

智能传感技术丛书

Intelligent Monitoring Technology for
Complex Area of Three Dimension Sensor Networks

空间传感器网络

复杂区域智能监测技术

谭励 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

智能传感技术丛书

空间传感器网络 复杂区域智能监测技术

谭 励 著



机械工业出版社

本书面向复杂环境和三维空间无线传感器网络的部署问题,对平面有向传感器网络的部署与优化,以及空间无线传感器网络的部署与目标追踪技术进行研究。主要内容包括:感知角度与感知半径可变的节点感知模型;非均匀势场和复杂区域的节点部署模型;覆盖优先的部署算法、连通优先的部署算法和多中心部署算法等平面有向传感器网络部署算法;三维全向感知节点模型和三维有向感知节点模型;三维空间中任意曲面的部署模型、可移动目标模型、部署路径模型。此外,本书还介绍了基于虚拟力理论的不同类型覆盖算法,包括基于加权虚拟力算法,基于复杂路径的自主部署算法以及基于移动目标追踪的部署算法。

本书可作为高等院校物联网工程、电子工程、计算机和信息类专业的本科生、研究生的教学参考用书,也可供从事相关行业的研究人员和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间传感器网络复杂区域智能监测技术/谭励著. —北京:
机械工业出版社, 2018. 10
(智能传感技术丛书)
ISBN 978-7-111-60558-4

I. ①空… II. ①谭… III. ①无线电通信-传感器-智能
控制-研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 168311 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吕潇 责任编辑:吕潇

责任校对:陈越 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·9.25 印张·169 千字

0001—2500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-60558-4

定价:49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）作为物联网的基本组成部分，已经成为当下的研究热点之一。随着微机电系统技术、无线通信技术和数字电子技术的进步和日益完善，为建立低能耗、低成本的无线传感器网络提供了有利条件。无线传感器网络为日益增加的应用需求提供了足够的发展空间与有效的解决方案，例如基础设施的安全维护管理与监控、人体健康护理、环境监测、战场侦察、食品安全监控与追溯与智慧能源等领域。典型的无线传感器网络是由大量低成本、低功耗、包含多种传感器的节点组成，分布在特定的区域。传感器节点配备了传感器、嵌入式微处理器、射频收发器，不仅有感知功能，还有数据处理能力和通信能力。相比于传统的网络技术，无线传感器网络具有许多优势，但是在网络结构的设计、模型预算法等方面也存在很多挑战。无线传感器网络中的传感器节点一般采用电池提供能量，在许多应用中，更换电池或者给电池充电是非常困难甚至是不可能的。无线传感器网络节点需要高密度分布，节点的不可靠性较高，对功率、计算能力和内存容量都有限制。目前为止，在学术与工业领域已经有了很多关于无线传感器网络的研究。

本书重点关注的是无线传感器网络在面向复杂环境和三维空间无线传感器网络的部署问题。全书从内容结构上可以分为三部分，第1部分包括第1章和第2章，从全局的角度出发综述了无线传感器网络，介绍了无线传感器网络的特点、发展现状、面临的挑战以及评价指标。

第2部分包含第3~5章，重点对平面的有向传感器网络的部署与优化进行研究。

第3章针对现有的有向节点感知模型，分析了现有的有向节点感知模型的缺点，并且在此基础上设计了一种新的感知角度与感知半径可变的感知模型，节点通过调节自身的感知角度和感知半径的大小，从而达到提高整个覆盖区域覆盖率的目标。

第4章针对有向移动无线传感器网络提出了两种部署模型，分别为非均匀势场下的部署模型和复杂区域的节点部署模型。非均匀势场下的部署模型主要

利用非均匀势场特性解决监测区域内的非均匀部署问题；复杂区域的节点部署模型是通过改进原有的复杂区域的节点部署模型提高监测区域的覆盖率。

第5章重点介绍了几种面向平面的有向传感器网络的部署算法，分别是覆盖优先的部署算法、连通优先的部署算法和多中心部署算法，通过对不同的监测环境进行分析，提出不同的部署算法。

第3部分包含第6~8章，重点对空间无线传感器网络的部署与目标追踪技术进行研究。

第6章开始关注空间无线传感器网络的部署，重点介绍了两种三维节点感知模型，分别为三维全向感知模型和三维有向感知模型。

第7章针对三维空间内的无线传感器网络节点部署问题，研究了三种类型的空间部署模型，分别为在任意曲面的部署模型、可移动目标模型、部署路径模型并且在针对三中模型提出了不同的改进算法，能有效提高三维监测区域的覆盖率。

第8章针对三维空间内无线传感器网络自主部署问题，应用虚拟力相关理论提出了不同的类型覆盖问题的解决算法。基于加权虚拟力算法主要解决空间内区域覆盖问题，基于复杂路径的自主部署算法主要解决三维路径覆盖问题，基于移动目标追踪的部署算法主要解决三维空间内的目标追踪问题。

本书可作为高等院校物联网工程、电子工程、计算机和信息类专业的本科生、研究生的教学参考用书，也可供从事相关行业的研究人员和工程技术人员阅读参考，对于想了解无线传感器网络的人员来说也可以作为参考资料。

本书的写作受到国家自然科学基金（61702020）及其配套项目（PXM2018_014213_000033）和北京市自然科学基金（4172013）资助。写作完成离不开我的研究生所做的工作，他们是陈玉程、王云会、胡计鹏、杨朝玉、唐小江、董旭、王敏基等，在此表示感谢。

由于本书完成时间仓促，书中错误或者疏漏之处在所难免，望广大读者能够海涵，并对本书的错误和疏漏之处进行批评指正。

作者

目 录

前 言

第1部分 空间传感器网络技术发展现状	1
第1章 无线传感器网络简介	1
1.1 无线传感器网络概述	1
1.2 无线传感器网络面临的挑战	3
第2章 部署技术的发展和评价指标	5
2.1 发展现状	5
2.1.1 采用确定放置的部署技术	5
2.1.2 采用随机抛洒且节点不具移动能力的部署技术	6
2.1.3 采用随机抛洒且节点具移动能力的部署技术	6
2.2 评价指标	7
参考文献	8
第2部分 平面有向传感器网络部署及优化	9
第3章 有向感知模型	9
3.1 概述	9
3.1.1 有向传感器网络的部署	9
3.1.2 传统节点模型的缺点	10
3.2 AR 可变的有向传感器网络节点模型	11
3.2.1 节点模型	11
3.2.2 算法描述	14
3.3 结果与分析	16
3.3.1 感知角度变化	16
3.3.2 感知半径变化	17

3.3.3 感知角度与感知半径变化	18
3.4 本章小结	19
参考文献	20
第4章 部署模型	22
4.1 概述	22
4.1.1 非均匀势场部署	22
4.1.2 复杂区域部署	23
4.2 非均匀势场下的部署	23
4.2.1 改进的非均匀有向节点部署算法	24
4.2.2 实验及结果分析	28
4.3 复杂区域的节点部署	30
4.3.1 基于虚拟力的复杂区域覆盖优化算法	30
4.3.2 算法仿真和性能分析	34
4.4 本章小结	38
参考文献	38
第5章 部署算法	41
5.1 概述	41
5.1.1 有向传感器网络节点部署问题	41
5.1.2 有向传感器网络连通性覆盖问题	42
5.1.3 多中心覆盖问题	42
5.2 覆盖优先的部署	43
5.2.1 覆盖优先的部署算法	43
5.2.2 算法仿真和性能分析	46
5.3 连通优先的部署	51
5.3.1 连通优先的部署算法	51
5.3.2 算法仿真和性能分析	54
5.4 多中心部署	62
5.4.1 问题描述	62
5.4.2 算法描述	65
5.4.3 仿真实验	66
5.5 本章小结	69
参考文献	70

第3部分 空间传感器网络自主部署与目标追踪技术	74
第6章 三维节点感知模型	74
6.1 全向感知模型	74
6.2 有向感知模型	75
第7章 空间部署模型	76
7.1 概述	76
7.2 任意曲面部署模型	79
7.2.1 仿真模型	79
7.2.2 基于虚拟力补偿的三维空间自主部署算法	80
7.2.3 实验仿真及结果分析	84
7.2.4 平台实验	88
7.3 可移动目标模型	90
7.3.1 有向移动传感器网络三维立体目标覆盖模型	90
7.3.2 三维空间立体目标全覆盖算法	93
7.3.3 实验分析	94
7.4 部署路径模型	96
7.4.1 问题描述	97
7.4.2 自主部署算法	97
7.4.3 仿真实验	100
7.5 本章小结	103
参考文献	104
第8章 自主部署算法	107
8.1 概述	107
8.1.1 复杂路径	108
8.1.2 移动目标追踪	108
8.2 基于加权虚拟力算法	109
8.2.1 空中虚拟力分解	109
8.2.2 基于加权虚拟力分解的分段部署	110
8.2.3 实验结果与分析	112
8.3 基于复杂路径自主部署算法	119
8.3.1 复杂路径自主部署算法模型	119
8.3.2 三维空间复杂路径自主部署算法	122

8.3.3 实验仿真与结果分析	123
8.4 基于移动目标追踪部署算法	128
8.4.1 目标追踪算法模型	129
8.4.2 算法描述	133
8.4.3 实验仿真与结果分析	135
8.5 本章小结	137
参考文献	138

第 1 部分 空间传感器网络 技术发展现状

第 1 章 无线传感器网络简介

1.1 无线传感器网络概述

随着社会的不断发展和进步，通信技术也在高速发展，无线通信技术的应用也越来越广泛，不断改变着我们的生活。无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）作为无线通信中一个新的领域，也得到了快速发展，并走向集成化和规模化发展。

WSN 是由大量低成本、低功耗功能不同的传感器节点组成，可以被广泛地应用于各种不同的复杂环境中。由于微机电系统和通信技术的快速发展，使得传感器节点变得越来越微型化、智能化，成本也越来越低。传感器节点的体积虽然很小，但是集成嵌入式微处理器、无线射频收发装置和各种传感器。这类传感器除了能够检测环境中我们需要的一些数据外，还可以对收集到的数据进行一些必要的处理，然后把数据通过无线网络发送给其他节点或网关，有的传感器节点甚至具备数据融合功能。因此，WSN 不仅能够进行信息采集，而且还能实现数据处理、无线通信和与因特网互联，可以广泛地应用到环境监测、军事、医疗、工业控制等多个领域。WSN 是继因特网之后，将对人类生活方式产生重大影响的重要技术之一，是物联网的重要组成部分。近些年来，WSN 在学术界和工业界得到极大的关注，同时也引发了研究热潮。为了解决 WSN 的设计和应用问题，开展了大量的研究活动，取得了显著的成果。可以预见，WSN 将在民用和军事领域取得更为广泛的应用。

WSN 是一种特殊的无线通信网络，它是由许多个传感器节点通过无线自组

织网络的方式构成的，应用在一些人力不能及的领域，如战场、环境检测等地方，通过无线网络的形式将传感器感知到的数据进行简单的处理之后，传送给网关或者外部网络，因为 WSN 具有自组织网形式和抗击毁的特点，已经引起了各个国家的重视。

WSN 是由多个无线传感器节点和少数几个汇聚（Sink）节点构成，一般来说无线传感器网络的工作流程如下：首先在目标区域部署大量的微型且具有一定的数据处理能力的无线传感器节点，节点激活后通过无线网络来搜集它附近的传感器节点，并和这些节点建立网络连接，从而形成多节点分布式网络，这些无线传感器节点通过自身集成的传感器感知和收集这些区域的信息，经过自身的处理器处理完后，通过节点之间的相互通信最终传送到外部网络。

如图 1-1 所示，WSN 由传感区域内大量无线传感器节点、Sink 节点和外部网络构成，其中无线传感器节点按照一定的规则分布在被监测区域内，通过协作感知的形式实现区域内节点间的通信。考虑到节点能量问题或者通信范围的限制，节点只能与一定范围内的节点进行数据交换，因此要将数据传送到邻居节点以外的节点或者外部网络，必须采用多跳传输。Sink 节点的能量值和通信距离比其他传感器节点要轻一些，负责整个无限通信网络与外部网络之间的信息交换，从而实现外部网关与传感区域内的节点的相互通信。例如节点 A 感知到的数据通过 B、C、D 多跳传送给 Sink 节点，再由 Sink 节点传送到外部网络。

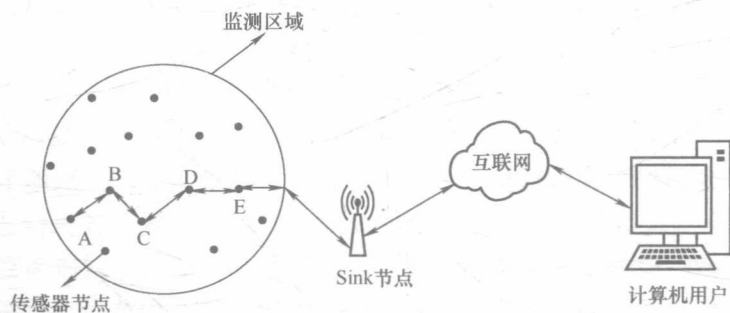


图 1-1 无线传感器网络

传统的无线网络包括移动通信、无线局域网、无线个人网、蓝牙网络等，这些网络大多都是为了满足音频、视频、图像等信息的交换。而 WSN 一般是为了某个特定的应用而设计，是一种基于应用的无线网络，和传统的无线通信网络、蜂窝网络相比，WSN 有下面几个特点。

(1) 网络规模大：WSN 节点的数量通常都是成百上千，有的甚至上万。为了对某些地理区域进行监测、保证数据的高可靠性和实现数据的冗余，需要高

密度部署节点，其数量比移动自组织网络多出几个数量级。

(2) 自组织：传感器节点通常部署在环境恶劣或者无人区域，一旦完成部署，传感器节点必须能够自动配置，完成组网工作，并且能够根据节点的加入或退出来重新组织网络，使网络能够稳定运行。

(3) 安全性差：对于 WSN 来说，由于每个节点的通信范围是非常有限的，因此只能和自己通信范围内的节点进行通信，采用无线信道，对于邻居节点以外的节点通信需要通过多跳路由的形式进行，所以传输的可靠性不高。

(4) 资源有限：由于无线传感器节点受到成本、硬件体积等的影响，节点只具备有限的信号处理能力、计算能力和存储能力等。

(5) 能量有限：由于受到成本和硬件条件的影响，传感器节点一般都采用电池供应能量，其能量有限。节点的能量消耗主要集中在节点的数据收发和处理上，而数据的接收和发送占据了主要部分。

(6) 动态拓扑：WSN 节点容易被破坏或者失效，节点的添加、能量耗尽、信道衰减等因素都可以引起网络拓扑结构的变化。

(7) 数据高冗余度：WSN 通常采用大量的传感器节点协同完成任务，这些节点被密集地部署在目标区域，多个节点所获取的数据具有较强的相关性和冗余度。

1.2 无线传感器网络面临的挑战

无线传感器网络的特点给网络的设计和实现提出了许多挑战，主要有以下几个方面。

(1) 能量消耗：传感器节点由电池提供能量，其能量十分有限，而且在大多数情况下，电池都是没有办法充电的，WSN 中的节点能量一旦耗尽，节点就会失效或废弃，这就要求在无线传感器网络运行的过程中，每个节点都要最小化自身的能量消耗，以获得最长的工作时间，因此必须在传感器网络设计的各个方面充分考虑能量效率。

(2) 资源的使用与分配：传感器节点只有有限的处理能力和存储能力，因此只能完成简单的计算功能。在这种限制条件下，无线传感器网络的设计和实现不仅要考虑能量效率，还要考虑节点的处理能力和存储能力。

(3) 大规模部署：无线传感器网络是由大量的传感器节点组成的，节点的部署对于通信网络的构建、目标区域监测的覆盖率、网络的使用寿命都有很大的影响，因此如何能够把节点更好地部署在监测区域内，对于无线传感器网络的设计和实现也是一个非常大的挑战。

(4) 动态网络拓扑结构：无线传感器网络的拓扑结构的变化主要有两方面

的原因。一是节点由于能量耗尽或者遭到破坏而失效，新的节点加入到网络中引起的拓扑结构变化；二是由于传感器节点之间是通过无线信道进行通信的，而无线信道容易出现错误、信号时变、信号衰减等问题，造成网络的频繁中断，引起网络拓扑结构的频繁变化。

(5) 降低成本：WSN 是由大量的传感器节点组成的，单个传感器节点的价格会极大程度地影响系统的总成本。为了能够实现降低成本的目的，需要设计出对计算、通信和存储能力均要求较低的简单网络系统和通信协议。此外还可以减少系统管理与维护的开销来降低成本。

(6) 实时性：无线传感器网络的应用大多要求较好的实时性。例如，对监测区域内的目标进行追踪，需要实时地对目标的状态进行监测，并且对事件做出进一步响应。

(7) 安全性和抗干扰性：无线传感器网络系统具有严格的资源限制，需要设置低开销的通信协议，但同时也会带来严重的安全问题。由于传感器节点会部署在各种环境中，所以节点必须具备良好的抗干扰能力，能够在恶劣的环境中稳定工作，这也是无线传感网络设计和实现的一个挑战。

2.1 发展现状

节点部署是在指定的监测区域内,通过适当的方法部署节点以满足某种特定的需求。节点部署是传感器网络进行工作的第一步,它直接关系到网络监测信息的准确性、完整性和时效性。合理的节点部署不仅可以提高网络的工作效率,也是无线传感器网络研究领域的基本问题之一。目前,关于节点部署的研究中,已经设计出了许多模型和相关算法。这些技术可根据适用环境分为三类:第一类适用于采用确定放置的部署方式;第二类适用于节点不具备移动能力,而且采用随机抛洒的部署方式;第三类适用于节点具备移动能力,采用随机抛洒部署方式。

2.1.1 采用确定放置的部署技术

该技术将监测区域划分为二维或三维网格,并假设传感器节点分布在网格点上,监测目标也出现于网格点上。假设节点的检测模型为0/1模型,即如果节点和网格点间距离不大于检测半径,则节点能感知该网格点,反之,节点无法感知该网格点。如果每个网格点至少被一个节点所覆盖,则网络将覆盖整个监测区域。每个网格点对应一个监测向量,该向量表示该网格点可以被哪些节点感知。如果不同的网格点对应于不同的监测向量,则可根据监测向量对出现在网格点上的目标进行定位。若某个监测向量对应于多个不同的网格点,则网格点间距越小,定位精度越高,在以上模型的基础上,可为每个网格点定义一个取值为0或1的整数变量。若以传感器网络部署的代价为最小优化目标,以每个网格点都至少被一个节点覆盖为约束条件,则可以采用商用整数规划软件求解。若以网络定位精度为最高优化目标,以部署代价为约束条件,则可采用模拟退火算法求解。若假设节点的检测模型为与距离相关的概率检测模型,即节点对网格点的检测概率为 e^{-ad} ,其中, d 代表节点与网格点之间的距离, a 反映节点的检测能力。所以 d 越大,检测概率越小; a 越大,节点对网格点的检测能力越弱。如果障碍物出现在节点或网格点之间的连线上,则节点对该网格点的

检测概率将降低。另外，每个节点对网格点的检测相互独立。如果每个网格点被检测概率大于指定的阈值，则无线传感器网络的感知范围能覆盖整个检测区域。而且，可将较大的阈值设置到具有较高安全可靠程度的网格点，从而对指定区域进行优先覆盖。在与距离相关的概率检测模型上，一般使用基于贪婪算法的传感器网络部署算法，每次选择一个网格点并在其放置节点，直到满足约束条件。

确定性部署通常应用于网络的状态相对固定或应用环境已知，节点在网络中的位置信息以及节点的密度已知情况下。节点的确定性部署通过对问题进行学抽象，可成为静态优化问题或线性规划问题^[1]。在文献 [2] 中，得出节点部署达到覆盖所需要的最少节点个数并给出了节点相应的位置；在文献 [3] 中，利用多边形网格来部署节点，以实现最大的连通覆盖。确定性部署能简化问题的解决方案，但在实际的应用中，尤其是大规模、无人监守的恶劣环境中，随机部署显得更具有优势。

2.1.2 采用随机抛洒且节点不具移动能力的部署技术

当监测区域环境恶劣或存在危险时，随机部署是唯一的选择。同样，在大规模应用时，由于节点数量众多、分布密集，采用确定性节点部署技术也不切实际的。此时，可通过飞机、炮弹等载体把节点随机抛撒在监测区域内，节点到达地面以后自组成网。这种随机性主要体现在两个方面^[4]：一是节点落在监测区域内的位置具有随机性；二是由于环境的影响，落在区域内的节点状态具有一定的随机性，某些节点可能会在坠落过程中由于损坏而失效。因此，在随机部署策略下，为取得较好的覆盖性能，必须投入大量的冗余节点以达到所需要的节点密度。随机部署方式^[5]不能保证部署的节点可以完全覆盖整个监测区域，一般适用于对覆盖要求不太严格的应用环境中。文献 [6] 采用渐近性分析方法分析了在实际随机部署时带来的问题。文献 [7] 介绍了三种随机部署模型：简易扩散模型、均匀模型和 R-random 模型。

2.1.3 采用随机抛洒且节点具移动能力的部署技术

针对区域覆盖的监测应用，基于机器人部署应用中的势场技术，研究人员提出了采用随机抛洒，且节点具备移动能力的部署技术。文献 [8] 和文献 [9] 就通过利用节点的有限移动，完成覆盖空洞，达到网络 k 覆盖的目的。在传感器节点向其他节点移动过程中，把移动节点看成虚拟的带电粒子，假设相邻节点间 0 点与障碍物之间存在作用力，每个节点根据受力平衡的原理移动一定距离后，平衡态，这时节点能够充分覆盖整个区域。目前，针对该方向已提出一些算法，Zou 和 Chakrabarty 等人提出了 VFA 算法^[10]，其基本思想，一是部署

区域中存在障碍物对节点的斥力；二是对覆盖率要求较高的区域产生的引力；三是节点之间产生的引力或斥力。算法计算产生在每个节点上的合力来控制之间的距离及节点的移动。另一种方法是在部署阶段采用拓扑控制技术对节点采取局部分簇策略，每个节点根据周边节点的能量及分布密度等情况，自适应地调整工作模式，从而提高能量的机用率，若定义节点和被跟踪目标间存在作用力，则可使节点根据被跟踪目标的位置和重要性，动态地调整部署，保证在覆盖区域内提高节点跟踪能力。李亨等人^[11]主要研究了在未知覆盖目标的情况下，如何根据原有的虚拟力算法进行网络节点的三维部署。作者将虚拟力算法从二维空间拓展到三维空间，创新地提出了自适应中心引力和目标斥力网的概念，使传感器节点能够自适应地覆盖未知目标进行有针对性的探测任务，最终实现了对不同形态的复杂目标进行精确覆盖。当然，研究人员也提出过一些基于启发式的算法设计，但这些技术不能有效保证对监测区域的完全覆盖。李轩涯等人^[12]提出了面向空中移动传感网的带电粒子群部署模型。作者认为空中移动传感器网络应用领域广阔，动态性强且环境复杂，原有的平面部署策略不再适用，提出的新算法基于带电粒子群思想，能够保证监测区域内重点覆盖与一般覆盖的均衡。Senel 等人^[13]讨论了水下传感器网络中节点的自部署及最大化覆盖，认为传感器进入水下环境的困难会使该问题更加复杂化。在文中他们提出了一个完全分布式节点部署方案，同时研究了可能对网络产生影响的环境因素，如海流、漩涡和随机表面效应等。

2.2 评价指标

节点部署的效果好坏直接影响着网络的性能和寿命，结合无线传感器网络的应用特点和系统特性，在评价无线传感器网络的节点部署时，主要考虑以下三个指标。

(1) 监测区域的覆盖率：要求节点部署后能够覆盖目标区域，并能对传感器节点进行动态的管理，以保证采集信息的完整性和精确性。

(2) 可靠传输：实际上是对网络连通性的要求，以保证采集到的信息能够准确及时传递到信息的使用终端。

(3) 部署时间：无线传感器网络大多数情况对于时效性要求比较高，要求节点能够迅速地完成部署工作，为接下来的工作节省时间。

(4) 能量效率：无线传感器网络应用的最大问题是能量限制问题，要求在完成任务的前提下最大限度地延长整个网络的寿命。

在节点部署时需要从上述评价指标出发进行设计，考虑覆盖、连接和节能问题。其中，覆盖根据无线传感器网络的应用需要考虑三种情况：静态覆盖、

动态覆盖和移动覆盖。连接需要考虑通信连接和路由连接两种情况。节能也需要部署时的能量消耗问题和运行中的能量消耗问题。

参考文献

- [1] ROIRRE O J. Art Gallery Theorems and Algorithms, the International Series of Monographs on Computer Science [M]. Oxford University Press, New York, 1987.
- [2] SFAKKOTTAI S, SRIKANT R, SHROFF N. Unreliable sensor grids: coverage, connectivity and diameter [J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3 (6): 702-716.
- [3] COSKILX V. Relocating sensor nodes to maximize cumulative connected coverage in wireless sensor network [J]. Sensors, 2008, 8: 2792-2817.
- [4] 王晓东. 无线传感器网络节能算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [5] TILAK S, ABU-GHAZALEH N B, HEINZELMAN W. Infrastructure trade-offs for sensor networks [A]. Proceedings of First International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02) [C]. 2002. 49-57.
- [6] BALISTER P, BOLLOBAS B, SARKAR A, et al. Reliable density estimates for coverage and snips of finite length [A]. Proceedings of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. Montréal, Québec, Canada, ACM, 2007. 75-86.
- [7] GONZALEZ B H. A randomized art-gallery algorithm for sensor placement [A]. Proceedings of the Seventeenth Annual Symposium on Computational Geometry [C]. Medford, Massachusetts, United States, ACM, 2001. 232-240.
- [8] YANG X, HUI C, KUIW U, et al. Modeling detection metrics in randomized scheduling algorithm in wireless sensor networks [A]. Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Kowloon, 2007. 3741-3745.
- [9] WU J, YANG S. SMART: a scan-based movement-assisted sensor deployment method in wireless sensor networks [A]. Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications, 2005. 2313-2324.
- [10] ZOU Y, KRISHNENDU C. Sensor deployment and target localization based on virtual forces [A]. Proceedings of the Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications [C]. 2003. 1293-1303.
- [11] 李享. 基于空中传感网的三维部署研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [12] 李轩涯, 慈林林, 杨明华, 等. 面向空中移动传感网的带电粒子群部署模型 [J]. 软件学报, 2012, 23 (1): 38-48.
- [13] Senel F, Akkaya K, Erol-Kantarci M, et al. Self-deployment of mobile underwater acoustic sensor networks for maximized coverage and guaranteed connectivity [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 34: 170-183.