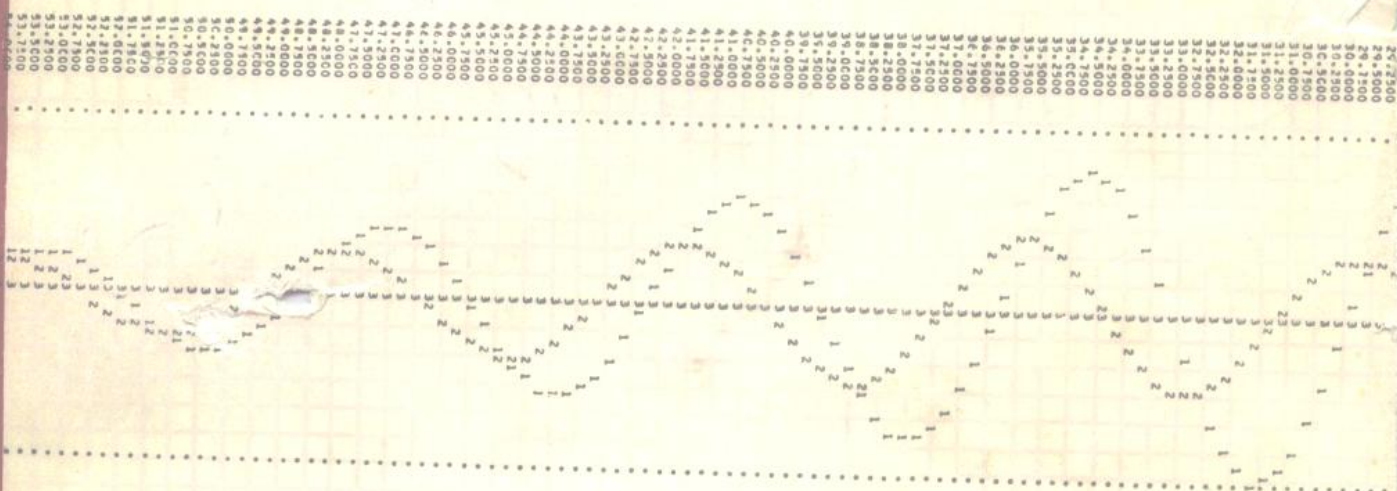


(美)小戴维·弗·塔特尔 编著

刘胜利 主译 顾福年 审校

电 路

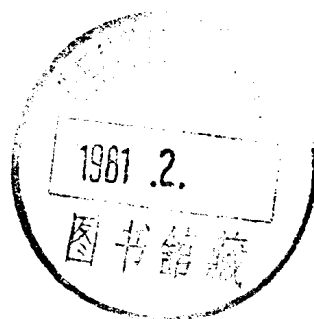


江 西 人 民 出 版 社

73.76
713
-3

电 路

(美) 小戴维·弗·塔特尔 编著
刘胜利 主译 顾福年 审校



江西人民出版社

1109046

内 容 简 介

本书是现代电路理论的一部优秀著作。主要阐述了线性电路的基本理论和常用知识。本书物理概念清晰,教授方法新颖,重点鲜明突出。它详尽地分析了基本的物理现象,并用各种数学方法论证展开;本书在内容和结构上也有不少独特之处;尤其是全书还插有许多精心拍摄的实验波形照片,作为电路模型的直观验证;各章之后,设有丰富多样的练习与习题。采用本书方法教学,容易收到生动形象、明白易懂之效果,便于达到牢固掌握与灵活运用之目的。

本书可供我国大专院校电子专业师生作教材,也可供研究生、进修生参考。对于从事电路技术各行各业的科技工作者,特别是许多上过大学而现在希望通过自学继续深造的工程技术人员,以及一些业余读者,本书都有较高的实用价值。

本书由刘胜利同志主译。上海交通大学电子工程系副教授顾福年审校了全部译稿。江西师院张联璋同志也审阅了部分内容。马桂元同志在译校过程中做了许多工作。

CIRCUITS

David F. Tattle, Jr.

Professor of Electrical Engineering Stanford University

McGraw-Hill Series on The Fundamentals
of Electronic Science 1977

电 路

(美)小戴维·弗·塔特尔 编著
刘胜利 主译 顾福年 审校

江西人民出版社出版
(南昌百花洲3号)

江西省新华书店发行 江西新华印刷厂印刷
开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张 40.5 字数 104 万
1980年10月第1版 1980年10月江西第1次印刷
印数: 1—55,000

统一书号: 15110·43 定价: 3.95 元

译者前言

在某种意义上可以说,四个现代化,实际上就是电子化,而“电路是电气工程的基础”。就是说,从一般的电子管电路、晶体管电路和集成电路,到专用的雷达、计算机、广播电视和通讯电路等等,不论种类繁多、形式万千,其共同的基础,都是基本的电子线路。基础打得越牢,专业上得越快;只有基础雄厚,才能“根深叶茂”。因此,更快更好地掌握现代电路理论,特别是基本电路理论,对于实现电子技术现代化,对于实现四个现代化,都有重要的现实意义与长远意义。“电路”一书,正是适应这种需要而问世的一本新书。

*

*

*

本书由美国斯坦福大学电气工程教授小戴维·弗·塔特尔编著,并列入西方世界大出版公司麦克哥罗-希尔的电子科学基础丛书(于1977年发行)。其阅读对象,是大学三年级以上具有一定电路基础和微积分知识的学生。

本书物理概念清晰直观,内容叙述深入浅出,教授方法新颖独特。它着重阐述了线性电路的基本理论和常用知识,同时,又用七十年代以来的最新成果和最新方法充实展开。其中包括数量可观的现代化方法——用数字计算机设计电路网络与显示电子扫描轨迹。

本书广泛地使用了各种数学方法。不但有经典的微分方程(t 域)求解法,更主要的是运用了传递函数(s 域)、卷积积分方法,以及幂级数展开、部分分式展开和对偶变换等方法,直到用计算机快速精确地求解各种网络的传递函数和脉冲响应值(数值计算)。这些都是现代电路分析中重要而常用的方法,作者都作了详尽易懂的阐述。

全书共分九章。在前三章中,讨论了电路分析中的一般情况:已知各种脉冲激励函数(冲激激励、阶跃激励、正弦激励、指数激励等),试求在初始条件为静止时基本网络(各种串、并联RC或RLC电路)对不同激励的响应。并详细介绍了一些基本概念:电路的固有性能与固有频率,响应的固有(瞬态)分量与强制(稳态)分量,传递函数,复频率平面,归一化,状态描述变量,高 Q 值谐振电路的脉冲响应等等。第四章介绍了线性(非时变、集总)网络理论的中心环节:迭加定理与卷积定理。在第五、六、七章中,作者广泛深入地讨论了一些关键性问题:例如传递函数的极点与零点,梯形网络,桥形网络,脉冲响应的初始特性(各阶导数的初始值),某些有源网络的传递函数,网络的无穷大损耗点,传递函数对偶表,传递函数与网络的(s)高、低频渐近性能,部分分式展开,波形形成网络(把大部分网络分析问题简化为求冲激响应的问题),网络分析的计算机程序,非静止初始条件,多重极点等。第八章讨论了无穷大网络、延迟、无失真传输等问题。第九章是结论。在附录里,作者在基础课训练中列出了五个最常用的计算机程序:LADANA(计算梯形网络的传递函数),IMPSTEP(根据传递函数计算冲激响应与阶跃响应),RESSINET(计算对正弦激励的响应),FOMEGA(计算正弦稳态 $s=j\omega$ 时的传递函数),CONVOL(卷积)。

本书还精心设置了丰富多样、新颖实用的练习与习题(较易的作“练习”,较难的作“习题”),严格反复地训练基本功。

别具一格的是,全书共插有125幅精确拍摄的实验波形照片,作为电路模型的直观验证,它准确地表达了电路的真实情况。用这种生动形象的方法配合教学,容易使学生明白易懂、

印象深刻而增加兴趣，十分有利于提高教学效果。它充分体现了电子学这门实验科学的特点。

此外，本书始终侧重于启发读者“怎样阅读”。它的出发点是作为函授教材来编写的。因此，本书不但给出了许多有用的电路与波形，公式与结论，更重要的是它把现代电路理论浩繁复杂的内在关系，按学生的认识规律有机系统地串联起来，大胆地进行了压缩和改编；它注意抓主要矛盾，注意弄清基本电路和公式产生、演变与发展的全过程，主要篇幅都注重培养学生分析解决实际问题的能力和思想方法。所以它在关键问题上展开得充分，而在内容选择上又精炼得合理。它既不是罗列电路的“百科全书”，也不是“压缩饼干”式的提纲。作者语言丰富，文笔形象生动，善于启发思路。本书在体系上脱离了传统教材的约束。它的这些特点，单从本书目录上是看不到的，正象作者所说：“要想正确评价本书，只有在熟悉课文本身的内容以后才有可能”。电路分析将证明它具有“持久的功效”与“广泛的运用”。

需要进一步指出的是：本书从“教师与学生两方面的实际效果和实际体会”出发，在内容安排上采用了新方式。其中具有“惊人教育价值”的是数学展开与物理展开的同时并行。也就是本书各章内容，一般先把电路系统简化为物理模型，然后列出其等效数学表达式，在数学方程式推导展开的同时，紧接着用大量的图解和波形照片，充分地展开和讨论其物理意义，以了解电路对信号的实际影响。直观的物理模型与巧妙的数学方法交替进行，紧密配合，使全书思路清晰集中，内容层次逐步深入，结论与运用恰到好处。这样十分有助于理解电路理论、深化基本概念和扩展知识领域，达到牢固掌握与灵活运用目的。正如作者指出：如果“按照本书方法教学，将使学生在电气工程基本实用的训练方面，打下一个坚实的基础”，“本书的目标，……在于培养优秀工程师的能力。”

虽然国内外有关电路的教材为数众多，各有所长，但象本书这种在物理概念和教授方法上训练有素的教材却难得少见。因此，本书在现代电路教材中具有一定的示范作用和创新意义，它对于改革现有教材与教学方法将有较高的参考价值。我们期待本书的出版，能有助于早日把人类的共同财富充分利用起来。

当然，本书也有不足之处。由于作者注意物理意义，注重对实际现象的分析，所以在理论的系统性和数学的完整性上，不免要分散注意力。虽然本书在基本的物理现象上阐述得很仔细很全面，使读者得到清晰的概念，但对于只在电路理论上有兴趣的读者，可能感到过于繁琐。

最后补充几点说明。(一)作者在每章开始，都有一段文学性的引语。由于没有什么实际意义，与我国风俗习惯也不同，故均已删去。(二)原文各章节内容，一般用英文正体字母，而少数关键性字句使用斜体，以使读者醒目。为了在中文体现这一特点，我们采用相应的黑体字，以区别一般的宋体字。(三)为了尽量节省版面，加快出版速度，本书在排版和制版上采取了一些措施。

由于水平有限，时间仓促，错误之处在所难免，恳请各位老师和读者批评指出，以便再版时更正。

序 言

有关电路和电路分析的书籍是为数众多的。因此,一本题材相同的新教科书,总得在序言中为它的问世列举一些理由。本书与众不同:它利用简明确切、富于教益并且易于再现的物理演示,说明电路模型的可靠性,以准确反映电路的真实情况;本书充分地使用了数字计算机;本书的编写,全以教师和学生两方面的实际效果和实际体会为依据。凡此种种,都算是本书问世的理由。但是,要想正确评价本书,只有在熟悉课文本身的内容以后才有可能。(第一章概述了本书的基本原理,阐明了它要研究的问题,解决的方法,以及对读者提出的要求。)尤其在探讨一般原理时,本书是**逐步深入**的:先从简单易懂(多数是特殊但却有助于理解)的原理入手,也就是开始只要求**最低限度**的基础知识;进而分析比较复杂的例子;最后,只有在学生具备条件时,才进入正式的讨论。按照本书方法教学,将使学生在电气工程基本实用的训练方面,打下一个坚实的基础。

全书内容,都是我在斯坦福大学多年执教的成果。其中也包括度休假年时,在其它见解不同的学术机构所得到的教益。我与同事和学生进行过多次讨论,尤其是 L.A.Manning 教授的某些见解,对本书作出了贡献。特别要指出的是,本书还依靠了学生们的帮助(见1.01节)。

最后,对于在专业问题上虽然帮助不多,但却给予大力支持和耐心帮助的其他家庭成员 Becky, Jacqueline 和 Robert, 在此表示衷心的感谢。

小戴维·弗·塔特尔

目 录

序 言	IV
-----------	----

第一章 导 论

1.01 基础	1	1.09 阶跃与脉冲	11
1.02 方法	1	1.10 单个脉冲与冲激脉冲	12
1.03 主题	3	1.11 小结	15
1.04 起点	5	1.12 练习, 习题, 以及“爱普斯坦 (Epstein)定律”	16
1.05 一个模型	6	1.13 练习	16
1.06 两种模型	7	1.14 习题	18
1.07 分析与综合	8		
1.08 信号	8		

第二章 RC 电路

2.01 引言	20	2.11 脉冲响应	36
2.02 一个例子	20	2.12 多重脉冲响应	39
2.03 固有性能与固有频率	23	2.13 存在与唯一性	44
2.04 固有性能的计算	23	2.14 指数响应	45
2.05 再谈 RC 电路	26	2.15 正弦激励: 复数与相量	49
2.06 归一化	28	2.16 其它一些简单模型	57
2.07 响应的数值计算	28	2.17 内容提要	60
2.08 能量	30	2.18 练习	61
2.09 阶跃响应	32	2.19 习题	68
2.10 阶跃响应与冲激响应	35		

第三章 RLC 电路

3.01 引言: 并联 RLC 电路	77	3.13 RLC 电路的正弦响应(继续)	106
3.02 冲激响应	77	3.14 谐振	108
3.03 固有性能	79	3.15 RLC 电路中的电流	116
3.04 固有频率	81	3.16 RLC 电路中的能量	122
3.05 缓变情况(情况 1)	83	3.17 复频率平面: 几何学与代数学比较	125
3.06 谐振(高 Q 值)情况	84	3.18 电感器(和电容器)中的损耗	130
3.07 谐振情况时的固有性能	88	3.19 有损耗时对其它激励的响应	134
3.08 高 Q 值电路的阶跃响应	92	3.20 状态描述变量	135
3.09 高 Q 值电路的脉冲响应	95	3.21 对偶与模拟	137
3.10 指数响应; 传递函数	99	3.22 结论	139
3.11 正弦响应	101	3.23 练习	141
3.12 计算: 单调乏味还是乐趣横生?	105	3.24 习题	150

第四章 迭加积分与卷积

4.01 引言	166	4.07 卷积	176
4.02 迭加	166	4.08 数值卷积	178
4.03 概念	169	4.09 卷积与迭加积分	183
4.04 迭加积分	170	4.10 结论	184
4.05 迭加积分的其它形式	173	4.11 练习	184
4.06 迭加积分的应用	173	4.12 习题	188

第五章 冲激响应与传递函数

5.01 引言	195	5.09 $T(s)$ 的零点	206
5.02 RC 与 RLC 的课程	195	5.10 桥形与格形	207
5.03 一个形式模型	197	5.11 阻抗与导纳	208
5.04 一种数学推导	198	5.12 对偶性	214
5.05 传递函数; 极点与零点	199	5.13 格形与桥形	215
5.06 例子	201	5.14 内容提要	222
5.07 级联接法	202	5.15 练习	224
5.08 并联接法	203	5.16 习题	228

第六章 网络与传递函数

6.01 梯形网络	236	6.16 梯形网络的无穷大损耗点	291
6.02 梯形网络的传递函数	238	6.17 网络的阶	293
6.03 固有模与固有频率	244	6.18 一个例子——渐近网络	295
6.04 因式分解多项式	247	6.19 有损耗时的其它例子	300
6.05 量纲的核对	251	6.20 无穷大损耗点	303
6.06 从物理上看冲激响应的初始性能	252	6.21 公因子异常	308
6.07 从传递函数上看冲激响应的初始性能	257	6.22 剩余因子的一个应用: 恒电阻网络	308
6.08 阶跃响应的初始性能与最终性能	261	6.23 桥形网络的传递函数	311
6.09 冲激响应导数的初始值	264	6.24 节点与回路	316
6.10 初始值的核对	270	6.25 某些有源网络的传递函数	321
6.11 初始值表	271	6.26 另外一个例子: $M = N$	335
6.12 二端口网络的微分方程	272	6.27 $M \geq N$	340
6.13 $r_d(t)$ 的幂级数形式	278	6.28 网络与传递函数	342
6.14 一个综合问题	282	6.29 练习	343
6.15 s 的渐近性能	286	6.30 习题	354

第七章 传递函数与网络分析

7.01 引言	371	7.03 传递函数的推广	373
7.02 对指数激励的响应	371	7.04 波形成网络	377

7.05 一个新的传递函数定义.....	381	与固有部分.....	436
7.06 一个综合问题.....	382	7.17 网络分析的计算问题.....	445
7.07 传递函数(冲激响应)表.....	393	7.18 网络分析的一些计算机程序.....	449
7.08 电感器与电容器中的真实情况.....	400	7.19 应用网络分析的程序; 延迟,	
7.09 传递函数对偶表—Ⅱ.....	401	渐近性能.....	476
7.10 网络分析.....	406	7.20 其它方法.....	505
7.11 网络分析的一般情况.....	408	7.21 现有技术概况.....	505
7.12 部分分式展开.....	409	7.22 非静止初始条件.....	506
7.13 网络分析的一个例子.....	411	7.23 多重(重合)极点.....	517
7.14 归一化.....	413	7.24 现有技术概况.....	526
7.15 网络分析的又一个例子(继续);		7.25 练习.....	527
信号失真.....	420	7.26 习题.....	536
7.16 正弦激励时响应的强制部分			

第八章 拉普拉斯变换

8.01 引言.....	549	8.08 拉普拉斯变换.....	566
8.02 一个无穷大网络.....	549	8.09 理想滤波器; 截止速率,	
8.03 另一个无穷大网络.....	553	延迟, 上升时间.....	568
8.04 其它有趣的平方根.....	554	8.10 一个实际的网络.....	571
8.05 附加几个新的对偶.....	556	8.11 结论.....	572
8.06 延迟.....	558	8.12 练习.....	573
8.07 无失真传输.....	559	8.13 习题.....	575

第九章 结 论578

附 录

A 演 示	579
B 参考文献	585
C 计 算	586
LADANA (计算梯形网络的传递函数)	588
IMPSTEP (根据传递函数计算冲激响应与阶跃响应)	595
RESSINET (计算对正弦激励的响应)	603
FOMEGA (计算当 $s = j\omega$ 时的传递函数)	611
CONVOL [卷积(第4章)]	616
D 对数度量	631

索 引

第一章 导 论

远航初期，人们需要某种航海图，所拟定的航线就标绘在图上。在本书第一章中，确定了我们要研究什么，它对工程师和工科学生为什么有重要意义，以及怎样进行研究。此外，本书还要介绍近来取得的一些最重要成果。当然，如果没有根据而只是“随便说说”，那么即使引用某些直观的物理例子，上述要求还是不能实现。作者编写本书的意图，在于让读者从开始就得到一个清晰的概念；但并不希望使读者失去主动学习、研究和试验的乐趣。读者只要翻阅几页就可以确信，这是一本值得化许多时间去阅读的书籍。

1.01 基 础

“从起点开始学”，这当然是再好不过的建议了。但真正的起点是在很早以前（例如初次学做加法时），甚至更早一些（例如第一次遇到问题并作出回答时）。所以当我们开始研究电路时，实际上已从起点走过很长的一段路，已经具备了较深的基础知识。

在数学方面，我们假定学生已具有一定的微积分知识；在实验方面，我们假定学生掌握了普通物理、特别是电学的知识（这些知识不是以单纯的实验为基础，而是用微积分进行推导的）。就是说，有了大学一、二年的基础后，我们才开始学习本书，而这离开“起点”已经很远了。但它适合大多数工科学生，因此是一个有利的起点，也是本书的一个优点。另外，能够编程序并充分使用数字计算机，这是很重要的。计算机不必很大，也不需要编算法语言。但从第四章开始，计算机的使用就多起来了。最后，在理解许多作为出发点的假设和某些所用模型的来历时，研究现代（或以往）的电子学，有十分重要的意义。

本书是从我在斯坦福大学多年教授学生的“电路”课程中，逐步发展起来的。其阅读对象，通常是大学三年级的电气工程学生，但也有其它学科的在校生的和毕业生。我非常感谢学生们提出的不同见解和宝贵意见，因为本书中所列举并解答的问题，有许多是他们提供的，而编写方式和具体细节也是由此决定的。所以本书大部分内容，实际上是学生们谱写的。

为了便于阅读本书，读者自然应对本学科感兴趣。他们应乐意作某些训练：各种类型的习题很多，必须做完一定数量的习题；对于“演示”也必须细心观察和体会。当然还需要一些便于教授和学生选择的作业。总而言之，热爱工程技术，正是我们所希望的。尽管本书实际上要讨论应用数学，但它的重点仍在于应用。而喜欢作一定的物理探讨，却是非常有用的。本书的目标，始终在于尽力发展物理概念，在于培养优秀工程师的能力。

1.02 方 法

电路是电气工程的基础——这是我们假定的前提。可以让今后的实践以及其它方面的研究，来说明这个论点，在这里不必过多讨论了。我们将在适当的课程里，对什么是电路给予准确的定义，因为给术语下定义，一般要在充分了解其内容之后。现在可以先了解一下大意，等有了更多的概念和用词以后，就可以更好地确定什么是电路。急于知道定义的读者，只要查阅索引就能找到准确的定义。

电路理论是值得详细研究的。这种研究必然涉及到一系列彼此完全不同的概念，对这些概念可以分别来学习。但不同概念之间又有密切的关系，所以整个学习应该是一个循序渐进、生动而有趣的过程。我们将努力做到这一点。

研究电路必须大量地依靠数学工具。由于分析模型时有足够精确的前提，因而其结果往往有很高的工程价值。但也要提防误入歧途。我们要研究的是工程技术，如果理论对工程技术没有直接的意义，就必须抵制单纯发展高雅理论的倾向。当然，理论上的研究，也可能有一天得到重要的应用；只有傻瓜才会断言：“那些特别抽象的数学推导，永远与工程技术无关”。但是，本书所关心的并不在明天的科研进展，而在于今天的电路理论及其应用。所以，我们应把精力集中在电路分析上，它将具有持久的功效和广泛的应用。为了展望未来，我们将简要介绍一些更先进的见解与技术，但对它们的详尽论述，只好“留待别处研究”（后面这句话是作者的常用语——译者）。否则，如果在本书中对它们详尽论述，必然会颠倒主次，引起混乱，造成“只见树木不见森林”。

由于电路理论具有悠久的历史，它以物理模型为基础，因此用数学是容易进行处理的。今天，电路理论已成为一座非常庄严的大厦。它有很强的逻辑性，我们不必惧怕攀登更高的水平。但不应该忘记，我们主要关心的是工程技术。由于基础是模型，而不是实际的工程器件或系统，所以，从电路理论的“高楼大厦”上作出的判断，与基于工程实体的实际性能之间，可能存在着差异。这种差异对于工程师十分重要，既不能忽略它们，也不能放在次要地位考虑。由电路理论作出的设计，与相应工程电路实际性能之间的差异，是不难加以控制的。在大多数工作中，容易实现简单具体的控制。阴极射线管示波器，将方便而清晰地显示电路的性能。此外，还可以拍摄照片来保留各种波形图象，所以在本书有关章节中，读者可以不断地计算差异值。后面我们将做这项工作，并由此估价分析结果在物理上的正确性。

自然，观看本书中阴极射线管屏幕上的静止照片，并不能代替实际仪器的三维观察。特别是，不能取代调节仪器旋钮而改变参数值时对荧光屏的观察。本书读者特别是讲课老师，应尽力安排好演示，并且亲自观看。最好使班上每个学生都能操作仪器，“调调旋钮”，让他们自己作实地观察。大部分旋钮的使用是简单而有效的。除少数情况外，必要的仪器多数是常见的。按照规定的要求，可使设置与调节演示所需要的时间减到最少。重要的事情在于自己动手！为了改进要作一些调整，为了更好观察需要改变旋钮，这些实验技能，在操作时自然而然会涌现出来。在数学推导展开的同时，观察波形的物理展开，以了解电路对信号的实际影响，是一种具有惊人教育价值的经验。这种价值来自对效果的感受；虽然用“惊人”两字很平淡，但它是确切的。书中照片的作用还是有限的，只有通过慢慢调整实际的仪器，直到亲眼观看感到满意后为止。

我们将设计各种充分简化分析的工程系统模型，在对每个模型作数学分析之后，就能看出简化模型的实际性能。只有这样，才可以确定分析的价值。如果分析是有效的，则为我们的知识宝库增添了一份财富，也可以利用它进行综合，去设计工程系统。在学完本书时，我们将得到十分丰富完整的知识。自然这不是真正的结束，然而在学完本书时，可以把它作为应具备的基础知识，为进一步学习电路理论奠定牢固的基础，并为今后各阶段的教学和工程技术研究创造条件。

但是，即使把本书的页数增加10倍，也不可能对所有的电路都详细进行探讨，因为有关电路的知识实在太多了。所以我们将予以综合考虑，去粗取精，择优选用。本书的大部分内容，是把近年来最好的研究成果，经过整理和压缩以后形成的。然而，作者还试图指出今后电路发展的可能趋势。另外，本书有一个义不容辞的责任，就是为读者阅读其它书籍作好准备，以填补将来有一天可能很有价值的空白，并为浏览和研究当前与今后的大量刊物创造条件。简而言之，本书的一个目的，是指导读者“怎样阅读”。

我们将努力使本书的笔调富于文学特色。现在，专业术语在漫无节制地增加，其中许多没有什么意义，既不精确又无多大价值。但有些技术用语却风趣而形象、准确而简炼，可以用来充实我们的语言。凡属这种术语，我们都采纳和使用。

1.03 主 题

我们对于“什么是电路”已经有了一些概念。但是仍有必要作一些说明。

通信(传递信息)与(能量的)控制，构成了电气工程的大部分内容。从上述任一种类型中，选出几个中等复杂的系统，就能轻易地得到许多例子，足以阐述需要的全部电路理论。这些系统可以作为叙述的主线，即作为本书的骨架。为了与目前的工程实际密切结合起来，我们开始对以下三个系统进行考察。

第一个是长途电话通信线路。比如在加利福尼亚和法兰西之间，相距大约10000公里。今天在旧金山和马赛之间接通一条电话线，已是一件平常的事；只需要几秒钟就可以接通(几乎全部用机械转换)，它的质量很好。但该系统所涉及的复杂性，已达到在此无法描述的程度。对它作任何分析，都超出我们的研究范围，事实上过去从来没有做过这种分析，今后也很难做到。所以设计与制造工作，必须限制在分系统内。这些分系统(按照要求，但不能预料用什么方式)联接起来后，就会作为一个大系统进行工作。图1.03-A的原理图表示这种通信系统的结构。方框图表示当地的机构，连接线则代表它们之间的传输通路。

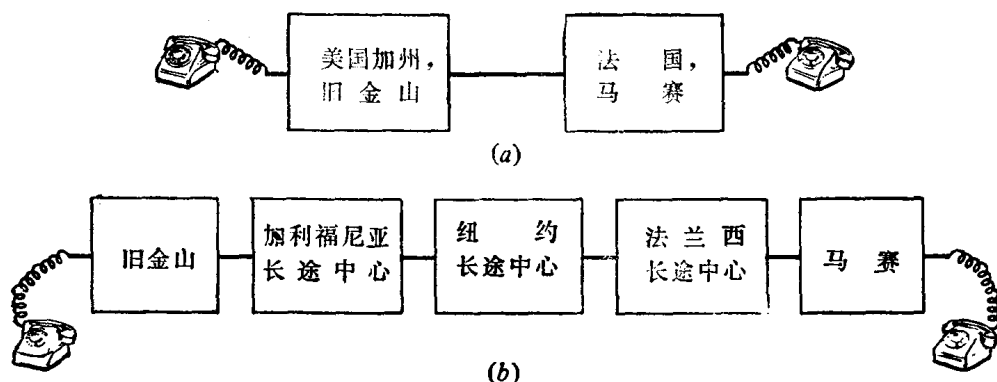


图 1.03-A

交换中心如图 1.03-Ab 所示，我们不必象专职通信工程师那样了解它需要几种设备，也不必知道连接各交换中心的通信系统彼此有多大差异。从用户电话机到当地的中心机务处，通话线可能是电缆中的一对绝缘线(紧紧装有其它许多连线)。而从当地中心机务处到最近的长途电话交换中心，其联接线可能由一种“短途”多路系统组成，它使用其它类型的电缆线。能同时处理大量的各种通话。横跨大陆的线路，则是一种更复杂的多路系统，它使用同轴电缆或微波接力传输线。横跨大西洋的线路，则可能是海底电缆系统，或者是以人造地球卫星为中继站的无线电系统。在法国的通信线路，也是由类似的系统组成的。

我们不必花更多精力去注意整个系统的复杂性。但是，可以列出组成它所必需的几个主要分系统的部分清单。其中必须有放大器，它补偿信号通过传输系统时产生的衰减。还应该调制器与解调器，取样器，编码器与译码器，以及使多路信号信道在传输系统的一端混合、而在另一端分离的设备。(长途系统由于成本昂贵，要求做到效率高而经济节约，就应同时为许多用户服务。)无论是电缆系统还是无线电多路系统，在系统两端都要设置发射机和接收机。其

它分系统为传输提供了十分重要的电源(能量), 並正常地交换通话, 准确记录大量的通话数据, 以计算和收取长途电话费用。若把全系统尽量分解成小的方框, 则每个方框都可以为我们提供各种电路(和设备), 便于进行广泛的研究。

第二个例子是, 考虑精确控制巨大载重体(例如船舵)的位置。移动重负载需要许多功率, 但指令信号却很微弱。因此, 不仅要放大指令信号, 而且还要保证负载确实能按照指令行动。又比如, 按预定图样操纵机床去加工钢材; 或驾驶一艘大轮船; 或使一架60吨重的天线, 对准横跨大西洋上空的无线电通信卫星(或使天线跟踪一个快速运动的雷达目标, 以控制空中交通, 或者使望远镜跟踪一颗缓慢移动的星体)。以上这些例子, 都属于同一类问题。图 1.03-Ba 表示这种控制系统的基本单元。图中的箭头表示它与通话线路有很大区别: 图中的信号传输, 仅仅是单方向的。指令信号可以来自记录好的图样, 或来自一条预定的路线, 或来自细致选定的空间坐标和观测值, 或来自一台手动控制器, 也可能是从别处打来的电话。指令信号被放大后加到机械装置上, 可用它去推动负载作直线运动或绕轴旋转。

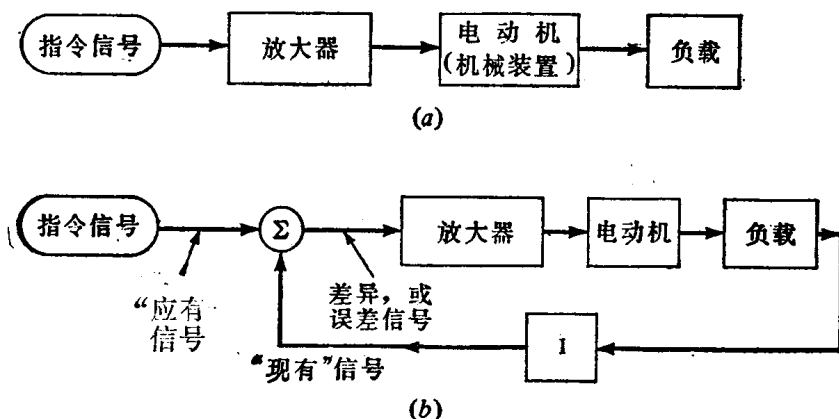


图 1.03-B

但有时很可能产生不精确的运动。也就是, 重负载位置不完全符合指令的要求, 从而出现了误差。然而, 很早以前就有人卓越地想到: 如果能测出该误差, 就可以利用测量值使运动精确化。这就是反馈控制: 将“现有”信号与“应有”信号进行比较, 並利用误差作为实际的指令信号。我们提供测量设备(图1.03-Bb中的 I), 把实际的负载位置转换成“现有”信号, 它与指令信号的变化是一致的。此时, 比较机构 Σ 产生误差信号, 实际上发出了控制机械装置的指令。如果适当设计与调整该系统, 那么机械装置将按预定方式工作, 使负载移动到可以忽略误差为止。因为只要还存在误差, 总会有力矩(或力)作用在负载上, 使误差减少。

即使对反馈多加注意, 仍然会出现一些新问题。因为闭合回路很像一种“环形蛇”, 一旦它的尾部啣在口中, 就会产生与通常方式完全不同的运动。如果闭合回路系统设计不妥或调整不当, 那么它将反复放大一些随机噪声和干扰, 甚至引起危险的(通常是振荡的)负载运动。因此, 设计系统中的各种方框图, 並不是一件容易的事, 它提出了与电路理论有关的各种问题, 最终(6.25节)要讨论这些引人注意的问题。有时没有任何指令信号, 人们可能设计出一个“按本身性能”振荡的闭合回路系统。如果用适当的器件代替机械装置和负载, 那么系统就变成一个运动发生器或电信号发生器(即一个振荡器)。

以上两个例子都假定提供了足够的动力(多半指电源), 通常这是不言而喻的。在第三个例子中, 将概述提供这种动力(电源)的一个系统。我们可以用燃烧煤、燃油和气体作动力, 或者利

用核反应,或用瀑布的势能作动力。利用这些能量驱动汽轮机以带动发电机。然后把电力送到用户, 並把它转换为便于使用的形式(电压): 例如交流电 6 kV 25Hz, 交流电 115 V 60Hz, 或者直流电 24 V (不变)。图1.03-C 表示一个大型电力系统的部分原理图, 但并不涉及该系统的实际复杂性。每座发电厂 G 都有能源, 原动机和发电机。此外, 还需要大量的辅助设备:

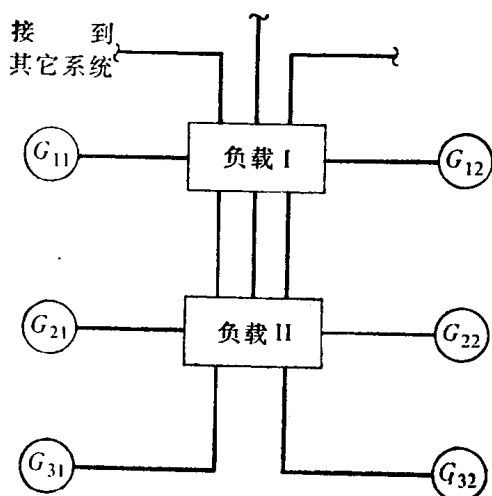


图 1.03-C

例如燃油泵, 润滑油泵, 操作开关和保护设备的空气压缩机, 辅助电源, 测量仪器, 中继设备和通信设备等等。传输线把远距离发电厂接到负载(例如城市的各个区域)。用户需要用电的范围是从几盏电灯和一些家用电器, 到大建筑物中的电梯马达和空调机, 以及工业上的机械设备和电气铁路上的许多大型电动机。其它传输线则把距离很远的系统联在一起, 使之更有效可靠地发电和配电。设计与操作这种系统的问题在于: 决定各发电机组之间的最有效配电方式(分布情况); 怎样接通和断开发电机以达到高效率的运转; 怎样处理用电量的经常变化; 怎样防止电力的不稳定性, 以及由此可能引起的断电(因为这是一种反馈系统, 其情况十分复杂)。这些都是很重要的问题。

各种例子还有很多。在这些例子中, 只列举三个, 如果把它们方框图再详细展开和分解成更小的方框, 就可以包括我们需要的许多电路。这些例子, 也使读者大致了解工程技术在社会上所起的作用, 以及电路系统在世界日常事务中的重要性。

电路理论不仅与这种系统的纯电气部分有关, 而且还与系统中的电机部分、机械部分以及其它部分有关。按照相似原理, 描述它们的几种模型也常常具有十分相似的数学形式。因此, 要简单地选择从何处开始, 本身就是一件困难的事。

1.04 起 点

我们必须选择充分简单的方框图, 使它可以作为学习的起点。然而, 不应简化到没有工程意义的地步。我们将任意选择一个放大器方框。在前面二个例子中, 显然有很多重要的放大器, 而在第三个例子中, 放大器必然要用到通信与控制设备上。在一般情况下, 放大器应该是主要的, 有些也是简单的。一个放大器方框图(图1.04-A)接收信号和功率, 输出信号被放大到较强, 因而更有用处。不必要都用电子放大器, 例如液压气动和运转电机的放大器, 在控制系统中都会有用处。然而在本书中, 我们感兴趣的放大器只是电子器件。从广义上说, 有一半电子器件涉及到半导体(或真空管)中发生的现象, 而另一半则与电路有关。我们的愿望是研究电路。电路必然要使用电子器件, 它在系统工作中是必不可少的, 在工程技术上也富于创造性。电路既可以简单些, 也可以复杂些, 这正是我们希望的。下面可以考查其它方框图。然而, 首先研究电路中的放大器, 则是一个良好的起点。

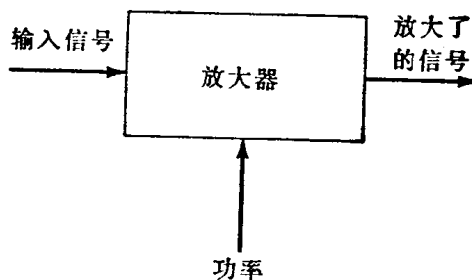


图 1.04-A

1.05 一个模型

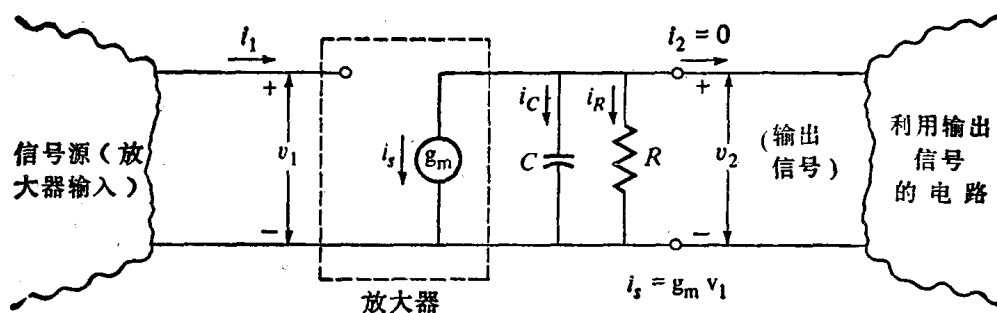


图 1.05-A

即使只包含一个晶体管的小型放大器，也是很复杂的。然而，只要我们集中研究它的最重要性能，就可以设计出表示该性能的有用模型。这种模型将大大简化分析。各种实际的放大器，虽然在性能上完全不同，但其模型不会有很大差别。分析简单的模型，既实际又有用。

讨论半导体材料(或真空)中电荷迁移的机制，并不是我们要研究的范围；设计与制造基本的电子器件，也不是我们要考虑的事情。我们只是叙述一下它们在电子学上的研究结果。许多小的(单级)放大器，按要求可以画成图1.05-A中所示的模型。

用虚线画出的小方框，表示晶体管(或真空管)模型。(至少有一部分 C 和 R 元件，也属于电子器件部分)。实线表示通过电流的导线，它把元件 g_m 、 C 和 R 连接起来，形成一个电路或网络。晶体管模型的一个特有性能，是其输入端不吸收电流：即 $i_1 = 0$ 。第二个性能是，输入端的(信号)电压 v_1 ，控制着标记为 g_m 的电流源：即 $i_s = g_m v_1$ 。模型中被放大的信号能量，来自该电流源，因此 g_m 是实际网络的有源(而不是无源)元件。它表示该电子机构能控制图1.04-A中(在图1.05-A中没有表示出来)电源能量的流动。

模型中的电流和电压，并不是放大器的实际参数。它们表示放大器的动态(随时间变化的、也是最感兴趣和有利的)部分；其静态部分则忽略不计。电流 i 和电压 v 只是在静态工作点附近的变量，静态值对电子器件工作是重要的，然而它与信号无关；只有变量 i 和 v 才携带信号信息。我们不讨论信号怎样输入，怎样同静态部分混合，以及随后怎样消失。我们感兴趣的仅仅是动态部分，也就是该模型所表示的全部内容。

电容器 C 和电阻器 R ，都是网络的无源元件。有一部分 C ，表示非理想晶体管(电子管)中存在的寄生效应；它可能是 C 的主要部分或全部值，也可能是无关紧要的。同理，有一部分 R 属于电子器件，但它主要由外部电阻器所组成。元件 R 与 C 组成晶体管的工作负载，在负载两端产生输出信号(电压 v_2)。有时要讨论 R 与 C 对信号大小和波形所产生的影响。在该模型中，系统的下一部分利用输出信号，但它没有吸收任何电流(即 $i_2 = 0$)。

假设电容器与电阻器按线性规律变化。这个假设的意思，是指电流和电压保持小信号。当信号幅度增大时，器件常常工作在非线性状态。因此，所谓“小”信号，只有在工程上才能作出判断，它必须根据情况来确定。然而，这些线性模型能达到的精度，却使人出乎意料！

电容器的特性，可用电容量来表示：

$$C = \frac{q}{v} \text{ (法拉, F)} \quad (1.05-1)$$

式中 q (库仑, C) 是指电容器上的电荷，而 v 是指电容器上的电压。我们有

$$q = Cv_2 \quad (1.05-2)$$

以及

$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dv_2}{dt} = i_c (\text{安培, A}) \quad (1.05-3)$$

根据欧姆定律, 对于电阻器有*

$$v = Ri \quad (1.05-4)$$

或者

$$i = Gv \quad (1.05-5)$$

式中 $v = v_2$ 和 $i = i_R$, 是电阻器上的电压和电流。电阻 R 自然用欧姆(Ω)来度量; 其倒数 $G = 1/R$ 则由姆欧(或西门子)来度量。

这些定律的线性性质, 也限于电流和电压及其变化率不大的场合。不言而喻, 它包括下列假设: 这些效应是局部的(集总的), 它与空间座标(x, y, z)无关, 也没有偏导数。又假设元件值在时间变化时保持不变, 也就是说 g_m (欧姆)、 R 和 C 不会改变。(在4.02节中, 会更详细地讨论这些假设。)

由于网络元件的数学模型包括变化率(导数), 所以为了求出已知输入信号 $v_1(t)$ 时产生的输出信号 $v_2(t)$, 必须求解一个微分方程。根据基尔霍夫定律, 该微分方程为

$$i_S + i_G + i_R = 0 \quad (1.05-6)$$

也就是

$$g_m v_1 + C \frac{dv_2}{dt} + Gv_2 = 0 \quad (1.05-7)$$

当然, 必须知道在某开始瞬间的 v_2 值, 还必须知道输入信号 $v_1(t)$ 。(该初始值是由电路先前发生过的情况确定的, v_1 将决定以后的过程。)

在这里我们有一个“电路”或网络, 并存在一个网络分析问题: 试求开始瞬间后的 $v_2(t)$ 。它是一个简单、实际而有用的问题, 也是一个良好的起点。

1.06 两种模型

1.05节的模型有两种不同的形式。一种是物理示意图, 它描述物理网络。为了强调模型的网络部分而不是电子器件部分, 再次画出图1.06-A。电流源(以及下面电路图中信号)方向的标记变化, 只是为了简洁整齐起见。另一种形式是数学微分方程式, 根据图1.06-A 重新写出它:

$$\begin{aligned} E[v] = C \frac{dv}{dt} + Gv - i_F(t) &= 0, \\ v(0) &= V_0 \end{aligned} \quad (1.06-1)$$

式中 E 代表方程式, 运算符号 $E[v]$ 着重强调它是一个以 v 为未知数的方程式。记号 V_0 表示必要的起始条件或初始条件(我们称 $t = 0$ 为起始时间)。

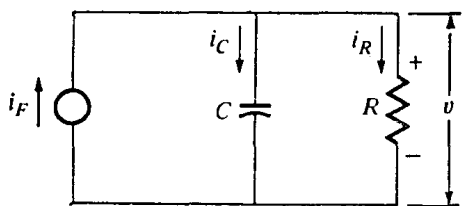


图 1.06-A

通常, 我们都要建立物理形式和数学形式两种模型。虽然这两种模型是等效的, 但两者往往都很有用处。物理形式接近于模型所代表的系统; 而数学形式则是为了便于进行分析。

用模型表示系统时所具有的精确度, 在每个实际问题中都要讨论。模型化的过程, 不可避免会带来误差。但其目的是反映实际系统中的主要效应,

* 为了减少繁琐的论证, 我们引用了一些基本定律。它们在实验上和理论上的发展历史, 是电路分析的重要部分。但在本书中, 它超出了所要讨论的范围; 附录 B 列出了研究其发展史的几篇基础文献。

而舍去那些无关紧要的影响。即把难于处理的(由于真实和复杂的)系统,用一个容易分析的(由于经过简化的)模型所代替。模型越是简单(分析也越容易),其真实性就越差;而模型越是精确和逼真,其分析也越困难、越复杂和费力。优秀的工程技术,需要一种协调得失的观念,也就是对于上述两种倾向,善于权衡其得失利弊而决定最佳方案的能力——即在得到的信息量(模型的复杂性)与付出的代价(分析的复杂性)之间权衡利弊的一种能力。这里所说的权衡,自然取决于当时工作的性质。工程判断的要点,就是这种决策。令人遗憾的是,尽管书本可以再三指出这个问题,但也只能是说说而已。只有实际经验才能告诉你如何去作。

1.07 分析与综合

一旦确立了模型,分析工作就可以开始。这就是当已知输入信号 $i_F(t)$ 和初始条件 V_0 时,试求输出信号[上面的 $v(t)$]。从物理上说,这个问题是分析模型怎样工作;从数学上说,这个问题则是求解微分方程。

由于放大器具有惰性,因此我们必须利用导数和微积分,来分析每个物理器件在性能上出现的现象。惰性对于良好放大作用是有害的,尽管它是多余而不希望有的,但却不可能避免。采用更精心(更昂贵)制做的电子器件,可以减少惰性;但是,用电容器及其导数作为模型的影响始终存在。(有时我们会发现:由于某种原因有意识地利用这种“电抗”元件或储能元件,可以获得需要的整形作用。)然而在每个实际有趣的分析问题中,都要求出导数。因此,在一定程度(通常在很大程度)上可以说,分析就是求解微分方程。所以,我们需要微积分知识。

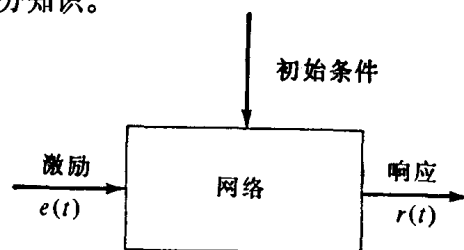


图 1.07-A

示意图1.07-A在讨论时很方便。我们把网络(电路模型)的输入信号称为激励 $e(t)$;把输出信号称为响应 $r(t)$ 。网络的初始条件是必不可少的,例如(1.06-1)式中的 V_0 值,或者当 $t = 0$ 时等效于电容器中储存的一定能量。它就像网络的一个附加“输入”。(我们将看到初始条件的作用象附加激励,通常最好也把它看成是附加激励。)分析的任务在于:当已知激励和网络时,

试求出(算出)响应。它是一项基本的工程任务,常常也是一件简单的工作,因而有时并不十分有趣。综合工作(设计过程)却有趣得多,因为它往往不是简单易行的,它需要想象和思考。在综合时网络不是已知的,只需要知道激励和响应。虽然综合工作十分吸引人,但要进行综合,必需有牢固的分析基础。分析能力是综合能力的基础之一。

对现有系统的分析,也是维修工作和操作使用时所必要的。有时分析问题可能是:已知响应和网络,试确定输入——这正是测量工作的一个基本问题。

所以分析必然成为我们的起点。只要有可能,在本书中,我们将尽可能多地进行综合。但我们所关心的是分析,综合仍然是次要的。

1.08 信号

在1.05节和1.06节中,我们有一个简单而有用的放大器模型,它是只有一级的小型放大器。实际放大器可能由几级这样的小放大器组成,因为一级放大器的放大量不够。在一个实际的放大器中,由于反馈十分有用,所以可能在各级之间设置反馈回路。然而在小模型中,我们的确具备了实际放大器的核心部分。这是一个实际的电子线路(网络),它具备原始的有趣