



ELECTRIC CIRCUITS

电路理论 专题研究

田社平 何迪 张峰◎著

美与趣 / 电路定理 / 电路图论与电路-力学相似性 / T形电路和 π 形电路的等效
无穷电阻网络与负电阻 / 电桥电路 / 电路的反馈 / 动态电路的分析 / 正弦振荡电路
功率和能量 / 电路的计算机辅助分析



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

电路理论 专题研究

田社平 何迪 张峰◎著

常州大学图书馆
藏书章



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书是一本论述电路理论中若干问题的书籍,内容涉及电路的美与趣、电路定理、电路图论与电路-力学相似性、T形电路和 Π 形电路的等效、无穷电阻网络与负电阻、电桥电路、电路的反馈、动态电路的分析、正弦振荡电路、功率和能量、电路的计算机辅助分析等方面。

本书叙述严谨,既注重理论,又联系实际,特别适合从事电路理论或电路分析教学的教师以及学习电路理论或电路分析的学生阅读。本书也可供进行电路分析或电路设计的工程技术人员或高校相关专业的研究生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论专题研究 / 田社平,何迪,张峰著. —上海:上海交通大学出版社, 2017.
ISBN 978-7-313-18021-6

I. ①电… II. ①田… ②何… ③张… III. ①电路理论—理论研究 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 208513 号

电路理论专题研究

著 者: 田社平 何 迪 张 峰

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 苏州市越洋印刷有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 277 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-18021-6/TM

定 价: 68.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 15.75

印 次: 2017 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-68180638

前言

电,无处不在,无时不在。作为电的应用形式之一的电路,亦广泛应用于科学研究、工程技术领域和人类的日常生活。电路理论来源于电路应用的实际,同时也指导电路的应用。因此,掌握好电路理论是合理、正确分析与设计电路的前提。作者在长期从事电路理论的教学和研究的过程中,发现要掌握好电路理论,除了要对电路理论具有总貌性的了解之外,同时也要对电路理论中的具体问题详加探讨,以期对电路理论的基本概念和基本规律有明晰的理解。同样,要应用好电路理论,设计出合理又有实用价值的应用电路,亦须对电路理论具有深刻的理解。本书正是基于这一认识,对电路理论中的一些特殊或特别的应加注意的问题加以探讨,对电路理论的教与学中出现的一些难点加以研究,故名《电路理论专题研究》。

在电路理论的教学过程中,总有学生或学员感慨:电路理论真难学啊。作者以为,学习电路理论的最佳境界,大致应该是:一个阶段觉得较难,另一个阶段觉得比较简单,再一个阶段又觉得较难,如此交替演进。初入门,觉得有点难度;既入门,不过就是所谓的 KCL、KVL、VCR(电压-电流关系)两类约束而已,其实不难;继而为了简化电路的分析(如减少分析电路的方程数量),又须仔细研究;进一步,非线性电路、动态电路、各种变换域方法等又须认真探究。觉得简单,源于已经理解;觉得难解,说明还须学习。如此反复,对电路理论的掌握也就逐步精进、深入。

电路理论经过两百多年的发展(以 1800 年意大利物理学家伏特发明伏打电池作为起点),已形成一门逻辑严密、体系完善的科学。在这一理论的指导下,对集中参数电路而言,其基本规律就是基尔霍夫定律以及电路中集中参数元件的电压-电流关系。所有的集中参数电路均受到此基本规律的约束。正是基于此而形成了集中参数电路理论。对于电路应用中的实际问题,

往往涉及电路理论中多方面的内容,问题的解决亦须综合运用电路理论的方法。作者希冀对这些问题的讨论,起到抛砖引玉的作用,以辅助读者加深对电路理论的理解。

本书所述问题并不按照电路理论的系统性来展开,只是进行粗略的归类,包括电路的美与趣、电路定理、电路图论与电路-力学相似性、T形电路和 Π 形电路的等效、无穷电阻网络与负电阻、电桥电路、电路的反馈、动态电路的分析、正弦振荡电路、功率和能量、电路的计算机辅助分析等方面。这里分类的目的仅在于方便读者阅读、理解。

感谢上海交通大学教学发展中心对作者在电路理论教学和研究的的工作给予的持续支持。感谢上海市北斗导航与位置服务重点实验室在本书的编辑与出版过程中所给予的帮助,以及上海市科委项目(编号:16DZ1100402)、上海智能诊疗仪器工程技术研究中心(15DZ2252000)对本书出版的资助。

本书的写作得到了清华大学、浙江大学、上海交通大学等多位长期从事电路理论研究与教学的老师的帮助或指导,作者在此致以衷心的感谢。

作者指导的学生对本书亦有贡献,他们是:丁晨华、曲韵、杨光、杨硕、倪守诚。

由于作者才疏学浅,书中存在的错讹之处,敬请读者批评指正。作者的Email 邮址为:sptian@sjtu.edu.cn;dihe@sjtu.edu.cn;fzhang@sjtu.edu.cn。

目 录

第 1 章 电路的美与趣

1

1.1 论电路之美	1
1.1.1 电路名称之美	1
1.1.2 电路理论之美	2
1.1.3 电路应用之美	6
1.1.4 电路研究之美	7
1.1.5 结语	9
1.2 论电路之趣	9
1.2.1 电路历史之趣	9
1.2.2 电路内容之趣	11
1.2.3 分析方法之趣	15
1.2.4 结语	16
参考文献	17

第 2 章 电路定理

18

2.1 KCL、KVL 和特勒根定理的相互关系	18
2.1.1 符号约定与基本结论	18
2.1.2 KCL、KVL 和特勒根定理相互关系的表达式	19
2.2 受控源在叠加原理中的另一种处理方法	21
2.2.1 电阻的等效	21
2.2.2 应用实例	22
2.2.3 结语	25

2.3	关于置换定理成立条件的讨论	26
2.3.1	置换定理的实质	26
2.3.2	进一步讨论	28
2.3.3	结语	29
2.4	特勒根定理应用的再讨论	29
2.4.1	式(2-14)成立的条件	30
2.4.2	对文献[12]例题的分析	31
2.4.3	进一步讨论	32
2.4.4	结语	33
2.5	互易电路回路矩阵和节点矩阵的对称性	33
2.5.1	回路矩阵和节点矩阵对称是电路互易性的充分条件	33
2.5.2	回路矩阵和节点矩阵对称不是电路互易性的必要条件	35
2.5.3	结语	37
2.6	对互易电路性质的补充讨论	37
2.6.1	互易电路性质的补充讨论	38
2.6.2	互易定理和补充性质之间的关系	40
2.6.3	结语	41
2.7	互易二端口网络的互连	41
2.7.1	互易二端口电路的判定规则	42
2.7.2	互易二端口电路互连的互易性	42
2.7.3	互易二端口电路互连的有效性判断	44
2.7.4	对称二端口电路的互连	45
2.7.5	结语	45
2.8	密勒定理及其应用	45
2.8.1	密勒定理的表述及其证明	45
2.8.2	密勒定理的应用	47
2.8.3	结语	49
2.9	二端口网络有效互连的判据和实现	49
2.9.1	二端口网络互连的有效性	49
2.9.2	有效连接的判据	51
2.9.3	有效连接的实现	52
2.9.4	结语	53
	参考文献	53

第 3 章 电路图论与电路力学相似性

55

3.1 一种由基本割集矩阵求网络图的方法	55
3.1.1 基本割集矩阵与降阶关联矩阵间的关系	56
3.1.2 由基本割集矩阵求网络图	57
3.1.3 结语	58
3.2 基于相似性的电路力学分析方法	59
3.2.1 广义力学模型	59
3.2.2 电路力学模型的建立	60
3.2.3 基于力学模型的集中参数电路分析方法	64
3.2.4 讨论与结语	66
参考文献	67

第 4 章 T 形电路和 Π 形电路的等效

68

4.1 含源 T 形电路和含源 Π 形电路的等效变换	68
4.1.1 含源 T- Π 形电路等效变换的唯一性问题	68
4.1.2 含源 Π 形电路到含源 T 形电路的等效变换	70
4.1.3 含源 T 形电路到含源 Π 形电路的等效变换	72
4.1.4 结语	74
4.2 T 形和 Π 形电阻电路等效变换方法探讨	74
4.2.1 等效变换公式的推导	74
4.2.2 结语	78
4.3 T- Π 形电路等效变换的几个结论	78
4.3.1 几个基本结论	79
4.3.2 应用例子	82
4.3.3 讨论与结语	84
参考文献	84

第 5 章 无穷电阻网络与负电阻

85

5.1 无穷电阻网络等效电阻的计算	85
5.1.1 公式推导	86

5.1.2	基于 Matlab 的等效电阻计算结果	88
5.1.3	结语	90
5.2	无穷电阻网络的分析	90
5.2.1	应用叠加定理求解	91
5.2.2	应用等效变换方法求解	92
5.2.3	利用网孔法和节点法求解	93
5.2.4	结语	95
5.3	负电阻及其串并联	96
5.3.1	负电阻的实现	96
5.3.2	负电阻与负电阻的串并联	97
5.3.3	负电阻与正电阻的串并联	98
5.3.4	正负电阻的混联	99
5.3.5	结语	100
5.4	负电阻的应用	100
5.4.1	应用要点	100
5.4.2	负电阻的应用举例	102
5.4.3	结语	104
	参考文献	104

第 6 章 电桥电路

105

6.1	电桥非线性校正电路分析	105
6.1.1	电桥电路的工作原理	105
6.1.2	电桥非线性校正电路	107
6.1.3	单臂电桥的双运放非线性校正电路	108
6.1.4	结语	109
6.2	关于非平衡桥式电路等效电阻求法的讨论	109
6.2.1	非平衡桥式电路的分析	109
6.2.2	进一步讨论	114
6.2.3	结语	114
6.3	基于二端口参数矩阵的非平衡桥式电路等效电阻的求法	115
6.3.1	基于二端口 VCR 的非平衡桥式电路的分析	115
6.3.2	构成二端口电路的形式	117

6.3.3 结语	118
6.4 利用待定系数法求解非平衡桥式电路等效电阻	118
6.4.1 等效电阻的通用参数表达式	119
6.4.2 一个算例	119
6.4.3 进一步讨论	120
6.4.4 结语	121
参考文献	121

第 7 章 电路的反馈

123

7.1 运算放大器工作状态的判定及其仿真	123
7.1.1 运算放大器工作状态的判定规则	123
7.1.2 对采用正、负反馈连接方式的运算放大器工作状态的判定	125
7.1.3 仿真结果	126
7.1.4 结语	128
7.2 含运算放大器电路的图解分析	129
7.2.1 问题产生原因的分析	129
7.2.2 含运算放大器电路的图解分析	130
7.2.3 教学建议	133
7.2.4 结语	133
7.3 关于 Howland 电路的分析与讨论	133
7.3.1 两种证明方法	135
7.3.2 进一步讨论	136
7.3.3 结语	137
参考文献	137

第 8 章 动态电路的分析

139

8.1 阶跃函数的定义及其在零点的取值	139
8.1.1 实例说明	140
8.1.2 结语	142
8.2 关于一阶电路时间常数求法的讨论	142
8.2.1 时间常数的一般求法	143

8.2.2	一阶电路时间常数的计算	143
8.2.3	结语	146
8.3	由原始值直接求动态电路响应	146
8.3.1	由原始值直接求解电路微分方程	147
8.3.2	应用实例	149
8.3.3	结语	150
8.4	动态电路全时域响应的求解	150
8.4.1	动态电路全时域模型	151
8.4.2	全时域响应的时域解法	152
8.4.3	全时域响应的频域解法	153
8.4.4	结语	154
8.5	含全耦合电感电路的求解	154
8.5.1	一个实例	154
8.5.2	含全耦合电感电路的等效电路	156
8.5.3	进一步讨论	157
8.5.4	结语	157
8.6	关于动态电路阶数的讨论	158
8.6.1	实例分析	158
8.6.2	动态电路阶数的确定	159
8.6.3	进一步讨论	161
8.6.4	结语	162
8.7	关于电容电压和电感电流跃变的讨论	162
8.7.1	电路实例	162
8.7.2	进一步讨论	164
8.7.3	结语	166
参考文献		167

第9章 正弦波振荡电路

168

9.1	正弦波振荡电路的负阻分析方法	168
9.1.1	正弦波振荡电路的一般模型	168
9.1.2	应用实例	169
9.1.3	结语	172

9.2	自激振荡虚拟实验电路设计及其仿真	172
9.2.1	负反馈放大电路设计	172
9.2.2	自激振荡的观察	174
9.2.3	进一步讨论	176
9.2.4	结语	178
9.3	相移式振荡电路的分析与仿真	178
9.3.1	电路正弦振荡条件分析	178
9.3.2	电路仿真实例	182
9.3.3	结语	183
9.4	文氏桥式振荡电路特性及数值分析	183
9.4.1	电路方程的建立及分析	184
9.4.2	数值分析	185
9.4.3	结语	186
	参考文献	187

第 10 章 功率和能量

188

10.1	电容充电电路的能量效率分析	188
10.1.1	采用指数型电压源对 RC 电路充电	188
10.1.2	RLC 充电电路的能量效率	190
10.1.3	RLC 充电电路能量效率的提高	192
10.1.4	结语	193
10.2	关于正弦稳态功率传输的讨论	194
10.2.1	有关推导与结果	194
10.2.2	应用实例	196
10.2.3	进一步讨论	197
10.2.4	结语	199
10.3	关于无功功率定义的讨论	199
10.3.1	利用旋转相量定义无功功率	200
10.3.2	电路元件的无功功率	201
10.3.3	讨论与结语	202
10.4	对称三相电路无功功率的测量	203
10.4.1	相序对测量无功功率的影响	203

10.4.2	用功率表测量三相电路的相序	206
10.4.3	进一步讨论	206
10.4.4	结语	207
10.5	非正弦周期稳态电路最大功率传输	207
10.5.1	负载为电阻的情况	207
10.5.2	负载为动态网络的情况	208
10.5.3	负载获得最大功率的情况	209
10.5.4	结语	211
参考文献		211

第 11 章 电路的计算机辅助分析

212

11.1	Matlab 函数编程在电路分析中的应用	212
11.1.1	Matlab 函数编程规则	212
11.1.2	Matlab 函数编程在电路分析中的应用	213
11.1.3	讨论与结语	216
11.2	Matlab 符号计算在二端口网络分析中的应用	217
11.2.1	Matlab 的符号计算功能	217
11.2.2	符号计算在二端口网络各参数关系推导中的应用	219
11.2.3	符号计算在具有端接二端口网络分析中的应用	220
11.2.4	结语	222
11.3	Matlab 符号计算在傅里叶级数分析中的应用	224
11.3.1	基于 Matlab 编程的傅里叶级数分析	224
11.3.2	应用举例	227
11.3.3	结语	230
11.4	基于频率响应法的 RLC 串联电路参数的测量	230
11.4.1	基于频率响应法的 RLC 参数测量原理	230
11.4.2	Multisim 仿真实验	232
11.4.3	实验计算结果	234
11.4.4	结语	234
参考文献		235

索 引

236

第1章 电路的美与趣

电路理论是一门体系完整、内容丰富、结构稳定的经典科学。挖掘电路中美与趣的因素,无论对学习电路还是应用电路理论,都有重要的意义。

1.1 论电路之美

人类社会生活中出现了美,并相应地产生了人对美的主观反映,即美感^[1]。美,无处不在。著名雕刻大师罗丹曾说过:“生活中并不缺少美,而是缺少对美的发现”^[2]。电路理论是一门体系完整、内容丰富、结构稳定的经典科学。挖掘电路中美与趣的因素,无论对学习电路理论还是应用电路理论,都有重要的意义。下面从电路名称、内容、应用的角度,讨论电路之美——电路名称之美、电路理论之美、电路应用之美、电路研究之美。

1.1.1 电路名称之美

“电路”之名,由“电”和“路”两个汉字组成。从名称看,电路之名兼具科学与人文之美。电,是指电路这门科学研究的对象。路,是指研究电路的形式与方法。电,具有科学性,它指电子、电力、电现象等,而“路”是一个在社会和生活应用广泛的汉字。按照《现代汉语词典》(2005年版),路的常用含义有:①道路,如水路、陆路、铁路;②路程,如路遥知马力;③途径、门路,如生路;④条理,如思路、心路;⑤路线,如网路、邮路。电路之“路”指路径、路线,因此可以将电路理解为“[电气器件互连而成的]电[的通]路”。可以说,电路这一名称非常简洁、准确地指出了电路的基本含义,而学习、理解电路的过程也与“路”密切相关,如学习电路的途径、理解电路的思路等都与“路”有关。

从电路之名,也容易让人想到文学作品中“路”的描述。鲁迅先生说:“世上本没有路,走的人多了也便成了路。”这句话的意思很明白,凡事都不是一定要有先例可循才可以进行,人需要探索精神。

“山重水复疑无路,柳暗花明又一村。”读着如此流畅绚丽、开朗明快的诗句,仿佛可以看到诗人在青翠可掬的山峦间漫步,清碧的山泉在曲折溪流中汨汨穿行,草木愈见浓茂,蜿蜒的山径也愈益依稀难认。正在迷惘之际,突然看见前面花明柳暗,几间农家茅舍,隐现于花木扶疏之间,诗人顿觉豁然开朗(其喜形于色的兴奋之状,可以想见)。同样,学习电路遇到问题多思考多观察,往往峰回路转惊喜连连。

“曲径通幽处,禅房花木深。”曲曲折折的小路,通向幽静的地方,僧人们的房舍掩映在花草树林中。诗人为我们形象地描绘了山寺幽深、清寂的景色。而学习电路亦需要静心揣摩。

电桥,也是一种电路。桥,也是路的一种。由电桥之名,不禁让人想到“一桥飞架南北,天堑变通途。”雄伟宏图,展现眼前。想到“车到山前必有路,船到桥头自然直。”对待任何困难,都要泰然处之,坦然面对。

1.1.2 电路理论之美

1) 简洁美

电路理论内容丰富、结构严谨,具备简洁之美。作为电路理论的基石,KCL、KVL可用两句简明的语句加以描述,或者用两个简单的式子加以表达,形式极具美感。电路理论中许多方法、定理大多描述简洁,公式表达上也十分简明。如戴维南定理可简述为^[3]:任何线性含独立电源一端口电阻电路,可以用一个电压源与一个电阻的串联组合来等效。用一句话就表达

出定理的内涵。又如,串联电阻分压公式可表示为 $u_k = \frac{R_k}{\sum_{j=1}^n R_j} u$,形式上非常简单。

更令人不可思议的是当我们从电阻电路进入正弦稳态电路,KCL/KVL、欧姆定律、参数关系呈现惊人的简洁美,如表1-1所示。正弦交流稳态电路的表达式只要在直流基础上,电压电流用相量、电阻用阻抗、电导用导纳替换就可以表示了,何其简洁!

简洁美有利于内容的理解和记忆,也是一切科学的基本特征。

表 1-1 电阻电路与正弦稳态电路的对比

	电阻电路	正弦稳态电路
KCL/ KVL	$\sum i = 0, \sum u = 0$	$\sum \dot{i} = 0, \sum \dot{U} = 0$
欧姆定律	$u = Ri, i = Gu$	$\dot{U} = Z \dot{I}, \dot{I} = Y \dot{U}$
元件参数关系	$R = 1/G$	$Z = 1/Y$

2) 对称美

对称既是几何学的一个基本法则,又是美学的一个基本要素。几何学中有众多的轴对称、中心对称图形,它们是绘画艺术中对称美的来源。对称可以产生结构或形式上的美感。古今中外不少伟大的画家都善于将对称之美运用到绘画艺术中。中外很多古代建筑、教堂、庙宇、宫殿等也都以“对称”为美作为基本要求。

构成电路的基本单位——电路元件,其符号许多就具有对称的形式,如电阻、电容、电感、理想变压器、理想回转器等。正是这种对称性,既展示了电路元件符号的形式美,又展示了利用这些元件构成的电路的形式美。

在众多的电路中,也有许多结构对称的例子。电路结构的对称,是实现电路功能的需要,同时也展示了电路形式美。仪表放大器电路是一种典型的采用对称结构的电路^[4],如图 1-1 所示。在电路的输入端采用了完全对称的结构,使仪表放大器具有高共模抑制比、高输入阻抗、低噪声、低线性误差、低失调电压及漂移、低输入偏置电流等优点,在数据采集、传感器信号放大、高速信号调节、医疗仪器和高档音响设备等方面得到了广泛的应用。

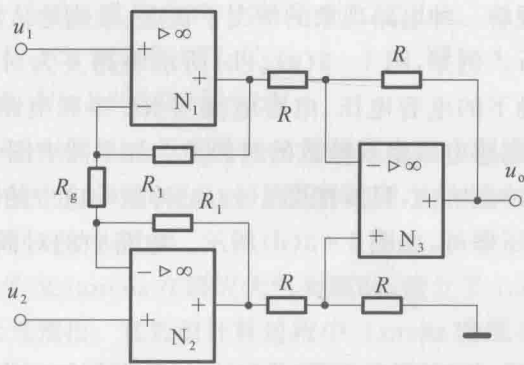


图 1-1 三运放型仪表放大器

图 1-2 是一个对称、无穷的电阻网络,设方格电阻电路四周均伸向无穷远接地,所有未标识的电阻均为 $1\ \Omega$,试求电流 i 。这是一个有趣的电路难题^[5]。从电路结构看,它具有对称美。而解决这一问题的方法又充分利用了这一对称性,从而更加增强了求解过程的美感。

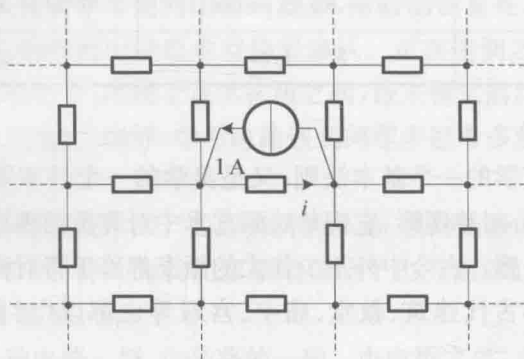


图 1-2 无穷电阻网络

3) 对偶美

对偶是一种普遍现象。所谓对偶,就是相对应的两件事或物。对偶具有形式上的美感,如文学作品中运用的对偶句、日常生活中的春联等,它们都讲究对仗工整,遣词典雅,寓意深刻,规格严谨,从而使人赏心悦目,美感油然而生。

在电路中,对偶是一种普遍规律。电路的对偶指出了如果对电路中某一现象、关系式、定理的表述是成立的,那么将表述中的概念(变量、参数、元件、结构等)用其对偶因素置换所得的对偶表述也一定是成立的^[6]。利用对偶性可以帮助我们在理解一种电路现象的情况下快速、准确地认识其对偶现象,从而简化电路的分析。例如,图 1-3(a)、(b)所示电路互为对偶, RC 并联电路在冲激电流源激励下的电容电压、电容电流与 RL 串联电路在冲激电压源激励下的电感电流、电感电压呈现精致的对偶美。如果需求图 1-3(b)电路中的电感电流、电压的冲激响应,只要把图 1-3(c)冲激响应中的电容电压、电流更换为电感电流、电压即可,如图 1-3(d)所示。电路中的对偶例子可以说是俯拾皆是、举不胜举。

4) 混沌美

混沌理论的研究自 20 世纪 60 年代以来已成为许多不同学科领域的热点。科学家发现许多自然现象即使可以化为单纯的数学公式,但是其行径却无法加