



## 第二章 非线性器件的分析方法

2.1 概述

2.2 指数律特性分析

2.3 折线律特性分析

2.4 差分特性分析

2.5 平方律特性和钳位平方律特性

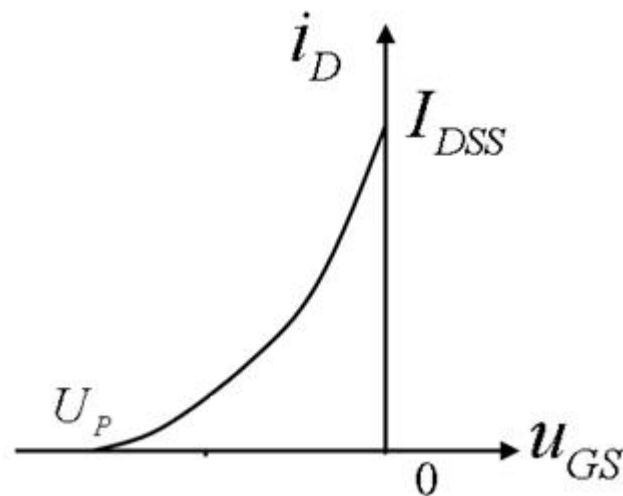
2.6 时变参量分析法

## 2.5 平方律特性和钳位平方律特性分析

适用于FET、MOS管。

FET:

$$i_D = \begin{cases} I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P}\right)^2 & U_P < u_{GS} < 0, \quad U_P - \text{夹断电压} \\ 0 & u_{GS} < U_P \end{cases}$$



MOS:

$$i_D = \begin{cases} I_{D0} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{th}}\right)^2 & u_{GS} > U_{th}, \quad U_{th} - \text{开启电压} \\ 0 & u_{GS} < U_{th} \end{cases}$$

## 2.5 平方律特性和钳位平方律特性分析

### 1. 以FET为例，介绍平方律特性分析

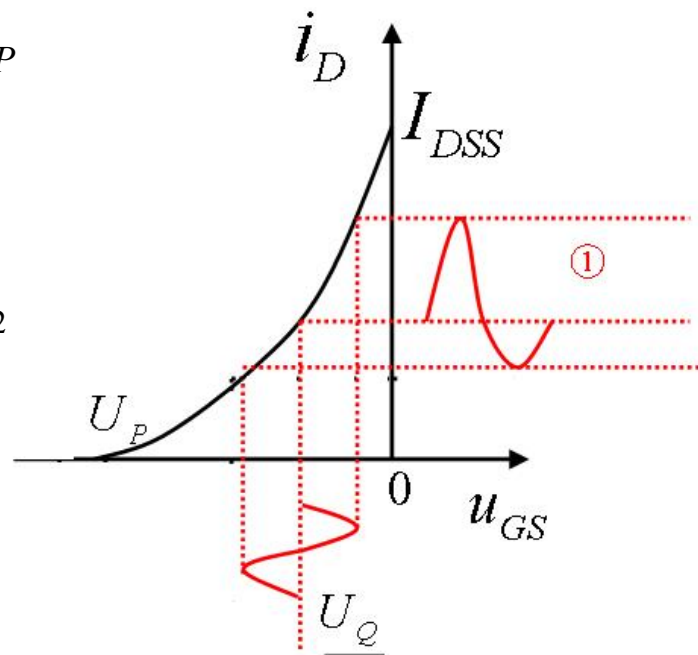
$$u_{GS} = U_Q + U_1 \cos \omega t$$

#### (1) 完全平方区 $U_Q + U_1 \leq 0$ , $U_Q - U_1 > U_P$

器件工作在平方律区，输出电流中只含有直流、基波和二次谐波。

$$\begin{aligned} i_D &= I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P}\right)^2 = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_Q + U_1 \cos \omega t}{U_P}\right)^2 \\ &= I_{D0} + I_{D1} \cos \omega t + I_{D2} \cos 2\omega t \end{aligned}$$

$$\begin{cases} I_{D0} = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} [(U_P - U_Q)^2 + \frac{1}{2} U_1^2] \\ I_{D1} = -\frac{I_{DSS}}{U_P^2} 2U_1 (U_P - U_Q) \\ I_{D2} = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} \cdot \frac{1}{2} U_1^2 \end{cases}$$



优点：高次谐波少、多频率信号输入情况下组合频率个数少。

$$\therefore G_1 = \frac{I_{D1}}{U_1} = -\frac{2I_{DSS}}{U_P^2} (U_P - U_Q)$$

## 2.5 平方律特性和钳位平方律特性分析

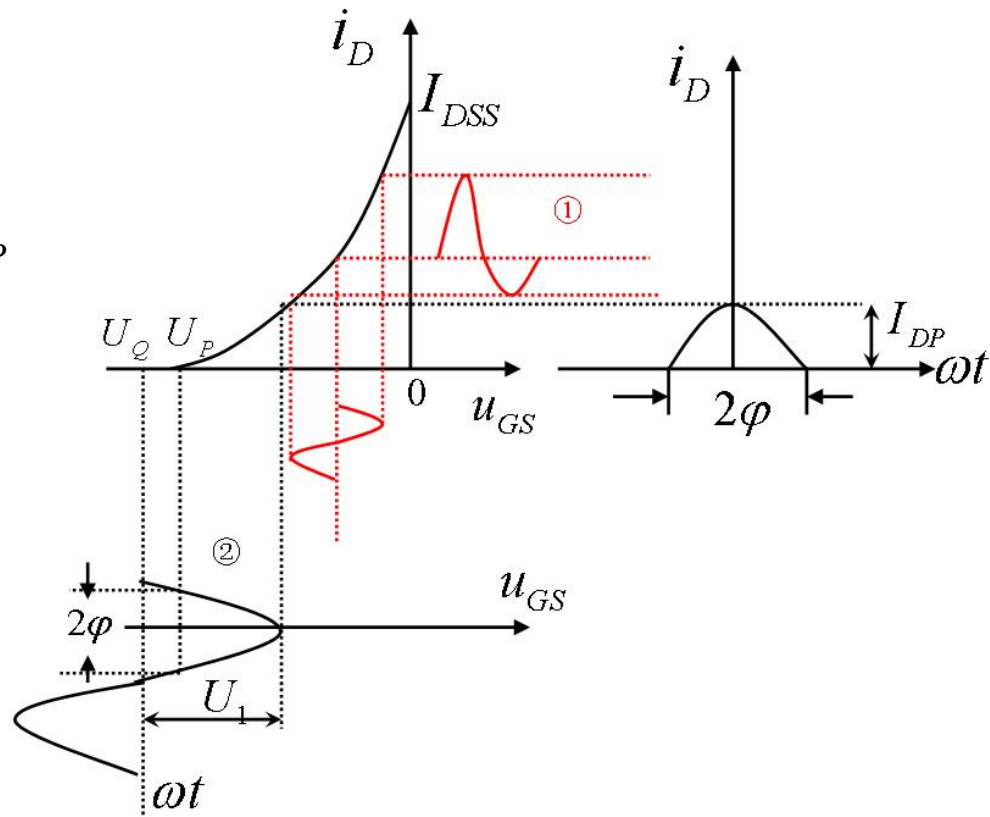
### (2) 通角工作状态

$$U_P < U_Q + U_1 \leq 0, \quad U_Q - U_1 < U_P$$

响应电流为正弦平方脉冲:  $\varphi$ ,  $I_{DP}$

$$U_Q + U_1 \cos \varphi = U_P$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \varphi = \cos^{-1} \frac{U_P - U_Q}{U_1} \\ I_{DP} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_Q + U_1}{U_P}\right)^2 \\ \quad = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} U_1^2 \left(1 - \frac{U_P - U_Q}{U_1}\right)^2 = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} U_1^2 (1 - \cos \varphi)^2 \end{cases}$$



展开成Fourier级数:  $i_D = I_{DP} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n(\varphi) \cos n\omega t$        $I_{Dn} = I_{DP} \alpha_n(\varphi)$

## 2.5 平方律特性和钳位平方律特性分析

### (2) 通角工作状态

$$i_D = I_{DP} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n(\varphi) \cos n\omega t = I_{D0} + I_{D1} \cos \omega t + \dots + I_{Dn} \cos n\omega t + \dots$$

$$I_{Dn} = I_{DP} \alpha_n(\varphi)$$

$\alpha_n(\varphi)$ —归一化谐波分解系数，可查附录B.6得到。

用回路品质因数为 $Q_T$ 的并联调谐回路提取基波

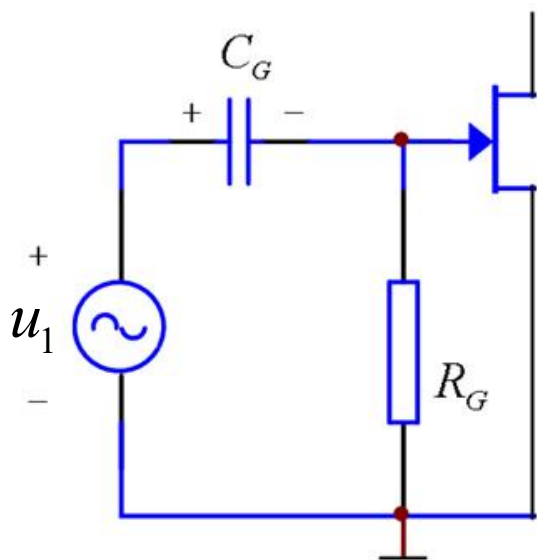
$$G_{m1}(\varphi) = \frac{I_{D1}}{U_1} = \frac{I_{DP} \alpha_1(\varphi)}{U_1}$$

$$THD_1 = \frac{1}{Q_T} D(\varphi) \quad \text{可查表得到}$$

$G_{m1}(\varphi) \sim \varphi, D(\varphi) \sim \varphi$ 。见教材图2.5.1

## 2.5 平方律特性和钳位平方律特性分析

### 2. 钳位平方律特性



自生负偏压偏置电路

$$u_1 = U_1 \cos \omega t$$

充电时间常数： $r_{GS} C_G$

( $r_{GS}$ 为栅源结瞬时导通时的正向电阻)

放电时间常数： $C_G R_G$

要求： $R_G C_G \gg T$  (输入信号周期)

$$R_G C_G \gg r_{GS} C_G$$

工作原理： $C_G$ 上产生电荷积累而建立起左正右负 $U_{CG}$ ，给栅源提供偏置。

把栅源结看成理想二极管，有：

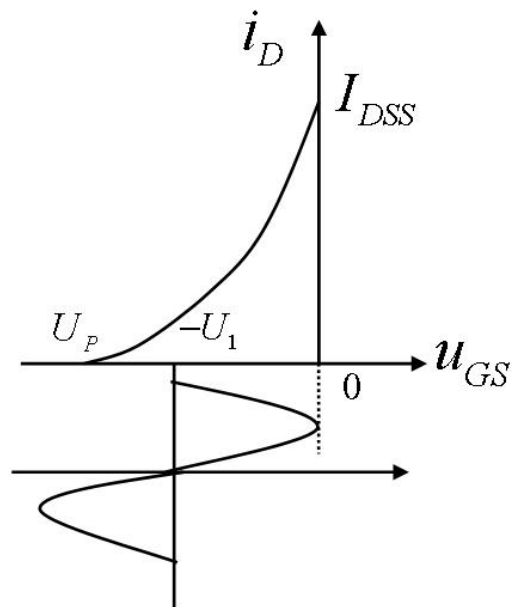
$$\begin{cases} U_{CG} = U_1 \\ u_{GS} = -U_1 + U_1 \cos \omega t \end{cases}$$

# 2.5 平方律特性和钳位平方律特性分析

$$u_{GS} = -U_1 + U_1 \cos \omega t$$

$u_{GS}$  的峰值被钳位在0

$$U_Q = -U_1$$



$$\begin{cases} I_{DP} = I_{DSS} \\ \varphi = \cos^{-1} \frac{U_P - (-U_1)}{U_1} = \cos^{-1} \left( 1 + \frac{U_P}{U_1} \right) \end{cases}$$

$$i_D = I_{DP} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n(\varphi) \cos n\omega t$$

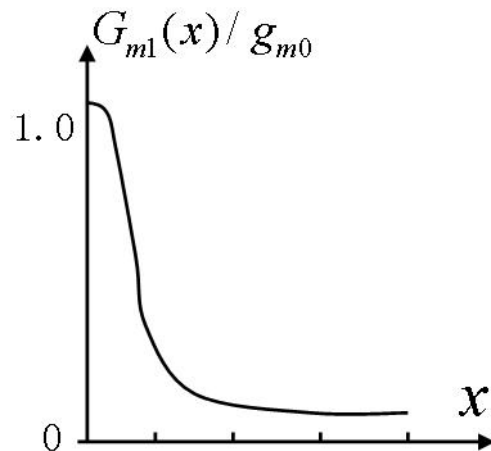
$$I_{Dn} = I_{DP} \alpha_n(\varphi)$$

或：设  $x = \frac{U_1}{-U_P}$ ,  $g_{m0} = \left. \frac{di_D}{du_{GS}} \right|_{u_{GS}=0} = -\frac{2I_{DSS}}{U_P}$ , 则有：

$$\frac{G_{m1}(x)}{g_{m0}} = \begin{cases} 1-x; & x \leq \frac{1}{2}, \text{完全平方区} \\ \frac{x}{\pi} [\dots]; & x \geq \frac{1}{2}, \text{通角状态} \end{cases}$$

; 具体数值可查附录B.5得到。

如图所示,  $x^{\uparrow} \rightarrow G_{m1}(x)^{\downarrow}$



## 2.5 平方律特性和钳位平方律特性分析

例题：FET转移特性为：

$$i_D = \begin{cases} I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P}\right)^2 & U_P < u_{GS} < 0, \\ 0 & u_{GS} < U_P \end{cases} \quad U_P - \text{夹断电压}$$

$$I_{DSS} = 15\text{mA}, U_p = -8\text{V}。$$

(1) 若输入信号为  $u_i = -4 + 3 \cos \omega t (\text{V})$ ，求漏极电流中各频率分量的大小；

(2) 若输入信号的偏压改为  $-6.5\text{V}$ ，其它参数不变，求漏极电流中直流、基波和二次谐波分量的大小。



## 2.5 平方律特性和钳位平方律特性分析



University of Science and Technology of China

解答: (1)  $-7 < u_{GS} < -1V$ , FET工作在完全平方区

$$i_D = 15\left(1 - \frac{-4 + 3\cos\omega t}{-8}\right)^2 = 15\left(0.5 + \frac{3}{8}\cos\omega t\right)^2$$

$$= 15\left(\frac{41}{128} + \frac{3}{8}\cos\omega t + \frac{9}{128}\cos 2\omega t\right)$$

$$\therefore I_{D0} = 15 \times \frac{41}{128} = 4.8mA; I_{D1} = 15 \times \frac{3}{8} = 5.625mA; I_{D2} = 15 \times \frac{9}{128} = 1.05mA$$

(2)  $-9.5 < u_{GS} < -3.5V$ , FET工作区域延伸到截止区

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{U_P - U_Q}{U_1} = \cos^{-1} \frac{-8 + 6.5}{3} = 120^\circ$$

$$I_{DP} = 15\left(1 - \frac{-3.5}{-8}\right)^2 = 4.746mA$$

$$\therefore I_{D0} = I_{DP}\alpha_0(\varphi) = 4.746 \times 0.3141 = 1.49mA$$

$$I_{D1} = I_{DP}\alpha_1(\varphi) = 4.746 \times 0.4801 = 2.28mA$$

$$I_{D2} = I_{DP}\alpha_2(\varphi) = 4.746 \times 0.1941 = 0.921mA$$

# 2.5 平方律特性和钳位平方律特性分析



University of Science and Technology of China

## 作 业

- 2.8 (1) , 2.10