

铁路职业教育铁道部规划教材

数字电子技术

SHUZIDIANZIJISHU

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAONU GUIHUA JIAOCAI

李江玲 / 主编 肖荣 / 副主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



铁路职业教育铁道部规划教材

数字电子技术

李江玲 主 编
肖 荣 副主编
于 勇 主 审

中国铁道出版社

2008年·北京

内 容 简 介

本书主要包括：晶体管的开关特性和脉冲基本单元电路、逻辑门电路、脉冲单元电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、数/模和模/数转换等内容。

本书可作为高等职业学院和中专学校铁路信号专业通用教材，也可以作为相关专业的技术基础课教材。（带*号的内容为中职学生的选学内容，在书中用楷体编排。）

图书在版编目 (CIP) 数据

数字电子技术/李江玲主编. —北京：中国铁道出版社，
2008.1

铁路职业教育铁道部规划教材

ISBN 978-7-113-08586-5

I. 数… II. 李… III. 数字电路—电子技术—职业教育—
教材 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 005961 号

书 名：数字电子技术

作 者：李江玲 主编 肖 荣 副主编

责任编辑：武亚雯 刘红梅

电话：010-51873132

电子信箱：wyw716@163.com

封面设计：陈东山

责任校对：张玉华

责任印制：金洪泽

出版发行：中国铁道出版社（北京市宣武区右安门西街8号，100054）

印 刷：北京华正印刷有限公司

版 次：2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

开 本：787 mm×1 092 mm 1/16 印张：11.25 字数：277 千

书 号：ISBN 978-7-113-08586-5/TM·77

定 价：22.50 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书，如有缺页、倒页、脱页者，请与本社读者服务部调换。

电 话：市电 (010) 51873170 路电 (021) 73170 (发行部)

打击盗版举报电话：市电 (010) 63549504 路电 (021) 73187

前 言

本书为铁路职业教育铁道部规划教材,是根据铁路职业教育铁道信号专业教学计划“数字电子技术”课程教学大纲编写的。

数字电子技术是一门应用性很强的技术基础课。随着现代电子技术的迅速发展,中、大规模和超大规模数字集成电路在各个领域得到了广泛应用,铁路行业也不例外。为了适应铁路信号专业对工程技术人员的要求,结合多年的教学经验和教改实践,我们编写了本书。在编写过程中,主要做了以下几方面的考虑:

1. 在满足教学大纲要求的同时,紧扣职业教育的特点,做到实用性和操作性相结合,尽可能处理好实践与理论基础的关系。

2. 在保证基本概念、基本原理、基本方法的前提下,减少了分立元件内容,压缩了集成电路内部工作原理的分析及电气特性的讨论,突出了集成电路逻辑特性和工作特点的介绍,侧重于培养学生的应用能力。

3. 编写时力求概念清楚、条理清晰、循序渐进、便于自学。每章后有小结和复习思考题,以帮助学生总结复习、巩固所学。

4. 本书作为高职和中专的通用教材,高职和中专课程内容的主要区别为:带*号的内容为中专学生选学的内容,在书中用楷体编排。

本书由乌鲁木齐铁路运输学校于勇审阅,审者认真、细致地审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

本书第1、2章由乌鲁木齐铁路运输学校李江玲编写,第3章由华东交通大学职业技术学院吴翔编写,第4章由华东交通大学职业技术学院肖荣编写,第5章由兰州交通大学王全宇编写,第6章由华东交通大学职业技术学院潘红英编写,第7章由天津铁道技术学院杨卫红编写。本书由李江玲主编,肖荣副主编,共同负责统稿工作。

本书可作为高等职业学院和中专学校铁路信号专业《数字电子技术》课程的通用教材,也可以作为高职电子信息、电气自动化、通信工程、机电一体化、汽车电子等的专业技术基础课选用教材,还可供从事电子技术的工程技术人员自学与参考使用。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处;敬请读者批评指正。

编 者

2007年12月

目 录

第1章 晶体管的开关特性和脉冲基本单元电路	1
1.1 晶体管的开关特性	1
1.2 晶极管开关特性的应用	5
1.3 RC电路构成的脉冲基本单元电路	12
本章小结	15
复习思考题	16
第2章 逻辑门电路	19
2.1 分立元件门电路	19
2.2 TTL集成门电路	23
2.3 其他功能的TTL门电路	27
* 2.4 MOS逻辑门电路	31
2.5 各类门电路的特点及应用	36
本章小结	40
复习思考题	41
第3章 脉冲单元电路	45
3.1 双稳态触发电路	45
3.2 单稳态触发电路	48
3.3 发射极耦合触发电路	50
3.4 多谐振荡电路	52
3.5 锯齿波发生器	55
3.6 555定时器及其应用	57
本章小结	61
复习思考题	62
第4章 组合逻辑电路	65
4.1 逻辑代数与逻辑函数的简化	65
4.2 组合逻辑电路的分析和设计	76
4.3 编码器	80
4.4 译码器	84
* 4.5 数据选择器和数据分配器	90
4.6 加法器	94
本章小结	96

复习思考题	96
第5章 触发器	101
5.1 触发器的基本类型与逻辑功能	101
5.2 集成触发器的基本结构	108
5.3 集成触发器的参数与功能转换	112
5.4 CMOS 集成触发器	114
本章小结	116
复习思考题	116
第6章 时序逻辑电路	119
6.1 时序逻辑电路概述	119
6.2 同步时序逻辑电路的分析	120
6.3 异步时序逻辑电路的分析	125
6.4 同步时序逻辑电路的设计	128
6.5 寄存器	131
6.6 计数器	136
本章小结	146
复习思考题	147
第7章 数/模和模/数转换	149
7.1 数/模和模/数转换的概念	149
7.2 D/A 转换器	150
7.3 A/D 转换器	160
本章小结	171
复习思考题	172
参考文献	173

第 1 章

晶体管的开关特性和脉冲基本单元电路

【学习目标】

1. 掌握晶体二极管及三极管的静态开关特性和动态开关特性。
2. 掌握晶体二极管及三极管构成的限幅电路、箝位电路工作原理。
3. 掌握 RC 电路构成的脉冲基本单元电路的组成及工作原理。

1.1 晶体管的开关特性

一个理想的开关在接通时，其接触电阻为 0，在开关上不产生压降；在开关断开时，其电阻为无穷大，在开关中没有电流，并且接通与断开都要求在瞬间完成。在脉冲与数字电路中，晶体二极管和三极管通常工作于开关状态，即它们在输入信号作用下，时而导通，时而截止，起着“开关”的接通与断开作用。但实际上晶体二极管和三极管并非理想开关，因而需要研究它们的开关特性，以便了解它们和理想开关之间的差异，从而正确使用。

1.1.1 二极管的开关特性

1. 静态开关特性

下面参照图 1-1 所示二极管的伏安特性讨论二极管的静态开关特性。

(1) 正向特性

由图 1-1 所示二极管的伏安特性可看出，如果二极管两端的正向电压 U_D 小于门限电压 U_{TH} （硅二极管约为 0.5 V，锗二极管约为 0.2 V），则不导通。只有 U_D 大于 U_{TH} 时，二极管 VD 才导通。

当输入 U_i 为高电平 U_{IH} 时，二极管 VD 充分导通，呈现很小的电阻，其两端的电压 $U_D \approx 0.7$ V，导通电流 $I_D = \frac{U_{IH} - 0.7}{R} \approx \frac{U_{IH}}{R}$ 。当输入 U_i 增大时， I_D 随之迅速增大，

但 $U_D \approx 0.7$ V 不变。这时，二极管可等效为一个具有 0.7 V 压降的闭合开关。如图 1-2 (b) 所示。

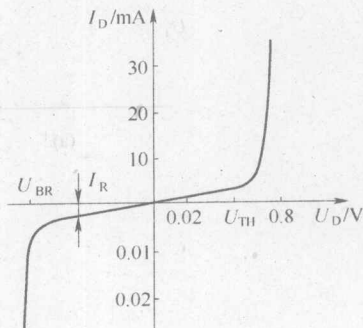


图 1-1 硅二极管的伏安特性

(2) 反向特性

当输入 U_i 为低电平 U_{IL} 且小于 0 V 时，二极管 VD 受反偏截止，其反向电流 $I_R \approx 0$ ，二

极管呈现极高的电阻, 这时, 二极管相当于开关断开, 如图 1-2 (c) 所示。

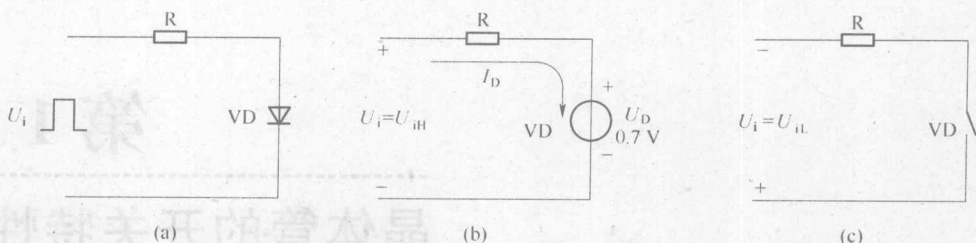


图 1-2 二极管静态开关电路及其等效电路

(a) 电路图; (b) 输入高电平时的等效电路; (c) 输入低电平时的等效电路

应当指出, 二极管两端的反向电压不能过大, 如大于其反向击穿电压 U_{BR} , 反向电流 I_R 会急剧增大, 它会使二极管反向击穿而损坏。因此, 工作时, 二极管两端的反向电压应小于其反向击穿电压 U_{BR} 。

可见, 二极管在电路中表现为一个受外加电压 U_i 控制的开关。当外加电压 U_i 为一脉冲信号时, 二极管将随着脉冲电压的变化在“开”态与“关”态之间转换。这个转换过程就是二极管开关的动态特性。

2. 动态开关特性

(1) 反向恢复时间

在低速开关电路中, 二极管由导通变为截止, 或由截止变为导通的转换时间通常是可以忽略的, 然而在高速开关电路中这个时间就不能不考虑了。因此, 了解二极管导通与截止间的快速转换过程, 对学习集成逻辑门电路是十分必要的。如在图 1-3 (a) 所示电路中输入图 1-3 (b) 所示的快速脉冲电压时, 二极管的动态工作过程如下。

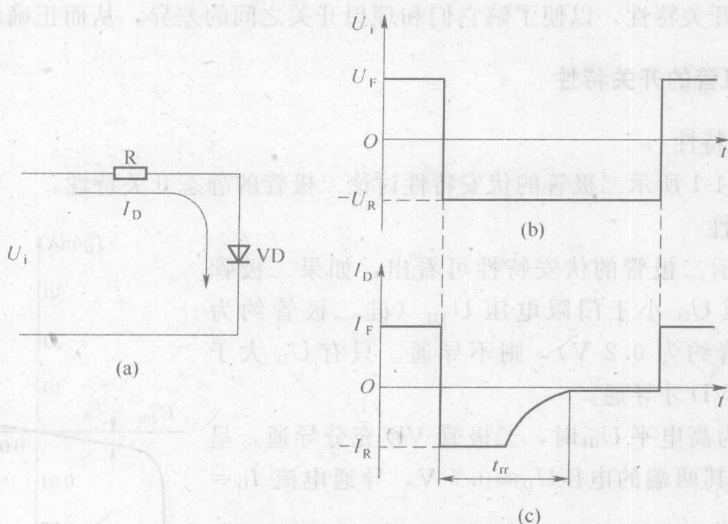


图 1-3 二极管的动态开关特性

(a) 电路图; (b) 输入脉冲电压波形; (c) 实际电流波形

在 $U_i = U_F > U_{TH}$ 时, 二极管 VD 导通, $I_D = I_F \approx \frac{U_F}{R}$ 。当输入电压 U_i 由正值 U_F 跃变为负值 U_R 的瞬间, VD 并不能立刻截止, 而是在外加反向电压 U_R 作用下, 产生了很大的反

向电流 I_R , 这时 $I_D = I_R \approx -\frac{U_R}{R}$ 。经过一段时间 t_{rr} 后, 二极管 VD 才进入截止状态, 如图 1-3 (c) 所示。通常将 t_{rr} 称作反向恢复时间。

产生 t_{rr} 的主要原因是由于二极管在正向导通时, P 区的多数载流子空穴大量流入 N 区, N 区的多数载流子电子大量流入 P 区, 在 P 区和 N 区中分别存储了大量的电子和空穴, 统称为存储电荷。当 U_i 由 U_F 跃变为负值 U_R 时, 上述存储电荷不会立刻消失, 在反向电压的作用下形成了较大的反向电流 I_R , 随着存储电荷的不断消散, 反向电流 I_R 也随之减少, 最终二极管 VD 转为截止。

(2) 开通时间

二极管由截止转为正向导通所需的时间称为开通时间。当二极管 VD 由截止转为导通时, 在 P 区和 N 区中积累电荷所需的时间远比 t_{rr} 小得多, 对二极管开关速度的影响很小, 故开通时间可以忽略。

1.1.2 三极管的开关特性

1. 静态开关特性

三极管电路、三极管的输出特性曲线及负载线如图 1-4 所示。

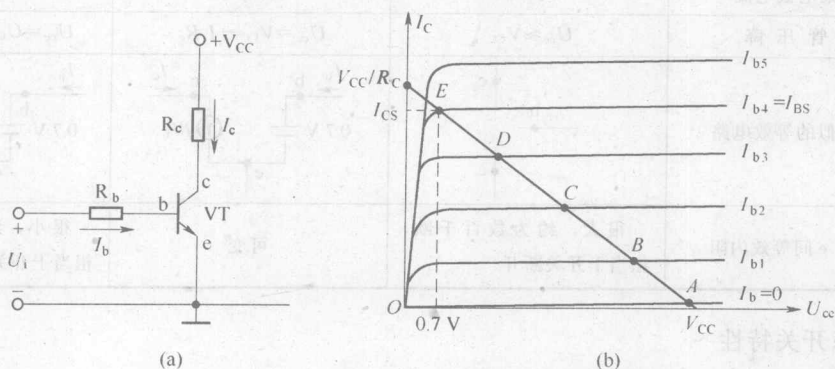


图 1-4 三极管的三种工作状态

(a) 电路; (b) 三种工作状态图解

(1) 当输入电压 U_i 小于三极管发射结死区电压时, $I_b = I_{CBO} \approx 0$, $I_c = I_{CEO} \approx 0$, $U_{ce} \approx V_{CC}$, 三极管工作在截止区, 对应图 1-4 (b) 中的 A 点。三极管工作在截止区的特点就是电流很小, 集电极回路中的 c、e 之间近似开路, 相当于开关断开。

(2) 当输入电压 U_i 为正值且大于死区电压时, 三极管导通。若 U_i 远大于发射结的正向压降 U_{BE} (硅管为 $0.7V$), 则有

$$I_b = \frac{U_i - U_{be}}{R_b} \approx \frac{U_i}{R_b}$$

此时, 若逐渐减小 R_b , 则 I_b 逐渐增大, I_c 逐渐增大, U_{ce} 逐渐减小, 工作点沿着负载线由 A 点 $\rightarrow$ B 点 $\rightarrow$ C 点 $\rightarrow$ D 点向上移动。在此期间, 三极管工作在放大区, 其特点为 $I_c = \beta I_b$ 。三极管在模拟电路中作放大用时就工作在这种状态。

(3) 保持 U_i 不变, 继续减小 R_b , 当 $U_{ce} = 0.7V$ 时, 集电结由反偏变为零偏, 称为临界饱和状态, 对应图 1-4 (b) 中的 E 点。此时的集电极电流称为集电极饱和电流, 用 I_{CS} 表

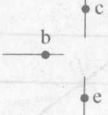
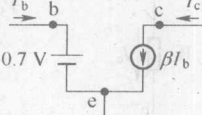
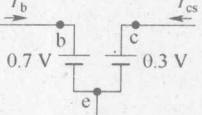
示；基极电流称为基极临界饱和电流，用 I_{BS} 表示，有

$$I_{CS} = \frac{V_{CC} - 0.7 \text{ V}}{R_c} \approx \frac{V_{CC}}{R_c}$$

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{V_{CC}}{\beta R_c}$$

若再减小 R_b ， I_b 会继续增加，但 I_c 已接近于最大值 V_{CC}/R_c ，受 V_{CC} 和 R_c 的限制，不会再随 I_b 的增大按 β 关系增大，三极管进入饱和状态。所以三极管工作在饱和状态的条件为： $I_b > I_{BS}$ ，进入饱和状态后， I_b 增加时， I_c 会略有增加， $U_{ce} < 0.7 \text{ V}$ ，集电结变为正向偏置。所以也常把集电结和发射结均正偏作为三极管工作在饱和状态的条件。饱和时的 U_{ce} 电压称为饱和压降 U_{CES} ，其典型值为： $U_{CES} \approx 0.3 \text{ V}$ 。此时集电极回路中的 c、e 之间近似短路，相当于开关闭合。

表 1-1 NPN 型三极管三种工作状态的特点

工作状态		截止	放大	饱和
条 件		$I_b \approx 0$	$0 < I_b < I_{BS}$	$I_b > I_{BS}$
工 作 特 点	偏置情况	发射结反偏 集电结反偏	发射结正偏 集电结反偏	发射结正偏 集电结正偏
	集电极电流	$I_c \approx 0$	$I_c = \beta I_b$	$I_c = I_{CS} \approx V_{CC}/R_c$
	管 压 降	$U_{ce} \approx V_{CC}$	$U_{ce} = V_{CC} - I_c R_c$	$U_{ce} = U_{CES} \approx 0.3 \text{ V}$
	近似的等效电路			
	c、e 间等效内阻	很大，约为数百千欧， 相当于开关断开	可变	很小，约为数百欧， 相当于开关闭合

2. 动态开关特性

同二极管一样，给三极管加上脉冲信号，三极管时而截止，时而饱和导通。三极管在两种状态之间相互转换时，其内部电荷也有一个“消散”和“建立”的过程，也需要一定的时间。这就是我们要研究的动态特性。

为描述其动态过程，引入如下四个开关参数：

延迟时间 t_d ——从输入信号 U_i 正跳变的瞬间开始，到集电极电流 I_c 上升到 $0.1 I_{CS}$ 所需的时间。是发射结的结电容充电，使空间电荷区逐渐由宽变窄所需要的时间。

上升时间 t_r ——集电极电流从 $0.1 I_{CS}$ 上升到 $0.9 I_{CS}$ 所需的时间。是给发射结的扩散电容充电，即在基区逐渐积累电子，形成一定的浓度梯度所需的时间。

存储时间 t_s ——从输入信号 U_i 下跳变的瞬间开始，到集电极电流 I_c 下降到 $0.9 I_{CS}$ 所需的时间。是

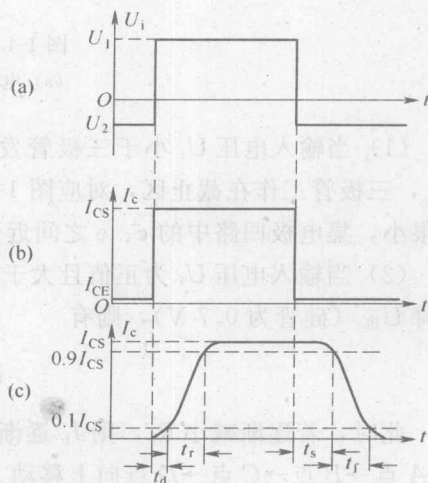


图 1-5 三极管开关的动态特性

(a) 输入电压波形；(b) 理想的集电极电流波形；
(c) 实际的集电极电流波形

消散超量存储电荷所需的时间。饱和越深,超量存储电荷越多,存储时间 t_s 越长;而反向基极电流越大,超量存储电荷消散得越快, t_s 越短。

下降时间 t_f ——集电极电流从 $0.9 I_{CS}$ 下降到 $0.1 I_{CS}$ 所需的时间。是继续消散临界饱和状态时为建立浓度梯度而在基区中积累的电荷,即发射结的扩散电容放电所需的时间。

其中: t_d 和 t_r 之和称为开通时间 t_{on} ,即 $t_{on}=t_d+t_r$;

t_s 和 t_f 之和称为关闭时间 t_{off} ,即 $t_{off}=t_s+t_f$ 。

三极管的开启时间和关闭时间总称为三极管的开关时间,一般为几个纳秒到几十纳秒。三极管的开关时间对电路的开关速度影响很大,开关时间越小,电路的开关速度越高。

3. 抗饱和三极管

图1-6(a)所示为抗饱和三极管的电路结构,它是在三极管基极和集电极之间并接了一个肖特基二极管(简称SBD)构成的。肖特基二极管的正向压降小,约为 0.4 V ,容易导通,它分流了三极管的一部分基极电流,使其工作在浅饱和状态,从而大大缩短了三极管的开关时间,提高了开关速度。

图1-6(b)所示为抗饱和三极管的符号。

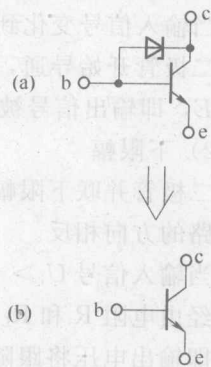


图1-6 抗饱和三极管
(a) 电路结构; (b) 电路符号

1.2 晶极管开关特性的应用

1.2.1 二极管开关特性的应用

限幅电路与箝位电路是两种利用晶体管的开关特性工作的常用电路。在分析电路的工作原理时,要把握晶体管的导通与截止,从而确定输入信号与输出信号的关系。

1. 二极管限幅电路

所谓限幅是当输入信号的幅度在一定范围内变化时,输出跟随输入的变化而变化,当输入信号超过了这个范围时,限幅电路就起作用,削去超过部分保持恒定输出。限幅电路的应用较广,除可作波形变换之外,一般还可作整形、波形选择等。在实际电路中一般常使用限幅电路来控制电路的电压变化,使电路工作于一定范围的正常状态。

根据削去的部位,限幅可分上限幅、下限幅和双向限幅。根据二极管在电路中不同的连接方法,可分为并联限幅和串联限幅。

(1) 并联限幅电路

1) 上限幅

利用二极管与输出端并联,构成二极管并联限幅电路。用这种接法达到上限幅目的电路,称为二极管并联上限幅电路,如图1-7(a)所示。

图中 E 是电源电压, R 是限流电阻,当 $R \leq R_L$,如果输入信号最大幅度 $U_{im} > E$,电路就能起限幅作用,限幅的过程讨论如下。

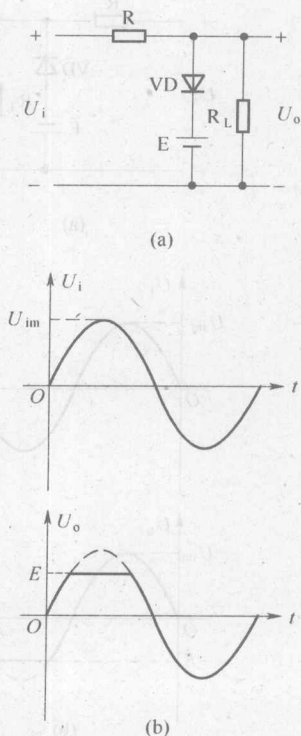


图1-7 二极管并联上限幅电路
(a) 电路图; (b) 输入输出波形

当输入信号 $U_i < E$ 时, 由于二极管 VD 受反向偏压而截止, 相当于开路, 这时输入信号经由电阻 R 和 R_L 的分压输出, 在 R_L 两端的输出电压 U_o 为:

$$U_o = \frac{U_i}{R + R_L} \cdot R_L \approx U_i \quad (R \leq R_L)$$

即输出电压将跟随输入信号的变化而变化。

当输入信号变化到 $U_i > E$ 时, 这时由于二极管 VD 两端的反向偏压消失并出现正向偏压, 二极管开始导通, 如果忽略二极管的导通压降, 二极管 VD 相当于短路。这时输出电压 $U_o = E$, 即输出信号被限幅于 E 的电压上, 如图 1-7 (b) 所示。

2) 下限幅

二极管并联下限幅电路如图 1-8 (a) 所示。可以看出二极管 VD 和电源 E 的连接与上限幅电路的方向相反。

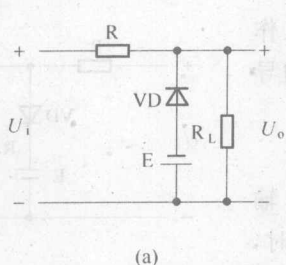
当输入信号 $U_i > -E$ 时, 由于二极管 VD 受反向偏压而截止, 相当于开路, 这时输入信号经由电阻 R 和 R_L 的分压输出: $U_o \approx U_i$ ($R \leq R_L$)。

即输出电压将跟随输入信号的变化而变化。

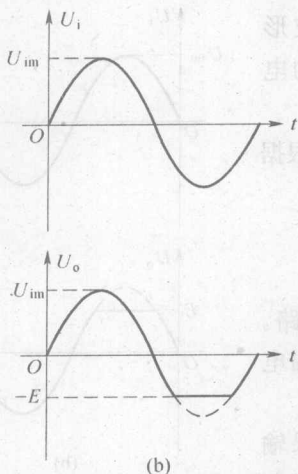
当输入信号变化到 $U_i < -E$ 时, 这时由于二极管 VD 两端的反向偏压消失并出现正向偏压, 二极管开始导通, 如果忽略二极管的导通压降, 二极管 VD 相当于短路。这时输出电压 $U_o = -E$, 即输出信号被限幅于 $-E$ 的电压上, 如图 1-8 (b) 所示。

3) 双向限幅

并联双向限幅电路如图 1-9 所示。输出电压的正负半周分别被电源 E_1 、 E_2 的限幅作用所限制, 电路的原理即是上、下限幅电路的综合, 可自行分析。



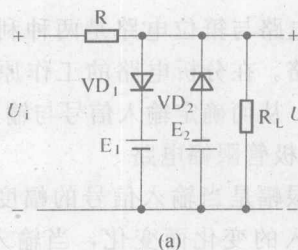
(a)



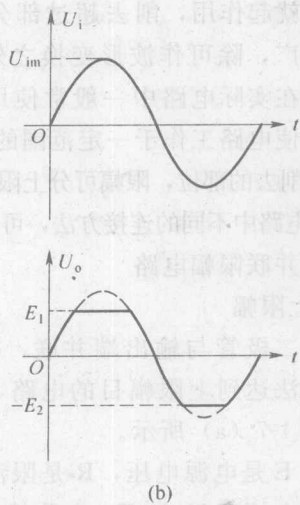
(b)

图 1-8 二极管并联下限幅电路

(a) 电路图; (b) 输入输出波形



(a)



(b)

图 1-9 二极管并联双向限幅电路

(a) 电路图; (b) 输入输出波形

在上述二极管限幅电路中,输出信号的限幅起点,称为限幅电压。可通过对电源 E 的改变,来调整限幅电压的大小。特别地,如果在上限幅电路中,当电源 $E=0$ 时,输出信号仅为负半周。相反,在下限幅电路中,当电源 $E=0$ 时,则输入信号负半周被削,这时输出信号仅为正半周。

并联限幅电路较简单、可靠,但输出回路串有电阻 R ,因此输出有损耗,需要有较大的输入信号。

* (2) 串联限幅电路

1) 上限幅

利用二极管与输出端相串联,构成二极管串联限幅电路。用这种接法达到上限幅的目的的电路,称为二极管串联上限幅电路。如图 1-10 (a) 所示。图中 C_i 和 C_o 为耦合电容, E 是电源电压, R_i 是输入电阻, R_o 是输出电阻。

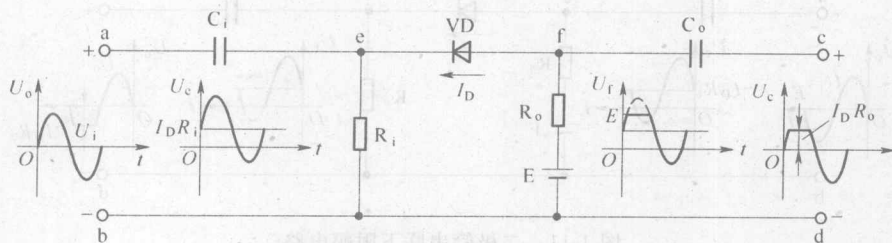


图 1-10 二极管串联上限幅电路

在输入信号 $U_i=0$ 时,二极管 VD 由于 E 的作用而导通,导通电流为 I_D

$$I_D = \frac{E - U_D}{R_i + R_o}$$

式中, U_D ——二极管两端的压降。

这时, e 点直流电位: $U_e = I_D \cdot R_i$

f 点直流电位: $U_f = E - I_D \cdot R_o$

当有输入信号 U_i 时,由于 C_i 的耦合作用,这时在输入电阻 R_i 上不但有直流压降,而且输入信号 U_i 在 R_i 上也产生交流压降。当叠加交流信号后的 $U_e > U_f$ 时,二极管截止,将输出与输入完全隔断,使得 f 点电位保持在 $U_f = E$ 不变。而经由耦合电容 C_o 在输出端输出电压为:

$$U_o = E - (E - I_D \cdot R_o) = I_D \cdot R_o$$

当叠加交流信号后的 $U_e < U_f$ 时,二极管始终导通,输出信号 U_o 跟随着输入信号 U_i 的变化而变化。

通过上面分析,可以知道,串联限幅电路是靠二极管截止将输入与输出隔断来进行限幅的。它的限幅电压为 $I_D \cdot R_o$,各点相应的波形变化如图 1-10 所示。

2) 下限幅

图 1-11 所示为串联下限幅电路,现分析它的工作原理。

在输入信号 $U_i=0$ 时,二极管 VD 由于 E 的作用而导通,导通电流

$$I_D = \frac{E - U_D}{R_i + R_o}$$

式中, U_D ——二极管两端的压降。

这时, e 点直流电位: $U_e = E - I_D \cdot R_i$

f 点直流电位: $U_f = I_D \cdot R_o$

当有输入信号 U_i 时, 由于 C_i 的耦合作用, 这时在输入电阻 R_i 上不但有直流压降, 而且输入信号 U_i 在 R_i 上也产生交流压降。当叠加交流信号后的 $U_e < U_f$ 时, 二极管截止, 将输出与输入完全隔断, 使得 f 点电位保持在 $U_f = 0$ 不变。而经由耦合电容 C_o 在输出端输出电压为:

$$U_o = 0 - I_D \cdot R_o = -I_D \cdot R_o$$

当叠加交流信号后的 $U_e > U_f$ 时, 二极管始终导通, 输出信号 U_o 跟随着输入信号 U_i 的变化而变化。

各点相应的波形变化如图 1-11 所示。

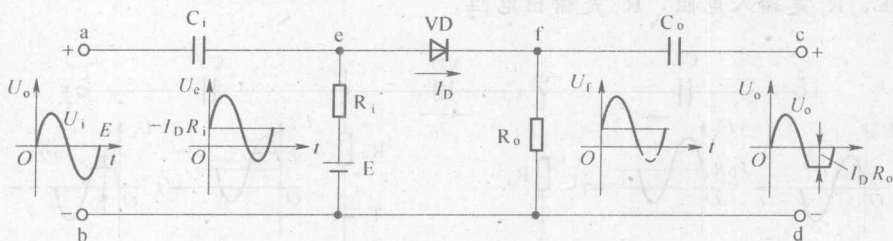


图 1-11 二极管串联下限幅电路

3) 双向限幅

由上、下限幅电路合并可组成串联双向限幅电路, 如图 1-12 所示。在没有输入信号时, 二极管 VD_1 、 VD_2 均导通。在输入交变信号时, VD_1 对正半周信号无阻挡作用, 而对负半周信号由于反向作用电压将使 VD_1 中导通电流逐渐减小, 当 VD_1 截止时就起限幅作用。同理, VD_2 对负半周信号将无阻挡, 而对正半周信号将逐渐减小回路电流, 最后 VD_2 截止, 对正半周起限幅作用。因此, 该电路对输入信号起双向限幅作用。

输入输出波形变化如图 1-12 所示。在一定的负载电阻 R_i 情况下, 如果恰当调整电阻 R , 即可得到正负半周相等的限幅值。同时, 对电阻 R 的调节, 将直接影响二极管 VD_1 、 VD_2 的导通电流的大小, 改变了 f 点的电位, 从而改变了限幅电压。具体的限幅电压值这里就不再计算了。

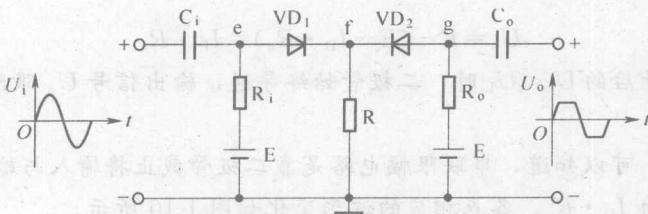


图 1-12 二极管串联双向限幅电路

2. 二极管箝位电路

一般 RC 耦合电路如图 1-13 所示。电容 C 起隔直流作用, 交流信号经由电容 C 耦合至输出端。因此, 如果有矩形脉冲经由 RC 耦合电路, 这时矩形脉冲包含的直流分量平均值 E_0 , 将全部被电容 C 所隔离降落在电容 C 两端, 而输出端不包含直流分量 E_0 , 见图

1-13所示,但有时并不希望信号的直流分量为零,而是要求信号输出波形具有一定的直流成分,固定在某一电位上,并且必须基本不改变波形形状。达到这样作用的电路,称为箝位电路。

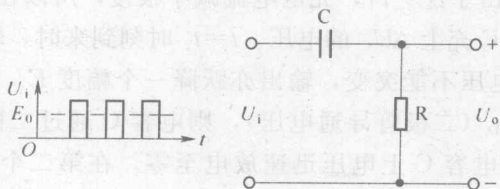
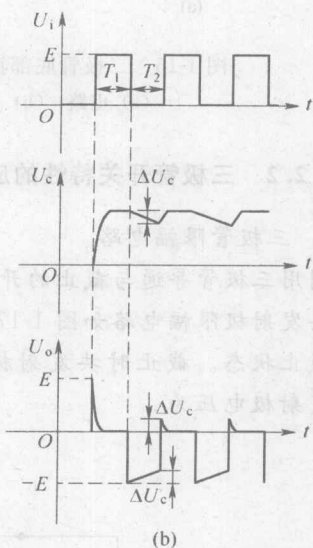
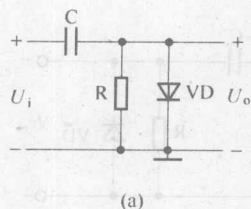


图 1-13 RC 耦合电路

(1) 二极管顶部箝位

图 1-14 (a) 所示是二极管顶部箝位电路。设输入信号 U_i 为幅度由零到 E 的矩形波信号。从图中可以看到,如果没有二极管 VD,则即为普通的耦合电路。现分析在加上二极管 VD 时,电路中矩形信号被箝位的原理。

当第一个矩形波到来 $t=t_1$ 时, U_i 从零跃变至 E , 由于电容 C 两端电压不能突变,所以输出也上跃为电压 E 。此时,二极管 VD 导通,对电容 C 充电。由于二极管的正向电阻 r_d 很小,故充电时间常数 $\tau=r_d \cdot C \ll T_1$, 电容 C 两端电压 U_c 很快从零充到 E , 而输出电压 U_o 迅速下降至零,如图 1-14 (b) 所示。

图 1-14 二极管顶部箝位电路和波形
(a) 电路; (b) 工作波形

在 $t=t_2$ 时,矩形波从 E 下跳至零。同理,电容 C 两端电压不能突变,输出电压 U_o 也下跳至 $-E$ 。此时,二极管 VD 截止,电容 C 经电阻 R 放电。由于时间常数 $RC \gg T_2$, 放电速度很慢,直到第二个矩形波到来时, U_c 只变化很少一点 ΔU_c 。

当 $t=t_3$ 时, U_i 又从零跃变至 E , U_o 也上跳同样的数值,但现在 U_o 是从负电压上跳,上跳后只是稍大于零 (ΔU_c)。这时二极管再次导电, U_c 很快充到 E , U_o 则很快回到零,以后将重复上述过程。

上面的讨论表明:顶部箝位电路的输出电压 U_o 的形状和幅度基与输入电压 U_i 相同,只是将输入波形向下移动了 E 的大小,输出脉冲的顶部被箝位在零电位附近。波形的失真主要是顶部出现小的尖峰 ΔU_c (ΔU_c 是电容 C 在矩形波间歇时由于放电而变化的电压)。在 T_2 期间电容 C 的放电电荷 $\Delta q = i T_2$ 。所以 ΔU_c 为

$$\Delta U_c \approx \frac{\Delta q}{C} = \frac{i}{C} T_2 \approx \frac{E}{R \cdot C} T_2$$

上式表明,只要把 $R \cdot C$ 取得足够大,就可使 ΔU_c 很小。

(2) 二极管底部箝位

如果把顶部箝位电路中的二极管倒接就可成为底部箝位电路,如图 1-15 所示。

设输入信号 U_i 仍为幅度由零至 E 的矩形波,在 $t=t_1$ 时, U_i 从零跃变至正,由于电容两端电压为零并不能突变,因此 t_1 时刻输出电压 $U_o=E$ 。并且二极管 VD 已截止,电路以 $\tau_1=RC$ 的时间常数向电容 C 充电。由于 $\tau_1 \gg T_1$, 充电电流减小很慢,所以在 $T=T_1$ 期间,输出电压 U_o 仅下降 ΔU_c ,也即电容 C 充上 ΔU_c 的电压。 $t=t_2$ 时刻到来时,输入 U_i 又突然下降至零,同样在 t_2 时刻电容两端电压不能突变,输出亦跃降一个幅度 E 。如图 1-15 (b) 所示,如果电容上所充电压 $\Delta U_c > U_D$ (二极管导通电压),则电容 C 通过二极管 VD 放电,放电时间常数 $\tau_2=r_d \cdot C \ll T_2$,所以电容 C 上电压迅速放电至零。在第二个输入矩形脉冲时,重复上述过程,即将输出矩形波的底部箝位。

如果要求箝制的电位并不为零,而为某一电位 E_0 时,须将原来接地的地方改接电源 E_0 ,如图 1-16 所示。电路的工作原理与上面介绍的底部箝位电路完全相同。

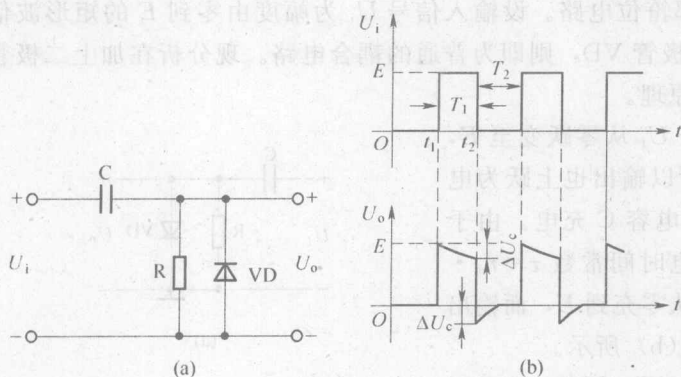


图 1-15 二极管底部箝位电路和波形

(a) 电路; (b) 工作波形

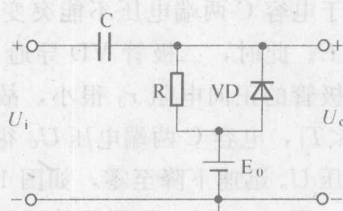


图 1-16 底部箝位于 E_0 的电路

* 1.2.2 三极管开关特性的应用

1. 三极管限幅电路

利用三极管导通与截止的开关特性,可以方便地构成双向限幅器。现讨论如下:

共发射极限幅电路如图 1-17 所示,当输入交变信号 U_i 小于下限幅电压 U_L 时,三极管处于截止状态。截止时共发射极等效电路如图 1-18 所示,由图所示的等效电路,可得基极—发射极电压为

$$U_{be} = E_b + \frac{U_i - E_b}{R_s + R_1 + R_2} \cdot R_2$$

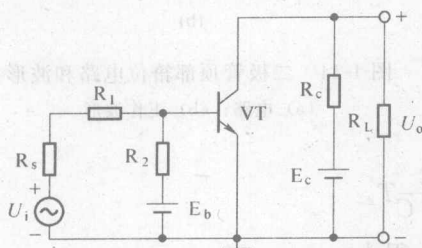


图 1-17 共发射极双向限幅电路

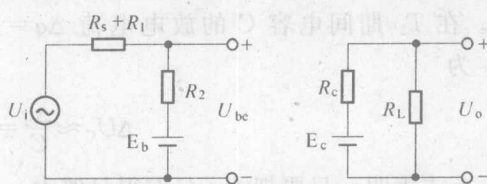


图 1-18 截止时的等效电路

当 $U_{be} \leq 0$ 时, 三极管处于截止状态, 代入上式, 可求出限幅器的下限幅门限为:

$$U_i = U_L = -E_b \frac{R_s + R_1}{R_2}$$

与 U_L 对应的截止时输出的高电平为 $U_{oH} = \frac{E_c}{R_L + R_c} \cdot R_L$

当输入 U_i 逐渐增加后, 三极管处于放大状态, 继续增加输入 U_i , 当其达到上限幅电压 U_H 后, 三极管处于饱和状态, 输出低电平 U_{oL} 。

在共发射极电路中, 一般都满足 $R_s + R_1 \gg r_{be}$ 及 $R_2 \gg r_{be}$, 其中, r_{be} 为晶体管输入电阻。若放大器的传输增益为 K , 则在电路输入信号 U_i 达到上限幅电压 U_H 时, 输出低电平 $U_{oL} = U_{CES}$, 此时, 上限幅电压 U_H 为

$$U_H = U_L + \frac{U_{oH} - U_{oL}}{|K|}$$

把上述输入、输出的关系由传输特性曲线来表示, 如图 1-19 所示。当输入 U_i 小于 U_L 下限幅电压时, 输出高电平 U_{oH} , 若输入处于 $U_L < U_i \leq U_H$ 范围内, 三极管处于放大状态, 实现信号以一定增益进行传输, 在传输特性上用一条斜线表示。当输入 U_i 大于 U_H 上限幅电压时, 输出低电平 U_{oL} 。

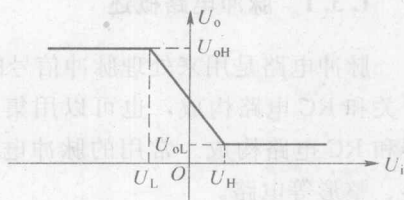


图 1-19 三极管限幅电路传输特性

如果输入信号为正弦波, 传输区间宽度越窄, 则输出端的脉冲就越接近矩形波, 因此也可作为波形变换电路, 能方便的将正弦波变换成方波。同时三极管限幅器, 一般也被视为双态开关, 即输出高电平状态与低电平状态。

2. 三极管箝位电路

与二极管箝位器一样, 利用三极管发射结这个等效二极管的 PN 结, 也可以构成顶部箝位电路, 三极管箝位电路如图 1-20 所示。电容 C_b 为耦合电容, 三极管在静态时基极偏置电阻在电源 E_c 的作用下, 处于饱和状态, 即满足: $R_b \leq \beta R_c$, 三极管的基极与发射极之间的压降: $U_{be} = U_{BES}$ 。

此时如果输入 U_i 是矩形波, 在 t_1 时刻, 突然从高电平跃降一个幅度 U_{im} 时, 由于电容 C_b 两端电压不能突变, 三极管基极与发射极电压 U_{be} 则从 U_{BES} 也跃降一个幅度 U_{im} , 即

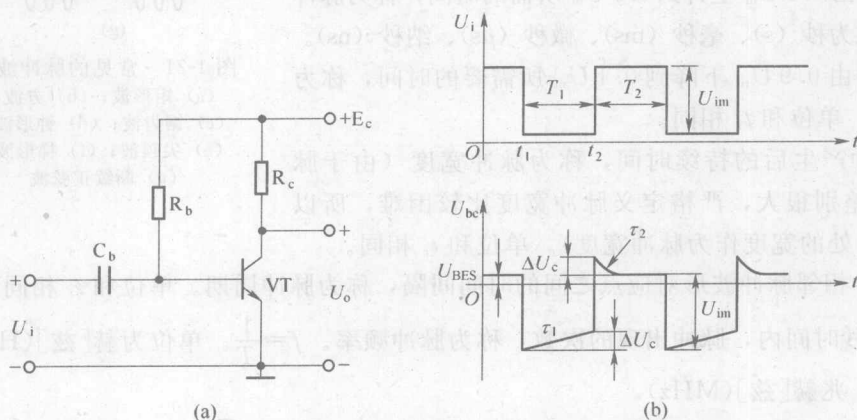


图 1-20 三极管箝位电路

(a) 电路; (b) 工作波形