

前 言

面向无线应用的能量收集技术在近 10 年得到了前所未有的重视和发展。具有恶劣复杂工况特点的生产过程对装备健康状态尤其关注,如煤炭领域提出少人或无人化井下生产模式,以机械化生产替换人工作业、以自动化控制减少人为操作,从而减少井下作业人员。自动化、智能化、信息化水平提高和可靠性保障需求,使得煤矿机电装备在工况检测、位姿感知和健康监测等方面对传感器的需求数量剧增。煤矿井下电气防爆和供电要求严格,采用有线监测与控制方式意味着设置复杂的布线通道和采用防爆结构,传感器布线成为井下装备智能监测与控制面临的首要难题。

考虑到采掘过程存在外激振动,2012 年笔者在设计采掘装备在线监测方案时,将无线监测节点自供电作为研究内容,在研究中拜读了美国佐治亚理工学院 Alper Erturk 和弗吉尼亚大学 S. Priya、D. J. Inman 等教授关于振动俘能技术的论文,系统认识了多种能量收集技术及其在生物、医疗、结构健康检测等领域的应用。最近 10 年来,正是这些潜在的应用牵引,加之低功率电子元件和无线传感技术的飞速发展,能量收集技术受到学术界和工业界的广泛关注。利用压电效应将环境中的振动能转化为电能的压电俘能器技术,以其供能充足、受环境影响小、无污染和易于实现小型化和集成化等优点成为国内外研究热点之一。

由于外界振动激励源频域能量分布在较宽频带,且具有随机时变特征,一般的线性压电俘能器自身的线性机理决定其共振频带很窄,难以满足外界振动激励复杂多变的要求,导致俘能效率低下,拓频能力有限且灵活性较差。如何提高压电振动系统的俘能效率是一个亟待解决的问题。国内外研究机构及学者从阵列式、自调谐、非线性、泵浦频率、弹性放大器等方面对压电俘能器的俘能效率提升技术进行了大量研究,其中引入非线性系统理论和方法拓展压电俘能器共振频带的研究尤为突出,但是多方向、随机振动激励方面的研究较少,加之受安装尺寸等限制,压电俘能器结构设计面临很大困难。因此,本书主要介绍不同形式激励下压电俘能器的多场耦合建模和响应特性问题,即俘能问题,而对储能、用能两方面内容未过多涉及,感兴趣的读者可参考相关文献。

考虑基于振动的压电俘能器设计属多学科交叉研究,机电耦合系统及其分析方法已经成为智能俘能机构设计的理论基础,面对压电系统动力学、随机振动、非线性振动等知识,为了帮助读者尽快熟悉具有力、磁、电、温度等多场耦合特点的压

电俘能设计,全书由浅入深,特别是以外加磁力多方向压电俘能器的研究为线索,将理论分析和研究方法的介绍与应用贯穿其中,以便于读者理解和掌握。

本书首先从压电俘能系统基础入手,简要阐述了压电材料、静力学及动力学相关理论知识,并介绍了压电能量俘获系统的几种建模方法,然后结合“系统总体结构设计+多物理场建模+动力学分析+实验研究”的研究思路,以悬臂式多场耦合非线性压电俘能器为对象,展开了多物理场耦合建模、动力学模型解析和实验研究等方面的总结和分析,并在此基础上补充介绍了多方向压电能量俘获技术的建模和分析方法,最后介绍了不同应用环境下压电能量俘获技术的发展,让读者对该领域技术的发展前景和发展趋势有整体的认识。

本书的研究工作和出版得到了国家自然科学基金项目(No. 51974228)、中国博士后科学基金项目(No. 2015M582692)、陕西省创新人才推进计划-科技创新团队项目(No. 2018TD-032)等资助。

多年在煤矿机电设备智能检测与控制方面的探索研究,承蒙马宏伟教授、吴海雁教授级高工的指点和帮助。在压电能量俘获技术的研究过程中,樊红卫、毛清华、徐冬梅、万翔等青年学者参与了研究讨论,使得研究过程充满乐趣,也克服了重重困难,取得了喜人的进展;研究生林然、邓鹏飞、吴中华、赖正鹏、谭厚志、左萌、杨文娟、陈孝玉、汪林、余晓等人参与了各阶段研究,陈路阳、吕欣媛、鞠佳杉等参与了资料的收集和整理工作,在此表示感谢。

本书研究过程中,得到西安交通大学曹军义教授、南京航空航天大学陈仁文教授、西北工业大学周生喜教授等众多学者的指导和帮助,Energy Harvesting Group、转子动力学与控制、振动利用与控制、中国振动故障诊断等论坛或研究群体创造的浓厚学术氛围,有力推动了相关技术的发展。同时,作者在研究中也吸收了相关文献的研究思想,在此一并表示感谢。

新型能量收集技术的发展日新月异,涉及多个学科。笔者期望本书的出版对相关的科研人员有所帮助。但鉴于笔者水平有限,对涉及多学科的相关技术进行系统性描述和概括时难免存在遗漏和错误,恳请读者予以批评指正。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 新型能量俘获技术需求与利用	1
1.2 振动能量俘获技术概述	2
1.3 压电式振动能量俘获技术研究进展	6
1.3.1 从单方向到多方向	6
1.3.2 从线性到非线性	11
1.3.3 从简谐激励到随机激励	15
1.4 本书结构及主要内容	16
第 2 章 压电式能量俘获技术基础知识	18
2.1 压电材料基础知识	18
2.1.1 正/逆压电效应	18
2.1.2 压电方程	19
2.1.3 压电材料	21
2.2 梁的建模与模态分析	22
2.2.1 Euler-Bernoulli 梁理论	22
2.2.2 梁的弯曲振动	23
2.2.3 梁的模态分析	25
2.3 Lagrange 机电耦合方程	29
2.3.1 虚功原理	29
2.3.2 Hamilton 原理	30
2.3.3 Lagrange 方程	31
2.4 本章小结	32
第 3 章 悬臂式线性压电俘能器机电模型构建	34
3.1 引言	34
3.2 线性压电俘能器集中式参数建模	34
3.3 线性压电俘能器分布式参数建模	36
3.3.1 力学平衡法	36

3.3.2	能量守恒法	39
3.4	本章小结	42
第4章	悬臂式多场耦合非线性压电俘能器模型构建	44
4.1	引言	44
4.2	多物理场模型建立	44
4.2.1	磁场模型	45
4.2.2	力学模型	49
4.2.3	电学模型	53
4.3	压电能量收集系统分布式参数机电耦合模型	55
4.4	本章小结	57
第5章	悬臂式多场耦合非线性压电俘能器模型解析	58
5.1	引言	58
5.2	简谐激励下系统模型解析方法	58
5.2.1	四五阶龙格-库塔法	58
5.2.2	谐波平衡法	61
5.2.3	增量式谐波平衡法	61
5.3	随机激励下系统模型解析方法	68
5.3.1	环境振动过程中随机激励形式	68
5.3.2	蒙特卡罗模拟法	71
5.3.3	FPK 方程法	72
5.4	有限元仿真分析法	76
5.4.1	压电俘能器有限元分析建模	77
5.4.2	压电俘能器有限元分析	79
5.5	本章小结	83
第6章	悬臂式多场耦合非线性压电俘能器实验验证	85
6.1	引言	85
6.2	实验平台搭建及实验材料制备	85
6.2.1	实验平台的搭建	85
6.2.2	实验材料的制备方法	86
6.3	不同激励下的俘能器实验验证	90
6.3.1	简谐激励下俘能器实验验证	90

6.3.2 随机激励下俘能器实验验证	92
6.4 本章小结	94
第7章 多方向压电俘能器建模分析与实验研究	95
7.1 引言	95
7.2 悬臂式多方向压电俘能器	95
7.2.1 悬臂式多方向压电俘能器的结构设计	96
7.2.2 悬臂式多方向压电俘能器的建模分析	96
7.2.3 悬臂式多方向压电俘能器的实验研究	116
7.3 击打式多方向压电俘能器	127
7.3.1 击打式多方向压电俘能器的结构设计	128
7.3.2 击打式多方向压电俘能器的建模分析	129
7.3.3 振动能量收集装置的实验验证	139
7.4 本章小结	146
第8章 压电俘能器的应用	148
8.1 环境监测	148
8.1.1 在风速及温度监测方面的应用	148
8.1.2 在水质监测方面的应用	149
8.2 设备状态监测	151
8.2.1 矿井机械设备状态监测	151
8.2.2 汽车胎压监测	153
8.2.3 桥梁及建筑健康监测	154
8.3 可穿戴式人体能量收集技术	155
8.3.1 人体行走的鞋式能量收集技术	156
8.3.2 人体行走的背包式能量收集技术	160
8.3.3 人体关节部位的能量收集技术	162
8.4 人体医疗设备供电	163
8.4.1 心脏起搏器的供电	163
8.4.2 健康检测设备供电	165
8.5 本章小结	167
参考文献	168

第 1 章 概 述

美国学者杰里米·里夫金(Jeremy Rifkin)于 2011 年在其著作《第三次工业革命》中预言,以新能源技术和信息技术的深入结合为特征,一种新的能源利用体系即将出现,并将其称为能源互联网(energy internet),即“基于可再生能源的、分布式、开放共享的网络”。随着国家发改委“互联网+智慧能源”的提出,我国已经进入能源市场深度融合的产业发展新形态。伴随着能源资源日益紧张以及全球环境不断恶化,如何在可持续发展的前提下解决能源供给成为全世界共同面临的重大问题。节能减排、治理环境污染是解决该问题的有效方法,但从长远角度出发,需要主动解决能源增量问题,积极探索和开发新能源,科学有效地利用各种可再生资源,建立安全、清洁、可靠的可持续能源系统。

1.1 新型能量俘获技术需求与利用

能源是人类生存、生活与发展的必要基础,一切发展的物质动力来自能源,人类生存离不开能源,能源科学与技术人类社会的发展中一直扮演着极其重要的角色。在面临能源紧缺、全球气候变暖等严重问题的今天,寻找和利用清洁能源是各国都在重点研究的关键领域。新型环境能量俘获技术是指将自然界广泛存在的各种环境能量,包括太阳能、风能、热能、振动能、海洋能,以及其他能量如人体动能、雨滴能量、生化能等,通过各种新型换能材料、结构或系统,将其转化为电能并存储和利用的一种技术。自然环境中存在的能源种类繁多、分布广泛,且取之不尽,用之不竭。通过各种环境能量俘获技术均可得到能量,大到电力系统,小到无线传感器和微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)等都有相应的俘能技术。

在面临能源短缺的同时,随着电子工业技术的发展,传感器、微机电系统(MEMS)、便携式电子器件等低能耗电子产品的应用越来越广泛,而以化学电池作为其主要供能方式所存在的弊端也越发明显,比如环境污染、回收困难、需定期更换电池等,在一些特殊场合(如太空、深海、森林腹地、人体内等)更换电池组动力设备尤为困难。因此,探究如何持续稳定地为电子产品供能是当前全球科学研究者面临的主要问题。

近年来,无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)技术得到了快速的

发展与应用。无线传感器网络是由部署在监测区域内的大量微型传感器节点通过无线通信方式形成的一个自组织网络系统,其作用是协作感知、采集和处理网络覆盖区域中被感知对象的信息,并发送给观察者。无线传感器网络的核心是无线传感器节点,传统的有线供电方式在很多场合下难以满足无线传感器节点的供电需求,大多仍采用传统电池供电的方式提供电能。由于电池容量有限,且在到达使用寿命前必须进行更换,在高温、强腐蚀等恶劣环境下传统电池难以使用,严重限制了无线传感器节点的微型化和集成化,且传统电池存在易污染环境、难以回收等问题。因此,作为探究传统电池的关键替代技术,新型能量俘获技术已经成为国际多个学术领域研究的热点。

未来有望解决无线传感器节点供电问题的能量形式包括振动能、太阳能、风能、热能等。太阳能和温差供能技术由于受到自然条件的限制而难以广泛使用,而工作环境中的噪声或振动能却几乎无处不在,并且能量密度较高,成为解决微电子产品供能问题有效的方法之一。电磁感应、静电效应和压电效应等技术已经初步实现了俘能器的基本功能,与太阳能、风能及温差、射频辐射等环境能量相比,该方式具有来源广泛、相对稳定且能量密度高等优点。相对于其他形式的俘能装置而言,由压电材料制成的俘能装置具有结构简单、不发热、无电磁干扰、无污染、易于加工制作和实现机构的微小化、集成化等诸多优点,非常适合用于为无线传感器提供能量,已成为科学界和工程界备受期望的新型能源。随着人们对振动能量收集机理、俘能装置和性能的深入研究,压电俘能技术也有了长足的发展与进步。

1.2 振动能量俘获技术概述

振动是自然界中普遍存在的现象,如机器设备工作运转时的振动、汽车通过桥梁时产生的振动、海洋中波浪的振动、心脏的跳动等。智能结构、高性能材料、多场耦合和非线性动力学等技术的发展有力促进了振动能量收集方面的研究。作为一种绿色与可再生能源,振动能量的回收利用已经成为当前能源俘获研究的重要领域。目前,国内外学者研究了多种形式的振动能量俘获方法,包括电磁转换、静电转换、压电转换、磁致伸缩转换、磁电转换以及摩擦纳米发电等不同工作原理的俘能方式。

1. 电磁转换

根据电磁转换原理设计的振动能量俘获装置,它利用法拉第电磁感应定律将振动能量转换为电能。其结构通常由可动磁铁、线圈、振动膜、质量块等构成,如图 1.2.1 所示。

当外部振动作用于转换装置时,质量块与永磁铁将会与闭合线圈间形成相对

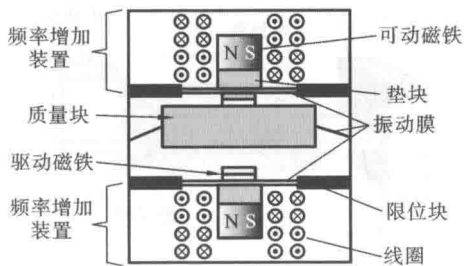


图 1.2.1 电磁转换俘能装置

运动,使穿过闭合线圈回路的磁通量发生变化,从而产生感应电动势,闭合回路产生感应电流输出,实现振动能量转化为电能。

2. 静电转换

根据静电转换原理设计的能量俘获装置,它利用静电效应将振动能量转换为电能。此类俘能装置的核心部件是可变电容,其结构如图 1.2.2 所示。

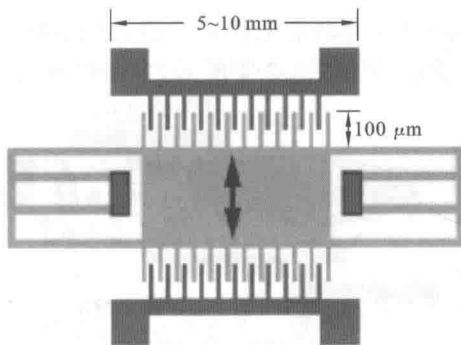


图 1.2.2 静电转换俘能装置

当外部激励作用于俘能装置时,两电容极板间的间距会发生变化,导致极板间电容值发生变化,引起电压或电量变化,从而通过外部电路输出电流,实现从振动能量到电能的转换。但此类能量俘获装置在进行能量收集之前需要连接外部电源充电,以便在可变电容之间产生电压差,进而感知振动激励引起极板间距或相对位置的变化,这给该类俘能装置的应用带来了较大的局限性。

3. 压电转换

根据压电转换原理设计的能量俘获装置,它利用压电材料的正压电效应将振动能量转换为电能。其典型结构如图 1.2.3 所示,俘能装置主要由压电材料、基座、悬臂梁、质量块构成,其核心部件为压电材料。

外力激振会使悬臂梁产生弯曲变形,紧贴于悬臂梁上的压电材料会随之发生

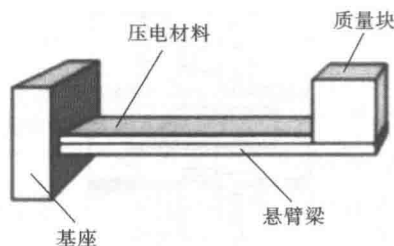


图 1.2.3 压电转换俘能装置

形变,使压电材料内部正、负电荷中心发生相对移动产生电极化,从而导致元件两个表面上出现异号电荷,连接电路便会有电能输出。没有电场作用只是由于形变产生的极化现象称为正压电效应。这种压电效应可以方便地用于动能到电能的转换,而且压电元件用于振动能量俘获时具有结构简单、不发热、无电磁干扰、无污染、易于实现结构微型化等优点。

4. 磁致伸缩转换

根据磁致伸缩转换原理设计的能量俘获装置,它利用磁致伸缩逆效应将振动能量转换为电能。其装置结构如图 1.2.4 所示,主要包括基座、永磁铁、质量块、线圈、磁致伸缩层等。

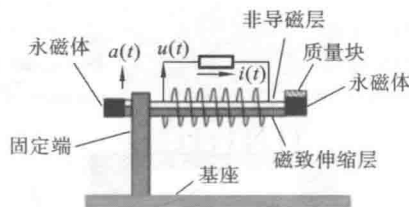


图 1.2.4 磁致伸缩俘能装置

当振动激励作用于俘能装置时,会使磁致伸缩材料受到力的作用引起材料形变,导致其磁化状态随之改变,也就是磁场强度发生变化,引起磁通密度的改变,根据电磁感应定律,变化的磁场引起穿过闭合线圈的磁通量发生改变,从而在线圈产生感应电动势,使振动能量转化为电能。

5. 磁电转换

根据磁电转换原理设计的能量俘获装置,它利用磁电复合材料的磁电效应将振动能量转换为电能,其核心部件为永磁铁和磁电复合材料。其结构如图 1.2.5 所示,该磁电转换俘能装置主要由两层磁致伸缩材料和一层压电材料黏结而成。

外界振动引起磁电复合材料与永磁铁形成相对运动,使处于变化磁场中的磁致伸缩材料层在纵向被磁化,继而产生应力或应变,并将产生的应力或应变传递给

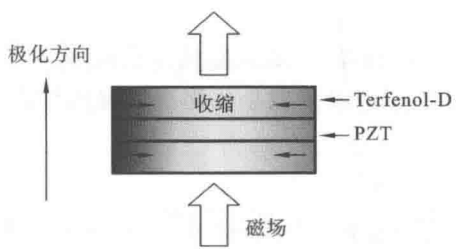


图 1.2.5 磁电转换俘能装置

压电材料层,后者在厚度方向被极化,通过正压电效应产生极化电荷,从而将振动能量转换为电能。磁电复合材料具有较高的能量密度、机电耦合系数,可对振动能量与磁场能量同时进行收集。

6. 摩擦纳米发电

摩擦纳米发电机最早由 Wang 研究团队于 2012 年提出,其核心部件为两种摩擦电序不同的材料,其结构和工作原理如图 1.2.6 所示。所谓摩擦电序就是根据两种不同的材料相互接触以后表面的相对带电极性,将其排成的序列。摩擦纳米发电机(tribo electric nano generator, TENG)利用摩擦起电与静电感应的耦合效

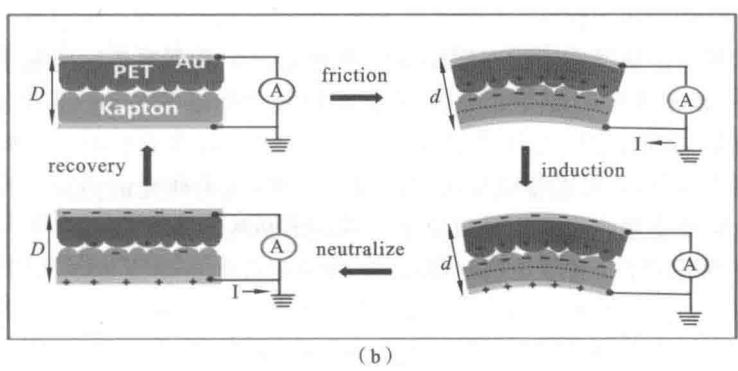
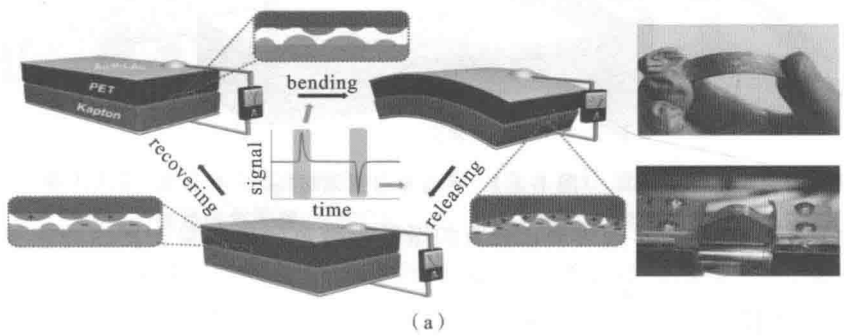


图 1.2.6 摩擦纳米发电机的结构和工作原理示意图

应进行能量收集。

与其他振动转换机理相比,压电式能量俘获技术具有更高的力-电耦合效应和能量密度,不受电磁干扰以及易于微小化集成等突出优点,更适合于为低功耗无线传感器节点提供电能。

1.3 压电式振动能量俘获技术研究进展

1.3.1 从单方向到多方向

在众多的压电振动能量俘获结构中,基于悬臂梁结构的单方向能量俘获技术无论是在理论研究还是在实验研究方面研究较多,发展最为成熟,目前已经积累了大量可供借鉴的研究成果。由于单悬臂梁结构的压电俘能装置的固有频率较高,但环境振源的频率一般较低,为了降低单悬臂梁结构的固有频率,通常在悬臂梁末端加装一个金属质量块,其典型结构如图 1.3.1 所示。

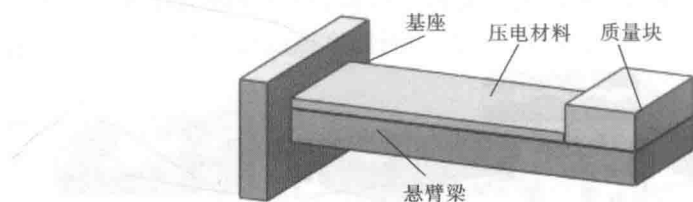


图 1.3.1 典型单悬臂梁结构

对于单悬臂梁结构,为实现在较宽的振动频带范围内收集到更多的能量,需要尽可能地扩宽其俘能频带的范围,目前主要采用的方法有:多悬臂梁-单/多质量块结构、单悬臂梁阵列式结构以及频率可调式结构等。这些结构有效提高了压电振动能量收集结构的实用性。

压电式振动能量俘获结构在实际应用中的另一个不可避免的问题引起众多研究者的关注,即环境振动具有可变化、多方向以及多频率的特点,而单方向的压电振动能量收集结构的方向选择性很强,能量收集能力被严重削弱。如何从环境中有效收集振动能量,拓展能量收集装置的应用范围,成为研究的热点。具有宽频特性的多方向振动能量收集装置是解决上述问题的必然选择。

陈仁文等提出了一种立方体-质量块结构的全方向振动能量收集装置,结构如图 1.3.2 所示。该装置由一个立方体形金属框架、一个金属质量块、8 个相同的 Rainbow 型压电换能器组成(也可以是其他换能元件)。装置受到外界环境激励时,质量块会产生受迫振动,Rainbow 型压电换能器因而产生弯曲变形,使得粘贴

在换能器上的压电材料随之产生变形,从而输出电荷,实现对不同方向振动能量的收集。Rainbow 型压电换能器具有受环境振动方向影响小、便于安装、适应性强等优点。但该结构仍存在制作相对复杂、当振动方向处于装置对角线方向时能量收集效率低等缺点。

陈仁文等提出的另一种新型压电式振动能量收集器如图 1.3.3 所示。该结构由多面球形支撑体、多个悬臂梁式换能结构以及基座组成,其形状类似蒲公英球。其各个悬臂梁式压电换能结构沿不同方向固定在多面支撑体上。当装置受到不同方向外部振动激励时,相应方向布置的悬臂梁换能元件就会产生受迫振动,因而具有多方向振动敏感性。每一组悬臂梁的固有频率设置不同就会覆盖某一振动频率范围,在某一振动方向下就会具有宽频带俘能功能,且装置结构简单、便于加工制作。

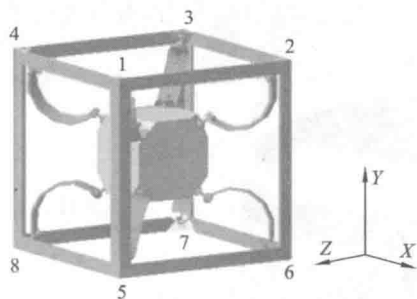


图 1.3.2 立方体-质量块结构
能量收集装置

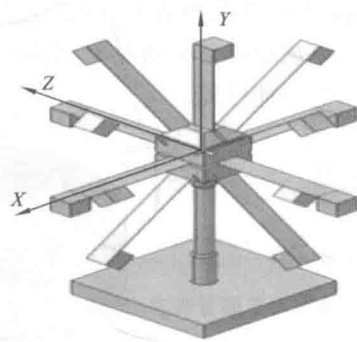


图 1.3.3 蒲公英状多方向压电振动
能量收集装置示意图

针对全方向振动能量收集装置阻尼大、频带窄、结构复杂及安装烦琐等问题,张旭辉等在现有全方向振动能量收集装置的基础上,提出一种可更换能量收集模块的多方向振动能量收集装置,结构如图 1.3.4 所示。

该装置由 1 个正方体中心固定座和 6 个能量收集模块组成,6 个能量收集模块垂直安装在正方体中心固定座 6 个面上。能量收集模块设计为空心圆柱体,主要由质量块、弹簧、压电陶瓷组成,其中质量块上、下两个面带有击锤,弹簧一端安装在压电陶瓷上,另一端安装在击锤上,起到固定和复位的作用。该装置能够多方向多频带俘获能量,且安装简单,维修方便。

张旭辉等在振动俘能结构中引入非线性磁吸力,设计了一种多场耦合多方向压电俘能器,结构如图 1.3.5 所示。该俘能器由 4 个线形-拱形组合梁、永磁铁质量块和可调磁铁组成,线形-拱形组合梁以金属梁为基层,其表面贴有压电换能元件,4 个组合梁拱形端分别连接永磁铁质量块四个面,线形端固定在外壳上。外壳上下表面通过调节螺纹可调整磁铁间距。结果表明,引入磁铁可显著提高系统能量转

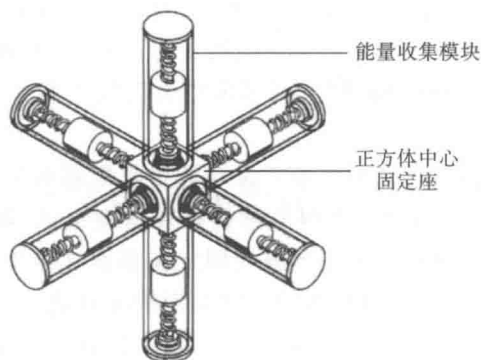


图 1.3.4 可更换能量收集模块的多方向振动能量收集装置结构图

换效率,当磁铁间距为 15 mm、激励幅值为 0.5 m/s^2 时,相比无磁力输入的情况,系统响应电压提高了 6 倍左右,谐振频率从 18 Hz 降至 9.5 Hz 左右,有效改善了压电俘能器的俘能性能。

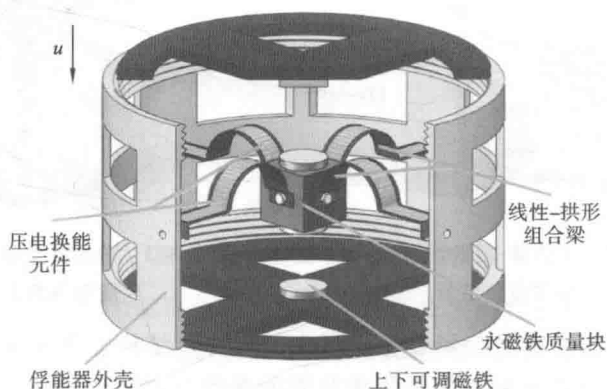


图 1.3.5 多场耦合多方向压电俘能器模型图

如图 1.3.6 所示,张强提出了一种双向压电俘能装置,主要通过主副压电振子 X 轴和 Z 轴的振动发电实现压电俘能,复合了外界各个激励方向的振动,其中基座

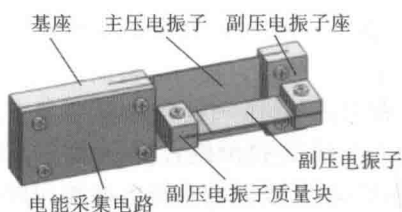
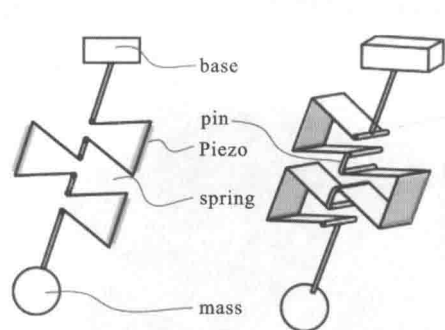


图 1.3.6 双向压电俘能装置结构

用于连接主压电振子与电能采集电路,副压电振子基座用于连接副压电振子与主压电振子,副压电振子质量块作为副压电振子的附加质量,副压电振子质量块、副压电振子座和副压电振子共同作为主压电振子的附加质量。这种俘能器降低了加工的复杂程度,使得结构更加小巧、实用和高效。实验结果表明:压电振子的固有频率与自由端附加质量

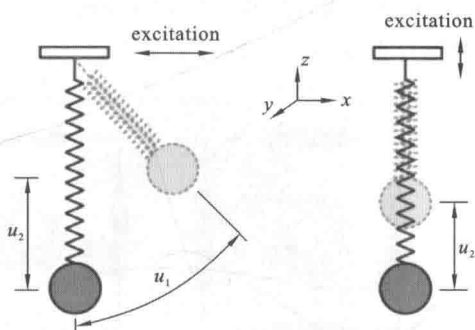
成反比,在进行主副压电振子附加质量选取时,根据外界环境激励的频率范围,选取最容易激发压电振子共振的附加质量,使得主压电振子与副压电振子分别与激励频率产生共振,实现俘能效率最大化。

吴义鹏等设计了一种用于多方向能量收集的弹簧摆结构,如图 1.3.7 所示,这是一种基于普通活页夹结构的简单压电弹簧结构。通过带有压电薄膜的摆锤弹簧将机械振动的能量转换为压电传感器中的电能。其工作原理如图 1.3.8 所示,弹簧摆能量收集结构能够收集水平和垂直方向的振动激励,弹簧受激振动,其上的压电薄膜变形产生电能,从而实现振动能到电能的转换。



(a) 俯视图 (b) 三维视图

图 1.3.7 压电弹簧摆结构



(a) 水平激励 (b) 垂直激励

图 1.3.8 压电弹簧摆工作原理

杨征保和 Jean Zu 考虑到传统压电悬臂梁仅能够从一个固定的垂直方向收集振动能量,振动方向的改变或沿着不同方向振动会降低压电能量收集装置的收集性能,对此提出了多束组装的概念,设计了一种新的 MC-PEH 结构。如图 1.3.9 所示,该结构使用弯曲的悬臂梁而不是传统的直梁来收集多方向振动能量,可以在垂

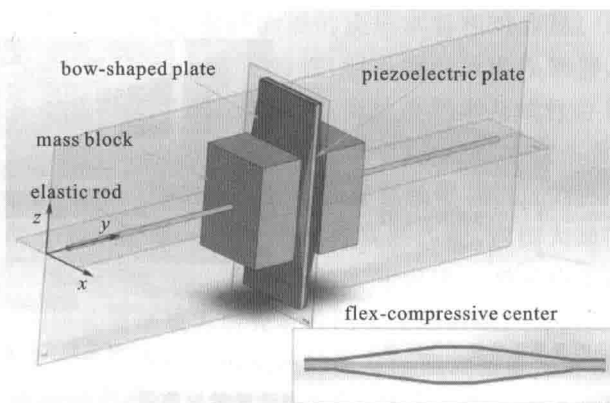


图 1.3.9 多向压缩模式压电能量采集示意图

直平面内从任意方向俘获振动能量,在扩展工作带宽和高压输出方面的能力显著增强,而且可通过改变弹性杆的倾斜角来调节其俘能方向。

Davide Alghisi 提出了一种用于能量收集的压电俘能器,如图 1.3.10 所示。该俘能器由一个刚性球组成,刚性球封装在压电隔膜之间。当该结构受到机械振动激励时,球反复弹跳并击中一个或多个隔膜,实现在不同方向激励下的振动能量俘获。这种结构作为一种单轴/三轴球冲击多自由度的压电俘能器,可用于宽频带低频振动能量的收集。有别于传统俘能器的是,该结构通过使用驱动球代替低频谐振梁实现冲击技术,以便在保持能量转换效果的同时减小转换器的尺寸。此外,由于三轴转换器不仅对振动敏感,而且对旋转和小倾角敏感,对于提高振动能量的俘获能力具有特别的意义。

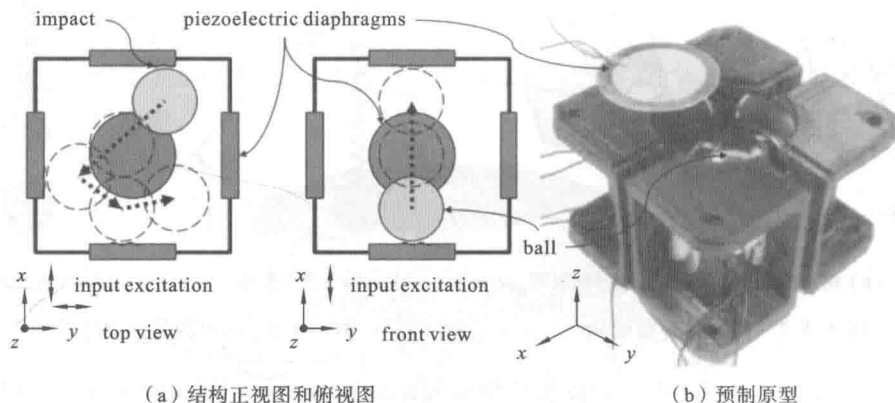


图 1.3.10 三轴球冲击式压电能量转换器

B. Andò 等提出了一种多方向宽频带双稳态压电振动俘能器,其结构如图 1.3.11 所示。

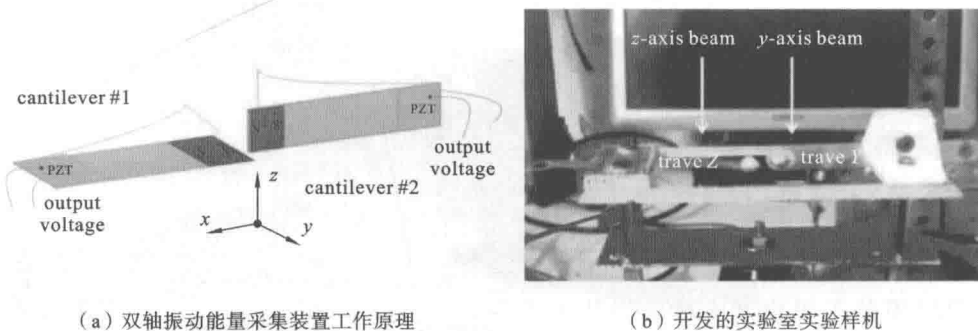


图 1.3.11 双向振动能量采集器

多方向宽频带双稳态压电振动俘能器由两个尺寸参数相同方向相互垂直排列

的压电悬臂梁和两个质量相等的永磁铁构成,其中永磁铁分别固定在两个压电悬臂梁的自由末端,两永磁铁极性相反形成斥力,通过永磁铁之间产生的非线性磁场力使系统动力学响应行为呈现双稳态现象,同时由于磁场力的相互作用,当其中一个悬臂梁由于受到激励作用力产生振动时,另外一个悬臂梁也会随之振动,从而实现俘能系统对多方向振动能量的收集。

Jong C. Park 研究了一种利用不对称惯性质量块采集压电悬臂梁长度和厚度方向上振动的压电振动能量收集器,其结构如图 1.3.12 所示。这种振动能量收集装置能够采集在二维平面内各个方向上的振动能量,可以通过调整质量中心,在 PZT 曲梁的末端处不对称地产生惯性质量,不对称的惯性质量能够有效提高俘能器的俘能效率。

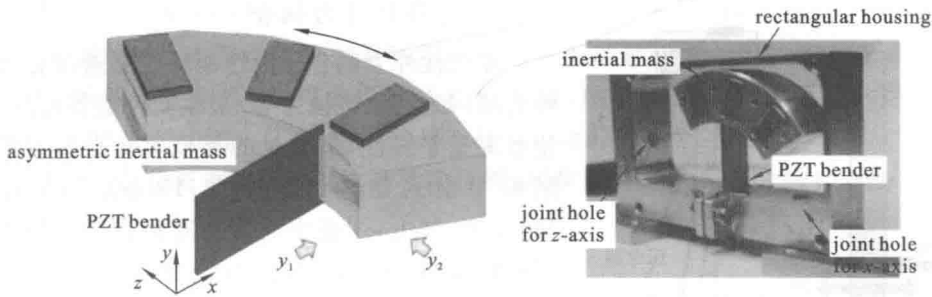


图 1.3.12 二维振动能量收集装置

1.3.2 从线性到非线性

最初学者们研究的压电俘能器多为单自由度的线性压电俘能器,采用线性微分方程来描述其动力学行为,故称为线性压电俘能器。由于线性微分方程的相关数学理论已经很成熟,故线性压电俘能器的模型求解相对容易。通过理论计算能够较为准确地预测压电俘能器的俘能特性,但是线性压电俘能器具有一定的局限性和缺点。大量的实践以及理论均已表明:当外界频率与线性俘能系统自身固有频率匹配时,线性俘能系统的性能达到最优,一旦激励频率发生偏移时,其发电性能会被明显削弱。实际环境中的振动频率具有宽频带、随机的特点,外界激励的频率不可能时刻与压电俘能器的固有频率保持良好匹配,这极大地限制了压电俘能器的发电性能,同时也影响了压电俘能器的实际应用。如何使压电俘能器有更宽的俘能频带、更高的俘能效率成为研究者共同关注的话题。

近年来,研究者将基于线性转换机理的压电俘能器拓展到非线性转换机理,积极探索并发展非线性压电俘能技术。相对于线性俘能器,非线性压电俘能器具有俘能频带宽度广、发电效率高等特点,因此采用非线性压电俘能器已成为当前压电

俘能技术的研究热点。严格来讲,并不存在完全的线性压电俘能系统,因为即使对于人们普遍认同的线性压电俘能器,系统中总存在非线性因素的影响。例如,压电俘能器自身材料的非线性,压电俘能器产生大的变形导致应力-应变的非线性以及压电系统自身机电耦合带来的非线性因素。但这些非线性因素由自身特性所确定,影响有限,故将系统近似看成线性系统。

本书所讨论的非线性压电俘能器是指采用其他方式引入得到的非线性压电俘能器。相对其他非线性项而言,引入非线性刚度更易实现,因此当前对于非线性压电俘能器的研究大多是这一类型。

引入非线性刚度的方法不同,就形成了不同类型的压电俘能器。引入方法主要有三种:非线性外力耦合、分段线性结构以及非线性大应变。

1. 非线性外力耦合

非线性外力耦合压电俘能器主要通过施加外力场(如磁力、机械力等)来改变俘能器刚度,使系统呈非线性,最常见的类型就是在悬臂梁结构中引入磁力。2009年 Erturk 等采用 Moon 和 Holmes 提出的磁力双稳态模型用于压电俘能器的俘能研究,结构如图 1.3.13 所示。通过理论分析与实验研究,证明该结构在简谐激励下具有较宽的低频俘能范围,电路断态下的输出电压比线性结构高 2 倍,输出功率高出 8 倍。

Ferrari 等在悬臂式压电振子自由端增加了一个磁块,另一个磁块固定布置,且与自由端磁块保持磁斥力关系。对压电振子在随机激励下的共振位移特性进行了理论和实验研究,分析了非线性对双稳态现象的影响。Minh Sang

Nguyen 等提出一种具有 2 自由度的双稳态压电俘能器,2 自由度压电振子主要通过结构参数优化使各个自由度离散的共振频率接近,从而形成共振频率带以拓宽频率。陈仲生、孙舒等均对磁力引入悬臂式压电俘能器展开了研究。张旭辉等设计了一种直梁加拱形梁的组合梁式新型压电俘能器结构,如图 1.3.14 所示。他们对组合梁进行建模,分析了阻抗、机电耦合系数、阻尼等对系统响应的影响,实验结果表明,这种新型非线性压电俘能器的有效工作频带是相应线性压电俘能器的 3.1 倍。

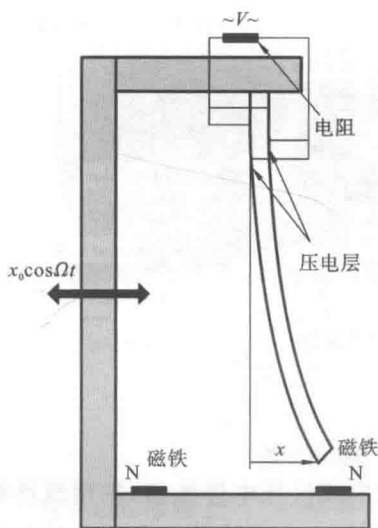


图 1.3.13 基于磁力作用的非线性俘能器结构