

电工原理与计算方法

上册

(电路部分)

黄礼镇 黄椿熙 编著

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书从基本概念出发,比较全面和系统地讨论了电工的基本理论和有关的计算方法。书中汇集了较多的例题和习题,在书末附有习题答案。本书可作为高等院校电类专业教材,也可供有关科技人员参考。

全书分上、下两册。上册讨论电路原理,下册讨论电磁场原理。

上册共分十章,论述电路的基本定律和定理,分别讨论了静态网络、动态网络、正弦稳态网络、信号分析、多端口网络、分布参数电路和非线性电路等。网络的分析方法包括经典法、各种变换运算法、状态变量法和矩阵分析法等。此外,还介绍了电路数值计算常用的计算方法。

电工原理与计算方法

上 册

(电路部分)

黄礼镇 黄椿熙 编著

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年9月第一版 开本:787×1092 1/32

1987年9月第一次印刷 印张:23

印数:0001—9,550 字数:527,000

统一书号:15031·843

本社书号:4742·15—5

定价:5.40元

目 录

第一章	电网络的构成及其基本定律	1
1-1	电网络的构成	1
1-2	理想化的电路元件	3
1-3	电网络的基本定律	20
1-4	实际电气装置及器件的电路图举例	33
1-5	等效电路图,单端口电路元件的串并联	39
1-6	电网络的类型	49
	习题	50
第二章	网络定理及线性定常静态网络的计算	62
2-1	引言	62
2-2	叠加定理	63
2-3	回路法	65
2-4	节点法	71
2-5	电路图的等效替换及替代定理	83
2-6	等效电源定理	91
2-7	互易定理	102
2-8	特勒根定理	107
	习题	112
第三章	线性定常动态网络的分析	133
3-1	经典解法	133
3-2	特殊激励函数	139
3-3	直流激励及单位阶跃响应	143
	一阶网络的分析	143
	具有受控源的动态网络分析	154
	二阶网络分析	163

3-4	单位冲激响应	181
	一阶网络分析	181
	二阶网络分析	188
3-5	任意激励函数的零状态响应	190
	卷积积分	191
3-6	拉普拉斯变换计算法	198
	拉氏变换的基本性质	199
	应用拉氏变换的电路运算	203
	网络函数	205
	习题	218
第四章	正弦交流电路	242
4-1	正弦交流电路的基本概念	242
	正弦交流电的三要素	242
	有效值	244
	正弦交流电的复数表示法	245
	电路元件的相量形式的数学模型	247
4-2	交流电路的计算	250
	网络方程的相量表示	250
	无源二端网络的功率计算	254
	最大的功率传输	257
4-3	互感电路	269
4-4	谐振电路	277
4-5	网络的对偶性	286
4-6	三相电路	290
4-7	正弦激励的动态电路分析	299
	习题	302
第五章	信号分析	321
5-1	周期信号的傅里叶级数	321
5-2	非正弦激励的稳态响应计算	325
5-3	周期信号的频谱分析	331

5-4	非周期信号的频谱与傅里叶变换	337
5-5	傅里叶变换的性质及计算	344
5-6	离散时间信号及 Z 变换	355
5-7	对称三相线性定常网络中的高次谐波	370
	习题	375
第六章 线性定常网络矩阵分析法		387
6-1	引言	387
6-2	矩阵的基本概念	387
	定义	387
	矩阵的代数运算	390
	矩阵在线性代数方程组的应用	393
6-3	网络矩阵及 KCL 和 KVL 的矩阵表示	394
	关联矩阵	395
	特勒根定理的证明	398
	割集矩阵	398
	网孔矩阵	400
	连集矩阵(回路矩阵)	402
6-4	网络矩阵方程式及其解法	405
	广义支路	405
	阻抗矩阵法	409
	导纳矩阵法	410
	节点法	410
	网孔法	416
	割集法	419
	连集法	424
	含有受控源电路的矩阵分析法	426
6-5	多端口网络矩阵分析	435
	常用的双口网络	436
	* 端口网络	449
	* 端口网络	451

6-6	双口网络的连接	457
	习题	467
第七章	线性定常网络状态变量分析法	486
7-1	状态变量及状态方程式	486
7-2	状态方程的编写法	489
	直接编写法	489
	系统编写法	502
7-3	状态方程式的解法	511
	一般解法	511
	拉氏变换运算法	515
7-4	矩阵的函数	519
	凯莱-哈密顿定理	520
	矩阵函数的多项式表示法	520
	应用矩阵多项式解状态方程示例	524
7-5	传递矩阵	527
	习题	529
第八章	分布参数电路	538
8-1	均匀传输线的方程式	538
8-2	均匀传输线正弦稳态分析	540
	正弦稳态解	540
	入端阻抗和参数的测试	545
	行波	547
	无反射的传输线	551
	无失真(无畸变)的传输线	554
8-3	无损均匀传输线正弦稳态分析	555
	终端接几种特殊负载的传输情况	556
	无损线的应用	565
8-4	均匀传输线的等效双口网络	565
	等效双口网络	565
	链形网络	568

8-5	无损均匀传输线的暂态分析	571
	应用拉氏变换运算法	572
	等效电路图的解法	587
	习题	594
第九章	非线性电路	600
9-1	引言	600
9-2	含非线性电阻元件的简单电路	601
	解析法	604
	图解法	604
9-3	晶体管电路分析	615
	小信号分析	616
	艾伯斯-莫尔方程式	621
9-4	含有一个动态元件的简单非线性电路	625
	解析法	628
	图解法——等斜线法	634
9-5	含有非线性动态元件的交流电路	636
	曲线图解法	637
	铁心线圈的等效电路图	640
	铁磁谐振电路	645
9-6	相平面分析法	649
	习题	653
第十章	有关电路的数值计算方法	667
10-1	方程式求根法	667
	二分区间法	667
	牛顿-拉夫逊迭代法	669
	根的平方(格来弗法)	670
10-2	联立代数方程式解法	680
	高斯消去法	680
	迭代法	683
	求逆矩阵法	685

10-3	解非线性联立方程式	687
	牛顿-拉夫逊迭代法	687
10-4	数值积分法	689
	高斯型积分法	691
10-5	一阶微分方程解法	692
	欧拉法	692
	梯形法	693
	龙格-库塔法	694
	习题答案	698
	参考文献	715
	中英名词索引	716

第一章 电网络的构成及其基本定律

1-1 电网络的构成

由若干电气设备或器件所构成的可供电流流通的通路叫做电路。电路在电工应用中起着输送电能和处理电信号等作用。

在电路中有一个或几个输入电能或电信号的端口，也有一个或几个输出电能或电信号的端口，每个端口有二个成对的接端。由输入端口输入的电能或电信号叫做激励。由输出端口输出的电能或电信号叫做响应。接在输入端口提供电能或电信号的设备叫做激励源或电源。接在输出端口取用电能或电信号的设备或器件叫做负载。这样，一个电路就形成一个系统。包括电源及负载的整个电路系统叫做电网络。电网络和电路这两个名词常可互相通用，不过用电网络时，常联系到系统这一概念。有的电网络很庞大，如供应电力的电力网络或系统，有的则很简单，如干电池供电的手电筒。并且，一个大系统还可分为若干个小的单元系统，每一个小系统也有它的输入和输出。

在物理世界有各种各样的系统。在人类社会也有各种各样的系统，例如一个工厂就是一个系统，输入的有原料、动力等等，输出的则是产品、废料等等。

在电气工程中要设计和建立一个电网络，有许多事要做，也需要各种专业知识。对电网络进行分析和综合就是其中的重要环节之一。但要对一个实体的电网络进行分析研究是有

困难的,这需要把组成电网络的各种部件,根据它在电路中所表现的物理现象,加以简化,并突出其主要作用,用一个或几个基本的物理模型来表示。这些基本的物理模型是理想化的模型,称为电路元件。电路元件依所表征的物理性能的不同,可分为几种,如电阻元件、电感元件、电容元件等等。当然,由这些理想化的电路元件构成的电网络模型也是理想化的,它和实际的电网络只是一种近似,但要求在实验测试上能基本上较好地表示实际情况。各种电路元件可以用符号表示(参见下节),由各种电路元件组成的电网络模型便可绘成电路图或称电网络图,便于分析研究。

在网络理论中,表征电路的基本物理现象的基本变量有四个,即

(1) 电流,以 i 表示,单位用安培,简写为 A。

(2) 电荷,以 q 表示,单位为库仑,简写为 C。

(3) 电压,以 u 表示,或电位,以 ϕ 表示,单位用伏特,简写为 V。

(4) 磁通,以 Φ 表示,单位是韦伯,简写为 Wb。

上述这些变量一般是时间 t 的函数。从这些变量还可计算电功率 $p(t) = u(t) \cdot i(t)$, 单位用瓦特,简写为 W, 也可计算电能。

$$W(t) = \int_0^t u i d\tau = \int_0^t p d\tau$$

单位用焦耳,简写为 J, 或用千瓦-时,简写为 kW-h。

根据电路元件所表征的物理性能,就有可能用数学表达式来表示该元件的基本变量之间的关系。这种数学表达式就叫做电路元件的数学模型(参见下节)。根据电网络的基本规律可以把各电路元件的数学模型联系起来,建立表征电网络整个系统的变量之间的关系的一组方程式,此式称为电网络

方程式或电网络的数学模型。有了电网络的数学模型就可以求解所需要的电路变量或响应。

1-2 理想化的电路元件

电路元件是一种理想化的物理模型，用以作为组成电网的基本元件。为了表征不同的物理性能，可要采用不同的电路元件。现将各种现代网络分析中常用到的基本电路元件扼要介绍如下：

1. 电阻元件

这是一个只表征有热能损耗的二端电路元件。符号如图 1-1(a) 所示，图中沿电路的矢号表示电流 i 的正方向（或称参考方向），电路外方矢号或用正负号表示电压 u 的正方向。因为电流沿电路流动有二种可能方向，电压降落也有二种可能方向，故需选定所朝的那一方向为正，正方向的选定是任意的。就一个电路元件来说，二者的正方向如图 1-1 所示，常选定为一致的。电阻元件的 u 和 i 服从欧姆定律，可写出 u - i 关系的数学表达式为

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-1)$$

或

$$i(t) = Gu(t)$$

式中比值 R 称为电阻，单位用欧姆，简称为欧，以 Ω 表示。 G

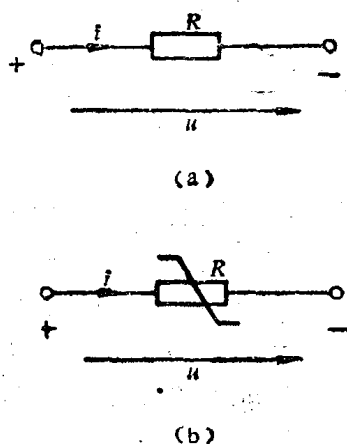


图 1-1

为 R 的倒数,称为电导,单位用西门子,简称为西,以 S 表示。如果电压与电流为恒值,常以大写字母表示,欧姆定律写为

$$U = RI$$

或

$$I = GU$$

上面表征欧姆定律的数学式称为电阻元件的数学模型。

如果比值 R (或 G) 恒定不变,则电阻元件的 $u-i$ 关系曲线在二维平面坐标上是通过原点的直线,如图 1-2。这种电

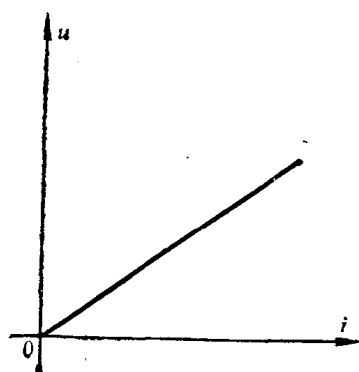


图 1-2

阻元件称为线性电阻元件,其符号如图 1-1(a) 所示。另一判别线性的方法是从线性代数学观点来看,即数学模型 $u = f(i)$ 是否满足齐次性和叠加性。所谓齐次性是对任一常数 a 有 $f(ai) = af(i)$; 叠加性是 $f(i_1 + i_2) = f(i_1) + f(i_2)$ 。对于 R 为常数的电阻元件来说, $u =$

$f(i) = Ri$ 显然有 $u = R(ai) = aRi$ 和 $u = R(i_1 + i_2) = Ri_1 + Ri_2$, 故这种电阻元件为线性电阻元件。

如果电阻元件的比值 R 是时间函数,即 $R = R(t)$, 例如 $R = R_0 \cos \omega t$, 则 $u = R(t) \cdot i(t) = R_0 \cos \omega t i(t)$, 这种元件称为时变电阻元件。如果在不同时刻作 $u-i$ 曲线, 仍旧是通过 $u-i$ 坐标原点的直线, 故仍是线性元件。前面所说的 R 为常数的元件, 叫做定常电阻元件 (或非时变电阻元件)。

不符合线性条件的 $u-i$ 关系的电阻元件称为非线性电阻元件, 其符号如图 1-1(b) 所示。如 $u-i$ 关系可写为 $u = f(i)$, 则元件称为非线性定常元件, 如写为 $u = f(i, t)$, 称为非线性时变元件。这二种情况都属电流控制型非线性电阻元

件,如充气二极管。当电压单调变化时,可能有二种不同的电流值,其曲线图形如图 1-3 所示。

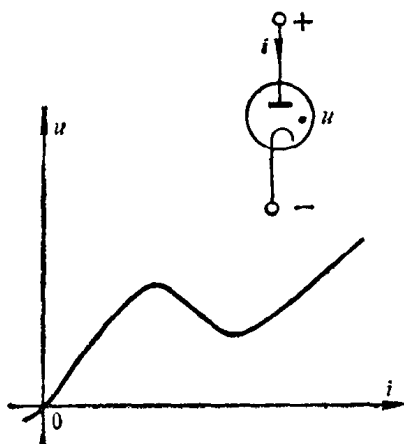


图 1-3

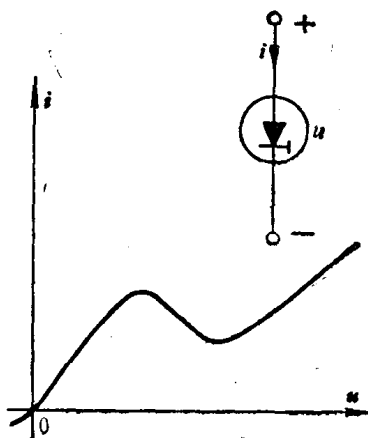


图 1-4

如果 $u-i$ 关系可写成 $i = f(u)$, 则为电压控制型非线性定常元件, 可写成 $i = f(u, t)$ 的, 则称为电压控制型非线性时变元件, 如隧道二极管(如图 1-4 所示)。

对半导体一类的 pn 结二极管, u 和 i 的关系也是非线性的, 但都是单调变化的, 曲线如图 1-5 所示。

非线性电阻元件的电阻值有二种表征方式。在 $u-i$ 曲线上任一点的 u 和 i 的比值 $R_s = u/i$ 称为静态电阻, 在曲线上任一点的增量比值 $R_d = \frac{du}{di}$ 称为动态电阻或增量电阻。

从图 1-3 和 1-4 可看到在曲线的一段范围内, 增量电阻为负值, 而在这范围内消耗的电功 $W = \int_{t_0}^t u(\tau)i(\tau)d\tau$ 也可能成为负值, 表示在这范围内电阻元件成为一个有源元件, 在其他范围内 W 仍为正值表示为无源元件。

表征非线性电阻元件的符号,除一般用图 1-1(b) 所示的图形外,对于不同类型,也有用不同的符号,如图 1-3、图 1-4、图 1-5 中的符号。

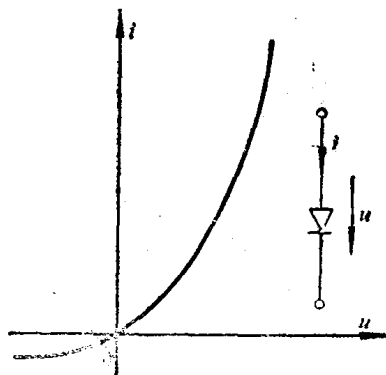


图 1-5

2. 电感元件

这是一个只表征储藏磁场能量的二接端的电路元件。通常我们选定电流的正方向与磁通的正方向有右螺旋的关系,

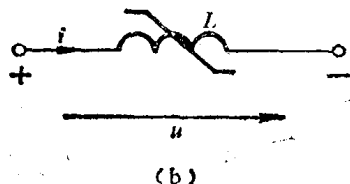
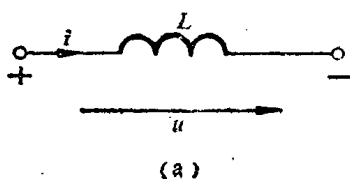


图 1-6

即当一个表示右螺旋的前进方向时,另一个则表示旋转的方向。电压 u 和自感电动势 e_L 的正方向与电流 i 的正方向一致。如磁链 ϕ (磁通与线匝交链次数的总和参阅下册) 与电流 i 的比值 L 与 i (或 u) 无关,是一常数,有如下关系:

$$\phi(t) = Li(t)$$

$$u(t) = \frac{d\phi}{dt} = -e_L(t)$$

参数 L 称为自电感, 简称电感, 单位为亨利, 简称亨, 以 H 表示。电感元件为线性元件, 符号如图 1-6(a) 所示, $\phi-i$ 曲线为通过 $\phi-i$ 坐标的原点。在静态时 $\phi = LI$, 而 $U = 0$ 。

u 和 i 的关系为微分关系, u 比例于 i 的变化率, 即

$$u(t) = L \frac{di}{dt} \quad (1-2)$$

故电感元件也称为动态元件。而

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau + i(0)$$

式中 $i(0)$ 表初始电流, 表明当时刻 t 的电流与 u 在时刻 0 到 t 的作用, 以及初始时的电流有关, 所以常说电感元件是具有记忆功能的元件。

如果 L 与时间 t 有关 则 $\phi(t) = L(t)i(t)$, $u(t) = L(t) \times \frac{di}{dt} + i(t) \frac{dL}{dt}$, 这种元件称为时变电感元件。当 L 等于常数时, 称为非时变或定常电感元件。时变元件也是线性元件。

若参数 L 与 i 或 u 有关时, 则称为非线性电感元件, 其符号如图 1-6(b) 所示。

非线性定常电感元件的变量关系式可写为

$$\phi(t) = f(i), \quad u(t) = \frac{df}{di} \frac{di}{dt}$$

非线性时变电感元件的变量关系式可写为

$$\phi(t) = f(i, t), \quad u(t) = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial i} \frac{di}{dt}$$

非线性电感元件的 $\phi-i$ 关系曲线比较复杂, 有多种类型。如电感器中有铁磁类物质, 其曲线呈现磁滞现象, 如图 1-7 所示。

非线性电感元件所用的参数类似非线性电阻, 有二种:

静态电感 $L_s = \frac{\phi}{i}$ 和动态电感或增量电感 $L_a = \frac{d\phi}{di}$ 。

线性电感元件是无源元件，非线性电感元件在某一工作范围内可能成为有源元件，可由

$$W = \int_{i_0}^i u(\tau) i(\tau) d\tau$$

是否为负确定之。

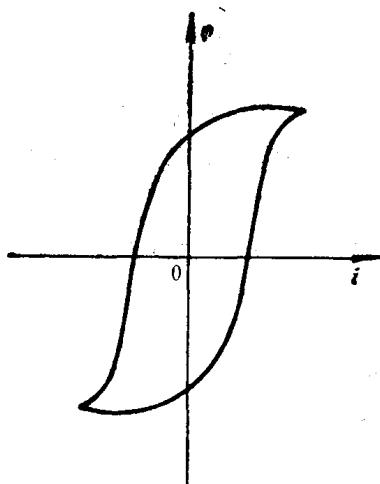


图 1-7

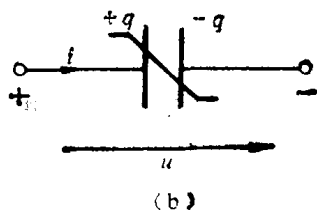
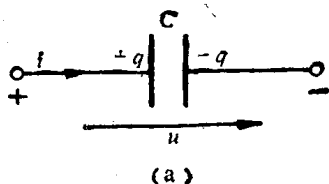


图 1-8

3. 电容元件

这是一个表征储藏电场能量的电路元件。电容器带正电荷 $+q$ 的极板为高电位。 u 和 i 的正方向如图中所示。如 q 与 u 的比值 C 与 u (或 i) 无关，是一常数，而有下式关系

$$q(t) = Cu(t)$$

电流为

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-3)$$

上式中参数 C 称为电容, 单位为法拉, 简称法, 以 F 表示。电容元件为线性元件, 符号如图 1-8(a) 所示。 i 和 u 的关系是微分关系, 即 i 比例于 u 的变化率, 故电容元件称为动态元件。在静态时, $Q = CU, I = 0$ 。电压 u 也可以 i 表示, 即

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau + u(0)$$

而电荷

$$q(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau + q(0)$$

可见, 电容元件也是具有记忆功能的元件。

如果 C 与时间 t 有关, 则 $q(t) = C(t)u(t)$, $i(t) = \frac{dC}{dt} \times u(t) + C(t) \frac{du}{dt}$ 。这种元件称时变电容元件。当 C 为常数时, 称为非时变或定常电容元件。时变电容元件也是线性元件。

参数 C 与 u 或 i 有关时, 称为非线性电容元件, 符号如图 1-8(b) 所示。

非线性定常电容元件的变量之间的关系可写为

$$q(t) = f(u)$$

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{df}{du} \frac{du}{dt}$$

非线性时变电容元件的变量之间的关系可写为

$$q(t) = f(u, t)$$

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial u} \frac{du}{dt}$$

非线性电容元件的 $q-u$ 关系曲线也比较复杂。含有钛酸钡一类介质的电容器的 $q-u$ 曲线也有电滞现象(电滞回线)。

非线性电容元件所用的参数类似非线性电阻元件, 有二种:

静态电容 $C_s = \frac{q}{u}$ 和动态电容或增量电容 $C_d = \frac{dq}{du}$ 。