

高等学校试用教材

电子线路

上册

第一分册

武汉大学《电子线路》教材编写组编

人民教育出版社

高等学校试用教材

电子线路

上册

第一分册

武汉大学《电子线路》教材编写组编

人民教育出版社

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大纲编写的。

全书分上(暂又分两册)、下两册。上册有线性电路基础、半导体二极管和晶体管、放大器的基本分析方法、负反馈放大器和常用放大器五章,下册有正弦振荡与非线性变换、脉冲电路、数字集成电路和直流电源四章。

本书连同我组所编《电子线路实验》一书,可作为综合大学物理系各专业(无线电专业除外)电子线路课的教材,也可作为师范院校物理系的借用教材或参考书以及从事电子线路工作人员的参考书。

高等学校试用教材

电 子 线 路

上 册

第一分册

武汉大学《电子线路》教材编写组编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 7.5 字数 180,000

1979年2月第1版 1979年6月第1次印刷

印数 00,001—85,000

书号 13012·0289 定价 0.63 元

前 言

本书是根据一九七七年十月全国高等学校理科物理教材会议为物理专业拟订的《电子线路》大纲编写的。全书分上、下两册。上册有线性电路基础、半导体二极管和晶体管、放大器的基本分析方法,负反馈放大器和常用放大器等五章;下册有正弦振荡与非线性变换、脉冲电路、数字集成电路和直流电源等四章。书中加*号的部分为参考资料,可不列入教学内容。本书与我组所编《电子线路实验》一书配套,组成电子线路理论课和实验课的教材。

本书经《电子线路》教材审稿会审订。参加审稿会的单位有厦门大学(主审单位)等十三个院校。参加审稿会的同志和我校物理系、空间物理系审阅本书的同志,提出了不少宝贵的意见,在此一并致以衷心的感谢。

本书第一、七、八章和上册附录由卢孝先编写,第二、三、六、九章和下册附录由梁明理编写,第四、五章由廖孟扬编写。

由于我们水平有限,编写时间仓促,书中必有错误和不妥之处,希读者批评指正。

武汉大学《电子线路》教材编写组

一九七八年十二月

符号说明

一、基本符号

a	增益或放大倍数、简谐量的幅度
A	增益或放大倍数
B	通频带宽度
C	电容
D	二极管、反馈深度
e	电动势
E	直流电源电压、电动势
f	频率、函数
F	重复频率、反馈系数、频率、函数
g	响应函数
G	电导、增益
h	h 参数
H	稳态特性
i, I	电流
j	$\sqrt{-1}$
K	传输系数
L	电感
$\mathcal{L}$	拉普拉斯变换
m	调制指数
M	互感
n	变压比、取样比、接入系数、电子型半导体
N	匝数、噪声、过驱动系数

p	功率、空穴型半导体
P	功率
Q	晶体管、场效应管、品质因数、电荷量、静态工作点、触发器输出端
r	电阻、动态电阻
R	电阻、直流电阻
s	复频率($j\omega$)
S	稳定系数、开关
t	时间
T	周期、变压器
u, U	电压
V	伏特表
x, X	电抗、信号
y, Y	导纳、 y 参数、逻辑函数(Y)
z, Z	阻抗、 z 参数
α	温度系数、衰减系数
γ	非线性失真系数
Δ	增量、行列式
η	效率
ρ	特性阻抗
Φ	磁通
φ	相角、角度
ω	角频率、高频角频率
τ	时间常数
ξ	集电极电压利用系数
Ω	低频角频率

二、下标符号

B, b 基极

C, c 电容、集电极

D, d 漏极、二极管

E, e 发射极

f 反馈

F 正向

G, g 栅极

h 高频段

H 上界频率点

I, i 输入、电流、中频

J, j 结

L 电感、负载、下界频率点

l 低频段、本机振荡

$M(\text{Max}), m(\text{max})$ 最大值、峰值

N, n 中和

O, o 输出

P, p 功率、并联、峰值

$p \sim p$ 峰-峰值

R, r 反向、电阻

S, s 短路、源极、信号、串联、稳定

T, t 温度

U, u 电压

u 脉冲宽度

X, x 电抗

Z, z 稳压的

三、电量参数符号说明

1. 基本符号

随时间变化的电压、电动势、电流、功率的瞬时值用相应的小写字母表示： u 、 e 、 i 、 p 。

直流值、平均值、均方根值和最大值(峰值)、电源电压和功率，用相应的大写字母表示： U 、 E 、 I 、 P 。

2. 下标符号

变化的分量值(最大值或峰值、平均值、均方根值、瞬时值)使用小写字母下标，举例如下：

均方根值	例如： I_b 、 U_{ce}
平均值	$\bar{I}_b$ 、 $\bar{U}_{ce}$
最大值(峰值)	I_{bm} 、 U_{cem}
瞬时值	i_b 、 u_{ce}

直流值、总的最大值(峰值)、总的平均值、总的瞬时值使用大写字母下标，举例如下：

无信号时的直流值	例如： I_B 、 U_{CE}
总的最大值	I_{BM} 、 U_{CEM}
总的平均值	$\bar{I}_B$ 、 $\bar{U}_{CE}$
总的瞬时值	i_B 、 u_{CE}

注 (i) 如下标有几个，则应当都用大写或都用小写，例如 I_{BM} 、 U_{cem} 。

(ii) 电源电压用大写下标，如 E_C 、 E_B 。

四、晶体管的主要参数符号

α 、 h_{fb}	共基极短路电流放大系数
β 、 h_{fe}	共射极短路电流放大系数
h_{FE}	共射极短路直流电流放大系数

h_{ie}	共射极短路输入电阻
h_{oe}	共射极开路输出电导
BU_{CE0}	基极开路, 集电极-发射极反向击穿电压
BU_{CB0}	发射极开路, 集电极-基极反向击穿电压
BU_{EB0}	集电极开路, 发射极-基极反向击穿电压
U_{CES}	集电极-发射极饱和压降
I_{CB0}	发射极开路, 集电极-基极反向截止电流
I_{CE0}	基极开路, 集电极-发射极反向截止电流
f_{α}	共基极截止频率
f_{β}	共发射极截止频率
f_T	特征频率
I_{CM}	集电极最大允许电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率

五、单位和量级

A	安培	F	法拉
V	伏特	Hz	赫兹
W	瓦特	s	秒
Ω	欧姆	dB	分贝
H	亨利		
m	毫(10^{-3})	k	千(10^3)
μ	微(10^{-6})	M	兆(10^6)
n	纳诺(10^{-9})	G	吉加(10^9)
p	皮可(10^{-12})		

目 录

符号说明	(1)
第一章 线性电路基础	(1)
§ 1.1 信号及其频谱简介	(1)
一、信号及其基本型	(1)
二、周期信号的频谱分析	(4)
三、非周期信号的频谱分析	(12)
§ 1.2 线性元件与线性电路	(13)
一、理想的无源元件	(15)
二、电源	(17)
三、线性电路的特征	(19)
四、支配电过程的基本定律	(21)
§ 1.3 RC 电路的正弦稳态过程	(23)
一、稳态过程和过渡过程	(23)
二、正弦稳态过程	(27)
三、稳态特性	(30)
四、几种简单电路的稳态特性	(32)
§ 1.4 几个常用的基本定理	(36)
一、叠加原理	(36)
二、等效电压源定理(戴文宁定理)	(38)
三、等效电流源定理(诺顿定理)	(40)
四、电源变换	(41)
§ 1.5 复杂电路的计算方法	(42)
一、节点法	(42)
二、回路法	(47)
§ 1.6 四端网络	(51)
一、四端网络的基本方程和网络参数	(53)
二、有端接的四端网络	(59)
三、阻抗匹配	(63)

本章小结.....	(66)
习题与思考题.....	(68)
第二章 半导体二极管和晶体管.....	(73)
§ 2.1 $p-n$ 结的特性.....	(73)
一、什么是半导体.....	(73)
二、本征半导体的导电特性.....	(74)
三、 p 型半导体和 n 型半导体.....	(78)
四、 $p-n$ 结的特性.....	(79)
§ 2.2 半导体二极管.....	(83)
一、半导体二极管的结构.....	(83)
二、二极管的伏安特性.....	(85)
三、二极管的主要参数.....	(88)
§ 2.3 晶体三极管的工作原理.....	(92)
一、晶体三极管的结构.....	(92)
二、晶体三极管的直流通路与电流分配关系.....	(95)
三、晶体三极管的放大作用.....	(99)
§ 2.4 晶体三极管的特性曲线.....	(100)
一、晶体管的三种连接方式.....	(100)
二、共发射极连接的晶体管特性曲线.....	(102)
三、共基极连接的晶体管特性曲线.....	(109)
§ 2.5 晶体三极管的部分参数.....	(112)
一、晶体管的电流放大系数.....	(112)
二、极间反向电流.....	(115)
三、极限参数.....	(117)
四、频率参数.....	(119)
附录 2-1 半导体器件型号命名方法.....	(120)
本章小结.....	(122)
习题与思考题.....	(123)
第三章 放大器的基本分析方法.....	(125)
§ 3.1 放大器静态工作点的设置.....	(126)
一、放大电路说明.....	(126)
二、应该怎样设置静态工作点.....	(127)
三、直流负载线.....	(130)

四、定基流偏置电路	(132)
§ 3.2 图解法分析放大器	(134)
一、用图解法作出放大器各部分的波形	(134)
二、晶体管的线性运用	(139)
三、用图解法求放大器的放大倍数	(143)
四、交流负载线	(146)
§ 3.3 偏置电路及工作点的稳定	(151)
一、温度变化对放大器工作点的影响	(151)
二、电流反馈式偏置电路	(154)
三、其它稳定工作点的偏置电路	(158)
§ 3.4 等效电路法分析放大器	(161)
一、晶体管的 h 参数	(161)
二、晶体管的 h 参数等效电路	(169)
三、晶体管输入电阻的估算	(173)
四、用等效电路法分析晶体管放大器	(175)
§ 3.5 阻容耦合放大器	(184)
一、运用输入电阻和输出电阻计算多级放大器的电压放大倍数	(186)
二、阻容耦合放大器的频率特性	(191)
三、放大器的动态范围	(206)
四、阻容耦合放大器的设计方法	(211)
附录 3-1 增益的分贝表示法	(217)
本章小结	(219)
习题及思考题	(222)

第一章 线性电路基础

§1.1 信号及其频谱简介

电子线路的主要任务之一,是传输信号,图 1-1 是其示意。要解决“信号通过电路”这个课题,必须明瞭电路的特性,也必须明瞭信号的特性,这样才能使信号和电路两相适应。“电子线路”这门课程,主要是讨论各种电路的特性和功能,为达此目的,有必要先对信号作一简单介绍。

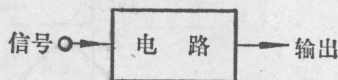


图 1-1 信号通过电路示意

一、信号及其基本型

电子线路的信号,通常是指从外部加于电路,并由电路进行处理和传输的电压变量或电流变量,或者说,信号就是变化的电压和电流。这种变化的电压和电流,都是时间的函数,其函数关系可以写成表达式 $f(t)$, 亦可画成关系曲线。信号随时间变化的关系曲线,称为信号波形。

本书常用的信号大致可分为两类:一类是周期信号,另一类是非周期信号。

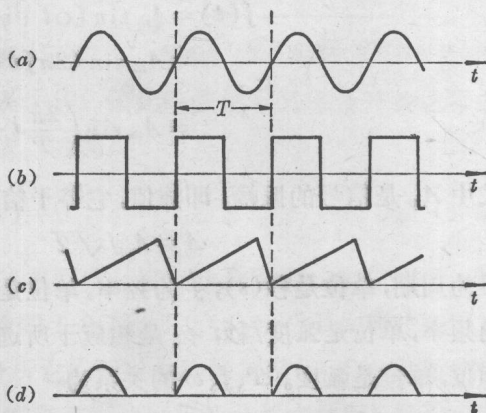


图 1-2 周期信号

周期信号是以一定时间间隔重复的无始无终的信号。图 1-2 所示的就是几种简单周期信号。周期信号可定义为:

$$f(t) = f(t + nT) \quad (1-1)$$

式中 n 为任意整数, T 为信号的重复周期, 简称周期。 T 的倒数 $F = \frac{1}{T}$, 称为信号的重复频率。

正弦信号是一种最简单、最常用的周期信号, 可将它作为周期信号的基本型或标准型, 现将它仔细画于图 1-3。

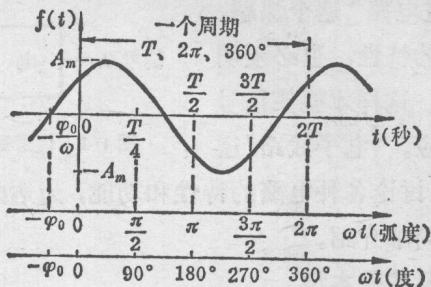


图 1-3 正弦信号

正弦信号的表达式为:

$$f(t) = A_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1-2a)$$

$$= A_m \sin(2\pi f t + \varphi_0) \quad (1-2b)$$

$$= A_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_0\right) \quad (1-2c)$$

式中 A_m 是信号的振幅, 即峰值, 它等于信号有效值 A 的 $\sqrt{2}$ 倍。

$$A = A_m / \sqrt{2} \quad (1-3)$$

T 为周期, 单位是秒(s); f 为频率, 单位是赫(Hz), 或周/秒; ω 为角频率, 单位是弧度/秒; φ_0 是相应于所选时间起点($t=0$)的初始相位, 单位是弧度。 T 、 f 、 ω 的关系为

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{或} \quad T = \frac{1}{f} \quad (1-4a)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (1-4b)$$

要指出的是,在分析电子线路时,为了简单起见,往往将角频率也称为频率,似乎有点混淆,但习惯之后,也不会出错。

非周期信号就是在时间上不具有周而复始性质的信号,图 1-4 和图 1-5 示出的都是非周期信号。

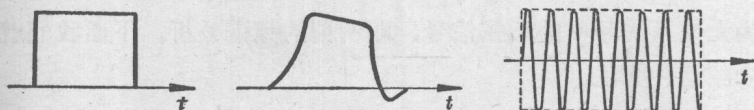


图 1-4 非周期信号

阶跃信号是非周期信号的基本型,它的特点是:在某时刻 $t=0$ 之前,恒为零,在 $t=0$ 时刻,以无限小的时间突跳到振幅 A ,以后始终保持 A 不变,如图 1-5。象图 1-6 那样,用开关突然接通

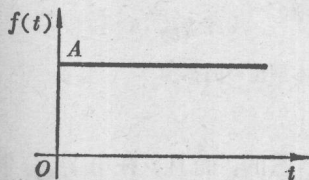


图 1-5 阶跃信号

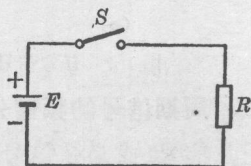


图 1-6 接通直流电源获得阶跃信号

直流电源,可以获得阶跃信号;因此阶跃信号又称为开关信号或接通信号。阶跃信号的表达式为:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

为什么要特别提出基本型信号呢?这是因为:实际信号一般都是比较复杂的,即使象图 1-2(b)、(c)、(d)和图 1-4 那些还不算太复杂的信号,要直接分析它们通过电路的情况,弄清电路对它们的影响,也不那么容易。有没有简便可行的分析方法呢?我们可以设想,如果能够把复杂的信号分解成一些同类型的简单信号,根据

这种简单信号通过电路的情况，就能得知任何复杂信号通过电路的概貌，这样我们就可以避开前述的困难了。正是基于这种设想，在电子线路分析中，总是将复杂的信号分解为一系列简单信号，特别是将它分解为某种基本型信号。最常用的分解法有两种，一种是将信号分解为许多阶跃信号，如图 1-7(a)，或者是将信号分解为无数相邻的冲激信号^①，如图 1-7(b)。另一种方法是将信号分解为无数不同频率的正弦信号，即所谓的频谱分析。下面我们就来介绍这种方法。

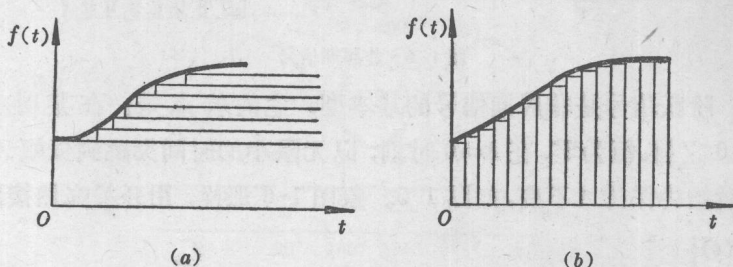


图 1-7 任意信号 $f(t)$ 可视为基本型信号的叠加

二、周期信号的频谱分析

正弦信号(或余弦信号)是大家最熟悉的，而且，在电路分析方面，我们还有电学中交流电路的基础。能否将一个复杂的信号分解为一系列正弦信号呢？我们先来看一个反面的例子。图 1-8 示出了两个正弦信号，它们的初相都为 0， $f_1(t)$ 的周期为 T ，频率为 $f_1 = \frac{1}{T}$ ； $f_2(t)$ 的频率则为 f_1 的两倍，即 $f_2 = 2f_1$ 。如果把 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 叠加起来，即可得到细线所示的 $[f_1(t) + f_2(t)]$ 。由图可见，虽然 $[f_1(t) + f_2(t)]$ 的波形已不再是正弦形，但它仍然具有与 $f_1(t)$ 周期相同的重复周期 T 。读者如有兴趣，还可以将一些正弦信号叠加上去，只要这些信号的频率是 f_1 的整数倍，初相为 0，

^① 冲激信号是一种持续时间极短的脉冲信号，它是非周期信号的另一基本型，详细定义见上册附录 I。

叠加所得的复杂波形,就一定具有与 $f_1(t)$ 相同的周期。这一情况启示我们,复杂的周期信号,可以看成是一系列正弦信号的叠加。

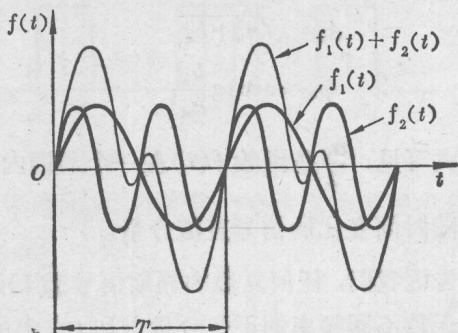


图 1-8 正弦信号叠加成非正弦信号

上述结论有没有普遍性呢? 大家知道,任何周期函数 $f(t) = f(t + nT)$, 只要满足狄义赫利条件^①, 都可展开为傅里叶级数(以后都简称傅氏级数):

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (1-6a)$$

$$\text{或 } f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t - \varphi_n) \quad (1-6b)$$

式中, $\omega_1 = 2\pi F_1 = 2\pi/T$, $F_1 = \frac{1}{T}$ 则等于原周期信号 $f(t)$ 的重复频率。 n 只能取正整数 $1, 2, \dots, n, \dots$ 。其它参数由下列各式决定。

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (1-7a)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos n\omega_1 t dt \quad (1-7b)$$

^① 所谓狄义赫利条件, 就是: 函数 $f(t)$ 在任一有限区域内连续, 或者只有有限多个第一类间断点和有限多个极值。电子线路中的周期信号一般都满足此条件。