2021 年 第 21 卷 第 31 期
2021, 21(31): 13203-08
科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering
ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:高 琳, 曹建国. 管道泄漏检测中两个难点问题的研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13203-13210.
Gao Lin, Cao Jianguo. Review of two knotty issues on testing of pipe leakage[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13203-13210.

石油、天然气工业

管道泄漏检测中两个难点问题的研究进展

高 琳[1,2], 曹建国[1,3*]
(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古科技大学机械工程学院, 包头 014010;
3. 北京科技大学人工智能研究院, 北京 100083)

摘 要 管道泄漏常常造成环境污染、财产损失和人员伤亡,由于其发生的隐蔽性,对管道泄漏的及时识别与准确定位具有重要的现实意义,但在检测中存在两个问题目前并没有得到很好的解决,管道泄漏声发射应力波的频散问题、管网泄漏的检测成本(时间成本、传感器数目等)和检测精度之间的矛盾问题。围绕这两个问题,分别重点介绍了"管道泄漏模态声发射检测(连续型、突发型)"以及"管网泄漏检测(泄漏源定段、传感器布置、算法)"的中外研究现状,梳理了众多文献间的区别和联系;最后分析了当前研究的不足,并对这两个问题的未来研究方向做出了展望。

关键词 管道; 泄漏; 检测; 难点; 综述
中图法分类号 TE832; **文献标志码** A

Review of Two Knotty Issues on Testing of Pipe Leakage

GAO Lin[1,2], CAO Jian-guo[1,3*]
(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
3. Institute of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

[**Abstract**] Pipe leakage may cause environmental pollution, property losses and casualties. It is very important to detect in time and accurately locate pipe leakage for its concealment. There are two issues remained to be settled better in testing: the dispersion phenomena of acoustic emission stress wave induced by pipe leakage, the contradiction between cost (time cost and number of sensors) and precision in leakage testing of pipe network. Concerning these two issues, the corresponding summarization at home and abroad were introduced emphatically, including modal acoustic emission testing technique for continuous and burst type pipe leakage and pipe network leakage testing such as isolation of leakage source, arrangement of sensors and algorithm. The difference and relationship of the previous relevant literatures were combed through in detail. Finally, the deficiencies of present research were discussed and future research objects on these two issues were proposed.

[**Keywords**] pipe; leakage; testing; knotty issues; review

输流管道常常由于外力、疲劳、腐蚀等原因发生破坏进而发生泄漏事故,造成环境污染甚至重大人员伤亡和财产损失,如 2010 年 7 月 25 日,美国 Enbridge 公司所属管线在密歇根州马歇尔地区的湿地内发生破裂,导致 3 192 m^2 的原油流入了 Kalamazoo 河,大约 320 人因暴露在原环境下出现了不同程度的病症,直接经济损失超过 7.67 亿美元[1]。值得注意的是,此次事故在泄漏长达 17 h 后才被运营商发现,因此,如何快速有效地识别和准确地定位泄漏是管道泄漏检测的关键所在。

管道泄漏的检测手段有很多,综观现有研究文献,按检测对象可以分为以下三类:管道内部流体状态检测[2]、管壁状况检测[3]、管道外部环境检测[4]。按检测方法总体上可分为"基于硬件[5]"和"基于软件[6]"两大类方法,也可以具体分为"基于模型[7]""基于信号处理[8]""基于人工智能[9]"的

收稿日期: 2021-01-20; **修订日期**: 2021-06-08
基金项目: 国家自然科学基金(52075270);内蒙古自然科学基金(2021LHMS05027)
第一作者: 高 琳(1979—),男,汉族,辽宁新金人,硕士,副教授。研究方向:设备故障诊断。E-mail:dongao521922@163.com。
*通信作者: 曹建国(1971—),男,汉族,湖南衡阳人,博士,教授。研究方向:复杂机电系统检测与控制、轧制技术及自动化。E-mail:841570098@qq.com。

检测方法。王俊岭等[10]对用于在役排水管道缺陷检测的主要方法做了综述,分析了各检测方法的原理和特点。

目前虽然已经有众多成熟技术广泛应用在管道泄漏的检测当中,但其中仍有以下两个难点尚未得到充分解决。其一,由于管道属于圆柱壳结构,因此泄漏所致声发射应力波在圆柱壳这种薄壁结构中传播会产生多种模态,包括扭转模态、弯曲模态和纵向模态,不同频率的模态波还具有不同的传播速度,即存在频散现象,导致难以准确定位泄漏源,尤其对于较长管道。正因如此,出现了专门的分支领域——模态声发射[11](modal acoustic emission, MAE),但由于管道泄漏声发射应力波模态种类多、频散机理复杂,故管道泄漏的 MAE 问题尚处在不断探索之中。其二,对于管网泄漏的检测,一直存在着泄漏定位精度与传感器数量的矛盾。不同于一维管道,二维平面管网和三维立体管网存在大量弯头、法兰、阀门等改变泄漏信号传播特性的因素,为了能准确定位泄漏,往往需要布置大量的传感器,但由此又带来了检测成本高、数据量大、实时响应慢的不足,因此有待进一步深入研究。

基于上述存在于管道泄漏检测中的两个难点问题,现就相关研究现状进行介绍和评述,并做出展望。

1 基于模态声发射的管道泄漏检测

“模态声发射”是在传统“参数声发射”的基础上发展起来的声发射检测技术,该理论认为在被测结构中发生的声发射事件是由多个模态组成的导波信号[12],而管道泄漏的导波信号在管道内传播的频散特性使得信号波形不再是固定不变的,而是随着传播距离的增大逐渐失真,从而降低了通过互相关方法进行管道泄漏定位的精度。因此,可以考虑的做法是,先从传感器所测信号中提取有效泄漏信号(去噪),然后对其进行模态分析,提取其中某个模态波进行互相关定位[13],这样才能最大限度地提高定位精度。但由于模态混叠,从管道泄漏波中提取出单一模态波并不容易,这正是模态声发射定位管道泄漏的难点所在。

综观现有为数不多的基于模态声发射技术的管道泄漏检测文献,可以分成两大类:一类是针对“连续型”声发射信号的;一类是针对“突发型”声发射信号的。对于管道,“突发型”声发射信号指的是管道从无泄漏到有泄漏过程中测得的声发射信号,“连续型”声发射信号指的是管道泄漏过程中测得的声发射信号。

1.1 连续泄漏模态声发射检测

对于模态声发射检测,“连续型”泄漏声发射信号相对“突发型”泄漏声发射信号更加难于处理,这是因为突发泄漏信号从无到有,信号中传播速度不同的模态波可依次被传感器检测到,而对于“连续型”泄漏信号,各种模态波已混叠到一起,很难分辨。

文献[14]奠定了基于模态声发射理论进行管道连续泄漏定位的基础,之后的很多文献都是在此基础上开展的。该文章提出“时空变换法”来描述说明频散现象,即首先将管道泄漏声发射信号表示成 n 种模态波的求和形式,再对两传感器接收到的声发射信号做时间傅里叶变换和空间傅里叶变换,经过处理后即可提取出单一模态的声发射信号,进而通过互相关计算实现精准的定位。

“时空变换法”虽然理论严谨,但是需要知道传感器附近一定区间内所有的声发射信号,这在现实中是难以实现的,Rewerts 等[14]也仅仅是做了理论推导。焦敬品等[15]针对该问题,基于传感器位置的泄漏信号波形,利用导波理论推导出了附近的传播波形表达式,使 Rewerts 等[14]提出的“时空变换法”成功地应用于实际的管道泄漏检测中,但正如作者所述,该方法仅适用于泄漏源在两传感器之间的情况。为此,Jiao 等[16]进一步提取出了两种不同的模态波,从而仅使用一个传感器就可进行模态声发射泄漏的定位,避免了泄漏源可能不在两传感器之间的问题。杨丽丽等[17]同样基于上述的“时空变换法”,从频域的角度,首先对管道泄漏原始信号的互谱加窗,通过调整窗参数从中提取单一模态的互谱,再对其傅里叶逆变换得到该模态波的互相关函数,从而进行时延估计。Li 等[18]基于模态导波理论,评估了泄漏信号中不同模态波的频散程度,据此提取出频散最小的单一模态波用于泄漏的互相关定位。

以上文献无论是从时域的角度还是从频域的角度,都是以提取模态特征参数为前提。除了此类方法,也可通过对泄漏波的频散进行补偿,使之恢复为原始的真实波形,以达到提高定位精度的目的。例如,李帅永等[19]采用平滑魏格纳-维尔(Wigner-Ville)分布对泄漏信号的互相关函数进行时频分析,提取出互相关函数时频谱的峰值,如图 1 所示[20]。峰值对应的时间 0.012 2 s 即为两泄漏信号的时延,峰值对应的频率 356.45 Hz 可用于确定具体声速,最后由时频定位公式确定了管道泄漏位置。该互时频相关法有效地补偿了泄漏信号的频散,抑制了信号波形发生畸变。郝永梅等[21]在上述

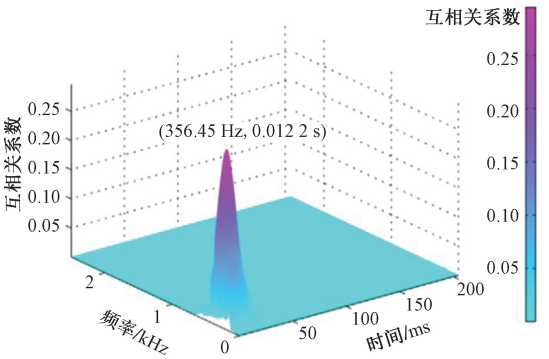

图 1　管道泄漏信号互时频谱[20]

Fig. 1　Cross time-frequency spectrum of pipe leakage signals[20]

互时频法的基础上,提出了广义 S 变换互时频分析,获得了更加准确的时延,进一步提高了定位精度。

由于管道泄漏波存在频散,即波速随着不同模态、不同频率而变化,因此在管道泄漏模态声发射检测中,对波速的估计一直是研究重点。如 Li 等[22]基于圆柱壳弹性振动理论准确估计了波速;刘志宏等[23]根据管道振动理论,结合管道内部流体的性质,利用流固耦合技术对塑料管道泄漏波的波速做了较准确的预测。

1.2　突发泄漏模态声发射检测

最早基于模态声发射理论研究“突发型”声发射信号定位问题的是 Kishimoto 等[24]提出在某频率下,小波变换系数的最大值所对应的时间值就是信号到达传感器的时间,再通过群速度频散曲线得到该频率下的群速度值,从而实现声发射源的准确定位。

Kishimoto 等[24]的研究对象是薄板,李江全等[25]借鉴其研究思路,确定了管道中某一频率下某一模态导波到达传感器的时间,由此计算出该频率下该模态导波的群速度,从而描绘出管道导波的频散曲线,结果表明与理论计算频散曲线吻合较好。

上述文献均基于两个传感器进行时频分析,而 Mostafapour 等[26]仅采用一个传感器,利用 Kishimoto 等[24]的方法,通过时频变换确定某一模态导波到达传感器的时间,再由数值计算得到该频率处模态导波的群速度,最终求出泄漏位置。和 Kishimoto 等[24]采用一个模态不同的是,该文采用扩展模态(对称)S0 和弯曲模态(反对称)A0 两种模态,如图 2 所示,计算的是这两种模态分别到达同一传感器的时间差(对于“突发型”管道泄漏声发射信号,首先到达传感器的是 S0 模态波,随后到达的是 A0 模态波),因而可只采用一个传感器进行泄漏的定位。

同样只使用一个传感器检测的还有 Xu 等[27],首先采用经验模态分解(empirical mode decomposition,EMD)提取出泄漏特征信号,再结合导波频散曲线确定计算所用模态,最后基于 Kishimoto 等[24]的方法利用该模态波对管道泄漏进行定位。针对泄漏源与传感器不在管道同一条母线上的情况,Wang 等[28]基于 Kishimoto 等[24]的方法,结合时反聚焦技术对泄漏源进行了三维空间定位,结果表明可提取出显著的扩展模态波 S0 和弯曲模态波 A0,如图 3 所示,证明了该方法对“突发型”泄漏声发射信号在曲线传播路径中定位的有效性。

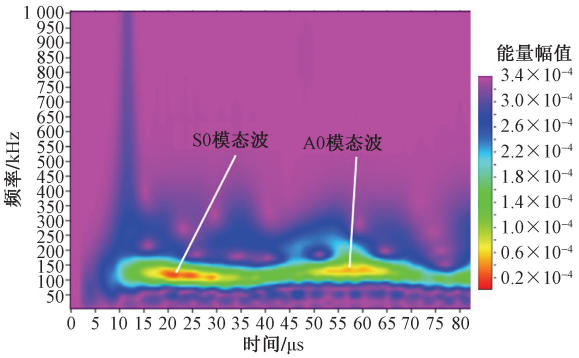

图 2　管道泄漏模态波的时频能量分布[26]

Fig. 2　Time-frequency distribution of pipe leakage modal wave[26]

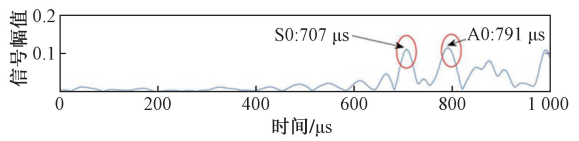

图 3　管道泄漏的扩展模态波和弯曲模态波[28]

Fig. 3　Extension and flexural modal wave of pipe leakage[28]

无论是“连续型”泄漏声发射信号还是“突发型”泄漏声发射信号,在非金属管道中都会存在较大的衰减,尤其对于埋地管道,由于管道-土壤的相互作用而产生能量辐射,从而将声发射信号的部分能量泄漏到土壤中而产生较大的衰减。因此,在管道泄漏模态声发射信号的研究中,衰减问题一直是研究的热点。如 Long 等[29]研究了埋地铸铁水管中波的传播,结果表明弯曲模态波 F(1,1)衰减最严重,传播的距离最短;在此基础上,Long 等[30]进一步研究了管接头对波传播的影响,结果表明弯曲模态波 F(1,1)和纵向模态波 L(0,1)的衰减最大。李帅永等[31]也对管道泄漏模态声发射信号的衰减做了研究(研究对象为非埋地管道),结果表明,轴向声发射信号中的主要模态为纵向模态,而纵向模态波在所有模态波中总体上衰减最小,故文章建议应提取管道轴向声发射信号进行检测,以最大限度地增加检测距离。

2 管网泄漏的检测

除了一维管道外,管网(pipe network)由于其包含若干一维管道,且配有更多的阀门、法兰等管道连接,因此泄漏问题更为突出。但由于管网中管道的维数增加,从一维管线到多维管线,导致管网泄漏检测的复杂程度也大幅增加。

2.1 不同形式管网的泄漏检测

关于管网的不同形式,国外文献一般将其分为TM(transmission mains)和DNs(distribution networks)(有的文献称为DS:distribution systems)两种形式。这里,TM指的是最简单的管网,即一维管线形式[32];DNs是复杂的管网,经常呈网状分布(即中国文献所述的"环状"管网,如图4所示[33]),这也是最复杂、研究最多的管网。介于这两种管网形式之间的是distribution-transmission mains(有的文献称之为branch pipes,即中国文献所述的"枝状"管网,如图5所示[34]),这种管网结构比较简单,泄漏检测相对容易一些。

对于"枝状"管网,Meniconi等[35-36]采用经典的瞬态流检测技术(transient test-based techniques,TTBT)对分枝管道上的缺陷进行了定位和大小估计;随后又指出,TTBT仅适合在TM和distribution-transmission mains中应用,这是因为这两种管网中的流体压力较大,易形成明显的瞬态压力流,而DNs则由于众多的分段使得管网压力较小,瞬态流效应不够显著(Gupta等[37]指出,TM的工作压力一般大于1.6 MPa,而DNs的工作压力仅为0~50 kPa)。中国对"枝状"管网泄漏的研究有张丽娟等[38]在研究"枝状"管网泄漏时分别采用加权最小距离分类器和神经网络两种模式识别方法对枝状燃气管网的泄漏进行了定位,但泄漏源位置设定在了管道产生分叉之前,具有一定的局限性。针对该问题,赵彬伶等[34]分别研究了泄漏点在支管上游、支管下游以及两支管之间等不同位置对瞬态压力波的影响,如图5所示。

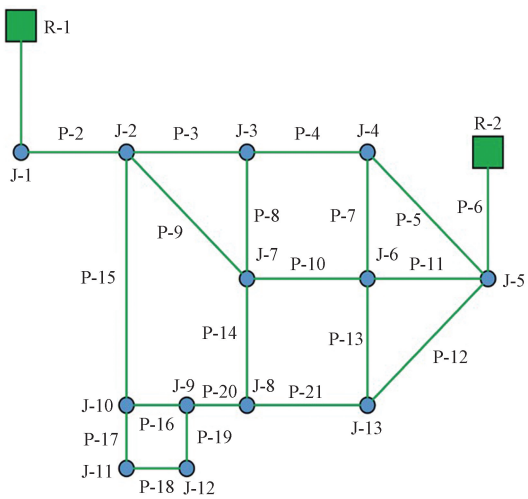

图4 "环状"管网示意图[33]

Fig. 4 Diagram of annular pipe network[33]

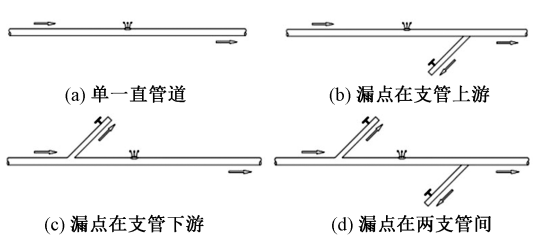

图5 "枝状"管网示意图[34]

Fig. 5 Diagram of branching pipe network[34]

不同于"枝状"管网,"环状"管网(DNs)较为复杂,其泄漏检测的一般思路为[39]:首先将管网在管道交汇处进行分割,以形成多段一维管线,然后在每段一维管线上同时布置大量传感器进行检测。由此可见,DNs的信息采集量巨大,数据处理时间长,检测成本高,较难达到工业界期望的快响应、低成本的要求(文献[40]阐明,对于一个实际的DNs,管道节点可以达到数千个,计算时间需要数天甚至数周)。王桂增等[41]运用上述思路,在各条一维管线的汇接点处安装压力传感器,采集管网每个节点的压力信号,并基于模式识别的原理对管网进行了泄漏检测。但由于传感器数量大,计算时间成本和经济成本均较高。段昱等[42]针对成本较高的问题提出了对管网分区检测的思想,即先把管网分成若干区域,再在各个分区内选择特征节点并进行模式识别。该方法使得模式识别所用特征向量的维度大大降低,显著减少了计算时间。虞丹阳等[43]则从优化特征向量的提取方法入手,提出了压力图像特征向量法,结果表明该方法也能有效降低特征向量的维度。

2.2 管网泄漏检测的"定段"和传感器布置

在一维管线泄漏源的定位过程中,泄漏事故段的区间长度是已知的,这确保了泄漏源位置的可算性,而当检漏对象为管网时,泄漏事故段区间预先并不知道,因此,如何从管网中先行确定泄漏发生的区间是研究的关键,即所谓的"定段"(leakage isolation)问题。当泄漏事故段确定下来之后,接下来就是泄漏源的具体"定位"(leakage localization)问题了。如林伟国等[44]首先利用管网各节点接收到的异常信号的先后顺序判别泄漏发生的管段,然后采用互相关方法进行具体定位;魏立明等[45]利用泄漏目标点到各传感器接收点之间的信号强度指示

器计算得到泄漏点至各接收点之间的距离,再通过最小二乘法获得泄漏点的近似具体坐标。

管网泄漏检测的矛盾是:若要达到一定的识别定位精度,需要布置大量的传感器,成本较大;若减少传感器的数量,则定位精度会有所下降。所以管网泄漏检测中的一个重要任务是如何优化传感器的布置,这主要包括传感器的位置和传感器的数目。Fuchs-Hanusch 等[46]提出了 6 种优化压力传感器布置的算法,以考察传感器位置因算法不同的稳健性,结果表明“基于图形理论的最短路径法”和“基于泄漏敏感度的香农熵法”计算得出的传感器布置结果相差较大,对于泄漏流量小于 0.5 L/s 的工况,后者具有更高的定位精度。Soldevila 等[40]基于压力模型和分类器理论,在给定传感器数目的基础上,通过遗传算法构造了相关和冗余滤波器,从而把传感器的位置选择问题转化为一个混合特征选择问题。该方法成功地应用在了越南河内的包含 197 个节点(图 6)的供水管网(water distribution networks,WDNs)中,检测计算时间仅为 240.48 s。

前面介绍的管网无论是 DNs 还是 branch pipes,均属于二维管网,即各个管段在同一平面内,目前绝大部分研究都是基于二维管网展开的,针对三维管网(立体管网)的研究并不多。类似立体管网的三维结构, Ozevin 等[47-48]提出了关于桁架、悬索和钢结构塔等空间结构的疲劳损坏实时监测方法,其主要思路是先在局部坐标系中定位声发射源,然后再将其转化到全局坐标系中,从而确定其在空间的位置,类似本节讨论的管网泄漏“定段”问题。立体管网属于网状空间结构,和桁架、钢结构塔的几何拓扑具有类比性,因此 Didem[47-48]对三维立体管网的泄漏定位进行了研究,利用各分段一维管线之间的几何拓扑特点,每个分段管线上只布置有一个传感器,因此显著地降低了检测成本。

2.3　管网泄漏检测的具体算法

管网泄漏检测的具体算法多种多样,一些算法在前文已有介绍,其中应用较为广泛的为灵敏度分析法(sensitivity analysis)。如张宏伟等[49]根据供水管网的水力学模型和拓扑学机理,建立了压力灵敏度矩阵,确定了压力监测点的数量及位置;Pérez 等[50]基于遗传算法优化了传感器的布置,利用压力灵敏度矩阵(图 7)对泄漏进行了定位。从图 7 中可看出,不同的泄漏节点对于不同节点上的传感器具有不同大小的灵敏度,该方法成功地应用在了西班牙巴塞罗那的 WDNs 中,但作者同时指出,灵敏度矩阵的计算严重依赖管网中所用节点的数目,节点数目增加,计算成本将急剧增长。针对该不足,Soldevila 等[51]建立了一个 DNs 模型,据此得到各节点压力值,将其与测量值比较得到残差,然后输入到分类器实现泄漏定位。该方法避免了求解灵敏度矩阵,但仅适用于管网中只有一个泄漏点的情况,作者指出,对于多泄漏点,该检测方法会非常耗时。

由于管网结构的复杂性,单纯由一般的信号处理方法检测管网泄漏的效果往往不尽理想,而通常需要结合人工智能方法提高检测精度。人工智能可根据给定的训练样本求出系统输入输出之间的关系,使之能够尽可能准确地预测系统的未知输出。因此,人工智能非常广泛地应用在了管网泄漏的检测当中。如 Cody[52]首先通过奇异谱分析把信号分解,提取出特征分量,再将其输入到支持向量机(support vector machine,SVM)中识别管网泄漏。作者指出,由于所有可能的泄漏类型数据不可能全部获取,所以采用了基于半监督学习的 SVM 模型。类似地,吴雷[53]也采用 SVM 对城市供水管网的泄漏进行了定位研究。

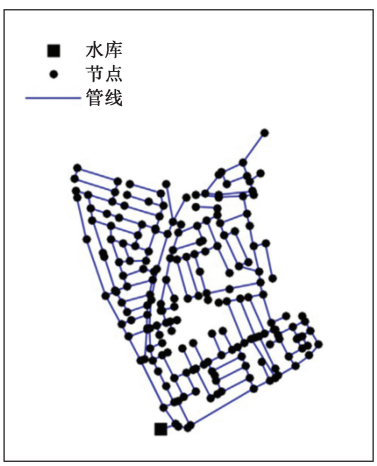

图 6　越南河内供水管网示意图[40]

Fig. 6　Diagram of water distribution network in Hanoi Vietnam[40]

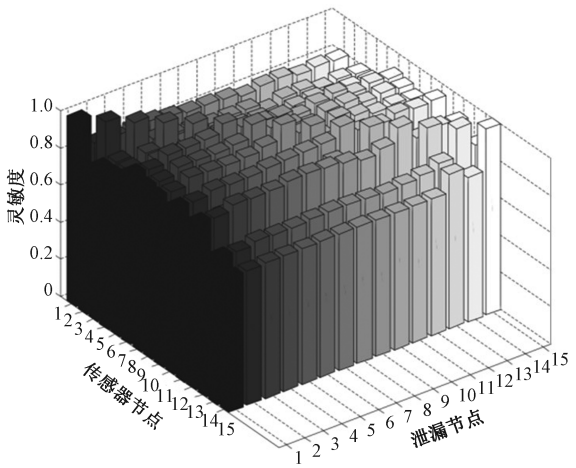

图 7　归一化压力灵敏度矩阵[50]

Fig. 7　Normalized pressure sensitivity matrix[50]

除了 SVM 外,其他人工智能算法也有大量的应用,如张若愚[54]利用神经网络(neural networks,NN)对燃气管网的泄漏进行了诊断。相对于 SVM,神经网络的泛化能力较弱,其找到的极值解并不一定是全局最优解,同时还需要大量训练样本,故在管网泄漏检测中,传统 NN 不如 SVM 应用的广泛。但随着深度学习算法的提出,出现了诸如卷积神经网络(convolutional neural networks,CNN)、深度神经网络(deep neural networks,DNN)等一系列神经网络新算法,使神经网络的分类能力大大提高,如 Cody 等[55]结合深度学习理论,利用水声频谱图对供水管网的泄漏进行了识别。此外,Wachla 等[56]将模糊理论与 NN 结合起来检测管网泄漏,解决了 NN 仅适用于小样本的问题。以上方法都是与常用的 SVM、NN 相结合进行研究的,对于其他模式识别算法,如贝叶斯分类器[57]、K 近邻法[58]等也都在管网泄漏检测中有所应用。

除了上述常用算法外,在一维管线中的部分算法也应用在了管网泄漏的检测当中。如 Suwan 等[8]利用主分量分析(principal component analysis,PCA)对水网中的泄漏进行了检测;Zeng 等[59]基于压力波的冲激函数响应对水网泄漏进行了识别等。这些方法的原理和一维管线中的类似,这里不再赘述。

3 总结与展望

目前虽然已有大量检测管网泄漏的方法,但其中仍有 2 个问题需要进一步深入研究,一是管道泄漏声发射应力波在传播过程中发生的频散现象难以处理;二是管网泄漏检测中,检测成本与检测精度间的矛盾。为此,分别从这两方面对相关文献逐一进行了梳理分析。

通过对现有文献的总结整理,今后需要在以下几个问题上作进一步深入研究。

(1)由于时频分析(如上文所述魏格纳威尔分布)不能完全去除交叉项,故无法从管道泄漏模态声发射信号中提取出纯净的单一模态波,也不能对泄漏模态波进行彻底的频散补偿;除此之外,对波速的估计也尤为重要,但因为圆柱壳弹性振动理论和流固耦合理论中存在大量的简化假设,由此估计出来的波速还不够准确。因此后续还需不断改进时频分析算法、尽量减少不必要的简化,不断完善 MAE 在管道泄漏中的应用研究。

(2)针对埋地管道中不同模态波的衰减特性的研究目前还不够充分,尚需加强,即不同土壤地质、不同管道材料(及其外包保温防腐层)、不同流体状态对不同频率、不同模态波(扭转模态、弯曲模态、纵向模态)的衰减特性的影响。由于这涉及到管道-流体-土壤 3 种物质之间的耦合,任何一种物质的变化均会影响模态波的衰减特性,因此后续应就其衰减机理进行深入研究,以有效解决埋地管道尤其是埋地塑料管道检测距离短的问题。

(3)管网泄漏检测中的“定段”问题研究已比较成熟,但由于压力灵敏度矩阵阶数和传感器节点数密切相关,在传感器数目较大时,计算时间较长(可长达数小时),实时性差,故仍需要在传感器数目、传感器布置算法等方面进行进一步优化,以达到可实际应用的目的。

(4)由于管网结构的复杂性,很多文献都基于人工智能的方法检测泄漏,这种“黑箱技术”的缺点是并不知道泄漏信号在管网中的具体传播特性,因而不是从机理角度出发解决管网的泄漏问题。在管网中,泄漏源与传感器之间的路径不是直线的情况下,由于管道拐弯处的折线角度不同以及接头处的阀门、法兰等连接件的影响,泄漏信号并不一定从最短路径到达传感器。因此,深入研究泄漏信号在管网中经过折线处以及连接件处时的传播特性是今后需要关注的一个重要内容。

参 考 文 献

[1] 戴联双. 事故案例 [DB/OL]. (2018-07-17)[2021-06-16]. http://guandaobaohuchina.com/htm/20187/20_1219.htm.
Dai Lianshuang. Accident cases [DB/OL]. (2018-07-17)[2021-06-16]. http://guandaobaohuchina.com/htm/20187/20_1219.htm.

[2] Wang X, Lin J, Keramat A, et al. Matched field processing for leak localization in a viscoelastic pipe: an experimental study [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 124: 459-478.

[3] DiaoX , Chi Z Z, Jiang J C, et al. Leak detection and location of flanged pipes: an integrated approach of principle component analysis and guided wave mode[J]. Safety Science, 2020, 129:1-8.

[4] Kasai N, Tsuchiya C, Fukuda T, et al. Propane gas leak detection by infrared absorption using carbon infrared emitter and infrared camera[J]. Nondestructive Testing and Evaluation International, 2011, 44(1): 57-60.

[5] 高文傲, 刘 洋, 李登科, 等. 基于光纤监测技术的燃气管道泄漏研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(8): 67-72.
Gao Wen'ao, Liu Yang, Li Dengke, et al. Research on gas pipeline leakage based on optical fiber monitoring technology [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(8): 67-72.

[6] 毛 敏, 王晓东, 吴建德. 基于 EMD 与 VPMCD 的矿浆管道泄漏检测方法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(1): 149-153.
Mao Min, Wang Xiaodong, Wu Jiande, et al. Leak detecting method for mineral slurry pipeline based on EMD and VPMCD [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(1): 149-153.

[7] Zyl J E V, Lambert A, Collins R P. Realistic modeling of leakage and intrusion through leak openings in pipes [J]. Journal of Hy-

draulic Engineering, 2017, 143(9): 04017030.

[8] Parka S, Haa J, Kim K. The principal component analysis for detecting leaks in water pipe networks utilizing flow and leak record data[J]. Desalination and Water Treatment, 2019,143: 69-77.

[9] 王学渊, 陈志刚, 钟新荣. 基于粒子群优化的SVM供水管道泄漏诊断方法[J]. 现代电子技术, 2018, 41(7): 156-164.
Wang Xueyuan, Chen Zhigang, Zhong Xinrong, et al. PSO-SVM based leakage diagnosis method of water supply pipeline[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(7): 156-164.

[10] 王俊岭, 邓玉莲, 李　英, 等. 排水管道检测与缺陷识别技术综述[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13520-13528.
Wang Junling, Deng Yulian, Li Ying, et al. A review on detection and defect identification of drainage pipeline [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(33): 13520-13528.

[11] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 模态声发射基本理论[J]. 无损检测, 2002(7): 302-306.
Geng Rongsheng, Shen Gongtian, Liu Shifeng. A study on modal acoustic emission theory [J]. Nondestructive Testing, 2002(7): 302-306.

[12] 李孟源, 尚振东, 蔡海潮, 等. 声发射检测及信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Li Mengyuan, Shang Zhendong, Cai Haichao, et al. Acoustic emission detection and signal processing[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[13] 王少峰, 刘朋真, 王建国. 基于小波包熵与Gabor小波变换的管道连续型泄漏源定位[J]. 仪表技术与传感器, 2017(9): 98-102.
Wang Shaofeng, Liu Pengzhen, Wang Jianguo, et al. Location of pipeline continuous leakage source based on wavelet packet entropy and gabor wavelet transform[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(9): 98-102.

[14] Rewerts L E, Roberts R R, Clark M A. Dispersion compensation in acoustic emission pipeline leak location[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16: 427-434.

[15] 焦敬品, 何存富, 吴　斌, 等. 基于导波理论的管道泄漏声发射定位新技术研究[J]. 机械工程学报, 2004(10): 77-81.
Jiao Jingpin, He Cunfu, Wu Bin, et al. New technique for modal acoustic emission pipeline leak location [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004(10): 77-81.

[16] Jiao J P, He C F, Wu B, et al. A new technique for modal acoustic emission pipeline leak location with one sensor [J]. Insight, 2004, 46(7): 392-395.

[17] 杨丽丽, 谢昊飞, 李帅永, 等. 气体管道泄漏声发射单一非频散模态定位[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 969-976.
Yang Lili, Xie Haofei, Li Shuaiyong, et al. Leak location in gas pipelines by extraction of single non-dispersive mode from leakage-induced acoustic emission signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 969-976.

[18] Li S Y, Cheng N W, Wang P, et al. Extraction of single non-dispersive mode in leakage acoustic vibrations for improving leak detection in gas pipelines [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 41: 77-86.

[19] 李帅永, 王鹏飞, 严　冬, 等. 气体管道泄漏模态声发射时频定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2068-2075.
Li Shuaiyong, Wang Pengfei, Yan Dong, et al. Leak location in gas pipelines with time-frequency analysis of modal acoustic emission using smooth pseudo Wigner-Ville distribution[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2068-2075.

[20] 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: 3889-3903.

[21] 郝永梅, 覃　妮, 邢志祥. 基于VMD分量相对熵分析的压力管道泄漏定位[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(10): 124-130.
Hao Yongmei, Qin Ni, Xing Zhixiang. Pressure pipe leakage location based on of VMD and relative entropy analysis[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(10):124-130.

[22] Li S Y, Wen Y M, Li P, et al. Determination of acoustic speed for improving leak detection and location in gas pipelines[J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(2): 024901.

[23] 刘志宏, 崔伟华, 梁坤鹏. 泄漏管道波速预测理论及其应用[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 405-408.
Liu Zhihong, Cui Weihua, Liang Kunpeng. Prediction theory and application of wave velocity in leaky pipeline [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 405-408.

[24] Kishimoto K, Inoue H, Hamada M, et al. Time frequency analysis of dispersive waves by means of wavelet transform[J]. Journal of Applied Mechanics, 1995, 62: 841-846.

[25] 李江全, 焦敬品, 何存富, 等. 基于小波变换和模态声发射的管道中导波传播特性的试验研究[J]. 管道技术与设备, 2005(4): 14-16, 39.
Li Jiangquan, Jiao Jingpin, He Cunfu, et al. Experiment on guided waves propagation in thin plate through wavelet transformation and modal acoustic emission [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2005(4): 14-16, 39.

[26] 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.

[27] Xu C H, Du S S, Gong P, et al. An improved method for pipeline leakage localization with a single sensor based on modal acoustic emission and empirical mode decomposition with hilbert transform [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(10): 5480-5491.

[28] Wang S F, Wang H L, Wang D R, et al. AE source localization and imaging on cylindrical shell structures based on six-AE-sensor monitoring network and VTR focusing imaging[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2019, 36(10): 1-27.

[29] Long R, Vine K, Lowe M J S, et al. Monitoring acoustic wave propagation in buried cast iron water pipes[J]. AIP Conference Proceedings, 2001, 557(1): 1202-1210.

[30] Long R, Lowe M, Cawley P. Attenuation characteristics of the fundamental modes that propagate in buried iron water pipes[J]. Ultrasonics, 2003, 41(7): 509-519.

[31] 李帅永, 夏传强, 杨丽丽. 不同方向的气体管道泄漏声发射信号模态特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 195-204.
Li Shuaiyong, Xia Chuanqiang, Yang Lili. Modal characteristics of leakage-induced acoustic emission in different directions of gas pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 195-204.

[32] Alawadhi A, Tartakovsky D M. Bayesian update and method of distributions: application to leak detection in transmission mains

[J]. Water Resources Research, 2020, 56: e2019WR025879.

[33] 王 聪. 城市供水管网泄漏监测的传感器布置问题的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
Wang Cong. Research on sensor deployment of leakage monitoring in urban water supply network [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[34] 赵彬伶, 许仕荣, 俞亭超,等. 漏损管网中瞬态压力变化规律的研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(19): 40-45.
Zhao Binling, Xu Shirong, Yu Tingchao, et al. Variation of transient pressure in leaking water pipe network [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(19): 40-45.

[35] Meniconi S, Brunone B, Ferrante M, et al. Transient tests for locating and sizing illegal branches in pipe systems[J]. Journal of Hydroinformatics, 2011, 13(3): 334-345.

[36] Meniconi S, Brunone B, Ferrante M, et al. Anomaly pre-localiation in distribution transmission mains by pump trip: preliminary field tests in the Milan pipe system[J]. Journal of Hydroinformatics, 2015, 17(3): 377-387.

[37] Gupta P, Zana T T T, Wang M M. Leak detection in low-pressure gas distribution networks by probabilistic methods[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 58: 69-79.

[38] 张丽娟, 李 帆, 王文龙. 两种基于模式识别的枝状燃气管网泄漏定位方法[J]. 天然气工业, 2007, 27(8): 106-109.
Zhang Lijuan, Li Fan, Wang Wenlong. Two leakage positioning methods for dentritic gas pipeline network based on pattern recognition[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(8): 106-109.

[39] Jiménez-Cabas J, Romero-Fandio E, Torres L, et al. Localization of leaks in water distribution networks using flow reading [C]// 10th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. Warsaw, Poland: 2018,51(24): 922-928.

[40] Soldevila A, Blesa J, Tornil-Sin S Adrià S, et al. Sensor placement for classifier-based leak localization in water distribution networks using hybrid feature selection[J]. Computers and Chemical Engineering, 2018, 108: 152-162.

[41] 王桂增, 叶 昊. 流体输送管道的泄漏检测与定位[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
Wang Guizeng, Ye Hao. Leak detection and location of fluid pipeline[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.

[42] 段 昱, 武 平. 基于模式识别的燃气管网泄漏检测技术[J]. 能源研究与管理, 2014, 2: 69-72.
Duan Yu, Wu Ping. Leak detection of gas pipeline network based on pattern recognition[J]. Jiangxi Energy, 2014, 2: 69-72.

[43] 虞丹阳, 玉建军, 靳新迪. 2 种基于模式识别的环状燃气管网泄漏检测方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(1): 187-192.
Yu Danyang, Yu Jianjun, Jin Xindi. Study on two kinds of leakage detection methods for loop gas pipeline network based on pattern recognition[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(1): 187-192.

[44] 林伟国, 吴 震, 王 芳. 基于虚拟声波的舰艇管网泄漏检测方法研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(4): 152-157.
Lin Weiguo, Wu Zhen, Wang Fang. Research on leakage detection and location of the ship piping network based on virtual acoustic signal[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(4): 152-157.

[45] 魏立明, 郭 兴. 基于 RSSI 算法的城市燃气管网泄漏检测及定位研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8): 1046-1049.
Wei Liming, Guo Xing. Research on leak detection and location of urban gas pipeline network based on RSSI algorithm[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(8): 1046-1049.

[46] Fuchs-Hanusch D, Steffelbauer D. Real-world comparison of sensor placement algorithms for leakage localization[J]. Procedia Engineering, 2017, 186: 499-505.

[47] Didem O. Geometry-based spatial acoustic source location for spaced structures [J]. Structural Health Monitoring-an International Journal, 2011, 10(5): 503-510.

[48] 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.

[49] 张宏伟, 张 丽, 梁建文. 给水管网压力监测点的布置方法[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3): 52-55.
Zhang Hongwei, Zhang Li, Liang Jianwen. Layout of pressure monitoring nodes of water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(3): 52-55.

[50] Pérez R, Puig V, Pascual J, et al. Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks [J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(10): 1157-1167.

[51] Soldevila A, Blesa J, Tornil-Sin S, et al. Leak localization in water distribution networks using a mixed model-based/data-driven approach[J]. Control Engineering Practice, 2016, 55: 162-173.

[52] Cody R, Harmouche J, Narasimhan S. Leak detection in water distribution pipes using singular spectrum analysis[J]. Urban Water Journal, 2018, 15(7): 636-644.

[53] 吴 雷. 城市供水管网泄漏定位技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
Wu Lei. Research on leakage location technology of urban water supply network[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

[54] 张若愚. 量子 BP 神经网络在燃气管网泄漏诊断的应用[J]. 煤气与热力, 2018, 38(2): B20-B24.
Zhang Ruoyu. Application of quantum BP neural network to leakage diagnosis of gas pipe network[J]. Gas & Heat, 2018, 38(2): B20-B24.

[55] Cody R A, Tolson B A, Orchard J. Detecting leaks in water distribution pipes using a deep autoencoder and hydroacoustic spectrograms[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2020, 34(2): 04020001.

[56] Wachla D, Przystalka P, Moczulski W. A method of leakage location in water distribution networks using artificial neuro-fuzzy system[C]//9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical. Paris: IFAC, 2015: 1216-1223.

[57] Soldevila A, Fernandez-Canti R M, Blesa J, et al. Leak localization in water distribution networks using Bayesian classifiers [J]. Journal of Process Control, 2017, 55: 1-9.

[58] Verde C, Torres L. Modeling and monitoring of pipelines and networks: advanced tools for automatic monitoring and supervision of pipelines [M]. Berlin: Springer, 2017.

[59] Zeng W, Gong J Z, Simpson A R, et al. Paired-IRF method for detecting leaks in pipe networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2020, 146(5): 04020021.