

文章编号:1007-2780(2009)02-0217-04

高效自适应电荷泵研究与设计

谢永宜, 刘诗斌, 刘雨鑫

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072, E-mail: xyy021007@sina.com)

摘 要: 针对小型 LCD 的 LED 背光驱动芯片的电源效率问题, 研究并设计了一种高效的 1X/1.5X 自适应电荷泵。采用结构简单而实用的 PAM 负反馈控制技术, 使电荷泵输出电压得以稳定。分析了电荷泵相关性能, 讨论了电路高效优化设计的措施。在 0.6 μm BiCMOS 工艺模型下对电路进行了仿真, 结果表明电荷泵能够实现 1X/1.5X 自适应模式变换功能, 具有电源转化效率高(90.8%)和输出纹波低(67 mV)的特点。

关 键 词: 自适应电荷泵; 白光 LED 驱动器; 脉冲幅度调制; 电源转化效率

中图分类号: TN433; TN873⁺.3 **文献标识码:** A

1 引 言

白光 LED 具有发光效率高、功耗小、使用寿命长和安全环保等优点, 是下一代主流照明光源。目前, 在手机、数码相机和 PDA 等小型 LCD 应用领域, 白光 LED 已被认为是其背光照明的最佳选择。

便携式设备一般由单节锂电池(标称电压约为 3.7~4.2 V)供电, 而白光 LED 的正常导通压降约为 3.5 V。若直接由锂电池供电, 随着电池电压的下降, LED 的发光亮度难以保持稳定并进而无法被驱动, 所以需要专门的驱动电路来驱动 LED。

电荷泵以其电路结构简单、体积小、低 EMI 等特点成为便携式设备的首选驱动方案。作为电源的“心脏”, 电压增益、电源转换效率、输出电压纹波等电荷泵的相关性能对 LED 的正常工作及便携式设备的待机时间有直接的影响, 如何改善、提高电荷泵的性能是 LED 驱动领域的研究重点。

本文研究并设计了一种高效的 1X/1.5X 自适应电荷泵。采用结构简单而实用的 PAM 负反馈控制技术, 使电荷泵输出电压得以稳定。在 0.6 μm BiCMOS 工艺模型下的仿真结果表明, 电荷泵能够实现 1X/1.5X 自适应模式变换功能, 电源转化效率最高达 90.8%, 具有电源转化效率高(90.8%)和输出纹波低(67 mV)的特点。

2 自适应电荷泵原理与实现

为了适应实际应用, 电荷泵可以工作在 1 倍、1.5 倍等多个模式下。传统驱动电路采用固定电压模式转换, 存在输出电压不稳定、固定点设置不当、效率偏低等缺点。

图 1 所示为 1X/1.5X 自适应电荷泵。它可以检测出最小的 LED 负极电压, 通过模式选择器控制电荷泵自动在 1X、1.5X 模式之间变换, 从而可以稳定输出电压, 大幅提高了电源效率, 其性能远优于固定电压模式变换电荷泵^[1]。

电荷泵需要实现升压变化, 即要传输高电平。设计中考虑到 MOS 管自身的传输特性, 采用 PMOS 管作开关管, 可减小阈值损失和功率损耗, 其工作原理如下:

当电源电压高于 LED 的正向导通电压时, 电荷泵工作在 1X 模式下。M₈ 导通将功率调节管 M₃ 关断, 而其余开关管打开, 电池直接向负载供电, 除了在开关管上有略微损耗外, 电荷泵的输出电压基本等于电池电压。

当电源电压低于 LED 的正向导通电压时, 电荷泵工作在 1.5X 模式下。电路由两相占空比为 50% 的时钟信号 ϕ_1 、 ϕ_2 控制, 其中: M₁、M₂、M₈ 同属 ϕ_2 控制, 其余属 ϕ_1 控制。 ϕ_1 为低电平, ϕ_2 为高电平时, M₁、M₂、M₈ 导通, 电池对电荷泵充电; ϕ_1

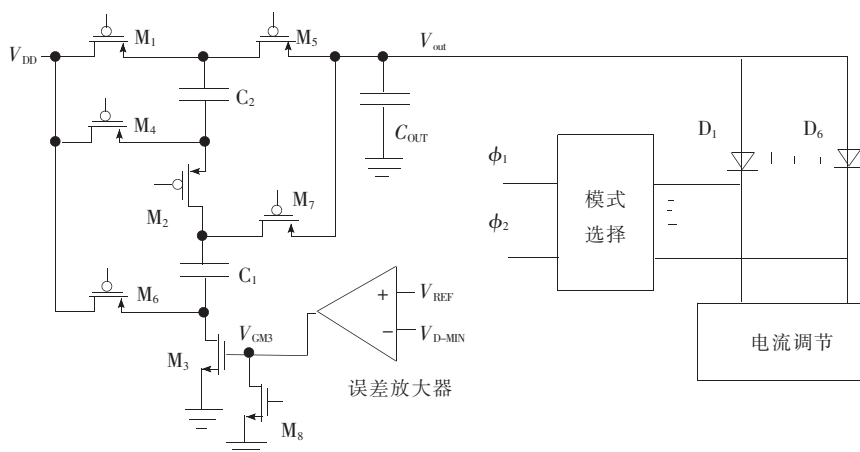


图 1 1X/1.5X 自适应电荷泵核电路

Fig. 1 Core circuit of 1X/1.5X adaptive charge pump

为高电平, ϕ_2 为低电平时, $M_4 \sim M_7$ 导通, 电荷泵向负载放电。则 1.5X 模式下电荷泵的输出为 (I_L 为负载电流, R_{ON} 为开关管的导通电阻):

$$V_{OUT} = 1.5V_{DD} - I_L R_{ON, M3} - I_L R_{ON, 1.5X} \quad (1)$$

$$R_{ON, 1.5X} = R_{ON, M1+M2+M4+M5+M6+M7} \quad (2)$$

M_8 和误差放大器实现脉冲幅度调制 (PAM; Pulse Amplitude Modulation), 即将 LED 负极的最小电压与基准电压的差值信号放大, 进而生成 PAM 信号, 调节 M_3 管的导通电阻, 如式 (1), 实现对输出电压的调节, 从而得到一个稳定的输出电压。相比 PSM、PFM 控制方式^[2,3], PAM 结构更为简单实用。

3 相关性能分析

3.1 输出纹波

输出纹波是由于电荷泵对输出电容周期性的充放电而引起的, 其大小直接影响输出电压的稳定性。分析电荷泵的工作过程可以得到输出纹波的表达式:

$$V_{OPP} = I_L / 2C_{OUT} f \quad (3)$$

3.2 电源转化效率

电源转化效率是表征电荷泵转换能量优越的特性, 对大负载电荷泵尤为重要。其表达式为:

$$\eta = \frac{P_L}{P_L + P_{CP} + P_{OM}} \quad (4)$$

P_L 为负载消耗的功率; P_{OM} 为电荷泵系统中基准、振荡器和模式选择比较器等模块消耗的功率; P_{CP} 为电荷泵自身消耗的功率, 与电路本身结构、规模和静态电流有关。

4 电荷泵的高效设计

对便携式设备而言, 在电压增益和输出纹波满足要求的前提下, 电源转化效率的高低直接决定其待机时间的长短。1X/1.5X 自适应模式转换本身已经是一种高效设计, 下面将就如何进一步提高电荷泵的电源转化效率进行讨论并给出相应的措施。

4.1 提高电荷泵电源转化效率的理论分析

P_{CP} 由导通电阻功耗 P_{ON} 和自身动态损耗 P_{dy} 组成, 其中:

$$P_{ON} = I_L^2 R_{ON, M1+\dots+M7} \quad (5)$$

$$P_{dy} = f(V_{OUT}, V_{DD})_{MAX} \sum C_G \quad (6)$$

其中, f 为电荷泵的工作频率, C_G 为功率管的栅电容。而功率开关工作在线性区, 其导通电阻为:

$$R_{ON, Mx} = 1/\mu_0 c_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - V_{TH}) \quad (7)$$

由于 P_L 、 P_{OM} 在给定的应用条件下一般不变, 要增大电源转化效率, 就必须减小 R_{ON} 、 P_{dy} 。

4.2 提高电源转换效率的措施

(1) 为了使 PMOS 开关管能够有效地导通和截止, 同时减小其导通电阻, 利用如图 2 所示的电平转移电路 (level shifter), 将各开关管栅极时钟控制信号的幅值转换到整个芯片的最高电压 $(V_{OUT}, V_{DD})_{MAX}$ 。

(2) 采用衬底变换 (bulk switching) 结构以消除体效应。衬底变换电路结构如图 3 所示。阈值电压的表达式为:

$$V_{TH} = V_{TH0} + \gamma(\sqrt{2\phi_{FB} + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_{FB}}) \quad (8)$$

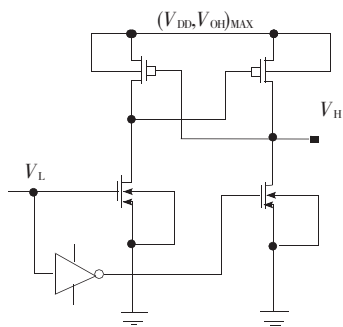


图 2 电平转移电路
Fig. 2 Level shifter

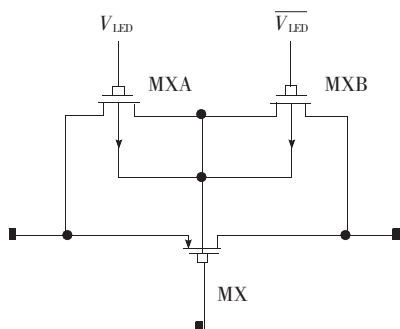


图 3 衬底变换电路
Fig. 3 Bulk switch

在 1X/1.5X 模式下, MXA、MXB 分别导通, 将衬底和真正的源极(源、漏极电压较高者)相连, 使 $V_{SB}=0$, $V_{TH}=V_{TH0}$ 。

(3) 采用两相非交叠时钟信号发生电路以防止电荷泵中的开关同时导通, 产生大的短路电流或倒灌电流, 造成能量损耗或损坏电池。两相非交叠时钟信号(non-overlapping signal)发生电路如图 4 所示。

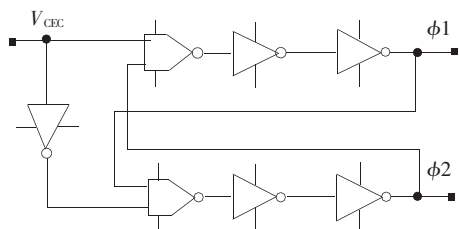


图 4 两相非交叠时钟信号发生电路
Fig. 4 Generating circuit for non-overlapping signal

(4) 确定 W 的平衡点以使电荷泵自身的功耗最小。由式(5)、(6)可得到:

$$P_{ON} \propto \frac{1}{W}, P_{dy} \propto c_{ox} \cdot W \cdot L \quad (9)$$

为了使电荷泵自身的功耗最小, 就要在 R_{ON} 和 P_{dy} 之间找一个关于 W 的平衡点, 可利用式(10)得到

W 的最优值如式(11)所示:

$$\frac{\partial P_{ON}}{\partial W} + \frac{\partial P_{dy}}{\partial W} = 0 \quad (10)$$

$$W_{optimal} = \frac{I_L}{V_{GS} \cdot C_{ox} \sqrt{\mu_p} \cdot f \cdot (V_{GS} - V_{TH})} \quad (11)$$

(5) 确定合理的工作频率。由于输出纹波与动态损耗关于频率相互矛盾, 如式(3)、(6)所示, 所以需要对它们合理折衷, 为系统设定一个合理的工作频率。

(6) 在不影响电路性能的前提下, 适当减小电路的偏置电流, 从而减小 P_{OM} , 降低静态功耗。

5 仿真结果

在泵电容和输出电容均为 $1 \mu F$ 、工作频率 1 MHz 、负载电流 120 mA 的条件下, 采用 $0.6 \mu m$ BiCOMS 工艺, 用 HSPICE 对基于本文设计的电荷泵的白光 LED 驱动芯片仿真, 结果如图 5、图 6 所示。由图 5 可知, 在 PAM 基础上电荷泵完全实现了 1X/1.5X 自适应模式变换的功能, 且在电源电压变化时, 芯片输出电压稳定, 纹波电压最大 67 mV 。

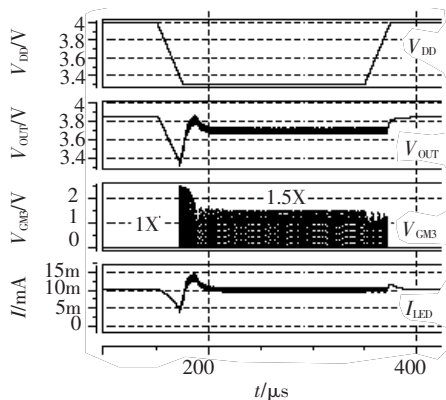


图 5 电源电压变化时电荷泵的调节过程
Fig. 5 Waveforms of charge pump with power change

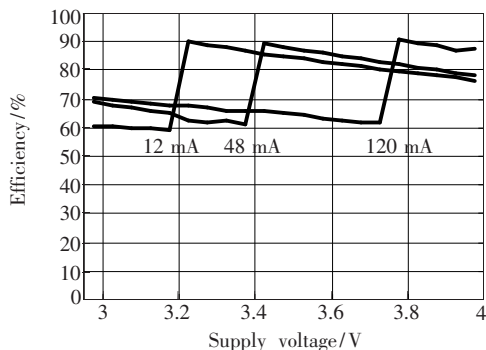


图 6 不同负载电流下芯片的电源转换效率
Fig. 6 Efficiency of charge pump under different current loads

由图 6 看出,芯片在 120 mA 负载电流下效率能达到 90.8%,达到甚至超过同类型其它芯片的效率^[5]。此外,在图 6 中还给出了负载电流 48 mA 和 12 mA 时芯片的转化效率。

6 结 论

设计了一种结构简单且性能优良的电荷泵,该电荷泵能够根据输入电压的变化而自动调节其

工作模式。采用 PAM 技术,获得了稳定的输出电压,纹波电压仅 67 mV;通过一些优化的高效设计,使得电荷泵电源转化效率达到 90.8%,赶上甚至超过了当前的同类芯片,可用于并联型白光 LED 驱动器中,达到延长便携式设备的待机时间的功效。此外,还可以加入软启动、过温欠压保护电路等,以保证电荷泵能够高效、稳定、安全地工作。

参 考 文 献:

- [1] 景卫兵,王宇华,张波. 基于电荷泵的高效白光 LED 驱动电路设计 [J]. 中国集成电路,2006,73:48-51.
- [2] Saiz-Vela A, Miribel-Catal P, Puig-Vidal M, *et al.* An electron mobility independent pulse skipping regulator for a programmable CMOS charge pump [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2005, 8(5):117-120.
- [3] Lee Jae-Youl, Kim Sung-Eun, Seong-Jun Song, *et al.* A regulated charge pump with small ripple voltage and fast start-up [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2006, 41(2):425-432.
- [4] Wang Chichang, Wu Jiinchuan. Efficiency improvement in charge pump circuit [J]. *IEEE J. Solid-State Circuit*, 1997, 32(6):852-860.
- [5] Analog Device Inc. Data Sheet adm8845 [R]. Norwood, USA: Analog Device Inc., 2004.
- [6] 杨盛光,何书专,高明伦,等. 一种低电压、高增益电荷泵 [J]. 电子与信息学报,2007,29(8):2001-2005.
- [7] Nork S H, William L W, Steven L M. Charge pump DC/DC converters with reduced input noise; US Patent, 6411531 [P]. 2002-06-25.
- [8] 吕丽峰,魏廷存,高武. TFT-LCD 驱动芯片内置电荷泵的优化 [J]. 液晶与显示,2007,22(3):346-350.
- [9] 王海峰,杨淑燕,张凤生. 用于液晶显示器背光的 LED 驱动电路设计 [J]. 液晶与显示,2008,23(4):442-447.

Research and Design of Adaptive Charge Pump with High Efficiency

XIE Yong-yi, LIU Shi-bin, LIU Yu-xin

(College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China, E-mail: xyy021007@sina.com)

Abstract

For the display drivers of portable devices, power efficiency is a key problem. This paper researched a 1X/1.5X adaptive charge pump with high efficiency. Negative feedback loop based on PAM was used to keep a constant output voltage. Furthermore, to improve charge pump's performances, several optimized design techniques were introduced. The simulation results on the basis of 0.6 μm BiCOMS technics model show: the proposed charge pump can work under 1X/1.5X mode adaptively and have an excellent performance with a higher power transform efficiency (90.8%) and lower output ripple (67 mV).

Key words: adaptive charge pump; white LED driver; pulse amplitude modulation; power transform efficiency

作者简介:谢永宜(1983—),男,陕西扶风人,硕士研究生,研究方向是数模混合集成电路设计与电源管理技术。