

高等学校教材

电子线路

(线性部分)

第二版

谢嘉奎 主编

谢洪陂 金宝琴 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所编《电子线路》第一册、第二册和第五册部分内容的基础上,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。全书由半导体器件、基本放大电路、频率响应及稳定性三部分组成。包括晶体二极管的基本特性、晶体三极管的基本特性、场效应管的基本特性、放大器基础、放大电路中的负反馈、集成运算放大器及其线性应用、放大电路的频率响应、负反馈放大器的频率响应和小信号谐振放大器以及电子管及其基本放大电路。各章后附有大量习题和部分答案。

本书对第一版中的部分内容作了较大压缩和删减,内容安排也作了调整,并加强了小信号放大器的基本概念和基本分析方法,各章还新增了习题及部分答案。全书篇幅比第一版约压缩三分之一。

本书可作为高等学校无线电技术专业“线性电子线路”课程教材,也可供从事电子技术工作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北方交通大学蒋焕文副教授主审、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
(线性部分)

第二版
谢嘉奎 主编
谢洪麟 金宝琴 编

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
上海商务印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 18.375 字数 442,000

1983年10月第2版 1984年4月第1次印刷

印数 00,001—15,500

书号 15010·0536 定价 2.10 元

第二版前言

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

电子线路的种类繁多。但是,在无线电技术类专业的教学计划中,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。此外,在学习电子线路课程时,应有电路、信号和线性系统分析的基础。

“电子线路”课原先是作为一门大课开设的,这对于统一安排教学内容是有利的。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》就是根据这种安排编写的。但是,这样一门大课的学时过多,在安排教学计划时十分不便。因此,在一九八〇年春修订的无线电技术类专业参考性教学计划中,将这门大课分成两门课程。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,对原来的《电子线路》第一册、第二册和第五册部分内容进行改编而成的。与第一版比较,这第二版的变动较大,各章节几乎都重新改写过。全书篇幅压缩约三分之一。

在修订过程中,广泛听取了本院及兄弟院校教师和学生的意见,并根据教学实践的经验和教训,对第一版中某些要求过高、讨

论过细或内容重复的部分作了压缩或删减,还对第一版中的内容安排作了合理的调整。各章都新增了习题。希望这样的变动能够加强基本概念和基本分析方法,便于教学。

在教材体系的处理上,本书是按照半导体器件、基本放大电路、频率响应及稳定性三个相对独立的单元顺序安排的。半导体器件单元包括晶体二极管、晶体三极管和场效应管三章,着重讨论三种半导体器件的内部物理过程,并在此基础上介绍它们的外特性及相应的直流参数。基本放大电路单元包括放大器基础、放大电路中的负反馈、集成运算放大器及其线性应用三章,着重讨论各种基本放大电路(包括三种基本组态电路、组合电路、集成运算放大器电路等)的组成原理、分析方法、性能特点以及反馈在放大器中的应用等问题。在讨论这些问题时,没有涉及放大器的频率响应及稳定性,而将这部分内容集中放在第三单元中讨论。第三单元包括放大电路的频率响应、负反馈放大器的频率响应和小信号谐振放大器三章,着重介绍频率响应的复频域分析方法,基本放大电路的频率响应特性以及反馈对频率响应的影响,并且在此基础上讨论稳定性及相位补偿技术。建立这样的教材体系,便于逐步引出放大器的基本概念和基本分析方法,比较符合循序渐进、由浅入深的教学规律,也便于抓住共性问题,精选内容,减少重复。

在教材内容的处理上,与第一版比较,作了如下的重大修改。

半导体物理基础知识是了解各种半导体器件工作原理及其外特性的前提。这部分内容历来有两种不同的讲法。第一版中采用能级能带模型的讲法,这种讲法比较严密,可以解释各种物理现象,但是,需要涉及更多的近代物理知识。由于本课程的学时有限,采用这种讲法的教学实践效果总是不很理想。考虑到本课程讲解半导体器件的目的仅限于更好地了解晶体二极管、晶体三极管和场效应管的工作原理及其外特性,因此,一九八〇年审订的教

学大纲中建议采用共价键模型的讲法。本书采用共价键模型,用经典的电学知识讲清半导体器件中的基本物理过程。

晶体管的小信号等效电路可以有各种模型。其中,有的是从晶体管固有的物理特性引出来的;有的是从网络观点引出来的。但是它们本质上都是非线性器件在增量基础上进行线性化处理的结果。因此,本书从这个本质出发,将第一版中分散在各章节的等效电路集中在第四章中讨论,着重介绍了混合 Π 型和 H 参数两种常用的等效电路,并以混合 Π 型等效电路作为分析各种小信号放大器的基本模型。

噪声是放大器的固有特性。但是,考虑到噪声的深入讨论已超出了本课程的范围。因此,本书仅在第四章中介绍了噪声系数的概念,删去了第一版中噪声系数及其测量一章。

放大器中的负反馈历来是教学中的一个难点。本书针对第一版中对这个问题讨论过细、过繁、重点不突出的缺点,从讲清反馈的基本概念和基本分析方法出发,对这部分内容重新作了改写。其中,反馈网络的负载效应改由网络的观点进行处理,以突出其内涵的规律性。

本书将第一版中分散在各章讨论的频率响应及稳定性集中在一个单元中讨论,并统一将放大器看作为一个线性系统,采用复频域的分析方法。由于严格分析放大器的频率响应是十分繁琐的,一般都必须借助计算机进行近似数值分析。因此,本书在处理这部分内容时,尽量避免繁琐的数学演算,力求采用近似的工程分析方法,并从中引出具有实际意义的概念和结论。

为了照顾部分院校的需要,将第一版第五册中的电子管及其电路一章进行压缩和删减,作为本书的附录。

本书是按约 100 课内总学时数而编写的。根据我们的教学实践,建议学时分配如下:半导体器件单元为 22~24 学时;基本放大

电路单元为 42~44 学时；频率响应及其稳定性单元为 30~32 学时。在使用这些学时数时，我们主张课堂讲授的学时数最好少一些，留一部分内容让学生自学，或采用习题课和课堂讨论的形式指导学生学习，培养他们独立学习的能力。

“线性电子线路”是一门实践性较强的技术基础课。许多理论概念必须通过实践才能获得更清晰的了解，在实践中积累丰富经验就能更主动地学好理论。因此，在学习本课程时必须高度重视实验环节，坚持理论联系实际的原则。

我们主张教材只能起到主要参考书的作用。在满足教学大纲所规定基本内容的前提下，教师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，这样才能促进教学质量的提高。

本书由谢嘉奎主编。在谢嘉奎主持下，共同拟定了改编的指导思想及各章的改编大纲。由谢洪醵编写第一、二、三、四、六和附录各章，金宝琴编写第五、七、八、九各章。在整个编写过程中，谢洪醵还协助对全书进行修改和文字加工，最后由谢嘉奎定稿。

本书的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所编《电子线路习题集》中选取的。

本书由北方交通大学蒋焕文副教授主审，北京工业学院俞宝传教授复审，他们都提出了许多宝贵的修改意见。这些意见对本书的编写帮助很大，在此谨向他们致以衷心的感谢。

我们还要向广大读者、兄弟院校和本院的教师致以衷心的感谢，他们对第一版提出的批评和建议，以及对第二版提出的希望和要求，都对这次改编有很大帮助。

限于水平，本书仍可能有不少不妥和错误之处，恳请读者提出批评。

编 者

1983 年 9 月

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、邹家驖。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

L 电感

C 电容

M 互感

$Z = R + jX$ 阻抗

$Y = G + jB$ 导纳

K 增益

f 频率

$\omega = 2\pi f$ 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值

(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} $B-E$ 间静态工作点上的电压

u_i 输入电压瞬时值

u_o 输出电压瞬时值

u_s 信号源电压瞬时值

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

U_m 正弦电压幅值

U 直流电压, 直流放大器的增量电压值, 正弦电压有效值

$U(s)$ [简称为 U] 电压的拉普拉斯变换

E 直流电源电压

E_s 信号源电动势

带有下标的电流符号涵义与电压类似。

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)

$R_z(g_z)$ 回路空载谐振电阻(电导)

$Z(s)$ 阻抗的拉普拉斯变换

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

$Z(\omega), \varphi_z(\omega)$ 阻抗的幅值和相角

$Y(s)$ 导纳的拉普拉斯变换

$Y(j\omega) = Y(\omega)e^{j\varphi_Y(\omega)}$ 导纳的复数量

$Y(\omega), \varphi_Y(\omega)$ 导纳的幅值和相角

y_i, y_r, y_f, y_o 晶体三极管的 Y 参数

四、增益

$K(s)$ 增益的拉普拉斯变换

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

$K(\omega), \varphi(\omega)$ 增益的幅值和相角

K_u, K_{us} 电压增益和源电压增益

K_i, K_{is} 电流增益和源电流增益

K_p 功率增益

K_g, K_{gs} 互导增益和源互导增益

K_r, K_{rs} 互阻增益和源互阻增益

K_{uo}, K_{ud} 差分放大器的共模增益和差模增益

K_{ufs} 反馈放大器的源电压增益

K_L 低频增益

K_I 中频增益

K_H 高频增益

五、频率

f_L 3dB 下限频率

f_H 3dB 上限频率

f_{Hf} 反馈放大器的 3dB 上限频率

$\Delta f_{0.7}$ 3dB 通频带

f_0 回路固有的谐振频率

六、器件参数符号

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

C_T 势垒电容

C_D 扩散电容

2. 晶体三极管

I_{CB0} 发射极开路时 C-B 结反向饱和电流

I_{CBS} 发射结短路时 $C-B$ 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

BV_{CBO} 发射极开路时 $C-B$ 结反向击穿电压

BV_{CEO} 基极开路时 $C-E$ 间的击穿电压

BV_{CES} 发射结短路时 $C-E$ 间的击穿电压

P_{CM} 集电极最大允许耗散功率

g_m 跨导

$r_{bb'}$ 基区体电阻

α 或 $\bar{\alpha}$ 共基极交流或直流电流传输系数

$\alpha(s)$ [简写为 α] 共基极交流电流传输系数的拉普拉斯变换

$\alpha(j\omega) = \alpha(\omega)e^{j\varphi_\alpha(\omega)}$ 共基极交流电流传输系数的复数量

$\alpha(\omega), \varphi_\alpha(\omega)$ 共基极交流电流传输系数的幅值和相角。

β 或 $\bar{\beta}$ 共发射极交流或直流电流放大系数

$\beta(s)$ [简写为 β] 共发射极交流电流放大系数的拉普拉斯变换

$\beta(j\omega) = \beta(\omega)e^{j\varphi_\beta(\omega)}$ 共发射极交流电流放大系数的复数量

$\beta(\omega), \varphi_\beta(\omega)$ 共发射极交流电流放大系数的幅值和相角

f_α 共基极交流电流传输系数的截止频率

f_β 共发射极交流电流放大系数的截止频率

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

七、其它符号

A 耦合因数

CMRR 共模抑制比

$\mathcal{E}$ 电场强度

F 反馈放大器的反馈深度

GB 增益带宽积

k 耦合系数

k_f 反馈系数

NF 噪声系数

n 接入系数

Q_0 回路的空载品质因数

Q_e 回路的有载(等效)品质因数

r_g 增益裕量

r_ϕ 相位裕量

S 选择性

t 时间, 摄氏温度

T 反馈放大器的环路增益, 绝对温度

W 线圈匝数

ζ 阻尼系数

θ 角度

ξ 一般失谐

ρ 电阻率, 回路特性阻抗

τ 时间常数

目 录

第一章 晶体二极管的基本特性	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 半导体物理基础知识	2
1-2-1 本征半导体	2
1-2-2 杂质半导体	7
1-2-3 载流子在电场作用下的漂移运动	11
1-2-4 载流子在浓度梯度作用下的扩散运动	14
§ 1-3 PN 结	16
1-3-1 动态平衡下的 PN 结	17
1-3-2 PN 结的伏安特性	21
1-3-3 PN 结的击穿	31
1-3-4 PN 结电容	34
1-3-5 晶体二极管的伏安特性	38
*§ 1-4 隧道二极管和肖特基二极管	39
习题	44
参考文献	48
第二章 晶体三极管的基本特性	49
§ 2-1 概述	49
§ 2-2 晶体三极管的工作原理	51
2-2-1 晶体三极管内部载流子的传输过程	51
2-2-2 直流电流传输方程	54
2-2-3 晶体三极管内部载流子传输过程的定量分析	58
*2-2-4 埃伯尔斯-莫尔模型	66
§ 2-3 晶体三极管的特性曲线和参数	69
2-3-1 共基极伏安特性曲线和参数	70
2-3-2 共发射极伏安特性曲线和参数	75
2-3-3 晶体三极管的结电容	82
*§ 2-4 晶体三极管制造工艺简介	83

习题	84
参考文献	87
第三章 场效应管的基本特性	89
§ 3-1 结型场效应管	89
3-1-1 结型场效应管的工作原理	89
3-1-2 N 沟道结型场效应管的伏安特性曲线	93
3-1-3 结型场效应管的制造工艺	98
§ 3-2 绝缘栅场效应管	98
3-2-1 N 沟道增强型 MOS 场效应管	100
3-2-2 其它类型 MOS 场效应管	104
§ 3-3 场效应管和晶体三极管的比较	108
习题	110
参考文献	112
第四章 放大器基础	113
§ 4-1 放大器的基本概念	114
4-1-1 放大的基本工作原理	114
4-1-2 小信号放大器的一般分析方法	120
§ 4-2 晶体三极管小信号等效电路	128
4-2-1 T 型等效电路	128
4-2-2 混合 II 型等效电路	134
4-2-3 H 参数等效电路	138
4-2-4 等效电路参数之间的相互转换	141
§ 4-3 基本放大器的性能	143
4-3-1 放大器的性能指标	144
4-3-2 共发射极放大电路	149
4-3-3 共基极放大电路	153
4-3-4 共集电极放大电路	156
4-3-5 三种基本组态放大电路的比较	159
4-3-6 组合电路	160
§ 4-4 晶体三极管放大器的偏置电路	161
4-4-1 对偏置电路的要求	161
4-4-2 分压式偏置电路的工程设计举例	169
§ 4-5 场效应管放大电路	171

4-5-1 场效应管的偏置电路	171
4-5-2 场效应管的等效电路	175
4-5-3 场效应管放大器的性能分析	176
§ 4-6 放大器的噪声	178
4-6-1 起伏噪声的来源及其性质	179
4-6-2 放大电路中噪声的计算	184
4-6-3 噪声系数	189
§ 4-7 多级小信号放大器	193
4-7-1 多级放大器的基本问题	194
4-7-2 多级放大器的增益	200
4-7-3 多级放大器的噪声系数	204
习题	206
参考文献	219
第五章 放大电路中的负反馈	220
§ 5-1 反馈放大器的基本概念	220
5-1-1 放大器的反馈	220
5-1-2 四种类型负反馈放大器	223
5-1-3 反馈类型的判别	226
§ 5-2 负反馈对放大器性能的影响	229
5-2-1 输入电阻	229
5-2-2 增益及其稳定性	231
5-2-3 输出电阻	234
5-2-4 频率失真和非线性失真	238
§ 5-3 负反馈放大器的分析方法	240
5-3-1 电压并联负反馈放大电路	241
5-3-2 其它类型的负反馈放大电路	246
§ 5-4 分析举例	251
习题	262
参考文献	271
第六章 集成运算放大器及其线性应用	273
§ 6-1 半导体模拟集成电路的制造工艺	274
§ 6-2 差分放大电路	281
6-2-1 电路工作特点	281

6-2-2	差分放大电路基本性能的分析	284
6-2-3	差分放大器在任意信号输入时的性能	294
6-2-4	差分放大器的失调和漂移	298
6-2-5	差分放大电路的大信号分析	304
§ 6-3	集成运算放大器的基本电路	308
6-3-1	镜象恒流源电路	311
6-3-2	集成运算放大器中的输入级	314
6-3-3	典型集成运算放大器电路举例	317
§ 6-4	集成运算放大器的线性应用	327
6-4-1	集成运算放大器的理想化条件	328
6-4-2	反相放大器、同相放大器和跟随器	329
6-4-3	集成运算放大器的运算误差	333
6-4-4	集成运算放大器线性应用	338
	习题	340
	参考文献	351
第七章	放大电路的频率响应	352
§ 7-1	概述	352
7-1-1	放大器的频率响应	352
7-1-2	放大器的阶跃响应	356
§ 7-2	复频域分析方法	358
7-2-1	传递函数和极零点概念	358
7-2-2	系统的波特图和渐近波特图	363
7-2-3	上、下限频率	374
§ 7-3	共发射极放大电路的频率响应	378
7-3-1	低频响应	379
7-3-2	高频响应	383
7-3-3	阶跃响应	392
§ 7-4	共基极放大器的频率响应	394
7-4-1	增益与上限频率	396
7-4-2	输入阻抗与输出阻抗	397
§ 7-5	共集电极放大器的频率响应	398
7-5-1	增益与上限频率	398
7-5-2	输入阻抗与输出阻抗	401
§ 7-6	宽频带放大器	402