

低压低功耗电流反馈运算放大器设计

王丽娜, 陈向东, 李沁莲, 梁 建

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 微电子与固体电子研究所, 四川 成都 610031)

摘 要: 基于第三代电流传输器, 通过在放大级与输出之间采用隔离补偿电容, 以消除低频零点的方式, 设计了一种新型的低压低功耗的电流反馈运算放大器. 基于 TSMC 0.35 μm CMOS 工艺, 在 1.5 V 电源电压工作条件下, 采用 Hspice 在 LEVEL49 模型参数下对整个电路进行仿真. 仿真结果: 直流增益 96.3 dB, 单位增益带宽 765 MHz, 静态功耗 0.82 mW, 闭环工作状态下有 64.3 MHz 的固定带宽.

关键词: 高增益带宽; 电流反馈运算放大器; 固定带宽

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)06-0193-04

Design of Current Feedback Operational Amplifier with Low Voltage and Low Power

WANG Li-na, CHEN Xiang-dong, LI Qin-lian, LIANG Jian

(School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on third-generation current conveyor, through the use of compensation capacitor isolation between the output and the amplification, the way is to eliminate the low frequency zero, we designed a new current feedback operational amplifiers with low-voltage and low power consumption. Based on TSMC 0.35 μm CMOS process, the 1.5 V power supply voltage conditions, using Hspice in LEVEL49 model parameters to simulate the entire circuit. Simulation results: DC gain of 96.3 dB, unity gain bandwidth of 765 MHz, static power consumption 0.82 mW, the state closed loop bandwidth is fixed under the 64.3 MHz.

Key words: high-gain bandwidth; current feedback operational amplifier; fixed bandwidth

1 引言

运算放大器是许多模拟系统和混合信号系统中的一个完整部分, 不同复杂程度的运算放大器实现不同功能: 从直流偏置的产生到高速放大或滤波.

由于电流反馈运算放大器(CFOA)在精度, 带宽和转换速率等方面均优于传统电压型运算放大器(VOA), 由此在第三代电流传输器(CCIII)的基础上, 本文设计了低压低功耗的 CFOA. CFOA 被广泛应用在模拟信号处理中, 比如模数转换器、数模转换器、高速数据采集系统、射频、视频、多功能滤波器及其他高速电子通信系统中^[1-2].

1980 年代末, 基于互补双极工艺发展起来的 CFOA, 电源电压一般都是 ± 5 V, 电压较高, 导致功

耗也比较大, 由此本文设计了基于 ± 1.5 V 电源电压的 CFOA, 并采用 TSMC 0.35 μm CMOS 工艺, 在 ± 1.5 V 电源电压工作条件下, 采用 Hspice 在 LEVEL49 模型参数下对整个电路进行仿真, 功耗仅为 0.82 mW.

2 电路设计

2.1 CFOA 输入缓冲级

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_{x+} \\ I_{x-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_{x+} \\ V_{x-} \end{bmatrix} \quad (1)$$

理想双输出 CCIII 的电路符号如图 1 所示, 式 (1) 为其理想端口特性矩阵^[3]. 其中矩阵中的正号和

负号分别表示电流是流进 z 端口还是流出 z 端口, 用此来区分 $CCIII^+$ 和 $CCIII^-$.



图 1 第三代电流传输器符号

由图 1 和式(1)可以看出, $CCIII$ 是一个四端口器件, 端口 X 和端口 Y 均为电流输入端, 且电流方向相反; X 端口的电压跟随 Y 端口电压, $Z+$ 端口和 $Z-$ 端口的电流均跟随 X 端口的电流。

本设计采用 $CCIII^+$ 作为 $CFOA$ 的输入级, $CCIII$ 的基本实现电路如图 2 所示, 它由四个基本电流镜 ($M5, M6$) ($M7, M8$) ($M13, M14$) ($M15, M16$) 和晶体管 ($M1 \sim M4, M9 \sim M12$) 组成, 其中 V_x 跟随 V_y , $Z+$ 端口的电流跟随 X 端口的电流。

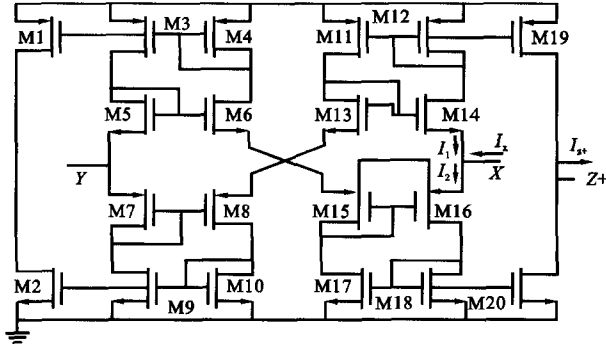


图 2 基本实现电路

反向输入端的电流 $I_x = I_2 - I_1$, 若 $V_x = 0$, $I_2 = I_1$. 端口 $Z+$ 和 $Z-$ 的输出电阻如式(2):

$$R_{oz+} = (R_{ds19}) // (R_{ds20}) R_{oz-} = (R_{ds1}) // (R_{ds2}) \quad (2)$$

式中, R_{ds_i} 是第 i 个 MOS 管的输出电阻。

图 3 所示为 $CCIII$ 的直流电压跟随特性, 从图 3 可以看出, $CCIII$ 在 2 V 电压范围内有很好的跟随特性, 满足本文的设计需求。

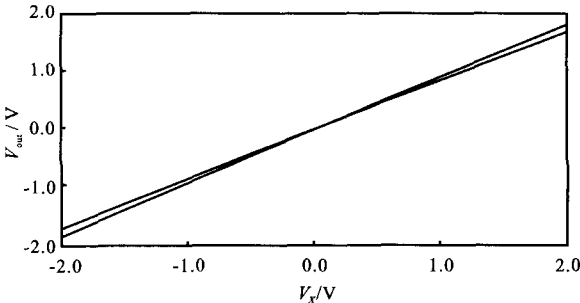


图 3 $CCIII$ 的直流电压跟随特性

2.2 CFOA 输出级

$CFOA$ 电平转移级电路图如图 4 所示, $M23$ 、

$M24$ 完成电平转移的功能, 使 $M23$ 、 $M24$ 的漏极工作在最佳的静态工作点附近, 还有一个作用是隔离输出级与中间放大级, 避免输出级影响放大级. $M26 \sim M29$ 作为电压跟随器, 把电压很好地传输到输出端, 整个输出级是一个放大器, 具有较大的电压增益, 缺点是输出阻抗较大, 为了减小输出阻抗, 提高带负载的能力, 采用电阻 R_2 反馈, 改善电路的驱动能力。

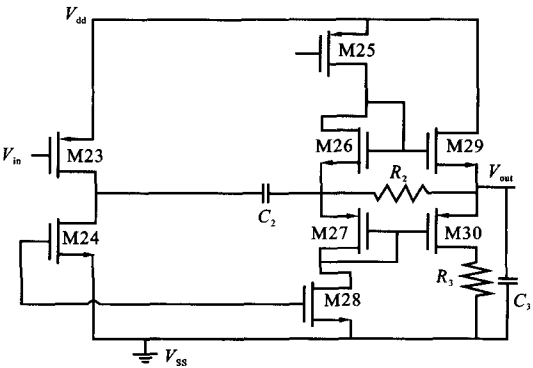


图 4 $CFOA$ 输出级

2.3 CFOA 整体电路

图 5 为所设计的 $CFOA$, $M5, M7, M14, M16$ 构成输入缓冲级, $M12, M18, M19, M20$ 和补偿电容 C_1 组成跨阻放大级, $Z+$ 是高阻抗输出端. 由前面的介绍可知, $M1 \sim M20$ 是一个 $CCIII$, 与文献 [4] 中的电流传输器相比, $CCIII$ 的电流电压传输特性更好, 输出阻抗更大. 利用 $CCIII$, 整体电路的增益更大, 带宽更宽. 本文中 $CCIII$ 把 X 端的信号电流传输到 $Z+$ 端, 通过 $Z+$ 端的高输出阻抗, 把电流 I_x 转换成电压 V_{Z+} , 从 X 端到 $Z+$ 端, 中间线性传输的物理量是电流, 而且电流的变化在理论上没有限制, 这是 $CFOA$ 能获得高速特性的根本原因. 若与电压模式的放大器^[5] 相比, $CFOA$ 的稳定性更好, 共模抑制比更高; 处理高频信号时, 增益更高; 转换速率更大。

2.4 CFOA 闭环电路

图 6(a) 为 $CFOA$ 反向闭环特性电路, 其小信号等效电路见图 6(b).

对图 6 进行分析, 计中间级运放的增益为 A , X 端的输入电阻为 r_x , $Z+$ 端输出电阻为 Z_{out} , 运放的输出电阻为 r_o , 流过 R_f 的电流为 i_f , 流过 R_1 的电流为 i_1 , V_x 为 X 端电压未知, 用叠加原理, 可得

$$-AV_x = V_{out} \quad (3)$$

$$\frac{V_x - V_{out}}{R_f} = i_f \quad (4)$$

$$\frac{V_{in} - V_x}{R_1} = i_1 \quad (5)$$

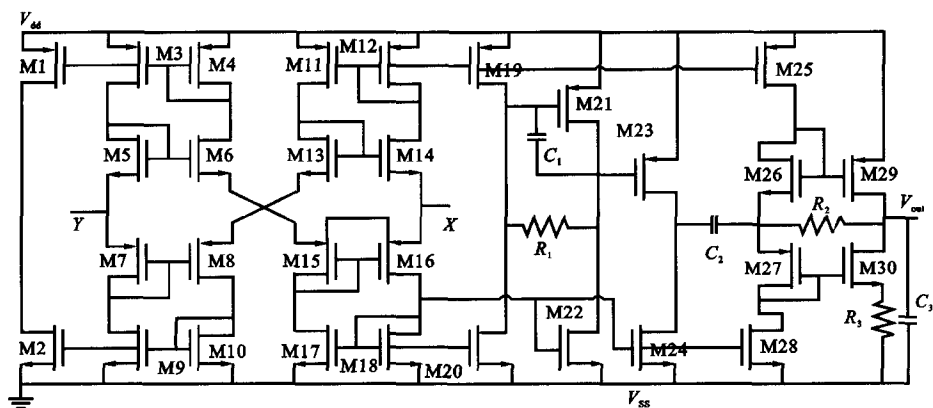


图 5 CFOA 完整电路

$$V_x = -i_x r_x \tag{6}$$

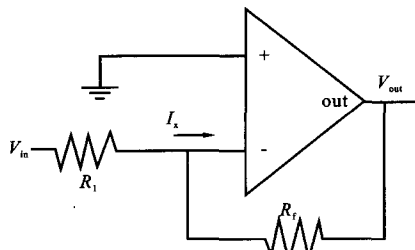
$$i_1 = i_x + i_t \tag{7}$$

结合式(3) ~ (7) 可得

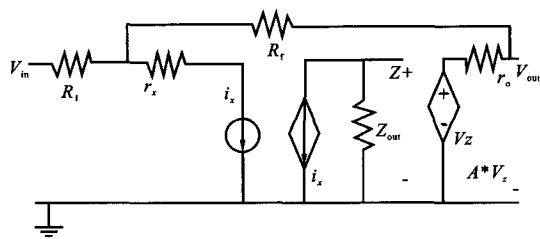
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{2R_f}{Ar_x}} \tag{8}$$

3 电路仿真

本文采用 TSMC 0.35 μm CMOS 工艺,电源电压 $V_{dd} = 1.5\text{ V}$, $V_{ss} = -1.5\text{ V}$,应用 Hspice 在 LEVEL49 模型参数下对图 5 中的电路的主要特性开环幅频相频响应、闭环幅频响应和瞬态响应,单位增益带宽等都进行仿真。



(a) CFOA 闭环电路



(b) (a) 的小信号等效电路

图 6 电路图

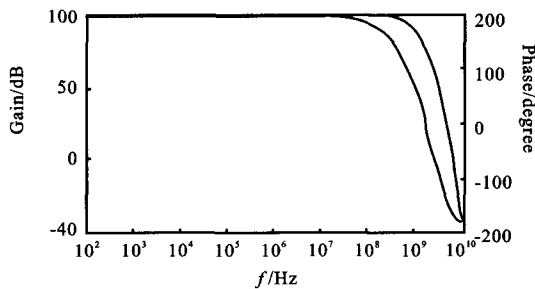
考虑到 r 为有限值,反向运算放大器的理想放大倍数为

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_1} \tag{9}$$

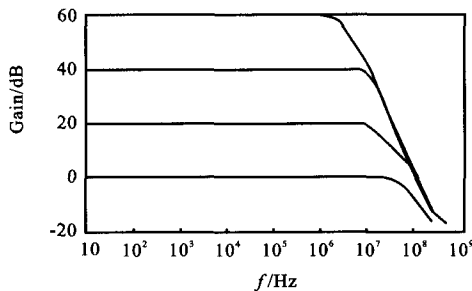
依次类推,同向运算放大器的放大倍数为

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \tag{10}$$

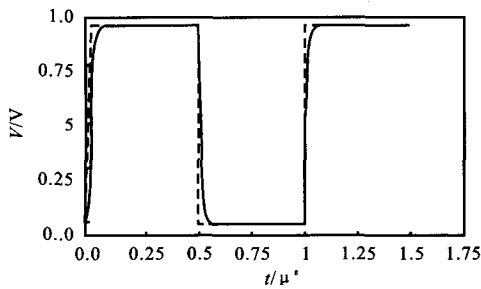
式(9) 表明,CFOA 的闭环增益可用外接的输入电阻 R_1 和反馈电阻 R_f 调节,通常固定 R_1 不便,改变 R_f 控制闭环增益。闭环带宽可用输入电阻控制,增益带宽相互独立,传统的电压模式运放不具备这一点^[4]。



(a) CFOA 开环幅频相频特性曲线



(b) CFOA 反相闭环幅频特性曲线



(c) CFOA 瞬态响应特性曲线

图 7 CFOA 特性曲线

开环幅频相频响应特性如图 7(a)所示. 从频率曲线可以看出, 直流开环增益为 96.3 dB, 单位增益带宽为 765 MHz, 相位裕度为, 显然电路的稳定性很好.

图 7(b)是该 CFOA 的反向闭环特性, 固定 $R_{in}=100\ \Omega$, R_f 分别取 $100\ \Omega$, $1\ k\Omega$, $10\ k\Omega$, $100\ k\Omega$ 时, 反向闭环增益分别为 0 dB, 20 dB, 40 dB, 60 dB, 此时-3 dB 带宽几乎相等, 同向闭环增益与此类似. 这体现了 CFOA 的主要特性: 增益与带宽独立, 这也是优于电压模式运算放大器的地方之一, 因为电压模式放大器的带宽增益积是一个常数.

传统电压模式运算放大器采用共源差分对输入级, 而差分对的限幅作用影响了补偿电容的充放电电流, 这就限制了转换速率(SR)的提高. 本文设计的 CFOA, 采用了用跨导线性回路构成的 CCIII, 将电流作为信号的传输量, 因此 SR 得到了很大的提高. 将 CFOA 接成电压跟随器的结构, 在同向端加 1 V 的方波, 图 7(c)为瞬态响应曲线, 线性输出部分的斜率即为运放的 SR. 本文设计的 CFOA 与文献[6]的主要参数对比及其他参数仿真结果分别见表 1、表 2.

表 1 本文设计的 CFOA 与文献[6]的主要参数对比

性能参数	本文	文献[6]
电源电压/V	± 1.5	± 3.3
开环增益/dB	96.3	74
单位增益带宽/MHz	765	58
相位裕度/度	65	57.5
转换速率/(V/ μ s)	56	310
静态功耗/mW	0.82	5.36
共模抑制/ dB	146	122
建立时间/ns	48	10.4

从图 7(c)可以看出, 本文设计的 CFOA 具有较好的瞬态响应特性. 其 SR 为 56 V/ μ s.

4 结束语

本文在 CCIII 基本电路的基础上, 提出了一种新型低压低功耗的电流反馈运算放大器, 在 CFOA 的输入级设计合理的 W/L , 避免了输入级的密勒补偿. 本文采用 TSMC 0.35 μ m 工艺, 应用 HSPICE

表 2 本文 CFOA 其他参数仿真结果

性能参数	参数值
闭环增益带宽/MHz	64.3
共模输入范围/V	-1.34~1.42
输入失调电压/ μ V	506
X 端电阻/k Ω	2.69
Z+端电阻/k Ω	834.5
输出端电阻/k Ω	3.12

对电路进行仿真. 仿真结果显示, 直流增益 96.3 dB, 单位增益带宽 765 MHz, 功耗 0.82 mW, 闭环工作状态下有 64.3 MHz 的固定带宽. 本 CFOA 适合低压较低功耗及带宽要求恒定的模型中.

参考文献:

[1] Sarkar A R, Maundy B J, Gift S J. On the new design of CMOS current feedback amplifiers[C]// Proceedings of the 46th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems. Cairo: IEEE, 2003: 47-50.

[2] Maundy B J, Sarkar A R, Gift S J. A new design topology for low-voltage CMOS current feedback amplifiers [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 2006, 53(1): 34-38.

[3] Ozoguz S, Kuntman H, Cicekoglu O. First-order all-pass filter realization using a modified third generation current conveyor [J]. IEEE Circuits and Systems for Communications, 2002: 66-69.

[4] 姚尧, 陈向东, 左兵. 一种超低功耗电流反馈运算放大器 [J]. 电子技术应用, 2007, 12: 156-158.

[5] Giustol ISI G, Palmisano G, Segreto T. A 1.2-V CMOS op-amp with a dynamically biased output stage [J]. IEEE J Sol Sta Circ, 2000, 35(4): 632-636.

[6] Pennisi S. High-performance CMOS current feedback operational amplifier[C]// IEEE Int Symp Circ and Syst Kobe, Japan: IEEE, 2005: 1573-1576.

作者简介:

王丽娜 女, (1986-), 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计.

陈向东 男, (1967-), 教授, 博导. 研究方向为微电子技术、信息获取技术及新型传感器领域.