



21 世纪大学新型参考教材系列

电气电路 B

〔日〕 日比野伦夫 编著

Inter University



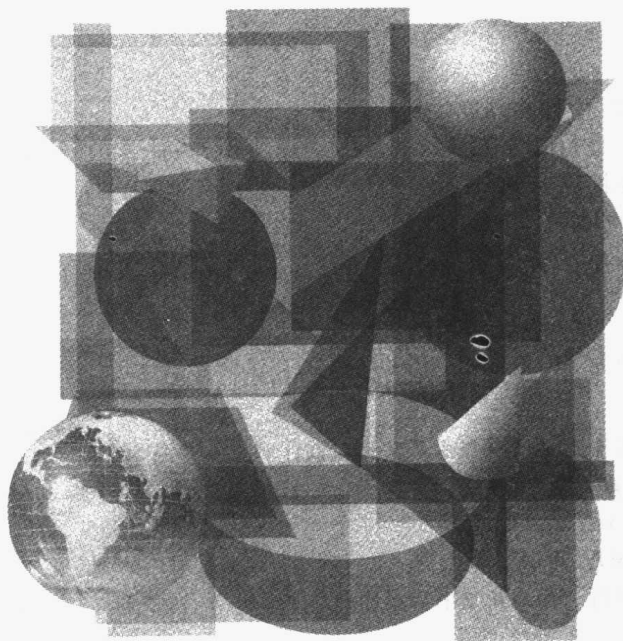
科学出版社

OHM 社

21 世纪大学新型参考教材系列

电气电路 B

〔日〕 日比野伦夫 编著
刘晓萱 译
王友功 校



科学出版社 OHM 社

2001. 北京

MAF63/11

图字:01-2000-4330 号

Original Japanese edition

Interuniversity Denki Kairo B

by Michio Hibino et al.

Copyright © 1997 by Michio Hibino

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B

日比野倫夫 オーム社 2000 第1版第4刷

图书在版编目(CIP)数据

电气电路 B/[日]日比野伦夫编著;刘晓萱译. -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日… ②刘… 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: 179000

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
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

本书作为大学工学院电气、电子工程系的教科书,其内容与本丛书中的《电气电路A》互相补充,构成姐妹篇。

由于电气电路涉及的内容非常广泛,通常分成2~3门课程讲授的情况比较多,本套教材中,将“电气电路”分为A、B两册。《电气电路A》讲解电路的基本定理,以及正弦交流电路稳定状态时的特性。在这本《电气电路B》中,则讲解输入(电源)不仅限于正弦交流情况下电路的输出(响应)特性。在电气、电子工程领域,包括数字电路在内的许多电路中,输入是矩形波或者三角形波等的情况也很多,这时就需要求解与这些波形相对应的输出。需要研究对应于各种输入波形时,电路从过渡状态到稳定状态的输出特性。这也是本书要讨论的问题。

本书包括以下内容:(1)含有过渡过程电路的输出(2~4章);(2)把电路看作网络时的解析方法,以及根据网络函数特性设计电路的方法(5章);(3)类似电话线等比较长线路的情况下,或者线路电压、电流的频率较高的情况下所需要的分布参数电路(6章)。包含上述内容的教科书较多,与同类书相比,本书具有以下特点:在内容上,增加了状态方程解法(第4章)。这种解法适合于利用计算机来解析多输入、多输出电路问题。状态方程解法在集成电路的评价和设计方面越来越重要,所以在本书中加入了与其相关的基本知识。另外,有关分布参数电路,在许多教科书中,大多是先说明正弦交流的稳定状态,然后单独说明过渡状态。但是,由于电路是经过过渡状态才到稳定状态的,不应该把这一问题分开处理,因此把电路达到稳定状态的过程作为过渡状态随时间变化的最后结果来考虑才是合理的。按照这种思路,本书首先学习过渡状态,在此基础上再进而学习稳定状态。

本书在编写时,注意到尽量避免简单地罗列数学公式,对于能帮助读者更好地理解电路基本特性的物理(指电路理论上的)意义则多加说明。在实际工程中,因为电路的构成、输入波形、初始条件等是各种各样的,要想通过学习来记住每种电路的特性是不可能的,即使记住,在碰到具体实际问题

时也将不起什么作用。如果能透彻理解电路的基本原理和解析方法,就可以不依靠记忆来分析求解电路的特性。

在本书出版之时,对给予出版机会的家田正之主编、大熊繁编委,以及参与本书编写的各位执笔者表示诚挚的感谢。

日比野伦夫

目 录

1 电路的学习方法	
1.1 电路解析(稳定状态与过渡状态)	2
1.2 电路模拟	3
1.3 集总参数电路和传输线	4
1.4 电路解析的基础	5
1.5 各章的概要与目标	9
2 电路的过渡现象及其求解方法	
2.1 过渡现象	12
2.2 过渡现象的求解方法	12
2.3 一阶电路(单能量电路)过渡现象的求解	17
2.4 电路的脉冲特性	25
2.5 多阶电路(多能量电路)的过渡现象	29
练习题	36
3 用拉普拉斯变换法求解过渡现象	
3.1 拉普拉斯变换法求解电路的技巧	40
3.2 如何理解拉普拉斯变换	42
3.3 如何用拉普拉斯变换求解电路	50
3.4 如何求解特殊波形的响应	57
3.5 冲激响应与阶跃响应及其应用	60
练习题	64
4 利用状态方程求解过渡现象	
4.1 状态方程	68

4.2	系统方程及其解法	70
4.3	用状态方程求解过渡现象	72
4.4	状态方程法解析电路的实用性	78
	练 习 题	79
5	网络的性质与描述方法	
5.1	网络的黑匣子表述	82
5.2	一端口网络	83
5.3	二端口网络	84
5.4	网络函数及其性质	97
5.5	网络综合	98
5.6	滤波器的特性	101
	练 习 题	109
6	传输线路的电压与电流	
6.1	传输线电路	112
6.2	基本方程及其通解	114
6.3	无限长线路的电压与电流	120
6.4	线路不连续点处的反射和传输	125
6.5	由多重反射波的重叠求解有限长 线路的电压、电流	129
6.6	用基本方程求解有限长线路的电压、电流 ...	134
6.7	正弦波稳态时的电压、电流	142
	练 习 题	150
	练习题解答	153
	附 录	165
	参考文献	177

篇外话

磁通链守恒定律和电荷守恒定律	35
RLC 串联电路中电流的根 s_1 与 s_2 的位置	56
从冲激响应理解电路	61
状态方程与系统响应	78
互易性与对称性	88
形形色色的滤波器	103
平行传输线与同轴电缆	119

电路的学习方法

在这一章中,首先介绍电路过渡现象及其相关内容的分析,这既是电路解析的基础,也是为学习第2章以后的内容作准备;其次,说明本书所研究的电路的性质和电路解析的基本定律;最后,叙述本书的各章内容及学习要求。

1.1 电路解析(稳定状态与过渡状态)

当电路中只有电阻时,如电源是直流,则电路中的电压和电流也是直流;如电源是正弦波,则电路中的电压与电流也是同一频率的正弦波。如图 1.1(a)所示的分压电路,当开关在 $t=0$ 闭合时,电阻 R 两端的电压 v 为如图 1.1(c)所示的虚线 v_s ,它在 $t=0$ 时立刻达到 $E/3$ 。但是在如图 1.1(b)所示的电路中,电阻 R 两端并联上电容 C_1 以后, v 就按照图 1.1(c)所示的实线从 0 开始慢慢增加,经过一定时间后达到 $E/3$ 。

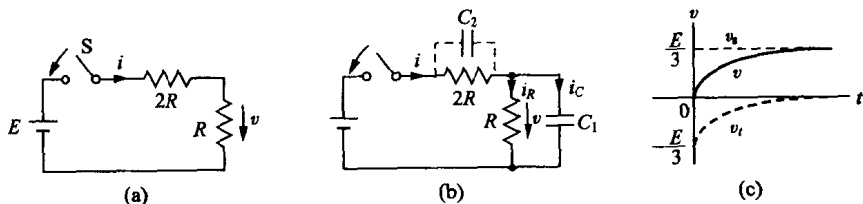


图 1.1 RC 电路的过渡现象

出现这种现象的原因在于,电源提供电流 i ($i \leq E/2R$),其中分流电流 i_c 对电容充电,使电容电压达到 $E/3$ 时需要一定的时间。像这样经过一定的时间后达到的状态称为**稳定状态**(steady state),在这之前,处于变化的状态则称为**过渡状态**(transient state)。过渡状态下,电压和电流的变化现象为**过渡现象**。

过渡状态时的电压 v 是**稳态解** v_s 与**过渡解** v_t 的和,用 $v = v_s + v_t$ 来表示。在含储能元件 L 和 C 的电路中,由于储存能量或者释放能量需要时间,在接通和切断电源时,电路中电压与电流不会立刻达到稳态值。

遇到高速脉冲时,在短时间里必须达到稳定状态的情况很多。在如图 1.1(b)所示的电阻 $2R$ 上并联一个电容 C_2 进行分流,此时,大电流 $i_c > E/2R$,使电容 C_1 在短时间内充电。特别是当 $C_2/C_1 = R/2R = 1/2$ 时,过渡现象可以在瞬时完成,电压立刻达到 $v = E/3$ 。

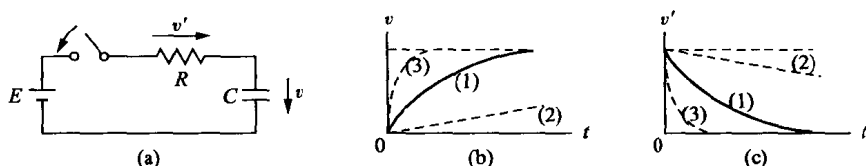


图 1.2 RC 电路的过渡现象与积分、微分特性

另外,我们可以积极地利用过渡现象。如图 1.2(a)所示的电路,由于电容充电需要时间,电压 v 的变化为图 1.2(b)中(1)所示的曲线。但是当增大电阻 R 时,充电电流会变小,电压 v 会如图 1.2(b)中(2)所示的那样缓慢变化,这种情况下,短时间 t 内, v 几乎成直线变化,充电时间延长,可用电源电压的积分来表示。另外,当减小电阻 R 而使充电电流增加时,充电过程会在较短时间里完成。这时,电阻两端的电压 $v' = E - v$ 是如图 1.2(c)中(3)所示的脉冲曲线,可以用 $t = 0$ 时电源电压的微分值来表示。像这样由 R 和 C 构成的电路,选择电路元件的值,可作成积分器和微分器,在信号传递和处理系统中,多用于波形变换等。

综上所述,本书在研究电路解析或电路设计时,通过稳态解和过渡解来理解电流、电压的过渡现象是十分有益的。值得强调的是,本书所研究的过渡现象,并非仅仅是电源开闭时的过渡现象,而且还包括当电路用作信号传递和处理时,研究其输入与输出响应之间关系,或者是频率响应特性等方面的重要内容。

1.2 电路模拟

电路解析的方法也适用于机械振荡系统的运动、扩散现象、流体的流动现象等领域。描述这些系统运动的数学方程形式上与电路方程完全相似,可以用同样的方法进行分析。像这样对类似的系统以电路方程进行置换,用电路解析的手法进行分析、设计的思想方法称为电路模拟。这里,以一维机械振荡系统与电路进行对照说明。式(1.1)是如图 1.3(a)所示的振荡系统的运动方程, x 是物体离开平衡点的位移变化,速度用 $x' = dx/dt$ 来表示。

则运动方程为

$$m \frac{dx'}{dt} + \mu x' + k \int x' dt = f \quad (1.1)$$

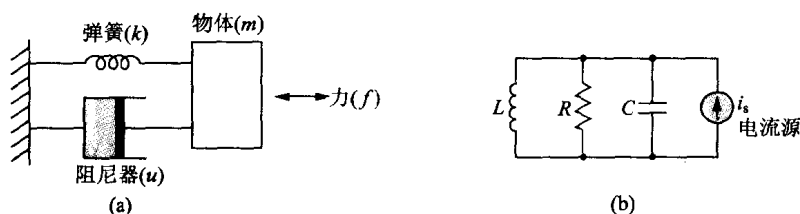


图 1.3 电气回路与类似的机械振荡系统

式中,左边第1项是质量 m 的物体以加速度 dx'/dt 运动时对应的力,第2项是阻尼系数为 μ 的阻尼器在速度是 x' 时相对应的力,第3项是弹性系数为 k 的弹簧在变形时相对应的力,右边的 f 是外力。将这些量进行以下对应置换,速度 x' : 电压 v , 力 f : 电流 i_s , 质量 m : 电容 C , $1/k$: 电感 L , $1/\mu$: 电阻 R , 可以得到

$$C \frac{dv}{dt} + \frac{1}{R}v + \frac{1}{L} \int v dt = i_s \quad (1.2)$$

上式左边各项,将在 1.4.2 小节里进行介绍,它们是流过电容、电阻、电感的电流,右边是它们的和。这一关系如果用电路来表示,即是如图 1.3(b) 所示的电路,式(1.2)则是基尔霍夫电流定律的表示式。在 1.4.4 小节中将介绍,基尔霍夫电流定律的物理意义是在电路结点处电荷既不会产生也不会消失,而是连续流动的,满足连续性原理。而相对应的力、热量、流体的流量、磁通等也都满足这一关系,所以都可用电路的分析方法进行求解。

1.3 集总参数电路和传输线

以上所讲的电路是假定连接电路元件的导线上的电压、电流与导线长度无关,但是对于用来传送信息,如声音、数据以及图像等大量信息的通信电缆和输送电力时所使用的长距离导线来讲,长导线(这里称为线路)上的

大小和方向无关,为定值的线性元件。电路元件也有参数值随电流大小而变化的非线性元件,如变阻器。只由电源和线性元件组成的电路具有下面的性质。

1. 线性性

电源电压(输入)是 $x_1(t)$ 时,电流(响应)为 $y_1(t)$;当电源电压是 $x_2(t)$ 时,电流为 $y_2(t)$;电源为 $x_1(t) + x_2(t)$ 时,电流将是 $y_1(t) + y_2(t)$ 。即线性电路满足叠加定理。由非线性电路元件构成的电路则不满足这一关系,称其为非线性电路。

2. 时不变性

时刻 t 施加于电路的电源电压为 $x(t)$,此时电路中的电流为 $y(t)$ 时,如时间变化 τ ,则 $t + \tau$ 时的电源电压为 $x(t + \tau)$,对应的电流将变为 $y(t + \tau)$ 。换句话说,在某一时刻改变电源电压,则电流(响应)也在同一时刻作相应改变的电路称为时不变电路。电流(响应)不按上述条件随电源电压变化的电路则称为时变电路。

3. 无源性

电路中,电阻消耗能量,电感和电容储存或释放能量,电源向电路提供能量,或相反,电路也可能向电源提供能量。如果电路内部不含其他能量源,只有 R 、 L 、 C 组成,那么,电源向电路提供的平均能量(在电路中平均消耗的能量)将不会成负值。这种电路称为无源电路。除电阻为零的情况外,无源电路中的过渡过程必将随时间而衰减。但含有放大器和振荡器的电路将不满足这一关系,称其为有源电路。

1.4.2 R 、 L 、 C 元件的电压、电流特性

流过电路元件的电流和元件两端的电压分别用 $i(t)$ (安[培], A) 及 $v(t)$ (伏[特], V) 来表示,它们都是时间 t 的函数。明白这一点后,我们将省略 t ,而简单地用 i 、 v 表示。电压 v 的正负极性设定原则为:电流流入端为 +、流出端为 -, 本书都按这一设定画箭头。电路中各元件的电压和电流将满足如下关系:

(1) 电阻 如图 1.5(a) 所示, i_R 与 v_R 之间满足下述的欧姆定律。

$$v_R = Ri_R, \quad R = \frac{v_R}{i_R} \quad (\text{电阻: 欧[姆]}, \Omega) \quad (1.3)$$

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{电导: 西[门子]}, S)$$

电阻消耗的功率(能量/秒) $p = v_R \cdot i_R = Ri_R^2$

(2) 线圈 如图 1.5(b) 所示, 线圈的电感为 L (亨[利], H) 时, 磁通链 ϕ 和 v_L, i_L 之间下面的关系成立:

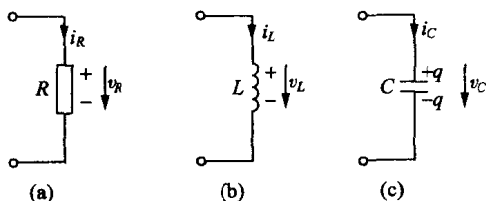


图 1.5 R, L, C 的电压电流特性

$$\phi = Li_L, \quad v_L = \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.4)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_L dt = \frac{1}{L} \left(\phi(0) + \int_0^t v_L dt \right) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t v_L dt \quad (1.5)$$

式中 $\phi(0), i(0)$ 是 $t=0$ 时 ϕ, i 的初始值。线圈储存的能量(磁场能)为

$$w = Li_L^2/2 \text{ (焦[耳], J)}.$$

(3) 电容 如图 1.5(c) 所示, 电容的电容量是 C (法[拉], F) 时, 两极板的电荷 $+q, -q$ (库[仑], C) 和 i_C 与 v_C 间的关系用下式表示:

$$q = Cv_C, \quad i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv_C}{dt} \quad (1.6)$$

$$v_C = \frac{1}{C} \int i_C dt = \frac{1}{C} \left(q(0) + \int_0^t i_C dt \right) = v(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt \quad (1.7)$$

$q(0), v(0)$ 是 $t=0$ 时 q, v 的初始值, 电容储存的能量(电场能)为

$$w = Cv_C^2/2 = qv_C/2 \text{ [J]}$$

1.4.3 电压源与电流源

向电路提供能量的电源分为电压源和电流源两种。