

前 言

随着信息技术的飞速发展,无线通信、雷达、电子对抗、物联网、航空航天等领域对高性能电子系统的需求日益迫切。在这些系统中,承担着信号产生、频率变换、功率放大等核心功能的电路,其工作机理大多建立在电子器件的非线性特性上。因此,深入理解和掌握非线性电子线路的分析与设计方法,已成为电子信息类专业学生和工程技术人员必须具备的核心能力。

本书是编者在国防科技大学电子对抗学院多年教学与科研实践的基础上,结合当前技术发展趋势和教学改革需求,精心编写而成的。本书旨在系统、深入地阐述非线性电子线路的基本概念、工作原理、分析方法与工程设计技术,为读者构建坚实的理论基础,并培养其解决复杂工程问题的能力。

本书在内容编排上遵循从理论到实践、从基础到应用的原则。全书共分为 6 章:第 0 章绪论系统阐述了非线性电子线路的基本概念、特性、作用和基本分析方法,强调非线性元件在现代电子系统中的关键作用,并对比其与线性电路的差异;第 1 章围绕正弦波振荡器展开,详细分析了反馈型、LC 三端式、石英晶体、RC 及环形振荡器的工作原理、稳定条件及设计方法,为后续的频率变换电路提供信号源基础;第 2 章系统论述频谱线性搬移技术,重点剖析了振幅调制与解调、混频器的核心机理、电路实现及性能指标,强调了非线性器件在实现相乘功能中的关键作用;第 3 章深入探讨频谱非线性变换,以角度调制及其解调为重点,分析了其特性、实现电路及改善性能的技术途径;第 4 章专述谐振功率放大器,详细讨论其工作原理、工作状态、性能分析及高效率工作模式,并专门介绍馈电与匹配电路的设计;第 5 章介绍反馈控制电路,包括自动电平控制、自动频率控制以及极为重要的锁相环技术,阐述了锁相环的数学模型、跟踪与捕捉过程及在频率合成、解调等领域的广泛应用。

本书力求体现以下特色。

(1) 理论基础扎实:注重物理概念的阐释和数学模型的建立,使读者不仅能知其然,更能知其所以然。对关键公式和结论进行了详细推导,便于读者深入理解。

(2) 工程应用突出:紧密结合工程实践,各章节均安排了典型的电路实例、工程设计考虑和仿真验证环节,引导读者将理论知识与工程设计相结合。附录专门介绍了滤波器技术,以支撑全书各章节对选频网络的需求。

(3) 内容系统前瞻:内容组织上注重知识的系统性和连贯性,同时纳入了集成模拟乘法器、VCO、锁相频率合成等现代电路技术,反映了技术发展的前沿。

(4) 教学适用性强:语言力求简洁明了,图文并茂。各章均配有思考题与习题及其参考答案,便于教师组织教学和学生自主学习巩固。

在本书的编写过程中,参考了大量国内外优秀教材、学术专著和科技文献,谨向相关

作者致以诚挚的谢意。感谢国防科技大学电子对抗学院领导和同事的大力支持，感谢科学出版社编辑的辛勤工作和宝贵建议，同时也要感谢历届学生在教学互动中提出的宝贵意见，本书得以不断完善。

由于非线性电路领域内容广博且技术发展日新月异，加之编者水平有限，书中疏漏与不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2025 年 10 月于国防科技大学

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 非线性元件的基本特点	1
0.2 非线性电子线路的作用	6
0.3 非线性电子线路的基本分析方法	8
0.3.1 折线近似法	8
0.3.2 多项式近似法	11
0.3.3 数值迭代法	12
思考题与习题	12
第 1 章 振荡器	13
1.1 引言	13
1.1.1 周期信号与振荡器	13
1.1.2 正弦波振荡器与张弛振荡器	13
1.1.3 振荡器的非线性实质	14
1.2 反馈型振荡器的组成与分析方法	14
1.2.1 基本组成与工作原理	15
1.2.2 起振条件	16
1.2.3 平衡条件	17
1.2.4 稳定条件	18
1.2.5 基本分析方法	20
1.3 LC 三端式振荡器	22
1.3.1 电路组成规则	22
1.3.2 电路起振的振幅条件	23
1.3.3 偏置电路	31
1.3.4 频率稳定度及稳频措施	34
1.3.5 差分对管振荡器	39
1.3.6 LC 正弦波振荡器的设计与仿真验证	42
1.4 石英晶体振荡器	43
1.4.1 石英晶体谐振器	44
1.4.2 石英晶体谐振器的电特性	44
1.4.3 石英晶体振荡器电路	46
1.5 RC 振荡器与环形振荡器	50
1.5.1 RC 振荡器	50

1.5.2	环形振荡器	54
1.5.3	逻辑门电路构成的环形振荡器	55
1.5.4	反相放大器构成的环形振荡器	56
1.6	负阻正弦波振荡器	56
1.6.1	负阻器件	57
1.6.2	负阻振荡原理及其电路	58
1.6.3	正反馈电路实现负阻振荡	60
1.7	压控振荡器	61
1.7.1	压控特性与实现途径	61
1.7.2	变容二极管与压控振荡器	62
1.7.3	延时控制实现压控振荡器	64
1.7.4	电流控制实现压控振荡器	64
1.8	特殊振荡现象	66
1.8.1	寄生振荡	66
1.8.2	间歇振荡	67
1.8.3	频率占据	68
	思考题与习题	71
第2章	频谱搬移电路	76
2.1	引言	76
2.1.1	频谱变换的概念	76
2.1.2	频谱搬移电路的作用	77
2.1.3	频谱搬移电路的基本组成	78
2.2	频谱搬移的实现技术	79
2.2.1	非线性器件实现频谱搬移的机理	79
2.2.2	相乘器的基本组成单元	83
2.2.3	四象限相乘器	86
2.2.4	二极管实现频谱搬移的原理	92
2.3	混频器	94
2.3.1	混频器的主要性能指标	95
2.3.2	二极管平衡与双平衡混频电路	97
2.3.3	集成模拟乘法器	101
2.3.4	混频失真及其抑制	104
2.3.5	混频电路仿真	111
2.4	振幅调制与解调	113
2.4.1	振幅调制的基本原理	114
2.4.2	振幅调制电路	122
2.4.3	振幅调制的解调电路	125
	思考题与习题	136

第3章 频谱非线性变换电路	141
3.1 角度调制的基本原理	141
3.1.1 频率调制和相位调制	141
3.1.2 角度调制信号的频谱	145
3.2 调频电路	149
3.2.1 调频器的主要技术指标	149
3.2.2 调频器的实现方法	150
3.2.3 直接调频电路	151
3.2.4 间接调频电路	161
3.2.5 扩展最大频偏的方法	169
3.2.6 集成调频器	170
3.3 调频信号解调电路	171
3.3.1 鉴频电路性能指标	172
3.3.2 鉴频的实现方法	172
3.3.3 斜率鉴频器	177
3.3.4 相位鉴频器	179
3.3.5 典型集成鉴频器	191
3.3.6 鉴频电路仿真	194
思考题与习题	196
第4章 谐振功率放大器	200
4.1 谐振功率放大器的工作原理	200
4.1.1 电路组成	200
4.1.2 工作原理	201
4.1.3 性能分析	204
4.2 谐振功率放大器的工作状态	208
4.2.1 工作状态分类	208
4.2.2 负载特性	210
4.2.3 偏置特性	211
4.2.4 放大与限幅特性	213
4.3 馈电与匹配电路	214
4.3.1 馈电电路	214
4.3.2 谐振回路匹配电路	216
4.3.3 谐振功率放大器的仿真	223
4.4 开关型谐振功率放大器	225
4.4.1 丁类谐振功率放大器	225
4.4.2 戊类谐振功率放大器	226
思考题与习题	227

第 5 章 反馈控制电路	229
5.1 反馈控制电路的作用与分类	229
5.1.1 反馈控制电路的作用	229
5.1.2 反馈控制电路的分类	230
5.2 自动电平控制电路	230
5.2.1 工作原理	231
5.2.2 检波与控制	232
5.3 自动频率控制电路	233
5.3.1 工作原理	233
5.3.2 应用	236
5.4 锁相环	238
5.4.1 工作原理与环路模型	238
5.4.2 跟踪与捕捉	241
5.4.3 锁相解调与接收	249
5.4.4 锁相频率合成	252
5.4.5 锁相环仿真分析举例	256
思考题与习题	258
附录 A 滤波器	260
A.1 滤波器的特性和分类	260
A.1.1 滤波器的特性	260
A.1.2 滤波器的分类	260
A.1.3 滤波器的基本性能指标	262
A.2 无源滤波器	263
A.2.1 RC 滤波器	263
A.2.2 LC 滤波器	267
A.3 有源滤波器	269
A.3.1 有源低通滤波器	269
A.3.2 有源高通滤波器	271
A.3.3 二阶有源带通滤波器	273
A.3.4 二阶有源带阻滤波器	275
参考文献	277

第0章 绪 论

从严格意义上讲,任何电子器件的电特性都不是绝对的线性关系,其电特性只是在局部呈现出线性或在一定工作条件下呈现出近似线性的特性,电特性为非线性则是更为常见的情况。

利用器件电特性的线性部分或一定条件下的近似线性特性可以实现许多期望的功能,最典型的就晶体三极管构成的小信号放大电路。尽管晶体三极管的输入、输出伏安特性都是非线性的,但在输入为小信号且晶体管被偏置到放大区合适位置的限定条件下,可以实现对输入小信号的近似线性放大,可以使用相应的小信号线性等效电路,采用线性电路的分析方法对放大电路的性能(增益、输入电阻、输出电阻、系统传递函数等)进行分析。同样,对于含晶体二极管的电路,在确保二极管正向导通的情况下,可以将二极管等效为线性电阻或短路线,对电路的性能进行分析。在这些条件下,尽管晶体管的非线性或多或少地会造成输出的非线性失真(注意与线性失真不同),但在上述使用中都尽可能地降低非线性失真,使之处于微小或可接受的范围之内。

但是,器件电特性的非线性是客观存在的,而且正是由于器件电特性非线性的存在,信号的产生、频率变换、调制与解调等功能得以实现,而这些功能在现代电子系统中的重要性是不言而喻的。如何运用器件的非线性特性构成可以实现上述功能的电子线路,并对这些电子线路的性能进行分析,正是本书的宗旨所在。

0.1 非线性元件的基本特点

电阻、电容、电感亦有线性与非线性之分。例如,线性电阻是指其伏安(v - i)特性为线性,而非线性电阻是指其伏安特性为非线性。图 0-1-1 给出了一个典型线性电阻与一个典型非线性电阻的伏安特性示意图。由图可以看出,线性电阻的伏安特性为一条过原点的直线,直线斜率的不同表示线性电阻的阻值不同;而非线性电阻的伏安特性为一条过原点的曲线(其特性无法用单一数值的电阻来表征)。

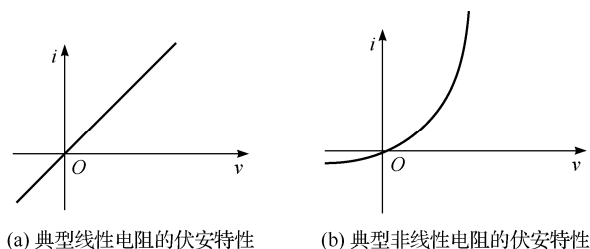


图 0-1-1 线性与非线性电阻的伏安特性示意图

与此相对应, 电容的线性与非线性是由其库伏($q-v$)特性是否为线性来决定的, 电感的线性与非线性是由其韦安($\phi-i$)特性是否为线性来决定的。

在非线性电子线路中, 被广泛运用的非线性器件是晶体二极管、晶体三极管与场效应管。这些器件被广泛运用的原因: 一是 PN 结具有与生俱来的非线性伏安特性; 二是对上述器件的非线性伏安特性的深刻认知与精确描述。本书所涉及的非线性电子线路均是以晶体二极管、晶体三极管与场效应管作为非线性元件的。因此, 在后面的讨论中都是以上述元件为主来进行讨论的, 这也是本书将非线性元件的参数描述限定于伏安特性的原因所在。非线性电阻元件具有如下特性。

1. 不满足叠加性

不满足叠加性是非线性元件的一个重要特性, 即在一般情况下, 不能使用叠加定理对非线性电子线路进行分析。

以图 0-1-2 所示的电路为例来加以说明。其中, v_1 、 v_2 及 v_1+v_2 均不会导致二极管 D 的热击穿与反向击穿, 已知二极管的伏安特性为 $i = I_s(e^{v/V_T} - 1)$, 其中 I_s 是二极管反向饱和电流, V_T 是热电压。 v_1 、 v_2 单独作用时产生的电流分别为 i_1 、 i_2 , 根据伏安特性有

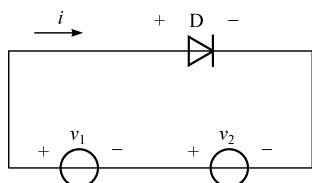


图 0-1-2 某非线性电路图

$$i_1 = I_s(e^{v_1/V_T} - 1)$$

$$i_2 = I_s(e^{v_2/V_T} - 1)$$

设 v_1+v_2 作用时的电流为 i , 则

$$\begin{aligned} i &= I_s \left[\exp\left(\frac{v_1+v_2}{V_T}\right) - 1 \right] = I_s \left[\exp\left(\frac{v_1}{V_T}\right) \exp\left(\frac{v_2}{V_T}\right) - 1 \right] \\ &\neq I_s \left[\exp\left(\frac{v_1}{V_T}\right) - 1 \right] + I_s \left[\exp\left(\frac{v_2}{V_T}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (0-1-1)$$

可见, $i \neq i_1 + i_2$, 该电路的电流不满足叠加性。

不满足叠加性是非线性电子线路的一个重要特点, 这使得对非线性电子线路的分析面临许多新的问题, 但这也给电路实现信号的非线性处理带来可能。

2. 非线性元件的控制量

元件的非线性特性可以是单调的, 也可以是非单调的。图 0-1-3 分别给出了普通二极管与隧道二极管伏安特性的正向特性。可以看出, 普通二极管的伏安特性是单调的, 而隧道二极管的伏安特性则呈现出明显的非单调性。

对于伏安特性为非单调的元件来说, 在分析时确定其控制量是十分重要的。以隧道二极管为例, 它是一个典型的电压控制元件, 即控制量为电压。对该元件而言, 元件两端给定一个确定的电压值, 则元件具有唯一对应的电流值, 而仅知道流过它的电流值, 是无法唯一确定元件两端的电压值的。从图 0-1-3(b)可以看出, 当隧道二极管两端的电压为 V_1 时,

有确定且唯一的电流值 I_1 与之对应；而知道(如测量得出)流过隧道二极管的电流为 I_1 时，电压 V_1 、 V_2 与 V_3 均可能导致电路产生该电流，因而无法唯一确定此时元件两端的电压。因此，将该元件称为电压控制型元件——控制量为电压，反之则称为电流控制型元件——控制量为电流。

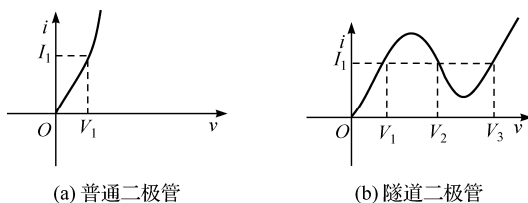


图 0-1-3 普通二极管与隧道二极管的正向伏安特性示例

对于伏安特性为单调的元件来说，由于其电压与电流之间的一一对应关系，因此无须区分其为电压控制型或电流控制型，无论是将电压视为控制量还是将电流视为控制量均可。

3. 非线性元件的参数

以晶体二极管为例，尽管伏安关系式已经精确地描述了元件的特性，但对于该元件来说，直接使用其伏安关系式并采用解析的方法来分析电路将是一个非常复杂的问题。在图 0-1-4 所示的简单电路中，二极管为普通二极管，设其两端的电压为 v_D ，则求解二极管两端电压进而求解电路中电流的方程为

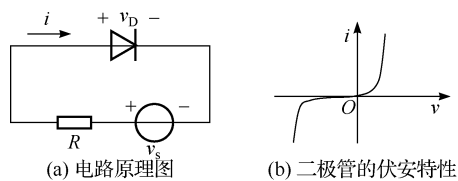


图 0-1-4 某一含二极管元件的电路示例

$$v_s = v_D + iR = v_D + I_s(e^{v_D/V_T} - 1)R \quad (0-1-2)$$

其中， I_s 为二极管的反向饱和电流； V_T 为热电压。方程中只有一个待求量 v_D ，但直接求解该方程是非常复杂的。若电路进一步复杂化，则求解会更加复杂。因此在实际使用中，往往采用一些特性参数来描述非线性元件，从而使求解在满足精度要求的条件下变得更加简化。

1) 非线性电阻的特性参数

从伏安特性上来看，晶体二极管就是一个典型的非线性电阻元件，因此在下面将以晶体二极管为例来讨论特性参数。

非线性电阻的特性参数可以用直流电导 g_Q (静态电导)、小信号电导 g (交流电导) 与平均电导 g_{av} 来描述。

(1) 直流电导 g_Q 。

直流电导又称静态电导，它是非线性电阻元件在直流激励条件下，流过元件的电流与其两端电压的比值，即直流电导 g_Q 为

$$g_Q \stackrel{\text{def}}{=} \frac{I_Q}{V_Q} \quad (0-1-3)$$

图 0-1-5 给出了直流电导在伏安特性上的图示。它可以理解成伏安特性上静态工作点(Q 点)与原点连线的斜率。Q 点改变, 则该点与原点连线的斜率也随之改变。因此, 对非线性元件而言, 即便是直流电导也随着静态工作点的变化而变化, 这是非线性电阻与线性电阻的区别之一。

(2) 小信号电导 g 。

小信号电导又称交流电导, 它是非线性电阻被偏置在某一静态工作点 Q 时, 电流相对电压的变化率, 即小信号电导 g 为

$$g|_Q \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{di}{dv} \right|_Q \approx \left. \frac{\Delta i}{\Delta v} \right|_Q \quad (0-1-4)$$

图 0-1-6 给出了小信号电导在伏安特性上的图示。它可以理解成静态工作点处伏安特性的斜率, 近似等于静态工作点处电流微小变化与相应电压微小变化的比值。小信号电导可在小信号范围内用于线性等效电路的分析。同时应注意到, 小信号电导的大小与所设置的静态工作点紧密相关, 例如, 晶体二极管在正向导通区的小信号电导就近似为 I_Q/V_T , 其中, I_Q 是流过它的静态电流。

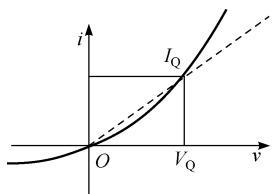


图 0-1-5 非线性电阻直流电导定义的图示

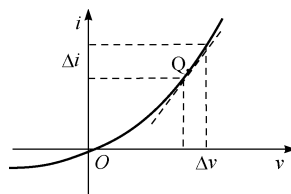


图 0-1-6 非线性电阻小信号电导定义的图示

需要注意的是, 对于某些非线性电阻, 尤其是伏安特性非单调的非线性电阻, g 可能会出现负值。 g 为负值就意味着在交流情况下, 非线性电阻能等效地“提供”能量(相对于为正值时的消耗能量而言), 这一特性在振荡电路中有独特的运用。

(3) 平均电导 g_{av} 。

平均电导是指非线性电阻上基波电流幅值与基波电压幅值的比值, 即平均电导 g_{av} 为

$$g_{av} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{I_{1m}}{V_{1m}} \quad (0-1-5)$$

如果非线性电阻被偏置于 Q 点, 且所加的交流电压为小信号, 可以认为 g_{av} 就是 g ; 但当所加的交流电压为大信号时, 元件的非线性将起主导作用, 此时 g_{av} 与 g 就是两个完全不同的概念。为了理解 g_{av} 的意义, 下面结合图 0-1-7 进行说明。

假定某非线性电阻的伏安特性如图 0-1-7(a)所示, 为了更加突出重点, 此时假设没有直流偏置电压, 即加在非线性电阻两端的电压为正弦交流电压 $v = V_{1m} \cos(\omega t)$, 如图 0-1-7(b)所示, 结合伏安特性, 则可得到如图 0-1-7(c)所示的流过非线性电阻的电流。从图 0-1-7(c)

中明显可以看出,此时的电流已经不是正弦信号了,但其仍是周期信号,其周期与所加电压信号的周期一致,则根据傅里叶级数的概念,电流可表示为

$$i = I_0 + I_{1m} \cos(\omega t) + I_{2m} \cos(2\omega t) + \cdots + I_{nm} \cos(n\omega t) + \cdots \quad (0-1-6)$$

电流中的基波成分为 $I_{1m} \cos(\omega t)$, 其幅值 I_{1m} 与元件两端所加正弦交流电压的幅值 V_{1m} 的比值即为平均电导(注意: I_{1m} 一般不是图 0-1-7(c)中的 I_m)。

应该注意到,式(0-1-6)中各次谐波电流的振幅是电流 i 的傅里叶级数展开的系数,该系数除了会随着激励电压的变化而变化外,还会随着静态工作点的改变而改变。因此, g_{av} 的大小也与静态工作点紧密相关,只不过其关系不像 g_Q 与 g 那样明显。

在示例中是假定为电压激励的,但换成电流激励亦可,只是要对相应的电压进行傅里叶级数展开得到基波电压幅度,然后使用式(0-1-5)就可得到 g_{av} 。

对于伏安特性为非单调的非线性电阻来说,其 g_{av} 值的定义与求解思路与前面一致,只不过得到响应量基波信号的振幅的计算过程会更加烦琐一些。

在更多的非线性应用中,可能希望得到的响应与加在非线性电阻两端的激励不是同一个频率,而是激励的某次谐波频率,此时就需要使用其他的电导参数来描述该元件。仍旧使用上例,如果此时希望该非线性电阻能够实现倍频,即 $I_{2m} \cos(2\omega t)$ 是希望的响应,则应定义相应的倍频电导。当用于其他频率变换时,还可定义相应的变频电导等。

2) 晶体三极管的跨导

非线性电子线路中另一个经常使用的元件是晶体三极管(包括场效应管),其最主要的参数就是跨导。与非线性电阻(包括晶体二极管)一样,也有静态跨导 g_{mQ} 、小信号跨导 g_m 、平均跨导 g_{mav} 的概念,其定义分别为

$$g_{mQ} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{I_{CQ}}{V_{BEQ}} \quad (0-1-7)$$

$$g_m|_Q \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{di_c}{dv_{be}} \right|_Q \quad (0-1-8)$$

$$g_{mav} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{I_{c1m}}{V_{be1m}} \quad (0-1-9)$$

同样,当它运用于倍频或变频时,还可定义为倍频跨导或变频跨导。

对于非线性电感与非线性电容的特性参数,这里不再一一赘述。其实,非线性电容也是非线性电子线路组成中的一个重要元件,最典型的就是利用 PN 结的反向势垒电容——该

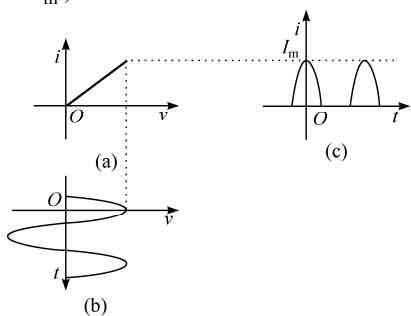


图 0-1-7 非线性电阻平均电导定义的图示

电容的大小受 PN 结的反向电压控制——构成压控振荡器(VCO)和调频电路,其特性参数到具体使用时再介绍。

0.2 非线性电子线路的作用

非线性电子线路在现代电子系统中起着重要作用。无线收发系统是非线性电子线路运用的典型系统。图 0-2-1 给出了无线收发系统最简单的组成框图。

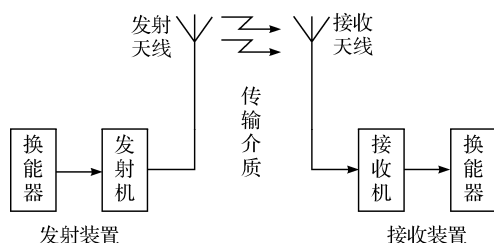


图 0-2-1 无线收发系统最简单的组成框图

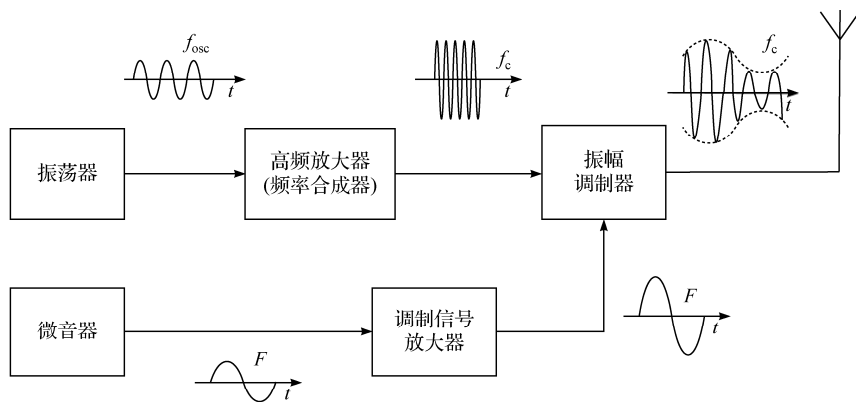
无线收发系统利用电磁波进行信号的传递。就装置而言可分为发射装置与接收装置两大部分。

发射装置包括换能器、发射机和发射天线。换能器将待传输的信息,如声音、图像、文字等转化为电信号;发射机将该电信号变换为能量足够且适合无线传播的电磁振荡——频率远高于甚至远远高于待传输信息经过换能器转换生成的电信号的最高频率;发射天线将发射机产生的电磁振荡转换为电磁波,向传输介质辐射。

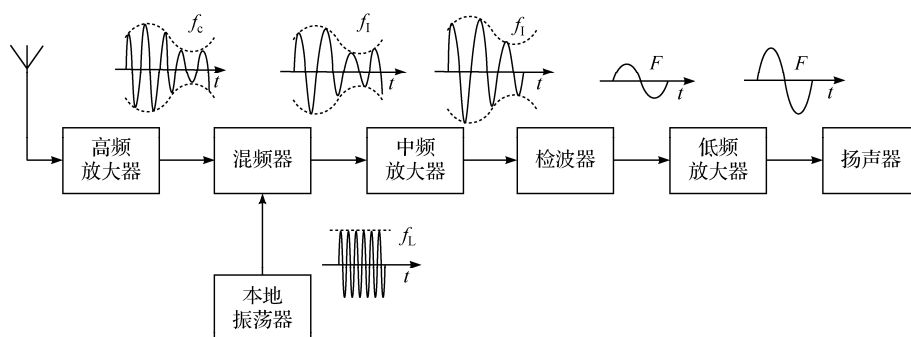
接收装置包括接收天线、接收机和换能器。接收天线将从传输介质传输过来的电磁波变换为对应的电磁振荡;接收机将电磁振荡还原为传输的电信号——频率远低于甚至远远低于天线输出的电磁振荡的频率;换能器将传输的电信号转换为原始信息,如声音、图像、文字等。

换能器与天线的内容由相应的课程进行讨论,不在本书的讨论范畴内;而发射机与接收机中都有一系列的频率产生与转换的过程,非线性电子线路正是实现这些过程的关键。

为了展现发射机与接收机中非线性电子线路所起的作用,结合调幅广播系统中的发射机与接收机的组成来进行说明。图 0-2-2 给出了一个调幅广播系统中发射机与接收机的简单组成框图,其中,图 0-2-2(a)是发射机的简单组成框图;图 0-2-2(b)为接收机的简单组成框图。在图中分别给出了发射机与接收机各个主要组成部分的输出波形,同时为了波形的简单明了,假设需要收发的信号为一简谐波,即微音器的输出为一频率 F 的正弦信号。



(a) 发射机的简单组成框图



(b) 接收机的简单组成框图

图 0-2-2 调幅广播系统发射机与接收机的简单组成图

发射机中各部分的职能是：微音器将语音信号变换为电信号；调制信号放大器将其放大到合适大小；振荡器(oscillator)用来产生频率为 f_{osc} 的高频振荡信号，其频率一般在几百千赫兹(kHz)以上；高频放大器与频率合成器(frequency synthesizer)(可选)由多级带有谐振系统的谐振放大器与频率合成器(可选)组成，用来将振荡器产生的信号变换到需要的载波频率 f_c 上(如果载波频率即为振荡器产生信号的频率，则不需要频率合成器)，并将其放大到足够高的功率。振幅调制器用调幅的方式将待传送的信号调制到载波上，并馈入天线进行发射。调制是通过有效利用传输介质、合理控制天线尺寸以实现无线传输的重要手段，振幅调制是诸多调制方式中的一种。发射机中的振荡器、频率合成器及调制器均属于非线性电子线路的范畴。

接收机中各部分的职能是：高频放大器对天线耦合的信号进行放大；本地振荡器(它也可以由振荡器与频率合成器构成)用来产生频率为 f_L 的本地振荡信号($f_L = f_c - f_1$ ， f_1 为中频频率，对于广播而言，它是一个业界公认的固定频率，我国调幅广播的 f_1 为 465kHz)；混频器是根据本地振荡器的频率，将高频放大器输出的信号从频率上进行搬移，输出载波为 f_1 的调幅信号(也就是通过可变的 f_L 与固定的 f_1 结合，实现了电台的选择)；中频放大器通过多级固定调谐的小信号谐振放大器实现对中频调幅信号的放大；检波器实现对中频调幅信号的解调，即从载波为 f_1 的调幅信号中还原出发射机传输的信号(假设是频率为 F 的正弦波)；低频放大器对解调输出的信号进行幅度放大与功率放大；扬声器是将经过放大的信号转换为最初的信息。接收机中的本地振荡器、混频器、检波器均属于非线性电子器件的范畴。

这里的接收机采用的是超外差体制，因本地振荡器的频率总是比欲接收的信号载波高一个中频而得名，还有其他体制的接收机，但超外差体制是调幅、调频广播接收机(最典型的是收音机)中普遍采用的接收机体制。

观察接收机与发射机中各组成框的输出波形，结合已有的信号分析方法(傅里叶级数与傅里叶变换)可以看出，非线性电子线路的一个显著特点就是输出信号与输入信号(有时甚至没有输入信号，如发射机中的振荡器或接收机中的本地振荡器)的频率不一致，要么产生了新的频率分量，要么消除了已有的频率分量，或者是二者兼而有之。观察一下检波器可以看出，输入信号的频谱应该是集中在中频频率附近，这一点在本书后面会给出详细的分析，而输出信号已是一个频率为 F 的低频信号。

0.3 非线性电子线路的基本分析方法

至少存在一个非线性元件且元件工作于非线性状态的电子线路称为非线性电子线路。非线性电子线路与线性电子线路的最大共同点是二者均服从基尔霍夫定律,因此,均可通过列写相应的回路电压方程与节点电流方程来进行求解。但非线性元件的出现使得线性电路中的线性代数方程组(电路中含储能元件)或线性微分方程组(电路中含储能元件)被含有非线性代数方程或非线性微分方程的方程组取代。对于非线性代数方程与非线性微分方程而言,直接解析求解将十分烦琐甚至不可能,例如,在已知 v_s 、 R 、 V_T 与 I_s 的情况下,直接通过求解式(0-1-2)来得到 v_D 或 i 就会非常烦琐,而且由于不满足叠加定理,通过系统传递函数与冲激响应分析系统在各种激励条件下的零状态响应也成为不可能(因为系统中的参数与激励的形式和强度紧密相关,如非线性电阻的 g_Q 、 g 、 g_{av} 等)。因此,在线性电子线路中已经非常成熟且广泛使用的分析方法,在非线性电子线路中往往不能直接使用。但是直接使用非线性元件的特性(伏安特性、输入-输出特性、库伏特性、韦安特性)进行方程的解析求解,其复杂度在工程上又是难以承受的,因此在实际的非线性电子线路分析中,在不影响分析精度、确保工程使用性能的基础上,往往采用如下三种方法对非线性元件的特性进行近似:折线近似法、多项式近似法和数值迭代法。以此在保证非线性特性与保持电路实际性能的基础上尽可能简化分析的烦琐度。

0.3.1 折线近似法

仍旧以晶体二极管为例来讨论。图 0-3-1 给出了晶体二极管在非线性应用下折线化处理的方法。其中,图 0-3-1(a)是忽略晶体二极管正向开启电压的影响、反向特性理想化为截止的折线化近似伏安特性;图 0-3-1(b)是考虑二极管正向开启电压的影响、反向特性理想化为截止的折线化近似伏安特性;图 0-3-1(c)是忽略正向开启电压的影响,但考虑反向特性的折线化近似伏安特性;图 0-3-1(d)是同时考虑正向开启电压与反向特性的折线化近似伏安特性。其中, g_1 、 g_2 分别为二极管伏安特性的正、反向特性折线化后的斜率。

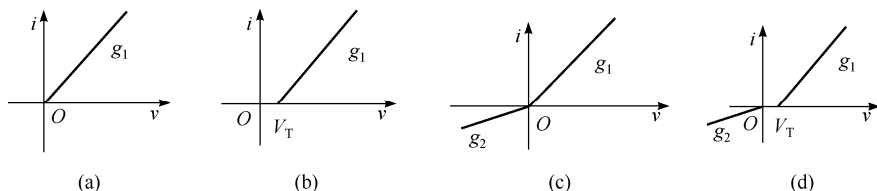


图 0-3-1 晶体二极管伏安特性的折线近似

上述四个折线化模型都未考虑二极管的击穿特性,因此,在使用上述折线化模型时必须确保二极管不会工作到击穿区。

进行了这样的折线近似后,含二极管的电路在非线性的运用下的分析就可进行分段解析求解了(因为在每一段都可以采用线性电路的分析方法进行解析求解)。至于在四个折线化模型中选取何者,取决于所加激励的形式、幅度及对问题的求解精度。

图 0-3-2(a)给出了一个含晶体二极管的非线性电子线路。该电路的激励为正弦信号，其幅度 V_m 远大于晶体二极管的开启电压，但不会导致二极管的击穿，且产生的反向导通电流的大小可以忽略不计。要求在此条件下分析流过二极管的电流。

根据题意，在分析时可采用图 0-3-1(a)的折线化模型，则可得到电流的分段表达式为

$$i_D = \begin{cases} \frac{V_m \cos(\omega t)}{R + 1/g_1}, & 2n\pi - \frac{1}{2}\pi \leq \omega t < 2n\pi + \frac{1}{2}\pi \\ 0, & 2n\pi + \frac{1}{2}\pi \leq \omega t < 2n\pi + \frac{3}{2}\pi \end{cases} \quad (0-3-1)$$

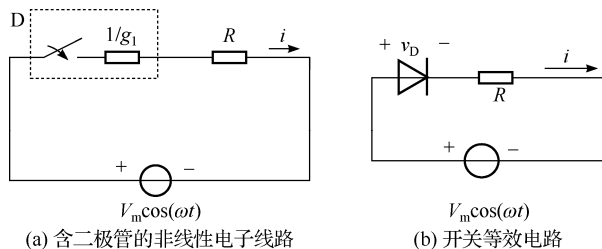


图 0-3-2 含晶体二极管的非线性电子线路及其开关等效电路

如果需要分析电流中的频率成分，则可以采用傅里叶级数对电流进行级数展开，从而得到各个频率分量的幅值。

如果需要提高分析的精度，可以采用分段折线化进行伏安特性的近似，这对伏安特性非单调的非线性元件来说尤为重要。

折线近似法较为适合在输入的交变信号为大信号(或多个交变信号中存在大信号)的情况下电路的分析计算。

从图 0-3-2(a)的特性可以看出，该模型的实质是：在输入信号为负值时，二极管截止；在输入信号为正值时，二极管导通，并等效为一个阻值为 $1/g_1$ 的电阻。因此，图 0-3-2(a)的伏安特性可以用一个单向开关加电阻等效。因此在分析电路时，可将图 0-3-2(a)等效为图 0-3-2(b)的单向开关等效电路。

为了表示开关特性并将分段函数写成统一的解析表达式，在非线性电子线路分析过程中引入了开关函数。

常用的开关函数有两种：单向开关函数 $K_1(\omega t)$ 和双向开关函数 $K_2(\omega t)$ 。

单向开关函数 $K_1(\omega t)$ 的定义为

$$K_1(\omega t) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 1, & 2n\pi - \frac{1}{2}\pi \leq \omega t < 2n\pi + \frac{1}{2}\pi \\ 0, & 2n\pi + \frac{1}{2}\pi \leq \omega t < 2n\pi + \frac{3}{2}\pi \end{cases} \quad (0-3-2)$$

图 0-3-3 给出了单向开关函数 $K_1(\omega t)$ 的图示。

由于单向开关函数 $K_1(\omega t)$ 在半个周期内为 1，另外半个周期内为 0，因此运用它可以很简洁地将式(0-3-1)用分段函数表示的电流解析表达为

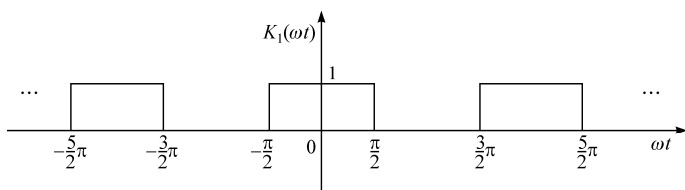


图 0-3-3 单向开关函数

$$i_D = \frac{V_m \cos(\omega t)}{R + 1/g_1} K_1(\omega t) \quad (0-3-3)$$

从数学的角度来看，单向开关函数 $K_1(\omega t)$ 是一个周期性方波，可对其进行傅里叶级数分析。由于该函数是一个偶函数，并且去掉该函数的平均分量 $K_1(\omega t) - 1/2$ 后，是一个奇谐函数，因此，其傅里叶级数展开式中只有直流、基波与奇次谐波的余弦分量。对应的傅里叶级数表达式为

$$K_1(\omega t) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{2}{(2n-1)\pi} \cos[(2n-1)\omega t] \quad (0-3-4)$$

基于式(0-3-4)，再来分析式(0-3-3)中电流 i_D 的频率成分及各成分的幅度就会非常方便。除了单向开关函数 $K_1(\omega t)$ 外，还有双向开关函数 $K_2(\omega t)$ ，该函数的定义为

$$K_2(\omega t) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 1, & 2n\pi - \frac{1}{2}\pi \leq \omega t < 2n\pi + \frac{1}{2}\pi \\ -1, & 2n\pi + \frac{1}{2}\pi \leq \omega t < 2n\pi + \frac{3}{2}\pi \end{cases} \quad (0-3-5)$$

图 0-3-4 给出了双向开关函数 $K_2(\omega t)$ 的图示。

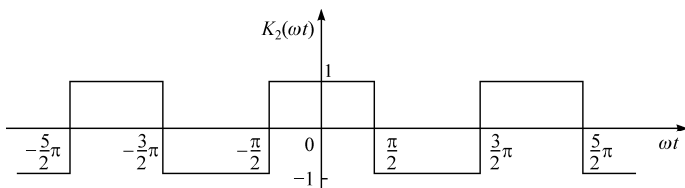


图 0-3-4 双向开关函数

由于双向开关函数 $K_2(\omega t)$ 在半个周期内为 1，另外半个周期内为 -1，因此，在电路的等效分析上可以将它视为一个具有方向选择性的开关“元件”。

$K_2(\omega t)$ 是一个均值为零的偶函数，并且为奇谐周期函数，其相应的傅里叶级数表达式为

$$K_2(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{4}{(2n-1)\pi} \cos[(2n-1)\omega t] \quad (0-3-6)$$

双向开关函数 $K_2(\omega t)$ 与单向开关函数 $K_1(\omega t)$ 之间有如下关系：

$$K_2(\omega t) = K_1(\omega t) - K_1(\omega t - \pi) \quad (0-3-7)$$