

双谱在城市地下燃气管道泄漏检测中应用研究

张彬 汪剑鸣

(天津工业大学信息与通讯工程学院, 天津 300160)

[摘要] 由于城市地下燃气管网压力较低, 环境噪声复杂, 泄露信号微弱, 使得泄漏信号难于用基于二阶累积量理论的信号处理手段检测。根据高阶累积量及双谱理论, 将双谱应用于高斯噪声下的非高斯信号检测, 通过直接法得到双谱的估计值, 并利用二维窗来提高双谱的频率分辨率, 然后根据实际情况建立了相应的假设检验模型。实验结果表明, 该方法可有效地检测出低压燃气管网的泄漏信号, 检测距离不小于 20m。

[关键词] 双谱; 城市地下燃气管网; 低压燃气管网; 泄漏检测; 声发射

1. 引言

作为一种清洁、高效的能源, 天然气越来越受到人们的关注。随着西气东输工程的推进, 中俄、中土等天然气供应的签订, 以及城市和乡村的天然气置换工程的启动, 天然气管网的铺设也在随之进行。天然气管网的泄漏有着隐蔽性、流动性、爆炸性等特点, 与其它管道(输水管道、输油管道)相比较而言, 天然气管网的泄漏更具危险性。天然气的消费终端是城市居民用户, 为了将天然气输送到城市的每个居民家中, 就必然要铺设错综复杂的城市地下天然气管网。仅就京津两地来讲, 到 2006 年底, 北京城市管网总长约为 7400km, 天津城市管网总长约为 5000km。不仅如此, 京津两地的城市地下管网工程仍然在进行过程中。城市是人口分布密集地, 而天然气又具有易燃易爆等属性, 一旦发生泄漏, 不仅扰乱了人民正常的生产生活, 而且存在着人身伤亡的危险。仅 2007 年 5 月, 全国就有几十起天然气管网泄漏、爆炸事故。及时的发现泄漏, 并准确的对漏点进行定位, 无论从人身安全角度, 还是从经济方面考虑, 都是急待解决的问题。对城市地下燃气管网的泄漏检测, 目前主要采用可燃性气体检测仪和窨井, 其主要缺点是不能够对管线进行实时在线监测, 另外一个缺点是定位过程繁杂、不准确。国内、外都正在积极开展各项城市管网泄漏监测技术的研究, 比较有前景的几种方法有: 声发射监测技术, 光纤检测技术以及阴极保护技术。从实时性和简单性(如无需附加大量施工)层面上讲, 声发射监测技术最具诱惑性。

2. 检测原理简述

由于输气燃气管道管内外存在压差, 一旦管道发生破损, 气体从压力高的管内向压力低的管外逃逸, 由此引发管壁的振动, 有学者将这种振动归于广义声发射范畴。在这种情况下, 管壁只作为波的传播介质, 并没有能量的积累和释放过程。泄漏所产生的声波, 沿着管壁向两端传播, 泄漏点的两端安装振动传感器, 就有可能检测到该声波, 由此可判断是否有泄漏产生并对泄漏点进行定位^[1~3]。城市地下燃气管网的压力很低, 《城镇燃气设计规范》GB50028-2006 中规定, 城镇中

压管网的压力为 $0.01 < P <= 0.4 \text{Mpa}$, 而入户压力在 0.01Mpa 以下。如此低的压力, 加上城市特有的环境噪声, 决定了泄漏检测的高难度。如何在复杂的环境噪声中, 及时准确地检测到低压燃气管网的泄漏, 仅仅依靠传统的信号处理手段难以解决。近些年发展起来的高阶累积量, 为泄漏信号的检出提供了一个新颖、有力的手段。多谱定义为高阶累积量的多维傅氏变换。其中常用的多谱为双谱和三谱。与传统的二阶统计量信号处理手段相比, 双谱有以下独特的优势^[4~7]:

- 1) 信号的双谱在理论上为零, 而非高斯信号的双谱不为零;
- 2) 保留了信号的相位信息, 而基于二阶统计量的功率谱对相位是盲的;

鉴于以上优点, 作为复杂环境噪声中的信号检测处理手段, 双谱有着无以比拟的优势。

泄漏信号在信号分类上应属于随机信号。虽然随着管道内的压力不同、泄漏孔径的不同, 泄漏信号的差异很大。但某一段管道上, 特别是城市中、低压管道上, 压力的变化频率不高, 所以在某种程度上, 泄漏信号在短时间内可看作平稳信号。城市燃气管网的泄漏检测中的噪声可分为两部分: 高斯噪声和非高斯噪声。其中高斯噪声主要来自检测仪器自身和部分环境噪声, 管道内气体流动噪声在某种情况下, 也可认为是高斯噪声; 非高斯噪声主要来自人为环境噪声, 如汽车噪声等。这里仅讨论高斯噪声中的信号检测。

在此基础上, 有以下假设:

- 1) 泄漏信号为平稳的各态历经非高斯随机信号;
- 2) 噪声为高斯加性噪声;
- 3) 泄漏信号与噪声统计上独立。

2.1 双谱检测非高斯信号理论

泄漏检测系统可表示为图 1。

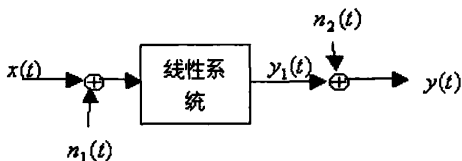


图 1 检测系统示意图

作者简介: 张彬, 男, 天津人, 学士, 研究方向: 电子信息工程。

检测系统的输入输出的关系表示为:

$$\begin{aligned} y(t) &= (x(t) + n_1(t)) * h(t) + n(t) \\ &= y_s(t) + y_n(t) + n(t) \\ &= y_s(t) + N(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } y_s(t) &= x(t) * h(t) \quad y_n(t) = n_1(t) * h(t) \\ N(t) &= y_n(t) + n(t) \end{aligned}$$

由线性系统特性及高斯信号的特性可知, 非高斯信号通过线性系统后, 仍为非高斯信号, 高斯信号的线性变换仍为高斯信号, 则式(1)中的 $y(t)$ 为非高斯信号, $N(t)$ 为高斯信号。

由双谱的性质, 可得到:

$$B_y(\omega_1, \omega_2) = B_{y_s}(\omega_1, \omega_2) + B_N(\omega_1, \omega_2) \quad (2)$$

在得到观测值的数据记录 $\{y(i)\}$, $i=0, 1, \dots, N$ 的情况下, 希望判决以下的假设:

$$\begin{cases} H_0: y(i) = N(i) \\ H_1: y(i) = y_s(i) + N(i) \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

考虑到高斯信号的双谱为零, 而非高斯信号的双谱不为零, 对式(3)的判决为: 如果系统输出的双谱为零, 则接受 H_0 , 否则接收 H_1 。即: $|B_y(\omega_1, \omega_2)| \begin{cases} = 0 & \text{接受 } H_0 \\ \neq 0 & \text{接受 } H_1 \end{cases} \quad (4)$

在实际操作中, 准确的信号双谱很难得到, 只能得到高阶累积量的渐进无偏的估计量; 另外, 当采用计算机处理观测数据时, 即使很严格的高斯分布信号, 在观测序列很长的情况下, 也不可能得到 $B(\omega_1, \omega_2) = 0$ 的结果, 仅能得到一个非常小的数值, 所以, 以式(3)作为判据在实际操作过程中, 很难实现。

2.2 双谱检测非高斯信号
既然双谱的准确值难以得到, 而只能得到其估计值, 那么在对式(3)进行实际判决时只能依据观测序列的双谱估计值。这里采用直接法得到双谱的渐进无偏估计: 将所给的数据分成 K 段, 每段含 P 个观测样本, 即 $N=KP$, 并对每段数据减去该段的均值。然后计算 DFT 系数:

$$Y^{(0)}(\theta) = \frac{1}{P} \sum_{n=0}^{P-1} y^{(0)}(n) \exp(-jn2\theta P/P) \quad (5)$$

其中: $\theta=0, 1, 2, \dots, P/2, i=1, 2, \dots, K$
再计算 DFT 系数的三重相关:

$$\begin{aligned} \hat{b}_i(\theta_1, \theta_2) &= \frac{1}{\Delta^2} \sum_{k_1=-K}^{K_1} \sum_{k_2=-K_2}^{K_2} Y^{(0)}(\theta_1+k_1) Y^{(0)}(\theta_2+k_2) \\ &\quad \times Y^{(0)}(-\theta_1-\theta_2-k_1-k_2) \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $i=1, 2, \dots, K$

最后所给数据的双谱估计由 K 段双谱估计的平均值给出, 即: $\hat{B}_y(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \hat{b}_i(\omega_1, \omega_2) \quad (7)$

$$\text{式中: } \omega_1 = \left(\frac{2\pi f_1}{N_0} \right) \theta_1, \quad \omega_2 = \left(\frac{2\pi f_2}{N_0} \right) \theta_2$$

假定已经得到序列双谱的估计值 $\hat{B}_y(\omega_1, \omega_2)$, 对于一个大的样本 N , 该估计值近似服从均值为 $B_y(\omega_1, \omega_2)$ 的复高斯分布, 其方差可近似表示为:

$$\text{var}(\text{Re}(\hat{B}_y(\omega_1, \omega_2))) \approx \text{var}(\text{Im}(\hat{B}_y(\omega_1, \omega_2)))$$

$$\approx \frac{N}{KL^2} p_y(\omega_1) p_y(\omega_2) p_y(\omega_1 + \omega_2)$$

式中: N 为观测数据长度; K 为双谱估计时的观测数据分段数; L 为平滑窗的长度; p_y 为观测数据的功率谱估计。

$$\text{则统计量 } T = \frac{\hat{B}_y(\omega_1, \omega_2)}{\left[\frac{N}{KL^2} p_y(\omega_1) p_y(\omega_2) p_y(\omega_1 + \omega_2) \right]^{1/2}} \quad (8)$$

服从 $N_c(B_y(\omega_1, \omega_2), 1)$

若输出为高斯信号, 则式(5)中的统计量 T 服从 $N_c(0, 1)$ 。

由概率论中的理论可知, 下述统计量

$$T_s = \sum_p \frac{2 \left| \hat{B}_y(\omega_1, \omega_2) \right|^2}{\frac{N}{KL^2} p_y(\omega_1) p_y(\omega_2) p_y(\omega_1 + \omega_2)} \quad (9)$$

服从 χ^2 分布, 自由度为 $2p$ 。

式中: p 为双谱的主值区间

当 $2p > 30$ 时, $T_s \sim N(\sqrt{4p-1}, 1)$

由此, 则对式(3)的判决准则为: 在显著性水平 α 下, $T_s < \chi_{2p}^2(\alpha)$, 接受 H_0 , 否则接受 H_1 。

2.3 二维窗函数

为了得到更好的高阶谱估计, 亦有必要使用 $k-1$ 维窗函数。二维窗函数的使用对于双谱估计的频率分辨率的提高起着关键的作用。对于二维窗函数可以利用一维滞后窗函数 $d(x)$ 来构造:

常见的二维窗有三种: 最优窗, Parzen 窗, 频域均匀窗, 这里采用 parzen 窗, 见图 2:

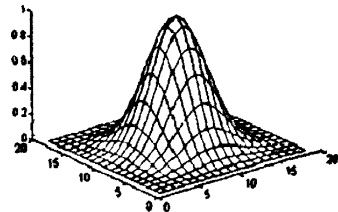


图 2 Parzen 窗示意图

3. 实验及数据分析

3.1 低压燃气管道泄漏实验装置

根据实验室现有条件, 在某闲置工厂空地上, 按照国家标准铺设 40m 长管线, 其材质为 2' 钢管。实验中采用加速度计作为振动传感器, 用卡环将传感器与管壁紧密连接在一起, 传感器与卡环采用螺钉连接的方式, 如图 3 所示。在安装过程中考虑到传感器的声灵敏度的影响, 在加速度计的外面增加了一个壁厚为 5mm 的钢制外壳, 将传感器密封起来, 以减小外界噪声的影响; 为了得到好的耦合效果, 卡环与管壁、卡环与传感器之间用硅油填充。



图 3 传感器的安装

3.2 数据处理与分析

按照前述信号处理理论,数据分析步骤可简述如下:

- 1) 数据预处理:去均值,去一阶趋势项,剔除不合理数据;
- 2) 估计数据的双谱;
- 3) 计算观测数据的功率谱;
- 4) 按照式(9)构造统计量;
- 5) 给定显著性水平 α , 计算阈值, 得到判决结果。

考虑到近距离和较高压力, 泄漏信号比较容易检测到, 这里仅取 0.01Mpa 以下压力的泄漏信号作为研究对象, 检测距离为 20m, 泄漏孔径约为 1.5mm。在 0.005~0.01Mpa 的压力范围内, 重复实验 20 次。

在显著性水平 $\alpha=0.05, p=4160$, 的情况下, 对 20 组实验数据进行处理, 结果如表 1 示。

表 1 数据处理结果

实验次数	实际情况	T_s	判决结果
1	泄漏	34893	泄漏
2	泄漏	97947	泄漏
3	无泄漏	3609.6	无泄漏
4	无泄漏	7157.3	无泄漏
5	泄漏	39587	泄漏
6	泄漏	18672	泄漏
7	无泄漏	5619.6	无泄漏
8	泄漏	14057	泄漏
9	泄漏	8905	泄漏
10	无泄漏	3796.8	无泄漏
11	泄漏	18672	泄漏
12	泄漏	15380	泄漏
13	无泄漏	6493.3	无泄漏
14	泄漏	47865	泄漏
15	泄漏	9691.1	泄漏
16	无泄漏	2514.6	无泄漏
17	泄漏	8967.5	泄漏
18	泄漏	16742	泄漏
19	无泄漏	5483	无泄漏
20	无泄漏	7428	无泄漏

4. 结论

根据双谱检测理论, 将双谱应用于城市燃气低压管网的泄漏检测试验研究, 得出以下结论:

- 1) 双谱可有效地检测到低于 0.01Mpa 压力下的高斯噪声中的泄漏信号, 由表 1 中可看到, 在 20 次重复实验中, 20 组数据均能正确区分泄漏与无泄漏情况;
- 2) 有效检测距离大于 20m;
- 3) 该方法具有较好的稳定性。

基于双谱检测理论的城市低压燃气管网的泄漏检测技术, 能够在信噪比很低的情况下, 有效地检测到泄漏信号。这种方法不仅适用于低压管网的泄漏检测, 对中压燃气管网的泄漏检测依然有效, 而且检测距离将更长。

参考文献:

- [1] Miller RK, Pollock AA, et al. The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled buried pipelines[J]. Journal of Acoustic Emission, 2001, 32(2): 245-256.
- [2] 焦敬品, 何存富, 吴斌等. 基于导波理论的管道泄漏声发射定位新技术研究[J]. 机械工业学报, 2004, 40(10): 77-81.
- [3] Amanda M C, Lance E R, et al. Experimental Studies on the role of backfill and pipeline characteristics in the application of acoustic leak location to underground pipelines. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation [J]. 1997, 16: 467-473.
- [4] MELVIN J Hinich. Detecting a transient signals by bispectral analysis [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1990, 38(7): 1277-1283.
- [5] Erdem A T, Tekalp A M. Linear Bispectrum of Signals and Identification of Nonminimum Phase FIR Systems Driven by Colored Input [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1992, 40 (6): 1469-1479.
- [6] Hinich M J, Wilson G R. Detection of non-gaussian signal in non-gaussian noise using the bispectrum [J]. IEEE Trans on ASSP, 1990, 38(7): 1126-1131.
- [7] Erdem A T, Tekalp A M. Linear Bispectrum of Signals and Identification of Nonminimum Phase FIR Systems Driven by Colored Input [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1992, 40 (6) : 1469-1479 .

Bispectrum Application in the Leakage Detection of Urban Underground Gas Pipeline

Zhang Bin Wang Jianming

(Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160)

[Abstract] Due to low pressure, complex circumstance noise and weak leakage signal of the urban underground gas pipeline, it is difficult to detect the signal by general signal processing method which is based on the second-order cumulants. According to higher-order cumulants and bispectrum theory, bispectrum is applied to non-Gaussian signal detection in Gaussian noise, the frequency resolution is improved in bispectrum through the direct method of bispectrum estimate and the use of two-dimensional window, setting up the corresponding hypothesis testing model in actual situation. Experimental results show that the method can be validated to detect leakage signal of low-pressure gas network, the detection distance is not less than 20m.

[Keywords] bispectrum; urban underground gas pipeline network; low-pressure gas pipeline network; leak detection; acoustic emission

双谱在城市地下燃气管道泄漏检测中应用研究

作者: [张彬, 汪剑鸣, Zhang Bin, Wang Jianming](#)
 作者单位: [天津工业大学信息与通讯工程学院, 天津, 300160](#)
 刊名: [电脑与电信](#)
 英文刊名: [COMPUTER & TELECOMMUNICATION](#)
 年, 卷(期): 2009, ""(4)
 引用次数: 0次

参考文献(7条)

1. Miller RK, Pollock AA [The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled buried pipelines](#) 2001(02)
2. 焦敬品, 何存富, 昊斌 [基于导波理论的管道泄漏声发射定位新技术研究](#)[期刊论文]-[机械工程学报](#) 2004(10)
3. Amanda M C, Lance E R [Experimental Studies on the role of backfill and pipeline characteristics in the application of acoustic leak location to underground pipelines](#) 1997
4. MELVIN J Hinich [Detecting a transient signals by bispectral analysis](#) 1990(07)
5. Erdem A T, Tekalp A M [Linear Bispectrum of Signals and Identification of Nonminimum Phase FIR Systems Driven by Colored Input](#) 1992(06)
6. Hinich M J, Wilson G R [Detection of non-gaussian signal in non-gaussian noise using the bispectrum](#) 1990(07)
7. Erdem A T, Tekalp A M [Linear Bispectrum of Signals and Identification of Nonminimum Phase FIR Systems Driven by Colored Input](#) 1992(06)

相似文献(5条)

1. 期刊论文 [高华, 王宝光, 杜振辉, 乔晓崑, Gao Hua, Wang Baoguang, Du Zhenhui, Qiao Xiaowei](#) [双谱应用于城市地下燃气管网泄漏检测的研究 - 仪器仪表学报](#) 2008, 29(11)
 城市地下燃气管网由于其压力低, 周边环境噪声复杂, 决定了其泄漏信号检测的难度. 本文从实际出发, 提出了一种简单实用的城市地下低压燃气管网泄漏检测系统模型. 并根据双谱检测理论, 研究模型中涉及到的泄漏信号、管内流体噪声、城市环境噪声的平稳性、高斯性, 采用三种基于双谱的统计量, 实现了在0.005~0.10 MPa压力范围内的复杂城市环境噪声中的泄漏检测. 在对大量现场实验数据进行处理的基础上, 验证了这种模型及双谱检测法在城市特有的环境噪声中检测泄漏信号的有效性.
2. 期刊论文 [乔晓崑, 高华, 王宝光, QIAO Xiaowei, GAO Hua, WANG Baoguang](#) [双谱在城市地下燃气管道泄漏检测中的应用研究 - 新技术新工艺](#) 2008, ""(11)
 由于城市地下燃气管网压力较低, 环境噪声复杂, 泄漏信号微弱, 使得泄漏信号难以利用基于二阶累积量理论的信号处理手段检测到. 本文根据双谱理论, 利用双谱对高斯有色噪声的有效压制及其保留相位的独特性质, 将其应用于低压燃气管道泄漏检测, 建立了检测系统模型. 利用直接法估算双谱值并给出相应的判断准则. 在试验室现有条件下, 按照国家标准铺设了一段40 m长埋地管道进行泄漏试验. 通过试验验证, 该方法在中低压管道泄漏检测中有着较好的准确性.
3. 期刊论文 [高华, 王宝光, 杜振辉, 刘会朴, GAO Hua, WANG Bao-guang, DU Zhen-hui, LIU hui-pu](#) [城市地下燃气管网泄漏定位研究 - 传感技术学报](#) 2008, 21(12)
 由于城市燃气管网泄漏极具危险性, 而现有的检测定位手段不能有效地对泄漏点准确及时的发现与定位. 根据互双谱延时估计理论, 将双谱应用于地下中压燃气管网泄漏的定位, 通过直接法得到互双谱和自双谱的估计值, 由该估计值得到双谱的相位, 为了得到真正意义相位, 对估计相位进行了解卷绕, 得到最小二乘意义上的无卷绕相位, 最后由互双谱和自双谱的无卷绕的相位差得到泄漏点的位置, 并通过大量的泄漏定位实验证明了该方法的有效性. 实验结果表明, 该方法应用于城市中、低压管网的泄漏定位, 在检测距离为30 m的情况下, 定位绝对误差小于2 m.
4. 期刊论文 [高华, 王宝光, 杜振辉, 乔晓崑, GAO Hua, WANG Bao-guang, DU Zhen-hui, QIAO Xiao-wei](#) [双谱在管道两点泄漏定位模型中的应用 - 纳米技术与精密工程](#) 2009, 7(5)
 在广义声发射检测理论和盲信号处理理论相结合的基础上, 在假设两泄漏信号统计独立及检测噪声与信号统计独立的前提下, 提出了一种基于双谱的管道两点泄漏定位方法, 该方法在理论上可定位已经存在或正在发生的泄漏事故. 依据该模型, 按照独立信号双谱的特性, 建立了两检测系统输出的自双谱和互双谱组成的方程组, 巧妙地利用双谱域中的两条直线上的双谱值, 推导了两泄漏点的定位理论公式. 在双谱估计中, 采用直接法和Han-ning-Poisson组合二维窗估计了观测序列的双谱值. 在实验基础上, 验证了该公式的正确性及该方法在工程上的可行性. 实验结果表明: 对于城市地下燃气管网, 在0.01~0.09 MPa压力范围内, 检测距离为28.6 m的情况下, 定位绝对误差小于1.5 m.
5. 学位论文 [乔晓崑](#) [城镇地下燃气管网泄漏检测系统及其算法研究](#) 2008
 作为一种清洁, 高效的绿色能源, 天然气日益受到世界各国的青睐. 管道作为天然气资源的主要输送手段, 其安全性也就显得尤为重要. 特别是城市地下燃气管网的泄漏事故, 不仅会导致巨大财产损失, 同时也存在造成人员伤亡潜在危险. 随着城市燃气管网的飞速发展, 寻求一种准确、快速的检

测和定位手段势在必行。

目前市场上的燃气管道泄漏检测手段比较丰富，但真正适合城市燃气管道的检测设备仍然非常有限。本文按照国家城市燃气管网铺设标准，在某闲置工厂内，搭建了一套模拟埋地管道泄漏的实验平台，并在此平台基础上，利用声发射、小波、高阶统计量及广义相关理论，研究了泄漏检测和定位的算法。论文的主要内容如下：

1. 按照国家标准，铺设了一条36m长钢管管线，其中直管线30m，过弯头管道6m，模拟实际燃气管道；
2. 根据压电式加速度传感器特点，搭建了后续的信号放大、滤波电路，并利用LabVIEW虚拟仪器技术实现数据的采集和信号处理；
3. 利用小波变换工具对信号进行去噪声处理；根据db4小波分析实际的噪声和泄漏数据，对各分解层次利用长对数阈值进行阈值估计，并用软阈值方式作用此阈值；
4. 利用高阶统计量（三阶累计量及双谱）对泄漏和噪声信号进行高斯性分析，完善了泄漏判断算法，并通过大量试验证明了该方法在平稳噪声环境下的有效性，检测准确率达97%以上；
5. 利用广义互相关法实现对泄漏信号的定位分析，实验结果表明，在检测距离为30m、压力为0.05~0.25MPa的情况下，定位绝对误差小于1m。

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gddnydx200904025.aspx

下载时间：2010年6月22日