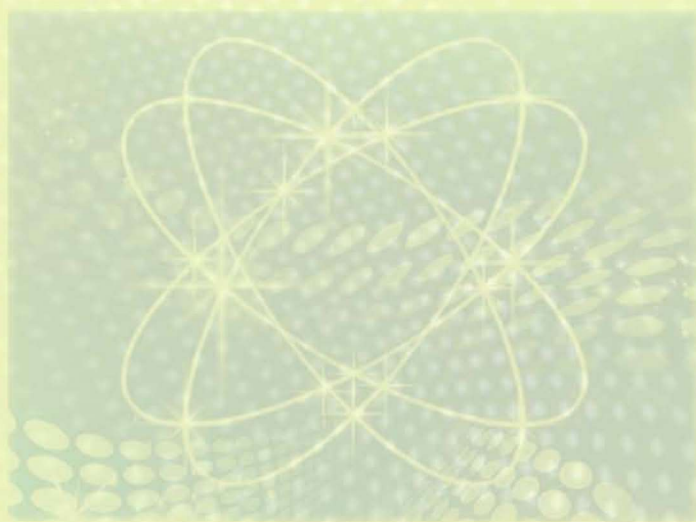


面向环境振动的压电俘能器及其俘能特性研究

单小彪 谢 涛 著



黑龙江教育出版社

面向环境振动的压电俘能器 及其俘能特性研究

**Enviromental Vibration-Based Piezoelectric Energy
Harvesters and Their Harvesting Characteristics**

单小彪 谢 涛 著

黑龙江教育出版社

图书在版编目（C I P）数据

面向环境振动的压电俘能器及其俘能特性研究 / 单
小彪，谢涛著. — 哈尔滨：黑龙江教育出版社，2015. 2
ISBN 978-7-5316-7759-8

I. ①面… II. ①单… ②谢… III. ①铁电及压电器
件 IV. ①TN384

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第037243号

面向环境振动的压电俘能器及其俘能特性研究

Enviromental Vibration-Based Piezoelectric Energy Harvesters and Their Harvesting Characteristics

单小彪 谢 涛 著

责任编辑 徐永进
封面设计 刘乙睿
责任校对 程 佳
出版发行 黑龙江教育出版社
(哈尔滨市南岗区花园街 158 号)
印 刷 黑龙江远东联达教育文化传媒有限公司
开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16
印 张 12.75
字 数 250 千
版 次 2015 年 2 月第 1 版
印 次 2015 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5316 - 7759 - 8 定 价 30.00 元

黑龙江教育出版社网址: www.hljep.com.cn
网络出版支持单位: 东北网络台(www.dbw.cn)
如需订购图书, 请与我社发行中心联系。联系电话: 0451 - 82529593 82534665
如有印装质量问题, 影响阅读请与我公司联系调换。联系电话: 0451 - 51993506
如发现盗版图书, 请向我社举报。举报电话: 0451 - 82533087

前 言

当前,越来越多的研究者开始关注能够将环境中的振动能转换成电能的俘能器(Energy Harvester),并将其作为一种替代能源为微电子产品供电。

本课题组从2008年开始进入振动俘能领域,以俘能(Energy Harvesting)为研究方向开展学术研究,经过这些年的努力,取得了一些研究成果,在国际期刊发表了一些高质量的学术论文,并先后得到了国家自然科学基金项目(项目资助编号:51077018)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(项目资助编号:HIT.NSRIF.2014059)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(项目资助编号:HIT.KISTP.201412)的大力资助。承蒙恩典,感激不尽,因此,萌生想法,整理并总结课题组这些年来在俘能领域的研究成果,形成此专著,供本课题组成员和从事压电俘能领域的研究人员参考和学术交流之用。

本专著以基于环境振动的压电俘能器为研究对象。我们本着从简单到复杂,从常见到新奇,从浅显到深远的思路来安排本专著的章节。首先,选择常见的、谐振频率较低以及能量密度高的悬臂梁式压电俘能器入手;然后,以宽频、拓频思想为指导,对固支梁压电俘能器进行研究并加以改进改善,来提高压电俘能器的性能;最后,研发能够适应环境中具有大振幅、高频率、大加速度甚至包含冲击振动等高载情况压电俘能器。

在第2章中,针对悬臂梁式压电俘能器,建立了单、双晶片压电俘能器电压输出的数学模型、不同形状双晶压电振子的数学模型。分析了悬臂梁式俘能器输出电压与功率等的影响因素。分析了悬臂梁式压电俘能器的结构参数对发电能力的影响规律。建立了压电结构与负载电阻耦合的理论模型,然后利用数值方法研究了负载阻抗、俘能器结构参数、压电晶体材料参数等因素对俘能器性能的影响。分析了压电晶体的材料参数对俘能器发电能力的影响规律。

在第3章中,设计并研制了标准型能量存储电路和Buck-boost型能量储能电路;在这一章中我们详细地给出了各种悬臂梁式压电俘能器的具体制作步骤及其注意事项;研制了矩形、梯形、三角形以及末端带质量块的多种悬臂梁式压电俘能器。然后搭建了俘

能实验系统,对上述悬臂梁式压电俘能器进行俘能实验,验证了第2章中理论分析的正确性。

在第4章中,首先,基于宽频的思想,采用有限元方法对固支梁压电俘能器进行了调频设计和分析,并进一步对固支梁进行分段得到多分段压电片多质量系统固支梁压电俘能器,实现宽频效果。在此基础上提出十字梁多质量块分布宽频规划方法,通过仿真及实验验证了十字梁压电俘能器有较好的宽频效果。然后,研制了调频和宽频的固支梁压电俘能器并搭建了实验平台,通过实验验证了仿真分析的正确性。

在第5章中,对高载情况下的压电俘能器进行数学建模、仿真以及实验验证分析。以钹型压电俘能器为研究对象,根据碟簧理论和压电理论,建立了钹型压电俘能器的理论发电性能数学模型并进行了数值分析。利用有限元手段分析了其主要结构参数对压电俘能器输出电压和谐振频率的影响关系,针对钹型压电俘能器存在环向应力集中而导致其力电转化效率降低的问题,提出了几种对钹型压电俘能器进行开槽结构的优化方式,分析了槽结构参数对其输出性能的影响关系并确定了其中发电性能最佳的开槽形式。在此基础上,为了研究压电俘能器结构与能量存储电路间的相互机电耦合作用,建立了钹型压电俘能器—能量存储电路多物理场机电耦合作用分析模型,并分析了振动频率和负载对压电俘能器输出性能的影响关系。

在第6章中,以力电转化效率更高的鼓型压电俘能器为研究对象。首先,利用薄板振动理论和压电理论,建立了鼓型压电俘能器的谐振频率计算模型。将鼓型换能器作为压电俘能器进行压电发电性能研究,建立了鼓型压电俘能器发电性能的数学模型并进行数值模拟分析。对鼓型压电俘能器进行有限元仿真分析,获得了其关键结构参数对鼓型压电俘能器谐振频率和发电特性的影响规律,然后,对鼓型压电俘能器—能量存储电路进行了多物理场机电耦合作用仿真分析,为鼓型压电俘能器的实际应用提供了理论依据。最后,设计并研制鼓型压电俘能器,搭建俘能系统,进行俘能实验,验证了理论分析的正确性。

在第7章中,提出了一种具有钹型换能器高的承载能力,又同时具有鼓型换能器高的机电能量转化效率的钹鼓复合型压电俘能器。首先,分析了钹鼓复合型换能器主要结构参数对其发电、变形性能和谐振频率的影响关系,以此确定换能器合理的结构尺寸参数;然后,建立复合型压电俘能器—能量存储电路的机电耦合作用分析模型,针对负载和振动频率对压电俘能器输出性能的影响关系进行了研究。最后,设计并研制了钹鼓复合

型压电俘能器,搭建了钹鼓复合型压电俘能器俘能实验系统,验证理论分析的正确性。综合比较了钹型、鼓型以及钹鼓复合型压电俘能器的性能,结果表明:鼓型压电俘能器的能量密度最高,但其直接承载能力低;而复合型压电俘能器能量密度高、匹配阻抗小、承载能力大且利于微型化,是钹型、鼓型以及钹鼓复合型压电俘能器中综合性能最优异的压电俘能器。

在本专著的撰写过程中,得到了本课题组已毕业的袁江波博士、王红艳博士、李知远硕士、卢有为硕士、房目稳硕士、王志彬硕士、岳国强硕士、刘承玺硕士、任佳琦硕士、关世伟硕士、张发洋硕士,以及还在本课题组俘能方向攻读学位的博士生徐振龙、宋汝君、刘申等人的大力帮助,在此表示感谢。

单小彪
于多伦多大学
2015 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论 1

 1.1 引言 1

 1.2 环境振动能的三种转换形式 1

 1.3 压电俘能器国内外研究现状 4

 1.3.1 压电材料 4

 1.3.2 压电俘能器的工作模式 6

 1.3.3 单晶与双晶压电技术 7

 1.3.4 俘能振子的结构形式 8

 1.3.5 压电俘能器的频率调节技术 10

 1.4 能量存储电路和存储元件研究现状 11

 1.4.1 能量存储电路的研究现状 11

 1.4.2 能量存储元件的研究现状 12

 1.5 压电俘能技术应用研究现状 13

 1.6 当前研究存在的问题 16

 1.7 本专著的主要研究内容 17

第 2 章 悬臂梁式压电俘能器的数学建模与分析 19

 2.1 引言 19

 2.2 压电效应及压电方程 19

 2.2.1 压电效应 19

 2.2.2 四类压电方程 20

 2.2.3 压电单晶片与压电多晶片 21

 2.3 单晶压电俘能器输出特性的基本数学描述 21

 2.4 单晶片悬臂梁式俘能器的数学建模 24

2.5 不同形状双晶压电俘能器输出特性的基本数学描述	30
2.5.1 矩形压电俘能器的电压输出	30
2.5.2 梯形压电俘能器的电压输出	32
2.5.3 三角形压电俘能器的电压输出	34
2.6 双晶片悬臂梁式压电俘能器的数学建模	35
2.7 压电陶瓷材料的材料属性	37
2.7.1 PZT-5A 的材料属性	37
2.7.2 PZT-5H 的材料属性	38
2.8 悬臂梁式压电俘能器的数值分析	39
2.8.1 相关概念介绍	40
2.8.2 负载阻抗的分析	42
2.8.3 俘能器结构参数对发电能力的影响	48
2.8.4 压电晶体材料参数对俘能器的影响	51
2.9 本章小结	53
第3章 俘能电路的研制及悬臂梁式压电俘能实验	55
3.1 引言	55
3.2 压电储能电路设计	55
3.3 基于 Buck-Boost 变换的压电储能电路分析	57
3.3.1 Buck-Boost 变换电路的工作原理	57
3.3.2 压电储能电路硬件设计	57
3.4 矩形、梯形及三角形悬臂梁式压电俘能器俘能实验	60
3.4.1 悬臂梁式压电俘能器的制作过程	60
3.4.2 矩形、梯形及三角形悬臂梁式俘能器俘能实验	62
3.4.3 矩形、梯形及三角形振子形状对发电能力的影响	63
3.5 末端带质量块的悬臂梁式压电俘能器俘能实验	65
3.5.1 激振加速度的标定	67
3.5.2 末端带质量块的单悬臂梁式压电俘能器的振型测试	67
3.5.3 末端带质量块的多悬臂梁式压电俘能器的振型测试	70
3.6 悬臂梁式压电俘能器的内阻抗测试	71

3.7 悬臂梁式压电俘能器能量采集实验	72
3.7.1 单悬臂梁式压电俘能器能量采集实验	73
3.7.2 多悬臂梁式压电俘能器能量采集实验	74
3.8 本章小结	76
第4章 固支梁压电俘能器宽频构型规划、仿真与实验	77
4.1 引言	77
4.2 固支梁压电俘能器的构型规划基本参数确定	77
4.2.1 固支梁压电俘能器构型规划的思路	77
4.2.2 固支梁压电俘能器基本参数的确定	78
4.3 固支梁压电俘能器的动力学仿真	78
4.3.1 固支梁压电俘能器模态分析	78
4.3.2 固支梁压电俘能器谐响应分析	81
4.4 单质量块固支梁压电俘能器调频设计及其振动模型	82
4.4.1 单质量块固支梁压电俘能器结构参数	82
4.4.2 单质量块固支梁压电俘能器模态分析	83
4.4.3 单质量块固支梁压电俘能器谐响应分析	84
4.5 固支梁压电俘能器宽频设计及其振动模型	84
4.5.1 多分段压电片多质量系统固支梁压电俘能器结构设计	85
4.5.2 多分段压电片多质量系统固支梁压电俘能器模态分析	86
4.5.3 多分段压电片多质量系统固支梁压电俘能器谐响应分析	87
4.6 十字型固支梁压电俘能器宽频设计及其振动模型	87
4.6.1 十字型固支梁压电俘能器结构参数	87
4.6.2 十字型固支梁压电俘能器模态分析	90
4.6.3 十字型固支梁压电俘能器谐响应分析	90
4.7 固支梁压电俘能器实验研究	91
4.7.1 实验平台的建立	92
4.7.2 固支梁压电俘能器的振型测试	93
4.7.3 固支梁俘能器能量采集实验	98
4.8 本章小结	104

第 5 章 铍型压电俘能器发电性能数学建模及开槽结构分析	105
5.1 引言	105
5.2 铍型压电俘能器发电能力数学建模	106
5.2.1 铍型压电俘能器发电性能数学建模	106
5.2.2 铍型压电俘能器发电性能的数值模拟	111
5.3 铍型压电俘能器有限元仿真分析	112
5.3.1 压电体有限元分析理论	112
5.3.2 结构参数对铍型压电俘能器性能的影响	114
5.3.3 开槽结构铍型压电俘能器发电性能仿真分析	116
5.3.4 铍型压电俘能器—存储电路的机电耦合作用仿真分析	120
5.3.5 黏接层应力分析	124
5.4 铍型压电俘能器发电性能的实验研究	127
5.4.1 压电发电振子的制作	127
5.4.2 铍型压电俘能器发电能力实验研究	128
5.4.3 开槽对铍型压电俘能器性能的影响测试	131
5.4.4 Buck – Boost 电路参数对压电俘能器性能影响测试	133
5.5 本章小结	136
第 6 章 鼓型压电俘能器的振动特性及发电性能研究	138
6.1 引言	138
6.2 鼓型压电俘能器的受迫振动	138
6.3 鼓型压电俘能器发电性能研究	144
6.3.1 鼓型压电俘能器发电性能数学建模	144
6.3.2 鼓型压电俘能器发电性能的数值模拟	149
6.4 鼓型压电俘能器结构参数对其发电性能及谐振频率的影响	151
6.4.1 模型建立	151
6.4.2 仿真结果分析	152
6.5 鼓型压电俘能器—存储电路的机电耦合作用仿真分析	154
6.6 鼓型压电俘能器的振动特性及俘能实验研究	157
6.6.1 鼓型压电俘能器阻抗测试	157

6.6.2 鼓型压电俘能器的发电性能研究	159
6.7 本章小结	161
第7章 钹鼓复合型压电俘能器的研究	162
7.1 引言	162
7.2 复合型压电俘能器结构设计	162
7.3 钹鼓结构参数对钹鼓复合型压电俘能器性能的影响	163
7.3.1 模型建立	164
7.3.2 结构参数对钹鼓复合型压电俘能器输出电压的影响	165
7.3.3 结构参数对钹鼓复合型压电俘能器变形性能的影响	166
7.3.4 结构参数对钹鼓复合型压电俘能器谐振频率的影响	166
7.4 复合型压电俘能器与存储电路的机电耦合作用仿真分析	168
7.5 钹鼓复合型压电俘能器的实验研究	170
7.5.1 钹鼓复合型压电俘能器阻抗测试及变形性能研究	170
7.5.2 钹鼓复合型压电发电性能研究	172
7.6 压电俘能器的综合比较	174
7.7 本章小结	175
总 结	177
参考文献	179

第1章 绪论

1.1 引言

我们课题组在俘能(Energy Harvesting)方向先后得到了国家自然科学基金项目(项目资助编号:51077018)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(项目资助编号:HTT.NSRIF.2014059)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(项目资助编号:HTT.KISTP.201412)的大力资助。

在周围环境中存在多种能源,如太阳能,风能,波浪能,热能和机械振动能等^[1,2]。太阳能和风能是两种被人们广为利用的能源,它们适合进行大规模俘能,并为大型电子设备供能。而从环境振动进行俘能是当前一项最有前景的技术^[3]。因此,来自于材料、机电、环境和电子等领域的科研人员们更多的关注于从周围环境振动中俘获能量为微型电子设备供能的研究^[4]。

近年来,如何使压电俘能装置(也叫压电俘能器, Piezoelectric Energy Harvester)具有更好的输出性能(能量密度更大、输出频带更宽)成为一个普遍关注的问题,不少的学者展开了相关的研究并取得了一定的进展。国内外学者为了改善压电俘能装置的输出性能提出了很多的优化方法和思路。其中包括优化机械结构、优化外部负载、优化储能电路等等。其中的一些学者考虑到压电式和电磁式发电装置都具有较高的机电耦合系数,并且这两种发电装置都不需要外接电源等特点,将目光投向了将这两种发电装置耦合在一起。复合俘能装置的结构设计不同,其特点也随之不同。然而,压电俘能器具有结构简单和容易制作的特点,得到了许多研究人员的关注^[5]。现在国内外的一些学者已经对压电俘能器的性能进行了研究,并取得了瞩目的成果。

在本章中首先对压电俘能领域的研究成果进行简单介绍,进而总结目前研究中存在的不足,最后提出本专著的研究内容。

1.2 环境振动能的三种转换形式

环境中的振动能无处不在,如汽车经过道路、桥梁时将会引起强烈振动;海水随海风

的拍打而引起的巨浪及潮起潮落的潮汐;城市街道两旁的高楼等建筑随着地壳的运动每天也存在微弱的振动;工厂机床等大型机械工作时引起周围环境不停地振动;人心脏每天不停地跳动等。利用环境的振动,可以通过发电装置将环境中的振动能转换为电能满足微电子器件等的供能需求。1996年,英国 Sheffield 大学的学者 Williams 和 Yate^[6]提出了利用环境振动能发电的三种能量转换形式:电磁转换、静电转换、压电转换。

(1) 电磁转换 电磁能量转换原理与法拉第发电机的发电原理相同,当导线在磁场中在做切割磁力线运动时在导线内产生电流。输出电能的大小由磁场强度和线圈相对于磁场的运动速度决定^[6]。香港中文大学 Ching 等人^[7]研制的微型电磁电机,总体积只有 1 cm^3 ,当在频率为 104 Hz ,振幅为 $240\text{ }\mu\text{m}$ 简谐激励驱动下,输出电压达到 245 mV ,输出功率没有报道。国内重庆大学温中泉^[8]研制了电磁发电机,输出电压 134.3 mV ,功率达 $18.04\text{ }\mu\text{W}$ 。

(2) 静电转换 基于静电转换的微型发电装置结构主要由两部分组成:可变电容和恒定电压源^[9-11]。由于环境的振动使得电容极板产生相对运动,从而改变电容的大小。保持电容器的电压稳定,根据 $Q = CV$,当电容大小随着极板的相对运动而发生变化时,极板表面产生的电荷也随着变化,从而引起电荷在极板间的相对移动而输出电能。比利时微型电源研究组的 Sterken 等人^[11]利用微工艺制作了静电梳齿结构的微电源,如图 1-1 所示。当在电极上施加静电电压 150 V ,振幅 $20\text{ }\mu\text{m}$,频率为 1020 Hz 的振动环境下输出功率为 $1\text{ }\mu\text{W}$ 。当频率为 3754 Hz 时输出功率为 $16\text{ }\mu\text{W}$ 。

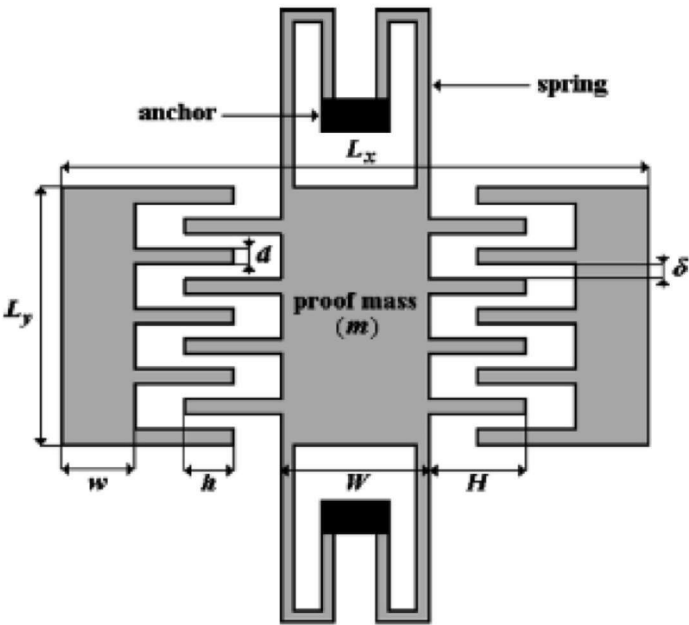


图 1-1 电解质静电发电机^[11]

美国加州大学伯克利分校的 Roundy 等人^[12]提出了三种不同形式的静电俘能器,如图 1-2 所示。经研究发现,在面内改变叉指距离(见图 1-2b)产生的能量最多,在面外改变极板距离(见图 1-2c)产生的能量次之,在面内改变叉指交叠面积(见图 1-2a)产生的能量最小。静电俘能器具有易于和微机电系统集成的优点,在小尺度应用场合优势明显。但静电俘能器的缺点是需要外加电压源或电荷源,应用受限。

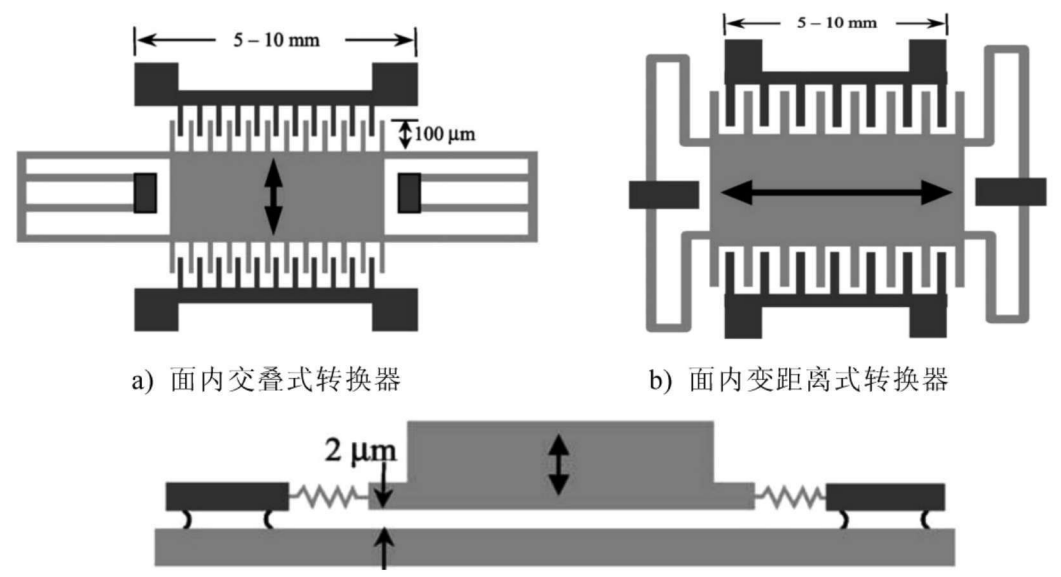


图 1-2 三类静电转换器^[12]

(3) 压电转换 压电能量转换是利用环境振动诱导压电结构产生变形,进而引起压电材料内部的正负电荷中心分离,从而产生极化电压,极化电压将驱动极板上的自由电荷定向流动而输出电能。

表 1-1 给出了各种能源密度的比较情况^[13,14]。由表可知: 化学能电池和燃料电池的能量密度随着时间的推移急剧下降,供能寿命有限,需要对电池进行定期更换,而利用环境能为微系统提供能量稳定,输出能量密度不随时间的变化而发生变化,可以实现长期供电,但是在短时间内能量密度也会受环境影响波动较大,如太阳能电池会随着光照的强度发生显著改变,温差电池也会随着温度改变而发生起伏不定的变化。利用环境振动驱动微型发电装置可以不断地将环境振动能转换为微系统所需的电能,相比较电磁转换、静电转换和压电转换这三种微型发电装置,其中基于压电能量转换的压电俘能器能量密度最高,且能量密度不随时间的变化而改变。

表 1-1 各种供能形式能源密度的比较^[13,14]

电源类型	能量密度($\mu\text{W}/\text{cm}^3$)	能量密度($\mu\text{W}/\text{cm}^3$)
	一年寿命	十年寿命
电池(一次性锂电池)	45	3.5
电池(可充电锂电池)	7	0
碳氢燃料(微热发电机)	333	33
燃料电池(甲醇)	280	28
温差能电池	15(10℃ 温差)	15(10℃ 温差)
核同位素(铀)	6×10^6	6×10^5
太阳能电池	10 ~ 15000	10 ~ 15000
	户外: 150 ~ 15000	户外: 150 ~ 15000
	室内: < 10	室内: < 10
振动能	1 ~ 200	1 ~ 200
	压电转换: ≈ 200	压电转换: ≈ 200
	静电转换: 50 ~ 100	静电转换: 50 ~ 100
	电磁转换: < 50	电磁转换: < 50

表 1-2 给出了收集环境能量的方法在微系统应用中的优缺点^[15]。Roundy^[12,16,17]、Sodano 等人^[18]、Mateu 和 Moll^[19] 在分析综合比较了上述各种微能量获取方法后指出: 压电能量转换方法其力电转换性能好、结构简单、能耗低、易微型化, 因此具有非常广阔的应用前景。

1.3 压电俘能器国内外研究现状

本节将从压电材料、压电俘能器的工作模式、单晶与双晶压电技术、俘能振子的结构形式以及压电俘能器的频率调节技术几个方面的研究现状进行阐述。

1.3.1 压电材料

压电材料的选择对压电发电系统性能的影响至关重要。到目前为止, 已有多种压电材料应用于压电俘能器中。其中, 最常用的压电材料是锆钛酸铅, 又称为 PZT。虽然 PZT 型的压电材料应用最为广泛, 但 PZT 陶瓷易碎, 使得 PZT 压电片在压电发电系统中不能承受大的应变。Lee 等研究表明在高频周期载荷作用下, 压电陶瓷极易产生疲劳裂纹, 发

生脆性断裂^[20,21]。为了克服 PZT 的这一缺陷和提高发电效率,研究者需要研制出柔韧性能更好的压电材料。

表 1-2 各种供能形式的比较^[15]

电源类型	优点	缺点	微系统兼容性
太阳能电池	无运动部件	依赖天气条件	兼容性好
	工作可靠	(光照)	
	技术成熟	光电转换效率低	
温差发电	无运动部件	能量转换效率低 但温差小	兼容性好
	工作可靠		
	能量耐久		
静电转换电源	与微工艺兼容性好	有运动部件	兼容性好
		需要电压源 具有较大阻尼效应	
电磁转换电源	不需电压源	有运动部件	兼容性差
		体积大 存在电磁干扰	
压电转换电源	结构简单	有运动部件	兼容性好
	能量密度高		
	易于微型化		

另一种常用的压电材料为聚偏氟乙烯(PVDF)。PVDF 是一种压电聚合体,相比于 PZT,具有更好柔韧性。Lee 等人^[22]研究表明 PVDF 更适合应用于交变载荷的场合。由于 PVDF 的柔韧性性能更好,其使用寿命更长,俘获的能量将更多。Mohammadi 等人^[23]研究了一种压电光纤混合体,它由不同直径的压电光纤和环氧树脂构成。对由 40% 的压电光纤和 60% 的环氧树脂构成的矩形梁进行了实验研究,矩形梁的结构尺寸为 34 mm × 11 mm × 5.85 mm。当一个质量为 33.5 g,直径为 20 mm 的钢球,从 10 cm 的高度撞击矩形梁,可得最大输出电压为 350 V,最大功率为 120 mW。在此基础上,对输出电压与矩形梁结构尺寸关系进行了研究,研究结果表明,矩形梁越厚,承受变形能力越大;压电光纤的直径越小,压电系数越大,介电常数越小,发电系统的输出功率越大,能量转化效率越高。Churchill 等人^[24]进行了类似的研究,研究结果表明当结构尺寸为 130 mm × 38 mm × 0.38 mm 的样本,在振动频率为 180 Hz 的振源激励下能采集 7.5 mW 的能量,产生的能量能够满足微电子产品的供能需求。由上述可知,柔韧性好的压电材料能够承受更大的应变,在振动环境下能俘获更多的电能。因此,柔韧性好的压电材料在发电装置的应用中备受青睐。

1.3.2 压电俘能器的工作模式

压电俘能器在压电系统中有多种工作模式,如 d_{31} 、 d_{33} 和 d_{51} 等。通过有效的选择压电俘能器的工作模式,可以有效地提高压电发电效率,其中常用的两种工作模式为: d_{31} 模式和 d_{33} 模式^[25]。 d_{31} 模式为作用力与极化方向垂直, d_{33} 模式为作用力的方向与极化方向相同^[13],如图 1-3 所示。一般地, d_{31} 是最常用的转换模式,但 d_{31} 模式的耦合系数比 d_{33} 模式小。Baker 等人^[26]通过对三种不同的压电材料研究表明, d_{33} 模式下的耦合系数要高于 d_{31} 模式的耦合系数。将一个等体积的 d_{33} 模式下的压电叠堆与 d_{31} 模式下压电悬臂梁进行了对比实验,结果表明叠堆结构振动性能更好且耦合系数更高,但是在同样的应力作用下,压电悬臂梁产生的能量比压电叠堆产生的能量多两个数量级,其主要原因是由于压电叠堆的机械刚度大,从而使压电单元产生的形变小。Roundy^[17]给出了相同的结论,同时还指出,相比于 d_{33} 模式, d_{31} 模式下的压电发电系统的谐振频率更低,这样使得 d_{31} 模式下的压电发电系统更容易在低频的自然环境下产生谐振,从而俘获更多的能量。

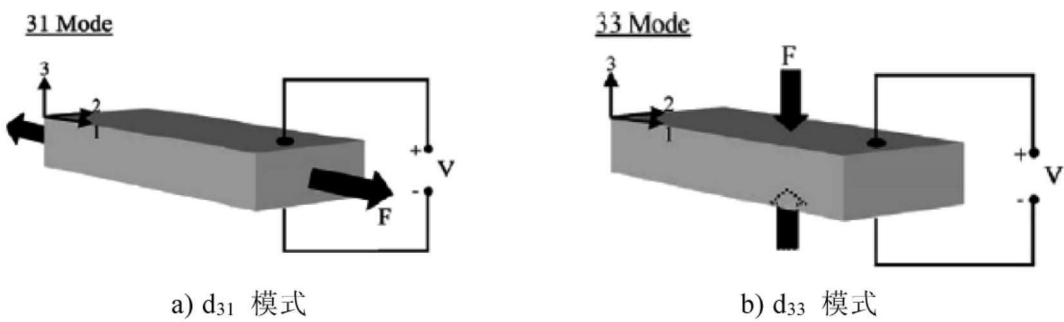


图 1-3 压电材料的两种工作模式^[13]

Yang 等人^[27]对不同的压电俘能器工作模式进行了数值分析研究。研究表明,工作在 d_{33} 模式下的压电盘的输出功率与机电耦合系数和介电常数成正比,压电俘能器的机电耦合系数越高,俘获的能量越多及发电效率越高。同时给出了当激振力的频率接近于发电系统的谐振频率时,输出的功率显著增加的结论。Richards 等人^[28]做了相似的研究,建立了压电俘能器的机电耦合系数、品质因数 Q 和转换效率之间的数学模型。研究表明,在一个振荡系统中阻尼越大,以热能形式流失的能量越大;机械品质因数正好与阻尼作用相反,品质因数越高,其以热能流失的能量越少,发电系统的转换效率就越高。同时还指出,若要提高发电效率,发电系统需要适中的机电耦合系数和大的品质因数。因此,为了提高发电系统的发电能力,系统的品质因数对压电俘能器来说是一个非常重要的设计参数。