

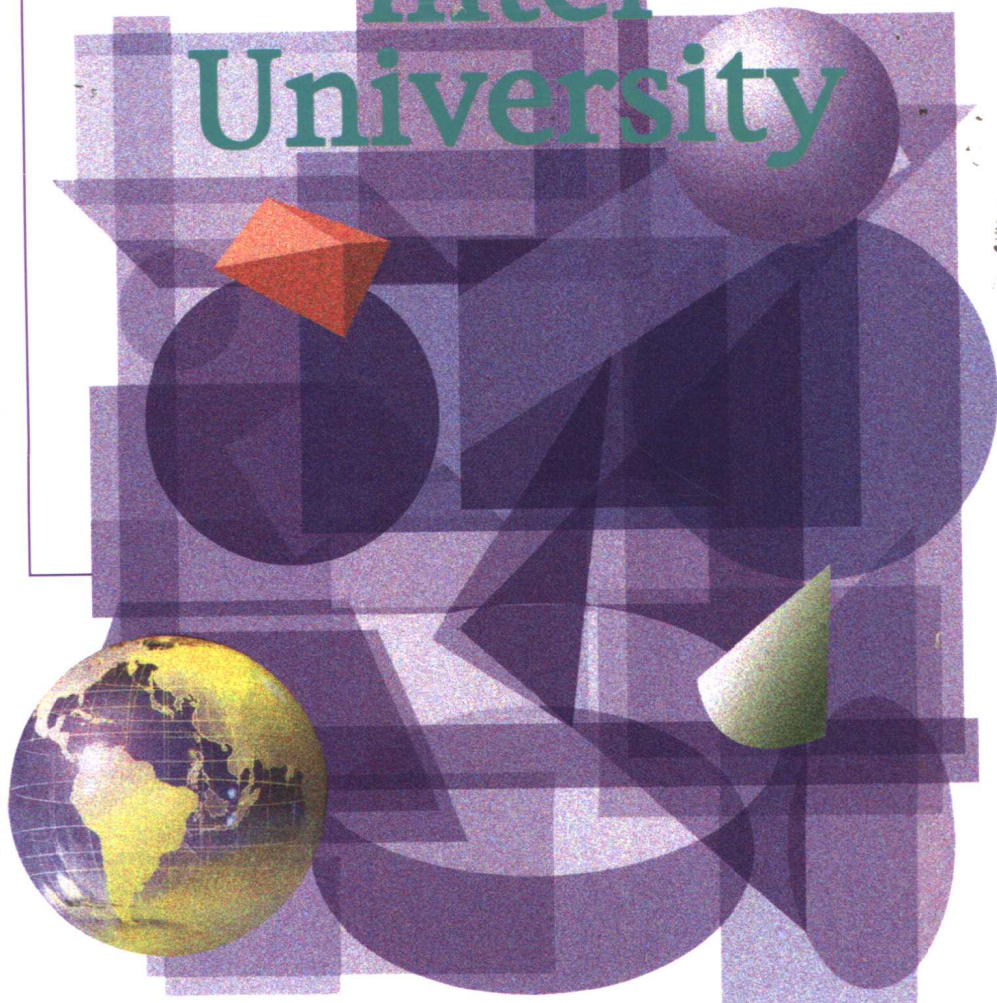


21 世纪大学新型参考教材系列

电气电路 A

〔日〕 佐治 学 编著

Inter University



科学出版社

OHM 社

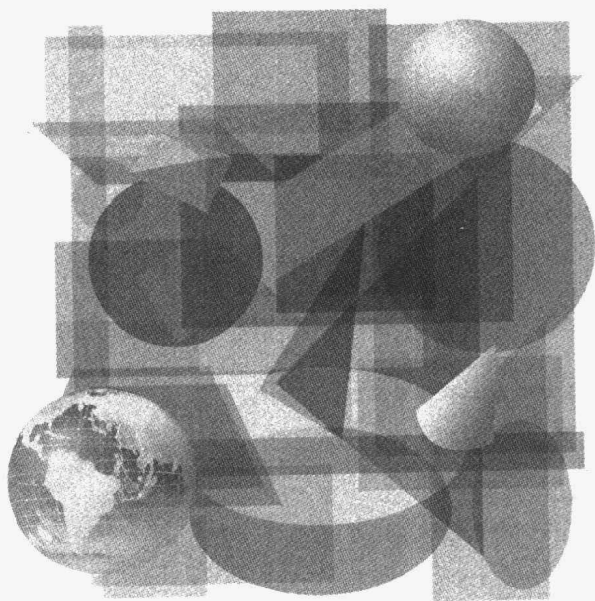
21 世纪大学新型参考教材系列

电气电路 A

〔日〕佐治 学 编著

王友功 译

刘正兴 校



科学出版社 OHM 社

2001. 北京

图字:01-2001-1055 号

Original Japanese edition

Interuniversity Denki Kairo A

by Manabu Saji et al.

Copyright © 1996 by Manabu Saji

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

インターユニバーシティ

電気回路A

佐治 学 オーム社 2000 第1版第3刷

图书在版编目(CIP)数据

电气电路 A/[日]佐治学编著;王友功译. - 北京:科学出版社,2001

21 世纪大学新型参考教材系列

ISBN 7-03-009409-3

I. 电… II. ①佐… ②王… III. 电子电路-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 037558 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 8 月第 一 版 开本: A5(890 × 1240)

2001 年 8 月第一次印刷 印张: 6

印数: 1—5 000 字数: 157 000

定 价: 24.00 元(全二册)

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

电气能源基础
等离子体电子工程学
电力系统工程学
电气电子材料
高电压/绝缘工程学
电动机器
电力电子学

电气能源

公共基础

电磁学A
电磁学B
电气电路A
电气电路B
电子电路A
电子电路B
电气数学
信息数学
程序设计

测量 · 控制

系统与amp;控制
信号分析
传感测量
柔性信息处理
机器人控制

信息通信

逻辑电路与自动机械
计算机工程学
程序语言设计
信息传送和符号的理论
信息通信工程学
信息网络

为了适应21世纪的要求

面向21世纪,日本各大学进行了系与学科的改编、研究生院的调整、导入两期制等。伴随着这些调整,现有的教材已不能适应现代学生的水平和兴趣要求。因此就要求有一套从版面到内容都更新颖的教科书。

本系列正是考虑到这种新的要求,经过不断深入考察和讨论,按照全新的整体编排形式制作完成的新型教材。曾荣获第七届日本工科教育协会奖「业绩奖」。

电子器件

电子物性
半导体工程学
电子器件
集成电路A
集成电路B
光电子学

21世纪大学新型参考教材系列 编辑委员会

主任委员: 家田正之 (爱知工业大学)
编 委: 稻垣康善 (名古屋大学)
白井支朗 (丰桥技术科学大学)
梅野正义 (名古屋工业大学)
大熊 繁 (名古屋大学)
绳田正人 (名城大学)

前 言

电路对于学习电子工程、电气工程、控制工程,以及通信工程等专业的学生都是一门重要的基础课程。本书是作为工科院校电气工程类专业电路课程的通用教材而编写的。

在《电气电路 A》中讲解,怎样用欧姆定理表示的电压与电流的关系说明由线性电路元件的电阻 R 、电容 C 、线圈电感 L (包括互感 M) 和电源构成的复杂电路;怎样灵活运用基尔霍夫定理、戴维宁定理、Y- Δ 变换等各种定理,加深对各种电路工作原理的理解;怎样运用微分方程、复数运算、矩阵、拉普拉斯变换进行电路计算等。

电路是电气工程类专业的学生最早接触到的专业基础课程。如果掌握了初中、高中物理知识就能充分理解它的基本内容,所以学习和复习都是很容易的。作为专业知识,不能只要求简单记忆其内容,重要的是能灵活应用。如果没有深入地理解和熟练地掌握这些知识,在分析由多种元件组成的复杂电路时,就不可能得出正确的结果。

从这层意义上讲,要把所学的内容转变成准确的、牢固的知识,并且能系统、灵活地运用这些知识,多做练习是非常重要的,希望学生能独立地完成每章后的习题。作为大学生,通过电路的学习应培养以自觉态度“主动学习”的良好习惯。

电工学中已自成体系的电路,不仅可用于对电路的分析、计算和电路设计,也可用于电磁场和含有晶体管等有源元件的线性电子电路的分析、计算。它对推动电气工程领域的发展有重大的作用。另外,除电气工程领域之外的机械工程、化学工程等领域的各种现象的分析,以及人类活动的统计分析等,亦都可采用模拟的方法将其各种不同的物理量转换成电路参数进行处理,这种模拟方法已获得了极大的发展。由于电信号的快速传输性、数据处理的快速性、电路设计方便并易于大规模集成等优点,再加上计算机极高的综合处理能力,使得电路理论将会在更广阔的领域获得应用,成为越来越重要的基础学科。

最后,对给予本书出版机会的编委会主任家田正之先生、编辑大熊繁先生,以及参与本书执笔的各位同仁致以衷心的感谢。

佐治 学

目 录

1	电路的学习方法	1
1.1	欧姆定律	2
1.2	交流电路的欧姆定律	2
1.3	电路的数学表达式	3
1.4	电路分析法在其他领域中的应用(模拟)	6
	练习题	6
2	学习电路必要的数学知识	7
2.1	复数表示法及其计算	8
2.2	微分与积分	13
2.3	拉普拉斯变换的定义与作用	15
2.4	矩阵与行列式的定义与作用	16
	练习题	20
3	电路元件的特性与正弦交流	21
3.1	电路元件的基本性质	24
3.2	电压源与电流源	25
3.3	正弦交流	27
	练习题	32
4	用相量法表示交流电路	33
4.1	用相量法表示交流电路	34
4.2	阻抗与导纳	36
4.3	串联与并联	38
	练习题	40

5 电路方程式的建立与解法

5.1 基尔霍夫定律	42
5.2 用回路电流建立电路方程	44
5.3 用结点电压列电路方程式	48
练 习 题	52

6 电路网络中的定理(I)

6.1 网络的基本性质	54
6.2 叠加定理	55
6.3 戴维宁定理	57
6.4 诺顿定理	60
6.5 补偿定理	61
练 习 题	63

7 电路网络中的定理(II)

7.1 阻抗的Y- Δ 形等值互换	66
7.2 电桥电路	68
7.3 恒电阻电路	69
7.4 最大功率传输定理	71
7.5 互易定理	73
练 习 题	74

8 谐振电路及其选频特性

8.1 电路的频率特性	78
8.2 线圈、电容器的Q值	81
8.3 CLP 串联谐振电路	82
8.4 并联谐振电路	85
8.5 多谐振荡电路	87
练 习 题	88

9 耦合线圈	
9.1 自感与互感	92
9.2 耦合线圈串联的合成电感	94
9.3 变压器的电路方程式与等值电路	95
9.4 理想变压器	97
9.5 单线圈变压器	98
9.6 谐振变压器(耦合谐振电路)	100
练习题	102
10 正弦交流电路的功率与功率因数	
10.1 瞬时功率与有功功率	106
10.2 有功功率与无功功率的关系	107
10.3 视在功率与功率因数	108
10.4 功率的复数表示法及其计算	109
10.5 提高功率因数的意义与方法	110
练习题	112
11 非正弦交流	
11.1 周期函数的傅里叶级数	116
11.2 非正弦交流	120
练习题	122
12 多相交流电路方程式与求解方法	
12.1 多相交流电路的电动势与电流	126
12.2 对称三相交流电路	129
12.3 对称三相交流电路的Y- Δ 变换	133
12.4 三相交流电路的功率及其测量	135
12.5 对称三相交流的旋转磁场	138
练习题	140

13 非对称多(三)相交流电路与对称分量法的应用

13.1 二相三线制交流电路	144
13.2 非对称三相交流电路	146
13.3 对称分量法及其应用	149
练 习 题	153

练习题解答	155
-------------	-----

参考文献	177
------------	-----

篇外话

关于相位	6
基尔霍夫定律的物理意义	43
图 论	44
电压源与电流源	61
逆电路	70
伯德图	85
压电现象	88
直流-直流转换	93
电源的小型化	99

电路的学习方法

通过本章的学习充分理解电路最基本的理论——欧姆定律,并学习欧姆定律在交流电路中的应用及各种函数表达式。

1.1 欧姆定律

电路中电压与电流的线性关系是通过欧姆(G. Ohm, 1787 ~ 1854)实验得出的。为了进行这项实验,必须预先准备好稳定的直流电源——电池、具有准确刻度的电流表和电压表、稳定的电阻器等实验所需的仪器和组件。

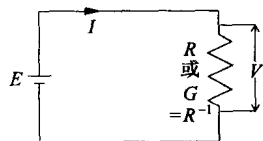


图 1.1 直流电路

在图 1.1 所示的直流电路中,电流 I 和电压 V 之间的线性关系如式(1.1)所示:

$$V = RI \quad (R \text{ 为正的常数}) \quad (1.1)$$

或者表示成:

$$I = GV \quad (1.1)'$$

式中 V 为电路元件(电阻)的端电压,单位为伏特[V], I 是流过电路元件(电阻)的电流,单位为安[A]。 R 是电路元件值,在数学上可表示为电流和电压之比即电压/电流 = [V]/[A],其物理意义为电阻。为了纪念科学家欧姆特命名为欧[Ω]。 G 是 R 的倒数,称为电导,单位为西门子[S]。

因为各个物理量均带有单位,所以在电路分析时便于验算和检查。另外,记录计算结果时必须标明单位。例如,电流不能写成 $I = 2$,必须写成 $I = 2[\text{A}]$ (在用文字表述物理量时可以不写单位,但最好还是养成写上单位的良好习惯)。

这些电学单位是用国际单位制(SI)(长度为[m],质量为[kg])和时间[s]所组成的单位,电流单位安[A]是电学的基本单位。电学中的电压[V]和电阻[Ω]是由国际单位制导出的单位。

1.2 交流电路的欧姆定律

交流电流 $i(t)$ 流过电阻 R 时,它和端电压 $v(t)$ 之间的关系也符合欧姆定律,即

$$v(t) = Ri(t) \quad (1.2)$$

式中 $v(t)$ 、 $i(t)$ 为时间的函数,称为瞬时值。把这些瞬时值对时间的方均根值称为有效值,可分别表示为

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \\ I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \end{aligned} \quad (1.3)$$

以正弦交流为例,正弦交流电流可以写成

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi)$$

式中, I_m 为振幅(最大值); ω 为角频率; ϕ 为初相。根据上式电流的有效值为

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{I_m \sin(\omega t + \phi)\}^2 dt} \\ &= \sqrt{\frac{I_m^2}{2T} \int_0^T \{1 - \cos 2(\omega t + \phi)\} dt} \\ &= \sqrt{\frac{I_m^2}{2T} \left[t - \frac{\sin 2(\omega t + \phi)}{2\omega} \right]_0^T} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

同样,正弦交流电压的有效值为 $V = V_m/\sqrt{2}$,因此, V 和 I 的关系可以写成

$$V = RI \quad \text{或者} \quad I = GV \quad (1.4)$$

由瞬时值与有效值的关系式(1.3)可知,式(1.4)的关系不仅对正弦波,而且对任意周期性波形的电流与电压也是成立的。

但是由于电路分析多用于正弦交流,所以对于正弦交流可以写成角频率的函数 $I = \dot{I}(\omega)$, $V = \dot{V}(\omega)$ 。非正弦交流(畸变波)的表示方法将在第11章学习。

1.3 电路的数学表达式

正弦交流电路中,不仅电阻 R 是电路的元件,电容器 C 、线圈 L 也都是电路的元件,并在电路中发挥着重要作用。

如前所述,流过 C 、 L (包括线圈的互感 M)、 R 等三种电路元件的电流与

端电压之间的关系,对电阻来说是符合欧姆定律的。

线圈的作用是阻止电流的变化,它所产生的反电动势与电流的变化率成正比。对于角频率为 ω 的正弦波,线圈电感 L (单位:亨[H]) 的感抗为 ωL ,端电压的相位超前于电流 90° 。为了表达这种关系,可以采用平面向量(复数)将其写成 $j\omega L$ (j 是虚数的单位,在复平面上表示从实轴旋转 90° ,在数学上可以理解为正弦波的微分)。

电容器的作用是可以储存流入的电荷,它所产生的反电动势与单位时间内储存的电荷量(电流对时间的积分)成正比。对于角频率为 ω 的正弦波,电容量为 C 的电容器容抗为 $1/\omega C$,其端电压的相位滞后于电流 90° 。为了表达这种关系,与线圈一样也可以采用复数将其写成 $1/j\omega C$ 。

用数学式表示上述关系,其瞬时值与有效值可分别写成

$$\begin{aligned} v_R(t) &= Ri_R(t), & \dot{V}_R(\omega) &= R\dot{I}_R(\omega) \\ v_L(t) &= L \frac{di_L(t)}{dt}, & \dot{V}_L(\omega) &= j\omega L\dot{I}_L(\omega) \\ v_C(t) &= \frac{1}{C} \int i_C(t) dt & \dot{V}_C(\omega) &= \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_C(\omega) \end{aligned} \quad (1.5)$$

电路元件 R 、 L 、 C 串联时,如图 1.2 所示,电流为 $i_R(t) = i_L(t) = i_C(t) = i(t)$,电压的瞬时值与有效值可分别写成

$$\begin{aligned} v(t) &= v_R(t) + v_L(t) + v_C(t) \\ &= Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt \\ \dot{V}(\omega) &= \dot{V}_R(\omega) + \dot{V}_L(\omega) + \dot{V}_C(\omega) \\ &= R\dot{I}(\omega) + j\omega L\dot{I}(\omega) + \frac{1}{j\omega C} \dot{I}(\omega) \end{aligned} \quad (1.6)$$

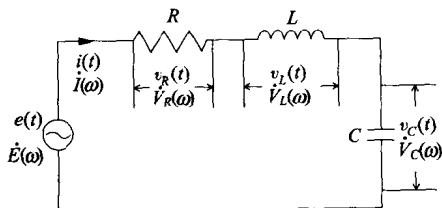


图 1.2

$$= (R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}) \dot{I}(\omega) \quad (1.7)$$

电路元件 R 、 L 、 C 并联时,如图 1.3 所示,可有 $v_R(t) = v_L(t) = v_C(t) = v(t)$ 。此时电流的瞬时值与有效值可分别写成

$$\begin{aligned} i(t) &= i_R(t) + i_L(t) + i_C(t) \\ &= \frac{1}{R}v(t) + \frac{1}{L}\int v(t)dt + C\frac{dv(t)}{dt} \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}(\omega) &= \dot{I}_R(\omega) + \dot{I}_L(\omega) + \dot{I}_C(\omega) \\ &= \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right) \dot{V}(\omega) \end{aligned} \quad (1.9)$$

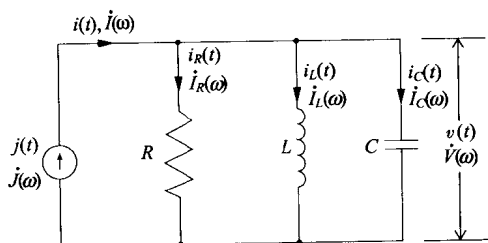


图 1.3

如果将 R 、 L 、 C 串联电路中的电压与电流之比写成 $Z(\omega)$,则 $Z(\omega)$ 称为阻抗。可写成

$$Z(\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (1.10)$$

$Z(\omega)$ 的幅值为

$$|Z(\omega)| = |R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2|^{1/2}$$

$Z(\omega)$ 的相位为

$$\phi = \tan^{-1}(\omega L - 1/\omega C)/R。$$

在 R 、 L 、 C 并联电路中,将电压与电流之比写成 $Y(\omega)$, $Y(\omega)$ 称为导纳。它是 R 、 $j\omega L$ 、 $1/j\omega C$ 的倒数和,可写成

$$Y(\omega) = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \quad (1.11)$$

由于 $Z(\omega)$ 和 $Y(\omega)$ 是复数,所以在电流、电压、阻抗、导纳等的计算过

程中,必须使用复数的四则运算,其运算方法将在第2章学习。

电路中的电源电压,其瞬时值与有效值可分别写成 $e(t)$ 、 $\dot{E}(\omega)$, 电流写成 $j(t)$ 、 $\dot{J}(\omega)$, 以便于与元件电压 $v(t)$ 、 $\dot{V}(\omega)$ 和电流 $i(t)$ 、 $\dot{I}(\omega)$ 相区别。

关于相位

串联电路中可以选用电流为基准相量,分析电压相位的超前或者滞后。对于线圈有 $\dot{V}_L = j\omega L \dot{I}$, 表示电压的相位超前于电流 90° 。对于电容器可以写成 $\dot{V}_C = (1/j\omega C) \times \dot{I}$, 电压滞后电流 90° 。并联电路中则选择电压或者流过并联电阻的电流为基准相量,分析流过各元件电流的相位。电力工程中一般是以电压为基准相量,描述电流的相位超前或者滞后。

1.4 电路分析法在其他领域中的应用(模拟)

在电路中,用时间的微积分方程表示电压和电流的瞬时值,以角频率为参数的线性代数方程表示有效值。对于与电压和电流相似的其他物理量也可以用同样的方法来表示。例如,电动机的转矩和角速度、力学中的位移与作用力以及分析物流等,均可以用时间的二阶微分方程表示。

对于这些物理量,可以把各种物理量与电压和电流相对应,利用电路进行模拟实验。这种方法,因为利用电路可以很容易做成一个系统,所以具有 R 、 L 、 C 的取值范围广、运算速度快、数据可以非常容易地输入计算机等优点。

练 习 题

- 1 请说明改变电流 I 时,欧姆定律的使用会受到什么限制?
- 2 ① 当角频率为 ω 时,请求出 R 、 L 、 C 串联电路的阻抗 Z ?
② 当电源的电压和电流相位相同时,请求出角频率 ω_0 与阻抗 Z 各为多少?
- 3 请用二阶微分方程写出 R 、 L 、 C 并联电路中,电流 $i(t)$ 和电压 $v(t)$ 的关系式。