

附件 5

湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划 项目 申 报 表

项目名称：基于“悬臂-弹簧”结构的微动能量俘获装置的设计与优化				
学校名称	长沙理工大学			
学生姓名	学 号	专 业	性 别	入 学 年 份
杨立新	201449060122	新能源科学与工程	男	2014
叶妮娜	201449060108	新能源科学与工程	女	2014
黄镜亮	201455110121	电气工程及其自动化	男	2014
李振良	201449060132	新能源科学与工程	男	2014
范泽轩	201449060127	新能源科学与工程	男	2014
指导教师	李 聪	职 称	副教授	
项目所属一级学科	动力工程及工程热物理	项目科类(理科/文科)	理 科	
<p>学生曾经参与科研的情况</p> <p>团队成员均对研究性学习与创新性计划兴趣浓厚，项目经验较为丰富，学习能力强，学习成绩优秀，能够充分利用自身优势完成该项目，进一步提升自主创新的能力。以下是团队成员的主要情况：</p> <p>(1) 杨立新，14级新能源科学与工程学生，成绩优秀，专业排名第八，物理、数学、新能源知识丰富，兴趣浓厚，2016年获湖南省第三届大学生物理竞赛省三等奖；第九届节能减排社会实践与科技竞赛全国三等奖，参与国家级大学生创新创业训练计划项目并顺利完成结题（教高司函[2015]41号：201510536010）（排名2/5），申请国家发明专利1项（申请号201510996234.X，指导老师第一发明人，本人第二发明人）；获校科技立项项目《高楼光雨互补发电供电系统的应用研究》校级一等奖；多次参与或主持项目，项目经验丰富，团队协调能力强。</p>				

(2) 叶妮娜, 14 级新能源科学与工程学生, 学习成绩优秀, 专业排名第三, 2014-2015 年获二等奖学金, 2015-2016 获得一等奖学金; 2016 年全国大学生英语竞赛 (NECCS) 获三等奖, 文献调研能力强。作为《新能源专业人才培养与就业需求》项目负责人, 研究问题深入; 曾参与校科技立项项目《高楼光雨互补发电供电系统的应用研究》, 科学研究经验丰富。

(3) 黄镜亮, 14 级电气工程自动化学生, 学习能力强, 理论基础扎实, 电气学院电气工程自动化专业排名第八, 精通电源电路电子设计, 电磁分析仿真软件, 曾参与全国大学电子设计大赛、物电杯负责电源电路的设计, 项目经验丰富。

(4) 李振良, 14 级新能源科学与工程, 成绩优秀, 曾获 2014-2015 学年三等奖学金, 2015-2016 学年三等奖学金。动手能力和实践能力较强, 曾获工程模型大赛三等奖, 新材料比赛三等奖, 创业大赛三等奖, 创业策划大赛三等奖等。可为项目实施、动手实践, 提供有力保障。

(5) 范泽轩, 14 级新能源科学与工程, 善于组织和策划, 动手能力较强。有较为优秀的学生组织能力和领导能力, 现担任能源与动力工程学院学生会副主席。曾获船模比赛二等奖。写策划能力较强, 善于学习, 并善于讲解知识。可为项目人员分配工作划分提出合理意见, 使整个团队高效率运转。

指导教师承担科研课题情况

1. 基于应力诱发马氏体相变的钛合金疲劳行为及机理研究(51405037), 国家自然科学基金项目(青年), 主持, 在研;
2. 钛合金中基于微观相变的疲劳裂纹扩展行为及机理研究(2015JJ6002), 湖南省自科基金项目, 主持, 在研;
3. 基于能源高效利用的钛合金构件中相变-疲劳的交互作用研究(14K004), 湖南省高校创新平台开放基金, 主持, 在研;
4. 燃料电池阳极材料多孔 CuNi 合金蠕变过程中组织结构研究(2014NGQ004), 能源高效清洁利用湖南省高校重点实验室开放基金项目, 主持, 在研;
5. 大容量锂离子电池负极集流体泡沫铜的疲劳组织结构研究(2016NGQ007), 能源高效清洁利用湖南省高校重点实验室开放基金项目, 主持, 在研。

项目研究和实验的目的、内容和要解决的主要问题

【研究目的】

本项目拟设计一种适用于微功率自供电的微动能量俘获装置：（1）设计一种微振动能量俘获装置并优化能量俘获结构；（2）基于设计的微动能量俘获装置，使得俘获的机械能转换成为电能并供给外围电路使用。

【研究内容】

本项目通过对振动能量采集系统进行理论分析以及换能结构的优化设计，试制一种在振动环境中能够有足够功率输出的能量采集装置，并结合实际应用设计外围电路。项目的主要研究内容如下：

（1）电磁式振动能量采集装置的理论分析：通过数学工具，从理论上分析电磁式振动能量采集装置对微动能量采集以及转换过程，为装置设计以及样机试制做指导；

（2）“悬臂-弹簧”电磁式能量采集结构的设计：在综合理论分析之后，对提出的“悬臂-弹簧”电磁式能量采集装置结构进行设计以及试制；

（3）电磁式振动能量采集装置样机的试制以及实验平台搭建：在能量俘获装置完成之后，通过试制的整体高精度实验样机进行测试，并结合实测实验数据以及软件仿真分析结果，优化结构参数；

（4）电磁式振动能量采集装置外围电路的设计：设计合适的外围处理电路，对微动能量转换装置输出的电能做转换，使其符合微功耗用电设备供电要求。

【要解决的主要问题】

换能结构是振动能量采集装置最核心的部分，而该装置的最终目的是采集环境中的振动能量并转换成为可供使用的电能。因此，能量采集装置的技术关键是需要最大程度的从服役环境中俘获能量并转换成电能。拟解决的主要问题于下：

- （1）高效换能结构的设计；
- （2）高精度试验样机的试制以及测试平台的搭建；
- （3）结合实际应用的高效率外围电路设计。

国内外研究现状和发展动态

随着社会的发展，人们进入了“互联时代”，无线传感网络得到大力发展。无线传感网络以其低成本、分布式、低功耗和自组织等特点得到了迅速广泛应用。但是无线传感网络节点的发展遇到了瓶颈，那便是供电问题。传统的节点供电基本采用化学电源或者直接连接外电源进行供电，但是无线传感网络的分布一般是比较复杂或者条件苛刻，有些无线传感节点一次性植入环境中之后基本无法更换化学电源（汽车轮胎的胎压传感装置），而自身携带的电能是有限的，一旦耗尽，该节点就只能弃用，这将对整个传感网络产生不良影响，造成了资源浪费。因此，最大程度的为无线传感网络节点供电成为有效延长节点使用寿命的重要途径。

延长无线传感网络节点的供电时间，最直接的办法是增加化学电源的容量，此外也有学者提出无线传感器网络能量收集技术，可以直接从无线网络传感节点的环境中采集能量转换为电能。环境中最常见的光能、热能、风能甚至电磁波辐射能与微小的振动均可以被收集起来转换为电能，然而在某些情况之下风能、太阳能、热能等均不稳定，在室外太阳能可以提供 $15000 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ 的能量密度，然而在室内就只能是降低到 $10\sim 20 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ ，显然这对于传感节点稳定供电是不允许的^[1]。因此我们要寻找一种不确定性相对较小的能量源，振动便是一种无处不在的运动形式。小到风吹草动、人们的日常生活，大到海洋中波涛汹涌的波浪、自然界中的地震都是在以不同形式振动。如果把环境中振动产生的能量收集起来并转换为能够为无线传感网络供电的电能，不仅能延长节点的使用寿命，而且能大量减少化学电池对环境带来的环境污染。因此，振动能量的采集自供电装置更具有实用性。

振动能量采集装置是一种利用环境中振动能量进行发电的装置。目前国内外研究的振动能量采集装置按其收集原理，主要可以分成三类：静电式、压电式、电磁式。电磁式振动能量采集装置是基于法拉第电磁感应定律，当外界发生振动时，使磁铁与线圈发生相对运动致使通过线圈的磁通量发生变化，便可以进行能量采集。电磁式能量采集装置的输出功率主要与装置尺寸、结构、材料特性等因素密切相关，能量转换结构的主要元件为永磁体和线圈。电磁式能量采集装置微型化后会导致动子（或者动线圈）的振幅减小，从而大大降低环境能量俘获并转换成电能的能力。虽然电磁式振动型能量采集系统存在某些缺陷，但电磁式能量

采集系统因其输出电流功率较大、对材料没有硬性要求，同时无需要启动电压，经济效益高以及能适应宽频等特点获得了较大的进展^[2]。

微型电磁式振动能量收集器最早是由英国 Sheffield 大学的研究小组提出，并且建立了电磁式振动能量采集的输出模型，结构如图 1 所示。聚酰亚胺薄膜的厚度为 $7\mu\text{m}$ ，永磁体的体积为 $1\text{mm}\times 1\text{mm}\times 0.3\text{mm}$ ，质量为 $2.4\times 10^{-3}\text{kg}$ 。基于底座硅圆片上制作平面线圈，线圈通过剥离 $2.5\mu\text{m}$ 厚的溅射金层形成，其参数为宽度 $20\mu\text{m}$ ，间距 $5\mu\text{m}$ ，匝数 13。完整的结构整体尺寸约为 $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 1\text{mm}$ 。理论分析得到振幅为 $\pm 50\mu\text{m}$ ，振动频率为 70Hz 时将产生 $1\mu\text{W}$ 的功率，而在频率为 330Hz 时将产生大约 $330\mu\text{W}$ 的功率。实验测试结果表明，当激振振幅为 $0.5\mu\text{m}$ ，激励频率为 4.4kHz 时，在加速度为 382m/s^2 ，采集装置的感生功率为 $0.3\mu\text{W}$ ^[3]。

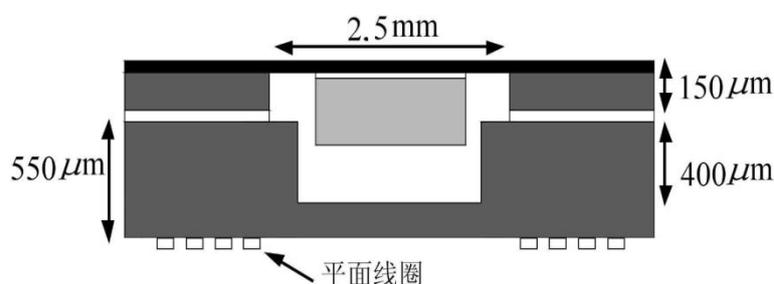


图 1 英国 Sheffield 大学提出的电磁式发电机截面图

振动具有高能量密度且微型振动发电机可以无限、持续地作为低功率自供电设备（传感器等）提供电能^[4]。文献^[5]中提出了一种采集低频环境下振动的抗磁悬浮振动能量采集器，当热解石墨距离悬浮永磁体的位置不同时，系统对外界的频率响应不相同。并通过仿真分析，当系统受到外界的加速度为 6.25m/s^2 ，频率输入为 $2\sim 12\text{Hz}$ ，线圈产生最大感应电动势 145mV ，最大输出功率为 $19.7\mu\text{W}$ 。王佩红、鲁李乐等人^[6]设计了一种结构新颖的振动能量采集结构，其体积大约为 200mm^3 。测试表明：在加速度为 $3g$ ($g=9.8\text{m/s}^2$) 的外界输入冲击下，负载两端的交流电压峰峰值为 32.5mV 。

李伟、车录锋等人^[7]基于微机电系统（MEMS）设计了一种结构新颖的横向电磁式振动能量采集器，能量采集器尺寸为 $7.2\text{mm}\times 6.0\text{mm}\times 2.3\text{mm}$ 。测试表明质量块-弹性梁振动系统的一阶固有频率为 241Hz ；在频率为 241Hz 、加速度为 2.8m/s^2 动激励下，负载两端产生的交流电压峰峰值为 9.2mV 。杨晓光、汪友华等^[8]对振动能量采集装置进行了探索，提出了一种新型的振动发电装置，该装置采用两端固定环形永磁体构成磁弹簧，运动永磁体的内侧和外侧分别缠绕线圈。测试

表明, 当振动发电装置在振动频率为 20Hz, 振幅为 5mm 时, 最大输出功率为 28.3mW, 开路电压的有效值为 5.1V。王祖尧等^[9]通过引入线性弹簧振子, 将单自由度非线性磁力悬浮能量采集器扩展到两个自由度, 研究了系统质量比、频率平方比和非线性系数比对增强共振强度、扩大共振区域, 也就是提高能量采集的强度和带宽的影响。为提高振动发电机对多方向振动环境的适应能力, 刘祥建等^[10]研究多方向发电性能问题, 可以进一步提高环境能量的采集效率。因此, 多方向的能量采集结构设计是有效提高环境中微振动能量俘获途径之一。

通常, 科研者都期望能量采集装置的谐振频率与初级环境振动频率匹配, 以获得最佳的能量收集性能。D. Lin 等^[11]通过在二维空间中向该装置施加磁力来实现频率调谐, 使得产生的磁力具有水平分量和垂直分量, 期望能量采集装置的谐振频率与初级环境振动频率匹配, 以进一步提高装置能量采集效率。文献^[12]综述了目前国内外研究者们所提出的各种典型电磁式微振动能量采集方案, 但装置基本只能采集单一方向的振动能量, 无法很好的采集复杂环境中的多方向振动能量。由此可见, 现有电磁式振动能量采集装置主要集中在如何进一步提高环境中的微小振动能量采集的效率。

本项目拟在目前已有的研究基础上, 设计一种新型的高效率微动能量俘获装置, 并且通过软件分析以及实验的方法获取装置相关参数, 并进行再次优化设计。然后基于设计的微动能量俘获装置, 使得俘获的机械能转换成为电能并供给低功耗装置使用。

参考文献:

- [1] 李梦阳, 董川, 唐翹楚, 徐大诚, 李昕欣. 基于振动能量采集器的无源无线传感节点技术研究[J]. 传感技术学报, 2016(08): p. 1260-1266.
- [2] 蓝澜, 何青, 赵晓彤, 宋博. 新型微型电磁式振动能量收集器. 2013 年中国智能自动化学术会议. 2013. 中国江苏扬州.
- [3] Williams, C.B., C. Shearwood, M.A. Harradine, P.H. Mellor. Development of an electromagnetic micro-generator[J]. Electronics Letters, 2001. **148**(6): p. 337-342.
- [4] 张庆新, 李岩, 林凯, 高云红, 赵树国, 许瑾. MSMA 振动能量采集器的设计与实现[J]. 压电与声光, 2016(05): p. 740-743.
- [5] 苏六帅, 叶志通, 苏宇锋. 微型抗磁悬浮振动能量采集器输出特性分析[J]. 仪

表技术与传感器, 2015(04): p. 46-48+83.

- [6] 王佩红, 鲁李乐, 戴旭涵, 赵小林.基于电镀铜平面弹簧的微型电磁式振动能量采集器[J]. 功能材料与器件学报, 2008(01): p. 171-174.
- [7] 李伟, 车录锋, 王跃林.横向电磁式振动能量采集器的设计与制作[J]. 光学精密工程, 2013(03): p. 694-700.
- [8] 杨晓光, 汪友华, 张波, 曹莹莹.一种新型振动发电装置及其建模与实验研究[J]. 电工技术学报, 2013(01): p. 113-118.
- [9] 王祖尧, 丁虎, 陈立群.两自由度磁力悬浮非线性振动能量采集研究[J]. 振动与冲击, 2016(16): p. 55-58.
- [10] 刘祥建, 陈仁文, 侯志伟.多悬臂梁式压电振动发电机的多方向发电性能[J]. 金陵科技学院学报, 2016(03): p. 1-5.
- [11] D. Lin, F.T. Fisher. Analysis of Magnetic Forces in Two-Dimensional Space With Applications for the Tuning of Vibration Energy Harvesting Devices. in ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2015.
- [12] 苏宇锋, 张坤, 叶志通, 张鲲鹏.微型振动能量采集器的抗磁悬浮结构分析[J]. 仪表技术与传感器, 2016(10): p. 28-31+36.

本项目学生有关的研究积累和已取得的成绩

课题组成员通过文献调研, 对国内外相关领域的相似发电系统进行了深入总结, 并且针对目前振动发电装置中存在的问题与缺点, 对本项目进行了预研, 并提出了初步的设想和解决方案。

本项目预研的电磁式直线振动能量俘获装置(如图 2), 主要由能量俘获部分以及能量转换部分组成。本系统能量俘获部分部分主要包括: 外管壳、定磁铁、动磁铁、缓冲层等组成。当外界产生振动时(如: 汽车在颠簸的路面上行驶、海洋表面波浪的振动), 外管壳与外界直接相连, 跟随外界做同步振动。同时动磁铁部分由于与定磁铁相互作用而悬浮于管壳内部, 当外界发生上下振动时, 动磁铁由于惯性作用将做相对于外管壳的上下振动的运动。能量转换部分即基于法拉第电磁感应定律, 当动磁铁相对于外管壳上下振动时, 穿过固定子在外管壳上面的线圈绕组的磁通量将发生变化, 由此在线圈绕组中产生感应电动势。

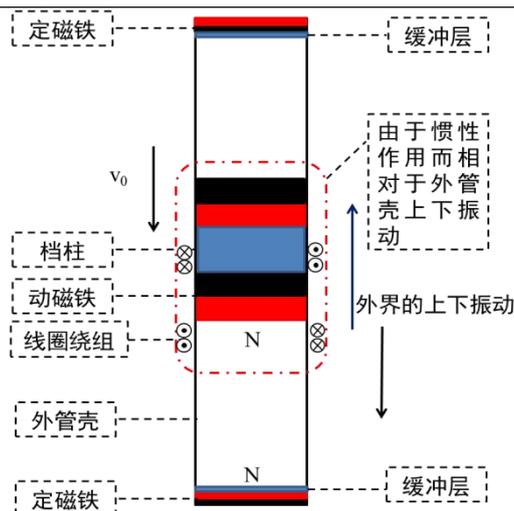


图2 装置的初步工作原理简图

项目组成员承担或参加过多项新能源以及电力相关的项目，科研、动手实践能力较强，具有较好的研究基础和丰富经验，为本项目的顺利实施提供了保障：

(1) 杨立新，对物理数学基础扎实，作为项目负责人或者参与者，参与较多的项目，曾与黄镜亮一同参加过电子设计大赛，并一起设计制作《环境能量采集充电装置》参与物电杯；(2) 叶妮娜，英语好，文献调研能力强，可以查阅国外相关研究进展；(3) 李振良，范泽轩，动手能力和实践能力均较强，为装置的试制提供了有力保障。

此外，目前所有团队成员均学过《电机学》、《电路》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》，以及《电磁学》或者《大学物理》，理论知识扎实，可以为项目的实施提供理论指导，保障项目的实施与完成。

项目的创新点和特色

本项目的特色在于设计的微动能量俘获装置能够采集环境中微小振动能量，充分利用环境中能量并转换成为电能，给微功耗装置供电，有望提供一种适用于物联网传感节点、微功耗传感设备的全新供电技术。其创新点在于：

(1) 本项目设计“悬臂-弹簧”结构，能最大程度的多方向俘获环境中振动能量，确保换能装置俘获环境能量并转换成电能，输出电能完全足够满足微功耗传感节点使用。

(2) 本项目结合实际应用为微振动能量采集装置设计高效率能量管理电路，可有效管理能量采集装置俘获环境中的振动能量，汇聚能量，短时间放电工作可有效替代电池供电的方式或者用于某些不宜更换电源的特殊场合。

项目的技术路线及预期成果

【技术路线】

本项目的通过微动能量俘获装置的设计，采集环境中微小振动能量并转换成电能，供微功耗装置供电。拟采用如图 3 技术路线完成能量转换装置。

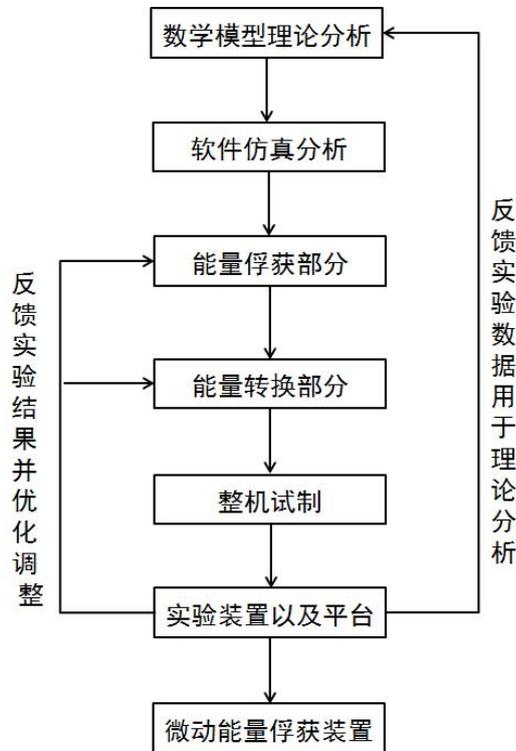


图 3 技术路线

【技术路线分析】

- (1) 数学模型理论分析：建立数学模型，从原理上分析影响电磁式振动能量采集效率的因素，并提出切实可行的方法以提高能量采集效率。依据提出的改进方法，设计并且建立可行的能量采集模型；
- (2) 软件仿真分析：通过 ANSYS 有限元软件对振动能量采集模型进行电磁仿真，研究表格 1 中变量与输出电压关系：

表格 1 变量与输出电压关系

恒定量	变量	处理
磁场、线圈匝数、振动、悬臂等相同	动子质量 M（运动部分的质量）	U-M 图
磁场、线圈匝数、振动、动子等相同	悬臂 L（悬臂长、宽、高）	U-L 图
磁场、振动、悬臂、动子等相同	线圈匝数 N	U-N 图
磁场、线圈匝数、振动、动子等相同	线圈与磁铁之间距离 X	U-X 图

- (3) 能量俘获部分、能量转换部分：依据数学计算、仿真分析、试验结果反馈进行结构的多次调整，使其达到最佳效果，以满足需求。
- (4) 整机试制：通过组合分析，将能量俘获部分于能量转换部分结合起来，试制

符合要求的微振动能量采集装置。

(5) 试验平台：试验平台为实验样机提供实验保障，测得相关数据并进行分析反馈给设计环节以及理论分析。

(6) 微动能量俘获整机装置：通过反复试验以及多次调整之后，得到优化结构，并设计能量转换装置外围电路，得到能够直接为微功耗装置供电样机。

【预期成果】

1. 设计制作微动能量俘获装置一台， 申请专利 1 项；
2. 结合优化设计实验，发表学术论文 1 篇。

年度目标和工作内容（分年度写）

2017 年 1 月至 2017 年 12 月：

2017.01~2017.06 建立振动能量采集模型，并进行电磁仿真

2017.06~2017.12 实验样机制作与发电试验

2018 年 1 月至 2018 年 12 月：

2018.01~2018.06 设计能量转换装置外围电路，并优化实验样机

2018.06~2018.12 撰写研究报告与学术论文，申请专利

指导教师意见

本项目以新型能源与节能减排为背景，针对现实中的能源电力问题，结合具体实际，提出了新型电磁式振动发电的研究点，选题符合新能源科学与工程专业本科生培养要求，创新性较好，研究内容充实，研究方案合理，在项目的支持下能取得预期的成果，能有效地提高学生创新思维与创新能力。同意申请。

签字：

日期：

注：本表栏空不够可另附纸张