

高等学校教材

电子线路

(非线性部分)

第二版

谢嘉奎 主编

谢嘉奎 宣月清 编

高等教育出版社

本书是在南京工学院无线电工程系电子线路编写组编写的《电子线路》第三册、第四册、第五册的基础上,根据一九八〇年高等学校工科电工教材编审委员会审订的《电子线路(I)、(II)教学大纲》(草案)改编而成的。全书由功率放大电路、正弦波振荡电路和频率变换电路三部分组成。包括非谐振功率放大器、谐振功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制与解调电路、混频电路、角度调制与解调电路和反馈控制电路。书末附有整流与稳压电路的附录。各章后附有大量习题和部分答案。

本书对第一版的内容做了较大幅度的压缩和删减,并加强了频率变换电路的基本原理和基本概念,各章还新增了习题和部分答案。全书篇幅比第一版压缩三分之一以上。

本书可作为高等院校无线电技术专业“非线性电子线路”或“高频电子线路”课程的教材,也可供从事电子设备及其电路的设计和研制的工程技术人员参考。

本书经高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组委托由北方交通大学贺允东副教授主审、北京工业学院俞宝传教授复审。

本书责任编辑李永和

高等学校教材
电 子 线 路
(非线性部分)

第 二 版

谢嘉奎 主编

谢嘉奎 宣月清 编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
河北香河印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 21 字数 500,000

1984年4月第2版 1984年11月第1次印刷

印数 00,001—17,300

书号 15010·0580 定价 3.20 元

第二版前言

电子线路是指含有晶体二极管、晶体三极管、场效应管等电子器件、并且能实现特定电功能的电路,它被广泛应用于各种电子设备中。

电子线路的种类繁多,在无线电技术专业教学计划中,作为主要技术基础课程的“电子线路”仅限于讨论集中参数的放大电路、正弦波振荡电路、频率变换电路以及相应的半导体器件。至于脉冲电路、数字电路、分布参数电路则分别划归“脉冲与数字电路”和“微波技术”等课程介绍。

南京工学院无线电工程系“电子线路”编写组于一九七九年编写出版的《电子线路》是“电子线路”原先作为一门大课开设时的教材。在一九八〇年春教育部组织修订无线电技术专业教学计划时,从便于安排考虑,将这门大课分成两门课程,并将其中的实验部分单独设置课程。同年又在高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组的会议上,审订了《电子线路(I)(II)教学大纲》(草案),并提出了两门课程可按工作频率高低分成“低频电子线路”和“高频电子线路”;也可按电子器件的工作特点及其分析方法上的不同分成“线性电子线路”和“非线性电子线路”。本书就是根据这个大纲,对《电子线路》第三册、第四册和第五册进行改编而成的。与第一版比较,它的变动较大,各章都重新改写过,全书篇幅压缩三分之一以上。

在改编过程中,我们对第一版中要求过高、讨论过细以及枝节性的内容做了较大幅度的压缩和删减,并力求由浅入深地讲清实现每一种功能电路的基本原理、基本组成和基本工程分析方法,不

是着眼于全面介绍各种实用电路,而是选择其中具有典型性的电路来进一步说明上述基本内容。我们期望这样的变动将有利于开阔思路,举一反三,并引导学生从本质上了解各种不同功能的具体电路,同时也有利于教师精选内容,讲清规律。

本书大体上保留了第一版的体系。全书由功率放大电路、正弦波振荡电路和频率变换电路三部分组成。功率放大电路部分包括非谐振功率放大器和谐振功率放大器两章,着重讨论这两种功率放大器的工作原理、功率管的充分利用、工作状态的近似工程分析方法以及匹配网络的计算,还介绍了传输线变压器及功率合成技术,并设有电子管谐振功率放大器的附录。正弦波振荡电路部分只包括正弦波振荡器一章,它是由第一版中振荡原理和正弦波振荡器两章合并而成的,着重讲清反馈振荡器的起振条件、平衡条件和稳定条件,并介绍了 LC 振荡电路和晶体振荡电路以及它们的分析方法,还讨论了频率稳定度问题。频率变换电路部分包括振幅调制与解调电路、混频电路、角度调制与解调电路和反馈控制电路四章,删去了第一版中的参量电路一章,将该章部分内容并入混频电路。这部分着重讨论频谱搬移电路(包括振幅调制与解调电路、混频电路)和频谱非线性变换电路(包括频率调制与解调电路)的特点、电路模型、实现方法及实用电路,还讨论了各种反馈控制电路的作用、工作过程及应用。

书末设有整流与稳压电路的附录,简要介绍各种整流电路的特点以及串联式稳压电路的工作原理和提高稳压性能的主要措施。

本书是按课内总学时数约 100 而编写的,根据我们的教学实践,建议学时数分配如下:功率放大电路部分为 26,正弦波振荡电路部分为 16 学时,频率变换电路部分为 58。为了培养学生独立学习的能力,在使用这些学时数时,课堂讲授的学时数最好控制在

80% 以内, 多余的学时数用于习题课、课堂讨论或其它行之有效的形式指导学生学习。

我们认为, 教材只能起到主要教学参考书的作用, 在满足教学大纲要求的前提下, 教师完全可以有自己的教学体系和阐明问题的方法, 不要受一本教材的束缚, 还应指导学生多看些书。同时, “非线性电子线路”是一门有待发展的课程, 在集成化技术和计算机辅助设计的推动下, 可以预期这门课程无论在内容上或体系上将会有较大的变动, 因此, 我们热切期待大家在更新内容、引入计算机辅助分析和设计以及建立更完善和合理的课程体系等方面取得有益的经验。这样, 才能促进这门课程教学质量的提高。

本书的大部分习题是从南京工学院无线电工程系《电子线路习题集》编写组于一九八〇年编写出版的《电子线路习题集》中选取的。

本书由北方交通大学贺允东副教授主审, 北京工业学院俞宝传教授复审, 他们都提出了许多十分宝贵的意见。

本书第一版的主编之一陈笃信副教授对改编的原则和具体内容都提出了有益的意见。

南京工学院无线电工程系电子线路教研组全体同志, 根据他们的教学实践对第一版及第二版的内容都提出了具体的意见, 为本书积累了不少习题, 并为本书编写做了许多具体工作。

广大读者和兄弟院校教师对第一版提出了宝贵的批评和建议, 并对第二版提出了希望和要求。

我们对上述同志表示深切的谢意。

限于水平, 本书在内容取舍、叙述方法和文字润饰等方面都会存在着不妥之处, 甚至还会有错误之处, 恳请读者批评指正。

编 者

1984. 2.

第一版前言

一九七〇年我们编写了《电子线路》讲义,作为我院无线电技术类专业的试用教材。在此基础上,根据一九七七年全国高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上“电子线路”小组讨论修订的编写大纲,作了较大的修改和补充,编写成本书。

根据编写大纲的要求,本书加强了以下两个方面的内容:第一,半导体器件的工作原理;第二,同一类型电路的共同物理本质及其分析方法。电子线路所涉及的分析方法主要有非线性电路的各种近似分析方法和反馈电路的分析方法。

由上述考虑,本书不按工作频率的高低来分类,而按分析方法相同的电路归类,例如,小信号放大电路、功率放大电路、正弦波振荡电路、频率变换电路等,以便联系对比,讲清电路的物理本质和分析方法。同时还注意介绍各种新的电路技术,使学生开阔思路。

我们期望,通过本书的学习,学生能掌握电子线路的分析方法,较深刻地认识各种电路的物理本质,这样,他们才能适应电子技术迅速发展的需要。

本书的编写组由谢嘉奎、陈永彬、陈笃信担任主编,成员有吴林如、林福华、祝宗泰、李潜生、陈子敏、谢洪臙、彭沛、邹家驛。其中陈笃信、谢洪臙、林福华、陈子敏还做了大量的具体工作。

北京工业学院俞宝传教授担任本书的主审,进行了认真细致的审阅,并提出了许多宝贵的意见。

北京工业学院、华中工学院、成都电讯工程学院、西安交通大学、华南工学院、重庆大学、浙江大学、北方交通大学、北京航空学

院、国防科学技术大学、合肥工业大学、大连工学院、大连海运学院、上海科技大学、南京邮电学院、南京航空学院、清华大学、中国科学技术大学等有关同志参加了本书的审稿会议，他们也都提出了宝贵的意见。

在编写本书时，我院吴伯修教授进行了指导。在教材中还引用了我院田良、沈永朝、詹宏英、周文兴、周寿根等同志编写的讲义。

成都电讯工程学院魏志源同志为本书编写了“负反馈放大器的另一种分析方法”的附录。

我们对上述的单位和个人表示深切谢意。

限于编者的水平，本书对分析方法的介绍还不够系统，各种具体电路的工作过程及工程设计方法的介绍还嫌太多。此外，还有不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

南京工学院无线电工程系

《电子线路》编写组

1979年1月

常用符号表

一、基本符号

I, i 电流

U, u 电压

E, e 电动势

P, p 功率

R, r 电阻

G, g 电导

X 电抗

B 电纳

$Z(j\omega) = R + jX$ 阻抗

$Y(j\omega) = G + jB = g + jb$ 导纳

L 电感

C 电容

M 互感

K 增益

f, F 频率

$\omega = 2\pi f, \Omega = 2\pi F$ 角频率

$s = \sigma + j\omega$ 复频率

二、电压、电流

小写 u 、小写下标表示交流电压瞬时值 (u_{be} 表示 $B-E$ 间交流电压瞬时值)

大写 U 、大写下标表示直流电压 (U_{BE} 表示 $B-E$ 间直流电

压)值

小写 u 、大写下标表示包含有直流的电压瞬时值(u_{BE} 表示 $B-E$ 间包含有直流的电压瞬时值)

大写 U 、小写下标表示正弦电压有效值(U_{be} 表示 $B-E$ 间 正弦电压有效值)

U_{BEQ} $B-E$ 间静态工作点电压

u_i 输入电压瞬时值

u_o 输出电压瞬时值

$\dot{U} = U(j\omega) = Ue^{j\varphi}$ 正弦电压复数值

U_m 正弦电压振幅值

U 正弦电压有效值

$U(s)$ 电压的拉普拉斯变换

E_C, E_B 集电极和基极直流电源电压

E_s, e_s 信号源电动势有效值和瞬时值

u_Ω 调制信号电压瞬时值

u_c 载波信号电压瞬时值; 集电极输出信号电压瞬时值

U_{av} 电压平均值

带有下标的电流符号含义与电压类似。

三、阻抗、导纳

R_s 信号源内阻

R_L 负载电阻

$R_e(g_e)$ 回路有载谐振电阻(电导)或回路等效谐振电阻(电导)

$R_{e0}(g_{e0})$ 回路空载谐振电阻(电导)或回路固有谐振电阻(电导)

$Z(j\omega) = Z(\omega)e^{j\varphi_Z(\omega)}$ 阻抗的复数值

$Z(\omega), \varphi_Z(\omega)$ 阻抗的模值和相角

$Y(j\omega) = Y(\omega)e^{i\varphi_Y(\omega)}$ 导纳

$Y(\omega), \varphi_Y(\omega)$ 导纳的模值和相角

G_{fc} 混频正向传输电导(混频跨导)

$g(t)$ 时变电导

$C(t)$ 时变电容

$S(t)$ 时变电弹、时变倒电容

四、增益

$K(s)$ 增益的拉普拉斯变换

$\dot{K}(\omega) = K(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi_K(\omega)}$ 复数增益

$K(\omega), \varphi_K(\omega)$ 增益的幅值和相角

K_u 电压增益

K_i 电流增益

K_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_{dc} 直流电源供给功率

P_A 额定功率

六、频率

f_g 振荡频率

f_c 载波频率(载频)

f_I 中频

f_L 本振频率

f_0 回路固有谐振频率

B 频谱宽度

七、器件参数

1. 晶体二极管

V_D PN 结内建电位差

V_B PN 结击穿电压

I_s 反向饱和电流

C_j 结电容

2. 晶体三极管

I_{CBO} 发射极开路时 $C-B$ 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_{CES} 集电极饱和压降

BV_{CBO} 发射极开路时 $C-B$ 结反向击穿电压

BV_{CEO} 基极开路时 $C-E$ 结击穿电压

P_{CM} 集电极最大允许耗散功率

g_m 跨导

α 共基极短路电流传输系数

β 共发射极短路电流传输系数

f_α 共基极交流电流传输系数的截止频率

f_β 共发射极交流电流传输系数的截止频率

f_T 特征频率

3. 场效应管

I_{DSS} $u_{GS}=0$ 时的饱和漏源电流

V_P 夹断电压

V_T 开启电压

八、其它符号

A	耦合因子
k	耦合系数
k_f	反馈系数
n	接入系数; 匝数比
Q	静态工作点
Q_0	回路空载品质因数(回路固有品质因数)
Q_e	回路有载品质因数(回路等效品质因数)
t	时间
T	反馈放大器的环路增益(回归比); 绝对温度
W	线圈匝数
ξ	阻尼系数
θ	角度
ξ	一般失谐; 集电极电压利用系数
ρ	回路特性阻抗
τ	时间常数; 渡越时间
φ	相角

目 录

绪 论

§ 0-1 非线性电子线路的作用	1
§ 0-2 非线性器件的基本特点	9
§ 0-3 本课程的特点	12

第一章 非谐振功率放大器

§ 1-1 概述	15
§ 1-2 单管甲类功率放大器	21
1-2-1 用图解法分析放大器的能量关系	23
1-2-2 功率放大管的充分利用	25
1-2-3 非线性失真	31
§ 1-3 变压器耦合的乙类推挽功率放大器	32
1-3-1 工作原理	33
1-3-2 电路性能	35
1-3-3 交叉失真	42
1-3-4 设计举例	45
§ 1-4 无输出变压器的乙类推挽功率放大器	47
1-4-1 工作原理	48
1-4-2 互补对称功率放大电路	51
1-4-3 功率管保护电路	55
1-4-4 集成化功率放大器	57
1-4-5 VMOS 场效应管功率放大器	60
§ 1-5 功率管的散热	62
§ 1-6 宽频带高频功率放大器	67
1-6-1 传输线变压器	68
1-6-2 宽频带功率合成技术	78
习题	85

参考文献	95
------	----

第二章 谐振功率放大器

§ 2-1 丙类谐振功率放大器的特点	96
2-1-1 工作原理	96
2-1-2 丙类工作时效率高	99
2-1-3 分析方法及其近似假设条件	100
§ 2-2 丙类谐振功率放大器工作状态的分类	103
2-2-1 谐振功率放大器的动态线	103
2-2-2 集电极电流脉冲的分解	109
2-2-3 E_C, E_B, U_{bm}, U_{cm} 对谐振功率放大器性能的影响	112
§ 2-3 丁类高效率谐振功率放大器	120
2-3-1 电压开关型电路	121
2-3-2 电流开关型电路	125
§ 2-4 晶体管谐振功率放大器的高频特性	128
§ 2-5 谐振功率放大器电路	132
2-5-1 直流馈电电路	132
2-5-2 匹配网络	137
2-5-3 谐振功率放大器的实用电路	151
§ 2-6 线性功率放大器	153
§ 2-7 晶体管倍频器	157
2-7-1 工作状态的选择	157
2-7-2 输出回路的滤波作用	158
附录一 余弦脉冲分解系数表	164
附录二 电子管谐振功率放大器	163
习题	178
参考文献	187

第三章 正弦波振荡器

§ 3-1 反馈振荡器的工作原理	189
3-1-1 平衡条件	189
3-1-2 起振条件	191

3-1-3 稳定条件·····	194
3-1-4 基本组成及其分析方法·····	200
§ 3-2 LC 正弦振荡器·····	201
3-2-1 电容三点式电路的起振条件·····	204
3-2-2 其它 LC 振荡电路·····	212
§ 3-3 LC 振荡器的频率稳定度·····	218
3-3-1 频率稳定度的分析·····	219
3-3-2 提高频率稳定度的措施·····	223
3-3-3 克拉泼电路和西勒电路·····	225
§ 3-4 晶体正弦振荡器·····	228
3-4-1 石英谐振器的电特性·····	229
3-4-2 晶体振荡电路·····	237
§ 3-5 RC 正弦振荡器·····	246
3-5-1 RC 相移振荡电路·····	247
3-5-2 文氏电桥振荡电路·····	250
§ 3-6 负阻正弦振荡器·····	253
3-6-1 负阻器件·····	254
3-6-2 负阻振荡原理及其电路·····	256
3-6-3 用负阻观点讨论 LC 反馈振荡器·····	259
§ 3-7 寄生振荡、间歇振荡和频率占据·····	260
3-7-1 寄生振荡·····	261
3-7-2 间歇振荡·····	262
3-7-3 频率占据·····	266
习题·····	271
参考文献·····	283

第四章 振幅调制与解调电路

§ 4-1 频谱搬移电路的共同特点·····	284
4-1-1 振幅调制·····	284
4-1-2 振幅调制信号的解调·····	296
4-1-3 混频·····	298
§ 4-2 非线性器件在频谱搬移电路中的作用·····	299
4-2-1 非线性器件特性的解析函数逼近·····	299

4-2-2 非线性器件的相乘作用	302
4-2-3 线性时变工作状态的分析	304
§ 4-3 振幅调制电路概述	313
§ 4-4 低电平振幅调制电路	317
4-4-1 差分对管振幅调制电路	317
4-4-2 双差分对模拟乘法器振幅调制电路	320
4-4-3 晶体二极管平衡振幅调制电路和桥式振幅调制电路	329
§ 4-5 高电平振幅调制电路	338
4-5-1 工作原理	338
4-5-2 调幅电路	350
§ 4-6 晶体二极管包络检波电路	351
4-6-1 包络检波的概念	351
4-6-2 晶体二极管包络检波电路的物理过程	355
4-6-3 晶体二极管包络检波电路的性能分析	357
4-6-4 晶体二极管包络检波电路的非线性失真	369
4-6-5 晶体二极管包络检波电路的设计考虑	376
§ 4-7 同步检波电路	378
4-7-1 实现方法	378
4-7-2 参考信号	381
附录一 第一类修正贝塞尔函数表	384
附录二 $\beta_{2n-1}(x)$ 数值表	385
习题	385
参考文献	397

第五章 混 频 电 路

§ 5-1 概述	398
§ 5-2 三极管混频电路	400
5-2-1 在线性时变工作状态下, 晶体三极管用作 混频时的小信号等效电路	400
5-2-2 混频参数	404
5-2-3 晶体三极管混频电路	408
5-2-4 组合频率干扰和非线性失真	411
§ 5-3 晶体二极管混频电路	421

5-3-1 单晶体二极管混频电路	421
5-3-2 平衡和环形混频电路	427
§ 5-4 参量混频电路	429
5-4-1 非线性电容器件的能量转换原理	430
5-4-2 参量混频电路的性能分析	438
5-4-3 参量混频电路	451
习题	454
参考文献	464

第六章 角度调制及解调电路

§ 6-1 角度调制波的基本特性及其实现方法	465
6-1-1 调频波和调相波	465
6-1-2 调角波的频谱	470
6-1-3 调角波的频谱宽度	474
§ 6-2 实现调频方法综述	476
6-2-1 直接调频	477
6-2-2 间接调频	483
§ 6-3 变容管直接调频电路	488
6-3-1 性能分析	488
6-3-2 扩展线性频偏的方法	499
§ 6-4 间接调频电路	501
6-4-1 变容管调相电路	501
6-4-2 脉冲调相电路	503
6-4-3 间接调频发射机扩展线性频偏的方法	506
§ 6-5 调频波解调方法综述	508
6-5-1 斜率鉴频	511
6-5-2 相位鉴频	519
6-5-3 脉冲计数式鉴频	524
6-5-4 限幅	526
§ 6-6 耦合回路相位鉴频电路	530
6-6-1 基本电路和鉴频工作过程	530
6-6-2 实际鉴频特性曲线	535
6-6-3 其它常用的耦合回路相位鉴频电路	541