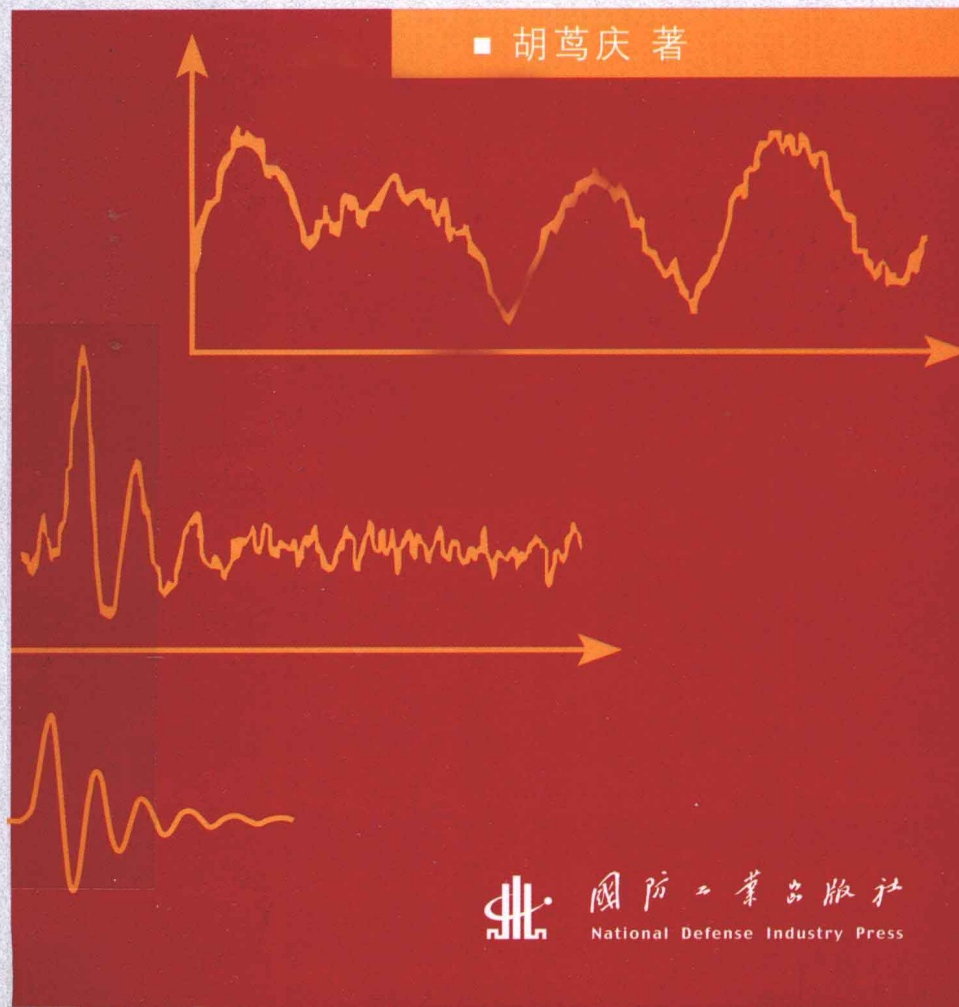


随机共振微弱特征信号 检测理论与方法

■ 胡芑庆 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

随机共振微弱特征信号 检测理论与方法

胡莒庆 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

随机共振微弱特征信号检测理论与方法/胡莺庆著.

—北京:国防工业出版社,2012.8

ISBN 978-7-118-08155-8

I. ①随... II. ①胡... III. ①信号检测—研究 IV.

①TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 159879 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6 1/2 字数 145 千字

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717



微弱特征信号检测是一门综合技术,涉及电子学、信息理论、非线性科学、信号处理及计算机技术等学科,且与具体的应用领域密切相关,是研究如何从强噪声背景中把有用信号提取出来或者把非常微弱的信号检测出来的一种技术。强噪声背景下的微弱特征信号检测是许多工程应用领域中的一个共同问题。正是由于微弱特征信号检测技术应用的广泛性,使之得到众多科技人员的关注,并促使人们不断探索与研究微弱特征信号检测的新理论、新方法,以期能在一定约束条件下更快速、更准确地从强噪声背景中检测微弱特征信号或者增强检测本身很微弱的有用信号。

随机共振(Stochastic Resonance, SR)方法是近 30 年来随着非线性动力学和统计物理理论的发展而发展起来的一种用于微弱特征信号增强检测的新方法。回顾传统的微弱特征信号检测方法,不论是用硬件实现还是用软件实现,都立足于抑制噪声,采用各种措施尽量抑制噪声,然后把有用信号提取出来。随机共振方法则不同,它通过一个非线性系统,利用将噪声的部分能量转化为信号

能量的机制来增强检测微弱特征信号。长期以来,人们较多认为“噪声”是讨厌的东西,它破坏了系统的有序行为,降低了系统的性能,是微弱特征信号检测的一大障碍。但是人们研究发现,在某些非线性系统中,噪声的增加不仅没有进一步恶化某些特定频带范围内输出的特征信号,反而使得输出局部信噪比得到一定的改善,增强了信号的显现,这一现象被称为“随机共振”。随机共振现象及在此基础上拓展的一些非线性现象为微弱特征信号的增强检测开辟了一条新途径,在理论上和应用上具有重要意义。

随机共振理论从提出到现在已有 30 年历史,从相关理论研究到实际应用都得到了较大发展。关于随机共振的研究工作,很多都集中在揭示自然界的或人工的不同系统中的随机共振现象,或者通过一些抽象出来的模型进一步分析随机共振现象的机理,较多给出的是数值计算和仿真的结果。与随机共振相关的实验研究一部分是以观测不同实验装置中出现的随机共振现象为目的,另一部分则是依据一定的机理,在某一类或某几类系统中诱导随机共振现象。总之,经典的随机共振理论已经成熟,但在此基础上拓展的现象与理论还在进一步发展中;而且随机共振理论与真正意义上的实际应用还存在一定距离。在微弱特征信号检测领域,针对不同信号类型,如何根据已有的随机共振理论设计信号增强检测模型,是一件很有意义的工作。

从 20 世纪 90 年代末开始,本书作者就尝试对随机共振理论开展应用研究,拓展了以往随机共振只能适用于较低频信号检测这一局限性,并将其引入机械系统早期故障增强检测中。近 10 年来,在国家自然科学基金项目(资助号:50275144、50675219)、国家 863 项目(资助号:2006AA04Z423)及湖南省杰出青年基金项目

(资助号:08JJ1008)支持下,从随机共振微弱信号检测模型的稳定性研究,到针对不同类型微弱信号开展的基于随机共振的检测方法研究等,为将这一理论应用于实际信号检测进行了一定的理论和试验研究工作。

本书简明扼要地介绍了随机共振的相关理论,结合作者从事机械状态监测和故障诊断研究工作中遇到的一些微弱信号类型,提出了相应的随机共振微弱信号检测方法。本书内容大部分取材于作者的博士论文及随后的研究工作,也部分取材于作者协助指导并协同作研究的杨定新博士和陈敏博士的有关工作。作者的博士生张晓飞、范彬、胡雷、程哲、夏鲁瑞、赵国英及博士后高经纬参与了部分书稿的整理工作,在此对所有贡献者表示感谢!

另外,本书参考了国内外研究人员在随机共振微弱信号检测领域的部分成果,在此向各文献作者表示感谢!

限于作者水平,书中难免有不当、疏漏和错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2012.4

内 容 简 介

本书阐述了随机共振的基本概念及基本原理,着重分析了基于随机共振原理的微弱特征信号检测方法。书中针对微弱周期信号和非周期信号的检测问题,分析了基于随机共振原理的微弱信号检测一般模型、数值计算稳定性、变尺度模型、模拟系统实现,并对其增强检测能力进行了仿真与实验验证;最后分析了随机共振与混沌理论相结合的微弱信号检测方法,并展望了随机共振的应用前景。

本书可供从事机械信号测试与处理、机械故障检测的高等院校教师、研究生和高年级本科生阅读,还可供从事多学科应用领域中微弱信号检测的科技人员参考。



第 1 章 概论

001

- 1.1 随机共振效应的内涵与模型 001
 - 1.1.1 经典随机共振 001
 - 1.1.2 随机共振模型 002
- 1.2 随机共振发展简述 005
 - 1.2.1 随机共振概念的提出及初始发展阶段 005
 - 1.2.2 随机共振理论与模型研究 006
 - 1.2.3 随机共振应用研究 009
- 1.3 随机共振在微弱信号检测中的应用 012
- 1.4 本书的内容与章节安排 014

第 2 章 随机共振基本理论

016

- 2.1 随机共振的衡量指标 016
- 2.2 双稳态系统 018
- 2.3 绝热近似理论 020
- 2.4 线性响应理论 025

第3章 基于双稳态系统随机共振模型的微弱周期信号检测方法

031

- 3.1 双稳态系统微弱周期信号检测模型 031
- 3.2 双稳态系统数值仿真的稳定性分析 034
- 3.3 双稳态系统归一化尺度变换 042
- 3.4 基于双稳态系统随机共振模型的微弱周期信号检测算法 047
- 3.5 基于外差式随机共振的微弱周期信号检测方法 053
- 3.6 多层随机共振算法 056

第4章 微弱周期信号检测的自适应随机共振方法

060

- 4.1 自适应随机共振基本理论 060
- 4.2 外加信号随机共振微弱信号检测方法 061
 - 4.2.1 概述 061
 - 4.2.2 基于外加信号随机共振的周期信号检测模型及原理 065
 - 4.2.3 外加信号随机共振微弱信号检测方法仿真验证 070
- 4.3 最佳匹配随机共振微弱信号检测方法 073
 - 4.3.1 概述 073
 - 4.3.2 最佳匹配随机共振方法设计 075
 - 4.3.3 最佳匹配随机共振方法的实现及数值仿真 084
- 4.4 基于混沌振子与随机共振的微弱信号检测方法 090
 - 4.4.1 基于混沌振子的微弱信号检测原理 090
 - 4.4.2 基于混沌振子的微弱周期信号幅值估计方法 092
 - 4.4.3 随机共振与混沌振子结合的微弱信号检测 095

第5章 微弱非周期冲击信号检测的随机共振方法

097

- 5.1 概述 097

5.2	非周期随机共振的理论及模型	098
5.2.1	非周期随机共振的线性响应理论及互相关描述	098
5.2.2	双稳态系统的单势阱近似模型	103
5.3	微弱非周期冲击信号检测的数值仿真与分析	107
5.3.1	非周期冲击信号产生模型	107
5.3.2	双稳态系统结构参数对非周期冲击信号检测的影响	108
5.3.3	非周期冲击信号特征参数对信号检测的影响	109
5.3.4	基于随机共振原理的微弱非周期冲击信号检测算法	112
5.3.5	非周期冲击峰值位置的确定及振荡衰减冲击信号的检测	113

第6章 微弱信号检测的随机共振模拟系统方法 117

6.1	概述	117
6.2	参数可调随机共振模拟系统	118
6.2.1	双稳态系统模拟电路实现原理	118
6.2.2	参数可调随机共振模拟系统的设计与实现	121
6.2.3	参数可调随机共振模拟系统微弱信号检测实验	123
6.3	随机共振电路模拟系统微弱信号检测实验与应用	128
6.3.1	微弱正弦信号检测实验	128
6.3.2	微弱脉冲信号增强传输实验	131
6.3.3	随机共振电路模拟系统在光栅微弱信号预处理中的应用	133
6.4	随机共振模拟系统在机械动部件故障检测中的应用	135
6.4.1	某型直升机中尾减速器实验分析	135
6.4.2	轴承故障检测初步分析	136
6.4.3	齿轮故障检测初步分析	140

- 7.1 解释随机共振的混沌动力学方法 146
 - 7.1.1 随机共振类同步现象进一步说明 146
 - 7.1.2 经典随机共振中噪声调节问题及可能的解决途径 147
 - 7.1.3 动态系统及产生混沌的必要条件 148
 - 7.1.4 谐波及追加的谐波组合激励 152
 - 7.1.5 噪声与谐波组合激励对 SNR 的影响 154
 - 7.1.6 谐波信号和噪声激励系统 159
- 7.2 随机共振应用的进一步讨论 161

第1章 概 论

1.1 随机共振效应的内涵与模型

1.1.1 经典随机共振

非线性系统在优化噪声强度作用下获得最大信噪比时就会展现随机共振,常出现在具有亚阈输入的双稳系统和可激励系统中。对较低的噪声强度,信号不会使系统穿越阈值,因而信号通过系统得不到明显的输出结果;对大的噪声强度,系统输出由噪声主导,也导致低信噪比。对适量的噪声强度,噪声促使信号达到或穿越阈值,且噪声不至于淹没信号。因此,信噪比随噪声强度变化的曲线展现出近似倒U形。

严格地说,随机共振存在于小周期力(正弦)和宽带随机力(噪声)共同作用的双稳系统中。系统响应由两种不同时间尺度的力共同驱动,两种力相互竞争/协同使得系统在两稳态间切换。有序的程度与系统响应中的周期函数的量值相关,当周期力足够小使得系统不存在切换的响应态时,所存在的噪声会使切换偶尔发生。当噪声非常小时也不会出现切换,系统响应处于没有明显周期性的随机结果;当噪声足够大,使得在一个正弦周期内切换大量发生时,系统响应则不会展现明显的周期性。令人惊奇的是,在上面两种极端情况之间,存在一个优化的噪声值,与周期力协同作用,使得在一个周期内几乎精确出现一次切换(此时信噪比达到最大)。

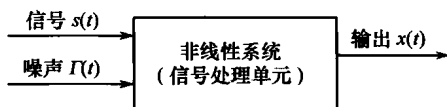
这种有利的输出状态切换现象可由两个时间尺度的匹配来定量确定:正弦周期(确定性尺度)和 Kramers 率(单独由噪声导致的平均切换率的倒数:随机尺度),并由此得名“随机共振”(Stochastic Resonance, SR)^[1]。

随机共振由意大利 Benzi 等学者于 1981 年开始在解释冰期周期性递归时首次被发现和提出^[2-4]。此后同样的原理应用于各种各样的系统。当前,随机共振普遍应用于确定噪声与非线性协同作用时系统响应的有序性增长中。

简言之,随机共振就是在一定的非线性条件下,由弱周期信号和噪声(随机干扰)合作而导致的非线性系统增强周期性输出的现象。

1.1.2 随机共振模型

经典的随机共振模型如图 1.1 所示。



随机共振模型一般包括 3 个基本要素。

(1) 微弱的输入信号 $s(t)$ 。该信号可以是诸如周期信号、非周期信号、数字脉冲信号、确定性信号或随机信号等各种类型的信号。

(2) 噪声 $\Gamma(t)$ 。可以是系统固有的噪声或者是外加的噪声。噪声信号实际上是满足一定统计特性要求的随机信号,如白噪声、有色噪声、高斯噪声或非高斯噪声等。

(3) 用于信号处理的非线性系统。以有用信号与噪声的混合信号作为系统输入,经非线性系统处理以后得到输出信号 $x(t)$ 。

随机共振模型的背景涉及物理、化学、生物学、通信、信息论、电子学等各个学科领域。下面介绍几类典型的模型。

1. 双稳态系统

Benzi 提出随机共振的概念时研究了具有双稳态的 Langevin 方程(LE)^[2], 即

$$dx = [x(a - x^2) + A \cos \Omega t] dt + \sigma dW \quad (1.1.1)$$

式中: σ 为 Wiener 过程 W 的方差。随后, 这个模型得到广泛的研究^[5-27]。

2. 阈值系统

最早实现随机共振现象的实际系统是 Schmitt 双稳态电路^[5], 它可以用阈值系统来模拟, 因而阈值系统也成为最简单的能够产生随机共振的系统。一种简单的阈值系统为

$$y(t) = \text{sgn}(x(t)) = \begin{cases} -1, & x(t) < \Theta \\ 1, & x(t) \geq \Theta \end{cases} \quad (1.1.2)$$

式中: $x(t)$ 为输入信号, $x(t) = s(t) + n(t)$; $y(t)$ 为输出信号; $\Theta \in \mathbf{R}$ 是阈值。阈值可以量化输入信号, 除了二值量化, M 值量化在随机共振的研究中也十分常见^[7,28]。

3. 单稳态系统

单稳态系统不存在双稳态和多稳态系统中的势垒, 仅有一个稳定点^[29,30]。一种特殊的例子是单阱 Duffing 振子, 即

$$\ddot{x} + 2\Gamma \dot{x} + \omega_1^2 x + \gamma x^3 = s(t) + n(t) = \varepsilon \cos \omega_0 t + n(t) \quad (1.1.3)$$

式中: $\Gamma \ll \omega_0$; $|\Delta\omega| \ll \omega_0$, $\gamma\Delta\omega > 0$ ($\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$)。单阱 Duffing 振子在小信号情况下也能出现随机共振效应。

4. Fitz Hugh - Nagumo (FN 或 FHN) 神经模型

FHN 是研究生物神经系统中随机共振现象的一个基本模

型^[31-37],即

$$\begin{aligned}\tau_v \dot{v} &= v(v-0.5)(1-v) - w \\ \tau_w \dot{w} &= v - w - b + A \sin \Omega t + \xi(t)\end{aligned}\quad (1.1.4)$$

式中: v 为快变量(以表示变化的势); w 为慢变量或恢复变量; τ_v 和 τ_w 分别为快、慢的特征时间; b 为阈值。Longtin 和 Douglass 利用这种模型对小龙虾神经系统的随机共振现象进行了实验研究^[38,39];Collins 提出非周期随机共振理论时,利用的可激系统也是 FHN 神经模型^[40]。此外,多个并联的 FHN 神经网络中微弱的生物信号检测^[41],以及神经网络中的随机共振现象与视觉图像检测应用也得到了研究^[42,43]。

5. 混沌系统

一些混沌系统中也可以发现随机共振效应^[44-46]。这些模型包括 Chua's 电路、Lorenz 系统及以下的受迫 Duffing 振子,即

$$\ddot{x} = -\delta \dot{x} + x - x^3 + \varepsilon \sin(\omega_0 t) + n(t) \quad (1.1.5)$$

6. 阵列和耦合系统

这类系统将许多单个的随机共振单元组合在一起,包括神经网络和其他的耦合系统。Inchiosa 和 Bulsara 认为耦合连接的具有过阻尼非线性的动态单元(Hopfield 神经元)提高了信号检测能力,并对其接收特性进行了详细研究^[47];Kim 等也利用这种模型研究了视觉图像传输中的随机共振现象^[48]。耦合连接的 Hopfield 神经元可以表示为

$$C_i \ddot{x}_i = -\frac{x_i}{R_i} + \sum_{j=1}^N m_{ij} \tanh x_j + s(t) + n(t) \quad i = 1, \dots, N \quad (1.1.6)$$

式中: C_i 和 R_i 为第 i 个神经元的输入电容和神经元之间的电阻; x_i 、 x_j 为神经元膜电压; m_{ij} 为耦合系数。

1.2 随机共振发展简述

1.2.1 随机共振概念的提出及初始发展阶段

随机共振最早是在1981年由意大利的 Benzi^[2~4]等,在研究地球古气象冰川问题时提出的,用来解释古气象学中冰川期与暖气候期周期性交替出现的现象。地球在远古时代,暖气候期和冰川期每隔10万年会交替出现一次,研究这一时期地球环境的变化,发现地球绕太阳转动的偏心率的变化周期也大约为10万年。这一变化意味着太阳对地球施加了周期变化的作用信号。然而,这一周期信号很微弱,其本身不足以使地球气候发生从冰川期到暖气候期如此大幅度的变化(粗糙估计的变化幅度为 1°C 量级,但实际变化幅度为 10°C 量级)。Benzi等提出一种解释:地球可以看做一个非线性系统,只有将这一信号与地球本身的非线性条件,以及在这一时期地球所受的随机力作用结合起来,研究它们的协同作用,才可能解释上述气候现象。Benzi等假设了一个被势垒分开的双稳气候模型,地球处于非线性条件下,这种条件使地球可能取冰川期和暖气候期两种状态。地球离心率的周期变化使气候有可能在这两个状态之间变动,而地球所受的随机力(如太阳常数的各种无规则变化、地球接受太阳热量年度性的波动、地球内部磁热噪声)则大大提高了小的周期信号对非线性系统的调制能力,通过“随机共振”,很微弱的输入产生了很大的输出(暖气候与冰川期的跃迁)。这一理论对于地球古气象这一难题提供了一个较为成功的解释。

1983年,Fauve和Heslot^[5]在研究Schmitt触发器电路时,发现了随机共振现象。Fauve等对该触发器加一固定幅值和频率的调制信号,同时加一强度可以改变的噪声信号。实验测量结果显示,

在一定的噪声强度下,输出信噪比会达到一个峰值。但这一实验没有引起人们足够的注意,使得随机共振的研究出现了一段时间的沉寂,直到 1988 年,美国佐治亚理工大学的 McNamara、Wiesenfeld 和 Roy^[6]等在环形激光器中也发现了随机共振现象才使之出现转机。他们将一个环形的具有双向发射的激光器作为一个双稳态器件并进行随机共振实验,其方法是用声—光调制,用声频去调制激光的发射方向,同时加入白噪声。噪声的强度从零逐渐增加,测量一个方向上的激光强度,在输出功率谱中,在调制信号处有一峰值并叠加了宽带噪声谱。他们测量了峰的幅值和调制频率的背景噪声,计算出输出信噪比,得到与文献[5]类似的现象。相关的研究一经报道,随机共振就引起理论和实验研究人员广泛的兴趣和重视,掀起了研究热潮。随机共振理论、模型及应用的研究成为近 30 年来非线性科学研究领域的热点之一。

1.2.2 随机共振理论与模型研究

随机共振理论可以分为经典随机共振理论与非经典随机共振理论两种。一般认为,经典随机共振理论包括绝热近似理论、线性响应理论与驻留时间分布理论;非经典随机共振理论包括非周期随机共振^[31,32,40,51,52]、参数调节随机共振^[8,53-58]、单稳态随机共振^[59-64]等。

随机共振模型与随机共振理论之间是紧密联系的。随机共振的模型较多,涉及物理、化学、生物学、通信、信息论、电子学、光学、神经网络等各个学科及研究领域^[8,10,19,21,31,32,40,41,47,49,50-74]。

经典随机共振是针对双稳态随机共振系统提出来的,随后才逐渐推广到其他系统。人们利用受周期信号与噪声驱动的双稳态系统的 Langevin 方程及所对应的 Fokker-Planck 方程分析随机共振的各种统计性质。McNamara 与 Wiesenfeld^[10]对双稳态系统两态模型(Two-State Model)的随机共振效应进行了理论描述,提出