

高精度单向模拟开关的设计及其 基于 CMOS 工艺的电路实现

兀 革 石 寅

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 提出并设计了一种基于 CMOS 工艺实现的高速高精度的单向隔离模拟开关, 该开关用在高速两步法 A/D 转换器中使电路结构大为简化。通过对开关特性的理论分析与电路模拟, 证明了这种模拟开关具有高速可控性, 传输信号的精度优于先前研究的双极单向隔离模拟开关。

关键词: 高精度; 单向; 模拟开关; CMOS 实现

EEACC: 2180B; 2570D; 1265H; 7220

中图分类号: TN 79⁺ 2 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2000)12-1214-06

Realization of High Precision Single-Way Analog Switch Circuits Based on CMOS Technology

WU Ge and SHI Yin

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Received 29 November 1999, revised manuscript received 29 March 2000

Abstract: A high-speed and high-precision single-way analog switch based on CMOS technology is proposed. Simple structure of two-step A/D converter is realized by adopting this switch. According to the analysis and simulation of the static and dynamic performance of CMOS analog switch the high-speed and controlled property of CMOS analog switch is proved. Analysis results also show that this switch is superior to the bipolar analog one in transmission precision. Owing to the popular adoption of CMOS technology, this kind of CMOS analog switch plays important roles in new structure A/D、D/A converter circuits and the system integration including digital circuits.

Key words: high-precision; single-way; analog switch; CMOS realization

WU Ge(兀 革) female, was born in 1971. She is a Doctorial student and engaged in the design of CMOS high-speed IC.

SHI Yin(石 寅) male, was born in 1950. He is a director of Ph. D, whose current research interests are in the area of high-speed IC.

1999-11-29收到, 2000-03-29定稿

EEACC: 2180B; 2570D; 1265H; 7220

Article ID: 0253-4177(2000)12-1214-06

1 引言

普通电子模拟开关的作用如同机械式金属接点开关,在控制信号作用下实现模拟开关两端的物理连通和物理断开。1978年王守觉提出的多元逻辑高速线性“与或”门^[1]用作模拟开关时输入输出端间无物理连接,实现了信号的单向传输。文献[2—4]分别报道了以多元逻辑电路的单向传输性能为基础发展出的双极单向模拟开关在高速 A/D、D/A 转换器中的应用,该开关的应用使 A/D 转换器的结构大为简化,相比用常规双极模拟开关的 A/D 转换器,模拟开关和精密电阻的数目减少了 90% 以上,所以该单向模拟开关的设计对高性能 A/D 转换器的发展非常有利,是一项非常有创意的工作。

采用双极单向模拟开关实现的高速 A/D 转换器结构简单,而双极电路本身的功耗大不利于系统的大规模集成,同时双极开关在导通时对输入端的分流作用和开关关断后的倒灌电流对输入信号的影响^[5]使得在常规工艺条件下很难实现高精度的 A/D 转换器。如今主流的 CMOS 工艺在功耗方面具有明显的优势,而且开关关断后不存在倒灌电流,用 CMOS 工艺实现上述结构的 A/D 转换器对系统的大规模集成和精度的提高都是非常有意义的。而实现上述 A/D 转换器的关键是 CMOS 单向模拟开关的设计。本文设计了一种基于 CMOS 工艺实现的高精度单向隔离模拟开关,给出了分析计算过程和模拟结果,为高速 CMOS A/D 转换器的设计奠定了基础。

2 基于 CMOS 工艺实现的单向隔离模拟开关的设计与分析

为了引用双极单向隔离模拟开关的设计思想^[5],在 CMOS 电路实现时用 MOS 源极跟随器来实现开关的单向传输特性,开关结构如图1所示。该开关导通时传输门上无电流,所以输入输出电压的差值即是 M₁晶体管的栅源电压 V_{GSI}:

$$V_{GSI} = \sqrt{\frac{2I_{out}}{K_P} \left[\frac{L}{W} \right]_1 + V_{to}} \quad (1)$$

$$V_{to} = V_{T0} + Y \left[\sqrt{2\phi_f - V_{bs}} - \sqrt{2\phi_f} \right] \quad (2)$$

从式(1)和(2)中得出输入输出的电压差值不固定值,是输入电压的函数,无法实现高精度的传输,为此设计了一种基于 CMOS 工艺实现的单向隔离模拟开关,开关结构如图2所示。在该开关中用与 CMOS 工艺兼容的双极 NPN 晶体管代替了图1中的 M₁晶体管,双极晶体管的 BE 结电压降受输入信号的影响很小,理想情况下可以认为是固定值,所以提高了开关对信号的传输精度。下面从实际情况出发具体分析开关的传输特性。

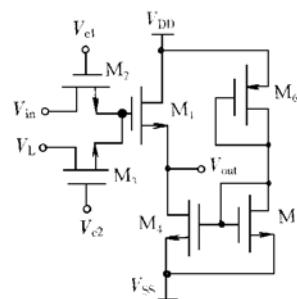


图1 CMOS 单向隔离模拟开关

FIG. 1 Circuit Diagram of Single-Way CMOS Analog Switch

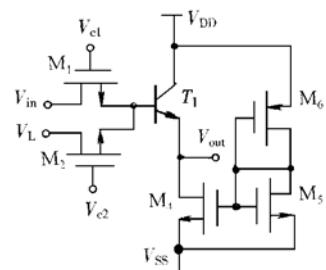


图2 基于 CMOS 工艺实现的单向隔离模拟开关

FIG. 2 Circuit Diagram of Single-Way Analog Switch Based on CMOS Technology

2.1 开关的精度分析

从开关的工作原理知,当开关导通时,输入信号 V_{in} 与输出信号 V_{out} 的差值为 ΔV :

$$\Delta V = V_{in} - V_{out} = V_{ds}(M_1) + V_{be}(T_1) \quad (3)$$

$$V_{ds}(M_1) = I_{out}/(\beta_1 + 1)R_{on}(M_1) \quad (4)$$

$$V_{be}(T_1) = kT/q \ln(I_{out}/I_s) \quad (5)$$

其中 $V_{ds}(M_1)$ 、 $V_{be}(T_1)$ 分别为晶体管 M_1 的导通压降和 T_1 晶体管的 BE 结电压, $R_{on}(M_1)$ 为晶体管 M_1 的导通电阻。如果 ΔV 为固定值, 则认为信号传输后没有产生失真。从(3)–(5)式得: 如果温度 T 固定, 则 ΔV 的线性度由传输门 M_1 的导通电阻和射极跟随器输出电流的稳定性决定。

首先分析传输门导通电阻对 ΔV 线性度的影响。传输门导通电阻与输入电压有如下关系:

$$R_{on}(M_1) = \frac{1}{K_p(W/L)_1 [(V_c - V_{in}) - V_{to}]} \quad (6)$$

$$V_{to} = V_{to} + Y \left[\sqrt{2\Phi_f} - (V_{ss} - V_{in}) - \sqrt{2\Phi_f} \right] \quad (7)$$

从(6)、(7)式看出: 导通电阻随输入电压的增加而增加, 所以在输出电流不变的条件下, 导通电阻上的电压降会随输入信号的增加而增加。在整个输入电压范围内导通电阻变化引起的 ΔV 的变化量为 $\Delta V'_1$:

$$\Delta V'_1 = \frac{I_{out}}{(1 + \beta_1)K_{p1}} \left[\frac{L}{W} \right]_1 \frac{1}{[V_c - V_{in(min)} - V_{to(min)}]} \times \frac{\Delta V_{in} + \Delta V_{to}}{[V_c - (V_{in(min)} + \Delta V_{in}) - (V_{to(min)} + \Delta V_{to})]} \quad (8)$$

其中:

$$\Delta V_{in} = V_{in(max)} - V_{in(min)}$$

$$\Delta V_{to} = V_{to(max)} - V_{to(min)}$$

假设开关的源极与衬底接在一起, 则 $\Delta V_{to} = 0$ 。设 V_c 的高电平值为正电源电压 V_{dd} , 上式可简化如下:

$$\Delta V'_1 = \frac{I_{out}}{(1 + \beta_1)K_{p1}} \left[\frac{L}{W} \right]_1 \frac{\Delta V_{in}}{\xi(\xi - \Delta V_{in})} \quad (9)$$

其中:

$$\xi = V_{dd} - V_{in(min)} - V_{to}$$

$$\frac{W}{L} = \frac{I_{out}}{(1 + \beta_1)K_{p1}} \times \frac{1}{\Delta V'_1} \times \frac{\Delta V_{in}}{\xi(\xi - \Delta V_{in})} \quad (10)$$

所以在输入范围 ΔV_{in} 一定的条件下, 非线性失真量的大小 $\Delta V'_1$ 与 I_{out} 和 $(W/L)_1$ 有关。如果 I_{out} 固定, $\Delta V'_1$ 唯一由传输门的宽长比 $(W/L)_1$ 决定。在要求的失真量范围内由(10)式可定量算出传输门的最小宽长比。失真量 $\Delta V'_1$ 越小, 传输门的宽长比越大。

射极跟随器输出电流 I_{out} 的稳定性将对信号传输线性度产生影响。双极晶体管 T_1 的 BE 结压降与输出电流间的函数关系如下:

$$V_{be} = kT/q \ln(I_{out}/I_s) \quad (11)$$

如果输出电流变化, V_{be} 也变化, 从而对信号的传输产生非线性失真。输出电流的稳定性与恒流源的输出电阻有关, 输出电阻越大电流越稳定, 图2中电流源的输出电阻为 r_o :

$$r_o = \left[\frac{K_p}{2} \left(\frac{W}{L} \right)_4 (V_{GS} - V_T)^2 \right] \lambda \quad (12)$$

从(12)得出: 减小 λ 和(或)增加 $(W/L)_4$ 可以提高恒流源输出电阻。 λ 与沟道长度近似成反比关系, 所以增加沟道长度可以提高输出电阻。设在整个输入范围 (ΔV_{in}) 内输出电流变化导致 BE 结压降的偏差为 $\Delta V'_2$:

$$\Delta V'_2 = kT/q \ln(I_{out1}/(I_{out1} + \Delta I_{out})) \quad (13)$$

$$\Delta I_{out} = I_{out2} - I_{out1} \quad (14)$$

$$\Delta V_{in} \approx \Delta I_{out} r_o \quad (15)$$

式中 I_{out1} 和 I_{out2} 分别为输入最小信号的最大信号时的输出电流。在输入范围一定的条件下, 由(15)知输出电阻越大, 在整个输入范围内输出电流的变化越小, 由(13)式得 BE 结压降的线性度越好, 开关的精度越高。

CMOS 开关静态传输精度优于先前设计的双极模拟开关。双极开关中信号传输中有两个电流源, 所以信号传输的非线性由两个恒流源的稳定性决定。而 CMOS 开关中只存在一个电流源和一个 MOS 传输门, 为了提高开关速度, 传输门的导通电阻一般做的很小, 而且传输门的电流是双极晶体管的基极电流, 所以由输入信号变化引起传输门的偏差非常小, CMOS 开关的偏差主要是一个 PN 结的偏差, 相比双极开关的两个 PN 结的偏差要小, 所以信号传输精度提高了。另外, 由于 CMOS 开关采用基极输入, 相比双极开关的射极输入的输入电流小, 大大降低了系统的插入损耗。而且 CMOS 关断后, 彻底切断了开关与系统间的联系, 而双极模拟开关关断后, 基极反向倒灌电流一直存在, 对系统精度产生影响。如果采用 CMOS 传输门代替 NMOS 传输门, 模拟开关的精度还可以大大提高, 所以发展 CMOS 模拟开关是非常有价值的。

前面分析了开关静态时的传输精度, 但是当开关在导通和关断的瞬间, 由于电荷注入效应对开关的精度影响也是一个非常重要的因素。通常情况下, 为了减小电荷注入效应, 传输门的尺寸做的比较小, 但是传输门的导通电阻也会随传输门尺寸的减小而增加, 从上面的分析中可以看出这对开关的静态精度传输是不利的。另外一种减小开关闭注效应的方法是用尺寸为 1/2 传输门宽长比的辅助模拟开关与传输门串联。第三种减小开关闭注效应的方法是用 CMOS 传输门代替 NMOS 传输门。但是在我们设的开关中这些方法都可以不采用。因为从开关的结构中可以看出, 当输入信号的传输门关断的瞬间, 传输低电平的传输门导通, 而传输信号的传输门导通的瞬间, 传输低电平的传输门关断, 这样两个传输门的电荷注入刚好抵消, 从而对开关的输入端不会产生影响, 所以可以不考虑电荷注入效应开关精度的影响。

2.2 开关的速度分析

从开关的工作原理知: 开关关断过程实际上是传输门传输低电平的导通过程。所以开关的导通和关断都用开关的导通过程来分析。

CMOS 单向模拟开关由 MOS 传输门和射极跟随器组成。由于传输门中的晶体管和射极跟随器中的双极晶体管都不进入饱和区, 所以开关速度非常快。下面用开关的小信号模型来分析影响开关开关速度的因素。图 3 是 CMOS 单向模拟开关的小信号等效电路模型。图中 r_{ds} 为 NMOS 传输门的导通电阻; C_μ 和 C_π 分别为 NPN 晶体管的 BC 结和 BE 结电容; r_{be} 为晶体管的基区电阻和 BE 结结电阻之和。输入输出交流通路的等效交流阻抗为:

$$r = r_{ds} + \frac{r_{be}}{1 + j w C_\pi r_{be}} \quad (16)$$

$$r_{ds} = \frac{L}{K_p W (V_{GS} - V_T)} \quad (17)$$

NPN 晶体管只工作在正向偏置, C_π 主要是扩散电容, 即^[5]:

$$C_\pi = t_f G_{be} = \frac{q}{kT} t_f I_{be} \quad (18)$$

$$t_f = TF \left[1 + XTF (3x^2 - 2x^3) \exp \left(\frac{V_{be}}{1.44VTF} \right) \right] \quad (19)$$

$$f_T = \frac{1}{2\pi TF} \quad (20)$$

式中 TF、XTF 和 VTF 是 PSPICE 的模型参数, TF 是理想正向渡越时间, XTF 是偏置变化系数, VTF 是描述 TF 随 V_{be} 变化的电压; G_{be} 是 BE 结的直流电导; t_f 是有效基区渡越时间。要提高开关速度, 必须降低交流阻抗。一种途径是通过增加 MOS 传输门的 W/L , 减小 r_{ds} . W/L 增加带来寄生效应增大, 开关关断时栅电容放电对输入信号影响加大, 所以传输门的 W/L 不宜太大。另外一种方法是用 CMOS 传输门代替 NMOS 传输门来实现小 r_{ds} . 这是最有效的措施。另外可以通过增加基区渡越时间 t_f 和输出电流 I_{be} 加大 C_π . 输出电流的增加不仅可以提高速度, 而且可以增加开关带负载的能力。所以在开关精度允许的条件下,

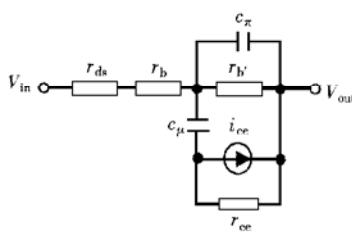


图3 CMOS 开关小信号等效电路图

FIG. 3 Small Signal Diagram Circuit of CMOS Analog Switch

可以通过增加电流来减小阻抗, 来提高速度.

3 开关特性模拟

根据以上对开关的分析, 我们设计了一个用于8位精度 A/D 转换器的 CMOS 模拟开关. 设计条件要求: 在 $\pm 2.5V$ 的工作电源下, 输入电压范围为 $\pm 1V$ 时信号的传输误差小于 $1.5mV$. 设计传输门和 BE 结压降的偏差分别控制在 $0.5mV$ 和 $1mV$ 以内, 输出电流为 $50\mu A$. 下面为 PSPICE 对设计开关的模拟结果.(采用 PSPICE 模拟软件的二级模型, 工艺参数采用东北微电子研究所的 $1.5\mu m$ n 阵 CMOS 工艺参数).

图4和图5分别为传输门上压降和 BE 结压降随输入信号的变化曲线, 当输入电压从 $-1V$ 变化到 $+1V$ 时, 传输门上的压降从 $0.18mV$ 变化到 $0.65mV$, 变化量为 $0.47mV$. BE 结上的压降从 $0.5768V$ 变化到 $0.5779V$, 变化量为 $1.1mV$. 整个开关的传输误差是两项之和为 $1.57mV$, 设计结果基本达到精度要求.

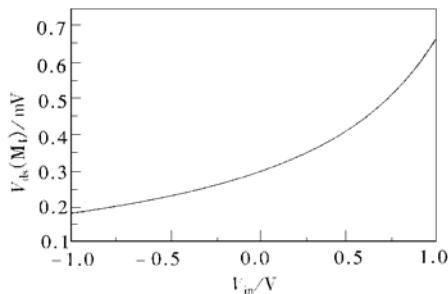


图4 V_{ds} 随输入信号的变化曲线

FIG. 4 V_{ds} Versus Input Signal

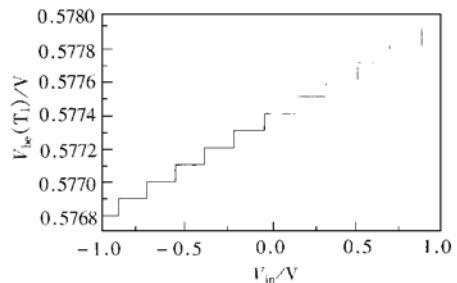


图5 V_{be} 随输入信号的变化曲线

FIG. 5 V_{be} Versus Input Signal

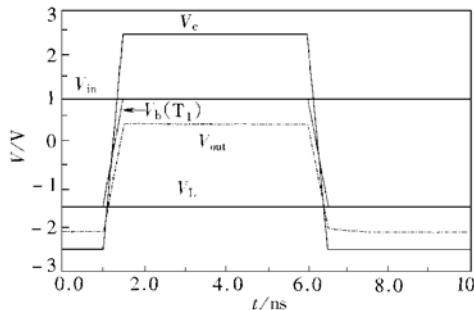


图6 开关的瞬态响应曲线

FIG. 6 Dynamic Performance of Analog Switch

图6是对设计开关的动态特性的模拟结果. V_c 为开关控制信号, $V_{b(T1)}$ 为 NPN 晶体管基极的响应信号, V_{out} 为开关输出信号, V_l 为输入低电平值. 在传输门栅极加上控制信号 V_c 后, 只要 $V_c - V_{in} > V_T$, NMOS 传输门开始导通, NPN 晶体管的基极电位跟随输入信号, 从模拟结果可以看出, NPN 晶体管的基极电位几乎在开关的控制信号达到高电平的同时完全跟随输入信号, 这说明 MOS 传输门的响应速度非常快. 开关的输出信号几乎与 NPN 晶体管的基极电位同步, 在 NPN 晶体管的基极电位稳定的同时也稳定, 这一点说明了射极跟随器的响应速度非常快. 从开关加上控制信号到输出完全跟随输入信号, 在 $1ns$ 之内即可完成, 所以整个开关响应速度确实非常快.

4 结论

本文提出并设计了一种基于 CMOS 工艺实现的单向高速模拟开关. 通过对开关电路结构的分析以及对开关静态特性和动态特性的理论计算与模拟, 这种单向模拟开关性能优良并能十分方便地与 CMOS 数字系统兼容集成制作, 应用前景广阔. 这种单向模拟开关已经构成了性价比很高的 A/D、D/A 转换器, 这必将在以数模混合集成电路为基础的系统集成中扮演重要角色.

参 考 文 献

- [1] 王守觉, 孙祥义, 王润梅, 电子学报, 1978, **6**(2): 43—51. [WANG Shoujue, SUN Xiangyi and WANG Runmei, ACTA Electronics Sinica, 1978, **6**(2): 43—51(in Chinese)].
- [2] SHI Yin, LI Shizhu, ZHU Ronghua and WANG Shoujue, 1998 5th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Beijing, China, 1998: 377—380.
- [3] LI Shizhu, SHI Yin, ZHU Ronghua and WANG Shoujue, 1998 5th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Beijing, China, 1998: 397—400.
- [4] 石寅, 王守觉, 电子学报, 1988, **16**(9): 48—54[SHI Yin and WANG Shoujue. Acta Electronics Sinica, 1988, **16**(9): 48—54 (in Chinese)].
- [5] 李世祖, 高速高分辨率视频模数转换器的结构设计, 博士学位论文, 中国科学院半导体研究所, 1998[LI Shizhu, Design of High-Speed and High-Precision Analog/Digital Converter, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 1998].