

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 19920121152713

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

一种新型的可调频压电俘能器的研究

Study on A Novel Frequency Tunable Piezoelectric Vibration
Energy Harvesting Device

李营泰

指导教师姓名: 关明杰 副教授

专 业 名 称: 机械电子工程

论文提交日期: 2015 年 月

论文答辩时间: 2015 年 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） **1.**经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） **2.**不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

随着传感器技术、嵌入式计算机技术、无线通信技术的快速发展，无线传感器网络（WSN）得到了广泛应用。传统电源已无法满足无线传感器网络应用的要求，因此俘获环境能量并将其转换为电能为无线传感器供电成为传统电源的一种替代方案。环境中的振动能凭借能量来源广泛、收集方便的特点而成为了很具吸引力的环境能量源。振动能量的回收方式主要有三种，即电磁式、静电式和压电式。其中压电俘能方式可以直接将施加的应变能转化成电能，适用于各种尺度，结构相对简单，无需额外的电源，而且易于集成。

大多数振动能俘能器都采用弹簧质量阻尼结构并使该结构的固有频率与俘能器周围环境振动的频率一致。只要这两个频率存在很小的偏差，俘能器产生的能量就会显著减小，从而导致俘能器输出的明显减少。为解决这一问题，宽频和可调频压电俘能技术被提出和研究。然而目前可调频俘能技术尚未成熟，存在驱动装置体积较大及调频环节耗能过大等主要问题。

本文在国内外研究的基础上，提出一种新型的结构紧凑的可调频压电俘能技术，使得俘能器结构的固有频率可以根据周围环境的振动频率进行调整。本文采用理论分析、模拟仿真和实验相结合的方法系统研究和分析了这种可调频阵列式压电悬臂梁俘能器，根据压电元件刚度因电学边界条件的不同而发生变化的特性，通过改变其电学边界条件来改变压电悬臂梁的固有频率，使压电悬臂梁与环境振动频率相同或相近，获得尽可能大的俘能输出。本文还设计并实现了一种基于微控制器的压电悬臂梁振动频率及幅度测量系统，并对压电悬臂梁结构的调频方案进行研究，为将来实现自调频俘能技术做准备。

关键词：压电；能量收集；可调频；悬臂梁

Abstract

With the rapid development of the sensor technology, embedded computer technology and the wireless communication technology, the wireless sensor network (WSN) has been widely used. Traditional power supply can hardly meet the power requirements of wireless sensor network applications. Therefore to harvest the environmental energy and convert it into electricity as an alternative of traditional power supply for powering wireless sensor networks has drawn more and more attentions. The vibration energy which is abundant in the environment becomes one of attractive energy source for energy harvesting. There are three main types of vibration energy harvesting technology: electromagnetic, electrostatic and piezoelectric. The piezoelectric energy harvesting technology is attracting more and more concerns thanks to their relatively high power densities and compact structures.

Most of the vibration energy harvester use a spring-mass-damper structure, and make the resonant frequency of the structure match the vibration frequency in the ambient environment. As long as the two frequencies have a small discrepancy, the energy output will decrease remarkably. In order to solve this problem, broadband vibration energy harvesting and self-tuning vibration energy harvesting techniques were proposed and investigated. However these harvesting technologies were not yet mature due to problems from large volume or the large consumed energy of the control system.

We propose a novel frequency tunable piezoelectric harvester structure which is constructed by a cantilever base beam and several piezoelectric elements bonded with the base beam in a certain manner in this work. The piezoelectric effect makes the piezoelectric material very special in its mechanical behavior owing to its convenient electromechanical convertible characteristic. When the electrical boundary condition of a piezoelectric element changes, its effective stiffness will change too. By modifying the electrical boundary conditions of the piezoelectric elements, the resonant frequency of the beam structure changes accordingly. To find out better frequency tunability, d_{31} and d_{33} modes in which

piezoelectric elements coupled with the beam were investigated and verified with simulations and experiments. We also designed and developed a vibration frequency and amplitude measurement system for the piezoelectric cantilever beam based on a microcontroller. Frequency tuning strategy is also investigated in order to fulfill a self-tuning system in the future.

Keywords: Piezoelectric; Energy harvesting; Frequency tunable; Cantilever beam

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 发展现状.....	3
1.2.1 国内外发展现状.....	3
1.2.2 目前研究存在的不足.....	5
1.3 本文研究的主要内容.....	6
第二章 压电俘能原理及结构	8
2.1 压电效应和压电陶瓷.....	8
2.1.1 压电效应.....	8
2.1.2 压电陶瓷.....	9
2.2 压电方程与参数.....	9
2.2.1 压电方程.....	9
2.2.2 压电参数.....	11
2.3 压电俘能结构.....	15
2.3.1 铰铍式.....	15
2.3.2 堆叠式.....	15
2.3.3 壳式.....	16
2.3.4 悬臂梁式.....	17
2.4 本文采用的俘能结构.....	18
2.4.1 结构方案设计.....	18
2.4.2 压电元件工作模式.....	19
第三章 可调频压电悬臂梁结构设计理论与理论分析	21
3.1 压电悬臂梁结构固有频率分析.....	21
3.2 可调频压电悬臂梁结构设计.....	23
3.2.1 d_{31} 贴片式结构.....	23
3.2.2 d_{31} 嵌入式结构.....	24
3.2.3 d_{33} 压电片结构.....	25
3.2.4 d_{33} 压电柱结构.....	26
3.3 小结.....	27
第四章 可调频压电悬臂梁结构仿真分析与结果	28
4.1 ANSYS 有限元软件.....	28
4.2 d_{31} 贴片式结构仿真分析与结果.....	29
4.2.1 仿真分析.....	30

4.2.2 仿真结果.....	30
4.3 d_{31} 嵌入式结构仿真分析与结果.....	32
4.4 d_{33} 结构仿真分析与结果.....	33
4.4.1 d_{33} 压电片结构仿真分析与结果.....	33
4.4.2 压电元件厚度对频率相对变化率的影响.....	36
4.4.3 d_{33} 压电柱结构仿真分析与结果.....	37
4.5 小结.....	37
第五章 可调频结构实验验证.....	39
5.1 可调频压电悬臂梁设计.....	39
5.2 实验测量装置.....	42
5.3 实验结果与验证.....	43
5.3.1 d_{31} 嵌入式结构测量结果.....	43
5.3.2 d_{33} 压电柱结构测量结果.....	44
5.3.3 压电元件俘能输出测量.....	45
第六章 压电悬臂梁结构频幅测量与控制系统.....	48
6.1 频幅测量系统设计与实现.....	48
6.1.1 振动频率和幅度测量系统设计.....	48
6.1.2 振动频率和幅度测量结果.....	49
6.2 频率控制方案设计.....	51
6.2.1 控制流程.....	51
6.2.2 状态控制码.....	52
第七章 总结与展望.....	54
7.1 本文总结.....	54
7.2 展望.....	55
附 录.....	57
参考文献.....	63
致 谢.....	67
硕士期间科研成果.....	67

Table of contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background of the research.....	1
1.2 Development of the research area.....	3
1.2.1 Literature review.....	3
1.2.2 Problem statement.....	5
1.3 Objective of the research.....	6
Chapter 2 Piezoelectric energy harvesting principle and structure.....	8
2.1 Piezoelectric effect and piezoelectric ceramics.....	8
2.1.1 Piezoelectric effect.....	8
2.1.2 Piezoelectric ceramics.....	9
2.2 Piezoelectric equations and piezoelectric parameters.....	9
2.2.1 Piezoelectric equations.....	9
2.2.2 Piezoelectric parameters.....	11
2.3 Structures of the piezoelectric energy harvester.....	15
2.3.1 Cymbal type.....	15
2.3.2 Stack type.....	15
2.3.3 Shell type.....	16
2.3.4 Cantilever type.....	17
2.4 The energy harvester structure used in this research.....	18
2.4.1 Main idea of the structure.....	18
2.4.2 The working modes of piezoelectric elements.....	19
Chapter 3 Theoretical analysis and design of the tunable piezoelectric cantilever energy harvester.....	21
3.1 Theoretical analysis of resonance frequency of the piezoelectric cantilever.....	21
3.2 Design of the tunable piezoelectric cantilever.....	23

3.2.1 Surface-mounted type of d_{31}	23
3.2.2 Embedded type of d_{31}	25
3.2.3 Piezoelectric plate type of d_{33}	25
3.2.4 Piezoelectric cylinder type of d_{33}	26
3.3 Summary.....	27
Chapter 4 Simulation analysis and results of the tunable piezoelectric cantilever energy harvester.....	29
4.1 Finite element software <i>ANSYS</i>	29
4.2 Simulation analysis and results of the surface-mounted type of d_{31}	30
4.2.1 Simulation analysis.....	31
4.2.2 Simulation results.....	31
4.3 Simulation analysis and results of the embedded type of d_{31}	33
4.4 Simulation analysis and results of the type of d_{33}	34
4.4.1 Simulation analysis and results of the piezoelectric plate type of d_{33}	34
4.4.2 Effect of the relative change rate of frequency by piezoelectric element thickness.....	37
4.4.3 Simulation analysis and results of the piezoelectric cylinder type of d_{33}	38
4.5 Summary.....	38
Chapter 5 Experimental verification of the tunable piezoelectric cantilever energy harvester.....	40
5.1 Fabrication of the tunable piezoelectric cantilever.....	40
5.2 Experimental measuring setup.....	43
5.3 Experimental results.....	44
5.3.1 Results of the embedded type of d_{31}	44
5.3.2 Results of the piezoelectric cylinder type of d_{33}	45
5.3.3 Results of piezoelectric energy output.....	46
Chapter 6 Amplitude and frequency measurement and control system of the tunable piezoelectric cantilever energy harvester.....	49

6.1 Design and results of amplitude and frequency measurement system.....	49
6.1.1 Design of amplitude and frequency measurement system.....	49
6.1.2 Results of amplitude and frequency measurement system.....	50
6.2 Design of frequency control system.....	52
6.2.1 Control flow chart.....	52
6.2.2 Status control code.....	53
Chapter 7 Conclusions and future work.....	55
7.1 Conclusions.....	55
7.2 Future work.....	56
Appendix.....	58
References.....	64
Acknowledgement.....	68
Published papers.....	69

第一章 绪 论

1.1 研究背景

近年来，随着传感器技术、嵌入式计算机技术、无线通信技术的快速发展，由具有感知能力、计算能力、通信能力的微型传感器自组织而成的无线传感器网络（WSN）引起了人们的极大关注^[1]。传统方法采用电池对无线传感器供电，但由于电池携带的能量有限，不能满足长期工作的需要，并且在环境恶劣或人类无法到达的场合，电池的更换非常困难，因此收集环境能量并将其转换成电能为无线传感器供电成为解决这一问题的研究热点^[2,3]。

我们所处的环境中蕴藏着巨大的能量，其能量的具体表现形式也是多种多样，常见的能源有太阳能、风能、热能和振动能等。太阳能的应用十分广泛，这种能源类型在白天普遍存在，如果在室外应用并且只在白天启动，那么太阳能电池提供了一个良好并且技术成熟的能量回收方式。风能资源取决于风能的密度以及可利用风能的年累计小时数，目前对风能的利用主要有风力发电、风帆助航、风力提水和风力制热四个方面。不过，风能的利用受到一些因素的限制，如风速不稳定而导致的能量不稳定、地理位置的影响巨大、风能转化效率低、风能发电的设备技术不是非常成熟等等。热能的回收利用则是来源于自然中的热量变化，对一个热电装置（热电偶）而言，如果有 10°C 的温度梯度，那么可获得超过 $15\text{mW}/\text{cm}^3$ 的能量，然而在 1cm^3 的空间里有着稳定 10°C 温度梯度的情况是非常罕见的。振动普遍存在于自然环境中，如车辆行驶时的振动、工厂机器设备的振动、人行走时的能量、桥梁振动等等。由于谐振状态下的能量与加速度幅值 A 和频率 ω 有关，与 A^2/ω 成正比，而振动的高阶谐振状态的加速度值较低，因此回收低频谐振模态下的振动能量受到更多的关注。在这些能量形式中，振动能凭借能量来源广泛、收集方便的特点而成为了很具吸引力的可供回收的环境能量源^[4]。

振动能量的回收方式主要有三种，分别为电磁式^[5]、静电式^[6]和压电式^[7]。这三种

能量回收方式在特定的场合下应用，均会表现出各自相应的优势。电磁式能量回收结构产生的能量比较低，系统的体积受到弹簧和应用场合的限制，一般体积较大，不易小型化，因此更适用于大型系统中；静电式能量回收结构与微系统工艺有很好的兼容性，容易集成于微型系统中，但其制作工艺相对复杂，并且每次工作前都需要对电容进行充电，并且能量密度相对不高；压电能量回收方式可以直接将施加的应变能转化成电能，适用于各种尺度，结构相对简单，无需额外的电源，而且易于集成。压电能量回收方式以其适用性广，结构相对简单等优势，受到了广泛的关注。

压电俘能装置的核心部件是压电晶片。压电晶片可以在压力的作用下发生形变，致使晶片本身发生极化，在晶片表面出现正负束缚电荷，此效应为压电效应。利用压电晶片的这种压电效应，可以将压力转换为电荷，实现机械能与电能之间的转换。悬臂梁压电双晶片是压电俘能装置中最常用的结构方式，它由一弹性层作为悬臂梁基体，在基体上下两侧各粘贴一层压电层组成，其结构如图 1.1 所示。

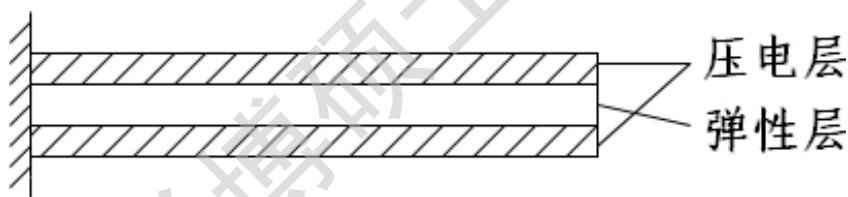


图 1.1 悬臂梁压电双晶片

在周期性外部载荷作用下，压电晶片被交替拉伸和压缩，从而在上下表面间产生交变电压；当外力消失，压电晶片的弹性变形恢复，金属极片上的电荷也随之消失；如果在悬臂梁的两端设置电能采集电路，适时地将电荷导出并加以存储，就可以将环境振动的机械能转换成电能，作为电源对外供电^[8]。

研究表明，当压电俘能装置处于共振状态时，压电晶片的形变量达到峰值，因压电效应而产生的电能输出同时达到峰值；当压电俘能装置处于非共振状态时，压电晶片的形变量大幅度下降，同时输出电能也大幅下降。传统技术下的压电俘能器需保持工作频率等于固有频率才能令俘能装置处于共振状态，限制了其应用范围。随后，研究人员又提出了宽频和可调频技术，使压电俘能装置在一定频率宽度内均能处于共振状态，拓宽了压电俘能器的工作频率，大大提高了压电俘能器的应用范围。

1.2 发展现状

1.2.1 国内外发展现状

1984年,美国科学家 *Hausler* 与 *Stein* 做了从生物环境中回收能量的尝试,他们利用生物体呼吸时肋骨间的周期性相对运动,通过 *PVDF* (聚偏氟乙烯,有机压电材料) 薄膜回收生物能量;他们将压电微电源固定在狗肋骨上,在狗的自然呼吸下可以输出 $18V$ 的峰值电压,回收了相当于 $17\mu W$ 的能量^[9]。

1998年,美国麻省理工学院媒体实验室 (*The MIT Media Lab*) 的研究人员 *Kymissis* 等人对置于鞋跟处的微型能量回收装置进行了关于压电材料使用的研究比较,分别设计使用了多层结构 *PVDF* 和压电陶瓷 *PZT* 两种压电材料;实验表明 *PVDF* 和 *PZT* 组成的能量回收装置分别能收集到 $1.1 mW$ 和 $1.8 mW$ 的电能^[10]。他们制作的压电发电鞋受到了广泛关注,随后又有大量研究人员和机构利用 *PZT* 进行了压电振动能量收集器的研究。



图 1.2 压电发电鞋

2002年,美国匹兹堡大学的 *Kim* 对基于不同振动模式 d_{31} 和 d_{33} 分别进行了模型理论推导,建立了器件结构的几何尺寸和外界机械力对输出能量的影响^[11]。2005年, *Jeon* 等人共同研制出了一种基于 d_{33} 模式的悬臂梁结构压电发电机。他们的研究表明: d_{33}

模式的压电发电装置能够产生更高的电压，在 13.91 kHz 的振动频率下，输出功率在负载为 $5.2\text{ M}\Omega$ 时达到最大值 $1.01\text{ }\mu\text{W}$ ^[12]。同年，美国德克萨斯州大学的 *Priya* 等人发明了一种压电袖珍风车，用以回收外界风能为无线网络供电；实验研究表明，随着风速的增加，压电风车的输出功率也线性增加；当外界风速为 16 km/h 同时压电风车的后续匹配负载为 $6.7\text{ k}\Omega$ 时，便可以产生 7.5 mW 的持续电能；这足以保证一个电子传感器的运转，为完整的无线传感器网络提供电能^[13]。



图 1.3 压电袖珍风车

2008 年，美国密歇根理工大学的 *Feenstra* 等人设计了“悬挂式负重”背包，通过将 $20\sim 38$ 公斤重物垂直运动时的机械能转换为电能，在人正常行走时能够产生 7.4 W 的电能；这种发电设备有助于科学工作者、探险者和救灾人员摆脱沉重的设备电源及电池，能够让他们在偏远地区更加方便地使用便携式电子设备^[14]。



图 1.4 “悬挂式负重”背包

近年来，宽频^[15-17]和可调频^[18-20]压电俘能技术被提出和研究。Xue 等^[15]提出一种宽频技术，将多根不同尺寸的悬臂梁串联或并联来俘能，并讨论他们的效果，数值计算结果表明组合之后结构的固有频率可以发生变化，但他们的设计首先是仅比较几组组合，其次是不具备自动调整频率功能，最后是缺少实验验证。Lallart 等^[18]提出一种可调频技术，利用一块压电片作为频率传感器，一块压电片作为驱动片，一块压电片作为俘能片，应用 *DSpace* 进行控制实验，结果使结构的频宽增加 4 倍，但他们所采用的系统控制策略较复杂，而且控制电路所消耗的实际能量并没有被实验测得，这样并没有得到系统净俘能和俘能效率。Challa 等^[19]提出另一种可调频结构，通过在悬臂梁自由端增加磁场力，来控制梁的频率，使得原固有频率为 26 Hz 的梁的频宽增加到 $22\text{-}32\text{ Hz}$ 。但这种方法需要一个产生磁场的装置，使得俘能机构体积大大增加，失去了压电俘能机构结构紧凑的优点，另外用直流电机作为驱动，驱动和控制的能量也较大，未能得到较高的俘能效率。

1.2.2 目前研究存在的不足

大多数振动能俘能器都采用弹簧质量阻尼结构并使该结构的固有频率与俘能器周围环境振动的频率一致。只要这两个频率存在很小的偏差，俘能器产生的能量就会显著减小。然而在实际应用中，周围环境的振动频率通常不是恒定不变的单一频率，而是分布在一定的频率范围之内，即使是环境振动方面的频率较单一、稳定，俘能结构方面也会因为环境温度、压力和使用时间等原因而使得其固有频率偏离环境振动频率，

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.