



杰出青年学者研究文丛  
Distinguished Young Scholars

# 无线传感网中 低能耗近似计算方法

Energy-Efficient Approximate Computation  
Algorithms in Wireless Sensor Networks

◎ 程思瑶 李建中 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社



杰出青年学者研究文丛

# 无线传感网中 低能耗近似计算方法

Energy-Efficient Approximate Computation  
Algorithms in Wireless Sensor Networks

◎ 程思瑶 李建中 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

无线传感网中低能耗近似计算方法 / 程思瑶, 李建中著. —杭州: 浙江大学出版社, 2016. 7

(杰出青年学者研究文丛)

ISBN 978-7-308-15207-5

I. ①无… II. ①程… ②李… III. ①无线电通信—  
传感器—节能—近似计算—计算方法 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 233994 号

## 无线传感网中低能耗近似计算方法

**Wuxian Chuanganwang Zhong Dinenghao Jinsi Jisuan Fangfa**

程思瑶 李建中 著

---

丛书策划	张凌静 许佳颖
责任编辑	张凌静 徐瑾
责任校对	陈慧慧
封面设计	刘依群
出版发行	浙江大学出版社 (杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007) (网址: <a href="http://www.zjupress.com">http://www.zjupress.com</a> )
排 版	杭州星云光电图文制作有限公司
印 刷	杭州日报报业集团盛元印务有限公司
开 本	710mm×1000mm 1/16
印 张	15
字 数	278 千
版 次	2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-308-15207-5
定 价	65.00 元

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式(0571)88925591; <http://zjdxcsbs.tmall.com>

浙江省“十三五”重点出版物出版规划项目

# 前 言

随着微电子技术、嵌入式技术、集成电路及无线通信技术的日益成熟,无线传感器网络进入了人们的生活,并为人类低成本地观察、认知复杂物理世界提供了一条有效途径。目前,传感器网络已被广泛应用于环境监测、医疗卫生、国防军事等各大领域。在构成传感网的诸多要素之中,传感器节点采集的感知数据是其核心部分之一,几乎传感网的所有应用都是建立在感知数据的计算(包含查询、分析、挖掘等)的基础之上的。由于传感网中的感知数据规模庞大,将其传送至 Sink 节点再进行计算势必消耗大量能量,故分布式的网内计算方法对传感网来说十分重要。并且,由于传感器节点在感知、计算、通信、存储及能源等方面的能力均十分有限,故在许多情况下,传感网无法给出精确的查询分析结果。此时,正如智者亚里士多德所述,我们不必纠结于无法获得精确结果,具有一定误差保证的近似结果亦是可接受的。综上,在传感网的研究中,设计低能耗、分布式、具有一定误差保证的感知数据近似计算方法具有极其重要的意义。因而,本书开展了这方面的研究。

一方面,本书针对无线传感网中最为常用的几类查询计算问题,提出了几种近似查询处理算法,使得传感网在面向特定查询计算任务时所需的数据传输量和计算复杂度尽可能小,以达到节能、延长网络生命周期的目的。在该方面,本书的研究成果如下:

(1)静态传感器网络中的 $(\epsilon, \delta)$ -近似聚集算法。聚集操作是传感网中的一种十分重要的操作。由于精确聚集算法的能量消耗很大,所以近年来人们开展了对近似聚集算法的研究。然而,现有的网内近似聚集算法均具有固定的误差界,并且很难调节,所以一旦用户所需要的误差小于已有聚集算法所能保证的误差界时,这些算法将失效。为了解

决该问题,使得近似聚集结果能够满足用户任意的精度需求,本书开展了传感器网络中的 $(\epsilon, \delta)$ -近似聚集算法的研究,并基于均衡抽样技术,提出了静态传感器网络中的 $(\epsilon, \delta)$ -近似聚集算法。在该研究中,我们首先针对聚集和、平均值、无重复计数值等3种聚集操作,给出了根据 $\epsilon, \delta$ 来确定优化的样本容量的数学方法。其次,我们提出了一种分布式的均衡抽样算法,用以完成样本数据的抽取,并且对该算法的计算与通信复杂性进行了分析。第三,我们给出了估计聚集和、平均值、无重复计数值的数学方法,根据这些数学方法,提出了一种静态传感器网络中的 $(\epsilon, \delta)$ -近似聚集算法,并证明了该算法能够满足用户的任意精确度需求。第四,鉴于 $\epsilon, \delta$ 和感知数据的变化会影响最终的聚集结果,我们提出了两种样本数据信息的维护更新算法,分别用于处理 $\epsilon, \delta$ 和网络中感知数据发生变化的情况。最后,通过模拟实验验证了本部分提出的算法的有效性。

2

(2)动态传感器网络中的 $(\epsilon, \delta)$ -近似聚集算法。虽然第一部分所给出的算法能够满足用户任意的精确需求,并在静态网络中具有较高性能,但是该算法需要 Sink 节点频繁地统计各个簇及全网内处于活动状态的节点的数量,考虑到动态传感网中活动节点数目是不断变化的,故该算法不适合应用于动态传感网之中。进而,本书开展了动态传感网中的 $(\epsilon, \delta)$ -近似聚集算法的研究,并基于 Bernoulli 抽样技术,提出了4种 $(\epsilon, \delta)$ -近似聚集算法。在该研究中,我们首先针对活动节点计数值、感知数据聚集和、平均值等3种聚集操作,给出了根据 $\epsilon, \delta$ 来确定优化的抽样概率的数学方法。其次,我们给出了适应动态网络环境的、分布式的 Bernoulli 抽样方法,用以获取样本数据,并对该算法计算与通信复杂度进行了分析。第三,我们给出了估计活动节点计数值、感知数据聚集和与平均值的数学方法。第四,在上述数学方法基础上,我们给出了4种基于 Bernoulli 抽样的 $k$ -近似聚集算法,分别用以处理 Snapshot 查询与连续查询。我们证明了上述4种算法能够满足用户任意的精度需求,并且能够适应动态的网络环境。最后,通过详尽的模拟实验验证了本部分提出的算法的性能。

(3)传感器网络中的地理位置敏感的极值点查询算法。在传感网收集的大量数据中,感知数据的极值点(例如,感知数据的最大值)及其所出现的地理位置有助于用户识别与定位异常区域,对于用户来说十

分重要。虽然传统的 top- $k$  查询亦能够返回最大的  $k$  个感知值及其发生位置,但是由于在传统 top- $k$  查询处理过程中未考虑感知数据的空间相关性,所以其返回的结果(包括感知值及其位置)往往集中于一个小区域,为用户提供的异常信息也极其有限。并且,由于传统 top- $k$  查询结果包含大量的冗余数据,使得传输上述结果的能量消耗过大。鉴于上述原因,本书提出了一种新的查询,称之为地理位置敏感的极值点查询(location aware peak value query),简记为 LAP- $(D, k)$  查询,并对 LAP- $(D, k)$  查询处理算法进行了研究。在该研究中,我们首先对 LAP- $(D, k)$  查询处理问题进行了严格定义,并证明了该问题是 NP-难的。其次,我们分别给出了两种分布式近似算法用以解决 LAP- $(D, k)$  查询处理问题。第三,我们证明了这两种算法均具有常数近似比,同时,我们亦对上述两种算法的计算和通信复杂度进行了详细的分析。最后,通过真实和模拟实验验证了本部分提出的算法在精确性及能量消耗方面均具有较高的性能。

另一方面,当查询计算任务不明确时,本书亦研究了面向物理过程可重现的感知数据采集算法,以获取最有价值的感知数据信息,从源头上提高感知数据质量、控制感知数据规模。目前,几乎所有的感知数据计算技术均是建立在等频数据采集之上的,并且假设通过等频数据采集而获得的感知数据能够精准地反映物理过程的变化情况。但是,现实中物理过程往往是连续变化的,而等频数据采集仅是对连续变化物理过程的离散化,故等频数据采集存在着关键点丢失和曲线失真等问题。鉴于上述原因,为了尽量捕捉最有价值的感知数据信息,更精确地描述物理过程的变化情况,本书开展了传感网中面向物理过程可重现的数据采集方法的研究。在该研究中,我们首次提出了面向物理可高精度逼近的数据采集问题,并分别基于 Hermit 插值和三次样条插值技术提出了两种面向物理可高精度重现的数据采集算法。上述算法可根据真实物理过程的变化情况及用户的误差需求,自适应地调整传感器节点的数据采集频率。其次,我们对上述算法的性能进行了分析与比较,包括算法输出的曲线光滑程度,在计算一阶、二阶导数时的误差,算法的数据采集次数及复杂性等。第三,我们改进了传统意义上的感知数据的概念,在本部分研究中,感知数据不再是离散的数据点,而是多条连续的分段曲线,称之为感知曲线。该曲线可以更好地表达物理过

程连续变化等诸多特性。第四,我们提出了感知曲线的分布式聚集算法,并对算法精度及其优化策略进行了分析。最后,通过真实与模拟实验验证了本部分提出的算法的性能。

由于作者水平有限,书中错误与疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。



# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	( 1 )
1.1 研究的目的和意义 .....	( 1 )
1.2 无线传感器网络简介 .....	( 3 )
1.2.1 什么是无线传感器网络 .....	( 3 )
1.2.2 无线传感器网络的特点与挑战 .....	( 3 )
1.2.3 无线传感器网络领域的研究现状与热点问题 .....	( 5 )
1.3 无线传感网中感知数据的获取与计算技术简介 .....	( 10 )
1.3.1 无线传感网中感知数据获取与计算技术的研究现状 .....	( 11 )
1.3.2 无线传感网中感知数据的获取与计算技术所面临的新挑战 .....	( 22 )
1.4 本书研究的问题与成果 .....	( 23 )
第 2 章 静态传感器网络中基于均衡抽样的 $(\epsilon, \delta)$ -近似聚集算法 .....	( 26 )
2.1 引 言 .....	( 26 )
2.2 问题定义 .....	( 28 )
2.3 数学基础 .....	( 31 )
2.3.1 聚集和的估计器 .....	( 31 )
2.3.2 平均值的估计器 .....	( 32 )
2.3.3 无重复计数值的估计器 .....	( 33 )
2.4 分布式均衡抽样算法 .....	( 34 )
2.4.1 样本容量的确定 .....	( 34 )
2.4.2 均衡抽样算法 .....	( 39 )
2.5 近似聚集算法 .....	( 43 )
2.6 样本信息维护算法 .....	( 44 )
2.6.1 $\epsilon$ 和 $\delta$ 变化时样本数据信息维护算法 .....	( 45 )

2.6.2	感知数据变化时样本信息维护算法	( 47 )
2.7	实验结果	( 50 )
2.7.1	基于抽样技术算法的特有性能	( 50 )
2.7.2	查询处理过程中的能量消耗	( 53 )
2.8	相关工作	( 56 )
2.9	本章小节	( 57 )
<b>第 3 章</b>	<b>动态传感器网络中基于 Bernoulli 抽样的 <math>(\epsilon, \delta)</math>-近似聚集算法</b>	
	.....	( 58 )
3.1	引 言	( 58 )
3.2	预备知识	( 60 )
3.2.1	问题定义	( 60 )
3.2.2	Bernoulli 抽样	( 61 )
3.3	数学基础	( 61 )
3.3.1	计数值及聚集和的估计器	( 61 )
3.3.2	平均值估计器	( 63 )
3.4	Bernoulli 抽样算法	( 65 )
3.4.1	抽样概率的确定	( 65 )
3.4.2	Bernoulli 抽样算法	( 71 )
3.5	基于 Bernoulli 抽样的 $(\epsilon, \delta)$ -聚集算法	( 73 )
3.5.1	Snapshot 查询处理算法	( 73 )
3.5.2	连续查询处理算法	( 77 )
3.5.3	基于多抽样概率的 $(\epsilon, \delta)$ -近似聚集算法	( 81 )
3.6	实验结果	( 86 )
3.6.1	大规模传感网中算法的性能	( 87 )
3.6.2	中等规模传感网中算法的性能	( 95 )
3.7	本章小结	( 98 )
<b>第 4 章</b>	<b>传感器网络中地理位置敏感的近似极值点查询算法</b>	( 99 )
4.1	引 言	( 99 )
4.2	问题定义	( 101 )
4.3	贪心算法	( 104 )
4.3.1	集中式贪心算法	( 104 )
4.3.2	分布式贪心算法	( 107 )

4.3.3	算法的复杂性 .....	(114)
4.4	基于区域划分的分布式算法 .....	(115)
4.4.1	算法的总体思想 .....	(115)
4.4.2	$R_{D_k}^r$ 的计算方法 .....	(117)
4.4.3	算法的复杂性 .....	(126)
4.5	实验结果 .....	(127)
4.5.1	“Top- $k$ ”与“LAP- $(D, k)$ ”的比较 .....	(128)
4.5.2	不同算法在计算“LAP- $(D, k)$ ”时的性能 .....	(133)
4.6	相关工作 .....	(135)
4.7	本章小结 .....	(136)
<b>第 5 章</b>	<b>传感器网络中面向物理过程可重现的感知数据采集算法 .....</b>	<b>(137)</b>
5.1	引 言 .....	(137)
5.2	问题定义 .....	(140)
5.3	两种变频数据采集算法 .....	(142)
5.3.1	基于 Hermit 插值的变频数据采集算法 .....	(142)
5.3.2	基于三次样条插值的变频数据采集算法 .....	(148)
5.4	感知曲线聚集算法 .....	(159)
5.4.1	问题的定义 .....	(160)
5.4.2	感知曲线聚集算法 .....	(160)
5.4.3	聚集算法的优化策略——曲线合并算法 .....	(163)
5.5	实验结果 .....	(169)
5.5.1	变频数据采集算法的性能 .....	(169)
5.5.2	感知曲线聚集算法的性能 .....	(182)
5.6	相关工作 .....	(187)
5.7	本章小结 .....	(188)
<b>第 6 章</b>	<b>结 论 .....</b>	<b>(189)</b>
参考文献	.....	(192)
索 引	.....	(228)

## 1.1 研究的目的是和意义

随着微电子技术、嵌入式技术、集成电路及无线通信技术的日益成熟与不断进步,集成了信息采集、数据处理、无线通信等多种功能的微型传感器开始在世界范围内广泛出现并进入人们的生活之中。这些微型传感器节点的出现使得人们低成本地观测复杂物理世界成为可能。而也正是造价低这一特点,使得微型传感器节点的感知能力、数据处理能力及通信能力均有限,因而单一的传感器节点往往无法独立地完成复杂对象的监测工作,需要大量的微型传感器节点通过无线通信的方式组织成一个网络系统,协作地完成感知、采集和信息处理等工作。该网络系统即是赫赫有名的无线传感器网络<sup>[1-3]</sup>。无线传感器网络(无线传感网)综合了分布式信息处理技术、嵌入式计算技术、传感器技术及无线通信技术,能够实时地感知、处理、分析监测区域内的各种信息,为人们观测复杂物理世界提供了一条有效途径。如果说 Internet 改变了人们之间的交互模式,搭建了逻辑上的信息世界,那么无线传感器网络则是将信息世界和物理世界有机地融合在一起,极大地扩展了人们认知、控制物理世界的能力,推动了新一代网络技术的发展。所以说,无线传感器网络技术是目前计算机领域具有重大影响的重点技术,它亦被美国《商业周刊》票选为未来四大高技术产业之一。

目前,无线传感器网络被广泛应用于国防军事<sup>[4-5]</sup>、环境监测<sup>[6-8]</sup>、交通管制<sup>[9-11]</sup>、医疗卫生<sup>[12-13]</sup>、深海和矿井探测<sup>[14-15]</sup>、建筑物健康监测<sup>[16-20]</sup>等诸多领域。例如,在环境监测领域,清华大学刘云浩教授的团队在大规模森林生态环境监测传感器网络的研究中已取得了很大的成就,他们搭建了拥有成千个节点、覆盖范围很广的“绿野千传(GreenOrbs)”网络<sup>[6]</sup>,该网络已在森林生态环境的监测中起

到了重大作用。目前,该团队正研究如何利用传感器网络进行碳汇、碳排放等指标的监测与分析,其主要理念是利用传感器网络建立虚拟碳通量塔,在此基础上对森林碳汇、城市碳排放等各项指标进行计算、分析。该项研究使得环保部门无须再斥巨资建立多个真实的碳通量塔,必将为国民经济的发展作出巨大贡献。因而,该项研究受到了国家科研部门的重视,并获得了国家自然科学基金重大项目的支持。在建筑物健康监测领域,美国 Berkeley 大学搭建了监测金门大桥的振动程度的传感器网络<sup>[16]</sup>。该网络使得人们可以实时地观测桥梁随着车流量的变化而振动的情况,建立及时的桥梁健康预警机制,从而有效地避免了重大人员、财产损失事故的发生。在交通管制方面,无线传感器网络使得“无线城市”、“智慧的地球”<sup>[21]</sup>等理念成为可能。同样地,在医疗卫生、国防军事、深海和矿井探测等诸多领域,无线传感器网络也发挥着巨大的作用。正是无线传感器网络的巨大作用,使其成为工业界和学术界的研究热点之一。

对于无线传感器网络来说,传感器节点所采集的感知数据是其核心部分之一,几乎所有无线传感器网络的应用都是建立在对感知数据进行查询、分析基础之上的。因而,如果无法有效地获取感知数据并对之进行计算(包括查询、分析、挖掘等),势必会影响建立在其上的各种应用的性能。所以,设计和实现高效的感知数据获取和计算方法,是传感器网络能否取得广泛应用所需解决的核心问题之一。

与传统数据库相比,传感器网络的自身特点为数据获取和计算方法的设计提出了一些新的挑战。首先,传感器网络将产生大量的感知数据,如果将这些数据全部传送至 Sink 节点再进行集中式处理,则势必消耗大量能量。同时,由于无线通信的不稳定性,也会产生数据包丢失、网络拥塞等问题,因而,在传感器网络中的数据获取与计算方法必须是分布式的。其次,组成传感器网络的传感器节点在感知、计算、通信、存储、能量等诸多方面的能力均非常有限,该特点决定了数据获取与计算方法必须是轻量级的且不能太复杂,所需的通信和能量消耗亦不能过大。第三,由于传感器节点自身硬件条件所限,所以在很多情况下传感器网络无法精确地完成感知数据的查询、分析工作,所以在此条件下,感知数据的获取与计算方法需能给出具有一定误差保证的近似结果。同时,在算法设计过程中也要考虑如何平衡算法的精度与通信、能量消耗的关系。综上所述,研究感知数据的获取与计算方法不仅在理论和实际应用中均具有十分重大的意义,而且颇具挑战性。

## 1.2 无线传感器网络简介

### 1.2.1 什么是无线传感器网络

所谓无线传感器网络,是指由大量部署在监测区域内的,具有一定计算能力、通信能力和存储能力的,低成本的微型传感器节点通过自组织的方式来协作地完成特定任务的分布式智能化网络系统。通常情况下,无线传感器网络主要由以下 2 部分构成:大量的、随机布置在监测区域内的传感器节点和接收发送器(Sink 节点)。

传感器节点是构成无线传感器网络的重要单元。在一般情况下,传感器节点由感知部件、处理器部件、通信部件和电源等几部分构成。传感器节点的感知部件是沟通物理世界与信息世界的桥梁,它可以获取物理世界的信息,并通过模数转换等功能将物理世界所采集的信息数字化。处理器部件包含 CPU、嵌入式操作系统和存储器等,它使得传感器节点能够进行简单的数据处理操作。通信部件是完成传感器节点与 Sink 节点、传感器节点之间的相互交互的功能模块。通信部件的存在,使得传感器节点可将感知数据通过多跳的方式传送至 Sink 节点,Sink 节点也能够将各项任务下发至传感器节点。同时,该部件也使得不同传感器节点相互协作地完成各项任务成为可能。最后,电源是为数据感知、数据处理和通信提供能源支持的部件。

接收发送器(Sink 节点)的计算、通信和存储能力要比普通的传感器节点强得多,它可以完成更为复杂的计算工作。同时,Sink 节点也是连接网内传感器节点和外部信息世界的重要接口。我们可以用 Sink 节点将无线传感网与互联网相连,从而使得传感器网络所采集的感知信息能够更容易地发布到互联网之中。我们也可以利用 Sink 节点将无线传感器网络与用户界面相连。通过 Sink 节点,用户可将查询请求与命令传送至各个传感器节点,并获取相应的查询结果。所以说,Sink 节点是传感器网络与外界世界联系的桥梁,亦是无线传感器网络不可或缺的一部分。

### 1.2.2 无线传感器网络的特点与挑战

与传统网络相比,无线传感器网络具有如下特点:

### 1. 无线传感器网络是以数据为中心的网络

与传统互联网不同,无线传感器网络是任务型网络。传感器节点采用编号标识,而非固定的 IP 地址;而且节点编号是否唯一,取决于传感器网络所执行的任务。同时,由于传感器网络往往采用随机播撒的方式部署,所以传感器节点编号与其所在地理位置无特定关系。用户使用传感器网络时,通常不会指定某一节点来完成查询、分析任务,而是将查询任务提交给整个网络,由网络中的节点协作完成查询、分析处理。由于传感器网络中节点地址不绑定,其搭建的主要目的是对感知数据进行计算,故称之为以数据为中心的网络。

### 2. 无线传感器网络是动态、自组织网络

传感器节点的随机部署方式使得网络中的节点无法预先建立固定的路由,它们需要通过自组织的方式维护网络的联通性,并且保证感知数据信息能够通过多跳传送至 Sink 节点。而且,环境变化、节点失效、无线通信的不稳定性以及移动节点的加入等诸多因素,使得无线传感器网络的动态性十分强,网络拓扑也不断发生变化。此时,需要网络中的节点具有一定的自组织能力,以适应网络的动态性,维持网络正常运作。

### 3. 无线传感器网络中的传感器节点的资源极度受限

传感器节点体积微小、价格低廉,这使得它们在计算能力、通信能力、存储能力和能量上极度受限。以 Telosb<sup>[22]</sup> 为例,其能源供给为两节 AA 干电池,它的处理器是 244MHz,内存空间为 10kB,外存空间为 1MB,通信带宽是 38.4kbps,无线通信的传输范围是几十米,且在有干扰或障碍物的情况下,该传输范围会急剧减小。同时,由于目前传感器网络使用的是正交信道进行通信,所以在在一个传感器网络中可用信道也极少。

### 4. 无线传感器网络的监测范围广、规模大、持续时间长

无线传感器网络通常被布置在十分广阔区域内,例如,森林生态监测通常需要传感器网络的覆盖范围为几十或者上百平方公里。由于传感器网络监测范围广,所以造成了传感器网络规模巨大。同时,由于传感器节点受环境等因素影响而容易发生故障,故为了使得传感器网络在部分节点故障时依然能正常运转,传感器网络一般采用高密度的方式布置,这也无形中增加了网络规模。最后,由于传感器网络规模巨大、所部署的环境恶劣,所以为其更换电池是十分困难的事,这就要求传感器网络中运行的算法需是能量消耗小的轻量级算法,才能使得整个网络能够长时间地工作。

### 5. 无线传感器网络的监测对象复杂,感知数据流巨大

在现实中,无线传感网所监测的对象往往是随时间连续变化的,并且需要从多角度进行监测,这为传感器网络精确捕捉其监测对象的变化规律增加了难度。

同时,上述情况也使得网络中充斥着各种模态的感知数据,如标量数据、矢量数据、图像、声音等。这加大了感知数据融合的难度。此外,由于传感器网络规模巨大,而且每个传感器节点随时都产生较大的流式数据,所以整个网络的感知数据流十分庞大。

#### 6. 无线传感器网络的应用相关性强

无线传感器网络一般是为了特定应用或执行特定任务而搭建的。所以,传感器网络中的数据获取与计算技术、网络维护和路由模式等都取决于应用。因此,传感器网络各项技术的设计和开发要充分考虑其实际的应用背景。

无线传感器网络的上述特点为传感器网络中的算法设计提出了许多新的需求与挑战。

首先,根据特点 1 与特点 2,运行在传感器网络中的算法需要能充分适应网络自组织模式,并且这些算法需要建立在非绑定式网络地址架构之上。同时,传感器网络中的算法要具有更高的鲁棒性,这样才能适应网络的动态性,使之在部分节点失效的情况下依然能正常地运行。

其次,根据特点 3 与特点 4,运行在各个节点处的算法必须是轻量级的,太复杂的算法不适合应用于传感器网络。同时,在算法设计过程中需要充分考虑节能问题,以保证整个网络能够长时间地运行。由于在很多应用中,近似结果是可以被用户接受的<sup>[23-25]</sup>,所以牺牲一部分算法精度,以换取更小的能量消耗是有意

义的。第三,根据特点 5,网内感知数据的处理算法必须是分布式的,因为如果集中式地处理庞大的感知数据流的话,势必将消耗大量的能量。而且,监测对象的复杂性可能会导致传感器网络无法精确地捕捉其变化规律,此时需要设计一些具有误差保证的近似算法以解决上述问题。并且,在算法设计过程中需要充分考虑如何平衡算法精度与能量消耗之间的关系。最后,由于网络中感知数据模态较多,在设计感知数据计算方法的过程中,也需考虑多模态感知数据的融合问题。

第四,根据特点 6,在设计传感器网络中的算法时需要充分考虑其实际的应用背景,通用的算法由于过于复杂,故不适合应用于传感器网络中。

综上所述,如何能兼顾上述 4 点需求,在无线传感器网络中设计出行之有效的算法颇具挑战。

### 1.2.3 无线传感器网络领域的研究现状与热点问题

无线传感器网络领域的研究问题可概括为 4 个方面:“感”、“联”、“知”和网络安全。



### 1.2.3.1 “感”

所谓“感”是指监测物理对象各项状态的获取。此方面的研究问题包括感知数据的采集、数据收集与整合、对象的定位技术等。

在感知数据采集方面,已有的大多数研究均是建立在传感器节点等频采集感知数据的基础之上的。目前,关于传感器节点的变频数据获取方法比较少,大致可包含如下几类:基于时间序列分析的变频数据采集方法<sup>[26]</sup>、基于 Box-Jenkins 技术的变频数据采集方法<sup>[27]</sup>、基于历史数据加权的变频数据采集方法<sup>[28]</sup>、基于傅立叶变换的变频数据采集方法<sup>[29]</sup>等。上述方法仅从节能角度出发,讨论了如何降低等频数据采集的次数,并未考虑如何利用采集的数据逼近、再现真实的物理过程。因而,面向物理过程可高精度重现的、节能的变频数据采集方法将成为未来传感器网络领域研究的热点问题之一。

在感知数据的收集与整合方面,现有的研究包括:事件或任务驱动的数据收集方法<sup>[30-31]</sup>、基于时空相关性的数据收集方法<sup>[32-37]</sup>、基于概率模型的数据收集方法<sup>[38-40]</sup>、基于抽样技术的数据收集方法<sup>[41]</sup>、基于语义信息的异质数据整合方法<sup>[42-43]</sup>等。

上述方法在节能和精确度等方面就能达到较高的性能。然而,目前关于感知数据获取与整合的研究还集中于处理单一类型的数据,鉴于传感器网络的应用越来越广泛、所监测的对象也越来越复杂,所以在未来的研究中,多模态感知数据的高效获取与有效整合会成为传感器网络领域的一个热点问题。

在定位技术的研究方面,基于测距的定位方法有利用信号到达时间、时间差定位的方法<sup>[44-45]</sup>、利用信号到达角度定位的方法<sup>[46]</sup>、利用信号强度定位的方法<sup>[47]</sup>。基于测距的定位方法对节点的硬件条件要求高,并且易受干扰,适用的环境有限。鉴于上述原因,人们开展了非测距定位的研究,包含基于质心的定位算法<sup>[48]</sup>、基于距离向量的定位方法<sup>[49]</sup>。这些算法可以不利用测距信息进行定位,但是定位的精度较低,为此近年来又发展出了一些新的非测距定位方法,如基于近似三角形内点测试的定位方法<sup>[50]</sup>、Fingerprinting 算法<sup>[51]</sup>等。综上所述,目前设计高精度、高鲁棒性、可扩展性强的非测距定位方法仍是无线传感器网络研究的热点问题。

### 1.2.3.2 “联”

所谓“联”是指如何使用各种通信手段以保证整个传感器网络的联通性。这方面的研究包括网络通信协议的设计、网络优化策略及网络支撑技术的研究等。

网络通信协议的研究涉及物理层、数据链路层、网络层。物理层的研究主要