

引用格式: 杨挺, 田立业, 杨磊, 等. 一种适用于柔性可穿戴设备的柔性开关电容电路[J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 175-184. YANG Ting, TIAN Liye, YANG Lei, et al. A flexible switch capacitor circuit suitable for flexible wearable devices [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 175-184. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-353.

一种适用于柔性可穿戴设备的柔性开关电容电路

杨挺¹, 田立业², 杨磊^{2,✉}, 杨悦农¹, 谢阳阳¹

(1. 榆林学院, 陕西 榆林 719000;

2. 西安理工大学 电气工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的]当前, 柔性可穿戴设备的发展需求包括稳定高质量供电以及良好的可弯曲性。传统的变换器存在电感元件, 具有较强电磁干扰, 影响柔性可穿戴设备的性能。文章旨在解决这一问题。[方法]提出了一种柔性开关电容变换器为柔性可穿戴设备稳定高质量供电。与主流的变换器相比, 设计采用开关电容变换器, 以电容为储能元件, 具有电磁干扰小、体积小等优点, 是柔性可穿戴设备供电的优良选择。此外, 采用柔性材料制造, 所有电路元件均为贴片式, 这不仅使其更适合可穿戴设备, 还通过巧妙的电路设计实现了体积小、效率高和纹波小等优良特性。最后, 进行了理论分析和实验验证。[结果]实验证明了可实现1 W功率下91%的效率, 3 W输出功率下86%效率的输出, 最大输出电压可达8 V, 输出电压纹波限制在2%之下。[结论]柔性开关电容变换器能在低功率下为柔性可穿戴设备提供高质量电能供给。

关键词: 可穿戴设备; 开关电容变换器; 柔性; 升压; 纹波系数

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-353

文章编号: 2095-8676(2025)05-0175-10

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-353

中图分类号: TM7; TM12



A Flexible Switch Capacitor Circuit Suitable for Flexible Wearable Devices

YANG Ting¹, TIAN Liye², YANG Lei^{2,✉}, YANG Yuenong¹, XIE Yangyang¹

(1. Yulin University, Yulin 719000, Shaanxi, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] Stable and high-quality power supply and bendability of flexible wearable devices are the current development needs of flexible wearable devices. Traditional converters have strong electromagnetic interference due to the existence of inductors, which affects the performance of flexible wearable devices. The paper aims to solve this problem. [Method] A flexible switched capacitor converter was proposed to supply stable and high quality power to flexible wearable devices. Compared with the mainstream converter, the switched capacitor converter was designed. The capacitor was used as the energy storage element, which had the advantages of low electromagnetic interference and small size and was an excellent choice for supplying power to flexible wearable devices. At the same time, it was made of flexible materials, and all circuit components were patch type components, making it more suitable for wearable devices, and it had excellent characteristics such as small size, high efficiency and small ripple through circuit design. Finally, theoretical analysis and experimental verification were carried out. [Result] The results have shown that the output efficiency of 91% at 1 W power and 86% at 3 W output power can be achieved, the maximum output voltage can reach 8 V, and the output voltage ripple is limited to less than 2%. [Conclusion] It is finally proved that the flexible switched capacitor converter can provide high quality power supply for flexible wearable devices at low power.

Key words: wearable devices; switching capacitance converter; flexibility; boost; ripple coefficient

收稿日期: 2024-10-15 修回日期: 2024-11-08 网络首发日期: 2024-12-06

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目(52267019); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2024QCY-KXJ-034); 西安市科技计划重点产业链技术攻关集群项目(24LLRHZDZX0007)

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着柔性电能变换的发展,电子皮肤^[1-2]、柔性可穿戴设备^[3-5]进入大众视野。柔性可穿戴设备通常是指可直接穿在身上或者佩戴在衣服上的一种便携式设备。柔性可穿戴设备具有良好的便携性和舒适性,在医疗检测、运动健康和信息娱乐等领域应用广泛。目前柔性可穿戴设备常采用电池进行供电,需要 DC-DC 变换器对电能进行转换。然而传统刚性电子电路是由刚性的基体和基板焊接或粘接而成,不具有柔软性,不易与人体或者动物柔软的身体相适应。刚性的硬件也可能会对身体造成损伤和破坏,且由于其不可弯曲,占用空间更大,不利于柔性可穿戴设备的小型化和集成化。故需要一种适用于柔性可穿戴设备的柔性电能变换电路^[6-8]。柔性可穿戴设备与 DC-DC 变换器关系图如图 1 所示。其中柔性开关电容变换器在智能手环、智能服装、柔性医疗设备和柔性显示屏等领域均已应用广泛,如 HeiQ 企业的智能服装,集成了用于管理传感器电源的柔性开关电容变换器,企业 Medtronic 开发的柔性心脏起搏器,内置柔性开关电容变换器。上述产业市场规模巨大。其中 2023 年智能手环市场规模达 200 亿元,全球智能服装市场规模达 181 亿元。因此,柔性开关电容变换器的开发具有迫切性。

柔性可穿戴设备性能与直流变换电路的性能密切相关,尤其受 DC-DC 变换器集成度、电磁干扰^[9-11]强弱的影响。传统的 DC-DC 变换器^[12-14]具有电感

元件,会产生电磁干扰,影响电路的集成度,进而影响柔性可穿戴设备的性能。开关电容变换器^[15-17]是以电容为储能元件的变换器,通过对功率开关管的控制,实现电容的充放电过程,从而实现电能的输出。因为开关电容变换器不具有磁性元件,所以具有电磁干扰小、功率密度高和变换效率高等优点^[18-19],在小功率场合应用广泛。目前根据输出电压比的不同,开关电容变换器可分为降压、升压和反相开关电容变换器。

开关电容变换电路由于自身的优点,成为柔性可穿戴设备电能变换的优良选择。目前国内外针对开关电容变换器用于可穿戴设备进行了大量研究。文献 [20-22] 介绍了用于可穿戴设备的高效开关电容变换器,证明了开关电容变换器在可穿戴设备的应用领域的优势。然而传统的开关电容变换器自身刚性的电路无法满足柔性可穿戴设备小型化、轻量化、柔性化的要求。因此需要对传统开关电容变换器进行改进,需要采用柔性开关电容变换器。但柔性开关电容变换器由于自身采用柔性电路,相较于刚性电路,存在电压纹波大、输出电压受弯折程度的影响,同时,因为用于柔性可穿戴设备,电路元件大多应采用贴片式器件以保证柔性开关电容变换器的可弯折性。因此,为保证柔性可穿戴设备的稳定供电,柔性开关电容变换器的电路设计至关重要。

文章提出一种柔性开关电容升压变换器,改善了传统硬件电路难以弯折以及柔性适配的问题,采用以聚酰亚胺或聚酯薄膜为基材的柔性电路,使得电路具有质量轻、柔软性好、可弯曲性优良等优点。同时电路元件全部采用贴片式元件,使其更适合可穿戴设备。此外,相较于目前可穿戴设备中 DC-DC 变换器,通过电路设计使其具有更小体积、更高功率密度和更小纹波,为柔性可穿戴设备提供了一种优良的 DC-DC 变换器。

1 开关电容变换器原理

1.1 开关电容变换器电路

文章中升压开关电容变换器电路图如图 2 所示。该电路由 2 个功率开关管、2 个二极管和 3 个电容组成。其中功率开关管与二极管相连,通过控制功

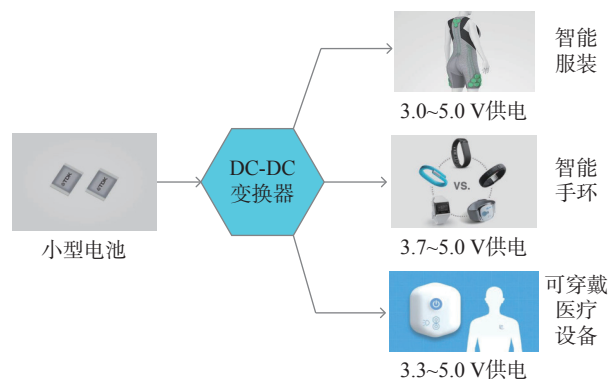


图 1 柔性可穿戴设备与 DC-DC 变换器关系

Fig. 1 Relationship between flexible wearable devices and DC-DC converters

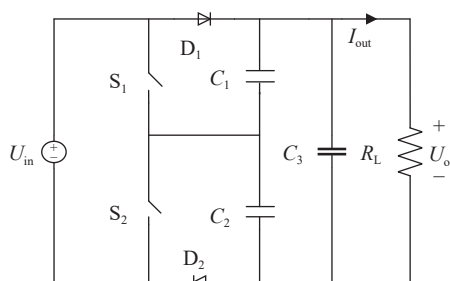


图2 升压开关电容变换器电路图

Fig. 2 Switched-capacitor converter circuit diagram

率开关管的开关, 来实现电容的充放电, 从而实现二倍升压。图2中 U_{in} 为输入电源, S_1 和 S_2 为功率开关管, C_1 和 C_2 为开关电容, C_3 为滤波电容, D_1 和 D_2 为二极管, R_L 为负载。

功率开关管的驱动信号电压波形如图3所示, 脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 驱动信号互补, 分别控制功率开关管 S_1 和 S_2 开通和关断, 开关频率为 $1/T$, 其中两组互补 PWM 信号之间存在死区时间, 防止上下功率开关管同时导通造成短路。

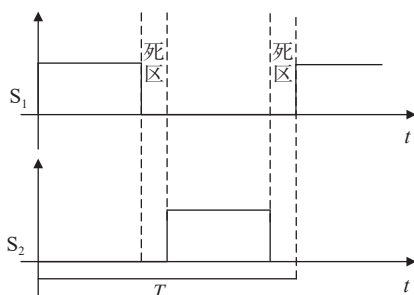


图3 功率开关管驱动信号

Fig. 3 Power switch tube drive signal

1.2 开关电容变换器工作过程

开关电容变换器工作过程如图3所示。开关电容变换器在一个周期内, 工作过程具有两个状态, 根据功率开关管开关状态不同, 使不同电容充放电, 实现二倍电压输出。

1) 状态1。如图4(a)所示, 在一个周期内, 当功率开关管 S_1 导通, S_2 关断时, 电源电流分为大小相等, 方向相反两部分。在忽略功率开关管的导通电阻理想条件下, 一部分电流流经电容 C_2 和二极管 D_2 回到电源, 对电容 C_2 进行充电, 直至电容 C_2 两端电压等于输入电源电压。同时, 上阶段充满电的电容 C_1 放电, 此时 D_1 作用为防止 C_1 的电流反

向流入电源, 从而实现电源和电容 C_1 为负载供电, 电流流经 C_1 、负载 R_L 和二极管 D_2 回到电源, 此时电容 C_1 两端电压也为电源输入电压, 而负载两端与电容 C_1 和 C_2 两端并联, 此时负载两端电压等于电压之和, 等于二倍输入电压, 实现二倍升压。即:

$$U_o = U_{C1} + U_{in} = U_{C1} + U_{C2} = 2U_{in} \quad (1)$$

式中:

U_o ——输出电压 (V);

U_{C1} ——电容 C_1 稳态电压 (V);

U_{C2} ——电容 C_2 稳态电压 (V);

U_{in} ——电源输入电压 (V)。

2) 状态2。如图4(b)所示, 当功率开关管 S_2 导通 S_1 关断时, 在忽略功率开关管的导通电阻理想条件下, 电流流经二极管 D_1 和电容 C_1 回到电源, 电源对电容 C_1 进行充电, 直至电容 C_1 两端电压等于输入电源电压。同时, 上阶段充满电的电容 C_2 放电, 此时 D_2 作用为防止 C_2 的电流反向流入电源, 电源和电容 C_2 为负载供电, 电流流经二极管 D_1 、电容 C_2 和负载 R_L 回到电源, 此时电容 C_2 两端电压也为电源输入电压, 而负载两端与电容 C_1 和 C_2 两端并联, 此时负载两端电压等于电压之和, 等于二倍输入电压, 实现二倍升压。即:

$$U_o = U_{C2} + U_{in} = U_{C1} + U_{C2} = 2U_{in} \quad (2)$$

如图5所示, 图5(a)为理想条件下电路工作时, 功率开关管开通与关断时电容充放电电压波形和输出电压波形, 图5(b)为理想条件下电容充放电过程电容的电流波形。可以看到, 在充电时电容电压缓慢上升, 电流瞬时增大, 又逐渐减小。

2 理论分析

2.1 稳态分析

在各个功率开关管和电容一致以及忽略功率开关管导通电阻的理想条件下, 功率开关管在 PWM 驱动信号的控制下, 依次导通关断, 控制电容充放电, 在一个周期内, 使电容保持电压平衡, 电容电压有效值等于直流源输入电压, 理想的输出与输入电压比值为2。即:

$$G = \frac{U_o}{U_{in}} = \frac{U_{C1} + U_{C2}}{U_{in}} = 2 \quad (3)$$

在非理想条件下, 对电路进行暂态分析。为了简化分析过程, 令 $C_1 = C_2 = C$; 只考虑电路中的阻性

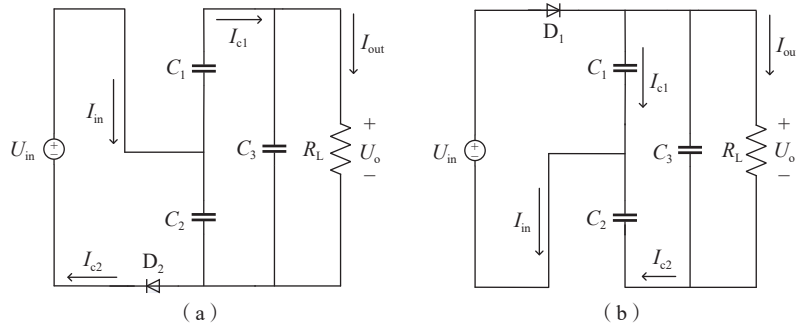


图 4 开关电容变换器工作原理

Fig. 4 Working principle of switched capacitance converter

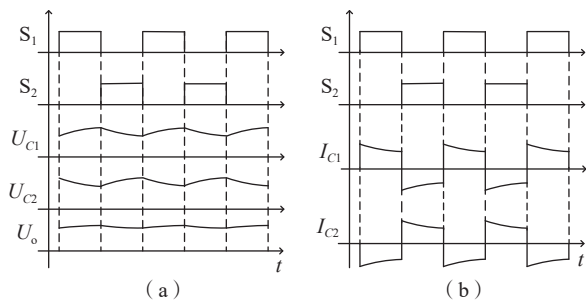


图 5 开关管开关电压电流波形

Fig. 5 Switching voltage and current waveform of switching tube

成分^[23], 包括功率开关管导通电阻 R_{ON} 、电容的等效串联电阻 R_{ESR} 和二极管导通电阻 R_{DS} , 忽略导线等电阻。由于开关电容变换器的对称性, 只对工作状态 2 期间进行建模分析。

如图 4(b) 所示, 电容 C_1 处于充电状态, 从其最小值充电至最大值。因此, 可列出如下方程:

$$U_{in} = u_{C1}(t) + (R_{ON} + R_{DS}) \left(C \frac{du_{C1}(t)}{dt} + I_L \right) + R_{ESR} C \frac{du_{C1}(t)}{dt} \quad (4)$$

式中:

I_L ——负载电流 (A)。

另设充电前电容的初始电压为 U_{10} ; 电容放电前的初始电压为 U_{20} , 故有

$$u_{C1}(t) = e^{-\frac{t}{R_A C}} [(R_{ON} + R_{DS}) I_L + U_{10} - U_{in}] + \frac{U_{in} - (R_{ON} + R_{DS}) I_L}{R_A} \quad (5)$$

式中:

R_A ——电容充电回路等效电阻 (Ω), $R_A = R_{ON} + R_{ESR} + R_{DS}$;

R_L ——负载电阻 (Ω)。

当电容 C_1 进行放电时, 电能传递给负载, 可

得电容 C_1 的电量平衡方程:

$$C(U_{20} - U_{10}) = \frac{(1-D)TU_o}{R_L} \quad (6)$$

式中:

D ——PWM 信号占空比。

由于开关电容变换器电路具有对称性, 电容 C_1 和 C_2 在一个周期内互补进行充放电, 则输出电压为:

$$U_o = U_{20} + U_{10} \quad (7)$$

为简化分析, 将电容放电近似为恒流:

$$I_L = \frac{U_o}{R_L} \quad (8)$$

将式 (4) — 式 (8) 联立可得开关电容变换器升压比表达式:

$$G = \frac{U_o}{U_{in}} = \frac{2R_L f C}{f C [2(R_{ON} + R_{DS})] + (1-D) \coth \left[\frac{D}{2f C R_A} \right]} \quad (9)$$

当 R_L 趋近于 ∞ 时, 可得:

$$\lim_{R_L \rightarrow \infty} G = \frac{U_o}{U_{in}} = 2 \quad (10)$$

即空载时, 变换器变比为 2, 带载情况下功率开关管导通电阻、电容等效电容以及电路其他部分损耗会导致变换器电压变比小于 2。

2.2 开关电容纹波系数分析

该变换器的电容充放电过程均为电容的全响应过程。以电容 C_1 为例, 在充电过程中, 其电容电压为:

$$u_{C1}(t) = U_{in} + (U_{10} - U_{in}) e^{-\frac{t}{R_A C_1}} \quad (11)$$

在电容 C_1 放电过程中电容电压为:

$$u_{C1}(t) = -U_{in} + (U_{20} + U_{in}) e^{-\frac{t-DT}{R_B C_1}} \quad (12)$$

式中:

R_B ——电容放电回路等效电阻 (Ω), $R_B = R_{ON} + R_{ESR} + R_{DS} + R_L$ 。

稳态时, 电容放电前后电压分别为:

$$\begin{cases} U_{10} = -U_{in} + 2U_{in}e^{-\frac{(1-D)T}{R_B C_1}} \\ U_{20} = U_{in} \end{cases} \quad (13)$$

因此, 电容放电前后电压差值为:

$$\Delta U_{C1} = U_{20} - U_{10} = 2U_{in} \left[1 - e^{-\frac{(1-D)T}{(R_{ON} + R_{ESR} + R_L + R_{DS})C_1}} \right] \quad (14)$$

实际中 $R_L \gg R_{ON}$, $R_L \gg R_{ESR}$, $R_L \gg R_{DS}$, 故可以将上式简化为:

$$\gamma = \frac{\Delta U_{C1}}{U_{in}} \times 100\% = 2 - 2e^{-\frac{1-D}{R_L C_1 f}} \quad (15)$$

由上式可以说明纹波系数受占空比、负载、开关频率以及电容 C_1 值的影响。当占空比和负载确定时, 电容 C_1 值和开关频率增大时, 纹波系数减小。如图 6 所示, 为占空比和负载确定的情况下, 纹波系数和电容 C_1 值和开关频率 f 的关系图。

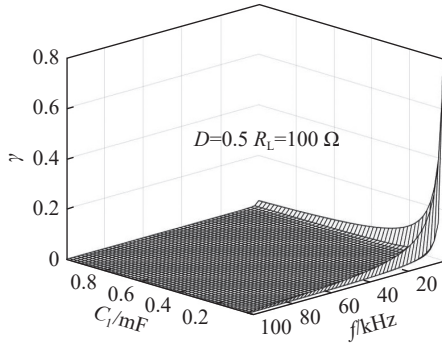


图 6 纹波系数和电容、开关频率之间的关系

Fig. 6 The relationship between ripple coefficient and capacitance and switching frequency

2.3 充电效率分析

在电容充电过程中, 由于电容存在等效电阻, 电能并不能完全供给电容, 而是在等效电阻上有所消耗。则在充电时电容吸收的功率为:

$$\begin{aligned} P_1 &= f \left[\frac{1}{2} C_1 U_{C1}^2 - \frac{1}{2} C_1 (U_{C1} - \Delta U_{C1})^2 \right] = \\ &= \frac{1}{2} f C_1 \Delta U_{C1} (2U_{C1} - \Delta U_{C1}) \end{aligned} \quad (16)$$

式中:

U_{C1} ——电容稳态时电压 (V);

ΔU_{C1} ——充电时电压变化量 (V)。

由于实际中 $R_L \gg R_{ON}$, $R_L \gg R_{ESR}$, $R_L \gg R_{DS}$, 则:

$$\begin{cases} \Delta U_{C1} = 2U_{in} \left[1 - e^{-\frac{(1-D)T}{R_L C_1}} \right] \\ U_{C1} = U_{in} \end{cases} \quad (17)$$

电源输出功率为:

$$P_2 = f \int_0^{DT} U_{C1} i_c dt = C_1 f U_{C1} \Delta U_{C1} \quad (18)$$

电容充电效率为:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = 1 - \frac{\Delta U_{C1}}{2U_{C1}} = e^{-\frac{1-D}{R_L C_1 f}} \quad (19)$$

由上式可以说明电容充电效率受到占空比、负载、开关频率以及开关电容 C_1 值的影响。当占空比和负载确定的情况下, 电容 C_1 值和开关频率增大时, 充电效率提高。如图 7 所示, 为占空比和负载确定的情况下, 电容充电效率和电容 C_1 值和开关频率 f 的关系图。

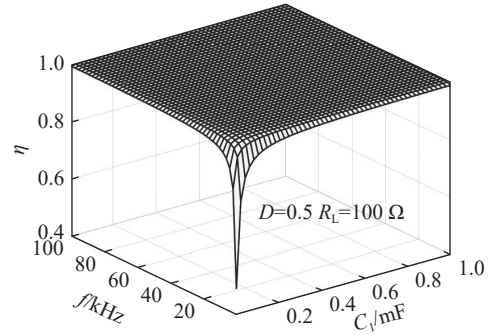


图 7 电容充电效率和电容、开关频率之间的关系

Fig. 7 The relationship between capacitor charging efficiency and capacitance and switching frequency

3 系统设计参数

3.1 实验设计和数据分析

电容电压纹波的大小和电容充电效率受电容容值影响。根据式 (15) 可知, 占空比、负载一定时, 纹波系数受开关频率以及电容 C_1 值的影响。若是纹波系数最大为 γ_{max} 时, 进一步推导可得:

$$C_1 \geq \frac{1-D}{R_L f \ln \left(\frac{2}{2-\gamma_{max}} \right)} \quad (20)$$

由式 (19) 可知占空比、负载一定时, 电容充电效率受到开关频率以及开关电容 C_1 值的影响。进一步推导可得:

$$C_1 \geq \frac{1-D}{R_L f \ln \left(\frac{1}{\eta} \right)} \quad (21)$$

电压纹波、电容充电效率和电容容值成反比，即当电容容量较大时，电容电压纹波波动小，电容充电效率高。

根据上述分析，同时考虑实际电路与理论计算的差异，留有一定裕量，同时考虑常用电容容值，从而确定柔性开关电容变换器的电路参数，使其具有更高效率、更低纹波，电路参数如表 1 所示。

根据以上参数设计开关电容变换器电路，电路如图 8 所示。图 8(a) 为电路实物图。其中开关电容变换器长 5.0 cm，宽为 2.2 cm，该体积可很好地应用于柔性可穿戴设备。

如图 8(b) 所示，电路采用柔性材料制造，在镊子的作用下弯曲折叠，展现出良好的柔软性、灵活性和可弯曲性，为柔性可穿戴设备提供一个良好的柔性电能转换电路。如图 9 所示，为实验平台图，右图为开关电容放大图。

如图 10 所示，为示波器输入输出电压波形图，直流输入电压为 4.4 V，直流输出电压为 8.2 V，基

表 1 开关电容变换器电路参数
Tab. 1 Circuit parameters of switched capacitor converter

Parameters	Value
$C_1/\mu\text{F}$	47
$C_2/\mu\text{F}$	47
$C_3/\mu\text{F}$	100
f/kHz	100
R_L/Ω	100

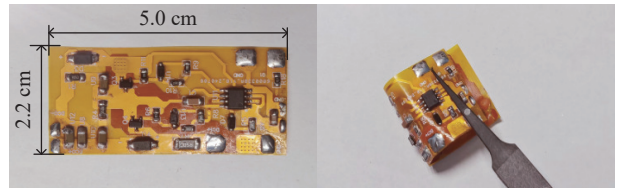


图 8 开关电容变换器电路
Fig. 8 Switched-capacitor converter circuit

本实现二倍升压。

如表 2 所示，在输入电压为 8.24 V 不变的情况

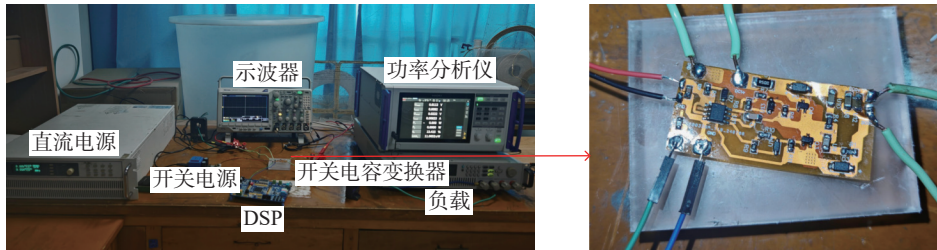


图 9 开关电容变换器实验平台
Fig. 9 Switching capacitor converter experimental platform

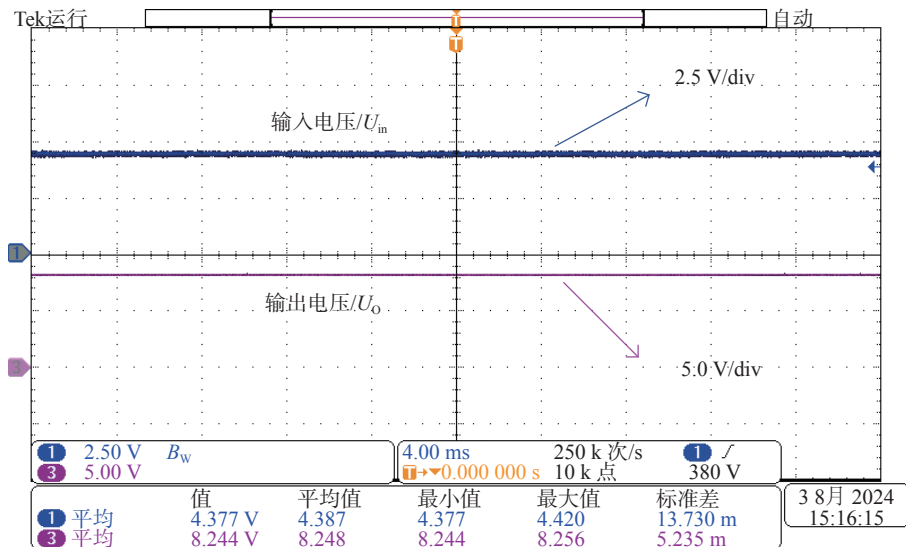


图 10 输入输出电压关系
Fig. 10 Input and output voltage relationship

下, 对变换器进行弯折, 可以看到在不同弯折角度下, 柔性开关电容变换器的输出电压虽略有变化, 但控制在 1% 左右, 可以实现在不同弯折角度下的输出电压的恒定。可以看到, 系统功率和系统效率随弯折角度增大也略有降低, 但总体在 1% 左右。

如图 11 所示, 文章中所提出的柔性开关电容变换器可实现 1 W 功率时 91% 的效率, 在 3 W 左右时, 可实现 86% 效率的输出。

表 2 输出电压、系统功率、系统效率和弯折角度关系

Tab. 2 Relation between output voltage, system power, system efficiency and bending Angle

弯折角度/(°)	输出电压/V	系统功率/W	系统效率/%
0	8.24	0.678	90.3
30	8.20	0.673	90.1
60	8.19	0.671	90.1
90	8.18	0.668	89.8
180	8.15	0.665	89.5

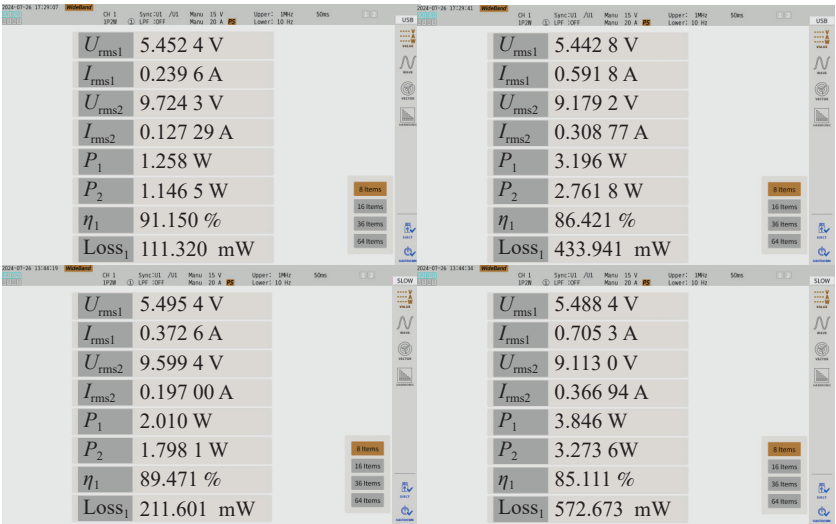


图 11 电路效率分析

Fig. 11 Circuit efficiency analysis

图 12 为输出功率和系统效率关系图, 可以看到在 1 W 功率左右时, 效率有一个峰值, 随着功率增大, 效率呈下降趋势。

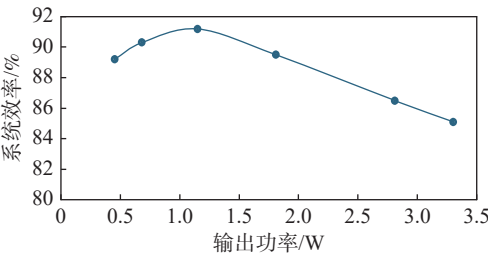


图 12 输出功率与系统效率关系图

Fig. 12 The relationship between output power and system efficiency

如图 13 所示, 输出电压峰峰值为 123 mV, 输出电压平均值为 7.9 V, 输出电压纹波为 1.55%, 实现了低电压纹波。

在负载阻值、占空比和电容容值恒定时, 改变

开关频率, 对不同频率下的纹波系数进行比较, 可得表 3。

在开关频率、占空比和电容容值恒定时, 改变负载电阻, 对不同阻值下的纹波系数进行比较, 可得表 4。

由表 3 和表 4 可得, 占空比和电容容值恒定情况下, 系统纹波分别和开关频率、负载阻值成反比, 变化趋势与文中理论基本符合, 验证了开关电容变换器的可行性。

4 结论

柔性可穿戴设备发展迅速, 为柔性可穿戴设备提高稳定供电是当前迫切需求。文章提出一种柔性开关电容变换器, 具有电磁干扰小、功率密度高等优良特性。电路元件全部采用贴片式, 减小了变换器的体积, 提高了功率密度和减小了纹波系数。同时采用柔性材料制造电路, 实现电路的可弯曲性,

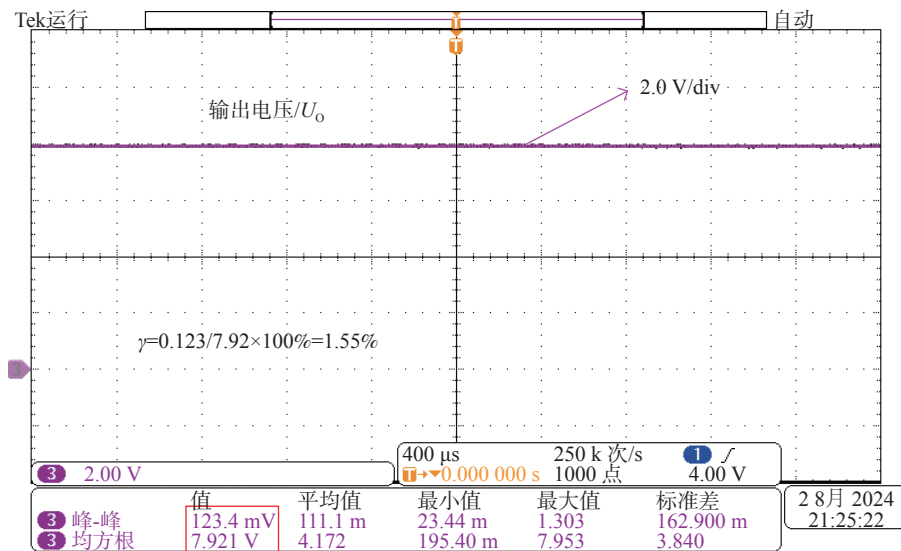


图 13 电压纹波分析

Fig. 13 Voltage ripple analysis

表 3 开关频率和纹波系数关系

Tab. 3 Relation between switching frequency and ripple coefficient

开关频率/kHz	纹波系数/%
10	10.59
30	4.12
50	2.73
100	1.55

表 4 负载阻值和纹波系数关系

Tab. 4 Relation between load resistance and ripple coefficient

负载阻值/ Ω	纹波系数/%
10	11.13
30	3.97
50	2.53
100	1.59

从而实现为柔性可穿戴设备高质量供电的需求。最后,通过实验对柔性开关电容变换器进行了验证,证明了柔性开关电容变换器可实现 4 V 输入,7.8 V 输出,电压纹波在 2% 之下,且在 1 W 功率下 91% 的效率,在 3 W 左右时,可实现 86% 效率的输出,说明柔性开关电容变换器可实现低功率下高质量电能输出,可为柔性可穿戴设备提供供电。在后续工作中将会对柔性开关电容变换器进行闭环控制设计,

实现更稳定电压输出,同时降低输出电压纹波至 1% 以下,同时优化电路设计从而提高柔性开关电容变换器效率,令效率达到 95% 以上。

参考文献:

- [1] 周冰, 范精国, 周严, 等. 采用离子导电水凝胶电极的触觉传感电子皮肤 [J]. 微纳电子技术, 2024, 61(9): 090401. DOI: 10.13250/j.cnki.wndz.24090401.
- ZHOU B, FAN J G, ZHOU Y, et al. Tactile sensing electronic skin using ionic conductive hydrogel electrode [J]. Micronanoelectronic technology, 2024, 61(9): 090401. DOI: 10.13250/j.cnki.wndz.24090401.
- [2] MA T C, ZHANG W J, ZHAO H X, et al. A flexible multifunctional electronic skin for intelligent tactile perception [J]. IEEE sensors journal, 2023, 23(15): 17407-17414. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3285628.
- [3] HUANG H, WU R. S, LIN M, et al. Emerging wearable ultrasound technology [J]. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2024, 71(7): 713-729. DOI: 10.1109/TUFFC.2023.3327143.
- [4] JEERAPAN I, KHUMNGERN S. Printed devices for wearable biosensors: laboratory to emerging markets [J]. IEEE journal on flexible electronics, 2023, 2(5): 358-365. DOI: 10.1109/JFLEX.2023.3272624.
- [5] CHENG X, ZHANG L, TANG Y, et al. Real-time human activity recognition using conditionally parametrized convolutions on mobile and wearable devices [J]. IEEE sensors journal, 2022, 22(6): 5889-5901. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3149337.
- [6] 陈兆润, 黄显. 柔性混合电路的柔性优化方法研究及应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 74-79. DOI: 10.13382/j.

- jemi.B2306687.
- CHEN Z R, HUANG X. Investigation of the optimization approach to improve flexibility of flexible hybrid circuit and its application [J]. *Journal of electronic measurement and instrumentation*, 2023, 37(10): 74-79. DOI: 10.13382/j.jemi.B2306687.
- [7] SHI Y, FENG L L, LI Q F, et al. High power ZVZCS phase shift full bridge DC-DC converter with high current reset ability and no extra electrical stress [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2022, 69(12): 12688-12697. DOI: 10.1109/TIE.2021.3130346.
- [8] 房绪鹏, 王晴晴, 郑士成, 等. 一种高增益双向准 Y 源 DC-DC 变换器 [J]. *电源学报*, 2020, 18(3): 31-37. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2020.3.31.
- FANG X P, WANG Q Q, ZHENG S C, et al. High-gain bidirectional quasi-Y-source DC-DC converter [J]. *Journal of power supply*, 2020, 18(3): 31-37. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2020.3.31.
- [9] 蔡高凤, 王庆斌, 陈镇宇, 等. 基于离散小波变换和 GRU 的触电诊断分析 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(4): 127-136. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.13.
- CAI G F, WANG Q B, CHEN Z Y, et al. Analysis on electrocution diagnosis based on discrete wavelet transform and GRU [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(4): 127-136. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.13.
- [10] 郭瑞, 张力之, 韩冬, 等. 耦合电感型 Boost-Sepic 高增益 DC-DC 变换器 [J]. *电源学报*, 2022, 20(3): 80-88. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2022.3.80.
- GUO R, ZHANG L Z, HAN D, et al. High-gain Boost-Sepic DC-DC converter with coupled inductors [J]. *Journal of power supply*, 2022, 20(3): 80-88. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2022.3.80.
- [11] FARDAHAR S M, SABAH M. New expandable switched-capacitor/switched-inductor high-voltage conversion ratio bidirectional DC-DC converter [J]. *IEEE transactions on power electronics*, 2020, 35(3): 2480-2487. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2932325.
- [12] 岳舟, 李浩天, 廖辰星, 等. 一种差动型高增益 DC-DC 变换器分析与设计 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(17): 119-131. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230164.
- YUE Z, LI H T, LIAO C X, et al. Analysis and design of a differential high gain DC-DC converter [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(17): 119-131. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230164.
- [13] 李海滨, 颜胥, 翁雨森, 等. 软开关高增益准 YZ 源 DC-DC 变换器 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(11): 4435-4445. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.230707.
- LI H B, YAN X, WENG Y S, et al. Soft-switched high voltage gain quasi-YZ source DC-DC converter [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(11): 4435-4445. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.230707.
- [14] AKHORMEH A R N, ABBASZADEH K, MORADZADEH M, et al. High-gain bidirectional quadratic DC-DC converter based on coupled inductor with current ripple reduction capability [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2021, 68(9): 7826-7837. DOI: 10.1109/TIE.2020.3013551.
- [15] GOYAL V K, SHUKLA A. Two-stage hybrid isolated DC-DC Boost converter for high power and wide input voltage range applications [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2022, 69(7): 6751-6763. DOI: 10.1109/TIE.2021.3099245.
- [16] 荣德生, 陈靓, 任杰, 等. 磁集成开关电容高增益级联 Boost 变换器 [J]. *电源学报*, 2022, 20(3): 71-79. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2022.3.71.
- RONG D S, CHEN L, REN J, et al. Magnetic integrated switch capacitor high-gain cascaded boost converter [J]. *Journal of power supply*, 2022, 20(3): 71-79. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2022.3.71.
- [17] ZHU Y C, YE Z C, PILAWA-PODGURSKI R C N. Modeling and analysis of switched-capacitor converters with finite terminal capacitances [J]. *IEEE transactions on power electronics*, 2024, 39(6): 6640-6653. DOI: 10.1109/TPEL.2023.3313562.
- [18] 刘妍, 杨晓峰, 闫成章, 等. 考虑寄生电感的谐振开关电容变换器电压尖峰抑制 [J]. *电工技术学报*, 2021, 36(12): 2627-2639. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90231.
- LIU Y, YANG X F, YAN C Z, et al. Suppression of voltage spike in resonant switched capacitor converter considering parasitic inductance [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2021, 36(12): 2627-2639. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90231.
- [19] TESAKI K, HAGIWARA M. Control and experimental verification of a bidirectional nonisolated DC-DC converter based on switched-capacitor converters [J]. *IEEE transactions on power electronics*, 2021, 36(6): 6501-6512. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3040070.
- [20] 夏守行, 白若琦, 宋建伟, 等. 新型谐振式开关电容变换器及其潜电路分析 [J]. *电源学报*, 2023, 21(2): 38-45. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2023.2.38.
- XIA S X, BAI R Q, SONG J W, et al. Novel resonant switched-capacitor converter and analysis of its sneak circuit [J]. *Journal of power supply*, 2023, 21(2): 38-45. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2023.2.38.
- [21] KILANI D, ALHAWARI M, MOHAMMAD B, et al. An efficient switched-capacitor DC-DC buck converter for self-powered wearable electronics [J]. *IEEE transactions on circuits and systems I: regular papers*, 2016, 63(10): 1557-1566. DOI: 10.1109/TCSI.2016.2586117.
- [22] GU Z W, ZHANG Y H, ZHAO Y, et al. Synthesizing step-down switched capacitor power converter topologies [J]. *IEEE transactions on circuits and systems I: regular papers*, 2024,

71(3): 1465-1479. DOI: [10.1109/TCSI.2023.3336718](https://doi.org/10.1109/TCSI.2023.3336718).

- [23] 蔡慧, 包莅庭, 张子省, 等. 变比为 2 的升压型开关电容变换器研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2963-2970. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.160832](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.160832).

CAI H, BAO L T, ZHANG Z X, et al. Research on a step-up switched-capacitor converter with a conversion gain of 2 [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2963-2970. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.160832](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.160832).

作者简介:



杨挺

杨挺 (第一作者)

1987-, 男, 副教授, 博士, 研究方向为电力电子技术、无线电能传输等 (e-mail) yt1028@yulinu.edu.cn。

田立业

2001-, 男, 硕士, 研究方向为无线电能传输、电能变换 (e-mail) 2231921176@stu.xaut.edu.cn。



杨磊

杨磊 (通信作者)

1986-, 男, 副教授, 博士, 研究方向为无线电能传输、电能变换及其控制策略 (e-mail) yanglei0930@xaut.edu.cn。

杨悦农

2003-, 男, 学士, 研究方向为电力电子技术 (e-mail) 285926970@qq.com。

谢阳阳

2003-, 男, 学士, 研究方向为电力电子技术 (e-mail) 2508732634@qq.com。

(编辑 叶筠英)