

一种高速宽带 BJT 模拟开关的设计与实现

高文焕, 李冬梅

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文采用射极跟随器、电流镜、非饱和电流开关等高速单元电路设计了一种新颖的 BJT 模拟开关。它具有速度快、频带宽、隔离度高、动态范围大、线性好等优点。介绍了电路结构, 分析了电路的工作原理, 给出了电路性能的仿真结果和芯片电路指标测试结果, 并总结了电路的主要特点。所设计的电路可以做成单片集成电路, 也可以作为一个基本单元应用于大规模集成芯片中。

关键词: 模拟开关; 电流开关; 高速; 宽带

中图分类号: TN431. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 11-0122-03

Design and Actualization of a High Speed Wide Band BJT Analog Switch

GAO Wen-huan, LI Dong-mei

(Department of electronics engineering, Tsinghua university, Beijing 100084, China)

Abstract: A new design of BJT analog switch using high-speed unit such as emitter follower, current mirror and unsaturated current switch is presented. The switch has high speed, wide band, less cross talk, wide dynamic arrangement and good linearity. The circuit structure, principle and the main character are introduced. It also gives the simulation results of circuit performance and the test results of the integrated circuit chip. This circuit can be used in single chip, and can be used in VLSI as a basic unit.

Key words: analog switch; current switch; high speed; wide band

1 引言

在许多高速、宽带电子系统和大规模集成电路中, 经常需要性能优良的高速度、宽频带双极型晶体管 (BJT) 模拟开关, 用来完成信号的可控传输。高速宽带系统对模拟开关的要求很高, 主要有: 频响特性要好, 时域响应要快, 隔离度要高, 动态范围要宽, 非线性失真要小等等。传统的模拟开关难以满足上述要求。本文采用射极跟随器、电流镜、非饱和电流开关等高速单元电路设计并投片制作了一种新颖的 BJT 模拟开关。电路内晶体管工作在放大状态或在放大状态与截止状态之间转换, 不进入饱和区。电路性能仿真和芯片指标测试结果表明, 该电路具有速度快、频带宽、隔离度高、动态范围大、线性好等优点, 是模拟开关电路设计的一种突破。

2 电路的组成及工作原理

2.1 电路的组成

所设计的模拟开关电路如图 1 所示, 它是一个具有使能控制的二选一模拟开关。

开关的 1 通道由晶体管 $T_{20} \sim T_{22}$ 组成。其中 T_{20} 、 T_{21} 是两级射极跟随器级联。2 通道由晶体管 $T_{25} \sim T_{27}$ 组成, 其电路结构与 1 通道相同。 T_{22} 、 T_{27} 、 T_{30} 为非饱和电流开关, T_{22} 的基极加基准电压 V_{REF} (约为 2.0V), T_{27} 的基极加开关控制电压 V_C 。在 V_C 的控制下, T_{22} 或 T_{27} 导通, 将电流源 T_{30} 的集电极电流接

入 1 通道或 2 通道, 实现开关的切换。 T_{31} 、 T_{32} 为射极跟随器作输出级, 以降低开关的输出阻抗, 增加带负载能力。

开关的使能控制电路由 $T_5 \sim T_{10}$ 、 $T_{13} \sim T_{17}$ 及 T_{28} 、 T_{29} 等组成。其中 T_5 、 T_6 及 T_7 为非饱和电流开关, T_5 的基极加基准电压 V_{REF} , T_6 的基极加使能控制电压 V_{EN} 。 T_7 为 T_5 、 T_6 的偏置电流源。 T_8 、 T_{28} 、 T_{29} 、 T_{30} 各组成一个电流镜, 它们的工作状态决定于 T_5 的集电极电流, 以实现开关的使能控制。 T_9 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{16} 亦各组成一个电流镜, 它们的工作状态受 T_6 的集电极电流控制, 用来决定 T_{13} 、 T_{14} 和 T_{17} 是否导通。这部分电路是为了保持开关在禁止态和工作态下输出的直流电位一致而设计的。

$T_1 \sim T_4$ 、 T_{11} 、 T_{12} 、 T_{18} 、 T_{19} 与 T_{23} 、 T_{24} 等组成直流偏置电路, 为开关控制电路和使能控制电路提供基准电压 V_{REF} ; 为开关的两个信号通道提供直流偏压; 为各级电流源提供基准电流。

2.2 电路的工作原理

2.2.1 使能控制

当使能控制电压 V_{EN} 为低电平 (如 0V) 时, 晶体管 T_6 截止, T_5 导通。由 T_9 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{16} 组成的两个电流镜无基准电流注入而不能导通, 迫使 T_{13} 、 T_{14} 和 T_{17} 截止, 对开关的工作无影响。 T_5 导通, 电流源 T_7 的电流通过 T_5 注入到由 T_8 、 T_{28} 组成

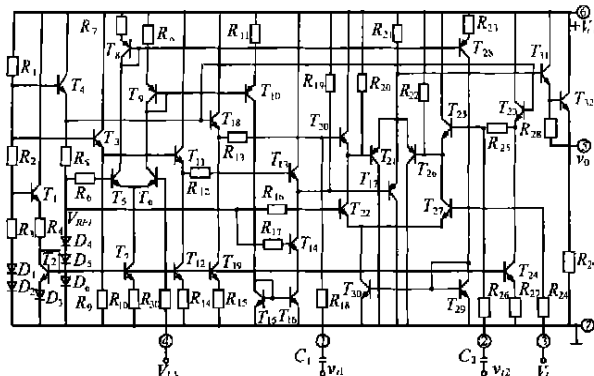


图 1 高速 BJT 模拟开关电路

的电流源,则 T_8 、 T_{28} 与 T_{29} 、 T_{30} 均导通, T_{30} 的集电极电流成为开关信号通道的工作电流,模拟开关处于正常的工作状态(工作状态)。开关的输出接通哪个通道则由电压 V_C 控制。

当使能控制电压 V_{EN} 为高电平(如 3V)时,晶体管 T_5 截止, T_6 导通。类似的分析可知,此时 T_8 、 T_{28} 、 T_{29} 、 T_{30} 均截止,上述信号通道关断,两通道的输入信号不能传输到输出端。同时, T_9 、 T_{10} 、 T_{15} 、 T_{16} 这两个电流镜工作,使 T_{13} 、 T_{14} 和 T_{17} 导通。由于这部分电路与信号通道电路对称,故它保证了开关处于禁止态时输出的直流电位与开关处于工作状态时一致。这样设计是为了避免开关状态切换时输出直流电平的变化对下一级电路可能产生的不利影响。

2.2.2 开关控制

设 V_{EN} 为低电平,开关处于正常的工作状态。

表 1 开关控制真值表

开关控制 V_C	使能控制 V_{EN}	输出 v_o
L	L	v_{o1} v_{i1}
H	L	v_{o2} v_{i2}
L	H	$v_o = 0$
H	H	$v_o = 0$

当开关控制电压 V_C 为低电平(如 0V)时,晶体管 T_{22} 导通, T_{27} 截止。因此, T_{25} 、 T_{26} 无偏置电流也不会导通,电源电压 V_{CC} 则通过电阻 R_{22} 加至 T_{25} 的射极,使 T_{25} 、 T_{26} 的发射结反向偏置而截止,即 2 通道关断,输入信号 v_{i2} 不能传至输出端。同时, T_{22} 导通,其集电极电流成为 T_{20} 、 T_{21} 的偏置电流, T_{20} 、 T_{21} 导通,输入信号 v_{i1} 则通过 T_{20} 、 T_{21} 以及射极跟随器 T_{31} 、 T_{32} 传输至输出端,即 1 通道接通。信号通道可看成是三级射极跟随器级联,电压增益近似为 1,故 $v_o \approx v_{i1}$ 。

当控制电压 V_C 为高电平(如 3V)时,晶体管 T_{27} 导通, T_{22} 截止。类似的分析可知,此时 1 通道关断,2 通道接通,输入信号 v_{i2} 传至输出端, $v_o \approx v_{i2}$ 。

总结以上的分析,可得开关控制真值表,如表 1 所示。

3 电路性能仿真及电路的特点

采用 Pspice 软件对电路性能进行仿真。晶体管的主要模型参数为: NPN 管的电流放大系数 $\beta = 120$, 特征频率 $f_T = 600\text{MHz}$, 基区体电阻 $r_{bb} = 50\Omega$; 纵向 PNP 管的 $\beta = 100$, $f_T = 400\text{MHz}$, $r_{bb} = 50\Omega$; 横向 PNP 管的 $\beta = 50$, $f_T = 50\text{MHz}$, $r_{bb} =$

60。电源电压 $V_{CC} = +12\text{V}$ 。图 1 中的 1、2、3、4、5 分别为 1 通道输入、2 通道输入、开关控制、使能控制和开关输出端的节点号。

3.1 静态特性

(1) 输出电压: 对电路进行静态分析, 得到开关处于工作和禁止两种状态下节点的输出电压均为 $6.561\text{V} \sim 6.563\text{V}$ 之间。这表明, 开关接通 1 通道, 接通 2 通道及处于禁止态时输出的直流电平之差极小, 便于与下一级电路直接耦合。

(2) 静态功耗: 电路处于禁止态时的电源电流与功耗和电路处于工作状态时的相同, 电源电流 $I_{CC} = 9.80\text{mA}$, 静态功耗约为 118mW 。

3.2 工作态的动态特性

(1) 传输特性: 在图 1 中, 设 $v_{i2} = 0$, 节点加 $0 \sim +14\text{V}$ 的直流扫描电压, 计算节点的输出电压, 如图 2 所示。可以看出, 输出电压在 $0.60\text{V} \sim 10.3\text{V}$ 范围内保持良好的线性。动态范围宽, 线性好, 大信号应用时产生的失真小是该电路的一个特点。图中的水平直线为静态输出电压(约 6.56V), 输出电压的动态范围约为 $10.3 - 6.56 = 3.7\text{V}$ 。

(2) 电压增益与输入输出电阻: 在工作态下, 对 1(或 2) 通道电路进行交流分析, 得电路的幅频响应特性如图 3 所示。其电压增益约为 0.94, -3dB 带宽约为 207MHz 。输入电阻和输出电阻分别约为 $8.43\text{k}\Omega$ 和 10Ω 。电压增益近似为 1, 输入电阻较高, 输出电阻很低, 具有单位增益缓冲级功能, 能有效地将信号源与负载隔离开来, 是一个非常好的缓冲电路。

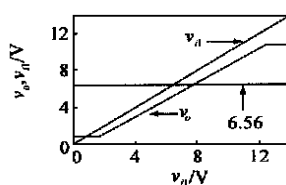


图 2 电路的传输特性

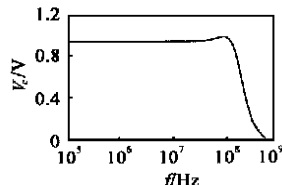


图 3 通道的幅频响应特性

(3) 隔离度: 设 $v_{i1} = 0$, v_{i2} 为幅度等于 1V 的交流信号, 节点控制信号 $V_C = 0\text{V}$ (即 2 通道加输入信号, 1 通道接通), 计算节点的输出电压, 结果为: 在 1MHz 以内为 $3.97\mu\text{V}$ (信号衰减了 108dB); 在 100MHz 下为 $205\mu\text{V}$ (信号衰减了约 74dB)。对电路进行时域瞬态分析, 结果与此类似。可见开关具有极高的隔离度。

(4) 通道时域响应特性: 设 $v_{i2} = 0$, v_{i1} 为幅度等于 2V ($0 \sim 2\text{V}$) 的“理想”方波脉冲电压, 计算节点的输出电压波形, 如图 4 所示。其上升时间 $t_r = 3.2\text{ns}$, 下降时间 $t_f = 5.5\text{ns}$ 。上升沿摆率 $S_R = 468\text{V}/\mu\text{s}$, 下降沿摆率 $S_R = 273\text{V}/\mu\text{s}$ 。可见, 电路的时域响应速度很快。

(5) 开关切换响应特性: 节点加 10V 直流电压, 节点加 6V 直流电压(相当于两节点在工作点的基础上分别加 $+2\text{V}$ 与 -2V 的直流信号), 节点加 $0 \sim 3\text{V}$ 的“理想”脉冲电压, 计算节点的输出电压波形, 如图 5 所示。一般, 从控制电压跳变到输出电压达到其幅度的 50% 所需的时间为开关切换延迟时间, 则从 1 通道切换到 2 通道的延迟时间约为 10.2ns , 从 2 通道切换至 1 通道的延迟时间约为 11.3ns 。可见,

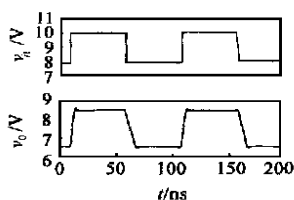


图4 通道时域响应特性

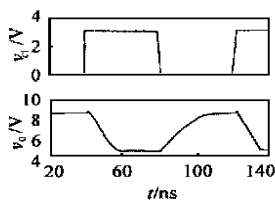


图5 开关切换响应特性

开关切换延迟时间很短,适于两路输入信号的高速切换。

频带宽,速度快是该电路的最突出的优点。这是因为,电路的信号通道和控制电路是由射极跟随器、电流镜及非饱和和电流开关等高速、宽带基本单元组成,晶体管工作在放大区或在截止与放大状态之间转换,不会进入饱和状态,它们的频响特性和时域响应特性比传统的模拟开关(晶体管交替工作于饱和、截止状态)要好得多。

3.3 禁止态的动态特性

(1) 信号泄漏: 节点的使能控制电压为 3V(开关处于禁止态),输入(或)节点加幅度为 1V 的交流信号,计算节点的输出电压。低频下,该输出电压约为 35.5 μ V,信号衰减了 89.5dB;10MHz 下约为 101 μ V,约衰减了 80dB。对电路进行时域瞬态分析,结果与此类似。可见信号通过开关的泄漏极小,一般可以忽略。

(2) 使能/禁止切换特性:

开关两输入端所加信号与上述计算开关切换响应特性相同。节点加 0 至 3V 的“理想”跳变电压(以交替接通 1、2 通道),节点加 0~3V 的“理想”电压(使开关交替工作在禁止和工作两种状态),计算节点的输出电压波形,如图 6 所示。最下面的图中的水平

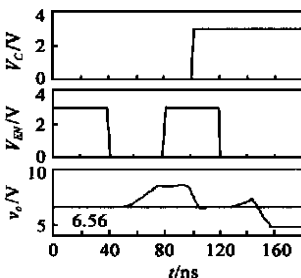


图6 使能/禁止切换特性

直线为静态输出电压(约 6.56V)。可以看出,在 0ns~40ns 期间,节点的使能控制电压为高电平,开关处于禁止态,节点的输出电压为静态值。在 40ns~80ns 期间,节点的使能控制电压为低电平,开关处于工作状态,且节点为低电平,接通 1 通道,故节点的输出电压上升,逐渐达 8.45V。从节点电压负跳至节点输出电压达到其幅度的 50% 时的延迟时间约为 24.5ns,这就是 1 通道由禁止态转为接通时的延迟时间。在 80ns~120ns 期间,节点的控制电压为高电平,开关又处于禁止态。节点输出电压下降,逐渐达静态值。其延迟时间约为 20.3ns,这就是 1 通道由接通转为禁止态时的延迟时间。与此类似,可求出 2 通道由禁止态转为接通及由接通转为禁止态时的延迟时间。

电路具有使能控制功能,控制电平与 TTL 电平兼容。开关控制与使能控制的基准电压 V_{REF} 设计为 2V 左右,且不受电源电压变化影响。

4 开关芯片指标测试结果

作者将上述设计的电路作为一个基本单元,采用标准集

成工艺制做在专用集成芯片中,测试的主要指标如下:低频电压增益为 0.93; -3dB 带宽大于 70MHz;在 100kHz 下隔离度大于 80dB,在 6MHz 下仍大于 70dB;开关切换延迟时间不大于 18ns;最大不失真输出电压约为 3.2V(峰值);工作态和禁止态输出直流电压差不大于 8mV。输出电阻小于 15 Ω ,在负载电阻为几百 Ω (阻容耦合)时仍能正常工作且保持良好的线性。证明电路设计先进,性能优异。

5 结论

本文采用射极跟随器、电流镜及非饱和和电流开关设计的模拟开关,具有速度快,频带宽,隔离度高,动态范围大,线性好等优点,并把开关控制与缓冲隔离巧妙地结合起来。它与传统器件工作于非线性开关状态的模拟开关完全不同,是模拟开关的一种新颖设计,也是模拟开关设计的一种突破。该电路可广泛应用于各种宽频带、高速度的电子系统和集成电路中,例如,用作彩色电视机画中画开关或用在计算机图形信号处理中,可以在一个像素的时间内实现信号的切换。这种模拟开关具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 高文焕,刘润生. 电子线路基础 [M]. 北京:高等教育出版社,1997.
- [2] 高文焕. 一种高性能双极型模拟开关 [J]. 电视技术,1998,1.
- [3] 高文焕,汪蕙. 模拟电路的计算机分析与设计——Pspice 程序应用 [M]. 北京:清华大学出版社,1999,1.
- [4] C. Toumazou, F. J. Lidgey, D. G. Haigh. Analog IC design: Current-mode approach [M]. Peter Peregrinus Ltd, 1991. 中译本:姚玉洁等译. 模拟集成电路设计——电流模法 [M]. 北京:高等教育出版社,1996.
- [5] N. R. Malik. Electronic Circuits: Analysis Simulation and Design [R]. Prentice Hall, 1995.
- [6] E. Seevinck. Analysis and Synthesis of Translinear Integrated Circuits [R]. Elsevier, 1988.

作者简介:



高文焕 1945 年生,清华大学电子工程系副教授。1970 年毕业于清华大学,一直在该校任教。主要从事电子线路的教学和模拟集成电路研究与设计工作。



李冬梅 讲师,1966 年出生,1990 年获清华大学电子工程系微电子学专业学士学位,1994 年获清华大学电子工程系电路与系统专业硕士学位。现从事模拟电路研究与集成电路设计工作。