



半导体电路下

南京邮电学院·北京邮电学院 编

人民邮电出版社

半 导 体 电 路

下 册

南京邮电学院
北京邮电学院 编

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书是结合电信技术编写的，供邮电高等院校作为试用教材，也可供其它高等工科院校通信、电子计算机、自动化和无线电技术专业作为教学参考用书。对从事通信和电子技术的工程技术人员以及中等专业的师生来说，也有一定的参考价值。

全书共十五章，分上、下两册。上册主要内容为小信号放大电路及其分析计算；下册主要内容为功率放大、正弦波振荡、整流和稳压电源以及调制和解调电路等非线性半导体电路，此外还附带介绍一些电子管电路。

半 导 体 电 路

下 册

南京邮电学院
北京邮电学院 编

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：850×1168 1/32 1980年2月第一版
印张：14 24/32 页数：236 1980年2月天津第一次印刷
字数：388千字 印数：1—17,000册

统一书号：15045·总2376-无696

定价：1.65元

前 言

半导体电路是高等工科院校通信、电子计算机、自动化以及无线电技术等专业的一门技术基础课。本书是结合电信技术编写的，可作为邮电学院的试用教材，也可供邮电工程技术人员自学参考。

全书共十五章，分上、下两册。上册主要讲解半导体器件的基本原理和特性，以及线性半导体电路的分析计算。下册主要讲解非线性半导体电路的分析计算。

本书是在南京邮电学院《晶体管电路》讲义的基础上，由南京邮电学院和北京邮电学院教师共同修改、补充和审订的。全书由郭祥沅同志主编，参加编写的有金惠幼，钱秀珍同志。下册由宋亚民同志主审，参加审订的还有北京邮电学院、南京邮电学院、长春邮电学院、兰州铁道学院、上海铁道学院、北方交通大学的有关教师。

由于时间仓促，经验不足，书中难免有谬误之处，希望读者批评指正。

邮电部人事教育局

1979年6月

目 录

第十章 非线性电路的分析基础	1
10-1 非线性元件的特性	1
10-2 非线性电路的基本分析方法	4
10-3 非线性电路的幂级数分析法	6
10-3-1 元件特性的幂级数表示法	6
10-3-2 非线性产物的分析计算	8
10-3-3 谐波失真系数(或非线性失真系数)	10
10-3-4 倍频器	11
10-4 非线性电路的指数函数分析法	12
10-4-1 伏安特性的指数函数近似	12
10-4-2 指数函数近似分析法	13
10-5 非线性电路的折线分析法	17
10-5-1 折线近似表示法	17
10-5-2 折线近似分析法	18
10-6 准线性分析法	22
10-6-1 平均跨导和准线性等效电路	22
10-6-2 平均跨导的计算	24
本章小结	30
习题	31
第十一章 功率放大器	33
11-1 功率放大器的特点和分类	33
11-2 甲类单管变量器耦合功率放大器	36
11-2-1 工作原理	36
11-2-2 单管甲类功放的基本关系式	38
11-2-3 设计计算	45
11-2-4 甲类功率放大器的失真	51
11-3 乙类推挽功率放大器	57

11-3-1	乙类推挽功率放大器的电路和工作原理	57
11-3-2	乙类推挽功率放大器的基本关系式	61
11-3-3	乙类推挽功率放大器的非线性失真	68
11-3-4	乙类推挽功率放大器的设计	71
11-4	无变量器的功率放大器	78
11-4-1	无输出变量器的推挽功率放大器	79
11-4-2	集—射极倒相电路	81
11-4-3	互补对称放大电路	82
11-4-4	复合互补对称功率放大电路	87
11-4-5	无变量器功率放大器的优缺点	89
11-5	晶体管的散热问题	90
11-5-1	晶体管的热阻和最大允许集电极功耗的关系	90
11-5-2	晶体管的散热系统	92
11-5-3	散热板的设计计算	93
11-6	晶体管的并联运用	96
*11-7	场效应管功率放大器	98
11-7-1	功率场效应管	98
11-7-2	VMOS管的优缺点	100
11-7-3	VMOS管功率放大电路	101
11-8	功率放大管的二次击穿和防护	102
11-8-1	二次击穿的现象和原因	102
11-8-2	晶体管的安全工作区	103
11-8-3	二次击穿的防护措施	105
本章小结		106
习题		107
第十二章	正弦波振荡器	111
12-1	振荡器的基本原理	111
12-1-1	振荡器的振荡物理过程	112
12-1-2	振荡的平衡条件与自激条件	115
12-1-3	振荡的建立和稳定的分析	118
12-1-4	利用负电阻产生振荡	124

12-2	晶体管正弦波振荡器的主要形式	128
12-3	LC振荡器	129
12-3-1	变量器反馈振荡器	129
12-3-2	三点式LC振荡器	142
12-3-3	改进型电容反馈振荡器	150
12-3-4	场效应管LC振荡器	152
12-4	LC振荡器的设计计算	153
12-5	RC振荡器	161
*12-5-1	RC移相式振荡器	162
12-5-2	文氏电桥振荡器	168
12-6	振荡器频率的稳定	175
12-6-1	频率稳定度	175
12-6-2	频率变动的因素	176
12-6-3	提高频率稳定度的方法	179
*12-7	音叉振荡器	180
12-7-1	压电音叉谐振器	180
12-7-2	音叉振荡电路	183
12-8	石英晶体振荡器	184
12-8-1	石英晶体谐振器的结构	185
12-8-2	石英晶体谐振器的特性	187
12-8-3	影响晶体频率的主要因素	192
12-8-4	石英晶体振荡电路	195
*12-8-5	高稳定石英晶体振荡器的组成	198
*12-8-6	高稳定石英晶体振荡器的实例	199
*12-8-7	恒温槽温度控制电路	203
*12-8-8	石英晶体振荡器的调测	204
*12-9	振荡器的注入锁相	206
12-9-1	注入锁相的现象和应用	206
12-9-2	注入锁相的原理	208
*12-10	锁相环路	212
12-10-1	工作原理	212

12-10-2 基本方程	214
本章小结	215
习题	216
第十三章 调制、解调及其电路	221
13-1 调制和解调的作用	221
13-2 调制的方式及其基本特性	223
13-2-1 调幅波的基本特性	224
13-2-2 调频波的基本特性	230
13-3 实现调幅的方法和调幅电路	236
13-3-1 平方律调幅和折线调幅	236
13-3-2 载波抑制式调幅电路	239
13-3-3 载波传输式调幅电路	248
13-4 调频电路	251
13-5 反调幅器和检波器	252
13-5-1 载波抑制式的反调幅器	253
13-5-2 检波器	254
13-6 变频电路	262
13-6-1 混频器	264
13-6-2 变频器	266
13-7 鉴频器	267
13-7-1 斜率鉴频器	267
13-7-2 振幅鉴频器	269
13-7-3 相位鉴频器	270
13-7-4 比例鉴频器	274
本章小结	278
习题	280
第十四章 整流与稳压电源	284
14-1 常用的整流电路	285
14-1-1 半波整流电路	285
14-1-2 全波整流电路	286

14-1-3	桥式整流电路	287
14-2	桥式整流电路的计算	289
14-3	整流电路特性小结	292
14-4	平滑滤波器	292
14-4-1	电容滤波器	292
14-4-2	电感滤波器	296
14-4-3	复式滤波器	296
14-4-4	有源滤波器	298
14-5	整流滤波电路的设计计算	300
14-5-1	电容滤波整流电路的基本关系式	300
14-5-2	设计计算	306
14-6	倍压整流电路	307
14-7	硅稳压管稳压器	308
14-7-1	硅稳压管的特性和参数	309
14-7-2	硅稳压管稳压电路的工作原理	311
14-7-3	稳压器的质量指标	313
14-7-4	硅稳压管稳压电路的设计计算	315
14-8	串联式晶体管稳压电路	320
14-8-1	简单串联式晶体管稳压电路	320
14-8-2	带有放大器的串联式晶体管稳压电路	325
14-8-3	串联式晶体管稳压电源的调整测试	340
14-8-4	串联式稳压电路稳压系数和输出电阻的计算	342
14-8-5	串联式晶体管稳压电源性能的改进	346
14-8-6	串联式晶体管稳压电源的过流保护电路	354
14-8-7	集电极输出式稳压电路	361
*14-9	集成电路稳压电源	363
14-9-1	5G11集成稳压电源	363
14-9-2	5G14集成稳压电源	368
14-9-3	利用运算放大器组成稳压电源	369
*14-10	晶体管开关式串联稳压器	370
14-10-1	开关式串联稳压器的的工作原理	371

14-10-2 实例	375
14-10-3 优缺点	379
*14-11 换流器和直流变换器	379
14-11-1 单管式直流变换器	380
14-11-2 推挽式换流器和直流变换器	384
14-12 可控硅整流元件及其电路	389
14-12-1 可控硅的结构和工作原理	389
14-12-2 可控整流电路	396
14-12-3 可控硅整流的控制电路	399
14-12-4 可控硅稳压电路	404
本章小结	406
习题	407
第十五章 电子管和电子管电路	412
15-1 真空二极管	412
15-1-1 构造	412
15-1-2 二极管的单向导电性	413
15-1-3 二极管的特性曲线	414
15-1-4 二极管的参量	415
15-1-5 真空二极管与半导体二极管的比较	415
15-2 真空三极管	416
15-2-1 栅极的控制作用	416
15-2-2 三极管的特性曲线	417
15-2-3 三极管的参量	419
15-3 四极管	424
15-4 五极管	427
15-4-1 五极管中抑制栅极的作用	427
15-4-2 五极管的特性曲线	427
15-4-3 五极管的参量	428
15-5 束射四极管	430
15-6 电子管的基本结构和编号系统	433
15-6-1 电子管的基本结构	433

15-6-2 电子管的编号系统	434
15-7 电子管放大的基本电路	435
15-7-1 电子管的三种联接方式	435
15-7-2 电子管共阴放大的基本电路	436
15-7-3 电子管放大电路的分析方法	437
15-7-4 电子管放大电路与晶体管放大电路的比较	442
15-8 电子管电路举例	443
15-8-1 两级负反馈放大器	443
15-8-2 GB-2型电子管电压表电路	443
15-9 电子射线示波管	446
15-9-1 示波管的构造	446
15-9-2 示波管显示图象的原理	448
本章小结	451
习题	453
参考书目	457

附有*号的节或小节是选学内容。

第十章 非线性电路的分析基础

10-1 非线性元件的特性

组成电路的元件可以分为线性的和非线性的两类。线性元件的主要特征在于它们的工作特性是线性的，并且它们的参量是一个常数，与加到元件的电压或通过的电流大小无关。非线性元件的主要特征则在于它们的工作特性是非线性的，并且它们的参量不是一个常数，而与外加电压或通过的电流大小有关。下面分别介绍非线性电阻、非线性电容和非线性电感的特性。

1. 非线性电阻

电阻元件的工作特性可以用流过电阻的电流 i 和电阻上的压降 u 两者间的关系来表示，这种关系称为伏安特性。线性电阻的伏安特性是通过坐标原点的一条直线，如图10-1-1(a)所示。非线性电阻的伏安特性则是一条曲线，如图10-1-1(b)所示。

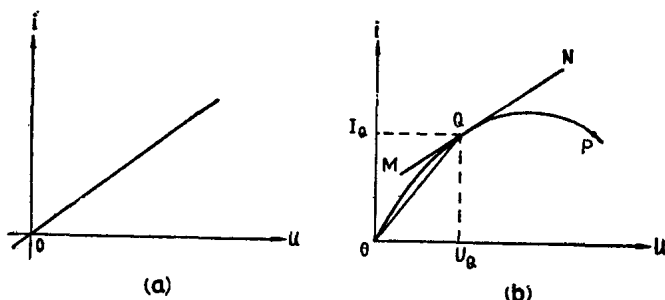


图 10-1-1 线性电阻的伏安特性(a)和非线性电阻的伏安特性(b)

线性电阻的阻值是一个常数，等于电阻上的压降 u 与通过电阻的电流 i 之比，也等于电阻伏安特性曲线的斜率的倒数，即

$$R = \frac{u}{i} = \frac{du}{di}$$

由于非线性电阻的伏安特性是一条曲线，用一般函数式可表示为

$$i = f(u)$$

这时，端电压 u 与电流 i 的比值不等于常数，随电阻上的压降而变化，并且比值 $\frac{u}{i}$ 也不再等于电压对电流的导数 $\frac{du}{di}$ 。一般我们定义两种非线性电阻值——直流电阻（或静态电阻）和交流电阻（或动态电阻）：

$$\text{直流电阻 } r_d = \frac{u}{i}$$

$$\text{交流电阻 } r_a = \frac{du}{di}$$

这两个电阻都不是常量，而是外加电压的函数。

例如，对于具有图10-1-1(b)伏安特性的非线性电阻，当外加电压为 U_0 时，直流电阻

$$r_d = \frac{U_0}{I_0}$$

它是割线 OQ 的斜率的倒数。切线 MN 的斜率的倒数则是这时的交流电阻。

直流电阻始终是有限的正值，而交流电阻则可能为零、无限大、甚至为负值。例如在图10-1-1(b)中的 P 点上，相应于电压的正增量，电流为负增量，就是说该点上的切线斜率的倒数即交流电阻为负值。交流负电阻的概念，在振荡技术中有重要的应用。

实际应用的非线性电阻有二极管和晶体管（低频工作时）以及热敏电阻等。

2. 非线性电容

电容元件的工作特性可以用电容贮存的电荷 q 和电容两端电压 u 二者之间的关系来表示, 这种关系称为伏库特性。线性电容的伏库特性是通过座标原点的一条直线。线性电容的值 C 是一常量, 它等于这条直线的斜率的倒数, 也等于比值 q/u , 即

$$C = \frac{dq}{du} = \frac{q}{u}$$

非线性电容的 q 与 u 不再保持线性关系, 同样可定义两种非线性电容值——静态电容与动态电容为:

$$\text{静态电容 } C_{dc} = \frac{q}{u}$$

$$\text{动态电容 } C_{ac} = \frac{dq}{du}$$

静态电容和动态电容都随电容两端电压的大小而变化。

变容二极管就是一种常用的非线性电容。

3. 非线性电感

电感元件的工作特性可以用线圈的磁链 ψ 与流过线圈的电流 i 两者之间的关系来表示, 这种关系称为磁化曲线。线性电感的磁化曲线是通过座标原点的一条直线。线性电感的参数称为自感系数或简称为电感 L , 它等于

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{d\psi}{di}$$

对于非线性电感, 磁链 ψ 与电流 i 不再保持线性关系, 这时线圈的电感也不再是一常量, 而是电流的函数, 即

$$L(i) = \frac{d\psi}{di}$$

$L(i)$ 称为非线性电感或动态电感。

电感的非线性主要决定于磁心材料，磁心的导磁系数 μ 是磁感应 B 的函数，也是流过电感线圈的电流 i 的函数，因而线圈的电感量也是电流 i 的函数。

应该指出，绝对线性的元件是不存在的。就是线性最好的电阻器，当流过的电流过大时，由于产生热量，也会引起电阻值的变化，呈现出一定的非线性。而从另一方面来说，任何非线性元件，在外加电压或流过的电流很小，并且工作点选定在它的工作特性的线性区间时，又都可以近似地看作是线性元件。在上册各章中，正是在这种条件下，把晶体管当做为线性元件来处理的。因此，在实际应用中一个元件的线性和非线性在很大程度上还取决于作用信号的大小。当作用信号很小时，元件近似处于线性工作状态，可以当做是线性元件；信号很大时，元件的非线性不可忽略，就应看做是非线性元件了，所以非线性工作状态通常也称为大信号工作状态。一般情况下，电阻器、电容器和电感器（特别是空心线圈电感器）的动态范围要比二极管和晶体管大得多。在作用信号较大时，电路中的元件往往是二极管和晶体管首先进入非线性工作状态。

在放大电路中，元件的非线性是有害的，因为它会引起信号的失真，所以应设法尽可能减小它。但在通信技术中，有关电振荡的产生、频率和波形变换以及调制、检波和整流等许多应用中，元件的非线性则起了有益的作用。因为以上这些应用利用线性元件是无法实现的，只有采用非线性元件才有可能达到。

10-2 非线性电路的基本分析方法

全部由线性的或处于线性工作状态的元件所组成的电路称为线性电路。只要电路中有一个元件是非线性的或处于非线性工作状态，则称为非线性电路。无论是线性电路或非线性电路，电路分析的任务通常是在给定电路和激励信号下，计算电路的响应。

线性电路的分析方法是以迭加原理为基础。它首先将复杂的激

励信号分解为若干单元激励信号，并根据电路的特性求出对各单元激励信号的响应，然后应用迭加原理求出电路的总响应。如果单元激励信号是正弦波，则在稳定状态下，电路中的响应也是正弦的，并与激励信号有相同的频率。对于非线性电路，由于其中元件特性的非线性，不能应用迭加原理，并且在正弦信号作用下，电路的响应为非正弦波，所以，以迭加原理为基础的线性电路分析方法都不能直接应用于非线性电路的分析。由于这个缘故非线性电路的分析要比线性电路复杂得多。

我们知道线性电路的特性可以用常系数线性微分方程来表示。而非线性电路的特性则要用非线性微分方程来表示。例如在图10-2-1中，设铁心线圈的电感量 L 是电流 i 的函数，记为 $L(i)$ 。利用基尔霍夫定律列出电路的微分方程为

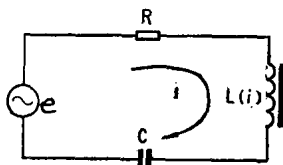


图 10-2-1 一个非线性电路

$$L(i) \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = e$$

将上式对 t 微分，并经过整理得到

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R + \frac{d}{dt} L(i)}{L(i)} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{CL(i)} i = \frac{1}{L(i)} \cdot \frac{de}{dt}$$

这是一个非线性微分方程。这一类方程大多数至今尚未进行详细研究。个别的虽然已设法求出了解答，但很复杂，不合工程实用。所以在实际应用中采用图解法和解析法两种近似分析方法。

当激励信号 $x(t)$ 和非线性特性 $y = f(x)$ 给定时，利用图解法可以求解响应函数 $y(t)$ 。在上册第二章和第四章中我们就曾采用图解法通过在晶体管的输出特性曲线上做负载线，确定晶体管电路的工作点。当外加电压波形已知时，还可以通过逐点绘制，将输出的电流、电压波形画出。图解法的优点是直观，缺点是比较麻烦，特别

在电路中有电感电容等电抗元件时，图解就很困难。

在采用解析法时，已知激励信号的时间函数 $x(t)$ 。如果非线性元件的响应与激励的解析表示式 $y=f(x)$ 也知道，那么元件响应的的时间函数，可由直接代入法求得为 $y=f[x(t)]$ 。所以解析法的关键在于如何求得非线性元件的响应解析表示式。

本章以后几节，将介绍几种常用的非线性元件工作特性的近似数学表达式，以及相应的解析方法。

在通信技术中，应用的非线性元件有许多种，其中 $P-N$ 结二极管和晶体管等半导体器件是最基本的。所以下面将主要研究由晶体管构成的非线性电路分析法。掌握了这种方法，再推广运用到包含有其他非线性元件的电路将是很方便的。

为了突出基本概念和方法，假设晶体管的极间电容可以忽略，并假设电路中只有一个晶体管非线性元件。

10-3 非线性电路的幂级数分析法

10-3-1 元件特性的幂级数表示法

任何形状的特性曲线，当其高阶导数均存在时，都可以用幂级数来表示，对于图10-3-1所示晶体管的 i_C-u_{BE} 转移特性曲线，在工作点 (I_{CQ}, U_{BEQ}) 处，集电极电流 i_C 可以用幂级数表示为：

$$i_C = a_0 + a_1 (u_{BE} - U_{BEQ}) + a_2 (u_{BE} - U_{BEQ})^2 + \dots \\ + a_K (u_{BE} - U_{BEQ})^K + \dots \quad (10-1)$$

式中 $a_0 = I_{CQ}$ 是 $u_{BE} = U_{BEQ}$ 处的 i_C 值， $a_K = \frac{1}{K!} \left[\frac{d^K i_C}{d u_{BE}^K} \right]_{u_{BE} = U_{BEQ}}$

是 $u_{BE} = U_{BEQ}$ 处 i_C 的 K 次导数值。像(10-1)式这样围绕工作点展开的幂级数，常称为泰勒级数。从原则上讲，幂级数要有无限多项才能准确地表示原曲线，但在实际应用中，为了便于计算，项数不应取得过多，以免计算过于烦琐。如果伏安特性如图10-3-1那样变化