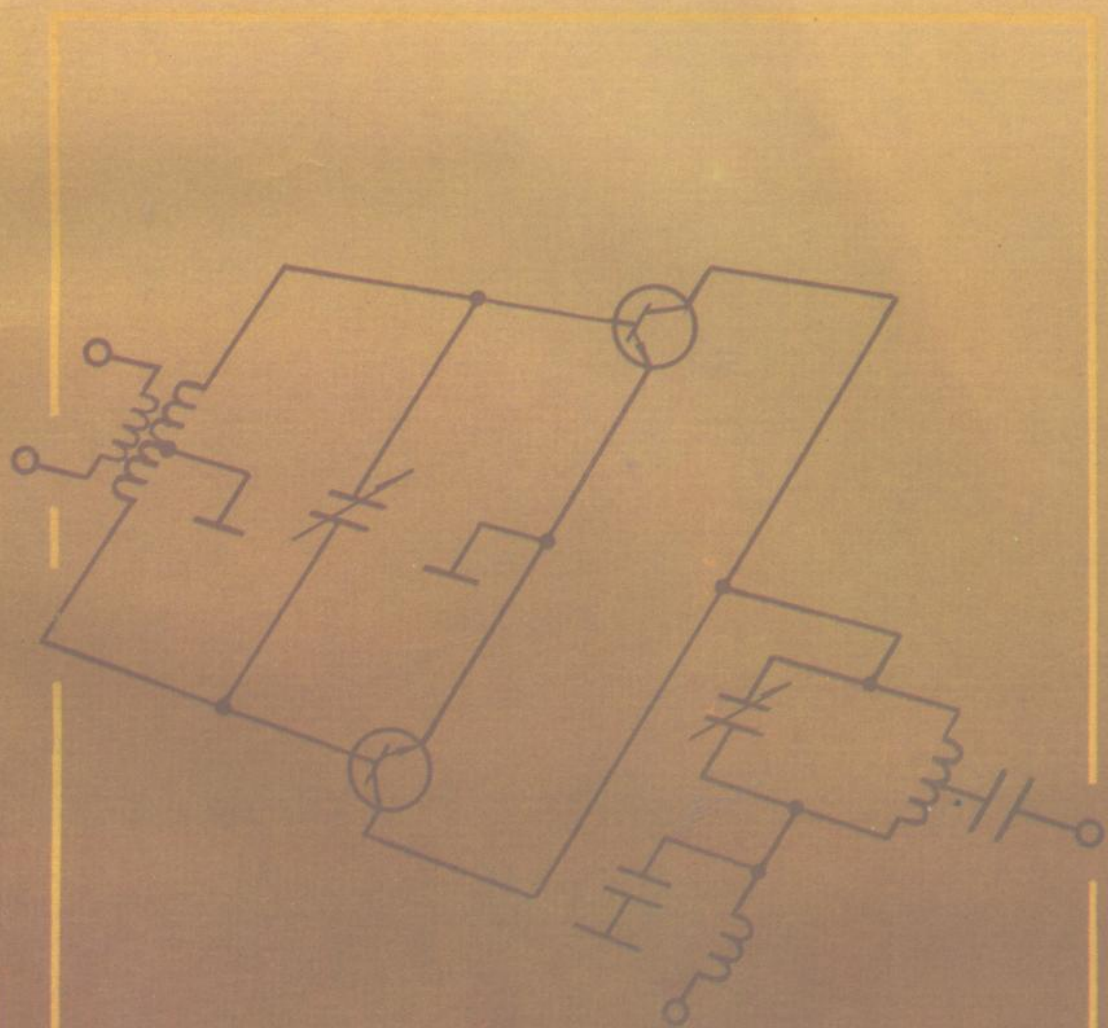


沈 琴 李长法 编著

非线性电子线路

PEIXIANXING DIANZIXIANLU



北京广播学院出版社



非线性电子线路

沈琴 李长法 编著

北京广播学院出版社

(京)新登字 148 号

内容简介

《非线性电子线路》全书共分七章,内容包括:绪论、非谐振功放、谐振功放,正弦振荡、模拟相乘器和混频器,振幅调制与解调电路,角度调制与解调电路、锁相环路。还有两个附录:稳压电源、通信系统举例。

本书吸收本领域近年来的新成果、新技术、新概念。增加了高效率功放(D. E. S 类)工作原理,基本分析和电路设计举例;开关电容基本概念和开关电容振荡器;突出相乘器,并以相乘器为核心展开在频率变换中应用;引入电流模基本概念、电流模分析方法、电流模相乘器及芯片应用举例;频率合成技术原理和常见频率合成;还增加通信系统应用举例,以提高学生对单元电路应用于整机能力、读图能力和电路分析能力,每章有难易适当的思考题和习题。

为帮助学生课后复习和提高,改革教学手段,专为本教材配备了计算机辅助教学(CAI)软件,(内容包括原理(要点,难点)、例题、练习题、总结、实验、制作、英汉科技词汇索引及帮助等。)以便学习中配合使用。

本书读者对象为本科生、电大、联大和夜大学生,也可供有关工程技术人员参考。

非线性电子线路

沈 琴 李长法 编著

北京广播学院出版社出版发行

(北京朝阳区定福庄南里 7 号 邮编:100024)

北京朝阳东方印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:20 字数:350 千字

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

印数:1—1000 册

ISBN7—81004—674—8/G·353

定价:22.00 元

出版前言

根据一九八七年国家教委电子线路指导小组公布的电子线路 1、2 课程基本要求,和一九九一年国家教委电子线路课程教学指导小组扩大会议有关修订教学基本要求的精神,目前随着新元器件的出现,集成电路与工艺技术的发展,以及计算机广泛应用,电子线路教学内容与近年通信、广播、电视的发展相适应,贯彻以集成电路为主原则,同时考虑非线性电子线路是核心技术基础课程,任务是培养学生分析和设计电子系统的硬件能力,培养学生掌握科学分析方法和认知的规律,因而在内容改革时,基础部分必须相对稳定,精选基础内容,为设计集成电路和适应不断出现的各种新电路形式,需重视基本分立电路技术和讨论各单元电路基本结构、特性、工作原理、分析方法及工程估算方法,删去过细繁琐的教学推导分析,加强集成电路应用,以适应规定的 51 至 68 教学学时,实验 25 学时。

本书的绪论,第一章至第三章(除高效率功放外)及附录 I 由李长法执笔。第四章至第七章,第二章的高效功放及附录 II 由沈琴执笔。由沈琴负责全书的组织和定稿。清华大学肖华庭教授主审全书稿,提出许多宝贵意见。北京广播学院张永辉教授对书稿也提出许多有益的建议,在此一并表示诚挚的谢忱。

限于编著的水平,本书在内容取舍,叙述和文字润饰等方面难免存在不妥之处,甚至可能有错误。恳求读者批评和指正。

编 者

一九九六年五月

常用符号表

一、基本符号

I, i 电流
 V, v 电压
 P, p 功率
 R, r 电阻
 G 电导
 X, x 电抗
 B, b 电纳
 Z, z 阻抗
 Y, y 导纳
 L 电感
 C 电容
 M 互感
 A 增益
 t 时间
 f, F 频率
 ω, Ω 角频率
 $S = \sigma + j\omega$ 复频率
 BW 带宽, 频谱宽度
 NF 噪声系数

二、电流、电压

小写 $v(i)$, 小写下标表示交流电压(电流)瞬时值(例如, v_o 表示输出交流电压瞬时值)

大写 $V(I)$, 大写下标表示直流电压(电流)(例如, V_o 表示输出直流电压。)

小写 $v(i)$, 大写下标表示包含有直流的电压(电流)瞬时值(例如, v_o 表示含有直流的输出电压瞬时值)

大写 $V(I)$, 小写下标表示正弦电压(电流)有效值(例如, V_o 表示含有直流的输出电压瞬时值)

V_Q 静态工作点电压

v_i 输入交流电压瞬时值

v_o 输出交流电压瞬时值

v_s 交流信号源电压瞬时值

$\dot{V} = V(j\omega) = V e^{j\omega t}$ 正弦电压复数值

V_m 正弦电压振幅值

$V(s)$ 电压的拉普拉斯变换

V_{CC}, V_{BB} 集电极和基极直流电源电压

V_{DD}, V_{GG} 漏极和栅极直流电源电压

v_n 调制信号电压瞬时值

v_c 载波电压瞬时值

v_s 信号电压瞬时值

v_L 本振电压瞬时值, 负载电压瞬时值

v_I 中频电压瞬时值

v_{AV} 含有直流的平均电压瞬时值

V_f 反馈电压有效值

V_{REF} 基准电压

三 阻抗、导纳

R_s 信号源内阻

R_L 负载电阻

R_i 输入电阻

R_o 输出电阻

$R_e(g_e)$ 回路有载谐振电阻(电导)
或回路等效谐振电阻(电导)

$R_\infty(g_\infty)$ 回路空载谐振电阻(电导)或回路固有谐振电阻(电导)。

$Z(j\omega) = Z(\omega) e^{j\phi_z(\omega)}$ 阻抗复数值

$Z(\omega) = |Z(j\omega)|, \phi_z(\omega)$ 阻抗的模
值和相角

$Y(j\omega) = Y(\omega) e^{j\phi_y(\omega)}$ 导纳复数值

$Y(\omega) = |Y(j\omega)|, \phi_y(\omega)$ 导纳的模
值和相角

g_{ic} 混频跨导

四、增益

$A(s)$ 增益的拉普拉斯变换

$\dot{A} = A(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\phi_A(\omega)}$ 复数增
益

$A(\omega) = |A(j\omega)|, \phi_A(\omega)$ 增益的幅

值和相角

A_v 电压增益

A_i 电流增益

G_P 功率增益

五、功率

P_o 输出信号功率,载波功率

P_c 集电极耗散功率

P_D 直流电源供给功率

P_A 额定功率

P_i 输入功率

P_{av} 已调波平均功率

六、频率

f_{osc} 振荡频率

f_c 载波频率(载频)

f_l 中频频率(中频)

f_L 本振频率

f_o 回路固有谐振频率

七、器件参数

1、晶体二极管

V_B 内建电位差,势垒电压

$V_D(on)$ 导通电压

$V_{(BR)}$ 击穿电压

I_S 反向饱和电流

C_j 结电容

V_Z 稳压管的稳定电压

V_O 整流电压

I_O 整流电流

2、晶体三极管

I_{CBO} 发射极开路时集电结反向饱和电流

I_{CEO} 基极开路时的穿透电流

I_{CM} 集电极最大允许电流

$V_{CE(sat)}$ 集电极饱和压降

$V_{(BR)CBO}$ 发射极开路时C—B结反向击穿电压

$V_{(BR)CEO}$ 基极开路时,C—E结反向击穿电压

$V_{BE(on)}$ B—E 结导通电压

P_{CM} 集电极最大允许耗散功率

R_{th} 热阻

T_{jm} 最高允许结温

g_m 跨导

α 共基极短路电流传输系数

β 共发射极短路电流放大系数

f_c 共基极交流电流传输系数的截止频率

f_β 共发射极交流电流放大系数的截止频率

f_T 特征频率

r_e 发射结电阻(肖特基电阻)

$\gamma_{bb'}$ 基区扩展电阻(基区体电阻)

3、场效应管

I_{DSS} $U_{GS}=0$ 时饱和漏极电流

$V_{GS(off)}$ 夹断电压

$V_{GS(th)}$ 开启电压

八、其他符号

k 耦合系数

Q_o 回路空载品质因数或回路固有品质因数

Q_e 回路有载品质因数或回路品质因数

ρ 回路特征阻抗

η 效率、耦合因子

n 接入系数,匝数比,变容管变容指数

N 匝数

Q 静态工作点

τ 渡越时间、时间常数

ξ 一般失谐量、集电极电压利用系数

k_f 反馈系数

T 反馈放大器的环路增益(回归比)

M 调制度或调制系数

$K(j\omega)$ 开关函数

η_d 检波效率(检波电压传输系数)

ζ 阻尼系数 S_{np} 纹波系数(纹波抑制比) S 稳压系数 θ, φ 流通角

目 录

绪论	1	§ 2-1 谐振功率放大器的特点	41
§ 0-1 什么是非线性电子线路	1	2-1-1 工作原理	41
§ 0-2 无线电发送设备的工作过程和 主要组成部分	1	2-1-2 电路中的能量关系	44
§ 0-3 无线电接收设备的工作过程和 主要组成部分	3	2-1-3 提高效率的途径	44
§ 0-4 本书的研究对象及内容	3	§ 2-2 谐振功率放大器的性能分析	45
第一章 非谐振功率放大器	5	2-2-1 谐振功率放大器的分析方 法	45
§ 1-1 非谐振功率放大器概述	5	2-2-2 各极电压对工作状态的影 响	47
1-1-1 功率放大电路的特点	5	§ 2-3 晶体管谐振功率放大器的高频 特性	49
1-1-2 功率放大器的极限工作区	6	§ 2-4 谐振功率放大器的电路	51
1-1-3 功率放大器的分类	7	2-4-1 直流馈电电路	51
§ 1-2 单管甲类变压器耦合功率放大 器	8	2-4-2 匹配网络	54
1-2-1 典型电路与各元件的作用	8	2-4-3 谐振功率放大器的实用 电路	60
1-2-2 工作状态的图解分析	9	§ 2-5 高效功率放大器	61
§ 1-3 乙类推挽功率放大器	13	2-5-1 丁类功率放大器	61
1-3-1 工作原理	14	2-5-2 戊类功率放大器	65
1-3-2 电路性能分析与计算	15	2-5-3 S类功率放大器	68
1-3-3 非线性失真	18	§ 2-6 晶体管倍频器	72
§ 1-4 集成化功率放大器	20	2-6-1 倍频器的工作原理	73
§ 1-5 功率管的散热与保护	23	2-6-2 倍频器的电路	74
1-5-1 功率管的散热问题	23	附录 I :折线近似分析法	76
1-5-2 功率管的二次击穿	26	附录 II :LC 谐振回路	79
1-5-3 功率管的保护电路	27	思考题	81
§ 1-6 功率合成技术	28	习题	81
1-6-1 传输线变压器	28	第三章 正弦波振荡器	84
1-6-2 功率合成和分配电路	33	§ 3-1 概述	84
思考题	37	§ 3-2 反馈型正弦波振荡器工作原理	85
习题	38	3-2-1 振荡器的平衡条件	85
第二章 谐振功率放大器	41		

3-2-2 振荡器的起振条件·····	86	4-1-5 电流模电路及电流模相乘器·····	144
3-2-3 振荡器的稳定条件·····	87	4-1-6 MOS 集成相乘器·····	159
3-2-4 振荡器的组成及分析方法·····	90	§ 4-2 混频电路·····	162
§ 3-3 LC 正弦振荡器·····	91	4-2-1 混频概念与实现方法·····	162
3-3-1 三点式振荡电路·····	91	4-2-2 混频的质量指标·····	164
3-3-2 差分对管振荡电路·····	99	4-2-3 三极管混频器·····	165
§ 3-4 关于振荡器频率和振幅稳定的问题·····	100	4-2-4 集成混频电路·····	171
3-4-1 关于振荡频率的稳定问题·····	100	4-2-5 二极管混频器·····	172
3-4-2 提高幅度稳定性的措施·····	102	4-2-6 场效应管混频电路·····	174
§ 3-5 晶体振荡器·····	103	4-2-7 混频器的干扰和非线性失真·····	177
3-5-1 石英晶体的基本特性及其等效电路·····	103	4-2-8 参量混频·····	180
3-5-2 晶体振荡电路·····	105	思考题·····	184
§ 3-6 RC 振荡器·····	109	习 题·····	185
3-6-1 RC 选频网络·····	109	第五章 振幅调制与解调电路 ·····	187
3-6-2 RC 振荡电路·····	112	§ 5-1 振幅调制的基本原理·····	187
§ 3-7 开关电容振荡器·····	114	5-1-1 标准调幅波特性和实现的数学模型·····	187
3-7-1 开关电容网络的基本知识·····	114	5-1-2 单、双边带调制的基本特性和数学模式·····	190
3-7-2 开关电容振荡器·····	117	5-1-3 残留边带调幅·····	192
§ 3-8 负阻振荡器·····	119	§ 5-2 振幅调制电路·····	194
3-8-1 负阻的基本概念与器件的负阻特性·····	119	5-2-1 低电平振幅调制电路·····	194
3-8-2 负阻振荡原理·····	121	5-2-2 高电平振幅调制电路·····	202
3-8-3 负阻振荡线路·····	122	§ 5-3 振幅调制的解调电路·····	206
§ 3-9 寄生振荡·····	124	5-3-1 检波概述·····	206
思考题·····	126	5-3-2 标准调幅波的解调电路·····	206
习 题·····	126	5-3-3 双边带和单边带调幅波的解调电路·····	215
第四章 模拟相乘器和混频电路 ·····	130	思考题·····	217
§ 4-1 模拟相乘器·····	130	习 题·····	217
4-1-1 概述·····	130	第六章 角度调制与解调电路 ·····	221
4-1-2 二极管相乘器·····	132	§ 6-1 角度调制的基本特性·····	221
4-1-3 三极管相乘器·····	136	6-1-1 调角波的表示式·····	221
4-1-4 实用四象限集成相乘器·····	140	6-1-2 调角波的频谱结构和带宽·····	224
		6-1-3 调频波的平均功率·····	226

6-1-4 调频波与调幅波的比较	226	§ 7-2 锁相环路的性能	259
6-1-5 调频电路的主要性能指标 ...	227	7-2-1 锁相环路方程和相位模式	259
§ 6-2 直接调频电路	227	7-2-2 锁相环路的跟踪性能 ...	263
6-2-1 电抗管调频电路	227	7-2-3 锁相环路的捕捉性能 ...	266
6-2-2 变容二极管直接调频 ...	228	§ 7-3 锁相环路的应用	272
6-2-3 晶振变容二极管直接调频	232	7-3-1 锁相倍频、分频和混频	272
§ 6-3 间接调频电路	232	7-3-2 锁相调频、调相,鉴频鉴相和锁相同步检波	274
6-3-1 间接调频工作原理	232	§ 7-4 频率合成技术	276
6-3-2 实现调相的电路	233	7-4-1 概述	276
6-3-3 变容二极管间接调频电路	236	7-4-2 主要技术指标	277
§ 6-4 扩大线性频偏的方法	238	7-4-3 频率直接合成方法	277
6-4-1 倍频扩大绝对频偏,保持相对频偏不变	238	7-4-4 锁相频率合成法(频率间接合成法)	279
6-4-2 混频扩大相对频偏,保持绝对频偏不变	238	7-4-5 集成频率合成器	281
§ 6-5 调频波解调方法和鉴频电路	239	思考题	282
6-5-1 鉴频方法	239	习 题	282
6-5-2 鉴频器的性能指标	239	附录 I 稳压电路	284
6-5-3 斜率鉴频	240	§ I-1 集成稳压电路	284
6-5-4 相位鉴频	241	I-1-1 串联式稳压电路的工作原理	284
6-5-5 比例鉴频	246	I-1-2 稳压电源的质量指标	285
6-5-6 脉冲数字式鉴频	248	I-1-3 集成稳压电路	286
§ 6-6 限幅器	250	§ I-2 开关稳压电路	291
6-6-1 晶体二极管限幅器	250	I-2-1 开关电源的工作原理	291
6-6-2 晶体三级管限幅器	251	I-2-2 自激式开关稳压电路	295
6-6-3 差分对管限幅器	252	I-2-3 集成开关电源控制器	295
思考题	252	思考题	297
习 题	253	习 题	297
第七章 锁相环路(PLL)	256	附录 II 通信系统举例	299
§ 7-1 通信系统中的反馈控制电路简介	256	§ II-1 概述	299
7-1-1 自动增益控制电路	256	II-1-1 简介	299
7-1-2 自动频率控制电路	257	II-1-2 系统的结构,信号的流	
7-1-3 自动相位控制电路(APC)的工作原理	257		

通是读阅的前提·····	299	I-2-2 中频电视发射机框图	305
I-1-3 读图要则·····	299	·····	305
§ I-2 通信系统举例 ·····	300	I-2-3 黑白电视接收机·····	305
I-2-1 短波收发信机·····	300	I-2-4 超外差收音机·····	306

绪 论

当我们初次接触到“非线性电子线路”这门课程时,可能立即会想到,什么是非线性电子线路?这门课程的主要研究对象和内容是什么?为了阐明这些问题,我们先概略地谈一下非线性电子线路的概念,然后结合通信系统的主要结构,进一步阐明各部分非线性电子线路的功能。

§ 0-1 什么是非线性电子线路

各种电子器件一般来说都是非线性器件,因此,所有包含这类器件的电子线路都是非线性电路。当然,随着其使用条件不同,电子器件表现出来的非线性程度也大不相同。在线性电子线路中,我们对信号进行处理时,尽量使用电子器件的线性部分。在这种情况下,电路基本上是线性的,但多少存在着失真。从另一方面来看,可以利用电子器件的非线性来完成振荡、频率变换等功能。完成这些功能的电路统称为非线性电子线路。

例如功率放大器,由于输入信号幅度大,且要考虑放大器效率等要求,器件就应工作到非线性特性部分,这样,就不能用线性等效电路表示电子器件,而必须用非线性电路的分析方法。因此,从分析方法的观点出发,将功率放大器归在非线性电子线路的范畴。

非线性电子线路广泛应用于通信系统和各种电子设备中。为了了解非线性电子线路的作用,现以通信系统为例,对其应用作一概括介绍。

一个完整的通信系统一般包括信号源、发送设备、传输信道、接收设备和受信装置五部分,如方框图 0-1 所示。传输信道可以是平行线(如架空明线等)、电缆、或光缆,也可以是传输无线电波的自由空间。下面我们就以无线电通信系统为例,说明通信系统中发送设备和接收设备的工作过程和主要组成部分。

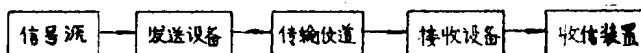


图 0-1 通信系统方框图

§ 0-2 无线电发送设备的工作过程和主要组成部分

无线电通信是指把声音或图像,以“无线电”为手段传送给远方接收者的一种通信方式。

人耳能听到的声音的频率约在 20 赫到 20 千赫的范围内,这一频率范围叫做音频。声波在空气中的传播速度很慢,约 340 米/秒,而且衰减很快。一个人无论怎样尽力高喊,他的声音也不能传得很远。为了把声音传到远方,常用的方法是把它变成电信号,然后再设法把这信号传出去。把声音变为电信号一般是由话筒来实现的。当发话人对着话筒说话时,话筒就输出相当的电压,但这个电压很小,通常只有几毫伏到零点几伏,需要用音频放大器加以放大,经过放大后的音频信号可以利用导线传出去,再经耳机或喇叭恢复为原来的声音。这就是通常的有

线通信或广播。

怎样才能不用导线,将声音的信号由天空传送出去呢?我们知道,交变的电振荡可以利用天线向空中辐射,但天线的长度必须和电振荡的波长可以比拟。声音的频率约 20 至 20 千赫,即波长范围为 15×10^3 至 15×10^6 米,要制造出与此尺寸相当的天线是很困难的。因此无法直接将声音信号辐射到空中去,而且即使辐射出去,由于各个电台所发出的信号频率都在相同范围,它们在空中混在一起,接收者也无法选择要接收的电台信号。因此要想不用导线传送声音信号,就必须利用频率更高(即波长较短)的电振荡,并设法把音频信号“装载”在这种高频振荡之中,然后由天线辐射出去。这样,天线尺寸可以比较小,不同的电台也可以采用不同的高频振荡频率,使彼此互不干扰。

无线电台产生高频电振荡的部件叫做高频振荡器,把音频信号“装载”到高频振荡的过程叫做调制。音频信号叫调制信号,未调制的高频振荡称为载波信号,经过调制的高频振荡信号称为已调波信号。若受控的参数是高频振荡的振幅,则这种调制称为振幅调制,简称为调幅,而已调波信号就是调幅波信号;如果受控的参数是高频振荡的频率或相位,则该调制称为频率调制或相位调制,简称为调频或调相,并统称为调角,而已调波信号就是调频波或调相波,并统称为调角波信号。

综合上面的分析,归纳起来,一个无线电发射机应包括四个组成部分:一、声音的变换与放大,这一部分的频率较低,叫做“低频部分”;二、高频振荡的产生、放大与调制,统称为“高频部分”;三、天线与传输线;四、直流电源部分。图 0-2 画出了采用调幅方式的无线电通信发射机的组成方框图(直流电源部分在图中没有画出)。

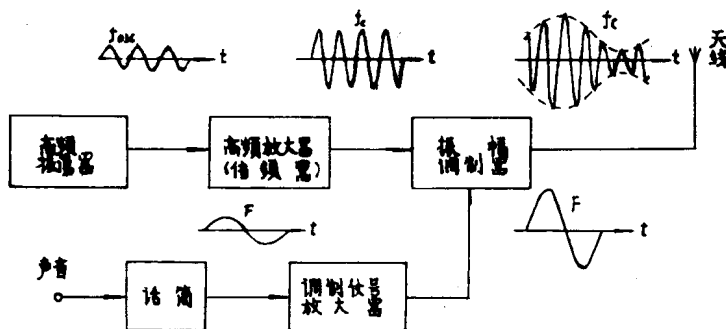


图 0-2 采用调幅方式的无线电通信发射机组成方框图

图中,高频振荡器用来产生恒定频率 f_{osc} 的高频振荡信号,其频率一般在几十到几百 KHz 以上。

高频放大器由多级谐振放大器及倍频器组成,用来放大振荡器产生的振荡信号,并使其频率倍增到载波频率 f_c 上,最后提供足够的载波功率。

调制信号放大器又称低频放大器,它是由电压放大器和功率放大器组成。前面几级为电压放大器,用来放大经话筒变换后的音频电信号;后面几级为功率放大器,用来提供足够功率的调制信号。

振幅调制用来实现调幅功能,它将输入的载波信号和调制信号变换为所属的调幅波信号,

然后加到发射天线上。

§ 0-3 无线电接收设备的工作过程和主要组成部分

接收机的工作过程恰好和发射机相反,它的基本任务是将天空传来的电磁波接收下来,并把它还原为原来的信号。

图 0-3 是采用调幅方式的无线电通信接收机组成方框图。

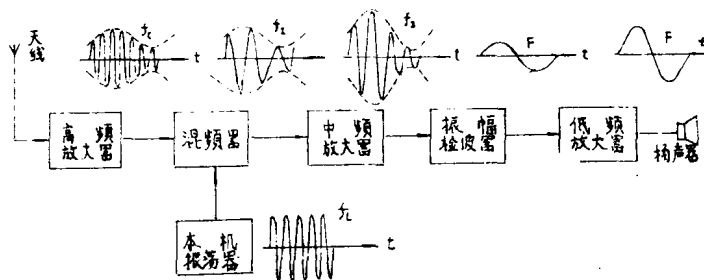


图 0-3 采用调幅方式的无线电通信接收机组成方框图

图中,高频放大器由一级或多级小信号谐振放大器组成,用来放大电磁波在天线上感生的有用信号;同时,利用放大器中的谐振系统抑制天线上感生的其它频率的干扰信号。由于谐振放大器的中心频率随所需接收信号频率 f_c 的不同而不同,因此,高频放大器必须是可调谐的。

混频器是将载波频率为 f_c 的高频已调信号不失真地变换为载波频率为 f_1 的中频已调信号的变换电路。由于中频频率是固定的,因此中频放大器的选择性和增益都和所接收的载波无关。

本机振荡器用来产生频率为 $f_L = f_c + f_1$ 的高频振荡信号。由于 f_1 是固定值,而 f_c 是随所需接收信号不同而不同,所以,本振频率 f_L 应该是可调的,而且必须正确跟踪 f_c 。

中频放大器用来放大中频调幅信号,而振幅检波器则将中频调幅信号变换为反映传送信息的调制信号。

低频放大器由电压放大器和非谐振功率放大器组成,用来放大携带信息的调制信号,向扬声器提供必须的推动功率。

除上述调幅通信系统外,目前也越来越广泛地采用调频等方式的通信系统。但是,不论采用何种调制方式,发射机和接收机都必须包括上述各组成方框、它们的区别主要在调制器和解调器。

§ 0-4 本书的研究对象及内容

在上面介绍的通信系统组成方框中,除了小信号放大器以外,其它如振荡器、功率放大器、调制器、解调器、混频器、倍频器都属于本书讨论范围内的非线性电子线路。显然,它们的性能好坏,直接影响整个通信系统的质量。

就电路功能而言,各种非线性电子线路可以归纳为以下三类:

第一类是实现功率放大功能的电路。这类电路可以在输入信号作用下,将直流电源所提供的直流功率,变换为按输入信号规律变化的输出信号功率,并使输出信号功率大于输入信号功率。这类电路有非谐振功率放大器和谐振功率放大器等。

第二类是实现振荡功能的电路。这类电路能在接通直流电源后,自动地产生某个特定频率的电振荡或一定频率范围的正弦波振荡信号。

第三类是实现波形变换或频率变换功能的电路。这类电路能在输入信号作用下产生与输入信号波形和频率不同的输出信号。属于这类功能电路的有:混频电路、倍频电路、调制电路和解调电路等。

本书将顺序讨论这三大类电路,在第七章还将介绍近代通信技术中广泛应用的锁相技术,最后在附录中简单讨论集成和开关稳压电源电路。

学习本书时,要注意电路的工作原理和基本物理概念的分析,以及各电路功能之间的内在联系。再者,非线性电子线路是在科学和生产实践中发展起来的,许多理论概念只有通过实践才能得到深入的了解。因此,学习本书时,必须高度重视实验环节,坚持理论联系实际,这样可以更好地验证和掌握所学的理论知识。

第一章 非谐振功率放大器

功率放大器包括非谐振功率放大器和谐振功率放大器,本章讨论非谐振功率放大器。

功率放大器要解决的主要矛盾是:在允许的非线性失真条件下,如何使晶体管本身的损耗减小,使输出的信号功率尽可能大,从而提高放大器的换能效率。

本章首先介绍了功率放大器的一般问题,如工作特点和分类情况等,进而指出提高放大器效率的途径。接着重点讨论变压器耦合甲类、乙类推挽功率放大电路、功率管的散热与保护和功率合成等问题。

学习过程中要紧紧抓住功率、效率和失真问题,并以提高效率为线索,掌握输出功率、晶体管的损耗、电源供给的直流功率以及效率等相互间的关系。以乙类推挽电路作为分析的重点,要求能够运用图解法熟练地掌握这类放大电路的分析与计算;了解减小管耗及波形失真的方法,以及使输出级处于更佳运用状态,以保证放大器有最大的输出功率。

§ 1-1 非谐振功率放大器概述

1-1-1 功率放大电路的特点

在许多电子设备的末级,往往需要输出一定的功率来带动负载工作,如使扬声器发出声音,继电器簧片振动等,这类放大器通常称为功率放大器。

功率放大器和电压放大器不同。电压放大器主要任务是使负载得到不失真的电压信号,其主要指标是电压放大倍数、带宽、频率响应以及输入与输出阻抗等,输出功率的大小则不是主要的。而功率放大器则不同,它主要要求是获得一定的不失真(或失真较小)的输出功率,因此通常在大信号状态下工作。功率放大器包含许多在电压放大器研究中没有出现过的特殊问题,这些问题概括起来便是:

一、输出功率要大

为此要求功放管的电压和电流都有足够大的输出幅度,从而使管子往往在接近极限运用状态下工作。

二、转换效率要高

由于输出功率大,因而要求直流电源提供的功率也较大,这就存在一个效率问题。所谓效率、就是指功率管集电极输出的有用信号功率 P_o 和电源供给的直流功率 P_D 的比值,用 η_c 表示。

$$\begin{aligned}\eta_c &= \frac{P_o}{P_D} \times 100\% \\ &= \frac{P_o}{P_o + P_c} \times 100\% \quad (1-1-1)\end{aligned}$$

P_c 为管耗, η_c 越接近于 1, 则放大器的效率越高,它意味着在相同输出功率的情况下,要求直流电源供给的功率越小或管子内部消耗的功率越小。例如, $\eta_c = 50\%$, 说明电源供给的直流

功率 P_D 中,一半通过晶体管转换或交流输出功率,另一半在晶体管的集电极以发热的形式消耗掉了。因此,如何提高放大器的效率是功率放大器必须着重考虑的又一个重要问题。

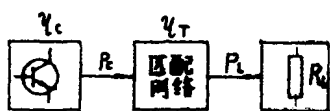


图 1-1-1 功率放大器的组成

为使功率放大器能够高效率地输出一定的功率,就要求放大器具有合适的交流负载,但外接负载往往不等于放大管所要求的交流负载,为此,在放大管与外接负载之间一般都加有能够实现阻抗匹配的网络,如图(1-1-1)所示。

考虑到匹配网络也会引入一定的损耗,所以实际放大器的效率

应为

$$\eta = \frac{P_L}{P_D} = \eta_c \eta_T \quad (1-1-2)$$

式中 η_T 称为匹配网络的效率,定义为

$$\eta_T = \frac{P_L}{P_o} \quad (1-1-3)$$

式中 P_L 为负载电阻 R_L 所获得的输出功率,称为负载功率。

三、非线性失真要小

由于功率放大器是在大信号状态下工作,所以不可避免地会产生非线性失真,而且同一功放管输出功率越大,非线性失真往往越严重这就使输出功率和非线性失真成为一对相互制约的矛盾。我们的任务是如何在允许的非线性失真范围内,使负载得到尽可能大的功率。

四、要考虑半导体三极管的散热问题

在功率放大器中,有相当大的功率消耗在管子的集电极上,使结温和管壳温度升高。为了充分利用允许的管耗而使管子输出足够大的功率,半导体三极管的散热就成为重要问题。

此外,功率放大器为了输出较大的信号功率,管子必须承受较高的电压,通过较大的电流,因此功率管损坏的可能性也就比较大,所以,有关晶体管的损坏和保护问题也不可忽略。

在分析方法上,由于晶体管在大信号作用下工作,不能近似等效为一个线性元件,因而通常都采用图解法来分析。

1-1-2 功率放大器的极限工作区

为了输出足够大的功率,功率管往往在大的电压和电流的动态范围内工作,并接近其极限应用状态。因此,如何保证管子能安全工作,也是必须着重加以考虑的问题。

就晶体三极管而言,它有三个极限参数:即集电极最大允许管耗 P_{cM} 、集电极反向击穿电压 $V_{(BR)CEO}$ (共射组态)和集电极最大允许电流 I_{cM} 。因此,讨论管子安全工作问题时,应该从这些参数入手。

一、集电极最大允许耗散功率 P_{cM}

最大允许耗散功率取决于管内最高允许的结温,而由于热惰性的原因,结温的高低仅取决于平均管耗的大小。因此,为了保证管子不因结温过高而烧坏,要求最大平均管耗 P_{cmax} 不超过 P_{cM} ,即 $P_{cmax} \leq P_{cM}$ 。

由于 $P_{cM} = I_c V_{cE}$,故可在 $i_c \sim V_{cE}$ 坐标中画出这条曲线,如图(1-1-2)所示。这条曲线称做最大集电极功率损耗线。为了安全工作,功放管的静态工作点不允许超过最大集电极功率损耗