

线性电路

上册

[美] R. E. 斯科特著

郑翔 董达生 译
沈鹤庭 盛剑桓

高等教育出版社

线 性 电 路

上 册

(时域分析)

〔美〕 R. E. 斯科特著

郑 翔 董达生 译
沈鹤庭 盛剑桓

高 等 教 育 出 版 社

本书系根据 1960 年出版的斯科特 (R. E. Scott) 著“线性电路”(Linear Circuits)一书译出的。

本书内容包括线性电路的时域分析与频域分析。全书分上下两册出版。上册包括第一至第十四章及附录,属于时域分析部分;下册包括第十五至第二十三章,属于频域分析部分。上册内容包括从模型理论和激励反应关系来研究电路的方法、电阻电路的各种计算方法、对偶电路、电阻电路的简化、电阻电路中的能量与功率、储能电路中的能量与功率、奇异函数、电路微分方程、储能电路中阶跃函数及脉冲函数激励的时域反应、附录(复杂电路的瞬变过程)。

原著是作为美国电气工程系“线性电路”课程的教科书,但可供我国高等工业院校无线电、电信、自动控制及电机类各专业学习“电工基础”课程时参考。对于以上专业的研究生及工程技术人员也有参考价值。

本书是由山西矿业学院郑翔、董达生、沈鹤庭、盛剑恒同志翻译的。

线 性 电 路

上 册

(美) R. E. 斯科特著

郑 翔 等 译

北京市书刊出版业营业许可证出字第 119 号

高等教育出版社出版(北京景山东街)

商务印书馆上海厂印装

新华书店上海发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 K15010·1198 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 16 $\frac{13}{16}$

字数 436,000 印数 0,001—5,000 定价(7) ¥ 1.90

1965 年 12 月第 1 版

1965 年 12 月上海第 1 次印刷

譯 序

线性电路是电路理论的基础，也是所有电工技术及电工理论的基础。它是我国当前电机、电信及无线电等系各专业所开设的“电工基础”课程中的一个重要组成部分。国外有些高等院校单独地把“线性电路”课程列为电气工程专业的一门入门课程，而且在教材内容的体系上也各不相同。有的以储能及无损耗电路（即电容电路）为基础，有的则以耗能电路（即电阻电路）为基础；有的把电路分为直流电路及交流电路；有的则把电路分为时域电路及频域电路。同时在计算电路问题时所使用的数学知识也各有不同。为了了解与研究国外有关课程的情况，为有关课程的教材建设提供资料，我们结合学习与研究国外教材，译出美国东北大学教授 R. E. 斯科特所著的“线性电路”一书，它可以作为“电工基础”课程中电路部分的一本较好的参考书。

该书绝大部分内容是讨论网络分析，把网络分析分为时域分析和频域分析。时域分析讨论了由阶跃函数与脉冲函数激励的电路，而频域分析则讨论了由正弦函数激励的电路。全书主要分为四个部分，即电阻电路理论、时域瞬变过程、稳态交流电路理论和频域瞬变过程。自始至终地以电路理论的激励反应关系来研究有关网络输入与输出的关系问题。全书以第一部分的电阻网络原理为基础，导出许多有用的网络理论和许多解决网络问题的普遍方法，去讨论与解决其他的网络问题。书中包含有不少内容，如虚回路电流法、虚节点电压法、诺尔顿的等效电流源定理、巴莱特平分定理及其逆定理、格阵网络的解法以及用振幅与相位反应曲线表征网络、用 s 平面法及 $\log\text{-db}$ 图求反应曲线、功率密度频谱和能量密度频谱等，这些在我国目前的“电工基础”教材中是很少或者没有阐述的。此外在解决网络问题时，还引入了代数拓

朴、奇异函数、折积理论等数学工具，这在一般的“电工基础”教材中也是很少见的。

原书有以下几个优点：（一）由浅入深、循序渐进地叙述问题，明了易懂；（二）重点突出，难点分散，每章内容都有侧重，份量也比较均匀；（三）章节之间联系好，全书有绪言，每章开始有引言，并在这里首先重点而扼要地介绍所要讨论的内容及其特点，节与节之间，章与章之间的过渡比较自然，每章之后除文字小结之外，还特别列出一节，以公式及图例进行小结，并反复地以对比的方法进行巩固；（四）举例生动，能适当地联系实际，有助于理解一些抽象的概念；（五）每章末附有参考文献，并对参考文献有关部分的特点作了简要的介绍与评价，有助于读者进行深入研究；（六）每章末附有习题，习题是按章节次序编排的，紧密地结合了各节的内容，计算简单，形式多样，着重概念，注意启发读者进行思考，书末还附有答案。

原书存在着如下的一些缺点：（一）不少地方作者还掺杂了一些错误的思想观点；（二）作者笔误及印刷错误较多；（三）有些部分叙述过于繁琐；（四）原书没有涉及三相电路理论，只讨论了单相电路理论。书中所用符号与我国目前教科书沿用的符号不尽一致。例如由于作者不主张在电路理论中引入“电动势”的概念，故以 E 、 e 及 V 、 v 来表示通常的“电动势”及“电压”的概念。作者虽然引入了“电位”的概念，但却也用 E 及 e 来表示。此外如磁链的符号，我国教科书沿用 ψ ，但原书中却用 λ ，正弦量的复数表示法，我国沿用的符号为在物理量的符号上加“ $\cdot$ ”（如 $\dot{I}$ ），但原书中却只用物理量的符号来表示（如 I ）。

针对以上的缺点，在不影响内容完整的前提下，我们在译本中已将那些错误的思想观点删去。对原著中作者笔误及印刷错误，也尽力根据文意加以改正；为了节省篇幅，对原书中明显错误的改正，中译本里不一一加注。此外，由于时间仓促，未能对习题的答案进行核对。至于符号等其他问题，由于牵涉范围较大，已非译者力所能及，故仍按原文

译出,希望读者在阅读时注意。最后,由于译者水平所限,误译及错改之处在所难免,所作之更正,也恐有挂一漏万,敬希读者指正,特先致以谢意。

郑 翔 董达生

沈鹤庭 盛剑桓

1965年6月

原 序

对于学习电气工程的学生来说,这部“线性电路”可作为电气工程的第一门课程。全书分为两册,想用最少的时间,在电路理论方面达到最大的深度。为了达到这个目的,电路以线性模型提出,并把电路理论看作是应用数学的一个分支。本书的目的是要在电气工程课程计划中较早地打下线性电路的基础,电气工程的全部大学课程就可建立在这个基础上。根据这一设想,电子学发展成为含源元件和非线性元件的电路理论,电机和换能器发展成为时变元件的电路理论,电磁场发展成为分布参数的电路理论。电路理论的信号分析在信息论和通讯理论中得到了发展,同时电路理论中的激励反应关系在系统分析中导至合乎逻辑的结论。

本书的内容可分为四个主要部分:

1. 电阻电路理论,
2. 时域瞬变过程,
3. 稳态交流电路理论,
4. 频域瞬变过程。

头两部分在第一册(时域分析)中,后两部分在第二册(频域分析)中。第一部分论述电路理论的基本定律、网络拓扑的基本原理、回路电流和节点电压以及求解二端网络和四端网络问题的方法。利用电阻电路原理的骨架,我们得以向读者介绍各种电路理论方法的一个简单而完整的内容。第二部分包括简单电路的瞬变过程,而以时域的信号分析及折积理论的要点为结尾。

第三部分研究网络对单频正弦量的反应。时域电路和频域电路是很清楚地划分开来了,并且第一部分所有的方法都用于频域电路。从 8

平面和 $\log\text{-db}$ 图可以得到振幅和相位的反应曲线。第四部分用频域方法来处理瞬变过程,同时提出傅里叶法和拉普拉斯法,并把重点放在电路对复杂激励波的反应这个问题上。

两册中有足够的材料供大约一年半(约 150 学时)的电路理论课程用。在东北大学,两册在四个学期中讲完。本书的初稿曾经在其他学校用作两学期和三学期的课程。如果学生在数学和物理方面具有较好的基础,则第一册中有些材料可以省略。第一册用作一学期课程时,建议以 2、3、4、5、10、11 和 12 章为重点。

R. E. 斯科特

1960 年 7 月

上册目录

译序.....	viii
---------	------

原序.....	xi
---------	----

时域分析

第一章 绪论.....	1
-------------	---

1-1. 模型理论.....	1
----------------	---

1-2. 在实际系统中的激励与反应.....	3
------------------------	---

1-3. 电路变量: 电流与电压.....	4
-----------------------	---

1-4. 电路参数: 电阻、电感和电容·电源.....	10
-----------------------------	----

1-5. 电路定律 $\sum e = 0$ 与 $\sum i = 0$	18
---	----

1-6. 小结.....	23
--------------	----

参考文献.....	24
-----------	----

习题.....	25
---------	----

第二章 电气网络的 $2b$ 方程组.....	29
-------------------------	----

2-1. 引言.....	29
--------------	----

2-2. 串联与并联电阻器.....	30
--------------------	----

2-3. 电源支路.....	34
----------------	----

2-4. 可用算术方法求解的问题.....	41
-----------------------	----

2-5. 代数拓扑学.....	46
-----------------	----

2-6. 求解网络问题的 $2b$ 法.....	50
--------------------------	----

2-7. 小结.....	58
--------------	----

参考文献.....	60
-----------	----

习题.....	61
---------	----

第三章 回路电流与节点电压.....	70
--------------------	----

3-1. 引言.....	70
--------------	----

3-2. 回路电流.....	71
----------------	----

3-3. 虚回路电流.....	76
-----------------	----

3-4. 节点电压法.....	79
-----------------	----

3-5. 虚节点变量.....	84
-----------------	----

3-6. 对偶性.....	87
---------------	----

3-7. 线性与叠加性.....	92
------------------	----

3-8. 小結	98
参考文献	100
习题	101
第四章 表征二端电阻网络的方法	109
4-1. 引言	109
4-2. 用施加电源的方法求等效电阻	110
4-3. 用网络简化的方法求等效电阻	113
4-4. 对称网络的电阻	118
4-5. 梯型网络的电阻	121
4-6. 含源支路·戴维南定理·诺尔顿定理	125
4-7. 替代原理	130
4-8. 小結	134
参考文献	137
习题	137
第五章 表征四端电阻网络的方法	148
5-1. 引言	148
5-2. 四端网络的等效电路·互易原理	149
5-3. 三端与四端网络的直接简化	155
5-4. 用 r 与 g 参数简化四端网络	161
5-5. 四端网络的对称性	168
5-6. 对称格陣	172
5-7. 小結	180
参考文献	183
习题	184
第六章 电阻电路的功率和能量	192
6-1. 用支路电流与电压表示的功率	192
6-2. 用回路电流与节点电压表示的功率·二次方型式	194
6-3. 等效二端网络中的功率	197
6-4. 等效四端网络中的功率	201
6-5. 最大功率原理	206
6-6. 功率与叠加原理	209
6-7. 小結	211
参考文献	212
习题	213
第七章 储能电路导论	221
7-1. 引言	221

7-2. 伏安关系与储存在电路中的能量	223
7-3. $t=0$ 与 $t=\infty$ 时的计算	229
7-4. 电阻网络的延伸	234
7-5. 储能电路中的激励反应关系	240
7-6. 互感	243
7-7. 小结	248
参考文献	250
习题	251
第八章 微分、积分与奇异函数	259
8-1. 引言	259
8-2. 函数的微分	260
8-3. 函数的积分	262
8-4. 微分和积分的关系	266
8-5. 奇异函数	268
8-6. 奇异函数在表示波形时的应用	274
8-7. 小结	281
参考文献	283
习题	284
第九章 电路微分方程	288
9-1. 引言	288
9-2. 由内部的能量储存激励的一阶系统	290
9-3. 由阶跃函数激励的一阶系统	296
9-4. 由正弦波激励的一阶系统	299
9-5. 由初始能量储存激励的二阶系统	302
9-6. 由阶跃函数激励的二阶系统	309
9-7. 小结	311
参考文献	314
习题	315
第十章 单一元件的时间反应函数	322
10-1. 引言	322
10-2. 电阻、电感与电容的阶跃反应	323
10-3. 电阻、电感与电容的脉冲反应	325
10-4. 初始条件当作阶跃与脉冲电源	328
10-5. 同一类型元件的网络	332
10-6. 小结	340
参考文献	342

习题	343
第十一章 $R-L$ 与 $R-C$ 电路的时间反应函数	350
11-1. 引言	350
11-2. $R-L$ 电路的脉冲反应	352
11-3. $R-L$ 电路的阶跃函数反应	356
11-4. $R-L$ 电路的倾斜函数反应	358
11-5. $R-C$ 电路的脉冲反应	360
11-6. $R-C$ 电路的阶跃反应	365
11-7. 较一般的单一时间常数电路	367
11-8. 小结	371
参考文献	375
习题	375
第十二章 $L-C$ 与 $R-L-C$ 网络的时间反应函数	386
12-1. 引言	386
12-2. $L-C$ 电路的脉冲反应	387
12-3. $L-C$ 电路的阶跃函数反应	392
12-4. $R-L-C$ 串联电路的脉冲反应	396
12-5. $R-L-C$ 并联电路的脉冲反应	402
12-6. $R-L-C$ 串联电路的阶跃函数反应	405
12-7. $R-L-C$ 并联电路的阶跃函数反应	408
12-8. 瞬态 p 平面	410
12-9. 小结	412
参考文献	419
习题	419
第十三章 对任意激励函数的时域解	431
13-1. 引言	431
13-2. 冲击与脉冲的等效性	432
13-3. 叠积分和折积分	436
13-4. 折积分的解析算法	442
13-5. 折积定理的推广	445
13-6. 小结	452
参考文献	455
习题	455
第十四章 储能元件电路的功率与能量	462
14-1. 引言	462
14-2. 单一元件电路的能量与功率	463

14-3. $R-L$ 与 $R-C$ 电路的功率与能量	467
14-4. $L-C$ 电路的功率与能量	469
14-5. $R-L-C$ 电路的功率和能量关系	472
14-6. 脉冲电路的能量与功率	474
14-7. 小结	480
参考文献	482
习题	482
附录 复杂电路的瞬变过程	490
习题答案	495
英汉名词对照及索引	518

第一章 緒論

在公元前 600 年，迈利特斯城的塔勒斯——古希腊七贤之一——用布摩擦琥珀，并观察到它能吸引轻微的物体。这种现象被称为“电”，这个字是由希腊字“琥珀”转化而来的。有记载的第一次用电是安突斯进行的，他是罗马帝国泰比利斯王朝的自由人。他踏在电鳗身上，遂即治愈了他的痛风病。

自古以来，电的知识已增加了无数倍，电的用途亦然。实际上，所有近代生活的便利条件，都在一定程度上依靠着电。电的课题是如此渊博，以致一个学生不可能凭借自己的力量去发现所有的事实。为了提高效率，他必须将这个课题当作一门系统的科学来学习。

电路理论是电气科学的基本学科。它所研究的是从一个装置到另一个装置的能量传递。在研究时既不考虑装置的内部构造，也不考虑装置 *A* 与装置 *B* 的相互位置关系，而只考虑有多少能量从一个装置流向另外一个装置。由于电的基本功能就是能量的控制和传输，因此，电路理论在电机工程中具有关键作用是不足为奇的。

1-1. 模型理论

科学的每一分支都必须有自己的一套“模型”。当物理学家讲到原子或电子的时候，他并不妄想是在处理真正的实物，而仅仅是在研究一个模型，这个模型的数学方程他是理解的，模型的特性也是他能精确预知的。又如经济学家分析经济状态的变动时，也是在处理模型，他的模型不够精确，因而他从模型所得出的结论相应地也不够可靠。事实上，一门科学的“精确度”就是对其模型与实物之间的相符程度的一种度量。

在电机工程中，我们设法预知以各种方式相互联结的实际电气装置的特性。为了避免实际装置那种难以置信的复杂性和过份的分散性，我们就使用理想化的数学模型来代替这些实际装置。关于模型的问题有两种观点。第一种观点是把模型当作是实际装置的纯粹数学近似表达式。比如，一个真正的轮子，在数学上可以把它看作是一个半径为 R 的圆。第二种观点是把模型当作一种理想化的实际装置。一个“理想”的轮子可看作是完全圆形的、没有质量的，如同数学上的圆一

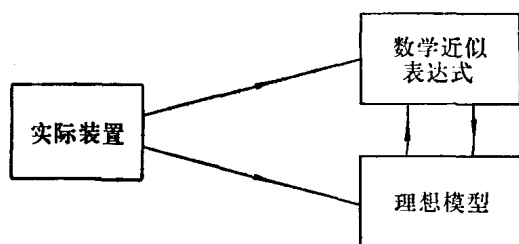


图 1-1. 实际装置和模型

样。两种观点都是有用的。我们拟出模型的主要理由是我们能用数学方法把装置的情况描述出来。然而，我们对理想物理模型的直观认识，往往指导我们的数学技巧。图 1-1 表示实

物与模型之间的关系的方框图。电路就是表示实际电气装置的理想模型。

作为工程师，我们对于电路将不感兴趣，除非它们能够或多或少准确地符合物理实际。这种符合的性质是不容易预见到的。理想电路的运用不是一门精确的科学，而是一个必须在实验室里和通过经验来学习的课题。然而，好几代电机工程师所积累的经验告诉我们，这样的电路和实际电气装置之间的对应关系是非常好的。因此，学生一开头就应该接受这些成果，并且应该象他们一度学习乘法表那样来学习电路理论。假如学生因知道电路理论不是“真正”的工程实际而感到失望的话，那么，他也将因知道电路理论并不过时而喜出望外。当他成为工程师而变得更加熟练时，他就会用更加复杂的模型来代表某一个装置，但操纵这些模型的规则仍然是一样的。每当发明一种新的实际装置的时候，它们也将被化为模型，并用同样的电路理论来处理。

1-2. 在实际系统中的激励与反应

激励与反应的概念是我们对现实世界的概念的基础。我们可以直觉地看到我们周围世界中各个方面的因果关系的例子。有一些例子是可以预知的：当我们用手指在墙上摩擦时，手指即会发热；当我们闭上眼睛时，我们就看不见了。有些例子是不易预知的：天气的变化与许多因素有关，而且不能准确地预知。

在电气工程中可以将激励单独地分离出来而测量其反应。而且，这些结果可以随时随人加以重做。一个典型情况的方框图示于图 1-2 中。输入的激励代表着外加电源供给系统的能量，输出的反应代表着在电路某

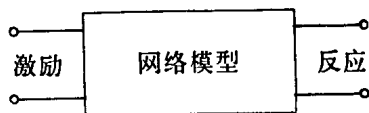


图 1-2. 激励与反应的关系

点上能量的应用。理想化的系统本身即称为电路，或者称为网络。

在许多网络中，输出的反应与输入的激励成正比关系。例如，输入增加一倍，输出也增加一倍。具有这种性质的网络称为线性网络。本书将讨论的线性网络理论构成网络理论的基本核心，并且确实代表着大部分可以用简单的解析法来求解的电工问题。线性的意义是影响深远的。比如我们考虑一个具有一个输入激励和一个输出反应的网络。在输入端加入第二个相同的激励。因为激励的总数加倍了，所以输出反应也加倍。实际上，输出反应是当两个激励电源单独作用时，各自获得的两个单独反应的和。这个结论可以推广到网络中的任何部分中的任何激励电源上去^①。这就称为叠加原理。因为许多电源同时作用下所引起的反应，可以由每个电源单独作用下所引起的反应之和来求得，这样，每次就不需要考虑多于一个的电源。图 1-2 所示的简单激励反应关系即代表线性网络中最普遍的情况，它也是本书的中心主题。

^① 关于线性和叠加性的数学证明见第三章。

本书共分三部分:第一部分讨论类型特别简单的网络,在这种网络中,反应等于激励乘一个常数^①。这个常数概括了网络从输入激励中产生反应的效应,称为网络的反应函数;第二部分内容所讨论的反应函数不再是一个常数,而是时间的函数;第三部分讨论的是激励反应关系的特别重要情形,即激励具有正弦特性时的情形。

1-3. 电路变量: 电流与电压

如果我们对一个国家的汽车来往的流动情况感到兴趣,无疑地我们将把注意力集中在各条公路干线上,而忽略任何单个城市内的精确分配状况。同样,在电路领域中,我们经常感到兴趣的是电流从一个装置到另外一个装置间的流动情况,而不是任一装置内能量的分配情况。在这些情况下,我们有理由把模型理论中的基本长方块看作“集中”元件,其中的电气特性可用进入装置的端钮或端线上所产生的效应来概括。最简单的装置具有一对端钮。电由一端流入,由另一端流出。一个

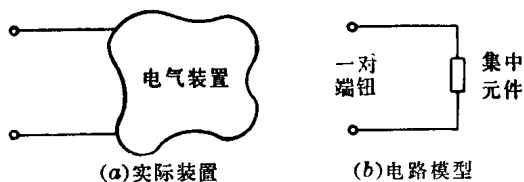


图 1-3. 一个集中元件和它的一对端钮

典型的集中元件和一对与它相联的端钮示于图 1-3 中。实际装置是占有一定空间的,如图 1-3(a)所示。图 1-3(b)

所示的网络模型具有一对端钮,端钮之间是理想化的数学联接,它在空间没有实际大小和一定的方向,而且可以将它任意移动或转动。

网络是由这些不吸收任何能量的理想导线联结起来的理想元件组成的。在许多应用问题中,网络模型以令人满意的准确性预示实际装置的特性。电能的有限速度的传递,对网络模型的精确度施加限制。如果能量加在某一装置上,则需要稍为延迟,才能传达到第二个装置

^① 这些网络有时可以笼统地称作直流或 $d-c$ 网络。正确的要求是网络中没有储能元件,在激励类型方面则没有什么限制。