.4.1 问题重述.....	27
4.4.2 覆盖率评价指标.....	28
4.4.3 能耗均衡评价指标.....	28
4.5 基于能耗均衡的有向传感器网络多目标变速 k 级覆盖算法.....	29
4.5.1 问题重述.....	29
4.5.2 覆盖模型假设.....	29
4.5.3 移动目标轨迹预测模型.....	29
4.5.4 EEMTKLC 算法数学模型.....	29
4.5.5 均衡能耗多目标变速移动 k 级覆盖算法 (EEMOKA) 算法描述.....	30
4.5 实验仿真与性能分析.....	31
4.6 本章小结.....	38
第五章 小水电厂区无线感知器网络远程监控系统.....	39
5.1 需求分析.....	39
5.2 系统设计与实现.....	39
5.2.1 系统概要.....	39
5.2.2 系统功能模块.....	40
5.2.3 调度流程.....	41
5.2.4 系统登录界面.....	42
5.2.5 人员信息管理.....	43
5.2.6 机组额定参数管理.....	44
5.2.7 发电机组模块运行状况监测.....	45
5.2.8 水电机组远程控制.....	46
5.2.9 厂区传感器网络覆盖状况查询.....	46
5.2.10 数据库设计概要.....	47
5.3 本章小结.....	47
第六章 结论与展望.....	49
5.1 结论.....	49
5.2 展望.....	49
参考文献.....	51
致 谢.....	54
作者简介.....	55

1 作者简介.....	55
2 攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	55
3 参与的科研项目及获奖情况.....	55
4 发明专利.....	55
学位论文数据集.....	56

第一章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 无线传感器网络介绍

无线感知网络（wireless sensor network, WSN）是一种由特定目标区域内随机分布的传感器节点构成的分布式系统，同时具有网络通信能力。其中的传感器节点具有一定的能量、存储容量以及有限的处理能力。通常使用小容量电池为无线传感器节点提供能量。传感器收集的信息有助于预测和警告监测区域内的异常情况。因此，WSN 被应用在环境监测、医疗保健、军事、工业、农业和物联网技术^{[1]-[9]}，在核泄漏监测、化学战扩散监测方面也有着广泛的应用^{[10][11]}。图 1-1 为无线传感器网络示意图^[12]。

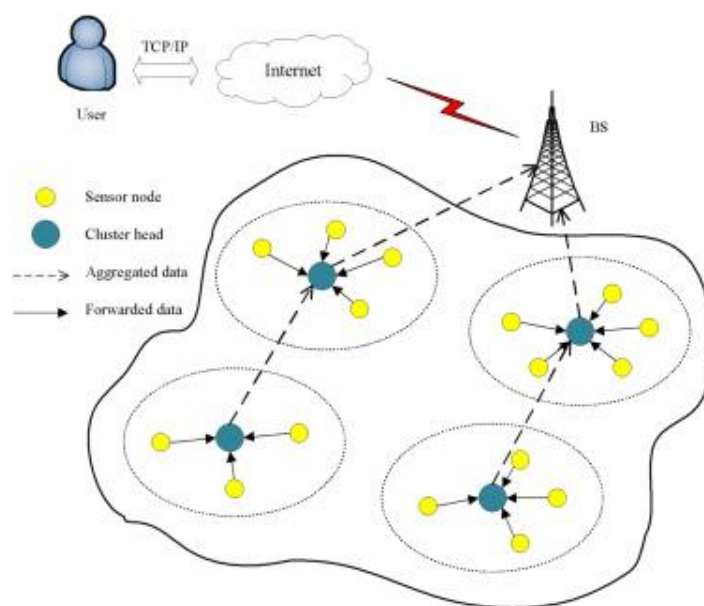


图 1-1 无线传感器网络示意图

Figure 1- 1. Schematic diagram of Wireless Sensor Networks

无线传感器网络通常由一个或多个基站和一组传感器节点组成，用于跟踪环境因素（如移动目标、温度、水盐度和湿度）的变化。每个传感器都有一个已知的感知范围，在该范围内，环境数据被传感器收集。然后，这些数据直接或通过中转节点最后传送至传感器通信范围内的基站^{[3][4]}。传感器收集的信息有助于预测和警告监测区域内的异常情况。

由于传感器节点有限的覆盖范围以及数量，使得监测区域内存在未被覆盖的区域（目标）。为了扩大覆盖范围，传感器节点的数量有增加的趋势，这需要更

高的基础设施成本。实际上，不同传感范围的传感器可以部署在同一个网络中，以适应监视区域的具体大小和形状，并优化部署成本。目前现有的传感器网络感知节点模型多假定所有传感器的感知范围固定，可能无法满足实际应用的要求。

由于传感器节点能量有限，传感器只能在有限的时间内保持活动状态。这样，传感器节点相互协调，形成传感器覆盖层，共同完成一段时间内的覆盖，每个覆盖层在一定的时间内监控目标（区域），如何优化大量传感器间的协作以达到增加传感器网络寿命的目的，成为传感器网络覆盖问题的关键 (Cerulli, Donato, Raiconi, 2012)。而这种部署冗余传感器以覆盖感兴趣的区域，同时协调传感器工作顺序以延长部署后的覆盖时间，这就是无线传感器网络 K 覆盖问题，它需要至少 K 个传感器节点来监视同一个目标。

无线传感器网络技术在工农业制造、空间工程、智能家居等诸多领域也不断的发展延伸，该技术的发展正越来越不可或缺

1.1.2 国内外研究现状

无研究表明^{[17][18]}，无线感知网络的覆盖目标是影响覆盖算法质量的关键因素，覆盖算法所优化的目标必须匹配无线传感器网络的应用。依据覆盖目标的不同，无线传感器网络覆盖问题分为三类，即区域覆盖、目标覆盖和栅栏覆盖^{[17]-[21]}。其中区域覆盖问题是覆盖问题的最常见形式^[26]，栅栏覆盖用来监测传感器网络中的边界区域（或屏障），目的是将保护屏障区域，检测试图侵入保护区的入侵者。目标覆盖问题旨在覆盖传感器网络中的一组静止或移动目标^[27]。这些覆盖问题主要目的是为了最小化覆盖区域、屏障或目标所需的传感器数量。本文主要研究目标覆盖中的多移动目标 K 重覆盖问题。

首先关注区域覆盖研究领域。区域覆盖的主要目标是通过协调大量随机部署传感器节点的感知方向，使整个传感器网络对区域的覆盖面积最大，同时避免产生覆盖盲区和重叠区^[40]。区域覆盖问题理想的解决方案是将传感器确定地放置在传感器网络的预定位置。然而确定传感器布局只能应用于部署在环境可控且相对较小的传感器网络中，当需要将大型传感器网络部署在恶劣环境且难以进入时，随机部署成为更通用的选择^{[27][28]}。Chen 等人^[23]根据不同感知节点覆盖范围的重叠区域。提出了一种基于重叠感知率的增强覆盖算法，降低了计算复杂度，同时提升覆盖范围。陶丹等人^[24]将虚拟势场引入到有向传感器网络中，并为虚拟力增加了质心的概念。考虑到传感器供应商未必支持定制传感器，且采购的传感器来源不一致，因此在部署传感器时只考虑单一型号的传感器节点是实际的，考虑到这一因素，Yoon 和 Kim 提出了一种区域覆盖问题模型^[13]，这个问题可以被描述为：给定多个具有不固定感知范围的传感器节点，如何在特定区域部署传感器，从而最大化总覆盖面积。该问题被证明该问题是 NP 难问题，探讨具有异质感知范围的传感器节点，旨在寻找固定数量感测器的最佳放置方案。该模型的目标是

使传感器节点集覆盖的面积最大。由于 NP 难组合优化问题，通常采用启发式和元启发式方法来解决，Yoon 和 Kim 提出了求解奇异边值问题（BVPS）的连续遗传算法^{[30][31]}，分别为 PGA、MGA、OPTHA 和 OPTHGA 算法，证明了其收敛性和稳定性，解决了覆盖最大化问题^[25]。这四种算法在不同层面都体现了各自的优势，相较而言 OPTHGA 算法的表现最佳。缺点是 OPTHGA 算法具有很高的计算复杂度。为了克服这个缺点，Ly 等人^[14]提出了 IGA 算法，替换了前者应用的蒙特卡罗技术，引入了一种启发式动态变异算子。与 OPTHGA 算法相比，这一改进极大降低了计算复杂度，且提升了一定算法表现^[14]。随后 Hanh^[15]等人指出 IGA 收敛速度较慢，为了提高算法的收敛速度，Hanh 等人提出了一种粒子群优化算法（DPSO），该算法在获得相似质量解的同时，收敛速度相较 IGA 算法快了将近 5 倍。在^[16]中，Binh 等人提出了改进的布谷鸟搜索（ICS）和混沌花授粉算法（CFPA）。以获得更好的计算时间。接着 Hanh 等人认为上述算法的性能在某种程度上并不稳定，比如这些算法的结果通过传感器投射到监视区域上的近似区域覆盖来评估，而该区域的覆盖率在不同的运行环境中变化很大，有时甚至超过理论上限。基于此，提出了一种新的遗传算法 MIGA 来克服上述缺点。

接着关注目标覆盖问题研究领域。Sliejepevic、Potkonjak 等人^[2]首先提出了一种基于互斥传感器节点集合的启发式算法，每一个集合实现完全覆盖整个区域，并且在任何时候只有一个传感器集合处于活动状态。该保持了一定的网络覆盖质量，同时降低了网络的能耗。Cardi 等人^[33]将传感器组织为最大数量的不相交覆盖子集，通过轮流启动这些覆盖子集来延长传感器网络寿命。Berman^[34]等人提出了一种节能监测模型，该模型在监测和通信功耗之间实现平衡的分配协议，在质量、灵活性和可扩展性方面的显著优势。Wan^[35]等人引入了流分解算法（FDA），并与 Hincapie^[36]等人提出的固定方向传感器调度问题（FDSSP）进行了比较。Yang^[37]等人提出了可变电网寿命（VP-NL）调度方案，假设每个传感器可以动态的改变其工作功率（如雷达传感器）来调节传感范围。在 VP-NL 算法中，提出了一种多项式算法，并同过大规模模拟实验验证了该算法的有效性。国内的李威^[41]等人，针对传感器网络随机部署存在的弊端，引入 RCCM 移动模型，并分析了移动目标检测率、检测时间与节点运行速度以及节点数量之间关系。张美燕等人^{[42][43]}提出了一种分布式多目标覆盖增强方法。

上述传感器网络由于传感器不具备移动特性被称为静止传感器网络。在许多情况下，可能不需要对整个区域进行监测，尤其是在考虑到所观察过程的动态性质的情况下。当传感器具备运动能力时，监控多个感兴趣点而不是整个区域会提高网络性能并允许时间相关的覆盖。在移动感知网络中，如何将目标覆盖、传感器与数据接收器的连接相结合仍是一个挑战^{[38][39]}。

接着关注栅栏覆盖。国内的班冬松等人^[44]使用具有一定移动能力的传感器节点来构建 k-栅栏覆盖，提出 1-最小移动距离和栅栏覆盖问题 (1-barrier coverage

min-sum of moving distance, 简称 1-BCMS). 证明了其是 NP-hard 的, 然后提出了 1-GBMS 问题的近似算法 CBGB (constructing baseline grid barrier)。罗卿^[45]等人通过分治法构造栅栏, 使用概率预测模型减少节点间通信开销, 在降低网络能耗以及延长传感器网络生命周期方面作出了一定贡献。秦宁宁等人^[46]利用 Voronoi 图的划分, 论证了利用 Voronoi 图产生的最小暴露进攻轨迹逼趋近于理想状态。舒坚等人^[47]将移动模型引入到栅栏覆盖问题, 能够更早的检测到入侵行为。陶丹等人^[48]为了判定网络能否提供强栅栏覆盖, 设计了一种分布式算法, 仿真显示算法以较小代价判定并改善网络强栅栏覆盖性能。国外的 Kumar 等人^[49]首先定义了无线传感器 k-栅栏覆盖概念, 引入概率栅栏覆盖的两个概念, 即弱栅栏覆盖和强栅栏覆盖。Liu 等人^[50]设计了一种分布式算法, 在不规则栅栏区域构建多个隔离屏障, 以实现强屏障覆盖。Saipula 等人^[51]研究了基于线路部署的栅栏覆盖。He 等人^[52]进一步研究了栅栏覆盖问题中基于曲线的传感器部署。

1.2 课题背景与意义

无本课题来源于“十二五”国家科技支撑计划“农村小水电高效发电技术与设备研制”。作为该课题的研究方向之一, 本论文研究有向传感器网络中多移动目标 K 覆盖优化算法及其在小水电站远程智能监控系统中的应用。

随着无线网络近年来在通信范围、可扩展性等方面的改善, 无线技术得到了高速的发展。无线传感器网络的覆盖控制问题一直以来都是学术界研究的热点之一, 研究人员从覆盖质量、覆盖效率、能量利用效率和分布策略等不同角度进行探索, 在无线网络的各分支中, 无线传感器网络由于其广泛的应用, 特别是在物联网 (IOT) 技术中, 得到了学术界的广泛关注。因此, 近几年来大规模 WSN 中的通信得到了显著改善, 使其能够部署在地形复杂的区域。无线网络覆盖算法的研究, 能够代替人力实现入侵检测等安防措施, 为企业节约用人成本、提高监测、生产效率等方面做出巨大的贡献。

农村小水电站因其因地制宜的开发方式, 有效的促进了农村及偏远地区的经济发展, 对防洪工作起到重要的作用, 同时为当地提供电力支持。然而随着小水电项目的进展, 一些安防问题也相继暴露。为了减轻小水电人为入侵对水电设备造成破坏, 一套完整的小水电站远程监控安防系统亟待开发和部署。

考虑到水电站厂区复杂的地形, 传统摄像头由于价格昂贵、覆盖区域受限等等原因, 无法实际应用到小水电安防系统中。相较之下, 无线有向传感器凭借其低廉的成本、适应大范围部署、维护成本低、足够的数据处理能力、部署简单等优点功能, 更是凭借低成本、无需布线、部署简单等特性, 正逐步成为小水电安防监控的首选设备。

为了实现高质量的网络覆盖, 覆盖控制算法的研究必不可少。按照实际应用

的方向和领域，覆盖质量评价指标有特点的方法。覆盖优化方法的好坏直接影响着传感器网络的覆盖质量、生存时间等关键因素。正是在这种需求的驱动下，本文希望通过优化无线网络覆盖算法，在满足小水电厂区覆盖率要求的前提下同时平衡感知网络能耗以延长网络运行时间。

除了移动目标追踪算法的研究，小水电远程监控系统的设计同样必不可少。水电站远程监控系统通过提供 **WEB** 服务向用户实时反馈水电站运行状态、设备参数信息等。针对非法入侵等问题，需要依据监控区域部署的传感器返回的数据，通过覆盖算法实现入侵报警功能。

1.3 课题结构

本论文总共分为六章，具体每一章的安排如下：

第一章，绪论。从研究课题来源和意义出发，具体讲述了国内以及国外相同领域无线感知网络覆盖优化问题的研究现状及发展前景以及覆盖控制的分类。阐述了本课题的研究意义，最后对本文的组织结构进行梳理和说明。

第二章，有向传感器网络相关技术。主要对传感器网络覆盖优化问题所涉及到的基础技术理论展开了详细介绍。

第三章，提出一种有向传感器网络中多移动目标**K**重覆盖算法；

第四章，提出一种基于能耗均衡的有向传感器网络多目标变速**k**级覆盖算法；

第五章，设计实现了一种小水电站厂区远程监控系统；

第六章，结论以及展望；

第二章 无线感知网络覆盖理论

2.1 引言

为了更好的展开研究和讨论,本章节对有向传感器网络中的相关技术包括有向感知模型、无线感知网络分类,覆盖质量评价指标以及几种典型有向网络覆盖控制算法进行详细的介绍,为后面几章描述做好铺垫。

2.2 有向感知器

在本节中,我们将介绍现实世界中的方向传感器并介绍它们的物理指标。方向传感器主要包括视频传感器、红外传感器和超声波传感器。

2.2.1 视频传感器

视频传感器从物理环境中收集视觉信息以监控感兴趣的区域。这些传感器基本上依赖于电荷耦合器件技术(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)成像技术。CMOS 成像技术能够将透镜、图像传感器和图像压缩和处理技术集成到单个芯片中,而采用 CCD 技术的摄像头模块更大、更重、成本也更高。

2.2.2 红外传感器

视红外(IR)传感器作为一种电子装置,能够发射或检测红外辐射,以检测周围环境变化。红外传感器可以用来测量物体的热量,也可以检测物体运动。红外传感器的种类繁多。被动红外传感器(PIR)是一种比较典型的红外传感器,仅用于测量红外辐射,而不能发射红外射线。红外传感器作为运动探测器监测环境,并在检测环境发生突变时及时反馈信息。反射式红外传感器使用物体反射的红外光,而中断式红外传感器检测由经过的物体引起的红外光中断现象。

2.2.3 超声波传感器

超声波传感器通过产生高频声波,评估反射到的回声。超声波传感器计算发送信号和接收回声之间的时间间隔,以确定本身到物体的距离。超声波传感器常用于机器人的区域地图绘制、障碍物检测和避障以及在环境中导航。此外,这些传感器也被可用于测量物体的尺寸以及容器中物体的尺寸,并根据这些尺寸对物体进行分类,在停车辅助系统和汽车报警系统中有广泛的应用。

2.3 有向感知模型

与全向传感器不同，有向传感器（如红外、超声波和视频传感器）具有有限的视角，因此无法像全向感知器那样感知整个圆形区域。方向传感器节点可以有多个工作方向，并且可以调整感应方向。严格上讲，三维传感模型更加符合现实中的监控环境，然而，由于三维传感模型在设计和分析上的复杂程度较高，现有的工作大多集中在简化的二维传感模型和相关的覆盖控制方法上。

图 2-1 显示了典型的有向传感器感知模型。每个传感器只有一个工作方向 θ ($-\pi \leq \theta \leq \pi$)， θ 定义为其相对于 x 轴正向的夹角。传感器的有效覆盖范围（视场）为一个扇形，感知半径为 r ，夹角为 α 。当且仅当满足以下两个条件时，目标节点 $P(x, y)$ 被传感器 $S(x_s, y_s)$ 覆盖：

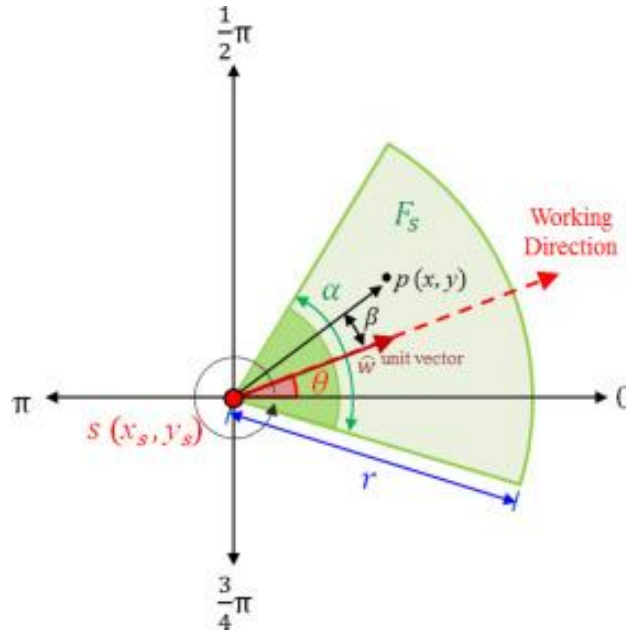


图 2-1 有向感知模型

Figure 2-1. directional sensor model

条件 1：P 点与有向传感器 S 之间的直线距离小于或者等于传感器节点 S 的感应半径 r 。

$$\sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2} \leq r \quad (2-1)$$

条件 2：点 P 与传感器 S 形成的向量与传感器 S 的方向角夹角 (β) 小于或等于传感器 S 视角 α 的一半

$$\beta \leq \frac{\alpha}{2} \quad (2-2)$$

根据线性代数中两个欧几里得向量内积的定义：

$$\vec{sp} \cdot \vec{\omega} = \|\vec{sp}\| \|\vec{\omega}\| \cos \beta \quad (2-3)$$

其中 ω 表示有向传感器工作方向的单位向量。

基于公式 (2-3) 有公式 (2-4)：

$$(x-x_s)\cos\theta+(y-y_s)\sin\theta=\sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2}\cos\beta \quad (2-4)$$

由于 $\beta \leq \alpha/2$, $\cos\beta \geq \cos(\alpha/2)$ 。根据给定已知参数 θ , α 以及目标 P 和传感器 S 的位置, 条件 2 可以被描述为公式 (2-5)。

$$(x-x_s)\cos\theta+(y-y_s)\sin\theta \geq \sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2}\cos(\frac{\alpha}{2}) \quad (2-5)$$

简而言之, 在满足公式 2-1 和 2-5 的前提下, 传感器节点 S 能够覆盖目标点 P 源。

2.4 无线感知网络分类

无线传感器网络 (WSN) 依据部署的节点类型、部署策略、网络架构、节点移动性、所覆盖种类以及感知方式可以有多种分类方式, 参考图 2-2。

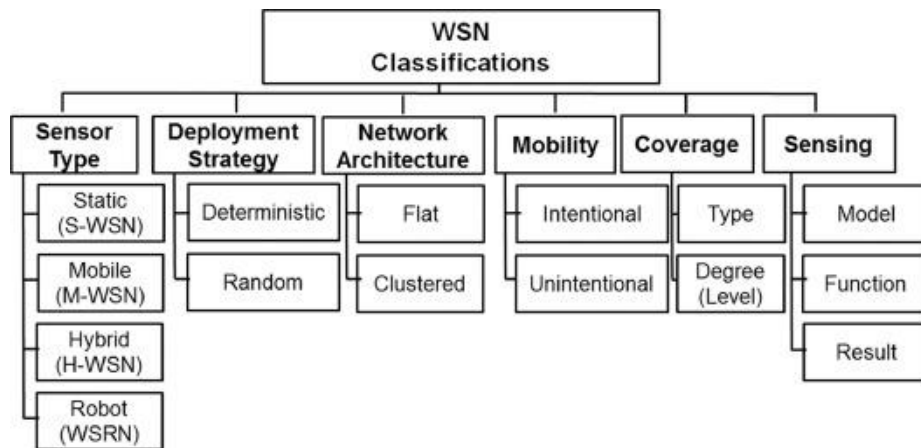


图 2-2 WSN 分类

Figure 2-1. WSN classification

传感根据传感器节点的不同, 有静态网络、移动网络、混合网络以及动态机器人网络等无线传感器网络分类。在静态无线传感器网络 (S-WSN) 中, 所有部署的传感器都是静态的, 而移动无线传感器网络 (M-WSN) 中的传感器都配备可转移设备, 因此它们可以在初始部署后发生位置变化。混合无线传感器网络 (H-WSN) 则包含静态和动态传感器。机器人网络可以携带静态传感器, 而非使用移动传感器, 这种网络被称为无线机器人网络 (WSRN)。机器人可以携带静态传感器并将其部署在适当的位置, 在这种情况下, 可以使用确定性部署模型, 并使用路径规划算法来优化机器人的运动, 实现传感器自部署。

按照部署的方式, 有确定和随机两种网络部署方式, 具体取决于应用。在一些环境中, 例如火灾、敌对区域, 随机部署比确定性部署更符合实际。

按照拓扑结构, 无线网络又分为平面结构和集群结构。集群结构简单、低成

本，并减少了泛洪和冲突。

移动性是无线感知网络的另一个分类依据。移动性是指节点在初始部署后具备改变位置的能力。增强移动性有助于增强覆盖、连接以及延长网络寿命，代价是需要更高的设备成本。

感知特性影响传感器的能耗，以及覆盖范围和网络连通性。感知特性可以根据感知节点模型、功能或结果进行分类。从功能上看，感知行为可以发生在本地环境，也可以是遥感的方式。局部感知一般测量环境特性如温度、湿度等，而遥感则用于远距离的环境感知例如使用激光探测入侵者。对于本地和遥感两种感知类型。感知结果的判断可以是确定性的，也可以是概率性的。

最后，传感模型又分为圆盘型和不规则（非圆盘）型。圆盘模型假定传感器感知范围为一个固定的圆

2.5 WSN 覆盖问题分类

为了更好的展开研究和讨论，本节给出 WSN 中基本的定义、对现有的 WSN 覆盖问题进行分类，并列举了部分覆盖问题的数学模型，为后面几章描述做好铺垫。

2.5.1 覆盖问题基本概念

覆盖率指传感器网络的覆盖程度，该指标根据网络部署场景、覆盖问题的不同等因素有不同的计算方式。

覆盖部署的目的是使用最少的传感器数量，通过特定的部署方式，同时配合特定的网络覆盖算法以达到满足实际应用所需覆盖要求的目的。

收敛时间（或部署延迟）指从实施网络覆盖算法开始到实现稳定的网络覆盖状态所需的时间。特别当覆盖问题需满足动态需求时（如移动目标覆盖问题），收敛时间对覆盖质量的影响尤为凸显。

覆盖级别指满足覆盖要求时目标节点应当被覆盖的传感器数量。当目标区域中的每个目标节点都在 K 个不同的传感器的感应半径范围内，则称整个目标区域具有 K 覆盖级别或满足 K 覆盖。

θ -覆盖指满足覆盖率达到 θ 及以上的覆盖状态。

2.5.2 覆盖问题分类

覆盖问题按照实际覆盖需求可以分为完全覆盖和部分覆盖。部分覆盖进一步分为点覆盖、路径覆盖和陷阱覆盖。点覆盖是指覆盖目标为特定点，可进一步分为集中覆盖和目标覆盖。路径覆盖则需要覆盖部署区域中的特定路径，路径覆盖又分为有障碍覆盖和扫描覆盖。有障碍覆盖又分强、弱两种障碍情况。图 2-3 展示了详细的覆盖问题分类

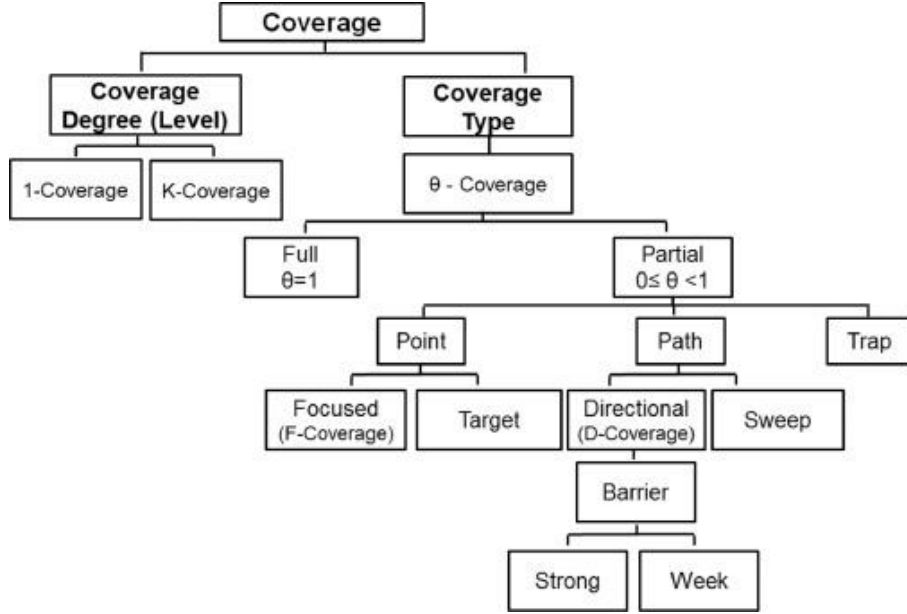


图 2-3 覆盖问题类别

Figure 2-2. Categories of coverage problems diagram

2.5.3 完全覆盖数学模型

完全（区域）覆盖的目的是确保部署区域 R 中任意位置都由至少一个感知节点覆盖，其中部署区域可以是任何形状的区域。本质上是一个节点启动最优化选择问题。传感器 s_i 具有感知范围 r_s 和一个通信范围 r_c 。如果目标点 A 在小于其传感半径的距离内（特指全向感知模型），则认为该点被传感器覆盖。因此，当满足公式 2-6 时，区域 R 被称为完全覆盖：

$$\bigcup_{s \in S} \|s\| \geq \|R\| \quad (2-6)$$

其中 $\|R\|$ 为监控区域面积， $\|s\|$ 为感知节点 s 覆盖的范围， S 为所有激活的感知节点集。公式 2-6 经过适当修改即可以用来表达其他覆盖类型形式。如果一个点同时被多个传感器覆盖，则该点的总覆盖级数为（公式 2-7）：

$$C(p) = \sum_{i=1}^K C_{s_i}(p) \quad (2-7)$$

当满足下列条件时达到 K 覆盖要求（公式 2-8）：

$$C(p) = K \quad \forall p \in A \quad (2-8)$$

2.5.4 部分覆盖数学模型

对于特定应用来说，完全覆盖由于对覆盖质量要求的苛刻可能导致效率低下、浪费成本。在这种情况下，根据应用实际需求，可使用部分覆盖来替代完全覆盖。部分覆盖保证了一定程度的覆盖，这在环境监测等应用中是必要的。部分覆盖又被称为 θ -覆盖、 Q -覆盖和 P -覆盖，均指覆盖部署区域的一定比例（ $0 \leq \theta < 1$ ），而非全部比例。

当达到如下条件时，称部署区域满足 θ -覆盖（公式 2-9）：

$$|R| \cap (\cup_{s \in S'} |s| \geq \theta |R|) \quad (2-9)$$

其中 $|R|$ 为监控区域面积， $|s|$ 为感知节点 s 覆盖的范围， S 为所有激活的感知节点集， $S' \subset S$ 。如果 R 中每个区域都达到 θ -覆盖，则 R 被称为均匀 θ 覆盖。 R 中没有被任何已部署传感器覆盖的区域称为感知空隙。

2.5.5 D-陷阱覆盖数学模型

D-陷阱覆盖用来覆盖移动目标，传感器感知区域间留存的最大直径为 D 的覆盖间隙，因此称为 D-陷阱覆盖。假定 $H = h_1, h_2, h_3 \dots h_n$ 为所有覆盖间隙的集合，每个覆盖间隙具有最大直径 $\sigma(h_i)$ ，且 $H \subset R$ ，则 D-陷阱覆盖可描述为（公式 2-10）：

$$|R| \cap (\cup_{s \in S'} |s|) \geq \theta \quad \text{且} \quad \exists H \subseteq R: \sigma(h_i) \leq D \quad \forall h_i \in H \quad (2-10)$$

其中 $|R|$ 为监控区域面积， $|s|$ 为感知节点 s 覆盖的范围， S 为所有激活的感知节点集， $S' \subset S$ ， H 为所有覆盖间隙的集合， $\sigma(h_i)$ 为覆盖间隙 h_i 具有的最大直径。

2.5.6 目标覆盖数学模型

部分覆盖的另一个分支是目标覆盖，它的覆盖目标是一组点。因此，目标覆盖在检测移动对象这类应用中更有效。假定部署区域 R 中存在一组目标点 $P = p_1, p_2, p_3 \dots p_m \mid p_i \in R$ ，其中包含要监视的以下点集。目标覆盖范围可定义为（公式 2-11）：

$$\forall p, \exists s_i \rightarrow C_{s_i}(p) = 1 \quad (2-11)$$

其中 $C_{s_i}(p)$ 表示 p 点被 s_i 覆盖， P 为目标节点 p 的集合。

$$P \in |R| \cap (\cup_{s \in S'} |S|) \quad (2-12)$$

2.5.7 路径覆盖数学模型

与目标覆盖监测一组目标不同，路径覆盖监测一条穿过监控区域的路径，因此也将路径覆盖称为栅栏覆盖。路径覆盖需要观察一组点，这些点形成一条穿过部署区域宽度的路径。路径覆盖有两种覆盖类型，分别为方向覆盖（D-覆盖）和屏障覆盖，下面分别给出两者的数学模型。

（1）D-覆盖

在 D-覆盖问题中，覆盖目标是在入侵者穿出边界的之前，从入侵者进入覆盖区域的边界探测到入侵行为。D-覆盖有很广泛的应用，例如保护设备设施或探测军队的动向。

假设 $L=l_1, l_2 \dots l_n$ 是一组穿透路径，这些有方向的路径均从边界 S_B 开始，在目标边界 E 结束，其中 S_B ， E 属于一条带区域。带区域是指两条均匀分离的曲线（如一对同心圆）所限定的区域。当满足公式 2-13 时，监控区域 R 被称为满足部分 D-覆盖：

$$C_{s_i}(p_i)=1 \forall l_i \in L: \exists p_i \in l_i \quad (2-13)$$

其中 $C_{s_i}(p_i)$ 表示目标 p_i 被感知节点 s_i 覆盖， L 表示所有穿透路径集。

(2) 屏障覆盖

与 D-覆盖具有方向性不同，屏障覆盖虽然也被用来检测入侵行为，区别在于，屏障覆盖忽略入侵者的穿透方向。屏障覆盖又可进一步分为强屏障覆盖和弱屏障覆盖。由于与本次研究相关性较小，不对这两个分支展开介绍。

2.6 传感器网络部署策略

有效的传感器部署是监控体系网络覆盖的前提，网络实施监控算法和效能有效化的控制都需要引入对分布策略变量的考虑。无线传感器网络的可行性在很大程度上依赖传感器部署机制所提供的覆盖。传感器需要合理摆放，才能保证其感知能力被完全利用。

首先是计划部署：采用计划部署方式分布传感器，往往监控环境并不复杂，地势相对来说比较平坦，易于传感器摆放和调整。在部署之前，需要对监控覆盖目标需求和监控目标的特点进行分析，合理设计节点放置的地点，尽可能减少节点之间覆盖重叠区域和网络当中冗余节点数量，严格控制监控网络的实施成本。但是，计划部署要求对整个监控网络当中所有节点位置做出精确计算，将产生较大的计算量，而且部署过程需要做到准确投放，对设备精密性和操作人员熟练程度有一定要求。

随机部署是另一种常用的传感器网络部署方式，监控区域比较大或者地势较为险峻的情况下，一般采用随机部署的方式。该种部署方式，节点投放的位置具有随机性，单个节点很有可能投放比较偏远位置点，导致无法与周围邻居节点通信。为了防范该种情况出现只能增加投放节点数量。但是，投放节点数量过多会出现节点覆盖重叠区域增多的现象，容易造成网络监控成本上升。在随机部署前置条件下，在算法层面考虑到节点部署数量，网络监控成本和监控覆盖率三者之间关系，在节点状态当中引入休眠机制，动态实现节点之间状态的转换，降低监控实施成本，延长网络监控服务的时间。

上述两种部署方式，其中计划部署可以准确投放节点，但是投放过程成本过高；随机部署减轻投放成本压力，但是投放一旦分布不均匀很容易造成网络监控成本大幅度上升。因此，有些学者比较前面两种投放方式的特点，提出了规则部

署。该种部署方式依据投放场景的不同，将投放场景分割成一个个规则化的拓扑结构，做到小范围内的随机部署。规则部署有效结合随机部署和计划部署两种方式优点，在一些地势稍微平坦，有确定化边界的环境当中，可以快速确定投放场景的分割方案。但是，规则部署依然对于投放设备有一定的要求，投放环节当中，投放人员需要对投放场景有一定熟悉程度。总体而言，规则部署较为减轻投放成本，为随机部署调整优化提供指导意义。

2.7 传感器网络覆盖性能指标

无线传感器网络的覆盖性能评价是检验节点部署策略和覆盖控制算法有效性、实用性的标准。对于节点部署的好坏主要通过以下几个方面来反映，同时也是区分各类覆盖控制算法优缺点的重要指标。

2.7.1 覆盖率评价指标

在区域覆盖率是研究中指所有有向感知节点覆盖的面积和与目标监控区域面积之比。对于布尔模型的节点，节点覆盖区域的面积即是一个扇形面积，所有感知节点的覆盖面积之和则是多个扇形面积的合集。区域覆盖率越大对应覆盖控制算法下的节点感知方向调整越高效。区域覆盖率的计算公式通常为公式 2-2。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} \quad (2-13)$$

其中 S_i 代表节点 S_i 的覆盖面积， n 表示节点的数量， S 表示为监测区域的总面积。区域覆盖率越高，传感器网络提供给用户的监测信息量就越全面，有利于对目标区域的监控掌握。

覆盖效率值是指所有感知节点覆盖面积的合集与所有感知节点覆盖面积总和的比值，其值可以用来评价感知节点感知范围的覆盖效率，判断覆盖控制算法是否有效减小节点的覆盖冗余面积，其计算公式如公式 2-3：

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n\pi R^2} \quad (2-14)$$

路径覆盖率通常用于评价移动目标轨迹的覆盖指标。在已知目标移动路径的条件下，有向传感器节点覆盖移动路径长度和路径总长度之比即为路径覆盖率。在节点数量等条件一致的状况下，算法调度对移动目标路径的覆盖值越高，则该算法越优。路径覆盖率可以看成特殊的区域覆盖率，是从二维到一维的转变。

目标 K 覆盖率^[2]指目标被 K 个及以上的传感器节点所覆盖的数量与目标总数之间的比值，该覆盖评价指标多用于静止目标覆盖的问题，尤其对于某些重要热点目标如水轮机、变电箱等的监测，此指标不可忽视甚至是主要评测指标。 K 覆盖率越大，则表示覆盖方法对网络的调度方式越好。

2.7.2 网络能耗指标

网络能耗是另一个反映传感器网络性能的关键指标。主要从传感器旋转、移动、运行三个角度来考虑能量消耗。

1) 感知节点转动角度和

对于方向可调的有向传感器感知模型,节点的旋转角度通常是能量消耗的重要因素。节点能耗是否均衡与整个网络的生命周期具有重要联系。在覆盖控制算法下,节点的转动角度之和越小,则网络生存时间越久,代表算法的能耗性能越优秀。

2) 传感器节点移动距离之和

同样针对位置可移动的传感器模型,节点移动的距离大小代表节点能耗的多少。如果这个值很小代表整个系统的能耗较少。通过节点移动距离的标准差也可以反映出节点能耗的差异,检测节点能耗均衡问题。如标准差越大,则代表网络能耗不均匀,部分节点可能过早耗尽能量。

3) 网络剩余能量^[39]

节点能耗受各类参数影响下,因而部分研究以能量效率优化的角度来衡量算法优劣。在保障覆盖质量满足需求的前提下,尽可能的保留网络剩余能量,延长网络生存时间。覆盖控制算法调度后网络剩余能量越多代表算法越优越。

2.8 典型覆盖优化算法

目前广泛应用的无线网络覆盖方法主要有四个研究方向,分别为虚拟力技术、几何图像移动部署技术和计算几何技术。

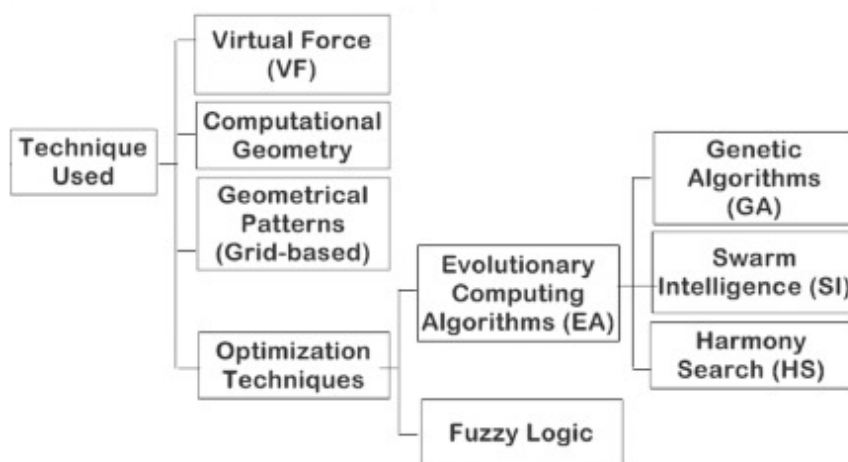


图 2-4 WSN 算法研究方向汇总

Figure 2-8. Research direction of WSN algorithms

基于虚拟力的算法被广泛应用于传感器网络动态部署以及网络功能增强。虚拟力模拟电磁粒子的行为，每个传感器节点都充当一个力源，与周围传感器节点或者障碍物根据吸引或者排斥力的大小相互作用，使得传感器网络达到一个平衡。根据传感器与其他传感器之间的距离，力源可能具有吸引力或排斥性。此外，环境中的其他物体可以充当诸如障碍物之类的力。

基于计算几何的覆盖算法，最典型的有采用 Voronoi 图或 Delaunay 三角的方式。Voronoi 图将该区域划分为较小的多边形，由传感器的垂直平分线及其相邻的每一个平分线构成^[37]。为了提高覆盖率，传感器工作方向指向未被覆盖的多边形顶点。Delaunay 三角对一个区域进行三角测量，使任何三角形中的任何点都不位于该区域中任何其他三角形的外接圆内。

基于优化的部署算法包含进化算法和模糊计算两大类。进化算法又有遗传算法、群体算法以及和声搜索三个主要分支。群体智能算法又包括粒子群优化（PSO）、蚁群（AC）、人工蜂群（ABC）、鸟群等。这些算法在 WSN 覆盖领域得到广泛应用。

2.9 无线传感器网络应用

WSN 在现实生产中具有广泛的应用。根据它们的部署目标、交互模式等进行分类，分类情况如图 2-5。

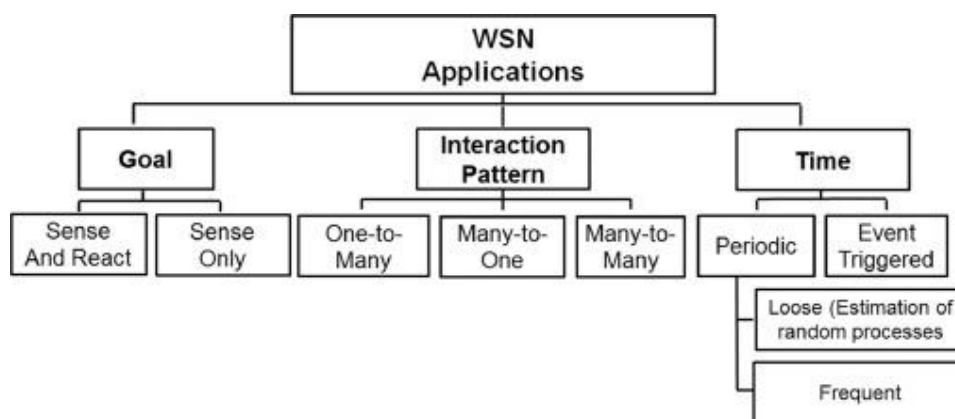


图 2-5 WSN 应用分类

Figure 2-5. WSN application classification

首先，从应用的目标来看，无线网络应用的目标可以是数据采集，也可以是采集并反馈。当应用程序的目标是仅为信号采集时，节点收集感知到的数据，并将其发送到接收节点。否则，节点与环境交互，并根据检测到的数据（如智能家居）采取既定行为。

从交互模式来看，应用分为一对一、一对多、以及多对多三种模式。在只有

一个接收器节点的部署中，通信是一对一的，传感器将感测数据发送回接收器。具有多个接收节点的部署具有多对多的交互模式。当接收节点向部署的传感器发送指令时，需要一对多模式。

依据信息反馈的方式，应用又分为周期报告型和事件驱动型传感器。在周期报告应用中，传感器监控某些功能（如温度、湿度或照明），并将其反馈给接收节点。事件驱动则根据特定的事件触发传感器反馈数据。根据报告时间的频率，定期报告又进一步分为频繁报告或随机报告。一般来说，这类应用程序需要完全覆盖。

2.10 本章小结

本章主要对 WSN 覆盖问题涉及到的核心理论进行了详细地说明介绍，为接下来的覆盖优化方法研究做好铺垫。先是具体分析了感知模型特性，接着罗列出传感器模型的分类和各自适用场景以及定义了节点覆盖到目标点的判断方法，随后对网络初始时节点的三种部署策略进行简要描述，之后也给出了多种常用的网络覆盖质量评价指标，用于区分不同覆盖算法的优劣，最后依据对相关文献的总结和归纳，列举并分析了四种较为典型的覆盖控制算法。

第三章 多目标覆盖控制方法

3.1 引言

近年来, 无线传感器网络 (WSN) 被广泛应用于监测和跟踪应用。传感器性能的提升大大扩展了可应用空间。但由于 WSN 网络的特点, 用于大规模覆盖的传感器节点能量和电池寿命有限, 只能在非常有限的时间内保持激活状态。如何在保证网络覆盖质量满足需求的情况下, 尽可能地延长网络的生命周期是有向传感器网络的研究热点和难题。

为了实现监控区域内静态多目标的高效覆盖, 同时兼顾传感器网络的能耗平衡, 以避免传统覆盖模型的缺点, 特别是在传感器死机的情况下, K 覆盖模型要求至少 K 传感器节点监视任何目标以考虑覆盖, 基于此本节提出了一种静态区域多目标覆盖算法, 在能量资源有限的情况下, 实现对指定目标群体最长时间的覆盖。

3.1.1 有向感知网络与全向感知网络

在研究有向传感器网络覆盖方法之前, 先讨论一下有向感知网络 and 传统全向感知网络的异同, 以及有向感知网络覆盖问题的难点。设计标准 (图 5) 和 DSN 中的困难。不难发现, 有向传感器网络继承了传统无线传感器网络带来的所有技术挑战。除了这部分挑战, 有向感知网络还引入了独有的困难, 比如有向感知器特有的方向性, 以及受限的感知域等。关于 DSN 的研究主要集中在以下方面: 采用随机部署的方式, 目标区域存在未被感知节点覆盖的目标。为获得满足一定质量要求的覆盖, 而且有效控制 WSN 整体能耗, 最少节点最大覆盖 (MCMS) 算法的研究显得尤为重要, 下一小节就 MCMS 问题展开讨论。

3.1.1 最少节点最大覆盖算法

由于采用随机部署的方式, 目标区域存在未被感知节点覆盖的目标。为获得满足一定质量要求的覆盖, 而且有效控制 WSN 整体能耗, 最少节点最大覆盖 (MCMS) 算法的研究显得尤为重要

3.1.2 MCMS 问题描述

MCMS 问题是目标传感器网络目标覆盖问题领域重要的研究方向, 该类问题是要通过一定调度策略, 使用最少数量的感知节点实现最多的目标覆盖。

MCMS 问题模型假设:

- 1) 监控范围内所有感知节点的坐标以及目标的坐标可知;
- 2) 由于监控范围内感知节点和目标位置已知, 可以通过判断位置关系确定

目标结点是否落入感知节点的覆盖范围中，不存在位置的覆盖情况。调整感知方向的过程就是在若干感知方向中进行选择，且每个感知区域之间不发生重叠；

3) 感知节点的覆盖范围不发生碰撞，同一目标可以同时被多个感知节点覆盖。

4) 静止目标，监控范围内的目标无法发生位置变化。

监控范围内存在若干静止目标 $T = \{T_j | j=1,2,...M\}$ ，以及大量感知节点 $S = \{S_i | i=1,2,...N\}$ ，其中任意节点 S_i 存在 $k \in P$ 种视角可供选择。

3.1.3 整数线性规划算法

整数线性规划算法是一种常用的 MCMS 问题解决算法，下面利用整数规划思想求解 MCMS 问题。

目标覆盖问题的主要目标即最大化监控区域中被覆盖的目标。假设目标被多传感器节点覆盖和被单一传感器覆盖这两种情况直接无覆盖质量差异，只存在目标节点被覆盖或未被覆盖两种情况，判断目标是否被感知节点覆盖采用 TIS 检验。MCMS 目标函数如下：

$$\text{Maximize } \sum_{j \in M} \gamma_j \quad (3-1)$$

γ_j 表示 T_j 是否被任何感知节点覆盖， γ_j 为一个 0-1 变量，取 1 时目标被感知节点覆盖，取 0 则相反。约束条件如下：

$$\text{s.t. } \sum_{k \in P} X_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (3-2)$$

$$\frac{\sum_{i \in N, k \in P} a_{ik}^j x_{ik}}{L} \leq \gamma_j \leq \sum_{i \in N, k \in P} a_{ik}^j x_{ik} \quad \forall j \in M \quad (3-3)$$

$$X \in \{0,1\} \quad \gamma \in \{0,1\} \quad (3-4)$$

公式 3-2 表示任意时刻感知节点 S_i 只能选择一个感知方向 P_k ， X_{ik} 是 0-1 变量，取 1 时感知节点 S_i 工作方向为 P_k ，取 0 表示未选择该工作方向，对 X_{ik} 求和并确保任何时刻单个传感器仅有一个工作方向。公式 3-3 保证对于任何一个目标 T_j ，其 γ_j 取值不超过 1，即超过一层覆盖对单个目标的覆盖质量不做提升。公式中 a_{ik}^j 的描述如公式 3-4：

$$a_{ik}^j = \begin{cases} 1, & \text{当工作在感知方向} k \text{的传感器能够覆盖目标} j \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (3-5)$$

任意感知节点 S_i 在选择完工作方向后，获得一个覆盖矩阵 $A_{N \times P}^M$ ，其中每一个元素 A_{ik}^j 表示节点 S_i 能否在感知方向 P_k 覆盖目标 T_j ，若能够实现覆盖则该元素为 1，否则记为 0。公式(3-3)中不等号左边的 L 取任意大于 N 的值 $L \geq \|N\|$ ， γ_j 取 1

时目标 T_j 被至少一共传感器节点覆盖，取 0 则表示未被任何传感器节点覆盖。

整形规划方法在不考虑计算时间限定的情况下可以得到理论上的最优解，然而考虑到较大规模 WSN 情况以及网络对实时性的要求，线性方法就显得力不从心，下面讨论一种在多项式时间内可获得较优解的启发式贪心算法。

把整个监控区域规则化划分成一个个基本分割单元，而后逐一选择节点覆盖每一块基本分割单元。但是，监控区域中分布的节点具有随机性，规则化划分方式并不能与节点跟节点之间多重交集区域有效的结合，依旧会造成节点的浪费。在本文算法当中，基于降低节点启动数量的目的，采用节点感应区域边界来划分整个监控区域，把节点与节点多重交集区域作为基本分割单元。

3.1.4 一种启发式贪心算法

启发式算法因其计算效率高且算法复杂度较低，能够在一定程度上寻找 MCMS 问题的较优解。这里介绍一种较为典型的启发式贪心算法，用于求解 MCMS 问题。整数线性规划算法是一种常用的 MCMS 问题解决算法，下面利用整数规划思想求解 MCMS 问题。

启发式贪心算法基本步骤包括：首先初始化 WSN 网络、随机分布传感器和目标节点，此时传感器还未进入工作状态。进行每一轮覆盖时，激活全部或部分传感器节点，选取各自工作方向。每个传感器选择自己能够覆盖最多目标节点的工作方向，同时更新所有目标被覆盖状态以及所有传感器工作状态。当所有传感器节点都已经激活或者区域内部存在未被覆盖的目标节点时，结束运算。算法流程图如图 3-1。

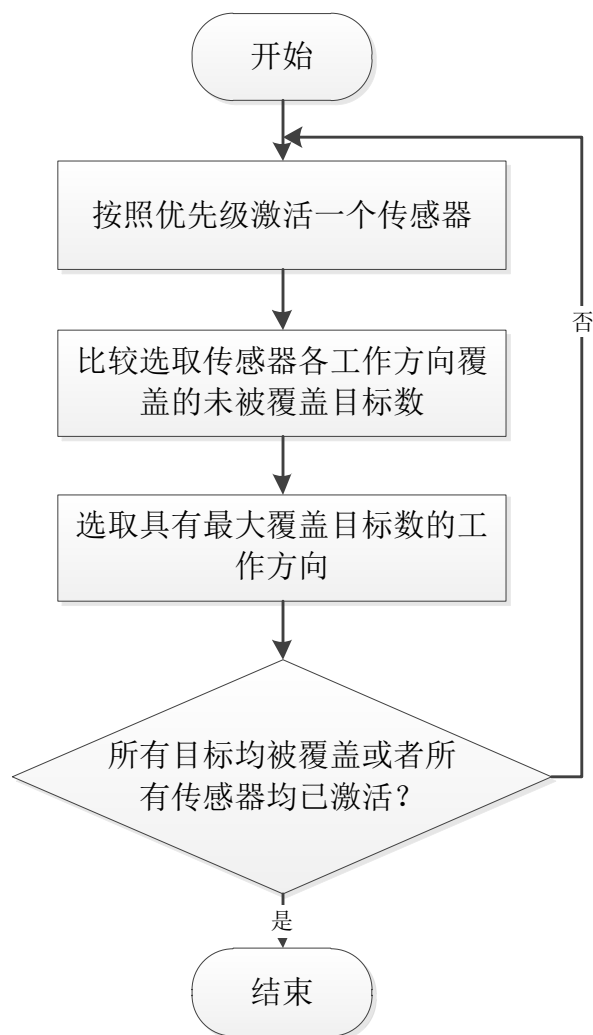


图 2-5 贪心算法流程图

Figure 2-9. Flow chart of greedy algorithm

无论是整形规划方法还是以上贪心算法，都有着明显的不足，贪心算法则更容易陷入局部最优的情况。下面提出一种受网络生命周期约束的目标导向有向传感器网络覆盖算法。

3.2 一种受网络生命周期约束的目标导向有向传感器网络覆盖算法

3.2.1 引言

为了体现本算法在均衡负载以及延长整个传感器网络工作时间上的优势，所有传感器的工作时间被限制在一个相同的预设值，且单位时间的功耗相同。通过所有传感器功耗的标准差来评价负载均衡情况，同时追求在满足一定覆盖要求下的最长网络工作时间。

3.2.2 算法具体实施

(1) 初始化

首先初始化传感器网络环境，具体包括在二维平面区域随机部署 n 个传感器节点以及 m 个目标节点、初始化感知半径 r 、感知节点剩余能量集合 PI 、单位时间能耗 c 、可感知方向、以及感知节点的初始朝向。

(2) 排序

t 时刻 (t 初始为 0)，按照目标节点对网络生命周期的限制对目标节点进行排序 (注：网络生命周期指从网络开始工作并覆盖全部目标节点，直到传感器节点剩余能量无法满足在 Δt 时间段内持续覆盖所有目标节点；目标节点对网络生命周期的限制指该目标节点周围传感器节点全部用来服务该目标节点时，该目标节点能够维持的被覆盖的最大时间)，存储于 TS 集合中。目标节点 i 对网络生命周期的限制用 LT_i 表示。

(3) 确定目标节点

令 $j=1$ ， j 标识 TS 集合中目标节点的序号。选取 TS 集合中的第 j 个目标节点 TS_j ，若已被覆盖，则 $j=j+1$ ，选取下一个目标节点 TS_j 。

(4) 覆盖目标节点

对于目标 TS_j (注： TS 集合中第 j 个目标节点)，将所有能对其进行覆盖的传感器工作模式 $S_{o,p}$ (注：传感器 S_o 工作在 p 方向) 加入集合 CTS_j ，依据公式 3-6 计算每个工作模式的适应度 f ，选取最大适应度的传感器工作模式对其进行覆盖。

$$f = \frac{PI}{c\delta^{j-\alpha}(\beta-j)^{1+\beta^*-\beta}} \quad (3-6)$$

公式 3-4 中 PI 为传感器剩余能量， c 为指定工作模式 $S_{o,p}$ 对应的功耗， j 为当前目标

节点 TS_j 的排位，参数 α 为该工作模式对应工作半径的圆域内 (即放宽该工作模式对应的感知角度，使其为一个圆域) 该传感器能够覆盖的 (包括 TS_j 在内) 所有目标节点中在 TS 中排位最靠前的目标节点的排位 (注：最高排位对应 $\alpha=1$ ，最低排位对应 $\alpha=m$ ，排位越高 α 越低；且 $\alpha \leq j$)；参数 β 为该工作模式下能够覆盖的除了 TS_j 外的还未被覆盖的目标节点中，在 TS 中排位最靠前的目标节点的排位；参数 β^* 为该工作模式对应工作半径的圆域内 (即放宽该工作模式对应的感知角度，使其为一个圆域)，该传感器能够覆盖的除 TS_j 外的还未被覆盖的目标节点中，在 TS 中排位最靠前的目标节点的排位 (注： $j < \beta \leq \beta^*$)。 PI 为传感器剩余能量， m 为目标节点数， n 为传感器节点数量。

(5) 更新并判断循环条件

更新传感器节点的剩余能量，更新 TS 中的目标节点排序，若 $j=n$ (即所有目标节点全被覆盖)，产生一个覆盖子集， $t=t+\Delta t$ ；否则，回到步骤 3 (注：这里

并不令 $j=j+1$ ，返回步骤 3 后 j 仍被赋值 1，原因是考虑到排位存在调整的可能)。

(6) 寻找更多覆盖子集

重复步骤 3—5 直到无法产生更多的覆盖子集。

(7) 输出

最后，输出一组覆盖子集

3.2.3 算法描述

本节给出 3.2 描述的目标导向有向传感器网络静态多目标覆盖算法描述如下表 3-1:

表 3-1 算法描述

Table 3-1. Algorithm description
算法描述
<ol style="list-style-type: none"> 1. 初输入参数: n 个传感器节点和 m 个目标节点初始位置, 感知半径 r 和单位时间能耗 c、可感知方向、初始朝向。 2. 输出结果: 一组有效覆盖子集。 3. $t \leftarrow 0$; //初始化传感器剩余能力集合 TL; 4. While(true) 5. 按照目标节点对网络生命周期的限制对目标节点进行排序, 存于集合 TS 中; 6. For j in range of m: 7. 选取 TS 集合中的第 j 个目标节点 TS_j; 8. if 目标节点 TS_j 若已被覆盖: 9. continue; 10. 计算 CTS_j, 11. if CTS_j 非空: 12. 选择 CTS_j 中最大适应度的传感器以及工作方向; 13. else: 14. End //无法获得更多覆盖子集 15. 更新 TS 集合 16. if $j==m$: //所有目标均完成覆盖 17. 输出一个覆盖子集

3.3 本章小结

本章从最小节点最大覆盖问题入手, 给出 MCMS 问题的详细描述, 并列举了两种常见的多目标感知网络覆盖问题的解决方案, 分别为整数线性规划规划方法以及启发式贪心方法。通过分析这两种方法的优劣, 结合均衡能耗的思想, 提出了一种受网络生命周期约束的目标导向算法, 通过以最低网络能耗平衡性损失

为代价，依次寻找覆盖子集。通过这种方式，每组覆盖子集间尽可能的互斥，从而达到均衡网络能耗，同时满足覆盖要求的。该算法在平衡网络负载以及提高网络生命周期上具有一定优势。

4 基于能耗均衡的有向传感器网络中多移动目标变速 k 级覆盖算法

4.1 引言

近年来,无线传感器网络(WSN)被广泛应用于监测和跟踪应用。传感器性能的提升大大扩展了可应用空间。但由于 WSN 网络的特点,用于大规模覆盖的传感器节点能量和电池寿命有限,只能在非常有限的时间内保持激活状态。如何在保证网络覆盖质量满足需求的情况下,尽可能地延长网络的生命周期是有向传感器网络的研究热点和难题。单纯地采用有向传感器网络覆盖技术。虽然能够通过节点感知方向的调整提升网络覆盖率,然而调整过程中旋转角度的不同势必会造成区域内节点能耗不均,个别节点会因能耗完而过早的死亡,进而会引起部分网络的过早瘫痪,无法达到区域全面监测的目的。所以一种有效的节能覆盖方法和能量消耗均衡机制是延长传感器网络寿命的设计重点。

为避免传统覆盖模型的缺点,特别是在传感器死机的情况下, K 覆盖模型要求至少 K 传感器节点监视任何目标以考虑覆盖。本文提出了一种新的多移动目标 K 级覆盖算法,在能量资源有限的情况下,对指定移动目标群体进行最长时间的连续监测。为了进一步证明该模型优于其他相关工作,与相关算法进行了比较。

移动目标覆盖是关于监测以及追踪入侵目标轨迹的一类问题。当目标出现在监测区域中,网络节点被唤醒,通过协调各自感知方向对移动目标进行覆盖。其中多移动目标指监控区域中同时出现多个移动目标;变速指下一时刻移动目标的速度未知,需要对移动目标的位置进行实时的预测。 K 重覆盖指感知网络对覆盖目标的监控要求,即每个移动目标需要满足一定的覆盖质量,若满足任意移动目标同时被 K 个感知节点覆盖则称满足 K 覆盖,否则将降低一定的覆盖质量,具体依据所采用的覆盖质量评价方法。

在延长网络生命周期的研究成果上,工作状态转换和节点功率调节这两种能量优化方式取得了较为优越的效果。Gaurav 等人^[48]提出一种不包含位置信息的分布式节能覆盖方法,将整个传感器网络寿命分成若干轮,在每一轮,通过轮换机制轮流选取能够达到覆盖整个监测区域的节点子集进行工作激活,直到下一轮。李兰英等人^[33]分析了节点能量消耗状况并根据分簇思想,提出了一种能耗控制策略,结合了能耗速率色带表示方法,在简化计算操作的同时,减少了能量消耗。邓克波等人^[34]利用了感知距离可调的传感器节点,将区域覆盖性能和网络能耗模化成节点感知距离的函数,将覆盖问题转变成带能量约束的优化问题。

本章在 3.3 节静态目标导向多目标覆盖算法的基础上提出一种有向传感器网络变

速多移动目标场景下的均衡网络能耗覆盖算法。

4.2 有向感知模型

本论文采用的有向传感器网络感知节点模型：采用六元组 $\langle P, R, \vec{V}(t), \alpha, \theta, \omega \rangle$ 表示，其中 $P=(x, y)$ 为有向感知节点在监控区域中的位置坐标； R 为感知节点最大的感知范围，即感知半径； $\vec{V}(t)$ 为一个矢量，方向为扇形区域的中轴线，表示 t 时刻有向感知节点的工作方向，而 θ 则表示该时刻节点相对于水平 X 轴正方向的感知方向角； α 表示有向传感器节点感知范围的边界和感知方向 $\vec{V}(t)$ 的夹角， 2α 则表示节点的感知视角。当 $\alpha = \pi$ ，节点退化为传统的全向感知器。 ω 表示节点感知方向调整时的旋转角速度。

有向感知模型如图 4-1 所示。

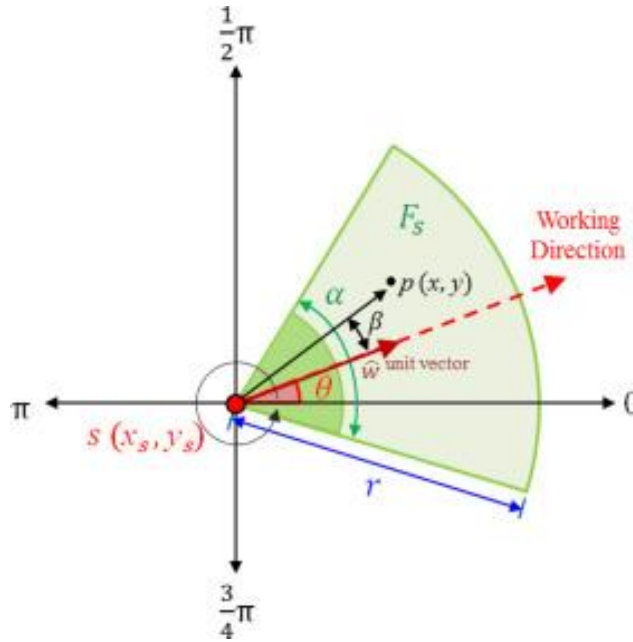


图 4-1 有向传感器节点感知模型

Figure 4-1. Directed sensing model

4.3 节点能耗模型

无线感知节点的硬件模块主要分为信息感知模块，数据处理模块和通信模块。信息感知模块主要用于对目标区域内事物的各类信息参数进行采集和模数转换。数据处理模块是对采集或接收到的信息数据进行一些必要的存储和计算处理，方便在互联网上的传播以及与用户的交互。通信模块则是完成与邻居节点和汇聚点对有效数据的收发工作。每个模块都有各自独立的能耗模型

4.3.1 能耗模型

(1) 通信能耗模型

通信模块的能耗要远远高于其他模块，例如通信模块传输一个比特的能量消耗相当于数据处理模块执行上千条指令的能耗。通信模块产生耗能原因主要分为休眠、感知信号、发送和接受能耗，当节点处于休眠状态时，其能耗是最低的，因此在大多数网络节能控制算法中都通过让多余节点进入待机状态，以节省节点能耗，延长网络生命周期。感知侦听是指节点采集周围环境中的数据，以及识别接受邻居节点传给自身的数据信息，由于对区域的监测是节点间协同感知交互的过程，因而在节点感知工作结束后，仍需要耗能来不断监听无线信道，防止漏捕邻居节点所上传的数据信息。另外，节点间还会传送汇聚节点广播感知方向调度的控制信息，由此也会带来一些能耗，因而实际应用中也要尽可能减少控制报文的收发数量。

节点通信过程中发送接收数据信息的能耗都与所传输的数据量大小有关，而发送能耗还与节点到目的点之间的距离有关。研究者们通常利用公式（4-1）对数据发送能耗进行建模：

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} k * E_{elec} + k * \varepsilon_{fs} * d^2, & \text{if } d \leq d_0 \\ k * E_{elec} + k * \varepsilon_{amp} * d^4, & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (4-1)$$

其中 d_0 为设定的阈值。如果当节点 s_i 和节点 s_j 的距离小于阈值 d_0 时，数据发送能耗中的放大器模块将采用自由空间模式（即 $\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{amp}$ ）；否则放大器模块将采用多路径模式进行传输（ $\varepsilon_{amp} = E_{amp}$ ）； ε_{fs} 和 ε_{amp} 分别表示放大器不同模式下的能耗参数， E_{elec} 则表示电路能耗参数，主要受节点硬件影响，如数字信号的调制，解调和编码等。对于节点数据信息的接收能耗，则使用如下公式 4-2 计算。

$$E_{Rx} = k * E_{elec} \quad (4-2)$$

(2) 感知能耗模型

节点的感知能耗模型主要受感知半径 R 的影响，其具体能耗模型如公式 4-3：

$$E(R) = c \times R^\alpha \quad (4-3)$$

其中 c 表示传感器节点感知能力的精确系数， α 作为指数，不同的参数感知技术，其值的选取也不相同，一般在[2,4]之间内浮动，具体依实际应用而定。

(3) 计算能耗模型

传感器节点在有些实际场景应用中，不光只进行节点的感知工作，还需要进行简单的本地信号处理与数据计算，如簇头节点对簇内节点的移动总距离或者旋转总角度的求和计算，这类传感器节点间协同对数据的预处理操作都将消耗能量。

(4) 移动及旋转耗能

对于 WSN 中具有移动性的节点，其移动过程中节点能量的消耗与位移距离有关。

通常使用如下公式 4-4 线性函数对节点移动耗能进行建模。

$$E(s_i) = m_u \times d(s_i) \quad (4-4)$$

其中, m_u 代表节点移动单位距离的能耗, $d(s_i)$ 表示节点 s_i 移动的距离。

针对传感器网络中位置不变, 但方向可旋转的节点, 其节点转动能耗模型与其相似, 如下:

$$E(s_i) = w_u \times \theta(s_i) \quad (4-5)$$

其中, w_u 代表节点旋转单位弧度的能耗, $\theta(s_i)$ 表示节点 s_i 旋转的弧度。

4.3.2 能耗优化模型

本文致力于有向传感器网络覆盖优化控制的研究, 而并不是对网络连通性的研究, 因而节点的通信能耗以及计算能耗不加入考虑范围, 同时本文又服务于小水电站监控系统, 利用能耗模型的对象是主要是小水电站的视频传感器, 是一种位置不可变动, 方向可旋转的有向传感器, 所以本章节采用的节点能耗模型主要考虑两方面的能量消耗, 即感知和旋转, 其最终优化后的能耗指标模型如下:

$$E(s_i) = k_1 R^\beta \cdot \Delta t + k_2 \theta \quad (4-6)$$

其中 k_1 、 k_2 分别为感知能耗系数和旋转能耗系数, R^β 表示节点半径为 R 时的单位时间能耗功率, β 为指数和公式 4-3 一样, 通常为 2~4, 本文设定为 2。

从以上优化的节点能耗模型中可以看出, 在节点的感知方向调整过程中, 不管节点是否进行旋转决策, 节点也会因感知监测而持续消耗能量, 直到节点死亡, 除非进入休眠状态, 保留能量。考虑到小水电厂区的移动目标 K 级覆盖, 在 1 个时刻内有 3 个节点进行覆盖监测比 3 个时刻只有 1 个节点覆盖监测要更加合理、高效。节点间能耗差异化只会让网络逐渐出现监测空洞, 监测质量步步下降。而节点能耗均匀则有利于提高网络能量利用率, 保持网络全方面监测覆盖, 提高网络存活时间。

4.4 覆盖质量评价

4.4.1 问题重述

本文致力于有向传感器网络覆盖优化控制的研究, 而并不是对网络连通性的研究, 因而节点的通信能耗以及计算能耗不加入考虑范围, 同时本文又服务于小水电站监控系统, 利用能耗模型的对象是主要是小水电站的视频传感器, 是一种位置不可变动, 方向可旋转的有向传感器, 所以本章节采用的节点能耗模型主要

根据传感器网络应用场景和覆盖目标, 有不同的覆盖质量评价标准。好的覆盖质量评价标准能够准确的反映覆盖优化算法的质量好坏。本节结合小水电厂区

多移动目标监控的实际应用场景，从覆盖率和能耗两个角度考虑，提出与之相匹配的覆盖质量评价指标。

4.4.2 覆盖率评价指标

覆盖率是传感器网络覆盖质量最常见的指标，目前常见的 K 覆盖问题评价方法大致思想是：统计监控区域内分布的目标节点中被感知节点覆盖的目标节点数，接着计算其中达到 K 重覆盖的目标数占有所有目标数的比值。由于本文的应用场景是对移动目标的监控，移动目标每一时刻的位置通过设定的预测模型提前获得。由于通过预测的方式获得下一时刻移动目标的位置，因此相应的覆盖策略得到的期望覆盖情况与目标实际被覆盖情况存在差异。如果在计算 K 重覆盖率时忽略那些实际未达到 K 重覆盖的目标的贡献，则覆盖率指标不能真实的体现传感器网络实际的覆盖质量。因此将未达到 K 重覆盖的情况也依据其实际覆盖的重数按照非线性递增的方式计算对网络覆盖质量的贡献。

具体的覆盖率评价函数如式 (4-7)

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^T k_{i,j}^{\beta}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^T k^{\beta}} \quad (4-7)$$

其中 n 代表被监控目标个数； $k_{i,j}$ 表示第 i 个目标在 $t=j$ 时刻被实际覆盖的重数； β 为非线性修正系数，本论文实际取 2，单个目标的覆盖率随覆盖层数的递增呈非线性指数增长，这样处理同时兼顾了未达到指定 K 覆盖的情况和提高了达到或接近 K 覆盖情况对覆盖率贡献的占比； T 代表监控的总时长。

4.4.3 能耗均衡评价指标

能耗均衡是衡量传感器网络覆盖质量的另一个重要指标。可以反映覆盖优化方法对传感器网络整体能量的利用程度。4.3 节中已经提到能耗均匀利于提高网络能量利用率，保持对网络全方面监测覆盖，延长网络生存时间。当感知网络中出现能耗不均衡的情况，容易导致覆盖质量快速下降，然而网络中感知节点整体的剩余能量并不能反映出这一问题。因此通过建立均衡能耗指标，可以反映感知网络的持久性。具体能耗均衡评价指标见公式 4-8。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - \mu)^2} \quad (4-8)$$

其中 E_i 为第 i 个传感器节点消耗的总能量，包括转动以及激活状态两部分消耗； μ 为所有传感器节点总消耗能量的均值； n 为总的传感器节点数。这里用传感器节点消耗能量的标准差来衡量能耗均衡表现。标准差又称为波动率，可以用来反映一组数据的稳定程度，这里使用标准差能够体现一组传感器节点剩余能量的均衡水平，同时计算公式直观容易理解。

4.5 基于能耗均衡的有向传感器网络多目标变速 k 级覆盖算法

4.5.1 问题重述

在监控区域二维平面随机投放若干有向传感器，初始状态所有传感器处于待激活状态，节点能够感知感应半径范围内的移动目标。初始时刻在监控区域内随机产生多个监控目标，这些目标每个时段具有不同的速度，通过预测模型获得目标下一时刻的速度。传感器采用 4.2 节中的有向感知模型。对每个移动目标的覆盖要求为 K ，超过 K 时不提高覆盖率，低于 K 时按照 4.4 节中的覆盖率算法按实际覆盖层数呈现指数递增。通过覆盖率和均衡负载两个指标来评价网络覆盖质量。传感器节点激活或者转动均产生能量消耗。

4.5.2 覆盖模型假设

本算法应用在特定的生产环境中，为了简化复杂的应用环境、提高算法计算效率、并且更加清楚的的阐释变速移动目标 K 覆盖问题，基于以上提出下:6 个模型假设：

假设 1：有向感知节点同构，且各参数均相同；

假设 2：感知节点一旦随机投放后不再发生位置改变，仅改变转动方向以及选择激活或休眠；

假设 3：不考虑移动目标的体积，移动目标移动不发生碰撞且不互相干扰；

假设 4：传感器节点能够对感知半径范围内的目标进行覆盖；

假设 5：传感器网络能够获得所有移动目标当前时刻的位置以及速度；

假设 6：目标做变速移动，传感器网络无法准确获得目标下一时刻的位置；

4.5.3 移动目标轨迹预测模型

不同于静态目标覆盖问题，移动目标的位置时刻发生改变，需要对移动目标运动轨迹进行一定的预测。好的预测模型能够使真实覆盖率更加接近理想覆盖率。本文采用概率预测的思想，假设目标下一时段的速度满足均值为上一时刻速度，方差为目标之前所有时刻速度方差的高斯分布。基于同一片区域移动目标存在共性的可能，初始时刻的历史运动速度方差取为所有目标初速度的方差。目标下一时刻的位置满足概率密度函数如公式 4-9：

$$\begin{cases} \gamma(x,y) \geq 0 \\ P(a_{min} \leq X \leq a_{max}), -\pi \leq Y \leq \pi) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{a_{min}}^{a_{max}} \gamma(x,y) dx dy = 1 \end{cases} \quad (4-9)$$

4.5.4 EEMTKLC 算法数学模型

均衡能耗多移动目标变速 K 级覆盖问题定义为：基于应用对覆盖质量的要求

不同，任意移动目标结点需要达到期望的 K 重覆盖。在达到期望 K 重覆盖前提下，最小化传感器节点的能耗标准方差，以延长整个网络的工作时间。

EEMTKLC 问题非线性规划模型定义如下：

$$\min \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - \mu)^2} \quad (4-10)$$

$$\text{s. t. } \left[\sum_{i=1}^n \iint_D \gamma_i(x, y) A_{i,j}^t dx dy \right] \geq k \quad (4-11)$$

其中， E_i 为第 i 个传感器节点消耗的总能量，包括转动以及激活状态两部分消耗； μ 为所有传感器节点总消耗能量的均值； n 为总的传感器节点数， $A_{i,j}^t$ 是一个二维覆盖矩阵：

$$A_{i,j}^t = \begin{cases} 1 & \text{如目标 } T_j \text{ 被节点 } S_i \text{ 覆盖} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4-12)$$

4.5.5 均衡能耗多目标变速移动 k 级覆盖算法（EEMOKA）算法描述

基于上述分析，EEMTKLC 问题属于 NP 完全问题，无法在多项式时间内得解，因此，寻求一种启发式算法在有限的计算能力下获得近似最优解成为最佳的选择。本节提出的均衡能耗多目标变速移动 K 级覆盖算法 EEMOKA，基于目标轨迹移动概率模型，在邻居节点范围内，依次寻找对传感器节点间能耗平衡影响最小的传感器节点对目标所在概率分布区域选择最大概率范围的工作方向进行覆盖。具体算法描述如表 4-1：

表 4-2 EEMOKA 算法描述

Table 4-1. EEMOKA algorithm description

均衡能耗的多目标变速移动 k 级覆盖算法（EEMOKA）算法描述	
1.	初输入参数： n 个传感器节点和 m 个目标节点初始位置，感知半径 r 和单位时间能耗 c 、可感知方向、初始朝向。输入参数：有向传感器感知节点 s 初始位置，感知方向信息和初始能量。
2.	输出结果：每一时段节点 s_i 最终的激活状态 $O_i(t)$ 以及感知方向信息 $\vec{D}_i(t)$ 。
3.	$t \leftarrow 0$ ；//初始化时间步长变量
4.	初始化移动目标移动速度 $\vec{V}_i(t)$
5.	按照高斯概率分布产生下一时段移动目标速度 $\vec{V}_i(t+1)$
6.	While(true)
7.	$t \leftarrow t+1$ ；
8.	计算未达到 k 级期望覆盖的移动目标集合 ϕ_t ；
9.	计算移动目标此时落点分布概率；

10. 计算所有感知节点 s_i 达到最大覆盖效果值时的转动角度 $\Delta\theta_i$ 、工作方向 \vec{D}_i 以及能耗 E_i ;
11. 按 E_i 从小到大的顺序将传感器节点加入队列 L
12. 计算每个移动目标达到期望 K 级覆盖剩余的级数, 存储于 δ ;
13. 取队列 L 中第 1 个传感器节点
14. 激活并选取 L_1 最大覆盖效果值时的工作方向, 依据能耗公式 (4-1) 更新 L_j 节点能耗;
15. 更新所有传感器剩余期望覆盖级数 δ ;
16. 更新队列 L;
17. $f \quad \forall i \leq n \quad \delta_i = 0$;
18. continue //t 时刻达到期望 k 级覆盖要求;
19. else:
20. 返回第 8 步;

4.5 实验仿真与性能分析

本次实验在 Windows7 环境下, 利用 MatlabR2012b 工具仿真了 EEMOKA 算法, 通过分析比较 EEMOKA 与 MVPFCEA、PFCEA 算法之间的性能, 验证 EBPFCFA 算法在延长网络生命周期方面的可行性和优越性。实验的相关仿真参数如下表 4-2 所示:

表 4-3 仿真相关参数设置

Table 3-2 Setting of parameters related to simulation

参数名称	参数值
目标区域范围 (单位: m)	100×100
有向传感器节点数量	200
节点的感知半径 R	10
节点的感知视角 2α	$\pi / 2$
节点初始能量 E_0	20
节点感知能耗系数 k_1	2×10^{-5}
节点旋转能耗系数 k_2	12.5 J°
覆盖率质量要求 K	2

图 4-5 展示了一组覆盖过程, 包含 5 个移动目标。

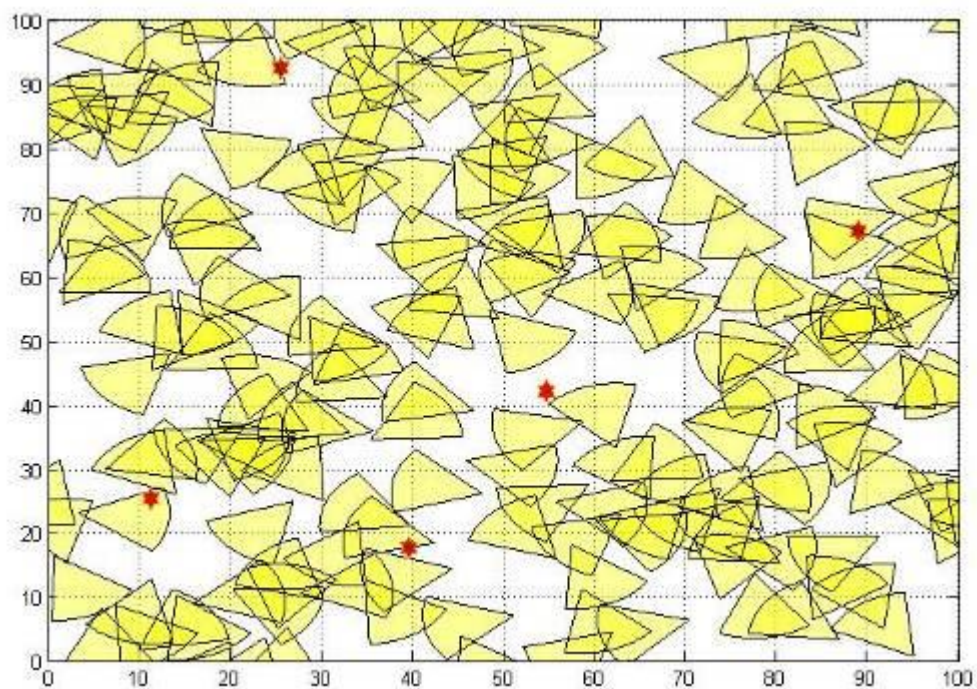


图 4-2a 初始时刻网络部署以及移动目标分布

Figure 4-2a. Network deployment and mobile target distribution at first time

其中图 4-2a 为传感器网络初始状态, 有向传感器此时具有初始朝向但仍处于休眠状态, 红色六边形代表 5 个移动目标初始位置。黄色标示未激活的有向传感器节点。

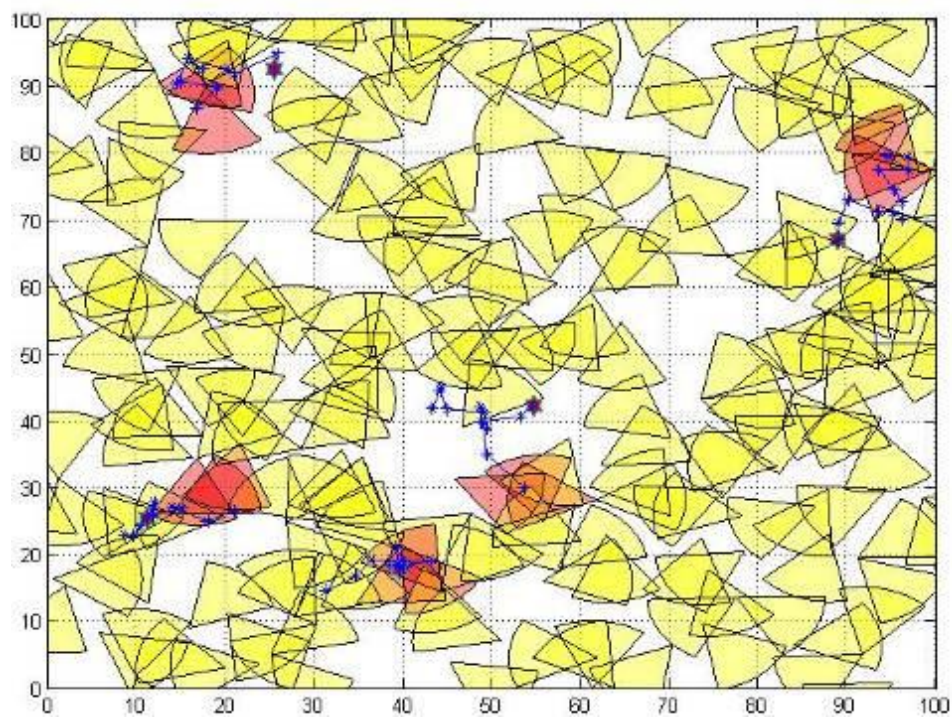


图 4-2b t=5 时刻网络部署以及移动目标分布

Figure 4-2. Network deployment and mobile target distribution when t=5

图 4-2b、4-2c、4-2d 分别对应传感器网络工作在 $t=5$ 、 $t=10$ 、 $t=15$ 三个时刻的网络部署状态，红色标示处于激活状态的有向传感器节点。

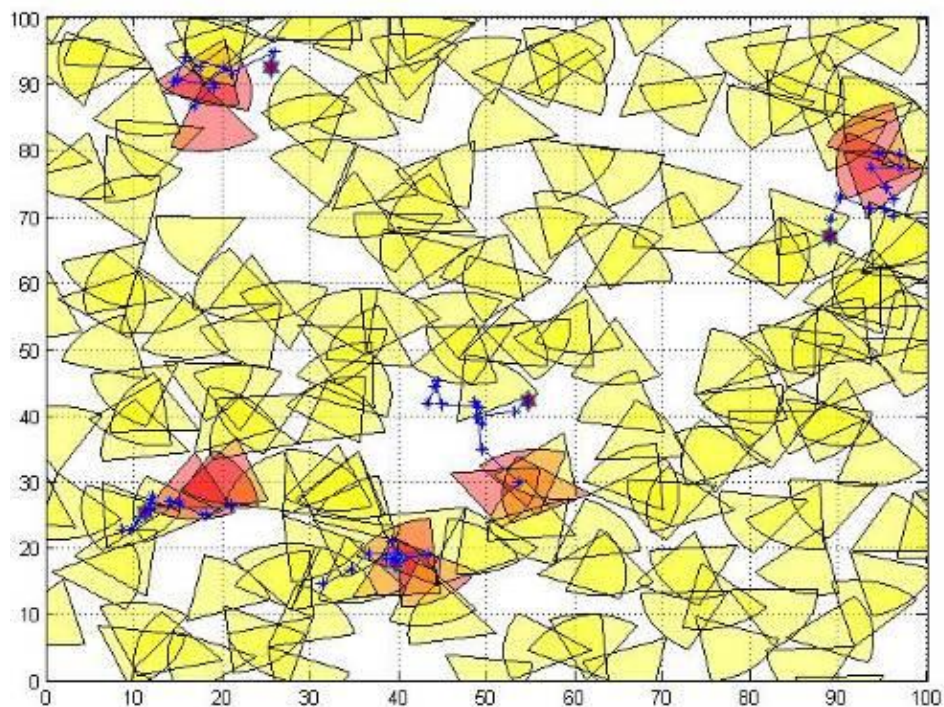


图 4-2c $t=10$ 时刻网络部署以及移动目标分布

Figure 4-2. Network deployment and mobile target distribution when $t=10$

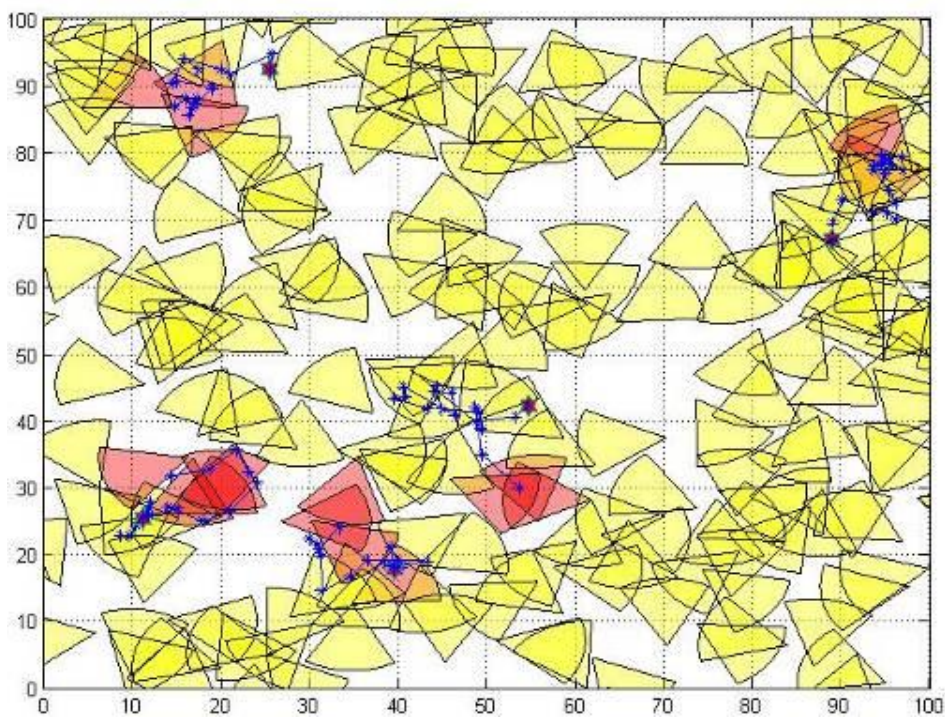


图 4-2d $t=15$ 时刻网络部署以及移动目标分布

Figure 4-2. Network deployment and mobile target distribution when $t=15$

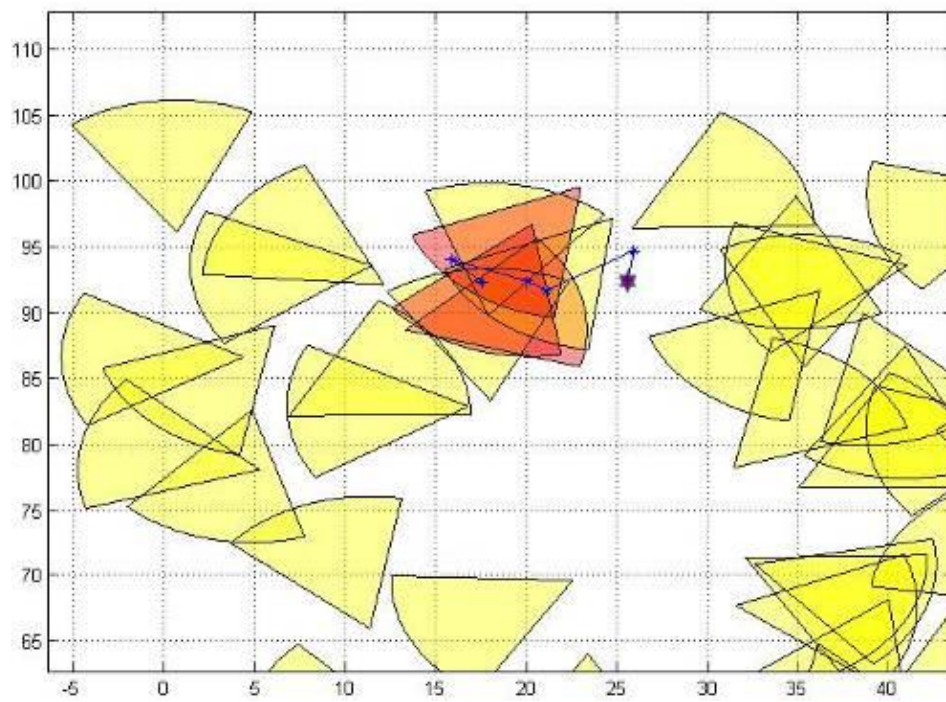


图 4-3a t=5 时刻监控区域左上角局部放大

Figure 4-2. Top-left local enlargement of picture 4-2a

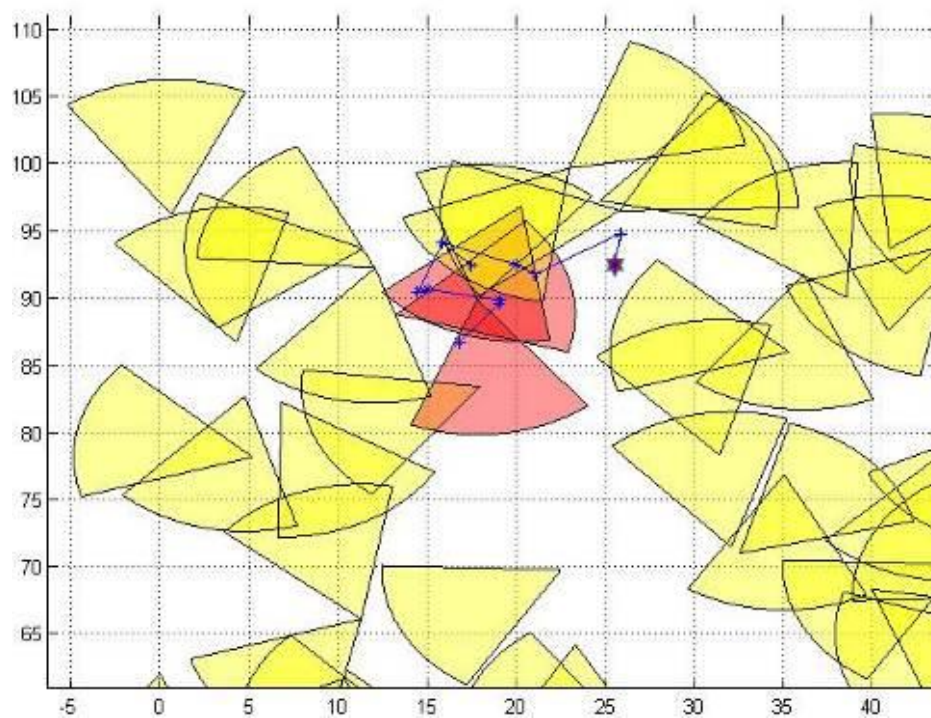


图 4-3b t=10 时刻监控区域左上角局部放大

Figure 4-3b. Top-left local enlargement of picture 4-2b

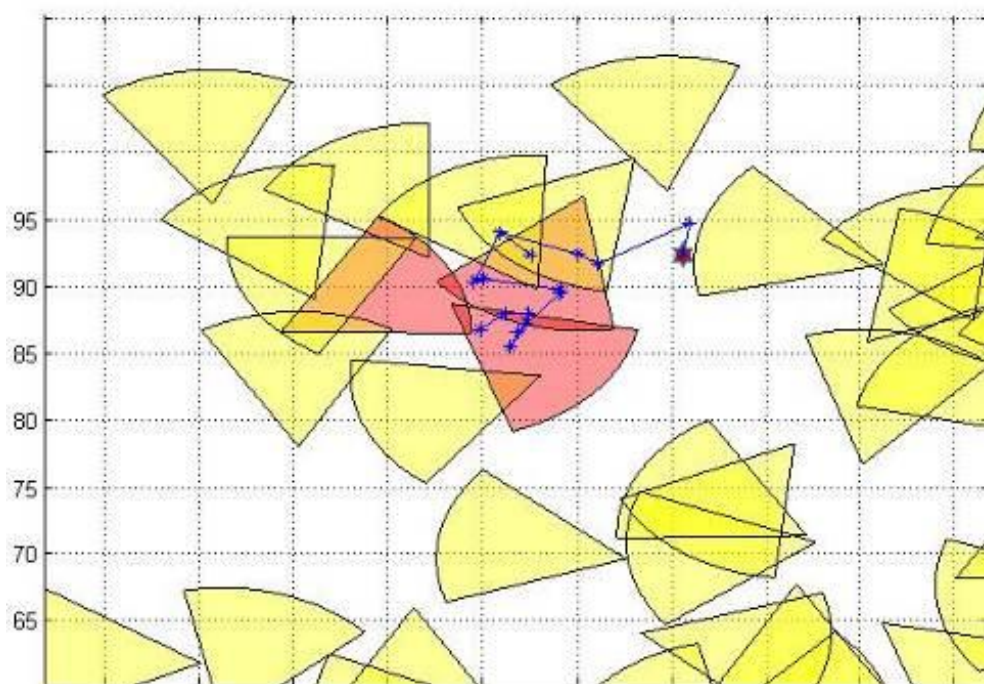


图 4-3c t=15 时刻监控区域左上角局部放大

Figure 4-3c. Top-left local enlargement of picture 4-2c

将 EEMOKA 算法与其他三种算法 Random(随机选择节点旋转), DPGKCA 算法^[11], 以及 MPKCDA 算法^[40]进行比较, 通过调整传感器节点数量、感知半径等关键参数对以下 2 个指标分别进行了对比分析。

(1) 均衡能耗

均衡能耗指标定义及计算由 4.3 节给出, 该值能够正确反映出节点感知方向调整过程中能耗均衡问题, 是本章研究问题的主要评价指标。

(2) 网络生存时间

网络生存时间在不同的应用场景具有不同的定义, 本文考虑到面向的是小水电厂区的区域覆盖问题, 因此对网络生存时间的定义为: 当网络中存在期望覆盖级数无法满足大于或者等于 K 时。

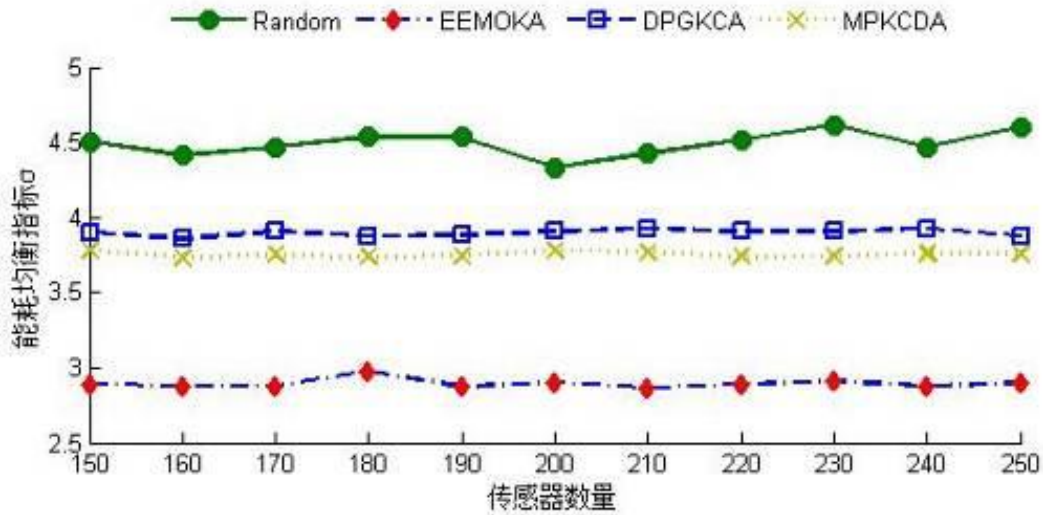


图 4-4 不同传感器数量对不同算法负载均衡能力的影响

Figure 4-4. Effect of different sensor number on balancing ability of different algorithms

图 4-4 选取 $t=10$ 时刻 4 种算法的网络能耗均衡指标，传感器数量取 150 到 250 范围，采样间隔为 10，能耗均衡指标 σ 的详细说明与计算公式已经在 4.4.2 节给出。由图 4-4 结果可以看出，EEMOKA 算法在能耗均衡方面明显优于其他 3 种算法，另外传感器数量的变化对能耗均衡指标的影响不大。

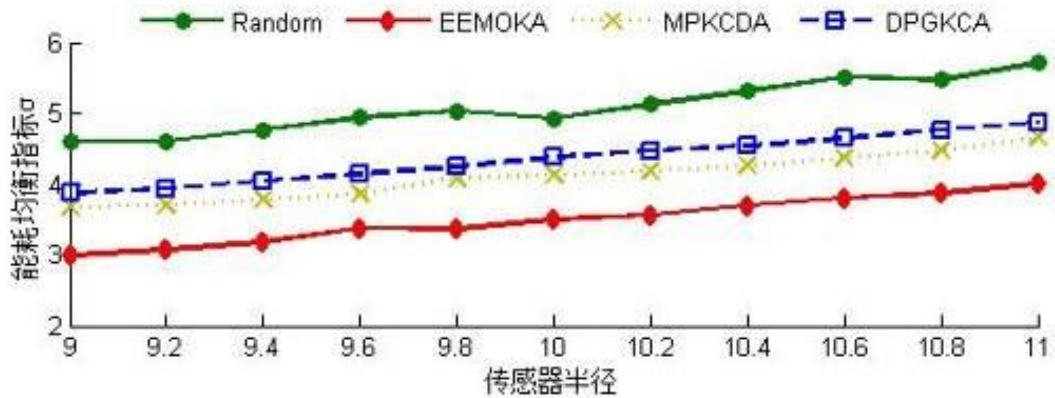


图 4-5 不同传感器感知半径对不同算法负载均衡能力的影响

Figure 4-5. Effect of different sensing range on balancing ability of different algorithms

图 4-5 选取 $t=10$ 时刻 4 种算法的网络能耗均衡指标进行对比，传感器的感知半径取 9 到 11 范围，采样间隔为 0.2，由 4-5 结果可以看出，EEMOKA 算法在能耗均衡方面优于其他三种算法，传感器半径增加对 4 种算法负载均衡指标呈现正相关，对 4 种算法的影响基本相同。

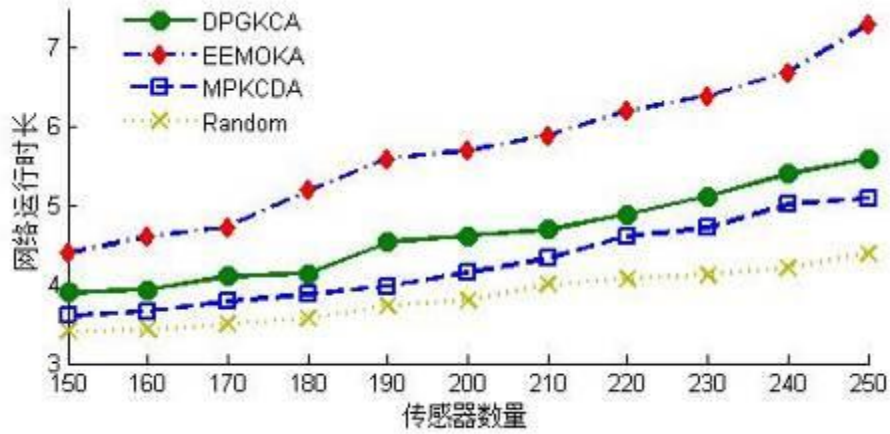


图 4-6 不同传感器数量对不同算法下网络运行时长的影响

Figure 4-6. Effect of different number of sensor on length of working time of different algorithms

图 4-6 中通过改变传感器数量，取 150 到 250 范围，采样间隔为 10，得到 4 种算法下网络运行时长。由图 4-6 可以看出，EEMOKA 算法在延长网络运行时长方面明显优于其他 3 种算法，另外传感器数量的变化对网络运行时长有明显的正相关性。

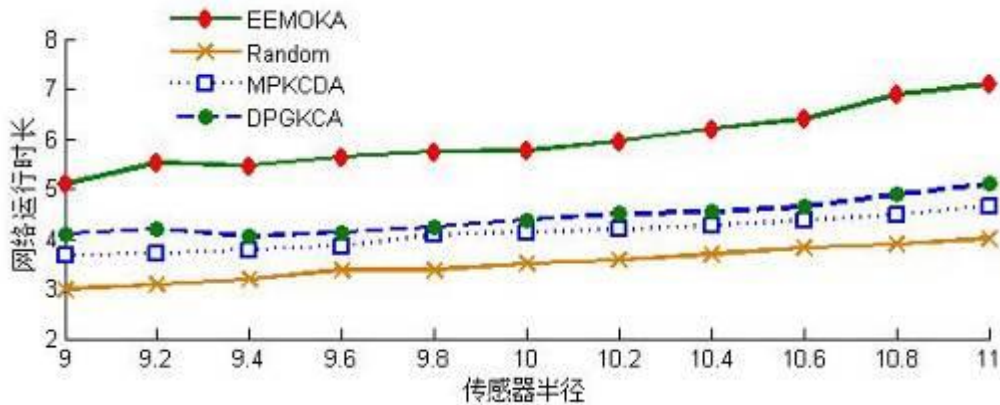


图 4-7 感知半径对不同算法下网络运行时长的影响

Figure 4-7. Effect of different sensing range on length of working time of different algorithms

图 4-9 显示了通过改变传感器感知半径，取 9 到 11 范围，采样间隔为 10，得到 4 种算法下网络运行时长。由图 4-7 可以看出，EEMOKA 算法在延长网络运行时长方面明显优于其他 3 种算法，另外传感器感知半径的变化与网络运行时长存在明显的正相关性。

通过比较以上 4 组性能对比，当同时满足 K 重覆盖率要求的情况下，

EEMOKA 通过更好的平衡网络覆盖，在延长多移动目标 K 重覆盖问题上表现出更佳的性能。

4.6 本章小结

本章针对有向传感器网络多移动目标变速 K 级覆盖问题，建立了移动目标轨迹概率预测模型以及传感器功耗模型，分析了变速目标的运动轨迹；设计了一种基于轨迹预测的多目标 K 级覆盖优化算法，在满足网络 K 覆盖要求的前提下，最大限度均衡传感器的功耗。仿真结果显示，EEMOKA 算法在均衡传感器网络负载以及延长整个网络工作时间方面有明显的优势。

第五章 小水电厂区无线感知器网络远程监控系统

5.1 需求分析

水电作为一种再生清洁能源，对环境污染小，作为替代能源有利于有效减少煤电燃烧所带来温室效应。基于这些农村小水电的发展为偏远地区的经济建设和生态保护做出了卓越的贡献。由于地处偏远，多数小水电站的防护条件相对落后且缺乏基本的维护，同时人力监测的成本较高无法具体实施且存在安全隐患。基于此，发展小水电远程监控技术成为一种必要的趋势。通过在小水电站厂区随机部署一定数量的无线视频传感器以及基站的方式，对水电站厂区的生产、生态、入侵目标等进行监测，能够减少人力成本，具有实际价值。

基于 WEB 浏览器的服务方式对基础设备要求低，通过浏览器远程提交控制指令对水电站机组设备进行监测管理是一种很好的解决方案，有利于水电站管理人员远程进行监控，预防事故，并紧急情况下的应急抢救速度。处于这些考虑，本系统基于 B/S 模型开发控制系统，管理人员能在远程浏览器上监控水电站设备运行状况并修改设备参数，即使排除故障，有效的对设备进行管理。

5.2 系统设计与实现

5.2.1 系统概要

本系统是一种基于浏览器/服务器模式的水电站厂区远程监控系统，旨在保障水利设施安全生产，同时具有数据采集、控制指令发送/接收、信息管理以及安全预警等主要功能，为水电站远程监控提供了一套科学规范且实用性强的环境信息管理与决策系统。本系统对环境参数进行实时反馈并提供入侵分析，使得对水电站厂区环境的监测更加及时、高效。

系统主要采用 ASP、VBScript、MySQL 等技术构建。系统实现的功能主要包括：环境参数实时监测、监测点状态监测、历史数据查询、报警查询、阈值设置、信息发布等功能。小水电厂区远程监控系统通过接入网络信息传输将各小水电站厂区生产情况实时反馈至管理中心，依据反馈的实时数据采取相应决策如起停水电机组、控制发电量、调整传感器网络监控等相应工作，工作人员下达命令受到管理权限的约束。系统总体结构如图 5-1 所示。



图 5-1 系统总体结构

Figure 5-1. Overall structure of the system

5.2.2 系统功能模块

小水电厂区远程监控系统主要包括用户信息管理、水电站运行状态展示、水电机组操作以及实时预警四个功能。其功能结构如图 5-2 所示。



图 5-2 系统功能结构

Figure 5-2. System functional structure

下面分别对四个功能模块展开具体的介绍

(1) 信息管理

信息管理功能主要包括对不同厂区管理员信息的注册登记、权限分配、厂区信息的注册登记以及对这些信息的删除、修改和查询。其中厂区信息管理主要是对水电站的数据进行管理,包括基本的增加、删除等操作,除此之外还包涵厂区地理信息、厂区传感器网络覆盖质量要求等基本信息。人员管理包含对不同级别分工人员的操作权限管理、记录员工进行过的操作、员工的个人信息注册查询以及修改。考虑到水电机组的运行安全,对于重要的生产操作,需要配合上位机系统进行再次核实操作权限才能实施。比如重要的操作如起停水电机组,调整发电量等操作。

(2) 机组操作

机组操作主要是对各机组的操作以及对厂区内感知器网络的部署调度。其中机组操作包括发电、停机、空载、指令复位等生产操作,并依据实时反馈回的数据进一步调节有功和无功作业。同时,根据厂区内反馈回的实际覆盖质量数据分析并发布新的调度决策。

(3) 机组运行状态监视

实时数据组件采集到生产机组的相关运行参数,通过网络传输发送到监控系统后台,通过前端页面展示水电机组各模块的运行状态、实时参数、故障信息、操作记录等,以及机组电流、电压、水位、有功以及无功等生产数据。有助于确保水电机组的正常工作。实时数据能有助于工作人员远程获取水位、流速、电站环境等参数,并加强感知网络的覆盖精度。

(4) 实时预警

实时预警功能包括预警阈值设定、异常运行预警、入侵预警三个主要模块。管理人员通过监控系统前端设置水电站各项运行参数的正常工作范围,当检测到的实时工作参数超出设定范围时,提供报警提示。报警内容包括具体的异常参数,异常值等信息。另外,当无线传感器网络检测到入侵目标时,反馈入侵目标个数、移动速度以及理想的当前覆盖率值等信息。此外还支持对报警事件提供短信提醒的功能,方便工作人员即使排除故障,减小安全隐患。

5.2.3 调度流程

小水电远程监控系统调度逻辑如图 5-3 所示。

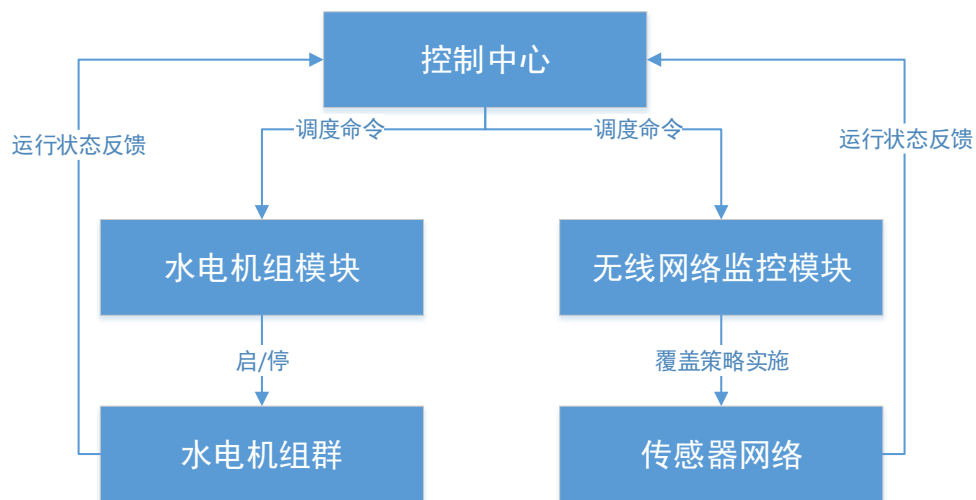


图 5-3 厂区动态调度流程示意图

Figure 5-3. Schematic diagram of plant dynamic dispatching process

首先，控制中心获取获取下位机运行数据，用户通过前端页面展示分析得到控制命令，并通过前端操作调用服务器向下位机下发调度命令。同时水电机组群和传感器网络进一步将运行状态反馈给服务器等待下一步调度指令。电厂区远程监控系统主要包括用户信息管理、水电站运行状态展示、水电机组操作以及实时预警四个功能。其功能结构如图 5-3 所示。

5.2.4 系统登录界面

管理人员登录

type username

type password

☐ 记住密码

登录

非管理人员？

暂不提供非厂区管理人员注册

图 5-4 管理员登录界面

Figure 5-4. Administrator login interface

图 5-4 为管理员登录界面，支持数据库中已存在的管理员登录，新增管理员需要用已有增加管理员权限的管理人员登录后进行操作。

5.2.5 人员信息管理

人员管理功能包括查询和编辑两类。首先查询功能允许查看已有的管理人员，具体包括他们的姓名、权限、登录状态、操作记录等信息。编辑功能允许管理员对较低管理权限的管理人员信息进行修改、删除以及新增。图 5-5、5-6 分别为管理人员查询界面和管理人员注册界面。



图 5-5 人员信息管理界面

Figure 5-5. Personnel information management interface

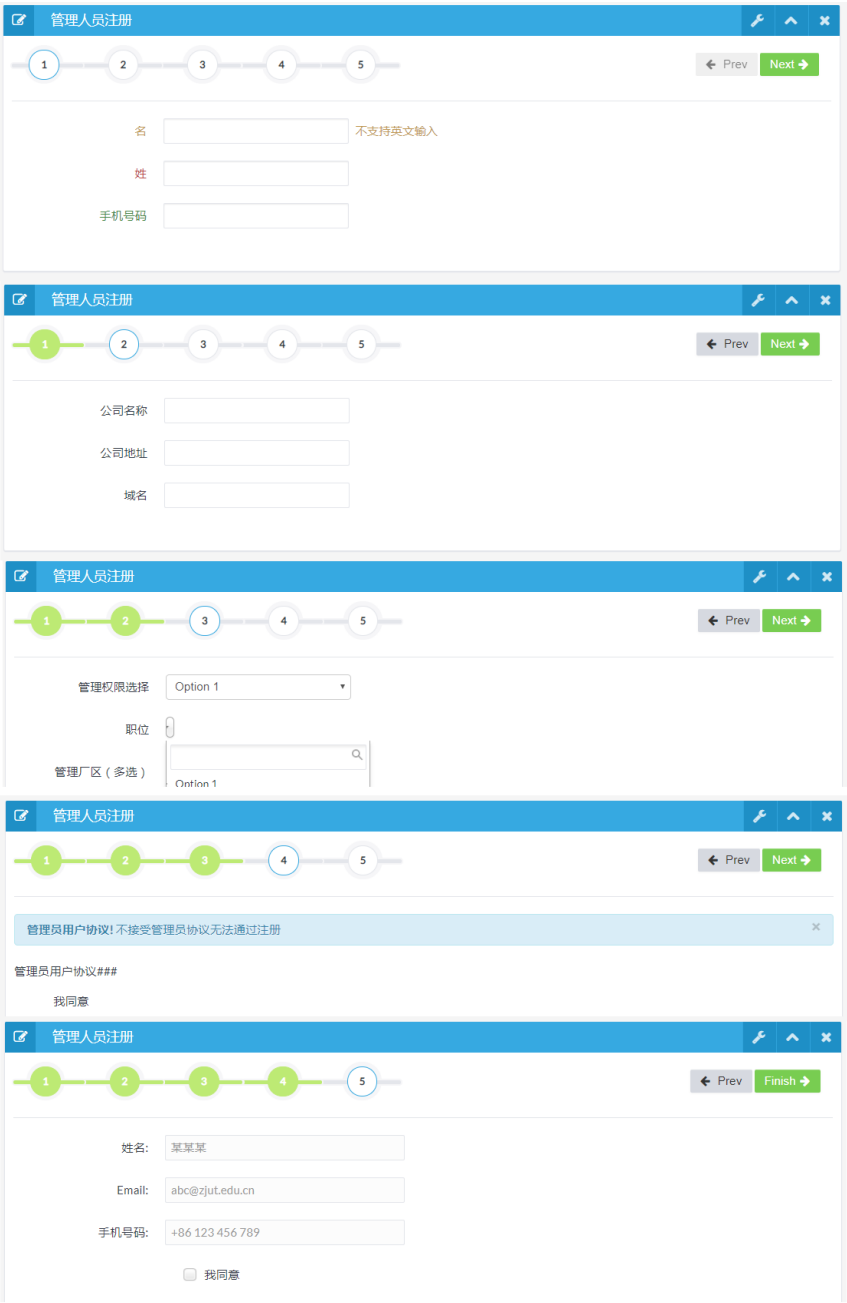


图 5-6 管理人员注册界面

Figure 5-6. Administrator registration interface

5.2.6 机组额定参数管理

发点机组额定参数设定包括：机组有功、机组无功、机组功率因数、机组励磁电流、机组励磁电压、机组系统电压、机组导叶开度、机组转速、机组机制动气压、机组机调速器油、机组机涡壳压、机组网频等。机组额定参数管理界面如图 5-7 所示。

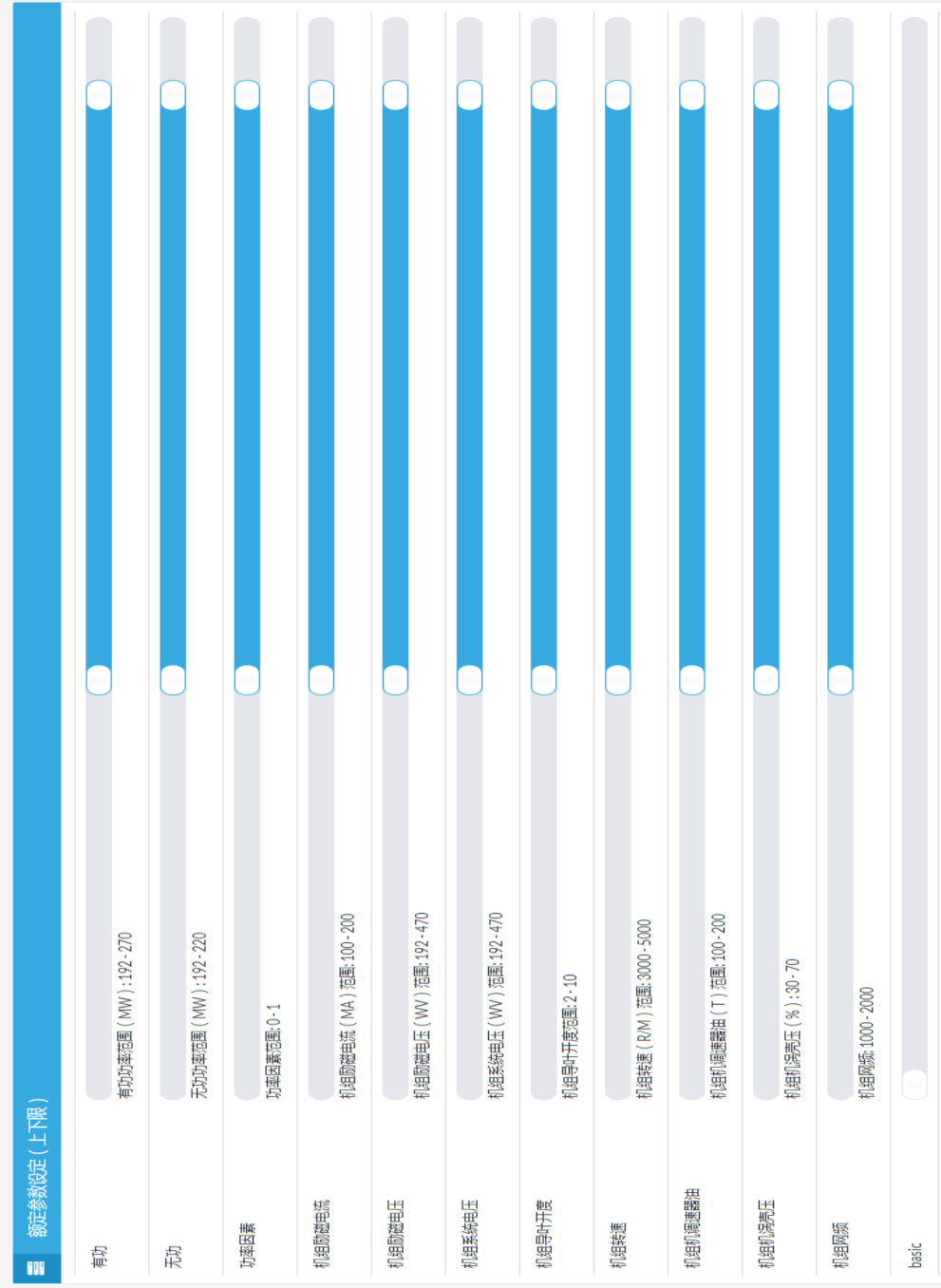


图 5-7 机组额定参数管理界面

Figure 5-7. Rating parameter management interface

5.2.7 发电机组模块运行状况监测

发点机组额定参数设定包括：机组有功、机组无功、机组功率因数、机组励磁电流、机组励磁电压、机组系统电压、机组导叶开度、机组转速、机组机制动气压、机组机调速器油、机组机涡壳压、机组网频等。机组额定参数管理界面如图 5-8 所示。

机组运行状态监控			
序号	更新时间	参数名称	运行状况
1	2019/01/01 10:11:15	流旁通阀开闭	良好
2	2019/02/01 10:11:15	流开进水闸	良好
3	2019/02/01 10:11:15	流开技术供水阀	良好
4	2019/03/01 10:11:15	流机组冷却水	良好
5	2019/01/21 10:11:15	流开调速器	接近预警下限

Prev

1

2

3

4

Next

图 5-8 水电机组各模块运行监控界面

Figure 5-8. Operating monitoring interface of each module of hydropower unit

5.2.8 水电机组远程控制

当符合预设的管理权限时，管理人员能够进行水电机组远程操作具体包括启动发电、停机、空载、空转、调节方式选择以及指令复位，其中发电、停机操作需要最高管理员权限。水电机组远程控制界面如图 5-9 所示。



图 5-9 水电机远程控制界面

Figure 5-9. Operating monitoring interface of each module of hydropower unit

5.2.9 厂区传感器网络覆盖状况查询

传感器网络覆盖状态模块提供展示当前存活传感器节点数量、当天平均覆盖水平、监控区域移动目标数量、未达到 K 覆盖移动目标数量、一周覆盖率每日平均值变化趋势以及当前传感器网络覆盖率。

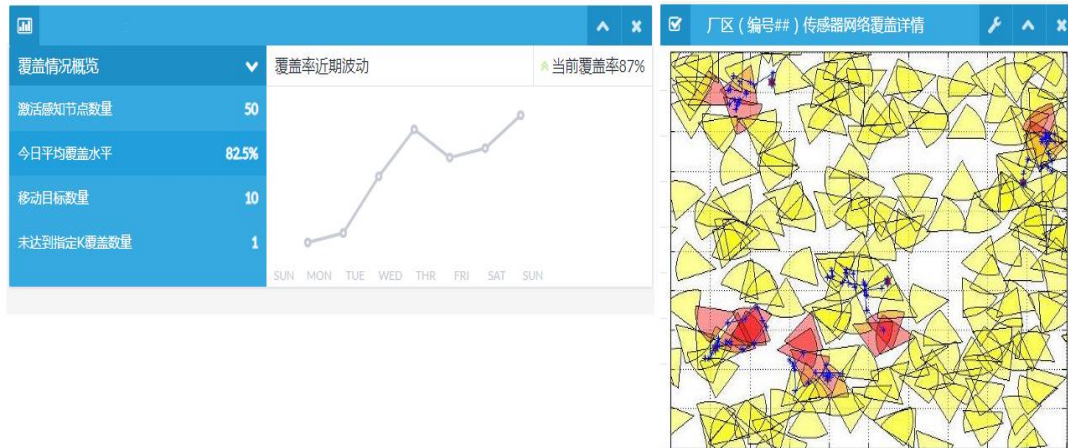


图 5-10 网络覆盖状态监控页面

Figure 5-10. Network coverage status monitoring page

5.2.10 数据库设计概要

在小水电站远程监控系统中，数据库是信息管理的基础。水电站远程监控系统数据库的设计应结合水电站实际的业务需求。本次应用主要涉及数据包括管理人员注册信息、管理员操作历史记录信息、水电机组设备信息、厂区传感器覆盖状态信息。其中人员注册信息主要包含包含管理员姓名、联系方式、公司、电子邮箱地址、获得管理权限、职务、拥有管理权限的厂区。管理员操作历史记录信息包含管理员日常远程操作记录，具体指启停水电机组、修改管理员账户信息、空转、空载等操作以及对应操作时间。水电机组设备信息包括机组有功、机组无功、机组功率因数、机组励磁电流、机组励磁电压、机组系统电压、机组导叶开度、机组转速、机组机制动气压、机组机调速器油、机组机蜗壳压、机组网频等运行参数，以及流旁通阀开闭、流开进水闸、流开技术供水阀、流机组冷却水、流开调速器、调速器手动/自动、技术供水阀、水导轴承示流、发电机径向轴承示流、空冷器示流、灭磁开关、DL 位置等参数的状态是否正常。厂区传感器覆盖状态信息包括传感器网络有效感知节点数量、移动目标数量以及覆盖率。

本远程控制系统采用 MySQL 数据库保存信息。MySQL 作为目前主流的关系型数据库管理系统之一，在 WEB 应用方面，是最好的 RDBMS（Relational Database Management System，关系型数据库管理系统）软件。MySQL 支持标准化 SQL 语句访问，同时具有体积小、快速部署、成本低、开放源码等特点，综合考虑本系统选择 MySQL 作为数据库。

5.3 本章小结

本章首先对小水电远程监控系统的需求进行分析，分析了小水电远程监控系

统的设计架构，详细介绍了系统各模块，包括主要功能以及解决方案，完整描述了系统的设计过程，并将本文移动目标覆盖控制算法移植入远程监控系统当中，配合小水电站厂区安全生产工作，最后展示了客户端监控系统的界面效果，良好的交互和便于日常工作。

第六章 结论与展望

5.1 结论

随着信息技术的发展,无线视频传感器因其独特的部署及信息采集方式,已经广泛应用于军事、环境监测、医疗健康等多个领域。作为一种有效的信息采集、目标追踪和环境感知方式,无线视频传感器能够有效的优化传感器设备资源、延长网络寿命、提高网络覆盖质量,帮助实现监测任务包括收集信息、传递消息等。本文针对目前农村小水电站厂区环境监控问题展开研究,根据小水电厂区监测实际环境,以 K 级质量覆盖厂区内多移动目标为前提,追求最大限度均衡传感器节点间的能量消耗,以保障更久的网络运行时长。最终实现了将提出的算法应用于小水电站远程监控系统,获得了不错的覆盖质量。

本文的主要工作总结如下:

(1)总结了现有的传感器模型以及在不同监控场景下所广泛应用的算法模型,分析了这些算法的优劣以及特点。在静态多目标覆盖场景下,提出一种受网络生命周期约束的目标导向启发式网络覆盖算法,通过最大化有效覆盖子集的个数达到延长网络覆盖时长的目的。

(2)针对农村小水电厂区实际存在的有向传感器网络多移动目标覆盖问题,通过分析变速移动目标的运动规律,建立了移动目标变速轨迹概率预测模型。在此基础上,设计了满足期望 k 覆盖条件下的平衡网络负载算法 EEMOKA,仿真结果显示在不同传感器部署数量、传感器感知半径、 K 级覆盖要求下 EEMOKA 算法具有更好的覆盖性能。

(3)针对小水电厂区实际监控需求,从调度控制、信息管理、实时数据和远程交互四个功能入手开发了小水电站厂区远程监控系统,将 EEMOKA 算法应用于远程监控系统,解决了算法移植和系统开发时的若干困难。

5.2 展望

无线视频传感器网络中的变速多移动目标 K 级覆盖问题的研究仍处于新兴阶段,使用有向感知模型进行覆盖时,无论是区域覆盖、目标覆盖还是移动覆盖,均面临着诸多的挑战。仍迫切的需要更加优秀的算法支持应用。

本文提出的移动目标 K 级覆盖方法,距离真正应用到水电站实时监控系统还存在大量的基础工作需要进一步深入的研究,目前仍存在的问题和进一步工作如下:

(1)文本提出的目标导向多目标 K 级覆盖算法以获得更多的最小覆盖子集

为目标，算法迭代计算量大且无法并行计算，任何一个目标的覆盖都取决于之前已经覆盖的情况，因此在实时覆盖性能上稍显不足，如何找到一个支持并行计算且覆盖性能较优的覆盖算法，值得进一步深入的研究。

（2）小水电厂区远程监控系统基本功能已经设计完成，但距离真正的实地部署还有一定的差距，系统仍需大量的数据进行测试与排错。对于大量水电专业数据，系统还缺乏专业的分析功能，如何应用数据挖掘技术添加分析功能，值得进一步的深入研究。

参考文献

- [1] 石为人,袁久银,雷璐宁.无线传感器网络覆盖控制算法研究[J].自动化学报,2009,35(05):540-545.
- [2] 刘丽萍,王智,孙优贤.无线传感器网络部署及其覆盖问题研究[J].电子与信息学报,2006(09):1752-1757.
- [3] 陶丹,马华东.有向传感器网络覆盖控制算法[J].软件学报,2011,22(10):2317-2334
- [4] 马华东,陶丹.多媒体传感器网络及其研究进展[J].软件学报,2006(09):2013-2028.
- [5] 王燕莉,安世全.无线传感器网络的覆盖问题研究[J].传感技术学报,2005(02):307-312.
- [6] A. ur Rehman, A.Z. Abbasi, N. Islam, Z.A. Shaikh A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture[J] Comput. Stand. Interfaces, 36 (2) (2014), pp. 263-270
- [7] B. Wang Coverage problems in sensor networks: a survey[J] ACM Comput. Surv., 43 (4) (2011), pp. 32:1-32:53
- [8] F. Xia, L.T. Yang, L. Wang, A. Vinel Internet of things[J] Int. J. Commun. Syst., 25 (9) (2012), pp. 1101-1102, 10.1002/dac.2417
- [9] S. Yinbiao, K. Lee, P. Lanctot, F. Jianbin, H. Hao, B. Chow, J. Desbenoit Internet of Things: Wireless Sensor networks[J], International Electrotechnical Commission (2014)
- [10] El-Bendary M.A., et al. Developing Security Tools of WSN and WBAN Networks Applications[J] Springer (2015)
- [11] Abdollahzadeh S., Navimipour N.J. Deployment strategies in the wireless sensor network: a comprehensive review Comput[J], Commun., 91 (2016), pp. 1-16, 10.1016/j.comcom.2016.06.003
- [12] J.S. Wilson Sensor Technology Handbook[J], Elsevier (2004)
- [13] Y. Yoon, Y.H. Kim An efficient genetic algorithm for maximum coverage deployment in wireless sensor networks[J], IEEE Trans. Cybern., 43 (5) (2013), pp. 1473-1483
- [14] D.T.H. Ly, N.T. Hanh, H.T.T. Binh, N.D. Nghia. An improved genetic algorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks[J], SoICT (2015)
- [15] N.T. Hanh, N.H. Nam, H.T.T. Binh. Particle swarm optimization algorithms for maximizing area coverage in wireless sensor networks[J], JNW, 5 (9) (2010), pp. 1033-1040
- [16] H.T.T. Binh, N.T. Hanh, N. Dey, et al. Improved cuckoo search and chaotic flower pollination optimization algorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks[J], Neural Comput. Appl. (2016), pp. 1-13
- [17] B. Wang. Coverage problems in sensor networks: a survey[J], ACM Comput. Surv., 43 (4) (2011), pp. 32:1-32:53
- [18] Y. Yoon, Y.H. Kim. The roles of crossover and mutation in real-coded genetic algorithms. S. Gao (Ed.), Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications, InTech, Rijeka (2012), 10.5772/38236
- [19] G. Fan, S. Jin Coverage problem in wireless sensor network: a survey[J], JNW, 5 (9) (2010), pp. 1033-1040
- [20] A. Howard, M.J. Matarić, G.S. Sukhatme Mobile sensor network deployment using potential fields: a distributed, scalable solution to the area coverage problem[J], H. Asama, T. Arai, T. Fukuda, T. Hasegawa
- [21] (Eds.), Distributed Autonomous Robotic. Systems[J], Springer Japan, Tokyo (2002),

- pp. 299-308.
- [22] A. Sangwan, R.P. Singh. Survey on coverage problems in wireless sensor networks[J], *Wirel. Pers. Commun.*, 80 (4) (2015), pp. 1475-1500
 - [23] S. Yinbiao, K. Lee, P. Lanctot, F. Jianbin, H. Hao, B. Chow, J. Desbenoit. Internet of Things: Wireless Sensor networks[J], International Electrotechnical. Commission (2014)
 - [24] Wang Y C, Chen Y F, Tseng Y C. Using rotatable and directional(R&D) sensors to achieve temporal coverage of objects and its surveillance application[J]. *IEEE Transactions on mobile computing*. 2012, 11(5): 1358-1370.
 - [25] 陶丹, 马华东, 刘亮. 基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法[J]. *软件学报*, 2007, 18(5):1152 -1163.
 - [26] Kandoth C, Chellappan S. Angular mobility assisted coverage in directional sensor networks[C]. *International Conference on Network-Based Information Systems*[J], 2009. 376-379.
 - [27] S. Misra, M.P. Kumar, M.S. Obaidat Connectivity preserving localized coverage algorithm for area monitoring using wireless sensor networks[J], *Computer Communications*, 34 (2011), pp. 1484-1496
 - [28] B. Wang, H.B. Lim, D. Ma. A survey of movement strategies for improving network coverage in wireless sensor networks[J], *Computer Communications*, 32 (2009), pp. 1427-1436
 - [29] A. Ghosh, S.K. Das. Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks: a survey[J], *Pervasive and Mobile Computing*, 4 (2008), pp. 303-334
 - [30] 赵旭, 雷霖, 代传龙. 无线传感器网络的覆盖控制[J]. *传感器与微系统*[J], 2007(08):62-66.
 - [31] Z. Abo-Hammour, O.A. Arqub, O. Alsmadi, S. Momani, A. Alsaedi. An optimization algorithm for solving systems of singular boundary value problems[J], *Appl. Math. Inf. Sci.*, 8 (6) (2014), p. 2809
 - [32] O.A. Arqub, Z. Abo-Hammour Numerical solution of systems of second-order boundary value problems using continuous genetic algorithm[J], *Inf. Sci.*, 279 (2014), pp. 396-415
 - [33] S. Slijepcevic, M. Potkonjak Power efficient organization of wireless sensor networks *IEEE international conference on communications,(ICC)*, 2, IEEE (2001), pp. 472-476
 - [34] M. Cardei, D. Du. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization *Wireless Networks*[J], 11 (3) (2005), pp. 333-340
 - [35] P. Berman, G. Calinescu, C. Shah, A. Zelikovsky. Power efficient monitoring management in sensor networks. *Proceedings of the wireless communications and networking conference (WCNC)*, 4, IEEE (2004), pp. 2329-2334
 - [36] X. Wan, J. Wu, X. Shen. Maximal lifetime scheduling for roadside sensor networks with survivability. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*[J], 64 (11)(2015), pp. 5300-5313
 - [37] J. Tang, B. Zhu, L. Zhang, R. Hincapie. Wakeup scheduling in roadside directional sensor networks. *Global telecommunications conference (GLOBECOM 2011)*, IEEE (2011), pp. 1-6
 - [38] Q. Yang, S. He, J. Li, J. Chen, Y. Sun. Energy-efficient probabilistic area coverage in wireless sensor networks[J], *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64 (1) (2015), pp. 367-377
 - [39] E. Fadel, V. Gungor, L. Nassef, N. Akkari, M. Malik, S. Almasri, I. Akyildiz. A survey on wireless sensor networks for smart grid. *Computer Communications*, 71 (2015), pp. 22-33
 - [40] P. Rawat, K. Singh, H. Chaouchi, J. Bonnin. Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies. *The Journal of Supercomputing*, 68 (1) (2014), pp. 1- 48

- [41] 任彦,张思东,张宏科.无线传感器网络中覆盖控制理论与算法[J].软件学报,2006(03):422-433.
- [42] 李威,王广超.基于移动模型的传感器网络覆盖控制算法[J].信息通信,2015(11):18-19.
- [43] 张美燕,蔡文郁,周丽萍.三维水下移动传感网多目标有向路径覆盖增强机制研究[J].传感技术学报,2014,27(01):100-106.
- [44] 涂志亮,王强,沈毅.一种目标监测的移动传感器网络覆盖分布式优化算法[J].控制与决策,2012,27(09):1353-1358.李建中,高宏.无线传感器网络的研究进展[J].计算机研究与发展,2008,45(1):1-15.
- [45] 班冬松,温俊,蒋杰,窦文华.移动无线传感器网络 k-栅栏覆盖构建算法[J].软件学报,2011,22(09):2089-2103.
- [46] 罗卿,林亚平,王雷,尹波.传感器网络中基于数据融合的栅栏覆盖控制研究[J].电子与信息学报,2012,34(04):825-831.
- [47] 秦宁宁,盖伟,张林,蒋敏峰,徐保国.Voronoi 图在无线传感器网络栅栏覆盖中的应用研究[J].计算机应用研究,2008(03):863-865.
- [48] 舒坚,余坤,刘琳岚,董海星,谌友仁.无线传感器网络中基于移动模型的栅栏覆盖研究[J].计算机研究与发展,2011,48(S2):141-144.
- [49] 陶丹,陈后金.视角受限传感器网络强栅栏覆盖判定算法[J].北京交通大学学报,2011,35(05):8-11.
- [50] S. Kumar, T.H. Lai, A. Arora. Barrier coverage with wireless sensors[J], Proc. of ACM MobiCom (2005), pp. 284-298
- [51] B. Liu, O. Dousse, J. Wang, A. Saipulla Strong barrier coverage of wireless sensor networks[J], Proc. of ACM MobiHoc (2008), pp. 411-420
- [52] A. Saipulla, C. Westphal, B. Liu, J. Wang. Barrier coverage of line-based deployed wireless sensor networks[J], Proc. of IEEE INFOCOM (2009), pp. 127-135
- [53] 蒋一波等.一种受网络生命周期约束的有向传感器网络覆盖优化方法:中国,201610341648.4 [P].2005-01-04
- [54] 李雪辉,耿卫国,潘微平,等.1-双酯基-3-烷基咪唑离子液体及其制备方法:中国,CN10 032 669.X [P].2005-01-04.
- [55] S. He, X. Gong, J. Zhang, J. Chen, Y. Sun Curve-based deployment for barrier coverage in wireless sensor networks[J], IEEE Trans. Wirel. Commun., 13 (2) (2014), pp. 724-735

致 谢

首先非常感谢蒋一波教授对我的悉心指导，让我能够顺利的完成我的硕士论文撰写。从最初的论文题目拟定、选题讨论、开题报告以及后期的论文初稿完成、最后经过反复修改直至定稿，已经一年有余。在此期间，蒋一波老师耐心的与我讨论论文的框架与细节、不断给予我激励和帮助，从中我受益非凡。

时光如梭，三年时光如一段美好的旅行，悄然接近尾声。我从一个稚嫩的本科毕业生开始，逐渐学会独立研究，一步步朝一名合格的研究生前进。许多细节历历在目，老师们的教会令我受用终身。从蒋老师严谨的学术作风、渊博的学识、踏实认真的工作态度中，我不但学会了如果做事，也领悟了许多做人的道理。实验室中蒋老师的学子们，我的师兄师弟，他们的刻苦认真的钻研精神，营造了浓郁的学术气氛，我为能和你们一起学习成长而感到骄傲，感谢各位的相伴。这里特别感谢梅佳东同学，我亲密的“战友”，我们一起熬夜学术、修改论文的时光值得我一生珍藏。

特别感谢我的母亲汪璧昭女士，是她无微不至的关怀和鼓励支持我完成学业，成长为今天的我。同时感谢我的父亲、兄弟以及亲戚朋友对我的鼓励和支持，感谢室友们给予我的帮助和陪伴。

最后，感谢各位论文评审专家和教授，在百忙之中评阅我的论文。

浙江工业大学计算机大楼

2019年4月

作者简介

1 作者简介

1991 年 03 月出生于浙江宁波。

2015 年 09 月——2019 年 06 月，浙江工业大学计算机科学与技术学院（系）计算机技术专业学习，攻读专业硕士学位。

2 攻读硕士学位期间发表的学术论文

3 参与的科研项目及获奖情况

国家自然科学基金“视频传感网中 K 级冗余覆盖增强及多热点区域检测效能协同优化”（61402415）

4 发明专利

学位论文数据集

密 级*	中图分类号*	UDC*	论文资助
公开	TP391	540	
学位授予单位名称	学位授予单位代码	学位类型*	学位级别*
浙江工业大学	10037	专业硕士	硕士
论文题名*	*****		
关键词*	*****		论文语种*
并列题名*	*****		中文
作者姓名*	**	学 号*	*****
培养单位名称*	培养单位代码*	培养单位地址	邮政编码
浙江工业大学计算机科学与技术学院	10037	杭州市潮王路 18 号	310032
学科专业*	研究方向*	学 制*	学位授予年*
软件工程	远程控制	3	2019
论文提交日期*			
导师姓名*		职 称*	
评阅人	答辩委员会主席*	答辩委员会成员	
电子版论文提交格式：文本（ ）图像（ ）视频（ ）音频（ ）多媒体（ ）其他（ ）			
电子版论文出版（发布）者	电子版论文出版（发布）地	版权声明	
论文总页数*	**		
注：共 33 项，其中带*为必填数据，为 22 项。			

