

电子线路基础

高等学校试用教材

电子线路基础

上 册

蓝鸿翔 编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是根据一九七七年十月高等学校理科物理教材会议拟订的教材编写大纲编写的。

全书包括课堂教学部分《电子线路基础》(分上、下两册)和实验教学部分《电子线路基础实验》。

《电子线路基础》一文的特点是用网络分析的一般方法讨论各种电子线路。内容共分十三章,其中包括线性电路分析基础、半导体器件的特性和模型、各种放大电路、集成运算放大器、振荡电路、非线性变换电路及电源设备。

本书连同《电子线路基础实验》一书可作为综合大学和师范院校物理系无线电类专业的试用教材,也可供从事电子线路工作的工程技术人员参考。

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日,上级同意恢复“高等教育出版社”。本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

高等学校试用教材

电子线路基础

上 册

蓝鸿翔 编

•
高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

大连印刷一厂印装

•
开本850×1168 1/32 印张16.125 字数385,000

1981年12月第1版 1984年2月第3次印刷

印数26,001—31,100

书号15010·0363 定价1.65元

前 言

“电子线路基础”是供理科无线电类专业使用的教材。本书是根据 1977 年 10 月高等学校理科物理教材会议拟订的教材编写大纲编写的。本教材不包括“脉冲与数字电路”部分(另开课),而加强了线性电路的分析方法、器件的物理特性和等效模型、放大电路、集成电路等内容。

本书分上、下两册出版。上册包括:线性电路分析基础、电子器件、放大电路基础和反馈电路四章。下册包括直流放大器、运算放大器、宽带放大器、调谐放大器、功率放大器、场效应管放大电路、振荡器、非线性电路、电源供给等九章。另外,“电子线路基础实验”是与本书相适应的实验教材。

由于各校情况不同,具体专业的特点不同,本书的部分内容可供选择。

兰州大学、四川大学等兄弟院校的同志对本书的初稿进行了认真的、反复的审查,提出了许多宝贵的修改意见。复旦大学无线电电子学教研组的许多教师,无线电专业 77 届、78 届同学及物理系部分青年教师,在使用本书初稿的过程中,也提出不少宝贵意见,特此表示衷心感谢!

由于编者水平所限,本书不可避免地会存在很多未被发现的问题和错误,希望同志们批评指正。

编者

1981 年 8 月

• i •

符号说明

一、基本电量及元件符号

V 直流电压(或泛指)

v 交流电压(瞬时值)

I 直流电流(或泛指)

i 交流电流(瞬时值)

P 直流功率

p 交流功率

R (或 r)⁽¹⁾电阻

C 电容

L 电感

$G(g)$ ⁽²⁾电导

Z 阻抗

Y 导纳

B 变压器

M 互感

D 二极管

BG 三极管(基极 b 、集电极 c 、发射极 e)

BG 场效应管(栅极 G 、漏极 D 、源极 S)

IC 集成电路

$f(F)$ ⁽³⁾频率

$t(T)$ ⁽⁴⁾时间

ω 角频率

Ω	归一化频率
Ω	调制频率
$\varphi(\theta)^{(5)}$	相位函数
θ	导通角
$H(s), T(s)$	传递函数
$Y(s), Y(j\omega), Y$	驱动点导纳
$Z(s), Z(j\omega), Z$	驱动点阻抗
$K_v(s), K_v(j\omega), K_v$	电压放大系数
$K_i(s), K_i(j\omega), K_i$	电流放大系数
$K_p(s), K_p(j\omega), K_p$	功率放大系数
$G_m(s), G_m(j\omega), G_m$	转移导纳(跨导)
$R_m(s), R_m(j\omega), R_m$	转移阻抗(跨阻)
F	反馈系数
D	反馈深度
P	极点
Z	零点
B	通频带
A_v	电压增益
A_i	电流增益
A_p	功率增益
D	失真度
Q	品质因数
ξ	阻尼系数
η	效率
$\alpha, (\beta)$	三极管电流放大倍数
$h_{ie}, h_{re}, h_{fe}, h_{oe}$ ($h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$)	h 参数

$Y_{il}, Y_{rl}, Y_{fl}, Y_{ol}$
 $(Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22})$ Y 参数

E 电池

二、脚标

b 基极
 c 集电极
 d 漏极
 e 发射极
 f 频率
 G, g 电导
 Hz, kHz, MHz 赫芝, 千赫芝, 兆赫芝
 I 直流电流, 输入
 i 交流电流, 输入
 k 临界
 L 电平, 电感, 负载
 l 电感
 M 最大值, 互感
 m 峰值
 O 输出, 谐振
 P 直流功率, 峰点
 p 交流功率
 $P-P$ 峰-峰值
 $R, (r)$ 电阻(等效电阻)
 s 饱和, 讯号源
 T 时间间隔
 t 时间变量
 V 直流电压, 谷点

v	交流电压
X	水平轴
Y	垂直轴, 导纳
Z	阻抗
α	共基极电流放大系数
β	共发射极电流放大系数
$0, 1, 2 \dots$	顺序号
$a, b, c, \dots$	

说明:

- (1) 一般电阻用 R , 内阻、器件内的等效电阻等用 r 。
- (2) 一般电导用 G , 内电导、器件内的等效电导等用 g 。
- (3) 频率应用 f , 但在调制电路中, 载频用 f , 调制频率用 F 。
- (4) 时间变量用 t 表示, 时间轴上某一点用 t 附加脚标表示, 时间间隔用 T 表示。
- (5) 泛指相位用 φ 表示, 特定的相位角可用 θ 表示。

目 录

前言	i
符号说明	1
第一章 线性电路分析基础	1
第一节 概述	1
第二节 基本电路定律	17
第三节 回路电流法和节点电压法	28
第四节 网络函数	54
第五节 稳态频响应函数	65
第六节 线性网络的瞬态分析法	89
第七节 网络的稳定性	107
第八节 网络参数及其应用	138
第九节 特律根定律	160
习题	166
第二章 半导体器件	174
第一节 半导体的物理特性	174
第二节 半导体 PN 结	193
第三节 半导体二极管	212
第四节 半导体三极管	229
第五节 场效应管	277
习题	298
第三章 放大器基础	302
第一节 单级放大电路	302
第二节 多级放大器	368
第三节 放大器中的噪声	387
习题	401
第四章 放大器中的反馈	407

第一节	反馈的基本概念·····	407
第二节	负反馈对放大电路特性的影响·····	416
第三节	基本反馈放大电路的分析·····	439
第四节	发射极跟随器·····	466
第五节	负反馈放大电路的稳定性·····	476
第六节	寄生反馈·····	487
习题	·····	492
附录	常用拉普拉斯反变换表·····	498
参考书	·····	503

第一章 线性电路分析基础

电子线路是由电阻、电容、电感、变压器、二极管、三极管……等元件按一定规律组合而成的。

学习电子线路的主要任务是了解各种电路的基本工作原理,分析电路中各支路的电流电压关系,确定描述电路特点的主要指标以及它们与电路中各元件参数的关系,或者根据预定的电路指标设计电路的元件参数。

由于许多常用的电子线路在一定的近似条件下都可以等效为线性电路,因此,线性电路的分析方法是分析电子线路的基础。在学习每一类具体的电子线路之前,系统地讨论一下线性电路的分析方法是很必要的。

本章将研究线性电路分析的一般问题:如何根据已知的电路结构列出描述其电流电压关系的电路方程;如何根据电路方程求解输出和输入讯号间的关系,即电路的传递函数;如何根据传递函数讨论电路的频响特性和瞬态响应以及电路的稳定性等。

第一节 概 述

具有导电性能的元件称为电气元件。电阻器、电容器、电感器、变压器等都是电气元件。在电路中,习惯称它们为电路元件。

由电气元件按一定的规律联结而成的网络(Network)称为电路,或电网络。也可一般地称为网络。

根据电路元件的电特性和电路的结构,研究电路中电流电压关系,描述电路的主要性能,计算电路的主要特征指标,这就是电

路分析的任务。

由于电特性的差异，电路元件可分为线性元件和非线性元件两大类。

若某一元件的电流电压关系可由一线性方程（代数方程或微分、积分方程）描述，它就是线性元件。

若某一元件的电流电压关系为一非线性方程，那么，它就是非线性元件。

构成电路的元件都是线性元件，该电路称为线性电路。包含有非线性元件（一个或更多）的电路称为非线性电路。

实际上，“线性”与“非线性”是相对的。所谓“线性元件”，总是对于一定的电流电压范围而言的，超出特定的范围，它很可能就成为非线性的了。同样，对于“非线性元件”，在一段特定的较小的电流电压范围内，也可以近似地将其当作线性元件来处理。

最常用的电路元件是电阻器、电容器、电感器、变压器，不特别说明时，它们都是线性元件。

除了上面介绍的电路元件外，我们还常用三极管、场效应管、集成电路、电子管等元件，这类元件的电特性要复杂的多，它们统称为电子器件。

包含有电子器件的电路称为电子线路。电子线路可以具有各种各样的功能，在近代科学技术中获得极其广泛的应用。

电路中的电流和电压是在电源的激励下产生的。电源可分为电压源和电流源。

电路分析就是要研究在一定的电源激励下，电路中有关元件上流过的电流和建立的电压，即响应电流和电压。

§ 1-1 常用电路元件

电路中大量出现的元件是电阻器、电容器、电感器和变压器，它们的电特性归纳如下。

一、电阻器

电阻器是一个二端元件，它可用图(1-1-1)所示的符号来表示。根据欧姆定律，电阻器的电压、电流关系为：

$$v_R(t) = R \cdot i_R(t) \quad (1-1-1a)$$

$$i_R(t) = G \cdot v_R(t) \quad (1-1-1b)$$

这里， $v_R(t)$ 是它的端电压，图(1-1-1)中的正负号表示电压的参考方向。 $i_R(t)$ 是流过电阻器的电流，图(1-1-1)中的箭头表示电流的参考方向，它应由电压 $v_R(t)$ 的正端指向负端。 R 是电阻器的电阻值，单位是欧姆(Ω)， G 是电阻器的电导值，单位是西门子(S)， R 和 G 互为倒数，即 $G = \frac{1}{R}$ (或 $R = \frac{1}{G}$)，显然 $1\text{S} = \frac{1}{1\Omega}$ 。

通常，电阻器是线性元件，也就是说 R 、 G 是常数，与电压 $v_R(t)$ 和电流 $i_R(t)$ 的大小无关。

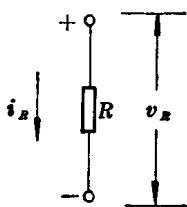


图 (1-1-1)

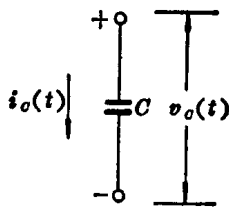


图 (1-1-2)

二、电容器

电容器是一个二端元件，可用图(1-1-2)所示的符号来表示。根据电容的物理特性可知：

$$q_o(t) = C \cdot v_o(t) \quad (1-1-2)$$

这里， $q_o(t)$ 为电容器中存贮的电荷量，单位是库仑。 $v_o(t)$ 是电容器的端电压，单位是伏特(V)。 C 是电容器的电容量，单位是法拉(F)。

通常，电容器是线性元件，也就是说 C 是常数，与 $v_o(t)$ 、 $q_o(t)$

的大小无关。

由(1-1-2)式可知,电容器的电压电流关系为:

$$i_c(t) = \frac{dq_c(t)}{dt} = C \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (1-1-3a)$$

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt + v_c(0) \quad (1-1-3b)$$

其中, $i_c(t)$ 为流过电容 C 的电流, $v_c(0)$ 是电容器二端的初始电压, 若电容器的初始电压为零, 则有:

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt \quad (1-1-3c)$$

三、电感器

电感器也是一个二端元件, 可用图(1-1-3) 所示的符号来表示。根据电感的物理特性可知:

$$\phi_L(t) = L i_L(t) \quad (1-1-4)$$

这里, $\phi_L(t)$ 是电感线圈中的磁通量, 单位是韦伯。 $i_L(t)$ 是流过电感的电流, 单位是安培(A)。 L 是电感器的电感量, 单位是亨利(H)。

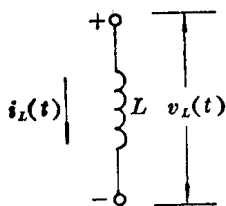


图 (1-1-3)

通常,电感器是一个线性元件, L 是常量, 与 $\phi_L(t)$, $i_L(t)$ 的大小无关。

根据(1-1-4)式,电感器的电压与电流关系为:

$$v_L(t) = \frac{d\phi_L(t)}{dt} = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (1-1-5a)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v_L(t) dt + i_L(0) \quad (1-1-5b)$$

其中, $i_L(0)$ 为电感器中的初始电流, 若 $i_L(0)$ 为零, 则:

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v_L(t) dt \quad (1-1-5c)$$

四、变压器

变压器是一个四端元件, 它由互相耦合的初级和次级绕组线

圈制成, 可用图(1-1-4)所示的符号表示, 其电压、电流关系为:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1-1-6a)$$

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = -\frac{n_2}{n_1} \quad (1-1-6b)$$

这里, n_1 和 n_2 分别为变压器的初级和次级线圈的圈数。显然, n_1 和 n_2 是常数, 所以变压器也是一个线性元件。

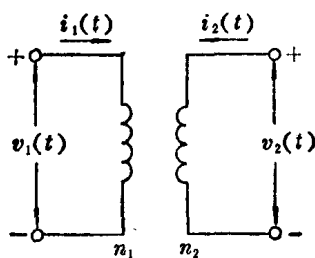


图 (1-1-4)

由(1-1-6)式可得:

$$v_1(t)i_1(t) + v_2(t)i_2(t) = 0 \quad (1-1-7)$$

其中 $v_1(t)i_1(t)$ 为初级线圈中的电功率, $v_2(t)i_2(t)$ 为次级线圈的电功率。(1-1-7)式反映了变压器的能量守恒关系。

五、实际的元件

上面介绍的电阻器、电容器、电感器和变压器都是理想的。实际使用的元件还要考虑一些其他因素。

一个电阻器除了它的电阻特性外, 还具有一定的分布电感 L 和分布电容 C ^①, 如图(1-1-5)所示。通常 L 、 C 都是很小的, 可以忽略。只有当它工作在高频情况下, 才需要考虑这些分布参数的影响。

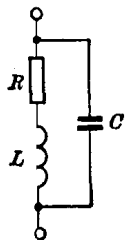


图 (1-1-5)

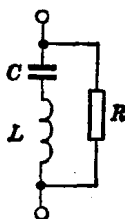


图 (1-1-6)

① 这里并没有人为地接入电容或电感, 而是引线电感和端子间的等效电容, 所以称为“分布”电感、“分布”电容。或称为“寄生”电感、“寄生”电容。

一个电容器除了它的电容特性外, 还具有一定的分布电感 L 和漏电阻 R , 如图(1-1-6) 所示。通常分布电感 L 是很小的, 在工作频率不太高时可以忽略。而漏电阻 R 的影响往往不可忽略。不同电容的漏电阻 R 相差很大, 取决于电容的介质材料和制作工艺。在选择电容时应注意这一点, 尤其在高频情况下, 更是如此。

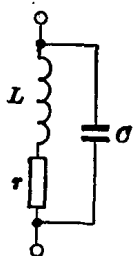


图 (1-1-7)

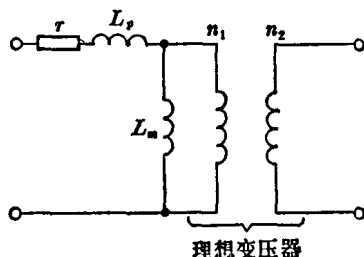


图 (1-1-8)

一个电感器除了它的电感特性外, 还有一定的损耗电阻 r 和分布电容 C , 如图(1-1-7)所示。损耗电阻 r 的大小直接反映了电感器的质量好坏。电感 L 阻抗和电阻 r 之比 (在一定的工作频率下), 即:

$$\frac{\omega L}{r} = Q_L \quad (1-1-8)$$

称为该电感的品质因素或 Q 值。

变压器除了通过电磁感应将初级线圈中交变的电压和电流感应到次级回路外, 还要考虑变压器本身的损耗电阻 r , 漏感 L_p 和初级线圈的磁化电感 L_m , 如图(1-1-8)所示, 其中大括号指示的部分是一理想变压器。

由于电阻器、电容器、电感器是电路中经常出现的基本元件, 今后一律简称为电阻、电容和电感, 分别用 R 、 C 、 L 表示之。

§ 1-2 电源(source)

电路中常见的电源分为两大类: 独立源(independant source)和相关源(dependant source)

若某一电源,它的基本参数(源电压、源电流)仅仅由源内部的因素所决定,它就是独立源。若某一电源,其基本参数(源电压、源电流)与其所处的电路中某参数有关,那它就是相关源。只有独立源才能作为电路的激励讯号源 (driving signal)。仅仅依靠相关源,无法在电路中激励出电流或电压,因为相关源本身是依存于电路中某一元件上的电流或电压的。

一个网络的内部不含有任何相关源,则称其为无源网络。仅仅由 R 、 L 、 C 和变压器构成的电网络,都是无源网络。

一个网络的内部若含有一个或若干个相关源,则称其为有源网络。凡是含有晶体三极管,场效应管,集成电路,……等电子器件的电路,都是有源网络。因此,电子线路所讨论的问题,大都是有源网络的问题^①

不管是独立源还是相关源,它们都可以分为电压源和电流源。

理想独立电压源具有确定的电动势,源内阻为零。因此,不管由它流出的电流多大,其两端电压始终不变,等于其电动势。理想电压源用图(1-1-9a)所示的符号来表示,其中 E (或记为 v_s) 为该电压源的电动势,极性用 (+、-) 号标志。

然而,任何实际的电压源,不可避免地要具有一定大小的内阻 R_s , 这样的电压源可用图(1-1-9b)所示的符号来表示,其中 $E(v_s)$ 表示源的电动势, R_s 表示内阻。因此,实际电压源的端电压 v_{ab} 等于电动势 v_s 与内阻 R_s 上电压降之差。若由源流出电流为 i_s , 则:

$$v_{ab} = v_s - i_s R_s$$

① 无源网络总要消耗一部分激励电源的能量,因此输出讯号功率总是小于输入的激励功率。

有源网络,常常是以激励讯号电源作为控制源,而将其他形式的电源能量,转化为讯号能量输出。因此,它的输出讯号功率可能大于输入讯号激励功率。换言之,有源网络往往具有“放大”功能。

然而,不论是无源网络,还是有源网络,都不能违反能量守恒原则。