

一种压电换能器热释电防护电路设计

李世国¹, 潘 灿², 赵德峰³, 母江东^{1,2}, 李 军^{1,2}, 何知益²

(1. 中国电子科技集团公司 第二十六研究所, 重庆 400060;

2. 中国电科芯片技术(集团)有限公司, 重庆 401332; 3. 云南无线电有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要:该文探讨了压电材料热释电效应产生的机理, 得出压电换能器中压电陶瓷材料受温度变化会产生极化电荷, 引起的热释电压会使压电换能器输出信号幅值增大, 导致输出失效。因此针对热释电问题提出了两点解决方案。经过对比分析设计了一种 ESD 保护电路来解决热释电问题。该 ESD 保护电路通过设计一种改进型二极管钳位电路, 针对压电换能器存在的极化电荷构建热释电释放环路, 消除了热释电压对有用信号收发影响。最后, 通过对比实验验证了设计方案的可行性。

关键词:压电换能器; 热释电效应; 信号幅值增大; ESD 保护电路; 改进型二极管钳位电路

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

Design of Pyroelectric Protection Circuit for Piezoelectric Transducer

LI Shiguo¹, PAN Can², ZHAO Defeng³, MU Jiandong^{1,2}, LI Jun^{1,2}, HE Zhiyi²

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. CETC Chips Technology Inc., Chongqing 401332, China; 3. Yunnan Radio Co. Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: This study explores the mechanism of the pyroelectric effect in piezoelectric materials and analyzes the polarization charge generated by temperature changes in the piezoelectric ceramic material employed in a piezoelectric transducer. It was observed that the resulting pyrovoltage heightened the output signal amplitude of the piezoelectric transducer, thereby compromising the output's validity. Consequently, two solutions to mitigate the pyroelectric issue were investigated. Following a comparative analysis, an ESD protection circuit incorporating an enhanced diode clamp was devised. This circuit integrated a pyroelectric release loop to discharge the charge, effectively eliminating the impact of pyroelectric voltage on the transmission and reception of useful signals. Finally, the feasibility of the design scheme was verified by comparative experiments.

Key words: piezoelectric transducer; pyroelectric effect; signal amplitude increase; ESD protection circuit; improved diode clamp

0 引言

压电换能器是一种能将机械能和电能相互转换的装置, 已广泛应用于声波传感器、振动控制、医疗设备及测距测向等领域。通过对超声波信号的收发, 压电换能器利用压电材料实现机械能和电能的转换。压电材料的压电效应可实现电信号和声信号的转换^[1]。因此, 压电换能器也可称为超声波换能器。

压电陶瓷是压电换能器常用的压电材料, 是具

有压电特性的电子陶瓷材料。与不包含铁电成分的压电石英晶体相比, 构成压电陶瓷主要成分的晶相均是具有铁电性的晶粒。由于陶瓷是晶粒随机取向的多晶聚集体, 因此, 其中各个铁电晶粒的自发极化矢量也是混乱取向的^[2]。为了使陶瓷能表现出宏观的压电特性, 须在压电陶瓷烧成并于端面被复电极后, 将其置于强直流电场下进行极化处理, 以使原来混乱取向的各自自发极化矢量沿电场方向择优取向。经过极化处理的压电陶瓷在电场取消后会保留一定的宏观剩余极化强度, 从而使陶瓷具

收稿日期: 2023-12-07

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展(军民融合专项(重点))手持式智能气象传感器研发与应用

作者简介: 李世国(1981-), 男, 重庆市梁平区人, 高级工程师, 硕士生。

有了一定的压电性质^[3]。常用的压电陶瓷为钛酸钡系及锆钛酸铅二元系^[4-5]。

当外界环境温度变化较大时,压电材料受温差影响发生形变产生额外的极化电荷,这种极化电荷会在超声波换能器中以静电的形式存在,即压电材料中常见的热释电效应^[6]。热释电效应对传感器的信号处理造成干扰,产生的热释电叠加在输出信号上使其幅值变大,导致信号饱和或淹没有用信号,可能烧坏电路芯片或使器件功能下降,导致压电换能器性能受损^[7]。

本文主要研究压电换能器在温度变化较大时产生的热释电效应。通过在换能器输入输出端口与接地端间设计信号分离及电压释放电路,在保证输出信号不被干扰的情况下消除热释电,该防护电路可有效规避因温度剧烈变化而产生的热释电效应。

1 机理分析

1.1 压电换能器工作原理

压电换能器是利用压电材料在机械力作用下将产生极化电荷的固有属性特点制备而成。一般压电式超声波换能器的压电材料为压电陶瓷。通过将压电陶瓷制成片状,上下两面涂上导电层作为电极,并进行极化处理,可制得压电换能器简易模型。

当施加应力时,材料中的电荷由一个导电平面向另一个导电平面移动,产生的电荷经导电层传导实现电能的转化。这种电能将以信号形式被下一级传感器接收,传感器对接收信号进行处理。根据接收电荷大小和极性判断所受外力大小和方向,再输出处理信号,从而实现机械能完全转换为电能。

1.2 热释电效应原理

如图1所示,温度变化时,以压电陶瓷为核心的压电材料中电荷产生中心偏移,导致自发极化强度变化。因此,在压电陶瓷的上下两个表面,电荷呈现相反的电极性而产生电场力的作用,即热释电效应^[8]。拥有这种特殊性质的材料统称为热释电体,热释电体包括压电陶瓷。

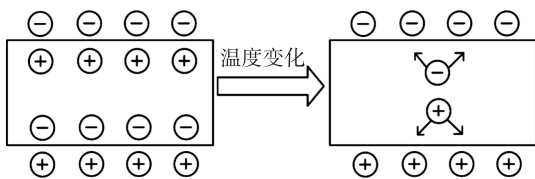


图1 热释电产生

从机理的角度分析,热释电效应是因为温度的改变引起晶体内部电位移发生变化产生的,而表面束缚电荷是因为晶体内部电位移改变而产生。电位移为

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E + P_s \quad (1)$$

式中: P_s 为自发极化强度,仅与热释电材料本身属性有关; E 为外加电场; ϵ_r 为材料介电常数; ϵ_0 为真空介电常数。

热释电系数 p 是温度变化与束缚电荷产生的相关性参数, p 与 D 相关,其根据温度变化的相关性可表示为

$$p = dD/dT = d(\epsilon_r \epsilon_0 E)/dT + dP_s/dT \quad (2)$$

通过式(2)可得,介电常数对 p 有影响,同时受温度影响,自发极化强度变化率对 p 也有影响。一般情况下,材料未通电(偏置电场 $E=0$)时热释电系数为

$$p = dP_s/dT \quad (3)$$

由式(3)可知材料本身不受其他因素影响。

2 压电换能器热释电解决方案

一般元器件中解决热释电效应的方法有:

1) 通过改良压电材料的组成成分,减少其热释电效应产生。

2) 温度变化引起了热释电效应的产生,可通过在器件外部增加隔热层以减小温度变化,减少热释电效应的产生。

3) 将积累的热释电电荷释放,器件能正常工作^[9]。

第1)种方法较复杂,一般情况不适合。第2)种方法增加隔热层,虽然可很好地避免热释电效应,但隔热层会增加设计成本及增大封装尺寸,也不适用于压电换能器。与前面两种方法相比,第3)种方法较简便,成本较低,本文设计采用第3)种方法。

从热释电释放的角度进行设计,最简单方法是直接将换能器与接地端串联,使积累的极化电荷沿着通路直接泄放。但这种直接将换能器端与接地电位相连的放电方法,会引起充电器件模型(CDM)效应^[10]。在器件电路工作过程中,因器件或电路本身因素导致积累静电电荷,在积累电荷过程中并未损伤电路。但在对静电处理的过程中,器件与接地端相连,形成放电现象,称为CDM效应。此时,需

考虑放电电流大小,防止在放电过程中损伤电路。

在此基础上,在器件或静电积累电路与接地端间引入电容及电感,可满足静电放电的需求。其中,电容、电感器件结构简单,且易拆卸更换,方便调试。但电容、电感值需经过精密的设计。若引入电容、电感值较小,在静电放电过程中会在短时间内形成巨大电流,此电流将超出器件本身的工作承载能力,在电流泄放时损伤器件,因此不可取。若引入的电容、电感值较大,则需考虑器件尺寸及电路适配性问题,这将对超声波换能器的封装及性能造成影响。

另一种热释电效应处理方法是使用静电放电保护电路(ESD)。ESD 保护主要是通过在被保护器件或电路后并联旁路保护器件,使大多数 ESD 冲击电流被低阻的旁路保护器件分流,大电流不进入内部电路,同时降低电路承受的冲击电压^[11]。通过此方法可避免因静电放电电流过大损伤器件的问题,同时也避免了使用大电容导致的封装问题。本文研究基于设计 ESD 保护电路解决了压电换能器的热释电问题。

3 热释电释放电路设计

3.1 二极管钳位电路设计

本文设计 ESD 保护电路解决了压电陶瓷材料所产生的热释电效应,设计时先考虑使用瞬态抑制二极管(TVS 二极管)(见图 2)来满足设计需求。

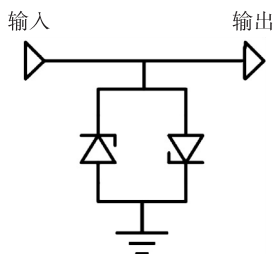


图 2 瞬态抑制二极管

TVS 二极管是一种具有双向稳压特性和双向负阻特性的过压保护器件,类似于压敏电阻器。它应用于各种交流及直流电源电路中,用来抑制瞬间过电压。当被保护电路瞬间出现浪涌脉冲电压时,双向击穿二极管能迅速齐纳击穿,由高阻状态变为低阻状态,对浪涌电压进行分流和箝位,从而保护电路中各元件不被瞬间浪涌脉冲电压损坏^[12]。

TVS 二极管结电容较大(约 50 pF),当应用于

信号传输电路保护时,若信号高于 100 MHz,则需把 TVS 管连接到快速恢复二极管组成桥路中,以降低总的等效电容,提高传输信号频率。压电换能器最大谐振频率可达几百兆赫兹。因此,TVS 二极管不能直接用于压电换能器。

TVS 二极管无法应用于高速传输,因而可利用钳位二极管(见图 3)的单向导通性,设置一个正偏和一个反偏的二极管,组成一个单向导通的钳位放电结构。因二极管正向工作电压及反向击穿电压较小,该电路利用二极管正向导通压相对稳定且数值较小的特点来限制电路中电位,将静电放电瞬间较大的电流限制在一个确定的直流电平上,使器件不被损毁^[13]。



图 3 钳位二极管

钳位二极管不能直接连接在压电换能器与输出端间。因为热释电压可能超过二极管的反向击穿电压而烧毁二极管,同时产生较大的泄放电流,引起压电换能器功能的损坏。因此,需再给钳位二极管增加 1 个限流电阻和 1 个分流支路,如图 4 所示。

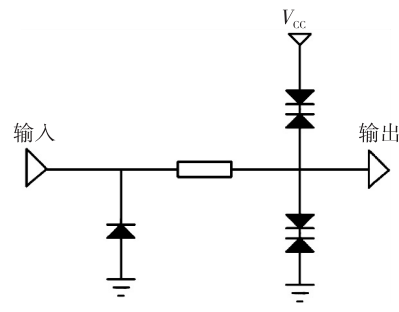


图 4 二极管钳位电路

限流电阻可以在回路放电时防止电流过大引起器件的烧毁,并且将信号的直流分量(热释电压)与交流分量(输出信号)分离,较大的直流电压分压在限流电阻上,再通过钳位二极管释放。通过整个二极管钳位电路,可有效分离热释电产生的极化电压与输出信号,并将直流分量有效泄放。

通过仿真测试,在信号频率较高时,热释电释放电路输入及输出波形如图 5 所示。

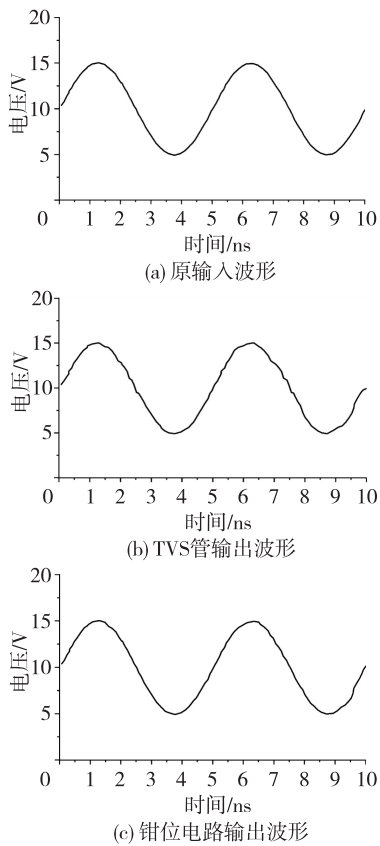


图5 热释电释放电路输入及输出波形

由图5可知,当信号频率较高时,使用TVS二极管电容较大,交流信号快速充放电时残留的电荷影响了信号的幅值,使信号失真情况更明显,因此本次设计采用二极管钳位电路进行设计。

3.2 热释电环路优化

二极管钳位电路可泄放掉大部分由热释电效应产生的极化电荷,但仍有小部分电荷残存。这是因为正向导通二极管有导通电压,此电压因选择二极管类型不同而不同,如硅基二极管电压约为0.7V,肖特基二极管电压约为0.3V,这个导通电压无法随着二极管钳位电路泄放,仍会叠加在输出信号中。为了释放掉这部分电压,考虑设计时在二极管旁并联NMOS管及1个小电容,开关NMOS管由单片机控制导通。所用单片机功能为温度检测及输出使能信号,当温度趋于平稳时,单片机检测到温度变化,输出使能信号控制开关闭合,并联支路导通;当温度发生较大变化时,单片机检测到温度变化,输出使能信号控制开关断开,并联支路断开。本文设计中,在温度变化较大,产生较大的热释电电压可通过二极管钳位电路进行释放;当温度趋于

稳定时,大部分热释电电荷已得到泄放,并联支路此时导通,快速泄放掉剩余热释电电荷,以保证泄放电荷的同时不损伤原电路。改进二极管钳位保护电路如图6所示。

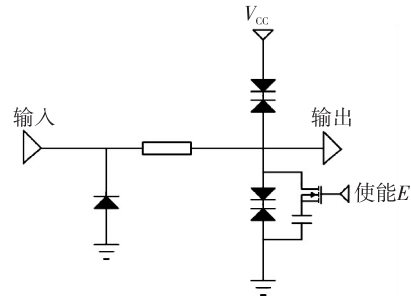


图6 改进二极管钳位保护电路

设计代码控制单片机对外界环境温度的读取,每100个时间触发沿采集温度数据,温差大于 1°C 时控制三极管开关导通,泄放支路导通,实现小电压的释放。在精度要求不高时,单片机及MOS控制开关可由逆温热敏电阻替代。电容可隔断直流,确保MOS管开关处于关断状态时无大电流通过。单片机温度采集系统模块如图7所示。

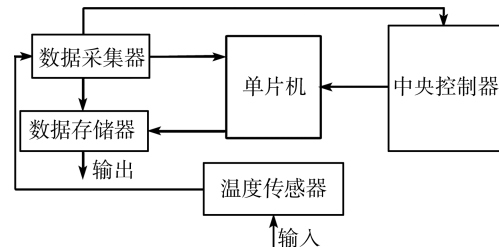


图7 单片机温度采集系统模块

温度传感器模块对外界温度进行识别并采样,数据采集模块将采集的温度数据进行A/D转换处理并进行检验,存储器对采集的温度数据进行存储,中央处理器控制单片机运行,同时对存储器储存的数据进行分析处理,输出下一步指令。

把二极管钳位电路添加单片机前后的输出波形进行对比,加入0.7V的直流偏压,仿真输出结果如图8所示。

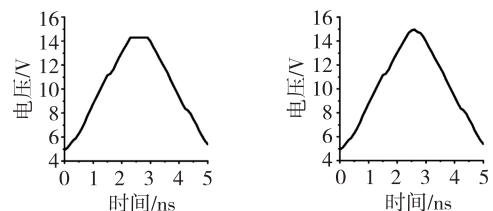


图8 添加单片机前后波形对比图

由图8可看出,0.7V直流偏压会影响信号的输出

幅值,尤其在峰值附近会引起波形失真现象,添加了单片机释放回路后直流偏压被释放,波形恢复正常。

将改进的二极管钳位保护电路与超声波换能器相连,最终搭建实现完整的热释电释放环路。

3.3 仿真验证

在仿真软件中对设计的改进型二极管钳位保护电路进行测试。设输入信号为 10 V 正弦信号与 10 V 直流信号相叠加,正弦信号模拟换能器输出信号,直流信号模拟热释电压。二极管采用常用肖特基二极管 1N5817,压降约 0.5 V。单片机采用 89C51,NMOS 采用常见开关 SI2312DS。电容和电阻通过计算并进行实时调整更换,以保证信号完整性。仿真输出结果如图 9 所示。

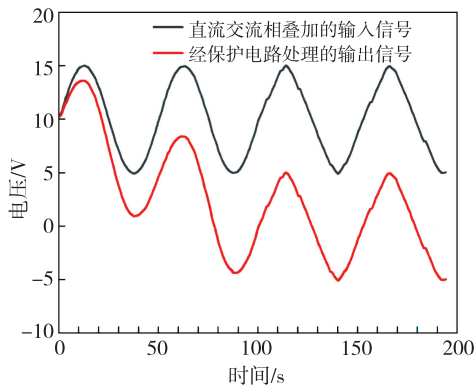


图 9 输入、输出曲线图

4 实验检测分析

4.1 热释电产生检测

综上分析,为验证本文采用的压电陶瓷材料在温度变化较大时产生的热释电效应,将 8 个压电换能器放入 50 °C 烤箱中进行 2 h 烘烤,再将其放入 20 °C 环境中冷却。此时换能器表面温度和环

境温度之差超过 20 °C,测试其电压,然后将电压测试端接地,再进行电压测试,输出波形如图 10 所示。

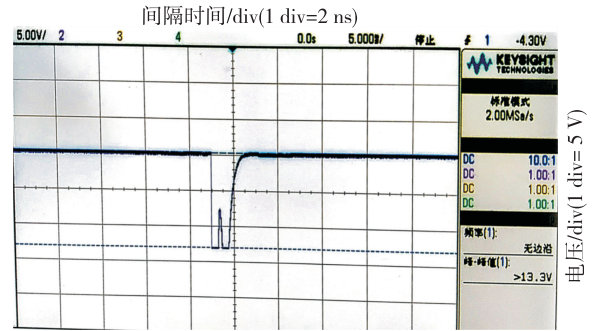


图 10 测试波形输出结果图

由图 10 可看出,在换能器两端出现了较大的热释电电压(约为 13 V),换能器与接地端相连后,生成的电压可快速释放。由此可知,压电陶瓷材料在温差较大的环境下出现了热释电效应,产生了电荷积累,极化电压大于 10 V,且为直流电压,输出信号是幅值约为 5 V 的交流信号,由热释电引起的极化电压与输出信号叠加后直接淹没输出信号,从而使压电换能器功能失效。

4.2 热释电释放环路检测

对压电换能器改进型二极管钳位保护电路(见图 6)进行装配测试。将未装配保护电路的 4 个换能器(1#~4#)与装配保护电路的 4 个换能器(5#~8#)放入 60 °C 烤箱中烘烤 2 h,再将其放入 20 °C 环境中冷却,检测换能器两端电压值。通过检测结果可知,4 只未装配保护电路的换能器两端检测到电压,而 4 只装配了保护电路的换能器两端未检测到电压(小于 0.1 V),说明本文设计的换能器保护电路有效。测试结果如表 1 所示。

表 1 压电换能器检测结果

编号	电压/V						
	0	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min
1#	13.2	13.2	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
2#	11.7	11.9	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
3#	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
4#	12.7	12.6	12.6	12.6	12.7	12.6	12.6
5#	10.5	5.4	0	0	0	0	0
6#	12.1	6.7	3.2	1.1	0	0	0
7#	11.4	7.0	2.9	0	0	0	0
8#	8.4	3.9	0	0	0	0	0

为了验证引入保护电路的压电换能器功能,又

进行了如下实验。将 4 个装配了保护电路的压电换

能器和4个未装配保护电路的压电换能器放入60℃烤箱中烘烤2h,再将其放入20℃环境中冷

却,输出结果如表2所示。表中,“×”表示工作异常,“√”表示工作正常。

表2 压电换能器输出结果

编号	输出状态						
	0	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min
1#	×	×	×	×	×	×	×
2#	×	×	×	×	×	×	×
3#	×	×	×	×	×	×	×
4#	×	×	×	×	×	×	×
5#	×	×	√	√	√	√	√
6#	×	×	×	×	√	√	√
7#	×	×	×	√	√	√	√
8#	×	×	√	√	√	√	√

由表2可看出,未装配的压电换能器经冷却后工作不正常;装配了二极管钳位保护电路后,经过一段时间的热释电放电后压电换能器输出功能恢复正常,输出信号幅值未受影响,说明本文设计方案可行。

换能器功能恢复时间比预期时间更长,其可能因素:

- 1) 经高温烘烤后的压电材料恢复时间较长。
- 2) 二极管钳位保护电路受高温影响泄放速率较低。

5 结束语

本文分析了压电换能器受温度变化所引起信号饱和及输出异常的原因,并基于热释电效应引起的故障设计了一款基于压电换能器的热释电释放环路,可以在不影响压电换能器功能及封装前提下,释放换能器中积累的电荷。实验结果证明,本文设计的热释电释放环路对消除静电电荷积累有效,可以保证压电换能器在温度变化较大时稳定工作。同时,本文设计的热释电释放电路不仅适用于压电换能器,设计思路可借鉴到其他受热释电效应影响(如温度传感器、压电生物传感器等)传感器中,具有较好的工程应用效果^[14]。

后续工作将对热释电释放时间问题进行进一步展开,主要改进热释电释放环路,因钳位二极管导通电流较小,可考虑并联支路或改为使用CMOS器件,加快热释电电压释放速度。

参考文献:

- [1] 蔡贵祥. 基于MEMS压电超声换能器的超声测距系统设计[D]. 重庆:重庆大学,2021.
- [2] 伍平,赵雪梅,董加和,等. 一种防止声表面波器件静电

烧伤的方法[J]. 压电与声光,2021,43(2):222-224.

- WU Ping, ZHAO Xuemei, DONG Jiahe, et al. Method to prevent damage of SAW devices from electrostatic discharge[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2021, 43(2): 222-224.
- [3] 陈金华. 柔性热释电复合薄膜制备及其特性研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [4] 李聪聪. 低频空气耦合超声换能器研究[D]. 南京:南京大学,2021.
- [5] 雷磊,万昊,李睿,等. 面向超声压电换能器的MnO₂掺杂Pb(Sc,Nb)O₃-Pb(Hf,Ti)O₃陶瓷研究[J]. 压电与声光,2023,45(1):39-44.
- LEI Lei, WAN Hao, LI Rui, et al. Study on MnO₂ doped Pb(Sc,Nb)O₃-Pb(Hf,Ti)O₃ ceramics for ultrasonic piezoelectric transducers [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2023, 45(1): 39-44.
- [6] 张显洪,陈彦光,朱勇,等. 声表滤波器热释电效应的研究[J]. 压电与声光,2017,39(6):797-799.
- ZHANG Xianhong, CHEN Yanguang, ZHU Yong, et al. Study on pyroelectric effect of surface acoustic wave filter[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2017, 39(6): 797-799.
- [7] 唐鹏. 融合片上多层电感的宽带ESD保护电路研究与设计[D]. 长沙:长沙理工大学,2021.
- [8] 杨浩. 基于铌酸钾钠单晶正交-四方相变的热释电效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [9] 朱兆旻,何艳梅,程宪宝. 一种新型的耐高压箝位ESD保护电路设计[J]. 北部湾大学学报,2022,37(4):33-36.
- ZHU Zhaomin, HE Yanmei, CHENG Xianbao. Design of a novel clamped ESD protection circuit with high voltage tolerance[J]. *Journal of Beibu Gulf University*, 2022, 37(4): 33-36.

(下转第263页)

- 由算法[J]. 计算机应用, 2018, 38(6):1721-1725.
- WANG Guan, WANG Ruiyao. Routing algorithm based on cluster-head optimization for self-energized wireless sensor network[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(6):1721-1725.
- [2] 赵宇恒, 梁俊睿, 赵康. 一种自供能压电能量收集系统的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2018, 26(5):1-6.
- ZHAO Yuheng, LIANG Junrui, ZHAO Kang. Design and implementation of a self-powered piezoelectric energy harvesting system[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(5):1-6.
- [3] 汪振国, 雷晓燕, 罗锟, 等. 桥梁结构振动试验相似模型的设计及校验[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7):220-226.
- WANG Zhenguo, LEI Xiaoyan, LUO Kun, et al. Design and validation of similarity model in bridge structural vibration tests [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7):220-226.
- [4] 宋立忠, 冯青松, 孙坤, 等. 城市轨道交通高架钢轨波磨地段振动噪声试验[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3):159-168.
- SONG Lizhong, FENG Qingsong, SUN Kun, et al. Test on vibration noise of rail corrugation section on urban rail transit viaduct [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3):159-168.
- [5] 罗浩. 公路曲线连续梁桥车桥耦合振动响应研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [6] 王光庆, 杨斌强, 徐文潭, 等. 非线性宽频压电振动能量采集器的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1):221-230.
- WANG Guangqing, YANG Binqiang, XU Wentan, et al. Research on nonlinear broadband piezoelectric vibration energy collector[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1):221-230.
- [7] CAO D, GAO Y. Free vibration of non-uniform axially functionally graded beams using the asymptotic development method[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2019, 40(1):85-96.
- [8] 施海天, 魏莎, 丁虎, 等. Z型梁结构压电式能量采集性能分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(4):93-100.
- SHI Haitian, WEI Sha, DING Hu, et al. Performance analysis of piezoelectric energy harvesting of a Z-shaped beam [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(4):93-100.
- [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 Xiaodong, ZHOU Gongbo. Study on power generation performance of piezoelectric energy harvester under intermediate beam fixed mode[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2):404-414.
- [10] 贺学锋, 杜志刚, 赵兴强, 等. 悬臂梁式压电振动能量采集器的建模及实验验证[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8):1771-1778.
- HE Xuefeng, DU Zhigang, ZHAO Xingqiang, et al. Modeling and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8):1771-1778.
- [11] KLYUCHNYK I, BONDARENKO A, GALKIN P, et al. Response-time of pyroelectric detector simulator [C]//Sozopol: 2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), 2021:1-5.
- [12] 李搏, 李健壮, 干旭春, 等. 一种系统级封装的ESD保护技术[J]. 微电子学, 2021, 51(2):211-215.
- LI Bo, LI Jianzhuang, GAN Xuchun, et al. A kind of ESD protection technology using system in package [J]. Microelectronics, 2021, 51(2):211-215.
- [13] 彭雄, 徐骅, 刘韬, 等. 射频电路ESD防护优化设计[J]. 微电子学, 2021, 51(3):363-367.
- PENG Xiong, XU Hua, LIU Tao, et al. Optimization design of an ESD protection strategy in RF circuits [J]. Microelectronics, 2021, 51(3):363-367.
- [14] 丁雨瞳, 何杰, 陈哲明, 等. 硅基钽酸锂压电单晶复合薄膜材料及应用[J]. 压电与声光, 2023, 45(1):66-71.
- DING Yuchong, HE Jie, CHEN Zheming, et al. Single-crystal LiTaO₃ composite film material on Si substrate and its application[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2023, 45(1):66-71.

(上接第258页)