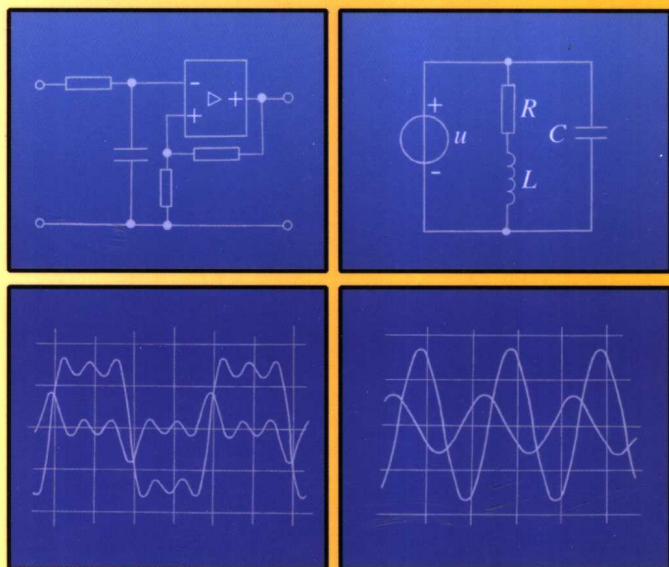


陆文雄 主编

电路原理

(上册)



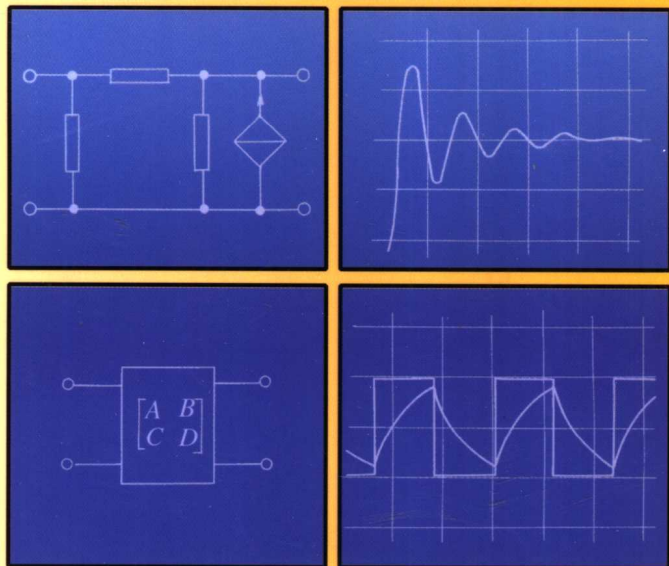
同济大学出版社

DIANLUYUANLI DIANLUYUANLI

陆文雄 主编

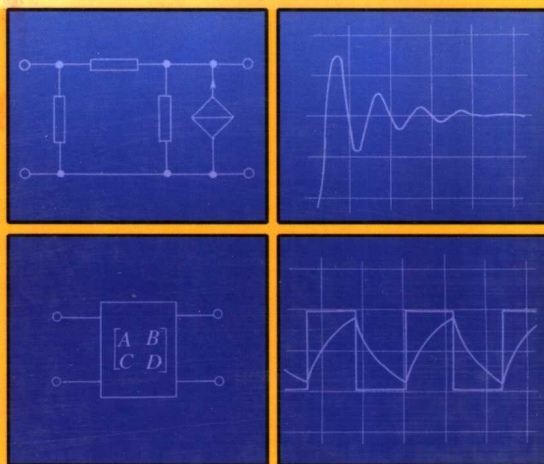
电路原理

(下册)



同济大学出版社

DIANLUYUANLI DIANLUYUANLI



ISBN 7-5608-2575-3



9 787560 825755 >

ISBN7-5608-2575-3/TN · 4

定价 49.80 元 (上、下册)



电 路 原 理

(上 册)

陆文雄 主编

同济大学出版社

电 路 原 理

(下 册)

陆文雄 主编

同济大学出版社

内 容 简 介

本书主要讨论集中参数电路的基本理论和基本分析方法。全书分上、下两册。上册包括电路的基本概念和定律、电阻电路的分析、正弦电流电路的分析、具有互感的电路、三相正弦电流电路、非正弦周期电流电路、受控源和多端元件。下册包括一阶电路和二阶电路、电路的复频域分析、二端口网络、网络方程的矩阵形式、简单非线性电阻电路的分析、磁路与铁芯线圈。每章均附有习题和学习指导,还有供自我检测的练习题,书末还附有习题答案。

本书可作为普通高等学校电力专业和自动控制等专业“电路”课程的教材,也可供计算机等电类少学时专业节选使用,还可供函授、夜大学等成人高校电类专业学生及自学者使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理/陆文雄主编. —上海: 同济大学出版社,
2003. 7

ISBN 7-5608-2575-3

I. 电... II. 陆... III. 电路理论—高等学
校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 004643 号

电路原理 (上、下册)

陆文雄 主编

责任编辑 兰孝仁 张 丁 责任校对 徐 栩 封面设计 陈益平

出 版 行 同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂印刷

开 本 787 mm×960 mm 1/16

印 张 41.5

字 数 830 000

印 数 1—7 000

版 次 2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-2575-3/TN·4

定 价 49.80 元(上、下册)

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

前 言

本教材参照教育部“电路”课程教学基本要求,根据电类专业教学的需要,结合长期以来“电路”课程的教学实践,在使用多年的内部教材的基础上参考有关资料修订编写而成。

本教材共分十三章:电路的基本概念和定律;电阻电路的分析;正弦电流电路的分析;具有互感的电路;三相正弦电流电路;非正弦周期电流电路;受控源和多端元件;一阶电路和二阶电路;电路的复频域分析;二端口网络;网络方程的矩阵形式;简单非线性电阻电路的分析;磁路与铁芯线圈。

在本教材编写中,考虑到不同专业和不同层次的教学特点,在保证基本要求的前提下,力求内容适度、实用,重点和难点逐步引入。如介绍电路分析方法时,先介绍电路分析的基本方法,再分析受控源电路,以免过早引入受控源内容而影响对分析方法的掌握。另外,考虑到学生自学的需要,在每章后均附有学习指导,在概述主要内容及重点的同时,对疑点难点作了进一步的补充解释,可供自学辅导或作为课后复习参考,附带的练习题可供自我检测用。本教材将“磁路和铁芯线圈”列为一章,主要是为满足电力类专业后续电机学课程的需要。本教材可用作普通高等学校电类专业“电路”课程的教材,节选后可供其他电类少学时专业选用,也可供函授、夜大等成人高校电类专业学生、自学者使用。

参加本书编写的有陆文雄、杨尔滨、杨欢红、朱丹平。陆文雄编写第一至七章,并任主编;杨尔滨编写第八、九章;杨欢红编写第十、十一章;朱丹平编写第十二、十三章。本教材编写过程中,陆士杰同志为书稿提供了宝贵的资料和修改意见,在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,希望广大读者批评指正。

编 者

2003 年 4 月

目 录

前言

第一章 电路的基本概念和定律	1
§ 1-1 电路和电路模型.....	1
§ 1-2 电流和电压的参考方向.....	3
§ 1-3 电阻元件.....	5
§ 1-4 电压源和电流源.....	7
§ 1-5 功率.....	9
§ 1-6 基尔霍夫定律	10
习题	15
学习指导	18
练习题	28
练习题答案	29
第二章 电阻电路的分析	30
§ 2-1 电阻的串联、并联和串并联.....	30
§ 2-2 电阻的 Y 形联接与 Δ 形联接的等效变换	35
§ 2-3 电源的等效变换	39
§ 2-4 电路的图	43
§ 2-5 KCL 和 KVL 的独立方程数	46
§ 2-6 支路电流法	49
§ 2-7 回路电流法	52
§ 2-8 节点电压法	57
§ 2-9 叠加定理	62
§ 2-10 替代定理.....	66
§ 2-11 戴维南定理和诺顿定理.....	68
习题	74
学习指导	79
练习题	96
练习题答案	97
第三章 正弦电流电路的分析	98
§ 3-1 正弦量的基本概念	98

§ 3-2 相量法	103
§ 3-3 电阻中的正弦电流	110
§ 3-4 电感元件和电感中的正弦电流	113
§ 3-5 电容元件和电容中的正弦电流	119
§ 3-6 基尔霍夫定律的相量形式	125
§ 3-7 RLC 的串联电路和复阻抗	126
§ 3-8 RLC 的并联电路和复导纳	131
§ 3-9 正弦电流电路的功率	137
§ 3-10 正弦电流电路的计算	145
§ 3-11 电路中的谐振	154
习题	164
学习指导	170
练习题	198
练习题答案	200
阶段测验题(一)	200
第四章 具有互感的电路	202
§ 4-1 互感	202
§ 4-2 具有互感电路的计算	208
§ 4-3 空芯变压器	213
习题	216
学习指导	218
练习题	225
练习题答案	226
第五章 三相正弦电流电路	227
§ 5-1 三相电路	227
§ 5-2 对称三相电路的计算	233
§ 5-3 不对称三相电路	241
§ 5-4 三相电路的功率及其测量	245
习题	252
学习指导	254
练习题	271
练习题答案	271
第六章 非正弦周期电流电路	272
§ 6-1 非正弦量的产生	272
§ 6-2 周期函数分解为傅里叶级数	274

§ 6-3 有效值、平均值和平均功率	281
§ 6-4 非正弦周期电流电路的计算	286
§ 6-5 非正弦周期电流电路中的谐振现象	290
§ 6-6 对称三相电路中的高次谐波	293
习题	299
学习指导	301
练习题	307
练习题答案	308
阶段测验题(二)	308
第七章 受控源和多端元件	310
§ 7-1 受控源	310
§ 7-2 含受控源电路的分析	313
§ 7-3 运算放大器	319
§ 7-4 理想变压器	325
§ 7-5 回转器	328
习题	330
学习指导	333
练习题	341
练习题答案	342
习题答案	343

目 录

第八章 一阶电路和二阶电路	349
§ 8-1 电路的过渡过程	349
§ 8-2 初始值的计算	352
§ 8-3 一阶电路的零输入响应	358
§ 8-4 RC 一阶电路的零状态响应	370
§ 8-5 RL 一阶电路的零状态响应	375
§ 8-6 一阶电路的全响应	382
§ 8-7 一阶电路的等效化简和三要素法	386
§ 8-8 阶跃函数与阶跃响应	394
§ 8-9 冲激函数与冲激响应	401
§ 8-10 二阶电路的零输入响应	408
习题	419
学习指导	425
练习题	434
练习题答案	436
第九章 电路的复频域分析	437
§ 9-1 拉普拉斯变换	437
§ 9-2 拉氏变换的基本性质	442
§ 9-3 拉普拉斯反变换	447
§ 9-4 电路元件电压电流关系的运算形式	456
§ 9-5 电路定律的运算形式	462
§ 9-6 运算法	466
习题	471
学习指导	475
练习题	488
练习题答案	489
阶段测验题(三)	489
第十章 二端口网络	491
§ 10-1 二端口网络及端口条件	491
§ 10-2 二端口网络的方程和参数	493

§ 10-3 二端口网络的等效电路	510
§ 10-4 二端口网络的联接	514
习题	519
学习指导	522
练习题	532
练习题答案	534
第十一章 网络方程的矩阵形式	535
§ 11-1 关联矩阵及 KCL 和 KVL 的矩阵形式	535
§ 11-2 支路方程的矩阵形式	540
§ 11-3 节点分析法	543
§ 11-4 用观察法编写节点电压方程	548
§ 11-5 移源法和改进的节点分析法	552
§ 11-6 基本回路矩阵和基本割集矩阵	557
§ 11-7 特勒根定理	562
习题	565
学习指导	567
练习题	574
练习题答案	574
第十二章 简单非线性电阻电路的分析	575
§ 12-1 非线性电阻元件	575
§ 12-2 非线性电阻电路的图解法	578
§ 12-3 非线性电阻电路的线性化法	583
§ 12-4 小信号分析法	584
习题	586
学习指导	588
练习题	596
练习题答案	597
第十三章 磁路与铁芯线圈	598
§ 13-1 磁场的基本物理量和基本定律	598
§ 13-2 铁磁物质的磁化	603
§ 13-3 磁路的基本定律	608
§ 13-4 恒定磁通无分支磁路 and 对称分支磁路的计算	613
§ 13-5 交变磁通下的铁芯损耗	618
§ 13-6 铁芯线圈的电压、磁通和电流	621
§ 13-7 铁芯线圈的相量图和等效电路	625

习题.....	630
学习指导.....	631
练习题.....	640
练习题答案.....	641
阶段测验题(四).....	641
习题答案.....	643
参考文献.....	649

第八章 一阶电路和二阶电路

电感和电容都是储能元件,又称动态元件。这类元件的电压和电流之间是微分、积分关系而不是代数关系,故称这类元件为动态元件。含有动态元件的电路称动态电路。描述动态电路的特性方程是微分方程。如果电路中只含有一个动态元件,描述它的是一阶微分方程,这种电路称为一阶电路。对于用二阶微分方程描述的电路称为二阶电路,如 RLC 串联电路就是典型的二阶电路。

在第一至七章中,我们在电路已经处于稳定状态的情况下,讨论激励和响应的关系,称为稳态分析,这时,电路在直流或交流电源作用下,其电压和电流都不随时间变化或按电源的频率作正弦规律变化。分析时没有涉及开关的动作,或认为开关动作已完成很久,电路已经处于直流稳态或交流稳态。

本章将讨论一些含有 L 、 C 元件的基本电路,在开关动作后电路中发生的过渡过程,这种分析称为电路的过渡过程分析或暂态分析。

分析电路的过渡过程有多种方法。常用的数学方法是通过解描述电路的微分方程,来求得电路过渡过程的变化规律及特征,这种分析方法称为经典法。

§ 8-1 电路的过渡过程

一、动态电路的过渡过程

一般而言,物质运动由于某种原因,从一种稳定状态变化到另一种稳定状态,需要一段时间,经历一个渐变过程,这种渐变过程称为过渡过程。如处于静止状态的发电机、电动机,在开始运行后,要经历一段时间才能上升到额定转速;其他机械运动,如火车、汽车从静止状态到匀速行驶,都要经历一个加速过程和需要一段时间。相类似,在动态电路中,当电路的结构或元件的参数发生改变时,使电路改变原来的工作状态,而转变到另一个工作状态,这种转变往往需要经历一个过程,工程上称为过渡过程。过渡过程又称过渡状态或暂态。

(1) 含有动态元件的电路中存在过渡过程

下面的实验说明在含有动态元件的电路中会发生过渡过程。

图 8-1(a)所示电路中有一只原先不带电的电容器与一只电阻串联,将开关 S

从位置 2 合向位置 1。实验观察到,在开关闭合后伏特表指针从 0 开始慢慢地指向 100 V,电充足后,电压维持 100 V 不变,说明电容器充电过程是一个过渡过程。电路的状态是指它的能量状态,也即是电路中储能元件的能量状态。开关于位置 2 时,电路中既没有电流也没有电压, $i = 0$, $u_C = 0$,电容器储存的能量 $W_C = 0$,即电路处于零状态;当电容器充足电后,其电压 $u_C = 100\text{ V}$,电容器储存的能量为 $W_C = Cu_C^2/2$,此时电路为非零状态。电路能量从零状态变化到非零状态,需要一段时间或一个过程,即过渡过程。理论分析证明充电电压的变化将按图 8-1(b) 所示的曲线进行,电容电压 u_C 从 0 逐渐趋近于 100 V。

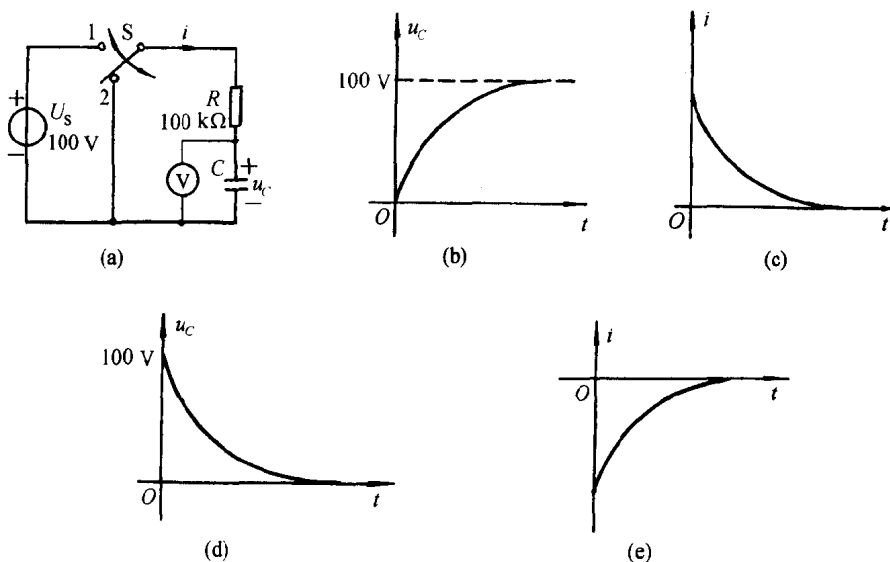


图 8-1 电容的充放电

如果在电路中串联一只电流表,将会发现开关合向位置 1 的一瞬间,电流表的指针摆到最大,然后慢慢地变小,充电结束后电流为 0,可以证明充电电流将按图 8-1(c) 所示的曲线变化。

如果在电容器充足电后,将开关 S 从位置 1 合向位置 2,电容器经电阻放电,电容器上的电压将按图 8-1(d) 所示的曲线变化,最终电路又成零状态,电路从位置 1 时的非零状态变化到位置 2 时的零状态,中间同样需要一个过渡过程。电路中的放电电流将如图 8-1(e) 所示的曲线变化。

(2) 纯电阻电路中不发生过渡过程

由于纯电阻电路中无储能元件,在这种电路中就没有能量的储存和释放,因此,电路所反映的能量状态也就总是为零,所以电路中不发生过渡过程。图 8-2 所示为纯电阻电路,在 $t = 0$ 时开关 S 闭合,由欧姆定律可知, $t \geq 0$ 时,电流 i 和电压 u_1 为

$$i = U_S / (R_1 + R_2) = 100 / (5 + 15) = 5 \text{ A}$$

$$u_1 = R_1 i = 5 \times 5 = 25 \text{ V}$$

计算表明,纯电阻电路中不发生过渡过程,电流和电压由 0 变为 5 A 和 25 V 是在开关闭合的一瞬间完成的。 i 和 u_1 的变化曲线如图 8-2(b)所示。

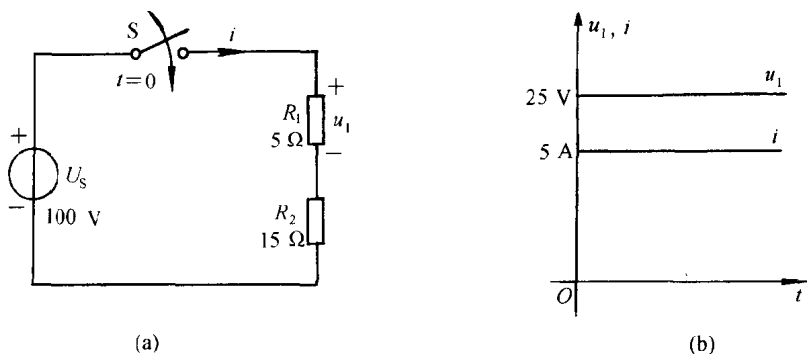


图 8-2 纯电阻电路

二、产生过渡过程的原因

动态电路发生过渡过程的直接原因是电路中开关的动作,将电源或无源元件断开或接入,使电路的联接和结构发生改变,使电路改变原来的工作状态,转变到另一种工作状态,从而产生过渡过程。上述电路结构或参数变化引起的电路变化统称为“换路”。

然而电路中产生过渡过程的根本原因,是由于电路中储能元件的电磁能量不能突变。由于换路,电路从一种工作状态转变到另一种工作状态,使储能元件的能量发生变化,从物理学知道能量的变化率就是功率, $p = dW/dt$,如果在一瞬间电路中的能量有 dW 的变化,也就是说 dW 的能量变化不需要时间,那么从能量和功率的关系式可以看出,由于 $dt = 0$,所以功率 $p = \infty$,但是物理上能够实现任何装置都不可能有无穷大的功率,因此能量的变化不可能在一瞬间完成,即能量不能突变,它的变化需要一段时间或一个过程。换路只是产生过渡过程的外因,而电路中电磁能量不能突变才是内因,即根本的原因。

电路中过渡过程经历的时间,长的可历时数十分钟,短的仅几个毫秒 ($1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$),甚至几个微秒 ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$)。但是在过渡过程中会产生许多稳态电路所没有的各种电磁现象,它带来了许多利弊供人们认识和利用。在电子技术中利用电容器充放电可以实现脉冲的产生和变换,可以说,许多电子设备、自动控制技术、电子计算机等就是工作在过渡过程之中。在电力工程中,过渡过程也是极其重要的电磁现象,由过渡过程所产生的过电流或过电压有可能

损坏开关和其他电气设备。

§ 8-2 初始值的计算

在电路分析中,常把元件的支路电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 的变化规律称为响应,感兴趣的响应是电路分析的求解对象。响应是由独立源的激励及储能元件的初始储能共同作用而产生的。

在分析动态电路中响应演变的全过程中,往往应回答如下三个问题:

- (1) 电量开始变化时的初始值;
- (2) 暂态变化结束时电量的终值;
- (3) 在其间电量的变化规律。

从数学上讲,应用求解微分方程的经典法分析一阶、二阶电路时,除了要列出电路的微分方程外,还需要知道待求电压或电流的初始值,这样才能由初始值确定积分常数。

一、三个零—— 0 , 0_- , 0_+ 的区别

为了定量分析电路的过渡过程,引入了如下三个零的概念。

$t = 0$ ——换路瞬间即计时起点。过渡过程是在一段时间内进行的,令该段时间的开始时刻作为过渡过程的计时起点。

$t = 0_-$ ——换路前瞬间, $0_- = 0 - \epsilon$, ϵ 为高阶无穷小量。

$t = 0_+$ ——换路后瞬间, $0_+ = 0 + \epsilon$ 。

图 8-3(a) 所示动态电路,我们假定开关动作是在 $t = 0$ 时刻瞬时完成的。三个零在时间顺序上是有区分的, 0_- , 0 和 0_+ 在时间轴上的表示如图 8-3(b) 所示,但在数值上可认为相等,即 $0_- = 0 = 0_+$ 。

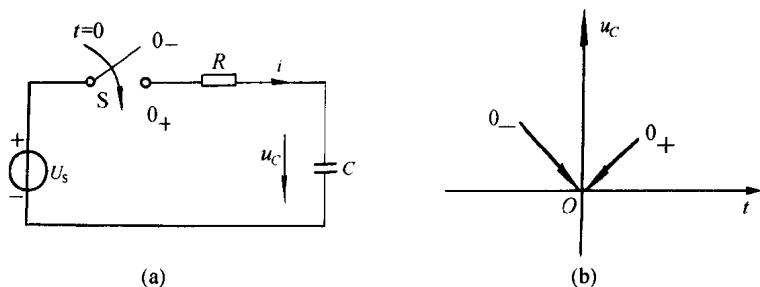


图 8-3 0 , 0_- , 0_+ 的说明