



中国计算机学会学术著作丛书

物联网智慧安监技术

张勇 著



清华大学出版社



中国计算机学会学术著作丛书

物联网智慧安监技术

张勇 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地讲述了物联网智慧安监领域的基本理论、方法及其在危化品泄漏监管方面的应用。全书共分7章,第1、2章概述了危化品物联网智慧监测定位的分类,综述了物联网危化气体监测定位算法的研究现状,给出了定位算法性能评价指标;第3章分析了危化品物联网智慧监测定位所涉及的关键问题和实现方法,设计了监测定位系统;第4~7章探讨了基于序贯分布式卡尔曼滤波、序贯最小均方差估计、能量均衡并行粒子滤波和高斯混合模型非线性滤波的危化气体监测定位算法,推导了算法迭代公式,进行了计算机仿真。

本书注重结构的完整性和内容的连续性,强调理论推导的连续性和语言描述的精炼性,力求从简到繁、由浅入深、循序渐进。

本书可供从事信息与自动化控制技术的广大科技人员参考,也可作为信息与自动化工程学科研究生的教材。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

物联网智慧安监技术/张勇著. —北京:清华大学出版社,2019

(中国计算机学会学术著作丛书)

ISBN 978-7-302-53034-3

I. ①物… II. ①张… III. ①互联网络—应用—化工产品—危险物品管理—安全监察—研究
②智能技术—应用—化工产品—危险物品管理—安全监察—研究 IV. ①TQ086.5-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第094460号

责任编辑:汪汉友

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

责任印制:丛怀宇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:7.5

字 数:184千字

版 次:2019年9月第1版

印 次:2019年9月第1次印刷

定 价:88.00元

产品编号:081364-01

前 言

物联网是微机电系统、智能传感器、嵌入式系统、计算机网络和分布式信息处理等多种技术融合的产物,目前已成为信息、通信与自动化控制等学科的重要研究热点,具有重要的理论意义和实用价值。近年来,频发的危化品泄漏事故严重地影响着自然环境和人民的生命财产安全,对安全监管水平提出了新的挑战。物联网智慧安监可将“防、管、控”等安全监督管理业务融于一体,通过整合安全信息资源,建立日常监管和应急救援智能信息化系统,可提供全面感知的、高效可控的智慧安监服务。

本书在国家自然科学基金项目“三维时变气流环境下机器人寻踪气味源方法研究”“机器人气体泄漏源定位关键问题研究”“动态气流环境中机器人主动嗅觉鲁棒寻源方法研究”、天津市科技支撑项目“铁路危险化学品运输智能监控物联网系统”、天津市自然科学基金项目“时变流场无线传感网络多气体泄漏源定位研究”、天津市自然科学基金(企业科技特派员)项目“物联网危化品物流智能监控管理系统研制”、天津市高校科技发展基金项目“时变气流环境中基于分布估计的气体源测定研究”等多年来的相关课题研究的基础上,对运用物联网协作信息处理技术进行危化气体泄漏监测定位的研究成果进行了汇总及提炼。

本书共分7章。第1章为绪论,分析了物联网智慧安监技术,概述了危化气体物联网智慧监测定位的分类、实现方法和基于物联网的危化气体监测定位算法研究现状,指出了本书的研究背景和所做的主要工作;第2章为危化气体物联网监测定位关键问题,阐述了危化气体扩散的基本理论和模型,重点归纳了基于物联网的智能协作信息处理框架,给出了危化气体监测定位算法评价指标;第3章为危化气体物联网智慧监测定位系统,分析了系统具体功能需求,完成了环境状态监测结点、物联网中异构网络网关、智慧监测定位终端等部分的软硬件设计;第4章为基于序贯分布式卡尔曼滤波算法的危化气体监测定位,研究了基于高度非线性、非高斯特征危化气体扩散模型的序贯分布式扩展卡尔曼滤波算法和序贯无迹卡尔曼滤波算法,并对两种算法的性能进行了计算机仿真分析;第5章为序贯最小均方差估计算法的危化气体监测定位,研究了在网络能耗约束条件下,基于分布式最小均方差迭代估计的监测定位算法,并对算法的性能进行了计算机仿真验证分析;第6章为能量均衡并行粒子滤波危化气体监测定位,研究了基于并行分簇传感网络信息处理和粒子滤波基本原理的监测定位算法,实现了并行簇集之间的调度和协作多输入输出(MIMO)通信,通过计算机仿真验证了算法的有效性;第7章为高斯混合模型非线性滤波危化气体监测定位,研究了基于高斯混合模型和非线性粒子滤波相结合的危化气体泄漏参数后验概率分布迭代估计监测定位算法,通过计算机仿真验证了算法的有效性。

作者在本书编写过程中得到了天津大学博士研究生导师孟庆浩教授、天津大学博士研究生导师张立毅教授等的大力支持和帮助。另外,作者在研究过程中参阅和引用了部分国内外学者的相关文献,在此一并致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免会出现一些疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2019年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 何为物联网智慧安监技术	1
1.2 危化品泄漏监管现状	2
1.3 危化气体物联网智慧监测定位	3
1.4 基于物联网的危化气体监测定位算法	6
1.4.1 基于经典概率估计的定位算法	6
1.4.2 基于贝叶斯推理的定位算法	7
1.4.3 基于非线性滤波估计的定位算法	8
1.4.4 基于智能优化算法的定位算法	10
1.5 课题研究背景及结构安排	10
1.5.1 本书研究背景	10
1.5.2 本书的结构安排	10
第 2 章 危化气体物联网监测定位关键问题	12
2.1 引言	12
2.2 危化气体扩散理论及模型	12
2.2.1 气体扩散影响因素	12
2.2.2 高斯气体扩散模型	13
2.2.3 基于湍流扩散理论的气体扩散模型	14
2.3 基于物联网的智能协作信息处理框架	16
2.3.1 经典分布式估计算法	16
2.3.2 物联网监测结点调度与规划策略及自组织通信	18
2.4 危化气体泄漏安全监测与定位性能评价	23
2.4.1 定位误差和收敛速度	23
2.4.2 运算复杂度	23
2.4.3 系统容错性和自适应性	23
2.4.4 结点功耗和生命周期	23
2.5 本章小结	23
第 3 章 危化气体物联网智慧监测定位系统	25
3.1 引言	25
3.2 危化气体智慧监测定位系统总体设计	25
3.2.1 系统设计需求分析	25

3.2.2	总体设计方案	25
3.3	危化气体环境感知监测系统设计	26
3.3.1	气体传感器分类及选型	26
3.3.2	危化气体环境感知监测系统硬件电路设计	28
3.3.3	电源选型及硬件电路设计	31
3.3.4	危化气体环境感知系统软件设计	33
3.4	无线通信网关模块设计	38
3.4.1	网关总体结构及运行流程	38
3.4.2	网关硬件设计	39
3.4.3	网关软件设计	41
3.5	智慧监测定位终端系统设计	43
3.6	本章小结	44
第4章	基于序贯分布式卡尔曼滤波算法的危化气体监测定位	45
4.1	引言	45
4.2	危化气体扩散的模型描述	46
4.2.1	气体的扩散和测量模型	46
4.2.2	气体扩散过程的状态空间模型描述	47
4.3	基于序贯分布式卡尔曼滤波算法的定位	48
4.3.1	卡尔曼滤波理论	48
4.3.2	基于序贯扩展卡尔曼滤波算法的定位	49
4.3.3	基于序贯无迹卡尔曼滤波算法的定位	52
4.4	基于序贯卡尔曼滤波算法的危化气体监测的定位	54
4.4.1	基于序贯卡尔曼滤波算法的危化气体监测定位过程	54
4.4.2	基于序贯卡尔曼滤波算法实现危化气体监测定位	54
4.5	算法性能分析及仿真结果	56
4.5.1	仿真参数设定和性能指标	56
4.5.2	仿真结果分析	57
4.6	本章小结	60
第5章	基于序贯最小均方差估计算法的危化气体监测定位	61
5.1	引言	61
5.2	最小均方差气体扩散状态与观测方程	62
5.3	基于序贯最小均方差估计算法的定位	63
5.3.1	气体泄漏参数的最小均方差估计量及均方误差	63
5.3.2	监测结点协作信息融合目标函数构建	65
5.3.3	结点调度及路由规划算法推导	67
5.4	算法性能分析及仿真结果	69
5.4.1	仿真参数设定与性能指标	69

5.4.2	仿真结果分析	70
5.5	本章小结	73
第6章	能量均衡并行粒子滤波危化气体监测定位	74
6.1	引言	74
6.2	并行分簇传感网络系统模型	75
6.2.1	系统状态模型	75
6.2.2	系统观测模型	75
6.3	并行分簇粒子滤波算法	76
6.3.1	粒子滤波原理	76
6.3.2	并行粒子滤波算法	77
6.4	并行分簇传感网络信息处理机制	78
6.4.1	传感网络结点分簇及调度策略	78
6.4.2	能量均衡并行分簇多结点数据传输策略	78
6.4.3	能量均衡危化气体泄漏参数估计量目标函数	80
6.4.4	基于奇异值分解的估计量目标函数凸优化求解	80
6.5	算法性能分析及仿真结果	83
6.5.1	仿真参数设定与性能指标	83
6.5.2	仿真结果分析	83
6.6	本章小结	88
第7章	高斯混合模型非线性滤波危化气体监测定位	89
7.1	引言	89
7.2	高斯混合模型	90
7.2.1	高斯混合模型定义	90
7.2.2	基于EM算法的高斯混合模型参数估计方法	91
7.3	基于动态传感网络的危化气体监测定位	92
7.3.1	问题描述	92
7.3.2	扩散分布状态模型及观测模型	92
7.3.3	基于GMF的气体泄漏源参数估计算法	93
7.4	源参数估计定位的传感器管理策略	97
7.4.1	基于条件信息熵的结点选择效用函数	98
7.4.2	条件信息熵梯度传感网络结点优化调度策略	98
7.5	算法性能分析及仿真结果	101
7.5.1	仿真参数设置及性能指标	101
7.5.2	仿真分析	102
7.6	本章小结	104
参考文献	105

第 1 章 绪 论

1.1 何为物联网智慧安监技术

随着低成本、低功耗、多功能传感器和无线通信技术的蓬勃发展,在计算机网络领域诞生了一种崭新的无线网络——物联网(Internet of Things)^[1-4]。目前,物联网技术在国际上备受关注,是多学科高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域。它综合了传感器、嵌入式计算、现代网络、无线通信、分布式信息处理等技术,是微机电系统(Micro-Electro-Mechanism System, MEMS)、嵌入式系统(Embedded System)、无线通信系统等多种相关技术结合的产物^[5]。

物联网中的传感器结点不仅可以完成环境信息采集与处理,还可以在所搭建的无线通信网络平台通过单跳或多跳的方式进行直接或间接的信息交互。结点既是信息的采集和发出者,也是信息的路由者,采集的数据通过多跳路由传送到网关,网关一般被视为特殊的结点。若能在传感网络中添加一些中继结点或网关结点完成局域信息收集或处理,然后将处理结果传送到其他中继结点或者 Internet、移动通信网络、卫星等地方,也可利用无人机飞越网络上空,通过网关采集数据,传递给用户终端^[6-7]。物联网系统架构如图 1-1 所示。

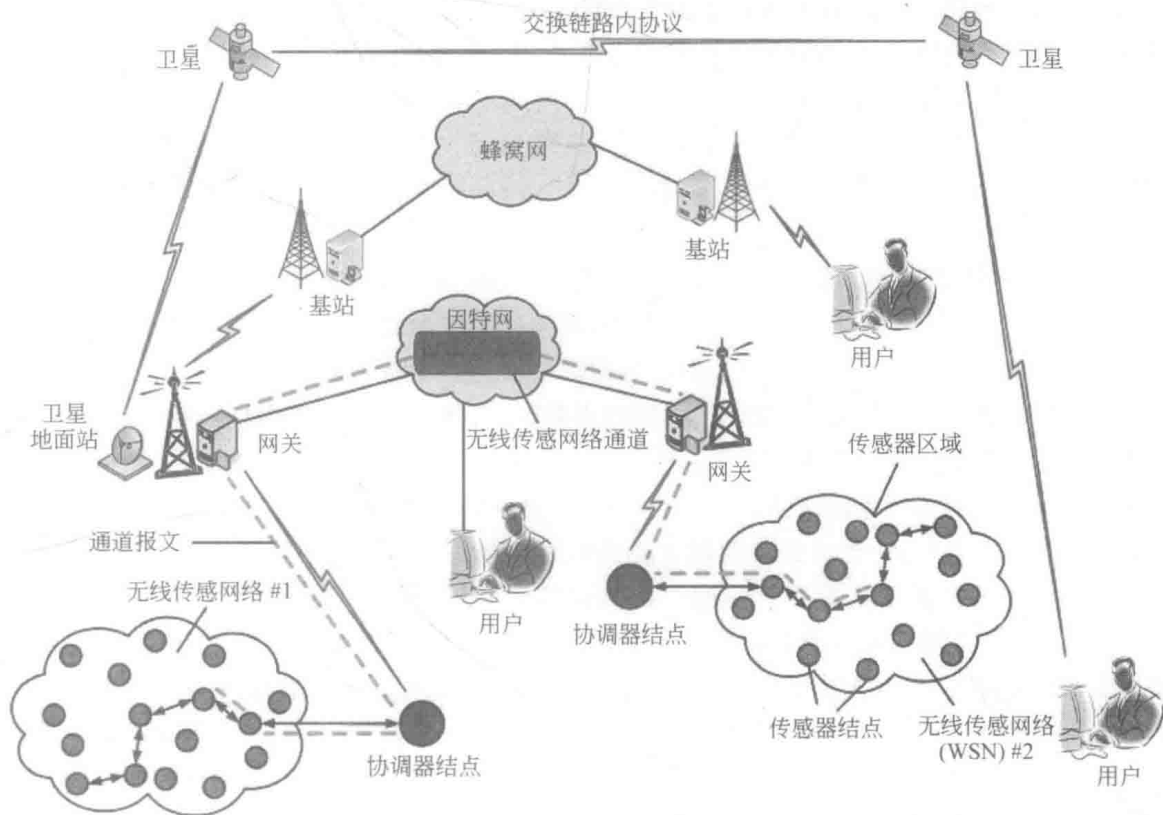


图 1-1 物联网系统架构

由于物联网具有网络自组织、广覆盖、容错性高以及高精度测量和组网成本低、构建灵活、方便等优点,因此引起了学术界和工业界的高度重视,被认为是将对 21 世纪产生巨大影响的技术之一。物联网在军事和民用领域均已显示出明显的应用潜力,例如,防控、反恐及多元化的战场环境监测^[8]、环境监控^[9]、防灾、救灾^[10]、医疗监护^[11]、工厂的管理及泄漏源监测^[12]、目标源追踪与定位^[13]等。可以想象,随着传感网络技术的不断发展,人与周围物理世界的交互方式将会得到革命性的改变^[14]。

物联网智慧安监在广义上是指将物联网智能信息技术集成应用于安全生产监督管理行业,将安全监管部门“防、管、控”三大业务功能融于一体,整合安全生产监督管理信息资源,建立安全生产电子政务、日常监管、应急救援等基于物联网的信息化系统,围绕安全生产监督管理的数字化、网络化、智能化和可视化发展形式,提供全面感知的、有效控制的高效管理和优良服务,逐步实现安全生产监管业务与信息化的深度融合。在狭义上主要是指安全生产监督管理信息化系统,即基于宽带多媒体信息网络、物联网、云计算、智能计算、空间信息系统等技术,构建一种面向安全生产监督管理、控制与服务的综合应用基础设施平台,实现对感知数据的集中管理、海量信息的智能化处理,及企业监管信息的互联共享。基本包括以下几个方面内容。

(1) 实现安全生产元素全面地感知。安全生产中布设大量的多源感知终端,通过传感器网络,在运行、服务中捕获到安全生产、运输、存储及其环境的多种信息元数据。

(2) 进行海量的数据处理。实现海量的跨部门、跨行业异构数据的存储能力,对海量异构数据进行高效分析、计算和处理,构建基于数据分析和知识管理的智能应用能力。

(3) 提供智能的管理服务。在形成支撑安全生产监督管理的行业智能应用的基础上,建立面向服务的智慧安监物联网信息化综合应用的统一管理平台,为公众、企业、政府部门等提供普适的、智能的应用与服务。

1.2 危化品泄漏监管现状

随着工业的发展和技术的进步,越来越多的危化品直接或间接被用于生产生活中。根据统计表明,国内使用的化学品共有 3777 种,其中剧毒致死化学品 335 种^[15]。这些化学品在改善人们生产生活的同时,也对人们的生命和财产构成了威胁:一方面,这些危化品在生产、运输和存储等过程中发生高浓度、区域性泄漏,将直接导致人员的伤亡和财产的损失;另一方面,危化品在室内外环境中缓慢扩散,并在环境中累积构成污染,从而诱发长期处于此污染环境的人产生一些潜在的、严重的疾病,造成人员伤亡和财产的间接损失。有关资料显示,1953—1992 年,全世界损失超过 1 亿美元的危化品泄漏事故多达数千起^[16]。例如,发生在 1984 年 12 月的印度博帕尔农药厂剧毒液体泄漏事故直接造成 3150 人死亡,超过 20 万人残疾,约一半城市人口受到此次事故的影响。国内危险化学品事故带来的危害也不容小觑。Zhang 等^[17]对我国 2006 年 1 月至 2010 年 12 月发生的化学危险品伤亡事故进行了统计,结果显示,这 5 年共发生事故 1632 起,死亡人数为 1038 人,每年事故总数基本维持不变(略呈上升趋势)。文献^[17]指出,事故的多发省份为江苏、山东、浙江、广东和湖北等经济比较发达的人口密集区,并且事故在城区的发生率远高于郊野。例如,2013 年 8 月 31 日,在上海发生的液氨泄漏事故造成 15 人死亡,25 人受伤;2004 年 4 月 16 日,在重庆发生的氯

气泄漏事故造成 9 人死亡,疏散了 15 万人。

频发的危化品泄漏事件和严重的环境危机说明我国在有毒有害物的监测、预警、管理和防护上还存在着一定的问题。如果能有效利用以物联网技术为代表的智能监测技术实现危化品有效治理和监管,将能极大地减小甚至消除危害,避免财产损失。

1.3 危化气体物联网智慧监测定位

要想对危化品突发泄漏或偷排偷放实现有效的治理和监管,就需要首先确定危化品的泄漏源,然后再基于物联网技术,结合危化品泄漏和扩散的相应机理,进行安全、可靠的危化品智慧监测与定位。这些监测与定位方法的研究在近年受到了越来越多的关注^[18-20]。多年以来,研究人员针对危化品泄漏源的定位问题进行了不懈的努力并取得了一定的成果,其中以危化气体泄漏监测定位研究更具代表性。不管是危化品突发泄漏还是日常生产中的偷排偷放,危化品以气态在空气中扩散是非常重要的方式。目前,危化品气体泄漏定位可以通过生物监测、移动机器人、传感网络等方法实现,这些研究成果有利于对危化品泄漏事故进行快速预警和监控,同时也可以有效地治理和监管有害气体的偷排偷放,这对保障人们的生命和财产安全、改善生态环境具有重大的现实意义。

基于物联网的危化气体源定位是传感网络技术在环境监测领域的一个典型应用,具有重要的现实意义^[21-22]。气体在空气中的物理扩散过程通常可描述为一个随机过程,因此采用基于物联网技术的分布式信息融合算法对气体泄漏参数进行预测估计是一种可行的解决方法。该方法一般采用概率估计算法进行实现,所以通常也被看作对环境中的气体物理扩散模型构建的逆向求解问题,即利用已知(或者假设)的气体扩散模型和气体浓度信息对气体泄漏的参数进行反向求解^[23]。考虑到物联网中传感网络结点所具有能量有限性和因大量传感结点部署所造成的网络拓扑结构具有高度动态性等特点,所以物联网危化气体监测定位所采用的信息融合算法就必须结合实际环境以及物联网中的其他各种约束条件来具体实现。

按网络拓扑结构的不同,物联网危化气体监测定位可分为静态拓扑网络定位和动态拓扑网络定位两大类。

(1) 基于静态拓扑的危化气体物联网监测定位。在已知的固定环境中,通常需要在感兴趣的已知区域部署静态固定物联网监测结点,各监测结点会上传各自的测量值到融合中心,然后通过分析计算这些数据得出泄漏源的各种参数,这种气体源监测定位的方法称为静态拓扑物联网监测定位法。然而,在单纯使用静态拓扑物联网对气体源进行定位时,结点位置需要提前预知,一旦泄漏位置周围没有安装监测结点或者结点失效,就会大大降低定位的精度,甚至导致定位失败;另外,在使用静态物联网对气体源定位的过程中,若想获得较高的定位精度,就需要在已知环境中布置大量的结点并存储其位置信息,这将会增加实现成本。

(2) 基于动态拓扑的危化气体物联网监测定位。为了弥补静态拓扑物联网气体监测定位方法的上述缺陷,在移动机器人技术的帮助下,人们提出了在移动机器人上安装相应的传感器,构成移动监测结点的方法,这些移动机器人可以自主移动并实现动态拓扑部署,多个相同的移动监测结点还可构成动态拓扑物联网。这种物联网可以固定在某个位置作为固定结点对环境进行监测。在气体源紧急泄漏情况下,根据结点的测量值进行路由规划并

完成结点的运动控制,快速、合理地覆盖气体泄漏区域,实现较为精确的监测定位。

根据两种不同的网络拓扑结构,物联网多节点协作信息处理技术可以采用集中式和分布式两种方法具体实现。

(1) 集中式物联网协作信息处理技术。如图 1-2 所示为基于物联网的集中式协作信息处理系统,网络中被激活的监测结点首先对危化气体泄漏环境进行测量并对得到的信息进行预处理,得到一个局部融合结果,这些融合结果会被传递给融合中心(Fusion Center, FC),最后由融合中心把监测区域内所接收的所有信息用信息融合算法进行计算并得到最终的结果。该方法的优点是可以很容易地得到全局最优解,缺点是由于各监测结点与融合中心之间存在一定的传输距离,无线通信对比数据运算占用的资源更大,特别是在进行远距离通信时情况更加严重,这影响了整个网络的生命周期。由此可见,集中式协作信息处理在实际应用中具有很多局限性,只适用一些小规模的物联监测网络^[24]。

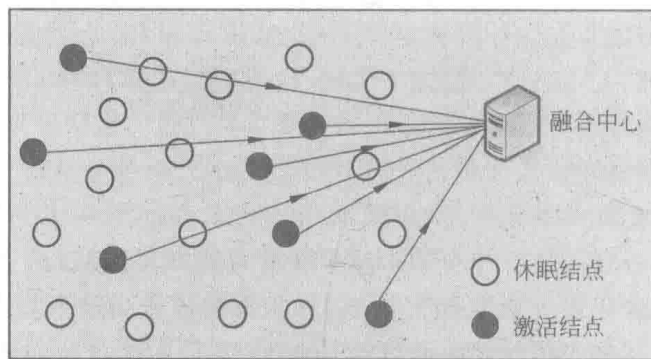


图 1-2 集中式物联网信息融合系统示意图

(2) 分布式物联网协作信息处理技术。分布式物联网协作信息处理技术一般有两类实现方法:基于序贯分布式估计(Sequential Distributed Estimation)的实现方法和基于分簇分散式估计(Cluster Based Decentralized Estimation)的实现方法。

文献[25-26]给出了序贯分布式物联网信息融合系统的理论框架,在序贯分布式信息融合系统中,网络中的监测结点往往依次形成串行的拓扑结构。首先,起始结点对所采集的自身位置周围的环境信息进行初步的处理,然后传给下一个结点,被选择的结点需要将本地观测值和前一个结点所发送来的处理结果进行信息融合并得到新的估计结果,然后再发给它所选择的下一个结点,最后直至发送给最终接收结点,如图 1-3 所示。

序贯分布式物联网信息融合方法在实现过程中往往只需要在各监测结点间进行短距离的单跳或多跳传输,不需要发送给融合中心,有些情况下,甚至不需要融合中心。因此,可很大程度上降低通信能耗,有效提高整个传感网络系统的寿命并增加网络利用率。若执行过程中的某中间结点发生故障或者失效将会导致整个系统信息传递中断,同时由于每个结点都需要对观测值进行融合并压缩成少量的数据才进行传递,在某种程度上也会造成原始数据的部分信息丢失。因此,序贯分布式信息融合方法很容易受到连接故障与结点状态的影响,其鲁棒性和可靠性会随着系统中监测结点的增多而变差,网络延时也会增大。

分簇分散式物联网信息融合^[27]通常是基于分簇(Cluster)的传感网络系统进行实现,即将网络中的结点通过某种方式静态或者动态的划分为多个簇,每个簇通常都包含一个簇头

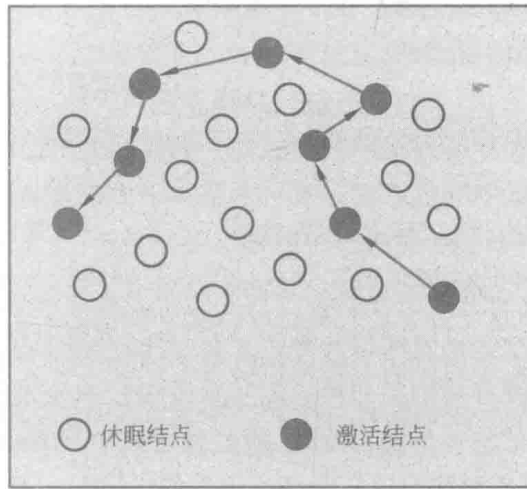


图 1-3 序贯分布式物联网信息融合系统示意图

结点(Cluster Head Node),簇内其他结点被称为普通结点或簇成员结点(General Node),如图 1-4 所示。

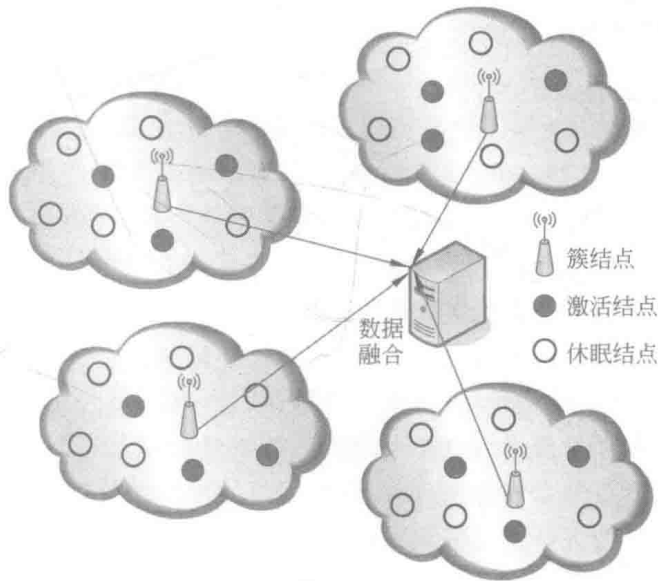


图 1-4 分簇分散式物联网信息融合系统示意图

首先,簇内普通结点将原始测量值进行简单处理,然后传送给簇头,簇头会基于所收集的簇内结点信息完成所在单元的信息融合,得到融合结果并传递给下一个分簇的簇头或者直接发送给融合中心,由融合中心根据各簇头所传递的判决结果做出最终系统判决^[28]。分簇的传感网络系统通常不需要所有监测结点都与融合中心直接建立通信关系,因此可节省大量通信能耗,同时,其在簇内又利用了集中式信息融合方法增强了系统的整体性能。簇内簇头结点的选择可由多种方式实现,如采取固定结点法等^[29]。在固定结点法,每个簇的簇头总是负责与汇聚中心远距离通信,其能量衰减很快,在一定程度上会降低系统寿命,因此低功耗自适应的分簇协议(Low Energy Adaptive Clustering Hierarehy, LEACH)应运而

生^[30],此协议下的簇头选择采取轮换机制。这种选择机制的优点是可以有效防止个别结点能量的迅速耗尽,提高网络的可靠性。

1.4 基于物联网的危化气体监测定位算法

1.4.1 基于经典概率估计的定位算法

早期的目标源定位是采用固定传感器阵列实现的。华盛顿大学 Nehorai^[31]等于 1995 年便开始从信号处理的角度运用概率估计方法对目标源定位进行研究,提出了一个完整的基于物理扩散模型和概率统计模型的信号检测和参数估计理论框架,并在此基础上运用静态传感器阵列采集环境中的气体浓度信息,再通过融合中心计算实现了蒸汽源的定位。随后,其课题组成员 Porat^[32]又对源定位问题进行了扩展,采用一个移动传感器结点替代静态传感器阵列,实现了蒸汽源定位并同时移动结点在信号采集过程中的最优路径规划问题展开了研究。Jeremic^[33]把文献[32]所提出的参数估计理论框架应用到了地雷监测中,并对雷场中传感器结点的部署和成功检测到地雷的概率之间的关系进行了研究。以上工作均基于菲尔克斯定律^[34]所推导的释放源物理扩散模型实现且只针对目标源位置坐标参数进行估计,其信息融合均采用极大似然估计(Maximum Likelihood Estimation, MLE)算法由融合中心实现。

文献[35-36]中,Michalis 根据传感器结点测量的环境信息(气体浓度)采用非线性最小二乘估计(Nonlinear Least Squares Estimation, NLSE)方法对环境泄漏源的定位进行了研究。为了减少算法实现过程中的信息处理量和降低网络能耗,设定了传感器的浓度测量阈值,当结点所测浓度超过阈值时才传递给融合中心完成融合计算。作者重点在气体泄漏源定位精度与传感器结点数量以及测量方差之间关系、传感器测量阈值选择对估计性能的影响等几方面进行了实验分析。

佛罗里达大学的 Vijayakumaran^[37]也在传感器网络中运用 MLE 方法对气体释放源进行了估计定位。这种方法是传感结点把采集的气体浓度测量值进行二值化处理,并将处理后的数据周期性地传递给融合中心完成计算,实现气体泄漏源位置和时间两个参数的估计。由于该方法通过对测量值进行了二值化处理,因此可减轻算法在实现过程中的通信及信息处理消耗,但二值化处理导致估计误差较大。

Michalis^[38]对基于二值法处理实现目标源的定位进行了改进,提出了一种具有容错性的 MLE 方法实现目标源检测与估计。所改进的 MLE 算法在融合过程中对各种噪声(传感器结点测量噪音、环境噪音、通信噪音等)的影响具备了更强容错能力,更贴近了实际环境应用。

Matthes^[39]在文献[38]所推导的气体物理扩散模型基础上,又进一步考虑了气体平流因素的影响,推导出了一种新的气体扩散模型,并运用最小二乘估计算法对扩散方程求解解析,实现了气体泄漏源的位置参数估计。该气体泄漏源定位算法通过两个步骤实现:第一步,先使用固定的传感器结点采集浓度信号,并在给定的气体扩散模型的基础上对气体泄漏源的位置进行预估运算,给出一些类似泄漏源坐标点集合;第二步,对这些不同传感器结点通过预估运算得到的泄漏源坐标点集合求交集,其交集可用于最后判定是否为气体泄漏源。

该算法中运用了气体释放率对预估气体泄漏源的位置坐标进行确认。

1.4.2 基于贝叶斯推理的定位算法

还有学者从目标源参数测定的角度对危化气体泄漏源的释放率(源强)和定位问题进行研究^[40]。主要思想是利用概率统计模型与气体扩散模型相结合来构建目标源参数的数学估计模型,并根据传感器结点所测量的扩散物质浓度对气体泄漏源的释放率和位置参数进行反向推导,从而实现目标源的相关参数估计。这种方法主要基于贝叶斯推理的理论框架并结合马尔可夫随机过程及蒙特卡罗抽样等方法具体实现。贝叶斯估计理论在线性系统的参数估计中取得了很好的应用,而气体扩散模型受湍流的影响往往存在大量的非线性因素,不能直接使用贝叶斯推理方法,通常需要把气体扩散模型近似线性化处理后再进行求解以实现源参数估计。

Pudykiewicz^[41]在1998年首先对一个放射源的释放率和位置两个参数同时进行了参数测定研究,Sohn^[42-43]等于2002年基于贝叶斯理论框架对一个室内气体释放源的位置、源强和气体释放持续时间等参数进行了测定研究。通过对基于物理扩散模型的似然函数进行量化蒙特卡罗抽样,不断改进参数估计量的估计误差,最终实现气体释放源的相应参数测定。

Zhao^[44-45]基于序贯贝叶斯理论实现了气体泄漏源的分布式预估定位,具体算法如下:首先根据菲尔克斯定律推导了无湍流扩散和湍流主控扩散两种不同环境下的气体扩散模型,并基于所推导的模型设计了估计量的概率分布函数,然后根据测量信息选定一个初始结点计算求解估计量分布函数的后验概率分布,并由当前运算结点把估计结果与设定阈值进行比较,当达不到设定阈值时,当前运算结点将估计结果向下一个结点传递,并由下一个结点在其测得的环境信息基础上进一步完成运算和更新,达到或者小于设定阈值则停止迭代运算。传感结点的选择和估计信息的路由规划基于文献[25-26]中信息驱动机制实现。与文献[25-26]不同的是,该算法在结点之间传递的信息是估计量的后验概率分布。该算法实现的前提是气体泄漏源扩散模型通常必须符合某种概率分布函数,但是实际环境中所推导气体泄漏源的扩散模型是高度非线性的,其估计量的后验概率分布不一定能够得到,因此文献[44]采用近似高斯模型和将非线性气体泄漏源扩散模型简单线性化的方法予以解决,以便于用贝叶斯理论实现对估计量概率分布函数的后验概率分布求解,相对来讲存在一定的估计误差。

在前面所阐述的集中式定位方法中也提到了基于贝叶斯理论的定位方法,算法的实现是由融合中心在不同的时间周期内通过迭代运算完成,属于时间域中的贝叶斯迭代估计。而文献[44-45]则把贝叶斯迭代估计扩展到了传感网络的空间域,融合计算的完成不再需要融合中心而是由传感网络中的不同激活结点来实现,其估计结果需要在网络中进行传递和更新。

同属Nehorai课题组的Ortner^[46-47]也提出了一种基于贝叶斯理论框架的危化气体泄漏源监测与定位方法,环境气体浓度的测量由固定的传感器阵列实现。首先,文献[46]中作者通过大量的蒙特卡罗抽样仿真实验,基于费恩曼-卡茨(Feynmann-Kac)公式给出了现实复杂环境中的危化气体近似扩散模型,此模型充分考虑了风和湍流因素影响;然后,运用贝叶斯理论框架完成了室外环境和室内两种环境下的危化气体泄漏源定位。文献[47]则在文献[46]基础上采用广义似然比检验方法对分布式序贯气体泄漏源参数估计进行了实现,主要

完成了气体泄漏源位置参数和释放率估计。

Chow^[48]、Delle^[49]和 Hutchinson^[50]等针对基于马尔可夫链的蒙特卡罗抽样和贝叶斯推理相结合的方法对气体释放源的参数估计以及扩散模型重构进行了研究和综述。Keats^[51]和 Yee^[52,53]在 2006 年对该方法进行了改进,通过引入伴随阵模式使其计算性能得到了很大的提高。2008 年,Senocak^[54]在 Chow、Keats 等人的研究基础上,进一步引入了风场对算法性能的影响。这种基于高斯扩散模型的参数测定方法,通常采用求解析解的方法实现参数估计,其运算速度快,效率高,但所需前提假设往往比较苛刻,应用范围也比较窄。

澳大利亚学者 Gunatilaka^[55]和 Moreland^[56]等人也对目标源定位问题进行了研究。他们首先对放射源的源强和定位问题展开研究。主要采用基于贝叶斯理论和蒙特卡罗抽样方法对环境单个和多个放射源的源强和位置参数进行了估计,随后其将针对放射源所提出的理论框架应用到了危化气体扩散源的源强和定位问题研究中^[57]。文献[57]在选择气体扩散模型的时候充分考虑了湍流对源参数估计的影响,在对非线性湍流模型进行线性化处理时采用了一种恒定值和波动值分解的方法,即把传感器结点周期性地采集的环境浓度信息分解为恒定部分(周期内所采集的信息均值)和波动部分(噪声)进行处理,由融合中心分别求解实现源强(释放率)和位置参数估计,其中恒定部分基于贝叶斯估计理论及扩散模型用解析解方法实现,而波动部分则采用蒙特卡罗积分近似的后验概率分布期望来实现。最终该算法在真实环境的 COANDA 浓度数据库中得到了验证,实验结果比文献[48-53]具有更强的鲁棒性和实际应用意义。作者还进一步分析了结点部署浓度与源参数估计结果之间的关系。

1.4.3 基于非线性滤波估计的定位算法

Jaward^[58]运用序贯蒙特卡罗方法(粒子滤波)对空气中的污染物排放进行了实时追踪定位研究。主要方法是运用粒子滤波实时推导污染物云团扩散边界位置,从而绘制扩散云团形状,并根据云团的扩散形状确定气体泄漏源的位置,通过实时更新完成追踪。面向高度非线性、非高斯污染物扩散模型以及传感器所采集的具有大量噪声的测量值,传统贝叶斯方法往往需要已知气体扩散模型,并采用近似线性化方法实现,在高度非线性模型主控的环境中往往不能很好地直接加以应用,而采用序贯蒙特卡罗技术可以在模型未知的情况下,运用大量粒子近似代替概率分布的方法来解决高度非线性问题,从而实现空中污染物的跟踪。但是其计算量通常比较大,对网络能耗约束要求比较高。

Zhao 在文献[59]中首先对文献[44-45]所推导的气体扩散模型给出了经过线性和非线性分解的传感器测量模型,使其模型转换为线性和非线性两个部分的叠加,然后采用信息驱动机制的思想和分布式极大似然估计算法实现了危化气体泄漏源定位。其定位算法的实现主要包括两个部分。

(1) 采用增量高斯-牛顿法完成基于扩散模型和极大似然估计算法所推导的似然函数的迭代求解。

(2) 采用信息驱动机制实现路由结点的选择和规划,即先构建一个信息融合目标函数,然后对信息融合目标函数求极值以实现下一个结点的选择。信息融合目标函数中结点与结点之间估计量信息的计算或估计量性能评价指标采用基于 Cramér-Rao Bound(CRB)下限

的费希尔(Fisher)信息矩阵来实现。费希尔信息矩阵是算法实现过程中不可或缺的一个部分,其决定着算法何时结束。在该算法中传统的面向时间域的高斯-牛顿法在传感器网络中被转化为面向每个传感器结点的空间域求解方法,即由每一个被激活的结点实现似然函数的求解并最终完成估计量的更新和传递。这样可以不用激活全部结点来采集环境信息,从而节省网络能耗,该迭代方法非常类似卡尔曼滤波方法,因此该文在实验分析过程中针对结点的迭代运算求解引入了多种卡尔曼滤波算法并进行了比较分析。Branko^[60-61]基于信息驱动机制并采用分布式序贯估计算法对放射点源和伽马放射源的定位进行了研究。Keats^[62]等人2010年引入了熵的概念来测定源强信息。

还有部分作者运用卡尔曼滤波的思想实现了危化气体泄漏源的定位。文献[63]提出一种基于传感器网络的污染物释放点源的位置和释放率参数预估算法。首先,根据实际监测环境来激活相应的传感器结点,这些被激活的结点需要对环境气体浓度信息进行实时采集并完成信息传递,由于受到网络能耗的约束,信息的传递应使用尽可能少的结点来实现,信息应朝着气体浓度高的结点方向进行传递,最终选择一个最接近气体释放源的结点作为目标结点,并通过该结点对环境信息的采集和运算给出一个气体释放源位置和强度的预测估计。网络中的每个结点均可以激活其周围的邻居结点并获取其相应浓度测量信息并完成迭代运算,通过比较估计方差的大小在邻近结点中选择下一个执行结点,并将估计结果传递给被选择的下一个结点,由其完成新一个周期的迭代运算。结点与结点之间通信采用局部定向 Gossip(流言)方法实现,被选择结点接受滤波参数并完成迭代更新。

基于分簇传感网络的分散式估计(Decentralized Estimation)定位方法是一种基于并行分布式信息融合的定位方法,一般需要对传感网络中结点分簇,并基于簇内一致性滤波计算方法具体实现^[64-67]。该法在簇内单元所采用的信息融合方法通常为集中式信息处理方法,由于其简单的算法结构和较高的运行效率,在传感网络分布式估计算法研究中引起了广泛关注。一致性滤波算法起源于并行分布式计算中的一致性问题的,通过给定网络中相邻结点或者簇内结点之间的相互协作规范和协议,使传感网络中每个结点在相互协作估计的过程中渐近地趋于全局一致以获得最优结果。一致性滤波算法目前已经在多智能体控制系统领域获得广泛的应用,如多机器人系统的编队和队形控制^[68]、航天器的姿态控制^[69]和无人机系统的航迹控制^[70]等。

在基于分簇分散式估计的目标源定位方法中,网络中每个传感器结点只与其通信范围内的邻近结点(或簇内结点)进行信息交互,而不需要全部与融合中心进行直接通信,大大减少了网络中的通信能量消耗,而且网络的拓扑结构可根据外界环境的变化并结合结点自身的位置和能量来动态调整,大大提高了系统可靠性和鲁棒性。

Spanos^[71-72]等人最早研究了一致性算法在传感器网络中的应用,文中应用加权平均一致性算法设计了分布式最小二乘估计机制。之后,Olfati-Saber^[73-74]在文献[71]所提出的动态一致性算法基础上又进一步将卡尔曼滤波器与一致性算法相结合,提出了一种分布式卡尔曼滤波(Distributed Kalman Filter,DKF)算法。该DKF算法中包含一个低通滤波器和一个带通一致性滤波器,其中低通滤波器用于融合传感器测量数据,带通滤波器用于融合协方差信息。每个传感器可从其邻近结点接收包括传感器测量值、协方差值的融合结果以及状态估计值的信息包,并通过加权运算使每个传感器对状态的估计值在簇内趋于一致^[75]。该算法可应用于具有不同观测矩阵的传感器网络,数值仿真表明该算法具有较高的状态估