

基于压电和电磁效应的 宽频带振动能量采集器的研究

王红艳 著

非外借

 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

基于压电和电磁效应的 宽频带振动能量采集器的研究

王红艳 著

 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内容简介

本书是对作者在压电和电磁式振动能量采集方面研究成果的总结。全书共9章,第1章主要介绍了压电和电磁技术在国内外的研究现状,第2章至第9章分别以分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器、复合梁压电式振动能量采集器、两自由度压电电磁复合式振动能量采集器、非线性两自由度压电式振动能量采集器、双质量电磁摆非线性振动能量采集器、直角梁压电式振动能量采集器、圆盘形压电式振动能量采集器为研究对象,研究了电极配置、结构复合、单一和多发原理复合能量采集、磁作用力、内共振振动特性、激励方向、阻抗匹配等对振动能量采集器谐振频率和输出功率的影响,为基于压电和电磁效应的振动能量采集器的宽频和拓频研究提供了理论和实验依据。

本书可作为从事压电和电磁式振动能量采集技术研究的专业技术人员和科研人员的参考资料,也可作为高校教师、研究生、高年级本科生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

基于压电和电磁效应的宽频带振动能量采集器的研究/
王红艳著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2018. 6
ISBN 978-7-5661-2028-1

I. ①基… II. ①王… III. ①机械振动-研究
IV. ①TH113.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第160110号

选题策划 刘凯元
责任编辑 于险波 马毓聪
封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区南通大街145号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 北京中石油彩色印刷有限责任公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 10
字 数 254千字
版 次 2018年6月第1版
印 次 2018年6月第1次印刷
定 价 39.80元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

近些年涌现出了大量的无线传感器和便携式电子装置,这些微型电子产品给人们的生活带来了极大的便利,但为其提供能源的电池却因体积大、使用寿命短、更换费用高等缺点而逐渐不能满足使用要求,寻找替代能源就成了亟待解决的问题。振动是环境中最普遍存在的能量,将振动能转换为电能的研究已引起广泛的关注。在周围环境中,绝大多数振源的频率是随机变化的,只有在振源频率接近或等于振动能量采集器的固有频率时,振动能量采集器才能高效地输出电能,当振源频率远离振动能量采集器的固有频率时,振动能量采集器的输出功率将急剧降低。因此,在振动能量采集研究中,如何拓宽振动能量采集器的工作频带、提高振动能量采集器的输出功率一直是研究人员重点关注的问题。

本书本着宽频思想,对不同类型的宽频压电和电磁式振动能量采集器进行了多模态发电性能研究,分别以分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器、复合梁压电式振动能量采集器、两自由度压电电磁复合式振动能量采集器、非线性两自由度压电式振动能量采集器、双质量电磁摆非线性振动能量采集器、直角梁压电式振动能量采集器、圆盘形压电式振动能量采集器为研究对象,研究了电极配置、结构复合能量采集、单一和多发电原理复合能量采集、磁作用力、内共振振动特性、激励方向、阻抗匹配等对振动能量采集器谐振频率和输出功率的影响,为基于压电和电磁效应的振动能量采集器的宽频和拓频研究提供了理论和实验依据。

本书在撰写过程中,得到了哈尔滨工业大学的谢涛教授和单小彪副教授的大力帮助,在此表示感谢。

著 者

2017年12月于齐齐哈尔大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 振动能 - 电能转换原理	1
1.2 压电式振动能量采集器的研究现状	3
1.3 电磁式振动能量采集器的研究现状	18
1.4 压电电磁复合式振动能量采集器的研究现状	20
1.5 当前研究存在的主要问题	22
1.6 本书的主要研究内容	23
第 2 章 分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器发电性能理论建模及实验研究	25
2.1 分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器发电性能数学建模	25
2.2 分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器等效电路建模	32
2.3 分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器有限元建模	34
2.4 分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器等效电路模型理论验证	35
2.5 使用有限元法确定分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器等效电路参数	39
2.6 与标准整流电路相连的分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器发电性能评估	43
2.7 分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器多模态俘能实验	46
2.8 电极配置对悬臂梁压电式振动能量采集器发电能力的影响案例分析	53
2.9 本章结论	62
第 3 章 复合梁压电式振动能量采集器发电性能数学建模及实验研究	63
3.1 复合梁压电式振动能量采集器发电性能数学建模	63
3.2 复合梁压电式振动能量采集器有限元仿真分析	73
3.3 复合梁压电式振动能量采集器发电性能实验测试	77
3.4 双悬臂梁对称配置的复合梁压电式振动能量采集器发电性能数学建模	81
3.5 本章结论	82
第 4 章 两自由度压电电磁复合式振动能量采集器发电性能数学建模及实验研究	84
4.1 两自由度压电电磁复合式振动能量采集器发电性能数学建模	84
4.2 两自由度压电电磁复合式振动能量采集器理论模型的实验验证	89
4.3 机电耦合系数对系统发电性能的影响	95
4.4 本章结论	97
第 5 章 基于磁力作用的非线性两自由度压电式振动能量采集器发电性能数学建模及实验研究	99
5.1 线性和非线性两自由度压电式振动能量采集器发电性能数学建模	99
5.2 线性和非线性两自由度压电式振动能量采集器发电性能数值分析	102
5.3 双稳态两自由度压电式振动能量采集器发电性能数值分析和实验研究	106
5.4 本章结论	114

第 6 章 双质量电磁摆非线性振动能量采集器发电性能研究	116
6.1 双质量电磁摆非线性振动能量采集器发电性能数学建模	116
6.2 系统动态性能数值分析	120
6.3 系统参数对双质量电磁摆非线性振动能量采集器输出功率的影响	122
6.4 本章结论	125
第 7 章 谐振梁连接方式对压电式振动能量采集器发电性能的影响	127
7.1 压电式振动能量采集器结构	127
7.2 有限元模型建立和振型分析	128
7.3 发电性能分析	129
7.4 本章结论	131
第 8 章 直角梁压电式振动能量采集器多方向能量收集	132
8.1 直角梁压电式振动能量采集器结构	132
8.2 直角梁压电式振动能量采集器有限元模型建立	133
8.3 系统在不同激励条件下的功率输出	134
8.4 金属梁结构参数对系统发电性能的影响	136
8.5 本章结论	137
第 9 章 圆盘形压电式振动能量采集器等效电路建模及复阻抗匹配分析	138
9.1 圆盘形压电式振动能量采集器结构及其电学等效模型	138
9.2 圆盘形压电式振动能量采集器有限元模型及内阻抗分析	139
9.3 圆盘形压电式振动能量采集器功率分析	141
9.4 本章结论	142
参考文献	143

第1章 绪 论

随着集成电路的发展,电子设备的体积越来越小,呈现出微型化的发展趋势,而低能耗设计技术的发展又使得这些微型电子设备工作所消耗的功率越来越低,毫瓦级甚至微瓦级的电能就能使其正常工作。如何实现为这些微型电子设备供能的研究得到了国内外学者广泛关注。目前,微电子设备多使用化学电池供能。化学电池因其电量稳定、易满足电子产品能量需求等优点而被广泛使用。然而,化学电池存在的使用寿命有限、更换费用高以及难以微型化等问题限制了其发展。对于迅速发展的微电子设备来说,替代能源的研究已成为当务之急。

机械振动能是一种环境中普遍存在的能源,收集环境中的振动能并将其转换为电能的研究已引起人们的广泛关注。振动能-电能的转换方式主要有3种,即静电式、压电式和电磁式。与静电式振动能量采集器相比,压电式和电磁式振动能量采集器均不需要外加引导电源,得到的关注更多。本书主要以压电式振动能量采集器和电磁式振动能量采集器为研究对象,对宽频带压电式和电磁式振动能量采集器进行发电性能研究。

本章首先阐述3种振动能-电能转换原理,然后重点介绍压电式和电磁式振动能量采集器的研究现状,总结当前研究中存在的不足,最后提出本书的研究内容。

1.1 振动能-电能转换原理

1.1.1 静电式振动能-电能转换原理

静电式振动能量采集器由一个可变电容器和具有永久电场的驻极体构成。静电式振动能量采集器的工作原理是:外界环境的振动引起可变电容器的两个极板产生相对运动,极板电容发生改变,可变电容器的两个极板上产生的电荷通过驻极体在两极板之间发生转移产生电流,环境振动能由此转变成电能。图1-1为静电式振动能量采集器的3种典型结构。Roundy等的研究表明,在面内改变叉指交叠面积产生的能量最少,在面外改变极板距离产生的能量次之,在面内改变叉指距离产生的能量最多。需要特别指出的是,静电式振动能量采集器需要外加激励电压源或电荷源。

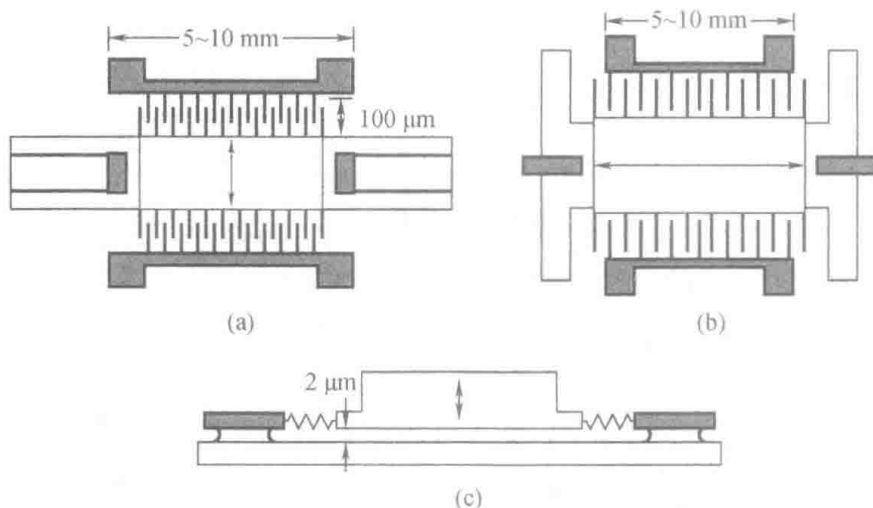


图 1-1 静电式振动能量采集器的 3 种典型结构
(a) 面内交叠式; (b) 面内变距离式; (c) 面外变距离式

1.1.2 压电式振动能 - 电能转换原理

压电式振动能量采集器利用压电效应将机械能转换为电能,外界环境振动引起压电体产生机械变形,其内部产生极化现象,在压电晶片的一对电极面上分别出现正电荷和负电荷。与静电式振动能量采集器相比,压电式振动能量采集器具有不需要外加激励源的优点;与电磁式振动能量采集器相比,压电式振动能量采集器具有输出电压高、体积小、功率密度高和易于微型化的优点。因此,近 10 年来,与其他两种振动能量采集器相比,压电式振动能量采集器的研究得到了更多的关注。

1.1.3 电磁式振动能 - 电能转换原理

电磁式振动能量采集器利用电磁感应现象把机械能转换为电能,当磁铁和线圈产生相对运动时,线圈中磁通量发生变化,从而在线圈中产生感应电动势。其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。英国的谢菲尔德大学(The University of Sheffield)的 Williams 和 Yates 建立了把振动能转换为电能的电磁式振动能量采集器的理论模型。该装置由弹簧和振子质量块组成,当振子受振时,质量块和基座产生相对运动,以此驱动电磁传感器产生电能。随后,Williams 等根据这个设计原理制作了器件原型,如图 1-2 所示。使用该装置进行振动发电测试,测试结果表明激振频率为 4.4 kHz 时,输出功率为 0.3 μW。

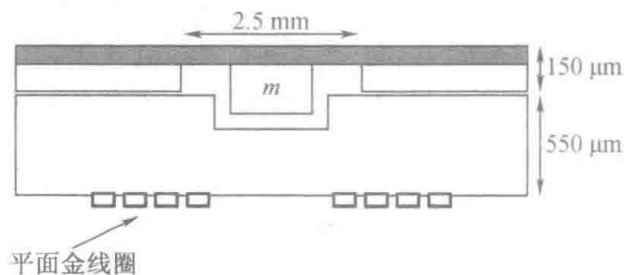


图 1-2 电磁式振动能量采集器器件原型

1.2 压电式振动能量采集器的研究现状

1.2.1 压电材料

压电材料对振动能量采集器的发电性能有着非常重要的影响。目前,在振动能量采集研究中,比较常用的压电材料有锆钛酸铅($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{(1-x)})\text{O}_3$, PZT)、粗纤维复合材料(macro fiber composite, MFC)、快速包装型式压电材料和聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)等。其中, PZT 应用最为广泛,但 PZT 比较脆,不能承受大的变形。此外,对于梁类型的压电式振动能量采集器,粘贴于梁结构表面的 PZT 只能利用较小的压电常数 d_{31} ,其机电耦合系数低于 d_{33} 工作模式下的机电耦合系数。

为了克服 PZT 不能承受大的变形的缺点,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)兰利研究中心(Langley Research Center, LRC)研制了一种柔韧性更好的粗纤维复合材料(MFC)。MFC 由压电纤维和环氧树脂复合而成,并用聚酰亚胺壳体将其包裹起来。MFC 采用了交叉指型电极(IDEs),可以利用压电材料的 d_{33} 机电耦合系数,增强了振动能量采集器的机电转换效率。另外一些研究人员在压电陶瓷体中嵌入了环氧树脂材料,研制出了快速包装型式压电材料(包括 Quick Pack(常规电极配置)和 Quick Pack IDE(交叉指型电极配置))。Sodano 等对 MFC、Quick Pack 和 Quick Pack IDE 的发电能力进行了实验测试和比较研究。研究结果表明, MFC 单位体积的输出功率与 Quick Pack IDE 相近,但低于 Quick Pack。其主要原因是 MFC 和 Quick Pack IDE 均采用了交叉指型电极,交叉指型电极的电容值要小于采用常规电极的电容值,限制了电荷量的累积。因此,尽管交叉指型电极利用了较高的机电耦合系数(d_{33}),但电流的减小还是会引起输出功率的下降。

PVDF 是一种压电聚合物,具有比 PZT 更好的柔韧性,具有更长的使用寿命。Lee 等对 3 种不同电极涂层(Pt 电极涂层、ITO 电极涂层和 PEDOT/PSS 电极涂层)的 PVDF 的疲劳能力进行了实验研究,研究结果表明:使用 Pt 电极涂层的 PVDF 在 33 kHz 的交变载荷下疲劳破坏;使用 ITO 电极涂层的 PVDF 在 213 Hz 的交变载荷下疲劳破坏;使用 PEDOT/PSS 电极涂层的 PVDF 在 1 MHz 的交变载荷下振动 10 h 没有破坏迹象。以上研究表明,使用抗破坏能力强的电极涂层, PVDF 可以在剧烈振动的场合下工作。虽然 PVDF 的压电系数比较低,但由于其具有良好的柔韧性, PVDF 常被用于在风或流动的液体中俘能。

除了上面提到的压电材料外,一些学者还对一些其他类型的压电材料进行了发电性能研究。Elfrink 等研究了氮化铝(AlN)材料的发电能力,发现在谐振频率为 572 Hz、激励加速度为 2g 时,振动能量采集器的最大输出功率可达 60 μW 。Tien 和 Goo 研制了一种多层复合压电材料(由碳/环氧树脂、PZT 和玻璃/环氧树脂在高温下层合而成),这种压电材料柔韧性较好,适合在应变大的场合使用。

1.2.2 压电式振动能量采集器的建模方法

1. 数学建模

(1) 单自由度模型

电磁式振动能量采集器通常可以简化成一个单自由度系统(弹簧 + 质量 + 阻尼), 图 1-3 为通用振动能量采集器物理模型示意图。振子质量块运动方程为

$$m\ddot{z} + (b_e + b_m)\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad (1-1)$$

式中 m ——振子质量;
 y ——激励位移;
 z ——振动能量采集器相对于基座的位移;
 k ——弹簧刚度;
 b_e ——电磁俘能所引起的黏性阻尼;
 b_m ——机械阻尼。

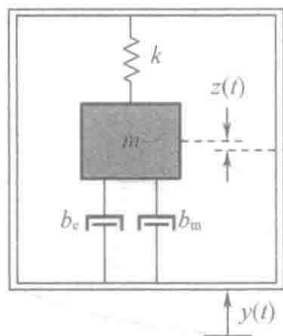


图 1-3 通用振动能量采集器物理模型示意图

一些研究人员将上述单自由度建模方法应用到了压电式振动能量采集器上。然而, 他们忽视了一个问题, 即压电式振动能量采集器的发电原理与电磁式振动能量采集器的发电原理并不相同。电磁式振动能量采集器的机电耦合系数与速度有关, 可以用黏性阻尼表示; 而压电式振动能量采集器的机电耦合系数还受电学量的影响, 不能单纯地用黏性阻尼来表示。

duToit 等建立了 d_{33} 模式压电式振动能量采集器的单自由度模型, 这个模型考虑了电学量与机械量之间的耦合作用, 其机械本构方程和电路本构方程分别为

$$\ddot{w} + 2\zeta_m\omega_n\dot{w} + \omega_n^2w - \omega_n^2d_{33}v = -\ddot{w}_b \quad (1-2)$$

$$R_1C^S\dot{v} + v + m_{\text{eff}}R_1d_{33}\omega_n^2\dot{w} = 0 \quad (1-3)$$

式中 w_b ——单位激励位移;
 w ——振动能量采集器相对于基座的运动位移;
 v ——负载 R_1 两端的电压;
 m_{eff} ——有效质量;
 ζ_m ——机械阻尼比;
 ω_n ——固有频率;

C^S ——压电式振动能量采集器的静态夹持电容。

式(1-2)中, $\omega_n^2 d_{33} v$ 项表示电学量对机械量的反作用。

随后, Erturk 等在对带末端质量块的悬臂梁压电式振动能量采集器的研究中指出, duToit 等建立的单自由度模型没有精确地考虑压电梁和末端质量块的应变分布, 因此, 其对电压和功率的评估并不准确。Erturk 等对单一模态的分布参数模型进行求解, 提出振动能量采集器的机械本构方程的激励加速度项应增加一个校正系数 κ_1 , 即

$$\ddot{w} + 2\zeta_m \omega_n \dot{w} + \omega_n^2 w - \omega_n^2 d_{33} v = -\kappa_1 \ddot{w}_b \quad (1-4)$$

当末端质量块与压电梁的质量比很大时, 校正系数 κ_1 接近或等于 1, 不需要使用校正系数; 当末端质量块与压电梁的质量比不是很大时, 则需要使用校正系数。Erturk 等进行了案例分析, 分析结果表明, 当末端质量块与压电梁的质量比 $M_t/(mL) = 1.33$ (式中, M_t 为末端质量块的质量, m 为压电梁单位长度质量; L 为压电梁长度) 时, 激励加速度的校正系数 $\kappa_1 = 1.0968$ 。

(2) 分布参数模型

单自由度模型只考虑了一阶模态, 而分布参数模型可以考虑多阶模态, 是更准确的建模方法。Erturk 和 Inman 对矩形悬臂梁压电式振动能量采集器的分布参数模型进行了闭合求解, 得出了输出电压的显性表达式。当俘能结构为不规则形状(如变截面梁或压电材料在梁表面不规则分布)时, 很难进行精确的分析求解。在这种情况下, 近似分布参数模型(如 Rayleigh-Ritz 公式)可作为一种替代方法使用。Hagood 等首先引入了 Rayleigh-Ritz 公式对压电传感器进行建模。一些研究人员使用 Rayleigh-Ritz 公式建立了压电式振动能量采集器的机电模型, 即

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K} \mathbf{r} - \mathbf{\Theta} \mathbf{v} = -\ddot{w}_b \left(\int_0^L m \varphi(x) dx + M_t \varphi(L) \right) \quad (1-5)$$

式中 \mathbf{M} ——质量矩阵;

\mathbf{C} ——阻尼矩阵;

\mathbf{K} ——刚度矩阵;

$\mathbf{\Theta}$ ——机电耦合矩阵;

\mathbf{r} ——与时间相关的位移矢量;

m ——压电梁单位长度质量;

M_t ——末端质量块的质量;

w_b ——单位激励位移;

φ ——模态型函数;

\mathbf{v} ——与时间相关的电压矢量(多个压电片和多对电极)。

当只考虑单个压电片(一对电极)时, \mathbf{v} 由矢量简化成标量, $\mathbf{\Theta}$ 由矩阵简化为矢量。

一些研究人员也采用其他的方法对压电式振动能量采集器进行了分析求解。Mofid 等根据 Hamilton 原理、弹性体应力-应变关系以及 Kirchhoff 板假设建立了板状压电式振动能量采集器的机电有限元模型。蒋树农等根据压电方程和材料的应力-应变关系得到了 4 种不同结构(悬臂梁、附加中心质量的环、厚度剪切圆柱壳、带悬挂质量的 Rosen 型)的压电式

振动能量采集器工作效能的解析解,采用数值计算方法分析了压电式振动能量采集器的几何和物理参数对工作效能的影响,其所建立的模型对压电式振动能量采集结构的优化设计具有指导意义。

2. 等效电路建模

进行数学建模时,常将振动能量采集器的外接电路简化成一个线性负载电阻,这主要是因为一旦外接电路包含非线性元件,振动能量采集器结构与非线性电路耦合的数学模型就很难建立。等效电路模型可以处理这种包含非线性元件的外接电路问题。等效电路法是将机械振动系统的力、位移和力阻抗分别类比为电学系统的电压、电荷和电阻抗,从而把机械振动、电振荡以及机电转换过程用机电类比的原理形象地组合在一个等效图中。Tilmans 提出了分布参数机电传感器的通用等效电路模型,电路如图 1-4 所示。图 1-4 中,质量被类比为电感,阻尼被类比为电阻,刚度的倒数被类比为电容,机电耦合系数被类比为理想变压器。

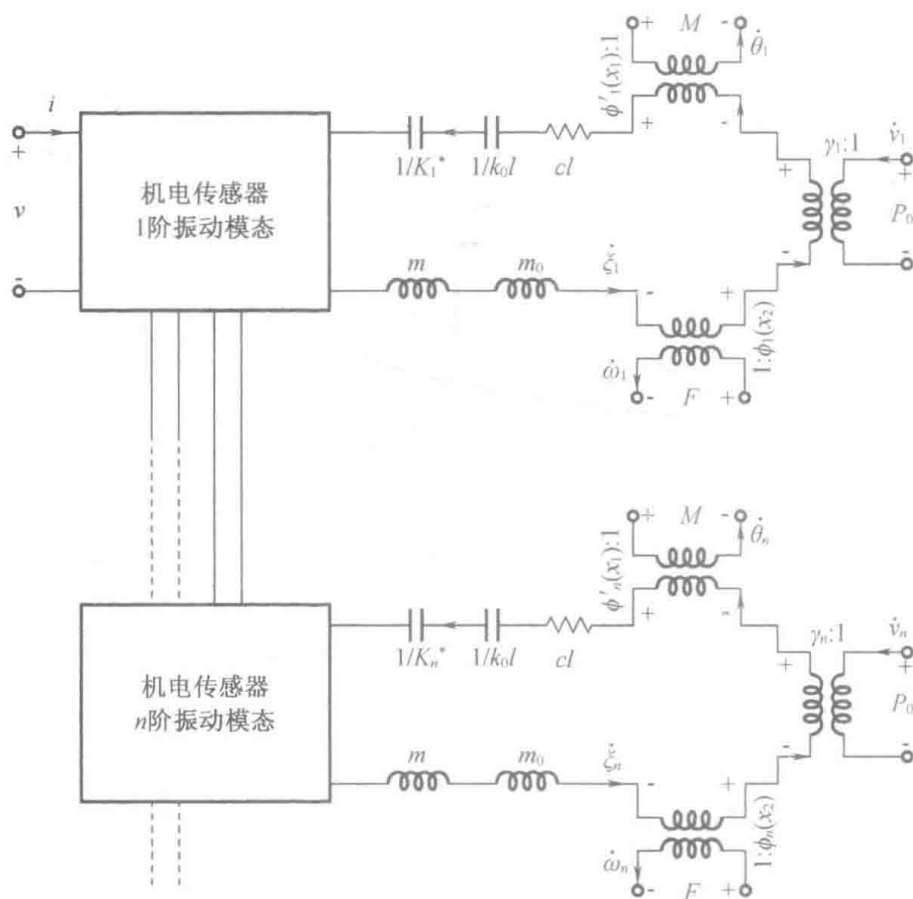


图 1-4 分布参数机电传感器的通用等效电路

当压电元件作为执行器被使用时,机械端口短路(外力为零),只有一个电端口,因此,工作在执行器模式下的压电传感器被称为单端口谐振器,其相应的等效电路(如图 1-5(a)所示)被称为单端口网络。将图 1-5(a)中变压器右侧的电学量变换到左侧,可得到如图 1-5(b)所示的等效简化电路。从图 1-5(b)中可以看出,等效变换后的电路实际上是一个 RLC 电路网络,每个 RLC 支路代表传感器的一个振动模式。图 1-5(b)虚线框中的电路为只考虑一阶模式时的等效电路图。Tilmans 指出,对于工作在低频条件下的等效电路,

为了建立更准确的模型,静态夹持电容 C^s 应该用阻尼电容 C^d 代替, C^d 包含了来自高阶模态电学支路的动态电容。

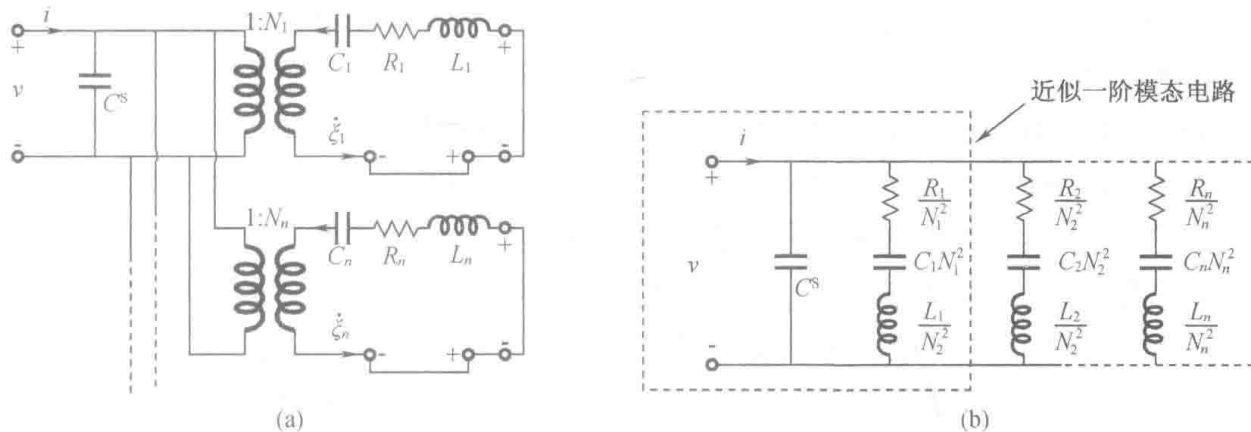


图 1-5 压电传感器在执行器模式下工作时的等效电路和等效简化电路

(a) 等效电路; (b) 等效简化电路

图 1-5 中的等效电路有助于理解压电传感器的导纳和谐振现象。等效电路的参数可以使用理论模型或有限元模型获取。在压电式振动能量采集研究中,一些研究人员建立了常规悬臂梁压电式振动能量采集器的等效电路模型,并使用 Rayleigh-Ritz 公式获得了单一模态和多模态振动时的等效电路模型参数。还有一些研究人员使用有限元法获得了常规悬臂梁压电式振动能量采集器多模态振动时的等效电路模型参数。

1.2.3 压电式振动能量采集器的结构及电极配置方式

1. 压电式振动能量采集器的结构

压电式振动能量采集器最典型的结构是悬臂梁结构,如图 1-6 所示。由于悬臂梁结构具有固有频率较低、容易达到谐振状态的特点,很多研究人员对悬臂梁压电式振动能量采集器进行了研究。Anderson 等研究了带末端质量块的矩形悬臂梁压电双晶振动能量采集器的物理和几何参数对系统性能的影响,研究结果表明,与压电双晶梁的长度和宽度相比,末端质量块质量的变化对俘能性能影响更大。Kim 等研究了考虑转动惯量的末端质量块对俘能性能的影响,研究结果表明,末端质量块几何形状的微小改变就会引起系统性能的变化。尽管末端质量块可以降低谐振频率并增大输出功率,但在微结构中使用过大的末端质量块会引起系统不兼容以及结构断裂问题。李艳宁等建立了矩形悬臂梁压电式振动能量采集器的微能量功率表达式,分析了压电梁的长度和末端质量块对谐振频率和输出功率的影响,研究结果表明,通过适当增加末端质量块质量和缩短压电梁长度,振动能量采集器可以实现低频谐振,并获得较大的输出功率。

矩形悬臂梁压电式振动能量采集器沿梁长度方向的应变分布是不均匀的。为了得到均匀的应变分布,Li 等提出了一种带曲线 L 形质量块的悬臂梁压电式振动能量采集器(如图 1-7(a)所示)。曲线 L 形质量块的结构在一定程度上均匀化了悬臂梁上的应变分布,增大了功率密度。管青春等提出了一种带 H 形质量块的矩形悬臂梁压电式振动能量采集器(如图 1-7(b)所示)。H 形质量块由两块分离的金属质量块构成,可以提供较大的转动惯

量。通过合理选择两个质量块的质量比,压电梁的纵向应力分布趋向均匀。Dietl 等对变宽度的悬臂梁压电式振动能量采集器(如图 1-7(c)所示)进行了形状优化设计,通过对矩形梁、常规梯形梁和倒梯形梁进行应变分析,发现与矩形梁和倒梯形梁相比,常规梯形梁应变分布更均匀,但靠近夹持端的应变最小。倒梯形梁在夹持端产生的应变最大,但由于梁宽最小而不能俘获更多的能量,因此,形状优化设计后的压电梁的输出功率并没有得到本质上的提高。Paquin 等提出了一种厚度呈梯形变化的悬臂梁压电式振动能量采集器(如图 1-7(d)所示),研究了倾角变化对俘能性能的影响。研究表明,倾角为 0.94° 时,振动能量采集器的输出功率最大,其输出功率与常规等厚度悬臂梁压电式振动能量采集器的输出功率相比增加了 3.6 倍。邓冠前等得到了矩形、梯形和三角形压电式振动能量采集器的应变分布表达式,并对这 3 种形状的压电式振动能量采集器进行了有限元分析和实验验证。实验结果表明,在相同条件下,三角形压电式振动能量采集器明显改善了应变分布,产生的电压最大,梯形压电式振动能量采集器次之,而矩形压电式振动能量采集器产生的电压最小。徐佳文等提出了一种直角梁压电式振动能量采集器,在主梁(压电梁)上附加了一个带末端质量块的附属梁,附属梁产生的扭矩可以使主梁上的应变分布更均匀。实验结果表明,直角梁压电式振动能量采集器的输出功率是常规悬臂梁压电式振动能量采集器的输出功率的两倍。

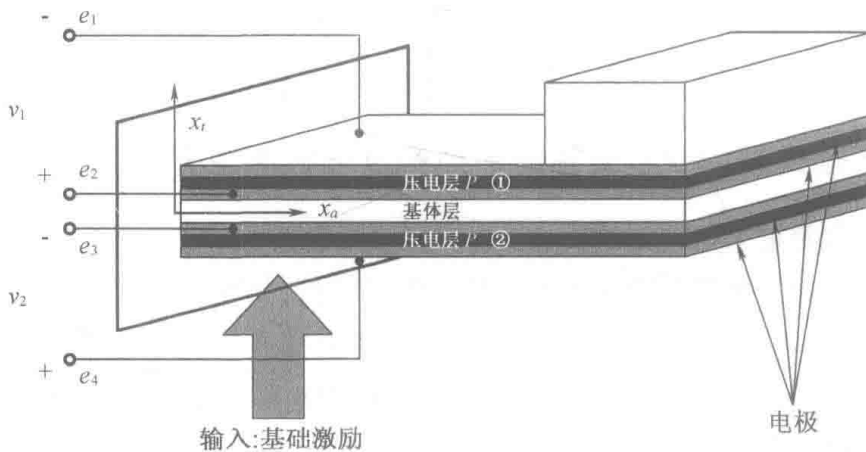


图 1-6 矩形悬臂梁压电式振动能量采集器

为了从低频振动环境中俘能,胡洪平等提出了一种螺旋状的压电式振动能量采集器。这种压电式振动能量采集结构有弯曲和伸缩两种耦合振动模态,具有结构尺寸小、稳定性好、结构内部最大应力幅值小、使用寿命长等优点。Karami 等提出了一种 Z 字形设计的压电式振动能量采集器,通过适当连接每个梁上的电极面可以避免电荷抵消现象的产生,增大输出功率。Massaro 等提出了一种新颖的环形微机电电压电式振动能量采集器,在常规的平面悬臂梁系统上附加了扭转模态,提高了能量采集效率。

针对能量采集场合的不同,一些研究人员也对其他结构形式的压电式振动能量采集器进行了研究。Kim 等研制了一种 cymbal 形压电式振动能量采集器,两个碟形金属帽被粘贴在圆盘形压电片的上下表面,施加轴向力时,碟形金属帽可以使压电材料所受应变更均匀。袁江波等对 cymbal 形压电式振动能量采集器进行了开槽结构优化分析,分析结果表明,与

边缘槽、锥槽、径向槽相比,环形槽具有更高的发电能力。党永等对工作在非谐振频率下的压电叠堆发电特性进行了研究,研究表明,压电叠堆的输出电压和功率与压电系数、压电片个数、压电片厚度、激振力以及激振频率正相关,与电极面积和介电常数负相关。刘祥建等设计了一种能采集多方向振动能的 Rainbow 形压电式振动能量采集器,通过建立的数学模型分析了材料和尺寸参数对系统发电性能的影响,分析结果表明,随着金属基片长度、压电薄膜宽度的增加,系统输出电能增多;随着压电薄膜长度、厚度的增加,系统输出电能先增多后减少;振动能量采集器内侧压电薄膜输出电能高于弧形外侧压电薄膜输出电能。李征等提出了一种基于流固耦合作用的压电式液压振动能量采集结构,利用流体与压电体的耦合作用实现运动的转换与能量传递,通过多压电式振动能量采集器的联合作业可实现低频、大振幅振动能量的回收。

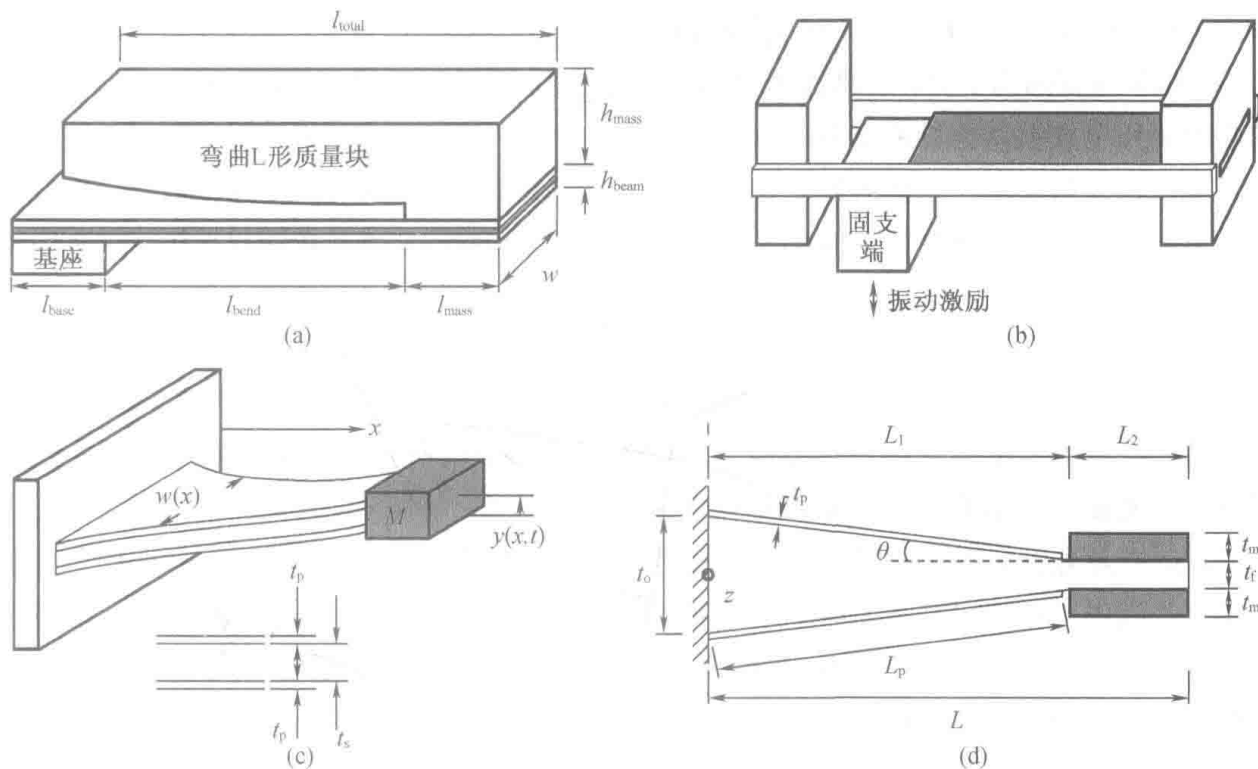


图 1-7 不同结构形式的悬臂梁压电式振动能量采集器

- (a)带曲线 L 形质量块的悬臂梁压电式振动能量采集器;(b)带 H 形质量块的矩形悬臂梁压电式振动能量采集器;
(c)变宽度的悬臂梁压电式振动能量采集器;(d)厚度呈梯形变化的悬臂梁压电式振动能量采集器

2. 压电式振动能量采集器的电极配置方式

振动能量采集结构确定后,采用适当的电极配置方式可以提高压电式振动能量采集器输出电量。

Friswell 等研究了电极形状对发电性能的影响,建立了变电极宽度压电式振动能量采集器的有限元模型,并对 4 种电极形状不同(方形全长度电极、三角形电极、平滑分段电极和方形分段电极)的振动能量采集器进行了理论研究。研究表明,电极形状会影响机电耦合系数。与其他 3 种形状的电极相比,方形分段电极的输出功率最大。

Stewart 等研究了压电材料在悬臂梁上的有效长度对输出功率的影响。研究表明,压电材料内的电荷再分布会导致 25% 的势能损耗,压电材料的有效长度为悬臂梁长度的

2/3 时,输出功率达到最大,附加额外的压电材料会降低振动能量采集器的输出功率。

Kim 等研究了电极配置方式对夹持条件下的圆盘形压电单晶片发电性能的影响,建立了全电极配置单晶片和分区电极配置单晶片的理论模型,并进行了实验验证。研究表明,根据压电材料所受应变符号的不同,通过对电极进行分区极化(相邻两个区域的极化方向相反)可提高振动能量采集器的发电能力。理论分析得到的夹持条件下的圆盘形压电单晶片的最优分区位置为圆盘半径的 0.707 倍,实验得到的最优分区位置为圆盘半径的 0.75 倍。

Erturk 等研究了悬臂梁压电式振动能量采集器的应变节点和电极配置对振动能量采集器发电性能的影响。研究表明,悬臂梁压电式振动能量采集器在二阶及二阶以上振型时,均存在应变节点,应变节点两侧的应变符号相反,这会导致压电梁电极表面聚集符号相反的电荷。在这种情况下,连续电极配置方式会导致正负电荷相互抵消现象的发生,减少输出电量。采用分段电极俘能法可以避免振动能量采集器在不同振动模态时发生电荷抵消现象。

Erturk 等仅指出了分段电极配置可以避免发生电荷抵消现象,并没有对分段电极配置的悬臂梁压电式振动能量采集器的输出功率进行评估。本书第 2 章将建立分段电极配置的悬臂梁压电式振动能量采集器发电性能数学模型和多模态振动等效电路模型,对与标准整流电路相连的分段电极悬臂梁压电式振动能量采集器的输出功率进行评估。

1.2.4 压电式振动能量采集器外接电路设计

虽然当前的微型无线电子器件的能耗很低,但仍然需要提高振动能量采集器的发电能力以满足微型无线电子器件的供能需求。电子工程领域的研究人员主要通过对外接电路进行设计来提高振动能量采集器的发电能力。

Liao 等对悬臂梁压电式振动能量采集器的最优负载阻抗进行了研究,负载电路与振动能量采集器的连接方式如图 1-8(a)所示。研究表明,每个激振频率都存在一个对应的最优负载阻抗值,其使振动能量采集器的输出功率达到最大,且在谐振区的最优负载阻抗值与以往研究的匹配阻抗值($1/(j\omega C^S)$)存在很大区别,最优负载阻抗值并不随着激振频率 ω 的增加而减小,而是在短路谐振频率处达到最小,在开路谐振频率处达到最大。在此研究的基础上,Liao 等又对电容与电阻串联电路的最优电学参数进行了研究,负载电路与振动能量采集器的连接方式如图 1-8(b)所示。研究表明:对于较小的机电耦合系数,两个分岔频率之间的最优电容值为负值,外接电路中附加电容不会增大系统输出功率;对于较大的机电耦合系数,两个分岔频率之间的最优电容值为正值,两个分岔频率之间的所有频率点都可以得到最大输出功率,附加电容可以拓宽系统的频带。

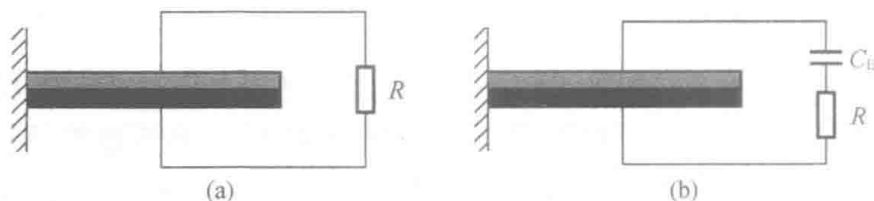


图 1-8 两种负载电路与振动能量采集器的连接方式

(a) 电阻电路; (b) 电容与电阻串联电路

Renno 等对纯负载电阻电路以及电阻和电感并联电路进行了研究,压电叠堆及其外接电路如图 1-9 所示。研究表明,振动能量采集器输出功率并不随着机电耦合系数的增加而增大,而是存在最优机电耦合系数使振动能量采集器的输出功率达到最大。在谐振区外,与最优外接电感并联的负载电阻上产生的最大功率与激振频率无关。与纯负载电阻电路相比,电阻和电感并联的外接电路可以改善振动能量采集器的发电能力。

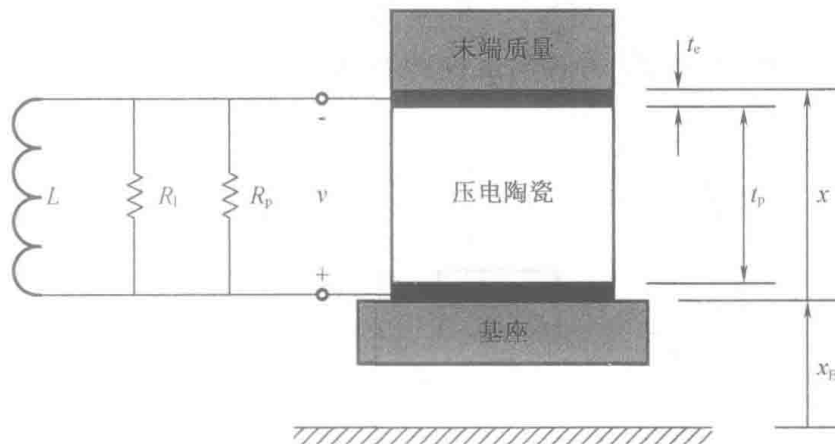


图 1-9 压电叠堆及其外接电路

Brufau-Penella 等对压电式振动能量采集器的复阻抗匹配方法进行了实验研究。他们使用压电传感器 QP40W 进行阻抗测试,发现一阶谐振时的内电抗非常大,需要匹配几十甚至几百亨的电感,然而实际上根本无法匹配如此大的电感元件,因此,低频谐振的压电式振动能量采集器采用复阻抗匹配方法不可行。而随着激振频率的增加,内电抗开始逐渐变小,测试结果表明,当激振频率等于振动能量采集器的第四阶谐振频率时,与纯负载电阻匹配电路相比,采用复阻抗匹配方法的压电式振动能量采集器输出功率提高了 20%。

上述最优阻抗研究都将外接电路简化成与压电式振动能量采集器直接相连的线性负载,实际上,振动能量采集器的外接电路还包含具有整流作用的非线性元件,图 1-10(a)和图 1-10(b)所示分别为输出端连接储能元件(电池)和耗能元件(负载电阻)的标准整流电路。Shu 等给出了标准整流电路的稳态求解。Wickenheiser 等研究了通过标准整流电路为电容充电的瞬态过程。

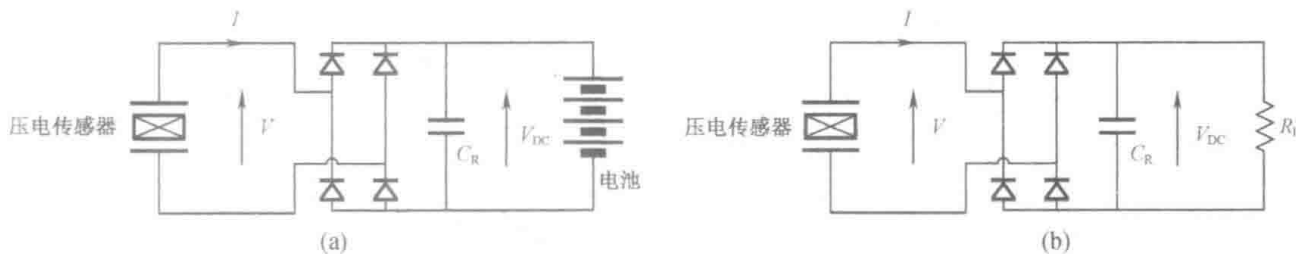


图 1-10 压电式振动能量采集器的标准整流电路

(a) 输出端连接储能元件; (b) 输出端连接耗能元件

Ottman 等提出了一种降压(buck)型 DC-DC 转换电路,研究了控制占空比的自适应算法,这种算法通过主动改变降压型转换器的占空比来增大输出电流,使其更易于为电池充