

现代电路分析导论

[美]D·A·卡拉汉等著

方孝慈 孙性如 朱涤心 宿延吉 合译

本书责任编辑 姚玉洁

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 28 字数 637,000

1979年6月第1版 1980年2月第1次印刷

印数 00,001—17,000

书号 15012·0163 定价 2.30 元

译者的话

本书是根据美国密执安大学 (UNIVERSITY OF MICHIGAN) D·A·卡拉汉, A·B·麦克尼, E·L·麦克马洪所著“*Introduction to Modern Circuit Analysis*”一书译出的。

原书综合论述了网络方面的根本问题,它不仅对网络理论中传统性的基本内容做了精辟的阐述,而且还用较多的篇幅介绍了一些能反映现代较新颖的网络分析的方法,这些知识对目前从事电路工作者是必不可少的。因此,我们认为此书可供从事电路工作的科技人员以及大专院校师生参考。

本书的译稿经我院柯大诰、杨维奇两同志校阅,并承西安交通大学邱关源同志对初稿进行了审阅。

由于我们的水平有限,且缺乏实践经验,虽在本译文后编入中英名词对照表,用以弥补译名不妥的缺陷,但在译文中仍不可避免存在一些缺点和错误,切望广大读者给予批评和指正。

哈尔滨电工学院 方孝慈 孙性如
朱涤心 宿延吉

目 录

序 言	1	5.1 引言	101
引言	1	5.2 线性方程组的解	102
总的宗旨	1	5.3 线性网络计算机分析示例	105
计算机在本书中的作用	2	5.4 非线性电阻性网络的分析	109
电子学课程的配合	3	5.5 网络折算	115
与实验课的关系	3	5.6 推广的牛顿迭代法	116
课时计划	3	5.7 晶体管模型	118
第一章 系统分析及电路分析导论	6	5.8 通用非线性计算机辅助分析程序	119
1.1 工程系统的分析	6	5.9 数字电路分析	122
1.2 电路分析	6	习题	132
1.3 电路功能	7	第六章 线性及其意义·小信号分析	139
1.4 基本分类	8	6.1 引言	139
第二章 网络分析导论	10	6.2 线性和迭加原理	139
2.1 电路性能的物理基础	10	6.3 推广的戴维南和诺顿等效	141
2.2 电阻性电路元件	15	6.4 小信号分析	142
2.3 网络定律	17	6.5 增量分析的应用	147
2.4 简单网络分析	19	习题	153
2.5 端口分析	24	第七章 动态电路元件	158
2.6 受控电源	32	7.1 引言	158
2.7 线性	36	7.2 电容	158
习题	37	7.3 电感	165
第三章 非线性网络分析	47	7.4 不变元件和时变元件	168
3.1 引言	47	7.5 互感	169
3.2 简单非线性元件	47	习题	172
3.3 基本的数字计算机电路	49	第八章 简单线性动态网络的求解	177
3.4 晶体管放大器电路导论	57	8.1 引言	177
3.5 放大器的详细分析	60	8.2 单一时间常数网络	177
习题	69	8.3 阶跃函数和阶跃响应	185
第四章 线性网络分析的一般方法	76	8.4 冲激函数和冲激响应	188
4.1 引言	76	习题	191
4.2 基本的节点分析法	76	第九章 二阶网络·卷积	196
4.3 求解方法	79	9.1 RLC 网络分析	196
4.4 节点分析法的推广	81	9.2 方程的建立	196
4.5 拓扑考虑	84	9.3 GCL 并联网路的解	204
4.6 网孔分析	92	9.4 卷积	204
习题	96	习题	212
第五章 大型网络的计算机分析法	101	第十章 正弦稳态分析	217

10.1 引言	217	15.3 另外一些参数组	364
10.2 周期信号的一些特征量	218	15.4 互易性	368
10.3 正弦稳态分析导论	219	15.5 参数间的相互关系	368
10.4 各元件在正弦稳态中的表示法	222	习题	372
10.5 正弦稳态网络分析	225	第十六章 变压器·模拟	379
10.6 正弦稳态的功率	231	16.1 引言	379
10.7 折算	236	16.2 变压器	379
习题	241	16.3 模拟	385
第十一章 拉普拉斯变换	247	16.4 机械系统的模拟	385
11.1 引言	247	习题	392
11.2 变换对的导出	247	附录A 矩阵代数	397
11.3 逆变换的确定	254	引言	397
11.4 线性动态网络的拉普拉斯解法	259	相等	397
11.5 零状态分析	265	矩阵加法	397
11.6 小信号动态分析	267	矩阵乘法	398
习题	273	方阵的行列式	398
第十二章 s域分析	278	计算行列式的值	399
12.1 引言	278	逆矩阵	400
12.2 时域的关系	278	联立方程的解	401
12.3 $H(s)$ 的s平面图解表示法	279	附录B 复数	404
12.4 谐振	282	定义和表示法	404
12.5 优势极点的分析	288	相等	405
12.6 伯德图	293	加法	405
习题	301	乘法	405
第十三章 状态变量分析	307	除法	405
13.1 引言	307	附录C 付里叶级数和付里叶变换	407
13.2 方程式的建立	308	付里叶级数的指数形式	409
13.3 状态方程式的拉普拉斯解	312	周期性波形的电路分析	411
13.4 状态方程式的直接解	314	频谱表示法	412
13.5 数值解	316	付里叶积分	413
习题	320	附录D 电子学基础	416
第十四章 用计算机进行瞬态分析	324	引言	416
14.1 引言	324	材料按电学性质分类	416
14.2 线性动态网络的分析	324	纯半导体的电学性质	417
14.3 非线性动态网络的分析	333	半导体中的杂质	418
14.4 具有非线性动态元件的分析	340	pn 结	420
14.5 结束语	350	双极型晶体管	423
习题	350	场效应晶体管	424
第十五章 二端口网络的分析	356	其他类型的场效应管	427
15.1 引言	356	索引	429
15.2 专题研究: 短路参量	357	中英名词对照	437

序 言

引言

电路初步理论课, 是大多数电工程课程的基础。工科学生常是通过它第一次和所选专业领域接触, 所以它常安排在二年级末或三年级初。

传统上, 第一门电路课的目的有以下两点:

1. 通过在有代表性的应用领域中使用连续数学以加深学生的基础;
2. 为集总线性电路的分析提供根据。

虽然电子线路分析的某些元件(诸如受控电源)也选入了典型的电路入门课中, 但重点仍然按照传统保持在比较简单的 RLC 电路分析上。

近年来电工程课程有很大的增改, 这就促使我们重新确定这一入门课程的目标和内容。如果说这种重新审查是由于对计算机革命的反响, 也并不算过于简单化。一方面, 这种改革使得迅速出现和扩充了一批新的人员, 他们的主要注意力在于从数学的角度研究计算机领域中的硬、软件, 且从纯粹功能的水平看待电路。同等重要的另一方面, 即使主要注意力仍在传统领域的人, 他们的计算能力也已经有了质的突变, 这是当前对工程人员正常的要求。实际上今日训练有素的年青一代工程人员看待计算机计算必然同他们的前辈看待计算尺计算一样。

正如所预料的那样, 电工程教育工作者对计算机以及和计算机有关的发展, 其反映远非一致。一种极端是有些学院在入门课程中进行连续系统与离散系统并重的尝试, 这常常显著削弱了这个系统的电学方面。另一个极端是保持这门课程不动, 只是将计算机及其运用的研究留在三、四年级选修的后续课程中去。

总的宗旨

本书试图同时介绍: (1)一整套知识;(2)一种学习这些知识的方法, 即在各种分歧的观点之间深入权衡。

1. 题材方面, 我们感到应首先对学生揭示设计过程中的模型分析阶段。由于焦点集中在电子线路上, 这就包括揭示非线性器件模型及含有这些模型的简单电路, 以及对这些电路的分析。进一步, 因为现在电路可以由功能方面来考虑, 所以重要的是提供一个连续统一的研究; 它包括“如何工作”这样水平的讨论, 同时讨论包括需要高度简化的电路模型。这就不可避免地扼要讨论一些甚至在初级教材中亦要引入的艰深的电路理论内容。

2. 我们的方法是根据这样的信念引入的, 即每一个电工程人员, 不论他的最终业务活动是面向数学方面还是物理方面, 都应对数学计算感到运用自如。我们还进一步看到许多学生对生硬地插入到(传统)电路分析论题中的计算机习题感到不自然。我们认为计算机的应用应和网络

分析融为一体。

我们企图把上述观点在初级教材中贯彻，是由于同事们热情的评论所促使的。他们被迫把我们书面上的设想与课堂体验紧密配合起来。屡次实验所暴露出的问题是：教师们虽然容许或热心于把电路分析扩充到用计算机计算非线性电阻性电路领域的尝试，但他们却一致反对冲淡或显著改变对线性动态电路部分的处理。特别是正弦稳态、极零点分析，更是不可侵犯的，总觉得这些概念最好还是用传统方法讲。因此，在本书中除了某些章节结尾明显的选修材料以外，我们并没有因为计算机的引入而打断这些主题的论述。我们觉得本书可以代替其它电路课本使用是由于它所包括的范围是大多数教师都感到极为重要的题材。

为了容纳多增加的内容，在对各种各样主题的叙述上我们力求简洁，但还要有合理的完整性。根据使用这些题材的课堂经验，多数学生希望多一些例题以说明分析方法，指出典型工程电路的应用，我们认为这由教师本人根据经验和爱好选择更为适宜。如果本课程包括有实验部分或有一门实验课并开，那末实验所用的电路就是最自然的例子，而且必将引起学生的高度兴趣。

计算机在本书中的作用

书中许多材料必须用数字计算机来引导学习、改进教学方法，特别是用了计算机可以：

1. 通过简单的非线性器件模型，对常见的电子（晶体管）电路进行分析。
2. 推广线性化、离散化概念的讨论。这些概念在计算机定向的过程中提出，恰如变换法在解析求解过程的基础上的形成是一样的。
3. 发展关于在理解和计算之间选择的早期评价，这将影响到手算定向设计和计算机定向设计。

计算机求解问题中，算法计算和解析方法之间没有联系的只是少数。例如，第三章和第五章的迭代法，就在第六章中与电阻性网络的小信号分析联系起来。而小信号分析和大信号分析，又再次在第十四章中与动态电路联系起来。

一般说来，算法的简单性和普遍性不能同时兼顾时，我们总是选择最简单的能代表最有权威的现代技术的算法。因此，我们在第十三章解联立的一阶微分方程时，用的是欧拉法，而不是龙厄-库塔法，因为前者容易理解。更有效的方法在某些习题中讨论。毫无疑问，初级课本中是不可能对计算方法作深入探讨的。例如数值稳定性这样一个很基本的概念只是在第十四章中间才提到；同样，用于二极管的牛顿迭代法的改进形式，也没有在第三章或第五章讨论；使得当代计算机辅助设计程序能有效工作的许多深奥微妙的数值计算技术（好象“诀窍”那样）当然不在本书范围之内了。

至于在初级课程中使用现成的电路分析程序，我们感到存在着尖锐的意见分歧，甚至在热衷于把计算机定向的材料包括进去的教师也如此。然而，非线性电路的小信号分析必须以直流分析为其前提。直流分析在第六章详尽介绍以后，在本书的其余部分，就一直用于放大器的动态分析以及近似线性的电路。显然，重新设计这类问题的直流分析阶段的程序，将浪费学生的时间和计算资源。因此，我们在教师指导书中包括了一个简单的然而有相当普遍性的非线性直流分析

程序 DCAP。有些教师熟悉了 this 程序以后，会倾向于用类似的程序进行(线性)动态分析。在这种情况下，我们发现 CORNAP 程序(参考文献 11.5)很有用。它不但能解状态方程，还能求极点、零点、频率以及瞬态响应。

对本书中用计算机辅助解题的新颖教学方法做一些说明是适宜的。第五章非线性电阻性网络的普遍分析法，是基于使用叫做伴随模型的一种非线性元件模型。这样处理将引导学生以普通的简单形式研究有效的牛顿分析法。这样处理还有一个好处，就是在第六章很自然地引进了线性增量模型和分析，这对于许多电子线路的处理是有用的。在第八章和第十三章论述了线性动态电路以后，最后才在第十四章中将伴随模型的应用扩展到线性和非线性动态电路的数值积分法。

电子学课程的配合

虽然我们从电子线路中自由地选取许多实例，使本书显有特色的大信号和小信号分析方法是建立在器件解析模型的基础上；与此相反，许多传统的电子线路设计是用图解法和分段线性化法的器件模型来完成的。我们不企望以使用这本书为教材的课程去代替通常的初级电子线路课程，只是希望它将作为这门课程的启发入门。

我们看到，在学生做了包括有晶体管电路的习题以后，他们的熟练程度增加了，使我们能迅速地进行后续电子课程。我们可以选用此额外的可利用的时间引入封装电子学的论题，致使学生在三门电路及电子课程里就能对现代电子线路设计有所了解。

非电专业学生可将本书看作是将通常一连串三门电路及电子课压缩到两门的一种尝试。这是因为在本书的习题中包括了大量电子线路的大信号和小信号模型，既有功能的考虑也有详尽的分析。例如，我们可以企望学生通晓简单放大器和数字计算机电路，甚至可以验证大信号动态电路的详细性能。但他对电子器件运行的物理原理将学得很少，而且不熟悉许多电子线路设计的要领。这个内容对于某些(例如，兴趣在计算机工程方面的)学生来说已足够了。

与实验课的关系

常常有一门实验课和这门电工入门课相配合，以增进学生的学习积极性和“实际”经验。我们觉得第三章、第五章以及第十四章对于简单数字电路和放大器电路分析的介绍，可以作为某些重要实验(不论是真做还是用计算机模拟)的基础。我们可以采取例如实验室讲课的形式尽量多介绍一些数字电路功能的应用。当然，对动态电路按照一般标准的论述，就足以提供在通常实验课中观察频域和时域现象的可能。

课时计划

初级电路课可以有不同的开设法，从紧张一些的每周四学时一门一学期的课，到每周三学时两门两学期或一个半学期的课。本书大部分的内容均曾在密执安大学以两门课连续开设，每周三学时三分之一学年。

在我们的课程组里,第一门每周三学时的课集中在线性与非线性电路的静态分析(第一章至第六章),也包括某些动态电路分析(通常是一直讲到第八章),这对电和计算机专业的学生来说是必修的。计算机专业的计划不要求学第二门课;第二门课通常接着继续讲第九章到第十五章所论述的动态电路。与此同时还有一门也是每周三学时三分之一学年的课程伴随开设,介绍许多通常在初级电路课程中讲授的数学:常微分方程、付里叶级数、复变数、拉普拉斯变换理论。教师如要在这本电路课程中讲述这些内容,则可用第十一章和附录C的材料。

为了帮助计划其它课程的组合,我们将指出在本书的材料中哪些是主要的内容,哪些是作为选修的内容。选学部分在后面课文中不再用到,但可在习题中涉及。

必学(第二章至第六章)

$i-v$ 特性曲线(第二章)

受控电源(第二章)

二极管与(双极型)晶体管模型(第三章)

放大器基础知识(第三章)

数字电路基础知识(第三章)

矩阵与行列式(第四章)

高斯消去法(第五章)

伴随模型(第五章)

DNET 程序(第五章)

全晶体管模型(第五章)

DCAP的应用(第五章)

增量分析及小信号分析(第六章)

选修

拓朴学分析(第四章)

逻辑电路和记忆电路(第五章)

互感(第七章)

卷积(第九章)

潮流分析(第十章)

小信号动态分析(第十一章)

状态变量分析(第十三章)

计算机定向的瞬态分析(第十五章)

二端口分析(第十五章)

变压器(第十六章)

模拟(第十六章)

付里叶分析(附录C)

物理电子学基础知识(附录 D^①)

当计划计算机在本课程中应用的程度时,要注意只要书中给出了程序,就不需要再去选择程序。离散化或线性化概念始终是重要的;只有少数场合教师需要对一个概念做详细地论述才编制程序。例如,我们指定了有代表性的问题,其中有第三章中的数字电路或放大电路的问题,第五章 DCAP 问题(以后可用于第六章的小信号分析)以及第十四章的瞬态分析问题(可由第五章的程序为依据),在整个 78 学时的课程中,这个内容是合理的也是适中的。

要注意第七章以后的顺序可以作某种程度的变动。例如第十六章前半部分变压器那一部分,可以直接在第七章互感以后讲述。第八、九章和第十、十一、十二章是传统的线性电路分析的固有部分。但完全有理由将第十四章中动态分析的计算方法放到第七章储能元件引言之后的无论什么地方。这样的变动可以避免到了期末,计算设备的负荷过重。

为了帮助初次使用本书的教师处理好三、五、十四章计算机定向的内容,同时提供以下几点以辅助教学:

- 1、在这些章末给出一些不用计算机的简单习题,以说明解题原理。
- 2、在教师指导书中收集了超过二十个 FORTRAN 程序,作为书中习题的解。这可使教师适应当前的教学方法,而不冒指定不切实际或者数值不合适的习题的风险。

可供用的程序

书中列出的程序,以及教师指导书中的 DCAP 程序都可以向著者索取,提供的程序是以穿孔卡片的形式或者标着 800 位/吋、九个磁道的、供用户相容的操作系统磁带。

D·A·卡拉汉

A·B·麦克尼

E·L·麦克马洪

^① 原书误为附录 C。——译者注。

第一章 系统分析及电路分析导论

1.1 工程系统的分析

所谓工程系统，是共同实现某一有用功能的物理部件的组合。因为这些部件常基于电学现象，所以电工工程人员在这些系统的设计中担任着重要的角色。这可用图 1.1 来说明，图中示出了一种下一代汽车所需的一些工程系统。这种汽车的轮胎压强、引擎情况、排气成分都可以用电子系统来监控。我们还可以考虑一种雷达导向的防撞装置，包含：(1)雷达发射机及接收机；(2)控制燃料与制动的电气系统；(3)决定什么时候有撞车危险的计算机。象这样的一些系统完全属于现代电工工程人员专业范围之内。

这种系统能否成功，在很大程度上取决于设计人员工程上的判断与分析能力。判断主要是以该设计领域的目前工艺水平的知识和经验作为根据的。而分析的技巧则通过用恰当的数学方法去分析“典型”系统的实践来取得。用数学来解电路问题的这种分析方法，即是本书的内容。

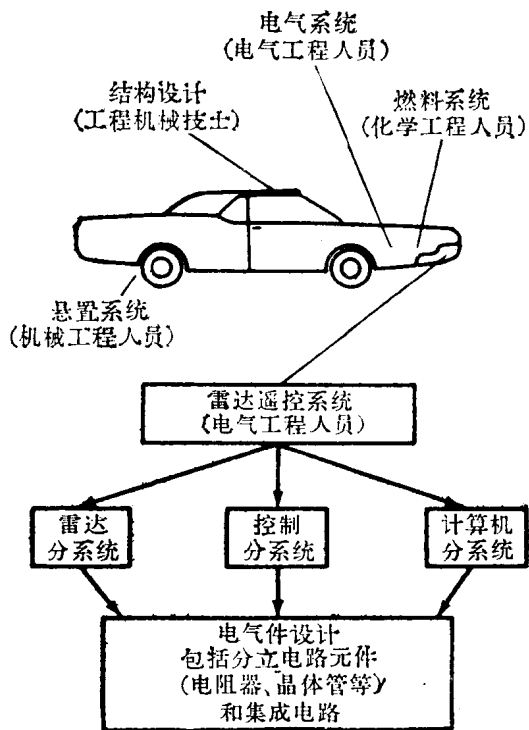


图 1.1 一个工程系统的例子：雷达导向汽车

1.2 电路分析

电路部件及电路性能的研究，起着这样几个作用：

第一，正如图 1.1 所示，几乎所有电气系统都需用电路部件。如果雷达、控制系统、或计算机系统的设计人员对电路部件没有基本的了解，他就没有为承担系统设计的任务做好充分的准备。

第二，工程设计过程的基础是系统的分析，它可以看作包含以下几步：

1. 分析设计对象，以确定它们是否与我们所能找到的部件的物理特性相适合；
2. 挑选可能用到的部件，确定一个初步的设计方案；
3. 导出部件的数学模型；
4. 分析一下这些部件在初步设计方案中的相互关系，以便列出一组数学方程，这些方程式就是整个系统的模型；

5. 解这些方程式, 将系统模型和设计对象之间的性能做比较(必要时修改方案);
6. 把这个系统模型的性能与原型物理系统的测量结果相比较;
7. 如有必要, 需修改部件的数学模型, 以改正系统模型中的缺点;
8. 使系统的性能最佳化。

虽然我们没有时间去熟悉设计中的这一切步骤, 但书中对步骤 3 至 5 做了详尽的阐述。

最后, 对我们要讲的某些电路及其功能, 许多读者至少将会粗略地懂得一些。从这一很实际的意义来说, 可以把我们分析的结果和可能观察到的电路工作性能联系起来。

1.3 电路功能

我们之所以要研究电路, 就在于它具有各式各样的功能。这些功能可能有很多分类法。下列选几条来说明较熟悉的功能。

1. 放大。将输入信号扩大为同样形状的输出信号的线路, 叫做放大器(见图 1.2)。这种功能最常见的例子是立体声和扩音系统中所使用的音频放大器。

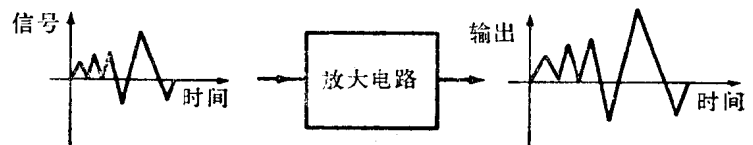


图 1.2 放大电路

2. 能量转换。我们大概都熟悉需要将电插座处的交流(*ac*)电转换为直流(*dc*)电的形式; 这种直流电源在收音机、电视机、电池充电器等等的工作中都是必需的。但在其它的电系统中把直流变成交流这样一种逆过程也是必不可少的, 如汽车用的收音机。

3. 信息处理。信号通常分为模拟的或数字的。前者是时间的连续函数, 对一个物理现象的测量所得便是。数字的信号表示为一系列脉冲的形式, 例如一个数的递次位。每一种信号的应用均由信息内容决定。信息可用电路来改变。如图 1.3 所示, 淹没在噪声背景中的模拟信号, 可以把它滤波出来以便产生基本上很纯的信号。我们都很熟悉的计算机电路可将数字的输入信息

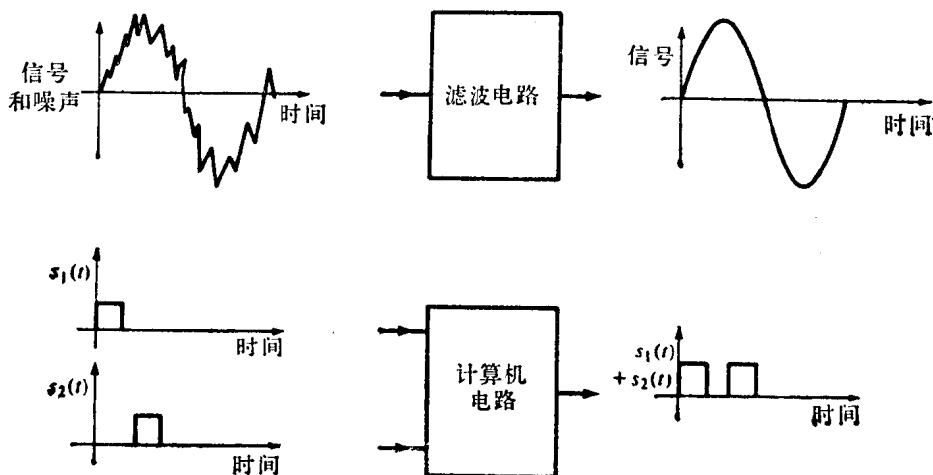


图 1.3 模拟与数字信息处理

加以运算,产生数据输出形式的新信息。

4. 存贮。用以把信息保留等待以后处理的电路实现了存贮功能。虽然有各种存贮模拟信号的存贮器,但最常用的都是数字计算机中的存贮电路,一台现代的计算机有几百万个这样的存贮元件(图 1.4)是很普通的。

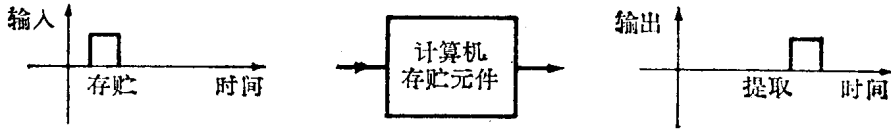


图 1.4 数字存贮功能

由于在本书中会遇到种种电路,读者可能会感到按上述类型把这些电路加以归类是有帮助的。

1.4 基本分类

我们将要知道,许多电路的类型或分类,都是以电路部件某些特性为依据的。然而本书章节安排次序的原则,是依照某一占优势的特性来确定什么时候研究什么电路的。

为说明这种特性,我们不妨来考虑一下图 1.5(a) 的简单照明系统。如在任一指定时刻(定为 $t=0$)合闸 S ,灯“好象”立即亮了。但我们根据基本的物理学知道并非如此,至少也要有一个光速走过 100 呎的时间延搁,灯才可能亮。这个时间是

$$t = \frac{\text{距离}}{\text{光速}} = \frac{100 \times 12 \times 2.54}{3 \times 10^{10}} = 1.016 \times 10^{-7} \text{ 秒}$$

即,约 0.1 微秒,而如果你站在开关处,你就须再过 0.1 微秒才能看到灯光! 十分之二微秒好象时间很短,在照明线路中确是如此;但在家用 23 吋的电视机上就代表 1/16 吋的长度;而现代计算机在这段时间内可以容易地把两个数相加,其精确度达到小数点后十位。传输时间对我们研究问题是否重要这一点,会大大影响我们分析的方法。

如果我们在图 1.5(a) 的电路中进行测量以便精确记下灯的亮度变化,我们就得到图 1.5(b) 所示的曲线,其形状取决于灯丝、电源及导线的电阻以及导线的几何形状。在任何情况下,只是在经历了一个瞬态时期以后,亮度才达到一个稳定值。

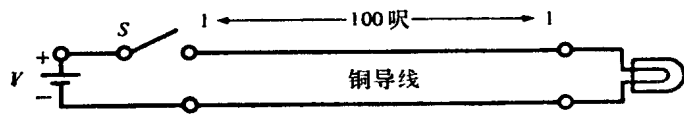
如果我们关心的只是稳定值,就可以用代数方程来描述这一照明电路,即欧姆定律(见第二章)

$$v = Ri$$

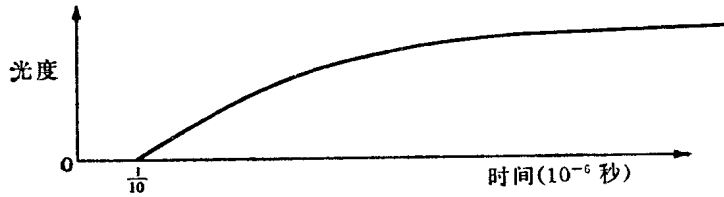
我们以后再正式研究这个定律,现在只需指出, v 和 i 是即时的相互跟随的。这就是图 1.5(c) 示出的照明电路的电阻性模型,或叫做静态模型。

为了得出图 1.5(b) 所示的时间函数的波形图,我们须用由微分方程来描述的动态模型。如图 1.5(c) 所示,可用一个电感器(见第九章)来代表那 100 呎连线的贮能特性,以构成一个粗略的动态模型,所得到的微分方程将是下面的形式

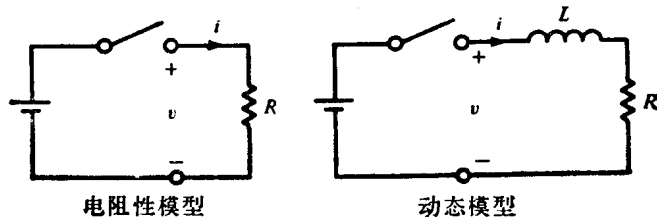
$$v = L \frac{di}{dt} + Ri$$



(a)



(b)



(c)

图 1.5 简单照明电路, 其瞬态响应及其模型

本书中, 网络的非动态(代数的)特性在第二章到第六章研究, 而动态特性则放到第七章到第十四章研究。因为代数方程的求解比微分方程的求解叙述起来要容易些, 所以读者会看到本书的前部分是用来建立网络概念及简单的数学解法, 后部分更加需要数学, 和更加依赖于读者对微分方程这门课程事先掌握或正在掌握的情况。

第二章 网络分析导论

2.1 电路性能的物理基础

电荷

基本电学量是表示电荷这种物质的性质的。因为电路利用电荷去达到它们的目的，所以在分析电路之前先讨论一下“什么是电荷”好象是很自然的。这是基础物理课程入门的内容，读者想必从那里学过两个相邻电荷之间的作用力、在磁场中的力等等。不过这种题材对于学习电路分析并不重要，我们通常关心的只是电荷在导线中、在电阻中和在电池中的流动等等，我们认为它们遵守一些相当简单的定律。

对我们唯一直接有用的物理定律是库仑^①定律

$$F \sim \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.1)$$

式中 F 是作用力， r 为 q_1 和 q_2 两电荷之间的距离。

电荷有两类：正电荷与负电荷，并且同性电荷相斥、异性电荷相吸；因此如认定式(2.1)中的力是推斥力，那么当两电荷的符号相反时，力是吸引力，这个力就是负的。

电流

我们研究电路时主要关心的是运动的电荷。假设电荷沿一导线流动，每秒有 1 库仑的电量穿过导线中的某一点，则这个导线的电流为 1 安培^②。那就是说：1 安培 = 1 库仑/秒。

只说 1 库仑/秒的电量经过某指定点是不完善的描述，因为这既没有阐明电荷的种类(正或负)，也没有阐明它流动的方向。我们可以采用一种约定，以照顾到这两个方面的问题。所以我们假定电流是由于正电荷运动而引起的，并且我们又取电流的正方向作为正电荷运动的方向。如果我们说有 1 安培电流在导线中自左向右流过时，实质上所说的是或者正电荷以 1 库仑/秒的速率从左向右，或者负电荷以 1 库仑/秒的速率从右向左运动。

电流用叫做安培表的仪器来测量，其略图示于图 2.1 中。电流表标有参考方向：一端标明

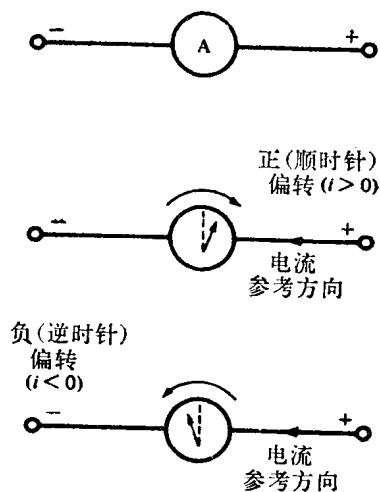


图 2.1 安培表的表示法

^① 查理·奥古斯廷·库仑(1736—1806)，法国物理学家。1786—1789 年间陆续发表了研究报告，说明他对电的斥力和吸力所进行的测量，并建立了以他的名字命名的定律。

^② 安德烈·马利·安培(1775—1836)，他在巴黎多科工业大学担任数学教授时开创了电磁学。1820 年 9 月 11 日他获悉 H·C·奥斯特发现电流对磁针有影响，于是在七天之后他向科学院提出了一篇报告，解释了类似的现象。

为+号(或红色), 另一端为一号(或黑色)。这就确定了安培表的参考方向从正(红)端经安培表通向负(黑)端。假如安培表用顺时针偏转指示正值, 这意味着电流的真实方向和参考方向一致, 而负值就意味着电流的真实方向和参考方向相反。

例题 2.1

设有如图 2.2(a) 的简单电路, 分析的第一步是指定电流(以及电压, 下文即将讲到)的参考方向。如图 2.2(b) 所示, 这样指定的方式是完全任意的, 也不需要预先对电路性能有什么了解。用本书的方法对电路经数学分析后, 假设我们求得的电流有如图 2.2(c) 的数值, 我们会看到其中某

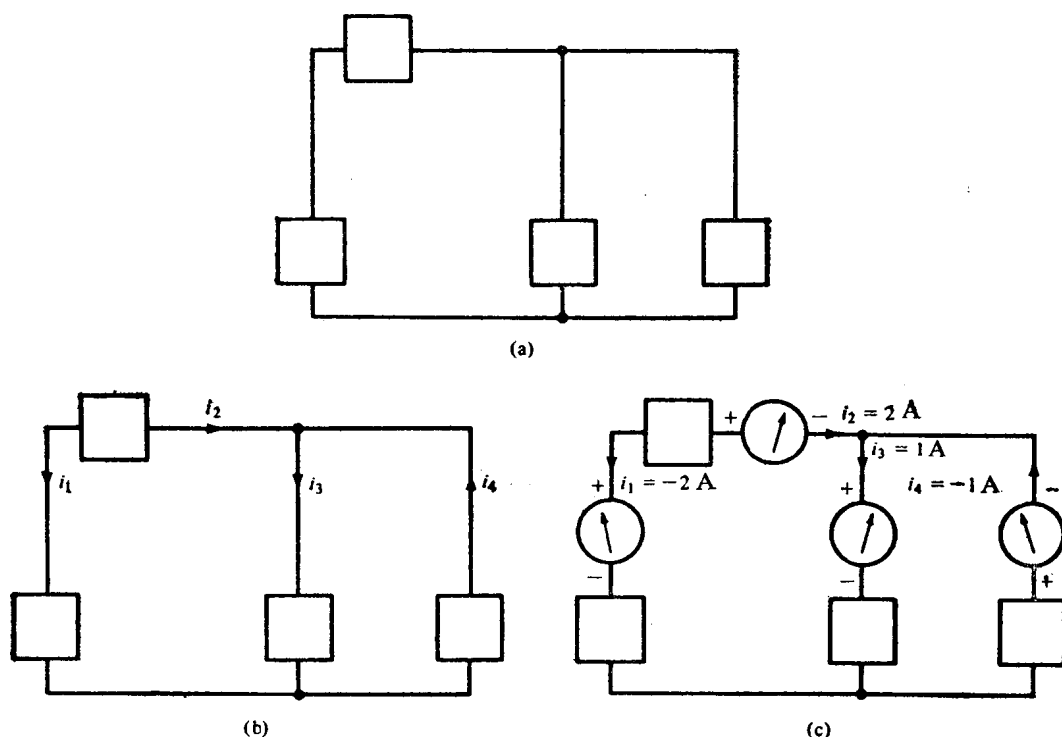


图 2.2 参考方向的应用(方框表示电阻电池等等)

(a) 已知电路; (b) 指定参考方向; (c) 计算结果。

些电流如 i_1 是负值, 这意味着在实际电路中, 电流(正电荷)流通的方向和我们的参考方向相反。这由安培表偏转的方向可以看出。

电压

通常电荷运动时有能量(功)与它相联系。假如在电路中从 a 点到 b 点移动正电荷 q 需要 w 焦耳的能量, 在 a 和 b 之间就有电压^③ $v = \frac{w}{q}$ 。我们说“ b 点相对于 a 点为正”。另一方面, 如果电

③ 亚历山大·伏打(1745—1827), 意大利物理学家。验电器和伏打电堆(蓄电池的前身)是他发明的。

荷由 a 移向 b 时电路给电荷以能量, 则 a 相对于 b 为正。

任意两点间电压和电荷移动的路径无关。而且在两点间即使没有电荷从一点向另一点运动, 电压依然存在, 因为电压是一个量度, 它表示如果有电荷运动时需要能量的多少。

电压需要参考极性, 正如电流需要参考方向一样。参考极性可将每一对点分别记为“+”号和“-”号来实现。正电压就是极性和参考极性相同的电压, 负电压是极性相反的电压。在实际中, 常常不用这样的符号记法而是沿用惯例将“+”号置于参考电流箭头的尾部, 将“-”号置于头部。这样只要给出电流的箭头或电压的“+”与“-”, 则电压与电流两者的参考方向就会自动地确定出来。

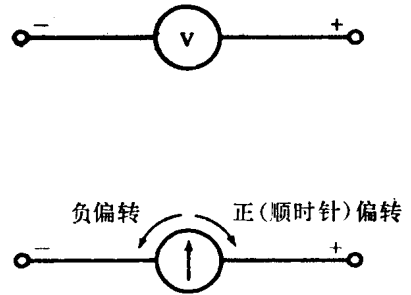


图 2.3 伏特表的表示法

电压用叫做伏特表的仪器来测量, 如图 2.3 所示。使用伏特表时参考极性是很重要的。假如伏特表用正向偏转(顺时针)指示正值, 这意味着正电荷从表的“-”端移动到“+”端需要做正功。

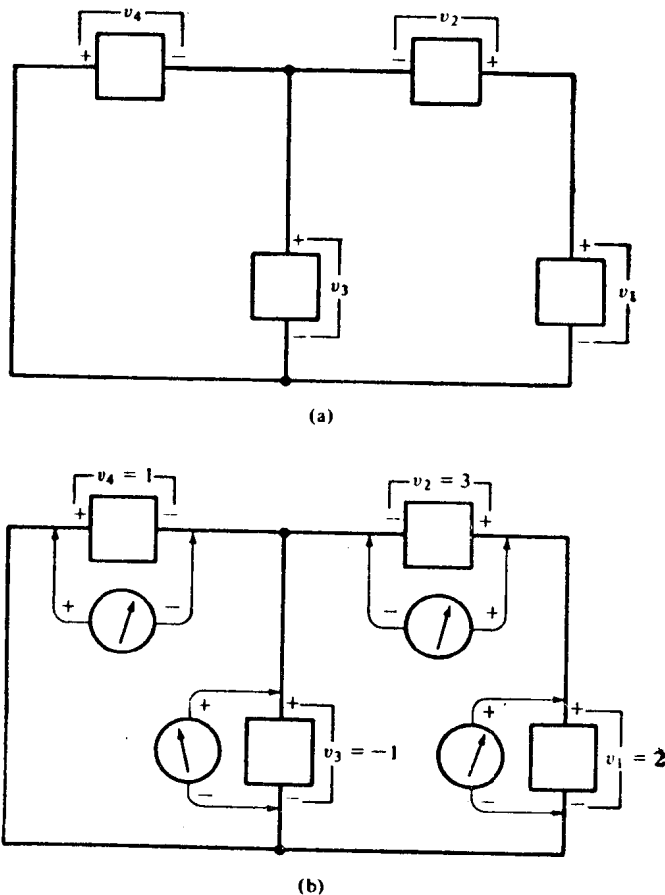


图 2.4 电压参考方向的例子

(a) 指定参考方向;

(b) 分析的结果。

例题 2.2

设图 2.4(a) 电路指定的电压参考方向如图中所示。计算后得到的电压数值在图 2.4(b) 中表明。正如电流的情形一样, 它们可能为正也可能为负。假如伏特表连接如图所示, 偏转的方向将反映出计算结果的符号。

功率

我们考虑一个典型的电路元件, 电流和电压的参考方向如图 2.5 所示。因为 v 是移动 1 库仑电量由 b 到 a 所需做功的焦耳数, 如果 i 是由 a 到 b 每秒运动的库仑数, 不难看出, 它们的乘积是焦耳/秒或瓦特, 这就是被元件所吸收的功率, 即

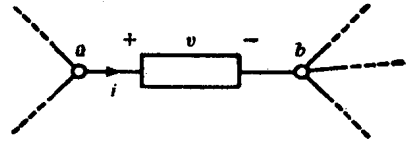


图 2.5 典型元件

$$vi = \frac{\text{焦耳}}{\text{库仑}} \times \frac{\text{库仑}}{\text{秒}} = \frac{\text{焦耳}}{\text{秒}} = \text{瓦特} = p \quad (2.2)$$

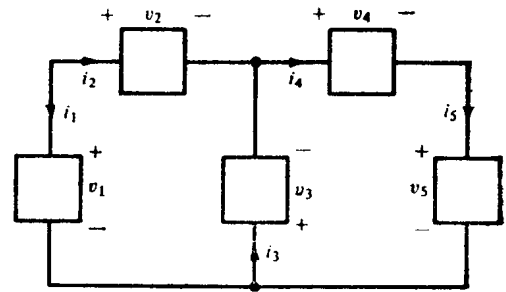
假如按惯例将电压参考“+”极性置于电流参考方向的尾部, 则正的 p 值意味着功率被元件所吸收或耗散; 而负值则意味着元件供给电路其他部分功率。即正 p 是元件吸收的功率; 负 p 意味着元件产生功率。电功率被吸收时当然不是丢失, 而只是转换为其他形式的能量 (热、光、等等)。

例题 2.3

在图 2.6(a) 中电流和电压的参考方向按图 2.5 的常规选择。假如计算后得出如图 2.6(b) 的电流和电压, 则被吸收的功率由 $p_j = v_j i_j$ 表示。

读者应当注意到指定参考方向时, 或者由 i_j 和 v_j 计算 p_j 时, 我们并没有涉及到电路元件的类型。知道的读者能够猜出具有正 p_j 的元件是电阻器 (吸收功率), 而具有负 p_j 的元件是电池, 它可以看作是产生功率的元件。正如下面的讨论指出的那样, 这种和物理上的联系并非总是可能的。

通常希望将电路的某一部分看作为一个单一元件, 这样做并不需要改变功率的计算方法。只要我们认为参考电流流入参考电压的正端, 我们就会自动算出被看作是单一元件的部分所吸收的功率。例如图 2.7 中乘积 $p = v(\pm i)$ 给出了虚线右边或是左边电路所吸收的功率, 它依赖于在电压正参考点上的电流参考方向是指向右端或是指向左端。从例 2.3 中得 $v = -v_3 = 4$ 伏以及 $i = i_2 = -2$ 安, 于是电路右边吸收的功率为 -8 瓦, 所以电路的这一部分产生了 8 瓦的功率, 虽然其中有一个元件 ($j=4$) 是吸收功率的。



(a) 指定参考方向;

j	v_j	i_j	p_j
1	1	2	瓦
2	-3	-2	瓦
3	-4	1	瓦
4	-3	-1	瓦
5	7	-1	瓦

(b) 分析结果。

图 2.6 从电流和电压计算功率