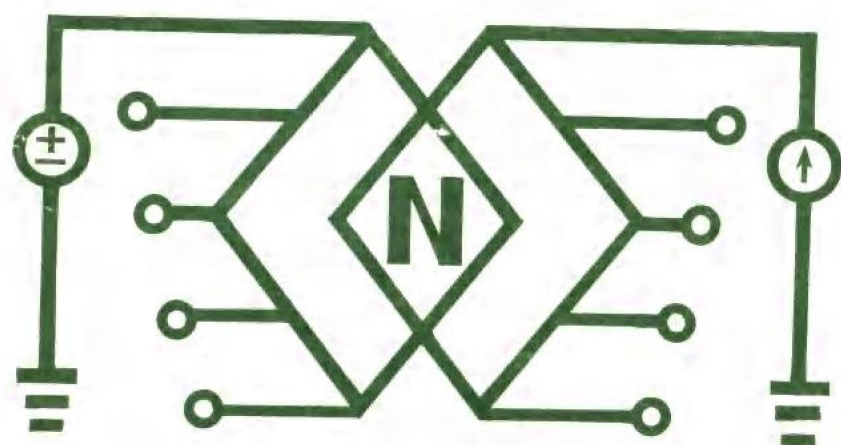


战胜录 主编



电路系统的理论基础

Dianlu
xitong
de
lilun jichu

大连工学院出版社

内 容 简 介

《电路系统的理论基础》一书是运用“电路和系统”、“线性和非线性电路”统一的观点编写而成的,并提出了电路理论知识基本结构:“以模型为基础,以基本定律和原理为根据,运用不同的数学方法,对不同类型电网络进行分析、综合”,教学实用性强。

本书适于作高等学校电气自动化、自动控制、仪表、无线电等专业教材外,亦可供有关科学技术人员参考。

电路系统的理论基础

Dianlu Xitong De Lilun Jichu

战胜录 主编

大连工学院出版社出版发行
(大连市甘井子区凌水河)

大连工学院印刷厂印刷

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 35 $\frac{1}{4}$ 字数: 878 千字

1988 年 8 月第一版

1988 年 8 月第一次印刷

印数: 0001—5000 册

责任编辑: 喆 斐 刘晓晶
责任校对: 韩 露

封面设计: 姜 严 军

ISBN 7-5611-0073-6/TM·1

定价: 5.07 元



序 言

我们生活在科学技术飞跃发展的年代,面临着当代科学技术革命新的挑战。当代科学技术的进步,不仅改变着人们的生产方式、生活方式,甚至改变着人们的思维方式和观念,改变着传统的教学观点。我们的教育要面向现代化、面向世界、面向未来,就要培养大批适应新时代需要的创造性人才,使得新一代大学生的聪明才智得到充分的发挥。为适应现代科学技术发展和教学的需要,编者在多年教学实践和教学研究的基础上,按新的教学论观点编写了这本教材,也是对电路理论课程教学改革的一种尝试和探索。

现代科学技术发展的一个主要特点是科学技术各个领域的相互渗透、相互促进,从而导致各门学科不断分化,不断综合。特别是本世纪四十年代以来,三大横断学科——控制论、信息论、系统论的形成和发展,电子计算机的广泛应用,大大加速了这种分化、综合的进程。电工程基础学科——电工理论也在分化、综合。在我国电工理论学科已经分化为电路理论和电磁场理论。电路理论已经成为一门十分重要、而又高度发展的成熟学科。随着新型电子器件的大量涌现,电子计算机辅助电路分析、设计的应用,使电路理论由传统的只研究线性的、定常的、无源的RLC网络,向研究非线性的、时变的、有源的大规模网络发展。同时,电路理论学科又在与其他学科综合。新兴技术的关键——电子技术的发展,特别是集成电路的出现和发展,打破了器件与电路分离的传统概念。集成电路的规模越来越大,现代控制系统、现代通信系统、现代电力系统等规模也愈加庞大、愈加复杂,要求从传统的局部电路分析、设计转向整体分析、设计,研究各个局部对整体的影响,需要人们从整体和互相联系的角度去观察、分析和解决问题,即电路理论与系统理论正在综合。这种综合,很可能为正在酝酿的电路理论新的突破开辟道路。本教材作为大学工科电类专业的基础电路理论教材,要力求反映这个变化。

无论是学科的分化,还是综合,最好用现代的统一科学观点和方法来阐述学科理论。本教材试用电路和系统统一以及线性和非线性电路统一的观点来阐述电路理论,为此精选现代的和传统的电路理论内容,并尽力将两者融合为一体,组成合理的知识结构。编者在多年教学实践和教学研究中,对电路理论知识进行结构分析,认为本学科知识的基本结构应该是:“以模型为基础,以基本定律和原理为根据,运用不同的数学方法,对各种类型电网络的特性进行分析、综合。”教学实践证明,这不仅有益于用基本的和普通的观念来扩大和加深学生的知识,且益于向学生传授系统的科学思维方法,开发学生的智力,培养学生的能力。

作为教材既要立足现实,又要着眼未来。根据上述观点,遵照国家教委所属电路教学指导委员会的关于电路理论课程的基本要求,本教材注意充分地利用目前大学生物理学、数学的基础和能力,立论起点较高;适当地压缩传统内容,增加非线性电路内容;试用统一科学的观点——系统观点阐述电路理论,强调了模型、网络(或系统)特性、响应、状态等重要概念,采用系统理论的演绎方法、分类方法建立电路理论课程体系,加强了课程的理论性。在

教材的编写过程中,同时考虑采取“重点讲授、自学为主、加强练习、提高能力”的教学方法。实行“高难度教学原则”,以最大限度发挥学生智力的潜力。本书每篇设总论,每章有内容提要,并配置不同层次的例题、练习题、习题以及综合练习题。每章最后附有参考资料。本书包括五篇十四章及附录,其中标注*号的为选学内容。

本书由大连工学院战胜录主编。书中的序言、引言及第一、二、十二、十三、十四章由战胜录编写;第三、四章及附录由沈阳工业大学程桂芬编写;第五、八章由大连工学院陈宝庄编写;第六、七章由大连工学院司媛春编写;第九、十、十一章由东北工学院郝蕴卿编写;全部习题由大连工学院付丕春编写。

本书经东北工学院周孔章教授审阅。

南京工学院管致中、沙玉钧教授,北京工业学院李翰荪教授审阅了编写大纲,并对编写工作给予指导;东北工学院、大连海运学院、沈阳工业大学、沈阳化工学院等电路教研室的老师,对编写大纲提出宝贵意见,对此深表谢意。

本教材是我们在改革课程教学中的一种尝试和探索,某些看法难免有不妥之处,敬请读者提出意见,以待充实和改进,不断提高本科电路理论课程的教学水平。

编者于大连工学院 1987. 9

目 录

引 言	(1)
-----	-------

第一篇 电路理论导论

第一章 电路器件模型和基本定律	(6)
§ 1—1 电路理论的主要变量——电流（强度）、电压及其参考方向	(6)
§ 1—2 无源器件模型	(12)
§ 1—3 电源器件模型——独立电源	(19)
§ 1—4 受控器件模型——受控电源	(26)
§ 1—5 基尔霍夫定律	(29)
参考资料	(34)
习题一	(35)
第二章 网络理论概述	(39)
§ 2—1 网络理论的基本问题、网络分类	(39)
§ 2—2 网络方程	(43)
§ 2—3 网络分析的基本方法	(49)
参考资料	(55)
习题二	(55)

第二篇 线性电阻网络分析

第三章 直观分析法	(59)
§ 3—1 电阻网络的三个基本概念	(59)
§ 3—2 节点分析法	(66)
§ 3—3 回路分析法	(72)
§ 3—4 网络特性在网络分析中的应用	(78)
参考资料	(83)
习题三	(83)
第四章 网络定理	(87)
§ 4—1 等效网络定义及两种等效性	(87)
§ 4—2 线性的代维宁（诺顿）定理	(91)
§ 4—3 叠加定理	(96)
§ 4—4 互易定理	(100)
* § 4—5 替代定理	(105)
* § 4—6 对称性定理	(109)

* § 4—7 电源位移定理·····	(114)
参考资料·····	(118)
习题四·····	(119)
综合练习题(一)·····	(123)
第五章 拓扑矩阵分析法·····	(127)
§ 5—1 网络拓扑入门·····	(127)
§ 5—2 矩阵形式欧姆定律·····	(132)
§ 5—3 矩阵形式基尔霍夫定律·····	(138)
§ 5—4 节点分析法·····	(144)
* § 5—5 回路分析法。割集分析法·····	(152)
* § 5—6 对偶性原理·····	(159)
§ 5—7 特勒根定理·····	(166)
参考资料·····	(171)
习题五·····	(171)

第三篇 线性动态网络正弦分析

第六章 正弦交流电路基本理论·····	(177)
§ 6—1 正弦交流电的基本概念·····	(177)
§ 6—2 相量形式的两类约束·····	(183)
§ 6—3 复数阻抗、复数导纳及其等效变换·····	(191)
§ 6—4 相量分析法·····	(198)
§ 6—5 网络函数及其在网络分析中的应用·····	(210)
§ 6—6 正弦交流电路的功率及其传输·····	(214)
§ 6—7 三相电路·····	(223)
参考资料·····	(236)
习题六·····	(236)
第七章 频率特性·····	(243)
§ 7—1 信号频率特性·····	(244)
§ 7—2 RLC 串联谐振电路·····	(245)
§ 7—3 RLC 并联谐振电路·····	(261)
§ 7—4 RC 电路频率特性·····	(268)
§ 7—5 周期性非正弦电流(压)的平均值、有效值和平均功率·····	(273)
* § 7—6 对称三相电路中的高次谐波·····	(279)
参考资料·····	(284)
习题七·····	(285)
第八章 多端网络分析·····	(289)
§ 8—1 多端器件模型·····	(290)

§ 8—2 含运算放大器电路的分析·····	(303)
§ 8—3 含耦合电感器电路的分析·····	(306)
§ 8—4 二端口网络·····	(316)
* § 8—5 多端网络方程 不定导纳矩阵·····	(326)
参考资料·····	(332)
习题八·····	(332)
综合练习题 (二) ·····	(337)

第四篇 线性动态网络动态分析

总 论·····	(340)
第九章 时域分析法·····	(343)
§ 9—1 时域分析法概述·····	(343)
§ 9—2 初始条件、状态和初始状态·····	(350)
§ 9—3 零输入响应、零状态响应·····	(356)
§ 9—4 一阶网络动态分析的三要素法·····	(363)
§ 9—5 一阶网络的阶跃响应、冲击响应·····	(369)
§ 9—6 一阶网络任意激励下的零状态响应——卷积分析·····	(380)
§ 9—7 二阶网络零输入响应·····	(384)
§ 9—8 二阶网络零状态响应、阶跃响应、冲击响应·····	(391)
参考资料·····	(397)
习题九·····	(397)
第十章 复频域分析法·····	(403)
§ 10—1 拉普拉斯变换及其重要性质·····	(403)
§ 10—2 拉普拉斯反变换·····	(410)
§ 10—3 复频域形式的两类约束及电路模型·····	(415)
§ 10—4 应用拉普拉斯变换分析线性动态电路·····	(422)
§ 10—5 网络函数及其零、极点·····	(426)
* § 10—6 卷积定理及其在复频域分析中的应用·····	(432)
参考资料·····	(434)
习题十·····	(435)
第十一章 状态分析法·····	(437)
§ 11—1 状态方程、输出方程·····	(437)
§ 11—2 状态方程直观编写法·····	(440)
§ 11—3 标准状态方程的通解·····	(445)
§ 11—4 状态方程复频域解法·····	(447)
参考资料·····	(452)
习题十一·····	(452)

综合练习题 (三)	(453)
-----------	-------

第五篇 非线性电路分析

概 述	(456)
-----	-------

第十二章 非线性器件模型和网络方程	(458)
-------------------	-------

§ 12—1 非线性器件模型	(458)
----------------	-------

§ 12—2 非线性网络方程的编写	(467)
-------------------	-------

参考资料	(473)
------	-------

习题十二	(473)
------	-------

第十三章 非线性电阻电路分析	(476)
----------------	-------

§ 13—1 数值法	(476)
------------	-------

§ 13—2 图解法	(482)
------------	-------

§ 13—3 分段线性迭代法	(487)
----------------	-------

参考资料	(491)
------	-------

习题十三	(491)
------	-------

第十四章 非线性动态电路分析	(493)
----------------	-------

§ 14—1 平衡状态的稳定性概念	(493)
-------------------	-------

§ 14—2 分段线性法	(499)
--------------	-------

§ 14—3 图解法	(503)
------------	-------

§ 14—4 数值法	(505)
------------	-------

参考资料	(508)
------	-------

习题十四	(509)
------	-------

附录: 均匀传输线	(511)
-----------	-------

§ 附—1 分布参数电路及均匀传输线	(511)
--------------------	-------

§ 附—2 均匀传输线的微分方程	(513)
------------------	-------

§ 附—3 均匀传输线的正弦稳态解	(514)
-------------------	-------

§ 附—4 行波	(519)
----------	-------

§ 附—5 终端接有不同负载的均匀传输线	(523)
----------------------	-------

§ 附—6 均匀传输线的等效二端口网络	(531)
---------------------	-------

§ 附—7 无损耗传输线	(532)
--------------	-------

§ 附—8 无损耗线与直流理想电压源接通的暂态过程	(539)
---------------------------	-------

参考资料	(545)
------	-------

附: 习题	(546)
-------	-------

部分习题答案	(548)
--------	-------

引 言

电路系统理论课程是一门“物理学、数学和电工程系统有机结合的工程技术基础学科”。电路对于我们并不生疏，在日常生活里，就接触过许多实际电路，如照明电路、收音机电路……。在中学、大学物理课程里的电磁理论（电路、电磁场、电磁波），是学习本课程的物理基础。就教学观点而言，电路系统理论课程又是一门应用数学课，它将应用初等数学、高等数学和专业数学（包括线性代数、微分方程、积分变换等）的方法，分析、综合不同类型的电路，这是学习本课程的数学基础。在系统阐述电路理论过程中，本教材强调如何将物理的电磁学知识和数学知识过渡并应用到电工程系统，以掌握科学思维方法，这一点至关重要。同时，运用系统观点阐述电路系统理论，会使大家熟悉并掌握有关专业工程领域若干重要概念和科学思维方法。本课程是学习电工程专业承上启下的一门重要专业技术基础课程。

本引言将着重介绍两个问题：其一，电路和电磁场的关系，以明确电路是电磁场一种特殊情形，分清电路理论和电磁场理论研究的范畴。其二，电路和系统的关系。以明确电路是系统的一个特例，以便于应用系统观点掌握电路理论。这两个问题是两个重要的科学思维方法。

一、电路和电磁场的关系

实际电路系统（如照明电路、收音机、电视机电路等）的各种器件（如电阻器、电容器、电感器、二极管、晶体三极管等）的工作物理过程，都与电磁场的基本现象密切相关。如在电阻器中集总电场能量并与其他形式能量（如热能、光能等）进行不可逆的转换；在电容器中集总电场能量及其变化；在电感器中集总磁场能量及其变化等等，即电路系统中的各种器件，它是将空间分布的电磁场集总于器件之中。这种电路器件，称作集总参数器件，由集总参数器件组成的电路，称作集总参数电路^①。为从理论上研究电路器件的外部特性和功能，我们将器件内部空间分布的电磁场微分量（电场强度矢量 $\vec{E}$ 、电流密度矢量 $\vec{\delta}$ 、磁感应强度矢量 $\vec{B}$ 等）分别近似地用积分量（电压 u ，电流强度 i 、磁通量 ϕ 等）来表示，即在电场中电压 $u_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$ ，在电流场中电流强度 $i = \int \vec{\delta} \cdot d\vec{s}$ 、在磁场中磁通量 $\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$ 等。这样，我们可以不直接研究电磁场，而是用这些积分量之间关系的简单方程式代替场的方程式，如欧姆定律： $i = u/R$ 代替 $\vec{\delta} = \vec{E}/\rho$ （ ρ 为电阻率）；焦耳-楞次定律： $p = u^2/R$ 代替热功率密度 $W = \vec{E}^2/\rho$ ；基尔霍夫电流定律： $\sum i = 0$ 代替 $\oint \vec{\delta} \cdot d\vec{s} = 0$ ，

^① “集总参数电路”概念，可以从电磁场的时间性和空间性来说明。这里是从电磁场空间分布性予以说明，亦可以从电磁场的时间同时性予以说明，详见参考资料〔1〕：1—2集总网络理论的同时性公设。

基尔霍夫电压定律： $\sum u=0$ 代替 $\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l}=0$ ，即可以说，电路基尔霍夫定律是电磁场普

遍定律——麦克斯韦方程的近似〔2〕。这样，电磁场问题便可近似地简化为电路理论问题。电压 u 、电流 i 是电路理论的主要变量，基尔霍夫定律是电路理论的基本定律之一。另外，大家熟知的电路理论中的基本参数：电阻 R 、电容 C 、电感 L ，对它们的分析计算，实质是电磁场问题。电路系统中，在传输线的导向下，能量传输过程的实质是电磁场能量在空间的传播。综上所述，电路的实质是电磁场问题，电路是电磁场的一种局限的特殊形式，电路理论是电磁场理论的一种近似和简化。这如同牛顿经典力学理论是爱因斯坦相对论的一种近似和简化，即只有在物体运动速度 V 远小于光速 c ，即宏观低速条件下，力学问题近似简化为经典力学范畴问题，否则为相对论力学范畴问题。任何科学理论都有一定的适用范围，这里关键是条件。电路和电磁场理论都是研究电磁场物质运动的不同形式，在什么条件下，归结为电路理论问题？在什么条件下，归结为电磁场理论问题呢？理论与实验证明，这里的条件就是电磁场变化的速率——场源频率 f 的大小。当电磁场变化频率 f 很低因而实际电路系统的几何尺寸 l 远小于电磁场工作频率 f 所对应的波长 λ ，有

$$l \ll \lambda \tag{0-1}$$

这个条件称作似稳（或准静）条件。其中 $\lambda=c/f$ ， c 为电磁波在空间传播速度，近似于光速 3×10^8 米/秒。在似稳条件下，电磁场问题近似地简化为电路问题。如我国工业用电频率 $f=50$ 赫兹，其波长 $\lambda=6000$ 公里，一般电气设备几何尺寸均远小于 6000 公里，归属电路理论问题；声音频率范围为 20 赫兹~25 千赫兹，相应波长 λ 为 15000 公里~12 公里，也满足似稳条件。如表 0—1 所示无线电频率，一般来说，长波、中波、中短波、短波无线电设备同样满足似稳条件，其理论问题均隶属电路理论问题。但是，当电磁场变化频率甚高时，其波长为分米、厘米、毫米时（如电视、雷达所用波长），就不满足似稳条件，电磁辐射能量不能忽略，电场和磁场的分布难于分开集总来进行研究，这样的问题归属电磁场理论问题。

表 0—1 无线电频率范围

名 称		频率 $f(\text{Hz})$	波长 $\lambda(\text{m})$	用 处
长 波		低于 100k	大于 3000	远洋长距离通讯
中 波		100k~1500k	3000~200	无线电广播
中 短 波		1500k~6000k	200~50	电报通讯
短 波		6M~30M	50~10	无线电广播，电报通讯
超短波（米波）		30M~300M	10~1	电视广播
微 米	分米波	300M~3000M	1~0.1	电视广播 雷达通讯 无线电导航
	厘米波	3000M~30000M	0.1~0.01	
	毫米波	30000M~300000M	0.01~0.001	

满足似稳条件的电路称作集总参数电路，不满足似稳条件的电路称作分布参数电路。本书主要阐述集总参数电路理论，分布参数电路理论，详见本书最后的附录。

二、电路和系统的关系

所谓“系统”，它是由相互制约的各个部分组成的具有一定功能的整体^{〔3〕}。一台收音机、电视机电路是一个系统，一条生产线、一个企业是一个系统，一个生物体，一个社会组织也是一个系统。有小系统，也有大系统，有的把一个国家，甚至全地球作为一个大系统来进行研究。“系统”是一个广义的概念，就广义而言，可分为工程控制系统、生物控制系统、经济控制系统、社会控制系统等。任何一个具体系统，都包括物质、能量和信息三大要素。为了实现物质系统本身的稳定和完成特定的功能，系统必须要有输入、输出能量和信息，即系统本身可以实现对能量的传输或者对信息的加工、处理。其结构方框图如图 0—1 所示。

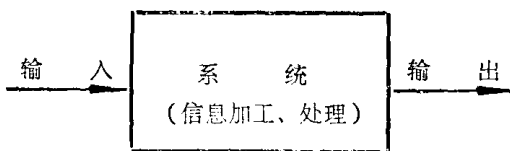


图 0—1

电路是由相互制约的各种电路器件组成的具有一定功能的整体。根据上述系统观点，电路也是一个系统，称为“电路系统”。在电路系统理论中包含着系统理论的许多重要概念、方法。简要说明如下：

其一，从组成系统的三大要素来看，电路系统是一种特殊物质形态——电磁场运动系统。为实现电路系统的稳定和完成特定功能，需要输入、输出电磁能量和信息，其中信息常常是随时间变化的电压或电流信号。电路系统的结构方框图，如图 0—2 所示。输入又称激励，输出又称响应。电路系统本身的功能，是实现对电磁能量的传输和对电流、电压信号的加工、处理。

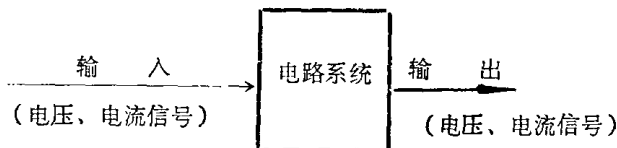


图 0—2

其二，电路理论和系统理论都是建立在“模型”的基础上。所谓“模型”，即不是实际系统本身，而是人们在对实际系统进行理论分析研究时，对应所研究实际系统的基本变量，在一定条件下的一种近似的模写、理论的抽象。如，力学系统中有力学模型——质点和刚体；原子物理中有原子模型；生物系统中有 DNA 双螺旋分子模型^①等等。电路系统理论就是建立在电路基本器件模型（又称理想元件）——理想电阻、电感、电容的基础之上的。电路或系统理论所应用的模型方法，是一种重要的科学方法。

其三，建立电路或系统理论采用演绎方法^{〔4〕}。根据“模型”来建立学科理论（包括电路或系统理论）是一种演绎方法，这种方法包含三个基本步骤：第一，定义某些与所研究学科有关的基本变量。就电路系统理论而言，所定义的基本变量为：电荷（量） q 、电流（强度） i 、电压 u 、磁通（量） ϕ （或磁链 φ ）等四个变量（将在 § 1—1 中介绍）。第二，确定基本变量之间的关系。电路系统所确定的四个基本变量之间的数学关系，包括：

^①在探索复杂的生命现象中，模型方法起着重要作用。1953 年（美）沃森和（英）克里克，就是应用模型方法成功发现了具有生命功能的 DNA 双螺旋分子模型，为遗传工程学打开新兴局面。

欧姆定律:
$$u = Ri \quad (0-2)$$

或
$$R = \frac{u}{i} \quad (0-3)$$

电磁感应定律:

$$u_L = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (0-4)$$

其中
$$L = \frac{\psi}{i_L} \quad (0-5)$$

电容电流连续性:

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt} \quad (0-6)$$

其中
$$C = \frac{q}{u_C} \quad (0-7)$$

以及基尔霍夫电流定律:

$$\sum i = 0 \quad (0-8)$$

基尔霍夫电压定律:

$$\sum u = 0 \quad (0-9)$$

电路系统理论就是建立在上述数学关系的基础上(将在 §1—2、3、4、5 中详细介绍)。第三, 确定基本变量的数学运算规则。电路或系统理论, 要应用不同的数学方法, 分析、综合不同类型电路或系统的特性——输入(激励)和输出(响应)之间的关系。电路或系统均分类为: 线性和非线性、静态和动态电路或系统。不同类型电路或系统, 要采用不同的数学方程进行处理, 分别为线性和非线性数学方程, 代数(函数)方程和微分方程, 相应称作线性和非线性分析、静态和动态分析(将在第二章概述)。本书将按演绎方法、步骤, 分篇、章介绍电路系统理论。

系统理论的概念、方法是没有专业领域的, 它是从许多不同专业领域里抽象提炼出来的, 又为各专业工程领域所应用。系统方法的实质是科学方法论, 对所有各专业系统都具有普遍意义的。因此, 利用统一科学观点——系统观点阐述电路理论是现代科学技术发展的必然。

参 考 资 料

〔1〕蔡少棠著, 虞厥邦译, 《非线性网络理论引论》上册, 人民教育出版社, 1980 年。

〔2〕C. A 狄苏尔, 葛守仁著, 林争辉主译, 《电路基本理论》, 第一节 集中参数电路, 人民教育出版社, 1979 年。

〔3〕钱学森、宋健著, 《工程控制论》上册, 序 现代化, 技术革命与控制论, 科学出版社, 1980, 年。

〔4〕D. 郑钧著, 《电磁场与波》1—2 电磁模型, 上海交通大学出版社, 1984 年。

第一篇 电路理论导论

电路（或电网络）理论知识的基本结构是：“以模型为基础，以基本定律、原理为根据，运用不同的数学方法，对各种类型电网络的网络特性进行分析和综合。”本篇分两章：电路器件模型和基本定律；网络理论概述。主要介绍网络理论知识的基本结构，内容包括：电路主要变量、器件模型、基本定律；网络理论基本问题、网络分类和网络方程、网络分析的基本方法等。这些内容属于本课程重要的基本概念、基本方法，它贯穿于本课程的始终，是本课程的基本结构。因此，掌握本篇的内容，是学习网络理论的基础，并能在统观全局的基础上，有目的地学习线性电阻网络（第二篇）、线性动态网络（第三、四篇）和非线性网络（第五篇）。

第一章 电路器件模型和基本定律

内容提要：本章在物理电磁学的基础上，过渡并引深到工程电路理论中。引入电路理论的主要变量——电流、电压及其参考方向；从实际电路器件抽象出几种电路模型——电阻、电容、电感元件，独立电压源、电流源以及四种受控电源元件；介绍电路基本定律——元件定律和互连定律（基尔霍夫定律）。

本章重点：电流、电压的参考方向、器件数学模型（元件伏安方程、特性曲线）、开路和短路等重要概念。初步学会应用元件定律、互连定律分析计算电流、电压（电位），要特别留心电流、电压（电位）的两套正、负号。

§ 1—1 电路理论的主要变量——电流（强度）、电压及其参考方向

引言中曾经指出：根据“模型”建立学科理论。首先必须定义某些与所研究学科有关的基本变量。电路系统理论所研究的基本变量为：电荷（量） q 、电流（强度） i 、电压 u 、磁通（量） ϕ 。在线性电路理论中，一般选电流（强度） i 、电压 u 为电路变量，在非线性电路理论中，有时选电荷（量） q 、磁通（量） ϕ 为电路变量。本节着重讨论电路理论主要变量——电流 i 、电压 u 及其参考方向。

一、电流（强度）及其参考方向

在电场作用下，自由电荷有规则的运动而形成的电流包括：在导体和半导体中的传导电流是由于自由电子和自由电子或空穴在电场作用下引起的；在电解液中电流是正、负离子在电场作用下引起的；在真空中电流是自由电子或离子在电场作用下引起的。但是，需要指出，电流的形成即可能是正电荷，也可能是负电荷有规则的移动。为了说明电流方向，我们规定：正电荷移动的方向为电流的实际方向。为定量说明电流的强弱，定义电流强度（简称电流）为：

$$i = dq/dt \quad (1-1)$$

式（1—1）表示在单位时间内通过导体横截面的电量。在国际单位制中，电流的单位为安培（简称安，国际代号为A）。安培是国际单位制（SI）中的基本单位之一。

若单位时间内通过导体横截面的电量相同，则电流强度为常量，这种恒定电流称作直流电流（非时变电流），一般用大写字母 I 表示，而小写字母 $i = i(t)$ ，一般表示随时间变化的电流，称时变电流。

电流有其大小和方向，在电路理论中如何同时表示其大小和方向呢？这是自然科学理论中一个基本概念。在自然科学中描述任何运动，总要选择参考系，即任何运动的表示都是相对参考系而言的。在电路理论中，这个参考系所取的形式，就是电流 i 的参考方向，即电流 i 的任何数学表示，都是相对于参考方向而言。

如图 1—1 (a) 所示直流电路，流经电阻 R 的电流大小为 $1.5A$ ，其实际方向是从 $a \rightarrow b$ （用虚线箭头表示）。在电路理论中，若用数学式表示电流（包括大小、方向），必须预先

任意选择参考方向。如图 1—1 (a) 所示电流参考方向（用实线箭头表示），即电流参考方向与实际方向相同，则写作： $I = +1.5\text{A}$ ；同样电路，若选择电流参考方向如图 1—1 (b) 所示，即电流参考方向与实际方向相反，则写作 $I = -1.5\text{A}$ 。

如图 1—2 (a) 所示交变电流 i ，在任选其参考方向前提下，其数学表示式为 $i = I_m \sin \omega t$ ，相应图解表示如图 1—2 (b) 所示。则知：在 $t = 0 \sim \frac{T}{2}$ 内， $i > 0$ ，即电流为正值，说明

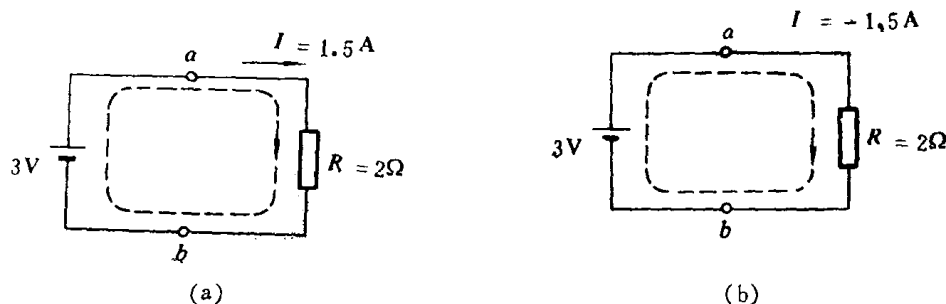


图 1—1

在这段时间内，电流的实际方向和参考方向相同；在 $t = \frac{T}{2} \sim T$ 内， $i < 0$ ，即电流为负值，说明在这段时间内，电流的实际方向和参考方向相反。

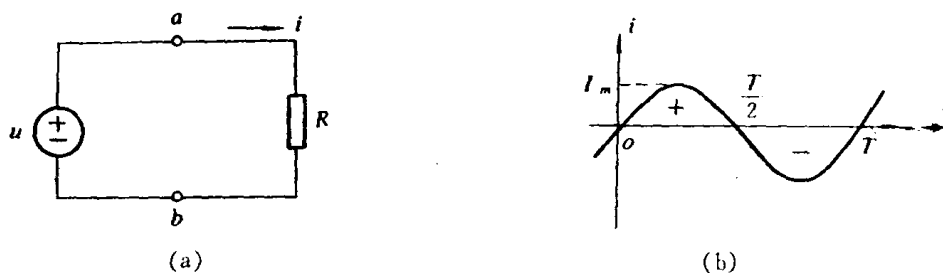


图 1—2

综上所述得知，在选定电流参考方向前提下，电流 i 是一个代数量，当电流为正值，说明实际方向与参考方向相同；当电流为负值，说明实际方向与参考方向相反。也可以说，电流的参考方向就是电流为正值的方向，故有的教科书里，参考方向称作正方向。参考方向（或参考系）可以人为的任意选择。参考方向又称作假定方向。

二、电压及其参考方向

在物理电学中得知，“电压”的物理意义是电场力对电荷做功，其定义：

$$u_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-2)$$

其中 $\vec{E}$ 为电场强度矢量，它在数值上等于单位正电荷在电场中所受的作用力。式 (1—2) 说明：单位正电荷在电场力的作用下，由 a 点移动到 b 点电场所做的功，称作 a→b 间的电压，用 u_{ab} 表示。在国际单位制中，电压单位为伏特（简称伏，国际代号为 V）。

这里要强调说明：电场力做功的路径问题，即线积分路径问题。式 (1—2) 中的电场（强度）应包括电荷形成的电场（称库仑电场，其强度可用 $\vec{E}_c$ 表示）、磁场变化形成的电场（称感应电场，其强度用 $\vec{E}_i$ 表示）以及非电磁原因形成的电场（称局外电场，如电池中电化学反应形成的电场，其强度用 $\vec{E}_e$ 表示）。电路导体中形成电流的库仑电场属于保

守场（或位式场，重力场属于位式场）。库仑电场一个重要性质：电场力对电荷所做的功与路径无关，只取决于路径的起点 a 和终点 b 的位置。相反，感应电场、局外电场属于非保守场（电源内部存在非保守场），其对电荷做功，不仅与起点、终点位置有关，且与路径有关，在电路理论中，为分析计算电压能有确定数值，式（1—2）的积分路径完全可以不通过感应电场和局外电场，即 $\vec{E}_i=0$ ， $\vec{E}_e=0$ 。在这个条件下，电路中任意两点 a→b 间电压 u_{ab} 与路径无关，只与起点 a 和终点 b 的位置有关。可写作：

$$u_{amb} = u_{anb} \quad (1-3a)$$

或
$$\int_{amb} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{anb} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-3b)$$

由式（1—3）可得：

$$\int_{amb} \vec{E} \cdot d\vec{l} - \int_{anb} \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

或
$$\int_{amb} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_{bna} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

即
$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (1-4a)$$

或
$$\sum u = 0 \quad (1-4b)$$

式（1—4）说明：任意时刻，沿电路中任意闭合路径 l 所有电压代数和为零，这就是电路重要定律——基尔霍夫电压定律的数学表示。要注意，式（1—3）（1—4）是库仑电场重要性质——做功与路径无关的不同数学表示，是在电路分析计算中最常用的重要公式之一。

在工程电路分析计算中，经常要进行电位的计算。所谓“电位”，是相对参考点而言，在电工程技术里，一般选公共线或大地为参考点，分别用符号 $\perp$ 或 ⏏ 表示。电位定义：

$$V_a = u_{ao} = \int_a^o \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-5)$$

式中 V_a 表示 a 点电位，它说明电路中任意点 a 的电位 V_a 等于 a 点对参考点 o 电压 u_{ao} 。或者 a 点电位等于单位正电荷在库仑电场作用下，由 a 点移动到参考点 o，电场力所做的功 u_{ao} 。在国际单位制中，电位与电压的单位都是伏特（简称伏，国际代号为 V）。

参考点 o 的电位为零，即

$$V_o = \int_o^o \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (1-6)$$

在电路分析计算中，参考点是可以任意选择的。电路中各点电位数值与参考点选择有关，而任意两点间的电压与参考点选择无关。

电路中任意两点间电压 u_{ab} 可以用该两点电位 V_a 与 V_b 之差来表示，即

$$u_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^o \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_o^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^o \vec{E} \cdot d\vec{l} - \int_b^o \vec{E} \cdot d\vec{l} = V_a - V_b$$

得

$$u_{ab} = V_a - V_b \quad (1-7)$$

电压又称电位差。

要强调指出：①式（1—3） $u_{amb} = u_{anb}$ 是基尔霍夫电压定律的一种形式，它经常用于分析计算电路中任意两点电压。②式（1—5） $V_a = u_{ao}$ 告诉我们，电位计算可以归结为电

压计算，即只要熟练掌握任意两点电压计算，电位计算是不难解决的。

在电路理论中，电压和电流一样，在选定参考方向(假定方向)前提下，电压也是一个代数量。在电路理论中，把从高电位指向低电位的方向规定为电压方向。电压参考方向，在目前各种教科书中有几种表示方法：一种以下标字母顺序表示，如 u_{ab} ，表示电压参考方向是从 a 指向 b，即假定 $V_a > V_b$ ；另一种用+、-极性表示，而电压参考方向是从+指向-；也有的用箭头“→”表示，箭头的方向是表示电位降低方向。因此，电压又称作电位降。

电压和电流参考方向，都可以任意选择。

如图 1—3 所示直流电路，任意选择电流 I 、电压 U (直流电压用大写字母 U 表示，小写字母 u 表示时变电压) 的参考方向。不难得知，电流实际方向与参考方向相同，所以； $I = +2\text{A}$ ；实际 a 点电位高于 b 点电位，所以 $U_{ab} = +6\text{V}$ ， $U = U_{ba} = -6\text{V}$ 。即知，在选定电压参考方向前提下。当电压为正值时，说明电压实际方向与参考方向相同；当电压为负值时，说明电压实际方向与参考方向相反。

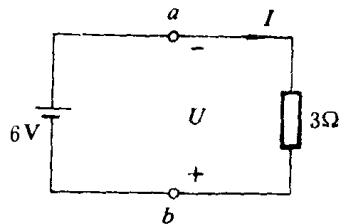


图 1—3

在电路分析计算中，电流、电压全部采用参考方向。如，在工程复杂电路分析计算之前，一般来说，电路中电流、电压的大小和实际方向是未知的，我们可以任意选择电流、电压参考方向，然后按照参考方向根据电路基本定律编写数学方程，并求解，可得电流、电压为代数量。这样，根据选定电流、电压的参考方向及其正、负值，就完全可以确定它们的实际方向。

电流、电压的参考方向以及式 (1—3)、式 (1—5) 是贯穿整个电路理论的重要内容，必须正确、熟练地掌握。举例说明如下：

例 1—1 如图 1—4 所示直流电路，任意选定电流 I 、电压 U 参考方向。试求： U 、 I 。

解 首先求电压 U 。根据选定电压参考方向知 $U = U_{ab}$ ，依式 (1—3) 任意两点电压与路径无关，得

$$U = U_{ab} = U_{anb} = U_{an} + U_{nb} \quad (1-8)$$

式中 $U_{an} = +3\text{V}$ ， $U_{nb} = -9\text{V}$ ，代入式 (1—8)，得

$$U = U_{ab} = (+3) + (-9) = -6\text{V}$$

U_{ab} 为负值，说明电压实际方向与参考方向相反，即假设 a 点电位高于 b 点电位，因为 $U_{ab} < 0$ ，故实际上 b 点电位高于 a 点，即得知电流的实际方向与参考方向相反，断定 $I < 0$ ；根据欧姆定律，得

$$I = \frac{U}{R} = \frac{-6}{2} = -3\text{A}$$

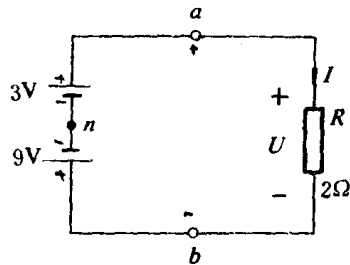


图 1—4

例 1—2 如图 1—5 所示直流电路，选定电流 I 、电压 U 参考方向。若选定 o 为电位参考点。试求各点电位及电压 U 、电流 I 。

解 根据式 (1—5) 电位计算可以归为电压计算，根据式 (1—3) 任意两点电压与路径无关，得

$$V_a = U_{ao} = -12\text{V}$$

$$V_b = U_{bo} = U_{ba} + U_{ao} = (+3) + (-12) = -9\text{V}$$