

高等学校教学用书

电工基础

DIANGONG JICHU

浙江大学电工基础教研组编

人民教育出版社

电 工 基 础

DIANGONG JICHU

浙江大学电工基础教研组编

人民教育出版社

本书叙述电工的基本原理，分路和场二部分。在路的部分，包括了线性电路、非线性电路、磁路和电路中的过渡过程。在直流电路一章，着重在路的基本理论的叙述。交流电路一章则着重在利用复数来计算正弦电流电路的基本概念。磁路一章只作初步介绍。其余各章，如三相电路、非正弦电路、非线性交流电路、长线路等；则着重在叙述电路的特性及算法。过渡过程的计算着重在经典法与运算法。场的部分包括了电势、电流场、磁场和交变电磁场。一般着重在基本概念的叙述。为了适应不同专业的需要，取材的面比较广泛。

本书可作为高等工业学校电机系各专业“电工基础”课程的教学用书，对于电工技术人员也有参考价值。

电 工 基 础

浙江大学电工基础教研组编

人民教育出版社出版 高等学校教学用书 印刷部
北京宣武门内承恩寺7号

(北京市书刊出版业营业登记证出字第2号)

外文印刷厂印装 新华书店发行

统一书号 15010·48 开 850×1168¹/₃₂ 印张16⁸/₃₂ 插页1

字数 409,000 印数 00001—21,000 定价 (7) 1.80

1960年10月第1版 1960年9月北京第1次印刷

序

本书叙述电工的基本原理,着重在基本概念和基本计算方法的分析,并附有例题,作为理论应用于实际的示范。内容分路和场两部分。考虑到本课程与物理课的适当配合,我们有可能自直流电路开始叙述。若于有关场的基本概念,则分散插入路的有关章节中。

为了使本书能适用于较多的专业,书中包括的内容较为广泛,深度和广度也略高于1954年高等教育部颁布的电工基础教学大纲的要求。在教学时,对不同的专业,可作适当的删减。

本书的编写,主要取材于苏联的教本,并结合我们教研组的教学经验,希望能较好地适合我国目前的教学情况。在编写过程中曾经教研组多次讨论。但因受各种条件的限制,缺点和错误之处在所难免。尚希各兄弟教研组和各位读者不吝赐予批评和指正。

本书是集体编写的。各章执笔者为:第一、十、十一、十二、十三章,黄礼镇;第二、三、五章,王国松;第四、九章,甘明道;第六章,周庭阳;第七章,孙士乾;第八章,江维澄。本书并经黄礼镇,王国松校阅。

目 录

序

緒論 1

第一部分 电路理論基础

第一章 直流电路	10
1-1. 电路元件和电路图元件	10
1-2. 电位沿不分支电路的分布	11
1-3. 不分支电路功率的平衡	15
1-4. 电势源和电流源	17
1-5. 基尔霍夫定律	19
1-6. 支路电流法	22
1-7. 节点电位法	27
1-8. 回路电流法	30
1-9. 迭加定理	35
1-10. 互易定理	39
1-11. 支路的自电导和互电导	41
1-12. 补偿定理	44
1-13. 电压和电流間的綫性关系	45
1-14. 二端网络	48
1-15. 等值电源定理	50
1-16. 从有源二端网络到无源二端网络能量的傳輸	55
1-17. 三端网络——Y 和 Δ 电路图的轉換	59
1-18. 四端网络及其方程式	62
1-19. 四端网络系数的决定	64
1-20. 四端网络的等值电路图	68
1-21. 有源四端网络	69
1-22. 直流电路計算討論	71
1-23. 含有电容器的电路的基本定律和計算	72
第二章 非綫性直流电路	77
2-1. 非綫性电路元件	77

目 录

2-2. 计算不分支非线性电路的试探法与图解法	82
2-3. 计算分支的非线性电路的图解法	85
2-4. 非线性电路的解析法	88
2-5. 非线性复杂电路的计算	92
2-6. 非线性电路的稳定性	96
第三章 磁路	98
3-1. 磁路的基本概念	98
3-2. 磁路的基本定律	101
3-3. 不分支磁路的解法	104
3-4. 分支磁路的解法	103
3-5. 最简单的含有永久磁体的磁路的计算	112
第四章 正弦电流的电路	114
4-1. 交变电流和正弦电流	114
4-2. 交流发电机的基本概念	115
4-3. 有效值	116
4-4. 用向量或复数表示正弦函数	117
4-5. 同频率正弦时间函数的加法	118
4-6. 电流正方向选择的任意性	122
4-7. 交流电路的元件及交流电路计算的概念	122
4-8. 电阻元件中的正弦电流	123
4-9. 电感元件中的正弦电流	124
4-10. 电容元件中的正弦电流	126
4-11. 电阻、电感和电容的串联。阻抗	127
4-12. 电阻、电感和电容的并联。导纳	129
4-13. 一般负载的串联和并联	131
4-14. 无源二端网络	132
4-15. 一般负载的功率	134
4-16. 功率的测量。瓦特计的基本作用原理	138
4-17. 复杂交流电路	139
4-18. 复杂电路中的功率关系。耶日万定理	142
4-19. 位形图	144
4-20. 串联谐振	146
4-21. 简单串联谐振电路的频率特性	149
4-22. 并联谐振	152
4-23. 最大功率的传输	155
4-24. 无源四端网络	157
4-25. 互感电路中的磁链和感应电动势	159

4-26. 有互感的线圈的串联	163
4-27. 互感线圈的并联	164
4-28. 有互感的复杂电路的计算	166
4-29. 空心变压器	163
4-20. 简单电路图	170
4-31. 电路的复数方程	172
第五章 三相电路	178
5-1. 多相电源和多相电路的概念	178
5-2. 星形与角形联接	180
5-3. 对称三相电路的计算	181
5-4. 不对称三相电路的解法	185
5-5. 三相电路的功率及其测量	190
5-6. 三相制的优点	193
5-7. 旋转磁势	194
5-8. 三相制的对称分量	195
5-9. 三相制电压电流对称分量的一些性质	198
5-10. 对称三相负载对不同序电流的阻抗	200
5-11. 对称负载电流的决定	202
5-12. 不对称负载电流的计算	204
5-13. 用对称分量表示三相电路的功率	211
第六章 非正弦电路	212
6-1. 非正弦电势、电流的产生	212
6-2. 周期性非正弦函数分解为傅里叶级数	212
6-3. 谐波分析法	215
6-4. 非正弦电压与电流的最大值、有效值和平均值	222
6-5. 表明非正弦周期性曲线的几个系数	224
6-6. 周期性非正弦电路的计算	225
6-7. 非正弦电路的功率	229
6-8. 非正弦电流电路的谐波	231
6-9. 最简单滤波器举例	234
6-10. 三相电路里的高次谐波	235
6-11. 电力系统中高次谐波的不良影响	240
6-12. 拍	240
第七章 非线性交流电路	243
7-1. 非线性交流电路的一般特性	243
7-2. 非线性电阻	243

7-3. 非线性电感	248
7-4. 铁心线圈和电容器联接的电路	253
7-5. 铁磁电压稳定器	256
7-6. 直流和交流共同作用下的铁心线圈	258
7-7. 铁磁功率放大器	260
7-8. 非线性电容	262
第八章 分布参数的电路	267
8-1. 长线的概念	267
8-2. 均匀长线方程式	267
8-3. 均匀长线在稳定状态下的解	269
8-4. 入端阻抗	274
8-5. 行波	276
8-6. 无反射的长线	281
8-7. 无损耗的长线	284
8-8. 驻波	285
8-9. 无畸变的长线	291
8-10. 长线与四端网络的等值替换	299
8-11. 梯形网络	295
第九章 电路中的过渡现象	299
9-1. 基本概念	299
9-2. 经典法	300
9-3. $r-L$ 电路的短接	302
9-4. $r-L$ 电路与直流电压接通	304
9-5. $r-L$ 电路与正弦电压接通	305
9-6. $r-C$ 电路的短接	308
9-7. $r-C$ 电路与直流电势接通	309
9-8. $r-C$ 电路与正弦电势接通	310
9-9. $r-L-C$ 电路短接放电	312
9-10. $r-L-C$ 电路与直流电压接通	318
9-11. $r-L-C$ 电路与正弦电压接通	320
9-12. 用经典法解复杂电路的过渡过程	322
9-13. 单位函数	324
9-14. 任意波形的电压作用下的过渡过程。丢阿蔑尔积分	325
9-15. 运算法	329
9-16. 拉氏变换的基本定理	331
9-17. 分解定理	333
9-18. 微分定理和基尔霍夫定律的运算形式	335

9-19. 有互感的电路的过渡过程	339
9-20. 均匀长线上的过渡过程	341
9-21. 反射的概念	346
9-22. 铁心线圈接通直流电压	347
9-23. 铁心线圈接通正弦电压	354
9-24. 有电容负载的整流器接通到正弦电压	355

第二部分 电磁场理论基础

第十章 电 场	357
10-1. 静电场	357
10-2. 真空中的库伦定律	358
10-3. 电场强度	359
10-4. 电场强度通量	361
10-5. 高斯定理	362
10-6. 电场的无旋性	367
10-7. 电压。电位	368
10-8. 已知电荷分布的电场	370
10-9. 电场几何	372
10-10. 电偶极子	375
10-11. 物质的电性质	377
10-12. 电介质的极化	379
10-13. 电介质中的高斯定理	382
10-14. 电介质分界面上电场的边界条件	385
10-15. 多层绝缘	387
10-16. 静电场的微分方程式	389
10-17. 静电场的基本问题	392
10-18. 静电场解答的唯一性	393
10-19. 在均匀电场中的导体圆柱	394
10-20. 镜像法	397
10-21. 双输电线的电场和电容	400
10-22. 导体系统的电荷与电位	403
10-23. 静电屏蔽	406
10-24. 三导线考虑大地影响时的电场	407
10-25. 三相输电线的电容	408
10-26. 复变数函数在平行平面电场中的应用	411
10-27. 电场的能量	414
10-28. 电场对带电体的作用力	416
第十一章 导电介质中的电场——电流场	419

11-1. 导体中的电场	419
11-2. 欧姆定律和楞次-焦耳定律的微分形式	420
11-3. 基尔霍夫定律的微分形式	421
11-4. 导电介质的边界条件	423
11-5. 电流场和静电场的比拟	424
11-6. 半球形的接地器	427
11-7. 单心电缆中的弱电流	428
第十二章 磁场	430
12-1. 电流的磁场	430
12-2. 磁感应线和磁通	433
12-3. 全电流定律	435
12-4. 物质的磁性质	438
12-5. 磁感应强度和磁场强度的关系	441
12-6. 磁性材料	444
12-7. 磁场强度的散度和旋度	447
12-8. 磁场中不同介质的边界条件	448
12-9. 磁场的像象法	449
12-10. 磁场的数量磁位	451
12-11. 磁屏蔽	453
12-12. 磁场的向量磁位	456
12-13. 电磁感应	459
12-14. 电感的计算	462
12-15. 输电线的电感	464
12-16. 两线圈间的互感	466
12-17. 磁场的能量	467
12-18. 磁滞损耗	470
12-19. 磁场对载有电流的导体的作用力	471
第十三章 交变电磁场	474
13-1. 交变电磁场的基本方程式	474
13-2. 瓦耳夫-波印亭定理	476
13-3. 电磁场能量发射的概念	480
13-4. 电磁场有向位和无向位的微分方程式	481
13-5. 达朗贝尔方程式的解法。滞后位	484
13-6. 赫芝偶极子	485
13-7. 均匀介质中的波动方程式	488
13-8. 均匀介质中的平面波	489
13-9. 电磁波在导体中的传播	492

13-10. 薄片铁心的涡流损耗	495
13-11. 电机槽内导体的集肤效应	499
13-12. 波导的概念	504
13-13. 共振腔的概念	505

結 論

在开始学习本课程之前,有必要簡略地了解一下人类在生产实践中对电的認識的經過。

电的現象发现很早。約在公元前 600 年希腊人就知道摩擦过的琥珀会吸引輕微的东西的現象。在我国古书中(如王充的論衡和郭璞的山海經图贊二书)也有同类的記載。可見我国人民早在汉朝以前就已发现了这一現象。但人們对电的現象的了解进展还是很緩慢的。直到公元 1600 年吉尔伯特 (William Gilbert) 才总结了一些有关电的經驗。当时人們已經知道带电体之間有相互吸引的現象,也有相互排斥的現象。偉大的俄国科学家罗蒙諾索夫 (М. В. Ломоносов) 对电的現象也作了不少的研究。他在 1753 年創立了大气中电的产生的理論。在那个时代,电的現象被理解为沒有重量的流体的作用結果。有单流体和两流体两种学說发表。罗蒙諾索夫不主張用电的流体学說,他首先想到了光和电的关系,认为电和光一样是由于以太的运动所引起。同一时代的俄国院士爱皮努斯 (Ф. У. Эпинус) 批判了电的流体学說,他正确地解释了靜电感应現象,并用实验証实了自己的見解。1785 年庫倫 (C. A. Coulomb) 发现了电荷間互相作用力的定量关系,奠定了靜电学的基础。

伏打电池的发现 (1800 年) 使电荷持續的运动成为可能。通过法拉台 (M. Faraday) 的实验 (1833 年) 和罗兰 (H. A. Rowland) 的实验 (1876 年) 使人們确信流过伏打电池的电流是和摩擦所得的电以及天电都是同一性質的,因而使靜电和流动的电荷统一起来。确实有电流通过的电路中电压与电流之間的关系的欧姆定律是在 1827 年发现的,而基尔霍夫定律是在 1845 年发现的。

磁的現象的發現也很早。我們的祖先最早發現天然磁鐵，并最早加以應用為指示方向的东西。早在兩千多年前就已有這方面的歷史記載。對磁現象較有系統研究的最早要算英國人吉爾伯特(W. Gilbert)。但在他的著作(1600年)中，他和其餘的人一樣，把電的現象和磁的現象看作是互不相關的。磁極間存在的互相作用力和電荷間的作用力相類似，容易使人對磁現象作出和電現象同樣的解釋，而認為有正磁質和負磁質存在於磁鐵的兩極。1785年與庫倫發表電荷的作用力的量的關係的同時，他發表了磁極間作用力的量的關係。當時他已注意到磁質和電荷之間本質上是有差別的。我們很容易把正負電荷分隔開來，但沒有方法可以把正負磁質分隔開來。

自從人們開始研究電和磁的現象以來，在很長時間內都是把電和磁當作互不相關的現象來看待的。首先由實驗得出兩者之間的聯繫的是丹麥物理學家奧斯特(H. O. Oersted)。他在1819年發現了電流對磁針的作用力。1820年法國物理學家安培(A. M. Ampère)也由實驗証實了通有電流的螺線管和磁鐵具有同樣的作用。因此安培推想磁鐵產生磁的現象的原因是由於磁鐵內有環繞的分子電流的緣故。這和近代的學說是契合的。在1831年法拉台發現當磁鐵對導線圈有相對運動時，也可能產生電流。

在法拉台發現電磁感應現象後，俄國科學院士楞次(Э. X. Ленц)於1833年發現了決定感應電流方向的規律，並在1839年用實驗証實了感應電流的性質和伏打電池的電流的性質相同。電的運動永遠伴隨着磁的現象，而磁的變化又必然伴隨着電的現象，這二個重要的發現終於把電和磁的密切聯繫的秘密揭示出來，使我們認識到電和磁是一個統一的整体。

自十七世紀末牛頓的萬有引力定律發表後，引起了超距作用的想法。對於帶電體間和磁鐵間力的作用，許多學者，如庫倫，也都解釋為力的超距作用，即力可超越距離自一帶電體作用到另一帶電體。法拉

台則認為帶電體間力的作用是由于周圍空間存在着一种叫做以太的彈性媒質所產生的應力的結果。英國物理學家麥克斯韋(J. C. Maxwell)根據前人實踐的結果,用數學的方法深入且廣泛地討論了法拉台的概念,反對超距作用。他在1873年發表了電磁場理論。通過實踐他並得出光是電磁現象的結論。後來赫茲(H. R. Hertz)在1887—1889年間電磁波試驗的成功,完全証實了電磁波的產生和傳播。在1895年,俄國物理學家波波夫(A. C. Попов)首先發明了無線電通信,使電磁波理論進一步在實踐中得到充實。

先進的俄國物理學家廣泛地傳播了法拉台和麥克斯韋對電磁場的物理過程的唯物觀點,並批判了超距作用的唯心觀點。在這一鬥爭中科學院士米特開維奇(В. Ф. Миткевич)有力地批判了超距作用觀點的唯心本質。按照超距的觀點,帶電體周圍空間中就沒有任何物理過程發生,這樣去研究周圍空間的電磁場也就沒有意義了。

麥克斯韋的電磁學說無疑地是一個光輝的成就。但是他的理論中却遇到一個困難,即所假設的媒質——以太,經實驗證明是不存在的。實際上電磁波在傳播時是攜帶着能量的。1900年,物理學家列別捷夫(П. Н. Лебедев)由實驗的方法証明了光壓的存在。這樣我們可以說電磁場本身既具有能量又具有動量,就是說它具有物質的形式,是獨立於我們外界的東西。我們如果承認了電磁場本身是一種物質,也就沒有必要去假設物質的攜帶者了。

自十九世紀以後,電廣泛地用於生產實際,電的工程技術得到了很大的發展。它對人類生產力的提高起了巨大的作用。

俄國是電氣照明的發源地。在1802年俄國物理學家彼得羅夫(В. В. Петров)發現了電弧。在1873年洛迪市(А. Н. Лодыгин)首先創設了白熾燈。1876年雅勃洛契可夫(П. Н. Яблочков)把電弧應用於照明。1885年別納爾篤斯(П. Н. Бенардос)和斯拉維揚諾夫(Н. Г. Славянов)利用電弧焊接金屬。

最先(1834年)制出能实际应用的电动机是俄国科学院院士雅可比(Б. С. Якоби)。1836年他又发明了电鑄技术。

1832年,俄国西林格(П. Л. Шиллинг)发明了电报通信。

俄国物理学家斯托列托夫(А. Г. Столетов)最先确定了铁的磁化系数和磁場强度的关系。指出铁的磁性能对电机电器制造的重要性。

在电力傳輸方面,皮罗茨基(Ф. А. Пирозкий)在1874年发明了沿鉄軌傳輸电力的方法。1880年,电气工程师拉契諾夫(Д. А. Лачинов)发表了长距离电力傳輸的論文。1881年台普莱(М. Deprez)也发表了类似的論文,并建造了傳輸电力的装置。

雅勃洛契可夫于1876年和烏薩金(И. Ф. Усагин)于1882年先后用变压器来傳輸交流电力。1891年多利沃-多勃罗沃尔斯基(М. О. Доливо-Добровольский)发明了三相变压器輸送电力,并且还发明了三相电动机。

进入二十世紀以来,电的利用和电气技术的发展更是一日千里。各种創造发明不胜枚举。現在人們已能制造出各式各样的电机和电器,已能掌握巨大的电能使之服务于生产。龐大的火力发电厂、水力发电站、原子能发电站以及高电压的长距离的輸电綫构成的电力网,能够很可靠而且很方便地为人类服务。在通訊方面,不論是有綫电或是无线电,都达到了高度的技术水平。人們現在可以很方便地作远距离通訊,收听无线电台广播,电视广播,也可以开全国电话會議。而无线电技术以及电子学技术、半导体技术的发展,使現代工业达到了高度的自动化:一切巨大复杂的机器,如起重机、自动車床、自动碾压机,都能有机地配合,自动动作;使飞机輪船的导航、火箭的控制等也都有了新的技术;使人們有可能制成电子計算机,計算迅速而准确;还使許多非电的量,如温度、時間、液体、气体成分的浓度、多种过程等,都有可能加以测量、檢查和控制。此外,电还广泛地用在医学上、化学上、生物学生以及日常生活上。由此可見,电对人类社会的发展和繁荣起着多么巨

大的作用！

电能的应用之所以重要和所以获得蓬勃的发展是因为电能具有非常宝贵的特性：第一，它可以简便地从其他形态的能量，如机械能、化学能等转变得到，又可以简便地转变为所需的其他形态的能量；第二，它便于控制；第三，它能够以很小的损失输送到很远的距离。

这些特性是电的应用获得充分发展的关键。而最后一个特性更具有非常重大的经济意义。当这特性最初被发现时，即为马克思和恩格斯所重视。恩格斯在 1883 年给伯恩斯坦 (Ed. Bernstein) 的信中说：“……这一个发现彻底地解除了地方条件加在工业上的限制，使利用最遥远地方的水力成为可能，而如果它在开始时仅有利于城市，以后它必然会变成消灭城乡间对立的最有力关键。十分明显，由于这一发现，生产力将无限地增长。……”

革命导师列宁也很重视电能的应用。他曾说过：“共产主义——这就是苏维埃政权加上全国电气化”。

正如大多数科学技术的发现和发明一样，电工技术的各种发现和发明，在现代两种社会制度下的两个世界里，走着两种截然相反的道路。在资本主义社会里，电能生产的高度集中伴随着工业生产的大规模高度集中而发生，因而为垄断资本家的掠夺大开方便之门。垄断资本家的本质是唯利是图的，每当自然资源的开发和技术的进步与他们的利益发生矛盾时，就要受到各种阻碍。电力资源的开发和利用也不例外。电气化、自动化和远距离操纵的技术主要是被应用在军事目的上。电气化和自动化的技术即使在工业技术上有所应用，也只能加深垄断资本对劳动力的剥削程度，其结果是大批工人（包括熟练工人）被解雇，失业队伍迅速扩大。总之，在资本主义的世界里，科学和技术只是为资本家的利益服务，并不给劳动人民带来幸福。

在社会主义国家里，情况就完全两样。苏联的电气技术和其他所有的科学技术一样达到史无前例的昌盛。而一切科学技术的成就，都

是为了劳动人民美好的生活，为了共产主义社会的建設。偉大的十月社会主义革命的胜利給苏联的国民經济創造了普遍实行电气化的条件。早在1920年，苏維埃政权就根据列宁的指示，成立了一个俄罗斯电气化全国委员会。这个委员会拟定的计划在列宁在世时就已经开始实行。自从1928年以后，电气化按照斯大林五年计划执行。苏联人民在布尔什維克党的领导下，发挥了无比的劳动热情和創造能力，他們在全俄电气化计划公布后的第十五周年（1935年）就完成原訂计划两倍半多，当时全苏电力已达450万千瓦。卫国战争以后的第四个五年计划的胜利完成，使苏联的电力工业跃居欧洲第一位，为全俄电气化计划的十三倍。第五个五年计划期间，开始建設了世界空前的巨大的古比雪夫水电站（容量210万千瓦已发电）和斯大林格勒水电站（已于1958年底开始发电，发电能力达256万3千千瓦）。值得一提的是苏联在1954年首先建立世界上第一个原子能发电站。在第六个五年计划期间，电力建設規模更为巨大，其中最大的是西伯利亚的安加拉河的布拉次克水电站，发电能力达450万千瓦。此外还有几个大型水电站有的正在建設中，有的正在設計中（在建設中的如容量为420万千瓦的叶尼塞河的克拉斯諾維爾斯克水电站，在設計中的如北极圈附近的下鄂毕河水电站，发电能力更超过前者）。在苏联，电力工业的飞跃发展促进了电气工程各部門的发展，并以电气化为基础来实现工业生产过程的自动化和远距离操纵。苏联的人造地球卫星、宇宙火箭和宇宙飞船的发射成功也是和电工技术的发展分不开的。在苏联的农村中除了巨大电力系统供电外，还有数以万計的中小型农庄水电站，使电能得以充沛地用于农业生产和滿足文化生活的需要。目前无论是工业或是农业生产的电气化水平，苏联都是居世界第一位。苏共第21次代表大会通过的宏伟的七年计划規定，七年内苏联的发电能力将增加六千万千瓦，计划完成时年发电量将达五千到五千二百亿度。到那时候将把工业最发达的资本主义国家远远抛在后面。