

# 电子技术基础学习指导

【数字电路部分】

阎 石 编

辽宁科学技术出版社



电子技术基础学习指导  
Dianzi Jishu Jichu Xuexi Zhidao  
(数字电路部分)

阎石 编

---

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市南京街9段1里2号)  
辽宁省广播电视大学发行 辽宁省机械研究院印刷厂印刷  
开本: 787×1092 1/32 印张: 6 3/4 字数: 150,000  
1985年8月第1版 1985年8月第1次印刷  
印数: 1—50,000

---

书号: 15288·184 定价: 1.35元  
(委托出版)

## 内 容 简 介

本书是为配合中央电大84级数字电子技术基础的教学而编写的辅助教材。该书是作者在总结中央电大79、80、82级教学经验的基础上,以若干专题的形式写成的。其中包括半导体器件基本知识、门电路、逻辑代数基础、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、数模与模数转换各部分的有关问题,并附有84级数字电子技术基础的教学大纲以及历届中央电大数字电子技术基础课程期末考试和补考的试题和标准答案。

本书也可供普通高等院校师生参考。

## 前 言

自从一九八一年我应聘在中央广播电视大学讲授《数字电子技术基础》课程以来,不断收到各地电大的同学、辅导老师以及一些普通工科院校同学的来信,要求解答他们在学习中所遇到的一些问题。但由于时间所限,未能逐一函复,至今深感愧疚。

现在,针对以往同学们在学习这门课程时容易发生的问题以及需要强调说明的一些重要概念和方法,写成这本小册子,供今后学习《数字电子技术基础》的同学们参考。

因为是采取若干独立的专题形式编写的,所以它不是一本系统的教材,而只能作为《数字电子技术基础》(清华大学电子学教研组编阎石主编)和《数字电子技术基础简明教程》(清华大学电子学教研组编)两套教科书的辅助教材。

所讲的问题当中既有属于本课基本要求的内容,也有超出基本要求的东西。在属于非基本要求部分的标题上,都标有\*号。之所以这样取材,是期望本书对不同学习程度的同学,乃至有些辅导老师们均能有些帮助。

由于成书仓促,疏漏之处恐难避免,尚盼读者批评指正。

一九八五年春节于清华

# 目 录

## 前 言

### 第一部分 半导体器件的基本知识

- 1.1 半导体二极管的外特性与工程近似 ..... 1
- 1.2 三极管三个工作区的条件与工作特点 ..... 4
- 1.3 为什么把PN结短接时不产生回路电流? ..... 6
- 1.4 为什么结型场效应管在预夹断后仍有漏极  
    电流流过? ..... 9
- 思考题与练习 ..... 11

### 第二部分 门电路

- \*2.1 集成电路的分类 ..... 14
- 2.2 TTL 电路中的多发射极三极管  
    工作状态的分析 ..... 18
- 2.3 TTL 电路外特性应用举例 ..... 31
- \*2.4 分立元件门电路中输入端二极管工作  
    状态的分析计算 ..... 36
- \*2.5 反相器抗干扰能力的定量计算 ..... 40
- 思考题与练习 ..... 45

### 第三部分 逻辑代数基础

- 3.1 卡诺图与逻辑表达式的关系 ..... 48
- 3.2 图形(卡诺图)化简法的步骤 ..... 53
- 3.3 约束项及其在逻辑函数化简中的应用 ..... 57
- 思考题与练习 ..... 66

## 第四部分 组合逻辑电路

- 4.1 分析和设计组合逻辑电路的一般步骤.....68
- 4.2 逻辑抽象的方法.....74
- \*4.3 组合逻辑电路设计中有关逻辑函数化简的几个问题.....77
- \*4.4 利用中规模集成电路构成组合逻辑电路的方法..... 83
- 思考题与练习..... 92

## 第五部分 触发器及时序逻辑电路

- 5.1 触发器的逻辑功能和结构.....94
- 5.2 时序电路的一般形式与特例..... 108
- 5.3 时序逻辑电路分析、设计的一般方法..... 111
- \*5.4 时序逻辑电路设计中的几个问题..... 120
- 思考题与练习 ..... 127

## 第六部分 脉冲信号的产生和整形

- 6.1 RC 电路的脉冲工作特性 ..... 133
- 6.2 脉冲电路的波形分析法..... 139
- \*6.3 关于充、放电时间的计算公式..... 146
- 思考题与练习 ..... 148

## 第七部分 数模与模数转换

- 7.1 D/A、A/D 转换器的精度与速度.....151
- \*7.2 集成单元D/A 转换器应用举例.....155
- 思考题与练习.....160
- 《数字电子技术基础》教学大纲(草案).....162
- 中央广播电视大学历届《数字电子技术基础》试题及参考答案.....163

## 第一部分 半导体器件的基本知识

本章内容的重点在于介绍半导体二极管、三极管的工作原理和外特性。

所谓外特性,系指从器件的外部引出端(包括输入端和输出端)看进去的电压——电流关系。在电路分析课程中,也有时把它称为伏——安特性。以后我们将会看到,这些外特性始终是我们正确使用器件的基本依据。

器件内部电荷的运动过程不是这一章的重点。虽然教科书中间或也谈到一些器件内部电荷运动的问题,但其目的绝非引导同学们去钻研这些微观过程,而仅仅是为了帮助大家更好地理解半导体器件的外特性而已。

### 1.1 半导体二极管的外特性与工程近似

#### (一) 半导体二极管的外特性

根据半导体物理中的理论分析,加到二极管两端的电压  $V$  和流过其中的电流  $I$  之间的关系可以用PN结方程(或称做二极管方程)表示,即

$$I = I_s(e^{V/V_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中  $V_T = \frac{kT}{q}$ ,  $k$  为波尔兹曼常数,  $q$  为电子电荷量,  $T$  为绝对温度。在常温条件下(即结温为  $27^\circ\text{C}$  时,  $T = 300^\circ\text{K}$ ), 得到  $V_T \approx 0.026\text{V} = 26\text{mV}$ 。  $I_s$  称为反向饱和电流, 它与管子

的材料、工艺、尺寸有关，对每一管子而言，都是一个定值。

这个公式的推导不是本课程所要求的内容，我们在这里是把它作为一个结论直接引用的。

根据式(1-1)所描绘出的特性曲线，如图1-1所示。式(1-1)及图1-1的曲线都表明，二极管两端的电压和流过的电流之间是非线性关系，所以二极管是一个非线性器件，或者说它具有非线性内阻。

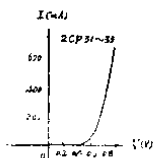


图1-1

此外，还需要补充说明几点：

①由于PN结表面的漏电阻以及半导体本身的电阻等原因，实际的二极管特性曲线和理论曲线会略有差异。

②即使同一型号、同一厂家生产的二极管，在特性上也不可能每只都一样。我们把这一现象叫做二极管特性的分散性。这是由于材料和工艺不可能绝对均一所造成的。在将几只二极管联合使用时，必须考虑到这一分散性。

③反向饱和电流受温度影响较大。当反向电流对电路的工作影响不可忽视时，应该注意温度的影响。

## (二) 二极管特性的工程近似

由式(1-1)所给出的二极管外特性，是一个比较复杂的非线性关系，直接用它来分析工作情况显然是不方便的。为此，有必要采用工程近似的方法，将二极管的电压与电流之间的关系简化。常用的工程近似方法有以下几种：

①在模拟电子电路中，外加正向电压时用指数函数近似表示，当外加的正向电压 $V \gg V_T$ 时，因 $e^{V/V_T} \gg 1$ ，故式(1-1)可近似为



$$I \approx I_S e^{V/V_T} \quad (1-1)'$$

亦即随 $V$ 的增加， $I$ 将按指数曲线迅速上升。例如当 $V = 0.2V$ 时， $e^{0.20/0.026} = 2.19 \times 10^3 \gg 1$ ，所以用式(1-1)'代替式(1-1)而带来的误差已十分微小。

在模拟电子电路中，根据式(1-1)'，可以利用二极管和线性集成运算放大器产生近似的对数函数和指数函数。

当加到二极管两端的电压为反向电压时，若 $|V/V_T| \gg 1$ ，则 $e^{-V/V_T} \ll 1$ ，故式(1-1)可近似为

$$I \approx -I_S$$

这就是说，当反向电压较大以后，随着电压绝对值的增加 $I$ 迅速饱和，饱和后的大小就等于 $I_S$ 。因此，我们把 $I_S$ 叫做反向饱和电流。

②在数字电路与整流电路中，把二极管近似地看成一个开关元件。根据外接电路的不同情况，经常采用的近似方法有三种：

(a) 当外加的正向电压较低，外接电阻又较小时，二极管正向导通的压降和导通电阻均不能忽略，这时可以用图1-2(a)所示的折线去近似二极管的特性曲线。相对应的等效电路如图1-2(a)。在分析小功率、低压整流电路时，可以利用这种近似方法。

(b) 当外加正向电压较低而外接电阻较大时，二极管的正向导通电压不能忽略，但正向导通电阻可以忽略不计，故可用一条垂直于横轴的直线代替，如图1-2(b)所示。亦即可将二极管正向导通时看作一个恒定压降 $V_D$ 。

(c) 当外加正向电压很高( $V \gg V_D$ )，同时外接电阻又很大时，二极管的正向导通电阻与导通压降均可忽略，因此可用图1-2(c)所示的与座标轴重合的理想开关特性来近似，

相应的等效电路可以画成一个理想开关。

因为反向饱和电流 $I_S$ 绝对值很小，所以在(a)、(b)、(c)三种情况下，都把外加反向电压时的二极管视为开路。

由此可知，究竟取哪一种办法来近似二极管的特性，要视外接电路的具体条件而定，不能绝对化。

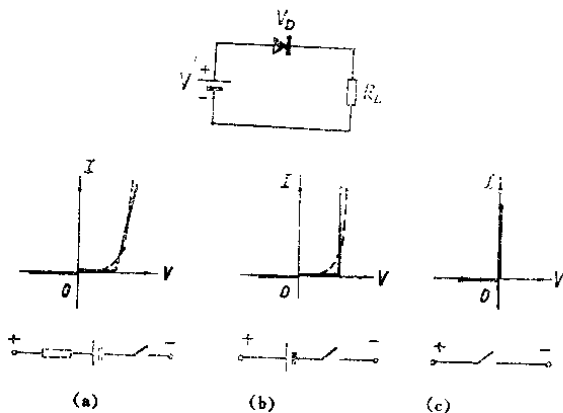


图1-2

当我们说“二极管导通时相当于0.7V的压降”时，只有工作在图1-1所示的特性曲线的上翘部分时，这句话才是对的。

## 1.2 三极管三个工作区的条件与工作特点

为了使三极管得以正常工作，通常情况下需要在基极回路加以适当的偏置电压，而在集电极回路接入电源和负载电阻，如图1-3所示。而三极管的工作状态，是由基极回路、集电极回路的外加电压以及负载电阻所决定的。归纳起来，

三极管所处的工作状态不外乎以下三种：

### (一) 截止状态

截止的条件是：

$$V_{BE} < 0.5V$$

在实际电路中，为了实现可靠截止，总是取  $V_{BE} \leq 0V$ 。

截止区的工作特点是：

$$I_B \approx 0 \quad I_C \approx 0$$

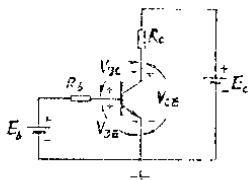


图1-3

因此，若把三极管的C-E之间看作是一个开关的话，这时相当于开关断开一样，如图1-4所示。

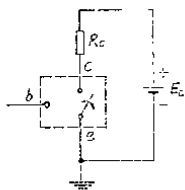


图1-4

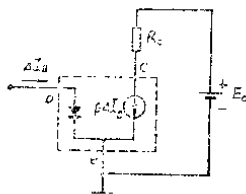


图1-5

### (二) 放大状态

放大的条件是：

$$V_{BE} > 0.5V \quad V_{BC} < 0V$$

也就是要求发射结电压 ( $V_{BE}$ ) 是正向偏置，而且  $V_{BE}$  的大小应大于PN结的开启电压，工作在特性的线性区；与此同时，集电结是反向偏置。

放大区的工作特点是： $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$

亦即  $I_C$  的变化受  $I_B$  变化的控制，而且两者基本保持  $\beta$  的比例关

系。这时三极管的等效电路可以画成图1-5中虚线框内的形式。

(称为简化的三极管等效电路，是三极管等效电路中最简单的一种。)

### (三) 饱和状态

饱和的条件是：

$$I_B \geq I_{BS} = \frac{E_C}{\beta R_C}$$

其中 $I_{BS}$ 称基极临界饱和电流。此时 $E_C$ 全部降落在 $R_C$ 上， $I_C$ 不再随 $I_B$ 而增加。

饱和区的工作特点是：

$V_{CE} \approx 0V$ ， $I_C$ 不随 $I_B$ 继续增加。

如果我们仍将三极管的C-E间看作是一个开关，则这时就相当于开关接通一样，如图1-6所示。

在数字电路中，我们利用三极管的截止和饱和这两种状态分别表示逻辑1（或0）和0（或1）状态。而在线性放大电路中，则必须使三极管工作在放大状态，这样才可能在集电极回路中获得一个随基极回路输入信号的变化而按比例变化的输出信号。

## 1.3为什么把PN结短接时不产生回路电流？

处于平衡状态的PN结两端，存在着一个接触电位差。这个电位差是由于PN结两侧载流子各自的浓度不同，互相扩散而形成的。

由图1-7可知，P型区的空穴向N型区扩散后在界面附

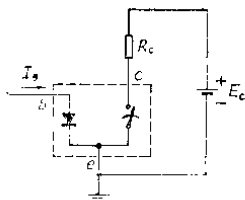


图1-6

近形成了负的空间电荷区，N型区的电子向P型区扩散后在界面附近形成正的空间电荷区，从而在界面附近造成了从N

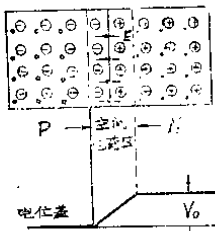


图1-7

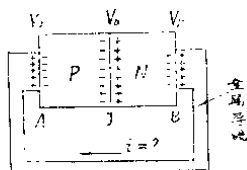


图1-8

区指向P区的内部电场，这个电场阻止扩散的进行。因为电场是从高电位指向低电位的，所以N区的电位将高于P区的电位，这就是通常所说的接触电位差，图中用 $V_0$ 表示。

如果将PN结的两端用一根金属导线连接起来（如图1-8所示），导线中是否会有电流流过呢？

为便于说明问题，我们把导线画得很粗，以突出金属导线与PN结两端的接触面。根据半导体物理知识得知，由于金属导线和P型N型半导体中的载流子浓度不同，同样也会发生互相扩散运动，形成接触电位差。因此，在P型半导体与金属的交界面A处存在接触电位差 $V_A$ ，在N型半导体与金属的交界面B处存在接触电位差 $V_B$ 。假如以 $n_P$ 、 $n_N$ 、 $n_M$ 分别表示P型区、N型区及金属中载流子的浓度，则从理论上可以证明，PN结的接触电位差 $V_0$ 、界面A的接触电位差 $V_A$ 及界面B的接触电位差 $V_B$ 分别为

$$V_0 = - \frac{KT}{q} \ln \frac{n_N}{n_P} \quad (1-2)$$

$$V_A = \frac{KT}{q} \ln \frac{n_M}{n_P} \quad (1-3)$$

$$V_B = \frac{KT}{q} \ln \frac{n_M}{n_N} \quad (1-4)$$

式中K为波尔兹曼常数，q为电子电荷，T为绝对温度。

因为金属导线中的电子浓度显然远高于P型和N型任何一种半导体，所以扩散的结果所形成的接触电位差都是金属一侧的电位为高。

在温度平衡的条件下（即回路中各处温度相同），可以写出图1-7电路的回路电位差之和

$$\Sigma V = V_0 - V_A + V_B \quad (1-5)$$

将式(1-2)、(1-3)及(1-4)代入上式可得

$$\begin{aligned} \Sigma V &= \frac{KT}{q} \left( \ln \frac{n_N}{n_P} - \ln \frac{n_M}{n_P} + \ln \frac{n_M}{n_N} \right) \\ &= \frac{KT}{q} \ln \frac{n_N}{n_P} \cdot \frac{n_P}{n_M} \cdot \frac{n_M}{n_N} \\ &= \frac{KT}{q} \ln 1 \\ &= 0 \end{aligned}$$

这个结果表明，回路中总的接触电位差之和是零，因此没有回路电流流过。从物理意义上也不难理解，因为金属—P型半导体的接触电位差与金属—N型半导体接触电位差恰好抵消了PN结的接触电位差 $V_0$ ，故不会有回路电流产生。

我们从能量守恒的观点也可以判断上述结论是正确的。因为倘若有回路电流产生，则必然有功率消耗，而在没有供

给任何能源的情况下，是不会产生功率的，否则将违反能量守恒这一基本原理。

假如把导线断开接入一只电压表，当然也不可能量出电压来。

## 1.4 为什么结型场效应管在预夹断后仍有漏极电流流过？

首先，让我们比较一下图1-9(a)、(b)两个图中N沟道结型场效应管的工作情况。

图(a)中的场效应管工作在  $|V_{GS}| > V_P$  的情况下（即栅源间负压的绝对值大于夹断电压），因而处于真正的夹断状态， $I_D = 0$ 。由图可知，这时PN结的空间电荷区（或称耗尽区）已扩展至整个N型区，只有束缚电荷存在，没有可以导电的

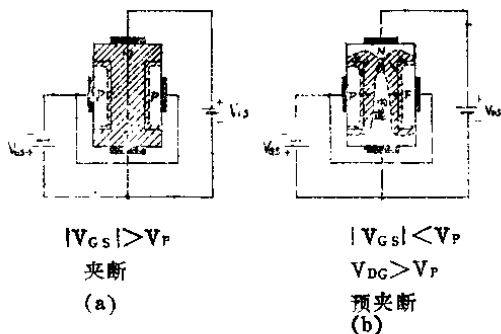


图1-9

电子流向漏极，所以漏极电流为零。

图(b)的情况就不同了。这时 $|V_{GS}| < V_T$ ，亦即栅源间的负压绝对值小于夹断电压，所以导电沟道肯定存在。由于外加的漏极电源电压是沿沟道长度方向降落在沟道上的，所以越是靠近漏端电位越高，PN结的反向压降也越大，耗尽区自然就更宽。当 $V_{DS}$ 增大到一定程度时，漏端两侧的耗尽区将合拢，这样就出现了所谓预夹断现象。耗尽区内空间电荷形成的内电场方向，如图1—9(b)中箭头所示。

由图可见，在靠近沟道顶部的电场方向，是吸引电子的方向。而此时沟道的其余部分并未被耗尽区所侵占，并且沟道中保持有原来的电位梯度，亦即有电场存在，因此沟道内的电子仍源源不断流向顶部的耗尽区。当它们到达耗尽区后，立刻在耗尽区内电场作用下形成漂移电流，全部从漏端流出，成为漏极电流 $I_D$ 。 $I_D$ 的大小取决于沟道电阻。

当 $V_{DS}$ 继续增加时，耗尽区将会加大，沟道长度会略有缩短。因此，沟道电阻会有微小的减少， $I_D$ 因之略有增加。但宏观上看， $I_D$ 已基本不变，故将预夹断以后场效应管的工作区称为饱和区。

在 $V_{DS}$ 较小，未出现预夹断情况之前，因为漏极电流取决于沟道电阻与 $V_{DS}$ 的大小（指 $V_{GS}$ 一定的条件下），所以 $I_D$ 几乎随 $V_{DS}$ 线性上升，这就是我们把预夹断以前的工作区域叫做线性区的原因。

这里要提醒一点，就是场效应管的饱和区及线性区的概念，和双极型三极管的饱和区及线性区的概念是完全不同的。在双极型三极管当中，饱和状态是指集电极电流不再随基极电流而成比例地增加这种状态，而线性区一般是指放大区，即集电极电流随基极电流成比例地增加这种情况。所以在它们各自的输出特性上，饱和区和线性区所指的区域也是



不同的，正如图1—10所指出的那样。

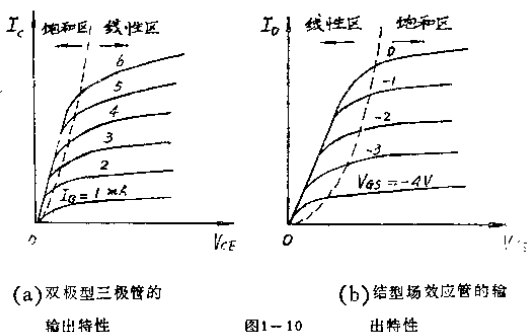


图1—10

## 思考题与练习

〔1—1〕 在图1—10(a)的单相半波整流电路中，试画出当电源 $V$ 和负载 $R_L$ 为不同数值时负载电阻上的电压波形，并标出电压峰值的大小：

- ①  $V = 30V$  (交流有效值)， $R_L = 20K \Omega$ ，
- ②  $V = 2V$  (交流有效值)， $R_L = 20K \Omega$
- ③  $V = 30V$  (交流有效值)， $R_L = 500 \Omega$ 。

整流二极管为2CP4它的特性示于图1—10(b)中。

〔1—2〕 在图1—12电路中，因为一只二极管允许通过的电流太小，所以把两只二极管并联使用。试问在什么前提下才可以保证两只二极管中流过的电流是相等的？