

基于阈上随机共振的混合气体识别研究 *

吴莉莉¹, 郑宝周¹, 林爱英¹, 郭淼², 陈裕泉³

(1. 河南农业大学 理学院, 河南 郑州 450002;
2. 杭州电子科技大学 生物医学工程与仪器研究所, 浙江 杭州 310018;
3. 浙江大学 生物医学工程与仪器科学学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在深入分析阈值随机共振系统模型的基础上, 提出了一种基于最大互相关系数的方法来进行混合气体的分类识别。实验结果表明, 该分类方法准确可行, 为分类识别提供了一种新的思路和方法。

关键词: 阈上随机共振; 互相关系数; 气体识别; 气敏传感器

中图分类号: TP911.1

文献标识码: A

Study of multi-gas recognition based on suprathreshold stochastic resonance

WU Li Li¹, ZHENG Bao Zhou¹, LIN Ai Ying¹, GUO Miao², CHEN Yu Quan³

(1. College of Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;
2. Institute of Biomedical Engineering and Instrument, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 210029, China;
3. College of Biomedical Engineering and Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A novel method of “maximum cross-correlation coefficients” based on suprathreshold stochastic resonance (SSR) was proposed in the paper to classify the multi-gas. The experimental results showed that this algorithm got high accuracy, which provided a new method for the recognition of gaseous ambiguity.

Key words: suprathreshold stochastic resonance; cross-correlation coefficient; gas recognition; gas sensor

在检测和传递信息的过程中, 噪声通常被认为是有害的。然而随着随机共振概念的提出, 这一观念有所改变。在某些非线性系统中, 适量的噪声加到信号中能够起到放大的作用, 这种有利于在噪声环境中检测和传递信息的效应就是随机共振的典型特征。

随机共振是非线性动力系统中的普遍现象, 它向人们展示了噪声在非线性体系中的积极作用: 部分噪声的能量转换为信号的能量, 从而增强弱信号的信噪比。在过去二十多年的研究中, 科学家们发现在物理、化学、生物、通信、电子、光学、神经网络、视觉、听觉等众多科学领域都存在随机共振现象^[1-2]。在 20 世纪 80 年代 90 年代主要研究了双稳态系统中随机共振的原理及应用, 并且在光学系统中发现了随机共振现象。从上世纪 90 年代至今, 在物理、化学等各个学科中都形成了随机共振的理论方法, 同时随机共振也开始应用于传感器、生物医学、信号处理、通信网络等领域^[3-5]。

近年来对阈值系统随机共振现象的研究受到了广泛的关注。在这类系统中, 阈值下的弱信号在噪声的作用下获得了部分能量, 从而使得信号跃迁阈值。也就是说, 通过随机共振现象, 噪声能增强阈下信号对系统的响应。通常的研究认为随机共振只出现在阈下信号, 而对于阈上信号, 则不能观察到随机共振^[6-7]。然而最近的理论和模型研究^[8-9]都表明对于多阈值系统和神经元并行阵列的阈上信号也可以出现噪声优化信息传递率的现象。这一过程与随机共振类似, 称为阈值上随机共振。

由多个阈值单元构成的并行网络在工程中广泛存在, 例如: 模-数变换; 由多个传感器组成的加和阵列; 构成电子鼻的多个气敏传感器等, 其中每个传感器具有一定的灵敏度, 存在对信号响应的阈值, 就是典型的多阈值加和并行网络系统。而且具有多个阈值电平的网络在神经元建模中也经常用到, 因此, 研究这些阈值系统中的随机共振就显得非常重要了。

本文研究在阈上随机共振模型和仿真的基础上, 将其应用到混合气体识别的训练中, 以期作为一种模式识别方法。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(3040000461); 郑州市科技攻关项目(083SGYG24123-2)

别的新方法。

1 阈上随机共振模型

如果已知输入信号和高斯分布噪声的相关信息，则一个简单的多阈值跃迁模型最基本的数学描述为： $x(t) = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, $y(t) = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$, 其中任一阈值单元为 $y_i = \begin{cases} 1, & x_i(t) + \eta_i(t) > \theta_i \\ 0, & \text{others} \end{cases}$ $i=1, \dots, n$ 。式中， $x(t)$ 表示输入信号， $y(t)$

表示输出信号， θ_i 为第 i 个阈值， $\eta_i(t)$ 为加在第 i 个阈值单元上的随机噪声。如果输入信号在噪声的作用下超过了阈值则输出为 1，反之为 0，因此单阈值检测器的输出是一系列的 0 和 1。图 1 给出了单个阈值检测器模型的方框图^[10]。

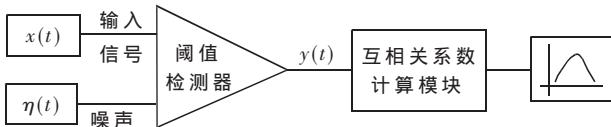


图 1 带有相关系数计算模块的阈值信号检测器的基本框图

阈值检测器的输入信号是随机的非周期信号，因此，本文用相关系数来描述通过阈值随机共振系统后的输出信号与输入信号的线性相关程度，它是从概率的角度来看待两个信号之间的匹配程度。如果两个信号完全一致，则相关系数应该为 1；如果没有任何相似则为 0。计算公式如下：

$$\rho_{xy} = \frac{\overline{[x(t)-\bar{x}][y(t)-\bar{y}]}}{\sqrt{\overline{[x(t)-\bar{x}]^2}\overline{[y(t)-\bar{y}]^2}}} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{\text{var}(x)\text{var}(y)}} \\ = \frac{E(xy) - E(x)E(y)}{\sqrt{\text{var}(x)\text{var}(y)}} \quad (1)$$

式(1)从概率角度描述了单个阈值单元的特性，它将是整个网络统计分析的基础。

若假设信号的均值为零，即 $E(x)=0$ ，则在计算相关系数表达式时，只需要计算 $E(xy)$ 和 $\text{var}(y)$ 。

为了分析方便，假设每个阈值检测器具有相同的阈值 θ ，每个阈值检测器的输出符合 0-1 的二值分布，则输出 1 的概率可表示为：

$$P_1 = P[y_i(t)=1] = P[x(t)+\eta_i(t) > \theta | x(t)] \quad (2)$$

输出 y 的方差为：

$$\text{var}(y) = E(y^2) = \frac{1}{N} E(P_1) + \frac{N-1}{N} E(P_1^2) - [E(P_1)]^2 \quad (3)$$

式中 N 为阈值单元的个数。

若输入信号 x 的概率密度函数已知为 $P_x(x)$ ，则输入信号与输出信号之间的互相关函数可表示成：

$$E(xy) = \int_{-\infty}^{\infty} x P_x(x) P_1 dx \quad (4)$$

因此，只要已知信号和噪声的概率密度，就可得到相关系数的解析表达式^[8]。

2 阈上随机共振的仿真分析

如果输入信号服从高斯分布，且均值为 0，方差为

σ_x ，则其概率密度函数为：

$$P_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (5)$$

作用在每个阈值单元上的噪声也是均值为 0，方差为 σ_η 的高斯分布，其概率密度函数为：

$$f_\eta(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\eta} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma_\eta^2}\right) \quad (6)$$

把(6)式代入(2)式可得：

$$P_1 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\theta-x}{\sqrt{2} \sigma_\eta}\right) \quad (7)$$

因此可以得到互相关函数 $E(xy)$ 和输出方差 $\text{var}(y)$ 如下：

$$E(xy) = \frac{\sigma_x}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_x^2(1+\sigma^2)}\right) \sqrt{\frac{1}{1+\sigma^2}} \quad (8)$$

$$E(P_1) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\sqrt{2\pi} \sigma_x} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{\theta-x}{\sqrt{2} \sigma_\eta}\right) dx \quad (9)$$

$$E(P_1^2) = -\frac{1}{4} + E(P_1) + \frac{1}{4\sqrt{2\pi} \sigma_x} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \operatorname{erf}^2\left(\frac{\theta-x}{\sqrt{2} \sigma_\eta}\right) dx \quad (10)$$

式中， $\sigma = \sigma_\eta / \sigma_x$ 为噪声方差与信号方差之比。把式(9)和式(10)代入式(3)可得到 $\text{var}(y)$ 。最终根据式(1)可得到相关系数。

通过调整阈值 θ 的大小，可考察系统处于阈值下和阈值上随机共振现象。当阈值 $\theta>0$ 时，表示信号均值小于阈值，可看作是阈值下状况。而当阈值 $\theta=0$ 时，只要存在噪声就可产生输出，因此可用来考察阈值上随机共振行为。

把 $\theta=0$ 代入式(8)、式(9)和式(10)可得到不含积分项的表达式：

$$\rho_{xy} = \sqrt{\frac{1}{2\pi(1+\sigma^2)}} / \sqrt{\frac{1}{4N} + \frac{N-1}{2\pi N} \arcsin\left(\frac{1}{1+\sigma^2}\right)} \quad (11)$$

图 2 给出了在高斯输入信号下的阈上随机共振的仿真图。图中的 5 条曲线从下到上依次是 $N=1, 2, 6, 30, 100$ 的情况下互相关系数随噪声强度变化的过程，显然随着阈值单元的增加，互相关系数曲线确实体现了共振的特

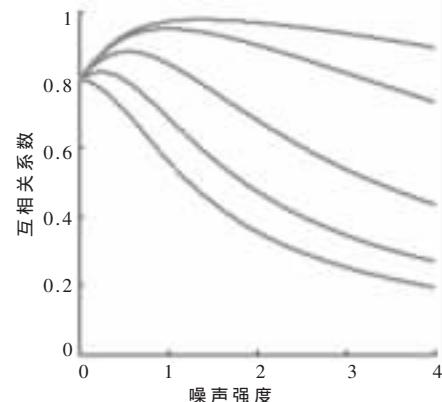


图 2 高斯输入信号下的阈上随机共振仿真图

征。在 $N=1$ 的情况下,没有出现 SSR,从 $N=2$ 开始 SSR 就非常明显了,互相关系数随噪声强度的增加达到一个极大值,随后又逐渐减小。随着 N 的增加,相关系数逐渐接近 1,但是始终小于 1。

3 混合气体识别实验

本次实验针对环境污染与安全问题,使用 6 只不同材料的碳纳米管气敏传感器,对 4 种易挥发性气体甲醛、苯、甲苯、二甲苯进行分类。实验中的传感器阵列选用参考文献[11]中的碳纳米管气敏传感器,分别为多壁碳纳米管、镀钯后的多壁碳纳米管、掺杂 Cu^+ 的多壁碳纳米管、定向碳纳米管、乙二胺修饰的定向碳纳米管和十二胺修饰的定向碳纳米管气敏传感器。

6 只不同的碳纳米管气敏传感器阵列组成了具有 6 个不同阈值的加和网络,每只传感器具有各自不同的检测阈值即最低检测浓度。用 4 个不同阈值电平的检测器来检测 4 种不同的气体,从这 4 个检测器得出的数据通过计算分别代表各自的气体种类。噪声随机产生然后加在每类气体上一同作为输入信号,通过各自的阈值检测器。

实验中 4 种样本气体为甲醛、苯、甲苯、二甲苯,每个气样的体积分数测量范围为 10×10^{-6} ~ 80×10^{-6} ,每隔 10×10^{-6} 取一个样本体积分数,即 4 种气体共有 32 个测量值。以 6 只传感器的输出电流值和它们所测试的 16 个样本值组成 6×32 的矩阵。其中选取 20×10^{-6} 、 40×10^{-6} 、 60×10^{-6} 、 80×10^{-6} 四个样本体积分数作为测试样本,其余 4 个样本体积分数为验证样本。

计算 4 种气体通过阈值系统后的互相关系数,以每种气体 24 个样值点作为传感器的响应输入信号,外加高斯白噪声(强度取值从 0~3.5),一起作为阈上随机共振的输入信号。在不同的噪声强度下,每种气体的输出和输入之间的相似程度用互相关系数来表示,这个互相关系数是经过 100 次计算后得到的均值。图 3 是 4 种气体的噪声强度与互相关系数的关系曲线图。

从图中可以看到,在加噪声的情况下出现了阈上随机共振现象,在不同的噪声强度下,4 种气体的最大互相关系数明显不同,而且这个最大互相关系数基本为常

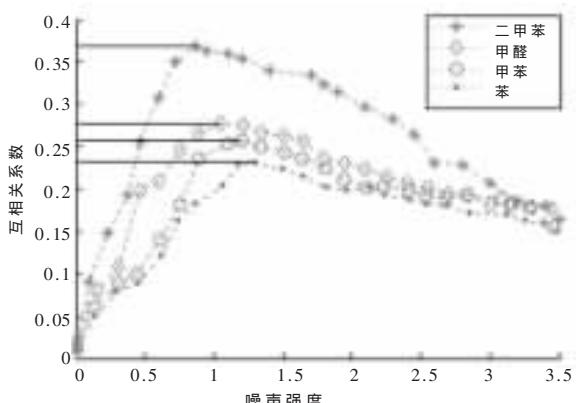


图 3 互相关系数随噪声强度变化的关系曲线

数,因此这些最大互相关系数可以用来表征不同种类的气体。

4 实验结果分析

图 3 是在选取 20×10^{-6} 、 40×10^{-6} 、 60×10^{-6} 、 80×10^{-6} 4 个样本体积分数作为测试样本的情况下得到的,与之对应的表 1 列出了 4 种气体在阈上随机共振出现时,噪声与最大互相关系数的值。

表 1 噪声与最大互相关系数的数值表

| 气体种类 | 最大互相关系数 对应的噪声强度 | 最大互相关 系数 |
|------|--------------------|-------------|
| 甲醛 | 1.055 1 | 0.278 4 |
| 苯 | 1.248 0 | 0.258 7 |
| 甲苯 | 1.307 4 | 0.230 1 |
| 二甲苯 | 0.871 2 | 0.369 2 |

为了验证当选取不同的样本体积分数时,最大互相关系数和与之对应的噪声强度仍基本为常数,选取了 10×10^{-6} 、 30×10^{-6} 、 50×10^{-6} 、 70×10^{-6} 四个样本体积分数作为验证样本。表 2 给出了最大互相关系数和与之对应的噪声强度的数值。表中,最大互相关系数用 p_{\max} 表示,与之对应的噪声强度用 D_{\max} 表示。

表 2 噪声与最大互相关系数的数值表

| 气体种类 实验次数 \ | 甲醛 | 苯 | 甲苯 | 二甲苯 | |
|----------------|------------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | D_{\max} | 1.054 8 | 1.246 5 | 1.306 1 | 0.871 0 |
| | p_{\max} | 0.278 0 | 0.258 0 | 0.231 0 | 0.369 7 |
| 2 | D_{\max} | 1.057 6 | 1.249 6 | 1.308 2 | 0.873 2 |
| | p_{\max} | 0.277 9 | 0.257 8 | 0.231 1 | 0.365 4 |
| 3 | D_{\max} | 1.056 3 | 1.245 7 | 1.305 1 | 0.870 8 |
| | p_{\max} | 0.279 0 | 0.258 9 | 0.229 1 | 0.367 9 |
| 4 | D_{\max} | 1.057 9 | 1.248 3 | 1.307 7 | 0.872 6 |
| | p_{\max} | 0.278 8 | 0.259 5 | 0.228 4 | 0.369 0 |
| 均值 | | 1.056 7 | 1.247 5 | 1.306 8 | 0.871 9 |
| | | 0.278 4 | 0.258 6 | 0.229 9 | 0.368 0 |

对比表 1 可以看出,校验样本通过阈上随机共振系统后的最大互相关系数和噪声强度基本为一个定值,显然这 2 个常数值与选取的样本体积分数无关,而与气体本身的种类相关,因此可用来识别气体。

该方法在利用随机共振提高系统性能方面有很好的应用前景,不仅可用于电子鼻等传感器阵列,还可用于电子眼、电子舌等的模式识别中。

参考文献

- [1] GAMMAITONI L, HÄNGGI P, JUNG P, et al. Stochastic resonance[J]. Reviews of modern physics, 1998, 70(1): 223~287.
- [2] WELLENS T, SHATOKHIN V, BUCHLEITNER A.

- Stochastic resonance[J]. Reports on progress in physics, 2004(67): 45–105.
- [3] SASAKI H, SAKANE S, ISHIDA T, et al. Suprathreshold stochastic resonance in visual signal detection[J]. Behavioural Brain Research, 2008, 193:152–155.
- [4] 吴莉莉, 惠国华, 潘敏, 等. 基于随机共振的纳米碳管气体传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19 (5): 2114–2119.
- [5] MANJARREZ E, MENDEZA I, MARETINEZ L, et al. Effects of auditory noise on the psychophysical detection of visual signals: cross-modal stochastic resonance. Neurosci Lett, 2007, 415: 231–236.
- [6] MOSS F, WARD L M, SANNITA W G. Stochastic resonance and sensory information processing: a tutorial and review of application[J]. Clin Neurophysiol, 2004, 115: 267–281.
- [7] STOCKS N G. Suprathreshold stochastic resonance in multilevel threshold systems[J]. Physical Review Letters, 2000, 84 (11): 2310–2313.
- [8] 刘军. 传感器阵列中阈上随机共振现象的仿真研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(3):854–857.
- [9] SASAKI H, SAKANE S, ISHIDA T, et al. Suprathreshold stochastic resonance in visual signal detection[J]. Behavioural Brain Research, 2008, 193:152–155.
- [10] RITABAN D A, DAS A, STOCKS N G, et al. Stochastic resonance-based electronic nose: a novel way to classify bacteria[J]. Sensors and actuators B, 2006, 115:17–27.
- [11] 郭森. 多壁碳纳米管的掺杂及其气敏特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006:36–80.

(收稿日期: 2009-01-22)