

ZHUANZHU

非线性能量采集系统的相干共振与动力学特性研究

李海涛 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

非线性能量采集系统的相干共振与动力学特性研究



西北工业大学
官方微信



西北工业大学出版社
天猫旗舰店

ISBN 978-7-5612-6656-4



9 787561 266564 >

定价：50.00元

非线性能量采集系统的 相干共振与动力学 特性研究

李海涛 著

西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 本书是一本关于如何借助于非线性动力学手段实现宽频能量采集的专著,系统地阐述了压电能量采集的动力学建模方法,介绍了包含确定因素和随机因素的定性和定量分析基本理论以及结果。本书共分为8章,主要包括压电能量采集介绍、基于 Melnikov 方法的非线性能量采集参数研究、单自由度集中参数能量采集模型的相干共振、受压压电梁模型的相干共振与随机共振、基于磁耦合效应的改进双稳态能量采集系统、三稳态能量采集系统的相干共振与动力学行为、高效受压式压电能量采集系统和屈曲受压式能量采集系统等。

本书适合高等学校机械工程、工程力学、电子科学技术等专业的科研工作者、高年级本科生、研究生以及相关工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

非线性能量采集系统的相干共振与动力学特性研究/
李海涛著. —西安:西北工业大学出版社,2019.11
ISBN 978-7-5612-6656-4

I. ①非… II. ①李… III. ①非线性振动-压电效应-能量转换-研究 IV. ①TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 242395 号

FEIXIANXING NENGLIANG CAIJI XITONG DE XIANGGAN GONGZHEN YU DONGLIXUE TEXING YANJIU
非线性能量采集系统的相干共振与动力学特性研究

责任编辑:胡莉巾	策划编辑:何格夫
责任校对:何格夫	装帧设计:李飞
出版发行:西北工业大学出版社	
通信地址:西安市友谊西路127号	邮编:710072
电话:(029)88491757, 88493844	
网址:www.nwpup.com	
印刷者:陕西向阳印务有限公司	
开本:787 mm×1 092 mm	1/16
印张:10	
字数:262千字	
版次:2019年11月第1版	2019年11月第1次印刷
定价:50.00元	

如有印装问题请与出版社联系调换

前 言

随着微机电技术和精密加工技术的不断发展,以微型传感器为代表的现代微电子产品的应用日趋广泛。当前,微电子产品的能量供给大多依赖于化学电池,化学电池在使用过程中存在寿命有限、需要定期更换以及容易造成污染的弊端。能量采集作为一项可实现环境废弃能量回收利用的技术应运而生,所采集的能量为无线低功率的电子元件提供电能。能量采集技术一方面可以有效减少电池更换所带来的废弃物,另一方面可以降低无线传感器的维护和保养成本,因而具有显著的生态环境保护意义以及经济效益。近年来,在压电振动能量采集领域,研究最多的是利用压电效应将环境中的能量转化为电能。本书的研究重点也是基于压电能量采集装置的力-电耦合响应。

压电振动能量采集装置研究的初始阶段主要是根据线性振动理论来进行设计的,只有当激励频率在固有频率附近时,才会有比较好的能量采集效果。实际上,环境振动通常是非周期的低频、宽谱激励,而双稳态能量采集系统可以在低频范围内产生大幅的运动,因而被认为是一种实用化的高效能量采集系统。本书的重点为非线性能量采集系统的解析、数值和实验研究,设计多种振动能量采集系统,研究系统在随机激励下的相干共振和动力学行为;基于广义 Hamilton 原理,建立各个能量采集系统的机电耦合控制方程,应用 Melnikov 方法分别分析基础激励和参数激励下能量采集系统的同宿分岔现象;使用随机线性化、谐波平衡法和 Monte-Carlo 等方法研究双稳态系统以及多稳态系统中的随机共振和相干共振现象。

压电振动能量采集涵盖了机械工程、材料科学和电子科学与技术等学科。在压电振动能量采集分析过程中,结构振动内容往往和电学问题相互耦合在一起。本书主要介绍不同激励形式、结构下的多稳态非线性力-电耦合响应的建模问题,而不去关心储能元件和电子元件等内容。压电能量采集的力学响应和电学响应完全取决于环境激励特征,笔者主要考虑外部环境中谐波激励和随机激励两种形式,并通过一系列解析、数值和实验方法进行定性和定量分析。

本书设计多种双稳态以及多稳态能量采集装置,并着重分析其随机动力学行为,利用相干共振机理对系统参数进行优化设计。本书共包括 8 章,具体内容如下:

第 1 章,阐述压电能量采集系统的研究背景及意义,简要介绍国内外相关领域的发展历程和研究现状,总结能量采集领域尚未解决或有待进一步探索的关键问题,初步确立主要的研究内容和研究方案。

第2章,基于 Melnikov 方法,分别探讨同宿分岔对基础激励下和参数激励下能量采集系统的影响。一方面,建立双稳态非线性压电能量采集系统动力学模型并且分析系统的同宿分岔和混沌等非线性动力学行为;另一方面,为了进一步探究参数激励下的能量采集系统,基于能量法和广义 Hamilton 原理建立磁致屈曲压电梁的分布式参数模型。根据 Melnikov 理论,获得双稳态能量采集系统在谐波激励下关于同宿分岔的定性研究方法。通过对系统参数优化,得到同宿分岔和高能解的阈值曲线。分析数值结果发现,系统在临界阈值处由单阱运动演变为双阱运动,验证了该方法的有效性。实验结果表明,通过 Melnikov 方法获得的参数可以取得更宽的工作频带,因此可为能量采集系统参数设计提供有效的理论依据。

第3章,根据基尔霍夫定律和牛顿第二定律,从受压梁的双稳态特性出发,建立等效的随机激励作用下压电能量采集系统的集中参数模型。首先,采用随机线性化方法对一类环境噪声作用下能量采集系统进行分析,获得输出电压近似闭合形式的表示函数,用数值方法验证相干共振现象。其次,研究含分数阶阻尼的双稳态能量采集系统的相干共振。对于分数阶方程,采用 Euler-Maruyama-Leipnik 方法进行求解,计算不同阻尼阶数下的能量采集系统的信噪比、响应均值、跃迁数目等统计物理量。结果表明,此压电能量采集系统在随机激励下可以实现相干共振,阻尼阶数对相干共振的临界噪声强度和相干共振幅值有很大影响。最后,提出将压电和电磁两种能量转换方式集中在一个系统当中,形成一个具有复合能量采集机理的微能源装置,既有压电式结构简单、换能密度大的优点,又有电磁式材料制备容易、成本低廉的优点,为能量转化提供了新的尝试方法。

第4章,研究受压梁能量采集系统在横向激励时的动力学问题。通过广义 Hamilton 原理得到分布参数形式的机电耦合控制方程。采用数值方法计算系统在确定性激励和随机激励作用下的动态响应。结果表明,系统在谐波激励下经历了不同的非线性运动状态,屈曲双稳态时所能采集的能量更多。在随机激励下,屈曲双稳态导致相干共振的发生,使能量转化效果大幅提升,为结构参数优化提供了依据。在相干共振的基础上,通过引入轴向谐波激励,研究受压压电梁在横向随机激励下的随机共振。根据广义 Hamilton 原理得到机电耦合控制方程。采用 Kramers 逃逸率得到随机共振发生的必要条件。数值结果验证了随机共振发生阈值,表明随机共振发生时能量转化效率可以进一步提高。这为优化能量采集结构提供了尝试性方法。

第5章,为了提高振动能量的转化效率,提出一类改进双稳态能量采集系统 (ABEH) 模型并开展理论分析。通过改变传统磁斥力双稳态系统 (BEH) 中磁铁的支撑方式,有效地降低系统的势能垒,使其更容易实现双阱之间的跳跃。通过推导,得到磁铁之间的耦合公式,采用数值方法计算系统在确定性激励和随机激

励作用下的动态响应。结果表明,相比传统双稳态系统,改进了的双稳态系统能够在随机强度较小时产生大的电压和功率,因而具有更好的鲁棒性。

第6章,为了进一步提高传统磁斥力双稳态系统(BEH)振动能量采集效率,提出三稳态能量采集系统。通过广义 Hamilton 原理建立压电磁耦合能量采集系统的模型,推导出耦合的磁力公式。分别用数值方法和实验方法计算系统在确定性激励和随机激励下的响应。结果表明,该系统可以在低频激励下实现大幅运动,并且可以在低强度随机激励下实现相干共振。

第7章,提出高效受压能量采集系统(HC-PEH)的分布参数模型,并采用伽辽金法将连续体模型离散为单自由度非线性振动系统。结果表明,硬弹簧特性使得模型即使在很小的基础激励下也可以产生宽频响应以及多解共存等非线性特点。理论结果和实验结果相互对应,共同验证了非线性响应可用于提升能量采集效果。此外,通过扫频开展参数分析,获得了梁长度、质量、阻尼等对能量采集器电压响应的影响规律。

第8章,建立屈曲受压式能量采集系统(BC-PEH)的解析模型,并通过谐波平衡方法进行求解。在谐波激励和随机激励下开展参数研究,获得优化的结构参数。数值结果、解析结果以及实验结果的一致性充分验证了模型的正确性。通过和已有的高效受压式能量采集系统(HC-PEH)和双稳态能量采集系统(BEH)比较,屈曲受压式能量采集系统在单位能量密度、能量输出和输入比等方面都具有优势。

作为阅读本书的必要条件,笔者假定读者已经学过一些工科类本科阶段所必须掌握的课程,如振动力学,并且具备一定的常微分方程基础知识。本书的部分内容超出了本科生必修课程的范围,如随机振动、非线性振动等,不过笔者列出了一些参考书目和文章供读者学习和参考。

在本书的编写和出版过程中,笔者得到了各方的大力支持,也非常高兴在研究的过程中能够与多位研究者合作,例如秦卫阳教授(西北工业大学)、Jean Zu 教授(多伦多大学)、田瑞兰教授(石家庄铁道大学)、杨永锋副教授(西北工业大学)、Zhengbao Yang 博士(香港城市大学)、蓝春波博士(南京航空航天大学)和周志勇博士(河南大学),没有他们就不可能完成这项工作,在此对他们表示诚挚的谢意。还要感谢中国力学学会和中国振动工程学会,他们举办了多次以能量采集为主题的研讨会,非常有利于拓宽视野和启发创新精神。

最后,希望本书出版后,能得到广大读者的支持。欢迎各位批评、指正。

李海涛

2019年7月于太原

目 录

第 1 章 压电能量采集介绍	1
1.1 压电振动能量采集	1
1.2 随机激励下振动能量采集	6
1.3 随机共振和相干共振	7
第 2 章 基于 Melnikov 方法的非线性能量采集参数研究	8
2.1 引言	8
2.2 基础激励下的同宿分岔研究	8
2.3 参数激励能量采集系统的同宿分岔	18
2.4 结论	32
第 3 章 单自由度集中参数能量采集模型的相干共振	33
3.1 引言	33
3.2 宽频激励下能量采集模型的相干共振	34
3.3 分数阶能量采集系统	41
3.4 复合式能量采集系统	47
3.5 结论	56
第 4 章 受压压电梁模型的相干共振与随机共振	58
4.1 引言	58
4.2 受压压电梁模型的相干共振	59
4.3 受压压电梁能量采集系统的随机共振	65
4.4 结论	73
第 5 章 基于磁耦合效应的改进双稳态能量采集系统	74
5.1 引言	74
5.2 模型分析	74
5.3 数值模拟	80
5.4 结论	86
第 6 章 三稳态能量采集系统的相干共振与动力学行为	87
6.1 引言	87

6.2	模型分析	88
6.3	数值模拟	90
6.4	实验验证	96
6.5	结论	99
第7章	高效受压式压电能量采集系统	100
7.1	引言	100
7.2	分布式参数模型	100
7.3	Galerkin 离散	103
7.4	谐波激励	105
7.5	随机激励	113
7.6	性能比较	117
7.7	结论	119
第8章	屈曲受压式能量采集系统	120
8.1	引言	120
8.2	系统设计与建模	120
8.3	谐波平衡法	122
8.4	参数分析	126
8.5	数值模拟	127
8.6	实验验证	131
8.7	性能比较	137
8.8	结论	138
参考文献		139

第 1 章 压电能量采集介绍

本章主要介绍利用压电材料的压电效应进行能量回收、利用,讨论压电能量转化机理相对于电磁式和静电式的优越性。在本章中,我们将对涉及压电能量采集的文献进行广泛的回顾,并综述压电能量采集的研究现状,探讨非线性振动能量采集。本章还将介绍随机振动能量采集以及相干共振机理,目的在于借助于相干共振机理,在宽带环境弱基础激励下大幅度提高环境能量转换效率。

1.1 压电振动能量采集

能源问题是当今世界最受关注的热点话题之一,各国研究者一直在努力解决传统能源在使用过程中遇到的问题。近年来随着对低耗能电子元件如无线传感器^[1-2]、便携电子设备^[3-5]、微型医疗器械的研究深入^[6-7],如何有效地为这些器件供能成为研究者非常关注的问题。

近年来,微型高能电池蓬勃发展。它可以满足对无线低耗能电子元件的供能需求,但是仍然存在一些缺点:一是对于一些需要长时间工作的分散式、嵌入式元件而言,定期更换供能设备要花费大量的人力和物力;二是一些元件常常处于精密的仪器当中,假如供能设备体积较大,会给产品微型化带来很多不便^[8]。另外,日常生活的环境中存在各式各样的能量,将环境中能量收集起来,为电子设备供给能量,这无疑对优化电子设备性能具有十分重要的意义。以上这些原因直接促进了能量采集领域(energy harvesting)的兴起。

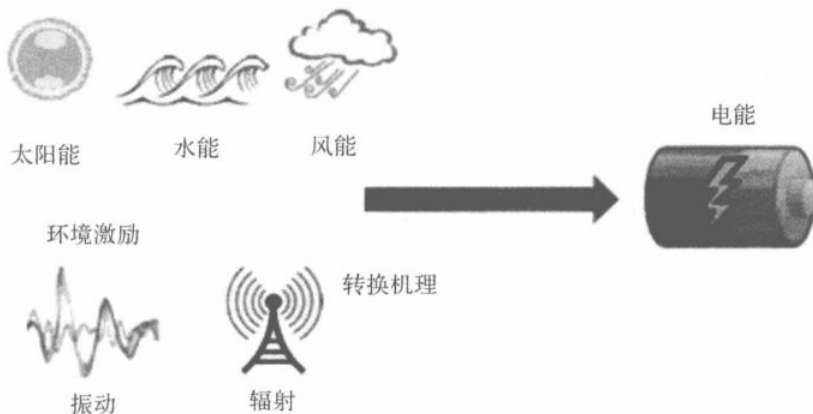


图 1.1 能量采集示意图

如图 1.1 所示,许多能源,比如我们所熟知的太阳能、水能、风能和地热等都可用于能量采

集。太阳能的能量密度很高,但是它对光照强度和光照时间却有着较强的依赖,并且一些对光照较为敏感的元件也会影响系统的能量采集效率,除此之外,较低的转换效率也会妨碍装置的进一步应用^[9]。热能可以通过热电耦合将外界热能转化为电能,虽然使用寿命长,但是能量转化效率低^[10]。表 1-1 列出了几种常见的振动源的基本振动特征(主要指频率和对应的加速度),可见机械振动在现实环境中广泛存在,而且相对一些能源来说能量密度较高。因此,环境振动的动能是一种比较理想的备用能源,将环境振动能量转化为可用的电能的振动式能量采集系统也成为微能源领域研究的一个重点课题。一些研究表明,振动能量采集系统可以充分地从环境振动中采集能量,目前已经广泛地应用在生产、生活领域,例如轮胎压力测试传感系统、无线医疗设备、楼宇自动化系统^[11-14]等。

表 1-1 实际环境中可用于振动能量采集的能量源

振动源	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	频率/Hz
行走	0.4	1
汽车引擎	12	200
开关门的声音	3	125
洗衣机	3.5	121
搅拌机	6.4	121
机床地基	10	70
汽车仪表盘	3	13
空调通风口	0.2~1.5	60
微波炉	2.5	121
繁忙街道的窗户	0.7	100
人行过街天桥	1.3	0.9~1

振动能量采集系统输出电能的大小取决于从应用环境中获得的动能、振动方式和转化效率等因素。Williams 和 Yate^[15]首次提出振动能量采集的概念,他们设计了单自由度的能量采集装置并且介绍了压电式^[16-19]、电磁式^[20-24]以及静电式^[25-28]三种能量转换机理,如图 1.2 所示。电磁式主要利用磁铁和线圈之间的电磁感应现象和法拉第定律。由于振动的能量会带动永磁铁产生变化的磁场,因此感应线圈会产生感应电流。研究表明,电磁式虽然能量密度较高,但相对输出功率较低、体积大,妨碍了其进一步微型化。静电式是通过相对运动改变电容形成电流,从而采集能量。静电式适用于微尺度系统,但是由于其能量密度较低,限制了其进一步发展。

在三种转换机理中,压电式由于其工作频带较宽、能量密度较高而最受研究者关注。压电式能量采集系统是基于压电效应将动态应变转化为动态的电压。1880 年,居里夫妇首次发现压电效应。它是指当压电晶体受到机械应力发生拉伸和压缩时,内部产生极化现象,同时表面呈现正负相反、等量的电荷。如图 1.3 所示,压电效应是一个可逆的过程,当外力作用方向改变时,电荷的极性随之改变,这种现象称为压电正效应,常常应用于传感器和能量采集器等。相反,对压电材料施加电场,将使其产生机械变形或机械应力,这种现象称为压电逆效应,常常应用于作动器等。压电材料的发展经历了从天然晶体到人工合成多晶体的变化,其性能得到

了极大的改善。目前,压电材料主要分为以下几大类:压电单晶结构、压电多晶体、压电高分子聚合物、压电复合材料以及压电半导体。在过去的十几年中,压电材料在现代工业中得到了广泛的应用,如 B 超检测超声探头、海洋探测声呐、压电超声马达和超声清洗器等^[29-32]。

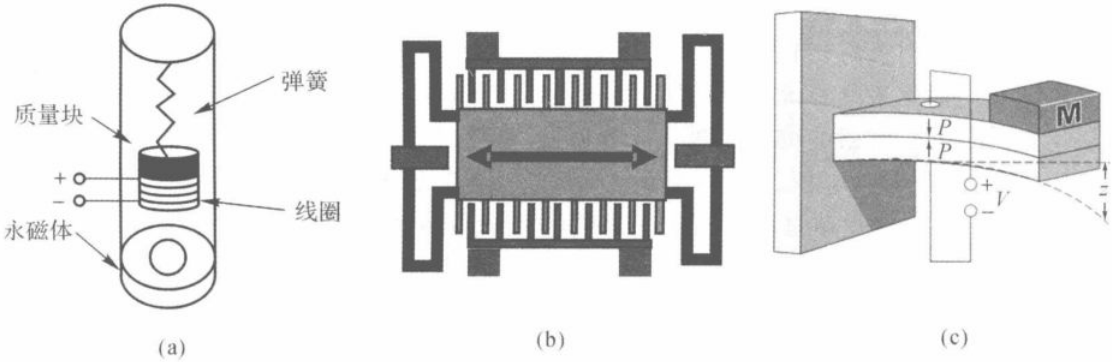


图 1.2 三种能量转化机理
(a)电磁式; (b)静电式; (c)压电式

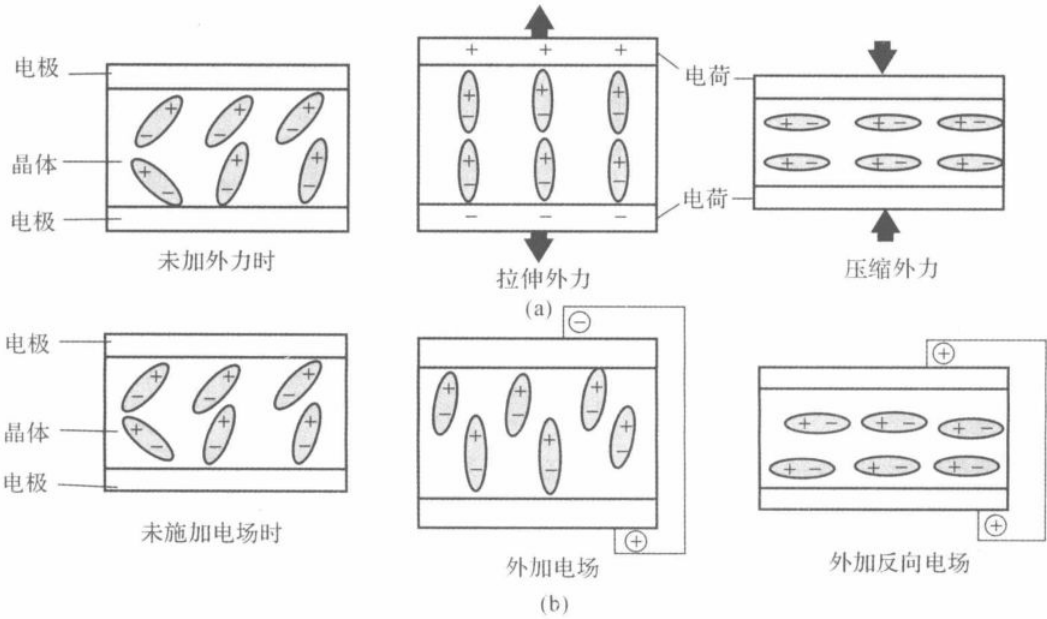


图 1.3 压电效应
(a)压电正效应; (b)压电逆效应

压电材料的力学和电学特性可以用两个线性的本构方程来描述。

$$\left. \begin{aligned} \text{正压电效应:} & \quad \mathbf{D} = \mathbf{eS} + \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{E} \\ \text{逆压电效应:} & \quad \mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} + \mathbf{e}^T \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

其中, \mathbf{D} 是电位移矢量; \mathbf{T} 是应力矢量; \mathbf{e} 是压电应力矩阵; \mathbf{c}^E 是恒定电场下的弹性系数矩阵; \mathbf{S} 是应变矢量; $\boldsymbol{\varepsilon}^S$ 是恒定应变下的介电系数矩阵; \mathbf{E} 是电矢量。

根据极化、加载和响应方式的不同,压电陶瓷的工作模式可以分为 31, 33 和 15 三种。31 模式的特点是极化产生的电场方向垂直于位移方向,而 33 模式的特点是产生的电场方向与位移

方向相同。由于15模式利用压电材料的剪切变形且电压极易退化,因此实用价值不大。31和33模式的能量采集效率被许多研究者研究。Cottone 等人^[33]研究了固支梁能量采集系统在31方向的效率,Feenstra 等人^[34]发现了压电叠堆能量采集器在33模式下的能量采集效率。研究发现,能量采集系统的采集效率除了与固有频率相关外,还与结构特性有关,梁式能量采集系统的研究主要基于31模式,而叠堆式压电能量采集系统在33模式下工作更有效率。

悬臂式压电能量采集系统是目前研究最广的 31 模式能量采集系统,它是一个包裹着单层或双层压电薄膜的悬臂梁结构。如图 1.4 所示,当基础激励作用到悬臂梁上时,悬臂梁的弯曲变形使得压电薄膜产生电压。这种能量采集装置被许多研究者进行了系统的研究^[35-39]。Roundy 和 Wright^[4]建立单自由度双压电薄膜的能量采集系统理论模型,并进行了相应的实验研究。Dutoit 等人^[40]通过简化压电材料的本构关系,提出了简化的单自由度能量采集系统集中参数模型。Euturk 和 Imman^[41-43]基于 Euler-Bernoulli 梁理论得到了压电式振动能量采集系统的解析形式解。

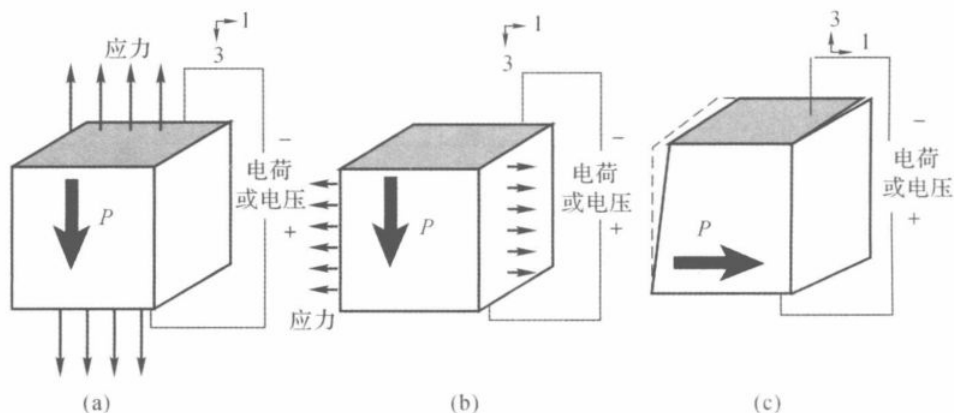


图 1.4 压电效应的三种模式

(a)33模式; (b)31模式; (c)15模式

如图 1.5 所示,传统的能量采集系统研究主要基于线性共振理论,虽然结构简单,但是只能在固有频率附近有效工作。然而当激励频率与固有频率不一致时,能量采集效果就会急剧下降。由于环境激励是以多频、宽谱形式存在的,因此这种能量采集系统无法在实际环境中有效地工作。

为了解决这一问题,研究者分别使用不同的方法拓宽能量采集系统的工作频带。目前最为有效的常见方法是引入调频控制和非线性刚度。总体上讲,调频控制可以分为主动调频^[44-47]和被动调频^[48-53]。主动调频是通过给压电能量采集系统输入电压或者对分流电阻进行开关控制来实现的。这种方法的弊端是输入的能量往往大于采集到的能量。相反,被动调频不需要额外地输入能量,而是通过调节刚度和质量来改变系统的共振频率。常见的被动调频例子是对悬臂梁式能量采集系统引入尖端质量。通过改变质量的大小,系统可以实现可控频率。另外,被动调频控制也可以通过引入外预应力改变系统刚度来实现。另一种拓展频带的方法是设计多模态的能量采集结构^[54]。Shahuruz^[55]设计了一种由多个长短不一的悬臂梁组成的能量采集系统,每根梁都有各自的独立频率,这样整个系统无须调频就可以在不同的频率下有效地工作。类似地,Xue 等人^[56]和 Ferrari 等人^[57]设计了改变厚度和改变顶端质量的

能量采集系统,也可以实现拓展工作频带的结果。

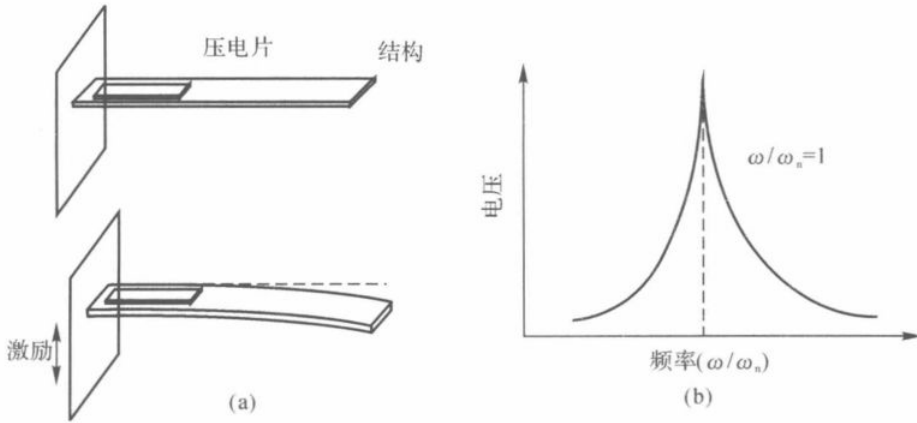


图 1.5 线性能量采集系统

(a) 悬臂梁式能量采集系统示意图; (b) 频谱响应函数

为了克服线性能量采集系统工作频带较窄的缺点,近期研究者利用非线性振动拓宽压电式能量采集系统的工作频带^[58-63]。磁力耦合和结构非线性是引入非线性刚度的典型手段。磁力耦合给常规的能量采集系统安装磁铁,充分利用磁极之间的非线性吸力和斥力,使系统呈现非线性刚度。

一些研究者研究了压电耦合和电磁耦合作用下的非线性单稳态能量采集系统。在单稳态能量采集系统中,非线性磁力耦合可以使系统在不同的磁间距下分别呈现非线性迟滞特性(即硬弹簧特性和软弹簧特性,见图 1.6)。正是这种特殊的性质使得非线性系统能在较宽的频带上取得较好的能量采集效果。Gafforelli 等人^[64]实验研究了带有单稳态特性的固支梁能量采集系统,结果表明硬弹簧非线性使系统的工作频带变宽。然而,事实上单稳态能量采集系统存在依赖初始条件的多解共存现象。因此当激励强度较小时,单稳态能量采集系统和线性能量采集系统的输出响应类似,工作频带较窄。

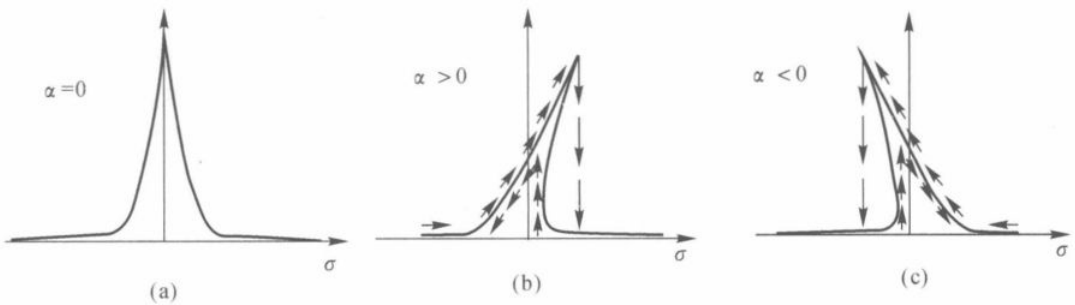


图 1.6 非线性 Duffing 方程的频响曲线

(a) 线性; (b) 硬弹簧特性; (c) 软弹簧特性

Erturk 和 Inmman^[65]研究了双稳态能量采集系统,分析了系统的高能轨道、混沌吸引子等特殊的非线性现象。结果表明,在非共振情形下,非线性能量采集系统的输出性能远远大于线性能量采集系统。除了磁力耦合,一些研究利用结构非线性特别是双稳态来拓宽工作频带。

Arrieta 等人^[66-68]建立了复合材料板的双稳态模型,实验结果表明,系统可以在较宽的频率范围内产生大的功率输出。Hajati 等人^[69]提出了带有跨中质量的受压梁式能量采集系统,该结构通过考虑拉伸应变等结构非线性来拓宽系统的有效带宽。Masana 等人^[70-72]研究了轴向受力的受压梁式能量采集系统,在预应力的作用下,固支梁呈现屈曲状态。Sneller 等人^[73]建立了带有跨中质量块的双稳态能量采集系统,柔性梁在预应力和基础激励共同作用下会出现平衡点突变现象,此时会产生较大的位移应变。因此,双稳态的突变机理可用于提升能量采集系统在宽频激励下的功率输出。与文献^[73]中结构相似,Cottone 等人建立了不含跨中质量的受压梁能量采集系统,着重分析了系统在随机激励下的响应,结果表明屈曲状态比非屈曲状态产生了更大的功率输出。

1.2 随机激励下振动能量采集

关于能量采集的大部分研究都认为振动系统的输入激励是确定性的,一般假设其为谐波激励。然而谐波激励的假设过于理想化,环境激励一般是以具有一定带宽的随机形式存在的。与研究确定性系统庞大的人群相比,只有很少的人从事随机激励下能量采集系统的研究。一般情形下,假设激励为具有无限带宽的 Gauss 白噪声,其功率谱密度(PSD)可以近似看成一条平滑的直线。

单自由度模型是目前定性、定量研究随机激励下能量采集系统的常见模型。Adhikari^[74]在考虑系统基础振动模态的前提下将连续系统简化为单自由度振动模型,求得了功率的解析表达式并给出了数值算例进行验证。Scruggs^[75]研究了线性能量采集系统的最优控制,增加了系统在随机激励下能量采集效果。Daqaq^[76-77]求得了单自由度能量采集系统在 Gauss 白噪声情形下的概率密度函数和闭合形式的均方响应。Gammaitoni 等人^[78]发现在一些特定的情形下,非线性单稳态系统和非线性双稳态会产生比线性系统好的能量采集效果。Litak^[79]采用数值方法研究了压电磁耦合的能量采集系统,发现噪声标准差和响应之间的内在联系。Zhao^[80-81]建立了悬臂梁式能量采集系统的分布参数模型,采用 Euler-Maruyama 方法对随机微分方程进行求解,并通过实验进行验证。Cottone^[82]建立了双稳态能量采集系统,该系统由倒立摆和相互排斥的耦合磁铁组成。实验表明通过优化磁铁之间距离,双稳态能量采集系统在随机激励下获得了较大的能量输出。

目前针对随机激励下能量采集系统的理论研究主要集中在通过解析方法近似求解方面。Halvorsen^[83]通过求解 FPK 方程优化了系统参数,得到了系统的闭合形式解。Jiang^[84-85]使用矩方程方法求得了一类电磁耦合的能量采集系统的响应统计量的解析表达式。Ali^[86]使用随机线性化对宽频激励下的能量采集系统进行了定性分析,得到了随机谱密度和响应标准差之间的解析关系。Jin^[87]使用随机平均法求得能量采集系统在 Gauss 白噪声激励下的近似解析解。He 和 Daqaq^[76,88-89]在理论上分析了硬弹簧特性的能量采集系统在 Gauss 白噪声激励下的随机响应,结果表明引入非线性刚度能够提高系统的输出功率。

1.3 随机共振和相干共振

在现实生活中,噪声总是扮演着一个消极、有害的角色。例如,当机械设备出现故障时,故障信号总是掺杂着许多背景噪声,从而影响人们获取有效质量的信号。

1981年 Benzi 等人^[90]在研究古冰川气象问题时提出随机共振(Stochastic Resonance, SR)概念。自此以后,这一现象受到了广大科学家和工程技术人员的重视。随机共振展现出一些特殊的性质,例如将噪声加入受到周期信号作用的非线性系统时,输出信噪比在某一噪声强度下会增加。随机共振的出现,彻底改变了人们对噪声的看法,因为在某些特殊的情况下,可以将噪声变害为利,起到积极的建设性作用。由此可以联想,可将随机共振的独特优势应用到能量采集系统当中,通过某种机制使其产生随机共振现象,将宽频激励能量在某一频带上集中输出,从而大大提高能量转换效率。McInnes 等人^[91]提出利用非线性随机共振原理提高能量采集效率,建立了具有双稳态特性的物理模型,通过数值模拟验证了该方法的有效性。

本书研究的相干共振(Coherence Resonance, CR)是一类特殊的随机共振。一般来讲,随机共振的构成要素有3个:①微弱的相干信号(周期力);②非线性双稳态系统[见图1.7(a)];③加在相干信号上的随机激励,例如白噪声、色噪声和一些非白噪声^[92-94]。而相干共振主要是指非线性系统只受噪声激励的情况,故相干共振又被命名为“自适应随机共振”^[95]。由于此时系统在只受到宽频的随机激励时也会产生近似于周期的大幅运动[见图1.7(b)],因此可以在频域范围内实现能量集中。由此可以联想到,相干共振和能量采集之间有很强的比拟性,也就是说,这一特点可以应用于增强低频小幅激励下能量采集系统的振幅响应,提高输出电压和功率,从而大幅提高能量转化效率。目前,从动力学角度看,相干共振一般存在于两种系统:一种是可激发系统,噪声引发弛豫振荡;另一种是临界分岔系统,噪声引发谐波振动。自1993年首次提出相干共振概念之后,Wenning 等人^[96]在单个神经元细胞中证明相干共振的存在,即在噪声的强度超过一定的阈值之后,系统发生相干共振,产生脉冲放电现象。Ushakov 等人^[97]在对带有延迟反馈的半导体激光研究中,在 Hopf 分岔点附近,发现由于随机激励,系统的响应会发生超临界或亚临界 Hopf 分岔,出现稳定的极限环,由此产生相干共振。本书的核心思想是提出若干种压电梁能量采集系统并采用随机共振和相干共振原理,即利用噪声、外界周期信号和非线性系统的协调作用,将无序的噪声能量集中输出,从而提高能量的转化效率。

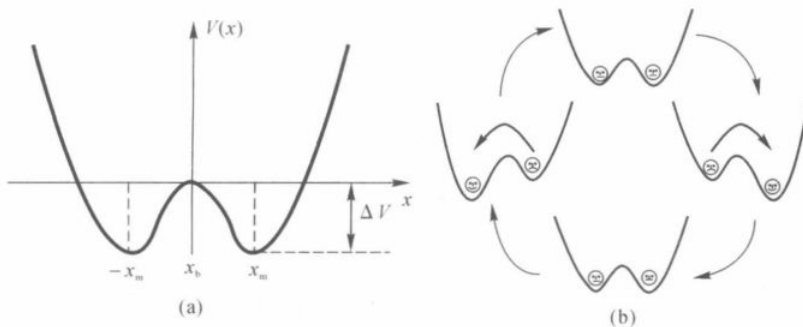


图 1.7 势能函数

(a) 双稳态; (b) 动态双稳态

$V(x)$ —势能函数; x_m —稳定平稳位置; x_b —不稳定平稳位置

第 2 章 基于 Melnikov 方法的非线性 能量采集参数研究

2.1 引 言

在双稳态能量采集系统中,同宿分岔是实现大幅阱间运动和混沌运动的原因。同宿分岔本质上是相交于鞍点的稳定流形和不稳定流形发生横截同宿缠绕。引发流形横截相交的激励临界值就是发生同宿分岔的阈值。同宿分岔发生的时候,同宿轨道破裂消失,开始出现阱间跳跃。

1963年, Melnikov 提出了全局的解析方法用于判断平面可积系统的稳定和不稳定流形在微弱参数扰动下发生横截同宿相交。该理论成立的假设是平面可积系统的未扰 Hamilton 系统存在双曲鞍点以及连接这些双曲鞍点的同宿轨道或者异宿轨道。Melnikov 理论已经被证明是一种很好的可以预测同宿分岔的方法,它的优点在于可以直接用于解析计算,以便对系统进行深入的理论分析研究。一些文章中给出了关于 Melnikov 函数严格的数学证明和理论推导^[98-102]。Melnikov 理论的意义在于它能定量地给出 Smale 马蹄意义下的混沌阈值。

Melnikov 方法从提出到现在得到了广泛的应用和发展。Melnikov 方法为研究平面确定性与随机性动力系统的混沌和分岔提供了理论支持。Holmes^[103]将 Melnikov 方法应用到负刚度振子当中,并通过数值计算得到了系统的奇怪吸引子。Wiggins 等人^[104]将 Melnikov 方法推广到多频激励的情形。Moon^[105]使用 Melnikov 方法研究了 Duffing 系统次谐轨道的存在性以及稳定性。Frey 和 Simiu^[106-107]提出了广义随机 Melnikov 方法,并分析了 Duffing 振子在 Gauss 白噪声激励下发生阱间跳跃的激励阈值。Hao 等人^[108]使用改进的广义 Melnikov 方法分析了复合压电梁结构的混沌动力学问题,数值结果表明当参数满足 Melnikov 方法的阈值曲线时,系统出现多脉冲混沌现象。张伟等人^[109]利用 Melnikov 方法研究了参数激励与强迫激励联合作用下 Duffing - Van der Pol 系统的同宿分岔与异宿分岔,并通过数值方法验证了混沌运动特性。Parthasarathy^[110]采用 Melnikov 方法研究了参数激励下的 Duffing 方程,得到了不同的结构参数情形下发生同宿分岔的必要条件。

2.2 基础激励下的同宿分岔研究

大多数研究者采用 Melnikov 方法来预测 2 维平面系统发生同宿分岔的激励阈值^[111-112]。但是当前的能量采集系统至少为一个 3 维的机电耦合系统。因此受维数的限制,目前关于受