电子技术
Introduction to Electronics

By Bao Qilian
鲍其莲

2018/12/27 1

Course textbook

- *Digital Fundamentals*, Thomas L. Floyd, 10th Edition, Prentice Hall
- 模拟电路讲义
- 数字电子技术基础，阎石,第四版,高等教育出版社

Chapter1 模拟电路基础

主要内容

- 基本概念介绍
- 二极管介绍
- MOS管介绍

1 导论

1.1 模拟信号与数字信号（Analog and Digital Signals）

1.2 模拟电路与数字电路（Analog and Digital Circuits）

1.3 放大器（Circuit Symbol for Amplifier）

1.1 模拟信号与数字信号

信号是指随时间变化的某些物理量，如温度、压力、速度。模拟信号与数字信号是指随时间变化的电压或电流。如果一个电压或电流是随时间连续变化的，或者说，定义在一个连续统(continuum)上，那么该电压或电流就是模拟信号，如温度、压力、速度传感器(transducer或sensor，一种将非电量转换为电量的装置)输出的电压或电流；反之，如果一个电压或电流定义在一个有限集(finite set)上，那么该电压或电流就是数字信号。

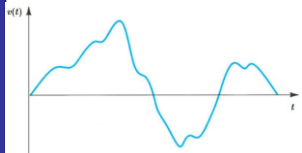


图1.1 一个模拟信号

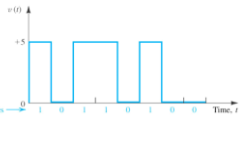


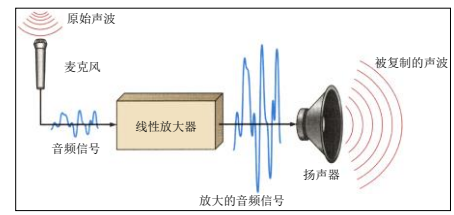
图1.2 一个数字信号

1.2 模拟电路与数字电路

模拟电路:输入和输出均为模拟信号的电路。

数字电路:输入和输出均为数字信号的电路。

混合电路:如果输入为模拟信号，输出为数字信号，或者反过来，输入为数字信号、输出为模拟信号，那么这样的电路叫做混合电路（mixed circuits）。

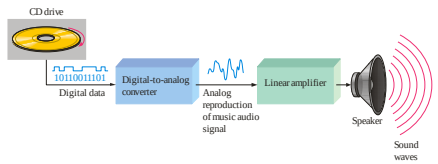


1.2 模拟电路与数字电路

模拟电路:输入和输出均为模拟信号的电路。

数字电路:输入和输出均为数字信号的电路。

混合电路:如果输入为模拟信号，输出为数字信号，或者反过来，输入为数字信号、输出为模拟信号，那么这样的电路叫做混合电路（mixed circuits）。



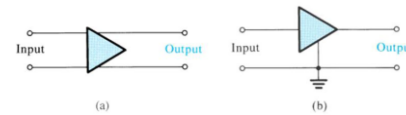
1.3 放大器(Amplifiers)

1.3.1 放大器的电路符号(Circuit Symbol for Amplifier)

信号的电路。

放大器:用来完成信号放大(amplification)功能的模拟电路。

放大器的电路符号如图(a)所示。从信号传输的角度看，放大器是一个二端口网络（two-port network），与信号源连接的端口叫做输入端口，与负载连接的端口叫做输出端口。输入端口和输出端口往往公用一个端子，这个端子叫做公共端（common terminal），也叫做地（ground），如图(b)所示。



1.3 放大器(Amplifiers)

1.3.2 放大器的分类(Classifications of Amplifier)

理想放大器的输入信号与输出信号之间的关系是线性的。如果x_i和x_o分别为放大器的输入信号和输出信号，那么:

$$x_o = Ax_i$$

按照输入信号和输出信号是电压信号还是电流信号，可将放大器分为以下四类:

(1)电压放大器（voltage amplifier）x_i和x_o均为电压信号。A叫做电压增益（voltage gain），无量纲。

(2)电流放大器（current amplifier）x_i和x_o均为电流信号。A叫做电流增益（current gain），无量纲。

1.3 放大器(Amplifiers)

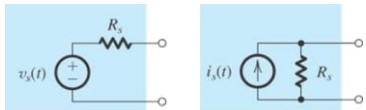
(3)跨导放大器（transconductance amplifier）：x_i为电压信号，x_o为电流信号。A叫做跨导（transconductance），单位为姆欧（mho,Ω）或西门子（siemens，S）。

(4)跨阻放大器（transresistance amplifier）：x_i为电流信号，x_o为电压信号。A叫做跨阻（transresistance），单位为欧姆（ohm,Ω）。

1.3 放大器(Amplifiers)

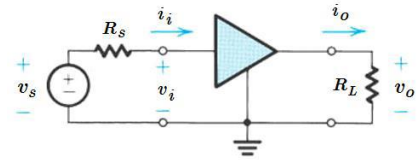
1.3.3 放大器的性能指标(Specification for Amplifier)

在分析放大电路时，一般用戴维南（Thevenin）等效电路或诺顿（Norton）等效电路来表示放大器的信号源，分别如图1.4(a)和(b)所示。



图中，戴维南电阻或诺顿电阻Rs也叫做信号源内阻(internal resistance)。在分析放大电路时，一般用电阻来表示放大器的负载并称之为负载电阻(load resistance)。

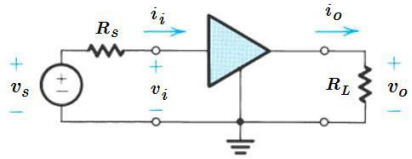
1.3 放大器(Amplifiers)



若将输入端电压和电流分别记为v_i和i_i，输出端电压和电流分别记为v_o和i_o，则放大器的电压增益定义为:

$$A_v \triangleq \frac{v_o}{v_i}$$

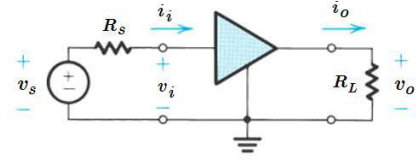
1.3 放大器(Amplifiers)



从信号传输的角度看，放大器是信号源的负载。从信号源向右看过去的等效电阻就是放大器的输入电阻（input resistance），即：

$$R_i \triangleq \frac{v_i}{i_i}$$

1.3 放大器(Amplifiers)



放大器的电流增益和功率分别定义为：

$$A_i \triangleq \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / R_L}{v_i / R_i} = A_v \frac{R_i}{R_L}$$

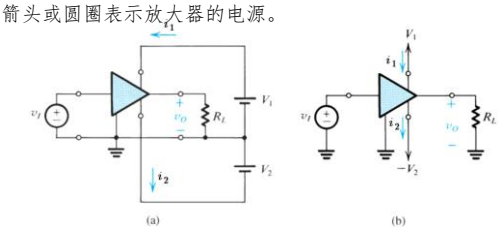
$$A_p \triangleq \frac{p_o}{p_i} = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = A_v A_i = A_v^2 \frac{R_i}{R_L}$$

1.3 放大器(Amplifiers)

放大器的功率增益总是大于1的，这是放大器区别于其它器件（比如变压器）的本质特征。放大器提供给负载的能量主要源于直流电源（dc power supply或dc supply）而非信号源。放大器的作用实质上是能量控制，它把能量从直流电源转移到负载。我们把具有能量控制作用的器件叫做有源器件（active component）。

1.3 放大器(Amplifiers)

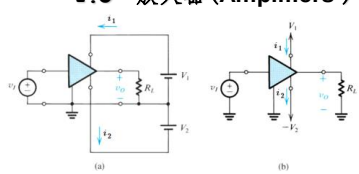
下图为一个完整的放大器电路。为简单起见，我们常用箭头或圆圈表示放大器的电源。



可见，放大器并非真正的二端口网络。例如，图1.6所示的放大器电路就有两个信号端口和两个电源端口。放大器从直流电源吸收的功率为：

$$p_s = V_1 i_1 + V_2 i_2$$

1.3 放大器(Amplifiers)



$$p_s + p_i = p_o + p_c$$

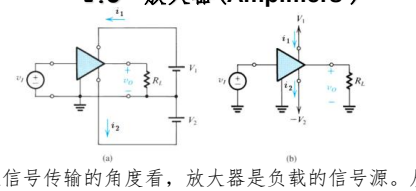
其中，P_c表示放大器本身消耗的功率。因为P_i<<P_s，所以：

$$p_s \simeq p_o + p_c$$

放大器的效率（efficiency）定义为：

$$\eta \triangleq \frac{p_o}{p_s} \times 100$$

1.3 放大器(Amplifiers)



从信号传输的角度看，放大器是负载的信号源。从负载向左看过去的戴维南或诺顿等效电路的电阻就是放大器的输出电阻（output resistance），即

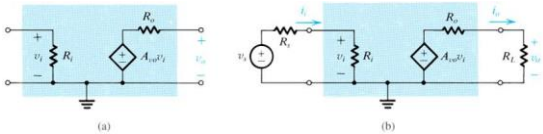
$$R_o \triangleq \left.\frac{v_{test}}{i_{test}}\right|_{v_s=0}$$

其中，v_{test}和i_{test}分别是测试源的端电压和端电流，其参考方向必须是非关联的。放大器是有源（active）器件，欲求其输出电阻，必去其独立源并将测试源加诸其输出端口。测试源的端电压与端电流之比就是输出电阻。

1.3 放大器(Amplifiers)

1.3.4 电压放大器的电路模型 (Circuit Model for the Voltage Amplifier)

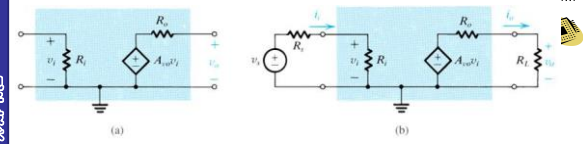
电压放大器的电路模型如图1.7(a)所示，其中，R_i和R_o分别是输入电阻和输出电阻。A_{vo}叫做电压放大器的开路电压增益（open-circuit voltage gain）。



(a) (b)

例1.1 分析图1.7(b)所示的电压放大器电路。求放大器的(端)电压增益$A_{vo}=v_o/v_i$、总电压增益$G_v=v_o/v_s$、电流增益、功率增益、输入电阻和输出电阻。

1.3 放大器(Amplifiers)



(a) (b)

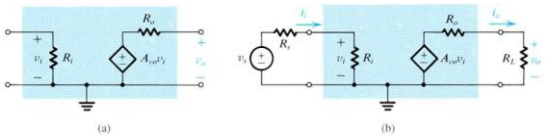
解：电压放大器的输出电压和输入电压分别为：

$$v_o = A_{vo} v_i \frac{R_L}{R_L + R_o} \qquad v_i = v_s \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

电压放大器的电压增益为：

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

1.3 放大器(Amplifiers)



(a) (b)

电压放大器的总电压增益：

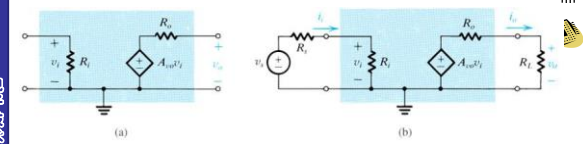
$$G_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i}\frac{v_i}{v_s} = A_v \frac{v_i}{v_s} = A_v \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

$$= A_{vo} \frac{R_i}{R_i + R_s} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

电压放大器的电流增益：

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / R_L}{v_i / R_i} = A_v \frac{R_i}{R_L}$$

1.3 放大器(Amplifiers)



(a) (b)

电压放大器的功率增益：

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = A_v A_i$$

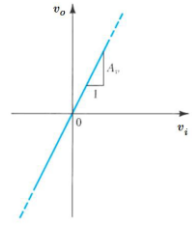
由例1.1知，电压放大器的端电压增益A_v，与放大器的输入电阻有关，总电压增益G_v与放大器的输入电阻和输出电阻都有关系。

1.3 放大器(Amplifiers)

1.3.5 放大器饱和（Amplifier Saturation）

图1.8画出了理想放大器的电压传输特性（voltage transfer characteristic），即：

$$v_o = A_v v_i$$



实际上，只有$|v_i|$足够小，上式才成立，如果$|v_i|$超过了一定的限度，v_o将不再随线性变化，也就是说，放大器的输出饱和(saturation)了。

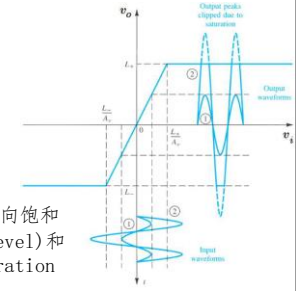
1.3 放大器(Amplifiers)

1.3.5 放大器饱和（Amplifier Saturation）

如右图所示，为了反映放大器饱和现象，我们把上式修改为：

$$v_o = A_v v_i$$

$$v_o = \begin{cases} L_-, & v_i < L_- \\ A_v v_i, & L_- / A_v < v_i < L_+ / A_v \\ L_+, & v_i > L_+ \end{cases}$$



L_+和L_-分别叫做放大器的正向饱和电平(positive saturation level)和负向饱和电平(negative saturation level)。

2 二极管电路 (Diode Circuits)

电子技术

2.1 理想二极管（The Ideal Diode）

2.2 半导体二极管（Semiconductor Diodes）

2.3 二极管的正向特性(The Diode Forward Charicteristic)

2.1 理想二极管（The Ideal Diode）

2.1.1 理想二极管的伏安特性(The Ideal Diode *i-v* Characteristic

理想二极管是二端非线性元件，其电路符号和伏安特性分别如图2.1(a)和(b)所示：

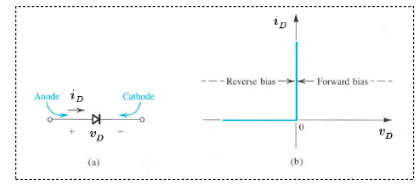


图2.1(a)中，标着加号(+)的端子叫做二极管的阳极(anode)，标着减号(-)的端子叫做二极管的阴极(cathode)。

2.1 理想二极管（The Ideal Diode）

2.1.1 理想二极管的伏安特性(The Ideal Diode *i-v* Characteristic

由图2.1(b)知，当二极管电压v_D<0，即二极管反偏(reverse biased)时，二极管电流i_D=0，二极管相当于开路(open circuit)，二极管处于截止(cut off，简称off)状态，其电路模型如图2.1(c)所示；

当二极管电流i_D>0时，二极管电压v_D=0，二极管相当于短路(short circuit)，二极管处于导通(turned on，简称on)状态，其电路模型如图2.1(d)所示。

2.1 理想二极管（The Ideal Diode）

2.1.2 理想二极管的电路特性(Analysis of Ideal Diode Circuits)

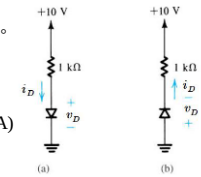
分析二极管电路时，首先要判断二极管的状态。如果二极管截止，那么二极管电流i_D=0，二极管电压v_D由二极管外部的电路决定；如果二极管导通，那么二极管电压v_D=0，二极管电流i_D由外电路决定。

例2.1：在图2.2所示的理想二极管电路中，电压源V=10V，限流电阻R= 1KΩ。求二极管电压v_D和二极管电流i_D。

解：图2.2(a)中，电压源使二极管导通。

二极管电压：$v_D = 0$

二极管电流：$i_D = \dfrac{10 - v_D}{R} = \dfrac{10 - 0}{10} = 10\ (\text{mA})$



2.1 理想二极管（The Ideal Diode）

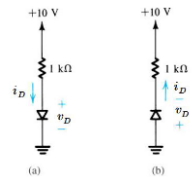
2.1.2 理想二极管的电路特性(Analysis of Ideal Diode Circuits)

解：图2.2(b)中，电压源使二极管截止。

二极管电流：$i_D = 0$

二极管电压：

$$v_D = -V - i_D R = -10 - 0 \times 1 = -10\ (\text{V})$$



2.1 理想二极管（The Ideal Diode）

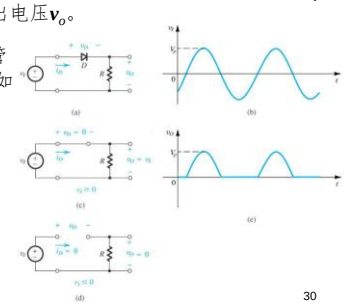
2.1.2 理想二极管的电路特性(Analysis of Ideal Diode Circuits)

例2.2：图2.3(a)是一个由理想二极管D和电阻R组成的半波整流器(half-wave rectifier)电路。输入正弦交流电压v_i如图2.3(b)所示。求输出电压v_o。

解：在v_I的正半周，二极管导通，整流器的等效电路如图2.3(c)所示

$v_D = 0$

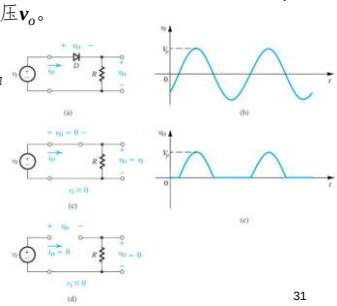
$v_O = v_I$



2.1 理想二极管（The Ideal Diode）

2.1.2 理想二极管的电路特性(Analysis of Ideal Diode Circuits)

例2.2：图2.3(a)是一个由理想二极管***D***和电阻***R***组成的半波整流器(half-wave rectifier)电路。输入正弦交流电压v_I如图2.3(b)所示。求输出电压v_o。



解：在v_I的负半周，二极管截止，整流器的等效电路如图2.3(d)所示

$$i_D = 0 \quad v_D = -v_I$$

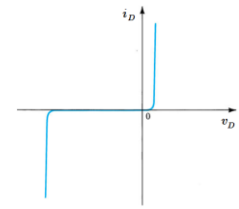
$$v_O = 0$$

v_O的波形如图2.3(e)所示

2.2 半导体二极管(Semiconductor Diodes)

2.2.1 半导体二极管的伏安特性

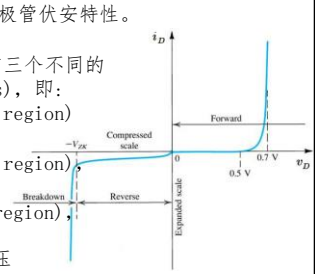
半导体二极管的伏安特性如图2.4所示。



2.2 半导体二极管(Semiconductor Diodes)

2.2.1 半导体二极管的伏安特性

图2.5是以夸张手法绘就的二极管伏安特性。



由图2.5可见，半导体二极管有三个不同的工作区(region of operations)，即：

(1)正向偏置区(forward-bias region)

v_D>0；

(2)反向偏置区(reverse-bias region)，

$-V_{ZK}$<v_D<0；

(3)(反向)击穿区(breakdown region)，

v_D<$-V_{ZK}$。

V_{ZK}叫做二极管的反向击穿电压(breakdown voltage)。

2.2 半导体二极管(Semiconductor Diodes)

2.2.1 半导体二极管的伏安特性

在正向偏置区和反向偏置区，二极管的伏安特性可表示为：

$$i_D = I_S(e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1)$$

上式叫做二极管方程（diode equation）

I_S叫做二极管反向饱和电流(reverse saturation current)。同一型号的二极管，其I_S往往有十倍甚至百倍之差。对温度非常敏感，大约5°C的温升就能使I_S加倍。

n≈1~2，集成电路二极管的约为1，分立元件二极管的约为2。为方便计算，常取n=1。

V_T叫做热电压(thermal voltage)。当温度为20°C时，V_T≈25.3mV。当温度为25°C时，V_T≈25.7mV。为方便计算，常取V_T=25mV。

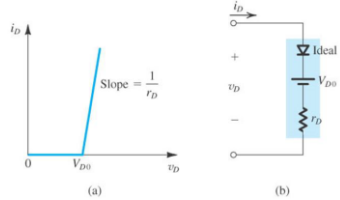
2.3 二极管的正向特性

2.3.2 分段线性模型(The Piecewise-Linear Model)

二极管参数有很大的离散性。此外，直流电源的电压有±5%的容差，电阻有5%~10%的容差。在电路参数不够准确的前提下，追求二极管电压或电流数值解的精度是没有必要的。在实际工作中，我们往往把二极管的伏安特性线性化，以便快速估算二极管电压或电流的数值。

2.3.2.1 电池电阻模型(Battery Plus Resistance Model)

二极管的伏安特性可以用两个线段来近似，如图2.11(a)所示：



2.3 二极管的正向特性

2.3.2.1 电池电阻模型(Battery Plus Resistance Model)

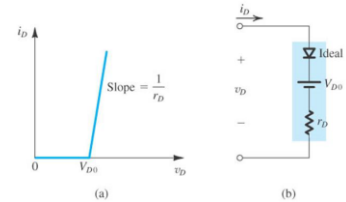


图2.11(a)所示的二线段模型（即分段线性模型）可描述为：

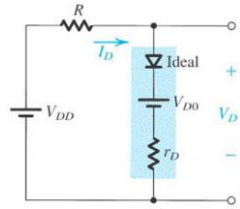
$$i_D = \begin{cases} 0, & v_D < V_{D0} \\ (v_D - V_{D0})/r_D, & v_D \geq V_{D0} \end{cases}$$

与这个模型对应的二极管等效电路如图2.11(b)所示。我们把它叫做二极管的电池电阻模型。

2.3 二极管的正向特性

例2.6：用电池电阻模型代替图2.9所示电路中的二极管，估算二极管电流i_D和电压v_D。已知V_{DD}= 10V, R= 10KΩ, V_{D0}=0.65V, r_D= 20Ω。

解：图2.9所示电路的等效电路如图2.12所示：



由图2.12得：

$$i_D = \frac{V_{DD} - V_{D0}}{R + r_D} = \frac{10 - 0.65}{10 + 20 \times 10^{-3}}$$

$$\approx 0.9331\ (\text{mA}) \approx 0.93\ (\text{mA})$$

$$v_D = V_{D0} + i_D r_D$$

$$= 0.65 + 0.9331 \times 20 \times 10^{-3} \approx 0.67\ (\text{V})$$

2.3 二极管的正向特性

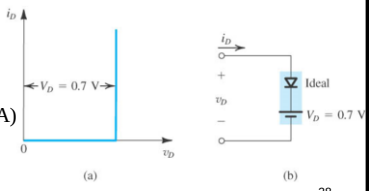
2.3.2.2 恒压降模型(Constant Voltage Drop Model)

二极管的分段线性模型不是唯一的。如图2.13所示的恒压降模型比电池电阻模型更简单。在恒压降模型中，V_D通常取0.7V。恒压降模型是默认的二极管模型。

例**2.7**：用恒压降模型代替图2.9所示电路中的二极管，估算二极管电流i_D。已知V_D=0.7V。

解：

$$i_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{10 - 0.7}{10} = 0.93\ (\text{mA})$$



3 MOS电路 (MOS Circuits)

3.1 MOS管(The MOSFET)

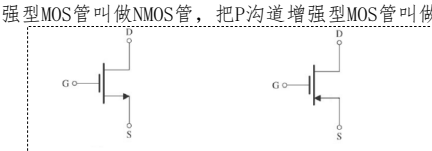
3.2 MOS电路的大信号分析(Large-Signal Analysis…)

3.3 MOS放大器(The MOS Amplifer)

3.1 MOS管 (The MOSFET)

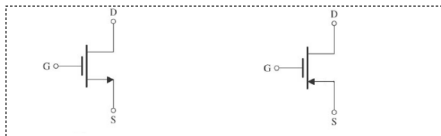
MOS管的全称是金属氧化物半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductorfield-effecttransistor)。MOS管是一种三端半导体器件。MOS管的三个端子分别叫做栅极(gate, G) 、漏极(drain, D)和源极(source, S)。

本讲义只介绍用途广泛的增强型MOS管。图3.1(a)和(b)分别是N沟道增强型MOS管(n-channel enhancement-type MOSFET)和P沟道增强型MOS管(p-channel enhancement-type MOSFET)的电路符号。符号中的箭头表示MOS管源极电流的实际方向。为简单起见，我们把N沟道增强型MOS管叫做NMOS管，把P沟道增强型MOS管叫做PMOS管。



(a) Simplified circuit symbol for the *n*-channel enhancement-type MOSFET　(b) Simplified circuit symbol for the *p*-channel enhancement-type MOSFET

3.1 MOS管 (The MOSFET)



(a) Simplified circuit symbol for the *n*-channel enhancement-type MOSFET　(b) Simplified circuit symbol for the *p*-channel enhancement-type MOSFET

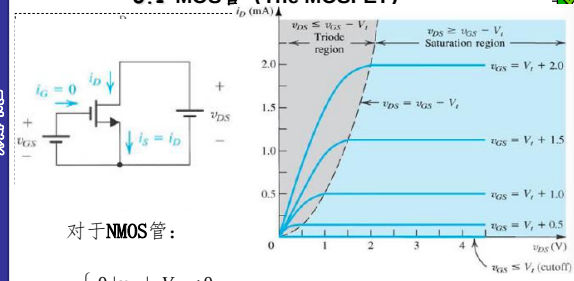
MOS管的特性如下：

$$i_G = 0$$

这是MOS管栅极与MOS管其余部分绝缘的缘故。MOS管也叫做绝缘栅型场效应晶体管。又因为，$i_S = i_G + i_D$，所以：

$$i_D = i_S$$

3.1 MOS管 (The MOSFET)

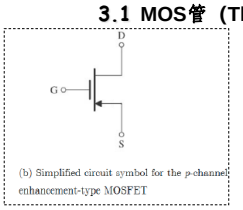


对于NMOS管：

$$i_D = \begin{cases} 0, & |v_{GS}| - |V_{TP}| < 0 \\ k_p[(v_{GS} - V_{TP} - v_{DS}/2)v_{DS}, & 0 \le |v_{GS}| - |V_{TP}| \le |v_{DS}| \\ k_p(v_{GS} - V_{TP})^2(1 + \lambda |v_{DS}|)/2, & 0 \le |v_{GS}| - |V_{TP}| \le |v_{DS}| \end{cases}$$

V_{TN}是NMOS管阈值电压。k_n是NMOS管的跨导参数，λ是MOS管的沟道长度调制参数。

3.1 MOS管 (The MOSFET)



(b) Simplified circuit symbol for the *p*-channel enhancement-type MOSFET

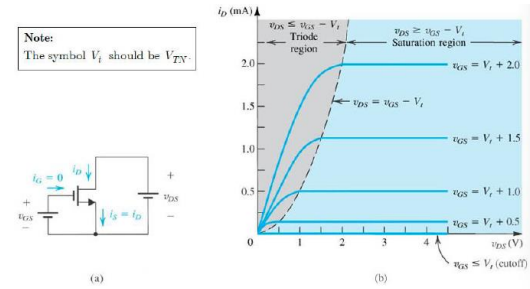
对于PMOS管：

$$i_D=\begin{cases}0, |v_{GS}|-V_{TP}<0\\ k_p(v_{GS}-V_{TP}-v_{DS}/2)v_{DS}, 0\le|v_{GS}|-V_{TP}, |v_{GS}|-V_{TP}>|v_{DS}|\\ k_p(v_{GS}-V_{TP})^2(1+\lambda|v_{DS}|)/2, 0\le|v_{GS}|-V_{TP}\le|v_{DS}|\end{cases}$$

V_{TN}和V_{TP}分别是NMOS管和PMOS管的阈值电压。k_n和k_p分别是NMOS管和PMOS管的跨导参数，λ是MOS管的沟道长度调制参数。

3.1 MOS管 (The MOSFET)

由上两式可知：漏极电流i_D是栅源电压v_{GS}和漏源电压v_{DS}的函数，一般记为$i_D=f(v_{GS})|_{vGS}$。这个函数叫做MOS管的漏极特性或共源输出特性。下图为NMOS管的漏极特性曲线。



3.1 MOS管 (The MOSFET)

由图3.2可见，MOS管有三个工作区，即截止区(cutoff region)、可变电阻区(triode region)和放大区(active region)。

NMOS管工作在截止区的条件：

$$v_{GS}-V_{TN}<0$$

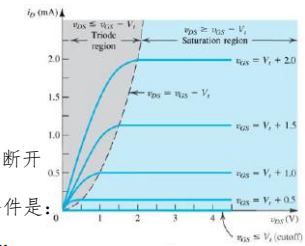
在截止区：$i_D=0$

在截止区，MOS管相当于一个断开的开关。

NMOS管工作在可变电阻区的条件是：

$$0\le v_{DS}\le v_{GS}-V_{TN}$$

在可变电阻区：$i_D=k_n(v_{GS}-V_{TN}-\frac{v_{DS}}{2})v_{DS}$



3.1 MOS管 (The MOSFET)

当$v_{DS}\ll 2(v_{GS}-V_{TN})$时，$i_D\approx k_n(v_{GS}-V_{TN})v_{DS}$。在$v_{GS}$不变时，$i_D$大致与$v_{DS}$成正比，MOS管可近似为线性电阻，叫做MOS管的导通电阻(on resistance)，记作R_{on}。

$$R_{on}=\lim_{v_{DS}\to 0}\left[\frac{1}{\partial i_D/\partial v_{DS}}\right]_{v_{GS}=V_{GS}}=\frac{1}{k_n(V_{GS}-V_{TN})}$$

当v_{GS}变化时，R_{on}随之变化，MOS管相当于压控(voltage-controlled)电阻。可变电阻区也叫线性区(linear region)。

NMOS管工作在放大区的条件是：

$$0\le v_{GS}-V_{TN}\le v_{DS}$$

在放大区：$i_D=\frac{k_n}{2}(v_{GS}-V_{TN})^2(1+\lambda v_{DS})$

3.1 MOS管 (The MOSFET)

$$i_D=\frac{k_n}{2}(v_{GS}-V_{TN})^2(1+\lambda v_{DS})$$

λ的倒数叫做厄尔利电压(Early voltage)，记作V_A，即：

$$V_A=\frac{1}{\lambda}$$

如果忽略MOS管的厄尔利效应(指MOS管放大区的漏极特性曲线略有上翘的现象)，即λ=0,那么：

$$i_D=\frac{k_n}{2}(v_{GS}-V_{TN})^2$$

由上式可知：

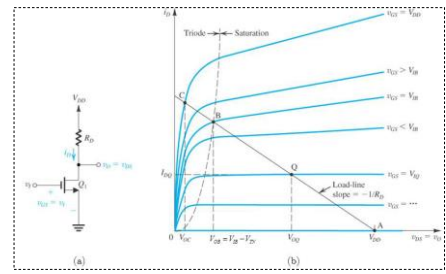
(1)MOS管在放大区时可看成是平方律（square-law）器件。

(2)在v_{GS}不变的情况下，i_D也不变，所以放大区也叫恒流区(constant-current region)或饱和区(saturation region)。

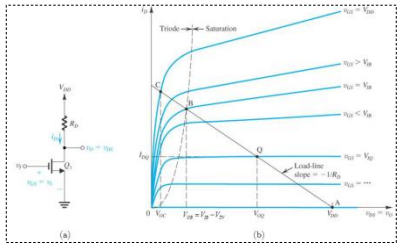
另外：(v_{GS}-V_{TN})是非常重要的参数，叫做盈余电压(override voltage)或有效电压(effective voltage)，记作V_{ON}。

3.2 MOS电路的大信号分析

例3.1：考虑图(a)所示的MOS电路。MOS管的漏极特性如图(b)所示。$0\le v_I\le V_{DD}$。画出该电路的电压传输特性(voltage transfer characteristic)



3.2 MOS电路的大信号分析



解：$v_I = v_{GS}$

$v_O = v_{DS}$

MOS管的外电路特性为：$V_{DD} = i_D R_D + v_{DS}$

3.2 MOS电路的大信号分析

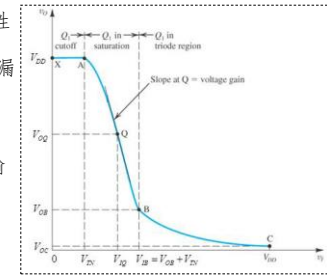
$V_{DD} = i_D R_D + v_{DS}$　　$i_D = \dfrac{V_{DD} - v_{DS}}{R_D}$

该式表示一条斜率为$-1/R_D$、v_{DS}轴截距为V_{DD}、i_D轴截距为V_{DD}/R_D的“负载线(load line)”。

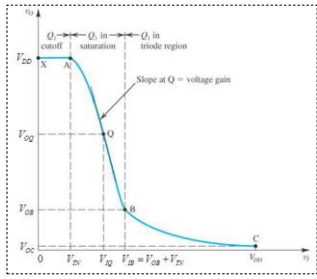
把负载线与漏极特性画在一起。对于给定的输入电压v_I，可以找到漏极特性曲线$i_D = f(v_{DS})\big|_{vGS=vI}$与负载线的交点。

交点的横坐标v_{DS}就是输出电压v_O。

得到了电压传输特性曲线。



3.2 MOS电路的大信号分析

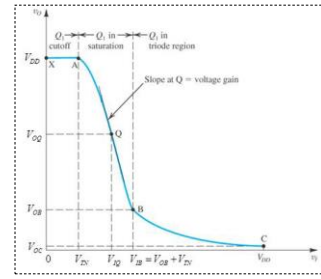


当$0 \le v_I < V_{TN}$时，$v_{GS} - V_{TN} < 0$成立，MOS管工作在截止区

$i_D = 0$，$v_O = v_{DS} = V_{DD}$

对应着图3.4所示的电压转移特性的XA段

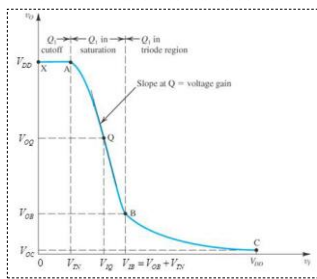
3.2 MOS电路的大信号分析



当$V_{TN} \le v_I \le V_{IB}$时，$0 \le v_{GS} - V_{TN} \le v_{DS}$，

MOS管工作在放大区，对应着AB段。

3.2 MOS电路的大信号分析



当$V_{IB} \le v_I \le V_{DD}$时，$0 < v_{DS} < v_{GS} - V_{TN}$

MOS管工作在可变电阻区，对应着BC段。

3.2 MOS电路的大信号分析

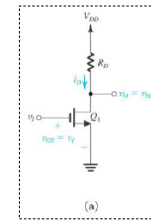
例3.2：图3.3(a)所示的MOS电路具有“反相”功能，即输入为低电平时，输出为高电平；输入为高电平时，输出为低电平。已知V_{DD}=3.3V，R_D=100KΩ，V_{TN}=0.7V;输入$v_I = v_{GS}$有两个可能的值，一个是0V，另一个是3.3V。问：(1)当v_{GS}=0V时，输出$v_O = v_{DS}$为多少？(2)当v_{GS}=3.3V时，若使v_{DS}=0.2V，k_n应为多少？

解：当输入v_{GS}=0V时，

$v_{GS} - V_{TN} = 0 - 0.7V = -0.7V$

因为$v_{GS} - V_{TN} < 0$，所以NMOS管截止。

$v_{DS} = V_{DD} - i_D R_D = V_{DD} = 3.3V$



3.2 MOS电路的大信号分析

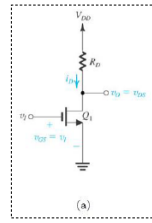
例3.2： 图3.3(a)所示的MOS电路具有“反相”功能，即输入为低电平时，输出为高电平；输入为高电平时，输出为低电平。已知V_{DD}=3.3V，R_D=100KΩ，V_{TN}=0.7V;输入$v_I=v_{GS}$有两个可能的值，一个是0V，另一个是3.3V。问：(1)当v_{GS}=0V时，输出$v_O=v_{DS}$为多少？(2)当v_{GS}=3.3V时，若使v_{DS}=0.2V，k_n应为多少？

解：当输入v_{GS}=3.3V时，

$v_{GS}-V_{TN}$ = 3.3-0.7V = 2.6V

又因为v_{DS} = 0.2V，所以：

$0<v_{DS}<v_{GS}-V_{TN}$，NMOS管工作在可变电阻区



3.2 MOS电路的大信号分析

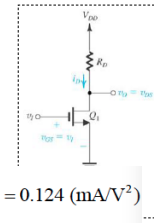
例3.2： 图3.3(a)所示的MOS电路具有“反相”功能，即输入为低电平时，输出为高电平；输入为高电平时，输出为低电平。已知V_{DD}=3.3V，R_D=100KΩ，V_{TN}=0.7V;输入$v_I=v_{GS}$有两个可能的值，一个是0V，另一个是3.3V。问：(1)当v_{GS}=0V时，输出$v_O=v_{DS}$为多少？(2)当v_{GS}=3.3V时，若使v_{DS}=0.2V，k_n应为多少？

解：当输入v_{GS}=3.3V时，

$$i_D=\frac{V_{DD}-v_{DS}}{R_D}=\frac{3.3-0.2}{100}=0.031\ (\text{mA})$$

$$i_D=\frac{k_n}{2}(v_{GS}-V_{TN}-\frac{v_{DS}}{2})v_{DS}$$

$$k_n=\frac{2i_D}{(v_{GS}-V_{TN}-\frac{v_{DS}}{2})v_{DS}}=\frac{2\times3.1\times10^{-2}}{(3.3-0.7-\frac{0.2}{2})\times0.2}=0.124\ (\text{mA/V}^2)$$



3.2 MOS电路的大信号分析

例3.3： 图3.5所示的MOS电路叫做“四电阻偏置电路”。已知V_{DD}=10V，R_1=1MΩ，R_2=1.5KΩ，R_D=75KΩ，R_S=39KΩ，k_n=25μA/V²，V_{TN}=1V。求I_D和V_{DS}。

解：$I_G=0$

$$V_G=V_{DD}\frac{R_1}{R_1+R_2}=10\times\frac{1}{1+1.5}=4\ (\text{V})$$

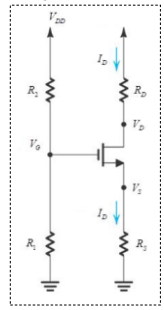
V_G=4V，意味着MOS管不可能截止。

如果MOS管截止，那么：

$$\begin{cases}V_{GS}-V_{TN}<0 \\ I_S=0\end{cases}\Rightarrow V_G-V_S-V_{TN}<0$$

$$V_G<V_S+V_{TN}=I_SR_S+V_{TN}=V_{TN}=1\ \text{V}$$

所以与V_G=4V相矛盾。



3.2 MOS电路的大信号分析

例3.3： 图3.5所示的MOS电路叫做“四电阻偏置电路”。已知V_{DD}=10V，R_1=1MΩ，R_2=1.5KΩ，R_D=75KΩ，R_S=39KΩ，k_n=25μA/V²，V_{TN}=1V。求I_D和V_{DS}。

解：不妨先假设MOS管工作在放大区。

$$I_D=\frac{k_n}{2}(V_{GS}-V_{TN})^2$$

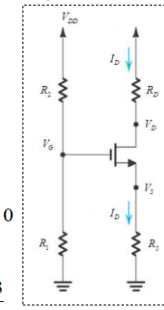
$$V_S=I_SR_S=I_DR_S=\frac{k_n}{2}(V_{GS}-V_{TN})^2R_S$$

$$V_{GS}=V_G-V_S=V_G-\frac{k_n}{2}(V_{GS}-V_{TN})^2R_S$$

$$\frac{k_nR_S}{2}(V_{GS}-V_{TN})^2+(V_{GS}-V_{TN})-(V_G-V_{TN})=0$$

$$0.4875(V_{GS}-1)^2+(V_{GS}-1)-3=0$$

$$V_{GS}-1=\frac{-1\pm\sqrt{1^2+4\times0.4875\times3}}{2\times0.4875}\approx\frac{-1\pm2.6173}{0.975}$$



3.2 MOS电路的大信号分析

例3.3： 图3.5所示的MOS电路叫做“四电阻偏置电路”。已知V_{DD}=10V，R_1=1MΩ，R_2=1.5KΩ，R_D=75KΩ，R_S=39KΩ，k_n=25μA/V²，V_{TN}=1V。求I_D和V_{DS}。

解：不妨先假设MOS管工作在放大区。

$$V_{GS}\approx2.6588\ \text{V}$$

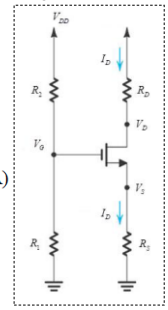
$$I_D=\frac{k_n}{2}(V_{GS}-V_{TN})^2$$

$$=\frac{25\times10^{-3}}{2}\times(2.6588-1)^2\approx3.4395\times10^{-2}\ (\text{mA})$$

$$V_{DS}=V_{DD}-I_D(R_D+R_S)$$

$$=10-3.4395\times10^{-2}\times(75+39)\approx6.08\ (\text{V})$$

因为$V_{GS}-V_{TN}\approx1.66\text{V}<6.08\text{V}=V_{GS}$，所以MOS管工作在放大区，与假设吻合。



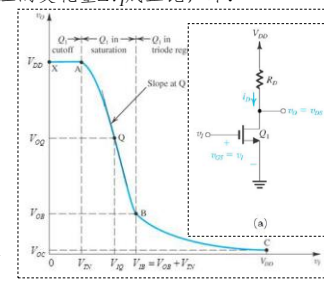
3.3 MOS放大器(The MOS Amplifier)

由图3.4可见，在电压传输特性AB段的Q点附近，输出电压的变化量Δv_O基本上与输入电压的变化量Δv_I成正比，即：

$$\Delta v_O\approx\left.\frac{dv_O}{dv_I}\right|_Q\Delta v_I$$

因此，图3.3(a)所示的电路具有电压放大功能。

我们在设计MOS放大器时，必须为MOS管选择合适的直流偏置点(即静态工作点)，使之始终工作在放大区。



小结

- 基本概念
- 二极管及其特性
- MOS管及其特性