



装备科技译著出版基金

WILEY



[美] Alper Erturk Daniel J. Inman
舒海生 赵丹 史肖娜

著
译

压电能量收集

Piezoelectric Energy Harvesting

Piezoelectric
Generator



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

压电能量收集

Piezoelectric Energy Harvesting

[美] Alper Erturk Daniel J. Inman 著

舒海生 赵丹 史肖娜 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2014-133 号

图书在版编目 (CIP) 数据

压电能量收集 / (美) 厄尔图克 (Erturk, A.), (美) 英曼 (Inman, D. J.) 著; 舒海生, 赵丹, 史肖娜译. —北京: 国防工业出版社, 2015.11

书名原文: PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING

ISBN 978-7-118-10134-8

I. ①压… II. ①厄… ②英… ③舒… ④赵… ⑤史…
III. ①压电效应—能量转换—研究 IV. ①TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 258787 号

Copyright ©2011 by John Wiley & Sons, Ltd. All rights reserved.

Piezoelectric Energy Harvesting by ALPER ERTURK and DANIEL J. INMAN.

ISBN 978-0-470-68254-8

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with National Defense Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版。

版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 20¼ 字数 416 千字

2015 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 99.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

振动是广泛存在着的，我分析了不同情况下的振动问题，对其节点位置和幅值水平等特性进行了大量实验研究，取得了与理论非常吻合的结果。

——丹尼尔·伯努利（给莱昂哈德·欧拉的信）^①

我们已经在这些晶体中找到了激发极化电流的新方法，即，使它们沿着半面轴方向承受变化着的压力。

——居里兄弟（源自其公布新发现的论文）^②

^① 铁摩辛柯，1953, *History of Strength of Materials (with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures)*, McGraw-Hill, New York.

^② Cady W.G., 1946, *Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals*, McGraw-Hill, New York.

过去的 10 年间，作为一项面向无线应用的使能技术，能量收集应运而生，这项技术可以收集外界环境中废弃或无用的能量，为低功率电子元器件提供运行所需的电能。其目标是提供远程电源和（或）为一些储能设备充电，如电池组和电容器。该技术的应用一方面可以减少由于电池更换产生的化学废弃物，因而具有生态保护意义；另一方面还可以降低维护和保养成本，因而同时也具备了潜在的经济效益。不仅如此，该技术还可以为无线监测方面的应用如结构健康监测系统提供能量，所以对于增强安全性也是十分重要的。正是被这些潜在的应用前景所激励，再加上当今低功率电子元件和无线传感技术的发展需要，能量收集领域已经受到了学术界和工业界的广泛关注，学术论文大量出现，新产品不断问世。在这一领域，研究最多的是利用压电效应将环境中的振动能转化为可用电能，很多现有产品正是基于这一原理工作的。本书的重点也正是各种应用条件下的压电能量收集器的机电耦合建模。

基于振动的能量收集器涵盖了机械、材料和电子等学科。这些学科的研究人员都为能量收集技术做出了贡献。由于所涉及的主题包含了大量不同的研究领域，早期能量收集技术的分析过程和预测模型构造工作大都引入了很多的简化假设。有鉴于此，本书将主要目的定位于提供一种可靠的技术来确保压电能量收集器机电耦合模型的精确性，并帮助人们更好地理解相关现象。能量收集器这一术语在本书中是指在某种特定形式的激励下产生振动的发电装置。因此，本书主要介绍的是不同形式的激励下此类装置的机电耦合响应建模问题，而不去关心储能元件和电子元器件等内容。除此之外，本书也简要介绍了一些压电能量收集电路的相关研究文献。

作为阅读本书的必备条件，我们假定读者已经学习过工学类本科阶段所必须掌握的一些课程，如“振动学”或“结构动力学”课程，并具有一定的常微分和偏微分方程的基础知识。本书中的部分内容可能超出了大多数本科生的必修课程范围，如随机振动、非线性振动以及气弹性振动。不过，我们根据阅读需要列出了一些优秀的参考书和相关文章供读者参考。需要指出的是，在基于压电换能的振动能量收集分析过程中，为建立其模型并研究其特性，上述这些振动和结构动力学内容往往是与电学问题相互耦合在一起的。

从传统的悬臂结构到更为复杂的具有非线性现象的结构，本书给出了基于振动能量收集的多种构型，阐述了其建模过程并进行了测试，分别建立了这些构型的解析和近似解析的分布式参数机电耦合模型，并对其中的几种情况进行了实验验证。此外，还给出了实验室环境中压电能量收集器的实验模态分析的实验指导。

压电能量收集器的机电响应和它产生的电能是完全取决于环境能量特征的。我们主要考虑了外部环境中的简谐型和非简谐型两种激励形式，对移动负载激励、瞬态激励、周期激励，以及气流导致的振动等具体形式进行了讨论。每一章的末尾都有注释说明，其中给出了进一步的讨论并给出了一些文献资料供进一步深入研读。

在能量收集研究和实验过程中，我们受到了各方的大力支持。特别地，书中列出的一些结果引用了一些著作，这些著作有的受到了空军科学研究所局在能量收集研究方面提供的资助（该资助受益于“Les” Lee 博士的规划和鼓励），有的受到了美国国家标准与技术研究所的资助（受益于 Jean-Louis Staudenmann 博士的指导）。我们非常高兴在能量收集研究中能够与多位学者合作，例如与 Carlos De Marqui Jr. 博士（圣保罗大学，圣卡洛斯，巴西）合作研究了气弹性振动条件下的能量收集，与 Didem Ozevin 博士（伊利诺斯大学，芝加哥）以及 MISTRAS 集团有限公司产品与系统部合作研究了桥梁的能量收集与桥梁应变。另外，我们还要衷心感谢 Earl Dowell 教授、Brian Mann 博士、Sam Stanton 先生（杜克大学）、Ephrahim Garcia 教授（康奈尔大学）、Yi-Chung Shu 教授（台湾国立大学）、Niell Elvin 教授（纽约城市大学）、Dane Quinn 教授（阿肯大学）、Mohammed Daqaq 博士（克莱姆森大学）、Steve Burrow 博士、David 博士、Barton（布里斯托大学，英国）、Sondipon Adhikari 教授、Michael Friswell 教授（斯旺塞大学，英国）、Andres Arrieta 博士（TU Darmstadt，德国）、以及 Ho-Yong Lee 博士（Ceracomp 有限责任公司，韩国）。弗吉尼亚理工学院智能材料系统和结构中心的 Shashank Priya 教授、Steve Anton 先生、Na Kong 女士、Justin Farmer 先生和其他同事以及研究生们也共同提供了很多有益的帮助，为我们创造了合作研讨的良好学术氛围，没有他们，就不可能完成这项工作。我们还要感谢 Neville Hankins 先生的文字编辑工作和 Shalini Sharma 女士的排版工作。最后，我们要感谢能量收集学会，它为我们的交流和讨论提供了各类研讨会，这十分有利于启发我们的智力和创新精神。

A. Erturk

亚特兰大，佐治亚

D. J. Inman

布莱克斯堡，弗吉尼亚

Alper Erturk 博士：佐治亚理工学院机械工程学院（George W. Woodruff）助理教授。从 2008 年起，他发表了 50 余篇论文，这些论文主要讨论了振动能量收集技术中的压电材料建模与应用问题。他还是美国机械工程师学会、美国航空航天学会、实验力学学会和光学工程国际学会的会员。2009 年在弗吉尼亚理工学院获得工程力学博士学位。

Daniel J. Inman 教授：弗吉尼亚理工学院智能材料系统与结构中心主任，机械工程系教授，布里斯托大学机械工程系智能材料与结构学院教授。自 1980 年开始，他出版了 8 本著作，发表了 700 余篇论文，涉及的主题包括振动和结构健康监测等，指导毕业了 50 名博士生和 75 名硕士生。他是美国力学学会、美国机械工程师学会、声学与振动国际学会、美国航空航天学会和国家航空学会等机构的会员。1980 年在密歇根州立大学获得机械工程博士学位。

第 1 章 压电能量收集介绍	1
1.1 通过压电转换的振动能量收集	1
1.2 一个压电能量收集系统的例子	3
1.3 压电能量收集器的数学建模	5
1.4 线性压电理论摘要	8
1.5 全书总览	10
参考文献	12
第 2 章 悬臂梁结构的基础激励问题和集中参数型机电模型的修正	19
2.1 悬臂薄梁横向振动中的基础激励问题	19
2.1.1 一般基础激励下的响应	19
2.1.2 简谐基础激励下的稳态响应	24
2.1.3 基础简谐激励问题的集中参数模型	24
2.1.4 分布参数和集中参数模型预测的对比	26
2.2 横向振动情况下对集中参数型基础激励模型的修正	28
2.2.1 集中参数模型的修正因子	28
2.2.2 末端质量对于修正因子的影响	30
2.3 修正因子验证的实验案例研究	32
2.3.1 基础激励下不带末端质量的悬臂梁	32
2.3.2 基础激励下的带末端质量的悬臂梁	35
2.4 纵向振动的基础激励问题及其集中参数模型的修正	36
2.4.1 简谐基础激励下的解析模态分析和稳态响应	36
2.4.2 纵向振动的修正因子	37
2.5 机电耦合的集中参数方程的修正因子及理论实例研究	39
2.5.1 压电能量收集中的机电耦合的集中参数模型	39
2.5.2 机电耦合的集中参数模型的修正因子和理论实例研究	40
2.6 本章小结	41
2.7 本章说明	42

参考文献	42
第3章 悬臂式压电能量收集器的分布参数机电模型的解析构建	44
3.1 机电耦合的分布参数模型的基本原理	44
3.1.1 建模假设与双晶构型	44
3.1.2 双晶悬臂梁的耦合力学方程及其模态分析	46
3.1.3 动力弯曲下薄压电陶瓷层的耦合电路方程	50
3.2 压电陶瓷层的串联	52
3.2.1 模态坐标下的耦合梁方程	53
3.2.2 耦合电路方程	53
3.2.3 稳态电压响应和振动响应的封闭解	54
3.3 压电陶瓷层的并联	55
3.3.1 模态坐标下的耦合梁方程	55
3.3.2 耦合电路方程	56
3.3.3 稳态电压响应和振动响应的封闭解	56
3.4 串联和并联情况的等效表示	57
3.4.1 模态机电耦合项	57
3.4.2 串联和并联情况下的等效电容	58
3.4.3 机电方程的等效表达	58
3.5 模态激励下的单模态机电方程	59
3.6 多模态和单模态机电频响函数	60
3.6.1 多模态机电频响函数	61
3.6.2 单模态机电频响函数	61
3.7 理论实例研究	62
3.7.1 双晶悬臂梁的特性参数	62
3.7.2 电压输出的频率响应	63
3.7.3 输出电流的频响	66
3.7.4 输出功率的频响	67
3.7.5 末端相对位移的频响	70
3.7.6 压电陶瓷层的并联	73
3.7.7 单模态频响函数	75
3.8 本章小结	78
3.9 本章说明	78
参考文献	82
第4章 双晶构型的解析解的实验验证	85
4.1 不带末端质量的PZT-5H型双晶悬臂梁	85

4.1.1	能量收集器测试实验的设置和指导	85
4.1.2	针对一组电阻的机电频响函数的验证	90
4.1.3	基本的短路和断路共振频率处相应的电学性能图	94
4.1.4	基本的短路和断路共振频率处对应的振动响应图	96
4.2	带末端质量的 PZT-5H 双晶悬臂梁	96
4.2.1	实验设置	96
4.2.2	针对一组负载的机电频响函数的验证	98
4.2.3	基本的短路和断路共振频率处的电学性能图	101
4.2.4	基本的短路和断路共振频率处的振动响应图	102
4.2.5	点质量假设下的模型预测	103
4.2.6	有无末端质量的 PZT-5H 双晶构型的性能对比	104
4.3	PZT-5A 双晶悬臂梁	105
4.3.1	实验设置	105
4.3.2	针对一组电阻的机电频响函数的验证	107
4.3.3	单模态和多模态机电频响函数的对比	109
4.4	本章小结	110
4.5	本章说明	111
	参考文献	112
第 5 章	面向参数识别和优化的无量纲方程、渐近分析及其封闭关系式	113
5.1	单模态机电频响函数的无量纲描述	113
5.1.1	复数形式	113
5.1.2	幅值—相位形式	114
5.1.3	无量纲形式	115
5.2	渐近分析和共振频率	116
5.2.1	电压频响函数的短路和断路渐近线	116
5.2.2	末端位移频响函数的短路和断路渐近线	116
5.2.3	电压频响函数的短路和断路共振频率	117
5.2.4	末端位移频响函数的短路和断路共振频率	117
5.2.5	短路和断路共振频率的比较	118
5.3	机械阻尼的识别	119
5.3.1	从电压频响函数中识别模态机械阻尼比	119
5.3.2	从末端位移频响函数中识别模态机械阻尼比	119
5.4	共振激励下最优电负载的识别	120
5.4.1	电功率频响函数	120
5.4.2	在电压频响函数的短路和断路共振频率处激励时对应的	

最优负载阻抗	120
5.5 电压渐近线的交叉和一个用于最优负载实验识别的简单技术	121
5.5.1 共振激励下电压渐近线的交叉	121
5.5.2 一个最优负载阻抗实验识别的简单技术	123
5.6 从短路到断路时的振动衰减与放大	123
5.7 PZT-5H 双晶悬臂梁的实验验证	124
5.7.1 机械阻尼的识别	125
5.7.2 基本的短路和断路共振频率	125
5.7.3 电压频响函数的幅值和相位	125
5.7.4 共振激励下的电压渐近线	126
5.7.5 功率—负载阻抗图和最优负载	127
5.7.6 最优负载电阻的评述——从压电陶瓷层简化电路描述 来获得最优值	127
5.8 本章小结	129
5.9 本章说明	129
参考文献	130
第 6 章 悬臂型压电能量收集器的近似解析的分布参数式机电建模	131
6.1 单晶压电能量收集器构型	131
6.2 带轴向变形的欧拉-伯努利机电模型	132
6.2.1 分布参数机电能量描述	132
6.2.2 能量方程的空间离散	136
6.2.3 拉格朗日机电方程	138
6.2.4 拉格朗日机电方程的解	140
6.3 带轴向变形的机电系统的瑞利模型	143
6.3.1 分布参数机电能量描述	143
6.3.2 能量方程的空间离散	144
6.3.3 拉格朗日机电方程	144
6.3.4 拉格朗日机电方程的解	144
6.4 带轴向变形的机电系统的铁摩辛柯模型	145
6.4.1 分布参数机电能量描述	145
6.4.2 能量方程的空间离散	148
6.4.3 拉格朗日机电方程	150
6.4.4 拉格朗日机电方程的解	153
6.5 对称构型的建模	155
6.5.1 欧拉-伯努利和瑞利模型	155

6.5.2	铁摩辛柯模型	156
6.6	考虑末端质量的欧拉-伯努利、瑞利和铁摩辛柯模型	156
6.7	运动容许试探函数的评述	158
6.7.1	欧拉-伯努利模型和瑞利模型	158
6.7.2	铁摩辛柯模型	159
6.8	双晶悬臂梁假设模态解的实验验证	160
6.8.1	不带末端质量的 PZT-5H 双晶悬臂梁	160
6.8.2	带末端质量的 PZT-5H 双晶悬臂梁	162
6.9	两段式悬臂梁的实验验证	164
6.10	本章小结	167
6.11	本章说明	168
	参考文献	169
第 7 章	不同动力加载形式下的压电能量收集建模	171
7.1	机电控制方程	171
7.2	周期激励	174
7.2.1	周期基础加速度的傅里叶级数表达	174
7.2.2	周期性的机电响应	175
7.3	白噪声激励	176
7.3.1	基础加速度的描述	177
7.3.2	电压响应的谱密度和自相关函数	177
7.3.3	输出功率的期望值	178
7.4	移动负载造成的激励	179
7.4.1	放置在桥上的悬臂式压电能量收集器	179
7.4.2	桥上覆盖薄压电陶瓷层	183
7.5	大型结构上的局部应变波动	184
7.5.1	一般应变波动下的功率输出	185
7.5.2	简谐应变波动下的稳态功率输出	186
7.5.3	应变计测量和应变转换	187
7.6	一般瞬态激励下的数值解	188
7.6.1	模态坐标下的初始条件	188
7.6.2	机电方程的状态空间描述	188
7.7	实例研究	190
7.7.1	放置在连杆上的双晶能量收集器的周期激励	190
7.7.2	桥梁表面应变波动下的压电陶瓷片分析	194
7.8	本章小结	198

7.9	本章说明	198
	参考文献	199
第8章	压电能量收集中的机械非线性建模与利用	201
8.1	压电能量收集问题的摄动解:多尺度法	201
8.1.1	压电能量收集器的线性单模态方程	201
8.1.2	精确解	202
8.1.3	精确解的共振近似	203
8.1.4	摄动解	203
8.2	带压电耦合的单稳态杜芬振子	205
8.2.1	基于摄动解的解析表达	206
8.2.2	针对数值解的控制方程的状态空间描述	208
8.2.3	理论实例研究	208
8.3	带压电耦合的双稳态杜芬振子:压电磁弹性能量收集器	212
8.3.1	集中参数机电方程	213
8.3.2	机电响应的时域仿真	214
8.3.3	相空间中压电磁弹性构型与压电弹性构型的性能对比	215
8.3.4	混沌响应和大幅值周期响应的对比	217
8.4	双稳态压电磁弹性能量收集器的实验性能结果	218
8.4.1	实验设置	218
8.4.2	压电磁弹性构型的性能	219
8.4.3	压电磁弹性和压电弹性构型的生成电压比较	220
8.4.4	关于响应的混沌部分和大幅值周期部分	221
8.4.5	宽带性能比较	222
8.4.6	压电磁弹性能量收集器的垂直激励	225
8.5	用于压电能量收集的双稳态板	226
8.5.1	双稳态板的非线性现象	226
8.5.2	宽带功率生成性能	230
8.6	本章小结	231
8.7	本章说明	232
	参考文献	233
第9章	基于气弹性振动的压电能量收集	236
9.1	压电气弹性能量收集器的集中参数型简谐响应模型	236
9.2	颤振边界处集中参数模型的实验验证	240
9.3	压电气弹性能量收集系统中非线性性的利用	243

9.4	一种分布参数式压电气弹性的简谐响应模型: 假设模态描述	244
9.5	时域和频域压电气弹性描述及其有限元建模	246
9.5.1	基于 VLM 的时域描述	247
9.5.2	基于 DLM 的频域描述	249
9.6	气流激励下悬臂板的理论实例分析	250
9.6.1	基于 VLM 描述的仿真	251
9.6.2	基于 DLM 的仿真	254
9.7	本章小结	256
9.8	本章说明	256
	参考文献	257
第 10 章	材料常数和机械阻尼对能量生成的影响	260
10.1	不同软陶瓷和单晶体的有效参数	260
10.1.1	不同软陶瓷和软晶体的特性	260
10.1.2	薄梁的平面应力型压电常数、弹性常数和介电常数	262
10.2	软陶瓷和单晶体的性能对比——理论实例研究	263
10.2.1	双晶悬臂梁的特性	263
10.2.2	初始构型的性能比较	264
10.2.3	压电应变常数的影响	265
10.2.4	弹性顺度的影响	265
10.2.5	介电常数的影响	266
10.2.6	悬伸长度的影响	267
10.2.7	机械阻尼的影响	267
10.3	典型软、硬陶瓷和单晶体的有效参数	268
10.3.1	软陶瓷 PZT-5H 和硬陶瓷 PZT-8 的特性	268
10.3.2	软单晶体 PMN-PZT 和硬单晶体 PMN-PZT-Mn 的特性	269
10.4	软硬陶瓷和单晶体性能对比的理论分析实例	269
10.4.1	双晶悬臂梁的特性	269
10.4.2	软硬陶瓷的对比: PZT-5H 和 PZT-8	270
10.4.3	软硬单晶体比较: PMN-PZT 和 PMN-PZT-Mn	271
10.4.4	陶瓷 (PZT-5H, PZT-8) 和单晶体 (PMN-PZT, PMN-PZT-Mn) 的综合比较	272
10.5	PZT-5A 和 PZT-5H 悬臂梁的实验验证	273
10.5.1	实验设置	273
10.5.2	机械阻尼的识别与模型预测	274
10.5.3	PZT-5A 和 PZT-5H 悬臂梁的性能对比	276

10.6	本章小结	277
10.7	本章说明	278
	参考文献	279
第 11 章	压电能量收集电路相关文献的简要回顾	281
11.1	AC-DC 整流和整流输出分析	281
11.2	两级能量收集电路: 面向阻抗匹配的 DC-DC 转换	287
11.3	压电能量收集中的同步开关感应器	290
11.4	本章小结	294
11.5	本章注释	294
	参考文献	295
附录 A	压电本构方程	298
A.1	三维形式的线性压电本构方程	298
A.2	针对薄梁的简化方程	299
A.3	针对中厚梁的简化方程	300
A.4	针对薄板的简化方程	300
	参考文献	302
附录 B	基础运动时梁和杆的激振力建模	303
B.1	横向振动	303
B.2	纵向振动	304
	参考文献	305
附录 C	带末端质量的均匀悬臂梁的模态分析	306
C.1	横向振动	306
C.1.1	边值问题	306
C.1.2	分离变量法求解	307
C.1.3	微分特征值问题	308
C.1.4	初始条件下的响应	309
C.1.5	特征函数的正交性	309
C.1.6	特征函数的归一化	310
C.1.7	外部激励下的响应	311
C.2	纵向振动	312
C.2.1	边值问题	312
C.2.2	分离变量法求解	313
C.2.3	微分特征值问题	313

C.2.4	初始条件下的响应	314
C.2.5	特征函数的正交性	314
C.2.6	特征函数的归一化	315
C.2.7	外力响应	315
	参考文献	317
附录 D	悬臂式和其他边界条件下均匀薄梁的应变节	318
D.1	不带末端质量的均匀悬臂薄梁的应变节	318
D.2	末端质量对应变节的影响	319
D.3	其他边界条件下的应变节	321
	参考文献	323
附录 E	PZT-5A 和 PZT-5H 压电陶瓷的数据资料	324
	参考文献	325
附录 F	各向同性结构的本构方程	326
F.1	各向同性材料本构方程的三维形式	326
F.2	针对薄梁的简化方程	326
F.3	针对中厚梁的简化方程	326
F.4	针对薄板的简化方程	327
	参考文献	327
附录 G	悬臂梁的基本边界条件	328
G.1	欧拉-伯努利梁理论和瑞利梁理论	328
G.2	铁摩辛柯梁理论	328
附录 H	基于扩展哈密尔顿原理的拉格朗日机电方程	329
	参考文献	330

本章主要介绍利用压电转换技术来实现振动能量的收集。在总结振动—电能之间的基本转换机制的基础上,讨论压电换能较之其他转换形式如磁电式和静电式的优越性。由于本章所涉及的一些现有文献资料已经对压电能量收集这一主题进行了广泛的回顾,因而此处仅总结一下通过柔性压电陶瓷和薄膜电池来实现自充电结构这一概念,并将其作为一个多功能的启发性实例。我们重点综述此类装置的数学建模研究现状,并探讨一些人们较为感兴趣的问题,如机械非线性的利用和气弹性能量收集等。本章还对线性压电数学理论及已有研究进行了简要回顾,目的在于由此导出基于热力学第一定律的压电本构方程,该方程将被进一步化简为简化形式,并在本书中广泛使用。此外,其余各章的概要也将在这里一并给出。

1.1 通过压电转换的振动能量收集

在过去的 10 年中,振动能量收集技术受到了越来越多的关注。小型电子元件的低功率化是促进这一研究领域发展的一个动力源,例如,用于被动和主动监测的无线传感器网络,其最终目标是通过收集环境中的振动能量来为这些小型元件提供动力。一旦实现这一目标,那么就可以省去外部电源,并可降低由于周期性更换电池(组)带来的维护保养费用,此外,还能减少传统电池造成的化学废弃物。

正如 Williams 和 Yates^[1]在他们早期针对微系统的振动能量收集工作中所描述的,一般有三种基本的振动—电能转换机制,分别是磁电式^[1-3]、静电式^[4,5]以及压电式^[6,7]①。近 10 年来,已经有若干篇文章讨论了可从环境振动中汲取低功率电能的这些转换机制。其中, Beeby 等^[12]和 Cook-Chennault 等^[13]的两篇综述覆盖了几乎所有类型转换机制的实验研究。比较现有的采用不同机制的文献数量可以看出,近 5 年来,压电式换能机制是其中最受重视的一种。自 2004 年到 2008 年,已经有好几篇文章^[13-16]对采用压电方式来汲取振动能量进行了重点探讨。

① 其他振动能量收集技术包括磁致伸缩^[8,9]和“电活性”聚合物的使用^[10, 11]。