

基于 Duffing 振子的天然气管道泄漏检测方法^①杨红英^{②*} 葛传虎^{**} 叶 昊^{**} 王桂增^{**}

(* 清华大学计算机系 北京 100084)

(** 清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要 针对天然气管道泄漏因泄漏声波信号信噪比(SNR)过低而难于检测的问题,研究了基于 Duffing 振子的天然气管道泄漏检测方法。该方法将待检测数据输入 Duffing 振子系统,以振子系统的状态转化实现非周期信号中周期信号的检测。为了更好地提高 Duffing 振子的检测性能,在 Duffing 振子设计阶段,以随机共振的有关理论为基础,通过对系统输出信噪比的优化来实现 Duffing 振子的参数设计。基于实际天然气管道泄漏数据的测试结果表明,所提出方法可在低信噪比(-68dB)的情况下有效检测出泄漏,具有较好的检测性能。

关键词 混沌,天然气管道,泄漏检测,Duffing 振子,随机共振

0 引 言

天然气作为优质清洁能源已在世界范围内得到广泛使用,天然气输送管道也随之得到了迅猛发展^[1]。天然气管道在运行过程中,由于种种原因,可能会发生泄漏,造成经济损失和环境污染,因此对天然气管道的泄漏检测具有重要的经济和社会意义。

由于天然气的可压缩性以及管道的大容积性,发生泄漏后,其压力变化可能很小^[2,3],因此,用于液体管道泄漏检测的负压波方法很难实现对气体管道的泄漏检测与定位。由于泄漏发生后,除了伴随压力的变化外,当流体经过泄漏孔时,还会激发持续的声信号,近年来,基于声波的泄漏检测方法受到了越来越多的重视^[4-8]。而声波传感器灵敏度高且具有良好的动态特性,使得基于声波信号的天然气管道泄漏检测有望成为可能。虽然声波传感器具有较高的灵敏度,但很多管道上小泄漏产生的声波信号幅度比较小,通过肉眼很难观察到泄漏信号,并且由于信噪比(signal to noise ratio, SNR)低,当采用功率谱分析方法对测量数据进行分析时,几乎也无法估计这类信号的功率谱,因而无法实现信号的检测^[9]。因此,此时的泄漏检测问题就转化为强背景噪声下的微弱信号检测问题。在该微弱信号检测领

域,基于混沌振子的检测算法由于能够显著降低对检测信噪比的要求,并且具有极强的噪声抑制能力,因而受到了广泛关注^[10-13]。但目前还未见到将其用于天然气管道泄漏检测的报道。为解决天然气管道泄漏声波信号因信噪比低而难于检测的问题,本文利用 Duffing 振子对小信号敏感、对噪声免疫的特性,研究了基于 Duffing 振子的天然气管道泄漏检测问题。为了提高基于 Duffing 振子系统的检测信噪比,本文提出了通过随机共振理论对 Duffing 振子的参数进行合理优化的方法,成功检测出了天然气管道的泄漏。此外,传统的 Duffing 振子系统要求待检测信号是周期信号,而本文的方法可以有效检测出非周期声波信号中的周期成分。

1 Duffing 振子

Duffing 振子系统是一类典型的混沌系统,可以用如下方程描述^[12-14]:

$$\ddot{x} = -k\dot{x} + ax - bx^3 + f\cos(\omega t) \quad (1)$$

其中 x 为系统的输出信号, $\dot{x}$ 表示 x 对时间的微分, k ($k > 0$) 为阻尼系数, $f\cos(\omega t)$ 为周期性驱动力, a ($a > 0$)、 b ($b > 0$) 为系数。对于混沌系统,通过输入与时间有关的连续微小扰动可以实现混沌系统由不稳定状态到稳定状态的过渡,这是混沌 Duffing

① 国家自然科学基金(60974059, 60736026, 60721003)和中国博士后科学基金(20090450402)资助项目。

② 女,1980年生,博士;研究方向:故障检测;联系人,E-mail: yanghongying@tsinghua.org.cn
(收稿日期:2009-05-18)

振子用于检测微弱周期信号的基本依据。当采用 Duffing 振子进行微弱周期信号检测时,由于混沌系统在临界相变点处对噪声不敏感,如没有微弱周期信号存在,则系统处于混沌状态,将待检测信号输入混沌系统,系统则会进入大尺度周期区。在利用 Duffing 振子进行微弱周期信号检测时,需首先确定式中的各个系数及驱动力的幅值 f 。其中驱动力幅值 f ,可以通过相图状态的转化来确定,目前需要解决的是系数 k 、 a 、 b 的确定,由于 Duffing 振子是随机共振系统的一个特例,因此下面用随机共振的有关理论来确定上述参数。

2 Duffing 振子与随机共振

2.1 随机共振的基本模型

随机共振的概念是由 Benzi^[15]等在研究古气象冰川问题时提出的,它描述的是在信号、噪声和非线性体系之间的协调作用下产生的一种现象。在随机共振的研究中,与 Duffing 振子对应的是一类由双势井(double-well potential 或者 twin-well potential)描述的系统,其数学描述为^[16,17]

$$\ddot{x} = -k\dot{x} - \frac{\partial V(x)}{\partial x} + f\cos(\omega t) + n(t) \quad (2)$$

式(2)描述了单位质量小球在周期性作用力下,在双势井系统中的轨迹。其中 x 表示小球的位置, k 表示小球与双势井之间的摩擦系数, $f\cos(\omega t)$ 表示外加周期性驱动力, $n(t)$ 为白噪声,其方差为 D , $V(x)$ 为势能函数。对于双势井系统来说,其具体形式为

$$V(x) = -a\frac{x^2}{2} + b\frac{x^4}{4} \quad (3)$$

当 $a = 1$, $b = 2$ 时,势能函数如图1所示。当没有

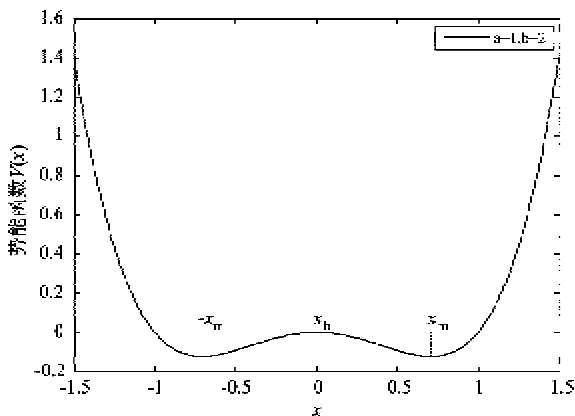


图1 势能函数曲线

周期性驱动力时,小球在图1中 $x = +x_m$ 或者 $x = -x_m$ 的稳定点上。

将式(3)带入式(2)可以得到

$$\ddot{x} = -k\dot{x} + ax - bx^3 + f\cos(\omega t) + n(t) \quad (4)$$

而采用 Duffing 振子进行信号检测时,需将待检测数据 $z(t)$ 输入到振子系统中,即

$$\ddot{x} = -k\dot{x} + ax - bx^3 + f\cos(\omega t) + z(t) \quad (5)$$

而 $z(t)$ 不可避免地带有噪声。对比式(4)和式(5)可以看出,当 Duffing 振子用于信号检测时,即为双势井随机共振系统,因此,可采用随机共振的有关理论设计 Duffing 振子系统的系数。

2.2 Duffing 振子检测系统的参数设计

2.2.1 k 的确定

在 Duffing 振子的设计阶段,需首先确定 k 的数值。关于 k 的选取,一般取固定值,例如 0.5^[18]。而由随机共振的物理模型可以看到, k 对应小球与双势井之间的摩擦系数,从微弱信号检测的角度而言, k 应该取一个较小的数值,否则,当带有待检测微弱检测信号的数据输入振子系统时,可能不足以克服摩擦阻力的影响,从而不会导致系统状态的跳变。但 k 值也不能过小,在极端情况下,如果 $k = 0$,此时没有摩擦阻力,系统没有任何能量衰减,小球的运动状态始终是周期的,由于不存在混沌态,没有状态的转变(混沌态→大尺度周期态),从而也就不能通过状态的转变实现信号检测了^[19]。基于这种思想,针对我们的实验数据,我们以 0.25 为初始值,并在此基础上进行调整,最终设定 $k = 0.275$ 。

2.2.2 参数 a , b , f 的确定

在信号检测中,算法的性能受信噪比的影响,因此,本节将通过优化信噪比实现参数 a , b , f 的选择。由文献[20]可知,式(4)所示的系统,其信噪比 SNR 与参数的关系为

$$\text{SNR} \propto \frac{f^2 a^2}{b D^2} e^{-\frac{a^2}{b D}} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,在噪声水平 D 一定的情况下,信噪比 SNR 与参数 a , b , f 有关,而由式(1)可以知道,驱动力 f 还和参数 a , b 有关,当选定 a , b 后,可以通过 Duffing 振子由混沌态向大尺度周期态的转变来确定 f , 因此,最终优化信噪比时只需要优化参数 a , b 即可。但是由于优化过程中需要采用李亚普诺夫指数确定 Duffing 振子的临界驱动力,计算量大,为降低计算量,针对实际数据,我们首先通过仿真对参数 a 的影响进行了分析,通过仿真发现 a 的数值不应过大,否则振子系统很难进入混沌态,因此,根

据待检测信号的频率,我们最终固定 $k = 0.275$, $a = 0.2$, 通过优化参数 b 实现信噪比优化,信噪比曲线如图 2 所示。

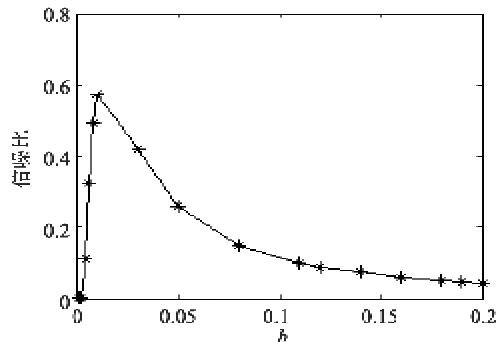


图 2 信噪比曲线

在图 2 中,信噪比曲线的极大值点处 $b = 0.01$, 此时 Duffing 振子的临界相变点驱动力 $f = 1.032$, 下面就以该参数构建混沌系统,以进行泄漏检测。

3 基于 Duffing 振子的管道泄漏检测

3.1 基本原理

基于 Duffing 振子的泄漏检测可以看作是 Duffing 振子微弱信号检测在管道领域中的一个具体应用。对于式(1)所示的 Duffing 振子系统,构造检测系统^[12]

$$\ddot{x} = -k\dot{x} + ax - bx^3 + f\cos(\omega_0 t) + z(t) \quad (7)$$

其中 $z(t)$ 为测量数据,满足

$$H_0: z(t) = n(t)$$

$$H_1: z(t) = u\cos\omega_0 t + n(t) \quad (8)$$

其中 $u\cos\omega_0 t$ 为幅值未知、频率已知的待检测微弱周期成分。当采用式(7)所示的系统进行泄漏检测时,由于混沌系统对噪声的免疫性,当 $z(t)$ 中不存在待检测周期信号 $u\cos\omega_0 t$ 时,系统仍处在混沌态,当存在信号 $u\cos\omega_0 t$ 时,系统会进入大尺度周期态。利用状态的转化即可进行信号检测。

3.2 泄漏检测

图 3 所示为实测泄漏信号,虚线为辅助线,从左边开始,每两条为一组,每组虚线之间对应一次泄漏实验,其信噪比^[21,22]仅为 -68dB 。对图 3 信号进行功率谱分析可以得到图 4,从图 4 可以看到,通过功率谱很难区分两种信号。

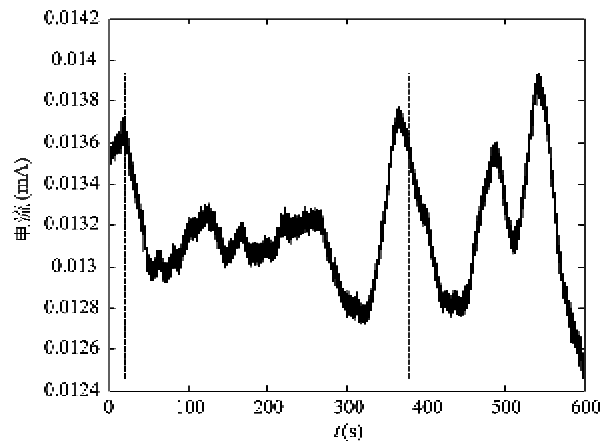


图 3 传感器测量值曲线

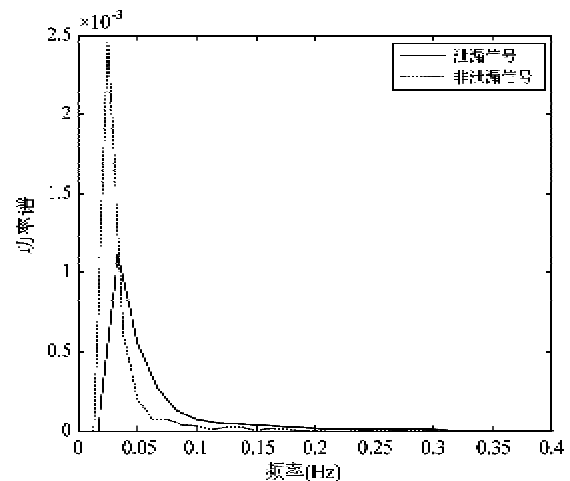


图 4 泄漏与非泄漏信号的功率谱

而采用 3.1 节所述方法对图 3 所示的数据进行泄漏检测,当不存在泄漏信号时,系统的相图如图 5 所示,此时系统仍处于混沌区。加入泄漏信号时,系统的相图显示系统处于大尺度周期区(如图 6 所示),从而实现微弱泄漏信号的检测。

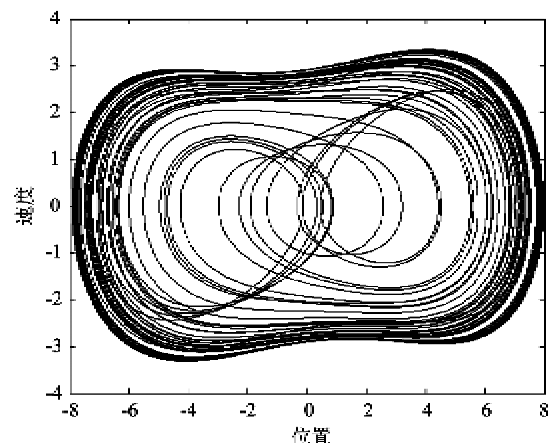


图 5 无泄漏时的相图

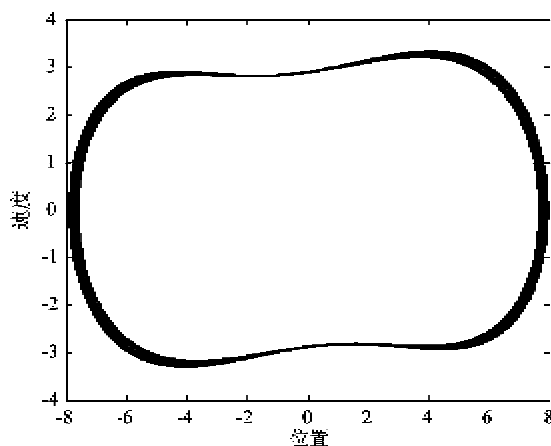


图6 泄漏时的相图

4 结论

本文研究了基于 Duffing 振子的天然气管道泄漏非周期信号中周期成分的检测。为提高系统的检测性能,根据随机共振的有关理论,对 Duffing 振子系统参数进行了优化,并通过某实际天然气管道的泄漏声波数据验证了所提出算法的有效性。

参考文献

- [1] 刘银春,杨光,常志波,周玉英,徐广军.天然气管输管道的节能降耗.天然气技术,2007,1(6):57-59
- [2] 向素平,冯良,周义超.天然气管道泄漏模型.天然气工业,2007,27(7):100-102
- [3] Levenspiel O. Engineering Flow and Heat Exchange. New York: Plenum press, 1998
- [4] Long R, Lowe M, Cawley P. Attenuation characteristics of the fundamental modes that propagate in buried iron water pipes. *Ultrasonics*, 2003, 41(7): 509-519
- [5] Eiswirth M, Burn L S. New methods for defect diagnosis of water pipelines. In: Proceedings of the 4th International Conference on Water Pipeline Systems, York, UK, 2001. 137-150
- [6] Miller R K, Pollock A A, Watts D J, et al. A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques. *NDT&E International*, 1999, 32(1):1-8
- [7] Osama H, Chu W T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. *Applied acoustics*, 1999, 58(3): 235-254
- [8] Fuchs H V, Riehle R. Acoustic analysis detects leaks. *Water Engineering & Management*, 1991, 138(1): 11-13
- [9] 戴逸松.微弱信号检测方法 & 仪器.北京:国防工业出版社,1994.195
- [10] Haykin S, Li X B. Detection of signals in chaos. *Proceedings of the IEEE*, 1995, 83(1): 95-122
- [11] Wang G Y, Chen D J, Lin J Y, et al. The application of chaotic oscillators to weak signal detection. *IEEE Trans on industrial electronics*, 1999, 46(20): 440-443
- [12] Wiesenfeld K, McNamara B. Period-coupling systems as small-signal amplifiers. *Physical review letters*, 1985, 55(1): 13-16
- [13] Wiesenfeld K, McNamara B. Small-signal amplification in bifurcating dynamical systems. *Physical review A*, 1986, 33(1): 629-642
- [14] Szemplinska-Stupnicka W, Rudowski J. Steady states in the twin-well potential oscillator: computer simulations and approximate analytical studies. *Chaos*, 1993, 3(3): 375-385
- [15] Benzi R, Sutera A, Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance. *J Phys, A*, 1981, 14(11): L453-L457
- [16] Gammaitoni L, Menichella-Saetta E, Santucci S, et al. Periodically time-modulated bistable systems: Stochastic resonance. *Physical review A*, 1989, 40(4): 2114-2119
- [17] Gammaitoni L, Marchesoni F, Menichella-Saetta E, et al. Stochastic resonance in bistable systems. *Physical review letters*, 1989, 62(4): 349-352
- [18] 杨红英.基于混沌理论的故障检测方法研究:[博士学位论文].北京:清华大学自动化系,2007.82-85
- [19] Guckenheimer J, Holmes P. Nonlinear Guodongpan Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields. New York: Springer-Verlag, 1986. 180-183
- [20] Gammaitoni L, P Hänggi, Jung P, et al. Stochastic resonance. *Reviews of Modern Physics*, 1998, 70(1): 223-287
- [21] Scharf L. Statistical Signal Processing: Detection, Estimation, and Time Series Analysis. Reading, MA: Addison Wesley, 1990. 494
- [22] Wang G Y, He S L. A quantitative study on detection and estimation of weak signals by using chaotic duffing oscillators. *IEEE transactions on circuits and systems-I: fundamental theory and applications*, 2003, 50(7): 945-953

Leak detection based on duffing oscillators for gas pipelines

Yang Hongying*, Ge Chuanhu**, Ye Hao**, Wang Guizeng**

(* Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084)

(** Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract

Considering the gas pipeline leak is difficult to detect due to the very low signal to noise ratio (SNR) of the leak-generated signals, this paper proposes an algorithm for gas pipeline leak detection based on Duffing oscillators. The algorithm makes test data as the input of the Duffing system, and realizes the frequency component detection within the non-periodical signals by using the state transfer of the Duffing system. In order to improve the detection performance of Duffing oscillators, the design for parameters of the Duffing system is realized by optimization of the output SNR of the system according to the stochastic resonance theory. The test result based on the real leak data of the gas pipeline shows that the proposed method can effectively detect the leakage with a low SNR (- 68dB) and has the good detection performance.

Keywords: chaos, gas pipelines, leak detection, Duffing oscillators, stochastic resonance