

对工作在较大信号状态下模拟相乘器的分析

胡放鸣

(西昌学院 数理系, 四川 西昌 615022)

【摘要】 本文利用PN结理论及晶体管原理来分析工作在较大信号下模拟相乘器的工作原理, 推导出它工作于输入较大信号状态下的输出关系式。

【关键词】 分析; 模拟相乘器; 大信号

【中图分类号】 TN710 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1673-1891(2005)02-0055-03

模拟相乘器原理图见图1。在一些模拟电子技术教材中虽都是采用了晶体管的电压、电流方程对模拟相乘器进行分析, 得到双信号输入双端输出关系式, 并没有给出双信号输入单端输出关系式。同时又只对输入小信号状态下的双端输出信号进行了分

析, 并没有对它在输入较大信号状态下的单、双端信号进行分析。为了避免人们产生片面的理解, 认为模拟相乘器输入信号只限制在远远小于52毫伏条件下才工作。下面将对模拟相乘器输入信号为较大状态下的单、双端输出关系式进行分析。

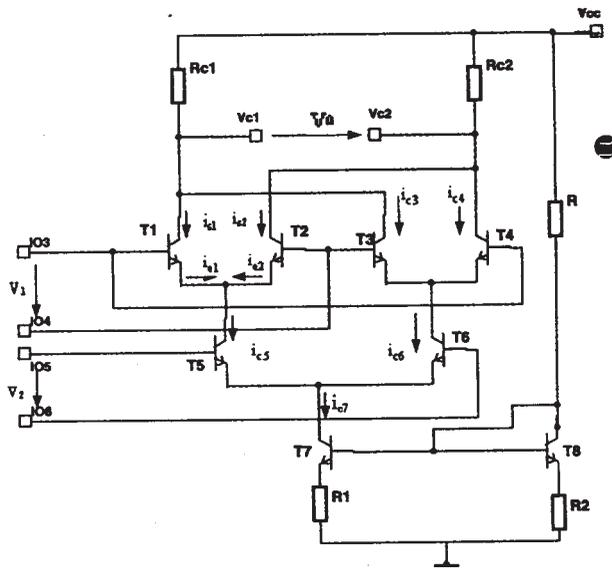


图1 模拟相乘器原理图

1 利用PN结理论对模拟相乘器进行分析

模拟相乘器原理图见图1, 它由三对差动放大器, 一组恒流源组成。

1.1 输入信号

输入信号有两个 V_1 和 V_2 , V_1 以差模输入方式同时加到 T_1 、 T_2 以及 T_3 、 T_4 两组并接的差动放大器的基

极。 V_2 以差模输入方式加到 T_5 、 T_6 组成的差动放大器的基极。

1.2 输出信号

由图1知, 因为 T_1 、 T_2 及 T_3 、 T_4 为并接形式的差动放大器, 所以输出信号有两种形式, 一种是单端输出 V_{c1} (或 V_{c2}), 即输出信号取自于 T_1 (或 T_4)集电极。另一种是双端输出 $V_0 = V_{c1} - V_{c2}$, 即输出信号取自两组并接的差动放大器的集电极。

收稿日期: 2005-05-09

作者简介: 胡放鸣(1956-)女, 副教授, 主要从事电子线路教学和研究。

1.3 输入、输出关系

为了便于分析,设所有管子的参数相同,即 β 、 I_s 、 V_{BE} 等一致。电路对称,各支路电流参考方向见图(一)。

由PN结理论与晶体管原理可知,晶体管的发射极电流 i_c 与发射结电压 V_{BE} 近似成指数关系,表示为:

$$i_c = I_{cs} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

式中 I_{cs} 为反向饱和电流, V_T 为温度的电压当量,在室温条件下 $V_T \approx 26\text{mV}$ 。

则 T_1 、 T_2 两管的集电极电流表示为:

$$i_{c1} = \alpha i_{e1} = \alpha I_{es} e^{\frac{V_{BE1}}{V_T}} \quad (1)$$

$$i_{c2} = \alpha i_{e2} = \alpha I_{es} e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}} \quad (2)$$

将(1)式与(2)式相比得

$$\frac{i_{c1}}{i_{c2}} = e^{\frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{V_T}} = e^{\frac{V_1}{V_T}} \quad (3)$$

由图(一)知 $V_1 = V_{BE1} - V_{BE2}$

$$\text{又因为 } i_{c1} + i_{c2} = \alpha(i_{e1} + i_{e2}) = \alpha i_{e5} \quad (4)$$

将(3)式和(4)式联立求解,可得:

$$i_{c1} = \frac{\alpha e^{\frac{V_1}{V_T}}}{1 + e^{\frac{V_1}{V_T}}} i_{e5} \quad (5)$$

$$i_{c2} = \frac{\alpha}{1 + e^{\frac{V_1}{V_T}}} i_{e5} \quad (6)$$

(5)-(6)得:

$$i_{c1} - i_{c2} = \frac{e^{\frac{V_1}{V_T}} - 1}{e^{\frac{V_1}{V_T}} + 1} \alpha i_{e5} = e^{\frac{V_1}{2V_T}} \frac{e^{\frac{V_1}{2V_T}} - e^{-\frac{V_1}{2V_T}}}{e^{\frac{V_1}{2V_T}} + e^{-\frac{V_1}{2V_T}}} \alpha i_{e5} = \alpha i_{e5} th \frac{V_1}{2V_T} \quad (7)$$

由(4)式和(7)式求得晶体管 T_1 、 T_2 集电极电流与输入信号 V_1 的关系

$$i_{c1} = \frac{\alpha}{2} i_{c5} \left(1 + th \frac{V_1}{2V_T} \right) \quad (8)$$

$$i_{c2} = \frac{\alpha}{2} i_{c5} \left(1 - th \frac{V_1}{2V_T} \right) \quad (9)$$

由图(一)知 T_1 、 T_2 与 T_3 、 T_4 为并接形式,同样可求得晶体管 T_3 、 T_4 集电极电流与输入电压 V_1 的关系为:

$$i_{c3} = \frac{\alpha}{2} i_{c6} \left(1 - th \frac{V_1}{2V_T} \right) \quad (10)$$

$$i_{c4} = \frac{\alpha}{2} i_{c6} \left(1 + th \frac{V_1}{2V_T} \right) \quad (11)$$

同理,将(8)(9)式中的 i_{c5} 用 i_{c7} 代替, V_1 用 V_2 代替,得晶体管 T_5 、 T_6 集电极电流与输入电压 V_2 的关系:

$$i_{c5} = \frac{\alpha}{2} i_{c7} \left(1 + th \frac{V_2}{2V_T} \right) \quad (12)$$

$$i_{c6} = \frac{\alpha}{2} i_{c7} \left(1 - th \frac{V_2}{2V_T} \right) \quad (13)$$

得单端输出 V_{C1} 为 $V_{c1} = V_{cc} - R_c(i_{c1} + i_{c3})$

$$= V_{cc} - R_c \left[\frac{\alpha}{2} i_{c5} + \frac{\alpha}{2} i_{c3} th \frac{V_1}{2V_T} + \frac{\alpha}{2} i_{c6} - \frac{\alpha}{2} i_{c6} th \frac{V_1}{2V_T} \right]$$

$$= V_{cc} - \frac{\alpha}{2} R_c (i_{c5} + i_{c6}) - \frac{\alpha}{2} R_c (i_{c5} - i_{c6}) th \frac{V_1}{2V_T}$$

$$= V_{cc} - \frac{\alpha^2}{2} R_c i_{c7} - \frac{\alpha^2}{2} R_c i_{c7} th \frac{V_1}{2V_T} th \frac{V_2}{2V_T}$$

$$= V_{CQ1} - \frac{\alpha^2}{2} R_c i_{c7} th \frac{V_1}{2V_T} th \frac{V_2}{2V_T} \quad (14)$$

式中 $V_{CQ1} = V_{cc} - \frac{\alpha^2}{2} R_c i_{c7}$ 为 T_1 管的直流分量

$$i_{c5} + i_{c6} = \alpha(i_{e5} + i_{e6}) = \alpha i_{c7}$$

同理,单端输出 V_{C2} 为: $V_{c2} = V_{CQ2} + \frac{\alpha^2}{2} R_c i_{c7} th \frac{V_1}{2V_T} th$

$$\frac{V_2}{2V_T} \quad (15)$$

双端输出电压为: $V_0 = V_{c1} - V_{c2} = -\alpha R_c i_{c7} th \frac{V_1}{2V_T} th$

$$\frac{V_2}{2V_T} \quad (16)$$

由式(14)(15)表明,单端输出时,输出信号中含有直流项和信号项,并 V_{C1} 与 V_{C2} 的信号项为反相关系。由式(16)表明,双端输出时由于 V_{C1} 、 V_{C2} 中的直流项大小相等,方向相反相互抵消了,因此,输出信号 V_0 中只含有信号项,其大小是单端输出的两倍。

由于以上整个电路分析过程都是采用PN结的电压、电流关系式,所以它适用于输入信号为较大、小信号工作状态。但不同强度信号, V_0 的具体内容是不同的下面分别进行分析。

2 小信号工作状态下的输入、输出关系式

根据双曲正切函数 $\text{th}x$ 特性,当 $|x| \ll 1$ 时, $\text{th}x \approx x$ 。要满足此式成立,所以小信号是指双曲函数中的

$$\frac{V_1}{2V_T} = 1, \frac{V_2}{2V_T} = 1 \text{ 即 } V_1 = 2V_T, V_2 = 2V_T, \text{ 在室温条件下 } V_T$$

$$\approx 26\text{mv}, V_1 \ll 52\text{mv}, V_2 \ll 52\text{mv} \text{ 时 } \text{th} \frac{V_1}{2V_T} \approx \frac{V_1}{2V_T},$$

$$\text{th} \frac{V_2}{2V_T} \approx \frac{V_2}{2V_T} \text{ 则} \quad V_{c1} = V_{CQ1} - \frac{1}{8} \frac{\alpha^2 R_c i_{c7}}{V_T^2} V_1 V_2 \quad (17)$$

$$V_{c2} = V_{CQ2} - \frac{1}{8} \frac{\alpha^2 R_c i_{c7}}{V_T^2} V_1 V_2 \quad (18)$$

$$V_0 = -\frac{1}{4} \frac{\alpha^2 R_c i_{c7}}{V_T^2} V_1 V_2 = KV_1 V_2 \quad (19)$$

$$\text{式中 } K = -\frac{1}{4} \frac{\alpha^2 R_c i_{c7}}{V_T^2}$$

式(17)(18)(19)表明,模拟相乘器在小信号工作状态下,输出信号正比于两个输入信号的乘积。常称此电路为模拟相乘器就是由此得名的。由于输入信号 V_1, V_2 是差模输入电压,没有限制它们是正,还是负(即可正可负),这样它们有四种组合方式,所以又称它为四象限乘法器。

3 较大信号工作状态下的输入、输出关系式

较大信号工作状态是指 $1 < \frac{V_1}{2V_T} < 1.57, 1 < \frac{V_2}{2V_T} <$

$$1.57 \text{ 即 } 52\text{mv} < V_1 < 82\text{mv}, 52\text{mv} < V_2 < 82\text{mv} \text{ 时 } \text{th} \frac{V_1}{2V_T} \neq$$

$$\frac{V_1}{2V_T} \text{ 而是用级数将 } \text{th} \frac{V_1}{2V_T} \text{ 展}$$

开。

$$\text{由于 } \text{th}x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{2}{15}x^5 - \frac{17}{315}x^7 + \dots$$

$$\text{所以有 } \text{th} \frac{V_1}{2V_T} = \frac{V_1}{2V_T} - \frac{V_1^3}{24V_T^3} + \frac{2V_1^5}{480V_T^5} - \dots \quad (20)$$

$$\text{th} \frac{V_2}{2V_T} = \frac{V_2}{2V_T} - \frac{V_2^3}{24V_T^3} + \frac{2V_2^5}{480V_T^5} - \dots \quad (21)$$

将(20)(21)式,代入(14)(15)(16)式得

$$V_{c1} = V_{CQ1} - \frac{\alpha^2}{2} R_c i_{c7} \left(\frac{V_1}{2V_T} - \frac{V_1^3}{24V_T^3} + \frac{2V_1^5}{480V_T^5} \dots \right)$$

$$\left(\frac{V_2}{2V_T} - \frac{V_2^3}{24V_T^3} + \dots \right)$$

$$= V_{CQ1} - \frac{\alpha^2}{2} R_c i_{c7} \left(\frac{V_1 V_2}{4V_T^2} - \frac{V_1 V_2^3}{48V_T^4} - \frac{V_1^3 V_2}{48V_T^4} + \frac{V_1^3 V_2^3}{576V_T^6} + \dots \right)$$

.....)

$$V_{c2} = V_{CQ2} + \frac{\alpha^2}{2} R_c i_{c7} \left(\frac{V_1 V_2}{4V_T^2} - \frac{V_1 V_2^3}{48V_T^4} - \frac{V_1^3 V_2}{48V_T^4} + \frac{V_1^3 V_2^3}{576V_T^6} + \dots \right)$$

.....)

$$V_0 = -\alpha^2 R_c i_{c7} \left(\frac{V_1 V_2}{4V_T^2} - \frac{V_1 V_2^3}{48V_T^4} - \frac{V_1^3 V_2}{48V_T^4} + \frac{V_1^3 V_2^3}{576V_T^6} + \dots \right)$$

以上分析表明模拟相乘器在较大信号工作状态下,输出信号中只含有输入信号奇次项,不含有偶次项,如 V_1, V_2 为频率变化信号,则输出信号中就只含有输入信号的奇次谐波,不含有偶次谐波,这就比小信号工作状态下的输出信号要复杂。

综上所述,模拟相乘器的输出信号与输入信号强度有关,使用者可根据实际输入信号的强度来决定它的工作状态,以便于了解输出信号中是否含有所需要输出的信号,才能合理正确使用模拟相乘器。

The Analysis of the Simulated Multiplier Working in the State of Stronger Signal

HU Fang-ming

(Department of Mathematics and Physics, Xichang College, Xichang 615022, Sichuan)

Abstract: With the help of the PN junction theory and the transistor principle the author analyzes the principle of operation of the simulated multiplier working in the state of stronger signal and concludes its related formula in this state.

Key words: Analysis; Simulated multiplier; Strong signal