

## 基于低延迟并联电感同步开关的压电能量收集电路及系统设计<sup>①</sup>

蒋建东<sup>②</sup> 吴松涛 乔欣

(浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023)

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室 杭州 310023)

**摘要** 针对履带起重机稳钩控制系统中无线传感节点的自供能需求,提出一种基于低延迟改进型自供能并联电感同步开关(ISP-SSHI)的高效能量收集电路。对自供能并联同步开关电感收集电路的开关响应开展了理论模型研究,分析了整流电路开关延迟(SD)对能量收集效率的影响规律,并改进设计了基于 ISP-SSHI 电路的无线传感节点,研制了实验节点装置并进行了工程对比实验。结果表明,改进后电路与自供能并联电感同步开关(SP-SSHI)电路相比输出功率提高了 15.5%,与标准能量收集电路(SEH)相比输出功率提高了 121.8%,满足工程机械装备的需求。

**关键词** 压电能量收集;自供能;开关延迟(SD);传感网络节点

### 0 引言

履带起重机在吊重物(未离地)时,其吊钩往往无法与地面垂直,有一定的倾覆风险,因此需要设计相应的稳钩控制系统来监测吊钩摆动角度和方向以实现起重吊装的稳钩。稳钩控制是为了吊装和搬运后吊装物的快速稳定,保证安全和提高吊装效率。稳钩控制系统需要获取吊臂及重物的位置姿态信息,这些信息需要构建无线传感网络系统来获取,其中,自供能无线传感节点是构成整个系统的关键装置。

环境中具有太阳能、热能和振动能等多种能源,其中振动能由于具有良好的功率密度和集成潜力而得到广泛的关注<sup>[1-2]</sup>。为对环境中耗散的振动能收集以实现系统自供能,需要设计相应的能量收集电路<sup>[3-4]</sup>。传统的方法是由 Ottman 等人<sup>[5]</sup>提出的标准能量收集电路(standard energy harvesting, SEH),该电路在电路设计方面比较简单,但存在能量收集效率低下的问题。Guyomar 等人<sup>[6]</sup>在此基础上,提出

了基于非线性开关技术的电感同步开关(synchronized switch harvesting on inductor, SSHI)电路,通过电压翻转提高了能量收集效率。Lefeuvre 等人<sup>[7]</sup>也提出了一种电荷同步提取电路,该电路通过免除负载匹配过程提高了能量收集效率。上述文献中非线性开关技术的引入明显提升了能量收集效率,并促使国内外学者对如何产生开关控制信号进行了大量的研究。Do 等人<sup>[8]</sup>提出一种使用 4 个晶体管的整流器电路。Du 等人<sup>[9-10]</sup>提出一种使用 1 个或多个电容来执行剩余电荷反转动作的无电感偏置翻转整流器电路。Chen 等人<sup>[11]</sup>也提出一种通过可重构电容阵列实现电压整流的电容整流器电路。Zouari 等人<sup>[12]</sup>在 SSHI 电路中引入了基于分数开路的最大功率追踪技术。此外,还有通过外部逻辑电路驱动的开关<sup>[13]</sup>、机械开关<sup>[14]</sup>和通过速度控制的开关<sup>[15]</sup>等多种实现形式。但上述文献中开关技术的实现一方面需要引入额外的开关控制电路与外接电源,虽然提高了能量的收集效率,但带来了更高的系统功耗。另一方面,其电路的实现更为复杂,需要通过互补金

<sup>①</sup> 国家自然科学基金(51375456)和浙江省自然科学基金(LY18E050025)资助项目。

<sup>②</sup> 男,1974 年生,博士,教授;研究方向:复杂机电系统设计与分析,机械系统动力学;联系人,E-mail: jiangjd@zjut.edu.cn。  
(收稿日期:2020-12-05)

属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺生产加工,难以在实际工程中应用。Lallart 和 Guyomar<sup>[16]</sup> 在并联电感同步开关 (parallel synchronized switch harvesting on inductor, P-SSHI) 电路的基础上,提出一种自供能并联电感同步开关 (self-powered parallel synchronized switch harvesting on inductor, SP-SSHI) 电路,通过非线性元件实现开关的通断控制。Liang 和 Liao<sup>[17]</sup> 进一步改进了 SP-SSHI 电路,并讨论在不同激励水平下 SP-SSHI 与 P-SSHI 电路之间的区别。但是,上述文献只是近似地将系统中的开关延迟 (switching delay, SD) 认定为一个恒定值,并没有考虑到 SD 对能量收集效率产生的影响。

针对上述问题,本文对电路中 SD 进行理论模型研究与关键参数分析,在 SP-SSHI 电路的基础上,提出一种低延迟的改进型自供能并联电感同步开关 (improved self-powered parallel synchronized switch harvesting on inductor, ISP-SSHI) 电路,并基于此设计了自供能无线传感网路节点。通过理论分析与电路仿真,并搭建完整的实验平台,验证了该系统的可行性。

## 1 压电能量收集电路理论分析

为构建无线传感网络,需要有共计 15 个传感网络节点,分别对吊臂的运动参数、驱动机构的动力参数等数据进行采集,并将数据汇集至驾驶室的中央节点进行统一的数据处理,通过中央节点与装备控制器进行数据交互,以实现履带起重机的稳钩控制。图 1 显示了履带吊稳钩的实现过程。

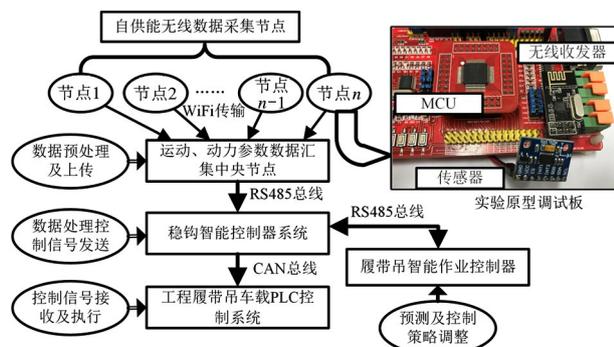


图 1 基于无线传感网络的履带吊稳钩智能控制系统原理图

### 1.1 压电振子等效电学模型

压电悬臂梁满足如下表达式<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} F_p = K_{pE}u + \alpha V \\ I = \alpha u - C_p V \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $F_p$  为压电片的回复力,  $K_{pE}$  为压电悬臂梁的刚度,  $u$  是压电片的位移,  $\alpha$  为压电片的压电应力因子,  $C_p$  为压电片的夹持电容,  $V$  是压电片的输出电压,  $I$  是压电片产生的输出电流。在实际应用中,通常将压电悬臂梁等效为一个电流源  $i_p$  与其夹持电容  $C_p$  与内部电阻  $R_p$  的并联,  $R_L$  为电路的负载。压电振子电流源为  $i_{p(t)} = I_p \sin(\omega t)$ , 其中  $I_p$  是电流幅值,  $\omega$  是振动角频率。

### 1.2 P-SSHI 电路分析

P-SSHI 电路通过在整流桥前并联入一个电感  $L$  和一个开关  $S$ , 开关和电感之间是串联关系,以减少在半个周期内的能量损失,增加整个电路的能量收集效率。

在实际中,因为电感中的等效串联电阻的存在,在电压翻转这一动作后,电感中会损失一部分能量,损耗与振荡电路的品质因子  $Q$  有关,具体如下式:

$$V_{\text{off}} - V_{\text{ref}} = e^{-\frac{\pi}{2Q}} (V_{\text{ref}} - V_{\text{on}}) \quad (2)$$

式中,  $V_{\text{on}}$  和  $V_{\text{off}}$  分别是翻转前后的电压,  $V_{\text{ref}}$  是参考电压,  $Q$  为品质因子。

根据整个电路的电荷守恒定律:

$$\frac{V_{DC}}{R_L} \frac{T}{2} = - \left( \int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{2}} I dt - \int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{2}} I_s dt \right) \quad (3)$$

$$\int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{2}} I dt = -2\alpha U_M + 2C_p V_{DC} \quad (4)$$

$$\int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{2}} I_s dt = -C_p V_{DC} (1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}) \quad (5)$$

联立式(1)、(3)、(4)、(5)得出输出功率为

$$P_{\text{P-SSHI}} = \frac{4\alpha^2 U_M^2 \omega^2 R_L}{(\omega C_p R_L (1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}) + \pi)^2} \quad (6)$$

式中,  $U_M$  为悬臂梁振动的位移幅值,  $\omega$  为振动角频率,  $V_{DC}$  为  $R_L$  两端电压,  $\alpha$  为压电片的压电应力因子。

上述 P-SSHI 电路是工作在理论条件下的,在实际中,开关  $S$  不可能正好在位移的极值处闭合,两者之间必定存在着一定的相位延迟,接下来分析实际情况下的 P-SSHI 电路工作情况。

### 1.3 SP-SSHI 电路 SD 分析与改进

SP-SSHI 电路通过包络检波器、比较器和同步开关 3 部分实现开关  $S$  的工作。图 2 是此 3 部分的局部图。

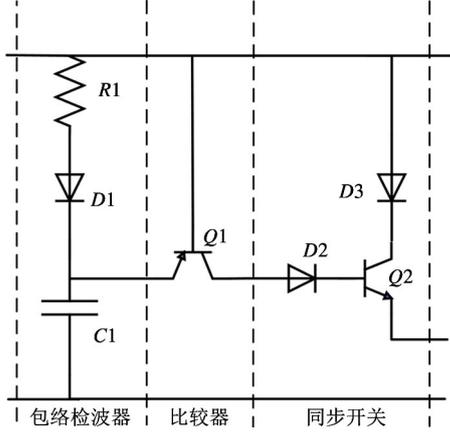


图 2 SP-SSHI 电路局部图

整个电路的延迟总体  $\phi$  也由 3 部分组成。(1) 压电振子的电压与位移之间的相位延迟  $\sigma$ ; (2) 包络检波器的相位延迟  $\theta$ ; (3) 比较器的相位延迟  $\beta$ 。下面分别分析这 3 个相位。

对于压电振子的电压与位移之间的相位差,将内部电容  $C_p$  与电阻  $R_1$ 、二极管  $D_1$  的等效电阻  $R_D$  以及电容  $C_1$  合并成为一个统一的阻抗  $Z$ , 那么阻抗的模  $A_Z$  为

$$A_Z = \sqrt{\frac{1 + \omega^2 R^2 C_1^2}{\omega^4 R^2 C_1^2 (C_p + C_1)^2 + \omega^2 (C_p + 2C_1)^2}} \quad (7)$$

$$\sigma = \tan^{-1}(\omega RC_1) - \tan^{-1}\left(\omega RC_1 - \frac{\omega RC_1^2}{C_p + 2C_1}\right) \quad (8)$$

式中  $R = R_1 + R_D$ 。

对于包络检波器的相位延迟,由于正、负两个半周期的对称性,只讨论正周期的情况,负半周期同理。当压电振子电压  $V_p$  还未到极大值时,开关断开,此时  $V_p$  与  $V_{C_1}$  满足:

$$\frac{V_{C_1}}{V_p} = \frac{1}{1 + j\omega RC_1} = A \angle \theta \quad (9)$$

$$\begin{cases} A = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_1^2}} \\ \theta = -\tan^{-1}(\omega RC_1) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $A$  和  $\theta$  分别是包络检波器的电压幅值比和相位延迟。

对于比较器的相位延迟,此时  $V_p$  达到极大值,显然,有  $V_p^{\text{MAX}} = V_{DC} + 2V_D$

为使比较器工作,需要满足:

$$V_{C_1} - V_p = V_{ON}^{\text{BE}} \quad (11)$$

式中  $V_{ON}^{\text{BE}}$  为三极管的基极-发射极阈值电压。且  $\beta > -\theta$ ,  $C_1$  的值可以被视为常量<sup>[19]</sup>  $AV_p^{\text{MAX}}$ , 因此有:

$$AV_p^{\text{MAX}} - V_p^{\text{MAX}} \cos\beta = V_{ON}^{\text{BE}} \quad (12)$$

于是可得:

$$\beta = \cos^{-1}\left(A - \frac{V_{ON}^{\text{BE}}}{V_{DC} + 2V_D}\right) \quad (13)$$

得出输出功率为<sup>[20]</sup>

$$P_{\text{SP-SSHI}} = \frac{\alpha^2 U_M^2 \omega^2 R_L [1 + \cos\phi - e^{-\frac{\pi}{2Q}} (1 - \cos\phi)]^2}{(\omega C_p R_L (1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}) + \pi)^2} \quad (14)$$

由式(14)可知,在  $\phi \in [0, \frac{\pi}{2}]$  范围内,当且仅当  $\phi = 0$  时,  $P_{\text{SP-SSHI}} = P_{\text{P-SSHI}}$ 。SD 对整个电路的收集效率有着阻碍作用,且  $\phi$  越大,收获的功率越小。结合上述式子,总结 3 类延时对总延时的影响,即  $\sigma$  影响较小、 $\beta$  占主导地位 and  $\theta$  可以忽略不计。因此,为减小 SD,减小  $\beta$  是最有效的方法。

## 2 具有低延迟 ISP-SSHI 压电能量收集电路的节点系统设计

### 2.1 低延迟 ISP-SSHI 整流电路

基于上述分析,为减小  $\beta$  提出一种低延迟的 ISP-SSHI 电路,其电路如图 3 所示。

通过在三极管  $Q1$  的  $B$  极上端加入一个二极管  $D6$ ,从而降低三极管  $Q1$  的基极电压  $V_{ON}^{\text{BE}}$ , 减小  $\beta$  后达到了减小 SD 的目的。图 4 显示 SP-SSHI 与 ISP-SSHI 电路的 SD 在时间常数  $\tau = RC_1$  的变化下的对比情况,由图可知,ISP-SSHI 整体曲线都在 SP-SSHI 曲线之下。

为更清晰地描述低延迟 ISP-SSHI 电路的工作原理,图 5 给出在等效电流源  $i_{p(t)}$  作用下,其正半周期的电路工作状态,负半周期同理。

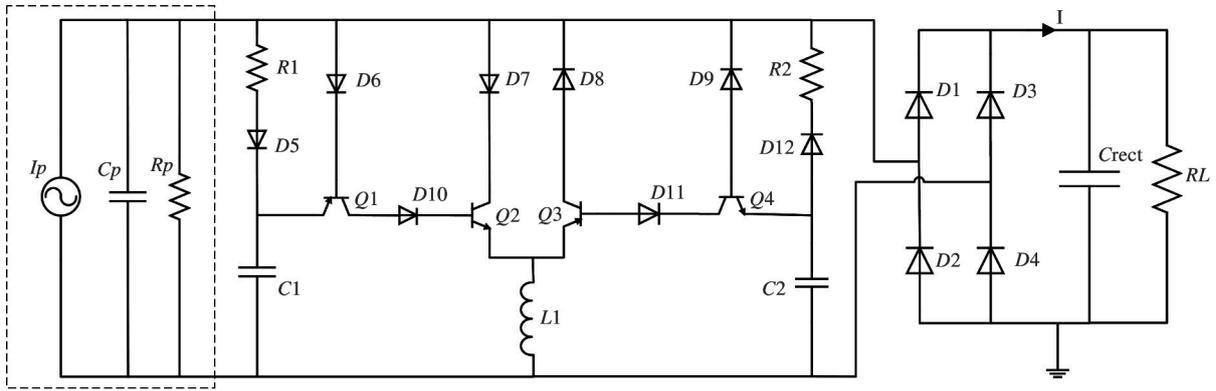


图3 ISP-SSHI 电路

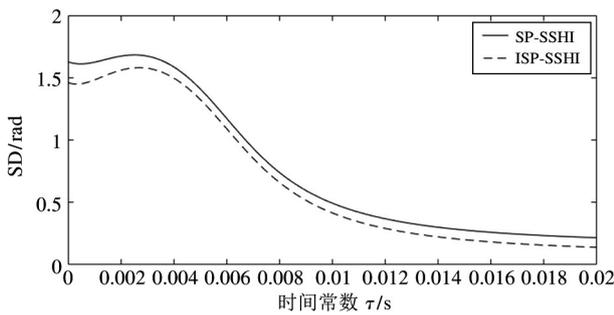


图4 两电路SD对比图

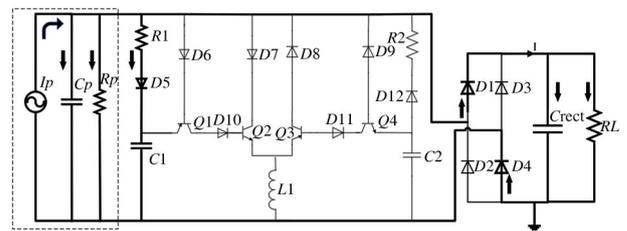
在自然充电阶段,电路由零状态开始工作,电路中的电流流向如图5(a)所示。在这一阶段,电流源经过  $R_1$  和二极管  $D_5$  向电容  $C_1$  充电,整流桥中二极管  $D_1$ 、 $D_4$  导通向负载供电。

在电压第1次翻转阶段,此时压电振子的输出电压由正向最大值下降至  $V_{ON}^{BE}$ , 三极管  $Q_1$  导通,从而带动三极管  $Q_2$  导通,然后  $C_p$  通过  $D_7$ 、 $Q_2$  与电感  $L_1$  形成振荡回路,电容  $C_1$  通过  $Q_1$ 、 $D_{10}$ 、 $Q_2$  放电,电路中的电流流向如图5(b)所示。

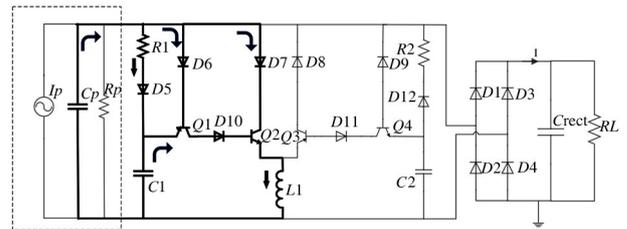
在电压第2次翻转阶段,电路中的电流流向如图5(c)所示。在这个阶段,电感  $L$  开始趋向于放电,由于二极管的单向导通性以及  $Q_3$  内部存在的小寄生电容, $L$  通过  $Q_3$ 、 $D_8$  开始放电。

在电荷中和阶段,电路中的电流流向如图5(d)所示。此时三极管全部断开,但电容  $C_2$  中有残余电荷,因此通过  $D_{12}$ 、 $R_2$  开始放电。

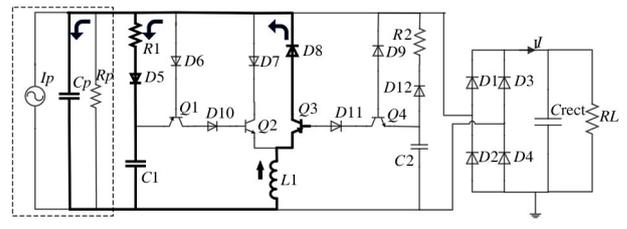
为验证改进后的 ISP-SSHI 电路与原 SP-SSHI 电路之间的区别,现通过仿真软件对 SP-SSHI 与 ISP-SSHI 电路进行仿真测试。仿真参数设置如表1所示。



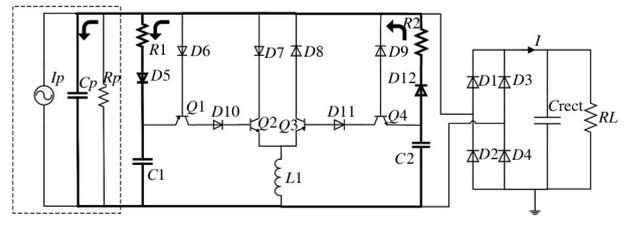
(a) 自然充电阶段



(b) 电压第1次翻转阶段



(c) 电压第2次翻转阶段



(d) 电荷中和阶段

图5 正半周期电路工作状态

表 1 仿真中主要器件的型号及参数

参数	数值
$I_p$	1 mA
频率	100 Hz
$C_p$	33.74 nF
$R_p$	100 k $\Omega$

测试结果如图 6 所示,两者的波形大致相同,但 ISP-SSHI 电路最终稳定的输出电压在 3.5701 V,相比于 SP-SSHI 电路的 3.3213 V,提升约 7.5%。

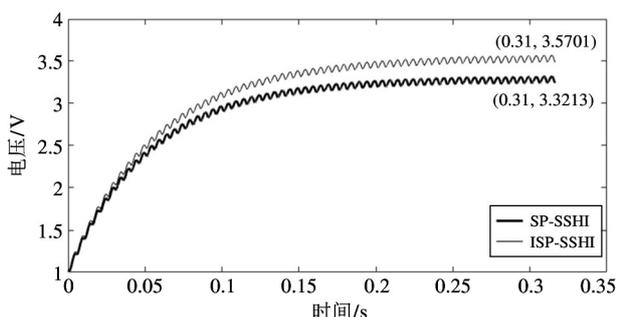


图 6 两种电路输出电压对比图

## 2.2 无线传感节点设计

基于上述低延迟 ISP-SSHI 整流电路,设计应用于稳钩控制系统的无线传感节点系统。系统包括压电能量采集器、整流电路、电压变换电路、中央控制器、传感器和无线收发器。

其中,压电能量采集器使用 L 型双压电晶片压电悬臂梁式换能器以获得更好的低宽频响应。L 型压电悬臂梁式换能器结构如图 7 所示。

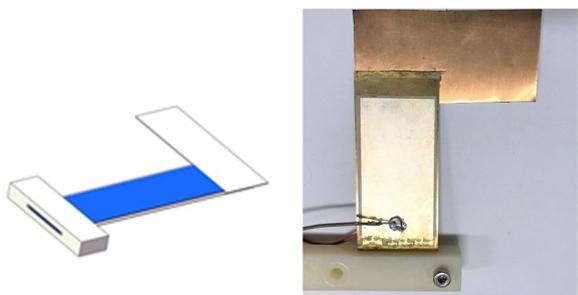


图 7 压电悬臂梁式换能器结构图与实物图

电压变换电路用于将压电振子产生的能量稳定至芯片工作电压,通过比较后选择 ADI 公司的 LTC 3331 超低电压降压-升压型 DC/DC 转换器。该芯片集成一个高电压能量收集电源和一个由可再充

锂电池供电的降压-升压型 DC/DC 转换器,内部带有一个 10 mA 的分流器允许向电池进行简单的充电,并针对多输入系统提供电源路径管理功能,最终输出 3.3 V 电压以供系统工作。同时,为应对弱振动下的产能不足,芯片外接一个锂电池充当后备能源。其电路图如图 8 所示。

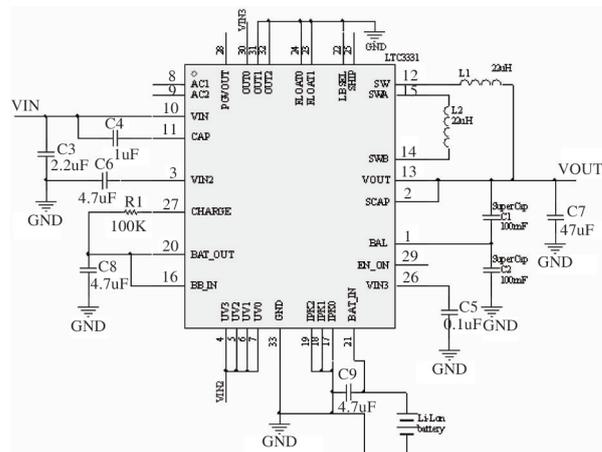


图 8 电压变化电路图

为验证系统的可行性,通过仿真软件对该芯片电路进行仿真测试。为加快仿真速度,将  $I_p$  电流加大 10 倍,芯片 VOUT 输出电压如图 9 所示,显示输出电压在 23 ms 与 30 ms 时有一段平台期,在 31 ms 后稳定在 3.3 V 左右,能够满足系统的工作电压要求。同时为测试系统在带负载时的输出,在 VOUT 后接入一个 10 k $\Omega$  负载电阻,以此测量其输出功率的大小。结果显示,功率与电压波形类似,在电压的平台期,输出功率有略微的下降,在 31 ms 后,峰值功率维持在 11 mW 左右,但这是电流源放大后的输出功率。

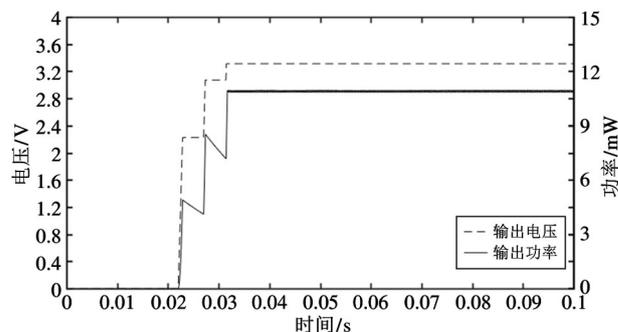


图 9 输出电压和功率波形图

节点的中央控制器选取 MSP 430 F169,该芯片

具有极低的功耗,1.1  $\mu\text{A}$  的待机电流十分适合用于此类低功耗的传感系统使用。无线收发器选用工作在 2.4 GHz 频段的 nRF24L01 器件,通过 SPI 接口与 MSP 430 进行通讯。传感器选择 ADXL 345 超低功耗 3 轴加速度计,通过 IIC 接口与 MSP 430 进行通讯。整个系统由 MSP 430 统一控制休眠与工作状态。

### 3 实验测试

根据上述系统需求,设计相应的无线传感节点系统,并搭建实验平台以验证功能与性能的实验测试,实验平台如图 10 所示。

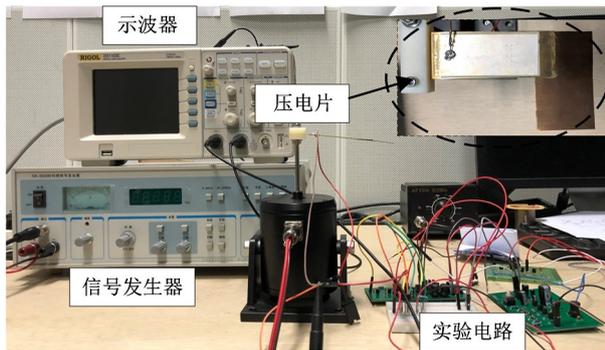


图 10 无线传感节点系统实验平台

本实验选取的压电悬臂梁,其压电片材质为压电陶瓷片,型号为 PZT-5A,压电陶瓷尺寸(长、宽、厚)为 60 mm  $\times$  15 mm  $\times$  0.3 mm,基片尺寸为 70 mm  $\times$  17 mm  $\times$  0.3 mm,L 型外延基片为 45 mm  $\times$  15 mm  $\times$  0.3 mm。实验中由 SA-SG 030 型扫频信号发生器产生正弦激励信号,经由 SA-JZ 002 电磁式激振器产生振动以带动压电悬臂梁。本文电路均采用分立元件实现,具体的元器件选型与参数如表 2 所示。

为验证本文所提出的 ISP-SSHI 电路的优势,特进行对比实验,将 SEH 电路和 SP-SSHI 电路、ISP-SSHI 电路在相同的实验条件下进行输出电压的测量。上述电路的输出电压都与负载电阻有关,因此,选取不同的电阻阻值,分别进行输出电压的测量,得到图 11。

由图 11 可知,随着负载阻值的增大,电路的输出电压都随之增大,其中,本文所提出的 ISP-SSHI 电路能够输出最高的电压。又根据电压与功率的关

系及图 11,得到图 12。

表 2 电路中主要器件的型号及参数

器件名称	型号及参数
二极管 D	1N60P
Q1、Q3	PNP 管 S8550
Q2、Q4	NPN 管 S8050
L1	10 mH
R1、R2	200 k $\Omega$
C1、C2	680 pF
Crect	47 $\mu\text{F}$
RL	33 ~ 220 k $\Omega$

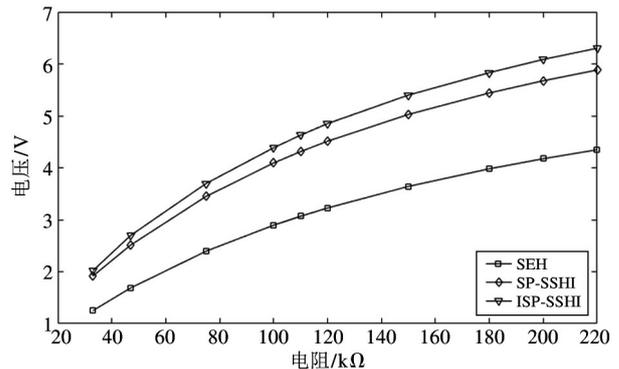


图 11 负载电阻和输出电压之间的关系

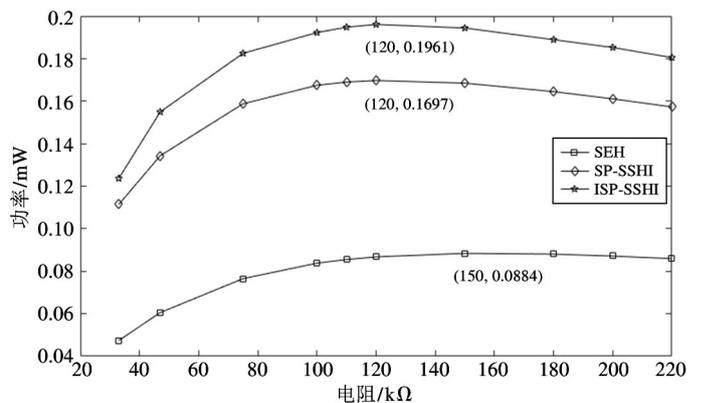


图 12 负载电阻和输出功率之间的关系

由图 12 可知,SEH 电路在负载电阻为 150 k $\Omega$  时输出功率最大,为 88.4  $\mu\text{W}$ ;SP-SSHI 电路次之,在负载为 120 k $\Omega$  时输出 169.7  $\mu\text{W}$  的功率;本文所提 ISP-SSHI 电路输出的功率最大,在负载为 120 k $\Omega$  时输出功率为 196.1  $\mu\text{W}$ 。相比于 SEH 电路,ISP-SSHI 电路输出功率提高 121.8%,对比 SP-SSHI 电路,输出

功率提高 15.5%。

为进一步验证设计的能量采集电路能否满足传感网络节点的工作需求,还需对系统的工作功耗进一步分析。

无线传感节点的工作步骤分为 3 个过程,即休眠阶段、数据采集阶段和数据发送阶段。其中,休眠阶段保持中央处理器、传感器、无线收发器的休眠状态,确保系统的低消耗,并采用定时唤醒机制,休眠一段时间后唤醒 MCU,并进入数据采集阶段。此时,MCU 唤醒加速度传感器,使加速度传感器正常工作,设置 ADXL 345 的输出速率为 1600 Hz,输出 1600 个周期后,关闭传感器,开启无线收发器,进入数据发送阶段。此时将采集到的数据进行发送,发送速率为 1 Mbps,发送时间持续约 40 ms,然后重新进入休眠阶段。每个步骤的功耗如表 3 所示。

表 3 各阶段系统功耗

工作步骤	工作电流 /mA	工作电压 /V	工作时间 /ms	功率/mW
休眠阶段	0.401	3.3	$T_s$	1.32
数据采集 阶段	0.552	3.3	1000	1.82
数据发送 阶段	11.630	3.3	300	38.38

通过调节系统的休眠时间,可以调整系统的平均功耗,使其跟收集的压电能量进行匹配,通过表 3 中的数据,可用下式计算出系统的平均功耗。

$$P = \frac{1.32T_s + 13.334}{T_s + 1.3} \quad (15)$$

式中,  $P$  是平均功耗,  $T_s$  是系统的休眠时间。压电悬臂的最大输出功率为 196.1  $\mu\text{W}$ 。因此,为满足传感器的功耗,在不使用备用电池时,  $T_s$  最少应大于 11.64 s。考虑到能源效率,最佳睡眠时间应不少于 20 s。

## 4 结论

本文提出一种基于低延迟 ISP-SSHI 的高效能收集电路,开发并设计了适用于工程机械装备的自供能无线传感节点,建立了压电振子的电学等效模型与 SP-SSHI 电路的理论模型,并通过仿真分析

和实验对比得到如下结论。

(1) SP-SSHI 电路中 SD 的存在导致了能量收集效率的降低。

(2) SP-SSHI 电路中的 SD 由  $\sigma$ 、 $\theta$ 、 $\beta$  组成,其中  $\beta$  占有主导地位。为减小  $\beta$  可以通过降低三极管的基极-发射极阈值电压实现,并以此提出 ISP-SSHI 电路,仿真结果显示相比于原 SP-SSHI 电路输出电压提升约 7.5%。

(3) 进行了 SEH、SP-SSHI、ISP-SSHI 电路之间的对比实验,测量其输出电压的大小并进行功率计算。实验结果表明,所提电路输出功率为 196.1  $\mu\text{W}$ ,比 SP-SSHI 电路提升 15.5%,比 SEH 电路提升 121.8%。

## 参考文献

- [1] 周兴,叶益迭,夏桦康,等. 基于自适应并联电感同步开关控制的压电能量俘获电路设计[J]. 传感技术学报, 2018, 31(12): 1815-1821
- [2] 高世桥,闫丽,金磊,等. 非线性双端固支梯形梁压电俘能器结构设计与特性分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 398-405
- [3] NICO V, RODRIGUEZ J C, PUNCH J. A vibration energy harvester and power management solution for battery-free operation of wireless sensor nodes [J]. *Sensors*, 2019, 19(17): 3776
- [4] DUCHARNE B, GUPTA B, LITAK G. Simulation of synchronized-switching method energy harvester including accurate piezoceramic nonlinear behavior [J]. *Energies*, 2019, 12(23): 4466
- [5] OTTMAN G K, HOFMANN H F, LESIEUTRE G A. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(2): 696-703
- [6] GUYOMAR D, BADEL A, LEFEUVRE E, et al. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2005, 52(4): 584-595
- [7] LEFEUVRE E, GUYOMAR D, BADEL A, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 126(2): 405-416
- [8] DO X D, NGUYEN H H, HAN S K, et al. A self-powered high-efficiency rectifier with automatic resetting of

- transducer capacitance in piezoelectric energy harvesting systems[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2015, 23(3):444-453
- [9] DU S, SESHIA A A. An inductorless bias-flip rectifier for piezoelectric energy harvesting[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2017, 52(10):2746-2757
- [10] DU S, JIA Y, SESHIA A A. An efficient inductor-less dynamically configured interface circuit for piezoelectric vibration energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 32(5):3595-3609
- [11] CHEN Z, LAW M K, MAK P I, et al. Fully integrated inductor-less flipping-capacitor rectifier for piezoelectric energy harvesting[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2017, 52(12):3168-3180
- [12] ZOUARI M, NAIFAR S, BOUATTOUR G, et al. Energy management based on fractional open circuit and P-SSHI techniques for piezoelectric energy harvesting[J]. *Technisches Messen*, 2018, 86(1):14-24
- [13] TIWARI R, BUCH N, GARCIA E. Energy balance for peak detection method in piezoelectric energy harvester[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(8):1024-1035
- [14] GIUSA F, GIUFFRIDA A, TRIGONA C, et al. Random Mechanical Switching Harvesting on Inductor: a novel approach to collect and store energy from weak random vibrations with zero voltage threshold[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 198:35-45
- [15] CHEN Y Y. Piezoelectric power transducers and its interfacing circuitry on energy harvesting and structural damping applications[D]. Taipei: College of Engineering, National Taiwan University, 2013:20-23
- [16] LALLART M, GUYOMAR D. An optimized self-powered switching circuit for non-linear energy harvesting with low voltage output[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 17(3):035030
- [17] LIANG J, LIAO W H. Improved design and analysis of self-powered synchronized switch interface circuit for piezoelectric energy harvesting systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(4):1950-1960
- [18] 严小伟. 基于压电悬臂梁的俘能系统研制[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2018:20-24
- [19] CHEN Z S, HE J, LIU J H, et al. Switching delay in self-powered nonlinear piezoelectric vibration energy harvesting circuit: mechanisms, effects, and solutions[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(3):2427-2440
- [20] LALLART M, WU Y C, GUYOMAR D. Switching delay effects on nonlinear piezoelectric energy harvesting techniques[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(1):464-472

## Piezoelectric energy harvesting circuit and system design based on low delay parallel inductance synchronous switch

JIANG Jiandong, WU Songtao, QIAO Xin

(\* College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

(\*\* Key Laboratory of Special Equipment Manufacturing and Advanced Processing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023)

### Abstract

Aiming at the self-powered demand of wireless sensor nodes in the crawler crane hook stabilization control system, a high-efficiency energy harvesting circuit based on a low-latency improved self-powered parallel synchronized switch harvesting on inductor (ISP-SSHI) is proposed. A theoretical model study is carried out on the switching response of the self-powered parallel synchronous switch inductance collection circuit, the influence of the switching delay (SD) of the rectifier circuit on the energy collection efficiency is analyzed, and a wireless sensor node based on the ISP-SSHI circuit is designed. The experimental node device is developed and the engineering comparison experiment is carried out. The results show that the output power of the improved circuit is increased by 15.5% compared with the self-powered parallel synchronized switch harvesting on inductor (SP-SSHI) circuit and an increase of 121.8% compared with the standard energy harvesting (SEH) circuit, which could meet the needs of construction machinery equipment.

**Key words:** piezoelectric energy harvesting, self-powered, switching delay (SD), sensor network node