

# 物联网声发射无人值守定量泄漏监测

谢杰辉，谢志鹏，刘时风

(清诚声发射研究(广州)有限公司, 广州 510520)

**摘要:** 本文从原理上分析泄漏的声发射监测理论基础。通过实际现场泄漏实验, 得到相同压差条件下的不同泄漏量与声发射参数的定量关系; 相同阀门开度条件下不同压差与声发射参数及泄漏量的定量关系; 以及相同压差条件下的不同泄漏开度与声发射参数特征关系(罐壁堵头)。建立在线水管定量泄漏演示实验系统, 声发射采集器自动判断泄漏及泄漏量, 进而传输到云服务器, 设定报警条件, 达到报警条件时推送到手机, 开放云服务器供读者查阅。

**关键词:** 声发射; 泄漏; 定量; 物联网; 无人值守; 报警

**中图分类号:** TB51; TB52

**文献标识码:** B

## Acoustic emission unattended quantitative leakage monitoring of Internet of things

Xie Jiehui Xie Zhipeng Lui Shifeng

(QingCheng AE Institute (Guangzhou) Co., Ltd, Guangzhou 510520)

**Abstract:** This paper analyzes the theoretical basis of acoustic emission monitoring of leakage in principle. Through the actual field leakage experiment, the quantitative relationship between different leakage quantities and acoustic emission parameters under the same differential pressure is obtained; The quantitative relationship between different pressure difference and acoustic emission parameters and leakage under the condition of the same valve opening; And the characteristic relationship between different leakage opening and acoustic emission parameters under the same differential pressure (tank wall plug). Establish an online water pipe quantitative leakage demonstration experimental system, and the acoustic emission collector will automatically judge the leakage and leakage amount, and then transmit it to the cloud server, set the alarm conditions, push it to the mobile phone when the alarm conditions are met, and open the cloud server for readers to consult.

**Key words:** Acoustic emission; Leakage; Quantitative; Internet of things; Unattended; Alarm

阀门、管道广泛应用于各行各业, 大到航空航天工业、船舶海洋工业、石油化工工业, 小到家庭供水供气, 应用已非常普遍。然而阀门、管道在长期使用中受冲刷、腐蚀等影响, 导致阀芯与阀座密封不严、管壁减薄等, 常常发生泄漏事故。虽然常规检测方法(如直接观察法、流量平衡法、负压波法、运行压力法等)应用已经比较广泛, 但是其不足之处就是要依赖专业专业人员去现场巡查, 而且需要逐点扫查甚至需要开挖检查埋地管道, 劳动强度大, 工作效率低。

声发射泄漏检测技术作为声发射技术应用的重要分支之一, 其动态、高灵敏度、覆盖面广的优势, 使得声发射泄漏检测技术应用近年来越来越被广泛认可。但是, 目前的技术、设备始终还是需要依赖声发射技术专家来分析声发射数据从而判断是否泄漏及泄漏量大小, 限制这项技术的大范围工业应用。本文从原理上分析泄漏的声发射监测理论基础。通过实际现场泄漏实验, 得到相同压差条件下的不同泄漏量与声发射参数的定量关系; 相同阀门开度条件下不同压差与声发射参数及泄漏量的定量关系; 以及相同压差条件下的不同泄漏开度与声发射参数特征关系(罐壁堵头)。建立在线水管定量泄漏演示实验系统, 声发射采集器自动判断泄漏及泄漏量, 进而传输到云服务器, 设定报警条件, 达到报警条件时推送到手机, 开放云服务器供读者查阅。

## 1 泄漏监测的声发射原理及理论基础

泄漏产生声发射信号的原理是介质从缝隙因压力差喷射而出形成紊流, 该紊流中的介质与介质密封表面产生冲击和摩擦, 从而激发出弹性应力波; 该弹性应力波的信号强度、频率范围等与介质紊流的速度即压力差、泄漏速率、阀门介质与结构等因素都密切相关。产生的泄漏信号会随着管道管壁、介质等传播, 当利用声发射传感器在管道表面合理的位置, 会接收到该信号, 利用传感器的压电效应将弹性波信号转换成电压信号, 然后经过采集设备的放大、分析处理和输出显示等。

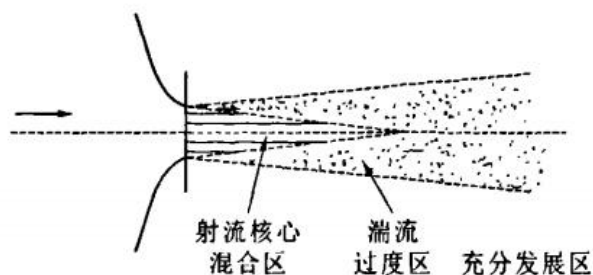


图 1 管道泄漏模型图

典型的泄漏信号特征具有连续、随机非平稳信号的特点，其频率分布具有明显的陡峰，因此具有一定的抗干扰能力。而通过喷射泄漏的模型可以看出，泄漏信号主要在湍流混合区和过渡区产生，在泄漏口附近主要产生高频摩擦冲击信号，而在远离泄漏口的位置则主要产生低频震荡信号。一般而言，泄漏量越大，泄漏产生的声发射信号的能量密度越大。压力差增大时，会产生泄漏阻塞导致的冲击声，该冲击声要比湍流信号高出不少，这些信号都可以作为检测有意义的信号。

当气体或液体在一定压力作用下从漏孔泄漏时会在漏孔处激发出连续的机械波，通过示波器观察泄漏激发的声发射波形，其形状为幅度波动很小的、连续的、几乎无任何规律的波动。泄漏声发射波的频带范围分布随漏孔大小、泄漏速度、泄漏介质不同可从几Hz到几百kHz不等。利用适合的声发射传感器接收这些来自泄漏部位的声发射波，然后将机械波转变成电信号并放大后传送至声发射主机，经过分析处理就可以得到泄漏量的大小的信息，设置合适的阈值，达到阈值输出报警，通过物联网通讯将泄漏量或报警参数传输到互联网云平台，进而推送到终端用户管理员，达到无人值守定量泄漏监测智能报警的目的。

## 2 声发射泄漏定量实验

### 2.1 实验背景介绍

本次实验是在深圳某潜水器生产公司完成的。实验所用的潜水器、潜水器外部的阀门以及流量计如图2、图3所示。潜水器内部有足够的体积，打入一定压力的空气，保证在接下来做泄漏实验压力可以稳定在很小的范围。被检阀门是球阀，公称通径为15mm，阀门完全关闭时无泄漏。阀门后端连接一个气体流量计，用以定量计量泄漏速率。

实验采用清诚声发射研究（广州）有限公司的SAEU3H-4型数字化声发射检测仪，与配套的声发射传感器、同轴电缆线、采集卡和分析软件等组成声发射检测系统。声发射传感器选用SR40M型谐振传感器（中心频率为40kHz，频域范围15~70KHz），外置增益40dB前置放大器。详细如下图所示。灵敏度断铅测试99dB。

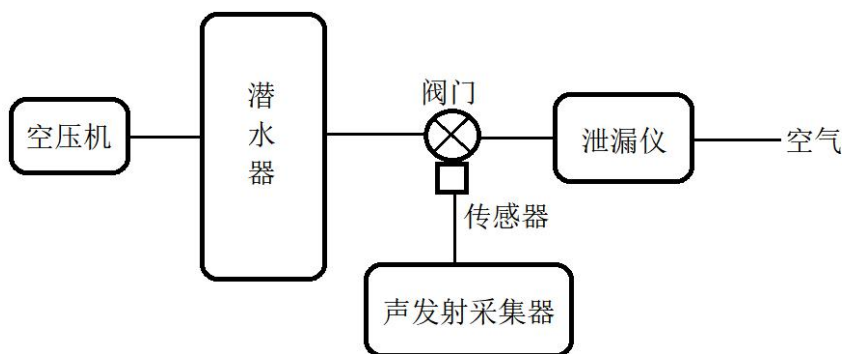


图 2 实验原理图



图 3 现场图片

表1 采样参数

采样率 1000KHz	参数强制截止时间: 30ms	滤波器 20KHz~400KHz
撞击定义时间 HDT: 300us	撞击锁闭时间 HLT: 1000us	门限 23dB

2.1.1 相同压差条件下的不同泄漏量与声发射参数的定量关系

罐内表压: 0.1Mpa。

保持声发射仪器持续采集信号, 通过手动转动球阀得到不同开度, 泄漏仪测量泄漏速率。泄漏仪保持稳定以下几个阶段: 0L/h - 42L/h - 64L/h - 310L/h - 540L/h - 更换大量程流量计 - 650L/h - 430L/h - 230L/h - 110L/h - 38-6L/h - 1.7L/h - 0L/h。

泄漏率从0-65000mL/h的连续过程, 泄漏与声发射关系如下图所示:

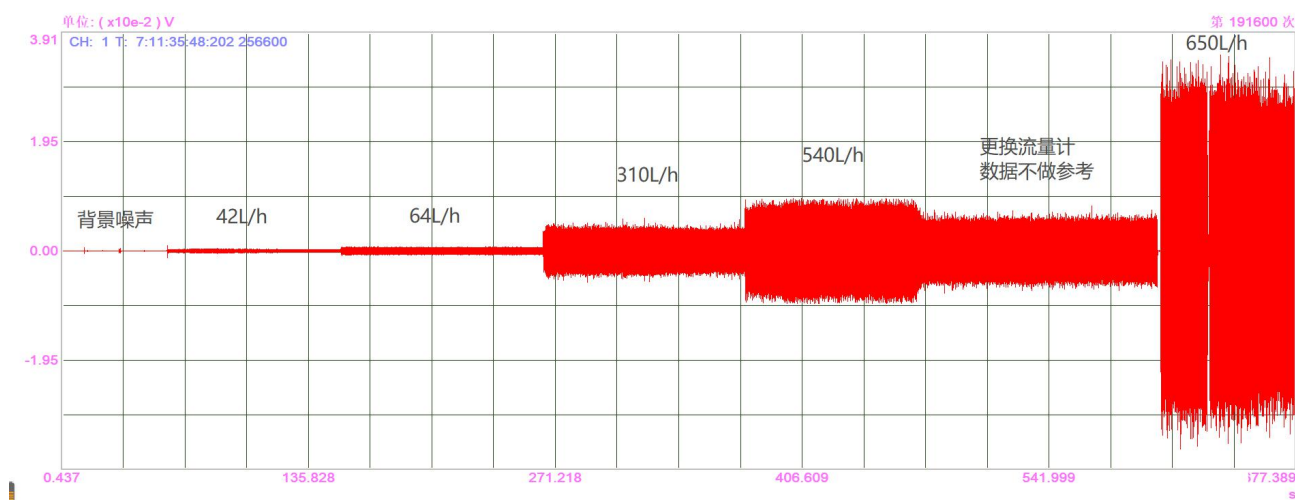


图 4 时域连续波形图 (相同压差不同泄漏率)

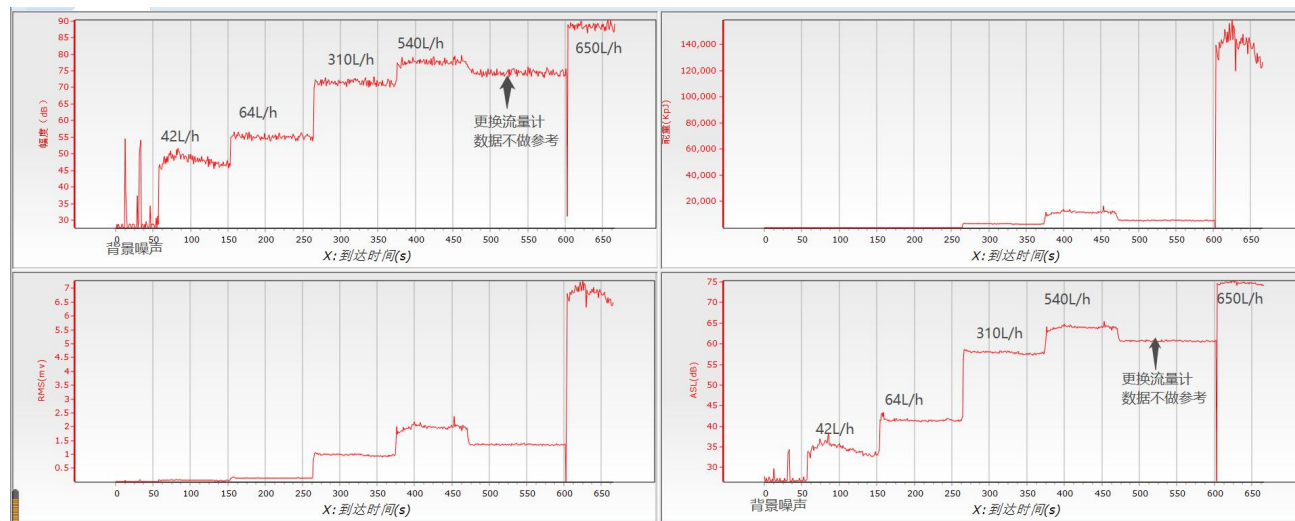


图 5 泄漏率与各特征参数相关图

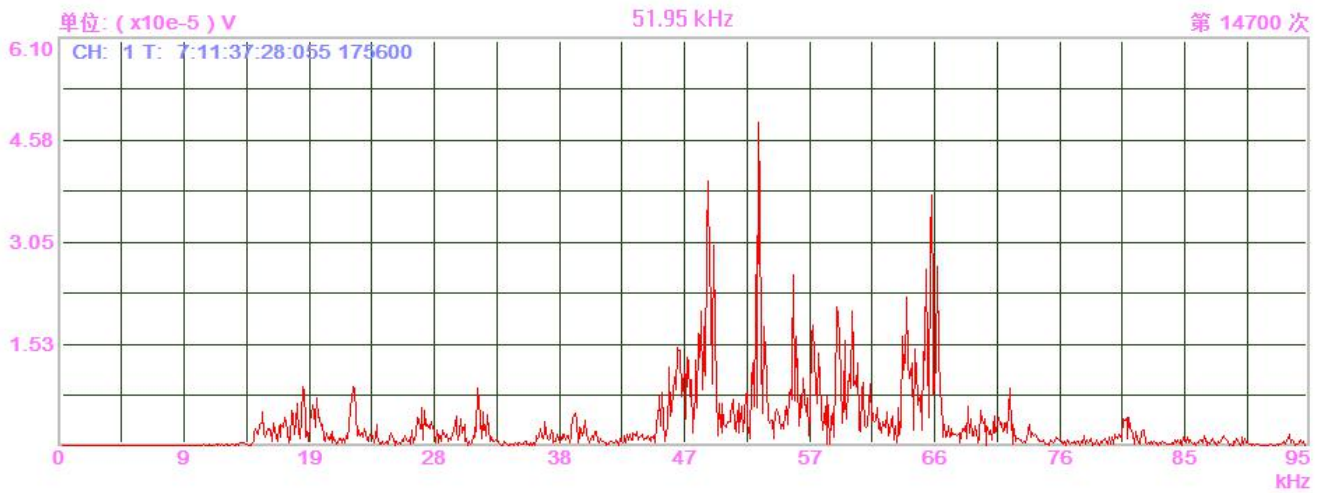


图 6 泄漏典型频谱图

统计各阶段声发射特征参数如下表所示:

表2 不同泄漏量与声发射特征参数统计

序号	泄漏率 mL/h	波形幅值 (mV)	幅度 (dB)	振铃计数	能 量 (Kpj)	RMS (mV)	ASL (dB)	频率范围 (kHz)
1	0	±2 (毛刺)	26.6-30	1-80	0-1	0.007-0.023	14-25	40-60
2	42000	±26	46-51	1530-1680	9-22	0.055-0.085	33-37	40-60
3	64000	±54	54-56	1600-1700	65-75	0.14-0.16	41-43	40-60
4	310000	±420	68-72	1700-1800	2500-3200	0.95-1.05	57-58	40-60
5	540000	±900	76-79	1750-1850	11000-13000	1.9-2.1	64-65	40-60
6	650000	±3000	85-90	1300-1450	120000-140000	6.5-7.5	74-76	40-60
7	430000	±820	72-76	1750-1850	8000-10000	1.7-1.85	62-63.7	40-60
8	230000	±600	70-74.5	1560-1724	4680-6480	1.25-1.46	60-61.1	40-60
9	110000	±300	63-70	1733-1800	1440-1980	0.7-0.8	54.9-56.3	40-60
10	38000	±102	56-60.7	1656-1756	138-185	0.21-0.25	44.6-46	40-60
11	6000	±6.1	38-45	1390-1560	3.3-8.8	0.035-0.045	29.2-30.7	40-60
12	1700	±4.2 (毛刺)	26.6-44	1-1529	0-8.3	0.006-0.2	11-32	40-60
13	0	±2 (毛刺)	26.6-30	1-80	0-1	0.007-0.023	14-27.4	40-60

将以上数据，画出X轴（泄漏率）-Y轴（声发射参数）坐标散点图如下图所示：

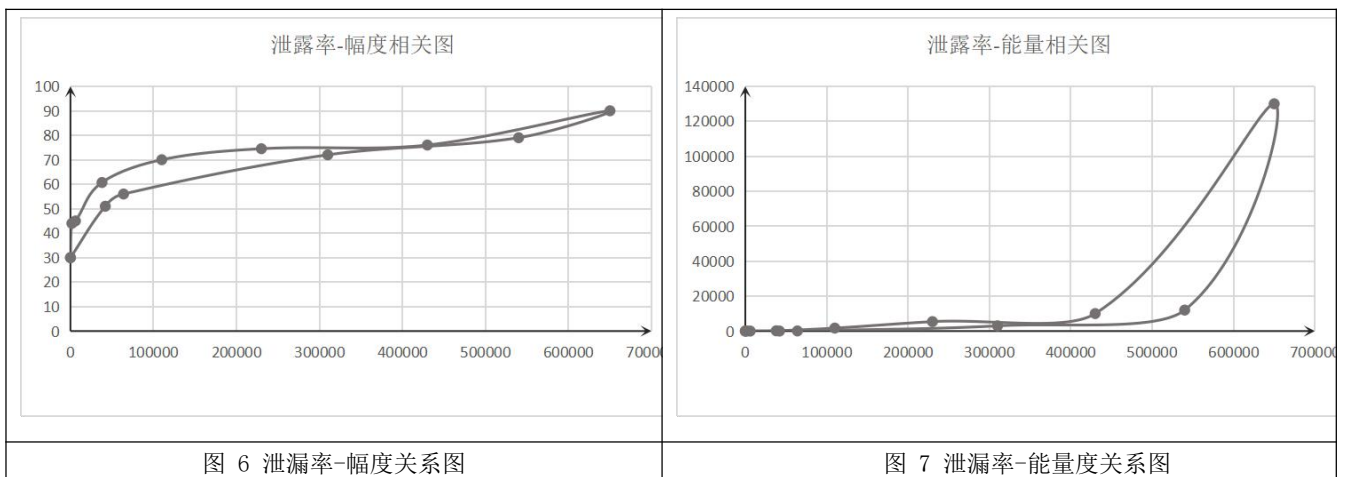
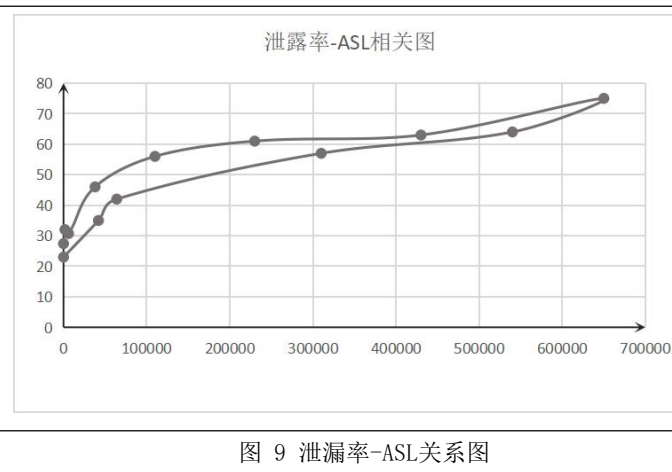
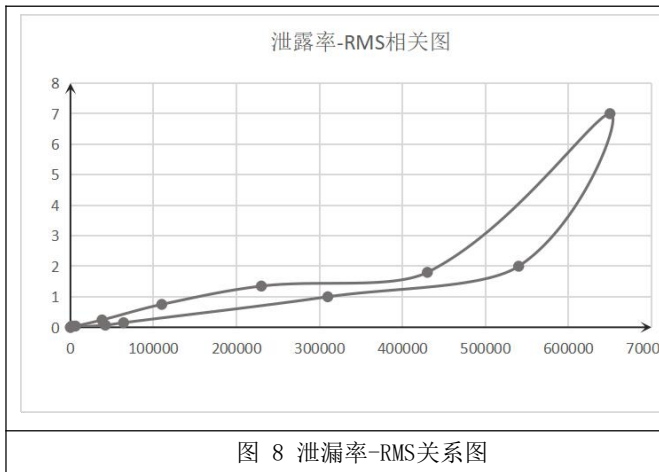


图 6 泄露率-幅度关系图

图 7 泄露率-能量度关系图



说明：由于540L/h泄露率到650L/h之间更换了大量程流量计，流量计之间有些偏差，所以0-650的曲线与650-0曲线不能完全吻合，随着泄露压差不一定，但是走向/斜率是基本一致的。

### 2.1.2 相同阀门开度条件下不同压差与声发射参数及泄漏量的定量关系

全过程保持阀门开度一致，泄漏仪测量泄漏速率，罐内加压到不同压力，通过其他排气口将罐内压力逐步从高低降低，保持几个稳定压力阶段：0.42MPa、0.31MPa、0.21MPa、0.1MPa、0.05MPa、0.02MPa、0.02MPa（阀门关紧）。

连续过程图（箭头所示为减压过程，数据不做参考）：

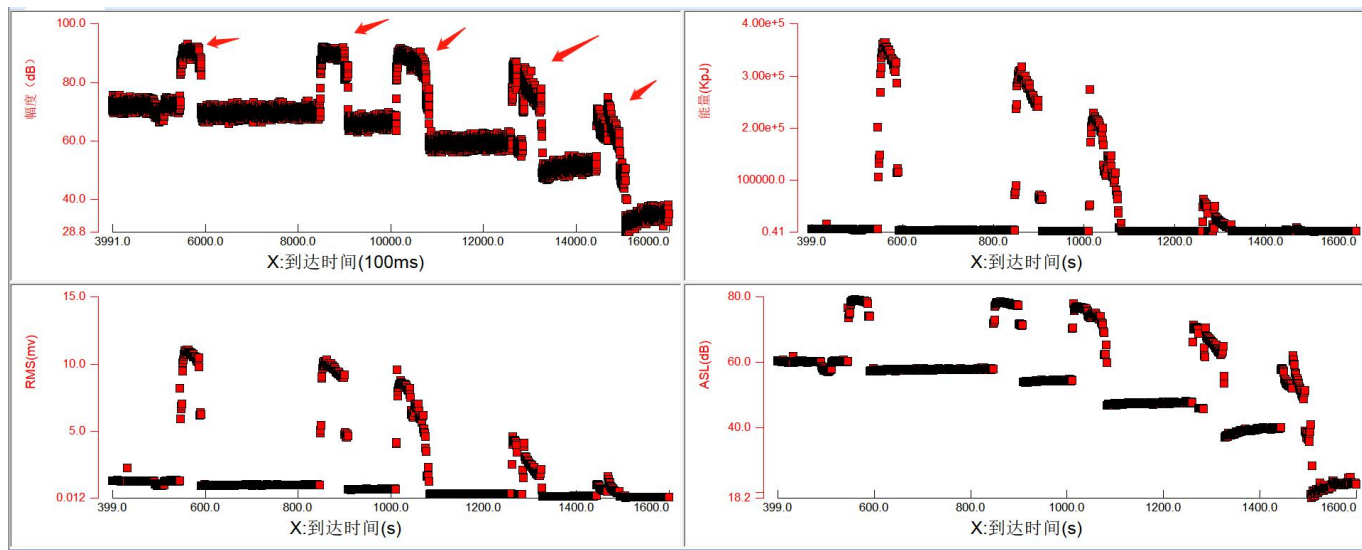


图 10 时域连续波形图（相同阀门开度不同压差）

通过滤波处理，得到下图：

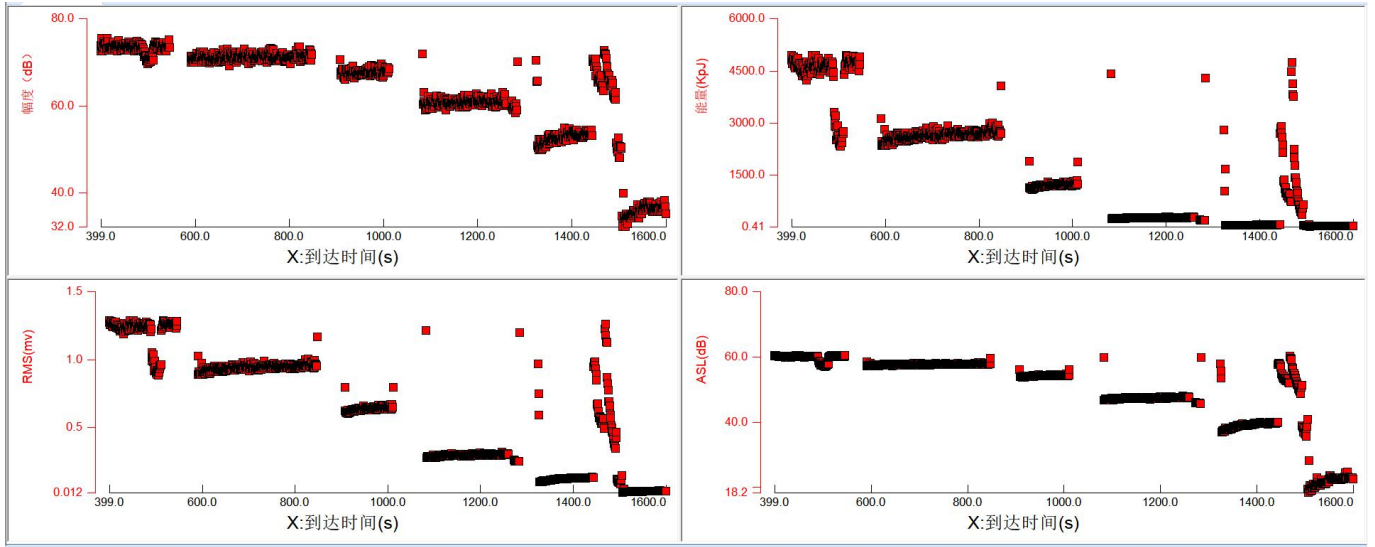


图 11 时域连续波形图（相同阀门开度不同压差）滤波处理

统计各阶段的罐内压力、泄漏率、声发射参数如下表所示：

表3 相同阀门开度、不同压差下的泄漏量与声发射特征参数统计

序号	罐内压力 (MPa)	泄漏率 (L/h)	幅度 (dB)	能量 (kJ)	RMS (mV)	ASL (dB)
1	0.42	286	72-75	4300-4800	1.2-1.3	60-61
2	0.31	227	69-72	2300-2700	0.85-0.95	56-58
3	0.21	168	65-68	900-1100	0.58-0.62	53-54
4	0.1	110	58-63	0.3-250	0.28-0.33	46-47
5	0.05	71	50-55	0.01-40	0.09-0.12	37-40
6	0.02	38	33-38	0.001-1	0.01-0.05	19-25
7	0.02	0	28-30	0-1	0.007-0.023	14-25

将以上数据，画出X轴（泄漏率）-Y轴（声发射参数）坐标散点图如下图所示：

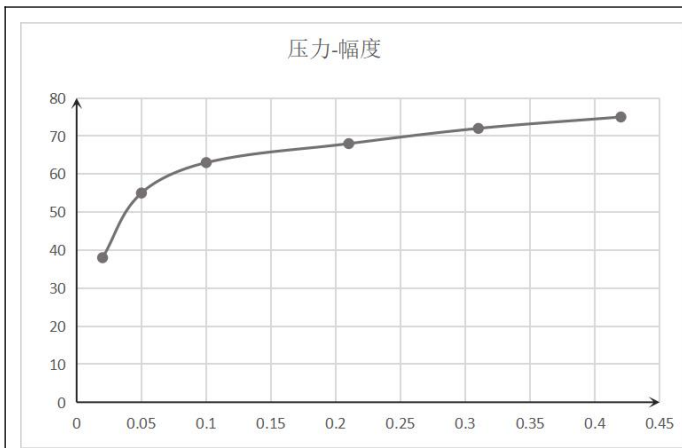


图 12 压力-能量关系图

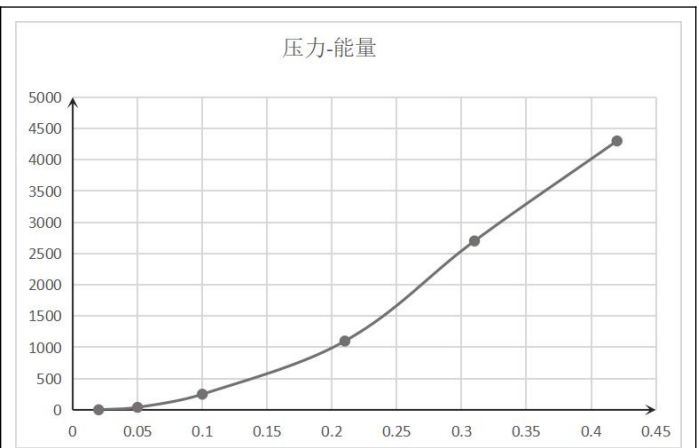


图 13 压力-能量关系图

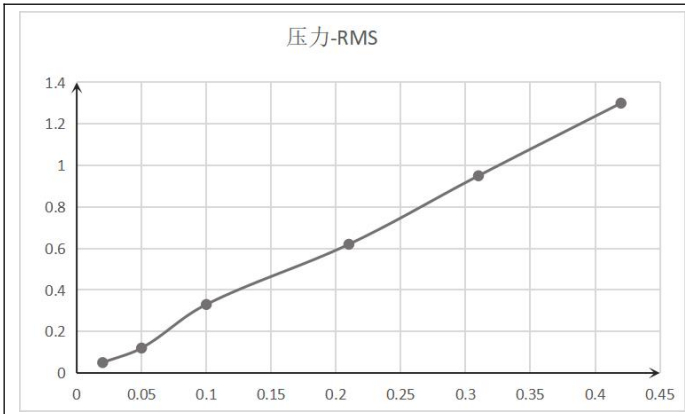


图 14 压力-RMS关系图

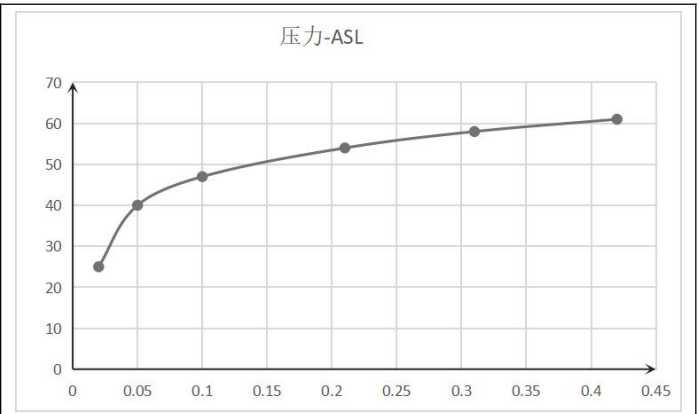


图 15 压力-ASL关系图

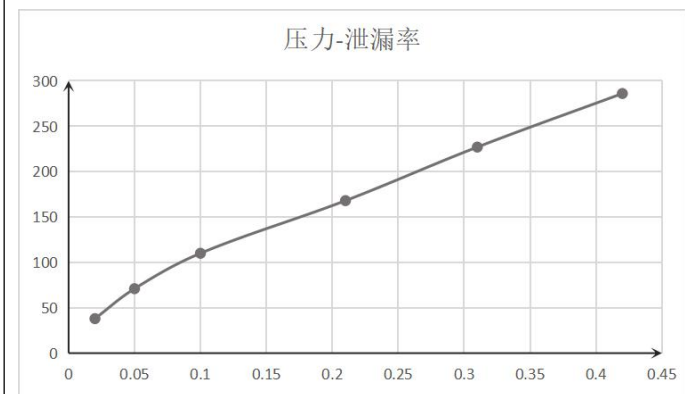


图 16 压力-泄漏量关系图

### 2.1.3 罐壁堵头: 相同压差条件下的不同泄漏开度与声发射参数特征关系

罐体内部充0.1MPa气压, 测试对象是容器外壁上的堵头, 通过旋转堵头不同的角度, 让气体从堵头缝隙渗出, 通过喷气泡水可知大概的泄漏情况 (采集信号时, 堵头上的气泡会擦干, 排除气泡破裂产生的干扰信号)。传感器布置在距离堵头1米位置。本实验是泄漏定性实验, 小角度旋转堵头使气体微微渗出、稍大渗出量, 与无泄漏时的对比, 如下图所示。



图 17 堵头位置



图 18 微渗漏 (测量时气泡水抹干净)

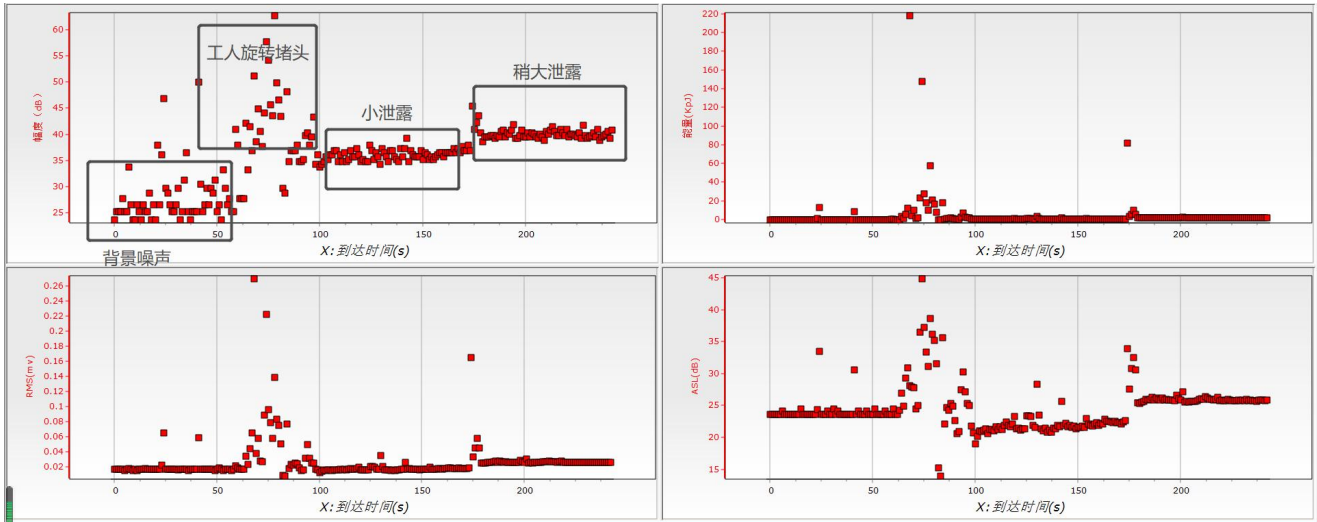


图 19 堵头泄漏实验全过程相关图

#### 2.1.4 实验小结

- 1) 泄漏位于阀芯附近，传感器越靠近阀芯位置，泄漏信号越强。所以传感器的最佳安装位置为阀芯附近；
- 2) 对应气体泄漏信号，可以使用低频传感器（15-70kHz）；
- 3) 相同压力下，泄漏率越大，声发射参数（幅度、能量、RMS、ASL）也越大。其中，幅度和ASL前段上升较快后端较缓，能量和RMS前段较缓后段较快；
- 4) 相同泄漏孔径条件下：压力与泄漏率基本成正比；压力与RMS基本成正比；压力与幅度的关系：随着压力增大，幅度先快速上升，后缓慢上升；压力与能量的关系：随着压力增大，能量先缓慢上升，后快速上升；压力与ASL的关系：随着压力增大，幅度先快速上升，后缓慢上升；
- 5) 用能量、RMS、ASL都可以作为泄漏定量的判据，ASL最佳；
- 6) 堵头（管道泄漏）定性判断泄漏的声发射特征明显。距离泄露源1米依然能够分辨出极小的泄漏信号（泡沫水判定泄漏量极小，测量时将泡沫水抹干）；
- 7) 介质、压差、泄漏孔径大小、传感器安装位置等都直接影响阀门、管道的声发射特征，需要现场标定，一旦标定以后，终身使用。

### 3 在线水管定量泄漏演示实验系统

#### 3.1 系统简介

如下图所示，水龙头和水管用于产生泄漏，传感器安装在水龙头旁边。采用清诚声发射研究（广州）有限公司研发的RAEM1系统，采集器主体是一个铝合金外壳小圆筒，集信号采集、分析、储存和通讯为一体的智能物联网声发射设备，采用linux系统，具有看门狗等长期稳定运行的能力，可以长期无人值守监测运行。采集器采集信号，自动判断是否泄露及泄漏量，进而通过4G传输到云服务器，用户可以登录云服务器查看实时和历史参数，也可设置报警推送到手机。

采集器采样频率1000kHz，参数截止时间30ms，参数定义时间300us，闭锁时间1000us，门限30dB；传感器谐振频率35kHz，频率范围15kHz-70kHz。

原理图及设备布置如下图所示：



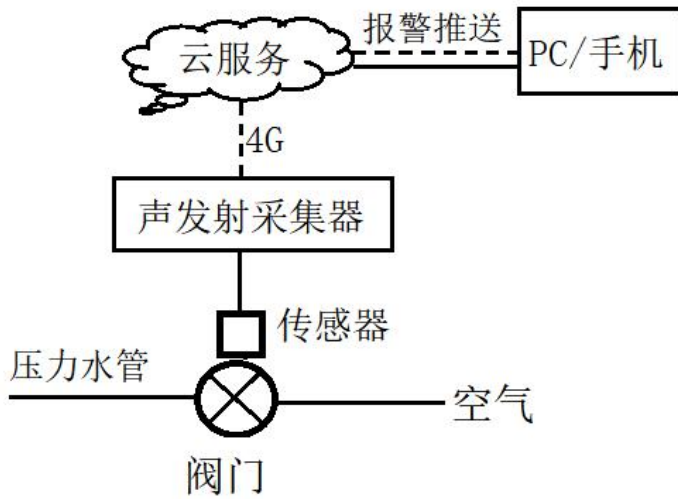


图 20 在线水管定量泄漏演示实验系统

### 3.2 实验标定

水龙头打开不同角度，用量杯接泄漏出来的流体，测得泄漏率与ASL关系如下表所示：

表3 水龙头泄漏率标定

序号	泄漏量 (L/H)	ASL (dB)
1	0	32
2	8.5	38
3	18	47.8
4	29.5	53.2

绘制散点图如下图所示：

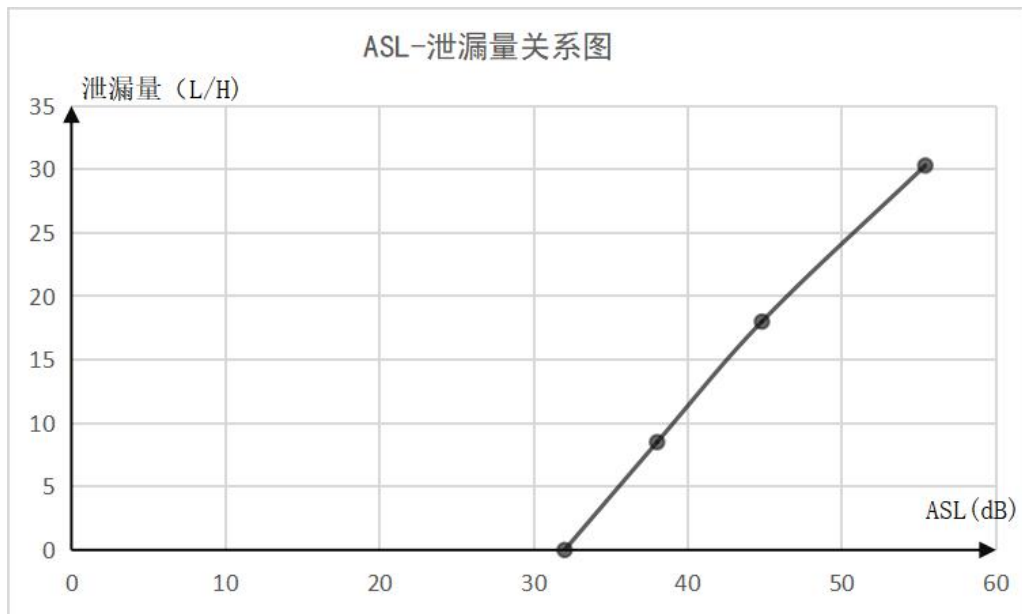


图 21 水龙头标定 ASL - 泄漏量关系图

由上图，ASL与泄漏量基本为一个斜率一直的斜线，

设泄漏量： $L=k \times ASL+b$

序号2、序号3数据： $k=1.4$ ， $b=-44.7$

故泄漏量与ASL关系为： $L=1.4 \times ASL-44.7$

上述公式设置到采集器，采集器即可计算出泄漏量，将泄漏量参数通过4G传输到云平台，实现定量在线泄露监测。

### 3.3 在线定量泄漏监控

登录云服务器查看实时数据。以下是开放的云服务器，长期在线监测，可供读者随时访问查看：（网址：<https://signin.aliyun.com/login.htm#/main>；账号：qc@1269046717299274.onaliyun.com；密码：qc123456）。如下图22所示，可以清晰看到泄漏发生的时间以及对应泄漏率。

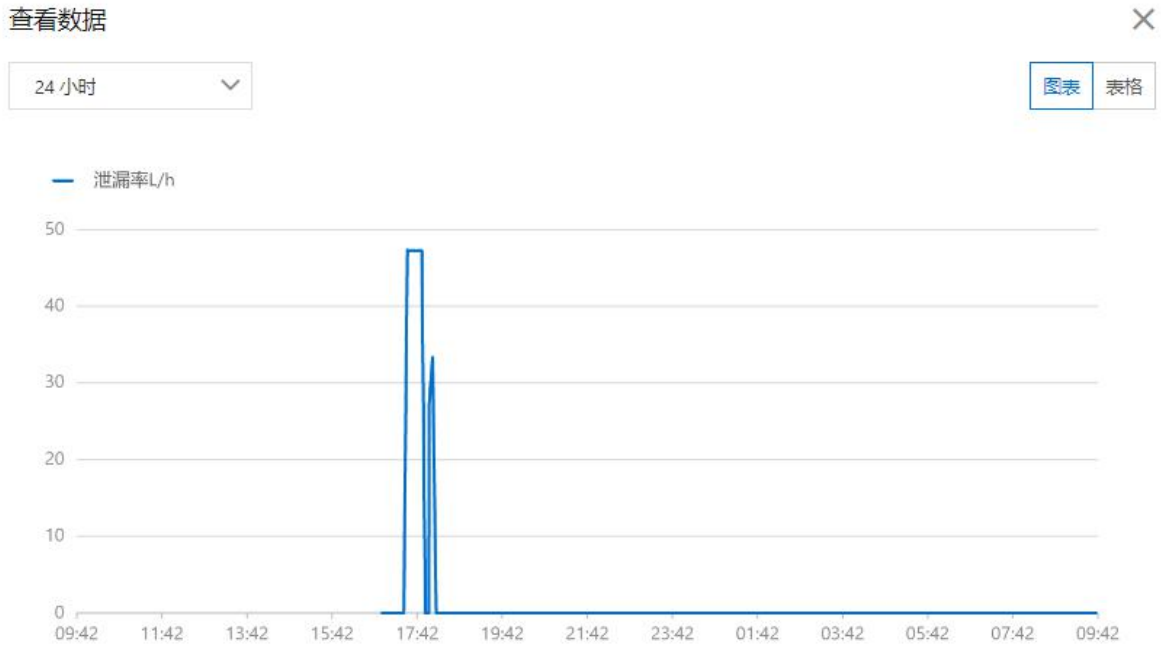


图 22 云服务器查看历史泄漏量

设置合适的报警，本次演示设置规则： $1L/H \leq \text{泄漏量} \leq 10L/H$ 时输出2级报警， $10L/H \leq \text{泄漏量} \leq 20L/H$ 时输出3级报警， $20L/H \leq \text{泄漏量} \leq 30L/H$ 时输出4级报警， $30L/H \leq \text{泄漏量} \leq 10L/H$ 时输出5级报警，例如3级设置如下图所示：

#### ← 1号位置泄露啦

描述 泄漏量10-20L/H

##### 场景联动规则

触发器 (Trigger) 2

触发器1			
设备触发	RAEM1	qc_raem1_test_0010	
属性触发	泄漏率L/H	between	[10,20]

+ 新增触发器

执行条件 (Condition) 2

+ 新增执行条件

\* 执行动作 (Action)

**告警关联**  
已被 1号位置泄露啦 告警规则关联为触发场景，如需编辑告警规则，请前往 告警中心

执行动作1
告警输出

+ 新增执行动作

保存 取消

图 23 设置合适警报

当达到报警条件时，系统会将报警信息推送到手机，也可以通过手机/电脑登录服务器，查看和处理历史报警信息，如下图所示：

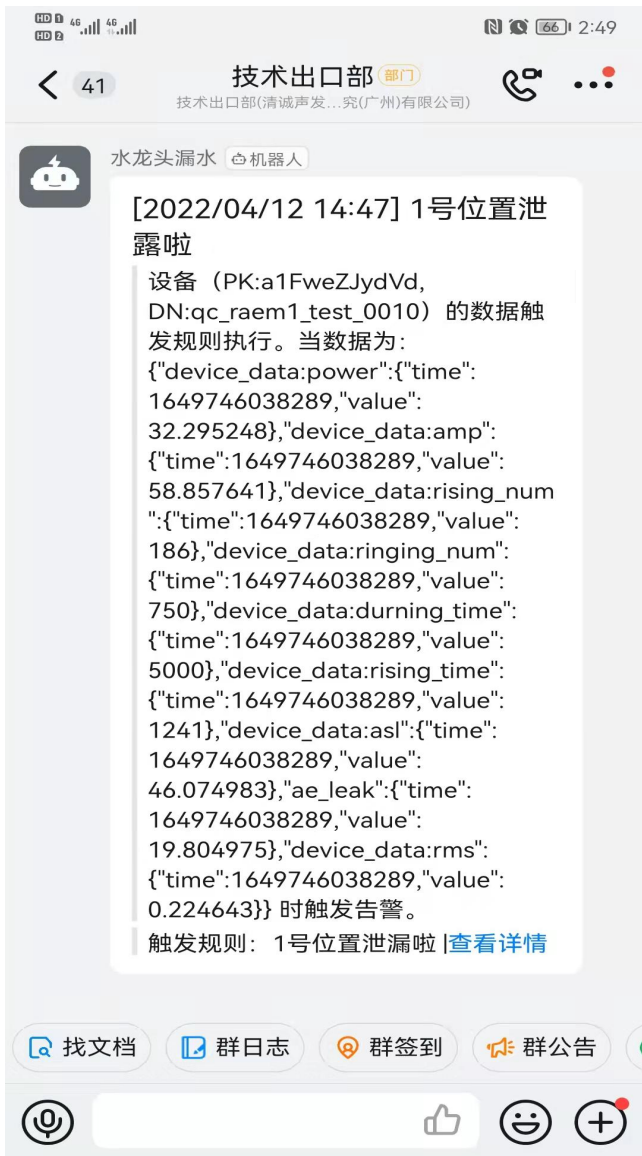


图 24 报警信息推送到手机



图25 手机/电脑登录云服务器查看历史泄报警

## 4 结语

物联网声发射设备通过嵌入式软硬件自动控制数据采集、数据分析、自动报警推送，可实现长期无人值守定量泄漏监测。通过自动数据处理，将海量声发射数据转化成简单易懂的泄漏等级，可以免去传统声发射依赖专业人员分析声发射相关数据的麻烦，让不懂声发射的使用人员也能快速上手。而且，数据处理集中在采集器，只输出/上传少量数据，可以有效降低数据通讯速度要求和设备成本。其长期稳定运行、自动报警、定量监测、设备成本/运营成本低廉的优势，对工业应用有很大的意义。

参考文献（小五黑体）

- [1] 沈功田. 声发射检测技术及应用[M]. 北京：科学出版社，2015.
- [3] 孔德连. 声发射技术在阀门泄漏在线监测方面的应用[D]. 北京：北京化工大学，2010
- [2] Jiehui Xie, Shifeng Liu. Internet of Things Acoustic Emission: Systems and Applications[C]// Gongtian Shen. Advances in Acoustic Emission Technology. US: Springer, 2019. P19-P31.
- [4] 贾娜, 姜雪松, 孙杰, 等. 基于声信号的供气管道阀门泄漏监测系统与定位系统研究[J]. 森林工程, 2014年, 第30卷(第5期): 96-98.