

一种应用于AMOLED的宽电压摆幅高精度伽马校正电路设计

庄则敬, 尹勇生, 孙晓霞, 雷蕾

引用本文:

庄则敬, 尹勇生, 孙晓霞, 等. 一种应用于AMOLED的宽电压摆幅高精度伽马校正电路设计[J]. 液晶与显示, 2021, 36(4): 529–537.

ZHUANG Ze-jing, YIN Yong-sheng, SUN Xiao-xia, et al. Design of a wide voltage swing high-precision Gamma correction circuit for AMOLED[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(4): 529–537.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0299>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应用于AMOLED源极驱动的高精度DAC设计

High precision DAC design for AMOLED source drive

液晶与显示. 2019, 34(4): 379–385 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193404.0379>

应用于AMOLED源极驱动的具有DAC功能的输出缓冲器设计

Design for AMOLED source driver output buffer with DAC function

液晶与显示. 2020, 35(9): 938–945 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0938>

应用于硅基OLED微显示器的分段可调伽马校正

Gamma correction with adjustable segmentation for OLED-on-silicon microdisplay

液晶与显示. 2020, 35(8): 825–830 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203508.0825>

一种LTPS-TFT AMOLED像素电路的理论研究

LTPS-TFT threshold voltage compensation pixel circuit for AMOLED

液晶与显示. 2017, 32(8): 614–621 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173208.0614>

基于无源逆变器的全模拟液晶驱动电路设计

Design of fully analog liquid crystal drive circuit based on passive inverter

液晶与显示. 2021, 36(2): 272–278 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0220>

文章编号:1007-2780(2021)04-0529-09

一种应用于 AMOLED 的宽电压摆幅高精度伽马校正电路设计

庄则敬, 尹勇生*, 孙晓霞, 雷 蕾

(合肥工业大学 微电子设计研究所, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对 AMOLED 显示驱动芯片对高精度、低功耗的应用需求,设计了一种宽电压摆幅、高精度、具有温度补偿功能的伽马校正电路。电路通过幅值调节和斜率调节,并微调关键点,从而改变 DAC 输出曲线,更好地拟合灰阶-电压曲线实现高精度。通过使用轨到轨输入级及基于亚阈值跨导恒定设计的输出缓冲器电路保证了宽输入电压范围,采用 Cascode Miller 补偿结构以降低补偿电容大小,提高稳定性和响应速度。电路使用了温度补偿结构以平衡温度变化对灰阶电压带来的影响。仿真结果表明:在 UMC 80 nm 的工艺下,在输入电压为 0.2~6.3 V 的范围内,设计的伽马校正电路的响应时间在 20 μ s,电路输出电压的误差在 3 mV 以内。性能基本不受温度影响,满足了分辨率为 1 080 $\times$ 2 160 的 AMOLED 驱动芯片的设计需求。

关键词:AMOLED 显示驱动芯片;伽马校正;低压差线性稳压器(LDO);高精度

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2020-0299

Design of a wide voltage swing high-precision Gamma correction circuit for AMOLED

ZHUANG Ze-jing, YIN Yong-sheng*, SUN Xiao-xia, LEI Lei

(Institute of VLSI Design, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the application requirements of AMOLED display driver chips for high precision and low power consumption, a Gamma correction circuit with wide voltage swing, high precision and temperature compensation is designed. The circuit uses amplitude adjustment and slope adjustment, fine-tune key points to change the DAC output curve, and better fitting the grayscale-voltage curve to achieve high accuracy. By using rail-to-rail input stage and output buffer circuit based on constant sub-threshold transconductance design, a wide input voltage range is guaranteed. Cascode Miller compensation structure is used to reduce the size of the compensation capacitor and improve stability and response speed. The circuit uses a temperature compensation structure to balance the effect of temperature changes on the gray-scale voltage. The simulation results show that under the UMC 80 nm process, within the range of 0.2~6.3 V input voltage, the response time of the designed Gamma cor-

收稿日期:2020-11-06;修订日期:2020-12-07.

基金项目:模拟集成电路重点实验室课题(No.6142802190506)

Supported by Project of Science and Technology on Analog Integrated Circuit Laboratory (No. 6142802190506)

* 通信联系人, E-mail: yinyongsheng@hfut.edu.cn

rection circuit is $20\ \mu\text{s}$, and the error of the circuit output voltage is within $3\ \text{mV}$. The performance is basically not affected by temperature and meets the design requirements of AMOLED driver chips with a resolution of $1\ 080 \times 2\ 160$.

Key words: AMOLED display driver chip; Gamma correction; low drop output; high precision

1 引言

AMOLED 技术已经成为显示面板厂商的新宠,其显示屏以体型轻薄,发热量低,画质精细等优点风靡全球^[1]。伽马校正技术通过调节显示曲线,以及数字模拟转换器(DAC)提高灰阶电压精度,对 AMOLED 显示效果有着非常重要的影响,是驱动电路中的重要组成部分。伽马校正电路的作用是调节灰阶电压输出曲线,使其与人眼对亮度的感知曲线拟合,使灰阶电压与亮度产生一一对应的关系,产生更好的视觉效果。

为了使得电路达到高精度的标准,输出的灰阶电压曲线需要尽可能贴合理想的电压曲线,需要将伽马校正曲线分段处理。文献[1]采用 6 位精度、六段式曲线进行伽马曲线调节,输出电压摆幅为 $0.2 \sim 3\ \text{V}$,输出精度为 $10\ \text{mV}$ 。文献[2]采用 10 位精度、16 段式曲线进行伽马曲线调节,其输出电压摆幅为 $0.1 \sim 6.4\ \text{V}$,精度为 $3\ \text{mV}$ ^[3]。但 16 段式曲线意味着大量电阻和缓冲器的使用,付出了更多的芯片面积和功耗的代价。

本文针对分辨率为 $1\ 080 \times 2\ 160$ 的 AMOLED 驱动芯片,通过权衡性能、功耗与芯片面积,设计幅值调节、斜率调节以及关键点的微调,并选择 10 位 DAC 来输出电压,从而实现高精度灰阶电压输出曲线。设计了宽摆幅缓冲器以满足宽摆幅应用需求。

2 伽马校正电路的结构及原理

2.1 伽马校正曲线的调节方法

由于人眼对于亮度变化的感知是非线性的,对低亮度变化更敏感,同时像素电路驱动管 V/I 特性为非线性关系,导致亮度对电压变化产生非线性响应。因此作为反映电压与人眼感光能力曲线的伽马曲线也是一条非线性曲线^[4]。由于硬件结构的限制,一般情况下,非线性曲线是通过对该曲线进行分段线性化实现的。本文采用非线性数

据结合线性 DAC 的方式实现非线性的伽马校正曲线,即灰阶电压曲线。线性 DAC 不需要根据灰阶电压的大小按比例分配电阻串的阻值,只需要大小均等的电阻即可实现高精度并节省面积。因此只需要确定非线性曲线上幅值、斜率以及关键点,结合非线性数据以及线性 DAC,便可以实现所需的非线性伽马校正曲线。

图像数据和灰阶电压之间的非线性关系通过分段线性化实现,其实现过程如图 1 所示,主要包含 3 个步骤:

(1)确定非线性曲线上的最低点和最高点,称为幅度调节。

(2)确定曲线两个中间点,从而将曲线分成 3 段,称为斜率调节。

(3)确定曲线上的关键点,称为微调。

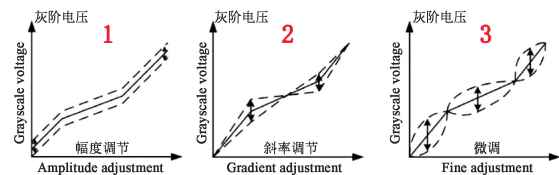


图 1 关键灰阶电压产生过程

Fig.1 Generation procedure of key grayscale voltage

2.2 伽马校正电路的主体结构及工作原理

图 2 为本文伽马校正主体电路结构。主要由 V_{REF} 电压产生电路、512 选 1 的多路选择器电路、 $V_{\text{GMP}}/V_{\text{GSP}}$ 输出缓冲器电路、32 选 1 的多路选择器电路以及输出缓冲器电路组成。前级的 V_{REF} 产生电路产生参考电压,采用 LDO 结构,输出给后级的 $V_{\text{GMP}}/V_{\text{GSP}}$ 电压产生电路,产生稳定的输出电流进入电阻串,由 512 选 1 的多路选择器电路选出伽马校正曲线幅度调节所需的最高电压 V_{GMP} 和最低电压 V_{GSP} 。输出的电压通过两个缓冲器,即 $V_{\text{GMP}}/V_{\text{GSP}}$ 输出缓冲器,将选择出来的 $V_{\text{GMP}}/V_{\text{GSP}}$ 电压输出到电阻串 Rstring1 的两端。之后,由两个 32 选 1 的多路选择器分别选择并产生高斜率调节点 V_{H} 和低斜率调节点 V_{L} 。这两点电压即为三段式曲线的两个拐点电压^[5]。由

Rstring2、寄存器、开关电路及其输出缓冲器电路确定三段曲线上的关键节点电压,对曲线进行微调。通过设计并调节较优的幅值、斜率以及关键点,实现较高的非线性曲线拟合精度。结合三段式曲线,确定 10 bit 数据和 8 bit 数据之间的对应关系,完成非线性数据的转化。源极驱动电路根据转换后的 10 bit 数据产生最终的灰阶电压输出曲线。

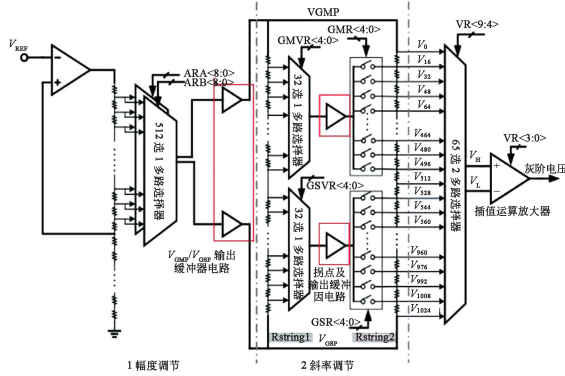


图2 伽马校正主体电路结构

Fig.2 Main structure of Gamma correction circuit

3 电路设计

3.1 设计思路及指标

由于电路的输入电压摆幅为 0.2~6.3 V,所以设计的参考电压产生电路中的运放和 V_{GMP}/V_{GSP} 输出缓冲器电路都要采用轨到轨的输入级。为了达到高精度设计,使误差保持在 3 mV 以内,需要使参考电压产生电路中的运放和 V_{GMP}/V_{GSP} 输出缓冲器电路的开环增益达到 55 dB 以上。由于温度对 AMOLED 显示屏亮度有较大影响,需要对其输出缓冲器输出进行温度补偿,使得电路的输出电压以及频率特性不随温度变化而变化。

3.2 V_{GMP}/V_{GSP} 输出缓冲器设计

3.2.1 输入级和跨导恒定设计

由于输入电压范围较大,为了使输入电压范围达到从电源到地, V_{GMP} 和 V_{GSP} 输出缓冲器电路能够在宽摆幅的输入电压下正常工作,该电路采用轨到轨结构的输入级^[6]。

图 3 中, V_{INCMn} 的范围在 $V_{GSn} + V_{DSsatn}$ 和 V_{DD} 之间,而 V_{INCMp} 在 V_{SS} 到 $V_{DD} - V_{GSp} - V_{DSsatp}$ 之间,则电路的共模范围扩大到了 V_{DD} 到 V_{SS} ,实现了宽输入电压范围。

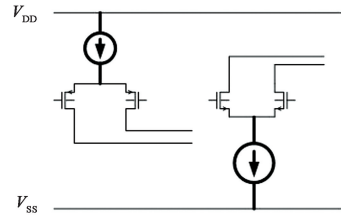


图3 轨到轨输入级结构

Fig.3 Rail-to-rail input stage structure

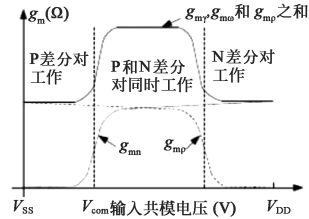


图4 总跨导与共模输入电压的关系

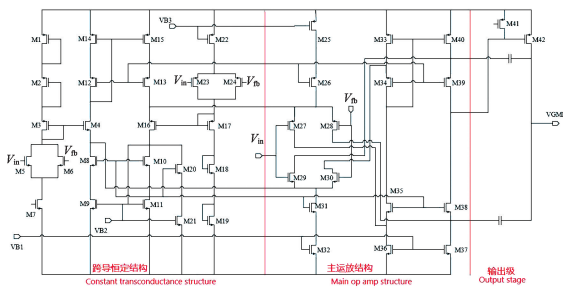
Fig.4 Relationship between common mode input voltage and total g_m

传统轨对轨输入级的共模输入电压 V_{INCM} 为电源电压一半时两组差分对同时导通,总跨导 $g_m = g_{mn} + g_{mp}$,而当 V_{IN} 接近电源电压上下限时,只有一个管子工作,此时总的 g_m 也减小了一半。总跨导与共模输入电压的关系如图 4 所示。

轨对轨运放 g_m 的剧烈波动会使得放大器的增益发生变化,也给频率补偿带来困难,需要增大 g_{mn} 或 g_{mp} 使得总 g_m 在整个共模输入范围内维持不变, $g_{mn} + g_{mp} = g_m$ 。因而电路引入跨导恒定结构使其在宽电压摆幅下也可保证 g_m 的稳定^[7]。

出于对低功耗方面的考虑,电路的差分对管工作在亚阈值区,其跨导与电流成一倍关系, $g_m = I_d / nV_T$ 。因此可以利用 MOS 管工作在亚阈值区来实现跨导恒定。

本文设计的 VGMP 电路的主运放结构如图 5 所示,图中从左至右依次是跨导恒定部分、放大器部分和输出部分。在跨导恒定部分,由 V_{in} 和 V_{ib} 控制的传输门 M5、M6 和 M23、M24 根据栅极电压的不同而开启和关断,控制电流镜通路的导通和关闭。主运放部分中 M27、M28、M29、M30 管为轨到轨运放的输入差分对管, M25、M26 为 PMOS 管尾电流源,电流为 I_D 。M31、M32 管为 NMOS 管尾电流源,电流同样为 I_D 。轨对轨运放采用共源共栅结构以提高增益。输出级采用共源极结构以实现宽输出摆幅,为后级提供 V_{GMP} 电压。

图 5 V_{GMP} 电路的主运放结构Fig.5 Main amplifier structure of V_{GMP} circuit

当输入电平 V_{in} 为高时 (5.2 V 以上), NMOS 对管单独工作, PMOS 对管关断。此时, V_{in} 和 V_{fb} 使 M5, M6 管导通, 通过 M1, M2, M3 管将 M4 管的栅压拉低, 使 M4 管关断。M16 管导通, 使 M25, M26 管产生的电流通过 M8~M11 管组成的电流镜流入 NMOS 对管。此时流过 NMOS 单管的电流为 I_D , 输入级总跨导为 $g_{mtot} = g_{mn} = \frac{I_D}{n V_T}$ 。

输入电平为低时 (0.6 V 以下), NMOS 对管关断, PMOS 对管单独工作。此时 V_{in} 和 V_{fb} 使 M23 和 M24 管导通, 通过 M17~M19 管抬高 M16 管的栅压, 使其关断, M4 管导通, 使 M31 和 M32 产生的电流, 由 M12~M15 管组成的电流镜通路流入 PMOS 对管。此时流过 PMOS 单管的电流为 I_D , 输入级总跨导为 $g_{mtot} = g_{mp} = \frac{I_D}{n V_T}$ 。

输入电平为中间值 (0.6 ~ 5.1 V) 时, NMOS 对管和 PMOS 对管同时工作。此时 M4 和 M16 管都关断, 关闭了两个电流镜通路, 不进行电流的补偿。此时流过 NMOS 对管和 PMOS 对管的电流均为 $\frac{I_D}{2}$ 。输入级总跨导为 NMOS 管和 PMOS

管跨导之和 $g_{mtot} = g_{mp} + g_{mn} = \frac{I_D}{n V_T}$ 。

3.2.2 温度补偿电路

OLED 利用载流子注入和复合自身发光的, 但是载流子的运动受到温度影响, AMOLED 显示屏的亮度随着环境温度的变化而变化。典型 OLED 发光亮度与温度之间的关系如图 6 所示, 当温度小于 60 °C 时, OLED 发光亮度随温度的增加而增强; 当温度大于 60 °C 时, OLED 发光亮度随温度增加而减弱。为了在很宽温度范围内

AMOLED 显示屏发光亮度保持恒定, 需要对 AMOLED 显示屏驱动灰阶电压进行温度补偿。

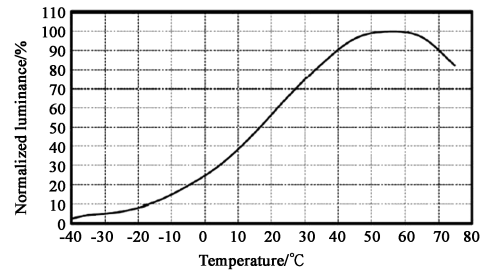


图 6 OLED 发光亮度与温度曲线

Fig.6 OLED brightness and temperature curve

AMOLED 显示驱动芯片工作环境温度一般在 -40~85 °C, 且在 60 °C 以下 OLED 发光亮度与温度基本成正比关系。因此, 为了满足较宽温度范围内的工作要求, 驱动灰阶电压的温度补偿通过调节伽马曲线的幅度电压来实现, 即控制输出的 V_{GMP} 和 V_{GSP} 电压, 将伽马曲线整体平移, 且温度补偿系数为 11 mV/°C。具体实现方案是利用带隙基准源和温度之间的关系来实时检测温度的变化, 产生正温度系数 PTAT 电流、负温度系数 CTAT, 最后将 PTAT 电流和 CTAT 电流求和灌入到电阻中来实现一定温度系数的幅度电压调节过程, 结构如图 7 所示。

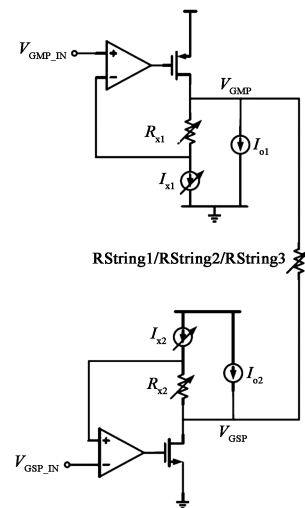
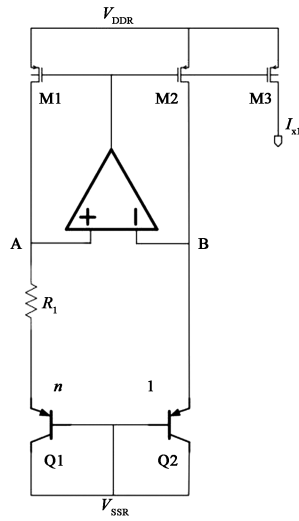


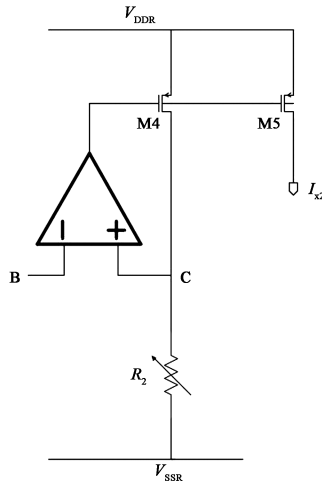
图 7 温度补偿电路

Fig.7 Temperature compensation circuit

图 7 中 R_{x1} 、 R_{x2} 是可调电阻, I_{x1} 、 I_{x2} 是带隙基准源产生的可编程的正温度系数 PTAT 电流、负温度系数 CTAT 电流, 产生电路如图 8 所示。



(a)PTAT 电流



(b)CTAT 电流

图8 PTAT 电流与 CTAT 电流产生电路

Fig.8 PTAT and CTAT current generating circuit

由图8可知:

$$V_{R1} = V_{BE2} - V_{BE1} = V_T \ln \frac{I_{C2} I_{S1}}{I_{C1} I_{S2}} = V_T \ln n, \quad (1)$$

PTAT 电流为:

$$I_{x1} = V_T \ln \frac{n}{R_1}, \quad (2)$$

由 $V_C = V_{BE2}$ 可得 CTAT 电流为:

$$I_{x2} = \frac{V_{BE2}}{R_2}, \quad (3)$$

从图7可以得出, V_{GMP}/V_{GSP} 与温度之间的关系表达式如下:

$$V_{GMP} = V_{GM} P_{IN} + I_{x1} R_{x1}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial V_{GMP}}{\partial T} = R_{x1} \frac{\partial I_{x1}}{\partial T}, \quad (5)$$

$$V_{GSP} = V_{GSPIN} - I_{x2} R_{x2}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_{GSP}}{\partial T} = -R_{x2} \frac{\partial I_{x2}}{\partial T}, \quad (7)$$

式中忽略电阻 R_{x1} 、 R_{x2} 的温度系数,可以得出, V_{GMP} 、 V_{GSP} 与 I_x (I_{x1}/I_{x2}) 对温度的斜率、 R_x (R_{x1}/R_{x2}) 的乘积成正比。因此,改变 R_x 的大小或者 I_x 的温度系数都可以调节 V_{GMP}/V_{GSP} 的温度系数,从而实现驱动灰阶电压的温度补偿。

3.3 拐点及输出缓冲器设计

拐点缓冲器作为斜率调节点的电压缓冲器,其作用是对伽马校正曲线进行斜率调节。伽马校正电路需要为 DAC 输出 65 个不同的灰阶电压,相应地需要使用 65 个缓冲器。这些缓冲器需要驱动大小为数千欧的电阻负载或者为大电容充电。由于行列信号施加的时间很短,因此这个过程必须在极短的时间内完成。拐点缓冲器电路需要具备大电流输出能力,因而需要降低静态电流以压低电路功耗。综合以上要求,本文的拐点及输出缓冲器使用了 Class AB 输出级和 Cascode Miller 补偿结构,如图9所示,输入级采用轨对轨输入级以实现宽输入摆幅,中间级采用共源共栅结构以及浮动偏置,输出级采用 Class AB 输出级,实现宽输出摆幅的同时提供大的动态输出电流。

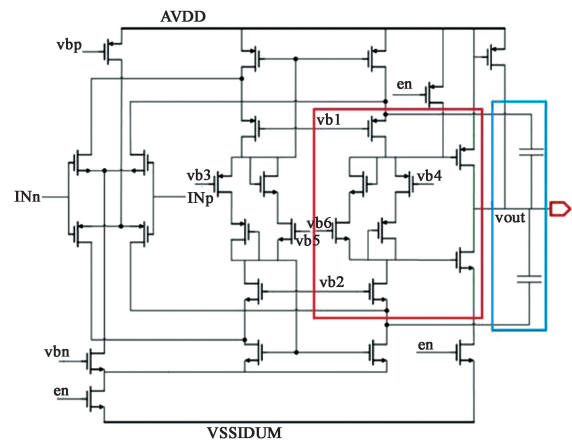
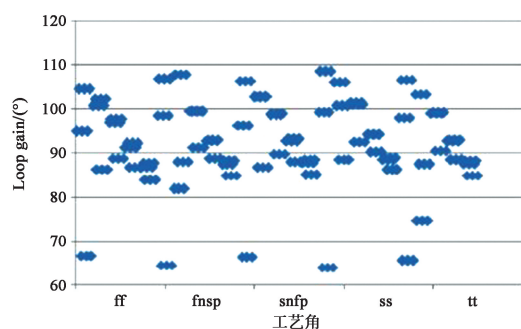
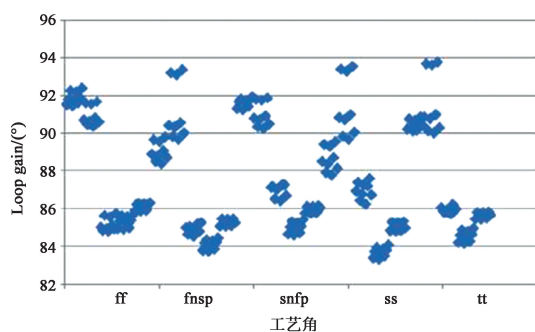
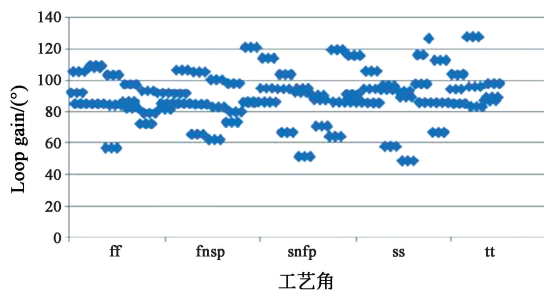
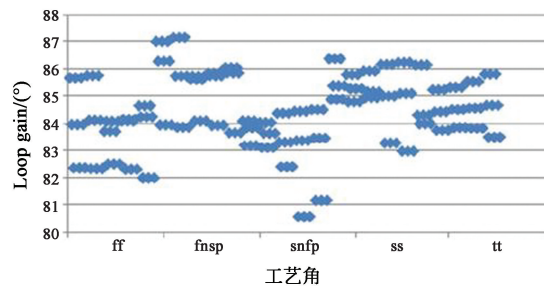
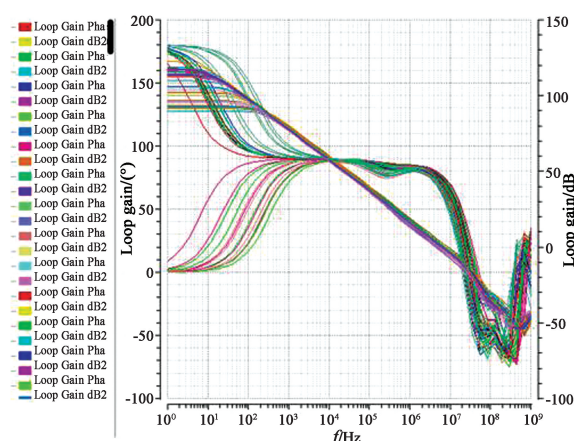


图9 拐点缓冲器电路

Fig.9 Breaking point buffer circuit

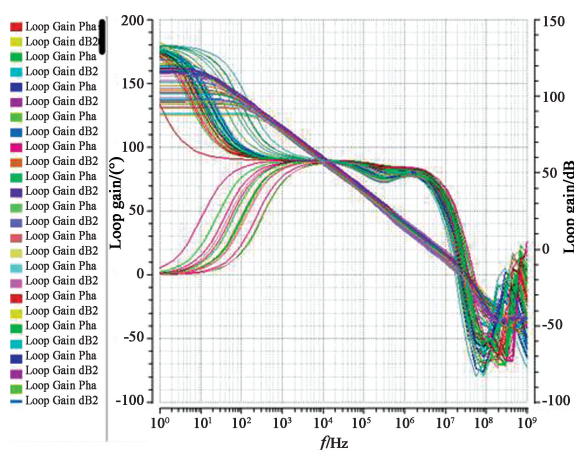
3.3.1 Class AB 输出级设计

对于 V_{GMP}/V_{GSP} 输出缓冲器电路的设计,需要考虑输出电压宽摆幅的要求,同时需要输出大

(a) V_{GMP} 电路的幅频曲线(a) Amplitude-frequency curves of V_{GMP} circuit(b) V_{GMP} 电路的相频曲线(b) Phase frequency curves of V_{GMP} circuit图 12 V_{GMP} 电路的稳定性仿真Fig.12 STB simulation of V_{GMP} circuit(a) V_{GSP} 电路的幅频曲线(a) Amplitude-frequency curves of V_{GSP} circuit(b) V_{GSP} 电路的相频曲线(b) Phase frequency curves of V_{GSP} circuit图 13 V_{GSP} 电路的稳定性仿真Fig.13 STB simulation of V_{GSP} circuit

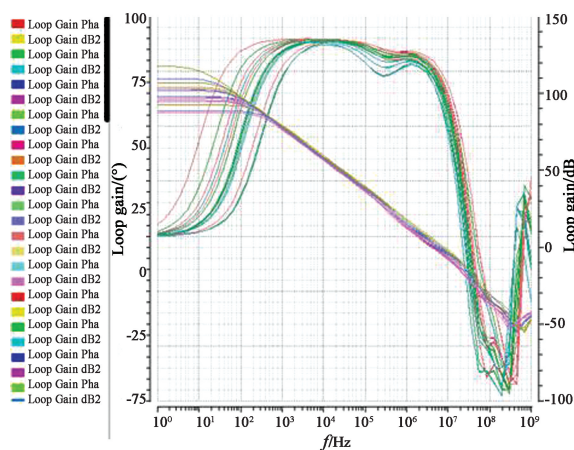
(a) 1 V 电压

(a) Voltage at 1 V



(b) 3.5 V 电压

(b) Voltage at 3.5 V



(c) 6.2 V 电压

(c) Voltage at 6.2 V

图 14 不同输入电压下的稳定性仿真

Fig.14 Stability simulation of different input voltage

当电源电压为 6.5 V 时,对拐点和输出缓冲器环路取不同输入的电压范围分别扫描,其幅频与相频特性曲线如图 14 所示。可以看出,在整个输入电压范围内,输出缓冲器的低频增益都在 70 dB 以上,相位裕度在 60°以上,可以保证输出缓冲器环路的稳定性。在典型工作的 3.3 V 左右时,增益可达 129 dB,相位裕度 75°,满足设计要求。

对整个伽马校正电路进行级联仿真,可以看到当 V_{GMP} 电压取 5.508 V, V_{GSP} 电压取 1.019 V 时产生的实际仿真曲线与理想曲线的对比如图 15、图 16 所示。图 15 中红线为理想曲线,绿线为实际曲线。图 16 中蓝线为实际曲线,红线为理想曲线,绿线为二者之差。从比较结果可以看出,理论

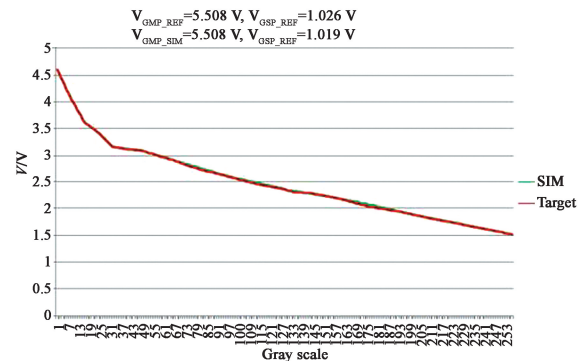


图 15 伽马曲线仿真结果

Fig.15 Gamma curve simulation result

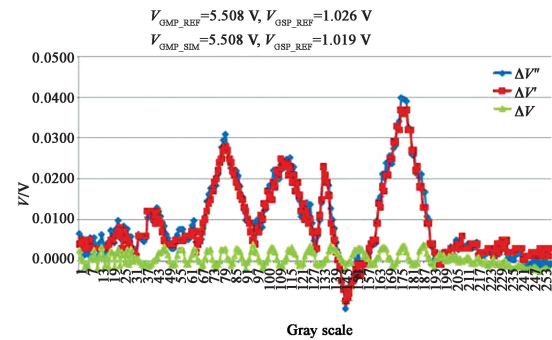


图 16 伽马曲线误差比较

Fig.16 Error comparison of Gamma curves

值和仿真值基本相等。理论值和目标值、仿真值和目标值在某些点存在较大误差。这主要是由于采用屏厂商给的伽马曲线的关键灰阶电压和芯片实现的不一样造成的。如果要消除仿真值和目标值之间的误差,可以根据屏厂商需要的伽马曲线进行定制。

表 1 本文设计的伽马校正电路与其他设计比较

Tab.1 Comparison of Gamma correction circuit with other designs

性能	本文	文献[1]	文献[2]
电源电压/V	6.5	3.3	7
输入电压范围/V	0.2~6.2	0.2~3	0.1~6.4
开环增益/dB	55~129	>118	>67
相位裕度/(°)	60~75	>58.94	>70
电压精度/mV	3	10	3

通过与其他设计对比(表 1)可以看出,本文设计的伽马校正电路具有较宽的输入电压范围和较高的精度,并能够进行温度补偿。

5 结 论

本文基于 UMC 80 nm 工艺设计了宽摆幅、高精度的伽马校正电路。通过幅值调节、斜率调节以及关键点调节,更好地拟合伽马校正曲线并实现高精度。设计宽摆幅参考电压产生电路及其输出缓冲器,使用轨到轨输入级和基于亚阈值的跨导恒定结构使输入电压摆幅达到 0.2~6.3 V 并具有良好的稳定性。通过温度补偿结构补偿温度偏移造成的输出电压误差,实现高精度。拐点及输出缓冲器使用 Class AB 输出级达到宽输出摆幅和快速响应。设计的伽马校正电路满足 1 080×2 160 分辨率 AMOLED 对于伽马校正电路输出精度与输入电压宽摆幅的要求。

参 考 文 献:

- [1] 宇跃峰,尹勇生,谢照明,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.
YU Y F, YIN Y S, XIE X M, *et al.* A charge pump system applied to AMOLED display drive [J]. *Application of Electronic Technique*, 2020, 46(10): 51-56. (in Chinese)
- [2] 王颖.高分辨率 AMOLED 显示屏源极驱动电路设计[D]. 成都:电子科技大学,2015:1-2.

- WANG Y. Design of a high-resolution AMOLED panel source driver circuit [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 1-2. (in Chinese)
- [3] 童振霄. 高分辨率 AMOLED 显示屏源极驱动电路的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- TONG Z X. Research and design of a high resolution AMOLED panel source driver circuit [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014: 8-9. (in Chinese)
- [4] 马奔, 杨文华, 尹勇生, 等. RGB-Delta 结构 AMOLED 子像素渲染算法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101106.
- MA B, YANG W H, YIN Y S, *et al.* Research on RGB-Delta structure AMOLED sub-pixel rendering algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101106. (in Chinese)
- [5] 孟宇, 尹勇生, 宇跃峰, 等. 应用于 AMOLED 源极驱动的高精度 DAC 设计[J]. 液晶与显示, 2019, 34(4): 379-385.
- MENG Y, YIN Y S, YU Y F, *et al.* High precision DAC design for AMOLED source drive [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2019, 34(4): 379-385. (in Chinese)
- [6] SEOL H C, HONG S K, KWON O K. An area-efficient high-resolution resistor-string DAC with reverse ordering scheme for active matrix flat-panel display data driver ICs [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(8): 828-834.
- [7] 李有慧. 一种输入输出轨到轨 CMOS 运算放大器的设计[J]. 电子科技, 2015, 28(6): 165-169.
- LI Y H. An input output rail-to-rail CMOS operational amplifier design [J]. *Electronic Science and Technology*, 2015, 28(6): 165-169. (in Chinese)
- [8] RAZAVI B. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* [M]. Boston: McGraw-Hill, 2001.
- [9] GRAY P R. *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2009.
- [10] KANG J S, KIM J H, KIM S Y, *et al.* 10-bit driver IC using 3-bit DAC embedded operational amplifier for spatial optical modulators (SOMs) [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2007, 42(12): 2913-2922.
- [11] 王为之, 靳东明. 一种采用共栅频率补偿的轨到轨输入/输出放大器[J]. 半导体学报, 2006, 27(11): 2025-2028.
- WANG W Z, JIN D M. A rail-to-rail input/output amplifier using common-gate frequency compensation [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(11): 2025-2028. (in Chinese)
- [12] SANSSEN W M C. *Analog Design Essentials* [M]. New York: Springer, 2006.
- [13] HWANG C, MOTAMED A, ISMAIL M. Universal constant- g_m input-stage architectures for low-voltage op amps [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1995, 42(11): 886-895.
- [14] 陈宏, 曾龄宇, 胡乔, 等. 一种用于轨到轨运算放大器的新型频率补偿结构[J]. 微电子学, 2011, 41(1): 15-18.
- CHEN H, ZENG L Y, HU Q, *et al.* A novel frequency compensation structure for rail-to-rail operational amplifier [J]. *Microelectronics*, 2011, 41(1): 15-18. (in Chinese)

作者简介:



庄则敬(1992—),男,安徽合肥人,硕士研究生,2016年于西交利物浦大学获得学士学位,主要研究方向为模拟集成电路设计和 OLED 显示驱动。E-mail: chinareaper92@163.com



尹勇生(1973—),男,博士,教授,2006年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为模拟混合信号集成电路设计、可重构计算技术等,当前研究重点在模拟电路的数字化辅助设计方面。E-mail: yinyongsheng@hfut.edu.cn