

# 压电陶瓷能量捕获与电容储能-释放一体化设计

孔晓涵 高圆圆 邵媛媛 巩乔娜 李永旭\*

青岛城市学院 山东青岛 266106

**摘要:** 随着能源需求的不断增加与环境保护问题日益严峻, 可持续能源技术的研究逐渐成为现代科技领域的热点之一。压电材料由于其能够将机械能转化为电能特性, 在能量捕获领域得到了广泛应用。本文围绕压电陶瓷能量捕获与电容储能-释放一体化设计展开研究。首先, 分析了压电陶瓷的工作原理及其在能量捕获中的应用, 接着介绍了电容储能技术的原理, 并探讨了两者结合的设计理念与实现路径。通过实验数据与模型分析, 本文提出了一种将压电陶瓷与电容器结合的能量捕获与存储一体化设计, 展示了其在微能量收集领域的应用潜力及优势。最后, 文章对未来压电能量捕获系统的发展趋势进行了展望, 提出了进一步优化和商业化应用的可能路径。

**关键词:** 压电陶瓷; 能量捕获; 电容储能; 一体化设计; 微能量收集

## 引言

随着科技的迅速发展, 能源的高效利用和环境问题的日益突出, 寻找替代传统能源的可持续能源成为全球科技研究的重点。在众多可持续能源技术中, 压电材料因其能够将机械能转化为电能特性, 成为了微能量收集领域的重要研究方向。压电陶瓷, 作为一种重要的压电材料, 在能量捕获、传感器、电子设备以及自供电系统中发挥着越来越重要的作用。尤其在低功率设备和智能化设备的能源需求中, 压电陶瓷提供了一种高效且环境友好的解决方案。

本文将围绕压电陶瓷能量捕获与电容储能-释放一体化设计展开讨论, 重点分析其工作原理、设计方法以及可能的应用场景, 探讨该设计在微能量收集领域中的应用前景和挑战。

## 一、压电陶瓷能量捕获原理与应用

### 1. 压电效应与能量转化原理

压电效应是指某些材料在受到外部机械力或压力时,

能够在其表面或体内产生电荷或电势差的现象。这种效应首先由皮埃尔和雅克·居里于1880年发现, 后来成为了现代材料科学中一个非常重要的研究领域。具体来说, 当压电材料(如压电陶瓷)受到外界机械力或振动作用时, 它们的晶格结构发生了变形, 导致材料内的电荷分布发生变化, 从而在材料表面产生电荷或电势差。这些电荷可以通过外部电路被捕获和利用。

压电陶瓷作为一种具有显著压电效应的材料, 已被广泛应用于能量转化领域。在压电陶瓷的能量捕获过程中, 外部的机械能(如振动或压力)转化为电能。首先, 当压电陶瓷受到外部作用力时, 陶瓷的晶体结构发生变化, 导致材料内部的电偶极子发生偏转, 从而在材料的表面产生电荷。这些电荷通过连接在陶瓷表面的电极进行收集, 并储存在电容器或电池中。最终, 储存的电能可以通过电路释放, 供给各种低功率设备运行。

压电陶瓷的优势在于其结构简单、响应迅速、成本较低, 并且能在较小的空间内提供较高的能量转换效率, 因此在许多小型设备和低功率应用中得到广泛应用。特别是在一些无法接入电网的偏远地区, 或者是环境监测、微传感器、无线通信设备等领域, 压电陶瓷提供了一种理想的能源解决方案。这种能源捕获方法能够不依赖于传统的电池或电源, 减少了电力供应的局限性, 为设备提供了更大的灵活性。

### 2. 压电陶瓷的能量捕获效率问题

尽管压电陶瓷在能量捕获方面表现出较好的性能, 但其能量输出通常较低, 且受限于多种因素。这些因素包括压电陶瓷材料的性质、几何形状、外部负载、以及振动频率等。能量捕获效率的提高是压电陶瓷技术的一

**课题项目:** 青岛城市学院机电工程学院院部级科研课题“智慧交通中微发电储能技术的研究”(编号: JD24B01)

**作者简介:**

1. 孔晓涵(1997—), 女, 汉族, 山东省菏泽市人, 硕士研究生, 主要从事模拟电子技术应用与开发的研究工作。
2. 李永旭(1970—), 男, 汉族, 辽宁省沈阳市人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事数字和模拟电子技术应用与开发、嵌入式技术应用与开发、智能控制系统研究与开发的研究工作, 为本文通讯作者。

个关键研究方向。为了优化其性能，科研人员已提出了多个改进策略。

首先，提高压电材料的性能是提高能量捕获效率的关键之一。压电陶瓷的压电系数直接影响能量转化的效率，因此，开发具有更高压电系数的陶瓷材料是提升能量捕获效率的重要途径。目前，研究者们正致力于开发新的压电材料，如基于钛酸铅（ $\text{PbTiO}_3$ ）的陶瓷或其他陶瓷复合材料，这些材料在实际应用中具有更好的压电响应。

其次，陶瓷的几何形状和尺寸对于其振动响应能力有显著影响。研究表明，合理的形状和尺寸能够使陶瓷材料在外界振动作用下获得更强的能量响应。例如，通过优化压电陶瓷的结构设计，可以提高其在低频振动环境下的能量捕获能力。此外，陶瓷材料的表面积和厚度也是决定能量捕获效率的关键因素之一，增加表面积有助于捕获更多的电荷。

第三，外部振动源的频率与压电陶瓷的共振频率匹配也对能量捕获效率有重要影响。压电陶瓷的能量捕获效率与振动频率之间的关系非常紧密。当外部振动频率接近陶瓷材料的共振频率时，能量转化效率会达到最大。因此，优化振动源的频率以及陶瓷的共振频率，可以显著提高能量捕获效率。

### 3. 压电陶瓷在能量捕获中的应用实例

压电陶瓷在微能量收集领域的应用非常广泛。许多研究和实践证明，压电陶瓷是一个理想的低功率能源收集器，特别适合应用于无线传感器网络（WSN）、环境监测、可穿戴设备以及智能设备等领域。

例如，压电陶瓷可以用于无线传感器网络，为传感器提供持续稳定的电力供应。由于这些无线传感器通常分布在难以接入电源的区域，传统的电池供电可能会导致更频繁的维护和更高的运营成本。通过使用压电陶瓷，可以利用环境振动或机械压力为传感器提供源源不断的能源，从而消除了传统电池更换的需要，减少了维护工作量。

在可穿戴设备中，压电陶瓷的应用也展示了其独特的优势。通过人体的运动（如步伐、手臂摆动等），压电陶瓷可以有效地捕获机械能，转化为电能供给可穿戴设备使用。例如，智能手环或健康监测设备可以通过佩戴者的运动产生的振动，持续为设备提供电力，避免了频繁充电或更换电池的麻烦。这样的设计特别适用于需要长时间连续工作的智能设备，有助于提升用户体验。

## 二、电容储能技术原理与设计方法

### 1. 电容储能的基本原理

在压电陶瓷能量捕获系统中，电容器通常用于储存压电陶瓷转化的电能。由于压电陶瓷在受外部机械力或振动时产生的电能具有较高的瞬时波动性，因此需要高

频率响应的储能设备。与电池相比，电容器具有更快的充放电速度，这使其非常适合在高频率能量捕获与释放的场合中使用。例如，在一些应用中，压电陶瓷产生的电能只能维持短时间的高峰，因此，电容器凭借其较低的内阻和较快的响应速度，能够在短时间内完成充电与放电，从而保证系统的高效运作。

电容器不仅充电速度快，而且释放能量也非常迅速，适合用于对瞬时能量需求较高的应用场景。这种特性使得电容储能的小型传感器、无线传感器网络等低功耗设备中得到广泛应用。

### 2. 电容储能-释放一体化设计

电容储能和压电陶瓷能量捕获系统的结合，不仅能够提高能量存储效率，还能借助电容器快速充放电的特性，确保捕获的能量能够在需要时迅速释放。这一设计使得压电陶瓷能够更好地为需要高频能量释放的设备提供动力支持。

为了实现这一目标，设计师通常需要通过精确的电路设计，将电容器与压电陶瓷的接口进行优化。具体来说，电路的设计要保证能量从压电陶瓷传递到电容器时效率尽可能高，减少能量损耗。例如，可以设计合适的电压调节电路，确保电容器的充电和放电过程符合电容器的最佳工作范围，从而避免电压过高或过低导致的电能损失。

此外，为了实现高效的电能转移，通常会采用整流电路将压电陶瓷输出的交流电转换为直流电，再通过合适的调节电路将电流调节到电容器所需的电压范围。这样，通过合理的电路设计，可以确保从压电陶瓷到电容器的能量传递过程更加高效和稳定。

### 3. 电容储能系统的设计与优化

电容储能系统的设计不仅需要考虑电容器的容量和充放电特性，还要优化整个系统的电路设计，以确保能量的稳定流动。尤其是在多点能量捕获系统中，如何高效地将不同来源的能量储存并在需要时释放，是一个需要解决的技术难题。比如，在环境监测应用中，可能有多个压电陶瓷模块同时工作，系统必须能处理来自各个模块的电能，并确保能够在短时间内释放足够的电能。

为了解决这个问题，许多系统采用了智能控制系统来实现动态管理。智能控制系统可以实时监控电容器的充放电状态，并根据设备的实际能量需求调节储能过程。通过这种智能管理，系统能够更好地应对不同应用中的能量需求波动，确保能量在需要时能够及时供应，避免了不必要的能量浪费。

## 三、压电陶瓷与电容储能一体化设计的结合

### 1. 设计思路与实施路径

压电陶瓷与电容储能系统的结合需要解决能量捕获、

储存、释放的多重问题。在设计过程中，首先要选择合适的压电材料和电容器，根据实际应用的需要进行参数匹配。然后，设计一个高效的电路系统，确保捕获到的电能能够快速存储在电容器中，并在需要时通过控制系统释放。此外，为了提高系统的稳定性与可靠性，可以采用多重保护机制，如过电压保护、过电流保护等，确保系统在长时间运行中的安全性。

### 2. 能量捕获与储能一体化设计的优势

将压电陶瓷与电容储能结合具有显著的优势。首先，电容器可以快速响应并储存来自压电陶瓷的能量，避免了能量浪费；其次，电容储能系统具有较长的使用寿命和较高的效率，能够在低功率环境中保持稳定的能量供应。最重要的是，压电陶瓷与电容储能系统的结合为微型设备提供了一个绿色、环保、可持续的能源解决方案。

### 3. 实验与模型分析

为验证压电陶瓷与电容储能系统一体化设计的可行性，本文通过实验数据和模拟模型对设计方案进行了分析与验证。电路设计如图3.1所示，根据压电陶瓷的电学等效模型，以电流源模拟压电陶瓷的电流响应，压电陶瓷的级间电容为 $C_1$ ，外接电容为 $C_2$ ，压电陶瓷的等效电阻为 $R_1$ ，负载为 $R_2$ 。负载端电压如图3.2所示。

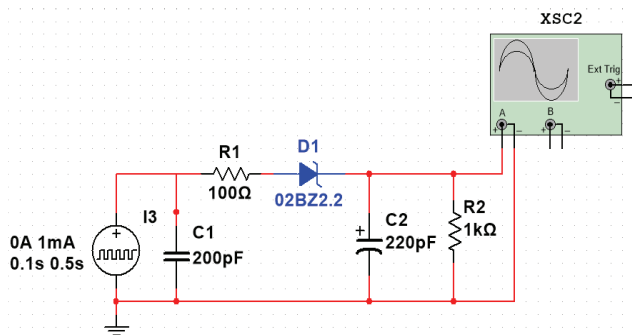


图3.1 压电陶瓷与电容储能电路设计

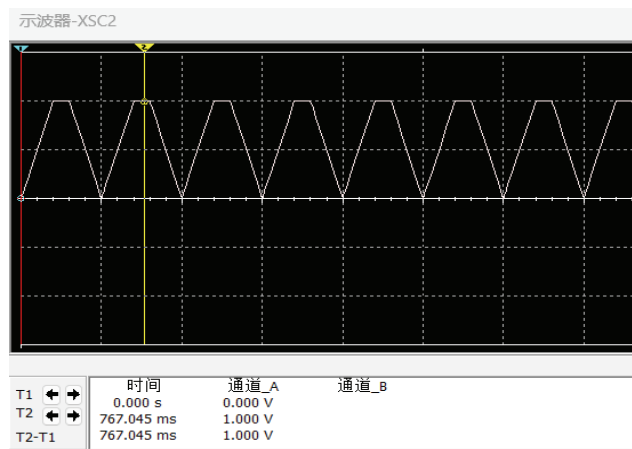


图3.2 负载端电压波形

实验表明，通过电容器的选择和电路设计，可以通过压电陶瓷发电及电容储能为负载供电。模型分析结果显示，在一定的振动频率和负载条件下，能量捕获与释放的效率达到了预期的目标，表明该设计方案在实际应用中具有良好的前景。

## 四、压电陶瓷能量捕获与电容储能技术的未来发展

### 1. 技术优化与创新方向

尽管目前压电陶瓷能量捕获与电容储能系统已经在微能量收集领域取得了一定的进展，但仍然面临诸多挑战。未来，随着材料科学与电子技术的发展，压电陶瓷的性能有望得到进一步提升，电容储能系统也将迎来更加高效和环保的技术创新。例如，随着纳米材料和智能材料的不断涌现，压电陶瓷的转换效率和能量密度将大幅提高，而电容器的储能容量和响应速度也会不断优化。

### 2. 商业化应用的前景

随着低功耗设备和绿色能源需求的增加，压电陶瓷与电容储能技术的结合将在许多领域发挥重要作用。从环境监测到可穿戴设备，再到智能家居和医疗设备，该技术具有广泛的应用潜力。未来，随着技术的不断优化和成本的逐步降低，压电陶瓷能量捕获与电容储能系统有望在更大规模的商业化应用中实现突破。

## 结束语

压电陶瓷能量捕获与电容储能一体化设计是一种具有巨大应用潜力的微能量收集技术，通过有效结合压电陶瓷与电容器，能够为低功耗设备提供可持续的电能供应。本文提出的设计方案经过实验验证，证明了该技术在实际应用中的可行性和有效性。随着技术的不断发展，压电陶瓷与电容储能系统将在绿色能源领域发挥越来越重要的作用，推动低功耗设备和自供能系统的普及与应用。

## 参考文献

- [1] 郑瑞防. 面向输电线路状态监测的复合发电机研究[D]. 长春工业大学, 2024. DOI:10.27805/d.cnki.gccgy.2024.001073.
- [2] 彭璟晖. BNT基无铅铁电薄膜制备及储能特性研究[D]. 青岛科技大学, 2024. DOI:10.27264/d.cnki.gqdhc.2024.001449.
- [3] 张海涛, 杨维清, 何正友. 超级电容器储能材料、器件与应用[M]. 化学工业出版社: 202405.283.
- [4] 李泉. 工厂供配电技术[M]. 化学工业出版社: 202405.269.
- [5] 睦鹏帅. 车载光伏控制系统研究及控制器设计[D]. 长安大学, 2024. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2024.001594.