

K A O Y A N X I N G A N X I A N

丛书主编 王凤兰

考研新干线

模拟电子技术常见题型解析及模拟题

蔡惟铮 主编 王宇野 副主编



国防工业出版社

h t t p : / / w w w . n d i p . c n

模拟电子技术

常见题型解析及模拟题

蔡惟铮 主 编
王宇野 副主编

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术常见题型解析及模拟题 / 蔡惟铮主编.
北京:国防工业出版社,2004.1
(考研新干线)
ISBN 7-118-03292-1

I. 模... II. 蔡... III. 模拟电路-电子技术-研究生-入学考试-自学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 095161 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15¼ 350 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《考研新干线》丛书编委会

丛书主编 王凤兰

编委会成员

秦安琳	金桂霞	程 鹏	蒋持平	樊昌信
申利民	刘长林	韩向春	丁天昌	苏 媛
许曰滨	刘遵仁	曲继方	王淑娟	王宇野
张华弟	董五洲	张德斌	聂国权	徐亚清
戴 民	王铁军	赵晓冬	杨 茜	李继勇

前 言

本书系学习指导类辅助教材,旨在帮助学习《模拟电子技术》课程的学生掌握课程的基本概念、重点、难点和主要的分析方法。把握好本课程的重点和难点是掌握本课程的关键,这里要说明的是,重点不一定难,难点可能是重点,但也不一定是重点。不论是重点还是难点,其中的基本概念是最重要的。掌握基本概念的定义固然重要,但会运用基本概念去分析问题和解决问题更加重要。所以,做习题的主要目的是掌握好概念,特别是同一个概念在不同题型中的具体反映,以深化对概念的理解。同时,学习本门课程不但要会做题,而且会解决一些基本的实验问题,也包括解决实际中的问题。做习题的目的是要考核自己掌握基本概念的正确性和准确性,以及是否会运用电子电路的基本分析方法。这些方法除了与电路基础课程中的方法有共同之处外,还有其特殊性。要学好《模拟电子技术》这门课,掌握电路基础课程是很重要的。

本书的章节按现行教材安排,每章中的内容分学习要点、重点难点、例题分析和自我测试四个部分。在学习要点中简明扼要地介绍了本章的主要内容,类似教学基本要求。在重点难点中对本章的内容进行了简要的介绍,有一部分对教材的内容进行了概述,也有的部分给予了总结,有些内容在一般教材中难于看到。考虑到同学们已经基本学习完本课程了,所以书中有的内容是前后联系在一起加以说明的。如果同学们还没有学完本课程,暂时看不懂,可以先跳过去,等过后再看。在例题分析和自我测试中,举了一些习题,同学们主要是借鉴,千万不要将一个例题孤立起来,否则越学越多。要通过例题巩固概念,分辨不同概念的差别和相似之处,要融会贯通,尤其要通过例题学会用基本概念解决问题的本领,要学会用某一个概念解决多个不同问题的本领,这样便会越学越自由,真正达到了少而精,虽少而底蕴坚实。书中还收集了一部分电子技术课程的试题,分类给出,供同学们参考。本书内容对于报考硕士研究生的同学也十分有益。

本书由哈尔滨工业大学电子学教研室的教师编写,参加编写工作的有蔡惟铮、王宇野、王淑娟、张辉、齐明、于泳等,由蔡惟铮任主编,王宇野任副主编。由于时间紧,一些素材未经实际验证,可能会有差错之处,望读者批评指正,不胜感谢。

编 者

2003年7月

内 容 简 介

本书是一本帮助学生学习《模拟电子技术》课程的辅助教材,共分 12 章。内容选取主要遵照教育部颁发的电子技术基础教学基本要求,以及近年来高校本课程的教学情况而确定的。每章由学习要点、重点难点、例题分析和自我测试四个部分组成。

本书可供本科生、报考硕士研究生的同学使用,对讲授本门课程的教师也有参考价值。

目 录

第 1 章 半导体器件基本知识	1
1.1 学习要点	1
1.2 重点难点	1
1.2.1 半导体的基础知识	1
1.2.2 二极管	2
1.2.3 双极型三极管	4
1.2.4 场效应三极管	6
1.3 例题分析	8
1.4 自我测试	14
第 2 章 基本放大电路	22
2.1 学习要点	22
2.2 重点难点	22
2.2.1 基本放大电路的组成及工作原理	22
2.2.2 静态分析	23
2.2.3 放大电路的性能指标	24
2.2.4 分析方法	24
2.2.5 电阻归算的概念	28
2.2.6 三种组态放大电路的比较	28
2.2.7 场效应放大电路	29
2.3 例题分析	31
2.4 自我测试	41
第 3 章 运算放大器组成单元电路	50
3.1 学习要点	50
3.2 重点难点	50
3.2.1 多级放大电路	50
3.2.2 差动放大电路	51
3.2.3 电流源电路	54
3.2.4 功率放大电路	55
3.3 例题分析	57
3.4 自我测试	64
第 4 章 运算放大器的线性应用	74
4.1 学习要点	74

4.2	重点难点	74
4.2.1	集成运算放大器	74
4.2.2	理想集成运放	75
4.2.3	集成运算放大器线性应用电路	76
4.3	例题分析	79
4.4	自我测试	84
第5章	负反馈放大电路	95
5.1	学习要点	95
5.2	重点难点	95
5.2.1	反馈的概念与反馈基本方程式	95
5.2.2	反馈的组态	97
5.2.3	四种负反馈类型的特性分析	98
5.3	例题分析	99
5.4	自我测试	107
第6章	放大电路的频率响应	117
6.1	学习要点	117
6.2	重点难点	117
6.2.1	频率响应的概念	117
6.2.2	频率响应的表达方式	117
6.2.3	三极管高频小信号模型	118
6.2.4	负反馈放大电路的稳定性	120
6.3	例题分析	121
6.4	自我测试	123
第7章	振荡器	131
7.1	学习要点	131
7.2	重点难点	131
7.2.1	自激振荡概述	131
7.2.2	RC 正弦波振荡器	132
7.2.3	LC 正弦波振荡器	134
7.2.4	石英晶体正弦波振荡器	137
7.3	例题分析	138
7.4	自我测试	141
第8章	有源滤波器	153
8.1	学习要点	153
8.2	重点难点	153
8.2.1	滤波器的分类	153
8.2.2	滤波器的功能	154
8.2.3	一阶有源 RC 滤波器	154
8.2.4	二阶有源滤波器	155

8.2.5	几种典型的滤波器	156
8.2.6	有源滤波器电路的分析要点	157
8.3	例题分析	158
8.4	自我测试	160
第9章	运算放大器的非线性应用	166
9.1	学习要点	166
9.2	重点难点	166
9.2.1	电压比较器	166
9.2.2	非正弦信号产生电路	166
9.3	例题分析	169
9.4	自我测试	172
第10章	模拟乘法器	182
10.1	学习要点	182
10.2	重点难点	182
10.2.1	模拟乘法器的基本原理	182
10.2.2	两种模拟乘法器电路构成及框图	183
10.2.3	集成乘法器	183
10.2.4	乘法器的应用	183
10.3	例题分析	185
10.4	自我测试	186
第11章	直流稳压电源	191
11.1	学习要点	191
11.2	重点难点	191
11.2.1	直流电源概述	191
11.2.2	整流电路	192
11.2.3	滤波电路	194
11.2.4	稳压电路的技术指标	198
11.2.5	稳压二极管稳压电路	199
11.2.6	串联型线性稳压电源	200
11.2.7	三端集成稳压器	201
11.2.8	串联式开关型稳压电源	203
11.3	例题分析	204
11.4	自我测试	208
第12章	试题点评	213
12.1	填空类试题	213
12.2	简答类试题	216
12.3	放大电路分析计算类试题	218
12.4	反馈类试题	222
12.5	运算放大器线性应用类试题	224

12.6	振荡电路类试题	228
12.7	运算放大器非线性应用类试题	229
12.8	滤波电路和模拟乘法器类试题	232
12.9	功率放大电路类试题	232
12.10	直流电源类试题	233

第 1 章 半导体器件基本知识

1.1 学习要点

- (1) 掌握本征半导体、杂质半导体的构成以及载流子等概念。
- (2) 掌握 PN 结的形成及其导电性等有关知识。
- (3) 熟练掌握二极管的结构、特性曲线和参数。
- (4) 掌握双极型晶体管的结构和工作原理以及三个电极电流的分配关系。
- (5) 熟练掌握双极型晶体管的外部特性曲线和主要参数。
- (6) 掌握场效应管的结构和工作原理。
- (7) 掌握场效应管的特性曲线和主要参数。
- (8) 掌握双极型晶体管和场效应晶体管的特点和它们的异同。

1.2 重点难点

1.2.1 半导体的基础知识

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。物体的导电能力是用电阻率来表示的,电阻率的单位是 $\Omega \cdot \text{cm}$,半导体的电阻率介于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。

化学成分纯净的半导体称为本征半导体,制造半导体器件的本征半导体应该是无缺陷的单晶体。

一、本征半导体

- (1) 当温度为绝对零度时,本征半导体中没有载流子,所以它不导电。
- (2) 当温度升高时,半导体原子最外层的价电子发生本征激发,产生两种载流子——自由电子和空穴,且它们总是成对出现,浓度相等,称为电子空穴对。
- (3) 本征激发产生的载流子浓度与温度有关,温度越高本征激发越强,产生的载流子越多。本征半导体导电具有热敏性、光敏性以及掺杂后导电能力明显增强的特性。

二、杂质半导体

1. 两种杂质半导体

在本征硅或锗中掺入微量五价元素就可得到 N 型半导体,N 型半导体也称为电子型半导体;在本征硅或锗中掺入微量三价元素就可以得到 P 型半导体,P 型半导体也称空穴型半导体。

2. 两种载流子

多数载流子由掺杂产生,少数载流子由本征激发产生。N 型半导体中多数载流子为自由电子,少数载流子为空穴;P 型半导体中多数载流子为空穴,少数载流子为自由电子。

多数载流子简称多子;少数载流子简称少子。

三、PN 结

1. PN 结的形成

P型和N型半导体通过一定工艺形成紧密地连接,两种不同类型的半导体中载流子因载流子浓度差→产生多子扩散→多子的扩散使晶格中的杂质离子形成内电场→内电场阻止多子进一步扩散、促使少子漂移。当扩散与漂移达到动态平衡时,交界面形成稳定的空间电荷区,即形成PN结。PN结也称为空间电荷区、耗尽层、内电场、位垒等。

2. PN 结的单向导电性

PN结最重要的电特性是单向导电性。PN结正偏(P接正,N接负),内电场削弱,耗尽层变窄,扩散运动加强,多子扩散运动形成的电流大,PN结导通,呈现的电阻小;PN结反偏,内电场增强,耗尽层变宽,扩散运动减弱,漂移运动加强,少子漂移运动形成的电流很小,PN结截止,电阻大。请注意反向电流是少子电流,在一定温度条件下,反向电流基本上不变,但反向电流随温度的增加而增加。

3. PN 结的温度效应

当温度升高时,PN结的反向电流,即少数载流子的漂移电流,迅速增加。大约每增加 10°C ,反向电流翻一番。PN结的正向压降随温度增加而减小,对于硅PN结大约为 $-2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

4. PN 结的电容效应

包括扩散电容 C_D 和势垒电容 C_B 。

扩散电容 C_D ——PN结正向导通时,多子扩散到对方区域后,在PN结边界上积累,形成一定的浓度分布。积累的电荷量随外加电压变化而变化,由此引起的电容效应。

势垒电容 C_B ——PN结的空间电荷区随外加反向电压而变化,因此存储在空间电荷区的电荷量随之变化,由此所等效的电容效应。

1.2.2 二极管

二极管由PN结加上引线和管壳组成,有点接触型、面接触型和平面型几种。

一、二极管的伏安特性

根据理论推导,二极管的伏安特性可用下式表示:

$$I = I_S(e^{U/U_T} - 1)$$

式中, I_S 为反向饱和电流; U 为二极管两端的电压降; $U_T = kT/q$ 称为温度电压当量, k 为玻耳兹曼常数, q 为电子电荷量, T 为热力学温度。当温度等于室温时(相当 $T = 300\text{K}$), 有 $U_T = 26\text{mV}$ 。二极管的伏安特性曲线如图 1.2.1 所示。

1. 正向特性

当正向电压小于开启电压 U_{th} (对硅管 $U_{th} \approx 0.5\text{V}$, 对锗管 $U_{th} \approx 0.2\text{V}$)时, 流过二极管的电流很小, $I \approx 0$; 当正向电压大于开启电压 U_{th} 后, 电压 U

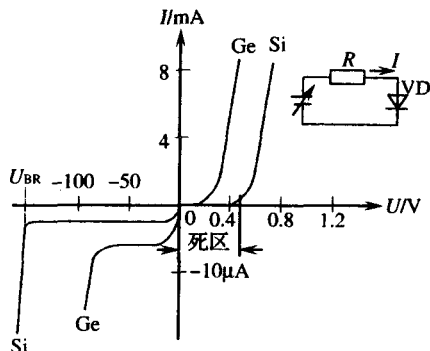


图 1.2.1 二极管的伏安特性曲线

稍有增加,电流 I 增加很大,或者说,在电流 I 较大时,二极管上的压降近似为一常数(对硅管 $U_D = 0.7V \sim 0.8V$,对锗管 $U_D = 0.3V \sim 0.4V$),即二极管在正向导通时,具有近似的稳压特性,利用这一特点可将二极管用于钳位。

2. 反向特性

起始段,反向电流随电压的增加而增加;在随后的很大范围内,电流基本保持不变,此电流即为二极管的反向饱和电流 I_S ;当反向电压达到一定值后,反向电流会急剧增加,此时二极管发生反向击穿(按击穿机理的不同,分为雪崩击穿和齐纳击穿)。击穿后,电流在很大范围内变化时,电压几乎不变,即击穿后的反相特性具有较好的稳压特性。

二、二极管的电路模型

二极管本身是非线性元件,在分析含二极管的电路时,常用某种模型代替,如图 1.2.2 所示。主要有:

- (1) 理想二极管:相当于开关,正向导通时,没有压降;反相截止时没有电流。
- (2) 理想二极管加电压源:即考虑二极管的正向压降,但正向压降视为固定值。
- (3) 折线化模型:当加入信号时考虑二极管两端的压降在某一固定值上作微小变化时所引起的电流变化。

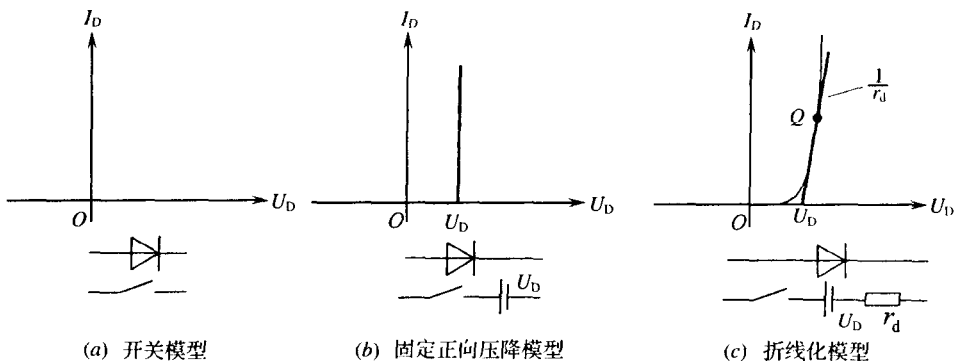


图 1.2.2 二极管的低频模型

三、二极管的主要参数

二极管的参数主要有:

最大整流电流 I_F ;

反向击穿电压 U_{BR} 和最大反向工作电压 U_{RM} ;

反向电流 I_R ;

正向压降 $U_F(U_D)$ 。

四、稳压管

利用硅二极管反向击穿特性而使二极管两端电压稳定的特殊二极管,工作中采取反向接法使之处于反向击穿状态。

其主要参数有稳定电压 U_Z ,最小稳定电流 I_{Zmin} ,最大耗散功率 P_{ZM} ,最大工作电流 I_{Zmax} ($P_{ZM} = U_Z \cdot I_{Zmax}$),动态电阻 r_Z 。动态电阻的表达式如下($\Delta U_Z, \Delta I_Z$ 见图 1.2.3):

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

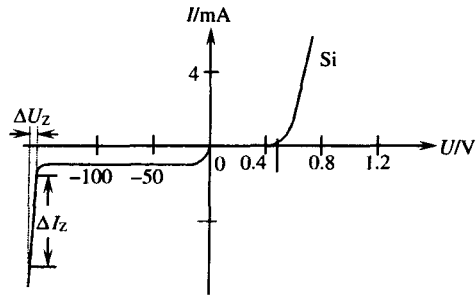


图 1.2.3 稳压管的特性及参数

1.2.3 双极型三极管

双极型半导体三极管(BJT)有电子和空穴两种载流子参与导电,是一种电流控制电流型(CCCS)器件。

一、结构和分类

双极型半导体三极管可以有两种类型,即 NPN 型和 PNP 型。它们都有两个 PN 结和三个电极,三个电极分别称为发射极(e)、基极(b)和集电极(c)。be 间是发射结,bc 间是集电结。三个电极连接的区域分别称为发射区、基区和集电区。双极型三极管其工艺特点为:基区极薄,且掺杂浓度低,发射区掺杂浓度高,集电区掺杂浓度低。

按照制作三极管所用材料的不同,三极管分为硅管和锗管。国标型号前两位如下:

锗管 PNP:3A---;锗管 NPN:3B---;

硅管 PNP:3C---;硅管 NPN:3D---。

后面的“---”由三部分组成,左侧是英文字母,代表三极管的种类;中间为数字序号;右侧为字母,表示同一种型号的三极管中不同的规格分类。

二、三极管的放大作用

为保证三极管工作在放大状态,应使其发射结正偏,集电结反偏。即对 NPN 型: $U_C > U_B > U_E$;对 PNP 型: $U_C < U_B < U_E$ 。

1. 载流子分配与控制关系

在放大条件下,由发射区发射的载流子只有极少数在基区被复合,绝大部分被集电区收集。其分配关系是:在基区中每复合一个载流子,就有 β 个载流子被集电区收集。该比例关系由三极管的结构决定,所以,控制 I_E 或 I_B ,就能控制 I_C ,即

$$I_C \approx \bar{\alpha} I_E$$

$$I_C \approx \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} I_B = \bar{\beta} I_B$$

2. 各极电流之间关系

共基极接法:

$$I_C = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO}$$

$$I_B = (1 - \bar{\alpha}) I_E - I_{CBO}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

共射极接法:

$$\begin{aligned} I_C &= \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \\ I_E &= (1 + \bar{\beta}) I_B + I_{CEO} \\ I_{CEO} &= (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \\ I_E &= I_C + I_B \end{aligned}$$

3. 电流放大系数

共基组态:

$$\text{直流 } \bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E}, \text{交流 } \alpha = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \right|_{U_{CE} = \text{const}}, \alpha \leq 1. \text{实际上, } \alpha \approx \bar{\alpha}$$

共射组态:

$$\text{直流 } \bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}, \text{交流 } \beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE} = \text{const}}, \beta \gg 1. \text{实际上, } \beta \approx \bar{\beta}$$

在放大电路中,通过改变 u_{BE} 去改变 i_B (共射) 或 i_E (共基), 由 Δi_B 或 Δi_E 产生 Δi_C , 再通过负载电阻 R'_L (R_L 开路时, $R'_L = R_C$), 把电流的控制和放大作用转化为电压放大作用, 产生 $\Delta u_O = \Delta i_C R'_L$.

共基组态:

$$\Delta u_{BE}(u_i) \longrightarrow \Delta i_E \xrightarrow{\alpha} \Delta i_C \xrightarrow{R'_L} \Delta i_C R'_L$$

共射组态:

$$\Delta u_{BE}(u_i) \longrightarrow \Delta i_B \xrightarrow{\beta} \Delta i_C \xrightarrow{R'_L} \Delta i_C R'_L$$

三、共射接法的特性曲线

输入特性曲线—— $i_B = f(u_{BE}) |_{u_{CE} = \text{const}}$

输出特性曲线—— $i_C = f(u_{CE}) |_{i_B = \text{const}}$

1. 输入特性曲线

输入特性曲线如图 1.2.4 所示。其中 $u_{CE} = 0V$ 的那一条相当于发射结的正向特性曲线。当 $u_{CE} \geq 1V$ 时, $u_{CB} = u_{CE} - u_{BE} > 0$, 集电结已进入反偏状态, 开始收集电子且基区复合减少, 特性曲线向右有些偏移, 但偏移不大。

2. 输出特性曲线

共发射极接法的输出特性曲线如图 1.2.5 所示, 在不超过集电极功耗和击穿电压的条件下, 输出特性曲线可以分为三个区域:

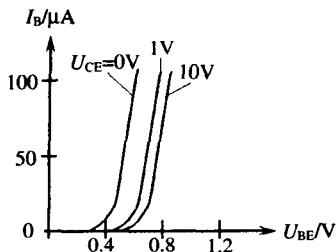


图 1.2.4 共发射极输入特性曲线图

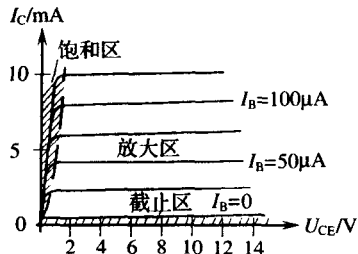


图 1.2.5 共发射极输出特性曲线

饱和区—— i_C 受 u_{CE} 显著控制的区域,该区域内 u_{CE} 的数值较小,此时发射结正偏,集电结正偏或反偏电压很小。对于小功率三极管, $U_{CES} = 0.3V \sim 0.5V$; 对于大功率三极管, $U_{CES} = 1V$ 左右。

截止区—— i_C 接近零的区域,相当 $i_B = 0$ 的曲线的下方。此时,发射结反偏,集电结反偏。

放大区—— i_C 平行于 u_{CE} 轴的区域,曲线基本平行等距。此时,发射结正偏,集电结反偏。在放大区, i_C 几乎与 u_{CE} 无关(恒流),而仅与 I_B 有关(受控)。

四、主要参数

三极管的参数主要分为极限参数、直流参数和交流参数三类。三极管正常工作时不能超过极限参数;直流参数也称静态参数,交流参数也称动态参数,它们都表明三极管能够达到的技术指标数值。电流放大系数、特征频率、各种极限参数及反向电流是三极管最常用的几种参数:

电流放大系数 β 与 α , $\bar{\beta}$ 与 $\bar{\alpha}$;

极限参数 I_{CM} 、 P_{CM} 和 $U_{(BR)CEO}$;

极间反向电流 I_{CBO} 与 I_{CEO} ;

特征频率 f_T 、 f_α 、 f_β 。

1.2.4 场效应三极管

一、场效应管的特点

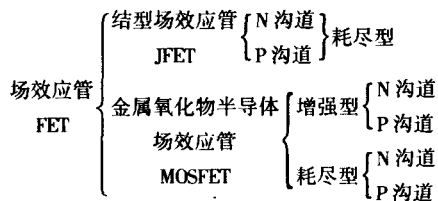
(1) 为单极型器件,仅一种载流子(多子)参与导电,热稳定性好。

(2) 场效应管为电压控制电流型器件(VCCS)。它通过栅源电压变化来控制沟道宽度,改变漏极电流;栅极输入电阻极大。

在了解了场效应管的特点,画出场效应管放大电路微变等效电路以后,实际上就是一个解电路的问题。

(3) 场效应管基本放大电路的偏置有分压偏置和自给偏压两种方式。对于耗尽型场效应管基本放大电路,可以采用分压偏置和自给偏压;对于增强型场效应管基本放大电路只能采用分压偏置,因为增强型场效应管在 $U_{GS} = 0$ 时, $I_D = 0$,无法通过自给建立偏置。

二、场效应管的分类



三、场效应管的符号

各种场效应管的符号如表 1.1 所列。结型场效应管栅极的箭头,对于 N 沟道指向里,因为沟道是 N 型的,所以栅极必须是 P 型的,箭头代表 PN 结的方向。

对于 MOSFET,栅极处有两条平行线,表示栅极是绝缘的。对于耗尽型场效应管,漏源是连在一起的,说明 $U_{GS} = 0$ 时, $I_D \neq 0$;对于增强型场效应管,漏源不连在一起,是断开

的,说明 $U_{GS} = 0$ 时, $I_D = 0$ 。

表 1.1 场效应管的符号

沟道		P	N
结型	耗尽型		
绝缘栅型	耗尽型		
	增强型		

四、各种场效应管的特性曲线

1. 转移特性

$$i_D = f(u_{GS}) |_{u_{DS} = \text{const}}$$

因为场效应管没有栅极电流,所以没有输入特性曲线,而采用转移特性曲线,见表 1.2。

2. 输出特性

$$i_D = f(u_{DS}) |_{u_{GS} = \text{const}}$$

场效应管的漏极输出特性曲线与双极型三极管的输出特性曲线相对应,见表 1.3。

表 1.2 场效应三极管的转移特性曲线

表 1.3 场效应三极管的输出特性曲线

沟道		P	N	沟道		P	N
结型	耗尽型			结型	耗尽型		
绝缘栅型	耗尽型			绝缘栅型	耗尽型		
	增强型				增强型	增强型	