

高等学校试用教材

电子线路

第一册

南京工学院无线电工程系
《电子线路》编写组编



人民教育出版社

三、其他符号

A 耦合因数

CMRR 共模抑制比

F 噪声系数

GB 增益带宽积

k 耦合系数

M 频率失真系数; 稳定系数

m 调幅系数

m_f 调频系数

m_p 调相系数

n 匝数比; 级数

Q_0 回路空载品质因数

Q_L 回路有载品质因数

S 选择性; 稳压系数; 偏置不稳定系数

t 时间

T 周期; 绝对温度; 回归比

w 匝数

γ 非线性失真系数; 变容管电容变化指数; 波纹系数

$\Delta f_{0.7}$ 三分贝通频带

η 效率; 失调参量

θ 通角

λ 波长

ξ 电压利用系数; 一般失调

ρ 回路特性阻抗; 电阻率

τ 时间常数

本书是按一九七七年《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”组讨论修订的“电子线路教材编写大纲”编写的。可作为高等院校无线电技术类试用教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员阅读。

本书介绍了半导体器件的工作原理和电路模型、各种线性和非线性电子线路的工作原理、分析方法及设计原则。全书共分五册：第一册是半导体器件及放大电路的基础部分，第二册是小信号放大电路部分，第三册是功率放大电路和正弦振荡电路部分，第四册是频率变换电路部分，第五册是电源电路和电子管及其电路部分。

本册介绍了半导体二极管、三极管、场效应管的工作原理和电路模型；讨论了放大器的基本概念和基本的分析方法。

本册对半导体器件的内部物理过程和负反馈电路的分析方法都有所加强。

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专业试用的教材。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、谢洪贻、彭沛、邹家驊。其中陈笃信、谢洪贻、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

1) 电流

- i 包含有直流的电流瞬时值
- $\tilde{i}$ 正弦电流瞬时值
- I 正弦电流有效值; 直流放大器的增量电流值
- $\dot{I}$ 正弦电流复数量
- I_m 正弦电流振幅值
- I_Q 静态工作点电流

2) 电压

- u 包含有直流的电压瞬时值
- $\tilde{u}$ 正弦电压瞬时值
- U 正弦电压有效值; 直流放大器的增量电压值
- $\dot{U}$ 正弦电压复数量
- U_m 正弦电压振幅值
- e 交流电源电动势
- E 正弦电源电动势有效值; 直流电源电压
- U_Q 静态工作点电压

3) 功率

- P 功率通用符号
- p 瞬时功率

4) 电阻、电导

- R, r 电阻通用符号
- G, g 电导通用符号

R_e 回路有载谐振阻抗

R_s 回路空载谐振阻抗

R_n 电压控制型负阻

r_n 电流控制型负阻

R_T 热阻

5) 频率

f 频率通用符号

$\omega (=2\pi f)$ 角频率通用符号

F 调制、解调时作为调制信号频率

$\Omega (=2\pi F)$ 调制、解调时作为调制信号角频率

f_L 低频; 三分贝下限频率

f_H 高频; 三分贝上限频率

f_0 回路固有谐振频率

f_g 振荡频率

$4f$ 通频带(包括上、下边带)

6) 电容、电感、电抗、电纳

C 电容通用符号

L 电感通用符号

M 互感通用符号

X 电抗通用符号

B 电纳通用符号

Z 阻抗复数量

z 阻抗模值

Y 导纳复数量

y 导纳模值

θ, φ 相角

7) 增益

$\dot{K}$ 增益复数量

K 增益模值

K_u 电压增益

K_i 电流增益

K_p 功率增益

K_f 反馈放大器增益

K_L 低频增益

K_I 中频增益

K_H 高频增益

上述各基本量配合下列下标组成一系列符号

c 集电极; 共模

b 基极

e 发射极

d 漏极; 差模

g 栅极

s 源极; 信号源

a 阳极

k 阴极

j 结

p 空穴

n 自由电子; 噪声

i 输入

o 输出

L 负载

av 平均

dc 直流

max 最大值

$\min$ 最小值

opt 最佳

cr 临界

f 正向传输

r 反向传输

D 扩散

t 漂移

例如:

i_o 集电极电流

I_{cQ} 集电极静态直流工作点电流

$i_{\max}$ 瞬时电流最大值

R_L 负载电阻

K_{ujs} 反馈放大器源电压增益

u_{ce} $c-e$ 间电压

二、器件参数符号

1) 二极管

I_R 反向电流

I_{0M} 最大允许整流电流

I_{ZM} 稳压管最大稳定电流

V_D PN 结内建电位差

V_B PN 结击穿电压

V_{RM} 最大允许反向电压

R_Z 稳压管动态电阻

f_{dM} 最高工作频率

C_j 结电容

C_T 势垒电容

C_D 扩散电容

2) 三极管

I_{CBO} 发射极开路时 $c-b$ 间反向饱和电流

I_{CFO} 基极开路时的穿透电流

I_{CER} $b-e$ 间接电阻 R 时的穿透电流

I_{CM} 集电极最大允许电流

I_{DSS} 场效应管当 $U_{gs}=0$ 时的饱和漏源电流

I_{DM} 场效应管最大漏源电流

BV_{CEO} 基极开路时 $c-e$ 间的击穿电压

BV_{CER} $b-e$ 间接电阻 R 时 $c-e$ 间的击穿电压

BV_{CES} $b-e$ 间短接时 $c-e$ 间的击穿电压

BV_{EBO} 集电极开路时 $e-b$ 间的击穿电压

BV_{GS} 栅源间的击穿电压

BV_{DS} 漏源间的击穿电压

V_P 场效应管夹断电压

V_T 场效应管开启电压

P_{CM} 集电极最大允许耗散功率

P_{DM} 漏极最大允许耗散功率

g_m 跨导

$r_{bb'}$ 基区体电阻

f_β 共发交流电流放大系数的截止频率

f_α 共基交流电流传输系数的截止频率

f_T 特征频率

f_M 最高振荡频率

α 共基交流电流传输系数

$\bar{\alpha}$ 共基直流电流传输系数

β 共发交流电流放大系数

$\bar{\beta}$ 共发直流电流放大系数

第一册 目 录

引言	1
----------	---

第一篇 半导体器件原理及放大电路分析基础

第一章 半导体二极管的基本特性

内容提要	6
§ 1-1 概述	6
§ 1-2 本征半导体	8
1-2-1 半导体的晶体结构	8
1-2-2 半导体中电子的能级与能带	11
1-2-3 本征激发产生自由电子-空穴对	13
1-2-4 导体、半导体和绝缘体的区别	15
1-2-5 费米-狄拉克分布函数	16
1-2-6 本征载流子浓度	18
1-2-7 本征半导体的迁移率和电阻率	20
§ 1-3 N 型和 P 型半导体	23
1-3-1 N 型半导体	23
1-3-2 P 型半导体	26
§ 1-4 非平衡状态下的半导体	29
1-4-1 非平衡载流子的扩散	30
1-4-2 载流子空间电荷的中和	32
1-4-3 载流子扩散方程	33
§ 1-5 PN 结	38
*1-5-1 PN 结的制造工艺	38
1-5-2 PN 结阻挡层形成的物理过程	42
1-5-3 内建电位差 V_D 与掺杂浓度的关系	44
1-5-4 用泊松方程求阻挡层宽度	48
1-5-5 PN 结电流与电压关系	52
1-5-6 PN 结电容	61

1-5-7 PN 结的击穿	66
1-5-8 PN 结的温度特性	70
*1-5-9 载流子在中性区内的漂移运动	73
§ 1-6 半导体二极管	76
1-6-1 半导体二极管的伏安特性	76
1-6-2 半导体二极管是一种非线性元件	78
1-6-3 二极管的交流等效电路	81
1-6-4 包含有非线性元件的直流电路的图解法	83
1-6-5 半导体二极管的分类及参数	87
附录 泊松方程的推导	89
复习思考题	90
参考文献	92

第二章 半导体三极管的基本特性

内容提要	93
§ 2-1 概述	93
§ 2-2 三极管的放大作用	95
2-2-1 三极管中三个电流的测量结果	95
2-2-2 三极管的放大作用	96
2-2-3 三极管具有放大作用的条件	97
§ 2-3 三极管的电流分配关系	100
2-3-1 三极管的三种连接方式	100
2-3-2 共基极接法的电流分配关系	101
2-3-3 共发射极接法的电流分配关系	115
2-3-4 共集电极接法的电流分配关系	118
§ 2-4 三极管的伏安特性曲线及其物理解释	119
2-4-1 共基极伏安特性曲线	120
2-4-2 共发射极伏安特性曲线	127
§ 2-5 三极管的分类和参数	136
2-5-1 三极管的分类	136
2-5-2 三极管的制造工艺简介	137
2-5-3 三极管共基 T 型交流等效电路	141
2-5-4 三极管的主要参数	155
2-5-5 三极管的温度特性	160

附录 半导体器件型号命名方法	161
复习思考题	163
参考文献	163

第三章 放大器基础

内容提要	164
§ 3-1 放大器的基本概念	165
3-1-1 放大器的功能	165
3-1-2 放大器的主要技术指标	166
3-1-3 放大器的基本电路	171
§ 3-2 放大器的图解分析法	177
3-2-1 静态工作点和直流负载线	177
3-2-2 交流工作状态	180
3-2-3 放大器的能量关系	183
3-2-4 交流负载线	186
3-2-5 负载线与工作点的正确选择	188
§ 3-3 半导体三极管交流等效电路	190
3-3-1 T 参数物理模型	191
3-3-2 网络参数模型	193
§ 3-4 放大器的等效电路分析法	205
3-4-1 用 T 参数等效电路分析放大器	205
3-4-2 用 H 参数等效电路分析放大器	215
3-4-3 三种基本组态放大器比较	223
§ 3-5 放大器的频率特性	226
3-5-1 放大器中频段增益	226
3-5-2 放大器低频端频率特性	227
3-5-3 放大器高频端频率特性	232
3-5-4 对数频率特性——波特图	236
§ 3-6 直流工作点的稳定	240
3-6-1 温度对半导体三极管的影响	241
3-6-2 分压式偏置稳定电路	243
3-6-3 双管直接耦合偏置电路	250
3-6-4 其他直流工作点稳定电路	252
§ 3-7 多级小信号放大器	255
3-7-1 多级小信号放大器的基本问题	255

3-7-2 耦合方式问题	256
3-7-3 组态选择问题	257
3-7-4 总增益与单级增益	259
3-7-5 总频率特性与单级频率特性	262
3-7-6 直流工作点的选择	265
3-7-7 防止多级放大器自激的问题	267
复习思考题	269
参考文献	270

第四章 反馈放大器

内容提要	271
§ 4-1 放大器的反馈和反馈的分类	272
4-1-1 放大器的反馈	272
4-1-2 负反馈的分类	275
§ 4-2 电流串联负反馈	284
4-2-1 负反馈的物理过程	284
4-2-2 增益和增益稳定性	287
4-2-3 输入电阻和输出电阻	298
4-2-4 频率响应特性	301
4-2-5 对非线性失真的影响	306
§ 4-3 电压并联负反馈	307
4-3-1 电压并联负反馈的一般分析	307
4-3-2 电压并联负反馈电路举例	314
§ 4-4 电压串联负反馈	318
4-4-1 电压串联负反馈的一般分析	318
4-4-2 二级式电压串联负反馈电路	323
4-4-3 单级电压串联负反馈——共集电路	328
§ 4-5 电流并联负反馈	334
4-5-1 电流并联负反馈的一般分析	334
4-5-2 二级式电流并联负反馈电路	338
4-5-3 单级电流并联负反馈——共基电路	346
§ 4-6 负反馈电路小结及反馈的其他问题	350
4-6-1 四种负反馈电路特性的总结	350
4-6-2 负反馈放大器稳定性的初步讨论	353
附录 反馈放大器的另一种分析方法	361

复习思考题	381
参考文献	383

第五章 场效应管及其电路

内容提要	384
§ 5-1 结型场效应管	384
5-1-1 场效应管的由来	384
5-1-2 沟道变化与结型场效应管的特性	388
5-1-3 结型场效应管的结构和工艺	395
§ 5-2 金属氧化物半导体场效应管	397
5-2-1 N 沟道 MOS 管中沟道的形成	398
5-2-2 N 沟道增强型 MOS 管的特性曲线	402
5-2-3 N 沟道耗尽型 MOS 管	405
5-2-4 P 沟道 MOS 场效应管	407
§ 5-3 场效应管的符号、特性、参数和安全使用	411
5-3-1 场效应管的符号和特性	411
5-3-2 主要参数	411
5-3-3 场效应管的安全使用	415
§ 5-4 场效应管基本电路	417
5-4-1 三种基本组态及其等效电路	417
5-4-2 场效应管的偏置方式	424
§ 5-5 共源阻容耦合放大电路	432
5-5-1 单级阻容耦合放大器	432
5-5-2 实用线路举例	437
§ 5-6 场效应管的其他特点和应用	438
5-6-1 场效应管其他特点	438
5-6-2 场效应管的几种特殊应用	440
复习思考题	442
参考文献	443
第一册 名词索引	444

引 言

电子线路是指包含有电子器件的电路。常用的电子器件有半导体二极管和三极管、场效应管、电子管等。根据电子器件的特性,电子线路具有下列两个基本性质。

其一,电子线路都是包含有源器件的,大部分电子线路具有功率放大作用,即当输入信号通过电子线路时,其输出信号功率将大于输入信号功率。该输出功率是网络内部的电源(大部分是直流电源)所提供的,电子器件的作用在于将电源提供的功率部分地变换为输出信号功率。我们把具有这种变换作用的电子器件称为有源器件,含有这种器件的网络称为有源网络。普通的电阻、电容、电感、变压器等元件没有这种变换作用,信号通过由这些元件所组成的网络时,输出信号功率恒小于(或等于)输入信号功率。因此,这些元件称为无源元件,由它们所组成的网络称为无源网络。

其二,电子器件的特性是非线性的,称为非线性器件,即它们的电流随电压变化的特性不呈线性关系,不满足欧姆定律。如果将电子器件看成为等效的电阻或电抗,那么该电阻或电抗值将随着加在其上的电压或通过其间的电流大小而变化,而不是恒定的数值。

非线性器件与普通的线性元件不同。当单频正弦信号加到该器件时,其输出不仅含有原信号频率的分量,而且,还有平均分量及信号频率的各次谐波分量。当两个不同频率的正弦信号(设为 f_1 和 f_2)同时加到该器件时,其输出不仅含有原信号频率的分量,还有许多组合频率分量,例如: $2f_1$ 、 $3f_1$..., $2f_2$ 、 $3f_2$..., $f_1 \pm f_2$, $f_1 \pm 2f_2$..., $2f_1 \pm f_2$ 、 $3f_1 \pm f_2$...。我们将这种作用称为非线性器件

的频率变换作用。含有这种器件的电路称为非线性电路。而由普通的电阻、电容、电感等元件所组成的线性电路没有频率变换作用。

由于电子线路具有上述的两个基本性质,它们能够实现无源、线性电路所无法实现的电路功能。归纳起来,电子线路能够实现如下的电路功能:

一是放大不同形状、频率和强度的信号。根据信号和负载的特点,可以有各种放大器。例如:根据输入信号强弱的不同有小信号放大器和功率放大器;根据频段的不同有直流放大器、低频放大器、高频放大器等;根据负载性质的不同有谐振放大器和非谐振放大器等…。

二是对信号进行各种频率变换。根据不同的频率变换作用,可以有各种调制器、解调器、变频器、倍频器、分频器、整流器等。

三是综合利用电子器件的放大作用和频率变换作用实现各种反馈控制。根据不同的要求,可以有各种振荡器以及各种用途的反馈控制电路。

电子线路作为有源、非线性电路,无论其工作原理或分析方法都与无源、线性电路不同。就分析方法而言,涉及到两方面的内容:一是非线性电路在各种条件下的近似分析方法;二是反馈电路(包括线性反馈电路和非线性反馈电路)的分析方法。

通过本书的学习,应达到下列要求:

1) 了解半导体管、场效应管、电子管等电子器件的基本原理,掌握它们的主要参数及运用特性。

2) 掌握放大电路、振荡电路、频率变换电路的工作原理和工程设计基础。

3) 掌握非线性电路在各种条件下的近似分析方法以及反馈