



国外经典教材

PEARSON
Prentice
Hall

FOUNDATIONS OF

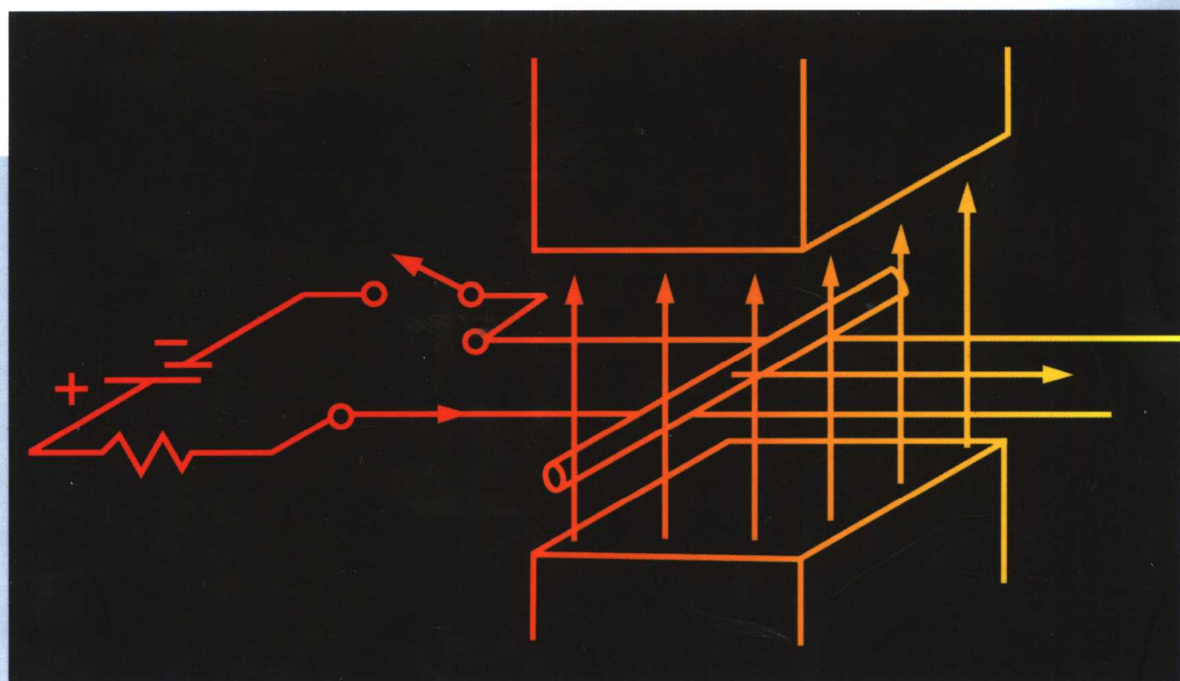
电气工程学概论

ELECTRICAL
ENGINEERING

(第2版)

S E C O N D

E D I T I O N



[美] J. R. Cogdell 著 贾洪峰 译



清华大学出版社

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了电气工程学的基础知识。全书分4部分,共18章,内容丰富,涵括了电路、电子技术、系统和电动机等方面的知识。全书在讲述基本概念和基本原理的同时,又注重实际应用的例子。每章均有大量例题、思考题和习题,便于读者复习和自学。

本书可作为高等工科院校电工学教材,也可供电气工程技术人员参考。

EISBN: 0-13-092701-5

Foundations of Electrical Engineering (Second Edition)

J.R.Cogdell

Copyright © 1996, 1990 by Prentice Hall Inc.

Original English language edition published by Prentice Hall Inc.

All right reserved.

For sale and distribution in the People's Republic of China exclusively (except Taiwan, Hong Kong SAR and Macau SAR).

仅限于中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)销售发行。

本书封面贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 图字 01-2002-5756 号

图书在版编目(CIP)数据

电气工程学概论/(美)科格戴尔著;贾洪峰译.—北京:清华大学出版社,2003

书名原文: Foundations of Electrical Engineering (Second Edition)

ISBN 7-302-06394-X

I.电... II.①科... ②贾... III. 电气工程—教材 IV.TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 017836 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦, 邮编 100084)

[http:// www. tup. com. cn](http://www.tup.com.cn)

[http:// www. tup. tsinghua. edu. cn](http://www.tup.tsinghua.edu.cn)

责任编辑: 文开棋 王新亭

印 刷 者: 北京鑫丰华彩印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 45.75 字数: 1482 千字

版 次: 2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06394-X/TP·4821

印 数: 0001~4000

定 价: 88.00 元

前言

本书的说明

10 年前, 我开始讲授电工学这门课, 该课程面向的是非电气专业的学生。当时, 我选用了一本较为普及的教材, 可很快发现这本教材给学生带来了很大的麻烦。因为这本教材就像一本百科全书, 涉及面很广, 内容却缺乏深度。于是, 我很希望能够出版这样一本教材: 从一定深度上讲解电工学的重要思想, 涉及更多的细节, 便于学生日后进行深入研究以及专业实践。因此我写了这本《电气工程学概论》。选择“概论”一词作为教材的名称, 主要是为了表明——电工学的整体构架是由几个基本的重要原理组成的。

第 2 版和第 1 版的主要目的是一样的, 有以下 3 个:

- (1) 深入地阐明电工学的基本思想;
- (2) 围绕基本思想进行阐述, 强调主题的一致性;
- (3) 全面概述电路、电子、系统以及电力工程所涉及的内容。

当然, 我并没有忘记电力工程是电工学的重点。可以预见, 电力工程将是这个时代必备的知识。对许多电子工程专业的学生来说, 新技术的挑战、大量的就业机会以及从事电子技术所获得的成就感, 都使得他们对电力工程逐渐失去了兴趣。大多数学生认为, 电力之于电子, 如同劣马之于纯种马。结果可想而知, 有许多电子工程专业学生, 基本不选修电力。可是在实际工作中, 选择电机时, 工程师不得不重新面对如何查找电机相关信息的问题。比如, 机械工程师需要选择适当的电机来驱动一个泵等。而本书正是考虑到了这种工程师的实际需求, 深入地阐述了电力方面的知识, 特别是电机的有关知识。

第2版的改进

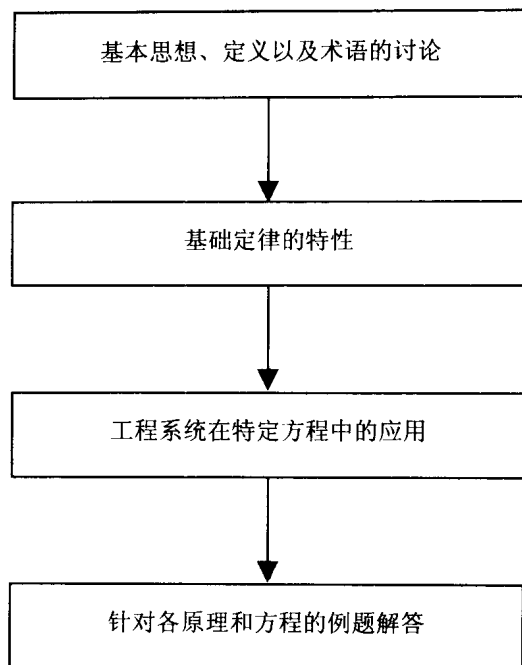
在第 1 版的基础上, 第 2 版做了许多改进。对全书重新进行了修订, 新增了一章, 并重新排版, 使全书条理更清晰。通过大量图例和多种讲解方式, 大大提高了本书的可读性。在重新修订期间, 全书共做了 3 次修改、2 次审稿, 并在 4 所大学进行了教学试验。

预备知识

本书面向的是完成大学一年级课程——《微积分》和《物理》的学生。要求会解线性微分方程, 并掌握复数的代数计算。但是为了便于理解, 本书仍然给出了详细的解题过程。在涉及到电机的那部分内容中, 首先总结了有关的物理知识, 并给出了相应的公式和术语。在介绍电机的动态和静态特性时, 本书还涉及一些简单的力学知识, 主要是牛顿第二定律的有关知识。

本书的教学方法

工程类课程的教学结构图如下所示:



教师应该按照以上各项，教学重点依照从上到下的顺序进行调整。在教师的头脑里，首先应该出现的是思想和术语，然后是方程，然后是实例——从一般到特殊。大多数学生的学习方法恰恰相反：先是实例，接着是方程，然后是定律，最后是思想。甚至有不少学生只是想学一下书本上的例子。当然，大多数学生还是认识到方程的重要性了。可是当教师想要考察一下学生是否理解常用的原理，出一个和先前实例不同的难题时，结果许多学生只会求助于记忆中的解题方法，或者提出异议“这个题从来没有见过，和笔记、作业中的题不一样！”而本书，最重要的一点就是同时兼顾了教师和学生的实际需求，以此来解决实际的问题。

学习帮助

本书从几个方面解决了学生和教师的问题：

- **思想** 我们给出了电工学的8个基本思想，并用一个灯泡图标作为标识。这些图标的使用是让读者明确：电工学是由一些重复出现的基本思想构成的。
- **关键术语** 当第一次介绍并定义关键术语时，会使用黑体字。不能过分强调术语的一致性，因为我们还要与其他人交流。重要的是，这些术语便于我们思考。
- **因果关系图** 在解题时，读者遇到问题的原因是，他们只关注方程，不去考虑到变量的重要性。理解一个问题，很大程度上需要知道各个因素之间的因果关系，这样才能有目的地列出方程组，因果关系图则直接列出了这些因果关系。
- **学习目标** 在各章开始列出了学习目标，并在各章结尾处做了回顾，便于读者查看这些学习目标是否实现。这为读者提供了一个个“路标”，使他们不至于在学习时“迷路”。

例题：全书共有 230 个加有边框、标题和已经编号的例题。

解：针对不同问题一一进行了解答。在解答之后有个思考题，目的是使学生不再被动地学习这些例题。

思考题：思考题对实例做了一个小小的改动之后，要求读者重新求解该实例。为了便于核对结果，在当前页的脚注中提供了相应的答案。

- **自测题** 主要的小节都提供“自测题”，包括问题和解答，以此来检查读者是否真正理解本节的内容。
- **问题** 书中提供3类问题，难度等级各不相同，它们分别位于3个不同的位置。
 - (1) 例题之后，一般都有一个思考题。它对例题做了一个小小的改动，使得读者能够主动学习该例题所阐明的原理，思考题的答案见当前页脚注。
 - (2) 各小节之后，一般都有自测题。这样，可以时常地回顾一下本节所学的内容，并进行快速的自我测验。这些自测题都提供相应的答案。
 - (3) 每章最后提供的问题涉及范围很广，包括直接的理论应用，与实例相似的问题，以及需要一定思考能力以及解题技巧的具有挑战性的难题，一共有 1035 道题。

目 录

第 I 部分 电路

第 1 章 基本电路理论.....	3
1.1 电气工程学导论.....	3
1.1.1 什么是电气工程学.....	3
1.1.2 电气工程学的基本思想.....	3
1.1.3 为什么从电路理论开始 学习电气工程学.....	4
1.2 电路理论的物理基础.....	4
1.2.1 能量与电荷.....	4
1.2.2 什么是电路理论.....	5
1.3 电流和基尔霍夫电流定律.....	5
1.3.1 电流的定义.....	5
1.3.2 基尔霍夫电流定律.....	7
1.4 电压与基尔霍夫电压定律.....	9
1.4.1 电压的定义.....	9
1.4.2 基尔霍夫电压定律(KVL).....	11
1.5 电路中的能量流动: 电压、电流和功率.....	14
1.6 电路元件: 电阻和电源.....	17
1.6.1 电阻和开关.....	17
1.6.2 电压和电流源.....	19
1.6.3 直流电路的分析.....	21
1.7 串联电阻和并联电阻: 分压器与分流器.....	24
1.7.1 串联电阻与分压器.....	24
1.7.2 并联电阻与分流器.....	26
小结.....	30
习题.....	31
第 2 章 直流电路分析.....	40
2.1 叠加.....	40
2.1.1 叠加举例.....	40
2.1.2 叠加原理.....	41
2.2 戴维南等效电路与诺顿等效电路.....	45
2.2.1 验证概念的例子.....	45
2.2.2 戴维南等效电路.....	46
2.2.3 阻抗水平.....	51
2.2.4 电源变换.....	52
2.3 节点电压分析法.....	53
2.3.1 基本思想.....	53
2.3.2 节点电压法.....	55
2.3.3 部分改进.....	57
2.3.4 结论.....	59
2.4 回路电流分析法.....	60
2.4.1 回路电流分析法的简单方法.....	60
2.4.2 扩展和要点.....	62
2.4.3 电路分析方法小结.....	65
小结.....	66
习题.....	68
第 3 章 动态电路.....	76
3.1 电感和电容理论.....	76
3.1.1 时间与能量.....	76
3.1.2 电感的基础知识.....	77
3.1.3 电容的基础知识.....	80
3.2 RL 和 RC 电路的一阶暂态响应.....	84
3.2.1 经典微分方程法.....	85
3.2.2 一种简单方法.....	87
3.2.3 RC 电路.....	89
3.3 高级技巧.....	90
3.3.1 有多个电阻的电路.....	90
3.3.2 初始值和终值.....	91
3.3.3 脉冲问题.....	94
3.3.4 高阶暂态.....	96
3.3.5 RLC 电路.....	98
小结.....	100
习题.....	101
第 4 章 交流电路分析.....	108
4.1 交流电路(AC)导论.....	108
4.1.1 交流电路的重要性.....	108
4.1.2 正弦量.....	108

4.1.3	交流电路问题	111
4.2	用相量法表示正弦量.....	112
4.2.1	正弦波与线性系统	112
4.2.2	复平面数学	113
4.2.3	相量思想	118
4.2.4	回到电路问题	119
4.3	阻抗：在频域内表示电路.....	124
4.4	RL 、 RC 和 RLC 电路的相量图.....	129
4.4.1	RL 电路	129
4.4.2	RC 电路	132
4.4.3	RLC 电路	134
小结		137
习题		138
第5章	交流电路中的功率.....	145
5.1	交流功率和能量贮存：时域图.....	145
5.1.1	功率和能量的重要性	145
5.1.2	电信号的平均值	145
5.1.3	有效值和均方根(RMS)值	147
5.1.4	R 、 L 和 C 中功率和能量 的关系	150
5.1.5	交流电路中功率的一般情况..	153
5.2	频域的功率和能量.....	157
5.2.1	用相量表示的有效功率 和无功功率	158
5.2.2	复功率	160
5.2.3	电力系统中的无功功率.....	163
5.2.4	电子设备中的无功功率.....	165
5.3	变压器	167
5.3.1	变压器原理	167
5.3.2	变压器在交流电力 系统中的应用	173
5.3.3	家用交流电源	176
5.3.4	电气安全	177
小结		180
习题		182
第6章	电力系统.....	190
6.1	三相电	190
6.1.1	电力系统的重要性	190
6.1.2	三相电力系统的介绍	190
6.1.3	三相电源	192
6.1.4	三相负载	195
6.1.5	单相等效电路.....	201
6.2	配电系统.....	203
6.2.1	三相变压器	203
6.2.2	单位的计算	205
6.2.3	传输特性	206
6.3	电动机导论.....	209
6.3.1	术语	209
6.3.2	稳态运转时的电动机特性....	210
6.3.3	带有负载的电动机.....	211
6.3.4	动态运转	212
6.3.5	三相异步电动机铭牌的 解释	214
6.3.6	单相异步电动机.....	218
小结		219
习题		220
第II部分 电子技术		
第7章	半导体器件与电路	231
7.1	整流电路与电源.....	231
7.1.1	电子技术导论.....	231
7.1.2	理想二极管	232
7.1.3	整流电路	234
7.1.3	带有滤波电容的整流电路....	237
7.2	PN结二极管.....	241
7.2.1	半导体过程和PN结.....	241
7.2.2	实际二极管的物理特性.....	246
7.3	双极型晶体管(BJT)的作用.....	248
7.3.1	晶体管的重要性.....	248
7.3.2	BJT特性.....	249
7.3.3	输出特性	250
7.3.4	晶体管放大器—开关电路 分析	252
7.3.5	晶体管的应用.....	255
7.3.6	小信号放大器.....	256
7.4	场效应晶体管.....	261
7.4.1	结型场效应晶体管.....	261
7.4.2	JFET的应用.....	264

7.4.3 金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET).....	267	9.2.2 波特图	348
小结	269	9.3 反馈概念.....	355
习题	270	9.3.1 反馈放大器	355
第8章 数字电子技术	282	9.3.2 系统模型	357
8.1 数字信息	282	9.3.3 负反馈的优点.....	359
8.1.1 什么是数字信号	282	9.4 运算放大器电路.....	366
8.1.2 信息的数字表示法	284	9.4.1 概述	366
8.2 数字信号电子技术.....	287	9.4.2 基本运算放大器.....	368
8.2.1 “非”电路	287	9.4.3 线性运算放大器电路.....	372
8.2.1 BJT 门	288	9.4.4 非线性运算放大器电路.....	376
8.2.3 MOSFET 门	290	小结	379
8.3 数字电子技术的数学.....	291	习题	380
8.3.1 数学语言的需要	291	第III部分 系统	
8.3.2 普通布尔法则	292	第10章 测试设备系统	393
8.4 组合数字系统	294	10.1 测试设备系统简介.....	393
8.4.1 逻辑符号和逻辑系列	294	10.1.1 一般考虑	393
8.4.2 逻辑功能的实现	296	10.1.2 传感器	394
8.4.3 二进制运算	297	10.1.3 误差分析	398
8.4.4 数字运算电路	299	10.2 模拟信号处理.....	401
8.4.5 卡诺图	301	10.2.1 测试设备放大器.....	401
8.5 时序数字系统	303	10.2.2 模拟有源滤波器.....	405
8.5.1 双稳态电路	304	10.2.3 布线、接地和屏蔽技术.....	410
8.5.2 锁存器与触发器	305	10.3 数字信号处理.....	412
8.5.3 触发器应用	309	10.3.1 模拟/数字转换	412
8.6 计算机	313	10.3.2 采样	415
8.6.1 概述	313	10.3.3 数字/模拟转换	419
8.6.2 计算机结构	313	小结	421
小结	316	习题	423
习题	317	第11章 通信系统	428
第9章 模拟电路	329	11.1 无线电原理.....	428
9.1 信号的频域表示.....	329	11.1.1 频域中非线性器件的 一般原理	428
9.1.1 概述	329	11.1.2 调制与解调.....	430
9.1.2 周期函数的频域表示	330	11.1.3 无线电接收机.....	434
9.1.3 非周期信号的频谱	335	11.1.4 接收机中的噪声.....	440
9.1.3 随机信号的频谱	339	11.2 电 磁 波.....	443
9.1.4 带宽与信息率	342	11.2.1 导行电磁波.....	444
9.2 滤波器	344	11.2.2 自由电磁波.....	446
9.2.1 滤波器概念	344		

11.2.3 天线	448
11.3 通信系统举例	453
11.3.1 FM 广播电台	453
11.3.2 测速雷达	454
小结	455
习题	457
第 12 章 线性系统	460
12.1 线性系统简介	460
12.1 复频率	460
12.2 线性系统的阻抗和暂态特性	464
12.2.1 广义阻抗	464
12.2.2 暂态分析	465
12.2.3 频率响应	471
12.3 RLC 电路的暂态响应	472
12.3.1 RLC 电路自然响应的类型	472
12.3.2 RLC 电路暂态特性	474
12.4 系统分析	477
12.4.1 系统函数	478
12.4.2 反馈系统的动态稳定性	479
小结	483
习题	484
第 13 章 机电学物理基础	491
13.1 电力和电场	492
13.1.1 电荷间的相互作用力	492
13.1.2 电场	492
13.2 磁力和磁场	495
13.2.1 电流和磁力	495
13.2.2 磁场的方向	497
13.2.3 物质的磁作用	497
13.2.4 磁通量(Φ)与磁链(λ)	500
13.3 动态磁系统	502
13.3.1 感应电压	502
13.3.2 磁系统中贮存的能量	506
13.3.3 在磁通中运动的导体	507
13.3.4 电机中的能量转化	509
小结	511
习题	513

第IV部分 电动机

第 14 章 磁结构与变压器	519
14.1 磁结构的分析	519
14.1.1 磁结构导论	519
14.1.2 环形铁芯	520
14.1.3 分析磁结构的原理	522
14.2 变 压 器	525
14.2.1 变压器简介	525
14.2.2 将变压器作为磁结构 进行分析	526
14.2.3 变压器的等效电路	528
14.2.4 变压器的开路(OC)/短路 (SC)测试	530
14.2.4 为什么要在铭牌上标记 额定电压和视在功率(kVA)	533
14.2.5 三相变压器的模型	534
14.3 磁系统中的力	537
14.3.1 磁极方法	537
14.3.2 电流磁通相互作用的分析	538
14.3.3 能量因素的分析	538
14.3.4 同能量与磁力	542
14.3.5 电路方法	543
小结	544
习题	546
第 15 章 同步电机	564
15.1 柱形磁结构中的磁通与转矩	566
15.1.1 柱形磁结构的分析	566
15.1.2 转子和定子磁通之间 转矩的产生	569
15.2 交流电动机中的旋转磁通	572
15.2.1 两相旋转磁通	572
15.2.2 三相旋转磁通	574
15.2.3 表示为旋转磁通的单相	575
15.3 同步发电机的原理与特性	577
15.3.1 同步发电机的构造与 等效电路	577

15.3.2 工作于独立电力系统 中的发电机	580	17.1.2 转子结构	647
15.3.3 功率角	581	17.1.3 电路模型	649
15.3.4 工作于大型电力系统 中的同步发电机	582	17.1.4 直流电机中的能流	650
15.4 同步电动机的特性	585	17.2 直流电动机的特性	653
15.4.1 发电机与电动机的比较	585	17.2.1 并联励磁	653
15.4.2 凸极电动机	589	17.2.2 串联励磁	657
小结	591	17.2.3 通用(AC/DC)电动机	660
习题	593	17.3 直流电动机的动态响应	661
第 16 章 异步电动机	604	17.3.1 电流驱动电动机的 动态特性	662
16.1 感应原理简介	604	17.3.2 电压驱动电动机的 动态特性	663
16.1.1 感应原理	604	小结	665
16.1.2 生成的转矩 $T_{dev}(\omega_A)$	607	习题	667
16.1.3 三相异步电动机特性	607	第 18 章 功率电子系统	676
16.2 三相异步电动机的等效电路	611	18.1 功率电子学导论	676
16.2.1 等效电路的物理基础	611	18.1.1 半导体开关	676
16.2.2 等效电路的应用	615	18.1.2 功率电子学的常见应用	682
16.2.3 异步电动机的动态响应	620	18.2 直流电动机控制器	687
16.2.4 负载转矩变化的电动机 规格选择	625	18.2.1 电动机控制器引言	687
16.3 单相异步电动机	628	18.2.2 直流电动机模型	688
小结	633	18.2.3 单相不受控整流器分析	690
习题	635	18.2.4 受控整流器工作状态: 恒定转速分析	693
第 17 章 直流电动机	645	18.2.5 恒定激发角的电动机特性	699
17.1 直流电机的原理	645	18.3 交流电动机控制器	701
17.1.1 定子磁结构	645	小结	707
		习题	709

第 I 部分 电 路

- 第 1 章 基本电路理论
- 第 2 章 直流电路分析
- 第 3 章 动态电路
- 第 4 章 交流电路分析
- 第 5 章 交流电路中的功率
- 第 6 章 电力系统

第1章 基本电路理论

学习目标

1. 理解什么是电路以及电路在电气工程学中的重要性
2. 理解电流的定义,能用基尔霍夫电流定律(KCL)表达电荷守恒
3. 理解电压的定义,能用基尔霍夫电压定律(KVL)表达能量守恒
4. 掌握如何利用电压和电流计算电路元件吸收或释放的功率
5. 理解欧姆定律中描述的电压与电流之间的关系
6. 掌握如何以串联形式连接电阻,以及如何在串联电阻中分配电压
7. 掌握如何以并联形式连接电阻,以及如何在并联电阻中分配电流
8. 掌握如何分析包含一个电源和多个串联、并联电阻的电路

从电路开始学习电气工程学基于3个原因。最重要的一个原因是:几乎每个电子设备,从收音机到电动机,都是一个电路,或至少包含电路。第二个原因是电路不像其他电气工程学课程(如电磁场)那样抽象,不需要掌握复杂的数学知识。最后一个原因:电路理论学科产生了电气工程学的语言。掌握了电路理论的词汇,我们就可以参加关于电气工程学的讨论。

1.1 电气工程学导论

1.1.1 什么是电气工程学

在某种意义上,电气工程学中的电与闪电是截然不同的。闪电释放电能是不可预期的并具有破坏性。而电气工程学则是利用电能对人类服务——传递能量和信息、承担费力而且乏味的任务。电能的重要性体现在其能量本身时,比如启动发电机为百货公司提供照明,我们就会想到电力行业。当电能的重要性体现在其符号(信息)内容时,我们就会想到电子行业。这两个行业对电能的应用都是有益于人类的。

本书介绍了电气工程学的基本思想和方法。其目的是为读者解决基本的实际问题奠定坚实的基础,并使读者掌握该学科的词汇和思想,以进行有条理的思考和清晰的交流。无论哪位工程师,只要他从事的技术领域与电的关系日益密切,就需要掌握这些背景知识。

1.1.2 电气工程学的基本思想

我们将主要关注那些作为电气工程学基础的思想。这些基本思想列举如下:

1. 电荷守恒(基尔霍夫电流定律)是写电路方程的基本原理之一。
2. 能量守恒(基尔霍夫电压定律)的应用有两种形式:电能守恒是写电路方程的基本原理之一;能量守恒通常还用于机电系统中的方程求解。
3. 频域方法是研究物理世界的一个方法。在这种方法中,其自变量是频率而不是时间。
4. 等效电路采用理想电气设备模拟实际电气设备,其特性与实际情况相同或类似。
5. 阻抗水平决定了电气设备间如何相互作用。

6. 反馈是一种将电子设备的部分输出返回到输入端,从而提高其性能的技术。
7. 模拟信息用与其内容成比例的电信号表示。
8. 数字信息用二值代码表示。



在介绍、解释和应用这些思想时,会用一个灯泡图标来提醒读者:正在应用某个基本思想。使用这种方法的目的是让读者相信:电气工程的基础是由为数不多的几个思想构成;其他内容都是对这些基础思想的详细解释。

1.1.3 为什么从电路理论开始学习电气工程学

本书第 I 部分是关于电路的理论。之所以由电路理论开始电气工程的学习是基于 3 个原因。其一,电路理论易于入门,不像电气工程的其他分支学科那样抽象,也不需要复杂的数学知识。其二,也是最重要的是,每个电子设备事实上都是一个电路。收音机是一个电路,能够使电灯和空调工作的配电系统也是一个电路。因此,理解了电路的方法就等于是打开了研究电气工程所有领域的大门。其三,因为电路理论产生了电气工程的语言,所以把研究电路作为学习电气工程的起点是合适的。即使那些比电路复杂得多的设备(如航空雷达),电气工程师们仍然采用电路的语言来描述它们。因此,电路研究提出的思想和语言是电气工程的主要基础。

1.2 电路理论的物理基础

1.2.1 能量与电荷

1. 电荷是一个基本物理量

电荷与质量类似,是物质的一个属性。事实上,电荷与质量、长度和时间一起构成了基本单位,所有的科学单位都是由它们推导得出的。电荷的单位是库仑(简称为 C),它是为纪念查利·库仑(1736—1806)而命名的。电荷有两种:正电荷和负电荷。这两个名字起得非常恰当,因为两种电荷产生的效果正好相反。因此,如果将一个正数与一种电荷联在一起,将一个负数与另一种电荷联在一起,那么用来描述电荷作用的方程就可以同时适用于两种电荷。根据惯例,电子用负号表示,而质子用正号表示。电子所带的电量最小;在 MKS(米—千克—秒)单位系统下,它的值为:

$$e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ 库仑(C)} \quad (1.1)$$

电子的质量是 $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 所以其荷质比在 MKS 系统下为 1.76×10^{11} 。质子所带电荷符号为正,数值与电子所带电荷值相等,但质子质量比电子质量大 1846 倍。物质基本粒子的荷质比很大,所以其电效应通常比机械惯性效应更明显。因此,讨论电荷时,通常可认为它与质量无关,即电荷是无质量的。

2. 电荷间的力

我们知道电荷的存在,就是因为它对其他电荷施加了作用力。电荷间的力有两种。根据库仑定律,电荷由于静电力的不同而互相吸引或排斥。闪电就是由于静电力而形成的,因为被小水滴分离的电荷也被分离在不同的云层中所致。静电力还可应用于复印机,使带电的墨粉在硒鼓上形成图像。

根据安培定律,移动的电荷(即电流)产生磁力。磁力可以驱动电动机,使电视显像管中的电子束偏转,还能使发电机中的能量发生转换。因此,电子工程师既可以通过静电效应,也可以通过磁效应来利用电能。

3. 能量的重要性

能量是物理系统的交流媒介,就好像金钱是经济系统的媒介一样。只要有一个物体对另一个物体产生了影响,就有能量进行了交换。在力学中,做功(交换能量)需要力和运动;在电学中,做功(交换能量)需要电作用力和电荷运动。在电路中,电作用力由电压来表征,而电荷的运动由电流来表征。

1.2.2 什么是电路理论

学习目标 1: 理解什么是电路以及电路在电气工程学中的重要性

1. 一个电路问题

为了明白电路理论包括哪些内容,设想汽车上的一个电路,如图 1.1 所示,该电路包括电池、照明开关、两个前灯、连接导线和汽车底盘。合上开关时,希望两个电灯发光并变热,这表明电池正在给前灯供给能量。^①图 1.2 给出的电路表示图 1.1 所描述的物理情形。电路包括一个 12.6 伏特(V)的电池符号和两个 5.25 欧姆(Ω)的电阻、前灯的模型以及代表导线和底盘回路的直线。可以利用电路理论计算导线中的电流、电池输出的功率和流入每个前灯的能量。

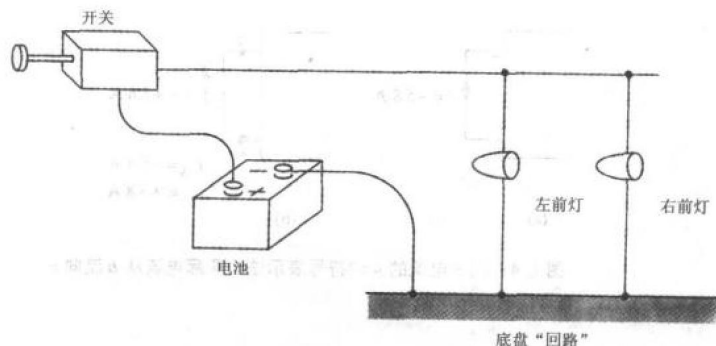


图 1.1 汽车照明系统

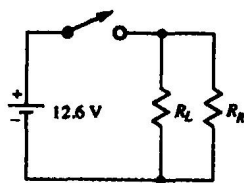


图 1.2 汽车照明系统的描述电路。前灯用电阻来表示

2. 电路理论的实质

稍后将介绍进行这些计算所需要的定义和定律。这里先说一下电路理论包括的内容。解决一个工程问题通常需要四个步骤：第一，证实问题的实际性；第二，问题建模；第三，分析模型；第四，将分析结果用于解决最初的物理问题。在电池和前灯的问题中，省略了第一步和最后一步。用通用的电路符号模拟了物理情况(电池、开关和前灯)，并准备分析这个电路模型。电路理论仅包括第三个步骤：对一个给定的电路模型，应用已知的电路定律求出特定的结果。该步骤就是本书第 I 部分的内容。其余部分的内容是利用电路理论学习电子系统、机电系统的原理。下面首先学习电流和电压的定义。

1.3 电流和基尔霍夫电流定律

学习目标 2: 理解电流的定义，能用基尔霍夫电流定律(KCL)表达电荷守恒

1.3.1 电流的定义

1. 电流是运动的电荷

从前面关于汽车的电池、前灯的实验中，可以看出前灯发光是因为电荷在导体中运动。导体中有很多移动(传导)的电子，这些电子可以响应电的作用力而移动。非导体也有大量电荷，但这些电荷不能移动。

假设有一根导线，其横截面为 $A \text{ m}^2$ 。导线上的电荷以速度 u 从左向右运动，如图 1.3 所示。如果在 Δt 时间内，有 ΔQ 库仑的电荷按指示方向通过横截面 A ，则电流定义为：

^① 多数人认为能量沿着导线流动，但准确地说，应该是导线将能量从电池向前灯导引。

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{C/s或安培 (A)} \quad (1.2)$$

注意, 电流的单位是库仑/秒。但是, 为纪念安培(1775—1836), 人们给这个单位起了一个专用名称——安培(A)。铜导线中导电电子的密度为 $n_e = 1.13 \times 10^{29}$ 个/ m^3 。如果电子以速度 u 运动, 在 Δt 时间内通过横截面 A 的电子数 $\Delta n = n_e A u \Delta t$ 。因此, 电流为:^①

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{e \Delta n}{\Delta t} = e n_e A u \quad \text{A} \quad (1.3)$$

例如, 假定电子在 12 号导线(直径为 0.081 英寸)内以蜗牛般的速度——0.1mm/s 向下运动。由公式(1.3)得, 电荷形成的电流 $i = -5.8\text{A}$, 方向向下, 如图 1.4 所示。也可以将这个结果表示为电流为 $i = +5.8\text{A}$, 方向向上, 如图 1.4(b)。

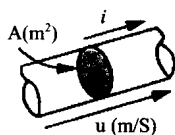


图 1.3 有电流的导线

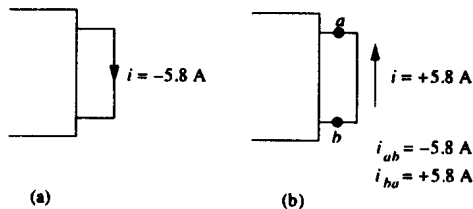


图 1.4 同一电流的 4 种符号表示法。实际电流从 b 流向 a

2. 参考方向

电流可以用两个方向来表示, 所以电流的参考方向非常重要。我们用“向下”表示电流的参考流动方向。为了明确说明一个电流, 需要一个参考方向和一个数值, 该数值可能为正也可能为负。本书中, 电流的参考方向用画在代表导体的直线上的箭头来表示, 如图 1.4 所示。也可以用导线旁边的箭头记号表示, 还可以用下标来表示。参考方向与电流的数字符号之间的关系如图 1.4 所示, 这三种方法表示的是同一电流。实际电流的方向与电子运行的方向相反, 所以根据定义, 实际电流在数值上是正的。

3. 设定参考方向

工程人员开始分析电路时就要设定电流参考方向。设定参考方向时, 可以不考虑实际电流的方向; 设定它们只是为了方便记录。在后面讲解基尔霍夫电流定律时, 会看到参考方向的设定是非常自由的。

另一方面, 如果实际电流的方向很明显, 有经验的工程人员通常会将电流的参考方向定义为实际电流的方向。他们知道, 在正常情况下, 真实电流从电压的“+”端输出, 经过电路, 返回到电池的“-”端。因此, 尽量猜出实际电流方向是合理的。但为确定电流的真实方向, 必须列出方程, 并进行求解。

4. 小结

运动的电荷形成电流。为了明确说明导体中的电流, 需要同时知道参考方向和数值, 该数值可能为正, 也可能为负。

5. 力学类比

对于大多数读者而言, 对于力学的理解要早于对电现象的理解。大家都有关于力和运动、弹性和惯性的经验, 而且在很多课程安排中, 力学的教学也是安排在电气工程之前。大家对力学的直觉相对来说要敏锐一些, 所以本书对许多电气工程物理量和电气工程现象进行了力学类比。

速度是电流的最简单类比。而位移可以作为电荷积累的类比。用这些类比可以说明与这些量相关的方程是类似的。

例如, 如果知道某一物体的速度为 $u(t)$, 在 $t_1 < t < t_2$ 时间内, 位移的变化量 $x_2 - x_1$ 为:

^① 注意, e 为负值, 所以用数字表示的正电流(实际电流)的方向与电子运动的方向相反。

$$x_2 - x_1 = \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt \quad (1.4)$$

如图 1.5(a) 所示。与此相似, 如果知道一根导线中的电流为 $i(t)$, 在 $t_1 < t < t_2$ 时间内, 通过导线横截面的电荷 q 为:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \text{ 库仑} \quad (1.5)$$

如图 1.5(b) 所示。速度和位移一般是矢量。电荷运动一般也是矢量。而在电路中, 可以先确定导线电流的方向, 然后用正负符号来表征电流的“矢量性”。因此可以认为, 电路中的电荷流动与力学中的线性运动是一致的。

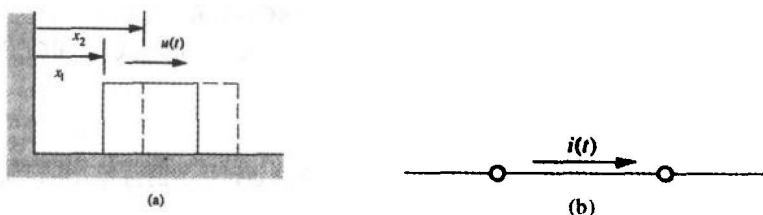


图 1.5 电流(b)的力学类比是速度(a)

例 1.1 电子运动

直径为 0.001 英寸的铜导线中有一向右流动的恒定电流, 电流值为 $+10^{-6}$ A。求电子运动的速度与方向, $1\mu\text{s}$ 内有多少电子通过导线的横截面?

解: 因为向右流动的电流为正, 所以电子必然向左移动。根据公式(1.3), 其速率为

$$u = \frac{I}{An_e|e|} = \frac{10^{-6}}{\pi(0.0005 \times 0.0254)^2 \times 1.13 \times 10^{29} \times 1.60 \times 10^{-19}} = 1.09 \times 10^{-7} \text{ m/s} \quad (1.6)$$

在 10^{-6} s 内通过横截面的电荷总数为:

$$q = \int_0^{10^{-6}} i dt = 10^{-6} \text{ A} \times 10^{-6} \text{ s} = 10^{-12} \text{ C} \quad (1.7)$$

电子数为:

$$\frac{10^{-12} \text{ C}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ C/电子}} = 6.24 \times 10^6 \text{ 电子} \quad (1.8)$$

思考题: 如果电流速度不变, 且导线的直径加倍, 电流值是多少? ①

1.3.2 基尔霍夫电流定律

1. 电荷守恒和电中性



所有的事实都表明宇宙是电中性的。也就是说, 对于每个负电荷都会在某地方存在着一个正电荷与其相对应。正如在讨论静电力时所暗示的那样, 正负电荷可以因为自然原因(闪电)或人工原因(电视显像管)而分离。但多数物质都没有剩余电荷, 也就是说多数物质是电中性的。更确切地说, 电荷在电路中既不会被创造, 也不会被消灭。这一守恒定律直接引出了导线联接点的一个电流约束。

① 电流值为 $4\mu\text{A}$ 。