

热电能量采集自适应阻抗匹配电路设计

毛世杰 陈仁文

(南京航空航天大学 南京 210016)

摘要:为了实现自供电的无线网络节点,本文提出了基于MSP430的低功耗自适应阻抗匹配设计方案。为了降低阻抗匹配电路的功率消耗,方案使用MSP430产生、调节PWM波的参数控制MOS开关产生虚拟阻抗,以实现最大功率跟踪。使用MSP430内部AD模块实时测量电路参数,使用扰动观察法进行反馈调节。设计实验获得了输出功率与PWM波占空比之间的关系,并在变温度条件下测试了方案的工作性能。实验表明本文提出的控制方案可以实现自供电稳定工作,并且可以大幅提高能量收集的效率和输出功率。

关键词:热能采集;虚拟阻抗;低功耗;PWM调制

中图分类号: TN8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Adaptive impedance matching circuit design for thermal harvest

Mao Shijie Chen Renwen

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at realizing the self-powered wireless network node, this paper proposes an adaptive impedance matching scheme for thermal harvest with low power consumption based on MSP 430. In order to reduce the power consumption, micro controller MSP430 is used to output PWM wave to control the MOS switch. The scheme emulates a resistor to achieve maximum power tracking. A/D module inside MSP430 gets the circuit parameters to regulate the PWM wave using perturb-observe method. This paper designs experiment to obtain the relationship between the output power and the duty cycle of PWM wave. Then, some experiments have been done to test the working performance of the scheme under variable temperature conditions. Experiments show that the scheme proposed in this paper realizes the stable self-power supply and improves the energy harvesting efficiency and the output electric power greatly.

Keywords: thermal harvest; resistor emulation; low power consumption; PWM modulation

1 引言

对现代结构进行健康监测和实时管理对提高系统安全有重要作用^[1]。为解决健康监测系统电源线信号布线困难的问题,越来越多的传感器开始使用无线数据发射模块^[2]。但是目前大多数无线传感器仍然通过干电池进行供电,无法长时间的确保节点正常工作。无线节点的供电问题已经成为无线传感网络技术发展的主要瓶颈,能量供给技术已经成为该技术的核心课题之一。

温差发电装置因为结构紧凑、内部不含运动装置、无磨损泄漏的优点逐渐进入了人们的视野,一批应用于各

领域的温差发电器相继投入使用^[3]。目前关于热电能量采集的研究大多集中于如何获得性能更好的温差材料,另有少量的关于温差发电装置的结构性能优化设计^[4],而对如何高效的收集利用所得能量的研究仍有所欠缺。

为确保收集的能量能够支持无线节点工作,无线网络节点均采用低功耗设计^[5]。并通过组网、算法优化降低系统功耗^[6-7]。还有动态电源管理技术,选取不同工作模式和关闭不工作的外设,在最大程度上降低功耗^[8]。多数能量管理方案都将环境能量源假设为恒定,优化节点功耗;但实际应用中环境能量多为随机变化的值,如何控制提高能量收集效率的研究还较为匮乏。

收稿日期:2015-12

2 热能转化原理

2.1 塞贝克效应

热能收集的基本原理是塞贝克效应,即在两种不同的金属导体组成的回路中,如果接头1和接头2维持在不同的温度,则在导体的断开处 T_1 和 T_2 之间,将会产生一个电压:

$$V_{sc} = \alpha_{ab}(T_1 - T_2) \quad V_{sc} = \alpha_{ab}(T_1 - T_2) \quad (1)$$

2.2 温差发电装置

温差发电装置(TEG)是一种基于塞贝克效应的热能转换器件,可以将热能直接转化为电能。每一个温差发电片由几千个热电偶电器串联,且热并联而成。每一个热电偶是由 P、N 两种类型不同的半导体通过导流片串联而成,导流片的电导率较高并被固定在陶瓷片上。TEG 的开路电压可表示为^[9]:

$$V_{oc} = n\alpha(T_H - T_C) = S\Delta T_{TEG} \quad (2)$$

式中: n 为 TEG 的 PN 结对数,一般为几百到一千。用 α 表示热电偶的塞贝克系数,用 S 表示整个 TEG 的塞贝克系数。一般情况,在温差一定时,温差发电片的内阻 r 是一个固定值,当温差发电装置所处环境温度发生变化,温差发电装置内部温度以及其两端温差都将发生变化,导致温差电元件中有效传热热流变化,最终改变温差发电装置内阻。温差发电装置内部所含半导体单元越多这种变化越明显。

3 电路分析

3.1 电路分析

本文旨在设计温差变化环境下的热能收集阻抗匹配电路,温差发电装置在温差变化环境中输出电压与内阻均有较大波动。所以选用同时具有升降压功能的 buck-boost 电路进行设计,电路如图 1 所示。

定义 MOS 开关两端的电压为 v_1 、通过的电流为 i_1 ,二极管两端的电压为 v_2 、通过的电流为 i_2 ,电感两端的电压为 v_L 、通过的电流为 i_L 。在一个工作周期中电感电流上升、下降、为 0 的时间分别为 $d_1 T_s$ 、 $d_2 T_s$ 、 $d_3 T_s$ 。

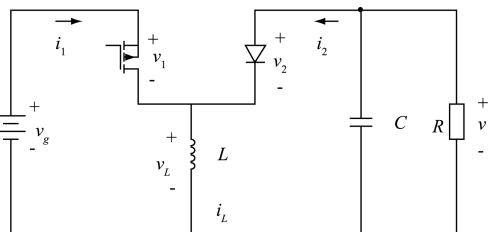


图 1 buck-boost 电路参数定义

为方便分析,定义以上各参数在一个工作周期内的平均值为 $\langle v_1 \rangle$ 、 $\langle i_1 \rangle$ 、 $\langle v_2 \rangle$ 、 $\langle i_2 \rangle$ 。电路参数在一个周期内的变化规律如图 2 所示。

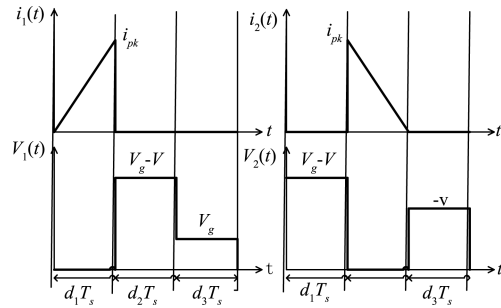


图 2 buck-boost 电路参数变化周期

电感电流峰值为:

$$i_{pk} = V_g d_1 T_s / V_g \quad (3)$$

平均电感电压为:

$$\langle v_L(t)_{T_s} \rangle = d_1 \langle v_g(t)_{T_s} \rangle + \langle v(t)_{T_s} \rangle \quad (4)$$

可以认为在整个工作周期中的电感电压为 0,整理求解 d_2 :

$$d_2(t) = -d_1(t) \langle v_g(t)_{T_s} \rangle / \langle v(t)_{T_s} \rangle \quad (5)$$

将(5)带入 $v_1(t)$ $v_1(t)$ 的平均表达式:

$$\langle v_1(t)_{T_s} \rangle = \langle v_g(t)_{T_s} \rangle \quad (6)$$

$i_1(t)$ $i_1(t)$ 的平均表达式为:

$$\langle i_1(t)_{T_s} \rangle = \int_t^{t+T_s} i_1(t)_{T_s} dt / T = q_1 / T \quad (7)$$

式中: q_1 即一个周期内 i_1 曲线下方图形面积。

将式(3)带入式(7),消去 i_{pk} 得:

$$\langle i_1(t)_{T_s} \rangle = d_1^2(t) T_s v_1(t)_{T_s} / 2L \quad (8)$$

得到:

$$R_c(d) = \langle v_1(t)_{T_s} \rangle / \langle i_1(t)_{T_s} \rangle = 2L / d_1^2 T_s \quad (9)$$

同理可以得到:

$$\langle P(t)_{T_s} \rangle = \langle i_1(t)_{T_s} \rangle^2 / R_c(d) \quad (10)$$

3.2 最大功率点

由开关电路等效电路图可知匹配阻抗与内阻 r 、负载 R 的关系:

$$r = R_c(d) + R_L \quad (11)$$

由式(10)可以看出开关电路的输出功率与输入功率相等,即 $R_c(d)$ 不消耗功率,温差发电装置的输出功率均由负载 R 获得,当两者之和与内阻相等时电路工作在最大功率点。

4 控制方案

4.1 控制电路

目前温差能量收集的普遍问题是能量转换效率较低,这就要求能量收集电路在内阻和负载发生变化时能及时调整电路参数使输出功率保持在最大值,此技术称为 MPPT(最大功率点跟踪技术)。由于温差发电装置的输出功率较小,传统的 MPPT 方案由于功率浪费大、算法复杂、硬件要求高等缺点,并不适用于此阻抗匹配电路。因此,本文提出基于 MSP430 的改进扰动观察法阻抗匹配

方案。

由 MSP430 的定时器 A 产生 PWM 波,由于 MSP430 的输出电压可能不足以使 MOS 开关闭合,所以设计一个三极管拉高后输入到 MOS 开关。阻抗匹配电路的输出电压会超过 MSP430 中 A/D 模块的最大值,需要分压后接入。为防止在 MSP430 阻抗匹配电路对 TEG 产生冲击,在电路的输入端增加一个电容。

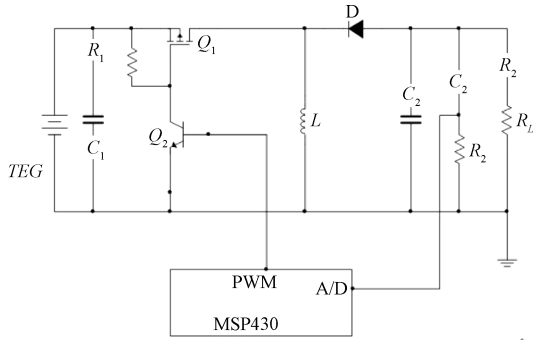


图3 自适应阻抗匹配电路控制系统电路

4.2 控制流程

应用扰动观察法,需要检测 TEG 的实时输出功率,传统的功率测量方法需要测量 TEG 的输出电压和输出电流。然而测量输出电流需要引入采样电阻,采样电阻太小会消耗大量功率;采样电阻太大会严重影响电路的工作。这种方法并不适用于输出能量较小的 TEG^[10]。为解决此问题,本文提出通过测量储能电容两端电压计算 TEG 输出功率的方案。

在扰动观察法中,并不需要确切的知道 TEG 输出的功率;只需要比较不同占空比下 TEG 输出功率的大小。在负载电路工作状态不变的前提下,经过一定时间后,电容获得能量较多的状态对应的占空比更加靠近最大功率点。在调节占空比之前首先测量储能电容两端的电压 V_1 ,经过 Δt 后再次测量储能电容两端的电压 V_2 。根据电容能量计算公式计算 TEG 在带负载情况下的充电功率。接着改变 PWM 波的占空比,使用同样的方法计算占空比变化后的 TEG 带负载的充电功率,两者相减即可计算出 TEG 输出功率的变化 ΔP 。控制算法每次启动都先测量电路目前的工作状态,可以有效的减小因环境温度突变带来判断错误的几率。

在扰动观察法的理论中,TEG 输出的最大功率点处应有 $\Delta P=0$;但在实际应用中,很难找到这一点。如果使用 $\Delta P=0$ 作为判定最大功率点的依据,就会导致控制系统一直在最大功率点附近震荡,导致 MSP430 一直处于工作状态无法进入低功耗模式,会增加系统的功耗。为此,设置一个参数 e ,当 ΔP 的绝对值小于 e 时,即认为系统达到了最大功率点,MSP430 随即进入低功耗模式,等待下一次激活,流程如图4所示。

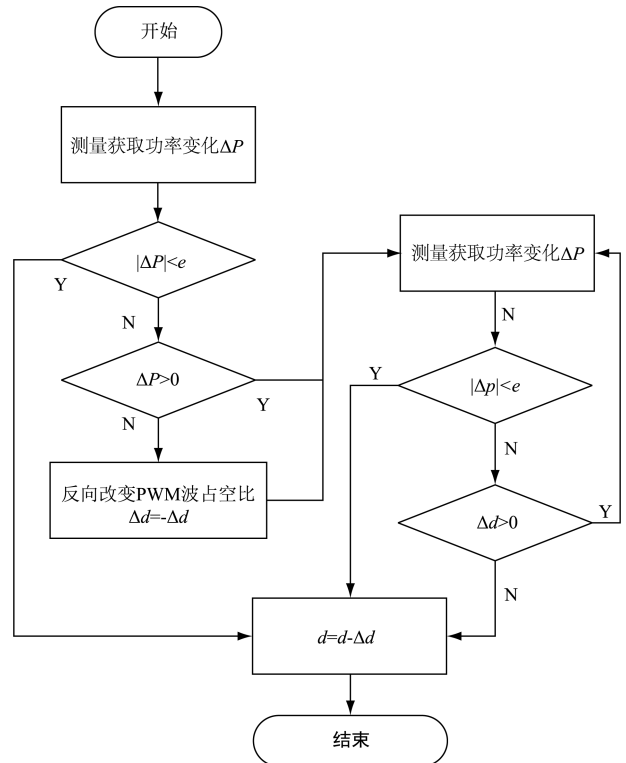


图4 阻抗调节控制程序流程

5 实验和结果分析

为了验证此阻抗匹配电路的工作性能,搭建了试验平台。温差发电片热端选用 PTC 铝壳陶瓷加热板,冷端采用强制风冷散热^[11]。电容值选用 $47 \mu\text{F}$ 、 $100 \mu\text{F}$,电感选用 $470 \mu\text{H}$,MOS 开关选用 SI2301。

实验首先选取两个不同阻值的负载,占空比 d 从 0.05 开始以 0.05 的步幅逐渐增加到 0.95,记录负载两端电压,计算输出功率,结果如图5所示。接着,为模拟工作环境中的温度变化,实验采用先开启热源再关闭热源,始终保持强制对流的方式,使温差发电片的工作状态持续变化。分别记录直接输出、 d 固定及 d 受控变化情况下温差发电装置的输出功率,结果如图6所示。

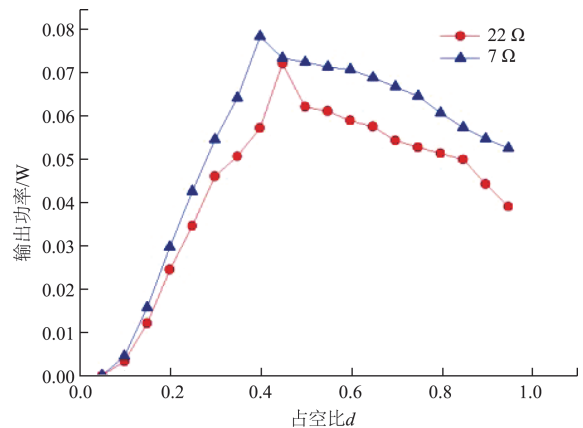


图5 不同负载情况下 TEG 输出功率

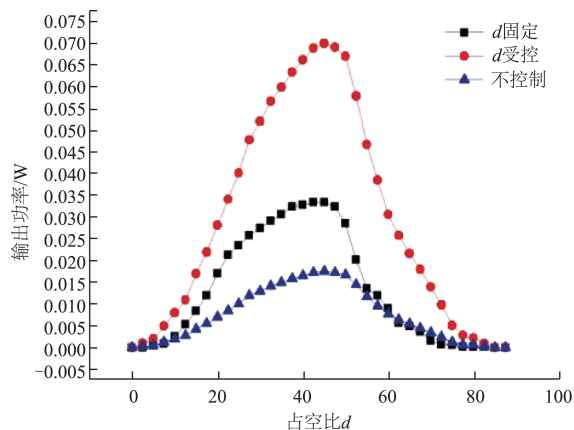


图6 控制效果对比实验

由图6可以看出,不同的负载情况下最大功率点的PWM占空比 d 随负载变化明显。当环境温度发生变化时,温差发电片的输出电压及内阻均由较大幅度的变化。只有不断调节PWM的占空比跟踪最大功率点才能最大程度收集环境中的热能,达到最高的工作效率。

6 结论

本文利用MSP430以及buck-boost转换电路,成功设计了自适应阻抗匹配的热能收集方案,并搭建实验系统加以验证。在实验室搭建的实验环境下,温差达到 10°C ,本方案收集的功率完全满足无线节点等负载的工作需求,不再需要额外的能量输入。实验表明,本热电能量采集自适应阻抗匹配电路工作稳定,对后续的自供电无线节点设计具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 蒋新花,丁德宝,沈庆宏. 应用于桥梁结构健康监测

的低噪声振动测量系统实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(2):116-119.

[2] 卢庆林. 基于单片机MPS430F的无线通信系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12):74-77.

[3] 张建中. 温差电技术[M]. 天津:中国电子科技集团公司第十八研究所, 2008.

[4] 屈健,李茂德,乐伟,等. 半导体温差发电器的工作性能优化[J]. 低温工程, 2005(2): 20-23.

[5] 朱海洋,张合,马少杰. 低功耗声/超声复合传感器节点设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2223-2230.

[6] SHI W, JIANG Y, ZHAO Y. A backbone formulation algorithm in wireless sensor network based on cross-entropy method [J]. Instrumentation, 2014,1(1):38-48.

[7] 黄庆卿,汤宝平,邓蕾,等. 无线传感器网络子带能量自适应数据压缩方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9):1998-2003.

[8] 吴琦,熊光泽. 基于随机决策模型的动态功耗管理策略研究[J]. 计算机学报, 2007,30(4):622-628.

[9] TAN Y K. Energy harvesting autonomous sensor systems: design, analysis, and practical implementation [M]. CRC Press, 2013.

[10] 陈欢,张兴,谭理华. 扰动观察法能量损耗研究[J]. 电力电子技术, 2010,44(4):15-16.

[11] 周泽广. 温差发电器的传热特性及机理研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.

作者简介

毛世杰,1991年5月出生,现为南京航空航天大学硕士研究生,主要研究方向为环境能量采集、测试计量技术与仪器。

E-mail:maoshijie802@sina.com