

—— 高等学校教材 ——

电 工 学

上 册

秦 曾 煌 編

高 等 教 育 出 版 社



电 工 学

上 册

秦 曾 煌 编

高 等 教 育 出 版 社

序 言

1962年5月,教育部召开了高等工业学校教学工作會議,会上审訂了机械制造类各专业适用的《电工学教学大綱(試行草案)》。这份教学大綱所規定的教学总学时为150学时,其中讲课100学时;在內容方面与1956年所制訂的大綱相比,出入較大。因此,編者按照新教学大綱的內容、份量和安排系統,并根据十年来的教学經驗,将目前所用的讲义加以修訂补充,編成此书。本书經高等工业学校电工学及电工基础課程教材編审小組审閱后,修改定稿,可作为高等工业学校机械制造类各专业电工学課程的教材。

电工学是一門非电专业的技术基础課程,它的主要任务是为学生学习专业知識和从事工程技术工作打好电工技术的理論基础,并使他們受到必要的基本技能的訓練。为此,在本书中对基本理論、基本定律、基本概念及基本分析方法都作了尽可能詳尽的闡述,并通过实例、例題和习题來說明理論的实际应用,以加深学生对理論的掌握和理解,以及了解电工技术的发展与生产发展之間的密切关系。

本书注意到与普通物理課的分工,避免了不必要的重复。至于部分內容,例如电路的基本物理量、欧姆定律、电路的参数、磁場的基本物理量及铁磁物质的磁性能等,虽然已在普通物理課程中讲过,但是为了加强理論的系統性和满足电工技术的需要,仍列入本书中,使学生在温故知新的基础上,对这些內容的理解能进一步巩固和加深,并能充分地应用和扩展这些內容。

本书也注意到与后續专业課的分工,书中一般不討論綜合性的用电系統和专用设备,而只研究用电技术的一般規律和常用的

电气設備、元件及基本电路。

本书中用小号字排的部分內容教师在讲授时可灵活掌握，一般应視专业的需要、学时的多少和学生的实际水平而决定取舍。有些內容可让学生通过自学掌握，不必全在課堂讲授。本书各章习題的数目比教学大綱所規定的多一些，这样可使教师选择习題时比較灵活，同时也可滿足部分学习成績較好的学生希望多做一些习題的要求。为了照顾某些动力机械制造专业的需要，对同步电机一章的內容介紹較多，其他专业可按其需要选择其中部分內容讲授。

本书所用的图形符号是符合中华人民共和国第一机械工业部所頒布的电工专业标准(草案試行)电(D)42-60《电气綫路图上图形符号》的規定的。至于文字符号則以国际通用符号为主，仅对某些物理量的注脚(例如額定电压 U_0 、短路电流 I_D 、起動轉矩 M_Q 、励磁电流 I_L 等)和綫路图上的部分文字符号(例如发电机 F 、电动机 D 、接触器 C 等)参考了上述标准試用了汉语拼音符号(見附录二)。

本书承西安交通大学袁旦庆同志仔細审閱，指出錯誤，提出修改建議，哈尔滨工业大学电工学教研室对本书內容的安排和部分章节的內容进行过討論，提出了宝贵意見，并承哈尔滨工业大学繪图室描繪了插图，在此对他們表示衷心的感谢。

由于編者能力有限，見解不多，本书难免有些內容不够妥善，甚至会有錯誤之处。希望讀者，特别是使用本书的教师和同学积极提出批評和改进意見，以便今后修訂提高。

秦會煌

于哈尔滨工业大学

上册目录

序言	vii
緒論	1
第一部分 电路、磁路及电工測量	
第一章 直流电路	8
1-1. 电路及其組成部分	8
1-2. 电流	9
1-3. 电压与电动势	11
1-4. 欧姆定律	13
1-5. 电阻与电导	17
1-6. 电功率与电能	20
1-7. 絕緣材料的电性能	23
1-8. 电路的工作状态	25
1-9. 基尔霍夫定律	29
1-10. 电阻的串联与并联	32
1-11. 电源的串联与并联	36
1-12. 复杂直流电路	37
1-13. 支路电流法	38
1-14. 回路电流法	41
1-15. 节点电压法	42
1-16. 叠加原理	44
1-17. 等效电源定理	46
1-18. 非綫性电阻电路	49
第二章 正弦交流电路	52
2-1. 交变电流	52
2-2. 正弦电动势的产生	54
2-3. 周期与频率	58
2-4. 初相位与相位差	60
2-5. 正弦量的有效值	62

2-6. 正弦量的矢量表示法	64
2-7. 正弦量的复数表示法	65
2-8. 电路的参数	71
2-9. 纯电阻的交流电路	77
2-10. 纯电感的交流电路	79
2-11. 电阻与电感串联的交流电路	83
2-12. 纯电容的交流电路	91
2-13. 电阻、电感与电容串联的交流电路	94
2-14. 负载串联的交流电路	100
2-15. 负载并联的交流电路	102
2-16. 复杂交流电路的计算	108
2-17. 电路中的共振	112
2-18. 功率因数的提高	117
2-19. 电路的感应耦合	122
第三章 三相电路	127
3-1. 多相电路	127
3-2. 三相电动势的产生	128
3-3. 发电机绕组的星形联接	130
3-4. 发电机绕组的三角形联接	132
3-5. 负载星形联接的三相电路	133
3-6. 负载三角形联接的三相电路	142
3-7. 三相功率	146
第四章 非正弦周期电流的电路	149
4-1. 非正弦周期电流的产生	149
4-2. 非正弦周期量的分解	150
4-3. 非正弦周期量的有效值	153
4-4. 非正弦周期电流的线性电路的计算	154
4-5. 非正弦周期电流电路中的平均功率	159
第五章 电路中的过渡过程	162
5-1. 概述	162
5-2. 用解微分方程的方法计算电路中的过渡过程	165
5-3. 电阻与电感串联电路中的过渡过程	166
5-4. 电阻与电容串联电路中的过渡过程	174
5-5. 电容器的振荡放电	178

第六章 磁路与铁心线圈电路	183
6-1. 磁场及其基本物理量.....	183
6-2. 铁磁物质.....	188
6-3. 磁路及其基本定律.....	193
6-4. 直流励磁的磁路的计算.....	196
6-5. 交流励磁的磁路(交流铁心线圈电路).....	200
6-6. 电磁铁.....	209
6-7. 铁磁稳压器.....	213
6-8. 交、直流励磁的磁路及磁放大器.....	214
第七章 电工测量	217
7-1. 电工测量仪表的分类.....	217
7-2. 电工测量仪表的型式.....	222
7-3. 电流的测量.....	232
7-4. 电压的测量.....	233
7-5. 万用电表.....	235
7-6. 功率的测量.....	237
7-7. 兆欧计.....	241
7-8. 用电桥测量电阻、电感与电容.....	243
附录	246
附录一 实用单位制(MKSA制)、静电单位制(CGSE制)和电磁单位制 (CGSM制)之间的关系.....	246
附录二 关于汉语拼音文字符号的说明.....	246
附录三 利用计算尺进行复数运算的方法.....	247
习题	251
第一章.....	251
第二章.....	256
第三章.....	262
第四章.....	265
第五章.....	266
第六章.....	268
第七章.....	270

緒 論

1. 电能的应用及其与生产发展的关系

电工学是研究电和磁的现象在技术中应用的科学。电能的应用范围是极其广泛的，现代一切新的科学技术的发展无不与电有着密切的关系。电力是技术革命的物质基础。所谓电气化，就是要将整个国民经济转移到最先进的机器设备的基础上，在生产 and 生活中最广泛地应用电能。

在现代工业、农业及国民经济的其他各个部门中，电能的应用日益广泛，逐渐以电力作为主要的动力来源。工业上的各种生产机械（如各种金属切削机床、起重机、轧钢机、卷扬机、鼓风机、水泵、油泵等）都是用电动机来拖动的；生产过程的自动化主要是用电来实现的，自动化工厂已在不少国家建成；许多非电量（如温度、压力、速度、水位等）都可以用电的方法来测量和进行自动调节；在机械制造工艺上，电能也正得到日益广泛的应用，如电镀、电焊、高频淬火、电蚀加工、超声波加工及电子束加工等；金属的冶炼也常常要应用到电炉。农业生产的进一步发展需要在高度技术的基础上实现，而农业电气化就是这种高度技术的动力基础；在农业上将日益广泛地采用电力排灌设备、电力拖拉机与收割机、粮食与饲料的电力加工装置等。在交通运输部门，也正在逐渐采用电力牵引；汽车和飞机发动机的点火也都是用电来完成的。此外，原子能研究和宇宙开发（如火箭技术、宇宙飞行等）的发展则更是与电分不开的。

电也是现代物质和文化生活中所不可缺少的，如电灯、电话、电影、无线电广播、电视及X射线透视等都是电能的应用。

电能所以会得到这样广泛的应用，是因为它具有无可比拟的

优越性。电能的优越性主要表现在下列三个方面：

(1)便于轉換 电能可以从水能(水力发电)、热能(火力发电)、原子能(原子能发电)、化学能(电池)及光能(光电池)等轉換而得；同时也可以将电能轉換为其他所需要的能量形态，如利用电动机将电能轉換为机械能，利用电炉将电能轉換为热能，利用电灯将电能轉換为光能，利用揚声器将电能轉換为声能。此外，电能之間也可轉換，如利用整流器将交流电能轉換为直流电能，利用电子管振荡器将直流电能轉換为交流电能。

(2)便于輸送 电能可以方便地被輸送到远方，而且輸电設備简单，輸电效率很高。我們知道，工厂通常都建于原料产地和运输方便之处，而发电站則大多建于有能源的地方，二者之間有一定的距离。动力基地与工业基地在位置上存在的这个矛盾，由于电能的远距离輸送而得到了解决。电能不仅輸送方便，而且分配也很容易，自几十瓦的电灯到几百瓩的电动机，根据用电需要，都可以灵活分配。

此外，电能也可以不通过导綫而以电磁波的形式傳播，例如无线电信号的傳遞就是这样。

(3)便于控制 利用电能可以达到高度自动化。例如用自动监督来防止事故；用自动控制来进行操作；用自动調节来稳定运行。

电能的应用对劳动生产率的提高和社会生产力的发展起着巨大的作用。电气化是实现工业化和生产过程自动化的必要条件。沒有电力要想大規模发展工业是不可想像的。列宁曾說过：“社会主义的唯一的物质基础，就是同时也能改造农业的大机器工业。……适合最新技术水平并能改造农业的大工业就是全国电气化。”^①在生产过程机械化和自动化的基础上，不仅繁重的体力劳

① 《列宁全集》第 32 卷，人民出版社，1958 年，446—447 頁。

动可以全由机器代替,而且工人的文化技术水平也必然大大提高。这就为消除体力劳动与脑力劳动之間的差别創造了条件。同样,随着农业生产的逐步机械化和电气化,必然也会不断縮小城乡之間和工农之間的差别。

因此,列宁在全俄苏維埃第八次代表大会上对电气化的作用作了卓越的估計:“共产主义就是苏維埃政权加全国电气化。……只有当国家实现了电气化,为工业、农业和运输业打下了現代大工业的技术基础的时候,我們才能彻底取得胜利。”^①列宁还把全俄电气化計劃叫做“第二个党綱”,这就是說要实现共产主义,不仅需要以无产阶级专政作为政治基础,同时还必須实现全国城乡的电气化作为經濟基础。

迅速实现电气化只有在社会主义制度下才有可能,这是由于社会主义社会实现了生产資料公有制,国民經济能有計劃、按比例地发展;而在資本主义制度下,由于生产的社会性和生产資料的私人占有制之間的矛盾,給生产的发展和电气化的实现造成了很大的障碍。在資本主义社会中,生产的电气化只增加了少数人的財富,而給劳动人民带来的却是更大的失业和貧困。

2. 电工技术发展簡史

現在,人們已經掌握了大量的电工技术方面的知識,而且电工技术还在不断地发展着。这些知識是人們长期劳动的結晶。

我国很早就已发现电和磁的現象,在古籍中曾有“慈石召铁”和“琥珀拾芥”的記載。磁石首先应用于指示方向和校正時間,在《韓非子》和东汉王充著《論衡》两书中所提到的“司南”就是指此。以后由于航海事业发展的需要,我国在十一世紀就发明了指南針。

^① 《列宁全集》第31卷,人民出版社,1958年,468—469頁。

在宋代沈括所著的《夢溪筆談》中有“方家以磁石磨針鋒，則能指南，然常微偏東，不全南也”的記載。這不僅說明了指南針的製造，而且已經發現了磁偏角。直到十二世紀指南針才經由阿拉伯人傳入歐洲。

在十八世紀末和十九世紀初的這個期間，由於生產發展的需要，在電磁現象方面的研究工作發展得很快。庫倫(C. A. Coulomb)在1785年首先從實驗確定了電荷間的相互作用力，電荷的概念開始有了定量的意義。1820年，奧斯特(H. C. Oersted)從實驗發現了電流對磁針有力的作用，揭開了電學理論的新的一頁。1820年，安培(A. M. Ampère)確定了通有電流的綫圈的作用與磁鐵相似，這就指出了磁現象的本質問題。有名的歐姆定律是歐姆(G. S. Ohm)在1826年通過實驗而得出的。法拉第(M. Faraday)對電磁現象的研究有特殊貢獻，他在1831年發現的電磁感應現象是以後電工技術的重要理論基礎。在電磁現象的理論與實用問題的研究上，楞次(Э. X. Ленц)發揮了巨大的作用，他在1833年建立了確定感應電流方向的定則(楞次定則)。其後，他致力於電機理論的研究，並闡明了電機可逆性的原理。焦耳(J. P. Joule)與楞次先後在1841年和1842年分別獨立地確定了電流熱效應定律(焦耳-楞次定律)。與楞次一道從事電磁現象研究工作的雅科比(Б. С. Якоби)在1834年製造出世界上第一台電動機，從而證明了實際應用電能的可能性。電機工程得以飛躍地發展是與多里沃-多勃羅沃爾斯基(М. О. Доливо-Добровольский)的工作分不開的。這位傑出的俄羅斯工程師是三相系統的創始者，他發明和製造出三相異步電動機和三相變壓器，並首先採用了三相輸電綫。1895年波波夫(А. С. Попов)發明了無線電，為無線電技術的發展开辟了道路。

3. 我国电气工业的发展情况

解放前我国的电气工业是非常薄弱的。許多电工企业都掌握在外国资本家手中；同时这些企业的设备陈旧，技术落后，经营腐败，在地区分布上也极不合理。

解放后由于党的正确领导，电气工业发展很快，迅速地改变着反动统治时代的落后面貌。从1953年到1957年，实行了发展国民经济的第一个五年计划，建立了社会主义工业化的初步基础。在发电量方面，1957年即增长到193亿度，比刚解放时（1949年）的43亿度提高了3.4倍。在第一个五年计划期间，发电量的逐年增长率平均为21.2%，这是异常迅速的。在1958年到1962年的第二个五年计划期间，在党的社会主义建设总路线的指引下，我国的工业有了进一步的发展，我国的社会主义工业化的基础已经建立起来。1958年我国发电量即增长到275亿度，比1957年增长了42.4%。而在1959年又增长到415亿度，即比1958年增长了51%，提前三年完成了第二个五年计划原定在1962年达到的指标。这样的增长速度是任何资本主义国家电力工业发展史上所没有出现过的。

我国的动力资源极为丰富，不但煤和石油的储藏量丰富，而且水力资源也很丰富。水力资源是取之不尽的动力泉源。利用水力发电不仅可以节省燃料，减少劳动力，降低成本，而且还可以把发电和防洪、灌溉、航运等结合起来进行水能的综合利用。解放以来，我国大力发展水电事业，建设了一批大、中型的水电站，和较多的小型水电站。而在解放前水力资源的开发根本没有受到重视，在国民党统治的三十多年中，仅仅建设了一些小型水电站。

我国的电机制造工业在解放前也是极为薄弱的，所生产的水轮发电机容量最大的不过200瓩，而汽轮发电机就根本不能制造。解放后电机制造工业的发展也极为迅速。在水轮发电机制造方面，

1951年开始制造 800 瓩的水輪发电機組，而到 1958 年就已能生产 72,500 瓩的水輪发电機組了。在汽輪发电機制造方面，1954 年开始生产 6,000 瓩的汽輪发电機組，到 1958 年就已能生产 25,000 瓩的汽輪发电機組，而 1959 年又制造出了 50,000 瓩的氫冷却汽輪发电機組。

現在我国的电机制造工业已經在旧中国殘缺不全的基础上，从无到有、从小到大、从修配到仿制、从仿制到自行設計制造、从不成套到成套，基本上形成了电机制造工业的体系。

此外，电器、电工仪表和电子器件等制造工业在解放后也有了很大的发展。程序控制机床、快速电子計算机、高压电桥以及一些复杂的电子装置等也都已能自行設計与制造。

近几年来，农业用电也有很大的发展。在农村中因地制宜，挖掘了水、火、風、沼各种可以利用的能源，发挥了广大群众办电的积极性。目前在农业上正在逐漸使用电力进行排灌和粮食、飼料及农副产品的加工，另外，也可利用电犁耕田。从实际情况看来，这不仅在灌溉、排澇、抗旱等方面收到实效，使粮食、蔬菜及其他农作物得以增产，而且也降低了成本（譬如电力排灌較內燃机排灌要降低成本 2—3 倍），提高了劳动生产率。

我国电气工业所取得的这些偉大成就，都是我国人民贯彻执行党的正确路綫和政策的結果，都是我国劳动人民艰苦奋斗的結果，都是同社会主义各国人民、同世界各国人民的支持分不开的。我們深信，全国人民在党和政府的领导下，在党的社会主义建設总路綫的指引下，繼續发揚艰苦奋斗、勤儉建国、自力更生、奋发图强的革命精神，共同努力，定会使我国的电气工业得到更大的发展。

4. 电工学課程的任务和主要内容

在高等工业学校机械制造类各专业的教学計劃中，电工学是

一門技術基礎課程。在本課程中主要研究用電技術的一般規律和常用的電氣設備、元件及基本電路。為此，它的任務是：使學生通過教學大綱所規定的全部內容的學習，掌握電工學的基本理論知識，了解本專業內常用的各種電機、電器、電工測量儀表及電子離子器件，並受到必要的計算和實驗技能的訓練，為學習專業知識和從事工程技術工作打好比較寬廣的基礎。

本課程的內容分為三部分：(1)電路、磁路及電工測量；(2)電機、控制及供電；(3)工業電子技術與非電量的電測法。

第一部分中主要講述電路和磁路的基本理論，為機械製造類各專業的学生在電工技術應用方面打下必要的理論基礎。本部分對學生的基本要求是：(1)能掌握分析各種電路和簡單磁路的基本定律和基本方法；(2)對電壓電流關係、電磁關係及能量轉換和功率問題，有比較清楚和正確的概念；(3)對直流電路和簡單正弦交流電路(包括三相對稱電路)具有一定的計算能力；(4)能正確選擇和使用常用的電工測量儀表，掌握電壓、電流、功率及電阻的測量方法。

第二部分中主要講述變壓器和各種電機(特別是三相異步電動機和並勵直流電動機)的基本構造、作用原理、主要特性以及操作使用。學生對上述內容應基本掌握，並具有初步選擇電動機的容量、種類及型式的能力，對電動機的繼電接觸控制的基本電路應能初步分析。此外，對車間供電系統和安全用電也應具有一般知識。

第三部分中主要講述常用的電子與離子器件的簡單構造、作用原理及主要特性，各種基本的整流電路、放大電路、振蕩電路的工作原理以及這些電路中的主要元件的作用，常用電子儀器的結構原理及其使用方法，非電量電測法的基本原理。學生除掌握上述內容外，還應具有查閱電子管手冊的初步能力。

第一部分 电路、磁路及电工测量

第一章 直流电路

在本章中主要討論：1. 电路的基本物理量；2. 电路的基本定律以及应用它們来分析与計算各种直流电路的方法；3. 能量的轉換和电功率。这些問題虽然在直流电路中提出，但也适用于其他各种电路，它們是分析与計算电路的基础理論。其中有些內容虽然在普通物理課程中讲过，但是为了加强理論的系統性和滿足电工技术的需要，仍列入本章中，以便使讀者在温故知新的基础上，对这些內容的理解能进一步巩固和加深，并能充分地应用和扩展这些內容。

1-1. 电路及其組成部分

电路，简单地說，就是电流所流經的路徑，它一般由电源、負載及联接导綫三个基本部分組成（图 1-1 所示的是最簡單的直流电路）。

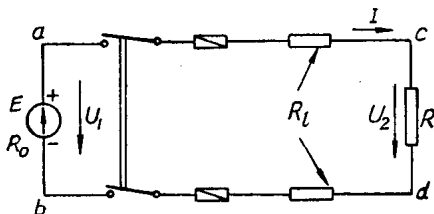


图 1-1. 最簡單的直流电路。

1. 电源 电源是一种将非电能量轉換成电能的装置。常用的电源有原电池、蓄电池和发电机等，它們分別将化学能或机械能轉換为电能。图 1-1 的 ab 段即表示一个电源。

2. 負載 負載是取用电能的装置,也就是用电設備。它将电能轉換为其他形式的能量。例如电灯、电炉和电动机分别将电能轉換为光能、热能和机械能。图 1-1 的 cd 段即表示負載。

3. 电源与負載間的联接部分 联接部分中除必不可少的联接导綫外,还常接有开关和熔断器等。联接部分是用来輸送、分配和控制电能的。

电路中能量的轉換、輸送、分配及控制是反映在电流、电压及电动势等上面的,所以在分析与計算电路之前,首先討論一下电路中的这几个基本物理量。

1-2. 电流

金屬內的自由电子和电解质內的正、負离子一般都处于不規則的运动(热运动)状态。如果在电場的作用下,則这些自由电荷除开作不規則的运动外,还要作定向运动,它們的实际运动就是这两种运动的合成。这时正电荷按电場的方向运动,而負电荷則按相反的方向运动。在这种情况下,就有一定的电量通过导体的任一截面,便显示出导体內有电流。当电荷仅作不規則的热运动时,通过导体任一截面的电量平均为零,对外就显示不出有电流。

电流是一种物理現象,通过它的各种效应,例如热效应、磁效应及机械力效应等,能使我们觉察到它的存在。

为了計量电流的强弱,我們規定电流强度一量。电流强度是在电場的作用下单位時間內通过某一导体截面的电量。

設在极短的时间 dt 內通过导体截面 S (图 1-2) 的微小电量为 dq , 則电流强度为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

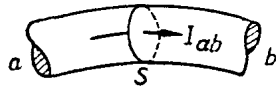


图 1-2. 导体中的电流。

通常所用的是交变电流,简称交流。

交流的电强度 i 是随时间而变化的, 是时间的函数。

如果电流强度不随时间而变化, 即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$, 则这种电流称为恒定电流, 简称直流。直流的电流强度常用大写的字母 I 表示, 所以式(1-1)可改写为

$$I = \frac{q}{t}, \quad (1-2)$$

式中 q 是在时间 t 内通过导体截面 S 的电量。

因为电流强度是电工学中极常用的物理量之一, 所以就常常简称为电流。这样, 电流一词就不仅代表一种物理现象, 而且也代表一个物理量。

习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向为电流的方向(实际方向)。但在分析与计算电路时, 常规定某一方向作为电流的正方向。电流的正方向并不一定与电流的实际方向一致。当电流的正方向与其实际方向一致时, 则电流为正值(图1-3, a); 反之, 当电流的正方向与其实际方向相反时, 则电流为负值(图1-3, b)。因此, 在正方向已规定之下, 电流之值可为正, 也可为负。

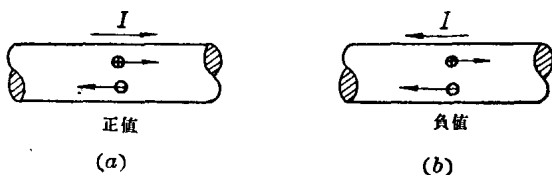


图 1-3. 电流的正方向。

本书中电路图上所标的电流方向都是正方向。

电流的正方向除用箭头表示外, 还可用双注脚表示。如图1-2中的 I_{ab} 即表示正方向是由 a 向 b 的电流。而电流的实际方向是一定的, 如果所规定的正方向与实际方向不同, 则二者之间差一负号, 即

$$I_{ab} = -I_{ba}.$$