

高等学校教材

电 工 学

(1981 年修订本)

上 册

秦曾煌 主编

人民教育出版社

高等学校教材

电 工 学

(1981 年修订本)

上 册

秦曾煌 主编

人民教育出版社

本书(1981年修订本)是参考1980年修订的高等工业学校《电工学教学大纲(草案)》(150学时)修订的。全书分三册出版。上册是电路与磁路部分;中册是电子技术部分;下册是电机与控制部分。每章均附有习题。

本书上册是由秦曾煌同志编写和修订的。

本书(1981年修订本)上册由大连工学院蒋德川、赵宗武、唐介同志审阅,并经高等学校工科电工学教材编审小组复审通过,可作为高等工业学校电工学课程(150学时)的教材,也可供工程技术人员参考。

本书责任编辑 王缉惠

高等学校教材

电 工 学

(1981年修订本)

上 册

秦曾煌 主编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 字数 240,000

1978年11月第1版 1982年10月第2版 1983年3月第7次印刷

印数 472,501—568,500

书号 15012·082 定价 1.05 元

序 言

本书第一版是在1978年出版的。1980年6月在成都召开了高等学校工科电工教材编审委员会扩大会议，会上修订了150学时《电工学教学大纲》(草案)。本书(1981年修订本)是参考这份大纲修订的，并经电工学教材编审小组审阅后，修改定稿。可作为高等工业学校电工学课程的教材。

电工学是一门非电专业的技术基础课程。在本课程中，主要讨论用电技术的基本理论和基本方法，以及专业常用的电子器件、机电器件及其基本电路，并使学生受到必要的实验技能的训练，为学习专业知识以及从事工程技术工作和科学研究工作打好基础。为此，在本书中对基本概念、基本理论和基本分析方法都作了尽可能详尽的阐述，并通过实例、例题和习题来说明理论的实际应用，使学生对所学理论能更好地理解 and 掌握，以及了解电工技术的发展与生产发展之间的密切关系。

为了反映科学技术的发展水平和满足非电专业的用电需要，本书在内容安排上，着重在电路与电子技术两部分。至于电机部分的内容则作了较大精简。但考虑到当前国内生产上的实际情况，对三相异步电动机及其继电接触器控制的基本电路保持一定份量，以满足非电专业的需要。最后对反馈控制系统作了简单的介绍。

本书注意到与物理课的分工，避免了不必要的重复。部分内容，例如电路的基本物理量、欧姆定律、电路的参数、磁场的基本物理量及磁性材料的磁性能等，虽然都已在物理课程中讲过，但是为了加强理论的系统性和满足电工技术的需要，仍列入本书中，使学

生对这些内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内容。

书中带有*号的是加深加宽的内容,不计在学时之内,有些学校和学生如有余力,可讲授或阅读这部分内容。书中还有一部分是供不同专业选用的非共同性基本内容,例如同步电机、直流电机和控制电机等。

总之,对本书内容的取舍,讲授的先后次序以及习题的选择,完全由教师决定。一般应视专业的需要、学时的多少、后续课的内容和学生的实际水平而定。有些内容可通过实验、习题或课外自学让学生掌握,不必全在课堂讲授。例题和“练习与思考”题是给学生课后复习巩固用的,一般不必讲授。

本课程总学时定为150学时,其中实验约40学时。各部分学时(包括实验)的分配,大致如下,以供参考:

电路与磁路部分 约50学时

电子技术部分 约70学时

电机与控制部分 约30学时

本书(1981年修订本)承大连工学院蒋德川、周武禄、赵宗武、唐介同志仔细审阅,指出错误,提出修改建议;本书还得到许多教师和读者的关怀,他们提出了宝贵的意见;并承哈尔滨工业大学绘图室描绘插图,在此对他们表示衷心的感谢。

参加本书中册第一版编写的有吴项、魏富珍、柳焯、郭文安和问延棣同志。

由于编者能力有限,见解不多,本书有些内容难免不够妥善,甚至会有错误之处。希望读者,特别是使用本书的教师和同学积极提出批评和改进意见,以便今后修订提高。

秦曾煌

于哈尔滨工业大学

目 录

序言	1
绪论	1

第一部分 电路与磁路

第一章 电路的基本概念与基本定律	9
1-1. 电路的作用与组成部分	9
1-2. 电路的基本物理量	11
一、电流	11
二、电压与电动势	12
1-3. 欧姆定律	15
1-4. 电路的有载工作状态、开路与短路	18
一、有载工作状态	19
二、开路	21
三、短路	22
1-5. 克希荷夫定律	25
一、克希荷夫电流定律	26
二、克希荷夫电压定律	27
1-6. 电阻的串联与并联	31
一、电阻的串联	31
二、电阻的并联	32
1-7. 电路中电位的计算	37
习题	41
第二章 电路的分析方法	48
2-1. 支路电流法	48
2-2. 节点电压法	51
2-3. 叠加原理	54
2-4. 电压源与电流源及其等效变换	57

一、电压源	57
二、电流源	59
三、电压源与电流源的等效变换	61
2-5. 等效电源定理	68
一、戴维南定理	68
二、诺顿定理	73
*2-6. 电阻星形联接与三角形联接的等效变换	75
2-7. 非线性电阻电路	78
习题	82
第三章 正弦交流电路	87
3-1. 正弦电压与电流	87
一、频率与周期	88
二、幅值与有效值	89
三、初相位	91
3-2. 正弦量的相量表示法	94
3-3. 电路的参数	102
一、电阻元件	103
二、电感元件	104
三、电容元件	107
3-4. 电阻元件的交流电路	111
3-5. 电感元件的交流电路	114
3-6. 电容元件的交流电路	119
3-7. 电阻、电感与电容元件串联的交流电路	123
3-8. 阻抗的串联与并联	133
一、阻抗的串联	133
二、阻抗的并联	135
*3-9. 复杂交流电路的分析与计算	141
*3-10. 交流电路的频率特性	146
3-11. 电路中的谐振	149
一、串联谐振	149
二、并联谐振	154
3-12. 功率因数的提高	158
习题	162

第四章 三相电路	170
4-1. 三相电压	170
4-2. 负载星形联接的三相电路	174
4-3. 负载三角形联接的三相电路	183
4-4. 三相功率	185
*4-5. 三相功率的测量	186
习题	190
第五章 非正弦周期电流的电路	192
5-1. 非正弦周期量的分解	193
5-2. 非正弦周期量的有效值	198
*5-3. 非正弦周期电流的线性电路的计算	201
习题	205
第六章 电路的暂态分析	209
6-1. 换路定则与电压和电流初始值的确定	210
6-2. RC 电路的放电过程	214
6-3. RC 电路的充电过程	219
一、零状态	220
二、非零状态	225
6-4. 一阶电路暂态分析的三要素法	229
6-5. 微分电路与积分电路	231
一、微分电路	232
二、积分电路	234
6-6. RL 电路中的暂态过程	235
一、与恒定电压接通	235
二、短路与断开	240
*6-7. RLC 电路的放电过程	245
习题	249
第七章 磁路与铁心线圈电路	254
7-1. 磁场的基本物理量	254
一、磁感应强度	254
二、磁通	255
三、磁场强度	255

四、磁导率.....	257
7-2. 磁性材料的磁性能.....	259
一、高导磁性.....	259
二、磁饱和性.....	260
三、磁滞性.....	261
7-3. 磁路及其基本定律.....	263
7-4. 交流铁心线圈电路.....	268
7-5. 变压器.....	274
一、变压器的工作原理.....	275
二、变压器的外特性.....	283
三、特殊变压器.....	284
四、变压器绕组的极性的测定.....	287
7-6. 电磁铁.....	289
习题.....	294
附录	298
附录一 国际单位制(SI)、静电单位制(CGSE)和电磁单位制(CGSM)之 间的关系.....	298
附录二 常用导电材料的电阻率和电阻温度系数.....	299
附录三 国际单位制(SI)的词头.....	299
习题答案	300
中英名词对照	305

绪 论

1. 电能的应用及其与生产发展的关系

电工学是研究电能和技术领域中应用的技术基础课程。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。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,在生产和生活中最广泛地应用电能。

电能的应用,在生产技术上曾引起了划时代的革命。在现代工业、农业及国民经济的其他各个部门中,逐渐以电力作为主要的动力来源。工业上的各种生产机械(如机床、起重机、轧钢机、锻压和铸造设备、鼓风机、水泵等)都是用电动机来驱动的。在机械制造工艺上,如电镀、电焊、高频淬火、电炉冶炼金属、电蚀加工、超声波加工、电子束和离子束加工等,都是电能的应用。对生产过程中所涉及的一些物理量(如长度、速度、压力、温度、水位、流量等),都可用电的方法来测量和进行自动调节,以实现生产过程的自动化。农业生产的进一步发展要靠现代化的技术,而现代化农业技术的主要动力是电力。在农业上将日益广泛地采用电力排灌设备、粮食和饲料的电力加工装置等。电也是现代物质、文化生活中所不可缺少的,如电灯、电话、电影、电视、无线电广播及X射线透视等都是电能的应用。

随着生产和科学技术发展的需要,电子技术得到高度发展和广泛应用(如空间电子技术、生物医学电子技术、信息处理和遥感技术、微波应用等),它对于社会生产力的发展,也起着变革性的推动作用。电子水准是现代化的一个重要标志,电子工业是实现现

代化的重要物质技术基础。电子工业的发展速度和技术水平，直接影响到工业、农业、科学技术和国防建设，关系着社会主义建设的发展速度和国家的安危；也直接影响到亿万人民的物质、文化生活，关系着广大群众的切身利益。“电子科学技术，特别是电子计算机的高度发展及其在生产领域中的广泛应用，不仅可以模拟人的感觉和思维，把人们从大量的、繁重的、简单的劳动中解放出来，而且可以逾越人体机能的限制，在检测、计算、判断、控制等方面，完成人们无法承担的任务，为我们提供崭新的生产手段、有效的科学实验和组织管理方法，把生产自动化提高到一个新的水平，从而获得当代最高的劳动生产率。”^①

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) 便于转换 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)等转换而得；同时也可以将电能转换为其他所需要的能量形态，如利用电动机将电能转换为机械能，利用电炉将电能转换为热能，利用电灯将电能转换为光能，利用扬声器将电能转换为声能。电能之间也可以转换，如利用整流器将交流电能转换为直流电能，利用振荡器将直流电能转换为交流电能。

此外，工业生产中为了实现自动控制和调节，也可以将非电量利用传感器转换为电量(信号)。

(2) 便于输送 电能可以方便地被输送到远方，而且输电设备简单，输电效率很高。我们知道，工厂通常建于原料产地或运输方便之处，而发电站则大多建于有能源的地方，二者之间有一定的距离。动力基地与工业基地在位置上存在的这个矛盾，由于电

① 1977年12月5日《人民日报》社论《电子水准是现代化的标志》。

能的远距离输送而得到了解决。电能不仅输送方便，而且分配也很容易，自几十瓦的电灯到几百千瓦的电动机，根据用电需要，都可以分配自如。

此外，电能也可以不通过导线而以电磁波的形式传播。

(3) 便于控制 利用电能可以达到高度自动化。例如，能控制生产过程或设备，实现程序控制、数字控制或最佳状态控制；能检测生产过程的各种参数，转换成一定的电信号，实现自动调节和管理自动化。

此外，利用电能还能实现巡回检测，分析数据，程序显示，处理故障等功能。

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。没有电力要想大规模发展工业是不可想象的。列宁曾说过：“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，不仅繁重的体力劳动可以全由机器代替，而且工人的文化技术水平也必然要大大提高。这就为消除体力劳动与脑力劳动之间的差别创造了条件。同样，随着农业生产的逐步机械化和电气化，必然也会不断缩小城乡之间和工农之间的差别。

因此，列宁在全俄苏维埃第八次代表大会上对电气化的作用作了卓越的估计：“共产主义就是苏维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现代大工业的技术基础的时候，我们才能彻底取得胜利。”^② 列宁还把全俄电气化计划叫做“第二个党纲”，这就是说要实现共产主义，不仅需

① 《列宁全集》第32卷，人民出版社，1958年，446~447页。

② 《列宁全集》第31卷，人民出版社，1958年，468~469页。

要以无产阶级专政作为政治基础，同时还必须实现全国城乡的电气化作为经济基础。

2. 电工技术发展概况

现在，人们已经掌握了大量的电工技术方面的知识，而且电工技术还在不断地发展着。这些知识是人们长期劳动的结晶。

我国很早就已发现电和磁的现象，在古籍中曾有“慈石召铁”和“琥珀拾芥”的记载。磁石首先应用于指示方向和校正时间，在《韩非子》和东汉王充著的《论衡》两书中提到的“司南”就是指此。以后由于航海事业发展的需要，我国在十一世纪就发明了指南针。在宋代沈括所著的《梦溪笔谈》中有“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也”的记载。这不仅说明了指南针的制造，而且已经发现了磁偏角。直到十二世纪指南针才经由阿拉伯人传入欧洲。

在十八世纪末和十九世纪初的这个时期，由于生产发展的需要，在电磁现象方面的研究工作发展得很快。库仑(C. A. Coulomb)在1785年首先从实验确定了电荷间的相互作用力，电荷的概念开始有了定量的意义。1820年，奥斯特(H. C. Oersted)从实验发现了电流对磁针有力的作用，揭开了电学理论的新的一页。同年，安培(A. M. Ampère)确定了通有电流的线圈的作用与磁铁相似，这就指出了磁现象的本质问题。有名的欧姆定律是欧姆(G. S. Ohm)在1826年通过实验而得出的。法拉第(M. Faraday)对电磁现象的研究有特殊贡献，他在1831年发现的电磁感应现象是以后电工技术的重要理论基础。在电磁现象的理论与实用问题的研究上，楞次(Э. Х. Ленц)发挥了巨大的作用，他在1833年建立了确定感应电流方向的定则(楞次定则)。其后，他致力于电机理论的研究，并阐明了电机可逆性的原理。楞次在1844年还与

英国物理学家焦耳 (J. P. Joule) 分别独立地确定了电流热效应定律 (焦耳-楞次定律)。与楞次一道从事电磁现象研究工作的雅可比 (Б. С. Якоби) 在 1834 年制造出世界上第一台电动机, 从而证明了实际用电能的可能性。电机工程得以飞跃地发展是与多里沃-多勃罗沃尔斯基 (М. О. Доливо-Добровольский) 的工作分不开的。这位杰出的俄罗斯工程师是三相系统的创始者, 他发明和制造出三相异步电动机和三相变压器, 并首先采用了三相输电线。在法拉第的研究工作基础上, 麦克斯韦 (C. Maxwell) 在 1864 年至 1873 年提出了电磁波理论。他从理论上推测到电磁波的存在, 为无线电技术的发展奠定了理论基础。1888 年, 赫兹 (Hertz) 通过实验获得电磁波, 证实了麦克斯韦的理论。但实际利用电磁波为人类服务的还应归功于马可尼 (Marconi) 和波波夫 (А. С. Попов)。大约在赫兹实验成功七年之后, 他们彼此独立地分别在意大利和俄国进行通信试验, 为无线电技术的发展开辟了道路。

人类在向自然界斗争的过程中, 不断总结和丰富着自己的知识。电子科学技术就是在生产斗争和科学实验中发展起来的。1883 年美国发明家爱迪生 (Edison) 发现了热电子效应, 随后在 1904 年弗莱明 (Fleming) 利用这个效应制成了电子二极管, 并证实了电子管具有“阀门”作用, 它首先被用于无线电检波。1906 年美国的德福雷斯 (De Forest) 在弗莱明的二极管中放进了第三个电极——栅极, 而发明了电子三极管, 从而建树了早期电子技术上最重要的里程碑。半个多世纪以来, 电子管在电子技术中立下了很大功劳; 但是电子管毕竟成本高, 制造繁, 体积大, 耗电多, 从 1948 年美国贝尔实验室的几位研究人员发明晶体管以来, 在大多数领域中已逐渐用晶体管来取代电子管。但是, 我们不能否定电子管的独特优点, 在有些装置中, 不论从稳定性、经济性或功率上考虑, 还需要采用电子管。

集成电路的第一个样品是在1958年见诸于世的。集成电路的出现和应用,标志着电子技术发展到了一个新的阶段。它实现了材料、元件、电路三者之间的统一;同传统的电子元件的设计与生产方式、电路的结构形式有着本质的不同。随着集成电路制造工艺的进步,集成度越来越高,出现了大规模和超大规模集成电路(例如可在一块6平方毫米的硅片上制成一个完整的计算机),进一步显示出集成电路的优越性。

在工业上可控硅也获得广泛应用,使半导体技术进入了强电领域。

随着半导体技术的发展和科学研究与生产的需要,电子计算机应时而兴起,并且日臻完善。从1946年诞生第一台电子计算机以来,已经历了电子管、晶体管、集成电路及大规模集成电路四代。当前计算机每秒能运算几百万、几千万乃至上亿次之多。数字控制机床也是这样,从1952年研制出来后,发展很快。“加工中心”多工序数字控制机床和“自适应”数字控制机床相继出现。目前利用电子计算机对几十台乃至上百台数字控制机床进行集中控制(所谓“群控”)也已经实现。

“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。”^①

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,许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。

电力是现代化生产的基本动力。建国以来,我国电力工业规

① 《周恩来总理在第三届全国人民代表大会第一次会议上的政府工作报告》,1964年12月31日,《人民日报》。

模从小到大,迅速发展,因地制宜地形成了一批水电火电相联结的电力系统,发电量^①和装机容量有了几十倍的增长,电力建设水平也有了很大的提高。

我国能源十分丰富,煤炭和石油的蕴藏量居于世界的前列,水力资源达五亿多千瓦,占世界首位。水力是一种取之不尽,用之不竭的能源。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。建国以来,我国大力发展水电事业,建设了一批大型水电站和较多的中、小型水电站。此外,在火电方面我们将大力发展坑口电站,在城市有计划地发展供热电站。我国自行设计的第一座30万千瓦的核电站也正在兴建中。

我国的电力事业大有可为,前景极其广阔。我们有能力,有条件使我国的电力工业赶上世界先进水平,实现我国城乡电气化的宏伟任务。

我国的电机制造业在解放前也是极为薄弱的,所生产的水轮发电机的容量最大的不过200千瓦,而汽轮发电机就根本不能制造。解放后电机制造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800千瓦的水轮发电机组,而到1958年就已能生产72500千瓦的,其后不久又生产125000千瓦的水轮发电机组。现在,17万千瓦和30万千瓦的机组都已制造出来。在汽轮发电机制造方面,1954年开始生产6000千瓦的汽轮发电机组,到1958年就已能生产25000千瓦的,而1959年又制造出了50000千瓦的氢冷却汽轮发电机组,其后,又相继制造出10万、20万、30万千瓦的汽轮发电机组。此外,较大容量的超导电机的研制工作,也已取得很大的进展。

^① 1949年的发电量为43亿度,1981年为3093亿度,增长了71倍。

现在我国的电机制造工业已经在旧中国残缺不全的基础上，从无到有，从小到大，从修配到仿制，从仿制到自行设计制造，从不成套到成套，基本上形成了电机制造工业的体系。

电子水准是现代化的一个重要标志。1956年，我国制订了十二年科学技术发展规划，把电子学、半导体、计算技术等列为重点项目。这为以后电子科学技术和电子工业生产的高速度发展，日益缩短同世界先进水平的差距开辟了道路。但是，后来由于受到林彪、“四人帮”的干扰和破坏，差距又被拉长了。现在我们必须加快步伐，努力发展电子技术，赶超世界先进水平。

我国的科学技术总的来说还很落后。为了适应今后一个相当长时期国民经济发展的需要，全国科学技术领导部门、研究机构和科学技术人员必须组织起来，加强协作，进行科学技术攻关。我们相信，我国的科学技术人员是有决心有能力攻克一个一个难关，一定能把我国建设成为一个现代化的社会主义强国。