

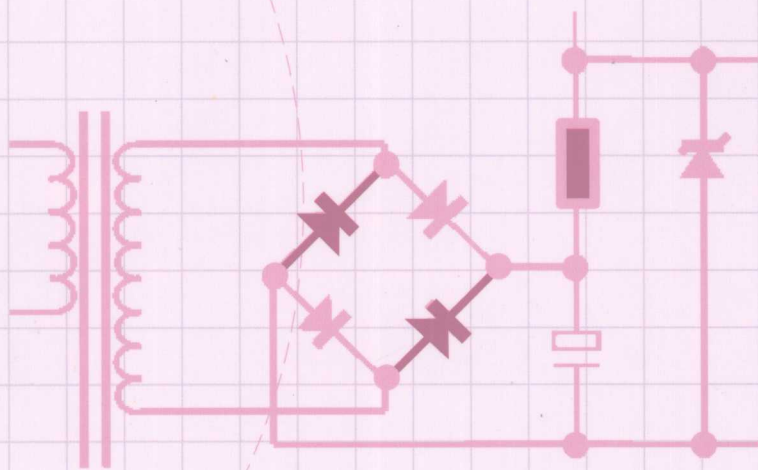


北京市高等教育精品教材立项项目

The Art of Circuit Analysis

电路分析方法

胡薇薇 陈江 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



北京市高等教育精品教材立项项目

The Art of Circuit Analysis

电路分析方法

胡薇薇 陈江 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

电路分析方法/胡薇薇,陈江编著. —北京:北京大学出版社,2009.4
ISBN 978-7-301-12455-0

I. 电… II. ①胡…②陈… III. 电路分析—高等学校—教学参考
IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 088977 号

书 名: 电路分析方法

著作责任者: 胡薇薇 陈

责任编辑: 孙 琰

封面设计: 张 虹

标准书号: ISBN 978-7-301-12455-0/TN·0043

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038 出版部 62754962

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 22.75 印张 420 千字

2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: (010)62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书是在《电路分析》(王楚、余道衡,北京大学出版社,2000)的基础上,为配合北京大学信息科学技术学院本科生“电路分析原理”课程教学而编写的,作为配套教材使用。

本书的主要内容和指导思想自2002年9月起公布于<http://ee.pku.edu.cn/ca>。全书整体结构框架分为上、下两篇。

“授人以鱼,不如授之以渔。”上篇包括六章,以分析方法为主线,深入浅出、循序渐进地阐述了电路分析原理和方法,其中包括简单线性电路的分析方法,线性电路的时域分析方法、复数分析方法、变换域分析方法、网络分析方法,双口网络参量分析方法以及非线性电路的分析方法。其中,第一、五、六章为初步要求,除第三章外的其他五章为基本要求。

“融会贯通,举一反三”。电路分析原理和方法的学习,旨在深刻理解和熟练掌握了原理和方法之后的学以致用。下篇包括四章,以方法的应用为主线,将电路分析原理和方法应用于传输线、集成运算放大器、二极管电路、三极管电路、场效应管电路等,以帮助学生增加兴趣,加深理解,踩实对基本概念、基本原理、基本方法(简称“三基”)的学习。

每章的开头和结尾均提纲挈领地列出相应的纲领性内容,教师和学生在实际教学过程中可以根据不同要求安排取舍。在每一概念后面,给出相应的例题,有些例题可以帮助学生拓宽解题思路,更好地理解所学内容。每章最后配有大量习题,既有利于学生复习和巩固所学内容,又有利于培养他们独立解决问题的能力 and 信心。所有习题采用“三星”分级,并给出部分参考答案:“*”是需要学生理解和掌握“三基”的简单题目;“**”是需要学生理解、掌握和运用所学知识的题目,旨在检查他们对所学知识的理解程度,提高他们对内容的掌握程度;“***”是旨在拓宽学生思路、有一定难度的题目,有些取自高年级本科生、研究生的相关研究课题的电路基础部分。学生可以根据自己对课程的不同兴趣或不同要求来选择题目进行练习,从而达到理解、掌握并拓宽知识的目的。

“工欲善其事,必先利其器”。本书的附录部分包含了对相关数学基本知识和电路软件分析工具的简要介绍。

本书由胡薇薇制订全书编写思想,统筹全书整体构架和内容,并编写第一至七章、全书部分三星习题、附录前四节、本书使用的各类符号列表、参考文献以及索引;陈江编写第八至十章和附录第五节。北京大学信息科学技术学院余道衡

教授以及 2004 和 2005 级选课的部分本科生阅读了本书的初稿并提出宝贵的意见和建议;2003 级学生张诚、杨筱舟,2004 级学生赵瑜、杨暉健、刘成、徐晓帆、王达提供了部分三星习题;史超、王峥、严伟振、纪君宠、张锐、蔡钦协助整理并选编了第一至七章大部分习题。此外,本书于 2004 年被列为北京大学教材建设立项项目,2007 年被列为北京高等教育精品教材立项项目。在此,一并表示深切的谢意。

由于时间、学识所限,书中必有不少不妥、错误和疏漏,恳请读者批评、指教。来信请寄往北京大学信息科学技术学院(100871),或发电邮至 wwhu@pku.edu.cn。

胡薇薇

2007 年 5 月于北京大学燕北园

目 录

上篇 线性电路分析方法

第一章 线性电路分析基础	(3)
§ 1.1 线性电路基本概述	(3)
1.1.1 基本单位	(3)
1.1.2 集总假设及集总电路模型	(5)
1.1.3 基本参数、基本变量和基本术语	(6)
1.1.4 基本方法	(8)
1.1.5 基本定律	(9)
§ 1.2 常见的电路元件模型及其约束方程	(12)
1.2.1 电阻元件	(12)
1.2.2 理想电压源和理想电流源	(15)
1.2.3 电容元件	(17)
1.2.4 电感元件	(18)
1.2.5 受控源	(20)
§ 1.3 常用的源信号和响应信号	(22)
§ 1.4 线性二端网络的等效	(27)
1.4.1 等效的定义	(27)
1.4.2 电阻电路的等效	(27)
1.4.3 具有初始储能的动态元件的等效	(29)
1.4.4 源电路的等效	(29)
1.4.5 戴维宁定理和诺顿定理	(32)
§ 1.5 线性电路的时域分析	(34)
1.5.1 静态电路的分析	(35)
1.5.2 动态电路的暂态过程和起始状态	(35)
1.5.3 一阶动态电路分析(RL 或 RC 电路)	(36)
1.5.4 动态电路的零状态响应	(39)
1.5.5 二阶及高阶动态电路分析	(43)

§ 1.6 正弦稳态电路的分析	(44)
1.6.1 正弦稳态响应和网络稳定性的判断	(45)
1.6.2 正弦信号的复数表示	(46)
1.6.3 电路元件的相量表示	(47)
1.6.4 正弦稳态分析	(50)
1.6.5 正弦稳态功率	(51)
§ 1.7 网络函数、频率响应和滤波器	(53)
1.7.1 网络函数和频率响应	(53)
1.7.2 滤波器	(55)
§ 1.8 本章小结	(60)
习题	(61)
第二章 变换域分析方法——拉普拉斯变换	(71)
§ 2.1 拉普拉斯变换	(71)
2.1.1 变换域分析方法	(71)
2.1.2 拉普拉斯变换的定义	(72)
2.1.3 拉普拉斯变换的基本性质	(74)
2.1.4 拉氏反变换的分解定理	(81)
§ 2.2 线性电路的 s 域解法	(85)
2.2.1 元件的运算模型	(85)
2.2.2 定律的运算形式	(87)
2.2.3 线性电路的 s 域解法	(89)
§ 2.3 网络函数的 s 域描述	(92)
2.3.1 网络函数的定义	(92)
2.3.2 网络函数的特性	(93)
§ 2.4 本章小结	(95)
习题	(95)
第三章 变换域分析方法——傅里叶分析(信号的频谱分析)	(101)
§ 3.1 傅里叶级数(周期信号的频谱分析)	(101)
3.1.1 周期信号的傅里叶级数表示	(101)
3.1.2 周期信号对称性与傅里叶级数之间的关系	(108)
3.1.3 周期信号的有效值和平均功率	(110)
3.1.4 非正弦周期信号作用于线性电路的稳态响应	(111)
§ 3.2 傅里叶变换(非周期信号的频谱密度分析)	(112)
3.2.1 从傅里叶级数到傅里叶变换	(112)
3.2.2 傅里叶变换与反变换	(113)

3.2.3 傅里叶变换的基本性质与定理	(115)
§ 3.3 傅里叶变换与拉普拉斯变换	(118)
* § 3.4 采样定理	(119)
§ 3.5 本章小结	(120)
习题	(120)
第四章 网络拓扑分析方法	(126)
§ 4.1 支路电流法	(126)
§ 4.2 网络拓扑分析的基本知识	(128)
§ 4.3 回路电流法	(133)
4.3.1 一般的回路电流法	(133)
4.3.2 网孔电流法	(135)
4.3.3 对含电流源支路的处理	(137)
§ 4.4 节点电压法	(139)
4.4.1 一般的节点电压法	(139)
4.4.2 含电压源支路的处理	(140)
* § 4.5 网络拓扑分析方法	(141)
4.5.1 节点分析法	(141)
4.5.2 回路分析法	(145)
§ 4.6 本章小结	(147)
习题	(147)
第五章 网络定理	(152)
§ 5.1 唯一性定理	(152)
§ 5.2 置换定理(替代定理)	(153)
§ 5.3 叠加定理	(156)
§ 5.4 戴维宁定理和诺顿定理	(158)
§ 5.5 互易定理	(161)
§ 5.6 特勒根定理	(164)
§ 5.7 本章小结	(166)
习题	(167)
第六章 双口网络的分析方法	(173)
§ 6.1 双口网络参量	(173)
6.1.1 “黑盒子”方法	(174)
6.1.2 双口网络参量及其相互转换	(174)
6.1.3 双口网络参量与双口网络联结	(176)
§ 6.2 双口网络的阻抗参量	(183)

6.2.1 阻抗参量的定义	(183)
6.2.2 等效电路	(184)
§ 6.3 双口网络的导纳参量	(186)
6.3.1 导纳参量的定义	(186)
6.3.2 等效电路	(186)
§ 6.4 双口网络的混合参量	(189)
§ 6.5 双口网络的传输参量	(190)
§ 6.6 有端接的双口网络	(193)
§ 6.7 本章小结	(195)
习题	(195)

下篇 方法的应用

第七章 均匀、无耗传输线	(207)
§ 7.1 分布参数电路	(207)
§ 7.2 传输线方程	(210)
7.2.1 传输线的建模	(210)
7.2.2 传输线方程	(211)
7.2.3 传播常数、入射波和反射波	(212)
7.2.4 特性阻抗与无限长传输线	(214)
7.2.5 双口网络等效方程	(215)
§ 7.3 均匀、无耗传输线上的波动	(217)
7.3.1 波动方程与双口网络等效方程	(217)
7.3.2 均匀、无耗传输线上的波动特性	(217)
§ 7.4 均匀、无耗传输线的阶跃响应	(223)
§ 7.5 微波双口网络的散射参量	(226)
§ 7.6 本章小结	(227)
习题	(228)
第八章 非线性电路初步	(235)
§ 8.1 常见非线性元器件	(236)
8.1.1 真空管	(236)
8.1.2 晶体二极管	(237)
8.1.3 双极结型晶体管	(240)
8.1.4 场效应晶体管	(242)

8.1.5 线性区、静态工作点和动态电阻	(243)
§ 8.2 非线性电路的分析方法	(245)
8.2.1 作图法	(247)
8.2.2 分段线性近似法	(250)
8.2.3 小信号条件下的线性化方法	(254)
§ 8.3 本章小结	(266)
习题	(266)
第九章 晶体管放大电路	(270)
§ 9.1 BJT 和 FET 概述	(270)
9.1.1 BJT 和 FET 的特性	(270)
9.1.2 BJT 和 FET 的动态小信号模型	(275)
§ 9.2 密勒定理及其对偶定理	(277)
§ 9.3 单管放大器的三种基本组态	(279)
9.3.1 三种组态的引出	(279)
9.3.2 基本组态之一:同时放大电压和电流的放大器	(280)
9.3.3 基本组态之二:电压跟随的电流放大器	(288)
9.3.4 基本组态之三:电流跟随的电压放大器	(291)
9.3.5 晶体管常用组态的比较	(294)
§ 9.4 多管放大电路	(294)
9.4.1 级联放大电路	(295)
9.4.2 复合管:达林顿电路	(296)
9.4.3 互补放大器:CMOS 反相放大器	(297)
9.4.4 互补输出级:推挽电路	(298)
9.4.5 高增益放大:有源负载	(300)
9.4.6 差分放大电路:共模与差模响应	(300)
9.4.7 运算放大器:带有推挽输出的高增益级联差分放大器	(302)
§ 9.5 本章小结	(305)
习题	(306)
第十章 运算放大器电路	(313)
§ 10.1 运算放大器概述	(313)
§ 10.2 理想运算放大器的分析	(315)
10.2.1 运算放大器的转移特性	(315)
10.2.2 运算放大器的理想化模型和分析方法	(315)
§ 10.3 反馈及其对运算放大器电路的影响	(318)
10.3.1 反馈的基本概念	(318)

10.3.2	反馈的类型和基本特点	(318)
10.3.3	工作于深度负反馈的运算放大器	(320)
§ 10.4	常见运算放大器应用电路的分析	(320)
10.4.1	同相和反相放大电路:基本运算放大电路	(320)
10.4.2	加法和减法电路:多信号源激励的运算放大电路	(322)
10.4.3	指数和对数电路:含非线性元件的运算放大电路	(323)
10.4.4	积分和微分电路:含动态元件的运算放大电路	(324)
§ 10.5	本章小结	(326)
习题	(326)
附录	(331)
§ A.1	复数运算	(331)
A.1.1	复数的表示	(331)
A.1.2	复数的图形表示	(332)
A.1.3	复数的运算	(333)
A.1.4	重要的恒等式	(334)
§ A.2	线性常参量方程和方程组求解	(334)
A.2.1	一阶微分方程的求解	(334)
A.2.2	n 阶微分方程的求解	(335)
A.2.3	用克莱姆法则求解线性方程组	(336)
§ A.3	矩阵的基本知识	(339)
A.3.1	矩阵	(339)
A.3.2	矩阵代数	(341)
A.3.3	单位矩阵、伴随矩阵和逆矩阵	(342)
§ A.4	分块矩阵	(343)
§ A.5	电路仿真和软件简介	(344)
参考文献	(350)
部分电气图、电路图及变量符号	(352)

上篇 线性电路分析方法

电路是各种电器互相连接而构成的电流的通路. 电路的功能是实现电能(强电)或电信号(弱电)的产生、传输及使用.

电路分析理论是一门理论基础性的电子工程学科. 它并不具体分析、研究各种实际电路, 而是系统和深入地探讨电路中所发生的电磁现象, 寻求其普遍和基本的规律, 为电路分析和综合提供理论基础.

由电阻、电容、电感等集总参数元件(简称集总元件)组成的电路称为集总参数电路(简称集总电路). 由线性元件组成的电路称为线性电路. 本书上篇将讨论线性集总电路的分析方法; 在一定的约束条件下, 上篇讨论的线性电路分析方法可以推广和应用到分布参数电路和非线性电路(将在本书下篇讨论).

第一章 线性电路分析基础

在这一章里,我们将接触到经典电路分析中一些重要的基本概念和方法;它们是:源、元件、集总假设,欧姆定律、基尔霍夫定律,等效的概念和方法,戴维宁定理和诺顿定理,电路的激励与响应,单位阶跃信号、单位冲激信号以及电路的单位阶跃响应和单位冲激响应,一阶、二阶和高阶电路,正弦稳态响应和电路的复数法分析;频率响应和滤波器.我们希望达到的学习目标是:(1)了解线性电路分析的基本约束条件;(2)掌握常见电路元件模型及其约束方程;(3)掌握线性电路的基本分析方法;(4)掌握戴维宁(Thevenin)定理和诺顿(Norton)定理,理解等效的实质;(5)掌握正弦稳态电路的复数分析方法,理解复数法的实质;(6)熟练利用网络函数分析电路的频率响应;(7)了解滤波器,学习从频域的角度,分析电路.

§ 1.1 线性电路基本概述

1.1.1 基本单位

我们知道,国际单位制(SI)定义电压的单位为伏[特](V)、电流的单位为安[培](A)、功率的单位为瓦特(W).根据国家标准(GB 3100~3102—93),本书中出现的SI部分基本单位和导出单位标准如表1.1所列.此外,表1.2给出了部分SI词头.

表 1.1 部分 SI 基本单位和导出单位

变量名称	单位名称	符号	变量名称	单位名称	符号
长度	米	m	时间	秒	s
电流	安[培]	A	电压	伏[特]	V
能量	焦[耳]	J	功率	瓦[特]	W
电荷	库[仑]	C	电阻	欧[姆]	Ω
电导	西[门]	S	电容	法[拉]	F
电感	亨[利]	H	磁通[量]	韦[伯]	Wb
频率	赫[兹]	Hz			

表 1.2 部分 SI 词头

因数	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12} *	10^{-15}	10^{-18}
词头英文	milli	micro	nano	pico	femto	atto
词头中文	毫	微	纳[诺]	皮[可]	飞[母托]	阿[托]
符号	m	μ	n	p	f	a
因数	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}
词头英文	kilo	mega	giga	tera	peta	exa
词头中文	千	兆	吉[咖]	太[拉]	拍[它]	艾[可萨]
符号	k	M	G	T	P	E

这样,我们可以方便地表示各物理量的大小.例如,我国民用交流电是 50 Hz, 220 V;一般家庭用电的总电流为 1~10 A;闪电可以达到 10 kA, 100 MV;显像管的极间电压上千伏;集成电路流过一个电路的电流可以小到几微安几毫安;脑电图记录的人脑电波的电压为微伏数量级;脑神经细胞的工作电流为皮安数量级;等等.

在对两个功率量 A 和 B 进行比较时(例如信号与噪声之比、主瓣与副瓣之比、输入与输出之比),除了普通的比值关系 A/B 表示,我们还习惯采用对数的关系来表示: $\lg(A/B) = \lg A - \lg B$ ^①. 后者的好处是化乘除运算为和差运算,并可以把一系列比值较小和较大的量同时表示在图形中或显示在仪器上(图 1.1). 这在工程上非常有用.

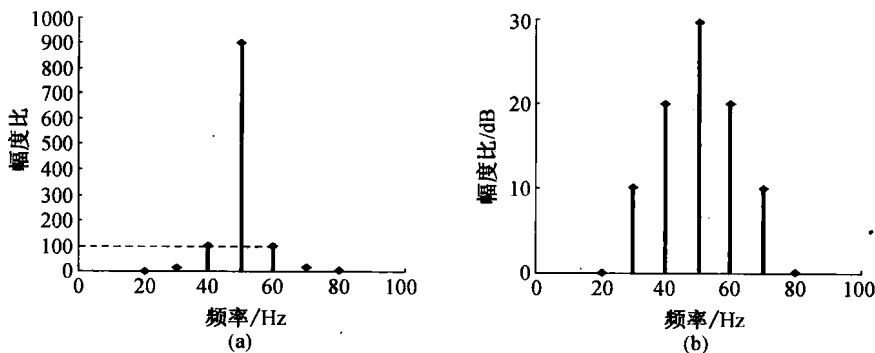


图 1.1 一个调幅信号频谱的比值表示和对数表示

为了纪念发明者贝尔^②,定义这个对数关系的功率比的基本单位为贝[尔]

① 有时也可取其他数为底数.

② 贝尔 1876 年发明了电话,然而重要的是,他发现我们人类耳朵对声音强度的反应是呈对数关系的,即当声音的强度增加到某一数量级时,人的听觉会变得迟钝.这使得对数的单位可以用来表征听觉变化的比例.为了纪念他的发现,这个基本单位因而命名为 Bell,简称为 Bel.

(B). 实际上, 这个单位太大, 不常用; 而常用的是它的 $1/10$, 即分贝 (dB): $1 \text{ dB} = 0.1 \text{ B}$. 由于功率 $P \propto V^2$, $P \propto I^2$ (V 和 I 分别为电压和电流), 于是定义: 当 A, B 为功率时, 分贝对数关系表示为 $10 \log(A/B)$; 当 A, B 为电压或电流时, 分贝对数关系表示为 $20 \log(A/B)$. 例如, 功率比为 1000, 采用对数的关系来表示为 30 dB; 也就是说, “功率比为 1000 倍” 和 “功率比为 30 dB” 的描述是等价的. 又如, 功率比为 $1/2$, 采用对数的关系来表示为 $-3.0103 \text{ dB} \approx -3 \text{ dB}$; 也就是说, 输出功率衰减了一半时, 采用对数关系来表示就是功率衰减了 3 dB. 由于输出功率衰减一半的位置是衡量滤波器或其他电路的一个重要指标, 因此常称这个位置为半功率点或 3 dB 功率点.

工程上还有一种用对数关系表示的物理量也是常用的, 即以一个特定的参考值为标准, 所有物理量的大小都用和这个参考值之比的对数关系来表示. 例如, 取 1 mW 为参考值, 物理量的单位定义为 dBm, 则 1 mW 等价于 $10 \lg(1/1) = 0 \text{ dBm}$, 10 mW 等价于 $10 \lg(10/1) = 10 \text{ dBm}$; 同理, 20 dBm 和 100 mW 是等价的, 30 dBm 和 1 W 是等价的. (想一想: 单位 “dBW” 表示什么意思?)

1.1.2 集总假设及集总电路模型

任何工程学科都是建立在 “模拟” 概念的基础之上的. 要分析任何一个复杂的物理系统, 我们必须用理想模型来描述这个系统; 而理想模型则由一些理想元件所组成. 理想元件本身也是一些简单的模型, 用来表达或近似地表达一些简单的实际元件的基本物理性质. 在电路分析理论中, 我们研究的是由理想电路元件所构成的电路模型. 这些理想元件代表了实际电路元件的主要外部特征和功能, 可以用数学关系式来精确定义, 所以又称为数学模型.

电路模型具有实际电路装置的主要电磁性能, 由其得出的数学关系反映实际电路的基本物理规律. 用电路模型来近似表示实际电路称为建模. 在一定的条件下, 有些元器件的模型较简单, 只涉及一种元件; 而有些模型则要多由多种元器件构成. 例如, 在 50 Hz 交流电工作下的灯泡 (电感极其微小), 可以用一个电阻元件作为它的模型; 而干电池的模型可以由电压源元件和电阻元件 (反映电池的内阻) 串联组成. 必须指出, 建模是有条件的; 一种电路模型只有在一定条件下才是适用的, 如果条件变了, 电路模型也要做出相应的改变.

严格地说, 涉及电磁现象的分析应该用麦克斯韦 (Maxwell) 方程求解才准确. 然而, 当实际电路的尺寸远小于最高工作频率所对应的波长时, 可以不考虑通路中电磁场的相互作用, 也不必考虑电磁波的传播现象; 而认为电能的传输是瞬时完成的, 电流和电压与其在电路中的位置无关. 在这种条件下, 建模可以简化, 在数学上引入一种集总参数元件, 来表示实际元件的基本电磁特征. 每一种集总元件只反映一种基本电磁现象, 且可用数学方法精确定义. 例如, 电阻元件

只涉及电能损耗的现象;电容元件只涉及与电场有关的现象;电感元件只涉及与磁场有关的现象. 电场、磁场被认为只“集总”在相应元件的内部,元件之间的连线(称为导线)无耗;即参数特性集中于一个质点上. 这称为集总参数假设条件. 这样的电路元件即称做集总参数元件,由集总参数元件构成的电路称做集总参数电路.

这一“路”的分析方法的实质是只研究元件端口上的外部特性(例如电压、电流、功率),不考虑元件内部的电磁作用. 若不满足这个条件,即实际电路的尺寸与最高工作频率所对应的波长可以相比拟或更大时,集总参数电路模型就失效,而要用分布参数电路(简称分布电路)模型来模拟实际电路. 例如,我国市电频率为 50 Hz,对应的波长为 6000 km,对以此为工作频率的实验设备来说,其尺寸远小于这一波长,可以按集总电路处理;而对上千千米的传输线来说,就必须考虑到电磁场沿线分布的现象,不能按集总电路来处理. 本书只讨论集总电路. 因为工程中所遇到的大量电路都可作为集总电路来处理.

电路理论的分析对象是电路模型而不是实际电路. 电路图是用元件图形符号表示的电路模型. 如何用集总元件构成某一元件或器件的模型(即建模),不是本书所要讨论的主要问题. 集总假设为电路分析的基本假设,本书上篇所述的所有的电路基本定律、定理、方法等均是在这一假设的前提之下才能成立的. 在这一假设下,图 1.2 中的电路(不管我们是否看得顺眼)实为同一个电路模型.(想一想:实际的“导线”和电路图上的“导线”有什么不同?)

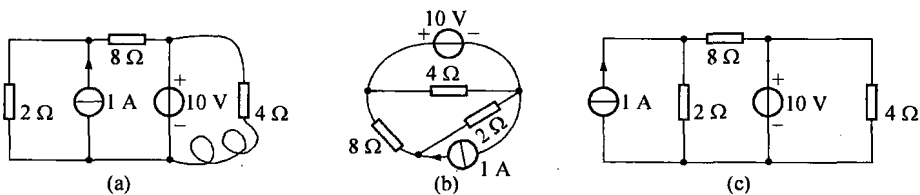


图 1.2 同一电路模型的三种表示

1.1.3 基本参数、基本变量和基本术语

1. 基本参数

电路分析的基本参数是电阻 R 、电容 C 和电感 L . 我们定义,电阻元件的电阻为 R ,电容元件的电容为 C ,电感元件的电感为 L . 它们和电源元件(简称源)一起组成各种功能的电路. 它们都是从实际电路元件中抽象出来的. 根据集总假设,电场被认为只集中在电容元件的内部;磁场被认为只集中在电感元件的内部;损耗被认为只集中在电阻元件的内部. 电路中电能与磁能相互转换以及能量在电路中的动态传递现象,由电路中的电容和电感元件上的动态储能特性体现