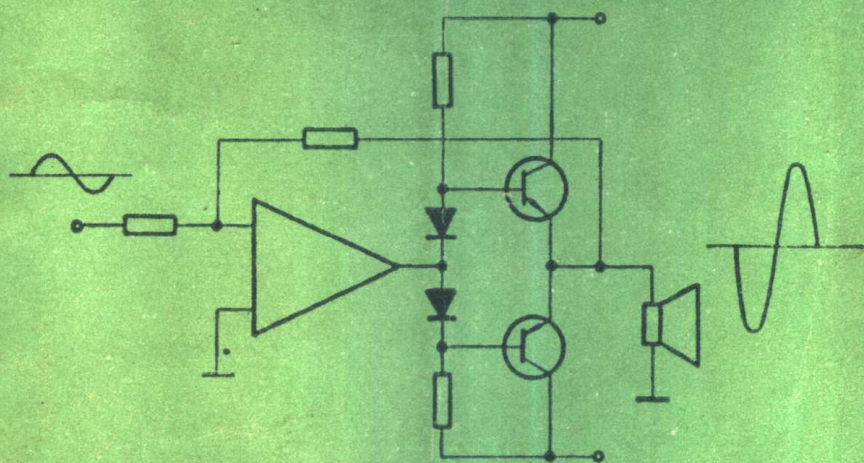


王世昌编

电子线路 辅导和题选



DIANZI XIANLU
FUDAO HE TIXUAN

上海科学技术文献出版社

电子线路辅导和题选

王世昌 编

上海科学技术文献出版社

电子线路辅导和题选

王世昌 编

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路2号)

新华书店经销

上海市印刷三厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 15.25 字数 368,000

1989年1月第1版 1989年1月第1次印刷

印数: 1—4,600

ISBN 7-80513-231-3/T·87

定价: 5.40 元

《科技新书目》176-279

前 言

本书是根据中等专业学校电类专业《模拟电子技术基础》课程的教学大纲而编写的，在编写过程中还参照了高等工业院校非电专业《电子技术基础》课程教学大纲的模拟电路部分，是一本配合课堂教学的辅导读物。

作为一本辅导书，应具有补充性、针对性和指导性。根据这个原则，本书取材是以下面三个方面作为基本内容：

1. 内容提要。对各章的基本教学内容进行扼要的总结、归纳和比较，便于学生在复习时掌握重点，并使他们从各部分内容之间的有机联系上把握知识的总体结构。同时，带结论性的语句可成为教师命题的基体。

2. 难点释疑。本书选取了个33个具有一定代表性的疑难问题，进行深入细致的解释和分析，以使读者从中得到启迪，开拓思路。

3. 解题分析。对于各种基本题型，不仅给出例题，而且介绍解题要领，以揭示其中的规律和方法，收到触类旁通的功效。

此外，从国内外有关书刊上摘选、改编了585道练习题(大题)，其中包括目前盛行的作为标准化试题主要形式的选择题222道(小题)，为学生反复练习和教师命题提供了丰富的题源。选题时注重概念性、浅显性、实用性和趣味性，力忌繁琐的计算、全套的设计和过于复杂的电路分析。带“*”号的题供学有余力的读者选用。每章末尾给出答案并对部分难题给出提示，以供参考。

为便于学生进行图解练习和教师批改作业，将习题中给出的所有特性曲线和部分波形图附在书末的附页上，解题时可将其剪下贴在本子上。

复旦大学电子工程系副教授蓝鸿翔先生审阅了本书的基本内容。

本书主要适用于中等专业学校电类专业和高等工业院校、电视大学、职工大学等非电类专业。也适用于中等专业学校非电类专业，技工学校和中高级技工培训的相关课程。

由于本人水平有限，书中不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

作 者

1987年9月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管	1
一、内容提要.....	1
二、难点释疑.....	7
三、解题分析.....	16
练习题.....	26
答案和提示.....	47
第二章 放大器基础	52
一、内容提要.....	52
二、难点释疑.....	63
三、解题分析.....	78
练习题.....	99
答案和提示.....	155
第三章 放大器中的负反馈	167
一、内容提要.....	167
二、难点释疑.....	172
三、解题分析.....	189
练习题.....	198
答案和提示.....	228
第四章 功率放大器	235
一、内容提要.....	235
二、难点释疑.....	237
三、解题分析.....	247
练习题.....	254

答案和提示	271
第五章 直流放大器及其应用电路	275
一、内容提要	275
二、难点释疑	279
三、解题分析	293
练习题	300
答案和提示	328
第六章 正弦波振荡器	336
一、内容提要	336
二、难点释疑	340
三、解题分析	347
练习题	355
答案和提示	378
第七章 直流稳压电源	376
一、内容提要	376
二、难点释疑	382
三、解题分析	386
练习题	397
答案和提示	415
第八章 场效应管电路	420
一、内容提要	420
二、难点释疑	424
三、解题分析	429
练习题	440
答案和提示	457
主要参考书	462
附图 图解练习用特性曲线及波形图	464

第一章 半导体二极管和三极管

一、内 容 提 要

1. 关于半导体的基本知识

导电能力介于导体和绝缘体之间的物体称为半导体。常用的半导体有锗、硅和砷化镓等。

半导体中的载流子有两种，一种是带正电的空穴；一种是带负电的电子。

不含杂质的半导体即纯净半导体称为本征型半导体。在本征型半导体中，电子和空穴这两种载流子在数量上相等。

主要依靠空穴导电的半导体称为P型半导体。在本征型半导体中掺入硼(B)、铝(Al)、镓(In)等三价元素可得到P型半导体。在P型半导体中，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。

主要依靠电子导电的半导体称为N型半导体。在本征型半导体中掺入磷(P)、砷(As)、锑(Sb)等五价元素可得到N型半导体。在N型半导体中，电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

半导体中载流子的定向运动有扩散和漂移这两种基本形式。漂移运动由电场引起，沿电场力的方向进行；扩散运动由载流子的浓度梯度引起，沿浓度减小的方向进行。

2. PN结和半导体二极管

在P型半导体和N型半导体交界面附近的一个特殊的薄层称为PN结。

在没有外加电压时，PN结中载流子的扩散运动和漂移运动

达到动态平衡,所以通过 PN 结的总电流为零。

若 PN 结的 P 区接电源的正极, N 区接电源的负极,则称为正向连接或正向偏置(简称正偏),反之称为反向连接或反向偏置(简称反偏)。

当 PN 结加正向电压时,阻挡层的自建电场被削弱,使载流子的扩散运动占优势,形成较大的正向电流。

当 PN 结加反向电压时,阻挡层的自建电场被增强,使载流子的漂移运动占优势,形成极小的反向电流。

PN 结只在正向连接时导电,反向连接时几乎不导电,这种特性称为单向导电特性。

单向导电特性是 PN 结的基本特性。

半导体二极管的核心是 PN 结,所以单向导电特性也是二极管的基本特性。

按结构分类,半导体二极管有点接触型和面接触型两种。前者由于结面积小,故结电容也小,可在很高的频率下工作,但不能经受大电流。后者由于结面积大,能通过大电流,但由于结电容大,不宜在高频情况下运用。

半导体二极管的伏安特性一般分为正向特性、反向特性和反向击穿特性三部分。

锗二极管的死区电压约为 0.1 V,正向压降一般在 0.2~0.3 V;硅二极管的死区电压约为 0.5 V,正向压降一般在 0.6~0.8 V。

硅二极管的反向电流一般要比锗二极管的小得多。

通常,温度每升高 10℃,半导体二极管的反向饱和电流约增加一倍。

长时间通过二极管的正向平均电流的最大允许值称为最大整流电流,记为 I_{FM} 。如果实际的整流电流超过 I_{FM} ,则二极管

过热甚至烧坏。

最高反向工作电压是指允许加在二极管上的反向电压峰值。

二极管两端所加电压与通过它的电流之比值，称为它的直流电阻。用式子表示即为

$$R_D = \frac{u_D}{i_D} \quad (1-1)$$

在某个工作点附近，二极管两端电压的变化量与相应的电流变化量之比值，称为它的交流电阻或动态电阻。用式子表示即为

$$r_D = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \quad (1-2)$$

二极管的正向电阻越小越好，反向电阻越大越好。理想二极管的正向电阻为零，反向电阻趋于无穷大。

稳压管是利用二极管的反向击穿特性工作的。

稳压二极管的主要参数有稳定电压 U_Z 、稳定电流 I_Z 、最大稳定电流 I_{ZM} 、最大允许耗散功率 P_{ZM} 、动态电阻 r_Z 、电压温度系数 α_{TV} 等。

8. 半导体三极管

半导体三极管（简称晶体管）的三个电极分别称为发射极、基极和集电极。管内半导体芯片上与此相应的有三个区：发射区、基区和集电区。这三个区组成两个 PN 结：发射结和集电结。

按管内芯片中各区导电类型的排列顺序分类，晶体管有 PNP 型和 NPN 型两种。二者对应的工作电压极性和电极电流方向都相反，如图 1-1 所示。

晶体管在用作放大时，应该外加工作电压，通常使其发射结正偏、集电结反偏。为此，三个电极的电位应该满足一定的关

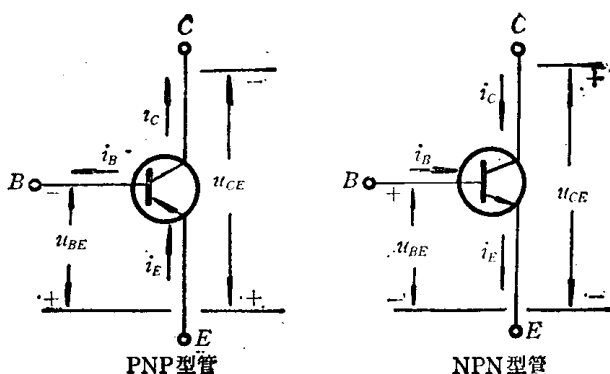


图 1-1 晶体管工作电压的极性和电极电流的方向

系,对于 PNP 型管,这个关系可表示为

$$u_E > u_B > u_C \quad (1-3)$$

对于 NPN 型管,这个关系可表示为

$$u_E < u_B < u_C \quad (1-4)$$

当处在放大状态时,晶体管内部少数载流子的输运可分三个过程:由发射区向基区注入;在基区扩散和复合;被集电区收集。

在一般情况下,晶体管的三个电极电流和三个电极电压满足以下两个基本关系:

$$i_E = i_B + i_C \quad (1-5)$$

$$u_{CE} = u_{CB} + u_{BE} \quad (1-6)$$

只要晶体管处在放大状态,在数量上比较其三个电极电流,有

$$i_B \ll i_C, i_E, \quad i_C \approx i_E \quad (1-7)$$

若比较三个电极电流的变化量,则

$$\Delta i_B \ll \Delta i_C, \Delta i_E, \quad \Delta i_C \approx \Delta i_E \quad (1-8)$$

所以,如果把基极电流作为输入电流,把集电极电流或者发射极

电流作为输出电流,则晶体管具有电流放大作用。

晶体管是一种电流控制器件,放大电流是它的基本特性。

晶体管处在放大状态时,其主要的电流公式除了(1-5)式,还有以下几个:

$$i_C = \bar{\beta} i_B + I_{CEO} \quad (1-9)$$

$$\Delta i_C = \beta \Delta i_B \quad (1-10)$$

$$\beta \approx \bar{\beta} \quad (1-11)$$

$$I_{CEO} = (\bar{\beta} + 1) I_{CBO} \quad (1-12)$$

按三个电极在输入回路和输出回路中的归属,具体地说,根据哪一个电极在这两个回路所共有,晶体管有共发射极、共基极和共集电极三种基本接法。

晶体管共发射极输入特性曲线,以发射极电压 u_{BE} 为自变量、基极电流 i_B 为因变量、集电极电压 u_{CE} 为参变量。共发射极输出特性曲线,则以集电极电压 u_{CE} 为自变量、集电极电流 i_C 为因变量、基极电流 i_B 为参变量。

晶体管共发射极输入特性曲线,形同 PN 结伏安特性曲线。所以,发射结的正向压降一般变化不大,锗管在 0.2~0.3 V,硅管在 0.6~0.8 V。

共发射极输出特性曲线可分为截止、放大、饱和三个区,这三个区分别对应于晶体管的截止、放大、饱和三种状态。各种状态的主要特点见表 1-1。

晶体管的主要参数有 β 、 I_{CEO} 、 BU_{CEO} 、 P_{CM} 等,现将它们的定义、测试条件和对管子性能的影响等内容列在表 1-2 中。

在共发射极输出特性曲线的放大区中,由 I_{CM} 、 P_{CM} 、和 BU_{CEO} 这三个极限参数,可定出一个允许工作区。

温度每升高 10°C 左右,晶体管的 I_{CBO} 就增加一倍。

在室温范围内,晶体管的 β 随温度升高而增大。

表 1-1 晶体管三种状态的特点

晶体管的状态	PN 结的偏置情况		电流、电压的变化特征	电流、电压的数量特征	放大能力
	发射结	集电结			
截止	① 反偏, ② 正偏, 但正向电压小于死区电压	反偏	电压变, 电流基本不变(近似为零)	电流极小	无
放大	正偏, 且正向电压大于死区电压	反偏	① u_{ce} 变, i_o 基本不变 ② i_b 小变, i_o 大变	不 定	强
饱和	同 上	正偏	i_b 变, i_o 基本不变	电压很小	弱, 甚至无

表 1-2 晶体管的主要参数

类别	符号	定 义	测试条件	对管子性能的影响	相互关系
电流放大系数	$\bar{\beta}$	$\bar{\beta} = \frac{i_o - I_{cso}}{i_b}$	U_{ce}, I_o	其值太小, 则管子放大能力差; 其值太大, 则管子工作稳定性差	$\beta \approx \bar{\beta}$
	β	$\beta = \frac{\Delta i_o}{\Delta i_b}$	U_{ce}, I_c		
极间反向电流	I_{cso}	发射极开路时集电结的反向电流	U_{bo}	其值越大, 则管子的工作稳定性越差	$I_{cso} = (\bar{\beta} + 1) I_{cbo}$
	I_{cbo}	基极开路时, 集电极与发射极间的反向电流	U_{cb}		
极限参数	I_{cm}	β 下降到允许值时的最大集电极电流		若 $i_o > I_{cm}$, 则管子放大能力很差	
	BU_{cbo}	基极开路时, 集电极与发射极间的反向击穿电压	I_o	若 $ u_{cb} > BU_{cbo}$, 则管子击穿	
	P_{cm}	结温不超过允许值时的最大集电极耗散功率		若 P_o, P_{cm} 则管子过热甚至烧坏	

晶体管发射结正向压降 U_{BE} 的温度系数约为 $-2.4 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。

半导体二极管和三极管型号的第二部分，通常用字母表示所用的半导体材料及其导电类型，各字母的意义如表 1-3 所示。

表 1-3 半导体管型号中第一个字母的意义

字 母	二 极 管	三 极 管
A	N 型锗	PNP 型锗
B	P 型锗	NPN 型锗
C	N 型硅	PNP 型硅
D	P 型硅	NPN 型硅

二、难 点 释 疑

1. 二极管的单向导电特性和伏安特性有什么关系？

单向导电特性和伏安特性都是用来描述二极管导电性能的。

二极管的种类繁多，各种管子的伏安特性不尽相同，但单向导电却是它们的共同属性。二极管的用途十分广泛，但大多是利用单向导电特性实现的。由此可见，通过单向导电特性，把二极管伏安特性中最具本质的内容给概括和抽象出来了。

然而在许多场合，需要全面、深入、细致地分析二极管，单向导电特性就显得过于粗糙甚至于不严格了。这时要用到伏安特性，因为只有它才能描述二极管电流随电压变化而变化的全貌。

例如，由伏安特性可知，二极管在正向电压小于死区电压时并不导通，在反向电压（指绝对值，下同）大于击穿电压时也并不

截止,如图 1-2 所示。可见,单向导电特性是有条件的,这个条件就是:正向电压大于死区电压,反向电压小于击穿电压。

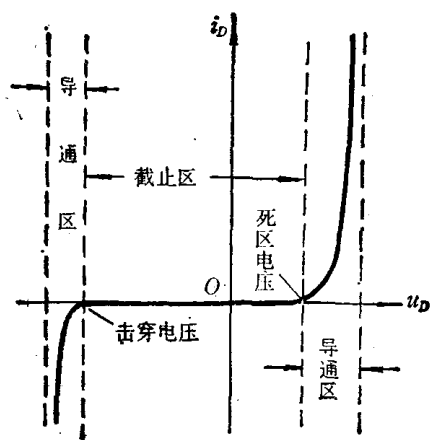


图 1-2 二极管的伏安特性

又如,单向导电特性是通过比较二极管正、反向导电能力后得出的,是一个带有相对性的概念。如果只看正向,二极管的正向电阻并不等于零。管子的种类不同,工作电压不同,正向电阻的大小可以有较大的差别。同样,如果只看反向,漏电流小的在 $0.1\mu\text{A}$ 以下,大的可达几百微安甚至几毫安,因管子种类而异。所有这些,都只能从具体的伏安特性得到反映。

2. 二极管的直流电阻 R_D 和交流电阻 r_D 有什么关系?

直流电阻和交流电阻都用来表征二极管的导电能力。直流电阻和工作点密切相关;在特性曲线的非线性段,交流电阻也和工作点有明显的关系。从单向导电特性考虑,无论直流电阻和交流电阻,正向时阻值越小越好,反向时阻值越大越好。

但 r_D 涉及的电压、电流都是变化量(包括交流量),而 R_D 涉

及的仅是电压、电流本身。这一点从它们的定义式(1-1)和(1-2)看得很清楚。

工作点一经确定, R_D 随之确定。但 r_D 如果利用(1-2)式求解, 它还跟 Δu_D 和 Δi_D 取值的大小有关。如图 1-3 所示, 当电压、电流在 A, B 两点间变化时, r_D 等于直线 AB 斜率的倒数; 当电压、电流在 A', B' 两点间变化时, $r_{D'}$ 等于直接 $A'B'$ 斜率的倒数。由于两个斜率不等, 所以 r_D 和 $r_{D'}$ 也不等。

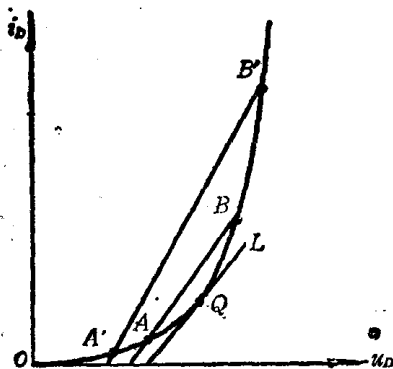


图 1-3 r_D 与 $\Delta u_D, \Delta i_D$ 的取值有关

显然, A, B 两点离 Q 点越近, 即 Δu_D 和 Δi_D 越小, 求出的 r_D 就越能确切地反映 Q 点的导电能力。可见, 用 Q 点的导数来表示该点导电能力最确切。这样,

$$r_D = \left. \frac{du_D}{di_D} \right|_{u_D=U_D} \quad (1-13)$$

U_D 是 Q 点的电压。 r_D 的几何意义是输入特性曲线上过 Q 点的切线的斜率的倒数。例如在图 1-3 中, r_D 就等于切线 L 的斜率的倒数。

工作点一旦给定, 过该点的切线只有一条, 所以由(1-13)式求出的 r_D 也是完全确定的。

根据(1-13)式, r_D 应该是二极管电压微变量与电流微变量

的比值。这个定义比由(1-2)式给出的更为严格。

在利用(1-13)式求出的 r_D 进行计算时, Δu_D (或 Δi_D) 不能取得太大, 以免计算值和实际值之间的误差太大。例如在图1-4中, 对于给定的 Δu_D , 利用 r_D 计算出的电流变化量是 Δi_D , 而实际值却是 $\Delta i_D'$, 二者的误差是 $(\Delta i_D' - \Delta i_D)$ 。 Δu_D 越大, 则该误差越大。这就是说, 用 r_D 进行计算只适用于小信号, 这是由二极管的非线性所决定的。

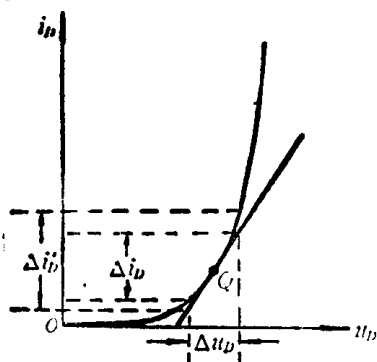


图 1-4 Δu_D 给定时计算值 Δi_D 和实际值 $\Delta i_D'$ 的误差

8. 二极管的最大整流电流 I_{DM} 为何要用平均值表示?

I_{DM} 是个极限参数, 它与二极管的热效应相联系。

我们知道, 电流流过电阻器也要产生热效应, 其强弱取决于电压、电流的有效值。那么二极管中的热效应为什么又取决于电流的平均值呢?

热效应的强弱归根结底要取决于耗散功率。对于电阻器, 电流的波形与电压相似, 如图1-5(a)所示。在数量上, 两者的关系符合欧姆定律:

$$u_R = i_R R$$

所以耗散功率

$$P_R = \frac{1}{T} \int_0^T u_R i_R dt = R \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_R^2 dt = R I_R^2$$