

学校代码： 10255

学 号： 2131163

# **无线传感器网络的多 sink 部署和 路由算法研究**

## **The Research on Multi-sink Deployment and Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks**

学 院： 信息科学与技术学院

专 业： 控制科学与工程

姓 名： 李 芳

导 师： 丁永生 教授

2016 年 1 月

### 东华大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：李芳

日期：2016年 2 月 25 日

## 东华大学学位论文版权使用授权书

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，允许论文被查阅或借阅。本人授权东华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。

保密 ☐，在      年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：李男

指导教师签名：丁永才

日期：2016 年 2 月 25 日

日期：2016 年 2 月 25 日

# 无线传感器网络的多 sink 部署和路由算法研究

## 摘 要

无线传感器网络 WSNs(Wireless Sensor Networks)是由大量低成本的、计算能力和通信能力受限的微型传感器组成的多跳自组织网络。它能够对部署传感器节点的区域进行监控，完成信息的感知和数据的传输，这种网络容易部署且自适应性强，在农业生产、环境监控、远程医疗等领域有着广泛的应用。随着技术的发展和应用的需要，部署大规模的无线传感器网络也越来越普遍。在大规模无线传感器网络中，部署在环境中的传感器节点一般是由微型电池供电的，能量有限且应用过程中不易更换，在网络中部署多个 sink 节点，能够减少普通传感器节点到 sink 节点的跳数，减少数据转发过程中的能量消耗，避免某些传感器节点过早死亡，从而延长网络的寿命。无线传感器网络中 sink 节点部署的个数和位置以及能量高效的路由算法等对网络寿命有着重要的影响。因此，研究多 sink 无线传感器网络能量高效的路由算法以及多 sink 节点的部署算法对延长网络的寿命有着重要的意义。另外，在多 sink 无线传感器网络中，当某个 sink 节点失效时，研究带容错机制的多 sink 路由算法也有着重要的意义。本论文的主要工作如下：

(1) 对多 sink 无线传感器网络的分簇路由协议进行研究与分析，归纳了多 sink 分簇路由协议的原理，然后设计了能量均衡的多 sink

分簇路由算法，该算法在簇头选择阶段，综合考虑了节点的剩余能量级和节点到 sink 的距离等因素选择簇头节点；在簇间通信过程，采用多跳传输的方式，综合考虑了路径传输能量消耗、路径最小剩余能量和节点到 sink 的跳数等因素，选择节点到多个 sink 的最优路径。仿真实验表明，该路由算法能够更好地均衡网络能量，延长网络的寿命。

(2) 对多 sink 节点的部署策略进行研究，提出一种基于改进粒子群聚类的多 sink 节点部署策略。该策略首先根据设定的部署的 sink 节点数目，将整个区域内的传感器节点根据节点间的距离特征划分为  $K$  类，使得总的类内离散度最小，然后计算出各类的聚类中心作为各 sink 节点部署的位置。最后，通过仿真实验对该算法进行了验证与分析。

(3) 研究多 sink 无线传感器网络中某个 sink 节点失效情况下的带容错机制的路由算法。采用多路由数据重传的容错方法，首先利用上文中基于改进粒子群聚类的多 sink 部署算法将网络划分成多个子网并完成多个 sink 节点的部署；然后在每个子网区域中，利用粒子群聚类算法，对每个区域内的传感器节点进行聚类，选择离聚类中心较近的并且剩余能量相对较高的节点作为簇头节点；然后在簇间路由过程中，综合考虑路径上的能量消耗、路径上的最小剩余能量和路径上数据包的传输跳数等因素，选择将数据包传输到本子网区域 sink 的最优路径作为主路由，另外选出到其他 sink 的最优路径作为备选路由路径。一旦某个 sink 节点失效，立即启用备选路由路径。仿真实验表明，该算法能够在 sink 节点失效的情况下启用备选路由路径传输数据，从而提高了数据包的接收率。

最后，对全文进行了总结和展望，归纳了主要研究成果与实验结论，并提出了一些值得进一步拓展研究的方向与问题。

**关键词：**多 sink 无线传感器网络，能量均衡，路由算法，多 sink 节点部署算法，容错机制

# **THE RESEARCH ON MULTI-SINK DEPLOYMENT AND ROUTING ALGORITHM IN WIRELESS SENSOR NETWORKS**

## **ABSTRACT**

Wireless Sensor Networks (WSNs) are multi-hop self-organized networks, which are composed of a large number of low cost micro-sensors with limited calculation and communication ability. It can monitor the environment, complete information perception and data transmission. The network is easy to deploy, and is widely used in the field of agricultural production, environmental monitoring, remote medical treatment and so on. With the development of technology, deploying large-scale WSNs is becoming more and more popular. In large-scale WSNs, the sensors deployed in the environment are generally powered by a small battery with limited energy and are not easy to replace in the application process. Deploying multiple sink nodes in the network can reduce the hops from common sensor nodes to the sink node, so as to avoid premature death of some sensor nodes, and prolong the life of the network. The number and position of sink nodes and an energy efficient routing algorithm for WSNs have a great impact on the network life. Therefore, it is significant to study the energy efficient routing algorithm for multi-sink WSNs and the deployment of multi-sink nodes in WSNs. In addition, when a sink node fails, it has important significance to study the multi-sink routing algorithm with fault tolerance mechanism in multi-sink WSNs. The main works of this paper are as follows:

(1) Analyze the clustering routing protocols for multi-sink WSNs deeply, and summarize the principle of multi-sink clustering routing protocols. Then, I proposed an energy balanced multi-sink clustering routing algorithm (EBMCR). In the cluster head selection phase, the EBMCR algorithm considered the residual energy level of sensor nodes and the distance between sensor nodes and sink nodes to select the cluster head. In the inter-cluster communication process, the EBMCR algorithm adopted multi-hop transmission mode, calculating the energy consumption of the path, the minimum residual energy of the path and the hops from the sensor node to the sink node, to select the optimal

path to the best sink nodes. Simulation results show that the EBMCR algorithm can balance the network energy effectively and prolong the network life.

(2) Study the deployment strategy of multi-sink nodes. I proposed a multi-sink deployment strategy based on improved particle swarm clustering optimization (IPSCO) algorithm for WSNs. The IPSCO algorithm is a combination of the improved particle swarm optimization algorithm and K-means clustering algorithm. According to the sink nodes number  $K$ , the IPSCO algorithm divides the sensor nodes in the whole network area into  $K$  clusters on the distance between them, making the total within-class scatter to minimum, and outputs the center of each cluster. Then, we can deploy multiple sink nodes in the center of each cluster, to achieve the effects of partition network reasonably and deploy multi-sink nodes optimally. The simulation result shows that the deployment strategy can prolong the network lifetime.

(3) Study the routing algorithm with fault tolerance mechanism in the case of the failure of any sink node in multi-sink WSNs. We adopt multiple routing paths fault tolerant mechanism. Firstly, divide the whole network into  $K$  sub networks by the IPSCO algorithm above. Secondly, in each sub network area, using the particle swarm optimization clustering algorithm, cluster the sensor nodes in each region, and then select the nodes which is closer to the cluster center and with higher energy level as the cluster head. Lastly, in the inter cluster routing process, considering the energy consumption of the path, the minimum residual energy of the path, and the number of hops in the path, select the best path to the sink of this sub network area as the main route, and select the optimal path to other sink nodes as an alternative route. Once the sink node of this sub network fails, the alternate routing path is started immediately. Simulation experiments show that the algorithm can enable alternative path to transmit data when a sink node fails, so as to improve the packet reception rate.

Finally, the paper summarizes and prospects the main research results and conclusions, and puts forward some problems worthy for further research.

**Fang Li (Control Science and Engineering)**

**Supervised by Professor Yong-Sheng Ding**

**KEY WORDS:** Multi-sink wireless sensor networks, energy balanced, routing algorithm, multi-sink deployment algorithm, fault-tolerant mechanism



# 目 录

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 摘 要.....                             | I  |
| ABSTRACT.....                        | IV |
| 目 录.....                             | 6  |
| 第一章 绪 论.....                         | 1  |
| 1.1 研究背景和意义.....                     | 1  |
| 1.2 国内外研究现状.....                     | 2  |
| 1.2.1 无线传感器网络研究现状.....               | 2  |
| 1.2.2 无线传感器网络的多 sink 路由技术研究现状.....   | 3  |
| 1.2.3 无线传感器网络的多 sink 节点部署方法研究现状..... | 4  |
| 1.2.4 无线传感器网络的容错路由算法研究现状.....        | 4  |
| 1.3 论文的主要研究内容和创新点.....               | 5  |
| 1.4 论文的章节安排.....                     | 7  |
| 第二章 多 sink 无线传感器网络技术概述.....          | 8  |
| 2.1 引 言.....                         | 8  |
| 2.2 多 sink 无线传感器网络概述.....            | 8  |
| 2.3 多 sink 路由协议.....                 | 10 |
| 2.3.1 无线传感器网络的路由协议分类.....            | 11 |
| 2.3.2 多 sink 路由过程.....               | 13 |
| 2.3.3 典型的多 sink 路由协议分析.....          | 13 |
| 2.4 多 sink 部署算法.....                 | 16 |
| 2.5 带容错机制的路由算法.....                  | 17 |
| 2.6 小 结.....                         | 19 |
| 第三章 能量均衡的多 sink 分簇路由算法.....          | 20 |
| 3.1 引 言.....                         | 20 |
| 3.2 多 sink 网络结构.....                 | 20 |
| 3.3 模型假设及术语定义.....                   | 21 |
| 3.3.1 传感器网络模型假设.....                 | 21 |
| 3.3.2 术语定义.....                      | 21 |
| 3.4 能量均衡的多 sink 分簇路由算法.....          | 22 |
| 3.4.1 基本思想.....                      | 22 |
| 3.4.2 簇的建立.....                      | 23 |
| 3.4.3 簇间多跳路由.....                    | 23 |
| 3.4.4 稳定的数据传输阶段.....                 | 26 |
| 3.5 仿真实验.....                        | 27 |
| 3.5.1 仿真环境及参数设置.....                 | 27 |

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 3.5.2 实验结果与对比.....                   | 28 |
| 3.5 小 结.....                         | 30 |
| 第四章 无线传感器网络的多 sink 部署策略.....         | 32 |
| 4.1 引 言.....                         | 32 |
| 4.2 粒子群聚类算法.....                     | 32 |
| 4.2.1 标准粒子群算法.....                   | 32 |
| 4.2.2 $K$ 均值聚类.....                  | 33 |
| 4.2.3 粒子群聚类算法.....                   | 34 |
| 4.3 改进粒子群聚类的多 sink 节点部署策略.....       | 34 |
| 4.3.1 算法思想.....                      | 34 |
| 4.3.2 算法改进.....                      | 34 |
| 4.3.3 算法编码.....                      | 35 |
| 4.3.4 适应度函数.....                     | 35 |
| 4.3.5 算法流程.....                      | 36 |
| 4.4 仿真结果.....                        | 37 |
| 4.4.1 多 sink 节点部署结果.....             | 38 |
| 4.4.2 不同部署算法网络寿命比较.....              | 39 |
| 4.6 小 结.....                         | 40 |
| 第五章 带容错机制的多 sink 分簇路由算法.....         | 41 |
| 5.1 引 言.....                         | 41 |
| 5.2 容错路由介绍.....                      | 41 |
| 5.3 系统模型.....                        | 42 |
| 5.4 算法思想.....                        | 43 |
| 5.5 算法步骤及仿真结果.....                   | 44 |
| 5.5.1 利用改进的粒子群聚类算法实现多 sink 节点部署..... | 44 |
| 5.5.2 多 sink 网络分区内成簇.....            | 44 |
| 5.5.3 多 sink 网络中带容错机制的路由算法.....      | 46 |
| 5.6 小 结.....                         | 48 |
| 第六章 总结与展望.....                       | 50 |
| 6.1 总 结.....                         | 50 |
| 6.2 展 望.....                         | 51 |
| 参考文献.....                            | 53 |
| 致谢.....                              | 60 |
| 附录：攻读硕士期间参加的项目及成果.....               | 62 |

## 第一章 绪 论

### 1.1 研究背景和意义

随着经济和科技的飞速发展，在互联网广泛应用的背景下，迫切需要在互联网的基础上，将其用户端延伸和扩展到任何物品与物品之间，进行信息交换和通信，物联网的概念就由此产生了<sup>[1,2]</sup>。物联网（Internet of Things, IoT）是通过一定的传感器设备，如射频识别（RFID）、红外感应设备、摄像机、全球定位系统（如GPS）等，将物与物之间通过网络连接起来，按照约定的协议，完成信息的通信、交互与共享，实现智能识别跟踪、监控和管理等一系列的功能。物联网技术的基本特征是：全面感知、可靠数据传送和智能处理。其中，全面感知是使用各种传感器设备对物体进行信息采集和处理。可靠数据传送是指将物体接入网络，完成信息通信、交互和共享。智能处理是指使用云计算和模糊识别等技术对海量数据进行分析处理，提供智能化的决策方案。物联网主要包括以下几个方面的技术<sup>[3]</sup>：

- 1) 无线传感网络技术，主要完成信息的感知和数据的传输。无线传感器网络是由大量低成本的、计算能力和通信能力受限的微型传感器组成的多跳自组织网络。它是一种智能网络系统，能够监控部署传感器节点的区域，进行信息感知和数据传输，自主完成指定的任务<sup>[4]</sup>。传感器节点感知周围环境信息，然后通过相互协作将感知数据传输给特定的应用。我们也可以监控和操作传感器节点，这样就实现了计算机世界与物理世界的互通。
- 2) 射频识别技术，是一种非接触式的完成信息采集并进行自动识别的技术。根据射频信号和传输性能，能够自动识别监测对象，并获得其相关数据，实现对射频标签信息的获取。
- 3) 智能技术，物联网的目标是实现人与物或物与物的交互，从而实现物体的智能化。当前的智能技术主要是采用嵌入式技术将物体装入智能系统，实现物体与用户的交流。
- 4) 纳米技术，可用于各种类型的传感器的微型化设计。

无线传感器网络是物联网底层网络的重要组成部分。物联网是通过事先部署在环境中或附着在物体上的无线传感器节点来进行感知数据，然后通过各传感器节点所组成的无线传感器网络来完成数据的传输与处理。无线传感器网络是关系国民发展的一项重要技术，它集分布式信息采集、传输和处理技术于一体，是一个智能的网络信息系统，主要特点是：低成本、低功耗、微型化和组网方式灵活<sup>[5]</sup>。目前，无线传感器网络已经被广泛于农业生产、环境监控、智能交通、军事、远程医疗、建筑等多个领域。

目前,我国无线传感器网络在应用过程中还存在着诸多问题,例如传感器设备的体积较大、功耗较高、感知数据的精度较低、传感器设备在恶劣自然环境下不够稳定等,一般情况下,部署在环境中的传感器节点是由微型电池来供电的,节点能量非常有限并且不容易更换<sup>[6]</sup>,因此,设计有效的策略来延长网络的寿命是至关重要的。在网络中部署多个 sink 节点是一种延长网络寿命的有效方案。本文主要针对多 sink 无线传感器网络中能量均衡的路由算法、多 sink 节点的部署策略和带容错机制的多 sink 路由技术展开了研究。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 无线传感器网络研究现状

无线传感器网络因其巨大的应用价值而引起了国内外的广泛关注。许多科研机构、大学以及相关企业投入了不菲的力量和基金来研究无线传感器网络及产品应用。

在国外,关于无线传感器网络的研究最早起源于美国国防部,其主要目的是监控敌方的活动状况。随后,在 2001 年美国陆军提出了“灵巧传感器网络通信”计划,计划将弹药武器、机器人系统和传感器连成网络,以提高未来战斗系统能力。2002 年,欧盟提出了 EYES 计划,主要对无线传感器网络架构、传感器节点间的协作、网络协议和安全问题等展开研究。2003 年,美国科学基金委员会制定了无线传感器网络研究计划,研究领域涉及能够感知生物攻击、有毒化学物等传感器网络。2005 年,网络技术和系统计划研究下一代可靠性高、安全性高、可扩展性强、可编程的无线传感器网络。哈佛大学、康奈尔大学和麻省理工学院等美国名校也成立了研究小组对无线传感器网络展开研究。另外,国内外的许多知名企业也先后对无线传感器网络进行了研究。2002 年,英特尔公司的发展规划中,计划将无线传感器网络应用在森林火灾监测和医疗等方面。另外,还有飞利浦、爱立信、西门子以及三菱、NEC 等公司也开展了对无线传感器网络的研究<sup>[7]</sup>。

在我国,国家和政府大力支持对无线传感器网络技术的研究。2006 年,发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》中确定了信息技术发展的三个前沿方向,其中自组织网络技术和智能感知技术这两个方向均属于无线传感器网络领域。2009 年 11 月 3 日,温家宝总理发表了主题为“让科技引领中国可持续发展”的讲话。温家宝总理强调,要着力突破传感网、物联网关键技术,及早部署后 IP 时代相关技术的研发,使信息网络产业成为推动产业升级,迈向信息化社会的“发动机”。目前,我国已将无线传感器网络技术列入国家中长期科技发展规划。近年来,我国一些科研院所和高校在政府的鼓励和支持下,以及国家自然科学基金、

国家“863”计划的支持下，也开展了对无线传感器网络技术的研究<sup>[8]</sup>。

目前，无线传感器网络的研究和应用已经取得了一定的成就，但其网络模式一般还是小规模和低密度的，随着各项技术的不断发展和成熟应用，网络布局规模越来越大，这时单 sink 网络结构就显现出了许多缺陷，例如“能量空洞”、网络节点能耗不均衡、网络可靠性低等问题，单 sink 节点的网络结构越来越难以满足无线传感器网络发展的需求，而多 sink 网络结构能够较好的解决上述的问题。近年来，多 sink 网络结构越来越受到研究人员的关注。目前，多 sink 无线传感器网络也有了一些应用：中国考察队于 2008 年初在南极的 Dome-A 地区成功安装了中科院应用研究所研发的无线传感器网络，该系统设计成双基站（双 sink）系统以防止因通讯故障而造成的数据丢失，节点发出的数据，其中一份被通讯系统接收传回国内，另一份被一台值守系统接收存储在本地。另外，在文献[9]中采用多 sink 网络结构来部署水下无线传感器网络系统。以上这些应用为多 sink 网络结构的研究提出了宝贵经验。

### 1.2.2 无线传感器网络的多 sink 路由技术研究现状

近年来，已有相关学者对多 sink 无线传感器网络的路由技术进行了相关研究。文献[10]提出的 MRMS 算法采用多 sink 网络结构，主要包括三个阶段：拓扑发现、分簇维持和路径重新选择，该算法利用多 sink 节点、分簇维持和路径重新选择机制来均衡网络的能量。文献[11]提出的 PBR 算法综合考虑了路径传输能量消耗和路径能量级别，通过对这两个因素的综合考虑，均衡了网络节点的能耗，延长了网络的生命周期。但是该算法的计算量非常大，算法也不够灵活，它只能在 sink 节点处完成计算工作，不适合应用在分布式的网络系统中。文献[12]提出的 GLOBAL 算法，该算法综合考虑了累积路径负载和路径中超载节点的负载流量，综合考虑这两个因素来计算网络节点的梯度值，然后将数据包转发到负载最小的路径上，以实现负载均衡。文献[13]提出的 EMCA 算法是基于多 sink 网络结构的分簇路由算法，在簇头选择阶段考虑节点的剩余能量因素，在簇内选择多跳传输方式来减少能量消耗，在簇间一跳传输过程中，选择最近的 sink 节点作为目的节点，但该算法中簇头与 sink 节点进行一跳通信，可能会导致距离 sink 远的节点能量消耗过快。文献[14]提出了一种基于等级表路由方法来解决多 sink 的 Zigbee 无线传感器网络中的拥堵和交通流量均衡问题。网络中每个节点都有一个等级路由表来缓存路径成本和下一跳地址，其中路径成本包含负载水平信息，当一个节点需要传输数据到 sink 节点时，查找等级表中路径成本最小的路由路径，然后将数据包转发到该条路径对应的下一跳地址，但由于该网络采用网状拓扑结构，计算代价比较大。文献[15]研究分层网络结构，采用混合整数线性规划模型来确定最佳的 sink、簇头节点的位置和数据转发的路径，综合考虑传感器节点的位置信息和



节点的能量信息,避免能量高或者位置好的节点持续担任簇头。文献[16]提出了一种基于时间的简单弹性多跳路由协议(SRMR)。SRMR 协议综合考虑了节点到 sink 的跳数和节点到 sink 的预期传输时间来使网络效益最大化。文献[17]首先提出预期寿命指标显示每个节点的剩余时间,设计机制来检测节点的能源瓶颈和均衡负载流量,然后将这个度量标准应用于 RPL 路由协议中,以延长网络寿命;并提出了多路径方法,利用有向无环图的拓扑以一定概率提前分散负载流量,以提高网络的稳定性。

### 1.2.3 无线传感器网络的多 sink 节点部署方法研究现状

在无线传感器网络监测区域中部署多个 sink 节点,能够减少传感器节点到 sink 节点的跳数,从而降低每个传感器节点用于传输数据的能耗,进而达到节能的目的。目前,关于多 sink 部署策略的研究已经取得了一些成就。在文献[18]中,提出递归算法来解决多 sink 节点的部署问题,算法的主要思想是将 sink 节点部署在传感器节点密度大的区域,从而延长网络的生存时间。在文献[19]中,基于传感器节点随机分布的无线传感器网络应用,提出了一种多 sink 节点的部署算法(RDF 算法),该算法的主要思想也是将 sink 节点部署在传感器节点密度大的区域。此外,RDF 算法还可以确定一个特定的网络区域中部署的 sink 节点的最佳个数。在文献[20]中,提出一个  $P$ -中值多 sink 部署模型,并采用遗传算法来求解该模型。在文献[21]中,首先对无线传感器网络多 sink 节点部署问题建立优化模型,然后设计一种混合智能优化算法求解该模型。先用蚁群算法来解决关联问题,从而确定每个传感器的关联 sink 节点;然后使用遗传算法来求解多 sink 部署的优化模型。在文献[22]中,将多 sink 节点部署问题进行公式化和离散化,并引入粒子群算法进行局部搜索。在文献[23]中,D. R. Dandekar 等人将多 sink 部署问题被看作一个最小化问题,求解过程中首先用  $K$ -means 算法将整个区域分成  $K$  类,然后在每一类中采用 PSO-MSP 算法决定 sink 节点的最佳位置。在文献[24]中,N. Achir 等人根据传感器节点与 sink 节点间的最大跳数,来计算 sink 节点部署的位置。

### 1.2.4 无线传感器网络的容错路由算法研究现状

无线传感器网络容错路由算法有很多,例如多路径路由、纠删编码/网络编码、数据重传机制、仿生智能容错等等。其中,多路径容错路由<sup>[25]</sup>是容错路由机制中研究的重点。多路径路由传输容错技术是通过在源节点与目的节点之间建立多条路径进行数据传输,通过冗余路径来实现故障容错。一旦出现节点故障或链路断裂,立即新建路由路径或者启动事先建立好的备用路由路径。

对多路径路由的研究,目前已经取得了丰硕的研究成果。文献[26]提出的

REAR 协议中, 当 sink 节点接收到从传感器节点传来的兴趣消息, 并且不在路由表中时, 建立两条互不交叉、互不相连的路由路径, 其中一条路径用来传输数据, 第二条作为备份路由路径。在文献[27]中, D. Ganesa 等人提出了高效的多路径弹跳路由协议, 该协议主要是基于 DD 路由协议的 BM 多路径路由模式, 通过建立几条互不交叉的路由路径, 来实现路由算法的低能耗性和故障的快速恢复性。文献[28]提出了按需多路径可靠容错路由协议 RFTM, 该协议的主要思想是根据网络可靠性需求和链路质量期望, 来建立满足不同需求的互不交叉的多条路由路径, 然后采用编码方式来进行数据传输。文献[29]中提出了能量高效多路径容错路由协议 MFTR, 该协议采用多路径路由的方式进行故障容错和流量控制, 选择最短的路由路径做为主路由, 建立两条备份路由路径以预防网络故障。当主路由路径上的传输能量超载时, 可以选用备选路径来分担负载; 当主路由路径出现故障时, 可以激活备份路由路径来传输数据。文献[30]提出了 IFRP 协议, 该协议是根据能量效率采用单路径与多路径传输相结合的方式, 通过本地监测系统的监测和中心决策系统的分析与决策, 确定故障节点或入侵节点, 然后根据决策将该节点进行孤立。文献[31]提出了 ENFAT-AODV 协议, 该协议的主要思想是将 Ad hoc 网络中的按需距离矢量路由协议应用到无线传感器网络中, 为主路由路径上的每个节点都建立备份路径。当主路径中的节点出现故障时, 立即启用备份路径进行下一个数据包的传输, 从而减少数据的丢包率并保持数据传输的连续性。文献[32]提出了高效多路径容错路由协议 EEFTM, 该协议通过基于节点可靠度(RR)的各路径平均可靠度(ARR)来选择可靠路由。节点可靠度(RR)定义为节点正确传输数据到目的节点的概率。当网络链路质量差或者出现故障时, 从多条路径中选择路径平均可靠度(ARR)值最高的路由路径作为传输路径, 以实现正常可靠稳定的数据传输。在文献[33]中, Gregoire Michae 等人提出的多路径容错路由算法, 主要是通过射频信道监听并确定故障节点, 在故障节点的邻居节点中选择一个节点重新建立路由路径, 从而避开故障节点实现数据传输, 不是在网络中重新建立一条从源节点到目的节点的备份路由路径。

### 1.3 论文的主要研究内容和创新点

本文主要对多 sink 无线传感器网络的路由技术及多 sink 节点部署策略进行研究。在多 sink 网络能量高效的路由算法研究中, 本文采用分簇路由策略, 在簇间多跳通信中, 通过路由路径评价函数, 选择从源节点到 sink 节点的最优路径, 该路径的目的节点即为最佳的 sink 节点; 在多 sink 节点部署的过程中, 对粒子群算法(PSO)进行改进并与 K-means 聚类结合, 形成改进的粒子群聚类算法, 用于解

决多 sink 节点的部署问题；在某个 sink 节点失效情况下的多 sink 容错路由的研究中，采用多路径重传的方式，当一个 sink 节点失效时，立即启用备选路由。本文具体所做的研究内容总结如下：

(1) 对无线传感器网络分簇路由算法进行深入研究，融合多 sink 网络架构的思想，提出一种能量均衡的多 sink 分簇路由算法 (EBMCR)。在簇头选取时，选择剩余能量高的节点来竞争簇头，并根据节点到 sink 节点的距离，构造大小不等的簇，使得靠近 sink 节点的簇的规模较小，从而为数据转发预留能量；在簇间数据传输中，引入多跳传输机制，综合考虑路径传输能量消耗、路径最小剩余能量和节点到多个 sink 的跳数等因素，对路由路径进行评估，选择一条最优路由路径，该最优路径对应的 sink 节点即为该传感器节点最佳的目的地节点。该算法可均衡网络能耗，提高网络性能，从而延长网络的生存时间。

(2) 在单 sink 节点的无线传感器网络中，靠近 sink 的传感器节点由于转发大量的数据包会导致能量消耗过快，造成“能量空洞”问题，在网络中部署多个 sink 节点是一种解决“能量空洞”问题的有效方法，但是在网络中 sink 节点的个数和部署的位置对网络的性能有着严重的影响。本文提出一种基于改进粒子群聚类的多 sink 节点部署策略。该策略首先根据设定的部署的 sink 节点数目，将整个区域内的传感器节点根据节点间的距离特征划分为  $K$  类，使得总的类内离散度最小，然后计算出各类的聚类中心作为各 sink 节点部署的位置。

(3) 针对多 sink 无线传感器网络中某个 sink 节点失效的情况，提出一个带容错机制的路由算法。采用多路径路由的容错方法，首先利用上文中基于改进粒子群聚类的多 sink 部署算法完成对网络子网的划分和 sink 节点的部署；然后在每个子网区域中，利用粒子群聚类算法，对每个区域内的传感器节点进行聚类，选择离聚类中心较近的并且剩余能量相对较高的节点作为簇头节点；然后在簇间路由过程中，综合考虑路径上的能量消耗、路径上的最小剩余能量和路径上数据包的传输跳数等因素，选择将数据包传输到本区域 sink 节点的最优路径作为主路由，另外选出到其他任意一个 sink 节点的最优路径作为备选路由路径。一旦某个 sink 节点失效时，立即启用备选路由路径。

本课题在理论和技术上的创新点主要包括：

(1) 提出 WSNs 能量均衡的多 sink 分簇路由算法 (EBMCR)，该算法是在 LEACH 分簇路由协议的基础上，融合了多 sink 架构的思想。在 LEACH 的基础上做如下改进：1) LEACH 采用的是单 sink 网络架构，EBMCR 采用多 sink 网络架构。2) 在簇的建立阶段，LEACH 算法中所有节点均可以平等地竞争簇头；EBMCR 算法中只有能量高于网络平均能量的节点才可以竞争簇头，并综合考虑了节点的剩余能量级和节点到 sink 的距离等因素，修正了 LEACH 的阈值选择函数。3) 在簇间数据传输过程中，采用多跳传输方式。4) 针对由簇头组成的骨干网络，综合



考虑了路径传输能量消耗、路径最小剩余能量和节点到多个 sink 的跳数等因素，对各条路由路径开销进行评估比较，选出最佳的路由路径。

(2) 在多 sink 节点的部署方案中，采用粒子群聚类算法来解决多 sink 节点的部署问题，另外对粒子群聚类算法进行了改进，一方面改进了粒子群聚类算法中的惯性权重表达式，使之可以自适应调节权重系数，另一方面，针对粒子群聚类算法容易陷入局部最优解的情况，本文添加了扰动策略，使算法能够较快地跳出局部最优解，进而快速找到全局最优解。

(3) 对多 sink 网络中某个 sink 节点失效的情况，提出一个带容错机制的路由算法。采用多路径重传的容错路由方法，在簇间路由过程中，综合考虑路径上的能量消耗、路径上的最小剩余能量和路径上数据包的传输跳数等因素，选择将数据包传输到本区域 sink 节点的最优路径作为主路由，另外选出到其他 sink 节点的一条最优路径作为备选路由路径。一旦某个 sink 节点失效，立即启动激活备选路由路径。

## 1.4 论文的章节安排

本文的具体结构安排如下：

**第一章：**绪论，首先简要介绍课题背景和意义；然后对无线传感器网络的研究现状进行分析总结；最后对本文内容结构安排进行说明。

**第二章：**介绍多 sink 无线传感器网络，并对多 sink 无线传感器网络路由协议的原理、多 sink 部署算法和容错路由技术进行分析与介绍。

**第三章：**设计能量均衡的多 sink 分簇路由算法。首先，建立多 sink 网络结构模型，然后设计能量均衡的分簇路由算法，最后对设计的算法进行仿真验证。

**第四章：**介绍多 sink 节点部署算法。首先概述该算法的工作原理，然后介绍粒子群聚类算法，然后详细介绍将改进粒子群算法用于解决多 sink 节点的部署问题，并给出算法的整体工作流程，最后对该算法进行仿真验证，并给出在实际大田监测应用中的可行性意见。

**第五章：**介绍多 sink 无线传感器网络中带容错机制的路由算法。首先介绍带容错机制的路由算法的原理，然后介绍系统模型，然后假设在多 sink 无线传感器网络中有一个 sink 节点失效，设计带容错机制的路由算法。

**第六章：**总结与展望。总结本论文所做的工作，并展望该课题进一步研究的方向。

## 第二章 多 sink 无线传感器网络技术概述

### 2.1 引言

无线传感器网络是由大量低成本的、计算能力和通信能力受限的微型传感器组成的多跳自组织网络，可实时监测、采集网络分布区域的对象信息，并将监测信息无线传输到 sink 节点。在单 sink 节点的无线传感器网络中，sink 节点附近的传感器节点由于大量转发其他节点传输过来的数据包，容易使自身能量消耗过快而导致节点死亡，造成“能量空洞”问题。在大规模无线传感器网络中部署多个 sink 节点是解决“能量空洞”问题的一种有效策略<sup>[34]</sup>。在网络中部署多个 sink 节点，可以有效减少普通传感器节点到 sink 节点的跳数，避免某些节点过早死亡，从而延长网络生存时间。

本章首先介绍了多 sink 无线传感器网络；然后对多 sink 路由协议进行了归纳、分析与总结；然后，对多 sink 节点的部署方法进行了介绍；最后，对带容错机制的路由技术进行了介绍。

### 2.2 多 sink 无线传感器网络概述

在无线传感器网络<sup>[35]</sup>中，sink 节点又称为网关节点，网络中传感器采集的信息通过数据传输给 sink 节点，然后 sink 节点将无线接收的各传感器节点的数据通过有线或无线的方式传输到用户终端。sink 节点是一种网关节点，能够将传感器网络与现有的通信网络（如 Internet）连接起来<sup>[36]</sup>。

无线传感器网络主要是由大量的微型传感器节点、汇聚节点（即 sink 节点）和管理节点组成<sup>[37]</sup>。图 2.1 是一个典型的单 sink 无线传感器网络结构图。在该网络中，众多传感器节点根据具体要求以不同的密度分散地部署在某个固定的监测区域内，然后这些传感器节点自组织成网络，节点将采集的信息通过一跳或多跳传输到 sink 节点，最后 sink 节点利用 Internet 或者其他网络，将收集到的信息进行信息融合后传送到用户控制的管理节点<sup>[38]</sup>。

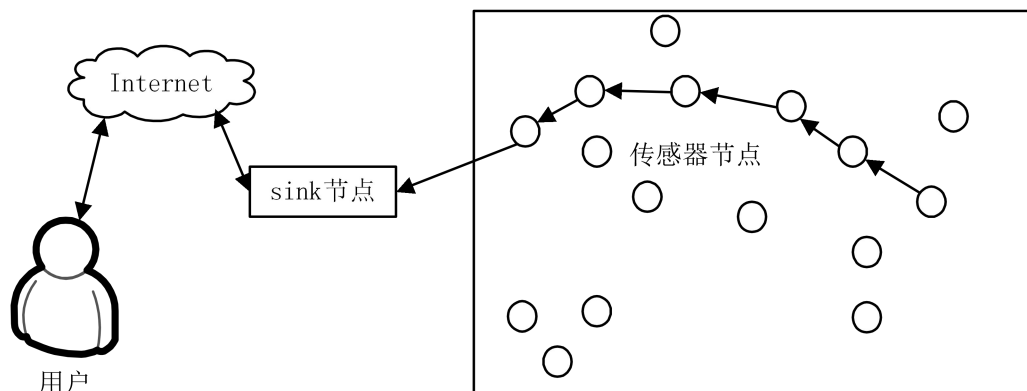


图 2.1 单 sink 网络结构图

在单 sink 无线传感器网络中，传感器节点将采集的数据通过一跳或多跳传输到 sink 节点，离 sink 比较远的节点如果要将采集的数据传输给 sink 节点，就需要采用多跳转发的方式，而靠近 sink 的传感器节点会因为转发大量其他传感器节点传输过来的数据包，容易造成能量较快耗尽，而引起“能量空洞”问题。另外，单 sink 无线传感器网络中，只有一个 sink 节点，一旦该 sink 节点失效，整个网络将面临瘫痪的危险。由于单 sink 无线传感器网络的上述缺陷，近年来越来越多的研究偏向于对多 sink 节点的无线传感器网络的研究。多 sink 网络结构不仅能够提高网络能量利用率，均衡网络能耗，解决“能量空洞”问题，而且能够增强网络的稳定性。整体来讲，多 sink 网络结构与单 sink 网络结构是基本相似的。不同之处在于：多 sink 网络监测区域中部署了多个 sink 节点，这几个 sink 节点之间通过有线或者无线通信的方式来即时共享网络的数据<sup>[39]</sup>。图 2.2 展示了一个多 sink 节点网络的结构图。

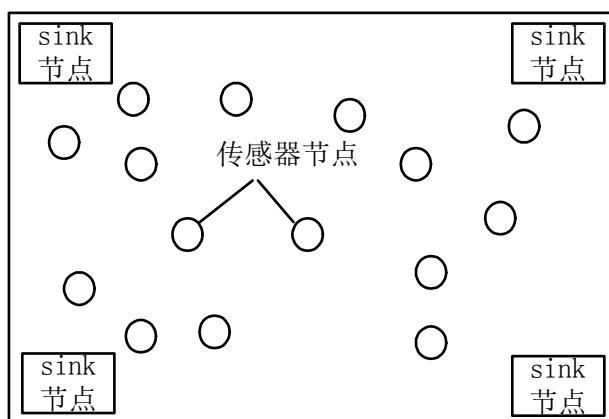


图 2.2 多 sink 网络结构图

与传统的无线传感器网络相似，多 sink 节点网络的特点主要有<sup>[40]</sup>：

(1) 能量受限

传感器节点一般是由微型电池来供电的，节点的能量十分有限并且更换电池也不方便。当节点能量耗尽时，传感器节点就会失效，导致“能量空洞”问题，

改变无线传感器网络的拓扑结构。因此，降低传感器节点的能量消耗，最大化网络的生存周期是多 sink 无线传感器网络设计的重要目标。

#### (2) 以数据为中心的网络

与传统的路由协议不同，多 sink 无线传感器网络的路由协议更关心监测区域内的监测数据指标，而不是发送该监测值的传感器节点的具体地址。因此，当用户查看无线传感器网络的监测信息时，获取的是网络中传感器节点所采集的数据，而并不像互联网那样知道信息具体是从哪个主机地址发过来的。

#### (3) 拓扑多变性

由于传感器节点能量有限、节点移动、工作环境恶劣或者节点硬件损坏等因素，将会增大多 sink 无线传感器网络拓扑结构变化的随机性。因此，在设计多 sink 无线传感器网络的时候，需要考虑网络拓扑结构动态变化的适应性。

#### (4) 节点数目大

虽然传感器节点能量有限，但传感器节点的成本较低，为了满足网络的覆盖率要求并延长网络的生存时间，可以部署大量的无线传感器节点。虽然庞大的节点数目使网络维护起来相对比较困难，但是由于多 sink 网络对动态变化的适应性，它仍然能够保证系统的容错性和信息的精确度。

#### (5) 与应用相关

针对不同的应用，设计的多 sink 无线传感器网络结构差异很大。目前还没有通用的网络结构能够适合所有的应用。因此在构建多 sink 无线传感器网络时，需要详细地了解应用的目的和需求来设计网络。

## 2.3 多 sink 路由协议

无线传感器网络的路由协议主要负责在传感器节点与 sink 节点间进行安全可靠地传输数据信息。目前，针对单 sink 节点的无线传感器网络路由协议的研究和应用取得了一定的成就，但随着网络规模的增大，单 sink 网络路由协议难免存在一些弊端<sup>[41,42]</sup>：

(1) 在单 sink 节点的无线传感器网络中，一旦 sink 节点失效，整个网络都会瘫痪，网络的可靠性非常差。

(2) 在单 sink 节点的无线传感器网络中，所有传感器节点的数据都沿着该 sink 节点的方向的路径来传输数据，容易使 sink 节点周围的传感器节点因为转发大量其他节点的数据而使节点能量耗尽，造成“能量空洞”问题，使网络能耗严重失衡。

(3) 单 sink 节点的无线传感器网络中，当网络拓扑结构较复杂时，数据融合

工作将变得较为复杂<sup>[43]</sup>，合理的增加网络中的 sink 节点个数能够简化数据融合的复杂度。

(4) 不同的用户 (sink) 可能需要不同的环境变量信息，比如温度、湿度、气体浓度等，通过在网络中部署多个 sink 节点，不同的 sink 节点负责汇集不同的环境变量信息，一方面能够有效控制网络中的数据流，另一方面也方便了后续的数据融合工作。

多 sink 网络结构具有可靠性、稳定性，便于管理，能够分散网络中的数据流，均衡网络的能耗，因此，研究多 sink 节点的无线传感器网络路由协议具有很大的应用价值。

### 2.3.1 无线传感器网络的路由协议分类

在不同的应用场景下，无线传感器网络路由协议差别很大，根据应用场景的不同，研究人员目前已提出多种路由协议。根据路由协议的特点，对路由协议进行分类，主要存在以下几种分类方法<sup>[44,45]</sup>：

#### 1、根据源节点获取路径的方法

(1) 按需路由协议：当源节点有信息需要发送时才会创建路由协议。网络中只有一部分节点建立了路由，这些节点也只保存部分网络路由信息。当本次消息发送完毕之后，节点将进入休眠模式，不再维护相关的路由信息。这种路由协议能够按需地使用能量，但路由的创建过程比较长，不适合应用在实时性要求很高的无线传感器网络中。

(2) 主动路由协议：在传感器节点部署好之后，各节点之间的路由就已经创建完毕。这种路由协议能够很好的保证实时性，但因为要时刻保证每条路由的可靠性，每个传感器节点会对自己的路由表进行定期的维护和更新。在网络拓扑结构变化比较快的网络中，该路由协议可能会加速传感器节点的能耗，因此不适合应用在网络拓扑变化快的网络中。

(3) 混合路由协议：主动路由方式和按需路由方式进行结合。在一个网络中，对于经常使用并且网络拓扑变化不大的网络部分采用主动路由方式来建立路由并维护，对于传输数据少或者网络拓扑变化快的网络部分，采用按需路由方式建立路由，以取得效用和时延的折中。

#### 2、按节点参与通信的方式

(1) 直接通信路由协议：在该协议中，传感器节点可以直接发送信息到目的节点，由传感器节点的能耗模型可知：传感器节点的通信距离和能耗成指数增长，发送距离越远，能耗越大。所以该路由协议不适合应用在大范围的多 sink 无线传感器网络中。同时，由于多个传感器节点同时在一个频段进行通信，因此需要考虑它们之间的通信冲突。



(2) 平面路由协议：在该协议中，所有传感器节点都是同构的，即所有节点的地位和作用都是一样的，都可以发送或者转发数据。该算法的优点是：路由协议的鲁棒性较好和数据流量分散在网络中；缺点是：网络的可拓展性差，如果在单 sink 无线传感器网络中采用平面路由协议，网络中很容易出现“能量空洞”问题。典型的平面路由协议有泛洪（Flooding）协议<sup>[46,47]</sup>、DD 协议<sup>[48,49]</sup>、SPIN 协议<sup>[50]</sup>等。

(3) 分簇路由协议：在该协议中，将网络中的传感器节点分成多个簇，然后在每个簇中选择一个簇头节点。簇内普通传感器节点按时隙将采集的数据传输给本簇簇头节点，簇头节点接收本簇成员节点发送过来的数据后，进行一定的数据融合，然后将数据通过一跳或多跳转发到 sink 节点。由于簇头一直处于活动状态，簇头的能量消耗较大，在网络运行过程中，通过对簇头不断进行更换，使网络的能耗更均衡，从而延长整个网络的生存时间<sup>[51]</sup>。典型的分簇路由协议包括：LEACH 协议<sup>[52,53]</sup>、HEED 协议<sup>[54]</sup>、PEGASIS 协议<sup>[55,56]</sup>等。下面是对这几种路由协议的简要介绍。

LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)协议是无线传感器网络中的第一个分簇路由协议。在该协议中，网络中的传感器节点被分成多个簇，每个簇中都有一个簇头节点，其他非簇头节点将采集到的数据一跳发给各自的簇头节点，簇头节点收集本簇内节点发送过来的数据，进行一定的数据融合，然后一跳转发给 sink 节点。但簇头节点到 sink 节点的距离一般比较远，而且每个簇头节点需要转发的数据包数量又比较大，所以这种远距离传输较为耗能。

HEED(Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering)协议提出衡量无线传感器网络性能的三个指标：网络生存周期、网络可扩展性和网络负载均衡性，算法的主要思想是通过均衡网络的能耗来延长网络的生命周期。该协议的簇头产生算法是完全分布式的，能够在有限次内完成簇头选择，并缩小报文开销。该协议分簇速度快、簇头分布均匀、网络拓扑更合理。

PEGASIS(Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)协议中的簇是一条基于地理位置的链。该协议通过邻居发现机制，采用贪婪算法，从离 sink 节点最远的传感器节点开始构建一条链，每个节点以最小功率来发送数据，每次随机选择一个簇头与 sink 进行通信，减少网络通信量。

### 3、按路由的发现过程

(1) 以位置信息为中心的路由协议：在该协议中，每个传感器节点都有地理位置定位模块（如 GPS），通过位置定位模块来获得自身的位置信息。通过邻居节点间的信息互换就可获得其他节点位置信息。在已知节点位置信息的情况下，节点在发送数据包的时候就能选择一条相对较优的路径，减少传输能量消耗，延长网络生存周期。因为每个节点中都含有地理信息定位模块，所以这种路由协议

对节点器件要求比较高，同时在定位的过程中也会消耗很多能量。

(2) 以数据为中心的路由协议：网络中的数据传输是由数据查询发起的，如果查询网络某个区域的数据，则该区域内的传感器节点建立路由，将采集的数据传输到 sink 节点，并输出查询结果。该路由协议只关心数据，而不关心数据来自哪个传感器节点，因而在无形中进行了数据融合，减少了数据冗余，从而减少了数据包的传输量，节约了网络的能量。

无线传感器网络的路由协议有很多种类，除了上述分类方法外，还有根据应用场合、路径数量、数据传输方式等其他分类方法，这里就不再一一赘述。

### 2.3.2 多 sink 路由过程

多 sink 节点的无线传感器网络的路由过程主要分为以下 4 步<sup>[57]</sup>：

- (1) 某个节点发出路由请求命令，启动路由发现过程。
- (2) 相关传感器节点收到路由请求后，立即回复应答命令。
- (3) 综合考虑各种因素，如跳数和延时等，对各条路由路径的开销进行评估和比较。
- (4) 选中评估出的最佳路由路径，以该路径来发送信息。

与传统网络一样，在多 sink 节点的无线传感器网络中，每个节点都维护着一张路由表，在路由表中记录着目的节点和下一跳节点，路由表如表 2.1 所示。在路由发生变化时，需要及时更新路由表。当某个节点发送信息时，首先检查该信息的目的地址，然后在自身路由表中查询有没有该条路由，若有，则找到下一跳节点，将信息传输给下一跳节点。网络中各个节点通过定期通信来完成路由消息的交换，以完成路由表的更新。路由信息更新包括更新部分或全部路由表，从而建立并维护新的网络拓扑。

表 2.1 目的/下一跳最佳路由表

| 下一跳地址 | 目的节点   | 下一跳地址 | 目的节点   |
|-------|--------|-------|--------|
| 24    | Node B | 65    | Node D |
| 58    | Node A | 35    | Node C |
| 36    | Node C | 57    | Node B |
| 27    | Node A | ..... | .....  |

### 2.3.3 典型的多 sink 路由协议分析

(1) MRMS(multipath routing in large scale sensor networks with multiple sink nodes)多 sink 路由协议<sup>[10]</sup>

Chen Yuequan 等人提出 MRMS 路由协议，该协议利用多 sink 节点机制、一

种新的路径选择机制、高效率的动态分簇维持和路径切换机制增强了整个网络的能量效率。MRMS 协议主要分为三个部分：拓扑发现、分簇维持和路径切换<sup>[10]</sup>。

**拓扑发现：**拓扑发现算法是在 TopDisc 算法的基础上进行改进的，对节点间的距离、到目标 sink 节点的跳数和节点自身剩余能量等因素进行综合考虑，是一种高能效的拓扑构建算法。

**分簇维持：**簇头会周期性地检查节点自身的剩余能量，如果簇头的剩余能量低于预先设置的门限值，它就会启动分簇重建机制：簇头向邻居节点广播一个 SELECT\_NEW\_CH 消息；收到这个消息的节点就会检查自身路由表，如果优先路由中的前一跳节点就是当前簇头，那么该节点就会把自己的剩余能量反馈回簇头节点。在综合考虑所有的反馈信息之后，簇头节点会选择剩余能量最多的反馈信息节点作为新的簇头。

**路径切换：**当传感器节点到某个 sink 节点的路由路径已经使用过一段时间后，传感器节点发现当前路由路径已经不是最优的路径时，就触发路由路径的切换甚至更换目的 sink 节点。

仿真结果表明，该协议采用分簇的思想，使各传感器节点的分工更加细化，更进一步降低网络的能耗，延长整个网络的寿命，但该协议在路由路径的确定上还不够动态灵活。虽然有多条路径到达各个 sink 节点，但是到某个 sink 节点的路由路径还是相对单一，所以该协议在性能方面还有很多可以提升的空间。

## (2) PBR (priority based routing)多 sink 路由协议<sup>[11]</sup>

Meng Min 等人提出 PBR 多 sink 路由协议。该协议是一种基于能量级别和传输能耗的多 sink 路由协议。节点能量级别是指节点当前所剩余的能量，具体表示为能够向邻居节点传输数据的次数。路径能量级别是指路径中剩余能量最小的节点能量级别。传输能耗是指从一个传感器节点到 sink 节点传输数据所消耗的能量。PBR 协议综合考虑能量级别和传输能耗来选择最优的路由路径，从而均衡网络能耗，延长网络的生存时间。

当网络中部署了  $k$  个 sink 节点，则从传感器源节点  $i$  到 sink 节点  $j$  的能量消耗表示为  $Cost(v_i, v_j)$ ，用  $S_{i,j}$  表示从节点  $i$  到节点  $j$  的路径能量级别。此时，从传感器节点  $i$  到所有 sink 节点的最大传输能耗为： $\max_n [Cost(v_i, v_k)]$ ，归一化后，有

$Cost(v_i, v_j) / \max_n [Cost(v_i, v_k)]$ ，则 PBR 可表示为：

$$\max_n (\max_n [Cost(v_i, v_k)] / Cost(v_i, v_j))^\alpha \times (S_{i,j})^\beta \quad (2-1)$$

其中  $\alpha, \beta$  是影响因子。

我们可以看到：PBR 算法在传输信息时综合考虑了路由路径的能量级别和路



径的能量消耗,从而使整个网络的能耗负载更加均衡。但是,PBR 算法也有一定的缺点:首先,它只有运用在集中式网络中时传感器节点才能进行准确的计算,如果在分布式网络中,PBR 算法的计算代价会特别大;其次,PBR 算法只有在路由路径相对固定单一的情况下才能有效计算出这条路径的能量等级。如果路由路径是动态变化的,那么计算路径能量等级的计算量将十分巨大,不适合运用在能量受限的无线传感器网络中。

(3) ORFCE(Optimal Routing in Multi-sink Sensor Networks based on Fuzzy Comprehensive Evaluation)多 sink 路由协议<sup>[39]</sup>

Yuan Tiantian 等人提出了 ORFCE 协议,该协议在选择路由路径时利用模糊综合评价法,从节点最小剩余能量、链路稳定性和路径传输能耗等多方面对要选择的路由路径进行评估。

ORFCE 协议应用在传感器节点随机部署的多 sink 无线传感器网络中。在该协议中,定义路径最小剩余能量  $pathRE$  为路由路径中节点所剩能量的最小值。传感

器节点之间通信的平均链路质量被表示为  $\mu_{lqi} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k LQI, LQI \in (50,110)$ ,  $\mu_{lqi}$  是

LQI 的统计平均值,通过下层协议从接收到的数据包中获得。路径最小平均链路质量为路由路径中所有节点之间平均链路质量的最小值。

在 ORFCE 协议中,传感器节点到各个 sink 节点间有多条路径,但传感器节点只存储到最佳的 sink 节点的最好的那条路由路径。如果又发现一条新的到某个 sink 节点的路由路径,那么传感器节点就会利用模糊综合评价法将这条新记录与之前存储的路由路径记录作对比,然后存储那条最优的路由路径记录。在每个节点的路由表中,到各个 sink 节点的路由路径是按照评价值从高到低排列的。当有信息要发送时,选择排名最高的路由路径作为主路由来发送信息,其他路由路径作为备选路由。

在 ORFCE 路由协议中,虽然它利用模糊综合评价法,从节点剩余能量、链路稳定性和传输能耗等多方面进行综合评估,但是在该算法中从传感器节点到每个 sink 节点的路由路径还是固定的。另外,利用模糊综合评价法对路由路径进行评价必须在 sink 节点中去进行,一般计算能力的传感器节点很难进行自我评价。

#### (4) PAMR 多 sink 路由协议

Pietro Ciciriello 等人提出了 PAMR 协议,该协议是一种周期性的消息适应路由协议,主要是为了减少网络连接操作<sup>[57]</sup>。假设每个传感器节点到目标 sink 节点都具有相互独立的树状结构,这时我们可以看到从源节点到目标 sink 节点的路径已经建立完毕。该协议的主要思想是把实际的网络数据传输问题映射成为多商品流网络设计问题。在获得整个网络状态信息的条件下,采用周期性适应消息路由的

分散机制，减少网络连接数量，建立从源节点到目标 sink 节点的路由连接。

PAMR 协议比较适合数据量较少的无线传感器网络应用场合。仿真实验表明，PAMR 协议比没有适应机制的路由协议减少了 50% 的数据交叠，从而减少数据冗余。

## 2.4 多 sink 部署算法

在单 sink 的无线传感器网络中，随着网络规模的不断增大，因为所有传感器节点的数据都要沿着朝向 sink 节点方向的路径发送，sink 节点附近的传感器节点由于大量转发其他节点传输过来的数据包，容易使自身能量消耗过快而导致节点死亡，造成“能量空洞”问题，从而缩短网络的生存时间。此外，单 sink 网络还存在着传输路径单一、传输延迟以及节点失效问题。在网络中部署多个 sink 节点是解决这些问题的一种有效方法。但是，sink 节点的功能强大，需要进行复杂的数据处理，因此 sink 节点的成本比较高。在网络中部署多个 sink 节点还需要考虑 sink 节点的成本问题，而且 sink 节点的个数、sink 节点的选址和部署策略对无线传感器网络拓扑控制、组网形态、通信协议以及能量控制关系密切，这些因素直接影响着网络的寿命。

目前，已有一些学者对多 sink 部署策略进行了研究，下面举几个典型的例子：

### (1) RDF 算法<sup>[19]</sup>

RDF 算法是刘强等人提出的，该算法应用在传感器节点随机分布的无线传感器网络区域中。将网络区域划分为若干栅格，并根据 sink 节点的覆盖范围，将 sink 节点部署在网络区域中传感器节点密度大的位置，另外，通过对该算法的仿真实验结果进行分析，能够确定一个特定的网络区域中部署 sink 节点的最佳个数。

RDF 算法的主要步骤是：首先，将无线传感器网络区域划分若干个网络栅格，sink 节点的通信范围用半径为  $r$  的圆盘表示，然后依次将圆盘放置在每一个栅格的中心位置，记录每次落入圆盘中的传感器节点的个数，节点个数最多的那个圆盘所在的栅格即为最优栅格，将第一个 sink 节点部署在该栅格的中心。然后，移除该圆盘内的所有传感器节点，按照上述方法部署第二个 sink 节点，依次类推，直到完成对所有 sink 节点的部署。通过对不同 sink 节点个数情况下的网络寿命的仿真结果进行分析，分析部署 sink 节点的代价和网络寿命的关系，可以确定网络中需要部署的最佳 sink 节点个数。

### (2) 多 sink 节点的 P 中值布局模型<sup>[20]</sup>

徐久强等人提出了一种无线传感器网络多 sink 节点的 P 中值布局模型，该问题属于一个 NP 完全问题，采用遗传算法求解该模型，确定多个 sink 节点部署的

位置。

首先，对多 sink 节点部署问题进行分析，根据网络中 sink 节点与传感器节点间的服务与被服务关系来建立模型。模型的目标是在 sink 节点的候选集合  $M$  中找到  $K$  个合适的位置，使得传感器节点与 sink 节点之间总加权距离达到最小。目标函数为：

$$\min \sum_{i=1}^G \sum_{j \in G} r_i d_{i,j} T_{i,j} S_j \quad (2-2)$$

其中， $G$  表示传感器节点的数量， $r_i$  表示一定时间内传感器节点  $i$  发送请求数， $d_{i,j}$  表示传感器节点  $i$  和 sink 节点  $j$  之间的距离， $T_{i,j}$  为 1 时表示传感器节点  $i$  被 sink 节点  $j$  服务。 $S_j$  为 1 时表示  $j$  是 sink 节点，否则为 0。

然后，用遗传算法对该模型进行求解，经过编码、确定适应度函数、选择、交叉、变异等一系列的操作后，求解模型，确定多个 sink 节点部署的位置。

### (3) 能量均衡的多 sink 部署算法<sup>[23]</sup>

D. R. Dandekar 等人将多 sink 部署问题被看作一个最小化传感器节点与其对应的 sink 节点的平均跳数的问题，求解过程中首先用  $K$ -means 算法将整个区域分成  $K$  类，然后在每一类中采用 PSO-MSP 算法确定 sink 节点的最佳位置。

## 2.5 带容错机制的路由算法

在无线传感器网络中，传感器节点采集监测信息，然后将采集的信息一跳或多跳传输到 sink 节点，sink 节点对汇集的数据进行融合，然后发送到用户终端，完成对环境的监测。在实际的应用环境中，有诸多不可预知的情形，比如环境恶劣、通信链路断开或者节点软硬件出问题等，可能会导致传感器节点或者 sink 节点出现故障而失效。在设计路由算法时，我们希望路由算法具有一定的容错功能，在网络节点或链路出现问题的情况下，通过路由容错策略，能够自主地对网络进行调整，并仍然能够将数据传输到 sink 节点，保证系统的正常运行。

网络容错是指当网络系统出现故障后，网络中数据传输能够恢复和网络结构能够自愈的能力。网络的抽象层次包括：物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层，每层对应的容错技术包括：硬件容错、覆盖容错、路由容错、事件容错和应用容错。无线传感器网络抽象层次和每层对应的容错技术的关系如下图 2.3 所示。其中，硬件容错技术主要包括硬件冗余容错、各模块功能自检及参数的自适应调整等<sup>[58 59]</sup>；覆盖容错技术包括容错覆盖、容错拓扑结构与容错拓扑控制和编

码容错等<sup>[60,61]</sup>；路由容错技术主要是探索具有容错能力的路由算法和容错编码技术等<sup>[62]</sup>；事件容错技术包括建立故障检测、隔离与恢复机制；应用容错技术主要是利用数据融合模型等进行数据检测和容错<sup>[63-65]</sup>。



图 2.3 无线传感器网络抽象层次与容错技术对应关系

路由容错是无线传感器网络容错机制研究的基础，而多路径容错路由<sup>[25]</sup>是路由容错中的重点。与单路径路由容错机制相比，多路径容错路由具有以下优点：数据传输更可靠、负载更均衡和网络容错性更好。多路径路由主要是在源节点和目的 sink 节点之间建立多条传输路径，通过建立冗余路由路径来实现容错。多路径容错路由机制如图 2.4 所示。

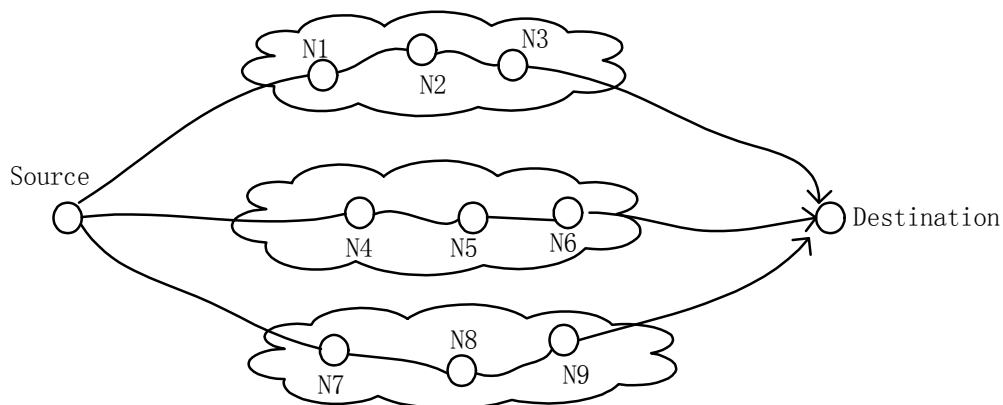


图 2.4 多路径传输容错机制

现有的多路径容错路由可分为如下几类：

(1) 根据多路径是否交叉，可分为互不交叉的多路径路由和部分交叉的多路径路由<sup>[66]</sup>。互不交叉的多路径路由是指所建立的主路径和备选路径互不交叉，任何一个节点或链路故障都不影响其它传输路径。部分交叉的多路径路由是指所建立的主路径和备选路径存在部分路径交叉，主路由路径的数据传输能耗和传输延

迟优于备选路由路径。

(2) 根据备份路径的起始位置,可分为:在故障节点的上一跳节点处重新建立到达目的节点的路由;在故障节点的周围建立备份路由以隔离故障节点;从源节点到目的节点间重新建立一条路由。

(3) 根据建立多路径的时间,可分为:事先建立好备份路由路径和在故障节点周围临时建立路由。事先建立好备份路由路径是在最初路由建立的时候建立两条路由路径,选择最优的一条作为主路由,次优的那条作为备选路由,当节点或链路出现故障时,激活备选路由。临时建立路由是在最初路由建立的时候只建立一条路由路径,当节点出现故障时,在故障节点周围临时建立一条到达目的节点的路由路径。

## 2.6 小 结

本章主要介绍了多sink无线传感器网络,包括对多sink路由技术、多sink部署方法和带容错机制的路由算法进行了介绍与分析,为下一步改进并提出新的算法提供了理论基础。

对多 sink 路由技术的概念、路由技术的分类、路由过程和典型的多sink路由协议进行了介绍与分析,为第三章中能量均衡的多sink路由算法的提出提供了理论基础;对多sink部署方法的概念及目前的研究成果进行了介绍与分析,为第四章中改进粒子群聚类的多sink部署算法的提出提供了理论基础;另外,在多sink无线传感器网络中,拥有带容错机制的路由算法十分必要,目前对多sink的容错路由的研究较少,本章介绍了路由容错机制,为第五章中设计多sink容错路由算法提供了理论基础。



## 第三章 能量均衡的多 sink 分簇路由算法

### 3.1 引言

无线传感器网络是由大量低成本的、计算能力和通信能力受限的微型传感器组成的多跳自组织网络。传感器节点部署在监测区域中，由传感器节点组成的网络，完成信息的感知和数据的传输，实现对区域的监控。在单 sink 节点的无线传感器网络中，由于传感器节点能量有限，随着网络规模不断扩大，sink 节点周围的传感器节点很容易因为转发大量数据而使自身能量过早耗尽。另外，在单 sink 网络中，如果唯一的 sink 节点出现故障，整个网络将会面临瘫痪的危险。此时，多 sink 网络架构可以有效的解决以上问题。多 sink 无线传感器网络的优势<sup>[67]</sup>：

(1) 多 sink 网络结构能够缩短传感器节点到 sink 节点的距离，减少数据转发过程中的能量消耗，从而延长网络寿命。

(2) 不同的 sink 节点负责收集不同的环境监测信息，能够有效控制网络中的数据流并方便后续的数据融合工作。

(3) 多 sink 网络能够提高网络的可靠性，当网络中某一个 sink 节点出现故障，还有其他几个 sink 节点可以替代该 sink 节点的工作，从而保证网络的可靠运行。

无线传感器网络路由协议主要负责将传感器节点采集的数据有效可靠地传输到 sink 节点。本章提出一种能量均衡的多 sink 分簇路由算法（EBMCR 算法）。在簇头选择阶段，综合考虑节点的剩余能量级和离 sink 节点的距离等因素来选择簇头节点；在簇间数据传输过程中，采用多跳传输的方式，综合考虑路径传输能量消耗、路径最小剩余能量和路径数据包的传输跳数等因素，来选择将数据包传输到最佳的 sink 节点的最优路径。实验表明，本算法可有效提高网络性能，延长网络的生命周期。

### 3.2 多 sink 网络结构

多 sink 无线传感器网络系统包括传感器节点、多个 sink 节点和管理节点，其网络结构如图 3.1 所示。众多传感器节点部署在待监测区域，主要负责完成数据的采集和传输；多个 sink 节点主要负责接收传感器节点采集的数据，然后进行一定的数据融合后将数据传输给管理节点；管理节点收集并处理数据，然后通过 Internet

将数据传送到用户终端。

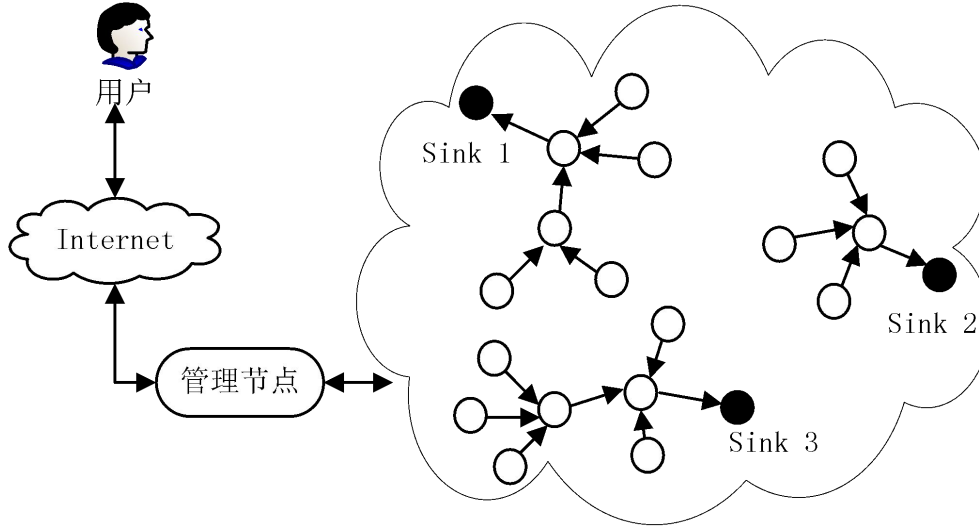


图 3.1 多 sink 网络结构

### 3.3 模型假设及术语定义

#### 3.3.1 传感器网络模型假设

假设监测区域是正方形的，多个 sink 节点部署在区域边界处；传感器节点和 sink 节点都是静止不动的；所有传感器节点都是同构的，且每个传感器节点都具有位置感知能力；每个节点具有唯一的 ID 号；sink 节点的能量是无限的。

#### 3.3.2 术语定义

定义 1 传感器网络

用无向图  $G(V, E)$  来表示传感器网络， $V$  表示所有节点， $E$  表示相邻节点路径。

$$V = V_{\text{sensor}} \cup V_{\text{sink}} \quad (3-1)$$

$$E = \{(i, j) | i, j \in V_{\text{sensor}}\} \cup \{(i, j) | i \in V_{\text{sensor}}, j \in V_{\text{sink}}\} \quad (3-2)$$

定义 2 通信能耗模型

节点发送数据的能量消耗为

$$E_{\text{Tx}}(i, j) = \begin{cases} l E_{\text{elect}} + l \xi_{fs} d_{i,j}^2, & d_{i,j} < d_{\text{thresh}} \\ l E_{\text{elect}} + l \xi_{mp} d_{i,j}^4, & d_{i,j} > d_{\text{thresh}} \end{cases} \quad (3-3)$$

其中， $l$  表示发送数据包的长度， $E_{\text{elect}}$  表示 1 bit 数据在发送电路和接收电路消耗的能量， $\xi_{fs}$  和  $\xi_{mp}$  分别表示两种模型中功率放大所需的能量<sup>[68]</sup>， $d_{i,j}$  表示节点  $i$  到

邻居节点  $j$  之间的距离， $d_{thresh}$  是距离阈值。

节点接收数据的能量消耗为：

$$E_{Rx} = l E_{elect} \quad (3-4)$$

簇头进行本地处理和数据融合时的能量消耗为：

$$E_{DA} = l E_{DA} \quad (3-5)$$

其中， $E_{DA}$  表示融合 1 bit 数据的能量消耗。

定义 3 相邻节点间通信能量消耗

从节点  $i$  传输到下一跳节点  $j$  的发送和接收每比特数据包的能量消耗为

$$Cost_{i,j} = (E_{Tx} + E_{Rx}) / l \quad (3-6)$$

其中， $E_{Tx}$  表示节点发送数据的能量消耗，如公式 (3-4)， $E_{Rx}$  表示节点接收数据的能量消耗，如公式 (3-5)。

### 3.4 能量均衡的多 sink 分簇路由算法

能量均衡的多 sink 分簇路由算法 (EBMCR) 是在 LEACH 分簇路由协议的基础上，融合多 sink 架构的思想，进行如下改进：

- (1) LEACH 采用的是单 sink 网络架构，EBMCR 采用多 sink 网络架构。
- (2) 在簇的建立阶段，LEACH 算法中所有节点均可以平等地竞争簇头；EBMCR 算法中只有能量高于网络平均能量的节点才可以竞争簇头，并综合考虑了节点的剩余能量级和节点到 sink 的距离等因素，修正了 LEACH 的阈值选择函数。
- (3) 在簇间数据传输过程中，采用多跳传输方式。
- (4) 针对由簇头组成的骨干网络，综合考虑了路径传输能量消耗、路径最小剩余能量和节点到多个 sink 的跳数等因素，对各条路由路径开销进行评估比较，选出最佳的路由路径。

#### 3.4.1 基本思想

EBMCR 算法采用“轮”的机制运行，每轮中分为簇的建立、簇间路由和数据传输三个阶段。在簇的建立阶段，传感器节点自组织成簇，每个簇中均有一个簇头节点，成簇后，簇节点只与本簇的簇头节点进行通信。在簇间路由阶段，簇头节点启动路由发现过程，组成骨干网络，然后对网络中多条通向不同 sink 节点的



路由路径的开销进行评估比较，选中评估出的最佳路由路径。在数据传输阶段，数据传输包括簇内数据传输和簇头与 sink 间的数据传输。每隔一个周期，整个网络重新进入簇的建立阶段，然后不断循环，直到传感器节点能量耗尽。

### 3.4.2 簇的建立

首先, sink 节点将自身的位置信息发送给网络区域中的所有传感器节点并请求所有节点的剩余能量信息，传感器节点接收到该消息后将自身的剩余能量信息发送给离自己最近的 sink 节点，sink 节点对全网的能量进行统计，计算出网络平均能量。然后进入簇头选举阶段，簇头选举机制类似于 LEACH 算法，通过制定阈值函数  $T(n)$  来控制信息的发送，并没有实际发送采集的数据。网络中所有的剩余能量高于网络平均能量的节点随机产生一个 0~1 之间的随机数，如果这个随机数小于阈值  $T(n)$ ，则该节点将会被选为簇头。其中  $T(n)$  的计算方式如下：

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p[r \bmod (1/p)]} \left[ g \frac{E}{E0} + (1-g) \frac{d_{avg}}{d_k} \right], & n \in C \\ 0, & n \notin C \end{cases} \quad (3-7)$$

其中， $r$  表示当前的轮数， $p$  表示簇头节点数占网络中总节点数的比率， $C$  表示到  $1/p$  轮中尚未成为簇头的节点集合。 $g$  为节点能量级的控制系数， $E$  表示节点的剩余能量， $E0$  表示节点的初始能量，因此  $E/E0$  表示节点的剩余能量级； $1-g$  表示距离因子的控制系数， $d_{avg}$  表示传感器节点到每个 sink 节点距离的平均值， $d_k$  表示传感器节点到最近 sink 节点的距离。由表达式 (3-7) 可以看出，剩余能量级大的节点当选为簇头的概率大。另外，距离某个 sink 节点越近的节点当选簇头的概率也越大，这样靠近 sink 节点的簇的规模相对较小，从而使这些簇头为多跳数据转发预留能量。

传感器节点当选为簇头后，向全网发送簇头广播消息，普通传感器节点接收到该消息后，根据接收的该消息信号的大小决定加入哪个簇。簇建立完毕后，簇头节点为本簇成员节点分配 TDMA 时隙，簇成员节点按相应的时隙将采集的数据发送到簇头。

### 3.4.3 簇间多跳路由

在簇间数据传输过程中，LEACH 协议中的簇头节点与 sink 节点之间是通过单跳路由的方式直接通信的，很容易造成离基站较远的簇头节点因能量消耗过大而很快死亡<sup>[69]</sup>。另外，当节点进行远距离通信时，多跳方式传输数据可以节省能量<sup>[70]</sup>。

因此，本文中的 EBMCR 算法，簇间数据传输采用多跳的方式。簇间多跳路由算法主要分为三个部分：路由发现、路由选择和路由维护。

### 3.4.3.1 路由发现

首先，簇头节点和 sink 节点发送 hello 消息进行邻居发现，如果发送节点为簇头节点，则发送的 hello 消息包括消息类型(*type*)、节点的 *ID*、节点位置(*position*)、节点离多个 sink 的距离(*sink\_dis*)、节点的剩余能量(*Renenergy*)等信息，消息的格式为 *hello(type, ID, position, sink\_dis, Renenergy)*；若发送节点为 sink 节点，则发送的 hello 消息包括消息类型(*type*)、节点的 *ID*、节点位置(*position*)等信息，消息的格式为 *hello(type, ID, position)*。

然后，簇头节点接收 hello 消息，簇头节点接收 hello 消息的处理过程如下。

- (1) 簇头节点  $V_i$  接收到邻居节点  $V_j$  的 hello 消息；
- (2) 判断邻居节点  $V_j$  是否是 sink 节点，若是，则转到步骤 (3)；若不是，则转到步骤 (4)；
- (3) 将该 sink 节点作为下一跳节点和目的节点，加入临时路由表，回复 ACK 消息；
- (4) 比较簇头  $V_i$  和  $V_j$  到  $k$  个 sink 的距离 *sink\_dis*，若存在  $sink\_dis(k,j) < sink\_dis(k,i)$  则转入步骤 (5)；否则，转入步骤 (6)；
- (5) 将簇头节点  $V_j$  作为下一跳节点，并保存  $V_j$  的消息，回复 ACK 消息；
- (6) 丢弃簇头节点  $V_j$  的消息。

重复此过程，直到所有的簇头节点都已经被发现。这样由源节点到不同 sink 节点的路由路径就建立起来了。

### 3.4.3.2 路由选择

假设一个簇头节点经过多跳将数据传输给 sink 节点  $k$ ，则该路径上所经过节点的有序集合为：

$$Path = (V_{CH\_1}, V_{CH\_2}, \dots, V_{sink\_k}) \quad (3-8)$$

该路径上的路径传输能量消耗定义为：

$$Cost_p = \sum (Cost_{i,j}) \quad (3-9)$$

其中， $Cost_{i,j}$  表示邻居簇头间发送和接收 1 bit 数据的能量消耗，可根据通信能耗模型的公式 (3-3) 和 (3-4) 求得， $Cost_p$  表示该条路径上从源节点到 sink 节

点的传输能量消耗总和。

该路径上的最小剩余能量定义为路径上剩余能量最小的节点所对应的剩余能量，用  $E_{rep}$  来表示：

$$E_{rep} = \min_{i \in p} E_i \quad (3-10)$$

在选择 sink 节点和路由路径的时候，可根据具体应用场景考虑多方面的因素。本文主要考虑的因素是路径传输能耗、路径最小剩余能量以及节点到 sink 的跳数。这样在簇头节点要发送信息时，综合考虑发送的代价，最终选出一条最佳的路由路径。为此，我们定义如下路径综合消耗评价函数：

$$f_p = (Cost_p)^\alpha \times (E_{rep})^\beta \times (Hopcount_p)^\gamma \quad (3-11)$$

其中， $Cost_p$  表示该条路径传输能耗， $E_{rep}$  表示该条路径上的最小剩余能量， $Hopcount_p$  表示该条路径上源节点到 sink 节点的跳数。 $\alpha$  表示能量消耗系数，为正数； $\beta$  表示节点剩余能量系数，为负数； $\gamma$  表示节点到 sink 的传输跳数系数，为正数。

因此，从源簇头节点  $V_i$  出发，当有  $n$  条到达  $k$  个 sink 节点的路径时，则到达 sink 节点的最优路径为路径综合消耗评价函数值  $f_p$  最小的那条路，该条路对应的 sink 节点为最佳的 sink 节点。簇间多跳路由选择算法可表示为：

$$\min_n (f_p(V_i, V_k)) \quad (3-12)$$

从式 (3-11) 和 (3-12) 可知，路径中两相邻节点距离越近，路径传输能耗越低，因此路径综合消耗越小；路径上节点的剩余能量越高，路径综合消耗越小；传输跳数越少，路径综合消耗越小。因此，该路由算法选出的是一条路径传输能耗低，路径剩余能量高，跳数少的路由路径，它可以更好地均衡网络节点的能量，从而延长网络的生命周期。

该路由选择算法的伪代码为：

- 1)  $Minfp = fp(V_i, V_1);$
- 2)  $SinkNodeID = V_1;$
- 3) for ( every path  $p_k$  from  $V_i$  to sink  $V_k$  )
- 4)     { if  $(fp(V_i, V_k) < Minfp)$

- 5)         $\{ \text{Minfp} = \text{fp}(V_i, V_k);$
- 6)         $\text{SinkNodeID} = V_k; \}$
- 7)         $\text{end } \}$
- 8)         $\text{end}$
- 9)         $\text{return SinkNodeID};$

簇头节点按上述簇间多跳路由选择算法，选中评估出的最优路由路径，该路径中的对应 sink 节点为目的节点，将该路径存入路由表，以该路径来传输数据。

### 3.4.3.3 路由维护

当簇头节点发现自身路由表为空时，需要进行路由更新，转入路由发现状态，然后按簇间多跳路由选择算法，评估最优路由路径。

### 3.4.4 稳定的数据传输阶段

当簇间多跳最优路径确定以后，整个传感器网络进入稳定的数据传输阶段。为了保证通信的效率和能量效率，稳定的数据传输阶段要比簇的建立和簇间多跳路由阶段的时间要长。数据传输主要分为簇内数据传输和簇间数据传输，每一轮中的数据传输流程如图 3.2 所示。

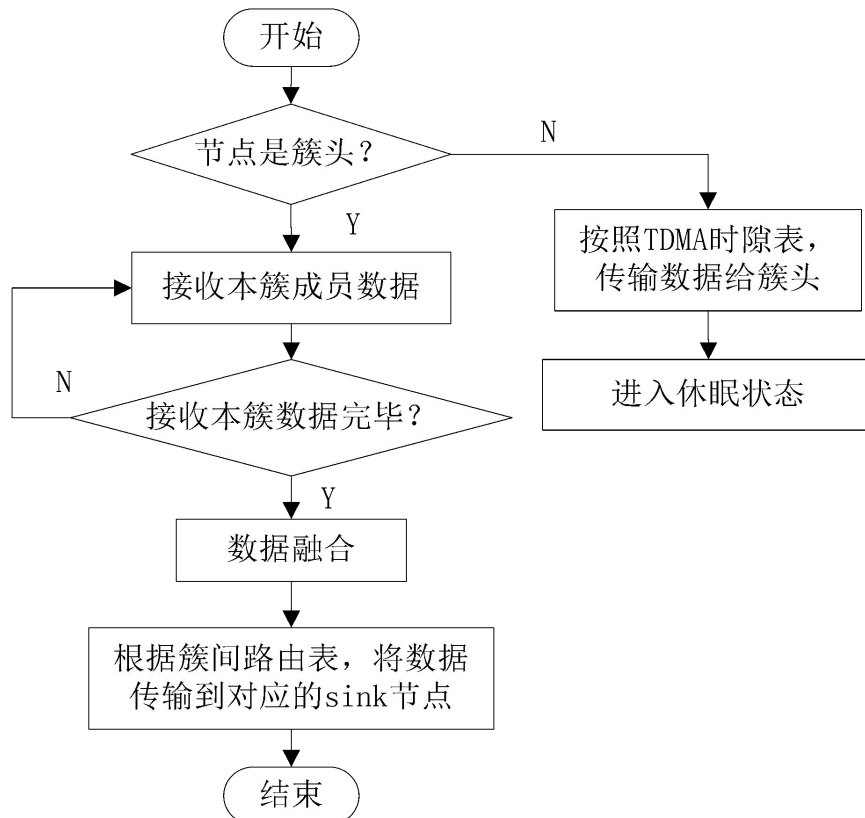


图 3.2 每一轮中的数据传输流程

详细过程为：簇成员节点根据簇头为它们制定好的 TDMA 时隙表，在相应的时隙内将采集的数据传输给本簇簇头。在没有数据传输时，各簇成员节点将会关闭数据传送模块，进入休眠状态，以节约能量。而簇头节点则一直保持活跃状态，收集本簇成员的数据，进行数据融合，然后按照簇间路由表，将数据传送给相应的 sink 节点。

经过一段时间的数据传输以后，网络将进入下一轮，重新建簇，如此周期性的循环，直到传感器节点的能量耗尽。

## 3.5 仿真实验

### 3.5.1 仿真环境及参数设置

为验证本文提出的路由算法，这里利用 Matlab 仿真平台对算法进行了仿真验证。假设在  $200m \times 200m$  的区域内，随机部署了 100 个传感器节点。实验将本文中的 EBMCR 多 sink 路由算法与 EMCA 多 sink 路由算法<sup>[13]</sup>、PBR 多 sink 路由算法<sup>[11]</sup>、LEACH<sup>[71]</sup>算法进行了比较。实验参数如表 3.1 所示：

表 3.1 仿真实验参数

| 参数          | 取值                                    |
|-------------|---------------------------------------|
| 网络分布范围/m    | (0,0)到(200,200)                       |
| sink 节点位置/m | (0,0), (0,200),<br>(200,200), (200,0) |
| 节点数         | 100                                   |
| 各节点初始能量     | 0.5J                                  |
| 数据包长度       | 6400bit                               |
| 控制包长度       | 200bit                                |
| $E_{elect}$ | 50nJ/bit                              |
| $\xi_{fs}$  | 10pJ/(bit·m <sup>2</sup> )            |
| $\xi_{mp}$  | 0.0013pJ/(bit·m <sup>4</sup> )        |
| $\alpha$    | 2                                     |
| $\beta$     | 5                                     |
| $\gamma$    | 2                                     |

### 3.5.2 实验结果与对比

将本文中的 EBMCR 算法与 EMCA 算法、PBR 算法、LEACH 算法的网络生命周期和网络剩余能量进行对比, 结果如图 3.3 和图 3.4 所示。

由图 3.3 可知, EBMCR 算法的网络生命周期长于其他三种算法。LEACH、PBR、EMCA 和 EBMCR 算法的第一个节点死亡时间分别是第 126 轮、218 轮、353 轮和 471 轮, 网络中一半的节点死亡时间分别是 344 轮、479 轮、432 轮和 498 轮。由此可以看出, 在网络生命周期上 EBMCR 明显优于 EMCA、PBR 和 LEACH。从图 3.3 中还可以看出 EBMCR 算法中, 当第一个节点死亡以后, 整个网络很快死亡。这是因为当第一个节点死亡的时候, 所有节点均处于低能量状态, 说明 EBMCR 算法可以更好地均衡节点的能耗。

由图 3.4 可以看出, EBMCR 算法和 PBR 算法的网络剩余能量高于 LEACH 和 EMCA 算法, 这是因为在 LEACH 和 EMCA 算法中, 簇头节点与 sink 节点一跳通信, 可能会导致距离 sink 远的节点能量消耗过快, 因此导致整个网络能量消耗过快。另外由图 3.4 还可以看出, 在网络节点数目死亡一半之前, EBMCR 算法在每轮中节点的剩余能量略大于 PBR 算法。这是因为 EBMCR 算法一方面减少了簇头竞争过程中产生的能耗, 另一方面, 在簇间多跳路径选择的过程中综合考虑了路径传输能量消耗、路径最小剩余能量和传感器节点到 sink 节点的跳数等因素, 均衡了网络能耗。

将 EBMCR 算法在 sink 节点的数量分别为 1 和 4 时的网络生命周期和网络节点的剩余能量进行对比, 如图 3.5 和图 3.6 所示。由图 3.5 和图 3.6 可以看出, 多 sink 下的网络生命周期明显长于单 sink 下的网络生命周期, 多 sink 网络的每轮中节点的剩余能量大于单 sink 的能量。这是因为多 sink 可以减少传感器节点到 sink 的跳数, 从而减少了节点用于转发数据包的能量消耗, 延长了网络的生命周期。

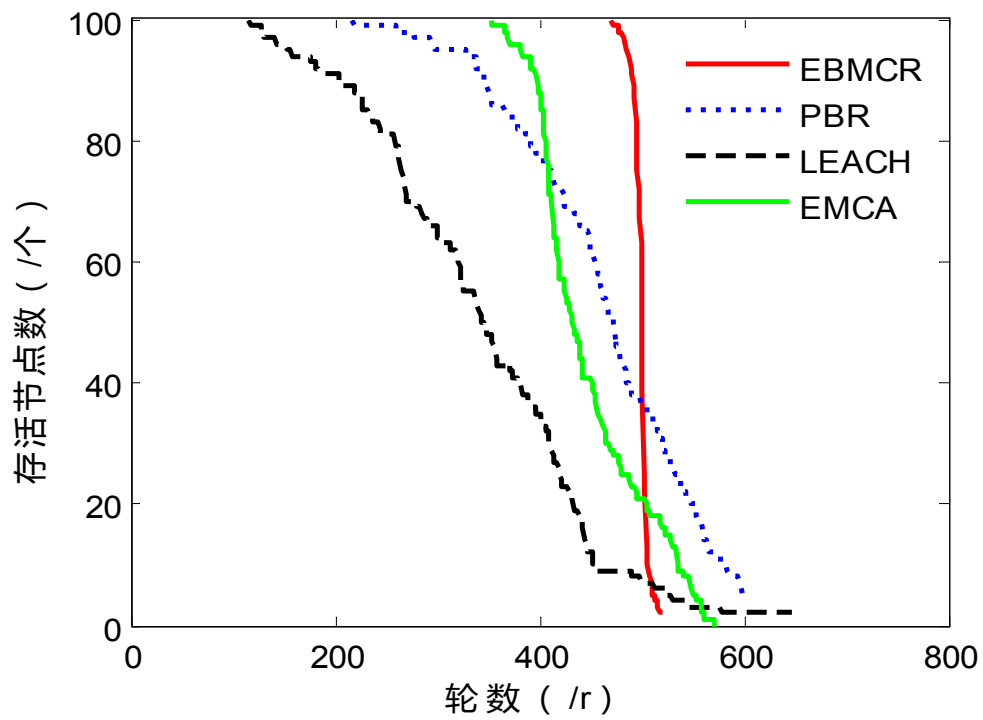


图 3.3 不同算法网络生命周期对比

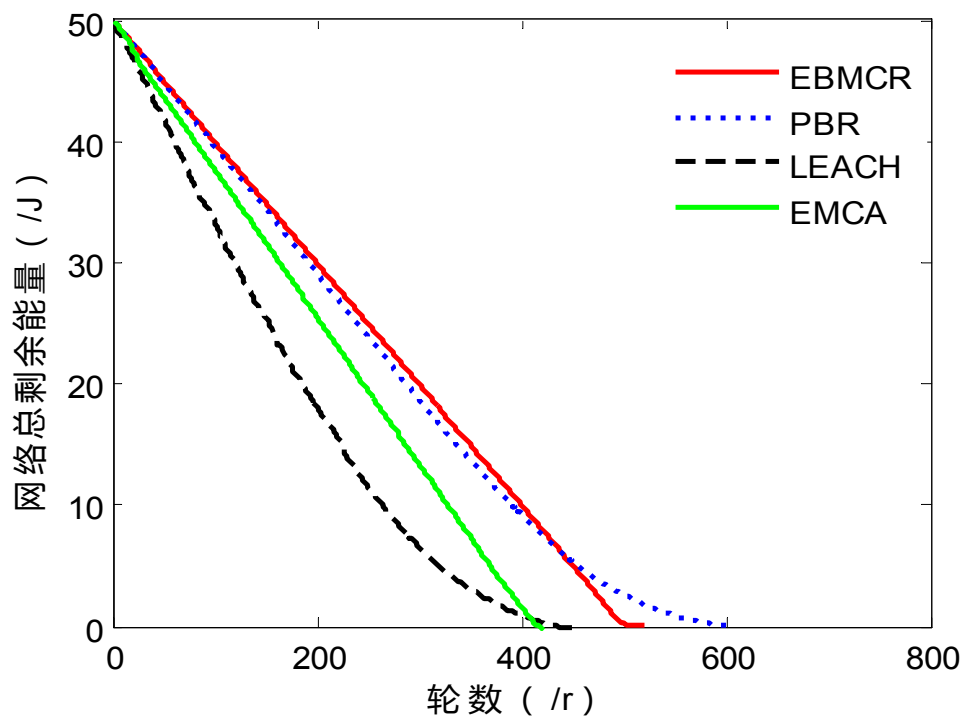


图 3.4 不同算法网络总剩余能量对比

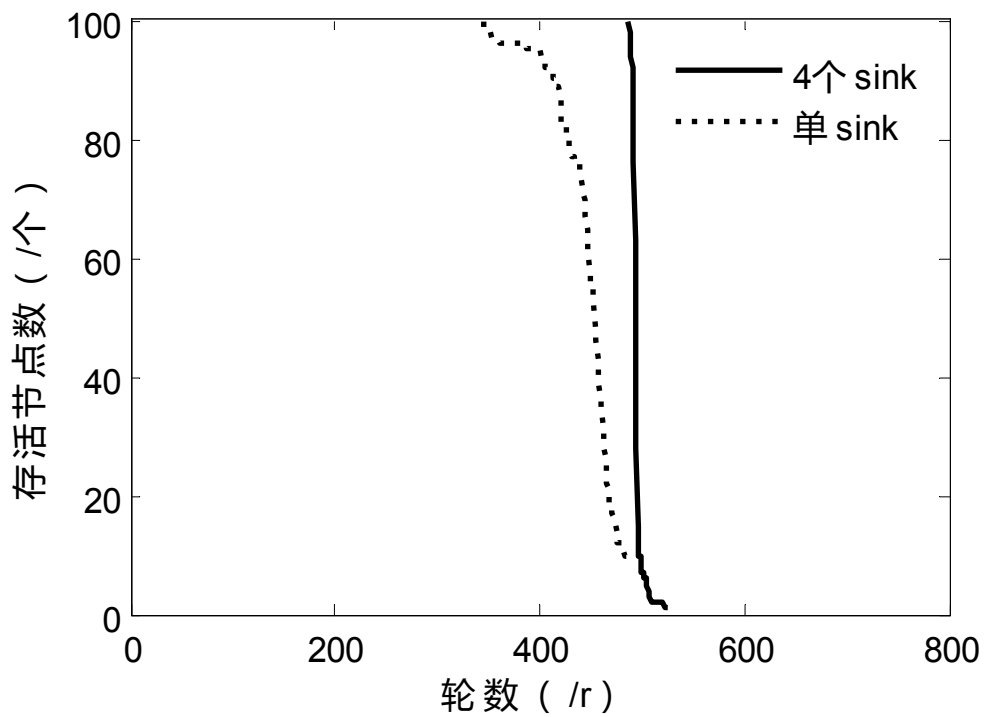


图 3.5 不同 sink 节点的网络生命周期对比

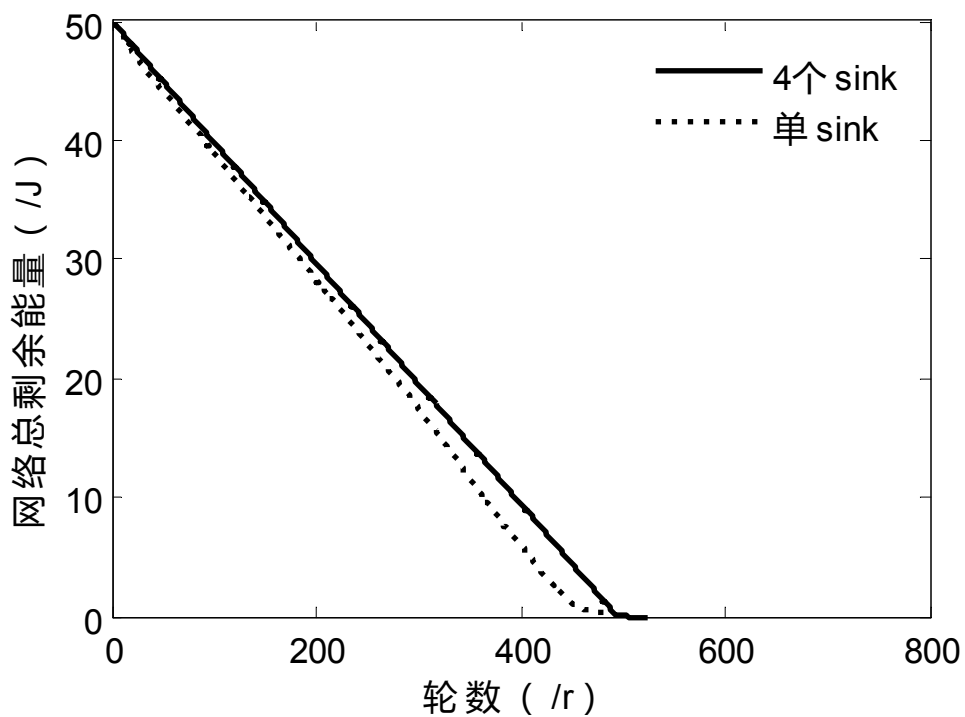


图 3.6 不同 sink 节点的网络总剩余能量对比

### 3.5 小 结



本章将无线传感器网络分簇路由算法与多 sink 网络结构进行结合，对多 sink 路由算法进行研究，提出了能量均衡的多 sink 分簇路由算法。在选举簇头时，只有剩余能量高于网络平均能量的节点才有资格竞争簇头，并综合考虑了节点的剩余能量级和距离 sink 节点的远近等因素；在簇间传输过程中，引入多跳传输机制，综合考虑了路径传输能耗、路径最小剩余能量和节点到 sink 的传输跳数等因素，选择一条到达最佳 sink 节点的最优路径，有效均衡网络节点能耗，延长了网络生命周期。

## 第四章 无线传感器网络的多 sink 部署策略

### 4.1 引言

在无线传感器网络中部署多个 sink 节点，一方面可以减少传感器节点到 sink 节点的跳数，从而减少用于数据转发的能量消耗，避免某些传感器节点过早死亡；另一方面，不同的用户（sink）可能需要不同的监测信息，比如温度、湿度、光照强度等，通过在网络中部署多个 sink 节点，使不同的 sink 节点汇集不同的环境监测变量信息，这样可以有效控制网络中的数据流。然而，部署 sink 节点的个数和位置对网络寿命也有着重要的影响<sup>[19]</sup>。

本章提出的基于改进粒子群聚类的多 sink 优化部署方法，将改进的粒子群算法与  $K$ -均值聚类<sup>[73,74]</sup>相结合，对网络区域内所有传感器节点进行聚类，划分为  $K$  个子网区域，sink 节点分别部署在每一类的中心，以达到网络分区合理、多 sink 节点部署优化的效果。

### 4.2 粒子群聚类算法

#### 4.2.1 标准粒子群算法

粒子群算法（即 PSO 算法）是一种群体智能算法，主要思想是通过群体间相互协作和信息共享来寻找最优解<sup>[74]</sup>。PSO 算法因具有简单、容易实现且没有过多的参数调节的特点而有着广泛的应用，目前已被用于函数优化、神经网络训练、模式分类、机器学习、模糊系统控制、信号处理和自适应控制等。

PSO 算法首先初始化为一群随机的粒子来表示算法的随机解，然后通过不断迭代进行寻优，找到最优解<sup>[75]</sup>。在每次迭代的过程中，粒子通过动态追踪个体最优解和群体最优解来不断更新粒子的位置和速度。个体最优解（即  $P_{id}$ ）是粒子本身的历史最优解；群体最优解也叫全局最优解（即  $P_{gd}$ ），是当前整个种群找到的最优解。找到这两个最优解后，粒子通过式（4-1）来更新自己的速度，通过式（4-2）来更新自己的位置。

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (P_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (4-1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (4-2)$$

$$\omega = \omega_{\max} - t \cdot \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{t_{\max}} \quad (4-3)$$

其中,  $v_{id}$  为粒子  $i$  在第  $d$  维的速度,  $\omega$  表示惯性权重系数, 其计算方法如式 (4-3)。

$c_1$  和  $c_2$  为学习因子,  $r_1, r_2$  是介于 (0,1) 之间的随机数,  $x_{id}$  为粒子  $i$  在第  $d$  维的位置。

惯性权重系数  $\omega$  为随时间线性递减函数, 在迭代初期,  $\omega$  值较大, 此时粒子群算法具有较好的全局搜索性能, 在较大的区域内进行全局搜索, 从而较快地定位最优解的大致位置, 随着  $\omega$  逐渐减小, 粒子速度减慢, 开始精细地局部搜索。 $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$

分别表示初始惯性权重和最终惯性权重,  $t$  是当前迭代次数,  $t_{\max}$  为最大迭代次数。

PSO 算法是一种全局搜索算法, 但该算法也有一定的缺陷: 它的搜索精度不是很高, 并且容易陷入局部最优解<sup>[76,77]</sup>。

#### 4.2.2 K 均值聚类

K 均值聚类算法<sup>[78]</sup>, 也称 K-means 算法, 是一种基本的聚类算法。该聚类算法的主要思想是根据数据对象的内在性质, 将数据集划分为  $K$  个聚类区, 使得类内离散度达到最小、类间离散度达到最大。基本步骤如下:

(1) 从数据对象集合中随机选取  $K$  个对象作为初始聚类中心  $c_1, c_2, \dots, c_k$ 。

(2) 按最小距离原则将每个对象划分到最近的一个聚类中心  $c_i (i=1, 2, \dots, k)$ , 划分到同一聚类中心的数据对象属于同一个聚类, 共形成  $K$  个聚类。

(3) 根据公式  $c_i' = \frac{1}{N_i} \sum_{X \in c_i} X$  重新计算聚类中心  $c_i'$ , 其中  $N_i$  为第  $i$  个聚类域  $C_i$  中

包含的数据对象的个数。

(4) 计算判断  $c_i'$  是否等于  $c_i$ , 如果不相等则转至步骤 (2), 直到  $c_i' = c_i$ , 聚类中心不再发生变化, 聚类算法结束。

K-means 算法存在着一些不足: (1) 算法寻找全局最优解的收敛速度较快, 但寻找全局最优解的能力较弱。(2) 算法对初始值依赖过大, 算法结果不稳定。这些不足限制了它的应用范围。

### 4.2.3 粒子群聚类算法

粒子群聚类算法是 PSO 算法与传统聚类方法的结合。Merwe 等人<sup>[79]</sup>提出基本粒子群聚类算法，是将 PSO 算法和 K-means 算法进行结合的混合聚类方法。粒子群聚类算法的基本思想是：先用 K-means 算法计算出聚类的中心，然后在粒子群初始化时将其赋值给某个粒子，其余粒子随机初始化，最后用 PSO 算法完成聚类。粒子群聚类算法利用 PSO 算法的全局寻优能力和分布式随机搜索特性来解决 K-means 算法易陷入局部最优解和对初值敏感问题，提高了算法的收敛速度，同时也在一定程度上提高了聚类的有效性，但当聚类规模较大时，还是有陷入局部最优解的危险。

## 4.3 改进粒子群聚类的多 sink 节点部署策略

### 4.3.1 算法思想

假设在整个网络区域内随机部署了  $N$  个传感器节点，每个传感器节点都具有位置感知能力，计划在网路中部署  $K$  个 sink 节点，则用改进的粒子群聚类算法对网络区域内所有传感器节点的位置进行聚类，将网络分成  $K$  个不同的聚类区域，各 sink 节点分别部署在每一个聚类区域的中心。

### 4.3.2 算法改进

由于标准的 PSO 算法比较容易陷入局部最优解，本文对标准 PSO 算法做了如下改进：

(1) 在 PSO 算法中，惯性权重  $\omega$  对算法的收敛速度和算法结果有很大的影响，当  $\omega$  较大时，算法的全局搜索能力强；当  $\omega$  较小时，算法的局部搜索能力强。在标准的 PSO 算法中，惯性权重  $\omega$  是以固定方式线性递减的，这种线性递减并不是以粒子群中粒子的实际收敛情况进行动态调整全局搜索能力和局部搜索能力的。由于粒子飞行具有不可预见性，粒子群的收敛并不是线性的。因此，将  $\omega$  定义为线性递减的方式不是很合理。本文对 PSO 算法中的惯性权重进行了改进，具体表达式如式 (4-4) 所示：

$$\omega^k = \begin{cases} \omega_{\min}, & \omega^k < \omega_{\min} \\ \omega_{\min} + \sigma \frac{|f_i^k - f_{gb}^k|}{f_{gb}^k} \times (\omega_{\max} - \omega_{\min}), & 0.5 \leq \omega^k \leq 0.9 \\ \omega_{\max}, & \omega^k > \omega_{\max} \end{cases} \quad (4-4)$$

其中， $k$  为迭代次数， $\omega^k$  表示第  $k$  次迭代时的惯性权重， $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$  分别表示最大

惯性权重和最小惯性权重，当惯性权重  $\omega$  大于  $\omega_{\max}$  时，置  $\omega = \omega_{\max}$ ；当惯性权重  $\omega$  小于  $\omega_{\min}$  时，置  $\omega = \omega_{\min}$ ，这样就可以使得  $\omega$  的值限定在区间  $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$  内。 $f_i^k$  表示第  $k$  代第  $i$  个粒子的适应度值， $f_{gb}^k$  表示第  $k$  代粒子群的全局最优适应度值。惯性权重影响着算法的收敛速度和算法结果，当粒子群中粒子较为分散时，粒子的适应度差异较大， $\omega^k$  值较大；当粒子群趋于收敛时， $\omega^k$  值逐渐减小；当粒子群收敛于全局最优点时， $\omega^k$  值为 0。因此， $\omega^k$  可以根据每一次迭代时粒子群收敛情况进行动态自适应调节惯性权重。

(2) 加入扰动策略。在算法迭代的过程中，所有粒子都朝着最优解的方向飞行，越靠近最优解，粒子的速度越小，当粒子的速度小于某一极小值时，它的变化已经无法更新粒子的位置。所以，粒子群算法容易陷入局部最优解。为了跳出局部最优解，本文引入了扰动策略，当粒子速度小于某一极小值时，随机抽取占群体比例为 10% 的粒子进行位置随机初始化，进行迭代寻优。

### 4.3.3 算法编码

在利用改进的粒子群聚类算法解决多 sink 节点的部署问题时，采用聚类中心的实数编码方式，每个粒子作为一组可行解组成粒子群，每个粒子由粒子位置、速度和适应度值三部分组成。每个粒子的位置由  $K$  个聚类中心组成，通过调整聚类中心获得最优划分。

粒子  $i$  的位置编码结构表示为：

$$x_i = [c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_K] \quad (4-5)$$

其中  $c_j$  表示类  $j$  的聚类中心，是一个 2 维矢量。

粒子  $i$  的速度编码结构为：

$$v_i = [v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_K] \quad (4-6)$$

其中  $v_j$  表示第  $j$  个聚类中心的速度值，是一个 2 维矢量。

粒子  $i$  的适应度值  $f_i$  为一个实数。

### 4.3.4 适应度函数

在 PSO 算法中，适应度函数可用于判断种群进化过程中粒子所在位置的好坏。

而在聚类算法中衡量聚类效果的好坏，主要取决于总的类内离散度  $F$ ，类内离散度  $F$  越小，聚类效果越好。本文定义粒子适应度函数如下：

$$f = 1/F = 1 / \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N \omega_{ij} \sum_{p=1}^m (S_{ip} - c_{jp})^2 \quad (4-7)$$

其中， $K$  表示聚类的类数，即计划部署 sink 节点的个数； $N$  表示传感器节点的个数； $\omega_{ij}$  是一个  $N \times K$  的加权矩阵，矩阵元素由 0 或 1 组成，当传感器节点  $S_i$  属于类  $j$  时为 1，不属于时为 0； $m$  表示属于类  $j$  的传感器节点个数； $S_{ip}$  表示传感器节点的位置； $c_{jp}$  表示类  $j$  的聚类中心的位置。聚类中心的位置  $c_{jp}$  是按照  $K$  均值聚类的聚类中心计算方法计算得来的，其表达式如式 (4-8) 所示。

$$c_{jp} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_{ij} S_{ip}}{\sum_{i=1}^N \omega_{ij}} \quad (4-8)$$

因此，类内离散度  $F$  越小，粒子的适应度  $f$  越大，聚类效果越好。

#### 4.3.5 算法流程

根据已定义好的粒子群结构，采用改进的粒子群聚类算法，求解多 sink 节点的部署位置，图 4.1 为整个算法的流程图。

(1) 初始化。定义聚类类别数为  $K$ ，定义粒子群中粒子数为  $L$ ，首先将每个传感器节点随机指派为某一类，作为初始聚类划分，然后计算各类的聚类中心，作为粒子  $i$  的位置编码  $x_i$ ，然后计算粒子的适应度  $f_i$ ，设置粒子  $i$  各聚类中心的初始速度为 0。

(2) 对每个粒子，根据对应的聚类划分，按照式 (4-8) 计算其聚类中心，按照式 (4-7) 更新粒子的适应度值。

(3) 根据粒子群中粒子的适应度大小，得到粒子的个体最优位置  $P_{id}$ ， $i=1, 2, \dots, L$  和全局最优位置  $P_{gd}$ 。

(4) 按照式 (4-4) 更新惯性权重系数  $\omega$ ，其中  $\omega_{\max}$  取 0.9， $\omega_{\min}$  取 0.4。

(5) 按照式 (4-1) 和式 (4-2) 更新所有粒子的速度和位置。

(6) 判断粒子的速度是否小于某一极小值，若是，则加入扰动策略，随机抽取占群体总数 10% 的粒子进行位置随机初始化，进行迭代寻优；若否，则不用添加扰动。



(7) 对每个传感器节点，根据粒子的聚类中心编码，按照最近邻法则，来确定该传感器节点位置的聚类划分。

(8) 若达到结束条件（到达足够好的位置或最大迭代次数），则算法结束，输出每个 sink 节点部署的位置；否则，转到步骤（2）继续迭代。

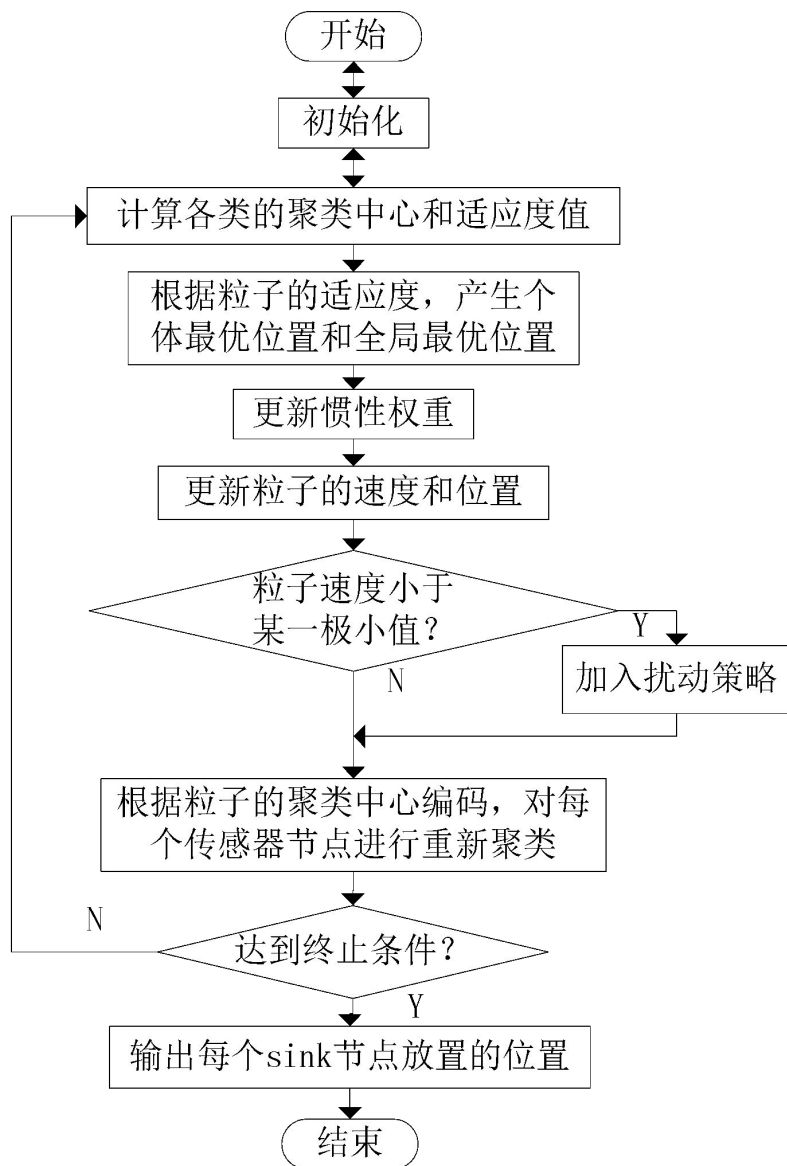


图 4.1 算法流程图

## 4.4 仿真结果

为了分析和验证本文中的改进粒子群聚类的多 sink 节点部署方法，对本文中的算法在 Matlab 平台上进行仿真验证。

仿真参数设置如下：在  $600m \times 600m$  网络区域内随机部署 400 个传感器节点，

sink 节点部署个数为  $K$ ，学习因子  $c_1 = c_2 = 1.2$ 。

#### 4.4.1 多 sink 节点部署结果

当在整个网络区域内部署 5 个 sink 节点时，利用本文中的改进粒子群聚类算法 (IPSCO) 部署多 sink 节点的布局图如图 4.2 所示，IPSCO 算法与标准的粒子群聚类算法(IPSO)的迭代结果对比如图 4.3 所示。

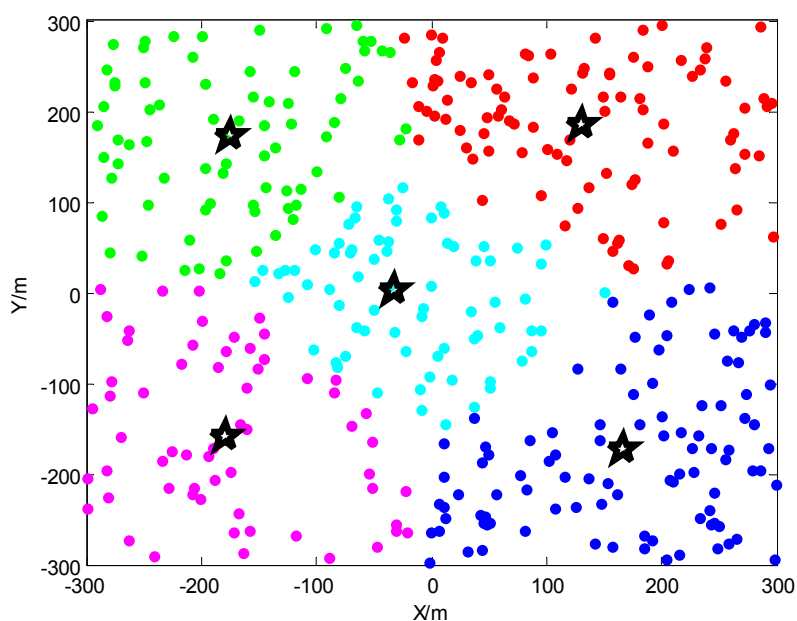


图 4.2 IPSCO 算法部署多 sink 节点的布局图

其中，图 4.2 中五角星表示 sink 节点，“\*”表示普通传感器节点，不同的颜色表示聚类的不同类别，即根据传感器节点的位置进行区域的划分结果。

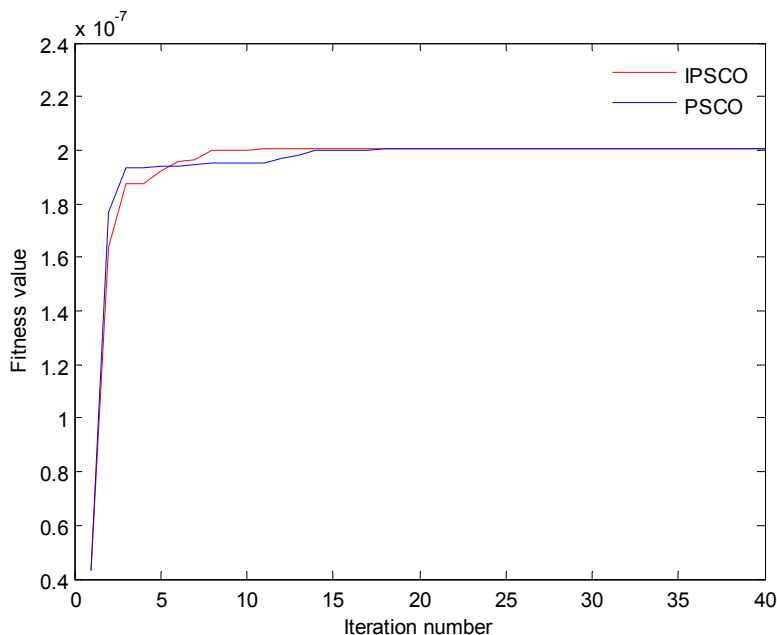


图 4.3 IPSCO 算法与 IPSO 聚类算法的迭代结果对比

由图 4.3 可知,本文中改进的粒子群聚类算法(IPSCO) 比标准的粒子群聚类算法(IPSO) 收敛速度要快,当算法陷入局部最优解时,IPSCO 算法能够较快的跳出,进而去寻找全局最优解。一方面可能是因为本文中改进了粒子群聚类算法的惯性权重系数,使算法可以更好的根据实际情况调整粒子飞行的整体权重,加快了收敛速度;另一方面可能是因为本文中对算法添加了扰动策略,当算法陷入局部最优解时,能够使算法更快的跳出局部最优解,尽快找到全局最优解。

#### 4.4.2 不同部署算法网络寿命比较

对本文中的改进的粒子群聚类算法(IPSCO) 与 RDF 算法<sup>[19]</sup>和随机部署 sink 节点的网络生命周期在 Matlab 平台上进行多次仿真,按照 sink 节点数目从 1 变化到 10,不同部署算法的网络生命周期对比结果如图 4.4 所示。图 4.4 是以网络中传感器节点死亡 30%的数量作为整个网络的生命周期。

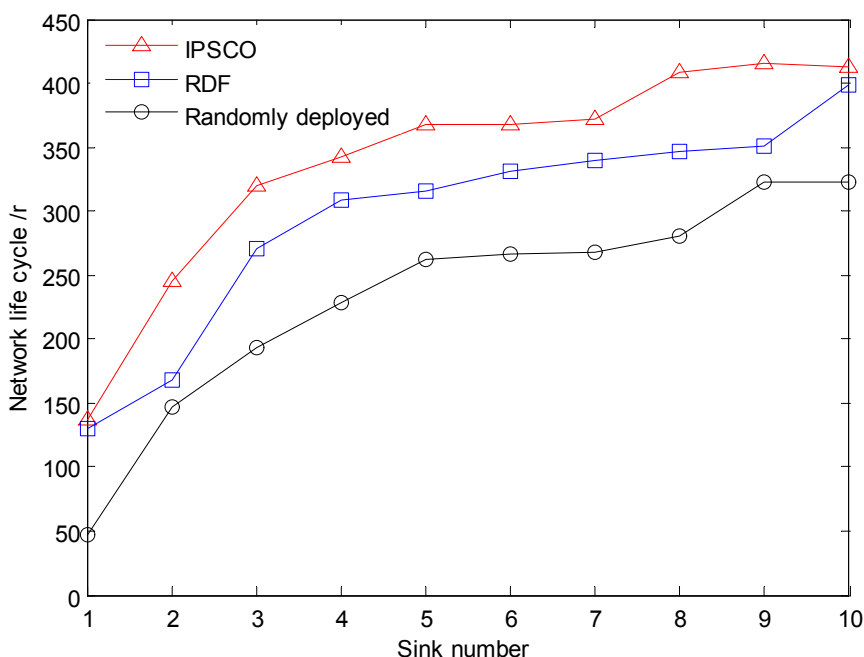


图 4.4 不同部署算法的网络生命周期对比

由图 4.4 可以看出，本文中的 IPSCO 算法的网络生命周期长于 RDF 算法和随机部署算法，RDF 算法的网络生命周期长于随机部署算法。从该图可以看出，部署的 sink 节点越多，网络的生命周期越长，当 sink 节点数目大于 3 时，随着 sink 节点数目的增加，IPSCO 算法的网络的生命周期没有很大提升，考虑到部署 sink 节点的代价，可以得出该网络中部署的最佳的 sink 节点数目为 3。

## 4.6 小 结

本章提出了一种基于改进粒子群聚类的多 sink 部署算法，该算法主要是针对大规模的无线传感器网络，通过在网络中部署多个 sink 节点，将大规模的网络分为较小的子网。该算法主要是根据传感器节点的位置信息进行聚类，然后将 sink 节点部署在每一类的中心。仿真实验验证了该多 sink 部署算法具有良好的效果。

在农业大田监测应用中，我们可以根据不同区域农作物的类别和传感器位置信息进行聚类，在不同的作物监测区域部署不同的 sink 节点，也可以在种植同一作物的大范围区域内部署多个 sink 节点，将大规模的网络划分为多个较小的子网，从而解决“能量空洞”问题，最大限度地提高网络的生命周期。我们还可以考虑更多的因素，对多种因素进行聚类分析，将相似程度高的划分为一类，然后将 sink 节点部署在这一类别的中心，这对农业物联网中分类监测提供了良好的思路。

## 第五章 带容错机制的多 sink 分簇路由算法

### 5.1 引言

在无线传感器网络中,部署多个 sink 节点能够提高网络的可靠性,当某个 sink 节点出现故障时,还有其他几个 sink 节点可以替代该 sink 节点的工作,从而保证网络的可靠运行。

本章主要针对无线传感器网络中,某一个 sink 节点出现故障而失效的情况,提出一种带容错机制的多 sink 分簇路由算法,来保证网络的正常运行。该算法采用多路径路由的容错机制,创建从源节点到不同 sink 节点的两条路径,到本子网区域的 sink 节点的最优的路径为主路由,到其他 sink 节点的最优的路径作为备选路由路径。在正常情况下,采用主路由来传输数据,当某个 sink 节点失效时,激活备选路由,采用备选路由来进行传输数据。

### 5.2 容错路由介绍

在物联网的实际应用中,由于环境改变、通信链路断裂、sink 节点负荷过重等不可预知事件,可能会造成 sink 节点失效。如果在单 sink 无线传感器网络中,当 sink 节点失效,会引起网络瘫痪,但在多 sink 无线传感器网络中,当某个 sink 节点失效后,还有其他几个 sink 节点可以替代该 sink 节点的工作,从而保证网络的可靠运行。

在物联网的应用中,为了应对网络中不可预知的情况,保证网络信息能够有效传输和网络正常运行,相关的研究人员提出采用冗余机制来提高数据传输的成功率。通过建立多路由路径,使得从源节点到 sink 节点之间有多条路径可以完成数据包的多跳转发,或者从一个源节点到不同的 sink 节点有不同路径完成数据包的多跳转发。现有的多路径路由技术主要有以下几类:对单路径路由的扩展、多路径并行传输和机会路由。

1) 基于单路径扩展的多路径路由机制。它是在路由发现时记录多条路径作为当前路径的备份路由路径<sup>[80]</sup>。当活动的那条路由路径失效后,从备选的多条路由路径中选择一条来完成数据传输工作。

2) 多路径并行传输的多路径路由机制。它是预先选择多条不相交的路由路径,然后综合考虑链路资源、跳数、延迟等多种因素,将需要传输的数据分散到

预先确定好的路径上。在发送数据之前，数据源可以通过在原数据中加入冗余数据来提高数据传输的可靠性。该路由机制的主要缺点是需要预测全局拓扑信息并且会消耗更多的能量<sup>[81-83]</sup>。

3) 机会路由是一种随机性多路径传输机制，它是基于概率性无线信道模型，利用离源节点不同距离的中间节点以不同概率来侦听来自源节点的数据包，通过中间节点来减少消息转发的次数，从而降低消息传输延时。

多路径路由机制<sup>[25]</sup>是一种常用的容错路由方案。该方法通过构建一定数量的与原路径不相交的备份路由路径<sup>[82,84]</sup>，来增加冗余，一旦原路径出现故障，即可启用备选路由路径。因为备份路径与原路径不相交，所以原路径上的某个节点失效不会影响备份路径的正常工作。在多 sink 无线传感器网络中，从源节点到不同 sink 节点分别构建路由路径，选择一条最优的路由路径将数据包从源节点传输到 sink 节点，当某个 sink 节点失效时，立即启用其它路由路径，将数据包从源节点传输到其他 sink 节点。当前更多研究集中在多路径路由机制的改进上。预留多条备份路径，当活动的路由路径失效时，启用备份路径，新的路径按需产生并替代失效路由路径<sup>[85]</sup>，以维持备份路径数量不变。

### 5.3 系统模型

在无线传感器网络监测区域内部署众多传感器节点和多个 sink 节点，传感器节点负责感知环境的信息，多个 sink 节点负责接收传感器节点传输过来的监测数据。传感器节点自组织成簇，将采集的数据按照 TDMA 时隙依次传输给簇头节点，簇头节点接收数据并进行数据融合后将数据包通过多跳转发的方式转发给 sink 节点，因为在网络中部署了多个 sink 节点，因此将数据包传送给任意一个 sink 节点即可。网络系统模型图如图 5.1 所示，假设整个网络划分为 3 个子网区域，每个传感器节点都具有位置感知能力，每个 sink 节点负责接收一个子网区域内的监测数据，当 sink 1 节点发生故障而失效后，则子网区域 1 内的簇头节点无法将本簇采集的数据传输到 sink 1 节点了，需要将数据包传输给其他相邻区域的 sink 节点，在图 5.1 中，sink 1 节点失效后，区域 1 内的簇头节点将数据包转发到了 sink 3 节点上。



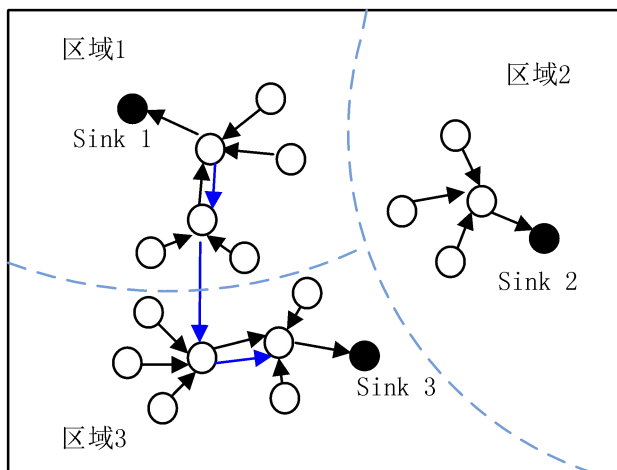


图 5.1 系统整体模型

## 5.4 算法思想

针对多 sink 无线传感器网络中出现意外变故而导致的某个 sink 节点失效情况, 提出带容错机制的路由算法, 当网络中某个 sink 节点失效时, 使网络能够进行正常的数据传输。该算法首先利用第四章中的多 sink 部署算法来将网络划分为若干个子网, 每个 sink 节点负责一个子网区域, 然后利用粒子群聚类算法建立网络拓扑结构, 然后采用多路径路由容错机制, 建立多条到不同 sink 节点的路由路径, 在正常情况下, 采用到本子网区域 sink 节点的最优的路由路径来传输数据, 当网络中某个 sink 节点失效时, 采用备选路由路径将数据包传输给其他 sink 节点。

首先, 利用改进的粒子群聚类算法对多个 sink 节点进行部署, 根据传感器节点的位置因素将一个大规模的网络分为若干个子网, 每个 sink 节点负责收集一个子网中传感器节点采集的数据, 然后将 sink 节点部署在各个子网区域的中心位置。具体部署方法见第四章。

然后, 在每个子网区域内再次利用粒子群聚类算法, 对传感器节点进行分簇。这样, 每个子网区域内传感器节点就组成多个簇, 每个簇的簇头负责收集本簇内传感器成员节点采集的数据。

再次, 为解决 sink 节点失效情况下的网络路由容错问题, 采用多路由数据重传的容错方式。在每个子网区域中, 每个簇头对应的目的 sink 节点即为本子网区域的 sink 节点, 在簇头节点与其目的 sink 节点间建立路由, 通过定义路由路径评价函数, 综合考虑路径上的能量消耗、路径上的最小剩余能量和路径上数据包的传输跳数等因素, 选择综合指标最佳的那条路由路径作为为主路由。另外, 为了应对 sink 节点出现故障的情况, 建立一条备选路由路径, 选择到另一个 sink 节点的综合指标最好的路由路径作为备选路由路径。当一个 sink 节点失效后, 中间节

点将所传输的数据包传回至源节点，删除目的节点为该 sink 的路由路径，立即启用备选路由，并向邻居广播 sink 节点失效的消息，当簇头节点接收到该消息后，立即查看自己的目标 sink 节点是不是该失效的 sink 节点，若是，则立即启动备选路由路径。

## 5.5 算法步骤及仿真结果

### 5.5.1 利用改进的粒子群聚类算法实现多 sink 节点部署

参照第 4 章中的多 sink 部署策略，确定该网络区域内需要部署的最佳 sink 节点数和 sink 节点部署的位置。假设网络中需要部署 sink 节点的最佳数目为 5，网络中随机部署的传感器节点数为 400，网络区域为  $600m \times 600m$ ，将整个网络划分为 5 个子网区域，然后对 sink 节点进行部署，每个 sink 节点负责收集一个子网分区中传感器节点采集的数据。sink 节点的部署结果如图 5.2 所示：

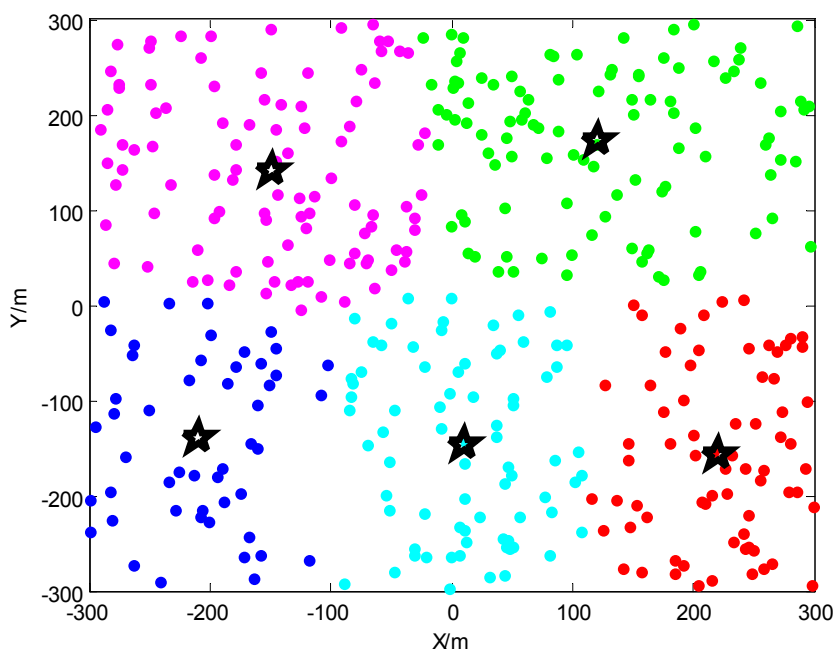


图 5.2 多 sink 节点放置图

其中，五角星表示 sink 节点，“\*”表示普通传感器节点，传感器节点不同的颜色表示不同的子网分区，每个子网内对应唯一一个 sink 节点。可知，该网络区域内部署了 5 个 sink 节点。

### 5.5.2 多 sink 网络分区内成簇

在分簇无线传感器网络中，普通传感器节点将数据包传输给对应的簇头节点，

簇头节点通过多跳路由将数据包传输给目标 sink 节点。通常情况下，首先是簇内数据传输，普通传感器节点将采集的数据发送给簇头节点，簇头节点接收到本簇所有成员节点采集的数据后，进行一定的数据融合。然后是簇间数据传输，簇头节点将接收的簇内数据进行融合后通过多跳转发传输给目的 sink 点。

由于簇头节点在整轮的数据收发过程中，始终保持活跃的状态，所以簇头的能耗相对比较大，因此节点当选一段时间的簇头之后，需要重新进行簇头选举。当簇头接收到本簇成员节点发送过来的数据之后，进行一定的数据融合，去除冗余数据以减少数据传输能耗，然后将数据包传输给更靠近 sink 的簇头节点，通过数据转发，最终将数据包传输到目的 sink 节点。在每一轮簇间传输完成后，簇头更新自己的剩余能量和当前整个簇的平均剩余能量，然后广播告知所有簇内成员当前簇的平均剩余能量，簇内节点接收到此消息后，将其保存，等待下一轮的开始。如果在下一轮中，簇头节点没有发生改变，那么继续按照原来的 TDMA 时隙表进行数据传输；如果簇头发生了改变，则旧簇头将上一轮中使用的 TDMA 时隙表发送给新簇头，然后新簇头将时隙表中上一轮中自身对应的时隙分配给旧簇头，即将上一轮中旧簇头的角色赋给新簇头，这样在一个簇中只需要进行一对节点进行角色互换，从而能量开销和计算开销。

在每个 sink 负责的子网区域内，利用粒子群聚类算法对该区域内的传感器节点进行分簇，选择离聚类中心较近的并且剩余能量相对较高的节点作为簇头节点。

在一个簇内，簇头选举公式为：

$$\max(\omega_1 \frac{E}{E0} + \omega_2 \frac{d_{avertocen}}{d_i}) \quad (5-1)$$

式 (5-1) 中， $E$  表示传感器节点的当前剩余能量， $E0$  表示传感器节点的初始能量，因此， $E/E0$  表示传感器节点的剩余能量级， $d_{avertocen}$  表示本簇内所有传感器节点到簇中心的距离的平均值， $d_i$  表示传感器到簇中心的距离， $\omega_1$  和  $\omega_2$  是权重系数。在选择簇头节点时，选择离簇中心近的并且剩余级能量高的节点当选簇头。

利用粒子群聚类算法对每个区域内的传感器节点进行分簇，分簇结果如图 5.3 所示：

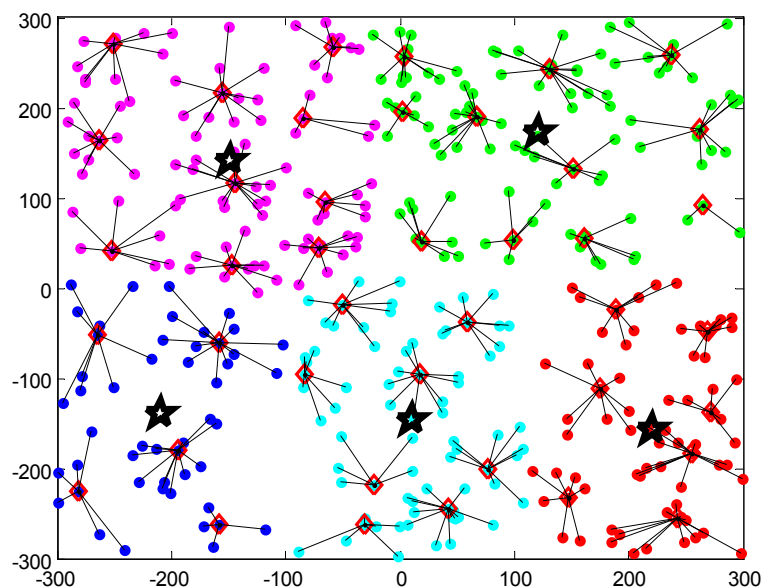


图 5.3 多 sink 网络分区中传感器节点分簇拓扑图

其中，五角星表示 sink 节点，“\*”表示普通传感器节点，传感器节点不同的颜色表示不同的分区，每个分区内对应唯一一个 sink 节点。在每个分区内，菱形表示簇头节点，可以看出网络在每个分区内已经完成分簇，而且每个簇的簇头基本位于本簇的中心。

### 5.5.3 多 sink 网络中带容错机制的路由算法

在无线传感器网络中，分簇完成以后，接下来就是路由路径的建立。每个簇内普通传感器节点只需要在特定的 TDMA 时隙内将采集的数据包发送给对应的簇头节点即可。而簇头节点要按照簇间多路由路径来完成簇间数据包的转发。在簇间数据传输中，由于网络的监测范围一般比较大，簇头节点分布在较为广阔的区域中，因此不同簇头所在的位置的网络实时情况可能相差较大。例如在数据发生异常的地方，由于数据采集频率会大大提高，因此数据量也会增加，进而导致节点缓存队列增长，增大了数据包丢失率。在多 sink 无线传感器网络簇间路由阶段，由于有多个 sink 节点作为信息接收点，并且网络各个部分的实时情况不完全一致。因此，在设计多 sink 无线传感器网络簇间路由算法时，引入簇间多跳机制来解决大规模网络对长距离通信的要求，簇头把融合后的数据通过簇间多跳转发的方式将数据包传输至目的 sink 节点。

建立多路由路径的主要步骤如下：

(1) 在每个子网区域内，均有一个 sink 节点负责收集本子网区域内传感器节点采集的数据，则该子网内所有的簇头节点的主路由的目的 sink 节点即为该 sink 节点。在簇头节点与其目的 sink 节点间建立路由，通过定义路由路径评价函数（见公式 3-11），综合考虑路径上的能量消耗、路径上的最小剩余能量和路径上数据包的传输跳数等因素，选择综合指标最佳的那条路由路径作为为主路由。

(2) 为了应对 sink 节点出现故障的情况，建立一条备选路由路径。首先，确定备选目的 sink 节点，簇头节点在其他子网区域的 sink 节点中选择离自身位置最近的 sink 节点作为备选目的 sink 节点。然后，确定备选路由路径，簇头节点在自身邻节点集合中选择到备选目的 sink 节点近的簇头节点作为下一跳节点的集合，然后通过定义路由路径评价函数（见公式 3-11），综合考虑路径上的能量消耗、路径上的最小剩余能量和路径上数据包的传输跳数等因素，选择综合指标最佳的那条路由路径作为备选路由路径。当负责该区域的 sink 节点失效时，触发一个信号，通知本区域内的所有传感器节点，节点接收到该消息后，中间节点将所传输的数据包传回至源节点，删除目的节点为该 sink 的路由路径，并向邻居广播 sink 节点失效的消息，当簇头节点接收到该消息后，立即查看自己的目标 sink 节点是否该失效 sink 节点，若是，则立即启动备选路由路径。

图 5.4 为多路径路由过程图，由图中可以看出，由源节点 P 到可以产生一条到 sink 1 节点的主路由路径和一条到 sink 2 节点的备选路由路径。

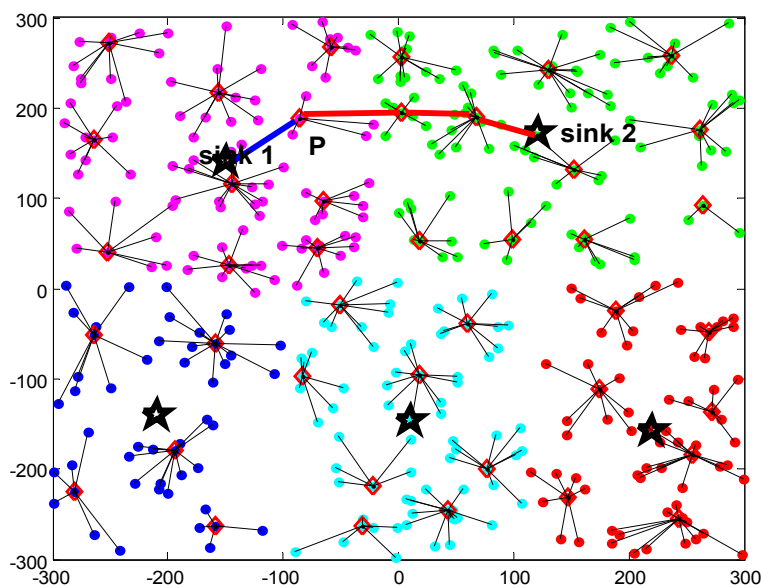


图 5.4 多路径路由过程图

图 5.4 中是从源节点 P 到 sink 节点的多路径路由过程图，从图中可以看出从源节点 P 出发，生成两条路由路径，蓝色的路由路径为主路由，其目的 sink 节点为 sink 1，红色的路由路径为备选路由，其对应的 sink 节点为 sink 2。当 sink 1 节点失效时，启用备选路由路径，将数据包从源节点 P 向 sink 2 节点传输。

图 5.5 为加入容错机制的路由算法与未加容错机制的路由算法的数据包接收率的对比结果。数据包接收率是指 sink 接收的数据包和传感器节点产生的数据包之间的比率。接收率越高，表示网络的可靠性越高。

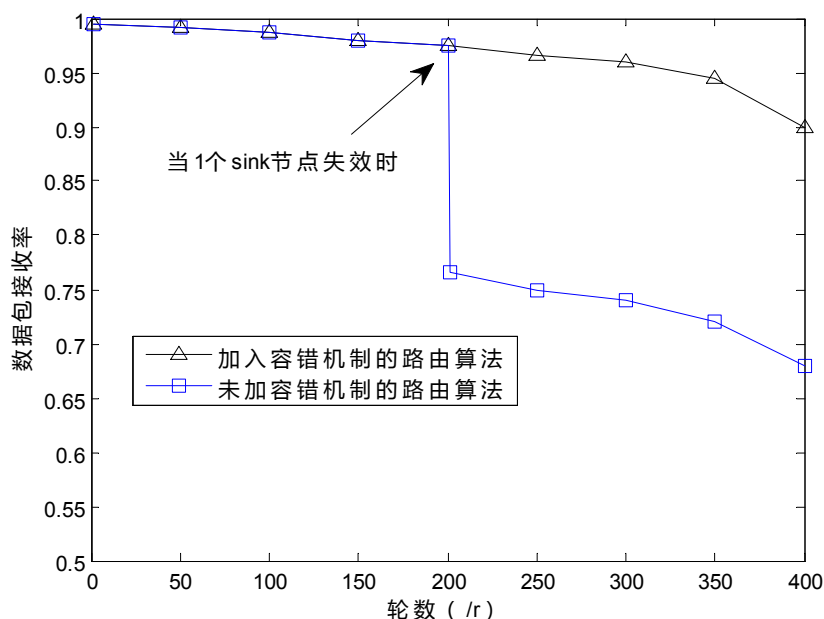


图 5.5 数据包接收率对比

由图 5.5 可以看出，当网络运行至 200 轮左右的时候，一个 sink 出现故障而失效，这时未加容错机制的路由算法数据包接收率明显降低，而加入容错机制的路由算法的数据包接收率变化不大。这是因为，在网络中，当一个 sink 节点失效后，在未加入容错机制的路由算法中，失效 sink 所负责的子网区域内的传感器节点采集的数据包无法发送到该 sink 节点，而使数据包接收率骤降；而在加入容错机制的路由算法中，失效 sink 所负责的区域内的传感器节点采集的数据包通过备选路由路径转发到其他 sink 节点，因而数据包接收率并没有发生很大变化。

## 5.6 小 结

本章针对多 sink 网络中某个 sink 节点失效的情况，提出一个带容错机制的路由算法。



首先, 根据第四章的基于改进粒子群聚类的多 sink 部署算法, 进行子网的划分以及多 sink 节点的部署。然后, 再次利用粒子群聚类算法, 对每个区域内的传感器节点进行聚类, 每一个聚类结果即为每一个簇, 选择离聚类中心较近的并且剩余能量相对较高的节点作为簇头节点。在簇间路由过程中, 按照第三章中的路由路径综合评价函数, 综合考虑路径上的能量消耗、路径上的最小剩余能量和路径上数据包的传输跳数等因素, 选择将数据包传输到本子网区域的 sink 节点的最优路径作为主路由, 另外选出到其他 sink 节点的最优路径作为备选路由路径。一旦某个 sink 节点失效时, 立即启动备选路由路径。仿真实验表明, 当某个 sink 节点失效时, 该路由算法能够很快启用备选路由路径, 使该传感器网络的数据进行正常传输。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 总结

本文对无线传感器网络的多 sink 节点部署策略和多 sink 无线路由技术及进行研究。基于多 sink 的网络结构, 在多 sink 节点部署的过程中, 将粒子群算法进行改进并与  $K$ -means 聚类算法进行结合, 形成改进的粒子群聚类算法, 用于解决多 sink 节点的部署问题。在多 sink 路由技术研究中, 本文采用分簇路由算法, 在簇间数据传输过程中采用多跳的方式, 通过路由路径评价函数, 确定由源节点到 sink 节点的最优路径, 该条路径的目的节点即为选中的最佳 sink 节点。针对某个 sink 节点失效情况下的容错路由, 本文采用多路径路由方法, 在每个簇头节点的路由表中存放到本子网区域 sink 节点的主路由和到其他 sink 节点的备选路由, 当某个 sink 节点失效时, 立即启动备选路由。本文具体所做的研究内容:

(1) 对无线传感器网络分簇路由算法进行深入研究, 融合了多 sink 网络架构的思想, 提出一种基于能量均衡的多 sink 分簇路由算法 (EBMCR)。在簇头选取时, 选择剩余能量高的节点来竞争簇头, 并根据节点到 sink 的距离, 构造大小不等的簇, 这样靠近 sink 节点的簇的规模相对较小, 使这些簇头为数据包的多跳转发预留能量; 在簇间数据传输过程中, 引入多跳传输机制, 综合考虑路径传输能量消耗、路径最小剩余能量和节点到多个 sink 的跳数等因素, 对多条路由路径进行评估, 选择一条能够将数据包传输到某个 sink 节点的最优路径。该算法可均衡网络能耗, 提高网络性能, 从而延长网络的生命周期。

(2) 在单 sink 无线传感器网络中, sink 节点的邻居传感器节点由于需要大量转发数据包导致能量消耗过快, 容易造成“能量空洞”问题, 在网络中部署多个 sink 节点是一种解决“能量空洞”问题的有效策略。本文提出一种基于改进粒子群聚类的多 sink 节点部署策略。该策略首先根据设定的部署的 sink 节点数目, 将整个区域内的传感器节点根据节点间的距离特征划分为  $K$  类, 使得总的类内离散度达到最小, 然后计算出各类的聚类中心作为各 sink 节点部署的最佳位置。

(3) 对多 sink 无线传感器网络中某个 sink 节点失效的情况, 提出一个带容错机制的路由算法。首先, 根据第四章的基于改进粒子群聚类的多 sink 部署算法, 进行子网的划分以及多 sink 节点的部署。然后, 再次利用粒子群聚类算法, 对每个区域内的传感器节点进行聚类, 每一个聚类结果即为每一个簇, 选择离聚类中心较近的并且剩余能量相对较高的节点作为簇头节点。在簇间路由过程中, 按照

第三章中的路由路径综合评价函数,综合考虑路径上的能量消耗、路径上的最小剩余能量和路径上数据包的传输跳数等因素,选择将数据包传输到本子网区域的 sink 节点的最优路径作为主路由,另外选出到其他 sink 节点的最优路径作为备选路由路径。一旦某个 sink 节点失效时,立即启动备选路由路径。仿真实验表明,当某个 sink 节点失效时,该路由算法能够很快启用备选路由路径,使该传感器网络的数据进行正常传输。

通过本项目的研究,实现了多 sink 无线传感器网络系统架构的整体设计,解决了包括多 sink 节点部署、能量均衡的多 sink 路由和带容错机制的多 sink 路由等关键问题,为多 sink 无线传感器网络的研究提供了理论基础。

## 6.2 展 望

目前,对多 sink 无线传感器网络的研究还相对比较少,多 sink 路由技术的发展还不是很成熟,但随着网络规模的增大以及研究人员的不断深入研究,多 sink 结构的无线传感器网络将不断会有新的发展。网络中的功率控制、流量控制、负载均衡是无线传感器网络路由的一大挑战,另外,在多 sink 网络中还比较关注网络规模与 sink 节点数据的最优化。多 sink 网络路由技术的发展趋势包括:

(1) 减少网络通信量。由于无线传感器网络中传感器节点的能量有限,因此在路由的过程中需要尽量减少数据通信过程的能耗。在多 sink 无线传感器网络中,普通传感器节点之间和多个 sink 节点之间需要进行通信,如何有限减少通信量非常重要。数据融合技术是减少网络通信量的一种有效方法。

(2) 确保网络通信负载均衡。均衡网络节点的能量消耗,从而延长网络的生存期,是多 sink 网络需要解决的关键问题。由于网络中部署了多个 sink 节点,因此传感器节点到 sink 节点之间有多条路径,使各个节点分担了数据传输任务。相对于单 sink 的无线传感器网络中的多路径路由方法,多 sink 网络架构有效缓解了单 sink 节点邻近节点的高负载的压力,有效解决了“能量空洞”的问题,并且多 sink 网络中多路径组网也更加灵活。

(3) 具有容错性的路由协议。由于无线传感器网络中的节点容易发生故障,如何在发生故障时能够尽快恢复路由,保证数据的有效传输,也是需要考虑的问题。路由协议需要具有一定的安全机制。现有的无线传感器网络路由协议很少考虑网络安全问题,但有一些特定的应用中必须要考虑。由于传感器节点本身能量和计算能力均有限,每个传感器节点不可能完成复杂的数据加解密的运算,因此,需要采用多 sink 节点来协调处理的网络安全机制。

在多 sink 网络结构中,通过多个 sink 节点之间相互协作,可以提高网络的稳

定性，均衡网络能耗，从而延长网络的生命周期。在大规模无线传感器网络中部署多个 sink 节点，将网络分成若干个子网，是无线传感器网络的一大研究趋势。

## 参考文献

- [1] J. I. Agbinya, Framework for wide area networking of inductive Internet of things[J], *Electronics letters*, 2011, 47(21): 1199-1201.
- [2] F. Michahelles, S. Karpischek, A. Schmidt, What Can the Internet of Things Do for the Citizen? Workshop at Pervasive 2010[J], *IEEE Pervasive Computing*, 2010, 9(4): 102-104.
- [3] 钱志鸿, 王义君, 面向物联网的无线传感器网络综述[J], 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215-227.
- [4] L. M. Wang, F. Li, and Y. Qin, Resilient method for recovering coverage holes of wireless sensor networks by using mobile nodes[J], *Journal of China Institute of Communications*, 2011, 32(4): 1-8.
- [5] S. Misra, A. Jain, Policy controlled self-configuration in unattended wireless sensor networks[J], *Journal of Network and Computer Applications*, 2011, 34(5): 1530-1544.
- [6] 唐珂, 国外农业物联网技术发展及对我国的启示[J], 中国科学院院刊, 2013, 06: 700-707.
- [7] 周雅琴, 谭定忠, 无线传感器网络应用及研究现状[J], 传感器世界, 2009 (5): 35-40.
- [8] 赵娜, 无线传感器网络研究现状及应用[J], 电脑与电信, 2015 (4): 47-49.
- [9] J. H. Cui, Building Autonomous Underwater Sensor Networks, Under Water Sensor Network (UWSN) Lab, <http://uwsn.engr.uconn.edu>.
- [10] Y. Chen, E. Chan, S. Han, Energy efficient multi-path routing in large scale sensor networks with multiple sink nodes[C]//Proc. of the 6th International Workshop on Advanced Parallel Processing Techniques. Berlin: Springer, 2005: 390-399.
- [11] M. Meng, X. L. Wu, H. Xu, Energy efficient routing in multiple sink sensor networks[C]//*Computational Science and its Applications*, IEEE, 2007: 561-566.
- [12] H. Yoo, M. Shim, D. Kim, A scalable multi-sink gradient-based routing protocol for traffic load balancing[J], *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011(1): 1-16.
- [13] Z. Y. Xu, Y. Yin, J. Wang, An Energy-efficient clustering algorithm in wireless sensor networks with multiple sinks[J], *Int. J. Control and Automation*, 2012, 5(4): 131-142.

- [14] Q. Gu, H. Zuo, R. Su, A rank table based routing method for multi-Sink zigbee wireless sensor network[J], *Journal of Communications*, 2013, 8(8):853-859.
- [15] H. Lin, H. Uster, Exact and heuristic algorithms for data-gathering cluster-based wireless sensor network design problem[J], *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2014, 22(3): 903-916.
- [16] C. Boler, S. Yenduri, Resilient multi Sink networks using simplistic hop based routing[C]// 11th International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG), IEEE, 2014: 192-195.
- [17] O. Iova, F. Theoleyre, T. Noel, Using multiparent routing in RPL to increase the stability and the lifetime of the network[J], *Ad Hoc Networks*, 2015, 29: 45-62.
- [18] Q. Wang, K. Xu, G. Takahara, Transactions papers-device placement for heterogeneous wireless sensor networks: Minimum cost with lifetime constraints[J], *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(7): 2444-2453.
- [19] Q. Liu, Y. M. Mao, Algorithm of multi-sink placement in Wireless Sensor Networks with random distribution[J], *Computer Engineering and Applications*, 2013, 22: 022.
- [20] J. Q. Xu, D. Bai, D. Luo, The Application of Genetic Algorithm to Deployment of Multiple Sink Nodes in WSNs[J], *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2008, 6: 013.
- [21] Y. Pan, Y. Li, J. K. Li, Multiple Sink Node Placement Problems in Wireless Sensor Networks[J], *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47: 92-95.
- [22] H. Safa, W. El-Hajj, H. Zoubian, Particle swarm optimization based approach to solve the multiple sink placement problem in WSNs[C]//Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012: 5445-5450.
- [23] D. R. Dandekar, P. R. Deshmukh, Energy balancing multiple sink optimal deployment in multi-hop Wireless Sensor Networks[C]//Advance Computing Conference (IACC), 2013 IEEE 3rd International. IEEE, 2013: 408-412.
- [24] N. Achir, P. Muhlethaler, Optimal sinks deployment and packet scheduling for Wireless Sensor Networks[C]//Wireless Days (WD), 2014 IFIP. IEEE, 2014: 1-6.
- [25] Y. Jing and L. Wang, EECCR: An energy-efficient m-coverage and n-connectivity routing algorithm under border effects in heterogeneous sensor networks[J], *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 2009, 58(3):1429-1442.
- [26] H. Hassanein, J. Luo, Reliable energy aware routing in wireless sensor networks[C]// Second IEEE Workshop on Dependability and Security in Sensor



- Networks and Systems (DSSNS 2006), IEEE, 2006: 54-64.
- [27] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks[J], *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2001, 5(4): 11-25.
- [28] H. Alwan, A. Agarwal, Reliable Fault-Tolerant Multipath routing protocol for wireless sensor networks[C]//25th Biennial Symposium on Communications (QBSC2010). IEEE, 2010:323-326.
- [29] I. Banerjee, P. Chanak, H. Rahaman, MFTR: Multipath Fault Tolerant Routing in Wireless Sensor Networks[M]//*Computer Networks and Intelligent Computing*, Springer Berlin Heidelberg, 2011: 410-415.
- [30] H. Nabizadeh, M. Abbaspour, IFRP: An Intrusion/Fault tolerant Routing Protocol for increasing resiliency and reliability in wireless sensor networks[C]//International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (iCOST). IEEE, 2011: 24-29.
- [31] Z. Che-Aron, W. F. M. Al-Khateeb, F. Anwar, An enhancement of fault-tolerant routing protocol for wireless sensor network[C]//International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), IEEE, 2010: 1-3.
- [32] C. Kavitha, K. V. Viswanatha, An Energy Efficient Fault Tolerant Multipath (EEFTM) Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//IEEE International Advance Computing Conference(IACC 2009), IEEE, 2009: 746-751.
- [33] M. Gregoire, I. Koren, An adaptive algorithm for fault tolerant re-routing in wireless sensor networks[C]//Fifth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops(PerCom Workshops' 07), IEEE, 2007: 542-547.
- [34] 龚君丽, 基于区域划分的无线传感器网络路由算法研究[D], 湖南大学,2011.
- [35] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. A Survey on Sensor Networks [J], *IEEE Communications Magazine*, 2002, 38(4): 393-422.
- [36] J. Kahn, R. Katz, K. Pister, Next century challenges: mobile networking for smart dust [C] // Proceedings of the 1999 Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 1999: 271-278.
- [37] 刘拥民,蒋新华,年晓红, 可能的 WSN 协议分层模型[J], 计算机工程与应用, 2008, 44(18):91-93.
- [38] 孙利民,李建中,陈渝等, 无线传感器网络[M], 北京:清华大学出版社, 2005:3-10.
- [39] T. T. Yuan, J. D. Xu, J. Z. Zhang, Optimal Routing in Multi-sink Sensor Networks

- based on Fuzzy Comprehensive Evaluation[C]//System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization (ICSEM), 2011 International Conference on. IEEE, 2011, 2: 250-254.
- [40] C. Y. Chong, S. P. Kumar, Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges[J], *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(8): 1247-1256.
- [41] 韩鹏,吴华锋,任久春,高传善, 多 sink 动态传感器网络主动式分层定位方法[J], *通信学报*, 2007, 28(11): 44-50.
- [42] 吴中博,樊小泊,陈红, 基于能量水平的多 sink 节点传感器网络路由算法[J], *计算机研究与发展*, 2008,45(1): 41-46.
- [43] K. Romer, Distributed Mining of Spatio-Temporal Event Patterns in Sensor Networks[C]// In: Proc. of Workshop on Middleware for Sensor Networks. San Francisco: IEEE Computer Society, 2006.103-116.
- [44] 许毅, 无线传感器网络原理及方法[M], 第一版, 北京:清华大学出版社, 2012.25-50.
- [45] 周淑俐, 基于增强学习的多 sink 无线传感网路由机制研究[D], 南京:南京邮电大学, 2012.
- [46] W. B. Heinzelman, Application-specific protocol architectures for wireless networks[D], Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [47] C. R. Lin, M. Gerla, A distributed architecture for multimedia in dynamic wireless networks[C]//Global Telecommunications Conference, 1995. GLOBECOM'95., IEEE. IEEE, 1995, 2: 1468-1472.
- [48] 李成法, 陈贵海, 叶懋, 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J], *计算机学报*, 2007, 30(1): 27-36.
- [49] 祁飞, 刘胜全, 划分子网的无线传感器网络分簇算法[J], *计算机工程与应用*, 2009, 45(8): 97-100.
- [50] 冯立波, 李全, 张梅, 基于动态路由的 SPIN 路由协议改进[J], *大理学院学报: 综合版*, 2014, 13(12): 26-30.
- [51] M. Elhawary, Z. J. Haas, Energy-efficient protocol for cooperative networks[J], *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(2): 561-574.
- [52] S. Bhatti, J. Xu, M. Memon, Clustering and fault tolerance for target tracking using wireless sensor networks[J], *IET wireless sensor systems*, 2011, 1(2): 66-73.
- [53] Y. R. Tsai, Coverage-preserving routing protocols for randomly distributed wireless sensor networks[J], *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(4): 1240-1245.
- [54] O. Younis, S. Fahmy, HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering

- approach for ad hoc sensor networks[J], *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366-379.
- [55] S. D. Muruganathan, D. C. F. Ma, R. Bhasin, A centralized energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks[J], *Communications Magazine*, IEEE, 2005, 43(3): S8-13.
- [56] H. Xu, L. Huang, Y. Zhang, Energy-efficient cooperative data aggregation for wireless sensor networks[J], *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2010, 70(9): 953-961.
- [57] H. Liu, Z. L. Zhang, J. Srivastava, PWave: A multi-source multi-sink anycast routing framework for wireless sensor networks[M], *Springer Berlin Heidelberg*, 2007: 179-190.
- [58] L. Karim, N. Nasser, T. Sheltami, A fault-tolerant energy-efficient clustering protocol of a wireless sensor network [J], *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2014, 14(2) : 175-185.
- [59] D. S. Park, Fault tolerance and energy consumption scheme of a wireless sensor network[J], *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013.
- [60] R. R. Yin, B. Liu, Y. Q. Li, Adaptively fault-tolerant topology control algorithm for wireless sensor networks[J], *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2012, 19: 13-35.
- [61] Y. Li, L. Zhao, H. Liu, An Energy Efficient and Fault-tolerant Topology Control Algorithm of Wireless Sensor Networks [J], *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8(19): 7927-7935.
- [62] 张莉, 李金宝, 无线传感器网络中基于多路径的可靠路由协议研究[J], 计算机研究与发展, 2011, 48:171-175.
- [63] H. Alwan, A. Agarwal, A survey on fault tolerant routing techniques in wireless sensor networks[C]// Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM'09 IEEE, 2009: 366-371.
- [64] 陈拥军, 袁慎芳, 吴键, 无线传感器网络故障诊断与容错控制研究进展[J], 传感器与微系统, 2010, 29(1): 1-5.
- [65] H. C. Shih, J. H. Ho, B. Y. Liao, Fault node recovery algorithm for a wireless sensor network[J], *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(7): 2683-2689.
- [66] N. M. Hoang, V. N. Son, Disjoint and braided multipath routing for wireless sensor networks[C]// Int. Symposium on Electrical and Electronics Engineering. 2005.
- [67] 徐晨, 曹磊, 章国安, 顾金媛, 无线传感器网络多 sink 路由技术研究[J], 计算机应用研究, 2010, 03:816-823.

- [68] 吕红芳,张浩, 链首节点轮换的无线传感器网络路由算法研究[J], 电子测量与仪器学报, 2013,07:610-616.
- [69] 王林,赵绍英, 无线传感器网络 LEACH 路由协议的研究与改进[J], 计算机工程与应用, 2012,48(2):80-82.
- [70] 林元乖, 能量高效的无线传感器网络分簇路由算法研究[J], 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1529-1532.
- [71] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan, An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J], *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [72] Y. C. Kao, S. Y. Lee, Combining K-means and particle swarm optimization for dynamic data clustering problems [C] // Proc of IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009: 757-761.
- [73] 沈艳,余冬华,王昊雷, 粒子群 K-means 聚类算法的改进[J], 计算机工程与应用, 2014,21:125-128.
- [74] 纪震, 廖惠连, 吴青华, 粒子群算法及应用[M], 北京: 科学出版社, 2009.
- [75] 邹学玉, 曹阳, 刘徐迅, 基于离散粒子群的 WSN 分簇路由算法[J], 武汉大学学报, 2008, 54( 1) : 99—103.
- [76] 徐辉, 李石君, 一种整合粒子群优化和 K-均值的数据聚类算法[J], 山西大学学报, 2011(4): 518-523.
- [77] 刘志雄, 梁华, 粒子群算法中随机数参数的设置与实验分析[J], 控制理论与应用, 2010(11): 1489-1496.
- [78] 杨韬, 邵良杉, 采用改进的 k 均值聚类分析策略的粒子群算法[J], 计算机工程与应用, 2009,12:52-54.
- [79] D. W. Van der Merwe, A. P. Engelbrecht, Data clustering using particle swarm optimization[C]//Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on. IEEE, 2003, 1: 215-220.
- [80] K. Akkaya and M. Younis, A survey on routing Protocols for wireless sensor network[J], *Ad Hoc Network*, 2005,3(3):325-349.
- [81] H. Ammari and S. Das, Fault tolerance measures for large-scale wireless sensor networks[J], *ACM Trans. Autonomous and Adaptive Systems*, 2009,4(1):1-28.
- [82] X. Han and X. Cao, Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks[J], *IEEE Trans. Mobile Computing*, May, 2010,9(5): 643 — 656.
- [83] N. Nasser and Y.F. Chen, SEEM: Secure and energy-efficient multipath routing protocol for wireless sensor networks[J], *Computer Communications*, 2007, 30(11): 2401-2412.

- 
- [84] J. Choi and J. Hahn, A fault-tolerant adaptive node scheduling scheme for wireless sensor networks[J], *Journal of Information Science and Engineering*, 2009, 25(1): 273-287.
- [85] P. Djukic and S. Valaee, Reliable packet transmissions in multipath routed wireless networks[J], *IEEE Trans. Mobile Computing*, 2006, 5(5): 548-559.

## 致谢

光阴荏苒，日月如梭，两年半的硕士研究生学习和生活就要结束了。而今，值此论文完成之际，在此向我的导师以及在我硕士生涯中帮助过我的各位老师与师兄师姐们表达最衷心的感谢！

首先，衷心感谢我的导师——丁永生教授。感谢丁老师孜孜不倦的教诲和微不至的关怀。丁老师严谨治学的态度，卓越的学术造诣以及前瞻性的战略眼光给我树立了榜样。自从 2012 年底本科毕业设计开始，丁老师便是我的指导教师。丁老师的记忆超好，带了那么多的学生，却总能清晰的记得每个人在研究上的进展、创新或者遇到的问题。丁老师的思维非常快，并且总是能给我十分有力的点拨，当我面对一堆问题无从入手时，丁老师都能迅速地找到关键问题，并为我指明一个有意义的钻研方向。另外，丁老师最让人动容的，是他在百忙之余，对于学生的论文，总是非常细心的一一修改，对每个词、每句话都认真揣摩，提出十分宝贵的意见。丁老师善于引导我进行独立思考，使我完成因缺乏信心而自认为非常困难的任务，而我在这一过程中也得到了极大的锻炼，提高了自己发现问题与解决问题的能力。尽管身为院长非常忙碌，丁老师总是坚持听我们每周的学术研讨会，为我们提供宝贵的指导意见，引导我们进行有意义、有价值的创新研究。从丁老师身上，我总能学到很多在别处永远也学不到的东西，丁老师的学习精神和钻研精神，对于我今后的整个人生都有至关重要的影响，而他对所有学生的尽职尽责，更是我们每个人都万分感激和感恩的地方。

其次，还要感谢信息学院智能控制与网络智能研究所的郝矿荣教授以及姚光顺师兄。郝老师在我的研究生期间协助指导我的课题研究与论文研究，同样非常重视我的学术进步，在论文的选题、研究思路及论文写作方面，她都提出了很多宝贵的意见，让我获益良多。每周的实验室例会，她都从百忙之中抽出时间对我们的课题进行督导。她严谨的治学态度和条理清理的研究思路影响着我，让我对科研有了更深的认识。而姚光顺师兄在我进行论文研究时，在具体问题上给我很多指导，对我的论文提供了宝贵的修改意见，使我能够从新的视角去发现我所研究内容中的不足与创新。在此致以崇高的谢意！

再次，在我攻读硕士学位期间，智能系统与网络智能研究所的所有博士、硕士师兄师姐们，无论在学术上还是生活上都给我很多帮助，给我留下了实验室的美好回忆。在此，对实验室的所有同学们，一并致以诚挚的感谢！

最后，还要感谢远在家乡的父母。他们在我攻读硕士学位期间不断地从各方



面支持我，使我没有后顾之忧，在我苦闷时对家人我的开导也使我能够在任何环境下都乐观开朗，从而顺利完成学业并开展研究工作。

感谢这两年半以来陪伴过我的人，是你们和我分享着这两年半以来的欢声笑语，是你们的陪伴才让我的研究生生活变得更充实而有意义。谢谢大家！

李 芳

2016 年 1 月 4 日

## 附录：攻读硕士期间参加的项目及成果

### 1、攻读硕士期间参加的项目

- [1] 国家自然科学基金项目，面向服务智能协同的农业物联网动态自治与资源优化配置（61473078），2014.9~2016.03，参与。

### 2、攻读硕士期间发表的论文

- [1] 李芳, 丁永生, 郝矿荣, 姚光顺. 无线传感器网络能量均衡的多 sink 分簇路由算法[J], 计算机工程与应用, 录用.
- [2] **Fang Li**, Yongsheng Ding, Kuangrong Hao, Guangshun Yao. Multi-Sink Deployment Strategy for Wireless Sensor Networks based on Improved Particle Swarm Clustering Optimization Algorithm[J], Journal of Donghua University, 录用.