

广域复杂流体系统中基于无线传感网的数据保存关键技术研究进展

张 婕 梁俊斌 蒋 婵

广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004

广西多媒体通信与网络技术重点实验室 南宁 530004

(jiezhang_j@163.com)



摘 要 流体系统包括城市供水管网、天然气供给管网等,是具有经济和社会价值的重要基础设施。它们具有分布地域广、结构复杂、规模庞大、难以检测等特点,在出现泄漏、污染等异常时难以快速发现和准确定位。随着传感器技术、通信技术、微机电技术等技术的发展,利用无线传感网来对系统进行监测成为研究热点。由于在流体系统中通信困难,数据被监测到后很难实时传送给用户,只能暂时保存在传感器节点(简称节点)上,等待适当的时刻再进行上传。但是,节点具有体积微小、易损坏、存储容量小、通信能力弱、能量有限等特点,如何可靠地存储大量的数据是一个难点问题。目前,已有部分工作对这个问题进行了研究。为了解该领域研究的进展,文中对相关工作进行了细致地分析、对比、归纳和总结,介绍了它们的优缺点,并对未来的研究方向进行了探讨。

关键词: 无线传感网络;流体系统;数据保存;节点部署;可靠传输

中图法分类号 TP393

Research Progress on Key Technologies of Data Storage Based on Wireless Sensor Networks in Wide-Area Complex Fluid Systems

ZHANG Jie, LIANG Jun-bin and JIANG Chan

School of Computer Electronics and Information, Guangxi University, 530004, China

Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology, 530004, China

Abstract The fluid system, including the urban water supply pipe networks and the natural gas supply pipe networks, is an infrastructure with important economic and social values. They have the characteristics of wide geographical distribution, complex structure, large scale and difficult to detect. When leakage, pollution and other abnormalities occur, it's difficult to quickly find and accurately locate. With the development of sensor technology, communication technology, micro-electromechanical technology, using wireless sensor networks to monitor the system has become a research hotspot. Due to difficult communication in the fluid system, the data is difficult to transmit to the user in real time after being monitored, and can only be temporarily stored on the sensor node (referred to as a node), waiting for a suitable moment to upload. However, nodes have the characteristics of small size and easy damage, small storage capacity, weak communication capability, and limited energy. How to reliably store large amounts of data is a difficult problem. At present, some work has been done on this issue. In order to understand the progress of research in this field, this paper have carried out detailed analysis, comparison, summarization and summary of related work, and learned their advantages and disadvantages, and discussed the future research direction.

Keywords Wireless sensor network, Fluid system, Data preservation, Deployment of nodes, Reliable transmission

1 引言

流体系统是可以建模为流网络(Flow networks)的一系列管道系统的总称,包括城市供水管网、天然气管道系统等。

流体系统是国民经济及社会发展的重要基础设施,具有重要的战略意义。但是,流体系统具有分布地域广、连接复杂、深埋地下等特点,对其进行全面且快速地监测是一个难点问题。而在长年的工作中,系统容易受到地下水腐蚀、管道自身老

到稿日期:2019-04-04 返修日期:2019-08-15 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金项目(61562005,61762010);广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA281169);广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划项目(桂教人(2017)49)

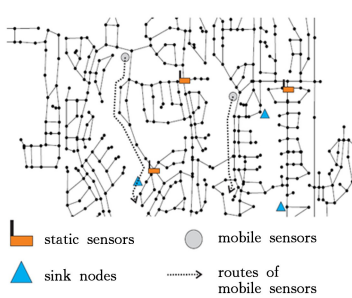
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61562005,61762010), Natural Science Foundation of Guangxi Province, China (2018GXNSFBA281169), and Thousands of Young and Middle-aged Backbone Teachers Training Program for Guangxi Higher Education [Education Department of Guangxi (2017) 49].

通信作者:梁俊斌(liangjb2002@163.com)

化、外部蓄意破坏等因素的影响,部分管道容易出现泄漏、污染等异常,从而造成大量的水资源浪费,甚至导致严重的安全事故^[1-3]。因此,如何有效地对系统中的异常进行快速监测是



(a) 管网系统



(b) 流网络图

图1 管网系统及流网络图

Fig. 1 Pipe network system and flow network diagram

数据保存是流体系统监测中的重要问题。系统的监测主要依靠在管道内部署的传感器网络来进行^[12-15],而传感器节点(简称节点)具有通信、计算、存储及能量有限等特点,很难在广域且复杂的系统中实时上传数据给用户。此外,节点容易损坏,从而导致数据丢失。因此,网络中的节点需要相互协作,在恶劣的系统环境中将数据进行有效保存,等待合适的机会再进行上传。

目前,流体系统在保存数据时遇到的主要困难包括:

(1)节点布置范围受限,投放位置难以确定。传统节点一般追求覆盖面积的最大化而采用随机散布的方式进行布置。但流体系统深埋地下,分支的密集程度不确定,有的分支距离相隔较远,而有的分支距离紧密。如果节点按常规的部署方式来布置,则可能会出现节点分布不均匀(有些地方密度大,有些地方密度小)的情况,造成不必要的资源浪费或检测缺口,导致保存的数据不完整。

(2)网络的动态性考虑不足。在流体系统中,往往在管道的开口处投放多个节点,由它们组成子网协作检测。但是,受到管道狭长形态的限制,节点组成的网络呈线性的链形态。在这样的网络中,每个节点仅有通信链上少量的邻居。如果一个节点发生故障,则很容易导致网络发生断裂。此外,节点的通信信号在管道中容易发生折射、反射等问题,这都会造成通信不可靠。在这样的环境中,数据的传输容易受到影响,部分数据容易丢失。

(3)节点运动受限,管道覆盖困难。首先,在流网络中流体的流向多为单向,即从源头向出口的方向流动。节点自身没有运动部件,主要随流体的流动而运动,其可能会因为管道某处堵塞或阀门关闭而停止运动。其次,管道中分支众多,节点在管道交叉处会随机进入某个分支。因此,可能会出现一个管道中有多个节点流入而多次重复检测或者部分管道没有节点流入而无法被检测等问题。如何在能力有限的节点上减少冗余数据的保存,或者通过保存已有的数据再根据其时空相关性推导出没有数据的管道的状态,是一系列研究的难点问题。

本文对流体系统中基于无线传感网的数据保存方法进行综述,主要贡献在于系统地归纳了流体系统中不同节点部署

目前研究的热点^[4-8]。图1(a)为一个工业环境中管网系统的照片^[9]。使用EPANET^[10]等软件将管网系统建模成流网络图,如图1(b)所示^[11]。

方式下的数据保存方案,并以此为主线介绍数据保存的研究现状。本文第1节阐述流体系统的特点及背景,总结分析现有的数据保存特点;第2节介绍现阶段国内外具有代表性的流体系统中的数据保存方案;第3节讨论流体系统应用;第4节提出需要解决的问题和未来的研究方向;最后总结全文。

2 国内外的研究现状

近年来,已有一系列的研究工作对流网络中的数据保存方法进行研究。研究的主要工作是尽可能地对整个管网进行实时监测,通过减少在收集或传输过程中的数据丢失,防止因意外或人为造成节点损坏从而导致的数据不可恢复。根据现阶段流体系统中不同的节点布置方式,可将当前的研究工作划分为3类:基于静态节点的数据保存方案、基于移动节点的数据保存方案以及移动节点和固定信标结合的数据保存方案,如图2所示。

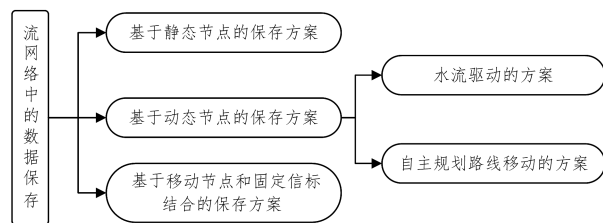


图2 数据保存方案分类

Fig. 2 Classification of data preservation schemes

2.1 基于静态节点的数据保存方案

静态节点通常基于最大人口覆盖或者最大管道范围覆盖等检测目标,部署在流体系统中的重要位置(一般为管道交叉口)^[16-20]。它们周期性地生成反映被监视环境或对象状态的参数,再通过广播或多跳的方式将参数上传或分发至其他节点进行保存^[21]。比较典型的基于静态节点的数据保存方案有RACS^[22],SACC^[23]等。

AtemehFazel等提出了一种基于压缩感知和随机接入的分布式保存方案(RACS)。该方案是基于帧实现的,由长期部署在流体系统某处的节点,在每个帧内根据一定的感知概率,随机选择是否将数据分组上传至中心节点(FC)。该方案使用压缩感知进行采样,通过少量的随机测量实现了精确的

数据恢复,避免了冗余数据的保存,节省了存储空间。同时,将数据划成小段,有效地解决了传输中断后传送成功的数据重复传输的问题。但是,RACS依赖于感知概率的选择,如果接受的数据分组较少,随机访问的方式则会导致数据分组冲突或丢失。

为了解决 RACS 由于随机访问带来的冲突,SACC 将密集传感网络划分为集群,分别对每个管道进行单独计算并保存,有效地解决了冲突带来的数据丢失问题。该方案在每个时隙中仅激活小部分传感器节点,采用多跳的方式将数据传输到汇聚节点保存。SACC 和 RACS 都基于压缩感知进行数据采样,但 SACC 在稀疏采样的基础上增加了睡眠调度的方法,不仅降低了总能耗,还延长了网络生命周期,使节点能更好地适应长期的数据保存。但是,SACC 的计算量过大,使用节点数量较多,花费成本较高,降低了实际应用的可行性。

Du^[24]等在 2015 年也提出了类似节点睡眠调度的方案,通过基于压缩感知(Compressed sensing)的调度方案可以减少额外能耗。该方案根据计算仅激活有限数量的节点来实现感知、存储以及传输数据,相较于贪婪算法,其网络生命周期延长了 20%,更适用于长期的数据保存。但该方案仅提出了激活方案,并未给出实际路由方案。

与 RACS,SACC 以及 Du 等的方案采用集中式存储不同,Jin 等^[25]增加了本地处理以保存局部缺陷附近的信息,减轻了主机的存储压力。他们在管道内壁或外部安装声学传感器,收集来自第三方在管壁上冲击产生的声波,并根据信号的特性检测整个流体系统。该方案通过在管道内壁或外部安装声学传感器,尽可能地避免了信号在反射或折射过程中产生的丢失,保证了数据的完整性。但研究中并没有给出第三方如何在管壁上冲击得到待检测的信号以及具体的传感器布置方案。以上算法的性能对比如表 1 所列。

表 1 基于静态节点的保存算法性能的对比

Table 1 Performance comparison of static node based preservation algorithms

算法	平均延迟	优点	缺点
RACS	较低	能耗小,节省空间	数据冲突或丢失
SACC	较低	生命周期延长,能量平衡	计算量大,使用节点数较多,成本较高
Rong Du 等的算法	较低	网络生命周期延长	未提出实际路由方案
Jin 等的算法	较低	矩阵运算减少	缺少具体的冲击和节点布置方案

通过表 1 的对比可以发现:静态节点的安全性好,不易被外力摧毁,避免了因节点损坏导致的数据丢失。但是,静态节点价格较为昂贵(从 4 万美元到 5 万美元不等),并且安装位置受到一定的实际约束(如随着管道内水力状况的变化,感测位置也需要调整)。此外,受节点感测范围的限制,只能保存部署节点周围的数据,无法实现对流体进行全面、快速监测^[26-27]。以污染监控为例,当管道中污染物浓度超过阈值时,静态传感器节点将触发报警并将获取的数据上传到监控中心。当监控中心知道这些传感器节点周围发生了污染事件时,污染物已经随水流动并扩散,这时监控中心无法确切知道污染的范围和扩散速度。

2.2 基于移动节点的数据保存方案

随着传感器技术的发展,逐渐使用移动节点代替昂贵的静态节点来执行研究任务^[28]。其中,移动节点包括移动传感器和移动通信器。在检测时,将移动节点投放在指定位置(一般为源头),让其随流体或自主规划路线移动或到达管道某处进行检测。移动过程中如遇其他移动节点,可与相邻节点组成子网,进而协作保存移动传感器获取的数据^[29-30]。根据目前基于移动节点的数据保存方案,可以将这些工作进一步划分为两类:基于水流驱动的方案和基于自主规划路线移动的方案。

2.2.1 基于水流驱动的方案

Suresh 等^[31]和 Mahboubi 等^[32]根据流体流速等信息计算系统中需要投放的最小节点数,尽可能地避免节点流入相同的管道,从而造成信息重复保存。其中,Suresh 等计算节点的最佳投放点位置,使投放节点数达到最小以覆盖检测整个网络,最后通过物理捕获或通过无线通信的方式收集泄漏/回流的信息。但该方案要求移动节点必须流入污染边缘的检测限定范围内。然而节点在分支处的选择受流体影响,无法预先判断节点的流动方向,具有一定的随机性,而且检测的移动节点需要物理捕获,不利于大范围区域的数据保存。而 Mahboubi 等将具有障碍物的待检测区域划分成一定大小的网格,将通信或移动引起的能量消耗作为网格边缘的权重,将选取路线和放置节点位置的问题转换为最短路径问题。然而该方案中权重的分配影响最佳路径的选择,且网格大小直接决定算法的精准度,如果选择不当则会产生大量计算冗余和存储冗余,但研究中并未给出具体权重的分配方式和网格大小的选择方法。

这些方案侧重于解决重复收集所带来的信息冗余,避免不必要的信息占用节点的有限空间,以提高保存信息的数量。而另一些方案侧重解决节点遭遇故障而导致的数据丢失,或是数据丢失后的恢复方案。

Almazayad 等^[33]采用非实时 RFID-WSN 的方案。该方案在特定时间段内只有一个节点处于活动状态,其他节点处于睡眠模式。某个节点在获取数据并将其保存后,将唤醒其他节点,在数据和任务交接后自动关闭。关于睡眠唤醒方案,有研究提出了基于位置、基于时间和中断驱动的 3 种方案来进行节点切换。实验结果表明,该方案有效地降低了节点能耗,延长了节点生命周期,使节点更适应长期的数据保存工作。并且方案中使用的 RFID 价格较低,节省了成本开支。但如何在现实场景中选择合适的中断和唤醒方式来保证数据的完整有效,也是问题研究的难点。

与文献^[33]相同,TriopusNet^[34]也考虑了节点因故障造成保存数据丢失不可逆的情况。但它侧重于解决节点遭遇意外故障而导致的监测空缺,采用新的节点及时进行替换,保证了研究数据的完整性。TriopusNet 将节点从供水管道源释放,让它随水流向前传送。到达监测点时,节点中的马达将节点固定在管道的内表面上。当节点以低电池电量运行或遇到故障时,系统就会释放一个新节点替换故障节点。然而,该方案假设通过控制水流可以使传感器的路径成为确定性的,这在不破坏管道功能的情况下实现比较困难。

表 2 基于水流驱动的移动节点保存算法的性能对比

Table 2 Performance comparison of mobile node preservation algorithms based on water flow driven

算法	平均延迟	优点	缺点
Suresh 等的算法	较高	减少重复收集, 扩大存储信息量	具有偶然性;需物理捕获; 不利于大范围区域数据的保存
Mahboubi 等的算法	较高	减少冗余信息存储	未给出具体权重的分配方式和网格大小
Almazayd 等的算法	较高	RFID 费用较低;内存大小得到改善	未给出合适的中断和唤醒方式
TriopusNet	较低	故障节点可替换	路线选择无法确定

从表 2 可以看出,与基于传统静态节点的保存方案相比,基于水流驱动的移动节点能够深入管道内感知流体的细微变化,保存的数据更加准确有效。但是其对节点的要求较高,如果在检测过程中节点遭遇意外,并且故障无法及时处理,就会导致保存无法进行,甚至可能会对系统造成损坏(如堵塞管道、引发故障);其次要求节点必须进入流体系统的故障边缘。由于水流方向无法控制,因此基于水流驱动的数据保存方案在获取管道故障数据方面具有一定的随机性。

2.2.2 基于自主规划路线移动的方案

Li 等^[9]和 Lai 等^[35]侧重对待测区域的重要位置进行检测,通过对点进行检查来减少收集不重要的信息,实现节点在有限空间中保存信息量最大。Li 等提出了基于分层整数线性规划优化算法,计算覆盖整个标记的 3-D 区域所需的最少点位置。投放的节点只需要移动到这些位置,扫描周围环境建立实时检测图像,与预处理阶段所建立的完整模板图像进行对比、分析。与传统的贪婪算法相比,该算法的时间复杂度较小,有效地缩短了整个方案所需的时间,方便数据实现快速存储。但检测图像和模板图像的匹配对比问题,仍然是急需解决的难点和关键。

而 Lai 等则考虑泄漏经常发生在两个管道的连接处,侧重于管道转向等隐藏管道的检查,设计了一种适用于隐藏管道的移动传感装置(PipeProbe)。当 PipeProbe 流过管道时,利用压力和陀螺仪传感器收集压力和角速度,计算管道的垂直和水平转向点,并将每一个转向点的起始点位置(进水口)和终点位置(出水口)作为约束条件,计算转弯的具体坐标。该方案虽然实现了隐藏管道的定位,解决了节点在隐藏管道保存数据困难的问题,但转弯坐标在约束条件下仍会产生多种可能的解决方案,需要借助其他装置来帮助确定。

以上方案都是通过获取待检测区域的空间拓扑,根据不同目标计算系统中的最佳节点投放点。通过对点进行检测,降低收集信息的冗余度以保证节点保存信息数最大。但是这类方案依赖于良好的空间模型建立,如果管道的拓扑发生改变,则需要重新建立新的管道模型,根据目标计算投放检测点,工作量较大。为了能够更好地适应管道变动的需求,基于启发式算法的方案逐渐受到研究者的关注^[36]。

Basagni 等^[37]提出了一种路径查找的启发式算法(GAAP),设计了仅依靠声学通信来交换信息的方案,通过声学信道向自主水下航行器(AUV)发送信息,再由 AUV 根据当前最好的决策做出选择,最后将收集的数据传递到位于地面或陆上的水槽。该方案不断调整路径以适应新信息,即使管道发生变化,保存工作仍能继续。但是在不同的位置启动 AUV 对 GAAP 的影响十分巨大,特别是在更密集的情景中,

错误的起点会导致接收器保存数据的信息值(VoI)性能显著下降,影响信息准确度。以上算法的性能对比如表 3 所列。

表 3 基于自主规划路线的移动节点保存算法性能对比

Table 3 Performance comparison of mobile node preservation algorithms based on autonomous planning routes

算法	平均延迟	优点	缺点
Li 等的算法	较高	时间复杂度较小	图像对比困难
Lai 等的算法	较高	实现隐藏管道的数据保存	可能损坏网络
Basagni 等的算法	较高	最大化传送数据	AUV 启动位置决定保存的信息准确度

从表 3 可知,针对基于移动节点的数据保存方案,可以发现大多数方案侧重解决节点遭遇意外而导致数据丢失的问题,或者是通过选择最佳路线来达到使用最少节点数检测最大区域范围的效果,有效地减少了待检测区域内信息的重复收集,节省了存储空间,保证了在有限空间的节点上存储信息量最大。

总的来说,移动节点相较于传统的静态节点多了灵活性,能够感知流体系统中更加细小的变化。而在基于移动节点的数据保存方案中,基于自主规划路线移动的方案与基于水流驱动的方案相比,在移动的基础上考虑了路线的选择,降低了故障检测的偶然性,能够在目标区域内进行更加全面的检测,节点获取和保存的数据更加精简。但移动节点之间大多采用水声通信,传播延迟较大,而且容易发生故障,造成数据丢失等问题。最重要的是,如果移动节点没有被设计得足够小来保证通过管道,反而会对管道造成堵塞。

2.3 移动节点和固定信标相结合的数据保存方案

基于移动节点的数据保存方法一般通过物理捕获或者依靠自身通信来获取移动节点上保存的数据。而移动节点会出现电池耗尽或毁坏死亡的情况,这将导致辛苦收集的数据损坏或丢失,从而未能及时发现、处理管道中的意外,造成能源浪费和经济损失,甚至威胁人类健康。于是,有研究者提出了在管道附近增加静态节点作为信标^[38],保证移动节点检测的数据能够及时上传,下面介绍一些比较典型的方案。

Sankary 等^[39]采用启发式算法对一组固定信标和移动节点进行优化部署。其中,移动节点跟随系统中流体一起悬浮运动,根据所需的时间间隔进行数据采样和测量,最后将感知数据通过本地化处理后发送至收发器。该方案将污染模拟一起建模,解决了静态节点数据不能对故障进行追踪的问题,有利于实时信息的保存。但移动节点可以精确穿过哪些管道需要依靠操作人员来分析判断。那么,如何在流体流向变化的同时维持用户使用压力,为系统提供更好的控制,减少覆盖冗余,实现保存信息简洁、准确是一个仍需解决的问题。

因此,Du 等^[11]将移动节点的释放位置转化成集合优化问题,提出了一种基于子模块最大化的算法,根据系统中投放的移动节点数量,使用贪婪算法计算需要投放的静态节点和汇聚节点数。该方案在交叉处释放移动节点,使其随流体流动,当其穿过预先安置的静态节点(信标)时,将结果上传至信标保存。其中,投放的移动节点数量根据人口数量给出,避免了在人迹罕至的地方投入较多的节点,从而造成资源浪费和覆盖冗余。但移动节点的通信距离较小,如果未能在允许范围或时间内将数据完全上传,移动节点漂远,则会导致节点和

信标通信中断,保存工作暂停。

为了解决移动节点在允许范围内无法将数据完全上传,以及移动节点和信标因为距离较远而造成的传输中断等,导致数据保存工作无法继续的问题,有研究者提出了在信标和移动节点之间增加中间节点的方案,旨在加强信标和移动节点之间的通信,使保存的数据更加完整。

2014年,Wu等^[40]在移动节点(SN)和信标(BS)之间增加了中继节点(RN)的部署,并提出了在多个传输介质上进行无线电传播的路径损耗模型,解决了因传输距离过长而导致数据丢失的问题。2016年^[41],他们对SN的定位算法提出了改进,通过组合加速度和电信号的接收信号强度(RSS)来测量定位系统中的移动节点位置。RSS对于管道一类周围覆盖障碍(如泥土、沙石等)的系统十分适用,能够有效地解决信号在水、塑料和空气中的衰减,准确地判别节点是否处于允许的通信范围内,避免了节点因距离过长而导致的保存中断。但针对如果多个SN同时通过多个RN向BS传送数据,那么BS如何快速有效地保存、处理到来的数据这一问题,文中并没有给出详细的解决方案。

为了解决多个SN同时通过多个RN向BS传送数据的问题,Suresh等^[42]在移动传感器和信标的基础上,增加了leader节点,并规定只有leader节点能将数据发送至信标。当leader节点与信标结束通信后,节点擦除发送的数据,继续检测。该方案增加的leader节点有效地缓解了多个移动节点同时向信标传输带来的拥挤,避免了数据在保存过程中出现信息交叉、重叠等情况。同时,节点通信结束后擦除数据,可立即投入重新使用,提高了节点空间的利用率。但文中并没有提及需要使用多少传感器以及通信多少次才能将检测研究的数据完全上传至信标。以上算法的性能对比如表4所列。

表4 基于移动节点和固定信标的保存算法性能对比

Table 4 Performance comparison of storage algorithms based on mobile nodes and fixed beacons

算法	平均延迟	优点	缺点
Sankary 等的算法	较低	解决数据存储更新缓慢	节点选择投放依靠人工判断
Du 等的算法	较低	避免资源浪费和重复收集	无法判断节点是否能在范围内将数据完全上传
Wu 等的算法	较低	RSS 解决信号衰减的问题	BS 处理多个数据存在困难
Suresh 等的算法	较低	减少数据冲突	缺少具体的节点部署方案

从表4可以看出,移动节点和固定信标相结合的数据保存方案是将移动节点放入流体系统中进行数据收集,当节点流经固定信标时,将数据上传至信标保存。这样既解决了由于单个移动节点探测能力弱和通信能力有限,而导致获取数据不完整的问题,又增强了数据保存的准确性和有效性;同时,还缓解了采用静态节点检测所带来的成本压力,以及因静态节点检测范围有限导致数据更新不及时的问题。

3 应用

近年来,流体系统中的各种应用逐渐丰富,例如 MISE-PIPE^[43],MIT Leak Detector^[44],SWMS^[45]等,数据保存技术是使用这些应用的基础。例如在水分配中,将以精细时间间

隔连续收集并保存的数据,用于传输水力和水质测量。在这种保存方案下获取的数据有利于准确分析、判断配水系统中不断更新变化的情况,用于分析、建模和控制供水系统是方便、可行的。

PipeNet^[46]是一种基于无线传感器网的系统,可用于流体泄漏及输水管道中的异常情况检测。它通过将声学 and 振动传感器连接到外部管道,内部管道使用压力传感器,多种传感器联合对管道进行监测。Stoianov 等通过多次现场实验,对于检测泄露的大型故障设备,证明沿着管道从多个位置连续采集的数据用于故障分析是可行的。该方案保存的数据来源多样,数据信息更加丰富。同时,从管道的多个位置收集数据,避免了信号在传输过程中发生反射或折射而导致保存的数据具有片面性,有利于对系统进行更加全面地分析。

图3为PipeNet检测验证的实验图^[46]通过沿管道安装阀门,模拟两个位置在受控条件下产生泄漏,同时在泄漏旁边安装两个双轴加速度计(Sensor1, Sensor2)以收集泄漏产生的振动数据,将这些加速度计同时连接到数据采集系统,将每个传感器连接到 Stargate 网关,并通过 GPS 同步网关。

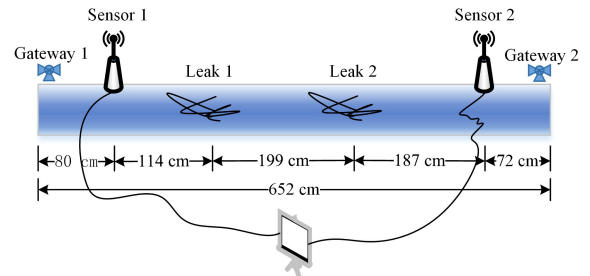


图3 PipeNet 检测实验

Fig. 3 Experiment of PipeNet detection

NAWMS^[47]是一种扩展性强、非侵入式的自主水监测系统,主要由3个部分组成:基础设施、水流速传感器和信息融合算法。水流速传感器主要利用管道流量与管道的振动正相关,通过测量振动来计算管道内的流量;又根据振动和加速度的关系,在传感器网络上使用一个配备了加速计的节点来捕获信号,然后将该信号发送至融合中心计算得到研究数据。其系统工作流程如图4所示^[47]。

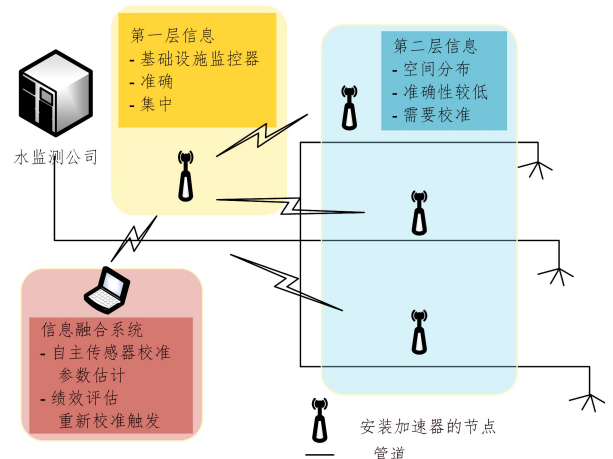


图4 NAWMS系统的工作流程

Fig. 4 Work flow of NAWMS system

该方案主要利用振动、加速度和流速之间的关系,通过保存流体的加速信息数据来分析检测系统中的设施情况。其中,NAWMS虽然便于安装,但其系统架构要求在每个管道上都安装有传感器。当管道拓扑结构复杂时,这会变得繁琐且成本昂贵。

新加坡配水系统连续测试项目 WaterWiSe @ SG^[48-50] 是一个集数据采集、传输以及数据归档、处理于一体的系统。项目实施主要分为概念验证、扩展部署、大范围部署 3 个阶段。其中,信息数据在每个节点处获取,其被处理转换成时长为 30 s 的文件,文件被压缩后传输。项目的主要目标是实现低成本和高速率的传输、远程检测泄露、预测管道爆裂、综合检测水力以及水质参数。其系统工作流程如图 5 所示^[48]。系统主要在数据筛选和数据传输的环节中对数据进行简化,保证最小存储空间下保存的信息量最大。

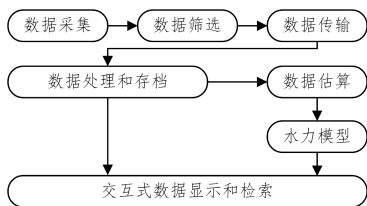


图 5 WaterWiSe @ SG 项目的工作流程

Fig. 5 Work flow of WaterWiSe @ SG project

SPAMMS^[51] 是一种低成本、可扩展的基于自主传感器的系统,为管道提供监控和维护。Kim 等使用一组 RFID 均匀地排列在管道内,每个 RFID 之间的距离由本地化控制(可以每隔 50m 就安装一个 RFID,也可以根据需要安装)。通过分析管道的空间信息和检查要求,移动节点或自主机器人读取附近 RFID 中存储的信息。该系统工作示意图如图 6 所示^[51]。该系统使用 RFID,成本相对较低,将其均匀分布在管道内,移动节点或机器人能够更加准确地收集、保存管道故障区域内的数据。

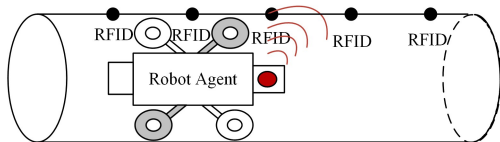


图 6 SPAMMS 系统的工作示意

Fig. 6 Working of SPAMMS system

4 存在的问题以未来的研究方向

综上所述,数据保存是管道泄漏以及回流检测等问题研究的基础,但由于其分布地域广、连接复杂、难以检测等特点,使它区别于一般的系统。如何在有限的存储空间内保存完整有效的数据是研究的重点。通过研究流体系统中现有的数据保存方案,发现研究工作主要侧重于数据收集和节点部署方面的改进。虽然已经取得了一些进展,但仍然存在一些问题,主要表现在以下几个方面。

(1)数据的保存方式单一。现阶段的工作大多从数据收集、分发等方面进行研究。学者通过计算待检测区域的最小投放节点数和最佳投放位置,来实现节点覆盖范围的最大化;通过减少投放节点数,来减少重复数据的收集,在有限的存储

空间中实现存储信息数量最大化。但大多数方案都在获取数据后直接存储,由于移动节点的内存有限,且计算能力一般,数据无法通过压缩来减少内存空间的使用。如需要存储较多信息则需要多个移动节点共同协作完成,而移动节点的组网问题也是研究中的难点。

(2)网络的动态性考虑不足。静态节点的安全性较高,数据上传及时,但其检测范围有限,遭受外力破坏后,如果没有新节点及时替换,那么待检测区域范围内就会出现空缺,保存中断,影响数据的完整性,从而影响研究结果。其次,在移动节点的网络中,节点间通过水声通讯传送数据,容易受到流体的因素影响,导致数据传播延迟大、准确度低。最后,投放的移动节点可能因管道走向而分离,进入不同的分支,不再组成网络。以上都会对数据的保存工作形成干扰,影响数据的准确性。

(3)节点数量和投放位置的不确定。在规模庞大、结构复杂的流体系统中,如果期望获得目标区域内详细的监测信息,就需要部署尽可能多的节点。但有限的成本预算,只能提供有限的节点。如何在有限成本的条件下载放合适的节点数使得检测范围最大,是研究的难点。此外,部分移动节点需要通过信标才能将数据上传,这就导致检测延迟较大,而用户往往希望检测数据实时有效。比如在检测污染扩散的情况时,这就要求检测距离不能太远;另一方面,为了检测更多区域,节点位置通常离信标位置较远。那么,如何平衡检测距离和检测范围也是研究中的重点。

针对以上问题,未来的研究方向如下:1)数据的保存方式,如何将获取的数据尽可能多地保存到有限空间的节点中;2)网络的动态性,网络在外界因素的影响下,仍能继续检测、工作并恢复遭到破坏的数据;3)传感器节点数量和投放位置,合理的传感数量和位置不仅能够节省成本开支,还能最大化监测范围,避免重复信息的收集,实现节点空间的最大利用率。

结束语 本文综述了近几年流体系统中基于无线传感网的数据保存关键技术的研究进展。与传统系统相比,流体系统由于深埋地下、规模庞大、错综复杂的特点,使节点间的通信困难,同时为数据保存的应用带来了新的难点问题。因此,如何在复杂的流体系统中支持高效、可靠的数据保存,是用户访问、分析数据等开展后续工作的关键。本文对比分析了流体系统中不同节点布置方式下的数据保存方案优劣。可以看出,现有研究虽然已经取得一些进展,但仍然存在一些问题。为了推进数据保存工作的进行,本文提出了几个待解决的问题,并展望了下一步的研究方案。

参考文献

- [1] DATTA S, SARKAR S. A review on different pipeline fault detection methods[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 41: 97-106.
- [2] PUUST R, KAPELAN Z, SAVIC D A, et al. A review of methods for leakage management in pipe networks[J]. Urban Water Journal, 2010, 7(1): 25-45.
- [3] KULKARNI P, FARNHAM T. Smart city wireless connectivity considerations and cost analysis: Lessons learnt from smart water case studies[J]. IEEE Access, 2016, 4: 660-672.

- [4] WANG Y, RAJIB S M S M, COLLINS C, et al. Low-Cost Turbidity Sensor for Low-Power Wireless Monitoring of Fresh-Water Courses[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(11): 4689-4696.
- [5] LIU Z, KLEINER Y. Computational Intelligence for Urban Infrastructure Condition Assessment: Water Transmission and Distribution Systems[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(12): 4122-4133.
- [6] ADEDEJI K B, HAMAM Y, ABE B T, et al. Towards Achieving a Reliable Leakage Detection and Localization Algorithm for Application in Water Piping Networks: An Overview[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 20272-20285.
- [7] CHAN T K, CHIN C S, ZHONG X. Review of Current Technologies and Proposed Intelligent Methodologies for Water Distributed Network Leakage Detection[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 78846-78867.
- [8] LIU S, LIU W, CHEN J, et al. Optimal locations of monitoring stations in water distribution systems under multiple demand patterns: a flaw of demand coverage method and modification [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, 6(2): 204-212.
- [9] LI X, YU W, LIN X, et al. On optimizing autonomous pipeline inspection[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(1): 223-233.
- [10] ROSSMAN L A. EPANET; U. S. Environmental Protection Agency; EPA-600/R-94/057 [P]. <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
- [11] DU R, FISCHIONE C, XIAO M. Flowing with the water: On optimal monitoring of water distribution networks by mobile sensors[C]//*IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2016: 1-9.
- [12] SURESH M A, SMITH L, RASEKH A, et al. Mobile sensor networks for leak and backflow detection in water distribution systems[C]//*2014 IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. IEEE, 2014: 673-680.
- [13] SURESH M A, STOLERU R, ZECHMAN E M, et al. On event detection and localization in acyclic flow networks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, 43(3): 708-723.
- [14] MOHAMED N, AL-MUHAIRI L, AL-JAROUDI J, et al. A fault-tolerant acoustic sensor network for monitoring underwater pipelines[C]//*2014 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*. IEEE, 2014: 877-884.
- [15] KIZIROGLOU M E, BOYLE D E, WRIGHT S W, et al. Acoustic energy transmission in cast iron pipelines[C]//*Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2015, 660(1): 012095.
- [16] ABBAS W, PERELMAN L S, AMIN S, et al. Resilient sensor placement for fault localization in water distribution networks [C]//*2017 ACM/IEEE 8th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS)*. IEEE, 2017: 165-174.
- [17] TRINCHERO D, CISONI L, STEFANELLI R, et al. Mobile wireless sensor networks applied to the survey of water infrastructures[C]//*SENSORS*. 2010 IEEE. IEEE, 2010: 690-693.
- [18] PERELMAN L, OSTFELD A. Optimal mobile self-powered sensor operation for water distribution systems water quality enhancements[C]//*World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries*. 2012: 3207-3216.
- [19] SCHANTZ C, DONNAL J, SENNETT B, et al. Water Nonintrusive Load Monitoring [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2177-2185.
- [20] POSTOLACHE O, PEREIRA J D, GIRÃO P S. Wireless sensor network-based solution for environmental monitoring: Water quality assessment case study[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2014, 8(6): 610-616.
- [21] LIN Z, WANG W, YIN H, et al. Design of Monitoring System for Rural Drinking Water Source Based on WSN[C]//*2017 International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA)*. IEEE, 2017: 289-293.
- [22] FAZEL F, FAZEL M, STOJANOVIC M. Random Access Compressed Sensing for Energy-Efficient Underwater Sensor Networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(8): 1660-1670.
- [23] DU R, GKATZIKIS L, FISCHIONE C, et al. Energy efficient sensor activation for water distribution networks based on compressive sensing[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(12): 2997-3010.
- [24] DU R, GKATZIKIS L, FISCHIONE C, et al. Energy efficient monitoring of water distribution networks via compressive sensing[C]//*2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2015: 6681-6686.
- [25] JIN Y, EYDGAHI A. Monitoring of distributed pipeline systems by wireless sensor networks[C]//*Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference*. 2008: 213-222.
- [26] ZENG D, GU L, LIAN L, et al. On cost-efficient sensor placement for contaminant detection in water distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(6): 2177-2185.
- [27] LI L Y, JAAFAR H, RAMLI N H. Preliminary Study of Water Quality Monitoring Based on WSN Technology[C]//*2018 International Conference on Computational Approach in Smart Systems Design and Applications (ICASSDA)*. IEEE, 2018: 1-7.
- [28] DI F M, DAS S K, ANASTASI G. Data collection in wireless sensor networks with mobile elements: A survey [J]. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2011, 8(1): 7.
- [29] PERELMAN L, SALIM W, WU R, et al. Enhancing water distribution system security through water quality mobile sensor operation[C]//*World Environmental & Water Resources Congress*. 2013: 663-674.
- [30] PERELMAN L, OSTFELD A. Optimal mobile self-powered sensor operation for water distribution systems water quality enhancements[C]//*Proc. of World Environmental and Water Resources Congress*. 2012: 3207-3216.
- [31] SURESH M A, SMITH L, RASEKH A, et al. Mobile sensor networks for leak and backflow detection in water distribution systems[C]//*2014 IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. IEEE, 2014: 673-680.

- [32] MAHBOUBI H, MASOUDIMANSOUR W, AGHDAM A G, et al. An Energy-Efficient Target-Tracking Strategy for Mobile Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 47(2): 511.
- [33] ALMAZYAD A S, SEDDIQ Y M, ALOTAIBI A M, et al. A Proposed Scalable Design and Simulation of Wireless Sensor Network-Based Long-Distance Water Pipeline Leakage Monitoring System[J]. *Sensors*, 2014, 14(2): 3557-3577.
- [34] LAI T T, CHEN W J, LI K H, et al. TriopusNet: Automating wireless sensor network deployment and replacement in pipeline monitoring[C]//2012 ACM/IEEE 11th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). IEEE, 2012: 61-71.
- [35] LAI T T, CHEN Y T, HUANG P, et al. PipeProbe: a mobile sensor droplet for mapping hidden pipeline[C]//Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2010: 113-126.
- [36] HAN G, SHEN S, SONG H, et al. A Stratification-Based Data Collection Scheme in Underwater Acoustic Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(11): 10671-10682.
- [37] BASAGNI S, BÖLÖNI L, GJANCI P, et al. Maximizing the value of sensed information in underwater wireless sensor networks via an autonomous underwater vehicle[C]//IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2014: 988-996.
- [38] GONG W, SURESH M A, SMITH L, et al. Mobile sensor networks for optimal leak and backflow detection and localization in municipal water networks[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 80(C): 306-321.
- [39] SANKARY N, OSTFELD A. Inline mobile sensors for contaminant early warning enhancement in water distribution systems [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016, 143(2): 04016073.
- [40] WU D, CHATZIGEORGIOU D, YOUCEF-TOUMI K, et al. Channel-Aware Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks for Pipeline Inspection[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(7): 3510-3523.
- [41] WU D, CHATZIGEORGIOU D, YOUCEF-TOUMI K, et al. Node Localization in Robotic Sensor Networks for Pipeline Inspection [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 12(2): 809-819.
- [42] SURESH M A, ZHANG W, GONG W, et al. Toward Optimal Monitoring of Flow-Based Systems Using Mobile Wireless Sensor Networks[J]. *Acm Transactions on Sensor Networks*, 2015, 11(3): 1-37.
- [43] SUN Z, WANG P, VURAN M C, et al. MISE-PIPE: Magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring[J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(3): 218-227.
- [44] CHATZIGEORGIOU D, YOUCEF-TOUMI K, BEN-MAN-SOUR R. MIT Leak Detector: Modeling and Analysis Toward Leak-Observability[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(5): 1-12.
- [45] JHA M K, SAH R K, RASHMITHA M S, et al. Smart Water Monitoring System for Real-Time Water Quality and Usage Monitoring[C]//2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA). IEEE, 2018: 617-621.
- [46] STOIANOV I, NACHMAN L, MADDEN S, et al. PIPENET: A wireless sensor network for pipeline monitoring[C]//Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks. ACM, 2007: 264-273.
- [47] KIM Y, SCHMID T, CHARBIWALA Z M, et al. NAWMS: nonintrusive autonomous water monitoring system[C]//Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems. ACM, 2008: 309-322.
- [48] WHITTLE A J, GIROD L, PREIS A, et al. WATERWISE@SG: A testbed for continuous monitoring of the water distribution system in singapore[M]//Water Distribution Systems Analysis 2010. 2010: 1362-1378.
- [49] WHITTLE A J, ALLEN M, PREIS A, et al. Sensor networks for monitoring and control of water distribution systems[C]//6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII 2013). Hong Kong, 2013: 9-11.
- [50] ZAN T T T, LIM H B, Wong K J, et al. Event detection and localization in urban water distribution network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(12): 4134-4142.
- [51] KIM J H, SHARMA G, BOUDRIGA N, et al. SPAMMS: A sensor-based pipeline autonomous monitoring and maintenance system[C]//2010 Second International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2010). IEEE, 2010: 1-10.



ZHANG Jie, born in 1995, postgraduate. Her main research interests include wireless sensor networks, network deployment and optimization.



LIANG Jun-bin, born in 1979, Ph. D., professor, Ph. D supervisor. His main research interests include wireless sensor networks, network deployment and optimization.