

永磁同步电磁原理的冲击式按压发电机研究*

赵兴强^{1,2,3} 殷旭鹏¹ 张译文¹ 许珂钊¹ 蔡骏^{2,3,4}

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044; 2. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 3. 江苏省气象能源利用与控制工程技术研究中心 南京 210044; 4. 安徽建筑大学机械与电气工程学院 合肥 230009)

摘要: 按键开关用的发电机可将按键动作转为电能,为无线按键开关提供电能,在绿色智能家居中有重要的应用价值。本文提出了一种利用电磁原理的冲击式发电机,设计了一种双稳态转换的结构,在两个稳态转换的过程中,线圈中磁力线反向突变,产生电动势脉冲。采用有限元软件对双稳态结构的磁场分布情况进行了分析,对线圈和铁芯尺寸进行了优化设计,结果表明两个稳定状态的线圈中磁力线方向相反,感应电动势基本上随尺寸线性增加。加工组装了发电机样机,通过实验研究发现,按压一次,发电机输出电压可以达到 30 V,产生电能达到 1 469 μJ 。利用电磁转换原理将按压动作转化为电能,其紧凑的设计、小巧的体积和高输出功率使其具有显著的优势,有望为无线传感网络节点和无线开关提供充足的能源,实现绿色自给运行。

关键词: 冲击;电磁式发电机;自发电技术;双稳态;仿真;开关

中图分类号: TN712; TM619 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4047

Study on impact pressing generator based on permanent magnet synchronous motor principles

Zhao Xingqiang^{1,2,3} Yin Xupeng¹ Zhang Yiwen¹ Xu Kefan¹ Cai Jun^{2,3,4}

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Meteorological Energy Utilization and Control Engineering Technology Research Center, Nanjing 210044, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230009, China)

Abstract: The switch pressing generator can convert pressing actions into electrical energy, supplying power for wireless key switches, which holds significant application value in green smart homes. This paper introduces an electromagnetic principal impact generator and proposes a bistable conversion structure. During the two steady-state transfers, the magnetic field lines in the coil undergo sudden changes in the opposite direction and the coil generates induced electromotive force pulses. Finite element software was employed to analyze the magnetic field distribution of the bistable structure, and the dimensions of the coils and iron core were optimized accordingly. The results show that the magnetic field lines in the two stable states of the coils have opposite directions, and the induced electromotive force increases almost linearly with the dimensions size. A prototype generator was fabricated and assembled. Experimental analysis reveals that the generator can produce an output voltage of up to 30 V, generating an electrical energy of 1 469 μJ . This provides sufficient power supply for wireless sensor network nodes and wireless switches, enabling green and environmentally friendly self-sufficient operation.

Keywords: impact; electromagnetic generator; self-powering; bistable state; simulation; electrical switch

0 引言

在智能家居中,综合布线技术、无线网络技术、自动控制技术等给居家生活带来了很大的便利,构建节能环保的居住环境。能量收集技术将环境中的振动、风、光照等能量转换为电能^[1-3],为智能家居中无线开关、无线传感器网络节点等低功耗设备供电,无需再依赖电池,有绿色环保的优势。

自从谢菲尔德大学的 Williams 课题组^[4]发表了第 1 篇关于电磁式微型振动发电机的研究论文后,微型振动能量收集器件受到研究者的广泛关注。根据机电转化原理,振动能量收集技术典型的有电磁式^[5-7]、压电式^[8-10]和电容式^[11-12]3 种形式。电磁式发电装置利用电磁感应原理,将磁铁和线圈的相对运动转化为电能,结构设计灵活,成本低。而压电式发电机主要利用正压电效应,将振动产生的压电材料应变能转化为电能输出,结构简单。电容式发电装置通过外加电源在电容器中建立电场,使极板带电。断开电源后,由于驻极体内阻大的特性,电容器不能瞬间放电,保持带电状态。在此期间,电容器内电场能保留,使电荷分离。连接电路释放极板电荷,实现电流输出。通过延长电荷释放时间,增加输出电流的稳定性和持久性。

智能家居中,无线开关利用电磁原理将按压冲击动作转化为电能,结构中往往具有两个稳定状态,在双稳态转换过程中线圈中磁力线的方向突然发生反向,产生一个电脉冲。吴少杰等^[13]设计了一个机械按压式能量收集装置,该装置通过永磁体的运动使通过线圈的磁通反转从而产生感应电动势,按压一次可以产生 301.0 μJ 电能。赵兴强等^[14]前期研制了由 2 个小磁铁和 E 型铁芯组成按键发电结构,两个稳定状态的铁芯的中间臂上磁力线反向,按压一次产生 660 μJ 电能,同时实现 2 bytes 数据自发电无线发送。刘远芳^[15-16]设计的电磁式线圈铁芯通过磁性吸力接触其中一个导磁板电磁线圈,电性连接于控制器。其中,当开关板被按压时,驱动摆臂移动,使弹性元件产生变形,并且弹性元件复原时,驱动线圈铁芯接触另一个导磁板,使电磁线圈中产生电流以供给控制器,从而电力驱动控制器生成无线控制指令。但该类电磁式发电机在能量传输过程中,存在能量损耗,如磁场逃逸、电阻损耗等问题,且需要较大的空间容纳线圈、铁芯等元件。这限制了发电机在一些小型或轻量化应用中的应用,

有些研究者关注于压电式结构发电机在无线开关应用。林伟等^[17]研制的利用压电陶瓷振动发电的自供电无线开关,其发电单元包括按钮和底板按钮底部固定有直齿条,直齿条固定在弹性机构顶部,压电陶瓷片的边缘

卡在直齿条的齿槽内。能将按压按钮时的机械能转换成电能,从而给微控制单元和无线发送单元供电。陈建明等^[18]设计的基于压电效应的无源无线开关装置,利用双晶压电发电片将手指对按键的压力转换成电压信号,解决绿色建筑中通信设备工作电源的问题。Face 等^[19]利用压电悬臂梁,按压拨动梁的自由端,使之衰减振荡,延长了发电时间,但这种结构可靠性较差。刘宇轩等^[20]利用打火机的压电点火器作为按压发电机,在 3 个点火器一次按压可在电容上存储 1.6 mJ 电能,该结构成本很低,但需要较大按压力来触发。冲击动作会使得压电材料过度变形疲劳,频繁的按压操作可能导致装置的寿命缩短。

本文提出一种创新的双稳态结构,利用电磁转换原理将按压动作机械能转化为电能。该结构体积小,设计紧凑,输出功率高,具备显著的优势。该技术可广泛应用于无线开关等领域,为其提供了高效可靠的电能来源。

1 工作原理

冲击式按压发电机的结构如图 1 所示,由 4 个磁铁、4 个导磁板、2 个铁芯和 2 个线圈(图 1 中未画出)组成。发电机的左侧两个磁铁磁极方向一致,右侧两个与左侧相反。导磁板夹住磁铁的磁极,并伸出一段,限制线圈铁芯运动。铁芯上绕有线圈,并且在导磁板限制的上下位置内运动。该结构中具有两个稳态,施加按压力使得两个状态转换,线圈中磁力线反向突变。在图 1(a)中,前端铁芯分别与下面的两个导磁板接触,后端铁芯分别与上面两个导磁板接触,磁力线方向如图所示。按压后,前后两个线圈和铁芯组合联动,突然转换到另一个状态,如图 1(b)的位置,铁芯内的磁力线会反向,使得线圈磁通发生突变,进而产生电脉冲。若两个铁芯连接复位弹簧,按压动作从(b)状态释放后,再次恢复到(a)状态,线圈内会产生一个相反的电脉冲。这个冲击脉冲可以为后续电路供电电能。

2 仿真优化

为了对发电机结构参数进行设计和优化,本文利用 Ansoft Maxwell 的瞬态磁场求解器进行仿真。将结构简化为 2 D 模型,如图 2 所示,其中磁铁、导磁板、铁芯和线圈的相关参数如表 1 所示。为了简化设计过程,将磁铁和导磁板的尺寸固定,线圈线径为 0.1 mm,分析铁芯和线圈尺寸长度和厚度对输出性能的影响。

铁芯和线圈在导磁板限制的上下空间内运动。尽管冲击式按压发电机的两个状态转换是一个冲击过程,仍可以将运动速度设定为常数,简化仿真过程。本文速度

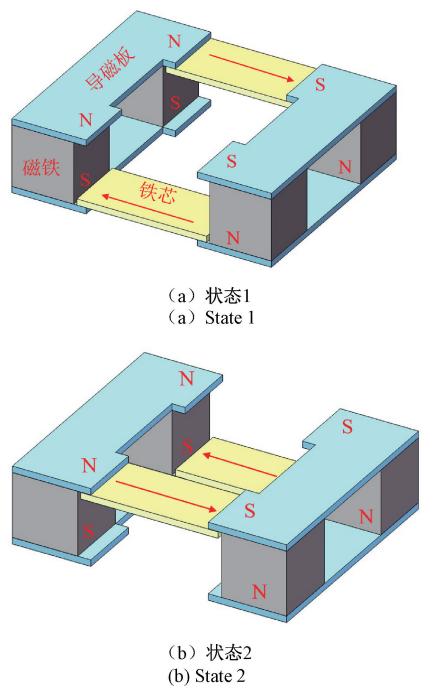


图 1 按压冲击式发电机的结构
Fig. 1 Schematic diagram of impact pressing generator

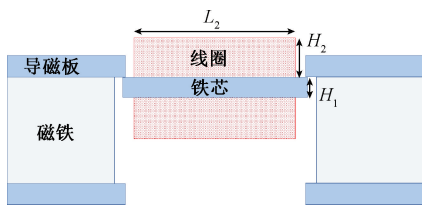


图 2 发电机 2D 模型
Fig. 2 Generator 2D model

设定为 100 mm/s,时间步长约为 50 步。

表 1 发电机结构尺寸
Table 1 The structural dimensions

结构	长×高/mm	材料
磁铁	10×10	NdFe35
导磁板	1×11	steel_1008
铁芯	$(L+2) \times H_1$	steel_1008
线圈	$L \times H_2$	copper

为了避免磁力线发散,仿真时增加了辅助的导磁板,尽量使磁力线引入导磁板内,这样更符合实际情况。图 3 为仿真得到的磁力线分布情况,可以看出两个稳定状态下磁力线大部分穿过铁芯,且方向相反。状态转换的过程中,线圈输出一个电压脉冲,最大电压为 6.617 V,如图 4 所示。

为了对比分析,统计了不同尺寸感应电动势脉冲的

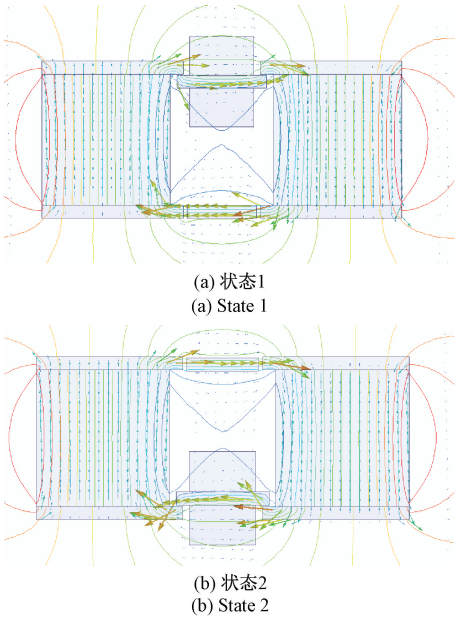


图 3 稳定状态时的磁力线分布
Fig. 3 Magnetic field line distribution in stable state

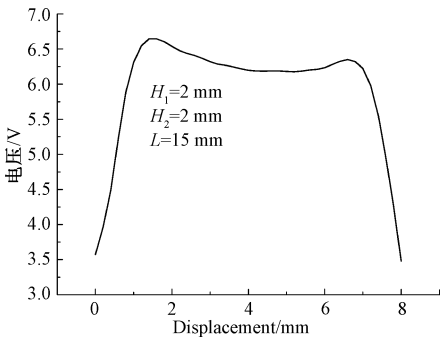


图 4 感应电动势脉冲
Fig. 4 Induced electromotive force pulse

有效值,如图 5 所示。可以看出感应电动势基本上随着线圈尺寸增加线性增加,随着铁芯厚度增加也增加。相比之下,线圈长度 L 比厚度 H_1 对感应电动势影响更显著;铁芯厚度 H_2 超过 2 mm,影响就不大了。铁芯厚度 H_2 为 3 mm,线圈尺寸 $L=20$ mm, $H_1=4$ mm 时,感应电动势最大为 17.69 V。尽管如此,在有限的体积要求下,线圈和铁芯的尺寸不能要求太大。而且线圈增加会增加内阻,输出功率增加到一个极大值时也会减小。

3 实验分析

3.1 样机加工

本文设计发电机和各部件的机械结构如图 6 所示,其中图 6(a)为总体装配图,图 6(b)为核心部分拆示

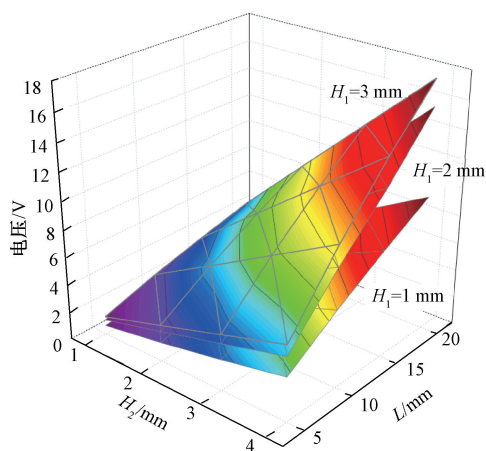
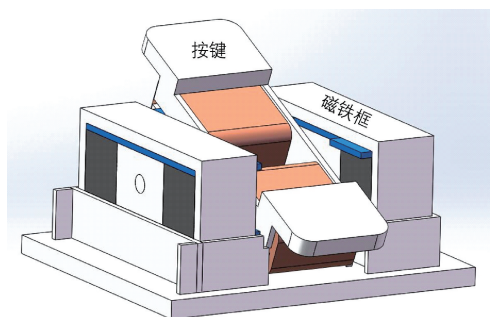


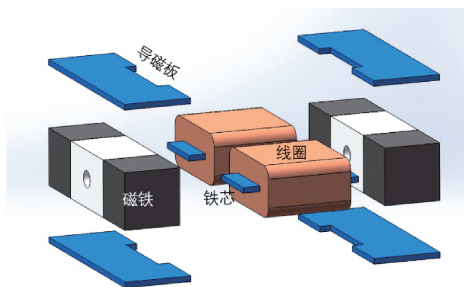
图5 感应电动势随铁芯和线圈尺寸的变化

Fig. 5 The relationship between induced electromotive force and dimensions of iron core and coils

意图。磁铁尺寸为 $10 \times 10 \times 10$ mm, 导磁板厚度 1 mm, 铁芯厚度 2 mm, 线圈线径 0.1 mm, 厚度 4 mm, 长度 15 mm。考虑到实际的安装方便, 两侧的磁铁框开口设置, 且左侧设有可拆卸的挡板。同时考虑到线圈和铁芯部分的按压行程限制, 磁铁下部设置了一个台阶, 在线圈和按键运动部件位置形成了凹槽, 如图 7(b) 所示。



(a) 总体装配图
(a) General assembly drawing



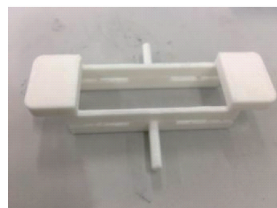
(b) 各结构分解图
(b) Exploded view drawing

图6 发电机三维结构

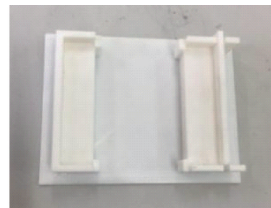
Fig. 6 The generator 3D structural diagram

通过 3D 打印技术加工了相关的机械结构, 组装得到发电机样机如图 7 所示。其中图 7(a) 为线圈支架, 两端

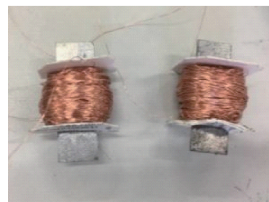
为按键部位, 两侧为转轴。图 7(b) 为底座, 图 7(c) 为铁芯和线圈, 约 1 800 匝, 图 7(d) 为磁铁、导磁板及其磁铁框, 图 7(e) 为发电机整体组装。



(a) 线圈支架
(a) Coil bracket



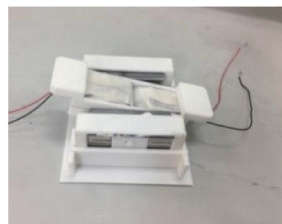
(b) 底座
(b) Base



(c) 铁芯和线圈
(c) Iron cores and coils



(d) 磁铁
(d) Magnet



(e) 发电机整体组装图
(e) Overall assembly drawing of generator

图7 发电机和各结构实物图

Fig. 7 The assembled generator and its parts

3.2 测试

手动按压按键, 利用示波器测试两线圈的电压波形图, 结果如图 8 所示。两个线圈产生的最大输出电压分别为 26.745、21.689 V, 平均脉冲宽度约为 11 ms。两个线圈串联后, 输出电压最大为 30.088 V。由于线圈手工绕制, 线圈匝数远小于理论值。通过机器精密绕制后, 输出电压可以增加 2 倍以上。尽管如此, 30 V 左右的电压也较大, 便于后续电源接口电路的处理。

尽管该发电机脉冲输出功率高, 但脉冲宽度仅 11 ms, 能量较低, 其电源接口电路要求较高, 需要通过整流、滤波、储能和释放等一系列处理, 其中储能元件大多使用电容。为了分析发电量的大小, 本文测试不同电容值情况下存储的电能量。发电机两个线圈串联后, 通过整流电路, 接 $10 \sim 60 \mu\text{F}$ 铝电解电容。为了减小手动按压的测量误差, 每个电容值, 测量 20 次。图 9 分别为 10 和 $60 \mu\text{F}$ 电容的充电曲线, 可看到按压后, 电容电压很快达到一个最大值, 然后由于铝电解电容的漏电或者通过测量仪器放电, 开始逐渐放电, 电压减小, 其他电容充电波形类似。

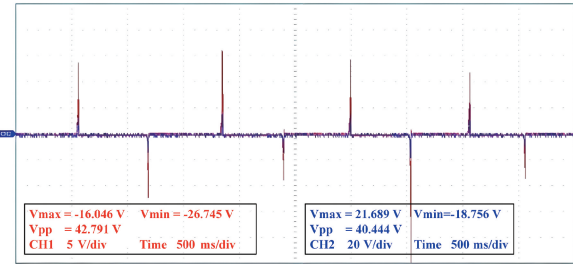


图 8 发电机输出电压波形

Fig. 8 Generator output voltage waveform

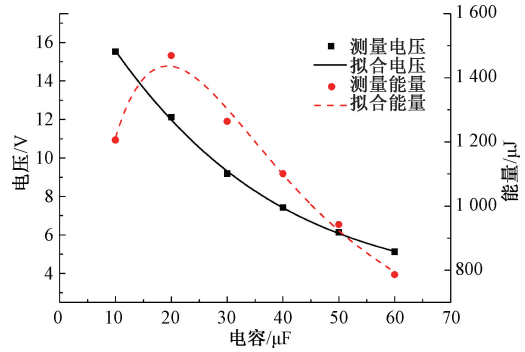


图 10 不同电容的充电结果

Fig. 10 Charging results of different capacitors

表 2 发电机性能对比

Table 2 Comparison of generator performance

研究者	结构及原理	单次发电能量/ μJ
吴少杰等 ^[13]	电磁式	301.0
陈建明等 ^[18]	压电式	142
刘宇轩等 ^[20]	压电式	1 600
本文	电磁式	1 469

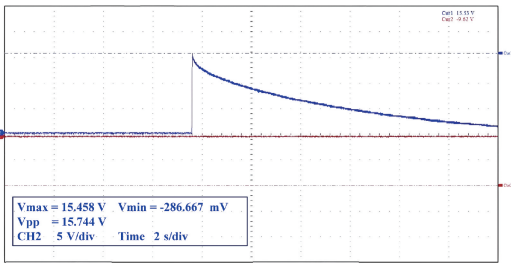
4 结 论

本文设计了一种冲击式按压发电机,提出了一种新型的双稳态切换结构。通过有限元分析,对发电机相关尺寸进行了仿真优化,得到输出电压随着线圈和铁芯尺寸增加而增加。通过 3D 打印技术加工了相关的机械结构,组装得到了发电机样机。该设计增强了能量收集效率,也尽可能减小了自发电装置的体积。使得其能够更有效地转化机械压力为电能。具体而言,通过优化机械结构和采用磁铁与铁芯的巧妙组合,这一按键发电结构实现了更高的转换效率,从而在实际应用中提供了更为可靠和可持续的能源来源。这种创新性的技术不仅为发电领域注入了新的活力,同时也为可再生能源的开发和利用提供了更为可行的解决方案。能够为无线电开关、无线传感网络节点等应用对象提供足够的电能。

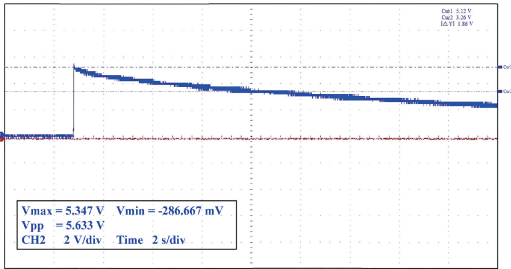
参考文献

[1] 蒋晓东, 吕森. 双定子无刷双馈发电机电磁分析与实验研究[J]. 中国科技论文, 2023, 18(4): 455-461.
JIANG X D, LYU S. Electromagnetic analysis and experimental study of double stator brushless doubly-fed generator[J]. China Science Paper, 2023, 18(4): 455-461.

[2] 陈春明, 袁天辰, 陈立群. 新型三角形结构电磁式振动能量采集器的设计与分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(22): 52-59.
CHEN CH M, YUAN T CH, CHEN L Q. Design and



(a) 10 μF



(b) 60 μF

图 9 电容充电电压波形图

Fig. 9 Capacitor charging voltage waveform

图 10 为统计的电容最大充电电压和存储的电能,可以看出随着电容增加充电电压减小,而存储的电能则是先增加,后减小。10 μF 电容充电电压为 15.53 V,60 μF 时减小为 5.12 V。20 μF 电容的存储的电能最大,为 1 469 μJ ,电压为 12.12 V。若是电容释放时,电容电压降低到 3.3 V,可以释放出 1 368 μJ 电能。对于 3.3 V、50 mA 的无线通信模块来说,这个能量可以传输 8.3 ms 数据。若通信速度 9 600 bps,足够传输 10 bytes 的数据包,可以满足很多应用场所。

发电机性能对比如表 2 所示。通过实验测试与对比发现,本文设计的发电机输出电压最大可以达到 30 V,发电能量达到 1 469 μJ ,较吴少杰等^[13]和陈建明等^[18]研究的电磁式和压电式按键发电结构和能量收集装置,在发电效率上有了显著的提升。且在增强能量收集效率的同时,还兼顾到发电装置的体积的小型化,较刘宇轩等^[20]设计的压电式自发电装置减小了 80% 的体积。

- analysis of a novel electromagnetic vibrational energy harvester with triangular structure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(22): 52-59.
- [3] 吴子英, 常宇琛, 赵伟, 等. 三稳态电磁式涡激振动俘能装置发电性能研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(13): 26-33.
- WU Z Y, CHANG Y CH, ZHAO W, et al. Power generation performance of tri-stable state electromagnetic VIV energy harvester[J]. *Journal of Vibration and Shock* 2022, 41(13): 26-33.
- [4] WILLIAMS C B, YATES R B. Analysis of a micro-electric generator for Microsystems [J]. *Sensors & Actuators A*, 1996, 52: 8-11.
- [5] 刘一民, 郑少明, 董鹏, 等. 新能源发电设备接入的电磁暂态仿真研究[J]. *自动化技术与应用*, 2024, 43(1): 161-165.
- LIU Y M, ZHENG SH M, DONG P, et al. Research on Electromagnetic Transient Simulation Considering New Energy Generating Equipment Access[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2024, 43(1): 161-165.
- [6] 史立伟, 严兵, 张文超, 等. 电励磁分块转子磁通切换发电机电磁特性分析[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(6): 110-118.
- SHI LW, YAN B, ZHANG W CH, et al. Electromagnetic characteristics analysis of electric excitation segmental rotor flux-switching generator[J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(6): 110-118.
- [7] 李恒, 王博文, 李娜, 等. 电磁式振动发电机的机电特性分析与实验研究[J]. *微电机*, 2016, 49(3): 10-13.
- LI H, WANG B W, LI N, et al. Electromechanical characteristic analysis and experimental study of electromagnetic vibration-to-electrical generator [J]. *Micromotors*, 2016, 49(3): 10-13.
- [8] 闫震, 何青, 王东平, 等. 悬臂梁压电式振动发电机材料性能优化研究[J]. *传感技术学报*, 2015, 28(3): 352-356.
- YAN ZH, HE Q, WANG D P, et al. Optimization study on cantilever piezoelectric vibration generator material property[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(3): 352-356.
- [9] 闫晓东, 周公博. 中间梁方式下压电式能量采集器发电性能研究[J]. *电子学报*, 2022, 50(2): 404-414.
- YAN X D, ZHOU G B. Study on power generation performance of piezoelectric energy harvester under intermediate beam fixed mode [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(2): 404-414.
- [10] 马超群, 王德波. 基于压电能量收集技术的自供电系统设计[J]. *微纳电子技术*, 2024, 61(2): 109-116.
- MA CH Q, WANG D B. Design of self-powered system based on piezoelectric energy harvesting technology[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2024, 61 (2): 109-116.
- [11] 贺晓蓉, 刘述喜, 董淳, 等. 三相电容式异步发电机的研究[J]. *电机与控制应用*, 2007(2): 12-15.
- HE X R, LIU SH X, DONG CH, et al. Research on three phase capacitor induction generator [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2007(2): 12-15.
- [12] 贺鹏飞, 杨晓雅, 马星晨, 等. 驻极体静电能量采集器的结构优化[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(9): 1371-1376.
- HE P F, YANG X Y, MA X CH, et al. Structure optimization of electret-based electrostatic energy harvester [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(9): 1371-1376.
- [13] 吴少杰, 黄峰, 朱卓玲, 等. 新型机械按压能量收集装置设计与实验[J]. *传感技术学报*, 2020, 33(1): 28-33.
- WU SH J, HUANG F, ZHU ZH L, et al. Design and experiments of a novel mechanical energy harvesting device[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(1): 28-33.
- [14] 赵兴强, 戴志新, 丁宇, 等. 针对远程无线开关的电磁式冲击能量收集器研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(14): 287-291.
- ZHAO X Q, DAI ZH X, DING Y, et al. Electromagnetic shock energy harvester for a remote wireless switch [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(14): 287-291.
- [15] 刘远芳. 免布控制线的照明装置[P]: CN207011032U, 2018-02-13.
- LIU Y F. Controlled line free illumination device[P]: CN207011032U, 2018-02-13.
- [16] 刘远芳. 无线动能开关模组[P]: CN205003493U, 2016-01-27.
- LIU Y F. Wireless kinetic energy switch module [P]: CN205003493U, 2016-01-27.
- [17] 林伟, 文强, 刘一丁, 等. 利用压电陶瓷振动发电的自供电无线开关[P]: CN205451449U, 2016-08-10.
- LIN W, WEN Q, LIU Y D, et al. Self powered wireless switch using piezoelectric ceramic vibration power generation[P]: CN205451449U, 2016-08-10.
- [18] 陈建明, 郭香静, 赵明明. 压电式无源无线开关的设计[J]. *科技创新与应用*, 2015(3): 19-20.

CHEN J M, GUO X J, ZHAO M M. Design of piezoelectric passive wireless switch [J]. Technology Innovation and Application, 2015(3): 19-20.

[19] FACE B R, BOYD C D, JR G F R, et al. Self-powered switch initiation system[P]. US7692559, 2010-04-06.

[20] 刘宇轩, 赵兴强, 余浩楠, 等. 用于无线开关的冲击式压电自发电模块设计[J]. 传感技术学报, 2023, 36(3): 362-366.

LIU Y X, ZHAO X Q, YU H N, et al. Design of impulse energy harvester using a piezoelectric igniter for wireless switch [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(3): 362-366.

作者简介



赵兴强, 2005 年于重庆大学获得学士学位, 2008 年于重庆大学获得硕士学位, 2014 年于重庆大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学副教授, 主要研究方向为能量收集、智能感知。

E-mail: zxq8562@163.com

Zhao Xingqiang received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Chongqing University, Chongqing, China, in 2005, 2008 and 2014 respectively. He is now an associate professor in Nanjing University of Information Science & Technology, China. His main research interests include energy harvesting and intelligence perception.



殷旭鹏, 南京信息工程大学本科生, 主要研究方向为机器人工程、能量收集。

E-mail: 2623765591@qq.com

Yin Xupeng is now a B. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science & Technology, China. His main research interests include robotics engineering and energy harvesting.



蔡骏 (通信作者), 2012 年获得南京航空航天大学电气工程博士学位。2013 ~ 2015 年为英国谢菲尔德大学自动控制与系统工程系的 EPSRC 研究员, 现为南京信息工程大学教授, 主要研究方向为传感器技术、SR/PSM 驱动器、电动汽车电力驱动系统、无线电力传输、可再生能源系统中的电力电子。

E-mail: j. cai@nuist.edu.cn

Cai Jun (Corresponding author) received the Ph. D. degree in electrical engineering from the Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, in 2012. From 2013 to 2015, he was a EPSRC research associate with the Dept. Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, U. K. Since 2015, he has been a professor with the Nanjing University of Information Science. His research interests include sensorless technologies, SR/PMSM drives, EV power drive systems, wireless power transfer, power electronics in renewable energy systems.