

应用电路理论

矩阵和计算机方法

〔英〕P. R. 阿德拜 著

韶能仁 舒贤林 译

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书是1980年出版的英国剑桥大学电气与电子工程丛书之一。全书共分九章,内容包括:基本电路理论(第一章),网络的矩阵分析、传递函数分析和状态变量分析(第二、六、七章),非线性直流分析(第三章),节点导纳矩阵法(第四章),双口网络分析(第五章),以及灵敏度分析和容差分析(第八、九章)。

本书填补了基本电路理论和计算机辅助设计之间的空白,内容新颖,概念清晰。全书附有较多的应用实例,在每章末都有小结和习题。书中还给出了五个主要计算机程序,可供读者借鉴和参考。

本书可供高等院校电子和电气工程、物理和计算机等专业的教师、学生和研究生作为教学参考书,也可供这些领域的工程师、设计师和科研工作者参考。

P. R. Aaby

APPLIED CIRCUIT THEORY

Matrix and Computer Methods

Ellis Horwood Limited, 1980

应用电路理论

矩阵和计算机方法

[英] P. R. 阿德拜 著

韶能仁 舒贤林 译

责任编辑 张建荣

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年3月第一版 开本:850×1168 1/32

1986年3月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:0001—6,100 字数:376,000

统一书号:15031·699

本社书号:4473·15-7

定价:4.10元

译 者 的 话

我们现在把英国 P. R. 阿德拜博士所著《应用电路理论：矩阵和计算机方法》一书介绍给读者。该书属 1980 年出版的英国剑桥大学电气与电子工程丛书之一，是近代电路理论与计算机辅助电路设计紧密结合的一部重要著作。原版的手稿曾由作者在伦敦大学皇家学院电子与电气工程系进行讲授。

本书的特点是内容新颖，概念清晰，语言简练，深入浅出。全书附有较多的应用实例，在每章末都有小结和习题，并根据每章内容提出了适当数量的进修读物，对帮助理解各章内容和进一步自学均有一定指导意义。本书将网络拓扑分析与状态变量分析，传递函数分析，网络的计算机程序设计，网络的灵敏度分析和容差分析，以及随机取样等许多最新的研究成果，通过矩阵方法与计算机的应用有机地结合起来，这就是本书的最大优点。书中还给出了五个主要计算机程序，它们都具有一定的实用价值。在翻译过程中，我们对原书的个别错误作了订正。本书对电子与电气工程、物理和计算机等专业的高等学校师生和研究生在教学与研究工作中均有一定的参考价值，也适用于这些领域的工程师、设计师和科研工作者。

本书的翻译出版曾得到西南交通大学任朗教授的热情支持和帮助。全书译稿还经北方交通大学许珠副教授看过并提出宝贵意见。在此谨向他们表示衷心的感谢。

本书是由两人翻译的。舒贤林译第四、五、六章，韶能仁译序言、第一、二、三、七、八、九章并负责全书的校订工作。

由于译者水平有限，译文中难免有不妥和错误之处，欢迎读者批评指正。

1983 年 11 月于北京

序 言

近十年来,计算机已成为电气与电子电路分析和设计的一种必不可少的工具。在电路设计的各个阶段,从技术要求直到工业生产,每个工程师都和从前熟悉计算尺和计算器一样,必定要采用计算机。在计算量增长的情况下,最近的一种趋势是要提高远离计算中心的计算机的利用率。现在,提供 32K 存储器的小型计算机和微型计算机不超过 1000 英镑(2000 美元)。所以,每一个那怕是很小的设计室,花很低的费用也能运算意义重大的分析程序。并且,这些程序本身已使人们更易于适应和改进。还容易和图形输出结合起来,以及较快地写出专用程序。

通过采用尖端的数字技术,运行于大型计算机上的现代化电路分析程序是能够达到很好的精度和效率的。本书给出这类程序所依据的电路理论,并且提供计算机辅助电路设计最新研究的入门知识,不会因数值算法而增加负担。全书强调的是矩阵方法和计算机计算。工业领域的工程师,以及工程和物理方面的研究生,如果他们以前并没有采用这种方法对电路进行分析的话,将会发现本书对他们是非常适合的。本书还以一种过渡处理方式填补了基本电路理论和计算机辅助电路设计之间的空白,因而在英国各大学和工科院校中,适合于作为电子与电气工程方面大学二、三年级的课程以及其他方面相当的课程。假定读者已经具有矩阵代数和基本电路理论的知识,包括电路定理、正弦稳态分析和拉普拉斯变换。

随着计算机应用的普及和电路复杂性的增加,电路理论方面的大学生课程已经根本转到计算机算法上来。一个重要的后果是和实验室工作相结合的工具能够及早在课程中获得。大学生在实

验操作和整个电路理论两方面很快会涉及晶体管、运算放大器和其他有源器件。这个过程促使他增进对电子电路设计的了解，并且要熟悉器件及其电路模型，这类模型具有高度一致性益处。

本书中电路分析的论述主要是理论上的。为了把大部分有用的资料都概括进来，因此例题限于比较简单的电路。在大学课程中，使理论广泛应用于实际电路是最重要的。通过实验工作和设计方案去推动应用理论的方法全在于教师。对于提供更广泛的和现实的电路例子，教师是处于最有利的地位，这些例子不仅与课程的其余部分相配合，而且是适合于作分析的。

在大学课程中现已更多地考虑计算机的作用。皇家学院所持的观点是：在尽可能广泛的电路领域中，计算机应该用以取得电路性能一切可能方面的经验。虽然根本目的是把计算结果与设计 and 实测相比较，但在整个课程中计算机模拟试验方法是受到鼓励的。不要求大学生们写出分析程序，但他们必须写出简短的子程序，并经常要确定为什么分析不能进行。计算题放在每章的末尾，其中有些问题使大学生们感到困难。习题从简单电路研究到要求写出程序各不相同。当在小型计算机上实现时，即使限于小的电路，在热心的学生参与下，将计算机的计算综合用到课程中来，则时分的 BASIC 用于大的分析程序显得更为合理。

在本书中包含有五个主要计算机程序：它们是直流分析、交流分析、双口分析、传递函数分析和随机模拟。这些程序可以由教师随意复制和应用，同时 ASCII 编码纸带承索即寄。程序中难免仍有某些差错或不当；但差错的正式修正表和程序改进措施将以用户业务通讯的形式从作者处得到。习题中要求的许多程序也应该是可以利用的。适合于其他计算机系统和 BASIC 的不同工具语言的这些更广泛改进了的程序类型，将可从英国索塞克斯 (Sussex)，纽黑文港 (Newhaven)，南街，戴依顿电子有限公司 (Dayton Electronics Ltd) 得到。

本书手稿在伦敦大学皇家学院通过一些学工程的学生使用，已经有所受益。我很感谢他们提出有益的意见和批评。另外，也

非常感谢帮助打印讲义的 R. 安斯沃思小姐、M. 理查兹女士和 J. 海因斯女士。最后,还应衷心感谢那些计算机辅助电路分析和设计的先驱者们,我已大量采用了他们的成果,加以改编而引伸出有条理的学习材料。本书正是建立在他们的科学研究之上的。

P. R. 阿德拜

1979 年于伦敦皇家学院

目 录

译者的话

序言

第一章 基本电路理论	1
1.1 集总参数电路	1
1.2 基尔霍夫定律	3
1.3 特勒根定理	5
证明 (5) 例 1.1 (6)	
1.4 定常电路	7
1.5 线性电路	7
叠加 (9) 例 1.2 (9)	
1.6 正弦稳态分析	10
例 1.3 (13)	
1.7 非线性电路	15
线性化 (15) 非线性直流分析 (16) 非线性瞬态分析 (16)	
1.8 电路元件	17
非独立源 (17) 阻抗变换器与反变换器 (20) 电源 (21)	
1.9 等效电路	21
罗森 (Rosen) 定理 (22) 星形-三角形变换 (22) 密尔曼 (Millman) 定理 (23) 戴维南-诺顿 (Thévenin-Norton) 定理 (23) 替代定理 (24)	
1.10 小结	24
进修读物 (25) 习题 (25)	
第二章 网络的矩阵分析	30
2.1 网络拓扑	30
图 (30) 树 (31) 割集 (33) 例 2.1 (35) 环集 (37)	

例 2.2 (38) 对偶性 (39)	
2.2 矩阵分析法	40
标准支路 (40) 割集矩阵 (42) 环集矩阵 (45) 关联矩阵 (47) 网孔分析 (50) 例 2.3 (52)	
2.3 有源电路	57
转移阻抗耦合 (58) 互感 (60) 转移导纳耦合 (61) 例 2.4 (62) 普遍化 (64)	
2.4 阻抗变换器与反变换器	65
理想变压器 (67) 负阻抗变换器 (67) 回转器和负阻抗反变换器 (69) 互感 (69)	
2.5 计算机程序设计	70
用 RNODE 程序的直流电路分析 (71) 例 2.5 (73)	
2.6 小结	74
进修读物 (75) 习题 (75) 附录 (78)	
第三章 非线性直流分析	80
3.1 具有一个非线性电阻的电路	80
一维牛顿迭代法 (80) 非线性电阻网络 (81) 二极管偏压问题 (83) 例 3.1 (85) 几何解释 (86) 电路解释 (86)	
3.2 一般非线性电路	89
推广的牛顿迭代法 (89) 用牛顿迭代法进行分析 (90) 例 3.2 (93) 非线性直流节点分析法 (96)	
3.3 计算上的难点	97
标度 (97) 例 3.3 (98) 收敛性 (99) 一般非线性 (101)	
3.4 有源器件模拟	101
双极晶体管 (102) 埃伯斯-莫尔模型参数的确定 (105) MOS 晶体管 (111)	
3.5 计算例题	114
例 3.4 (115) 例 3.5 (117)	
3.6 小结	121
进修读物 (121) 习题 (121)	
第四章 节点导纳矩阵法	126

4.1 节点导纳矩阵	127
节点导纳矩阵的填写 (127) 节点电压直接求解 (130) 高斯 矩阵消去法 (131) LU 分解 (133) 网络简化法 (134) 稀 疏矩阵 (135) 例 4.1 (137)	
4.2 导纳参数	139
多端网络 (139) 节点加添 (140) 节点移除 (141) 网络 并联 (144) N 端口网络 (145) 例 4.2 (149)	
4.3 小信号模型	151
晶体管电容模型 (153) 小信号晶体管 π 模型 (155) 运算放 大器模型 (161)	
4.4 计算机程序设计	164
用 ACNLU 程序分析交流电路 (164) 程序输入 (165) 分析 和输出 (166) 操作控制 (167) 例 4.3 (168)	
4.5 小结	171
进修读物 (171) 习题 (171) 附录 (176)	

第五章 双口网络分析..... 182

5.1 双口网络	182
N 端网络 (182) Y 参数(短路导纳参数) (184) Z 参数(开 路阻抗参数) (185) A 参数(传输或链接参数) (185) B 参 数(反向传输参数) (186) H 参数(混合参数) (187) G 参数 (逆混合参数) (188) 参数换算 (188) 具有端接的双口网络 (189) 例 5.1 (193)	
5.2 双口网络的互连	194
并联-并联连接 (195) 串联-串联连接 (195) 串联-并联连 接 (196) 并联-串联连接 (197) 级联连接 (197) 反向级 联连接 (198) 有效性 (199) 端子变换 (200)	
5.3 电路元件的传输参数	203
阻抗元件 (203) 非独立源 (206) 阻抗变换器与反变换器 (206) 串联和并联连接的双口网络 (207)	
5.4 电路分析	208
一般过程 (208) 例 5.2 (209) 例 5.3 (211) 布线算子电	

路描述 (213)	
5.5 计算机程序设计	215
用 2PORT 程序分析线性电路 (215) 程序编排方式 (219)	
例 5.4 (222) 例 5.5 (224)	
5.6 小结	226
进修读物 (226) 习题 (226) 附录 (230)	
第六章 传递函数分析	235
6.1 网络函数	235
拉普拉斯变换 (236) 用拉普拉斯变换分析网络 (237) 线性网络函数 (245) 双口网络函数 (246) 节点导纳矩阵网络函数 (248)	
6.2 S 域分析	251
拓扑法 (252) 例 6.1 (256) 有源网络 (258) 例 6.2 (260) 用计算机作拓扑分析 (262) NAM 求逆法 (266) 例 6.3 (270) 信号流图法 (272) 例 6.4 (278)	
6.3 响应	281
频率响应 (282) 瞬态响应 (283)	
6.4 计算机程序设计	286
用 TOPSEN 程序作传递函数分析 (286) 例 6.5 (292)	
6.5 小结	296
进修读物 (296) 习题 (297) 附录 (300)	
第七章 状态变量分析	309
7.1 状态方程的形成	309
例 7.1 (310) 例 7.2 (313) 线性定常网络 (314) 例 7.3 (319) 过剩元件网络 (321) 例 7.4 (325) 网络函数 (327)	
7.2 状态方程的解	329
利用拉普拉斯变换求解 (330) 例 7.5 (331) 利用特征值求解 (333) 例 7.6 (336) 西尔威斯特(Sylvester) 定理 (338) 矩阵的对角线化 (338) 利用矩阵对角线化求解 (342) 例 7.7 (344) 利用数值积分求解 (346)	
7.3 小结	349

进修读物 (350) 习题 (350)

第八章 灵敏度分析	353
8.1 灵敏度测量	353
绝对灵敏度 (353) 相对与半相对灵敏度 (355) 定理 (356)	
例8.1 (358)	
8.2 灵敏度分析法	359
微分法 (359) 差分法 (360) 节点分析 (361) 伴随网络 (364) 例8.2 (365)	
8.3 频域灵敏度	367
例8.3 (369)	
8.4 传递函数灵敏度	371
分子灵敏度和分母灵敏度 (374) 极点灵敏度和零点灵敏度 (375) 对元件偏差的传递函数灵敏度 (375) 对极点、零点和系数偏差的传递函数灵敏度 (376) 频域灵敏度 (378) 时域灵敏度(379) 例8.4 (379)	
8.5 线性化直流灵敏度	381
温度灵敏度 (382) 例8.5 (384)	
8.6 计算机程序设计	386
采用 RNODE 子程序 2000 的灵敏度 (386) 例 2.5(续) (388)	
采用 ACNLU 子程序 6000 的节点电压灵敏度 (389) 例 8.6 (390)	
采用 ACNLU 子程序 8000 的电压增益灵敏度 (392)	
例 4.3(续) (395)	
8.7 小结	395
进修读物 (395) 习题 (396) 附录 (398)	
第九章 容差分析	401
9.1 元件变化	402
分立元件 (402) 集成电路元件 (405) 高斯分布 (407) 均匀分布 (408)	
9.2 最坏情况分析	409
例 9.1 (410) 大变化灵敏度 (411) 例 9.2 (414)	
9.3 矩量法	415

例 9.3 (417) 容差域 (421)	
9.4 随机取样	423
随机数的产生 (424) 相关随机数 (426) 计算机程序 (428)	
例 9.4 (431) 例 9.5 (434)	
9.5 小结	436
进修读物 (437) 习题 (438) 附录 (441)	
名词索引	444

第一章 基本电路理论

电路与系统设计是设计工程师的创造性的工作，而不是计算机的创造性工作。可是，正象分析器、数学模型器、模拟器和电网优选器那样，在设计过程中计算机几乎是一种必不可少的工具。今天，许多系统的主要部分都是集成电路，它比几年前的分立元件电路复杂上千倍。对于这样大规模的电路，作为设计的最重要阶段的分析，必须是系统的、精确的和经济的。网络理论的应用通过矩阵方法提供了一种适合于数字计算的方法，并且在计算机辅助设计的这个概括性题目下，这种方法也是能够作相当大的改进。

许多读者对下面将要研究的一些网络理论是熟悉的，尤其是本书的开始两章。第一章简要地复习一下基本电路理论，第二章给出电路分析的基本方法。为了使直流、交流、瞬态、灵敏度和容差分析等方法在本书的其余部分得以发展，我们把这些基本方法都表示成矩阵形式。所以，即使熟悉这项工作的人也要重视第二章，因为这使电路分析适应了矩阵和计算机方法。

1.1 集总参数电路

电磁理论告诉我们，每当加速电子时就会产生能量辐射。因此，在任何电流随时间变化的电路中，总有能量的辐射和损失。可是，产生的电磁波波长与电路的实际尺寸相比通常是很大的，所以能量损失可忽略不计。

辐射的能量可以忽略不计的那种电路叫做集总参数电路，把集总的电路元件相互连接起来就可以得到这种电路。

当然，集总参数元件和集总参数电路是实际元件和电路的理想化模型。假定集总参数电路的外形尺寸可忽略不计，因而能够

精确地对它进行分析。若分析的是取决于工作频率的实际电路，那么它的性能是否会象预期的一样就很难说。因此，所分析的电路并非实际的电路，而是以若干假定为条件画成电路图形式的电路模型。在这些假定下，在模拟实际电路的性能时，牺牲一些精度就可以简化电路分析。贯穿本书的最重要假定是：电路为集总参数的，因而遵守基尔霍夫定律。

不是集总参数的那种电路叫做分布参数电路。

通常，具体设计分布参数电路的尺寸以便在它们的工作频率下利用电磁波的特点。例如，电视天线是要接收从别的天线发射来的能量。因此，接收天线的形状和尺寸就要设计成能从某一特定方向有选择地接收所需要的频带。分布参数电路的一个不大明显的例子就是电力系统。相应于 50Hz 频率的波长为 6000km，电力系统的尺寸可以与之比拟，因此可以认为电力系统是分布参数电路。

对于读过电路与电子学初级课程的学生来说最常见的电路元件如电阻器、电容器、电感器、晶体管和电压源应该是熟悉的。我们假定这些元件的集总形式具有零值的实际尺寸，因而它们在一-点上与电路的电压或电流相互作用。每个元件有两个或更多的端点，通过这些点，使它与别的元件连接起来而形成电路。

电路中有两个或两个以上端子连接起来的点叫做节点。连接于电路两节点间的两端元件叫做支路。

图 1.1(a) 所示电路具有编号为 0, 1, 2 和 3 的四个节点，以及用箭头表示电流方向而标以 $i_1, i_2, \dots, i_6$ 的六个支路。

支路电压是支路两端点间的电压，支路电流是通过支路的电流。

电压的极性用图 1.1(b) 和 1.1(c) 加以说明，按照惯例，支路电压与支路电流方向相反。因为靠选电流方向和靠正负号惯例都可以选定极性，极性的表示或者用箭头，或者用正号与负号，两者同时使用是多余的。在具有正弦电源或其他与时间有关的电源的电路中，极性表示正变化的方向。

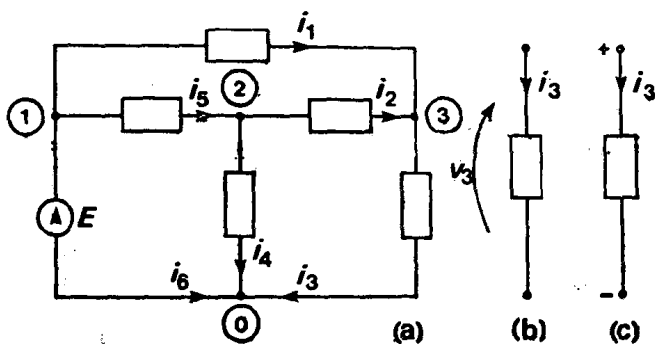


图 1.1 (a) 桥 T 型电路；(b), (c) 支路正负号惯例

并非所有的教科书都用同样的惯例来表示电压极性，常用类似图 1.1(b)那样的箭头指示电压降。本书所用的惯例保证得到所测实际电路的电压和电流具有象电路图上那样相同的方向。此惯例的另一个结果是，支路电压与支路电流的乘积代表输送给支路元件的功率。

1.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫电流定律(KCL)和电压定律(KVL)是决定电路电压和电流的两个基本定律。在集总参数电路的假设下，它们可由麦克斯韦方程求得。

基尔霍夫电流定律指出，在任一时刻，进入一个集总参数电路元件的电流总和等于零。

基尔霍夫电压定律指出，在集总参数电路中，在任一时刻，环绕一个闭合路径的电压总和等于零。

把一个节点看成是一个电路元件就可以引出基尔霍夫电流定律，所以进入电路节点的电流总和为零。此外，还可以把一个电路分成两半，每一半都看成是具有端子数比通常要大得多的简单元件。进入被分开的半个电路的电流总和为零。应用于一个电路元件、一个电路节点和一个被分开电路的基尔霍夫电流定律可用图

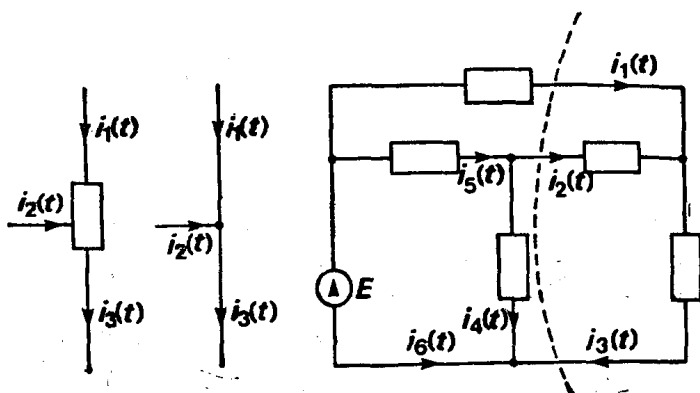


图 1.2 基尔霍夫电流定律

1.2 加以说明。在每种情况下基尔霍夫电流定律表明

$$i_1(t) + i_2(t) - i_3(t) = 0.$$

在图 1.2 中表示为一条虚线的电路分割，以后我们将把它明确地定义为割。

在每个节点上应用基尔霍夫电流定律可得出图 1.2 中电路的节点方程为

$$-i_1 - i_5 - i_6 = 0$$

$$i_5 - i_2 - i_4 = 0$$

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

$$i_3 + i_4 + i_6 = 0.$$

环绕闭合路径或通常所称的回路，应用基尔霍夫电压定律可求得电路的回路方程。利用三个明显的回路和外回路，我们得到

$$E - v_5 - v_4 = 0$$

$$-v_1 + v_2 + v_5 = 0$$

$$v_4 - v_2 - v_3 = 0$$

$$E - v_1 - v_3 = 0.$$

对于该电路中的更复杂的回路，可以得出另外三个方程。

上面这两组方程是线性的；它们表示电路中电流和电压的线性约束关系，这种关系仅仅是由于电路连接造成的。除假定元件

为集总参数的之外,对它们本身并没加以研究.可以看出,不但节点方程组,而且回路方程组都是线性相关的,因为任何一个方程都能够表示成其余三个方程的线性组合.

1.3 特勒根定理

特勒根定理应用于遵守基尔霍夫定律的任何网络;它主要是这样一种论点,即在集总参数网络中能量是守恒的.现在让我们来研究支路电流为 $i_1, i_2, \dots, i_n$ 和相应支路电压为 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 的 n 支路网络.

特勒根定理指出,在任一时刻,总和 $\sum_{k=1}^n v_k i_k$ 等于零.

我们已经注意到,支路电压和支路电流的乘积给出输送到支路的功率.所以,由含有电源的一个支路供给电路的总功率,必须被余下的支路吸收,这样能量是守恒的.

证明

研究网络中连接在节点①和节点③间的支路.在电路中引入一个参考点,如图 1.3 所示,我们可以确定相对于该点的节点电压 e_r 和 e_s .

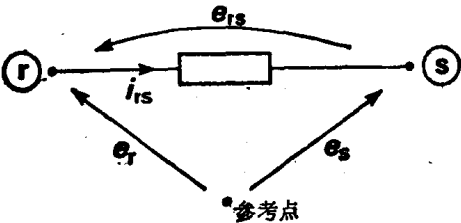


图 1.3 特勒根定理

于是

$$e_{rs} = e_r - e_s,$$

同时,供给支路的功率为

$$e_{rs} i_{rs} = e_r i_{rs} - e_s i_{rs}.$$