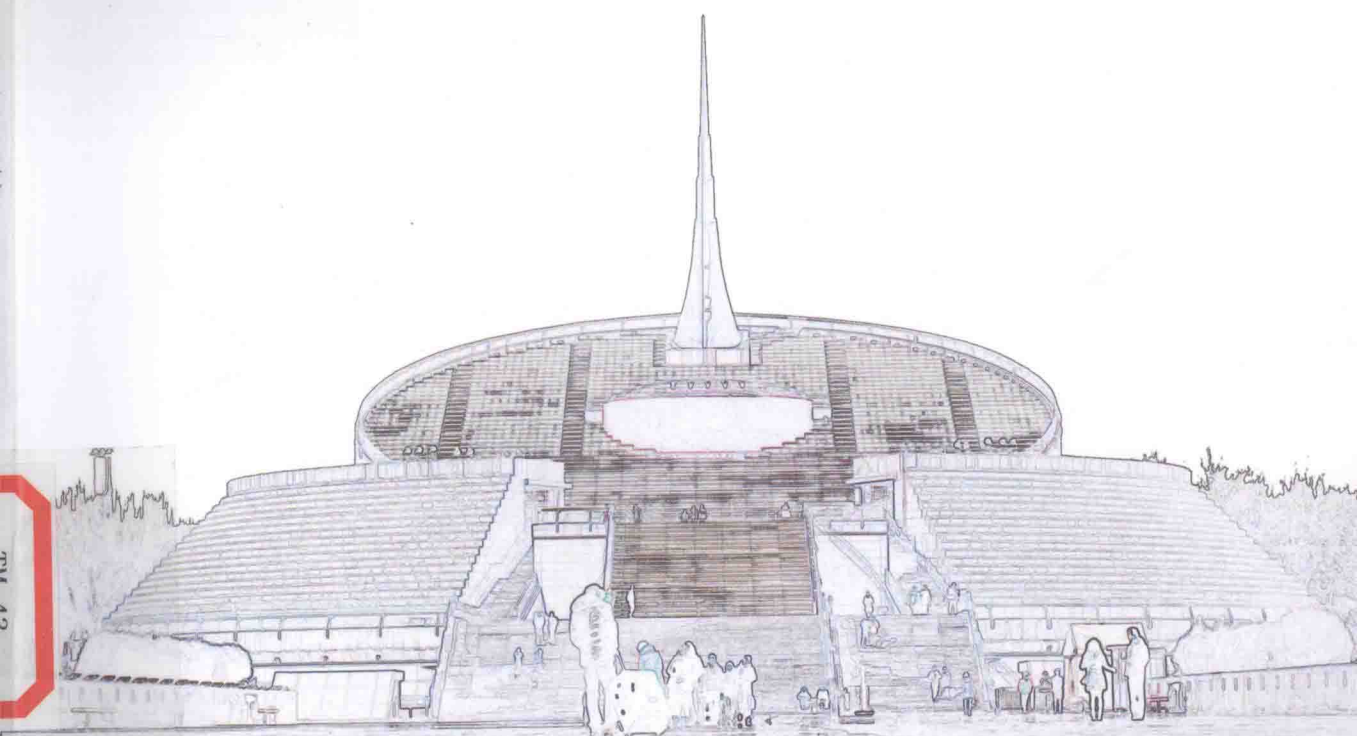


全国普通高校
电子信息与
电气学科
基础规划教材

电工学（电工技术）

（修订版）

元增民 编著



清华大学出版社

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

电工学（电工技术）

（修订版）

元增民 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书内容由电路、磁路与电机、电器两大部分组成。电路部分包括欧姆定律、基尔霍夫定律、 R 、 L 、 C 元件及电源的电压极性与电流方向的关联假设、熊仔爬山(电压升计算)法、猛虎下山(电压降计算)法;支路电流法、网孔电流法、节点电压法及弥尔曼公式、中点电压法、迭加法、图解等效电源法,戴维宁及诺顿解析等效电源法;直流电路暂态分析;单相及三相正弦交流电路。磁路部分包括磁性材料特性、磁路基本概念定律、磁力计算、直流磁路及交流磁路分析、变压器、电工测量。电机部分包括有刷及无刷直流电动机、三相及单相交流电动机。电器部分包括继电器、接触器及控制电路,还有发输变电、供配电及安全用电基本知识。

本书内容丰富、方法荟萃、循序渐进、概念清晰、说理透彻、应用性强,可供高等院校本科、专科电工技术课程教学、注册电气工程师执业资格考试培训,以及工程技术人员和电工电子技术爱好者自学使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电工学(电工技术)/元增民编著.--修订本.--北京:清华大学出版社,2016

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

ISBN 978-7-302-42873-2

I. ①电… II. ①元… III. ①电工—高等学校—教材 ②电工技术—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 028870 号

责任编辑:文 怡

封面设计:傅瑞学

责任校对:李建庄

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18.75

字 数:466 千字

版 次:2011 年 8 月第 1 版 2016 年 4 月第 2 版

印 次:2016 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.50 元

产品编号:062267-01

修订版前言

本书第一版于 2011 年在国防科技大学出版社出版。2009 年以来,作者使用本书(含讲义)作为教科书,教学效果非常好,所有专业班级课程考试及格率都稳定在 95% 以上。学生高兴、家长满意、校长放心,作者被学生赞誉为“人民的好老师”。

这次承蒙清华大学出版社支持修订,原版优点发扬光大,并进行以下优化。

(1) 积极响应习近平总书记对科技创新发展的指导以及教育部关于教育要面向应用、面向未来、面向世界的要求,介绍更多的典型电路及典型装置。

(2) 推出熊仔爬山(电压升计算)法、猛虎下山(电压降计算)法、中点电压法等高效方法。

(3) 除了 R 、 L 、 C 电压电流关联之外,又推出电压源电流与电动势极性的关联假设。

(4) 发现 RL 串联电路的阻抗三角形、电压三角形及功率三角形为三个相似的直角三角形, RL 并联电路的导纳三角形、电流三角形及功率三角形为三个相似的直角三角形, RLC 串联谐振与 RLC 串并联谐振特性曲线相同,很多知识点可以合三为一或合二为一,降低了学习难度。

(5) 除了电流源理想内阻为 ∞ 与电压源理想内阻为 0 等众多对偶关系之外,又陆续发现了电流源的镰刀形外特性曲线与电压源的锄头形外特性曲线等对偶关系。

(6) 本书如实相告,相电压、相电流难测量,线电压、线电流好测量,作为额定参数的也是线电压、线电流。用线电压、线电流乘 $\sqrt{3}$ 计算三相功率的公式,真好似臭豆腐闻着臭吃着香。学员不再被动,而是像吃臭豆腐一样主动使用这些公式,何愁学不好呢!

(7) 作者用节点电压法解决了在 $R_1 \neq R_2$ 、 $C_1 \neq C_2 \neq C_3$ 的一般条件下,三节 RC 移相振荡器的振荡频率和起振条件的计算难题。由此,本书着重讨论各种电路分析方法的优缺点及适应性,引导读者灵活机动科学选用。如 2.6 节所述:“若说支流法好像是步行,则网流法就好似自行车,节点电压法弥尔曼公式就好似电动车,中点电压法就好似摩托车,节点电压法兵不血刃最强大,迭加法及等效电源法就好似独到的偏方……”。

(8) 开发新功能,让传统老算法焕发青春。如使用两瓦特表测量三相功率的方法推算负载无功功率及功率因数,判断三相电源相序。

本书配有电子课件,登录清华大学出版社网站 www.tup.com.cn 可下载。

高岳民同志对本书给予了很大支持,在此表示感谢!

做梯应如缓慢坡助子攀登,写书要似涓涓细流引人入胜。书不惊人誓不休,为读者提供最好的服务,是作者毕生的追求,但因水平、精力及视野等都有限,欢迎广大读者提出建议、批评及指正。联系信箱为 yzmhb@126.com。

作者

2015 年仲夏于长沙湘江之滨

第一版前言

目前电工技术教科书数量很多。数量虽然很多,但是很多教科书含混不清、分类不妥、主次颠倒、内容陈旧、脱离实际等缺陷很明显,已经成为影响教学质量的绊脚石。

(1) 未知电压电流本来只有假设方向,传统愣是说成“参考方向”。电压电流的假设方向本来是关联的,传统却说“既可关联又可非关联,可选一致也可选不一致”,使学生如丈二和尚摸不着头脑。磁感应强度与磁场强度等概念更容易混淆。

(2) 电源等效转换法与戴维宁法都属于解析等效电源法。RLC 电路趋于并联谐振时线路总电流减小,感性负载并联电容进行功率因数补偿时线路总电流亦减小,也是趋于并联谐振。目前很多教科书把这些本是同根生的知识点都人为地隔开了。

(3) 漏磁有多有少,漏磁少时完全可以忽略不计。但目前磁路分析不管漏磁多少,都要大谈漏磁、漏磁感抗和漏磁电压等,没有漏磁不成书,扭曲事实,扰乱思维。

(4) 一些产品从开始流行到最终淘汰,在很多电工技术教科书中都难觅踪影。内容与实际严重脱节,书呆子气十足。用感温磁钢控制的机械式电饭锅就是一例。

(5) 缺乏概念定义,读者无所适从。2010 年作者应邀批阅一批电工技术试卷,其中三相电动机功率计算题竟然全员覆没,原因就是缺乏额定功率定义,令人扼腕。

科学之颠本来没有路。九曲十八弯的科学之路还是前辈们开辟的。除了感谢前辈,关键是不能坐享其成。学者有责任有义务拉直拓宽科学之路,使其愈加平坦,使后人走起来更顺畅。做梯应如缓缓长坡助力攀登,写书要似涓涓细流引人入胜。

为改进教学效果并有利于读者自学,本书采取了以下措施:注意纠正错误概念,合理分门别类,理顺内容关系;抓住主要矛盾,分清主次关系;介绍流行产品,融进新型电路;注意扬长避短,理论结合实际;量纲数值并用,始终把握脉络。

(1) 采用电压电流的假设方向及关联假设方向称呼来设定电流电压解方程。

把根据液气流 Q 的假设方向确定液气压 P 的关联假设方向的方法引申,根据电流 I 的假设方向来确定电压 U 的关联假设方向,根据电容电荷 Q 的假设方向确定电容电压 U 的关联假设方向,根据电容电荷增加率 dq/dt 确定电容电流 I 的关联假设方向,根据电感电流 I 的假设方向确定感应电压 $u_L = L(di/dt)$ 的关联假设方向,根据磁通 Φ 的假设方向依次确定线圈感应电流 I 及感应电压 U 的假设方向。

(2) 注意到额定功率定义的重要性,指出不同元器件、不同产品额定功率定义的异同,特别是电机额定功率指的是输出功率,灯具额定功率指的则是输入电功率。

(3) 用清晰的磁动势线密度、磁通密度概念代替模糊的磁场强度、磁感应强度概念。

(4) 把戴维宁法与诺顿法归类为解析等效电源法,又将图解等效电源法(等效变换法)与解析等效电源法归类为等效电源法。还将并联谐振与最佳功率因数补偿结合在一起讨论,理顺思路方便学习。合理的分门别类好似四两拨千斤,能使读者事半功倍。

(5) 注意介绍新型元件,如贴片电阻、电感、电容等,新型电路如单片机启动电路、续流二极管电子开关保护电路、反激式开关稳压电源及正激式开关稳压电源、机械零件消磁电

路、单相电动机换向电路、无刷直流电动机、电容式吊扇调速器等,以及新型磁路,如环形磁芯、C形铁芯、R形铁芯、立体三柱卷铁芯等。

(6) 讨论电路分析计算方法时注意扬长避短。指出节点电压法的优势在于针对双节点电路的弥尔曼公式。网孔电流法相比支路电流法的优势在于电流未知数少得多。还讨论了暗箱迭加法、交流磁路新分析方法等。

(7) 注重分析计算步骤,注重单位换算及量纲分析。把电路及磁路所有参数的量纲都分解表达为伏特(V)、安培(A)、欧姆(Ω)、秒(s)、米(m)等基本量纲的组合,让量纲参与到数值运算过程中,随着数值运算自然得出结果的单位,使人口服心服。

(8) 注重理论与实践相结合。讲过暂态过程理论后立即用 RC 充电理论解释计算机(单片机)复位启动电路工作原理。讲过自感系数计算方法后旋即指出该方法是电感式传感器分析计算的理论基础。结合实际讲解深奥的原理,如结合 CRT 消磁方法和交流继电器线圈损坏原因介绍磁路基本知识。

(9) 注意到磁场能量不能突变的本质是磁通不能突变。单线圈电感电流不能突变是磁通不能突变的连锁反应。多线圈电感线圈电流可以转移,实际表现为既可以瞬间停止,也可以即刻产生,并用多线圈电感模型很好地解释了开关稳压电源工作原理。

(10) 分析计算注意实事求是,抓住主要矛盾。例如,漏磁较小时注意忽略漏磁,磁芯磁阻远远小于空气隙磁阻时,注意适时忽略磁芯磁阻。

(11) 倡导一题多解的思路和做法。用多种方法解决同一个问题,可以巩固概念、熟悉方法、提高分析解决问题的能力。

作者在 2006 年出版了《单片机原理与应用基础》、2009 年出版了《模拟电子技术》。连续超高强度工作等因素使作者身心倍感疲惫。本来短期内不打算再写书,但 2010 年底所任教长沙大学土木系 2008 级建筑 1、2 班及土建 1、2 班四个班电工技术课程由于采用任课教师的电工技术讲义而使考试卷面/总评及格率各达 96%/99%,学生欢呼雀跃,强烈呼吁将电工技术讲义出版统订,长沙大学为学生着想而全力支持。主观上学生的期待和学校的支持,客观上电工技术讲义已经多年使用多次修改日趋充实,使得本书出版成箭在弦上不得不发之势。民意不可欺,作者唯有再舍命拼搏一次。

作者执教的长沙大学机电系 2005 级机械 5~8 班学员在暂态过程计算中不仅使用了传统的等效电源法,而且自主使用了节点电压法、叠加法,还把电容等效为电压源,把电感等效为电流源,发挥得出神入化,展现得淋漓尽致,说明作者的思路及做法已如春风化雨扎根于学生中。为此本书第 3 章专门编写了 3.8 节内容,以激励后人。

长沙大学、国防科技大学出版社给予大力支持,徐建英、杨军老师等提出了许多宝贵建议,在此一并表示诚挚感谢。

教材建设是一项浩大的系统工程。由于作者水平和见识所限,本书难免存在不足之处,衷心希望大家多多指正,以使本书不断完善,更好地为读者服务。建议和意见请发到作者电子邮箱 yzmhb@126.com。

元增民

2011 年仲夏于长沙浏阳河畔

电路、磁路常用符号

1. 电路、磁路常用字母符号

一个字母最好代表一种意思,但拉丁字母和希腊字母加起来只有 50 多个,而电路、磁路参数及单位多达上百个,故专用字母只有 U 、 I 、 R 、 L 、 π 、 η 、 β 、 X 、 Y 、 Z 等少数几个,一字母多用的情况比比皆是,甚至很多字母的大小写表达的意思也不同。

1) 专用字母符号(见表 0.1.1)

表 0.1.1 专用字母符号

U^*	电压	I	电流	R	电阻	π	圆周率 3.14	$X_C = 1/\omega C$	容抗模	Y	导纳
L	电感	R_m	磁阻	η	效率	β	BJT 电流放大倍数	$X_L = \omega L$	感抗模	Z	阻抗

* 电路、磁路所用字母符号多是拉丁字母或希腊字母,只有 U 来自于德语单词 Unterschied(差异)。

2) 多用字母符号

A ① 放大倍数;② 电流单位,安培(安)。

B ① 磁通密度(磁感应强度);② 感纳(感抗的倒数),容纳(容抗的倒数),统称电纳。

C ① 电容(电荷电压比);② 电量单位,库伦。

V ① 电压单位,伏特(伏);② 速度。

W ① 能量;② 功率单位,瓦特(瓦)。

μ ① 磁导率;② 前缀:倍率,微(10^{-6})。

3) 大小写含义不同的多用字母符号

通常大写字母 U 、 I 、 P 、 Q 、 V 、 E 、 Φ 代表物理量的直流值或有效值,小写字母代表瞬时值,还有很多大写字母与小写字母各自代表截然不同的意思。

E 电压源电动势。e ① 电子电量 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ 库伦;② 自然对数底 $e = 2.71828$ 。

F ① 磁动势 $F = NI$;② 电容单位,法拉。f 频率。

G ① 电导,电阻的倒数;② 前缀:倍率,吉(10^9)。 g_m : FET 跨导。

H ① 磁动势线密度(磁场强度);② 电感单位,亨利。h 小时单位。

J 功单位,焦耳(焦)。j ① 电流密度;② 虚数前缀, jX_L (感抗), $-jX_C$ (容抗)。

K 绝对温度。k 前缀:倍率,千(10^3)。

M 前缀:倍率,兆(10^6)。m (1) 独立使用:米;(2) 前缀:倍率,毫(千分之一 10^{-3})。

(3) 下标:① 幅度,例如 U_m 表示交流电压幅度;② 磁性,例如 R_m 表示磁阻。

N ① 匝数;② 力单位,牛。n ① 匝数;② 前缀:倍率,纳(10^{-9})。

P 功率。p ① 功率瞬时值;② 前缀:倍率,皮(10^{-12})。

Q ① 品质因数(比值);② 无功功率;③ 电量。q 电量瞬时值。

S ① 面积;② 视在功率;③ 导纳、电导及电纳单位,西门子, $S = \Omega^{-1}$ 。s 秒。

T ① 周期;② 扭矩;③ 磁通密度单位,特斯拉。t 时间。 τ 时间常数。

Δ 前缀:绝对变化量。 δ 前缀:相对变化量。

Ω 电阻单位。 ω 角频率,单位 rad/s , $\omega=2\pi f$ 。

Φ 磁通。 φ ① 磁通瞬时值;② 角度。

Ψ 磁链。 ψ ① 磁链瞬时值;② 角度。

4) 常用倍率汇总(见表 0.1.2)

表 0.1.2 常用倍率

p: 皮	n: 纳	μ : 微	m: 毫	k: 千	M: 兆	G: 吉
10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^3	10^6	10^9

符号规定一言难尽。字母符号数量有限,重复表达不可避免。除了以上所述之外,实际应用时应结合上下文具体理解。

2. 电路磁路常用图形符号

1) 电压源及电流源

电流源符号: 横向线条隔断的圆,横向隔断线直观地代表理想电流源内阻为无穷大。

电压源新符号: 纵向线条贯通的圆,纵向贯通线条直观地代表理想电压源内阻为零。

电压源旧符号: 一短一长两横,短横较粗,已经淘汰。

2) 电阻

国内: 长宽比 5 : 2 的矩形框; 国外: 夹角为 30° 的 6 根斜线。

3) 电感及电感线圈

国内: 3~4 个半圆; 国外: 具有立体感的波浪线。

继电器、接触器等电感线圈常用高宽比 2 : 3 的矩形框,整体上比电阻明显大。

注意电阻、线圈符号不要画成正方形,不要把长短比例画颠倒。

4) 电容及电解电容

无极性电容符号: 两条等长线代表电容两极板,线条长度应为距离的 3 倍左右。

电解电容新符号: 两条等长线,加写 + 代表正极,注意两条线不要画得不等长。

电解电容旧符号: 狭长矩形框并列直线条,矩形框代表正极,直线条代表负极。

5) 二极管及三极管

二极管: 在正方形区域画出两个对边,然后从左边的两端点向右边的中点引两条斜线,再从形成的三角形底边(右边)中点引出正极 P,从顶点(左边中点)引出负极 N,如图 0.1.1 所示。二极管符号就像一个大箭头,箭头方向就代表二极管正向导通时的电流方向。

三极管: 在高宽比 3 : 2 的矩形区域用竖线条画出左边代表基极 P,从其 $2/3$ 高度向矩形框右上角引出斜线代表集电结,从 $1/3$ 高度向右下角引出斜线,加箭头代表发射结。从粗线条中点引出横线代表基极 P,从两个斜线条终点各引出竖线代表集电极 C 和发射极 E。图 0.1.2 和图 0.1.3 分别给出了 NPN 和 PNP 三极管符号。

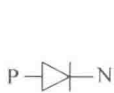


图 0.1.1 二极管符号



图 0.1.2 NPN 三极管符号



图 0.1.3 PNP 三极管符号

目 录

第 1 章 电路基础知识	1
1.1 电路参数量纲及定律	2
1.1.1 电路参数量纲、定律、电压极性及电流方向的关联假设	2
1.1.2 元件参数单位及其表达方式	7
1.1.3 载流导线中电子的平均运动速度*	11
1.2 电路组成及电源特性	14
1.2.1 电源特性	14
1.2.2 最大功率传输定理及其在工程技术中的应用	18
1.2.3 电源的连接与电路的三种基本工作状态	19
1.3 元件串/并联及星/角连接总阻值计算	22
1.4 总电阻等效时连接变换对分电阻的要求*	26
1.5 电源与元器件的额定参数	31
习题 1	33
第 2 章 电路分析设计方法	37
2.1 支线电流法与网孔电流法	37
2.2 节点电压法	42
2.2.1 双节点电路直接计算节点电压(弥尔曼公式)	42
2.2.2 多节点电路列方程组计算节点电压*	46
2.3 迭加法	49
2.3.1 透亮迭加	49
2.3.2 暗箱迭加	52
2.4 图解等效电源法	54
2.4.1 电压源与电流源的等效变换	54
2.4.2 图解等效电源法(等效变换法)	57
2.5 解析等效电源法——戴维宁法与诺顿法	59
2.5.1 戴维宁法	60
2.5.2 诺顿法	63
2.5.3 等效电源法解题步骤及技巧	64
2.6 电路分析设计方法汇总对比	67
习题 2	73

注：书中带 * 号的内容为选讲部分，难度较大，可以不讲。

第3章 直流电路暂态过程	76
3.1 暂态过程的微分方程分析法及三要素分析法	76
3.1.1 暂态过程与换路定则	76
3.1.2 RC电路的过渡规律	77
3.2 多电阻多电容RC电路的暂态过程	82
3.2.1 多电阻RC电路	82
3.2.2 多电容RC电路*	84
3.2.3 电流源作用下RC电路充放电	86
3.3 RL电路暂态过程与开关保护	86
3.3.1 RL电路电流从0开始过渡(零状态响应)	87
3.3.2 RL电路电流平稳衰减到0——开关保护电路(零输入响应)	88
3.4 暂态过程分析计算要点	90
3.5 双线圈RL电路暂态过程——开关稳压电源工作原理*	93
3.6 微分电路与积分电路*	96
3.7 RC电路暂态过程在单片机启动中的应用*	100
3.8 巧用节点电压法等进行暂态分析*	102
习题3	106
第4章 正弦交流电路	109
4.1 正弦交流电基础知识	109
4.1.1 正弦交流电的瞬时值、有效值及相量表达	109
4.1.2 RLC三大电子元件的欧姆定律	112
4.2 基本正弦交流电路	116
4.2.1 RL串联电路	116
4.2.2 RC串联电路	118
4.2.3 RLC串联电路及串联谐振	119
4.2.4 RLC并联电路与原始并联谐振	123
4.2.5 串并联电路的等效转换及等效RLC并联谐振	125
4.3 正弦电路功率及功率因数补偿	127
4.3.1 视在功率、无功功率、有功功率及功率因数	128
4.3.2 功率因数补偿	130
4.4 RC滤波电路(移相电路)	134
习题4	138
第5章 三相电路	142
5.1 三相电源与三相负载	142
5.1.1 三相星形电源	142
5.1.2 三相星形负载与角形负载	146
5.2 三相功率	151
5.3 三相负载功率因数补偿*	153

习题 5	155
第 6 章 磁路分析基础	157
6.1 磁性材料特性及磁路定律	157
6.2 直流磁路分析计算	164
6.3 交流磁路分析计算	167
6.4 变压器	170
6.4.1 变压器基本构造	170
6.4.2 变压器工作原理	172
习题 6	179
第 7 章 电工测量	180
7.1 电工仪表工作原理及电压、电流、电阻的测量	180
7.1.1 电工仪表构造	180
7.1.2 电工仪表改装	182
7.1.3 电压、电流及电阻的测量	184
7.2 功率的测量*	187
习题 7	190
第 8 章 直流电动机	192
8.1 直流电动机工作原理与构造	192
8.2 直流电动机基本参数及其关系*	195
8.2.1 发电常数与发电系数	195
8.2.2 力矩常数与力矩系数	197
8.2.3 发电系数与力矩系数的关系	198
8.3 直流电动机机械特性及其使用	200
8.4 无刷直流电动机	204
习题 8	210
第 9 章 交流电动机	211
9.1 交流电动机工作原理	211
9.1.1 交流电动机模型	211
9.1.2 旋转磁场技术指标*	216
9.2 三相异步电动机基本参数及其机械特性	219
9.2.1 三相异步电动机基本参数及其关系	219
9.2.2 三相异步电动机机械特性	221
9.3 单相异步电动机	222
9.4 异步电动机的使用及选用	226
9.4.1 启动、运转、调速及制动	226
9.4.2 异步电动机的选用	230

习题 9	232
第 10 章 继电器接触器控制系统	234
10.1 常用低压控制电器	234
10.1.1 开关电器的一些基本概念	234
10.1.2 手动电器	235
10.1.3 自动电器	235
10.1.4 自动保护电器	237
10.2 基本控制单元电路	239
10.2.1 自保单元与互锁单元	239
10.2.2 时间控制电路	240
10.2.3 顺序控制电路	241
10.3 典型继电器接触器控制电路	243
第 11 章 发输变电、供配电及安全用电	245
11.1 发输变电与供配电	245
11.2 安全用电	249
11.2.1 电对人体的危害	249
11.2.2 触电方式及保护措施	250
第 12 章 电工技术实验	253
实验一 万用表操作、元器件识别及电源特性	253
实验二 验证基尔霍夫定律	256
实验三 验证戴维宁定理	258
实验四 微分电路与积分电路	259
实验五 借助日光灯演练改善功率因数	260
实验六 三相异步电动机直接启动	263
实验七 异步电动机星-角降压启动	265
部分习题答案	268
附录 A 贴片元器件及其焊接要领	274
附录 B 铜导线及保险丝的选用和代换	277
附录 C 电工技术复习题	280
参考文献	286

第1章 电路基础知识

世界最早的电路以闪电为电源、以空气、动植物、土壤等为回路。闪电电流可达数千安,而且很难预测、很难控制,造成很多灾难。经过几百年的不懈探索,最终证明闪电、摩擦电、伏打电、温差电、动物电及电磁感应电的同一性,逐渐形成了电路理论。

1785年法国科学家库仑(Charlse-Augustin de Coulomb,1736—1806)发现电荷间相互作用力的规律——库仑定律。1881年后人以库仑(C)作为电荷的基本单位。

1800年意大利科学家伏特(Alessandro Volta,1745—1827)发明化学电池,为人类研究电路提供了原始电源。1881年后人以伏特(V)作为电压的基本单位。

1820年丹麦科学家奥斯特(Hans Christian Oersted,1777—1851)发现磁力线与电流正交,纠正了磁力线与电流平行的狭隘认识,奠定了现代电磁学的基础。

1820—1827年法国科学家安培(André-Marie Ampère,1775—1836)在电动力学方面的研究成果卓著。1881年后人以安培作为电流的基本单位。

1826年德国物理学家欧姆(Georg Simon Ohm,1787—1854)发现电压、电流与电阻关系的定律——欧姆定律。1881年后人把欧姆(Ω)作为电阻的基本单位。

1830年美国科学家亨利(Henry Joseph 1797—1878)发现自感现象。亨利晚年一直担任美国科学院院长。后人以亨利(H)作为电感单位。

1831年英国科学家法拉第(Michael Faraday,1791—1867)发现电磁感应现象,奠定了发电技术、电源大功率化和电能广泛应用的基础。1881年后人以法拉(F)作为电容单位。

1833年俄国科学家楞次(Эмилий Христианович Ленц,1804—1865)发现确定感应电流方向的楞次定则——感应电流总是抵抗磁通的变化。

1847年德国科学家基尔霍夫(Robert Kirchhoff,1824—1887)提出著名的节点电流定律(KCL)和回路电压定律(KVL)。后人将其命名为基尔霍夫第一定律和第二定律。

1855年德国物理学家韦伯(Eduard Weber,1804—1891)将库仑静电力、安培电力和法拉第电磁感应力统一起来。1935年后人以韦伯(Wb)作为磁通量单位。

1864年英国科学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell,1831—1879)建立电磁场及电磁波理论,为现代无线电技术奠定了理论基础。

1879年美国科学家爱迪生(Thomas Alva Edison,1847—1931)发明直流供电和电灯。

1883年法国电报工程师戴维宁(M. Leon Thevenin,1857—1926)发现把一个有源二端网络等效简化为一个电压源的方法,称为戴维宁定理。

1888年德国科学家赫兹(Heinrich Hertz,1857—1894)用实验证实了麦克斯韦电磁波理论。后人以赫兹(Hz)作为频率的基本单位。

1889年南斯拉夫科学家特斯拉(Никола Тесла,1856—1943)发明交流电动机,确立交流供电体系。后人以特斯拉(T)作为磁感应强度的基本单位。

1893年时任 IEEE(电气与电子工程师协会)主席的德国科学家斯坦梅茨(Proteus Steinmetz,1865—1923)创立相量法描述交流电,为后人提供了高效的分析计算方法。

1926年美国贝尔实验室工程师诺顿(E. L. Norton,1898—1983)发现把一个有源二端网络等效简化为一个电流源的方法,称为诺顿定理。诺顿定理与戴维宁定理互为对偶。

1.1 电路参数量纲及定律

通常原子核只占整个原子体积的几千亿分之一,气体乃至固体内部都是十分空旷的。电子比原子核小得多。固体虽然密不透风,但对电子而言依然是广阔天地任遨游。电子在原子之间不定向穿梭运动,物质不显电性;定向穿梭运动,物质就会导电。

科学探索的任务,一是确定参数变化规律;二是用合适的单位定量表示其大小。

基本量纲与导出量纲:彼此独立、不能互相导出,必须人为地设定的量纲,称为基本量纲;由基本量纲组合而导出的量纲称为导出量纲。

自然科学 7 大基本量纲:长度 m、质量 kg、电流 A、时间 s、热力学温度 K、发光强度 Cd 及物质量 mol,其中 6 项涉及电学。

根据电流 A 和时间 s 可导出电荷单位为秒安(sA),就是库伦(C)。电压单位(V)、电阻单位欧姆(Ω)、电容单位法拉(F)及电感单位(H)等派生单位都是这样导出的。

1.1.1 电路参数量纲、定律、电压极性及电流方向的关联假设

1. 电路参数及其量纲

电压 U 、电流 I 、电阻 R 、功率 P 及电荷 Q 等电路主要参数及其单位符号的来历如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 电路参数及其单位符号的来历

电路参数	符号	来 历	单 位	来 历
电压	U	德语 Unterschied(差异)	V	希文 Volta
电流	I	英语 Intensity of electron flow	A	法语 Ampere
电阻	R	英语 Resistance	Ω	德语 Ohm
功率	P	英语 Power	W	英语 Watt
电荷	Q	英语 Quotient	C	法语 Coulomb

电荷的常用单位是库伦(C)。6.24 $\times 10^{18}$ 个电子所携带的电量定义为 1 库伦。电量单位还有毫库伦(mC)、微库伦(μ C)、纳库伦(nC)和皮库伦(pC)。

电流强度(电流):单位时间内流过的电荷量。将导体截面每秒钟流过 1 库伦电荷的流量定义为 1 安培(Ampere),简称 1 安(A),1A=1C/s。

电流单位除了基本单位安(A)外,还有辅助单位千安(kA)、毫安(mA)和微安(μ A)等。

$1\text{kA}=10^3\text{A},\quad 1\text{mA}=10^{-3}\text{A},\quad 1\mu\text{A}=10^{-3}\text{mA}=10^{-6}\text{A}$

电力设备的电流可达数 A 到几十 A,三峡大坝发电机的电流可高达 22.5kA。

手机电池充电起始电流约 150mA,充电过程中电池电压不断上升,充电电流渐小。

若电阻 R 流过 1A 电流时的功耗为 1W(J/s),则该电阻两端之间的电压降定义为 1 伏特(Volt),简称伏(V),是电动势及电压的基本单位。

电压单位除了基本单位伏(V),还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μ V)等。

$1\text{kV}=10^3\text{V},\quad 1\text{mV}=10^{-3}\text{V},\quad 1\mu\text{V}=10^{-6}\text{V}$

2. 电路基本定律

1) 欧姆定律(Voltage Current Relationship, VCR)

电阻 R 两端电压 U 与其中电流 I 的关系为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad I_{ab} = \frac{U_a - U_b}{R} \quad (1.1.1)$$

电阻两端电压(降)与其中电流的比例关系及电阻概念是德国物理学家欧姆发现的,但首先承认欧姆先生这项伟大发现的却是英国,后来他的祖国——德国才承认。为了纪念欧姆先生,后人把描述电阻两端电压与其中电流关系的规律称为欧姆定律。

电压单位为伏特(V)、电阻单位为欧姆(Ω)时,电流单位为安培(A)。

2) 基尔霍夫定律(Kirchhoff's Law)

(1) 基尔霍夫第一定律(节点电流定律, Kirchhoff's Current Law, KCL)

一个节点上流进的电流和等于流出的电流和。设流进节点的电流为正,则流出节点的电流为负,基尔霍夫第一定律也可描述为:一个节点上的电流代数和为零,即

$$\sum I = 0 \quad (1.1.2)$$

在图 1.1.1 的节点 a 上看,电流 I_1 、 I_2 为流进, I_3 为流出,节点电流平衡方程可写为

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

(2) 基尔霍夫第二定律(回路电压定律, Kirchhoff's Voltage Law, KVL)

电流大小和方向一目了然的电路称为简单电路,不甚明确的电路称为复杂电路。

电动势 E 和电压降 $U = RI$ 的单位虽然都是伏特,但两者性质不同。在电路运行中,电动势是形成电流的动力,是主动发出的一方,而电阻电压降通常是阻力,是被动形成的一方。在简单电路中,电流只有一个,能根据阻力与动力相平衡的原理列出方程 $(\sum R)I = E$, 求出电流 $I = E / \sum R$ 。

阻力与动力相平衡的原理仅仅适用于简单电路。复杂电路不一定要要求阻力与动力相平衡,关键是电压降与电压升平衡,即电压降代数和等于零。闭合回路上的电压降代数和等于零的原理既适用于有源回路,又适用于无源回路。

闭合回路上的电压降代数和等于零是一条普遍原理。根据闭合回路上的电压降代数和等于零可列出任意回路的电压平衡方程

$$\sum U + \sum E = 0 \quad (1.1.3)$$

从图 1.1.1 左上点开始顺时针巡行,按累加电压降可列出左边回路的电压平衡方程

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 - E_1 = 0$$

3) 法拉第发电定律

小写 φ 代表磁通瞬态量。磁路中磁通 φ 有变化,其上绕的线圈就产生感应电压

$$u = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{或} \quad u = n \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.1.4)$$

这说明 n 匝线圈的感应电压等于 n 倍的磁通变化率,这就是法拉第电磁感应定律。

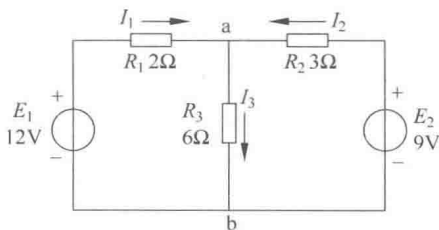


图 1.1.1 复杂回路

磁通单位为韦伯(Wb)、时间单位为秒(s)时,感应电压单位为伏特(V)。1Wb=1V·s。

3. 电能、电功率及其与电压电流的关系

物体受力 F 与其运动速度 V 的乘积就是机械功率 P , $P=FV$ 。电学中电压 U 相当于力学中的力 F , 电流 I 相当于物体运动速度 V , 电压 U 与电流 I 的乘积就是电功率 P 。在电源中, 电荷在电源电动势作用下从负极流向正极, 电位得以提升, 是电源做功。在负载中, 电荷从高电位跌落到低电位, 电能由负载做功转换为热能、光能或机械能等。其中除了机械能可以存储外, 热能、光能一般随即耗散殆尽, 所以常称为功率消耗(功耗)。

电源发出 1W 功率就是每秒把 1C 电荷的电位提高 1V, 负载消耗 1W 功率就是每秒钟把 1C 电荷的电位降低 1V。

电源输出功率 P 等于电动势 E 与工作电流(从负极到正极) I 的乘积, 即 $P=EI$ 。

电阻消耗功率 P 与电压 U 和电流 I 、阻值 R 的关系为

$$P = UI, \quad P = U^2/R, \quad P = RI^2 \quad (1.1.5)$$

电压为 1 伏特(V)、电流为 1 安(A)时, 能量转换速率(即功率消耗)定义为 1 瓦(W)。

电功率单位除了瓦(W)外, 还有兆瓦(MW)、千瓦(kW)、毫瓦(mW)、微瓦(μ W)。

$$1\text{MW}=10^6\text{W}, \quad 1\text{kW}=10^3\text{W}, \quad 1\text{mW}=10^{-3}\text{W}, \quad 1\mu\text{W}=10^{-6}\text{W}$$

已知恒定功率 $P(\text{VA})$ 及做功时间 $t(\text{h})$, 可以用功率与时间的乘积计算电能

$$W = Pt = UI t \quad (1.1.6)$$

已知电量及电压, 如蓄电池额定容量 $Q_n(\text{Ah})$ 及额定电压 $U_n(\text{V})$, 还可以根据电力做功(即把一定的电荷提高一定的电位)的原理, 用电量与电压的乘积来计算电能

$$W = Q_n(\text{Ah})U_n(\text{V}) = Q_n U_n (\text{VAh}) \quad (1.1.6a)$$

负载实际功率消耗 1W、工作 1s 所消耗的电能 1Wh, 叫做 1 焦耳, 简称焦(J)。

负载实际功率消耗 1kW、工作 1h 所消耗的电能称为 1 度。1 度=1 千瓦时。

$$1\text{度}=1\text{千瓦时}=1\times 10^3\times 3600\text{伏安秒}=3.6\times 10^6\text{焦耳}=36\,000\times 10^2\text{伏库仑}$$

也就是说, 在电源那端看, 发出 1 度电就是把 36 000C 的电荷提高了 100V, 在负载这端看, 消耗 1 度电就是把 36 000C 的电荷降低了 100V。

人们只要掏出大约 0.6 元钱的电费, 发电厂就使 16 400C 的电荷从 220V 电源到负载走一个来回。不到 1 元钱就换来 16 400C 电荷, 用户倒是相当划算, 不过如果库仑先生知道了可就有点生气了, 大家真应当感谢伟大的库仑先生。

电路中的电压、电流平衡, 功率也平衡。电路中的功率平衡关系为

$$\text{输出功率} = \text{消耗功率} + \text{吸收功率}$$

电源、电感、电容既能输出也能吸收功率。电源充电是吸收功率。电阻只能消耗功率。

例 1.1.1 寝室里有 40W 日光灯 1 只, 平均每天工作 4h; 12W 台灯 1 只, 平均每天工作 5h。1 度电费按 0.6 元计, 每月按 30 天计, 试求这间寝室照明每月消耗多少电费。

解 每月消耗电能为

$$(40\times 4 + 12\times 5)\times 30\text{ 瓦时(Wh)} = 6600\text{Wh} = 6.6\text{ 千瓦时(kWh)} = 6.6\text{ 度}$$

每月电费为

$$6.6\text{ 度}\times 0.6\text{ 元/度} = 3.96\text{ 元}$$

4. 机电之间的桥梁——功

从电的视角看, 把 1C 电荷提升 1V 电位, 做功是 1J, 即 1VC=1J。从机械的视角看, 把

1N 的重物提升 1m 高,做功也是 1J,即 $1\text{Nm}=1\text{J}$ 。故机电之间的桥梁为

$$\text{VC}=\text{Nm} \quad \text{或} \quad \text{VC/m}=\text{N}$$

例如,长度 l 、电流 I 的载流导线在磁通密度 B 的磁场中的受力为

$$F = BlI$$

磁通密度 B 的单位为特斯拉(韦伯/平方米, Vs/m^2)、长度 l 的单位为米(m)、电流 I 的单位为安(库伦/秒, C/s)时,力 F 的单位自然为牛: $(\text{Vs/m}^2)\text{m}(\text{C/s})=\text{VC/m}=\text{N}$ 。

为使答案得到正确单位,可采取两种方案。方案 1 生手宜用,方案 2 熟手宜用。

方案 1: 已知数的量纲分解参加运算,有关量纲抵消后自然得出答案的量纲;

方案 2: 已知量的单位用瓦(W)、伏(V)、库(C)、安(A)、欧(Ω)、秒(s)、米(m)、法(F)、亨(H)、韦(Wb)、特(T)、牛(N),答案的单位必是上述之一。

5. 电压极性与电流方向的关联假设

1) 电阻电流的假设方向及电压的关联假设极性

电压与电流大小相关,极性与方向亦相关。未知电流的方向或电压的极性都可以任意假设。但是电压极性假设后,电流方向就不能继续随意假设,而是应当根据电压极性关联假设;电流方向假设后,电压极性也不能继续随意假设,而应当根据电流方向关联假设。

原始假设不同,仅仅影响假设参数计算结果的符号。关联假设一旦搞错,就会混淆计算式或方程中的加号与减号,结果使分析计算差一个符号,甚至前功尽弃、铸成大错。

管道中的流体从压力高处向低处流动形成液气流。随着液气体的流动,压力变得越来越低。液(气)压 P 关联假设极性应以假设流体流进一端为正极,如图 1.1.2 所示。

负载中的正电荷也是从电位高处向低处流动形成电流。随着电荷的流动,电压变得越来越低。因此,负载电压 U 的关联假设极性应以电流流进一端为正极,如图 1.1.3 所示。

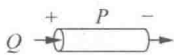


图 1.1.2 管道流体压力 P 与流量 Q 的关联假设

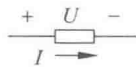


图 1.1.3 电阻电压 U 与电流 I 的关联假设

一段导体(电阻)的电流等于进端电压减去出端电压与该电阻的比值,见式(1.1.1)。

电阻上的电压降与电流方向是一致的。知道电压极性,就能标出电流方向;假设了电压极性,就能标出电流关联假设方向。知道了电流方向,也能标出电压极性;设定了电流假设方向,也能标出电压关联假设极性,如图 1.1.3 所示。

2) 电容电荷和电压的假设极性及其关联假设方向

电容电压与电荷同极性,即电容电压与电荷用同一个极板为基准。电容电流等于其正极板上的电荷增加率,电流的关联假设方向与电荷、电压的假设极性的关系如图 1.1.4 所示。

3) 电感电流的假设方向及感应电压的关联假设极性

电感感应电压总是阻止电流变化。电感感应电压在电流增加时作为阻力,在电流减小时作为短暂的动力。电阻电压作为电流的阻力,以电流进端为正极。电感电压作为电流的阻力,都应以电流进端为正极。电感感应电压假设极性与电流的关联假设方向的关系如图 1.1.5 所示。