

# 一种应用于 AMOLED 显示驱动的电荷泵系统\*

宇跃峰<sup>1</sup>, 尹勇生<sup>1</sup>, 谢熙明<sup>1</sup>, 权磊<sup>2</sup>, 贾晨<sup>2</sup>

(1.合肥工业大学 微电子设计研究所 教育部 IC 设计网上合作研究中心, 安徽 合肥 230601;  
2.深圳清华大学研究院, 广东 深圳 518057)

**摘要:** 基于 UMC 80 nm 工艺, 设计了一种应用于 AMOLED 显示驱动的电荷泵系统。为了满足 AMOLED 显示驱动在不同输出电压情况下保持电源效率高于 70% 的要求, 本设计中泵电路采用多输入电源结构, 并在不同路径上使用不同类型的 MOS 管。为了保障电路在 8 mA 负载下输出电压纹波小于 10 mV, 采用双边对称的泵电路结构。为了保持输出电压的稳定性, 整个系统采用 PSM 调制方式。对电路进行 Spectre 仿真, 在 1  $\mu$ F 泵电容以及 2.2  $\mu$ F 输出电容, 负载电流为 8 mA 情况下, 各种输出电压情况下的电压纹波最大为 1.2 mV, 电源效率最低为 70%, 峰值效率为 83.6%。

**关键词:** 电荷泵; 电源管理; 多输入电源; 对称结构泵电路

中图分类号: TN432

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200081

中文引用格式: 宇跃峰, 尹勇生, 谢熙明, 等. 一种应用于 AMOLED 显示驱动的电荷泵系统[J]. 电子技术应用, 2020, 46(10): 51-56.

英文引用格式: Yu Yuefeng, Yin Yongsheng, Xie Ximing, et al. A charge pump system applied to AMOLED display drive[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(10): 51-56.

## A charge pump system applied to AMOLED display drive

Yu Yuefeng<sup>1</sup>, Yin Yongsheng<sup>1</sup>, Xie Ximing<sup>1</sup>, Quan Lei<sup>2</sup>, Jia Chen<sup>2</sup>

(1. Institute of VLSI Design, IC Design Web-cooperation Research Center of MOE, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China;

2. Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** Based on the UMC 80 nm process, a charge pump system for AMOLED display drive is designed. In order to ensure that the output voltage ripple of the circuit is less than 10 mV under 8 mA load, this design adopts bilateral symmetric pump circuit structure. In order to maintain the power efficiency above 70% under different output voltages, the pump circuit in this design uses a multi-input power supply structure. In order to maintain the stability of the output voltage, the entire system in this design uses PSM modulation. Hspice simulation of the circuit, in the case of 1  $\mu$ F pump capacitor and 2.2  $\mu$ F output capacitor, the load current is 8 mA, the output voltage ripple is 1.2 mV and the power supply efficiency is at least 70% under various output conditions, 83.6% peak efficiency.

**Key words:** charge pump; power management; multiple-input power supply; symmetric pump circuit

### 0 引言

当前, 随着 AMOLED 显示技术的高速发展, AMOLED 屏幕逐渐成为手机、平板、智能手环等显示方案的主流选择。AMOLED 驱动芯片在上述移动设备中应用时, 需要满足高集成度, 低功耗等要求。由于 AMOLED 屏幕像素电路的开启和关断需要较高的电压, 电荷泵电路的升降压灵活以及集成度高的特性使其成为显示驱动芯片中电源产生高电压的首选。对于 1080p 分辨率的 AMOLED 屏幕, 需要电荷泵提供 8 mA 的负载电流。此

外, 驱动芯片产生的驱动电压将直接影响显示精度和效果, 为了不影响显示效果, 输出电压纹波需降低至 10 mV 之内。单支路的电荷泵在提供 8 mA 负载时输出电压将产生比较大的电压纹波, 从而无法满足 AMOLED 驱动芯片的显示要求。此外, AMOLED 在不同显示情况下所需要的电压也有所不同, 采用固定输入功率的电荷泵在相同负载电流下产生低电压会降低输出功率, 从而会降低电源效率。

本文针对 AMOLED 驱动芯片的需求, 设计一种电荷

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61704043); 中央高校基本科研业务费专项资金(JD2016JGPY0003); 深圳市科创委技术攻关项目(JSGC20170413153845042)

# 微电子技术

Microelectronic Technology

泵系统。为了满足低纹波的要求,本设计采用对称的双边结构电荷泵电路。为了满足较高电源效率的要求,泵电路在高电压和低电压的传输路径中分别采用 PMOS 和 NMOS 作为开关管,并且添加衬底调整电路解决漏电流的损耗,以及利用不同的输入功率匹配相应的输出功率。

## 1 电荷泵结构分析

经典的电荷泵电路由 Dickson 首先提出,采用二极管与电容连接阵列的方式泵送电荷,此结构会随着级数的增加产生较大的二极管导通电压的损失;在 CMOS 工艺中采用二极管连接的 NMOS 管替代二极管进行连接,也会产生阈值电压的损耗,并且由于体效应,阈值电压的损失逐级提高;之后提出的改进结构中,利用工作在线性区的 NMOS 管来作为开关管,降低了输出电压的损耗。利用后一节点产生的电压作为开关管栅极电压时,无法使 NMOS 完全导通,导通电阻较大;利用辅助电容以及四相时钟产生开关管栅极电压时,对时钟要求较为严格,增加了时钟产生电路的设计难度<sup>[1-2]</sup>。

本设计中在高电压传输路径中使用 PMOS 管作为开关管,在低电压传输路径中使用 NMOS 作为开关管,使控制开关管的栅极信号不需要利用其他电路产生额外的高电压就能够使开关管完全导通,降低了开关管的导通电阻。

## 2 系统设计

本文设计的电荷泵系统设计如图 1 所示,有时序产生电路、电平移位电路、泵电路以及反馈调制电路。

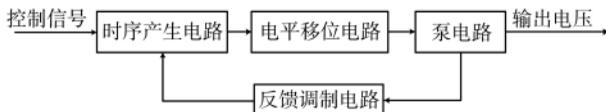


图 1 电荷泵系统框图

时序产生电路中包含张弛振荡器,用于产生时钟信号。系统工作时,接收外部控制信号,在时序产生电路内部与张弛振荡器产生的时钟信号进行逻辑运算,产生泵电路中开关管的控制信号。

时序产生电路所产生的控制信号的电压域为 0~1.2 V,而对称泵电路中开关管所需要的电压域为 -16 V~16 V,所以需要电平移位电路来转换控制信号的电压域。

本设计中泵电路采用双边对称结构,以满足显示驱动中需多通道提供 8 mA 负载电流以及输出电压纹波小于 10 mV 的要求。本设计中泵电路还采用多输入电源结构,在 8 mA 负载电流一定的情况下,不同的输出电压会产生不同的输出功率。利用多输入电源结构使输出功率不同时输入功率也可随之调节,保持电荷泵系统的整体电源效率在 70% 之上。

电荷泵电路产生的输出电压是一个容易受输入电压、负载电流、时钟频率等因素影响的值。所以需要

对电荷泵的输出电压进行稳压也称为调制,调制的目标是为了实现在一个较宽的负载范围内,输出电压保持稳定。本文采用的 PSM(Pulse Skip Modulation)调制是基于恒频恒宽的时钟脉冲信号。PSM 调制如图 2 所示。工作时,对称泵电路接收时序信号泵送电压,当输出电压高于目标值时,反馈调制电路屏蔽时序信号,使泵电路停止工作若干个周期的时序信号,当输出电压下降低于目标值时,泵电路重新接收时序信号泵送电压。PSM 调制是基于减少功率开关器件开关的次数来有效提高转换效率,可有效降低开关功耗,提高电源效率。

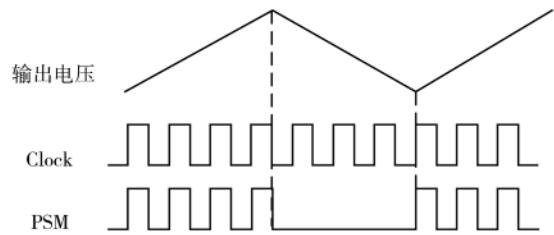


图 2 PSM 调制

## 3 电路设计与实现

### 3.1 时序产生电路

时序产生电路中时钟信号由张弛振荡器产生,本文设计的张弛振荡器如图 3 所示,张弛振荡器电路结构由比较器和 RS 触发器构成,利用恒流源对电容周期性充放电使比较器翻转,从而使 RS 触发器产生周期性的振荡<sup>[3]</sup>。

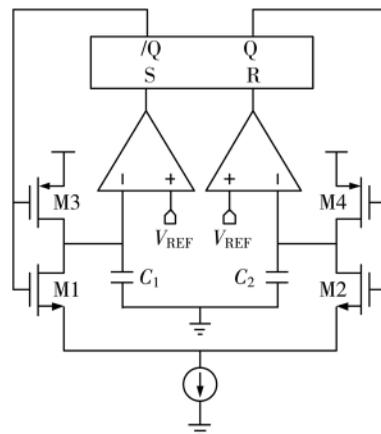


图 3 张弛振荡器

电源上电时, Q 端为低电平“0”,此时, M1 管和 M4 管导通, M2 管和 M3 管截止。电容 C<sub>2</sub> 电位通过 M4 管导通箝位在 V<sub>DD</sub>, 电容 C<sub>1</sub> 由于 M1 导通以恒流源 I 的电流放电, 上端电位下降。当电容 C<sub>1</sub> 上端电压下降至参考电压 V<sub>REF</sub> 时, 比较器产生翻转, 使 RS 触发器置位, Q 端输出高电平“1”。此时, M1 管和 M4 管截止, M2 管和 M3 管导通。M3 管导通使电容 C<sub>1</sub> 上端电压箝位在 V<sub>DD</sub>, 电容 C<sub>2</sub> 通过 M2 管放电, 使上端电位下降, 直到下降到参考电压 V<sub>REF</sub> 电位, 比较器发生翻转, 至此完成一个周期振荡。

# 微电子技术 Microelectronic Technology

张弛振荡器产生时钟信号后,需经过非交叠处理产生两相非交叠时钟用来控制泵电路中的不同开关管<sup>[4]</sup>,本设计中,两相非交叠时钟由带有延时单元的RS触发器来实现,非交叠时间宽度可由延时单元决定。非交叠时钟产生电路如图4所示。

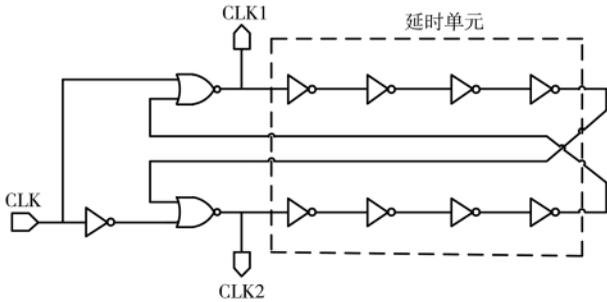


图4 非交叠时钟产生电路

### 3.2 电平移位电路

本设计中的泵电路在不同路径分别使用NMOS和PMOS作为开关管。控制不同开关管的栅极信号的电压各不相同,NMOS的开启电压需要为电路中的高电压,截止电压为地电位或者负电压;PMOS的导通电压为地电位,截止电压则需要电路中的高电压。所以需要将时序电路产生的时钟信号经过电平转换电路来控制开关管。时钟信号被先转换到电压域为 $V_{OUT}$ 到地电位以及地电位到负电源,再经过电平选择电路生成电压域为 $V_{OUT}$ 到负电源的时钟信号。电平选择电路如图5所示。

CLK1为 $V_{OUT}$ 到地电位的时钟信号,CLK2为地电位

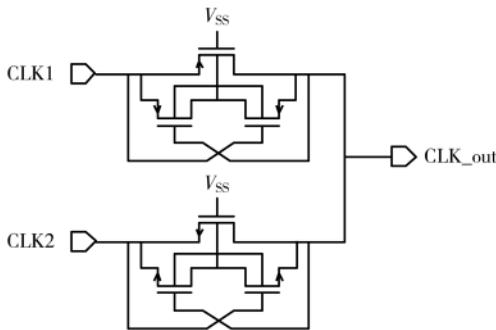


图5 电平选择电路

到负电源的信号,两个时钟信号相位相同,经过电平选择电路后,产生电压域为 $V_{OUT}$ 到负电源的时钟信号CLK\_out用于控制泵电路开关管。

### 3.3 泵电路

泵电路是整个电荷泵电路的核心模块,泵电路的拓扑结构的设计影响电荷泵电路的升压效率以及电压纹波等关键指标。

本设计中的泵电路为对称的双支路结构,并可根据不同的控制信号选择不同的输入功率来匹配输出功率,如图6所示。泵电路中在高电压路径和低电压传输路径分别使用PMOS和NMOS作为开关管,并且在输出端的开关管添加衬底调整电路来解决漏电流问题。

泵电路的工作可分为三个阶段,以图7所示单支路结构为例进行分析。

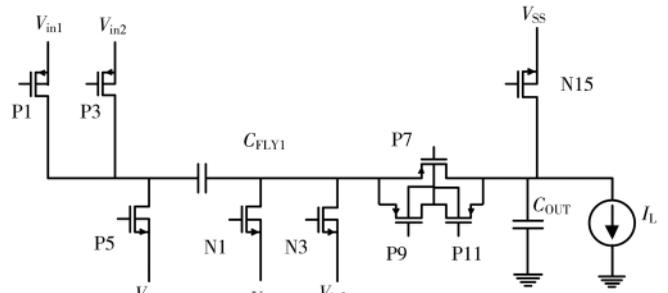


图7 泵电路工作分析

第一阶段,P1、N1导通,其余MOS管截止,P1、N1的导通电阻 $R_{ONP1}$ 、 $R_{ONN1}$ 与 $C_{FLY1}$ 串联。飞线电容 $C_{FLY1}$ 由输入电压 $V_{in1}$ 充电,设充电电流为 $I_A$ ,则此时:

$$V_{C_{FLY1}} = V_{in1} - I_A(R_{ONP1} + R_{ONN1}) \quad (1)$$

第二阶段,P5、P7导通,其余MOS管截止,P5、P7的导通电阻 $R_{ONP5}$ 、 $R_{ONP7}$ 与飞线电容 $C_{FLY1}$ 串联并向 $C_{OUT}$ 充电。设充电电流为 $I_B$ ,则此时:

$$V_{OUT} = V_{in1} + V_{C_{FLY1}} - I_B(R_{ONN1} + R_{ONP7}) \quad (2)$$

除了上述两个阶段,为了防止开关管同时导通导致电路工作异常,需要在控制开关管的时钟插入一定的非交叠时间 $t_s$ 。在时钟的非交叠时间 $t_s$ 阶段,电路中开关管都保持截止状态,飞线电容 $C_{FLY1}$ 两端压差不变,输出

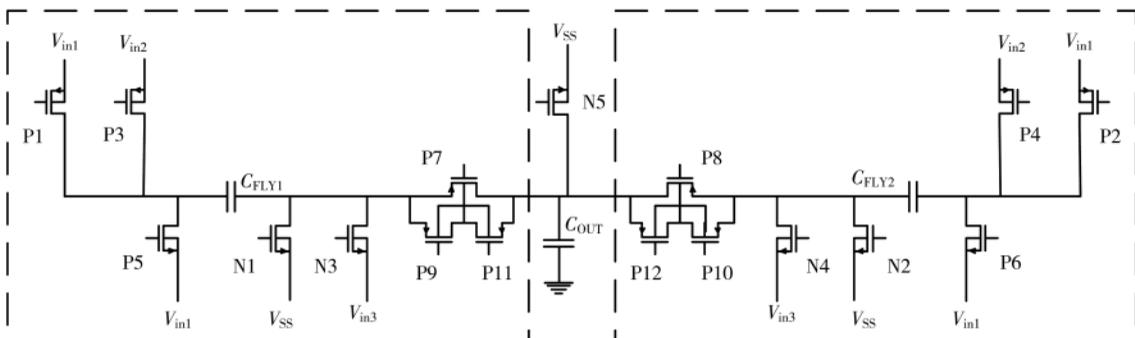


图6 对称结构泵电路

# 微电子技术

Microelectronic Technology

电容  $C_{OUT}$  向负载提供电流。

上述三个阶段为电荷泵电路一个完整周期,要输出电压维持稳定则一个周期内  $C_{OUT}$  上的电荷量守恒,即:

$$I_{B2} = I_L(t_1 + t_2 + t_s) \quad (3)$$

设第一阶段和第二阶段时间相等,  $t_1 = t_2 = t$ , 则有:

$$V_{OUT} = 2V_m - I_L(2 + \frac{t_s}{t}) \Sigma R_{ONNI} \quad (4)$$

由上述分析可知,输出端电容  $C_{OUT}$  在三个阶段内连续地充放电,会在输出端产生纹波电压,因此,电荷泵电路的实际输出是均值电压  $V_{OUT}$  和纹波电压  $V_R$  的叠加。对于  $V_R$ , 有:

$$V_R = \frac{I_{OUT}(t_2 + t_s)}{C_{OUT}} \quad (5)$$

传统的单边电荷泵在工作过程中输出电容只在时钟周期  $t_1$  得到充电,这样在整个工作周期中输出电容电荷量变化较大,输出电压会产生较大的纹波,并且提供负载能力也较弱,无法满足多通道同时负载的要求。而采用对称的双支路结构之后,输出电容由两边的电荷泵电路交替充电,在时钟周期  $t_1$  和  $t_2$  都有电荷的补充,输出电压的纹波仅为负载电流在时钟非交叠时期  $t_s$  内产生的波动。

$$V_R = \frac{I_{OUT}t_s}{C_{OUT}} \quad (6)$$

除了电压纹波,电源效率也是泵电路的一个重要指标。

$$E_{if} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN} + P_{LOSS}} \times 100\% \quad (7)$$

本设计中泵电路采用多输入电源的结构,通过控制信号选择不同输入电压组合的方式产生不同的输出电压。根据电路选择接入正电压  $V_{in1}$  和  $V_{in2}$  或负电压  $V_{in3}$  的不同,本设计中的泵电路可产生  $2V_{in1}$ 、 $V_{in1} + V_{in2}$ 、 $V_{in1} + V_{in2} - V_{in3}$ 、 $2V_{in1} - V_{in3}$  四种不同的输出电压。采用固定输入电压的泵电路输入功率  $P_{IN}$  是固定的,在负载电流一定的情况下,产生较低输出电压会产生较低的输出功率,电源效率会随着输出功率的降低而降低。本设计中泵电路可根据控制信号选择不同的输入功率匹配不同情况下的输出功率。在泵电路的输出功率较低时,采用输入功率低的电源,保障了电荷泵系统的电源效率。

除了选择不同的输入功率  $P_{IN}$ ,降低电路的损耗功率  $P_{LOSS}$  也是提升电源效率的方法。

对于 Dickson 等结构的电荷泵而言,在高电压传输路径使用 NMOS 管作为开关管。由 MOS 管线性区导通电阻公式可知, NMOS 管产生的导通电阻由于 NMOS 的栅源电压  $V_{GS}$  有限从而无法降到较低的值。

$$R_{ON} = \frac{1}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})} \quad (8)$$

本设计中在高电压的传输路径使用 PMOS 作为传输路径,使用地电位  $V_{SS}$  可使 PMOS 管完全导通,并且 PMOS

的栅源电压  $V_{GS}$  为  $(V_{SS} - V_{OUT})$ ,可产生较低的导通电阻,从而减少了开关管导通电阻上产生的功率损耗。

本设计中泵电路还加入衬底调整电路<sup>[5]</sup>,如图 8 所示。在电路工作的不同阶段中,电路中最高电位点的位置会发生变化,对于 PMOS 开关管来说,需要将衬底及时地接到最高电位,防止衬底电位低于源端或漏端,从而导致 PMOS 开关管的体二极管正偏产生体电流,避免电荷的损失并且防止衬底中流入大量电荷。加入衬底调整电路可有效解决开关管的漏电问题,减小了电路中的功率损耗,从而保持了电荷泵系统的电源效率。

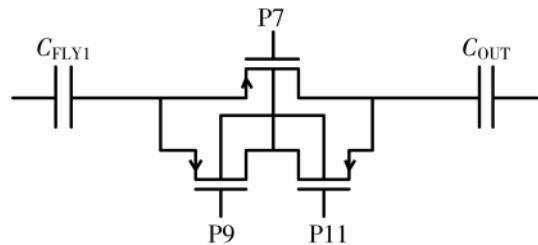


图 8 衬底调整电路

如图 8 所示,以 P9、P11 管为例,在飞线电容充电阶段, N9 管靠近输出电容端的电位较高,此时 P11 管导通,将 P7 管的衬底连接至输出电容端;飞线电容放电阶段, P7 管靠近飞线电容端的电位较高,此时 P9 管导通,将 P7 管的衬底连接至飞线电容端。这样确保 P7 管的衬底在整个工作期间都处于最高电位。

### 3.4 反馈调制电路

反馈调制电路中比较器如图 9 所示,将输出电压与参考电压进行比较,若输出电压高于参考电压,则比较器产生低电平,从而屏蔽时钟信号,进而使泵电路中的开关管停止工作<sup>[6]</sup>。使用反馈调制本身会使电压纹波变大,为了减小加入反馈调制带来的影响,可提高反馈调制电路中比较器的增益,使输出电压较小范围的波动就能引起比较器的翻转。

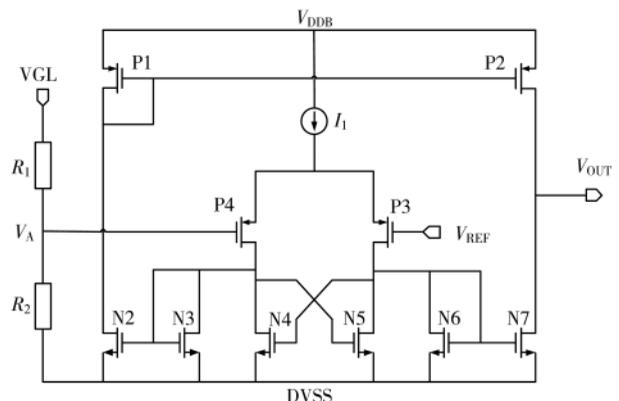


图 9 交叉耦合比较器

本文中,采用交叉耦合结构比较器来提高比较器的精度,对于此比较器,第一级的电压增益为:

$$A_v = \frac{g_{m3}}{g_{ds3} + g_{ds5} - g_{m5}} \quad (9)$$

对比传统的五管比较器而言：

$$A_v = \frac{g_{m3}}{g_{ds3} + g_{ds5}} \quad (10)$$

增益得到了提高。

由于电荷泵输出电压本身为一个波动的信号,为避免输出电压毛刺等因素对调制过程产生影响,本文在比较器之后加入 D 触发器,从而过滤掉输出电压的毛刺等非理想因素。由于 D 触发器采集上升沿数据,由比较器产生的比较结果需保持一定的时间才能作用于时钟信号上,这样可较大限度地提高电压调制的准确率,减小频繁地屏蔽时钟信号产生的输出电压的波动,减小了输出电压纹波。

#### 4 版图设计与仿真

基于 UMC80nm DNW 工艺,采用 Cadence Virtuoso 软件对设计的电荷泵系统版图进行了设计,该电荷泵的版图如图 10 所示。

基于 UMC 80 nm 工艺,采用 Cadence Virtuoso 软件对本设计进行仿真,采用  $1 \mu\text{F}$  飞线电容和  $2.2 \mu\text{F}$  输出电容,负载电流  $8 \text{ mA}$ ,输入电压选择为  $2V_{in1}$  电源的组合的

情况下,输出结果如图 11 所示。

$V_{in1}$  为  $6 \text{ V}$  输入电压,无负载情况下电路的输出电压可建立到  $11.95 \text{ V}$ 。驱动  $8 \text{ mA}$  负载时,输出电压稳定在  $9.236 \text{ V}$ 。

本设计中双边对称的泵电路的电压纹波仅为输出电流在时钟非交叠时期  $t_s$  产生,电压纹波大小仅为  $1 \text{ mV}$ ,如图 12 所示。

不同输出电压情况如表 1 所示。

可以看出,在不同输出电压的情况下双边对称结构的泵电路产生的电压纹波最大为  $1.2 \text{ mV}$ 。验证了双边对称结构在不同情况下的有效性。

本文与部分文献中电荷泵的参数对比如表 2 所示。可以看出,本文所设计电荷泵系统在负载能力以及纹波性能上有明显优势。本设计采用的双边结构泵电路可以使得输出电容在整个时钟都有电荷的补充,输出电流能力有所增强,在  $8 \text{ mA}$  负载下纹波可降低至  $1 \text{ mV}$ 。

在负载电流一定时,输出电压降低会产生较低的输出功率,对于固定的输入功率电荷泵来说,电源效率就会下降。本设计中利用不同输入功率对输出功率进行匹配可以在各输出功率下保持电源效率在  $70\%$  之上,峰值效率为  $83.6\%$ 。尤其在低输出功率时,电源效率明显优于固定输入功率的电荷泵系统,如表 3 所示。

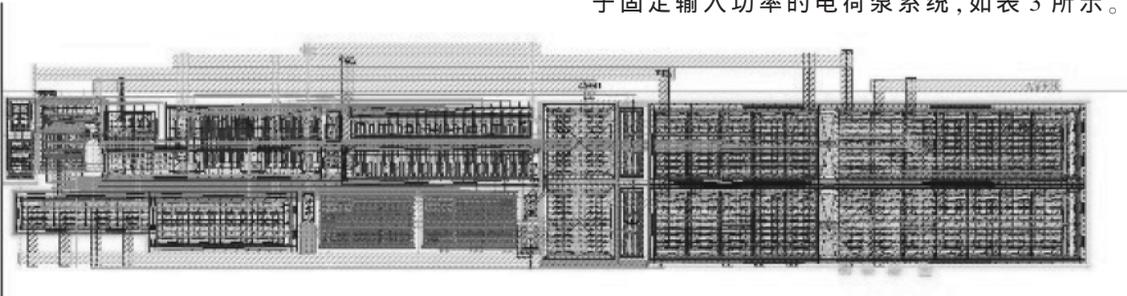


图 10 电荷泵系统版图

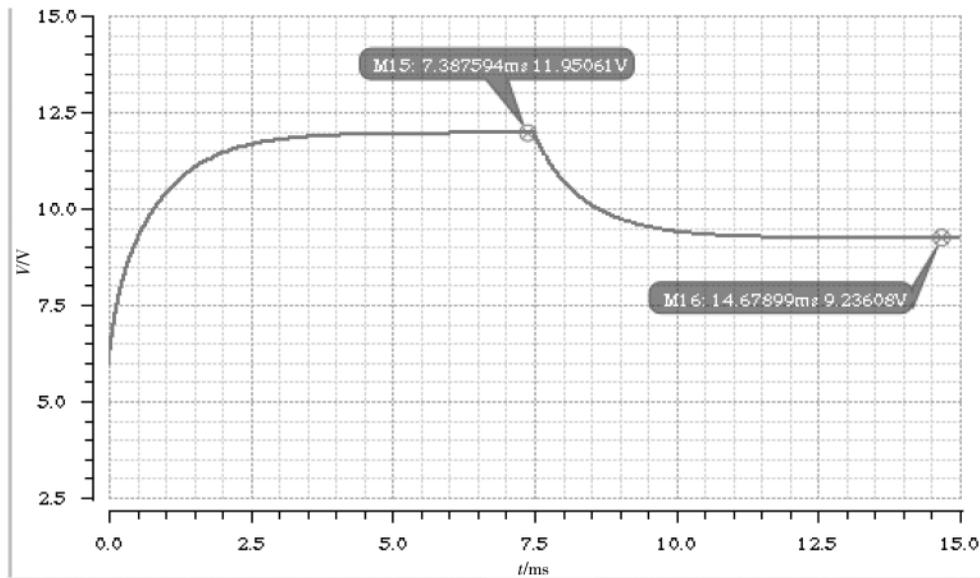


图 11  $2V_{in1}$  情况输出结果

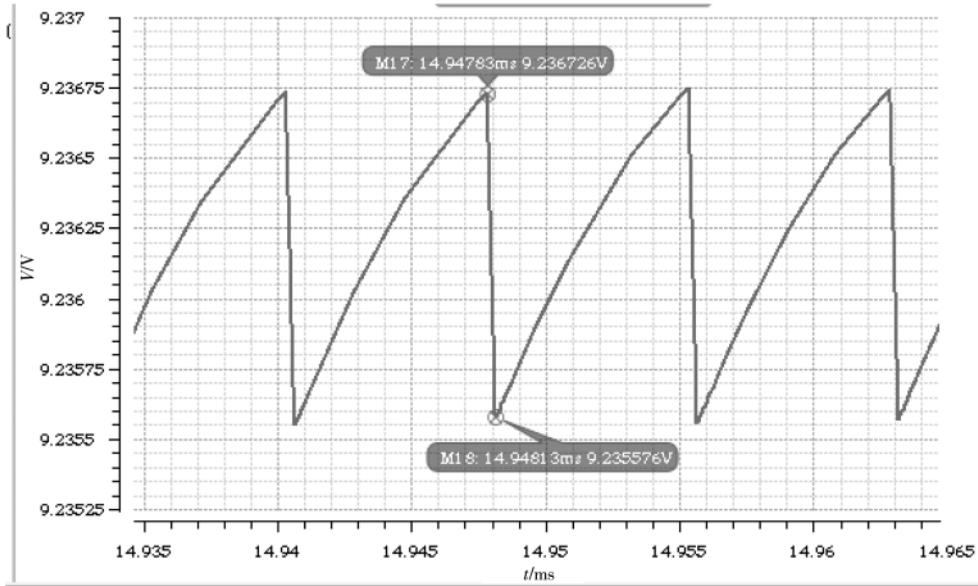
图 12  $2V_{in}$  情况电压纹波

表 1 不同输出电压及纹波结果

输出电压/V	电压纹波/mV
6.48	1
9.23	1.2
12.28	1.1
15.05	1.2

表 2 本文与部分文献中电荷泵的参数对比

参数	本文	文献[7]	文献[8]
输入电压/V	6/3.3/-6	3.3	1.2
输出电压/V	6.5~15.5	8.19	4.06
负载电流/mA	8	0.01	8
电压纹波/mV	1	9	37
电源效率/%	>70	/	54

表 3 固定输入功率和本文电荷泵电源效率对比

输出 电压/V	电源效率/%	
	本文	固定输入电源
6.48	70	38
9.23	76.9	53
12.28	80.2	75
15.05	83.6	83.6

## 5 结论

针对 AMOLED 显示驱动的要求,本文设计了一款多输出电荷泵系统,可满足 AMOLED 显示驱动不同输出电压、高负载、低纹波的要求。本设计中泵电路采用了双边对称的泵电路结构,利用多输入电源产生多输出电压。

通过进行 Spectre 仿真,验证了本设计实现了预期的性能,在 8 mA 负载下,各种输出情况下电压纹波最大为 1.2 mV,电源效率保持在 70% 之上,峰值效率为 83.6%。

### 参考文献

- [1] PALUMBO G, PAPPALARDO D. Charge pump circuits: an overview on design strategies and topologies[J]. IEEE Circuits and Systems, 1997, 44(8): 31-35.
- [2] 李卿,周健军.一种完全消除阈值电压损失的低纹波高效电荷泵[J].微电子学与计算机,2015,32(4):86-89,93.
- [3] 徐华超,林长龙,梁科,等.一种新型电荷泵电路设计[J].电子技术应用,2016,42(2):39-41,49.
- [4] 贾孜涵.开关电源中张弛振荡器的研究与设计[D].成都:西南交通大学,2016.
- [5] 魏哨静,梅年松,张钊锋,等.一种低压高效的电荷泵设计[J].微电子学与计算机,2017,34(10):72-75.
- [6] 李卿.用于 Flash 存储器的电荷泵研究[D].上海:上海交通大学,2015.
- [7] Jiang Xiaoxue, Yu Xiaojian, MOEZ K, et al. High-efficiency

charge pumps for low-power on-chip applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I, 2018, 65(3): 21143-1153.

- [8] 万悦,吕坚.一种具有对称结构的低损耗低纹波电荷泵[J].微处理器,2018,39(3):1-5.
- [9] SHIN J, CHUNG I Y, PARK Y J, et al. A new charge pump without degradation in threshold voltage due to body effect memory applications[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000, 35: 1227-1228.
- [10] Lin Hesheng, Zhang Min, CHAN W C, et al. A novel linear regulator in build-in capacitor Dickson charge pump applications with low output ripple[C]. IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), 2015.

(收稿日期:2020-02-10)

### 作者简介:

宇跃峰(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:开关电容电路。

尹勇生(1973-),通信作者,男,博士,教授,主要研究方向:模拟电路的数字化辅助设计,E-mail:yinyongsheng@hfut.edu.cn。

谢照明(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:模拟电路的数字化辅助设计。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所