

# 基于有源电容倍增器的新型电荷泵 DC-DC 变换器

王立志<sup>1,2</sup>, 陈治明<sup>1</sup>, 赵敏玲<sup>1</sup>, 隋晓红<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学电子工程系, 陕西西安 710048; 2. 空军工程大学文理学院, 陕西西安 710051)

**摘要:** 电荷泵中浮置电容是影响输出特性的关键因素, 针对大容量浮置电容难以集成的问题, 提出利用电流传输器构成有源电容倍增器代替浮置电容的方法, 可使等效的浮置电容量提高 1~3 个数量级. 利用 PSPICE 软件对反压及倍压电荷泵分别在采用有源电容倍增器和理想电容的情况下进行仿真, 对比分析的结果说明采用有源电容倍增器的电荷泵电路仅需要很小的电容就能得到与外加大容量浮置电容电荷泵电路相同的输出特性(实例中 100pF 可等效 50nF), 从而基于有源电容倍增器的电荷泵将更易于全单片集成.

**关键词:** 电荷泵; 电容倍增器; 开关电容; DC-DC 变换器; 电流传输器

**中图分类号:** TN86 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 05-0845-03

## A New Charge Pump DC-DC Converter Based on Active Capacitance Multiplier

WANG Li-zhi<sup>1,2</sup>, CHEN Zhi-ming<sup>1</sup>, ZHAO Min-ling<sup>1</sup>, SUI Xiao-hong<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Science Institute of Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China)

**Abstract:** The floating capacitor is a key factor to determine the output characteristics of a charge pump. In order to overcome the difficulty in fabrication of the large capacitors in monolithic integrated circuits, a technique of replacing the floating capacitor by an active capacitance multiplier is proposed in this paper. Equivalent capacitance value of the active capacitance multiplier can be enlarged in 1~3 orders of magnitude. PSPICE simulations of the output characteristics were carried out for charge pump doublers and charge pump inverters for the different designs of adopting the capacitance multiplier and a normal capacitor, respectively. The simulation results show that the same output characteristics can be obtained from the new charge pump with a capacitor much smaller than that adopted in the normal charge pump products. For example, 100 pF in the new is equivalent to 50nF normally in this work. Employing the active capacitance multiplier, therefore, the new charge pump is much easier to be fabricated in fully integrated realizations with on-chip capacitor.

**Key words:** charge pump; capacitance multiplier; switched capacitor; DC-DC converter

## 1 引言

电荷泵电路实际上属于开关电容 DC/DC 变换器, 它不含感性元件, 适合于制作成功率集成电路, 一般应用于电池供电的便携设备, 象手持仪表、移动通讯、微处理器系统、医疗仪器和个人数字处理(PDA)等, 这些设备对体积、重量和功耗都提出了很高的要求, 但目前的电荷泵产品仅是将功率开关和控制电路进行了单片集成, 使用时, 电荷泵的关键元件——电容器仍需外接, 这就限制了其体积和重量的进一步减小, 也没有完全发挥作为开关电容 DC-DC 变换器可以全集成的优势, 电荷泵电路中的电容之所以要外接, 是因为其容量在微法数量级, 而目前的集成工艺下要集成此容量的电容比较困难. 为此本文研究一种采用第二代电流传输器构成的有源电容倍增器, 以其用较小容量的电容变换成较大容量的电容, 同时此电

容倍增器又易于集成, 这样就可以用它来代替电荷泵电路中的浮置电容而得到一种新型电荷泵电路.

## 2 典型的电荷泵电路及分析

电荷泵电路由开关和电容组成, 其典型倍压电路如图 1(a)所示, 开关控制信号  $ph1$ 、 $ph2$  相位差为  $180^\circ$ , 所以此电路有两种工作状态, 状态 1 时, 开关  $S1$ 、 $S4$  导通,  $S2$ 、 $S3$  截止,  $V_{in}$  给浮置电容  $C_1$  充电, 同时  $C_L$  通过负载  $R_L$  放电. 状态 2 时, 开关  $S2$ 、 $S3$  导通,  $S1$ 、 $S4$  截止,  $V_{in}$  和  $C_1$  串联给  $C_L$  充电, 同时  $C_L$  通过负载  $R_L$  放电, 这样, 在开关控制信号的驱动下, 通过电荷的转移, 实现了 DC-DC 的变换, 在电路参数选取合适的情况下, 可以得到倍压的输出, 其工作波形见图 1(b).

图 1(a) 电路的输出特性的定量分析如下<sup>[1,2]</sup>:  
 $t_1$  时刻电容  $C_1$  所充得的电压

$$V_{c1}(t_1) = V_{in} \quad (1)$$

负载在一个周期  $T$  内消耗的能量

$$W_L = V_0 I_0 T = Q_L V_0 \quad (2)$$

其中,  $I_0$  是输出电流,  $V_0$  是输出电压,  $Q_L$  是负载在一个周期  $T$  内消耗的能量。

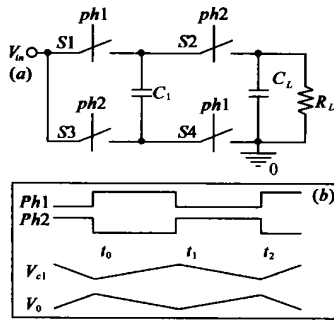


图 1 典型电荷泵倍压电路及工作波形

电容  $C_1$  所充得的能量

$$W_{C1} = W_{C1}(t_1) - W_{C1}(t_0) = 0.5 C_1 V_{c1}^2(t_1) - 0.5 C_1 V_{c1}^2(t_0) \quad (3)$$

$$\text{稳态时 } V_{c1}(t_0) = V_{c1}(t_2) = V_{c1}(t_1) - Q_L / C_1 \quad (4)$$

$$W_{C1} + V_{in} Q_L = W_L \quad (5)$$

由式(1)~(5),可得

$$V_0 = \frac{2V_{in}}{1 + \frac{1}{2R_L f C_1}} \quad (6)$$

$$I_0 = \frac{2V_{in} / R_L}{1 + \frac{1}{2R_L f C_1}} \quad (7)$$

由式(7)可见,电荷泵电路中浮置电容  $C_1$  对输出特性的影响很大,当  $C_1$  较小时,

$$I_0 = \frac{2V_{in} / R_L}{1 + \frac{1}{2R_L f C_1}} \approx \frac{V_{in}}{4f C_1} \quad (8)$$

在  $V_{in}$  数伏级,  $f$  不超过 MHz 的情况下,若  $C_1$  为 pF 级,输出电流  $I_0$  在  $\mu A$  数量级。

当  $C_1$  较大时,  $I_0 \approx 2V_{in} / R_L$  (9)

即就是说,在  $C_1$  大到一定程度后,  $C_1$  继续增大,输出电流  $I_0$  将趋于饱和。由上述可知,浮置电容  $C_1$  是影响电荷泵电路输出电流的关键因素之一,但较大容量的电容,目前难于集成,且占用芯片面积很大。要想获得全集成的开关电容 DC-DC 变换器,就必须寻求新的途径。

### 3 基于电流传输器的有源电容倍增器电路

用较小的电容,通过有源网络进行阻抗变换来获得较大容量的电容,这里有源网络采用新颖的电流传输器器件。第 2 代电流传输器(CC)的电路功能是<sup>[3]</sup>

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (10)$$

用 4 个电流传输器和 4 个阻抗元件组成的可连续变化浮置电容倍增器电路如图 2(a) 所示。

由式(10),可以推出图 2(a) 中的

$$V_{AB} = V_A - V_B \quad (11)$$

$$i_1 = (V_A - V_B) / Z_1 = V_{AB} / Z_1 \quad (12)$$

$$i_2 = (i_1 Z_2 + i_1 Z_3) / Z_4 = i_1 (Z_2 + Z_3) / Z_4$$

$$= V_{AB} (Z_2 + Z_3) / Z_1 Z_4 \quad (13)$$

$$i = i_2 \quad (14)$$

A 与 B 之间的输入阻抗

$$Z_{AB} = V_{AB} / i = V_{AB} / i_2 = Z_1 Z_4 / (Z_2 + Z_3) \quad (15)$$

由此可知,当  $Z_1$  和  $Z_4$  中任意一个为容性而其余 3 个阻抗均为纯阻性时,A 与 B 之间等效为电容。若取  $Z_4 = 1 / SC_1$ ,  $Z_1 = R_1$ ,  $Z_2 = Z_3 = R_2$ ,则

$$Z_{AB} = R_1 / S^2 C_1 R_2 \quad (16)$$

A 与 B 之间等效电容为

$$C_{eq} = 2 C_1 R_2 / R_1 \quad (17)$$

调节  $R_1$ 、 $R_2$  的比值可使 A 与 B 之间等效电容  $C_{eq}$  比电路原来所加电容  $C_1$  大大提高。但等效电容的提高受到晶体管饱和及安全工作的限制,不可能无止境的倍增。

图 2(a) 电路中

$$V_C = -V_D = i_1 R_2 = V_{AB} R_2 / R_1 \quad (18)$$

由此可见,随着等效电容的提高,电路中 C 点和 D 点电位也相应的急剧增加,所以,实际上等效电容一般只能提高 1~3 个数量级。

若考虑  $C_1$  电容的等效串联电阻  $ESR_1$ ,则

$$Z_{AB} = \frac{R_1}{2 R_2} \left( ESR_1 + \frac{1}{SC_1} \right) = \frac{R_1}{2 R_2} ESR_1 + \frac{R_1}{SC_1 2 R_2} \quad (19)$$

A、B 之间电容的等效串联电阻

$$ESR = \frac{R_1}{2 R_2} ESR_1 \quad (20)$$

由此可见,等效电容  $ESR$  比原电容的  $ESR_1$  相应减小了。

### 4 采用电容倍增器的新型电荷泵电路及仿真分析

#### 4.1 采用有源电容倍增器的倍压电荷泵

把图 1 电路中的  $C_1$  用图 2(a) 的电容倍增器代替,就得到图 2(b) 新型电容倍增器倍压电荷泵电路,其中取  $C_L = 1 \mu F$ ,  $R_L = 100$ ,  $R_1 = 1 K$ ,  $R_2 = R_3 = 250 K$ 。用 PSpice 进行仿真分析时,设置  $V_{in} = 5V$ ,  $S1 \sim S4$  开关的导通电阻  $R_{on} = 0.5$ ,关断电阻  $R_{off} = 1M$ ,  $f = 625 KHz$ ,电流传输器用理想模型(以下的

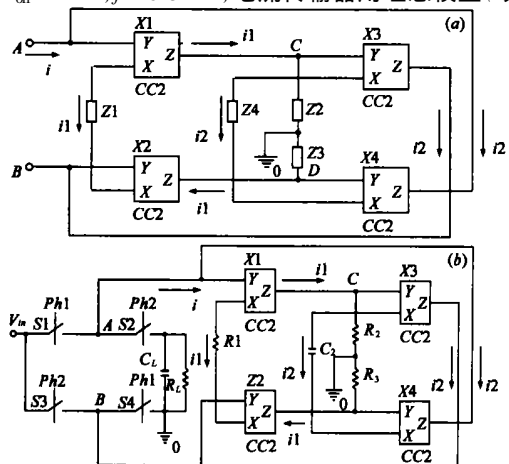


图 2 (a) CCII 浮置电容倍增器; (b) 新型倍压电荷泵拓扑结构

所有仿真,所用到的这些参数均相同)。

PSPICE 仿真分析的电容倍增器倍压电荷泵电路稳态输出电流  $I_0$  随浮置电容变化曲线见图 3(a), 典型倍压电荷泵电路的稳态输出电流  $I_0$  随浮置电容的变化曲线如图 3(b) 所示。由这两个特性可以看出, 当浮置电容较小时, 输出电流  $I_0$  较小, 随着电容的增大,  $I_0$  也相应增大, 电容增大到一定程度时,  $I_0$  趋于饱和, 达到最大值  $I_{0max} = 97\text{mA} (2V_{in}/R_L)$ 。

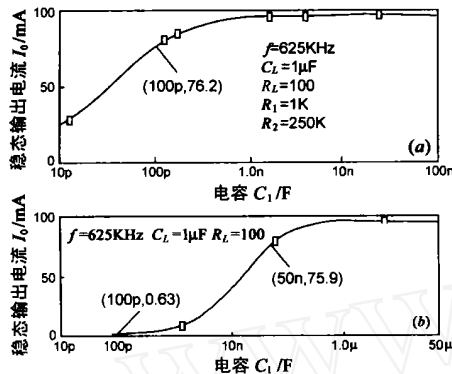


图 3 (a) 新型倍压电荷泵稳态输出电流与浮置电容关系;  
(b) 典型倍压电荷泵稳态输出电流与浮置电容关系

由图 3 可以看出, 典型倍压电荷泵电路与新型倍压电荷泵电路相比, 在采用同样电容情况下, 新型倍压电荷泵电路输出电流要大得多, 如在电容  $C_1 = 100\text{pF}$  时, 新型倍压电荷泵电路输出电流  $I_0 = 76.2\text{mA}$ , 而典型倍压电荷泵电路输出电流  $I_0 = 0.63\text{mA}$ , 它在容量为  $50\text{nF}$  时其输出电流才与新型倍压电荷泵电路输出电流相同。这些结果均与前述理论分析相一致, 说明提出的新型电荷泵电路能较大地改善输出特性。换句话说, 这种新型电荷泵电路仅需要很小的电容就能得到与外加大容量浮置电容电荷泵电路相同的输出特性。

由于新型电荷泵电路采用电容倍增器, 额外增加了一些元件, 它们必然要消耗能量, 从而使电荷泵 DC-DC 变换器的效率有所下降。在电路设计时采用 CMOS 低功耗技术, 另外,

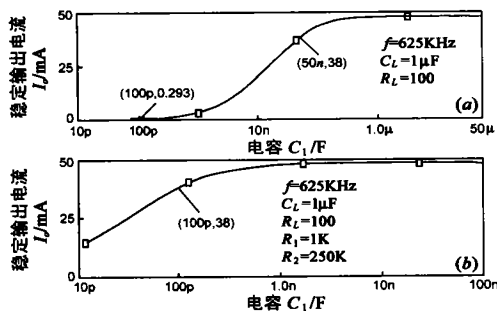


图 4 (a) 典型反压电荷泵的稳态输出电流与浮置电容的关系;  
(b) 新型反压电荷泵的稳态输出电流与浮置电容的关系

从式 (20) 可以看出等效电容的等效串联电阻比原电容的等效串联电阻大大下降了, 综合考虑效率下降不多。

#### 4.2 采用有源电容倍增器的反压电荷泵

把典型反压电荷泵电路中的浮置电容  $C_1$  用图 2(a) 的电容倍增器代替, 就得到新型反压电荷泵电路。PSPICE 仿真所得两种反压电荷泵电路稳态输出电流与浮置电容的关系曲线如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 典型反压电荷泵电路与新型反压电荷泵电路相比, 在采用同样电容情况下, 新型反压电荷泵电路输出电流要大得多, 如在电容  $C_1 = 100\text{pF}$  时, 新型反压电荷泵电路输出电流  $I_0 = 38\text{mA}$ , 而典型反压电荷泵电路输出电流  $I_0 = 0.293\text{mA}$ , 它在容量为  $50\text{nF}$  时其输出电流才与新型反压电荷泵电路输出电流相同。由此得出与倍压电路相同的结论, 再一次证实了使用电容倍增器的优点。

### 5 结论

通过上述的理论分析和对倍压与反压电荷泵 DC-DC 变换器的 PSPICE 仿真可以看出, 浮置电容是影响电荷泵输出特性的关键因素, 利用电流传输器构成的电容倍增器可以代替此电容, 从而得到一种新型的电荷泵 DC-DC 变换器, 这种新型电荷泵所需电容比目前的电荷泵产品所需电容大大地减小, 这样就避免了大容量电容的集成 (实例中仅用  $100\text{pF}$  的电容就等效了  $50\text{nF}$  电容的作用), 使这种新型电荷泵电路能实现全集成, 理论分析与仿真结果相吻合。

#### 参考文献:

- [1] J Liu, et al. A new design of power supplies for pocket computer systems[J]. IEEE Trans, 1998, IE-45 (2): 228 - 235.
- [2] 刘健, 陈治明, 钟彦儒. 开关电容 DC-DC 变换器的分析[J]. 电子学报, 1997, 25(2): 83 - 85.
- [3] 赵玉山, 等. 电流模式电子电路[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001. 58 - 63.

#### 作者简介:



王立志 男, 1962 年 11 月出生于陕西商洛市, 副教授, 博士研究生, 主要从事模拟与数字电路的教学与科研。

陈治明 男, 1945 年 10 月出生于重庆市, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究领域为电力电子技术, 功率集成电路以及新型半导体器件与材料。