

— 高等学校教材 —

电工理論基础

第一册

林海明編

人民教育出版社

73.1
335.1
=1

高等学校教材



电工理论基础

第一册

林海明 编

21498/35

人民教育出版社

本书是我社1961年出版的上海交通大学电工原理教研組編“电工理論基础”第一冊的修訂版。原版是以該教研組林海明同志的讲稿为基础的。修訂版的修訂工作由林海明同志負責。与原版相比較，修訂版增加了不少新的內容，每章都增加了习题，对問題的讲解也有所加深。在学生容易发生疑問的一些地方，书中給予詳尽的解釋和提示。此外，原版中一些技术性錯誤，已作了訂正。

本书原版以教科书名义出版，今后繼續供应。修訂版改以参考书名义出版。修訂版除了供高等学校电机系、自动控制系及无綫电系师生作为参考书以外，对电气工程技术人員也有参考价值。

本书由清华大学钟士模、肖达川两同志初审，并經高等工业学校电工課程教材編审委员会电工学及电工基础課程教材編审小組复审通过。

电 工 理 論 基 础

第 一 冊

林 海 明 編

北京市书刊出版业营业許可証出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

中华书局上海印刷厂印装

新华书店上海发行所发行

各地新华书店經售

統一书号 K15010·1045 开本 850×1168 1/32 印张 14 10/16

字数 362,000 印数 23,401—27,900 定价(7) ¥1.60

1961年8月第1版 1964年8月第2版

1964年8月上海第6次印刷

序

本书是根据編者在上海交通大学讲授“电工基础”这门课程时所用的讲义改写的。全书分为三个部分：第一部分是电磁现象的基本规律；第二部分是电路理论；第三部分是电磁场理论。头一部分是后两部分的共同基础。为了便利讀者起見，我們把每一部分独立成册出版。

本书的体系是按照下面几个意图安排的。

1. 根据本课程教学大纲的内容与精神，按照普通电动力学的体系，并结合电工学的实际应用，編者把本书当作一部“应用电动力学”教材来编写，正如有些編者按照力学的体系为工科学生编写应用力学或工程力学教材一样。

2. 电磁理论的叙述主要放在本书的第一部分与第三部分。第一部分着重于物理概念的叙述——从电场强度与磁感应的定义出发，通过一系列的实验定律，最后推展到电磁场的基本方程组（麦克斯韦方程组）与洛伦兹的电磁力公式（电磁现象的基本规律）。第三部分是根据这些规律，进一步阐明电磁场理论及其分析方法；电路参数的计算也包含在内。这一部分着重于分析方法的探讨。

3. 路是在场的基础上引出的。在第一部分，在讲了稳定电流场并引入电路概念以后，紧接着就用两章的篇幅来详细叙述线性直流电路与非线性直流电路的理论及其计算方法。在线性直流电路中，利用直流电路与电容电路的类似性来阐明电路理论的推广应用，从而也就解决了电容电路的计算方法问题。在讲了稳定磁场并引入磁路概念以后，紧接着就用一章的篇幅来叙述磁路理论及其计算方法。同时，非线性直流电路的计算方法在磁路一章内

得到了利用与发展。在讲了似稳电磁场并引入变动电流电路概念以后,紧接着就以本书第二部分的全部篇幅来系统地、完整地叙述电路理论。这一部分也着重于分析方法的探讨,并且叙述是以第一部分中场的理论与路的知识为基础进行的。由于电路理论在电工技术中有很广泛的应用,所以本书用来阐明电路理论的总篇幅占了全书篇幅百分之六十左右。

4. 全书约有五分之四的篇幅用来讲线性系统,其余篇幅则用来讲非线性系统。在讲线性系统问题时,特别强调“变换”这一概念。

5. 电工基础是一门基础技术课程,它是在学生已经掌握了一定程度的物理知识与数学工具以后讲授的。基于这种情况,就应该充分利用学生的已有知识,经常引导学生善于运用物理概念来分析问题,并善于应用数学工具来处理问题。并且,通过本课程的学习,要使学生已有的基础知识得到巩固与发展。

6. 本书在结构形式上,分成章与节,每节又分成段。主要内容用大字排印,次要内容与例题都用小字排印。公式与重要的表达式的编号都使用方括弧标出,以志区别。在初读时可以略去的内容都标有星号。

7. 为了帮助读者通过具体问题来理解抽象理论,掌握分析方法并逐渐地过渡到能独立应用理论来解算习题,在书中适当的地方举出了作为示范的例题。

8. 每章后面都附有习题,以供读者自己练习。比较难的题目本书都以辅导方式,给出足够的提示,并用小号字把提示排印在习题下面。对这些题目读者最好自己先行独立思考,有必要时再去看有关提示。每个习题都有一定的明确要求,而且许多习题是有实际意义的。通过这些习题的练习,有助于加深对某些基本概念的理解,并丰富有关电工技术的实际知识。还应该认识到:这些

20170

习题是本书不可分割的組成部分；解习题是培养思考能力与計算能力的一个极其重要的环节，同时也是为了了解讀者对于书中内容是否已經真正掌握。

在介紹了本书的系統以后，还要談一談本书的叙述方式，这种方式是按照下面一些意图进行的。

1. 叙述的一般方式是由簡單到复杂，具体到抽象。

2. 無論是場的或是路的問題都集中于它的性能与能量(或功率)两个方面来討論。并且先对媒质中一点来討論，然后扩大到媒质的一大块面积上来討論。

3. 对于場的問題，先是研究靜的，其次研究穩定的，接着研究緩慢变化的(似穩的)，最后研究迅速变化的。

4. 对于路的問題先是研究穩定的(直流)，其次研究交变的，最后研究一般的情况；先是研究集中参数的电路，其次研究分布参数的电路；先是研究穩态，其次研究过渡过程。

5. 全书的叙述力求有較好的联系。每个問題的讲述，基本上是先从物理現象入手，然后指出解决的方向，并介紹解决的适当方法。

6. 在叙述过程中，讀者对于某些内容可能发生一些問題或产生某种錯觉，我們在教學實踐中常常会遇到这种情况，因此在本书适当的部分对可能发生疑難的問題都作了解釋或启示，以便帮助讀者順利地掌握内容。

近三十年来，电磁理論在場的方面或在路的方面都有显著的发展，在电工技术上也有突飞猛进的成就。因此，在本书的选材上，注意了結合某些基本問題的討論，适当地反映出我們所研究的对象近年来的发展情况。

尽管有以上多方面的考虑，但由于編写的時間比較匆促，意見的搜集还不够周到，不独书中内容与編者意图之間尚有某些距离，

而且其中一定还有許多不妥、不成熟甚至錯誤之处，希望使用本书的各校师生与社会讀者不拘指正，以便将来再版时訂正。

本书編写时，曾經参考了許多电工基础、电动力学及其他有关著作。在本书每一部分的末尾都列有这些参考文献的目录。此外，在本书編写过程中，承上海交通大学电工基础教研組同志多方协助，在各次教学活动中还对教材的有关問題提出許多具体建議；初稿写成以后，又承清华大学钟士模教授与蕭达川副教授审閱并提出宝贵意見，重庆大学江澤佳副教授与前哈尔滨工业大学俞大光副教授也对初稿提出了許多建議与指正，編者在此一并致以衷心的感谢。

林海明 1963 年 10 月于上海交大

目 录

緒論	1
0-1 电工技术对现代生产的意义	1
0-2 电磁理论的发展及其与电工技术之间的关系	2
0-3 本课程的任务与内容	9

第一部分 电磁现象的基本规律

第一章 静电场	11
1-1 静电场与电场强度·库仑定律	11
1-2 电压与电位	24
1-3 高斯定理	36
1-4 电偶极子的电场及其受外电场的作用	47
1-5 电介质的极化	51
1-6 电位移与高斯定理的一般形式	58
1-7 静电场的基本特性·两种媒质分界面上的边界条件	64
1-8 电容	68
1-9 部分电容	76
1-10 静电场中的能量	82
*1-11 静电场中的倒易原理	88
1-12 静电场中的力	90
习题	102

第二章 稳定电流与稳定电场	112
2-1 电流与电流密度	112
2-2 稳定电流的获得·稳定电场与外来电场·电动势	115
2-3 欧姆定律·电压与电阻·稳定电流电路的概念	118
2-4 基尔霍夫定则	126
2-5 稳定电场的基本特性·两种媒质分界面上的边界条件	129
2-6 功率与焦耳-楞次定律	132
2-7 导电物质中的电场与静电场的比拟	136
2-8 接地电阻	138
习题	143

第三章 綫性直流电路	149
3-1 简单电路	149
3-2 两綫輸电綫的傳輸特性	152
3-3 网络几何	156
3-4 支路电流法	159
3-5 迴路电流法	161
3-6 节偶电压法	166
3-7 叠加原理	173
3-8 倒易原理	176
*3-9 替代原理与补偿定理	181
3-10 二端网络·戴維南定理	186
3-11 星形連接与三角形連接的互換及其推广	194
3-12 四端网络(二口网络)	203
*3-13 电阻网络中的功率	213
3-14 对偶原理·比拟法	217
习题	225
第四章 非綫性直流电路	234
4-1 非綫性电阻元件	234
4-2 非綫性电阻的联接	249
4-3 計算非綫性电阻电路的图解法	251
4-4 計算非綫性电阻电路的分析法	258
习题	270
第五章 稳定磁場	275
5-1 稳定磁場与磁感应·毕奥-薩伐尔定律	275
5-2 磁通量与磁通量連續性原理	284
5-3 磁感应矢量的环量	287
5-4 磁偶极子的磁場及其受外磁場的作用	298
5-5 物质的磁化	300
5-6 磁場强度与全电流定律	303
5-7 稳定磁場的基本特性·两种媒质分界面上的边界条件	309
5-8 磁通势、磁位降与磁阻·磁路的概念	313
习题	318
第六章 铁磁质与铁淦氧磁质的磁性能·磁路	322
6-1 铁磁质与铁淦氧磁质的磁性能	322
6-2 磁路与磁路定律	334
6-3 无分支的磁路	338

6-4 有分支的磁路.....	342
6-5 具有永久磁铁的简单磁路.....	347
习题.....	356
第七章 电现象与磁现象的联系及其统一.....	361
7-1 电磁感应.....	361
7-2 自感与互感.....	373
7-3 磁场中的能量·磁场中的倒易原理.....	379
7-4 铁芯损失.....	389
7-5 磁场中的力.....	393
7-6 位移电流与徙动电流.....	404
7-7 电现象与磁现象的统一.....	412
7-8 似稳的电磁现象.....	426
7-9 变动电流电路的概念.....	431
习题.....	440
参考文献.....	454

緒 論

- 0-1 电工技术对现代生产的意义
- 0-2 电磁理论的发展及其与电

- 工技术之间的关系
- 0-3 本课程的任务与内容

0-1 电工技术对现代生产的意义

1] 远在电的应用的萌芽时期，偉大的科学社会主义的創始人馬克思与恩格斯早已預見到电的革命意义及电气事业的广闊远景。

馬克思指出：“在十九世紀，曾經翻轉世界的蒸汽統治时代已宣告結束，代替它的是无比的最革命的力量——电气火花。”

在德普萊的高压輸电表演（1882 年）的第二年，恩格斯在他的一封信里談道：“这个发明彻底地把工业几乎由所有的地域条件的限制中解放了出来，同时也使利用最遙远的水力成为可能。”

列宁也曾明确地指出电气化的宏偉作用：“共产主义——这就是苏維埃政权加上全国电气化……”（列宁全集，第 31 卷，468 頁，人民出版社 1958 年版）

列宁还指出国家的电气化是社会主义胜利的最重要的保证，他說：“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。”（列宁全集，第 31 卷，469 頁，人民出版社，1958 年版）

现在，我們正在党的社会主义建設总路綫的指引下，为把我們的国家建設成为拥有現代农业、現代工业、現代国防和現代科学技术的强大的社会主义国家而奋斗。为了完成这一光荣而艰巨的任务，电气事业有着非常重要的意义。

2] 国民經济电气化在社会主义建設上的巨大作用，可以从以下几个方面来加以認識。第一，电能量是現代化的工业、农业及交

通運輸业的最主要的动力来源之一。几乎所有的現代工业生产部門，其中包括鋼铁工业、机械制造工业、化学工业、紡織工业等等，它們的生产設備，都需要用电力来拖动。在現代化的农业生产过程中，从耕种到收割，特别是灌溉，都使用机器，而电力又是这些机器的主要动力。現代的交通運輸工具，也正向着电气化的方向发展。第二，电是近代新兴科学技术的重要物质基础。像原子能、半导体、电子計算技术等新兴科学部門，都与电有着直接的不可分割的联系。同时，由于电的特殊性能，它已成为控制、調整、測量、通訊等技术所不可缺少的条件。第三，电的应用直接改变了許多技术操作过程，提高了劳动生产率，減輕了劳动强度，因而使各项生产在高度的技术基础上，能够不断增长，不断完善。第四，电是人民物质生活与文化生活的水平日益提高的手段。电灯、电热、电话、电影、无綫电广播、电视等等都是电在日常生活上广泛应用的例子。总而言之，社会的电气化水平乃是社会的生产水平与生活水平的重要标志；电气化乃是高度机械化与自动化的基础。

3] 电气事业在社会主义建設中占有如此重要的地位，是与电的优越性分不开的。电的优越性大致上可以归納成以下几点：1) 电能量可以实现远距离傳輸；而其他形式的能量很难做到这一点；2) 电能量与其他形式的能量相互轉換比較簡便；3) 利用天然的动力資源——水力，可以使电能量的生产成本大大减低，而且电能量在傳輸与利用过程中損耗小，因而比較經濟；4) 电能量在利用时便于控制，易于操纵；5) 自然現象中以电效应的反应最快，而且准确灵敏；6) 电还能以电磁波的形式在空間傳播。

0-2 电磁理論的发展及其与电工技术之間的关系

1] 电在生产上与生活上得到如此广泛的应用，固然是由于它

的多方面的优越性造成，但是这些优越性之所以被人们認識并加以利用，則是与人們长期以来对电磁理論的不断研究和对电工技术經驗的不断积累分不开的。

在古代，人們很早就知道琥珀与磁石这两种矿物的特性。前者在被摩擦以后能够吸引輕微的物体，而后者能够吸引铁。我們的祖先对于这两种現象認識特早。根据可靠資料的考证，公认中国人是世界上磁的最早发现者，并且最早知道制造罗盘来測定方位，也最早把罗盘应用在航海术中。

可是，人們对电磁現象进行系統研究，实际上可以說是从十七世紀初叶开始的。最初，把电現象与磁現象看做是沒有联系的两个单独的自然現象，因而它們的研究形成了物理学的两个独立部門——电学与磁学。直到1820年奥斯特(Oersted)才发现电流对磁針有力的作用及磁铁对載有电流的迴路也有力的作用。接着，在1820年到1823年，安培(Ampere)作了电流之間存在力的作用的表演，并证实了載流迴路与磁壳在磁效应上的等效性。尽管电流与磁之間存在着这样的等效性，而安培认为电流是基本的，磁現象实际上是电現象的表现。依此，他推断了磁铁的磁性是由于它的內部存在着一些永恒流动的“元电流”，也就是分子电流(又称安培电流)。同时，奥斯的发现引起了法拉第(Faraday)对电磁現象研究的兴趣。1831年，法拉第发现了电磁感应現象。奥斯特、安培与法拉第的先后发现，揭示出电現象与磁現象之間存在着紧密的相互联系；因此，安培用电动力学这一名称来称呼研究电与磁的科学。自此以后，电磁理論經過許多物理学家与数学家的不断研究，直到1873年，麦克斯韦(Maxwell)在总结前人的經驗后創立了統一的宏观电磁理論，并且揭示了光波就是电磁波这一科学真理。

茲将电磁理論发展史上重要事实摘述于下：

1600年,吉柏(Gilbert)发表了他的关于电与磁的著作:“論磁铁”(De Magnete)。他分別研究了电現象与磁現象的規律,而且对比研究了电力与磁力的不同之处;确认了地球本身是一个大磁铁;发现了每个磁铁有它的指南极(S极)与指北极(N极)及同极相排斥、异极相吸引的規律。

1729年,格雷(Gray)指出:物体按照电性能可以分为两类,就是导体与絕緣体。

1733年,丢飞(Du Fay)指出:电荷有两种,也只能有两种,这就是后来人們所称的正电荷与負电荷。他还发表了静电学上一个重要定律:同性电荷相排斥,异性电荷相吸引。

1747年,弗兰克林(Franklin)推断,任何絕緣的系統中电的总量是不变的。这就是通称的电荷守恒定律。

1750年,密歇尔(Michell)发表“論人造磁铁”(A Treatise of Artificial Magnets)的著作,指出磁极間的作用力是服从反平方律的。

1766年,普利斯萊(Priestley)推断电荷間的作用力是服从反平方律的。翌年,他发表了自己的著作:“电的过去与現在”(The History and Present State of Electricity, with Original Experiments)。

1785年,庫倫(Coulomb)用实验方法对电荷与磁极的作用力作了研究,确定作用力的大小是服从反平方律的。并明确指出:正負电荷可以单独存在;而南、北两磁极则永远不能分开来得到的。

1793年,伏打(Volta)指出,不同导体的接触,特别是不同金屬导体的接触,都可能产生电荷。他于1799年創造出第一个电池,直流电源于是誕生。

1812年,泊松(Poisson)研究了电位問題。1813年他把拉普拉斯方程发展成为泊松方程。1824年,他又对磁位問題进行了研究。

1813年,出現了高斯定理。

1820年,奥斯特发现了电流对磁針有力的作用;磁铁对載流迴路也有力的作用。

在奥斯特发表上述发现(1820年9月11日)之后一个星期(同年9月18日),安培发表了載导体之間有力的作用的論文,指出两平行导体載有同方向的电流时相互吸引;載有不同方向的电流时相互排斥。

同年10月30日,毕奥(Biot)与薩伐尔(Savart)确定了載流直导線周圍的磁場。

1822年,发现了西秘克效应;1834年,发现了派第耳效应;1845年,发

現了湯姆生效应。这些效应揭示电与热之間的相互联系。

1826 年,发表了欧姆定律,于是在电学方面进入了研究电路的新时期。

1828 年,格林(Green)发表了位函数在电磁理論上的应用的論文。

1831 年,法拉第創立了电磁感应定律,并区别了动生电动势与感应电动势。

1834 年,出現了楞次定律(就是电磁慣性原理)。

1841 年,出現了焦耳定律。由于楞次(Ленц)也独立发现电流产生热量这一規律,所以这定律也称作焦耳-楞次定律。

1845 年,出現了基尔霍夫定則(第一定則与第二定則)。

1847 年,亥姆霍茲(Helmholtz)发表了能量守恒定律。

1857 年,基尔霍夫(Kirchhoff)研究了架空导綫上电扰动的傳播,并确定了傳播速度等于光速。

1861 年,麦克斯韦把电位移通量对時間的改变率称作位移电流,并假設位移电流具有磁效应;他还用“全电流”一詞来称通常电流(传导电流与徙动电流)与位移电流的总和。

1864 年,麦克斯韦发表了一篇名为“电磁場的動力理論”的論文;断定了光波就是电磁波。

1873 年,麦克斯韦的經典著作“論电与磁”(A Treatise on Eleefricity and Magnetism)問世。

1884 年,波印亭(Poynting)研究了电磁場中的能量,并利用一个矢量来計算場中能量的流动。这矢量就是通称的波印亭矢量。

1887 年,赫茲(Hertz)用实验证明了电磁波的存在。

1899 年,列貝捷夫(П. Н. Лебедев)用实验证明了光压的存在。这一实验不仅证明了电磁場的物質性,而且也有有力地捍卫了唯物主义的世界观。

2] 在簡短介紹电磁理論的发展以后,讓我們提出下面几点来談一談:

- 1) 現象的發現,
- 2) 現象的数学表达,
- 3) 現象的物理解釋,
- 4) 現象的分析研究。

一般說來，一種新的現象是在有關該種現象的科學的已有基礎上，經過縝密考慮，並獲得相當線索，從而提出了探求步驟及實驗方案以後，經過一次又一次的觀察而發現的。科學家們之所以善於格物致知，見微知著，固然是由於他們具有優異的思考能力，但也是與他們在工作上的積極性及刻苦鑽研的毅力分不開的。還有這樣一種情況，就是某一個實驗原來是為了探求某一現象進行的，結果卻得到出乎意外的另一現象。例如，法拉第於1831年在進行某一次實驗時，本來是企圖探索穩定電流對鄰近導體迴路的影响，是否也像靜電情況下帶電體對鄰近導體發生靜電感應一樣發生電流感應，然而法拉第所看到的實在情況與他原來預想的不一樣。他發現鄰近導體中確有感應電流產生，這種感應電流存在的時間短暫，而且只在原電流開始或停止流動的那段短暫的時間才能被觀察到。這種奇異的現象促使法拉第去追根究底，結果終於發現了電磁感應定律，因而樹立起電磁理論中兩個柱石之一——變動的磁場產生電場；而麥克斯韋則以他的位移電流的假設樹立起電磁理論的另一個柱石——變動的電場產生磁場。當然，也有一些現象不是有意識探索的結果，而是偶然觀察到的。例如，奧斯特就是於1820年有雷雨的某一天，偶然觀察到磁針發生搖動的現象。由於這一現象的启发，奧斯特繼續探索下去，最後發現了電流的周圍總伴隨著磁場的存在這一客觀規律，從而揭開了電現象與磁現象的聯繫的秘密。麥克斯韋後來樹立的電磁理論柱石的基礎，就是由奧斯特的發現奠定的。

對一個物理現象，單單地就質的方面採用敘述性的描寫，而不同時從量的方面作出數學的表達，是大大不夠的。可以設想，只知道同性電荷相排斥、異性電荷相吸引，而沒有庫倫定律的表達式來確定排斥力或吸引力的大小及方向，想要進一步研究電場，顯然是不可能的。奧斯特發現了電流的周圍有磁場存在，但沒有作出量的

表达,因而他的发现在电与磁的联系这一问题上,只能算是迈开了半步。毕奥、萨伐尔与安培先后在量的方面确定出电流的磁场及载流迴路间的作用力的表达式,于是继续迈开了这问题所剩下来的半步。值得指出,这些现象的数学表达是实验的总结,并不随理论的发展而有所改变。譬如说,1875年发表的库仑定律,到了麦克斯韦建立电磁理论的时候,甚至到了今天,仍然是有效的。

至于电磁理论发展史上对现象进行的物理解释,情况就大大不同了,其中的经过往往是迂迴曲折的。例如对库仑定律所表示的作用力以及对安培电流间的作用力,在相当长的时期内曾应用超距作用来解释,也就是电荷之间以及电流之间的作用力,当时都假定是不借接触而隔着距离相互作用的。这是一种违反客观实际的片面想法,其结果是引导人们把注意力集中在电荷与电流之上,而忽视了周围空间的内在情况。归根结蒂,这种错误的假设完全是受了牛顿万有引力定律及其解释的影响。后来,法拉第独持不同的看法。他认为电荷之间,磁极之间,以及电流之间的相互作用力是通过它们中间的实物媒质传递的,并使用力线、力管的概念来解释电与磁的现象。麦克斯韦完全同意法拉第的观点,特别是他的力线、力管的概念;同时他还从开尔文(Kelvin)1847年发表的“电现象与弹性现象相类似的研究”一文中得到启发。因此,他假定空间到处充满着连续的、没有质量而有弹性的以太。基于这种力学范畴的假设,他列出包含所有电磁现象在内的“一组方程”,这就是通称的麦克斯韦方程组。法拉第与麦克斯韦对电磁现象所作的物理解释,已经引出了场的概念,比之用超距作用来解释,可以说是大大前进了一步。但是麦克斯韦的分析是基于宇宙空间存在着以太这一设想上的,然而客观世界根本不存在以太这种东西,所以麦克斯韦的理论的推证,是没有物理基础的,因而是违背辩证唯物观点的;这种解释是为电磁现象塑造机械模型,这显然是受了物体间力的