第 37 卷第 2 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 37, No. 2
2016 年 4 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Apr. 2016

文章编号:1008-1542(2016)02-0130-09　　doi:10.7535/hbkd.2016yx02004

立体管网微泄漏实时监测系统研究概述

王少锋,仲济祥,王建国

(内蒙古科技大学机械工程学院,内蒙古包头　014010)

摘　要:针对立体管网微泄漏实时监测系统搭建的关键技术问题,对国内外学者的相关研究进行了梳理,归纳为 3 个方面:1)在提取故障频率信号时如何避免回声混叠的影响,提高相关性的延时估计精度;2)在管网分叉结构下,如何辨别信号传播路径,如何定位泄漏源的位置;3)在信息数据收发延时不确定的情况下,如何保证立体管网泄漏实时监测系统的时间同步精度。通过对国内外管网泄漏监测技术的比较发现,基于声发射传感器网络的立体管网泄漏实时监测,对于解决探测易燃、易爆气/液体管道运输中的微弱泄漏问题具有较大优势。

关键词:自动控制技术;泄漏检测;管网定位;时间同步精度;回声混叠

中图分类号:TP277　　**文献标志码**:A

Research overview of real-time monitoring system for micro leak of three-dimensional pipe network

WANG Shaofeng, ZHONG Jixiang, WANG Jianguo

(Institute of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: Aiming at the key technical problems encountered by domestic and foreign scholars in building the real-time monitoring system for the micro leak of three-dimensional pipe networks, the paper classifies the problems into three aspects: 1) in the extraction of fault signal frequency, how to avoid the effect of the mixed echo stack and improve the delay estimation accuracy of the correlation; 2) in network bifurcation structure, how to discern the signal propagation path, and how to locate the leak source; 3) under the uncertainly delay in transmitting and receiving information data, how to ensure the time synchronization accuracy of the real-time monitoring system for the three-dimensional pipe network leakage. Through the comparison of the monitoring technologies for the pipe network leakage at home and abroad, it shows that the acoustic emission sensor network based three-dimensional pipeline leak real-time monitoring has great advantages in detecting the weak leakage of flammable and explosive gas/liquid transportation pipelines.

Keywords: automatic control technology; leak detection; pipe network location; time synchronization; echo aliasing

管道被广泛用于远距离运输、调配世界各地的天然气、石油、水及其他易于流动的物质。在其长期连续

收稿日期:2015-11-26;修回日期:2016-01-23;责任编辑:王海云

基金项目:国家自然科学基金(51565047);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY154);内蒙古科技大学创新基金(2014QDL025);内蒙古自治区研究生创新计划资助项目(S20151012706);内蒙古科技大学科技创新基金(2014087)

作者简介:王少锋(1980—),男,内蒙古包头人,讲师,博士,主要从事复杂机械系统故障监测与诊断以及数字化装配与链接方面的研究。E-mail:wsffree@163.com

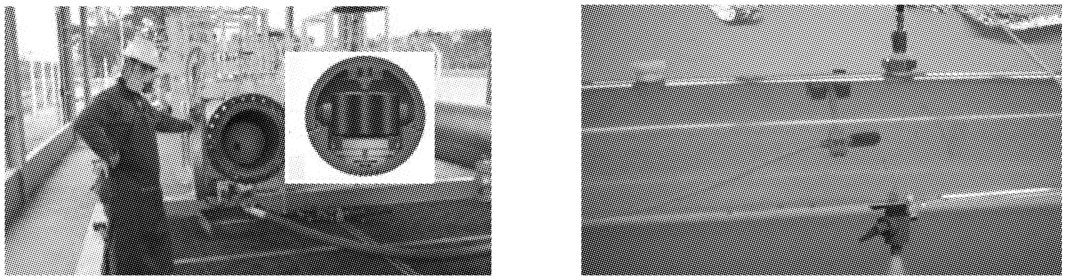
王少锋,仲济祥,王建国.立体管网微泄漏实时监测系统研究概述[J].河北科技大学学报,2016,37(2):130-138.

WANG Shaofeng, ZHONG Jixiang, WANG Jianguo. Research overview of real-time monitoring system for micro leak of three-dimensional pipe network[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(2): 130-138.

使用的过程中，伴随着管壁材料腐蚀与老化现象的出现，将不可避免发生管道泄漏，特别严重的会直接造成对人类居住环境与生命财产的严重破坏，如：大连中石油管道泄漏事故、青岛中石化东黄输油管道泄漏事故。

为了降低管道泄漏事故率，科学家们针对多种监测信号源开展了管道泄漏定期检修系统与技术的研究，常用的监测信号源包括压力、流量与泄漏声音等。图 1 显示了 2 种典型的管道泄漏定期检修系统：图 1 a)“Smartball”系统[1]，由加拿大 Pure Technologies 公司发明，其融合利用了声音/压力/温度传感器信息，实现了对油气管道微小泄漏的检测，克服了传统利用压力、流量、气体追踪等方法无法检测微小泄漏的缺陷；图 1 b)“水下听声器”监测系统[2-4]，利用管道机器人引导水下听声器，实现了对管道泄漏声学信号的检测。由此可见，上述检测系统完全适用于管道泄漏的定期巡检与维修，但无法实现对管道的泄漏事故进行实时监控。

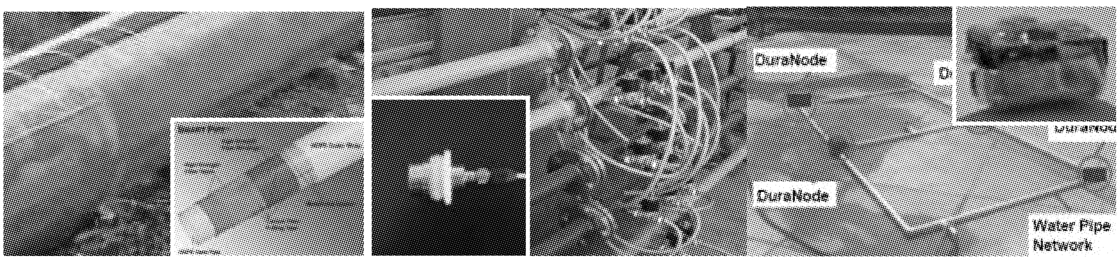
为了及时发现泄漏事故并精确定位泄漏源，管道泄漏的实时监测技术研究得到了广泛开展[2-5]。图 2 显示了 3 种典型的管道泄漏事故实时监测系统：图 2 a)“Smart Pipe”系统[6]，其将光纤传感器贴近管道埋设，通过监测管道外表面温度的实时变化，实现管道泄漏源的识别与定位，但该系统对光纤质量及其安装要求非常高；图 2 b)“MEMS”加速度传感器管网监测系统[7]与图 2 c)声发射传感器管网监测系统[8]分别利用加速度传感器/声发射传感器监测因泄漏所导致的管道微振现象，通过对相应波形进行频谱分析，实现管道泄漏事故的报警和泄漏源的精确定位。



a)“Smartball”系统　　b)“水下听声器”监测系统

图 1　管道泄漏定期检修系统

Fig. 1　Pipeline leak preventive maintenance system



a)“Smart Pipe”系统　　b)“MEMS”加速度传感器管网监测系统　　c) 声发射传感器管网监测系统

图 2　管道泄漏实时监测系统

Fig. 2　Pipeline leak real-time monitoring system

国内外的相关研究证明，基于声发射技术的管网泄漏监测系统相对于其他的管网泄漏监测技术具备以下优势：

1)相对负压波检测具有较高的灵敏度，能够监测和定位出微小的泄漏源；

2)泄漏源的检测与定位时间短，相对于别的检测方法定位精度高；

3)应用于大多数压力管道包括单相液体、单相气体和多相流体管道；

4)可在各种工况下正确检测泄漏，如开关阀、启停泵、增减流量、停输状态等。

为此，本文研究了国内外基于声发射技术的管网泄漏监测系统中需要解决的关键技术问题：

1)在提取故障频率信号时避免回声混叠的影响，提高相关性的延时估计精度；

2)在管网分叉结构下，辨别信号传播路径，定位泄漏源的位置；

3)在信息数据收发延时不确定的情况下,保证立体管网泄漏实时监测系统的时间同步精度。

1 管道泄漏信号回波分离研究

针对回声波形的分离问题,中国西安交通大学的何正嘉等[9]早在1983年就发表了利用倒频谱原理消除回声影响(见图3)的应用案例,该案例采集了车床床头箱的噪声信号相对地面、侧墙与天花板的回声信号,并依据回声传播路程差计算得到了回声延时,由此通过删除倒频谱上回声延时所对应的脉冲峰值,完美地消除了回声的影响。但是,很明显,该研究无形中对故障信号的回声传播路程差做了假设,其直接简化了回声延时的搜索,因此,并不适用于故障信号回声里程差未知的情况,如:长跨度一维管线未知泄漏源的典型案例。但这并不妨碍我们借鉴上述研究思想,围绕管道微泄漏的声发射应力波回声延时,对管道微泄漏应力波的回波传输机理及其分离与弱化算法进行研究,旨在能以此抑制声发射应力波回声部分对提取故障特征波形的干扰。

由此可见,在剔除回波与强背景噪声的基础上,可完全分离出待测一维管线两端声发射传感器所接收到的泄漏声发射信号特征波形;利用互相关分析,可精确辨识出两传感器捕捉到同一故障信号的时间差,进而基于已知的传感器间距与声发射应力波波速等参数,实现泄漏源的精确定位。不难发现:在上述一维管线泄漏源的定位过程中,作为预知的泄漏事故段监测区间的距离参数,其确保了泄漏源位置的可算性,然而,当检漏对象为立体管网时,其泄漏事故段监测区间预先未知,直接导致上述解算过程中的已知条件不复存在,将无法实现泄漏源位置的求解。因此,如何从立体管网中识别泄漏事故发生段监测区间是该研究的关键。

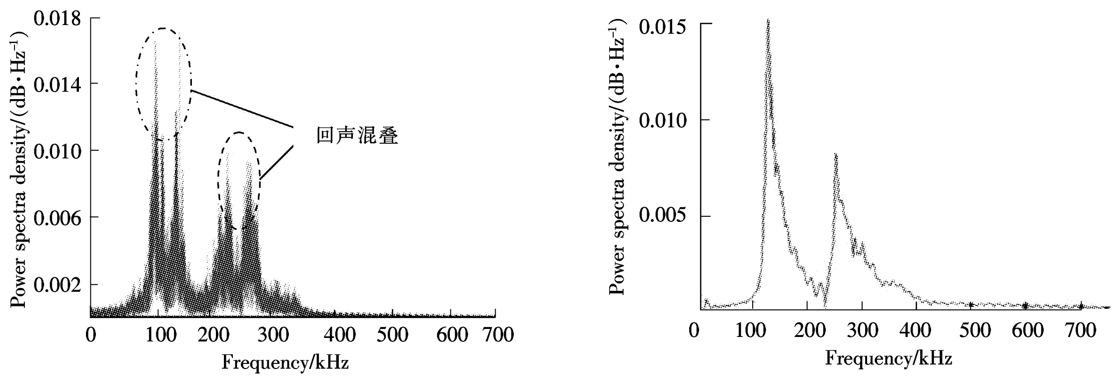


图3 管道中的回声混叠的频域表现

Fig. 3 Echo aliasing frequency domain performance of the pipeline

小波变换作为一种解析的时频域分析方法在信噪分离过程中被广泛采用。MOSTAFAPOUR等[10-13]、凌同华等[14]、RASHID等[15]、JIN等[8]和赵静荣[16]均采用了传统小波变换算法对气/液管道泄漏的声发射应力波、负压波信号进行降噪处理;潘碧霞等[17]采用小波包分解理论消除管道泄漏的声发射信号高频噪声,同时发现随着故障信号反射与衰减现象的加剧,微弱故障特征受其回声波形与强背景噪声的干扰,易造成故障波形特征提取的误判或丢失。正如前所述,何正嘉等[9]早在1983年就提出了基于倒频谱原理的故障信号的回声分离方法,其研究对回声传播路程差作出了假设。与其类似的研究在1976年被HSSAB等[18]提出过。正是借鉴上述思路,HANSON等[19]提出了一种基于倒频谱原理的时延估计,通过将时延信息包含在阶段交叉谱上,使得时延估计峰值更加尖锐明显,同时也为弱化回声延时影响提供了一种新的研究思路。类似地,高伟等[20]基于航路船舶噪声的实验分析,发现近距离测试条件下,单一自相关法或倒谱法难于连续检测时延峰,为此提出了一种利用船舶噪声的自相关和倒谱联合估计多径时延的方法。王燕等[21]对典型水声信道的倒谱表达式进行了研究,提出了利用倒谱提取多途时延差的策略。王卫国等[22]发现广义倒谱相关函数分析法在延迟估计中优于倒谱法,可以消除GPS信号多路径模型中发射源、各路径传递函数以及卷积干扰对延迟估计的影响。由此可见,大多研究并未涉及管道泄漏声发射应力波的回声分离,但上述研究也提示我们应将研究重点置于管道微泄漏应力波的回波传输机理,并进一步分离与弱化其回声波形影响。此外,针对

强背景噪声的干扰问题，王宏超等[23]用最小熵解卷积对强噪声滚动轴承微弱信号进行降噪处理，王志武[24]设计了一种基于局部均值分解和奇异值分解差分谱理论的微弱信息提取方法，以此提取强背景噪声下的微弱特征信息。JIANG 等[25]和陈敬龙等[26]提出了基于冗余提升多小波包与滑动窗奇异值分解相融合的信号降噪分离方法，旨在提取隐藏在原始振动信号中的弱周期性冲击信号，后者又出色地将多小波分析方法应用于行星齿轮箱的故障诊断中[27]。袁静等[28-29]构造了紧支、双正交、对称和四阶逼近阶的多小波，其匹配了复合故障的各特征波形，使得解耦的特征信息清晰地呈现于不同通道中，实现了复合故障耦合特征的一次性分离与提取。何正嘉等[30]学者对故障动态信号与基函数内积变换原理进行了深入研究，相继提出了多种自适应多小波基构造方法，实现了旋转轴系微弱故障动态信号的特征增强。受此研究启发，凌同华等[14]于 2013 年提出了基于实际爆破振动信号特征波形的模式自适应小波构造方法，该研究以工程信号特征波形为切入点，对实测微差爆破振动信号特征波形进行了模式自适应匹配，实现了专用于爆破振动信号分析的小波基构造。由此可见，大多研究集中于旋转机械的故障信号分析，对于微弱故障动态信号特征增强和提取问题，以典型故障信号特征波形为依据，构造与其相似度高、便于广泛应用到同类故障信号分析的专用小波基是其最佳选择。因此，如何构造专用于管道微泄漏声发射工程信号强背景噪声分离的专用小波基，有待于进一步研究。

2　管网分叉结构中泄漏源定位研究

时差定位法在管道泄漏的声发射源识别与定位研究中应用的最为广泛，正如伊朗 Tabriz 大学相关研究成果的介绍[10-11,31]，该方法需至少布置 2 个声发射传感器于待测一维管线的两端，通过提取管道泄漏应力波撞击 2 个传感器的时间差，并结合监测区间距离与应力波波速等参数，对泄漏源位置进行解算。其团队在 2015 年提出根据声发射信号的频散特性，利用声发射信号中 A0 模态与 S0 速度差所造成的到达传感器时间差进行定位[12]。DAVOUDI 等[31]和 LI 等[32]利用互相关函数法，通过提取管道泄漏声发射应力波信号互相关函数的最大峰值所对应的时间，确定 2 个声发射传感器受撞击的时间差，同时，MOSTAFAPOUR 等[33]继续将该思想延伸至金属平板的声发射源定位过程。RASHID 等[34]也将该方法应用于基于负压波互相关分析的水管爆裂源定位，并发现：声发射信号在材料界面、耦合剂和传感器的接触处会发生波形转换现象，将直接弱化相关函数的最大峰值，有时还会出现多个峰值，为确定时差带来了困难。为此，金中薇等[35]引入了信号波动少、噪声抑制能力高的 PHAT 加权函数，提出了基于 PHAT 加权函数的互相关声发射定位方法，实验结果表明 PHAT 加权函数能够有效提高估算时差精度。由此可见，目前多数研究聚焦于一维管线的声发射定位，定位误差已优于 5%，若完全依据上述研究将 2 个声发射传感器置于立体管网中，受管网分叉结构的影响，则声发射传感器很难辨识对应接收信号的传输路径。因此，有必要对立体管网微泄漏事故段的多传感器识别算法进行深入研究。东北大学[36]与中国石油大学[37]的研究团队或利用神经网络、或利用支持向量机，成功实现了管道泄露的模式识别，并借助 GPS 定位技术完成了管网泄漏故障段的识别，为利用时差定位法求解泄漏源位置奠定了坚实的基础。但是，该研究中特征值敏感度对故障辨识影响特别大，同时，为了彻底摆脱对 GPS 定位技术的依赖，美国 Illinois 大学学者 OZEVIN 等[38]依据声发射信号在高阻尼材料传播中的强衰减特性，提出了基于声发射应力波能量的管网泄漏事故段识别方法——将能量最大的 2 个声发射传感器间的管道视为泄漏事故段，实现了聚氯乙烯二维平面管网泄漏事故段的识别，但其并不适用于低阻尼材料的管网，究其根本原因在于声发射信号在低阻尼材料中并不具备强衰减特性，且法兰、阀门与管道弯头对信号能量的影响严重。受此启示，笔者认为：将上述以信号能量衰减的识别指标替换为与距离成正比的波形传播时间，同时考虑法兰、阀门与管道弯头对声发射应力波波速和波形的影响[18]，并以多声发射传感器监测为突破口，探索多分叉路径下的管道微泄漏声发射应力波传播规律，将会为立体管网微泄漏事故段的一维蜕化和定位准确率的提高带来新的思路。

考虑到李雄等[39]提出夹角对管道的影响同时借鉴多传感器实时监测网络拓扑结构的研究成果，构建立体管网微泄漏实时监测的声发射传感器空间布局（见图 4）：将立体管网的管道交汇点（如图 4 中的 J_1，J_2，…）之间布置声发射传感器（如图 4 中的 S_1，S_2，…），以分割成多个一维管线（如图 4 中的 L_1，L_2，…），对声发射应力波撞击各声发射传感器的时间序列及其传播路径的辨识，以此提取立体管网微泄漏事故段，将多分叉路径下的管网蜕化成一维管道泄漏源定位的问题，再利用交汇点矩阵 $\boldsymbol{J}$、传感器矩阵 $\boldsymbol{S}$、途径矩阵 $\boldsymbol{L}$ 将泄漏

源还原至立体中的位置。该监测方法中所采用的均为压电式声发射传感器，如果采用多种传感器装置并存，则在信号处理阶段则需要对多种传感器装置的幅相一致性校正处理，增加信号处理的负担，必然无法保证对应数据的实时处理，同时也会造成检测成本的急剧增加，与工业界所期望的低成本、快响应、高精度要求存在着巨大差距。

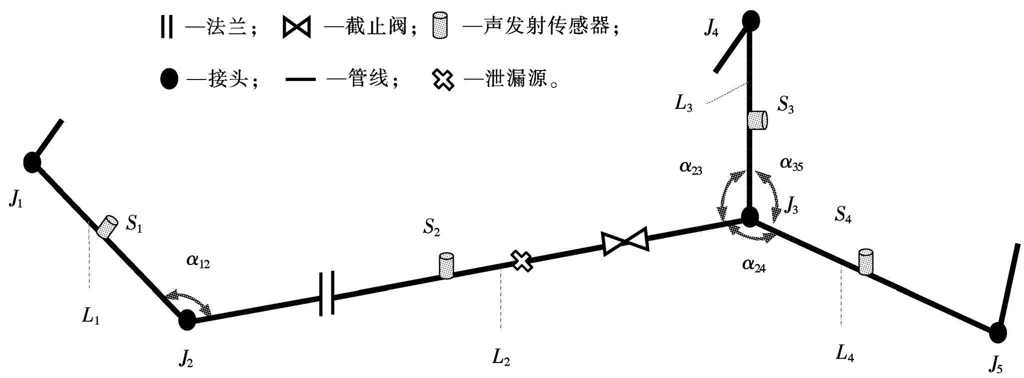


图 4 立体管网微泄漏全局监测的传感器布局

Fig. 4 Global monitoring sensor layout for three-dimensional pipeline network micro leakage

3 管网监测系统实时监测研究

3.1 监测网络的数据处理机制的研究

国内外学者针对管道泄漏实时监测的无线传感网络进行了深入研究。ABDELGAWAD 等[40]构建了无线声发射传感器星型拓扑网络，实现了各节点的数据融合，但其集中式数据处理模式往往会造成节点到中心基站的巨大数据流，为此，该研究进一步提出了基于分层式数据处理机制的无线声发射传感器树状拓扑网络，提高了数据传输与计算效率[41]，但其缺陷在于一旦根节点损坏，整个网络将失效。针对该问题，NASIM 等[42]与 RASHID 等[34]构建了无线声发射传感器簇头型拓扑网络(见图 5)，其节点被划分为可逐级通信的数据感知节点、数据采集簇头和路径簇头，数据最终到达基站。此外，SADEGHIOON 等[43]也进行了类似的研究，区别在于路径簇头最终将数据上传至云，其方便了各种客户端设备随时随地获取信息。由以上研究可发现：具有分层式数据处理机制的簇头型无线传感器网络拓扑结构相比其他，其数据处理与传输更高效可靠，且其数据采集簇头与感知节点连接的冗余性设计可作为抑制节点失效影响的新构想。此外，鉴于管道泄漏源实时无线监测与定位需各传感器并行协作完成的特点，各无线传感器的数据采集时间同步性是该研究的基础与前提。

3.2 监测网络的时钟同步研究

目前传统的时间同步机制——GPS，NTP 和 SCSDRT 等受能量和带宽限制，无法适用于只能使用轻量协议的无线传感网络[44]。为此，美国加州大学学者 ELSON 等[45]首次提出了“RBS 同步协议”，属于接收结点间的同步，虽然其同时考虑了时钟偏移与漂移的影响，但频繁的再同步增加了带宽流量和耗能。GANERIWAL 等[46]提出了“TPSN 同步协议”，是发送与接收结点的双向成对同步，其在 MAC 层引入时间戳进行传输延时和时钟偏移的估算，但其缺陷在于根节点失效后的再同步需大量的计算和能量开销，且未考虑时钟漂移的影响。此类协议还包括 TS/MS[47]，HRTS[48]，LTS[49]和 AD[50]同步协议，但 LTS 和 AD 同步协议的目的是减小时间同步计算的复杂度，并不是提高精确度，HRTS 同步协议相较于 LTS 协议，其牺牲一定的精度来降低整个网络的功耗。MARÓTI 等[51]借鉴“TS/MS 同步协议”中对节点时钟漂移规律的探索经验，提出了发送与接收结点单向同步的“FTSP 同步协议”，揭示了节点时钟偏移与漂移对同步精度的影响规律；与其类似的 DMTS 同步协议[52]则是以牺牲同步精度换取较低的计算复杂度和能耗，发送节点到接收节点的单向时间延迟直接测量得到，杨朔等[53]也在协议中添加异常漂移率检测器估计同步时间误差。由此可见，常见的同步协议很难协调精度与能量的开销；而且，常用的一体化无线通信模块将整个网络层到物理层协议封装，开发过程中需通过串口等与微控制器进行通信，如此虽说便于开发，但导致仅能通过软件实现同步协

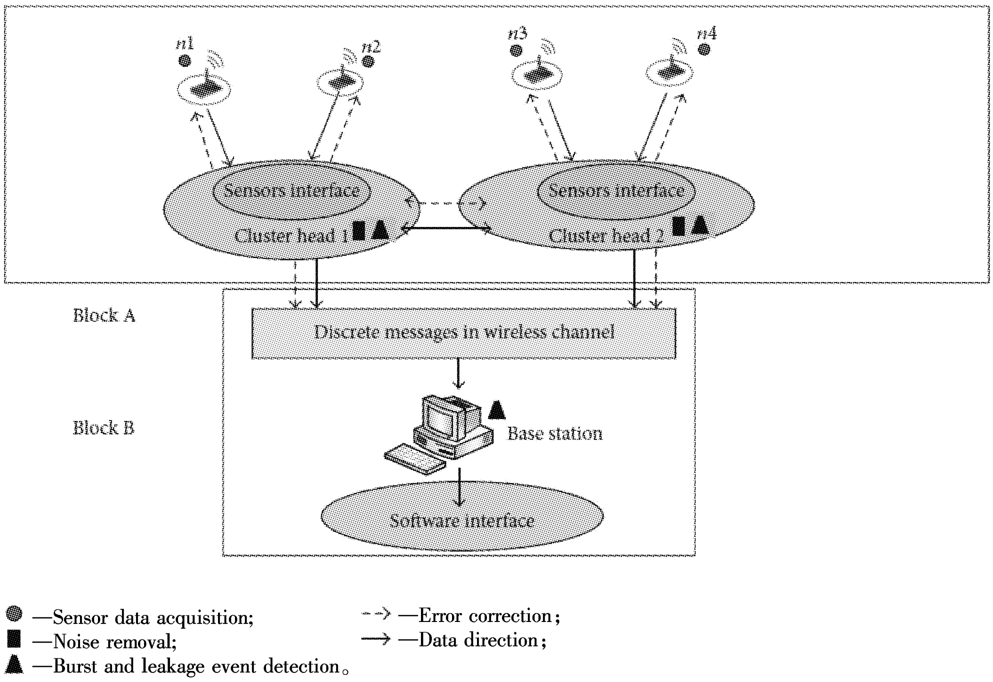


图 5　RASHID 无线声发射传感器簇头型拓扑网络

Fig. 5　RASHID's wireless acoustic emission sensor type cluster topology network

议的添加,软件延时进一步影响着同步精度的提高。为了实现在工业中的应用,北京声华兴业科技有限公司[54]与美国物理声学公司[55]均采用了传统的 GPS 时钟校准技术,尽管数据同步采集的时间精度达到了 30 μs,但远远未达到基于管道泄漏声发射应力波互相关分析的泄漏源定位要求,同时,GPS 设备常常受到环境障碍物与强电磁干扰的影响。针对这些问题,芬兰 Aalto 大学学者 GANERIWAL 等[56]在 2011 年提出了数据采集时间的 μ-Synch 同步协议,随后 BOCCA 等[57]将其应用到木质实验模型桥模态分析的数据同步采集(见图 6)中,达到了 1 kHz 采样频率下优于 10 μs 的时间同步精度。由上述研究可以看出:虽然研究还未涉及需要高采样频率的声发射信号,但基于上述研究思路,可通过搭建无线声发射传感器监测网络,并构建传感器间的数据采集时间同步协议,以此确保无线声发射传感器在立体管网泄漏源实时监测中的工程应用成为可能。

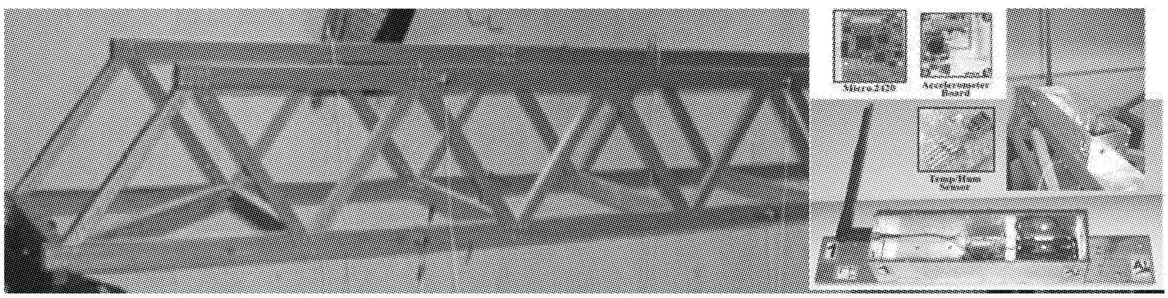


图 6　芬兰学者木质实验模型桥

Fig. 6　Finland scholars' wooden experiment model bridge

4　结　语

实现立体管网微泄漏的实时监测,需要依托声发射应力波信号采集系统,对管道微泄漏应力波的回波传输机理及其分离与弱化算法进行研究,克服泄漏辨识过程中具有相同波形特征的回声欺骗;同时,基于工程信号故障波形特征进行小波基设计,构造专用于增强管道微泄漏声发射应力波特征的专用小波基,实现管道微泄漏声发射应力波信号强背景噪声的分离。探索多分叉路径下的管网微泄漏声发射应力波传播规律,研

究立体管网微泄漏事故段的多传感器识别算法，进而在剔除泄漏段的声发射应力波回声与强背景噪声基础上，实现泄漏源的精确定位。另外，结合现有传感器监测网络拓扑结构的研究成果，构建具有分层式数据处理机制的簇头型无线传感网络，设计数据采集簇头与感知节点的冗余性连接，以此确保系统安全；研究基于硬件触发计时的无线传感网络同步协议，揭示无线传感网络软件延时的不确定性和节点晶振的波动对时钟同步精度的影响规律，提取网络时钟同步对准周期极限，实现网络低开销的同时，提高时间同步精度。为中国远距离油、气管道运行状态的实时监控技术及其系统研发，以及城市供水管网泄漏的实时监控提供技术参考。

参考文献/References：

[1] ELLIOTT J，FLETCHER R，WRIGGLESWORTH M. Seeking the hidden threat：Applications of a new approach in pipeline leak detection[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. [S. l.]:[s. n.]，2008：118070-MS.

[2] KHALIFA A，BEN-MANSOUR R，YOUCEF-TOUMI K，et al. Characterization of in-pipe acoustic wave for water leak detection[C]//ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition. [S. l.]：IMECE ，2011:62333.

[3] KHALIFA AE，CHATZIGEORIOU DM，YOUCEF-TOUMI K，et al. Quantifying acoustic and pressure sensing for in-pipe leak detection[C]//ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition. [S. l.]：IMECE,2010:40056.

[4] CHATZIGEORIOU DM，KHALIFA AE，YOUCEF-TOUMI K，et al. An in-pipe leak detection sensor：Sensing capabilities and evaluation[C]//ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. [S. l.]：IDETC/CIE ，2011:48411.

[5] 魏福祥，张帆，张楠. 海水总磷总氮在线自动监测装置[J]. 河北科技大学学报，2012，33(5):464-468.
WEI Fuxiang，ZHANG Fan，ZHANG Nan. On-line automatic monitoring device for total phosphorusand total nitrogen of seawater[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2012，33(5):464-468.

[6] INAUDI D，GLISIC B. Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing[J]. Journal of Pressure Vessel Techology，2010，132:1-9.

[7] SHINOZUKA M，FENG M，MOSALLAM A，et al. Wireless MEMS-sensor networks for monitoring and condition assessment of lifeline systems[C]// Urban Remote Sensing Joint Event. Paris:[s. n.]，2007：1-6.

[8] JIN H，ZHANG L B，LIANG W，et al. Integrated leakage detection and localization model for gas pipelines based on the acoustic wave method[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2014，27:74-88.

[9] 何正嘉，张涵浮，屈梁生. 倒频谱原理及其在噪声分析中的应用[J]. 噪声与振动控制，1983(6):8-12.
HE Zhengjia，ZHANG Hanfu，QU Liangsheng. Principle of the inverse spectrum and its application in noise analysis [J]. Noise and Vibration Control，1983(6):8-12.

[10] MOSTAFAPOUR A，DAVOUDI S. Analysis of leakage in high pressure pipe using acoustic emission method[J]. Applied Acoustics，2013，74:335-342.

[11] MOSTAFAPOUR A，DAVOUDI S. A theoretical and experimental study on acoustic signals caused by leakage in buried gas-filled pipe [J]. Applied Acoustics，2015，87:1-8.

[12] MOSTAFAPOUR A，DAVOODI S. Continuous leakage location in noisy environment using modal and wavelet analysis with one AE sensor [J]. Ultrasonics，2015，62:305-311.

[13] DAVOUDI S，MOSTAFAPOUR A. Modeling acoustic emission signal caused by leakage in pressurized gas pipe[J]. Journal of Nondestruct Eval，2013，32(4)：67-80.

[14] 凌同华，张胜，陈倩倩，等. 模式自适应小波构造与添加及其在爆破振动信号分析中的应用[J]. 振动与冲击，2014，33(12):53-57.
LING Tonghua，ZHANG Sheng，CHEN Qianqian，et al. Pattern adapted wavelet construction and addition and its application in blast vibration signal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock，2014，33(12):53-57.

[15] RASHID S，QAISAR S，SAEED H，et al. Performance analysis of wavelet transforms for leakage detection in long range pipeline networks[C]// In Proceedings of the IEEE Conference on Systems，Process and Control. Tamil Nadu:[s. n.]，2013:11-15.

[16] 赵静荣. 声发射信号处理系统与源识别方法的研究[D]. 长春：吉林大学，2010.
ZHAO Jingrong. Acoustic Emission Signal Processing System and Source Recognition Methods[D]. Changchun：Jilin University，2010.

[17] 潘碧霞，徐长航，曹国梁，等. 管道泄漏声发射信号的传播特性[J]. 油气储运，2013，32(10):1141-1145.
PAN Bixia，XU Changhang，CAO Guoliang，et al. Propagation characteristics of acoustic emission signals of pipeline leak[J]. Oil & Gas Storage and Transportation，2013，32(10):1141-1145.

[18] HASSAB J C，BOUCHER R A. Probabilistic analysis of time delay extraction by the cepstrum in stationary Gaussian noise[J]. IEEE Transactions on Information Theory，1976，22(4):444-454.

[19] HANSON D，RANDALL R B，BROWN G. Locating leaks in underground water pipes using the complex cepstrum[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering，2008，6(2):107-112.

[20] 高伟，王宁，陈川. 利用船舶噪声的自相关与倒谱联合估计多径时延[J]. 声学学报，2013，38(5)：521-523.
GAO Wei，WANG Ning，CHEN Chuan. Multipath time-delay estimation using auto-correlation and cepstrum of ship-radiated noise[J]. Acta Acustica，2013，38(5)：521-523.

[21] 王燕，邹男，付进，等. 基于倒谱分析的单水听器目标运动参数估计[J]. 物理学报，2014，63(3)：1-12.
WANG Yan，ZOU Nan，FU Jin，et al. Estimation of single hydrophone target motion parameter based on cepstrum analysis[J]. Acta Physica Sinica，2014，63(3)：1-12.

[22] 王卫国，蔡俊武. GPS 多路径信号的广义倒谱相关函数分析法[J]. 装备指挥技术学院学报，2008，19(6)：71-75.
WANG Weiguo，CAI Junwu. Generalized cepstrum correlation function analysis method on multipath signals of GPS[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology，2008，19(6)：71-75.

[23] 王宏超，陈进，董广明. 基于最小熵解卷积与稀疏分解的滚动轴承微弱故障特征提取[J]. 机械工程学报，2013，49(1)：88-94.
WANG Hongchao，CHEN Jin，DONG Guangming. Fault diagnosis method for rolling bearing's weak fault based on minimum entropy deconvolution and sparse decomposition[J]. Journal of Mechanical Engineering，2013，49(1)：88-94.

[24] 王志武. 强噪声背景下机械故障微弱信号特征提取方法研究[D]. 太原：中北大学，2014.
WANG Zhiwu. Research on Weak Signal Feature Extraction of Mechanical Equipment in Heavy Noise[D]. Taiyuan：North Central University，2014.

[25] JIANG H K，XIA Y，WANG X D. Rolling bearing fault detection using an adaptive lifting multi-wavelet packet with a 1.5 dimension spectrum[J]. Measurement Science and Technology，2014，24(12)：1-10.

[26] 陈敬龙，张来斌，段礼祥，等. 基于提升小波包的往复压缩机活塞-缸套磨损故障诊断[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2011，35(1)：130-134.
CHEN Jinglong，ZHANG Laibin，DUAN Lixiang，et al. Diagnosis of reciprocating compressor piston-cylinder liner wear fault based on lifting scheme packet[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Sciences)，2011，35(1)：130-134.

[27] CHEN J L，ZHANG C L，ZHANG X Y，et al. Planetary gearbox condition monitoring of ship-based satellite communication antennas using ensemble multi-wavelet analysis method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2015，54(55)：277-292.

[28] 袁静，何正嘉，訾艳阳. 基于提升多小波的机电设备复合故障分离和提取[J]. 机械工程学报，2010，46(1)：79-85.
YUAN Jing，HE Zhengjia，ZI Yanyang. Separation and extraction of electromechanical equipment compound faults using lifting multiwavelets [J]. Journal of Mechanical Engineering，2010，46(1)：79-85.

[29] YUAN J，HE Z J，ZI Y Y，et al. Construction and selection of lifting-based multi-wavelets for mechanical fault detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2013，40(2)：571-588.

[30] 何正嘉，孙海亮，訾艳阳. 自适应多小波基函数构造与机械故障诊断应用研究[J]. 中国工程科学，2010，13(10)：83-92.
HE Zhengjia，SUN Hailiang，ZI Yanyang. Adaptive construction of multiwavelet basis function and its applications for mechanical fault diagnosis[J]. Engineering Science，2010，13(10)：83-92.

[31] DAVOUDI S，MOSTAFAPOUR A. Gas leak locating in steel pipe using wavelet transform and cross-correlation method[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2014，70：1125-1135.

[32] LI S Y，WEN Y M，LI P，et al. Leak location in gas pipelines using cross-time-frequency spectrum of leakage-induced acoustic vibrations [J]. Journal of Sound and Vibration，2014，333(17)：3889-3903.

[33] MOSTAFAPOUR A，DAVOUDI S，GHAREAGHAJI M. Acoustic emission source location in plates using wavelet analysis and cross time frequency spectrum[J]. Ultrasonics，2014，54(8)：2055-2062.

[34] RASHID S，QAISAR S，SAEED H，et al. A method for distributed pipeline burst and leakage detection in wireless sensor networks using transform analysis[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks，2014，2014：939657.

[35] 金中薇，姜明顺，隋青美. 基于广义互相关时延估计算法的声发射定位技术[J]. 传感技术学报，2013，26(11)：1513-1518.
JIN Zhongwei，JIANG Mingshun，SUI Qingmei，et al. Acoustic emission localization technique based on generalized cross-correlation time difference estimation algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators，2013，26(11)：1513-1518.

[36] 伦淑娴，张化光，冯健. 自适应模糊神经网络系统在管道泄漏检测中的应用[J]. 石油学报，2004，25(4)：101-104.
LUN Shuxian，ZHANG Huaguang，FENG Jian. Filtering technique based on adaptive fuzzy-neural network applied to leakage detection of pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica，2004，25(4)：101-104.

[37] 梁伟，张来斌，郭存杰. 复杂工况下热油管道漏失识别与定位方法研究[J]. 石油矿场机械，2009，38(6)：12-16.
LIANG Wei，ZHANG Laibin，GUO Cunjie. Leak detection and positioning method for heat pipelines in complicated conditions[J]. Oil Field Equipment，2009，38(6)：12-16.

[38] OZEVIN D，HARDING J. Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping，2012，92：63-69.

[39] 李雄，刘伟军，唐飘，等. 排气三通管道分散流流动特性的数值模拟及分析[J]. 河北科技大学学报，2014，35(3)：272-278.
LI Xiong，LIU Weijun，TANG Piao，et a1. Numerical simulation and analysis on the dispersed flow characteristics in tee branch pipe of exhaust system[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2014，35(3)：272-278.

[40] ABDELGAWAD A，BAYOUMI M. Remote measuring for sand in pipelines using wireless sensor network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2011，60(4)：1443-1452.

[41] ABDELGAWAD A. Distributed sand monitoring framework using wireless sensor networks[J]. Journal of Communications Engineering and Networks, 2013,1(1):1-10.

[42] NASIM M, QAISAR S. Hierarchical MIMO: A clustering approach for ad hoc wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems. Princeton:[s. n.], 2010:1-6.

[43] SADEGHIOON A, METJE N, CHAPMAN D, et al. Smartpipes: smart wirelesswensor networks for leak detection in water pipelines [J]. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2014,3(1): 64-78.

[44] 徐焕良,刘佼佼,王浩云,等. WSN/WSAN 中的时间同步算法研究[J]. 计算机工程与应用,2012,48(31):56-60.
XU Huanliang , LIU Jiaojiao , WANG Haoyun, et al. Research on clock synchronization algorithms for WSN/WSAN[J]. Computer Engineering and Applications, 2012,48(31):56-60.

[45] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]// In Proceedings of the 5th Symposium. Boston:[s. n.],2002:147-163.

[46] GANERIWAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]// In Proceedings of Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles:[s. n.], 2003:138-149.

[47] MIHAIL L S, CHANCHAI V. Simple accurate time synchronization for wireless sensor networks[C]// In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New Orleans:[s. n.], 2003:1266-1273.

[48] DAI H, HAN R. TSync:A lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks[J]. Mobile Computing and Communications Review, 2004,8(1):125-139.

[49] GREUNEN J,RABAEY J. Lightweight time synchronization for sensor networks[C]// In Proceedings of International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications. San Diego:[s. n.],2003:1-5.

[50] LI Q, DANIELA R. Global clock synchronization in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2006,55(2):214-226.

[51] MARÓTI M, KUSY B, SIMON G, et al. The flooding time synchronization protocol[C]// In Proceedings of 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Baltimore:[s. n.], 2004:39-49.

[52] SU P. Delay Measurement Time Synchronization for Wireless Sensor Networks[R]. Santa Clara: Intel Research Berkeley Lab, 2003: IRB-TR-03-013.

[53] 杨朔,李长庚. 无线传感器网络泛洪时间同步协议安全算法[J]. 传感器与微系统,2014,33(1):137-140.
YANG Shuo, LI Changgeng. Security algorithm of flooding time synchronization protocol in wireless sensor networks[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2014,33(1):137-140.

[54] 北京声华兴业科技有限公司. SAEW2 分布式多通道声发射检测仪[EB/OL]. http://www. soundwel. cn/product/133. html,2013-10-11.

[55] 美国物理声学公司(PAC)北京代表处. 通道无线声发射系统[EB/OL]. http://www. pacndt. cn/ProductInfo. aspx? m=20131212100844083668&n=20131212131322847763, 2013-12-12.

[56] GANERIWAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]// In Proceedings of Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles: [s. n.], 2003:138-149.

[57] BOCCA M, ERIKSSON L M. MAHMOOD A, et al. A synchronized wireless sensor network for experimental modal analysis in structural health monitoring[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2011,26(7):483-499.