

全国家用电器维修培训教材6

低频电路原理

张连春 编著

电子工业出版社

内 容 提 要

主要包括晶体管的基本工作原理、前置放大器、放大器的负反馈、功率放大器的基本原理及可控硅、场效应管的基本工作原理和应用。本书通俗易懂，突出物理概念，叙述简明扼要，每章后有习题，可供复习之用。

低频电路原理

责任编辑：王小民

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

一二〇一工厂印刷

*

开本：787×1092毫米1/32 印张：11.125 字数：258千字

1988年1月第一版 1988年2月第一次印刷

印数：1-62,550册 定价：2.70元

书号 ISBN7-5053-0102-X/TN·63

《全国家用电器维修培训教材》编委会

主 编 隋经义

副主编 王明臣 沈成衡 宁云鹤

编 委 高坦弟 陈 忠 刘学达

段玉平 左万昌 赵文续

张道远 李 军

前 言

自1986年初中央五部委发出《关于组织家用电器维修人员培训的通知》以来,在各地有关部门的大力支持下,家用电器维修培训工作的在全国蓬勃开展起来,并取得了可喜的成果。

1987年4月9日,中国科协、商业部、国家工商行政管理局、劳动人事部、电子工业部、总政宣传部,中国电子学会在召开的“全国家电维修培训工作会议”上指出这项工作的重要意义,同时指出要对现有教材进行修改,并编写基础与专业基础教材,以适应全国家电维修培训工作的需要。

实践证明,编写好家用电器维修培训教材是搞好培训工作的重要保证。我们认真研究了各地培训班对试用教材《家用电器维修指南丛书》的意见,按照统一教学计划的要求,组织有一定理论知识和维修实践经验的作者,编写了这套家用电器维修培训教材。并由科学出版社、人民邮电出版社、电子工业出版社、科普出版社、解放军出版社共同出版。

本教材主要阅读对象是具有初中以上文化程度,从事或准备从事家电维修工作,参加家用电器维修培训班的学员;也可供从事家用电器生产的工人、初级技术人员和广大电子技术爱好者参考;还可作为军地两用人才的培训教材。教材共分十八种出版。其中基础课教材五种:《电工基础》、《机械常识》、《电动机原理和维修》、《元器件》、《家用电器维修基础》;专业基础课教材两种:《低频电路原理》、《高频电路原理》;专业课教

材十种：《电风扇、吸尘器的原理和维修》、《洗衣机的原理和维修》、《电冰箱、空调机的原理和维修》、《电热器的原理和维修》、《电子钟表的原理和维修》、《收音机的原理和维修》、《录音机的原理和维修》、《黑白电视机的原理和维修》、《彩色电视机的原理和维修》、《磁带录象机的原理、使用和维护》。教材分册出版，适于不同专业培训班选用；增加基础课和专业课教材，又为缺乏基础知识的学员提供了方便。此外还出版补充读物若干种，对教材起到拾遗补缺的作用。

在组织编写本教材时，我们注意贯彻理论与实践相结合的原则。基础课教材和专业基础课教材在介绍基本理论和电路时，紧密联系家用电器的实际，将共性的基础知识讲清楚。在教材的深度和广度上，尽可能照顾中、小城市和农村学员的实际水平，力求深入浅出，通俗易懂。

由于家用电器维修培训牵涉面广，学员水平参差不齐，要求不同，加之我们的水平有限，时间仓促，这套教材还会存在许多不足之处。我们恳切希望全国各地家电维修培训班的学员、教师，以及关心家电维修培训工作的同志们，对这套教材提出宝贵的意见。

全国家用电器维修人员培训教材编委会

1987年10月

目 录

第一章 晶体二极管及其应用	1
第一节 晶体二极管	1
一、二极管的伏安特性	1
二、主要参数	10
第二节 整流滤波电路	11
一、三种典型的单相整流电路	11
二、滤波电路	21
第三节 硅稳压二极管与稳压电路	29
一、硅稳压二极管的特性和主要参数	30
二、稳压二极管稳压电路的工作原理	34
三、稳压二极管稳压电路的设计举例	39
第二章 晶体三极管和交流放大器	49
第一节 晶体三极管	49
一、晶体管的结构特点	50
二、晶体管的电流放大作用	51
三、晶体管的特性曲线	61
四、晶体管的主要参数	68
第二节 放大电路的基本分析方法	72
一、放大电路的作用及其对它的基本要求	72
二、共发射极基本放大电路的组成	74
三、图解法	77
四、等效电路分析法	86
第三节 交流放大电路工作点的稳定问题	93
一、温度变化对工作点的影响	94

二、工作点稳定的典型电路	94
第四节 阻容耦合多级放大器	97
一、单级放大器的输入电阻和输出电阻	97
二、阻容耦合多级放大器	100
三、频率特性	104
第五节 放大电路中的负反馈	109
一、反馈的基本概念	109
二、负反馈电路的特点	114
三、反馈判别	119
四、几种基本负反馈电路实例分析	125
第六节 互补对称式功率放大器	152
一、从射极输出器的输出功率谈起	153
二、互补对称电路的工作原理	155
三、OTL电路的输出功率和效率	157
四、从基本原理电路到实用电路的演变过程	160
第三章 直流放大器	177
第一节 直流放大电路中的两个特殊问题	177
一、问题的提出	177
二、如何解决直流电平配置问题	179
三、如何解决零点漂移问题	182
第二节 实用差动放大器	185
一、双端输入射极耦合差动放大器	185
二、单端输入射极耦合差动放大器	194
第三节 集成运算放大器	198
一、什么是集成运算放大器	198
二、集成运算放大器内电路分析	204
三、集成运算放大器的基本应用	211
第四章 晶体管直流稳压电源	220
第一节 串联型晶体管稳压电源的演变过程	220

一、从串联分压谈起·····	220
二、最简单的串联型稳压电源·····	224
三、带有放大环节的串联型稳压电源·····	226
第二节 串联型晶体管稳压电源设计举例·····	230
一、设计基本要求·····	230
二、电路类型的选择·····	236
三、电路元器件的选择·····	236
四、核算稳压系数 S 和电源内阻 R_0 ·····	243
第三节 改进串联型稳压电源的若干措施·····	245
一、提高电路电压稳定性的措施·····	245
二、提高电路温度稳定性的措施·····	257
三、稳压电源的安全措施——保护电路·····	260
第四节 稳压电源实例分析·····	264
一、带短路保护的收音机用晶体管稳压电源·····	264
二、录音机等用集电极输出型稳压电源·····	265
三、联合设计40和47厘米电视机用高压稳压电源·····	267
四、正负跟随双路可调稳压电源·····	269
五、多用途直流稳压电源·····	274
第五章 场效应管和可控硅介绍 ·····	280
第一节 场效应管及其基本电路·····	280
一、结型场效应管·····	280
二、绝缘栅场效应管·····	281
三、场效应管的主要参数·····	295
四、场效应管的基本放大电路·····	297
第二节 可控硅介绍·····	301
一、从三个实验谈起·····	301
二、可控硅的内部结构及其工作原理·····	304
三、可控硅的伏安特性及主要参数·····	306
四、可控硅电路分析基础及实例分析·····	312

第六章 正弦波低频振荡电路	323
第一节 振荡电路的演变过程	323
一、什么是振荡	323
二、如何向振荡回路补充能量	327
三、从 LC 选频放大器到 LC 振荡器	328
四、振荡器的起振与振荡幅度的稳定	332
第二节 RC 振荡器	333
一、 RC 相移式振荡器	333
二、 RC 桥式振荡器	338

第一章 晶体二极管及其应用

本章介绍晶体二极管伏安特性及其主要参数，讨论的重点放在晶体二极管在低频电子电路中的主要应用——整流电路和硅稳压二极管稳压电路。

第一节 晶体二极管

PN 结的基本特性是它的单向导电性，因此晶体二极管的基本特性也是单向导电。为了全面了解它的导向特性，应该讨论晶体二极管的伏安特性，也就是加在二极管两端的电压与其流过二极管中电流的关系。

一、二极管的伏安特性

测量二极管伏安特性的电路如图1-1所示。在图(a)中，二极管 D 的负极通过毫安表与电源负极相接。二极管 D 的正极经限流电阻 R 、电位器 W 与电源正极相接。调节 W 即可改变加在二极管的电压，故可以测量二极管正向伏安特性。

在图(b)中，二极管 D 的负极通过微安表与电源的正极相连，其正极经限流电阻 R 和分压电位器的控制，可以取得电源正、负极及其中任意一个电压值，故可用来测量二极管的反向伏安特性。从图1-1中可见，分别调整图(a)和图(b)中的电位器 W ，则可断续地改变二极管两端的正向电压和反向电压，于是从毫安表和微安表中就可以读出相应的正向电流值和反向电

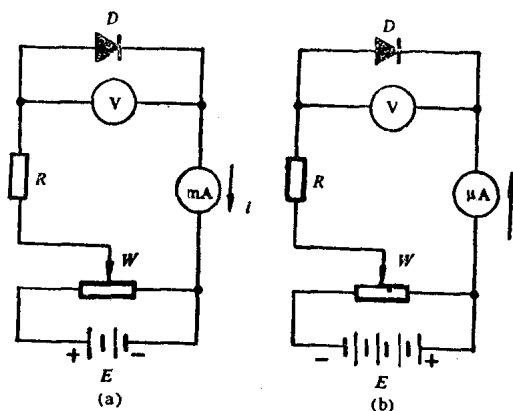


图1-1 测量二极管导电特性的电路

流值，这样便可以得到许多组电压 U 和电流 I 的对应数据。对这些数据基本上有三种处理方法：第一种方法是把测得的 U 与 I 数据用表格列出来，此时只要知道二极管两端电压 U 就可以从表上查出对应的电流 I 。显然这种方法不容易很直观地看清 I 随 U 变化的基本关系。第二种方法是以电压 U 为横轴，以电流 I 为纵轴，把测出的各组数据，画在坐标图上，然后把各点连成一条曲线，即为二极管的伏安特性曲线。由于这条曲线具有直观性，故可以一目了然地看到二极管的导电特性。这是电子技术中应用最广的一种研究方法。第三种方法就是把 U 与 I 的关系用数学方程式表示出来。根据半导体理论可知，二极管的伏安特性可借助于如下方程式表示：

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

式中 I_s 表示反向饱和电流， $U_T = 0.026$ 伏。

图1-2所示的为一有代表性的二极管伏安特性曲线，它就

是通过上述的测量电路，采用第二种处理方法得到的。图中纵轴代表电流 I ，横轴表示加在二极管上的电压 U 。交点 O 上部的纵轴表示流经二极管的正向电流的大小；下半部纵轴表示流经二极管反向电流的大小。交点 O 右半部横轴表示加在二极管上正向电压的大小，左半部横轴表示加在二极管上反向电压的大小。其电压和电流的具体值由坐标轴上的标度表示。

曲线 OA 段表示随着加在二极管上的正向电压从 $0V$ 增加到 $0.2V$ ，流经二极管的正向电流也由 0 增加到 $1mA$ ；曲线 AB 段，特别是它的上半段更显得陡直，说明正向电压从 $0.2V$ 增加到 $1V$ ，正向电流则由 $1mA$ 急速地增加到 $20mA$ 。可见，随着二极管两端正向电压由零逐渐升高，其管流有一个由增加得缓慢到增加得迅速的转折点，即图中的 A 点。通常我们把 A 点所对应的正向电压($0.2V$)称为导通电压，也有人形象地称为“死区”电压，

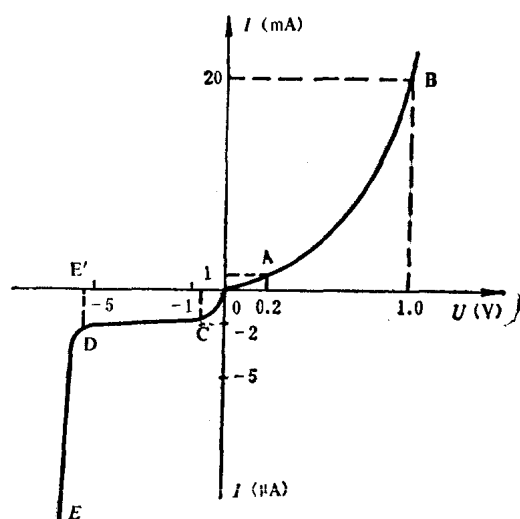


图1-2 二极管的伏-安特性曲线

即在这个区域里仍然可以认为二极管没有导通。

曲线 $OCDE$ 段表示二极管承受反向电压时的基本情况。其 OC 段表示随着加在二极管上的反向电压的增加(从0增加到1V左右),反向电流仅有微小的增加(从0增加到 $2\mu A$ 左右)。但当反向电压继续增大时,反向电流却几乎保持不变,这就是曲线 CD 段近于水平直线的道理。我们把这一不变的反向电流称为反向饱和电流。

如果继续增大二极管的反向电压至某一值时,流经二极管的反向电流会突然增大,说明二极管已被击穿。而且再稍稍加大反向电压,则反向电流便急剧增大,以致因过热而烧毁二极管,这就是曲线 DE 段表示的情况,我们把发生击穿现象时加在二极管两端的反向电压(如图中 E' 点对应的电压)称为反向击穿电压。

通过以上分析,我们可以看出二极管的伏安特性有两个主要的基本特点。

第一个特点是它的伏安特性曲线与我们在电工学中学过的线性元件的伏安特性曲线——斜直线有着极为明显的区别。那就是它的非直线性,简称为非线性。即二极管无论加上正向电压还是反向电压,其端电压与流过它的电流之比都不象线性电阻那样始终是定值,而是随着端电压的不同有着不同的比值。

为了加深对二极管伏安特性曲线非线性的认识,同时因为电子器件的基本特点是非线性,而线性与非线性的矛盾又贯穿于本书的始终。所以,我们有必要先来直观地讨论一下曲线的变化率。

(1) 图1-3所示直角坐标系中,我们令横轴表示电压 U ,纵轴表示电流 I ,过原点 O 作一条斜直线 OA ,显然 OA 的变化是直线性的。此时再过横轴上三个等分点1、2、3点作三条垂线与 OA 相

交于 A' 、 A'' 和 A''' 点。过 A' 、 A'' 点分别作横轴的平行线与 A''' 2线相交于 $2'$ 点，与 A''' 3线相交于 $3'$ 点。据此我们可以看出在电压的变化量均为 ΔU 的情况下，其对应的电流变化量也均为 ΔI 、 ΔI 、 ΔI ，即三者是相等的。由于变化率就是图中电流的变化量与电压的变化量之比，故可以看出它们的变化率 $\frac{\Delta I}{\Delta U}$ 是不变的。

简言之，所谓线性变化就是变化率不变即等于某一常数。

考虑到交流等效电阻（或叫动态内阻） $R = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ ，可见曲线的变化率与其对应的电阻互为倒数。由于 $0A$ 的变化为一常数，其对应电阻也是常数。

(2) 作与横轴平行的水平直线 BC ，可以看出它的变化率为零。这是因为尽管 ΔU 在变化而其 ΔI 却始终为零的缘故。由于零的倒数为 ∞ ，故其对应电阻 $R = \infty$ 。

(3) 作一个与纵轴平行的直线 DE 。可以看出在端电压的变化量 $\Delta U = 0$ 的情况下，电流的变化量 $\Delta I = \infty$ ，其对应电阻 R 必等于零。

(4) 作曲线 OF ，可以看出它的变化率愈来愈大，对应电阻则愈来愈小。

(5) 作曲线 OG ，可以看出它的变化率愈来愈小，对应电阻则愈来愈大。

至此，可知上述各条曲线的本质区别在于它们的变化率各不相同。掌握了曲线的变化率也就认识了曲线的本质。所谓线性变化就是变化率不变；所谓非线性变化就是曲线的变化率在发生变化。

根据以上的分析，我们就可以从二极管伏安特性曲线上直观地看出二极管内阻的变化规律。从变化率的角度来看，图1-2所示的二极管伏安特性曲线可以分为5段。

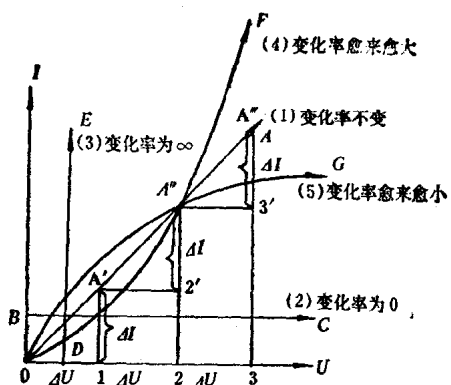


图1-3 曲线的变化率

(1) AB 段：该段曲线的变化率很大，而且随正向电压 U 的加大变化率愈来愈大。此时二极管的内阻很小而且有愈来愈小的趋势。这也说明在该段曲线的范围内二极管处于正向导通状态。此外，由于这段曲线近似于陡斜的直线，为了研究问题的方便，常常可以把它看成直线，从而使非线性问题转化为比较简单的线性问题。该段曲线陡直，意味着电压有一个微小的变化量则电流就会有一个很大的变化量。或者说电流有一个较大的变化而电压基本不变。从这个意义上说，二极管工作在这段曲线上具有一定的稳压特性。

(2) OA 段：该段曲线的变化率很小，但随正向电压的加大，其变化率略有缓慢的增加。它说明这时二极管的内阻还很大，可以认为它不导电。

(3) OC 段：该段曲线的变化率很小，而且有随反向电压加大，其变化率逐渐减小的趋势。此时二极管的内阻有由很大变得更大的趋向。这是因为加上反向电压后，尽管助长了少数

载流子的漂移运动，但由于少数载流子数量有限，而且只与外界温度有关，所以加上反向电压后并不能使少数载流子的漂移运动线性增长，而只能是按变化率愈来愈小的方式增长。因此这段一般可看作不导电区。

(4) *CD*段：该段曲线几乎与横轴平行，这表明它的变化率近似为零，即此时二极管的反向电阻极大，且不随电压而变。从图中可以看出，这段曲线所对应的二极管的内阻最大。它就是我们上面提到的反向饱和电流区，也是不导电区。

(5) *DE*段：这段曲线就是我们所说的反向击穿区所对应的曲线。它的变化率很大而且有愈来愈大的趋势，说明此时二极管的反向电阻急剧变小而且有愈来愈小的趋向。由于这段曲线变化率很大，说明它也具有稳压特性。

综上所述，可见：

(1) 二极管工作在正向导通区和反向击穿区时，其内阻均很小，有近似线性关系，而且都有稳压特性；

(2) 二极管工作在“死区”和反向电压不大的区域时，其内阻都很大，但二者稍有区别。前者随正向电压加大内阻稍有变小，而后者则随反向电压加大内阻变得更大；它们都是导通与截止的过渡区；

(3) 二极管工作在反向饱和电流区时，其内阻极大，以至于在理论分析时可以认为是 ∞ （指交流等效电阻 $\frac{\Delta U}{\Delta I}$ ，而直流电阻则不是 ∞ ）。只有工作在这个区，二极管才具有最好的截止特性。

讨论上述二极管内阻的变化规律，对今后我们分析二极管在实际电路中的作用是十分有益的。

最后，应强调指出，从整体上看二极管的伏安特性曲线是

非线性的，但与此同时，我们也应该认识到在这完整曲线的某一段中，也可以近似地把它看成是线性的。

第二个基本特点是二极管的单向导电性。通常所说的二极管单向导电性，实质上是忽略了正向“死区”电压，忽略了很小的反向饱和电流之后得出的简化结论。是电子电路中常常采用的一种分析方法。但这种忽略是有前提的，那就是对于我们打算讨论的具体问题来说是次要的，而且忽略的电流或电压数量，对将要讨论的电流或电压的数量之比要小得多，即相对比值要很小。这种观点对今后处理实际电子电路也是十分有益的。

考虑到常用的硅二极管和锗二极管的导电特性有一定差异，而同一只晶体二极管在不同的环境温度下导电特性也有一定的区别，我们再给出如图1-4中所示的两组二极管伏安特性曲线。图(a)中用实线给出的为硅二极管伏安曲线，虚线给出的为锗二极管伏安曲线；图(b)中实线给出的是一种锗二极管在 $+20^{\circ}\text{C}$ 时的伏安曲线，虚线所给的是该管在 $+50^{\circ}\text{C}$ 时的伏安曲线。显然它们都具备非线性和单向导电性的共同特点。除此之外，从图(a)中可见，硅二极管与锗二极管相比，二者的导电特性主要有两个差别。其一是硅二极管的导通电压约为 0.6V ，锗二极管的导通电压约为 0.2V ，即硅二极管的导通电压比锗二极管高得多。其二是硅二极管的反向电流比锗二极管小得多，通常小功率硅二极管的反向电流小于 1 微安，而小功率锗二极管却可高达几十微安，二者竟相差几十倍，这意味着硅二极管工作起来要稳定得多。

从图(b)中可见，同种材料制作的二极管，在不同温度下，其伏安曲线也有两个差别。一个是表现在正向特性上，即随着温度升高，导通电压要变小，例如设图中的A点所对应的电压值为 $+20^{\circ}\text{C}$ 时的导通电压，当温度升高到 $+50^{\circ}\text{C}$ 时，A点将提