

电工原理与计算方法

上册

(电路部分)

黄礼镇 黄樟熙 编著

科学出版社

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。

下册内容包括:静电场、恒定电流场、静磁场、静态场的特殊解法、时变场和电磁波等。为了方便初学矢量分析的读者,第十一章首先介绍矢量运算。最后一章为电磁场的数值计算方法,可作为进行数值计算时的参考。

电工原理与计算方法

下 册

(电磁场部分)

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

*

1988年2月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1988年2月第一次印刷 印张:19 1/8

印数:0001—4,300 字数:441,000

ISBN 7-03-000081-1/TM·2

定 价: 4.90 元

电工原理与计算方法

下册

(电磁场部分)

黄礼镇 黄椿熙 编著

科学出版社

1988

前 言

最近二十年来由于新的电磁元件的不断出现和电子计算机的广泛应用,使电工的基本理论在许多方面也有了新的发展。本书的编写目的是企图用简明的语言能比较全面和系统地阐述现代电工的基本理论和计算方法,为高等院校电类专业的学生和有关科技人员提供一部有价值的参考书,同时,也可供自学者阅读。

本书从基本概念出发,力求阐明电工方面的基本理论与计算方法,并提供了较多的例题和习题,书末并附习题答案,以帮助读者培养熟练的计算能力。这不但是工程上应用的需要,也是为了通过计算应用的实践来提高读者对理论的进一步认识。

读者只需具有高等数学和普通物理方面的初步知识,就能较为顺利地学习本书。

现代电工技术的飞快进步,各门学科也正在相互渗透,从事电工的科技人员应有更加宽广的基础理论知识。因此在编写本书时,考虑到高等学校现行的教学情况,在取材的深度和广度上作了适当的处理,力求使本书能包括各类电工专业所共同需要的基础理论,以及电工科技人员应了解的基本知识和具体内容,从而可帮助读者比较全面地掌握电工的基本理论,为进一步提高奠定基础。

读者学习本书时,可依不同情况和要求对学习的内容作适当的选择。如选本书作为教材,可按教学大纲的要求选择有关内容阅读。自学本书时,可按需要作重点阅读。若只是

一般参考,则可从其目录或索引中查阅有关内容后再行阅读。

电工理论在传统上分为电路和电磁场两个方面。这两个方面目前都已发展到自成体系,又各有其应用的场合,但是在理论上应是统一的。所以电路和电磁场之间的关系十分密切,在应用中常需要互相配合。全书依照传统的方式分为电路和电磁场两部分,上册讨论电路的原理,下册讨论电磁场的原理,并且阐明电路和电磁场的统一性。现在有些工科院校已将电工原理课程分为电路原理和电磁场原理两门课程,本书分上下册出版也是适应这两门课程的需要而编写的。

本书上册所论述的电路原理是以网络系统的分析为基础的。把电路的分析作为网络系统的分析来对待,对进一步学习颇有益处。各种电网络的基本理论是一致的,但按具体情况可采取不同的分析方法。本书就是按不同情况,采用不同分析方法分章加以讨论的。例如,第二章讨论的是代数方程的分析方法。第三章讨论经典法和拉氏变换运算法。第四章是用复数表示的相量分析法。第五章讨论谐波分析法、傅氏变换和Z变换分析法。第六章介绍矩阵的运算方法。第七章则介绍最近广泛应用的状态变量分析法。学习各章可以分别掌握其特殊性。求解电路问题时,首先应分清类型,然后再考虑应采用的方法。这样,就不难针对问题进行具体分析,写出网络方程式,并可用已知参数进行计算求出所需的结果。本书不涉及电子计算机程序的编写问题,只在最后一章提供了一些常用的求解电路问题的数值计算方法。这些方法可作为编写计算机程序的依据,并为读者在使用数字计算机解算网络时打下初步基础。

本书对电路理论的讨论,只着重于网络分析,不涉及网络综合。至于网络构成和电路元件的性能,以及测试等内容,均不属于本书所讨论的重点。

• ii •

在编写本书的过程中,得到浙江大学电机系电工基础教研组同志们的鼓励和支持,并提出了不少宝贵意见,黄焕焜教授审阅了全稿,在此谨向他们致以衷心的感谢。

由于编著者水平有限,书中一定还会存在一些缺点和错误,敬希读者指正。

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
	n 端口网络	449
	n 端网络	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	无损耗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
	无损耗线的应用	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
	根的平方法(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

目 录

第十一章 矢量运算	725
11-1 矢量的定义和表示法	725
11-2 矢量的代数运算	728
11-3 矢量的微分运算、梯度、散度、旋度	732
11-4 矢量的积分运算、线积分、面积分	736
11-5 高斯定理	742
11-6 斯托克斯定理	745
11-7 圆柱和球面坐标制	749
11-8 常用的矢量算式	756
习题	759
第十二章 静电场	763
12-1 静电场、电场强度	763
12-2 电场强度通量、高斯定律	771
12-3 静电场的无旋性、电位、电位梯度	781
12-4 静电场中的导体、导体系统、电容	800
12-5 静电场中的电介质、极化强度、电感应强度	809
12-6 不同物质交界面的边界条件	818
12-7 静电场的简化计算——静电电路算法	825
12-8 静电场的能量	833
12-9 静电场的作用力	839
习题	846
第十三章 恒定电流场	858
13-1 电流场、电流密度	858
13-2 导电物质中的电流场	862
13-3 微分形式的克希霍夫定律	865

13-4	不同物质交界面的边界条件	868
13-5	电阻的计算	872
13-6	静电比拟法	879
13-7	多电极系统的恒定电流场	883
13-8	直流电路与恒定电流场	885
	习题	888
第十四章 静磁场		892
14-1	磁感应强度、磁通连续性原理	892
14-2	比-沙定律、安培环路定律	898
14-3	矢量磁位	913
14-4	在磁介质中的磁场、磁偶极子、磁场强度	922
14-5	假想磁荷、标量磁位	936
14-6	不同物质交界面的边界条件	946
14-7	磁场的简化计算——磁路计算法	949
14-8	电感的计算	962
14-9	磁场的能量和作用力	976
	习题	985
第十五章 静态场的特殊解法		997
15-1	唯一性定理	997
15-2	镜象法	1001
15-3	分离变量法	1029
15-4	复变数函数法	1071
15-5	图解法	1105
	习题	1111
第十六章 时变场		1120
16-1	电磁感应、法拉第感应定律	1120
16-2	位移电流、麦克斯韦电磁场基本方程式	1128
16-3	不同物质分界面的边界条件	1134
16-4	动态电路基本定律和电磁场基本方程式的关系	1138
16-5	坡印亭定理	1142

16-6	电磁场基本方程式应用示例	1149
习题		1170
第十七章	电磁波	1177
17-1	在理想电介质中的平面电磁波	1177
17-2	平面波在两种电介质交界面的反射及折射	1187
17-3	平面电磁波在导电物质中的传播和在导体表面的反射 与折射	1200
17-4	驻波	1207
17-5	导行电磁波、横电磁波、传输线方程式	1215
17-6	矩形波导	1225
17-7	圆形波导	1235
17-8	谐振腔	1243
17-9	电磁波的辐射	1248
习题		1257
第十八章	电磁场的数值计算方法	1262
18-1	引言	1262
18-2	有限差分法	1263
18-3	有限单元法	1277
18-4	子面元法	1293
附录一	物质的性质	1298
附录二	钢和铸铁的基本磁化曲线	1301
附录三	全椭圆积分曲线图	1302
附录四	贝塞尔函数曲线图	1303
附录五	变态贝塞尔函数曲线图	1304
附录六	函数 ber , bei , b'er , b'ei 曲线图	1305
附录七	国际单位制词冠	1306
习题答案		1307
参考文献		1325
汉英名词对照索引		1326

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。

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

单位用焦尔,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