

MOS 开关传输交流信号的误差分析

蒋 清 明

(机电系)

摘 要 本文对MOS开关在传输交流信号时,由于导通电阻所产生的传输误差,结合MOS管的物理特性,进行了简捷实用的分析。提出了减少传输误差的措施。

关键词 开启电压, 导通电阻, 阻抗误差

1 问题的提出

图1所示MOS开关,栅极加上固定的偏压 V_G 。如MOS管的开启电压为 V_T ,对N-MOS管,当 $V_{GS} > V_T (V_T > 0)$,对P-MOS管,当 $|V_{GS}| > |V_T| (V_T < 0)$,即使输入信号 $u_i = 0$,MOS管处于导通状态,导通电阻为 $r_{on}|_{u_i=0}$ 。反之,MOS管截止。当管子导通时,对于N-MOS管,可以传输幅度小于 $(V_G - V_T)$ 的交变信号,而对P-MOS管,则可传输幅度大于 $-(V_G - V_T)$ 的交变信号(V_G, V_T 取绝对值)。由于 u_i 的变化,引起 V_{GS} 变化,从而使 $r_{on}|_{u_i \neq 0}$ 不是一个常数,而是非线性的,如图二所示^[1]。

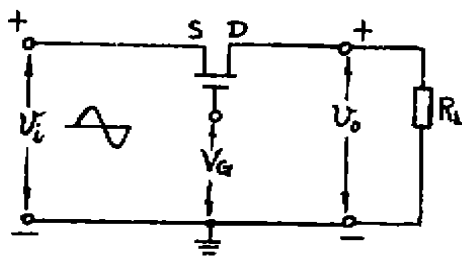


图1 MOS开关

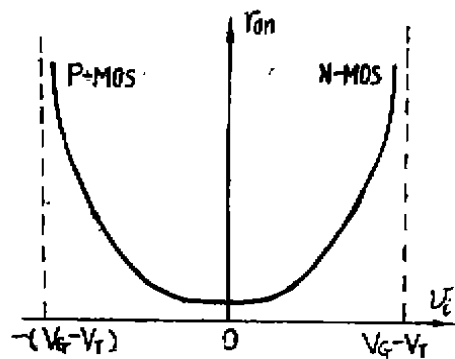


图2 MOS管的导通电阻

导通电阻 r_{on} 可近似地表示如下¹

$$r_{on} = \frac{1}{K_{DS}(V_{GS} - V_T)} \quad (1)$$

其中

$$K_{LS} = \left(\frac{\mu \epsilon_1 \epsilon_0}{d} \right) \frac{W}{L}$$

μ ——沟道中多数载流子迁移率

ϵ_0 ——真空介电常数 ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$)

ϵ_1 ——二氧化硅的比介电常数 ($\epsilon_1 = 4$)

d ——二氧化硅层的厚度

W ——沟道的宽度

L ——沟道的长度

图 1 中, 输出电压 $v_o = [R_L / (r_{on} + R_L)] v_i$ 。由于 r_{on} 的非线性, 使输出 v_o 产生失真。无论在 A/D, D/A 转换器或多路调制器应用中, 都是我们所不希望的, 必须尽量设法减少这种误差。

2 传输误差的分析

图 1 中, 当 $v_i = 0$ 时, 从输入端看, 进去的总电阻为

$$R_o = r_o + R_L \quad (2)$$

式中

$$r_o = r_{on} | v_i = 0$$

当 $v_i \neq 0$ 时, 从输入端看进去的总电阻为

$$R_i = r_i + R_L \quad (3)$$

式中

$$r_i = r_{on} | v_i \neq 0$$

因此, 当有输入 v_i 时, 总电阻之差为

$$\Delta R = R_o - R_i$$

电阻的相对误差定义为

$$\epsilon = \frac{\Delta R}{R_o} \quad (4)$$

则

$$\epsilon = \frac{\Delta R}{R_o} = \frac{r_o + R_L - r_i - R_L}{r_o + R_L} = \frac{r_o - r_i}{r_o + R_L}$$

为使 $v_o \approx v_i$, 一般 $R_L \gg r_o$, 所以

$$\epsilon = \frac{r_o - r_i}{R_L} \quad (5)$$

由式 (1)

$$r_{on} = \frac{1}{K_{DS}(V_G - v_i - V_T)} \quad (6)$$

当 $v_1 = 0$ 时,

$$r_0 = \frac{1}{K_{DS}(V_G - V_T)} \quad (7)$$

当 $v_1 \neq 0$ 时,

$$r_1 = \frac{1}{K_{DS}(\bar{V}_u - v_1 - V_T)} \quad (8)$$

由 (7), (8) 两式得

$$r_1 = r_0 \frac{V_G - V_T}{V_G - v_1 - V_T} \quad (9)$$

把式 (9) 代入式 (5) 得

$$\begin{aligned} e &= \frac{r_0 - r_0(V_G - V_T)/(V_G - v_1 - V_T)}{R_L} \\ &= -\frac{r_0 v_1}{R_L(V_G - V_T - v_1)} \end{aligned} \quad (10)$$

此式是把 e 与输入 v_1 联系的一般表达式。

设 $v_1 = E \sin \omega t$

则

$$e = K_1 \frac{E \sin \omega t}{K_2 + E \sin \omega t} \quad (11)$$

其中

$$K_1 = \frac{r_0}{R_L}$$

$$K_2 = V_T - V_G$$

令

$$a = \frac{E}{K_2}$$

则

$$e = \frac{K_1 a \sin \omega t}{1 + a \sin \omega t} \quad (12)$$

其中, a 总是小于 1 的正数, 一般在 $0 \sim 0.5$ 之间。

又令 $X = a \sin \omega t$

则式 (12) 变为

$$e = K_1 \frac{X}{1 + X} = K_1 (X - X^2 + X^3 - X^4 + \dots)$$

即

$$e = K_1 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k X^{k+1} \quad (13)$$

为一收敛级数。其中

$$X = a \sin \omega t$$

$$X^2 = a^2 \sin^2 \omega t = \frac{a^2}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

$$X^3 = a^3 \sin^3 \omega t = \frac{a^3}{4} (3 \sin \omega t - \sin 3\omega t)$$

$$X^4 = a^4 \sin^4 \omega t = \frac{a^4}{8} (3 - 4 \cos 2\omega t + \cos 4\omega t)$$

把上述各式代入式 (13), 得

$$\begin{aligned} \varepsilon = K_1 \left[- \left(\frac{a^2}{2} + \frac{3a^4}{8} \right) + \left(a + \frac{3a^3}{4} \right) \sin \omega t \right. \\ \left. + \left(\frac{a^2}{2} + \frac{a^4}{2} \right) \cos 2\omega t - \frac{a^3}{4} \sin 3\omega t \right. \\ \left. - \frac{a^4}{8} \cos 4\omega t - \dots \right] \end{aligned}$$

因 $a < 0.5$, 所以

$$\varepsilon \approx K_1 \left(- \frac{a^2}{2} + a \sin \omega t + \frac{a^2}{2} \cos 2\omega t \right) \quad (14)$$

此式为开关交变信号电阻相对误差的最后表达式。

传输信号输出

$$\begin{aligned} v_o &= \frac{R_L}{R_1} v_i = \frac{R_L}{R_0 - \Delta R} v_i \\ &= \frac{R_L}{R_0 (1 - \varepsilon)} v_i \end{aligned}$$

因为

$$\frac{R_L}{R_0} \approx 1, \text{ 所以 } \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{1}{1 - \varepsilon}$$

$$v_o = (1 + \varepsilon) v_i \quad (15)$$

把 $v_i = E \sin \omega t$ 和式 (14) 代入式 (15), 得

$$v_o = E \sin \omega t \left(1 - \frac{K_1 a^2}{2} + K_1 a \sin \omega t + \frac{K_1 a^2}{2} \cos 2\omega t \right) \quad (16)$$

把式 (16) 化简后得

$$\begin{aligned} v_o = E \sin \omega t - \frac{3K_1 a^2}{4} E \sin \omega t + \frac{EK_1 a}{2} - \frac{EK_1 a}{2} \cos 2\omega t \\ + \frac{EK_1 a^2}{4} \sin 3\omega t \end{aligned} \quad (17)$$

在式 (17) 中, 第二项表示传输信号的实际损失, 第三项表示输出直流偏移, 第四、五两项分别表示二、三次谐波输出。

3 结 论

通过上述分析, 证明了本文所提出的问题。由于 MOS 管导通电阻的非线性, 输入正弦信号传输过程中, 不仅衰减了一部分, 而且还产生了正比于输入信号幅度的直流偏移和二、三

次谐波。这些都是我们不希望的。为了减小衰减和失真，有效传输信号幅度不能太大，并且尽量减小 K_1 和 α 。减小 K_1 的措施是尽量加大 R_L 减小 r_o 。要减小 r_o ，在 V_G 一定时，选 V_T 小的管子最好；要减小 α ，必须增大 K_2 ，在 V_G 一定时，同样选 V_T 小的管子有利。

4 计算举例

已知： $r_{DS} = 200\Omega$ ， $V_G = -20V$ ， $V_T = -3V$ ， $E = 6V$ ， $R_L = 100k\Omega$ ，则
 $r_o = 200\Omega$ ， $K_1 = 2 \times 10^{-3}$ ， $K_2 = 17V$

$$\alpha = \frac{6}{17}$$

所以信号衰减为

$$\frac{3K_1\alpha^2}{4} = 0.0187\%$$

直流偏移为

$$\frac{K_1\alpha}{2} = 0.0358\%$$

二次谐波分量为

$$\frac{K_1\alpha}{2} = 0.0353\%$$

三次谐波分量为

$$\frac{K_1\alpha^2}{4} = 0.00623\%$$

上述计算表明，在给定条件下， $v_o \approx v_i$ 。

参 考 文 献

- 1 清华大学电子学教研组编，数字电子技术基础(下册)，高等教育出版社，1983
- 2 D. H. Sheingold, Ed. Analog-Digital Conversion Handbook, Analog Devices, Inc., Norwood, MA, 1976, ch. 3

(编辑：刘家凯)

ERROR ANALYSIS OF MOSFET SWITCH TRANSMITTING AC SIGNALS

Jiang Qingming

(Department of Mechanical and Electronical Engineering)

ABSTRACT In this paper, the error caused by the resistance of the MOSFET switch in the transmission of AC signals is straightforwardly derived in combination with MOSFET physical model. The method of decreasing transmissiv error is presented.

KEY WORDS threshold voltage, on resistance, impedance error