

## 中文摘要

大型储罐及管道是石化行业中油品储存和运输的重要设施，一旦发生事故，极易引起火灾和爆炸，并造成严重的环境污染。研究先进的无损检测技术，对于保障石油储运设施的安全稳定运行，减少和避免环境污染具有重要意义。本文主要对基于声发射方法的大型金属储罐底板和管道在线检测技术进行了研究。

本文首先分析了声发射现象产生的机理及声发射检测的基本原理，并对不同模态的声发射波的传播和衰减特性进行了研究。通过对无载荷和水载作用下钢板中声发射波的传播特性分析，确定了大型常压金属储罐内罐底有效声发射源的传播路径，并以此为依据，对罐底检测声发射传感器的频率及传感器的布置方案进行了研究，实现了罐底声发射信号的采集与定位。

针对非检测区域的噪声干扰问题，提出了基于双传感器组的传感器优化布置方案，对罐底声发射检测过程中声源的方向进行识别，有效屏蔽了来自非检测区域的干扰声源信号。通过对容积  $3000\text{ m}^3$  的固定顶煤油储罐的现场检测实验，验证了该方法的有效性。

本文采用 BP 神经网络对罐底声发射信号进行模式识别，消除了机械噪声和电磁噪声的干扰。通过提取声发射信号在不同小波分解频带上的特征系数，构造 BP 神经网络学习样本集的特征向量，优化了神经网络模式识别的性能，提高了神经网络对罐底腐蚀、裂纹扩展和泄漏等不同性质的声发射源的判别能力，使基于声发射在线检测技术的储罐底板结构完整性评价结果更加精确。

在声发射管道检测方面，本文首先对管道腐蚀裂纹声发射信号的检测及定位技术进行了研究，并提出了相应的定位补偿方法。采用声发射参数对管道在加载过程中裂纹“开裂前兆—开裂—扩展—快速断裂”的全部过程进行解释，弥补了根据常规力学方法在管道裂纹扩展速率预测方面的不足。

研究了管道泄漏声发射信号参数随压力、泄漏孔径大小、信号传播距离等的变化规律，并首次把 Hilbert—Huang 时频分析方法引入到声发射信号分析与特征提取的研究领域。将管道泄漏声发射信号分解为多个固有模式函数，通过提取包含有效声发射特征的 IMF 分量进行信号重构，提高了管道泄漏点的定位精度。验证了 HHT 变换是表征声发射信号的非平稳特征及参数提取的有效工具。

**关键词：** 声发射 储罐底板 管道 模式识别 BP 神经网络 小波分析

Hilbert—Huang 时频分析

## ABSTRACT

Large storage tanks and pipeline are significant equipments for oil storage and transportation in oil and chemical industry. Once there is an accident occurred on tanks or pipeline, it may cause fire or explosion, and result in severe environmental pollution. Therefore, advanced non-destructive inspection technology is key to insure safe and reliable operation of oil storage and transportation equipment, as well as avoid environmental pollution. This dissertation mainly researched on acoustic emission non-destructive and on-line inspection technology for large metal storage tank bottom and pressure pipeline.

Firstly, the mechanism of AE generation and basic principle of acoustic emission was analyzed and the propagation and attenuation characteristic of different acoustic emission waves were researched. The propagation characteristic of AE wave propagating in the steel plate without and with fluid load was analyzed, and the propagation path of effective AE source in the tank bottom was clarified. On the basis of that, the frequency and arrangement of AE sensors were discussed.

During the process of AE tank bottom inspection, it is liable to be interfered with noise outside the inspection area when the tank has fixed top and contains volatile media. This dissertation brought forward an optimal sensor arrangement method based on double sets of sensor arrays, which is used to distinguish acoustic emission source direction to the main sensor array and suppress interference noise outside inspection area. The in-site inspection test on a  $3000\text{ m}^3$  fixed top tank containing aviation kerosene demonstrated the effectiveness of this method.

In this dissertation, BP neural network was adopted to recognize the pattern of AE signals from tank bottom, and much mechanical and EMI noise could be distinguished and eliminated by the network. Wavelet transform was used to optimize the pattern recognition performance of the BP neural network by extracting the frequency or energy eigenvector of the AE signal from different wavelet decomposition frequency band. Wavelet characteristic parameters were used as input vectors of the neural network, and the network's recognition capability to corrosion, crack extension, and leakage was increased. Thus, structure integrity evaluation based on AE on-line inspection would be more correct.

In the aspect of pressure pipeline AE inspection, detection and location of pipeline corrosion and crack extension were studied, and algorithm for location compensation was brought forward. Acoustic Emission counts were used to explain the whole process of crack formation, extension, and rupture, which was an effective compensation for conventional fracture mechanic estimating the extension speed of pipeline crack.

The rule of pipeline leak AE parameters varying with pressure in pipeline, size of the leaking point, and propagating distance was studied in detail. In this dissertation, Hilbert-Huang time-frequency transform method was applied to the field of AE signal analysis and characteristic extraction. The pipeline leak AE signals were decomposed to several intrinsic mode functions, and reconstructed with IMFs containing typical acoustic emission characteristics. The two reconstructed signals were analyzed and their cross-correlation parameter was calculated. The location accuracy of the leaking point calculated with the reconstructed signals was greatly increased. Thus it is demonstrated that Hilbert-Huang transform is an effective tool for demonstrating the non-stable characteristic of acoustical signals and feature extraction of pipeline leak signals.

**KEY WORDS:** Acoustic Emission, Storage Tank Bottom, Pipeline, Pattern Recognition, Wavelet Transform, Hilbert—Huang Time-Frequency Analysis

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名: 孙立瑛 签字日期: 2006 年 12 月 27 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 孙立瑛

导师签名:



签字日期: 2006 年 12 月 27 日

签字日期: 2006 年 12 月 27 日

## 第一章 绪 论

### 1.1 引言

随着我国能源结构的变革和对能源需求的不断增加，石油、天然气在我国能源需求中的比例逐年加大。石油从开采、储存、加工到使用，每一个环节都至关重要。从油气井中开采出来的石油、天然气，经过矿场油气集输系统的收集和初步处理后，将通过长输管道运往全国各地的炼厂、化工厂或其它相关部门的大型储罐内贮存，进而供给工业或民用用户。

随着石油工业的迅速发展和能源需求的不断增加，原油和成品油的储备受到了世界各国的普遍关注，对各类油库的油品储备能力的要求也越来越高。近年来，我国陆续在全国建设了 4 个大型石油战略储备基地，与普通油库相比，不仅储罐数量激增，而且储油罐的设计及施工也朝着大型化的方向发展<sup>[1]</sup>。目前，基地内单台储罐的容积一般都在 5~15 万 m<sup>3</sup>，10 万 m<sup>3</sup> 的储罐已经成为我国石油化工行业原油储罐建设的主要结构。储罐大型化具有很多优点，但大型储罐容积大、分布集中，且多用来储存易燃、易爆、有毒介质，一旦发生泄漏或爆炸事故，往往会造成灾难性的后果及严重的环境污染，给社会带来巨大损失和危害。1974 年 12 月，日本水岛炼厂 50000 m<sup>3</sup> 储罐发生罐底破裂事故，原油泄漏 4.3 万 m<sup>3</sup>，油从罐壁与罐底之间冲出，并冲开了防油堤，污染地面 14.83 m<sup>2</sup>，约 9000 m<sup>3</sup> 的原油流到海面；1988 年 1 月，美国宾西法尼亚州 Ashland 石油公司的容积为 400 万加仑的柴油储罐解体并倒塌，造成 75 万加仑的柴油流入 Monongahela 和 Ohio 河，对河流造成极大污染<sup>[2]</sup>。

而管道由于在运送气体、液体、浆体等散装物品方面所具有的独特优势，世界各国已经普遍采用长距离管道输送原油、天然气和成品油等。迄今为止，全世界主要管道干线的总长已经超过了 230 万公里，其中原油和成品油管道 80 万公里，天然气管道 150 万公里，并且每年以 4 万公里的速度在增长，已经形成许多地区性、全国性，甚至国际性、洲际性的大型油气输送管网<sup>[3,4]</sup>。然而，随着管线的增多，由于管道的腐蚀、磨损，以及服役时间延长等造成的管道事故不断发生。1989 年，前苏联乌拉尔山区的一条输气干线泄漏，附近火车引起的火花引爆了泄漏的天然气，造成 600 多人死亡，烧毁森林数百公顷；1999 年，Colonial

管道公司运营的成品油管道在位于田纳西州东部的诺克斯维尔发生了一起破裂溢油事故，泄漏了  $2027 \text{ m}^3$  的高硫燃料柴油，财产损失达 700 万美元<sup>[5]</sup>。我国的管道也曾不同程度的发生各种事故，据不完全统计，截至 1990 年，我国仅输油管道在近 20 年的时间里，共发生大小事故 628 次，天然气管道也曾多次发生事故，这一期间的事故主要是由于管道腐蚀、野蛮施工或操作失误造成的。到了 90 年代以后，我国的管道泄漏事故中人为打孔破坏造成的事故占了相当大的比例。

随着我国国民经济的发展和可持续发展战略的实施，安全、环境及灾害防治的要求越来越高，反映在油气储运系统上就是保障油气储存及运输设备的安全生产、避免环境与生态污染、防止灾害的发生。因此，研究安全有效的无损检测技术，尤其是在线检测技术，为石油储运设施的长周期可靠运行提供有利保障，具有重要的意义。

## 1.2 我国石油储运设施的建设及发展状况

### 1.2.1 我国储罐的建设及发展概况

储罐是输油系统中的重要生产设施，立式常压储罐是原油贮存、分离、外输、中转的重要设备，是油田中使用最为普遍、在役时间较长的设备之一。由于能源危机，许多靠进口原油的工业发达国家都增加了原油的储备量。近十余年来，油罐的数量快速增长，与此同时，油罐的设计也朝着大型化的方向发展。有关大型化主要有以下优点<sup>[6]</sup>：

- 1、节省钢材及投资。油罐越大，每立方米容积消耗的钢材越少，投资越省。
- 2、占地面积小，便于管理。总体积相同时，几座大罐要比一群小罐占地面积小，且在检测、维护和保卫等方面都比较方便。
- 3、节省管路、阀门、仪表以及有关配件等。

近年来，大型油罐在油库总容积中占的比例越来越大。油罐大型化后，油库的结构大为改观，但油罐大型化后的危险性也增加了，首先，大型油罐更容易产生危险；其次，出现问题以后的危害性也特别大。

储罐内储存的介质主要为原油或污水，还有少量为汽油、柴油等成品油，多数是易燃易爆、具有环境污染的介质。由于金属储罐常年在自然环境和液位变化条件下运行，受到多种不利因素，包括地震、洪涝灾害等的影响，因此不可避免地受到各种损伤，特别是环境中的化学腐蚀和电化学腐蚀所引发的腐蚀穿孔、裂纹扩展以及破裂等。储罐事故的主要原因是由于罐底腐蚀和泄漏引起的，由于其破

坏的严重性，世界各国均以法律的形式要求必须定期对储罐罐底的腐蚀及泄漏情况进行检测。美国的API 653标准规定<sup>[7]</sup>，每5年至少进行一次运行中常压储罐的外部宏观检查。若腐蚀速率未知，超声测厚在线检测周期为5年；已知腐蚀速率后，超声测厚在线检测周期应根据实际计算而定，但最长不大于15年。底板检测周期应根据实际计算确定，但最长不大于20年。2004年，美国BP PLC的 Atlantic Richfield (Arco)公司就因为没有按时检测和更新它在加利福尼亚州的59个地下储油罐，给油站的安全造成巨大威胁而受到加州政府的指控。Arco公司被判支付四千五百八十万美元的罚款用于缴纳罚金及储油罐的更新，这是美国历史上涉及储油罐管理的最大一笔现金处罚。在我国，按照国务院颁布的《危险品化学安全管理条例》的要求，必须对化学危险品储罐进行定期检验，但目前具体年限和检验规则还没有明确的要求；SY/T 592 标准规定，新建储罐第一次检测修理期限不大于10年，以后的检验周期为5~7年<sup>[8]</sup>。

常压储罐的设计寿命一般为20年，随着使用时间的延长，像其它设备一样，储罐不可避免地会出现各种腐蚀和老化现象，存在着很大的安全隐患。而在储罐的使用单位，对储罐设备的管理也没有像锅炉压力容器一样纳入依法管理轨道，特别是现在很多大型石化企业为提高经济效益，通常都实行装置的长周期运行。延长检修周期带来的经济效益虽然非常可观，但石化企业的设备老化和安全问题也日渐突出。例如，我国东北地区的储罐大部分是70年代制造并投入运行的，已有近30年的历史，随着时间的变化和环境介质的影响，部分储罐已经出现材料老化、腐蚀等缺陷，造成储罐抗突发性荷载（如地震、地质作用）的能力下降。伴随着储罐服役期的延长，近年来不少常压储罐使用单位都曾出现过大大小小的问题，如上世纪末，大庆某采油厂一台污水罐由于罐底腐蚀严重，导致罐底圈板开裂，造成储罐倒塌。该台储罐倒塌时，由于互相连接的管线的冲顶，致使另一污水罐严重变形被迫报废，造成直接经济损失500多万元<sup>[9]</sup>。

### 1.2.2 我国油气管道建设及发展概况

20世纪90年代以来，我国的管道建设得到了快速发展。至2003年底，我国油气管道累计长度已达45865 km，管道长度居世界第六位。其中，原油管道15915 km，天然气管道21299 km，成品油管道6525 km，海底管道2126 km，已形成了东北、华北、中原、华东和西北广大地区的地下管道运输网络<sup>[10]</sup>，全国石油、天然气产量的90%通过长输管道源源不断地输向炼油厂、化工厂及海运码头。我国目前已形成了东北、华东原油管网和西北区域性原油管网。东北原油管网连接了抚顺、锦州、锦西、大连各炼油厂和大连新港、秦皇岛油港，华东原油管网联接了黄岛油港和仪征油港，东北和华东地区基本形成了以管道运输为主，并与

油港联运原油的格局。2004 年投产的西气东输工程横贯中国西东，放射型的支线覆盖中国许多大中城市，构成我国南北天然气管道环网。目前，我国已初步形成西气东输、陕京二线、忠武线三条输气干线，川渝、京津冀鲁晋、中部、中南、长江三角洲五个区域管网并存的供气格局<sup>[11]</sup>。我国海底油气管道建设还不到 20 年时间，管道数量不多，但技术上都达到了国际先进水平。1994 年，我国与国外公司合作铺设了南海崖 13—1 气田至香港全长 778km 海底管道，水深最大为 140m，其长度为世界第二，亚洲第一<sup>[12]</sup>。

油气长输管道具有管径大、运输距离长、输送压力高和运量大等特点。其起点一般建在油气田，终点为炼厂、石油化工厂或油库等部门。管道沿途一旦发生事故，不仅会给管道系统本身造成严重后果，而且会给社会和环境带来灾难。随着管线的增多、管龄的增长，由于管道腐蚀、自然灾害和人为损坏等因素使得管道安全问题变得日益严重。管道安全事故不仅会影响管道输送的正常进行，而且当管道输送有毒、有害、易燃和易爆介质时，还会给人们的生命财产和生存环境造成巨大的威胁。据欧盟各石油公司成立的“空气与水保护组织”(CONCAWE)统计的资料表明<sup>[13]</sup>：1971～1995 年西欧及美国输油管道事故中因腐蚀而造成的事故占事故总数的 30% 以上，事故统计表见表 1.1。

表 1.1 1971～1995 年西欧及美国输油管道的事故统计

地区	比例					
	外力损伤	腐蚀	机械损伤	操作失误	自然灾害	其它
西欧	33%	30%	25%	7%	4%	1%
美国	34%	33%	18%	2.5%	4.5%	8%

我国的输油管道多建在 20 世纪七八十年代，当时采用的设备、管材质量较差，相当一部分管线已经步入衰老期，泄漏事故时有发生。目前我国大庆、胜利、大港、辽河、华北、中原等油田所属的很多管线已达到设计年限，正处于超龄服役阶段，因而管道事故隐患较多，给管道和环境安全带来极大的危险。1970～1990 年我国东部输油管道的事故统计<sup>[14]</sup>参见表 1.2。与表 1.1 对比可知，当时我国管道的自动化水平不高，管材质量等造成的设备腐蚀、操作失误是造成管道事故的主要原因。

表 1.2 我国东部输油管道事故统计（1970～1990）

破坏原因	外力损伤	设备故障	腐蚀	操作失误	管材质量	其它
比例	8.3 %	30.3 %	21.3 %	20.5 %	8.5 %	11.1 %

由于上述原因，我国油气管道的事故率比发达国家要高出许多倍。据统计，近 30 年来，欧洲、俄罗斯、美国的输气管道事故率（次/ $(10^3 \text{ km} \cdot a)$ ）分别为 0.42、0.46、0.60。据 20 世纪 90 年代统计，中国四川地区 12 条输气管道的事故率为 4.3，东北和华北地区输油管道自运行以来，粗略统计事故率也要超过 2.0<sup>[15]</sup>。管道一旦发生事故，不仅对管道的安全运行危害极大，而且维修、维护极为困难。因此，如果能够及时发现管道安全隐患，并确定其位置，尤其是在不停产的条件下对管道进行在线检测，就可以有效地减轻事故造成的危害，产生明显的经济和社会效益。

## 1.3 大型储罐底板及管道检测方法综述

### 1.3.1 罐底检测技术综述

常压储罐的罐底检测方法和手段有着相当的局限性。长期以来，储罐罐底的缺陷检测一直采用离线检测方法定期开罐进行检测，即按照储罐的安全检测周期，停工后将储罐内的油品全部清空，再采用常规的无损检测方法，如漏磁、涡流、超声、渗透等方法对整个储罐底板进行检测。常用的罐底离线检测方法主要有超声波罐底检测、涡流罐底检测、漏磁罐底检测等，而声发射方法是目前国际上唯一认可的大型常压金属储罐底板在线检测方法，下面将逐一进行介绍。

#### （一）罐底超声波测厚技术<sup>[16]</sup>

罐底超声检测主要是利用超声波测厚仪进行板厚的测量，其测厚的原理是用探头将超声波脉冲透过耦合剂发射至被测物体，其中一部分声波将被物体表面反射，探头接收由被测物体底面反射的回波，并计算超声波的往返时间，经转换后显示出厚度数据。

超声波测厚的优点是使用方便、灵活，仪器成本低，维护保养容易；缺点是只能进行点的测量，整体检测效率低，对被测物体的表面状况要求较高（要求表面平整，光滑），清洗和打磨劳动强度大、检测周期长、费用高，同时漏检率较高。

#### （二）罐底涡流检测技术<sup>[17]</sup>

涡流检测只适用于导电材料，普通的涡流探伤法（ET）由于浸透性不足，一般仅能检测出钢板表面和近表面的缺陷，而对于背面缺陷则无法检出。低频涡流技术（低频电磁感应法）使试验频率下降后，提高了浸透性，可以对背面缺陷进行检测。低频涡流技术利用在交变磁场作用下不同材料会有不同振幅和相位的涡流值来检测铁磁性和非铁磁性材料的物理性能、结构和冶金情况等。这种技术的

优点是检测效率较高，对表面清洁度要求低，不需耦合剂就可以确定缺陷的大小和形状；缺点是对使用者的技术要求较高，而且仪器价格昂贵。

### （三）漏磁检测技术<sup>[18-20]</sup>

铁磁性材料的磁导率远大于其它非铁磁性介质（如空气）的磁导率，当磁场作用于被测对象并采用适当的磁路将磁场集中于材料局部时，一旦材料表面存在缺陷，缺陷附近将有一部分磁场外泄出来。用传感器检测这一外泄磁场可以确定有无缺陷，进而可以评价缺陷的形状尺寸。漏磁检测与磁粉检测类似，都是建立在铁磁性材料的高磁导率特性之上，只不过用灵敏度高的磁敏元件来代替磁粉，从而使检测更加智能化，更加简便快捷，结果更准确可高。

漏磁检测技术的检测结果具有很好的定量性、客观性和可记录性。该技术在国外已经得到较广泛的应用。代表性的仪器有Sliverwing（英国）公司生产的Floormap2000和MFL 2000罐底板腐蚀扫描器等，仪器对现场清洁程度要求较低，操作方便，检测速度快，精度较高，穿透力强，其不足表现为：仪器本身较重，且只适用于铁磁性材料，现在还不能对焊缝进行有效的检测。当需要对板间的对接或搭接焊缝以及底板与筒体的大角缝检测时，还要采用表面检测技术和真空查漏技术进行补充。

### （四）声发射在线检测

它无需清罐，检测周期短，而且基本不影响生产，极大地提高了检测效率，节省了大量检测费用。

作为一种动态检测方法，声发射技术用于在役储罐的在线检测及结构完整性评价，可以弥补其它常规无损检测方法的不足。声发射技术应用于储罐结构完整性检测与评价主要可分为三个方面：（1）新制储罐的声发射检测与评价；（2）在用储罐的声发射检测和评定；（3）储罐的声发射在线监测和安全性评定。从目前的应用来看，声发射技术在实现储罐的在线检测及评估方面最具优势<sup>[21]</sup>。

通过定期清罐对罐底进行离线检测不仅检测费用高，而且清罐清出的罐底残油如果直接排放也会对环境造成极大污染。声发射储罐罐底检测技术可以在不停产的情况下对储罐罐底进行评估，以延长“好罐”的检测周期，减少和避免因清罐造成的环境污染，使用户获得直接和潜在的经济效益，同时也可以及时发现和维修“坏罐”，避免其诱发事故所造成的损失。

采用声发射技术对储罐罐底进行在线检测主要是利用载荷变化时，罐底腐蚀和泄漏产生的声发射信号。通过布置在储罐外壁上的传感器来接收罐底腐蚀和泄漏产生的声发射信号，经过分析处理，即可对罐底的腐蚀损伤程度及罐底是否存在泄漏做出判断，计算出腐蚀区域和泄漏点的位置，从而对罐底的整体完整性及安全性做出评估。采用声发射方法对罐底进行检测所带来的经济效益是非常显著

的，目前，许多国际石油公司均采用声发射方法对储罐进行定期在线检测。

### 1.3.2 管道检测技术及其特点

随着能源需求量的增加，油气管道运输作为一种安全、经济的运输方式得到了更广泛的应用。作为管道运行监控重要组成部分的管道安全检测技术一直受到世界各国科技人员的重视。目前已有很多种管道安全检测方式和技术应用于管道的检测和维护，由于管道安全检测技术是多领域多学科知识的综合，各种管道检测方式和技术差别较大。

管道安全检测技术从不同的侧重点出发可以有不同的分类方法，从检测管道泄漏的角度可以将各种检测方法分为直接检漏法和间接检漏法。直接检漏法是利用安装在管道外的检测器，直接检测漏到管外的输送液体或其挥发气体，从而达到检漏目的；间接检漏法是指检测由于泄漏引起的管道运行参数的变化，如根据流体压力、流量的变化来判断是否发生泄漏。其中包括流量平衡法、负压波法、压力梯度法、密封加压法、实时模型法等。从检测方位的角度可以将各种检测方法分为外部检测法和内部检测法；从检测技术的角度可以将可分为基于物理学、声学、化学、光学等原理的检测方法。由于管道检测方法种类繁多，因此本文将仅对当前应用较为广泛的基于声学原理的管道安全检测方法和技术进行概述，其它更为详尽的管道检测技术方法分类参见文献<sup>[22]</sup>。

#### （一）负压波法<sup>[23-25]</sup>

当管道发生泄漏时，泄漏处由于流体物质损失而引起局部流体密度减小，造成泄漏处的压力突然下降，压降由泄漏处向上、下游传播，当以泄漏前的压力作为参考标准，泄漏产生的压降称之为负压波，其传播速度与声波在流体中的传播速度相同。该波以一定的速度自泄漏点经过若干时间以后分别传到上下游的压力传感器，压力传感器检测到负压波信号以后，通过分析两端的测试信号，即可进行管道泄漏的判断。由于管壁的波导作用，负压波传播过程衰减较小，可以传播相当远的距离，因而采用负压波测试技术可以对长输管道的泄漏进行监测。利用负压波通过上、下游测量点的时间差以及负压波在管线中的传播速度，可以确定泄漏位置。

负压波方法可以检测出管道的突发型泄漏，并可以进行较长距离的监测，因此是目前国际上广泛重视的管道泄漏检测和漏点定位方法。在管道实际运行过程中，泵、阀的正常作业也会引起负压波，但是来自泵站方向的负压波与泄漏产生的负压波方向不同，为区分因泄漏引起的负压波和正常作业产生的负压波，国外采用在管道的两端各设置两个压力变送器，用以区分负压波的方向。国内天津大学采用在管道两端各安装一只变送器的方法即可进行泄漏检测与定位。其原理是

泄漏引起的负压波与正常操作引起的负压波波形特征有较大的区别。对负压波进行分段符号化处理，形成波形结构模式，检测到的负压波经预处理后，与标准负压波模式库进行匹配，可以及时有效地判断管道是否存在泄漏。

## （二）水声换能器检漏法

海底管线泄漏比陆地上的泄漏检测更加困难，特别是小泄漏的情况下。由 Pelagos Corp. 研制了一种新型水中声学泄漏定位系统，可以成功地应用于海底管线的泄漏检测<sup>[26]</sup>。该种声学泄漏定位器采用了一个超灵敏水声换能器或者水听器，监听管道沿线的泄漏噪声，传感器沿管道设置，通过防波电缆联接到船上的数据处理系统，这个系统可以对管线中的液体或气体的微小泄漏进行检测和定位，在空气中或水中都十分有效。它的检测范围取决于泄漏信号强度、结构上的声音衰减及背景噪声的强弱。

## （三）超声导波法<sup>[27-30]</sup>

管道超声导波(Ultrasonic Guided Wave)检测技术是上个世纪九十年代刚刚发展起来的一种新的管道无损检测技术。导波在管道中传播时，管道所有的不连续处和几何形状的改变都会引起导波传播速度的变化，进而产生携带结构缺陷信息的反射回波。通过对所接收的信号进行分析处理，即能判断所检测结构中存在缺陷的位置，并对其尺寸进行估计。特定频率及模态下的超声导波可以传播较长的距离，在理想状况下单方向检测可达百余米。由于仅需要对安装传感器处的0.5~1m 范围内的管道进行防腐层剥离及除锈等表面处理，检验成本可大大降低，而且对于某些难以接近的管道系统，如带夹具、有套管的管道或高架管道、埋地管道、海底管道、穿越公路的管道等均能进行检测。此外，超声导波在管壁的内外表面和中部都有质点的振动，声场遍及整个壁厚，因此可以对壁厚进行 100% 检测，即管道内壁及外壁的金属损失缺陷都可以被检测到。

超声导波检测是一种快速大范围的初步检测方法，通过检测可以对管道系统的安全性做出评价，判定正常部位和可疑部位。但它只能对缺陷进行定性判断，对缺陷的尺寸估计是近似的，对缺陷定位是粗略的。对可疑部位仍需要采用其它检测方法才能做出最终评价。而且，导波检测只对管道环状截面上金属缺损面积大的缺陷较敏感，而对环向金属缺损面积小的缺陷，例如单个点状缺陷和轴向条状缺陷，以及轴向裂纹则较难检出。

## （四）声发射法

与采用超声探头发射超声导波的主动检测不同，声发射技术是一种被动检测技术，其检测的能量来自材料或构件本身。采用声发射技术可以对管道结构上的一些缺陷，如裂纹、腐蚀、分层、泄漏和冰堵等进行检测。管道在发生腐蚀、裂

纹扩展、泄漏及其它故障时，都会产生大量的声发射（AE）信号。

当管道由于腐蚀出现壁厚减薄或裂纹等缺陷时，通过工作压力范围内的加载就可以对管道的活性缺陷进行判断。管道泄漏在管道中激励出应力波也可以认为是一种广义的声发射现象，由泄漏引起的管壁振动包括横振动、纵振动和圆环振动，圆环振动与泄漏密切相关，携带缺陷信息的应力波沿管壁传播，利用声发射传感器采集该应力波信号，再对管道两端的测试信号进行分析处理即可确定管道上缺陷的位置，从而实现声发射检测的目的。通过对所接收到的声发射波进行模态分析，可以更好地确定缺陷的原始信息。相对于其它管道无损检测技术，声发射技术具有能动态监测且覆盖面大的优势，而且采用声发射方法可以在管道缺陷发展的初期就发现它，从而避免其扩大酿成其它事故。

## 1.4 相关领域的国内外研究现状

### 1.4.1 储罐声发射在线检测的应用历程及研究现状

#### 1.4.1.1 国外研究状况

声发射技术用于大型常压金属储罐底板腐蚀状况检测的研究始于上个世纪九十年代。自九十年代开始，美国物理声学公司（Physical Acoustics Corporation.）陆续对数千台常压和承压储罐进行了声发射在线检测，根据声发射检测结果与开罐检测结果形成的数据库，开发了 TANKPAC<sup>TM</sup> 大型常压金属储罐底板检测专家系统，用于对储罐底板的腐蚀和泄漏状况进行评价，并根据检测结果推荐清罐检查的优先顺序或下一次进行声发射技术检测的周期。目前，壳牌（Shell International Oil Product BV）、埃克森（Exxon Corporation）、Dow 等多家国际石油公司均采用其技术对其所拥有的储罐进行在线检测。

文献[31]（1998）根据 598 台储罐的声发射检测实验结果，给出了《声发射（AE）储罐检测的可靠性》的研究报告。报告根据 589 个罐的数据库，对声发射罐底检测技术的可靠性进行分析，指出根据声发射检测结果对罐底腐蚀状况进行分类的误判概率<5%，能够降低炼油厂维修储罐的成本并减少事故隐患。

与此同时，俄罗斯、德国、意大利、韩国等国的科研人员也对基于声发射方法的常压储罐底板在线检测技术进行了一些理论分析和实验研究。文献[32, 33]（2003, 2002）分析了板中的兰姆波及液体中传播的纵波等不同介质中的声发射波的传播特性，通过实验对大型立式储罐底板泄漏产生的主要声源进行了研究，对声发射技术在钢制立式储罐底板在线检测方面的前景进行了展望，并分析了罐底声发射检测过程中可能遇到的噪声干扰问题。

文献[34]（1993）根据储罐直径、容积的不同，讨论了声发射罐底检测过程中遇到的现场噪声干扰问题，并对不同频率的传感器对罐底声发射检测结果的影响进行了分析。

文献[35]（2001）通过实验对声发射检测的加载和保持载荷的方式进行了研究，并对维修后且已经通过射线（RT）方法检测的立式储罐罐底采用声发射方法进行复检，发现了储罐底板焊缝中所包含的活性缺陷。这一研究表明：声发射方法是常规无损检测方法的有效补充，采用声发射方法可以获得材料动载荷状态下有关疲劳裂纹扩展的重要信息。

#### 1.4.1.2 国内研究状况

在我国，对储罐底板声发射在线检测的研究主要基于压力容器声发射检测的一些经验。近年来，大庆石油学院和浙江省特种设备检验中心等单位也采用声发射技术对一些常压储罐进行了在线检测分析，相应的中国机械行业检测标准——《无损检测 常压金属储罐声发射检测及评价方法》<sup>[36]</sup>正在制定中。然而，对于罐底声发射在线检测过程中遇到的一些具体问题，如检测过程中液位的加载高度、保压时间，声发射传感器的布置等，一直没有达成统一的认识。而且，由于缺乏先进的信号处理手段，直接根据现场采集的声发射信号对罐底腐蚀状况进行评定时，检测结果与罐底的实际情况之间存在一定偏差，使罐底结构完整性分级的准确性受到一定影响。

目前，国内的研究主要集中在实验检测方面，文献[37, 38]（2003, 2005）综合分析了采用声发射方法对在用储罐底板进行在线检测与综合评估的意义，对声发射技术在评价储罐结构和完整性方面的研究进展作了全面评述。并通过地上立式金属储罐底板腐蚀损伤的实验，模拟了立式储罐底板在升压、保压阶段的不同声发射特性，提出了储罐完整性检测与评价方法。

文献[39]（2003）通过对实验室储罐预制缺陷的声发射检测信号分析，研究了声发射信号与模拟罐底焊缝及腐蚀、泄漏缺陷之间的关系，以及各个模拟罐底之间的比较，分析了声发射用于立式储罐罐底的结构完整性评价的可行性。

文献[40]（2006）中采用声发射方法对已经发生泄漏的常压立式储罐进行了声发射监测，确定了储罐底板的泄漏位置，对储罐罐底的检修提供了有价值的指导。

文献[41]（1998，台湾）在实验室的一个小型储罐的罐底上加工了不同的罐底缺陷，通过改变不同的实验条件，采用声发射方法对罐底的缺陷进行检验，指出罐内液体中气泡的爆裂和泥沙的冲击是罐底腐蚀检测的主要噪声源。

## 1.4.2 管道声发射检测的应用历程及研究现状

### 1.4.2.1 国外研究状况

声发射在管道检测方面的应用起步较早，但由于第一、第二代声发射检测仪器在管道泄漏产生的声发射信号处理方面存在较大困难，因此在上世纪九十年代以前，声发射技术一般只用于管道腐蚀及裂纹等动态缺陷的检验。上世纪九十年代后，美国物理声学公司及其俄罗斯分公司、新泽西技术大学、陆军部、国家环保署等部门分别在美国和俄罗斯进行了充液、埋地管道的裂纹检测及对泄漏点的定位研究，通过对声发射波形进行模态分析及相关处理，在管道泄漏声发射检测技术方面取得了较大进展。目前，根据管道腐蚀状况的不同，声发射管道检测的距离可以达到数十米，在静态水压试验条件下，传感器间距为70 feet时，可以检测1.0 gph的泄漏量；而当传感器间距为200 feet时可以检测到20 gph的泄漏量<sup>[42]</sup>，使管道声发射检测技术实现了工程应用。

由于管道泄漏声发射信号具有很大的随机性和不确定性，因此，近年来管道声发射检测的研究主要集中在管道泄漏声发射信号信号处理及特征提取，以提高泄漏点的定位精度等方面。

文献[43]（1998）基于模态声发射理论，将声发射源定位建立在给定的波形模态和频率基础上，利用小波分析方法提取针对复合材料不同损伤的声发射波相应的单一频率或某一很窄的频率段内的波形，选择形成波形的峰值，对衰减信号进行有效的补偿，通过设定相对于峰值的阈值或互相关方法计算时差，再进行声发射源定位，该方法有效减小声发射源定位误差，提高定位精度。

文献[44]（1997）建立了一种新的管网泄漏理论模型，获得了其声发射事件的基本特征。采用两种算法对泄漏源定位中声信号的弥散进行了补偿，采用时间一空间转换法可以精确确定模拟模型和现场试验中的噪声源；并从理论上证明，空间一频率转换法可以通过一个或两个探头来确定泄漏的位置。文献[45]（1998）研究了一种用于管线声发射泄漏源定位的有助于消除弥散现象对定位精度的影响的通用互相关方法，从试验结果来看，泄漏声发射信号既包括对称模态又包括非对称模态；模态的弥散特性沿管线长度变化，频率>30 KHz时更为明显；各模态的能量分布沿管线长度也是变化的，故合理的模态分离技术对定位算法的影响很大。

此外，管道内输送介质、外包覆层等对声发射波的传播路径及衰减特性的影响也是近年来管道声发射检测的重点内容之一。针对现有无损检测方法还不能实现地下管线0.1 gal/h (455 cm<sup>3</sup>/h)的泄漏量检测，文献[46]（2001）Miller设计了试验装置，建立了声发射泄漏检测系统，其中的模拟泄漏源具有可重复性。在变

化泄漏孔径、泄漏孔取向、背景填充物和管道填充物及压力的情况下，进行了声发射泄漏检测试验。

文献[47]（1997）研究了背景填充介质对充液管线中传播的声信号衰减的影响，在空气、水和不同湿度沙等背景填充介质情况下进行了试验。结果证明，背景填充介质对充液管线中传播的声信号影响很大；背景填充为空气和水时，声信号衰减分别为最小和最大，信号能量一般分布在10~100 KHz范围，大部分在30 KHz以上；背景填充物为沙时，增加湿度对整个管线的声信号衰减都有负面影响。

#### 1.4.2.2 国内研究状况

在国内，北京工业大学、冶金部锅炉压力容器检测中心等单位也在管道泄漏声发射检测的模态分析和信号处理方面进行了探索，并取得了一些有意义的研究成果，但由于检测过程中存在的声发射源定位不准确、信号解释困难和现场噪声污染等问题，我国在管道声发射检测方面仍主要停留在理论研究阶段。

文献[48, 49]（2003, 2004）根据模态声发射理论，将圆管中导波的传播理论应用于管道泄漏的声发射检测，建立了管道中泄漏声发射信号的多模态传播模型，并利用管道中导波传播的频散特性，在提取单一模态导波的基础上，提出了一种实用的声发射泄漏定位方法。文献[50]（1997）利用声发射技术对管道泄漏进行检测，实验证明应用泄漏声发射信号检测气体和液体的泄漏是可行的，并有较高的灵敏度，但存在的问题是难以准确确定泄漏源的位置以及检测灵敏度易受噪声影响等。

文献[51]（1998）描述了管道声发射检测实验中流体泄漏声发射信号的特征，并对检测过程中声发射参数的选择进行了叙述，实验证明了采用声发射方法检测压力管道泄漏的可行性，而且，对气体泄漏的检测效果优于对液体泄漏的检测。

文献[52]（2002）采用声发射技术分别进行了充水和工业气体的埋地管线泄漏检测研究。采用基于衰减和波形分析两种方法对泄漏源进行定位。试验初步证明了声发射技术检测埋地管线泄漏的可能性。

综上所述，管道的声发射缺陷检测及相关课题的研究是国内外无损检测领域的一个热点。虽然目前针对管道裂纹、腐蚀及泄漏问题提出了各种实验方案，但声发射管道检测技术在实际应用中还有许多问题需要解决，如检测距离、信号消噪及定位精度的提高等。

### 1.5 本课题的研究意义及主要研究内容

管道及储罐一旦发生事故导致介质泄漏，极易造成环境污染、诱发火灾和爆

炸，给人类的生存和生态环境造成严重损失。安全、环境及灾害防治是二十一世纪人类生存和可持续发展的重要课题，针对这一课题并结合我国相当一部分管道和储罐超期服役，已经存在极大的安全隐患的现状，研究管道和储罐罐底的安全检测技术，尤其是不停产的条件下的在线检测技术，具有重要的意义。

随着数字技术的发展，自二十世纪九十年代，声发射技术在国际、国内的研究和应用上均呈快速发展的趋势。声发射技术用于大型常压储罐罐底的检测，是目前国际上唯一认可的罐底在线检测方法。储罐声发射在线检测与评价技术的研究，为超役设备的延寿和最佳检修决策提供了先进的安全技术保障，对于大型石化储罐的安全稳定运行，减少和避免环境污染具有重要意义。而声发射作为一种动态无损检测方法，对于压力管道的缺陷检测具有极大的潜力，尤其是通过工作压力范围内的加载就可以对严重威胁管道运行安全的活性缺陷进行判断。

本文在查阅大量国内外储罐及管道安全检测技术，获取先进的储罐及管道缺陷无损检测研究成果的基础上，对基于声发射原理的大型常压储罐底板和管道在线检测与应用技术进行了研究。全文共分六章，各章主要内容如下：

（一）介绍了论文的选题背景，以及作为石油储运重要设施的大型储罐及管道的发展现状，综述了常压储罐底板及压力管道声发射在线检测技术的特点和应用情况，分析了国内外相关领域的研究现状。

（二）分析了声发射现象产生的机理及声发射检测的基本原理，对纵波、横波、Rayleigh 波和 Lamb 波等不同模态的声发射波在不同结构中的传播及衰减特性进行了研究。针对突发型和连续型声发射信号的不同特点，研究了两种声发射信号在形成机制和波形、频谱特征上的差异。

（三）详细分析了声发射波在无载荷和水载作用下的钢板中的传播和衰减特性，由此确定了大型常压立式储罐底板声发射在线检测中罐底有效声发射源的传播路径。并以此为依据，研究了罐底声发射检测的传感器布置方案。为了消除来自非检测区域的干扰噪声，提出了基于双传感器组的声发射波方向识别技术，成功地抑制了来自非检测区域的噪声干扰。通过对容积  $3000\text{ m}^3$  的固定顶煤油储罐的现场检测实验，对该方法的有效性进行了验证。

（四）根据罐底不同性质声发射源的特点，建立了用于罐底声发射源模式识别的BP神经网络，采用该网络对四台储罐底板现场检测的原始实验数据进行了分析，消除了原始实验数据中的大量机械摩擦和电磁噪声信号。为了进一步提高神经网络对罐底有效声发射源的判别率，采用基于小波变换的方法对神经网络的性能进行了优化。利用小波变换把声发射信号分解到不同的频段，提取不同频带上声发射信号的小波频谱或能谱特征，构造神经网络学习样本集的特征向量，使

神经网络获取到更丰富的声发射信号特征，提高了神经网络对罐底腐蚀、裂纹扩展和泄漏等不同性质的声发射源的模式识别能力，使声发射罐底结构完整性评价结果更加精确。

(五) 对管道腐蚀及裂纹产生的突发型声发射信号，及管道泄漏产生的连续型声发射信号的定位原理及源定位的影响因素进行了分析，并通过具体的实验对管道腐蚀及裂纹产生的声发射信号在管道中的传播和衰减情况，以及管道泄漏声发射信号参数随压力、泄漏孔径大小、信号传播距离等的变化规律进行了研究。采用声发射振铃计数对管道在加载过程中裂纹“开裂前兆—开裂—扩展—快速断裂”的全部过程进行分析，并对管道裂纹的扩展速率进行了估算。最后，针对管道泄漏检测现场的噪声干扰问题，分别采用小波包分析方法及 Hilbert—Huang 时频分析方法，对管道泄漏声发射信号进行了分析。通过对提取的特征频段信号或特征分量进行信号重构，并对重构后的信号进行互相关分析计算，提高了管道泄漏点的定位精度。

(六) 对论文进行了总结，并对声发射储罐及管道在线检测技术的进一步研究发展方向进行了展望。

## 第二章 声发射检测的理论分析

### 2.1 引言

当材料或结构受到外力或内力作用时，由于其微观结构的不均匀，以及内部缺陷的存在，会导致局部应力集中，造成不稳定的应力分布。这种不稳定应力分布状态下的应变能积累到一定程度时，不稳定的高能状态会向稳定的低能状态过渡，以弹性波的形式释放出应变能，这种现象叫做声发射（Acoustic Emission，简称AE），也称应力波发射<sup>[53]</sup>。声发射是一种常见的物理现象，大多数材料变形和断裂时均有声发射发生。

常见的几种无损检测方法，如超声、漏磁、涡流、射线、磁粉等，均属于静态检测或非受力状态下的检测，只能对某一检测时刻下缺陷的情况进行判断（如裂纹的长度和宽度等），而不能确定缺陷在受力状态下是否会继续扩展。20世纪60年代，美国航空航天部的科研人员发现，北极星导弹的外壳经过多种常规无损检测方法的严格检测已经合格，而升空后却仍然会发生爆炸，这一问题促使人们开始更深入地研究声发射技术<sup>[54]</sup>。在常规无损检测方法检测到的缺陷中，有一种对动态载荷非常有害的缺陷，由于其开始产生时疲劳源很小，因此静态无损检测方法很难发现，但在承受较大应力时其扩展速度很快，北极星导弹外壳在升空后（承压状态）会发生爆炸就是这一原因造成的。而基于声发射方法的无损检测是在加载条件下进行的，因此可以获得材料在动载荷状态下疲劳裂纹扩展的重要信息。

声发射检测的理论分析是应用声发射技术进行材料缺陷在线检测的重要内容之一。本章将对声发射现象产生的机理和声发射检测的基本原理，以及结构中不同模态的声发射波的传播及衰减特性进行研究。

### 2.2 声发射检测的基本原理

#### 2.2.1 凯塞效应和费利西蒂效应

现代声发射技术的开始以德国人Kaiser在二十世纪五十年代初所做的研

究工作为标志，二战结束后，Kaiser在战后的废墟中重建了实验室，他在对铜、锌、铝、铅、锡、黄铜、铸铁和钢等金属和合金的实验中发现，这些金属和合金的形变过程中均存在声发射现象，而且，材料的受载历史对重复加载时的声发射特性有重要影响。相同条件（温度、湿度、压力等）下，重复载荷达到原来所加最大载荷以前不发生声发射现象，这种声发射的不可逆性质称为凯塞效应（Kaiser Effect）<sup>[55]</sup>，如图2.1所示。

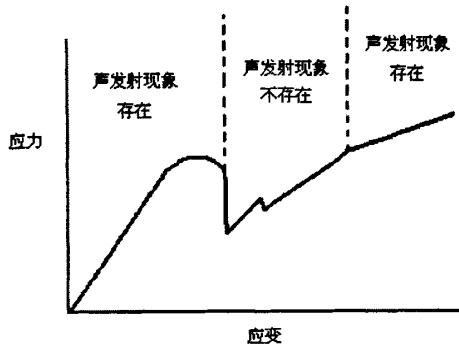


图 2.1 凯塞效应的基本原理

多数金属材料中，都可观察到明显的凯塞效应，但是，重复加载前，如产生新裂纹或其它可逆声发射机制，凯塞效应就会消失。这种材料被重复加载时，重复载荷到达原先所加最大载荷前即发生明显声发射的现象，称为费利西蒂效应（Felicity Effect），也可认为是反凯塞效应<sup>[56]</sup>。重复加载时产生声发射信号的起始载荷对原先所加最大载荷之比( $P_{MAX}/P_{AE}$ )，称为费利西蒂比。费利西蒂比大于1表示凯塞效应成立，小于1则表示费利西蒂效应成立。

费利西蒂效应是凯塞效应的补充，也是凯塞效应失效程度的度量。影响费利西蒂比的变量很多，包括加载和卸载速度，峰值载荷的时间，加载周期之间的时间，加载过程中的应力状态，声发射系统的灵敏度，声发射源的机制，检测或等待的环境等。费利西蒂比能够反映材料原先所受损伤或结构缺陷的严重程度，是缺陷严重性的重要评定判据之一。

## 2.2.2 声发射的源机制

声发射来自材料的变形与断裂，许多损伤与破坏机制都可以产生声发射现象，如固体中裂纹的形成和扩展、塑性形变、晶体内位错的移动和分离等<sup>[57]</sup>，如图 2.2 所示。声发射源指的是应力波发射时间的物理原点或发射应力波的机制源，不同的源机制对应不同的声发射波，因而也对应不同的声发射信号。

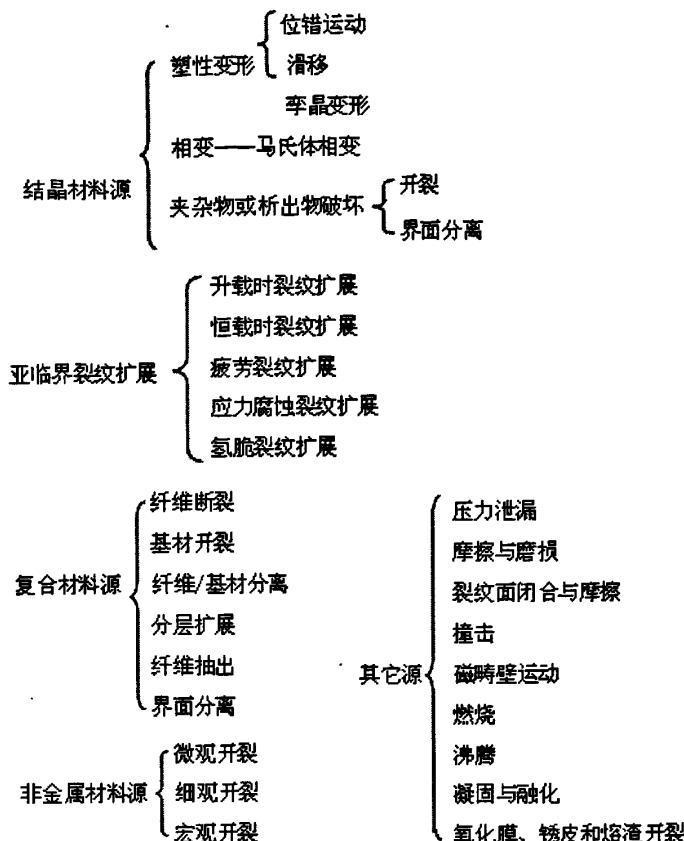


图2.2 声发射源分类图

尽管引起声发射的原因很多，但其共同点都是由于外部条件的变化，而引起物体或结构某一局部或某些部分变得不稳定并迅速释放出能量。声发射可以指示正在扩展的材料缺陷（裂纹），没有扩展的裂纹或材料的缺陷处于静止状态时，没有能量的平均分配，也就没有声发射现象。影响材料变形与断裂机制的因素主要包括<sup>[58,59]</sup>：

(1) 材料特性。不同材料的声发射特性差异很大。材料基体的晶体结构是影响材料声发射信号幅值的一个基本因素，一般各向异性大的晶体结构的声发射信号幅值较高，如六方晶体结构变形时的声发射信号比立方晶体结构强。晶体结构对声发射强度的影响主要取决于变形的机理，非扩散相变能产生强烈的声发射，而扩散型相变几乎不出现声发射。

材料的均匀性也会影响其声发射特性，存在着夹杂物的金属材料、由不同材料制成的复合材料，其声发射特性与原材料相比，有明显的差别。

(2) 试件的尺寸与形状。同一材料，在相同试验条件下，厚度不同，声发

射效应也不同，这有时也被称为声发射的体积效应。试样厚度影响带裂纹试样的突发型声发射的幅度，因为在厚度大的试样中，裂纹前沿的三向应力较大，可能导致试样中心平面的应变状态发生变化，并改变断裂形式。

(3) 承受应力。主要包括应力状态、应变率、受载历史等，许多材料在进行拉伸试验时，声发射计数率都会在屈服点附近出现高峰，这是声发射信号幅度和频度连续增大的结果。

(4) 环境温度。环境温度会影响材料变形和断裂的形式。同一材料在高温下易于发生塑性变形，连续型声发射信号比较活跃；随着温度降低，往往由塑性断裂变为脆性断裂，容易出现突发型声发射，信号的强度和活动性都会增大。

上述因素对于合理选择声发射检测条件，以及正确解释声发射检测结果具有重要意义。

### 2.2.3 声发射的检测原理及技术特点

许多材料的声发射信号强度都很弱，因此需要借助声发射检测仪器对信号进行检测、记录和分析，推断声发射源的性质及位置，以及判断材料内部受损伤的程度。声发射技术可用于长期连续地或间歇地检测可能对材料或构件的安全性产生影响的缺陷。声发射检测技术的基本原理如图2.3所示。

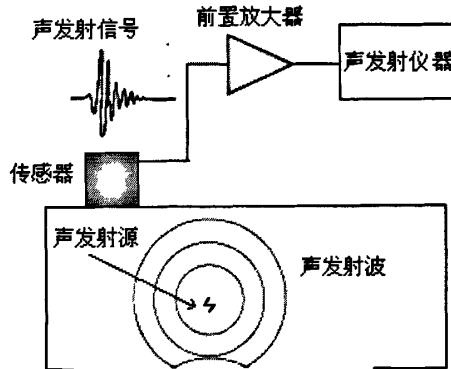


图 2.3 声发射检测的基本原理

声发射检测在许多方面不同于其它常规无损检测方法，主要表现为<sup>[60,61]</sup>：

(1) 声发射是一种动态检测方法，声发射检测过程中的能量来自于被测试物体本身；

(2) 声发射对活性缺陷比较敏感，它能探测到结构在外加应力下缺陷的活动情况，能够提供缺陷在应力作用下的动态信息，因此适合评价缺陷对结构

的实际危害程度；

(3) 对被检件的接近要求不高，适用于其它方法难以或无法接近情况下的检测，如高低温、核辐射、易燃、易爆及剧毒等；

(4) 对构件的几何形状不敏感，因此适用于检测其它方法受到限制的形状复杂的结构。

## 2.3 声发射波的模态

声发射波在介质中传播时，根据质点的振动方向和传播方向的不同，可构成纵波、横波、表面波和板波等不同传播模式。固体介质中发生局部变形时，不仅产生体积变形，而且产生剪切变形，因此，将激励出两种波，即纵波和横波。它们以不同的速度在介质中传播。当遇到不同介质的界面时就会产生反射和折射。任何一种波在界面上反射时都要发生波型转换，同时出现纵波和横波。在半无限自由体表面上，一定的条件下可转换成表面波，厚度接近板长的薄板中，又会产生板波<sup>[62]</sup>。

### 2.3.1 纵波和横波<sup>[63-66]</sup>

纵波的传播方向与质点的运动方向一致，由于纵波在介质中传播时会产生质点的稠密部分和稀疏部分，故又称疏密波。横波的质点振动方向与波的传播方向垂直，由于其在介质中传播时介质会相应地产生交变的剪切形变，故又称剪切波或切变波。一般情况下，将等体积的切变波（横波）按质点之间的位移偏振方向分解成两个分量，其中位移偏振方向为水平的波称为 SH 波，位移偏振方向为垂直的波称为 SV 波。因为液体和气体中缺乏恢复横向运动的弹性力，所以液体和气体中不存在横波，横波只能在固体中传播。

各向同性弹性固体介质的 Navier 控制方程为（直角坐标系下）：

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \nabla^2 u &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \nabla^2 v &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \nabla^2 w &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中， $u, v, w$  分别是  $x, y, z$  方向上的位移， $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。

记  $\nabla = \bar{i}_1 \frac{\partial u}{\partial x} + \bar{i}_2 \frac{\partial u}{\partial y} + \bar{i}_3 \frac{\partial u}{\partial z}$ ， $\bar{u} = (u, v, w)$ ，若不考虑体力的影响，式 (2-1)

可写成如下的矢量形式

$$(\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \bar{u} + \mu \nabla^2 \bar{u} = \rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} \quad (2-2)$$

若考虑体力问题，使用矢量恒等式

$$\nabla^2 \bar{u} = \nabla \nabla \cdot \bar{u} - \nabla \times \nabla \times \bar{u} \quad (2-3)$$

$$\text{式中, } \nabla \times \bar{u} = \begin{vmatrix} \bar{i}_1 & \bar{i}_2 & \bar{i}_3 \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix}.$$

将式 (2-3) 代入式 (2-2)，则运动方程可以表示为

$$(\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \bar{u} - \nabla \times \nabla \times \bar{u} = \rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} \quad (2-4)$$

通过 Helmholtz 分解，位移矢量  $\bar{u}$  可分解成标量的梯度和零散度矢量的旋度，

$$\bar{u} = \nabla \Phi + \nabla \times \bar{H} \quad \nabla \times \bar{H} \quad (2-5)$$

式中， $\Phi$  和  $\bar{H}$  分别为标量势和矢量势。

将式 (2-5) 代入式 (2-2) 可得

$$(\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot (\nabla \Phi + \nabla \times \bar{H}) + \mu \nabla^2 (\nabla \Phi + \nabla \times \bar{H}) = \rho (\nabla \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \nabla \times \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2}) \quad (2-6)$$

由式 (2-3)，上式可改写为

$$\left[ (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot (\nabla \Phi) - \rho \nabla \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right] - \mu \nabla \times \nabla \times \partial \Phi + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \nabla \times \bar{H} + \left[ \mu \nabla^2 \nabla \times \bar{H} - \nabla \times \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \right] u = 0 \quad (2-7)$$

由  $\nabla \cdot \nabla \Phi = \nabla^2 \Phi$ ,  $\nabla \times \nabla \times \nabla \Phi = 0$  及  $\nabla \cdot \nabla \times \bar{H} = 0$ , 可得

$$\nabla \left[ (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi - \rho \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right] + \nabla \times \left[ \mu \nabla^2 \bar{H} - \rho \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \right] = 0 \quad (2-8)$$

若式 (2-8) 成立, 则上式的两项均应为零, 可分解为

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{C_p^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2-9)$$

$$\nabla^2 \bar{H} = \frac{1}{C_s^2} \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (2-10)$$

其中,  $C_p^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}$ ,  $C_s^2 = \frac{\mu}{\rho}$ , 式 (2-9) 和 (2-10) 两者相互独立,  $C_p$  和  $C_s$  分别为纵波和横波在介质中的传播速度。且  $C_p > C_s$ 。纵波和横波在无界介质中传播时互不影响。两种类型的波在弹性体边界上为了满足边界条件相互耦合。

### 2.3.2 表面波 (Rayleigh 波) [67,68]

在半无限大固体介质与气体介质的交界面上, 可产生瑞利波 (Rayleigh), 也称表面波。

由式 (2-9)、(2-10) 可知, Navier 的基本控制方程可分解为两个简单的波动方程, 一个表示纵波, 另一个表示横波, 其传播速度分别为  $C_p$  和  $C_s$ 。

$$\begin{cases} \nabla^2 \Phi - \frac{1}{C_p^2} \ddot{\Phi} = 0 \\ \nabla^2 \bar{H} - \frac{1}{C_s^2} \ddot{\bar{H}} = 0 \end{cases} \quad (2-11)$$

在二维情况下 ( $xz$  平面), 位移矢量  $\bar{u} = (u, 0, w)$ , 沿  $z$  方向可得

$$\Phi = A_1 e^{-kqz} e^{ik(x-ct)} \quad (2-12)$$

$$H = B_1 e^{-ksz} e^{ik(x-ct)} \quad (2-13)$$

式中  $q = \sqrt{1 - \left(\frac{c}{C_p}\right)^2}$ ,  $s = \sqrt{1 - \left(\frac{c}{C_s}\right)^2}$ ,  $c = \frac{\omega}{k}$ ,  $A_1$  和  $B_1$  为任意常数。

式 (2-11) 的解代表了沿  $x$  方向传播的简谐波, 由式 (2-12)、(2-13) 可得

$$u = k(iA_1 e^{-qz} - sB_1 e^{-sz})e^{ik(x-ct)} \quad (2-14)$$

$$w = -k(qA_1 e^{-qz} - iB_1 e^{-sz})e^{ik(x-ct)} \quad (2-15)$$

基于胡克定律及式 (2-14) (2-15)，可导出应力的表达式为

$$\sigma_{33} = k^2 G(rA_1 e^{-qz} + 2isB_1 e^{-sz})e^{ik(x-ct)} \quad (2-16)$$

$$\sigma_{13} = k^2 G(-2iqA_1 e^{-qz} + rB_1 e^{-sz})e^{ik(x-ct)} \quad (2-17)$$

其中， $r = 2 - (c/c_s)^2$ 。

当  $z=0$  时， $z$  方向上的应力  $\sigma_{33} = \sigma_{31} = 0$ ，因此

$$rA_1 + 2isB_1 = 0, \quad -2iqA_1 + rB_1 = 0 \quad (2-18)$$

因此，得到表面波的特征方程为

$$r^2 - 4sq = 0 \quad (2-19)$$

且  $A_1 = -\frac{ir}{2q}B_1 = -\frac{2is}{r}B_1$ ，代入式 (2-14)、(2-15)，则满足边界条件的  $u$  和  $w$  的表达式为

$$u = A(re^{-qz} - 2sqe^{-sz})e^{ik(x-ct)} \quad (2-20)$$

$$w = iAq(-re^{-qz} + 2e^{-sz})e^{ik(x-ct)} \quad (2-21)$$

式中， $A = kB_1/2q$ 。

设  $\eta = c/c_s, \xi = c_s/c_p$ ，由式 (2-19) 可得到 Rayleigh 波的波速方程为

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8\eta^2(3 - 2\xi^2) + 16(\xi^2 - 1) = 0 \quad (2-22)$$

当  $c = c_R$  ( $c_R$  为 Rayleigh 表面波波速) 时，有  $\eta = c_R/c_s$ ，因此， $\eta$  只是泊松比  $\sigma$

的函数， $\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$ ， $\xi = \frac{c_s}{c_p} = \sqrt{\frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)}}$ ，进而可得式 (2-22) 的三个根。

Viktorov 提出了 (2-22) 的一个近似解，即  $\eta = (0.87 + 1.12\nu)/(1 + \sigma)$ ，在三次方程中，当  $\sigma > 0.263$  时，方程有两个共轭复根和一个实根，当  $\sigma \leq 0.263$  时有三个实根，但只有一个有效根，而且  $\eta$  与频率无关，所以 Rayleigh 波是非频散的。

由式 (2-20)、(2-21) 可得

$$\tilde{u} = \frac{u}{A} (re^{-qz} - 2sqe^{-sz}) \cos k(x - ct) \quad (2-23)$$

$$\tilde{w} = \frac{w}{A} = q(re^{-qz} - 2e^{-sz}) \sin k(x - ct) \quad (2-24)$$

式中， $\tilde{u}$  和  $\tilde{w}$  是关于未知常数 A 的归一化位移。

由式 (2-23) 和 (2-24) 可得，

$$\frac{(\tilde{u})^2}{(re^{-qz} - 2sqe^{-sz})^2} + \frac{(\tilde{w})^2}{(re^{-qz} - 2e^{-sz})^2} = 1 \quad (2-25)$$

因此，对于任意 z 值，具有坐标  $(\tilde{u}, \tilde{w})$  的矢量的运动轨迹为一个椭圆，即纵波和横波的叠加形成了表面波。如图 2.4 所示为瑞利波传播示意图。图中右侧的椭圆表示质点振动的轨迹。由图可知，瑞利波在固体表面沿 x 方向传播。质点只在 xy 平面内作椭圆振动，椭圆的长轴垂直于波的传播方向，短轴平行于传播方向。表面波沿深度约为 1~2 个波长  $\lambda$  的固体近表面传播，波的能量随传播深度的增加而迅速减弱。椭圆运动可视为纵向振动和横向振动的合成，因此表面波同样只能在固体介质中传播而不能在液体或气体介质中传播。

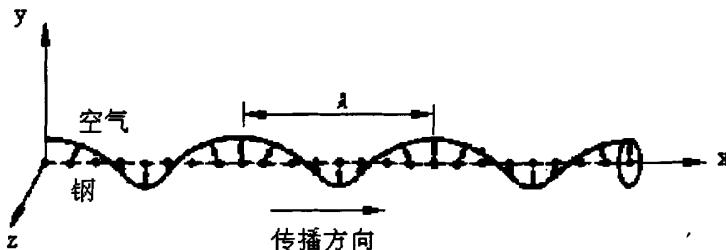


图 2.4 瑞利波的传播示意图

波的传播速度与介质的弹性模量和密度有关，因而，不同模式的波在不同材料中的传播速度也不同。同种材料中，不同模式的波速之间存在一定的比率关系，例如，横波速度约为纵波速度的 60%，表面波的速度约为横波的 90%。横波、纵波和表面波在几种常见材料中的传播速度参见表 2.1。在实际结构中，波的传播速度还受到材料类型、各向异性、结构形状与尺寸、内容介质等多种因素的影响<sup>[69]</sup>。

表2.1 声发射波在常见材料中的传播速度

材料	密度 ( $g/cm^3$ )	纵波 $c_p$ ( $m/s$ )	横波 $c_s$ ( $m/s$ )	Rayleigh波 $c_r$ ( $m/s$ )
空气	0.001	330	—	—
水 (20°C)	1	1480	—	—
油	0.92~0.953	1380~1500	—	—
铝	2.7~2.8	6250~6350	3100	2900
铸铁	7.7	4500	2400	2150
钢	7.8	5850	3230	2900
不锈钢	7.67~8.03	5660~7390	2990~3120	2700
铜	8.9	4660	2260	2000

### 2.3.3 板波<sup>[70-73]</sup>

如果固体物质为板状，则当板厚小到某一程度时，瑞利波将不存在而只会产生各种类型的板波。板波中最主要的一种即是兰姆波(Lamb 波)，狭义地讲，通常所说的板波就是 Lamb 波。兰姆波是由纵波和横波组合而成的波，只能在固体薄板中传播，质点做椭圆轨迹运动，按质点的振动也可分为对称型(膨胀波)和非对称型(弯曲波)两种。板波的速度介于纵波速度和横波速度之间，与波的频率有关，即具有频散现象。

在各向同性的固体自由板(图 2.5 所示横向尺寸非常大的薄平板)中，沿 z 方向传播的声波模式称为 Lamb 波。根据波的反射理论，一般地，纵波的反射波会被反射成纵波加 SV 波，而 SV 波会被反射成 SV 波加纵波，即反射的纵波和 SV 波是“耦合”的。当波在板内传播过程中，纵波在 z 轴方向上的波数  $k_{zL}$  与 SV 波在 z 轴方向上的波数  $k_{zT}$  相等时，板中纵波与 SV 波相互作用会形成共振，这便是兰姆波的物理模型。

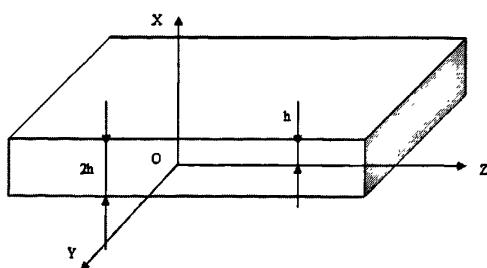


图 2.5 自由板的几何示意图

根据 Helmholtz 原理, 如将位移向量分解, 根据弹性理论可得两个分离的波动方程。对于自由板平面应变问题, 有

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \end{cases} \quad (2-26)$$

其中  $c_p$  和  $c_s$  分别为材料的纵波波速和横波波速, 而  $\phi$  和  $\psi$  分别是同纵波和横波有关的势函数。假设式 (2-26) 的解的形式如下:

$$\phi = \Phi(x) \exp[i(kz - \omega t)] \quad (2-27)$$

$$\psi = \Psi(x) \exp[i(kz - \omega t)] \quad (2-28)$$

注意到这些解代表  $z$  方向的行波和  $x$  方向的驻波。另外, 它还代表了沿板方向传播的波以及在横向固定分布的扰动。

将这些假设的解代入式 (2-26), 可以得到未知函数  $\Phi$  和  $\Psi$  的控制方程

$$\Phi(x) = A_1 \sin(px) + A_2 \cos(px) \quad (2-29)$$

$$\Psi(x) = B_1 \sin(qx) + B_2 \cos(qx) \quad (2-30)$$

式中

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2 \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \quad (2-31)$$

将上述结果代入位移和应力方程, 就可以得到位移和应力的表达式。分析可知, 该移场和应力场是含有以  $x$  为变量的  $\sin$  (或  $\cos$ ) 函数,  $\sin$  (或  $\cos$ ) 函数为关于  $x = 0$  的奇 (或偶) 函数。我们把解分成两组模态, 对称模态和反对称模态。特别是  $z$  方向的位移, 如果位移  $u_z$  中包含余弦项, 则运动是 (关于板的中面) 对称的, 如果  $u_z$  中包含正弦项, 则运动为反对称的。 $x$  方向的位移正好与之相反, 所以, 可以将板中传播的模态分为两种, 即对称模态和反对称模态:

对称模态

$$\left. \begin{array}{l} \Phi = A_2 \cos(px) \\ \Psi = B_1 \sin(qx) \\ u = u_z = ikA_2 \cos(px) + qB_1 \cos(qx) \\ w = u_x = -pA_2 \sin(px) - ikB_1 \sin(qx) \\ \sigma_{xz} = \mu[-2ikpA_2 \sin(px) + (k^2 - q^2)B_1 \sin(qx)] \\ \sigma_{xx} = -\lambda(k^2 + p^2)A_2 \cos(px) - 2\mu[p^2 A_2 \cos(px) + ikqB_1 \cos(qx)] \end{array} \right\} \quad (2-32)$$

反对称模态

$$\left. \begin{array}{l} \Phi = A_1 \sin(px) \\ \Psi = B_2 \cos(qx) \\ u = u_z = ikA_1 \sin(px) - qB_2 \sin(qx) \\ w = u_x = pA_1 \cos(px) - ikB_2 \cos(qx) \\ \sigma_{xz} = \mu[2ikpA_1 \cos(px) + (k^2 - q^2)B_2 \cos(qx)] \\ \sigma_{xx} = -\lambda(k^2 + p^2)A_1 \sin(px) - 2\mu[p^2 A_1 \sin(px) - ikqB_2 \sin(qx)] \end{array} \right\} \quad (2-33)$$

这里， $\mu$  和  $\lambda$  分别为 Lame 常数。

对于对称模态，波结构沿板厚是关于  $u$  对称的，关于  $w$  是反对称的；而对于反对称模态，波结构沿板厚关于  $w$  是对称的，而关于  $u$  是反对称的。边界条件为

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{xz} = \sigma_{xx} = 0, x = h \\ \sigma_{xz} = \sigma_{xx} = 0, x = -h \end{array} \right\} \quad (2-34)$$

分别代入式 (2-32) 和 (2-33)。对于对称模态 (S)，边界条件将给出关于  $A_2$ 、 $B_1$  的齐次方程组；对于反对称模式 (A)，边界条件给出关于  $A_1$ 、 $B_2$  的齐次方程组。对于齐次方程组，令系数矩阵的行列式为零，即可求解。经适当的变换推导，可得到频散方程

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad \text{对称模态} \quad (2-35)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad \text{反对称模态} \quad (2-36)$$

式中， $p$  和  $q$  如公式 (2-31) 定义，波数  $k = \omega/c_p$ 。对式 (2-35) 和 (2-36) 进行求解，就可以得到相速度  $c_p$  和频厚积  $fd$  之间的关系。对于同一频厚积  $fd$  可以求出不同的相速度，它们分别对应着不同的声发射波的模态。此外，根据群速度与相速度的关系公式

$$c_g = \frac{c_p^2}{c_p - (fd) \frac{dc_p}{d(fd)}} \quad (2-40)$$

其中,  $c_g$  为群速度,  $c_p$  为相速度,  $fd$  为频率-厚度积,  $f$  为导波的频率,  $d$  为测试件的厚度, 由式 (2-40) 即可以得到群速度的频散曲线。

如图 2.6 所示为真空中 10 mm 厚钢板 (密度  $\rho = 7.932 g/cm^3$ 、纵波波速为  $c_p = 5960 m/s$ 、横波波速  $c_s = 3260 m/s$ ) 的相速度和群速度频散曲线。

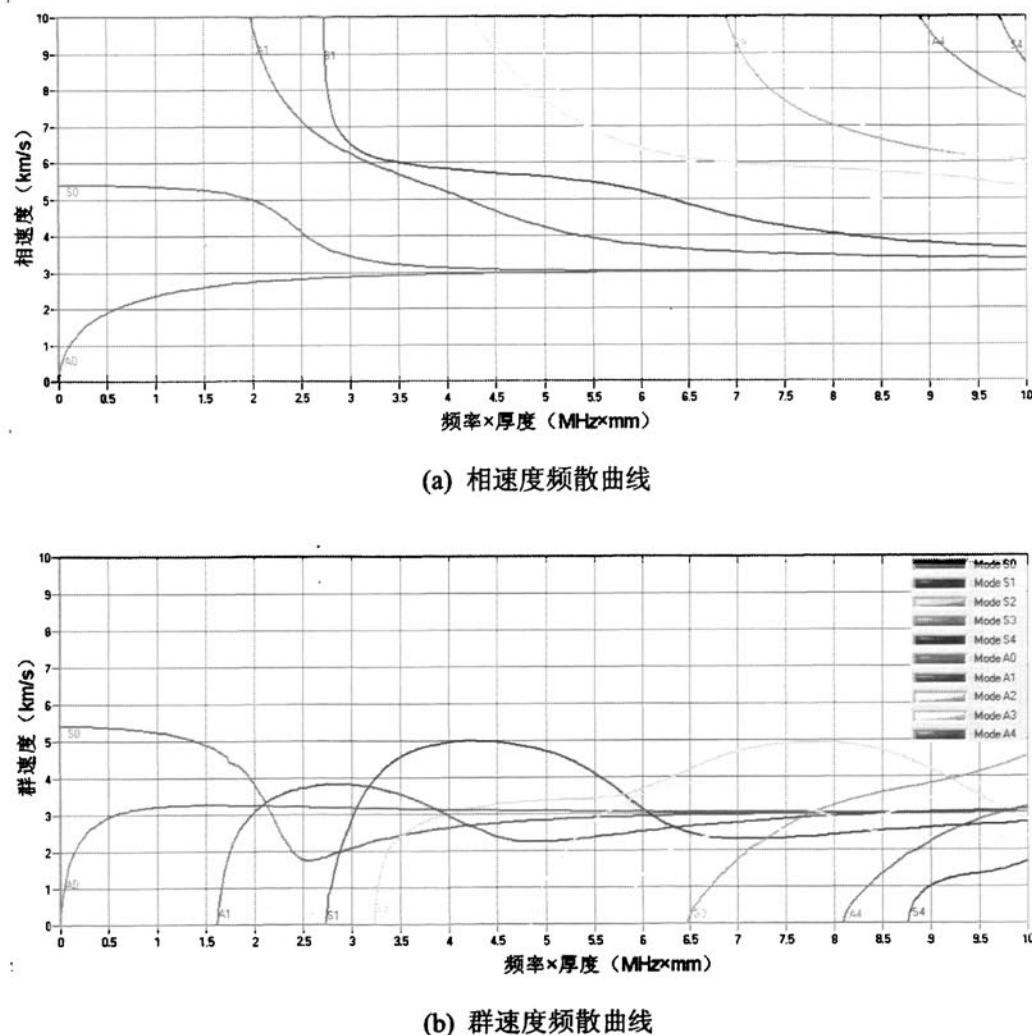


图 2.6 10 mm 厚钢板的相速度和群速度频散曲线

### 2.3.4 声发射波的衰减特性分析

声发射波的衰减是指波的幅度随传播距离的增加而下降的现象, 引起声发射

波衰减的因素主要有扩散衰减、吸收衰减、散射衰减和频散衰减等<sup>[74]</sup>。

#### 2.3.4.1 扩散衰减

当声波自一种媒质入射到另一种媒质时，若它们的特性阻抗不同，就会使部分声能折回到第一种媒质，形成反射波；而剩余部分的声能则透过边界形成透射波。由于声发射波从波源向各个方向扩展，因而随着传播距离的增加，波阵面<sup>[75]</sup>的面积逐渐扩大使单位面积上的能量逐渐减少，造成波的幅度下降。扩散衰减和传播介质的性质无关，主要取决于介质的几何形状（或波阵面），主要控制近场区的衰减。

一般而言，局部声发射源所产生的横波和纵波的幅度下降与传播距离成反比，而表面波和板波则与传播距离的平方根成反比<sup>[76]</sup>。

#### 2.3.4.2 散射衰减

在声场中，当媒质中存在弹性与密度不同的障碍物时，声波就朝各个方向发生不规则反射（散射），使波源在原来的传播方向上的能量减少。粗晶、夹杂、异向物、气孔等是引起散射衰减的主要材质因素<sup>[77]</sup>。

声发射波在结构中传播时，所有的结构不连续处和几何形状的改变，如焊缝余高、腐蚀和裂纹等缺陷，都会引起声发射波的散射衰减。

#### 2.3.4.3 吸收衰减

声波通过媒质或入射到媒质表面上时可能损失一些能量，即声波的吸收衰减。在纯媒质中产生声吸收的原因主要是媒质的粘滞性、热传导及媒质的微观分子过程引起的驰豫效应等<sup>[78,79]</sup>。由于质点间的内摩擦（粘弹性）和热传导等因素，部分波的机械能转换成热能，使波的幅度随传播距离以指数形式下降。其衰减率取决于材料的粘弹性等性质，并与波的频率有关，近似与频率成正比，这种能量损失机制主要控制远场区的衰减。

如果被测结构表面存在沉积物，如灰尘、泥沙、污垢等，当声波通过时，就会产生因摩擦引起的附加能量损耗，一部分声波的能量被吸收，声发射波的传播距离将受到影响。

#### 2.3.4.4 其它因素导致的衰减

当超声波在板、杆或管道等结构中传播时，随着距离的延长，不同频率成分的波会以不同的速度向前传播，引起波形的分离或扩展，从而使波的幅度下降。发生频散后，声发射波的能量衰减非常迅速。频散分为物理频散和几何频散，物理频散是由材料本身的物理性质（如非线性效应等）决定的，几何频散则是由于

波导几何尺寸的影响<sup>[80,81]</sup>。

以声发射波在管道中传播为例，管道上的特殊结构，如法兰、支路、弯管、三通、焊缝、支撑等，以及管道的外包覆层、输送介质等都会对声发射信号的传播造成一定影响。如图 2.7 所示。管道内输送的介质和管道外壁的包覆层都会引起管壁中传播的声波发生扩散衰减。如果管道外壁的涂层或包覆层为“粘”质的，例如，当管道外壁包有沥青防腐层或水泥包覆层时，部分声波会被其吸收。同时，管道内输送的物质，如水、油等都会使反射或折射到传感器的能量损失掉一部分。

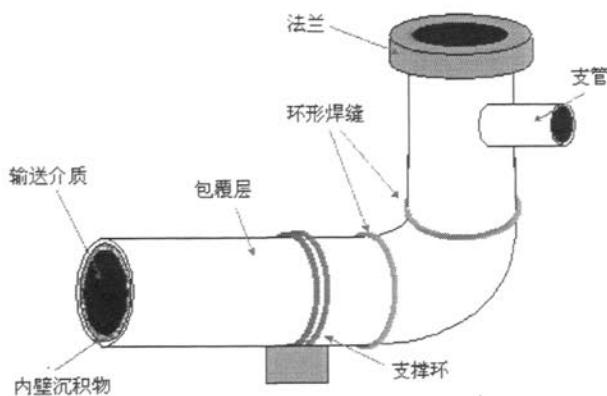


图 2.7 引起管道中声波衰减的几种因素

## 2.4 声发射信号分析方法

声发射(AE)检测的目的在于发现声发射源和得到有关声发射源尽可能多的信息。通过对检测到的声发射信号进行处理和分析，可以得到被检测材料和结构内部声发射源的大量信息。然而，受声发射源的自身特性、声发射源到传感器的传播路径、换能器的特性和声发射仪器等多种因素的影响，声发射传感器输出的声发射电信号波形十分复杂，甚至会出现与真实的 AE 源相差很大的情形。因此，如何根据传感器输出的电信号来获取有关 AE 源的信息一直是人们研究的主要课题。

目前，采集和处理声发射信号的方法可分为两大类。一类是以多个简化的波形特征参数来表示声发射信号的特征，然后对其进行分析和处理，简称参数分析方法；另一类为存储和记录声发射信号的波形，对波形进行频谱分析，简称波形分析方法。

### 2.4.1 声发射信号的类型

声发射信号的频率范围很宽，为 1K~2M Hz，覆盖了次声、音频及超声等

几个频段。其位移幅度可在  $10^{-15}\sim10^{-9}$  m 之间变化，达到  $10^6$  量级（120dB），声发射信号的产生率也是多种多样的。因此，根据声发射信号的特点，可以把声发射信号分为突发型和连续型两种<sup>[82]</sup>。突发型信号指的是在时域上可以分离的信号，由高幅值、不连贯、持续时间一般为微秒级的信号所组成，主要与材料中堆叠层错的形成、机械孪晶，以及裂纹的形成和断裂过程<sup>[83]</sup>有关。如果信号的单个脉冲在时域上不可分辨，则称之为连续型信号。连续型信号主要与材料的位错和交叉滑移等塑性变形有关，如塑性变形声发射过程前期的信号、泄漏信号、燃烧信号等。在实际检测中，也会出现混合型声发射信号。

如图2.8为典型的突发型声发射信号的波形，其上升段比较迅速，而下降段则呈现指数衰减振荡的现象，包络线的形态呈现一个三角形的形状。声发射源的一次突发发射实际上是一个突发脉冲，而传感器输出的信号呈现复杂的波形，则是信号在介质中传播过程的反射、折射、波形变换及传感器的谐振等多种因素合成的结果。突发型信号的频谱分布曲线非常集中，质心比较明显，表明信号包含的频率比较单纯。如图2.9为典型的连续型声发射信号的波形及频谱，其频谱的分布曲线平坦，质心相对不明显，表明信号所包含的频率成分比较丰富，分布比较宽。

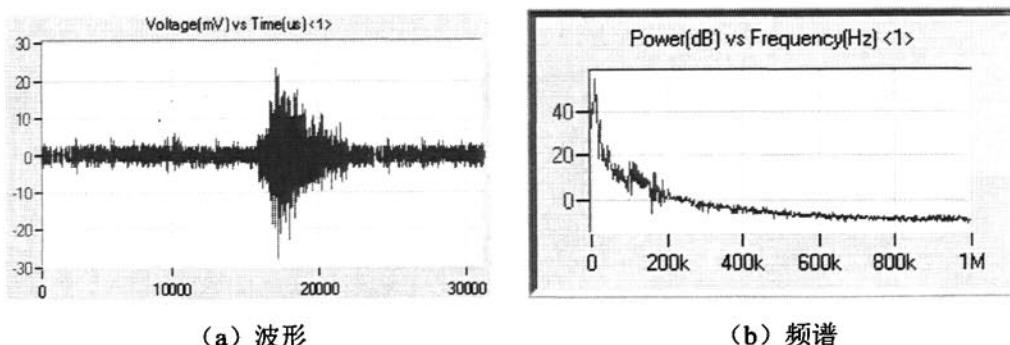


图 2.8 典型突发型声发射信号的波形和频谱

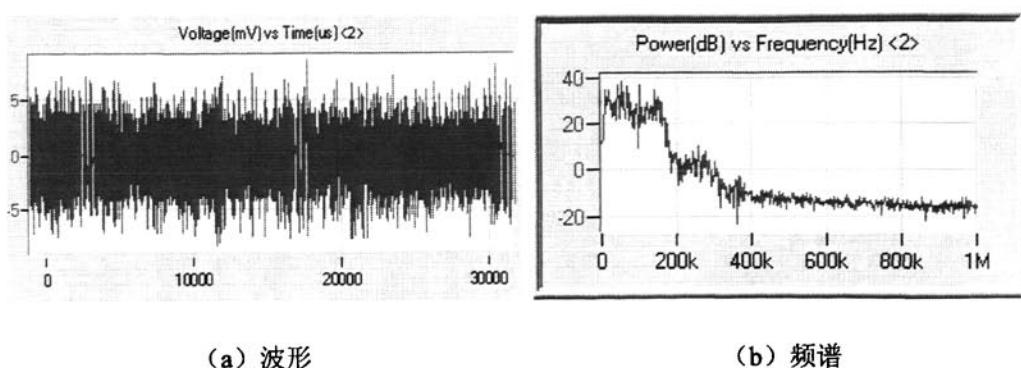


图 2.9 连续型声发射信号波形及频谱

### 2.4.2 声发射信号的参数分析法<sup>[84-86]</sup>

参数分析法是 20 世纪 50 年代以来广泛使用的经典声发射信号分析方法，目前，几乎所有声发射检测标准中，对声发射源的判断依据均采用简化的波形特征参数。一个越过门槛值的声发射信号可提取出多个信号特性参数。图 2.10 为一个突发型标准声发射信号的模型。由这一模型可得到波击计数、事件计数、振铃计数、能量、幅度、持续时间和上升时间等简化波形参数。对于连续型声发射信号，可以采用振铃计数、能量、平均信号电平和有效值电压等参数来描述信号的特征。

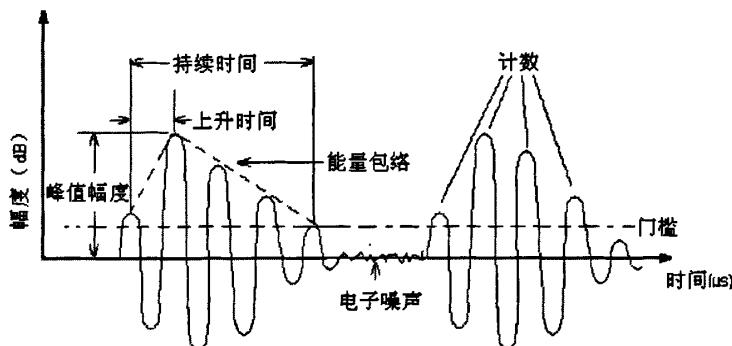


图 2.10 声发射信号简化波形参数的定义

表 2.2 中列出了常用声发射信号特征参数的含义和特点。

表 2.2 声发射信号参数

声发射参数	含义	特点与用途
Hit (波击计数)	超过阈值并使某一通道获取数据的任一声发射信号。	反映声发射活动的总量和频度，常用于声发射源的活动性评价。
Event (事件计数)	产生声发射的一次材料局部变化称之为一个声发射事件。一个阵列中，一个或几个波击对应一个事件。	反映声发射事件的总量和频度，可用于声发射源的活动性和定位集中度评价。
Counts (振铃计数)	越过门槛的信号的振荡次数。	能粗略反映声发射信号的频度和强度，可用于声发射活动性评价、但受门槛值大小的影响。

<b>Amplitude (幅度)</b>	信号波形的最大振幅值 (dB)。	与事件大小有直接关系，不受门槛的影响，直接决定事件的可测性，常用于波源的类型鉴别、强度及衰减的测量等。
<b>Energy (能量计数)</b>	信号检波包络线下的面积。	反映事件的相对能量或强度，对门槛、工作频率和传播特性不敏感，也用于波源的类型鉴别。
<b>Duration (持续时间)</b>	信号第一次越过门槛至最终降至门槛所经历的事件间隔。	与振铃计数相似，但常用于特殊波源类型和噪声的鉴别。
<b>Rise Time (上升时间)</b>	信号第一次越过门槛至最大振幅所经历的时间间隔 ( $\mu s$ )	因受传播路径的影响而物理意义变得不明确。
<b>RMS (有效值电压)</b>	采样时间内信号的方均根值 (V)。	与声发射信号的幅度大小有关，测量简便，不受门槛值的影响，适用于连续信号，主要用于连续型声发射活动评价。
<b>ASL (平均信号电平)</b>	采样时间内信号电平的均值 (dB)	适用于幅度动态范围要求高而时间分辨率要求不高的连续型声发射信号，也可用于背景噪声水平的测量。
<b>Arrival Time (到达时间)</b>	一个声发射波到达传感器的时间 ( $\mu s$ )。	决定了波源的位置、传感器间距和传播速度，用于波源的位置计算。

#### 2.4.3 声发射信号的波形分析法<sup>[87,88]</sup>

采用参数分析方法对声发射信号进行分析时，由于谐振式传感器获得的 AE 信号基本上是一个衰减的正弦波，所以有关 AE 本质的信息往往被谐振式传感器本身的特点所掩盖或模糊掉。AE 信号是突发性瞬态信号，并具有非平稳随机信号的特征，参数分析的结果往往随所用传感器的谐振频率和测试系统(放大倍数、阈值的不同等)而变化，重复性一般很差。另外，由于传统的参数分析方法认为 AE 信号是以某一固定速度传播的，这一假设与信号的实际传播过程有一定出入，因此也会带来定位上的误差。

声发射信号的波形分析方法指的是对声发射信号的波形进行存储和记录，并对波形进行频谱分析的方法。声发射波形是声发射传感器的输出电压随时间变化

的曲线，它可以用示波器从前置放大器或主放大器的输出观察到，也可以通过声发射软件记录下来。通过对声发射信号进行波形分析，可以将声发射信号波形与声发射现象的物理过程相联系，获取声发射信号的本质特征，进而定量地评价 AE 信号。

## 2.5 本章小结

本章主要对声发射技术的基本理论进行了分析，对声发射现象产生的机理、不同模态的声发射波的传播及衰减特性进行了研究，为后续的储罐底板和管道声发射检测研究奠定了理论基础。

- 1、分析了声发射现象产生的源机制及声发射检测的基本原理，研究了影响材料变形与断裂机制的主要因素，如材料特性、结构的尺寸与形状、应力及环境因素等。
- 2、研究了声发射检测过程中，凯塞效应和费利西蒂效应对材料承受载荷或损伤，以及结构缺陷的严重程度的影响。
- 3、对不同模态的声发射波在结构中传播特性进行了研究，分析了纵波、横波、Rayleigh 波和 Lamb 波的波动方程，并对不同模态的声发射波遇到不同介质的分界面时产生的反射和折射情况进行了研究。
- 4、针对不同结构中声发射波的衰减现象，对引起声发射波在传播过程中发生衰减的主要因素，如扩散、吸收、散射和频散等现象进行了研究。以声发射波在管道中传播为例，对管道上的特殊结构，以及管道的外包覆层、输送介质等对声发射信号衰减的影响进行了分析。
- 5、在分析突发型和连续型声发射信号不同特点的基础上，研究了两种声发射信号的形成机制及其波形及频谱特征，根据声发射信号类型的不同，需要采取不同的信号分析处理方法进行特征识别及信号提取。

## 第三章 声发射罐底检测信号采集与定位技术研究

### 3.1 引言

储罐事故主要是由罐底腐蚀和泄漏引起的。从腐蚀的机理来看，腐蚀可分为化学腐蚀和电腐蚀两大类。从腐蚀发生的区域来看，可分为均匀腐蚀和局部腐蚀。均匀腐蚀比较均匀地发生在立式储罐的各个部位，均匀地减薄各部位的金属厚度，降低立式储罐的使用年限。局部腐蚀发生在罐底的局部区域，又分为点腐蚀、凹坑腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀等。由于局部腐蚀具有形成周期短、不易被检测发现、易形成穿孔、破坏后果严重等特点，因此局部腐蚀是立式储罐的主要破坏形式。

由于其腐蚀破坏的严重性，储罐底板的腐蚀检测一直是世界各国的重点研究课题，因为即使是一个蚀点形成的穿透性孔眼，也可能导致储罐工作能力的丧失并引发不可预料的危险事故。长期以来，我国主要采取按固定检测周期定期开罐检查的方法来评价储罐的强度和安全性。但定期开罐检查的方法需要停工、倒罐、清罐后才能对储罐底板进行漏磁、涡流、超声等常规无损检测方法的检测（参见本文绪论部分），不仅检测费用高，而且倒罐清出的罐底残油如果直接排放也会对环境造成极大污染。

一般说来，对大型原油储罐进行一次内部（离线）检测需要几十至数百万元的费用，倒空、清洗、检测等时间可能达到几十天甚至数月；对大型低温储罐底板的检测费用则是这个数目的两倍以上<sup>[89]</sup>。而且，采用传统方法定期开罐普查时，一般仅会发现一部分储罐存在问题。根据三千多台储罐的开罐资料<sup>[90]</sup>，只有9%的罐确实发生了严重的腐蚀或泄漏，需要及时检测和修复；而54%的罐状态良好，完全可以继续生产，根本不需要离线清罐检测；其它的罐虽然存在一定程度的腐蚀损伤，但可以延期再维修。可见，企业若不考虑储罐的状况，而仅仅按照计划进行检修，就无法科学地判断哪些储罐才是腐蚀损伤严重而急需检测的储罐。状况良好的储罐被清洗检测，造成大量资金及维修资源的浪费；而状况不好的储罐则可能在检测前就已经出现泄漏。与传统的储罐底板腐蚀检测方法相比，声发射是一种在线、高效和经济的检测方法，克服了传统技术需要停工置换、清理罐底、逐点扫描检查造成的费时、费力，总体检测费用高的缺点，因而具有非

常广阔的应用前景。但该项技术在我国刚刚起步，检验与评价方法需要在不断的研究和实际应用中加以完善。

储油罐的结构多样，种类繁多，了解其结构及分类形式有助于确定合适的声发射检测方案。储罐按其所处位置可分为地上油罐、半地上油罐和地下油罐；按用途可分为生产油罐和存储油罐；按罐内所装油品则可分为原油罐、燃料油罐和润滑油罐等。金属油罐按容量有大型和小型之分，小型油罐大多是公称容积小于100 m<sup>3</sup>的油罐，一般为卧式油罐，大型油罐是指公称容积在100~30000 m<sup>3</sup>的平顶罐、固定顶罐和1000~100000 m<sup>3</sup>的浮顶罐。我国常用的立式储油罐的直径一般为φ8000~80000 mm，高度为6~19 m，容积为500~100000 m<sup>3</sup>。立式油罐绝大多数为圆筒形，主要由罐底、罐壁和罐顶三部分构成。罐顶的结构又可分为无力矩顶油罐、拱顶油罐、锥顶油罐、浮顶油罐和内浮顶油罐等。目前，分布在我国中石化、中石油等企业的立式储罐主要为拱顶和浮顶两种<sup>[91]</sup>。立式储罐的罐顶结构不同，罐底声发射检测过程中噪声数量及类型也不同。立式储罐的罐底由多块薄钢板（即中幅板和边缘板）拼装而成，大多数立式储罐还包含有进出接合管、排污孔、清扫孔和加热装置等<sup>[92]</sup>。熟悉储罐底板的结构，有利于对罐底声发射的检测结果进行有效分析。

## 3.2 声发射储罐底板检测的基本原理

声发射罐底检测主要是针对设备中的活性缺陷，利用少量固定不动的传感器来获得活性缺陷的动态信息，并通过区域定位、时差定位等方法来确定声发射源，即活性缺陷的位置。

采用声发射技术对储罐底板进行在线检测主要是利用载荷变化时，腐蚀减薄区产生变形而引起的腐蚀层脱落与开裂，以及泄漏产生的湍流声等声发射信号。在工作状态下，储罐底板主要有以下两种有效的声发射源<sup>[93]</sup>：

### （1）局部严重腐蚀区的受载变形，产生有效声源

当储罐存在腐蚀损伤时，其整体或局部强度会被削弱，在液位变化的情况下，罐底局部会产生一定的形变，虽然很微小，但这种变形引起的腐蚀产物开裂会产生一定的声发射信号，尤其是当罐底整体腐蚀较为严重或存在腐蚀减薄区时，这些区域在载荷变化的条件下会因出现变形（或由此引起的腐蚀层脱落与开裂）而产生声发射信号。采用高灵敏度的低频传感器可以接收到这些携带缺陷信息的声发射信号。通过对采集到的声发射信号进行分析，就可以对罐底的泄漏情况和腐蚀坑的严重程度做出评估。相比于多数噪声源，腐蚀剥落和泄漏是唯一可以在一个小时内产生几百到几万个信号的声发射源。

## (2) 泄漏点的液体流动声源

当罐底由于严重的局部腐蚀形成穿孔时，储罐会发生泄漏，泄漏处会产生连续的声发射信号。研究表明：当罐底存在泄漏时，介质流过泄漏孔时会产生湍流流动噪声，当介质夹带颗粒状杂质时，会使信号更丰富，若泄漏通道暂时受到碎渣等的阻碍时，“水击”效应也会产生较强的声发射信号。而且，相对于干净的盛满水的储罐，脏的储罐中的泄漏更容易被识别和定位<sup>[94]</sup>。通过声发射系统采集泄漏所产生的流体噪声信号并进行分析处理，即可对储罐底板是否存在泄漏做出判断，并计算出泄漏点的位置。

如图3.1所示为声发射罐底腐蚀检测示意图，罐底声发射检测设备主要由传感器、前置放大器、电缆线、声发射信号处理单元、计算机等构成。为了更好的屏蔽检测环境中的电磁干扰，实验中采用了内置前放的一体化传感器。

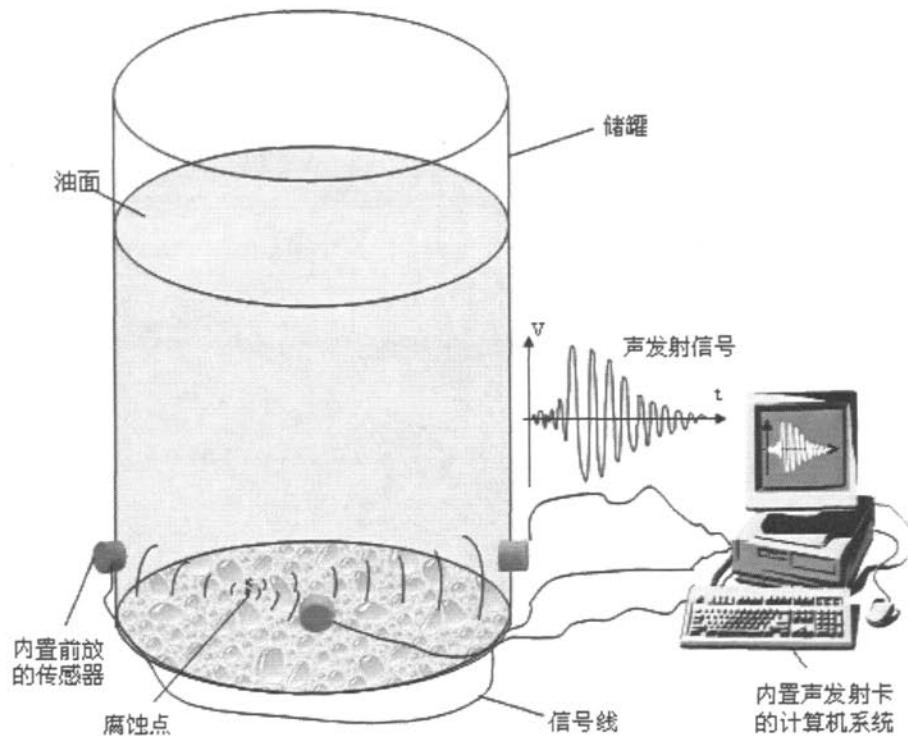


图3.1 声发射罐底腐蚀检测系统示意图

声发射储罐底板在线检测技术的主要优点是<sup>[95]</sup>：

(1) 利用声发射技术对常压立式储罐进行检测时不需要倒罐及清罐，只需要在检测前关闭阀门和泵12~24个小时，检测完成后储罐可立即投入使用，从而大大缩短检测时间，降低了检验的费用，而且也能够减轻检测人员的劳动强度，提高检验的工作效率。

(2) 通过按一定阵列布置的少量固定不动的传感器, 声发射仪就可获得储罐罐底声源在检测过程中的一切活动信息, 并可确定声源的位置, 这为实际检测和评价工作带来了极大的方便。

(3) 在声发射检测过程中, 如果罐体上包有保温层, 为了安装传感器, 需要在罐体保温层上开一些小孔, 由于只有少量的保温层被破坏, 因此对罐体的完整性没有影响;

(4) 可以对储罐中的已知活性缺陷进行局部状态监测, 确定其损伤的严重程度, 并提供维修决策依据;

(5) 根据罐底腐蚀状况的声发射检测结果, 可以对储罐底板结构的完整性进行分类, 并列出维修计划, 使企业可以更有效地对有限的维修资源进行合理调配。

### 3.3 水载作用下中声发射波的传播特性

#### 3.3.1 水载作用下声发射波的频散分析<sup>[96]</sup>

应力波波源处的声发射波形, 一般为宽频带的尖脉冲信号, 包含着波源的定量信息。然而, 由声发射仪器测得的波形信号, 由于介质的传播特性和传感器频率响应特性等影响已经变得非常复杂, 与原波形有很大不同。因此, 对声发射波在不同介质中的传播特性的研究, 将有助于对声发射源信号进行分析及评价。

水载作用下的构件是无损检测应用中的一个重要对象。如图 3.2 所示的钢板中, 作用在钢板上的水载(或其它形式的载荷)为声波能量的泄漏提供了一个通路<sup>[97]</sup>。因此, 通常被反射或折射到传感器的能量会损失一部分。

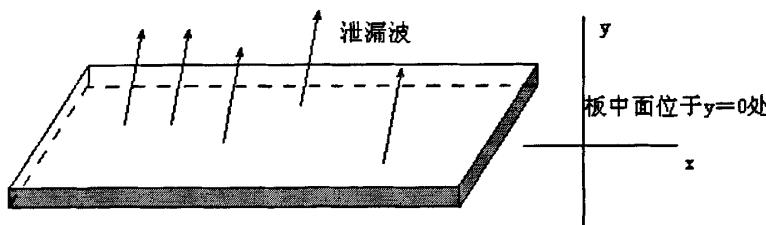


图 3.2 水载作用下的平板结构

对结构的水载效应进行研究, 目的是寻求某种特定模态的波, 它的传播对液体载荷不敏感, 可以用于检测水载作用下构件的缺陷。这一问题的数学处理与不受载荷的平板的频散方程处理方式基本相同, 但有两点需要特别注意: (1) 对于在水中传播的纵波, 必须将势函数  $\Phi_w$  和附加的位移场方程一起考虑; (2) 必须

考虑某种模态由于能量泄漏到水中引起的能量衰减。平板的底部可以看作是一个声阻无限大的介质（真空），平板的厚度为  $d$ 。

声波在板中传播时，由于受板的几何尺寸的影响，声波在传播过程中会发生几何弥散，即随着距离的延长，不同频率成分的波会以不同的速度向前传播。对于平板而言，在水中传播的波，其标量势和位移表达式为

$$\Phi_w = Ae^{-ik_w y} e^{i(kx-\omega t)} \quad (3-1)$$

$$\bar{U} = \bar{\nabla} \Phi_w \quad (3-2)$$

式中， $k_w = \sqrt{(\omega/c_w)^2 - k^2}$ ， $c_w$  为水中的纵波波速。

由此可得位移为

$$u_{x(\text{水})} = \frac{\partial \Phi_w}{\partial x} = [ike^{-ik_w y} A] e^{i(kx-\omega t)} \quad (3-3)$$

$$u_{y(\text{水})} = \frac{\partial \Phi_w}{\partial y} = [-ike^{-ik_w y} A] e^{i(kx-\omega t)} \quad (3-4)$$

水一侧的法向应力分量为

$$\sigma_{yy(\text{水})} = \lambda_w \Delta_w = [\lambda_w (-k_w^2 - k^2) e^{-ik_w y} A] e^{i(kx-\omega t)} \quad (3-5)$$

边界条件为

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} &= 0 \\ \sigma_{yy} &= \sigma_{yy(\text{水})} \\ u_y &= u_{y(\text{水})} \quad y = d/2 \text{ 处} \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{yy} = 0 \quad y = -d/2 \text{ 处} \end{aligned} \quad (3-6)$$

由位移和应力方程，及平板波导外表面上的无应力条件和内表面的应力、位移连续性条件，可得液体载荷下平板中声发射波的频散方程为

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

令系数矩阵的行列式为零并求解，即

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & 0 \end{vmatrix} = 0 \quad (3-8)$$

其中，

$$\begin{aligned} a_{11} &= -[\lambda(k_i^2 + k^2) + 2Gk_i^2]J_0(k_i a) + 2Gk_i J_1(k_i a) / a \\ a_{12} &= -[\lambda(k_i^2 + k^2) + 2Gk_i^2]Y_0(k_i a) + 2Gk_i Y_1(k_i a) / a \\ a_{13} &= -\{2iGk\}\left\{k_i J_0(k_i a) - \frac{1}{a} J_1(k_i a)\right\} \quad a_{14} = -\{2iGk\}\left\{k_i Y_0(k_i a) - \frac{1}{a} Y_1(k_i a)\right\} \\ a_{21} &= \{2iGkk_i\}\{J_1(k_i a)\} \quad a_{22} = \{2iGkk_i\}\{Y_1(k_i a)\} \\ a_{23} &= G\{k - k_i^2\}\{J_1(k_i a)\} \quad a_{24} = G\{k - k_i^2\}\{Y_1(k_i a)\} \\ a_{31} &= -[\lambda(k_i^2 + k^2) + 2Gk_i^2]J_0(k_i b) + 2Gk_i J_1(k_i b) / b \\ a_{32} &= -[\lambda(k_i^2 + k^2) + 2Gk_i^2]Y_0(k_i b) + 2Gk_i Y_1(k_i b) / b \quad (3-9) \\ a_{33} &= -\{2iGk\}\left\{k_i J_0(k_i b) - \frac{1}{b} J_1(k_i b)\right\} \quad a_{34} = -\{2iGk\}\left\{k_i Y_0(k_i b) - \frac{1}{b} Y_1(k_i b)\right\} \\ a_{35} &= -\lambda_w[(k_w^2 + k^2)H_0^{(2)}(k_w b)] \\ a_{41} &= \{2iGkk_i\}\{J_1(k_i b)\} \quad a_{42} = \{2iGkk_i\}\{Y_1(k_i b)\} \\ a_{43} &= G\{k - k_i^2\}\{J_1(k_i b)\} \quad a_{44} = G\{k - k_i^2\}\{Y_1(k_i b)\} \\ a_{51} &= -k_i J_1(k_i b) \quad a_{52} = -k_i Y_1(k_i b) \quad a_{53} = ik J_1(k_i b) \quad a_{54} = ik Y_1(k_i b) \quad a_{55} = k_w H_1^{(2)}(k_w b) \end{aligned}$$

对式 (3-8) 进行求解可得到复波数  $k$ ，以及相速度  $c_p$  和衰减系数  $\alpha$ （用  $20\lg\alpha$  来表示分贝数）。

在给定材料性质（材质、密度）和几何参数（壁厚等），就可以计算出声发射波在结构中的频散曲线。板中传播的声发射波主要有对称和非对称模态两种。当板厚较小时，声发射波的模态数量很少，通常只有  $A_0$  和  $S_0$  两种模态的声发射波。随着板厚的增加，声发射波的模态也随之增加。如图 3.3 所示为声发射波在油—钢—空气三层介质表面传播时的相速度频散曲线，其中钢板厚度为 23 mm，与储罐底板厚度相当。

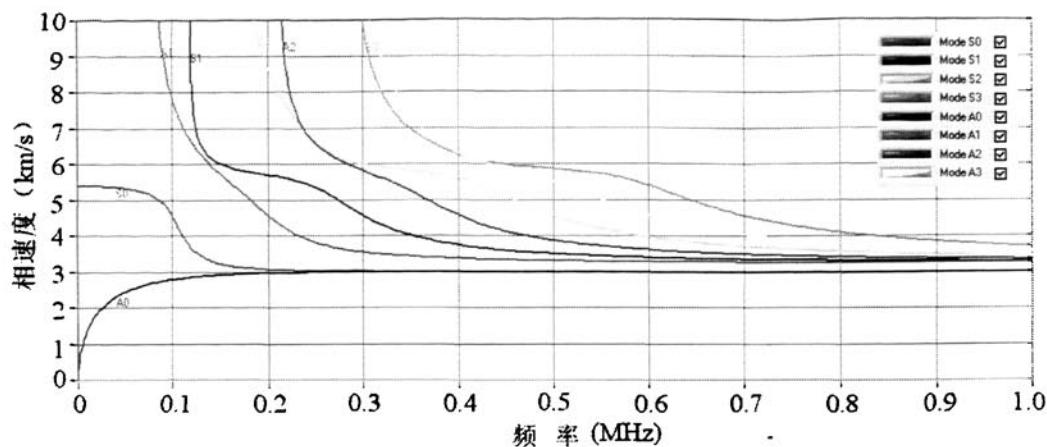
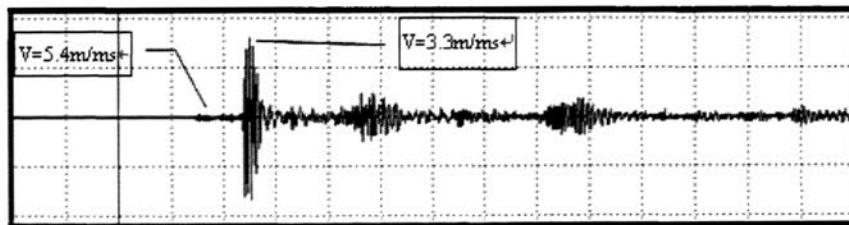


图3.3 油—钢—空气三层介质中传播的声发射波频散曲线

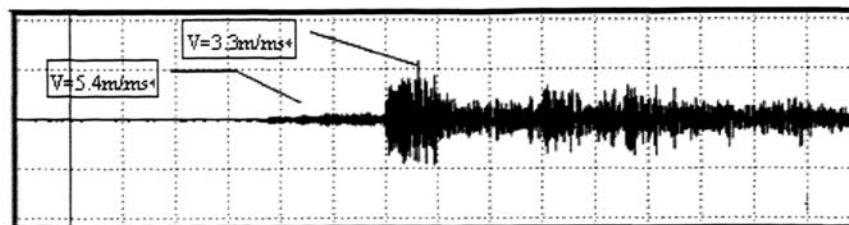
从图 3.3 中可以看出，在频率较低时，声发射波的模态较少，而随着频率的增大，模态数逐渐增加，因此，在对水载作用下的结构进行检测时，应尽量选择频率较低的传感器。

### 3.3.2 无载荷和水载作用下波的传播速度和衰减率测量

在理论分析的基础上，本文通过实验对无载荷和水载作用下的声发射波的传播速度和衰减率进行了测量。如图 3.4 (a)、(b) 所示为传感器与声发射源之间的距离分别为 2 m 和 20 m 时，不同模态的声发射波在无载荷作用下钢板中传播时的声发射波形。由试验测量可知，图中两种模态波的传播速度分别为 5400 m/s 和 3300 m/s。



(a) 传感器与声发射源相距 (a) 2 m



(b) 传感器与声发射源相距 20 m

图 3.4 无载荷作用下的声发射波形

如图 3.5 所示为上面两种模态的波在钢板中传播时的衰减曲线。从图中可以看出，传播速度较快的波的衰减率更低。

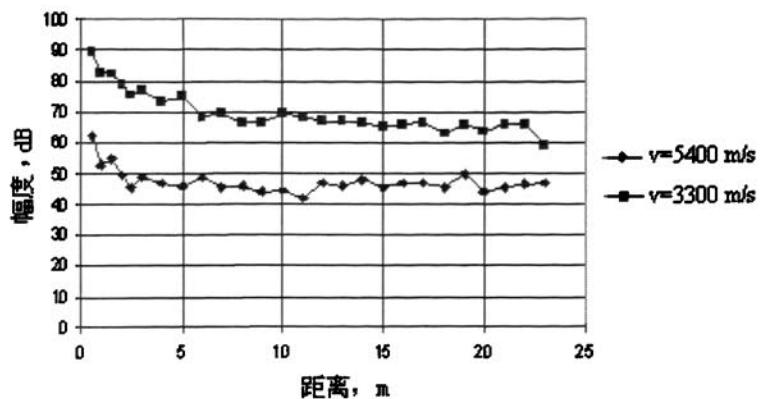
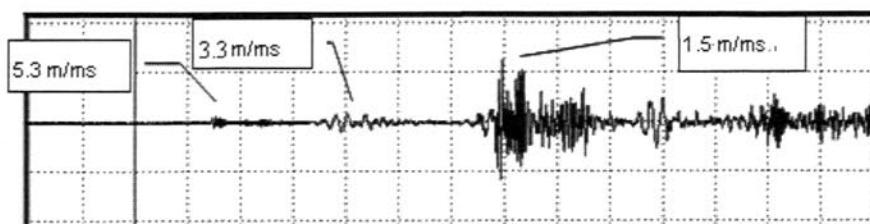
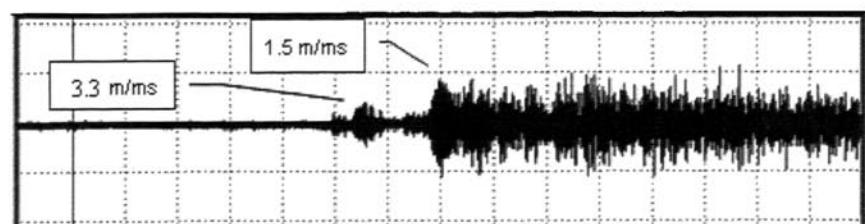


图 3.5 钢板中两种波速不同的波的衰减曲线

水载作用下，钢板中传播的波又引入了新的模态。如图 3.6 (a) 所示为传感器与声发射源相距 2 m 时，声发射仪接收到的波形，图中共有三种模态的波，分别以 5300 m/s、3300 m/s 和 1500 m/s 的速度传播。而传感器与声发射源相距 20 m 时，则只接收到两种模态的波，如图 3.6 (b) 所示。很明显传播速度较快的纵波在水载作用下衰减很快，当传感器距离声发射源较远时，该种传播速度较快的波已经无法分辨。



(a) 传感器与声发射源相距 2 m



(b) 传感器与声发射源相距 20 m

图 3.6 水载作用下的声发射波形

这几种不同模态的波的衰减曲线如图 3.7 所示。传播速度较快的波在水载作用下的钢板中传播时衰减很快，而另外两种速度较慢的波则可以传播更远距离。

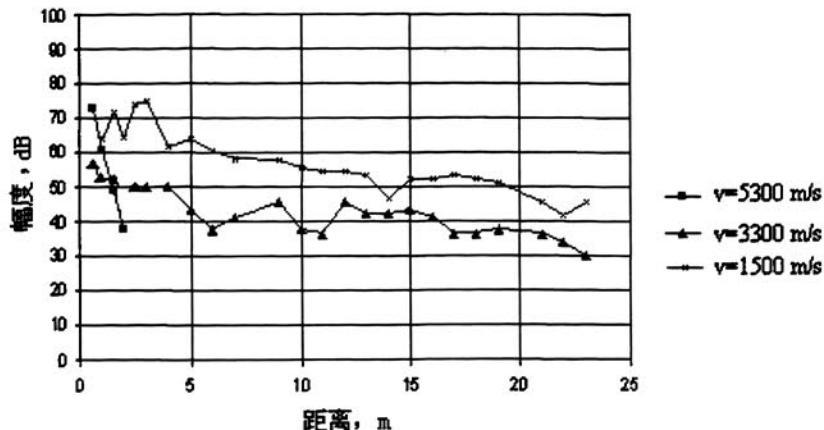


图 3.7 几种不同模态的波在水载作用下的钢板的衰减曲线

因此，在对非水载作用下结构中的缺陷进行定位时，通常采用波速为 3300 m/s 的波；而对于水载作用下的结构缺陷，则采用波速为 1500 m/s（纵波在水中传播的速度）的波。对盛装油品的储罐底板的声发射源定位的波速，可选为 1380~1500 m/s（油罐内油品密度及粘度不同，声发射波的传播速度也不同）。

通过对水载作用下的声发射波的传播特性的研究，我们得出如下结论：大型储罐底板检测中有效的声发射信号是从罐储内的油品介质中传播过来的，而不是通过储罐的金属壁板传播的。罐底声源的传播路径如图 3.8 所示，从图中可以看出，罐底缺陷激发的声发射波在罐底钢板中传播时衰减较快，传至罐壁时波形可能已经发散严重，无法被多个传感器接收到，而从油品中传播的模态则衰减很小，可以令多个传感器被有效触发。

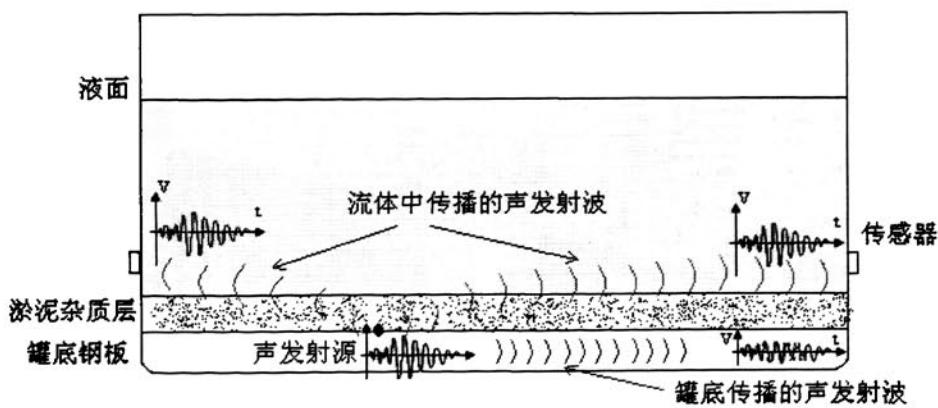


图 3.8 罐底声发射信号传播示意图

### 3.4 罐底声发射源的定位技术

由于罐底的一个声发射源信号可以被几个不同的声发射传感器接收到，因而可以根据传感器接收信号的时差对声发射源进行定位计算。立式储罐的外形结构是一个圆柱体，其定位实际上是平面定位的一种特例。在声发射源的定位方法中，可以进行平面源定位的方法有归一化正方阵定位法、平面正方形定位法、平面正三角形定位法和任意平面三角形定位法等<sup>[98]</sup>。在对储罐底板的声发射检测中，为了最大限度的利用仪器的现有通道数来覆盖最大的检测区域，以及方便现场对特定区域有针对性地重点监测，扩大使用范围，本文采用对探头布置要求较低而覆盖区域较大的任意三角形定位法来进行储罐底板缺陷定位技术的研究。

#### 3.4.1 声发射源的平面定位原理<sup>[99,100]</sup>

假定在平面上任意放置的三个传感器构成任意三角形（如图 3.9 所示），位置为  $S_0(x_0, y_0)$ ， $S_1(x_1, y_1)$  和  $S_2(x_2, y_2)$ ， $P(x, y)$  处有一声发射源，距  $S_0$  的距离为  $r$ 。

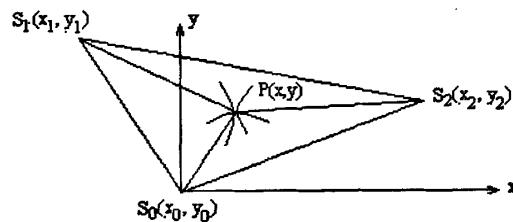


图 3.9 任意平面三角形定位原理图

声发射源信号从  $P(x, y)$  传至  $S_1$  及  $S_0$  的距离之差为  $\delta_1$  ( $\delta_1 = PS_1 - PS_0$ )，从  $P(x, y)$  传至  $S_2$  及  $S_0$  的距离之差为  $\delta_2$  ( $\delta_2 = PS_2 - PS_0$ )，即

$$\delta_1 = \Delta t_{10} \cdot v = (t_1 - t_0) \cdot v \quad (3-10)$$

$$\delta_2 = \Delta t_{20} \cdot v = (t_2 - t_0) \cdot v \quad (3-11)$$

式中， $t_0$ 、 $t_1$  和  $t_2$  分别是声发射信号到达三个传感器的时间； $\Delta t_{10}$  为声发射信号到达  $S_1$ 、 $S_0$  的时差， $\Delta t_{20}$  为信号到达  $S_2$ 、 $S_0$  的时差； $v$  为声波的传播速度。

声源  $P$  位于分别以  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  为圆心， $r$ 、 $r + \delta_1$ 、 $r + \delta_2$  为半径的圆的交点上，其方程分别为

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (3-12)$$

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = (r + \delta_1)^2 \quad (3-13)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = (r + \delta_2)^2 \quad (3-14)$$

将式(3-12)分别代入式(3-13)、(3-14), 整理可得

$$2xx_1 + 2yy_1 = (x_1^2 + y_1^2 - \delta_1^2) - 2r\delta_1 \quad (3-15)$$

$$2xx_2 + 2yy_2 = (x_2^2 + y_2^2 - \delta_2^2) - 2r\delta_2 \quad (3-16)$$

作极坐标变换, 令

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \end{cases} \quad (3-17)$$

且令

$$\begin{cases} A_1 = x_1^2 + y_1^2 - \delta_1^2 \\ A_2 = x_2^2 + y_2^2 - \delta_2^2 \end{cases} \quad (3-18)$$

可得

$$2r(x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta + \delta_1) = A_1 \quad (3-19)$$

$$2r(x_2 \cos \theta + y_2 \sin \theta + \delta_2) = A_2 \quad (3-20)$$

因此, 当  $x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta + \delta_1 \neq 0$ ,  $x_2 \cos \theta + y_2 \sin \theta + \delta_2 \neq 0$  时, 可得

$$r = \frac{A_1}{2(x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta + \delta_1)} = \frac{A_2}{2(x_2 \cos \theta + y_2 \sin \theta + \delta_2)} \quad (3-21)$$

等式两边变形, 从而有

$$(A_1 x_2 - A_2 x_1) \cos \theta + (A_1 y_2 - A_2 y_1) \sin \theta = A_2 \delta_1 - A_1 \delta_2 \quad (3-22)$$

令  $B = [(A_1 x_2 - A_2 x_1)^2 + (A_1 y_2 - A_2 y_1)^2]^{1/2}$ , 上式两边同除以  $B$  得

$$\frac{(A_1 x_2 - A_2 x_1) \cos \theta}{B} + \frac{(A_1 y_2 - A_2 y_1) \sin \theta}{B} = \frac{A_2 \delta_1 - A_1 \delta_2}{B} \quad (3-23)$$

对上式作余弦变换, 令

$$\cos \phi = \frac{A_1 x_2 - A_2 x_1}{B} \quad (3-24)$$

$$\sin \phi = \frac{A_1 y_2 - A_2 y_1}{B} \quad (3-25)$$

由于  $x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta + \delta_1 \neq 0$ ,  $x_2 \cos \theta + y_2 \sin \theta + \delta_2 \neq 0$ , 因此, 很明显  $\cos \theta$  与  $\sin \theta$  的系数均小于 1, 故根据余弦定理可取

$$\cos(\theta - \phi) = k \quad (3-26)$$

其中,  $k = \frac{A_2 \delta_1 - A_1 \delta_2}{B}$ 。

由式 (3-24) 和 (3-25) 可得

$$\tan \phi = \frac{A_1 y_2 - A_2 y_1}{A_1 x_2 - A_2 x_1} \quad (3-27)$$

上式中, 传感器的位置坐标  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  已知,  $A_1$ 、 $A_2$  可通过测得的声发射信号到达时差和传播速度  $v$  得到, 因此可确定  $\tan \phi$  的值, 则角  $\phi$  在  $[-\pi, \pi]$  范围内可确定。假设  $B \neq 0$ , 则  $\phi$  在  $[-\pi, \pi]$  内有两个解。

由式 (3-26) 得

$$\theta = \phi \pm \arccos \left( \frac{A_2 \delta_1 - A_1 \delta_2}{B} \right) \quad (3-28)$$

$\phi$  在  $[-\pi, \pi]$  内有两个解, 因此  $\theta$  在  $[-\pi, \pi]$  内有四个解。将  $\theta$  代入式 (3-21), 能够使公式两端的  $r$  值相等的为计算公式的解, 满足条件的解共有两个。

当声源较强时, 为避免同一信号被重复定位, 可以将其限制在三角形阵列内定位, 令  $r$  的最大值小于本阵列的最大边长与阵列交叠长度之和, 即

$$r_{\max} \leq \max \{S_0 S_1, S_1 S_2, S_2 S_0\} + \sigma \quad (3-29)$$

其中,  $\sigma$  值一般取阵列最大边长的 5%, 但当传感器布置较密 (储罐罐底板直径较小, 而传感器数量较多) 时, 可以将  $\sigma$  值适当加大, 以允许定位偏差的存在; 而传感器布置较稀疏时, 可以适当缩小  $\sigma$  值以防止重复定位。由式 (3-17), 即可确定声发射源的位置。

### 3.4.2 声发射平面定位法中特殊值的处理

进行上述计算的时候, 没有考虑某些特殊值出现的情况, 现在讨论如下:

(1) 当  $A_1 x_2 - A_2 x_1 = 0$  时,

可直接由式 (3-22) 变形得到

$$\sin \theta = \frac{A_2 \delta_1 - A_1 \delta_2}{A_1 y_2 - A_2 y_1} \quad (3-30)$$

即可求出  $\theta$  在  $[-\pi, \pi]$  内的两个解。

(2) 当  $B = [(A_1x_2 - A_2x_1)^2 + (A_1y_2 - A_2y_1)^2]^{1/2} = 0$  时, 方程等价于

$$\begin{aligned} A_1x_2 - A_2x_1 &= 0 \\ A_1y_2 - A_2y_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3-31)$$

即

$$\frac{x_1}{y_1} = \frac{x_2}{y_2} \quad (3-32)$$

这说明  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  和  $(0,0)$  三点共线, 不可能构成三角形阵列, 所以这种情况在实际检测中是不可能出现的。

(3) 当  $|k| = \left| \frac{A_2\delta_1 - A_1\delta_2}{B} \right| > 1$  时,

由于  $\cos(\theta - \phi) = k$ , 因此在理论上此类情况不可能发生, 但由于  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $B$  都是由传感器接收到信号的时间  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_0$  及波速  $v$  计算得到, 受到系统误差和计算误差的影响, 有时可能会出现  $|k| > 1$  的情况。此时一般令  $|k|=1$ 。显然, 此时继续按公式计算得到的  $r$  值肯定存在误差, 如果要求两个  $r$  值相等, 则可能会出现漏定位, 为此可以允许此时的两个  $r$  值存在一定的误差。

### 3.4.3 有效定位传感器阵列的确定

在立式储罐的声发射检测中, 传感器一般沿罐壁布置在罐的圆周上, 因此任意三个传感器连在一起都可以构成三角形网络。由于底板形状的特殊性(为平面圆板), 因此在接收到信号时, 相邻三个传感器对声源的定位要比不相邻的传感器定位准确(因为相邻的传感器接收到信号的最为相似)<sup>[101]</sup>, 因此, 需要确定只有相邻三个传感器构成的三角阵列才是有效阵列。如图 3.10 所示为采用六个传感器对储罐罐底进行检测时的传感器布置情况。

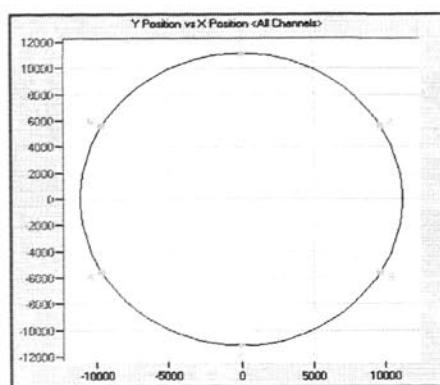


图 3.10 立式储罐声发射检测传感器布置图

在对罐底直径比较小的立式储罐检测时，只有传感器（1, 2, 3）、（1, 2, 6）、（2, 3, 4）、（3, 4, 5）、（4, 5, 6）和（5, 6, 1）才构成有效的任意三角形阵列。而在对罐底直径比较大的立式储罐（ $\phi \geq 10m$ ）进行检测时，考虑到声波在传播过程中的衰减，任意三个传感器都可能构成有效阵列。此时，一般采用最大距离判断法来进行有效三角形阵列的判断。首先设置一个最大传感器间距，当系统检测到有三个传感器被触发后，首先计算这三个传感器中任意两个传感器之间的距离，如果计算得到的三个距离均没有超过所设置的最大传感器间距，则认为这三个传感器处于有效的定位阵列中，反之则认为这三个触发不为同一阵列内的传感器，即不对该事件进行定位。

### 3.5 罐底检测声发射传感器的布置与标定

根据被检测储罐的结构、容积、高度、储存介质、介质温度等不同条件，应制定不同的声发射检测方案。传感器是声发射系统的关键组成部分之一，用于立式储罐底板检测的声发射传感器的谐振频率一般在 30~60 kHz 的范围内<sup>[102,103]</sup>。由于储罐内部淤泥、腐蚀物等杂质的存在，传感器的数量及布置位置与采集声发射信号的模态、数量，以及信号的分析难度有直接的关系。本文为此做了专门的理论及实验研究。

#### 3.5.1 传感器布置高度及间距

##### （一）传感器的布置高度

由于罐底的有效声源信号是通过罐内的油品介质进行传播的，因此，为了保证传感器能够接收到从油品中传播过来的有效声发射信号，传感器应布置在罐壁外侧距罐内淤积层上方 10~50 cm 处（罐内油品层内），一般为储罐底板上方 50~100 cm 处。

##### （二）传感器的数量（布置间距）

当罐底腐蚀点距离罐壁上的某些传感器位置较近时，通过罐底和罐壁传播的速度较快的声发射波（钢板中传播的纵波）很可能通过钢板率先到达附近的传感器。由上一节中罐底缺陷的声发射定位原理分析可知，某一模态的声发射波只有使三个（或三个以上的）传感器被触发，才会形成一个声发射定位事件。因此，为了避免三个传感器接收到由罐底钢板中传播的同一声源激励的声发射波，传感器之间的间距应该足够大。由声发射波在水载作用下钢板中的声发射波的传播和衰减特性可知，流体载荷作用下的钢板中，纵波在传播 8~10 m 后就会出现较大的衰减。如图 3.11 所示为一台容积为 3000 m<sup>3</sup> 的储罐，其直径为 15.49 m，沿罐

体同一垂直高度均布了 6 个传感器，传感器在圆周上的弧线距离为 8.11 m。图中点 S 为靠近罐壁边缘的腐蚀点，A、B、C、D 分别表示 2°、1°、6°和 5°传感器的位置，S 位于 B、C 之间。腐蚀点 S 距离 1°和 6°传感器均较近，其传播到 1°传感器的最短路径为 SB+0.5 m（0.5 m 为罐壁的高度），传播到 6°传感器的最短路径为 SC+0.5 m，两者为 4m 左右，因此钢板中传播的纵波会首先到达 1°和 6°传感器，但其传播至另外两个距离较近的传感器（2°和 5°传感器）的最短路径分别为 SA+0.5 m 和 SD+0.5 m，两者均超过了 12 m，因此钢板中传播的波已不足以使罐壁上的其它传感器被触发，由于被该模态的声发射波触发的传感器数量少于 3 个，因此，不会在罐底产生定位。

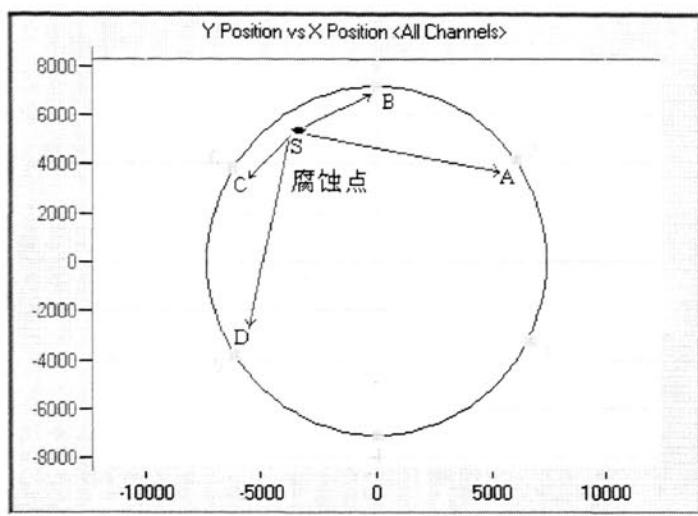


图 3.11 罐壁附近声发射源信号的传播途径

因此，罐底声发射传感器的布置间隔一般为 6~12m，最大不超过 15m。一般来说，容积在  $20000\text{ m}^3$  以上的储罐每圈需要安装 12 个以上的传感器； $5000\text{~}20000\text{ m}^3$  的储罐需要安装 8~12 个传感器； $5000\text{ m}^3$  以下的储罐需要安装 5~8 个传感器。

安装传感器时，应首先在储罐外壁上打磨出约  $\phi 30\text{mm}$  左右见金属光泽的区域，如果储罐外壁包有保温层，则需要先在保温层上开孔。传感器可用磁夹具、胶带或其它机械装置进行固定。前放可与传感器进行一体化封装，也可以单独封装。如果采用独立的前放，传感器与前放之间的信号线应不超过 2 m。信号电缆的长度（前放到信号主处理器之间的电缆）应不超过  $150\text{ m}^{[104]}$ 。信号线过长，会引起信号的过度衰减，并且也会增加电磁干扰和射频干扰。

### 3.5.2 检测通道灵敏度的标定

为使检测数据充分、结果可靠，检测前需要对所用通道进行标定，在达到灵敏度要求的前提下再开始进行检测。为使检测数据正确可靠，检测结束后需要对

所有通道再次标定，并记录无响应或低灵敏度的通道。

不同规格(容积或直径不同)的立式储罐，其定位标定方法不同。研究表明，对于间距小于 7 m 的声发射传感器阵列，采用国际上通用的 Nielsen-Hsu 断铅法或“AST”<sup>[105]</sup>方法进行定位标定，可获得较准确的标定结果。Nielsen-Hsu 断铅标定的具体的过程如下：在每个传感器开孔边缘标定位置处，使用 Nielsen-Hsu 标准自动铅芯，铅芯伸出长度为 2.5 mm，与罐壁表面成 30° 角，折断 5 次，取响应幅度的平均值作为该通道的灵敏度。各通道灵敏度与平均灵敏度的差不超过  $\pm 4$  dB，且各通道的灵敏度需大于 80 dB。

对于传感器间距大于 7 m 的声发射传感器阵列，则只能采用人工模拟声发射源的方法进行标定，标定结果虽然相对于 Nielsen-Hsu 断铅法重复性差，但定位精度尚能够满足工程检测的要求。

如果灵敏度不能达到要求，则需要进行调整或更换该通道的声发射检测元件，直至所有检测通道全部满足要求为止。

## 3.6 罐底声发射数据的采集

### 3.6.1 罐底声发射数据的采集

压力容器的声发射检测是在设备受压时进行的，而常压储罐不能给储罐加压，因此只能利用储罐介质本身的高液位，声发射检测时罐内液位达到最高液位的 80%~100% 为宜。在储罐刚注完油的过程中检测，由于液位还有波动，所以检测到的定位点较多且分散，对这些数据进行分析和评价相当困难。因此在实际检测中，每次改变液位后均需要静置一段时间（12~24 小时），待罐内介质的液面处于相对静止的情况下才进行数据的采集<sup>[106]</sup>。

一般情况下，在正式的检测开始之前，需要首先对背景噪声进行监测，在确定了低水平的背景噪声可接受之后，才可以进行声发射检测。

本文对某炼油厂的四台盛有不同介质的储罐进行了声发射罐底在线检测，以下分别简称为 1" 储罐、2" 储罐、3" 和 4" 储罐，四台储罐的使用年限为 10~30 年，分别用来盛放煤油、原油和汽油等不同介质。其中，容积为 5000m<sup>3</sup> 的 3" 和 4" 储罐在我国的石化企业中具有较强的代表性，而且这些储罐大多建造于上个世纪的 70、80 年代，已经进入了事故多发时期。四台储罐中，2"、3" 和 4" 储罐为浮顶式储罐，而 1" 储罐为固定顶式储罐。

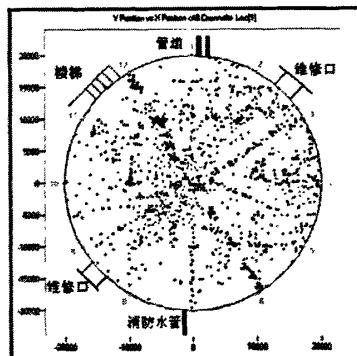
根据罐底声发射信号的特点及信号的有效传播路径，采用共振频率为 30 KHz 的低频传感器(R3A)对罐底进行检测，布置好传感器并对通道进行标定后，将储罐加载到指定液位，静置 12 个小时后开始数据采集。检测过程及现场检测

记录参见表 3.1。

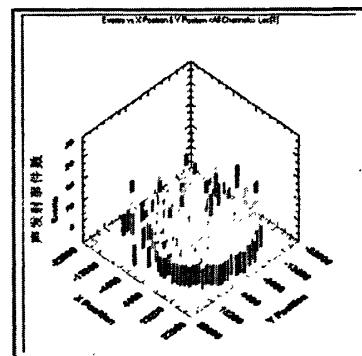
表 3.1 检测过程及现场检测的有关情况

储罐	检测通道数	传感器类型	检测时间	备注
1"储罐	6	R3I	10 min	在短时间内出现大量声发射事件，怀疑受到噪声干扰，检测过程被迫停止
2"储罐	12	R3A, 1224前放	1.5 h	未发现有明显噪声干扰及其它异常现象。整个测试过程顺利。
3"储罐	6	R3I	2.5 h	未发现有明显噪声干扰及其它异常现象。整个测试过程顺利。
4"储罐	6	R3I	1.5 h	未发现有明显噪声干扰及其它异常现象。整个测试过程顺利。

四台储罐的声发射检测平面定位图及三维显示图如图3.13~3.15所示，由于1"储罐在检测过程中受到干扰，故此处没有给出1"储罐的底板定位图。通过罐底定位平面示意图可以对储罐底板的腐蚀或泄漏源进行初步定位，而参考罐底的腐蚀和泄漏源的三维定位图可以对腐蚀的严重部位进行重点分析，并对罐底的完整性状况进行评估。



(a) 罐底定位平面示意图



(b) 罐底腐蚀情况三维显示图

图3.13 2"储罐的罐底原始数据定位图

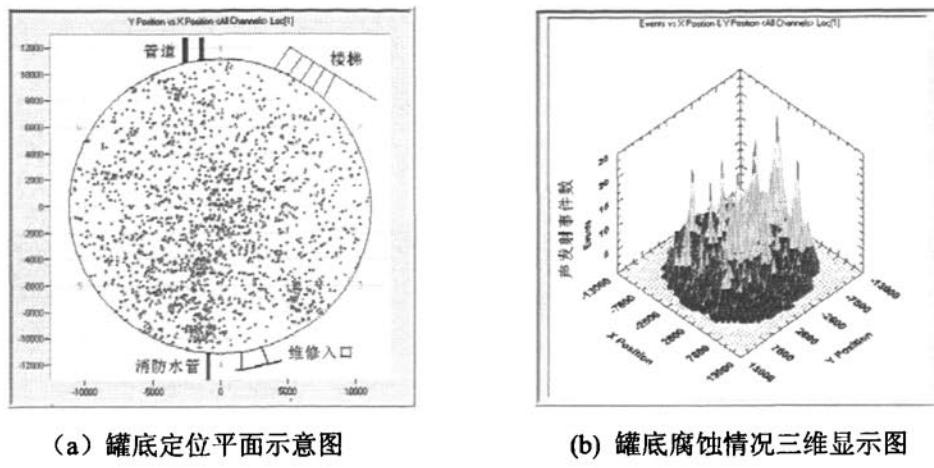


图3.14 3"储罐的罐底定位图

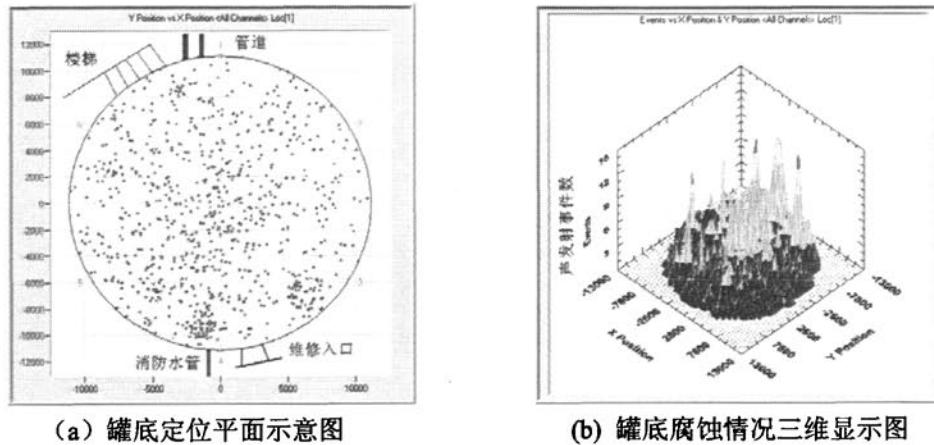


图3.15 4"储罐的罐底原始数据定位图

在平面定位图中标注了与储罐连接的管道、楼梯、消防水管及维修入口等的相对位置，以及传感器的相对位置及编号（图中的绿色数字为该编号传感器所处的位置）。罐底平面定位示意图中的红点代表了声发射事件的位置，红点越多，说明声发射源越密集。三维显示图中的X，Y坐标仍与平面图中的坐标一致，纵坐标Z表示在储罐底板不同位置的声发射事件数。

从2"储罐的原始定位图（图3.13）中，能够看出一些呈放射状的有规律的声发射事件分布，而3"储罐和4"储罐的原始定位图（图3.14和图3.15）中则显示了大量无规律的声发射事件。2"~4"储罐底板的声发射三维定位图中均出现了单点声发射事件较为集中的情况。

从数据采集时间上看，2"、3"和4"储罐的检测时间为2~3小时，而1"储罐仅采集了10分钟的数据，其获得的声发射事件就远远高于其它几台储罐的声发射定位数，整个罐底区域几乎都布满了定位点。可见，该储罐在检测过程中受到了较强的噪声干扰。根据罐底检测的经验，固定顶式储罐中盛放的如果是具有较

强挥发性的油品，在加热过程中会有一部分油品介质挥发到油品液面与罐顶之间的空气中，并在固定顶油罐的罐顶内部凝结。一段时间后，凝结的介质又会滴落在油面上，形成数量较多的噪声源。考虑到 1# 储罐是四个被检测储罐中唯一的固定顶油罐且采用了盘管加热器，其盛放的又是具有挥发性质的航空煤油，因此，可以判断 1# 储罐检测过程中遇到的噪声信号是来自罐顶液面的滴落噪声。对于这种来自与罐底声发射源相反方向的噪声，本文提出了一种基于双传感器组的声源方向识别技术，对罐底检测过程中声发射源的方向进行判断。

### 3.6.2 罐底检测中声发射源的方向识别

#### 3.6.2.1 基于双传感器组的声源方向辨识原理

罐顶滴落噪声直接在油品中传播，且与罐底泄漏信号十分相似，因此如果不加以消除，就会对罐底声发射源的性质做出错误判断，并直接影响到罐底结构完整性的评价结果。考虑到滴落噪声与罐底腐蚀信号的声源方向的不同，本文提出了基于双传感器组的传感器优化布置方案，即在检测传感器上方另外布置一圈辅助传感器，根据辅助传感器和检测传感器被触发的先后顺序，对声发射波的来源方向进行区分，进而达到屏蔽来自检测区域外的声发射源的目的。

如果辅助传感器组中有三个或三个以上的传感器被触发，则认为声源信号来自于罐底的相反方向。此时，可以通过不同的方法使随后被触发的主传感器组不对噪声源进行定位，以屏蔽非检测区域的噪声。例如，使主传感器组中的所有传感器在一段时间内闭锁；在闭锁时间内不进行任何定位计算。或者，在辅助传感器组形成有效定位后，对主传感器组中的下一个定位事件予以忽略。通过这些设置，可以有效抑制非罐底区域产生的声发射信号。

#### 3.6.2.2 辅助传感器数量及安装位置

##### (一) 辅助传感器的数量的确定

辅助传感器的数量一般与检测传感器的数量相同（如果声发射仪的检测通道数或系统的存储空间有限，也可适当减少，但不能少于 3 个），位于主传感器组正上方，如图 3.16 (a) 所示。当储罐外壁上存在特殊附属结构，如维修口、管道、阀门等时，辅助传感器也可以与主传感器交错布置，如图 3.16 (b) 所示。

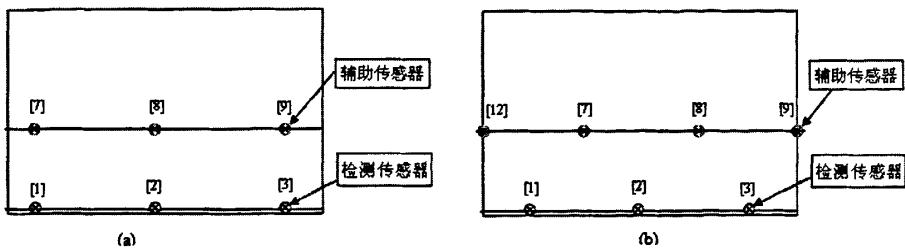


图 3.16 辅助传感器的安装位置

## (二) 辅助传感器的布置高度的确定

上一小节中提到, 当辅助传感器组产生定位事件时, 可令主传感器组中的所有传感器在一段时间内闭锁, 在闭锁时间内不进行任何定位计算, 以忽略滴落噪声产生的定位。其中, 主传感器的闭锁时间  $\Delta t$  可根据两传感器组之间的距离  $d$  以及声发射波在特定介质中的传播速度  $v$  来确定, 即  $\Delta t = d / v$ 。为了保证辅助传感器接收到的是真实的滴落噪声信号, 辅助传感器应尽量靠近噪声源(液面位置)。然而, 由于主传感器位置已经确定(距离罐底 0.5~1.0 m), 两传感器组间距离过大, 会导致主传感器的闭锁时间过长, 而使主传感器错失掉来自罐底的有效声发射信号。在对上述因素进行综合考虑后, 本文经过理论计算和实验验证, 证明了辅助传感器与主传感器之间的距离为 5~8 m 时, 能达到较好的实验效果。

以 1<sup>#</sup>储罐为例(如图 3.17 所示), 1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>传感器为检测传感器, 7<sup>#</sup>~12<sup>#</sup>传感器为辅助传感器。该固定顶式储罐的直径为 15.49 m, 高度为 14.1 m, 实验时液面高度为 12.5 m, 主传感器布置在距离罐底 1 m 高处, 辅助传感器位于距离罐底 9 m 高处。假定罐顶油品滴落点位于靠近罐壁位置, 2<sup>#</sup> 和 8<sup>#</sup> 传感器的正上方(其它位置的滴落在计算方法上与之类似)。罐顶滴落噪声通过油品传播, 首先触发辅助传感器(7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 和 9<sup>#</sup> 传感器), 并会产生一个定位事件。分别经过时间  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  和  $\Delta t_3$  后, 再触发主传感器(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 传感器), 油品中传播的纵波波速为 1450 m/s, 由于声源传播至辅助传感器和主传感器的最大路径之差为 2<sup>#</sup> 和 8<sup>#</sup> 传感器之间的直线距离, 故

$$\Delta t_{\max} = \Delta t_2 = \frac{SB' - SB}{v} = \frac{8}{1450} = 5.5 \times 10^{-3} s = 5.5 ms$$

因此, 在辅助传感器被触发后, 令主传感器在之后的 6ms 内闭锁, 即可忽略由罐顶滴落噪声引起的定位。

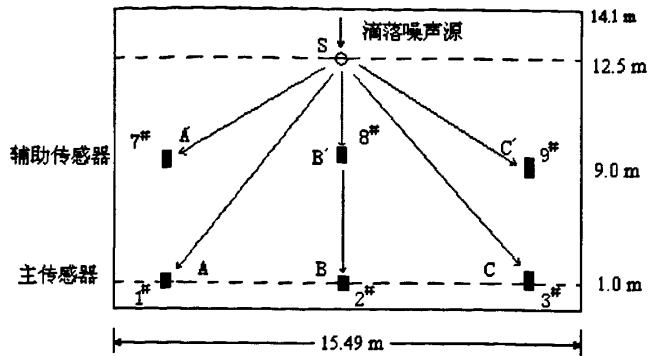


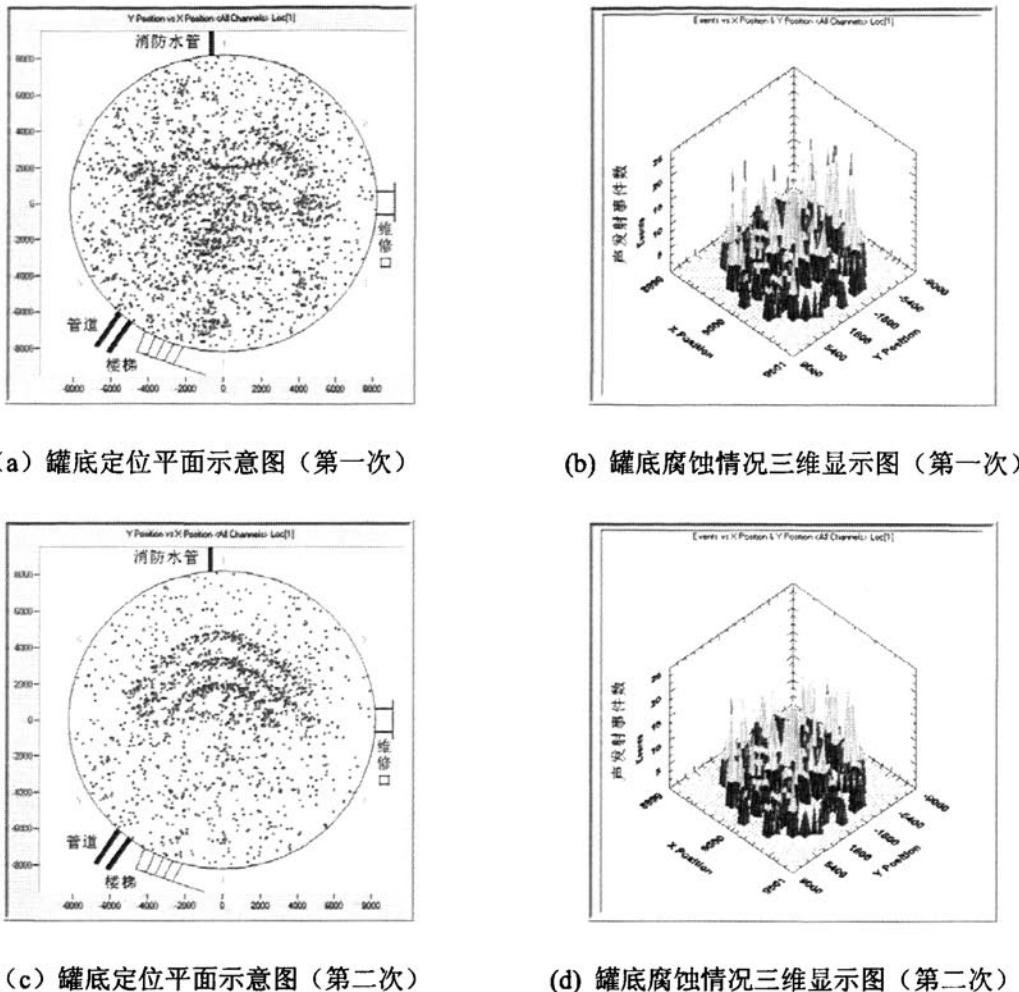
图 3.17 双传感器组的布置方案

对于辅助传感器组形成有效声发射定位事件后，即忽略主传感器的下一个定位事件的方法，本文也进行了研究。通过现场对两种方法的比较，我们认为，当罐底腐蚀情况较为严重时，宜采用在闭锁时间内不进行定位计算的方法，以消除滴落噪声的影响。因为此时如果采用忽略主传感器组的下一个定位事件的方法，则可能忽略了罐底缺陷的有效定位，而记录下滴落噪声产生的定位。当罐底腐蚀状况较轻微，声发射信号较少时，采用忽略主传感器组的下一个定位事件的方法，可以获得更“干净”的数据。

需要注意的是，虽然主传感器组在闭锁时间内不进行定位计算，但却会对所有超过阈值的声发射撞击都进行记录和保存，这对于数据的事后分析处理有一定好处，不过数据采集量过大又会造成数据处理速度减慢和存储空间紧张等其它问题的出现。因此，在安装传感器之前，需要确保声发射系统具有足够大的存储空间。

### 3.6.2.3 使用辅助传感器对 1# 储罐底板进行重新检测

按上述传感器优化布置方案，本文将辅助传感器布置于主传感器组正上方，与主传感器间隔 8.0 m，辅助传感器数量与主传感器相同。若辅助传感器组首先中形成声发射定位事件，则主传感器在 6 ms 内不进行任何定位计算，但记录下所有声发射撞击供事后分析。辅助传感器的固定方式与主检测传感器阵列相同，采用与检测传感器同样的标准进行通道标定，与主传感器同时开始数据采集。完成传感器安装与连线后，对 1# 储罐进行了重新检测（下面称为第二次检测），检测时间为 1.5 小时，定位结果如图 3.18 所示，图中 (a)、(b) 为采用单传感器组检测（第一次检测）形成的罐底平面和三维定位图，(c)、(d) 为采用双传感器组的优化传感器布置方案后检测（第二次检测）形成的声发射罐底平面和三维定位图。

图3.18 采用声源方向识别技术滤波前后的1<sup>”</sup>储罐底板定位图

由图 3.18 中 (a)、(c) 对比可知，在采用优化传感器布置方案后，滤除了大量油品滴落产生的干扰噪声。而且，在消除了滴落噪声产生的声发射事件后，从图 (c) 中能够清楚地看到三条同心圆弧状的声发射事件分布。

声发射罐底检测现场的环境一般都比较复杂，罐底的原始声发射数据中可能包含了大量的噪声信号，而且，储罐的特殊结构及特殊工艺等，均可能在声发射检测过程中产生噪声干扰信号。从四台储罐的原始声发射检测结果中可以看出，1<sup>”</sup>储罐的声发射源定位图呈现的三条同心圆弧状分布，而2<sup>”</sup>储罐的定位图则呈放射状分布。从检测现场获取的储罐的附属结构信息得知，1<sup>”</sup>储罐的罐底安装了盘管加热装置，而2<sup>”</sup>储罐采用了金属支撑结构，而且1<sup>”</sup>和2<sup>”</sup>储罐定位图中显示的这些有规律的声发射事件的位置与其罐底特殊装置的布置情况也存在较大的相似之处。因此，可以初步判断1<sup>”</sup>和2<sup>”</sup>储罐的声发射原始检测数据中可能包含储罐附

属结构噪声产生的定位。

由于罐底声发射检测数据中可能包含大量噪声信号，因此，直接根据原始声发射检测数据对罐底的腐蚀和泄漏情况进行评估时，很可能得出错误的评估结果。因此，在对罐底完整进行评价之前，需要对声发射检测过程中采集的原始信号进行模式识别，消除检测过程中由机械撞击、机械摩擦和电磁噪声等形成的噪声信号，这也是罐底声发射检测中关键技术的所在，本文将在下一章进行专门的讨论。

### 3.7 本章小结

本章主要研究了声发射波在无载荷和液体载荷作用下的结构中的传播和衰减特性，以及声发射的时差面定位原理，并由此确定了罐底声发射检测的传感器布置方案，在此基础上，获得了四台储罐的罐底声发射原始数据。本章主要工作如下：

- 1、研究了大型常压金属储罐底板声发射在线检测技术的基本原理，并确定了声发射在线检测过程中储罐底板的有效声源形式。
- 2、分析了声发射波在无载荷和水载作用下的钢板中的传播和衰减特性，研究了大型常压金属储罐内罐底有效声发射源的传播路径，并由此确定了罐底检测声发射传感器的频率及传感器的布置方案。
- 3、研究了声发射源的时差面定位技术，在罐底声发射检测中采用任意三角形网络传感器布置方法，最大限度地利用了传感器资源，扩大了罐底声发射检测的有效监测范围。
- 4、采用声发射技术对某炼油厂的四台不同容积、不同服役年限、分别盛放不同介质的立式储罐底板进行了在线检测，获取了罐底缺陷的原始实验数据，并初步分析了检测结果。
- 5、根据固定顶式储罐罐顶油品滴落形成的噪声与罐底泄漏噪声来源方向的不同，提出了基于双传感器组的声发射源方向识别技术，有效抑制了来自非罐底检测区域的噪声干扰。通过对容积  $3000\text{ m}^3$  的固定顶储罐的现场检测实验，验证了该方法的有效性。

## 第四章 声发射罐底检测信号的模式识别

### 4.1 引言

储罐在加载过程中，罐底裂纹的生成与扩展，夹渣、未熔合及未焊透等焊接缺陷的形成和增长，残余应力释放，氧化皮断裂和剥落，机械撞击，结构摩擦，泄漏和电磁噪声等均可能产生大量的声波信号。其中，裂纹扩展、腐蚀和泄漏是罐底常见的声发射源，也是需要在定位图中显示的声发射源，而机械冲击、机械摩擦和电磁噪声是罐底检测中普遍存在的干扰源，必须消除，否则就会影响罐底结构完整性评估的结果。本文采用神经网络模式识别技术对罐底声发射信号进行模式识别分析，解决了声发射检测过程中存在的噪声干扰和声发射源性质不明确等问题，为储罐底板的结构完整性评价提供可靠依据。

### 4.2 基于 BP 神经网络的罐底声发射信号模式识别

BP 神经网络在网络理论和网络性能方面均较为成熟，因此在工程应用中获得了最为广泛的应用。

#### 4.2.1 BP 网络及其模式识别原理

BP 网络实质上就是 1986 年 Rumelhart 提出的误差反传算法<sup>[107]</sup>，从网络结构看，它主要是由大量非线性神经元组成的多层前向网络。BP 网络的模式识别原理是通过网络自身的学习来实现输入  $l$  维学习样本向量  $X$  和输出  $n$  维分类向量  $Y$  的高度非线性映射，映射关系表示为：

$$Y = f_2(w_{nm} \times f_1(w_{ml} \times X)) \quad (4-1)$$

式中， $w_{ml}$  为输入和隐层之间的连接权值矩阵， $w_{nm}$  为隐层和输出层之间的连接权值矩阵， $f_1(x)$  和  $f_2(x)$  为神经网络的转换函数，一般采用 sigmoid 函数：

$$f(x) = \frac{1}{1 - e^{-x}} \quad (4-2)$$

BP 网络的学习过程包括网络的前向计算与误差反向传播计算，在前向传播过程中，输入向量  $X$  从输入层经隐层处理并传向输出层，每一层神经元的状态仅影响下一层神经元的状态，如果在输出层得不到期望的输出，则将误差反向传播，通过修正各连接权值使网络的总体误差达到最小。设有  $N$  对学习样本  $\{X_k, Y_k\}$ ， $d_k$  为每一个学习样本的期望输出，则神经网络的总体误差为：

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (Y_k - d_k)^2 \quad (4-3)$$

神经元之间的连接权值修正公式为<sup>[108]</sup>：

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \Delta w_{ij}(n+1) \quad (4-4)$$

$$\Delta w_{ij}(n+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (4-5)$$

当总体误差达到某一很小的预定值时，认为网络的学习过程收敛，网络实现了任意的  $X \in R^l$  到  $Y \in R^m$  的映射，具备了较强的非线性映射能力和模式识别能力。

神经网络用于信号模式识别的原理可简单归纳为通过学习样本的训练调整网络的连接权值，实现输入特征向量与输出模式层参数之间的非线性映射。设待识别的模式类别数为  $n$ ，根据前面的分析结果，网络的输出层单元个数应设为  $n$ ，属于  $j (1 \leq j \leq n)$  模式的输入向量的期望输出设置如下（其中第  $j$  个单元的输出设为 1，其余为 0）：

$$d_j = [0 \ \dots \ 1 \ 0 \ 0] \quad (4-6)$$

设输入特征向量  $x$  经过 BP 网络后的输出为  $y$ ，对于输出向量  $y$  中的数值进行如下处理：数值最大的置为 1，其它的置为 0，数值最大的输出单元位置设为  $k$ ，则该输入向量属于  $k$  模式。

在实际工程应用的声发射模式识别中，如果直接采用前面介绍的 BP 算法，在神经网络的学习训练过程中很可能出现训练时间长、收敛慢、甚至不收敛，陷入局部极小等问题。其原因主要在于 BP 算法从本质上是一种最速下降法，最速下降法的相邻两个搜索方向正交，当权接近极值区域时，每次迭代的步长很小，搜索沿相互正交的方向小步迈进，收敛十分缓慢，甚至不能收敛而在局部极小点附近产生振荡。共轭梯度法<sup>[109]</sup>利用已知点处的梯度构造一组共轭方向，并根据共轭方向搜索目标函数极值。共轭梯度法中搜索方向的产生不包含矩阵运算，计

算量和内存量比较小；而且其搜索在极值点附近收敛较快。

基于共轭梯度法的 BP 学习算法的权值修正公式为：

$$\Delta w_{ij}(n+1) = \eta \left( -\frac{\partial}{\partial w_{ij}} E(n) + \beta \Delta w_{ij}(n) \right) \quad (4-9)$$

其中

$$\beta = \frac{\left( \frac{\partial}{\partial w_{ij}} E(n) \right)^T \left( \frac{\partial}{\partial w_{ij}} E(n) \right)}{\left( \frac{\partial}{\partial w_{ij}} E(n-1) \right)^T \left( \frac{\partial}{\partial w_{ij}} E(n-1) \right)} \quad (4-10)$$

$$w_0 = -\frac{\partial E(0)}{\partial w_{ij}} \quad (4-11)$$

上式表明：共轭梯度法的搜索方向是从任一点的梯度构造的，因此初始点的选择对共轭梯度法性能优劣影响重大。

结合最速下降法和共轭梯度法的优点，首先利用最速下降法进行有限步的搜索，当搜索点接近目标函数最优解时，用该搜索点处的梯度方向构造共轭搜索方向，并采用共轭梯度法搜索目标函数极值。这样的算法更适合工程应用中声发射信号的模式识别。

此外，BP 网络中采用的 sigmoid 转换函数也是造成 BP 网络在声发射模式识别应用中收敛慢，易于陷入局部极小的原因之一<sup>[110]</sup>。对式 (4-2) 加上一个调整转换函数输出大小的因子 0.05，即：

$$f(x) = \frac{1}{1-e^{-x}} + 0.05 \quad (4-7)$$

再对 sigmoid 函数的输出加上适当的限制条件：

$$f(x) = \begin{cases} f(x), & f(x) \leq 0.95 \\ 0.95 & f(x) > 0.95 \end{cases} \quad (4-8)$$

对 sigmoid 函数加上限制条件后，可以降低 BP 网络的输入值落入 sigmoid 函数平坦区的几率。

### 4.2.3 罐底声发射信号模式识别神经网络的结构

神经网络的结构设计包括：网络的隐层个数，输入、输出层和隐层的节点个数，以及网络初始权值的设定等<sup>[111]</sup>。目前还没有统一的理论给出网络结构的最优设计，网络结构太小不利于解决工程问题，而网络结构太大则不仅对系统要求高，而且会导致网络的泛化能力下降。本文根据罐底声发射检测的工程应用经验，针对具体问题设计了适合罐底声发射信号模式识别的BP网络的结构。

#### 1. 输入层节点数的确定

神经网络用作实现模式识别的工程应用中，选择被研究对象的何种特征参数构成学习样本集是一个很重要的问题。不同性质的声发射源信号，其特征参数的取值范围也不尽相同，通过分析每种声源信号特征参量的取值范围及变化趋势，确定有效声发射信号特征参量的变化特点和取值范围，可以为人工神经网络提供典型的分析数据。本文根据罐底不同性质的声发射信号的特点，对每一个声发射撞击选取其原始波形的七个特征参数作为神经网络的输入，即信号的上升时间、峰值计数、平均信号电平（ASL）、信号均方电压（RMS）、持续时间、幅度和能量。

#### 2. 隐层个数的确定

根据Kolmogorov定理<sup>[112]</sup>，一个三层的BP网络足以实现实任意  $X \in R^l$  到  $Y \in R^m$  的映射。此外，BP算法的误差是通过输出层向输入层反向传播的，层数愈多，反向传播的误差在靠近输入层时变得愈不可靠，对权值修正的结果也就变得不可靠，同时隐层数增加也会造成BP网络过于复杂，降低BP算法的收敛速度。因此，本文将用于声发射信号模式识别的BP网络隐层个数设为1。

#### 3. 输出层节点数的确定

根据对罐底声发射源和干扰噪声的分析，本文以裂纹、泄漏、腐蚀、机械噪声和电磁噪声这五种声源作为神经网络的输出。

#### 4. 隐层节点数确定

隐层节点数的选择是神经网络结构设计中相对比较复杂的问题，它与输入输出层的节点数有直接的关系，隐层节点数选取过多，会使网络的训练时间过长，将导致网络收敛慢甚至不收敛，同时会降低网络的泛化能力；隐层节点数选取太少，则造成网络的容错性能降低。目前尚无确定的理论依据来确定BP网络的隐层节点数，主要是依靠经验公式<sup>[113]</sup>来设置隐层节点数。

$$N_{hl} = \text{int}^{+\infty} \left( \frac{N_{il} + N_{ol}}{2} \right) \quad (4-12)$$

式中,  $N_h$  为隐层节点数,  $N_i$  为输入层节点数,  $N_o$  为输出层节点数,  $\text{int}^{+\infty}$  表示朝正无穷大方向取整。根据输入层和输出层节点个数, 本文将用于罐底声发射信号模式识别的BP网络隐层节点个数设为6。

### 5. 初始权值的选择<sup>[114,115]</sup>

在 BP 算法学习过程的前向计算中, 对于同一个输入向量的计算结果, 初始权值起到决定性的作用。初始权值的选取范围直接影响神经网络的收敛性能和学习泛化能力。若范围过大将增加优化误差曲面中的局部极小的个数, 增加神经网络训练陷入局部极小的可能性; 权值范围选择过小, 将导致神经网络的权值差异较小, 影响收敛速度。对于声发射信号模式识别神经网络, 其初始权值通常选为小区间范围内的随机值。这样选取初始权值的优点可以令输入累加时每个神经元的状态值接近于零, 使得权值的变化在传递函数变化最大的地方进行, 以保证网络训练开始时不落入平坦区。不过, 选取随机值作为初始权值网络的性能不稳定, 有时甚至会造成网络无法收敛。

根据 Ngugen 和 Widrow 理论, 将输入层与隐层之间初始权值的设置公式定义为:

$$w_{ij} = \alpha N_i^{\frac{1}{N_i}} \times \text{random}_{ij} \times f_a \times r(x_j) \quad (4-13)$$

式中,  $w_{ij}$  为隐层第  $i$  个神经元与输入层第  $j$  个神经元的连接权值;  $N_i$  为隐层神经元个数;  $N_i$  为输入层神经元个数;  $\text{random}_{ij}$  为在 [-1,1] 之间的随机值;  $f_a$  为 BP 网络转换函数的输入有效区间范围系数;  $r(x_j)$  为第  $j$  个输入神经元的取值范围系数;  $\alpha$  为调整系数, 取 0.7。输出层与隐层之间的初始权值则设置为 [-1,1] 之间的随机值。

Ngugen-Widrow 方法根据使神经元的有效区间均匀地在输入层空间中分布的原则来设置神经网络的初始权值, 可以让每个神经元都能对输入向量做出贡献, 有利于提取输入向量的特征, 并且能充分利用每个神经元的性能, 从而起到提高网络性能的作用。

在对上述因素进行全面考虑后, 本文最终确定了用于罐底检测声发射信号识别的  $7 \times 6 \times 5$  的神经网络结构, 如图 4.1 所示。

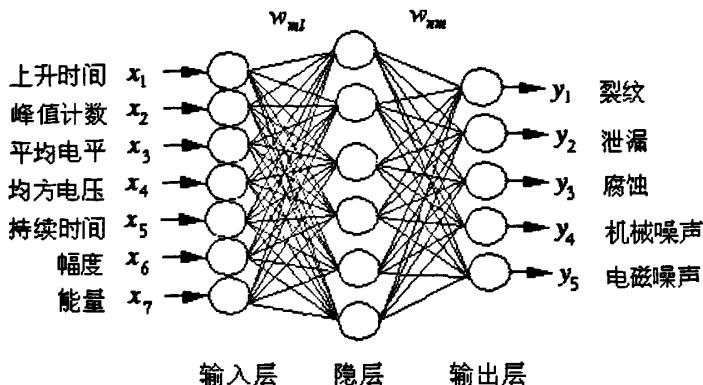


图 4.1 BP 网络的结构

#### 4.2.4 罐底声发射信号模式识别神经网络的训练

为了对本文所构建的罐底声发射信号模式识别神经网络进行训练，首先从典型声发射信号库中提取 150 组声发射信号作为样本数据（对应一个  $7 \times 150$  的数组）。将其中 90 组数据用于网络训练，其余 60 组数据用于训练后的验证。如表 4.1 所示。

表4.1 用于神经网络培训及测试的样本数据

样本类型	样本总数	裂纹信号	泄漏信号	腐蚀信号	机械噪声	电磁噪声
培训样本	90	18	18	18	18	18
测试样本	60	14	11	11	12	12

使一次网络训练停止的条件一般有三种：一是预先定义的最多迭代次数已经达到；二是预先定义的最小误差限已经达到；三是学习过程中出现调节梯度太小的情况。本文采用的第一种和第二种条件的组合，预先设定目标误差精度为 0.001，如果迭代 2000 次后仍不收敛则认为陷入局部极小。网络的初始权值按 4.2.1 节的研究结果设置，如图 4.2 为采用该 BP 网络训练后得到的误差函数随迭代次数变化的曲线。从图中可以看出，经过 625 次迭代后系统达到了设定的误差值。

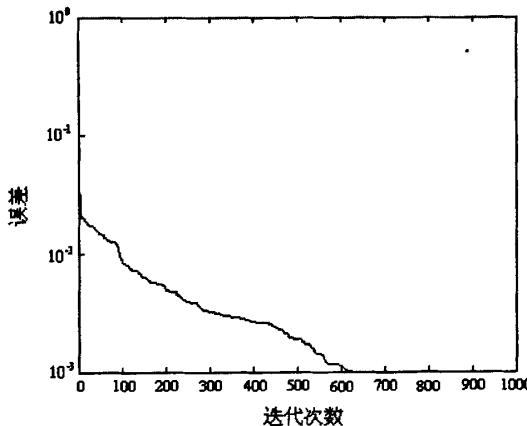


图 4.2 BP 网络训练误差曲线图

网络训练结束后使用剩余的 60 组样本数据对网络训练效果进行检验，获得的数据统计结果如表 4.2 所示。

表4.2 人工神经网络对五种声发射源测试数据的识别结果统计

声发射源	样本个数	裂纹	泄漏	腐蚀	机械摩擦	电磁噪声	正确识别率
裂纹扩展	14	11	0	3	0	0	78.5%
泄漏	11	0	10	0	0	1	90.9%
腐蚀信号	11	3	0	8	0	0	72.7%
机械噪声	12	0	0	0	12	0	100%
电磁噪声	12	0	0	0	1	11	91.7%

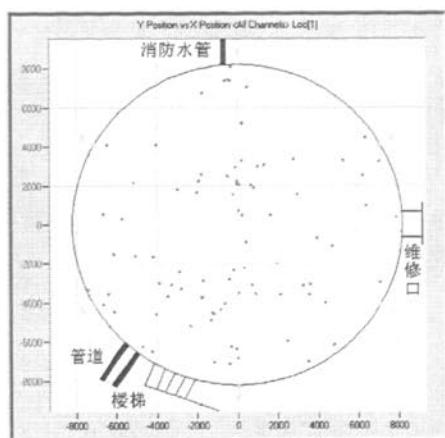
由表中可以看出，训练后的神经网络对噪声信号的识别率较高，机械摩擦噪声和电磁噪声的识别率分别为 100% 和 91.7%，而且，其中的误判也是发生在两种噪声之间的。可见，BP 神经网络可以对罐底的干扰噪声信号进行有效识别。

#### 4.2.5 罐底声发射检测数据的模式识别

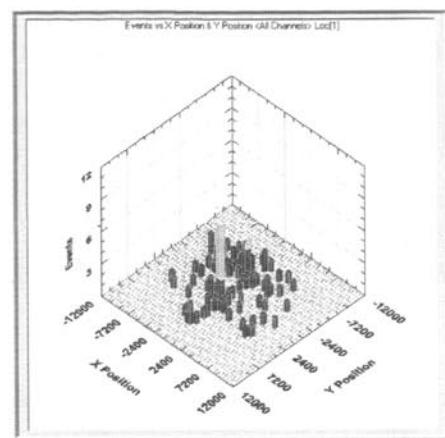
在上一章中，我们获取了四台储罐底板声发射在线检测的原始数据。通过对原始数据的分析可知，1#储罐和2#储罐的罐底检测平面定位图中，存在一些有规律的声发射事件分布。通过对储罐的附属结构及现场检测条件进行分析，并结合该储罐的历史检修记录，可以初步确定这些有规律的声发射事件是由罐底的其它干扰源所产生的。采用上一节中培训的人工神经网络对罐底的原始数据进行处理

后发现：1<sup>”</sup>储罐的声发射事件群是罐底的盘管加热器管路引起的机械摩擦噪声形成的定位；而2<sup>”</sup>储罐的定位群则多是由于罐底衬板振动导致的机械振动噪声所产生的；二者均属于机械噪声的范畴。而且，四台储罐的数据文件中均存在一定数量的由环境及电磁噪声引起的定位，这些定位是随机产生的，无规律性可言。此外，在四台储罐底板的有效声发射源中，均存在一定数量的裂纹信号和腐蚀信号，但没有发现泄漏声发射信号。

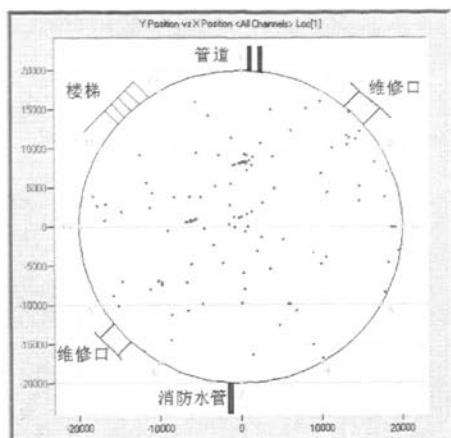
在去除掉原始数据文件中的大量由干扰噪声所形成的声发射事件后，可以得到新的罐底检测数据文件。通过对该数据文件进行重放，就能够得到新的定位结果图。处理后的四台储罐底板平面和三维声发射事件定位图如图4.3~4.6所示。



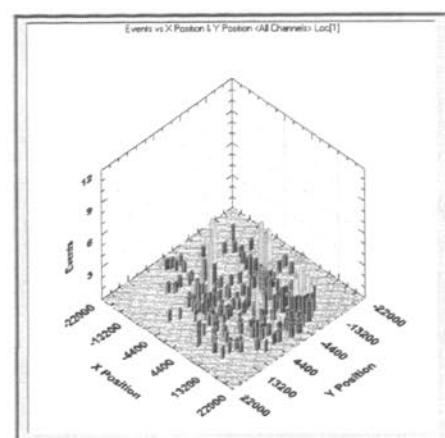
(a) 罐底腐蚀情况平面示意图



(b) 罐底腐蚀情况三维显示图

图4.3 模式识别分析后的1<sup>”</sup>储罐底板声发射事件定位图

(a) 罐底腐蚀情况平面示意图



(b) 罐底腐蚀情况三维显示图

图4.4 模式识别分析后的2<sup>”</sup>储罐底板声发射事件定位图

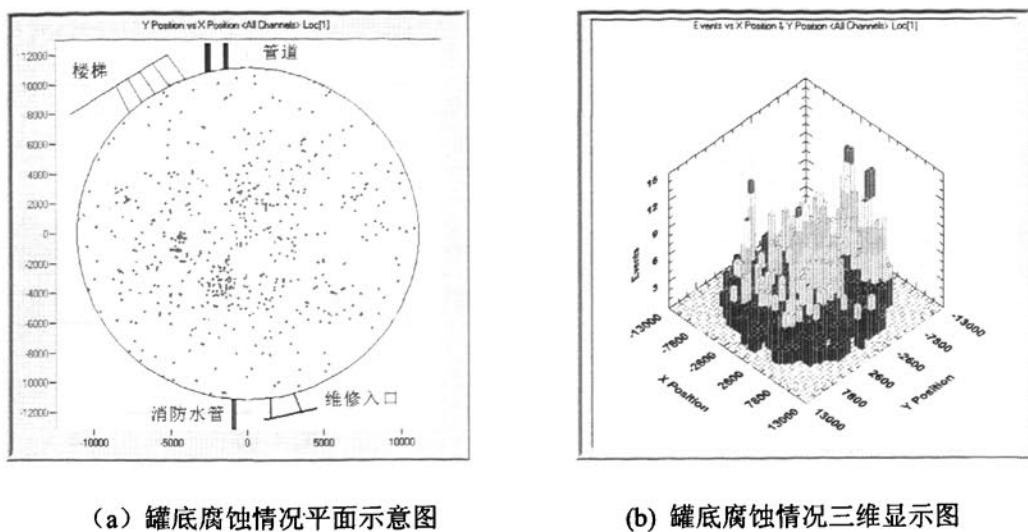


图4.5 模式识别分析后的3"储罐底板声发射事件定位图

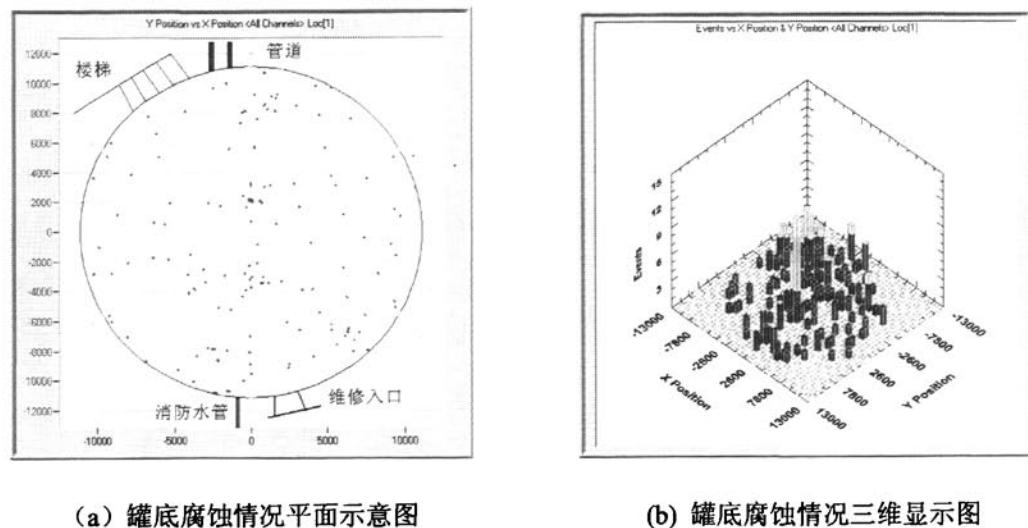


图4.6 模式识别分析后的4"储罐底板声发射事件定位图

从处理后的模式识别图中可以看出,四台储罐声发射检测数据文件中的定位(事件数)均有不同程度的下降,尤其是1"、2"和4"储罐的定位图中,声发射事件数有了较大幅度的下降。

#### 4.3 基于小波变换的神经网络性能优化方法的研究

本章上一节对神经网络的网络算法和网络结构进行了研究,并采用典型信号对训练后的神经网络进行了测试。由分析结果可知,该网络虽然可以消除现场的干扰噪声,但对于罐底有效声发射源的识别率还有待进一步提高。表4.2中,罐底的裂纹信号和腐蚀信号之间的相互误判率较高,有21.4%的罐底裂纹扩展产

生的声发射信号被识别成了腐蚀信号，而腐蚀信号中也有 27.3% 被识别成了裂纹信号。我们知道，裂纹扩展和罐底的腐蚀从性质上说是两种不同的声发射源，两者虽然都会在罐底产生定位，但危害程度却不完全相同。从某种意义上来说，储罐在使用一段时间后，罐底的腐蚀过程是时刻都在进行的，其形成破坏性结果所需要的时间相对较长；相比之下，罐底裂纹扩展的危害性则要大很多，而且其形成危害性后果的时间也短得多。因此，需要采取相应的信号分析手段获取罐底裂纹和腐蚀信号的更多特征，以便对这两类信号进行更有效的区分。

神经网络通过对学习样本的训练学习获取被研究对象的内在特征，学习样本所表示的相应模式特征信息的典型性和可辨识性越强，则通过网络的学习训练过程，神经网络获取被研究对象的内在特征越丰富，对被研究对象的模式识别能力越强。小波变换具有多分辨率分析的特点，其在时域和频域上都具有表征信号局部特征的能力，因此，利用小波变换把声发射信号分解到不同的频段，并提取不同频带上声发射信号的不同频率成分特征，作为神经网络的特征输入向量，可以提高神经网络训练样本的质量。

#### 4.3.1 分析声发射信号的小波基的选取

小波基是小波变换中的一个重要因素，小波基的选取对于准确提取声发射信号的特征具有重要意义。由于不同的小波基具有不同的时频特性，所以对同一个信号经过不同小波基进行变换后获取的信号特征分析结果往往也存在差异。一般情况下，对小波基进行分析时，主要针对紧支性、正交性、对称性和消失矩等特征。

根据声发射信号的特点及数据处理的要求，分析声发射信号的小波基函数应该是具有离散小波变换的小波基，且在时域具有紧支性，在频域具有快速衰减性，具有一定阶次消失矩的对称小波基<sup>[116, 117]</sup>。通过对常用的小波基进行分析可知，满足离散小波变换与时域具有紧支性要求的小波主要有：Haar小波、Daubechies小波、Symlets小波和Coitlets小波。为了便于对比分析，小波基的消失矩均取为8，即db8、Sym8、Coif4小波和Haar小波（消失矩为1）<sup>[118]</sup>，如图4.7所示。

Haar小波的时域局部分析能力最强，紧支长度为1，但是它的频谱不是快速衰减的，频域局部分析能力差。从时域波形看，Haar小波不具有近似指数衰减的性质。其它三种小波基在时域是紧支的，它们的频谱也都具有快速衰减性，时域波形也均具有一定的振荡衰减特性，并且这三类小波都具有一定的消失矩。因此，Daubechies小波、Symlets小波和Coitlets小波是适合于对声发射信号进行分析的小波基。

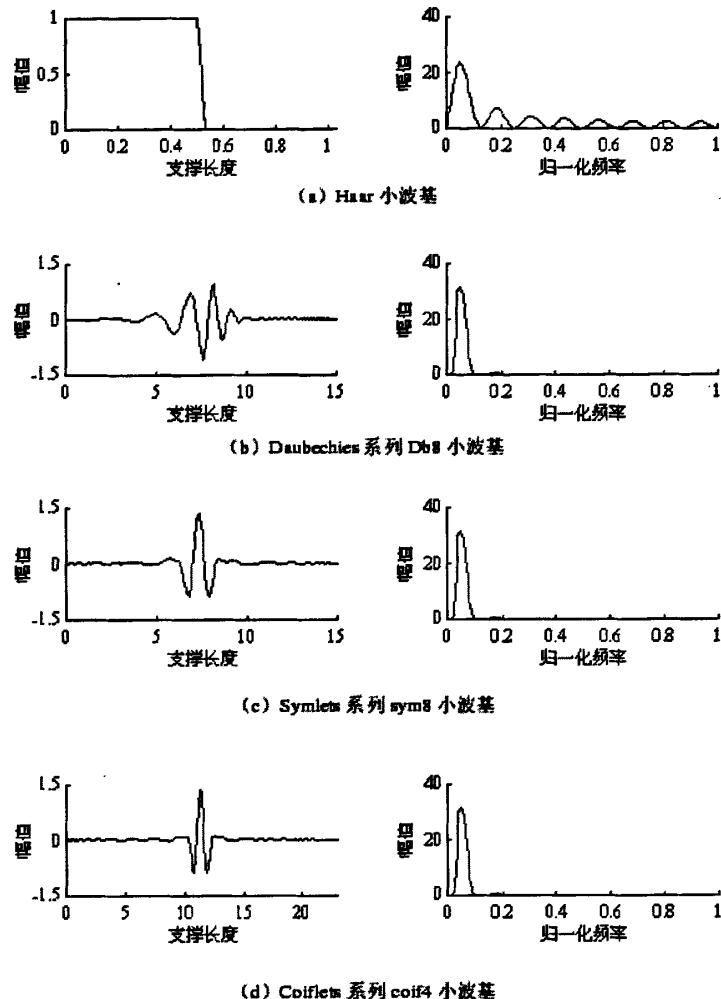


图4.7 四种常用的小波基函数

### 4.3.2 小波分解的频率范围和尺度的确定

通常根据 Mallat 算法对信号进行小波多尺度分析, 通过把信号分解成不同频率范围内的时域信号分量来实现信号的局部时频特性分析, 反映低频的局部信息表现在分解尺度较高的分解分量中, 反映高频的局部信息表现在分解尺度较低的分解分量中。

小波分解的每个尺度频率范围的可按如下方法确定<sup>[119,120]</sup>, 频率范围的确定不仅能进一步明确小波变换时频分析特性的物理含义, 同时也是对声发射信号的特征进行小波分析的前提和基础。

采样频率为  $f_s$  的信号  $f(n)$  进行  $J$  次小波分解后成为  $J+1$  个频率范围的信号,

每个频率范围为：

$$\left[0, \frac{f_s}{2^{J+1}}\right], \quad \left[\frac{f_s}{2^{J+1}}, \frac{f_s}{2^j}\right], \quad j = J, J-1, \dots, 1 \quad (4-14)$$

基于 Mallat 小波分解的最大分解尺度为：

$$J_{\max} = \min(\text{int}(\log_2 N), \text{int}(\log_2 \frac{N}{L_f}) + 1) \quad (4-15)$$

最大分解尺度公式表明：对信号进行小波变换的分解级数与信号的采样长度和选取的小波基直接相关。此外，若信号需分析的最低有效频率成分  $f_l$  为已知，则小波分解级数在满足上式的前提下，还应根据式 (4-14) 及  $f_l$  来确定，即

$$J \geq \log_2 \frac{f_s}{f_l} - 1 \quad (4-16)$$

### 4.3.3 小波特征频谱分析法<sup>[121,122]</sup>

采用 Mallat 算法对信号  $f(n)$  进行  $J$  尺度的分解，并对小波分解后的  $J+1$  个频率范围的成分进行重构，对应的时域信号为：

$$AJ, Dj, j = 1, 2, \dots, J \quad (4-17)$$

$AJ$  表示第  $J$  尺度小波分解的低频信息， $Dj$  表示第  $j$  尺度小波分解的高频信息。

对每个重构时域信号进行傅立叶变换，即可获取各分解尺度的详细频率信息：

$$\begin{aligned} AJF(N) &= \sum_{n=0}^{N-1} (AJ) e^{-j \frac{2\pi}{N} nw} \quad 0 \leq w \leq N-1 \\ DjF(N) &= \sum_{n=0}^{N-1} (Dj) e^{-j \frac{2\pi}{N} nw} \quad 0 \leq w \leq N-1, j = 1, 2, \dots, J \end{aligned} \quad (4-18)$$

采用上述方法对信号的每个小波分解尺度上的时域信号和频谱进行分析，能够提取出反映声发射信号特征的特征值。小波特征频谱分析的方法主要是根据声发射信号的特点确定包含声发射信号特征的小波分解尺度分量，并将这些尺度分量定义为特征频带，进行声发射信号的特征提取。

如图 4.8 和图 4.9 所示为两类声发射信号的波形及频谱图，其中信号 1 是裂

纹扩展引起的声发射信号，而信号 2 是钢板腐蚀引起的氧化皮剥落产生的声发射信号，信号的采样频率为 1MHz。

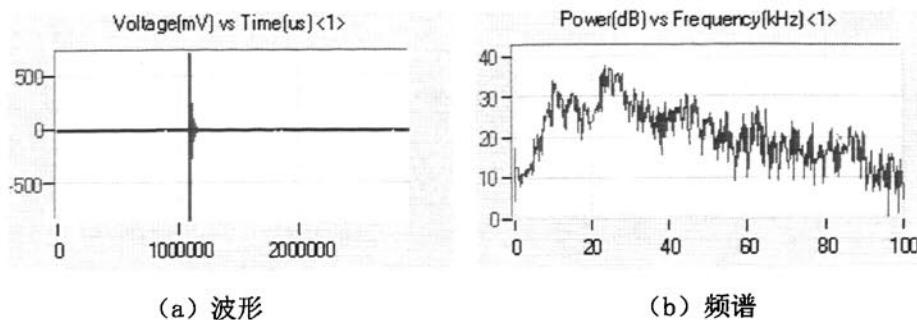


图 4.8 信号 1 的波形及频谱图

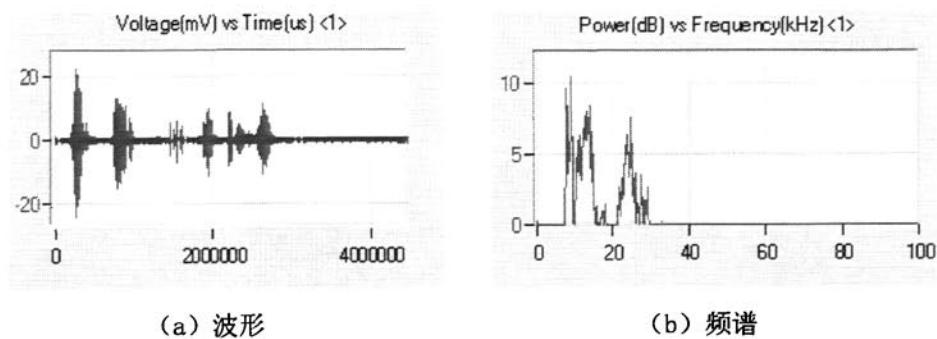


图 4.9 信号 2 的波形及频谱图

选择 db8 小波基，由式 (4—16)，对图 4.8 中的裂纹扩展信号进行 5 级小波分解，分解的结果为小波分析每个分解尺度的时域重构信号，如图 4.10 所示。图中标注的 s 为原始波形信号，a 和 d 分别表示经过小波分解后得到的低频信号和高频信号，a 和 d 后面的数字表示小波分解的级数。

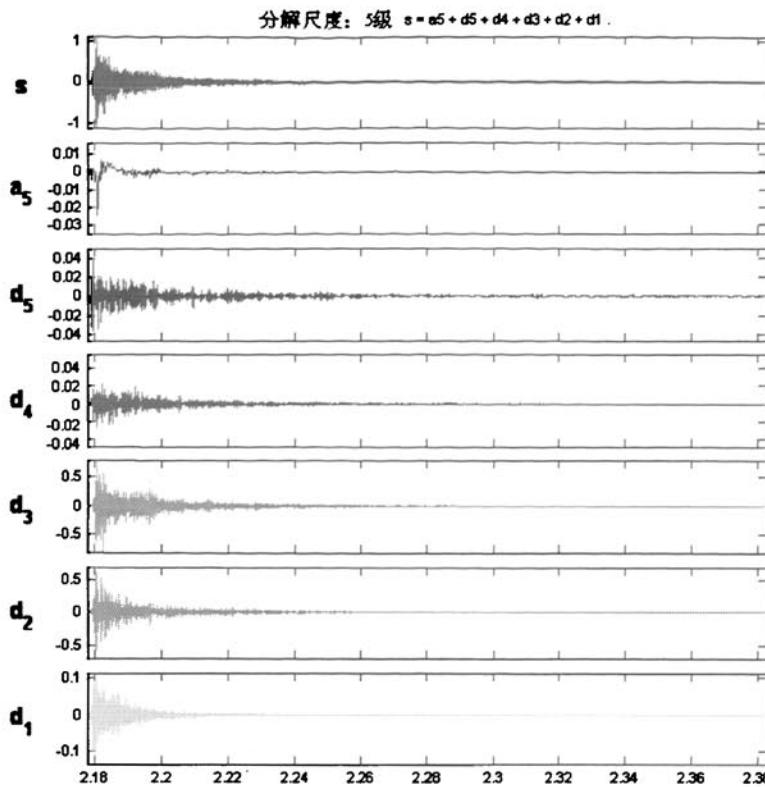
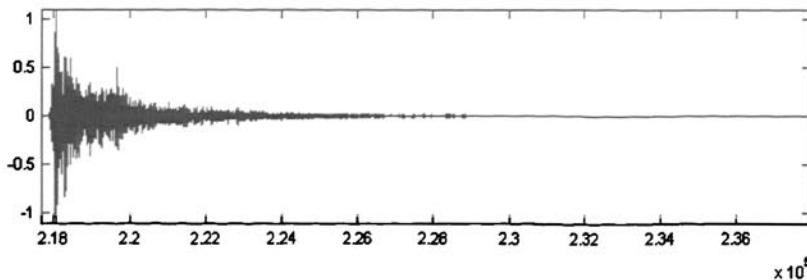


图 4.10 信号 1 小波变换后的结果 (db8 小波, 5 级分解)

根据小波特征频谱分析法对裂纹扩展信号的小波分解的各个尺度分量进行分析, 只有  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  分解分量中包含有近似指数衰减特性的分量, 则可确定  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  为裂纹扩展信号的特征频带。对  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  尺度采用小波重构算法, 可以得到的重构后的信号, 如图 4.11 所示。采用小波特征频谱分析可以识别出图 4.8 中的低频特征是噪声特性, 而不是裂纹信号的本质特征。

图 4.11 信号 1 小波特征频带  $d_1, d_2$  和  $d_3$  的重构信号

同样选择 db8 小波基, 对图 4.9 中的腐蚀信号进行 5 级小波分解, 小波分析每个分解尺度的时域重构信号如图 4.12 所示。

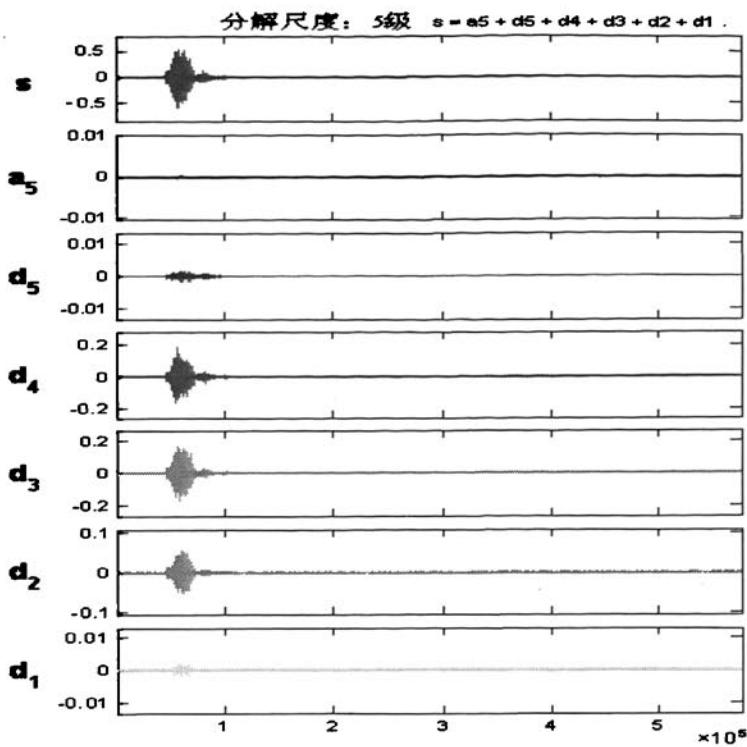
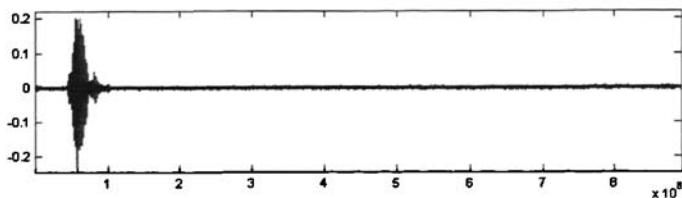


图 4.12 信号 2 小波变换后的结果 (db8 小波, 5 级分解)

根据小波特征频谱分析法对氧化皮剥落信号的小波分解的各个尺度分量进行分析,  $d_2$ 、 $d_3$  和  $d_4$  的分解分量中均包含有近似指数衰减特性的分量, 则可确定这三个分解尺度为腐蚀声发射信号的特征频带。则对  $d_2$ 、 $d_3$  和  $d_4$  三个尺度采用小波重构算法, 可以得到重构后的信号 (如图 4.13)。因此, 采用小波特征频谱分析可以识别出图 4.9 中高频和较低频特征是噪声特性, 而不是信号的本质特征。

图 4.13 信号 2 小波特征频带  $d_2, d_3$  和  $d_4$  的重构信号

#### 4.3.4 小波特征能谱分析法

声发射信号  $f(n)$  经过  $J$  个尺度的小波分解, 可分解为  $J+1$  个频率范围的分量, 即

$$f(n) = A_J f(n) + D_J f(n) + D_{J-1} f(n) + \cdots + D_1 f(n) \quad (4-19)$$

每个小波分解分量的能量定义为

$$\begin{aligned} E_J^A f(N) &= \sum_{n=1}^N (A_J f(n))^2 \\ E_j^D f(N) &= \sum_{n=1}^N (D_j f(n))^2 \quad j = 1, 2, \dots, J \end{aligned} \quad (4-20)$$

其中,  $E_J^A f(N)$  为信号在分解尺度  $J$  上的低频信号分量的能量,  $E_j^D f(N)$  表示信号在分解尺度  $j$  上的高频信号分量的能量。

由于小波分解的每个尺度对应的是信号中不同频率范围内的分量, 所以每个尺度的能量与信号的频谱分布有关, 这里将每个小波分解分量的能量与信号总能量比值定义为信号的小波特征能谱系数<sup>[123]</sup>, 即

$$rE_J^A = \frac{rE_J^A f(N)}{Ef(N)}, \quad rE_j^D = \frac{rE_j^D f(N)}{Ef(N)}, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (4-21)$$

其中,  $rE_J^A$  表示信号在分解尺度  $J$  上的低频信号分量的小波特征能谱系数,  $rE_j^D$  为信号在分解尺度  $j$  上的高频信号分量的小波特征能谱系数,  $E$  为信号总能量。

小波特征能谱系数表征的是信号能量在小波分解的每个频率范围中的分布情况。信号在不同频段上的能量分布不同, 必然是由于信号中包含有不同的信息造成的, 对于声发射信号而言, 则主要是由声发射源的不同特征造成的。

若信号经小波分解后特征主要分布在其中的几个分解尺度上, 则说明其它的分解尺度包含的是噪声信息, 对于这类信号, 可先用特征频谱方法提取信号的特征频带并对信号进行重构, 之后提取重构声发射信号的小波特征能谱系数才能真正反映声发射源的特征。

对 4.3.3 节中的裂纹和腐蚀产生的氧化皮剥落声发射信号进行特征频谱分析的基础之上, 小波基仍取 db8, 分解尺度为 5, 对所确定的特征频带采用小波特征能谱系数进行分析, 分析结果如图 4.14 和 4.15 所示。

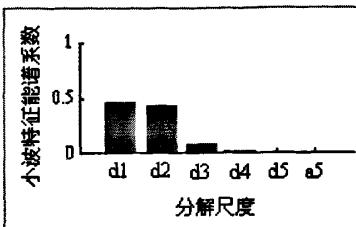


图 4.14 信号 1 的小波能谱系数分析图

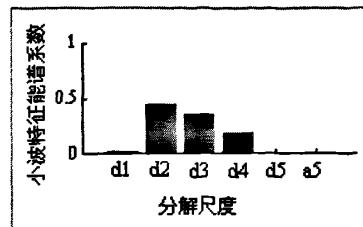


图 4.15 信号 2 小波能谱系数分析图

图 4.14 和 4.15 表明：裂纹产生的声发射信号的能量主要集中在 d1、d2 和 d3 尺度上；而腐蚀引起的氧化皮剥落声发射信号的能量则主要分布在 d2、d3 和 d4 三个尺度上，且各频带能量分布相对均匀。由此可见，储罐的裂纹扩展产生的声发射信号与氧化皮剥落导致的腐蚀信号的不同特征也可以通过小波特征能量分析的方法予以区别。而且，小波能谱系数对声发射信号的特征描述也非常简单直观。

#### 4.3.5 基于小波特征系数的声发射模式识别神经网络

小波分析能够把声发射信号分解成不同频率范围的分量，由于不同类型声发射信号包含的信息成分不同，经过小波分解后，声发射信号中的信息成分在各分解尺度分量中的分布也存在差异，故不同的声发射信号小波分解特征频段上的特征频谱或能谱系数也存在差异。因此，选择声发射信号特征频段的特征系数，作为神经网络的学习样本集，可以进一步提高神经网络的性能。

##### (一) 以小波能谱特征向量作为神经网络的输入向量

由图 4.15 和 4.16 可知，裂纹扩展过程中产生的声发射信号的能量主要分布在 d1、d2 和 d3 尺度上，而腐蚀引起的氧化皮剥落信号的能量则主要分布在 d2、d3 和 d4 三个尺度上，且两信号在三个频带的能量分布系数也不相同。本文采用 db8 小波基对典型信号库中的 18 组裂纹信号、18 组腐蚀信号进行 5 级分解，以信号 d1、d2、d3 和 d4 频段的小波能谱系数作为输入节点，裂纹和腐蚀信号作为输出节点，建立一个  $4 \times 3 \times 2$  的小型神经网络，目标误差精度及最高迭代次数的设置均与上一节相同。采用训练后的网络对测试样本中 14 组裂纹扩展信号、11 组腐蚀信号声发射信号进行识别后的结果如下：

表4.3 基于小波能谱系数的人工神经网络对罐底裂纹及腐蚀信号的识别结果

声发射源	样本个数	裂纹	腐蚀	正确识别率	平均识别率
裂纹信号	14	13	1	92.9%	96.5%
腐蚀信号	11	0	20	100%	

由表 4.3 可知, 采用基于小波能谱系数的人工神经网络对罐底的裂纹及腐蚀信号进行分析时, 腐蚀和裂纹信号的正确识别率有了较大提高。

### (2) 以小波频谱系数作为神经网络的输入向量

此外, 也可以采用声发射信号小波特征频谱分析的方法对声发射信号进行分析。即提取表征信号特征的特征频带, 并利用特征频带对信号进行重构。重构的信号包含了信号的本质特征, 并且去除了干扰噪声的影响。提取重构信号的时域或频域信息, 作为特征向量来构造神经网络的学习样本集。例如, 选择重构信号的频谱信息作为声发射信号的特征向量, 特征向量可表示为:

$$F = \left\{ F_w \left( i \frac{f_h - f_l}{N} + f_l \right), i = 0, 1, \dots, N-1 \right\} \quad (4-22)$$

式中,  $F_w$  为小波重构信号的频谱函数,  $f_l$  为信号的有效频率范围的下限,  $f_h$  为信号的有效频率范围的上限,  $N$  为特征向量提取个数。通过在特征频谱的有效范围内等间隔的提取频谱值, 可以构成特征向量作为神经网络的输入参数。

对于采用 db8 小波进行 5 级分解后的罐底裂纹扩展信号和腐蚀信号, 在对特征频段进行重构后, 由信号的频谱分析可知, 信号的频谱主要分布在[20KHz, 140KHz] 的频率范围内, 则在该范围内, 以 4 KHz 为间隔取 30 个频谱构成特征向量。

以典型信号库中的 18 组裂纹扩展信号、18 组腐蚀信号作为培训样本, 对测试样本中 14 组裂纹扩展信号、11 组腐蚀信号声发射信号进行了识别, 神经网络的结构选为  $30 \times 16 \times 2$ , 目标误差精度及最高迭代次数的设置均与上一节相同。识别结果如下:

表4.4 基于小波频谱系数的人工神经网络对罐底泄漏源的识别结果

声发射源	样本个数	裂纹	腐蚀	正确识别率	平均识别率
裂纹信号	14	13	1	92.9%	96.5%
腐蚀信号	11	0	20	100%	

由上表可以看出, 采用小波能谱系数和小波频谱系数作为神经网络的输入向量, 对裂纹信号和腐蚀信号的分辨率基本相同。

### (3) 原始波形参数与小波特征向量共同作为神经网络的输入向量

由表 4.2 罐底声源的模式识别结果可知, 罐底泄漏源的正确识别率为 90.9%, 这一比例虽然不是很低, 但泄漏源作为罐底最危险的声发射源, 神经网络的重点

识别对象，是需要想尽一切办法提高其识别率的。泄漏产生的声发射源是连续型声发射信号，其与罐底裂纹扩展和腐蚀引起的氧化皮剥落信号（突发型声发射信号）相比有比较明显的差别，因此相互之间的误判率很低。泄漏信号与噪声信号虽然在上升时间、峰值计数、平均信号电平（ASL）、信号均方电压（RMS）、持续时间、幅度和能量等参数（上一节中作为神经网络的输入向量的声发射参数）上存在一定差异，但二者之间也存在某种相似之处，例如，二者同是连续型声发射信号，而且二者在单位时间内产生的信号量都比较多。从某种意义上来说，电磁噪声信号是不可能完全消除的。因此，在神经网络的识别过程中，可能就会出现一定的偏差。对于这一问题，本文采用小波分析方法对声发射信号进行了分析。

从典型信号库中抽取泄漏声发射信号和机械噪声、电磁噪声信号的波形及频谱，对其采用小波特征频谱分析方法进行分析（coif4, 6 级分解），可知 d1 和 d2 频带包含泄漏的主要特征信息，是检测信号的特征频带，用 d1 和 d2 频带对声发射信号进行重构，并对重构信号进行频谱分析可知，信号的频谱主要分布在 [20KHz, 100KHz] 的频率范围内，则在该范围内，以 5 KHz 为间隔取 16 个频谱构成特征向量。

由于原始波形参数也能够反映相当一部分的声发射信号特征，因此保留了平均信号电平、信号均方电压、幅度和能量，与频谱信号一同作为神经网络的输入向量，以典型信号库中的 18 组泄漏信号作为培训样本，对测试样本中 11 组泄漏信号、12 组机械噪声信号、12 组电磁噪声信号进行了识别，神经网络的结构选为  $20 \times 12 \times 3$ ，目标误差精度及最高迭代次数的设置均与上一节相同。识别结果如下：

表4.5 基于小波频谱系数的人工神经网络对罐底泄漏源的识别结果

声发射源	样本个数	泄漏	机械噪声	电磁噪声
泄漏	11	11	0	0
机械噪声	12	0	11	1
电磁噪声	12	0	12	0

可见，小波频谱系数与声发射波形参数相结合，共同作为神经网络的输入向量，可以提高我们最为关注的罐底泄漏声发射信号的有效识别率。

采用小波特征向量对BP神经网络的性能进行优化后，本文采用该网络对四台储罐的罐底声发射源信号进行了分析，结果如表4.6所示：

表4.6 四台储罐的罐底分级评价结果

储罐	腐蚀信号情况	裂纹扩展信号	是否存在泄漏源
1"储罐	较少	少	否
2"储罐	较少	少	否
3"储罐	大量	中等	否
4"储罐	较少	少	否

由于在储罐的检测过程中，获取的数据量相当大（一是信号数量多，二是通道数多，而每一个有效声发射信号都会至少触发三个通道，有的也会同时触发所有通道），因此不可能将所有的数据都进行波形记录，在采用小波分析进行前处理时，采用的是系统在特定时间间隔所记录的波形信号，因此无法用确切的比例来表示信号数量的多少，故表中采用了大致的分级。从上表中可以看出：四台储罐的声发射源定位事件主要是腐蚀信号产生的，1"、2"和4"储罐不存在严重的裂纹扩展信号；而3"储罐的声发射源有效定位数据中，则出现了一些裂纹扩展信号；四台储罐的罐底均未发现泄漏声发射信号。

#### 4.4 声发射罐底结构完整性的评价

通过建立不同的神经网络对罐底声发射检测数据进行模式识别，本文已经实现了罐底有效声发射源信号的识别及声发射源性质（危害程度）的判断。在此基础上，即可根据罐底声发射信号的频度和活动度等参数，对罐底结构的完整性进行评价。

##### 4.4.1 罐底缺陷严重程度评价参数的选取

储罐底板平面定位图上的定位点对应着检测时间段内产生的声发射事件，其密集的程度与罐底板的腐蚀或泄漏情况有关。由于罐底检测时间较长，在检测过程中，某一位置的声发射源会发出的数量不等的声发射信号，这些信号被声发射系统检测到后，很可能出现定位重合的现象，即多个声发射事件在罐底平面定位图上仅形成一个定位点。因此，在对罐底完整性进行评价时，仅仅依靠定位图是不够的，还需要对检测过程中声发射事件的总体参数进行综合分析。

在对结构缺陷形成的声发射信号的危害程度进行评价时，一般都选择声发射信号的基本参数，如累积计数参数、变化率参数和统计参数等<sup>[124]</sup>。累积计数参数是指在一个声发射检测过程中，声发射信号某一特征量的累加值。这一类参数是材料内部结构变化累加效果的外部表现，从整体上描述了声发射源的总强度。

主要包括声发射总事件数、振铃总计数、总能量、幅度总计数、大事件计数等；变化率参数反映的是在一定条件下声发射信号在单位时间内的变化情况，是声发射信号瞬间特征的描述，同材料内部的变形速率以及裂纹扩展速率有直接关系。主要包括事件计数率、振铃计数率和能量释放率等；统计参数指的是材料在某一力学过程中声发射性能的统计规律。主要包括幅度分布、频率分布和持续时间分布等。

通过对罐底有效声发射源的特征分析，以及各声发射参数的物理意义及其对声发射过程的描述作用，在参考相关检测经验及国外文献的基础上，本文采用最大单通道事件数、幅度总计数和能量释放率三个参数，在结合上一节中对罐底声发射源性质的判断，对罐底缺陷的严重程度进行评估。

#### 4.4.2 罐底缺陷严重度评价的影响因素<sup>[125-127]</sup>

在对储罐底板腐蚀状况的严重程度进行评价时，由于储罐的结构、材质、高度、容积及内容介质等因素的影响，即使罐底的腐蚀程度完全相同，罐底缺陷产生的声发射事件数等评价参数的取值范围也会存在一定差异，因此应采用相应的影响因子对其进行修正。

##### (1) 储罐材质的影响

不同的材料有不同的声发射特性，储罐材质的不同将直接影响到声发射信号在传播过程中的衰减率和缺陷有害度评价中的能量释放率等参数。不过，由于我国的常压立式储罐的罐底一般都采用相同材质，即 A3F 钢，故材质方面差异的影响可以忽略。

##### (2) 储罐内介质的影响

在现场检测中，传感器布置在储罐的外壁，罐底声发射源产生的信号在通过介质传播时有一部分能量要被介质吸收，介质的粘度不同，信号的能量损失率也不同（参见第二章声发射信号衰减分析部分）。因此，引入介质粘度影响因子  $k_j$ ，当储罐内盛放介质为水时， $k_j = 1$ 。

##### (3) 检测时罐内液位的影响

在采用声发射方法对常压储罐的罐底进行检测时，我们要求罐内液位高度达到最大操作压力（最高液位）的 80%~100%。液位的高度不同使得罐底在检测时承受的压力也不同（ $P = \rho gh$ ，即底板承受的压力与高度成正比）。而不同压力下，罐底裂纹扩展和锈皮开裂等声发射事件源的表现活度，即检测期间声发射信号随着载荷或时间增加变化的程度也不同，表现在评价参数上即是能量释放率和总事件数的不同。因此，引入检测液位高度影响因子  $k_{hn}$ ，取 11900mm 高储罐的

最大操作压力的 90% 的影响因子为 1，当储罐为其它高度时，有

$$k_{hn} = 1 + \alpha_h \left( \frac{H}{9900} \right)^2 \quad (4-34)$$

式中， $-1 \leq \alpha_h \leq 1$ ，当  $H = 11900$  时， $\alpha_h$  取 0。

#### (4) 储罐底板直径影响

相同体积的储罐中，底板的直径也可能不同。储罐的体积一般从  $400\text{m}^3$  到  $100000\text{ m}^3$  不等，其中我国石化企业中最为普遍、使用最为广泛的是体积为  $5000\text{ m}^3$ 、规格为  $\phi 22880 \times 11900$  的储罐。当底板直径不同时，声发射信号的能量释放率、幅度分布、定位率或其它评价参量相同时，罐底的等级也不相同的，因此，必须介入底板直径影响因子。如果罐底定位分散，单位面积上定位点均匀，则直径影响因子主要表现在能量释放率上。如果单位面积上能量释放率相同，则可用与标准储罐相同的标准评价，即罐底直径的影响因子为 1；如果不同，则需要对能量释放率引入修正因子  $k_{dn}$ ：

$$k_{dn} = \alpha_d \left( \frac{\phi}{22880} \right)^2 \quad (4-33)$$

当  $\phi = 22880$  时， $\alpha_d$  取 1。

#### (5) 温度的影响

在不同的温度下，材料发生变形和断裂的形式也不同。同一材料在高温下易于塑性变形，连续型声发射比较活跃。随着温度降低，往往由塑性断裂变为脆性断裂，容易出现突发型声发射，声发射强度和活动性都会增大。温度的影响主要包括外界检测环境温度和罐内油温的影响。由于罐内盛放的介质不同，其需要保持的温度也不相同，因此引入温度系数  $k_w$  来对不同温度下罐底产生的声发射累积参数进行修正。

### 4.4.3 罐底缺陷严重程度的划分及完整性分级

根据储罐底板的最大单通道事件数，总幅度计数和能量释放率，并相应考虑储罐的结构尺寸、介质、液位高度等因素的影响，将罐底缺陷的严重程度划分为五个级别，参见表 4.7。其中  $a$ 、 $b$  和  $e_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 的值是根据不同储罐的介质粘度系数  $k_j$ 、液位高度系数  $k_{hn}$ 、罐底直径系数  $k_{dn}$  和温度系数  $k_w$  等进行修正后确定的。

表4.7 罐底缺陷声发射源严重程度的划分

声源等级	声源总事件数 $A$	总幅度计数 $B$	能量释放率 $E_a$	罐底情况
I 级	$A < a$	$B < b$	$E_a < e_1$	很好
II 级	$a \leq A < 2a$	$b \leq B < 2b$	$e_1 \leq E_a < e_2$	较好 (轻微腐蚀)
III 级	$2a \leq A < 20a$	$2b \leq B < 20b$	$e_2 \leq E_a < e_3$	一般 (有一定腐蚀)
IV 级	$20a \leq A < 200a$	$20b \leq B < 200b$	$e_3 \leq E_a < e_4$	较差 (腐蚀明显)
V 级	$A \geq 200a$	$B \geq 200b$	$E_a \geq e_4$	很差 (腐蚀严重)

根据神经网络模式识别后得到的罐底声发射源的性质,以及罐底检测过程中声发射事件数、总幅度计数和能量释放率等参数的范围,可以对储罐底板结构的完整性进行评价,按腐蚀程度的不同将其分为A、B、C、D、E五个等级,如表4.8所示。根据罐底完整性分级结果,企业可以根据具体情况制定维修方案,优先考虑维修质量最差的E级罐,这样会大大减少由于盲目清罐所造成的损失并减少安全事故。

表4.8 储罐底板完整性评价等级

声源性质	缺陷严重度				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
腐蚀	A	B	C	D	E
裂纹	B	C	D	E	E
泄漏	E	E	E	E	E

- 注: A: 罐底腐蚀非常微小,完整性很好,可以继续运行一个检验周期(5年);  
 B: 罐底有少量腐蚀及裂纹扩展情况,完整性较好,可以继续运行一个检验周期(3年);  
 C: 罐底缺陷完整性一般,应尽快制定检修计划( $\leq 1$ 年);  
 D: 罐底缺陷处于动态过程,完整性较差,应尽快制定检修计划或监控使用( $\leq$ 半年);  
 E: 罐底缺陷处于高动态,完整性很差,已经出现明显泄漏,需立即停工检修。

本文对四台储罐声发射在线检测获得的罐底声发射事件数、声发射总幅度计数、能量释放率等参数进行了计算，根据罐底声发射源的性质及严重程度，并考虑储罐直径、高度、检测液位等参数的影响，四台储罐的罐底分级评价结果如图4.9所示：

表4.9 四台储罐的罐底分级评价结果

储罐	罐底缺陷的活动情况	是否出现泄漏	罐底分级结果	推荐开罐或下一次AE检测的时间
1#储罐	腐蚀轻微，完整性较好	否	A 级	5 年
2#储罐	腐蚀轻微，完整性较好	否	A 级	5 年
3#储罐	腐蚀较重，完整性较差	否	D 级	0.5 年
4#储罐	腐蚀轻微，完整性较好	否	A 级	5 年

1#、2#和4#储罐的罐底最终被整体分级为A级，即属于无腐蚀活动或极少腐蚀活动的储罐，无需在近期进行清罐检查，可以继续使用。建议4年后再进行声发射技术检测，以跟踪监测罐底的腐蚀状态。3#储罐的罐底最终整体分级为D级，即属于腐蚀活动较为严重的储罐。如果在生产周期及资金允许的情况下可以考虑安排清罐计划或者建议在半年之后再次进行声发射检测，以跟踪监测罐底的腐蚀状态。

由于罐底声发射检测的时间较长，定位图中声发射事件定位重合的情况较为普遍，即定位图中的一个点对应着多个声发射事件。为了对罐底检测过程中得到的信号进行更直观有效的分析，可以根据声发射源的集中度（如定位点数、能量、计数或峰值计数等），统计出声发射信号量值较高的区域（腐蚀较为严重的区域），进行重点分析。

图4.16 (a) ~ (d) 所示的四台储罐的平面定位图中，罐底区域内的方框为根据声发射检测的定位点数（事件数）及声发射总计数划分的腐蚀区域。统计原则为：(1) 单位时间区域内声发射事件数不少于20个；(2) 声发射信号的总计数不少于500。腐蚀区域范围为：1#、3#和4#储罐1 m×1 m，2#储罐2 m×2 m，方框上方的英文字母(z~a)以及方框的不同颜色（红色、紫色、黄色、蓝色和绿色）均代表了各方框内声发射事件数由高到低的顺序，

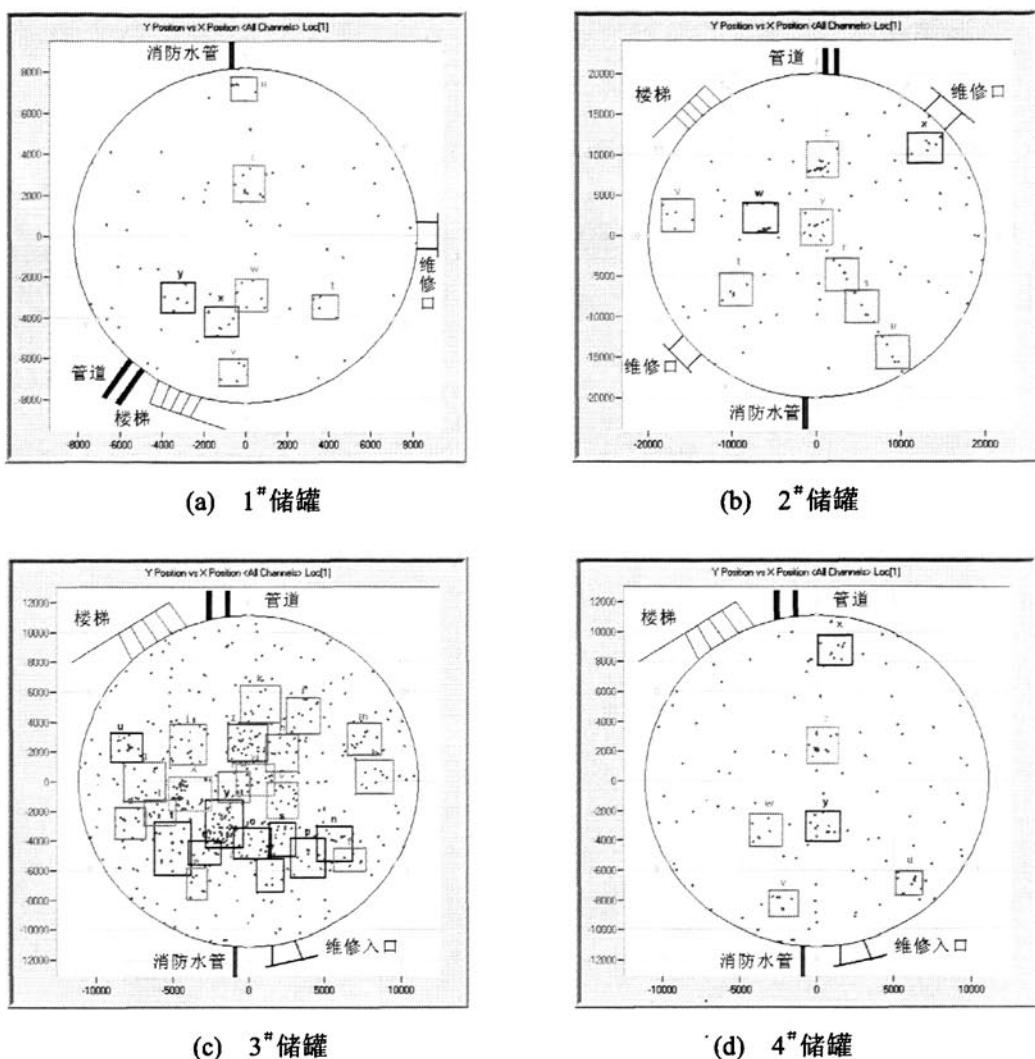


图4.16 根据声发射源的集中度划分的腐蚀区域图

从图中可以看出：3#储罐底板上的腐蚀区域最多，达到了25个，且出现了代表声源集中度较高的红色和紫色方框；而其它三幅图中的方框则相对较少，而且声源集中度也较低。根据声发射源集中度划分的罐底腐蚀区域图应作为历史记录予以保存，用于储罐下一次声发射检测，或开罐寻找缺陷时的参考。

根据罐底分级情况和声发射源集中度的划分的重点区域，最后，企业在考虑维修资源及计划安排的前提下，对3#汽油储罐进行了开罐检修。开罐检查后，发现了多处腐蚀区域，以及一个直径大于30mm、几乎穿孔的腐蚀坑。

## 4.5 本章小结

采用声发射大型常压立式储罐底板在线检测与安全性评价技术对罐底的腐蚀及泄漏缺陷进行评估，能够帮助管理者确定储罐是否需要维修，确定需要维修

储罐的优先权，优化维修资源，为大型石化储罐的长期稳定运行提供安全保障。

本章主要针对大型常压储罐底板检测过程中的噪声干扰问题，对罐底不同性质声发射源的模式识别分类问题进行了研究，并采用小波变换的方法，对神经网络的性能进行了优化，提高了神经网络对罐底腐蚀、裂纹扩展和泄漏等不同性质的声发射源的模式识别能力，使声发射罐底结构完整性评价结果更加精确。主要工作如下：

1、分析了 BP 神经网络的算法及结构，研究了人工神经网络输入层、输出层和隐层个数的选取规则，以及神经网络设计初始权值对于神经网络性能的影响。并根据储罐底板声发射信号的特点及不同声发射源的性质，设计了用于罐底声发射信号模式识别的神经网络。

2、从典型声发射信号库中抽取不同的声发射信号样本，对 BP 神经网络进行训练，训练后的网络能够很好地区分有效声发射信号和干扰噪声之间的差别。采用该网络对现场采集的四台储罐底板的声发射检测数据进行分析，成功地消除了现场检测数据中的大量噪声信号。

3、研究了基于小波变换的 BP 神经网络性能优化方法，利用小波变换把声发射信号分解到不同的频段，提取不同频带上声发射信号的小波频谱或能谱特征系数，构造神经网络学习样本集的特征向量，使神经网络获取到更丰富的声发射信号特征。采用该方法后，神经网络对罐底腐蚀、裂纹扩展和泄漏等声发射源的模式识别能力有了较大提高，降低了罐底有效声发射源之间的误判率。

4、研究了罐内介质粘度，液位高度，储罐直径和检测温度等参数对罐底检测声发射数据的频度和活动度的影响，并提出了相应的修正因子，使基于声发射在线检测的罐底完整性评估结果更加精确。

5、根据四台储罐现场检测数据的神经网络模式识别结果，以及检测过程中声发射事件的频度及活动度评价，对罐底结构的完整性进行了分级。根据声发射检测结果，3#储罐底板的腐蚀状况较为严重，被判定为 D 级罐，经开罐后，验证了罐底声发射的检测方法的有效性。

## 第五章 声发射管道检测技术研究

### 5.1 引言

管道在石油、化工、天然气、城市建设等行业中，起着非常重要的作用。随着管道网络的迅速发展，由于服役期延长、介质腐蚀、老化等因素的影响，管道事故频繁发生。管道缺陷的无损检测方法一直是人们研究的热点。常规的无损检测方法，如射线、超声波、磁粉、渗透等，由于检测过程为逐点扫描，速度慢、效率低，因此检测在役管道时只能采用抽查的方法，极易造成缺陷漏检。管道漏磁通检测器（MFL\_PIG）<sup>[128]</sup>可以对管道的腐蚀情况进行在线检测，是目前应用较为广泛的长距离管道内检测技术。但许多管道由于铺设较早，管径和阀门的尺寸与现有的管道漏磁通检测器不匹配，因此不适宜采用该技术。而且，管道漏磁通检测的费用也相当高。

声发射作为一种动态无损检测方法，可以在不停产的状况下对压力管道的活性缺陷和泄漏情况进行实时检测及判断，而且对管道特殊结构的形状不敏感。因此，压力管道声发射检测技术的研究具有重要的意义。

### 5.2 声发射管道裂纹检测及定位技术研究

采用声发射技术可以对管道结构中的缺陷，如裂纹扩展，焊缝未焊透、咬边、夹杂物，环形焊缝边缘位移，腐蚀，分层，泄漏和冰堵等进行检测<sup>[129]</sup>。裂纹是管道上最常见的缺陷之一，主要由管材缺陷、材料空隙、夹杂物或凹陷、局部脆性区域及应力、疲劳腐蚀等造成。裂纹类缺陷是管道中存在的较为严重的缺陷，对管道的威胁极大。裂纹扩展时释放出的声发射信号，不但频度高，而且集中度高，因此声发射检测的可靠性较高<sup>[130]</sup>。

#### 5.2.1 声发射管道裂纹检测与定位的原理

采用声发射技术对管道腐蚀裂纹等缺陷进行检测时，需要对管道进行工作压力范围内的加载。在载荷作用下，管道内的活性缺陷会发生轻微扩展，在管壁中激发出应力波并沿管壁传播。该应力波携带有丰富的管道缺陷信息，采用安装在

被测管道两端的传感器采集信号，再由声发射仪器进行数字化分析，就可以获取管道缺陷的详细信息，对缺陷产生的位置及严重程度做出判断。

管道上裂纹的产生与扩展属于突发型声发射信号。突发型声发射信号的定位方法主要有区域定位和时差定位两种。区域定位<sup>[131]</sup>是一种处理速度快、简便而粗略的定位方式，主要用于复合材料等由于声发射频度较高、传播衰减较大或检测通道数有限而难以采用时差定位的场合。时差定位通过测量声发射信号到达各个检测通道的时间差、波速和传感器间距等参数，并采用一定的算法来确定声源的目标或位置，因此定位精度比区域定位法要高。当被检测物体某一方向上的尺寸远大于其它两个方向上的尺寸时，如管道、棒材、钢梁等，可采用时差线定位方法进行声发射检测。

时差线定位至少需要两个声发射传感器，其定位原理<sup>[132,133]</sup>如图 5.1 所示。

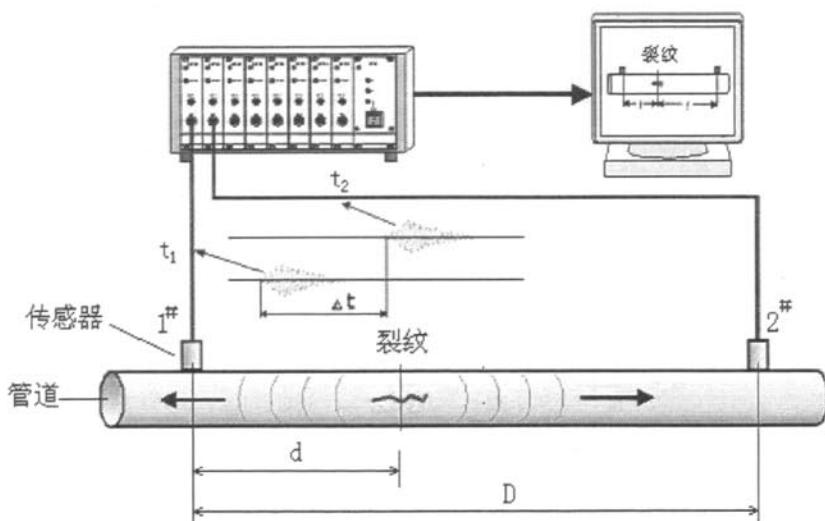


图 5.1 声发射时差线定位原理图

假设 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>传感器之间的一个活性缺陷（声发射源）发出声发射信号，该信号到达 1<sup>#</sup>传感器的时间为  $t_1$ ，到达 2<sup>#</sup>传感器的时间为  $t_2$ 。因此，信号到达两个传感器之间的时差  $\Delta t = t_2 - t_1$ ，如以  $D$  表示两个传感器间的距离，以  $v$  表示声波在结构中的传播速度，则可以得出声发射源距 1<sup>#</sup>传感器的距离为

$$d = \frac{1}{2}(D - v\Delta t) \quad (5-1)$$

由式 (5-1) 可知，当  $\Delta t = 0$  时，声发射信号源位于两传感器的正中间；当  $\Delta t = D/v$  时，声发射信号源位于 1<sup>#</sup>传感器处，而当  $\Delta t = -D/v$  时，声发射源位于 2<sup>#</sup>传感器处。当声发射源位于传感器阵列外部时(假定其位于 1<sup>#</sup>传感器外侧)，

此时无论信号源距离 1<sup>°</sup>传感器多远，时差总是  $\Delta t = t_2 - t_1 = D / v$ ，因此声发射源总是被定位在 1<sup>°</sup>传感器处。

时差线定位技术的关键是确定声波在试件中传播的速度  $v$  和信号到达两个传感器的时间差  $\Delta t$ 。其中，声波在不同材料中的传播速度一般可以通过查阅工程手册来获得。由于管道裂纹激发的声发射信号为突发型信号，故时差  $\Delta t$  可通过多通道声发射仪器记录的各通道信号的到达时间来确定。现代声发射仪的时差测量是基于各通道的到达时间的，而每个通道到达时间的测量与触发电平的设置和仪器的时钟频率有关。目前，仪器的采样时间可精确到 250 ns 以上<sup>[134]</sup>，因此，对时差测量已不会产生太大的影响。然而，由于触发电平设置的不同，也可能导致测量时差的误差，并最终影响定位源的计算精度。

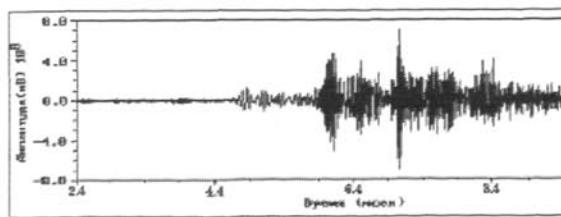
## 5.2.2 声发射管道裂纹检测的实验研究

### 5.2.2.1 管道裂纹信号的采集

由于在实验室条件下裂纹信号很难获取，因此在声发射检测中常采用国际上通用的 Nielsen-Hsu 断铅法来模拟裂纹的产生，这是声发射检测技术中最常用的模拟声发射源，具有广泛的代表性。图 5.2 给出了相同类型传感器采集的在管道中传播的声发射信号，图(a)为管道实际裂纹产生的声发射信号，图(b)为采用 Nielsen-Hsu 断铅法模拟的声发射信号，传感器与声发射源之间的距离均为 9 m。研究表明：固体材料断裂破坏时产生的声发射信号都具有与图 5.2 (a) 类似的波形<sup>[135]</sup>。



(a) 管道裂纹产生的声发射信号



(b) 断铅信号产生的声发射信号

图 5.2 实际裂纹和 Nielsen-Hsu 断铅所产生的声发射信号

在实验室条件下，对一条长约 15m、直径 100mm（变径后为 50mm）的不锈钢管道进行裂纹检测及定位实验。由于该管道的支路、法兰、支撑等附属结构众多，为了研究声发射波在通过不同管道特征，如焊缝、法兰、支路、变径等的衰减情况，选取了一段附属结构较多的管道进行实验。分别将 4 个传感器沿管道依序布置（如图 5.3 所示）。1<sup>#</sup>—4<sup>#</sup>传感器之间的距离为 5400mm。

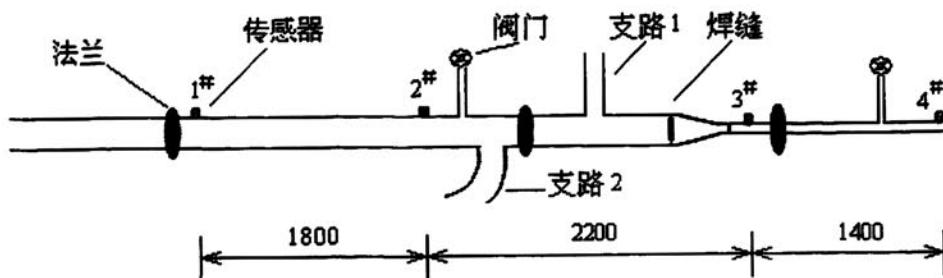


图 5.3 声发射裂纹模拟实验管道示意图

在管道上选择三处位置，用以模拟裂纹的产生。三处缺陷点分别位于（1）距离 1<sup>#</sup>传感器 1000 mm 处；（2）距离 2<sup>#</sup>传感器 900 mm 处；（3）距离 3<sup>#</sup>传感器 400 mm 处。在每处各断铅三次来模拟裂纹的产生，每两次断铅之间要保证一定的时间间隔，采集传感器接收到的声发射参数，记录相应的波形信息，并对裂纹进行定位。

#### 5.2.2.2 管道裂纹声发射信号的定位及误差分析

系统对声发射信号定位时，认为最先被触发的两个传感器接收到的声发射信号为有效信号，并以此进行定位计算。如图 5.4 所示为 1000mm 处产生裂纹时，1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 传感器采集到的波形。

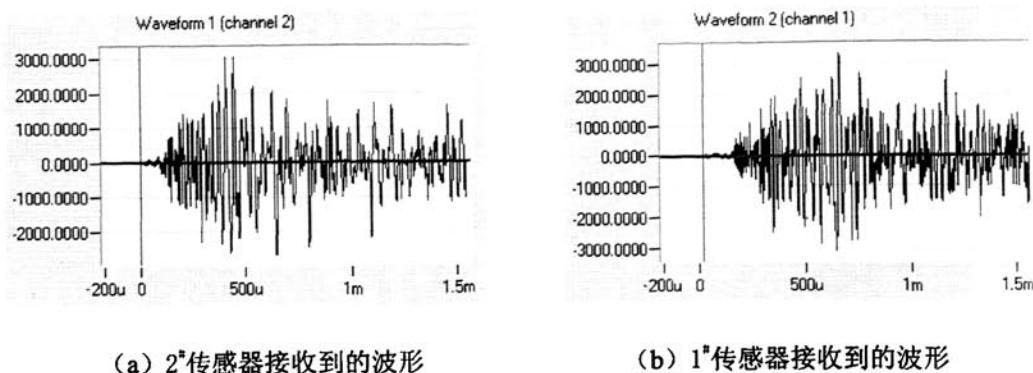


图 5.4 管道裂纹产生的声发射信号的波形

由于 2<sup>#</sup>传感器距离声发射源较近，故先被触发。两传感器接收的声发射信号的时差  $\Delta t = -23\mu s$ ，声发射波在不锈钢材料中的纵波的传播速度约为 7000m/s，则裂纹距离相邻传感器的长度为 980.5 mm。裂纹产生的真实位置为 1000 mm，测量值相对于真实值误差为 1.95%。考虑到传感器的布置位置也可能产生一定的误差，因此这种误差是可以接受的。其它计算结果如表 5.1 所示。

表 5.1 模拟裂纹的定位结果

定位 传感器组	裂纹实际位置 (mm)	裂纹计算位置 (mm)				误差
		第一次	第二次	第三次	平均	
1 <sup>#</sup> —2 <sup>#</sup> 传感器	(距 1 <sup>#</sup> 传感器) 1000	980.5	980.5	980.5	980.5	1.95%
2 <sup>#</sup> —3 <sup>#</sup> 传感器	(距 2 <sup>#</sup> 传感器) 900	574.4	574.4	528.2	592.3	34.2%
3 <sup>#</sup> —4 <sup>#</sup> 传感器	(距 3 <sup>#</sup> 传感器) 400	325.5	340.2	325.7	330.5	17.4%

从表 5.1 中可以看出：1<sup>#</sup>—2<sup>#</sup>传感器对 1000 mm 处的裂纹定位较为准确，且三次定位结果的重复性很好。3<sup>#</sup>—4<sup>#</sup>传感器的定位结果误差较大，而 2<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>传感器的定位效果最差。

直接从三段检测区域的管道特征上来看（图 5.3 中），1<sup>#</sup>—2<sup>#</sup>传感器之间为一段直管，3<sup>#</sup>—4<sup>#</sup>传感器之间存在一个法兰和一个阀门，而 2<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>传感器之间有一个法兰、两条焊缝、两条支路、一个阀门，并存在变径情况。由于这些特殊结构的作用，裂纹信号在传感器接收到之前，由于反射、折射及模式转换等，能量可能会出现较大衰减，两传感器接收到的很可能已经不是同一模态的声发射波，这些均会导致对缺陷定位的误差。

此外，在对处于不同检测区域的裂纹进行定位时，我们采用的是同一声速，而实际检测过程中，由于不同检测区段内的管道表面状态、尺寸及特殊结构等条件的不同，波的传播速度也不完全相同，甚至会出现较大差异。采用相同的波速进行计算，也会引起一定的定位误差。

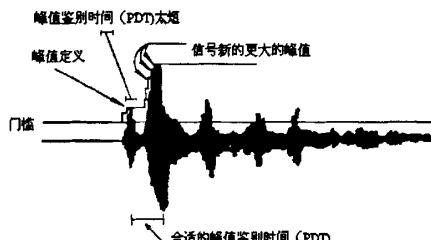
### 5.2.3 声发射管道裂纹检测的定位误差补偿

经过上一节的误差分析，我们知道，管道上第二和第三处模拟裂纹定位误差产生的原因主要是检测区域内的特殊管道结构引起的复合波时差测量误差，以及由此带来的波的传播速度的改变。对于这两种误差原因，本文提出采用下面的方法分别进行修正。

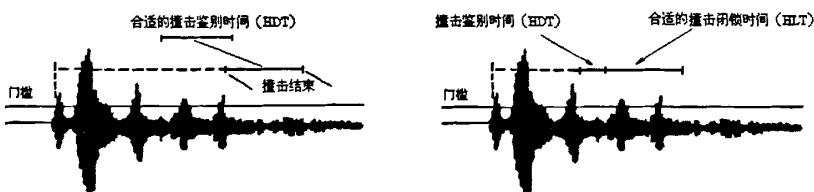
### 5.2.3.1 基于定时参数的定位补偿<sup>[136,137]</sup>

应力波在固体中传播时，遇到不同界面会发生反射、折射及波型转换，同时还会发生衰减和叠加等现象。如果检测区域两端的传感器接收的是来自同一声源中不同模态的应力波，那么所测得的时差必然会产生一定的偏差，由此将引起定位的误差。为了减少这种误差，应根据不同检测结构确定不同的定时参数。定时参数是指撞击信号测量过程的控制参数，包括：峰值鉴别时间（PDT）、撞击鉴别时间（HDT）和撞击闭锁时间（HLT）。

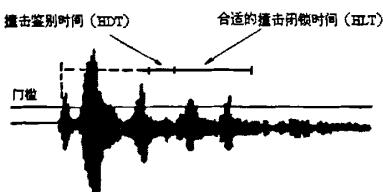
PDT 是指为正确确定撞击信号的上升时间而设置的最大峰值等待时间间隔，其作用是确定声发射波形的真正幅值点，如图 5.5 (a) 所示。由于峰值鉴别时间电路可以被一个新的峰值幅度更大的信号触发代替，因此，峰值鉴别时间应当设置得尽量短。不过，如果选得过短，也会把高速、低幅度的前驱波误作为主波处理，造成定位误差。HDT 是指为正确确定撞击信号的上升时间而设置的撞击信号等待时间间隔，其作用是使系统能够正确测定一个撞击的结束，如图 5.5 (b)。撞击鉴别时间如果选得过短，会把一个撞击测为几个撞击，如果选得过长，又会把几个撞击测量为一个撞击。HLT 是指在撞击信号中为避免测量反射波或迟到波而设置的关闭测量电路的时间间隔，其意义在于系统在锁定的一段时间内不处理任何撞击信号，以防止噪声的干扰，如图 5.5 (c) 所示。撞击闭锁时间足够长，可以消除噪声干扰，但是太长也可能将真正的信号当成噪声干扰滤除掉。因此，定时参数的设置将直接影响到对声发射源的定位精度。



(a) 峰值鉴别时间 (PDT) 的设置



(b) 撞击鉴别时间 (HDT) 的设置



(c) 撞击闭锁时间 (HLT) 的设置

图 5.5 声发射定时参数的设置

本文根据不同管道检测区段的管道特征及声发射波在通过这些结构的衰减率，对三段不同的检测区域分别设置了定时参数。

### 5.2.3.2 基于实测波速的定位改进方法

声波的传播速度是声发射源定位计算中的重要参数，其不确定性会对源定位精度产生一定影响。目前，声发射仪在进行定位计算时，一般采用工程手册推荐的特定模态声发射波的传播速度，如不锈钢结构中纵波的传播速度为 $5600\sim7500$  m/s。当声发射源位于在传感器阵列的中间部位时，两传感器接收信号之间的时差很小，波速的差异不易被发现；然而，当声发射源越靠近某一传感器，即时差越大时，声发射源定位的误差也越大。低于真值的波速将使声源定位点向阵列中心“聚拢”，当波速的偏差较大时，容易产生来自阵列外声源信号的伪定位；高于真值的波速将使声源定位由阵列中心向外侧“分散”，当波速的偏差较大时，在阵列的边缘区域容易产生漏定位<sup>[138]</sup>。当管道结构较为复杂时，受管道特征的影响，虽然管道材质相同，但声发射波在不同区段的传播速度是不同的，实际测量声速的方法充分考虑了管道材质的不均匀性及特殊结构等方面的影响，因此能够真实地反映声发射波在结构中的传播及衰减特性。

实测声速时，可以采用 Nielsen-Hsu 断铅法在指定位置模拟声发射源，首先测得信号从声发射源传至传感器所需的时间，再用声发射源与传感器之间的距离除以该时间即可得到波速。也可以使用声发射仪的 AST 功能，测得信号从一个传感器传播到另外一个传感器所用的时间，再用传感器间距除以该时间即可得到波速。经过实际测量波速后，本文将用于三处裂纹定位计算的波速分别确定为 7000m/s、4300m/s 和 5615 m/s。

### 5.2.3.3 基于衰减补偿的定位改进方法

声发射定位实验中，当被测件的结构较为复杂时，可能由于衰减过大而使某种模态的声发射波低于检测门槛值而无法触发传感器，因此，在检测过程中需要测量构件的衰减曲线，以便对定位结果进行补偿。

如图 5.6 所示为实验管道的衰减补偿曲线。从图中可以看出，0~1800 mm 范围内（1#—2#传感器检测区域），信号的衰减较小，只有 $-8\text{dB}$  左右；而在 1800~4000 mm 范围内（2#—3#传感器检测区域）和 4000~5400 mm 范围内（3#—4#传感器检测区域），信号衰减较快，有些区域甚至出现了 $-25 \text{ dB/m}$  的高衰减情况。

对不同检测区域采用距离一幅度衰减曲线进行补偿，可以对焊缝、法兰、支路等特殊管道结构对定位造成的负面影响进行补偿，避免漏定位。

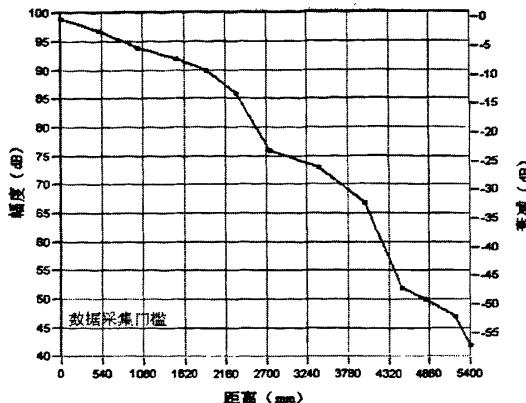


图 5.6 声发射幅度随距离的衰减曲线

采用上述方法对 5.2.3.2 节中的定位结果进行补偿，并根据不同的实测声速对各点位置进行重新计算后，定位的精度有了一定提高，如表 5.2 所示为补偿后的模拟裂纹定位结果。

表 5.2 模拟裂纹的定位结果

传感器组	裂纹实际位置 (mm)	裂纹计算位置 (mm)				误差
		第一次	第二次	第三次	平均	
1 <sup>#</sup> - 2 <sup>#</sup> 传感器	(距 1 <sup>#</sup> 传感器) 1000	980.5	980.5	980.5	980.5	1.95%
2 <sup>#</sup> - 3 <sup>#</sup> 传感器	(距 2 <sup>#</sup> 传感器) 900	856.4	847.7	859.2	854.4	5.06%
3 <sup>#</sup> - 4 <sup>#</sup> 传感器	(距 3 <sup>#</sup> 传感器) 400	387.5	391.8	396.3	391.9	2.03%

#### 5.2.3.4 结果分析

本节通过实验对管道裂纹产生的声发射信号在管道中的传播和衰减情况进行了研究（管道检测现场如图 5.7 所示），验证了不同的管道特征对声发射信号传播及衰减特性的影响，得出如下结论：

(1) 用于管道腐蚀及裂纹检测的理想声发射传感器的共振频率为 10~40 kHz。检测时传感器的布置间距一般随管道的具体状况而定。如果管道状况较为理想（空管道、不埋地），传感器间的布置距离就可以适当延长。

(2) 声发射信号通过法兰、焊缝、三通等管道特征时，会有不同程度的衰减。本实验中，每过一个法兰会有 10dB 左右的幅度衰减；每通过一条环形焊缝，会有 3dB 的衰减。弯头和三通等结构会对试验结果造成一些问题并导致错误的

定位。不过，如果将弯头和三通用作传感器的安装位置，这些问题是可以避免的。

(3) 管道直径的改变对声发射信号的传播并无太大影响。

(4) 前一次断铅与下一次断铅之间的时间间隔较小时，前一次的反射波会对下一次断铅产生波的叠加，这种情况在管道较长的情况下更为明显。因而，可能导致第二次断铅信号的幅值增大。本文的实验中，虽然管道不长，但由于管道特征较复杂，波的反射较多，断铅停止一段时间后仍然会有新的 hit 出现。

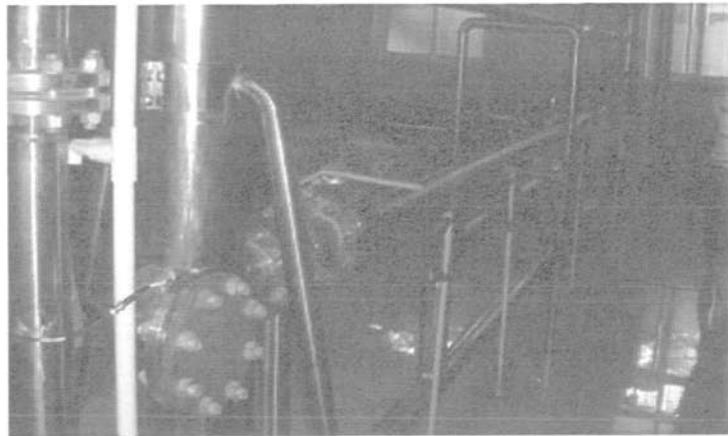


图 5.7 管道活性缺陷检测实验现场

#### 5.2.4 管道疲劳裂纹扩展速率的估算

管道工作时所承受的压力处于缓慢的波动状态，也就是说，管道承受的是循环载荷（交变载荷）的作用，管道承受交变载荷的大小取决于输气的不均匀系数和调峰量。低循环疲劳断裂也是压力管道破坏的主要形式之一，管道上的腐蚀裂纹会随着交变载荷的变化而不断发生扩展。如果能预测管道裂纹的扩展速率，就可以在裂纹失稳前及时采取措施，避免泄漏事故的发生。

##### (一) 管道疲劳裂纹的扩展规律

通常用每一个载荷循环中裂纹的扩展量表示疲劳裂纹的扩展速率，即

$$\alpha' = d\alpha / dn \quad (5-2)$$

式中， $\alpha$  为裂纹长度， $n$  为交变应力的循环次数。

材料的等幅载荷试验表明<sup>[139]</sup>，疲劳裂纹的扩展速度  $d\alpha / dn$  随应力强度因子幅度  $\Delta K$  变化，如图 5.8 所示。图中的  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ ， $K_{max}$  和  $K_{min}$  分别为作用在材料上的应力强度因子的上限和下限。疲劳裂纹的扩展曲线可分成三个区域：在区域 I 内，裂纹萌生并微观扩展， $\Delta K_{th}$  为疲劳裂纹扩展的门槛值，当  $\Delta K$  小于

$\Delta K_{th}$  时, 疲劳裂纹几乎不扩展; 在区域II内, 宏观裂纹稳定扩展(即亚临界扩展),  $d\alpha/dn$  与  $\Delta K$  之间存在线性关系, 工程结构的疲劳裂纹扩展大都处于此阶段; 在区域III内, 疲劳裂纹快速扩展(失稳), 裂纹扩展速率曲线上升并趋于一条渐近线, 疲劳应力循环中的最大应力强度因子  $K_{max}$  接近于材料的断裂韧性  $K_c$ , 裂纹出现疲劳失稳。此时, 由于裂纹扩展的速度非常快, 因此相应的声发射信号也大。

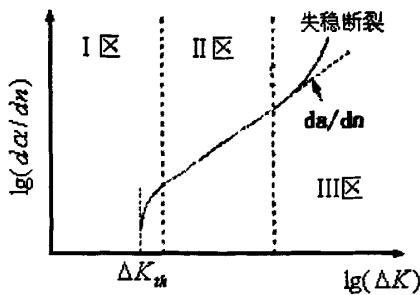


图 5.8  $d\alpha/dn$ — $\Delta K$  曲线

### (二) 管道疲劳裂纹扩展速率的常规估算方法

目前, 采用传统无损检测方法检测到管道裂纹后, 一般基于断裂力学的原理对管道上疲劳裂纹的扩展速率进行估算。目前应用较为广泛的是 Paris-Erdogan 公式, 疲劳裂纹的扩展速率(管道每一运行周期的裂纹增长量)可表示为:

$$\alpha' = C(\Delta K)^m \quad (5-3)$$

式中,  $C$  和  $m$  为材料常数。

Paris 公式虽然能够在一定程度上描述材料在亚临界条件下的扩展规律, 但由于其在估算中直接采用应力强度因子  $\Delta K$ , 而  $\Delta K$  与材料韧性等多种因素有关, 因此很难确定其精确值, 故 Paris 公式对裂纹扩展速率的估算比较粗糙。

### (三) 基于声发射的管道疲劳裂纹扩展速率估算方法

声发射除了可以对管道上的腐蚀及裂纹缺陷进行检测和定位之外, 其作为一种动态检测方法, 还能够提供材料疲劳裂纹扩展的重要信息。在管道加载过程中, 低应力强度时裂纹闭合, 高应力强度时裂纹扩展。而裂纹扩展时即释放应变能, 也就出现声发射信号。而且, 在疲劳裂纹扩展的不同阶段, 声发射信号的参数特征也存在较大差异。因此, 采用声发射方法可以对管道疲劳裂纹的“开裂前兆—开裂—扩展—快速断裂”的全部过程进行分析, 确定管道裂纹的危害程度并对裂纹的扩展速率进行估算。

声发射信号的幅值、振铃计数、持续时间、上升时间和能量等参数均能够反映裂纹在不同扩展阶段的信息，如图 5.9 所示。但由于传感器每振荡一次就输出一个振铃脉冲，而且振铃计数始终随载荷循环次数的变化而改变，因此声发射信号的振铃计数（count）集中地反映了疲劳裂纹信号的主要特征，故用来预测管道裂纹的扩展速度是比较理想的。

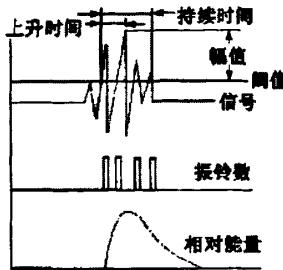


图 5.9 裂纹扩展信号的声发射参数

管道裂纹扩展过程中，每个循环的声发射计数  $N'$  与  $\Delta K$  的关系为

$$N' = \frac{d\eta}{dn} = B(\Delta K)^p \quad (5-4)$$

其中， $\eta$  表示声发射信号的振铃计数， $B$  与  $p$  为根据材料特性确定的常量。

当将式 (5-4) 代入式 (5-3) 可得，

$$\frac{d\alpha}{dn} = C \left( \frac{1}{B} \frac{d\eta}{dn} \right)^{\frac{m}{p}} \quad (5-5)$$

式 (5-5) 确定了疲劳裂纹扩展速率与声发射振铃率的相互关系，而且，在裂纹扩展过程中，裂纹并不是均匀地扩展，而是时而扩展、时而停止，声发射信号也相应地变化。在接近裂纹贯穿壁厚和管道裂开时，声发射计数率急剧增加，因此，基于声发射方法可以对管道疲劳裂纹的扩展速率及缺陷的危害程度进行更准确的预测。

需要注意的是，根据声发射信号的参数预测的裂纹长度一般都大于裂纹的实际长度。这主要是因为疲劳裂纹的闭合以及裂纹面间的摩擦也会产生声发射信号，使得声发射振铃计数增加，导致计算误差增大。对于这种误差，可以采用模态分析的方法予以补偿。通过对声发射信号进行波形分析，可以对裂纹扩展产生的有效声发射信号做出判断，消除裂纹闭合噪声。

采用声发射方法研究管道在加载过程中裂纹从开裂直到断裂的整个动态过程，用声发射参数来解释在管道裂纹在加载过程中各阶段的力学特征，弥补了常规力学方法在管道裂纹扩展速率预测方面的不足。

### 5.3 声发射管道泄漏检测及定位技术研究

管道在运行一段时间后，由于材料的腐蚀老化或在其它外力作用下，管道可能产生裂纹或腐蚀孔，由于管道内外压差的存在，管道内的流体会向外部泄漏。管道泄漏激发的应力波携带着泄漏源的信息（如泄漏的大小、位置等）并沿管壁传播，利用声发射传感器采集该应力波信号，并分析处理，就可以获得管道泄漏信息，从而实现声发射泄漏检测的目的。

从严格意义上讲，管道内介质泄漏所激发的应力波并不是声发射现象，因为在泄漏过程中，管壁本身不释放能量。但管道发生泄漏时，泄漏的流体与泄漏孔之间的相互作用也会在管道中激发出应力波，通过该应力波可以描述材料结构上的某种状况，因此泄漏在管道中激励出应力波也可以认为是一种广义的声发射现象，称为二次声发射<sup>[140]</sup>。本节将对管道泄漏的判断、管道泄漏声发射信号的特征提取，以及泄漏点的定位原理和方法等方面进行研究探讨。

#### 5.3.1 管道泄漏声发射信号的特点

由于泄漏声发射信号在管道传播过程中的复杂性和不确定性，对泄漏声发射源信号的认识和获取受到许多条件的限制，目前只能通过大量的实验和应用积累对泄漏声发射信号的特征进行识别。管道泄漏产生的声发射信号一般具有如下特征<sup>[141-143]</sup>：

- (1) 由气体或液体泄漏激励产生的声发射信号属于连续型声发射信号，泄漏声发射信号在管道内传播，能反映结构的某些特征，如泄漏孔的位置和大小等；
- (2) 管道泄漏声发射信号包含有多种模式的波形。除了信号前端的明显特征之外，在采样时间内还存在其它的波形特征，这是由于声发射信号在传播介质内发生波的反射、折射及波形转换等变化的结果；
- (3) 受声发射源的自身特性(多样性、信号的突发性和不确定性)、声发射源到传感器的传播路径、传感器特性、环境噪声等多种复杂因素的影响，声发射传感器输出的电信号波形十分复杂，甚至可能与真实的 AE 源信号相差较大。管道泄漏产生的声发射信号在时域上与通常意义上的声发射波形存在不同，即不表现为衰减的一系列波包；
- (4) 泄漏产生的声发射信号在时域分布上具有一定的稳定性，可以说是各

态遍历特性，但也并不是完全稳定的，因为当管道的压力较大使泄漏处于临界状态时，泄漏信号中将包含冲击性质的声源。

(5) 干扰噪声存在的普遍性。在管道泄漏检测实际的工程应用中，声发射信号多伴随着干扰噪声，如环境噪声、电子仪器带来的噪声等，如图 5.10 所示。这类常见噪声在时域表现出的主要特征是随机地分布在在整个采样时间范围内。

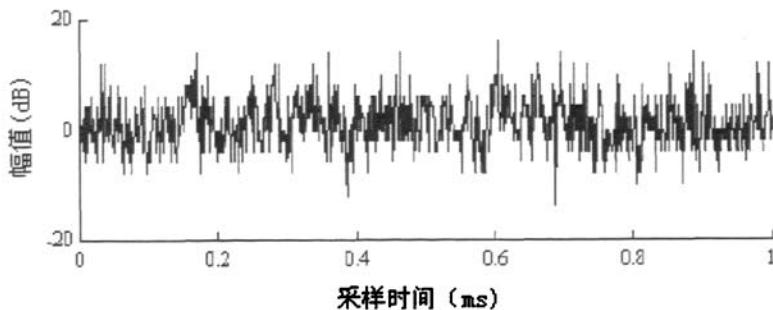


图 5.10 管道泄漏检测现场常见的干扰噪声

### 5.3.2 连续型声发射信号的定位原理<sup>[144-146]</sup>

管道泄漏检测的定位原理与腐蚀及裂纹检测的定位原理类似，泄漏点位于两个声发射传感器之间，由于泄漏声发射源的位置与两个传感器之间的距离不同，所以泄漏声发射信号到达不同的传感器所需的时间也不相同。通过确定两传感器被同一泄漏事件触发的时间差  $\Delta t$ ，以及泄漏声发射波在管道中的传播速度，按式(5-1)就可以计算声发射源（泄漏点）距相邻传感器的距离，从而实现对泄漏点的定位。

当声发射信号为突发型时，时差  $\Delta t$  可通过多通道声发射仪记录的信号到达各通道的时间来确定。而当信号为连续型声发射信号时，由于声发射信号在结构中传播时的衰减、频散，以及多模态现象，一般情况下，无法直接提取到两传感器接收信号的时差。

相关分析是时域中描述信号特性的一种重要方法，通常被用来分析随机信号的统计特性。通过对两个传感器接收到的两个性状相近的测试信号的波形进行相关运算，可以获得两个测试信号之间的时间差。采用互相关技术对连续型声发射信号进行分析，可以获得较高的定位精度。

在实际检测过程中，两传感器接收的管道泄漏产生的声发射信号分别为  $x(t)$  和  $y(t)$ ，经 A/D 转换后成为离散信号  $x(n)$  和  $y(n)$ ，其中  $n$  为整数。取两个声发射信号在相同时段、采样点为  $N$  的有限数据段进行相关运算，其互相关函数可表示为：

$$R_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \quad (5-6)$$

$x(n)$  和  $y(n)$  的相关系数  $\rho_{xy}$  为

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n)}{\left[ \sum_{n=0}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=0}^{\infty} y^2(n) \right]^{1/2}} \quad (5-7)$$

由于泄漏点的位置未知, 为确保两个传感器都能接收到同一时间发出的信号, 需要选择合适的采样长度。考虑极端情况, 泄漏点位于其中一个传感器的位置上, 为保证另外一个传感器能够收到同一泄漏点发出的信号, 最少应该保证采样长度  $t = D/v$ 。从实际考虑, 一般选择  $2t$  作为采样长度, 并选择固定的采样频率  $f$ 。将传感器 A 接收到的信号  $A(n)$  一分为二, 选取前半部分  $A_1$ , 将传感器 B 接收到的信号  $B(n)$  的前半部分  $B_1$  (从信号中间截断) 与  $A_1$  相关, 得出相关系数  $r_1$ , 然后再逐点平移传感器 B 接收的信号, 用等同的长度继续与  $A_1$  做相关, 可以得到  $r_2, r_3 \dots$

$$r_{AB}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A(n)B(n+m) \quad m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5-8)$$

式中,  $N$  取  $A(n)$  数据点数的一半, 也等于  $B(n)$  数据点的一半。

由于  $A_1$  至少应该含有一部分泄漏信号  $L$  (因为采样长度为  $2t$ ), 在做相关时  $B(n)$  中至少有一段信号会含有与  $A_1$  信号相同的泄漏信号  $L$ , 此处可认为是对泄漏信号  $L$  做的自相关, 自相关结果

$$r_L(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} L(n)L(n+i) \quad (5-9)$$

由自相关函数的性质可以得出,  $i = 0$  时, 相关结果最大。假定相关结果最大时对应为  $A_{\max}$  (也可认为是第  $m_{\max}$  个采样点), 此时与  $A_1$  做相关的对应相关信号为  $B_{\max}$ , 在泄漏信号  $L$  到达传感器 A 之后, 延迟了一段时间才到达传感器 B。此时, 就可以找出泄漏信号到达传感器的时间差  $\Delta t$ 。因为采样频率  $f$  已知, 这时可得出

$$\Delta t = m_{\max} / f \quad (5-10)$$

获得两传感器接收信号的时差后，利用公式（5—1），就可以确定位于两传感器间的泄漏点的位置。

### 5.3.3 管道泄漏声发射检测的实验研究

#### 5.3.3.1 管道泄漏声发射信号的判断

气体或液体管道发生泄漏时，系统采集到的声发射参数会发生一定变化。如图 5.11 所示为三次开关泄漏阀门模拟管道发生泄漏时各通道（3”、4”通道）采集的声发射撞击数（hits）的变化。

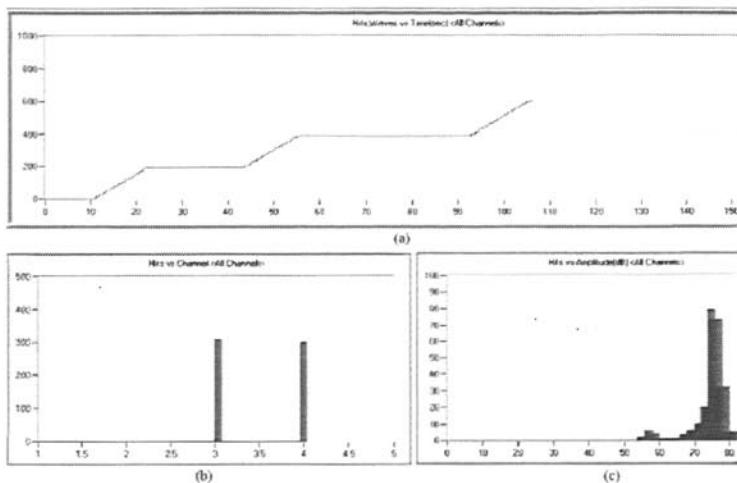


图 5.11 气体管道泄漏时各通道采集的声发射撞击数（hits）的变化

从图 5.11（a）中可以明显看出三次泄漏分别发生在 12~22 s、43~56 s 和 92~107 s；图 5.11（b）显示的是两个通道接收到的声发射撞击数大致相同；图 5.11（c）表明，泄漏声发射信号的幅度多集中在 70~80dB。可见，当流体管道发生泄漏时，是可以根据仪器所采集的声发射信号的参数的变化对泄漏进行定性判断的。此外，声发射信号具有特定的频谱，通过对信号进行频谱分析也可以判断管道是否发生泄漏。

#### 5.3.3.2 管道运行参数、泄漏孔的尺寸等与泄漏声发射信号参数之间的关系，

管道中声发射信号的能量及频谱与管道内部的压力、泄漏孔径大小及检测点到泄漏源的距离等因素密切相关。本章将通过逐一变化这些因素进行管道声发射泄漏检测的实验研究。实验设计如下：

##### （一）管道泄漏声发射信号参数随泄漏孔径大小的变化关系

管道泄漏模拟实验装置 1（如图 5.12）为碳钢实验管道，管道直径为 100 mm，长度为 1000mm，管道中部安装了球阀，球阀上端可以安装具有不同漏孔尺寸的

螺钉，用于模拟不同的泄漏孔径（如图 5.12(b)），图中  $d$  为螺钉漏孔的直径。通过更换带有不同漏孔直径的螺钉来改变泄漏孔径的大小（漏孔直径分别为 5.0mm、4.0mm、3.0mm、2.0mm 和 1.0mm），每次泄漏实验前管道内部压力均保持为 0.15MPa。两传感器分别安装在距离泄漏孔左右各 400 mm 处。采集泄漏声发射信号的能量、均方电压等参数。声发射信号的平均信号电平随泄漏孔的变化规律如图 5.13 所示。

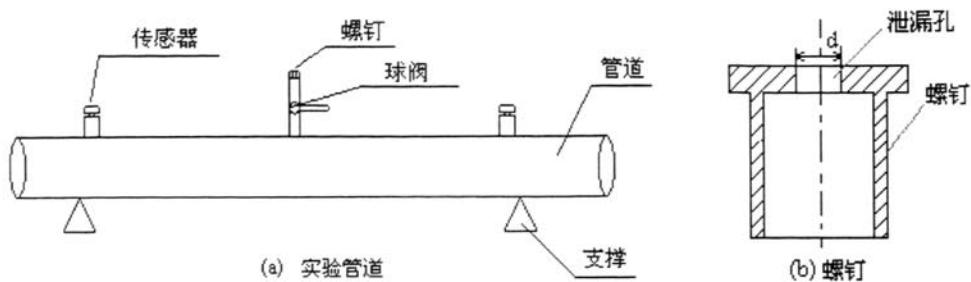


图 5.12 管道泄漏模拟实验装置 1

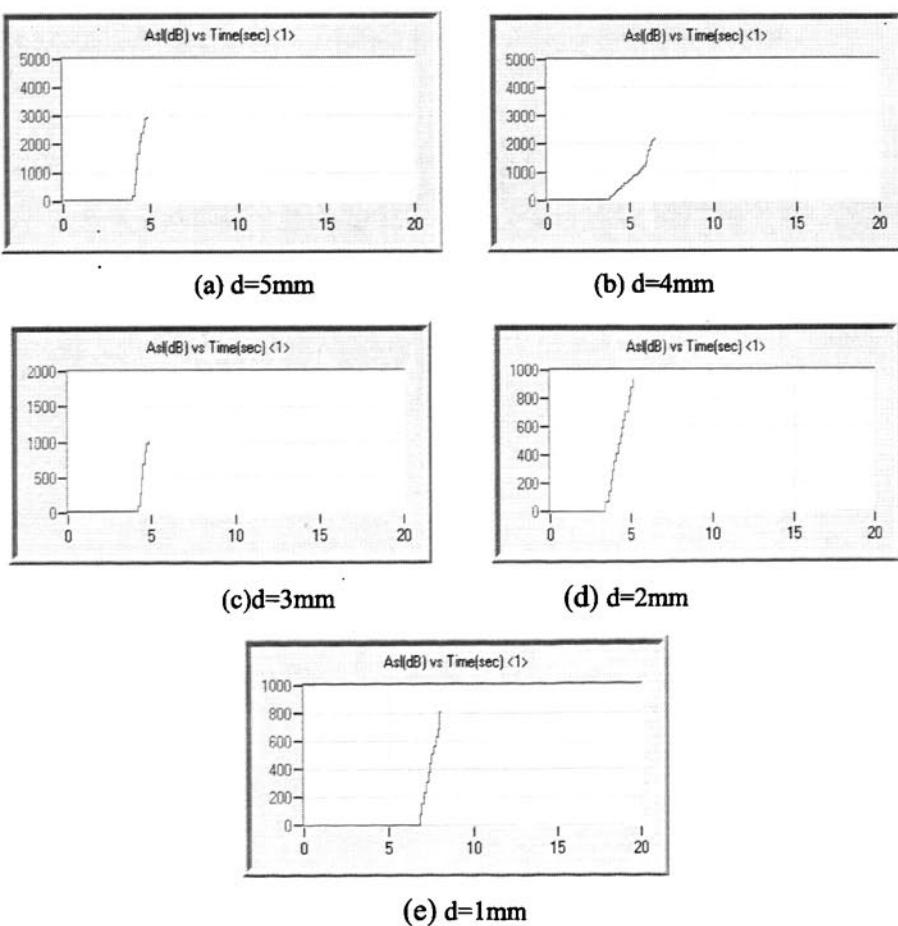


图 5.13 不同泄漏孔径下声发射信号的均方电压值

## (二) 压力变化时泄漏声发射信号的频谱及能量

采用管道泄漏模拟实验装置 1, 改变管道内部压力, 使管道内压力从 0.3 MPa~0.05 MPa 之间变化 (0.30 MPa、0.25 MPa、0.20 MPa、0.15 MPa、0.10 MPa 和 0.05 MPa), 压力每改变一次, 采集一组泄漏声发射数据, 如图 5.14 所示。

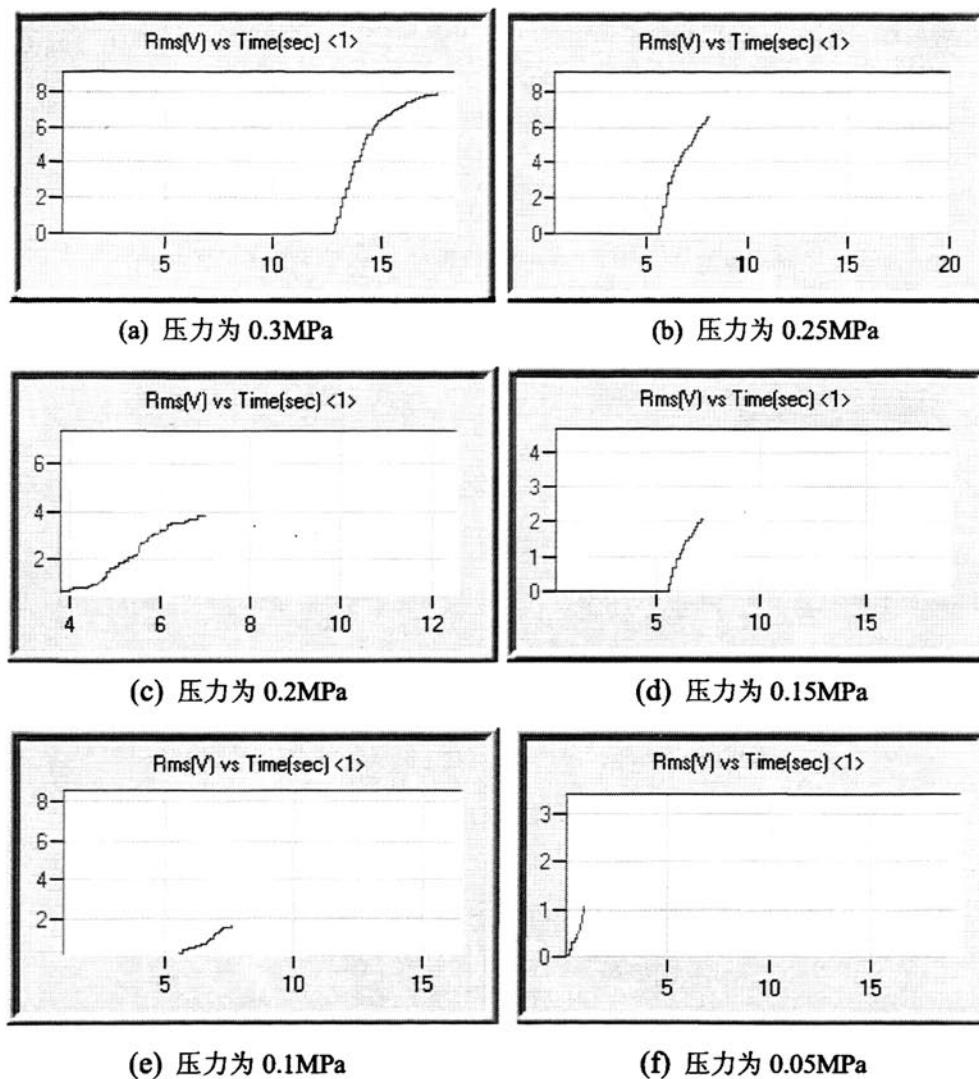


图 5.14 不同压力下泄漏声发射信号的均方根值

## (三) 传播距离与泄漏声发射信号的频谱及能量的关系

采用管道泄漏模拟实验装置 2 (如图 5.15), 其中不锈钢管道长约 15m、直径 100mm。每次实验前管道内部压力均保持为 0.85MPa, 6 个传感器沿管道依序布置, 其中泄漏孔位于 1" 和 2" 传感器之间。由于各传感器是同时工作的, 而且采集的也是同一声发射源发出的信号, 因此排除了开阀力度不均匀, 速度快慢不同等因素对检测结果的影响。

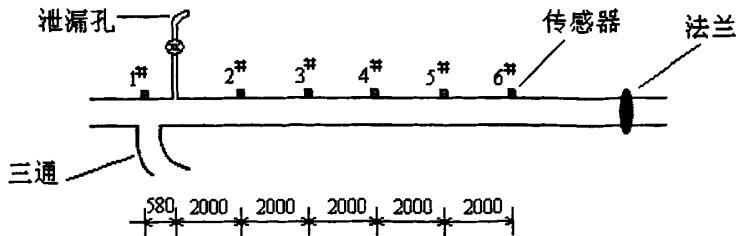


图 5.15 管道泄漏模拟实验装置 2

#### (四) 不同频率传感器对管道泄漏声发射信号的灵敏度

采用管道泄漏模拟实验装置 2，分别选用共振频率为 30 KHz、60 KHz、150 KHz 的窄带传感器和共振频率在 100~1000 KHz 宽带传感器采集泄漏信号，每次实验前管道内部压力均保持 0.6MPa。

通过上述实验研究，本文得出如下结论：

(1) 当管道内部压力一定时，不同泄漏率激发的声发射信号的功率谱密度和均方电压值存在一定差异，而且，④泄漏声发射信号的频谱在 20 KHz 附近有很陡的尖峰；⑥泄漏声发射信号的频谱范围主要集中在 0~100 KHz，当泄漏孔的直径比较小时，泄漏所激发的声发射信号中含有较多的高频成分，随着泄漏孔的直径增大，泄漏声发射的主要能量将逐渐集中在低频段 0~30 KHz 的范围内。而泄漏所产生的声发射信号的能量随泄漏孔的增大而增加。

(2) 随着管道内部压力的减小，泄漏所激发的声发射信号功率谱密度的幅值大致呈下降趋势，而且管道内部压力越大，泄漏所激励出的声发射信号的能量越大。

(3) 随着传播距离的增大，泄漏所激发声发射信号频谱的幅值在整个频率范围内都呈衰减趋势，信号中的高频成分衰减的速度要比低频成分衰减得快。而且系统对不同泄漏率（与管道内压力及泄漏孔径有关）的泄漏点的检测能力随泄漏信号在管道中传播的距离的延长而减弱。传感器布置间距越大，能够检测到的泄漏率越小。

(4) 用于管道泄漏检测的理想声发射传感器的共振频率为 10~40 KHz。

气体管道泄漏检测的实验现场如图 5.16 所示（模拟装置 2），图中 (a) 为实验管道，图 (b) 为用于模拟泄漏的阀门，图 (c) 为固定在管道上方的传感器，由于该管道为不锈钢材质，无法用磁性吸座固定，故采用胶带对传感器进行了固定，实验表明，该种固定方式对声发射信号的采集没有影响。

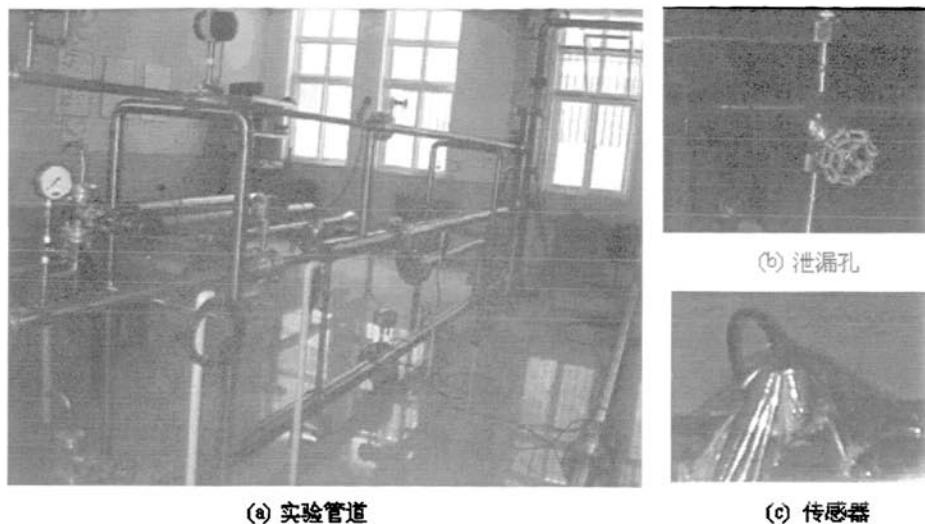


图 5.16 气体管道泄漏实验现场（模拟实验装置 2）

### 5.3.3.2 管道泄漏声发射源的定位

由于泄漏产生的是连续型声发射信号，因此需要对两传感器接收的信号进行相关分析确定时差后才能定位。采用管道泄漏模拟实验装置 1 对管道泄漏进行测试时（管道内压力为 0.3MPa），泄漏点位于管道中央。传感器 A、B 布置在泄漏点两端 400mm 处，采样频率为 10 MHz，采样点为 5.3 M，信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  分别是传感器 A、B 采集到的泄漏点发出的声发射信号，如图 5.17 所示。

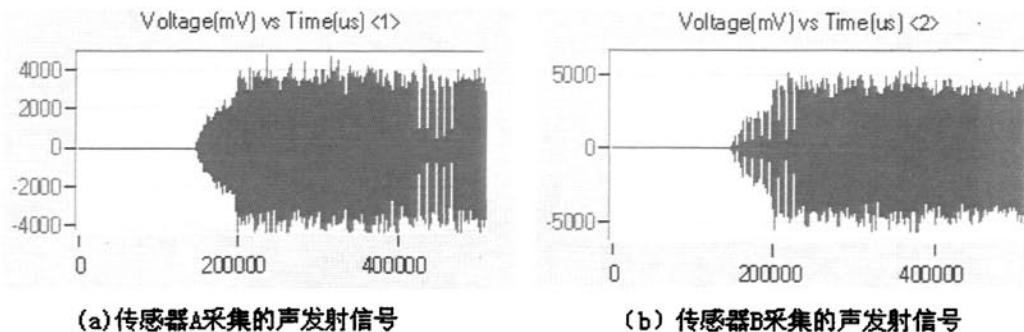
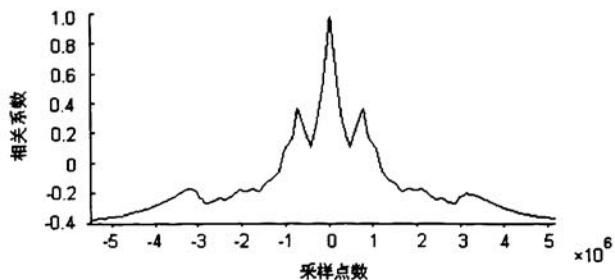


图 5.17 两传感器采集到的管道泄漏声发射信号

对声发射信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  进行互相关分析，其相关计算结果如图 5.18 所示。相关系数的最大值为 0.929，对应的采样点数为 79。由于采样频率已知，故可求得  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的时差为  $7.9 \mu\text{s}$ ，根据定位公式及实际测得的声发射波在钢制管道中的传播速度(5327m/s)，计算得到泄漏点距离传感器 A 的距离为 379.0mm，与泄漏点的实际位置相比，误差为 2.63%。

图 5.18 信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的相关分析图

模拟装置 1 由于采用的是人工充压的方法，而且管道两端是封闭的，因此检测过程中噪声干扰的问题较小，而实际检测过程中，管道中的非泄漏声源有多种。由于阀门减小使流过的流体形成喷注会产生噪声；有时管道系统或其中安装的附属结构的共振被激发，可形成机械噪声；其它，如车辆振动、地基振动或外界非管道系统的振动干扰等也会产生环境噪声。

采用管道泄漏模拟系统 2 进行管道泄漏实验时，采用空压机给系统充压和保压，空压机在工作时会产生一定的振动，而且实验现场距离马路较近，车辆驶过时也会使现场采集的声发射信号受到一定的噪声污染。实验时管道内压力为 0.6MPa，检测传感器组选择 1" 和 6" 传感器，两传感器与泄漏点相距分别为 0.58 m 和 10 m。如图 5.19 为检测现场 1"、6" 传感器采集到的管道泄漏声发射信号的波形和频谱，采样频率为 1 MHz，数据采集时间为 30 ms，采样点数为 30 K。

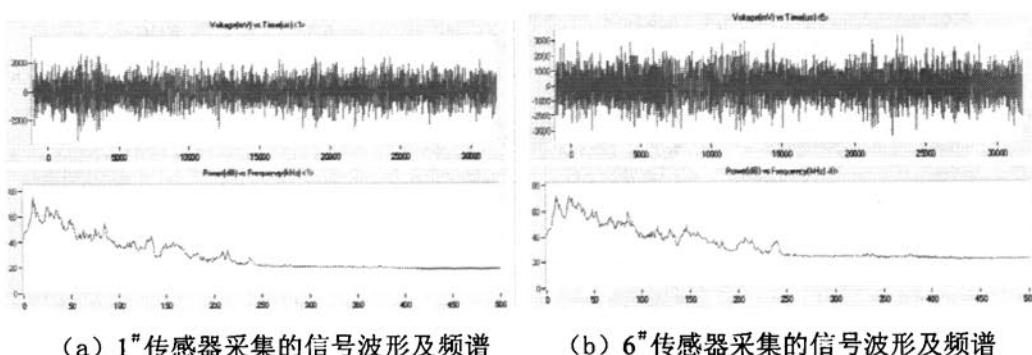


图 5.19 各传感器采集的管道泄漏声发射信号

对 1" 和 6" 传感器采集的 AE 信号直接做互相关分析，相关系数为 0.754， $\Delta t = 1.419\text{ms}$ ，由实测波速 (6948 m/s) 计算出泄漏点距离 1" 传感器之间的距离为  $d=360.4$ ，与真实值相差 219.6 mm。可见，直接进行互相关分析定位误差明显偏大。因此必须采取相应的手段对包含噪声的泄漏声发射信号进行处理。下面，本文将对小波包和 HHT 变换在管道声发射信号滤波中的应用进行研究。

### 5.3.4 管道泄漏信号的小波包分析

管道检测过程中的非缺陷类噪声源很多，传感器采集到的声信号不可避免地会受到这些噪声的污染，导致声发射信号特征模糊，使信号的分析产生困难。通过互相关分析可以获取管道泄漏声发射信号的时差，实现对连续型声发射信号的定位。这种技术虽然在结构简单的管道上应用效果较好，但对于管道结构复杂、管道内非泄漏噪声源较多的情况，由于声波传播过程的衰减和波形畸变严重，这种方法的定位精度会受到较大干扰。

小波分析是把信号投影到一组互相正交的小波函数构成的子空间上，形成了信号在不同尺度上的展开，从而提取了信号在不同频带的特征，同时保留了信号在各尺度上的时域特征。但在实际应用中，往往只需要提取某些时间段（点）或频域段（点）上的信息，而正交小波变换按固定规律变化的时频相平面不再满足这些要求，其主要原因是因为小波变换的多尺度分析只将尺度空间进行了分解，而没有对小波空间进行进一步分解，而小波包正好解决了这种矛盾<sup>[147-149]</sup>。

#### 5.3.4.1 小波包分析技术的原理

小波包的概念是由 M. V. Wickerhauser, R. R. Coifman 等在小波变换的基础上提出的<sup>[150]</sup>。小波包分解算法是对多分辨算法的改进，可以根据信号的特性，自适应地调整尺度函数  $\varphi(t)$ ，选择不同的时频分辨率进行分解，因此比较适合于提取干扰中隐藏的微弱信号。小波包（Wavelet Package）对信号的分解比小波分析更为精细，它的每一层分解不仅对低频分解，而且对高频部分也进行分解，并能够根据被分析信号的特征，自适应地选择相应的频带，使之与信号的频谱相匹配，从而提高了信号的时-频分辨率。

设  $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$  是  $L^2(\mathbb{R})$  的多分辨分析， $W_{j-1}$  是  $V_{j-1}$  在  $V_j$  的正交补空间， $\varphi(x)$  和  $\psi(x)$  是相应的尺度函数和小波函数，并由两尺度方程

$$\begin{cases} \varphi(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \varphi(2x - k) \\ \psi(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k \psi(2x - k) \end{cases} \quad (5-11)$$

式中， $g_k = (-1)^k \bar{h}_{1-k}$ 。

记  $\varphi_{jk}(x) = 2^{j/2} \varphi(2^j x - k)$ ，则  $\{\varphi_{jk}\}_{k \in \mathbb{Z}}$  是  $V_j$  的标准正交基；记  $\psi_{jk}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k)$ ，则  $\{\psi_{jk}\}_{k \in \mathbb{Z}}$  是  $W_j$  的标准正交基； $\{\psi_{jk}\}_{j,k \in \mathbb{Z}}$  是  $L^2(\mathbb{R})$  的标准正交基。空间  $V_j$  可写成正交和分解的形式

$$V_j = V_0 \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus \cdots \oplus W_{j-1} \quad (5-12)$$

对于每个  $f_j \in V_j$ , 有唯一分解

$$f_j(x) = f_0(x) + g_0(x) + \cdots + g_{j-1}(x) \quad (5-13)$$

其中,  $f_0 \in V_0$ ,  $g_k \in W_k$ ,  $k = 0, 1, \dots, j-1$ , 且  $\langle f_0, g_k \rangle = 0$ ,  $\langle g_k, g_l \rangle = 0$ ,  $k, l = 0, 1, \dots, j-1$ 。

记  $f_j(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{jk} \varphi_{jk}(x)$ ,  $g_j(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{jk} \psi_{jk}(x)$ , 则分解与重构算法为<sup>[151,152]</sup>

$$\begin{cases} c_{j-1,k} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \bar{h}_{n-2k} c_{jn} \\ d_{j-1,k} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \bar{g}_{n-2k} d_{jn} \end{cases} \quad (5-14)$$

$$c_{jn} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} h_{n-2k} c_{j-1,k} + \sum_{n \in \mathbb{Z}} g_{n-2k} d_{j-1,k} \quad (5-15)$$

为了对小波空间  $W_j$  进行分解, 记  $u_o(x) = \varphi(x)$ ,  $u_1(x) = \psi(x)$ ,  $\varphi(x)$  和  $\psi(x)$  的二尺度方程可以写为

$$\begin{cases} u_0(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k u_0(2x - k) \\ u_1(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k u_0(2x - k) \end{cases} \quad (5-16)$$

定义  $u_n$  为

$$\begin{cases} u_{2n}(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k u_n(2x - k) \\ u_{2n+1}(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k u_n(2x - k) \end{cases} \quad (5-17)$$

则称满足上面的双尺度方程的函数族  $\{u_n(x)\}_{n=0}^{+\infty}$  为尺度函数  $u_o(x) = \varphi(x)$  所确定的正交小波包<sup>[153]</sup>。

由式 (5-20), 有

$$\begin{cases} u_{2n}(x-l) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_{k-2l} u_n(2x - k) \\ u_{2n+1}(x-l) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_{k-2l} u_n(2x - k) \end{cases} \quad (5-18)$$

这里将  $\sqrt{2}u_n(2x-k)$  看作固定时间关于 k 的序列，则

$$u_n(x-k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{i \in Z} \bar{h}_{k-2i} u_{2n}(\frac{x}{2}-i) + \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{i \in Z} \bar{g}_{k-2i} u_{2n+1}(\frac{x}{2}-i) \quad (5-19)$$

设  $g_j^n(x) \in U_j^n$ , 则  $g_j^n(x)$  可表示为：

$$g_j^n(x) = 2^{j/2} \sum_{k \in Z} d_{jk}^n u_n(2^j x - k) \quad (5-20)$$

可得小波包分解算法

$$\begin{cases} d_{jl}^{2n} = \sum_{k \in Z} \bar{h}_{k-2l} d_{j+1,k}^n \\ d_{jl}^{2n+1} = \sum_{k \in Z} \bar{g}_{k-2l} d_{j+1,k}^n \end{cases} \quad (5-21)$$

由式 (5-19) 可得小波包重构算法<sup>[154]</sup>为：

$$d_{j+1,l}^n = \sum_{k \in Z} (h_{l-2k} d_{jk}^{2n} + g_{l-2k} d_{jk}^{2n+1}) \quad (5-22)$$

### 5.3.4.2 管道泄漏信号的小波包消噪处理

在 5.3.3.2 中，利用不锈钢管道泄漏模拟系统进行管道泄漏实验时，现场的振动噪声和环境较为复杂，使管道泄漏声发射信号受到较强的噪声污染。本文采用 coiflets4 小波包对信号进行了三层分解。

用小波包算法对信号做 k 层分解，每一次分解将上层 j 的第 n 个频带进一步分割变细为下层 j+1 的第 2n 和 2n+1 两个子频带，则它在第 k 层所形成的频域被分成  $0 \sim f_s/2^k$ ,  $f_s/2^k \sim 2f_s/2^k$ , ...,  $(2^k-1)f_s/2^k \sim f_s$ , 其中  $f_s$  是信号中的最高频率。基于 coiflets4 小波包和 Shannon 熵标准，对 1”和 6”传感器采集的泄漏信号进行 3 层分解，可得到 s(3,0)~s(3,7) 共 8 个小波包，各小波包的频率范围分别为 s(3,0): 0~25 KHz、s(3,1): 25 ~50 KHz、s(3,2): 50~75 KHz、s(3,3): 75~100 KHz、s(3,4): 100~125 KHz、s(3,5): 125~150 KHz、s(3,6): 150~175 KHz、s(3,7): 175~200 KHz，如表 5.3 所示。

表 5.3 小波包各级频带能量的百分比

小波包	S(3,0)	S(3,1)	S(3,2)	S(3,3)	S(3,4)	S(3,5)	S(3,6)	S(3,7)
各频带能量(%)	85.66	7.33	0.35	3.87	1.67	0.13	2.29	0.29

分析各频段的能量特征，根据各频带的能量百分比，提取包含特征信息丰富的小波包  $s(3,0)$  和  $s(3,1)$  作为特征小波包，进行信号重构，重构后的结果如图 5.20 所示。

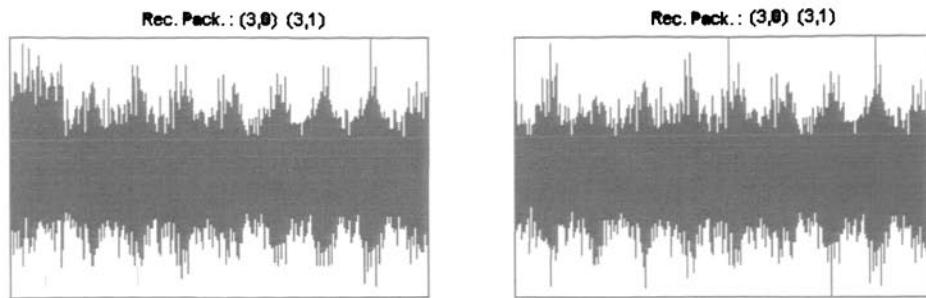


图 5.20  $s(3,0)$ ， $s(3,1)$  小波包的重构信号

对重构后信号做互相关分析，计算出  $\Delta t = 1334 \mu s$ ，由实测波速（6948 m/s）计算出泄漏点距离 1°传感器之间的距离为  $d=654.3$ ，与真实值之间的误差为 12.7%。可见，采用小波包对声发射信号进行分解和重构后进行相关分析，泄漏点的定位精度有了一定提高。

### 5.3.5 管道泄漏信号的 HHT 分析

Hilbert—Huang 变换是由美国国家航空航天局（NASA）戈达德空间飞行中心的美籍华人 Norden E. Huang（黄锷）博士及其同事于 1998 年提出的一种新的非线性、非平稳的信号处理方法<sup>[155,156]</sup>。其最大特点是采用经验模态分解（Empirical Mode Decomposition, EMD）技术，将源于数据并由数据导出的模式函数组作为分解的基函数，使数据分解为一组本征模函数（Intrinsic Mode Function, IMFs），分解唯一，且分解得到的 IMFs 之间具有正交性。分解出的各个固有模式分量突出了信号的局部特征，对各个分量进行分析便可更准确、有效地把握信号特征信息。相对于小波变换，EMD 方法是一种更精细的正交分解方法，它可以根据被分析信号本身的特点，自适应地选择频带，确定信号在不同频段的分辨率。它采用经验模式分解技术，经验模态分解被认为是近年来信号分析的一个突破，是一种自适应的信号分解方法，非常适用于对非平稳信号分析。

声发射信号具有强烈的非平稳特征，采用 HHT 时频分析方法对声发射信号的成分进行本质分析，可以为解决结构无损检测中有效声发射检测信号的识别及特征提取等问题提供新的思路。

#### 5.3.5.1 基于 EMD 信号分析方法<sup>[157-159]</sup>

Hilbert—Huang 变换由经验模式分解方法及 Hilbert 变换两部分组成，其核心

是经验模式分解，把复杂的信号分解成若干固有模式函数或固有模式信号（IMFs），再对IMF进行Hilbert变换，得到每一个IMF随时间变化的瞬时频率和振幅。

EMD算法本质上是一种将时域信号按频率尺度分解的数值算法，其结果是将信号中不同尺度的波动或趋势逐级分解出来，产生一系列具有不同特征尺度的固有模态函数。固有模态函数必须满足两个条件：

- (1) 曲线的极值点和零点的数目相等或至多相差 1；
- (2) 在曲线的任意一点，包络的最大极值点和最小极值点的均值等于零。

管道声发射检测过程中获得的是比较复杂的信号，并不一定满足本征模态函数的条件。事实上，我们获取的很多信号都是如此。因此，Norden E. Huang进行了如下假设：任何信号都是由一些不同的固有模态组成的；每个模态可以是线性的，也可以是非线性的；其局部极值点数和零点数相同，且上下包络线关于时间轴局部对称；任意时刻，一个信号都可以包含许多固有模态信号，如果模态之间互相重叠，便形成复合信号。

在上述假设条件下，可以用EMD将信号的本征模态筛选出来，其步骤如下：

- 1、给变量赋初值： $r_0(t) = x(t)$ ,  $i=1$ ;
- 2、提取第*i*个IMF分量：
  - (a) 给变量赋初值： $h_0(t) = r_i(t)$ ,  $j=1$ ;
  - (b) 确认  $h_{j-1}(t)$  的所有局部极大值点和极小值点;
  - (c) 用三次样条函数对  $h_{j-1}(t)$  的局部极大值点和极小值点插值形成上、下两条包络线;
  - (d) 计算上下包络线平均值  $m_{j-1}(t)$ ;
  - (e) 计算差值： $h_j(t) = h_{j-1}(t) - m_{j-1}(t)$ ;
  - (f) 利用标准偏差 SD 的值判断每次筛选结果：

$$SD = \sum_{i=0}^r \frac{|h_j(t) - h_{j-1}(t)|^2}{h_j(t)^2} \leq \varepsilon, \quad (5-23)$$

$\varepsilon$  的值在 0.2 到 0.3 之间，标准偏差满足上式，则停止计算并令： $imf_i(t) = h_j(t)$ ，否则转到 (b) 并  $j = j+1$ ；

- 3、 $r_i(t) = r_{i-1}(t) - imf_i(t)$ ;
- 4、若  $r_i(t)$  极值点数不少于 2 个，则  $i = i+1$ ，转到 2；否则，分解结束， $r_i(t)$  是残余分量。

算法最后可得：

$$x(t) = \sum_{i=1}^n imf_i(t) + r_n(t), \quad (5-24)$$

式中,  $r_n(t)$  代表信号的平均趋势, 即原始数据序列可以表示为固有模态函数分量和一个残余项之和。

一般说来, 式 (5-23) 中的 SD 值越小, 所得的固有模态函数的线型和稳定性就越好, 能够分解出的固有模态函数的个数就越多, 当然分解所用的时间也较多; 反之, 分解出的固有模态数目较少, 并且所用时间较少。研究表明<sup>[160]</sup>: SD 值介于 0.2~0.3 时, 既能保证“稳健”的分解过程, 又能使分解得到的固有模态函数具有相应的物理意义。

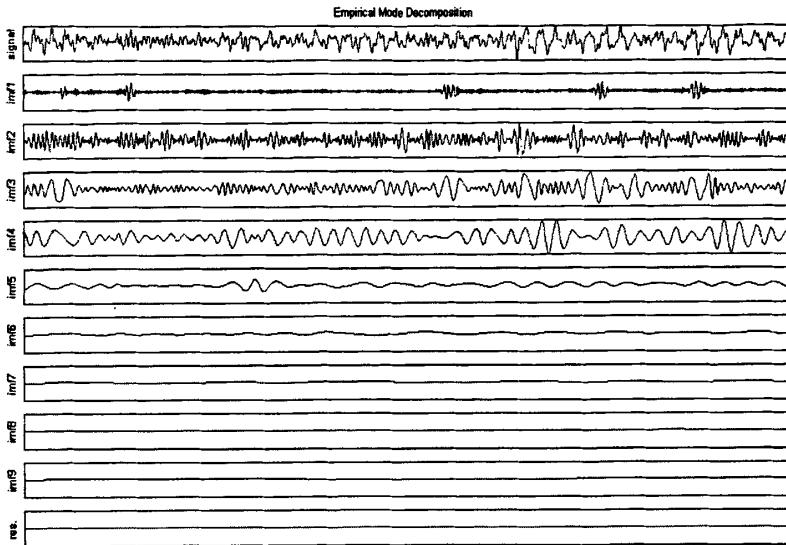
### 5.3.5.2 管道泄漏信号分析结果

管道泄漏产生的声发射信号具有的非平稳特征非常明显, 因此, 采用 HHT 时频分析方法可以对声发射信号的成分进行本质分析。对管道泄漏声发射信号进行经验模式分解后, 可在时域内对信号进行分析, 由于固有模式函数代表了信号的内在波动模式, 因此对分解后的固有模式函数进行分析可以获得信号中更丰富的波动信息。

在管道检测过程中, 现场的环境一般都比较复杂。传感器接收到的有效信号中往往包含有一定量的噪声信号, 因此, 从实测信号中剔除干扰噪声、提取有效信息是一项非常重要的工作。由于实测信号及其干扰信号都属于非稳态信号, 因此很难通过对实测数据直接滤波的方法来予以消除干扰。考虑到EMD方法总是将信号中最主要的成分先提取出来, 因此可以尝试利用分解得到的前几个IMF来恢复被干扰的真实信号, 而对于后几个IMF, 干扰的成分比较突出, 可以直接将其滤除。再把所有处理后的IMF与趋势项重新构造, 就得到没有干扰的数据。

图 5.21 为 1" 传感器采集的管道泄漏声发射信号的原始波形及其 EMD 分解结果。该信号经 EMD 分解后得到 9 个不同的固有模式函数 (如图所示从上到下依次排列), 以及一个表征趋势的残余分量。由于得到的残余分量是单调的, 幅值也较小, 对于声发射信号的分析作用不大, 故在声发射信号分析中可以不考虑残余分量的影响。

从图中可以看出, IMF 6 及其以后的固有模态振幅已经相当小, 前五个模态已基本描述了该种信号的特征。根据管道泄漏声发射信号的特征, 在五个有效 IMF 分量中, 可以确定分量 IMF1、IMF2 和 IMF3 (具有明显的声发射物理意义) 具有典型的泄漏声发射信号的特点。

图 5.21 泄漏信号 EMD 分解结果 (1<sup>st</sup>通道)

因此，选取前 IMF1~IMF3 三个固有模态分量进行重构，重构后的信号如图 5.22 所示。

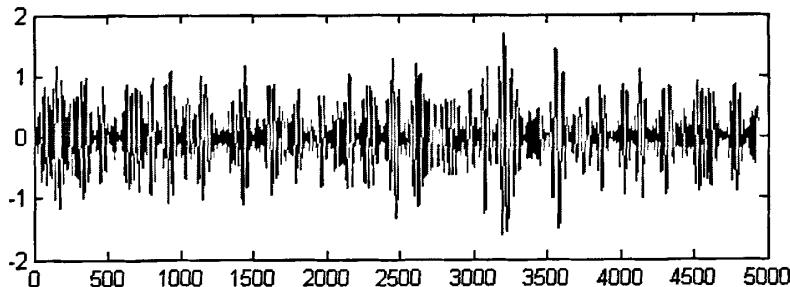
图 5.22 根据 EMD 分解结果重构的信号 (1<sup>st</sup>通道)

图 5.23 为 6<sup>th</sup>传感器采集的管道泄漏声发射信号的原始波形及其 EMD 分解结果，该信号经 EMD 分解得到 8 个不同的固有模式函数。与 1<sup>st</sup>传感器采集的管道泄漏声发射信号的分解结果类似，IMF 6 及其以后的固有模态振幅已经相对较小。前五个有效 IMF 分量中，分量 imf2、imf3 和 imf4 具有典型的物理意义。

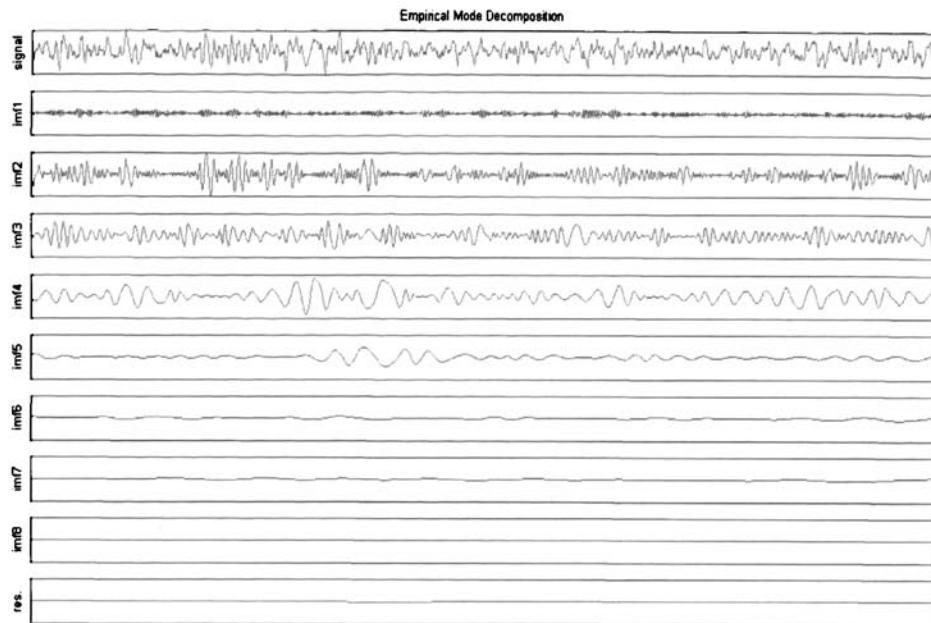


图 5.23 泄漏信号 EMD 分解结果 (6"通道)

因此，选取 IMF2~IMF4 三个固有模态分量进行重构，重构后的信号如图 5.24 所示。

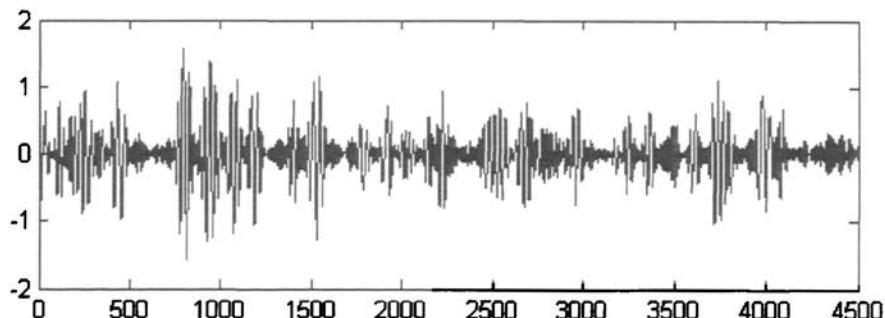


图 5.24 根据 EMD 分解结果重构的信号 (6"通道)

对重构后的信号作相关分析，可以计算出泄漏信号到达传感器的时差为  $\Delta t = 1366 \mu s$ ，由式 (5-1)，泄漏点距离第一个传感器之间的距离为  $d = 544.5$ ，与真实值之间的相对误差为 6.0%。可见，采用 EMD 分解并对包含有效声发射信号特征的 IMF 分量进行重构能够提取管道泄漏声发射信号的本征特征，使泄漏点的定位精度得到进一步提高。

### 5.3.5.3 HHT 时频分析与小波分析方法的比较

Hilbert—Huang 变换基于信号的局部特征时间尺度，将信号自适应地分解为

若干个 IMF 分量之和，使得瞬时频率具有了实际的物理意义，同时也使这种新的时频分析方法不同于用很多谐波分量来表示复杂的非线性与非平稳信号的传统方法，如傅立叶方法，也不同于小波或小波包分析中尺度的频率定义方法，而是同频率的经典定义方法相一致，从而可以精确的给出信号的能量随频率和时间的联合分析情况，非常适合于处理非线性和非平稳信号。与小波分析方法相比，Hilbert—Huang 变换在声发射信号处理方面有如下优点<sup>[161-163]</sup>：

(1) 经验模式分解和小波包分解都可以对声发射信号进行分解，但是所得到的结果却有很大区别。EMD 方法根据信号本身的局部特征信息进行自适应的分解，基函数在分解过程中自适应地随信号产生，因此，分解得到的各个 IMF 分量包含了原始信号的局部特征信息，具有一定的物理意义；而采用小波包变换对信号进行分解时，需要预先确定小波基函数，而且得到的分解结果是某一固定频率段的时域波形，因此小波分解不是一种自适应的分解方法。

(2) EMD 分解与小波包分解都可以对声发射信号进行分解而实现多分辨率分析，然而分辨率的大小是不同的。EMD 方法将声发射信号自适应地分解为若干个 IMF 分量之和，每个 IMF 分量包含了不同的特征时间尺度，从而将声发射信号的特征信息在不同分辨率下表现出来，而且分辨率的大小是随不同的信号而改变的。因此，EMD 方法可以实现自适应的多分辨率分析。而对于小波包分解来说，一旦选择了小波基，分辨率的大小也就确定了，而且是恒定不变的。因此，小波分解只能实现恒定的多分辨分析。

从管道泄漏声发射信号的应用处理上看，HHT 分析方法比小波包时频分析方法给出的时间、频率分辨率要高得多，具有很强的频率识别能力。根据有效的固有模式重构的信号能够更真实地反映管道泄漏声发射信号的本质特征，从根据 HHT 变换和小波包变换重构后的信号的相关分析结果来看，根据特定 IMF 序列重新构造的信号的相关程度更高，定位结果也更精确。根据原始信号、小波包分解后的重构信号，以及 HHT 变换后的得到有效 IMF 分量的重构信号进行互相关分析，计算得到的两传感器接收该泄漏信号的时差，以及泄漏点位置如表 5.3 所示。

表5.3 根据原始信号、小波包分解结果及HHT变换结果计算的时差及泄漏点位置

定位计算	相关系数	时差(μs)	泄漏点位置	误差
直接进行相关分析的结果	0.754	1419	360.4 mm	37.7%
小波包分解后的相关分析结果	0.912	1337	544.5 mm	12.8%
HHT分解后的相关分析结果	0.992	1366	654.3 mm	6.0%

## 5.4 本章小结

在声发射管道检测技术中，管道腐蚀及裂纹等动态缺陷激发的是突发型声发射信号，而泄漏是产生的声发射信号则是连续的，二者在定位原理上存在较大差异。本章对这几种声发射信号在管道中的传播和衰减特性进行了分析，研究了其定位原理，并采用小波包分析方法及 Hilbert—Huang 时频分析方法，提取管道泄漏声发射信号的本质特征，通过对提取的特征频段信号或特征分量进行信号重构，并对重构后的信号进行互相关分析计算，提高了管道泄漏点的定位精度。

1、分析了管道腐蚀及裂纹产生的突发型声发射信号的定位原理及源定位的影响因素，通过实验对管道裂纹产生的声发射信号在管道中的传播和衰减情况进行了研究，验证了不同的管道特征对声发射信号传播过程的影响，其中包括法兰、焊缝、三通、支管，以及管道直径的改变等，对定位误差产生的原因进行了分析，并提出了分别基于波速、定位参数、及衰减分析的定位补偿方法。

2、采用声发射参数对管道在加载过程中裂纹“开裂前兆—开裂—扩展—快速断裂”的全部过程进行解释，并对管道裂纹的扩展速率进行了估算，弥补了根据常规力学方法在管道裂纹扩展速率预测方面的不足。

3、通过对管道泄漏声发射信号的传播特性的分析，研究了泄漏产生的连续型声发射信号的参数特征。通过在实验管道上进行的气体压力管道声发射泄漏检测实验，研究了管道泄漏声发射信号参数随压力、泄漏孔径大小、信号传播距离等的变化规律。

4、针对管道泄漏信号受到噪声干扰而无法直接采用互相关分析的方法获取信号时差的问题，采用小波包分解技术对管道泄漏声发射信号进行分解，然后提取能量丰富的特征小波包进行重构，并对重构后的频段做互相关分析。相对于未进行小波包分解之前，两传感器接收信号的互相关系数及泄漏点的定位精度均有提高。

5、将 Hilbert—Huang 时频分析方法引入到声发射信号处理及特征提取领域，对基于经验模式分解（EMD）的信号分析方法进行了研究。对管道泄漏声发射信号进行了 EMD 的分解，通过提取包含声发射特征的 IMF 分量进行信号重构，并对重构后的信号进行互相关分析计算，使管道泄漏点的定位精度得到更大提高。并对基于 HHT 的时频分析方法与小波包时频分析方法在管道泄漏声发射信号特征提取方面的应用进行了比较。结果表明：Hilbert—Huang 变换是表征声发射信号的非平稳特征及管道泄漏声发射信号特征参数提取的有效工具。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 总结

随着世界石油工业的迅速增长和能源需求的不断增加，原油和成品油的开发及储备受到了世界各国的普遍关注。经济的快速发展，使得石油、天然气在我国能源需求中的比例逐年加大。作为油品和天然气的运输及储存设备，管道和储罐的安全性一直受到国家和石化企业的高度重视。常规的无损检测方法均属于静态检测或非受力状态下检测，只能检测出固有缺陷。而有些缺陷由于开始时的疲劳源很小，因而常规的静态无损检测方法很难发现，但其在受力状态下便会产生扩展，且扩展速度很快，极易形成严重的后果。声发射对活性缺陷比较敏感，它能够在加载的条件下，探测到在外加结构应力下缺陷的活动情况，得到缺陷在应力作用下的疲劳裂纹的扩展信息，能够预测缺陷对结构的实际损伤程度，并对被测结构的完整性进行评价。随着人们对声发射源和声发射信号传播理论研究的更深层次的认识，声发射检测技术正面临着全新的更高层次的发展前景。

本文在查阅大量国内外管道及储罐安全检测技术，获取先进的管道及储罐缺陷无损检测研究成果的基础上，对管道声发射无损检测技术和常压储罐罐底的声发射在线检测技术进行了研究。论文的主要工作如下：

- 1、分析了声发射现象产生机理及声发射检测的基本原理，对纵波、横波、Rayleigh 波和 Lamb 波等不同模态的声发射波的传播特性和衰减特性进行了研究。
- 2、对大型常压立式储罐底板声发射在线检测技术的基本原理及声发射源定位技术进行了研究。采用任意三角形网络定位技术，最大限度地覆盖了检测区域，扩大罐底声发射检测的有效监测范围，提高了罐底缺陷定位的准确性。
- 3、对声发射波在无载荷和水载作用下的钢板中的传播和衰减特性进行了详细分析，并由此确定了罐底声发射在线检测中有效声波的传播路径。在此基础上，研究了罐底声发射检测的传感器布置方案，采用该方案能够有效接收通过油品传播的罐底声发射信号。
- 4、根据固定顶式储罐罐顶油品滴落形成的噪声与罐底泄漏噪声来源方向的不同，提出了基于双传感器组的罐底声源方向识别技术。采用该技术可以有效区分储罐检测过程中声发射信号的来源方向，抑制来自非检测区域的噪声干扰。通

通过对容积  $3000\text{ m}^3$  的固定顶煤油储罐的现场检测实验，验证了该方法的有效性。

5、对 BP 神经网络的算法和网络结构进行了研究，根据储罐底板声发射信号的特点及不同声发射源的类型，构建了用于罐底声发射源性质判断的模式识别神经网络。采用从典型声发射信号库中抽取的声发射信号样本，对 BP 神经网络进行训练和验证，训练后的网络能够很好地区分罐底声发射检测中的有效声发射信号和干扰噪声信号之间的差异。

6、在对罐底裂纹、腐蚀及泄漏等不同性质的声发射源进行特征分析的基础上，研究了小波分析与 BP 神经网络相结合，提高神经网络模式识别能力的方法。利用小波变换把声发射信号分解到不同的频段，提取不同频带上声发射信号的小波频谱或能谱特征，构造神经网络学习样本集的特征向量，使神经网络获取到更丰富的声发射信号特征。采用该方法后，神经网络对罐底腐蚀、裂纹扩展和泄漏等声发射源的模式识别能力有了较大提高。

7、采用声发射罐底在线检测技术对某炼油厂的四台不同容积、不同服役年限、分别盛放不同介质的立式储罐底板进行了现场检测，在获取罐底缺陷原始实验数据后，采用以小波特征向量作为输入向量构建和培训 BP 神经网络对数据进行分析，成功地消除了现场检测数据中的大量噪声信号，并对罐底有效声发射源的性质进行了判断。

8、研究了罐内介质粘度，液位高度，储罐直径和检测温度等参数对罐底检测声发射数据的频度和活动度的影响，并提出了相应的修正因子。最后，根据四台储罐现场检测数据的神经网络模式识别结果，对罐底结构的完整性进行了分级。根据声发射检测结果，3#储罐底板的腐蚀状况较为严重，被判定为 D 级罐，经开罐后，验证了罐底声发射的检测方法的有效性。

9、通过实验对管道腐蚀及裂纹产生的声发射信号在管道中的传播和衰减情况进行了研究，验证了不同的管道特征对声发射信号传播的影响，其中包括法兰、焊缝、三通、支管，以及管道直径的改变等，对定位实验中定位误差产生的原因进行了分析，并提出了相应的定位补偿方法。

10、采用声发射参数对管道在加载过程中裂纹“开裂前兆 — 开裂 — 扩展 — 快速断裂”的全部过程进行解释，并对管道裂纹的扩展速率进行了估算，弥补了常规力学方法在管道裂纹扩展速率预测方面的不足。

11、通过对管道泄漏声发射信号的传播特性的分析，研究了泄漏产生的连续型声发射信号的参数特征。通过在实验管道上进行的气体压力管道声发射泄漏检测实验，研究了管道泄漏声发射信号参数随压力、泄漏孔径大小、信号传播距离等的变化规律。

12、对管道泄漏产生的连续型声发射信号的定位原理和特征提取技术进行了

研究。采用小波包分解技术对管道泄漏声发射信号进行分解后，提取能量丰富的特征小波包进行重构，并对重构后的频段做互相关分析，获取不同传感器采集的泄漏声发射信号的时差。相对于未进行小波包分解之前，两传感器接收信号的互相关系数及泄漏点的定位精度均有提高。

13、采用 HHT 时频分析方法对管道泄漏声发射信号进行了基于经验模态(EMD)的分解，通过提取包含有效声发射信号特征的 IMF 分量进行信号重构，并对重构后的信号进行互相关分析计算，使管道泄漏点的定位精度得到更大提高。并对基于 HHT 的时频分析方法与小波包分析方法在管道泄漏声发射信号特征提取方面的应用进行了比较。

## 6.2 本论文的创新之处

本论文针对大型常压立式储罐罐底声发射在线检测技术，以及管道声发射缺陷检测技术存在的一些问题，提出了解决方法，其中创新性成果如下：

1、采用小波分析与 BP 网络相结合的方法，提高了神经网络对罐底不同性质声发射源的模式识别能力，提高了罐底结构完整性评价的可靠性。

大型常压储罐底板检测过程中，罐底缺陷产生的有效声发射源容易受到噪声的干扰，导致声发射信号特征模糊，使信号的分析产生困难。本文通过对罐底不同性质声发射源的特征分析，利用小波变换把声发射信号分解到不同的频段，提取不同频带上声发射信号的小波频谱或能谱特征，构造神经网络学习样本集的特征向量，使神经网络获取到更丰富的声发射信号特征，提高了神经网络对罐底腐蚀、裂纹扩展和泄漏等不同性质的声发射源的模式识别能力，使基于声发射在线检测技术的储罐底板结构完整性评价结果更加精确。

2、提出基于双传感器组的罐底检测声源方向识别技术，有效屏蔽了来自非罐底检测区域的干扰声源信号，使声发射技术得以应用于盛放挥发性油品的固定顶式储罐的罐底在线检测。

固定顶储罐中挥发的油品易在油罐的罐顶内部凝结。当凝结的介质滴落在罐内油面上时，将产生大量噪声。由于滴落噪声在检测过程中随时可能发生，而且噪声直接在油品中传播，与泄漏信号十分相似，故极难区分。考虑到滴落噪声与罐底腐蚀及泄漏声发射信号的声源方向不同，本文提出基于双传感器组的声源方向识别技术，其原理就是在检测传感器上方布置另外一排辅助传感器，当“护卫”传感器首先检测到声源信号时，通过调整主传感器组中与护卫传感器相对应的检测通道的闭锁时间，可以使随后被触发的主检测通道忽略该次撞击。通过对容积  $3000\text{m}^3$  的固定顶煤油储罐现场检测实验，验证了该方法可以有效抑制来自非罐底检测区域的噪声信号。

3、首次将 HHT 时频分析方法用于声发射信号的分析与特征提取，提高了声发射管道泄漏检测的定位精度。

把一种新的非线性、非平稳信号的分析方法——HHT 时频分析方法，引入到声发射信号分析与特征提取的研究领域。HHT 时频分析基于经验模式(EMD)方法，根据信号本身的局部特征信息对信号进行自适应的分解，因此，分解得到的各个 IMF 分量包含了原始信号的局部特征信息，能够直接、真实的反映了声发射信号的非平稳特性。本文对管道泄漏声发射信号进行了 HHT 时频分析研究，通过提取包含有效声发射信号特征的 IMF 分量进行信号重构，提高了管道泄漏点的定位精度，验证了 Hilbert—Huang 变换是表征声发射信号的非平稳特征及管道泄漏声发射信号特征参数提取的有效工具。

4、采用声发射方法对管道在加载过程中裂纹扩展和断裂的全部过程进行分析，提出了基于声发射参数的管道裂纹的扩展速率估算方法。

管道工作时承受的是循环载荷(交变载荷)的作用，管道上的腐蚀裂纹会随着交变载荷的变化而不断发生扩展。如果能对管道裂纹的扩展速率进行准确预测，就可以在裂纹失稳前及时采取措施，避免泄漏事故的发生。本文提出采用声发射参数对管道在加载过程中裂纹“开裂前兆—开裂—扩展—快速断裂”的全部过程进行判断，并采用声发射计数率对管道裂纹的扩展速率进行估算，弥补了常规力学方法在管道裂纹扩展速率的动态预测方面的不足。

### 6.3 研究目标展望

立式储罐罐底的声发射在线检测技术是制定储罐维修计划的一个重要内容，虽然不能代替储罐罐底的内部检验和维修，但其优点也是非常明显的，它可以帮助确定储罐是否需要维修，以及需要维修的储罐的优先权，优化维修资源，适合于风险检验计划。与压力容器的声发射检测相比，大型常压立式储罐的声发射检测不但在方法上有所不同，而且检测工作开展得较晚，理论上也相对不成熟，可参考的成熟经验很少，但其应用前景却非常广阔。目前，本课题已经在声发射波的传播理论、检测传感器的布置方案、声发射信号的特征提取与识别等方面进行了大量的研究工作，并得到了一些有益的结论。后续工作可在此基础上进行更深入的探索与研究。

#### 1、储罐罐底声发射源的定位精度的进一步提高

目前，声发射罐底缺陷检测的定位精度较低，仅为罐底直径的 10~20%，因此，深入研究声发射波在载荷作用下的传播特性及模态变化，研究各种不同的检测条件对定位结果的影响，消除伪定位，对于提高储罐罐底声发射源的定位精度具有积极的意义。

## 2、重要石油储运设备的声发射在线监测

油田的重要设备、关键部位中动态缺陷的扩展将导致整个结构的失效，也常常引发恶性事故的发生。储罐（或管道）在发生腐蚀、破损及泄漏之前都会产生大量的声发射信号，采用声发射技术对重要的石油储运设施进行现场在线连续监控，可以快速捕捉到这些信息，并且可以通过组建有线或者无线以太网的方式将信息即时传回监控中心，实施远程监控。

## 3、管道外包覆层及管道内介质对声发射波传播特性的影响方面的研究

采用声发射技术对管道缺陷进行检测时，就检测效果而言，气体管道要比流体管道易于检测，低粘度流体管道要比高粘度流体管道易于检测，架空管道要比埋地管道容易检测。因此，深入研究管道内介质及外包覆层等结构对声发射波的传播及衰减特性的影响，根据具体的检测条件选择适合的声发射模态，以及采用特殊结构的传感器，对于实现管道，尤其是输送高粘度介质的埋地管道的长距离检测具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] 戴光, 李伟, 张颖, 储罐的声发射在线检测技术与研究进展, 中国第十届声发射学术研讨会论文集, 16~20
- [2] 胜山邦久编著, 冯夏庭译, 雷兴林校, 声发射(AE)技术的应用, 冶金工业出版社, 1997年7月, 北京
- [3] 郑朝霞, 国内外管道运输情况综述, 物流技术, 2003(2): 10~11
- [4] 杨祖佩, 推动管道技术发展的有关问题的研究, 管道技术与设备, 1994(6), 1~5
- [5] 严大凡, 翁永基, 董绍华编著, 油气长输管道风险评价与完整性管理, 化学工业出版社, 2005年6月, 北京
- [6] 关卫和, 沈纯厚, 陶元宏等, 大型立式储罐在线声发射检测与安全性评估, 压力容器, 2005, 22(1): 40~44
- [7] 李进宁, 地上储罐的检测与维修—API 635介绍, 油气储运, 1994, 13(4): 48~50
- [8] 邹鹏, 钢质拱顶油罐罐顶腐蚀与防护加固措施, 油气储运, 1992, 11(1): 39~41
- [9] 倪建乐, 立式圆柱形油罐基础形状和罐底板寿命, 油气储运, 1994, 13(5): 48~50
- [10] 王疆戈, 中国主要管道分布情况, 中国石化, 2004(7): 8~9
- [11] 王为民, 国内外石油管道输送技术发展综述, 管道技术与设备, 1997(4): 4~8
- [12] 梅云新, 中国管道运输的发展与建设, 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(2): 108~111
- [13] 陈世利, 埋地管道防腐层缺陷检测与评价技术研究: [博士学位论文], 天津: 天津大学, 2002
- [14] 俞蓉蓉, 蔡志章主编, 地下金属管道的腐蚀与防护, 石油工业出版社, 1998年7月
- [15] 钱建华, 关于中国石化油气管道发展的思考, 油气储运, 2003, 22(9): 18~21
- [16] 王同义, 许振清, 王伟国等, 油田常压储罐罐底腐蚀检测方法的选择, 腐蚀与防护, 2005, 26(2): 86~88

- [17] 李云花, 骆晓玲, 原油储罐的腐蚀与防护, 机械研究与应用, 2005, 18 (1) : 28~29
- [18] 刘志平, 康宜华, 杨叔子等, 储罐底板漏磁检测仪的研制, 无损检测 2003, 25 (5) : 234—236
- [19] Zhongqing You , David Bauer. Combining eddy current and magnetic flux leakage for tank floor inspection[J] . Materials Evaluation ,1994 ,52(7) :816 – 818
- [20] 陈加兴, 陈勇, 邓云峰, 漏磁技术在储罐钢板腐蚀检测中的应用, 油气储运, 2005, 24 (2) : 56~58
- [21] 沈功田, 戴光, 刘时风, 中国声发射检测技术进展, 无损检测, 2003, 25 (6): 302~307
- [22] 周琰, 分布式光纤管道安全检测技术研究: [博士学位论文], 天津; 天津大学, 2006
- [23] 靳世久, 王立宁等, 原油管道泄漏点定位技术, 石油学报, 1998, 19 (3): 93~97
- [24] 靳世久, 王立宁等, 瞬态负压波结构模式识别法原油管道泄漏检测技术, 电磁测量与仪器学报, 1998, 12 (1): 59~64
- [25] 王立坤, 靳世久等, 一种新型支线管网泄漏检测系统, 化工自动化及仪表, 2001, 28 (6): 55~58
- [26] G. J. Staff, Subsea Leak Detector, Pipeline and Gas Journal, 1987,214(6):36~37
- [27] Hyeon Jae Shin, J. L. Rose, Guided waves by axisymmetric and non-axisymmetric surface loading on hollow cylinders. Ultrasonics, 1999, 37: 355~363
- [28] D. C. Gazis. Exact analysis of the plane-strain vibrations of thick-walled hollow cylinders. Journal of the Acoustical Society of America, 1958, 30: 786~79
- [29] Gazis D C. Three-dimension investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders [J], J. Acoust. Soc. Am.,1959,31(5):568-573
- [30] M. J. S. Lowe, D. N. Alleyne, P. Cawley. Mode conversion of guided waves by defects in pipes. Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16: 1261~1268
- [31] P. J. van de Loo, How Reliable is Acoustic Emission (AE) Tank Testing? The Quantified Results of an AE User group Correlation Study! Proceedings of 7th European Conference on Non-destructive Testing,1998: 95~101
- [32] O.V. Nedzvetskaya, G.A. Budenkov, Calculation of the Acoustic Channel in Acoustic Emission Testing of Bottoms of Vertical Steel Tanks, Russian Journal of nondestructive testing,2003,Vol. 39(7): 779-781

- [33] A. V. Sokolkin, I. Yu. Levlev, Prospects of Applications of Acoustic Emission Methods to Testing to Testing Bottoms of Tanks for Oil and Oil Derivatives, Russian Journal of nondestructive testing, 2002, Vol. 38(2): 113-115
- [34] P. T. Cole, Acoustic Methods for the Evaluation of tank Integrity and Floor Condition, Technical Report: TR-107-74-06/93
- [35] Jeong-Rock Kwon, Geun-Jun Lyu, Tae-Hee Lee, Jee-Yoon Kim, Acoustic emission testing of repaired storage tank, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2001(78):373-378
- [36] 中华人民共和国机械行业标准《无损检测 常压金属储罐声发射检测及评价方法》(送审稿), 中国第十一届声发射学术研讨会论文集 (2006), 7~27
- [37] 戴光, 李善春, 李伟, 储罐的声发射在线检测技术与研究进展, 压力容器, 2005, 22 (3): 33~35
- [38] 李伟, 戴光等, 地上立式金属储罐腐蚀损伤的实验, 大庆石油学院学报, 2003, 27 (1): 99~102
- [39] 刘富君, 郑津洋等, 立式储罐罐底腐蚀状态声发射检测的实验研究, 压力容器, 2003, 20 (1): 12~15
- [40] 徐彦庭, 刘富君, 王亚东等, 以声发射技术为主的大型立式储罐现代综合检测技术展望, 中国第十一届声发射学术研讨会论文集, 36~42
- [41] Ming-Huei Yang, Chang-Pin Chou, An Investigation of Tank Bottom Leak Detection Using Acoustic Emission, Materials evaluation, 1998, Vol.56(7): 847-853
- [42] 杨明纬, 声发射检测, 机械工业出版社, 2004 年 3 月
- [43] Kwon Oh-Yang, Joo Yong-Chan. Source location in plate by using wavelet transform of AE signals. 14th International AE Symposium & 5th AE World Meeting (Vol. 4). Hawaii USA: 1998. 9-14
- [44] Rewerts Lance E., Roberts Ron A., Clark M Amanda. Dispersion compensation in acoustic emission pipeline leak location. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16(4): 427-434
- [45] Roberts Ron A., Rewerts Lance E., Clark M Amanda. The role of propagation characteristics in acoustic Emission pipeline leak location[J]. Renew of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1998, 17(5): 501- 508
- [46] Miller R. K., Pollock A. A., Finkel P., et al. The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled, buried pipelines. Journal of Acoustic Emission, 2001, 32(2): 245- 256
- [47] Clark M Amanda, Rewerts Lance E, Robbers Ron R. Experimental studies on the role of backfill and pipeline characteristics in the application of acoustic leak location to underground pipeline . Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16(4): 467- 473

- [48] 焦敬品, 何存富等, 基于导波理论的管道泄漏声发射定位新技术的研究, 机械工程学报, 2004, 40 (10): 77~81
- [49] 焦敬品, 李涌等, 压力管道泄漏的声发射检测实验研究, 北京工业大学学报, 2003, 29 (2): 144~146
- [50] 霍臻, 陈翠梅, 朱润祥, 压力管道声发射泄漏检测, 无损检测, 1997, 19(4): 105~107
- [51] 王祖荫, 用声发射检测管道泄漏的实试验研究, 中国锅炉压力容器安全, 1998, 15 (4) 34~37
- [52] 李光海, 王勇, 刘时风, 基于声发射技术的管道泄漏检测系统, 自动化仪表, 2002, 23(5): 20~23
- [53] CARPESTER S H. Sources of acoustic emission generated during plastic deformation of 7075 aluminum alloys[J]. Metallurgical transaction,1977, 8(10): 1629-1632
- [54] Z. Prevorovsky, M. Landa, M. Blahacek, et al. Ultrasonic scanning and acoustic emission of composite tubes subjected to multi-axial loading. ULTRASONICS. 36(1998): 531-537
- [55] S. H. Carpenter, M. R. Gorman. A Waveform Investigation of Acoustic Emission Generated during the Deformation and Cracking of 7075 Aluminum. Progress in Acoustic Emission VII. The Japanese Society for NDI,1994,105-112
- [56] Joo-suk Lee, Jong-o Lee, Sae-kyoo Oh. Source Characterizations of Acoustic Emission Wave During Tensile Test of CFRP by Analyzing Frequency Spectrum. Progress in Acoustic Emission. The Japanese Society for NDI, 1992, 53-62
- [57] Michael R. Gorman. Acoustic Emission for the 1990s. ULTRASONICS SYMPOSIUM, 1991,1039-1046
- [58] Heiple C. R., Carpenter S. H.. Acoustic Emission [M]. Mathiews JR, ed, New York: 1981
- [59] D. J. Buttle, C. B. Scruby. Characterization of Fatigue of Aluminum Alloys by Acoustic Emission, Part II – Discrimination between Primary and Other Emissions, Journal of Acoustic Emission, 1990,9(4):255-270
- [60] Dunegan H. L., Harris N., Acoustic emission, a new non-destructive tool [J]. Ultrasonics, 1969, 7(7): 160-166
- [61] D. C. Gazis. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation. Journal of the Acoustical Society of America, 1959, 31: 568~573
- [62] D. C. Gazis. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. II. Numerical results. Journal of the Acoustical society of America, 1959, 31: 573~578

- [63] Michael R. Gorman. Plate Wave Acoustic Emission. *Journal of Acoust. Soc. Am.*, 1991, 90(1):19~28
- [64] Moon Ho Park, In Sup Kim, Young Ku Yoon. Ultrasonic inspection of long steel pipes using Lamb waves. *NDT&E International*, 1996, 29(1): 13~20
- [65] Y. Cho, J. L. Rose. A boundary element solution for a mode conversion study on the edge reflection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999: 2097~2109
- [66] X. Zhao, J. L. Rose. Boundary element modeling for defect characterization potential in a wave guide. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40: 2645~2658
- [67] Jin Zhou Geng. Acoustic Emission Characteristics of C/E Laminate Beams during Bending Failure. *Progress in Acoustic Emission II*. 1984: 134~141
- [68] D. N. Alleyne, P. Cawley. Long range propagation of Lamb waves in chemical plant pipework. *Material Evaluation*, 1997, 53(4): 504~508
- [69] D. N. Alleyne, M. J. S. Lowe, P. Cawley. The inspection of chemical plant pipework using Lamb waves: Defect sensitivity and field experience. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1996, 15: 1859~1866
- [70] P. Cawley, D. Alleyne. The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures. *Ultrasonics*, 1996, 34: 287~290
- [71] R. C. Addison. Laser-based ultrasound arrays for generation and detection of narrowband, single mode Lamb waves. In: *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1994, 1201~1204
- [72] D.N. Alleyne, P. Cawley, The effect of discontinuities on the long range propagation of Lamb waves in pipes, *Proc. I Mech. E, Part E: J. Process Mech. Engng.* 210 (1996) 217-226
- [73] J. L. Rose, W. Zhang, Y. Cho. Boundary element modeling for guided wave reflection and transmission factor analyses in defect classification. *1998 IEEE Ultrasonics Symposium*, 1998: 885~888
- [74] 许肖梅著, 声学基础, 科学出版社, 2003年5月, 北京
- [75] Roberts T M, Talebzadeh M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(6): 695-712
- [76] Ronald B. Melton. Classification of NDE Waveforms with Autoregressive Models. *Journal of Acoustic Emission*, 1982, 1(4):266-270
- [77] Surgeon M. Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP Laminates. *NDT & E International*. 1999. 32(6): 311—322
- [78] H. Kwun, S.Y. Kim, M.S. Choi, S.M. Walker. Torsional guided-wave attenuation in coal-tar-enamel-coated, buried piping. *NDT&E International*. 37 (2004) 663~665

- [79] D. N. Alleyne, M. J. S. Lowe, P. Cawley. The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes. *Journal of Applied Mechanics*, 1998, 65: 635~641
- [80] T. M. Roberts, M. Talebzadeh. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. *JOURNAL OF CONSTRUCTIONAL STEEL RESEARCH*. 59(2003):695-712
- [81] W. H. Prosser, K. E. Jackson, S. Kellas, et al. Advanced waveform-based acoustic emission detection of matrix cracking in composites. *Materials Evaluation*. 1995(9):1052-1058
- [82] Miller Ronnie K, Mcintire Paul, et al. Nondestructive Testing Handbook (Vol.5) Acoustic Emission Testing[M]. Second edition, Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1987
- [83] 郑中兴编著. 材料无损检测与安全评估. 中国标准出版社. 2003.12, 北京
- [84] 沈功田, 耿荣生, 刘时风, 声发射信号的参数分析方法, 无损检测, 2002, 24 (2): 72~77
- [85] 王祖荫著. 声发射技术基础. 济南: 山东科学出版社. 1990
- [86] 耿荣生, 沈功田, 刘时风, 模态声发射—声发射信号处理的得力工具, 无损检测, 2002, 24 (8): 341~345
- [87] 岸 辉雄, 基于原波形分析的新型声发射技术, 无损检测, 1989, 11 (3): 81~85
- [88] J. M. Berthelot, M. Ben Souda. Frequency Analysis of Acoustic Emission Signals in Concrete. *Journal of Acoustic Emission*, 1993, 11(1):11-18
- [89] 徐彦庭, 王亚东, 刘富君, 声发射技术在探测储罐底板泄漏位置中的应用, 中国第十一届声发射学术研讨会论文集, 101~106
- [90] 许凤旌, 董卫平, 在线评估贮油罐底部腐蚀状况的经济有效技术, 中国第 9 届声发射学术研讨会论文集, 2001: 29~23
- [91] 张献军, 赵雄, 浮顶原油储罐检验与维修, 设备管理与维修, 2003 (2): 18~19
- [92] 李相怡, 油气田腐蚀与防护技术手册, 石油工业出版社, 1999, 北京
- [93] Ronnie K. M., Miller R. K.. Tank-bottom Leak Detection in Above-Ground Storage Tanks by Using Acoustic Emission. *Material Evaluation*, 1990, Vol.48(6):822-829
- [94] Nickolaus C. M.. Acoustic Emission Monitoring of Above-Ground Storage Tanks. *Material Evaluation*, 1988, Vol.46(4):508-512
- [95] Nordstrom R.. Direct Tank Bottom Leak Monitoring with Acoustic Emission. *Material Evaluation*, 1990, Vol.48(2):251-254
- [96] J. L. Rose. Ultrasonic Waves in Solid Media. Cambridge University Press, 1999

- [97] Davies J. T. *Turbulence Phenomena*. San Diego, California, Academic Press, 1972
- [98] 袁振明, 马羽宽, 何泽云编著, 声发射技术及其应用, 北京: 机械工业出版社, 1985
- [99] 金钟山, 刘时风, 耿荣生, 沈功田. 曲面和三维结构的声发射源定位方法. 无损检测, 2002, 24 (5) : 205~211
- [100] 马宏伟, 吴斌, 弹性动力学及其数值方法, 北京: 中国建材工业出版社, 2000
- [101] Parker A P. *The mechanics of fracture and fatigue*. London: E and F N Spon Ltd, 1981
- [102] Eckert E. G., Joseph W. Maresca. Detection of leaks in the Floor of Above-ground Storage Tanks by Means of a Passive Acoustic sensing System. Appendix A to An Engineering Assessment of Acoustic Methods of Leak Detection in Aboveground Storage Tanks. Washington, DC: American Petroleum Institute, API Publication No. 307, 1992
- [103] Eckert E. G. Joseph W. Maresca. The Acoustic Signal Produced by a leak in the Floor of an Aboveground Storage Tanks. Appendix A to An Engineering Assessment of Acoustic Methods of Leak Detection in Above ground Storage Tanks. Washington, DC: American Petroleum Institute, API Publication No. 322, 1994
- [104] 于鸿达, 段庆儒, 模拟与数字 AE 仪器的比较, 中国第十届声发射学术研讨会论文集, 2004, 67~71
- [105] Tschelesnig P., H. Theiretzbacher. Leakage Test by Acoustic Emission Testing(AET) on Flat Bottom Tanks. *Journal of Acoustic Emission*, 1985, Vol.4(2/3): 157-160
- [106] 蒋仕良, 李正旺, 骆海强, 许凤旌. PAC 公司罐底检测 TankPac<sup>TM</sup> 技术在天津石化炼油厂的应用. 中国第十一届声发射学术研讨会论文集: 112-115
- [107] 黄德双. 神经网络模式识别系统理论. 北京: 电子工业出版社, 1996 年 5 月
- [108] 李家林, 马羽宽, 董云朝等. 声发射检测中用人工神经网络剔噪的分析与研究[J], 无损检测, 1999, 21
- [109] 易若翔, 刘时风, 耿荣生等. 人工神经网络在声发射检测中的应用. 无损检测. 2002, 24 (11): 488~492
- [110] Rangwala S, Dornfeld D. Integration of Sensors via Neural Networks for Detection of Tool Wear States. American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division, 1987, 25: 109-120
- [111] 张平, 集成化声发射信号处理平台的研究: [博士学位论文], 北京: 清华大学, 2002

- [112] R.Sbarga, M.A.Friesel, R B Melton. Classification of Acoustic Emission Wavesform for Nondestructive Evaluation Using Neural Network. Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Florida, USA: SPIE, 1990.545-556
- [113] Almeida Adriano, Hill, Eric V. K. Neural Network Detection of Fatigue Crack Growth in Riveted Joints Using Acoustic Emission. Materials Evaluation, 1995, 53(1): 76-82
- [114] Tian Y., Lewin P. L., Davies A. E. Pattern Identification using Acoustic Emission Measurement and Neural Networks .IEE Conference Publication, 1999, 5(467): 541-543
- [115] Wilkinson P, Reuben R L, Jones J D C, et al. Tool Wear Prediction from Acoustic Emission and Surface Characteristics via an Artificial Neural Network. Mechanical Systems and Signal Processing. 1999, 13(6): 955-966
- [116] Kwon Oh-Yang, Joo Yong-Chan. Source location in plate by using wavelet transform of AE signals. 14th International AE Symposium & 5th AE World Meeting (Vol. 4). Hawaii USA: 1998. 9-14
- [117] Serrano E. P., Pablo M. A. Application of the wavelet transform to acoustic emission signal processing [J]. IEEE Transaction on signal Processing. 1995, 44(5): 1270-1275
- [118] 张平, 施克仁, 耿荣生, 沈功田, 小波变换在声发射检测中的应用, 无损检测, 2002, 24 (10): 436~442
- [119] Bjork A., Danielsson L. G. Spectra of wavelet scale coefficients from process acoustic measurements as input for PLS modeling of Pulp Quality [J]. Journal of Chemo-metrics, 2002(16): 521-528
- [120] Russell P. C., Cosgrave J., Tomtsis S., et al. Extraction of information from acoustic vibration signals using Gabor transform type devices [J]. Measurement Science & Technology, 1998,9(8): 1282-1290
- [121] Y. Meyer, Wavelets algorithms and Application, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1993
- [122] Y Higao. Acoustic Emission Frequency Domain Analysis. Progress in AE VII. The Japanese Society for NDI, 1994, 19-26
- [123] E P Serrano, M A Fabio. Application of the Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals Processing. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(5): 1270-1275
- [124] Kamala G, Hashemi J, Barhorst, et al. Discrete-Wavelet Analysis of Acoustic Emissions during Fatigue Loading of Carbon Fiber Reinforced Composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2001, 20(3): 222-238

- [125]戴光, 张宝琪, 朱国辉. 在役压力容器声发射源严重度的多级模糊综合评定方法研究. 中国安全科学学报. 1996, 6 (1): 30~33
- [126]陈钢, 沈功田, 李邦宪. 金属压力容器声发射源特性的研究. 中国安全科学学报. 2005, 15 (1): 98~103
- [127]戴光, 徐彦庭, 李伟等. 声发射源信号强度的“逆源”问题研究. 大气功能石油学院学报. 1998, 22 (3): 59~62
- [128]李一博, 靳世久, 吴刚, 杨庆, 王东升, 嵌入式系统在管道腐蚀漏磁通检测器地面标记系统中的应用, 天津大学学报, 2004 (2): 增刊: 258~261
- [129]Rae Min, Lee Joon-Hyun Acoustic emission technique for pipeline leak detection. Key Engineering Materials, 2000, 186(4): 888- 892
- [130]Miller R. K., Pollock A. A., Finkel P., et al. The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled , buried pipelines. Journal of Acoustic Emission, 2001, 32(2): 245- 256
- [131]沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射源定位技术. 无损检测, 2002, 24 (3): 114~117
- [132]Apostolos Tsimogiannis. Leak Detection—Buried Pipe Leak Detection Results, Acoustic Emission (AE) Test Report: FT-LT-123-04/2004
- [133]Rewerts Lance E., Roberts Ron A., Clark M Amanda. Dispersion compensation in acoustic emission pipeline leak location. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16(4): 427-434
- [134]刘时风, 李光海, 声发射仪器的研究进展, 中国第十届声发射学术研讨会论文集, 2004, 21~25
- [135]Roberts Ron A., Rewerts Lance E., Clark M Amanda. The role of propagation characteristics in acoustic Emission pipeline leak location[J]. Renew of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1998, 17(5): 501- 508
- [136]B.V. Samoilov, “In-line inspection, repairs used on ageing Russian product lines,” Oil & Gas Journal, International Petroleum New & Technology, November 1998: 42 – 46.
- [137]Jun Zhang, Designing a cost-effective and reliable pipeline leak-detection system, Pipe & Pipelines International, January–February 1997, pp20-25
- [138]Cao, Zhong, Chemical acoustic emissions from gas evolution processed recorded by a piezoelectric transducer. Sensors and Actuators, 1998, 50(1): 27-37
- [139]Maddox S. J. Fatigue strength of welded structures. Cambridge: Abington Publishing, 1991
- [140]Osama Hunaidi, Wing T. Chu. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. Applied Acoustics. 58 (1999) :235-254

- [141]Kenya Fukushima, Reiko Maeshima, Akira Kinoshita, et al. Gas pipeline leak detection system using the online simulation method. *Computers and Chemical Engineering.* 24 (2000): 453-456
- [142]J.M. Muggleton, M. J. Brennan. Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes. *Journal of Sound and Vibration.* 278 (2004): 527-537
- [143]Osama Hunaidi, Wing T. Chu. Acoustic characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. *Applied Acoustics.* 58(1999): 235-254
- [144]沈功田, 耿荣生, 刘时风. 连续声发射信号的源定位技术. 无损检测, 2002, 24 (4): 164~167
- [145]陈玉华, 刘时风等, 声发射信号的谱分析和相关分析, 无损检测, 2002, 24 (9): 395~399
- [146]Y. Gao, M. J. Brennan, P. F. Joseph, J. M. Muggleton, O. Hunaidi, A modal of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes. *Journal of Sound and Vibration,* 277(2004): 133-148
- [147]丁玉美, 高西全编著. 数字信号处理(第二版). 西安电子科技大学出版社. 2000. 10
- [148]王海清, 宋执环, 李平. 改进小波包算法及在故障检测中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2001, 35 (3): 307~311
- [149]彭玉华. 小波变换与工程应用. 北京:科学出版社, 1999.
- [150]褚福磊, 王庆禹, 卢文秀. 用声发射技术与小波包分解确定转子系统的碰摩位置[J]. 机械工程学报, 2002, 38 (3): 139~14
- [151]X. Li, Z. Yuan. Tool Wear Monitoring with Wavelet Packet Transform Fuzzy Clustering Method. *Wear,* 1998, 219(2):145 — 154
- [152]Knapp C. H., Gaiter G. C. The Generalized correlation method for estimation of time delay, IEEE, 1976, ASSP-24(4):1210-1218
- [153]Gaiter G. C. Coherence and Time Delay Estimation: and Applied Tutorial for Research Development, Test and Evaluation Engineers, IEEE Press, 1993
- [154]Qi Gang, Barhorst, Alan, et al. Discrete Wavelet Decomposition of Acoustic Emission Signals from Carbon-Fiber-Reinforced Composites .*Composites Science and Technology,* 1997, 57(4): 389403
- [155]N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long. The Empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proc. Roy. Soc. London,* 1998, 454:903-995
- [156]P. Flandrin, G. Rilling, P. Gon, Empirical mode decomposition as a filter bank, *IEEE sig. Proc. Lett.,* 2003,11(2): 112-114

- [157] Gabriel Rilling, Patrick Flandrin, Paulo Goncalves. On Empirical mode decomposition and its algorithms, Proc. IEEE-EURASIP workshop on nonlinear signal and image processing, 2003, 8-11
- [158] Z. Wu, N. E. Huang, Study of the characteristic of white noise using the Empirical mode decomposition method, Proc. Roy. Soc. London, Dec. 2003
- [159] E.P. Souza Neto, M.A. Custaud, C.J. Cejka, P. Abry, J. Frutoso, C. Gharib and P. Flandrin, Assessment of cardiovascular autonomic control by the Empirical Mode Decomposition, 4th Int. Workshop on Biosignal Interpretation, Como (I), pp. 123-126, 2002
- [160] Huang Daji, Zhao Jinping, Sun jilan, Practical implementation of Hilbert-Huang Transform Algorithm. Acta Oceanologica sinica, 2003, 22(1):1-14
- [161] Huang Daji, Zhao Jinping , Su Jilan On the end extending in the Hilbert-Huang Transform . Progress in Coastal Engineering and Oceanography , 1999, Vo1. 1. Coastal Oceanography of Asian. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 81~92
- [162] Guanghong Gai, The processing of rotor startup signals based on empirical mode decomposition. Mechanical Systems and Signal Processing. 20 (2006) 222 - 235
- [163] Z. K. Peng, Peter W. Tse, F. L. Chu. An Improved Hilbert—Huang Transform and its application in Vibration Signal Analysis. Journal of Sound and Vibration. 286(2005):187-205

## 发表论文和科研情况

### 发表的论文：

- [1] Sun Liying, Li Yibo, Jin Shiju, Study on Guided Ultrasonic Waves Propagating along Pipes with fluid loading, Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, Vol.6: 5037~5041 (Ei: 9187925)
- [2] 孙立瑛, 李一博, 靳世久, 宋志东, 张元凯, 纵向超声导波在管道中的传播特性的研究, Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, Vol.6: 5177~5181 (Ei: 9187941)
- [3] Jin shiju, Sun liying, Liu Guichun, Li yibo, Zhang Hong, Study on Ultrasonic Guided Waves in Fluid-filled Pipes surround by water, Proceedings of International Pipeline Conference, 2006, TK6
- [4] Li Yibo, Sun Liying, Song Zhidong, Zhang Yuankai, Study on Energy Attenuation of Ultrasonic Guided Waves Going through Girth Welds. Ultrasonics vol. 44,n1,pp 1111-1116, 2006 (Ei: 065210337181)
- [5] 李一博, 靳世久, 孙立瑛, 宋志东, 张元凯, 超声导波管道检测中导波模态及频率的选择, 天津大学学报, 2006, 37 (增刊): (EI: 063610098350)
- [6] 李一博, 靳世久, 孙立瑛, 超声导波在管道中的传播特性的研究, 电子测量与仪器学报, 2005, 19 (5): 63~66
- [7] Li Yi-bo., Sun Liying, Jin Shiju, Sun libo, Development of Magnetostriction Sensor for On-line Liquid Level and Density Measurement, Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation, Vol. 6: 5162~5166, 2006, (Ei: 9175667)
- [8] Li Yibo, Sun Liying, Jin Shiju , Pipe Elbow Inspection with Ultrasonic Guided Waves, Proceedings of the Seventh International Conference on Electronic Measurement and Instruments: 553~556, 2005 (ISTP: BDR74)
- [9] LI Yi-bo, JIN Shi-jiu, SUN Li-ying, Experimental Study on Ultrasonic Guided Waves in Fluid-filled Pipes Surrounded by Water, Proceedings of 6<sup>th</sup> International Symposium on Test and Measurement, 2005, Vol. (1):159~162 (ISTP: BCZ22)
- [10] 周琰, 靳世久, 张昀超, 孙立瑛. 分布式光纤管道泄漏检测和定位技术. 石油学报. 2006, 27(2): 121~124(Ei: 06209882150)

### 参与的科研项目：

- [1] 2004年6月—2005年2月, 参与完成与中国石油天然气管道局管道技术公司合作的“管道漏磁通检测器地面标记系统研发”项目。
- [2] 2004年9月~2006年9月, 参与完成与中国石油天然气管道局管道技术公司合作的“通径仪电子包系统研发”项目。

## 致 谢

本文是在导师靳世久教授的亲切关怀与悉心指导下完成的，在课题的研究及论文的撰写过程中，导师一直耐心细致地给予指导和分析，使论文研究得以顺利完成。导师渊博的知识、严谨求实的治学态度、精益求精的科学作风、对科学前沿敏锐的洞察力令我受益良多，这段时期的学习和研究经历必将成为我一生中最宝贵的财富，对我今后的人生起到重要的影响！衷心感谢导师几年来的谆谆教诲以及导师和师母在生活上给予的关心与照顾！

在博士学习和课题完成课程中，得到了曾周末教授、宋光德教授、毕玉玲老师、杨文敏老师、窦丽民老师，以及教研室其他老师的悉心指导和热心帮助，在此表示衷心感谢。

感谢李健副教授、陈世利副教授、李一博副教授、周琰博士后、张慧老师、张晓洁老师的热心帮助，在此表示衷心感谢！

在论文准备过程中，感谢曲志刚博士在信号处理方面给予的支持和帮助，感谢张虹在声发射实验中的配合工作，几年的学习和工作期间，还得到了詹湘琳博士、孙洁娣博士、诸葛晶昌博士，张宇博士，以及宋志东、张元凯、王铮、邢菲菲、林涛、曹海涛、郭晓莉、曹丽娜、刘延涛、刘元宾、温海昆、郭洪猛硕士等同学给予的帮助和启发，在此表示衷心感谢！

感谢美国物理声学公司（Physical Acoustic Corporation）的 Janson Dong 博士和 PAC 驻中国办事处的许凤旌首席代表、骆海强工程师在仪器调试方面给予的帮助和启发，以及所提供的数据支持，在此表示衷心感谢！

感谢渤海石油工贸有限公司的沙吉乐博士后、中国石油天然气总公司廊坊管道技术公司王立坤博士后，中国石油天然气管道局管道技术公司胜利油田钻井工艺研究院的魏茂安博士、崔谦博士在论文完成过程中给予的帮助和启发。

特别感谢我的亲人，感谢我的父亲孙福彬、母亲温晓芹在我学习期间默默的付出与奉献，感谢我的爱人李一博在论文最后阶段给予的大力支持，有了你们给予我的理解、鼓励和帮助，我才得以顺利完成博士期间的所有学业。

感谢所有曾帮助过我的老师、同学和朋友，谢谢你们对我的帮助和鼓励！

感谢所有审阅论文的老师，您们的意見将是极为宝贵的。

由于作者水平有限，论文难免存在不足之处，敬请批评指正。

孙立琪

2006年12月22日于天津大学