

引用格式:岳宏卫,杨俊,王桢楠,等. 基于单电感双输入双输出 Boost-buck DC-DC 的高转换效率能量收集电路[J]. 微电子学与计算机,2021,38(7):48-53. [YUE H W, YANG J, WANG A N, et al. A high convert efficiency energy harvesting circuit based on single-inductor dual-input dual-output boost-buck DC-DC [J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(7): 48-53.]

基于单电感双输入双输出 Boost-buck DC-DC 的高转换效率能量收集电路

岳宏卫, 杨 俊, 王桢楠, 肖 鑫, 韦保林

(桂林电子科技大学 广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 基于 TSMC 0.18 μ m CMOS 工艺,设计了一种应用于物联网(IoT)无线传感器节点的双输入双输出高转换效率能量收集电路,在最大功率点跟踪技术和整流技术支持下实现对压电能(PZ)和热电能(TEG)两种能量源的自主能量收集.电路在轻载状态下,Boost 升压回路对超级电容和负载供电,实现双路输出;在重载状态下,Boost 升压和 Buck 降压回路同时对负载供电,弥补了能源不足的缺陷.通过引入非连续导通模式(DCM)、连续导通模式(CCM)的自主切换技术,有效减少电感上的电流反向泄漏,显著提高了电路转换效率.仿真结果表明峰值转换效率可达到 90.6%.

关键词: 双源;整流;最大功率追踪

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2021)07-0048-06

A high convert efficiency energy harvesting circuit based on single-inductor dual-input dual-output boost-buck DC-DC

YUE Hongwei, YANG Jun, WANG Annan, XIAO Xin, WEI Baolin

(Guangxi Key Lab. of Precision Naviga. Technol. and Applic., Guilin Univ. of Elec. Technol.,
Guilin 541004, China)

Abstract: Based on TSMC 0.18 μ m CMOS process, a high conversion efficiency energy harvesting circuit with dual-input and dual-output was designed for wireless sensor nodes of the Internet of Things (IoT). With the support of maximum power point tracking technology and rectification technology, the autonomously harvest energy from both piezoelectric energy (PZ) and thermoelectric energy (TEG) sources was realized. Under light load, the Boost circuit can supply power to the super-capacitor and the load to achieve dual output, and under heavy load, the Boost and Buck circuits supply power to the load at the same time to compensate for the energy shortage. By introducing the independent switching technology of discontinuous conduction mode (DCM) and continuous conduction mode (CCM), the reverse current leakage on the inductor is effectively reduced and the conversion efficiency of the circuit is significantly improved. The simulation results show that the peak conversion efficiency can reach 90.6%.

Key words: dual source; rectification; maximum power tracking

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61861009, 12064003); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(2019YCXS017, 2020YCXS034)

1 引言

近些年来随着物联网和可穿戴设备等新兴产业的不断发展,极大地推动了能量收集技术的进步.采用微弱环境能量来为物联网中的无线传感器网络供电,可达到延长电池使用寿命或取代电池的目的^[1].

环境中微弱能量主要有光伏(PV)、热电(TEG)、压电(PZ)、射频(RF)等,一般在几微瓦到几十毫瓦之间.为达到对环境能量的有效利用,能量来源的多元化和较高的转换效率成为目前的研究热点.传统能量收集电路可在输入电压为 20 mV 时工作,静态功耗仅为 25 μ W,转换效率达到 75%,但仅是对单个能量源进行能量收集,没有考虑单一能量源供能不足的问题^[2],且电路需要电池辅助才能启动.文献[3]对能量收集中实现了电路多能量源输入和自启动,但缺少轻、重负载模式的调节,使得电路转换效率只有 74%.

本文设计了一种应用于物联网的单电感双输入双输出 Boost-buck DC-DC 能量收集电路.利用整流技术和最大功率追踪技术,不但实现了电路的自启动和较高的输入追踪效率,还弥补了能量收集电路供能不足和需要电池辅助启动的缺陷;通过在 Boost-buck 结构中实现自适应死区过零检测(ZCD)和在轻、重负载条件下的非连续导通模式(DCM)和连续导通模式(CCM)的自主切换,减小了电感上的电流反向泄漏,显著提高电路的整体转换效率.

2 电路整体结构设计

本文主要针对压电能(PZT)和热电能(TEG)两种能量源进行收集,所设计电路整体结构如图 1 所示,包括整流电路、最大功率追踪电路(MPPT)、Boost 升压电路、Buck 降压电路和控制电路.针对热电能(TEG)利用 MPPT 技术经 S_2 控制接通 Boost 升压电路对超级电容(C_{barr})和负载(R_{load})供电,Buck 降压电路仅在重载状态下从 C_{barr} 处对负载供能.压电能(P_z)经过整流电路通过开关 S_4 控制为整体电路提供一个稳定的 1.2 V 电源(V_{dd})且同时向 C_{barr} 充电.

电路开始启动时,首先通过 S_4 导通,为整体电路提供电源(V_{dd}),其次将多余的能量储存在超级电容(C_{barr})中.电路正常工作时分为两种工作状态.轻载状态下电路工作在非连续导通模式(DCM),在初

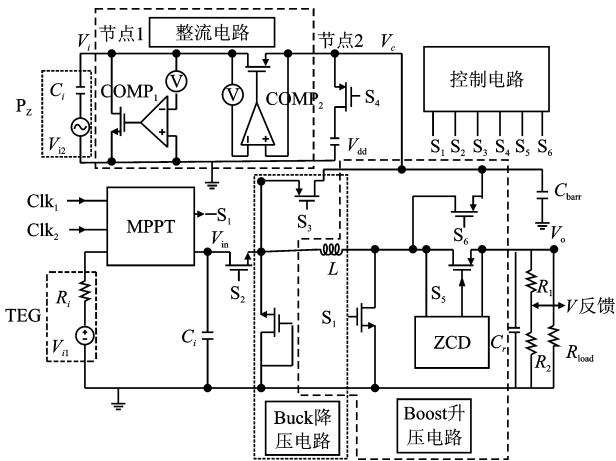


图 1 电路整体结构

始轻载状态下, S_1 正常工作, S_2 一直导通, S_3 不工作, S_5 不工作, S_6 正常工作,优先向超级电容(C_{barr})处充电.超级电容达到预设电压后, S_6 关闭, S_5 开始工作,Boost 升压开始为负载供电.当 TEG 不能满足负载正常工作时, S_2 间接性导通, S_3 开始正常工作,电路进入重载状态,此时 Boost-buck 电路工作在连续导通模式(CCM).如图 2 所示为系统从轻载到重载状态下部分开关管(S_1 、 S_3 、 S_5)的控制时序信号以及电感上电流 $i(L)$,由图可看出电感电流的变化实现了电路从非连续导通模式(DCM)到连续导通模式(CCM)的自主转换.

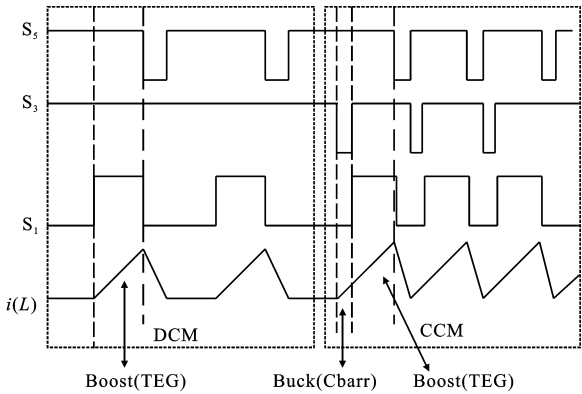


图 2 部分时序信号

3 整流启动电路设计

3.1 整流启动电路

整流启动设计使得电路无需再引入其他辅助性电路启动,不仅简化电路结构还降低系统功耗.采用整流电路对压电源(P_z)进行整流实现自启动.整流电路等效结构如图 3 所示,电路初始化阶段,存储在

$$P_i = V_{in} \times \frac{V_{i1} - V_{in}}{R_i} \quad (3)$$

$$V_{mppt} = \frac{1}{2} V_{i1} \quad (4)$$

由公式(3)、(4)可知在开路电压为 TEG 电压 0.5 倍达到最大功率输入. 设计最大功率跟踪电路如图 6 所示:

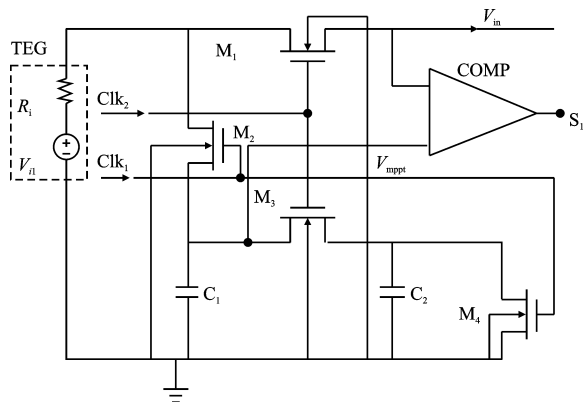


图 6 最大功率追踪电路

Clk₁ 高电平 Clk₂ 低电平时, M₂ 和 M₄ 管导通, M₁ 和 M₃ 截止, 此时 TEG 为电容(C₁)充电; Clk₁ 低电平 Clk₂ 高电平时, M₂ 和 M₄ 截止, M₁ 和 M₃ 导通, C₁ 将电荷分配到电容(C₂)。通过比较器 (COMP) 比较输出控制信号 S₁, 使得 V_{in} 为输入源电压(V_{i1})的 0.5 倍. 从而够达到最大功率追踪目的。

5 工作模式切换

非连续导通模式 (DCM) 和连续导通模式 (CCM) 的自主切换提高了电路转换效率^[7]. 传统设计中工作模式的转换需要根据负载调节振荡器的工作频率, 本文中电路工作的频率是由负载所决定, 比较器 (COMP) 输出 S₁ 的频率根据负载的大小自动调整输出频率. 因此能够实现工作模式的自主切换。

电路工作在轻载情况下, S₁、S₂ 和 S₅ 工作, 热能 (TEG) 先对 C_{barr} 进行供电, 当超级电容达到 2 V 时, 再对负载处供电. 压电能 (PZ) 不但为 C_{barr} 充电还用于整体电路的启动. 轻载时电路工作在非连续导通 (DCM) 模式下. 当电路进入重载, 仅从热能 (TEG) 处获取的能量不足以为负载提供能量, 此时 S₃ 也进行工作, 超级电容处作为新输入源同时对负载进行供电, 电路工作在连续导通模式 (CCM) 下。

为实现两种模式的转换, 控制信号 S₃ 设计尤为重要. S₃ 引入 C_{barr} 处的能量使电路进入 CCM 模式. 图 7 为 S₃ 控制信号电路示意图. 图 1 中的反馈电阻 R₁、R₂ 形成反馈电压, 利用误差放大器、D 触发器及比较器产生 S₃ 控制信号。

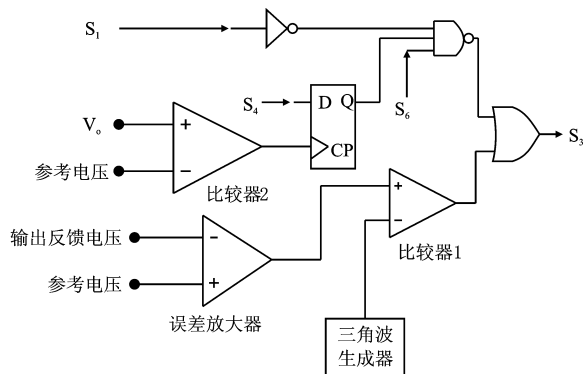


图 7 S₃ 控制信号

如图 8 所示, 通过开关控制信号 S₁、S₃ 的控制, 电路自动从非连续导通模式 (DCM) 进入到连续导通模式 (CCM) 下工作. 此时电感上的能量由超级电容 (C_{barr}) 和热能 (TEG) 共同提供, 使输出电压稳定在 1.2 V。

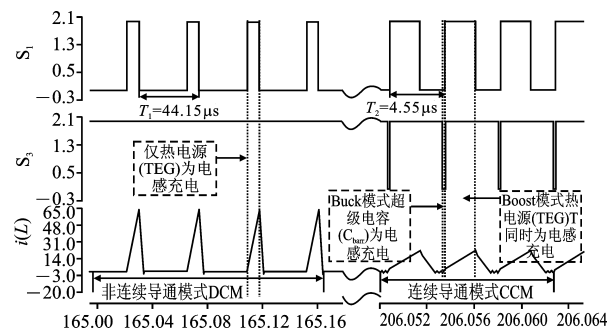


图 8 工作模式转换

6 仿真结果分析

本设计基于 TSMC 0.18 μm CMOS 工艺仿真, 压电能 (PZ) 从 0.6 V 到 1 V (200 Hz) 范围工作整流转换效率如图 9 所示, V_{i2} 为 0.7 V 时, 整流效率达到 95.6%。这种整流倍压结构不仅适用于微弱能量收集, 还有有效的提高了整流效率。

通过对热能 (TEG) 输入电压 (V_{i1}) 和阻抗 (R_i) 不同值进行仿真, 相同输入电压下输入阻抗越小最大功率追踪效率越高, 如图 10 所示, 其中在 V_{i1} 为 0.7 V, 输入阻抗 20 Ω 时, 追踪效率最高可达 99.2%。高效率的追踪使得电路有效输入功率最

大化.

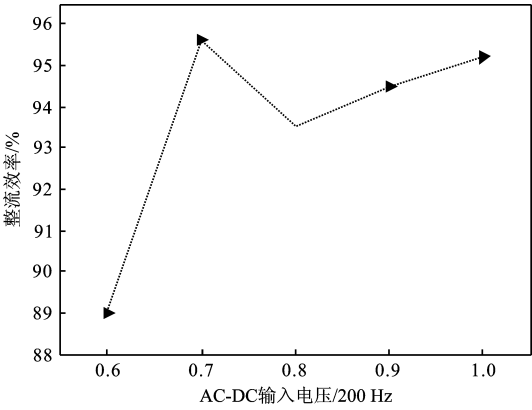


图 9 AC-DC 整流效率

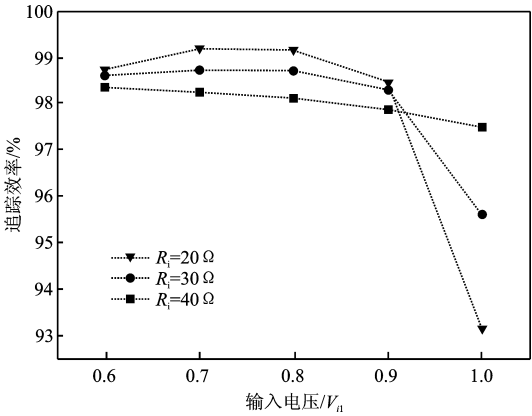


图 10 最大功率追踪效率

因此,在最大输入功率情况下,分别仿真不同工艺角下整体电路在负载端的转换效率.在 TT 和 FF 工艺角下的整体转换效率如图 11 所示.

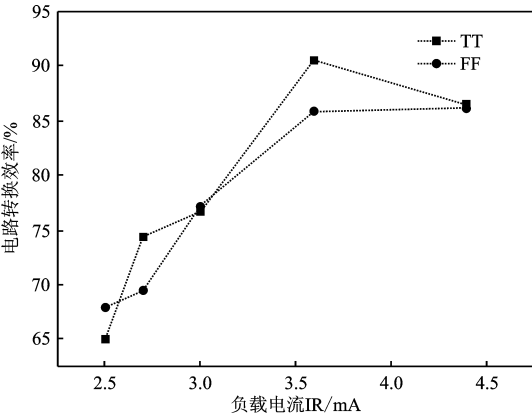


图 11 电路整体转换效率

TT 工艺角下,在负载电流为 3.65 mA,有效输入功率约 5.3 mW,负载功率约 4.8 mW,电路转换效率可达 90.6%. 仿真结果表明本电路设计

有效地提高了对微弱环境能量的利用率,更进一步提高了转换效率.

本文与部分文献中能量收集电路的参数进行对比,结果如表 1 所示.

表 1 本文与其他文献中的参数对比

参数	文献[3]	文献[6]	文献[7]	本文
工艺/ μm	0.25	0.13	0.18	0.18
电感值/ μH	—	47	—	47
能量源	PV/PZ	PV/PZ	PV/PZ	TEG/PZ
最大功率追踪	有	有	有	有
输入电压范围	1~3Vpp@180Hz(PZ); 0.2~0.6V(PV)	2~6Vpp@100Hz(PZ); 0.2~0.5V(PV)	—	0.6~1Vpp@200Hz(PZ); 0.6~1V(TEG)
工作模式	DCM	DCM	DCM/CCM	DCM/CCM
输出功率范围/mW	0~10	1~5	180	1~8
峰值转换效率/%	80	89	88.1	90.6

7 结束语

本文设计了一种应用于物联网(IoT)的单电感双输入双输出 Boost-buck DC-DC 能量收集电路.采用双输入源不仅弥补了单一能源供能不足的问题,还实现了电路的自主启动.非平衡偏执比较器应用于整流电路,使得压电(PZ)转换效率达到 95.6%.最大功率技术的设计对于热电(TEG)的追踪效率可达到 99.2%.采用自适应死区的过零比较器(ZCD)和工作模式的自主切换电路,有效的抑制了电感电流反向泄漏,将整体电路效率提高至 90.6%.该电路的设计不但拓宽了能量来源范围,还进一步提高了电路的整体转换效率.

参考文献:

[1] LIU C W, LEE H H, LIAO P C, et al. Dual-source energy-harvesting interface with cycle-by-cycle source tracking and adaptive peak-inductor-current control[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(10): 2741-2750. DOI: 10.1109/JSSC.2018.2844358.

[2] CARLSON E J, STRUNZ K, OTIS B P. A 20 mV input boost converter with efficient digital control for thermoelectric energy harvesting[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45(4): 741-750. DOI: 10.1109/JSSC.2010.2042251.

[3] ELHEBEARY M R, IBRAHIM M A A, ABOUDINA

- M M, et al. A dual source microscale energy harvesting system for wireless sensor networks[C]//2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Buzios: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/ISIE. 2015. 7281458.
- [4] DALLAGO E, FRATTINI G, MIATTON D, et al. Integrable high-efficiency AC-DC converter for piezoelectric energy scavenging system[C]//2007 IEEE International Conference on Portable Information Devices, Orlando: IEEE, 2007. DOI: 10.1109/PORTABLE. 2007. 61.
- [5] LIU L X, TU W, MU J C, et al. A voltage doubling AC-DC converter with offset-controlled comparators for piezoelectric energy harvester[C]//2015 IEEE 11th International Conference on ASIC (ASICON). Chengdu: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/ASICON. 2015. 7517113.
- [6] ELHEBEARY M R, IBRAHIM M A A, ABOUDINA M M, et al. Dual-source self-start high-efficiency microscale smart energy harvesting system for IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 342-351. DOI: 10.1109/TIE. 2017. 2714119.
- [7] CHEN I C, LIANG C W, TSAI T H. A single-inductor dual-input dual-output DC-DC converter for photovoltaic and piezoelectric energy harvesting systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019, 66(10): 1763-1767. DOI: 10.1109/TCSII. 2019. 2921349.

作者简介:

岳宏卫 男,(1967-),博士,副教授.研究方向为高温超导电子学器件和微波器件的设计.

杨俊 男,(1994-),硕士研究生.研究方向为模拟集成电路设计.

王桢楠 男,(1994-),硕士研究生.研究方向为模拟集成电路设计.

肖鑫 男,(1995-),硕士研究生.研究方向为模拟集成电路设计.

韦保林(通讯作者) 男,(1974-),博士,教授.研究方向为射频、模拟集成电路设计. E-mail: guilinwxb@163. com.